

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8592 Vol. 45, No. 193
2006. 10

HQJ

◆第13回国際伝熱会議◆
◆生産技術と熱◆

日本伝熱シンポジウムの歴史

回	年	開催地	回	年	開催地	回	年	開催地
1	1964	京都	10	1973	仙台	18	1981	仙台
2	1965	東京	11	1974	名古屋	19	1982	名古屋
3	1966	仙台	12	1975	福岡	20	1983	福岡
4	1967	名古屋	13	1976	神戸	21	1984	京都
5	1968	福岡	14	1977	東京	22	1985	東京
6	1969	札幌	15	1978	札幌	23	1986	札幌
7	1970	東京	16	1979	広島	24	1987	松山
8	1971	大阪	17	1980	金沢	25	1988	金沢
9	1972	広島						

回	年	開催地	回	年	開催地	回	年	開催地
26	1989	仙台	34	1997	仙台	42	2005	仙台
27	1990	名古屋	35	1998	名古屋	43	2006	名古屋
28	1991	福岡	36	1999	熊本	44	2007	長崎
29	1992	大阪	37	2000	神戸	45	2008	京都
30	1993	横浜	38	2001	さいたま			
31	1994	札幌	39	2002	札幌			
32	1995	山口	40	2003	広島			
33	1996	新潟	41	2004	富山			

(第10回以後は8地区・支部で定期的に巡回するようになった)

International Heat Transfer Conference の歴史

回	年	開催地	国
1	1951	London	United Kingdom
		Atlantic City	United States
2	1961	Boulder	United States
		London	United Kingdom
3	1966	Chicago	United States
4	1970	Paris Versailles	France
5	1974	Tokyo	Japan
6	1978	Toronto	Canada
7	1982	München	Germany
8	1986	San Francisco	United States
9	1990	Jerusalem	Israel
10	1994	Brighton	United Kingdom
11	1998	Kyongju	Korea
12	2002	Grenoble	France
13	2006	Sydney	Australia
14	2010	Washington	United States
15	2014	Kyoto	Japan

伝 熱

目 次

〈第 13 回国際伝熱会議〉

論文委員会報告

日本地域論文委員会報告…………… 笠木 伸英 (東京大学), 宇高 義郎 (横浜国立大学) ……………1

レビュー

Heat Conduction……………ウッドフィールド ピーター (佐賀大学) ……………3
 Forced Convection and Heat Transfer Enhancement……………川口 靖夫 (東京理科大学) ……………4
 Turbulence……………田川 正人 (名古屋工業大学) ……………7
 Jets……………廣田 真史 (名古屋大学) ……………9
 Mass Transfer……………長田 孝二 (名古屋大学) ……………11
 Natural Convection and Mixed Convection……………辻 俊博 (名古屋工業大学) ……………13
 Boiling and Evaporation……………奥山 邦人, 森 昌司 (横浜国立大学) ……………15
 Condensation……………宇高 義郎 (横浜国立大学) ……………17
 Multiphase Flow……………小泉 安郎 (工学院大学) ……………18
 Radiation……………上宇都 幸一 (大分大学) ……………20
 Thermophysics……………小原 拓 (東北大学) ……………22
 Heat Transfer in Nano and Microscale……………鶴田 隆治 (九州工業大学) ……………23
 Particulates and Porous Media……………中山 颯 (静岡大学) ……………25
 Heat Exchangers……………岩井 裕 (京都大学) ……………27
 Thermal Management of Electronic Equipment……………伏信 一慶 (東京工業大学) ……………28
 Equipment……………菱田 誠 (千葉大学) ……………29
 Energy and Environmental Heat Transfer……………近久 武美 (北海道大学) ……………31
 Nuclear……………大竹 浩靖 (工学院大学) ……………32
 Bio Heat Transfer……………萩原 良道 (京都工芸繊維大学) ……………33
 Manufacturing……………河野 正道 (九州大学) ……………34
 Combustion and Fire……………鳥居 修一 (熊本大学) ……………35
 Experimental Methods……………鈴木 洋 (神戸大学) ……………37

国際伝熱会議招致委員会報告

第 15 回国際伝熱会議の京都開催決定……………笠木 伸英 (東京大学) ……………38

〈国際活動・会議報告〉

第 17 回輸送現象国際会議 (ISTP-17) 報告……………中川 慎二 (富山県立大学) ……………40

〈生産技術と熱〉

特集：「生産技術と熱」	加賀 邦彦（三菱電機）	42
レーザによる熱加工	大村 悦二（大阪大学）	43
放電による熱を利用した新しい表面処理	秋吉 雅夫（三菱電機）	49
光ファイバ素線線引き過程における伝熱	福谷 和久（神戸製鋼所）	55
加工液による工具の冷却と潤滑性	糸魚川 文広（名古屋工業大学）	60

〈特別寄稿〉

沸騰の科学（8）	甲藤 好郎（東京大学名誉教授）	64
花火 —その原理と大玉紹介—	永井 二郎（福井大学），青木 和夫（長岡技術科学大学）	71
伝熱工学の視点から垣間見た熱気球と遊び心	門出 政則（佐賀大学）	75

〈International Letter〉

米国における研究・教育・テニユアについて	天野 良一（University of Wisconsin-Milwaukee）	80
----------------------	--	----

〈ヒストリーQ〉

熱工学的鉄道ファンからみた蒸気機関車	吉田 敬介（九州大学），田坂 誠均（住友金属工業）	84
--------------------	---------------------------	----

〈博物館めぐり〉

The National Railway Museum, The Museum of Science & Industry in Manchester, そして The British Library	吉田 英生（京都大学）	104
---	-------------	-----

〈Heat Transfer〉

伝えたいことって？	平澤 良男（富山大学）	110
-----------	-------------	-----

〈編集出版部会からの One-Point Manual〉

マイクロソフト Word 文書への図表挿入ガイドライン	杉山 智之（日本原子力研究開発機構）	111
-----------------------------	--------------------	-----

〈行事カレンダー〉 115

〈お知らせ〉

平成 18 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞 の募集		117
第 44 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集		119
事務局からの連絡		123
編集出版部会ノート：「生産技術と熱」を巡って	黒坂 俊雄（神戸製鋼所）	128

Energy and Environmental Heat Transfer	
Takemi CHIKAHISA (Hokkaido University).....	31
Nuclear	
Hiroyasu OHTAKE (Kogakuin University).....	32
Bio Heat Transfer	
Yoshimichi HAGIWARA (Kyoto Institute of Technology).....	33
Manufacturing	
Masamichi KOHNO (Kyushu University)	34
Combustion and Fire	
Shuichi TORII (Kumamoto University)	35
Experimental Methods	
Hiroshi SUZUKI (Kobe University)	37

IHTC-15 in 2014

Kyoto Approved as the Venue for the 15th International Heat Transfer Conference	
Nobuhide KASAGI (The University of Tokyo).....	38

< Report on International Conference >

Report on the Seventeenth International Symposium on Transport Phenomena	
Shinji NAKAGAWA (Toyama Prefectural University).....	40

< Manufacturing Technique and Heat >

Special Issue on “Manufacturing Technique and Heat”	
Kunihiko KAGA (Mitsubishi Electric Co.)	42
Thermal Processing with Laser	
Etsuji OHMURA (Osaka University).....	43
New Surface Modification Technology Applying the Heat Generated by Electric Discharges	
Masao AKIYOSHI (Mitsubishi Electric Co.)	49
Heat Transfer in Optical Fiber Drawing Process	
Kazuhiisa FUKUTANI (Kobe Steel, LTD.).....	55
Relationship between Lubricity and Chilling Effect of Metal-Cutting Fluid	
Fumihito ITOIGAWA (Nagoya Institute of Technology).....	60

< Contribution >

Science of Boiling (8)	
Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of the University of Tokyo).....	64
Firework - Principle and Large-Size Star-	
Niro NAGAI (University of Fukui), Kazuo AOKI (Nagaoka University of Technology)	71
Hot-Air Balloon from Viewpoint of Heat Transfer and Enjoying with It	
Masanori MONDE (Saga University)	75

< International Letter >

Research, Education and Tenure System in USA	
Ryoichi AMANO (University of Wisconsin-Milwaukee).....	80

< History Q >

Steam Locomotive from the Point of View of a “Thermal Engineering Railway Fan”
Keisuke YOSHIDA (Kyushu University), Masahito TASAKA (Sumitomo Metal Industries)84

< Museum Tour >

The National Railway Museum, The Museum of Science & Industry in Manchester, & The British Library
Hideo YOSHIDA (Kyoto University)104

< Heat Transfer >

What is the intention you want to transfer?
Yoshio HIRASAWA (University of Toyama) 110

< One-Point Manual from Editorial Board >

Guidelines for Figures and Tables Insertion into Microsoft Word Document
Tomoyuki SUGIYAMA (Japan Atomic Energy Agency)..... 111

< Calendar > 115

< Announcements > 117

Note from the Editorial Board: Thoughts around “Manufacturing Technique and Heat”
Toshio KUROSAKA (Kobe Steel, LTD.)128

第 13 回国際伝熱会議：日本地域論文委員会報告

Japan Region Papers Committee's Report on the Thirteenth
International Heat Transfer Conference

笠木 伸英 (東京大学)

宇高 義郎 (横浜国立大学)

Nobuhide KASAGI (The University of Tokyo)

Yoshio UTAKA (Yokohama National Univ.)

e-mail: kasagi@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

e-mail: utaka@ynu.ac.jp

1. 会議の概要

第 13 回国際伝熱会議が 8 月 13 日(日)から 18 日(金)にわたりオーストラリア・シドニーの Sydney Convention & Exhibition Centre で開催された。組織委員会委員長 Graham de Vahl Davis 教授，同事務担当 Eddie Leonardi 教授，論文委員会委員長 Brian E. Milton 教授 (いずれも The University of New South Wales) らが中心となり組織，運営された。本会議の日本地域論文委員会委員長 (笠木)，幹事 (宇高) として，以下に今回の会議の概要と委員会の活動をご報告する。

2. 発表論文と講演

国際論文委員会は 18 の地域を担当する 27 名で構成され，それぞれの地域毎に基調講演者候補の推薦，論文の採否等の業務を行った。アセンブリー委員会の統計データおよび登録者数リストに基づくと，会議で発表された論文数は表 1 および表 2 に見られるように，ポスター発表 657 編，基調講演 33 件，そしてパネルセッション 7 件がポスターセッションと並行して実施された。我が国からの基調講演は 3 件であった。会議の登録者数は 821 名，我が国からは 118 名で，米国の 98 名を上回り第 1 位であった。また，我が国のポスター登録数

表 1 地域別 基調講演数・論文数・論文割当数

地域(ISC 委員)	基調講演	論文	当初割当
Australia (Milton, Rosengarten)	0	50	25
Brazil (Nieckele)	1	21	10
Canada (Oosthuizen, Charette)	0	23	25
China (Guo, Tao)	2	53	30
France (Taine, Raynaud)	1	49	45
Germany (Hahne, Spidler)	2	34	35
India (Murthy)	1	18	10
Israel (Hetsroni)	1	9	15
Italy (Cumo, Celata)	1	24	15
Japan (Kasagi, Utaka)	3	107	90
Korea (Kim)	1	43	20
Netherlands (Steenhoven)	1	24	10
Portugal (Coelho)	1	5	2
Russia (Leontiev)	2	16	35
South Africa (Meyer)	1	9	10
Switzerland (Thome)	2	5	10
UK (Hewitt, Briggs)	3	63	50
USA (Jaluria, El-Genk)	6	104	110
Special	4		
合計	33	657	547

は 95 件と，米国の 102 件に迫る数であった。アセンブリー委員庄司正弘先生による前回の IHTC-12 に関する本誌報告にもあるように，国際伝熱会議における我が国の寄与は世界一と言っても過言でない。

今回の国際伝熱会議も「伝熱オリンピック」と称されるに相応しく盛大であったが，4 年前と比べ全般的に「伝熱」のスコープが拡がり，内容的にも新しい動きが目立った会議であった。また，オペラ鑑賞やディナークルーズなど種々のソーシャルプログラムも企画されて，楽しい会議であった。



図 1 開会式の様子

表2 国別 基調講演数・論文数

国名	基調講演	論文	国名	基調講演	論文
Australia	0	37	Lithuania	0	6
Azerbaijan	0	1	Malaysia	0	5
Belarus	0	1	Mexico	0	2
Belgium	0	7	Netherlands	1	5
Brazil	1	21	New Zealand	0	2
Bulgaria	0	2	Norway	0	1
Canada	0	23	Poland	0	4
China	2	48	Portugal	1	5
Czech Republic	0	9	Russia	2	12
Finland	0	3	Saudi Arabia	0	4
France	1	49	Singapore	0	5
Georgia	0	1	Slovenia	0	2
Germany	2	34	South Africa	1	9
Hong Kong	0	5	Spain	0	6
India	1	18	Sweden	0	8
Iran	0	5	Switzerland	2	5
Ireland	0	1	Taiwan	0	12
Israel	1	9	Thailand	0	1
Italy	1	18	Turkey	0	3
Japan	3	95	U.K.	3	23
Korea	1	43	Ukraine	0	1
Lebanon	0	2	U.A.E.	0	1
Libya	0	1	U.S.A.	6	102
			Special	4	
合計				33	657

3. 日本地域論文委員会の活動報告

我が国は、「Japan, Pakistan, other East Asian countries not specified elsewhere」の地域代表となっている。37名(日本35名、台湾2名)からなる日本地域論文委員会を構成し、大略下記のスケジュールで業務を遂行した。

- 1) 日本地域論文委員会設置(2005年1月)
- 2) 基調講演候補者7名の推薦(2005.2-4)、その後現地組織委員会による基調講演者決定、うち日本人3名(2005.7)
- 3) アブストラクト査読・採否決定(2005.8-11)
- 4) 本論文査読・採否決定(2006.3-4)
- 5) 会議開催(2006.8.13-18)

日程、論文の受付などの共通な基本事項は国際論文委員会(開催者側)にて設定され、そのルー

ルの下で基調講演候補者の推薦、論文採否業務等が地域論文委員会に委ねられた。なお、前回まで採用されてきた、地域毎に論文採択上限数を割り振る方式が今回は改められ、良質の論文であれば数を厭わないとの方針が示された。このような従来の変更への対応に関しては、当初従来方針が継続されるものとして進めていた日本地域論文委員会として少々の検討を要した。結果として、妥当な論文数を維持しつつ、できるだけ多くの方々に参加いただけるように、原則として1研究室からの論文を2編までとし、研究内容と論文の質に基準をおいて採否を決定した。なお、アブストラクトの投稿数は167件(日本137、台湾30)、本論文投稿数は128件(105,23)であった。

謝辞

ここに日本地域論文委員会が大過なく任務を終えることができたのは、本委員会前委員長の庄司正弘先生のご指導をいただき、また下記にお名前を挙げる日本地域論文委員会委員の皆様により論文査読などにご尽力いただいたお陰である。

委員：青木和夫(長岡技大)、有富正憲(東工大)、石塚勝(富山県大)、稲葉英男(岡山大)、大田治彦(九大)、岡崎健(東工大)小澤守(関西大)、片岡勲(阪大)、勝田正文(早大)、神永文人(茨城大)、工藤一彦(北大)、功刀資彰(京大)、小森悟(京大)、清水昭比古(九大)、瀧本昭(金大)、武石賢一郎(阪大)、竹中信幸(神戸大)、谷下一夫(慶大)、近久武美(北大)、辻俊博(名工大)、長坂雄次(慶大)、中山頭(静大)、西尾茂文(東大)、飛原英治(東大)、菱田公一(慶大)、平澤茂樹(日立)、牧野俊郎(京大)、円山重直(東北大)、宮内敏雄(東工大)、門出政則(佐賀大)、矢部彰(産総研)、C. Pan(台湾精華大)、D. J. Lee(国立台湾大)

アセンブリー委員：荻野文丸(舞鶴高専)、庄司正弘(産総研) (以上敬称略、所属は着任時)

また、勝田正文先生には、会議へのグループ旅行のお世話をいただいた。さらに、論文をご投稿いただいた皆様にも、短期間での原稿準備など、ご協力いただいた。各位に、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

Heat Conduction

ウッドフィールド ピーター (佐賀大学)
Peter WOODFIELD (Saga University)
e-mail: peter@me.saga-u.ac.jp

1. Introduction

Twelve papers were classified as dealing primarily with heat conduction. These ranged from rather ordinary numerical solutions to the heat conduction equation (e.g. CND-03) to a discussion of thermal wave propagation in superfluid helium II (CND-01). The majority of the papers for heat conduction were focused directly on engineering applications (CND-02, 03, 04, 07, 09, 10, 12). Three papers dealt with inverse heat conduction problems relating to experimental techniques (CND-05, 06, 08) and only one paper was purely theoretical (CND-13).

2. Limitations of Fourier's law

At very low cryogenic temperatures, extremely rapid heating, or on very small scales, Fourier's law of heat conduction can cease to be an adequate model. Zang et al. (CND-01) performed a two-dimensional numerical simulation on thermal wave propagation in superfluid He II. Guo et al. (CND-13) attempted to give a theoretical discussion and a brief historical background on treating Fourier's law as a limiting case of a phonon gas concept. Some of the keynote addresses and papers relating to nano-technology also discussed this kind of theme.

3. Applications

Three papers considered thermal insulation problems. Mensha and Uppu (CND-02) compared the resulting thermal and mechanical properties of a multi-layered insulation coating on the surface of a gas turbine blade applied by three different methods. Wang et al. (CND-07) performed numerical simulation of the performance of an insulation

material for applications such as space vehicle re-entry. They reported that pyrolysis expansion and thermal expansion must also be taken into account in addition to the ablation process as the insulation material vaporizes and burns. Bonacina et al. (CND-12) investigated experimentally the influence of surface emissivity on the effective thermal resistance of some plastic insulating materials.

Herranz and Tigeras (CND-04) analyzed the predictions of four nuclear safety computer codes regarding over-all thermal resistance between the nuclear fuel surface and the coolant. They identified a cause of discrepancy among codes related to the model for contact resistance between the fuel rod and the cladding.

Wang et al. (CND-09) numerically considered the performance of an array of micro-size thermo-electric coolers on the back surface of a silicon chip. They indicated that the technology is promising regarding optimized cooling of 'hot spots' within the chip. Dirker and Meyer (CND-03) considered steady-state heat conduction to simulate cooling of a multi-layered stack of micro-chips. Park et al. (CND-10) performed a thermal analysis of a light emitting diode in anticipation that LEDs will be used more and more as sources of illumination in the future.

4. Inverse heat conduction problems

Woodfield et. al (CND-05) considered time and space resolution issues for an inverse problem. Wu and Chu (CND-06) solved a composite inverse problem with interface resistance. Fieberg et al. (CND-08) proposed a technique to measure contact resistance at high pressures.

Forced Convection and Heat Transfer Enhancement

川口 靖夫 (東京理科大学)

Yasuo KAWAGUCHI (Tokyo University of Science)

e-mail: yasuo@rs.noda.tus.ac.jp

1. はじめに

強制対流および伝熱促進のセッションでは約 50 件のポスター発表がなされた。分野が広いため筆者の理解力が及ばず不正確な部分があればご容赦いただきたい。強制対流は基本的な伝熱様式であるが、要素となるケースについてはすでに検討が十分行われ、研究者の関心は複雑な個別の課題に向かいつつある。伝熱促進もまた多様な分野であり、両分野の研究は継ぎ目なく展開している。

2. 発表の概要

2.1 強制対流一般

FCV-05 は Convex-Concave 壁面上で層流に縦渦を生じさせて伝熱促進を行った研究。FCV-07 は環状垂直ダクトにおいて共存対流の解析解を求めたもの、FCV-08 は 1.5mm 程度の幅の角形微小チャンネル内の伝熱実験、FCV-02, FCV-19, FCV-19 は非定常または周期的流れにおける対流を扱った研究である。

2.2 流れの様々な形態

2.2.1 分岐管

FCV-17 は混合ティーにおける熱流体特性に関する実験。詳細な PIV 計測を行って渦の挙動を調べ、熱的疲労の機構を明らかにした。HTE-08 では分配ヘッダから比較的短い流路へ流出する系で、短い流路における伝熱と分岐の形状との関係を実験的に検討。FCV-14 はフィルム冷却における混合過程のアセトン LIF 法による実験と数値解析。プレナム・通路・交差流領域における挙動がよくとらえられており、実験・解析のレベルの高さが伺える。

2.2.2 挿入物体

HTE-01 は数値解析を用い、ねじれテープによる伝熱促進方法について、テープの形状最適化の考察を行っている。伝熱促進体をおく場合、伝熱促進と流体抵抗の増大はトレードオフの関係にな

るがここではエントロピー増大最小化 (EGM) の原理により判定を行っている。HTE-02 はチャンネル内流れと固体壁内の伝導との連成問題に対し、最適解を求める問題をあつかっている。強制対流と伝導との連成問題では他に FCV-13, FCV-15 があった。HTE-18 はワイヤ・コイルを円管内に挿入する方法についてワイヤの太さ、ピッチを変え、伝熱促進効果を実験的に調べたもの。HTE-12 は平板上においたウイング型渦発生体を縦あるいは横に並べた場合の伝熱促進効果について、RANS モデルを用いた数値解析を行っている。

2.2.3 多孔質体

FCV-12 は管内に金属フォームを詰めた系に対する非定常熱伝達の解析、FCV-21 は金属フォームに埋め込まれた円管外の伝熱に関する実験。HTE-11 は金属フォームをチャンネル内に挿入した系について流れと伝熱の数値解析。大きな空隙率では金属フォームは針金からなる籠状をなしているものとみなせるので、針金周りのマイクロな流れを解いて解析している。

2.2.4 各種フィン

HTE-06 は乱流伝熱を促進するためのピンフィン列の最適化。RANS モデルによる解析。HTE-25 は角型フィンと円柱状フィンの各々について最適化の考察。同じく RANS モデルを用いた解析。HTE-13 は管外の円形フィンについてピッチの最適化、また半径方向に切ったスリットの影響を数値解析 (商用コード) によって調べた。HTE-16 は強制対流場におけるフィン列の周りの流れと伝熱について数値解析。このような種々のケースに対する数値予測には設計資料を集積する意味があり、工業的価値はあると思われる。一方数値解析はかなり信頼できるツールとして確立したかに見えるので先端的研究としての面白みは薄くなってきたようにも感じられる。HTE-14 は縦フィンおよび円形フィン、ピンフィンの最適形状をコーテ

ィング（堆積物）のある場合に対して検討。簡略化した系について解析解を導いている。

HTE-22 は平行フィンの一部を切り取り、突き出した部分の寸法を変化させたり、ねじれを加えた場合の熱伝達率を実験的に検討。HTE-15 は3次元数値解析と詳細なPIV計測によって同様の系を扱った研究。平行フィンを流れに直角におくと流体がフィンの底部まで流通しないので、十分伝熱促進が行われない。そこでフィンの流れに対して斜めに置き、さらにカット部を設けるとフィンに沿った流れができ、伝熱促進と摩擦損失の低下につながるというアイデアであり、注目に値する。

2.2.5 伝熱表面の凹凸

一般の伝熱促進体は伝熱を促進するが流体抵抗を増大させ、また汚れの付着を増やす欠点がある。そこでHTE-21では伝熱面に球面状の窪み（ディンプル）を加工し、そこに生じる竜巻状の渦により伝熱促進する方法を実機スケールで検証した。ディンプルは大きな抵抗にならず、また汚れの付着も少ないとする。FCV-22は管内面にディンプルをつけた場合の数値計算。HTE-24は矩形流路内の壁面にディンプルとその逆の球面状突起を設け、圧力損失と伝熱促進効果について実験的に確かめている。

2.3 相変化と非ニュートン流体

2.3.1 相変化による伝熱促進

HTE-07では部分的に有機コーティングを施した伝熱面において、滴状凝縮と膜状凝縮が平行して起こる条件をつくり、性能比較。HTE-10では混合溶液において相分離を起こす温度領域で、管内強制対流と円柱の自然対流伝熱に及ぼす液・液相分離の影響を実験的に検討。著者は前者で400%、後者で100%の伝熱促進効果があると述べている。HTE-20は細管内を流れる相変化物質（PCM）スラリーの流れの伝熱を、数値解析と実験によって調べたもの。

2.3.2 非ニュートン流体流れにおける伝熱

FCV-09は正弦波状ダクト内、FCV-11は同軸円管内の非ニュートン流体流れの伝熱解析。特定の界面活性剤水溶液はToms効果として知られる乱流摩擦低減効果を持ち、その流れでは特有の輸送現象があることが報告されている。FCV-06はパイプおよび継ぎ手における抵抗低減と伝熱に関する

実験、FCV-20は筆者らによる発表で、新しい両イオン性界面活性剤抵抗低減剤で氷点以下の温度域・不凍液との共存ができるものの開発について、チャンネルにおける抵抗低減と局所熱伝達率、伝熱促進法について報告した。

2.4 外力の影響を受ける対流・伝熱促進

FCV-10複数の磁気コイルを用いた管内空気流の駆動。ユニークな着想を数値解析で確かめている。対流伝熱の促進では、HTE-03が極性流体の流れに磁場を印加し、縦渦を発生させることによる方法を、またHTE-05が電極配置と流体の組み合わせによるEHD的方法を試みている。またHTE-23は食品など高い粘度の流体を対象に、円管内の流体を往復運動するスクレーパで動かし、伝熱促進する方法についての実験報告。FCV-23はタービン動翼の内部の流れを模擬した角形チャンネル内の伝熱について、遠心力の影響を実験的に確かめている。FCV-16は円筒容器内の円錐状ロータ廻りの流れパターンと混合の様子を精力的な実験で明らかにした。

3. おわりに

強制対流・伝熱促進では要素となる基本的な流れと伝熱についての検討は終わり、個別の問題を扱うようになっていく。辞書の編集は卒業し、事典の編纂にかかったところと言うべきか。実験手法では局所流れの観測にはPIV、伝熱面温度分布の観測には感温液晶を用いる方法が、また乱流の数値解析ではRANSモデルを用いる方法が一般的になってきた。複雑な現象や新しい着想を洗練された実験的・数値解析的ツールを駆使して追う研究が散見され、こうした研究から新現象の発見、応用へとつながる価値ある発明が現れるのではないかと期待される。

国際会議では普段なかなか会う機会のない内外の専門家・知己と最近の情報を交換できる。今回は中国からの先生方が多く参加しておられたことが良かった。筆者は会議の後で北京に滞在する日程をたてていたのだが、会場での交流から発展して北京工業大学の馬重芳（Ma Chong-Fan）教授を訪問し、若手研究者達と意見交換する機会が得られた。こうした新しい出会いもまた国際会議の快樂のひとつである。

3. 発表リスト

FCV-02 Unsteady Forced Convection for a Developing Flow in a Non Symmetric Periodic Channel, Serge Blanchet (France)

FCV-05 Higher Heat Transfer Efficiency in Laminar Structured Boundary Layers Than in Turbulent Boundary Layers, Ladan Momayez (France)

FCV-06 Pressure Losses and Heat Transfer for Flow of Drag Reducing Surfactant Solutions in Pipes and Fittings, Jiri Sestak (Czech Republic)

FCV-07 Analytical Solution for Mixed Convection in a Vertical Circular Duct with Partially Insulated Wall, Stefano Lazzari (Italy)

FCV-08 Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop in Rectangular Narrow Channel at Low Pressure, Philippe Clement (France)

FCV-09 Thermally Developing Flow of Power-Law Non-Newtonian Fluids in Double-Sine Ducts, Paulo Couto (Brazil)

FCV-10 Application of Multiple Magnetic Coils to Drive the Air Flow in a Long Pipe, Shu-Shen Lu (P.R. China)

FCV-11 Thermal-Entrance-Region Heat Transfer for a Non-Newtonian Laminar Flow in a Concentric Annulus with an Axially Moving Core, Ganbat Davaa (Japan)

FCV-12 Numerical Study of Heat Transfer in Aluminium Foams Subjected to Oscillating Flow, Liwen Jin (Singapore)

FCV-13 Study on the Forced Convective Cooling of Laser Rod in a Concentric Circular Tube, Xiulan Huai (P.R. China)

FCV-14 Numerical and Experimental Research on a Mixing Process of Film Cooling Air with Mainstream, Takanori Kumagai (Japan)

FCV-15 Approximate Analysis for Conjugate Heat transfer in Solids under Steady Convection, Peter Richardson (U.S.A.)

FCV-16 Convection Pattern Transition in an Annular Gap around a Truncated Conical Rotor in a Circular Cylinder, Mamoru Ozawa (Japan)

FCV-17 Experimental Investigation of Thermal-Hydraulic Characteristics at a Mixing Tee, Seyed Mohammad Hosseini (Japan)

FCV-18 Transient Heat Transfer for Helium Gas Flowing over a Horizontal Plate with Exponentially Increasing Heat Input, Makoto Shibahara (Japan)

FCV-19 Heat Transfer in Steady-Periodic Flows over Heated Micro Wires, Serhat Yesilyurt (Turkey)

FCV-20 Drag-Reduction and Heat Transfer Characteristics of a Novel Zwitterionic Surfactant Solution, Yasuo Kawaguchi (Japan)

FCV-21 Enhanced Forced Convection from a Tube Imbedded in a Metal Foam, Francis A. Kulacki (U.S.A.)

FCV-22 effect of Surface Shape on Flow and Heat Transfer Characteristics in Pipes: A Numerical Study, Khalid Alammar (Saudi Arabia)

FCV-23 Heat Transfer in Rectangular Channels [AR=4:1] with Normal Trips at High Rotation Numbers, Sumanta Acharya (U.S.A.)

HTE-01 A Study of Convective Heat Transfer Entropy Generation in Tube Ducts with Various Spiral Onsets Based on Verified Computer Simulation Results, Tadeusz Ryszard Fodemski (Poland)

HTE-02 Optimal Geometry for Conjugate Heat Transfer in a

Cooling Channel, TUNDE Bello-Ochende (South Africa)

HTE-03 Convection Heat Transfer Active Enhancement by Magnetically Induced Longitudinal Vortices, Lijun Yang (P.R. China)

HTE-04 Experimental Investigation on Heat Transfer Enhancement of Semos Heat Pipe, Haizhen Xian (P.R. China)

HTE-05 Optimal Working Fluid and Electrode Configuration for EHD-Enhanced Single-Phase Heat Transfer, Daniel Testi (Italy)

HTE-06 Shape Optimization of Pin-Fin Arrays to Enhance Turbulent Heat Transfer, Kwang-Yong Kim (South Korea)

HTE-07 Condensation Heat Transfer Enhancement for Steam-Air Mixture Vapour by Interfacial Behavior of Falling Droplets, Xuehu Ma (P.R. China)

HTE-08 Heat Transfer in Short Rectangular Duct with High Angle between Exit Flow Direction and Duct Axis, Mikhail Gotovsky (Russia)

HTE-09 Network Transfer Functions. An Application to Extended Surfaces, Mariano Alarcón (Spain)

HTE-10 Heat Transfer Enhancement Via Liquid-Liquid Phase Separation, Sharon Gat (Israel)

HTE-11 Heat Transfer Enhancement by Metallic Foams, HTEo van der Meer (The Netherlands)

HTE-12 The Effect of Vortex Structures on heat Transfer and Flow Field behind Multielement Arrays of Vortex Generators, Christopher Dietz (Germany)

HTE-13 Prediction of Global Performance of finned Tube Cooler and Effect of radial Slits on its Fin Surface, Vijay Raghavan (Malaysia)

HTE-14 Thermal Efficiency and Optimum Sizes of Finned Surfaces with Coating, Valerij Gorobets (Ukraine)

HTE-15 Heat Transfer and Pressure Loss Characteristics of Obliquely-Arranged Cut-Fins, Kazuya Tatsumi (Japan)

HTE-16 Thermal-Fluid Transport Phenomena over Slot-Perforated Flat Fins in Forced Convection Environment, Shuichi Torii (Japan)

HTE-17 Convective Heat Transfer Enhancement Induced by Spinodal Decomposition, Pietro Presio (Italy)

HTE-18 Evaluation and Analysis of Convective Heat Transfer Enhancement Using Wire-Coil Inserts, Ramesh Chandra Prasad (Canada)

HTE-19 Influence of Hole Imperfection on Adiabatic Film Cooling Effectiveness, Anton A. van Steenhoven (The Netherlands)

HTE-20 Low Reynolds Number Limit of Heat Transfer Enhancement for Phase Change Materials Slurry Flow in Micro/Mini Channels, Yong Tao (U.S.A.)

HTE-21 Heat Transfer Enhancement and Fouling Mitigation Potential due to Dimpling the Convective Surfaces, Yaroslav Chudnovsky (U.S.A.)

HTE-22 Heat Transfer at Force Circulation I Flat-Plating Surfaces with Cut Fins, Georgiy Polupan (Mexico)

HTE-23 Experimental Study of heat Transfer Enhancement in Mechanically-Assisted Heat Exchangers with Active Scrapers, Juan P Solano (Spain)

HTE-24 Heat Transfer Enhancement of Internal Passage Using Dimple/Protrusion, Hyung-Hee Cho (South Korea)

HTE-25 Optimal Designs of heat Sinks for Different Fin Shapes, Kyoungwoo Park (South Korea)

Turbulence

田川 正人 (名古屋工業大学)

Masato TAGAWA (Nagoya Institute of Technology)

e-mail: m.tagawa@nitech.ac.jp

トピックス：乱流 (Turbulence) に分類された 27 件の論文はポスターセッション 7 [会議 5 日目, 8 月 17 日(木) 16:35-18:30] で発表された。当日配布されたアブストラクト集 (A4 版 315 ページ) に収録されている論文題目と著者を下記に掲載する。論文数を著者の国別で見ると, 日本 10 件, フランス 6 件, 米国 5 件, リトアニア, ロシア, イスラエル, インド, ポルトガル, 韓国がそれぞれ 1 件である (論文 27 件のうち 7 件は no-show であった)。残念なことに, 会議論文集 (CD-ROM) では, 27 件のうち 1 件が未収録であり, 7 件が画面表示されない不具合があるようで, 本稿で紹介できなかった研究がいくつかある。

「乱流」というキーワードで括られたことによると思われるが, 本セッションには, 強制対流, 自然・共存対流 (文献[2], [12], [13]), 混相流 ([16], [21], [22], [23]), 燃焼 ([7]) などが含まれており, 研究内容は多彩である。そこで, 本稿では, 他の分類項目と重複を避けるという意味で, 強制対流に関連する研究を中心に紹介させていただく。

論文[3]では, 自動車用空調機器をモデル化した流路 (T-Junction) における高温空気と低温空気の混合過程および乱れによる熱輸送機構が実験的に調べられた。測定には, レーザ流速計と冷線 (細線抵抗温度センサ) による速度と温度の同時測定法が用いられた。論文[4]は, 下壁が波状のチャンネル内に形成される安定成層乱流を LES (Large Eddy Simulation) により解析した研究である。乱流統計量と乱流構造の関連, レイノルズ応力等のエネルギー収支が調べられた。論文[5]は, 逆圧力勾配乱流境界層における熱輸送過程を実験的に調べた研究である。X 型熱線と線径 0.6 μm の冷線を組み合わせたプローブ 5 本による速度と温度の同時測定により, 運動量輸送と熱輸送の関連が特定された。論文[6]では, 鈍い物体周り (厚板先端の下流) に形成される剥離再付着流の熱伝達機

構が実験的に調べられた。速度測定に熱線および split-film プローブを, 温度測定には冷線を用いて, 大スケール渦の三次元構造と熱伝達特性の関連が示された。論文[8]は, 平板クエット乱流における熱輸送機構を DNS (Direct Numerical Simulation) により調べた研究である。壁面の熱的境界条件 (等温壁または等熱流束壁) と計算領域の大きさを系統的に変化させることにより, それらが乱流構造および熱輸送に及ぼす影響が明らかにされた。論文[9]では, 小さな缶形燃焼器 (micro can combustor) における乱流熱伝達が LES により解析された。酸化剤と燃料の供給口をもつバツフル板 (保炎板) の形状が高温流体と低温流体の混合過程や壁面熱伝達特性に及ぼす影響が調べられた。論文[10]は, 強い安定密度成層乱流を DNS および RDT (Rapid Distortion Theory) により解析した研究である。得られた結果を比較対照することで, スカラ輸送における乱れのスケールと非線形過程の関連が調べられた。論文[11]は, 矩形リブをもつチャンネル内の圧縮性乱流を LES で解析した研究であり, 流れの構造と伝熱促進の関連が調べられた。ガスタービン翼の冷却が想定されている。論文[14]は, 乱流噴流中に平板を噴流軸と平行に設置することにより, 主流乱れと壁面熱伝達の関連を実験的に調べた研究である。熱線と高速応答熱流束センサを同時に用いて主流乱れと壁面熱流束変動の相互相関係数を測定し, 上記の関連が議論された。論文[25]は, 伝熱促進とポンプ動力に関する研究である。矩形ダクト内の層流と乱流について, ダクト内に設置された振りテープおよびリブの伝熱促進効果が実験的に評価された。論文[27]では, 壁面にディンプル (dimple) があるチャンネル内乱流の速度場と温度場が LES により解析された。ガスタービン翼の冷却効果を高める技術に関連する研究であり, 熱輸送機構と伝熱促進の関連が議論されている。

海外の研究をもう少し多く紹介したかったが、上述のように画面表示できない論文 ([15], [17], [18], [24], [26]) は割愛させていただいた。研究動向を捉えることは難しいものの、LESを適用する研究 ([4], [9], [11], [16], [20], [27]) や市販の流体解析コード (ここでは FLUENT) を利用する研究 ([19], [20], [21]) が増えてきていることを実感した。

筆者もこのセッションで発表させていただいた。自分の展示場所を起点にして各ブースをマイクロマウスのごとく見て回ったが、そこではポスターを前にして熱心な質疑応答が展開されていて、時間があれば首を突っ込みたいとの思いに駆られることが度々であった。議論の内容を含めて紹介するのが本来のレビューだと思うが、なかなか難しいことである。

"Turbulence" 「乱流」に分類された論文題目と著者
(会議で使用された論文 ID: TRB-〇〇を行末に示す.)

【日本】 (10 件)

- [1] "Wavelet analysis of passive temperature scalar field in a turbulent cylinder wake," by A. Rinoshika, J. Mi and Y. Zhou (*TRB-04*)
- [2] "Turbulence characteristics and heat transfer enhancement of a natural convection boundary layer in water along a vertical flat plate," by T. Tsuji and T. Kajitani (*TRB-08*)
- [3] "Turbulent thermal mixing of hot and cold airflows in T-junction," by M. Hirota, H. Asano, H. Nakayama, T. Asano, H. Goto and S. Hirayama (*TRB-11*)
- [4] "Large eddy simulation of stably stratified turbulent flow over a wavy surface," by H. Suto and Y. Hattori (*TRB-12*)
- [5] "Effects of non-equilibrium adverse pressure gradient on spatio-temporal structures of convective heat transfer," by T. Houra and Y. Nagano (*TRB-13*)
- [6] "Turbulent heat transfer in a separated and reattached flow over a blunt flat plate," by H. Yoshikawa, K. Togawa and T. Ota (*TRB-14*)
- [7] "Velocity- and thermal-field characteristics of a non-premixed turbulent flame formed in a backward-facing step flow," by M. Tagawa (*TRB-18*)
- [8] "DNS of turbulent heat transfer in plane Couette flow," by S. Hane, T. Tsukahara, K. Iwamoto and H. Kawamura (*TRB-21*)
- [9] "Large eddy simulation of turbulent convective heat transfer in a micro can combustor with multiple jets," by K. Suzuki, H. S. Choi and T. S. Park (*TRB-22*)
- [10] "Linear and nonlinear processes in small-scale scalar transfer in strongly stable density stratified flows," by K. Nagata, S. Komori and Y. Sakai (*TRB-27*)

【フランス】 (6 件)

- [11] "Large-eddy simulation of turbulent flow and heat transfer in a ribbed square channel flow," by O. Labbé (*TRB-02*)
- [12] "Turbulent Rayleigh-Benard convection of a supercritical fluid in a closed cavity," by G. Accary, P. Bontoux, I. Raspo and B. Zappoli (*TRB-03*)
- [13] "Bifurcations and multiple solutions in an air-filled differentially heated cubic cavity," by O. Daube, G. De Gassowski, S. Xin and Y. Fraigneau (*TRB-05*)
- [14] "Dynamics of convective heat transfer in a boundary layer submitted to freestream turbulence," by F. Plaza, E. Sanz, C. Nicot and R. Point (*TRB-07*)
- [15] "Impinging jet: Experimental analysis of flow field and heat transfer for assessment of turbulence models," by A. Giovannini and N. S. Kim (*TRB-15*)
- [16] "Effects of turbulence on interfacial heat transfer: A priori test and filters evaluation," by O. Lebaigue, A. Toutant, E. Labourasse, S. Vincent, P. Lubin and D. Lacanette (*TRB-16*)

【米国】 (5 件)

- [17] "Reduced-order modeling of turbulent flows in multiscale domains," by Y. Joshi and J. Rambo (*TRB-10*)
- [18] "Convection heat transfer in pulsating turbulent pipe flow," by N. Zhang and X. Wang (*TRB-25*)
- [19] "Supercritical heat transfer and development of a criterion for mixed convection in a heated tube," by M. Corradini, K. W. Seo, M. H. Kim and M. Anderson (*TRB-26*)
- [20] "Turbulent scalar mixing in single and double elbow configurations," by Y. Hassan, V. K. Vijayaraghavan and A. R. McFarland (*TRB-28*)
- [21] "Computational study of aerosol particle deposition in turbulent flows," by S. S. Hu, A. R. McFarland and Y. Hassan (*TRB-29*)

【その他の国】 (6 件)

- [22] "Study of momentum and heat transfer in a falling liquid film," by S. Sinkunas, J. Gylys, A. Kiela and I. Gimbutyte [Lithuania] (*TRB-01*)
- [23] "Flow structure and turbulence modification in a downward bubbly flow," by M. A. Pakhomov and V. I. Terekhov [Russia] (*TRB-06*)
- [24] "Self similar thermal turbulent boundary layer," by M. Wolfshtein [Israel] (*TRB-09*)
- [25] "Heat transfer and pressure drop characteristics of flow through rectangular and square ribbed ducts with twisted tape inserts," by S. K. Saha, D. Pramanik and A. K. Mazumder [India] (*TRB-19*)
- [26] "Prediction of Richardson number effects on stably-stratified turbulence with second-moment closures," by J. C. F. Pereira and J. M. P. Rocha [Portugal] (*TRB-20*)
- [27] "Large eddy simulation of turbulent heat transfer in a dimpled channel," by J. S. Lee, Y. O. Lee, J. Ahn and J. C. Song [Korea] (*TRB-24*)

Jets

廣田 真史 (名古屋大学)

Masafumi HIROTA (Nagoya University)

e-mail: hirota@mech.nagoya-u.ac.jp

1. セッションの概要

“Jets”のポスターセッション (Poster Session 6 : JET) は会議4日目の8月17日 (木) 午前に行われた。27件の発表が予定されていたが、そのうち6件が欠席であった。論文題目と代表著者 (ポスター発表者) は最後に記す通りであるが、発表者の所属は18カ国にわたり国際色の強いセッションとなった。全発表論文のうち、約8割が衝突噴流に関する研究であり、また7割が実験的研究であった。数値シミュレーションでは乱流モデルを用いた解析結果が多く発表されていたが、全て市販ソフトによる計算であった。

セッションに先立って4件のKeynote Lectureが行われた。このうち、菱田公一教授 (慶応大学) による講演 “Optical Measurements of Transport Processes in Single and Multiphase Flows” は噴流の研究にも関連が深いと思われるが、本セッションで発表された研究は伝熱面上の熱伝達率に注目したものが多いためか、計測法も比較的オーソドックスな手法に留まっているように感じられた。

2. 発表内容の概要

以下にポスター展示のあった研究について概要を紹介する。なおJET-01は欠番であった。

JET-03 : 移動する高温面を2次元衝突噴流で冷却する場合について $k-\epsilon$ モデルを用いた解析を行った。熱伝達率は噴流速度と面の移動速度の増加に伴い増大することが明らかになった。

JET-04 : 低レイノルズ数の噴流が低密度流体中に上向きに噴出し壁面に衝突する場合について数値解析を行っている。噴流が壁面上を広がる速度はフーリエ数に依存することが示された。

JET-05 : 衝突噴流により円柱を冷却する場合について、円柱内の熱伝導と対流伝熱との連成問題を v^2-f モデルにより解析し、円柱内の温度分布の標準偏差を表す無次元式を導出している。

JET-06 : 流路内に置かれた直方体を管内流れとそれに直交する衝突噴流で冷却する場合について、

レイノルズ応力モデルによる数値解析を行い、実験結果との良い一致を得ている。

JET-08 : 噴射ノズル内のキャビテーションがスプレーの break-up に及ぼす影響についてレビューし、モデルを導出している。

JET-10 : 水平に噴き出した加熱噴流の混合特性について実験を行った。とくに、ノズル形状を変化させることで、噴流の発達に及ぼす運動量厚さの影響について検討を加えた。

JET-11 : 回転する加熱円筒とサブクール状態の衝突水噴流間の沸騰伝熱について実験的に調査し、様々な条件下で局所的な沸騰曲線を得ている。

JET-13 : 伝熱面と円形ノズル板との間に金属製多孔体を充填することにより、衝突噴流の伝熱促進を試みている。実験結果から、ヒートシンクとして最適な多孔体の仕様が決定された。

JET-14 : 脈動衝突噴流の伝熱促進効果を $k-\omega$ モデルにより解析し、伝熱特性に影響を及ぼすパラメータを明らかにした。

JET-15 : “non-zero-net-mass-flux hybrid synthetic jet” の伝熱特性を実験的に検討し、従来の zero-net-mass-flux synthetic jet に比べて高い伝熱促進効果が得られることを明らかにしている。

JET-16 : TiO_2 による親水処理を施した伝熱面において、衝突噴流の沸騰熱伝達特性を実験的に検討した。親水処理した結果、限界熱流束は銅表面における値を30%も上回ることを見出した。

JET-17 : 正方形あるいは六角形配列された衝突噴流群の伝熱特性を v^2-f モデルにより解析し、最適な噴流配置と噴流間隔を決定している。

JET-18 : 円形ノズルの周囲に設けられた三角形タブの伝熱促進効果を実験的に明らかにするとともに、流れ場の構造を SPIV で測定し伝熱促進のメカニズムについて検討している。

JET-19 : 正方形配列された層流衝突噴流群の伝熱特性と流動特性に関して、とくに噴流と伝熱面間の距離が熱伝達率分布に及ぼす影響を実験的に明らかにした。

JET-20：単一衝突噴流において瞬時の局所熱伝達率と速度分布の同時計測により、熱伝達に及ぼす渦の影響について検討した。

JET-21：周囲に“film flow”をもつ噴流の拡散特性を可視化により調べた。film flow と噴流との速度差と film flow に対する音響励起の有無が、噴流の拡散に及ぼす影響について明らかにした。

JET-22：ノズルと伝熱面との間隔が従来よりも長い場合における衝突噴流の伝熱特性を、実験により明らかにしている。

JET-23：高温金属面の水スプレー冷却を取り上

げ、表面温度及び熱伝達率分布の時空間変化を、赤外線サーモグラフィを用いて明らかにした。

JET-24：旋回衝突噴流の伝熱特性と速度分布を測定した。旋回に伴う循環領域の形成が熱伝達に大きな影響を与えることを見出している。

JET-25：噴流による高温回転円筒の冷却について実験を行い、回転面に対する噴流の角度が伝熱特性に影響を及ぼすことを明らかにした。

JET-26：格子による擾乱を与えた円形噴流について速度場と温度場の計測を行い、擾乱により渦構造の形成が抑制されることを見出した。

3. 全発表論文の著者とタイトル

No.	代表著者	論文題目
JET-02	L. Al-Hadhrami	Heat Transfer of Single Array of Impinging Jets in a Rectangular Channel with an Inclined Target Surface
JET-03	M. A. R. Sharif	Computational Study of Heat Transfer from a Confined Turbulent Slot Jet Impinging on a Moving Plate
JET-04	N. Srinarayana	Direct Simulation of Impinging Plane Fountains in a Homogeneous Fluid
JET-05	N. Zuckerman	Heat Transfer and Temperature Distributions in the Fluid and Cooled Cylindrical Solid during Radial Slot Jet Impingement Cooling
JET-06	D. Rundstroem	RSM Predictions of an Impinging Jet in a Cross-Flow on a Heated Wall-Mounted Cube
JET-07	H. Herwig	Heat Transfer under Unsteadily Impinging Jets: A Systematic Investigation
JET-08	S. Martynov	Modelling of Cavitation Flow in a Nozzle and its Effect on Spray Development
JET-09	A. N. Krylov	Heat Transfer Processes in Melting Furnace Elements while Using Transpiration Insulation, Fuel Reforming and Raw Material Preheating
JET-10	S. K. Das	The Transition and Mixing Behaviors of Slightly Heated Plane Jets Issued from Nozzles of Different Inlet Geometries
JET-11	M. Gradeck	Cooling of a Hot Cylinder with an Impinging Planar Water Jet
JET-12	H. Farahani Manesh	Visualization Numerical Simulation of an Impinging Square Jet Using Virtual Reality Technology
JET-13	K. Kamiuto	Impinging Jet Heat Transfer of a Porous Surface by a Circular Nozzle with a Flange
JET-14	W.Liewkongsataporn	A Numerical Study of Axisymmetric Pulsating Jet Impingement Heat Transfer
JET-15	Z. Travnicek	Hybrid Synthetic Jet Intended for Enhanced Jet Impingement Heat/Mass Transfer
JET-16	Z. Liu	Steady Boiling for Water Jet Impingement on the Flat Stagnation Zone from a Superhydrophilic Surface
JET-17	T. Chandratilleke	Thermal Performance and Optimization of an Impinging Fluid Jet Array at a Heated Surface
JET-18	S. J. Lee	Heat Transfer and Flow Characteristics of Impinging Jet with Triangular Multi-tabs
JET-19	A. Giovannini	Thermal Evaluation of Jet-to-Plate Spacing Effects in Laminar Confined Multijets
JET-20	T. S. O'Donovan	Effect of Vortices on Jet Impingement Heat Transfer
JET-21	N. Miyagi	Jet Diffusion Control by Acoustically Driven Secondary Film Flow Visualization of Controlled Jet Structure
JET-22	R. Karvinen	Heat Transfer under an Impinging Jet at Long Nozzle-to-Surface Distances
JET-23	W. J. Vorster	Visualization of the Temperature Field and Spatio-Temporal Heat Transfer Coefficient on a Flat Vertical Surface during a Water Spray-Quenching
JET-24	L.F. A. Azevedo	Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics of a Swirl Jet Impinging on a Flat Plate
JET-25	M. Raudensky	Spray Cooling of Rotating Rolling
JET-26	L. Djenidi	Effect of a Passive Disturbance on the Heat Transport in the near Field of a Round Jet
JET-27	M. I. Khan	Nozzle Side Wall Geometry Effect on the near Flow Field Mixing
JET-28	R. N. Sharma	Jet Impingement Heat Transfer from a Circular Cylinder in a Confined Space

Mass Transfer

長田 孝二 (名古屋大学)
Kouji NAGATA (Nagoya University)
e-mail: nagata@nagoya-u.jp

1. 研究発表の概要

国際伝熱会議ということで熱伝達・熱輸送に関する研究が数多く発表されたが、ここでは、物質輸送、特に、著者の興味対象である乱流物質輸送や物質の対流混合に関する研究発表を中心にその概要を報告したい。なお、本国際会議には「Mass Transfer」のセッションがあり、そのセッション (Poster Session 7: MST) における発表件数は11件であった。MSTセッションでの発表内容は多種多様に渡り、様々な流動場における物質伝達・物質移動に関する実験および数値研究が発表された (表1)。乱流のセッションでは、複数の曲がり部を持つ管内流での乱流物質拡散に関する研究が発表された[1]。自然対流・共存対流の分野では、物質拡散に及ぼす浮力の影響[2]や、熱煙の二重対流拡散に関する興味深い現象[3]が報告された。一方、ここ数年注目されている、ナノサイズ粒子の懸濁による熱物質移動促進に関する研究発表も行われた[4,5]。Nanofluids の特性に関しては不明な点も多く、また、幅広い工学的応用が期待されることから、これから益々発展する研究分野であろう。エネルギー分野では、燃料電池内の物質移動に関する研究が報告された[6,7]。その他、火災事故に関連した煙の拡散や排気、熱交換器やガスタービン等の実用機器に関連した流れ場の中での物質移動に関する研究等が多数発表されたが、紙面の都合上紹介を省略させていただきたい。

基調講演では、せん断力が作用する風波気液界面を通しての物質交換機構を明らかにするための基礎研究に対して AIChE The 2005 Donald Q. Kern Award を受賞した、Sanjoy Banerjee 教授(カリフォルニア大学サンタバーバラ校)による受賞記念講演[8]が行われた。従来、表面更新渦と呼ばれる、気液界面近傍の液側に現れる乱流渦が気液界面を通しての物質交換を支配することが知られていた。

しかし、海洋での表面更新渦は観測が難しく、大気・海洋間での物質交換に適用することが難しいという欠点があった。これに対して、「surface divergence」に基づく物質交換モデルが提案され、実測値をよく説明できることが示された。

2. 雑記

著者は学生時代から乱流熱物質輸送に関連した研究を行っているが、IHTCには初参加であった。基調講演以外は全てポスターセッションであるが、それ故に、フロアでじっくりと議論を交わす時間がとれたのはいいことであった。発表件数も多く、情報収集および情報交換の場としては最適ではなかろうか。実際、著者はフロアでのディスカッションによって数多くの情報を得ることができ、非常に有意義な会議であったと感じた。不満は高い参加登録費(10万円程度)であろうか。シドニーは冬季にも関わらず日中は汗ばむほどの陽気で、持参したジャンパーを使う機会が全くなかった(会場横のハーバーでは上半身裸で日光浴をしているおじさんもいた)。学会会場はダーリングハーバーというシティ近くのハーバー内にあり、そびえ立つ高層ビル郡とハーバー、そして飛び交う白い鳥たちが印象的であった。



Sanjoy Banerjee 教授(カリフォルニア大学サンタバーバラ校)の受賞記念講演の様子

表1 「Mass Transfer」のセッション概要

著者	国(第一著者)	論文タイトル	内容の概略, キーワード等
Olsson, C.O.	Sweden	Diffusion in Polymers with Temperature Dependent Properties	ポリマー薄層中の物質拡散に及ぼす温度の影響(実験, 数値計算)
Ershova, T.V. <i>et al.</i>	Russia	Modeling of Thermo-Erosion Destruction of Materials in Supersonic Heterogeneous Flows	大気 dust cloud 中を運行する超音速機の腐食モデル(数値計算)
Georgieva-Angelova, K. & Schmidt, J.	Germany	Simulation of Mass Transfer in a Catalytic Membrane Reactor	触媒中の物質拡散(FLUENT による計算)
Ngonda, T.N. & Sheer, T.J.	South Africa	A Generated Model of Frost Formation on a Flat Plate in Forced Convection	強制対流下の平板上での霜の発達モデル(数値計算)
Tong, T.W., Abou-Ellail, M.M.M. & Li, Y.	USA	Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer in Methane-Air Mixtures Flowing Over Catalytic surfaces	白金触媒平板上を流れるメタン-空気混合気の化学反応(数値計算)
Zheng, G., Gschwind, P. & Kottke, V.	Germany	Determination of Flow Phenomena and Mass Transfer Coefficients in Non-Newtonian Flow	非ニュートン流体の流れ(層流)中での物質伝達(実験), shear-thinning 効果
Volpe, L. & Mewes, D.	Germany	Investigation of Mass Transfer on Macro- and Microscale between an Injected Dyes Mixture and a Bulk Fluid	二種の染料(無反応および反応性染料)を含む噴流の物質拡散(実験), 対流の効果, tomography
Elperin, T. & Fominykh, A.	Israel	Influence of an Alternating Electric Field on Mass Transfer During Solute Extraction From a Fluid Sphere with Internal Circulation	固体, 連続相流体, 静止流体球系における物質移動抽出)に及ぼす電場の効果(数値計算)
Ortolan, M.A. & Barbosa Jr, J.R.	Brazil	Absorption of Refrigerant in Lubricant Oil: A Visualization Study	潤滑油中への冷却ガスの吸収(実験, 数値計算)
Komiya, A., Maruyama, S & Morita, S.	Japan	Measurement of Mass Diffusion Coefficient of Micro Quantity Proteins Using Phase Shifting Interferometer	位相シフト干渉計によるタンパク質物質移動係数の微量短時間精密計測法の開発(実験)
Wolczyński, W. <i>et al.</i>	Poland	Mass Transport during Diffusion Soldering or Brazing at Constant Temperature	拡散ろう接過程における物質移動(モデリングおよび数値計算)

論文題目

- [1] Vijayaraghavan, V.K., Hassan, Y. & McFarland, A.R., Turbulent Scalar Mixing in Single and Double Elbow Configurations.
- [2] Evans, G., Winters, W. & Greif, R., Effects of Buoyancy on Contaminant Transport in Room Air Flows.
- [3] Kamakura, K., Hirano, H. & Ozoe, H., Three-Dimensional Numerical Analysis of Smoke in Shear flow.
- [4] Phelan, P.E. *et al.*, Enhanced Heat and Mass Transfer in Nanofluids.
- [5] Kang, Y.T. *et al.*, Mass Transfer Enhancement of a Binary Nanofluid for Absorption Application.
- [6] Massarotti, N. *et al.*, Numerical Simulation of Mass Transfer in a Solid Oxide Fuel Cell.
- [7] Kolar, A.K. & Rajani, B.P.M., Heat and Mass Transfer Characteristics in a Free Breathing Fuel Cell with a Ducted Cathode.
- [8] Banerjee, S., From Surface Renewal to Surface Divergence: The Evolution of Models for Turbulent Transport Processes. The 2005 Donald Q. Kern Award Lecture.

Natural Convection and Mixed Convection

辻 俊博 (名古屋工業大学)

Toshihiro TSUJI (Nagoya Institute of Technology)

e-mail: tsuji.toshihiro@nitech.ac.jp

標記の分野に関する発表は、主に 8 月 14 日(月) 午前の Poster Session 1 および午後の Poster Session 2 の中で行われたが、別日の Poster Session の中で発表されたものもいくつかあった。

自然対流についての発表は 50 件で、国別に見るとフランス 9 件、アメリカ 6 件、日本 5 件、オーストラリア 4 件、イギリス 3 件、台湾 3 件、カナダ 3 件、韓国その他は 2 件以下であった。また、共存対流に関する発表は 17 件あり、日本 3 件、アメリカ 2 件、その他の国は 1 件ずつであった。残念ながら、これらの発表についてはポスター未掲示のものも数件あった。発表のあった研究テーマについて以下に列挙するが、実験的研究は解析に比べてかなり少なかった。

自然対流の研究

住環境に関連して、ブラインドを挟み込んだ二重ガラス内部の干渉計による温度場の可視化(NCV-03)、室内空間の熱対流と汚染物質の拡散の解析に利用される Zonal モデルを、天井の高い空間や開放ドアで連結された空間に適用する手法の提案(NCV-25)、換気口から有害ガスが室内に進入した場合のガス濃度分布を解析により検討(NCV-27)、居室の窓から入射する太陽エネルギーにより発生する自然対流について、その入射位置が床面を時間的に移動することを考慮に入れた熱伝達実験(NCV-35)、屋根裏部屋を想定した周期加熱される三角形断面の空間に生じる熱対流の解析(NCV-43)、建物に取付ける二重構造光発電外壁を局所的な加熱を受けるチャンネルで模し、その熱伝達特性を市販ソフトで解析(NCV-44)など多くの発表があった。

内部に熱源や物体を有する閉空間の自然対流については、矩形キャビティ内に置かれた角柱周りの対流に対する低マッハ数近似による解析(NCV-06)、底面加熱の水平流体層内に角柱を周期的に並べた場合の解析領域の検討(NCV-09)、遠心

加速される容器内に置かれた加熱平板周りの自然対流の熱伝達実験と市販ソフトによる解析(NCV-17)、正方形容器の鉛直側面に取付けた 3 つの加熱源の最適配置に関する解析(NCV-19)、閉空間内に鉛直仕切面を有する自然対流の有限要素法による解析(NCV-22)、温度差が与えられた矩形容器内に正方形物体を多数配置したときの熱放射・熱伝導・熱対流の連成解析(NCV-42)、矩形容器の高温側面に肉厚の薄いフィンを取付けたときの過渡伝熱特性の解析(NCV-45)などが発表された。

自然対流の外部流については、長軸を水平にして置かれた等温加熱の水平楕円柱周りに生じる層流境界層の解析(NCV-29)、水平に置かれた 4 種類の矩形断面のピンフィンと 2 種類の長方形プレートフィンからの自然対流熱伝達に関する実験(NCV-31)、水平面に置かれた正方形断面のピンフィンについて、ピッチを変えた場合の自然対流の市販ソフトによる解析(NCV-37)、水平平板から離れて置かれた水平加熱円柱の熱伝達特性の解析(NCV-46)などがあった。

磁場下の自然対流については、浮力と Kelvin 力により同軸円筒間に生じる空気の磁化力対流の解析(NCV-07)、強磁場中に置かれた正方形容器内の磁性流体に関する温度場の液晶による可視化(NCV-16)、浮力と磁化力が作用する空気流中における浮遊微小粒子の挙動解析(NCV-18)、超電導磁石の開口部に置かれた正方形容器内の自然対流の解析と液晶による温度場の可視化(NCV-21)などが発表された。

多孔質体内の自然対流については、側面加熱・冷却の多孔質体内自然対流について Brinkman 修正、Forchheimer 修正の効果を検討する解析(NCV-10)、多孔質体内の 2 成分混合ガスの二重拡散対流の過渡的振動に関する解析(NCV-34)、多孔質体内の流体層の底面温度を時間に比例して上昇させたときの対流発生に関する解析(NCV-40)な

どがあった。

伝熱促進を目的としたナノ流体の自然対流については、正方形閉空間内にアルミナのナノ粒子を分散させた水の自然対流熱伝達特性に関する実験(NCV-33)、水にアルミナあるいは銅のナノ粒子および油にカーボンナノチューブを懸濁させた矩形流体層の熱伝達解析(NCV-41)が発表された。

熱サイフォン、二相流に関連する自然対流として、正方形断面の閉ループ熱サイフォン流路を回転させた場合の DNS(NCV-20)、超臨界と亜臨界 CO₂ の鉛直円筒面上の自然対流について観察と熱伝達率測定を行った研究(NCV-36)、狭い鉛直流路を持つ開放型の二相流熱サイフォンに関する熱伝達実験(NCV-38)などがあった。

自然対流の安定性については、容器の底面に 3 個の平面加熱源がある場合の対流の不安定挙動の解析(NCV-04)、擬スペクトル法を用いた鉛直キャピタリ内放射性ガスの対流不安定挙動の解析(NCV-11)、水平流体層の底面温度を急変したときの温度境界層の線形安定解析(NCV-14)、水と CO₂ の超臨界状態における自然循環流の安定性に関する解析(NCV-24)、サーモキャピラリー対流の振動を自由表面の周期的な加熱により抑制する制御法の確立(NCV-30)、大きな閉空間ではたとえ温度差が小さくても通常の Boussinesq 近似が成立せず、エネルギー方程式中の圧力仕事の考慮が必要であることを指摘した研究(NCV-32)、溝付内管を有する同心二重円筒内の非線形熱対流挙動の解析(MTH-17)、立方体容器内の空気の熱対流に関する解析から遷移過程の分岐と多重解を検討(TRB-03)などの発表があった。

さらに、自然対流乱流については、二次元キャピタリ内対流を通常の $k-\varepsilon$ および RNG $k-\varepsilon$ モデルといくつかの壁関数を組合せて解析したときの精度評価(NCV-08)、高レイリー数における閉空間内の乱流空気流の速度計測と LES および DNS による解析結果との比較(NCV-23)、正方形容器内熱対流の乱流域について低レイノルズ数 $k-\varepsilon$ モデルと $k-\varepsilon-\overline{\nu^2}$ モデルを用いた解析の比較評価(NCV-28)、熱電対と PIV を用いた水の自然対流乱流境界層の熱流体計測と伝熱促進に関する実験(TRB-08)などの研究があった。

その他、鉛直二重円管の肉厚と偏心率の変化を考慮した自然対流の連成解析(NCV-15)、容器内の

溶融金属の対流と腐食に関連する酸素濃度の格子ボルツマン法による解析(NCV-26)、下面と側面の 75%を加熱した矩形容器内の 2 成分流体の二重拡散対流に関する熱物質伝達の解析(NCV-39)、側面加熱・冷却の矩形容器についてアスペクト比、姿勢および温度差を変えたときの熱対流挙動の解析と実験(NCV-47)などがあった。

共存対流の研究

円管内の共存対流については、鉛直円管流路壁の半円周部分のみを等熱流束加熱した場合の完全発達共存対流の解析解(FCV-07)、鉛直管内の過熱蒸気の共存対流について実験を行い、熱伝達の整理式を提案(MCV-11)、内管回転の同心および偏心二重管内流について、ニュートン流体と非ニュートン流体の流動特性を実験と解析で調べた研究(MCV-12)、超臨界状態の加熱円管内共存対流に市販ソフトを用いるときの適用範囲と壁関数の修正に関する提案(TRB-26)などの研究が発表された。

円管以外の流路については、水平流路において下面壁が加熱され移動する場合の共存対流の低レイノルズ数 $k-\omega$ モデルによる解析(MCV-01)、等温加熱半円断面流路の入口助走域における層流共存対流の解析(MCV-02)、加熱水平円柱の後流において離脱する熱ブルームに関する可視化とスペクトル要素法による解析(MCV-04)、非定常下における熱流動の解析について実用的な流体と固体壁の連成法を提案し、それを LDV, PIV を用いた実験で検証(MCV-05)、水平層流剪断流中で流れ方向に煙を発生させたときの二重拡散現象の解析(MCV-06)、急拡大する鉛直流路における共存対流における流れの分岐と熱伝達を調べた解析(MCV-07)、浮力と流れ方向が対向する鉛直平行流路内共存対流の遷移域に関する実験と市販ソフトによる解析(MCV-09)などがあった。

その他、市販ソフトによる軽合金鋳造施設における建物内環境の予測(MCV-03)、電導性流体中に置かれた等温加熱水平円柱周りに半径方向に磁場をかけたときの熱流動特性を解析(MCV-08)、チョクラスキー法におけるシリコン融液の振動現象に及ぼす結晶とるつぼの回転の影響に関する解析(MCV-10)、成層した非混和油におけるマランゴニ対流と自然対流の相互作用に関する PIV 計測(MCV-13)、軸対称噴水流の過渡的熱流動挙動の DNS(NCV-05)など様々な研究が発表された。

Boiling and Evaporation

奥山 邦人, 森 昌司 (横浜国立大学)

Kunito OKUYAMA, Shoji MORI (Yokohama National University)

e-mail: okuyama@ynu.ac.jp, morisho@ynu.ac.jp

沸騰・蒸発に関しては、キーノート 3 件、ポスターは第 2 日目 (8 月 15 日) 午後の Session 4 の BOI (Boiling) の 59 件 (内、管内流動沸騰 (FB) 33 件) の他に、同セッション内の NAN (Nanoscale) に 4 件、他セッションでは MPH (Multiphase) に 15 件 (FB 6 件), PRT (Particulate & Porous) に 4 件、MIC (Microscale) 3 件 (FB 3 件), NCL (Nuclear) 3 件 (FB 3 件), JET (Jets) 3 件, HEX (Heat exchangers) 2 件 (FB 2 件), そして EXP (Exp. Techniques), MTH (Math & Comp), OFM (Open forum) に各 1 件の計 96 件 (会議全ポスターの約 13%) の発表があった。(なお、ヒートパイプ、スプレー蒸発、マイクログループ蒸発熱交換器はここに含んでいない。)

内容は、プール沸騰および蒸発関連では、核沸騰熱促進 (11 件), 固液接触・クエンチ (9 件), 液膜蒸発 (8 件), 気泡成長・合体 (7 件), 限界熱流束・高熱流束除去 (5 件), 表面粗さと核沸騰熱伝達 (3 件), 直接接触 (3 件), 熱伝達機構・モデル (3 件), 核生成 (2 件), 微小重力下 (2 件), 混合物 (2 件) など、また管内流動沸騰では、熱伝達率, 圧力損失, およびボイド率の測定とそれらの予測 (17 件), 流れの構造・熱伝達メカニズム (7 件), CHF および高熱流束除去 (5 件), サブクール流動沸騰 (4 件) であった。流路形状で分類すると、細管および狭隘流路流れ (18 件), 通常サイズの円管および矩形流路流れ (13 件), 二重管流れ (4 件), 外部バルク流れ 3 件, さらにアプリケーション別に見ると、原子力 (10 件), 電子素子冷却 (9 件), 核融合炉 (4 件), 冷凍機 (3 件) であった。数値解析による研究には、気泡成長 (3 件), 核生成 (1 件), サブクール流動沸騰 (4 件) があった。国別では、日本 22 件 (内 FB 12 件), 米 12 (4), 独 9 (3), 仏 8 (4), 韓国 7 (6), 英 6 (3), 伊 5 (1), 中国 5 (1), カナダ 3 (2), スウェーデン 3 (2), 台湾 2 (2), スペイン 2 (1), インド 2 (0), その他 4 ヶ国各 1 で、日本の割合 (22/96) は本会議全登録者数に占める

日本からの登録者数の割合 (約 16%) よりやや高い。

キーノート KN-02: Phase Change Heat Transfer in Microsystems は Max Jakob Award を受賞された P. Cheng 教授による micro-, mini-, macro-channel 内の流動沸騰の流動様式, 熱伝達率, 圧力損失などに関する系統的研究のレビューとパルス加熱沸騰研究の紹介, また KN-12: Flow Boiling Heat Transfer in Microgravity は G.P. Celata 博士による微小重力下の流動沸騰伝熱研究レビューと ESA (European Space Agency) のプロジェクトとして 2004~06 年に行われた航空機実験結果の紹介で、沸騰熱伝達に与える重力加速度効果に対する流速と蒸気クオリティの影響が気泡挙動との対応に基づいて論じられた。KN-14: Fundamentals of Boiling in Microchannels では J.R. Thome 教授により microchannel 内流動沸騰の CHF, 流動様式, パターンマップ, 複数流路系の流動不安定性, 熱伝達率・圧力損失予測法等に関する 2000 年以降の最新研究結果のレビューと考慮されるべき特徴的現象全般にわたる詳細な解説がなされた。

ポスター発表のうち、核沸騰伝熱促進関連では、微細構造面 (マイクロフィン (BOI-04), 多孔質黒鉛 (BOI-36), 溶射 (BOI-50), フォームメタル (BOI-54), 樹状組織化 (NAN-07), カーボンナノチューブ (NAN-13) など) の主に冷媒への有効性のほか、水に 50nm 以下の超微粒子を含んだ「ナノ流体」の沸騰における核沸騰熱伝達の促進 (または悪化) 効果 (BOI-06, NAN-02), 細線での CHF 増大効果 (NAN-22) などが報告された。

固液接触・クエンチ関連では、衝突噴流または噴霧流による冷却時の沸騰曲線, 熱伝達率, CHF 相関式など (BOI-09, 15, 25, MPH-02, JET-11, 16, 23), 液滴微粒化沸騰のメカニズム (BOI-46), 膜沸騰蒸気膜崩壊時の動的固液接触角 (BOI-39) などが報告された。

液膜蒸発関連では、高 Pr 数液体の流下液膜蒸発熱伝達率相関式 (BOI-13)、蒸発液膜の対流不安定機構 (MPH-18)、固体面引き上げ時の蒸発液膜のマランゴニ流動 (MPH-33) のほか、微細構造面における蒸発伝熱促進や多孔質層からの蒸発による高熱流束除去に関する研究が複数 (BOI-58, MPH-17, PRT-11, 17, 18, 22) 報告された。多孔質を利用した高熱流束除去の概念が提案されて以来 30 年以上になるが、金属微粒子焼結体で 33.9 MW/m^2 の熱流束除去に成功した BOI-58 や二種類の多孔質構造により伝熱面温度を飽和温度付近に保ちつつ 10 MW/m^2 近い熱流束が除去できることを示した PRT-17, 18 の研究は、多孔質の潜在能力と可能性を改めて示すものとして注目される。

沸騰気泡の成長・合体に関しては、気泡成長離脱過程の数値計算 (BOI-14, 26)、高速 IR サーモグラフィによる気泡合体過程の壁温分布測定 (BOI-40)、微小薄膜温度センサーによる気泡下伝熱過程の測定 (BOI-43)、パルス加熱沸騰気泡の予熱による極大化 (BOI-55)、非凝縮ガスの沸騰気泡成長への影響 (MPH-09)、閉じたキャビティ内の過熱液から気泡への蒸発過程の数値解析 (MPH-12) などが報告された。BOI-26 では移動する三相界面付近のマイクロ液膜からの蒸発過程を組み込んだ計算から、液膜蒸発の気泡成長への寄与が二成分混合液の場合でも約 30% を占めることを示している。

管内流動沸騰関連の発表 (33 件) に関しては、以下の通りである。なお、紙面の都合上、数例紹介するに留める。

熱伝達率、圧力損失、およびボイド率の測定とそれらの予測 17 件 (BOI-1, 2, 8, 11, 17, 23, 24, 29, 34, 35, 38, 44, 48, 49, 51, NCL-09, EXP-20)

BOI-08 は、矩形ミニチャンネルにおいて見かけの流速 $j (=j_g + j_l)$ が、熱伝達率およびドライアウト発生点を予測するための重要なパラメータであることを実験的に示している。

流れの構造・熱伝達メカニズム 7 件 (BOI-3, 10, 16, 30, 41, 52, 57)

BOI-3 は、高粘性流体の流動沸騰 ($Re \approx 0.01$) において単相流、層流の熱伝達率の厳密解に沸騰の影響を加えた簡単なモデルにより熱伝達率を予測し、実験結果との良い一致を報告している。

BOI-10 は、狭隘矩形流路内の熱伝達率を規定す

る沸騰気泡の初期マイクロ液膜厚さをレーザ吸収法により測定し、その膜厚が気泡先端移動速度で決まることを示している。

BOI-16 は、マイクロチャンネル内部の流動様相を液スラグ、液膜、ドライアウト領域に分けた 3 ゾーン蒸発モデルにより局所熱伝達率を精度良く予測している。

BOI-41 は、熱的非平衡スラグ流モデルにより、局所熱伝達率、圧力損失を精度よく予測できるとしている。

BOI-52 は、数値シミュレーションによりマイクロチャンネル内部の蒸気泡の移動、ドライパッチ形成に接触角の影響が大きいことを示した。

CHF 及び高熱流束除去 5 件 (BOI-5, 7, 28, 32, 45)

BOI-05 は円管、環状流路、ロッドバンドルで熱流束分布が一様、または非一様の場合について CHF およびドライアウトクオリティを沸騰長さによって統一的に整理できることを示した。

BOI-28 は、主流路にサブクール液を供給し、副流路に設置した複数のノズルから伝熱面にサブクールジェット水を供給することで、 6 MW/m^2 の熱流束を除去できること、さらにこのジェットにより圧力変動が、非常に小さくなることを示した。サブクール流動沸騰 4 件 (BOI-19, 20, 21, 22)

BOI-21 は、気泡の Lift-off 径をヤコブ数、プラントル数の関数として定式化し、実験結果とよく合うことを示した。

なお、Session 4 (沸騰及びナノスケール計 89 件) の中から、宇高義郎教授 (横国大) の発表 BOI-10: Configuration of Micro-layer in Thin-Gaps in Boiling Heat Transfer が Best Poster 賞に選ばれた (写真は会議中の授賞の掲示)。



Condensation

宇高 義郎 (横浜国立大学)

Yoshio UTAKA (Yokohama National University)

e-mail: utaka@ynu.ac.jp

1. 凝縮セッションの概要

ほぼ半日毎に設定された 8 つのポスターセッションのうち PS7 の 80 件のポスター論文の中の 16 件が凝縮に分類された。そのうち凝縮現象を含んでいない CSN-12 を除外すると、凝縮関連の発表は 15 件であった。前回のグルノーブルでは 12 件であったので、特に発表数に大きな変化はなく、全体的には種々の内容を含んでいるが、近年のミクロ・ナノの傾向を除けば、従来の研究の連続的なものが多数を占めていた。

2. 分類と内容

表 1 に「凝縮」に分類された全ポスター発表論文についてまとめた。左側の欄に代表著者とその所属国を、右欄に論文番号、論文題目および内容を表す分類を示した。最後の分類については、凝縮現象の大分類だけを記しており、膜状凝縮（管群、促進管、マイクロチャネル）、滴状凝縮、直接接触凝縮、液滴（核）生成、排気ガス中の湿分凝縮などの内容の研究発表がなされた。

これらのうち、特に表面張力の支配的な場での細管内での凝縮液の挙動が熱伝達特性を決める上で重要となるマイクロチャネル内の凝縮特性（CSN-01, CSN-05）、および環境問題などとも関連が深い不凝縮気体（排気ガスなど）の中の凝縮成分の取り出し（CSN-15）、に関する内容の研究がみられ、近年の傾向を反映している。

膜状凝縮については、従来から継続して研究されてきている管群あるいは促進管（CSN-02, 14, 16）、平板上に関しては波状領域の研究（CSN-09, 13）が主要であった。滴状凝縮に関しては、実際上重要な長寿命の表面処理技術（CSN-03）、初生液滴（CSN-06）および表面エネルギー分布面における液滴移動（CSN-08,）の研究が発表された。凝縮滴（核）生成機構あるいはそのミスト利用に関して 3 件（CSN-04, 06, 07）発表された。

表 1 凝縮セッションのポスター発表リスト

代表著者 (国)	論文番号: 論文題目 (分類)
Yongping Chen (中国)	CSN-01: Influence of Hydraulic Diameter on Flow Condensation in Silicon Microchannels (マイクロチャネル)
David A McNeil (英国)	CSN-02: Heat Transfer Measurements in a Low Pressure Steam Condenser with a Horizontal Bundle of Staggered Tubes (管群)
Alfred Leipertz (ドイツ)	CSN-03: Dropwise Condensation on Plasma-Ion-Implanted Small Horizontal Tube Bundles (滴状凝縮)
Toshihiko Nakano (日本)	CSN-04: The Effect of Non-Equilibrium Condensation of Moist Air on Supersonic Cavity Flows (生成凝縮滴の可視化利用)
John Rose (英国)	CSN-05: Film Condensation in Microchannels: Preliminary Comparisons between a Theoretical Model and Experiment (マイクロチャネル)
Tianqing Liu (中国)	CSN-06: A mechanism study of Initial Condensation State (滴状凝縮, 液滴初生)
Naum Kortsenshteyn (ロシア)	CSN-07: Condensation-Relaxation of Supersaturated Vapor and the Possibility of the Experimental Determination of the Nucleation Rate (凝縮核生成)
Qiang Liao (中国)	CSN-08: Experimental Investigation of Dropwise Condensation Heat Transfer on the Surface with Gradient Surface Energy (滴状凝縮, 液滴移動)
Ulrich Gross (ドイツ)	CSN-09: Wave Characteristics of Liquid Films - Correlation of Heat Transfer Data with Visual Observations (波状膜状凝縮)
In-Cheol Chu (韓国)	CSN-10: Direct Contact Condensation in Steam-Water Stratified Flow (直接接触凝縮)
Alberto Cavallini (イタリア)	CSN-11: Flow Patterns during Condensation of Refrigerants inside Enhanced Tubes (促進管内凝縮)
Georg Dietze (ドイツ)	CSN-13: Modeling of Heat Transfer in Stable Wavy Film Flow Based on Effective Thermal Diffusivity (波状膜状凝縮)
Bhushan Bhatt (米国)	CSN-14: An Investigation into the Transient Response Characteristics of Condensing Flow inside a Tube in Downflow (管内凝縮)
Suil-In Wang (中国)	CSN-15: Force Convective Heat Transfer of Flue Gas on Anticorrosion Plane Surface with Condensation (排気ガス)
Adrian Briggs (英国)	CSN-16: Condensation of Steam on Integral-Fin Tubes - Effect of Fin Height and Vapour Velocity (促進管凝縮)

Multiphase Flow

小泉 安郎 (工学院大学)

Yasuo KOIZUMI (Kogakuin University)

e-mail: koizumi@cc.kogakuin.ac.jp

1. 会場

会場は港に面した大変美しいところであった。東京の江東区隅田川沿いのいわゆるウオーターフロント再開発地区のモデルにしたところとことで、確かによく似た雰囲気を感じられた。港にはマリン博物館が有り、退役した駆逐艦や潜水艦等が係留されていた。(図 1)



図 1 会場周辺

2. セッション

今回の会議では、一般投稿論文は混相流を含めて 30 の分野に区分けされていた。一般論文の発表は全てポスターセッションであり、混相流のセッションは 8 月 14 日月曜日 11:30~13:30 であった。図 2 はポスターセッション会場の様子である。混相流のポスターセッションブースをざっと見回して、残念なことではあるが、ポスターが貼られていないブースがちらほら見かけられた。全てのポスターを見ることができたわけではないが、見ることができたもの、また見ることのできなかつたものは CD にあるものを基にして、独善的にまとめた統計的な面から幾つかの報告をしてみたい。

各分野の投稿論文数を論文数の多い順にまとめて表 1 に示した。混相流は投稿論文数 58 件であ



図 2 ポスターセッション会場状況

表 1 分野別投稿論文割合

分野	件数	全 657 件中割合 %
Boiling	59	9.0
Multiphase Flow	58	8.8
Natural Convection	47	7.2
Equipment	46	7.0
Heat Exchanger	38	5.8
Nanoscale	30	4.6
Particle & Porous	30	4.6
以下略		

り、伝熱と混相流の強いつながりが理解できる。

日本から今回の会議への投稿論文は全 95 件であった。内、混相流へは 13 件の投稿が成されている。国別に、混相流への投稿件数の多い順位に挙げると、日本 13 件、米国 10 件、イタリア 4 件、イギリス、フランス、カナダ、ブラジル各 3 件、ドイツ他 6 国各 2 件、イスラエル他 7 国各 1 件であった。

混相流セッションへの投稿論文全 58 件について、

- A: 混相流投稿全 58 件中の割合
 B: 会議全投稿論文数中の各国の投稿論文数割合
 C: 各国全投稿数中の混相流への投稿件数割合
 として、表 2 にまとめてみた。

表 2 混相流投稿割合

国名	A %	B %	C %
Japan	22.4	14.5	13.7
US	17.2	15.5	9.8
Italy	6.9	2.7	22.2
UK	5.2	3.5	13.0
France	5.2	7.5	6.1
Canada	5.2	3.5	13.0
Brazil	5.2	3.2	14.3
2 件の国	20.1	22.5	8.1
1 件の国	12.1	12.5	8.5

日本は B が 15.5% に対し、A は 22.4%、また、表 1 の混相流論文の値が 8.8% に対し C は 13.7% で、日本からは混相流への投稿割合が多いことが分かる。US はかなり平均的である。

次に、おおざっぱな見方で論文種別を見ると、実験 38 件 (65.5%)、数値計算 19 件 (32.8%)、レビュー 1 件 (1.7%) であった。大きさを分けると、従来サイズ 41 件 (71%)、ミニ・マイクロ・ナノサイズ 17 件 (29%) であった。

混相流への投稿論文を対象分野別に区分けしてみた数値を表 3 に示す。

表 3 研究対象整理

研究テーマ領域	件数	内ミミコ
流路内気液二相流動・伝熱	24	7
液滴 (クエンチング, 伝熱, 蒸発, 分裂, スプレー)	8	0
凝固・融解・霜	7	2
液膜流	6	3
固気液混相流動・伝熱	3	0
沸騰, 核生成, 気泡挙動	3	2
固気・流動層	2	0
湿分形成	2	1
固液・流動層	1	0
気泡界面超音波振動	1	1
接触角	1	1

表 3 で、最も多い流路内気液二相流動・伝熱 24 件の詳細をみると、伝熱の関与した現象を扱ったもの 16 件、また実験 18 件、数値解析 6 件。微小重力もしくは重力の効果を扱ったもの 3 件であった。水-空気系を対象とした発表はわずか 1 件であった。

印象として、ミニ、マイクロ、ナノを対象とした発表がかなりの割合を占めていたように感じられた。事実、混相流の Key Note Lecture は、Max Jacob 賞受賞記念 Lecture でもあったが、Phase Change Heat Transfer in Micro Systems by Professors Ping Cheng and Hui-Ying Wu であった。

4 年前のグルノーブルで開催された IHTC12 から比べて、ミニ・マイクロ・ナノ領域が大きく増えていることは間違いない。前回と今回で論文種別分類が異なるため、なかなか比較は難しいが、数値計算に比べて実験系が多くなっている点、日本からの混相流領域への投稿が増えた点も、印象に残った。

3. 印象

今回の会議では、一般投稿者はポスター発表だけが発表の場であった。ポスター発表では、来訪者とじっくり議論できる利点はあるが、多くの方へ向かって語りかけることができず、その点では不満の残る状態であったと言える。また、上記したが、前回の会議からの 4 年間、どのように伝熱研究領域が進展してきたか、何が成されて今後の展開はどうなるか、そのような視点の Key Note Lecture が少なかったことは残念であった。また、せっかく投稿されている論文について、その傾向がどうであるとか、大きな成果は何と言えるか等の言及が有り、まとめる講演が有ってしかるべきではなかったかと残念に思える。参加している人たちへのサービスでもあろうかと思う次第である。Key Note 講演で引用される文献に今回の発表者のものが含まれていなければ、参加者にとっては何をしに来たのか、10 万円の参加料の価値があったか、と考えさせられるところでもあった。



Radiation

上宇都 幸一 (大分大学)

Kouichi KAMIUTO (Oita University)

1. 基調講演

今回の会議では、基調講演として、計18件の講演が行われたが、ふく射に直接、関係するものは、2件であった。まず、KN-4, How to design and control radiant heaters and furnaces (J. Howell-USA-)は、ふく射加熱炉の熱設計に関するふく射伝熱逆問題を扱ったもので、被加熱物に所定の熱負荷、温度分布を与えるための加熱用ヒーターの出力と最適配置の決定法について、これまでに、提案されている正則化法、最適化法、発見的アプローチ等の逆解析手法を説明した後、ある形状固定逆問題を、これらの方法で解いた場合の精度、演算時間、解の特性を概観している。とりあげた5つの代表的な手法いずれも、ほぼ同程度の精度で所定の非加熱面平均温度を予測するが、しかし、ヒーター出力分布、演算時間は、手法によりかなり異なる事などが報告された。また、形状決定問題などへの応用を考えた場合、最適化法、発見的アプローチが有用な手法となることが、示唆されている。本講演は、今後、この分野に入って行く技術者・研究者にとって恰好の手引となるものであり、一読をお勧めする。ただ、会場からも指摘があったが、入力データの観測誤差、解析手法の離散化誤差、計算機の丸め誤差に関する議論が行われていないので、引用されている原著論文に立ち返って検討する必要がある。蛇足ながら、今後の逆問題ソルバーの開発にあたっては、我国で研究が行われている任意多倍長浮動小数点計算を利用した解析が、非常に有効であろうと思われる。(例えば、藤原 他, 日本応用数理学会論文集, Vol. 15, No. 3, 2005, P.419-434)

次に KN-06, Experimental and numerical studies on interaction of radiation with other modes of heat transfer (S. P. Venkateshan and C. Balaji-India-)は、非ふく射性ガスの介在する各種キャビティ内、およびチャンネル内でのふく射と対流(主として自然

対流)の複合伝熱問題に関するものであり、著者のグループで得られた理論解析結果にもとづいて、多くの熱伝達整理式を提示している。実験結果との対比が、必ずしも十分でない点もあるが有用な設計資料となりうるものと思われる。また、著者が、漸近数値流体力学的手法(ACFD)と呼んでいる手法は、複合伝熱問題に関する整理式を作成する際に、参考になる。なお、本講演では、対流-ふく射フィンの最適化についての議論もなされた。

2. ポスター発表

ふく射に関するポスターセッション-RAD-で発表された論文は、20編であり、それらの概要をふく射物性、ふく射輸送・伝熱に大別して表1にまとめている(他のセッションで発表された論文の中にも、ふく射に関連した研究が散見されるが、ここでは割愛する)。全般的な傾向としては、多様な分散媒体のふく射物体に関する研究が比較的多いこと、赤外ふく射ガスのふく射物性に関する報告が見当たらないこと、輸送方程式の解析手法に関する研究の焦点が非定常問題に移行していること、複合伝熱問題に関する研究が、基本的な体系についてのパラメータ計算から、具体的な実在系についての詳細計算に移行していることなどが挙げられる。しかし、これら全般的な動向とは別に、今後、発展が予期される研究課題として、筆者は、「TPV」「近接場ふく射伝熱」「逆問題」の3つのテーマに着目し以下簡単にコメントしたい。「TPV(熱光起電変換)」は、熱を光に変え、さらに電力に変換しようとするシステムであり、高効率なシステムの開発に当たっては、Makino-Wakabayashi (RAD-11)の研究にあるような安価で高性能のエミッターの開発、カットオフ波長が可能な限り長波長域まで伸びた半導体受光セルの開発、希薄燃焼加熱器の開発などが不可欠であり、最初と最後

の課題については、熱工学分野の研究者が本質的な貢献をなしうると期待される。次に、「近接場ふく射伝熱」とは、理論的には、固体面間間隔がサブミクロンの範囲では、2面間の距離が小さくなるとともに、ふく射伝熱量が、黒体面間での伝熱量を、はるかに凌駕していくことが予測されるという非常に興味深い現象であり、このテーマに関する研究は、近年、増々、活性化していく様相を呈している（但し、そこで使用されている fluctuational electrodynamics なる理論用具はかなり高級である。例えば、K. Joulain et al., *Surface Science Reports*, Vol. 57, (2005), P.59-112）。しかし、未だ、決定的な実験的確認は得られていないよう

であり（例えば、RAD-05）、現在、国内・国外で、実験的研究が進行中である。近い将来、実験結果が報告されるであろうが、もし確認されれば、ふく射伝熱の分野に大きな衝撃を与えることになる。最後に、「逆問題」に関しては、Howell 教授の基調講演が委細を尽くしているので、コメントすべきことは、多くないが、ただこの問題は、具体的な熱設計の現場からの要求に端を発しているため、種々の実務上の要求に対応して、理論的研究が拡大していくことが予想され、今後、ふく射伝熱分野で主要な研究課題の一つとなっていくことは疑問の余地がない。若い皆さんの活躍を期待する。

表 1 ふく射セッションにおけるポスター発表論文の概要

分野	論文番号、著者、論文題目	概要	
ふく射物性	RAD-11, T. Makino and H. Wakabayashi, A spectroscopic approach for controlling a spectrally functional thermal radiation.	TPV 用エミッターの性能評価法の提案および酸化ニッケル膜の評価.	
	RAD-21, M. Xie, The contrast research of theory and experiment of random surface BRDF.	ランダム粗面の二方向反射率分布関数についての理論モデルと実験.	
	RAD-03, D. Baillis et al., Infrared radiative properties of polymer coating containing hollow microspheres.	中空微小ガラス球を含むポリマーの赤外指向半球反射率および透過率の測定と理論解析.	
	RAD-06, M. Loretz et al., Metallic foams radiative properties /comparison between different models.	オープンセル状アルミニウム多孔体のふく射物性モデルの提案、および実験結果との比較.	
	RAD-16, S. Kumar and A. Rahman, An asymptotic approach for radiation resonance in dielectric microspheres.	微小誘電球の共鳴散乱の漸近解析の妥当性の実験的検証.	
	RAD-18, S. K. Chu et al., Correlation of radiant transfer coefficient with packed bed microstructure in the absorbing system.	黒体球よりなる充てん層のふく射輸送係数 (RTC) の表示式の提示.	
	RAD-09, P. Lemaitre et al., Global rainbow refractometry development to characterize heat and mass transfers in a two phase flow.	大域レインボウ屈折率計を用いた噴霧液滴群の平均温度推定法の提案と実験的検証.	
	RAD-10, L. Robin et al., Experimental and theoretical determination of spectral heat flux emitted by a ceramic under axial temperature gradient.	温度勾配下にあるセラミックスの射出スペクトルと表面温度分布測定システムの開発とデータ解析法.	
	ふく射輸送・ふく射伝熱	RAD-07, P. J. Coelho, Assessment of the accuracy of the hybrid finite element /finite volume method for the solution of the radiative transfer equation.	FEM / FVM ハイブリッド法によるふく射輸送方程式の解析.
		RAD-12, C-Y. Wu, Discrete ordinates solution of transient radiative transfer in refractive planar media with pulse irradiation.	屈折率の変化する非等方散乱性媒体内非定常ふく射輸送の離散座標法による解析.
RAD-15, T. Okutucu and Y. Yener, Transient radiative transfer in participating media with short-pulse irradiation -an approximate Laguerre-Galerkin solution-.		等方散乱性媒体における非定常ふく射輸送の LG 法による解析の検証.	
RAD-05, P. O. Chapius et al., Near field radiative heat transfer between a sphere and a surface.		固体面-誘電球間近接場ふく射伝熱の解析.	
RAD-17, Y. Shuai et al., Directional characteristic and uniformity of energy in the focal region of solar collector system.		放物面集光器の焦点面内ふく射熱流束分布の解析.	
RAD-02, L. A. Dombrovsky and Lipinski, Temperature and thermal stress profiles in semi-transparent particles heated by concentrated solar radiation.		ふく射加熱を受ける半透明球状粒子内温度、熱応力分布の計算.	
RAD-04, T. Soubrie et al., Coupled radiation effects for earth entry flows.		大気再突入時における宇宙航行機表面の再突入流れ内熱流動解析および実験との比較.	
RAD-08, L. Pekker and J-L. Cambier, A model of ablative capillary discharge.		定常管状放電プラズマの理論モデルの提示.	
RAD-13, L. Tesse et al., Coupled modeling of aerothermochemistry, soot formation and radiation in a turbulent diffusion flame.		乱流拡散火炎中のふく射を考慮した熱・物質移動モデル.	
RAD-14, A. Habibi et al., Comparative study of the radiation models in thermal cracking furnaces.		熱分解炉内温度分布計算に及ぼす各種ふく射モデルの影響.	
RAD-01, S. M. H. Sarvai, Optimum placement of heaters in a radiant furnace using the genetic algorithm.		遺伝的アルゴリズムを用いたふく射加熱炉内ヒータ配置の最適化.	
RAD-20, O. Wellele et al., Identification of the thermophysical properties of semi-transparent materials.		伝導-ふく射伝熱逆解析による半透明材料の熱物性推定.	

Thermophysics

小原 拓 (東北大学)

Taku OHARA (Tohoku University)

e-mail: ohara@ifs.tohoku.ac.jp

最終日に発表されたトピック「Thermophysics」は、以下に述べるように必ずしも統一されたテーマの研究が並んでいたわけではなかったが、それでも個々のポスターは見物客が絶え間ないものも多く、活況を呈していた。

10 件の発表をおおまかに分類すると、

- 基礎現象：8 件，応用・開発：2 件
- 熱伝導率／熱輸送特性／熱抵抗：4 件，温度場／流れ場／圧力波：5 件，温度場・電磁場：1 件
- 固体：4 件，液体：1 件，気体：3 件，超臨界：1 件，吸着ガス：1 件
- 薄膜／界面：3 件，バルク：7 件
- 計算シミュレーション：8 件，実験／試作：2 件
- 計算シミュレーションのうち連続体方程式：6 件，分子動力学：1 件，フォノン伝導：1 件

となる。以下に各研究の概要を述べる。

Heat transfer and flow characteristics in an acoustically driven resonator with internal thin parallel plates, Y. Lin and B. Farouk

2 次元圧縮性 NS 方程式を用いた数値計算により、冷凍機等に応用可能な熱音響現象を解析している。

Numerical simulation of heat transfer in supercritical carbon dioxide, Z. Lei, Y. Lin, B. Farouk and E. S. Oran

超臨界 CO₂ 中に加熱により発生した圧力波の数値解析。Full-NS 方程式を用いて渦の発生などを捉えている。

Thermal resistance due to sub-mean free path constrictions, S. Volz and P.-O. Chapuis

シリコン上のディスクからシリコンへの熱伝導をフォノン輸送の Boltzmann 方程式により解析。ディスク半径がフォノンの平均自由行程の半分程度に小さくなると、熱通過が 1 ケタ小さくなる。

Measurement of thermal conductivity of silicon nitride thin films, S. W. Shin, H. N. Cho and H. H. Cho

3 ω 法による Si₃N₄ 薄膜 (厚さ 30~100nm) の熱伝導

率の計測 (50~150°C)，従来の知見と矛盾しない膜厚依存性を得ている。

Self-organized carbon nanotube pellet and its thermal transport properties, H. Xie, M. Choi, and X. Zhang

懸濁水から作成し、再溶解可能な MWCNT ペレット。ポーラス構造により低い熱伝導率・電気伝導度。

Computation of thermomagnetic phenomena in ferromagnetics using a Jiles/Atherton model, G. M. Lloyd and K. J. Kim

磁気特性の温度・応力依存性を考慮 (Jiles-Atherton-Sablik モデル) した強磁性体の熱磁気現象の数値解析

Solid-liquid boundary resistance: a molecular dynamics study on intermolecular energy transfer at solid-liquid interfaces, D. Torii, T. Ohara and K. Ishida

固液界面における熱伝導に寄与する分子運動自由度が固体表面の結晶格子スケール構造によって異なることを示した本稿筆者らの分子動力学シミュレーション

Numerical study of oscillatory flow and heat transfer in an isolated gas spring, Z. Zhang and M. Ibrahim

圧縮性 NS 方程式+移動境界 (ピストン) によりガススプリングの温度・速度・圧力場を解析している。

Thermal control of adsorbed natural gas reservoirs under discharge dynamic condition, P. Couto, L. G. Lara, D. M. A. Sophya and R. M. Cotta

中心にヒートパイプを装着した天然ガスのリザーバー (多孔質体にガスを吸着) からのガス排出時の数値計算により、ヒートパイプによる熱管理の有効性を示している。

Prediction of sonoluminescence phenomena in sulfuric acid solutions by a set of solutions of Navier-Stokes equations, K. Byun, K. Y. Kim, H. Oh and H. Kwak

硫酸水溶液中の球形 (1 次元) 気泡における音響ルミネッセンスの数値解析。気泡崩壊時に 0.75GW/m² の熱流束発生。

Heat Transfer in Nano and Microscale

鶴田 隆治 (九州工業大学)

Takaharu TSURUTA (Kyushu Institute of Technology)

e-mail: tsuruta@mech.kyutech.ac.jp

1. はじめに

ポスタートピックスとして 30 項目に分類された論文のうち、ナノスケール伝熱 (NAN) とマイクロスケール伝熱 (MIC) について報告させていただく。また、関連する基調講演を大まかに挙げるとすれば、表 1 の 8 件になると思われる。これは、全 33 件の基調講演の約 1/4 にあたり、この分野のポスター発表論文が 54 件であったことも考慮すると、国際伝熱会議においてもナノ・マイクロスケール伝熱の重要性とその進展とが高く評価されていると思う。そのなかで、1994 年に始まった日米セミナー以来、主として現象解明に力点を置き、アプリケーション重視の米国をリードしてきた背景を考えれば、伝熱オリンピックという意味合いからして、基調講演に日本からの登壇者があって欲しかったような気がしている。

表 1 ナノ・マイクロ伝熱に関する基調講演

KN-02	Phase-Change Heat Transfer in Microsystems P. Chen (China)
KN-11	Heat Transfer Mechanisms in Nanofluids -Experiments and Theory- S. Kabelac (Germany)
KN-13	Special Control of Heat Conduction in Nanostructured Materials A. Majundar (USA)
KN-14	Fundamentals of Boiling and Two-Phase Flows in Microchannels JR. Thome (Switzerland)
KN-18	Multiscale and Multiphase Physics in Thermal Manufacturing Processes involving Nanoparticle Inc D. Paulikakos (Switzerland)
KN-22	Energy Technologies Enabled by Nanoscale Heat Transfer Effects G. Chen (USA)
KN-29	Multiphysics Modelling with SPH: From Macro to Nanoscale Heat Transfer ACM. Sousa (Canada)
KN-31	Studies on Thermophysical Properties of Nanostructured Materials X. Zhang (China / Japan)

さて、ここでの報告は、すべての基調講演を聞いた訳ではなく、また自身のポスター発表もあったこと、そして報告者の能力を超える内容もあることから、雰囲気伝えるに留まってしまうことをご了承願いたい。

2. ナノスケール伝熱

ナノスケールに分類されたポスター発表論文は、30 件であった。その内容を分類して表 2 に示す。

一目してわかるように、ナノ流体に関する発表が半数近くを占めている。多くは伝熱性能が向上することに注目しており、熱伝導率に関する理論 (NAN-01) や、ナノ粒子の濃度とともに熱伝導率が増大し、特に高温では顕著であるとし (NAN-15, 18)、これをブラウン運動のようなナノ・マイクロスケールの対流によるものと説明している (NAN-05, 24)。また、ナノ流体を対流伝熱の促進に応用した研究として、強制対流に浮力と遠心力が加わる複合対流において、2 次流れが影響を受けるとした研究 (NAN-08)、同じく 2 次流れを増長して伝熱促進はあるが、壁面摩擦は抑えるとする研究 (NAN-12)、流路入口部にて伝熱促進が著しいとする研究 (NAN-11) があった。なお、基調講演 KN-11 でもナノ流体の伝熱機構について講演がなされたが、“ナノ流体にミラクルは無い”との締めくくりに対して、会場からミラクルのある話題も多くあるなどのシリアスなコメントもあった。

ナノ流体の応用についても、対流伝熱促進を活用する冷却システム (NAN03)、マイクロ鑄造への利用 (NAN-04)、アンモニアの水への吸収促進 (NAN-17)、および沸騰伝熱の促進 (NAN-02, 22) があった。特に CHF の増大については、ナノ流体自身が促進効果を持つのではなく、核沸騰期間中にナノ粒子によって伝熱面に形成されるナノ構造によるものとする研究があり (NAN-22)、最初から伝熱面にナノ粒子 (NAN-07)、カーボンナノチュー

表 2 ナノセッションのポスター論文

Topics	Paper No. NAN-##
Nanofluid	
-Fundamental thermal conductivity	-01(USA), -05(USA), -15(Canada), -18 (Singapore), -24(India)
convection	-08 (Iran), -12 (Canada), -11(India)
- Application boiling else	-02 (Canada), -22 (Korea) -03 (Canada), -04 (USA), -17(Korea/Japan)
Thermal Property	
nano-wire in-plane conductivity measurement	-06 (France) -09 (China/Japan), -10 (China) -14 (Korea), -19 (USA), -20(Switzerland)
Carbon Nanotube	-25 (Japan), -26 (Japan), -29(USA)
Droplet, Bubble and Interface Phenomena	-16 (Japan), -23 (Japan), -28(Japan), -30 (France/Japan)
Nanostructured Surface Effect on Boiling	-07 (Sweden), -13 (USA)
Microfluidic Channel	-21(Singapore), -27 (Australia)

ブ(NAN-13)によるナノ構造を形成して伝熱促進を確認した研究と関連するものであった。

ナノスケールの熱物性研究では、ナノワイヤーを対象にフォノン輸送のボルツマン方程式をモンテカルロ法によって解析した研究 (NAN-06), in-plane の熱伝導についての MD 解析(NAN-09, 10), そして 2ω (NAN-14), 3ω (NAN-19, 20)を用いた計測があった。さらに、カーボンナノチューブの CVD 作製法と成長機構ならびに構造分析(NAN-25), 有限長カーボンナノチューブの熱伝導の MD 解析(NAN-26), および MD 解析法の影響を調べた研究(NAN-29)があった。

その他、固体面上の液滴の移動機構(NAN-16), ナノバブル(NAN-23), 気液界面の逆温度こう配現象(NAN-28)などについての MD 研究, 融体液滴の固体面上での濡れ性と凝固面のマイクロ形状 (NAN-30), 電気浸透流れに及ぼす細線ジュール加熱の影響(NAN-21), ペルチェ素子を組み込んだマイクロ冷却熱交換のモデル解析(NAN-27)があった。

3. マイクロスケール伝熱

表 3 にマイクロスケールのポスター論文を示す。そのほとんどがマイクロチャンネルに関わるもので、矩形流路の角の丸み(MIC-05)や壁面粗さ(MIC-08)の熱伝達と流れへの影響を調べ、(MIC-12)では粗さが乱流への遷移を促し、熱伝達も向上することを示した。また、(MIC-14)では、感温液晶による壁面温度測定から乱流遷移には十分な流路長が

表 3 マイクロセッションのポスター論文

Topics	Paper No. MIC-##
Micro-Channel	
heat transfer/pressure loss	-05 (Canada), -08 (France), -12 (China), -13 (China), -14 (Taiwan), -19 (China), -21 (Australia)
with heat sink boiling/evaporation	-17 (Belgium), -20 (Korea) -07 (Switzerland), -18 (Korea)
MEMS/Control System	-03 (China), -04 (USA), -06 (Switzerland) -09 (China), -10 (China), -15 (USA)
Heat Pipe/Device	-01 (Bulgaria), -16 (Korea), -22 (Japan)
Fundamental	-02 (Finland), -11 (Japan)

必要としている。その他、急拡大と縮小による圧力損失(MIC-19), ジェット対流付加による伝熱促進の数値解析(MIC-21), 高クヌッセン数気体の DSMC 流動解析(MIC-13), 及びヒートシンク型マイクロチャンネルの最適形状(MIC-17)と複数流路への流量配分(MIC-20), 流動沸騰系のフローパターンマップ(MIC-07), 蒸発管内における潤滑油の影響(MIC-18)が調べられている。

また、マイクロチャンネル内の電磁流体流れに対し、磁界方向を変えることによって熱伝達制御を行うための格子ボルツマン解析(MIC-03)やマイクロ反応流路のジュール加熱による反応制御(MIC-04), マイクロ燃料電池システムのためのディスク型反応器の開発(MIC-06), 平板間流路内に回転円柱を設置して粘性による流体駆動と伝熱促進を同時に行うマイクロポンプ(MIC-09), 氷の形成と融解を利用したスイッチング方法(MIC-10)など、MEMS 技術として興味深い報告があった。

さらに、電子デバイス冷却用として、マイクロヒートパイプの活用法(MIC-01), 熱電素子冷却(MIC-16), そして銅の 25 倍の有効熱伝導率を達成するマイクロ COSMOS ヒートパイプ(MIC-22)が報告された。

その他、非平衡 MD によるホットスポットの熱伝導解析(MIC-02)や、不凍タンパク質のように氷核形成の抑制作用を持つアラニンペプチドと水との分子動力学解析(MIC-11)が行われている。

マイクロチャンネルについては、Max Jakob 賞を受賞した P. Cheng や JR. Thome による基調講演も行われているほどであるが、先のアノ流体と同様、日本での研究はさほど行われておらず、多少の温度差があるようである。

Particulates and Porous Media

中山 颯 (静岡大学)

Akira NAKAYAMA (Shizuoka University)

e-mail: tmanaka@ipc.shizuoka.ac.jp

Particulates & Porous Media のポスターセッションは、会議の最終日、18 日の午前 (10:35-13:30) に組まれた。会場は 10 時前から昼過ぎまで大勢の人で賑わい大盛況であった。私自身もプレゼンターとしてポスターの前に待機したが、入れ替わり立ち代りの鋭い質問攻めに会い、大変に良い刺激になり、勉強になった。国際伝熱会議の多孔質関連のセッションで、これほどの活気を見たのは初めてである。当初は、この原稿の件もあり、多くのプレゼンターから直接に話を聞き、情報収集するつもりでいたが、そんな機会も持てずに、あっという間に終わってしまった。そんなわけで、この報告も、私の一方的な解釈に依らざるを得ないことを、お断りしておきたい。

発表は、PRT-01 から PRT-30 のトータル 25 件 (PRT-12, 25, 26, 27, 29 はキャンセル) でファースト・オーサーの国の内訳は、アメリカから 6 件、フランスから 5 件、日本から 2 件、あとは、中国、韓国、イギリス、カナダ、ドイツ、トルコ、レバノン、ポルトガル、オーストラリア、ベラルーシ、ブラジルから各 1 件と、国際色豊かな顔ぶれであった。

多孔質体・粒子充填層関連が大部分であったが、蒸着 (PRT-02, 30)、粒子を含む混相流 (PRT-13, 24)、流動層 (PRT-16) に関するものも含まれていた。実験を主体とするもの、またはそれを含むものが約半数と、実験的研究が、いつもより多めであった。熱分散 (PRT-05, 19) などの古典的なテーマからマイクロヒートパイプ (PRT-22) やナノポーラス・シリカ・コーティング面の蒸発 (PRT-11) などの最新のテーマに至るまで、多岐にわたっている。

今回も、多孔質体の対流問題の定番である下面加熱の不安定性に関する Horton-Rogers-Lapwood 問題を発展させたものが 4 件あった。突然、下面温度が上昇する際の温度浸透面の不安定性について理論的に検討したもの (PRT-03)、高レイリー

数域に及ぶ下面加熱実験を実施し、長時間の温度計測データより乱流挙動を捕らえたもの (PRT-06)、さらには、Horton-Rogers-Lapwood 問題に機械的微小振動を印加して、加速度の微小変動の影響を明らかにしようとしたもの (PRT-20, 23) である。特に、機械的微小振動においては、その周波数を上げることで対流の安定化が図れることから、2 元合金の凝固過程の制御など、様々な工業的応用が考えられている。

圧力損失が小さく、かつ充填層に比べ高い熱伝達特性が期待できることから、高気孔率を有する発泡セラミック、発泡金属、焼結多孔質体が注目されている。このような背景があっただけでなく、発泡多孔質体の熱伝導率や界面熱伝達率に関するレビュー (PRT-08) や測定法 (PRT-09)、焼結多孔質体の応用に関する実験や解析 (PRT-04, 10, 15, 19) が目立った。まだまだ、高気孔率の開放性多孔質構造については基礎的データが不足しており、系統的な研究が望まれる。

個人的に、気になった論文をいくつか上げてみたい。まずは開会式で受賞した Bejan 氏らの論文 (PRT-01) だが、自然界に見られる枝状の多重スケール多孔質構造体を自らの Maximum flow access の原理で説明している。なかなか面白いので少し詳しい話をもっと聞いていたが、(やはり?) 会場には現れなかった。多重スケール多孔質構造体の一つとして Catton 氏らが Biporous media の応用 (PRT-17, 18) に注目している。この二重多孔質構造体を最適化することで、蒸発しやすく、かつ蒸気が逃げやすいウィックの製作が可能となるものと期待されている。

レバノンから参加した Ghaddar 氏らの地中に潜む地雷の撤去に関する研究 (PRT-07) は、地域柄、極めて切実であり、考えさせられる。通常、地雷の検出には金属探知器が使われる。しかし、木製やプラスチック製の地雷も多く、これらを見逃す

ことで、不幸な事故も起こっている。彼らは、1日の地表の温度分布をサーモグラフィーで計測し、その下に潜む地雷を検出することを考えている。地雷周辺と、それから離れた場所では、地雷の熱容量の影響を受けて、地表の温度に変化(Thermal signature)が現れる。これを検知し、地雷の位置を予測するのである。その準備段階として、水分を含む砂地に地雷を埋めた場合の地表温度分布の数値予測法を提案している。砂の質、水分量、地雷の種類と地表からの深さなど、様々な影響について検討している。なかなか難しい問題ではあるが、正に人の命がかかっている。この種のテーマには、微力なれども、自分も参画したい気持ちになる。

最近、コンポストを専門とする大学の同僚と、多孔質体の局所空間平均の手続きをコンポストの発酵プロセスのシミュレーションに適用する研究を進めている。局所分布にこだわるのは、発酵槽内で水分、微生物、基質および温度を均一化させることが好気性コンポストに求められており、発酵槽内でのそれぞれの分布の予測が重要な鍵を握

ると考えるからである。コンポストの発酵プロセスを分布定数系で扱った先例はないと思い込んでいたが、Prud'homme氏ら(PRT-14)は、以前より、コンポスト発酵槽を内部発熱がある多孔質体として取り扱っていることを知った。特にこの研究で興味を引くのは、微生物の増殖速度に関するMonodモデルに注目し、その最大比増殖速度を、実験データと数値解析結果の相関より(逆解法で)決定しているところである。かなり、先を越されている感がある。

今回のポスターセッションでは、多孔質体理論の適用範囲がますます学際域に広がってきていることが、実感できた。空間的に分解が難しい場合は、まずは多孔質体で考えてみるという手続きが定着しつつあるように思う。事実、多孔質体近似をモジュール化している市販の熱流体解析ソフトも多く見受ける。ただし、多孔質体の单相流に限っても、異方性、機械的分散、乱流、非熱平衡、固体壁、純流体との界面など、まだまだ未解決の部分が多いことも忘れてはならない。今後も、地道な努力が必要であろう。

Poster Session 1 (Mixed Convection, Multiphase, Solidification 発表数 85 件)
の中から、古城達則君 (東京理科大学大学院) の発表 :

Excitation of High-Order-Mode Shape Oscillation of Bubble under Ultrasonic
Vibration (MPH-40)

が学生ポスター賞に選ばれました。

宇高義郎教授 (横浜国立大学) の発表 :

Configuration of Micro-layer in Thin-Gaps in Boiling Heat Transfer (BOI-10)

のベストポスター賞 (p. 16 参照) とともに、報告させていただきます。

(編修出版部会)

Heat Exchangers

岩井 裕 (京都大学)

Hiroshi IWAI (Kyoto University)

e-mail: iwai@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

本稿は、第13回国際伝熱会議において15日(火)に実施された「Poster Session 3 (10:35~13:30)」中の熱交換器 (HEX) の分類についての報告である。

会議で配布されたCD-ROMにはHEXの分類で38件の論文が収録されている。フィン付き管、フィン・チューブ型、シェル・チューブ型、プレートフィン型、プライマリサーフェス型などの各種熱交換器のほか、ヒートパイプに関する研究もこの分類に含まれている。その内容は、理論・実験・数値解析を駆使して従来型の熱交換器の延長としてその性能向上や問題解決を目指す検討や、新しい熱交換器形状を提案するものなど、多岐に渡った。昼時にかかる時間帯であったためか終盤には室内の人数もやや減った感もあったが、全体的にはたいへん盛況であり、発表者との活発な議論が展開されていた。

会議登録者に配布された日程表 (Programme book) には、論文タイトル、第一著者名とともに第一著者所属先の国名が記されている。それに基づいて発表を分類すれば、発表件数が多い順に、韓国 (8件)、米国 (7件)、中国 (6件)、ドイツ (5件) と続き、この4カ国だけで過半数を占めた。それ以外は各国1~2件であった。特に今回の会議で韓国から発表された一般論文の数が43件であったことを考えると、その中に占める熱交換器関連の論文割合はぜひぶん高いという印象を持った。なお、韓国の2件 (HEX-15, 16) と米国の1件 (HEX-38) については実際のポスター発表は行われなかった。発表論文数が多く、ここでそれら全てにふれることはできないが、以下、いくつかを紹介する。

まず日本からは2件の発表があった。ひとつは東京大学のプライマリサーフェス型熱交換器 (レキュペレータ) に関するもので (HEX-24, Y. Suzue, K. Morimoto, N. Shikazono, Y. Suzuki, N.

Kasagi), プレートが斜め波型形状をもつ場合の熱流動現象の詳細と、それによって達成される熱交換器性能について数値解析により検討している。特に、平行平板にW字の波型を施した場合の有用性を示している。対象とする形状はもちろん異なるが、HEX-10 (J. Mitrovic, B. Maletic, ドイツ) もプライマリサーフェス型熱交換器の伝熱性能を数値解析により検討した研究であった。

日本からのもうひとつの発表は、熊本大学と(株)フジクラの共同研究で、フラット型ヒートパイプを小寸法の発熱部とヒートシンクの間に設置し、ヒートスプレッダーとして使用する提案であり (HEX-31, Y. Koito, H. Imura, M. Mochizuki, S. Torii, F. Kiyooka), 起動時および定常状態での特性を実験と数値解析により検討し、時間応答性がよいことや従来の金属製ヒートスプレッダーに比して約30%の軽量化が達成できることなど、その有効性を示している。HEX-19 (S. Tzanova, G. Angelov, L. Kamenova, Ch. Schaeffer, ブルガリア) の発表も、フラット型ヒートパイプをヒートスプレッダーとして利用する点で類似の研究であり、その数値解析モデルを提案している。

個人的にはHEX-37 (Freund, S. and Kabelac, S., ドイツ) で採用された赤外線サーモグラフィーを利用した非定常法による局所熱伝達率分布測定のポスターが印象に残っている。伝熱面を加熱するハロゲンランプの出力を時間的に変化させた際の赤外線画像の時間応答から、高い空間解像度で局所熱伝達率の分布を求める試みである。光のあて方など尋ねてみたいことは多かったのですが、セッション中に何度か足を運んだ。しかしポスターは貼られていたものの著者の姿が見えず、残念ながら詳しい説明を聞くことができなかった。もっとも、説明を受けられなかった故にポスターをじっくり見たことが、この研究が筆者の印象に残ったひとつの理由であることも事実である。

Thermal Management of Electronic Equipment

伏信 一慶 (東京工業大学)

Kazuyoshi FUSHINOBU (Tokyo Institute of Technology)

「電子機器のサーマルマネジメント」に係るセッション分類がもはや当たり前のように設定されることが多くなった日米の伝熱関連会議と異なり今回の国際伝熱には当該セッション分類が存在せず、またこの原稿を書くという個人的な事情もあって、会議参加期間(8/13-15)中のポスターセッション開催日である8/14, 15両日の4つのセッション全てに参加することとなり、会期を終えた今となって考えれば、結果として非常に充実した会議参加となったといえる。一方、私の非才は申すまでもなく、独立のセッションがなかったこともあり、著者の意図、あるいは参加者の視点を完全にカバーする形での報告原稿と至らない点については、どうかご容赦いただきたい。14, 15日両日のセッションのうち、タイトルやポスターの内容が陽に電子機器のサーマルマネジメントに関連すると思われた発表について、以下、報告する。

14日の午前のセッション(POSTER SESSION 1)では、MPH (Multiphase)のセッションにおいて、幅 200 μm のシリコンマイクロチャンネルの底面に 20 μm オーダーのピラミッド状のピットを作成し、沸騰伝熱時の安定性を向上させることを狙った報告(MPH-37)があり、また同じセッションでは、100 W/cm^2 を超える冷却能力で期待される Spray cooling に関して、複数ノズルを用いる場合の伝熱特性を単一ノズルの結果からいかに予測するかという工業上の応用を強く意識した報告(MPH-45)があった。なお、著者によれば、200 W/cm^2 程度の冷却能力が期待できるとのことである。

14日午後のセッション(POSTER SESSION 2)では、NCV (Natural convection)で47件の発表があり、筐体内における自然対流問題など、関連の発表が少なくない。中でもピンフィンやプレートフィンヒートシンクのオリエンテーションに関する発表(NCV-31)や、ピンフィンヒートシンクからの伝熱予測式に関する発表(NCV-47)などがあげられる。

15日午前のセッション(POSTER SESSION 3)では、チップスケールからデータセンタまでの長さスケールの広がり意識して、情報処理のレートエクセルギーロスで除した形で定義した fom (figure of merit)を基にサーマルマネジメントを議論する発表(ENR-13)があった。著者によれば、長さスケールの増加とともに fom は下がり、改善の余地が大きくなり、伝熱への期待が大きいのことである。また同じ時間帯の HEX (Heat exchangers)のセッションでは、外形寸法に制約を持たせて作製した capillary pumped loop の発表(HEX-06)があり、また高い冷却性能が期待される vapor chamber に関する発表(HEX-31)があった。

15日午後のセッション(POSTER SESSION 4)では、微小沸騰気泡を放出する flow boiling に関する発表(BOI-28)や、微細構造により沸騰伝熱促進をはかる発表(NAN-07)などがあった。また、同じ時間帯に開催されたパネル(Discussion Panel Session 4)では、sustainability を意識したサーマルマネジメントにかかる議論が行われている。

このほか、私自身は出張期間により帰国となったため残念ながら発表を見ることはできなかったものの、16日午前のセッションでは、日本機械学会の研究会で検討されているモデル筐体を対象として、伝熱と流動の計測を行った発表(EQP-39)があり、17日午前のセッションでは、非定常の伝熱特性の計測法に関する発表(EXP-11)、また最終日18日のオープンフォーラムでは、チムニー効果に関する発表(OFM-04)がなされている。

全体の印象として、パネルを除いては個別課題を論じるというよりは各国でのわりに最近の研究成果の発表という国際伝熱の傾向そのものと言える。わが国の研究者の基礎的な取り組みの強みが強く意識できた。

Equipment

菱田 誠 (千葉大学)

Makoto HISHIDA (Chiba University)

e-mail: hishida@faculty.chiba-u.jp

機器関係のポスターセッションに登録された論文は 44 件であった。ポスターセッションで発表された論文のテーマは極めて広範囲に及んでいたが、その中で最も発表論文数が多かったのは、ガスタービン翼の冷却に関する論文であり、次に多かったのが熱輸送デバイスに関する論文であった。基調講演もポスターセッションでの発表論文数を反映するかのようになり、ガスタービン翼の冷却に関する基調講演とループ型ヒートパイプに関する基調講演があった。ポスターセッションで発表された論文数を国別に見てみると米国 (10 編)、日本 (7 編)、カナダ、中国 (各 4 編)、オーストラリア、フランス、イタリア (各 3 編)、英国、インド、イラン、韓国 (各 2 編)、アフリカ、アゼルバイジャン、ドイツ、マレーシア、メキシコ、スイス、台湾、タイ (各 1 編) であった。また、2カ国以上の研究者による共著論文が 5 件あった。

ガスタービン翼の冷却に関しては、Manchester 大学の Iacovides 教授と Launder 教授による「INTERNAL BLADE COOLING : THE CINDERELLA OF C&FED RESEARCH IN GAS TURBINES」と題するガスタービン回転翼の内部冷却に関する基調講演があった。翼前縁近傍の内部冷却流路における衝突噴流による冷却、翼中央部の内部冷却流路におけるリブ付き折れ曲がり流路による冷却、及び、翼後縁近傍の内部冷却流路におけるピンフィン流路による冷却に関する実験及び数値解析研究が紹介された。最後のまとめでは以下の点が特筆すべきこととしてあげられた。

(1) 前縁近傍の衝突噴流による冷却と後縁近傍のピンフィンによる冷却についての CFD による研究が少なく、この分野における詳細な数値解析が望まれる。(2) ピンフィン冷却に及ぼす回転場の影響についての研究が無く、早急に行われることが望まれる。(3) 最近の実験結果及び数値解析によると、回転翼内部の冷却流路における局所熱伝達率

は一様でなく、この局所的な値の差は回転によって更に大きくなる傾向があるので、回転翼の熱応力解析に当っては、局所熱伝達率分布を考慮する必要がある。ポスターセッションではタービン翼の冷却に関して以下の論文が発表された。タービン翼の内部冷却流路間の流量配分に及ぼす冷却孔の影響[EQP-5]、回転円盤表面の噴出し冷却孔からの噴出流と回転円盤間の流れによるフィルム冷却効果[EQP-10]、翼の付け根形状の改善による馬蹄形渦の発生抑制と低熱伝達率の達成[EQP-11]、噴き出し孔の配置、高温流体の速度及び冷却材の噴出流量が冷却効果に及ぼす影響に関する基礎実験[EQP-20]、噴き出し孔近辺とその下流における局所熱伝達率に関する基礎実験 [EQP-21]、回転翼の先端形状(楔角)と噴き出し冷却孔群の位置、及び動翼の高温流体に対する迎角が冷却効果に及ぼす影響[EQP-36]、実測した局所熱伝達率を用いて行った回転翼の温度分布と熱応力分布の解析[EQP-42]、トポロジー最適化法による回転ディスクの設計[EQP-15]についての研究発表があった。

熱輸送デバイスに関しては、Institute of thermal physics (ロシア) の Maydanik 博士による「LOOP HEAT PIPES – THEORY, EXPERIMENTAL DEVELOPMENTS AND APPLICATION」と題するループ型ヒートパイプに関する基調講演があった。1972 年に航空宇宙用の熱輸送デバイスとして登場したループ型ヒートパイプは、ウイックにより水を還流させる伝統的な単管形ヒートパイプに比べて、特に、姿勢による性能変化の少ない点が特徴である。講演では、ループ型ヒートパイプ(LHP)の作動原理、始動条件、管の材質、作動流体の種類、形式(長尺 LHP, 大型 LHP, 高熱流束 LHP, 自動温度制御型 LHP, 分岐型 LHP, 可逆作動型 LHP, 平板蒸発器型 LHP, マイクロ LHP など)、宇宙船内での使用例や電子機器の冷却への応用例が紹介された。ポスターセッションでは熱輸送デ

バイスに関して以下の発表があった。複合材をヒートスプレッダーとして使用する際の熱伝導部材と強度部材との最適配合の方法[EQP-04]、コピー機のトナー定着ユニット用加熱ローラーに使用する半径方向ヒートパイプの開発とその起動時間や温度分布の均一性[EQP-6]、平板型蒸発器を持つループ型ヒートパイプの加熱量と蒸気温度及び蒸気配管の圧力損失との関係[EQP-18]、フィン付き冷却板をベーパーチャンバーに貼り付けたヒートシンクの空気流速、加熱部面積、加熱量と温度分布の均一性及び熱抵抗との関係[EQP-22]、脈動流によるオリフィス付き 2 重管の熱輸送性能[EQP-23]、電子デバイスの冷却材や燃料電池における燃料・酸化剤の供給流路として使用する T 字分岐流路の圧力損失の最小化とホットスポット温度[EQP-31]、四角形流路及び三角形流路で構成されるループ型自励振動式ヒートパイプと非ループ型自励振動式ヒートパイプの熱輸送性能、特に、作動流体（水及びエタノール）の充填量と最大熱輸送量及び熱抵抗値との関係[EQP-34]、直径 1mm の円管 24 本で構成される閉ループ型自励振動ヒートパイプを上部加熱した場合と、下部加熱した場合における、作動流体（水と R141 b）の充填率、冷却部長さと熱輸送量との関係及び作動流体の振動挙動のシミュレーション[EQP-38]についての研究発表があった。

以上の発表に加え、ポスターセッションでは以下のように多岐の分野にわたる研究発表があった。パワーピストン、冷却器、再生熱交換器、ディスプレイサ、加熱器などで構成されるスターリングエンジンのシミュレーション[EQP-1]、燃料電池-ガスタービン複合サイクルプラントのルーバーフイン付き再生熱交換器の非定常温度分布とコンパクト化の検討[EQP-2]、マイクロ波やレーザーを利用するビーム兵器（熱効率が低い）の排熱処理技術及びシステム（蓄熱・熱輸送・エネルギー変換）に関するサーベイ[EQP-3]、相変化物質を利用した通信機器の冷却[EQP-7]、化学反応塔上鏡の熱応力解析と熱伝達率、弾性係数、ポアソン比、線膨張係数等などのパラメータに対する熱応力の感度解析[EQP-8]、円形・半円形・矩形断面をもった繰り返し曲り流路の熱伝達と圧力損失[EQP-9]、フィン付き冷却面の冷却材の流れ方向、フィンピッチ、フィン高さとの熱伝達及び圧力損失との関係

[EQP-12]、 SiH_4/CH_4 及び $\text{SiH}_4/\text{C}_2\text{H}_4$ 混合気体のレーザー熱分解による SiC ナノ粒子の合成反応プロセスのシミュレーション[EQP-14]、冷却チャンネル付き超音速ノズルの速度場と温度場[EQP-16]、吸収式ヒートポンプに純水製造装置を組み合わせた複合ヒートポンプシステムのニューラルネットワーク法による成績係数の解析[EQP-17]、ポリウレタン発泡断熱材の高温雰囲気中における化学反応による分解過程のシミュレーションと反応定数に対する感度解析[EQP-19]、ナフサ等の熱分解過程で生成されるコークスの生成量を精度良く且つ短い計算時間で予測できる新しいシミュレーションモデル[EQP-24]、スリット型インパクトによるエアロゾル中の微粒子分離性能[EQP-25]、溶鉱炉壁内と溶鉱炉内の融解鉄の速度場と温度場[EQP-26]、形状記憶合金スクリーンを用いた断熱性能の自動最適化システムの提案と記憶形状合金の作動に伴う自然対流パターンの変化と熱伝達[EQP-27]、薄膜熱電変換素子とマイクロ燃焼器を組み合わせた超小型熱電変換システムの提案と速度場、温度場、電場、電力密度、変換効率、ポンプ動力、システム総合熱効率[EQP-28]、横風によるドライクーリングタワー冷却効率の低下抑制対策とその効果[EQP-29]、3次元燃焼解析と1次元流路網解析を組み合わせた石炭炊きボイラーの温度分布、熱流束分布、蒸気量分布[EQP-30]、バス用空調機に使用されるフィンチューブ蒸発器のフィンピッチと蒸発温度の最適化[EQP-32]、自動車のスーパーチャージャー用フィン伝熱面のフィン形状と伝熱面温度分布、熱伝達率、圧力損失係数、局所熱伝達率分布との関係[EQP-33]、 NO_x 発生量を低減できる燃焼ガス再循環方式加熱炉の熱負荷変動に対する動的モデルの改良[EQP-35]、乱流場中での化学反応が解析可能な ESORT コードによる酸素炊き石炭ガス化炉内の速度場、温度場、濃度場等の燃焼解析[EQP-37]、ノートパソコン冷却流路のモデル実験によるベンチマークデータの取得と数値解析[EQP-39]、自動車の空気冷却式ディスクブレーキの局所熱伝達率分布の測定と数値解析[EQP-40]、地熱利用ヒートパイプ用蒸発器近傍と帯水層内の速度場・温度場[EQP-44]、超音速蒸気インジェクタ内の速度分布、温度分布、圧力分布の測定と非凝縮ガス混入量とインジェクタ出口圧力との関係[EQP-46]等の研究発表があった。

Energy and Environmental Heat Transfer

近久 武美 (北海道大学)

Takemi CHIKAHISA (Hokkaido University)

e-mail: takemi@eng.hokudai.ac.jp

エネルギーに分類されたポスターは 20 件、環境に関するものは 2 件であった。国別ではオーストラリア(4)、日本(3)、中国(3)、インド(3)、米国(2)、ブラジル(2)のほか、ニュージーランド、スイス、チェコ、カナダ、イタリアが各 1 件となっていた。また、内容的には燃料電池に関するもの(5件)、太陽熱利用技術(4件)のほか、高温蓄熱、コンピュータセンターの冷却、水素貯蔵技術、建物外壁の熱損失、原子力プラントの自励振動等に関するものであった。

PEM 形燃料電池に関しては、東京工業大学の伏信先生が MEMS 加工技術によって微細穴加工した GDL を用いた研究発表を行っており、本セッションの中で質の高い研究であった。これは Ti 製の金属板にエッチング技術を利用して直径 25 μm の細孔を多数空け、GDL として用いたものである。一面に穴を空けたものとリブに接する部分の穴加工を行わなかったものの比較を行い、リブ部のガス拡散の寄与についても検討を行っている。この著者はこうした構造を持つ金属 GDL の実用化を期待している様であったが、むしろ GDL 内の物質移動現象を理解する上で興味深い研究と思われた。また、中国上海交通大学からセパレータ流路形状に対する電池性能を実験した結果が報告されていた。並行流型およびサーペンタイン型の流路のそれぞれについて溝幅や深さを変化させ、V-I 特性を論じていた。得られた結果は一般的に理解されている範囲のものであり、あまり新しい知見はなかった。この他、北京工科大学から DMFC 内の CO₂ 気泡を含む二相流を可視化した結果が報告されていた。燃料入り口側ではバブル流となっているのに対して、出口側では主としてスラグ流になっていると報告している。

SOFC に関する発表は 2 件あり、1 つはマイクロ SOFC 内のエクセルギー解析を行ったものである。電池の動作温度、燃料流量、各部の熱伝達率

等をパラメータとして解析を行っており、エクセルギー効率はそれらの運転条件に大きく依存すると述べている。また、平板型 SOFC 電池内の物質移動に関する数値シミュレーションを行ったものなどがあつた。文献による実験結果と比較がなされているが、比較的一般的な数値計算法であつた。

オーストラリアは太陽エネルギーの豊富な地であることから、太陽熱利用の研究がいくつか報告されていた。太陽熱集熱器において伝熱を促進するために流動気体が伝熱面に衝突するような構造としたものや、蓄熱槽内の温度成層化を実験したものなどがあつた。

原子力から直接水素を製造するプラントにおいて、伝熱のための作動流体としてヘリウムと熔融塩との比較を行った研究があつた。解析の結果、液体金属の方がヘリウムよりもポンプ動力が少なくすみ、0.2-0.6%程度、効率が高くなると論じている。MOX 燃料を用いた ABWR 型原子炉の自励振動および中性子の減衰について安定性解析を行った研究がある。これによると十分な安全余裕を持って MOX 燃料を利用可能であるとしている。

発電所の凝縮器内のスポンジボールによるオンラインクリーニングに関し、内部流動挙動を数値解析したものがあつた。これにより、多額の実験費用を節約できると結論している。また、ピーク電力需要の平準化を目的として、電気加熱による 900 $^{\circ}\text{C}$ 程度の高温蓄熱に関する研究があつた。レンガ材に NaCl や KCl を PCM として組み込み、蓄熱密度を大幅に向上しえることを解析しているが、実験を行った結果、それらの物質が溶出してレンガ材中に封入できなかつたと報告している。

以上、本セッションでは種々のエネルギーシステム技術の報告があつたが、目だつて新規な取り組みは伏信先生の研究以外、あまり見当たらなかつた。なお、燃料電池については他のセッションにおいて、さらに数件の発表があつた。

Nuclear

大竹 浩靖 (工学院大学)

Hiroyasu OHTAKE (Kogakuin University)

e-mail: ohtake@cc.kogakuin.ac.jp

1. 概要

Nuclear (NCL) のポスターセッションは、第 4 日目 8/16(水)の午前(10:40-13:30)に開催された。発表論文数は、NCL-01～NCL-12 の計 11 件 (NCL-07 は欠番)であった。なお、同時に併催された分野は、Equipment (EQP: 44 件)と Heat Transfer Enhancement (HTE: 25 件)であり、内容が近い PRT-21 (Particulate & Porous No.21)も同時刻に発表された。本報告では、NCL に PRT-21 (Pebble Bed Reactor 関連)を加え、計 12 件について取り上げる。

2. ポスターセッション内容

まず、発表論文を国別にまとめると、

『韓国: 4 件, ブラジル: 2 件, インド・豪・チェコ・米国・リトアニア・西: 各 1 件』であった。残念ながら日本からの発表はなかった。また、発表内容であるが、大まかに分類すると、『数値解析的研究: 9 件, 実験的研究: 3 件』であった。韓国からは、全体で 25% (4 件)を占めるとともに、実験的研究 3 件のうち 2 件を占め、他の国際会議でも感ずることではあるが、韓国における原子力工学の研究の近年の活発さを感じる数値である。

なお、一概に炉系にて分類することはできないが、大概すると、

『軽水炉: 6 件, 高速炉・重水炉・超臨界炉・ガス炉: 各 1 件, 燃料: 1 件, 基礎現象: 1 件』と分類できる。前回 (IHCT12) に続き、リトアニアから RBMK-1500 (黒鉛減速沸騰軽水圧力管炉)に関する発表が 1 件あり、定期的に続く本国際会議のよさを物語っている。

前出したように、昨今、原子力工学分野では、数値シミュレーションを利用した研究がその主流

となっているが、数値解析的研究 9 件をその利用コード別に分類した結果、

『CFX(NCL-03,04): 2 件, RELAP5(NCL-08)・PHOENIX(NCL-01)・LES&RANS(PRT-21): 各 1 件, オリジナル(NCL-05,10,11,12): 4 件』

となった。前回に比べ、RELAP5 が少なくなり、CFX や LES (Large Eddy Simulation) & RANS (レイノルズ平均モデル) を利用した詳細解析が進んだ。4 年後の動向がさらに楽しみである。

なお、実験的研究は、『ヘリカルコイル型 SG を持つ SMART 炉(NCL-02), 超臨界流体の伝熱特性 (NCL-06), サブクール沸騰のボイド挙動(NCL-09)』に関するものであった。

3. まとめ

前回 IHCT12 の 16 件 (内キャンセル 2 件・ポスターのみ 1 件) に比べ、今回は若干減であったようである。最も、前回の報告同様、今回も“沸騰伝熱や混相流動等他セッションへの応募数が相当数あり”、当セッションのみで研究動向を論ずるのは無理があると言わざるを得ない。しかしながら、今や軽水炉メーカー三大グループを擁し、かつ、高速増殖炉の研究を継続している“原子力工学・産業先進国の”日本からの発表がゼロであったことは、残念でならない。確かに、様々な国際会議が開催され、かつ、当国際会議はアカデミック過ぎて研究所およびメーカー側から参加しづらいとの話も耳にする。しかしながら、我が国に研究レベルを示すよい機会でもあり、是非に、次回 2010 年ワシントン DC (USA) においては、皆様方からの積極的な発表を期待申し上げます。

参考文献

- [1] 横堀誠一, 第 12 回国際伝熱会議: IHCT12 Nuclear, 伝熱, 41-170 (2002), 32.

Bio Heat Transfer

萩原 良道 (京都工芸繊維大学)

Yoshimichi HAGIWARA (Kyoto Institute of Technology)

e-mail: yoshi@kit.ac.jp

1. はじめに

世界的な伝熱研究の広がりの結果か、それとも開催国オーストラリアが農業大国のためか、定かではないが、Bio Heat Transfer のセッションが今回初めて設けられた。このセッションのポスター9件 (うち2件は掲示なし)、キーノートレクチャー3件、および関連の論文3件の報告を以下に記す。

2. 論文概要

研究内容が多岐にわたるため、件数の多い順に、医療、生体機能、食品、その他に分類する。

2.1 医療

キーノート KN-03 では、人体から、臓器・組織、細胞・分子に至るまで幅広いスケールのバイオ伝熱現象の中から、皮膚の薄い人の火傷と腫瘍のハイパーサーミア治療に関する成果が概説された。後者の治療に関連して、拍動血液流の腫瘍組織内温度分布への影響に関する数値シミュレーション結果 (BHT-10)、あるいはレーザー照射時の生体組織の温度上昇や変化を予測する数値シミュレーション結果 (BHT-03) が、ポスターにより発表された。また、低温手術におけるクライオアブレーションに関する数値シミュレーション結果 (BHT-04) も発表された。さらに、磁気ハイパーサーミアにおける磁性粒子を含む血流の制御の数値シミュレーションも行われた (BHT-10)。

キーノート KN-05 では、生体や血球の冷凍保存の際に生じる、細胞の損傷と細胞活性の劣化を防ぐ方法として、トレハロースなどの糖を添加することの有効性が示された。

2.2 生体機能

キーノート KN-30 の研究では、ネズミの大脳皮質における毛細血管構造と酸素分圧が計測され、計測結果に基づく数値シミュレーションが行われた。その結果より、酸素の脳組織への対流・拡散による輸送が議論された。類似の研究として、有限

要素法を用いた、掌の中の血流とそれに伴う熱伝達の数値シミュレーションがあった (BHT-05)。

キーノート KN-03 では、人体モデルを用いた宇宙服の冷却に関する成果の概説も行われた。関連する成果として、歩行中における着衣の中の手足からの熱と湿気の発散に関する数値シミュレーション (BTH-09) が挙げられる。

キーノート KN-03 では、熱ショック蛋白質も取り上げられた。関連する研究として、著者による以下の2つのポスター発表がある。極海に棲む魚の体内に生成される不凍化蛋白質に関連して、蛍光を付与した蛋白質の運動と氷結晶面の観察から、両者の関連を議論した (混相伝熱セッション MPH-38)。さらに、不凍化蛋白質の一部を模擬するモデル、水、氷の間の相互作用を、分子動力学法を用いて調べ、蛋白質を構成するアミノ酸の氷結晶の成長抑制への寄与を議論した (マイクロ伝熱セッション MIC-11)。

2.3 食品

ビール製造用の大型の発酵・貯蔵タンク内において、温度を同時多点計測した結果 (BHT-07) や、球形の芋や果物を冷凍する際に生じる、水分の凍結による変形や微小クラックを予測するためのモデリングに関する研究 (BHT-08) が示された。

凝固のセッションにおいて、生体材料を模擬する寒天ゲル内の氷の形成を超音波照射により制御する実験結果 (SOL-05) が提示された。

2.4 その他

バイオマスである向日葵の種の殻を加熱して燃料を生成するプロセスに関する数値シミュレーション結果 (BHT-06) が、ポスターにて発表された。

3. おわりに

医工連携の歴史は浅い。生物は複雑系であり、未知の現象も多い。これらを考慮すると、バイオ伝熱の研究は、今後さらに進展すると予想される。

Manufacturing

河野 正道 (九州大学)

Masamichi KOHNO (Kyushu University)

e-mail: kohno@mech.kyushu-u.ac.jp

1. セッションの概要

「製造技術」のセッションは8月17日の午後に行われ、9件の論文発表がなされた。内容は鋳造・溶接・レーザー加工・焼成・薄膜生成等の技術に関するもので、金属を研究対象とした発表が約半分を占めた。国別論文数(筆頭著者の国籍をその論文の発表国とした)は日本、ブラジルが各2件、ドイツ、イギリス、ベルギー、韓国、イタリアが各1件であった。

2. 発表論文の概要

(MNF-02, S.R. Carvalho et al., Federal univ. of Uberlândia)ではタングステン電極と不活性ガスを用いたアルミニウムのアーク溶接(GTAW)において、試料に供給される熱流束の測定に関する研究成果が報告された。従来の手法では溶接中に発生するノイズの問題によって、熱電対を用いた測定が困難であったが、逆問題解析を用いることによりこの問題を克服している。

(MNF-03, S Hirasawa et al., Kobe Univ.)では摩擦攪拌接合(FSW)プロセスにて溶接される金属の温度分布等をMoving-Particle Semi-implicit法にて解析し、工具形状等が接合強度に及ぼす影響を検討している。このプロセスではツールと呼ばれるロッドを試料に回転させながら押し付けて、その摩擦熱で試料を軟化させ接合を行うが、ツールにピンを付けることによって、金属接合部の温度を上昇させる事ができ、接合部の強度も増すことを報告している。また接合を強めるにはツールの回転を増やすことが重要で、ツール自体が移動する速度はそれほど効かないとしている。実際の加工では、様々なパラメータの最適値を知ることが重要となるが、数値解析によってこれらの値を予め知ることが出来れば、加工を行う際の大きな手助けとなる。しかしながら一方で、(MNF-06, A. Contino et al., Thermal Engng. & Combustion Lab.,

Belgium)で報告されているように、数値解析と実験結果が異なるケースもあり、いかに解析モデルを構築するかが重要と思われる。

(MNF-04, M Wong et al., Univ. of Liverpool)ではレーザー加工によって見事な小型熱交換器を作製していた。実際の発表では作製した熱交換器を展示しており、聴衆に大変好評であった。報告者もレーザー加工に携わっているが、ポスター発表の際に実際の加工品を展示する手法を今後取り入れたいと考えている。この論文発表は本セッションで一番賑やかであった。

(MNF-08, M F Naccache et al., PUC/Rio)では天然ガスを燃料としたトンネル焼成炉における、燃焼ガス温度と炉内部温度分布の関係を数値解析によって検討している。ブラジルでは主に木材の粉体等を燃焼させて焼成炉を稼働させているが、近年の原料費の高騰や環境汚染の問題から天然ガスが代替燃料として注目されており、天然ガスが代替燃料となりうる事を報告している。

これらの発表論文の他に、鋳型における金属の流動状態の把握を目的として、水を鋳型に流した際の流動状態をレーザードップラー法にて解析した研究(MNF-01, PR Scheller et al., Freiberg Univ. of Mining and Tech.), ナノ秒パルスベッセルレーザービームを用いた金属へのマイクロ穴あけ加工の研究(MNF-5, M. Kohno et al., Kyushu univ.), 製鉄過程で用いられるSIIP(Self-induced Ion Plating Process)における伝熱シミュレーションの研究(MNF-06, A. Contino et al., Thermal Engng. & Combustion Lab., Belgium), レーザー溶接の際に生じる溶融部やキーホール生成の挙動を数値解析にて検討した研究(MNF-07, E-J Ha et al., Hyundai motors), 大型ソーラーセル製造装置における各所の温度履歴の研究(MNF-09, C.P. Malhotra et al., Int. centre for science and high tech., Italy)等の論文発表がなされた。

Combustion and Fire

鳥居 修一 (熊本大学)

Shuichi TORII (Kumamoto University)

e-mail: torii@mech.kumamoto-u.ac.jp

燃焼・火炎のポスターセッションは2日目の午前に行われた。全部で24件の研究発表が予定されていたが、3件が欠席であった。発表論文のファースト・オーサーの国別の内訳は、サウジアラビア1, 米国3, 韓国1, フランス1, 日本3, イタリア1, オーストラリア3, 中国4, ベルギー2, チェコ1, ポルトガル1, ロシア1, 南アフリカ1, インド1であった。各論文の概要と論文番号を以下に纏める。

COM-02 は、異なった圧力環境で約 500 μm のアルミニウム塊を CO₂ パルスレーザーで着火し、その燃焼現象と周囲圧力との関係を高速カメラとふく射温度計を用いて検討している。燃焼量は圧力が増加するにつれて減少し、この傾向は低圧環境でかなり顕著であると指摘している。

COM-03 は、対流伝熱に及ぼす化学反応の効果を考慮した式が提案され、一様壁温加熱と反応による部分的温度上昇との組み合わせによるヌセルト数の変化を明らかにしている。

COM-04 は、ふく射伝熱に対するモデルを提案し、そのモデルの有効性を明らかにするために、4種類の対向流火炎の火炎温度やガス成分について他のモデルと比較検討している。

COM-05 は、赤外線計測法を用いて低レイノルズ領域での垂直上向きのプロパン予混合火炎を水平に固定したチタニウム板に衝突させ、ふく射と対流の熱流束再分化を実験と数値手法を用いて検討している。衝突部中心付近から半径方向の熱流束分布はふく射熱流束と対流熱流束で異なり、特に中心部分での熱流束は双方とも同じ割合で寄与することを明らかにしている。

COM-06 は、トルエン・酸素予混合火炎内の多環芳香族炭化水素からのフラレーン形成機構について、トルエンと酸素の流量の影響を実験によって検討している。

COM-07 は、直噴ディゼルエンジン燃焼容器内

部の燃料噴射における液滴の壁衝撃を検討するために、異なった2種類の高圧噴射圧力条件下で壁衝突噴流時の燃料液膜厚さと半径方向分布に及ぼす壁温の影響をパルスレーザーによる可視化手法で検討している。壁温は液滴と壁との熱交換に重要な液膜厚さとその半径方向分布に影響する。液滴の壁衝突後の分散した粒子形状に容器内部のガス圧が大きく影響することを明らかにしている。

COM-08 は、自動車用燃料ステーションや貯蔵装置の安全設計上のガイドラインを構築する目的で、超高压水素容器より水素噴流火炎が形成された場合のふく射熱流束と非着火水素噴流の周囲濃度を実験と数値解析で比較検討している。水素火炎の長さの時間変化、ふく射熱流束の軸方向分布及び半径方向分布、非着火水素噴流の軸方向濃度分布の変化を明らかにしている。

COM-09 は、多孔質バーナーを用いたメタン予混合火炎について、流れ、熱伝達及び化学反応を考慮した数値解析を行い、ふく射熱流束、ガス及び多孔質の温度、各種ガス濃度について検討している。ガス速度は火炎領域でかなり増加する一方、等温流に比べて圧力損失の増加を引き起こす。多孔質バーナーは熱ふく射を増加させ、酸化窒素を通常バーナーに比べて 1/3 に軽減させる特徴を持つと報告している。

COM-10 は、ふく射熱源にさらされる膨張性のある被覆内の温度分布を記述できる数学モデルを提案し既存の実験結果と比較検討している。

COM-11 は、乱れ、燃焼、すす、化学反応及びふく射を考慮した LES を用いて、浮力プルームの puffing 効果を伴った浮力炎が検討されている。ノズル先端より3直径下流位置での温度変動と速度変動をスペクトル解析した結果、puffing 現象はほぼ 2 Hz で発生して、この値は既存の実験結果とほぼ一致することを報告している。

COM-13 は、50 気圧まで加圧されたメタン・空

気混合媒体の自己着火について 1 次元モデルと 2 次元 CFD モデルを用いて実験結果と比較検討している。自然対流を考量した 2 次元モデルは自己着火プロセスを再現でき、レーリー数が 10^4 以上で浮力流が発生することを報告している。

COM-14 は、3 種類の異なる乱流非予混合火炎について乱流モデルを用いた数値解析を行い、既存の実験結果と比較することによって、流れ場や混合領域に及ぼすふく射の効果を検討している。

COM-16 は、亜音速領域での水素噴流拡散火炎の火炎挙動と再着火の現象について、シュリーレン法による画像計測、熱電対による温度計測、燃焼ガス分析を行っている。再着火時に生じるノズル先端に形成される数ミリの球体は水素が燃焼している領域であり、この高温の球体（火種）の発生の有無が再着火に影響することを明らかにしている。

COM-17 は、汎用 CFD コードを用い、二次燃焼容器設計に関して全操作条件における滞留時間及び混合と流れの均質化について検討している。

COM-18 は、自動車用トンネル火炎における熱・流動を定常と非定常数値解析によって、煙流動に及ぼす火炎熱発生率の影響を検討している。

COM-19 は、反応境界層内での質量伝達と摩擦に及ぼす流れの乱れと加速の影響を、媒体としてエタノールを用い非燃焼場と燃焼場について検討している。燃焼を伴った加速流の摩擦は層流の値よりも約 10 倍増加することを明らかにしている。

COM-20 は、ダイオードレーザー吸収分光センサーを用いて、旋回安定型乱流燃焼容器内部の燃焼ノイズと燃焼状態、特に温度変動や H_2O モル分率について検討している。間欠的な二次燃料噴射はピーク及び高周波数領域でのエネルギーを軽減し、温度変動強度は間欠的な二次噴射の周期によって最小値を示すことを明らかにしている。更に、燃焼ノイズに関係した燃焼振動や燃焼状態は温度と H_2O モル分率のパワースペクトルによって検知できることを報告している。

COM-21 は、主流に垂直に非反応噴流を加えた時の混合効率を数値解析によって検討し、主流と噴流の運動量束の比の効果について考察している。

COM-22 は、金属燃焼に及ぼす重力の影響を検討するために、通常重力場と微小重力場における

固体金属内部の熱伝達率を求めるための熱解析を行っている。

COM-25 は、長いトンネル内で火災が発生した際の煙層干渉高さを決定するために、加熱した煙をトンネル内に流し、可視化と温度計測を併用して行っている。

COM-26 は、2 階建てバス内部で火災が発生した際の煙制御を行うために、バス内部に高温の煙を発生させた実験によって、垂直排気口の設計について報告している。

COM-27 は、火災発生時における水噴霧を加え際の消火時間と火炎熱発生率との相互関係について検討している。火災が発生し水噴霧を加えない場合、室内温度は徐々に上昇しある温度に漸近するが、火炎に水噴霧を加えると室内温度は急激に下がる。また、水噴霧開始から室温が減少し一定温度に達するまでの消化時間は換気を行うことによって抑えられ、火炎熱発生率によって左右されることを明らかにしている。

COM-28 は、エチレンオキシド生成プロセス用の固定ベッド型触媒炉の安全性と性能に影響を及ぼす hot-spot を避けるために、1 次元数学モデルを用いて検討している。

COM-29 は、水平平板に垂直上向きにメタン・空気予混合火炎を衝突させた場合の伝熱特性に及ぼすバーナーアスペクト比の効果を平板に取り付けた熱電対と熱流束マイクロセンサーを用いて検討している。また、レイノルズ数やノズル先端と平板との距離の影響についても考察している。

今回の発表論文では、かなりの研究成果が数値計算によるものであり、その殆どが汎用計算コードを使用して行われていた。計算で求めた結果と既存の実験値とを比較して、計算結果の信頼性を確認しながら、計算結果を考察している論文がある一方、計算を行い得られた結果で現象を考察している論文もあった。更に、解の不確かさ判定や計算精度については一切触れずに、汎用コードを用いて計算を行っただけの論文も報告されていた。従って、数値解析は今後益々盛んになる一方で、計算精度だけでなく結果の信頼性についても十分吟味された研究が求められるようになると思われる。

Experimental Methods

鈴木 洋 (神戸大学)

Hiroshi SUZUKI (Kobe University)

e-mail: hero@kobe-u.ac.jp

1. はじめに

第 13 回の国際伝熱が行われた。本学会で計測法のセッションについてレビューを行う。計測法のセッションには 25 件の論文が提出された。ただし、うち 2 件の発表がキャンセルされている。そのうち、アメリカから 6 件、日本とオーストラリアから 4 件ずつ、ドイツおよびカナダから 3 件、フランス 2 件、スウェーデン、ベルギーおよびブラジルから各 1 件ずつの論文の提出があった。そのうち数件をとりあげたい。

2. 興味を引いた論文

計測のセッションは、計測技術に特に主体をおいた内容であったため、検討対象については、対流、燃焼、沸騰、物質移動といった多岐にわたる。そのため、学際的な議論は十分になされない。個人的な意見を述べさせていただければ、このようなセッションは、不要ではないかと思う。特に問題なのは、発表者の意志にかかわらず、このセッションに組み込まれてしまったことである。筆者らの発表も本来充填層の微粒子分散特性に関する研究であったのだが、ここに含められてしまい、非常に残念であった。セッションのあり方について再考する必要があるのではないと思われる。

中でも特に目を引いた発表について報告させていただくと、筆者のもっとも興味を惹いたのは、燃料電池膜内のエタノールの濃度分布を詳細に測定したものである (Scharfer ら, EXP-12)。膜の片側に対流物質移動がある場で、その逆側からラマン分光を用いて膜内のエタノール分布を測定し、燃料電池膜内物質移動特性を明らかにしている。この発表は筆者らが同様にラマン分光計を用いた測定を行っているため、特に興味を引いたのであるが、本手法によれば、非定常な特性を把握はできないが、高精度に薄膜内の平均場の物質移動を定量化できる。本来このような膜内の物質移動特

性に関する研究は燃料電池のセッションで議論されるべきかと思われる。計測法のセッションではこのように重要な内容を十分に議論できない。また、燃料電池の研究に従事している研究者の気を引くことができない。セッションのあり方として非常に疑問が残る。

今ひとつ興味を引いた発表は X 線トモグラフィを用いた計測である (Mahr ら, EXP-06)。すでにパッケージ化されている複雑形状の内部の流れを計測することは、一般に難しい。近年中性子ラジオグラフィを用いた計測が盛んに行われているが、大がかりな装置が必要であり、簡易にできることではない。しかしながら X 線装置については近年非常に小型化および安価となっており、複雑形状内の流れがこの手法を用いれば、つぎつぎと明らかとなる可能性があり、興味深い。

我が国の伝熱シンポでも発表があったが、中村氏の高速サーモグラフィを用いた非定常伝熱特性の測定は、これからの伝熱測定法として非常に有用であると思われる (EXP-11)。

その他、PIV や LIF を用いた計測法が多く発表されていた。しかしながら、これらの計測法については、計測のキーノートをされた菱田氏の講演 (KN-20)の方がむしろ参考になったことと思われる。特に PIV については計測技術として目新しいものはなく、現象の議論を主とした発表が多かったと思われる。その意味でも本セッションの位置づけに微妙なものを感じてならない。

3. 最後に

かなりセッションに対する批判的な意見を述べていただいたが、発表された新しい計測技術は非常に興味深く、これらの応用によって、将来伝熱に関する多くの発見がなされることは間違いないと思われる。今後のさらなる計測技術の発展を願いたい。

第 15 回国際伝熱会議の京都開催決定

*Kyoto Approved as the Venue for the 15th
International Heat Transfer Conference*

笠木 伸英 (東京大学)

Nobuhide KASAGI (The University of Tokyo)

e-mail: kasagi@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

1. 京都開催が決定

去る 8 月 13 日, シドニーで開催された国際伝熱会議アセンブリー会議において, 2014 年の第 15 回国際伝熱会議の京都開催が票決された. ここに, 日本の伝熱研究コミュニティの皆様朗報をお伝えし, 共にこの喜びを分かち合い, 同会議招致委員会の報告としたい.

2. これまでの経緯

2004 年夏, 国際伝熱会議アセンブリー委員の荻野文丸先生から, 2014 年開催の第 15 回同会議を日本へ招致する可能性を検討してはどうかと, 当時の伝熱学会理事会へ打診があった. そこで早速, 荒木信幸会長を中心に検討を進めたが, 1964 年の東京開催以来相当の年月を経ていること, 日本の伝熱研究がさらに隆盛の向きにあること, 会議組織開催に財政的な見通しがあることなどから, 再度の日本開催を申し出る方針を同年 9 月の理事会で決定した. 2006 年のシドニー, 2010 年のワシントン DC, そしてその先の話ではあったが, 決断の時期を逸してはいけないと, 理事会の総意はまとまった. 11 月アナハイムで開催されたアセンブリー会議で, 荻野先生, 同委員の庄司正弘先生から日本の熱意を伝えていただいた.

アセンブリー会議後, 日本と中国が立候補したこと, イタリア, カナダも立候補するかもしれないこと, 2014 年の国際伝熱会議招致には, 2006 年 4 月までに正式に申請書を提出し, 2006 年 8 月シドニーにてプレゼンテーションを経て, 投票で開催地が決定されること等が伝えられた. これを受けて, 伝熱学会に, 第 15 回国際伝熱会議招致委員会を設置すること, 同委員長を笠木 (当時副会長) に委嘱することが 12 月の理事会で決定された. その後, 同委員が委嘱され, 以下のように委員会が構成された. (所属・役職は当時, 順不同)

荻野文丸 (舞鶴高専, アセンブリー委員)
庄司正弘 (産総研, アセンブリー委員)
工藤一彦 (北海道大学)
太田照和 (東北大学)
西尾茂文 (東京大学, TSE エディター)
長野靖尚 (名古屋工業大学)
牧野俊郎 (京都大学, 日本機械学会熱工学部門長)
武石賢一郎 (大阪大学, 伝熱学会副会長)
門出政則 (佐賀大学, 伝熱学会企画部会長)
笠木伸英 (委員長, 東京大学, 伝熱学会副会長)

上記委員会では, 様々な角度から国内の開催候補地などの検討を慎重に進めた結果, 平成 17 年 4 月の伝熱学会理事会に, 京都を開催地, 開催の実務を担う実行委員会委員長を吉田英生教授 (京都大学) に依頼して招致活動を行うことを提案し, ご承認いただいた.

その後, 吉田先生を中心に, 岩井裕先生そして地元京都市に縁の深い方々によって, 京都開催提案書作りが 1 年掛かりで始まった. 提案書には, 京都市長・京都府知事の歓迎書簡, 京都の歴史と



京都開催提案書の表紙

文化、京都生まれの先端技術、会場となる京都国際会議場などの情報がカラフルな写真等と共に盛り込まれ、本年春には誠に魅力的な提案書ができあがり、期限までに予定通り提出することができた。最終的に、提案書を提出したのは、中国と日本だけとなり、アジア地区の中での招致競争となった。

去る5月の伝熱シンポジウム期間中での招致委員会では、本番までにどういった招致活動が可能かを再検討し、各国のアセンブリー委員に京都開催の優れた事項を十分理解していただくことが重要であるとの認識から、委員長から各アセンブリー委員あての書状を提案書と共に郵送すること、併行して招致委員会委員が手分けしてアセンブリー委員個人へ電話、メールあるいは面談を通じて、日本支持を依頼することとした。

8月に入り、吉田先生とパワーポイントの内容の詰めの準備をしたり、各国アセンブリー委員の反応などを集計したりしたが、事前の読みでは我が方がやや有利という予想でシドニー入りすることができた。

本番の8月13日正午、アセンブリー会議は軽食ランチから和気藹々とスタートした。我が日本チームは、アセンブリー委員の庄司先生、吉田先生、そしてオブザーバーの岩井先生、筆者の4名であった。予定議題の後半で、次回のワシントンの開催準備が報告された後、次々回の開催提案のプレゼンテーションと質疑が始まった。コイントスで日本が先となり、筆者が口火を切って提案に至った経緯を概説し、その後吉田先生がビデオも使ったプレゼンテーションを行った。二人で直前まで煮詰めたPPTには、日本開催の際にどんな新しい企画を取り入れるかについても、工夫と意気込みを盛り込んだ。例えば、Fahrenheitの水銀温度計から300年という年にも当たる2014年に、温度計測の学生コンテストを計画するというアイデアなどである。

日本のプレゼンテーションについては、ウェブ上の査読システム、会議場の交通の便、ホテル、登録料、新しい企画行事などについて質問があったが、出席者には日本の提案が十分信頼性のあるものとして理解をして頂けたと感じた。その後中国は、北京工業大学の馬重芳教授がプレゼンをされ、中国の隆盛と各国の協力を求めるなど、中国

らしい話しをされた。その後、日中の関係者すべてが退室を求められ、残りのアセンブリーメンバーで討議を経て投票後、我々は再入室して、日本開催決定を伝えられた。ここで、日本の関係者一同、ほっと安堵した次第である。

2. 2014年開催に向けて

国際伝熱会議の東京開催の時、筆者は博士課程学生でマイクを持って会場を走るアシスタントであった。以来、30年以上経つが、国際伝熱会議は“伝熱オリンピック”とよばれるに相応しく、脈々として世界の伝熱研究のマイルストーンを築いてきたと言える。そのような会議の8年後の京都開催が決まったことは、我が国の伝熱コミュニティにとって素晴らしい目標ができたとも言える。“オリンピック”開催は地元の負担は大変で、今後オールジャパンで本格的に開催のための準備が必要であるが、もうひとつはそれをバネに我々が力を付けることでもある。伝熱研究は、シドニーの国際伝熱会議にみられるように、今確かに一回り大きなスコープと新しい進展の兆しを見せ始めていると言える。新たなチャレンジとして、2014年に日本の伝熱コミュニティが次世代の伝熱研究の方向性を示すことができるかどうか、それはこれからの8年間の我々自身の厳しい鍛錬によってこそ可能と思える。それを担うべき世代の方々の自覚と健闘を大いに期待したい。

謝 辞

国際伝熱会議の招致の話が始まってから2年近くに亘ったが、お陰様で良い結果を勝ち取れた。招致委員会委員の方々には、常に適切なご意見を頂き、間際まで各国アセンブリー委員への依頼などにもご尽力頂いた。吉田英生先生には開催提案書作りからプレゼンテーションまで、この一年共にご苦労いただいた。伝熱学会の3期にわたる荒木信幸、庄司正弘、望月貞成各会長、理事の皆様のご支援とご協力を賜った。荻野文丸、鈴木健二郎両先生には終始貴重なアドバイスを頂き、日本支持要請には、Eitaro Yamane、宇高義郎、菱田公一、川路正裕、高田保之ら各先生をはじめとして、各国アセンブリー委員や伝熱研究者に友人を持つ複数の方々にお力添え頂いた。ここに記して、多くの皆様に謹んで謝意を表したい。

第 17 回輸送現象国際会議 (ISTP-17) 報告

Report on the Seventeenth International Symposium on Transport Phenomena

中川 慎二 (富山県立大学)

Shinji NAKAGAWA (Toyama Prefectural University)

e-mail: snakagaw@pu-toyama.ac.jp

2006年9月4日(月)から8日(金)にかけて、The Pacific Center of Thermal-Fluid Engineering (PCTFE)主催の第17回輸送現象国際会議(the 17th International Symposium on Transport Phenomena: ISTP-17)が富山国際会議場にて開催された。約200件の一般講演があり、24カ国から210名の参加者が集まった。熱物質移動に関する様々な分野の論文が集まり、従来にも増して、多くの研究者・技術者が参加された。また、アメリカの Prof. Agonafer (University of Texas at Arlington)と Prof. Ortega (Villanova Univ.), 韓国の Prof. Hyun (KAIST), 日本の望月正孝氏(フジクラ)による4件のKeynote講演があった。

電子機器冷却のセッションの1つでは、中山恒先生の70歳をお祝いし、これまでの貢献をたたえるためのパネルセッションが企画され、活発な議論が交わされた。



図1 Panel Session to honor Dr. Nakayama's 70th birthday [上段左から 石塚先生(富山県大), 鈴木氏(日立), 矢澤氏(ソニー); 下段左から Prof. Behnia (Univ. of Sydney), Prof. Agonafer, 中山先生, Prof. Joshi (Georgia Institute of Technology)]

Banquet は富山全日空ホテルで開催された。本会議の Chairman である石塚先生(富山県大),

PCTFE の President である Prof. W.-J. YANG, Vice President であり日本伝熱学会会長の望月貞成先生(東京農工大), 日本機械学会会長の笠木伸英先生(東京大)らが登壇され, ISTP や PCTFE への熱い思いと思い出話が披露された。1985年の第1回から続く学会の伝統を実感した。

富山の伝統芸能として、「獅子舞」と「こきりこ」が演じられた。獅子舞は江柱町で傳承されているもので、迫力のある舞と演奏で、大いに盛り上がった。「こきりこ」では、ささら等の珍しい楽器で奏でられる民謡と、こきりこ踊りを観賞した。日本最古の民謡と伝えられるだけに、日本の伝統が感じられるものであり、海外からの参加者だけでなく、日本人参加者も興味深げに見物されていた。



図2 バンケットでの「こきりこ」

Keynote 講演者の Prof. Ortega が2週間前に NSF から Villanova University への引越した際、パスポートを貸倉庫の荷物の中に収納してしまい、急遽来日できないハプニングがあった。しかし、Prof. Ortega の熱意により遠隔教育システムを利用したビデオとスライドによる講演が行われた。初めての試みであったが、予定時間通りに keynote 講演を終えることができた。なお、筆者は実行委員の

1人として、この講演の準備を担当したが、突然の予定変更と準備不足のため、音響設備や画面切替に幾分問題があったことをお詫び申し上げる。

Villanova University では遠隔教育システムを完備しているようで、ビデオとスライドを組み合わせた教材が迅速に作成され、ウェブベース教材のアドレスが送られてきた。この教材を事前にダウンロードして再生した。質疑応答ができない点が問題であるが、技術の進展によっては、オンラインでの質疑応答も可能であろう。多忙な研究者による講演の方法として、将来的には、このような遠隔講演が実施されることも有るのかもしれない。



図3 遠隔教育システムを利用した Keynote 講演

参加者に富山近郊の文化と自然環境を楽しんで頂くために、世界遺産「白川郷」と立山へのオプションツアーが企画された。白川郷ツアーは残念ながら雨天での開催となったが、立山ツアーは快晴に恵まれた。年に数回あるかどうかという絶好の観光日和であり、紅葉には少し早い時期であったが、素晴らしい景色を堪能できた。世界各地での観光を重ねてこられた参加者からも、世界に誇れる観光地だとのお墨付きをいただいた。

本会議 Co-chairman の竹越先生（前富山大）と石塚先生が、多くの方に参加いただけるよう、参加登録料の低減に尽力された結果、井上科学振興財団、富山市、富山県高等教育振興財団、富山市コンベンションビューローの援助を受け、参加登録費用が 38000 円（早期割引）となった。各団体からの支援に対し深く謝意を表すと同時に、石塚先生、竹越先生のご尽力に深謝いたします。また、平成 16 年伝熱シンポジウム開催のノウハウも生

かされ、両先生を中心として、参加者へ様々な心配りがなされた。LAN ケーブルを開放したネットワークサービスの提供場所は大盛況であり、多忙な日本人参加者のオアシスとなっていた。

本会議の実行委員を敬称略・順不同で列举すると、蛭子（ダイキン）、伏信（東工大）、岩崎（東芝）、小林（明治大）、小泉（コーセル）、丸山（東大）、三松（岐阜大）、宮崎（九工大）、宗像（産総研）、中別府（明治大）、中川（富山県大）、小原（東北大）、奥井（富山大）、坂村（富山県大）、瀬田（富山大）、芝原（大阪大）、鹿園（東大）、鈴木（日立）、多田（金沢大）、田坂（住友金属）、鳥居（熊北大）、矢澤（ソニー）となる。ご多忙中にも拘わらず、ご尽力いただいた各委員の方々、また、会議開催にあたってご協力頂いた皆様にこの場を借りて感謝申し上げます。特に、富山大 奥井先生、瀬田先生とコーセル 小泉氏には、会議開催中の様々な仕事をお引き受けいただき、感謝の念に耐えない。

次回 ISTP は、2007 年 8 月 27～30 日に、韓国で開催される。詳細は、ISTP-18 の WEB サイトをご覧ください。（<http://www.istp-18.org/>）



図4 立山（室堂）

生産技術と熱

Special Issue on "Manufacturing Technique and Heat"

加賀 邦彦 (三菱電機)

Kunihiko KAGA (Mitsubishi Electric Co.)

e-mail: Kaga.Kunihiko@cw.MitsubishiElectric.co.jp

生産技術と熱とのかかわりについては、ここで改めて述べるまでもなく、特に素材や部材の加工プロセスにおいて加工精度や歩留まりといった品質・信頼性の確保にとって重要な因子である。本特集では、比較的新しい加工技術と伝熱現象とのかかわりと、従来の加工プロセスへの積極的な熱制御による生産性向上とにスポットをあてた4件の話題につき、第一線で活躍される大学の先生および企業の研究者の方々に執筆をいただいた。

新しい加工技術と伝熱現象のかかわりというテーマでは2件の話題提供をいただいている。1件は大阪大学の太田先生による「レーザーによる熱加工」である。小生などはレーザー加工というと切断や溶接というイメージしかなかったが、太田先生によればシリコンウエハの内部加工、ガラスのスクライブ、ハードディスクのテクスチャリングなどといったさまざまな加工がレーザーを用いて行なわれている。レーザービームを短時間打ち込むことで局所的に大きな熱応力を発生させ亀裂を生じさせたり、レーザー加工の背後から冷却して圧縮応力と引っ張り応力を生成させてガラスを切断したりと、局所・瞬時的な熱注入が可能なレーザーの特性が生かされた加工法である。もう1件は三菱電機の秋吉氏による「放電による熱を利用した新しい表面処理」である。放電加工は通常、型彫りなどの部材の除去による形状加工をさすが、MSコーティングと呼ばれる秋吉氏らの方法は粒子を固めた電極から母材に放電させることで電極材料が母材表面に膜を形成するという逆転の発想の成膜法である。パルス状の放電を利用し加工液中で成膜を行なうため、母材に熱的ダメージを与えず、密着力の高い被膜が形成される。加工プロセスにおいて対流沸騰、固液二相流といった現象が絡み合い熱流体屋にとって興味深い加工法である。以上の2件はいずれも比較的新しい加工プロセスであり、伝熱現象が深く関わっている点で本誌の読者の好奇心

をかき立てることと思う。

従来からある加工プロセスに対する熱制御というテーマでは2件の話題を提供いただいている。1件は、神戸製鋼所の福谷氏による「光ファイバ素線線引き過程における伝熱」である。不勉強な小生は、「ネックダウン」とよばれる光ファイバーの製造方法を福谷氏の寄稿文によりはじめて知ることができた。本論によれば、光ファイバーの引き上げ工程においてファイバーの粘性係数の温度依存性が大きいと、ファイバー線表面と雰囲気ガスとの対流熱伝達の揺らぎがファイバー線の太さの軸方向ばらつきになって現れる。このばらつきを抑えるため、伝熱と線の変形を連成して高速で解く独自の数値解析技術を開発してガスの揺らぎの影響が顕著に出る位置を特定し、炉中のガス流れの設計を可能にした。最後の1件は、名古屋工業大学の糸魚川先生による「加工液による工具の冷却と潤滑性」である。古くから行なわれている切削加工のプロセスにおいて潤滑と冷却を兼ねた加工液として微量の油剤と水のミストを用いる複合ミスト潤滑法などにつき最新の研究成果をわかりやすくご紹介いただいている。水のミストを併用することで蒸発潜熱が部材の熱膨張を抑えて加工精度が向上するばかりでなく、潤滑材としての油膜の温度が高温になるのを防ぎ潤滑性能が確保されるという一石二鳥の手法である。上記の2件は、ガスの対流熱伝達や蒸発潜熱といった伝熱現象を加工の安定と精度向上に積極的に活用する点で、加工プロセスに伝熱現象を積極的に利用する好例となっている。

以上のようにいずれの内容も興味深く、生産技術ことに加工技術と熱という観点で、まだまだ面白い取り組みがありうると期待される。本特集が読者に研究開発に対する新たなインスピレーションを与えることになれば幸いである。

レーザによる熱加工

Thermal Processing with Laser

大村 悦二 (大阪大学)

Etsuji OHMURA (Osaka University)

e-mail: ohmura@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

高エネルギー密度のレーザビームを物質に照射すると、吸収によって光エネルギーが熱エネルギーに変換され、局部的に高温になる。周囲との温度差により熱拡散するが、短時間に局部的にエネルギーが投入されるので、熱拡散時間と熱拡散距離が短く、材料は熔融や蒸発、昇華といった相変化を生じる。その結果、機械加工が難しい硬脆材料でも非接触で加工できる。このようにレーザによる加工は、ほとんどが熱加工であるから、熱伝導や熱応力、熱流体などの解析・シミュレーションにより、加工現象を理解し、現象を支配する主要因や制御因子を究明することが可能となる。加工品質の定性的、定量的予測もできる。特に、レーザ加工における物理現象は極短時間に極微小領域で生じるため、実験による観察や計測が難しい場合が多く、その点でも解析やシミュレーションは有効といえる。加工現象を模式的に説明する場合にも、単なる想像や憶測に基づいたものではなく、解析やシミュレーションに基づいたモデルには説得力がある。このような立場からレーザ加工現象の解析・シミュレーションを行ってきた。本稿では、それらの中から、シリコンウェハの内部加工[1-3]、ガラスのスクライブ[4-6]、ハードディスクのテクスチャリング[7,8]、プリント基板の穴あけ[9,10]に関する研究の一部を紹介する。

2. シリコンウェハの内部加工

図 1(a)に模式図で示すように、シリコンウェハの内部に集光した透過性のナノ秒パルスレーザを水平方向にスキャンすると、ウェハ内に帯状の高転位密度層が形成され、高転位密度領域から単結晶領域に亀裂が進展する。この帯状の改質層に垂直に引張応力を作用させると、改質層から上下に延びた亀裂が表面まで進展することで、シリコン

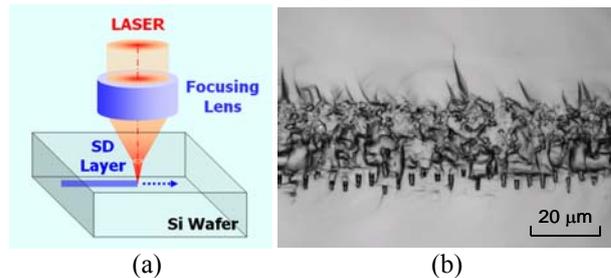


Fig. 1 Schematic of stealth dicing (a) and example of experimental result (b)

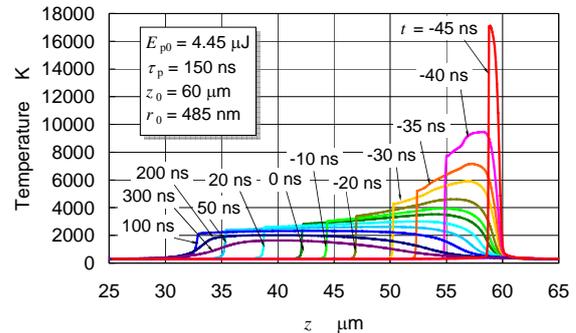


Fig. 2 Time variation of temperature distribution along the central axis

ウェハは容易に分断することができる。この技術は「ステルスダイシング(SD)」と称され、新しいダイシング技術として半導体業界で注目されている。図 1(b)は分断面写真の一例であり、中央の帯状領域が改質層である。より信頼性の高いダイシング技術として確立し、最適な加工条件を検討する上では、内部改質層の形成機構を明らかにする必要がある。そこで、内部改質層形成機構を明らかにすることを目的として、吸収係数の温度依存性を考慮した熱伝導解析と簡単な熱応力解析を行った。ここでは波長 1064 nm のレーザを想定し、パルスエネルギー E_p を、シリコン内部に浸透する実効値で 4.45 μJ とした。パルス波形はガウス分布を仮定

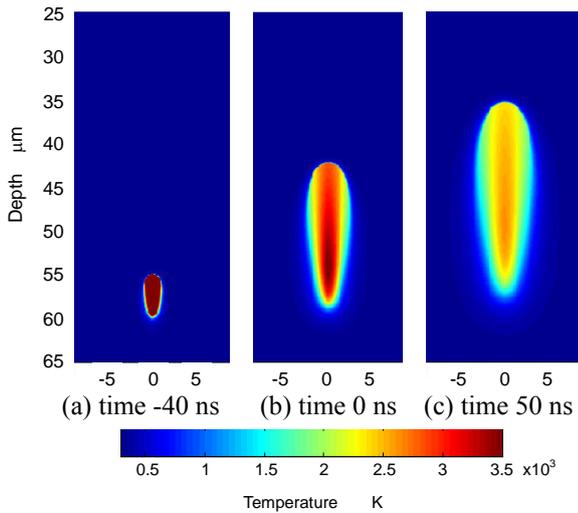


Fig. 3 Time variation of temperature distribution

した．パルス幅 τ_p は半波高全幅値(FWHM)で 150 ns とし，パルス中心時刻を $t=0$ とした．ビームの強度分布(空間分布)はガウス分布を仮定した．単結晶シリコンの厚さは 100 μm で，焦点位置 z_0 は深さ $z=60 \mu\text{m}$ に設定した．初期温度は 293 K とした．

中心軸上の温度分布の時間変化を図 2 に示す．図より，時刻 $t=-45 \text{ ns}$ あたりで深さ $z=59 \mu\text{m}$ 付近において急激な熱吸収が始まり，瞬間的に 20000 K 程度まで温度上昇する．瞬時に 10000 K を超えるような領域は一気に気化し，ボイドが形成されると推定される．以降は，図 3 に例示するように，熱衝撃波として表面方向に急速に高温部が伸びていく．

図 3 からわかるように，レーザ吸収によって高温になる領域は，周囲との間に非常に大きな温度差が生じている．このとき，高温部の熱膨張が周囲の低温部で押さえ込まれ，高温部は強い圧縮を受けると考えて，この圧縮応力を，各時刻の最高温度と初期温度との差 ΔT を用いて単純に

$$\sigma = E\alpha\Delta T / (1-\nu) \quad (5)$$

で見積もった．ここで， E はヤング率， α は線膨張係数， ν はポアソン比である．その結果，レーザ吸収が顕著となる初期は 12 GPa 程度の超高压状態になること，時刻 $t=-35 \text{ ns}$ では圧縮応力が 5 GPa を切り，その後最高温度の低下に伴って圧縮応力は急速に低下することがわかった．とはいえ，この高い圧縮応力状態の領域は高転位密度の改質層を形成するであろう．加熱速度が大きいのは，熱衝撃波の先端付近であり，実際に圧縮応力が強

く作用するのはこの領域である．この領域が前のパルスで生じている改質層を突き上げることで，改質層内の転位が核となって，改質層から単結晶領域に亀裂が進展すると考えられる．これらの繰り返しによって，図 1 のような帯状の改質層が形成されると予想される．

3. ガラスのレーザスクライブ

近年，液晶ディスプレイやプラズマディスプレイなどのフラットパネルディスプレイ(FPD)が急速に普及している．FPD では主にガラス基板が使用されており，その製造工程の中にガラス分断工程がある．基板面積が増大する一方で，板厚は減少する傾向にあり，ガラス分断工程では，パーティクルの減少とともに，基板強度の向上が求められている．レーザスクライブは，これらの要求を満たす画期的な加工法といえる．そこで，図 4 のように， CO_2 レーザで加熱し，その直後を冷却するレーザスクライブについて，加工現象とその支配因子を系統的に明らかにすることを目的として二次元熱応力有限要素解析を行った．解析では，ガラスのレーザ照射面に $x-y$ 座標をとり， y 軸， z 軸方向をそれぞれ，スクライブ方向，板厚方向とした．

板厚 0.7 mm のソーダガラスについて，スクライブ可能な照射条件(レーザ出力 $P=58.7 \text{ W}$ ，スクライブ速度 $v=200 \text{ mm/s}$)での，冷却点を含む $x-z$ 面の温度分布と応力分布の解析例を図 5 に示す． $x-z$ 面の温度分布は，表面部が冷却され，内部には高温域が存在する．応力分布は，内部の高温域

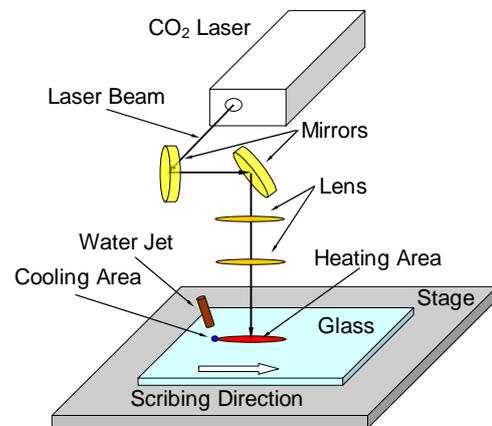
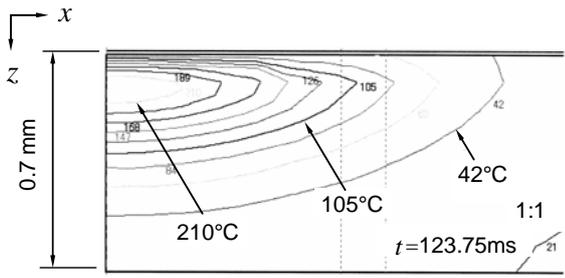
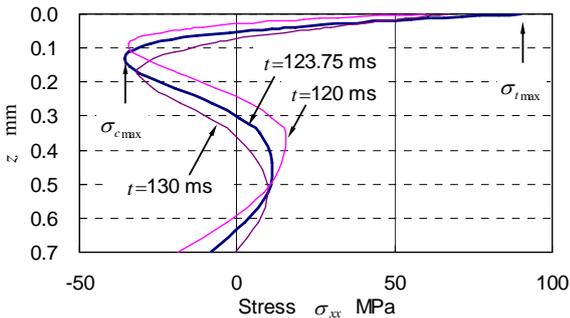


Fig. 4 Schematic of experimental setup for laser scribe of glass



(a) Temperature distribution on $x - z$ plane at $t = 123.75$ ms



(b) Stress distribution on z axis induced by temperature distribution shown in Fig. (a)

Fig. 5 Example of temperature and stress distribution in cooling area

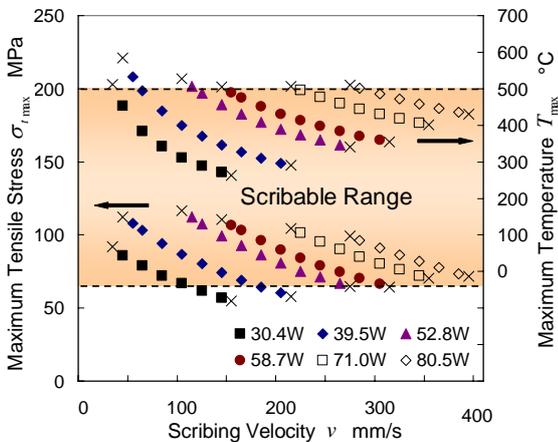
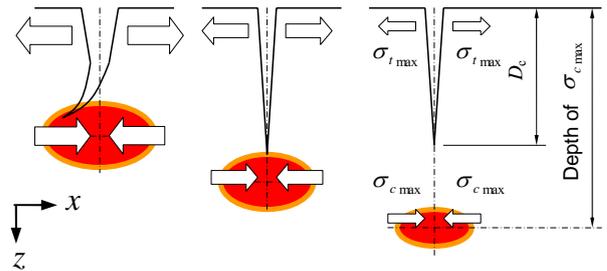


Fig. 6 Maximum tensile stress σ_{tmax} and maximum temperature T_{max} at scribable range

が圧縮応力場となり、冷却された表面に大きな引張応力が発生する。この表面引張応力によって亀裂が進展すると考えられる。

一方で、レーザスクライブ可能な照射条件をレーザ出力と移動速度について実験により求めた。その照射条件で熱応力解析を行い、ガラス表面の最高到達温度 T_{max} と冷却点表面の最大引張応力



(a) $d = 10$ mm (b) $d = 18$ mm (c) $d = 24$ mm

Fig. 7 Schematic of crack formation imagined from thermal stress analysis results

σ_{tmax} を求めた。結果を図 6 に示す。×印は、実験でスクライブ不可能だった条件を表している。スクライブ可能条件では、ガラス表面最高到達温度の上限値が、レーザ出力とスクライブ速度に関わらずほぼ一定で、これ以下ではスクライブ可能である。一方、スクライブ可能条件では、冷却点表面の最大引張応力の下限値も、レーザ出力とスクライブ速度に関わらずほぼ一定で、これより大きくなるとスクライブ可能である。したがって、レーザスクライブ可能条件は、ガラス表面最高到達温度の上限値以下、冷却点表面の最大引張応力の下限値以上の範囲にあり、熱応力解析を行えば、スクライブ可能条件を簡易に推定できることがわかる。

レーザ照射位置と冷却点の距離 d を変えて実験を行うと亀裂深さが変化した。図 7 に熱応力解析の結果に基づいた亀裂進展の模式図を示す。冷却点距離 d が大きくなると、冷却点で表面と内部の温度差が小さくなり、ガラス表面の引張応力は小さくなる。内部では熱拡散時間が増加して、高温域が深くなるとともに圧縮応力も小さくなる。その結果、亀裂は浅くなる。冷却点距離 d が短くなると、内部の高温域が浅く、圧縮応力も大きくなる。その反作用として、冷却点の引張応力はそれだけ大きくなり、亀裂進展は顕著となる。しかし、内部の大きな圧縮応力場が、亀裂の深さ方向への進展を妨げることになり、亀裂はまっすぐに進展できず、亀裂が湾曲する。その結果、亀裂深さは浅くなる。つまり、レーザスクライブの亀裂深さは、冷却点の引張応力と内部の圧縮応力の大きさ、および圧縮応力場の深さに依存し、これらの重畳効果により決まると考えられる。このような熱応力解析に基づく考察は、実験結果をよく説明する

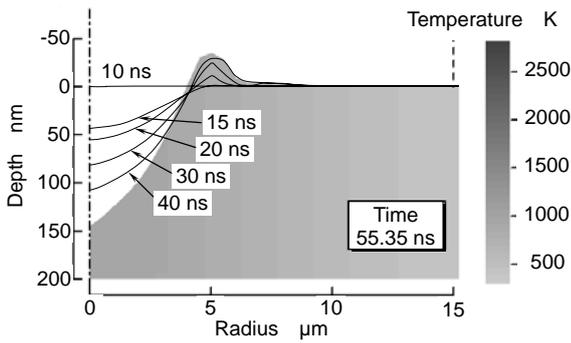


Fig. 8 Transition of surface profile of aluminum (laser energy 6.375 μJ , 1/e2 radius 15 μm , pulse width 15 ns, absorptivity 0.3)

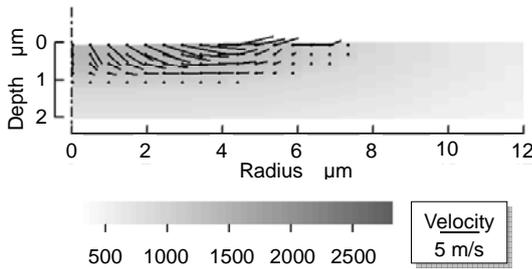


Fig. 9 Temperature distribution and flow of molten metal at time 30 ns in Fig. 8

ことができた。

4. ハードディスクのレーザテクスチャリング

ハードディスクでは、ディスクが静止したとき磁気ヘッドと凝着するのを防ぐため、CSS (Contact Start-Stop)ゾーンと呼ばれる領域に微小な凹凸をつける。レーザテクスチャリングはそのための技術で、パルスレーザを1ショットずつ照射しながら規則的に微細突起(バンプと呼ばれる)を多数作る。このときのバンプの形成メカニズムを明らかにするため、静止したアルミニウムに短パルスNd:YLFレーザを照射したときの熔融金属の流れと表面形状の時間変化を解析した。レーザビームの強度分布はガウス形とし、その中心軸に一致して深さ方向にz軸、初期表面にr軸をもつ二次元円柱座標系をとった。自由表面では蒸発に伴う気液界面の移動と、蒸発反跳圧力およびマランゴニ力(温度勾配に起因する表面張力)を考慮した。熔融池内部では、連続の式、ナビエストークスの式、エネルギー方程式を差分法によって解き、温度分布、熔融池流れの速度分布と圧力分布、および自由表面形状の時間変化を計算した。自由表面には

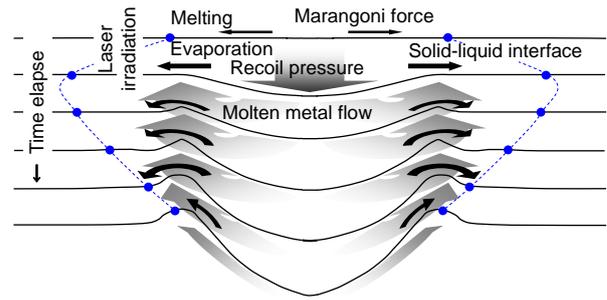


Fig. 10 Schematic of transition of surface profile in laser texturing

VOF法を適用し、物性値の温度依存性を考慮した。

パルスエネルギー6.375 μJ 、ビーム半径15 μm 、パルス幅15 ns、吸収率0.3のときの表面形状の時間変化を図8に、熔融金属の温度分布と流れのスナップショットを図9に示す。これらの解析結果を基にして作成した表面形状変化過程の模式図を図10に示す。レーザ照射中、蒸発反跳力が熔融金属表面を下向きに押さえつけるように働き、熔融金属を外側に押しやる流れが生じる。レーザ照射終了後も、それまでに蒸発反跳力によって誘起された流れはそのまま維持され、中央の陥没は持続する。この時点では蒸発を伴わないため、外向きに押し出された流れは熔融池周囲に盛りりを形成する。その直径は約10 μm である。冷却が進んで盛りりの外側が凝固するとき、盛りりの内側に働く外向きのマランゴニ力によって盛りりが促進される。約44 nsの時刻でバンプの最も高い部分が凝固し、これ以降高さの変化はない。その高さは初期表面上約35 nm、穴の深さは約145 nmである。

5. プリント基板のレーザ穴あけ

プリント基板のレーザ穴あけでは、一般に、バリアホールの底部に薄い樹脂層、いわゆるスミアが残り、配線に悪影響を及ぼす。このため、レーザ穴あけを行うときは、残存樹脂厚を把握することが重要である。さらに、加工穴形状はレーザ強度分布に強く依存するため、レーザが光学系を伝播する間の回折を把握することも重要である。そこで、スミアの残存と加工穴形状を理論的に推定することを目的として、結像光学系におけるレーザの回折と樹脂の蒸発を考慮した二次元軸対称非定常熱伝導解析を行った。

図11に示す結像光学系の回折解析を行った。図

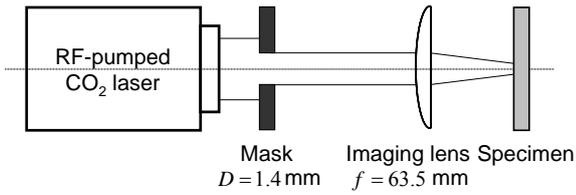


Fig. 11 Experimental setup for laser drilling of printed circuit board

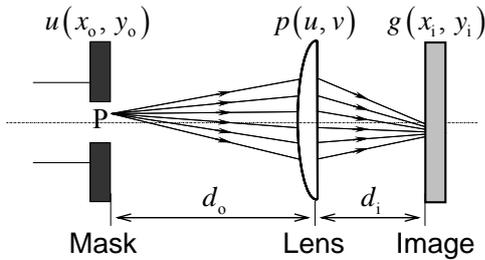


Fig. 12 Diffraction analysis model in imaging formation optical system

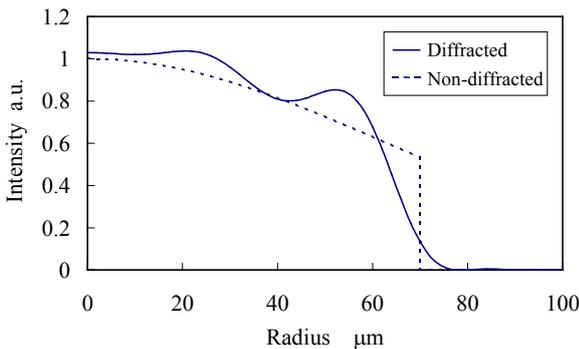


Fig. 13 Intensity distribution on resin surface obtained by diffraction analysis

12に、計算に用いた結像光学系の座標系と位置関係を示す。入力面における振幅分布 $u(x_0, y_0)$ の像面における振幅分布 $g(x_i, y_i)$ は、点像分布関数 $h(x_i, y_i)$ を用いて、

$$g(x_i, y_i) = \frac{1}{M^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u\left(-\frac{\bar{x}_0}{M}, -\frac{\bar{y}_0}{M}\right) \times h(x_i - \bar{x}_0, y_i - \bar{y}_0) d\bar{x}_0 d\bar{y}_0$$

と表すことができる。ここで、 $M = d_i/d_0$ は結像光学系の横倍率を表す。点像分布関数は、物体面上の点光源が発した光の像面上における回折像を表す。図13に、この回折解析により得られた像面(樹脂表面)の強度分布を実線を示す。比較のために、回折を無視した場合の像面の強度分布を破線を示す。

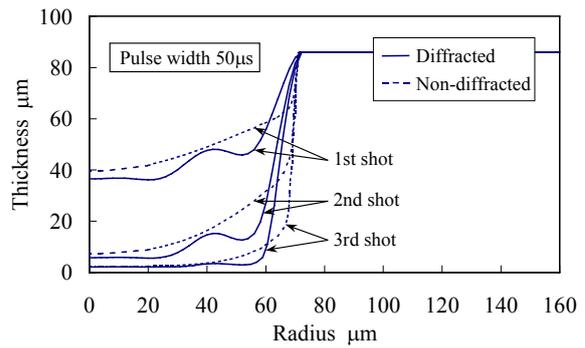


Fig. 14 Variation of via hole shapes when pulse width is 10 mJ, pulse width is 50 μ s and shot number is 3

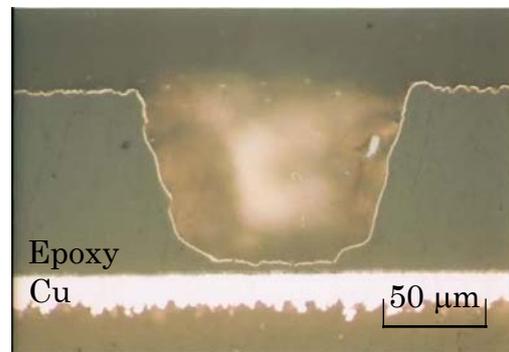


Fig. 15 Cross section of specimen (pulse width 10 mJ, pulse width 50 μ s, shot number 2)

レーザが照射されると、樹脂は固相状態のまま熱分解点に達し、表面から蒸発する。蒸発開始後、吸収されたレーザエネルギーは、樹脂内部への熱伝導と蒸発の二通りに使われる。樹脂表面が速度 dz_0/dt で蒸発するとすると、樹脂の蒸発速度は、次式で与えられる。

$$\frac{dz_0}{dt} = \frac{\int_t^{t+\Delta t} (I|_{z=z_s} - I|_{z=z_m}) dt + \frac{K}{C_p} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial H}{\partial z} |_{z=z_m} dt}{\rho L_v \Delta t}$$

ここで、 z_s は表面位置、 z_m は分解点領域の材料内部の境界位置、 I は光強度、 L_v は樹脂の蒸発潜熱、 Δt は数値計算で用いる時間刻みである。

パルスエネルギー10 mJ、パルス幅50 μ s で3ショットしたときの加工穴形状の変化を、レーザの回折がないとしたときの穴形状と比較して図14に示す。繰り返し照射の場合にも加工穴形状はレーザ強度分布を反映しており、特に $r = 40 \sim 60 \mu$ m 付近の底部形状および側壁の勾配において回折の有無による顕著な相違が見られる。図15は2ショット

ット目の試料断面写真である。回折を考慮したときの加工穴形状はこの断面写真とよく似通っており、回折を考慮しなかったときとの差は明らかである。

図 14 において、残存樹脂厚が吸収長に比べ十分厚いときは、レーザー強度分布が加工穴形状に反映される。残存樹脂厚が吸収長(約 16 μm)程度まで薄くなると、1 ショットあたりの除去深さが小さくなるとともに、 $r = 40 \sim 60 \mu\text{m}$ 付近の底部の凹凸が小さくなって、穴形状へのレーザー強度分布の反映のされ方が次第に小さくなる。これは、樹脂が薄いところほど吸収されるレーザーエネルギーが減少することと、金属への熱伝導の影響が大きくなるために除去量が減少するからである。その結果、穴の底にスミアが残ることになる。

6. おわりに

以上、熱伝導や熱応力、熱流体などの解析・シミュレーションに基づいて、レーザー熱加工現象の理解とモデル化、現象を支配する主要因子や制御因子の究明、加工品質の定性的、定量的予測などを行った研究の一部をいくつか紹介した。これらの研究は、実験による観察・測定の困難さや系統的分析の不足を補う上で有用な解析となった。拙著が読者各位に少しでも参考に供するところがあれば幸いである。

シリコンウェハの内部加工は浜松ホトニクス(株)との共同研究、ガラスのスクライブは三星ダイヤモンド工業(株)との共同研究の成果であり、後者は山本幸司氏(現在大阪大学博士後期課程(社会人ドクター))の貢献が甚大である。ハードディスクの

テクスチャリングとプリント基板の穴あけの研究は、それぞれ当時の大阪大学博士前期課程学生村山里奈氏(現在シャープ(株))、野口 悟氏(現在大阪大学博士後期課程)との共同研究の結果得られたものであることを付記する。

参考文献

- [1] Ohmura, E., Fukuyo, F., Fukumitsu, K. and Morita, H., J. AMME, **17** (2006), 381.
- [2] 大村悦二, 福満憲志, 内山直己, 渥美一弘, 熊谷正芳, 森田英毅, 第 66 回レーザー加工学会講演会講演論文集, (2006) 19.
- [3] 大村悦二, 福満憲志, 内山直己, 渥美一弘, 熊谷正芳, 森田英毅, 日本機械学会第 6 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2006). (掲載予定)
- [4] Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H. and Ohmura, E., Proc. ICALEO2004, CD-ROM, (2004).
- [5] 山本幸司, 羽阪 登, 森田英毅, 大村悦二, 精密工学会誌, **71-9** (2005), 1157.
- [6] 山本幸司・羽阪 登・森田英毅・大村悦二, 日本機械学会論文集, C 編. (掲載予定)
- [7] Ohmura, E., Murayama, R. and Miyamoto, I., Proc. SPIE, Vol. 4088, (2000) 244.
- [8] 村山里奈, 大村悦二, 宮本 勇, 原 裕紀, 井上直樹, 溶接学会論文集, **18-3** (2000) 373.
- [9] 野口 暁, 大村悦二, 精密工学会誌, **71-10** (2005) 1296.
- [10] Noguchi, S. and Ohmura, E., Proc. 2006ISFA, (2006) 303.

放電による熱を利用した新しい表面処理

New Surface Modification Technology Applying the Heat Generated by Electric Discharges

秋吉 雅夫 (三菱電機株式会社)

Masao AKIYOSHI (Mitsubishi Electric Co.)

e-mail: Akiyoshi.Masao@cj.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

部品に要求される機能は、耐摩耗性、耐食性、弾力性、美観の高さなど、それらを使用する環境や条件によって異なっている。要求される性能に合わせた材料が選ばれ、部品が作られているが、要求される性能が複数の場合、それらすべてを満足する材料は存在しないことが多い。表面処理は、このような複数性能の要求を一挙に満足させるために広く利用されている。

金属部品に対する代表的な表面処理技術として、CVD (Chemical Vapor Deposition), PVD (Physical Vapor Deposition), 溶接および溶射などがある。CVD や PVD は炉に入れた部品をすべて同時に処理できるという特徴を生かし、量産品に対して適用されている。また、厚い被膜を形成できる溶接や溶射は、航空機エンジンや医療機器などに適用されている。しかし、これらの技術は、様々な問題を抱えている。CVD や PVD は被膜の不要な部分にマスキングなどの前処理を必要とし、生産ラインに組み込めないため、コスト高となってしまう。また溶接では、溶接部が局所的に加熱されるため、被加工物の変形や割れを起こす恐れがあり、生産工程で不良品を出してしまう。さらに、作業によって被膜の品質がばらついてしまう。

このような問題を解決するため、筆者らはパルス状の小さな放電を利用した新しい表面処理技術

(MS コーティング) を開発した^[1]。MS コーティングは、簡単な装置で金属またはセラミックスの被膜を形成でき、その被膜の品質は安定している。本稿では、MS コーティングの概要、形成される被膜の特性、アプリケーションの例を説明する。なお、MS コーティングは、航空機用ガスタービンエンジンの新しい製造技術として開発された。

2. MS コーティングの概要

2.1 MS コーティングの原理

MS コーティングの原理を図 1 に示す。MS コーティングは、電極を消耗させて被膜にするため、電極は消耗しやすくミクロサイズの粒子で構成されている。その電極と被加工物は接触しないようにサーボが取られており、その隙間は数 μm ~数十 μm になるよう制御されている。その隙間を絶縁性の加工液(油)が満たしている。電極と金属製の被加工物の間に電圧を印加し、パルス状の小さな放電を発生させる。放電開始直後のアーク柱の温度は 2000K 以上^[2]であり、その熱を利用して被膜を形成する。放電が発生した周囲の電極と被加工物の表面は、放電の熱によって熔融する。被加工物に形成される熔融域の直径は数十 μm ~数百 μm である。電極に形成される熔融域は、静電気力や放電によって生じた気流の影響で被加工物表面の熔融域に移動し、放電終了後に再凝固して被膜となる。放電が終了すると、数十 μs ~数百 μs 間、電圧を印加しない。その間に周囲の加工液によって電極や被加工物は冷却され、放電によって生じていたプラズマは消滅し、電極と被加工物の間の絶縁が回復する。このようなパルス状の放電を数十 kHz で繰り返し発生させ、厚さ数十 μm ~数百 μm の被膜を形成する。

2.2 MS コーティングの特徴

厚さ 2mm のニッケル合金板に $\phi 20$ の円形状の

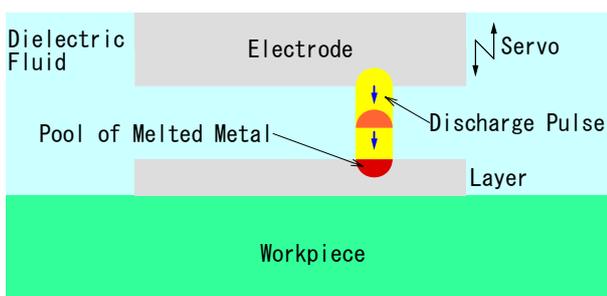
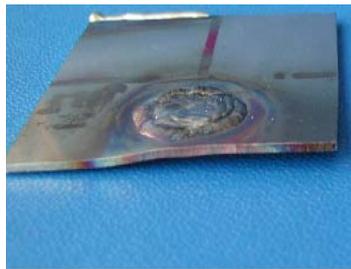
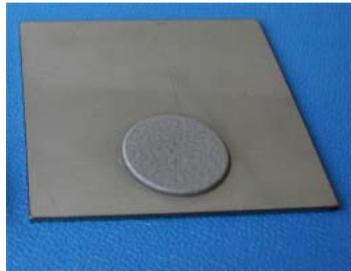


図 1 MS コーティングの原理

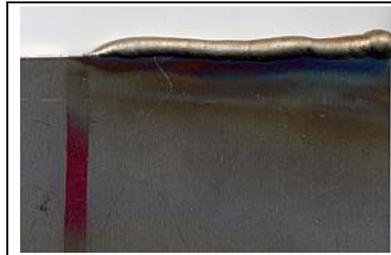


(a)溶接



(b)MS コーティング

図2 薄板上に形成された被膜の比較



(a)溶接



(b)MS コーティング

図3 薄板側面に肉盛りされた被膜の比較

コバルト被膜形成を溶接と MS コーティングで試みた例を図2に示す。設計値は厚さ0.4mmである。図2(a)は溶接、図2(b)はMS コーティングである。図2(a)は熟練工による溶接であるが、被加工物に変形し、側面には変色部が観察され、熱的に大きなダメージを受けていることがわかる。被膜表面にも大きな凹凸が存在し、厚みにばらつきがある。それに対し、図2(b)のMS コーティングでは、変形や変色がまったく生じていない。表面も平滑で、厚みも均一である。また、繰り返し同じ被膜を形成しても、0.4mm厚みに対し、ばらつきは $\pm 0.05\text{mm}$ 程度である。

厚さ2mmのニッケル合金の側面に厚さ0.5mm程度の肉盛りを溶接とMS コーティングで試みた例を図3に示す。図3(a)は溶接、図3(b)はMS コーティングである。被膜の材質は、コバルトである。図3(a)では、板厚2mmより厚くなった余肉部が生じ、後処理で形状を整える必要がある。それに対し、図3(b)では、被膜の幅が板厚とほぼ同じであり、後処理がほとんど不要な状態である。

従来の表面処理技術との比較も含め、MS コーティングの特徴を以下に挙げる。

1)パルス状の放電を利用するうえ、放電によって加熱された部分は、周囲にある加工液で素早く冷却されるため、被加工物に入力される熱量は小さい。そのため、溶接のように被加工物の変形や割

れを生じない。

2)電極の形状がそのまま被膜形状として転写されるため、不要な余肉部が生じず、表面の研磨以外の後処理をほとんど必要としない。また、溶接やCVDで必要とされる被膜を形成させない部分へのマスキング処理などの前処理も不要である。

3)被加工物表面に形成されていた酸化膜などの不活性な面を放電の熱で溶融・除去し、活性な面と被膜が結合するため、CVDやPVDのように前処理せずとも密着力の高い被膜となる。

4)電極と被加工物の距離や放電電流などのすべての条件は装置によって制御されているため、安定した被膜を形成でき、作業者のスキルに寄らない。

5)装置はコンパクトであり、生産ラインに組み込むことができる。

2.3 コバルト被膜の特性

MS コーティングは、コバルト系、ニッケル系、鉄系、モリブデン系など様々な材質の被膜を形成できるが、ここでは航空機用ガスタービンエンジンで使用される耐熱合金の主成分であるコバルトの単体被膜の特性について述べる。

2.3.1 表面粗さと表面構造

コバルト被膜の表面粗さと研磨後のコバルト被膜とSKH51(工具鋼)の表面粗さを表1に示す。測定方向は、研磨方向である。Raは算術平均粗さ、Rmaxは断面曲線の最大高さである。研磨前のコ



図 4(a) コバルト被膜表面 (研磨後)

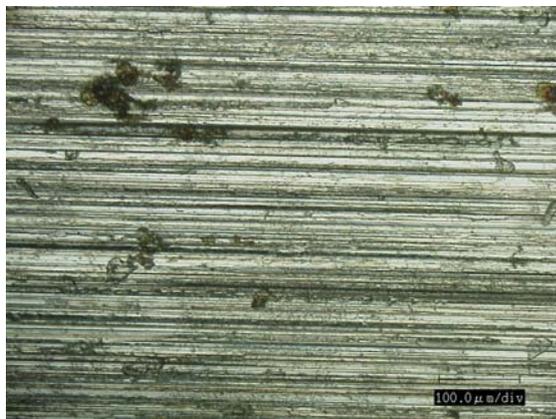


図 4(b) SKH51 表面 (研磨後)

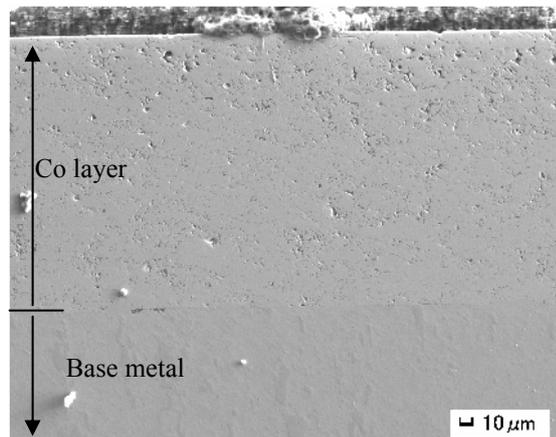


図 5 コバルト被膜断面

コバルト被膜の R_{max} は $45\mu\text{m}$ 以上であるが、被膜表面から $60\mu\text{m}$ 程度の深さまで研磨すると、 R_{max} が $3\mu\text{m}$ 程度の表面粗さとなり、製品や部品の表面として使用可能な範囲となる。ただし、SKH51 と比較して、研磨方向のコバルト被膜の表面粗さ R_a は 33.6%、 R_{max} は 17.8%大きい。

研磨したコバルト被膜と SKH51 の表面様相をそれぞれ図 4(a)、図 4(b)に示す。図は光学顕微鏡による 450 倍の像である。図中の左右に走る筋は、研磨痕である。直径 $10\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ 程度の空孔が、コバルト被膜により多く観察される。これらの空孔の存在によって、コバルト被膜の表面粗さが SKH51 より大きくなったと考えられる。

表 1 被膜と鋼材の表面粗さの比較

	R_a	R_{max}
Co layer (before grinding)	5.149	45.623
Co layer (after grinding)	0.199	3.088
SKH51 (after grinding)	0.149	2.622

2.3.2 断面構造

コバルト被膜断面の 300 倍の SEM 像を図 5 に示す。20×20 の S45C 上に形成したコバルト被膜を切断し、樹脂埋め後、研磨した面を観察した。SEM の加速電圧は 15kV である。空孔はほとんど無く、非常に緻密な被膜である。被加工物と被膜の界面も不明瞭であり、被膜が被加工物に接合されていることがわかる。

2.3.3 表面硬さ

マイクロビッカース硬度計を用い、研磨後のコバルト被膜と SKH51 の表面硬さを測定した。試験荷重を 50gf としたときのコバルト被膜と SKH51 の硬さを表 2 に示す。表中の値は、任意の 5 点の平均値である。コバルト被膜の硬さは 663HV で、SKH51 の約 2 倍、バルクのコバルトの約 5 倍であることがわかった。コバルト被膜の硬さが大きい原因は、結晶子のサイズや炭素量が影響していると考えられる。

表 2 被膜と鋼材の硬さの比較

	Hardness HV
Co layer	663
SKH51	334
Co (metal)	130 ^[3]

2.3.4 定量分析

被膜を表面から定性分析すると、コバルトと炭素で構成されていることがわかった。加工液は、絶縁性が必要であるため、油を使用している。放電の熱によって、その油は炭素や水素に分解され、炭素は被加工物に付着してその表面で金属間化合

物を形成することがある^[4]。コバルト被膜中の炭素も加工液である油が分解され、被膜中に含有したと考えられる。

被膜に含まれる炭素量を EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) で測定した。通常のコバルトの特性 X 線強度を基準値とし、コバルト被膜中のコバルト量を求めた。また、鉄中に 0.7wt% の炭素を含有させた標準試験片の炭素量の特性 X 線強度を基準値とし、コバルト被膜中の炭素量を求めた。加速電圧を 15kV、ビーム径を 5 μ m、測定時間を 10sec として任意の 5 点を計測した。それらの値の算術平均値を表 3 に示す。平均で 1.49wt% の炭素を含有していることがわかった。鉄鋼材の場合と比較すると鑄鉄と同程度の炭素量である。

表 3 コバルト被膜中の組成比

Co wt%	C wt%
98.51	1.49

2.3.5 結晶構造の解析

X 線回折分析で炭素を含んだコバルト被膜の物質を同定した。X 線源には CoK α (30kV, 100mA) を用いた。20 \times 20 の S45C 上に形成された 16 \times 16 のコバルト被膜表面の X 線回折分析結果を図 6 に示す。10 \times 10 程度の広い被膜表面から得られた回折線である。図の中段が CoC $_x$ のピーク位置、下段が面心立方構造のコバルト (β Co) のピーク位置を示す。立方晶系の通常のコバルトより低角度の立方晶系の CoC $_x$ に一致した回折線が得られた。また、Graphite のピークは存在せず、コバルト被膜中に Graphite は析出していないことがわかった。通常のコバルトは常温では六方晶 (α Co) で安定

であるが、722K 以上で面心立方構造に転移する^[5]。コバルト被膜の表面が放電の熱によって急加熱され熔融し、放電が終了した後、処理部の周囲にある加工液によって急冷され再凝固するという被膜形成過程であるため、コバルト被膜は六方晶に転移できずに面心立方構造となったと考えられる。また、コバルトの炭化物としては、Co $_3$ C と CoC $_2$ が知られている^[3]が、いずれも斜方晶であり、かつ Co $_3$ C は不安定である^[3]ため、CoC $_x$ が炭化物として存在する可能性は低い。以上より、コバルト被膜は炭素がコバルト中に固溶している状態であり、コバルト原子とコバルト原子の間に炭素原子が侵入し、コバルト原子間距離を拡大させたため、コバルト被膜のピークが立方晶系の金属コバルトより低角度側にシフトしていると考えられる。このように焼き入れされた鉄と同じように格子の歪みがコバルト被膜にも残り、コバルト被膜の硬さが通常のコバルトの 5 倍となったと考察できる。

また、X 線回折分析から結晶子径を求めた。X 線の回折線は結晶の微細化に伴いブロードになる。Scherrer の式によれば、結晶子径 D は半値幅 β を用いて次式のように表される^[6]。

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

ここで、 K は Scherrer 定数 (=0.94)、 λ は X 線の波長 17.8897nm、 θ は回折線のブラッグ角度である。表 4 に X 線回折線の 2θ と半値幅および上式より算出された結晶子径を示す。一般的なスチールの結晶子径が 10 μ m \sim 20 μ m であるのに対し、コバルト被膜ではいずれの結晶面方向も 10nm 程度の非常に小さい結晶子径である。急加熱・急冷によって生成させるコバルト被膜は 10nm 程度の微小な結晶子によって構成されていることがわかった。

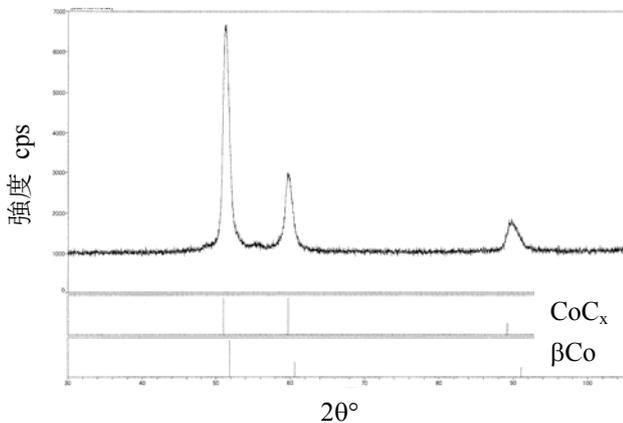


図 6 コバルト被膜の回折線

表 4 コバルト被膜の結晶子径

Crystal face	Angle of the peak $2\theta^\circ$	Half bandwidth β°	Diameter of the crystallite D nm
(111)	51.329	0.852	12.5
(200)	59.754	1.055	10.5
(220)	89.881	1.738	7.8

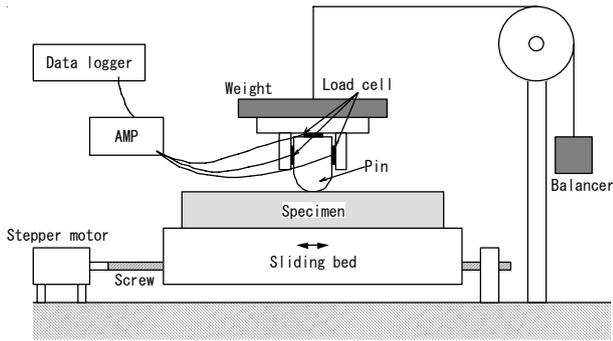


図 7 往復摺動試験装置の構成

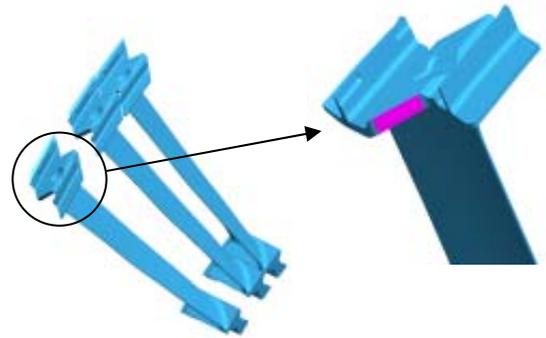


図 10 低圧タービンの MS コーティング適用部

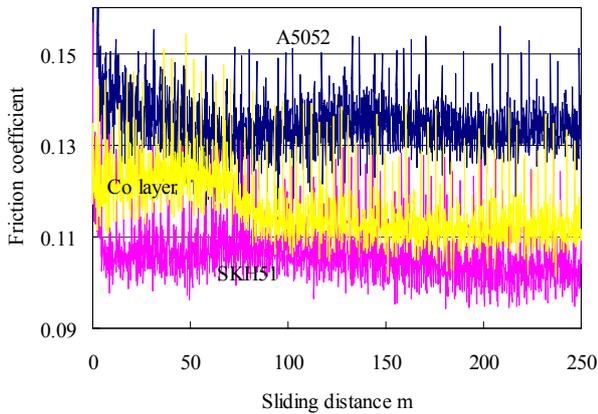


図 8 コバルト被膜, SKH51, A5052 の摩擦係数

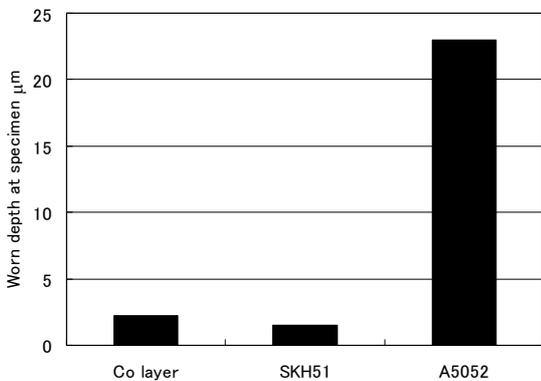


図 9 コバルト被膜, SKH51, A5052 の摩耗深さ

3. アプリケーション例

3.1 アルミ部品の耐摩耗性向上

硬いコバルト被膜を摺動部分に形成させると、部品の耐摩耗性を向上できる可能性がある。そこで、耐摩耗性は低いが、軽量化のために広く使用されているアルミ (A5052) 上にコバルト被膜を形成させ、被膜の耐摩耗性を摩擦・摩耗試験で評

価した。なお、溶接や溶射などの従来の表面処理技術では、アルミ上に被膜を形成することは困難である。

摩擦・摩耗試験は、ピン-プレートの往復摺動方式とした。装置の外略を図 7 に示す。半径 8mm の半球状の静止したピン先端が往復移動する試験片と接触している。試験片を取り付けた台がステッピングモータとボールネジによって往復移動する。往復移動する振幅を 50mm、移動速度を 50mm/s とした。ピンの上部に錘を載せ、接触部に荷重を負荷する。錘の重さを 3kg とした。試験片表面に潤滑油を十分に塗布した後、室温で試験を実施した。潤滑油には、リニアアルキルベンゼン (LAB) を主成分とし、極圧添加剤であるトリクレシルフォスフェート (TCP) を重量比で約 3% 混合したものを使用した。5000 回往復後、試験を終了し、被膜の摩耗量を調査した。ピンの材質は、焼き入れした SKH51 とした。その硬さは 780HV である。

試験開始からの摺動距離に対する A5052 上のコバルト被膜, SKH51, A5052 の摩擦係数を図 8 に示す。コバルト被膜は 0.111, A5052 は 0.135, SKH51 は 0.102 程度で安定する。摩擦係数は SKH51, コバルト被膜, A5052 の順に高くなった。

500m 摺動後の各試験片の摩耗深さを図 9 に示す。コバルト被膜と SKH51 の摩耗深さはほぼ同じであり、A5052 が最も多くなった。コバルト被膜の摩耗量は A5052 の 1/5 程度であり、コバルト被膜を A5052 上に形成すれば、A5052 の耐摩耗性を 5 倍向上できることがわかった。

3.2 航空機エンジンの低圧タービンへの適用

航空機用ガスタービンエンジンの製造や補修において、従来、溶接や溶射などの表面処理が利用



図 11(a) 溶接されたタービンプレード

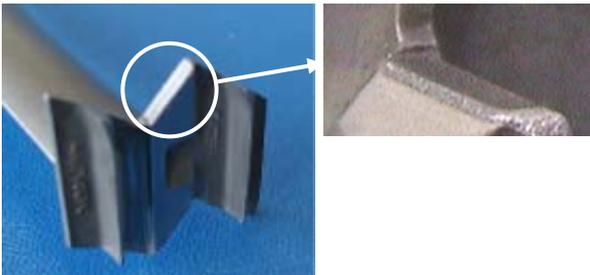


図 11(b) MS コーティングされたタービンプレード

されている。現工程の処理時間の短縮と低コスト化のため、図 10 に示す低圧タービンの連結部への MS コーティングの適用が検討されている。

低圧タービンの隣り合うブレードは、回転中に連結部で擦り合ってお互いに摩耗する。摩耗を抑制するため、従来は溶接でコバルト合金被膜を形成していた。溶接後のタービンプレードの様子を図 11(a) に示す。大きな余肉部ができており、形状だし加工、表面仕上げ等の後処理が必要である。

同じ位置に MS コーティングで被膜を形成させた。その様子を図 11(b) に示す。被膜の形状は被加工物と同じであり、形状だし加工等は必要ないことがわかる。前処理工程の削減、後処理工程の短縮によって、MS コーティングは、溶接の 1/2 程度のリードタイムとなる。

4. おわりに

本稿では放電の熱を利用した新しい表面処理技術 (MS コーティング) について紹介した。MS コーティングは、パルス状の放電を利用するうえ、放電によって加熱された部分は、周囲にある加工液で素早く冷却されるため、被加工物に熱的なダメージを与えず、被加工物との高い密着を持った被膜を形成できる表面処理技術である。さらに、前処理・後処理がほとんど不要であり、安定した品質の被膜を形成できる。今後、部品加工には欠かせない表面処理技術の一つとなるよう普及を進めていく。

謝辞

MS コーティングの開発は、石川島播磨重工業の落合氏をはじめ多数の関係者との共同によって実現できた。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- [11] 秋吉雅夫ほか：放電を利用した金属被膜形成技術に関する研究，2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2004) 571.
- [12] 橋本浩明，国枝正典：分光分析による放電加工アークプラズマの温度変化の観察，電機加工工学会誌，31，68 (1997) 32-40.
- [13] 金属データブック：日本金属学会編，丸善(株)。
- [14] 塚原秀和，南久，増井清徳，出水敬，曾根匠，放電加工によるチタンの表面改質，電気加工学会，Vol.33，No.74，1999.
- [15] 化学便覧基礎編 I：日本化学会，丸善(株)
- [16] 村松源太郎訳 新版カリティ X 線回折要論：アグネ

光ファイバ素線線引き過程における伝熱

Heat Transfer in Optical Fiber Drawing Process

福谷 和久 (神戸製鋼所)

Kazuhisa FUKUTANI (Kobe Steel, LTD.)

e-mail: k-fukutani@kobelco.jp

1. はじめに

本稿では、まず長距離の通信用途に一般的に使われている石英系光ファイバの製造工程の概要を説明する。つぎにそのうちのファイバ素線線引き工程における伝熱の特徴と、生産性の向上およびファイバの特性を両立させるための課題および対策について解説する。

2. 光ファイバ線引き過程

2.1 石英系光ファイバケーブル製造工程の概要

長距離の光通信で使われる石英系光ファイバケーブルの製造工程は、上流から順に (1) プリフォーム (母材) 製造, (2) 光ファイバ素線線引き, (3) ケーブル化に分けられる (図 1)。それぞれの概要を、文献 [1] から [4] を参考に、以下に説明する。

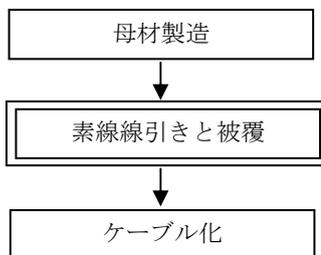


図 1 石英系光ファイバケーブルの製造工程

(1) プリフォーム (母材) 製造 プリフォームはほぼ合成石英からなる棒状のガラス母材で、外径は 50 から 80 mm 程度、長さは 1 m 程度である。製造方法には OVD 法, MCVD 法, VAD 法などがある。これらの方法では、酸水素バーナーなどをもちいて多孔質の合成石英の塊が作られた後、加熱して焼結することによってプリフォームが製造される。これらの方法は対流、輻射、燃焼など伝熱に関係する現象面でも興味深い。ファイバには光信号を伝えるために半径方向に屈折率の分布

が付けられるが、プリフォームはそれと同じ分布をつけて製造されている。その分布は合成石英に他成分を添加することによって作られている。(屈折率分布の詳細については文献 [1] から [4] を参照頂きたい。)

(2) ファイバ素線線引きと被覆 加熱炉内でプリフォームを高温に加熱して熔融させ、長手方向に張力をかけて変形させたあと、冷却され所定の外径のファイバ素線とされる。この後、表面に保護のための樹脂コーティングがされて巻き取られる。この工程は次節で詳細に説明する。

(3) ケーブル化 ファイバ素線は、テープ状にまとめられるなどした後、強度部材、保護部材とともにケーブル化される。ケーブルの構造はケーブルの用途、メーカ、国などによりことなる。詳しくは文献 [1] から [3] を参照いただきたい。

2.2 光ファイバ素線の線引きと被覆の過程

石英系の光ファイバ素線の線引きでは、プリフォームを加熱炉内のカーボンヒータなどで加熱して熔融させ、長手方向に張力をかけることにより変形させた後、冷却し、所定の外径のファイバが製造される。加熱炉内のプリフォームの変形は一般に「ネックダウン」と呼ばれている。冷却されたファイバの表面には、保護のために紫外線硬化性樹脂などが被覆される。炉内の雰囲気を維持するために、炉内には不活性ガスが連続的に供給されている。またこのガスには化学反応などにより炉内に生じた微粒子を炉外に流出させる役割もある。この過程の模式図 (文献 [1] から [3] をもとに作成) を図 2 に示す。近年、短距離のデータ通信用途で注目を集めているプラスチック光ファイバ^{[5][6]}の製造工程にも同様の線引き過程が使われている。

加熱炉内の石英の温度は 2300 K 以上、対応する合成石英の粘性は 1×10^4 から 1×10^5 Pa s 程度のオーダーである。線引きの速度は 15 から 20 m/s 程

度である。プリフォーム外径は 50 から 80 mm 程度のものが主に用いられている。被覆前のファイバ素線の外径は通常 0.125 mm とされている。計測されているのは、加熱炉のヒータ温度、線引き後のファイバ外径、樹脂被覆後の外径、樹脂被覆後のファイバ張力、プリフォーム送り速度あるいはファイバ線引き速度などである。これらを元に、ヒータ温度や、ファイバ外径を所定の値に保つためヒータ出力あるいは線引き速度などに対してフィードバック制御が行われている。また後述するようにファイバの外径変動が小さくなるよう供給されるガス流量が設定されている。ただし炉内のプリフォームの温度分布やネックダウン形状は測定が困難であることから測定されていないことが多い。

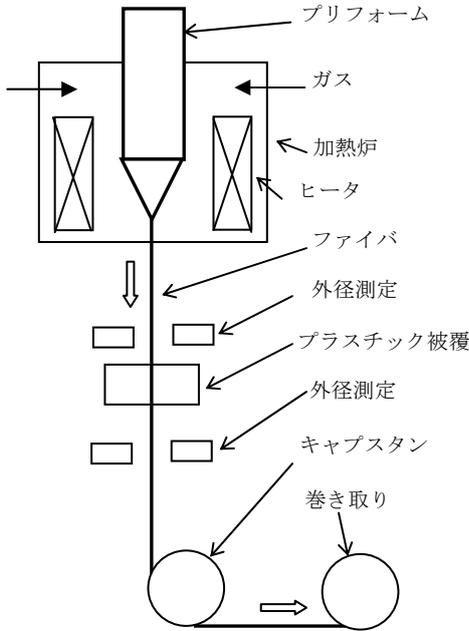


図 2 光ファイバ素線線引き過程の模式図

力とすることが必要であることが知られている。
 b) はファイバの特性を安定させるとともに、ファイバ同士をつなぐときの位置基準とすることからである。外径は基準の 0.125 mm に対して、 ± 0.0005 mm の範囲内に納めることが必要とされている。またこの工程の生産性向上のためには、
 1) 大外径のプリフォームからの
 2) 高速度での
 線引きが従来から要求されている。

線引き工程の伝熱としては、ヒータからプリフォームへの輻射伝熱、プリフォームから炉内、炉内ガスへの対流伝熱、プリフォーム内の熱伝導などがある。またこれらにより決まるプリフォームの温度分布とネックダウンの形状は連成しており、物理的に複雑な現象である。これらの模式図を図 3 に示す。プリフォームがヒータにより加熱される領域では輻射が支配的であり、下流でその温度が下がってくると、輻射と対流の双方が影響する範囲があり、さらに下流の冷却では対流が支配的となる。ここで炉内ではガスの温度差から生じる自然対流や、プリフォームあるいはファイバの移動に伴う流れなどが影響しあうため、複雑で不安定な流れが形成されやすい。

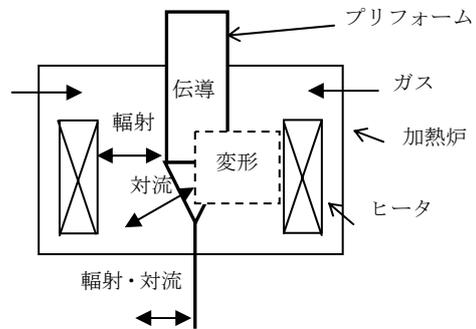


図 3 光ファイバ線引き工程における伝熱と変形の模式図

3. 光ファイバ素線の線引き工程における伝熱に関連する問題と対策

3.1 線引き工程への要求と線引き工程における伝熱

線引き工程において製造されるファイバ素線へ要求される特性は、

- a) 光学特性が一定していること
 - b) 外径が一定していること
- である。a) のためには線引き張力を所定の一定張

先の要求を満たすことが難しい原因の一つは、伝熱とプリフォームの変形が連成するとともに、図 4 に示すように石英の粘性の温度依存性が大きいことにある。たとえば 2300 K での温度差 1 K に対応する石英粘性の差は約 1 %ある。これは一般的な液体などに比べると極めて大きい。この特性のため、プリフォームの雰囲気熱的条件と加熱炉前後のプリフォームの変形は強く連成する。

定常的には、ネックダウンの形状とそれに必要な張力は加熱冷却条件から決まるプリフォームの温度分布により決定される。また非定常的には、プリフォームの熱的な雰囲気の変動すると、それとの間の交換熱量が変動してプリフォームの温度と粘性が変動することから、プリフォームが非定常に変形しファイバの外径変動が現れる^[8]、と経験的に推定されていた。ここでガス流量を変化させると、外径の変動幅が変わることから、熱的な変動としてはガス流れの変動にともなう熱伝達率の変動が支配的であるとされていた。しかしながら理論的には十分に検討されておらず、熱的な雰囲気の変動とファイバ外径変動の関係は明らかではなかった。

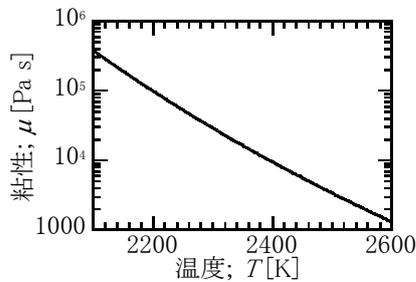


図4 石英ガラスの粘性の温度依存性^[8]

先の生産性向上の要求を満たすために、熱的な条件を一定として、プリフォームを大径化する、あるいは線引き速度を高速化すると、線引きの張力は増加し、ファイバ素線に必要な特性が得られなくなる。したがって、これらのときに線引き張力を一定として特性をえるためには、ヒータ温度を上昇させるか、ヒータ長を長くする必要がある。従来、これらに対応する条件は実験的に決められており、決定に手間と時間がかかるという問題があった。また大径プリフォームの線引き、あるいは高速の線引きでは、先のプリフォームの熱的な雰囲気変動によると思われる外径変動が生じやすくなり、実験的な試行による加熱炉設計、ガス流れと流量調整では十分に外径変動を抑えきれなかった。

近年のプリフォームの熱流動と変形、あるいは炉内のガス流動に関する研究により、線引き条件と線引き張力の関係、線引き条件とネックダウン形状の関係、炉内の熱伝達の変動条件とファイバ

外径変動の関係などが明らかにされてきた^{[9][10][11]}。これらにより先のファイバへの要求特性を満たしつつ、大径プリフォームから高速の線引きが可能な装置を設計することが可能となった。線引き速度は10年前の3倍程度が実現されている。さらにこれらの研究はファイバ品質の向上にもつながった。以下では、その内容を、線引き張力・ネックダウン形状とファイバ外径変動にわけて説明する。

3.2 線引き条件と線引き張力およびネックダウン形状の関係

従来から、文献 [12] をはじめとして文献 [13] など、光ファイバの線引き過程に関する研究が知られていた。しかしながら現在の工程に比べると、小径 (10 mm 程度) のプリフォーム、低速 (1 m/s 前後) の線引きを対象としている、数値解析ではプリフォームの変形と温度分布が連成していないなどの問題があった^[8]。

筆者らは、短計算時間で加熱冷却条件と線引き張力の関係を検討しうる、計算方法を開発した^[8]。その特徴は、この過程の力の釣り合いが線引き方向の1次元であることを考慮して、力の釣り合いを1次元で、エネルギーの釣り合いを軸対称の2次元であつかうことにある。これによりこれらを連成させつつ、計算の時間を大幅に削減した。

計算結果の例として線引き速度と線引き張力の関係を図5に示す。線引き張力は線引き速度にほぼ比例する。しかし線引き速度の上昇にともなって、図の下方にずれた。これは線引き速度が上昇すると、材料が高温に保たれる領域、すなわちネックダウン領域が下流に広がるためであった。

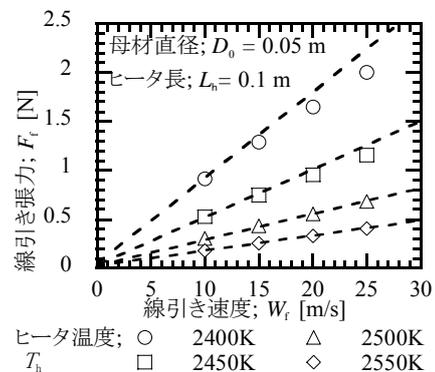


図5 線引き速度と張力の関係^[9]

また図6にはヒータ長さやネックダウン形状

の関係を示した。加熱炉のヒータが長いほど、ネックダウン部の高温の領域が広くなり、これにともなってこの部分の直径が大きくなることを明らかにした。これらのように測定が困難である、ネックダウン形状やその温度分布の予測が可能となった。

この計算方法をもちいて、線引き条件と線引き張力、ネックダウン形状の関係について体系的な検討をおこなった^[9]。これにより、高速の線引き速度、大径のプリフォームに対応した、加熱炉のヒータ長さ、温度などの基本設計が短期間で可能となった。またプラスチックファイバの加熱炉についても同様の検討を行い、高速線引きのための加熱炉の基本設計をおこなった^[14]。

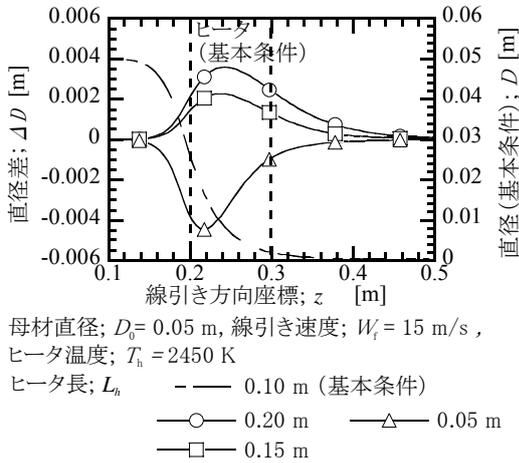


図6 ヒータ長さとネックダウン形状の関係^[9]

3.3 炉内ガス流れとファイバ外径精度

線引き過程における外径変動の主な原因の一つは、先に述べた加熱炉内の熱的な雰囲気の変動であり^[8]、雰囲気とプリフォームとの間の伝熱量の変動にともなって、温度と粘性が変動し、ネックダウン部分の変形の状態が変動した結果が、ファイバの外径変動として現れると推定されていた。この外径変動には長周期変動と短周期変動があることが知られている。長周期変動は、線引き速度のフィードバック制御により除去できる。これに対して、短周期変動は炉内のガス流れの変動が原因と推定されており、ガス流れを安定させることによりこれを取り除くことができる^[8]。これらの外径変動と制御の効果の模式図を図7に示す。

この図は文献 [8] を参考に作成した。

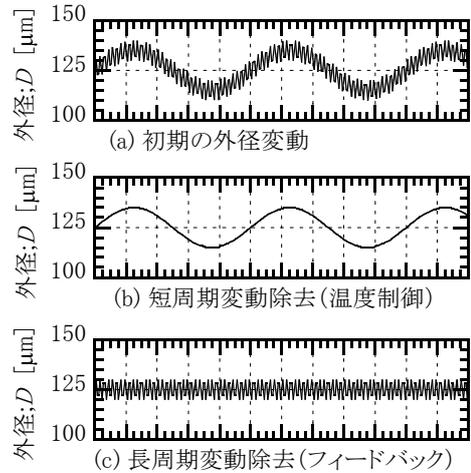


図7 ファイバ素線外径変動と変動制御の効果の模式図^[8]

筆者らは、ファイバ外径変動の摂動解法による数値解析手法を開発した。この計算によりプリフォームとガスとの熱伝達率変動の範囲と周波数が、ファイバの外径変動の大きさに与える影響を明らかにした。この計算結果の例を図8に示す。計算の結果として、短周期の外径変動を抑制するためにガス流れを安定させるべき領域が、ネックダウン領域の下流の外径が小さい領域であることを明らかにした^[11]。たとえば炉下部において熱伝達率が高周波数で10%変動すると、外径は約0.003mm変動すると計算されている。これによりガス流れを安定させる領域が特定でき、これに対応したガスの流量の設定、加熱炉の形状の設計が可能となった。

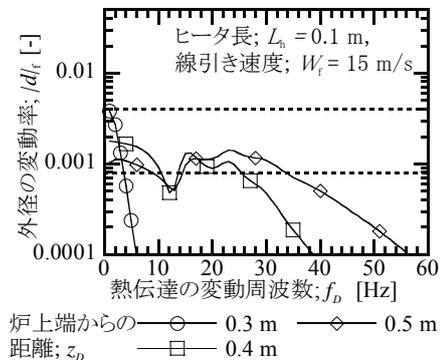


図8 外径変動率の熱伝達変動周波数への依存性^[11]

なお炉内のガス流れを安定させる方法は、各メーカーにより検討されており、メーカーにより対策がことなる。加熱炉内に供給するガスの種類、ガスの供給位置、流量、炉内の構造などに、工夫がされている。

4. おわりに

本稿では石英系光ファイバの製造工程と、光ファイバ素線の線引き過程における伝熱の特徴とファイバ特性の維持と生産性の向上を両立させる上での問題、その対策について概説した。

参考文献

- [1] Murata, H., Handbook of Optical Fibers and Cables 2nd Ed., Marcel Dekker (1996)
- [2] 稲田浩一, マルチメディアで夢を送る光ファイバの話, 裳華房 (1995)
- [3] 山下真司, 光ファイバ通信のしくみがわかる本, 技術評論社 (2002)
- [4] 末松安晴, 伊賀健一, 光ファイバ通信入門 改訂4版, オーム社 (2006)
- [5] Daum, W., Krauser, J., Zamzow, P. E. and Ziemann, O., POF Polymer Optical Fibers for Data Communication (2002)
- [6] プラスチック光ファイバコンソーシアム, ブロードバンド時代の光ファイバ The POF, エヌ・ティー・エス (2004)
- [7] Hofmaier, G. and Urbain, G., Sci. Ceram., 4, 25 - 32 (1968)
- [8] ニューガラスハンドブック編集委員会, ニューガラスハンドブック, 丸善 201 - 203(1991)
- [9] 福谷和久, 豊島史郎, 豊秀喜, 山本淳, 日本機械学会論文集C編, 69, 1670 - 1677 (2003)
- [10] 福谷和久, 豊島史郎, 豊秀喜, 山本淳, 日本機械学会論文集C編, 70, 1730 - 1736 (2004)
- [11] 福谷和久, 豊島史郎, 豊秀喜, 山本淳, 日本機械学会論文集C編, 69, 2403 - 2410 (2003)
- [12] Paek, U. C. and Runk, R. B., J. Appl. Phys., 49 (8), 4417 - 4422 (1978)
- [13] Vasilijev, V. N., Dulnev, G. N. and Naumchic, V. D., Glass Technology, 30 (2), 83 - 90 (1989)
- [14] Fukutani, K., Suzuki, H. and Usui, H., J. Chem. Eng. Japan, 39, 790 - 797 (2006)

加工液による工具の冷却と潤滑性

Relationship between Lubricity and Chilling Effect of Metal-Cutting Fluid

糸魚川 文広 (名古屋工業大学)

Fumihito ITOIGAWA (Nagoya Institute of Technology)

e-mail: itoigawa@nitech.ac.jp

1. はじめに

1.1 機械加工における熱の諸問題

切削加工は一般に塑性加工や接合加工に比べ精度の高い加工であり、製品の最終加工として欠かせない加工法である。汎用の工作機械を用いた加工でさえもミクロンオーダーの加工精度を達成することができるが、環境温度の変化や、軸受・ボールネジといったしゅう動機械要素の摩擦発熱による工作機械自身、工具、および工作物の熱ひずみは直接的に加工精度を悪化させるため様々な対策がなされている。その一つが工作機械各部の温度変化をモニターし、熱ひずみを補償する技術である[1,2]。中でも工作機械主軸軸受の発熱による主軸の伸びに対する温度補償は加工精度上重要であり、近年の高精度化への要求により、回転数変化による主軸と大気との熱伝達率変化を考慮した温度補償技術が開発されるに至った[2]。

一方、加工点における被削材料のせん断発熱、工具と被削材間の摩擦発熱も工具と被削材の熱膨張を招くだけでなく、工具摩耗や工作物材料の凝着、潤滑状態の悪化を招き、間接的に加工精度や表面仕上げの程度を悪化させる。代表的な機械構造材である鋼材の切削加工では、一般的な生産現場の加工条件でも工具と被削材の接触部温度は平均で700℃程度、最高温度点では1000℃を超える。このような温度条件では、高速度工具鋼の硬さは常温のそれが60-70H_{RC}なのに比べ、焼き戻し作用により20H_{RC}程度まで低下する[3]。超硬工具であってもバインダーであるコバルトの溶出による脆化[4]やタングステンカーバイドの酸化腐食が生じ工具の摩耗が進行する。こういった熱軟化や熱化学摩耗は工具コーティングを施したり、工具材料をセラミックとすることで減少させることができるが、発熱自体を低下させるわけではないため、凝着の問題や熱膨張による精度低下などすべてを解決できるわけではない。

1.2 切削加工液

古くから加工点の発熱の影響を低減させるために加工液が用いられてきた。言うまでも無く加工点の冷却がそれを用いる目的の一つであるが、工具と被削材の潤滑も加工液の重要な機能の一つである。工具と被削材の摩擦を低減することは、加工抵抗および工具摩耗の低減はもちろんであるが、加工点の発熱そのものを減少させる効果も大きく、切削加工の精度維持にとって重要である。

十分な量の加工液を加工点に供給すれば、精度維持の見地からは安全側であるが、近年環境保全の見地から生産現場での油剤使用量の削減が急務となってきた。この課題に対し、微量の油剤をミストにして加工点に供給するMQL法(Minimal Quantity Lubrication)が採用されるようになってきた[5]。この加工潤滑法はドリル加工などでは従来の切削加工液供給に引けを取らないが、冷却性の点で劣るため、延展性に富み、潤滑と冷却の助けなしには加工が容易でない5000,6000系アルミ合金の高負荷加工には適用が難しい。

これに対し微量の油剤と水のミストを用いる複合ミスト潤滑法[6]や油膜付き水滴加工法(OoW; Oil on Water droplet)は潤滑と冷却の両性能を有し、上記のアルミ合金を高負荷で加工することが可能であるばかりか、加工条件によっては大量の加工液を供給する場合よりも加工抵抗を減少させることができる[7-9]。

本稿ではこの潤滑法の効果とその潤滑メカニズムについて解説したい。

2. 油膜付き水滴加工液(法)の性能

50~100μm程度の水ミストに、水との界面張力が比較的小さい油剤のミストを接触させると、油剤は水面上に拡張する[10]。これを空気流により加工点に噴きつけることで潤滑・冷却を行うのが油膜付き水滴加工法である。油剤としては植物油

などエステル系の潤滑油を用いるが、これは鉱油に比べると金属への吸着活性が高く潤滑性能に優れ、かつ生分解性が高く環境にやさしい油剤である。図1はこの油膜付き水滴加工液(油剤: 30ml/h, 水: 1000ml/h)と従来の水溶性加工液(1200l/h), および MQL(油剤: 30ml/h)を用いてアルミ合金をエンドミルにより段加工した場合の加工力である。加工液は図2に示すように加工点近傍の工具表面に向けて供給する。油膜付き水滴加工液における油剤種は MQL と同一であるにもかかわらず、油膜付き水滴加工液の潤滑能力が高いことがわかる。また、植物油を乳化させた水溶性加工液よりもさらに加工力を低下できる。これらの結果は潤滑すべき表面に油剤が最初に接触し、かつ水ミストの蒸発潜熱による効率の良い冷却がなされていることを示唆する[11]。

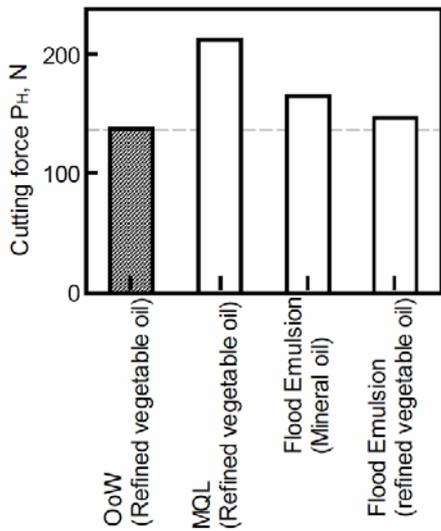


図1 アルミ合金 A6063S のエンドミル段加工における加工力(工具: f12 超硬エンドミル, 半径切り込み: 6mm, 軸方向切り込み: 9mm, 送り: 0.1mm/rev, 回転数 5400rpm)

図3(a)は直方体のブランク材(A5051)から図3(b)に示す円柱状突起を削り出した際の円柱高さの寸法誤差を示している。油膜付き水滴加工液を用いた加工は水供給量が水溶性加工液の 1/1000 程度であるにもかかわらず、同程度の誤差である。一方、MQL ではその 5 倍程度、誤差が大きくなっていることがわかる。これは油膜付き水滴加工液で

は水ミストによる冷却により被削材料および工具の熱膨張による過剰切り込みが抑制されたことを示している。

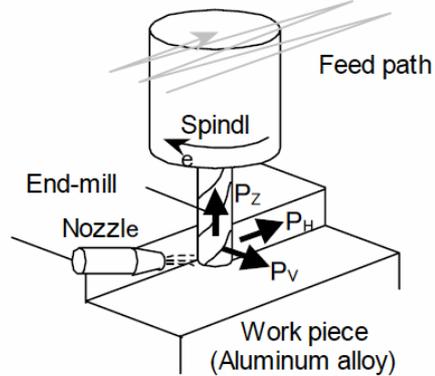
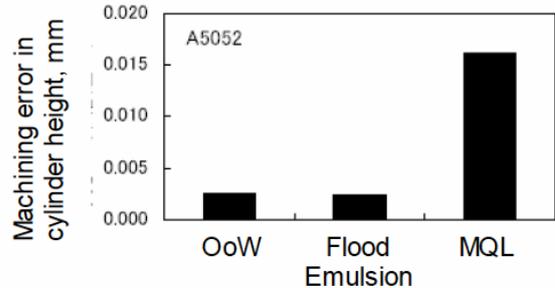
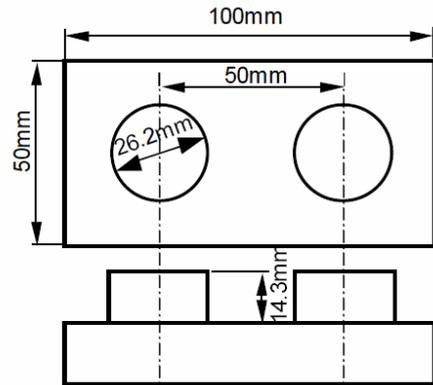


図2 エンドミル段加工と加工液供給方向



(a) 各種加工液による加工誤差



(b) 加工誤差評価用オブジェクト

図3 エンドミルによる削り出し時の加工誤差

3. アルミ合金加工時の潤滑メカニズム

切削加工では被削材料は非常に大きな塑性ひずみを受け、工具すくい面上で降伏状態にあり、接触応力は被削材料の降伏応力に達している。このような厳しい接触状態で、流体の動圧作用による負荷容量が望めない状況での潤滑形態は境界潤滑と呼ばれ、金属表面における油剤分子の吸着特性

や反応性が潤滑性能を左右する。潤滑剤分子の吸着特性や反応性は温度に大きく依存するから、切削における加工点の温度が潤滑性能に影響することは想像に難くない。

図4は油膜付き水滴加工液を用いたアルミ合金加工において、油剤量を30ml/h一定として、水ミストの供給量を変化させた場合の加工力変化を示している。水ミスト供給量の増加に対して初期に加工力は減少し、ある供給量以上では、ほぼ一定値に収斂することがわかる。ここで、水の蒸発潜熱と水ミスト供給量の積と、切削点における加工仕事率の比を横軸とし、水供給量が0の場合(MQL加工時)の加工力で正規化した比加工力を縦軸として、図4の結果を整理すると図5に示すように加工条件によらず、ほぼ同一傾向となることがわかる。また、ここには示さないが、油剤を用いず同量の水ミストのみを供給すると、加工力は減少するどころか増加する。横軸にとったパラメータの意味を水ミストの蒸発により奪った熱量と読みかえれば、これらの結果は切削仕事の10~20%程度の熱を奪うことにより、油剤の潤滑性能が十分に発揮される状態となることを示している。

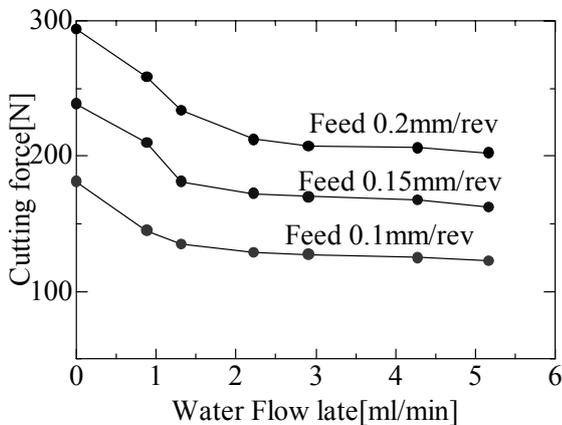


図4 油膜付き水滴加工法における供給水ミスト量と切削抵抗

ところで、切削仕事により生じた熱の流入量の分配を調べると、生産現場で採用される一般的な加工条件においては、切り屑へ6~7割、被削材料へ2割程度、工具への流入は1割に満たない[12]。このことから切削仕事の10~20%程度の熱を奪うことができれば油剤の潤滑性能が発揮されるのは、図2のように油膜付き水滴加工液を工具表面

に集中して供給していることから、工具表面が十分に冷却された結果であることが示唆される。

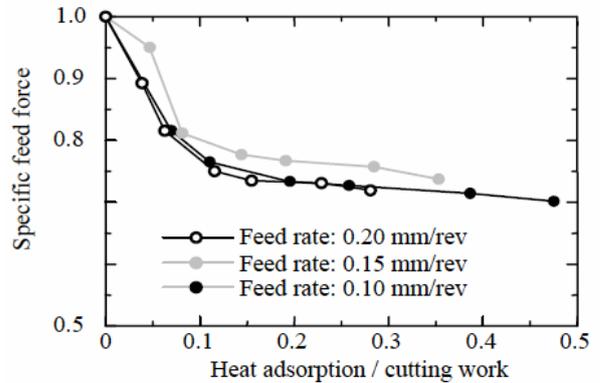


図5 油膜付き水滴加工法における吸熱効果と摩擦力の变化

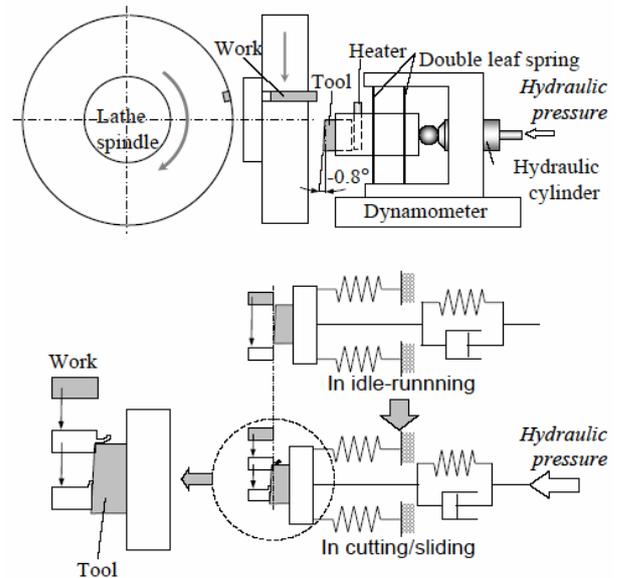


図6 新生面摩擦試験機

図6に示す摩擦試験機は切削同様に活性の高い材料新生面と工具表面の摩擦を実現できる。接触条件も切削同様に材料が降伏する応力状態となる。このような摩擦試験機を用いて工具表面温度を制御しながら摩擦試験を行った結果が図7である。

吸着活性の低い鉱油の摩擦力は低温域から無潤滑と大差ないのに比べ、吸着活性の高いエステル系の潤滑油である植物油やポリオールエステル(POE)では、200℃付近まで低摩擦が維持され、それ以上の温度域で摩擦力は急激に増加する転移温

度が存在することが分かる。この結果より実切削での工具表面温度が冷却により転移温度付近以下に維持されれば、潤滑効果が発揮されると予想される。

図8は油膜付き水滴加工液を用いてアルミ合金A6063の矩形ブロックを旋盤により断続旋削した場合の加工力の工具接線方向分力(送り分力)を、図5と同様のパラメータを用いて整理した結果である。図中の温度は工具表面から深さ方向1.0mm, 2.0mmの位置に埋め込んだ熱電対による内部温度測定結果から推算した。この結果から水ミストによる冷却により切削仕事の10~20%の熱を奪うことで、工具表面温度が転移温度を下回り、潤滑能力が向上することが確認できる。

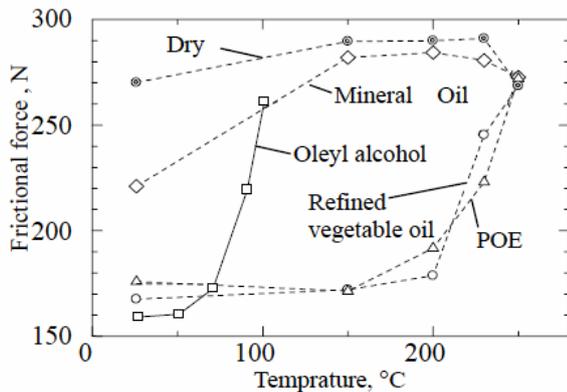


図7 新生面摩擦試験機による摩擦力の温度依存性測定結果

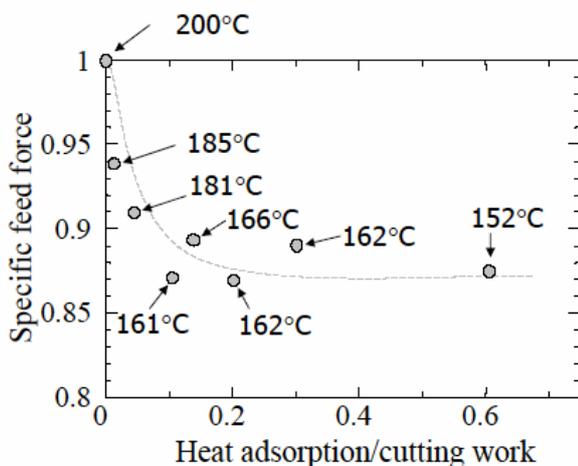


図8 実切削(A6063 断続旋削)における工具表面冷却による潤滑性能向上の確認実験結果

4. おわりに

切削加工に代表される機械加工に対する高精度化の要求は日々ますます高まっている。これらの要求に応えるためには、本稿で示した冷却による潤滑性の確保のみならず、工具の熱化学摩耗および被削材料の活性化による凝着の抑止が重要であり、冷却をはじめとする加工点における熱の制御が重要な技術となってくる。FEMを用いた温度場の予測やそれを用いた最適加工条件探索は、そのための有用な技術であると考えられる。本稿がそういった解析技術の境界条件のモデル化の一助になれば幸いである。

参考文献

- [1] 千田治光, 佐藤礼士, 森脇 俊道, 日本機械学会論文集 C 編 70-698 (2004) 2961-2965.
- [2] 千田治光, 佐藤礼士, 森脇俊道, 日本機械学会論文集 C 編 71-709(2005)2813-2818.
- [3] Show, M. C., In Cutting Tool Material Selection, SME, Dearborn, Mich.(1968)1.
- [4] Santhanam, A. T., Tierney, P. and Hunt, J. L., Cemented carbides, Metals Handbook 10th ed. 2, ASM(1990).
- [5] U. Heisel, M. Lutz, D. Spath, R. Wassmer and U. Walter, Production Engineering, 11-I (1994) 49-54.
- [6] 陳徳成, 鈴木康夫, 酒井克彦, 1999 年度精密工学会秋季大会講演論文集 (1999) 93.
- [7] Nakamura, T., Matsubara and T., Itoigawa, F., Proceedings of International Tribology Conference, Nagasaki (2000) 2269-2273.
- [8] 河田圭一, 中村隆, 松原十三生, 佐藤豊, 精密工学会誌, 69-9 (2003) 1342-1347.
- [9] Yoshimura, H., Itoigawa, F. Nakamura, T. and Niwa, K., JSME International Journal, 48 (2005) 723-729.
- [10] 吉村宏, 糸魚川文広, 中村隆, 丹羽小三郎, 日本機械学会論文集 C 編, 72-715 (2006) 941-946.
- [11] 慈道陽一郎, 金森英夫, トライボロジー会議 予稿集東京 2006-5 (2006)45-46.
- [12] Shmidt, A. O. and Roubik, J. R., Trans. ASME, 71 (1949), 245.

甲藤好郎先生ご遺稿
「沸騰の科学 (8)」
Science of Boiling (8)

甲藤 好郎 (東京大学名誉教授)

Late Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo)

8. 加熱管内の流れと沸騰

讚美歌の一節から

少し唐突ですが讚美歌の一節に、「むかし主イエスの捲きたまいし、いとも小さきいのちのたね、芽生え育ちて地の果てまで、その技を張る木とはなりぬ」というのがあります。これはキリストの教えや神の国が、いつか大きな広がりを見せて来たということへの讚美なのでしょうが、それはともかく前章で説明した非加熱管の話からの発展として、これからお話ししようとする加熱管内の流れは、管内における蒸気発生とともに、管の入り口から出口の方に向かって気液の状態変化が確実に広がりを見せて行くのです。

もっとも加熱管と一口に言っても、火力発電所のボイラーの蒸発管では、例えば火炎に直接面している管壁側とその反対側とで加熱の強さが違ってきます。また沸騰水型原子炉では、平行に並んでいる多数の発熱燃料棒の間を水が流れていますが、燃料棒の発熱は棒の中央部が強く、端の方では少し弱くなっています。しかし本章では本筋的な話だけに絞るため、前面にわたって一様に加熱されている一本の垂直円管を考えることにします。そしてその管の下端入口から上向きに、ある圧力、温度のサブクール液体（その圧力に対応する飽和温度よりも低い温度の液体）が定常的に流入しているとき、加熱管内を流れる流体にどんな状態変化が生じていくか、それを見て行くことにしましょう。

ついでながら、こうした現象について実験をしたときは、多くの場合、ステンレス鋼の円管を使い、その管壁に電流を直接流し管壁の電気抵抗による発熱を利用して流れを加熱するのです。もちろん通常の 100 ボルトとか 200 ボルトの電圧を

そのままかけると、電源のヒューズがとび、また電力が強すぎて管が融けてしまったりしますが、この場合のステンレス鋼管のように電気抵抗が極端に小さい場合には、電圧を普通の乾電池の電圧程度に低くし、その代り大電流を流す方法（低電圧大電流）で必要な加熱をすることが出来ます。なお精密な実験の場合には交流でなく直流を使います。なぜなら、たとえば 50 サイクルの交流を流すと、1 秒間に 100 回の割で管壁が周期的に加熱され、管壁上の蒸気発生が同じ周期で断続することになって、沸騰を伴う流れの状況に何らかの影響をもつかも知れないからです。

類似的な変化のパターン

さて一様に加熱される管入口から流れ込むサブクール液は管に沿ってしばらくの間、液相のまま加熱されながら温度が上がって行きます。一方、管壁の方も、そのサブクール液の温度よりほぼ一定の値だけ高い温度（その温度差で管壁から液体へ熱を与えて行く訳です）を取りながら、流れの方向に温度が上って行って、やがて沸点（飽和温度）より少し高い温度に達します。

そしてこの辺りでは、管壁に直接触れている附近の液体も飽和温度以上に過熱されていますから、いつか管壁上に核沸騰を生じ始めるわけで、この位置のことを「核沸騰開始点」と言います。ただし、この点から後流へかけて暫くの間はまだ、管壁近くを除く管内の大部分にサブクール液が流れています。従って、それに触れる蒸気はすぐに凝縮してしまうので普通、気泡や蒸気は管壁のごく近くにしか見られません。この状況は、2 章の終わりでお話した、サブクール・プール沸騰の時の「表面沸騰」にやや様子が似ていると言えるでしょう。

しかし管路に沿って流れる液体がさらに加熱されて行き、液体の持つサブクール度が少し減って来ると、管壁から液中へ離脱する蒸気泡が急には消滅しなくなりますから、管内に蒸気の蓄積が始まるようになります。そして、これを「正味蒸気発生」の開始と言いますが、これから以降、管内の液体の流れは気泡を含むようになり、7章（「流れのパターン」の項参照）に述べた「気泡流」の状態になって行きます。

そしてまもなく管内を流れる流体の温度は実質上、飽和温度に到達します。それゆえ、前述の核沸騰開始点からここに至るまでが「サブクール沸騰」だったのに対して、これ以後は「飽和沸騰」と言うこととなります。そして以後、蒸気の蓄積量が増して行くにつれて、流れのパターンは次第に変化し、7章（「流れのパターン」の項参照）で述べた「チェーン流」、「環状流」、またやがて「環状噴霧流」という風に順じ変わって行きます。そして、この最後の「環状噴霧流」では管内の中心部に蒸気の流れの一方、壁面上に薄い液膜の流れがあるわけですが、この液膜流は管壁の加熱を受けて蒸発し、さらに薄くなって行って、やがて消滅することになります。つまり、ここで管壁は乾いてしまい、そして環状噴霧流の領域が終わりを告げるようになりますが、この限界は考えてみると管壁が乾く点で限界熱流束現象の一形態に他ならず、管壁上の液膜流が乾いて生じるものゆえ特にドライアウトと呼ばれます。

さてここで再び温度の方に目を転じますと、まず流体の温度は前述の飽和温度に達した位置からこのドライアウト点までずっと、ほぼ飽和温度に保たれます。そしてこの間、非常に良好な熱伝達のため、管壁の温度も飽和温度よりやや高い程度の値—もちろん加熱の強さで高低に差はありますが—に保たれますが、しかしドライアウト点に来るや加熱面が乾いてしまうため、熱伝達が突然劣化、そのためその点以降、壁温は急上昇して高い温度になります。

そしてドライアウト点以降の流れは、多数の小さな液滴を伴った蒸気が管内を一杯に満たして流れるもので、このような流れを噴霧流（ふんわりゅう）と言います。この「噴霧流」は、前述のように高温加熱管の管壁が乾いた後に生じる高温加熱管の領域（ドライアウト発生後の領域という意

味でポストドライアウト領域と呼ばれます）に見られる流れのパターンであって、7章でお話したような非加熱管では見る事の出来ないものです。そしてこのポストドライアウト領域においては、管内を流れる蒸気は管壁からの直接加熱にさらされますから、飽和温度より温度が上がって過熱蒸気（飽和温度より高い温度の蒸気）になって行きます。また同時に、その蒸気に乗って流れている小液滴（これは飽和温度に保たれます）は、周囲の過熱蒸気からの加熱と、高温管壁からの熱放射を受けて蒸発し、やがて消滅するため、それ以降の流れは純粹に過熱蒸気だけの「単相流」に変ることになります。

現実に出会う加熱管内の流れの状況

前項では、加熱管内の流れの全般的なパターン（実はもう一つ追加すべき流れのパターン「逆環状流」がありますが、それについては後で触れることにします）を示すため、特別に管が長く、かつ加熱の強さが適当に低い場合を選んで説明をしたものです。実際には、与えられる条件によって、いろいろの状態を生じることになりますが、今それを見るため次のようにしてみましょう。すなわち、いま管の入口から常に同じ状態のサブクール液が流入するという条件の下に、まず ①管の長さ（あるいは流体の流量）を変えた場合、それから次に ②加熱の強さを変えた場合、この2つの場合のそれぞれについて管出口の流れの状態がどう変わるかを見てみます。

①「加熱管の長さを減少、または流量を増加した場合」

もし他の条件は一定のままにしておいて、いま加熱管の長さを短くする（あるいは流量を増加する）と、もちろん前項でお話した管内の状況変化の途中までしか変化は起こらないこととなります。つまり管出口の流れは、最初、管が長い場合は「環状噴霧流」ですが、管が短くなるにつれて「気泡流」など液体の多い流れに変わり、さらに管が短くなると、管内の沸騰は「飽和沸騰」から「サブクール沸騰」の状況に変わります。そして以後、さらに管が短くなると、やがて管壁表面近くだけに気泡や蒸気の見られる沸騰状態となり、ついに管出口が「核沸騰開始点」より上流の位置に来るよう管長が短くなれば、そのとき管内にあるのは、も

はや沸騰のないサブクール液の単相流だけになる訳です。

②「加熱を強める場合」

次に今度は十分に長い管で管長を一定にしておいて、管壁の加熱を強めて行くと、やがて管内にドライアウト点が生じ、それより後流にある管壁は赤熱焼損してしまうようになります。そしてそうなると、ドライアウト点以降の流れはもはや物理的に無意味になり、換言すれば管出口で丁度ドライアウトの発生する時が加熱の上限であって、それより熱流束の大きな加熱をするのは危険だということになります。そこで以下、この限界点以前の管内の流れだけに注目して考えることにしましょう。

いま、ある長い加熱管があつて、その管出口にドライアウト形式の限界熱流束の状態が前述のように生じているものとします。この時、仮に管出口から上流の方へ加熱管を少し切り詰めてみて下さい。当然のことながら、新しい管出口（前述の切り詰めによって出来た）ところで流体はまだ限界熱流束の状態に達しておりません。だから、この切り詰めた管の出口で限界熱流束の状態を起こさせるには、前よりもっと熱流束をあげる必要があります。換言すれば、この切り詰められた管の限界熱流束の値は前より高くなります。そしてこの簡単な原理は、一様加熱管の場合、何もドライアウト形式に限らず、他の形式の限界熱流束でも一般に適用できる訳です。なぜなら、一様加熱管の場合、限界熱流束の状態は常に管出口で始まるということが知られているからです。

要するに、加熱管を短くすると加熱を強めることが出来る訳ですが、実はこれと一緒に、前の①で述べたような管出口の流れの状況変化も伴って起こります。つまり管出口の流れは、次第に液体の多い流れになり、やがてサブクール沸騰の状態へと変わって行くのですが、それと共に管出口の限界熱流束も、そうしたいろいろの流れの状態に対応したものに変わって行くこととなります。なお加熱管内の流れに起こる状況変化として、加熱が強くなるとともに、管内の沸騰が弱い核沸騰の状況から強い核沸騰の状況（3章参照）へと移り変わって行くことも忘れてはならぬ事柄です。

加熱管内の限界熱流束の様相

前項で私たちは、加熱管出口のいろいろの流れの状況のもとに、それらに対応した限界熱流束現象が生じることを見ました。そこで以下、ここで限界熱流束にどんな性格の変化が生じることになるか、それについてごく簡単な説明をしておきましょう。

①「管が比較的長い（あるいは流量が小さい）場合」

長い管では一般に、低い熱流束のもとに徐々に発生する蒸気が管内に次第に蓄積されて行って環状噴霧流が作られ、その流れに付随する液膜流が管出口位置の管壁上で蒸発消滅するときに限界熱流束（ドライアウト形式）が発生します。そして管長が減るに連れて限界熱流束の値が上昇して行きます。なおここでの流れは環状流、つまり蒸気の流量割合の多い流れであって、従ってこの場合の限界熱流束は、加熱面のまわりに沢山の液体があり、そして強い核沸騰で生じる限界熱流束とは発生状況が非常に違います。また、現在のタイプの限界熱流束の発生にとっては、管内に「強い核沸騰」の存在は必ずしも必要ではありません。

②「中間の場合」

ところで、もっと管長をもっと短くすると、それに伴って限界熱流束の値が高くなって来ます。そして管出口における限界熱流束の発生メカニズムは、まだ前述の①の領域と同じドライアウト形式を保つものの、管内のもっと上流の部分に次のような新しい状況が生じるようになります。すなわち、熱流束が高くなるため「強い核沸騰」が生じるようになり、そして熱流束の上昇とともに加熱面上の「核沸騰液膜」の限界厚さ（4章「加熱面を覆う核沸騰液層の厚さ」の項参照）が急速に薄くなります。そのため、管内の環状噴霧流を構成している液膜流について、その厚さがこの限界厚さに支配されてどんどん薄くなるようになり、ひいては限界熱流束の値がそれだけ抑えられることとなります。従って、この状態に入ってからには管を短くして行っても、もはや限界熱流束は前述の①の領域ほどの上昇率では増大出来なくなります。

③「管がかなり短い（あるいは流量が大きい）場合」

しかし、さらに管を短くすると、前項でお話したように液体の流量割合の多い流れ、あるいはさ

らにサブクールの流れが管内全体を占めるようになります。そして熱流束が高いので、管出口まで「強い核沸騰」の状態に置かれ、従って5章で述べたプール沸騰の限界熱流束などに似たメカニズムで限界熱流束が発生することになります。もっとも現在は、管壁で限られた流路内を気液二相流が流れているのですから、気液の挙動と限界熱流束の発生メカニズムの間の関係が、プール沸騰の場合よりやや複雑化することはいうまでもありません。

限界熱流束の実験データの一般的な整理

一般に、沸騰に関する現象はすべて、複雑な気液の挙動を伴って起こるもので、これを理論的に厳密な形で表現したり記述したりすることは現在でも不可能に近いことです。けれども、もしそれが、かなりまとまりのある現象であるならば、適当なモデルを使って、現象の発生機構を説明したり理解することが出来る筈です。つまり、考えている現象がいろいろの条件の下に、ある程度統一的性格を持って現れることと、私たちがこの現象を物理的に理解できることは表裏一体の関係を持っています。

ところで、考えている現象がどの程度の統一的性格を持っているのか、それは広い条件範囲にわたる実験データを分析検討してみれば分かる訳ですが、沸騰のように複雑な状況の場合は、ただやみくもにやっても成果は上がりません。ではどうすればいいのか？それには前に7章(「管内の流れに生じる圧力損失」の項参照)で、どんな自然法則も「無次元数」の間の関係として表されるものだということをお話したことを思い出して下さい。つまり実験データの分析から適当な「無次元数」をいくつか探し出して、それらの間に何か法則性があるか否か検討する方がはるかに優れた方法ですし、また現象の理解のためにも助けになることになります。例えば前に5章(「限界熱流束の現象」の項参照)で、プール沸騰の限界熱流束の実験データの分析から、クタテラーゼが一般的な経験式を導いたことをお話しました。そしてこのクタテラーゼの成果が、この現象の発生機構に関するその後の研究を非常に助けたことは明らかです。

では、加熱管内の強制流動沸騰の限界熱流束については、どんなことになっているのでしょうか。

ここでは加熱管の長さや直径、管内の流量、管出口付近を流れる蒸気の流量割合など限界熱流束に関係しそうな因子の数が少なくありません。その上、前項で見たように限界熱流束発生の様相も単純なものではないのです。従って非常に広範囲にわたる条件下の限界熱流束 q_c の実験データを一般的な形に整理することは、必ずしも容易な問題ではないと言えます。

①「水の限界熱流束」

しかし加熱流路内の流れの限界熱流束について、その値の正確な予測は原子力発電所の設計やその他の実際技術面で非常に緊急かつ重要な問題です。そこで、特に重要な水の沸騰について、限界熱流束の実験データを経験式の形に整理する研究(なお整理式の代りに数表や図面の形で整理したものもあります)がいろいろ行われて来ました。そしてその中で最も単純な形式としては、例えば前項に見たように管出口の流れが蒸気の流量割合が多いものか、または少ないものかによって限界熱流束のメカニズムに大きな差が現れるという事実注目する方法です。管内の気液二相流において、そこを流れる蒸気の質量流量の割合 x (これは1と0の間の値をとります)を一般に「クオリティ」(これは英語の「質」という意味)と言い、気液の流れの割合から見た二相流の「質」を表す量になります。そして蒸気の多い高クオリティの流れでは限界熱流束の値が低く、逆に液体の多い低クオリティの流れでは限界熱流束の値が高くなると言った比較的分かりやすい傾向を手がかりに、あとは言わば手探りにデータの整理を試みるのです。そしてこれらの整理式は確かに実用的に有用なものです。現実問題としては水の限界熱流束データの整理だけに限られ(流体が水以外の物質になると適用できません)、限界熱流束の発生機構を一般的に考えるなどの目的には有用でないと言わざるを得ません。

②「混迷状態」

その上、限界熱流束というものに対する考え方について、歴史的に長い間、次のような状況にあったことを記しておくのも無意味な事ではないでしょう。すなわち5章(「気液相対速度の限界」モデルの項参照)でお話したようにプール沸騰の場合、加熱面から逃げる蒸気と、加熱面に向う液体と間の相対速度の限界が限界熱流束をもたらすと

いう考えが長い間、世界的に広く支配的な力を持ちました。ところが、この理論モデルは、普通の「プール沸騰」の場合は仮に説明出来ても、それ以外のモードの沸騰への拡張はまったく不可能という非常に奇妙な性格を持つものでした。従って、「プール沸騰」の発生原因をこれに依存して考える限り、「強制流動沸騰」の場合はプール沸騰とはまったく異なる限界熱流束発生メカニズムを考えざるを得なくなる訳です。また事実、そうした発生機構モデルがいくつか提案されても来ません。

しかし、ドライアウト形式の限界熱流束の場合は別として、プール沸騰の場合と同様に加熱面のまわりに多量の液体がある時の「強制流動沸騰」の限界熱流束が、「プール沸騰」のそれと少しの関連も無く、まったく別の機構で発生するというのも、何か納得のいかぬものを強く感じさせます。そしてそんな事情の下に、限界熱流束について論理的に何か閉そく的な、どうしようもない状態がかなり長い間続くことになりました。これは科学の研究の歴史上、興味ある事態の一つと言えるかも知れません。

③「各種流体の限界熱流束」

しかし最近では、その困難を乗り越えた道が一応拓かれ、まずプール沸騰についての新しい視点はすでに5章（「核沸騰層厚さの限界」モデルの項参照）でお話したところです。また加熱管内の限界熱流束の発生機構についても、すぐ前項において話したようなことが次第に明らかにされて来ました。そして、各種の流体および各種の状況下の限界熱流束がかなり統一的な視点から理解出来るようになった訳ですが、それと並ぶ形で、実験データの一般的な整理も進むようになって来ました。ここにはその代表例として、加熱管内の飽和沸騰の限界熱流束について、東京大学で求められた一般的な整理式について触れることにしますが、これは4個の特性領域のものから成り、それらに共通して次の形を取っています。

$$q_c / Gh_{fg} = \text{func}(\rho L \sigma / G^2 L_b, \rho u / \rho L, L_b / d)$$

ここに $\text{func}()$ はカッコ内の変数によって値が決まる意味で、つまり限界熱流束 q_c に関係する無次元数 q_c / Gh_{fg} の値が、右辺の3つの無次元数、つまり $\rho L \sigma / G^2 L_b$ (ウェーバー数と呼ばれる無次元数の逆数)、 $\rho u / \rho L$ (気体と液体の密度の比)、および

L_b / d (管長と管径の比) の関数として整理されています。なおここで G は管内を流れる液体の質量速度、 h_{fg} は蒸発熱、 σ は表面張力、また L_b は流体が飽和温度に達した位置から管出口まで測った長さです。

そしてこの式に含まれる4個の無次元数について特に重要なことは、これらが5章（「水平円柱加熱面上の限界熱流束」の項参照）で述べた比較的基本的な強制流動沸騰時の q_c の整理式に現れた無次元数と同じ形のものであり、また、ここには説明を割愛しますが加熱管内の環状噴霧流の状態変化をコンピューターで解析し、その限界熱流束を求める時に現れる無次元数とも共通性を持っていることです。また最後に、最近ではプール沸騰の限界熱流束の発生メカニズム（5章「核沸騰液層厚さの限界」モデルの項参照）を拡張する形で、加熱管内の強制流動沸騰の限界熱流束の説明も成功していることを付記しておきましょう。

加熱管内の流れに現れる膜沸騰

さて読者の皆さんの中には、これまでの説明から何となく、管内の流れには核沸騰だけしか存在せず、どんなに熱流束を上げて、プール沸騰で見たような膜沸騰の状況は起こり得ないという思いを持たれた人が多いかもしれません。振り返って見ると本章においてこれまで、限界熱流束の発生点以後の後流部分の流れに関し、熱流束が低いときは単相流的な噴霧流になること、また熱流速がもっと高い時は、その部分の流れは管壁の焼損のため実現せず考えても無意味であるという風な感じに話を進めて来ました。

しかしそれは話を解り易くするため故意にしたことで、そのため読者の皆さんに誤解を与えたとしたら許して頂かねばなりません。実を言うと、液体ヘリウム、液体水素、液体窒素、液化天然ガスなどきわめて低温の流体の流れなどでは、流体の飽和温度に比べて壁面がかなり高温になっても温度の絶対値自体がとても低いので、限界熱流束が生じてその発生場所から後流の管壁が少しも焼損を起こさず、そのまま耐えられることが少なくありません。従って、こうした例から見ても、膜沸騰の出現の可能性について考えてみる必要は十分にあり得ることになります。

そこでいま改めて、前々項でお話した限界熱流

束を、便宜上、次のような2形式に大別してみましよう。一つは、蒸気の流量割合の大きな高クオリティの流れ（環状噴霧流）に起こるドライアウト形式の限界熱流束、もう一つは液体が多量に流れる低クオリティの流れに起こる限界熱流束です。そして、これらの限界熱流束より下流部分の管内流れが、それぞれの場合にどのようなになるかを見てみます。

まず最初の形式の限界熱流束が生じる場合については、ドライアウト点以降の管内の流れが「噴霧流」の形であることを私たちはすでに知っています。この場合、気流に乗って流れている液滴は、流れの乱れのため管壁面に接近もしますが、管壁が高温のため蒸気膜に隔てられて普通は接触は出来ません。つまり壁面は液体で濡れずに乾いており、このような液滴と管壁との非接触状態は、すでに6章（「ラテン語の論文」の項参照）でお話した加熱面上に液滴を置く時のライデンフロスト現象とよく似たものです。そして、この両状態とも普通の感覚から言って、いわゆる膜沸騰と同一視するのはいささか無理がありましよう。

そこで問題は2番目の形式の限界熱流束の場合ですが、この時、前述のようにもし加熱管が焼損しないとすれば、限界点から下流の管内に低クオリティの流れ、つまり多量の液体の流れが残るわけです。そして限界点から下流では、高温の乾いた管壁に沿って薄い膜状の蒸気流が出来、そして管内の残りの部分を液体の多い低クオリティの流れが満たして流れる形式になるのです。

しかもこの流れのパターンは、誰でもすぐ気が付くように、7章（「流れのパターン」の項参照）で述べた普通の「環状流」に似ています。ただ管内に占める液流と気流の場所が「環状流」の場合の丁度逆になっているので、この流れを一般的に「逆環状流」と呼んでいます。それはともかく、この場合は膜沸騰の状態にあるとも言えることになります。つまり、こうして加熱管内の流れにも膜沸騰が生じ得る訳で、またこの「逆環状流」は、必ずしも低温流体の場合だけに起こるのではなく、次項に含めた項目③の中にも姿を現すこととなります。

リフラディングとクエンチ点

これまで加熱管内の定常的な流れと沸騰を見て

きましたが、終りに加熱管内に生じる非定常的な沸騰状態について少し触れておきましょう。

①「クエンチング」

一般に、高温の物体を液体で急冷することを英語でクエンチングと言います。従って英語では、鍋や刃物の硬さを増す時の「焼き入れ」のことも、また高温物体を液体中に入れるだけでなく、逆に高温の容器や流路内に外から液体を注入して急冷することも、すべて同じくクエンチングと言います。ただ日本では、後者の場合、つまり液体を高温の容器や流路に外から注入しておこなう急冷操作だけを「クエンチング」と言うのが普通です。そして、このクエンチングの場合、液体が流入して行く高温の容器や流路内で当然、非定常的な沸騰が発生することになります。

②「リフラディング」

前述のクエンチングは、高温の容器や流路を主体に考え、その壁面の急冷を指す言葉ですが、こうして急冷のため高温の容器に水を入れるにしても、その注水操作の方に注目して呼ぶ言葉もあります。すなわち、フラディング（冠水）がその一つですが、ただこれは7章（「フラディング現象」の項参照）でお話したフラディング（対向流限界）現象とまぎらわしい言葉なので、両者を混合しないよう特に注意して頂きたいと思えます。一方、何かの事故で空だきになった加熱装置（原子炉の炉心など）に水を緊急に注入するような場合は、事故以前に水につかっていたものを再び元に戻して冠水状態にすることになるので、これをリフラディング（再冠水）と言います。そして最近、前述の単純な注水だけのフラディング（冠水）の場合もこれに含めてしまい、すべてを一括してリフラディング（対向流限界）現象とはっきり区別が出来ますし、無用の混乱を避けるため、本書では以下これに従っておくことにします。

さて、いま簡単のため高温の垂直管の中に水を注入する場合を考えてみましょう。この場合、管内に流入した水はその付近の管壁を冷やししながら管内部の方へ進んで行くわけですが、そこで発生する蒸気は普通、上の方へ流れようとします。従って水が管下端から上向きに入って行くか、あるいは管上端から下向きに入って行くかで管内の流れの状況がまるで変わるので、以下それらを分けて考えることにしましょう。

③「管下端」の方から水が流入する場合」

高温の垂直管に下端から上向きに水を注入する時、水は管壁を冷却しながら上向きに上昇して行きます。そして、この時、注入水の先頭部近くの流れには、条件によって次のように水の流入速度などにより2つの特徴的なタイプが現れます。

第1のタイプは、水の注入速度が低く、かつ管壁が比較的高温でない時に生じるものです。この時は水の注入速度が低いので、管壁上の核沸騰で生じる蒸気（水に比べて通常、体積が非常に大きくなります）が管の中心部の方に集って高速の中心気流を形成し、それが管壁上にある水膜流を上方に引上げて行く形になります。つまり、注入水の先頭部付近の流れは、あたかも「環状噴霧流」のような形になる訳です。

また第2のタイプは、水の注入速度が高く、かつ管壁がかなり高温の場合に現れます。この時は水の注入速度が高いので、管内を満たして速く進む水流が、高温の管壁との間に薄い蒸気膜をはさんで流れる形になります。従って、このときの注入水の先頭部付近の流れは、あたかも前項の終わりの方で述べた「逆環状流」に似た状況になります。なお、この管壁に沿う薄い蒸気膜流の少し上流側の場所には当然、水が管壁を直接濡らし沸騰を起こしながら追隨して流れて行く部分を伴っていることになります。

④「管上端の方から水が流入する場合」

前述の③の場合とは逆に、高温の垂直管の上の方から下向きに水を注入する時は、管内で発生する蒸気は一般に管中心部を上の方に抜けようとするので、流れの状況はあたかも7章の終わりの方でお話した「逆に流れる気液二相流」のような傾向のものになります。ただ現在は非定常な流れであり、管壁に沿って下向きに流れて来る水膜流の先頭部が、高温の管壁に触れて沸騰を生じ、そこ

で激しく発生する蒸気が水膜流の先頭部付近を管壁から剥がし、かつ管内に飛散させるような現象（これをスパッタリングと言います）が起こります。

⑤「クエンチ点」

前述のようなリフラディングの場合、水の流れが上向き、下向きいずれであろうと、乾いた高温の管壁を濡らしながら進んで行く水の先頭部分では、そこで壁温の非常に急激な低下を生じさせるので、技術上、特に重要な意味を持っています。そこでその位置を「クエンチ点」、あるいは「リウエット（再び濡らすの意味）点」と呼びます。ここで、クエンチ点はそれまで高温だった壁面温度が急降下することに注目した言葉であり、他方、リウエット点は水が高温壁を濡らし始めることに注目した言葉です。なおリウエットとは、リフラディングと同じく、前には濡れていた面が乾いて高温になった所へ冷却のため水を注入して、もう一度濡らすという感覚から来た言葉であります。

なお前に6章（「液体との復縁のいとぐち」の項参照）で、加熱面と液体の復縁、つまり高温のために液体と絶縁していた加熱面が、温度の低下と共に再び液体と接触を始める現象の話をしました。そしていま問題にしているクエンチ点は、6章の場合とはかなり気液の状況が違うので、それとまったく同一に考えるのは危険ですが、それでも本質的には共通の現象であると言えましょう。少しオーバーな言い方かも知れませんが、200年以上も前にライデンフロストが高温のスプーンに水滴を置いて観察した現象が、いまなおこのクエンチ点で生き生き活躍している訳で、こんな事柄を見るにつけ科学的な人間の理性的精神の生命の長さを強く感じさせられます。

（次号に続く）

花火 ーその原理と大玉紹介ー
Firework - Principle and Large-Size Star -

永井 二郎 (福井大学), 青木 和夫 (長岡技術科学大学)
Niro NAGAI (University of Fukui) and
Kazuo AOKI (Nagaoka University of Technology)
e-mail: nagai@mech.fukui-u.ac.jp, aoki@mech.nagaokaut.ac.jp

1. はじめに

世界中の様々なイベントで打ち上げられる大小様々な花火. これは「伝熱」よりも「燃焼」の学会誌で採り上げるべきテーマですが, あえて燃焼の素人2人が協力して, 花火の基本的な原理や長岡大花火 (三尺玉) について調査した結果を紹介いたします. 詳しくは参考文献[1]~[4], あるいはインターネットでウィキペディア Wikipedia 等をご参照下さい.

花火といっても, 打揚げ花火以外に仕掛花火や玩具花火があります. 法的には, 火薬類取締法に定められており, 火薬の応用技術としての火工品に該当し, 正式には煙火と呼びます. 本稿では, 図1に示すような夏の夜空の風物詩「打揚げ花火」のみを対象とします. ちなみに, 図1の壮大で美しい花火は, 長岡の三尺玉の大花火の写真です.



図1. 長岡大花火 (三尺玉) と長生橋 [3]

2. 花火の原理

2.1 基本的な仕組みと手順

図2に示すように, 打揚げられる花火玉は打揚げ筒の底にセットされます. 花火玉は, 割物あるいは単に玉と呼ばれます. 割物は打揚げ用火薬 (黒色火薬粒) の上に置かれているだけです.

その火薬に離れた場所から導火線によって着火, あるいは図2のように落とし火を落とすことで着火させます. すると打揚げ火薬が燃焼を開始し, 割物と打揚げ筒で囲まれた密閉空間内の温度と圧力が高まり, 割物は上昇し始めます. 火薬の燃焼が終了するころ密閉空間内圧力が最高になり, 割物が筒から放出されます.

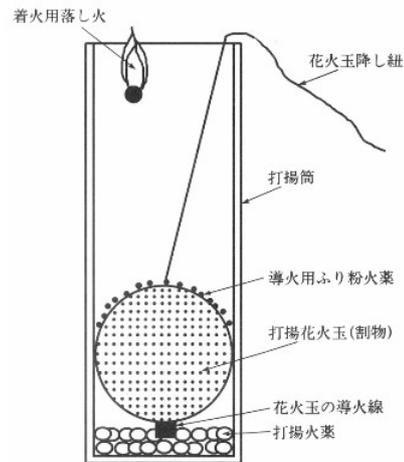


図2. 打揚げ筒の仕組み [1]

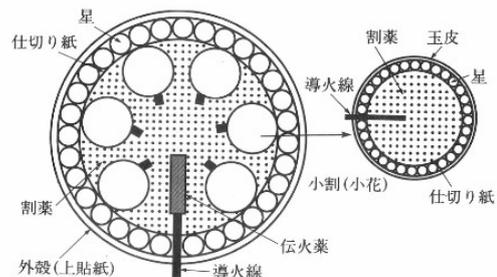


図3. 割物 (玉) の仕組み [1]

割物には、図3に示すように導火線があり、打揚げ筒内にあるうちに着火し、燃焼しながら一定の高度に達すると割物中心部の割葉に火が移ります。すると、割葉は爆発的燃焼（爆轟）を起こし、星と呼ばれる実際に発色する球状物に着火させると同時に、割物を包んでいる玉皮（外殻）を引き裂き、星を四方八方に放出させます。

星は、後述の炎色反応に従った色を発しながら飛散します。図3の割物は、内部に小さな割物（小割）を含んでおり、時間差や大きさの違いを伴う発色を実現します。

ちなみに、割物の大きさ（直径）は尺や寸で表されます。1尺=10寸=約300mmですから、例えば5寸玉は直径約15cmで5号と呼ばれ、重さは1.3kg程度です。最も大きな割物に相当する三尺玉は直径約90cmで30号と呼ばれ、重さは280kgもあります。

2.2 炎色反応と星の成分

きれいな花火の色は、炎色反応を利用しています。すなわち、炎の中に金属を入れると、金属はその熱エネルギーによりエネルギーの低い状態から高い状態になります。この活性化された状態から、エネルギーの低い安定した状態に戻る際に、そのエネルギーをある波長の光として放出します。これが炎色反応です。表1は、主立った元素の炎色を示しています。

花火の星は、過塩素酸カリウムを主成分として下記の発色剤が良く用いられます。

表1 各元素の炎色反応色 [4]

元素	色
リチウム (Li)	紅
ナトリウム (Na)	橙黄
カリウム (K)	紫
ルビジウム (Rb)	深赤
セシウム (Cs)	青紫
カルシウム (Ca)	橙赤
ストロンチウム (Sr)	深赤
バリウム (Ba)	黄緑
銅 (Cu)	青緑
モリブデン (Mo)	黄緑
ガリウム (Ga)	青
インジウム (In)	藍
スズ (Sn)	淡青

赤色星：炭酸ストロンチウム
 緑色星：硝酸バリウム
 青色星：硫酸銅
 黄色星：シュウ酸ナトリウム
 赤桃星：炭酸カルシウム

これらに加えて、発光を強めるために10%の木炭粉や、星の形状に成型するためのバインダーとなる糊剤として10%のみじん粉（モチ米から作られた澱粉）が加えられます。星の燃焼性の決定に、その固さや密度が影響するため、乾燥したり主成分を混合して成型していく手作業の過程が重要となります。

2.3 打揚げ技術

ある大きさの花火を所定の高度で開花させるには、相当の打揚げ技術が必要になります。割物の設計・製作と打揚げ技術が、まさに花火師の伝統技術であり芸術でもあります。

打揚げ筒は取り扱いの観点からは短い方が好ましいのですが、割物の加速器でもあるためある程度の長さが必要です。ただし、加速中に筒と割物の隙間から燃焼ガスが漏れるため、有効な長さの最適値が存在すると言われています。図4は、割物の大きさによって、目安となる打揚げ高度と到達時間を示しています。実際に割物が開花した際の平均的直径は、この打揚げ高度とほぼ同程度の値となります。

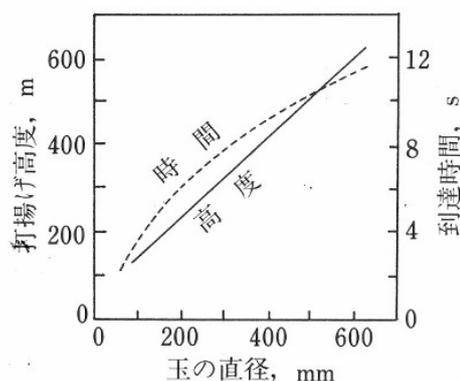


図4. 割物（玉）の大きさや打揚げ高度や到達時間の関係 [1]

2.4 花火や火薬の歴史

そもそも、火薬はなぜ火の薬と呼ぶのか？その理由は、医者が材料を粉末・混合して薬をつくったのと同様、火薬も粉末の混ぜもので、医者と同

種の道具を用いたから、だそうです。日本に火薬技術が伝わったのは、1543年の種子島鉄砲伝来時ですが、後江戸時代では、火薬技術開発はもっぱら花火開発が中心となりました。その後西欧で黒色火薬（硝石(硝酸カリウム)、木炭、硫黄の混合物)に代わる新しい火薬として、ダイナマイトやニトログリセリン、TNTが開発・発見されました。

「玉屋一っ!」「鍵屋一っ!」というイキのいい掛け声の対象は、江戸時代の花火屋ですが、その頃火薬は黒色火薬しかなく、燃焼温度が1700℃程度と推定され、花火の色は炭火の火の粉のような赤橙色でした。この温度の低い黒色火薬系統だけの花火を「和火」とよびます。一方、明治以降日本に輸入されてきた塩素酸カリウムを加えると、この強い酸化力により燃焼温度が2000℃以上になり、さらにアルミニウムやマグネシウムなどの光輝剤も使われ始めると3000℃近くに到達し、炎色反応色がはっきりと出始めました。この色鮮やかな花火は「洋火」と呼ばれています。

3. 長岡の大花火

3.1 三尺玉の歴史

毎年、8月2日、3日に信濃川畔で開催される長岡の大花火大会は、花火の打揚げ総数が約20000発という数量もさることながら、何といても「正三尺玉」の打揚げが目玉です。図5に割物（三尺玉）の実物大模型の写真を示します。直径90cm、重さ300kgの三尺玉が約600mの上空で直径650mもの大輪の花を咲かす光景は、肌を感じる大きな地響きとともに、人々に一瞬の沈黙とその後のどよめきを誘います。

新潟県は昔から花火師が多く、特に、割物が尺玉（10号玉）を超える大玉花火は越後の花火師の得意とするところ。世界で最初に三尺玉が打揚げられたのも新潟県小千谷市片貝で1891年（明治24年）と言われています。長岡市に隣接するこの片貝は新潟のなかでも花火の先進地であり、片貝に初めて花火が登場するのは18世紀半ばとも言われています。

長岡市ではじめて三尺玉が打揚げられたのは大正15年です。明治から続いていた花火大会が沈滞気味であり、花火大会を長岡市の名物の一つにするために三尺玉を打揚げたものと言われています。以来、三尺玉は信濃川畔で行なわれる花火大会の

超目玉として、燦然と輝いています。

戦前・戦中には長岡の花火大会も中止となりましたが、昭和20年8月1日の長岡空襲を経て、翌年、慰霊と戦災復興を祈願して花火大会が再開され、そして、昭和26年に待望の三尺玉も復活し、現在まで続いています。

近年、新潟県以外でも三尺玉が打揚げられることもあります。そのほとんどは新潟県内の花火師の製作によるものです。



図5. 正三尺玉の実物大模型（直径90cm）[3]

3.2 大玉競争

慰霊と戦災復興を祈願した長岡の花火大会（開催日8/2・3）と浅原神社の奉納を旨とした片貝の花火大会（開催日9/9・10）とでは趣を異にしますが、いずれも三尺玉の打揚げを目玉とした新潟の有名な花火大会となりました。しかし、昭和50年代に入って、両者は大玉花火の本家を争うかのように玉の大きさを競い合い始めました。昭和57年に片貝が三尺三寸玉を打揚げると、昭和58年に長岡が三尺五寸玉を打揚げました。さらに、片貝が四尺玉に挑戦し、昭和59年の失敗を経て、翌昭和60年について四尺玉の打揚げに成功しました。四尺玉は直径1.2m、重量400kgもあり、打揚げ高さ800mで、直径800mの大輪の花を咲かせます。

しかし、大量の火薬を使う大玉開発をこれ以上野放しにできないとして、旧通産省は昭和59年の四尺玉挑戦後、火薬使用量を80kgに制限しました。これが一因となり、両者の不毛な競い合いにもようやく終止符が打たれました。参考までに、この規制後に成功した片貝の四尺玉は80kgという火薬量の制限内で火薬間に砂を詰めるなどの工夫をして打揚げたとのこと。それゆえ、日本で打揚げに成功した花火で、最大火薬量のは昭和58年に長岡で打揚げられた三尺五寸玉の120kgです。

現在では、長岡は三尺玉、片貝は四尺玉を目玉



図7. 震災復興祈願花火「フェニックス」[3]

として、それぞれに素晴らしい花火の製作と打揚げが行なわれています。

図6は片貝に設置されている打揚げ筒の実物大模型の写真です。写真の左端が尺玉（10号）で、中央が四尺玉の筒です。東京で有名な隅田川の花火大会で打揚げる花火は五寸玉（5号）が限界で、東京湾の花火大会でも尺玉（10号）が最大です（最近、尺五寸玉（15号）も打揚げられるとか？）。このことを考えると、三尺玉および四尺玉がいかに大きいか実感いただけるものと思います。

3.3 震災復興祈願花火ーフェニックスー

長岡は平成16年10月23日の新潟県中越大地震で大きな被害を蒙りました。戦後の長岡花火が震災復興を旨として始められたのと同様に、昨年、震災復興を祈願して不死鳥を意味する「フェニックス」花火が打揚げられました。これは、今までにない規模の花火をとの思いで、図7に示すように横一直線上の6箇所から同時に長時間打揚げ続ける超大型ワイドスターメインです。この花火が、平原綾香さんの曲「Jupiter」に合わせて打揚げられ、フェニックスが舞う姿も鮮やかに、人々に筆舌に尽くしがたい感動と希望を与えました。ちなみに、「フェニックス」は募金により打揚げられた花火で、一つ1000万円を超えるものです。今年、長岡市制100周年を記念して再び「フェニックス」が大空に舞いましたが、来年も含めて今後も舞うかどうかは現時点では不明です。



図6. 打揚げ筒の実物大模型（小千谷市片貝）

4. 終わりに

真夏の夜を彩る花火を科学的に解説することは少し荷が重いことでしたが、入門としてご理解いただければ幸いです。割物が大玉の花火を中心に長岡の宣伝もさせていただきました。花火に関しては、“百聞（文）は一見にしかず”です。

参考文献

- [1] 久保田浪之介, 火薬のはなし, 日刊工業新聞社(1996)
- [2] 細谷政夫・細谷文夫, 花火の科学, 東海大学出版会(1999)
- [3] 長岡大花火 祈り, 長岡まつり協議会・(株)文藝春秋(2006)
- [4] 増本監修, 金属なんでも小事典, 講談社 BLUE BACKS (1997)

伝熱工学の視点から垣間見た熱気球と遊び心 Hot-Air Balloon from Viewpoint of Heat Transfer and Enjoying with It

門出 政則 (佐賀大学)
Masanori MONDE (Saga University)
e-mail: monde@me.saga-u.ac.jp

30年前に縁あって「佐賀」の地で研究・教育活動を開始することになりました。多くの方が、「佐賀」と聴けば、のどかな田園風景を思い浮かべることと思います。この田園風景にびったりしているものが、これから話題とする熱気球。

「なんと長閑、なんと風任せ、なんと気まま」

慌ただしい昨今において、ここは別世界！！

ご存じのことと思いますが、佐賀では、熱気球大会が盛んです。1980年に「バルーンフェスタ in 九州」、翌年から「バルーンフェスタ in 佐賀」、更には1984年第5回大会から「佐賀国際バルーンフェスタ」へと発展し、現在まで毎年盛大に行われています。そんな中、1989年「佐賀でも熱気球を作ろう」という機運がおり、翌1990年には輸入物の熱気球に頼らず、自作して飛ばそうという具体的な計画が持ち上がりました。その話に乗ったのが始まりで、この熱気球を熱工学の視点から解剖し、熱効率を改善した燃費の良い熱気球を作ることになりました。図1, 2は、バルーンフェスタでの熱気球と佐賀大学の熱気球です。

16年前の実験データと報告書を見ながら、熱気球を伝熱の視点から検討した結果の概要について話をしてみたいと思います。その折りに集めた参考文献のいくつかを例示しておきます。

熱気球の大きさと浮力

熱気球は、気球内の気体が周囲の気体よりも密度が小さくなることに伴う浮力によって空中に持ち上げられる。その浮力は、

$$F = \int_V (\rho(T) - \rho(T_\infty)) g dV = (\rho(T_\infty) - \rho(T_\infty)) g V \\ = (1/T_\infty - 1/T_0) p g V / R$$

ここで、 $T_0 = (\int T dV) / V$ で気球内空気の平均温度、 p は大気圧、 V は気球の容積、 R は気体定数である。

熱気球は、通常2—3名の乗員、燃焼バーナーと



図1 佐賀バルーンフェスタでの熱気球



図2 佐賀大学熱気球部の熱気球

燃料（プロパン）タンクなどの重量から約4000 N (400 kg) 以上の浮力で設計されている。気球内の気体の温度は、気球の皮殻布の耐熱温度から150°C以下に保たれている。このような制限条件から密度

差の大きさも自動的に上限が設定され、気球の体積（大きさ）が定まることになる。図3は、体積が2000 m³（相当直径15.6 mの試作気球）の熱気球内の平均温度と浮力の関係を示す。なお、浮力に計算に当たっては、気球内部の温度分布（平均温度）を求める必要がある。

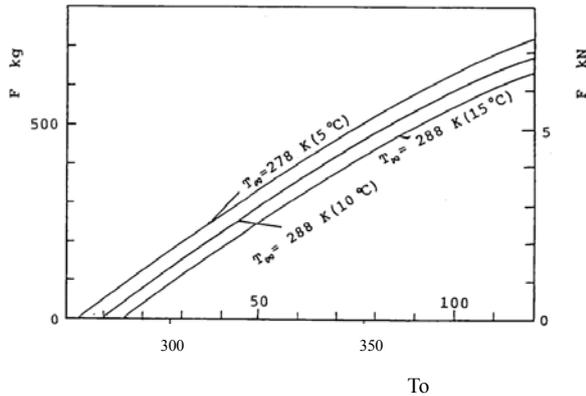


図3 熱気球の浮力(気球体積2000 m³)

熱気球の形状

熱気球は得られた浮力を球皮殻全体で受け、その球皮殻が乗員や機材などが乗るカゴをつり上げることになる。このカゴをつり上げている紐が力紐（Load strip or tape）と呼ばれるものである。

力紐は、球皮殻にかかる応力が均一になるように設計することになる。形状を回転体とすると回転面上の微小面に採用する力の釣り合いは、次式となる。

$$\frac{T_1 \sin \theta_2}{r} + \frac{T_2 d(\sin \theta_2)}{dr} = \rho g z$$

$$\sin \theta_2 = \frac{1}{(1 + (dz/dr)^2)^{1/2}}$$

ここで、 T_1 は、環張力、 T_2 は子午線張力である。子午線方向だけで荷重を持たせる場合、 $T_1 = 0$ となる。

ともあれ、この微分方程式を解くことによって、熱気球の形状が決定されることになるが、詳細については、著書の知識不足と表題から外れることから、これ以上の深入りは「生兵法怪我の基」で、賢い読者にお任せしたい。読者のために、詳細な形状計算に関連した文献[3]を示しておく。

形状が定まるとその展開図を求め、展開図に従って裁断された布を縫製することによって熱気球の完成となる。なお、天頂部には、浮力を制御するために大きな窓(直径4 m程度)が取り付けられている。この窓の開閉によって気球内の気体を放出し、浮力の調整を行っている。

図4は、計算から決定された形状の一例を示す。図4は、高さを $h = 1$ としたときの縮尺図となっている。また、図4中の(S, V)は、表面積と体積を示す。

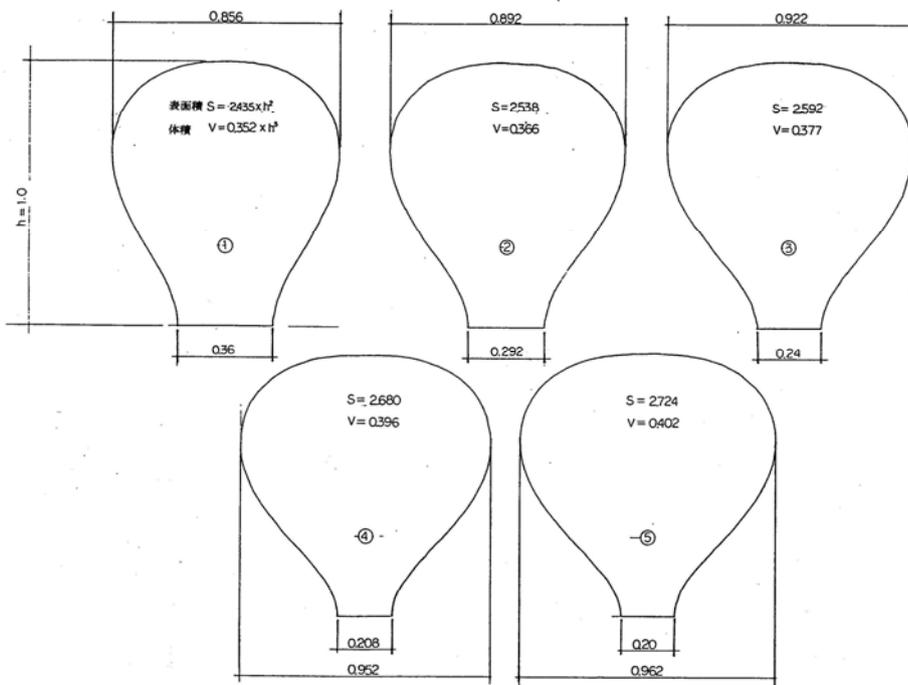


図4 設計された気球の形状(縮尺図)

図4から、熱気球にゴンドラを取り付ける部分の口（バーナーから加熱空気を供給）の大きさを変わると微分方程式の解が異なり、その形状もかなり変化することが理解できる。

図4の③、④の形状が一般的な熱気球となっているようです。

熱気球の操作

熱気球は浮力を利用して上下方向のみにしか移動できない。上下運動は、気球内にバーナーで暖められた空気を送ることによる浮力の増大と、逆に天頂部からの気球内空気の放出による浮力の減少を操縦することによって行われている。水平方向の運動は、風任せであることから、風の流れを読み取ることが最も重要な点である。気球は、風とともに水平運動していることから、気球に座標系を設定すると静止流体（空気）中を上下運動していることになる。パイロットは、離陸する前に風船を天高く打ち上げ気流の流れを大まかに読みとっているが、離陸後の操縦はもっぱら“勘”頼りとなる。上下に移動しながら目的地に向かう最適な風をキャッチしている。

熱気球内の温度分布

熱気球内の空気温度は浮力を得るために最も大切な制御パラメーターとなる。測定に使用した熱気球の大きさは、内容積で2000 m³（直径15.6 m）で、気球内のどこに、熱電対をどのように取り付けるかを定めることから検討が始まった。幸い、文献[1]には、気球内の温度の測定結果が示されていたので、それらを参考にしながら図5に示される位置を測定位置とした。長さは、20 m以上の熱電対を22カ所、所定の位置に取り付けた後、曇らされた熱気球にバーナーからの高温空気を充填し、膨らませながら正常な浮いた状態まで熱気球を立ち上げる。これが、また大変な作業でした。実験を重ねる内にそれなりに改善を加えながらの実験の遂行となりました。

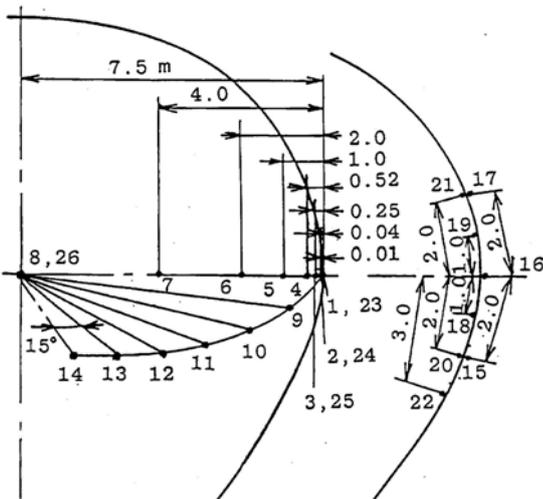


図5 熱気球内の温度測定位置

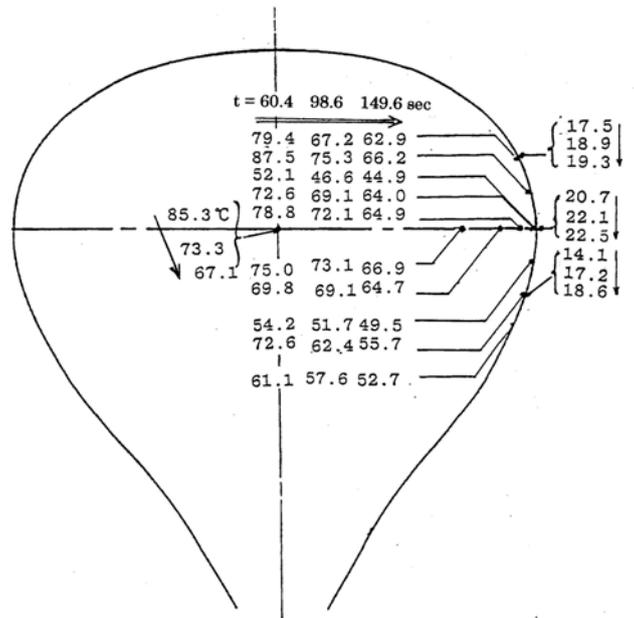


図6(a) 気球内の温度変化
(定常飛行中、測定時刻 $t = 60.4, 98.6, 149.6$ sec)

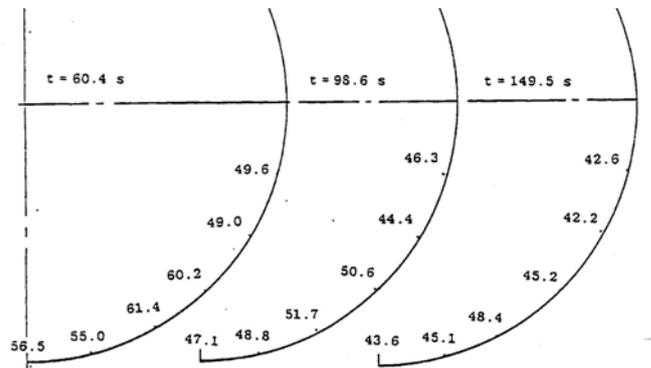


図6(b) 気球内の温度変化
(定常飛行中、測定時刻 $t = 60.4, 98.6, 149.6$ sec)

図6に測定された温度の一例（定常飛行中、バーナーを停止後の時間、 t ）を時間変化に対して示しておく。図6(a)から球皮の温度は、時間の経過につれて上昇している。これは球皮で遮られた空気中を熱が自然対流を伴って無限の周囲に拡散しているためである。図6(b)から周方向の温度は測定位置のずれを考えるとほぼ同じ温度となっていると考えられるだろう。なお、バーナーの点火中は、高温気体の強制供給となるために気球内の流れは大きく乱れているので、温度も複雑な変化となっていた。本測定点

だけでは複雑な変化の全体を把握できなかった。点火中の気球内の温度変化は、文献[1]に詳細に報告されている。

図7は、図6と同じ条件下での水平方向の温度分布を示す。空気の温度は、球皮の近傍で急降下している。そして、この温度境界層の厚さは、垂直平面上の自然対流熱伝達の予測式から推定される厚さとほぼ一致していることが確認されました。

「実験室レベルの寸法から提案された自然対流熱伝達の整理式が10 m 近くある熱気球の緩やかな曲面となっている表面に対してもほぼそのまま適用できることが確認され、無次元式の威力を改めに実感させられました。」——基礎原理の重要性の再認識

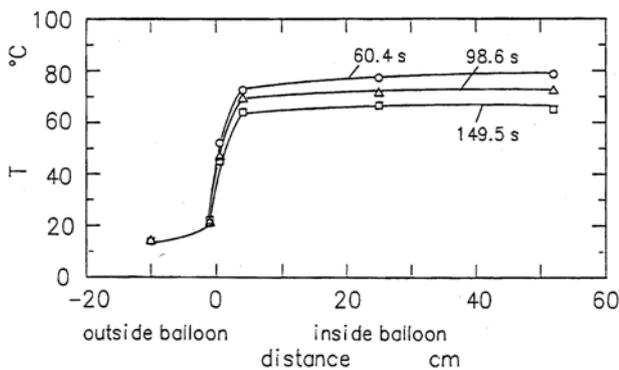


図7 熱気球内の温度分布
(定常飛行中、時間は図6と同じ)

熱気球からの熱損失

飛行中の熱気球からの熱損失は、大きく分けて4種類ある。

1. 気球表面からの熱損失
2. 天頂部の開閉に伴う気体の流出
3. 気体の球皮(布)通過
4. バーナーで加熱された空気の流入

ここでは、熱気球内部の空気の温度と気球表面の熱損失について主に検討することにする。

熱気球の直径は、通常10数mで、球皮の厚さは0.1 mm程度であることから、気球の曲面効果は無視でき、球皮を平板近似することが出来る。この結果、球皮を通しての熱損失は、一般に熱通過係数 K を用いて評価され、次式で与えられる。

$$Q_{loss} = K(T_{in} - T_{\infty})A$$

ここで、熱通過係数 K は、次式となる。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_{in}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_{out}}$$

ここで、 h_{in} は気球内面の熱伝達率、 h_{out} は気球外面の熱伝達率、 λ は、球皮素材の熱伝導率、 δ は、球皮の厚さである。

熱伝達率は、気球周りの気流によって大きく影響されることから、気球の運動によって分類する必要がある。

(1)水平移動：水平移動中の熱気球は、外気と一緒に動いていることから気球の内外とも相対速度は存在せず、ほぼ自然対流熱伝達となる。なお、厳密には、水平移動中でも、球皮からの熱損失のために浮力は徐々に減少しているので、バーナーによる加熱を時折必要となる。

(2)上下移動：上下移動中の熱気球は、外部は強制対流で、内部は自然対流となる。しかし、その速度は、それほど大きくないので強制対流の効果は無視できる。なお、上下移動は、浮力の調整による運動だからバーナーの点火あるいは逆に天頂窓を開放することになる。従って、上下運動の時間は、平行移動の時間と比較して通常短時間となるが、ここでは非常に大きい熱移動が生じていると同時に気球内部の温度分布も非常に複雑なものとなる。(文献[1]参照)

ここでは、我々の測定は水平移動中の熱損失を中心に行われたので、その結果について報告する。

図4に示されるように熱気球の形状は、完全な球面というよりも、天井部が水平に近い回転体状となっている。従って、天頂部とそれ以外の部分に分割し、天頂部については水平・自然対流熱伝達、それ以外の部分については、垂直・自然対流熱伝達と見なすことが出来そうである。

熱伝達率の推定にあたっては、鉛直に近い部分の温度境界層厚さの推定の正しさから、大胆に自然対流熱伝達の整理式を全表面に適用して推定することにした。

温度測定データと整理式から推定された熱気球表面上の熱伝達率は、大まかに図8に示される値となることが分かった。

推定された熱伝達率から水平飛行中の熱移動量が推定できるようになったが、天頂部開放に伴う加温空気の放出とバーナー点火時の放射熱と加温空気の気球への流入割合が熱気球の熱損失に対して大きく影響していることが分かった。この熱損失を少なくするために、飛行中点火されたバーナーの炎は、

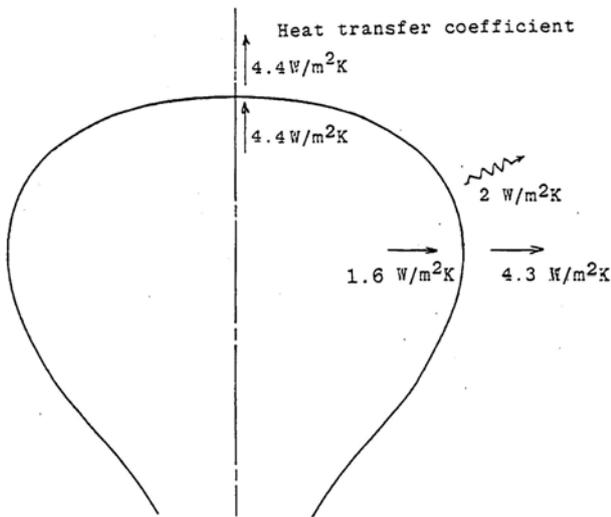


図8 定常飛行中の球皮上の平均熱伝達率

ほぼ鉛直に立ち上ることから、熱気球の口の部分にスカートを取り付け、飛行中はそのスカートを下げるこることによって放射による熱損失と加温空気の逃げを少しでも少なく出来ることを提案した。提案以降、熱気球の口の部分に取り付けられていた三角巾がスカートに取り換えられるようになった。効果の程は厳密には分からないが、スカート付きの熱気球(図2の気球下部の青い部分)が多くなったのは、1つの成果である。

終わりに

学生たちと一緒に、早朝(5時過ぎ)から起きて熱気球内の熱電対を取り付け、PC98ノート熱気球を持

ち込んで温度測定をするという貴重な体験をしました。また、熱気球の飛行にご協力していただいた方にこの機会に感謝したい。熱気球の設計は出来ましたが、資金面から自作するまでには至らなかったのが残念でした。

また、貴重な紙面を汚したのではないかと心配ですが、科学する「こころ」を楽しみ、持続することは、こころを広く、豊かにしてくれるのではないだろうか? 厳密な研究活動の中での一服の清涼剤も時には必要なことでしょう。

この機会を提供して頂いた編集担当理事の吉田英生教授にお礼申し上げます。また、バルーンの写真を提供して頂いた佐賀大学熱気球部にお礼申し上げます。

参考文献

1. Lambery, R. J. and Wood, P., Temperature distributions inside hot air balloons, Report No.178, Univ. of Bristol, (1974).
2. Stefan, K., Performance theory for hot air balloons, AIAA J. Aircraft, Vol.16, No.8, (1979), 539-542.
3. Irvin, H. M. and Montauban, P. H., On hot air balloons, Int. J. Mech. Sci, Vol. 22. (1980), 637-649.
4. Marion, W. F., Fuel requirements of a hot air balloon, AIAA 7th Aerodynamic Decelerator and Balloon Technology Conference, Oct. 21 -23, 1981, San Diego, California.

米国における研究・教育・テニユアについて

Research, Education and Tenure System in USA

天野 良一 (ウイスコンシン大学)

Ryoichi AMANO (University of Wisconsin-Milwaukee)

e-mail: amano@uwm.edu

web site: <http://www.uwm.edu/~amano>

1. はじめに

京大の吉田先生より海外の事情に関する記事執筆を依頼されました。日本伝熱学会誌に投稿するのは、海外留学体験記というのを何十年か前に依頼されて以来ご無沙汰しておりました。さて何を書こうかと考えているおりにトロント大学の川路先生が本誌7月号で北米の大学におけるグラント(外部獲得研究費)、大学院教育および学位論文、人事、など幅広くかつ微に入り細に入り書かれており、私が出る幕がありませんが、何とか重複しない記事をここに書きたいと思えます。

2. 研究費

このところ日本のニュースに触れる折に大学や研究機関での科学研究費乱用・不正に関する記事を見かけます。日本や米国に限らず、世界中の大学・研究機関では、研究計画・申請書を提出して獲得競争により研究費が支給されます。米国の大学では、こういったいわゆるグラントが全大学予算の大変大きな比重を占めます。というのは大学が教育運営以外に研究費獲得と研究予算運営の大きな役を担い成り立っているからです。

研究活動推進の上で研究予算内から間接費と称して研究者・事務員・技術者など雇用研究に携わる人事の給料や福利厚生費、さらには研究室と実験室にかかる設備費まで課されます。これは大学によって異なりますが、州立大で必要経費の50パーセント、私立大で100パーセントぐらいです。この差は、州立大学はその予算が州税から補われていますが私立大学は主に寄付や卒業生基金などで成り立っているのにより多くの額を必要とするからです。さらに間接費とは別にグラントから支払われる学生やポストドク、教授の給料のほかに福利厚生費・保険料が給料支払い金額の35~40パーセント足され、また修士・博士課程の学生の授業料まで研究費として請求額に増さなければな



図1 Milwaukee 周辺 (<http://encarta.msn.com/encnet/features/mapcenter/map.aspx> より)



図2 五大湖の一つミシガン湖を臨むキャンパス



図3 大学本部



図4 工学部建物

りません。そこで実質の必要経費の2~3倍申請する結果になります。給料にしても教授自身9ヶ月の年俵を大学から支給されるだけなので、夏3ヶ月の給料を研究費から支払う必要がある：つまり25%分の年収を研究費に頼らねばなりません。ちなみに、医科大学では教授の給料の75%をグラントに組みこむそうです。

このように研究費の主な部分は人件費や間接費でしめられるため、研究費の大半は公的に消滅してしまいます。必然的に、研究費不正流用の余地は極めて少なくなります。最近では、RGI (Research Growth Initiative) などのプログラムを組んで1:3 ROI (Return of Investment) と称して、大学が1の割合で競争的奨励金を教授に配分し2~3年以内に3の割合で外部からグラントを取らせる投資の方法をとるところも出始めています。

この1:3 ROIとは、大学学内で研究計画書を募り外部の審査官を何人か募って審査させ、グラント獲得の可能性大と判断した教授たちに申請額を支給します。このような競争的奨励金獲得に成功した者は、たとえば100万ドルを大学から得た場合、この資金を用いて研究を向上させ、2~3年後に大学外からグラントとして300万ドル以上を得なければなりません。これができる教授は数少ないです。たとえ3倍のグラントを得ないにしても、投資金額以上の成果が出れば大学は目的を全うしたことになります。その為、多くの大学では研究費を長期的にかつ巨額で確保できる者を優先的にほかの教員より高い給料を出しても雇用したりします。ここまで書くと米国の大学は学問よりビジ

ネスを優先していると思われませんが、これが一般に現実です。

研究費の不正は古典的に存在しますが、研究費使用監査も学内でランダムに行われています。日本では、米国と事情が違い、多額の研究費を確保できる教授に対する報酬があまりなされていないということを目にしたことがあります。もしそうであれば、それが不正研究費流用の一つの原因かもしれません。人の何十倍も研究費を獲得できる教授が全然研究をしない教授と同等の給料だとすれば不公平と思う人も少なくないかもしれません。いっその様に優秀な研究者は、研究費から特別ボーナスが取れるようにしたり大学が率先して昇給額を上げれば、研究意欲が増し、なおかつ研究の成果があった学者が報われるかもしれません。人が羨むほどのグラントをとれる研究者が十分に報われるシステムを確立すると共に、公的金融にたずさわる人たちの強い倫理と社会の支援を期待してやみません。

3. 教育

米国の教育はかなり日本と違います。学部での教育はほぼ日本と同じですが、大学院での教科必修はかなりあるのはびっくりすると思います。修士課程で20~30単位のクラスを取り博士課程で50~70単位のクラスが必要なのは、ほぼどの大学でも共通のようです。大学院に入学して最初の1~2年は1学期の授業で1クラス毎週のホームワークとして10問程度の演習問題とプロジェクトレポート作成と中間および最終試験を課されます。こういったクラスを1学期に3クラスほど取得しますから、かなりの学習時間が取られます。

また博士課程では機械工学科の教員合同で作成した筆記試験で7~8割の得点がないと課程を追われてしまうのは、日本の受験に類似しています。この筆記試験に合格した後、全取得必修科目を終了して、5人の教授で構成された博士諮問委員会で口頭試験に臨みます。この口頭試験に合格してようやく博士論文に着手することができます。ただほとんどの学生が研究助手として教授に雇われているため研究論文課題は入学時から進めています。

論文が完成したら、最後に同諮問委員会で論文を発表し、そこで合格すると晴れて博士号取得と

なります。著者の経験だけから述べますと、この米国のシステムはだいたい日本や欧州とは違うようです。米国が基礎に大きな比重を置くのに対して、ヨーロッパでは博士号取得に論文を重視しているようです。例としてまず、博士論文完成までにジャーナル論文が最低一編と国際学会発表論文がひとつ以上あることを必修条件にします。よく著者もヨーロッパの大学で依頼されるのですが、学生が論文最終審査に臨む際、該当大学の予算で招へいされ外部試験官として事前に論文を査読し質問項目を準備して博士論文の審査に臨みます。論文発表会場では5人の外部審査官による諮問を行います。この際その大学の指導教授は論文発表と質疑応答を公聴できても、諮問に参加してはいけないというルールにより公平さを期しています。このような制度はスウェーデンを含めた北欧諸国など政府が研究・教育に多額の資金援助を強化している国々で主に行われております。これに近い努力をしているのは、英国や英国の影響力が強かったシンガポールなどの大学で、ここでも外部試験官に諮問を依頼しますが、現地に招致しないで文書による諮問—審査方法等で、より少ない報酬金で済ませるところもあります。いずれにしても、米国よりもはるかに論文の質の向上に励み、指導教授の一任で博士号を認可する愚を避けているようです。

4. テニユア制度

来年度から日本でも教授、助教授、講師、助手という枠組(呼び名)が変わり教授、準教授、助教などの役職になるということ、そして任期を含めた雇用条件も見直されるとか聞きました。これは米国型のモデルになるのか、またはまったく革新的な制度になるのかは、まだ未定のようですが、御存知のように、米国では Assistant Professor から Associate Professor に昇格したときテニユア(終身雇用)を得られる制度が用いられています。そして原則として Associate Professor が最終階級であり Professor は更なる功績によって与えられると大学規約に記してあります。これも私立と公立で差があり、私立大学の場合、テニユアは Professor にならなければ与えられない大学もいくつかあります。この制度の利点はテニユアを得たら、自分の雇用に対する不安なしに研究なり教育なりに専

念できることでしょう。つまりは大学に気を使わず研究と学問と言論の自由がきくということでしょうか。

ただ、このテニユアはある意味で欠点もいくつかあると思われます。というのは一度テニユアが得られたら、もう好き勝手に振る舞い、学問や研究に手を抜く者が出て、なんら懲戒する権限がないということです。それに対抗する処置は学生による教授の授業評価とか年度末の教員同士で行われる業績評価で給料上昇率を決めることぐらいでしょう。しかしながら給料などなんとも思わない輩が出た場合、これは何の意味もなくなります。さらにはすでに熟成したような分野の研究者が多くなりすぎた場合、先端技術に携わる研究者と入れ替えるのは予算に限度がある場合、むずかしくなります。これらを鑑みてポストテニユア評価を行うべきだとの動議が出されることがありますが、投票により提案が却下されるのがしばしばです。最近米国大学の雄であるハーバード大学でテニユア制廃止の制度が提案され始めました。さらにはカリフォルニアやフロリダの新設大学ではテニユア制を取らないで全契約制で教員を雇用するシステムをスタートしました。一番重要なことはテニユアがあるなしに限らず研究—学問の自由を保ちながら学者としての使命を全うできるような環境作りでしょう。私の見る限りではテニユアに関係なく研究に励んでいる人が大多数であることは間違いありません。

これが米国での最近の動向ですが、日本での大学制度改正に当たって、研究者・大学・学生相互にとって最良の制度を採られることを期待しております。

以上思いつくまま述べてみましたが日本の事情に関しては見聞に基づいておりますので事実と相違しましたらご容赦ください。



著者略歴

早稲田大学理工学部機械工学科 学士号 (1973)、
修士号 (1975) 取得
カリフォルニア大学デービス校 副非常勤講師
(1977~1980)

カリフォルニア大学デービス校 工学部博士号
(1980) 取得
ウィスコンシン大学ミルウォーキー校勤務 (1981
~) 現在 工学部機械工学科教授
同大学 最優秀研究賞受賞 (2001)
同大学 工学部機械工学科長 (2001~2002)
同大学 大学院評議会副議長 (2003~2004)
同大学 大学院評議会議長 (2004~2005)
ASME Fellow
AIAA Associate Fellow
ASME Computer and Information Engineering
Division Executive Committee Member
AIAA Terrestrial Energy System Division Executive
Committee Member
ASME DETC/CIE/Energy System 最優秀論文賞受賞
(2001)

熱工学的鉄道ファンからみた蒸気機関車

Steam Locomotive from the Point of View of a "Thermal Engineering Railway Fan"

吉田 敬介 (九州大学), 田坂 誠均 (住友金属)

Keisuke YOSHIDA (Kyushu University), Masahito TASAKA (Sumitomo Metal Industries)

1. はじめに

みなさん、蒸気機関車って知っていますか？
こう聞かれて、ほとんどの人は「知ってるよ、SL
のことだろう!？」と答えるでしょう。確かに、蒸
気機関車は鉄道で貨物列車や客車を引っ張る機関
車のひとつで、SL は蒸気機関車の英語名 Steam
Locomotive の略語です。

しかしよく考えると大変不思議です。観光客目
当ての限定的な運行を除けば、現在の日本にはSL
は走っていません。最後までSL が走っていた九
州地区や北海道地区でも実質的には1960年代終
わり、すなわち今から40年ほど前には姿を消して
いました。それなのになぜ、普通ではもう見かけ
ないSLがこんなにもポピュラーなのでしょう。

著者らは周囲から鉄道ファンと思われています
が、実は二人ともSLにそれほど興味がありません。
それは吉田が49歳、田坂が46歳であり、SL
全盛時代を知らないからなのですが、だからこそ
年配の方はともかくSLがポピュラーであり、今
でも興味を持つ人が多いのが大変不思議です。

このコーナーはヒストリーQということになっ
ていますが、SLの歴史を詳細に解説しようとい
うものではありません。SLとは何か、何が魅力な
のか、なぜSLが消えていったのか、を熱工学的鉄
道ファンの立場から考えてみたいと思います。本
会会員には(隠れを含めて)鉄道ファンが山ほど
います。また、SLの設計、保守にあたっての方
もおられます。その中で我々がこのような記事
を書くのは大変恥ずかしいのですが、伝熱シンポ
ジウムに行き帰りに鉄道の未乗車区間を経由す
るなど恥ずかしいことを随分やっていますから、こ
こもその勢いで書くことにします。特に、若い方
に読んで頂ければ幸いです。

本記事の執筆にあたり、さまざまな文献を参考
にしましたが、直接引用した部分を除き、文献番

号を本文中に付しませんでした。また、使用単位
は無理にSIに統一せず、鉄道界で使用されている
または使用されていた単位をそのまま使用しまし
た。(出力:1PS=0.7355kW, 圧力:1at=1kgf/cm²
=0.09807MPa, ただし絶対圧を[ata]と書き, ゲージ
圧(大気圧との差圧)を[atg]と書く, 0atg=1.0332ata
=0.10133MPa.)

2. 蒸気機関車とは

狭義の蒸気機関車 蒸気機関車とは、「蒸気で動
く機関車」という意味です。「そんなの当たり前だ
ろう」と言われそうです。確かに電気機関車
(Electric Locomotive, EL)は「電気で動く機関車」
です。ではディーゼル機関車(Diesel Locomotive,
DL)は「ディーゼルで動く機関車」でしょうか？
蒸気機関車は作動媒体が蒸気であることを指し、
電気機関車はエネルギー源を電気(作動媒体とも
みなせるが)としている機関車で、ディーゼル機
関車は熱機関としてDiesel Engineと呼ばれる内
燃機関を採用している機関車です。このように鉄
道用語(に限らず工業的に使われる用語)は一貫
性がないのが普通です。

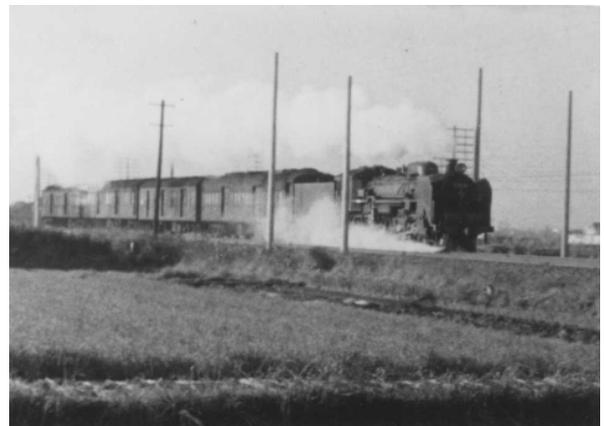


Figure 1 A Suburban Scene with Railway in
1960s (JNR Kagoshima Line).



Figure 2 Outlook of Steam Locomotive (Type C62 exclusively for Tsubame Super Express) [*]

広義の蒸気機関車 蒸気機関車は別名あるいは略称として「汽車」とも言われます(蛇足ながら中国語では「火車」と呼びます)。そして別に蒸気機関車に乗るわけではありませんが、蒸気機関車が引く客車列車に乗ることを「汽車に乗る」といいます。これはかつて、電車列車が近距離のためのもので、長距離は蒸気機関車が牽引する客車列車によっていたことの名残です。しかし、一部の寝台特急列車以外はすべて電車とディーゼルカーに置き換わった現在、ディーゼルカーに乗るときでさえ「電車に乗る」という人が増えている状況では、「汽車」などとっくの昔に死語になっているはずですが、まだ「汽車に乗る」が通じるとは不思議です。そう言えば、「汽車, 汽車, ポッポ, ポッポ, …」という「汽車」と題した童謡が今でも幼児向け CD に入っていることがあります。現存しないものを歌っている歌を幼児はどんな思いで聴くのでしょうか。が、どうやらこの場合の「汽車」とは、列車を指すのではなく鉄道システム全体を指しているようです。かつてまだ自動車のような移動手段を国民が持っていなかったとき、鉄道はあるときは隣町に、あるときは遠くの町に行くためのほとんど唯一の道具でした。そして客車を引く動力源としての蒸気機関車はその列車単位を代表していた、そのため「汽車」は鉄道システムの代名詞になった。そう考えると、なぜ今も汽車という言葉を使って違和感がないか、幼児に汽車の歌を聞かせて違和感がないか、が理解できるような気がします。もしかすると鉄道がある限り「汽車に乗

る」という言葉は、「書生さん」などと違って時代が変わってもある一定の割合で通じ続けるかも知れません。

蒸気機関車の誕生 蒸気機関車は、世界で初めての実用的な熱機関である Newcomen の蒸気機関(1712年)から 113 年後、産業革命の原動力としてあまりに有名な Watt の蒸気機関(1769年)の誕生から 56 年後の 1825 年、英国の G. Stephenson によって実用化されました。Darlington と Stockton 間 40km を結んだ鉄道は、馬の代わりに Locomotion 号と呼ばれる機関車が人や荷物を運びました(図 3)。機関車の英語名 Locomotive の語源はこの Locomotion であるというのは鉄道ファンには常識ですが、鉄道というのは G. Stephenson が突然蒸気機関車を発明したものでなく、むしろ従来の鉄道に蒸気機関を利用した動力車を開発したと考えるのが正しいと思います。なお、それに遡ること 21 年前の 1804 年には英国の R. Trevithick が鉄道用の蒸気機関車を作っていましたが、レールの技術が未熟であったため実用化されませんでした。そういう意味では、蒸気機関車の発明者は R. Trevithick と言えるかも知れません(この R. Trevithick の孫である F.H. Trevithick と R.F. Trevithick の兄弟は 19 世紀終わりの明治時代に来日し、日本の鉄道の黎明期に技術指導者として活躍しています)。いずれにしても 18 世紀初頭というのはまだ Lavoisier の熱素説が信じられていたころ、すなわち熱がエネルギーの一形態であるという認識がなかった時代です。熱力学の第二法則

の原型である Carnot の「火の動力についての考察」が発表されたのでさえ 1824 年、G. Stephenson の Locomotion 号完成の 1 年前という状況です。そういう時代に英国では熱機関を利用した機関車が開発されたということになります。また、本誌別稿で吉田英生氏が取材されている Rocket 号や、G. Stephenson の息子である R. Stephenson が父と一緒に Locomotion 号に改良を加えた有名な Planet 号は Locomotion 号よりはるかに高性能であっただけでなく、その後の蒸気機関車の重要技術の多くを生み出しています。左右の動輪(ピストンの動力が伝えられる車輪)を回すクランクの位相差を 90°にして起動不能に陥ることがないようにしたことや、いわゆる煙管ボイラを採用して蒸発量の増大と燃料消費率を改善したことなどはその一例です。

関連分野の学問的裏づけが十分でない中で、すばらしい性能の蒸気機関や蒸気機関車を製造していった彼らとその彼らを生み出した時代を考えると、天才という言葉を使い出してしまう。そして、天才=スーパースターの登場が革新的技術を生み、それが社会に豊かさをもたらすとしても、それが公教育、とりわけ大学などの高等教育機関で育成可能なのか、改めて疑問に思ってしまう。Watt や Stephenson を持ち出すまでもなく、豊田佐吉や本田宗一郎、井深 大など、日本の天才的な技術者が育った環境を見れば論を待たない筈なのですが。

ともあれ、このようにして英国で生まれた蒸気機関車はその後 150 年にわたって貨物や旅客を運び続け、産業発展と人々の暮らしを支えていくこととなります。

ゲージの話 鉄道にとって大変重要な規格のひとつに 2 本のレール間隔、すなわちゲージ (gauge, 軌間ともいう) があります。これは機関車の設計の自由度を大きく左右します。

G. Stephenson が初めて蒸気機関車を走らせた Darlington-Stockton 間鉄道のゲージは 1435mm であり、その後のゲージの基準 (標準軌) となった、という話は鉄道ファンなら誰もが知っています (厳密には 1422mm だったようです)。が、前述のように鉄道そのものは Stephenson の実用化より前から存在しており、この鉄道より前からこの幅が使われていたと考えるのが自然です。日本の新

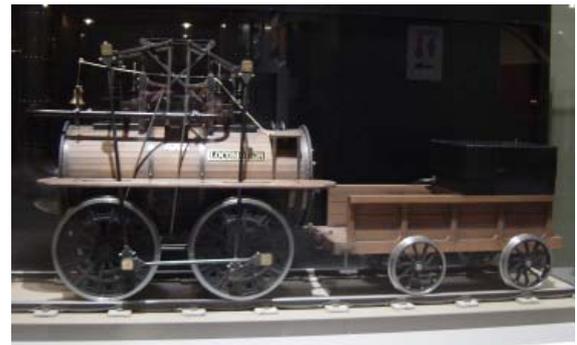


Figure 3 Replica of Stephenson's Locomotion [**]

幹線のゲージも 1435mm ですが、開発にあたっては別にこの幅にする必然性はなく、それまでの日本の在来線のゲージである 1,067mm (狭軌) より広く高速鉄道開発に有利なゲージを検討したものの、結局、英国を始め広範囲に使用されていた 1435mm を採用したとのこと。このように新しい概念で物を作るとき、寸法などの規格を決めるにあたっては、意外にもそれまでに存在していたものの寸法が基準となることがほとんどです。この Stephenson の軌間のルーツを求めて世界中を精力的に回っている人が、日本にいます[9]。

なお、前述のゲージ 1435mm と 1422mm, 1067mm は英国で生まれた単位系であるヤードポンド系に換算するとそれぞれ 4ft8.5in (8+1/2in), 4ft8in, 3.5ft (3+1/2ft) という切りの良い数値になります。家庭用冷蔵庫の冷凍室の設計温度が -18°C であることが多いですが、これは華氏 0°F であり、火力発電所の蒸気条件 538°C は 1000°F、市販のチーズの内容量が 225g ≒ 0.5 × 454g = 0.5 lb, 1 海里 = 1852m = 4 × 10⁷ m / (360 × 60 分)、即ち赤道上で 1 分動いた距離、携帯電話の距離別通話料金の境界は 160km = 100mile, JIS 規格の合板 1 枚の定尺 1.8m × 0.9m ≒ 1 間 × 0.5 間 = 0.5 坪、など SI で表記すると端数が付くが、その規格が生まれた単位系での値を知っておくと物理量が理解しやすいものが世の中には山ほどあります。

蒸気機関車の原理と特徴 図 4 は典型的な蒸気機関車の断面図です。見るからに複雑そうですが、蒸気機関車の作動原理は大雑把に言えば次の通りです。すなわち、

- ①ボイラで燃料を燃焼させ、その熱で水を加熱・沸騰させて蒸気を発生させる。
- ②高圧蒸気と背圧(大気圧)の差によりシリンダ内

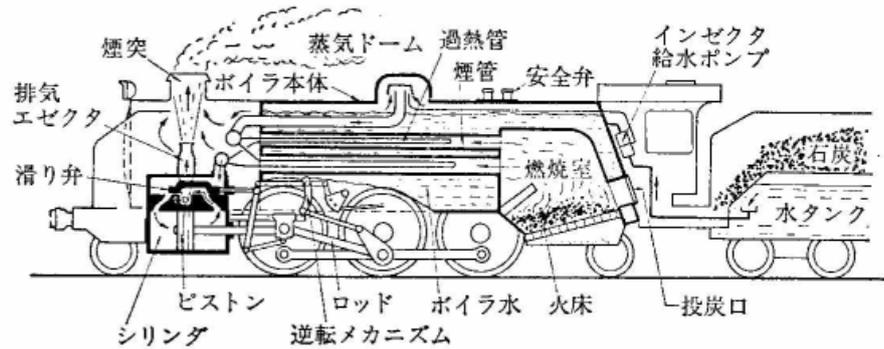


Figure 4 Cross Section of Steam Locomotive [2]

のピストンを押し、ピストンに繋がっているロッドを通して動輪を回す、
 ③ピストンを押しした後の蒸気（排気）は大気に捨てられる、
 というものです。すなわち、③を除けば原理的に火力発電所と同じであり、熱力学的にいえば「水を作動媒体とする開放型のランキンサイクル」となります。したがって、出力や熱効率を向上させる手法も原理的に火力発電所と同じです。例えば、水の蒸発量を増せば機関車の出力を大きくすることができ、ボイラでの蒸発圧力を上げたり蒸気を過熱したりして高温高压の蒸気を作れば出力、熱効率ともに向上させることができます。

ただし、火力発電所と違う制約条件がいくつかあります。第一に、鉄道車両であるがゆえに装置の寸法に大きな制限があることです。発電所であれば、出力を上げたければそれに見合った用地を確保すればよいだけの話ですが、車両は最初から幅や高さ(車両限界という)が決まっていますし、長さにしてもカーブを曲がらねばならぬため1両当たりの長さには制限が出てきます。また、線路やその下の構造物の強度制限から車両の重量も制限されます。鉄道の長所の一つである複数車両の連結(重連という)によって解決することも可能ですが、運転や保守が煩雑になります。

第二に、車両が動くことです。ボイラなどの重量物が路面から高いところにあれば機関車の重心が上がり不安定になりますし、水や燃料を入れるためその量によっても重心が変わってきます。また車両は発車すると加速減速を繰り返すため、激しい負荷変動に蒸気発生を追随させねばなりません。発電所のようにタービンをほぼ一定負荷で運転することはできません。この辺は自動車用エン

ジンと同じものが要求されますが、自動車よりはるかに大きな出力が要求されます。自動車は大型トラックでもせいぜい数百 PS 程度なのに対し、蒸気機関車は第二次世界大戦以前でも 1000PS 以上の要求が普通でした。

第三は、第二とも関連しますが、蒸気機関車で必要な動力は基本的に車両上で発生させた蒸気のエネルギーですべて賄わねばならないことです。火力発電所のように起動時に外部からの電力を借りるようなことは出来ません。給水ポンプの駆動、燃焼用空気の供給および燃焼ガスの通風装置、汽笛、照明などの電気を作るための発電機、ブレーキに必要な高压空気を作るための空気圧縮機、…、これらはすべて蒸気で駆動せねばなりませんし、その所要量は時々刻々変化するものです。

機関車用蒸気機関の構成要素 図5は熱機関としての蒸気機関車の主要な構成機器と火力発電所のそれとを比較したものです。なお、この機器構成は、20世紀初頭以降に製造された機関車でほぼ共通のもので

動力発生装置はシリンダ・ピストン⑤であり、火力発電所のタービンに対応します。Watt の時代ならともかく、タービンでなくピストンが使われ続けてきたのは不思議に思われるかも知れませんが、タービンは高速回転するため、機関車の動輪を駆動するために高出力用減速歯車が必要になり、その製作・保守技術がなかったからと考えられています(1970年代後半に最新技術で蒸気機関車を設計しようという機運がアメリカで高まった際にも蒸気タービンの導入が検討されましたが、技術的に有利でないという結論から見送られました)。蒸気機関車では一般的にシリンダを2つとし、それぞれを車両の左右に一つずつ置いて動輪を左右

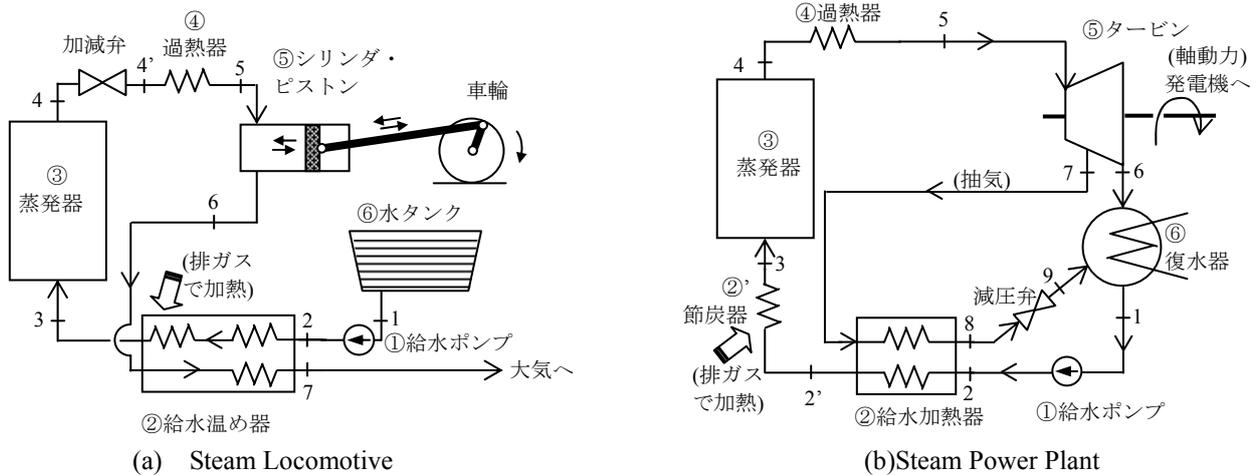


Figure 5 Basic Components of Steam Locomotive and Steam Power Plant

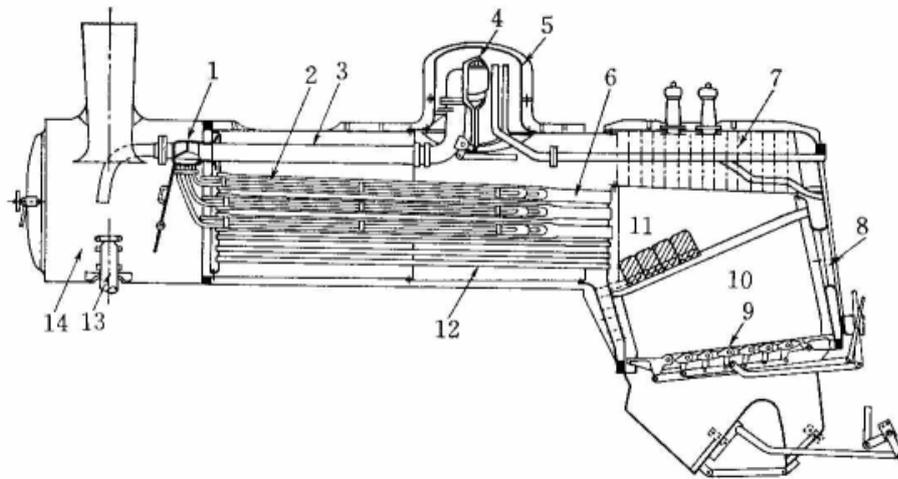
両側から駆動する方式が取られます (図 6). 大出力機関車や特別な場合にはシリンダを3つあるいはそれ以上に増やす場合もありますが、日本ではごく限られた機関車 (C52 および C53 形式) しか用いられず、ほとんどすべて2シリンダでした。シリンダ内で膨張した蒸気は煙突から大気へ排出されますが、まだ圧力温度とも高いため、エネルギー変換効率と出力アップを狙い1段階で膨張させずに2段階で膨張させる方式もあり、複式と呼びました(対比の意味で1段階膨張タイプを単式と呼ぶ)。複式は1887年にフランスのマレー(Mallet)が最初に開発したのでマレー型機関車とも言われ、火力発電所のタービンと同様、高圧シリンダ、低圧シリンダとして配置されます。ただし、日本では輸入車のみで国産車には採用されませんでした。

ボイラは、火力発電所と基本的に同一ですが、現在の火力発電所で主流の水管ボイラではなく、横置き煙管ボイラと呼ばれる丸ボイラの一種が使われてきました。図7は蒸気機関車用ボイラの断面図を示しています(注: 図4と機関車のタイプが若干異なるが実質的には同じ)。ドラム缶のお化けのようなもの(ボイラ胴という)を横に寝かせた状態にし、ドラム缶の両側の蓋に穴をあけてその間に多数の鋼管を水平に渡し、さらに一端に燃焼室(火室という)を鋼材で作し、他端に鋼材で部屋(煙室という)を作りそこに煙突を立てたものを連想して頂ければよいと思います。もちろん実際はドラム缶ではなく、煙突室も燃焼室も鋼材を用いて一体で作りますが、この缶に水を入れ、燃焼室



Figure 6 Two Cylinders and their Locations (Type D51) [**]

で燃料を焚くとドラム缶の中を通した水平管(煙管)を燃焼ガスが流れて水を加熱し蒸気が発生する、それが機関車ボイラのイメージです。このボイラが採用されてきたのは、丸ボイラの中ではコンパクトであり、かつボイラ胴の中に溜める水の量(保有水量)が少なく相対的に伝熱面積が大きいので、燃料を燃やし始めてから蒸気が出てくるまでの時間(起動時間)が早いからでした。一方、このタイプのボイラは水管ボイラのようにあまり高圧に出来ず、20atg (2MPa)程度が最高でしたが、水管ボイラはスケール(湯垢)が内部に付着すると除去が困難なため煙管ボイラより高純度水の給水が必要で、水補給が常に必要な蒸気機関車では採用不可能でした(これも前述のアメリカの最新技術による蒸気機関車設計のときに水管ボイラの採用が考えられましたが、メリットなしとの判断で見送られました)。



- 1 管寄せ, 2 過熱器管,
- 3 乾燥管 (飽和蒸気管),
- 4 加減弁,
- 5 蒸気ドーム, 6 大煙管,
- 7 ステー, 8 焚き口,
- 9 火格子,
- 10 燃焼室(火室),
- 11 れんがアーチ,
- 12 小煙管,
- 13 排蒸気管(エゼクタ),
- 14 煙室

Figure 7 Cross Section of Smoke Tube Boiler for Steam Locomotive [11]

過熱器④はボイラ(蒸発器③)で発生した飽和蒸気をさらに加熱(過熱)してシリンダに送るもので、1898年にドイツの Schmitt によって蒸気機関車用のものが開発され、1910年ごろ以降に製造される機関車にはほとんど全てにこの方式が採用されました。過熱器設置のメリットは最高温度を上げることによる断熱熱落差の増大ならびにシリンダでの乾き度の増大によって不可逆損失を減らし出力と熱効率を改善するものであり、これを採用してからの蒸気機関車はそれ以前に比べ出力と燃料消費が20%程度改善したと言われています。

一方、火力発電所と異って特記すべきは、過熱器の前に加減弁と呼ばれる弁が付いていることで

す。これはシリンダに送り込まれる主蒸気量を制御するもので、自動車のアクセルに相当します。運転手(機関士または機関手と呼んだ)は運転室内左側(図8)にあるテコハンドルを操作して加減弁を開閉し車両の加速を制御しますが、ここで蒸気量を変化させれば必ず過熱器出口温度が大きく変動するはずで、これが運転の「効き」にどのように影響したのか大変興味があります。

なお、Schmitt の過熱器は過熱器管が煙管の一部に挿入される構造で、そのためその煙管だけ他の煙管より内径が大きくなっている(大煙管)という、火力発電所のボイラでは考えられない「仰天技術」が使われています。

前述の加減弁は図7に示すようにボイラ胴上部に設置され、胴内で沸騰し発生した飽和蒸気がそ



Figure 8 Driver's Cockpit of Type D51 [*] (Left Side)

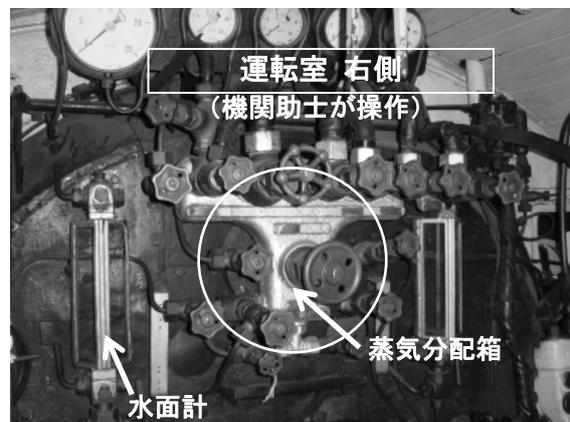


Figure 9 Driver's Cockpit of Type D51 [*] (Right Side)



Figure 10 Two Drivers for Steam Locomotive Operations [*]

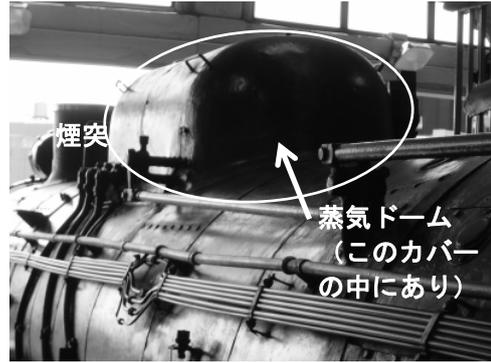


Figure 11 Steam Receiver (Outlook of Type C62) [*]

こを通過して行きますが、蒸気は通常わずかながら水液滴を同伴しており、そのままシリンダ内に入れると液滴が種々の問題を起こします。これは過熱器を設置しても同じことで、飽和蒸気への同伴液滴はボイラ出口で極力食い止めるような方策、すなわち汽水分離が図られます。汽水分離は火力発電所のボイラでも重要な技術ですが、蒸気機関車では加減弁回りに蒸気ドーム(蒸気だめともいう)と呼ばれる空間を作って汽水分離を促進します(外観で図11のように見える部分)。さらに加減弁を通った後の蒸気を乾燥管と呼ばれる部分で乾燥され過熱器に送る構造になっています。

給水温め器②は、火力発電所の給水加熱器に対応します。水タンクに溜めた水をボイラ本体に給水する前に予熱することによりボイラ本体の熱的ショックを和らげるとともに、その熱源としてシリンダで膨張した後の蒸気(排気)を使用することによって熱回収を行うものです。排気はまだ圧力・温度ともかなり高いので、給水予熱には効果的ですが、これを煙室に置くものも多く、排ガスの熱回収も兼ねることから、給水温め器は火力発電所の給水加熱器と節炭器を併せ持ったものも考えることができます。

一方、燃料を焚く側ですが、蒸気機関車は燃料として破碎された石炭(図12)を使用するため、火室内に火格子と呼ばれるものが設置されています。図13はその写真ですが、魚焼き網の化け物のようなもので、それに石炭を乗せ、下から空気を通して燃焼させます。現在の火力発電所では石炭焚きボイラのほとんどすべてが石炭を機械で微粒子化(数ミリのオーダ)にした微粉炭をバーナで噴出して燃焼させるので、この装置は蒸気機関車独特と



Figure 12 Coal for Steam Locomotives



Figure 13 Fire Grate of Steam Locomotive [*]

言えそうですが、かつては火力発電所のボイラも蒸気機関車と同じように火格子を使った燃焼方式が採用されていました。

特徴的なのは通風装置です。燃焼用空気および燃焼ガス(排ガス)の流動を確保するため、火力発電所ではモータによってファンを回し通風力を得ているのに対し、蒸気機関車では通風力を蒸気の排気により得ています。すなわち、排気が煙突に向かって排出する際に煙室内を高速で通過させ、

ベルヌーイの原理を利用して燃焼ガスを吸い出し通風させます(図4の排気エゼクタおよび図7の13.がこれに相当)。一方、火力発電所でポピュラーな、燃焼用空気を予熱するための空気予熱器は存在しません(後述の復水器と同様、この機器は大型になります)。

蒸気機関車ではすべての動力を蒸気で賄わねばなりません。排気を利用する装置を除けばすべて主蒸気を抽気して使用します。そのため、ボイラから運転室まで蒸気管が引かれ、そこに設置された分配器を通じて各機器へ配管されます。その分配器を蒸気分配箱(図9)といい、もう一人の運転手(機関助士または機関助手と呼んだ)が各機器への蒸気流量を弁操作によって調節します。これで操作される装置は、給水ポンプや発電機等の他に、給油機、燃焼室内の火格子の振動装置、D52やC62形式機関車に採用された自動給炭装置、さらには客車列車の暖房装置にまで及びます。蛇足ですが、昔の客車列車の暖房が蒸気によっていたため、電気機関車の時代になっても客車牽引用電気機関車では機関車内に蒸気発生器を備え、蒸気を客車に送っていました。

ところで、蒸気機関車には加減弁や後述の弁装置のように直接動力を制御するものだけでなく、種々の目的でいくつもの弁が用いられています。例えば、ボイラ破裂を防止するための安全弁、圧縮空気を所定の圧力まで下げる給気弁、ブレーキに使われる分配弁など機関車ならではの多彩さですが、その中でちょっと変わった弁があります。鉄道車両は走行抵抗が自動車等と比べ大変小さく、電車にせよ機関車にせよエネルギーを使って加速(力行という)、ある一定の速度に達した後は、かなり長い距離を惰性で走ること(惰行という)が可能です。もし蒸気機関車が力行から加減弁を閉じて惰行に移ろうとすると、そのままでは自動車のように「エンジブレーキ」がかかってしまい、鉄道車両の長所が活かせません。この惰行時(絶気運転という)に「エンジブレーキ」が利かないよう、シリンダ内が真空にならないよう大気開放するための弁、すなわち蒸気室空気弁(図6)が付いているのも蒸気機関車の特徴です。

この他、当然と言えば当然ですが、蒸気機関車のボイラの性能を表す指標は多くが火力発電所のそれと同じです。伝熱面積、火格子面積、火炉熱

発生率、火炉断面熱発生率、…、熱工学的鉄道ファンとしては、これらについても語りたいのですが、あまりに各論になり過ぎるので止めます。

弁装置 蒸気機関車の動力発生装置はシリンダ・ピストンです。蒸気機関車のシリンダでは、ピストン両面から交互に高圧蒸気を送り込むことで常に正の仕事が発生するようにします。これは Watt が考案した技術でしたが、当時、給気の切替えは手動で行っていました。その弁の自動切替え装置を考案したのは 1784 年、彼の会社の技師 W. Murdock であったと言われています。そのアイデ

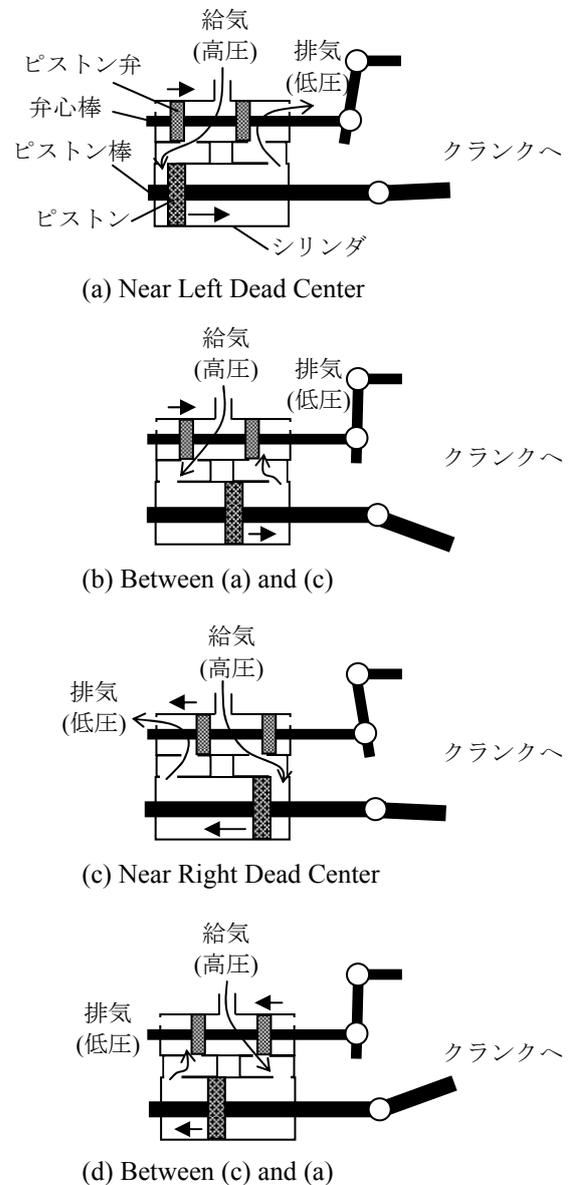


Figure 14 Principle of Steam Injection to Cylinder (Walschaet's Valve Gear)

アが R. Trevithick によって最初の蒸気機関車に応用され、G. Stephenson によって完成されます。彼の滑り弁式弁装置、いわゆるスチブソン式弁装置はその後 19 世紀末まで多くの機関車で採用されました。ただこの装置は耐久性や保守性に難があり、1880 年ごろから普及し始めたワルシャート (Walschaert) 式と言われる弁装置が開発されてからはあまり使われなくなりました。日本の国産機は 100% ワルシャート式です。図 14 にその模式図を示しますが、ピストンに並行してピストン弁と呼ばれる 2 つの弁が弁室にあり、ピストン棒の往復動にリンクして運動する弁心棒が弁室内を左右に動き、給気(高圧)側と排気(低圧)側の流路を制御することにより巧みにピストンを操るものです。すなわち、図 14(a)ではピストン左側に高圧蒸気が入り、右側は排気口に開放されるので、ピストンは右に動き始め、(b)を経て(c)になります。そこでは蒸気通路が反対になるため左に動き始めようとしており、やがて(d)を経て元の(a)に戻ります。

図 15 は弁装置の駆動によってシリンダ内で起きる行程の指圧線図(P-V 線図)を示したものです。ここで P_0 , P_1 はそれぞれ大気圧およびボイラ圧力で、 V_c および V_0 はすきま容積および行程容積と言われます。この系は以下の行程で構成されます。

- 1→2:等圧膨張 (給気口が開いた状態で高圧蒸気がシリンダ内に流入しながらピストンを押し、外部に仕事をする。)
- 2→3:断熱膨張 (給気口が閉じた状態で高圧蒸気がピストンを押し、膨張するにつれ圧力が低下、外部に仕事をする。)
- 3→4:等容膨張 (排気口が開いた状態で蒸気がシリンダ内から排出されながら膨張し、圧力が低下、仕事はしない。)
- 4→5:等圧圧縮 (排気口が開いた状態でピストンが反対方向に戻りながら、蒸気が排出され続ける。圧力差がないので仕事はしない。)
- 5→6:断熱圧縮 (排気口が閉じ、中に残った蒸気が圧縮される。外部から仕事をされる。)
- 6→1:等容圧縮 (給気口が開き、高圧蒸気がシリンダ内に流入してくる。仕事はしない。)

ただし、これは理想的な場合の状態変化であり、実際には内燃機関と同様、状態点 3 における給排気弁(ピストン弁)の開時間のオーバーラップや蒸気の慣性などにより指圧線図は太実線のようになり

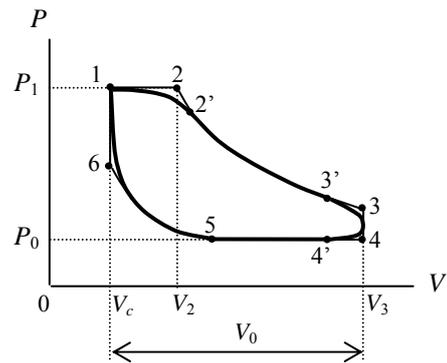


Figure 15 P-V Diagram of Cylinder System of Steam Locomotive (Cited from [1] with Minor Modifications)

ます。また、4→5の行程もピストンを移動するための仕事を外部からしてやらねばなりません。

オープンサイクルの意義 蒸気機関車が火力発電所と一番大きく異なる点はオープンサイクル、すなわち作られた蒸気はただか大気圧(飽和温度 100°C)までしか膨張できずに大気に捨てられることです。これは蒸気機関車が熱効率の面で大変損をするばかりか、走行中に燃料だけでなく水も定期的に補給しなければならないことを意味します。確かにこれは蒸気機関車の大きな短所ではありますが、実は長所でもあります。すなわち、オープンサイクルとすることにより復水器が不要になります。復水器は火力発電所でも非常に大きな寸法を占めていますが、鉄道の場合は冷却源が大気しかなく、海水を利用する火力発電所のものよりさらに大型になってしまいます。実はこれが省略できたからこそ蒸気機関が機関車の動力源として実用化されたのでした。その考案者が前述の R. Trevithick です。彼は Murdock が考案した弁装置を使って作った模型の蒸気車からヒントを得て、蒸気機関車を作ったのですが、Murdock の蒸気車がなければ、さらに Watt の蒸気機関がなければなかったかも知れない機関車でした。そして、実際に Trevithick の機関車は陽の目を見ず、その機関車を改良し、ちょうど鉄道に機関車の必要性が叫ばれた頃に登場した G. Stephenson が蒸気機関車の父として後世まで語り継がれています。「発明」とは、「発明者」とは一体何なのか考えさせられます。

燃料としての石炭 蒸気機関は外燃機関ですから、作動媒体が所定の温度圧力になりさえすれば本来

燃料は何でも良いのですが、基本的に石炭が使われています。石炭は、「燃える石」として古くから用いられてきた固体燃料で、かつては一般家庭でも風呂を沸かしたりストーブの燃料にしたり、粉にしたものを固めた豆炭(まめたん)、練炭(れんたん)という形にして調理や暖房に用いられましたが、現在では発電所の燃料や製鉄所のコークスの原料など産業界でしかお目にかかりません。

蒸気機関車で石炭が使われた理由として、固体燃料でハンドリングが楽だったからなどという人もいますが、それはおかしい話です。蒸気機関車では、ボイラに石炭を供給するために、かなり後の時代まで機関助手による投炭作業、すなわち石炭貯蔵タンクから石炭を定期的にシャベルですくい、ボイラの火室に投げ込む作業が必要でした。これが石油であればタンクから配管し、途中で弁を取り付けて流量を制御するだけで燃焼が可能です。石炭が燃料として採用されたのは、おそらく蒸気機関車が石炭の採掘がさかんに行われ燃料として最も普及していた英国で開発されたからだと思われまふ。これが中近東で開発されていたら最初の蒸気機関車は石油を燃料としていたかも知れまふ。

鉄道マニアの中には自分で超小型の蒸気機関車を所有する人がいますが、その中にはアルコールを燃料として走るものもありますし、第二次世界大戦中の日本の鉄道では、輸送用燃料にする石炭不足のため木を燃料とした時期もありました。著者の吉田は箱根越えの御殿場線を薪燃料で走る蒸気機関車の写真を見たことがあります。ただし、薪なら石炭と同じ熱量を得るのに10倍近い体積を必要とするので、燃料搭載スペースを考えただけでも現実的でないことは明らかです。

実は著者らも最近まで気がつかなかつたのですが、今の若い人は産業界で石炭と関わっている人以外に石炭を見る機会がありません。かつての日本は石炭をたくさん産出していました。図12に示すように、北海道、福島、山口、北部九州などが代表的ですが、この他にも国内至るところで産出され、それらを使って蒸気機関車は走っていました。石炭はその成分や燃え方によって泥炭、褐炭、亜瀝青炭、瀝青炭、無煙炭に分類され、後者になるほど石炭中の炭素の割合が増加して燃焼時に煙の発生が少なくなる一方、揮発成分が少なくなる



Figure 16 Major Coal Mines in Japan (1960s)



Figure 17 Replica of the First Miniature of SL in Japan Manufactured in 1855 by the Saga Clan.[**]

ため着火しにくくなります。蒸気機関車ではそのうち、瀝青炭や無煙炭が使われました。ただ、石炭は他の燃料に比べ産地による発熱量の差が大きいこと(20~35MJ/kg(低位発熱量)), 燃焼時に煙(正確には灰が含まれた煙)が出ること、燃焼後に燃え殻が出てその処理が煩雑なこと、などから、鉄道用燃料として決してすばらしいものではありませんでした。工夫を凝らした投炭作業を行っても、燃料の発熱量不足で所定の圧力の蒸気発生に手間取り、列車が遅延するという事もありました。**日本における蒸気機関車の歴史** 鉄道ファンでなくても日本の鉄道は1872年(明治5年)10月14日に新橋(現在の日本テレビ社屋辺り)~横浜(現在の根岸線桜木町駅)間で開業したのが始まりであることは多くの方がご存知と思います。このときに

英国から輸入されたのが 150 形式蒸気機関車ですが、実はこれに先立つこと 17 年、佐賀鍋島藩では 1855 年に蒸気機関車のミニチュアが公開運転されています。おそらくこれが日本人による蒸気機関車の初めての走行であったものと思われます。そのときの機関車は現存せず、性能等も不明ですが、燃料はアルコールであったようです。なお、大阪市にある JR 西日本の交通科学博物館にその複製が置いてあります(図 17)。

日本では明治維新後の近代化政策により日本全国に鉄道が敷設されていきますが、官営鉄道の建設だけでは資金の面もあり建設スピードが上がらないということで、民営鉄道の敷設が奨励されていきます。特に日本鉄道、山陽鉄道、九州鉄道などは有名です。

鉄道敷設の話をしてしていると「伝熱」とはかけ離れるので止めますが、この民営鉄道の敷設が、鉄道関係技術が未熟で欧米諸国の技術に頼っていた当時の日本で、いろいろな蒸気機関車が輸入される原動力にもなりました。有名などころでは、ミカド型と呼ばれた日本鉄道 9700 形式機関車(アメリカ製(1897 年))、山陽鉄道 5900 形式(アメリカ製(1897 年))、九州鉄道 10 形式(ドイツ製(1899 年))、官鉄の北海幌内鉄道で義経号、弁慶号などと呼ばれた 7100 形式(アメリカ製(1880 年))などがあります。当時は蒸気機関車発祥の地であるイギリスだけでなく、フランスやドイツ、スイス、イタリアなどでも蒸気機関車が製造されていましたし、アメリカでも 1869 年に大陸横断鉄道が太平洋側まで到達しており、高性能な蒸気機関車が製造されていました。

日本の蒸気機関車が国産化されたのは、日清戦争の前年の 1893 年で、前出の R.F. Trevithick の指導により 330PS の機関車 860 形式が官営鉄道の神戸工場で製造されました。このように、最初のころは官営鉄道や民営鉄道の鉄道工場で製造されていた、というよりそういうところでしか製造できなかったのですが、だんだん鉄道会社以外の会社がビジネスとして製造するようになってきます。今はありません(川崎重工業に吸収されています)が、鉄道マニアなら誰もが知っている「汽車製造会社(後の汽車会社)」はそのような中で 1896 年に設立された会社で、1901 年に最初の蒸気機関車を製造しています。それは台湾向けのものであり、



Figure 18 First Japanese Locomotive manufactured in Japan (Type 230) [**]

最初に日本国内に納めたのは 1902 年に製造された官営鉄道 230 形式からで、前述の交通科学博物館に 233 号機(1903 年)が保存されています(図 18)。当時の国産というのはまだ外国の機関車と同じか類似のものを元図面を参照しながら製造するという、今で言えば「技術提携」のようなものでした。蒸気機関車は多くの鋼材を使いますが、その鋼材は 1901 年に官営八幡製鉄所の高炉が稼働し始めたことにより国産化の条件が整ってきます。18 世紀の蒸気機関車開発の時代と違い、熱工学などの学問に裏打ちされた理論的検討も可能になり始めるとともに、工作技術の進展と相まって、国産機関車製造の機運が高まっていきます。折しも 1906 年に公布された鉄道国有法により、前述のような多くの民鉄が国鉄(以下、国有鉄道の意味で使用)に繰り入れられます。その際、各民鉄が有していた輸入機関車の形式がまちまちで運用や保守に困るため、それらに代わる標準機の導入が必要となったことも国産化にとって追い風となります。そのような中、国鉄が自主設計により製造した最初の国産機が 1911 年(明治 44 年)の 6700 形式でした。しかし一般的には、その 2 年後の 1913 年(大正 2 年)に初めて作られた 9600 形式蒸気機関車(図 19)が本格的な初めての国産車とされているようです。これはその性能が当時輸入されていた高性能な外国製機関車に匹敵するものであったためです。国鉄(と機関車メーカー)はその後も日本の発展とともに高性能な蒸気機関車を続々と設計、製造し続け、蒸気機関車の黄金時代を築いていきます。

主なものを挙げると、貨物用の 9600 形式と時をほぼ同じくして製造された旅客用機関車 8620 形式、大正 8 年に製造された高速旅客用機関車で特急「燕」やお召し列車を引いた C51 形式(1919 年)、



Figure 19 Front View of Steam Locomotives (Type C11, 9600, D51) [*]

強力貨物用機関車 D50 形式(1923 年), 昭和に入り, アメリカで多数採用された 3 シリンダ方式を取り入れた大型旅客用機関車 C53 形式(1928 年), 国鉄の標準機とも言われた貨物用 D51 形式(1936 年, 図 19), 旅客用 C57 形式(1937 年), C58 形式(1938 年), C59 形式(1941 年)などでしょう。

なお, ここで貨物用, 旅客用という言葉を使いましたが, 同じ性能のボイラで蒸気機関車を作る場合, 貨物用はスピードより牽引力を重視するため動輪を小さめにして数を増やし, 旅客用は牽引力よりスピードを重視するため直径の大きな動輪にしてその数を減らす設計がなされました。上記の機関車はすべて貨物用が動輪 4 つで旅客用が 3 つです。国鉄では機関車形式の呼び方として, 冒頭に動輪数(軸数)をアルファベットで標記します。A, B, C, D, …, は, 動輪がそれぞれ 1, 2, 3, 4, …, 個(軸)であることを示します。この規則は今でも使われています。例えば C51 とは動輪が 3 つの蒸気機関車で, DD51 とは動輪が 4 つのディーゼル機関車, EH200 とは動輪が 8 つの電気機関車のことです。アルファベットの後の数字の付し方にも規則がありますが, これ以上は本稿と関係ないので止めます(このため鉄道マニアは国鉄関係者と同じように形式名だけで機関車の仕様がわかります)。

ところで, 日本は 1941 年(昭和 16 年)暮れからいわゆる大東亜戦争に突入しますが, すべての鉄道事業は「戦時体制」の名の下, 戦時物資輸送の確保と物資不足への対応が至上命令となります。

蒸気機関車も貨物輸送量の増加対応のために増備されますが, 既存形式 D51 など材料を節約したり代替材料にするなどの「減量」製造を余儀なくされ, さらに戦時設計車として D52 形式(1943 年)が製造されます。この D52 形式機関車は戦時体制における極限設計を目指したものでしたが, それが原因でボイラの破裂事故を起こしたりしたものの, 結果的にこの機関車で生まれた技術がその後の機関車設計はもとより, 広く鉄道車両設計手法の発展に大きく寄与したことは大変皮肉です。

戦争が敗戦で終わり, 戦時設計や製造による耐久力不足や戦時中の酷使で走れない蒸気機関車が多く残りました。また, 貨物輸送が激減して D51, D52 などの機関車が余る一方で, 買出しなどの旅客需要が増加していき, 旅客用の蒸気機関車が不足しました。そのような戦後の混乱期に設計されたのが旅客用 C61 および C62 形式であり, D51, D52 形式機関車の部品が数多く流用されました。しかしながら, 戦後の国鉄はこれ以上新しい蒸気機関車を作ろうとはしませんでした。結局, 幹線の交通ネックである急勾配区間(具体的には奥羽本線の板谷峠)への対応のため作られた機関車 E10 形式(1948 年)が最後の新設計機関車となりました。

1949 年に国鉄は国営鉄道から日本国有鉄道公社, いわゆる国鉄に変身します。国鉄は無煙化政策, すなわち幹線の電化と非幹線のディーゼル化により蒸気機関車を廃止していきます。蒸気機関車の製造も 1950 年が最後となり, それ以降は前述

Table 1 Performances of Major Steam Locomotives made in Japan [4]

形式	製造年	特 徴	出力 PS	動 輪 数	ボイラ 圧力 atg	重量 ton	出力/重量 比 PS/ton
(150)	(1871)	(1872年の新橋～横浜間開業のために英国から輸入した機関車)	(240)	(2)	(9.8)	(21.7)	(11.1)
9600	1913～ 1926	日本発の本格的国産機（貨物用）	870	4	13	60.4	14.4
C11	1932～ 1947	幹線用の中型機関車(旅客用)	610	3	15	66.1	9.2
D51	1936～ 1945	いわゆるデゴイチ、標準機と言われる大型機関車（貨物用）	1280	4	15	78.4	16.3
C58	1938～ 1947	標準機と言われる地方線用万能機（貨客両用）	880	3	16	58.7	15.0
D52	1943～ 1946	戦時設計の幹線用大型機関車（貨物用）、自動給炭機など新技術を導入	1660	4	16	85.1	19.5
C62	1948～ 1949	戦後作られた幹線用大型機関車（旅客用）、種車はD52（種車：元の車両の一部または大部分を使って新しい形式の車両を作る際の、元の車両のこと）	1620	3	16	88.8	18.2

Table 2 Performances of Major Diesel and Electric Locomotives made in Japan [3]

形式	製造年	特 徴	速度制御方式 または電源方式	出力	動 輪 数	重量 ton	出力/重量 比 PS/ton
DD13	1961～ 1967	ヤードでの入替用ディーゼル機関車(ヤード：貨車を行先別の列車に並べ替えるための敷地)	流体(トルクコンバータ)式	500PS	4	56.0	8.9
DF50	1958～ 1963	幹線用電気式ディーゼル機関車(ディーゼルエンジンで発電機を回し電気モータを駆動、旅客用)	電気式	600kW(816PS) エンジンは 1060～1200PS	6	81.0	10.1
DD51	1962～ 1978	国鉄時代の代表的な幹線用中型ディーゼル機関車(旅客用)	流体(トルクコンバータ)式	1000～1100PS	4	84	12 ～13
DF200	1992～	JR化後発の大型ディーゼル機関車（貨物用）	電気式	1920kW(2610PS),エンジンは 3400～3600PS	6	96	27
EF58	1952～ 1958	国鉄時代の代表的な直流電化区間用電気機関車（旅客用）	直流式	1950kW (2650PS)	6	115	31.3
EF66	1966～ (1975)	日本最大の幹線用直流電化区間用電気機関車(貨物用) ,JR化後も製造継続	直流式	3900kW (5300PS)	6	100.8	52.6
EF81	1968～	国鉄時代の代表的な交直流電化区間用電気機関車（貨客両用）	交直流式	2550kW(DC), 2370kW(AC)	6	100.8	34.4 32.0
EH500	1997～	JR化後初の大型電気機関車（貨物用）,通称「金太郎」	交直流式	3400kW(DC), 4000kW(AC)	8	134.4 134.4	45.9 54.0

のD52形式など幹線用大型機関車が線路規格の低いローカル線区に入れるよう改造し、それに新形式を与えるに留まります。こうやって生まれたのがD60、D61、D62、C60形式などで1950年から1961年頃にかけてのことです。1964年10月1日には東海道新幹線が開業します。新幹線生みの親としてあまりにも有名な元国鉄技師長の島秀雄氏はC10、C11、C12、C54、C55、C56、C57、D51形式の

蒸気機関車の主任設計技師でもありました。日本の蒸気機関車の父とも言える彼の新幹線での名声は、蒸気機関車時代の終焉を象徴していたとも言えるようです。

さて、電化の進展とともにローカル線に追いやられた蒸気機関車は、ディーゼル機関車の完成、そしてモータリゼーションによるローカル線の凋落によってさらに行き場がなくなります。新幹線



Figure 20 Early Developed Electric Diesel Locomotive Type DF50 [**]

が博多まで延伸される 1975 年には蒸気機関車が牽引する列車が完全になくなりました。そして、1976 年 3 月 2 日には室蘭線追分駅において入れ替え機として使用されていた 9600 形式蒸気機関車が現役を引退し、日本から蒸気機関車が消えました。日本の SL の歴史は 103 年余りで幕を閉じたこととなります。

なお蒸気機関車の運命は世界中同じで、現在も現役で本格的に蒸気機関車を走らせているのは中国などごく一部になりました。中国に世界中の SL 好きの「鉄ちゃん」が集まっている映像を最近良く見かけます。

蒸気機関車の性能 では、その性能はどの程度だったのでしょうか。表 1 および表 2 は、国産の代表的な蒸気機関車およびディーゼル機関車と電気機関車の性能をそれぞれ示したものです。こうやってみると、我々が考えているほど蒸気機関車は性能的に劣っているとは言えないものです。1960 年代に非電化幹線で特急列車牽引まで任されていた DF50 型ディーゼル機関車（図 20）など出力は 9600 形式蒸気機関車にも及びません。後述する DD51 でも D51 蒸気機関車より「非力」です。著者らは特に自分たちの体験から「汽車は遅い」というイメージがありますが、必ずしもそうではなさそうです。1956 年から運転された東京～博多間約 1200km を走る寝台特急「あさかぜ」が山陽本線や鹿児島本線が電化されていなかった当時から 17 時間 25 分で両都市を結んだことを考えれば、それは理解しておくべきでした。ちなみに、表定速度(距離を停車時間を含む所要時間で除した平均速度)は 68.7km/h で、現在でもこの速度が出せ

Table 3 Changes in Boiler Pressure and Power of Steam Locomotives [4]

製造初年	形式名等 (製造国)	ボイラ圧力 atg	過熱式	動輪出力 PS
1825	Locomotive 号 (英)	1.7	×	—
1829	Rocket 号 (英)	3.3	×	100
1834	Norris 型 (米)	4.2	×	—
1848	リバプール号 (英)	8.4	×	400
1867	America 号 (米)	8.5	×	300
1870	Stirling 形 (英)	9.8	×	490
1883	Dean 形 (英)	11.2	×	420
1887	Malett 型 (仏)	12	×	150
1880	Teutonic 型 (英)	12.3	×	570
1893 頃	No.999 (米)	12.7	×	860
1901	ニュージ Q 形 (英)	14	×	1120
1906	Garratt 型 (英)	13.7	×	410
1911	6700 形 (日)	13	×	470
1912	K3 形 (米)	14.1	○	2330
1912	E 形 (ソ)	12	×	1920
1913	9600 形 (日)	13	○	870
1914	Mallet Triplex 型 (米)	15	○	4310
1919	旧満州 Mikai 形 (米)	13.4	○	2170
1921	Pasisi 形 (満)	14.1	○	2020
1921	231B 形 (仏)	17	○	1850
1923	D50 形 (日)	13	○	1280
1925	01 形 (独)	16	○	1930
1925	241A 形 (仏)	17	○	1980
1926	9000 形 (英)	15.5	○	4300
1936	D51 形 (日)	15	○	1280
1937	C57 形 (日)	16	○	1040
1941	4000 形 Big Boy (米)	21	○	6020
1943	D52 形 (日)	16	○	1660
1959	前進形 (中)	15	○	2920

注)日…日本, 英…イギリス, 仏…フランス, 独…ドイツ, 中…中国, ソ…旧ソ連

ない特急は日本中いたるところにあります。

一方、表 3 は日本を含む世界の主な機関車を年代別に示し、ボイラ圧力と出力の変遷をみたものですが、開発当初は飽和式であったため高圧化(=蒸発温度の高温化)が進み、Schmitt の過熱器が開発された段階で高圧化が鈍化し、その後は蒸発量の増大と蒸気の有効利用で対応していったというのが機関車高出力化の傾向のようです。なお、ボイラの高圧化については、日本では 16atg 以上に圧力を上げる試験を経て 16atg に落ち着いたこと、海外では米英で 20～21atg に達したものの、他の国々の大部分は日本と同程度圧力の蒸気機関車が設計上妥当であるとして製造されたことを述べておきます。

大出力蒸気機関車の頂点は 1941 年にアメリカ

で製造された 4000 形機関車（通称ビッグボーイ）で、6020PS という超高出力を誇りました。日本の最大出力蒸気機関車 D52 形式(1660PS)の 3.6 倍、最新鋭の大型電気機関車 EH500(交流時)と比較しても 1.1 倍です。この機関車は Union Pacific 鉄道(1,435mm ゲージ)で動いていたものですので、ボイラ寸法を大型化して蒸発量(=出力)を増大し難い日本の鉄道事情(1,067mm ゲージ)と単純には比較できませんし、旧満州鉄道(1,435mm ゲージ)用に日本が製造したパシナ形蒸気機関車(1934 年)でも 2,700PS であったことを考えると、技術力の差というより鉄道需要や設計に対する考え方の差と考えた方が良くと思います。いずれにしても蒸気機関車の力強さを認識せざるを得ないデータです。

一方、エネルギー変換効率の点からはどうだったのでしょうか。電気機関車が 80%程度、ディーゼル機関車が 30%程度に対して、蒸気機関車は 10%程度と言われています。後述するように、この効率は諸条件で大きく変わるものですが、一応の目安にはなるものです。電気機関車の場合、火力発電所での熱→電気の変換の際の熱効率が 40%程度と考えれば、ディーゼル機関車と大差ありません。それに比して、蒸気機関車の熱効率 10%程度というのは明らかに悪過ぎます。すなわち、蒸気機関車は地球温暖化や省エネルギーを叫ぶまでもなく燃料代がかさんだのです。これに水の補給や運転操作の難しさなどを考えれば、他の機関車が出現してきた時点で蒸気機関車には勝ち目がありません。

実は、本稿を執筆するにあたり、国内外の種々の機関車の熱効率を調査しようとしたのですが、いろいろな書物を見ても、関係者に聞いてもわかりませんでした。1932 年に発行された「最新 機関車の構造と理論」という本[19]の 115 ページにも「飽和蒸気機関車にありては大体 9~12%、過熱蒸気機関車は従来の試験成績によると 10~14%の範囲である」との記述がある程度で、個々の機関車に対する情報は得られませんでした。それではと、せめて過熱蒸気温度がわからないか、と調べてみましたが、これも「350℃~400℃の範囲である」としかわかりませんでした。これでは S L を設計した関係者から情報を頂くしか方法がありませんでした。

が、ここで大事なことに気がつきます。すなわち、熱機関に対しては既に熱力学的な考察が可能であった 1910 年代以降においてさえもそれらの情報収集が困難なこと自体が、鉄道車両用原動機としての蒸気機関の特徴を示しているということです。実際の設計や運転にはおそらく理論熱効率なるものをそこまでして計算する必要はなかったということでしょう。それは、不可逆過程が多く存在するため実際の熱効率を測定しないと意味がないことや、原動機の熱効率を知ることよりボイラ効率や機械効率などをすべて考慮した総合効率で考える必要があること、さらには負荷変動の激しい原動機では全負荷時の熱効率の優劣はあまり意味がないこと、また種々の機器を主蒸気によって駆動する以上、動輪(シリンダ・ピストン)以外による蒸気消費が無視できず、しかもそれが運転条件によって大きく異なること、そして投炭作業を行う機関助手とシリンダへの蒸気供給制御を行う機関手の技量差によって同じ区間を運転しても燃料消費量が大きく変わること、などがその理由でしょう。蒸気機関車の石炭消費量は 1km 走行あたり 10~20kg[4]、あるいは D51 が 40kg(梅小路蒸気機関車館の展示)などという大雑把な情報しかないことや、蒸気機関車に関する多くの書物では「蒸発圧力を高圧に上げて理論どおりに燃料は節約できない」などの表記があることも、それを裏付けているようです。そういえば、かつては自動車のカatalogにもエンジン性能曲線が載っており、そこに燃料消費率(g/PS/hr)という、一応熱効率に対応する物理量も掲載してありましたが、今では見ることがなく、10 モード燃費(=km/L)や 15 モード燃費という非常に大雑把な、しかし実際には経済性の目安として分かりやすい物理量に置き換わっています。しかも我々は、これらの値があくまで目安であり、その優劣が実際の燃費の優劣に直結せず、むしろ運転者や道路条件によって決定されることを経験的に知っています。

蒸気機関を熱機関として学問的に見ていると、つい熱効率という概念だけで見えてしまいますが、鉄道についてはやはり出力、牽引力、重量(質量)、実際の動力費、運転・保守のしやすさなどの性能を総合的に判断する必要があることを、蒸気機関車は教えてくれます。

ところで、表 1 および表 2 には機関車の出力だ

けでなく出力重量比も示していますが、ディーゼル機関車 DD51 を蒸気機関車 D52 と比較すると、前者は重量がほぼ同じにもかかわらず出力が後者の 0.7 倍しかなく、これから見る限りでは蒸気機関車のほうが良好です。実は国鉄の無煙化ではディーゼル機関車の開発が大きな問題となりました。ディーゼル機関は蒸気機関やモータと異なり、ある回転数(アイドリング回転数)以下では使用できず、車両の原動機として使うには停止状態から徐々に加速するための変速機構が必要になります。その主な方法として、(a)小型自動車に使用されるようなクラッチ板を断続させて車輪に動力を伝える方法(機械式)、(b)トルクコンバータと呼ばれる流体変速機を介して車輪を回す方法(流体式)、(c)ディーゼル機関で発電機を回して発電し、その電力でモータを回す方法(電気式)、の三つがあります。(a)は機関車のように出力が大きい車両には向かず、(c)は重量が大きくなるため、線路規格が低い非幹線への対応として(b)を採用する必要があったのですが、大容量トルクコンバータの開発が困難を極めました。DD51 はその目処がようやくつき、中型の流体式ディーゼル機関車として 1962 年に投入されたものですが、製造初年から 40 年以上経た現在でも日本の至る所で見かけます。蒸気機関車は同程度の距離を走るためにディーゼル機関車の数倍の重量の石炭と水を積みねばならないことを考えれば、ディーゼル機関車のこの程度の性能がそれまで製造された蒸気機関車の性能と同程度であったと考えるべきでしょう。

3. なぜ SL はなくなったか

では、改めて“SL はなぜなくなった”のか考えてみましょう。それは鉄道が電化したからであり、電車はエネルギー変換効率が高いから？ それも確かに答えの一つではあるでしょう。馬力が弱いから？ これも間違いではありませんが、今まで見てきた SL は非力でないものも多くありました。

その答えとして、SL は火力発電所を一緒に抱いて走っていたようなものであり、構造が複雑でかつ運転が大変難しかったからと筆者らは考えています。ここでは蒸気機関車がなくなる原因となった構造や運転に関する問題点のいくつかを取り上げてみたいと思います。

前に蒸気機関車はオープンサイクルであると述

べましたが、これに起因する構造的な面倒（敢えて欠陥とは言いません）に“水補給”があります。有名な D51 形式で見ると、平均的な走行時に 1km 当たり約 100L の水を必要としましたから、炭水車 20m³ の水タンクを満タンにしても連続して走れる距離は高々 200km、東京-静岡間程度でした。

燃料である石炭も機関助士の投炭作業、機関車への補給、地上側での運搬、貯蔵と他の機関車に比べ大幅に人・時間・場所を必要とし不利でした。特に夏場の焚火作業、いわゆる「カマ焼き」が過酷を極めた重労働であったことは有名です。

乗務員の窒息事故も軽重含め頻発していました。特に 1928 年の北陸本線・柳ヶ瀬トンネル（現存せず）内での事故は、重量貨物を引いて登坂中の D50 形式が登り切れず停止、機関助士らが窒息死するという悲惨なものでした。

運転の難しさは電気・ディーゼル機関車の比ではなく、機関士と機関助士の技量や努力で機関車の発揮できる性能や消費燃料に大差が出ました。この点は熱工学、いや機械工学を学んだ者にとって興味の尽きない例が無数にあります。一例を挙げれば、登り勾配で重量列車を始動するため、アクセルに当たる加減弁とギアに当たる逆転機（これで弁の開度を調整出来ます）のハンドルを微妙に調節し、動輪が滑る限界で砂を撒くといった操作で設計値を上回る牽引性能を引き出すこともよくあったようです。これらの操作により、結果的にシリンダ内の圧力や温度、或いは車輪と線路の摩擦といったものを経験的にしかも見事に最適制御していた事実は驚嘆に値します。この例からも解るように蒸気機関車運転は非常にやり甲斐のある仕事でもあったことは関係者の一致した見解です。さて、話は蒸気機関車がなくなる理由から脱線しかけたので本題に戻します。

保守面でも大変苦勞の掛かる車両でした。ほぼ 2 日毎の仕業検査から数年に一度、解体して行う全般検査まで数々の検査があるのは最新の新幹線車両に至るまで同じですが、蒸気機関車固有の困難な作業を伴う検査が幾つもありました。その内作業員にとって最も過酷な作業は、約 11000km (40~60 日ピッチ) の走行毎に行われる「無火検査」と呼ばれるものであったようです。この検査は文字通りボイラの火を落とし、煙管の煤を一本ずつ払い除くと共に、ボイラ内の湯垢やスケールを洗

い落とす洗缶作業を伴うものでした。狭く汚い劣悪を極める環境でこの作業に従事した作業者が、誰よりも近代化を望んでいたことは想像に難くありません。ここまで述べた事柄の他にも、排煙による乗客への被害の頻発や沿線火災への潜在危険の存在、脱線転覆事故での蒸気によるやけどや火災等二次災害の発生といった蒸気機関車特有の安全におけるマイナス面がありました。このため蒸気機関車を他の機関車や電車等で代替していく努力、いわゆる無煙化が特に昭和30年代以降、強力に推進されていくことはほぼ全ての人々（機関車メーカーとマニア以外？）から歓迎されていたと言えます。

4. 蒸気機関車と鉄道

鉄道システムの一部としての蒸気機関車は既に消え去りました。それは路面電車が存続の危機に瀕しながらも生き残り、都市交通システムの一つのバージョンとして活路を見出したのとは大違いでした。が、それはこれまでに見てきた通り歴史の必然でしょう。蒸気機関車は終焉近くになって各地で存続運動や保存運動が起きました。京都市にあるJR西日本の梅小路蒸気機関車館は1972年に鉄道100周年を記念して設立されましたが、その頃繰り広げられた保存運動が当時の国鉄を動かしたと言っても過言ではないでしょう。しかし当時(1960年代)の国民の声は「国鉄は早く蒸気機関車を廃止して無煙化を急げ」が主流でした。敢えて誤解を恐れずに言えば、当時存続を唱えていた人たちは既に快適な電車に乗って生活していた都会在住の人々であり、なかなか無煙化の恩恵に浴せない人々にとっては迷惑なものでした。実際、著者らには子供のころ、親に連れられて鉄道に乗って隣町まで行くのに電車に乗れると思っていたら、蒸気機関車が引く茶色い客車でがっかりし、遅くてしかも煙が客室に入ってくるので慌てて窓を閉めたという経験や、鉄道をまたぐ跨(こ)線橋を渡っていたら蒸気機関車がやってきて煙を全身に浴び、大変怖かったという経験があります。同時に、無煙化が進み煙で汚れずに済む電車(電気機関車)やディーゼルカー(ディーゼル機関車)が蒸気機関車に置き換わっていく様子を目の当たりにしながら鉄道の近代化を感じ、それに心躍るものを感じていた時代があり、いつしか鉄道好き



Figure 21 A Scene of Steam Locomotive and Road Crossing and Gatekeeper in early 1960s

になっていったような気がします。

現在、著者らは鉄道記念物として蒸気機関車を見るとき、ドキドキするものを感じます。それはこのような精巧な仕組みの機械が設計され、製造され、運転され、保守されていたことに対する一種の畏敬の念を感じるからであり、同時に機械屋としての誇りを覚えるからであります。これが復活して日本の鉄道に走り回ることを望むことは決してありません。マニアは自分が楽しければそれでよいし、嫌になればその趣味を止めればよい、しかし機械を設計する者は、その機械が人間や社会に及ぼす影響を常に考えておくべきであり、そうすれば蒸気機関車復活などという願いは慎むべきであると思うからです。とはいえ、蒸気機関車が人間社会の発展に偉大な功績を残したことは間違いなく、この事実を後世に伝えるために蒸気機関車を動態保存したり、公園に置いたりすること



Figure 22 A Kid playing with his Railway (1960s)

は大変重要なことと信じているのもまた事実です。

ここで蒸気機関車が社会に貢献した具体例として、その牽引した列車の話題を挙げることにします。東海道本線（東京～神戸）が全通したのは新橋～横浜開業から17年後の1889年で、この時の各駅停車で直通する列車はイギリス製の機関車により東京～大阪間を約20時間で結びました。それよりほんの20年前までは歩いて10日以上かかっていたところが1日弱に縮まったのですから、その効果や影響は東海道新幹線が開通した時より遙かに大きかったと思われます。東京～大阪間はその後の蒸気機関車や地上設備の発展により少しずつ時間短縮され1896年の急行列車の新設で約16時間半に、1921年の新逢坂山トンネルの開通で特急列車（後の富士）が11時間弱で結ぶまでになりました。その頃の特急牽引に使われていた主力機関車は、当時の狭軌では世界最大の直径1750mmの動輪を有する名機C51形式でした。1930年にはこのC51形式が東海道本線の勾配区間や曲線区間で出し得る最高速度を積み上げた綿密な計画の基に、超特急「燕」が新設され東京～大阪を8時間20分とそれまでより一挙に2時間半短縮することに成功しました。この「燕」は当時の箱根越え（現在の御殿場線）のため後ろから押し上げる補助機関車を走りながら切り離したり、給水時間を惜しんで機関車の後ろに給水タンク車を繋いだり（これにより国府津～名古屋間300kmをノンストップで走破）といった究極の努力により成し遂げられた列車でした。その後1934年の丹那トンネル開通で更に20分短縮された到達時分8時間は、東海道本線全線が電化され、蒸気機関車の牽引が無くなる1956年まで20年以上も破られることの無いレコードとなりました。特急「燕」は太平洋戦争後その名を「つばめ」と変え、牽引する機関車もC51→C53→C59→C62→電気機関車と変えながら電化を経て、東海道新幹線の開通する1964年まで東京～大阪間の主力列車の地位を保ち続けたわけです。

蒸気機関車が全廃された1976年までの約10年間、その牽引する旅客列車は激減し、優等列車も数えるほどになりました。その中で日本最大の旅客用蒸気機関車C62形式が本州最後の活躍の場とした呉線で1971年まで牽引した急行「安芸」や、1972年まで重連で引いた函館本線の急行「ニセ

Figure 23 Time table in 1967 [18]

コ」を強く記憶されている方は少なくないでしょう。蒸気機関車最晩年の「安芸」や「ニセコ」は乗客輸送という本来業務よりは、終焉期の蒸気機関車を代表しその功績を改めて人々に認識させるという意味で貢献した列車であったように思われます。この急行「安芸」の運転時刻を1967年6月の交通公社時刻表から図23に抜粋してみました。

ところで、これまで本稿では「鉄道ファン」という言葉と「鉄道マニア」という言葉を敢えて混ぜて使用しました。この「道」の人間は「ファン」と「マニア」を区別したり、自分はマニアでなくファンであることを強調する人がいますが（著者らも？）、どうせ傍から見れば「同義」に違いありません。鉄道マニアと言われる人にはいくつかの「種類」があります。蒸気機関車についてもほぼ同様、大きく分けて「撮影マニア」「収集マニア」があります。前者は大井川鉄道や山口線、豊肥本線で蒸気機関車の運転日に車内外に現れて写真を撮るものであり、後者は蒸気機関車に関する部品を収集するものです。これらはある意味、一般的な鉄道マニアと変わりませんが、著者らにはSL独特のものとして、この2つの他に「回顧マニア」と呼ばれるべきものがあるように思えます。往年の峠越えで蒸気機関車が複数台(重連)で貨車や客車を牽引していた様子を撮影した現場を訪ねたり、そこに行って昔と同じアングルから撮影したりする人々です。つまり「廃線マニア」と通じるものがあります。前述の「撮影マニア」に分類してもよいのですが、ホームや線路脇に群がるマニアと異なり、山に登ったりしますし、一見「鉄ちゃん」にどこことなく感じる「線の細さ」がないよ

うです。しかしやっていることは大して変わりません。おそらく、ここを読んでムツとした人、あなたはこの「道」のマニアでしょう。

Table 4 Chronological Table of Development of Steam Locomotives and Railways

	蒸気機関(車), 鉄道の発展	特徴	その他の主な事件
1700	Newcomen, 大気圧機関(英, 1712)	世界初の実用的蒸気動力	Celsius, 摂氏温度計(1714) 享保の改革(1716-1745) Fahrenheit, 華氏温度計(1717)
1750	Watt, 火力機関の燃料消費軽減: 特許(英, 1769) Cugnot, 蒸気自動車(仏, 1769)	いわゆる Watt の蒸気機関 フランスでは自動車発明者として有名	アメリカ独立宣言(1776) Lavoisier, 熱素説(1789) フランス革命(1789)
1800	Trevithick, Penydarren 号(英, 1804) Fluton, 蒸気船(1807)	世界初の鉄道用蒸気機関車 世界初の蒸気機関駆動の船	Evans, 戻り煙道式ボイラ(1800) Trevithick, Cornish ボイラ (1802) Napoleon 皇帝に即位(1804)
1825	G. Stephenson, Locomotion 号(英, 1825) Stephenson 親子, Rocket 号(英, 1829) Norris, Washington 号(米, 1834)	いわゆる世界初の実用的蒸気機関車 前車の改良型, 後の技術標準的存在 アメリカ鉄道開業のために製造	Carnot, 火の動力(1824)
1850	佐賀藩, 蒸気機関車のミニチュア試運転(1855)	日本最初の鉄道模型製作といわれる	天保の改革(1841) Joule, 熱の仕事等量(1845) Clausius, エントロピーの概念(1854) 明治維新(1867) Babcock & Wilcox, 水管ボイラ(1867)
1875	官営鉄道新橋～横浜間開業(1872) Malett, 複式蒸気機関車(仏, 1887)	英国技師 E. Morel の指導 蒸気圧を 2 段階(複式)膨張させ動力を得る最初の SL, マレー型	Otto, 4 行程ガス機関(1876) Siemens, 初の実用的電気機関車(1879) Persons, 蒸気タービン(1884)
1900	860 形式(1893) 9700 形式(ミカド)(1897) 230 形式(1903) 鉄道国有法公布(1906) K3 形蒸気機関車(米, 1912), 国鉄車両研究会開催(1912-1922) 9600 形式(1913)・8620 形式(1914)	R.F. Trevithick 指導による初の国産 SL アメリカから輸入の大型 SL(870PS) 民間車両メーカー製造の初の国産 SL 過熱器を搭載 (以降過熱式が普及) SL の性能向上のための官民組織 初の本格的国産 SL (それぞれ貨物用, 旅客用)	日本初の火力発電所, 東京茅場町(1887) 日清戦争(1894-1895) Diesel, 重油機関(Diesel Engine)(1899) 官営八幡製鉄所操業開始(1901) Wright 兄弟初飛行(1903)
1925	C51 形式(1919), D50 形式(1923) C53(1928), C50(1929), C10(1930), C54(1931), C11(1932), C12(1932), C55(1934), C56(1935)の各形式 D51 形式(1936), C57 形式(1937), C58 形式(1938), C59 形式(1941) Big Boy4000 形(米 1941) D52 形式(1943) C61 形式(1948), C62 形式(1948) E10 形式(1948)	大型国産機 昭和初期の国産 SL 増備時代 国鉄の標準機ラインナップ完成 ボイラ圧力 21atg, 6020PS の超大型 戦時設計, 後の性能向上技術も獲得 戦後最大級の SL 国鉄最後の新形式 SL	第一次世界大戦(1914-1918) Nukiyama(抜山), 沸騰曲線(1934) 田熊, 水管ボイラ(1938) 第二次世界大戦(1939-1945)
1950	日本国有鉄道発足(1949) D60, D61, D62, C60 形式(1955-1961) 10 形 (独, 1956) DD51(1962) 東海道新幹線開業(1964)	国鉄最後の改造による新形式製造 西ドイツ最後の SL 国鉄初の幹線用 DL	サンフランシスコ講和条約(1951) 日本初の原子炉臨界, 東海村(1957)
1975	山陽新幹線博多開業(1975) 国鉄 SL の運用完全廃止(1976) 国鉄民営化(1987)	国鉄室蘭線追分駅の入替用 SL 廃止(3月2日)	日本伝熱研究会設立(1961) 東京オリンピック開催(1964) 第一次オイルショック(1973) ロッキード事件(1976) 第二次オイルショック(1978)
2000 2006	新幹線 500 系 300km/h 運転開始(1996) 韓国 KTX 暫定開業(2004)	この事実を東日本在住の人が意外に知らないの、ここに記す	日本伝熱学会設立(1994)

5. おわりに

伝熱学会の会員には鉄道ファンが大変多いことを著者らは常日頃から感じています。故 小竹進先生がかつて本誌で、研究者の人間的な「個性の強さはほぼ取り扱っているエネルギーの強さに比例する」という内容の発言[5]をしておられましたが、まさに蒸気機関車は「核沸騰」現象を利用した熱機器であり、それが好きな人が本学会に多いというのは伝熱研究には「情熱家」が多いということでしょう。が同時に、鉄道システムというものが単純な物理法則だけで語れない「人の匂い」がする機械システムであることと密接な関係がありそうです。中でも蒸気機関車は産業革命がそのスタートであり、約 150 年にわたる長い歴史の中で鉄道システムの中核となってきました。その複雑な構造ゆえに我々の知的欲求をかき立てるとともに、設計した人間のすばらしさ、それを操作する人間のすばらしさ、そして技術のすばらしさを感じてしまうのではないのでしょうか。仮に現代の技術力で蒸気機関車を作るならば、大変高性能かつ運転が楽な機関車が製造可能でしょうが、その複雑な機構をほとんど手動で制御するからこそ魅力を感じるのでしょうか。SL マニアと違って発電所マニア[17]を作ろうとしてもなかなかできない理由がそこにあるようです。

蒸気機関車よ、永遠（とことわ）に！

謝辞

本稿を執筆するにあたり、職業能力開発総合大学の堤一郎氏に貴重な資料や情報をご提供頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

[1] 一色尚次, 内田秀雄, 柴山信三, 谷下市松, 応用熱力学, コロナ社, (1982), p154.

- [2] 一色尚次, 北山直方, 新蒸気動力工学, 森北出版, (1982), p27.
- [3] 久保田 博, 最新鉄道車両工学, 交友社, (1976).
- [4] 久保田 博, 蒸気機関車のすべて, グランプリ出版, (1999).
- [5] 小竹 進, 伝熱研究, 31,120, (1992), pp2-3.
- [6] 齋藤 晃, 蒸気機関車の興亡, NTT 出版, (1996).
- [7] 齋藤 晃, 蒸気機関車の挑戦, NTT 出版, (1998).
- [8] 佐々木富泰, 網谷りょういち, 事故の鉄道史, 日本経済評論社 (1995).
- [9] 塩津宣子, 緒方正則, 下間頼一, 日本機械学会年次大会講論(V), 06-01, (2006), pp365-366.
- [10] 田坂誠均, 伝熱, 44, 187, (2005), p29.
- [11] 谷下市松, 蒸気工学, 裳華房, (1984), p55.
- [12] 堤 一郎, 産業技術史(新体系日本史 11), 山川出版社, (2001), pp200-244.
- [13] 堤 一郎, 近代化の旗手, 鉄道, 山川出版社, (2001).
- [14] 西川兼康, 熱工学の歩み, オーム社, (1999).
- [15] 原田勝正, 日本鉄道史 (刀水書房全書 53), 刀水書房, (2001).
- [16] 細川武志, 蒸気機関車メカニズム図鑑, グランプリ出版, (1998).
- [17] 吉田敬介, 伝熱, 42, 173, (2003), pp4-7.
- [18] 交通公社の時刻表, 日本交通公社, (1967).
- [19] 最新 蒸気機関車の構造と理論 (上巻), 機関車工学会, 交友社, (1932).
- [20] 図説 蒸気機関車全史①, 学研, (2006).
- [21] 図説 蒸気機関車全史②, 学研, (2006).
- [22] 鉄輪の轟き (九州の鉄道 100 年記念誌), JR 九州, (1989).
- [*] JR 西日本, 梅小路機関車館(京都市)にて撮影.
- [**] JR 西日本, 交通科学博物館(大阪市)にて撮影.

The National Railway Museum, The Museum of Science & Industry in Manchester, そして The British Library
The National Railway Museum, The Museum of Science & Industry in Manchester, & The British Library

吉田 英生 (京都大学)
Hideo YOSHIDA (Kyoto University)
e-mail: yoshida@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

ヒストリーQ “蒸気機関車” のタイミングに合わせて、鉄道王国である英国の博物館 The National Railway Museum (in York) と The Museum of Science & Industry in Manchester とを本年9月に取材した。また、その機会に世界最大の図書館の一つ The British Library (in London) についても利用したので、これらを合わせて紹介させていただく(3都市の位置関係は図1参照)。

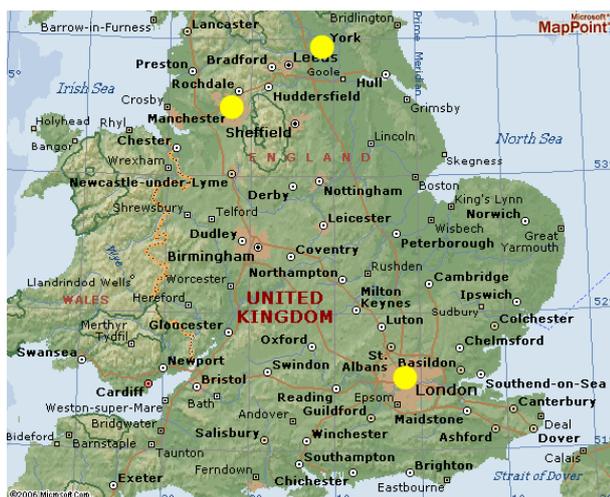


図1 London と Manchester と York (<http://encarta.msn.com/encnet/features/mapcenter/map.aspx> より)

2. The National Railway Museum

York はイングランド北部にある 2000 年の古都 (<http://www.york.gov.uk/>, <http://www.visit-york.org/>) であり、英国最大のゴシック大聖堂 York Minster (<http://www.yorkminster.org/>) やローマ時代に作られた city wall も残る、Ouse 川沿いの大変美しい町である。

その西端に位置する York 駅のさらに西側 (裏口) に世界最大の鉄道博物館 The National Railway Museum (<http://www.nrm.org.uk/home/home.asp>) がある (図2, 図3)。大きく分けて、入口の右側に

は Great Hall とさらに奥に The Works, 左側には Station Hall, があり、英国の蒸気機関車を中心に多数の鉄道車両が展示されている。Great Hall の中にはターンテーブルもあるから、以前の操車場跡であろう。Great Hall のいちばん奥には鉄道の父 George Stephenson (1781-1848) の像がある (図4)。



図2 The National Railway Museum



図3 The National Railway Museum の入口 (左側) と Great Hall (右側)



図4 George Stephenson の像



図5 Rocket号 (レプリカ)



図6 Mallard号と Shinkansen



図7 人気者の Shinkansen



図8 Shinkansen (室内でのビデオ放映)

Great Hall に展示された数ある車両の中でも注目すべきは以下の三つであろう (図 5-8).

- ・ Rocket号 : Robert Stephenson (1803-1859) により設計・製作された。3章と4章に後述。
- ・ Mallard号 : 1938年に蒸気機関車最速記録 (であると言われている) 時速 126 マイルを達成した。The Flying Scotsman の設計者でもある Sir Nigel Gresley (1876-1941) が流線型スタイルを採用した。
- ・ Shinkansen : 島 秀雄 (1901-1998) が開発の中心となったことは言うまでもない。同博物館の Official Guidebook [1] には以下のような記述がある。 “It's hard to believe that the Bullet Train - or Shinkansen train to give it the correct Japanese name - was built in 1964, just four years after we had built the last British main line *steam* locomotive. But it's true.” 筆者はさらに、“新幹線は日本の多くの部分が焦土と化した敗戦からわずか 19 年後に完成したことを信じられるか” と付け加えたいと思う。

3. The Museum of Science & Industry in Manchester

George Stephensonが1825年9月27日にStockton

- Darlington 間に導入した世界初の鉄道では、石炭輸送のみが Locomotion 号で行われ、その他にケーブルによる牽引や馬なども併用されていた。

一方、産業革命で綿工業の中心となった Manchester では西方の Liverpool 港で輸入・陸揚げされた綿の輸送が重要であり、また両都市間での商人の移動も盛んであった。そこで、Manchester - Liverpool 間で旅客を含めて全て蒸気機関車で営業運転することが計画された。このための機関車コンテストが 1929 年 10 月 6 日から開催された(後述の図 12 参照)。自重の 3 倍の荷を引いて距離 70 マイル (片道 $1\frac{3}{4}$ マイルのトラックを 20 往復) という条件で、優勝したのは George の息子の Robert が設計した Rocket 号であった [1, 3] (<http://www.sciencemuseum.org.uk/on-line/treasure/objects/1862-5.asp>)。そして翌 1830 年 9 月 15 日から Manchester - Liverpool 間の営業運転が始まった。

The Museum of Science & Industry in Manchester (<http://www.msim.org.uk/index.asp?menuid=723>) は、その開業当時の建物を利用したものである (図 9, 図 10)。5 つの展示館には以下のような番号がつけられている。①Main Building ②1830s Warehouse ③Station Building ④Power Hall ⑤Air & Space Hall。これら中で、③には Rocket 号の模型などが展示されており、④には、蒸気機関や蒸気機関車などの実物が集められている。図 12 は Thomas Newcomen の蒸気機関のレプリカ。図 13 の Novelty 号は Rocket 号には負けたが美しい外観で人気があったとのことである。また、カットされた蒸気機関車の前では子供を相手に説明をするおじさんがいて、なごやかな雰囲気満ちていた (図 14)。



図 9 The Museum of Science & Industry in Manchester の入口 (①Main Building)



図 10 ③Station Building にある説明



図 11 Rocket 号の模型 (③Station Building)



図 12 Newcomen の蒸気機関 (④Power Hall)

http://www.msim.org.uk/uploadedDocs/Document_Depository_01/Replica%20Newcomen%20Atmospheric%20Engine.pdf より



図 13 Novelty 号のレプリカ(④Power Hall)



図 14 蒸気機関車のカットモデルの前で
子供に解説する機関士おじさん (④Power Hall)



図 15 ②と③に挟まれた線路を走る Planet 号

そのほか、午後には図 15 のように実際の蒸気機関車を全長 200m 程度の線路で往復運転していた。総じてこの博物館の HP は良心的で、例えば <http://www.msim.org.uk/Galleries.asp?menuid=876> には View 360 Tour があって雰囲気把握できる。<http://www.msim.org.uk/customPages/FramesContentFrame.asp?menuid=1000> の情報も有用である。

4. The British Library

人類の貴重な記録に触れることができるのは博物館だけではない。万巻の書を所蔵する図書館こそ真っ先に挙げるべきであろう。London の Euston 駅と King's Cross 駅の間にある The British Library (<http://www.bl.uk/>) は、世界屈指の情報源である(図 16, 図 17)。入口にある巨大な像は、英国が誇る Newton がコンパスで思索している姿である。図 16 だけでは、大きさがとらえにくいかもしれないが、図 17 の人の背丈も合わせて見ていただくと、この建物の巨大さが理解いただけるかと思う。

The British Library のリーフレットには、

OUR MISSION

Helping people advancing knowledge to enrich lives.

と書かれている。The British Library では、この言葉どおりに万人に機会を与えるべく、最大限の努力をしていることが伝わってくる。開館日は特別な休日を除いて毎日、ただし以下に述べる Reading Room は日曜は閉館となっている。



図 16 The British Library 全景



図 17 玄関で 9:30 の開館を待つ人々

現地で残念に思うことのないよう少し詳細に記述しよう。Reading Room を利用するには、まず登録が必要である (<http://www.bl.uk/services/reading/admissions.html>)。このためには住所と署名とを証明する書類が不可欠であるが、登録デスクには日本人スタッフがいたので日本語の書類で十分である。今回の筆者の登録では滞在日数を考慮して 8 日間有効にしてくれたが、もし教育機関の在籍証明書も持ち合わせていたら 3 年間有効とできるそうである。登録を終えたら、登録証と鉛筆 (パソコン・貴重品も可) だけを透明の袋に入れて、他はクロークに預けなければ入室できない。さらに、貴重な書物を汚さないよう、“Clean dry hands” という注意書きが目立つように表示されている。

Reading Room のワークステーションで検索して本を請求すると、館内に保管している本の場合は平均 70 分程度 (ただし 16 時以降の請求は翌日渡し)、館外に保管している場合でも最大 48 時間

以内に届けられる。一方、Reading Room のワークステーションからなら、電子情報として画面上で閲覧し簡単にコピーできる (1 枚当たり p20, 約 45 円 : 5 枚単位で £1, 約 225 円のコピーカードを購入) 情報も少なくない。今回、筆者がその恩恵に浴したのは、*The Times* のアーカイブである。

まず The Humanities Reading Rooms の HP

<http://www.bl.uk/services/reading/humanities-rr.html> に入って、さらに

<http://www.bl.uk/collections/wider/electsubaz5.html#letter>

まで進むと

Times Digital Archive

A digital edition of *The Times*, using keyword searching and hit-term highlighting to retrieve full facsimile images of either a specific article or a complete page. The period covered is 1785-1985.

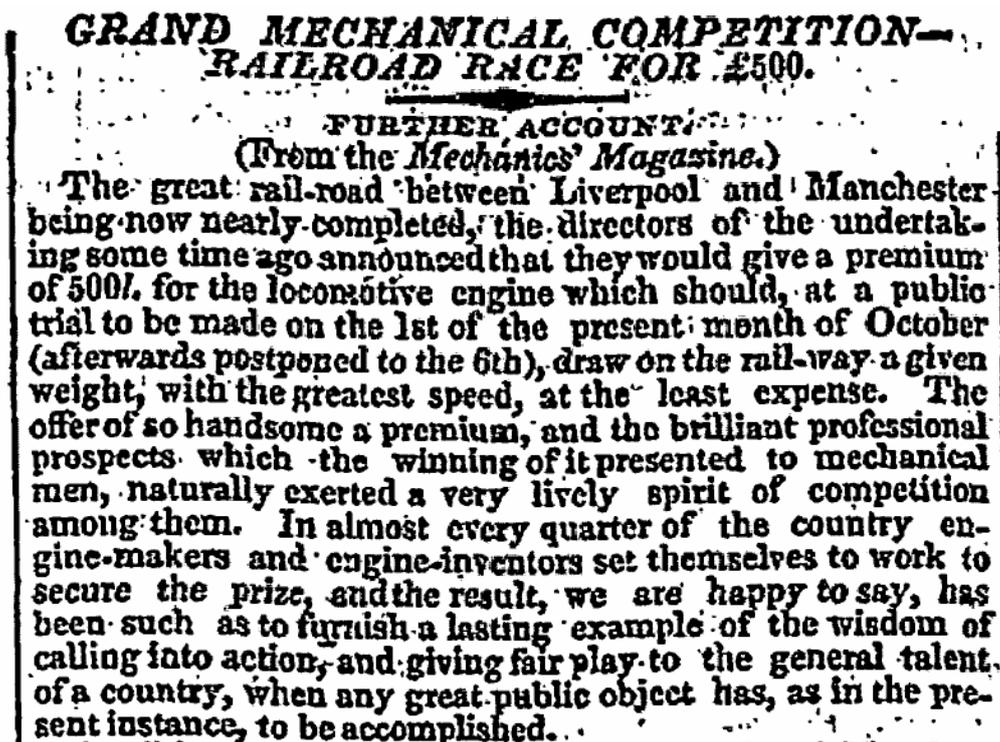


図 18

The Times, Oct 09, 1829; pg. 3; Issue 14040; col D

Grand Mechanical Competition railroad Race For £500. Further Account.

Category: News

Full Text: Copyright 1829, The Times

に辿り着く。このアーカイブはスキャンコピーされたものであるが、文章自体は電子情報化されているので、検索機能でどのような項目でも引き出すことができる。今回、1829年のRobert StephensonのRocket号を検索したら、競争に勝って£500を手にした記事(図18は冒頭部分のみ)が一瞬で出てきたのには感激した。

最後に蛇足ではあるが、地下中1階のクロークの突き当たりにある絵を紹介しよう(図19)。何気ない書棚の絵なのだが、その前を通り過ぎるときに図が変化する。最初は目まいでもしたのかと思って引き返してみたが、やはり変化する。かといって電光掲示板上の図でもなさそう。図の前にしばらく立って観察したらようやく謎がとけた。このような絵をこんなところに飾るなんて、やはり英国らしいウイットかなと感心した。

5. むすび

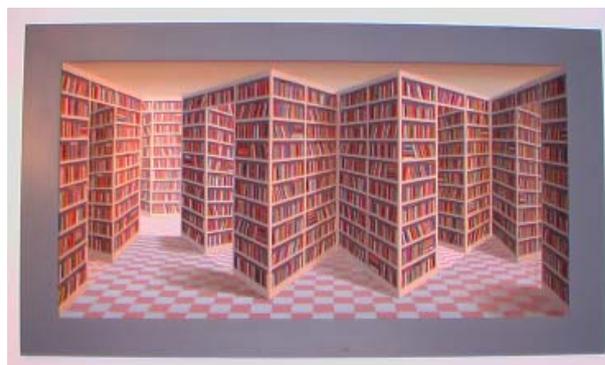
前号のIron Bridge Gorge Museumsに引き続いて英国を再訪する機会にめぐまれ、産業革命に関する一連の博物館取材することができたことに感謝したい。英国に行くたびに感じるのは、今日の文明の基礎を築き上げた底力、伝統を重んじて豊かな人生を実現しようとする強い意志、同時に新たな世界を切り拓く旺盛な独創精神である。わが国も、最後の点では負けてはいないと思うが、中世から続いているような英国の美しい街並みとは正反対のわが国の醜悪な街並み(電柱、電線、看板、コンクリート)[6]などを思うにつけ、過去から現在そして未来に文明を引き継いでいく上で、われわれが学ぶ点は多いと思う。もちろん英国の欠点も多々指摘されてはいるが、他人の欠点に注目して益することはめったにない。蒸気機関および鉄道という動機からではあったが、英国の博物館めぐりをしている間に、それ以外のさまざまなことを考えさせられた。

参考文献

(全般的に参考にさせていただいた文献については、本文中では特に箇所を明記していない。)

- [1] National Railway Museum, The World's Largest Railway Museum Official Guidebook, ISBN-13 978 1 900747 62 2, ISBN-10 1 900747 62 6.
 [2] National Railway Museum, The Story of the Train, ISBN 1 872826 1 1 3, (1999).

- [3] C.C. ドーマン(前田清志訳), スティーブソンと蒸気機関車, 玉川大学出版部(1992).
 [4] The Museum of Science & Industry in Manchester Museum Highlights.
 [5] 森本哲郎, 文明の主役—エネルギーと人間の物語—, 87, 新潮社(2000).
 [6] アレックス・カー, 美しき日本の残像, 朝日文庫(2000).



(a) 正面から



(b) 左から



(c) 右から

図19 PARADOXYMORON by Patrick Hughes

追記 1

The British LibraryのReading Roomでは無線LANが(例えば1日£6で)使用できるので便利ではあるが、備え付けのワークステーションのように館内資料の閲覧はできず、館外でインターネットを利用するのと変わらない。

追記 2

前号のIronbridge Gorge Museumsの記事でBritrail England Passが4日間有効で28,500円と記したのは1等料金であった。2等なら4日間有効で18,900円、8日間有効でも27,100円(以上2006年9月現在)と極めて経済的である。このチケットでHeathrow空港からPaddington駅までを結ぶHeathrow Express(<http://www.heathrowexpress.com/>)にも乗車できる。

伝えたいことって？

What is the intention you want to transfer?

Heart Transfer

平澤 良男 (富山大学)

Yoshio HIRASAWA (University of Toyama)

e-mail: hirasawa@eng.u-toyama.ac.jp

10年以上も前になりますが、家族全員で母の実家へ立ち寄る機会があった。子供達はまだせいぜい小学校低学年だったので、実家の近くの小川をのぞきに行ってみることにした。親が魚好きなのだから例のごとく子供もその道が大好きなのである。田んぼの真ん中の小さな小川だが、湧水だけで出来ている小川（大河川の扇状地の末端にあるので湧水量はかなり多く、その水でニジマス、アユその他ヤマメまで養殖している）で、川面を見ているうちに自分が小さかった頃の思い出が浮かんで来る。「あの頃は凄かったよなあ」……

皆で網で魚を捕まえたときは1回でバケツ一杯になるほどヤマメがいた、水温が低過ぎて足が紫色になった、裏庭の竹で作った竿、餌は柿の木にくっついたマユの中のタマ虫（イラガのさなぎ：タナゴ釣の餌に良く使われる）、季節的にいないときはハエ取り紙（若い人は知らない？）についたハエなどを……などと子供達に伝えようと一生懸命である。そのうちに探検してみようということになり、まずは上流にある孵化場（これがあつたため昔からこの小川は通称「孵化場の裏」である）の見学をしてみる。昔は管理も鷹揚で近所の子供達に餌を一握り渡してくれて、それをプールに投げ込ませてくれたものだ。それを期待したのだが、今は靴の底の泥まで感染症を防ぐためにきれいにした上で、見学者名簿なるものにサインさせられた。初めからがっかりと来たが、めげずにプールサイドを歩くと、小さな生簀にニジマスとヤマメの幼魚がいた。父親：「あ、ヤマメとニジマスだ」、案内の人：「へえ、,,、良く見分けつけましたね！」……父親の威厳復活である。プールサイドを歩くと、それについて来るようにニジマスが餌をくれとバシャバシャと跳ね回る。迫力たっぷり。やはり、いきいきした生物の姿が一番の先生と実感できる。それでは、自然の中の魚を見せたいということで、先ほどの小川に逆戻り。今、見るとひと跨ぎできそうな川でしかないのであるが、

「この橋の上で、暗くなるまで魚を釣った。今でもいるかな？」と覗き込んでみると、いるいる！。ニジマスの幼魚でしょう。上流に団地ができて随分ゴミも多くなったと聞いていたが、水そのものはきれいなようです。小さな虫を捕まえて投げ込んでみる。そこで「バシャ！」と来れば最高なのだが、いかんせん無視され、さっと逃げて行きます……「魚も賢いよねえ」うん、さすが野生……

去年から、「〇〇谷川魚保存会」なるものに入会した。昔から〇〇谷水系にいたイワナやヤマメなどを復活させようという人達の集まりである。以前からその会の存在・活動も知っていたので、機会があれば活動に参加したいと思っていた。筆者も、以前から溪流釣りをしながら下流で釣った手ごろな大きさのイワナを、人工物のないところまで持ってあがって放流していたのだが、一人で持っていく数では効果はあまりないと実感していたのである。今年もどの谷にいつ、どれくらい放流するか？の会合があった。もつとも、当然すぐ飲み会になるのだが……そのメンバーが様々で、登山好き、釣好き、薫製作りの名人、熊撃ちをする人（前日、保存会の事務所の近くで熊が捕れた！）。要するに「みやあらくもん」（富山弁で、趣味に長けた人のこと）ばかりである。自家製の薫製、イワナの昆布、その日に捕れたナメコ（自生）、昨日の熊肉を使った肉ジャガ（やや筋が多いが、臭みは全くなかった）、最後は座敷でゴロ寝……。今年も、10月初めに放流事業が実施されます。谷によっては崩壊が激しく、魚が住みにくいような場所、巨大な堰堤がいくつもあつたところ等様々ですが、自然が何を我々人間に伝えようというのか？メンバーそれぞれの思いがどんな形で自然に伝わるのか？効率は別として何かが残ることは間違いないはずす。

自分の現在の望みは、「あの熊の毛皮で作った尻当てが欲しい！」あれが、いいんだよなあ……

マイクロソフト Word 文書への図表挿入ガイドライン Guidelines for Figures and Tables Insertion into Microsoft Word Document

杉山 智之 (独立行政法人 日本原子力研究開発機構)
Tomoyuki SUGIYAMA (Japan Atomic Energy Agency)
e-mail: sugiyama.tomoyuki@jaea.go.jp

1. はじめに

本誌の編集出版部会委員という立場上、皆様に執筆していただいた原稿を e-mail 添付により送受信する機会や、レイアウト変更等の目的で手を加える機会があります。この作業で悩ましいのは、Microsoft Word という共通のプラットフォームを使っているにもかかわらず、執筆者により文書作成法、特に文書中への図表の挿入方法が実に多様である点です。時には、挿入方法が不適切なため、ファイルが(その情報量の割に)非常に大きくてメールサーバに拒絶されたり、図表が編集を拒むかのように逃げ回ったり、あるいは図中の文字が化けたりと、私達シロウト編集者が頭を抱えることもしばしばです。

本稿は、編集者側から見て望ましい図表の挿入方法について解説するものですが、同時に、PDF ファイルとして文書を配布する際の効率向上も念頭に置いています。従って、ここで示す情報は皆様がご自分のための文書を作成する際にもきつとお役に立つことと思います。

なお、本稿では Microsoft Word 2002 (Office XP) において標準インストール時のメニューバー及び右クリックメニューを想定していますが、他バージョンや他設定においても基本事項は共通です。

2. Word の設定について

Word 文書に図表を挿入するにあたり、各種編集記号を表示させることを強く奨励します。メニューバーの[ツール]/[オプション]/[表示] (図 1 参照。以後、メニューの階層に入っていくことをこのように表記します) に「編集記号の表示」というグループがあるので、その項目を全てオンにします。こうすると、挿入した図形がどの段落に関連付けられているかを示すアンカー記号などが見えるようになり、これまで不可解だった(?) Word の挙動を理解しやすくなります。

なお、Word による文書作成では、テキストを完

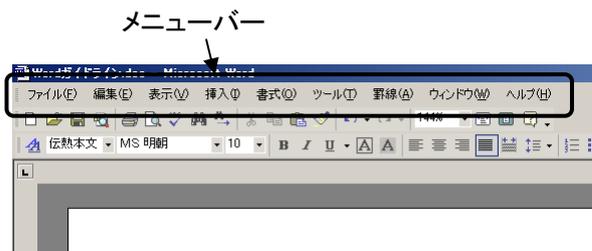


図 1 メニューバー

成させてから、最後に全ての図表を前から順番に挿入することをお勧めします。

3. 画像の形式について

図には、写真画像に代表されるビットマップ画像と、Word の図形描画機能などで描かれるベクタ画像の 2 種類がありますが、本誌ではビットマップ画像の使用を奨励します。

ベクタ画像は点や線の座標を数値として保持しているために拡大縮小による劣化が無く、一般にはデータ量も少なく済みますが、データ点数が増えるとファイルは却って肥大化し、PDF ファイルの表示に時間を要する場合があります。また、図中の文字に凝ったフォントを使っている場合、文書保存時及び PDF 変換時にフォントデータを埋め込まないと PDF 閲覧側で高い確率で文字化けが起きます。余談ですが、海外の雑誌に全角 α や全角スペースなどを含む DOC/PDF ファイルを送ってしまい、文字化けを報告されるケースをよく見ます。本文中ではなく図中だと見落としやすいので要注意です。

繰り返しますが、ベクタ画像で起こり得る上記の問題を認識し、クリアしている場合を除き、本誌ではビットマップ画像を奨励します。ビットマップ画像の形式については、BMP ファイルよりも JPEG, PNG, TIFF 等のデータ圧縮された形式を奨励します。解像度の目安は、文書内で倍率調整

した後の値で 300 DPI 程度です。

4. コピー&ペーストについて

ビットマップ画像を文書に挿入する手順として、本誌では他アプリケーションからのコピー&ペースト(貼り付け)は奨励しません。なぜなら、コピー操作によりクリップボードに取り込まれた時点で、画像データは無圧縮形式に展開されるため、元が JPEG 等の圧縮画像であってもペーストされた文書ファイルは肥大化するからです。(但し、Word-Word 間、Word-PowerPoint 間など、ある条件下では圧縮状態が維持されます。)この問題を回避して、JPEG 等をコンパクトなまま挿入するためには、メニューバーの [挿入]/[図]/[ファイルから] を使用します(図 2 の(a))。

また、ビットマップ画像・ベクタ画像を問わず、コピーまたはカットした図を貼り付ける際に、単に Ctrl+V とか[右クリック]/[貼り付け]を使うのではなく、メニューバーの[編集]/[形式を指定して貼り付け]を使うことで、貼り付ける図の形式を指定することが出来ます。指定可能な形式には PNG や JPEG 形式が含まれており、この機能を応用すると、外部のソフトを使わずとも図のデータサイズや解像度を落とすことが出来ます。

例えば、高過ぎる解像度を持つビットマップ画像を小さな倍率で張り込んである場合などに、その図を一旦コピーして JPEG 形式でペーストすれば、コピー時の表示状態に応じた解像度の JPEG として貼り付けてくれます。ただし、そのままだと拡大表示や印刷に耐えられないほど解像度が低

下するので、対象となる図を一旦拡大して(単に画面表示を変えるのではなく、図の書式設定で倍率を変える。その時点の表示状態に対して 3 倍程度が適当)からコピーし、JPEG でペーストして、最後に書式設定で倍率を下げた元の大きさに縮小します。

5. 描画キャンパスの利用

「描画キャンパス」を使うことにより、文書中に PowerPoint と同じ感覚で図形を簡単に配置出来る領域を設けることが出来ます。複数の図をまとめる場合、例えば、写真に文字や矢印を重ねる場合や、図の下にテキストボックスでキャプションを置く場合などに便利です。描画キャンパスは、メニューバーの[挿入]/[図]/[新しい描画オブジェクト]でカーソル位置に挿入されます(図 2 の(b))。本誌の原稿は 2 段組ですが、左右の段にまたがる描画キャンパスとすることも簡単です(例:図 4 の配置)。

ただし、描画キャンパス中のテキストボックス内の文字は、デフォルト設定だと元文書のページ設定(改行幅や行文字数など)の影響を受けます。これを解除する場合は、対象となるテキストボックスを選択した状態でメニューバーの[書式]/[段落]/[インデントと行間隔]の「1 ページの行数を指定時に文字を行グリッド線に合わせる」を無効にします。

6. 図のレイアウトについて

ここでいうレイアウトとは、文書全体における配置ではなく、文書に挿入した図や描画キャンパスを選択した状態で右クリックしたときに出てくる「・・・の書式設定」におけるレイアウト項目のことです。ここでさらに詳細設定を選ぶと図 3 の設定画面が現れます。ここで「文字列の折り返し」において「行内」を選ぶか、それ以外を選ぶかが大きな問題であり、この節の主題です。

本稿では、図 3 を「行内」で配置し、それ以外の図を「上下」で配置し、さらに「配置」設定において「文字列と一緒に移動する」をオフにしました。いずれも描画キャンパスを使用しています。一見すると大差がありませんが、図 2 は「・・・が低下する・・・」という文の「低」と「下」の間に配置されています。Word 上で「低」の前に何

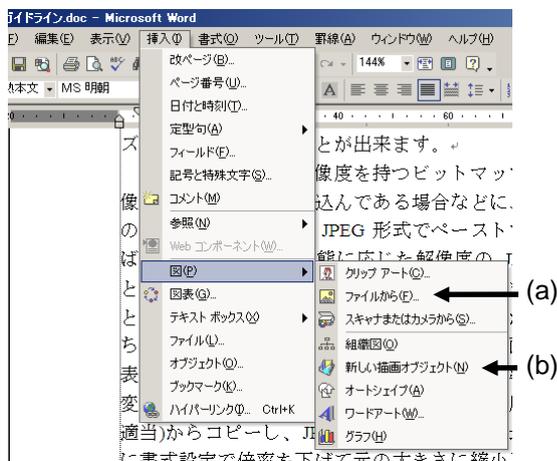


図 2 メニューバーを使った図の挿入

からの文字を挿入すると、図の位置は変わらずに「低」が図の後ろに送られます。つまり、文章と図が独立してふるまいます。



図3 レイアウトの詳細設定

一方、図3の様に「行内」配置とした場合は、あくまでも図が1つの段落あるいは文字のようにふるまい、段落における位置が固定されます。よって、図2のように段やページが切り替わる位置に図を挿入する場合や、文がその図をまたぐ場合には「行内」は不向きです。

さて、編集者の立場としては「行内」の方が扱

いやすいのですが、執筆者としては「上下」の方が断然使いやすいと言えます(ただし、次節で解説する「アンカー」を適切に取扱う必要があります)。そこで、やや中途半端な結論ではありますが、通常は「行内」を用い、必要に応じて「上下」「四角」「外周」を使い分けることをお勧めします。

7. アンカーを理解する

文書に図を挿入する場合、アンカーの理解は必須です。編集記号を表示させている場合(2節参照)、「行間」以外で貼り付けた図を選択すると、その図が文章中でどの段落に関連付けられているかを示すアンカー記号が表示されます(図4参照)。

アンカーと図は、同一ページ内に存在しなければなりません。図を貼り込んだ Word を編集すると図があちこちに飛び回ることがありますが、大抵の場合、それは、文字の挿入や削除によりアンカーが置かれた段落開始行が次ページや前ページに移動してしまい、それを図が追いかけて行ってしまふからです。従って、アンカーは最終的にその図と同じページとなる段落に置きます(図の挿入により段落が移動することを考慮する)。

アンカー記号そのものをドラッグ&ドロップして任意の段落に関連付けることが可能ですが、関連付けの後で図を動かすとアンカーが最寄りの段落に移動してしまうので、位置を決めたらアンカーをその段落に固定してしまうのが無難です。このためには、図の書式設定で、[レイアウト]/[詳細設定]/[配置]で「文字列と一緒に移動する」を無効にし、さらに「アンカーを段落に固定する」を有効にします(図3参照)。段落に固定されたアンカ

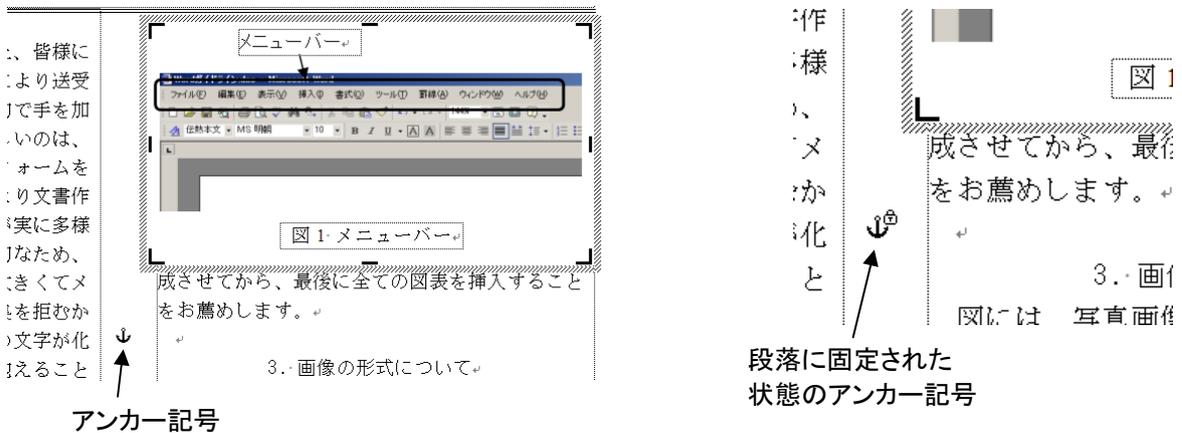


図4 アンカー記号

一の記号には右上に南京錠の絵が現れるので区別出来ます(図 4). 固定されたアンカーをドラッグで移動することは出来ません. また, アンカーが置かれた段落(の開始位置)をコピー/削除/ペーストすると, その図も同様にコピー/削除/ペーストされます.

なお, アンカーを置くことができるのは段落の先頭だけなので, もし p.1 から p.3 まで一度も改行することなく文章が続いていた場合, p.2 には図を「行内」以外で張り込むことは出来ません.

さて, 本誌では, 「行内」以外で配置した図についてはアンカーを適切な段落に固定することを推奨します.

8. 表について

ここでは, メニューバーの[罫線]/[挿入]/[表]により Word 上で表を作成するのではなく, Excel 等の他アプリケーションで作成した表を挿入する場合について述べます.

どんな表でも基本的には図として挿入します. ただし, Excel シートの一部をコピーしてそのまま貼り付けると, HTML 形式で貼り付けられてしまい(設定に依存するかも知れませんが), Word 上で体裁を整え直す必要があります. これを回避するためには, 4 節で述べたように, メニューバーの[編集]/[形式を指定して貼り付け]を使い, 「図」形式で貼り付けます. このときの図はベクタ画像

なので, 3 節で述べたフォント文字化け等の問題に気を付けて下さい.

9. まとめ

あれこれ書かせていただきましたが, 以下の 2 点のみ考慮していただくだけでもファイルサイズ低減に対して効果的です. 今後, 本誌記事執筆の機会を得られた方は, どうかこれらの点にご留意願います.

1. 挿入する図は JPEG, TIFF, PNG 等の圧縮ビットマップ形式が望ましい.
2. 図は, カット&ペーストではなく, 挿入メニューでファイルから読み込む.

なお, 筆者は Word 専門家ではなく単なるユーザーなので, 思い込みによる記述や, 他環境では成立しない記述があるかも知れません. また, 今回の内容は Word を使い込んでおられる方にとっては常識の範囲かと思います. お気付きの点やより良い方法のご提案をお寄せいただくと幸いです.

参考

- Microsoft Word ヘルプ
- <http://www.google.co.jp/>

行事カレンダー

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名(開催地, 開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2006年					
10月 14日(土) ～ 15日(日)	東北支部秋季伝熱セミナー 田沢湖高原リゾートホテル ニュー スカイ(水沢温泉郷)	'06.9.29		秋田工業高等専門学校機械工学科 土田 一: tsuchida@akita-nct.ac.jp Tel: 018-847-6035, Fax: 018-847-6041	2006.7
11月 10日(金) ～ 11日(土)	東海支部企画第17回東海伝熱セミナー ウェルハートピア長島 (厚生年金ハートピア長島)	'06.10.20		三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 丸山直樹 naoki@mach.mie-u.ac.jp Tel: 059-231-9386, Fax: 059-231-9663 http://www.es.mach.mie-u.ac.jp/~netsu_tk/17th_seminar2006.htm	2006.7
2007年					
5月 23日(水) ～ 25日(金)	第44回日本伝熱シンポジウム 長崎ブリックホール	'07.1.19	'07.3.12	第44回日本伝熱シンポジウム実行委員会 長崎大学工学部 機械システム工学講座内 Tel & Fax: 095-819-2527, E-mail: nhts44@celcius.mech.nagasaki-u.ac.jp http://nhts44.mech.nagasaki-u.ac.jp 委員長 茂地 徹, 庶務幹事 桃木 悟	2006.10

本会共催, 協賛, 後援行事

開催日	行事名(開催地, 開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2006年					
10月 12日(木) ～ 13日(金)	日本機械学会関西支部第284回講習会「熱応力による変形・破壊の評価方法と対策事例—デモ展示付き—」	'06.10.25		〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4 大阪科学技術センタービル内 Tel: 06-6443-2073, Fax 6049, E-mail: jsme@soleil.ocn.ne.jp	
10月 15日(日) ～ 18日(水)	International Workshop on Process Intensification (IWPI2006) (神戸大学百年記念会館, 神戸市)			神戸大学大学院自然科学研究科 鈴木 洋 Tel / Fax: 078-803-6490, E-mail: hero@kobe-u.ac.jp	
10月 20日(金) ～ 21日(土)	日本機械学会 No.06-29 第10回スターリングサイクルシンポジウム (神奈川大学工学部, 横浜市)		'06.9.11	(社)日本機械学会 滝本 Tel: 03-5360-3504, Fax: 03-5360-3507, E-mail: takimoto@jsme.or.jp	
10月 22日(日) ～ 25日(水)	2006年度 日本冷凍空調学会年次大会	'06.8.21-9.29		〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1九州大学大学院総合理工学研究院 Tel: 092-583-7831, Fax 7833, E-mail: jsrae2006@celcius.mech.nagasaki-u.ac.jp	
10月 26日(木) ～ 27日(金)	第24回睡眠環境シンポジウム			〒362-0806 埼玉県北足立郡伊奈町小室671-7 Tel/Fax 048-723-3606, E-mail: sse@futon-center.com	
10月 26日(木) ～ 27日(金)	Sixth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2006) (Institute of Aerospace Technology, JAXA, Tokyo, JAPAN)			AFI-2006 secretariat Institute of Aerospace Technology, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Tel: 0422-40-3210, Fax: 0422-40-3245	
10月 31日(火)	熱電発電フォーラム www.ena.or.jp/GEC 掲載予定			港区西新橋1-4-6 財)エンジニアリング振興協会地下開発利用研究センター技術開発第2部植木康行 Tel 03-3502-3671, Fax 3265, E-mail gec530@ena.or.jp	
11月 1日(水)	日本機械学会関西支部ステップアップセミナー2006	'06.10.25		〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4 大阪科学技術ビル内 主催と同 Tel: 06-6443-2073, Fax 6049, E-mail: jsme@soleil.ocn.ne.jp	
11月 7日(火) ～ 9日(木)	第3回流動ダイナミクスに関する国際会議 宮城県松島町 ホテル大観荘	'06.10.2		21世紀 COE プログラム「流動ダイナミクス国際研究教育拠点」リーダー 円山重直 (東北大学流体科学研究所) http://www.ifs.tohoku.ac.jp/21coe/icfd2006/index.html	2006.7
11月 20日(月) ～ 22日(水)	日本地熱学会平成18年学術講演会			〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20 東北大学環境科学研究科 土屋範芳 Tel/Fax 022-795-6335, E-mail: tsuchiya@mail.kankyo.tohoku.ac.jp, http://www.soc.nii.ac.jp/grsj/	
11月 22日(水) ～ 23日(木)	第14回プラスチック成形加工学会秋期大会 元気な中部から創り出そう新しい成形技術 (岐阜大学 岐阜市)			岐阜大学工学部機械システム工学科 熊田雅弥 (実行委員長), 三松順治 (代表幹事) Tel: 058-230-1892 学科共通, E-mail: pls2006@comb.mech.gifu-u.ac.jp (秋季大会関連の問合せ先)	

行事カレンダー

11月	24日(金) 25日(土)	日本機械学会熱工学部門 2006年熱工学コンファレンス (慶應義塾大学理工学部矢上キャンパス, 横浜市)		'06.9.22	慶應義塾大学理工学部システムデザイン 工学科 菱田研究室内 Tel: 045-566-1739, Fax: 045-566-1720, E-mail: tedconf06_secret@mh.sd.keio.ac.jp, http://jsme.kir.jp/Kouenkai/tedconf06/	
12月	1(金) ~ 3(日)	人間—生活環境系の過去・現在・未来	'06.9.1	'05.11.1	〒468-8504 名古屋市天白区塩竈口1-5-1名城 大学理工学部環境創造学科垣鏑研究室 内 Tel 052-832-1151, 2, Fax 052-838-2382, E-mail: jimukyoku@jhes-jp.com, http://www.jhes-jp.com	
12月	16日(土)	計算力学技術者(1級)及び(2級)(固体力学分野の有限 要素法解析技術者)ならびに計算力学技術者(2級)(熱 流体力学の解析技術者)に関する認定事業			日本機械学会能力開発促進機構 (社)日本機械学会 尾崎 Tel: 03-5360-3511, Fax: 03-5360-3509, E-mail: ozaki@jsme.or.jp, http://www.jsme.or.jp/cee/cminte.html	
12月	18日(月) ~ 20日(水)	第20回数値流体力学シンポジウム (名古屋大学 名古屋市)	'06.9.30	'06.10.30	名古屋大学 エコトピア科学研究所 シンポジウム実行委員会事務局 長谷川達哉 Fax: 052-789-4506, E-mail: cfd20@civil.nagoya-u.ac.jp	
2007年						
1月	3日(水) ~ 6日(土)	International Conference on Thermal Issues in Emerging Technologies: Theory and Applications (ThETA)	'06.7.3	'06.9.4	http://www.thetaconf.org 国内連絡: 中山 恒 E-mail: watnakayama@aol.com	2006.4
1月	23日(火)	第35回ガスタービンセミナー	'06.10.31		Gas Turbine Society of Japan 〒160-0023 新 宿区西新宿 7-5-13-402 Tel 03-3365-0095, Fax 0387, E-mail: igt@rainbow.dti.ne.jp, http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/igt	
2月	1日(木), 2日(金)	Mate 2007 13th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics" パシフィコ横 浜	'06.9.4 (専用申込 書有)	'06.11.20	〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町 1-11(社)溶接学会 MATE2007 事務局 Tel 03-3253-0488, Fax 3059, E-mail: s_kogure@tt.rim.or.jp, http://www.soc.nii.ac.jp/jws/research/micro/M ate2007.html	
3月	7日(水) 9日(金)	第56回理論応用力学講演会			〒106-8555 港区六本木 7-22-34 日本学術会 議事務局参事官(審議第二担当)付佐野和 子・藤井真木子・佐伯真奈美 Tel 3403-1056 Fax 1640 E-mail: s253@scj.go.jp	
9月	23日(日) ~ 26日(水)	NO. 07-201 国際会議 第13回国際スターリングエ ンジン会議	'07.2.15	'07.5.15	担当 エンジン部門滝本真也 〒160-0016 新宿区信濃町 35 番地信濃町煉瓦館 5階 Tel 03-5360-3500, Fax 3508, http://jsme.or.jp	
12月	2日(日) ~ 7日(金)	第9回国際ガスタービン会議 (京王プラザホテル 東京都新宿区)	'06.12.31		Gas Turbine Society of Japan Fax: +81-3-3365-0387, E-mail: igt@rainbow.dti.ne.jp, http://wwwsoc.nii.ac.jp/gtsj/2006/IGTC2007.p df	
2008年						
12月	21日(日) ~ 22日(月)	第15回微粒化シンポジウム	'06.10.6	'06.10.17	〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島 大学工学部第1類(機械系)西田研究室「微 粒化シンポジウム」講演論文担当 Tel 0824-24-7562, Fax 0824-22-7034, E-mail: nishida@mec.hiroshima-u.ac.jp	

**平成 18 年度
日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞 の募集**

日本伝熱学会は、学術賞・技術賞・奨励賞を設けています。本年度には、下記の要領によって募集を行います。ご申請・ご推薦を歓迎します。

記

1. 対象とする業績

- (1) 学術賞の対象は、原則として、最近3年間の *Thermal Science and Engineering* 誌に掲載された、あるいは、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、国内外で審査のある学術誌に掲載された伝熱に関する優秀な研究を行った研究者とする。なお、受賞対象研究課題名は、学術誌における掲載論文名あるいは日本伝熱シンポジウムでの発表論文名と厳密に一致することを要しない。また、*Thermal Science and Engineering* 誌に掲載された論文は、日本伝熱シンポジウムにおける発表の有無にかかわらず、受賞の対象とする。
- (2) 技術賞の対象は、公表された優秀な伝熱技術を開発した者とする。
- (3) 奨励賞の対象は、原則として、最近2回の日本伝熱シンポジウムにおいて優秀な論文を発表した若手研究者で、発表時に大学院生またはこれに準ずる者(大学卒業後5年以内の者)とする。
- (4) 学術賞と奨励賞の受賞者は、原則として本会会員に限る。
- (5) 学術賞は2件程度、技術賞は1件程度、奨励賞は4件程度とする。

2. 選考方法

- (1) 上記の3種の賞の選考は、6名からなる表彰選考委員会が「学会賞の審査・選考方法内規」に基づいて行う。
- (2) 表彰選考委員会は、この募集に応じるものの他に、上記の3種の賞の候補を推薦することができるものとする。

3. 提出書類

- (1) 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞 申請書・推薦書 1通
(次ページをコピーしあるいは学会ホームページからダウンロードしてご使用願います。)
- (2) 論文抜刷または技術内容説明資料 6部
- (3) 日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷 6部(該当の場合)

4. 提出先・問い合わせ先

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻
牧野俊郎教授
e-mail: a50141@sakura.kudpc.kyoto-u.ac.jp tel. 075-753-5265

5. 提出期限 平成19年1月12日(金)

以上

平成 18 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞
申請書・推薦書

申請者・推薦者名 _____ 印 _____
所属 (_____)

研究課題名 : _____
または技術名 _____
刊行物名 : _____
または技術内容 _____

(論文抜刷または技術内容説明資料 6 部添付)

受賞候補者 (氏名 (ふりがな), 本会会員資格・勤務先・職名・代表者の連絡先住所, e-mail, tel.)

研究代表者: 氏名・所属・職名 _____

連絡先 _____

共同研究者: 氏名・所属・職名 _____

関連研究の日本伝熱シンポジウム発表 (該当の場合)

論文題名: _____

講演発表: 第 _____ 回日本伝熱シンポジウム論文集 第 _____ 巻 _____ 頁 (抜刷 6 部添付)

申請・推薦理由: _____

連絡先 (推薦の場合): _____

第 44 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

開催日：平成 19 年 5 月 22 日（火）～ 5 月 25 日（金）
（5 月 22 日（火）16:00 参加者受付開始, 17:00～20:00 ウェルカムパーティー）
会場：長崎ブリックホール
（〒852-8104 長崎市茂里町 2-38, TEL:095-842-2002,
<http://www1.city.nagasaki.nagasaki.jp/brick>）

研究発表申込締切：平成 19 年 1 月 19 日（金）
論文原稿締切：平成 19 年 3 月 12 日（月）
参加事前申込締切：平成 19 年 4 月 13 日（金）

ホームページ URL：<http://nhts44.mech.nagasaki-u.ac.jp>

【シンポジウムの形式】

- ・一般セッションは、研究分野を分類して研究発表を募集し、この分類に応じてセッションを構成します。分類表は、別途、シンポジウムホームページに掲載します。
- ・今回のシンポジウムでは、特別にオーガナイズされたセッションを除いて、**すべての一般講演発表をポスターセッション形式**（1 件につき、数分程度の口頭発表と 2 時間程度のポスター発表）で実施します。詳細につきましては本シンポジウムのホームページをご参照ください。
- ・企業、大学、研究所等の技術者・研究者で、平成 19 年 3 月 31 日現在で 28 才以下の方、または発表申込み時点で学生（ただし、社会人大学院生を除く）を対象に、優秀プレゼンテーション賞の審査を実施します（詳しくは本号掲載の「優秀プレゼンテーション賞について」をご参照ください）。指導教員または研究グループ長等は奮って 1 名の代表をご推薦くださるようお願いいたします。優秀プレゼンテーション賞の審査を希望される方は、本号掲載の「優秀プレゼンテーション賞について」をお読みください。

【研究発表申込方法】

- ・原則としてウェブによる申込みに限らせていただきます。発表申込にあたっては、本シンポジウムのホームページから必要なデータを入力ください。ウェブによる申込みができない場合には本シンポジウム実行委員会事務局にお問い合わせください。
- ・優秀プレゼンテーション賞の審査を希望される場合には、その旨を必ず記載してください。その際には、指導教員あるいは研究グループ長等の氏名を必ず入力ください。なお、指導教員あるいは研究グループ長等ごとに応募者を 1 名（1 件）とします。
- ・発表申込時に、論文のアブストラクト（日本語で 200～250 字）を入力ください。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- ・申込受理のメールがお手元に届きましたら、郵便振替にて下記の口座に論文整理費（1 件につき 3,000 円）を送金ください（本号に挟み込みの払込取扱票をご利用ください）。払込取扱票には、メールで通知された受付番号（ID 番号）、第 1 著者名、論文題目（最初の 7 文字程度）、払込ご依頼人の住所氏名、振替金額をご記入のうえ、**2 月 2 日（金）**までに送金ください。郵便振替以外の方法で送金を希望される場合には事務局までご連絡ください。

論文整理費払込先

口座記号番号： 01760 - 4 - 80589

加入者名： 第44回日本伝熱シンポジウム実行委員会

- ・講演申込整理費を講演会場で支払うことはできません。また、期日までに払込みがない場合は講演申込みが無効になることがあります。ご注意ください。
- ・講演発表申込みは、講演者1名につき1題目とさせていただきます。
- ・発表の採否およびセッションへの振分けは、実行委員会にご一任願います。

【講演論文集】

- ・講演論文集として、オフセット印刷版（白黒）とCD-ROM版を作製します。
- ・オフセット印刷版の講演論文の長さは、1題目あたりA4サイズで2ページとします。論文の作成フォーマットは前回と同様、「2段組×片側26字×60行」の予定です。
- ・CD-ROM版には、オフセット印刷版と同じものか、または8ページ以内のフルペーパーを掲載することができます。様式はオフセット印刷版と同じですが、カラーの使用が可能です。ファイル容量は最大で2MBまでとし、アニメーションを挿入することはできません。
- ・本シンポジウムのCD-ROM版に掲載された論文を、本学会の論文集“Thermal Science and Engineering”（以下TSE）へそのまま投稿できます。TSEへの投稿を希望される場合は、原稿提出時に、ウェブ入稿システムでその旨お知らせください。その際、TSEの投稿規定をご一読願います。査読は、CD-ROM版に掲載された講演論文をもとに、TSE編集委員会において担当エディターを定め、通常の手順に従って行われます。オフセット印刷版の講演論文（2ページ）のままでもTSE投稿原稿として受け付けられますが、8ページ以内でより詳しく執筆されるほうが、その後の査読がより円滑に進みます。掲載可となった後に、TSEのテンプレートに従って書き直しの指示があります。なお、本システムでTSEへ投稿された場合、論文受理日は伝熱シンポジウム実行委員会での受付日になります。TSEへの掲載料は無料（ただし、カラーページと抜き刷りは有料）です。
- ・執筆要綱は、会誌「伝熱」（平成19年1月号）および本シンポジウムのホームページに掲載します。
- ・本シンポジウムでは、講演論文集をCD-ROM化するために、論文原稿を原則としてPDFファイルで提出していただきます。PDFファイルで提出できない場合には、論文整理費のほかに別途変換作業料（1件につき3,000円）を申し受けて、実行委員会がPDF化を代行します。
- ・CD-ROM化にともなって日程が厳しくなっています。原稿提出締切りまでに提出されなかった論文は講演論文集およびCD-ROMに掲載されませんので、十分ご注意ください。
- ・PDFファイルを作成する際は、フォントや画像などをPDFファイルに完全に埋め込み、どのパソコンでも同様に表示・印刷できるようにPDF変換ソフトウェアを設定して下さい。講演論文集掲載時の諸問題については原則として著者の責任とします。

【講演登録および参加費用等】

- ・論文整理費：3,000円
- ・シンポジウム参加費：
 - 一般（事前申込：8,000円、会場申込：10,000円）
 - 学生（事前申込：4,000円、会場申込：5,000円）
- ・講演論文集：
 - 伝熱学会会員：無料（CD-ROM版、印刷版共にシンポジウム参加者に当日手渡しいたします。参加されなかった会員へは、後日、CD-ROM版のみを郵送いたします。）
 - 非会員：8,000円（会場受付で伝熱学会に入会申込される場合は無料になります。）

【講演論文集の発行日】

- ・事前参加登録された方を対象に、シンポジウム開催日 1 週間程前からシンポジウム開催期間中まで、CD-ROM 版と同等の内容をシンポジウムホームページで閲覧できるようにします。
- ・特許に関わる講演論文につきましては、公知日はシンポジウム開催期間よりも 1 週間程前となりますのでご注意ください。

【懇親会】

- ・開催日：平成 19 年 5 月 24 日（木）
- ・会場：グラバー園の園庭パーティ（園庭夜間独占利用）
（〒850-0931 長崎市南山手町 8-1, TEL:095-822-8223, <http://www1.city.nagasaki.nagasaki.jp/glover/>)
雨天の場合：長崎全日空ホテル グラバーヒル
（〒850-0931 長崎市南山手町 1-18, TEL:095-818-6716, <http://www.ana-gloverhill.co.jp>)
- ・参加費：一般（事前申込: 8,000 円, 会場申込: 10,000 円. 夫婦同伴者 1 名無料）
学生（事前申込: 4,000 円, 会場申込: 5,000 円）

【交通と宿泊について】

- ・シンポジウム開催時期の長崎は、修学旅行シーズンと重なるため、直前の宿の予約が困難になると予想されます。お早めに宿を手配されることをお勧めいたします。
- ・交通と宿泊につきましては本シンポジウムのホームページをご参照ください。

【ご注意】

- ・研究発表申込の取消および論文原稿の差替は、準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮ください。
- ・論文題目と著者名が講演申込時と論文提出時で相違しないように特にご注意ください。
- ・ショートプレゼンテーション用として、液晶プロジェクタとパワーポイントが動作するパソコンを実行委員会で用意します。講演を円滑に実施するため、ショートプレゼンテーション用のパワーポイントファイルは、予め提出していただきます。
- ・参加登録費、懇親会費等は取消の場合でも返金いたしません。
- ・論文原稿の返却、別刷の配布はいたしません。
- ・その他ご不明な点がありましたら、下記の実行委員会事務局に、FAX または E-mail でお問い合わせください。

【お問い合わせ先】

第 44 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
長崎大学工学部 機械システム工学講座内
Tel & Fax: 095-819-2527
E-mail: nhts44@celcius.mech.nagasaki-u.ac.jp

第 44 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
委員長 茂地 徹
庶務幹事 桃木 悟

優秀プレゼンテーション賞（第44回日本伝熱シンポジウム）について

第44回伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生・若手研究者を対象に優秀プレゼンテーション賞の審査・表彰を行います。企業・大学・研究機関等、多数の皆様に御参加いただきますようお願い申し上げます。

日本伝熱学会・学生会委員会・委員長 黒田 明慈

- 日時：**平成19年5月23日（水） シンポジウム講演第1日目
- 発表方法：**一般の講演者と同様にショートプレゼンテーション（SP）とポスタープレゼンテーション（PP）を行ってまいります。
- 対象：**企業、大学、研究所等の技術者・研究者で、平成19年3月31日現在で28才以下の者、または、発表申込当日学生の者（ただし、社会人大学院生を除く）。
- 応募資格：**発表時（＝審査時）に、日本伝熱学会の会員（正員、学生員）、または申し込み中である事。
- 応募の数：**研究グループ長、または、指導教員等あたり、1名（1件）の発表応募とさせていただきます。
- 応募方法：**第44回日本伝熱シンポジウム研究発表申込時に、本号掲載の申込様式に従って、“**優秀プレゼンテーション賞**”の項目にチェックをし、“**指導教員または研究グループ長等氏名**”および“**研究分野の分類記号**”を入力ください（申込後の応募追加変更は、プログラム編成前で、可能な場合のみ対応します）。なお、予稿集用の原稿につきましては一般セッションと同様の形式とします。
- 審査方法：**数名の学会役員（理事、評議員、企画部会員および学生会委員等）による評価ならびに一般投票による評価に基づいて審査を行う予定です。
- 審査結果：**審査集計が終了次第、総合受付にて審査結果を発表します。また、受賞者はシンポジウム2日目の学会総会で表彰されます。

＜なお、詳細は、伝熱学会・伝熱シンポジウム実行委員会内で検討中ですので、最新情報は当該HPを御覧ください。＞

入会手続きについて

学会HP <http://www.htsj.or.jp/index-j.html>

から申込み用紙をダウンロードして下さい。詳細はHPを参照願います。

事務局

《業務内容》

- i) 入会届, 変更届, 退会届の受付
- ii) 会費納入の受付, 会費徴収等
- iii) 会員, 非会員からの問い合わせに対する応対, 連絡等
- iv) 伝熱シンポジウム終了後の「講演論文集」の注文受付, 新入会員への学会誌「伝熱」, 論文集「Thermal Science and Engineering」発送, その他刊行物の発送
- v) その他必要な業務

《所在地》

〒113-0034 東京都文京区湯島2-16-16

社団法人 日本伝熱学会

Tel/Fax: 03-5689-3401, E-mail: office@htsj.or.jp, HP: <http://www.htsj.or.jp>

(土日, 祝祭日を除く, 午前10時～午後5時)

(注意)

1. 事務局への連絡, お問い合わせには, 電話によらず, できるだけ郵便振替用紙の通信欄やファックス・E-mail等の書面にてお願いします。
2. 学会事務の統括と上記以外の事務は, 下記(総務担当副会長)にて行っております。

〒152-8550

東京都目黒区大岡山2-12-1-I1-54

東京工業大学大学院理工学研究科

機械宇宙システム専攻

宮内 敏雄

Tel/Fax: 03-5734-3183, E-mail: tmiyauch@mes.titech.ac.jp

45期新入会員 (2006. 7. 20～2006. 10. 10) 正4名・賛助1社

資	氏名	所属	資	氏名	所属
正	熊倉 晋	キャノン(株)生産技術本部	正	下山 力生	岡山県工業技術センター
正	伊藤 広之	東邦ガス(株)	賛助	トクデン(株)	
正	山下 浩司	三菱電機(株)			

45期寄付会費 (2006. 7. 20～2006. 10. 10) 5名 10,000円

資	氏名	所属	資	氏名	所属
正	秋山 光庸	宇都宮大学	正	庄司 祐子	大阪ガス(株)
正	茂地 徹	長崎大学	正	吉田 駿	
正	田子 真	秋田大学			

広告

センサテクノス

広告

テクノオフィス

広告

日本カノマックス

編集出版部会ノート：「生産技術と熱」を巡って

Note from the Editorial Board: Thoughts around "Manufacturing Technique and Heat"

熱は森羅万象に関係している。今回の特集「生産技術と熱」の扱っている範囲は物作りのほんの一部にすぎないが、熱が物作りに多様に絡んでいることが見てとれるように思う。しかし、生産技術に対して熱は現象的に大いに関係しているが、伝熱屋のかかわりはそれほど多くないのが実態ではなかろうか。

伝熱屋と生産技術の関係は、企業分野、規模、風土で様々であり一般化できないが、当社（神戸製鋼）の場合で見てみたい。素材製造に関しては、高度成長期の企業の設備導入が急テンポで進んだ時代には、伝熱屋はまずはその設備の導入計画の検討で、更に設備の安定稼動のために、生産技術の根幹の部分で大きな役割を担ってきた。しかし、設備が順調に稼動すると、省エネルギーなどでの改善的な課題はあっても、素材製造の主な課題である付加価値の高い材料開発やコストダウンに対して伝熱屋はサポート的な立場に変化してきたように思われる。当社では物を生産するための生産機械の事業も行なっている。生産機械の場合でも、熱は作られる製品の品質に係る重要な要求条件であることも多く、開発初期には伝熱屋は重要な立場に居る。しかし、あるレベルの仕様を満足できるようになると機械の差別化点はむしろ生産性を上げる機構や制御面に移ることが多い。やはり、伝熱屋は生産機械開発のサポート的な立場に変化してくる。どうも、当社の中を見てみると、昔に比べて伝熱屋の生産技術への絡み方が弱くなっているように感じられる。

このことは、技術が飽和に近づくとその分野の研究開発人材が薄くなるという当然の現象であるようにも思われる。しかし、本当に生産技術の中での伝熱技術は飽和しているのだろうか。時代が進み技術や経済環境が変化し、グローバル競争時代に突入し、製品の品質化や独自差別化への要求レベルは上がる一方である。このような製品要求に応えるための手段として、多くの場合、精緻な温度コントロールが重要になる。一昔前はトラブルを起こさないという伝熱の要求条件が、格段に高い制御精度が要求される時代になったと考えれば、それに応える伝熱技術は飽和しておらず、ブレークスルーにつながる技術革新の可能性があるのでないかと思うのである。

実際、鉄鋼、機械、電気から食品に至るまで多くの分野で温度制御の精度が向上してきた。これらの技術の多くは伝熱の見識のある人が関与したに違いない。しかし、実は企業の場合でさえ今日の伝熱屋は生産技術とのかかわりはそれほど多くはなく、潜在的なニーズをつかみ損なっているケースが結構残っているように思うのである。伝熱研究者が生産技術に対して関心を持つと、何か新しいことがひょっこり出てくるのではないか、そのような伝熱屋にとって楽しみな時代が静かに来ているのではないかと思っている。

黒坂 俊雄（神戸製鋼所）

Toshio KUROSAKA (Kobe Steel, LTD.)

e-mail: t-kurosaka@kobelco.jp

副会長 牧野俊郎（京都大学） 部会長 吉田英生（京都大学）
委員

（理事）辻 俊博（名古屋工業大学） 村上幸一（愛媛大学） 小山 繁（九州大学）
（評議員）近久武美（北海道大学） 丸田 薫（東北大学） 杉山智之（日本原子力研究開発機構）
中込秀樹（千葉大学） 加藤之貴（東京工業大学） 黒坂俊雄（神戸製鋼所）
永井二郎（福井大学） 加賀邦彦（三菱電機）

TSE チーフエディター 河村 洋（東京理科大学） TSE 編集幹事 佐竹信一（東京理科大学）

編集出版事務局：京都大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 吉田英生・犬山健二

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 Tel/Fax：075-753-5255 yoshida@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。なお、著作物の転載・翻訳のような複写以外許諾は、直接本会へご連絡下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F
学術著作権協会 (Tel/Fax : 03-3475-5618)

アメリカ合衆国における複写については、次に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.(CCC)
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Tel : +1-978-750-8400 Fax : +1-978-750-4744

Notice about photocopying

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Except in the USA

The Copyright Council of the Academic Societies (CCAS)
41-6 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan
Tel / Fax : +81-3-3475-5618

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc. (CCC)
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Tel : +1-978-750-8400 Fax : +1-978-750-4744

伝 熱

ISSN 1344-8692

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

Vol. 45, No. 193

2006 年 10 月発行

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING
(日本伝熱学会論文集)

ISSN 0918-9963

Vol. 14, No. 4

October, 2006

発行所 **社団法人 日本伝熱学会**

〒113-0034 東京都文京区湯島 2-16-16

Tel : 03-5689-3401, Fax : 03-5689-3401

郵便振替 00160-4-14749

Published by The Heat Transfer Society of Japan

16-16, Yushima 2-chome, Bunkyo-ku,

Tokyo 113-0034, Japan