

第4章 実験流体力学の進むべき道，あとがき

北海道科学大学 名誉教授

豊田 国昭*

Chapter 4 Future Prospects of Experimental Fluid Dynamics, Epilogue

*Kuniaki TOYODA, Professor Emeritus, Hokkaido University of Science

*E-mail for correspondence: toyodahm@poppy.ocn.ne.jp

本章では、最初に流体力学の将来を展望し、実験流体力学に関連して筆者が関心をもつ課題について私見を述べる。

1 流体力学の将来

1.1 対象範囲の拡大

人類の持続的発展にとって、地球環境、エネルギー、水資源、食糧の課題がますます重要になり、これらの課題に関連する流れ現象の解明・制御・予測の必要性が高まっている。それに伴って、流体力学が対象とする範囲が急速に拡大している。流れのスケール範囲の拡大では、大きなスケールでは宇宙、地球の大気・海洋の流れ、小さいスケールでは微小な生物や無生物の流体中の挙動、生体内の微細流れ、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の流れなどが注目されている。また、複雑性の拡大に関しては、非ニュートン流体、混相流、相変化を伴う流れ、燃焼・化学反応を伴う流れ、磁性流体、希薄・分子流、電離と解離を伴う流れ、液晶流れ、半導体液膜形成に伴う流れ、生体内の流れ、複雑な境界条件を伴う実在の流れなどが流体力学の研究課題となっている。

このように、科学技術の広い分野に流体力学が密接に関わっており、これらの分野で実験流体力学が重要な役割を担うことは言うまでもない。若い研究者・技術者には、未開拓の領域（ブルーオーシャン）¹⁾の研究にも挑戦することを期待したい。

1.2 コンピュータ利用の拡大

第3章²⁾で述べたように、近年の数値シミュレーションの発展は著しく、中程度の Re 数の流れは十分な精度で解かれるようになってきた。また、実験的研究との相互補完・融合により、数値シミュレーションの高精度化およびそれに伴う物理現象の解明が期待されている。

実験技術も、コンピュータの高速化・大容量化に伴って近年著しく発展したが、今後もこの傾向が続くであろう。とくに、高レイノルズ数流れへの PIV の適用や計測物理量の拡大ではコンピュータが大いに貢献すると思われる。また、大量のデータの中から意味のある情報を抽出し研究者の洞察力を刺激するデータマイニング技術の開発でも、コンピュータの利用がますます拡大することが予想される。

1.3 乱流研究の発展³⁾

乱流の研究は古くから行なわれているが、現在でも「Scientists come and go, but turbulence remains」の状態であり、乱流は研究者の挑戦意欲をかきたてる研究分野である。第3章²⁾で述べたように近年の数値シミュレーションの飛躍的な進歩により乱流構造の微細構造などが明らかにされつつあるが、その信頼性を検証できる実験が必要である。乱流研究をさらに発展させる革新的な実験技術の出現も期待したい。また、単純な乱流の実験についても、初期条件、境界条件、固有の風洞作動条件の影響についての検討と、それによらぬ一般性の追求も必要である⁴⁾。

乱流の特性は様々な分野で未解明な非線形現象の典型的な代表例なので、乱流研究の発展は関連現象の解明に貢献することが期待できる。関連分野との類似性などについては本節 1.6 項で述べる。

1.4 流れ制御技術の発展

流れ制御技術の開発は、省エネルギーおよび環境問題を考えると、流体力学分野の研究者・技術者にとって非常に重要な課題である。今後の発展が期待される技術は、摩擦抵抗の低減、はく離の制御、混合・拡散の制御、流体騒音の低減、知能流体の開発などであり、これらの制御技術の開発において実験流体力学の役割は重要である。

また食糧問題に関連して、食品製造技術に関連する流れ、植物の生育に関連する流れの解明と制御、漁業関連の流れ現象が重要課題である。

1.5 工学分野関連

工学分野の基礎研究の意義は「応用研究への道を拓く」ことにある。本項では、今後の発展が期待される「基礎研究に基づいた応用研究」課題の例を述べる。例として、機械工学分野の代表的機械である自動車、航空機、流体機械を取り上げる。なお、以下の内容は筆者の主観的意見の概要であり、詳細は文献⁵⁾に記されている。

(1) 自動車

自動車の性能に大きな影響をおよぼす主な流れ関連現象は、車体に働く空力抵抗、様々な要素から発生する空力騒音、エンジンの乱流燃焼である。これらの現象について以下の応用研究の発展が期待される。

空力抵抗に関しては、乱流制御による摩擦抵抗低減の応用研究が期待される。2007年に発行された自動車技術会の技術発展のシナリオでは、当時の C_d 値0.26を30年後に0.15にすることを目標としているが、この目標を達成するためには流れ制御技術の適用が不可欠である。

空力騒音に関しても基礎研究に基づいた応用研究が期待される。基礎研究の成果により明らかにされている空力騒音発生機構を考慮した騒音低減技術の開発が望まれる。空力音源である渦挙動を操作することにより、効果的に騒音を低減することが可能であろう。従来の基礎研究では単純な流れ場を対象としているが、実機に近い流れ場での応用研究が必要である。

エンジン内の乱流燃焼については第3章²⁾2節で述べた基礎研究が応用研究に発展することが望まれる。とくに、計算機のさらなる進歩により、大規模直接計算による応用研究の発展が期待される。

(2) 航空機

航空機は流体力学の代表的応用例であることは言うまでもない。特に乱流研究は常に航空機への応用を想定して発展してきたとも言える。乱流基礎研究の航空機への応用分野としては、乱流摩擦抵抗の低減、空力騒音の低減、ジェットエンジンの高効率化と排ガスクリーン化があげられる。

航空機に作用する抗力の大半は摩擦抵抗なので、摩擦抵抗の低減は燃料を節約し、航空会社の経費節減および航空運賃の低下に繋がる。したがって、航空機の開発では摩擦抵抗低減が重要な課題となっており、抵抗低減技術の応用研究が強く望まれる。とくに能動制御が注目されるが、実際の民間航空機($U=300\text{m/s}$, 高度10km)の胴体表面に発達する乱流境界層のバーストを発生する縦渦対を制御して、全ての低速ストリークを除去すること

を目標とした場合には、寸法が $26\mu\text{m}$ のセンサー／アクチュエータを 1m^2 に150万個も設ける必要がある。このような膨大な数のセンサー／アクチュエータを実際に設けることは現状では不可能と思われるが、将来は可能になるかもしれない。当面は制御目標を下げれば、個数を著しく減少させて大幅な抵抗低減を実現することが可能であろう。

航空機の空力騒音は現在でも大きな問題となっており、騒音低減を目的とした様々な研究が行われているが、まだ未解決の問題であり、航空輸送の増大と環境問題の高まりに伴い、騒音低減は今後の重要課題である。基礎研究に基づいた応用研究の発展が望まれる。従来、エンジン騒音が主であった航空機騒音は、その低騒音化技術の進歩により、着陸時には高揚力装置や降着装置を騒音源とする機体空力騒音が顕在化してきている。その原因ははく離せん断層や渦と翼との干渉によるものであり、実機で騒音を大幅に減らす画期的な方法は見出せていない。この種の空力騒音の低減技術の開発には、基礎研究による現象理解が不可欠である。

乱流燃焼現象も含めたジェットエンジン全体のシミュレーション技術の開発を目的として、ガスタービンエンジンの乱流燃焼予測に関する研究が米国のCTR (Center for Turbulence Research) で活発に行われており、今後の発展が期待される。航空機開発・研究におけるCFDの活用はますます進展することが予想される。

(3) 流体機械

産業基盤を支える流体機械の役割は21世紀になりますます重要となっている。地球規模の環境問題や資源・エネルギー制約などの世界的課題の解決に向けて、革新的技術開発が要望されている。そのためには、基礎研究により流体機械基本要素の流れ現象についてはかなり解明されてきたので、今後はその成果を統合した応用・開発研究の発展が望まれる。

応用・開発研究では数値シミュレーションが重要な役割を担うことは言うまでもない。現在でも数値シミュレーションは流体機械内の複雑な乱流現象を理解し予測する強力な手段となっているが、計算機や数値解析手法の高度化とEFD/CFD融合研究の進展により、全ての要素を含んだ実機条件での乱流現象が再現されることが期待される(第3章²⁾5節参照)。数値解析法としては、LESが直接計算と同程度の予測精度を与えるようになるであろう。また、高効率流体機械の開発には流れ制御技術の適用が有効である。流体機械内の乱流現象には3.2項の乱流制御技術が対象になる。翼面または流路内の摩擦抵抗低減、せん断流の混合制御、空力騒音低減の基礎研究の成果を応用する研究の発展を期待したい。

1.6 異分野との融合研究⁶⁾

人文・社会科学分野で見られる流れ現象も研究対象範囲に取り込むことが期待される。流れ現象は様々な分野で見られるので、統一的に扱うことにより新たな研究の発展および拡大が期待できる。この観点からとくに、様々な流れ現象を統一的に扱い普遍的なメカニズムを解明する非線形科学が注目される。非線形科学では、乱流のような自然科学現象だけでなく、人間の脳波、経済現象などの人文・社会科学現象も対象とし、カオス、アトラクター、フラクタルなどの共通の概念が用いられている。したがって、様々な人文・社会科学現象に乱流現象の概念を適用することが興味深い。

自然・人文・社会科学の様々な流れ現象を考慮すると、初期条件、境界条件、外乱などに影響されることは類似している。また、流れの重要な特性である不安定性、乱れなども共通している。例えば、乱流研究のキーワードである秩序構造、カスケード、逆カスケード、組織化、乱雑化などの概念は、異分野の複雑な乱れ現象の理解にも有用であろう。また、逆に異分野の概念が乱流現象の理解に役立つかもしれない。このような異分野との融合および交流による相乗効果により、お互いの分野の研究が発展することを期待したい。異分野との融合は、現代科学の課題の一つである「分化から統合へのパラダイムシフト」の一例になる。

人間の感覚器官も互いの非線形性により新たな発想が刺激されていることも考えられる。複数の視覚情報、または異なる感覚器官からの情報の非線形干渉効果がきっかけになることもあり得るであろう。また、異なった考え方をもつ研究者間の交流による非線形干渉もブレークスルーの突破口の鍵になるかもしれない。

乱流現象に関しては、「時間の矢」⁷⁾の非対称性に関する流体力学的検討が興味深い。空間は対称的に移動できるのに、時間は過去から未来に向けての一方向にしか進行できず、流れ現象の不可逆性・エントロピー増大性に対応している。学際的な普遍現象としての取扱いを期待したい。その他の流れ現象に関しても、学際的研究の発展と関連研究者の増加を期待したい。

2 EFDの対象となる流れ現象

上述のような様々な流れ現象の理解と解明のためには、EFDが重要な役割を担うことが期待される。EFDの対象となる流れ現象の例を以下に示す。

2.1 数値解析が困難な流れ

現状の最先端計算機でも解くことのできない高レイノルズ数流れの研究は実験に頼らざるを得ない。高レイ

ノルズ数流れが可能な風洞実験が必要不可欠である。また、複雑な境界条件をもつ流れも、数値解析では信頼できる結果を得ることは困難なので、実験が必要となる。例えば、自然流のモデル実験、複雑な形状の流体機器の実機実験が対象となる。

2.2 数値シミュレーションとの融合

数値シミュレーションの結果を検証するためには、信頼性の高い実験が必要になる。同じ流れ場をCFDとEFDで調べ比較する場合には、初期条件、境界条件、外乱条件を同じにすることは困難である。第3章²⁾5節で述べたような両者を融合した研究は、工業分野および自然環境の流れ現象の解明と予測に有効である。今後の発展が期待される。

特に地球環境温暖化に関連する流れ現象は従来の科学の枠組みにおさまりきらず、実験が困難で、シミュレーションの不確実性が大きく、かつ原因と結果の時間的スケールが巨大な非線形現象であるので、融合技術の進展による予測精度の向上を期待したい。

2.3 物理モデルが不明な流れ

流れの物理モデルが不明または不十分で基礎方程式の定式化が不十分な流れ現象では、実験的研究が不可欠であり続けるであろう。このような流れ現象の例としては、混相流、相変化を伴う流れ、非ニュートン流体、機能性流体などがあげられる。

2.4 乱流

乱流研究では、実験が重要な役割を担うことは言うまでもない。乱流構造の解明、乱流モデルの構築、数値計算結果の検証、乱流制御技術の開発に実験は欠かせない。とくに、従来の研究では不明な点が多い高レイノルズ数乱流の信頼できるデータを得るためには、実験が必要不可欠である。

乱流の動力学的特性が数値シミュレーションにより明らかにされつつあるが、NS方程式と結びつけて現象特性が理解できるような実験を期待したい。また、乱流に関する新たな概念の創造を刺激するような実験を期待したい。そのためには、異分野との交流も有効であろう。

2.5 マイクロ流体现象

マイクロマシンに代表されるMEMS関連技術が注目され急速に発展している、流体工学分野への適用に関する研究開発も盛んで、今後ますます発展するであろう。このようなマイクロ流体现象を対象とした計測・制御および医療機器に関連する技術の発展が期待される。コンピュータの高性能化には高度に累積された電子回路内の

冷却問題が重要課題となっているが、この分野の革新的技術開発においてもマイクロ実験流体力学の貢献が期待できる。

2.6 流れ制御手法の開発

流れ制御は、各種機械の省エネルギー、環境対策、高品質化などにおいて、基幹技術として大きな貢献が期待できる。例えば流れ制御により、航空機や自動車などの輸送機械の抗力低減やエンジン熱効率向上が実現すれば燃料消費が減少し、排気ガスの浄化が改善されれば大気汚染を少なくすることができる。このような効果が期待できる流れ制御は従来から注目されその応用技術開発が強く要望されているが、近年、基礎研究の発展により流れの理解が深まり、また制御技術のハード・ソフト面の進歩も伴い、その実用化が期待されている。

本項では乱流構造の理解に基づいた乱流制御を取り上げ、主に能動制御の最前線の研究を解説し、受動制御については最近の新たな知見を紹介する。制御対象として工業分野への有用性の高い、乱流摩擦抵抗低減、混合制御、空力騒音制御を取り上げ解説する。なお、本項の内容は文献⁹⁾の要約であり引用文献は省略されている。

(1) 摩擦抵抗低減

流れの中に置かれた物体の表面および管内流の壁面に作用する乱流摩擦抵抗の低減は、航空機・自動車などの輸送機関、各種プラントのパイプラインなどの様々な産業分野に関わる課題として、古くから多くの研究が行われているが、1990年代から乱流現象の知見に基づいた能動的な摩擦抵抗低減が注目されている。乱流機構の解明が進み、乱流摩擦抵抗発生機構に関する詳細な知見が飛躍的に豊富になり、さらに現代制御理論と流体力学の融合、マイクロ技術の著しい発展などにより乱流制御技術の開発研究が加速している。

壁乱流では壁面近傍に主流方向に伸張された秩序渦（縦渦）が自律的に生成され、その渦の誘起速度により壁面垂直方向の運動量輸送が活発になる。したがって、高速流体が壁面近傍に流入することにより壁面における速度こう配が増加し、速度こう配と粘性係数の積である摩擦応力が大きな値となる。このような摩擦抵抗の成因となる構造は空間的にも時間的にも間欠的なものである。したがって、これらの縦渦を選択的に操作することにより、効果的に壁面摩擦抵抗を低減できるはずである。すなわち、摩擦抵抗発生源を直接攻撃し弱めれば極めて効果的に抵抗が低減することが期待できる。

渦を検知して抑制することによる壁面摩擦抵抗低減が25～50%にも達することが数値シミュレーション（DNS）で予測され、その有効性が注目されている。数値シミュレーションの結果を実現するためには、DNSと

同条件の制御システムの構築が必要であり、MEMS技術を用いて試作されたシステムによる風洞実験も行われている。このシステムは4列の熱膜式壁面せん断応力センサー群および3列の電磁式変形膜型アクチュエータ群から成り立っている。これらの特性値が風洞実験において壁面近傍の縦渦構造を検知し操作するのに十分なものであること、また制御領域全体の長さが摩擦抵抗低減効果を確認するために妥当であることがDNSデータとの比較により検証されている。

上述のフィードバック制御では壁近傍秩序構造（縦渦）を検知し操作するために多数の微小センサー・アクチュエータ群が必要となる。例えば、実際の航空機の翼面境界層を制御するためには100 μm オーダーの寸法となり、製作・駆動・保守には技術的課題が多い。

一方プレディターミンド制御は、予め決められた制御入力の流れに付与するものであり、制御系が簡素になるという利点を持つ。以下に今後の発展が期待できるプレディターミンド制御手法を紹介する。

壁面上の流れにスパン方向攪乱を与えると壁近傍秩序構造（縦渦）が減衰して、摩擦抵抗が減少することが知られている。壁面をスパン方向に振動させたチャンネル乱流DNSにより、正負の縦渦はそれぞれが振動壁と同じ周期で規則的に変動しながら流れ方向に減衰し、その結果縦渦生成が抑制され摩擦抵抗が減少することが示されている。壁面振動制御を実機に適用するには技術的課題があるので、同様の制御効果を期待して、壁面からの吹出し・吸込みを時空間的に変化させてスパン方向流れを変動させる手法が提案されている。この手法による実験では10%の抵抗低減効果が得られている。

パイプライン輸送の省エネ化を目的とした管摩擦抵抗低減技術の開発が強く求められているが、脈動流を用いた再層流化現象による抵抗低減が注目される。円管内脈動乱流の実験は、定常乱流の場合と比較して摩擦抵抗低減33%、ポンプ動力減22%が実現できることを示している。

壁面加工による摩擦抵抗低減技術として、リブレット、植毛、柔軟壁がよく知られ多くの研究が行われている。近年の研究により抵抗低減機構の詳細が明らかにされつつあり、壁近傍の縦渦の抑制が重要であることが指摘されている。

アザラシ毛皮面の摩擦抵抗低減機構の実験的研究は、広いレイノルズ数範囲での低減効果は複数の凹凸周期が有効であることを示唆し、生物にヒントを得た工業的応用への抗力制御の可能性と有用性を示唆している。

水溶性ポリマーなどの添加剤を極微量添加することにより摩擦抵抗低減が生ずる現象は約70年前からToms効果として知られ、古くから多くの研究が行われている。

近年, 様々な添加物による摩擦抵抗低減効果が報告され, 特にマイクロバブル, 界面活性剤が注目されている. 添加剤による乱流制御は特別な装置を必要とせず, また外部からのエネルギー供給も不要なので, 安価で大幅な省エネ効果が期待できる. 特に流体輸送システムとして, 今後のますますの発展が予想される.

以上のように EFD により抵抗低減流れ制御技術の研究開発が行われており, 今後の発展を期待したい.

(2) 混合制御

流れの混合作用は自然界から工業分野までの広い範囲で重要である. とくに燃焼機関では, 高効率でクリーンな燃焼を得るためには燃料の混合促進が鍵となる. 異なる流体間の混合制御を考える際には, 流れの混合機構を理解することが必要である. 異なる流体の混合は接触面を介しての分子拡散により行われるので, 混合度合は接触面積に比例する. 混合層や噴流のように速度が異なる流体間の混合においては, 混合初期では接触面の不安定性により生成される大規模渦により周囲流体が巻込まれ, 境界面積が大きくなり混合が促進される. 次の段階では流れ方向に軸をもつ二次渦(縦渦)により境界面は三次元的に変形して境界面積はさらに増加する. その下流では, 渦構造は小規模な渦に分裂し, 接触面積は著しく増大し混合が促進される.

渦操作に注目した混合制御については, 様々な実験的研究が行なわれているが, さらに効果的に行うためには, 新たな手法の開発が必要であろう. 壁乱流ではフィードバック制御の有効性が期待されているが, 自由乱流の混合制御においても同様の手法の開発が望まれる. この際, 流れ場の局所的・局時的物理量の計測制御技術が必要になる. 計測技術としては, PIV, 超音波, レーザの利用, 制御技術としては, 微小プラズマアクチュエータ, レーザ, 超音波, 衝撃波, シンセティックジェットを利用した渦輪打ち込み, などを利用した遠隔制御が考えられる.

(3) 空力騒音制御

空力騒音は航空機・自動車・列車などの輸送機械, プラントの送風機, 空調設備などで発生し, その低減は重要な課題となっている. 空力騒音の発生は流れ中の渦の挙動に関連するので, その低減には渦の操作が有効である. 空力騒音の代表例である噴流騒音では, 音源となっている渦輪の合体・崩壊・干渉・分裂挙動を操作して, 騒音発生を抑制する様々な手法が研究されている.

(4) CFD との融合実験

流れ制御の開発研究では数値シミュレーションが積極的に利用されている. 制御アルゴリズムの有効性を数値シミュレーションで予測し, その結果を実験で確認し, 必要な場合にはアルゴリズムを改善して, さらに高度の制御が実現されることが可能であろう. 今後このような

CFD/EFD 融合研究がますます発展することを期待したい.

3 実験技術開発への期待

実験の成果は実験技術に依存することは言うまでもない. EFD の歴史(第1章⁹⁾3節参照)からも明らかのように, 新たな実験技術の出現が新たな発見に結びついている. 本章2節で述べた流れ現象の実験では, 新たな実験技術の出現による成果を期待したい. 今後の発展を期待したい実験技術の例を以下に示す.

3.1 計測技術

(1) 時空間計測技術

PIV の発展により様々な流れ場の時空間計測が可能になってきたが, まだ PIV 計測の課題も多い. 特に指摘されているのはダイナミックレンジが低いことで, 現状では, 乱流の微細な流れ構造を知るためのデータを取得することは困難である. 現状よりも高解像度, 高容量, 高速の PIV の開発が望まれる. 性能向上策の例が提案されており¹⁰⁾, 今後の進展を期待したい. 超音速流の PIV 計測におけるトレーサ粒子追従遅れに伴う不確かさも検討され, 簡易補正法が提案されている¹¹⁾.

近年の微細加工技術の進歩により, 乱流中の速度こう配9成分の直接測定が可能な超小型マルチ熱線プローブ¹²⁾, 速度・圧力を同時に測定できる小型プローブ¹³⁾, 壁面の温度や摩擦応力を計測する微小素子¹⁴⁾などが開発され実用化されているが, さらに小型のプローブ・素子の実現も期待される.

感圧・感温塗料(PSP・TSP)による時間変動圧力・温度場の計測技術の発展も著しく, 広い分野で各種の実験への応用が始まっている. 応用は, 生命科学や医療工学, 海洋観測の分野にまで多岐に展開され, 今後の発展が期待される¹⁵⁾.

近年マイクロ・ナノテクノロジーが注目され, 将来の発展技術として有望視され, 活発な研究開発が行われている. この技術に応用した様々なマイクロ機能粒子が提案されおり, 一例¹⁶⁾を以下に示す.

マイクロ機能粒子はPIVで使用されている程度の寸法で, 流れに追従するものである. 粒子内には各種センサーが内蔵されている. 圧力は圧力変換器により, 粒子位置はGPSと同じ原理の三次元MPS(Micro Positioning System)により測定される. 粒子の速度と加速度はMPSの測定結果から計算される. また, 粒子には超小型のマイクロビデオカメラとレーザ光線発光装置も内蔵されており, 外部からの操作により流体運動を撮影できる. この粒子には無線送受信装置も内蔵されているので, セン

サーの検知信号とカメラの撮影画像信号は外部で受信できる。複数のマイクロ機能粒子の流れに混入する場合には、認識番号を持った個々の粒子の軌跡を追跡し、センサーおよびビデオカメラからの信号を外部の記録装置に集録する。集録結果はデータ処理装置により処理され、三次元映写装置で可視化されることによって流れの詳細を検討できる。以上の可視化技術では、内部から流れを観察できるので、外部からでは観察できない流体现象の内部構造の詳細を解明することができる。このような機能粒子に近い将来に実現することを期待したい。

(2) 複数物理量の同時計測

流体力学関連分野の拡大に伴い、流れの基本量の速度と圧力だけでなく、密度、温度、濃度、混合物や化合物の個々の物質などを同時に計測することが必要になっている。また、流れ現象を解明する際に重要な物理量である渦度を直接測定する技術が開発されれば、その有用性は大きい。以上の物理量の計測については様々な手法が提案されており、今後の発展を期待したい。

(3) 新計測技術

コウモリは人間の感覚外の超音波により周囲の状況を検知して飛行している。その他の生物も優れた感覚機能を有していることが知られている。まだ未知の感覚機能もあるであろう。生物から示唆される新たな計測技術の開発も期待したい。

人間の感覚機能からも新たな計測技術に関する示唆が得られるであろう。人間は五感を通して外界の諸現象を検知しているが、それらのメカニズムの原理を解明することにより、新たな計測技術に関する示唆が得られることが期待できる。人間のインスピレーションを導く感覚を刺激する計測技術などが興味深い。

3.2 流れ制御技術

(1) MEMS

マイクロ流れ現象の解明および乱流微細構造制御の実験的研究では、MEMS 技術を応用した計測・制御技術の開発が強く望まれている。乱流制御の将来については、Gad-el-Hak は以下のような革新的制御技術を予想している¹⁷⁾。

「膨大な数のマイクロセンサーとマイクロアクチュエータが大容量の並列コンピュータを介して相互に情報伝達するような、洗練されたリアクティブな制御システムが構築され、将来は、抵抗低減、揚力増加、流体騒音抑制、混合促進、その他のいかなる流れ制御目標も達成する流体技術が飛躍的に高まるであろう」

このような乱流制御の夢の実現には、以下に示す乱流制御技術の開発が前提となる。

①ハードウェア：センサー、アクチュエータ、コントロ

ーラの微小化、高精度化、省エネ化、低コスト化

②ソフトウェア：データ処理量の軽減、制御アルゴリズムの開発

③効果的渦操作法の開発

①については、実際の応用機器に必要な時空間スケールは、航空機をはじめとする現実の機器やシステムでは多くの場合極めて小さく、数～数百 μm 、数 k ～数 MHz のオーダーである。そのようなサイズと動特性を有するセンサーやアクチュエータを製作することはほとんど不可能であったが、近年半導体製造技術などを利用したマイクロマシン技術が急速に発展しており、微小なセンサーやアクチュエータの開発が試みられ実用化が期待されている。

②については、流れの時空間スケールに対応して高速・高効率で作動する制御法の開発が必要である。近年、現代制御理論やカオス理論を適用した乱流制御アルゴリズムが開発されているが、それらを含めた革新的な制御アルゴリズムの発展を期待したい。

③については、乱流構造の理解に基づいて、対象となる渦の構造と挙動を効率よく検知して操作する手法の開発が必要である。乱流場は普遍的な微細渦要素と、流れ場の境界条件に依存する渦集団（クラスター）で特徴づけられ、さらに非線形現象特性（カオス、フラクタル）も有しているため、それらの特性を考慮した渦操作法を開発することが必要である。

(2) アクチュエータ

第2章¹⁸⁾ 2.3 項で述べたように、流体制御用アクチュエータとしてプラズマアクチュエータ（Plasma Actuator : PA）が注目され、様々な流れ場の制御でその有用性が示され、実機のタービン翼の流れ制御にも適用されている¹⁹⁾。PA の今後の発展が期待される。

近年、シンセティックジェット（Synthetic Jet : SJ）を利用した流れ制御も注目され、境界層の乱流制御、剥離制御、混合制御、噴流方向制御などへ適用されている。SJ は空洞部（キャビティ）とオリフィスから構成され、空洞部の容積を振動膜またはピストン運動により変化させ、オリフィスからの流体の吹出し・吸込みを繰り返す。吹出し過程で吹出流体が渦輪を生成し、吸込み過程開始時には渦輪は吸込まれず自己誘起速度により遠方へ伝播し続ける。その結果、連続的に発生した渦輪列は下流で崩壊してエンタインメントの大きな噴流となる。この噴流生成過程では空気源および管路を必要としないので、固体壁面からの吹出流を利用する流れ制御のアクチュエータとして非常に魅力的で注目されている。

(3) 知能流体²⁰⁾

流体中に混入された固体粒子に外部から電磁力などの力を及ぼすことにより、流れの構造を変化させる可能

性がある。また、センサー・プロセッサ・アクチュエータを内蔵した固体粒子の流れに混入し、必要に応じて自動的に集合・離散して局所的に抵抗や熱伝達を変えることが考えられる。このような粒子を内蔵した流体は、まさに智能流体と呼ぶべきであり、これからのきわめて挑戦的な課題である。このような流動は、人間社会における、個人（智能粒子）の社会行動（粒子運動）に類似しているので興味深い。

(4) 受動制御²¹⁾

上述の流れ制御は能動制御を対象としているが、優れた受動制御法の開発も今後の重要な課題である。外部からのエネルギー供給が不要で能動制御と同等の効果が得られる制御法の開発が望まれる。例えば、形状記憶合金のようにセンサーとアクチュエータの機能を持ち合わせて、自律的に渦を検知して作動する素子、または、センサー・プロセッサ・アクチュエータ機能を持ち合わせた機能性流体などが考えられる。また、2010年のノーベル化学賞の研究「化学反応のカップリング効果」で注目された触媒のような物質を添加して、渦やカオスの挙動を制御できるかもしれない。

流れ制御の開発では、従来から生物（動物、植物）からの応用が注目されているが、自然界の生物は長期間の進化の過程で独自の流れ制御法を身に付けており、そこから学べる点は多くあると思われるので、さらなる研究により新たな流れ制御法を発見することを期待したい。

環境およびエネルギー問題が人類の重要課題となっている現代において、それらの難問の解決に流れ制御は大きな貢献が期待できる。自然に優しい（逆らわない）流れ制御技術の発展に若い研究者と技術者が取り組むことを期待したい。

3.3 風洞実験技術

実験流体力学では風洞を使用することが多く、今後もその必要性が持続することは言うまでもない。数値シミュレーションの発展を考慮すると、その結果の検証のためには、従来以上に信頼できる実験結果を得ることが必要である。そのためには、第2章¹⁸⁾3節で指摘したEFDの問題点を意識して風洞実験を行うことが必要である。

また、常に不確実性を伴う実験によって得られる「実在現象」から有意な情報を抽出し、理論的研究や数値解析の成果と互いに論証しながら、流体力学的真実に少しでも近づくことのできる実験技術の開発を期待したい。JAXAで開発されているデジタル／アナログハイブリッド風洞（第3章²⁾5節参照）の発展が期待される。

3.4 データ取得・処理技術

計測技術のマイクロ化、高精度化、多次元化の進歩に

伴って大量のデータが取得・処理されるようになってきた。今後もこの方向に発展すると思われるが、それに伴ってコンピュータの役割がますます拡大することが予想される。大量のデータの中から意味のある情報を抽出し研究者の洞察力を刺激するデータマイニング技術（第2章¹⁸⁾3.4項参照）の開発を期待したい。将来は、AIおよびIoTの活用により研究活動がグローバル化し、実験で計測されたデータが、世界規格の高速通信網に接続された世界中の研究機関でリアルタイムで解析されることも予想されている²²⁾。

大量データの処理では可視化はIA（Intelligence Amplification）の手段として有効に利用されてきた。望遠鏡や顕微鏡のように、可視化は確かにデータに潜む視えないものを見る手段として、これまで多くの人間の知的判断を増強してきた。しかし、今後のデータのサイズや複雑さの増加を考慮すると、従来の可視化技術では十分に対応することが困難になり、可視化にも新たな原理が必要になってきた。新たな原理として注目され発展しているのが「知的可視化ツールとしてのAIの利用」である。研究者・技術者は知的可視化ツールが提供する可視化結果にただ頼るだけでなく、むしろその結果に鼓舞され、人間にしかできない発想を発展させることが期待される。AIは外界から検知したデータの中に未発見のパターンを発見することは可能だが、人間の証しである「普遍的な法則や真理を発見できる思考能力」は有していない。AIと人間の相互補完による両者の発展を期待したい。人間が普遍的な法則や真理を発見する論理的推論過程は、処理データに基づいた、アブダクション（発想・仮説形成）、演繹、帰納の繰り返しである²³⁾。この繰り返しにより現象の理解が深まり普遍則や真理に近づく。この過程が促進されるようなデータ処理が好ましい。

実験で取得した生データの情報処理は料理に例えることもできる。料理では、様々な材料を加工し・組合せ・味付けして美味しい食べ物ができる。実験データの情報処理でも、様々な生情報を加工・組合せ・味付けして理解しやすい新たな情報ができる。両者とも、優れた成果を得るためには、新鮮な材料（生情報）を用いて、食欲（知識欲）を刺激する食物（二次情報）を作り出している。なお、料理には様々な料理法（日本料理、中華料理、西洋料理、など）があるように、情報処理にも様々な様式があるので、栄養バランスを考えた健康的な材料および目的に応じた処理法を採用することが必要であろう。

データ処理結果の洞察では、人間の情報処理能力との関連性も重要である。人間は五感（流体実験では、主に視覚と聴覚）によって外部情報を感知するので、感知受容能力に応じた情報量の入力を心がけることが必要であ

る。受容能力は実験現象に対する問題意識（好奇心や知識欲）にも依存するが、最適条件で受容すれば、問題意識を満足させる情報として効率よく取り込まれて新たな発想の心に火をつけるきっかけになるであろう。あたかも、飢えた状態で食物を食べて健康な胃腸で消化吸收され、心身活動が活発になるようなものである。消化不良にならないように注意することも必要である。

4 EFD の環境

本節では研究者・技術者が EFD に取り組む際の好ましい環境を検討する。第 1 章⁹⁾では、実験環境と感性、EFD の精神に関する様々な見解を紹介したが、本節でも重要な点を重複して強調し、その他の思いつくことを述べる。

4.1 好奇心

最も重要なことは、流れを実感し好奇心をもち感動することであり、それにふさわしい環境で活動することが重要である。それでは、好奇心を誘発する環境とはどのような状況であろうか。「偶然との出会い」が一つのポイントになる。第 2 章¹⁸⁾ 4.2 項で述べたように、偶然は発見のきっかけにもなる。人間は予想しない物事（異常現象）に遭遇すると、本能的に欲望または危機感が刺激され、その現象に注目する。これは動物が生命を維持するための本能的反応に基づくものと考えられる。

したがって、研究環境では偶然を実感することが重要になる。実感の感度を高めるためには、現象の本質を含む美味しそうな新鮮な生情報との視覚・聴覚による接触が必要不可欠である。また、接触する際の心構えとして、既成概念に囚われないようにすることが必要である。既成概念に囚われ過ぎると、多少異なった類似の現象を既成の現象とみなしてしまう。あたかも、聴いた英語を日本語表記して英語発音を感知できないようなことになる。新現象を発見するためには、既成概念と異なった「違い（未知）を探す」ことを強く意識して、宝探しの心境で現象を感じることが必要である。これは人間教育でも同じであろう。何事も始まりは微小で目立たないことが多い。もっとも、未知がなければ研究の対象にもならず単なる確認実験である。ただし、普遍性を見出すためには、普遍現象を意識することも必要である。

未知（秘密）を意識することの大切さは、人間関係からも類推できる。昔流行した歌謡曲「知りすぎたのね」の歌詞「知りすぎたのね、あまりに私を、・・・、恋は終わりね、秘密がないから、・・・」は、知りすぎて秘密がないと恋心（好奇心）がわからないことを語っており、秘密を探求する実験では知りすぎない心境が重要であることを示唆している。ただし、研究成果をまとめる段階で

は、少なくとも既成の関連情報を十分に把握する必要があることは言うまでもない。

また好奇心が強いと、よそ見をすることにより、思わぬ偶然や秘密に遭遇することもあるであろう。好奇心に基づいた欲望をもった精神状態は、肉体的に食物に飢えているように、精神的に知識に飢えている状態である。好奇心は精神的飢餓状態と言える。

4.2 想像力

研究活動では想像力が重要であることは言うまでもない。想像は創造の源泉であり、また心理学的には喜びを伴う夢（願望）である。

想像活動を誘発する環境とはどのような状況であろうか。まず想像意欲を刺激する対象が必要である。途中までは見えるが、その先が見えない状況は想像力を刺激する。たとえば、実験結果などが中途半端な場合には、その先を想像したくなり、ワクワクして未知現象を想像するきっかけになる。想像した現象が実際に確認された場合には夢が実現した喜びとなり、異なった場合には想像の誤りを正す貴重な資料（失敗の教訓）を得たことになる。

想像を豊かにするためには、広い分野の情報（知識、体験）に触れることのできる研究環境が好ましい、異分野の現象からのアナロジー的類推、複数分野情報の合成・組合せにより、新たな発想が生まれ発展することはよく知られている。

4.3 年齢の影響

ノーベル賞受賞者が受賞対象の成果をあげた年齢は平均（1945～2015 年）で約 37 歳であり、研究の感性は 30 歳代で高いことを示している。その年齢付近の研究者・技術者がその能力を十分に発揮できるような上述の環境が必要である。この年代層を含む多様な年代の研究者が交流し、互いに刺激し合う（若者は成長し、年長者は若返り、熟年者は意欲が高まる）環境で研究活動が行なわれることが好ましい。ただし、ここで言う年齢は歴年齢でなく、肉体年齢・精神年齢である。歴年齢が高くとも、若者と同じような肉体的・精神的能力を持ち続けている例も多くみられる。今後の高齢化社会の発展に伴って、この傾向が進展することが予想される。

4.4 広い分野との接触

本連載では、研究者・技術者にとって広い分野に触れることが重要であることを度々述べた。自然科学だけでなく人文・社会科学を含む広い分野の考え方を学ぶことにより、異分野間のアナロジー的類推による新たな発想の示唆が得られことが期待できる。たとえば、文化的背

景の影響については谷一郎先生の示唆が興味深い。禅の思想「不動智」（あとがき参照）を適用して、「ひとつの実験事実や計算結果に執着せず、なるべく多くの実験や計算の結果を先入観を持たず吟味・検討すること」が重要であると述べている²⁴⁾。この示唆は佐藤浩先生の示唆「アジア人がもつ、ヨーロッパとは違う世界観、価値基準、宗教観などがものをいうでしょう。その一例が禅ですが、それらに根ざした原理の上に、新しい科学がつくられることは素晴らしい」²⁵⁾に通じている。様々な文化を取り入れて築かれた日本文化の良さが発展するような研究環境で、ブレークスルーが起こることを期待したい。

5 まとめ

本章では、現在の社会状況および科学技術動向を考慮して流体力学の将来を展望し、EFDの対象となる流れ現象を取り上げ、実験技術開発への期待を述べ、EFDに取り組む研究者・技術者にとって好ましい環境も検討した。その内容を以下に要約する。

(1) 流体力学は人類の持続的発展にとって重要な科学技術分野の課題に密接に関わっており、それらの課題の解決には流体力学分野の研究の発展が不可欠である。近年急速に進歩しているコンピュータ利用を拡大し、乱流現象の解明、流れ制御技術の開発、工学関連分野の応用研究の発展が必要である。また、新たな発想を誘発・促進するためには異分野との交流が重要である。

(2) 実験流体力学が重要な役割を担う関連分野は、数値解析が困難な流れ、数値シミュレーションとの融合、数値解析モデルが不明な流れ、乱流、マイクロ流体现象、流れ制御で、これらの分野の理解の進展が期待される。

(3) 実験的研究の成果は実験技術に依存する。計測技術では、時空間計測と複数物理量同時計測の発展、新たな原理に基づく計測技術の開発が必要である。また、流れ制御関連技術、風洞実験技術、実験データの取得・データ処理技術の開発も重要課題である。

(4) EFDに取り組む研究者・技術者は、好奇心と想像力が刺激される環境で活動することが好ましい。また、広い分野に触れて多様な考え方を学ぶことにより、新たな発想が誘発されることが期待できる。

あとがき

(連載の趣旨)

実験流体力学の意義と重要性などを記録として残し本学会会員に伝えることを趣旨として、本連載の執筆に取り組んだ。原稿作成に当っては、関連の研究者の意見も出来る限り参考にするように努めた。また、最近の情

報も記すようにしたが、筆者の知見と関心の範囲に限られていることをご承知願いたい。特に進歩の著しい分野の最新情報については、本連載内容は不十分なので、関連資料を参照していただきたい。

(連載の概要)

第1章の「実験流体力学の意義」では、実験の意義、自然現象の解明手法、実験流体力学の歴史を解説し、「EFDの精神」に関する研究者の言葉を紹介した。第2章の「既存実験技術の展望」では、最近の実験技術の発展分野、特にPIVとマイクロ実験流体力学を概説し、EFDの問題点・課題、計測上の注意事項、実験に取り組む際の心得についても述べた。第3章の「実験流体力学と数値流体力学」では、CFDの発展と有用性、EFDの必要性、両者の相互補完と融合の現状を展望した。第4章の「実験流体力学の進むべき道」では、流体力学の将来に関連して、EFDの対象となる流れ現象、実験技術開発への期待、研究環境についての私見を述べた。

(連載中に考えたこと)

本連載の担当は、筆者の研究活動を振り返り、関連の研究者の業績を再確認し、実験流体力学の現在の発展状況を知り、将来を考える良い機会になった、特に強く実感したことを以下に示す。

先達の言葉

流体力学分野で優れた業績をあげた研究者の語った言葉に感銘を深めた。体験に基づく先達の言葉は示唆に富んでいる。特に筆者が印象強く実感した例を以下に示す。EFDに取り組む読者にとって、研究活動の糧になれば幸いである。

谷一郎先生が、自分の研究のブレークスルーの体験を基に、研究者が実験観察や数値計算によるデータに基づいて問題の根底に潜む事項を探る際の「心構え」に、禅の思想「不動智」を適用することを提案している²⁶⁾。「不動智」とは「事物に動転しないこと、つまり心を留めないことを言い、智は般若（悟りを開くはたらき）で知恵であり、常に平静であるが、動いて瞬時もやまず、特定の事物に停留しない心」を意味する。例として沢庵和尚の言葉「一本の木に向かってその中の赤い葉一つを見ていれば、残りの葉は見えない。葉ひとつに眼をかけずに、一本の木に何心もなく打ち向かえば、多くの葉残らず見える」を引用している。また、実際にデータを吟味検討する探究の過程としてアブダクション（発想）、演繹、帰納の繰り返しを提案している。

佐藤浩先生も禅の思想を評価して、相変わらず未解明の乱流現象の解明に貢献する革命的なブレークスルーがアジアから生まれることを期待している²⁹⁾。また、欧州

および日本の大学で研究活動を体験した武田靖先生（チューリッヒ工科大学，北海道大学，東京工業大学）は，科学と技術の関係の議論²⁷⁾で，要素還元主義と線形性を基本とした分析的アプローチは現代科学の弱点であること指摘しており，多様な視点で現実の非線形現象を洞察するアジア的思考の有用性を期待させる²⁸⁾。

乱流研究のロマンについて語った木谷勝先生の言葉「1980年代前半までは，限られた情報から流れを考える楽しみがあった」²⁹⁾が印象深い。研究論文はたくさんのデータを羅列することではなく，不十分なデータからも新たな発見により知的興奮が得られることを示唆しており，EFDの研究者を元気づける言葉である。また，「毎年毎年の進歩はゆっくりでも，進歩が蓄積されてあるときブレークスルーが起こる。そのような過程を繰り返して今がある。今後も同じことが起こるでしょう」と述べており，本原稿作成中に開催された冬季五輪で，地道な練習を繰り返して爆発的な成果をあげた日本選手の活躍に実例を重ねた。

企業で優れた業績を上げた技術者・研究者の言葉「技術者・研究者の原動力は探求心であり，基本を大事にして，粘り強く興味を持続することが重要」や「技術開発における発明，発見の源泉は欲望から湧き出る気づきやひらめきに伴う発想である」も示唆に富んでいる。

AIについて

近年のAIの発展は著しく広い分野で話題となっており，本連載でもEFDへの適用の有用性を述べた。AI技術の有効利用によりビッグデータの処理などが高度化・効率化され，人間のひらめきや発想が誘発・促進されて，未知現象の解明が進展することを期待したい。人間の五感とAIの相互補完・融合によるEFD研究活動の発展を期待したい。

（連載を終えるに当たっての心境）

原稿執筆は，筆者の半世紀の研究教育活動を振り返る良い機会になり，お世話になった様々な方々に対する感謝の念がますます強まった。連載では，ご指導ご助言いただいた方々の有意義で示唆に富んだ多くの考え方を紹介した。筆者が実感し次の世代に語り伝えたいと思っていることは，ほとんどすべてそれらの考え方に含まれており，結局，筆者はそれらを語り引き継ぐ幸運に恵まれたことになる。EFD関連の研究会（2011年）で研究活動を回顧して語った本阿弥眞治先生（東京理科大学）の言葉「霧の中を歩めば，覚えずとも衣湿る」（道元），速水洋先生（九州大学）の言葉「その時の出会いが，人生を根本から変えることがある。良い出会いを！」（相田みつを）を思い出し実感している。

執筆をしながら，様々な先達の言葉をじっくり噛み締

め，その味の良さを再確認した。あたかも完熟した果物を味わっているようで，果物によっては見ているだけでよだれが出てくるようなものもある*。読者も，その美味を味わい温故知新の機会になれば幸いである。しかし，筆者にとっては美味である果物も，若い読者にとっては無味乾燥かもしれない。また，語り部としての筆者の言葉の中には，読者にとって毒となるものが含まれていることを恐れる。その場合には毒消し薬を見つけて飲んでいただきたい。

*筆者にとって，いつまでも新鮮で美味に見えた言葉を以下に記す。

・Something new, Something different

・基礎研究に基礎を置いた応用研究，応用研究に未来を拓く基礎研究

・21世紀の研究者・技術者には幅広い知識を基盤とした高い専門性（真の専門性）が必要

これらの言葉は，在職中は研究室に掲示していつも見ていたが，十分に食べて味わうことができなかったのは残念である。

（最後の一言）：（自分自身への気休めの言葉）

「見聞きたり体験したりして実感したことを記録して語り伝えておけば，それを見聞きた人がその先へ行くためのきっかけ（手助け）になるかもしれない。また，道を誤らない警鐘になるかもしれない」

引用文献

- 1) W. チャン・キム，レネ・モボルニュ：[新版]ブルーオーシャン戦略—競争のない社会を創造する（ダイヤモンド社，2015）。
- 2) 豊田国昭：実験流体力学の過去・現在・将来 第3章 実験流体力学と数値流体力学，ながれ，37 (2018) 61-68。
- 3) 日本機械学会編：流体工学最前線（共立出版，2011）73-171。
- 4) 佐藤浩：新世紀の流体力学は何を目指すべきか，ながれ，20 (2001) 445-452。
- 5) 文献 3)，158-160。
- 6) 文献 3)，160-161。
- 7) 松浦荘：時間とはなんだろう（講談社ブルーバックス，2017）59-75。
- 8) 文献 3)，134-152。
- 9) 豊田国昭：実験流体力学の過去・現在・将来 まえがき，第1章 実験流体力学の意義，ながれ，36 (2017) 327-332。
- 10) 榊原潤：PIVの歴史と技術動向，ターボ機械，43 (2015) 692-697。

- 11) 小池俊輔: 高速気流の PIV 計測と不確かさ, [No.14-1] 日本機械学会 2014 年度年次大会講演論文集, (2014) W052002.
- 12) Wallace, J. M. and Vukoslavavčević, P. M.,: Measurement of the velocity gradient tensor in turbulent flows, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 42 (2010) 157-181.
- 13) 高橋護, 岩野耕治, 酒井康彦, 伊藤靖仁: 二次元乱流噴流における速度勾配と変動静圧の同時計測, 日本機械学会論文集, 83 (2017) 17-00004.
- 14) 豊田国昭: マイクロ実験流体力学, 日本機械学会誌, 104 (2001) 518-519.
- 15) 浅井圭介: PSP・TSP—その今と未来, 可視化情報, 38 (2018) 2.
- 16) 豊田国昭, 平元理峰: 可視化の夢—マイクロ機能粒子などの開発—, 可視化情報学会誌, 22 Suppl.2 (2003) 46-47.
- 17) Gad-el-Hak, M.,: Flow Control—Passive and Reactive Flow Management— (Cambridge Univ. Press, 2000).
- 18) 豊田国昭: 実験流体力学の過去・現在・将来 第 2 章 既存実験技術の展望, ながれ, 36 (2017) 421-427.
- 19) 松沼孝幸, 瀬川武彦: リング型プラズマアクチュエータを用いたタービン翼列の漏れ制御における先端エッジ形状の影響, 日本ガスタービン学会誌, 45 (2017) 163-169.
- 20) 日本機械学会編: 創立 100 周年記念 機械工学 100 年のあゆみ, (日本機械学会, 1997) 99.
- 21) 文献 3), 157.
- 22) 菱田公一: 混相流動計測—点・面・時空間, さらにその先へ, 混相流, 31 (2017) 250-256.
- 23) 米盛裕二: アブダクション—仮説と発見の論理— (勁草書房, 2007).
- 24) 本橋龍郎: 禅と谷先生, 宇宙航空研究開発機構特別資料, (2008) JAXA-SP-08-006, 5-6.
- 25) 佐藤浩: 壁は打ち破れるか—流体力学の危機, ながれ, 13 (1994) 421-422.
- 26) 谷一郎: 計算機と流体力学, 谷一郎先生古稀記念講演集 (1977).
- 27) 武田靖: 「科学技術」か「科学と技術」か—技術の側から考える—, 混相流, 28 (2014) 273-276.
- 28) 武田靖: 欧米の科学と技術—科学の終焉と技術の役割, 日本機械学会北海道支部流体工学部門平成 29 年度第 3 回流体工学研究会・懇話会 (2018.3.17, 室蘭工大).
- 29) 石川仁: 40 周年記念インタビュー 木谷勝先生, ながれ, 27 (2008) 369-376.