103 破損解析におけるフラクトグラフィの役割

Role of Fractography in Failure Analysis

正 江原隆一郎 (香川大)

Ryuichiro Ebara, Dept. of Advanced Materials Science, Kagawa University, 2217-20, Hayashi-cho, Takamatsu-city, Kagawa,761-0296,Japan

Fractography is one of the indispensable key technology for failure analysis in failed machine components and structures. In this paper, in the beginning, it is described on a brief history of fractography. It is also described on a role and a procedure of fractography in failure analysis. Then it is briefly described on the availability of fractography by use of a couple of examples analyzed by fractography. First some characteristics of failed hot forging die quantitatively analyzed by use of stretched zone width are exemplified. Then characteristics of corrosion fatigue failure of steam turbine blades such as corrosion pit at initiation area and intergranular fracture at propagation area are also demonstrated. The possibility of quantitative analysis of corrosion fatigue fracture surface by use of brittle striation spacing also demonstrated based upon the quantitatively analyzed data of corrosion fatigue fracture surface of ship structural steel in sour crude oil environment. Finally future problems on fractography are touched in brief.

Key Words: Fractography, Forging die, Stretched zone, Steam turbine blade, Corrosion fatigue, Corrosion pit, Intergranular fracture, Ship structure, Brittle striation

1.緒言

フラクトグラフィは破損解析における極めて有益な技術の -つである。しかしながら、最近その技術があたかも成熟し た技術のように見なされ、必ずしも活発な研究がなされてい ないように思われる。また、現場では若い技術者に十分な技 術伝承が行われていないために同技術が有効に適用されて いるとは言い難い面も多々感じられる。本稿はフラクトグラ フィ技術の重要性を再認識し、今後の更なる研究の必要性と 有効な活用を願って取りまとめたものである。先ずフラクト グラフィ技術の歴史を簡単に記述する。次ぎに破損解析にお けるフラクトグラフィの役割と手順について概略を記述す る。さらに、これまでに著者が経験した多くの破損解析事例 の中からストレツチゾーン幅を用いた熱間鍛造用金型の定 量解析事例、蒸気タービン動翼の腐食疲労破面解析事例およ び船体構造用綱のサワー原油中における腐食疲労破面に出 現する脆性ストライエーションによる定量破面解析事例を 紹介することによりその有用性を記述する。最後に、今後必 要な研究課題について簡略に記述する。

2.フラクトグラフィの歴史

フラクトグラフィの歴史の中で技術が特段に進歩し,普及 した節目は3つあると考えられる。最初は1945年のZapffe & Clogg による ASM の論文"Fractography-A New Tool for Metallurgical Research⁽¹⁾であろう。本論文ではアームコ鉄や シリコン鉄のへき開破面が光学顕微鏡により観察され、その 技術の有用性が紹介され、"fractus"というラテン語と "graphos"というギリシャ語を合成し,フラクトグラフィと言 うネーミングがなされている。同論文中に記述されているよ うに 1722 年 に初めて R.A.F.de Reáumur により鋼のファセ ットが観察されて以来、1849 年に H.A.Sorby により岩石の薄 片が観察されたりしていた。しかしながら、A.Martens が鉄 の破面観察で失望したように、光学顕微鏡の焦点深度の浅さ はフラクトグラフィ技術の発展を阻害していたと言えよう。 この欠点は電子顕微鏡の適用により大きく改善されること になる。すなわち2番目の節目は1956年の C.Crussard 等に よる論文 "A Study of Impact Tests and the Mechanism of Brittle Failure"(2)の出現である。本論文では炭素鋼のへき開破 面が透過電顕によるプラスチックーカーボン2段レプリカ法 で明瞭に観察され river pattern と命名されている。ここに Electron microfractography が誕生したことになる。 これ以来各種破面の観察が精力的に行われることになるが 特に米国における進歩が著しかったように思われる。この頃、 線形破壊力学の誕生に伴い、特に航空機の Fail safe design と 関連し、高強度鋼,アルミニウム合金,チタン合金等の疲労、 SCC 等の破面を中心に多くの観察が行われている。 Douglas,Boeing,等の航空各社、海軍研究所等で活発な研究が 行われ、成果のは多くの ASTM の STP や Metals Handbook 等に蓄積されている。第3の節目は走査電顕の普及でありそ れ以降のフラクトグラフィ技術の進歩は著しく、材料、材料強 度の研究および破損解析にフラクトグラフィ技術が恒常的 に使用されることに到ったことは述べるまでもない。 我が国における最初のフラクトグラフィの論文は 1960年の 徳田による"炭素鋼の疲労破面の電子顕微鏡による観察"(3) であろう。その後、日本機械学会、日本材料学会、日本高圧 力容器技術協会、日本鉄鋼協会等で活発な研究が行われ、多く の成果が得られている。また、この間,フラクトグラフィに関 する有益な書籍^{例えば (4)(5)(6)}も出版されている。特に、日本 材料学会フラクトグラフィ部門委員会における活動は現在 も続行されており、その最新の成果が最近出版されている(?)。 最近ではレーザ顕微鏡,トンネル顕微鏡,AFM 等の新しい観 察機器の進歩に伴い3次元破面解析への関心が高まり、活発 な研究が展開されつつある。日本機械学会においても最近 「数値的破面解析法」(主査:九大村上敬宣教授) に関する活 発な研究活動が行われている。

日本機械学会 [Na01・28] 材料力学部門 2001 年春のシンポジウム講演論文集 - 材料力学の未来:21 世紀を生き抜くために-〔'01・3.28,29,東京〕

3. 破損解析におけるフラクトグラフィの役割と 手順

フラクトグラフィは破面の特徴から破壊形態及び破壊の 原因を推定する技術であり破損事故解析に際しては必ず使 用されていると言っても過言ではない。フラクトグラフィ技 術は破損事故解析手順の全てに深く係わっている。したがっ て、破面から得られる情報は多く、手順のどこかに不明な点 や間違いがあれば、過った原因を推定することになる。特に 破損状況の把握,破面の採取を慎重に行うことが肝要である。 技術的には破面起点部の取扱いおよび実機事故破面の錆取 りに特に注意が払われている。破面の起点部は破壊原因の鍵 を握っているので現場における検証時や破面採取時に損傷 を来すことなく破面を実験室に持ち帰ることが重要である。 錆取りについてはブランクレプリカにより機械的に剥離す る方法の他に錆取りの標準的な方法は存在せず、試薬の種類 及び浸漬或いは超音波洗浄の時間は錆の程度に応じてノウ ハウとして決定されている。筆者らは、例えば鉄鋼材料に関 しては酸化膜が薄く,付着物が少ない時には 50%クエン酸水 溶液と 50%アンモニウム水溶液の混合溶液に 2~3 分浸漬,付 着物が厚い場合には、アセトン 50CC と 0.5% 塩酸との混合溶 液を使用し、5~10 秒の超音波洗浄を数回繰り返す方法を常 用している。ただし、酸洗法は人為模様を導入することが多 いので条件の選定など細心の注意を払う必要がある。なお, ブランクレプリカは人為模様を導入しないように注意すれ ば根気よく続けることによりある程度の厚さの酸化膜を除 去し破面の同定を確実に行える方法と言える。

破壊事故破面の同定は先ず定性的になされるがそのために は破壊の基本的様式と破面の特徴を十分理解しておくこと が必要である。基本破面の特徴を理解するためには特に破面 起点部、環境破面、高温破面及び高硬度鋼、鋳鉄などの特殊な 破面形態の把握が重要である。また、定量解析に関してはス トライエーション幅による疲労破面の定量解析、ストレッチ ゾーン幅による不安定破面の定量解析、デインプル破面率と 靭性値との関係を利用した脆性破面の解析など事故解析へ の適用例の蓄積がなされている。

4熱間鍛造用金型の破面解析

熱間鍛造用金型の破損は金型の材質、設計,製作及び鍛造作 業の何れかが原因で生じることが知られている。しかしなが ら金型の破損は Fig.1 にナックル仕上型について示すように、 コーナー部を起点として発生し,脆性的に破壊(一発破壊)す ることが多い。したがってマクロ破面を一見すれば破壊原因 が容易に推定できるために金型の破損事故解析にはミクロ フラクトグラフィは特に必要とはされていなかったように 思われる。また、型鋼のように高硬度鋼の破壊とミクロ破面に 関する情報が少ないことも一因かと思われる。ところが、マ クロ的には一発破壊のように見えても Fig.2 のタービンブレ -ド金型の破壊例に示すように、破壊は表面からではなく表 面から疲労や熱疲労き裂が生じた後、表面直下から生じてい ることが低倍率の破面観察により容易に識別出来ることが 判明している。この一発破壊と疲労破壊部の境界にはしばし ばストレツチゾーンが観察され、ストレツチゾーン幅を測定 することにより金型破損時の破壊靭性値および使用温度の 推定が可能であることが明かにされている(の(の(1))。

Fig.3 はコネクテイング・ロッドおよびリバース・ギヤ型の 破壊起点近傍の破面を示す。疲労破面とへき開破面との間に ストレッチゾーンが観察されている。ここで代表的プレス用 金型 SKD62 相当鋼の計装化衝撃試験の結果得られた動的破



Fig.1 The macroscopic fracture surface of a knuckle forging die for a motor vehicle, SKD62, Arrows a and b show crack initiation points (Ebara and Kubota ⁽¹⁰⁾)



Fig.2 The macroscopic fracture surface of a turbine blade die (Ebara and Kubota ⁽¹⁰⁾) a: surface layer, b: brittle fracture surface

壊靭性値 (K_{1d})および試験温度とストレッチゾーン幅 (SZW) との関係(Fig.4,Fig.5)を利用すると両金型破損の際の破損温 度の推定が可能となる。コネクテイング・ロッドの場合 SZW=12.5 μ m であるから破損時の K_{1d} =110kgf・mm⁻³² 破損温度は 55℃と推定された。同金型の場合,現場からは予 熱温度は 100℃以下で予熱不足のため 10 数回でコーナ部に き裂が生じたと報告されている。一方,リバース・ギヤの場合 には SZW=41 μ m であるから破損時の K_{1d} =153kgf・mm⁻³² 破損温度は 200℃と推定される。この金型の場合、現場では 予熱は十分で金型のセッテイングの不具合が破損原因とさ れており SZW による破損温度の推定が妥当であることが明 らかである。なお、ハンマー用金型に関しては、命数が 2000



Fig.3 Stretched zone observed on fracture surface of hot forging die ,a: connecting rod, b: reverse gear (Ebara and Kubota¹⁰) C: Cleavage, F: Fatigue, SZ: Stretched zone



Fig.4 Dynamic fracture toughness (K_{1d}) as a function of tested Temperature,SKD62 (Ebara and Kubota⁽¹⁰⁾)

回以下で破損したフランジ・ヨーク金型の解析例が報告されている。この場合,型鋼の清浄度が d₆₄₀₀=0.083%と特に異常はなかったが鍛錬不足の為に破面の疲労き裂と一発破壊の境界部に長さ約 1mm の介在物 (MnS) が認められた。この場合にも疲労破面と一発破壊との境界に幅 8~10µm のストレ



Fig.5 K_{1d} as a function of SZW (Ebara and Kubota⁽¹⁰⁾)

ッチゾーンが観察された。別に求めたハンマー用金型 SKT4 鋼のストレッチゾーン幅 K_{ia} および試験温度との関係よりこ の金型の破損温度は 100℃ 以下で材料の不良に加えて,予熱 不足の故に破損したことが明かになった。その結果、本金型 は鍛伸回数を適度にコントロールすると同時に予熱温度を 適切に上昇させることによりその後の破損を防止している (⁹)。このように、ストレッチゾーン幅は実金型の不安定破面 の定量解析に有効であり、その結果が鍛造作業や金型の材質 に適切に反映できることが明かになった。

5. 蒸気タービン動翼の腐食疲労破面解析

蒸気タービン動翼の疲労破面は肉眼による観察でも比較的 平滑な破面にビーチマークが容易に観察されることが多い。 しかしながら、マクロ的には典型的な疲労破面であつても走 査型電顕による観察では大気中疲労破面に特有なストライ エーションは観察されず, Fig.6に示すような典型的な粒界破 面が支配的に観察されることがある(11)。この場合,破面近傍の 表面にはしばしば微小な腐食ピットを伴ったサブクラック や破壊起点部の腐食ピットおよびき裂の分岐といった腐食 疲労の特徴を示す現象が観察されている。これらの事実から 破壊は腐食疲労によると判定されるが起点部の微小な腐食 ピットおよび粒界破面は走査型電顕により初めて明瞭に観 察され得るものであり走査型電顕によるミクロな判断を要 する典型的な破面解析事例である。このことは高速回転体で あるタービン動翼に湿り,乾きを繰り返す段落で CI⁻等の不 純物の濃縮が生じれば見掛けはマイルドな腐食環境である 水蒸気環境中においても腐食疲労が生じるという新しい現 象の発見にフラクトグラフィ技術が活用された好例である と言える。なお、粒界破面率はFig.7に示すようにKmaxに依 存して変化しており(12) 粒界破面率から破壊力学的に作用応 力の推定が可能である。12Crステンレス鋼の場合には腐食 性環境の相違により破面形態及び粒界破面率が異なること が実験により確かめられている(13)ので今後これらの基礎デ -タが実機事故破面の解析に活用され作用応力のみならず



Fig.6 Intercrystalline fracture of the failed turbine blade Arrow shows crack propagation direction (Ebara et al. ⁽¹¹⁾)



Fig.7 Fraction of intergranular fracture vs. Kmax (Ebara et al ⁽¹²⁾)

作用環境の判定も可能となることが期待される。

6. VLCC 原油タンク 構造部の 腐食 疲労損傷

VLCC 原油タンクサイドロンジのフェイスプレートに疲労 き裂が発見され、疲労き裂進展域に極端に凹凸のある急速な き裂進展が想像される疲労破面が観察された。この疲労き裂 は従来の強度解析結果からは十分に説明できないもので、し かも同一構造を有する船舶においてメキシコ航路を含む船 舶では疲労損傷が生じていたのに、ペルシャ湾航路のみに就 航した船舶には疲労損傷が全く生じていないという特筆す べき事実が判明した⁽¹⁴⁾。..種々検討の結果、原油中の硫化水素 の影響による腐食疲労損傷の疑いが生じ、船体構造用鋼の腐 食疲労強度におよぼすサワー原油中の硫化水素の影響に関 する研究が行われた。H₂S400pmを含有するサワー原油中に おける KA36(TMCP)鋼の疲労き裂進展試験の結果、△K が 16MPam¹²以上の領域においては大気中に比較しサワー原油 中の疲労き裂進展速度は著しく加速され,⊿K が 30Mpam^{1/2} ではその加速度は7倍に達することが判明した⁽¹⁵⁾。溶接継手 に関しても同様の結果が得られた⁽¹⁶⁾。サワー原油中の腐食疲 労破面は母材,溶接継手共に茶褐色で EPMA による観察の結 果、FeS が同定され疲労き裂進展試験中にサワー原油と船体 用鋼との腐食反応があったことが推察された。腐食生成物を インヒビターを含む5%硫酸水溶液で除去した後 SEMにより 破面観察を行った。その結果、疲労き裂進展速度の加速が観 察されたサワー原油中の腐食疲労破面はへき開破面が支配 的で脆性ストライエーションが支配的に観察された。一方、 疲労き裂の進展速度の加速が観察されなかつた破面は延性 ストライエーションが支配的に観察された(Fig.8)。エッチビ





Fig.8 Fracture surface in sour crude oil (Ebara et al.⁽¹⁵⁾) H₂S 400ppm, KA36(TMCP) $\bigtriangleup K(MPa \cdot m^{1/2})$; a) 31.4 b) 17.3

-14 -





ットの形状から破面は(100)へき開破面と同定された。脆性ス トライエーションの間隔は⊿K が大なる程広くなることが 判明した。しかもストライエーション間隔を繰り返し数で除 したSと⊿Kとの間には略1:1の対応があることが明かに なつた(Fig.9)。この関係は KA36 (TMCP) 鋼溶接継手の熱影 響部および軟鋼に関しても同様に観察されている。腐食疲



mechanism in sour crude oil environment (Ebara et al⁽¹⁵⁾) ,H₂S 400ppm

労き裂進展後のサワー原油中の H₂O、pH 値は試験前に比較 し減少している (Table1)。したがつて、サワー原油中では比 較的高い⊿K の領域では船体用鋼とサワー原油中の H₂S と H₂O が反応して生じた H₂が H となつて疲労き裂先端の塑性 域に侵入し塑性域が水素脆化域になることにより疲労き裂 がへき開面上を脆性ストライエーションを伴いながら進展 することにより疲労き裂進展速度が加速されると結論づけ られる(Fig.10)。実船に見出された破面は腐食が激しく詳細な 破面観察ができなかつたが疲労き裂進展部の凹凸の激しい 破面はサワー原油中の H₂S の影響によるものと推察された。 このように腐食疲労破面に脆性ストライエーションが生じ ることはアルミニウム合金⁽¹⁾,軟鋼⁽¹⁹⁾およびステンレス鋼⁽¹⁹⁾ でも見いだされている。このように,本研究の結果、延性スト ライエーションと同様に脆性ストライエーションに関して

Table 1	Compositions and various properties	of used crude oil	(Ebara et al (15))
Tuble 1			(Louid of all

Crude oil	Specific gravity (15/4°C)	Kinetic viscosity (50°C cst)	Total S (wt%)	Water (ppm)	CI (ppm)	H₂S (ppm)	Fe (ppm)	C (wt%)	H (wt%)	N (wt%)	pН	Gasoline ¹⁾ (wt%)	Kerosene ²⁾ (wt%)	Light oil ³⁾ (wt%)	Heavy oil⁴ (wt%)
As received	0.8610	5.456	1.78	340	77	3	1.6	84.36	12.63	0.34	7.3	16.0	17.3	19.9	46.8
After crack propagation test for 400hrs	0.8927	11.16	2.15	230	90	380	2.5	84.03	12.29	0.30	5.1	7.0	20.5	23.5	49.0
After fatigue life test for 2933hrs	0.9086	15.83	2.50	210	92	340	3.1	83.8	12.2	0.1	4.3	2.0	9.0	17.0	72.0

Note:Distillate temperature 1) R.T~160°C, 2) 160~250°C, 3) 250~360°C, 4) 360°C

Note *1) SCO ; Sour <u>C</u>rude <u>O</u>il *2) HEZ ; <u>Hydrogen Embrittlement Zone</u> *3) PZ ; <u>Plastic Zone</u>

も定量解析が可能であることが見出された。

7. 結言

以上フラクトグラフィの有用性について著者の経験した 破損解析事例を基に簡略に述べた。しかしながらフラクトグ ラフィの更なる活用のためには、破面の定性解析においても 未だに情報が不足している。今後、特に破壊起点部の破面, 高温破面,腐食の関与した破面、高硬度鋼、鋳鉄、セラミック ス等の破面に関する研究が必要である。また、3次元破面解 析技術に関しては更に研究が進み実機の破損解析への活用 が望まれる。なお、最近の人手不足からギガビットネットワ ークを活用した破面解析の遠隔地診断技術の開発も進めら れている。KANMON プロジェクトでは北九州,九大,京阪奈、 四国を結び診断技術の開発が進められ既に居ながらにして 明瞭な破面の観察が可能になりつつある⁽²⁰⁾。

しばしば、破損解析は後向きの技術と言われる。しかしなが ら、破面からの情報は破損原因の究明のみならず新しい知見 の発見において極めて貴重である。これまでにも破面から実 に多くの新しい発見が得られている。また,破損解析のみに留 まらずその成果は材料の選定。開発、許容応力の設定により, 製品の信頼性向上、現製品の改善、新製品の開発に直結して いる。今後の地道で粘り強い研究が望まれる。

文献

- (1)C.A.Zappffe and M.C.Clogg, Trans.ASM, 34 (1945)71-107 (2)C.Crussard, R.Borione, J.Plateau, Y.Morillon and F.Maratary,
- Journal of the Iron and Steel Institute ,83 (1956) 146-177
- (3)徳田昭,日本金属学会誌, 24 (1960) 171-175
- (4)吉田亨,金属破断面の見方,日刊工業新聞社 1970
- (5)北川英夫、小寺沢良一共編,フラクトグラフィ、培風館 1977

- (6)小寺沢良一編著,フラクトグラフィとその応用,日刊工業新 間社 1981
- (7)日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会編,フラクトグ ラフィ,丸善,2000
- (8)江原隆一郎,井上慶之助,窪田勝昭,材料 29 (1980) 599-604
- (9)江原隆一郎,窪田勝昭,塑性と加工 23(1982) 977-983
- (10)R.Ebara and K.Kubota, Steel Forgings, ASTM STP903, E.G.Nisbett and A.S. Melilli, Eds., 583-592,1986
- (11) R.Ebara, T.Kai, M.Mihara.K.Kino, K.Katayama and K.Shiota, Corrosion Fatigue of Steam Turbine Blade Materials, R.I.Jaffee Ed., 4-150-4-167, Pergamon Press, 1983
- (12)R.Ebara, H.Kino, Y.Takano, K.Nakashima, and K.Hatano, Corrosion fatigue of Steam Turbine Blade Materials, R.I.Jaffee Ed., 4-168-4-180, Pergamon Press, 1983
- (13)江原隆一郎,紀博徳,鉄と鋼 65(1979)A205-A208
- (14)渡辺栄一,大型タンカー原油タンク内局部構造の疲労強
- 度評価に関する研究,広島大学学位論文 1998
- (15)江原隆一郎,山田義和,伏見彬、阪井大輔、渡辺栄一,矢島 浩,日本造船学会論文集,第 173 号 337-347,1993
- (16) 中野善文,松本重人,杉江英司,矢島浩,江原隆一郎, 渡辺栄一,日本造船学会論文集,第174号571-578,1993
- (17)R.Ebara and Y.Yamada,Proc. of the fourth Intern. Conf. on Fatigue and Fatigue Threshold,Ⅲ1685-1690 Materials and Components Engineering Publication Ltd.,1990
- (18)M.Tanaka,Proc. 5th APCC,Vol.2 (1987) 61-67
- (19) 金崎宏,馬越俊光、私信、2001
- (20)高田工業所、九州大学、高速・広域ネツトワーク上での
- マルチキャスト伝送を応用したプラント設備のコラボレー ション遠隔診断に関する研究開発、TAO 平成 11 年度研究