環境助長割れフラクトグラフィ診断
エキスパートシステムの開発*箕島 弘二^{*1}, 山崎 伯公^{*2}, 駒井 謙治郎^{*1}Development of Expert System for Fractography
of Environmentally Assisted Cracking

Kohji MINOSHIMA, Norimasa YAMASAKI and Kenjiro KOMAI

An expert system, which diagnoses the causes of failure of environmentally assisted cracking (EAC), based upon fractography has been developed. The system uses the OPS83 programming language expressing rules in a manner of production rules and is composed of three independent subsystems, which respectively deal with EACs of high-strength or high-tensile strength steel, aluminum alloy, and stainless steel in dry and humidified air, water, and aqueous solutions containing Cl, Br or I ions. The concerned EAC issues cover stress corrosion cracking (SCC), hydrogen embrittlement, cyclic SCC, dynamic SCC and corrosion fatigue as well as fatigue and overloaded fracture. The knowledge base covers the rules relating to not only environments, materials, and loading conditions, but also macroscopic and microscopic fracture surface morphology. In order to deal with vague expressions of fracture surface morphology, Fuzzy theory is used in the system, and the description of rules about vague fracture surface appearance is thereby possible. Applying the developed expert system to case histories, accurate diagnoses were made. We discussed the related diagnosis results and usefulness of the developed system.

Key Words: Expert System, Production System, Environmentally Assisted Cracking, Stress Corrosion Cracking, Hydrogen Embrittlement, Dynamic Stress Corrosion Cracking, Cyclic Stress Corrosion Cracking, Fuzzy Theory, Fracture Surface, Fractography

1. 緒 言

破壊を起こした材料の破断面には破壊の進行状況を示す特徴的な模様が残り、これを調べることで破壊機構や破壊の原因を究明できる。この破面解析(フラクトグラフィ)には、専門家の長年にわたる経験と深い知識が必要とされてきた^{(1)~(7)}。知識工学を応用することにより、フラクトグラフィ診断エキスパートシステムを構築できれば、フラクトグラフィの専門的な知識を持たないものでも、破壊原因を究明することができる。

著者らは先にエキスパートシステム構築用言語 OPS 83⁽⁸⁾を用いて、環境助長割れ診断エキスパートシステム(EXENAC)を開発して⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、割れ診断が精度良く行えることを示すとともに、知識の重要度評価手法を提案して、その有用性を示した⁽¹⁰⁾。本研究においては、OPS 83⁽⁸⁾を用いて、高強度鋼、アルミニウム合金、ステンレス鋼の破面様相より、環境助長割れを診断するシステムを開発した。環境助長割れの種類は多種多様であり、破断面にみられる模様もそれぞれの

破壊に独特あるいは共通のものがあられ、破面情報からの破壊原因推定には曖昧さが伴う。そこで、推論にファジィ理論⁽¹¹⁾を適用して、定量的に表すことが難しい専門家の行う曖昧な推論をコンピュータ上に実現した。本システムは、破面上に残された巨視的・微視的な模様と材料の種類、環境、応力状態から破壊原因を推論するもので、種々の環境助長割れ事例をシステムに適用してその有用性を確認するとともに、フラクトグラフィ診断に必要とされる破面知識について考察を加えた。

2. システム構成と推論方式

2・1 システム開発環境 環境助長割れフラクトグラフィ診断エキスパートシステムを構築するにあたって使用したコンピュータは、エンジニアリング・ワークステーション HP 9000 シリーズ、モデル 350 C (主記憶 8 MB)であり、オペレーティングシステムは日本語入出力をサポートした UNIX である。システム開発言語には、OPS 83 と C 言語を用いた。OPS 83 は OPS (Official Production System) 系言語の最新バージョンであり、知識を「もし…ならば…である」といった IF~THEN 形式のルール(プロダクションルール)型プログラミングで表現するものである⁽¹²⁾。

* 原稿受付 平成 6 年 2 月 23 日。

^{*1} 正員、京都大学工学部機械工学教室 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)。^{*2} 京都大学大学院 [現: 新日本製鐵株式会社]。

表 1 試作システムの構成

System	high	aluminum	sus
Materials	High-strength steels High-tensile strength steels	High-strength Al alloys	Ferritic-, austenitic-, martensitic-, and dual-phase stainless steels
Failure mechanisms	Hydrogen embrittlement (HE) Dynamic SCC (DSCC) Cyclic SCC (FSCC) Corrosion fatigue (CF) Fatigue (F) Over-loaded ductile failure Over-loaded brittle failure	Hydrogen embrittlement (HE) Stress corrosion cracking (SCC) Dynamic SCC (DSCC) Cyclic SCC (FSCC) Corrosion fatigue (CF) Fatigue (F) Over-loaded ductile failure Over-loaded brittle failure	Hydrogen embrittlement (HE) Stress corrosion cracking (SCC) Dynamic SCC (DSCC) Cyclic SCC (FSCC) Corrosion fatigue (CF) Fatigue (F) Over-loaded ductile failure Over-loaded brittle failure
Environments	Dry air, humidified air, hydrogen gases, inert gases, water, solutions containing Cl, Br, and I ions, etc.		

2.2 システム構成と動作の概要 環境助長割れフラクトグラフィ診断エキスパートシステムは、表 1 に示す、3 個の独立したサブシステム (high, aluminum, sus) より構成されている。推論エンジンは、OPS 83 に標準環境として提供されている近似的 MEA 法によるものを書き換えて、EXENAC システムと同様に、ルールに与えた重み表現 (Rating expression) を優先させる競合解消戦略 (修正近似的 MEA 法)⁽¹³⁾ を用いた。

システムの動作の概要を図 1 に示す。材料、環境を入力した後、まず第一ステップとして、巨視的な破面様相に関する初期質問により、破壊様式が延性破壊、脆性破壊、疲労破壊のいずれであるかを推論するとともに、巨視的な模様から、破壊の起点部、進展部を推論し、微視的な破面観察位置をアドバイスする。次に、破面の微視的な破面様相に関する情報を入力した後、き裂の発生原因、進展原因について推論を行う。

本システムは、マルチウィンドウによるユーザへのメッセージ表示 (実行中タスク、検証中の仮説、診断対象の説明など) を充実させ、システムからの質問を見やすくするとともに、マウスを中心とした入力方式を採用して、誤入力を極力さけるように工夫されている。さらに、推論過程で、どのような情報と知識が使用されたのかを説明する機能を持たせるとともに、ユーザが希望すれば、推論根拠を表示させたり、診断結果をまとめたカルテを表示、印刷させたりすることもできる。本システムを用いて、1 事例の診断に要する実行時間は、微視的な破面模様の入力に起点部 1 箇所、進展部 2 箇所の情報を入力した場合、CPU 占有時間で約 10 秒、実際にユーザがシステムを起動してから、診断に必要なデータの入力を行い最終的な結論を得る

図 1 システムの動作の概要

までの実時間は、約 5 分である。

2.3 システム推論方式 環境助長割れの種類は多種多様であり、破面にみられる模様もそれぞれの破壊に特有あるいは共通のものがあ、破面情報からの破壊原因推定には曖昧さが伴う。そこで、推論にファジ理論⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を適用して、定量的に表すことが難しい専門家の行う曖昧な推論をコンピュータ上に実現した。感染症診断システム MYCIN⁽¹⁶⁾や先に開発した EXENAC システムでは、確信度係数を用いて事実や規則の不確かさを表現している。ファジ理論の考えは、エキスパートの本質は確率的ではなくファジであるというものであり、不確実性を表す確率の値を一つの数値ではなく、区間で表しているため、確率の法則にしばられず、ルールの不確実性を確信度よりも自然に表すことが可能となる。例えば、確信度係数を用

いて破面に関するルールを表現した場合、ルールは次のような表現となる。

「もし破面上にストライエーションがあれば、疲労破壊である(0.8)」(括弧内がルールの確信度を表す)

このルール表現では、ストライエーションが破面上に「はっきり」あるいは「ぼんやり」と観察されたのかは考慮に入れることはできない。そこで、本システムでは、ファジィ理論を用いて、次のように不確実性をより自然な形で表現した。

「もし破面上にはっきりとしたストライエーション模様があれば、疲労破壊の可能性が高い」。

このルール表現からわかるように、曖昧性のある画像(破面模様)や真理値(仮説の確からしさ)は、確率で表すよりファジィで表現したほうが自然で、EXENACシステムで必要であった確信度係数の値の調整を必要としない利点がある。

本システムにおけるファジィ推論について説明すると以下のようである。 x, y を対象名、 $A, A'; B, B'$ をそれぞれ全体集合 $U; V$ におけるファジィ集合とする。

前提1として「If x is A then y is B 」

(以下簡単のため $A \rightarrow B$ とする)

前提2として「 x is A' 」があれば、

結論として「 y is B' 」が得られる。

本試作システムの推論は、 B' を A' と $A \rightarrow B$ から直接推論する方法である。すなわち、 B' を、ファジィ集合 A' とファジィ条件文 $A \rightarrow B$ の合成、すなわち

$$B' = A' \circ (A \rightarrow B)$$

から直接求める推論方法を採用している。ここで、 $A \rightarrow B$ は、ファジィ制御でよく使用されてきている A と B の直積を採用するMamdaniの推論法⁽¹⁷⁾を用いた。なお、ファジィ推論結果の非ファジィ化は、マックスミニ合成重心法を用いた。

図2 破面模様の見え方に関するファジィメンバシップ関数

2.4 知識ベース 本システムの知識は、「もし条件 A が成立するならば、 B を実行する」というIF～THEN形式で表現されている。ここで、 A, B はファジィ集合である。本システムで使用しているファジィメンバシップ関数を図2、3に示す。図2は、破面に見られる微視的な模様の見え方に関するメンバシップ関数である。横軸は表面上での模様の見え方を0-1で、縦軸は帰属度を0-1で表している。図中の4個の三角形は左から、「模様が見られない」、「ぼんやりとした模様が見られる」、「はっきりした模様が部分的に見られる」、「はっきりした模様が全面的に見られる」というファジィメンバシップ関数を表現している。例えば、破面上のある模様の見え方が0.5程度であるとすると、この見え方は、「ぼんやりした模様が見られる」というファジィメンバシップ関数と「はっきりした模様が部分的に見られる」というファジィメンバシップ関数に0.5の帰属度で特性づけられる。

図3は、破壊原因仮説の確からしさに関するメンバシップ関数である。横軸は仮説の確からしさを0-1で表現している。図中の5個の三角形は左から、Very false, False, Unknown, True, Very trueというファジィメンバシップ関数である。本システムは、図のファジィメンバシップ関数を各破壊原因仮説ごとにマックスミニ合成したのち、マックスミニ合成重心法を用いて仮説の可能性を数値化し、この値の大きい仮説から順に推論結果として出力するシステムとなっている。なお、推論結果での可能性表示は重心の値が0.6より大きい場合をVery true、0.6以下をTrueとした。

環境助長割れをフラクトグラフィに基づいて診断する場合、破面に見られる微視的な模様は、次のaタイプとbタイプの2種類に分類される。aタイプの模様は、「環境助長割れ特有の模様、あるいは、特有ではないにせよ環境助長割れであることの証拠になる模様」

図3 仮説の確からしさに関するファジィメンバシップ関数

であり、一方、bタイプは、「腐食生成物のように、環境助長割れ全体にわたってみられる模様であり、これらは、破壊が環境助長割れであることの証拠にはなるものの、個々の破壊原因の証拠にはならない」ものである。

知識ベースの構築は、aタイプに属する破面模様に関する知識を抽出して、「aタイプに属する微視的な模様が破面に観察されれば、ある破壊の可能性が“True”である」というルールを各環境助長割れごとに作成し、これらのルールをもとにファジィ推論を行った。仮説の可能性を“Very true”の可能性で支持するルールは、aタイプの典型的な微視的破面模様に加えて、巨視的な破面からの推論結果、環境条件および応力条件を条件部に持つものである。bタイプの模様に関するルールは、aタイプの模様によるファジィ推論で導かれる結果を肯定側に上方修正するルールとして用いた。このルールの例としては、例えば、「微視的な破面模様に腐食生成物が見られるなら、腐食疲労破壊の可能性を少し上げる」が挙げられるが、この場合、腐食生成物は腐食疲労特有の模様ではないので、同様のルールが他の環境助長割れ知識ベースにも入っている。また、多種多様な破面模様すべてについて上記のルールを作成するとルール数が膨大になるため、フラクトグラフィに関する常識的なルール、例えば、「微視的な破面模様にリバーパターンが観察されれば、破壊は粒内脆性割れである」と言うものを各環境助長割れに共通なルールベースとして作成した。このようなフラクトグラフィに関する常識的なルールを共通ルールベースに構築することで、微視的模様を先に述べた各環境破壊のルールベースのルール条件部に照合する形に変換することができ、ルール数や増やすことなしに、細かい模様も診断に取り入れることが可能となった。

表 2 高強度・高張力鋼フラクトグラフィ診断エキスパートシステムの環境助長割れ事例への適用結果

Failure mechanisms	Diagnostic results		
	Very true	True	Others
Hydrogen embrittlement (HE)	1	4	0
Dynamic SCC (DSCC)	2	1	0
Cyclic SCC (FSCC)	3	0	0
Corrosion fatigue (CF)	11	0	4
Fatigue (F)	1	1	1
Over-loaded ductile failure	2	0	0

3. 高強度鋼のエキスパートシステム

3.1 ルール化した知識 本システムの扱う環境、破壊原因は、表 1 に示したとおりである。ルール化した知識^{(18)~(27)}は水素脆化割れ、腐食疲労破壊、動応力腐食割れ、繰返し応力腐食割れに関するものである。高強度鉄鋼材料は環境に敏感で、種々の環境助長割れを生じる。とくに水素脆化割れ感受性が高く、へき開、擬へき開、粒界割れが主な破面模様である。他の材料に比べると破面にみられる模様は複雑ではないが、破壊原因を推論するのに決め手となる破壊特有の模様が少ない。そこで、各々の模様が破面上にどの程度見られるか、すなわち、粒界・粒内破面率や見え方の程度を考慮にいれて破壊原因を推論できるように、ルールベースを構築した。また、ルールの条件部を単純化して、一般性のあるルールとした。総ルール数は約 120 であり、これらのうち環境助長割れに関するルールが約 80 である。

3.2 損傷事例への適用結果 本システムを環境助長割れ事例(31 事例)^{(3)(6)(18)~(27)}に適用した。結果を表 2 に示す。各破壊事例に対してシステムが Very true, True, Others(その他)に分類した数を示している。Others の項目中の事例数は、事例集に記載されていた破壊原因を推論できなかった場合と、同程度の可能性で他の破壊原因を推論した場合を含んでいる。

表より、疲労破壊と腐食疲労破壊で Others に分類した 5 事例以外は、他に競合する仮説もなく正しく診断できた。Others の項目に分類された、疲労破壊の 1 事例は、事例集では巨視的な破面にビーチマークがあることのみから疲労破壊と診断している事例で、システムは破壊原因不明と診断した。この場合は、システムの診断結果が誤っているわけではなく、巨視的な観察のみから破壊原因を推論することの危険性を指摘する結果となった。腐食疲労破壊で Others に分類された 4 事例の破面は、粒界・粒内延性割れ混合破面であった。これよりシステムは、粒界割れ部は繰返し SCC、粒内延性割れ部は疲労破壊によりき裂が進展したと診断したものである。疲労被害に加えて、繰返し応力による SCC き裂の加速が生じていた事例で、この例もシステムが誤った診断をしたものではない。

高強度鋼の環境助長割れをフラクトグラフィに基づいて診断する場合、どのような破面模様が重要であるかを定量的に検討するために、ルールの使用頻度を調べた。結果を表 3 に示す。これより、環境助長割れをフラクトグラフィに基づいて診断する場合、粒界ファセットと粒内脆性割れを合わせた破面率が重要な因子で

あることがわかる。なお、水素脆化割れにおいて True と診断した 4 事例(表 2)は、破面率が不明であったため、高い可能性で診断が行えなかった例である。また、腐食疲労を診断する場合は、粒内延性割れが重要であることがわかる。

4. アルミニウム合金の エキスパートシステム

4・1 ルール化した知識 本システムの扱う環境、破壊原因は、表 1 に示したとおりである。ルール化した知識^{(28)~(34)}は応力腐食割れ、腐食疲労破壊、動応力腐食割れ、繰返し応力腐食割れに関するものである。総ルール数は約 120 ルールであり、このうち環境助長割れに関するルールは約 80 ルールである。

4・2 損傷事例への適用結果 本システムを環境助長割れ事例(17 事例)^{(28)~(34)}に適用した。結果を表 4 に示す。Others に診断されたのは、応力腐食割れの 1 事例だけであり、十分な精度で診断が行われたことがわかる。Others に分類された事例は、モード III 荷重下での応力腐食割れであり、破面は粒界割れと粒内脆性割れの混合破面で、繰返し SCC に典型的な破面となっている。破面には、モード III SCC の特徴であるすべり面が観察されているものの、この模様より SCC と診断するのは困難であった。

表 3 高強度・高張力鋼フラクトグラフィ診断エキスパートシステムにおけるルールの使用頻度

Rules	Failure Mechanisms			
	HE	DSCC	FSCC	CF
Fracture area fractions of IG and BTG	2	3	3	15
IG	3	0	0	0
DTG	0	0	0	15
Strations-like patterns	0	0	0	5
Corrosion products	0	0	0	6

IG: Intergranular cracking HE: Hydrogen embrittlement
BTG: Brittle transgranular cracking DSCC: Dynamic SCC
DTG: Ductile transgranular cracking FSCC: Cyclic SCC
CF: Corrosion fatigue

表 4 アルミニウム合金フラクトグラフィ診断エキスパートシステムの環境助長割れ事例への適用結果

Failure mechanisms	Diagnostic results		
	Very true	True	Others
Stress corrosion cracking (SCC)	3	0	1
Dynamic SCC (DSCC)	3	1	0
Cyclic SCC (FSCC)	5	0	0
Corrosion fatigue (CF)	4	0	0

ルールの使用頻度を調べた結果を表 5 に示す。アルミニウム合金の環境助長割れを診断する場合には、粒界破面率が重要であることが明らかである。また、腐食疲労破壊の診断には粒内脆性割れ(脆性ストライエーション)も考慮する必要がある。

5. ステンレス鋼の エキスパートシステム

5・1 ルール化した知識 診断対象は表 1 に示したとおりである。ルール化した知識^{(2)(3)(6)(35)~(37)}は応力腐食割れ、水素脆化割れ、腐食疲労、動応力腐食割れ、繰返し応力腐食割れに関するものである。総ルール数は約 140 ルールであり、このうち環境助長割れに関するルールは約 100 である。

5・2 損傷事例への適用結果 本システムを環境助長割れ事例(14 事例)^{(2)(3)(7)(35)~(42)}に適用した。結果を表 6 に示す。Others と診断された、腐食疲労破壊の 1 事例と、動 SCC の 1 事例を除いてほぼ正しい診断結果が得られた。Others と診断された事例は、情報不足により、他の破壊原因と区別しがたい事例であった。すなわち、腐食疲労破壊の 1 事例は、繰返し応力が作用しているが、事例集に記載された破面から診断する限り、水素脆化割れの可能性が高く、腐食疲労とは

表 5 アルミニウム合金フラクトグラフィ診断エキスパートシステムにおけるルールの使用頻度

Rules	Failure mechanisms			
	SCC	DSCC	FSCC	CF
Fracture area fractions of IG	4	4	5	4
Intergranular dissolution	2	0	2	0
BTG	1	3	3	3
Brittle striations	0	0	0	2
Corrosion products	3	0	0	0

IG: Intergranular cracking SCC: Stress corrosion cracking
BTG: Brittle transgranular cracking DSCC: Dynamic SCC
FSCC: Cyclic SCC
CF: Corrosion fatigue

表 6 ステンレス鋼フラクトグラフィ診断エキスパートシステムの環境助長割れ事例への適用結果

Failure mechanisms	Diagnostic results		
	Very true	True	Others
Stress corrosion cracking (SCC)	1	1	0
Hydrogen embrittlement (HE)	3	0	0
Dynamic SCC (DSCC)	0	0	1
Corrosion fatigue (CF)	5	1	1
Fatigue (F)	1	0	0

診断できなかった。一方、動 SCC の 1 事例は、破面から推論すると、腐食疲労と動 SCC の可能性が同程度で考えられる事例であり、応力状態に関する詳しい情報が正しい診断には必要である。

ルールの使用頻度を調べた結果を表 7 に示す。表より、腐食疲労破壊を診断するためには粒内延性割れが、応力腐食割れを診断するにはファンシェーブパターンが重要であることがわかる。高強度鋼に比べると、ステンレス鋼の場合は、破壊原因を推定する決め手となるそれぞれの破壊独特の模様が存在する。そのため、粒界破面率などを考慮せずに診断が可能なシステムとなっている。

高強度鋼やアルミニウム合金のシステムにおいては、環境助長割れ適用事例はほとんどが実験室の試験事例であったが、ステンレス鋼の場合は、実験室の試験事例に加えて、実機損傷事例⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾⁽⁴²⁾が 6 例含まれている。実験室で得られた破面知識を主に整理して構築された本システムによっても、実機損傷事例を正しく診断できており(表 6)、本開発システムの有用性が明らかである。

6. 試作システムの有用性

環境助長割れフラクトグラフィ診断エキスパートシステムは、環境助長割れ破面に残された巨視的・微視的な模様と、応力、環境条件から破壊原因を推定するシステムであるが、現段階では、破面の模様に関する質問は「ディンプル」などのフラクトグラフィに関する専門用語を用いて行っているため、フラクトグラフィに関するある程度の予備知識をユーザが有することを前提としている。本システムをさらに破面画像を自動認識するシステムと連結することにより、フラクトグラフィに関する知識を有しないユーザにも使用可能なより汎用性のあるシステムとなるが、現段階においても試作システムの有用性としては以下のことがあげられる。

(1) フラクトグラフィの専門家は必ずしもあらゆる破壊に精通しているわけではなく、専門家が本システムを種々の破壊原因調査に使用することにより、自分の有する知識の確認と補充が行える。

(2) 実機破断面には、実験室試験で得た破面に見られるような典型的な巨視的・微視的破面模様が観察されとは限らない。そこで、実験室試験で得た知識を主に整理して構築した本システムを用いて、実損傷事例を診断することにより、実損傷と実験室試験の違いを指摘し、今後のフラクトグラフィ研究の方向性を示すことが可能となる。

表 7 ステンレス鋼フラクトグラフィ診断エキスパートシステムにおけるルールの使用頻度

Rules	Failure mechanisms				
	SCC	HE	DSCC	CF	F
IG	0	1	0	0	0
BTG	0	2	0	1	0
DTG	0	0	0	6	1
Fan-shaped pattern	2	0	1	0	0
Secondary cracking	1	0	0	2	0

IG: Intergranular cracking
 BTG: Brittle transgranular cracking
 DTG: Ductile transgranular cracking
 SCC: Stress Corrosion cracking
 HE: Hydrogen embrittlement
 DSCC: Dynamic SCC
 CF: Corrosion fatigue
 F: Fatigue

7. 結 言

フラクトグラフィに基づいて、実用上重要である、高強度鋼、アルミニウム合金、ステンレス鋼の種々の環境助長割れ(応力腐食割れ、水素脆化割れ、腐食疲労破壊、繰返し応力腐食割れ、動応力腐食割れ)を診断するシステムを構築し、本システムを実損傷事例を含む破損事例に適用した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 知識ベースの規模が、100 ルール程度のシステムでも、診断対象をある程度限定すれば、十分に正確な診断が行える。

(2) 推論にファジィ理論を適用することで、破面上に見られる「はっきりしないぼんやりした模様」も診断に取り入れることが可能となった。ファジィ理論を用いることによりフラクトグラフィの専門的な破面知識を自然な形で簡便に表現できる。

(3) 診断にあたっての各ルールの使用頻度を調べることで、フラクトグラフィに基づく破壊原因診断においてどのような破面知識が重要であるかが定量的に検討できる。その結果、高強度鋼の場合は粒界ファセットと粒内脆性割れを合わせた破面率が、アルミニウム合金の場合は粒界ファセット破面率が重要であることが明らかとなった。

(4) 実験室で得られた破面知識を主に整理して構築した知識ベースを有する本システムにおいても、実環境助長割れ損傷事例を正しく診断することが可能であった。

(5) フラクトグラフィの専門家が本システムを実損傷事例診断に用いることにより、自分自身の破面知識の確認と補充が行える。

文 献

- (1) 北川・小寺沢共編, フラクトグラフィ, (1977), 培風館.
- (2) 小寺沢, フラクトグラフィとその応用, (1981), 日刊工業新聞社.
- (3) ASM Handbook, Fractography, *Metals Handbook*, Ninth Edition, 12(1987), ASM International.
- (4) 破壊事故調査と破面解析小特集号, 機誌, (1973), 1125.
- (5) フラクトグラフィ分科会成果報告書抄録, (1973).
- (6) 吉田, 金属破断面の見方, (1970), 日刊工業新聞社.
- (7) 小寺沢監修, 金属破断面写真集, (1985), テクノアイ出版部.
- (8) Forgy, C. L., *OPS 83 User's Manual*, (1985), Dept. of Computer Science, Carnegie Mellon Univ.
- (9) 駒井・箕島・小山, 機論, 56-530, A(1990), 2197.
- (10) 駒井・箕島・小山, 機論, 57-533, A(1991), 188.
- (11) Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, *Information and Control*, 8 (1965), 338.
- (12) 上野・石塚, 知識の表現と利用, (1987), 19, オーム社.
- (13) 田中・下井, エキスパートシステム構築の方法, (1987), 102, パーソナルメディア社.
- (14) 坂和, ファジィ理論の基礎と応用, (1989), 森北出版.
- (15) 寺野・浅居・菅野, 応用ファジィシステム入門, (1989), オーム社.
- (16) Buchanan, B. G. and Shortliffe, E. H., *Rule-Based Expert Systems The MYCIN Experiments of the Standard Heuristic Programming Project*, (1984), Addison-Wesley.
- (17) Mamdani, E. H., *IEEE Trans. Computers*, C-26(1977), 1182.
- (18) 駒井・箕島・尾島, 機論, 54-500, A(1988), 670.
- (19) 駒井・喜多・遠藤, 機論, 49-445, A(1983), 1029.
- (20) 遠藤・駒井・今城, 機論, 42-361(1976), 2652.
- (21) 駒井・箕島・山本, 材料, 33-374(1984), 1407.
- (22) 駒井・箕島・金・岡本, 機論, 55-510, A(1989), 179.
- (23) 遠藤・駒井・松田, 機論, 47-415, A(1981), 257.
- (24) 遠藤・駒井・箕島, 材料, 31-347(1982), 822.
- (25) 遠藤・駒井・松田・藤本, 機論, 45-398, A(1979), 1152.
- (26) 遠藤・駒井・松田, 機論, 46-412, A(1980), 1337.
- (27) 駒井・岡本, 鉄と鋼, 74-2(1988), 358.
- (28) 駒井・薄木, 材料, 33-370(1984), 921.
- (29) 駒井・箕島・行待, 防食技術, 34-11(1985), 606.
- (30) 遠藤・駒井・渡瀬, 材料, 24-267(1975), 1140.
- (31) 駒井・箕島, 機論, 51-462, A(1985), 432.
- (32) 駒井・山地・遠藤, 材料, 29-317(1980), 166.
- (33) 駒井・箕島, 機論, 50-459, A(1984), 1804.
- (34) 駒井・箕島・行待, 材料, 32-362(1983), 1238.
- (35) 駒井・入船, 材料, 36-409(1987), 1104.
- (36) 駒井・箕島・金・入船, 材料, 39-439(1990), 343.
- (37) 駒井・金崎, 機論, 50-454, A(1984), 1143.
- (38) 技術資料, 機械構造物の破損事例と解析技術, (1984), 日本機械学会.
- (39) 大井・長尾, 材料, 29-321, (1980), 538.
- (40) 内田・小寺沢・山田, 材料, 29-321, (1980), 605.
- (41) 村田・向井, 材料, 29-321, (1980), 611.
- (42) 日置, 佐藤, 第21回フラクトグラフィ部門委員会, 資料 No. 172, (1981), 日本材料学会.