

材料の劣化と損傷：評価法と状態監視技術への適用を目指して

Degradation and Damage of Structural Materials: Methods of Evaluation and Possibility of Their Applications to the Condition-Based Maintenance

東京理科大学工学部 中曽根 祐司 Yuji NAKASONE Member

This paper describes a collaborative study on degradation and damage of structural materials and the detection and evaluation methods of degradation and damage in structural components in the course of the activities of the research committee on the Detection and Evaluation Methods of Degradation and Damage in Structural Materials. The research committee has been established in the Japan Society of Maintenology since April, 2004 and has attempted to clarify the damage and/or degradation mechanisms caused by the interactions among electromagnetic, metallurgical and solid-mechanical effects and to develop new electromagnetic and other non-destructive evaluation methods that can detect and evaluate damage in structural components in order to be applied to condition-based maintenance practices.

Keywords: Material Degradation, Damage, Condition-Based Maintenance, Non-Destructive Evaluation

1. 緒言

近年の日本のように、一大成長期を経て、経済的な安定成長期を迎えた社会においては、一頃の大量生産・大量消費という考え方を 180° 転回して、現有の機械・構造物を修復、更新、時には一部再生して、如何に長く安全に、かつ安心して使用できるようにするかが重要な技術的課題となってきた。この場合、時間とともに徐々に進行する材質劣化が原因となって起こる損傷・破壊過程に対する安全性や信頼性の確保が必要となるが、長時間かけて生じる材質劣化は、従来の加速試験では顕在化せず、従って、従来の知識では予測し得ない損傷・破壊挙動を呈することがあり、従来のき裂状欠陥を主な対象としてきた非破壊検査ないしは診断手法の再検討を要する重要な問題である。

本学会の設立当初より著者等が開催してきた「材質劣化診断技術に関する調査分科会」[1]では、いわば健康診断の段階で未然に病根を絶って治癒率を上げ、早期の社会復帰を目指すように、き裂等の欠陥ないしはそのような欠陥に至る前に材質劣化部を早期発見し、補修あるいは劣化の進行抑制処置を施した上で再利用することにより、機械・構造物のディペンダビリティ*を高めることを目指し、それに必要な検査・診断技術を確認することを目的として活動してきた。そのため、

連絡先:中曽根祐司, 〒102-0073 東京都千代田区九段北1-14-6、東京理科大学工学部機械工学科、電話: 03-5228-8366、e-mail: nakasone@rs.kagu.tus.ac.jp

この研究分科会では、主な材質劣化と破壊機構の調査研究(材質劣化)、各材質劣化に最適な検査・診断技術の開発(診断技術)、及び開発した検査・診断技術の活用方法の検討(保全計画)を、相互に関連させ、有機的、統合的に実施するよう努めてきた。

(* ディペンダビリティ: 必要な時に安全に使用できる確率。)

本稿では、「材質劣化診断技術に関する調査分科会」で検討してきた材料の劣化と損傷、特に、劣化と損傷の評価法とそれらの状態監視技術への適用可能性について述べることにする。

2. 劣化と損傷

「損傷」という述語は、具体的には、疲労や腐食を受けて、例えば、き裂、減肉、ピンホール、ピット、減肉等の「欠陥」が材料や部材に生じる現象を言う。すなわち、「損傷」とは、機械的または化学的な作用によって「欠陥」が生じる現象を言い、これらの「欠陥」のために材料の強度(降伏強度、引張強度、疲労限度、クリープ強度等)や機能(形状記憶効果、超伝導特性、電気伝導度等)が損なわれる(=強度や機能の低下がもたらされる)ことになる。

塑性変形は英語では"failure"と呼ばれ、この語は「損傷」に近い概念を持つと考えられる。すなわち、塑性変形によりミクロな欠陥たる「転位」が導入され、加工硬化等、材料の強度に影響を及ぼすようになるが、その効果は一様ではないので、塑性変形を取り立てて

「損傷」とは呼ばないのが一般的であると思われる。

一方、「劣化」とは、機械的負荷（応力、変形等）や環境（応力場、雰囲気、温度等）等により、材質自体が変化し、材料の強度や機能の低下をもたらすことと定義する。「劣化」を考える場合、時間効果を考慮する必要が出てくるのがしばしばある。例えば、高温下では化学的に活性化された状態になるため、経時的に変化する化学反応が重要な役割を果たす。また、周囲環境によっては、材料中で浸炭や脱炭等、相反する現象が起こり、材料の強度が上ったり、下ったりするといった、全く逆の結果を招来することがある。この場合、強度低下をもたらす脱炭は「劣化」と見なすことができるが、強度上昇を招く浸炭は、たとえ強度を上昇させたとしても、脆化を引き起こすので、浸炭も「劣化」の1種と考えることができる。勿論、疲労やクリープを受けた場合にも「劣化」は起こり、いわゆるバース状態と比べると強度や機能は低下する場合が多い。しかし、通常はこのような「材質劣化」を考慮せずに、当初の特性、すなわち、バース状態の特性で議論することが多い。

従って、ここに「損傷」とは異なる「劣化」という概念を導入する必要性がでてくる。すなわち、通常の設計ではバース状態の特性で設計しており、時間が経つと材質の「劣化」が起こるため、機器の信頼度は、時間の経過とともに設計時の信頼度から低下し続けているはずであるが、通常はこのようなことを考慮に入れずに設計することが多い。

「劣化」の特徴を列挙すると次のようになる[2]。

- (1) 材料全体の劣化は経年的に進行する。
- (2) 必ずしもき裂を伴わない。
- (3) 応力が劣化を加速する場合がある。
- (4) 他の要因で割れが生じた場合、劣化が限界き裂寸法の著しい減少をもたらす。

* 実際に劣化が問題となるのは、き裂との複合効果。例えば、後述の σ 相劣化の場合、劣化によって平滑材の静的引張強度はほとんど変化しないが、シャルピー衝撃値、破壊靱性値は著しく低下する[3]。

以上のことから、「劣化」の概念は、保守・検査等に非常に重要な概念になる訳であるが、一般にはこのことに余り配慮していないのが現状と思われる。

疲労過程に例をとって「劣化」と「損傷」の違いをもう少し説明する。一般に材料は、疲労損傷を受ける

と、荷重の負荷・除荷の繰返しにより転位等が導入され続けるため、材質の「劣化」が起こり、やがてき裂が発生するという一連の過程が考えられる。き裂は代表的な「損傷」の1形態のため、き裂発生後、その材料は「損傷」を受けたということになるが、多くの場合、き裂発生前の時点では、その材料が「損傷」を受けたとは言うことはない。なぜならば、「損傷」がき裂のような「見えるもの」、「観察可能なもの」として顕在化しないからである。（すべり帯や固執すべり帯などき裂の前駆体を「損傷」として取扱う場合もあるが、これはき裂との区別が付きにくく、それよりも小さな、例えば、セル組織や亜結晶粒などは微視組織として取扱われることが多い。

さて、き裂発生後は「損傷」を受けたことになり、破壊力学等を適用して、その「損傷」の影響度を評価することが可能となるが、現時点では、その前の「材質劣化」を受けた材料を取扱う体系的な学問や研究はない。「材質劣化」をどのように取扱うか？どうしたら取扱えるか？これは非常に重要だが、同時に、非常に難しい問題と考えられる。

「損傷」は定量化（き裂寸法、ポイド率、減肉深さ等）が容易であるが、「劣化」はそもそもどのようなパラメータをとって評価したらよいか分からないことが多いのが現状である。最も一般的な評価法は「劣化」によって変化する電気抵抗値等の物理的特性を介して間接的に「劣化」を評価する方法である。しかし、「劣化」の種類によってそれを評価するために用いるパラメータは異なる。次節で種々の劣化とそのパラメータについて述べる。

3. 種々の劣化とその検出法

主な「劣化」事象をその主な原因ごとに列挙する[1]と次のようになる。

- (1) 温度履歴によって生じる劣化：熱時効、シグマ相脆化、焼戻し脆化、475℃脆化
- (2) 環境によって生じる劣化：水素侵食、照射脆化、吸水劣化、紫外線劣化
- (3) 腐食に関わる劣化：浸炭、窒化

Table 1 に、信頼性や保全性、健全性の解析手法の1つとして知られている故障モード・影響解析(FMEA; Failure Mode and Effects Analysis)に用いられる主な劣化事象の分類を示す。Table 1 には、使用環境、劣化機構、劣化モードに従って劣化事象が分類され、その劣

Table 1 Classification of material degradations (This table is made based on the table [4] modified by the author referring [2, 5-7]).

使用環境 大分類	劣化機構 小分類	劣化モード			問題となる 主な材料	発生原理	主な検出法 (信頼性試験)	
		フェーズI	フェーズII	フェーズIII				
温度	高温	焼戻し脆化	不純物の拡散	フェーズII	Cr-Mo Ni-Cr 鋼、低 合金鋼	不純物元素 (P, Sn, As) の粒界 近傍への偏析 脆性相σ相の析 出による脆化	Jフック、J= (P+Sn)(Si+Mn) 不純物元素含有量 硬度、組織、フェ ーズ、UT	
				フェーズIII				粒界破壊 き裂、破断
		高温脆性	σ相脆化	σ相の析出	脆化、延性低下	Ni 基合金	脆性相σ相の析 出による脆化	硬度、組織、フェ ーズ、UT
			黒鉛化	黒鉛化	強度・韌性低下	炭素鋼、低合 合金鋼	Fe ₃ Cの分解によ る黒鉛化と軟化	硬度、UT (破壊試験)
			再熱(SR)割れ	粒界の局部強化	相対的な強度低下	SUS347	炭化物の粒内 析出	
	高温劣化	赤熱脆化	高温加熱	脆化	鉄鋼	Sの偏析		
		青熱脆化	加熱	延性低下	鉄鋼	時効		
	腐食	相変化(軟化、溶 熱、蒸発、昇華)	変形	強度低下	金属、フラスバック、 温度ヒューズ等	相変態	(耐熱性試験)	
			浸炭	炭化物の析出	硬化、延性・韌性 低下	炭素鋼、低合金鋼	炭化物形成によ る硬化、脆化	硬度、ECT、 UT
		窒化	窒化物の析出	延性・韌性低下	炭素鋼、低合金鋼	窒化物による脆 化、耐熱性低下		
水素侵食		水素原子の拡散	メタン生成	炭素鋼、Mo 鋼、Cr-Mo 鋼	HとFe ₃ Cの反応 で発生したメタン ガス気泡のガス圧	硬度 (破壊試験)		
475°C脆化		スピノーガル分解	硬化	ステンレス(マルゲンサイト 系、13Cr系)	Cr濃度の異なる 固溶体の析 出による脆化	硬度 (破壊試験)		
湿度	高温+時間	高温酸化	保護膜破壊	加速酸化	接点材、ポリマ ー、Cr-Mo 鋼	酸化膜破壊によ る応力集中等	UT	
			熱拡散	相互拡散	微小き裂、空孔 金属間化合物の生成	ICチップ (Al/Au 接合部)	熱拡散による 空孔、物質移動	SEM (耐熱性&高 温保管試験)
		硬化	時効硬化	2次相の析出	硬化	鉄鋼、合金	転位の障害	(浸透探傷試験)
			ひずみ時効	常温加工	硬化	Al合金等	転位の相互作用	
			焼入時効	2次相の析出	硬化	合金	転位の障害	
	水素雰囲気	水素脆化	水素侵入	延性低下	鋼、Ti合金	侵入原子Hに よる原子結合 力の低下	光顕、SEM	
		遅れ破壊		—	高張力鋼	力の低下	UT	
	放射線	中間子照射	中間子照射	脆化	鋼	高エネルギー粒子に よって生成され た侵入型原子や 空孔による脆化	UT	
			紫外線照射	光エネルギー吸収	き裂、破断、変色	フラスバック	原子状酸素	
		中性子照射	中性子照射	スウェリング、脆化	き裂、破断	低合金鋼、ステン レス鋼、Ni基合金	ボイドの生成によ る体積膨張、脆化	UT
イオン照射			イオン照射	分子分離	強度低下	フラスバック	分子鎖の分離	

化事象が問題となる主な材料、劣化発生原理、主な検出法を示した[2、4-7]。

以下、Table 1 中に上げた代表的な劣化を抽出して、その検出法、評価法について述べる。

3.1 σ 相脆化

σ 相脆化は、Cr含有量の多いステンレス鋼が、565～930℃の高温に曝されると、Fe-Cr間の金属間化合物である、硬くて脆性的な σ 相が析出して、材質が脆化する現象である。

この σ 相脆化による事故例としては、2相ステンレス鋼製遠心分離機の破壊、ボイラ主蒸気管のクリープ損傷による蒸気漏洩事故[8]、デカンターボールシェルの熱処理ミスによる脆性破壊[2]等、多くの事例が挙げられる。

Figure 1 に σ 相劣化を受けたステンレス中鋳鋼と劣化を受けない受入材のシャルピー吸収エネルギーの温

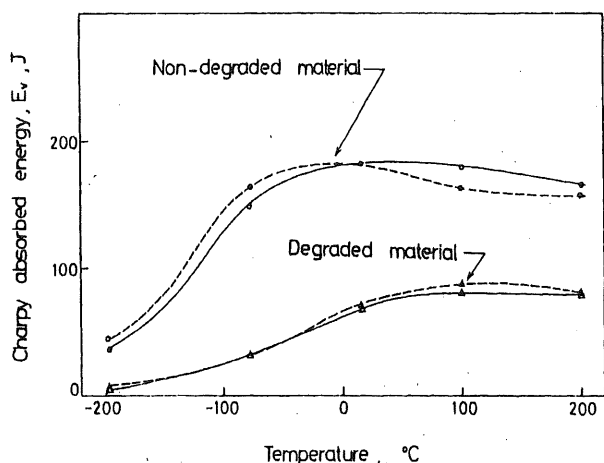


Fig. 1 Charpy absorbed energy vs. ambient temperature curves for degraded and non-degraded stainless steels.

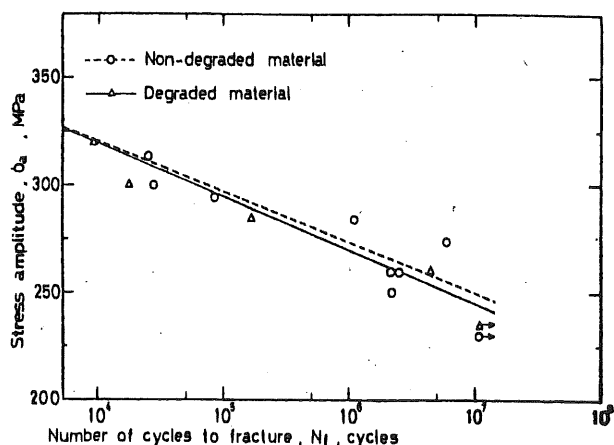


Fig. 2 S-N curves for degraded and non-degraded stainless steels.

度依存性を比較して示す[3]。また、Fig. 2 には、同じ劣化材と非劣化材の大気中疲労に対する S-N 線図を示す[3]。

Figures 1 と 2 から分るように、 σ 相脆化は、静的引張強度、疲労強度および疲労寿命にはほとんど影響を与えることなく、ただ V ノッチ・シャルピー衝撃試験におけるエネルギー吸収率や、J 積分値等の破壊靱性値の低下をもたらすだけである。この破壊靱性地の低下は顕著であり、室温における V ノッチ・シャルピー衝撃値は、 σ 相析出量の増加とともに急激に低下する。例えば、オーステナイト鋼では、 σ 相析出量が 10% の時、 σ 相未析出鋼の V ノッチ・シャルピー衝撃値の 17% にまで低下し、フェライトとオーステナイトの 2 相ステンレス鋼ではほぼ 0 J/cm² になったという報告までである[9、10]。また、この脆化の傾向は、析出する σ 相の形と場所により大きく異なるという報告[9]もあり、脆化現象の複雑な一面を示している。

この σ 相の析出により、強磁性相の体積率が変化することを利用して、従来からフェライトメータなどの電磁気学的方法が、供用中検査における σ 相の定量的検出法として採用されている。また、超音波法なども σ 相の検出法として採用されることが多い。

3.2 浸炭

高温の CO/CO₂ または炭素水素雰囲気中で金属表面層に炭素が侵入し、金属炭化物を生成することによって、金属の延性や靱性が低下する現象であり、金属材料の表面層は硬化して、浸炭層を形成する。また、侵入した炭素が金属と反応することによって金属炭化物を生成し、その結果、割れと異常酸化を誘起する場合がある[2]。

この浸炭による事故例としては、加熱管の浸炭による損傷、耐摩ライニング材の浸炭によるはく離、エチレン製造分解炉輻射管の浸炭損傷[2]等、多くの事例が挙げられる。

浸炭により、表面層の硬化が起こることを利用して、硬度測定により浸炭層の深さを測定する方法が取られている。また、浸炭により、Cr 炭化物の析出、結晶粒粗大化が起こり、超音波の伝播経路が変化することを利用して、UT によって浸炭深さを計測することもある。さらに、浸炭による材料の磁気的特性の変化が起こることを利用して、渦電流法 (ECT) による浸炭深さの計測を試みた例もある。

Figure 3 は、ECT による浸炭深さ計測の結果の 1 例

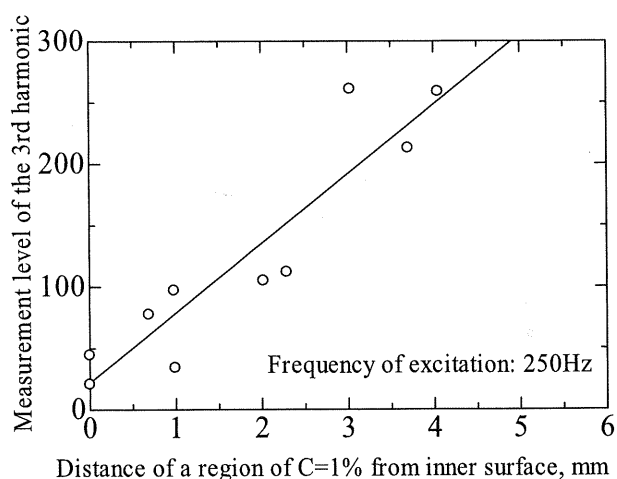


Fig. 3 Relationship between measurement level of the 3rd harmonic of the "Sumiprobe" and depth of carburization.

を示す[11]。Figure 3は、住友金属テクノロジー(株)で開発したスミプローブを用いて内面が波型をしている内面ひれ付き管の内面の浸炭深さを測定した結果の1例である。図から、浸炭量1%となる深さが第3高調波レベルと良好な線形関係があることが分る。

この結果を浸炭炭素量の分析値および硬度測定結果と比較したところ、スミプローブによって±0.5 mm程度の精度で浸炭深さを測定できることが明らかとなっている。

3.3 ひずみ時効

Table 1に示した劣化事象は材質的な劣化によるものが多いが、ひずみ時効の例は、外力を受けて変形することにより、転位の増殖が起こり、転位間の相互作用によって移動転位の運動が妨げられることによって硬化が起こるもので、主に化学的な原因で起こる他の「劣化」とは異なり、「損傷」に近いものである。ただし、前節でも述べたように、この場合、劣化過程の最終段階、すなわち、破断直前にならなければ、可視的な欠陥が現れず、大半の過程で転位の増加による材質の変化だけが起こるため既存の手法では検出することが難しい場合が多い。

中越沖地震の被害を受けた柏崎刈羽原子力発電所にある機械・構造物の健全性を検討している「中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会」では、地震で受けたと予想される機械・構造物の変形、特に、小さい塑性変形を計測するために、硬度法、磁歪法、音速測定法、バルクハウゼン・ノイズ法、金属粗組織観察法、ECT法、マルテンサイト変態量測定法等、種々の

方法を検討した[12]。

その結果、構造・機器部材の使用前の機械的特性や材料情報が無い状態で使用中に受けた数%以下の塑性変形を評価するために検討した方法の中で最適な方法は硬度測定であるとしている。

金属材料に引張負荷をかけ、塑性変形させた後、除荷をして荷重を0にし、再び引張負荷をかけて、塑性変形をさせると、Fig. 4 (a), (b)に示したように、変形前の状態から負荷した時と全く同じように弾性的挙動を示す。さらに引張負荷を増大させ、材料を降伏させると、元より高い降伏点、すなわち、ひずみ硬化を示して元の材料の応力-ひずみ曲線とほとんど同じ経路に沿って塑性挙動を開始する場合が多い。

従って、ある金属材料に対して、変形を受ける以前の情報が何も無い場合、現在置かれた状態が塑性変形を受けたか否かを判断するのは非常に難しい問題となり、事実上、初期状態からの現在の変形量を判定することは不可能なことが多い。

非磁性のオーステナイト相単相で構成されているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の場合、室温下で負荷を受けると、塑性誘起マルテンサイト変態により、非磁性のオーステナイト相が強磁性のマルテンサイト相に変態し、その変態量は変形量と良い相関関係を示すことが知られている[13]。従って、室温下で使用される SUS304 鋼製の機械・構造物に対しては、供用中にフェライトメータ等で強磁性相（マルテンサイト相）の量を測定することによって、その機械・構造物が受けた変形の大きさを推定することが可能となる。これは、疲労を受けてラチェット変形をする場合にも適用可能であり、疲労によって累積したひずみ量を定量的に評価できることが報告されている[14]。ただし、この方法で精度良い予測が可能になるのは、静的引張（圧縮）または疲労において、8%以上の大きな塑性変形がかかった場合であることに注意する必要がある。

なお、このマルテンサイト変態を利用した非破壊検査法を用いると、疲労を受けてき裂が発生した場合、そのき裂先端での応力拡大係数の最大値が定量的に評価できるという報告もある[15]。

4. 結 言

本稿では、「材質劣化診断技術に関する調査分科会」で検討してきた材料の劣化と損傷、特に、劣化の種類と劣化機構およびそれらの検出法を述べるとともにそ

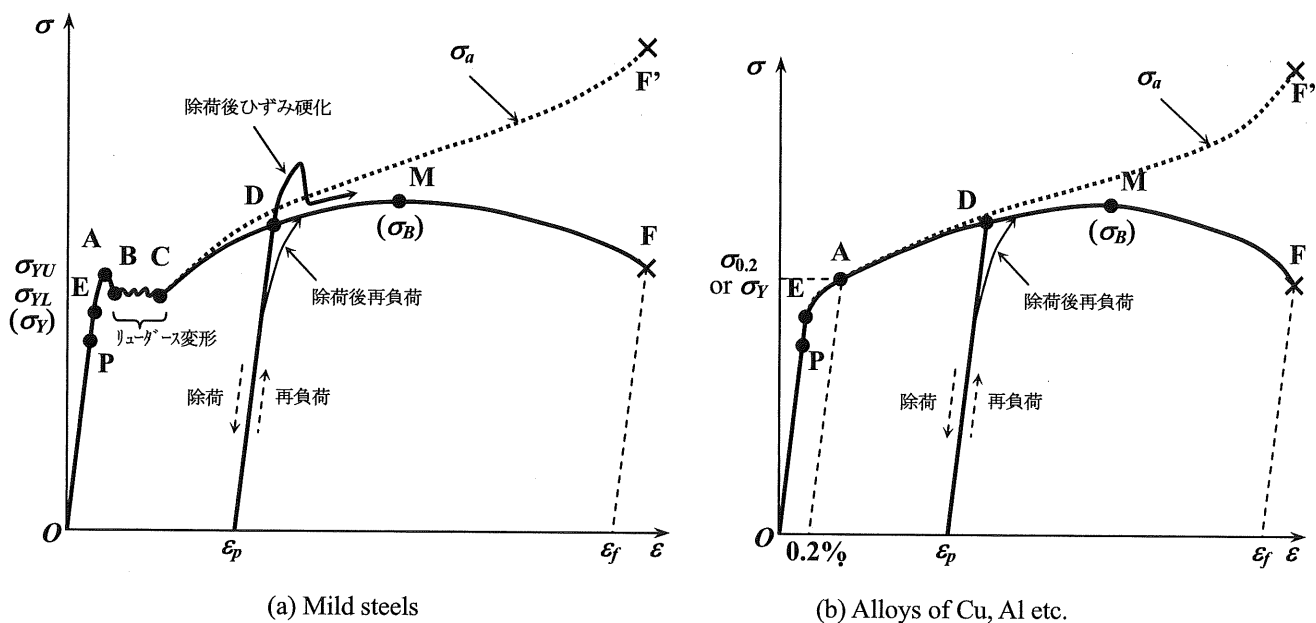


Fig. 4 Schematic illustrations depicting typical stress vs. strain curves of metallic materials.

これらの状態監視技術への適用可能性について述べた。

参考文献

- [1] http://mainte.gr.jp/web/index.php?option=com_content&task=view&id=183&Itemid=495
- [2] 小林英男編著、“破壊事故—失敗知識の活用—”、共立出版、2007、pp. 201-202.
- [3] 北川英夫、中曽根祐司、島崎剛、東出英一、北村武宇、“劣化材の強度評価と寿命予測の基礎研究”、機論(A編)、51巻464号、1985、pp. 1230-1234.
- [4] 鈴木和幸編著、“信頼性七つ道具”、日科技連、2008、pp. 180-191.
- [5] 西川精一、“新版 金属工学入門”、アグネ、2006.
- [6] 橋本宇一監修、“機械部品・鉄鋼材料の事故例集—原因と対策—”、丸善、1981.
- [7] 日本機械学会編、“動力プラント・構造物の余寿命評価技術”、技報堂、1992.
- [8] <http://shippai.jst.go.jp/fkd/Search> (JST 失敗事例データベース)
- [9] 熊田、日本金属学会報、2巻5号、1963、p. 261.
- [10] 前原ほか3名、鉄と鋼、67巻3号、1981、p. 577.
- [11] 櫻田理、“内面ひれ付管 (HPM) の内面浸炭深さ
- [12] 野本敏治、“中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会の検討状況”、原子力発電所の耐震安全性・信頼性に関する国際シンポジウム、2008.
- [13] 例えば、岩崎祥史、中曽根祐司、清水徹、小林昇、“室温、液体窒素温度下におけるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304、SUS316 鋼の塑性誘起マルテンサイト変態に及ぼす変形の影響(X線回折法による変形量の定量測定)”、機論(A編)、72巻722号、2006、pp. 137-144.
- [14] 中曽根祐司、清水徹、霞総司、“SUS304 鋼溶接材の疲労における塑性誘起マルテンサイト変態”、機構論 No.01-16、pp. 579-580.
- [15] Y. Nakasone, S. Kasumi and Y. Iwasaki, “Plasticity-induced Martensitic Transformation around Semi-elliptical Surface Cracks in Fatigue of an Austenitic Stainless Steel,” in “Mesoscopic Dynamics of Fracture Process and Materials Science,” H. Kitagawa and Y. Shibutani (eds.), Kulwar Academic Publishers, 2004, pp. 321-330.