

金材技研

1985

科学技術庁

ニュース

金属材料技術研究所

材料信頼性特集

金属材料の老化を診断

— 構造材料の信頼性評価技術の開発 —

人が老いると次第に衰えてくる。構造用金属材料も長年使用すると、外力に耐える能力が低下し、やがて破壊する。人は特別な場合をのぞいて、ほぼ平均的な寿命をまっとうするが、金属の寿命は力のかかり具合、温度、腐食環境などの相違により大幅に変わる。エッフェル塔は100年近く経った今日でも健在であるが、ボイラー用構造材料の寿命は約10年とされている。

構造材料の寿命を短くする要因には、使用される条件や環境によりクリープ損傷、疲れ損傷、腐食による損傷のほか金属組織の変化などがあり、それらが単独あるいは複合で作用し材料を劣化させる。使用材料の各種材料試験データの集積と解析、種々の損傷の定量的な把握などを行うことにより、現在使用中の構造物の安全性および信頼性を評価することができる。そして、その材料がどの位の期間使用できるか（寿命予測）、あるいは一定期間使用したものが、あとどの位使用できるか（余寿命予測）を知ることができれば、構造物にたいする信頼性は一層高まり、人命にかかわるような大事故を未然に防ぐことができる。

近年、各種プラントや輸送機器などの構造物は大型化、高性能化が目覚ましく、それに伴って使用される材料の使用条件は過酷なものになっている。また、高度成長期に作られたプラントなどは、近年になって老朽化が進み、使用されている材料

の劣化は少なくないと思われる。これらを経済的に稼働させるためにも、余寿命予測は不可欠なものである。

このような背景から科学技術庁では、昭和58年度に科学技術振興調整費研究の1つとして、「構造材料の信頼性評価技術に関する研究」を産・学・官からなる20機関の参加のもとに開始した。このプロジェクト研究は、当初3年間の目標として、1) 損傷生成・破壊機構の解明、2) 損傷、欠陥の検出および定量的計測技術の開発、3) 寿命および余寿命予測のためのシステムに関する技術開発の研究を重点的にとり上げ、実施した。そして、61年度以降は、これらの成果を踏まえて、寿命予測のためのデータベース作成、モニタリング技術の開発、実証試験の実施へと発展させる計画である。

当研究所では、本プロジェクトの基礎的研究分野を担当しており、これまでの成果をもとにして、1) クリープ損傷、2) クリープ疲れ損傷、および3) 腐食疲れ損傷に関し定量的評価方法の開発の3課題について研究を行っている。これらはいずれも現在問題になっている材料損傷・劣化、さらには破壊に関して極めて重要な課題であり、その成果は、高温機器や海洋構造物の安全性および信頼性確保などに広く応用されるものである。2, 3, 4頁に当研究所の成果をのべる。

高温材料のクリープ余寿命を予測する

—— クリープ損傷の定量的評価法を開発 ——

火力発電、石油化学、高速増殖炉などに用いる材料は、高温下で応力を受けながら長時間使用される。そのためクリープによる損傷が生じ、それが蓄積し、劣化が進みやがて破壊する。これら高温機器用材料の寿命は主としてクリープ損傷によって支配されるので、その実体を明確にし定量的に評価する方法を開発することが、安全性、経済性の上で極めて重要である。

長期間のクリープにより、材料内には種々の微視的な変化が生じる。これらのうちで寿命予測という観点から最も大切なものは破壊の直接的な原因となる変化である。

写真は、長時間使用した火力発電用タービンロータ（Cr-Mo-V鋼）の組織を示したもので、損傷として結晶粒界に生成した微小の空洞が認められる。クリープが進むと、このような空洞は数と大きさを増し、それらがつながってき裂となり、破壊に至る。したがって、空洞の定量化はクリープの進み具合すなわちクリープ損傷の程度を知る上で重要である。

当研究所では空洞の生成量に対応して材料の体積が増し密度が減少することに着目し、新開発の高精度の密度測定装置を用いて材料の密度変化から空洞などの生成量を精度良く（±0.002%）、しかも簡便に計測することに成功した。さらに、材料内の空洞は超音波の伝ば特性に著しい影響を与

えることを見出し、超音波を用いた非破壊的方法による空洞の定量化法の実用化の検討を行っている。

一方、高温材料を破壊に導く損傷の種類や破壊への過程（クリープ破壊機構）は材料の種類、使用温度および応力条件などによって異なるが、当研究所では、10年にわたるクリープ実験から、温度および応力条件とクリープ破壊機構との関係を示す破壊機構領域図を、多くの主要な高温材料について作成している。

このようにして得られた数多くの情報をもとにして、材料の余寿命を予測することができる。すなわち、クリープ破壊機構領域図から、破断につながる損傷の形態を知り、定量化したその損傷と余寿命の関係をクリープ損傷線図から求める。**図**はCr-Mo-V鋼の余寿命予測のためのクリープ損傷線図である。図には、破壊へ導く損傷としての空洞を、試料の密度変化より評価したものと、材料がこれまで使用された時間とその間に生じた伸びの積を推定することができる転位密度の減少を、回折X線の半価幅により評価したものを示している。材料の余寿命予測は、この両者によって定められた図中の位置と、実験によって求めた破断曲線から求める。

この研究で得られた成果は、他機関で実施している計測技術開発や、高温プラントにおける調査研究の成果と併せ、高温機器用材料の余寿命予測システムの構築へと発展される。

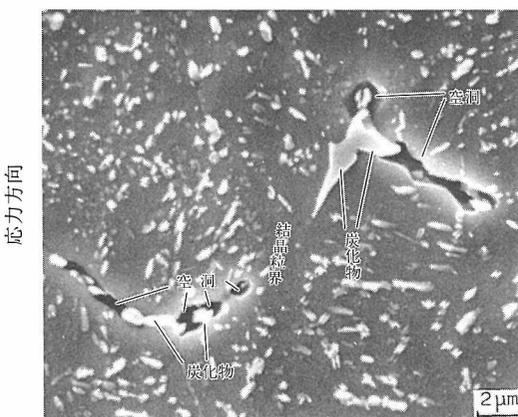


写真 火力発電用タービンロータCr-Mo-V鋼中にクリープにより生成した空洞

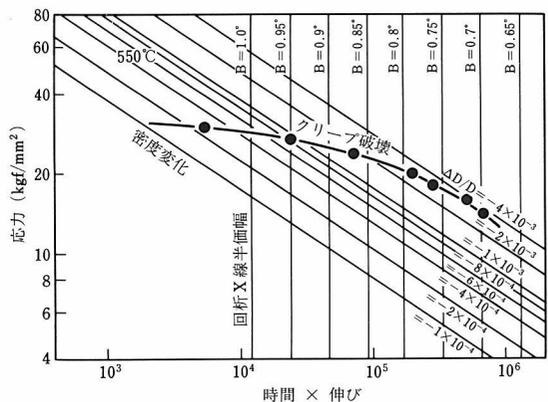


図 Cr-Mo-V鋼の余寿命予測のためのクリープ損傷線図

クリープと疲れが複合した場合の寿命評価

— 新しいタイプの試験機を開発 —

高温で作動するタービンや熱交換器などでは、加熱、高温保持、冷却の熱サイクルを受ける。この加熱、冷却時にタービンローター、ヘッダー等は、表面と内部の温度差のため、表面は内部により拘束された状態となり、引張り、圧縮の応力が生じ、この繰返しにより疲れ破壊が問題となる。そして保持温度が高ければ、クリープ損傷も受けるので、疲れ寿命は著しく減少する。このような疲れとクリープが関与する機器構成材料の寿命・余寿命を予測することは、機器の信頼性を評価する上で重要な問題となる。

この寿命評価を行うために、加熱、冷却に伴う応力波形を単純化して、二つの試験方法すなわち(1)クリープと疲れの負荷が繰返される試験、(2)引張りひずみが最大の時にある期間ひずみを一定にしておく疲れ試験を採用し、両者の破壊形態を調べ、その結果をクリープによる破壊と比較して、クリープ疲れ損傷の評価法の開発を試みた。

オーステナイト・ステンレス鋼の場合、ひずみを一定にした保持時間が入ると、破壊の経路は粒内型から粒界型に変り、破面全体に対する粒界破壊の割合が多くなり、寿命の低下が著しくなる。またこの粒界破壊の割合は、単純クリープ破断試験の破断延性値 Dc [$Dc = \ln(100/(100 - RA))$], RA : 破断絞り(%)]が小さいほど大きくなる。そこで、クリープ破断の延性値を採り入れた寿命曲線から、クリープ疲れ寿命の推定法を提案することができた。当研のクリープデータシートから材

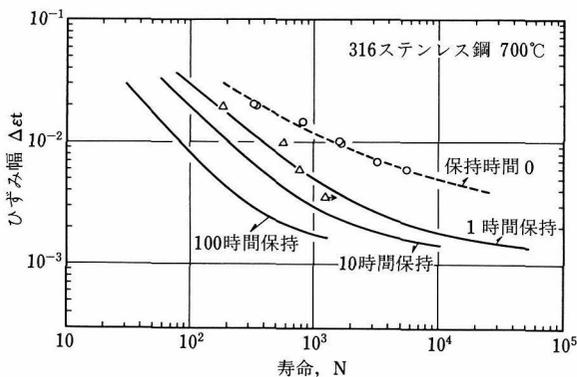


図 長時間クリープ疲れ寿命予測曲線

料のクリープ破断延性値を求め、これを用い推定したクリープ疲れ寿命と試験結果を図に示す。保持時間が1時間の場合、両者はよく対応している。

またクリープによる破壊の形態は、試験温度や負荷応力によって粒内型、粒界型などに変化するが、クリープと疲れの負荷が繰返される場合、クリープ条件がどの破壊形態を示すかによって、疲れ損傷への影響も違ってくる。これを基に、当研究所で作成したクリープ破壊機構領域図を活用し、クリープ損傷の形態を考慮した寿命の推定ができるようになった。

以上実験室的な条件下でのクリープ疲れ寿命の推定を試みているが、実際の機器について適用するには、より長い試験時間のデータが必要である。長い時間の試験には、これまでよく使われている高価な油圧サーボ方式の試験機に比べ、試験機の単価および運転経費の安い試験機が開発が望まれている。そこで当研究所では写真に示すような、機械的に動く部分がなく構造の簡単な試験機を開発した。これは試験片の上部に金属棒を置き、両者が固定された状態にして、金属棒(ヒートアクチュエータ)を加熱空冷することにより、試験片に所定の応力を与えるものである。

今後この試験機を用い、これまでの長時間の試験データを基に提案した寿命推定法の検証を行う予定である。

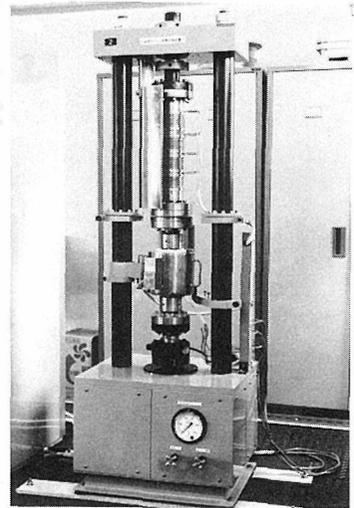


写真 長時間クリープ疲れ試験機

腐食疲れによる損傷の定量評価

— 新しい計測法を開発 —

わが国では都市や交通の要路の多くが沿海地帯にあり、いろいろな産業設備や公共構造物は台風などにより海塩粒子が付着する、いわゆる海浜環境にあるものが多い。このため例えば橋梁では、使用されている金属材料が腐食を受けやすく、同時に風圧や車輛による繰返し荷重のもとにあるため、疲れ損傷も生じやすい。一般に疲れ破壊は腐食により非常に起こりやすくなるため、腐食疲れによる損傷の評価は重要である。

写真は海水を模擬した食塩水中で疲れ試験を行った鉄鋼材料の、表面に生じた半球形の腐食ピットと割れを電子顕微鏡で見たものである。この場合、腐食によりピットがある深さ以上になると、その底から割れが発生、成長するため、材料本来の強さの数10分の1の力で破壊が起こり得る。

腐食疲れを受ける材料の寿命や余寿命の評価は図の手順で行われる。まず、材料の種類、環境、荷重条件の検討に続き、表面の腐食程度や割れの有無を調べる。割れが生じていなければ、ピットがある深さまで成長して割れを生ずるまでの期間と、その割れが伝ばして材料が破壊するまでの期間を評価することにより、全体の寿命または余寿命が評価される。既に割れが存在している場合はその伝ば期間だけを評価すればよい。

材料表面の損傷を詳細に調べるためには、電子

顕微鏡のほか、最近実用化された超音波顕微鏡も用いられる。後者は腐食表面を直接水溶液中で観察できるため、疲れにより割れが生ずるピットの限界寸法や、その寸法に達するまでのピットの成長速度を調べるのに都合が良い。疲れによる割れの成長速度については、割れの内部に腐食生成物が詰まりやすく、これまで再現性のよい測定が出来なかったが、一定の引張りを加えた状態で行う新しい試験方法を開発し、非常に小さな繰返し荷重下でも精度良く測定できるようになった。

一方、割れを含む材料に荷重が加わると、割れの先端は変形して新生面が露出し、そこに腐食反応が起る。そこで試料表面をダイヤモンドチップで引っかいて作った新生面について、腐食反応に伴う電流変化を調べたところ、新生面はさびで覆われた定常面より10倍も速く反応が進むことがわかった。そして以上の各測定結果をもとに腐食疲れの理論解析を行うことができるようになり、これによる予測値は別に行っている長時間寿命試験結果と良く一致した。

現在、構造材料の腐食疲れによる損傷評価は緊急課題とされ、本研究のほかにも、日本鉄鋼協会ほかによる共同確証試験の進行や、日本高圧力技術協会における専門委員会の発足など、産・学・官一体となった研究体制が整いつつある。

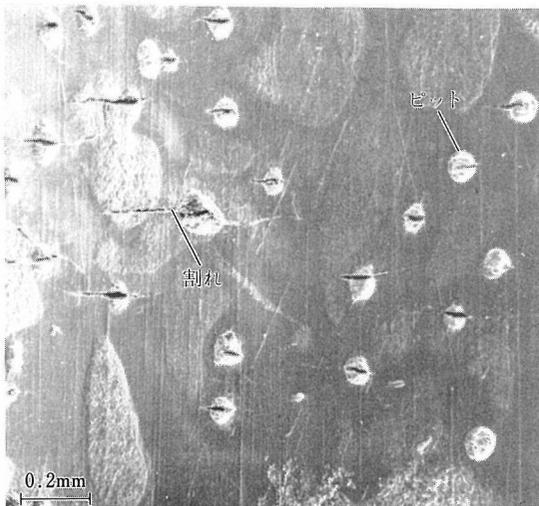


写真 腐食疲れによる鋼の表面損傷

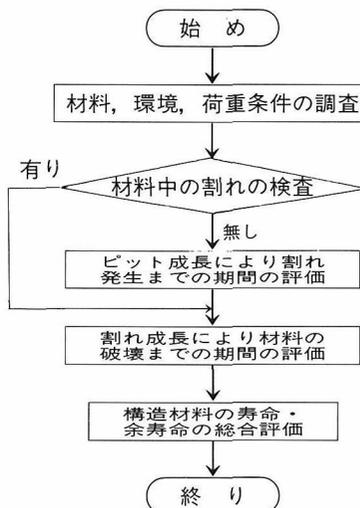


図 腐食疲れを受ける材料の寿命・余寿命評価の手順

日航機事故の 原因調査への協力

重要な機械や構造物に破損事故を生じたとき、その原因を明らかにして類似事故を防止することが大切である。航空機の場合は国際性が高いため、事故は発生地の主権国が原因を調査して、国際民間航空機構 (ICAO) に報告することになっている。わが国では運輸省に常置されている航空事故調査委員会がその任に当たっている。

一般に航空機の機器や構造などの不具合による事故の原因調査には、機械、電子、流体、材料など、各分野の専門知識が必要のことが多い。

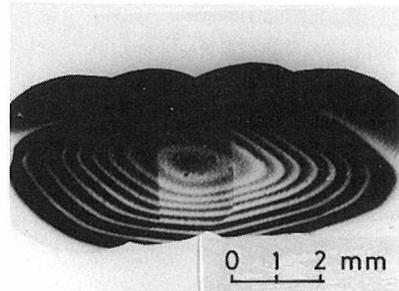
また材料の破断面の微視的特徴などから、破損原因を推定する破損解析の技術は特に重要である。当研究所の疲れ試験部では、金属材料の強度特性に関して豊富な研究実績をもち、実用金属材料に関する疲れデータシートを発行するなど、内外から高く評価されており、事故調査委員会にたいしても、破損解析などの面で10年以上にわたり、協力を行ってきた。

今回の日航B-747機の事故に際して、当研究所から派遣された専門委員を中心に、事故調査に積極的に協力し、速やかな原因究明と安全性向上に資することになっている。

金属多層膜の新しい 積層構造観察法

金属多層膜は、異なる金属を原子層オーダーの厚さで交互に蒸着し、これを規則的に繰り返して得られるもので、超電導性など高度の機能性が期待される人工物質である。その作製においては、層界面での組成変化、層内での均一性を把握し、積層構造を原子オーダーで制御することが必要である。

当研究所では積層構造を迅速に直接観察する方法を開発した。この方法では、イオンビームにより滑らかで緩い傾斜をもつクレーターを掘



り、深さ方向の厚さ数 10Å の金属層を横方向に数万倍に拡大して、電流吸収走査像で直接観察する。同時にオージェ分析を行うことにより、深さ方向の組成変化を $10\sim 20\text{Å}$ 程度の分解能で測定できるので、積層膜の新しい強力な評価手段となる。

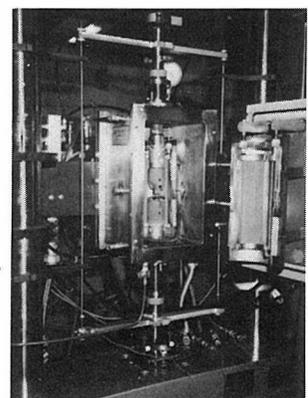
セラミックスの 高温疲れ研究に着手

セラミックスは、新しい高温用機械構造材料として注目されている。しかし、構造材料として不可欠な疲れ強さに関する研究はほとんど行われていない。

金属材料の疲れに関する研究に多くの実績をもつ当研究所は、科学技術振興調整費研究の環境としてセラミックスの高温疲れの研究を行っている。

写真は 1600°C までの高温で高真空中もしくは不活性ガス中でセラミックスの疲れ試験を行う

装置である。現在、炭化ケイ素の疲れ現象を、材料の微細組織変化や高温クリープ特性との対応関係において解明しつつある。



〔特許出願速報〕

出願日	出願番号	発 明 の 名 称	出願日	出願番号	発 明 の 名 称
60. 4. 1	60-066631	鉄中の中の有価元素の分離回収法	60. 7. 9	60-149305	金属磁性流体
60. 4. 19	60-082131	高融点金属酸化物の超微粒子の製造法	60. 7. 16	60-155197	超塑性加工に適した高強度耐熱チタン合金
60. 5. 10	60-098010	電子ビーム形状制御による電子ビーム溶接法	60. 7. 16	60-155198	Ni 基耐熱合金
60. 5. 10	60-098011	電子ビーム溶接法	60. 7. 17	60-156089	空冷翼 (㈱東芝との共同出願)
60. 5. 16	60-102762	化合物超電導体の製造方法 (㈱東芝との共同出願)	60. 7. 30	60-166786	電子ビーム照射による化合物超電導線材の製造法
60. 5. 18	60-106453	Nb ₃ Sn超電導線の製造方法 (㈱神戸製鋼所との共同出願)	60. 8. 2	60-169788	磁気冷凍作業物質及びその製造方法
60. 6. 10	60-124267	液中秤量装置	60. 8. 2	60-169789	磁気冷凍作業物質及びその製造方法
60. 7. 2	60-144032	粉末未混合法によるチタン合金の製造方法	60. 8. 2	60-169790	純Mo単結晶線の製造法
60. 7. 9	60-149304	共晶炭化チタン分散強化コバルト合金	60. 8. 28	60-188923	磁気記録媒体及びその製造方法 (日立金属㈱及び新技術開発事業団との共同出願)

〔出願公開発明の紹介〕

化合物超電導複合線材の製造法 特開昭60-89530 昭和60年5月20日

本発明はNb₃Sn, V₃Gaなどの超電導特性に優れた化合物を生成させる際、高温高静水圧加圧装置(通称HIP)を用いて加圧熱処理することを特徴とした製造法に関するもので、結晶粒が微細でしかも結晶軸の方向がそろった組織が得られるため臨界磁界の向上が図られ、しかも化合物生成時の原子移動のあとに残される空孔(カーケンダルポイド)の発生が完全に防止できるため応力、歪に対する線材の信頼性が向上するので実用線材の製造法として期待される。

繊維分散型Nb₃Sn超電導線材の製造法 特開昭60-86705 昭和60年5月16日

本発明は、Ti, Zr, Hfを含むSn基合金とNb-Cu合金とで複合体を作製し、これを線、テープ、管等に加工した後、熱処理することによりCu中で繊維状になっているNbとSn基合金のSnとを反応させてNb₃Snとした超電導線材を製造する方法に関するもので、添加されているTi等の元素により反応が促進されると共に強磁界特性が著しく向上し、しかも伸線加工が容易でコスト低減を図ることができるなどの優れた特徴を有しており実用線材の製造法として期待される。

◆短 信◆

●海外出張

木本 高義 原子炉材料研究部
高速炉および核融合炉用金属材料の照射損傷の研究のため、昭和60年9月15日から昭和61年9月14日までアメリカへ出張した。

長井 寿 極低温機器材料研究グループ主任研究官
高マンガン鋼溶接材の極低温における機械的性質に関する研究のため、昭和60年10月1日から昭和61年9月30日までアメリカへ出張した。

西田 勲夫 機能材料研究部主任研究官
熱電材料及び熱電応用について講演を行うため、昭和60年10月9日から昭和60年10月15日まで韓国へ出張

した。

中村 治方 溶接研究部長
原子力施設の溶接技術基準に関する調査のため、昭和60年10月10日から昭和60年10月20日までイギリス、ドイツ、フランスへ出張した。

衣川 純一 溶接研究部主任研究官
環境に挑戦するための溶接技術に関する国際会議出席のため、昭和60年10月13日から昭和60年10月20日までカナダへ出張した。

尾崎 太 製錬研究部主任研究官
日中科学技術協力による共同研究打合せのため、昭和60年10月21日から昭和60年11月4日まで中国へ出張した。

通巻 第323号

発行所 科学技術庁金属材料技術研究所

編集兼発行人 越川 隆 光
印 刷 株式会社 三 興 印 刷
東京都新宿区信濃町12
電話 東京(03)359-3841 (代表)

東京都目黒区中目黒2丁目3番12号
電話 東京(03)719-2271 (代表)
郵便番号 153