

NATIONAL
INSTITUTE FOR
MATERIALS
SCIENCE

NIMS NOW

No. 1

2013 January-February

材料は、 壊れる。

エネルギー関連構造材料の
信頼性評価技術の研究開発プロジェクト



新年あけまして おめでとうございます。



2013年を迎え、NIMSは発足から12年がたち、第3期中期計画も3年目となりました。昨年は、その時間経過とともに、NIMSは本当の意味でセンター・オブ・エクセレンスになっているな、と実感した一年でした。

まずなにより、世界でのNIMSの評価は非常に高く多くの国が研究連携を求めてNIMSへやってきました。国際学術連携は2012年だけで15件、包括協力協定は6つの機関と締結しました。フランス、ブラジル、台湾、英国、など、各国の大学や研究機関と連携を深めました。新規学術連携センターとしては「NIMS-NU連携研究センター」を米国ノースウェスタン大学と設立しました。本センターは、2011年の天津大学との設立に次いで、2番目のものとなります。

また、企業との連携が増えていることがあげられます。これは国際的な連携はもちろんですが、日本の企業との共同研究が非常に多くなってきています。NIMSのプロダクティビティが向上している証左でしょう。

さらに、日本のリサーチコミュニティへのサービスを充実させています。ナノテクノロジープラットフォーム、低炭素化材料設計・創製ハブ拠点、元素戦略磁性材料研究拠点、ナノ材料科学環境拠点GREEN、そしてTIA-nanoオープンイノベーション。また、材料データベースMatNaviでは文部科学大臣表彰もいただきました。日本のものづくり、素材開発への貢献に力を入れています。

国際社会は経済だけでなく、社会のありようまでもが激しく変化しています。製造業などでは新しい国の台頭があり、一方では世界経済は依然厳しい状態が続いています。日本では社会インフラの問題をはじめ、国の新しいかたちを誰もが模索しています。

このようなときこそ、クリエイティビティが重要であり、最後はどのような人材がいるか、育てているか、が肝要です。どのような世紀の発見も、人が行うのです。NIMSでは今、若手研究者のバックアップに力を入れています。そして、女性の登用も積極的におこなっていきます。

最近私は、人はひとりでもなかなか新しいことは出てこない、人はインタラクションして、ディスカッションして、時にはユーモアを交えて、いいアイデアを出していくものだと考えるようになりました。たとえば、昨年竣工したNanoGREEN/WPI-MANA棟では、人が人と出会い、顔が見える環境を重視しました。

このような研究開発環境で育まれたクリエイティビティが、日本、そして世界の新しい時代をつくりあげると信じています。

独立行政法人 物質・材料研究機構 理事長
潮田資勝

A handwritten signature in black ink, reading 'S. Ushioda'.

材料は、 壊れる。

エネルギー関連構造材料の 信頼性評価技術の研究開発プロジェクト

構造材料で多く使われる鉄鋼。
できたてのそれは、美しく、ずっしりと重く、とても強靱で、頼もしい。
人間の力ではとても曲げられないし、
ハンマーや機械を使ってもなかなか壊すことはできない。
未来までずっと、頑丈なままであるかのように思える。

けれども、あらゆる材料は、静かに、ゆっくりと、疲労し、壊れている。
壊れるはずがない、と感じる鉄鋼も、もちろんそうだ。

このような、人には感じることでできない材料における「破壊への過程」を研究し、予測し、
社会インフラにつかわれている様々な構造材料の評価をしているのがこのプロジェクトだ。

破壊現象のメカニズムを突き止め、劣化の進行を、
環境と時間、材料特性などのパラメータで予測しようと研究を続けている。

これからの日本、特に社会インフラの寿命という
問題に直結しているプロジェクトなのだ。

火力発電プラントの寿命評価の基礎 – クリープ強度評価

環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価ユニット
高温材料グループ
澤田浩太

注目される火力発電

現在、火力発電技術は、2つの観点から注目されています。一つは、東日本大震災による原発事故以降、火力発電が電力の安定供給の生命線になっている点。もう一つは、日本の火力発電プラントの発電効率が世界の最先端となっており、この技術を世界へ輸出することで日本の経済を活性化し、かつ、二酸化炭素の排出量を世界的に大幅に削減することが期待されるという点です。

火力発電プラントのうち、石炭火力発電プラントの発電効率は日本が世界一です。超々臨界圧火力発電プラントと呼ばれる最新鋭の高効率石炭火力発電プラントは、高クロム鋼と呼ばれる高強度耐熱鋼の開発によって実現されていて、国内では22基が稼働しています。

火力発電プラント構造部材の信頼性とクリープ強度

火力発電プラントで使用される配管などの肉厚を設計するためには、配管などで使用される材料の許容応力が必要となります。許容応力は、材料の10万時間(約11.4年)クリー

プ破断強度などに基づいて規定されます。したがって、許容応力を精度良く決めることが部材の信頼性を高めることになるのです。

そのためには、「10万時間クリープ破断強度」を精度よく評価することが重要です。NIMSでは高クロム鋼のクリープ破断強度を精度よく評価できる「領域分割解析法(図1)」を提案し、同手法は広く普及しはじめています。

許容応力は10万時間クリープ破断強度などによって決められますが、国内で実際に稼働している石炭火力発電プラントの多くは、その運転年数が10万時間を超えるものが数多く出てきています。したがって、これらのプラントの安全な長期運転をしていくためには、10万時間を超える「超長時間クリープ破断強度」を知る必要があります。

図2は、高クロム鋼の「応力-破断時間曲線」の模式図になります。図中の実線は「領域分割解析法」による評価線の例を示しています。10万時間を超える時間域では、実験データが極めて少ないため、点線のような外挿を行う必要があります。しかし、高クロム鋼の組織はマルテンサイト組織に加えて数種

類の析出物が分散したもので、高温・長時間条件では、原子の拡散による組織変化が生じます。10万時間を超える時間域では、拡散による組織変化が顕著になることが想定されるため、図2における外挿の妥当性を慎重に検討する必要があります。

図3は、ASME Gr.91 鋼において析出するZ相と呼ばれる複合窒化物の析出温度と析出時間の関係を示しています。実機使用温度600℃では、1万時間以上で初めてZ相が確認されます。このような長時間域で起きる組織変化をまずは把握し、計算科学を併用することで10万時間を超える長時間域での組織変化を予測した上で、「超長時間クリープ破断強度」を予測することが重要なのです。

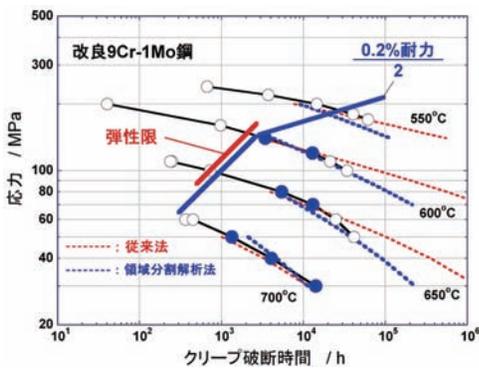


図1 高クロム鋼のクリープ強度

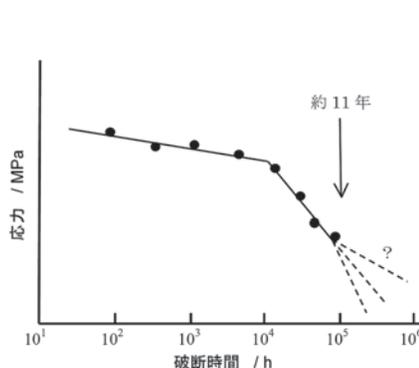


図2 超長時間クリープ強度の予測(模式図)

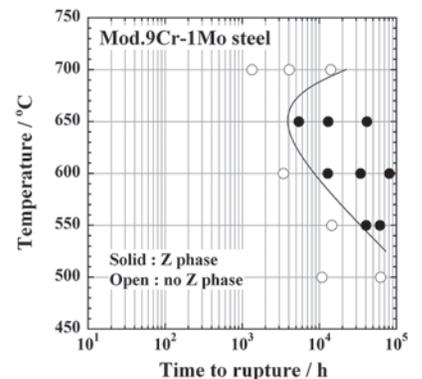


図3 Z相のTTP線図

さわだ こうた 博士(工学)。1999年東北大学大学院工学研究科にて博士課程修了。1999年金属材料技術研究所 任期付研究員、2002年NIMS研究員を経て2012年NIMS主幹研究員。2007年～2008年シュツットガルト大学材料試験研究所客員研究員。専門は高温強度学。

超音波疲労試験によるギガサイクル疲労特性の評価

環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価ユニット
疲労研究グループ
古谷佳之

100年以上に及ぶ疲労の研究

疲労の研究は100年以上の歴史がありますが、現在でもなお疲労による破損事故は後を絶ちません。これは疲労という現象の複雑さを物語っていますが、同時に疲労の分野には多くの未解決課題が残っていることを意味しています。そのような未解決課題の一つが、本研究で取り組んでいるギガサイクル疲労の問題です。

通常、鋼では疲労破壊が起きなくなる限界の応力である疲労限が存在し、疲労限を予測する技術はほぼ確立されているといえます。ところが、金属材料の中には疲労限の“無い”材料があり、鋼の場合でも高強度化すると疲労限が消滅します。特に高強度鋼の場合には、内部破壊という通常とは異なる破壊形態が出現することにより疲労限が消滅します。

疲労限がある場合には疲労試験の打切り繰返し数は 10^7 程度で十分ですが、疲労限が無い場合には 10^9 回を超えるギガサイクル域までの試験が必要になります。しかし、ギガサイクル疲労試験は数ヶ月から数年という長時間の疲労試験となるため容易ではあ

りません。これが、ギガサイクル疲労の問題です。

ギガサイクル疲労研究を経て、内部破壊機構の解明へ

ギガサイクル疲労の研究では、超音波疲労試験が有効なツールとなります。超音波疲労試験では20kHzという通常よりも200倍以上速い繰返し速度を実現できるため、 10^9 回試験に要する時間を1日に短縮することができます。超音波疲労試験では繰返し速度の影響に注意する必要がありますが、これまでの研究で内部破壊となる場合には繰返し速度の影響が極めて小さいことを複数の材料と条件で確認しています(図1)。

超音波疲労試験を用いたことにより、ギガサイクル疲労に関する様々な研究成果が得られました。例えば、平均応力効果の解明、寸法効果の解明、水素の影響の解明等が挙げられます。その結果、内部破壊の特性が通常の疲労とは大きく異なることが明らかになったと同時に、内部破壊機構を解明するための境界条件が整いました。また、超音波疲労試験を用いた介在物検査や高温超音波疲労

試験装置の開発といった技術開発もすすめてきました。その結果、超音波疲労試験に関する豊富な知識と技術を獲得することができました。

現在は、これまでの研究成果を踏まえて、内部破壊機構の解明に取り組んでいます。ここでは、これまでに明らかとなった内部破壊特性を説明できるモデルを仮定し、実験によりモデルの妥当性を実証します。この実験で鍵となるのが、内部き裂伝ば挙動の観察です。内部き裂は、表面き裂のように直接観察することができません。そこで、ビーチマーク法により内部き裂の伝ば挙動を可視化する技術の開発をすすめています。これは、荷重変動を与えることにより、図2のように破面上にき裂伝ばの痕跡を残す方法です。このように高強度鋼の内部破壊の研究は、“外堀”を埋めることに成功し、“本丸”の攻略に着手した段階です。

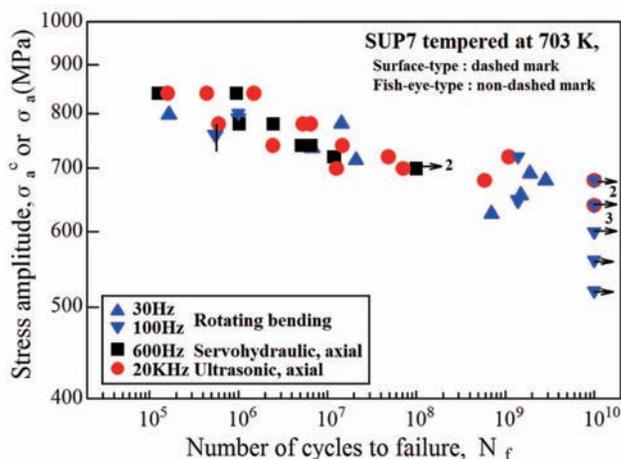


図1 超音波疲労試験結果の代表例

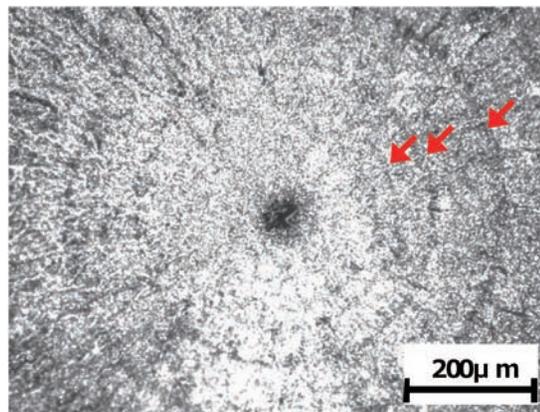


図2 内部破壊破面上のビーチマーク。荷重変動を与えた時の内部き裂の様子がリング状の模様として残っている。

ふるや よしゆき 博士(工学)。九州大学大学院工学研究科博士課程修了(機械工学専攻)。2000年金属材料技術研究所に入所、2001年NIMS研究員、2005年同主任研究員、2006年米国ローレンス・バークレイ国立研究所客員研究員、2010年より現職。入所して以降、一貫して疲労の研究に従事している。ギガサイクル疲労が主な研究テーマであるが、疲労データシートの作成や事故調査等の業務にも従事している。力学が専門であるが、学位論文のテーマが分子動力学(計算)であった背景があり、計算から実験までの幅広い研究経験を持つ。

非接触の超音波測定による疲労の計測技術

環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価ユニット
非破壊評価グループ グループリーダー
志波光晴

環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価ユニット
非破壊評価グループ
山脇 寿

き裂発生寿命

材料の疲労寿命の考え方には、疲労き裂が発生した段階を寿命と定義する「き裂発生寿命」及び、あらかじめき裂が導入された試験片を用いて疲労き裂の進展速度を基に材料の肉厚から寿命を求める「き裂進展寿命」の2種類があります。近年、プラントなどの鋼構造物においては、定期的な非破壊検査によりき裂寸法測定をおこない、き裂進展寿命を基に維持管理がおこなわれています。一方、宇宙機の液体ロケットエンジンに用いられる材料などは、供用中に補修ができないため、き裂発生寿命に基づいた設計が望まれています。き裂発生寿命を非破壊的に測定する手法がなく、開発が求められていました¹⁾。

疲労進展機構と非破壊測定法 — 非線形超音波とAE —

金属材料の疲労進展機構には、疲労源となる組織とその周辺の「転位挙動（塑性変形）」及び、「微視き裂」の発生と合体、主き裂の進展がありますが、き裂発生寿命の評価においては、疲労源となる組織とその周辺の転位挙動（塑性変形）及び、微視き裂の発生と合体の検出が求められます。

計測の手法において、転位挙動に敏感な

非破壊測定技術として、近年広帯域センサーの開発により、超音波の高調波を測定する非線形超音波法が注目されています。また、微視き裂の発生と合体としては、非接触によるレーザーアコースティック・エミッション(AE)法が開発され、溶射プロセスのその場観察に応用されています。

低温環境における超音波疲労時の非線形超音波とAE

これまでのNIMSにおける、このような研究においては、非線形超音波測定法として超音波疲労試験機に注目し、疲労試験中に発生する非線形超音波、及びAEを広帯域レーザー振動計及び連続波形収録解析装置を用いて、高強度鋼の常温における疲労進展挙動を評価する手法を開発してきました²⁾。これらの成果を基に、低温環境で使用される液体ロケットエンジン材料のき裂発生寿命を非破壊的に評価することを目的とした、液体窒素環境における超音波疲労試験時の非線形超音波及びAE計測システムの開発をおこないました³⁾。

図1は、クライオスタットに組み込んだ超音波疲労試験機及び試験片、及びレーザー振動計の光路です。超音波振動子はクライオスタットの下部に設置され、試験片への加振

は超音波ホーンを介しておこなわれます。試験片の振動は、液体窒素液面より上部にある端面に、覗き窓を介してレーザーを入射することで測定されます。超音波加振中は、液体窒素が気化してミストが大量に発生しレーザー光を遮ることから、ミストシールドを設けて、レーザー光路をミストが遮らないように工夫してあります。

図2は、疲労試験中に検出された累積AEヒット数、及びAE振幅のグラフです。図3は、疲労試験中に検出された非線形超音波として、分調波、第二高調波、第三高調波を示すグラフです。

低温環境における、この超音波疲労法は、これまでにない試験法であるため、非線形超音波信号の物理的な意味やAE源についてもまだ不明な点が多く、新たなチャレンジとして研究をすすめています。

参考文献

- 1) 志波光晴、高坪純治、佐藤英一、「NIMS-AIST-JAXAの3機関連携による非破壊信頼性評価」,非破壊検査, Vol.59, No.10(2010), 492-495.
- 2) 志波光晴、古谷佳之、山脇 寿、伊藤海太、榎 学:「超音波疲労試験時のAE・非線形超音波解析による高強度鋼の疲労進展評価」,日本金属学会誌, Vol. 73, No. 3, (2009), p205-210.
- 3) 特願2011-228283「極低温超音波疲労試験非破壊試験評価装置及び解析・評価方法」(志波光晴、山脇 寿、緒形俊夫、松浦 融、小林英樹、鈴木佳明)

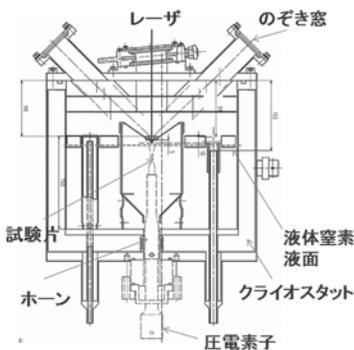


図1 液体窒素環境用の超音波疲労試験機

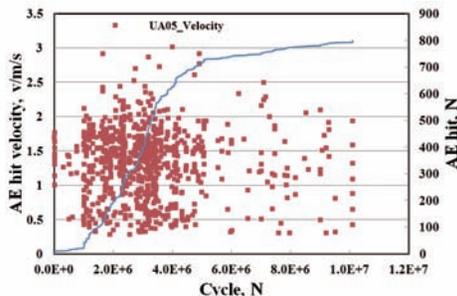


図2 超音波疲労試験中のAE特性

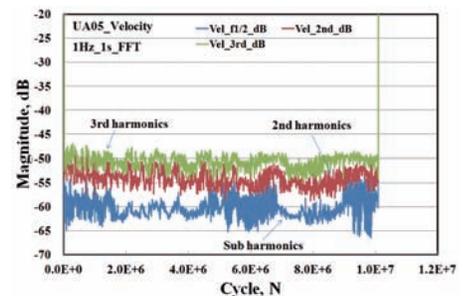


図3 超音波疲労試験中の非線形超音波

しわ みつはる 日本フィジカルアコースティクス(株)、東京大学先端科学技術センター、(財)発電設備技術検査協会を経て、2007年よりNIMSに在籍。電磁気、超音波、AE法により材料の非破壊評価を実施。 / やまわき ひさし 1980年 科学技術庁金属材料技術研究所に入所。以来、超音波探傷、レーザー超音波、超音波の計算機シミュレーションなどの研究に従事する。

高強度鋼の水素脆化特性

環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価ユニット
耐環境特性グループ
秋山英二

水素脆化とは

水素脆化とは、金属材料が荷重のかかった状態で使用される場合に、環境から金属材料に侵入する、あるいは材料の作製時に入った微量の水素によって金属材料が脆くなってしまふ現象のことです。荷重をかけてからしばらく時間を経た後に破断が起こることから、その破壊現象を「遅れ破壊」とも呼びます。

一般には金属材料の強度が高くなるほどその現象に対する感受性は高くなります。実際に遅れ破壊をした高強度ボルトの例を図1に示します。この例のような、高強度ボルト用材料をはじめとする建築・土木・自動車用材料あるいは水素エネルギー利用のための、より強度の高い材料の開発がすすめられている今日では、水素脆化は必ず直面する問題であり、材料の信頼性の確保、それを評価する技術に、今改めて関心が高まってきています。

水素脆化のメカニズムについては諸説あるものの、実のところ未だ議論の途上にあり、メカニズムの解明とそれに基づいた評価法が期待されています。

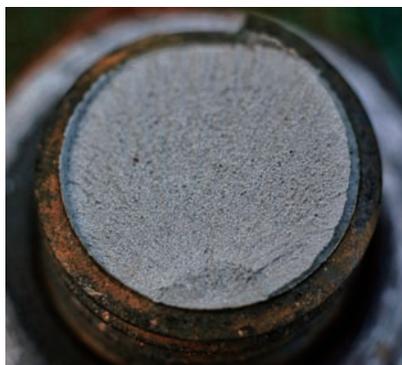


図1 実用ボルトより強度を高め水素脆化感受性を上げ、つばの屋外で暴露し遅れ破壊したボルトの例

水素脆化の特性

ボルトのネジを模擬した切欠きをつけた、種々の高強度鋼サンプルに水素をチャージして、低速で引張試験して求めた引張強度と水素量の関係を図2に示します。重量の比で鋼材に対して100万分の1（重量ppm）に満たないわずかな水素量でも、強度を大きく下げってしまうのがうかがわれます。NIMS開発鋼以外の市販鋼の強度レベルを変化させたものでは、その強度レベルが高いほど水素量に対して引張強度が下がっているのが明らかです。このような試験をおこなうことによって、材料の水素脆化感受性の評価をおこなっています。

環境から侵入する水素

例えば高強度ボルトのような場合、材料に取り込まれる水素の原因は腐食反応です。金属が錆びる時、金属の酸化反応にともなって必ずそれに対応する還元反応が起きており、屋外の鋼材などが錆びる際の還元反応は主に酸素の還元です。しかし、一部で水素の還元反応が起き、その大半は水素ガスで鋼材の表面から外部に逃げますが、更にそ

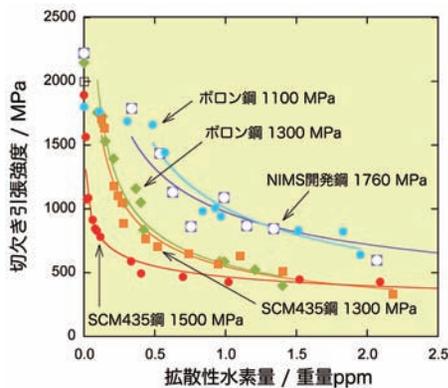


図2 種々の高強度鋼の拡散性水素量の増加にともなう引張強度の減少

の一部の原子状の水素が鋼材中に取り込まれます。その量は、大気腐食のようなマイルドな条件では図2の市販材のような場合0.2重量ppm程度までです。

微量ではありますが、図2からもうかがわれるように、このわずかな水素でも強度の高い鋼には大きな影響を及ぼします。したがって、腐食にともなうように、そしてどの程度水素が侵入するのも重要な課題です。

図3は電気化学的な方法で、鉄に侵入する水素の透過量の変化を、大気腐食を模擬した腐食試験環境でモニタリングした例です。腐食試験期間（腐食試験サイクル数）が長くなるにともなう、徐々に水素侵入が促進されていることがうかがわれます。このような腐食の進行にともなう水素侵入の促進に要する時間が、遅れ破壊の遅れの原因の一つであることが示唆されます。

水素脆化は、今後さらにその重要度が高まる課題であり、その解決に向けた貢献が一部でも出来ればと思います。

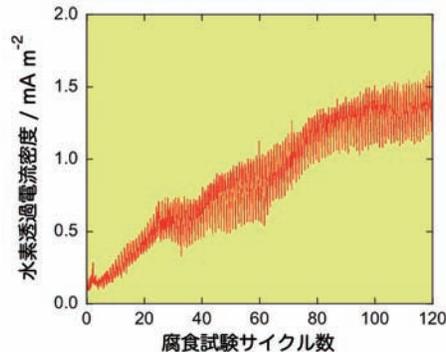


図3 腐食サイクル試験による腐食の進行にともなう水素侵入の促進

サイクロトロン加速器を用いた水素イオン照射下疲労試験

環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価ユニット
耐環境特性グループ
村瀬義治

照射損傷

原子炉材料は、一般的な社会インフラの構造材料が受ける様々な負荷に加えて、高速中性子照射場という特殊な環境に晒されます。高速中性子照射場では、材料の格子原子が中性子によってはじき出されて、原子空孔や格子間原子などの点欠陥が生じる（はじき出し損傷）ほか、中性子との核反応によって材料中に新たな放射性同位元素が生成する（放射化）とともに、水素やヘリウムなどのガス原子が生成します（図1）。

はじき出し損傷では、生じた点欠陥の一部が集合体を形成して材料の寸法変化や靱性低下を引き起こし、生成したガス原子は材料脆化を助長するなど、材料の力学特性に著しい悪影響を与えます。このように、中性子などの放射線環境下で材料が受ける損傷を「照射損傷」と呼びます。

サイクロトロン加速器によるシミュレーション照射試験

原子炉材料の研究は、高速中性子照射場での「照射下」材料試験が技術的、経済的に

困難であることから、その多くは原子炉で予め中性子照射した材料について実施する「照射後」材料試験を対象にしています。そのため、照射下材料挙動の理解は著しく遅れています。そこで私たちは、サイクロトロン加速器によるイオン照射を用いて、材料にはじき出し損傷を与えながら材料試験を行う「その場」材料試験装置（図2）を開発しました。図3はサイクロトロン加速器を用いた水素イオン照射下疲労試験の結果を示しています。

照射後試験では、照射下試験と同じ照射量（＝イオンビーム強度×時間）を予め照射した後に疲労試験をおこなっています。図3で明らかのように、非照射や照射後と比較して照射下で疲労寿命が伸長し、照射下では照射後よりも疲労寿命に与える影響が大きいことがわかります。その原因として、照射後では点欠陥集合体が転位運動との相互作用によって消費されて減少するのに対し、照射下では点欠陥集合体が連続的に供給され、疲労破壊と密接な関係にある転位運動を効率的に妨げるためと考えられています。

このような、原子炉照射を他の照射手段

で代用する試験方法を「シミュレーション照射試験」と呼び、同試験は、得られた材料挙動データからそのメカニズムを解明することによって実際の原子炉の材料挙動評価に役立つ「機構論的研究」に大いに威力を発揮します。

「その場」照射試験技術をさらに高度に

水は放射線分解により H_2O_2 など腐食を促進する化学種を生じるため、原子炉材料の腐食挙動を解明するためには「照射下」において応力腐食試験を実施する必要があります。私たちは、「その場」照射試験技術をさらに高度化した「照射下応力腐食試験装置」を開発し、原子炉材料や高レベル放射性廃棄物格納材料の安全評価技術のさらなる向上に寄与することを目指しています。

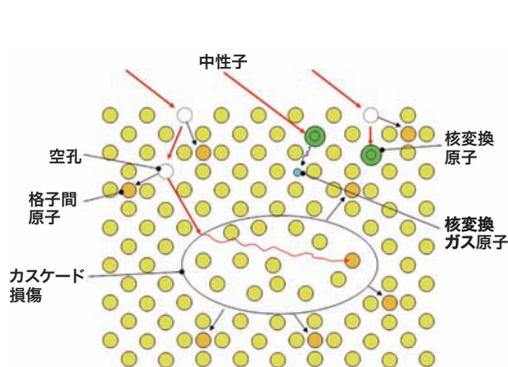


図1 中性子照射によるはじき出し損傷模式図

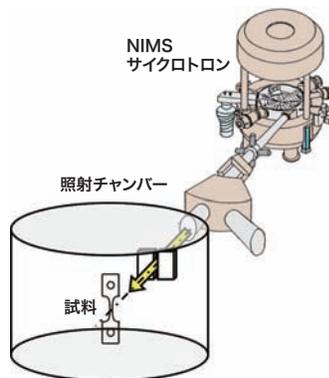


図2 サイクロトロンを用いた照射下材料試験装置

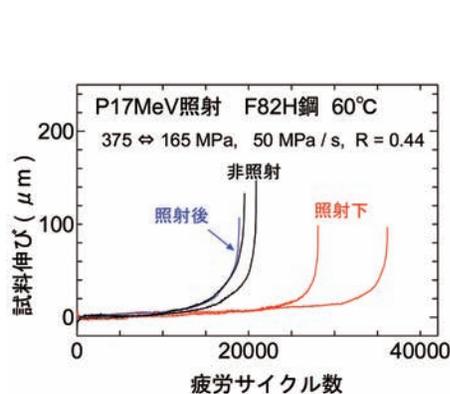


図3 水素イオン照射下疲労試験結果

むらせ よしはる 博士(工学)。1991年早稲田大学大学院理工学研究科修了。同年、金属材料技術研究所に入所、2001年NIMSに改組、現在に至る。

応力腐食割れの階層的な 3D・4D 解析

MANA- ナノマテリアル分野
ナノエレクトロニクス材料ユニット
半導体デバイス材料グループ
川喜多 仁

環境・エネルギー材料部門
材料信頼性評価ユニット
腐食研究グループ グループリーダー
篠原 正

環境・エネルギー材料部門
材料信頼性評価ユニット
疲労研究グループ
長島 伸夫

環境・エネルギー材料部門
材料信頼性評価ユニット
非破壊評価グループ グループリーダー
志波光晴

ステンレス鋼の応力腐食割れの機構を解明

社会インフラやエネルギー関連設備に用いられる構造材料の一つであるステンレス鋼では、腐食環境において外的・内的な応力が加わると応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking) と呼ばれる損傷が起こることがあり、深刻な事故につながる危険性があります。この応力腐食割れの抑制のためには、その発生と進展機構を解明することが重要であり、中でもき裂の進展方向や進展速度を明らかにすることが必要です。

従来から広くおこなわれてきた2次元の断面や破面におけるき裂の観察では、き裂の3次元の進展方向や進展速度を明らかにすることはできません。そこで、本研究プロジェクトでは、応力腐食割れの機構解明と抑制技術の開発を目標として、X線コンピュータ断層撮影(Computed Tomography、以下CT)、立体金属組織学やマイクロ・メソスコピック強度解析、電気化学やアコースティック

クエミッションといった固有の利点や特徴を有する解析手法を統合することで応力腐食割れの階層的3次元・4次元(3D4D)な解析をすすめています。

X線CTを用いた応力腐食割れの解析

ここではX線CTを用いた解析例を紹介いたします。

X線CTは以下の原理で3次元画像を得ます(図1)。

- ①サンプルにX線を照射し、検出器により透過像を撮影
- ②サンプルを回転させ連続して透過像を撮影
- ③撮影した複数の透過像を計算処理によって重ねる

また、X線CTでは任意の断層像を再構築して出力することも可能です。図2は応力腐食割れ試験後の円柱状304ステンレス鋼の軸方向の断層像、および応力腐食割れき裂を3次元的に視覚化した画像です。き裂が円柱表面から中心に向かって3次元的に進展し

ていることが明瞭に識別できます。

ステンレス鋼はその主要な構成元素の原子密度が大きいため、X線の透過能が低くなります。そのため、これまではシンクロトロン放射光のような、輝度の高い線源が用いられてきました。本プロジェクトでは、汎用性の高いX線源を用いているため、確率的に発生・進展するステンレス鋼の応力腐食割れき裂の検出や統計的なデータの取得に必要な断続的かつ長時間に渡る測定が可能です。さらに、き裂の2次元的・3次元的情報がサンプルを破壊することなく、従来よりも簡便に得られることから、他の解析手法との間の橋渡しの役割を果たすことができます。

これにより、応力腐食割れの発生と、進展機構の解明にかかる時間が短縮されることが期待されます。

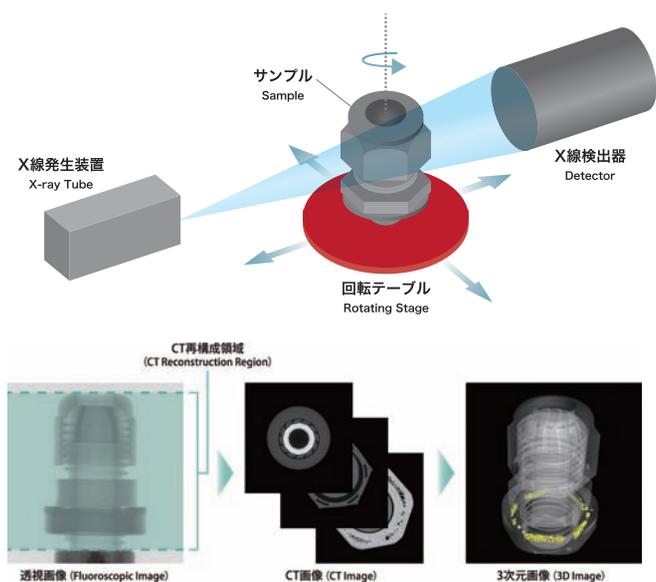


図1 X線CTの測定原理と得られる画像

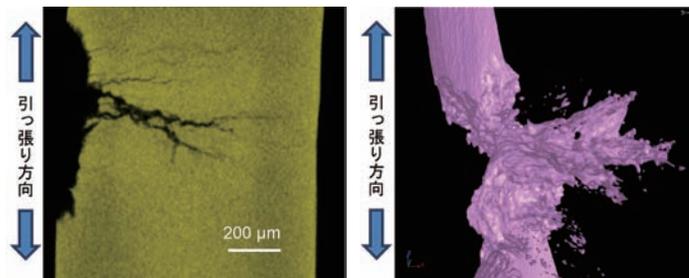


図2 SCC試験後の円柱状304ステンレス鋼をX線CTにより測定後、再構築して出力した軸方向の断層図およびSCCき裂を視覚化した画像

かわきた じん 博士(工学)。慶應義塾大学大学院後期博士課程短縮修了。1997年慶應義塾大学理工学部助手。2000年金属材料技術研究所研究員。2011年より現職。2004年～2005年文部科学省原子力関係在外研究員(ドイツ・マックス・プランク研究所)。2009年文部科学省科学技術政策研究所客員研究員。2010年～千葉工業大学連携大学院教授(兼任)。／しのはら ただし 博士(工学)。東京大学 工学系研究科 金属材料学博士課程修了。東京大学工学部金属材料学科講師、助教授を経て2002年よりNIMS。2011年より横浜国立大学大学院工学研究院 客員教授。／ながしま のぶお 博士(工学)。1981年金属材料技術研究所(現NIMS)入所。2011年より現職。／しむ みつはる プロフィールはP.6を参照。

Interview

論文を書いて終わりではない。社会に我々はどれだけ貢献できたのか。

環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価ユニット ユニット長
木村一弘

社会インフラの根幹をなす構造材料。その信頼性評価研究の先端に立っているNIMSの材料信頼性評価ユニット。ユニット長の木村氏は、常に社会と向かい、自分たちの研究がどのように社会とつながっているのかを意識することが重要だと語る。

——信頼性評価技術のどの範囲を考えていらっしゃるのでしょうか。

木村：私自身のフィールドは高温材料の評価技術なのですが、グループとしてはあらゆる構造材料、つまり社会インフラ全体を考えておりまして、なかでもエネルギー関連の構造材料に注力しています。

——たいへん広範囲に亘るわけですね。信頼性評価技術に取り組む上で特に留意していることはなんですか。

木村：「継続は力なり」という言葉がありますが、継続することが一番大事だと思っています。機械構造物を設計して製造するときには当然安全性を考慮してつくりませんが、長期間使

用することによって材料は徐々に劣化してきます。短時間では見つからなかったことや気づかなかったことが長時間使用後に顕在化してくる。材料の信頼性を考えた場合、こうした時間の経過に伴う変化を把握することが重要で、問題が起ってから取り組んだのでは手遅れです。したがって、将来の必要性を見越して継続して評価試験を続けることが大事なのです。

——プロセスを追いかけるのが大切なのですね。

木村：その通りです。当然、時間に依存した現象を加速するため、環境条件を過酷にして促進試験を行うこともあるわけですが、短時間で起こる現象と、長時間経ってから起こる現象は必ずしも同じメカニズムではありません。そこで継続して観察することが重要になる。たとえば（原子力）発電所のような大型プロジェクトでは、設計、建設、運転、廃棄までのあらゆるプロセスを念頭に置いて、運転中に起こりうる劣化挙動を評価診断するための検討に設計段階から着手することが、新しい技術を安全かつ積極的に導入するために必要なバックアップであると考えべきだと思います。何を調べるか、どういう材料をどのように使うか、というところから信頼性評価を行っていかないと、問題が起きてからでは手遅れになってしまいます。

——NIMSの研究体制はどのようになっていますか。

木村：やはりデータシートが基礎になっています。40年以上のクリープ試験や疲労試験の結果もありますし、データシートの充実を一義に、それに基づいて評価技術を開発していこうとしています。もちろん、研究者個人の興味本位ではなく、何が将来必要とされる材料なのか、社

会で必要とされるものに対する研究の重要性を常に考えています。試験研究に携わる職員全員が、私たちはどういう風に社会とつながっているかを意識するように徹底しています。

——研究者としての夢はなんですか。

木村：構造物の寿命に至るプロセスをできるだけ細かく評価して予測することでしょうか。劣化の進行を時間のパラメータで予測できるようになったら素晴らしいと思います。また、一般に機器の高性能化のためには、より過酷な環境で使用できる材料が求められます。したがって、社会的要請に応えるという点では、さまざまな環境における材料の信頼性を向上させることを通して、技術革新に貢献していくことでしょうか。

——若い研究者に対してどのようにお考えですか。

木村：論文を書いて終わりではない。社会にどれだけ貢献できるのかを考えることが大事だ、ということを常に話しています。現在6つのサブテーマで研究をすすめています。劣化の時間変化をきっちり予測すること、さらに劣化がなぜ進むのかのメカニズムの解明に注力するようにしています。最先端のナノテクを活用した極微小領域の観察や分析は研究に不可欠ですが、材料は決して均質な物質ではないため微小領域だけを見ていたのでは不十分で、引張試験や光学顕微鏡の組織観察等により、材料の基本的特性を把握することも大切だと考えています。N

きむら かずひろ 博士（工学）。1987年東京工業大学大学院にて博士後期課程修了。同年NIMSの前身である金属材料技術研究所に入所。1989年よりクリープデータシートプロジェクトに参画し、クリープ試験研究に従事。現在、環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価ユニット ユニット長。



酵素に学ぶ金ナノ粒子 — 触媒反応物を表面捕捉する金属ナノ粒子触媒 —

先端的共通技術部門 高分子材料ユニット
界面機能グループ グループリーダー
三木一司

先端的共通技術部門 高分子材料ユニット
界面機能グループ
磯崎勝弘

先端的共通技術部門 高分子材料ユニット
界面機能グループ
田口知弥

酵素を模倣した新型触媒

今回の新型触媒は酵素を模倣したものです。酵素の一構造では、触媒活性となる金属原子が中心にあり、周辺を取り囲むタンパク質が特定物質を活性部位に誘導する機能を持つことで、極めて高い活性と選択性を発現しています。

今回、私達は、金ナノ粒子表面に形成されるアルカンチオール^{注1}単分子膜が、親水性・疎水性の相分離構造に基づいて特定物質を内部に取り込む細胞膜（脂質二重膜）に似た相互作用を持つことに注目しました。この相互作用によって粒子表面に取り込まれた分子は、触媒機能を持つ金粒子表面に接触する確率が増える為、触媒反応が加速されると考えられます。つまり、金属酵素を、アルカンチオール分子で被覆された、金ナノ粒子の材料構造でモデル化する（図1 a、図1 b）ことで、金属酵素類似の触媒活性を実現できることになるのです。具体的には、金粒子表面にシラン分子とアルコール分子を取り込むことで、触媒である金表面において、シラン分子が効率よく活性化され、高活性の触媒反応を実証しました。

金ナノ粒子の修飾分子を設計することで、高活性・高選択的な触媒を期待

図1に新型触媒の働きを示します。金ナノ粒子表面においては、修飾分子（チオール分子）は脂質二重膜に似た疎水性空間をつくり（図1 c左）ます。そこに特定の長さや形のシラン分子とアルコール分子が取り込まれ（図1 c中間）、触媒である金表面に近接することによってアルコールシス反応の触媒効率が大きく向上するのです（図1 c右）。

新型触媒が特定の基質を認識する機能は、触媒表面のアルカンチオールとアルコール分子の炭素鎖長を変えた実験により、特定の組み合わせで最も触媒効率が向上することが確認されました（図2）。このような種々の検証から、金属酵素類似の触媒反応メカニズムが確認されています¹⁾。つまり、金ナノ粒子の修飾分子を設計する事によって、高活性かつ高選択的な触媒の実現が期待できるのです。

また、水溶液中でしか安定に利用できない天然の酵素とは異なり、金ナノ粒子は化学的に極めて安定であることから、酸性・塩基性水溶液条件や有機溶媒中においても利用可能であるため、工業利用上の制約がありません。

今回の実証では、チオール分子により表面修飾した金ナノ粒子を金薄膜表面に配列化し、固相のまま用いる不均一系触媒として用いました。触媒活性は、金原子が触媒として反応生成物を生成する回数を、（生成物のモル数）／（触媒のモル数）で示します。このターンオーバー（触媒回転）数が200,000、単位時間当たりのターンオーバー数ですと55,000/時間となり、市販の金コロイドに対して、10倍以上の高い値を示しました。

今回の成果は、アルカンチオール分子修飾金ナノ粒子の触媒機能を確認したはじめての例です。このことは、アルカンチオール分子の構造を工夫することにより、金属酵素触媒が持つ特定分子の選択的取り込み機能を実現することが可能であることを示唆しています。

また、今回実証した金属酵素型触媒は、溶液中に混ざらないで基板上に固定して用いる為、貴金属を浪費しません。金は資源的に重要な貴金属で、元素戦略の観点からも、浪費しない触媒構造は重要であると考えます。

参考文献

1. Tomoya Taguchi, Katsuhiro Isozaki, and Kazushi Miki *Advanced Materials*, 24, 6462–6467 (2012).

注1 アルカンチオール分子：CH₂が直線的に繋がった鎖状の分子の一端が水素原子、もう一端がチオール基（水素原子と硫黄原子）になったもの。

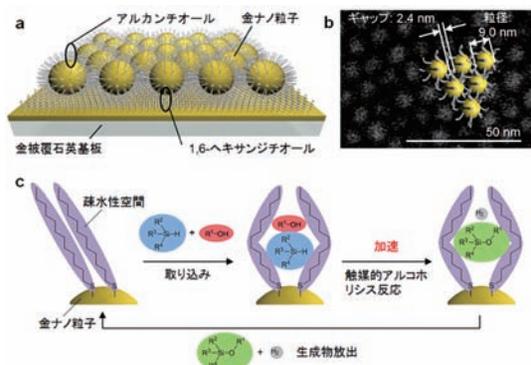


図1 新型触媒の概念。(a) 触媒の構造はチオール分子で表面修飾された金ナノ粒子の配列、(b) 走査顕微鏡像で見た配列構造、(c) 金ナノ粒子表面のチオール分子にシラン分子とアルコール分子を取り込み、金表面に近接する事で触媒活性が加速する。

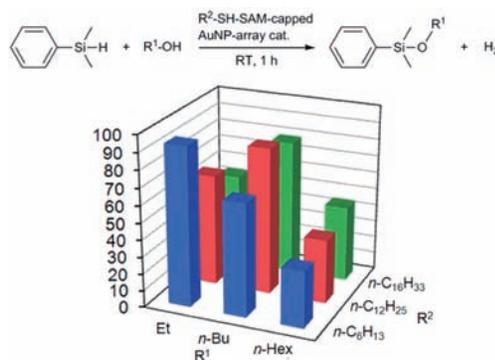
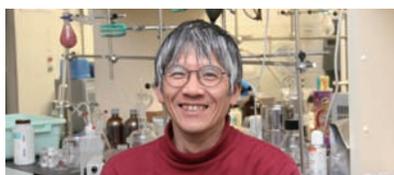


図2 新型触媒の基質認識特性

新型触媒はタンパク質と同様に、反応基質の長さやサイズを認識する機能を持つ。触媒表面のアルカンチオールとほぼ同じ長さの反応物質が最も高い活性を示す。



みき かずし(写真) 工学博士。筑波大学大学院工学研究科博士課程修了。1987年電子技術総合研究所研究官、1991年主任研究官、1994-6年オックスフォード大学客員研究員、2001年物質・材料研究機構主席研究員などを経て2003年から現職。／いそざき かつひろ 博士(工学)。大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。2007年物質・材料研究機構ポスドク研究員(本研究従事)、2012年6月より京都大学化学研究所へ特定助教として転出。／たぐち ともや 修士(工学)。筑波大学大学院数理物質科学研究科物質・材料工学専攻(D3)在籍。

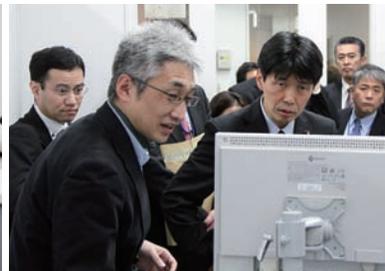
1 山本一太内閣府特命担当大臣が NIMS を視察

2013年1月9日、山本一太内閣府特命担当大臣（科学技術政策担当）がNIMSを視察されました。並木地区 NanoGREEN/WPI-MANA 棟に到着された山本大臣は、NIMSについての概要説明を受けた後、TIAナノグリーンについても概況説明を受けられ、「技術力の優位性をビジネスに生かすことがますます求められる」と意見されました。その後行われたジスプロシウムとサイアロン蛍光体のデモンストレーションにも非常に興味をもたれました。山本大臣はその後、NanoGREEN/WPI-MANA棟の中を見学され、NIMSが装置メーカーと共同開発した微細組織

三次元マルチスケール解析装置（FIB-SEM）をご視察されました。



概要説明を聞かれる山本大臣



研究施設をご視察

2 福井照文部科学副大臣が NIMS を視察

1月18日、福井照文部科学副大臣がNIMSを視察されました。福井副大臣はNIMS到着後、潮田理事長からNIMSの概況説明を受けられ、サイアロン蛍光体などNIMSの成果物のデモンストレーションをご覧になりました。研究室の視察では、まず2012年7月に文部科学省プロジェクトに採択された、元素戦略磁性材料研究拠点を訪問され、希少元素を使わない高性能磁石開発について説明を受けられ、実際に研究をご覧になりました。その後、クリープ試験をご覧になり、その試験が社会インフラに及ぼす重要性について説明を受けられました。また、2012年にできた新しいNIMSのプロジェクト「社会インフラの復旧・再生に

向けた構造材料技術の開発」について説明を受けられました。その後、並木地区の NanoGREEN/WPI-MANA棟に移動され、ナノシートの研究開発について説明を受けられました。



クリープ試験機のご視察



サイアロン蛍光体をご覧になる福井副大臣

3 NIMS-NSC-NTU Joint ワークショップ開催ならびに NTU との国際連携大学院協定及び NSC との包括協力協定の締結

1月10と11日、NIMSと台湾の国家科学委員会（NSC：日本の旧科学技術庁に相当）ならびに国立台湾大学（NTU）との先進材料に関する合同ワークショップが台北市内のNTUキャンパスにおいて開催されました。NIMSからは潮田理事長、青野MANA拠点長（NIMS側オーガナイザー）を含む総勢13名が参加、台湾側からはNTUの他にも精華大、交通大、中山大、成功大の主要4国立大学よりの招待講演者を含む20名以上の教員が参加し、研究発表と今後の学術協力についての検討が行われました。また、ワークショップの冒頭には会場においてNIMSの潮田理事長とNTUのSi-Chen Lee学長による国際連携大学院協定の調印式が行われ、さらにワークショップ

終了後には場所を市内のNSC本部に移し、潮田理事長とNSCのChung-Yuan Mou副大臣による包括協力協定（CCA）の調印式がとり行われました。NTUとは昨年2月7日に包括協力協定が既に締結されており、連携大学院制度の開始に

よって教員レベルのみならず若い大学院生の交流も大いに活発化するものと期待されます。また、NSCとの包括協力協定締結により、台湾からの優秀なポストドク派遣やWS共同開催等に対するNSCによる力強い支援が期待されます。



NIMS派遣団とNTU側組織委員および来賓



NSCとの包括協力協定の調印式にて