

# Materials

# &

# Mechanics



Newsletter, Materials and Mechanics Division, JSME, No. 35, July, 2011



## 変えるのが当たり前, 新しいことへの挑戦

第 89 期部門長 林 眞琴  
茨城県企画部

第 89 期の材料力学部門の部門長に就任しました。部門制が発足してから 30 年余り経ちましたが、学界以外から就任する初めての部門長ということになります。これまでの学界出身の部門長とは多少異なる運営になるかと思いますが、皆さまどうぞよろしくお願い致します。

昨年の副部門長就任挨拶でも述べたことですが、企業技術者が材料力学部門登録者に占める割合が 55%であるにも拘わらず、部門活動への参加者に占める比率や、論文集 A 編の論文掲載数に占める比率はいずれも 10%以下と低迷しています。これらを打破して、少しでも企業技術者の部門活動への参加比率を上げることが産業界出身である私の役目であると思っています。

20 世紀の日本は「生産技術の革新」で発展してきたとされています。私は生産技術だけでなく、新しい機能を有する製品の開発や、特異な機能を有する材料開発などでも大いに発展に貢献してきたと思っています。それはさておき、21 世紀のモノづくりは、より斬新で(従来にないコンセプト)、付加価値が高く、個別の性能が飛躍的に高い、単一機能ではなく、非常に多様な多機能な(システム化)、従来なかった新しい機能価値を有する製品に変わっていくものと考えられます。つまり、21 世紀ではオリジナルの製品を産み出さなければ、世界市場で勝てません。21 世紀は「知的創造の世紀」になると言えます。言い方を変えれば、最近とみに言われているように「科学技術創造立

国」へと変えて行く必要があります。そのためには、大学と企業がいわゆる「死の谷」を埋めるための「深化した産学連携」を推進しなければならないと考えます。これを実現するための 1 つの方策は「シーズとニーズのマッチング」です。M&M2007 においてその取組みを試みましたが、その後継続していません。このような活動は継続的に推進すべきだと思います。いま 1 つの方策は「ロードマップの充実と定期的な見直し」です。日本が主導的な製品分野、あるいは、これから大きく発展するであろう製品分野において、製品のロードマップを策定し、その開発に必要な技術のロードマップを産業界が提示すべきであると思います。無論、企業にとっては生命線である製品・技術戦略を全て開示することはできませんが、大まかな技術の方向性を示すことは可能であると思います。学界の方々にはそれを参考に研究テーマを探索していただければと思います。産業界には研究テーマのネタとなる情報がいくらかでもあります。自分たちからもっと積極的に産業界と接触してそうした情報を収集する努力もお願いしたいと思います。

第 2 技術委員会(将来構想)では、第 88 期から材料力学部門の活性化という観点から、産学連携を深化させるための方策を検討してきました。その 1 つが新しい研究会や分科会の立上げです。産業界から技術情報の提供だけでなく、できれば、活動費も提供していただいて、産学で新しい研究課題に取組む活動を広げたいと考えています。その 1 つ

として「マルチフィジクス研究会」を泉聡志東京大学准教授が中心となって立ち上げていただけたことになりました。また、藤山一成名城大学教授は材料力学とロボティクスの融合という観点で、ロボティクス部門との連携を探る活動を開始していただいています。このような活動の輪を広げたいと思います。どなたでも提案可能ですので、特に、若手の研究者、技術者の皆様からのご提案をお待ちしたいと思います。

話は飛びますが、私は研究開発・技術開発において重要なことは、「**持続的技術と破壊的技術のバランス**」ではないかと思っています。機械工学においていわゆる4力は正しく持続的技術と言えるのではないかと思います。材料力学においても、基本的な技術があります。それを継続的に進化、発展させることが必要な分野が持続的技術と考えます。一見地味で、進歩の速度が遅いという面がありますが、そうした技術がなくては技術開発は成り立ちません。一方、研究者、技術者は常に破壊的技術開発を目指す必要があります。学术界や産業界を大きく発展飛躍させるためには、革新的な技術開発が必要です。最近の言い方では「イノベーションの創出」に近いかと思います。過去で言えば、破壊力学、分子動力学、第一原理計算などは破壊的技術であったと思います。そうした技術的に桁違いの飛

躍をもたらす全く新しい技術開発にも常に挑戦していただきたいと思います。これは非常に難しい課題であり、そうした意味で持続的技術と破壊的技術のバランスの取れた研究開発をそれぞれの個人が目指すべきであろうと考えます。

最後に、私の座右の銘（信条）をご紹介します。「**積極進取・日々是革新**」です。20年ほど前に某社に勤めていたとき、研究室長や部長は自分の信条を明示するようにとの所長の指示があり、ピンク地の少し大きい紙に書き、プラスチックのケースに入れて机の前に掲げさせられました。意味は説明するまでもありませんが、常に新しいことに挑戦するということです。世の中の発展には目覚ましいものがあります。毎日何か新しいことを考えて行かなければ取り残されてしまいます。そうしたことがないようにとの戒めです。また、従来技術にしがみ付くことなく、変えることが当たり前という認識に立つべきということです。変えてみて、上手く行かないなら方向を変える、あるいは、元に戻っても構わないと思います。

材料力学部門の皆さまそれぞれが積極的に新しいことに挑戦していただければ、それ自身が材料力学部門の活性化、発展に繋がると考えます。新しいことに挑戦することを楽しんでやっていただきたいと思います。



## Strength of Materials か、Mechanics of Materials か

第 89 期副部門長 渋谷 陽二  
大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

第 89 期の副部門長を仰せつかりましたので、ご挨拶申し上げます。昨年度一年間は、機械学会論文集 A 編の編集に携わり、「和文で書く学術論文」の意義について私なりに考えてきました。資源に乏しい我が国が、将来も世界をリードする科学技術立国として存続するためには、日本の産業技術向上に日本語で深く理解する学術論文が必要不可欠であること。もう一点は、現在大学教員の流動化と准教授の導入により、従来の小講座制の枠組みが大きく変わってきました。多忙な少数の教員による、博士後期課程学生や若手研究者の論文執筆を通じた人材育成システムが十分機能しなくなりつつあります。そのため、校閲活動

を通じた学会としての若手研究者育成システムが今後不可欠になること、これらの2点に集約されるように思います。さて、今年度と次年度は、その A 編に投稿していただけた材料力学に関わる研究者・技術者の交流の場である材料力学部門について考える立場になりました。部門の置かれている現状をまずよく理解し、将来のあるべき方向について、多くの方々と意見交換をさせていただきたいと考えています。どうぞ、よろしく願いいたします。

材料力学の日本語名の源泉になっている英語名は、題目に書きました Strength of Materials や Mechanics of Materials とよく言われます。前者は「**材料の強さ**」であり、後者は

「材料に関わる力学」と直訳されると思います。材料力学という日本語名にどちららが適切か、という問題はさておき、両者ともに重要な観点であり、材料力学の研究分野の根源になっていることに違いはありません。その学理を探究する方法論として発展してきた計算科学の分野では「計算力学部門」と密接に関係し、その学理を探究する対象としての材料科学の分野では「機械材料・材料加工部門」と、そして対象を生体とした場合には「バイオエンジニアリング部門」、微小機械構造体を対象とした場合には「マイクロ・ナノ工学部門(2012年4月部門設立予定)」と深く関連することは言うまでもありません。したがって、材料力学は、サイズにかかわらず、固体物体の強さとその力学挙動を体系化する枠組みの中で、時代の要求に応じてたえず変化し、それに伴い研究者・技術者の輩出を行うソースとも言えます。材料力学部門の第1位部門登録が2,802名であり、第1位から5位までの合計が6,148名といった多くの方が登録されている事実(2010年11月末現在)からもそれを物語ることができ、周囲の部門と密接な関係を持っています。材料の強さを知り、より強化される新たな材料創製への指針を与えることと、その特性を十分に引き出すことのできる変形場のより厳密な理解は表裏一体の関係にあり、そのような意味では、題目の2つの英語名は同義語と言えるでしょう。材料創成だけでは意味がなく、その材料が健全に使用され、部材化とともに機能を持つ構造化がなされることで、その使命を果たすことができます。その過程の公理的存在が材料力学であると言っても過言ではありません。材料の内部構造を対象にする場合、あるいは材料を部材化した、“はり”、“棒”、“板”等を対象にする場合、それらの部材を組み合わせ、複合化・構造化することによ

りできあがる構造体を対象にする場合等、研究者・技術者の幅広い興味あるトピックスが材料力学部門の対象になります。その根底に流れている材料力学の学問的枠組みに共通性を持ち合わせた場としての材料力学部門が望ましいと、個人的には感じています。前述したように、周囲の部門や他学協会に分散化されている現状をどのように捉え、材料力学部門としての今後の活動の方向性をどのように見だしていくかが、近々の重要な課題と思います。

基礎学問としての材料力学は、脈々と機械工学の根幹をなし、安全で安心なものづくりを担う産業分野の根底にあることは周知のとおりです。したがって、いつの時代にも、そのニーズに応じた変化とシーズを産み出す源泉となる使命が本部門にはあります。機械学会は、学界と産業界が学術を通して相互に連携する組織体です。その中で、材料力学部門は、その2つの“界”がより近い分野であると言えます。国内では少子化や天災といった慢性的・劇的な環境の変化、海外ではアジア諸国の急成長といった中で、絶えず柔軟に対応できることが肝要であることは言うまでもありません。その変化に対する2つの“界”の持つ時間スケールが大きく異なり、そして“ずれ”を産み、ややもすれば相互批判になってしまう現状があります。相互批判から新たな相互扶助の仕組みを模索することも、材料力学部門の重要な課題の一つと言えます。

まずは、この一年間、産業界を代表する林部門長との対話、材料力学部門に関わる多くの研究者・技術者の方々と対話により、唯一解ではないであろうそれらの解を見いだすことに傾注したいと思います。皆様方のご協力・ご支援を何卒よろしくお願いいたします。

**M&M2011材料力学カンファレンスへのお誘い**  
<http://www.jsme.or.jp/conference/mmdconf11/index.html>

**M&M2011 実行委員会**

2011年7月16日(土)～18日(月)の3日間にわたり九州工業大学戸畑キャンパス(福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)におきまして、M&M 2011 材料力学カンファレンスを開催します。東日本大震災にも関わらず、被災地域からの申込みを含めて数多くの演題申込みをいただきました。期間中は26のオーガナイズドセッションを含めて390余件の学術講演、3件の基調講演を予定しています。

今回の会議では、市民公開特別講演(村上敬宜氏、「水素に関する最近の話題」)、従来から継続的に行なってきた部門企画行事としてフォーラム(企業参加型フォーラム「企業における製品技術課題と材料力学」、産学連携フォーラム(市民フォーラム)「社会を支える製造・利用技術」)、部門討論会(「材料力学を基軸とした分野横断型研究展開のあり方」、「これぞ材力」)、若手チュートリアル(「機械工学と研究開発との関わり」)に加え、(社)日本技術士会との共催企画「日本技術士会との連携セッション」を前会議に引き続いて実施します。また、若手研究者によるポスター発表の中で優秀な発表と認められた若手研究者の方々には若手優秀講演フェロー賞を部門賞授与式で授賞します。

付随行事として7月15日(金)に見学会を九州支部福岡東地区学生会と共同企画し、約30名の方から申し込みをいただきました。見学会では一日をかけてまず株式会社安川

電機、新日本製鐵株式会社を見学し、続いて北九州市エコタウン・次世代エネルギーパークに移動し、白島展示館、実証研究エリア(福岡大学と九州工業大学の研究)、電源開発株式会社を順に見学します。

そのほか、M&M2011材料力学カンファレンス特集号(ノート限定)を企画し、審査を経た後、機械学会論文集A編の2012年5月号で刊行する予定です(原稿締切:2011年10月31日(月))。

M&M 2011にて皆様にお目にかかり、研究情報交換と同時に部門の将来について語らえることを楽しみにしております。ご参集をお待ちしております。



戸畑祇園大山笠 (2011年7月22～24日)

**M&M 若手シンポジウム2012 Hakodate**

開催日: 2012年8月11日(土)～12日(日)

会場: KKR はこだて (北海道函館市湯川町2丁目 8-14)

材料力学部門では、ほぼ2年に1度、若手研究者を中心としたシンポジウムを開催してきました。21世紀に入ってから、2002年8月(滋賀県大津市)、2005年3月(長野県松本市)、2008年3月(和歌山白浜市)、そして2010年3月(カリフォルニア工科大学)と4回の若手シンポジ

ウムを開催しています。ここ2回のシンポジウムは英語での発表を主とした国際シンポジウムとしての開催でしたが、今回は再び原点に戻り、国内シンポジウムの形式として、若手研究者を中心に、中堅研究者、そしてシニアの研究者が、じっくりと意見交換を行えるシンポジ

ウムを目指したいと考えています。

数年前のM&M材料力学カンファレンスの若手チュートリアルでの話。部門の将来を担うであろう若手がパネラーとして壇上に上がり、自分の研究展望や部門に対する意見を述べる機会がありました。ここで、驚いたことに多くの若手研究者が、「実は材料力学部門の講演会に来たのは、今回が初めてです」と述べたのです。私のように、初めての学会発表が材料力学部門の講演会で、それ以来、部門の講演会を学会活動の軸として生きてきた者にとっては、大変なショックでした。この若手シンポジウムが、若手が部門の活動に参加する契機となり、若手研究者が将来の部門活動を牽引する大きな力となることを期待しています。

2日間のシンポジウムでは、若手研究者の発表セッションにおいて、研究交流や情報交換を活発に行うととも

に、シニアの研究者の基調講演を通じて若手研究者がさらに研究分野の幅を広げるための機会も提供したいと考えています。今回の若手シンポジウムは、北海道函館、湯の川温泉にて開催します。ご参加頂いた皆様には、シンポジウムはもちろんのこと、北海道有数の観光地としての函館を堪能して頂けるものと期待しています。

お申し込み期限、講演論文の提出期限等の情報は、随時材料力学部門のホームページおよびインフォメーションメール等でお知らせする予定です。若手研究者の皆様、どうか奮ってご参加下さいませようお願い申し上げます。

問い合わせ先

信州大学 荒井政大 ([arai@shinshu-u.ac.jp](mailto:arai@shinshu-u.ac.jp))

筑波大学 松田哲也 ([matsuda@kz.tsukuba.ac.jp](mailto:matsuda@kz.tsukuba.ac.jp))



KKR はこだて外観



KKR はこだて 内観

## 発電用設備規格委員会の活動について

**発電用設備規格委員会委員長 森下 正樹**  
**日本原子力研究開発機構**

「規格」という言葉からASME規格やJIS規格を思い起こす方が多いと思いますが、本会の発電用設備規格委員会では、名のおり火力や原子力を中心とする発電設備の機械構造物の構造健全性に関する一連の規格群を発行しており、これらは実際の設計などに活用されています。本稿では、部門ニューズレターの誌面をお借りして、発電用設備規格のあらましと今後の方向性などについて紹介させていただきます。

まず、発電用設備規格委員会の生い立ちを簡単に振り返

ってみます。原子力を例にとると、2000年代の当初まで、設備の設計・運転は国が定める技術基準（省令や告示）を満たすことが求められていました。これらの技術基準には、設備の構造、材料等に関して詳細かつ具体的な仕様を規定している条項（所謂「仕様規定」）があり、原則として規定されている仕様だけが容認される形となっていました。このため、最新の技術や知見の反映が遅れがちになり、結果として技術進歩への迅速かつ柔軟な対応が困難である等の問題が指摘されるようになりました。このような問題

意識の下、「国の技術基準は性能規定化し、詳細技術規格は民間規格を活用する」という方向性が打出されることになりました。本会発電用設備規格委員会は、このような議論と並行して1997年10月に設置され、発電設備の安全性・信頼性の一層の向上の基盤となる技術規格の自主的な整備策定を行っており、現在では国の安全規制に実際に適用されています。

機械学会が産業界と協力して民間規格を自主発行する、ということは、単に制度上の変更にとどまらず、「規則、基準は役所（お上）が決めるもの」といった従来の発想から、「産業界が自らの製品の安全確保のルールを自ら定める」という発想への転換、といった重要な意味合いを持っているものと考えています。

現在、本会から発行している主要な規格には表1に示すものがあります。これらの規格群の策定、改訂に当たっては、基本的に次のような思想に基づいて事に当たっています。すなわち、「最新、最先端の技術に工学的判断を加えて産業界に必要な規格を自主的に整備制定する。その際、発電用設備の健全性に関わる、材料、設計、製造、建設、試験・検査、および運転、維持・保守、廃止までの一連の技術活動を俯瞰したうえで、技術的に思想が一貫し、バランスのとれた合理的な規格の体系的な整備制定を目指す」というものです。

これらの規格の背景には、材料強度学、高温強度学、構造力学、破壊力学、溶接技術、非破壊検査技術といった材料力学関連の学問と技術がその裏付けとして存在しています。例えば設計・建設規格は文字通り発電プラントの容器や配管の構造設計に関する規格ですが、・延性破断、・過大な塑性変形、・進行性変形、疲労、・座屈、といった重要な破損様式を、構造解析の結果に基づいて防止するための規則（許容値）が体系的に定められています。近年の構造解析技術の進歩を反映して、弾塑性有限要素解析の結果を直接用いる設計規則も策定しています。維持規格は供用期間中検査（ISI）に関連する規格で、検査章、評価章、及び補修章から構成されていますが、それぞれ最新の非破壊検査技術、破壊力学（検出されたき裂の進展評価）、及

び補修技術を体系的に規格化したものです。

産業活動においては、安全性の確保は当然として、経済的合理性の追求も重要です。経済活動が国境を越えて世界的な規模で展開される今日においては、我国の産業の国際的競争力の維持向上の視点も忘れてはならないと考えます。そのためにも、発電用設備規格は国際的整合性と技術的優位性を目指した開発整備が重要であると考えています。前述のように規格の礎となるのは材料力学分野の諸学問、諸技術ですから、発電用設備規格委員会は、材料力学部門との連携強化が重要と考えています。最新の研究成果、技術知見を取り入れる努力を継続しますが、部門の研究者諸兄にも、是非、研究成果を規格化するところまでの意識を持って頂ければ、と思います。

最後になりますが、福島の事故はまさに衝撃でした。避難を余儀なくされている方々のご苦労は察して余りあるものですし、事故現場で対応に当たっておられる方々の献身的なご努力にはただ頭が下がる思いです。発電用設備規格委員会としても、このような事故が二度と繰り返されないよう、規格基準はどうあるべきか、という議論、検討を行っています。部門の皆様にも、このような議論に加わって頂けると幸いです。

表1 主な発電用設備規格

火力	発電用火力設備規格
	配管減肉管理技術規格(火力)
原子力	材料規格
	設計・建設規格 第I編 軽水炉規格
	設計・建設規格 第II編 高速炉規格
	コンクリート製原子炉格納容器規格
	溶接規格
	維持規格
	配管減肉管理技術規格(原子力)
使用済燃料貯蔵施設	金属キャスク構造規格
	コンクリートキャスク、キャニスタ詰替装置およびキャニスタ輸送キャスク構造規格設計規格
再処理	設計規格
核融合	超伝導マグネット構造規格



## 周期セル状材料の微視的座屈解析のための均質化理論の構築とその応用の研究

奥村 大

名古屋大学大学院工学研究科 計算理工学専攻

このたびは奨励賞を頂いた上に、ニュースレターへの寄稿という貴重な機会を頂きまして、たいへん有難うございます。私がこの課題に取り組み始めたのは修士課程1年生の冬でした。当時、名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻において、大野信忠先生の研究室に所属しており、就職氷河期の中、将来に向けてどうしようかと考えているときでした。

そんなある日、大野先生は私に Cellular solids: Structure and properties (Gibson & Ashby 著) という本の表紙を見せて下さいました。表紙には六角形ゴムハニカムに面内二軸圧縮を加えたときの写真が載っており、発生する座屈パターンは非常に不思議で綺麗な幾何学模様でした。また、当時、均質化法の研究が、非線形問題に対しても進められており、大野先生は均質化法を用いてハニカムの座屈を解析しようと言って下さいました。修士の1年生だった私は、計算機の中でこの不思議な現象を再現できるのだろうかという単純な好奇心をもって、先生のご指導のもと、研究をスタートさせました。

有限変形の均質化理論の構築は、大野先生の主導によって進められ、私はプログラムを開発し、解析する役割でした。また、途中からは、野口裕久先生（故人、当時、慶応義塾大学理工学部システムデザイン工学科助教授）に分岐座屈に関するアドバイスを受けるようになり、最終的には微視的対称分岐条件を導出し、分岐点や分岐座屈モード、座屈後の解析ができるようになりました。野口先生には、私が疑問に感じることをかみ砕いて丁寧に教えて頂きました。学会でお会いすると、ご多忙にもかかわらず、昼食に誘って下さり、雑談をする中で、研究者として多くの刺激を与えて頂きました。これから自分が成長して、もっといろいろなお話をすることがあることを楽しみにしておりましたので、早すぎのご逝去には残念でなりません。

六角形ハニカムの面内座屈解析では、解析を進めるうちに、座屈パターンと分岐の多重性との間になにかしらの関係があることに気づきました。しかし、これだという結論にはたどり着けないまま、数ヶ月の時間を過ごしました。

修士課程の学生だった私には、時間はたくさんありましたので、いつもこのことだけを考えていました。そして、あるとき、わかってしまえばなんてことはないのかもしれませんが、基本となる座屈モードの重畳発生によって、複雑な座屈モードは構成されるという結論に達し、数値解析でもこれを裏付ける結果を得ました。私はこの発見に興奮し、満足もして、すっかりしたわけですが、論文にする段階になって、手は動かなくなり、まとめることのたいへんさを知ることになりました。大野先生の論理力や構成力、文章力などのほとんどのことにいまだにまったく頭が上がりません。日本機械学会論文集には、理論が第1報として六角形ハニカムへの適用が第2報として掲載され、第1報は平成15年度の学会賞論文を頂きました。

博士課程進学後には、引き続き大野先生からのご指導を受け、微視的対称分岐条件は、対称という制約を必要とせず、一般的な場合にも成り立つ微視的分岐条件であることを理論的に示しました。また、サブストラクチャ法という領域分割法が均質化理論に基づく分岐解析とたいへん相性のいいことに気づき、六角形ハニカムや正方形ハニカムに生じる長波長座屈が巨視的局所化に進展することを解析で示しました。正方形ハニカムの研究では、単位セルの短波長座屈は知られていましたが、長波長座屈が約半分の荷重で優先的に発生することを明らかにし、座屈荷重を予測するための閉形解を導出しました。その後、計算機の発展に助けられ、3次元フォームの解析に取り組みました。フォームのセル構造はランダムですが、ケルビンセルで理想化し、座屈特性に支配的な要因の解析を行いました。

今年、私は36歳になりますので、奨励賞への応募はラストチャンスでした。また、昨年の応募から受賞資格が学会賞の受賞者に対しても与えられるようになり、私にとってはまたとない機会となりました。大野先生には、上述の研究課題を与えて頂き、いつも的確なご指導を授かり、なに不自由のない研究環境を与えて頂いただけでなく、受賞資格が改正されたことも教えて頂きました。この場をお借りして、心からの深い感謝の気持ちを表したいと思います。

他にも多くの先生方に感謝しなければなりません、字数制限のために出来そうにありません。どうかお許し下さい。最後になりますが、これからはよりいっそう研究活動に励み、微力ながらも科学技術の発展のために力を尽くす所存

でございます。材料力学部門の皆様方におかれましては、今後ともどうかご指導とご鞭撻のほど宜しくお願い申し上げます。



## 転位と水素の相互作用に着目した水素脆化の研究

武富 紳也

佐賀大学大学院工学系研究科 機械システム工学専攻

栄えある平成 22 年度機械学会奨励賞（研究）を頂き、身に余る光栄に存じます。ご推薦頂きました先生、選考委員の先生方に大変感謝致しております。また、今までご指導ご鞭撻下さいました先生方にも心よりお礼申し上げます。とは申しましても、本賞は『今後益々精進するように』との意味合いが強く、大変身の引き締まる思いであります。

さて、受賞業績タイトルは「転位と水素の相互作用に着目した水素脆化の研究」となっております。水素が金属材料強度を劣化させる水素脆化は、古くから知られているにも関わらず、今なお工学的課題として残っている問題であります。近年、石油資源問題にも関連して低炭素社会を目指した新エネルギーの開発が緊急の課題となっております。その中で、燃料電池をはじめ、水素を 2 次エネルギーとして用いることで、新エネルギー社会のインフラを整備する水素エネルギー社会構想にも期待が寄せられています。しかし、燃料である水素を高いエネルギー状態で取り扱う必要が生じるため、容器に用いる構造部材、特に鉄鋼材料に代表される金属材料の強度信頼性の確保は最も重要な課題の一つとなっております。こうした社会背景から、改めて注目されている水素脆化現象であります。長年にわたる数多くの優れた研究成果によって、水素存在下における転位の挙動が水素脆化現象を特徴付ける可能性が強く指摘されてきております。そこで、私は水素脆化の素過程のひとつとして、転位と水素の相互作用に着目し、ミクロスケールの分子静（動）力学解析、メゾスケールの転位動力学解析、マクロスケールの腐食疲労試験などを用いて、異なる物理スケールで研究を実施してまいりました。

ミクロスケール解析では、原子ポテンシャルを用いて  $\alpha$  鉄中の転位と水素の相互作用を調べました。例えば、き裂先端にトラップされた水素が転位射出応力拡大係数を減

小さえることを示し、その原因が積層欠陥エネルギーの減少に起因することを示しました。また、転位芯近傍のトラップサイトにおける水素トラップエネルギー分布を明らかにするとともに、静水圧のみならずせん断応力成分によって水素トラップエネルギーが増加することも明らかにしました。さらに、水素存在下での転位のダイナミクスを明らかにするため、状態遷移理論に基づく NEB 法を用いて、転位運動のエネルギー障壁を調べました。その結果、転位の運動に要する活性化エネルギーの低下によって転位の可動性が上昇する可能性を示唆しました。さらに、その発現条件を明らかにするため、転位の運動と水素の拡散に要するエネルギー障壁の負荷応力依存性を明らかにしました。本解析から、負荷せん断応力の低い場合には水素によって転位の運動速度が上昇する軟化が、負荷応力が高い場合には転位の運動速度が減少する硬化が、それ以上の負荷応力では転位の運動に水素の影響が現れないことを示しました。このように、ミクロスケールの研究によって初めて明らかになる、数多くの知見を獲得することが出来ました。

一方、鉄鋼材料は水素脆化によって粒内劈開破面を呈することが報告されております。このような延性材料の粒内破壊機構は、これまで明らかになっておりませんでした。本破壊機構を明らかにするために、水素の存在によって転位が局所的に集積する破壊モデルを構築して転位動力学法を用いた解析を実施し、メゾスケールでの転位群の挙動解析を行いました。例えば、くり返し負荷応力条件下では、転位群集積挙動や転位の射出挙動に応力負荷波形効果が現れることを明らかにしてきました。

マクロスケールの実験として、水素ガス圧力容器鋼として用いられている 2.25Cr-1Mo 鋼を供試材とした腐食環境



下における疲労き裂成長試験を行いました。本試験ではき裂成長速度におよぼす降伏応力や温度、応力負荷波形、さらには材料中の不純物濃度の影響を調べました。本腐食疲労試験におけるき裂成長メカニズムは、水素脆化機構や腐食疲労機構などの多重効果によることが知られております。得られた結果から、低温では水素脆化が、高温では腐食溶解反応が支配的な破壊メカニズムとなっており、その中間温度では粒内劈開破壊をとまなう破壊が発現していることが確認されました。さらに同一の温度であっても、応力負荷波形によって支配メカニズムが変化し、Fast-Slow 負荷波形の場合には水素脆化、Slow-Fast 負荷波形の場合には腐食反応が支配的となることも示唆されました。これ

らの実験結果は、転位動力学法を用いた上述の解析結果と定性的に非常によく一致していることが確認され、力学的制御（負荷応力波形制御）による耐水素脆性向上の可能性を示唆していると考えております。

以上のように、私はミクロスケールからマクロスケールに渡って、転位と水素の相互作用に着目した研究を実施してまいりました。未だ水素脆化現象の全体像解明には程遠い現状ですが、これらの研究を通じて水素脆化機構解明の一助となる結果を得ることが出来たと信じております。今後も、材料力学部門の先生方のご指導を頂きつつ、微力ながらも日本機械学会・材料力学部門、さらには社会全体に貢献できるように頑張っていきたいと思っております。



## ナノ界面/構造を制御したカーボンナノチューブ複合材料の作製と破壊機構の解明に関する研究

山本 剛

東北大学 工学研究科附属エネルギー安全科学国際研究センター

エネルギー機器および材料における高温腐食事例、自動車・航空宇宙材料における二酸化炭素排出量低減のための軽量化、ならびに超高齢社会の到来に伴う人工関節や人工歯根などの生体材料に求められる長使用寿命化に例示されるように、我々の生活を根底で支える重要な役割を担う機器・構造材料の機能性の向上が求められている。セラミックスはその材料特性から、機器・構造材料の性能や適応範囲の壁をブレイクスルーできる可能性を有している。しかしながら、き裂先端での高い応力集中を緩和させる機構が作用しにくいセラミックス材料は極めて脆く、強度においては金属材料を凌駕するものの、これを機器・構造用部材の荷重担体として使用する段階まで開発されてはいない。

本研究のキーマテリアルである多層カーボンナノチューブ（以降 MWCNT と表記）は、1991 年にその存在が発見されて以来、基礎研究が極めて活発に行われている。他に類を見ない電気、化学、力学的特性が報告されるにつれて MWCNT とその他の材料とを組み合わせた複合材料の開発に関する研究が注目を集めている。高分子または金属材料と MWCNT との複合化では、複合体合成時に溶融プロセスを経るために均一組織を有する材料合成が比較的

容易に達成される。既に、機械的特性の大幅な向上や電気伝導率を制御した複合材料の開発が行われ、その一部は実用に供されている<sup>(1)</sup>。一方、セラミックスを母材とする複合化では、① 溶融プロセスを伴わないため、MWCNT に固有の強い凝集性に起因し、均一組織を有する複合体の作製が困難<sup>(2)</sup>、② MWCNT のナノ寸法に起因し、複合体の力学的ならびに物理的特性を決定づける界面構造・性質の理解ならびに制御・設計が困難<sup>(3)</sup>、③ バッチ式の加圧焼成法による複合体合成に関する基礎研究が主であるために、産業応用を見通したニアネットシェープで製品とすることのできる無加圧焼成法に関する知見がない<sup>(4)</sup> 等の克服すべき技術的課題が存在する。本稿では、MWCNT/セラミックス複合材料の実用化を目指した我々のグループの研究例を紹介する。

これまでの研究から、複合体中に空間的に分布した MWCNT 凝集体は、その材料特性を低下させる主要因であることを明らかにしている<sup>(5,6)</sup>。そこで著者らは、セラミックス母材の in situ 形成のための新規な前駆体法ならびに静電反発力を活用した MWCNT のナノ分散技術を体系化することで、図 1 に例示されるように MWCNT が真に単離分散した組織を有する複合体の作製に成功した。さら

に、MWCNT に静電反発力を付与するための湿式酸化処理法を用いた表面化学修飾に関する体系的な研究を行い、均一分散を行うための最適な処理時間が存在することを明らかにした<sup>(7)</sup>。

MWCNT の分散性を飛躍的に向上させることに成功したことで、これまで不明瞭であった MWCNT/セラミックス複合材料の破壊機構に関する評価が初めて可能となった。この種の繊維強化複合材料における繊維と母材とのナノ界面構造と性質は、複合体の力学的ならびに物理的特性に大きな影響を及ぼすことが知られている<sup>(8)</sup>。複合体に荷重が負荷されたとき、その荷重は界面を介して母材から荷重担体である繊維へと伝達される。したがって、荷重の伝達を担う繊維と母材とのナノ界面構造・性質の理解と制御、ならびに荷重担体となる繊維の破壊強度に関する理解は、繊維を強化要素として使用した複合材料の設計において極めて重要である。著者らは、MWCNT とセラミックス母材との界面構造・性質を理解する目的で、SEM 観察下においてマニピュレーション技術を駆使することで、1本のMWCNTのみを複合体から引抜く実験を実施した。その結果、従来考えられていた "MWCNT は完全にプルアウトする<sup>(9,10)</sup>" のではなく、図2に例示されるように、き裂との相互作用により MWCNT は破断し、複合体に破壊特性の向上をもたらすき裂架橋効果が制限されていることを世界に先駆けて明らかにした<sup>(11)</sup>。この観察結果は、複合体の破壊特性の飛躍的な向上のためには、MWCNT の破断を防止することが必要不可欠な設計要素であることを示しており、複合化に関して重要な知見を提供するものである。MWCNT 単味の引抜き実験から得られた知見をもとに、適切な MWCNT の強度・剛性・寸法の選択、さらには MWCNT の表面化学処理ならびにセラミックス母材の合成に前駆体法を利用することで、界面構造をナノスケールで制御した複合体を作製した。その結果、MWCNT 単味の強度・剛性・形状の選択が複合体の力学的特性向上に極めて重要な設計要素であることを確認・検証し、世界トップクラスの曲げ強度と破壊靱性特性を兼ね備えた複合体の作製に成功した<sup>(12)</sup>。

無加圧焼成法による本法が開発でき、脆弱なセラミックス材料の伝統的イメージを超える革新的セラミックス基複合材料の創製技術が確立すれば、産業界ならびに当該研究領域にもたらすインパクト・波及効果は絶大であり、情

報技術関連、医療・健康関連、環境技術関連、エネルギー技術関連などの、人類が直面している困難に革新的な解決策を提供することができると期待している。

#### 参考文献

- (1) Baughman R.H., Zakhidov A.A. and de Heer W.A., *Science*, Vol. 297, (2008), pp. 787-792.
- (2) Chen J., Hamon M.A., Hu H., Chen Y., Rao A.M., Eklund P.C. and Haddon R.C., *Science*, Vol. 282, (1998), pp. 95-98.
- (3) Peigney A., *Nat. Mater.*, Vol. 2, (2002), pp. 15-16.
- (4) Cho J., Boccaccini A.R. and Shaffer M.S.P., *J. Mater. Sci.*, Vol. 44, (2009), pp. 1934-1951.
- (5) Yamamoto G., Omori M., Yokomizo K., Hashida T., and Adachi K., *Mater. Sci. Eng. B*, Vol. 148, (2008), pp. 265-269.
- (6) Yamamoto G., Omori M., Yokomizo K. and Hashida T., *Diam. Relat. Mater.*, Vol. 17, (2008), pp. 1554-1557.
- (7) 白須圭一, 山本剛, 大森守, 相沢養市, 橋田俊之, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 77, (2011), pp. 774-778.
- (8) Evans A.G., *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, (1990), pp. 187-206.
- (9) Flahaut E., Peigney A., Laurent Ch., Marlière Ch., Chastel F. and A. Rousset A., *Acta Mater.*, Vol. 48, (2000), pp. 3803-3812.
- (10) Xia Z., Riestler L., Curtin W.A., Li H., Sheldon B.W., Liang J., Chang B. and Xu J.M., *Acta Mater.*, Vol. 52, (2004), pp. 931-944.
- (11) Yamamoto G., Shirasu K., Hashida T., Takagi T., Suk J.W., An J., Piner R.D. and Ruoff R.S., *Carbon*, in press.
- (12) Yamamoto G., Omori M., Hashida T. and Kimura H., *Nanotechnology*, Vol. 19, (2008), 315708.

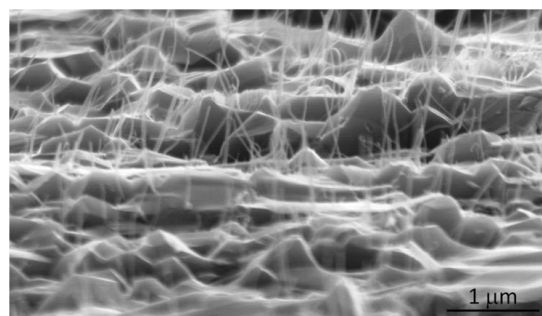


図1 真に単分散した MWCNT

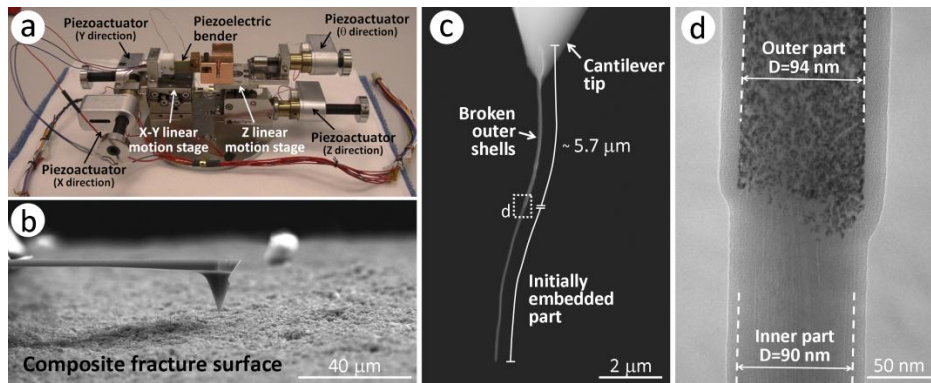


図2 MWCNT 単味の機械的特性キャラクタリゼーション法



## 電子機器のはんだ接合部における複合的な負荷の評価

大森 隆広

(株) 東芝 研究開発センター 機械・システムラボラトリー

ノート PC や車載部品を初めとする電子機器は、ユーザーの使用環境下において様々な種類の負荷を受ける。例えば、電源の ON, OFF に起因する熱サイクル負荷、車載状態での使用に起因する振動負荷、落下による衝撃負荷、などが考えられる。一般に設計段階での電子機器の信頼性評価では、単体の負荷を想定した試験が行われ、複合的な負荷を想定した評価が行われる例は少ない。一方、複合した負荷が作用した際の疲労寿命の予測手法として、それぞれの負荷による損傷を線形的に足し合わせる Miner 則に基づく手法が従来から提案されている。しかし、Miner 則では負荷の複合による相互作用は考慮されておらず、実際の寿命に対して大きく異なる寿命を算出する事例が知られている。このような複合負荷における寿命評価法は、1980年代後半から海外で軍事・宇宙機器の試験法として研究が始まり、近年日本でも複合負荷試験として注目されつつある。以下に、初期負荷として温度サイクルが負荷された BGA 実装基板を例にとり、温度サイクル後に振動負荷が作用した際のはんだ接合部の疲労寿命を評価し、Miner 則による予測寿命との差を検証した事例を示す。

一般的な線形累積損傷則において、温度サイクルによる損傷を  $D_{th}$ 、振動による損傷を  $D_v$  とすると、それぞれの負荷が複合した際の損傷は両者の和をとることによって得ることができる。 $D_{th}$ 、 $D_v$  は温度サイクル、振動それぞれの負荷によって、はんだ接合部に発生するひずみ振幅と

サイクル数から求められる。疲労寿命が Miner 則に従う場合、両者の和が 1 に達した時点で寿命に至る。複合負荷による Miner 則からのずれを検証するために、実験と FEM から  $D_{th}$ 、 $D_v$  の値を求め、その和を 1 と比較した。

温度サイクルによる損傷評価においては、振動負荷を与えずに温度サイクルのみの負荷で破断した実験の結果から、破断までのサイクル数の平均値を算出し、その値を 1 として正規化することにより損傷値とした。本報の実装基板では、 $-25^{\circ}\text{C}$  から  $100^{\circ}\text{C}$ 、30 分の保持時間で 7 サンプルの温度サイクル試験を実施した結果、平均 6893 サイクルで破断したため、負荷されたサイクル数を平均破断サイクル数 6893 で割ることにより正規化した。

振動による損傷評価においては、はんだバンプに生じるひずみ振幅を直接測定することは困難であることから、実験によるひずみの時刻歴測定と有限要素法の結果を組み合わせることで、振動状態のはんだバンプに生じるひずみ振幅を求めた。本報の実験では固有振動数付近の周波数で強制加振したため、振動モード形状は対象とする固有振動数が卓越する。よって、基板の任意位置のひずみの時刻歴応答を取得すれば、基板全体の振動状態を推定することができる。事前の固有値解析による振動モード形状と、ひずみ速度を考慮したはんだの弾塑性解析から、基板上のひずみからのはんだバンプの平均相当ひずみへの変換関数を作成した。振動試験により得られた基板のひずみ履歴を変換

関数で平均相当ひずみ履歴に変換し、寿命の評価に用いた。

図1に対象とする基板を示す。固有振動数探索試験により得られた固有振動数は188Hzであり、事前の固有値解析により得られた固有振動数183Hzは十分現実に近い値であることが確認された。次に破壊試験として、一定加速度で固有振動数188Hzを中心として±20Hzの範囲を片道2分間で繰り返しスイープする試験を行った。パンプの破断を検出するために、BGAと基板の間にはデージーチェーンが組まれ、チェーンの抵抗値が10%以上上昇した時点で破断と判定した。

損傷値を求めるにあたり、事前の温度サイクルなしの試験片が振動試験により破断した際の振動損傷値を基準値である1として、温度サイクルを経た後の試験片による試験結果との比較を行った。1000サイクル、3000サイクルの温度サイクルを経た試験片が振動試験により破断した際の損傷値を同様の手法で算出し、図2の表にプロットした。結果として、振動だけの負荷に比べて寿命が短縮化されていることが確認された。図中の点線はMiner則による寿命の予測値を示している。図中の温度サイクルによる疲労寿命は、温度サイクルのみで破断が確認された7サンプルの平均値(6893cycle)を1として正規化している。この結果から、Miner則の予測値に比べて大きく短寿命側の結果を示すことが確認された。

今後ますます多様化する電子機器の用途に従って、複合的な負荷の評価は重要性を高めつつある。より実用的な評価法の確立のために、今後も研究開発を進めていく。

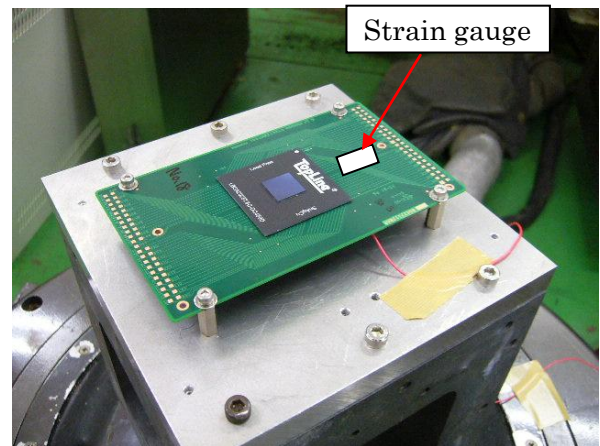


図1 Experimental setup of PCB vibration test

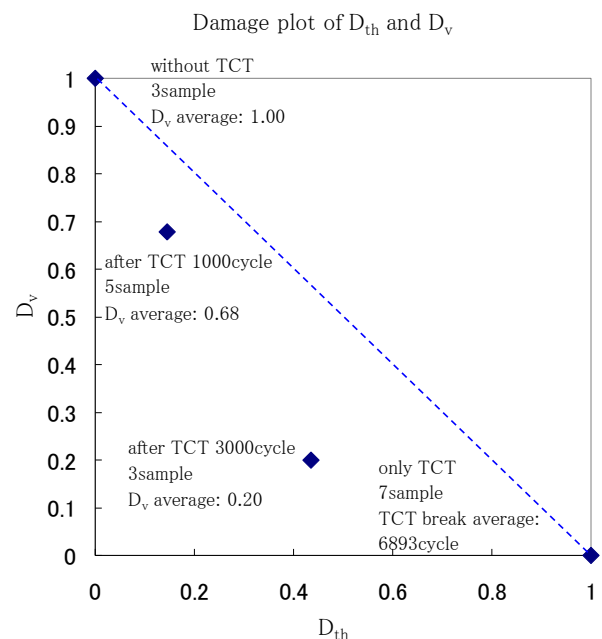


図2 Thermal and vibrational damage plot

1. 変えるのが当たり前, 新しいことへの挑戦
2. Strength of Materials か, Mechanics of Materials か
3. M&M2011材料力学カンファレンスへのお誘い
4. M&M 若手シンポジウム2012 Hakodate
5. 発電用設備規格委員会の活動について
6. 特集: 平成 22 年度 日本機械学会奨励賞 (研究・技術) 受賞者の声  
[研究] 周期セル状材料の微視的座屈解析のための均質化理論の構築とその応用の研究 奥村 大 (名古屋大学)  
[研究] 転位と水素の相互作用に着目した水素脆化の研究 武富 紳也 (佐賀大学)  
[研究] ナノ界面/構造を制御したカーボンナノチューブ複合材料の作製と破壊機構の解明に関する研究  
山本 剛 (東北大学)  
[技術] 電子機器のはんだ接合部における複合的な負荷の評価 大森 隆広 ((株) 東芝)
7. ニュースレター目次  
M&M 2012 材料力学カンファレンス 編集後記 M&M2012 実行委員会 (愛媛大学)  
広報委員長 荒木 稚子 (埼玉大学)

## M&M2012 材料力学カンファレンス

M&M2012 材料力学カンファレンスは 2012 年 9 月 22 日 (土) ~24 日 (月) の 3 日間にわたって愛媛大学城北キャンパス (松山市文京町) にて開催されます。

松山市は 1 年を通して温暖な気候に恵まれ, 正岡子規や夏目漱石をはじめとした文学の町として知られています。また会場の城北キャンパスは松山城と道後温泉からほど近く, 城と出湯の町の風情が感じられます。

愛媛県はかんきつ類をはじめとした果実栽培が盛んで, 農業県のイメージが強いと思われませんが, 工業生産額は全国 24 位, 西日本 (中国・四国・九州地区) では 5 位 (2009 年統計) であり, 工業県との側面も持ち合わせています。工業製品としてはパルプ・非鉄金属・化学・繊維など素材産業が中心ですが, 今治地区のタオル・造船業など地域の特色を生かした産業も盛んです。一方で, これまであまり発達してこなかった自動車産業振興の動きも出ています。2010 年度から愛媛県は電気自動車 (EV) の開発に着手しました。これはガソリンエンジンを電動モーターに積み替えたコンバート EV ですが, EV 関連産業の創出が期待されています。また松山市では太陽エネルギーを中心とした新エネルギー普及を目指した松山サンシャインプロジェクト

トを推進しており, ソーラー関連企業を誘致しています。以上のような地域特色性のある産業を含めて, 地域の工場見学を実施できればと考えています。

カンファレンスでは例年通り, 各種フォーラム, 部門討論会, 若手チュートリアルなどの企画を行う予定です。詳細は未定ですが, 大震災後の安全・安心・低エネルギー社会の確立が求められている今こそが材料力学の出番であり, 企画のテーマの一つとして考えています。その他, 今後の部門活性化につながるような産学連携の推進, 若手研究者の養成, 会員増強など, 学会や部門の持つ課題もフォーラムや討論会のテーマとして考えています。

M&M2012 への皆様の多数のご参加をお待ちしております。



M&M2012 実行委員長 黄木景二 (愛媛大学)  
有光 隆 (愛媛大学)  
高橋 学 (愛媛大学)

編集後記 お忙しい中、ご寄稿頂きました皆様方に、心より御礼申し上げます。

(社) 日本機械学会ニュースレター No. 35

ニュースレター発行担当広報委員会

荒木稚子 (埼玉大学), 真田和昭 (富山県立大)

発行 2011 年 7 月 8 日

発行者 (社) 日本機械学会材料部門 東京都新宿区信濃町 35 番地 信濃町煉瓦館 5F

TEL:03-5360-3500, FAX:03-5360-3508, <http://www.jsme.or.jp/mmd/>