

# Materials



# &

# Mechanics

Newsletter, Materials and Mechanics Division, JSME, No. 56, February, 2023

特集： 令和4年度 日本機械学会 材料力学部門賞 受賞者の言葉



業績賞：四面体有限要素を用いた非構造格子有限要素法  
解析モデルによる三次元破壊力学解析法に関  
する先駆的研究

岡田 裕  
東京理科大学

この度は日本機械学会材料力学部門業績賞という大変栄誉ある賞を賜り、大変光栄に思うとともに、今でも驚いております。推薦者の方をはじめ、材料力学部門関係者の皆様に感謝申し上げます。本稿では、私の自己紹介的なことも含め、今までの研究を通して考えたことや感じてきたこと書かせていただこうと思います。

私は 1982 年に東京理科大学工学部機械工学科に入学し、機械工学を学ぶことになりました。当時、数学者に淡い憧れがあり、数学か工学か少し悩みましたが、車やオートバイに興味を持ったメカ好きの岡田少年は機械工学を選んだと記憶しています。大学では材料力学に興味を持ち、宮本博先生と菊池正紀先生の研究室で学ばせて頂くことになりました。お二人の先生のご指導の下、

卒業論文では結晶塑性問題の有限変形有限要素法解析に関する研究の真似事を致しました。微小変形弾塑性有限要素法プログラムに更新ラグランジュ型の有限変形解析機能と結晶塑性構成方程式を実装して解析するものでした。今思うと大変勉強になるいいテーマだったと思います。連続体力学、有限変形、弾塑性、有限要素法など、誤解だらけでしたが勉強することができました。このことは宮本先生と菊池先生に大変感謝しています。

大学院に進学し、米国のジョージア工科大学で学ぶ機会を得ることができました。これも両先生にお世話になってのことです。ジョージア工科大学では計算力学の大家である Satya N. Atluri 先生にご指導頂き、境界要素法による有限変形弾塑性

問題解析や部分安定化ジルコニアの破壊靱性向上メカニズムに関する研究で Ph.D.の学位を取得しました。ジョージア工科大学では変分原理や偏微分方程式の数値解法としての弱形式の組立と考え方、破壊力学解析、特にエネルギー解放率の考え方を学ぶことができました。Atluri 先生には基本的考え方の大切さを教えて頂きました。ありがたいことに RA (リサーチアシスタント) として雇用して頂き、学費を一切払わず Ph.D.の学位を取得できました。日本でも博士学生を RA として雇用し、学費免除をする仕組みが必要と考えています。

博士課程修了後はポストドクター、日産自動車(株)総合研究所勤務、ジョージア工科大学研究員を経て 1996 年 4 月から鹿児島大学工学部機械工学科に助教授として勤めることになりました。常勤助教授の職を得て、少々研究で失敗し、すぐに成果が出なくても大丈夫と開き直り、それまでの研究は一旦止めにして岡田オリジナルの何かを始めようと心に誓いました。しかし、物事そんなに簡単ではありません。機械学会での講演発表できず、なかなか論文書けずの状態が月日が経っていきました。2 年位してようやく、均質化法とか、重合メッシュ法といういわゆるメゾスケール解析に関する研究で少しずつ講演発表や論文投稿ができるようになりました。

さて、いろいろ悩んでいたころ、業績賞授賞対象として頂いた破壊力学解析法のきっかけに出会うことができました。それは、2002 年に一般社団法人日本溶接協会・原子力研究委員会 MF 小委員会 (Mixed Mode Fracture) (主査：矢川元基教授 (東京大学, 当時)) の活動に参加する機会を頂いたことです。活動は、矢川先生に加えて、菊池正紀教授 (東京理科大学, 当時)、田中啓介教授 (名古屋大学, 当時)、菅野智氏 (日立製作所, 当時) のリーダーシップの下で進められていました。その中で、平板の半楕円表面亀裂の亀裂面にせん断応力が作用するときの応力拡大係数を解析し、データベース化するという活動がありました。平板

の表面亀裂の深さやアスペクト比を変えて解析をするというものです。三次元き裂問題の解析でも、有限要素法解析ポスト処理によって応力拡大係数を計算するだけで簡単だろうと考えていました。ところが、六面体二次要素を使用し、亀裂前縁近くで歪みの無いきれいなメッシュを生成する必要があるため、当時の鹿児島大学大学院生・東真由美さんが相当苦勞していました。これをなんとか簡単にしようと思い、亀裂先端の近くでメッシュが歪んでいても精度良く応力拡大係数を計算できる仮想亀裂閉口積分法 (VCCM) の提案に到り。東さんの修士論文、そして Engineering Fracture Mechanics に投稿、掲載となりました。しかし、六面体有限要素を使用しているのは有限要素法解析モデル生成の自動化はできないので、四面体二次要素を使うことにしました。当時慶應義塾大学の野口裕久教授の下で研究員をされていた河合浩志氏 (現、東洋大学教授) に亀裂問題の自動メッシュ生成について相談したところ、「そんなの簡単」というコメントを頂き、さらに、河合先生にご協力頂きながら亀裂進展解析ソフトを構築することができました。

やっと研究成果らしきものが出てきた頃、既に東洋大学に移られていた矢川元基先生から柴田悟氏 (原子力安全基盤機構, 当時) が亀裂進展解析ソフトの開発に興味を持たれているので、手伝うようにというお話があり、株式会社テクノスターの立石勝氏、他、プロメテック・ソフトウェア株式会社の藤澤智光氏、他、前述の河合浩志先生も加わり、矢川先生ご指導の下で亀裂解析に関する研究会が発足しました。亀裂進展解析に関する議論が進められ、アイディアの一部はテクノスター社の TSV/Crack として商用化されています。

このような経緯で、解析プレ処理自動化 (有限要素法解析モデルの自動生成) を強く意識した技術開発を始めました。四面体有限要素の使用が必須であり、それに合わせた三次元 J 積分、相互積分法等を提案することができました。さらに、有限変形問題、傾斜機能材料の取り扱い、有限変形

下の領域積分法による J 積分や繰返荷重問題での J 積分範囲  $\Delta J$  へと拡張しました。有限変形問題対応は、日本溶接協会原子力研究委員会に設置された、FDF 小委員会等繰返し過大荷重下の破壊問題を扱う研究委員会への参加がきっかけです。これらは、2009 年に現在の東京理科大学に移った後、主として理科大の大学院生と一緒に取組んだものです。

以上のように、多くの方々に様々な機会を与えて頂き、教えて頂き、ご協力頂く中で研究活動を続けることができました。短かい間でしたが、日産自動車では萩原一郎氏（現、明治大学）や鳥垣俊和氏、鹿児島大学では福井泰好教授や戸谷眞之教授（当時）に大変お世話になりました。私も大分いい年になり、先生方、諸先輩方が私のことを

大変暖かい目で見てください、育てて頂いたことを痛感するようになりました。若いころジョージア工科大学で Atluri 先生の下で勉強し、学問に向き合う姿勢を教えてくださいとともに、J 積分の J. R. Rice 先生のような方のセミナーに参加する機会を得たことで、そのような大先生達への憧れを抱き、少しでも近づきたいと思うようになりました。材料力学部門業績賞という大変栄誉ある賞を受賞させて頂き、少しは近づけたかなと思っています。最後に、今までお世話になった先生方、先輩、同僚、学生の皆様、中でも私の研究室で博士課程を修了された田中智行氏（広島大学准教授）、荒井皓一郎氏（ヘキサゴン）、佐藤皓明氏（テクノスター株式会社）に感謝の意を表し、結びとさせていただきます。



### 業績賞：接着・接合・締結における強度設計に関する一連の先駆的研究

野田 尚昭  
九州工業大学

この度は、日本機械学会材料力学部門業績賞という栄えある賞を頂き、誠に光栄に存じます。ご推薦頂いた先生方をはじめ、選考等でお世話になりました多数の諸先生方に心から御礼申し上げます。今回の業績は研究室メンバーの協力だけでなく、企業や外部機関との共同研究も含まれます。本稿では、これまで行ってきた研究を振り返り、これまでご指導頂いた先生方、ならびにご協力いただきました関係各位の皆様への感謝も含め、受賞の言葉とさせていただきます。

卒業研究(九州工大 1978 年～)と修士課程では、村上敬宜先生の弾性力学の授業が大変に面白かったことから、体積法による 3 次元応力集中の解析に取り組みました。前年度までの卒業研究で、

回転だ円体空か・ドーナツ状空洞の解析が終わっておりましたので、丸棒円筒面での境界条件を Rankin の解を使って満足させ、円周切欠きをもつ丸棒に拡張しました。なお、ドーナツ状空洞と円周切欠きの応力集中係数は精密な計算では数%以内で一致します(Key Engineering Materials Vols. 183-187(2000)p.499)。修士課程では円周切欠きを有する丸棒の曲げの解析に取り組みました。体積法で軸対称問題を解析するには  $r, z$  方向に作用する Ring Force による応力場の解を用いればよいのですが、軸対称体の曲げ問題ではどのような Ring Force を用いればよいのか？先生のご指導の下、Neuber の Kerbspannungslehre を読むなどして、円周上で大きさが  $\cos\varphi$  または  $\sin\varphi$  で変化する  $r, \theta$ ,

z方向の Ring Force を考えました。まず、厳密解のある回転だ円体空かの曲げ問題で、その正しさを確認して、→ドーナツ状空洞、→円周切欠きをもつ丸棒へ発展させました。頂いた研究テーマは大変に魅力的で、応力解析に夢中になりました。

博士課程(九州大学 1981 年～)では西谷弘信先生のご指導で、体積力法による軸対称体の引張り・ねじり・曲げの問題の解析法を明確にしました。学位論文の骨子は修士の研究で終えていましたが、特異積分の処理方法やプログラミングを改良することで、長谷川久夫先生の解と有効数字 4～5 桁まで一致する結果を得ました。体積力法は 1 つ 1 つの問題を工夫して解くことが必要ですが、それによってずいぶん学ぶことも多く、その経験は産学連携研究にも有用であったと思います。西谷弘信先生には、九州工大に赴任後(1984 年～)もご指導を賜り、切欠き試験片に関しては、使用に便利のように切欠き試験片の応力集中係数を誤差 1%以内で与える計算式として与えました(高瀬康博士論文)。研究テーマの決め方に関して、就職後最初に頂いたご助言は、いまでも深く記憶に残っております。

早い時期に Fazil Erdogan 先生(Lehigh 大学 1985 年～)の下で研究する機会を頂きました。体積力法と同じ特異積分方程式を、未知関数を基本密度と多項式で近似し、2次元縁き裂を 10 桁以上の精度で解いておられました。それを見て、他の体積力法の方程式も厳密に解きたいと思うようになり、帰国後、き裂全面の境界条件の満足度を吟味しながら、3次元表面き裂の滑らかな K の分布を求めました(機論 61-586,p.1232)。だ円孔/介在物の干渉問題では、解が収束しない場合がありますので、どのように解けば収束させることができるかを示しました(松尾忠利博士論文)。この種の研究に関連して、当時、陳玳琦先生が情報工学部におられ、ご相談する機会が戴けたことに感謝しております(小田和広博士論文など)。陳先生は、体積力法の著書だけでなく、異種接合材の特異応力場の解析も多くなされており、それらの理論を

参考にして、種々の Butt Joint や Scarf Joint の接着強度が界面端部の特異応力場の強さ＝一定で表現できることや、曲げの影響を受けない、Lap Joint の試験片厚さを示すことができました(李戎・任飛・高木怜博士論文など)。

1995 年頃ガasketの劣化で配管継手から漏れが生じるため、発明されたガasketレスフランジの相談がありました(機論 66-643,p.966)。それを契機に企業との共同研究を行うようになり、社会人博士も受け入れました(安藤誠人・池田朋弘・日高哲郎・斉藤亮一・斉藤金次郎博士論文)。産学連携の恩人である田中洋征先生のご尽力で、5 件の経済産業省の助成も頂きました。二重ねじりのプロジェクトでは、西田新一先生・竹増光家先生・大喜工業(株)との共同研究で、ナットの緩みやボルトの疲労強度を考える機会を頂きました。その後、単一のナットとボルトに適切なピッチ差を与えることで、緩み止めと強度向上が実現できることを示しました(陳鑫・劉溪・王彪博士論文など)。

日立金属(株)との共同研究では、まず、連続溶融亜鉛めっきラインに使用する、セラミック製ロールの開発を始めました。従前のステンレス製ロールでは、通常 2 週間程度でラインを停止しロール交換等を行います。溶融金属への浸漬時の熱応力・稼働中の応力・接合部の解体の解析などによって、開発に貢献しました(Hendra・栗文彬博士論文)。このようなセラミック製ロールには焼嵌め接合が不可欠と判明しましたが、一方で、稼働中に軸が抜け出しました。この現象は、抜け出し方向に外力がない条件下で生じる新しい損傷でしたので、ロール回転を荷重の移動で表現する荷重移動法によって、抜け出し現象を数値実験で模擬しました。その結果、接合部に不可逆的変形が生じ、その変位が蓄積して軸抜けが生じるメカニズムを明らかにしました(Dedi・張国偉博士論文)。

圧延用ロールに関しては、ロールメーカー 2 社との共同研究により、熱処理と残留応力の関係を調べました。実態に即してクリープ変形も解析に

取り入れました。これらの研究では、ロールの権威の佐野義一博士から、勤務先の日立金属(株)を退社後は大学の支援研究員としても、多大のご指導を賜りました。一例として、通常のロール全体を均一に加熱した後の焼入れと比べて、ロール内部が表面温度以下の状態で焼入れする、不均一加熱焼入れ法が有用であり、ロール中心の引張残留応力と内部破損リスクを低減できることを示しました(胡可軍博士論文)。残留応力を初期条件として、圧延時の応力も初めて解析的に考察し、遠心鑄造製複合ロールの HSS/DCI 境界の危険部位を明らかにし、ロールの疲労強度を評価しました(Radzi 博士論文)。

ところで、圧延用ロールにおいても、その構造をスリーブ組立式に移行する考え方があり、コスト縮減だけでなく、現状のロールの限界を超えた要求を満たす候補とされています。一方で、圧延中にスリーブが滑らないように設計されていても、スリーブが周方向にすべる現象が存在し、従来の設計基準(駆動トルク<摩擦抵抗トルク)では説明不可能です。よって、荷重移動による数値

実験でこれを実証し、ミニチュアロールによる模擬実験では、スリーブ内面に損傷が生じる過程を明らかにしました(酒井悠正・Rahimah 博士論文)。特に、自由転がり条件下(駆動トルク 0)でも界面すべりを解析と実験で確認しましたので、今後転がり軸受けの界面クリープ問題(類似の現象)への応用が期待できます。界面すべりは、荷重負荷により不可逆的すべり変形が局所的に生じ、ロール回転(すなわち荷重移動)時に、それらが蓄積されていくことで生じます。駆動トルクによってすべり量は増大し、圧延トラブルの際には、特に大きなすべりが生じます。これは不可逆的すべりが生じる領域が駆動トルクにより拡大することからも説明できます。

学会は機械学会の材料力学分野を中心としてきました。接着問題を始めたのは古口日出男先生とのお話しが契機でしたし、上田整先生のご質問で計算の誤りに気付いたことなど、多くの思い出がございます。ご指導いただきました材料力学部門の先生方に深くお礼申し上げますとともに、部門の益々の発展をお祈り致します。

## M&M2022 材料力学カンファレンス開催報告

<https://www.jsme.or.jp/conference/mmdconf22/index.html>

実行委員長 笹川和彦(弘前大学)

2022年9月26日から28日の三日間の日程で、M&M2022 材料力学カンファレンスが本州最北端の津軽の地、弘前市(弘前大学文京町キャンパス)において開催されました。新型コロナウイルスの影響に十分配慮したうえで、三年ぶりとなる対面での現地開催としました。企画委員長を務められた東北大学の三浦英生先生はじめ東北地方全県から実行委員に加わっていただいた材力研究者の皆様とともに、材料力学の熱い議論の場を提供させていただくことができましたことを大変光栄に思います。

本講演会では、材料力学に関連する知識や技術

の共有、議論の場として、また情報交換の場としてより機能させるべく、少しこれまでのプログラム構成を見直しました。18のオーガナイズドセッションを6つの大きな分野に分けて配置し、新規な分野の学術講演に加え、関心の高い分野のレビュー講演や企業等からの技術紹介講演を招待講演や依頼講演として実施し、産学官の特に若い研究者、技術者の学び、交流、出会いの場として活用していただけるよう工夫をしてみました。最終的には、参加登録者 536 名、講演件数 397 と、地方都市開催としては例年以上の規模の大変活気のある講演会となりました。

残念ながら懇親会は取り止めさせていただきましたが、津軽地方の文化に関します特別講演会と津軽三味線の演奏会を開催しました。津軽三味線の合奏は大変迫力があつたと多くの方から好評いただきました。また、地元料理のお弁当をご用意させていただき、制約の中ですが地方開催の醍醐味を味わっていただけたのではないかと考えております。

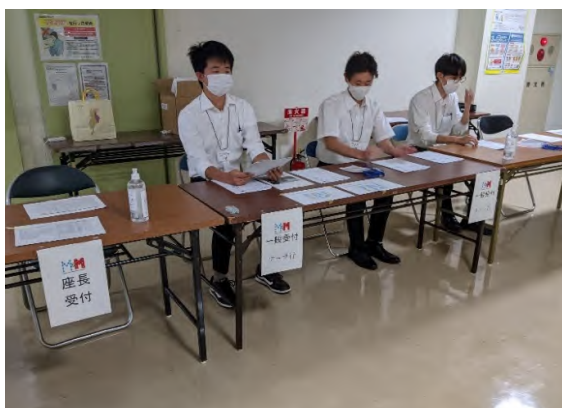
部門表彰式では、業績賞が岡田裕氏（東京理科大学）と野田尚昭氏（九州工業大学）に送られました。また、優秀講演表彰に佐野友彦氏（慶應大学）、久慈千栄子氏（東北大学）、久保淳氏（東京大学）が、若手講演フェロー賞に1名が選出されました。受賞されました皆様あらためておめでとうございます。

講演発表や全体会は感染予防に配慮しながらの実施となりましたが、特に大きなトラブルもなく、対面での活発なディスカッションや現地開催の醍醐味をご堪能いただきながら、成功裏にカンファレンスを終えることができました。発表頂いた方々、座長や特別講演など本会の運営にご協力頂いた方々、本講演会にご協力頂いたすべての方々に心より感謝を申し上げます。

次のカンファレンスは2023年9月27日より三日間の日程でつくば市にて開催されます。9月には新型コロナウイルスも終息に向かい、制約のない対面での討論や懇親会が復活して、夜の討論を含めた材料力学を研究する皆さまのより深い交流がつくばで実現することを楽しみにしております。



会場玄関前



会場内受付



特別講演会



津軽三味線演奏会

目次

1. 特集: 令和4年度 日本機械学会 材料力学部門賞受賞者の言葉

【業績賞】四面体有限要素を用いた非構造格子有限要素法解析モデルによる三次元破壊力学解析法に関する先駆的研究

岡田 裕 (東京理科大学)

【業績賞】接着・接合・締結における強度設計に関する一連の先駆的研究

野田 尚昭 (九州工業大学)

2. M&M2022 材料力学カンファレンス開催報告

実行委員長 笹川 和彦 (弘前大学)

編集後記

ニュースレター56号をお届けします。今号では、令和4年度日本機械学会材料力学部門賞受賞者の皆様からのお言葉の特集ならびにM&M2022材料力学カンファレンスの開催報告をお届けいたします。ご多用のところ、ご寄稿いただきました皆様方には、心より御礼申し上げます。

新型コロナウイルス感染症の流行により、2020年春から多くの会議・発表会がオンラインで開催されていましたが、ようやく（感染予防対策を行ったうえで）対面で行われるようになりました。オンラインの方が参加しやすい一方、対面の方が議論・ディスカッションが活発になり自由な時間での活発な交流も可能となることから、オンライン・対面の長所・短所を認識することができました。今後のイベントは、これらの長所・短所を鑑み、オンライン／対面／ハイブリッド（オンラインと対面）で開催されることになろうかと思えます。今後も、このような形式で行われる各種イベントの情報を、本ニュースレター等を通じて会員の皆様にタイムリーにお届けしたいと考えております。

広報副委員長 藤井朋之 (静岡大学)