

日本機械学会業績賞を受賞して 九州工大および卒業後の教育・研究での経験

機44 戸伏 壽昭



はじめに

平成29年10月に北海道大学で開催された材料力学カンファレンスにおいて日本機械学会・材料力学部門・業績賞を受賞しました。その表彰式



野田先生と受賞の写真

において、貢献賞を受賞された工学部機械工学科の野田尚昭教授から、明専会報に原稿を書くように依頼されたので、筆を執りました。

九州工業大学での経験

材料力学の授業は中川元教授に学びました。教科書は *Elements of Strength of Materials* でした。1年間の授業では、いつも何も手に持たず教室に来て、講義ノートなしで授業をされました。大学に入学早々英語の教科書で、講義ノートなしでの授業に対して、大学における講義に深く感銘しました。中川先生は我々の卒業と同時に定年退職されました。弾性学の授業は遠藤達雄助教授に学びました。教科書は *Theory of Elasticity* でした。学生の時は、遠藤先生が疲労強度に関して世界的な研究業績を挙げていることは知りませんでした。

大学の駅伝大会には4年間クラス

全員で参加し、2年次には最速のチームが優勝し、祝勝会を挙げて盛り上がりました。

クラスメートの中で、尾形正敏君、奥野哲也君、田村幸夫君、藤井修三郎君は東海地区に就職し、名大大学院で泣き言を吐く私をいつも励ましてくれました。田村君は三菱重工の名古屋研究所で射出成型機の開発に携わり、この関係で同研究所において開発された形状記憶ポリマーの力学特性を研究することができ、今回の業績賞の受賞に結びつくことになりました。白木邦明君はJAXAで理事を務め、現在は名工大の参事であり、また本工学部の宇宙環境技術ラボラトリーの特任教授として母校の発展に貢献しています。愛知工業大学で同僚になった内田誠之教授と前田徹君が東大大学院で同じ研究室で学び、松尾栄人君が三菱重工でエンジンの研究を共にを行い、彼らが非常に親しい関係にあることを知り、世間は狭いと感じました。

卒業研究は、井上順吉元学長の研究室で行い、振動輸送のテーマについて夜遅くまで村尾和則君と実験に取り組みました。村尾君の高校時代



名古屋で五人の同窓会
左から 戸伏、奥野、白木、尾形、田村

の友人の結城義一君が名大の大橋義夫教授の研究室で卒業研究を行っていることを知り、結城君にお願いして名大大学院において過ごした下宿を紹介してもらいました。

名古屋大学大学院での経験

名古屋大学大学院では修士課程と博士課程を大橋義夫教授の研究室で学びました。大橋先生は非常に勤勉で教育・研究に情熱があり、そのためだと思いますが、6人の教え子が名古屋大学教授になり、世界的に活躍しています。本大学院生命工学研究科の山田宏教授は名大の研究室の後輩になります。大学院においては、

機械設計で重要な強度特性の評価法および材料の力学特性を表す基本的な考え方を学びました。当時、私にはやる気はあったのですが、研究の進め方がよく分からず、研究成果をうまく挙げる事ができず苦労しました。博士の学位記は博士課程満了後に愛工大に勤務してから授与されました。その題目は「複合負荷に対する偏光流性実験法の基礎関係の研究」でした。この研究の過程で、材料の変形特性、疲労強度、高温強度、粘弾性特性、応力測定法などを学びました。

業績賞の受賞内容

業績賞受賞の理由は、「形状記憶材料の力学的特性に関する先駆的研究」です。形状記憶合金と形状記憶ポリマーについて、独創的かつ先駆的な数多くの学術論文および著書を発表し、その研究成果は世界的に高く評価されています。形状記憶合金に関しては、繰返し熱・力学特性、R相変態に伴う構成モデル、回復応力の特性、表面処理による疲労寿命の向上などを世界で最初に明らかにしました。また、形状記憶ポリマーに関しては、繰返し熱・力学特性、

形状固定性、形状回復性、二次賦形特性などを世界で最初に明らかにしました。特に、形状記憶ポリマーの形状固定性と形状回復性を評価する指標は非常に高く評価されており、国際標準的に使用されています。これらの研究成果は形状記憶素子を設計する上で最も重要であり、記憶素子の開発に用いられています。



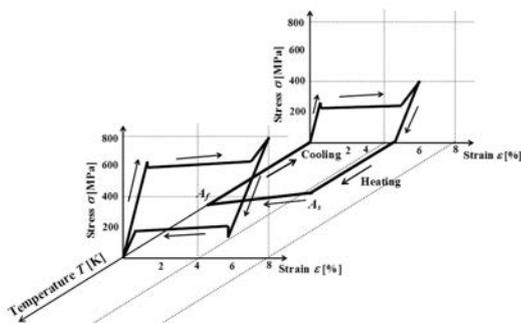
業績賞授賞式
岡村部門長との写真

1、形状記憶合金の

力学的機能特性の研究

形状記憶合金で現れる形状記憶効果と超弾性は、温度と応力に依存し、主にマルテンサイト変態に基づいて現れます。最も多く実用化されているNiTi形状記憶合金では、さらにR相変態に基づいてこれらの特性が現れます。繰返し変形を受ける場合のこれらの特性を表す構成モデルを

発表し、国の内外で高い評価を受けています。超弾性変形では負荷と除荷で応力-ひずみ曲線は大きなヒステリシスループを描くため、大きなエネルギーの散逸と貯蔵の特性が現れ、この特性はひずみ速度に依存して変化します。これらの特性を世界に先駆け明らかにしました。形状記憶合金は、素子の熱応答性の観点から細線とテープが多く実用化されているのに対して、テープは端を挟むだけで容易にねじることができ、ため、小型で単純な機構の回転駆動素子として応用できることを世界で初めて明らかにしました。このアイデアに基づき、車の窓やブラインドの



形状記憶効果と超弾性を示す応力-ひずみ-温度線図

自動開閉装置への応用が進められています。形状記憶合金は医療器具の脳ペラに必要な機能特性に優れているために、実用化において必要な形状と寸法および疲労特性を明らかにしており、この成果に基づいて脳ペラの実用化が進められています。

2、形状記憶合金の

サブグループ変形特性の研究

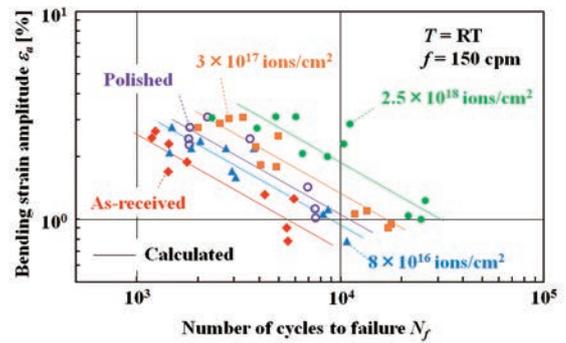
超弾性が現れる領域では負荷と除荷で応力-ひずみ曲線に上部水平段と下部水平段が現れます。これらの水平段はそれぞれ応力誘起マルテンサイト変態と逆変態に基づいて現れ、発熱反応と吸熱反応に対応します。応力制御で上部水平段と下部水平段が完了しない範囲で除荷および再負荷をする場合、除荷過程においてひずみが増加し、再負荷過程においてひずみの減少する特性が現れます。このような発熱と吸熱の特性に基づき現れる現象は、クリープとクリープ回復、および応力緩和と応力回復と見掛け上は類似であるが、マルテンサイト変態に基づいて現れることを明らかにしました。これらの現象は記憶素子を外部から加熱・冷却をしなくても現れるため、記憶素子の

設計において作動特性を評価する上で考慮すべき重要な知見であります。

この研究は、日本学術振興会の二国間共同研究の支援でポーランド科学アカデミー・基盤技術研究所のNowacki教授らと実施し、これまでに多くの研究成果を上げ、これらの実績が認められ、ポーランド理論応用力学会の名誉会員およびJournal of Theoretical and Applied MechanicsのAdvisory boardを欧米以外で唯一人務めています。

3、形状記憶合金の疲労特性

形状記憶効果や超弾性の機能特性をアクチュエータなどの駆動力に有効利用すれば、単純な機構の記憶素子が開発できます。この場合、記憶素子は繰返し作動するためその繰返し変形特性、特に記憶素子の信頼性の点から疲労特性が重要であります。しかしながら、実用化されている形状記憶合金の多くは細線やテープであり、その変形量は数%のひずみになるので、このような使用条件で作動する疲労試験機は市販ではないため、世界的に疲労のデータは非常に少なく、回転曲げおよび平面曲げの疲労特性試験機を独自に開発し、疲



イオン注入による疲労寿命の向上

労特性を明らかにしました。さらに、最近の研究では、窒素イオン注入や超音波ショットピーニングによる表面処理により疲労寿命が向上することを世界で最初に明らかにしています。これらの研究成果は、医療器具の開発などに利用されています。

4、形状記憶ポリマーの

力学的機能特性の研究

形状記憶ポリマーの形状固定性や形状回復性の変形特性は、ガラス転移に基づいて現れます。現在形状記憶ポリマーで実用化されているのは、ポリウレタン系形状記憶ポリマーのみであり、その力学的特性を世界で

最初に明らかにしました。形状固定性や形状回復性の変形特性を定量的に評価するために、これらの特性は非回復ひずみの現れる最大ひずみに依存する点に着目して、形状固定率と形状回復率を提案しました。現在発表されている国際学術雑誌における形状記憶ポリマーの論文では、この提案した形状固定率と形状回復率が国際標準的に使用されており、これに基づいて新たに開発された形状記憶ポリマーの力学的機能特性が評価されています。これらの先駆的研究成果は、三菱重工業やSMP、テクノロジーズにおいて広範囲の分野における製品開発、NASAやJAXAにおいて国際宇宙ステーションなどにおける宇宙での展開構造物の開発、3Dプリンターによる形状記憶素子の開発などへ利用・応用されています。

5、形状記憶ポリマーの

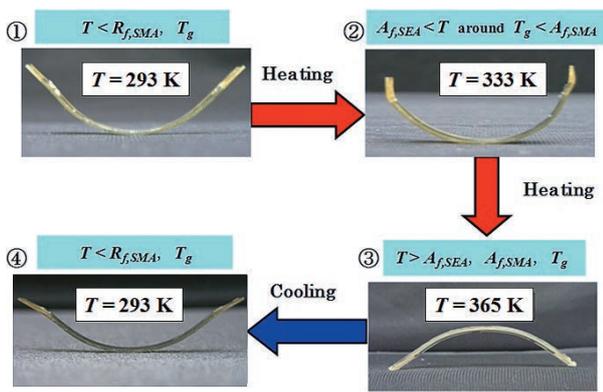
構成モデルの研究

形状記憶ポリマーのガラス転移に基づく形状固定性と形状回復性を表現する構成モデルとして、3要素標準線粘弾性モデルにすべり要素と温度依存性を考慮した理論を世界で最初に提案しており、記憶素子の設

計に実用されています。この構成モデルに含まれる弾性項と粘性項にそれぞれ非線形項を考慮した理論、さらに、このモデルを3次元の構成モデルに展開した論文を発表しています。これらの研究成果は、形状記憶ポリマー素子の設計・開発に応用されています。最近では、ガラス領域とゴム領域での体積分率を考慮した構成モデルを提案し、広範囲のひずみ速度における変形特性をうまく表現しています。

6、形状記憶複合材料の開発

加熱により形状の回復する形状記憶合金と形状記憶ポリマーについて、変態温度の上下における力学特性は真反対であります。弾性係数、降伏応力および回復応力は、形状記憶合金では高温で大きく、低温で小さいのに対して、形状記憶ポリマーでは高温で小さく、低温で大きくなります。したがって、特性の異なるこれらの材料を組合せた複合材料を開発すれば、高温でも低温でも剛性と回復力の大きな記憶素子に応用することができ、実用化の範囲が広がります。複合材料のファイバーとして変態温度の異なる形状記憶合金を用い



形状記憶複合材料の3方向挙動

れば、2方向変形挙動を示す複合材料が開発できることを明らかにしました。さらに、形状記憶合金および形状記憶ポリマーの変態温度と体積分率の組合せにより、3方向変形挙動を示す複合材料が開発できることを明らかにしました。

以上のように、形状記憶合金と形状記憶ポリマーの力学的機能特性に関する先駆的な研究成果は、記憶素子の設計において幅広く用いられ、国際的に高く評価されています。このような国際的な先駆的研究に対して、本年3月に退職を記念した国際

ワークシヨップが開催され^{*}、また退職記念の本がSpringer社から出版され、この度の業績賞の受賞に至りました。

おわりに

形状記憶合金の研究をスタートしたのは、カナダのマニトバ大学でCahoon教授から形状記憶合金熱エンジンの論文を紹介していただいたからです。形状記憶合金に関する最初の論文がカナダ機械学会論文集に掲載された数年後にインテリジェント材料とスマート材料に関する二つの国際学術雑誌が創刊されました。インテリジェント材料の研究が国際的に活発になる前に形状記憶合金の研究をスタートできたことは幸いです。カナダから帰国後に京大の井上達雄教授が主査の研究分科会に参加させていただき、田中喜久昭教授と出会い、形状記憶合金の共同研究がスタートしました。当初は、材料の形状記憶特性を評価するための加熱・冷却装置はなく、手作りの装置で研究をスタートしました。

研究の過程において、国内外の研究者との共同研究を進展させること

ができました。特に、カナダ、ポーランド、中国、フランスの研究者とは国際共同研究を進展させることができました。これらの研究活動を通して、「材料力学」や「形状記憶材料」に関する専門書を日本、アメリカ、ドイツの出版社から刊行できました。これらの経験の中で大切であると考えたことは、次の通りです。

- 1、名大大学院では研究成果を挙げることで苦勞しましたが、愛知工業大学に42年間勤務して当初考えていた以上の研究成果を挙げることができました。研究の予算、設備、スタッフなどの研究環境に恵まれていなくても、テーマの設定と努力次第で研究成果を挙げる経験ができました。どのような環境に居ても、夢と希望を持ち、何事にも積極的に取り組むことの大切さを学びました。
- 2、通常の研究成果は限られた条件の下で得られるものですが、多くの条件下での研究には長い研究期間が必要になります。長年かけて得られた成果をまとめると膨大なものになります。このために、得られた成果はたとえ小さくても必ず論文に仕上げるのが大切です。学会発表で

の質問や投稿論文に対する校閲委員からの意見が次の研究テーマに繋がることは何度も経験しました。

- 3、共同研究を行うためには自分から積極的に働きかけ、提案することが大切です。特に外国の研究者に対してはJapanese Englishが構わないので、積極的に話しかける必要があります。また国際共同研究には色々困難なこともあります。継続して発展させる地道な努力が必要であると思います。報告・連絡・相談の重要性は広く知られていますが、これだけでは不十分で、これに「提案」を付け加えることが重要です。報連相の際に必ず自分のアイデアを提案することにより、積極的に物事に取り組み、成果を挙げるができるようになります。

若い皆様方が恵まれない職場と思っていますが、可能性を信じて積極的に仕事に打ち込むことにより、成果を挙げるができるようになります。若い方々の今後のご活躍を期待しています。

(*) Sun, Q.P., Matsui, R., Takeda, K. and Pieczyska, E.A., eds. *Advances in Shape Memory Materials? In Commemoration of the Retirement of Professor Hisaaki Tobushi?* (2017), Springer.