

特別講演

□第177回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演
(2019年3月22日)

先端構造材料の力学的信頼性

Mechanical Reliability of Advanced Structural Materials

榎 学 東京大学大学院
工学系研究科
Manabu Enoki 教授



*脚注に略歴

1 はじめに

このたびは学術功績賞の榮譽にあずかり、まずこれまでに
ご指導およびご支援いただいた方々に感謝する次第である。
大学院の指導教官の岸輝雄先生のもとで、アコースティック・エミ
ッション (AE) に関する研究を始め、これまでその
延長で研究を展開してきた。材料の力学的特性は主に準静的
な試験を用いて測定するが、試験中のAEを計測してみると
試験中に多くのAE信号が計測される¹⁾。すなわち試験中に
発生する動的な微視変形・破壊の累積過程の結果として力学的
特性が発現していると考えられる。したがって、
このような動的な素過程を理解できれば、力学的特性を定量的
に評価可能であろうという思いのもとに研究を進めてきた。さら
に構造材料の力学的信頼性を考えるためには、負荷中における特
性発現のメカニズムを理解するだけでなく、材料プロセス中や構
造物として供用中に発生する損傷について考慮する必要がある
と考え研究を行ってきた (図1)。必ずしも十分満足のいく知見
が得られているとは言えないが、これまで著者が行ってきた研
究のいくつかを紹介したい。複雑な内容になるが、著者にとっ
ては構造材料の力学的挙動を理解したいと思って行ってきた一
連の研究内容である。

2 材料試験中のモニタリング

はじめにCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) のAE計測
のテーマで修士論文の研究を始めた。複雑な破壊過程をAE計測
により理解するのが研究の目的であった。しかし少しやってみ
ると、多くのAE信号が計測できるが、逆に信号

が多すぎて解析が必ずしもうまくいかないことがわかった。
複合材料においては、母相割れ、繊維破断、界面はく離などの
多様な微視破壊が生じる。試験に板状の引張試験片を用いる
ことが一般的であるが、ラム波としての性質 (速度分散性・
多モード性) が生じるため、超音波伝播も複雑でありAE信号
の解析だけでは破壊過程の解析は容易ではなかった。

そこで当時研究室で取り組んでいた波形をもっと直接的に
解析する手法であるAE原波形解析をすることにした²⁾。微
視破壊のAE源は地震と同じようにモーメントテンソルで表
現されることができると考えることができることはわかって
いた (図2)。しかし当時はAE波形の多チャンネル計測を行
い、モーメントテンソルの独立な6つの成分を解析している
研究報告はなかった。CT試験片を用いた破壊靱性試験は、
AEセンサーを適当に配置すると伝播する縦波の初動だけ
を計測できるので

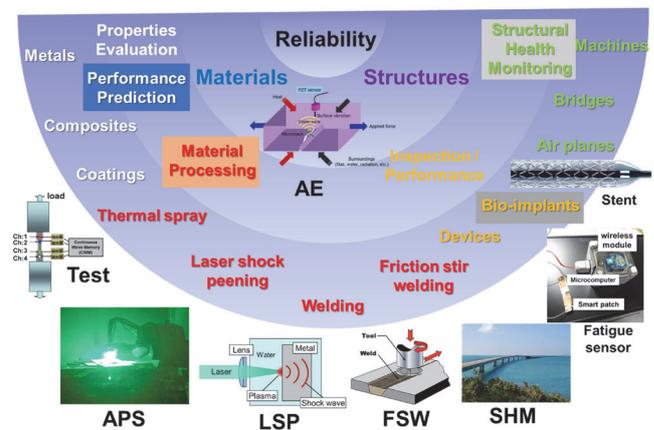


図1 主にAE法を用いた構造材料の信頼性に関する研究例

* 1989年東京大学大学院博士課程修了後、日本学術振興会特別研究員を経て、同年東京大学先端科学技術研究センター助手に着任。1991年講師、1993年助教授に昇任後、2000年東京大学工学系研究科助教授を経て、2009年教授に昇任、現在に至る。

都合がよかった。まずは単純な破壊過程をとる材料として脆性的な金属材料からはじめて、その後研究室で取り組んでいたセラミックス系の材料に適用することを行った。このような脆性的な材料は微視割れの発生頻度も限定的であり信号の解析も比較的容易であった。はじめはプログラム開発だけを行っていた。AE波形収録装置（ウェーブメモリ）を3台連結させてサンプリング間隔50nsで6チャンネル計測するためのプログラムを書いた。次に計測した波形の立ち上がり時刻を導出して精度よく位置標定を行うアルゴリズムを考えた。さらに厄介だったのは、多チャンネルの逆問題解析であったが、時間領域の波形をラプラス変換で周波数領域に持っていく、そこで離散的な逆畳み込み積分を行うことで一応収束する答えを出すことができた。

最初に研究が面白いと思ったのは、高靱性のA533B鋼における試験片内部の微視割れの位置標定がAE計測からできたことであった。MnSの割れによるAEが計測でき、位置標定結果から荷重が大きくなるにつれてAE発生領域が拡大していくことが、理論的な弾塑性境界の拡大に対応していくことがわかった。脆性的な材料においても予き裂先端に微視き裂発生することがわかった。またSiC繊維強化ガラスにおける

位置標定の結果もき裂進展や界面はく離の観察の結果とよく対応していた（図3）。損傷発生位置がin-situで評価可能なことはAE法の最も大きな利点であると言える。微視割れ以外においても、相変態、双晶、キンク等の発生による高振幅のAE信号を計測し、それらについて動的な力学的情報の解析を行うことができた。AE信号の周波数特性の違いから、Mg合金における双晶の発生・消滅の過程についての議論ができた（図4）^{3,4)}。またLPSO (Long Period Stacking Order)-Mg合金において生じるくさび型のキンクの形態についても、AE波形の解析から求めることができている（図5）⁵⁾。

3 プロセスモニタリング

セラミックス単体では常温での脆性を克服できないので、構造材料としては繊維強化やコーティングへセラミックス系構造材料の研究がシフトしていった。そこで我々もコーティング材料に取り組んだ。最初はセラミックコーティングした

Theory of AE measurement

AE signal due to dipole moment

$$V(\vec{x}', t) = S_i(\vec{x}', t) * G_{ij,k}(\vec{x}', \vec{x}, t) * D_{jk}(\vec{x}, t)$$

Sensor response function, $S_i(\vec{x}', t)$

Green's function of media, $G_{ij,k}(\vec{x}', \vec{x}, t)$

Dipole moment of source, $D_{jk}(\vec{x}, t)$

* : convolution integral

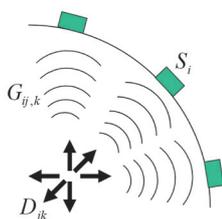


図2 AE波形解析の原理、AE信号は微視割れ発生によるモーメントテンソルと波動伝播のグリーン関数とセンサーの応答関数の時間に関する畳み込み積分で定式化される

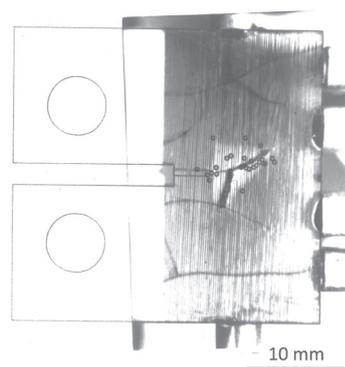


図3 SiC繊維強化ガラス複合材料の破壊靱性試験中の破壊挙動のAE位置標定結果

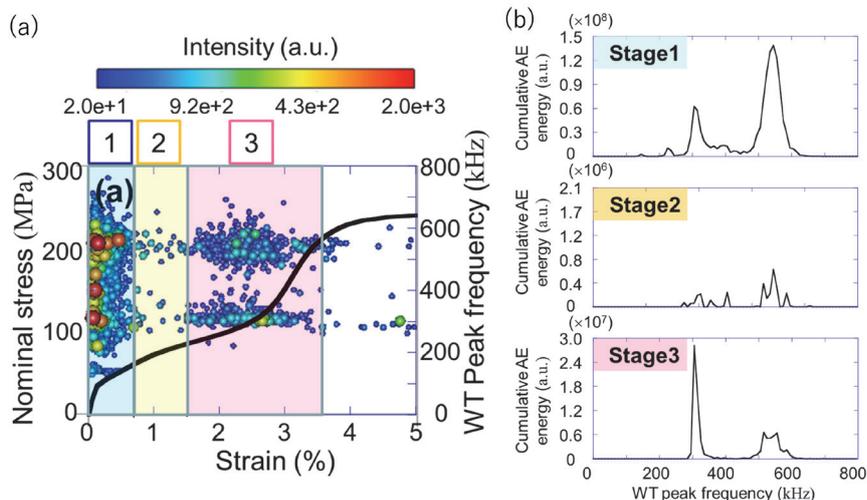


図4 (a) 双晶が導入されたAZ31マグネシウム合金の応力ひずみ曲線およびAE挙動、(b) 双晶の消滅開始から完全消滅に至るAE周波数特性の変化

材料の試験を行っていたが、試験片には元から多くの微視き裂が入っていることがわかった。そこでコーティングプロセス中に導入される微視割れをAE法を使って検出することにした⁶⁾。最初は溶射中に発生する機械的・電氣的なノイズをさけるために、冷却中の熱膨張係数差に起因する熱応力による割れの計測・解析を行った⁷⁾。この手法はセラミックス単体の大型試料における焼結後の冷却時における微視割れの発生の検出にも適用できた。

しかし解析を進めて行くうちにプラズマ溶射中にき裂が導入されているらしいことがわかった。このような過酷な環境でAE計測を行うには市販のAE計測装置の限界が見えてきた。精度良い波形解析を行うためには波形収録がどうしても必要であるが、ノイズが大きい場合には計測のしきい値を大きい値に設定する必要があり、小さな有効な信号は計測できないことになる。そこですべての波形を連続的に収録する装置(CWM)の開発を行った(図6)⁸⁾。周波数領域での処理によりノイズ成分を除去することが可能となり、材料プロセスのような音響的には高ノイズな環境においてもAE計測が可能となった。また、通常使われているPZT(Lead Zirconate

Titanate)のAEセンサーではキュリー点以上の高温においては計測ができないので、レーザー干渉計を用いたAE計測系の開発も行った⁹⁾。

これらの手法を用いることにより、プラズマ溶射中のすべてのプロセスにおいて損傷の発生のモニタリングが可能となった。TBC(Thermal Barrier Coating)の溶射中に微視割れの発生時刻が計測でき、その情報から熱応力の推定を行いセラミックス膜の強度を求めると、通常試験後にしか測定できない強度と良い対応していることがわかった(図7)^{10,11)}。また溶射だけではなく他のプロセスである溶接、FSW(Friction Stir Welding)、レーザーピーニング等にも開発したAE手法が適用可能となっている。例えばレーザーピーニング中に発生するAEを解析することにより、アブレーションだけでなくバブルの消滅の際にも強い衝撃力が働いていることを示すことができた(図8)¹²⁾。

4 構造ヘルスマニタリング

上記のように材料プロセス中に発生する損傷の計測を行っていたが、実際の構造物の使用を考えると供用中の信頼性評価も必要となる。AEは元々in-situの計測ができる手法であ

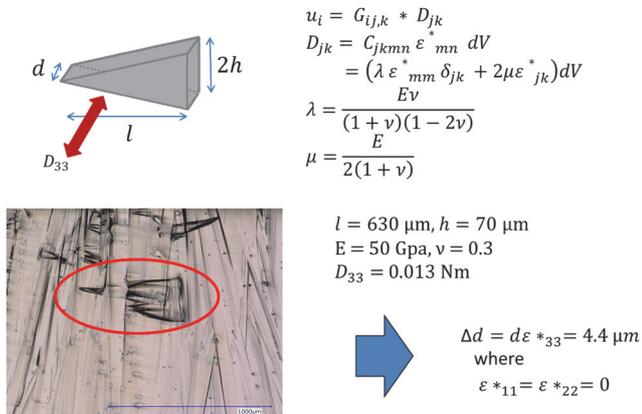


図5 LPSO-Mg合金において発生したキックおよびAE波形解析で得られた形状の例

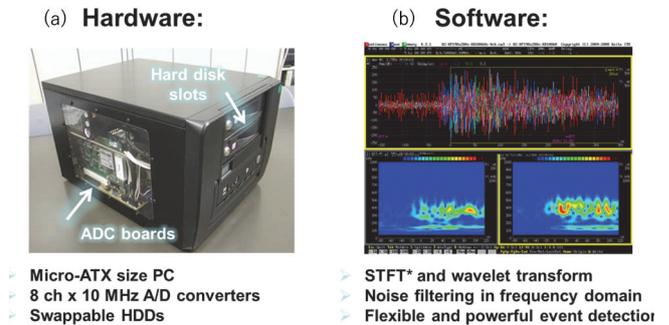


図6 (a) 開発した連続波形収録解析システム(CWM)、(b) 計測されたAE波形およびウェーブレット解析の表示の例

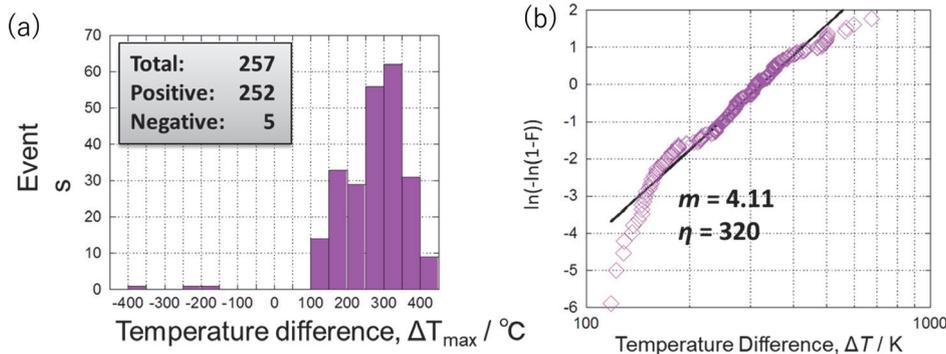


図7 (a) AE計測から解析されたTBCのプラズマ溶射中に発生した微視割れをもたらす温度差分布、(b) そのワイブルプロット

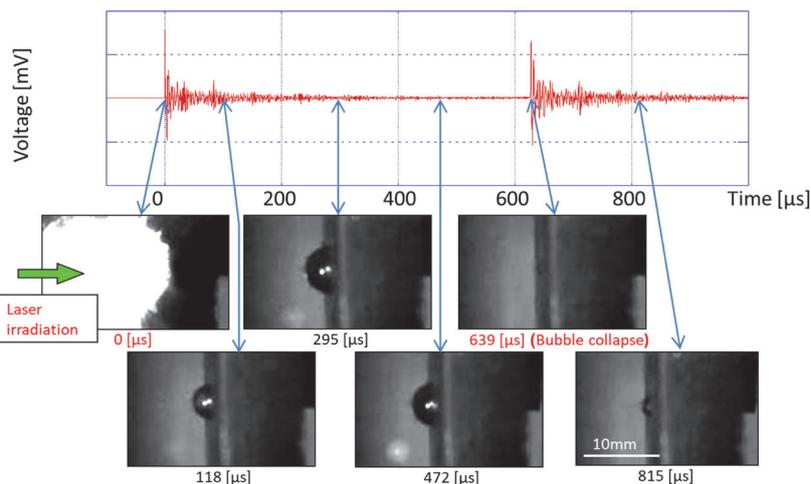
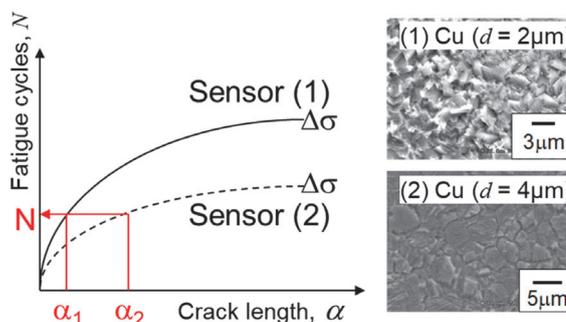


図8 レーザーショックピーニングプロセス中に発生したアブレーションとそれに伴い発生したバブル消滅によるAE信号

るので、損傷の監視に応用されてきた。ただし、環境に依存した様々な雑音が発生するので、有効な信号を抽出するには経験が必要であり少し難しい。AE法の普及が限定的な一つの要因がここにある。また信号を継続的に計測する必要があるが、構造物の使用は非常に長期的である場合が多いので連続的な計測を行うのは経済的には必ずしも合理的ではない。

そこでAE法を応用してもう少し簡便な手法がないか検討した。AEではカイザー効果という現象が知られており、これは材料の再負荷の際にはそれまでの最大負荷に達するまではAE信号が計測されないというものである。この現象を利用して長期的な信頼性が担保できるのではないかと考えた。具体的には予き裂を導入した犠牲試験片をセンサーとして構造物に貼り付け、後ではがして再負荷の際のAEを計測することによって構造物が受けた荷重が評価できると考えた。ただし、実際にやってみると疲労き裂進展が起こるような低負荷の場合はカイザー効果が必ずしも成立しないことがわかった。

そこでAEからは離れて、この犠牲的なセンサーのき裂長さを測定することにより、応力振幅と繰り返し数を計測できるものを考案した(図9)¹³⁾。異なる特性のセンサーを用いることにより、原理的には上記の応力振幅と繰り返しを計測可能であることを示すことができた。さらにき裂長さの計測は電気抵抗を用いて行い、ワイヤレスシステムと組み合わせることにより構造物の繰返し負荷の状況を把握できる簡便なシステムを提案することができた(図10)¹⁴⁾。また腐食センサーであるACM (Atmospheric Corrosion Monitor) センサーからの出力も同時にワイヤレスで計測するシステムの開発をし、実際に奄美大島や宮古島でのフィールド試験を行った。当時は損傷モニタリングとしてのIoT (Internet of Things) は必ずしも大きくは注目されていなかったが、今後構造物の



Two sensors with different characteristics

図9 異なる疲労き裂進展挙動を示す材料を用いて繰返し応力振幅を求める原理

信頼性確保においては不可欠な技術であると言える。色々な種類のセンサー技術とICT技術を組み合わせることにより構造物の信頼性を今後オンラインで精度よく把握できるようになるものと期待している。

5 マテリアルズインテグレーション

内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) に参加する機会を得た¹⁵⁾。我々が参加したプログラム「マテリアルズインテグレーション」の研究目標は計算科学とデータ科学を融合して、効率的な材料開発を行うことを可能にする基盤、プラットフォームを構築することであった。構造物の信頼性を確保するためには、特性の評価をしっかりと行う必要があることは言うまでもないが、上記で示したように微視的な動的な素過程に依存した特性発現のメカニズムを理解することが望ましい。またメカニズムがある程度わかっているの

であれば、その物理モデルをもとにした計算科学的な予測が可能であろう。あるいはメカニズムがはっきりわかっていなくても、何らかの相関を経験式として表現できていれば、それを利用した予測も可能である。さらには相関が明確でなければ、例えば機械学習のようなデータ科学的な手法を用いて見出すことが重要になるであろう。

構造材料の性能は、様々なスケールの現象が複雑に関係して発現されるので、予測するためには分野の異なるまたスケールも異なる計算を組み合わせて行う必要がある。構造材料における性能が微視組織に強く依存することを考慮して、プロセス (Process) -組織 (Structure) -特性 (Property) -性能 (Performance) の連関として材料の性能を考慮する手法が提案されており¹⁶⁾、性能予測をする上でのバックグラウンドとなっ

ている。前節で示したように疲労について少し研究を行っていたので、我々のグループでははじめに鉄鋼材料の溶接部の疲労性能に取り組んだ。当初は、計算するためには解析モデルが必要であり、それは既に報告されているものを用いるため、あまり研究的な要素はないだろう思っていた。しかし研究を進めて行くうちに、必ずしも確立した物理モデルがあるわけではなく、また性能を予測するというエンジニアリング的な観点からは計算モデルの取捨選択が重要であることがわかった。

溶接継手の疲労性能を予測するために、最新の計算技術を統合して包括的な枠組み (フレームワーク) を開発した (図 11)¹⁷⁾。手順は以下である。(1) CCT曲線を含む材料特性と鋼の機械的および熱的特性の推定、(2) 熱応力有限要素法 (FEM) による巨視的モデル上で溶接プロセス中に生じる温

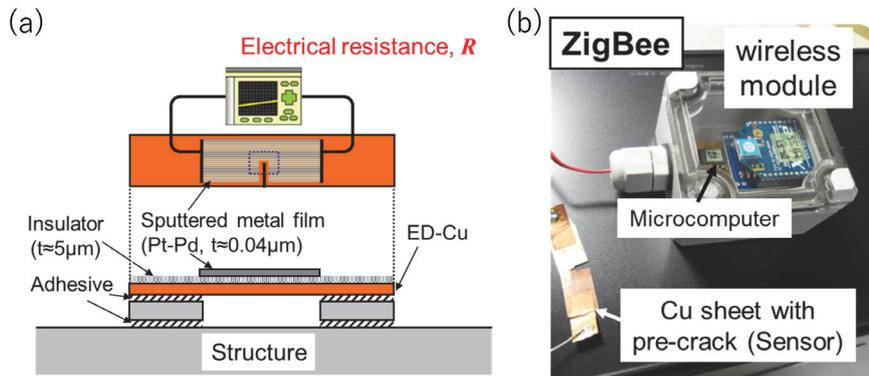


図 10 (a) スマートパッチ (疲労センサー) の模式図、(b) ワイヤレスシステムへの実装

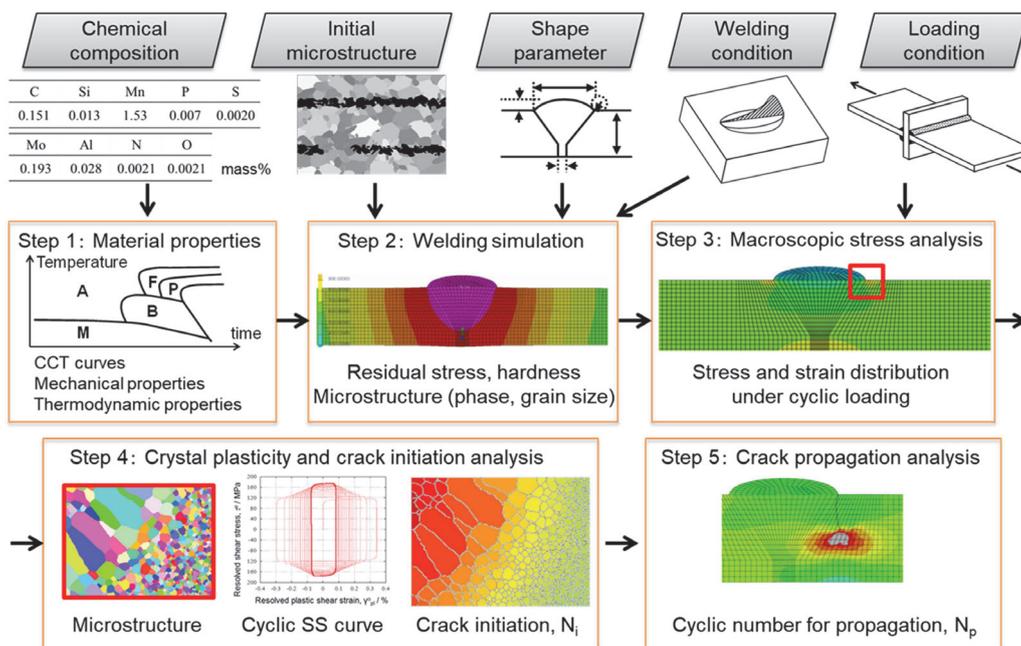


図 11 マテリアルズインテグレーションシステムにおける鉄鋼溶接部を対象とした疲労性能予測モジュールのワークフロー

度場、残留応力およびひずみの計算、(3) 硬化構成モデルを用いたFEMによる繰り返し荷重下での巨視的応力場の計算、(4) 巨視的モデルにおける応力集中領域の検出および微細多結晶構造モデルの作成、Tanaka-Muraモデル¹⁸⁾による結晶塑性解析を用いた疲労き裂発生寿命(Ni)の評価、(5) 拡張有限要素法(X-FEM)による初期き裂からの疲労き裂伝播寿命(Np)の解析、最終的なNiとNpの合計による破断寿命の推定。低炭素鋼(0.15% C)を用いて広く使用されている突合せ継手における疲労寿命を提案された方法によって評価し

た(図12)。結晶塑性解析を用いて、マルテンサイト鋼やMg合金においても疲労き裂発生寿命の評価も可能となっている(図13)^{19,20)}。

また、計算に必要な入力である材料パラメータは必ずしも明らかではなく、またそれらのパラメータは必ずしも測定が容易ではないことも問題であった。そこで計算結果と実験結果を対応させて材料パラメータを推定する、データ同化の手法の重要性が改めて認識できた。計算とデータを両輪として課題解決にあたるのが、今後材料工学の分野においてもま

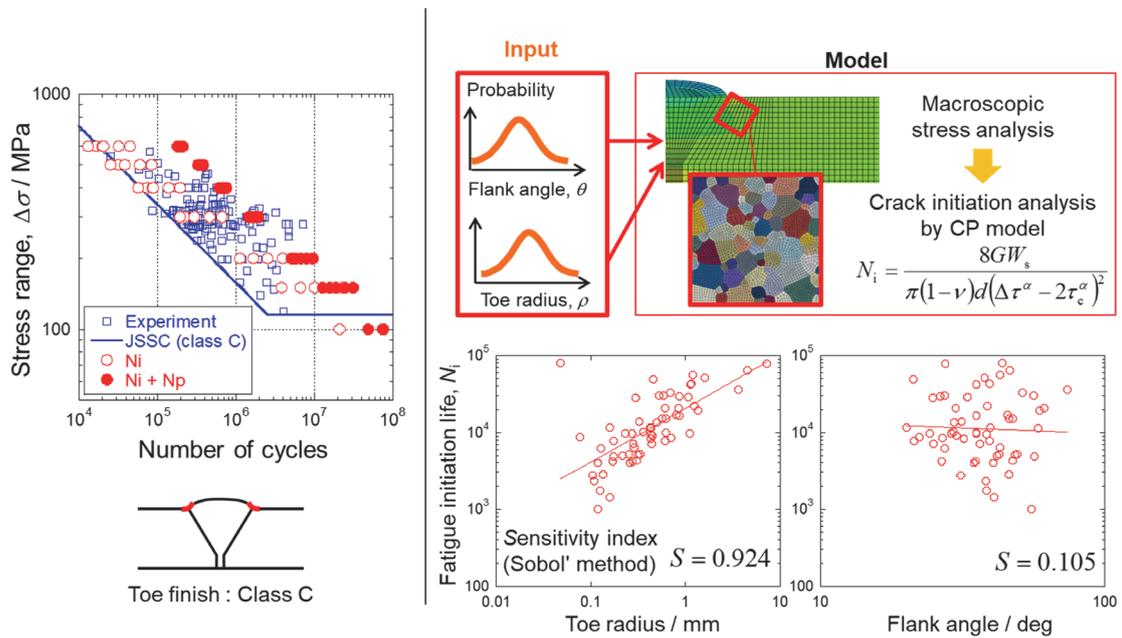


図12 予測された疲労性能と文献値との比較、ワークフローを用いたプロセス因子の感度解析の例

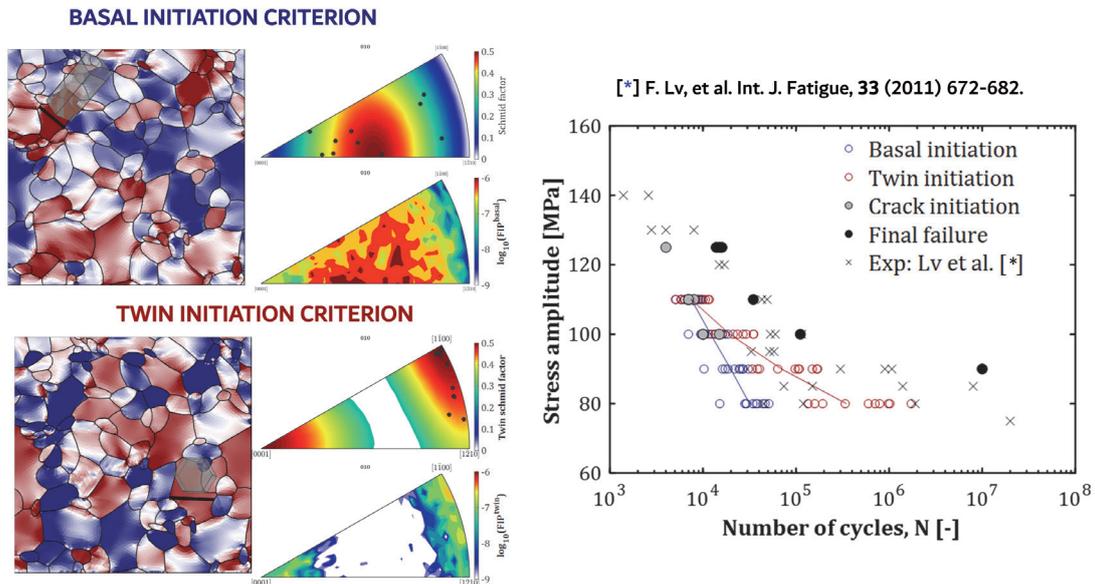


図13 AZ31 マグネシウム合金における結晶塑性FEM解析に基づく疲労性能予測の計算例と文献値の比較

すまず重要となっていくであろう。特に元々ばらつきが問題となる疲労のような課題においては、パラメータの分布を含めて評価するベイズ最適化が重要である。その意味では、マルチスケールの計算プログラムを連結して順次計算を可能とする一貫システムも重要であるが、分割された個々の計算においてしっかり実験データと整合させることの重要性を改めて確認した。そういう意味では、構造材料の性能予測においてはどのように計算手法が発展しようとも、それを検証するデータの重要性はますます強調されるべきであろう。計算科学とデータ科学の手法の開発や利用も重要であることは言うまでもないが、それにリアリティを与えるデータ自体の重要性や、特に再現性や信頼性の高い実験の重要性がもっと強調される必要がある。また、実際の材料プロセスや特性評価における上記のPSPPの連関をしっかりと模擬したデータフォーマットの構築もますます重要であろう。このようなデータの取り扱いの共通化がこれから材料開発を進めて行くキーテクノロジーとなるだろう。上で述べたMI (Materials Integration, Materials Informatics) は従来の手法に加えて材料科学や材料工学の発展を支援していくものと期待している。

6 おわりに

最初研究を開始したころ夢見ていたのは、微視的なき裂生成、さらにその後のき裂の成長をすべて予測できれば、材料の破壊靱性が実験無しで予測できるのではないかということであった。AEを測定することより、材料内部に発生している微小変形や微視破壊の情報はある程度得ることができるので、微視組織に依存した動的な変形・破壊挙動が計算できるのであれば靱性値の予測も可能であろうと考えていた。随分長い時間が過ぎたが、まだ全く到達できていないことに改めて気づいた。ただし、主にコンピューティングの飛躍的な進歩により道具立てはかなり実現できているように感じている。AE計測について言えば、既に全試験期間中の連続波形の多チャンネル計測が可能となっているし、またAE波形解析方法に関しても、従来の波動方程式に対する単なる波形の逆問題解析だけではなく、情報科学的な処理による統計的なアプローチによる全体挙動の解析が可能となってきている²¹⁾。また、疲労性能予測の例で示したように、実際の結晶粒径の方位の分布をもとにしたメゾスコピックな応力ひずみ場の大規模な計算も可能となっている。また粒を跨いだ微視き裂の伝播に関しても知見が集積されてきているように思われる。さらなるコンピューティングの進化も加えて、これらの知見や手法を一段と高いレベルで統合(インテグレーション)することにより、従来できなかったような予測や評価が可能となることを信じている。材料の信頼性を考える上では、材料の選択から

始まって、材料プロセスから使用状況に至るまで時間と空間に関して幅広いスケールの現象を考慮する必要がある。現状では全てを考慮して現象を理解することは難しいが、遠くない未来に何らかの形で実現されることを期待している。

本稿で紹介した内容は、研究室に在籍した多くの学生諸君や共同研究者と共に行ったものであり、彼らの協力なしでは成し得なかったことを記して、改めて謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 榎学, 伊藤海太: ふえらむ, 18 (2013), 9.
- 2) M.Enoki and T.Kishi: Int. J. Fract., 38 (1988), 295.
- 3) Y.Li and M.Enoki: Mater. Trans., 48 (2007), 1215.
- 4) T.Yasutomi and M.Enoki: Mater. Trans., 53 (2012), 1611.
- 5) Y.Muto, T.Shiraiwa and M.Enoki: Mater. Sci. Eng. A, 689 (2017), 157.
- 6) M.Watanabe, M.Enoki and T.Kishi: Mater. Sci. Eng. A, 359 (2003), 368.
- 7) S.Nishinoiri, M.Enoki and K.Tomita: Sci. Tech. Adv. Mater., 4 (2003), 623.
- 8) K.Ito and M.Enoki: Mater. Trans., 48 (2007), 1221.
- 9) M.Enoki, M.Watanabe, P.Chivavibul and T.Kishi: Sci. Tech. Adv. Mater., 1 (2000), 157.
- 10) K.Taniguchi, M.Enoki, M.Watanabe, S.Kuroda and K.Ito: J. Mater. Res., 24 (2009), 3182.
- 11) K.Ito, H.Kuriki, H.Araki, S.Kuroda and M.Enoki: J. Thermal Spray Tech., 24 (2015), 848.
- 12) T.Takata, M.Enoki, P.Chivavibul, A.Matsui and Y.Kobayashi: Mater. Trans., 57 (2016), 674.
- 13) S.Nambu and M.Enoki: Mater. Trans., 48 (2007), 1244.
- 14) T.Shiraiwa and M.Enoki: ISIJ Int., 51 (2011), 1480.
- 15) <https://www.jst.go.jp/sip/>
- 16) G.B.Olson: Science, 277 (1997), 1237.
- 17) T.Shiraiwa, F.Briffod and M.Enoki: Eng. Fract. Mech., 198 (2018), 158.
- 18) K.Tanaka and T.Mura: J. Appl. Mech., 48 (1981), 97.
- 19) F.Briffod, T.Shiraiwa and M.Enoki: Mater. Trans., 60 (2019), 199.
- 20) F.Briffod, T.Shiraiwa and M.Enoki: Mater. Sci. Eng. A, 753 (2019), 79.
- 21) A.Vinogradov, E.Agletdinov and D.Merson: Sci. Rep., 9 (2019), 5748.

(2018年5月20日受付)