



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

鉄鋼の損傷劣化評価の難しさ面白さ

Difficulties and Interests in Evaluating Damage Deterioration of Iron and Steel

白岩隆行

Takayuki Shiraiwa

東京大学
大学院工学系研究科
マテリアル工学専攻 助教

1 はじめに

材料における損傷・劣化、そしてそれに続く破壊という現象は非常に複雑なものであり、長い間研究されているにも関わらず、未だに予測することが難しく、大変興味深い現象である。筆者は2007年、学部4年生のときに現在の榎研究室(信頼性材料工学研究室)に配属されて以来、鉄鋼をはじめとする構造材料の損傷劣化の計測と評価に関する研究を行ってきた。10年程度ではあるが、様々な研究課題を通して、鉄鋼材料の損傷劣化を評価することの難しさと、それ以上の奥深さや面白さを感じることができた。本稿では、これまでの研究のいくつかを簡単に紹介させて頂く。

2 損傷記憶スマートパッチによる疲労モニタリング

破損の主要因のひとつである疲労に対しては、保全員による目視検査やひずみゲージを用いた応力頻度測定が行われているが、目視検査では定量的評価が行えず、またひずみゲージ法では長期計測に多大な労力を必要とする。そこで筆者らは、疲労診断のためのひとつのツールとして、損傷記憶スマートパッチの研究開発を行っている。これは、微結晶粒を有する金属箔が再現性のよい疲労き裂進展挙動を示すことを利用したものであり、繰返し荷重の回数と応力振幅を推定するものである。疲労損傷が懸念される溶接部付近などにセンサを貼付し、センサに導入した予き裂からのき裂進展量を計測することで、繰返し荷重の回数と応力振幅を推定できる(図1)。このような犠牲試験片のき裂進展を用いた疲労診断手法は、1977年のアメリカ空軍材料研究所による報告¹⁾が最も古く、その後2000年前後に国内において、累積損傷則(Miner則)に基づき、センサ材の疲労き裂長さから疲労

損傷度を直接求めるものがいくつか提案された^{2,3)}。その後、Nambuらが2種類のセンサを組み合わせる繰返し荷重の回数と応力振幅を推定する方法を初めて提案し、試作した^{4,5)}。これらのセンサは、無電源で配線なしに設置できるメリットがあるが、測定できる応力範囲が限られることや、現場でのデータ取り出しにおいては光学顕微鏡が必要であるなどの課題が残されていた。この課題に対して、筆者らはセンサの材料や形状について破壊力学に基づく検討を行い、実験的な検証を試みた。この際、疲労き裂進展則(Paris則)を連立させて解くために、Paris則の指数 m が異なる材料を2種類以上準備する必要がある。Paris則の m 値は、き裂開口挙動などを介して材料組織に依存するが、その程度は大きくなく、適切な材料を探すのに労力を要した。様々な条件で微細粒金属薄板を作成し、疲労き裂進展試験を行った結果、ある電着

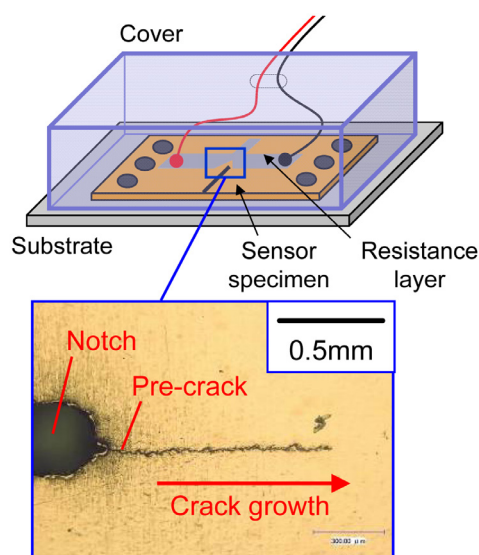


図1 無線式損傷記憶スマートパッチ

条件で作成した純銅薄板とニッケル薄板を用いることで、従来よりも広範囲の応力測定が可能となることを示した。さらに、試験片の形状を工夫し、センサにあらかじめ引張の予ひずみを導入することにより、検出可能な応力下限界を向上させることに成功した^{6,8)}。また、センサのデータ取得を容易にするため、センサ材の上に電気抵抗薄膜を形成して無線計測する手法を提案した^{9,10)}。図1に示す無線機器の開発では、消費電力を極限まで抑えるために、マイコンのプログラムをアセンブリ言語で書くこともあり一苦労したことを覚えている。これらは学生時代に初めて取り組んだテーマであり、抵抗薄膜の作製から電子回路の設計、基板の作製、実装などと、もともと持っていた材料研究のイメージとは随分と違う作業の連続であったが、すべて自分で考え、自身の手で進めることができたのは、非常に有意義な経験であった。

この手法のメリットのひとつとして、荷重の履歴を電源なしでセンサ自体に記憶させられるという点が挙げられる。一般に繰返し荷重を計測するためには、荷重の周波数よりも高頻度に応力やひずみを計測する必要があるが、本センサでは数分から数日に1回という非常に低頻度の計測によって、繰返し数と応力振幅を見積もることができる。この手法を拡張して面的な監視を行えるようにすれば、これまでにない簡便で効率的な構造物診断を実現できるのではないかと考え、次章に述べるようなセンサネットワークを研究するに至った。

3 ワイヤレスセンサネットワークによる鉄鋼設備診断

鉄鋼プラントでは多くの設備が広範囲に分散して配置されているため、すべてのセンサまで配線を敷設することは容易ではない。また操業中には立ち入れない箇所があるため、無人で長期間モニタリングをする技術が必要である。前章で開発した損傷記憶スマートパッチに加えて、大気環境下での腐食や破断を検知するための技術を組み合わせて、ワイヤレスセンサネットワーク (WSN) による構造物の面的監視を提案

することを試みた。

大気環境下での腐食に対しては、電気化学的な手法が適用できないため、篠原らが提案しているACMセンサ^{11,12)}を利用した。ACMセンサは、Fe-Ag対から構成されており、これまでに海洋性大気環境から住宅内環境までの広い範囲の環境に適用され、付着物を中心に様々な腐食性の評価に利用されてきた。その一方で、計測装置の寸法が比較的大きく、電源と配線を必要とすることが、WSN応用への課題であった。そこで筆者らは、広いダイナミックレンジを持つ対数アンプを組み込むことで計測レンジの切り替えが不要な電流測定回路を試作し、ZigBeeによる無線通信機能を追加することで、小型で軽量のACMセンサ用無線計測装置を開発した (図2)。また破壊検知のためには、構造体にRFIDタグ (電子タグ) を埋込、タグが破壊することによって破壊を検知する手法についても提案した¹³⁾。さらに、携帯電話通信網3Gを用いてインターネットへ接続する機器を開発し、構造物診断を行うWSNを構築した (図3)。

この研究をきっかけに、鉄鋼協会計測・制御・システム工学会会の「ワイヤレスセンサネットワークの鉄鋼応用」研究会に参加させて頂いた。実用面での課題を気づかされ、また思いがけないニーズがあることを知ることができ、大変貴重

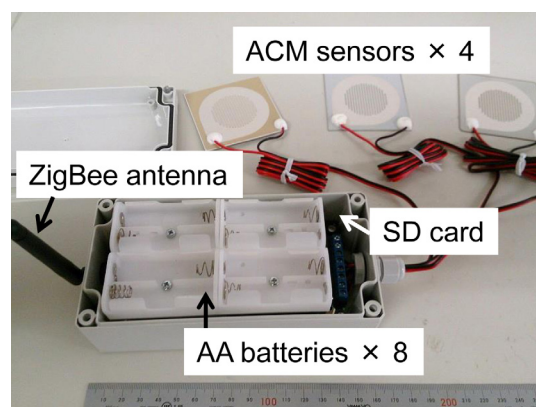


図2 ACM型腐食センサの無線化

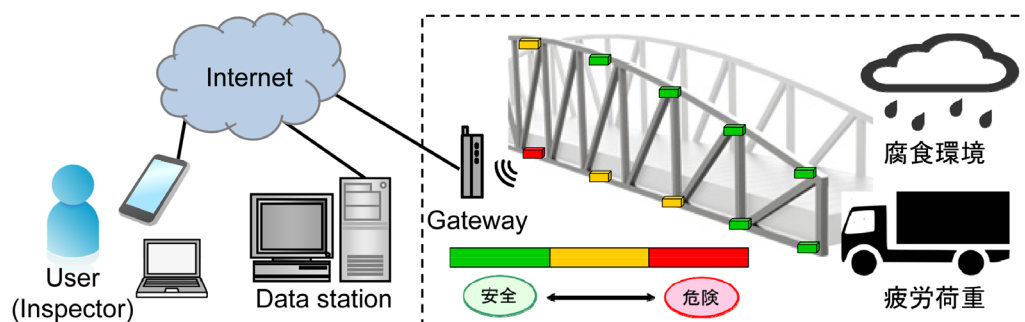


図3 構造物診断センサネットワークの概念図

な機会であった。この研究会では、環境発電の利用について具体的な検討をさせて頂いた。鉄鋼製造プロセスにおいては、例えば、圧延工程の振動発電から疲労診断することや、配管の熱発電から保温材下腐食 (CUI) をモニタリングすることが考えられる。ゼーベック効果を利用した熱発電では、適切な昇圧回路とキャパシタを用いることで、前述の無線計測器の自立駆動が十分可能であるという試算結果が得られている¹⁴⁾。WSNと環境発電の組合せは魅力的なものであり、研究例も多いが、発電電力が無線通信の消費に追いつかないことが常に課題となっている。近年注目されている圧縮センシングの手法を用いても、現状では数分の一程度の消費電力削減が限界である。一方で、筆者らが提案したWSNでは、桁違いに低頻度の計測で疲労と腐食環境のオンラインモニタリングが可能であるので、電力面でも十分実用可能であり、完全無電源のWSNを構築することは面白いと考えている。

今後の構造物診断では、いわゆるIoT (Internet of Things) 技術や、膨大なセンシングデータを扱うための技術が果たす役割が大きいと考えられる。そのような中でこそ、より有効な情報を引き出すためには、新しい特徴を持ったセンシング技術の開発が不可欠であり、その重要性はますます高まっている。引き続き、新たな計測診断技術の研究に取り組んでいきたい。

4 疲労寿命予測シミュレータの開発

前章までは、維持管理のための損傷劣化評価であったが、もうひとつの側面として、材料開発のための損傷劣化評価があると考えている。構造材料の多くは長期間使用され、人々の安心・安全に直接関わることから、その材料開発において

は、疲労性能を正確に評価することが重要である。通常は、疲労試験を行い、応力振幅と破断サイクル数の関係 (SN曲線) に安全率を適用し、構造設計されることが多い。しかしながら、その安全率の根拠は必ずしも明らかではなく、疲労寿命のばらつきを定量的に評価する必要がある。これまでに、確率論的破壊力学に基づく様々な疲労評価法が提案されており、簡便に疲労寿命のばらつきを評価できる利点があるが、組織制御を施した耐疲労鋼や、低変態温度溶接材など、新規的な材料への適用は困難である。したがって、今後の材料開発においては、微細組織や残留応力などの各因子が疲労寿命に与える影響を、定量的に評価する手法が必要である。そこで筆者らは、様々な物理モデルによるシミュレーションを組合せ、幅広い材料に対して有効な疲労性能予測システムの構築に取り組んでいる (図4)。これまでに、相変態を考慮した熱弾塑性解析や、結晶塑性シミュレーションを行うことで、溶接構造体の疲労寿命を予測する手法を提案している^{15,16)}。また、これらの計算結果は膨大であるため、機械学習などのデータ駆動型アプローチを適用することで、組織と繰返し応力ひずみ曲線の関係付けを行うなどの試みを行っている。さらに、すべてのパラメータを確率変数として扱うことで、組織の不均一性を考慮したシミュレーション結果と、データの不確実性を考慮した機械学習の結果をつなぎ合わせ、疲労寿命のばらつきを定量的に扱う枠組みの構築を目指している。特に、鉄鋼材料は階層的で複雑な微細組織を有するため、損傷劣化機構をマルチスケールに観察し、現実的かつ計算可能なモデルを構築する必要がある、大変難しいテーマであると実感している。また計算寄りの研究テーマであっても、実験的観察が非常に重要であることを再認識している。先人達の知見に基づきながら、最新の計測技術とシミュレーション、データ科学を上手に組合せることで、疲労き裂

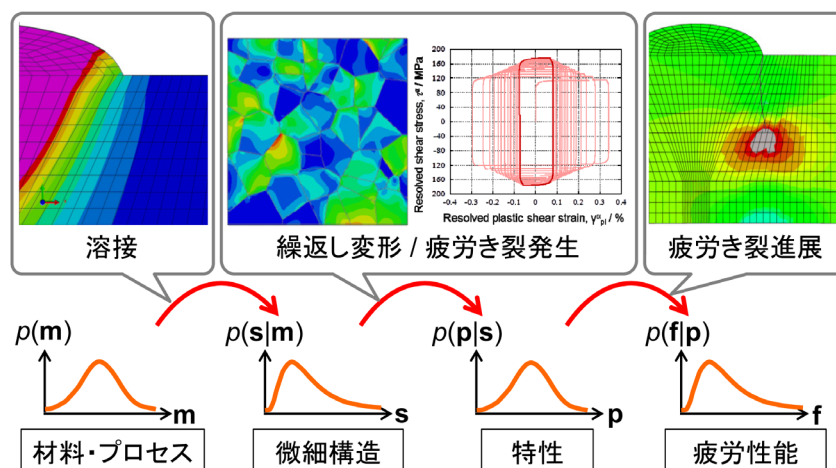


図4 疲労性能予測シミュレータの概念図

発生や微小き裂進展などの未知な領域を解明していき、鉄鋼材料に潜んでいる高い性能を引き出すための研究を進めていきたい。

5 おわりに

鉄鋼分野において、損傷劣化の評価には大きく2つの目的があると考えている。ひとつは、供用中の設備における鋼材の健康状態を診断し、寿命を予測し、維持管理に役立てるという使い方である。もうひとつは、鉄鋼材料の損傷劣化の素過程を明らかにし、破壊に至るまでのプロセスを解明し、材料開発へフィードバックするという役割である。筆者のこれまでの研究はその両面で取り組んできた。幸いにして周囲の方々に恵まれ、榎教授をはじめ、多くの先生方・先輩方のご指導と、後輩達の協力で研究を進めることができた。今後とも、多くの方々のご指導を賜りながら研究に邁進し、社会の安全・安心のために貢献できればと考えている。引き続き、ご指導ご鞭撻頂ければ幸いである。

参考文献

- 1) A.F.Grandt, R.L.Crane and J.P.Gallagher : Proc. of 4th International Conference on Fracture, 3, Waterloo, Canada, (1977), 19.
- 2) 藤本由紀夫, 濱田邦裕, 黄飛, 藤井健二, 新宅英司, 藤井堅, 西川貴則 : 日本造船学会論文集, 182 (1997), 705.
- 3) 村岸治 : 検査技術, 9 (2004), 93.
- 4) S.Nambu and M.Enoki : Mater. Trans., 48 (2007), 1244.
- 5) S.Nambu and M.Enoki : ISIJ Int., 47 (2007), 1687.
- 6) T.Shiraiwa and M.Enoki : ISIJ Int., 51 (2011), 250.
- 7) T.Shiraiwa and M.Enoki : Mater.Trans., 53 (2012), 690.
- 8) T.Shiraiwa and M.Enoki : ISIJ Int., 54 (2014), 2342.
- 9) T.Shiraiwa and M.Enoki : ISIJ Int., 51 (2011), 1480.
- 10) F.Yuan, T.Shiraiwa and M.Enoki : Mater. Trans., 55 (2014), 1464.
- 11) 篠原正 : ふえらむ, 11 (2006), 27.
- 12) 篠原正 : 材料と環境, 64 (2015), 26.
- 13) N.Ohashi, T.Shiraiwa and M.Enoki : Mater. Trans., 55 (2014), 1722.
- 14) 榎学, 白岩隆行, 村上岳央 : CAMP-ISIJ, 28 (2015), 17.
- 15) 白岩隆行, F.Briffod, 榎学 : CAMP-ISIJ 29 (2016), 809.
- 16) F.Briffod, T.Shiraiwa and M.Enoki : Mater. Sci. Eng. A, 695 (2017), 165.

(2017年4月21日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 腐食特性グループ 特別研究員

篠原 正

白岩さんは、材料の損傷劣化の評価に関する研究分野で活躍されており、その中で劣化挙動をどう計測するかということを大きなテーマとされている。実構造物での劣化の場合、これまで実用化されてきた技術は、比較的容易に人がアクセスできる部位に限られていた。すなわち、センサと測定器を対象箇所に置いて、定期的にデータ回収に行くか、あるいは複数のセンサが結線された中央制御によっていた。白岩さんはこれを打破し、現場から離れた場所、例えば自分の研究室で、劣化状況の実態を把握できるよう、ワイヤレスセンサネットワークを応用した計測システムの開発を進めている。そうした中で、私が白岩さんとお会いしたのは、2012年度から本協会が始まった計測・制御・システム工学部会「ワイヤレスセンサネットワークの鉄鋼応用」研究会においてである。研究会、講演大会等の他、腐食センサの実験のために私の実験室に来ていただいたときに交わしたディスカッションなどを通じて、感じたことをコメントさせていただく。

省資源、省エネルギーが世界共通の目標となって久しいが、白岩さんが述べておられるように、寿命予測や維持管理がいまだ重要な課題であることは言うまでもない。そのためには、モニタリング、計測技術が大変重要

となる。白岩さんの強み（魅力）は、損傷劣化の評価の重要性を理解しているだけでなく、そのためのセンサや増幅・通信回路の設計、製作が自身できるところである。私も、35年以上にわたる腐食・防食分野の研究の中で、腐食計測法とそれによる評価法の開発・発展に力を入れてきており、白岩さんをそうした自分とオーバーラップさせる部分が多々ある。とはいえ、私が腐食計測をやり始めた時代からすれば測定・通信回路技術の発展は著しく、羨ましい限りである。

大気腐食研究分野でいえば、この10年あまり、日本が中心となって、高温多湿なアジアとの共同研究が著しく進んでいる。白岩さんの無線計測システムがさらに発展すれば、日本国内のみならずアジア、ひいては全世界での腐食データの実時間的収集が可能となり、腐食機構の解明のみならず、防食対策も格段に進むのではないかと大いに期待している。

私が受けてきた数多くの腐食相談において、腐食を含めた損傷劣化が現場ではいかに切実な問題であるかを、毎回実感している。損傷劣化が研究室ではなく現場で起きているということを常に心に留め、損傷劣化評価研究に関して、高い目標を持ち続けていただきたいと願っている。

JFEスチール(株) スチール研究所 機械研究部 ロボティクス・自動化グループリーダー

四辻 淳一

白 岩先生との出会いは、本稿で紹介されている鉄鋼協会の研究会でした。東京大学 榎教授のご指導の下で研究されていた、スマートパッチに関する研究のご報告を拝聴させて頂きました。非常に優れた観察力と創造力を有した方だと感じております。

私自身は、長く鉄鋼分野における非破壊検査技術に関わっていましたが、用いていた手法としては電磁気・超音波などのアクティブな計測技術（エネルギーを与えてその反応を観察）でした。そのため、白岩先生が用いておられるパッシブな手法は、非常に興味深く新鮮な手法でありました。

昨今、IoT・機械学習などのビッグデータ周辺技術の進歩が目覚ましく、鉄鋼分野においてもその応用が広く検討されています。設備診断、保全計画効率化を目的として、構造物の異常検知もしくは寿命予測に応用するのは、その際鉄鋼プラントの広さ、監視すべき対象の多さを考慮すると、多点化・データ収集が容易なシステムが望まれます。また、プラント構造物の疲労損傷は、長期的な経時変化を観察する必要があり、耐久性とメンテナンス性も問われます。一つ一つのセンサ健全性を毎月

確認することは現実的ではありませんし、設置場所によっては半年に1回電池交換が必要という条件も非現実的です。そのような観点から白岩先生が取り組まれておられる技術を評価させて頂くと、非常に小型・低電力であり、ワイヤレス化も実現されており、“使える”最先端技術であります。鉄鋼分野ではこの“使える”すなわち“耐環境性に優れている”“保全性に優れている”点が重要です。プロセス監視などの現場における検査については、どんなに精密な測定が可能な技術でも実際に現場で使えなければ意味を為さない場合が多いのです。

白岩先生は、これまでもRFID・スマートセンサなどの先端技術を構造物診断に適用すべく試行されており、今回の研究会においてもスマートパッチという学術的に学ばれた手法を、我々産業現場からの要望に応える工夫を加えて実用化に近づけるなど、素晴らしい業績を残しておられます。新計測手法への意欲を持ち、データサイエンスへの取り組みもなさるなど、今後ますますのご活躍が期待されます。我々も一緒に“使える”新技術開発を行えば幸いと思います。