



機械・構造物の疲労評価のための調査・計測メニュー

Miyashita Kazuhiro
宮下 和大*1

機械や構造物における金属材料の疲労破壊に関する調査と計測方法を紹介する。疲労破壊は、金属材料に繰り返し応力が作用することで発生し、全体の破損要因の約80%を占め、構造物の健全性において重要な課題である。本稿では、疲労破壊が発生した後の調査・管理プロセスを説明し、各プロセスにて必要となる調査・計測技術を紹介する。具体的には、破断部の調査、材料試験、構造解析シミュレーション、風洞試験、振動試験、非破壊検査、健全性モニタリングなどの技術を取り上げ、疲労破壊の原因特定や対策立案に役立つ調査・計測メニューを紹介する。

キーワード： 疲労、損傷調査、材料試験、構造解析、非破壊検査、健全性モニタリング

1. はじめに

機械・構造物における金属部品・部材の破損要因は、主に疲労破壊の占める割合が多い。図1に、破損要因を整理した一例を示す。全体の59%は疲労破壊であり、疲労亀裂が起点となることが多い不安定破壊も合わせると全体の約

80%が疲労に起因する破損である⁽¹⁾。また表1に示す通り、疲労現象は社会的インパクトが大きい重大な事故の要因となることも少なくない。疲労損傷対策は、機械・構造物の健全性において、重要な課題であると言える。本稿では、金属疲労現象について述べた後に、疲労破壊が発生した

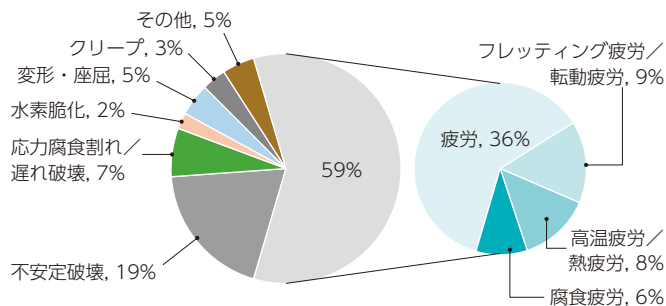


図1 金属部品・部材の破損要因 (1)

表1 社会的インパクトが大きかった疲労破壊による事故例 (1)

発生前年	事故名
1953-54	コメット号連続墜落事故
1985	JAL123 便御巣鷹尾根墜落事故
1995	高速増殖炉原型炉ナトリウム漏れ
1999	H2 ロケット破壊
2002	トレーラ・ハブ破損事故
2007	ジェットコースター横転事故
2017	新幹線 車両台車亀裂

*1：研究開発センター 研究開発グループ 非破壊検査技術者 ひずみゲージ試験レベル3

後の破壊事故調査・管理プロセスを説明し、各プロセスにて必要となる調査・計測メニューについて紹介する。

2. 金属疲労現象

金属疲労破壊は、金属材料に繰り返し応力が作用することで発生する破壊のことを指す。疲労破壊は、静的破壊を生じる応力（引張強さ）に比べて小さい応力にて発生する。そのため、応力変動を繰り返し受ける部品では、疲労破壊が発生することが懸念される。この疲労破壊は、応力変動の繰り返しに伴い亀裂が発生、徐々に進展して、外観上大きな変形を伴わずに破断に至る。特に亀裂発生初期は応力変動に伴う亀裂の開閉口挙動も小さく、目視点検などで発見することが困難な場合が多い⁽¹⁾。このため、破損が発生した場合には、詳細な調査が必要となる。次に、疲労評価のための調査・計測メニューについて説明する。

3. 疲労評価の調査・計測メニュー

金属材料が何らかの原因で破損した場合、材料の破壊様式を調べるところから、破損評価が開始される。金属材料は破壊様式ごとに、特徴的な破断面を示す。したがって、金属材料の破断した面（以下、破面）調査し、破壊様式を特定できれば、材質、形状、使用状況などの情報と併せて破損の主要因を推定して、対策を立案することができる⁽²⁾。また、対策の実施後に継続的に状態を監視すれば、健全性の把握、補修の要否や、その時期の明確化が可能である。図2に、金属材料に破壊が発生した場合の破損調査～原因特定～対策～保守の流れの例を示す。

当社は、図2の「①情報収集」から「⑥保全および状態監視」に関する技術を保有しており、各種サービスを提供可能である。本稿では、疲労破壊を取り上げ、「②破断部の調査」、「④検証のための再現試験、解析」、「⑥保全および状態監視」に関連するサービスを紹介する。

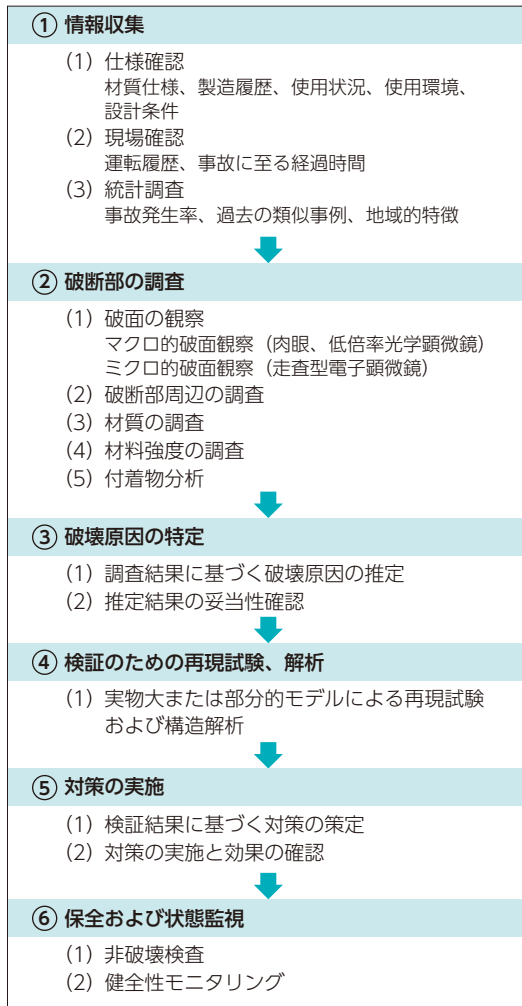


図2 破壊事故調査・管理プロセス(文献(2)を参考に作成)

4. 疲労破壊調査に関する各種検査・計測技術の紹介

4.1 破断部の調査

4.1.1 破面の観察

破損した部材の外観・破面には破損原因に関する情報が多く残されており、その特徴から破損原因が明らかになる場合がある。破面の観察方法としては、目視や実体顕微鏡を用いたマクロ的観察と、走査型電子顕微鏡を用いたミクロ的観察がある。

疲労破壊した破面を例に挙げて説明する。疲労破壊した際の破面には、マクロ的観察では応力履歴に応じたビーチマークと呼ばれる貝殻状模様

が、ミクロ的観察ではストライエーションと呼ばれる縞模様が見られる場合があり、これが観察されれば疲労破壊であると推定できる。ボルトの疲労破面を観察した例を図3に示す。左側のマクロ的観察では、上側に亀裂の発生点（以下、起点）があり、下に円弧状に広がるビーチマークが見られる。また、右側の走査型電子顕微鏡によるミクロ的観察では、亀裂進展の軌跡である縞状模様のストライエーションが確認される。

破面の観察は破壊の起点、進展方向や速度を推測するためにも重要である。ビーチマークは、振幅や応力レベルなどの変動や停止によってできるものであり、破壊の進行過程を推測する手掛かりとなる。ストライエーションは、疲労亀裂が進展する際の一周ごととの進展量に関係し、応力の大きさや頻度を推測することができる。これらの観察結果を総合的に分析することで、疲労破壊原因の推定に関する重要な情報が得られる。なお図3は十分情報が得られた場合の例であるが、破損品は2次的破損で1次破面が潰れて情報が得られなかったり、錆の発生によって情報が消失する場合が多い。そのため、破損品を調査する場合には、破損後に観察を行うまでの間、なるべく破面が変化しないよう、破面維持に十分な注意を要する。

4.1.2 材質の調査

(1) 材料の成分分析

金属材料の成分を分析することで、使用され

ている材料が設計仕様や規格に適合しているかを確認できる。また、金属内の介在物は疲労亀裂の起点となるため、介在物を作る成分（硫黄など）の含有量の確認も重要である。

(2) 金属組織の観察

金属組織の観察から、使用材料が所定の特性を得るために正しく加工・熱処理されていたかを判断することができる。また、破損品の断面形状を確認することで、起点や亀裂進展の情報を得ることができる。

さらには、金属組織中の不純物や介在物、結晶粒の大きさや析出物の分布を詳しく分析することで、疲労強度に影響を与える要因を特定できる場合もある。

(3) 硬さ試験

使用されている材料の硬さが仕様で定められている場合、それに適合しているかどうかを確認できる。硬さ計測方法はさまざまあるが、微小領域の計測ができる方法も多いため、局所的な材料強度の変化を確認する目的でも用いられる。材料の硬さは、その強度と関連することが知られており、硬さが高い材料は一般に引張強度や圧縮強度が高く、疲労限度も高い傾向がある。ただし過度に硬い場合は脆性が増し、疲労亀裂の発生が早まる可能性がある。

硬さ試験は、材料の均一性や局所的な強度の変化を評価することができるため、応力集中の

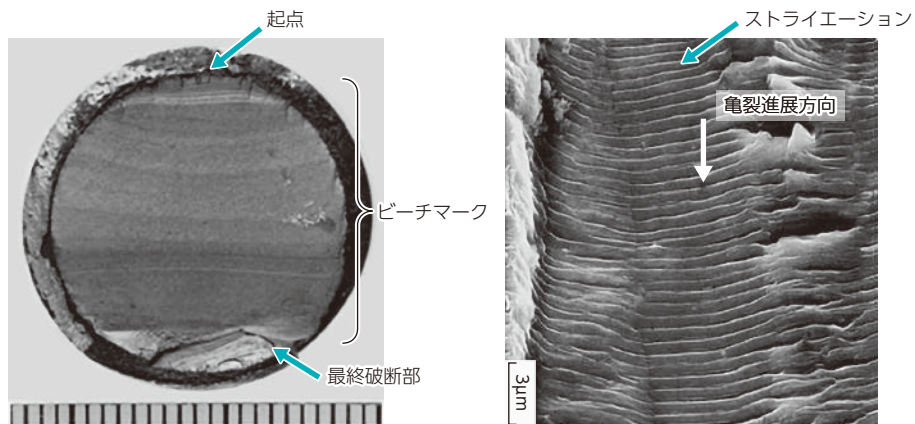


図3 ボルトのマクロ的観察（左）と走査型電子顕微鏡によるミクロ的観察（右）⁽³⁾

原因となる不均一性、表面硬化処理や残留応力の影響など、疲労破壊の原因を特定するための情報を調査することができる。

4.1.3 材料強度の調査

引張、曲げ、圧縮、衝撃、疲労試験などにより材料強度を調査することで、使用されている材料の機械的特性が仕様や規格に適合しているかどうかを確認できる。

当社では、標準試験片のみならず、特殊形状の強度試験も対応可能であり、製品の使用状況を模擬して強度を確認することもできる。また、各種材料での極低温 (-196℃) から高温 (1000℃) での試験にも対応している⁽⁴⁾。さらにデジタル画像相関法 (DIC 法) による応力分布測定、アコースティックエミッション法 (AE 法) による損傷箇所特定など各種計測手法を組み合わせることも可能である⁽⁵⁾。

(1) 引張試験

引張試験は、材料に引張荷重を加えてその応力 - ひずみ特性を評価する試験である。引張強度、降伏強度、伸び、絞りなどの特性を測定することで、材料の静的特性を評価できる。一般的には引張強度と疲労限度に比例関係がみられることから、疲労評価においても引張強度は重要な指標である。なお高強度材料は、材料の微小欠陥や不純物へ感受性が増し、疲労強度が比例的に上昇しない場合がある。

(2) 曲げ試験

曲げ試験は、材料に曲げ荷重を加えてその耐久性を評価する試験である。曲げ強度や曲げ弾性率を測定することで、材料の曲げに対する強度を評価できる。

(3) 圧縮試験

圧縮試験は、材料に圧縮荷重を加えてその変形特性を評価する試験である。圧縮強度や圧縮弾性率を測定することで、材料の圧縮に対する強度を評価できる。

(4) 衝撃試験

衝撃試験は、材料に瞬間的な荷重を加えてその靱性、すなわち材料の脆性破壊に対する抵抗力を評価する。

(5) 疲労試験

疲労試験は、材料に繰り返し荷重を加えてその疲労寿命を評価する試験である。何種類かの応力条件で試験し、それぞれの破断回数から S-N 曲線 (応力 - 寿命曲線) を作成することで、材料が特定の応力条件下でどの程度の繰り返しに耐えられるかを評価する。

また、実際の使用条件に近い状況で、部材の耐久性や疲労破壊挙動を評価するための試験もある。図 4 に、T 溶接継手に対して疲労試験を行った例を示す。応力が集中する溶接止端部からの疲労破壊が確認された。

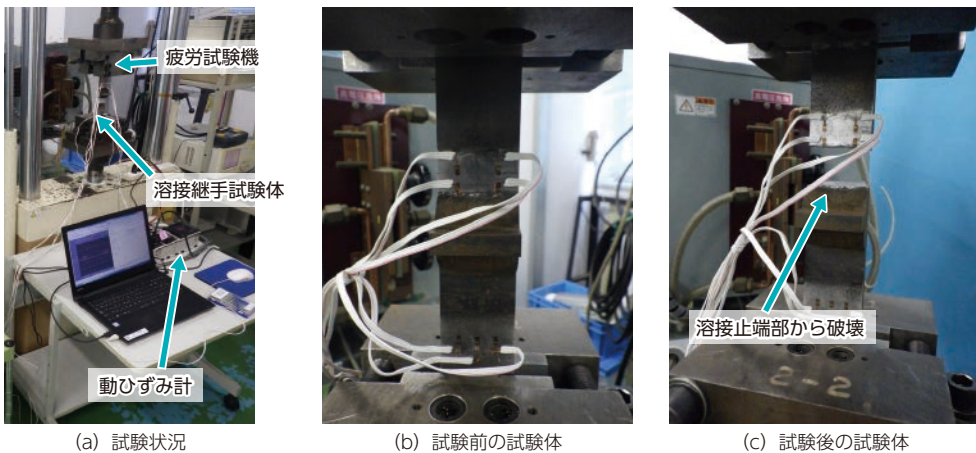


図 4 溶接継手試験体での疲労試験

4.1.4 付着物分析

金属表面の付着物を調査することで、腐食などが影響する破損の原因を特定できる場合がある。腐食要因を特定したり、腐食による損傷状況を確認するための分析方法はさまざまある。表面に付着したものの分析には、エネルギー分散型X線分析(EDS: Energy dispersive X-ray spectroscopy)、蛍光X線分析(XRF: X-ray Fluorescence)⁽⁶⁾などが有効である。断面で局所的な様相を分析するには電子プローブX線マイクロアナライザー(EPMA: Electron probe X-ray microanalyzer)⁽⁷⁾が適している。図5はEPMAによる元素のマッピングを行った例である。これは金属の表面に生成した酸化スケールの成分を調査しているが、他にも腐食の原因となる元素(例: 塩素Cl)の分布から腐食の影響を調べることができる⁽⁸⁾。

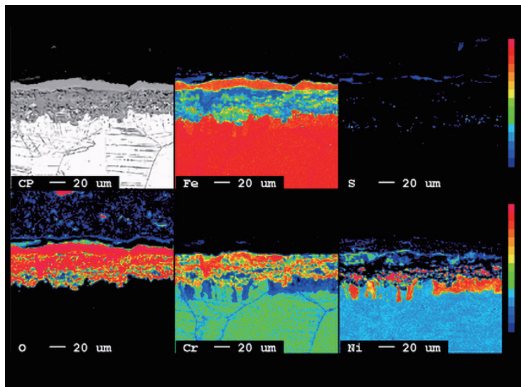


図5 EPMAによる元素のマッピング⁽⁷⁾

4.2 検証のための再現試験、解析

4.2.1 実構造体の応力測定

実構造体の応力測定は、構造部に発生する応力を直接測定できることから、疲労特性や構造物の健全性を評価するために非常に有効な手法である。一般的には、構造物の中で応力が集中しやすい部分から、構造体は疲労破壊するため、疲労評価において応力集中部の測定を行うことで疲労寿命をより正確に予測できる。ここで、応力集中は溶接やボルト接合部や形状が急激に変化する箇所

に生じるが、より正確な特定には、FEM (Finite Element Method、有限要素) 解析によるシミュレーションが有効である。

4.2.2 シミュレーション(応力)

疲労破壊が発生した部材に対するFEM解析は、発生した応力の把握や破壊挙動の評価に有効である⁽⁹⁾。FEM解析とは、構造物を小さな要素に分割し、それらの要素の性質を数値化して計算することで、全体の挙動を求める解析である。

疲労破壊評価においては、FEM解析により応力集中部位を特定し、他の部分よりどの程度応力が高くなるかを求めることで、再発防止策の策定につながる。

下記の図6は溶接継手の応力解析を行った例である。溶接部近傍に応力が集中していることが分かる。

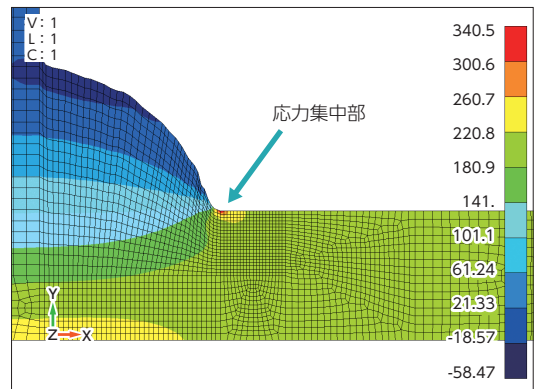


図6 溶接継手の応力解析

4.2.3 実構造体のアコースティック・エミッション測定

AE法は、材料に力を加えたときに発生する微細な音波を利用して、材料の初期の破壊現象を捉える技術である(図7)。AE法を用いることで、構造物の損傷具合を評価することができる。固体材料に応力を負荷してAEが発生すると、再度負荷した際に、前回の応力を超えるまでは、AEがほとんど生じないという現象がある(カイザー効果)⁽¹⁰⁾。しかし、材料に亀裂が生じると、この現象は見られなくなる。この特性を利用して、構造物の診断や

損傷具合を評価することができる。また、対象物に複数のAEセンサを取り付けて測定することで、損傷位置を特定できる場合がある。

当社では、AE計測システムの販売・保守、および計測サービスを提供している⁽¹¹⁾。

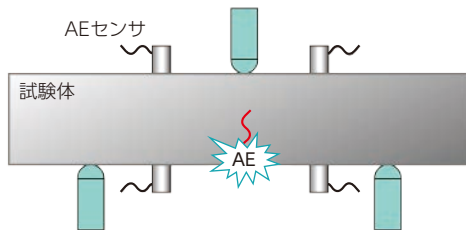


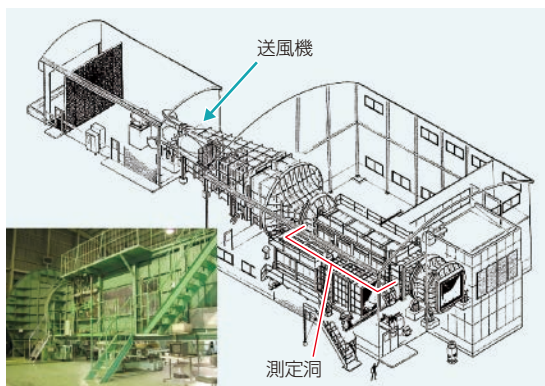
図7 AE試験の概念⁽¹¹⁾

4.2.4 風洞試験

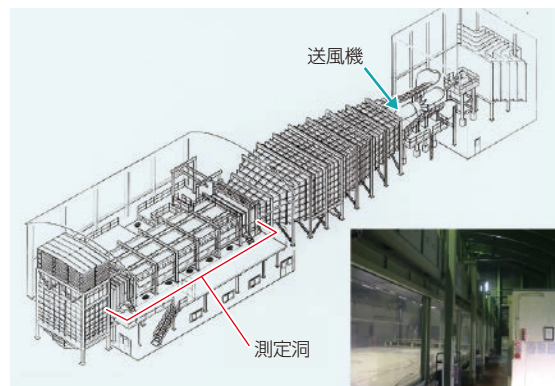
建築、土木構造物は風により変形や振動などが生じて、部材に繰り返しの応力が負荷され、疲労破壊が生じる場合がある。風による振動現象を調査するには風洞試験が有効である。当社では、風洞試験設備に構造体の実物もしくは縮尺モデルを設置して、風が与える影響を評価する試験を、その計画、モデル作製から実施、解析まで提供している⁽¹²⁾。図8は設備の様子である。ここで風洞試験を実施し、風速、変位、振動、風力などを計測する⁽¹³⁾、⁽¹⁴⁾。また、図9は橋梁の縮尺モデルを設置した風洞試験の例である。

4.2.5 振動試験

振動試験は、構造体に動的荷重を強制的に負荷する試験である。この試験では固有振動数などの



(a) 測定洞：幅 1.5 m × 高さ 2.5 m × 長さ 8 m



(b) 測定洞：幅 6 m × 高さ 3 m × 長さ 24m

図8 風洞試験設備

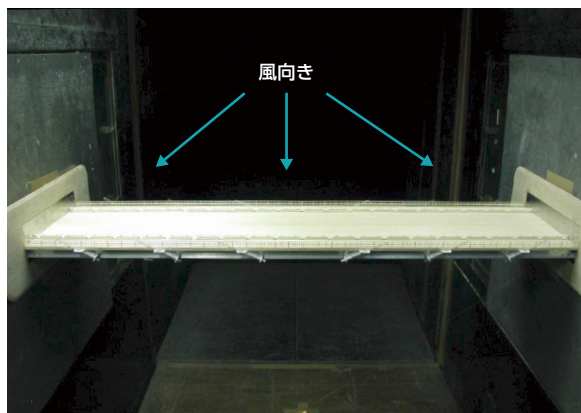


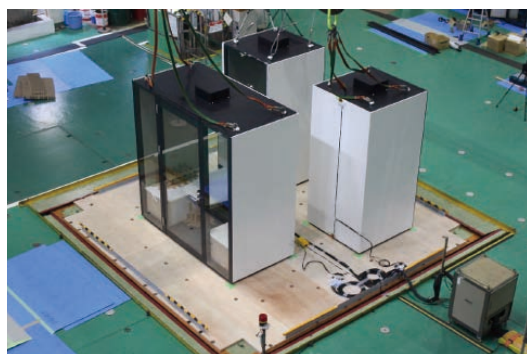
図9 橋梁の縮尺モデルを設置した風洞試験（計測項目：風速、変位、振動、風力）

構造体の振動特性を評価することができ、さらに応力測定を併用することで、振動時に構造体が受ける応力などの情報を得ることができる。

当社では、IHI 横浜事業所内の耐震実験場の振動台を用いた試験サービスを提供している。この振動台のテーブルは 4.5m 四方の大きさで、最大 35 トンまでの試験体に対応でき、水平 2 方向と垂直の並進に加え、各方向の回転自由度の 6 方向の振動を検討することができる⁽¹⁵⁾、⁽¹⁶⁾。図 10 は、耐震試験の例を示す。

4.3 保全および状態監視

損傷の原因を究明し、対策を施して、実機での供用を再開した後は、継続的に保全および状態監視を行うことで、破壊の発生を予知し、未然に防ぐことができる。この章では、保全もしくは、状態監視のために提供可能なサービスを紹介する。



4.3.1 非破壊検査

2 章で述べた通り、疲労破壊は、材料に繰り返し応力が作用することで発生する。疲労破壊のプロセスとしては、材料表面から微小な亀裂が発生し、亀裂が進展していき、最終的に材料が破断する現象である。疲労亀裂は重大な破壊を引き起こす可能性があるため、早期に検知して、適切な補修を行うことが重要である。

亀裂を有する部材に対して「破壊力学」を用いれば、亀裂の進展から材料の破断までの疲労寿命を定量的に評価できる。ただし、この方法で疲労寿命を評価するためには、疲労亀裂の発生を確実に検出して、精度良く寸法を測定することが必要となる。材料表面にある亀裂を検出する非破壊検査の手法としては、浸透探傷試験 (PT)、磁粉探傷試験 (MT)、渦電流探傷試験 (ET) がある。

各手法の探傷性に関する比較を表 2 に示す⁽¹⁷⁾。

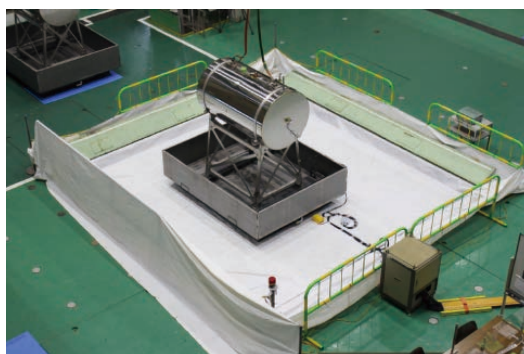


図 10 Web 会議向けブース (左)、燃料タンクの耐震試験 (右)

表 2 浸透探傷試験、磁粉探傷試験、渦電流探傷試験の比較⁽¹⁷⁾ (文献 (17) を元に作成)

探傷法			浸透探傷試験 (PT)	磁粉探傷試験 (MT)	渦電流探傷試験 (ET)
対象とする材質	金属	強磁性体	○	○	○
		非磁性体	○	×	○
	非金属		○	×	×
対象とするきず	表層部	表面開口	○	○	○
		表面非開口	×	○	○
きずに関する情報	寸法	寸法 (長さ)	○	○	△
		寸法 (高さ)	×	×	○
	きずの種類判別		△	△	△
主な適用例			鉄鋼材料、非鉄材料： ピレット、鋳鋼品、 角・丸棒、管、板、 溶接部、機械部品など	鉄鋼材料： 対象は PT と同じ	鉄鋼材料、非鉄材料： 管、線、細い丸棒、 機械部品など

○：適用可能、△：適用困難、×：適用不可能

非破壊検査手法は検出したい亀裂などに応じて選択する。

当社は、表 2 に示す検査以外にも、内部検査が可能な各種非破壊検査の出張検査や持ち込み検査に対応可能である⁽¹⁸⁾。

4.3.2 健全性モニタリング

健全性モニタリングは、機械や構造物の応力変動や振動特性などを監視することで、劣化状況を把握することができ、故障や事故を未然に防ぐことを目的とする。これにより、安全性の確保、設備の寿命延長、コスト削減、効率性向上が期待される。以下に、当社が提供可能な健全性モニタリングサービスについて、説明する。

(1) スマモニ[®]を使った簡易モニタリングサービス

構造物や機械などの疲労特性を分析するためには、使用中の応力状態を一定期間モニタリングする必要がある。このモニタリング期間と

しては、構造物の種類や使用条件に応じて異なる。疲労現象は、多くの場合一定回数の繰り返し負荷で亀裂が発生しなければ、以降も亀裂は発生しないことが知られている。そのため、負荷の頻度が高い場合は短期間で一定の繰り返し数に到達し、評価結果が得られるが、低頻度や季節による環境変化を考慮する場合は長期間(数カ月～年単位)の計測が必要となる。

当社は動ひずみ計などの計測機器を用いた応力計測サービスは提供しているが、長期間計測にはコスト的に不向きであることから、低コストでの遠隔モニタリングを実現するために「スマモニ[®]」という、小型無線システムの開発を進めている⁽¹⁹⁾、⁽²⁰⁾。図 11 にスマモニ[®]の外観とシステムを示す。またモニタリングをもとにした疲労寿命解析システムを図 12 に示す。これは、疲労損傷をモニタリングしたい構造物にひずみゲージを貼り、ひずみ情報を常時スマモニ[®]

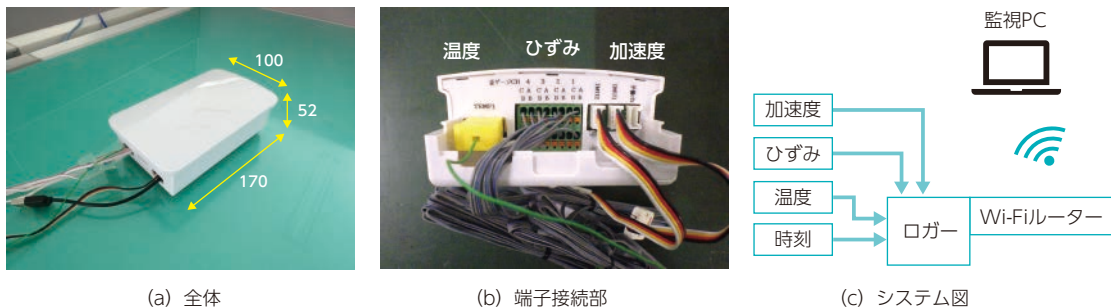


図 11 スマモニ[®]の外観とシステム⁽²⁰⁾

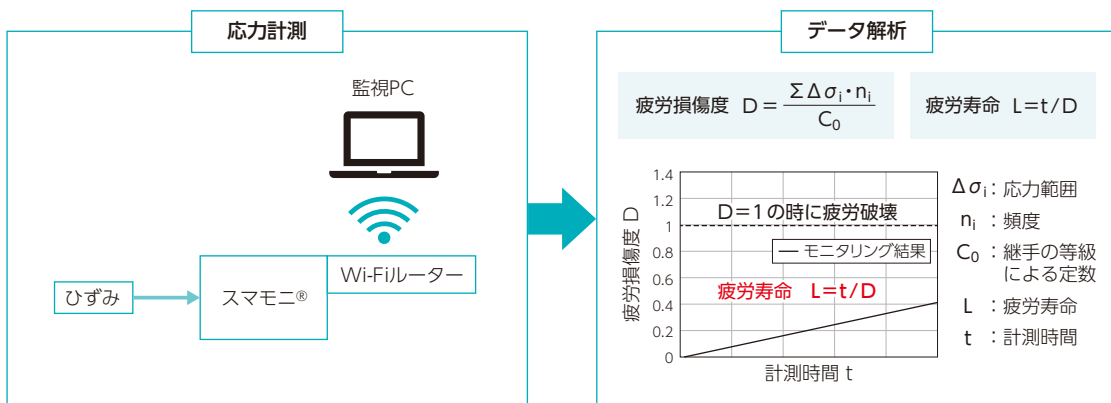


図 12 疲労寿命評価フロー（疲労寿命評価は鋼構造物の疲労設計指針⁽²¹⁾を元を実施）

でモニタリングしながらデータを監視用 PC に送り、鋼構造物の疲労設計指針⁽²¹⁾に則り疲労損傷の度合いを算出するというものである。現在、現地に常駐することなく、長期間の疲労モニタリングする計測サービスを提供している。

(2) FBG (Fiber Bragg Grating) センサによる長期モニタリングシステム

応力計測において、電気抵抗式のひずみゲージが使用されることが一般的であるが、ゲージ内には金属箔があるため温度、紫外線、疲労、環境などに対して一定の使用限界があり、また防爆性を要する環境では使用が困難である。これらを解決するため、当社では、屋外で5年間計測可能な固着剤と一体型のFBG センサを日東電工株式会社と共同開発した(図13)⁽²²⁾。

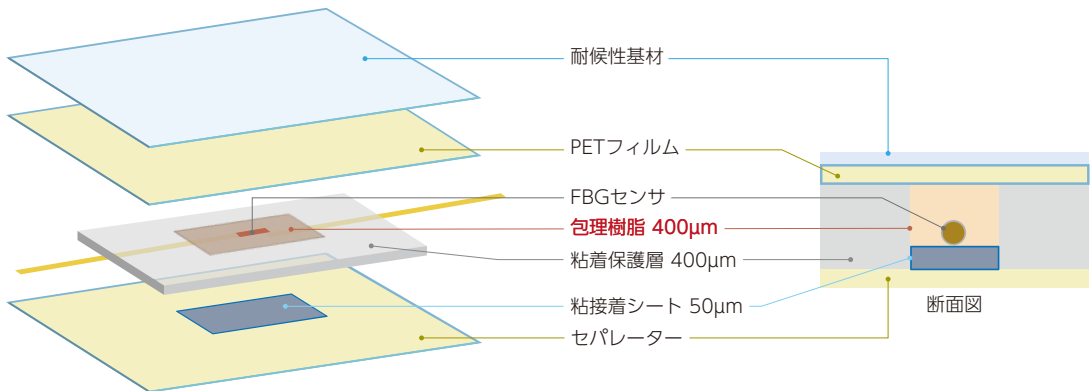


図13 長期計測可能な固着剤一体型FBG センサ⁽²²⁾

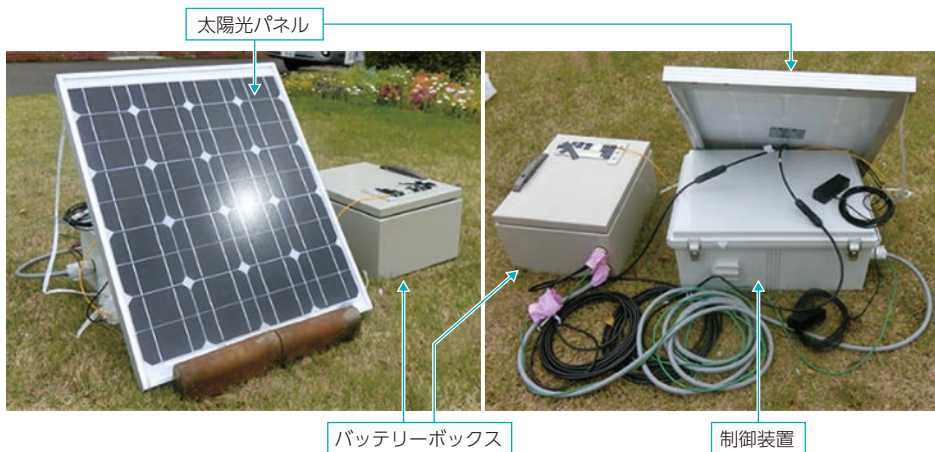


図14 FBG センサを用いた長期モニタリングシステム (左: 正面、右: 背面)⁽²²⁾

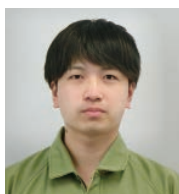
また、太陽光パネルを用いることで、外部電源不要な遠隔モニタリングシステムを開発している(図14)⁽²²⁾。これらを用いることで、長期間の応力状態、亀裂の進展⁽²³⁾、温度のモニタリングが可能となる。

5. まとめ

本稿では、疲労評価を例として、当社が提供している試験、シミュレーション、検査、モニタリング技術などを紹介した。当社では、疲労評価のみならず、各種試験サービス、モニタリングサービスなどを提供している。試験や計測を組み合わせることで、さまざまな課題を解決できるので、気軽に相談いただければ幸いです。

参考文献

- (1) 武正文夫：疲労損傷モニタリングのための基礎技術、IIC REVIEW, No.72、2024/10、pp.3-10、https://www.iic-hq.co.jp/library/072/pdf/072_02.pdf
- (2) 辻、水越、他：金属材料の破壊原因の調査方法、大阪府立産業技術総合研究所報告、No.10、1997、[https://orist.jp/dl/izumi/archive/shohou10/TRI10\(1997\)19.pdf](https://orist.jp/dl/izumi/archive/shohou10/TRI10(1997)19.pdf)
- (3) IHI 検査計測 HP：損傷調査と原因究明、その対策、<https://www.iic-hq.co.jp/services/S-04-14/>
- (4) IHI 検査計測 HP：機械試験、<https://www.iic-hq.co.jp/services/S-04-01/>
- (5) 櫻井香織、田中丸天兵：材料強度試験への計測サービス適用、IIC REVIEW, No.72、2024/10、pp.18-26、https://www.iic-hq.co.jp/library/072/pdf/072_04.pdf
- (6) IHI 検査計測 HP：蛍光 X 線分析 (XRF)、<https://www.iic-hq.co.jp/services/S-03-12/>
- (7) IHI 検査計測 HP：電子プローブ X 線マイクロアナライザー (EPMA)、<https://www.iic-hq.co.jp/en/services/02/03.html>
- (8) IHI 検査計測 HP：損傷調査 - 応力腐食割れ (SCC)、<https://www.iic-hq.co.jp/services/S-04-16/>
- (9) IHI 検査計測 HP：FEM 解析、<https://www.iic-hq.co.jp/services/S-05-01/>
- (10) 一般社団法人日本非破壊検査協会：アコースティック・エミッション試験 I、2006、pp.6
- (11) IHI 検査計測 HP：アコースティック・エミッション (AE) 音で状態を知る技術、<https://www.iic-hq.co.jp/services/S-02-13/>
- (12) 三船正純、三上隆雄、堀永和男：研究開発支援のための技術、IIC REVIEW, No.40、2008/10、pp.75-101、https://www.iic-hq.co.jp/library/040/pdf/040_05.pdf
- (13) 朝倉悠太、上島秀作：風洞試験による構造物の対風振動の評価、IIC REVIEW, No.61、2019/4、pp.24-31、https://www.iic-hq.co.jp/library/061/pdf/061_05.pdf
- (14) 中村純生：風洞の高風速化への一例、IIC REVIEW, No.51、2014/4、pp.60-64、https://www.iic-hq.co.jp/library/051/pdf/051_10.pdf
- (15) 片岡威：巨大地震を想定した耐震性能試験、IIC REVIEW, No.50、2013/10、pp.62-67、https://www.iic-hq.co.jp/library/050/pdf/050_09.pdf
- (16) IHI 検査計測 HP：大型振動台による耐震試験 / 振動試験、<https://www.iic-hq.co.jp/services/S-02-14/>
- (17) 一般社団法人日本非破壊検査協会：非破壊試験技術総論
- (18) IHI 検査計測 HP：出張検査・持ち込み検査、<https://www.iic-hq.co.jp/services/S-01-08/>
- (19) IHI 検査計測 HP：スマモニ[®]を使った簡易モニタリングサービス、<https://www.iic-hq.co.jp/products/P-11-04/>
- (20) 鈴木優平：簡易モニタリングシステムの開発 (その 1)、IIC REVIEW, No.72、2024/10、pp.40-42、https://www.iic-hq.co.jp/library/072/pdf/072_07.pdf
- (21) 社団法人日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例一 2012 年改定版一
- (22) IHI 検査計測 HP：光ファイバを利用した FBG (ファイバ・ブラッグ・グレーティング) 計測技術、<https://www.iic-hq.co.jp/services/S-02-15/>
- (23) 福本伸太郎、鈴木優平、寺岡毅、横山勇気、塩谷智基：穿孔法による死荷重計測を用いたトラス橋の耐力評価および FBG センサによる疲労き裂進展無線モニタリング、IIC REVIEW, No.68、2022/10、pp.27-31、https://www.iic-hq.co.jp/library/068/pdf/068_06.pdf



研究開発センター 研究開発グループ
非破壊検査技術者 ひずみゲージ試験レベル 3

宮下 和大

TEL 045-791-3522

FAX 045-791-3547