



疲労損傷モニタリングのための基礎技術

Takemasa Fumio

武正 文夫*1

1. はじめに

2011年にドイツで提唱されたIndustry4.0を皮切りに、米国、中国、日本といった国々でIoTやデジタル技術を活用した製造業の高度化を目指す産業政策が掲げられた。また、持続可能な開発目標（SDGs）が2015年9月に国連で採択されて以降、製造業にとどまらず、機械・設備・インフラ構造物など技術に関わる業界全体においても、エネルギーの効率化や環境保護など、新たな観点での役割や価値が重要視されるようになってきた。

これらを背景に、センサやデータ分析、データ記録、通信などモニタリングに関わる技術も発展するとともに、適用対象の裾野が広がることにより、関連装置がより手軽に利用できるような環境となってきた。従来対象外であった機械・構造物

でも、リアルタイムでの遠隔モニタリングや予知メンテナンスが実施可能となっている。

ここでは、機械・構造物の損傷要因として最も多い金属材料の疲労損傷を取り上げ、そのモニタリングに対するニーズや適用される場面の整理と、実施する上で必要となる基礎的な技術を概説する。

2. 金属疲労

2.1 金属疲労が要因となる機械・構造物の破損

図1に機械・構造物における金属部品・部材の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%が疲労が

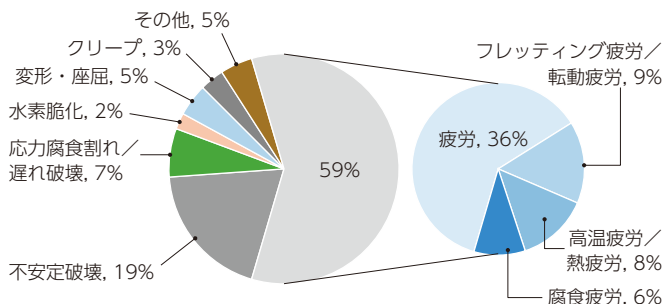


図1 金属部品・部材の破損要因

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

発生年	事故例
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：元エグゼクティブ・フェロー
一般社団法人 日本機械学会 名誉員・フェロー

要因となる破損である。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・構造物に関わる者の重大な課題であると言える。

2.2 金属疲労現象

(1) 疲労破壊

材料に荷重が負荷されることにより材料内に応力が発生する。疲労はこの応力が繰り返し変動することで起こる。疲労による破壊は静的な破壊と比べ低い応力で生じる。そのため、応力変動を繰り返し受ける部品や部材には、設計・製造・運用を通して疲労を考慮した対策が必要となる。

図 2 のように金属の一般的な疲労破壊過程は、①応力変動の繰返しに伴い材料の表面に生じるすべり変形もしくは介在物などを起点として亀裂が発生、②繰返しに伴い亀裂が進展、③残断面が減少し荷重に耐えられず静的最終破断に至るという経過をたどる。静的負荷のもとでは延性を示す材料でも、応力変動の繰返しに伴い亀裂が徐々に進展するため、外観上大きな変形を伴わず破断に至る場合が多い。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。

(2) 疲労強度 (S-N 曲線)

材料の疲労強度は一定の応力変動が繰り返されたときに破断が生じるまでの応力変動の繰返し数によって整理される。破断までの繰返し数を疲労寿命という。応力変動は図 3 のように、一サイクル中の応力の最大値を σ_{max} 、最小値を σ_{min} とすると、下式で示される応力振幅 σ_a もしくは応力範囲 $\Delta\sigma$ 、平均応力 σ_m 、応力比 R で表される。

$$\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2 \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \quad (2)$$

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2 \quad (3)$$

$$R = \sigma_{min} / \sigma_{max} \quad (4)$$

平均応力を一定としたときの、応力振幅 σ_a もしくは応力範囲 $\Delta\sigma$ と破断までの繰返し数 N

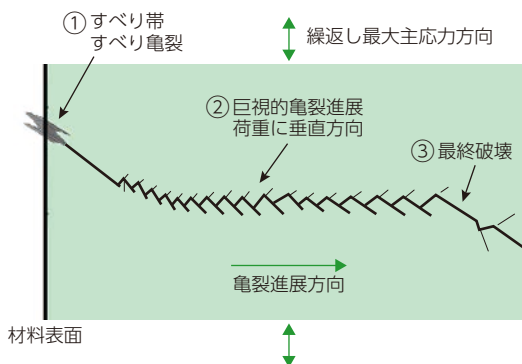


図 2 疲労破壊概念図

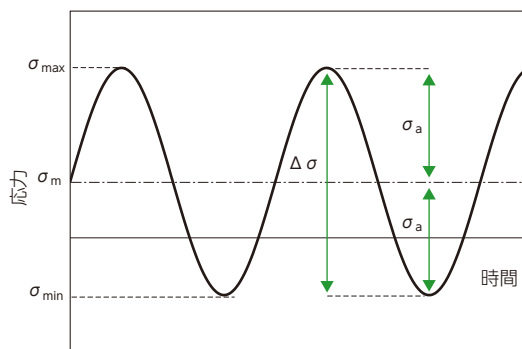


図 3 繰返し応力

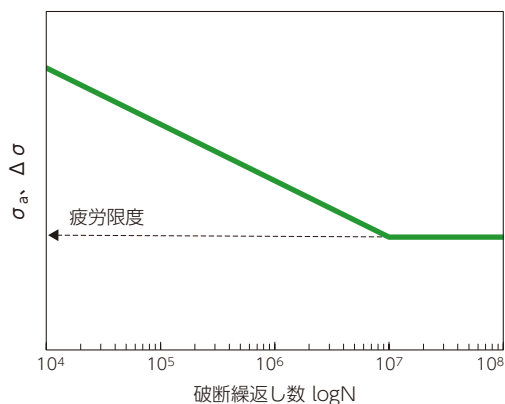


図 4 S-N 曲線

の関係を表す線を S-N 曲線という。図 4 に代表的な S-N 曲線の形を示す。S-N 曲線により指定した繰返し数 N で破断を生じさせる $\sigma_a(N)$ 、 $\Delta\sigma(N)$ を求めることができ、それを時間強度という。

炭素鋼などの鉄鋼材料では σ_a 、 $\Delta\sigma$ がある値以下で $N=10^6 \sim 10^7$ 回以上繰り返しても破断しない現象が現れる。この限界の σ_a 、 $\Delta\sigma$ を疲労限度といい、それ以降のS-N曲線を水平とする。一方、アルミニウム合金などほとんどの非鉄材料や、鉄鋼材料でも高温や腐食環境下では、明確な疲労限度を示さない。この場合でも、便宜上 $N=10^7$ 回の σ_a 、 $\Delta\sigma$ を疲労限度の代わりに用いることがある。

なお、破断繰返し数が $10^4 \sim 10^5$ 回より短い条件を低サイクル疲労といい、長寿命側の高サイクル疲労と区別して取り扱われる。この条件では最大・最小応力が材料の降伏点を超え塑性域に入るため、疲労強度は応力と破断繰返し数の関係に代わってひずみと破断繰返し数の関係で整理される。

金属の疲労現象は、材料の組成や微細構造、製造プロセス、表面状態、部材寸法、環境などさまざまな条件に影響を受ける。そのため、S-N曲線上ではバラツキが大きくなり、統計的な処理が行われる。図5のように破壊確率Pをパラメータとして明示的に表すP-S-N曲線を用いることもある。実現象を把握する必要がある損傷評価時などでは $P=50\%$ のS-N曲線、安全性が重要な設計時では下限値もしくは安全係数により下げたS-N曲線など、それぞれの目的に応じて評価に使用する強度が設定される。

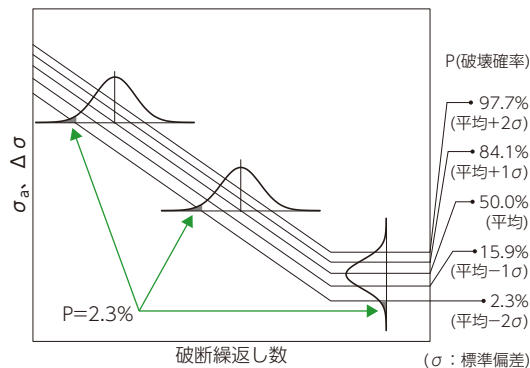


図5 P-S-N曲線

3. 機械・構造物の疲労を考慮した設計法と保全法

図6は一般的な機械・構造物の企画・開発から廃棄・更新までのライフサイクルを模式的に示した図である。繰返し荷重を受ける機械・構造物では、サイクルの中の廃棄・更新以外全ての場面で、疲労への考慮が必要となる。本章では、疲労損傷モニタリングに主として関係する設計と保全に関して以下に概説する。

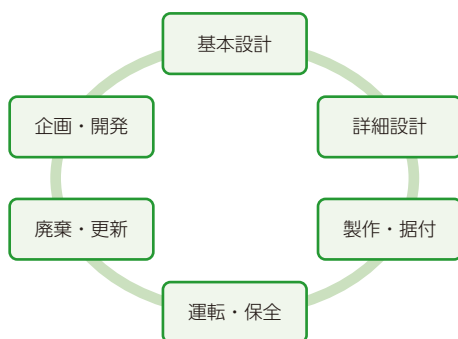


図6 機械・構造物のライフサイクル

3.1 疲労設計法

機械・構造物の設計において疲労を考慮する方法は、大別して疲労による破断強度を表すS-N曲線を用いる方法と疲労亀裂の進展を推定する破壊力学を用いる方法がある。

(1) S-N曲線を用いる方法（疲労限度設計・安全寿命設計）

上述のS-N曲線を用い、対象とする機械・構造物の供用期間中に疲労破壊が生じないように設計する方法として「疲労限度設計」と「安全寿命設計」がある。

「疲労限度設計」は、 σ_a 、 $\Delta\sigma$ を疲労限度以下にする方法で、鋼構造物やインフラ構造物など長期間の使用や、供用期間中の繰返し回数が 10^7 回を超えるような部品などに対して適用される。一方、「安全寿命設計」は、対象となる部品、部材が供用期間中に受ける繰返し数が特定の値以内に制限できる場合に、その時間強度を元に設計

を行う方法である。いずれの方法も S-N 曲線のバラツキを考慮し、十分安全側となるように設計値が設定される。しかし、疲労現象は上述の通り確率的現象であるため、設計時の対策のみで疲労の破壊確率を完全に 0 とすることは概念上できない。

(2) 破壊力学を用いる方法（損傷許容設計）

本手法は、製造段階で入り得る微小な損傷および供用中に受ける可能性のある損傷の存在を前提とし、損傷があっても点検・検査などで発見され修理されるまでは規定の荷重に耐えることのできるように設計する方法である。つまり、製造、運用、保全の各過程で計画的に点検・検査を行うことが必要であり、各時点での損傷程度を把握し、その結果から破壊力学により亀裂の進展と残存強度を予測することで、より高い安全性と耐久性を保障することができる。しかし適用される構造は、損傷が所定の運用期間内において臨界亀裂長さ（亀裂が急速に進展し始める長さ）にまで成長しない「Slow Crack Growth」もしくは構造の一部が破損しても直ちに全体の機能を損なうことのないように構造の冗長系を備えた「フェールセーフ」のいずれかに該当する必要があること、亀裂が検出可能であることなど高度な技術的要件が求められることや、設計から運用・保全までの対応がパッケージとして規定されているため作業負荷が高いなどの問題もあり、要求される安全性や経済性とのバランスで適用対象は限られる。

3.2 機械・構造物の保全

「JIS Z8115：2019 ディペンダビリティ（総合信頼性）用語」では、「保全、保守」は「アイテムが要求どおりに実行可能な状態に維持され、又は修復されることを意図した、全ての技術的活動及び管理活動の組合せ」と定義されている。図 7 は、主に保全活動が行われるタイミングでの分類を示す。各方式の概要は以下の通りである。

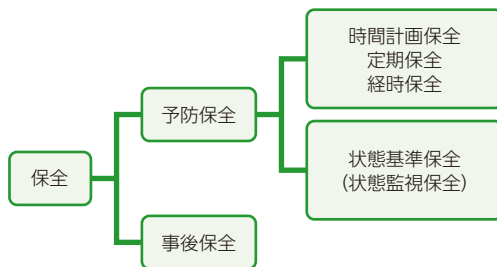


図 7 保全の管理上の分類

- (1) **予防保全**：使用中の故障の発生を未然に防止するために、既定の間隔または基準にしたがって実行する保全。
- (2) **事後保全**：故障が検出された後に修復する方式の保全。
- (3) **時間計画保全**：規定した時間計画にしたがって実行される保全。
- (4) **定期保全**：予定の時間間隔で行う保全。
- (5) **経時保全**：予定の累積動作時間に達したときに行う保全。
- (6) **状態基準保全**：対象の物理的状態の評価に基づき保全時期を決定する予防保全。供用中の物理状態もしくは動作パラメータについての情報を獲得することを状態監視と言い、連続的、間接的または定期的に点検、試験、計測などの手段または装置によって行われる。

ここで言うモニタリング技術は、上記の状態基準保全における「装置による状態監視に基づく評価手段」の一つとする。

4. 疲労損傷モニタリングのニーズ

4.1 疲労損傷モニタリング導入の目的と期待される効果

疲労を対象としたモニタリングは、機械や構造物が繰り返し受ける応力変動によって発生する疲労損傷を監視し劣化状況を把握することで、疲労損傷に起因する故障や事故などの発生を未然に防ぐことを目的とする。一般的にモニタリングには以下のような効果が期待される。

- (1) **安全性の確保**：より早期に問題を検出し、適切なメンテナンスや修理を行うことで、安全性を確保することが可能となる。
- (2) **設備の寿命延長**：機械や構造物の健康状態を定期的にチェックし、必要なメンテナンスを計画的に行うことができる。これにより、設備の寿命を延長し、投資効果を最大化することが可能となる。
- (3) **コスト削減**：損傷の早期発見と対応により、大規模な修理や交換の必要性を減らすことができる。これにより、長期的な運用コストを削減することが可能となる。
- (4) **効率性向上**：生産性、運転効率、メンテナンス効率の向上やそれに伴う省人化などが可能となる。

4.2 疲労損傷モニタリング導入の課題と今後

疲労損傷モニタリングを導入するということは、上記のような効果が期待できる半面、導入に伴う初期投資コストや専門的な人員確保、投資効果の確認など経営的な課題もある。また、付加的にセンサ・計測器などを設置するためのスペースや配線、電源などの問題も重要な課題となる。

損傷許容設計で設計された機械・構造物の場合は、安全上重要性が高く運用コストや全体コストに対する点検・検査工程のコスト割合が比較的大きいため、導入メリットの効果が大きく、すでに実用化が進んでいる。

一方、現在稼働中の機械・構造物の大多数は、疲労限度設計や安全寿命設計で設計されている。これらは設計上、供用中の疲労強度に十分な余裕があるため、そのままでは導入効果は大きくないと推測できる。ただし、上記疲労設計法の章で述べた通り、疲労現象はバラツキが大きく、十分余裕を持った設計でも破壊確率は0にはならない。また、鋼構造物やインフラ構造物などは供用期間が半世紀を超えるような長期に及ぶものも多く、その間の補修、補強、改修、部品交換、運転・稼

働条件・ワークなどの変更、老朽化、運転期間の延長、保全の省力化、効率化などなど、当初の設計条件から大きく運転・稼働状況が変わる要因も少なくない。さらに、国際紛争や自然災害などの影響によるサプライチェーンの障害や環境問題への対応による価値観の変化などにより、運転や保全状況に変化がでることも考えられる。これらの変化が疲労強度に及ぼす影響を確認するニーズは多く、特に老朽化が問題となっているインフラ構造物では喫緊の課題である。

事後保全や時間計画保全を行ってきた機械・構造物に疲労損傷モニタリングを導入する場合、上述の導入に伴う課題のうち、特に投資効果の確認と設置の課題がポイントとなる。投資効果の確認に限定すれば、必要な装置の精度や耐久性などの性能と、寸法、重量、コストなどの利便性とのバランスが比較的取りやすい。小型のWi-Fi機能付きシングルボードコンピュータやそれに対応したセンサ類も比較的入手しやすくなっている。今後の疲労損傷モニタリング市場の拡大のためにも、小型軽量で無線モニタリング可能なシステムの低価格化および、汎用評価システムの提供が望まれる。

5. 疲労損傷評価のための基本的な技術概要

本章では、2.2節で示したS-N曲線を使用する疲労損傷評価を対象とする。

5.1 疲労損傷評価

(1) 実働荷重下での疲労強度

S-N曲線は一定の応力振幅 σ_a とそれが繰り返したときに材料が破断する繰返し数Nの関係を示している。しかし、実際の機械・構造物に作用する実働荷重の変動は一定であることはごくまれである。このような実働荷重下での疲労寿命を推定する方法を線形累積疲労損傷則あるいはマイナー則と言う。マイナー則は以下の三つの仮定を

元になっている。

- ① 疲労損傷は疲労限度以上の応力振幅によって生じる。
- ② 疲労損傷は応力振幅の大小に無関係に繰返し数に比例して生じる。
- ③ 疲労損傷は応力の順序に無関係に累積される。

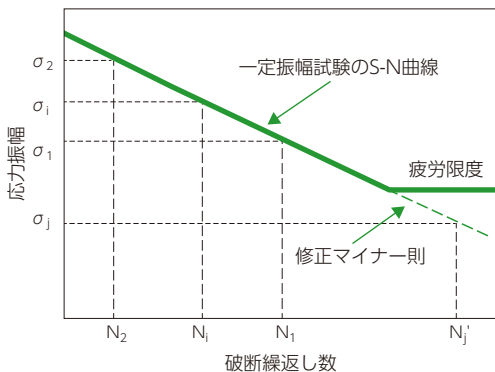


図8 S-N曲線とマイナー則、修正マイナー則

応力振幅のレベル $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots$ が単独で繰り返された場合の疲労寿命を図8に示すように $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots$ とする。それぞれのレベルの応力振幅が $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots$ 回加えられたとき、各レベルの疲労損傷を $n_1/N_1, n_2/N_2, \dots, n_i/N_i, \dots$ であるとし、これらの線形和をもって累積疲労損傷値 D を定義する。この D が1となったときに破壊が生じると考える。

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (5)$$

上記①の仮定では疲労限度未満の応力振幅は考慮しないが、実働荷重では疲労限度未満の応力振幅を多く含み、これが疲労損傷を与えることも知られている。そこで、S-N曲線を疲労限度以下まで延長し、応力振幅 σ_j に対する仮想的な破断繰返し数 N_j' を考え、(5)式を適用する方法が修正マイナー則である。

(2) 実働荷重下での応力頻度計数法

上述のマイナー則を適用する際、変動する応力の時刻歴から応力振幅・範囲のレベル σ_i とレ

ベルごとの繰返し数（頻度） n_i を求める必要がある。計数手法はいくつか提案されているが、コンピュータ処理のしやすさから、レインフロー法が用いられることが多い。

レインフロー法は応力の時刻歴を図9のように多重の屋根とみなす。雨だれを番号順に屋根のつけ根部分から流し、図中の黒点のように、屋根から落ちた段階もしくは先行した雨だれに突き当たった段階を計数することで応力振幅・範囲の大きさとその頻度を求めることができる。

(3) 公称応力による評価と局部応力による評価

通常の構造物は形状が複雑で、応力が一様に分布していることはまれである。疲労が問題となるのは主として応力が局部的に高い切欠きや溶接継手などの応力集中部である。この部分の疲労強度は局部の応力あるいはひずみによって決まる。ただし、溶接継手では、応力集中のほか継手形状や残留応力、表面性状などさまざまな因子が局部の応力やひずみに影響を及ぼす。そこで、さまざまな種類の溶接継手の疲労試験データを基に、溶接継手を疲労強度が同等となる種類で等級分類し、それぞれの等級に対し公称応力（応力集中部からある程度離れ、応力集中を含まない様な応力分布を示す位置での応力）に安全率を考慮した許容応力を与える手法が提案されている。この方法は

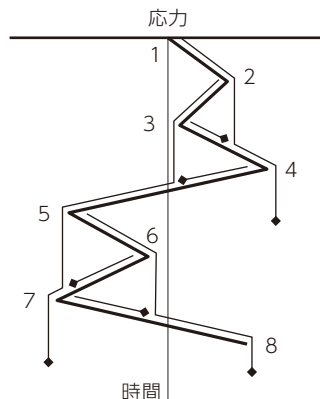


図9 レインフロー法

簡便であるため、日本鋼構造協会の疲労設計指針をはじめ多くの溶接構造物の疲労設計基準で採用されている。

なお、実構造では公称応力を定義できない複雑なものが多い。その場合、**図 10**のように、評価箇所付近の応力値をひずみ計測もしくは構造解析で求め、それを外挿して局所の応力集中を含まない評価箇所の応力を想定して評価を行う Hot Spot 応力法が適用される。

5.2 計測手法

(1) 応力・ひずみ

荷重や応力は直接観察することはできない。荷重・応力に伴い物体に発生する変形やひずみなどの現象を測定し、荷重・応力に換算する方法が一般的である。応力・ひずみには多くの測定手法があり、例えば「日本機械学会 機械工学便覧 α 3-197 表 13・5 各測定法の比較」などにまとめた解説がある。

センサを取り付けた位置の値を測定する点測定法と、対象領域内の分布を知ることができる全視野測定法で分類されることが多い。計測は対象の表面近傍の値を測定することになり、内部や裏面などの状態を把握するためには、解析など別の手法が必要となる。主な計測法を以下に示す。

① **抵抗線ひずみ計測法（ひずみゲージ）**：表面ひ

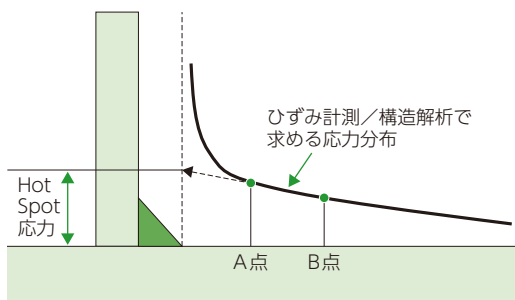


図 10 Hot Spot 応力

- ずみ測定、実物の測定可能。
- ② **FBG ひずみ計測法（光ファイバー）**：表面ひずみ測定、実物の測定可能。
- ③ **光弾性試験法**：光弾性樹脂による模型、内部の応力測定。
- ④ **応力塗膜試験法**：表面のひずみ、主応力方向、実物の測定可能。
- ⑤ **X線応力計測法**：表面近傍の応力測定、実物の残留応力を非破壊・非接触で計測可能

この中で、①のひずみゲージが最も一般的に使用されている。**図 11**に構造を、以下にその特徴を示す。

- a) 測定対象の表面に接着し、物体の変形に追従して変化する抵抗線の電気抵抗変化を計測
- b) ゲージ長 0.2 ~ 20mm 前後
- c) ゲージ長内の平均ひずみを計測（ひずみ勾配が大きいところではゲージ長の短いものが必要）
- d) 単軸、2軸、3軸のゲージがある（主応力方向が不明な場合には3軸ゲージを用いる）

(2) 計測条件：サンプリング周波数

センサから得たアナログ信号は、ノイズ処理や通信、ストレージ、分析などの後工程のために、通常、一定時間毎に標本化（サンプリング）してデジタル値に変換（A/D変換）する。その際の周波数をサンプリング周波数と言う。サンプリン

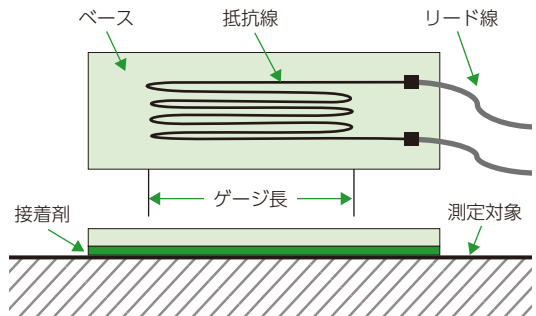


図 11 単軸ひずみゲージの構造

グ周波数が大きいほど元信号の情報を余さず変換できるが、データ量が大きくなり、後処理のハンドリング性が損なわれる。表 2 に、計測対象とする現象の把握したい特徴量とサンプリング周波数が満たすべき最小値を示す。疲労損傷評価のためには、波形・ピーク値を知る必要があるため、サンプリング周波数は信号周波数の 10 倍以上とする必要がある。

6. まとめ

本稿では、金属疲労損傷モニタリングに関わる背景や基礎的な技術の主要なものをかいつまんでその概要を述べた。現象論としての金属疲

労と疲労設計手法および保全方法を背景として、それらを疲労損傷モニタリングの導入の障害となる課題と結びつけて解説した部分は多分に筆者の推測が入っている。しかし、モニタリングの裾野を拡大するためには、目的に応じてシステムの性能と利便性のバランスを考慮することが重要で、なんでも“高精度、高価格”ではなく、“小さい、軽い、安い”を目指すシステム開発の必要性は間違いないのではないかと考える。最後に疲労評価法と応力・ひずみ計測に関する主要な基礎技術を解説した。いずれも、具体的な作業手順まで記載していないため、詳細は関連規格や参考書などを参照されたい。

表 2 計測する特徴量とサンプリング周波数が満たすべき条件

計測する特徴量	信号周波数に対するサンプリング周波数の倍率	備考
周波数成分	<ul style="list-style-type: none"> ・信号周波数の 2 倍以上 ・FFT などのデータ処理の都合で 2.56 倍以上とすることが多い 	<p>エリアシング*) を防ぐため</p> <p>*) エリアシング：波信号とは、1 周期内に最大値と最小値が存在する信号である。したがって、周波数情報を記録するためには最低でも 1 周期に 2 点のデータ、つまり、2 倍のサンプリング周波数が必要となる。サンプリング周波数がそれ以下のときに周波数成分にノイズが乗ることをエリアシングと言う。高速回転しているプロペラが止まって見えるような現象。</p>
波形・ピーク値	<ul style="list-style-type: none"> ・信号周波数の 10 倍以上が目安 <p>信号が正弦波の場合、サンプリング周波数の影響のみによるピーク値（絶対値）の変換誤差</p> <p>10 倍：-5%未満</p> <p>20 倍：-1.5%未満</p>	<p>信号を正弦波と仮定する。信号のピークに最も近いサンプリング点の値と、ピーク値との差が最も大きくなるのは、サンプリング点の中間にピークが来るときである。信号の周波数を F、サンプリング周波数を f_s、ピーク値とサンプリング値の誤差をピーク値で割った値を e_{max} とすると、以下となる。</p> $e_{max} = 1 - \sin(\pi/2 \times (1 - 2F/f_s))$ <p>$f_s/F = 10$ のとき、$e_{max} \doteq 4.9\%$</p> <p>$f_s/F = 20$ のとき、$e_{max} \doteq 1.3\%$</p>



元エグゼクティブ・フェロー
一般社団法人 日本機械学会 名誉員・フェロー

武正 文夫

TEL 045-791-3522

FAX 045-791-3547