



入門講座

計測技術編 - 3

設備診断のための計測技術

豊田利夫

九州工業大学 情報工学部 教授

Tosio Toyota

Measurement Engineering for Condition Monitoring and Diagnosis

1 設備診断のための計測技術の特徴

設備診断技術 (Condition Monitoring & Diagnostic Technology: 略称CDT) において、計測技術はその正否を決める基盤技術といえる。設備診断は、機械の内部状態の情報を運ぶ振動や音響などの状態変数 (Condition variable という) の計測から始まり、状態変数の計測→信号処理→信号の特徴抽出→異常の識別の5ステップで実施される。むしろ、設備診断の発展は計測技術の発展に依存するといっても過言ではない。その意味で計測技術は設備診断を支える基盤技術であるとともに重要なニーズ分野であり、かつ広範なマーケットでもある。

設備診断のための計測技術だけでなく、計測技術一般にいう特徴は、計測目標領域が雑多で一貫した取り扱いが困難なことである。たとえば、設備の異常状態を運ぶ情報キャリアーは可視光、赤外線、磁気、圧力、変位、電磁波、放射線、粒子数、圧力、流量、振動、熱、音響、超音波など50種類にもおよぶ。しかも、圧力といっても気体、液体、固体の圧力があり高真空から超高压までである。設備診断用の計測技術 (またはセンサ技術) の特徴をあげれば(1)ほとんどすべての計測技術の分野のセンサが対象となり(2)一般センサに比較して使用環境が格段に過酷であり、(3)高い信頼性と経済性が要求される点にある。

2 設備診断のための計測技術

すべての設備診断用センサ技術を網羅することは困難であるが、表1に示すように計測対象の状態変数を(1)機械信号系 (2)電気磁気信号系 (3)熱光学的信号系 (4)化学生物信号系に分けて考えれば比較的統一的な取り扱いができる。

以下表1に基づいて、設備診断用センサ技術の動向を概観しよう。

表1 設備診断のためのセンサ技術一覧

信号種類	状態変数	応用診断技術
機械信号系	(1)振動・音響 (2)圧力・流量 (3)力・応力 (4)超音波・AE	(1)回転機械診断 (2)圧力脈動のポンプ診断 (3)応力解析による寿命診断 (4)AEによる材料欠陥診断
電磁信号系	(1)電圧・電流 (2)電力 (3)磁束密度 (4)電磁波	(1)電流波形による断線診断 (2)損失角による絶縁劣化診断 (3)磁束漏洩によるモータ診断 (4)電磁波による変圧器診断
光・温度信号系	(1)可視光 (2)レーザー (3)温度 (4)赤・紫外線 (5)放射線	(1)直流機の整流診断 (2)レーザー変位計診断 (3)赤外カメラによる診断 (4)温度上昇による巻線診断
化学信号系	(1)臭気 (2)化学成分 (3)イオン (4)化学反応 (5)摩耗粒子	(1)ガス漏洩診断 (2)配管腐食診断 (3)摩耗粒子による診断 (4)可燃性ガスによる変圧器診断 (5)マイクロバイオ活性度診断

さて設備診断の分野でも、新しいバイオセンサやインテリジェントセンサなど新しい計測技術が試用されつつあるが、ここでは主として鉄鋼などの生産設備の異常診断に実用中の計測技術につき紹介したい。

(1) 機械的信号系のセンサ技術

回転機械など能動機械の診断には主として振動、音響、応力、圧力などの機械信号が利用される。ここでは典型的な機械的信号系のセンサの応用例として、原子力発電所用の吸水ポンプの監視診断のためのセンサの設置状況を図1

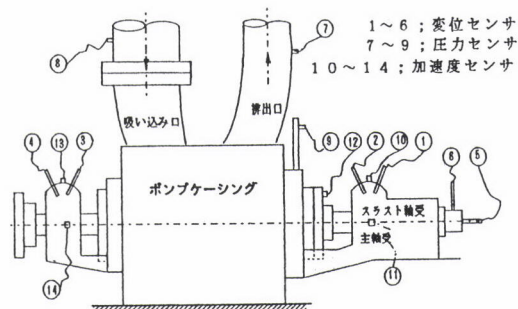


図1 発電所の吸水ポンプの設備監視用センサ

に示す。

図より明らかなように、振動変位センサ6個、圧力センサ5個、振動加速度センサ3個、合計14個の機械信号系センサが使用されている。

(2) 電気・磁気信号系のセンサ技術

電気磁気系センサは電動機など電気設備の回路異常診断や絶縁診断に必須であるが、機械設備の動作異常や摩耗などの診断にも電流など電気信号が多用される。

たとえば、図2に電気信号を用いた高压電動機の絶縁診断の計測系を示す。漏洩電流、部分放電電流、電流の損失角など波形解析法が従来より現場で実用されている。

(3) 熱・光学信号系のセンサ技術

設備状態を判定するのに、従来より油温や軸受ケーシングの温度測定が多用されてきた。最近は温度センサとオプティカルファイバを組み合わせて、高压電気機械内部の巻き線温度の監視などに実用されている。

原子力発電所の高压大型発電機などでは、鉄芯内の巻線の振動監視が必須であるが極強電磁界中であるため、従来の振動センサでは監視が困難であった。このような極強電界中での振動センサとして、図3に示すオプティカルファイバによる振動変位センサが開発され一部で実用されている。

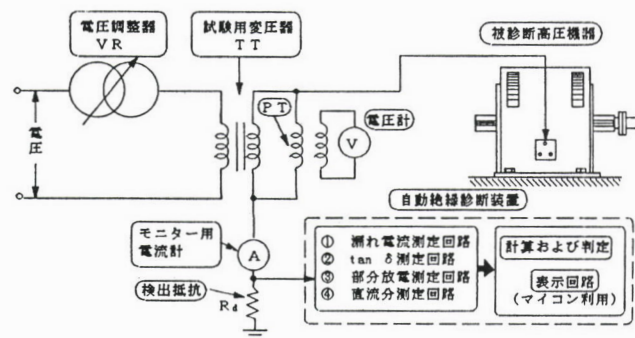


図2 高压電動機の絶縁診断の測定系

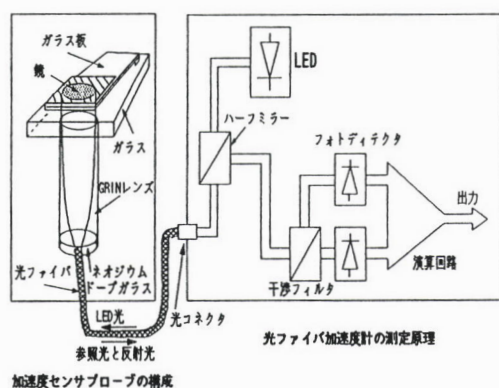


図3 光ファイバによる振動加速度センサ⁴⁾

る。

(4) 化学・バイオ信号系のセンサ技術

化学・バイオセンサも盛んに設備診断に実用されている。典型的な実用例は潤滑油や作動油中の金属摩耗粉の検出による油圧潤滑系の診断技術である。

潤滑油や作動油中の金属摩耗粉を定期的に検出することにより、該当システムの劣化傾向を把握し、正しいオーバーホールタイミングを設定することができる。

図4にみるように、油中摩耗粉の検出には大別して3種類の計測技術が適用されている。

(1) 油中金属摩耗粉の直接センサ

潤滑または油圧システムに金属粉検出センサを挿入して、金属分の瞬間発生率と蓄積量をモニタする。この値は機械のオペレータに表示される。

(2) 摩耗粉捕集クーポン法

油中の金属摩耗粉を沈殿させ捕捉するクーポンを油圧配管内に挿入して、定期的に摩耗分の沈殿状態を点検する。クーポンは機械システムの運転中に脱着できるように設計されている。

(3) サンプル油分析法

油圧または潤滑システムから定期的に少量のサンプル油を採取して、分光分析法またはフェログラフ法を用いて油中の金属摩耗粉の量と成分や性状を観察する。

図5にフェログラフ法の概念図を示す。採取した少量の

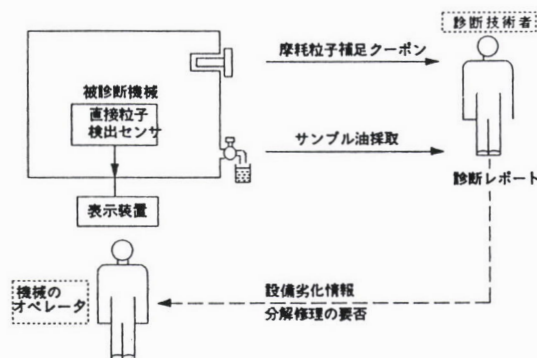


図4 油中の金属摩耗粉の分析による異常診断

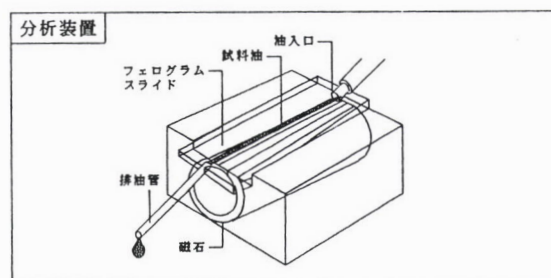


図5 フェログラフ法の原理

サンプル油をコラムの上に流し、金属摩耗粉の付着状況(これをフェログラムという)を顕微鏡などで観察して機械の劣化状況を判定する。

3 新しい設備診断用の計測技術の紹介

最近文献に現れた診断用計測技術もしくはセンサ技術の数例を紹介しよう。ここでは、技術の理論的背景や詳細には立ち入らず、イラストによるイメージの紹介にとどめる。詳細を知りたい読者は後掲の参考文献を参照されたい。

(1) 往復動機械の異常監視システム

ガソリンエンジンなど往復動機構を含む内燃機関の診断は従来振動など機械信号では診断が困難とされ、主として前掲の潤滑油中の金属摩耗粉の分析法などが適用されてきた。しかし、最近の非常常信号解析技術の進展により図6に示すように振動変位センサ、振動加速度センサ、バルブ診断用温度センサ等による異常の監視と診断が可能となった。図6ではロッド降下監視用に振動変位センサ、ケーシング監視用に振動加速度センサ、バルブ監視用に温度センサを使用している。

(2) 内燃機関のピストンリング摩耗監視センサ

図7は内燃機関の保全上最も問題となるピストンリング

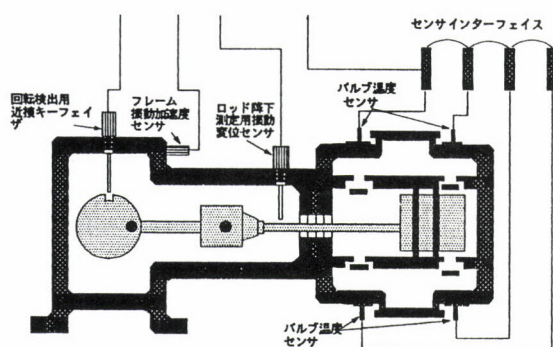


図6 往復動機械の振動変位による異常監視

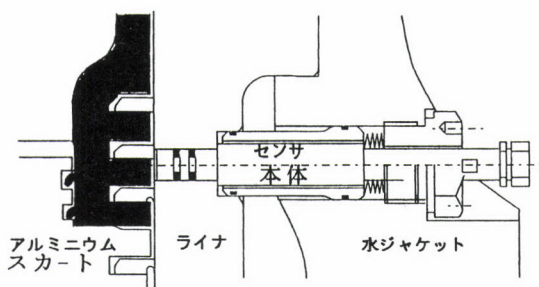


図7 内燃機関のピストンリング摩耗センサ

の摩耗をモニタリングする専用センサである。

(3) オンライン油中金属粉解析システム

図8に潤滑油のサンプル油中の摩耗金属粉観察用のフェログラムの概形を示した。最近はこのオンライン化したオンラインフェログラムが実用されている。

(4) 放射化技術による精密摩耗と腐食の監視

摩耗と腐食は生産プラントの保全コストの主要部分を構成している。アメリカの報告によると生産プラントの年間の保全コストは1000億ドル、腐食のそれは700億ドルに達している。自動車の保全コストはアメリカで年間400億ドルに達しているが、その大部分は摩耗に原因がある。

必ずしも新しい技術ではないが、摩耗、エロージョンおよび腐食などの精密オンライン監視技術として、材料の放射化技術を用いた表面放射化技術 (surface layer activation technique (SLA)) を紹介しよう。

SLA法においては、まず図9に示すように摩耗または腐

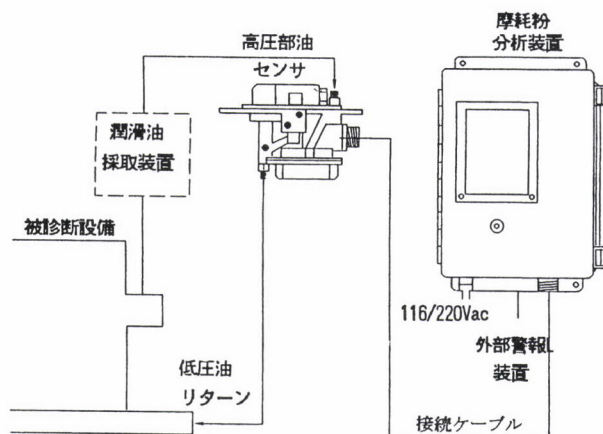


図8 オンラインフェログラムの結線図⁵⁾

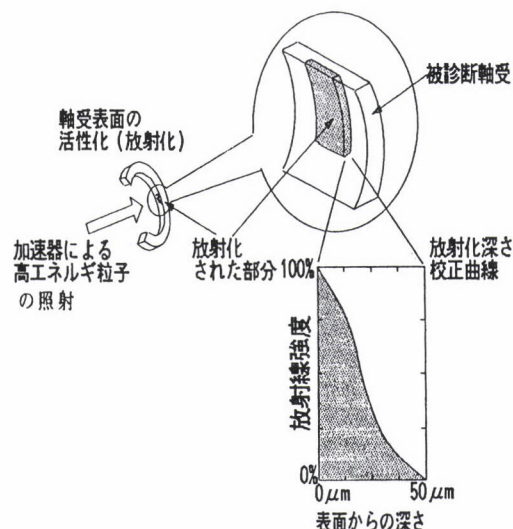


図9 高エネルギー粒子による軸受表面の放射化

食する部分の材料に加速器の高エネルギー粒子を照射することによって放射化する。これによって材料の厚さ50 [μm]程度の表層部が活性化して放射能をもつようになり、 γ 線を放射するようになる。

この放射線強度は材料が摩耗または腐食により失われるに従って減少するから、外部から放射線量をカイガカウンタなどで計測すれば、摩耗または腐食量の精密なオンラインモニタリングが可能となる。

本法によれば、摩耗または腐食量が極めて正確に計測できる（精度1 [μm]以上）でモニタリングできるばかりでなく、その位置も同定できる利点がある。

英国のHarwell Laboratory groupではすでに図10に示すような校正曲線を得ており、原子力発電所の配管の曲線部のエロージョンの監視に成果をあげている。

原子力発電所で本法を実用化する場合、主冷却系の冷却水は原子炉で発生した同位元素類を多数含有しており、放射線のバックグラウンドノイズのレベルが高いことを考慮して、放射線の選択センシングの能力のある固体（半導体）放射線検出器が使用される。

本法は高精度ではあるが、高価であるから主として原子炉の主および2次冷却水系配管の腐食モニタリングに応用されている。

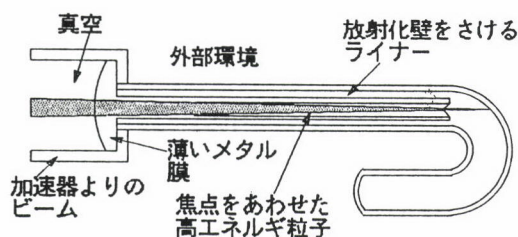


図10 SLA法における配管曲線部の放射化¹⁾

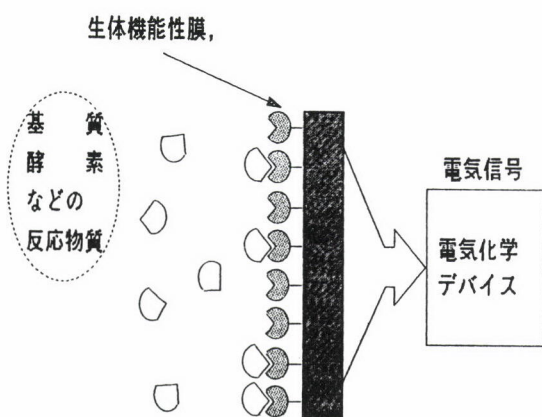


図11 化学・バイオセンサの原理³⁾

原子炉の冷却水系においては、配管の曲線部分のエロージョンが激しい。流体によるエロージョンは電気化学的現象ではないため、線形分極抵抗(LPR)法など従来の腐食監視技術が適用困難である。

本法は高精度ではあるが、高価であるから主として原子炉の主および2次冷却水系配管の腐食モニタリングに応用されている。また民間航空機の油圧系統に使用された実績がある。

(5) 化学・バイオセンサの利用

化学センサは動物の嗅覚、味覚に相当するセンサである。従来より生産プロセスのオペレータや点検マンは主として嗅覚や味覚により、機械や操業状態の異常を検出していた。

設備診断においては、嗅覚に相当するものがガス漏洩センサに、味覚に相当するものが液体あるいは溶液中の成分検知を目的に、イオンセンサまたはバイオセンサとして実用化されている。

バイオセンサでは分子構造選択機能と電気信号変換機能が図11のように分離している。原理的に図11に示すバイオセンサは、前半（図の左）は O_2 や H_2O を反応試薬とする電気化学反応系を構成しており、後（図の右）は化学電気変換機能を構成している。

通常の腐食モニタリング用センサはスケールなど付着物下の腐食は検知できない。孔食やピッチングなど局部腐食に対しては、有害液体が漏洩して初めて目視点検で確認できるのが実状である。また最近はバイオ誘起腐食も問題になっているが、化学・バイオセンサとコンピュータ技術の組み合わせはこれらの問題を解決できる可能性がある。

半導体センサーではこの2つの機能が一体化し直接電圧または電流の電気信号に変換されている。

図12にバイオセンサの例としてグリコースセンサの構造を示す。

構造の動作説明は紙数の関係で省略する（文献3）参照）が、酵素のような生体物質のもつ特異的な反応を利用する

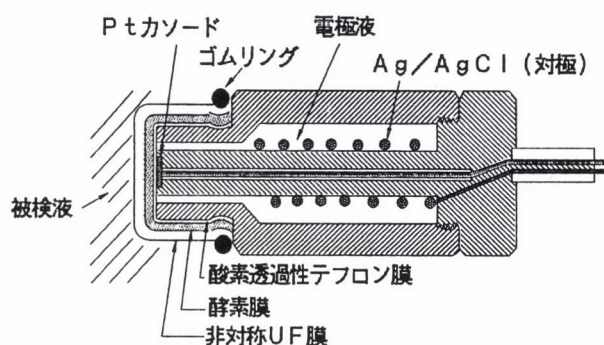


図12 バイオセンサ（グリコース）の構造例³⁾

ところに、バイオセンサの特徴がある。

最近のプラントでの腐食では、マイクロバイオ誘起腐食などが問題となりつつあり、バイオセンサはこのようなバイオが原因となる腐食環境や腐食速度のモニタ用にその応用が検討されている。

(6) ミクロバイオ誘起腐食のセンサ

最近バイオに起因する腐食 (microbiologically influenced corrosion (MIC)) が問題となっている。

従って冷却水配管内のバイオ活性度をモニターするシステムの研究が欧米で進められている。図13はアメリカで開発中の技術であって、間歇カソード分極法を基本としてバイオ膜生成速度を分極電位で追跡する装置の概念図である。

この計測装置によりバイオ皮膜の生成速度を推定できる。

(7) 配管内の局所腐食 (孔食) 監視システム

現用の腐食モニタリング技術には、クーポン法など単純な方法から電気抵抗法、線形分極抵抗 (Linear Polarization resistance; (LPR)) 法など種々の手法が適用されているが、いずれも全面腐食が対象で局部腐食のオンライン監視技術は実用化されていない。

現在この方面の研究は(1)配管内のスケールの下の腐食のモニタリング、(2)ピッチングなどの局部腐 (孔食) のモニタリング技術の開発に努力が集中している。

図14は現在アメリカで開発中の局部腐食とスケール下層の腐食の同時モニタリング装置の概念図である。

装置は小型熱交換機、流量および熱流制御装置、データ処理用のコンピュータから構成される。

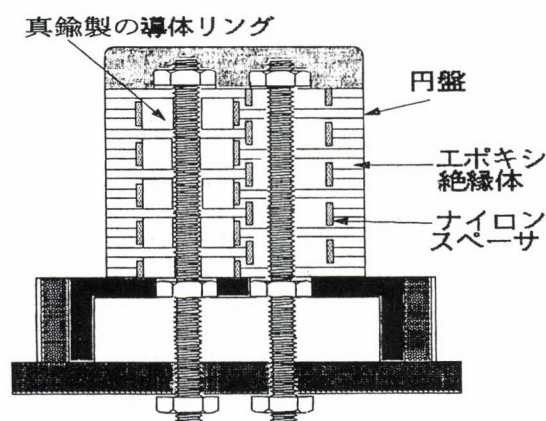


図13 バイオ誘起腐食 (MIC) センサ¹⁾

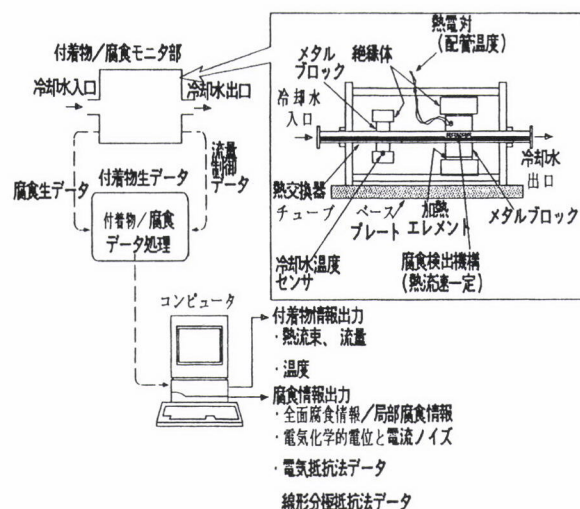


図14 配管のスケール下層の腐食モニタリング

装置は一定熱伝達率または一定内部表面温度に保つことにより腐食を算出する。一定内部表面温度のときスケールの付着により熱伝達率は減少する。反対に一定熱伝達率のとき、スケール沈澱に従って内部温度は上昇する。これによりスケール付着量や腐食程度を数式モデルから推定できる (詳細は文献 2) 参照)。

4 おわりに

設備診断用計測技術も他分野のそれと同様に、新しいセンシング技術と併せて信号処理、識別理論ともに著しい進展を見せている。本文が読者のこの方面への興味の発端になれば幸いである。

参考文献

- 1) S. D. Strauss: "Instrumentation advances improve fouling, corrosion monitoring", Power September, (1992), pp12-20
- 2) G. Licina: "On-Line biofouling monitoring of biofouling activity at the Browns Ferry Nuclear Plant", EPRI Seminar, Fla, April, (1992), USA.
- 3) 清山哲朗: "化学センサ", 共立出版, (1992), pp11-17
- 4) 市川ほか: "光ファイバセンサ", 高丘レビュー, 第36, 巻4号 pp34-39
- 5) P. A. Schweitzer: "Corrosion Engineering Handbook", DEKKER, (1996)

(1997年5月6日受付)