

第1章 点検・モニタリングに関する新技術

1-1. はじめに

1-1-1. 新技術調査の目的

点検・モニタリングにはさまざまな物理エネルギーもしくは物理現象が利用される。たとえば、超音波、X線、赤外線、音響、振動(加速度)、変位などである。これらの現象を計測するには適したセンサが必要である。センサでデータを取得した後、点検・モニタリングに必要なデータを抽出したり、変状を解釈するための波形処理アルゴリズムなどが必要となることがある。また、特に近年においては扱うデータ量も膨大となり、転送や保存のための技術開発も重要である。

点検・モニタリングは、まとめると、次の3つの要因の影響を大きく受けるといえる。

- ①センサ、アンプなどのハードウェア
- ②変状の検知、現象の把握をするための波形処理ソフトウェア
- ③データ転送、データベースといったデータ処理方法

③はハードウェア、ソフトウェアどちらにも含まれるものと考えられるが、データベース構築はモニタリングにおいても大きな課題であると判断したため、あえて、別の項目とした。

今日のコンピュータなどIT機器も含めた電子機器の進歩も考えるとき、点検・モニタリングに関する新しい技術をまとめることは意義あることと考える。そこで、本章では点検・モニタリングの新技術をまとめ紹介すること、鋼橋への適用性を考察することを目的とする。

1-1-2. 新技術の定義と調査方法

本章では新技術の定義として次の2つの条件を考慮することとした。

一つ目は鋼橋では現在それほど適用されていない技術である。したがって、他の分野、たとえば、航空、電力あるいはコンクリート構造物などでは日常的に用いられている技術であっても、鋼橋での適用例が少なければ該当することになる。

二つ目は鋼橋でも今後適用されれば有用と思われる技術である。この中には他分野で一般的に用いられている技術やまったく新しい技術も含まれる。

調査に際しては上記の定義に従う技術を抽出した。抽出の結果、多数の技術が候補としてあがったが、すべてを調査することは困難であるのでさらに絞り込んだ。候補としてあがった技術は付録にしてまとめている。

調査項目は以下の3つに着目した。一つは原理およびシステム構成、すなわちセンサの原理やセンサを利用するために必要な機器である。二つ目は適用段階である。適用段階と

しては、実験室での適用の検討が行われているもの、実物大の試験体で検討が行われているもの、実際の構造物に適用が行われているものなどに分類した。三つ目には鋼橋への適用を考えたとき、克服すべき課題もしくは鋼橋への適用の障害となる要因などである。

本章で扱った新技術は表.1-1-2-1のとおりである。本章では扱えなかった新技術のうち、議論にあがったものを本章の最後の付録にまとめてある。

表.1-1-2-1 本章で扱った新技術

| 技術名 | 点検／ モニタリング | センシング対象または 利用目的 | 鋼橋での適用実績 |
|-----------------------|---------------|--------------------|----------|
| TOFD 法 | 点検 | 溶接きず, 疲労き裂 | |
| フェーズドアレイ法 | 点検 | 溶接きず, 疲労き裂 | あり |
| 電磁超音波 (EMAT) | 点検 | 溶接きず, 疲労き裂 | |
| 非線形超音波 | 点検 | 溶接きず, 疲労き裂 | |
| 赤外線応力測定システム | 点検 | 応力, 疲労き裂 | |
| 熱音響法 | 点検 | 疲労き裂 | |
| X線による応力測定 | 点検 | 応力 | あり |
| 全方位音響探査 | 点検 | 音源 | |
| 圧電フィルム | モニタリング, 点検 | ひずみ, 疲労き裂 | |
| 光ファイバ | モニタリング | ひずみ, 温度 | あり |
| 疲労センサ | モニタリング | 疲労き裂 | あり |
| 腐食センサ | モニタリング | 腐食環境 | あり |
| センサネットワーク | モニタリング | 計測および情報伝送 | |
| RFID タグ | モニタリング | 情報管理 | |
| Weigh In Motion (WIM) | モニタリング | 荷重 | あり |

1-2. TOFD法 (Time Of Flight Diffraction : 飛行時間解析法)

1-2-1. 原理と特徴

TOFD 法は、欠陥の端部で生じる回折波の伝播時間を基にきずの有無やきず長さ、特に高さを精度良く計測する手法である。通常の超音波探傷は、超音波の送受信を1個の探触子で行っているが、TOFD 法では、図.1-2-1-1 に示すように、送信用探触子と受信用探触子各1個を試験部（突合せ溶接継手部）を跨いで配置する。送信探触子から送信された縦波超音波がきずの上端部及び下端部にあたると、そこが音源となって回折波（②及び③）が発生する。この回折波と、表面を伝播してくる表面波（①）及び試験体の裏面で反射する底面波（④）とともに受信探触子で受信する。探傷で使用する波は一般的には縦波である。

- ・ きずがない場合：表面波（①）と底面波（④）のみが観察される。
- ・ きずがある場合：表面波、底面波に加え、きずからの回折波（②及び③）が観察される。

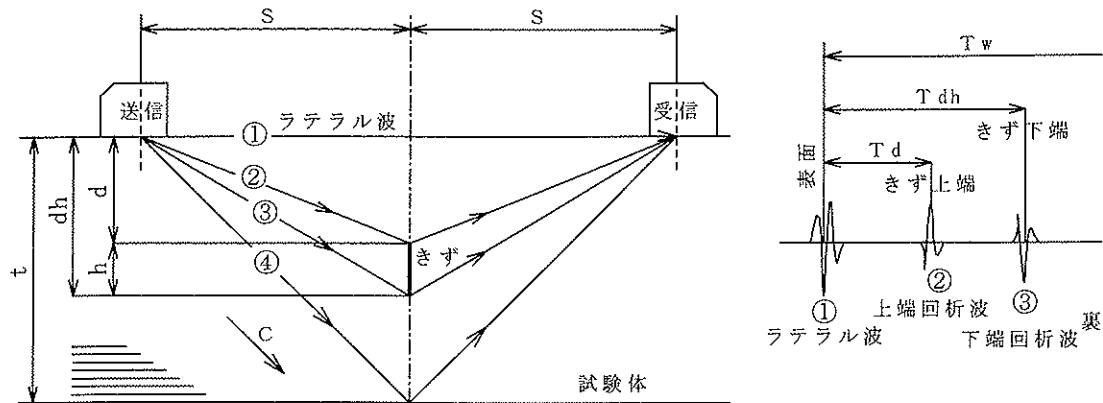
以上の結果から、きずの有無がわかり、各波形の伝播時間から(1-2-1-1)式によりきず上端部の深さ位置(d)を求めることができる。同様にきず下端の深さ位置(dh)を求めることにより、きず高さ(h)が(1-2-1-2)式により求められる。図.1-2-1-2 にスキャン方法と検査結果の表示例を示す。図.1-2-1-2 は縦軸に波動伝播時間を横軸に探触子位置を示したものである。検査においては、各走査ポイントにおいて、図.1-2-1-1 に示すような波形が取得される。エコー高さにより濃淡をつけると図.1-2-1-2 のようになるが、これをDスコープ像という。

図.1-2-1-3 に装置の構成及びプローブの外観を示す。装置は通常の超音波探傷試験のように、探傷器、2個の（縦波）探触子からなる。TOFD 法の場合は特に、探触子位置とDスコープ像を関連づけるためにエンコーダも必要である。

1-2-2. 適用段階

TOFD 法は、1970 年代にイギリスで開発された。当時、PISC 計画 (Programme for Inspection of Steel Components) が行われていた。PISC 計画は原子力容器を模擬した実物大の溶接試験体を作成し、欧州、北米および日本で回送し、検査を行い、欠陥の検出性能を確認するためのものであった。そのような経緯もあり、現在では、特に原子力分野、火力発電プラントなどを中心に適用されている。

TOFD 法は海外の規格としては、BS や ASME などに記述されている。国内の規格としては、日本非破壊検査協会規格の NDIS2423 : 2001 「TOFD 法によるきず高さ測定方法」が制定されているが、NDIS 策定当初はきず指示長さに関する実験データの報告例が少なかったため、高さの測定に限定した規格として制定された経緯がある。きずの指示長さ測定手法を確立するために、千葉県非破壊検査研究会（以下、CNDI）が主となり、千葉県産業支援技術研究所並びに JSNDI 「接合部の超音波探傷研究委員会」の支援を受け、CNDI 会員が保有する TOFD 装置と探触子を用いた集合実験を実施し、きず指示長さ測定に有効な探傷条件及び、測定条件の選択についての研究が行われているところである。



$$d = (C^2 T_d^2 / 4 + C T_d S)^{1/2} \dots\dots\dots (1-2-1-1)$$

$$h = dh - d \dots\dots\dots (1-2-1-2)$$

- S : 探触子間隔の半分
- d : きず上端部の深さ
- h : きずの高さ
- t : 試験体の厚さ
- C : 試験体の音速
- Td : ラテラル波と上端回折波の伝播時間差
- Tdh : ラテラル波と下端回折波の伝播時間差
- Tw : ラテラル波と裏面反射波の伝播時間差

図. 1-2-1-1 TOFD法の原理と探傷図形模式図

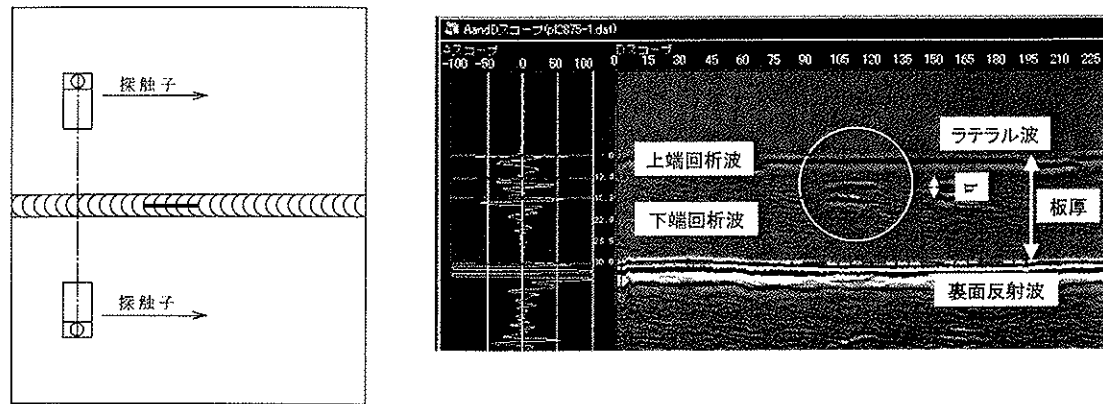


図. 1-2-1-2 スキャン方法と検査結果の表示例

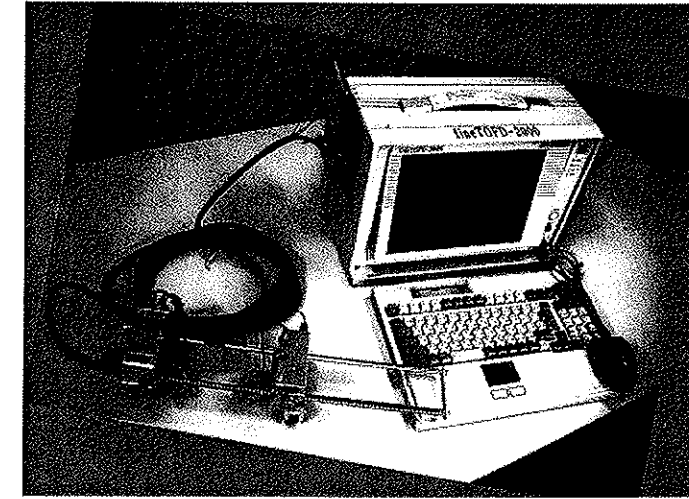


図. 1-2-1-3 装置

国内, 国外を問わず, TOFD 法は圧力容器で主に適用されており, 適用板厚の範囲も 10mm 程度から 300mm までに及んでいる. 極厚鋼板の検査を扱っている規定においては, 「TOFD 法」という用語を取り入れているため, 厚板は TOFD 法という傾向はよく見られるところである.

1-2-3. 克服すべき課題

TOFD 法にも下記に示す課題がある.

- ① 傷面に塗装が施されている場合, 塗膜の影響を受けやすい.
- ② 微弱なきず端部エコーを利用することから, 測定条件を誤れば, きずの計測度, 有無判別さえ誤る可能性がある (検査員の技量に左右される).
- ③ 想定されるきず位置により, 縦波探触子を適切に選択 (入射角・指向性) する必要がある. また, 探傷は前後ならびに左右の走査が必要である.
- ④ 検査の対象となる溶接継手は, 平板 (曲板) の突合せ溶接継手である. また, 溶接構造で板が角変形・うねり等で探傷面が歪んでいる状態では, きずの深さを精度良く検出しない.
- ⑤ テーパー付き配管等の板厚の断面変化を有している部位の探傷は, 探傷方法に工夫が必要である.

鋼橋においては, TOFD 法はそれほど用いられていないが, その理由としては上記の③と関連があると思われる. つまり, TOFD 法においては, 溶接きずの高さ方向の位置を推定することは可能だが, 溶接方向に直角方向の位置を推定することができないことである. 鋼橋の溶接では欠陥が検出された場合, 溶接による補修を行うことがあるので, 欠陥位置を

正確に把握する必要がある。

平成 14 年の道路橋示方書改訂以来、鋼橋においても厚板の適用が可能となった。厚板の場合は、従来のパルスエコー法では溶接きずの検出は難しい傾向が示されている。示方書改訂の際に、超音波探傷試験の適用性に関する研究が土木研究所を中心になって行われ、TOFD 法の適用性も検討された。その結果、TOFD 法は特に厚板には高い検出性能を示すとされている。今後、鋼橋においても厚板がよく使われるようになれば、TOFD 適用の機会も増えていくものと思われる。

【参考文献】

- 1-2-1) Welding Research Council: Destructive Examination of PVRC Weld Specimens 202, 203 and 251J, WRC Bulletin, Vol.343, 1989.
- 1-2-2) 千葉県産業支援技術研究所研究報告, No.2 : 超音波探傷試験 TOFD 法に関する研究, pp.22~27, 2004.
- 1-2-3) 第 14 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 8-2 TOFD 法による溶接きずの検出と指示長さ測定, pp.127~132.
- 1-2-4) 国土技術政策総合研究所資料 共同研究報告書 : 鋼道路橋溶接部の非破壊検査手法に関する共同研究 (I)
- 1-2-5) 寺田邦男 : ASME Code Case 2235 及び TOFD 法の適用状況, 非破壊検査, Vol.49, No.12, pp.806-811, 2000.
- 1-2-6) NDIS2423 : TOFD 法によるきず高さ測定法, 2001.
- 1-2-7) ㈱ダンテック : TOFD プレゼン資料
- 1-2-8) 三木千壽, 西川和廣, 白旗弘実, 高橋実 : 鋼橋溶接部の非破壊検査のための TOFD 超音波探傷システムの性能試験, 土木学会論文集, Vol.64, No4, pp.925-935, 2006.

1-3. フェーズドアレイ法

1-3-1. 原理と特徴

フェーズドアレイ法は図.1-3-1-1 に示すように、アレイ状に配置された小さな多数の振動子によって構成され、各振動子の振動を個別に電子制御することにより任意の方向に超音波を伝播させることが可能である。各振動子は小さいため、1 個の振動子で発生した超音波はほとんど指向性を持たず球面的に伝播するが、隣り合った振動子から超音波と干渉することによって方向性を持って伝播する。この原理を利用して、探触子の各振動子に同時にパルス波を与えると従来の振動子と同様に振動子面に垂直な音波を発生させることが可能になる。また、任意の遅延時間を設けることで、各振動子が振動を開始する時間を制御し特定方向に超音波を伝播させることが可能である。さらに、超音波を任意の位置で集束（集束ビームの探傷）させたり、伝播方向を連続的に変化させながらの探傷も可能となる。このようなビームの走査を行いながら、フェーズドアレイ法では図.1-3-1-2 に示すように、X 方向はビームを電子的に走査させているために、Y 方向の機械的な走査だけでチャンネル数の範囲で欠陥イメージを描くことが可能となる。探傷結果は PC での画像処理が出来るので、図.1-3-1-3 に示すように、リアルタイムに B, C, D スコープ画像が得られ、その画像を見ながらの探傷も可能である。図.1-3-1-4 に装置の構成及びプローブの外観を示す。

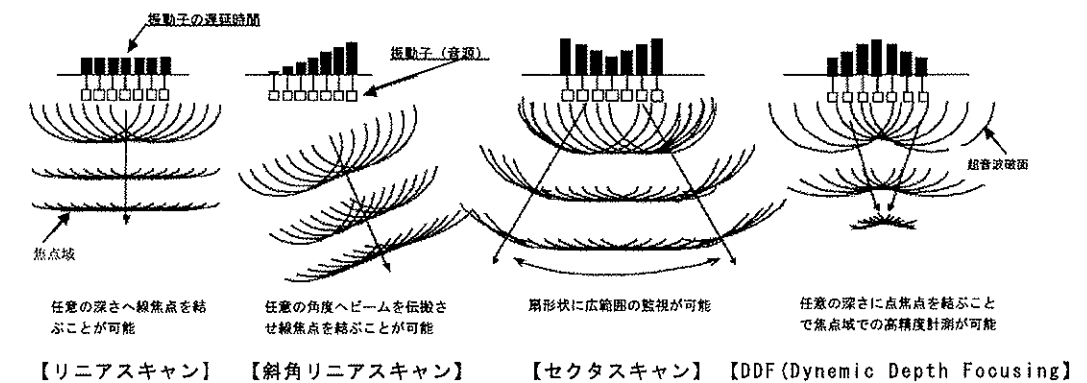


図.1-3-1-1 ビームの走査例¹⁻³⁻¹⁾

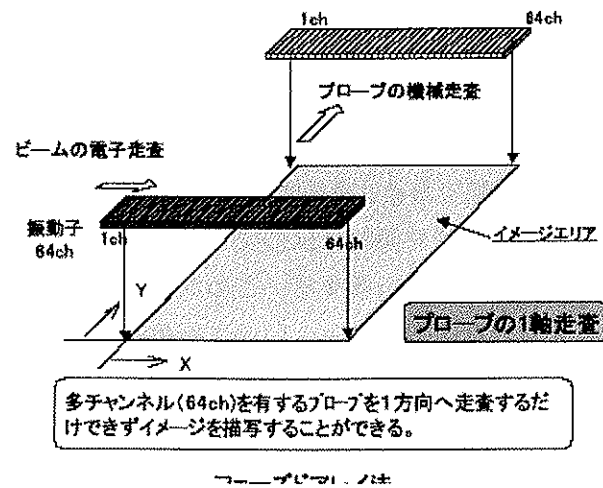


図. 1-3-1-2 フェーズドアレイ法の走査 1-3-1)

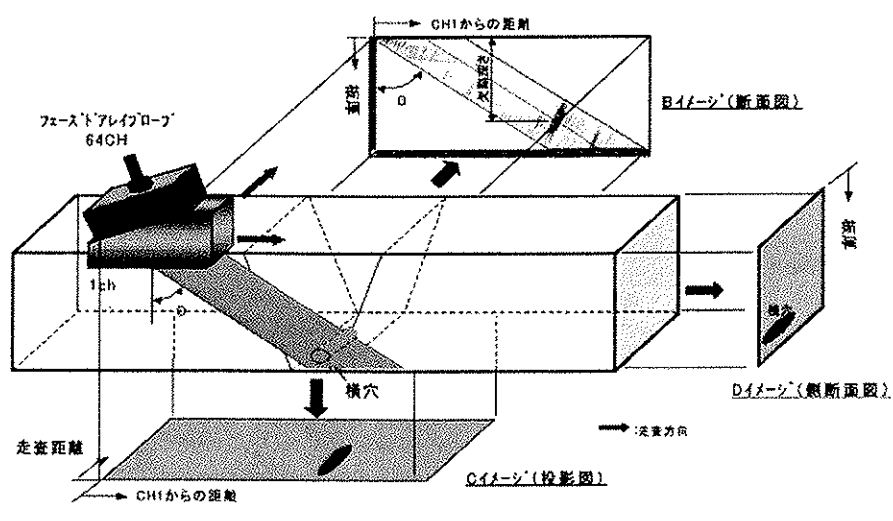


図. 1-3-1-3 探傷図形模式図 1-3-1)

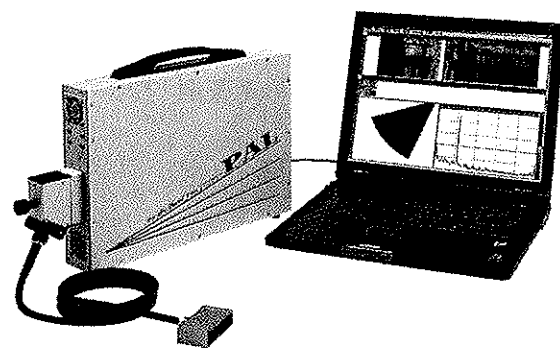


図. 1-3-1-4 装置 1-3-2)

1-3-2. 適用段階

フェーズドアレイ法は、医療分野においてエコー診断技術として広く用いられている。探傷画像が鮮やかできれいであることのメリットも大きく、超音波の伝播方向を変化させることが出来る等の特徴を生かして、原子力分野を中心に複雑な形状部の探傷に多く適用されている。特に原子力発電プラントの ISI (In Service Inspection : 供用期間中検査) におけるきずのサイジングのための一手法として取り入れられ、JEAG4207「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷検査指針」が 2004 年に改正され、付録「欠陥の深さ寸法測定要領」の第 5 章に「フェーズドアレイ法による欠陥深さ寸法測定要領」についての基準も制定された。橋梁分野においても、土木研究所において、大学、関係公団、橋研と共同研究を展開した「新設の鋼製橋脚隅角部の品質を確保するうえでの非破壊検査技術の開発」において、フェーズドアレイ法を中心とする各種探傷法の性能確認試験が実施され、「鋼製橋脚隅角部の非破壊検査法に関する共同研究報告書 (I)」がまとめられている。その後、引き続き実きずが内在された 9 体の試験体で回送試験が実施されており、その報告書 (II) が待たれるところである。

1-3-3. 克服すべき課題

医療分野では広く用いられているフェーズドアレイ法であるが、工業分野でも最近の電子技術の発展に伴い実用化に向けての研究がなされている。しかしながら、現状では装置の画像システムの違いで、得られる試験結果に差異が生ることがある。また、探傷時に使用する探触子についても、通常の探傷に使用する斜角・探触子と異なり取扱いが困難である。下記に探傷に際しての課題について述べる。

- ① 探触子が大きいため、狭隘な場所での探傷には不適である。
- ② 斜角探傷の場合、接近限界距離が大きいため直射の領域が小さい。
- ③ 瞬時に膨大なデータを取り込むため、探傷時の転送速度に制限がある。また、データ量が膨大であり、取扱いに利便性を欠く。
- ④ 探触子のシュー（断面積）が大きく、探傷面との接触面積が大きいため、接触面を均一に保つことが難しく、このため機器のセットに時間を要する。特に横向・上向探傷は困難である。
- ⑤ 薄板の溶接構造の場合、角変形・うねり等で探傷面が歪んでいる状態では、接触状態を均一に保つのは困難である。
- ⑥ 自動探傷への適用には、機器操作・ファイルの合成等、時間と手間がかかる。今後、効率的な支援ソフトの開発が必要である。

【参考文献】

- 1-3-1) 芝田 三郎, 船戸 一寛: フェーズドアレイ法による欠陥検出技術, IIC REVIEW, N0.33, pp.27-35, 2005.
 1-3-2) INDES ホームページ : <http://www.krautkramer.co.jp/products/pal/index.html>

1-3-3)川浪精一, 黒川政秋, 増本光一郎: 非破壊検査の信頼性向上を可能にしたフェーズド
 アレイ UT 技術, 三菱重工技報, Vol.41, No.1, pp.18-19, 2004.

1-4. 電磁超音波

1-4-1. 電磁超音波の原理¹⁻⁴⁻¹⁾

超音波探傷試験において, 超音波の発生方法の一つとして電磁超音波がある. 電磁超音波とは電磁気力を利用するものだが, さらに二つに分類される. 一つはローレンツ力を利用するものであり, もう一つは磁歪効果を利用するものである. どちらも広義には電磁超音波であるが, 狭義にはローレンツ力を利用したものを指す. 後者は磁歪法と呼んで区別することもある. 電磁超音波は ElectroMagnetic Acoustic Transducer の略で EMAT と呼ばれるが, こちらも狭義にはローレンツ力を利用したものを指すことが多いようである.

電磁超音波のセンサは磁石とコイルより構成されている. 金属試験体表面に近づけたコイルに高周波電流を流すと, 金属内部には渦電流が発生する. 渦電流と磁石により与えられた磁場の相互作用により, 金属粒子は力を受けることになる. ローレンツ力型と磁歪効果型とでは, 磁石やコイルの配置が異なっている. 磁石により与えられた磁場のことをバイアス磁場と呼ぶ.

電磁超音波センサにより生じた超音波を特に電磁超音波と呼ぶこともあるが, 圧電素子などで発生された超音波とは本質的には同じものである.

a) ローレンツ力利用のセンサ¹⁻⁴⁻¹⁾

ローレンツ力利用のセンサにおいては, 図.1-4-1-1 に示すような方向に力が発生する. つまり, 試験体表面を x-z 平面とすると, コイルによる渦電流は x-z 平面に平行に発生する. 磁場は y 軸に平行な方向で与えられている. 渦電流が z 軸正の方向に流れているとすると, ローレンツ力は x 軸正の方向に発生する.

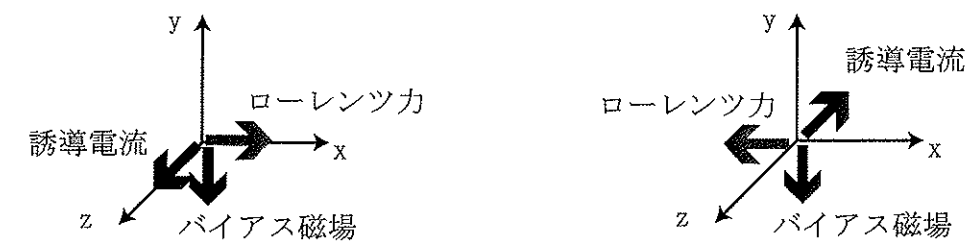


図.1-4-1-1 ローレンツ力利用

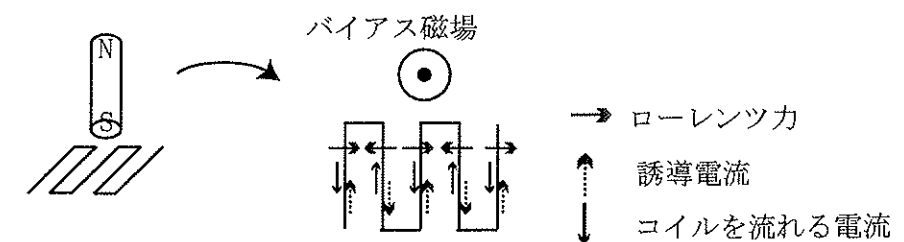


図.1-4-1-2 板波用センサ (ローレンツ力利用型)

b) 磁歪効果利用のセンサ¹⁻⁴⁻¹⁾

磁歪効果型のセンサにおいては、図.1-4-1-3 に示すようにコイルや磁場の向きが置かれている。ローレンツ力利用型のセンサと大きく異なるのは、誘導電流が作る磁場の向きと平行に磁場を与えている点である。誘導電流による磁場とバイアス磁場が重なった磁場を複合磁場と呼んでいるが、高周波電流をコイルに流せば、複合磁場は強めあったり、弱めあったりすることになる。鋼などの磁性体材料では、巨視的には磁気スピンに方向性がなくなっているが、微視的には方向性がある。複合磁場が作用することにより、材料内の磁気スピンに変化がおき、これが材料に歪を生じさせる。磁気スピンの変化により材料の伸び縮みが生じることを磁歪効果という。

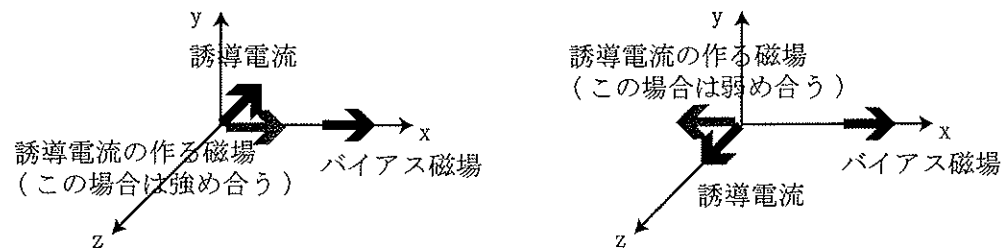


図.1-4-1-3 磁歪型

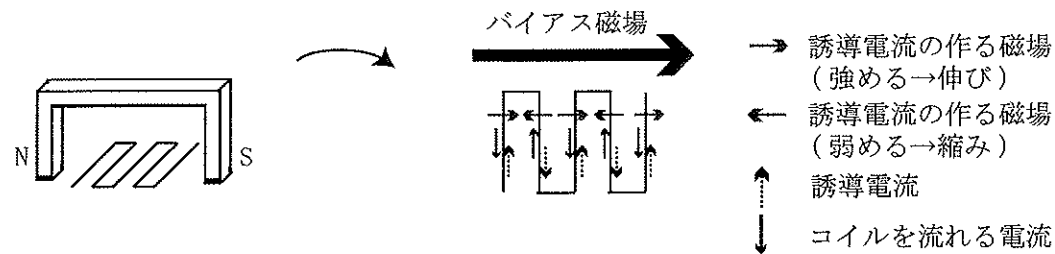


図.1-4-1-4 板波用センサ (磁歪型)

1-4-2. 電磁超音波のシステム構成

電磁超音波システムの構成を図.1-4-1-5 に示す。システムはパルス発生器（ファンクションジェネレータ）、増幅器、オシロスコープおよびセンサである。ファンクションジェネレータでは高調波を発生させる。発生された高調波は増幅され、センサに送られる。センサからは（電磁）超音波が試験体に送信される。センサは1個だけ、もしくは複数個でも利用可能であるが、受信波はセンサで電気信号に変換されて、増幅器に送られ、オシロスコープで波形が観察される。

圧電素子による超音波探傷システムと比較してもそれほど異なる器材を使用するわけではないが、電磁超音波の場合、高出力、高性能のアンプの使用が必要である。

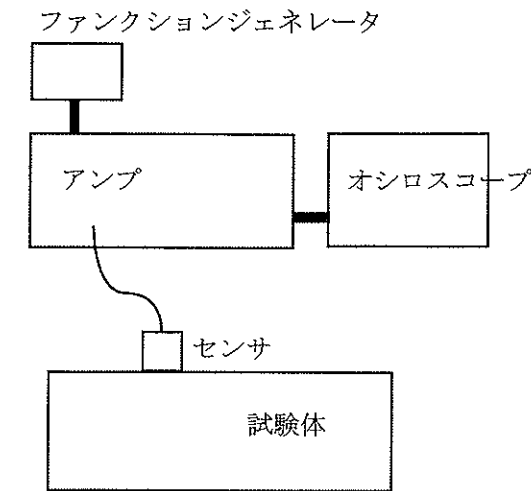


図.1-4-1-5 電磁超音波システムの概略

1-4-3. 電磁超音波の適用段階

電磁力を利用した超音波の発生が発見されたのは1960年代後半であり、その後の1970年代からThompsonを中心として、電磁超音波センサの研究がなされてきた¹⁻⁴⁻²⁾¹⁻⁴⁻³⁾。電磁超音波センサの特徴の一つとしては非接触であることがあげられる。非接触であることを利用して、鉄鋼の熱間圧延処理などの品質管理に用いられてきた。適用当初のころは利用していた波としては縦波が多かったようである。

その後、電磁超音波センサによる板波の発生方法の検討がなされ、鉄鋼関連以外においても、特にパイプやタンクなどで板波による探傷に適用されている^{1-4-4)~1-4-12)}。

1-4-4. 実用もしくは普及のために克服すべき課題

鋼橋溶接部の検査に用いられている圧電素子による超音波センサと特に比較した電磁超音波センサの特徴は次のようである。

- ①非接触である。
- ②SH波の送受信が容易である。
- ③センサのサイズが大きい。
- ④機器が高価である。
- ⑤感度が低い。

①で述べた非接触で送受信が行えることは安定した音響結合状態を保つためにはすぐれている。しかしながら、鋼橋溶接部の探傷には②で述べたSH波はそれほど使用されておらず、電磁超音波で置き換えようといった需要はそれほど考えられない。③のセンサのサイズに関しては、圧電タイプは20mm程度であるが、電磁超音波センサでは30~40mmと一回り大きくなる。狭隘な箇所を検査するには不利な条件となる。⑤で述べたように、電磁超音波センサは感度が低いと一般に指摘されている。この問題は電磁超音波センサを適用

する上でもっとも不利な条件であると考えられる。

普及するために重要な点は次に示す要件と考えられる。

①SH波を利用する探傷箇所を増やす。

②非接触であることを利用し、常時監視するような用途とする。

【参考文献】

- 1-4-1) 村山 理一：電磁超音波センサの基礎，非破壊検査，Vol.51, No.2, pp.62-67, 2002.
- 1-4-2) Thompson: A Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.20, No.4, pp.340-346, 1973.
- 1-4-3) Thompson: A Model for the Electromagnetic Generation of Ultrasonic Guided Waves in Ferromagnetic Metal Polycrystals, Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.25, No.1, pp.7-15, 1978.
- 1-4-4) 藤澤 和夫：鉄鋼・非鉄分野における電磁超音波法の応用，非破壊検査，Vol.51, No.2, pp.68-73, 2002.
- 1-4-5) 佐藤 道雄：メンテナンス分野における電磁超音波法の応用，非破壊検査，Vol.51, No.2, pp.74-78, 2002.
- 1-4-6) 服部 晋一，島田 隆史，亀山 俊平，松橋 貫次：低周波探触子とその応用—金属磁歪素子を用いた低周波弾性波法によるコンクリート構造物診断— 非破壊検査，Vol.52, No.1, pp.14-19, 2003.
- 1-4-7) Sugiura and Maruyama: Effects of a flaw on acoustic wave propagation by an EMAT system, Review of Progress in QNDE, Vol.17, pp.145-160, 1998.
- 1-4-8) Guo, Achenbach, and Krishnaswamy: EMAT generation and laser detection of single Lamb wave modes, Review of Progress in QNDE, Vol.17, pp.201-208, 1998.
- 1-4-9) Lim, Dixon, Edwards and Palmer: The detection of magnetic phase transitions in ER-TM by electromagnetic acoustic transducers, Review of Progress in QNDE, Vol.17, pp.1451-1456, 1998.
- 1-4-10) Igarashi, Alers, and Purtscher: Magnetostrictive EMAT efficiency as a materials characterization tool, Review of Progress in QNDE, Vol.17, pp.1485-1492, 1998.
- 1-4-11) Wilcox, Lowe and Cawley: Omnidirectional guided wave inspection of large metallic plate structures using an EMAT array, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.52, No.4, pp.653-665, 2005.
- 1-4-12) Ogi, Hirao and Ohtani: Line-focusing electromagnetic acoustic transducers for the detection of slit defects, Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.46, No.2, pp.341-346, 1999.

1-5. 非線形超音波

1-5-1. 非線形超音波とは

非線形超音波とは，材料非線形性に基づくものと境界非線形性に基づくものに分けられる¹⁻⁵⁻¹⁾。

まず，材料非線形性による非線形超音波について述べる。従来の超音波探傷では一般的に，材料によって超音波の波速は一定であると考えている。しかしながら，厳密には断熱圧縮過程においては，非線形の応力ひずみ関係を示すことが知られている。断熱圧縮過程を考慮すると，圧縮時は剛性が高くなる。そのような場合の応力ひずみ関係を図. 1-5-1-1に示す。よって，圧縮側では，波速が速く，引張側では相対的に遅くなり，波形にひずみが生じることになる。波形のひずみを模式的に描いたのが図. 1-5-1-2である。この波形をフーリエ変換し，周波数成分を調べると，入射周波数の整数倍の周波数の高調波が現れることになる。これを図. 1-5-1-3に示す^{1-5-1) 1-5-2)}。

次に境界非線形性に基づく非線形超音波であるが，図. 1-5-1-4に示すような不完全結合の界面を考える。この界面に縦波超音波が入射し透過していく場合，圧縮の際は入射超音波は界面を透過していくのに対し，引張の際は界面に隙間ができることになり，入射波は透過していかないことになる。これを模式的に描くと図. 1-5-1-5のようになる。この透過波をフーリエ変換すると，入射周波数の整数倍の周波数の高調波が生じることになる。このような境界非線形性に基づく高調波は疲労き裂などの，不連続面でも発生することがある。

入射超音波の振幅がき裂開口幅よりも大きければ，透過波は発生するが，き裂開口幅のほうが入射超音波の振幅よりも大きければ，透過波は発生しないことになる^{1-5-1) 1-5-3)}。

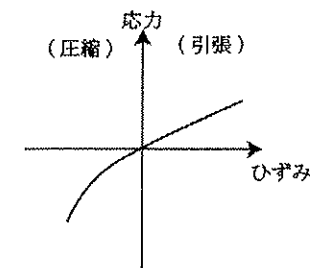


図. 1-5-1-1 応力ひずみ関係

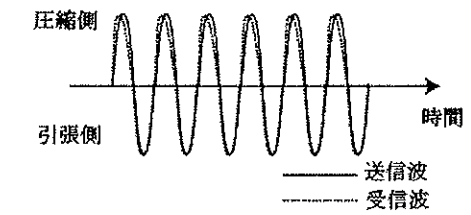


図. 1-5-1-2 波形のひずみ

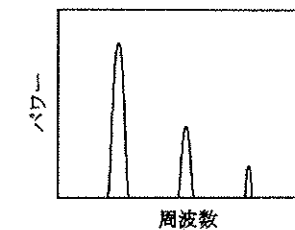


図. 1-5-1-3 ひずんだ波形のフーリエ変換

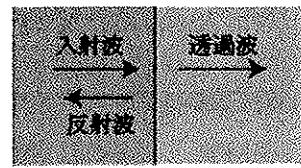


図. 1-5-1-4 不完全結合界面

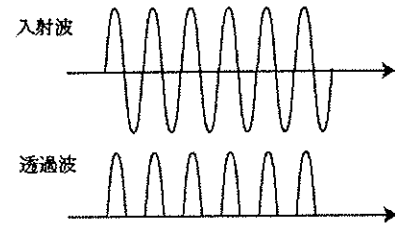


図. 1-5-1-5 不完全結合界面の入射波と透過波

1-5-2. 非線形超音波のシステム構成

非線形超音波システムにおいても、パルス発生器、超音波センサが必要なのは従来の超音波探傷装置と同じである。

従来のもの異なる点は、高出力なものが必要であることである。入射波はバースト波である必要がある。これは、周波数解析を行う際に、狭帯域のほうが高調波成分を検出しやすいことと同時に、非線形現象は微小なため検出しにくく、1波のみの入力ではなく、何波も入射したほうが検出しやすいためである。

入射超音波の振幅もある程度の大きさが必要で、10nm オーダーで 10MPa オーダーの応力が発生しなければ、高調波も発生しないことがあるようである。そのためにはパルス発生装置の送信電圧も 300~500V である必要がある。

波の受信においても、従来よりも高性能なものが望まれる。高調波を受信するので、サンプリング周波数も十分なものでなければならない。また、100 回以上の波形収録を行い加算平均するなどの措置が必要となることがある^{1-5-1) ~1-5-3)}。

1-5-3. 非線形超音波の適用段階

材料非線形性による超音波および境界非線形性による超音波の現象はそれぞれ 1960 年代、70 年代には知られていた^{1-5-4)、1-5-5)}。理論的および実験的研究が増えたのは 1990 年代以降のように思われる。その理由としてはパルス発生装置、オシロスコープなどの高性能化によるものと思われる。試験体としては、花崗岩や鋼、アルミニウム内の疲労き裂、シリカ化合物の接着状況などに適用されている。これらの試験体は比較的小型のものも多く、cm オーダーである。現場での適用例などはそれほど多くはなく、実験室レベルといえる^{1-5-2)、1-5-3)、1-5-6) ~1-5-10)}。

図. 1-5-3-1 は衝撃を受けた鋼板の板厚中央部付近に生じた微小き裂の検出を非線形超音波を用いて検出している例である¹⁻⁵⁻²⁾。試験片の厚さは 8mm 程度で、図. 1-5-3-1 に示すように、ターンテーブルにのせられるくらいの寸法である。送信探触子は 5MHz であり、透過波を受信するように受信探触子を置く。受信探触子の周波数は 10MHz である。微小き裂が生じるのは 2.7GPa の衝撃的応力をかけた場合で、衝撃前と衝撃後の波形を計測している。波形を図. 1-5-3-2 に示す。実線が衝撃後で破線が衝撃前である。衝撃前後で波形が若干変

化している。波形をフーリエ変換したものが図. 1-5-3-3 である。衝撃後の波形を変換したものは、5MHz の他に、10MHz にも小さなピークが見られる。

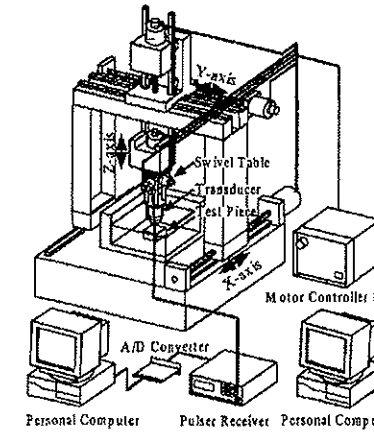


図. 1-5-3-1 実験装置

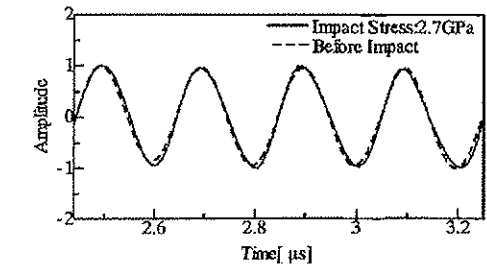


図. 1-5-3-2 衝撃前と後の波形

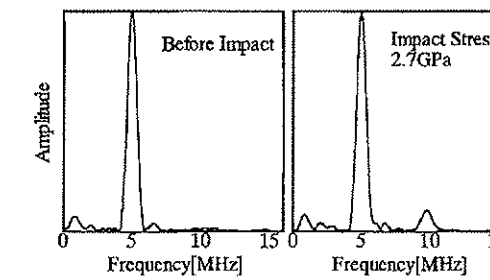


図. 1-5-3-3 衝撃前と後の波形のフーリエ変換

1-5-4. 実用もしくは普及のために克服すべき課題

非線形超音波探傷試験を鋼橋に適用するために克服すべき課題は次のように考える。

- ①非線形超音波の発生条件の詳細な解明。
- ②大振幅送信が可能な超音波センサ
- ③計測システムの高性能化
- ④現場での計測における雑音などの処理

①と②は関連しているが、非線形超音波の発生条件についてはまだよくわからないことも多いのが事実である。「非線形超音波とは」において述べているように、非線形性が現れるには、大振幅の超音波を送信する必要がある。接触によるき裂の開閉口現象は入射超音波の振幅やき裂自身の開口幅にも依存する。また、従来の超音波センサで送信されている波の振幅については nm オーダーであるとは言われているが、計測はそれほど容易ではない。垂直探触子の振動面をレーザーで計測するなどの例はあるが、振動面の振幅が試験体に入射される超音波の振幅となるということは確かめられていない。

③と④も関連する部分が多いが、非線形現象は計測が困難である。特に現場での適用を考えると、雑音の影響を大きく受けると考えられる。適当な波形処理をする必要があると思われ、検討すべき課題と考える。

き裂先端の開閉口現象により、溶接きずと疲労き裂の識別を行うといった検討はこれまでもなされてはいるが、現場で適用までにはいたっていない。上記課題が克服されることで、適用性が増加することが期待できる。

【参考文献】

- 1-5-1) 川嶋 紘一郎：非線形超音波とは？、非破壊検査 Vol.53, No.3, pp.180-181, 2004.
- 1-5-2) Ohara, Kawashima, Yamada, and Horio: Evaluation of amorphous diffusion bonding by nonlinear ultrasonic method, Review of Progress in QNDE, Vol.23, pp.944-951, 2004.
- 1-5-3) 奥村 毅, 佐藤 雅美, 川嶋 紘一郎：漏洩レイリー波の非線形性を用いた閉じたき裂の深さ測定, 非破壊検査 Vol.53, No.3, pp.159-164, 2004.
- 1-5-4) Breazeale and Thompson: Finite-amplitude ultrasonic waves in aluminum, Applied Physics Letters, Vol.3, No.5, pp.77-78, 1963.
- 1-5-5) Buck, Morris, and Richardson: Acoustic harmonic generation at unbonded interfaces and fatigue cracks, Applied Physics Letters, Vol.33, No.5, pp.371-373, 1978.
- 1-5-6) TenCate: New nonlinear acoustic techniques for NDE, Review of Progress in QNDE, Vol.20, pp.1229-1235, 2001.
- 1-5-7) Hurley and Telschow: Probing acoustic nonlinearity by mixing surface acoustic waves, Review of Progress in QNDE, Vol.20, pp.1236-1241, 2001.
- 1-5-8) Rothenfusser and Schiel: Nonlinear ultrasonic effects in adhesive joints, Review of Progress in QNDE, Vol.20, pp.1253-1260, 2001.
- 1-5-9) Yost, Cantrell, and Na: Nonlinear ultrasonic pulsed measurements and applications to metal processing and fatigue, Review of Progress in QNDE, Vol.20, pp.1268-1275, 2001.
- 1-5-10) Kawashima, Okada, Nawa, and Nishimura: Evaluation of minute cracks generated by spallation with nonlinear ultrasonic measurement, Review of Progress in QNDE, Vol.20, pp.1283-1289, 2001.

1-6. 赤外線応力測定システム

1-6-1. 原理

非接触応力計測手法のとして、赤外線による手法がある。測定原理としては、固体が、断熱的に弾性変形が生じるとき、固体内部には熱弾性効果¹⁻⁶⁻¹⁾にもとづく微小な温度変化が生じる熱弾性効果を用いている。金属材料など均質な材料の熱弾性効果は

$$\Delta T = -T (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y) \alpha / \rho C \sigma = -KT\Delta\sigma$$

で表され、温度変動 ΔT は主応力の変動 $\Delta\sigma$ に比例する。ここで、 T は材料の絶対温度、 K は熱弾性係数で、 α を材料の線膨張係数、 ρ をその密度、 $C\sigma$ を応力一定のもとでの比熱として、 $K = \alpha / \rho C \sigma$ で与えられる材料定数を示す。したがって、作用応力の変動によって被測定物表面に生じる温度変化 ΔT の分布を計測することで全表面にわたる応力データ($\Delta\sigma = \Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y$)を評価することができる。

1-6-2. 測定方式

温度分布計測方式には、1つの検出器で温度場を走査する方式と、多くの検出器が2次元的に配置されたアレイ検出器方式がある。

後者はセンサ間の感度補正を必要とするが、高速でデータを取り込むことができ、計測の高速化が図られるメリットがある。

装置により、装備されるセンサ、画像構成法、相関信号処理法などに違いや特徴はみられるものの、いずれの方式においても、温度レスポンスとしては0.001 Kに対応している。測定フレームレートは1000 フレーム/秒、最大計測温度は約1000°C、測定周波数は1~1000Hz程度まで可能である。

測定においては、試験体には繰返しの载荷が必要である。その理由は、熱弾性効果による温度変化は非常に微弱なものであるからである。そのため、測定ではサーボ疲労試験機などと連動させ、同期を取る必要がある。



図. 1-6-2-1 赤外線応力計測システムの一例

1-6-3. 適用段階

主として、実験室内などの外乱が少ない状態での計測に使用されることが多い状況にある。テーパーのある試験片や穴の開いた試験片を用いて、平滑な試験片と比較して温度分布がどのように異なるかといった検討や^{1-6-2),1-6-3),1-6-5),1-6-7)}、载荷による応力変動幅を変化させた場合の限界応力の測定などがある。また、表面近傍にある穴に関し、穴の直径や穴の表面からの距離を変えた場合の、穴の検出能力について調べた例もある^{1-6-4),1-6-5)}。

外部での計測例として、図. 1-6-3-1~3 に揺れる街路灯によって発生する温度変化と街路灯の赤外線応力画像を示す¹⁻⁶⁻⁸⁾。



図. 1-6-3-1 街路灯の基部写真

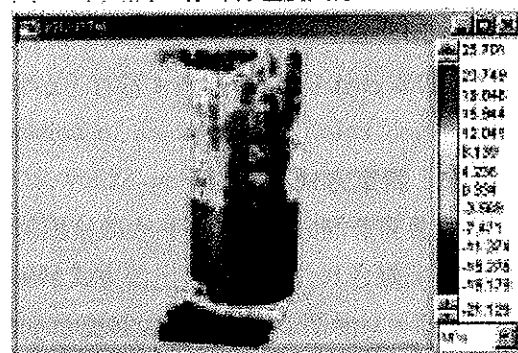


図. 1-6-3-2 街路灯の基部赤外線応力画像

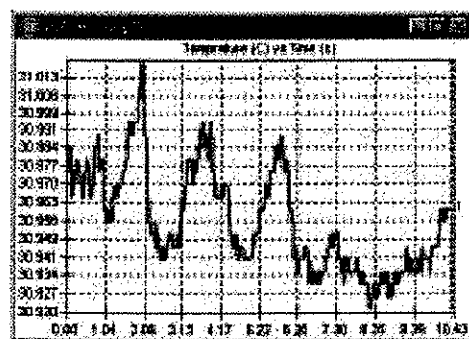


図. 1-6-3-3 揺れる街路灯の温度変化

1-6-4. 実用もしくは普及のために克服すべき課題

赤外線による応力測定装置の特徴をまとめると次のようになる。

- ①表面近傍にある欠陥の検出に関する検討も行われてはいるが、基本的には表面にある応力集中部の検出ができる。
- ②熱弾性効果によって得られる応力は主応力の大きさを示している。
- ③熱弾性効果による温度変化は非常に小さいので、基本的には繰返し荷重を载荷する必要がある。
- ④熱伝導率の高い材料のほうが測定しやすい。

⑤金属材料では、表面を銀白色とするよりも濃い色の塗料を塗ったほうが測定しやすい。

⑥周囲の温度が低いほうが測定しやすい。

①で述べたように、被測定物の全面にわたる応力分布が評価できるため、そのデータは直示的であり、説得力がある。また、製品の設計・開発、最適形状の決定の補助ツールとして、また、しばしば問題になる製品の危険箇所の予測や安全性の確認のため、きわめて有用と思われる。また①と関連して、応力測定以外の使用方法としては、部材に疲労などで亀裂が入っている場合に、発生する温度の不連続性をとらえることによる、内部亀裂の早期発見などにも適用が期待される。

ただ、③に述べたように現場では、長時間定常状態を継続させて計測精度を確保するような計測条件を整わせることが難しいと思われる。また、交通荷重作用時に鋼橋の一般部発生する応力計測のように、過渡的な状態、かつ、発生応力レベルが低い状態の計測は困難であると思われる。これらの解決が普及の鍵を握っていると考える。

応力そのものの測定ではないが、コンクリート構造物では、サーモグラフィ法が適用されている。サーモグラフィ法では、たとえばトンネルや盛土擁壁壁面のコンクリートにヒーターやランプなどの熱源を近づけ、ある程度の加熱をしたのち、温度の不連続面を検出することによって、き裂を検出する方法である。鋼構造物においても、疲労き裂進展によって生じる雨水などの漏れを検出することは可能と思われる。

【参考文献】

- 1-6-1) Thomson, W.: On the Dynamical Theory of Heat, Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Vol.20, pp.261-288, 1853.
- 1-6-2) 宮崎 宏, 押久保 武, 増喜 彰久, 仲山 要二: 表面温度検出による応力測定, 非破壊検査, Vol.30, No.8, pp.546-552, 1981.
- 1-6-3) 宮崎 宏, 押久保 武, 仲山 要二: 赤外線応力測定法における測定精度に関する問題, 非破壊検査, Vol.31, No.8 pp.519-524, 1982.
- 1-6-4) 宮崎 宏, 押久保 武: 熱弾性応力測定法による表層内部欠陥の検出, 非破壊検査, Vol.34, No.8, pp.527-526, 1985.
- 1-6-5) 岡本 芳三, 佐川 憲彦, 神永 文人, 関谷 将三, 内田 邦雄, 古村 一朗, 石井 敏満, 衛藤 基邦, 黒川 賢: 赤外線を用いた材料欠陥の検出限界について -熱流方向の影響-, 非破壊検査, Vol.41, No.7, pp.398-405, 1992.
- 1-6-6) 岡本 芳三, 神永 文人, 佐藤 和義, 石井 敏満, 大岡 紀一, 金谷 邦雄, 江藤 芳丸, 衛藤 基邦: 赤外線放射計による表面欠陥の検出について(第3報) -検出限界と影響因子-, 非破壊検査, Vol.41, No.7, pp.393-397, 1992.
- 1-6-7) 増喜 彰久, 酒井 重保: 赤外線応力画像システムによる応力測定, 非破壊検査, Vol.44, No.3, pp.144-148, 1995.

1-6-8)http://www.tri.pref.osaka.jp/news/NO71/TRI-SERIES.html : 熱弾性応力解析法---新しい応力測定法の特徴と応用---

1-7. 熱音響法

1-7-1. 熱音響法の原理

固体に荷重が作用すると、その体積が変化する。この変化が断熱的に行われる場合、その固体の温度はわずかながらも変化する。この現象を熱弾性効果という。疲労き裂などを含んだ試験体などに繰り返し荷重を作用させると、熱弾性効果により、き裂先端部など応力集中箇所の温度変化が他の箇所よりも顕著となる。これが赤外線による応力測定の実理である。

熱音響法においても熱弾性効果を利用する。ただし、超音波など弾性波を入力として与える。き裂などを含んだ試験体に弾性波を入力した場合、き裂先端箇所は応力が集中し、熱弾性効果によりまわりよりも温度が高くなる。これを高感度の赤外線カメラで撮影すると、き裂先端部の温度が高くなって浮かび上がることになる^{1-7-1)~1-7-7)}。

1-7-2. 熱音響法のシステム構成

熱音響法においては、赤外線カメラと波動源が必要となる。波動源としては、超音波溶接機が使われることが多いようである。システム構成を図.1-7-2-1に示す。超音波溶接機から送信される波動は10kHz オーダーであるものが多い¹⁻⁷⁻¹⁾¹⁻⁷⁻²⁾。

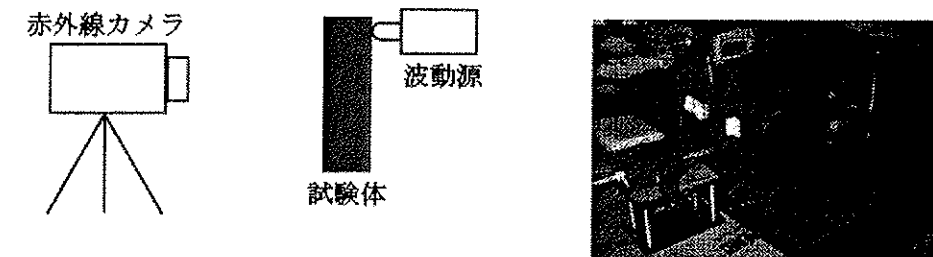


図.1-7-2-1 熱音響法システムの概略

検査結果の記録に関しては、赤外線カメラがビデオカメラにもなっているものを使われているケースが多いようである。

1-7-3. 熱音響法の適用範囲

熱音響法は実験室レベルでの実験は2000年あたりに始まったようである。図.1-7-3-1はノッチと疲労き裂を有する試験片に対し、熱音響法を適用した例である。疲労き裂のほうのみに対し、先端で温度の上昇がみられるのがわかる¹⁻⁷⁻¹⁾。

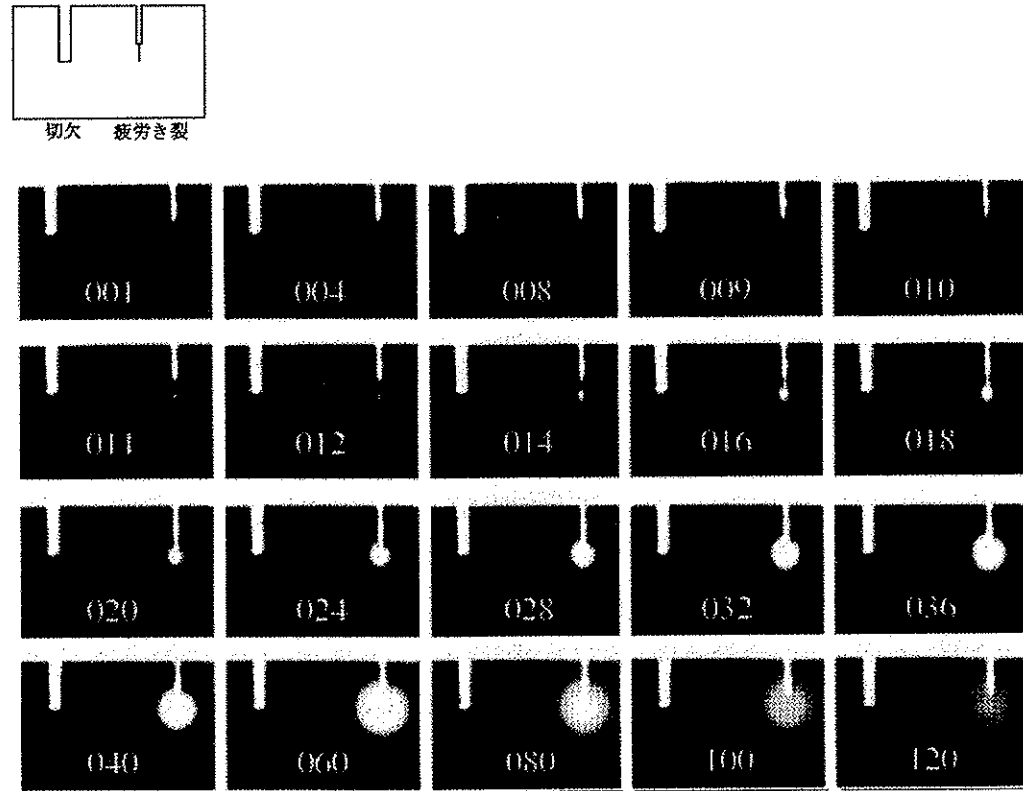


図. 1-7-3-1 切欠と疲労き裂への熱音響法適

図. 1-7-3-2 はコンポジット材料に人為的に剥離箇所をもうけた試験体での実験例である。試験体は 30cm 四方であり、剥離箇所は空隙となっている。A,B,C,D の順に深い位置に剥離箇所があり、A は 2~3 層目、B は 5~6 層目、C は 8~9 層目、D は 10~11 層目となっている。剥離箇所を正確に検出していることがわかる¹⁻⁷⁻³⁾。

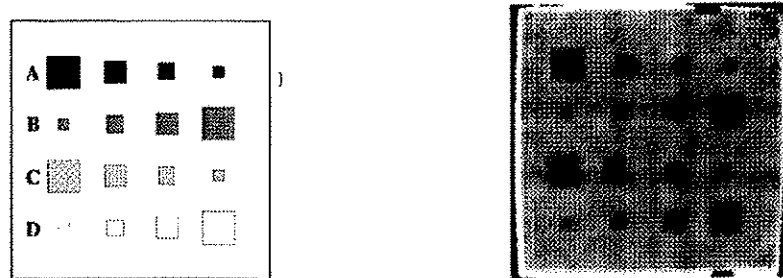


図. 1-7-3-2 コンポジット材料の剥離の検出

熱音響法は開発当初少し後に、適用性を調べることを目的に航空機などで試験的に適用されていた。その例を図. 1-7-3-3 に示す。図. 1-7-3-3 は飛行機エンジンのタービン刃に生じた疲労き裂を検出している例である。¹⁻⁷⁻²⁾

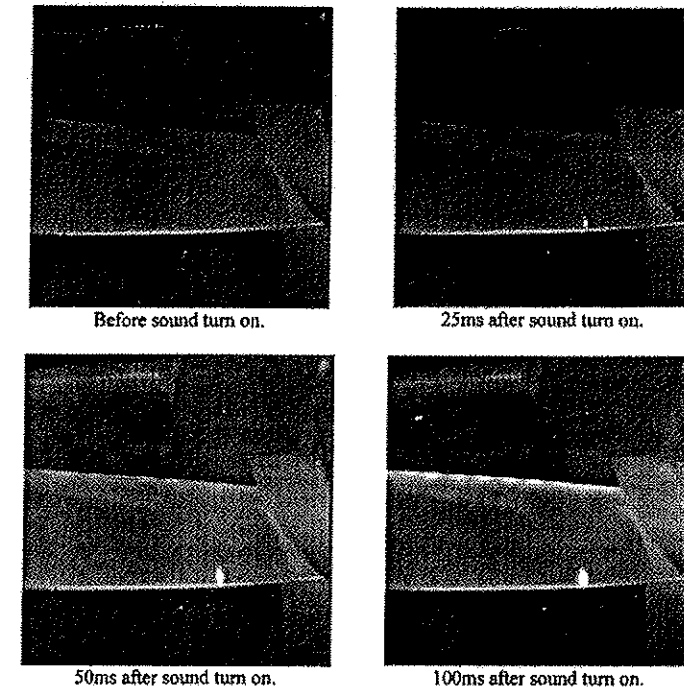


図. 1-7-3-3 飛行機エンジンのタービン刃に生じた疲労き裂の検出

1-7-4. 実用もしくは普及のために克服すべき課題

熱音響法は非接触で検査ができ、一度に広範囲にわたって検査することが可能である。き裂の検出においても、映像で見ることができ、感覚的にも理解しやすい方法である。

熱音響法は赤外線応力測定装置などと同様、表面および表面近傍に位置する疲労き裂を検出することが可能である。表面近傍といってもどれくらいの深さおよびどれくらいの寸法のき裂を検出できるかなどの検討例はまだそれほど多くないのが現状である。

波動源としては 10kHz オーダーのものがよく用いられているが、広い範囲を検査するには、周波数を下げる必要が生じる。周波数と入射エネルギーおよび検出できるき裂の寸法などに関してはそれほど詳細な検討はなされていないようである。

赤外線カメラをビデオに収録することで記録をしている例が多いが、き裂位置の正確な把握や自動化に対しては、記録性の向上の余地がまだまだあると思われる。

【参考文献】

1-7-1) Thomas: Thermal NDE techniques – from photoacoustics to thermosonics, Review of Progress in QNDE, Vol.21, pp.3-13, 2002.

1-7-2) Han, Favro, Ouyang, and Thomas: Recent developments in thermosonic crack detection,

Review of Progress in QNDE, Vol.21, pp.552-557, 2002.

1-7-3) Winfree and Zalameda: Single sided thermal diffusivity imaging with a shuttered thermographic inspection system, Review of Progress in QNDE, Vol.21, pp.544-551, 2002.

1-7-4) Simon: Industrial used of a new hybrid sonic/infrared NDT technique, Review of Progress in QNDE, Vol.21, pp.536-543, 2002.

1-7-5) Perez and Han: Pulsed thermography modeling, Review of Progress in QNDE, Vol.21, pp.564-571, 2002.

1-7-6) Sun: Analysis of quantitative measurement of defects by pulsed thermal imaging, Review of Progress in QNDE, Vol.21, pp.572-576, 2002.

1-7-7) Ouyang, Favro Thomas, and Han: Theoretical modeling of thermosinic imaging of cracks, Review of Progress in QNDE, Vol.21, pp.577-581, 2002.

1-8. X線による応力測定

1-8-1. 原理

材料や構造物の強度評価に必要な残留応力の測定法の一つにX線による方法がある。X線を多結晶材料に照射し、反射回折線の情報から応力を求める。結晶面の格子面間隔が応力によって変化するのを、ブラッグの条件を満足する回折角から格子面間隔の変化、さらに計算によりひずみや応力を求める。

ある方向から特定の波長のX線を材料の表面に投射すると、X線は結晶の各格子面によって散乱する。図.1-8-1-1に示すように、波長 λ の入射Xと結晶格子面の角度を θ 、その格子面間距離を d 、 n を正の整数とすれば、

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

の関係が成立するとき、隣接する格子面からの散乱X線の位相が等しくなり、干渉して強めあう。即ち角 θ の方向に強い回折現象が認められる。上式をブラッグの回折条件、 θ をブラッグ角という。

X線が照射される材料が多数の微結晶粒子で構成され、さらにそれぞれの向きがばらばらであれば、上式を満足する回折X線は円錐状の方向に反射される。このとき、図.1-8-1-2のように入射X線の反対側に垂直に写真フィルムを置けば、デバイ環と呼ばれる円形の回折像が得られる。

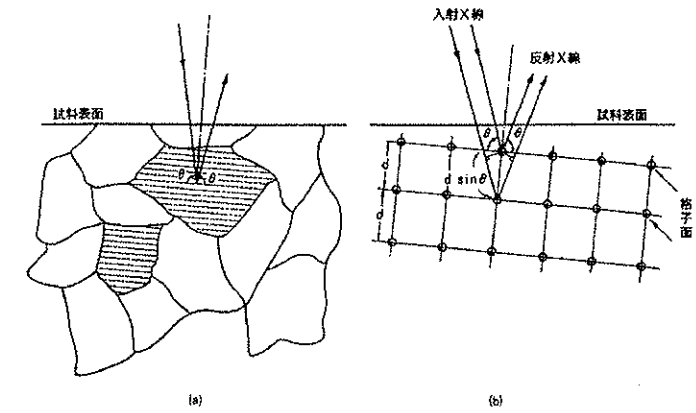


図.1-8-1-1 結晶格子からのX線の反射・回折

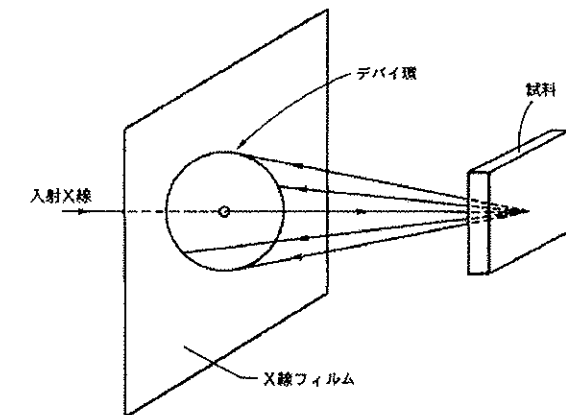


図.1-8-1-2 背面反射法(写真法)

試験材料に応力が作用したり、内部応力があると、X線の入射角度を変えた場合、デバイ環のプロフィールに変化が生じる。

即ち、材料が一様に弾性変形を受け内部応力が存在すると、材料を構成している結晶粒の格子面間隔が変化し、X線回折線は応力のない状態の反射位置から移動するとともにその幅が広がる。この変化を精度よくとらえて材料のもつ応力を知る方法がX線応力測定法である。

X線による応力測定の基礎理論としては、厳密には、x, y, z座標に対して働く応力の方向余弦をもつ6個の伸縮率(ひずみ)を求めて、これらを代数的に解き、応力を計算する。しかし特殊な場合を除き、一般にはX線応力測定法では、X線の侵入深さは100ミクロン以下という極めて薄い表面層のひずみを測定するため、表面の法線方向の応力成分は零と考慮して、2次元応力状態の弾性力学として扱って計算する。

1-8-2. 測定装置

測定装置としては、図.1-8-2-1に示すようなものが一例としてあり、測定部分と演算部分で構成されている。

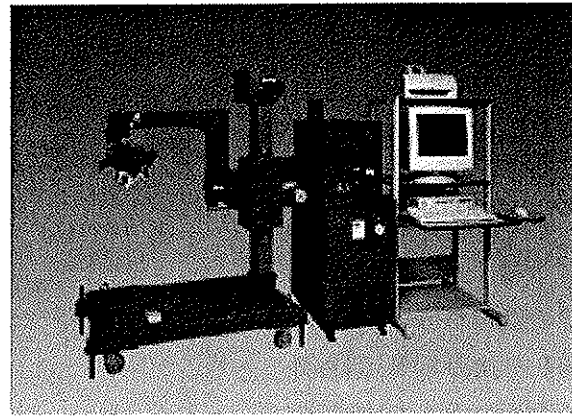


図.1-8-2-1 X線応力測定装置の一例

1-8-3. 適用段階

工場内での検査には比較的高い頻度で使用されているようであるが、屋外での計測での実績はなかなか見つからない。

1-8-4. 実用もしくは普及のために克服すべき課題

残留応力を非破壊で計測する方法としては、本方法以外に磁歪計測法などがある。残留応力の計測精度に表面の状態が影響を及ぼす。実験室レベルでは、それらの影響を少なくするを行えるが、実橋の部材では、その実現が難しい。鋼橋への普及促進のためには、これらを克服することが必要と考える。

1-9. 全方位音響探査

1-9-1. 原理

全方位音響探査システムは、これまで、計測者が製作していた、マイクロフォンのアレイ配置を、球バップルマイクロホンと呼ばれる球の表面に配置し、球を取り囲むすべての方向から到来する音に対して音源探査を行うことができるシステムである。

それぞれのマイクロホンで得られた音圧レベル差、位相差の情報を利用し、音源探査を行う。探査可能な周波数範囲は、200Hz弱～3000Hz弱程度である。また、球表面に12個のCCDカメラを配置し、音源探査した結果と該当する方向の写真を重ねて表示することが可能になっている。

1-9-2. システム構成

全方位音響探査システムは、図.1-9-2-1に示すように、4点の部品で構成される。

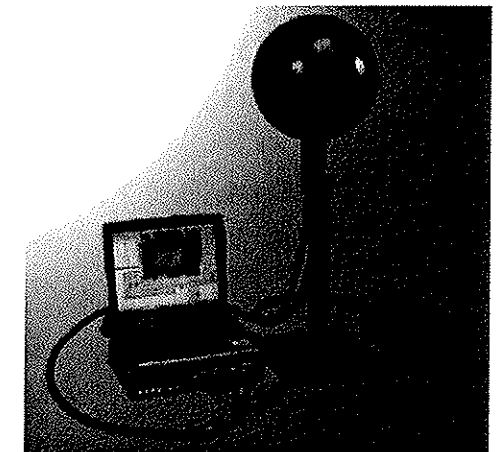


図.1-9-2-1 システム構成例

1-9-3. 適用段階

車室などの小空間内、屋外、一般の室内での音源探査や、鉄道騒音探査に適用されている。

図.1-9-3-1 および2には、システムを車内に設置し、100km/hで高速道路を実走行した場合の音源探査結果を示す。1600Hzの1/3オクターブバンドを解析した結果では、ドアミラー付近で生じた風切音の音圧が高いことが示されている。



図.1-9-3-1 センサ設置状況

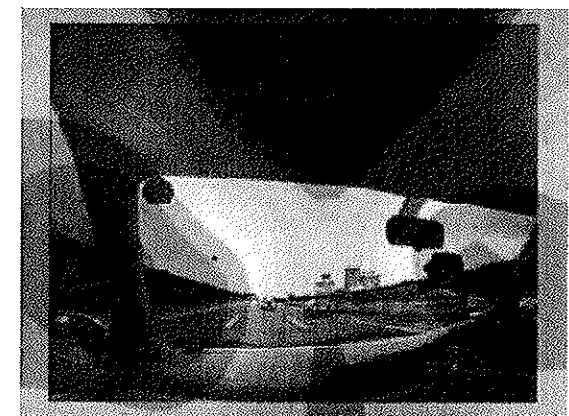


図.1-9-3-2 走行中の自動車の車室内音源探査例

1-9-4. 実用もしくは普及のために克服すべき課題

鋼橋から放射される騒音のうち、構造音に適用することを考えた場合、放射音の周波数特性が 200Hz 以下の場合もあり、普及するにあたり、測定可能な周波数領域を低周波側まで拡張することが必要であると思われる。また、過渡的な騒音であることが多いことから、そのような騒音への対応可能性の明確化が、課題として挙げられる。

1-10. 圧電フィルムを用いた損傷検知システム

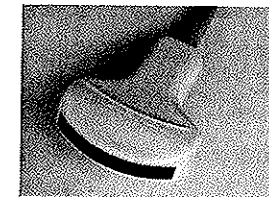
1-10-1. 圧電フィルムの原理およびシステム構成

ある種の結晶体には、電圧をかけられると、内部に応力を発生するものが存在する。このような現象を圧電効果といい、圧電効果を有する結晶体を圧電型変換子という。逆に、応力をかけると内部に電位差を生じる減少を逆圧電効果という。水晶の圧電効果はピエールキュリーによって発見されたが、その後はセラミックス系のチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) が開発された。近年においては、圧電効果を有する高分子材料が開発されている。

圧電高分子として一般的によく知られているのは PVDF である。PVDF はビニリデンフロリド ($\text{CF}_2=\text{CH}_2$) が重合した構造をもっている。PVDF は PZT と比較して、柔軟性があり、密度が低く、音響インピーダンスも低いものとなっている¹⁻¹⁰⁻¹⁾。

圧電効果および逆圧電効果を有する素材を検査もしくはモニタリングに適用する場合、外部からのエネルギーの与え方によって、能動的検査と受動的検査にわけることができる。能動的検査とは、電気信号を圧電素子に送って、素子を変形させるというようにエネルギーを外部から与えて損傷を検知する手法である。受動的検査とは、外部エネルギーを必要とせず、計測信号をとらえて損傷を検知する手法である。

PVDF を能動的手法で利用する場合、これまでの PZT による超音波探傷と同様の使い方がなされている場合が多い。PVDF の場合は、音響インピーダンスが低いので、医用への適用が多く見られる。同心円状、または格子状に PVDF に切れ目を入れたアレイ探触子として利用されている例が多い。レンズ状にカーブをつけて収束性を向上させたものもある。図.1-10-1-1 に、アレイ探触子の例を示す¹⁻¹⁰⁻²⁾。



日本電波工業(株)ホームページより (www.ndk.com)

図.1-10-1-1 アレイ探触子

PVDF を受動的手法で利用する場合、PVDF を電極ではさみ、PVDF 表面での電機ポテンシャルを計測することになり、適当な変換を行うことにより、従来のひずみゲージと同様の使い方がなされている。ひずみゲージと大きく異なる点は、PVDF は曲面上を (2 次元的に) 連続的に覆うことができる点である。

軽量であること、柔軟性があること、能動的および受動的なセンシングができることから、PVDF をスマート構造物のセンサデバイスとして利用しようとする検討がなされている。

1-10-2. 適用段階

PVDF センサを能動的に利用し、これまでの超音波センサと同様な適用をする場合、医学の分野ではすでに実用化がなされている^{1-10-2)~1-10-10)}。

PVDF を受動的に利用し、これまでのひずみゲージと同様な適用をする場合、現在では、試験体レベルでの研究例がいくつか存在する。図. 1-10-2-1 に示すように、Matsumoto らは板状の試験体に PVDF を貼り付け、PVDF 上の電気ポテンシャルを測定している¹⁻¹⁰⁻³⁾。試験体は円孔やみぞの入ったものがあり、これらの形状が電気ポテンシャル測定結果に対する影響を調べている。塩澤らもクラックが内在された板状の試験体に PVDF を貼り付け、電気ポテンシャル分布を調べ、クラック検出の可能性について検討している。図. 1-10-2-2 に示すように、Luo らは片持ち梁試験体に PVDF を貼り付け、梁先端をハンマーで衝撃を与え、PVDF に発生する電気信号を計測している¹⁻¹⁰⁻⁴⁾。試験体には切り欠きのあるものもあり、動的応答波形のスペクトルなどを比較し、切り欠き検出の可能性を調べている。

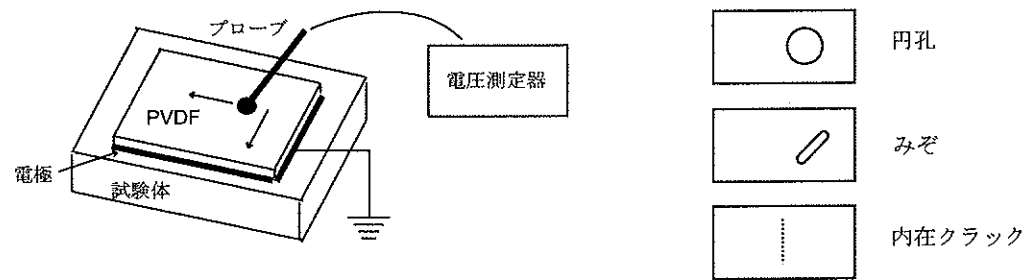


図. 1-10-2-1 PVDF による各形状欠陥の同定

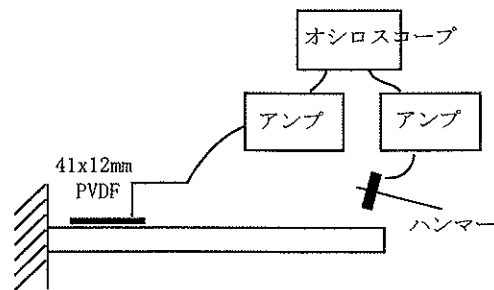


図. 1-10-2-2 衝撃時の波形受信による欠陥検出

1-10-3. 実用もしくは普及のために克服すべき課題

・PZT 圧電素子と比較して、音響インピーダンスが低い、周辺材料の影響を受けやすくなっている。この性質をうまく利用すれば、素子の望ましくない振動モードを除去することができる。近距離音場を短くすることも可能で、鋼への適用には有利な条件となる。

・音響インピーダンスが低いことは、エアカップリングの探触子を作成することも可能となり、有利な条件となる。

・素子を小さくすることができ、ハイドロフォンにも使われている。アレイ探触子にも使われている。素子が小さくなることによる感度の問題も生じると思われる。

・受動的検査に用いる場合、ひずみゲージの代用といった位置づけである側面もあり、研究室での試験体レベルでの検討にとどまっている。ひずみゲージとは異なり、面的に検査ができるといった特徴もあるが、圧電素子上のポテンシャル分布を求め、損傷位置を特定するのに、有限要素法による順解析により検証しなければならないといった煩雑さはあるといえる。

・ひずみゲージよりも価格が高い。

【参考文献】

- 1-10-1) 大東 弘二, 宮 隆雄: 圧電高分子超音波探触子, 非破壊検査, Vol.51, No.11, pp.692-697, 2002.
- 1-10-2) 小島 正: アレイ型探触子, 非破壊検査, Vol.51, No.11, pp.705-709, 2002.
- 1-10-3) Matsumoto, BIwa, Katsumi, Omoto, Iguchi, and Shibata: Surface strain sensing with polymer piezoelectric film, NDT&E International, Vol.37, pp.57-64, 2004.
- 1-10-4) Luo and Hanagud: PVDF film sensor and its applications in damage detection, Journal of Aerospace Engineering, ASCE, Vol.12, No.1, pp.23-30, 1999.
- 1-10-5) 塩澤 大輝, 久保 司郎, 阪上 隆英, 奥野 康輔: ピエゾ材料を用いた受動型電気ポテンシャル CT 法によるき裂同定に関する実験的検討, 材料, Vol.51, No.8, pp.926-931, 2002.
- 1-10-6) Lee and Ko: Measuring dispersion curves of acoustic waves using PVDF line-focus transducers, NDT&E International, Vol.34, No.3, pp.191-197, 2001.
- 1-10-7) Lewin and Schafer: Wide-band piezoelectric polymer acoustic sources, IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.35, No.2, pp.175-185, 1988.
- 1-10-8) Fiorillo: Design and characterization of a PVDF ultrasonic range sensor, IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.39, No.6, pp.688-692, 1992.
- 1-10-9) Benech, Chambered and Monllor: Acceleration measurement using PVDF, IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.43, No.5, pp.838-843, 1996.
- 1-10-10) Brown and Mason: Disposable PVDF ultrasonic transducers for nondestructive testing applications, IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.43, No.5, pp.560-568, 1996.

1-11. 光ファイバ

1-11-1. 原理およびシステム構成

光ファイバセンサは、一般にひずみや温度を測定するセンサで、以下の特徴を有している（一部 OSMOS は除く）。

- ① 測定に光を利用するため、電磁的なノイズの影響を受けず、耐雷対策の必要がない。
- ② 材質がガラスを基本としているため、耐食性に優れている
- ③ 光の低損失により、測定器からセンサ部までの距離を数 km のオーダーにすることが可能
- ④ 一本のファイバ上でひずみ分布や、他点のひずみ測定が可能。

このような特徴を総合すると、センサが屋外で長期間暴露され、かつ広範囲を網羅する必要がある土木構造物を対象としたモニタリングにおいて、光ファイバセンサは非常に有効であり、近年多数の適用実績も得ている。

現在商品化されている光ファイバセンサは大きく分類して、BOTDR、FBG および OSMOS である。各光ファイバセンサの特徴を表. 1-11-1-1 に示す。以下にそれぞれの測定原理および特徴を述べる。

表. 1-11-1-1 光ファイバセンサの比較

| | BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) | FBG (Fiber Bragg Grating) | OSMOS (Optical Strand Monitoring System) | ひずみゲージ |
|------------|--|------------------------------|---|---------------------|
| 計測精度 | $\pm 100 \mu \epsilon$ | $\pm 4 \mu \epsilon$ | $\pm 0.02 \sim \pm 0.004 \text{mm}$ | $\pm \mu \epsilon$ |
| 空間分解能 | 1m (信号光のパルス幅) | 数mm～数cm (センサ長) | 0.15～10m (センサ長) | 数mm～数10cm (センサ長) |
| 得られるひずみデータ | 長さ数kmにわたる連続分布 | ポイント (1本のファイバ上に10～20測定点) | 変位 | ポイント |
| 測定時間/周波数 | 数分 | 50～500Hz | 20～200Hz | 数MHz |
| センサ | 通信用光ファイバ | センサ部分を特殊加工した光ファイバ | 燃った光ファイバ | 抵抗線 |

【BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)】

BOTDR の技術は、元々通信用光ファイバの保守を目的として開発されたもので、光ファイバに沿ったひずみの分布を計測する技術である。測定原理は、光ファイバ中に光パルスを入射し、入射端側に帰ってくる後方散乱光 (図. 1-11-1-1) のうち、ブリルアン散乱光の光周波数が、その長さ方向のひずみの大きさに比例して変化する性質に着目している。計測手している位置は、光パルスを光ファイバに入射してからその散乱光が観測されるまでの時間を計ることによって求められる。このようにして、図. 1-11-1-2 に示すように光ファイバに沿ったひずみの分布を計測する^{1-11-1), 1-11-2)}。

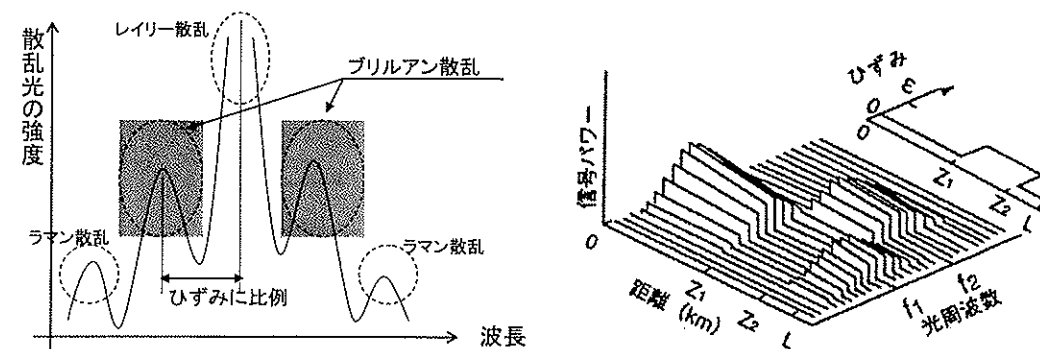


図. 1-11-1-1 光ファイバの後方散乱光 図. 1-11-1-2 ブリルアン散乱光の周波数特性

BOTDR は前述のように、光ファイバに沿ったひずみ分布の測定が可能といったことが利点であるが、計測精度 (100 μ 程度) や距離分解能 (1m) が他の光ファイバセンサと比べて低く、測定時間に数分 (測定精度によって測定時間は異なる) を要するため、大変形が広範囲のどこで生じるかが分からないような現象を定期的に監視するモニタリングシステムに適していると言える。

なお、近年この BOTDR を改良した BOCDA (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) 方式の実験的検討が進められている。BOCDA 方式では、周波数の異なる二つの光を対向させることによって、ブリルアン散乱光を局所的に発生させることができるため、距離分解能が数 cm レベルに向上している。また、連続光を利用し動的な計測も可能となっている (1-11-3)。

【FBG (Fiber Bragg Grating)】

FBG は、光通信における DWDM (高密度波長分割多重方式) を可能にした技術で、光フィルタ等を目的として開発された。FBG センサは、ファイバ上の特定位置におけるひずみ量を計測するセンサで、センサ部は紫外線によって回折格子 (グレーティング部) が形成されている。このグレーティング部では、特定の波長 (Bragg 波長) の光のみを反射し、それ以外の光は FBG を通過する。Bragg 波長はセンサ部に生じたひずみに比例して波長がシフトするため、このシフト量からひずみ量を検出する。なお、波長帯域が互いに重なり合わないよう計測点毎に異なるブラッグ波長を割り当てることで、波長による計測点の識別を可能としている (図. 1-11-1-3)。

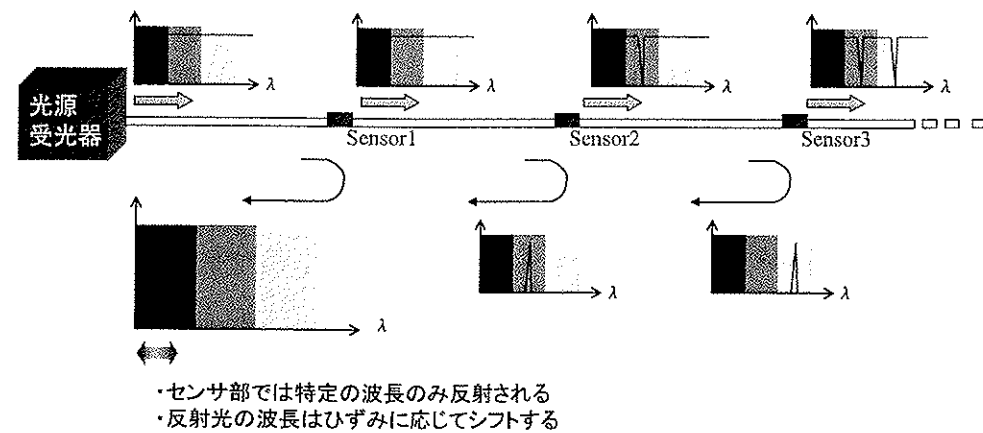


図. 1-11-1-3 FBG センサの測定原理

FBG センサは、BOTDR と異なり測定精度 (4μ 程度) や測定時間 (数 100Hz) の点で優れているが、光ファイバ上の点におけるひずみの測定しか行えない。このため、測定したい箇所が特定できており、かつ橋梁の振動測定のように動的な測定を行う場合に適していると言える。

【OSMOS (Optical Strand Monitoring System)】

OSMOS (光学ストランド) は、3 本の光ファイバをより線にして作成したもので、その中を通過する光は、その通路に曲り (マイクロベンディング) があると、その部位で光が外部に漏れ、ファイバ内部を通過する光の強度は減少する。このマイクロベンディングの原理を用いて、光の漏れ量を検出することで、構造物の変形や歪みを測定する。

1-11-2. 適用段階

BOTDR については、桁試験体や実橋において载荷試験による測定、もしくは温度変化による変形の測定等でその実用性が検討されてきている^{1-11-4)~1-11-6)}。しかしながら、測定に数分を要するため、いずれの試験においても静的な外力に対する測定であり、実橋梁のように常時動的な外力が作用する状態での試験は実施されていない。また、距離分解能が 1m であるため、いずれも主桁作用等の測定に限られてはいるが、測定誤差が数十%含まれている結果が多い。上記結果を踏まえると、BOTDR としては、橋梁の施工時の静的な挙動の監視や、地震時などの大規模な変形をモニタリングするような場合に適用するのが望ましいと考えられる。なお、その他の BOTDR の適用としては、BOTDR の温度依存性に着目した路面温度計や積雪計なども挙げられる¹⁻¹¹⁻⁷⁾。

FBG センサについては、橋梁部材における測定で求められるスペックがひずみゲージと同等程度有していることから、Weigh-In-Motion を利用した通過車両の重量測定や^{1-11-8),1-11-9)}、累積疲労損傷度評価¹⁻¹¹⁻¹⁰⁾といった、実橋梁におけるモニタリングシステムに適用され始め

ている (その他、文献 1-11-11 等)。また、FBG を利用した変位計、水位計¹⁻¹¹⁻¹²⁾、加速度計^{1-11-13),1-11-14)}、温湿度計などのセンサモジュールも開発されてきているため、1 本の光ファイバを橋梁に敷設することで様々な物理量を測定することができ、モニタリングにおける適用の範囲が広いと言える。

OSMOS についても、変位の精度や測定周波数といったスペックが橋梁における測定に対して十分であることから、既に実橋梁におけるモニタリングシステムとしての実績を有しているが^{1-11-15)~1-11-17)}、測定物理量が変位に限られていること、一つの光学ストランドで一箇所の変位測定しかできない等の制約がある。

1-11-3. 実用のために克服すべき課題

以下、光ファイバセンサを実用する、もしくは商用する場合の克服すべき課題について述べる。

① 敷設の問題 (センサの設置方法と敷設方法)

光ファイバセンサ自体は耐久性を有しているが、FBG センサは被測定対象に接着剤で設置するのが一般的であり、その接着剤の屋外における長期使用が検証されておらず、耐久性を有した設置方法の検討が必要となっている。また、相当な長さを有する 1 本の光ファイバを橋梁部材に敷設していくため、施工時の煩雑さや敷設経路の取り回し (光ファイバセンサは途中経路において大きな曲率を作ることができない) に注意を要する。

BOTDR に関しても同様の問題が挙げられ、さらに BOTDR については圧縮側の測定も可能とするために、予め均一にテンションをかけながら敷設する必要もある。ただし BOTDR については、ファイバをインコロイ管の中を通して保護し、均一なテンションをかけた上で、インコロイ管の途中をかしめてテンションを維持した状態とする手法などが開発されている¹⁻¹¹⁻⁴⁾。この場合、かした間隔の平均のひずみしか測定することができないが、BOTDR は元々 1m の平均ひずみを測定しているのだから、かした間隔を適切に設定すれば問題は生じない。さらに敷設する時も、接着剤を用いるのではなくある間隔で設置したクランプなどにインコロイ管を支持させる等の方法を用いることにより、耐久性も改善が可能となる。

② 温度補償

BOTDR や FBG センサは、被測定物のひずみに対して測定値が変化するが、同時に温度変化に対しても測定値が変化し (FBG センサの場合、 $6\sim 8\mu/\text{C}$)、モニタリングシステムなどに適用する場合は、温度補償を行なう必要がある。FBG センサであれば、ひずみゲージと同様にダミーゲージを用いて温度補償を行なうこともできるが、この場合は測定点に対してセンサ数が倍になることに注意が必要である。なお、バイメタルを用いたり、機械的な機構を設けたりすることによって、自己温度補償機能を備えた FBG センサの開発も進められており^{1-11-18),1-11-19)}、実験室レベルでは精度も検証されてはいるが、実橋測定等にお

ける検証結果は報告されていない。

【参考文献】

- 1-11-1)成瀬央, 倉嶋利雄, 益田順一: 光ファイバによる環境センシング, 電気学会全国大会, pp.9-12, 1998.
- 1-11-2)成瀬央: 光ファイバによる構造物のモニタリング, 日本機械学会誌, Vol.109, No.1048, pp.22-23, 2006.
- 1-11-3)今井道男, 酒向裕司, 三浦悟, 宮本裕司, SEAN S.L. ONG, 保立和夫: BOCDA 方式光ファイバセンサによる構造モニタリング実験, 土木学会大 58 回年次学術講演会, pp.695-696, 2003.
- 1-11-4)水ノ上俊雄, 三木千壽: ひずみ分布測定型光ファイバセンサの鋼橋梁モニタリング適応性, 土木学会第 55 回年次学術講演会, pp.634-635, 2000.9.
- 1-11-5)出野麻由子, 三木千壽: 温度変形を利用した橋梁の健全度評価モニタリングにおける可能性の検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp.286-287, 2001.9.
- 1-11-6)出戸秀明, 大河原正文, 岩崎正二, 倉嶋利雄: 光ファイバを用いたひずみ分布計測の既設鋼橋への適用, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1103-1108. 2001.
- 1-11-7)小松宏至, 奥津大, 藤橋一彦, 江田晃一: 光ファイバセンサを利用した積雪計及び路面温度計の開発, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp.369-370, 2003.
- 1-11-8)小林裕介, 三木千壽, 佐々木栄一: FBG 光ファイバセンサによる Weigh-In-Motion システムの構築, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1009-1016, 2003.
- 1-11-9)小林裕介, 三木千壽: FBG 光ファイバセンサを用いた Weigh-In-Motion システムの開発, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.58, pp.795-796, 2003.
- 1-11-10)仁平 達也, 仲山 貴司, 小林 裕介, 山田 聖治, 水野 進正, 佐藤 紀生: 構造物を情報技術で管理する, RRR (Railway Research Review), Vol.63, No.9, pp.18-21, 2006.9
- 1-11-11)山田聖志, 山田聡, 松本幸大, 平本隆: 光ファイバセンサを用いた鋼橋のヘルスマニタリング, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.851-852, 2005.
- 1-11-12)長田拓馬, 加藤一, 福地圭介, 佐藤耕自: 河川管理用光ファイバセンサの実用化, 日立電線, No.20, pp.27-32, 2001.
- 1-11-13)三田彰, 長井望: 構造ヘルスマニタリング用の FBG 加速度センサの最適設計と寿命推定, 日本建築学会技術報告集, 第 14 号, pp.79-82, 2001.12.
- 1-11-14)Kazama, H. and A. Mita : FBG-Based Vibration Sensor Using Gravity Effects for Large Infrastructures, Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE, Vol. 122, No.2, pp.159-166. 2005.10.
- 1-11-15)友利方彦, 田光誠二: 光ファイバセンサによるレンガ造り高架橋の長期連続モニタリング, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.301-302, 2002.

- 1-11-16)門万寿男, 佐藤拓哉: 光ファイバセンサによる構造物の長期連続モニタリング, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1105-1112, 2003.
- 1-11-17)前田信行, 山下英俊, 田口文雄, 佐々木慎一: 橋梁の挙動の測定手法としての光ファイバセンサの適用に関する一考察, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp.321-322, 2003.
- 1-11-18)Hayano, H. and A. Mita : FBG Strain Sensor with Simple Temperature Compensation Mechanism, Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE, Vol. 122, No.2, pp.167-184, 2005.
- 1-11-19)山賀一徳, 青木徹, 吉田幸司, 菅井栄一, 遠藤太嘉志, 西村好恵: FBG を受感部に用いた土木変換器の温度補償に関する研究報告, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.1453-1454, 2002.

1-12. 疲労センサー

1-12-1. 疲労センサーの原理

鋼構造物の疲労損傷度を評価するためには、一般に作用応力履歴データが必要となる。このようなデータは、鋼構造物にひずみゲージを貼付けて時系列データを計測して、レインフロー法などによる計数化法により得ることができる。具体的には、ヒストグラムレコーダを用いて、作用応力範囲と頻度を得ることとなる。

疲労現象は数年～数十年という相当長い期間のダメージの蓄積によって生じるものであるが、上述のひずみゲージを用いた計測と計数化処理を長期間にわたって行うことは、経済的にも実構造物の制約条件的にも困難である場合が多く、必ずしも実用的な方法とは言えない。

一方、図. 1-12-1-1 に示すような疲労センサーは、繰返し応力を受ける部材に一定期間貼り付けて点検することにより、構造物の疲労損傷度を間接的に推定できるものである(1-12-1)-1-12-3)。部材の疲労度合に応じて、センサー箔にき裂が発生する。そのセンサーのき裂長さを測定することで部材の疲労損傷度を推定でき、従来のひずみ計測による手法に比べて手軽で低コストの寿命診断を実現できる。

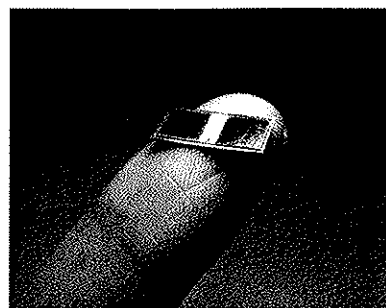


図. 1-12-1-1 疲労センサ

1-12-2. 疲労センサーのシステム構成

疲労センサーは、金属箔を用いた犠牲試験片による促進疲労き裂に関する実験研究(1-12-4)～(1-12-8)を経て開発されたものであり、現在、3タイプがあるが、その原理はほぼ同じである。代表的な疲労センサーを図. 1-12-2-1 に示す。

進展させるために設けたスリット入り金属箔を前もってベース金属に接合した構造になっており、感度を向上させるために中央部の初期スリット周辺の金属箔を薄く形成している。

部材に貼付けたセンサーが繰返し応力を受けたとき、その部材の損傷度を金属箔のスリット先端から生じるき裂の進展量として検出するものである。進展量を計

測する方法には、ルーペ法、レプリカ法が一般的であるが、遠隔モニタリングにも対応できるように、金属箔のき裂長さを電気信号に置換できる方法が開発されている。

図. 1-12-2-2 に疲労センサーによる診断フローを示す。

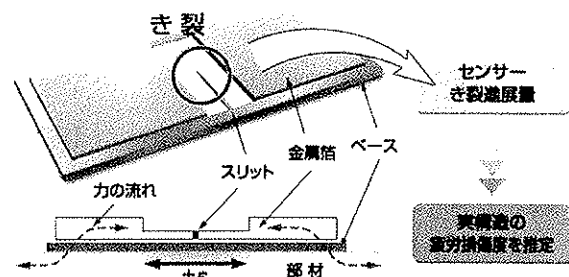


図. 1-12-2-1 疲労センサの構造

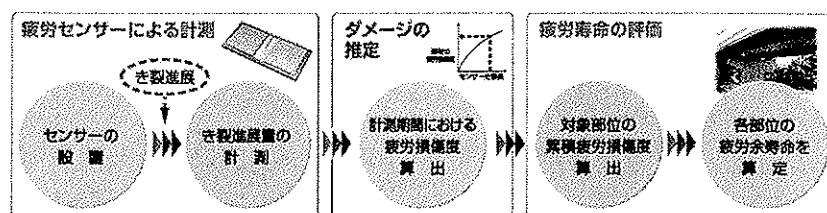


図. 1-12-2-2 疲労センサによる診断フロー

1-12-3. 疲労センサーの適用範囲

部材に疲労センサーを設置後、ある期間(3-6ヶ月)経過後に点検し、疲労センサーのき裂進展量を測定することで、対象部位の疲労ダメージの推定が可能である。疲労センサーの適用可能箇所は、ひずみゲージを用いた従来計測法と同一と考えてよい。ただし、ダメージ評価期間は、従来方法が3日程度であるのに比べて、計測期間を長くすることで精度が向上する。

疲労センサーの適用応力範囲は、20MPa～200MPaまでの各種をラインナップしている製品もあり、種々の鋼構造物に適用可能である。ただし、余寿命診断については、図. 1-12-3-1 に示すとおり、従来のひずみゲージ法と同様に、疲労破壊試験データが蓄積されている鋼構造物の疲労設計曲線との対比となることから、この必要条件を満たさない特殊なものは適用対象外である。

代表的な疲労センサーの特徴は次のとおりであり、近年、橋梁のみならず、鉄道車両、鉄道施設、船舶等の鋼構造に適用されている。

- ① 計測期間が長く、余寿命診断精度が向上する。
- ② 従来法で必要な計測器や配線が不要で、コストを低減できる。
- ③ 疲労センサーのき裂進展速度は、き裂長さに依存せず不変である。

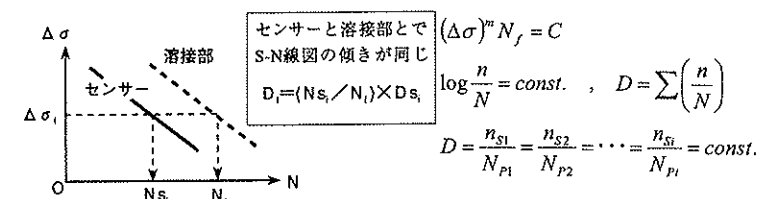


図. 1-12-3-1 疲労センサーによる寿命診断

1-12-4. 疲労センサーの克服すべき課題

疲労センサーの実用に際しては以下の課題がある。

- ① 遠隔モニタリングシステムの改良、コストダウン
- ② 水中、高温、低温環境下で適用できる高性能疲労センサーの開発
- ③ 疲労寿命診断の精度向上

ひずみゲージによる方法も同様であるが、診断の際に用いている疲労設計曲線は公称応力で評価しており(1-12-9)、実構造物では疲労対象部位から少し離れると構造的に応力が変化することなど課題がある。このため、小型のひずみゲージや疲労センサーを用いて、疲労対象部位近傍の構造的応力集中が生じる箇所(ホットスポット)に適用することも検討する必要がある(1-12-10)。

【参考文献】

1-12-1)川口喜史, 大垣賀津雄, 仁瓶寛太, 梅田聡, 小林 朋平: 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第1部, Vol.57, 2002.

1-12-2)公門和樹, 阿部允, 黒川資之, 森猛, 成木朝雄: 疲労損傷度モニタリングセンサー

- による実橋モニタリング, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第1部, Vol.59 巻, 2004.
- 1-12-3)伊藤久, 藤本由紀夫: 基礎継手疲労試験による疲労センサーの適用性の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第1部, Vol.58, 2003.
- 1-12-4)仁瓶寛太他: 機械・構造物の寿命予測法の開発研究—第2報: クラックゲージ型疲労センサーの試作—日本材料学会第19回疲労シンポジウム前刷集, 1988.
- 1-12-5)仁瓶寛太他: 既存船の疲労損傷度推定に関する研究—疲労センサーの開発—関西造船協会春季講演会論文集, 2000.
- 1-12-6)公門和樹, 阿部允, 杉館政雄, 成本朝雄, 三木千壽: 疲労損傷モニタリングセンサーの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第1部(A), Vol.54, 1999.
- 1-12-7)公門和樹, 阿部允, 森猛, 平山繁幸, 大野隆士: 疲労損傷モニタリング加速センサーの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第1部(B), Vol.56, 2001.
- 1-12-8)藤本由紀夫他: 構造物の疲労損傷予知のための犠牲試験片の開発, 日本造船学会論文集第182号, 1997.
- 1-12-9)(社)日本鋼構造協会編: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993.
- 1-12-10)仁瓶寛太: ホットスポット応力算出法の問題点と改善策, 溶接学会平成10年度秋季全国大会フォーラム「溶接構造物の疲労照査と照査に用いる応力」, 1998.

1-13. 腐食環境センサ

1-13-1. 原理 (システム概要)

鋼橋の主要な変状に腐食が挙げられる。鋼橋の部材の腐食量は、一般的に鋼材の板厚減少量で評価されることが多いが、板厚減少量を簡易に測定できるセンサがないこと、腐食部位が広範囲にわたること、一箇所の腐食部位においても腐食している面積が大きい場合があること等の理由から、部材の腐食量を自動で計測するようなモニタリングシステムは開発されていないのが現状である。

本項では、部材の腐食そのものを評価するのではなく、腐食にとっての作用である腐食環境を評価するセンサについて紹介する。センサは、ある部位において、対象としている鋼材がどの程度腐食しやすい環境かといったことを評価することが目的である。これにより塗装系の選定、塗装の塗替え周期の策定や、新しく架設する際の鋼種（特に耐候性鋼材）の選定に資するための諸データを収集することができる。これらの塗装種別や塗替え周期、耐候性鋼材の使用の可否等は、鋼橋にとって維持管理上のLCCを決定する支配的因子となることが多く、腐食環境センサによって、より低コストな維持管理を実現することが期待されている。

以下、2種類の腐食環境センサについて紹介する。

【ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサ 1-13-1)-1-13-4)】

ACM型腐食センサの構成は、図.1-13-1-1に示すように厚さ0.8mmで64mm四方の炭素鋼の基盤上に、絶縁層を介して銀ペーストがプリントされている。この表面に雨水や結露水等が付着すると、Fe基板とAgペースト間で異種金属接触腐食が生じ電流が流れる。この電流の検出により、結露と腐食発生状況を把握し対象としている環境の腐食性を評価する。センサからの出力は、大気腐食の主要環境因子である付着塩分量と相対湿度に応じて高くなる。

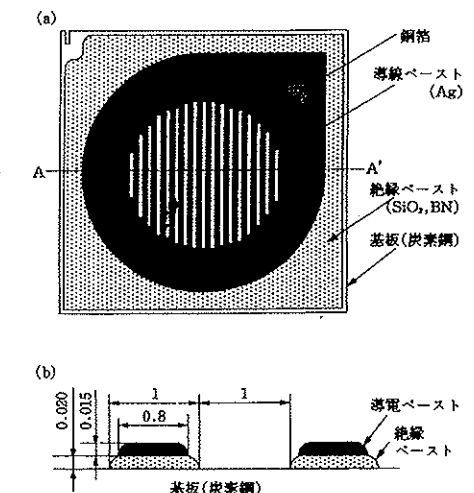


図.1-13-1-1 Fe-Ag対 ACM型腐食センサの構成

【複数金属を利用した腐食環境センサ 1-13-13)-1-13-17)】

センサは通常の大気環境下で変色しやすい純金属（マグネシウム、銀、アルミニウム、銅）および基準金属である鉄の板（30mm×30mm）を、非伝導ベースに埋め込んだ構造となっている（図.1-13-1-2）。このセンサを測定する構造部位に裏面のマグネットにより設置し、ある期間（1～3ヶ月）後に回収して、分析・評価を行なう。これまでの種々の試験から得られている各金属の変色状態と腐食因子（水分、塩分、SO₂ガス等）との相関（マスターデータ）と、回収したセンサの表面状況を照合することによって、複合的な要因で生じ

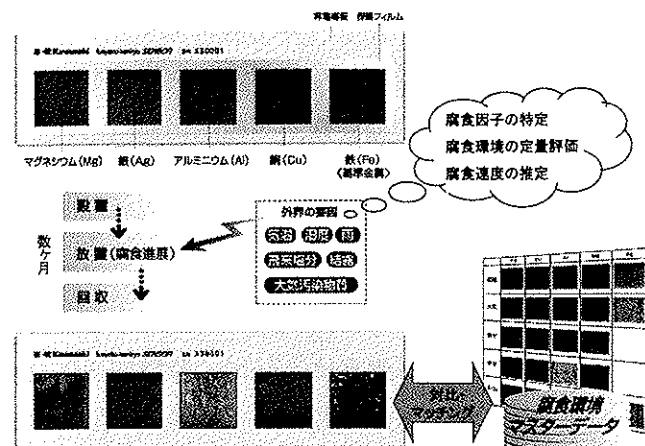


図.1-13-1-2 センサの構造と分析方法

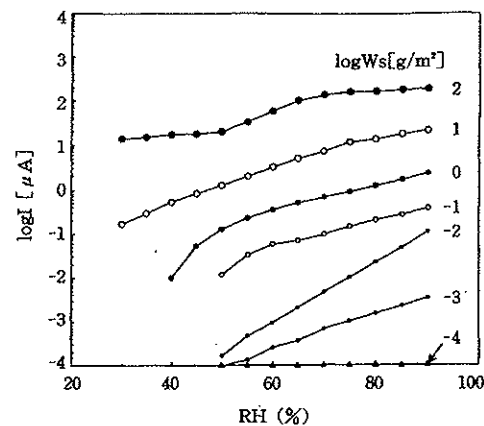


図.1-13-2-1 塩分付着量(Ws)ごとのセンサ出力(I)と湿度(RH)

ている腐食でも、一度に各要因を推定することが可能である。なお、センサの使用前は、空気を遮断する金属表面保護フィルムで覆われており、センサの設置時にはこのフィルムを剥がして使用する。

1-13-2. 適用段階

ACM 型腐食センサは、センサ自体が腐食した際に発生する電流を検出することにより、腐食環境を評価するが、室内試験や暴露試験の結果から付着塩分量ごとの電流と湿度の関係(図.1-13-2-1¹⁻¹³⁻³)や、以下の式で表わされる日平均電気量 Q と鋼材の腐食速度 CR(Fe) との関係¹⁻¹³⁻⁵等が明らかとなっている。

$$\text{鋼材腐食速度 } \log CR(\text{Fe})[\text{mm/year}] = 0.379 \log Q[\text{C/day}] - 0.723$$

また、上式と関係する指標として、ACM 型腐食センサの出力として、概ね以下のことが明らかとなっている¹⁻¹³⁻⁸。

- ① 0.01 μA 以上の腐食電流が常に流れている場合は、僅かながら錆が生じる(腐食量:0.009mm/年)。
- ② 腐食電流が 0.01 μA 未満に保たれていれば、錆は生じない。
- ③ 0.01 μA 以上の腐食電流が常に流れている場合は、かなり錆が生じる(腐食量 0.09mm/年)。
- ④ 瞬間値として 0.01 μA 以上の腐食電流が観測されても、常時流れていなければ錆は生じない。
- ⑤ 腐食量は腐食電流の累積値に比例する。

上記のような指標を用いて、ACM 型腐食センサは鋼橋の部位別の腐食環境モニタリングに数多く用いられている。例えば、3 主桁プレートガーダーの内桁と外桁や、フランジ上面

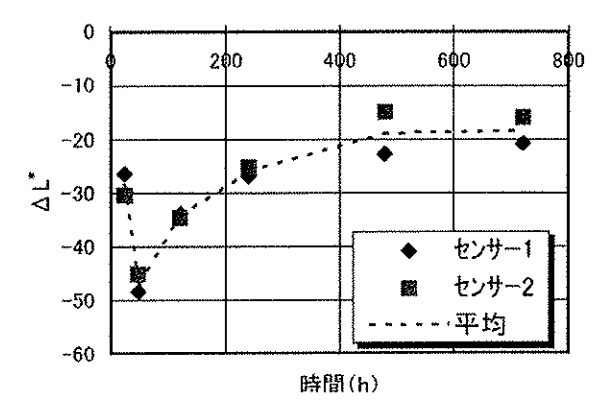
と下面の腐食環境の違い等の調査例¹⁻¹³⁻⁴があるが、特に箱桁の内外の腐食環境の違いに関する調査に使用されている例が多い¹⁻¹³⁻⁵、¹⁻¹³⁻¹⁰。これらの調査では、結露等による滞水を除けば、箱桁内は外と比べて高湿度な環境にあるが、密閉構造が保たれていれば塩類等の不純物の浸入がないため、箱桁内の腐食環境は非常に緩いと概して結論付けられている。また、箱桁内の結露を防止する目的で、換気システム¹⁻¹³⁻¹¹や除湿剤¹⁻¹³⁻¹²を導入した場合の効果の検証にも ACM 型腐食センサが用いられたりしている。

ACM 型腐食センサは発生する電流を自動で計測するため、時々刻々と変化する腐食環境を捉えることにも適用が可能である。例えば、日射による急激な気温の上昇に伴う相対湿度の低下によって腐食速度が低下するような現象や、雨水によって塩分が流された直後には、湿度が高い場合でも腐食速度が低いといった現象のモニタリングにも活用できる。

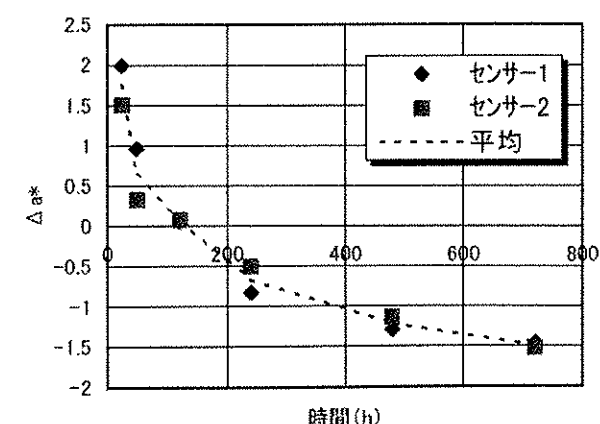
一方で、複数金属を利用した腐食環境センサは、金属表面の変色状態から対象としている箇所の腐食環境を評価する。このセンサは、測定対象部位にある期間(1~3ヶ月)設置した後に回収し分析するため、ACM 型腐食センサのように時々刻々の腐食環境をモニタリングすることはできないが、センサ裏面のマグネットにより鋼部材に貼付することが可能なため設置・回収が容易であり、電源や測定器といった設備が必要ないため、簡易に腐食環境を評価できることに特徴がある。また、腐食は複数の因子によって生じるが、本センサは複数の金属の変色状態を分析することによって、対象部位の腐食因子の影響の程度も把握することが可能である。

個々の腐食因子と各金属の変色状態との関係は、大気暴露試験、恒温恒湿試験、塩水噴霧試験、複合サイクル試験、亜硫酸ガス腐食試験によってデータが蓄積されている¹⁻¹³⁻¹³、¹⁻¹³⁻¹⁷。また、変色

状態を定量的に評価するため、明度 L*, 色相と彩度を表わす色度 a*, b* の表色系、および色差 $\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$ を指標として用いる手法も提案されている



(a) 塩水噴霧試験による Mg の明度変化 ΔL^*



(b) 塩水噴霧試験による Mg の色度変化 Δa^*

図.1-13-2-1 変色状態の定量的評価例

(図. 1-13-2-1)

1-13-14), 1-13-15), 1-13-17).

適用実績としては、全国各地の18箇所の鋼橋に設置され、各橋梁においてガーゼ法による飛来塩分量の測定とともに腐食環境の測定が行われてきている(図. 1-13-2-2)。また、2005～2006年には、中日本高速道路㈱小田原管理事務所管内5橋や、北海道の岩見沢北2号沼川橋、北海道開発局花畔大橋等において適用されている。

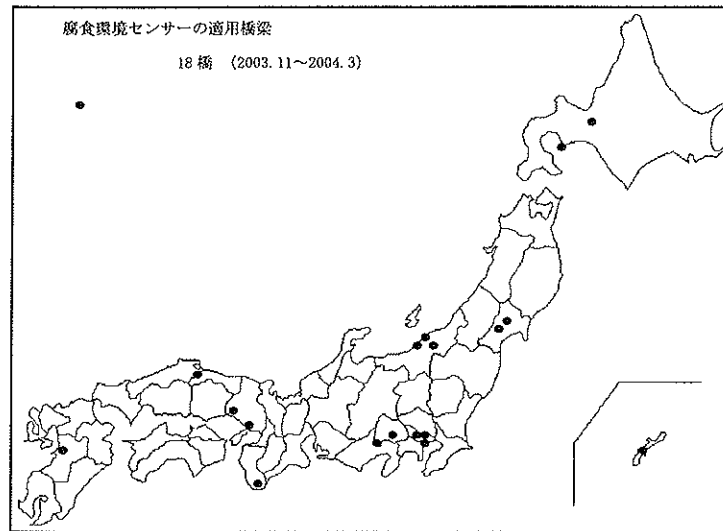


図. 1-13-2-2 腐食環境センサ適用鋼橋の位置

なお、本センサはマグネットによる設置であるため、簡易な設置方法である反面、マグネットを介しているために評価対象としている部材の温度とセンサの温度が同一とならず、結露については評価が困難なものと考えられる。また、本センサもACM型腐食センサも、センサ自身が腐食する、いわゆる犠牲片タイプのセンサであるため、必然とセンサの耐用期間が数ヶ月に限られ、その期間も腐食環境によって大きく異なることに留意する必要がある。

【参考文献】

- 1-13-1)元田慎一，鈴木揚之助，篠原正，兒島洋一，辻川茂男，押川渡，糸村昌祐，福島敏郎，出雲茂人：海洋性大気環境の腐食性評価のためのACM型腐食センサ，材料と環境，Vol.43，No.10，pp.550-556，1994.
- 1-13-2)元田慎一，鈴木揚之助，篠原正，辻川茂男，押川渡，糸村昌祐，福島敏郎，出雲茂人：ACM型腐食センサで測定した海洋性大気腐食環境条件の年変化，材料と環境，Vol.44，No.04，pp.218-225，1995.
- 1-13-3)篠原正，元田慎一：ACM型腐食センサによる大気環境の腐食性評価，防錆管理，Vol.40，No.10，pp.328-335，1996.
- 1-13-4)竹村誠洋，藤田栄：腐食センサを用いた鋼構造物の部位別腐食環境モニタリング，防錆管理，Vol.44，No.10，pp.361-364，2000.
- 1-13-5)森幸夫：大島大橋箱桁内腐食環境調査，(社)腐食防食協会「第121回腐食防食シンポジウム資料」，pp.38-45，2001.
- 1-13-6)松井繁憲，寺西功，三田哲也，藤野陽三：鋼箱桁内部防錆実験について，土木学会

第48回年次学術講演会概要集，第1部，pp.570-571，1993.

- 1-13-7)松井繁憲，寺西功，三田哲也，藤野陽三：鋼箱桁内部防錆実験について(その2)，土木学会第49回年次学術講演会概要集，第1部，pp.526-527，1994.
- 1-13-8)松井繁憲，寺西功，三田哲也，藤野陽三，篠原正：鋼箱桁内部防錆実験について(その3)，土木学会第50回年次学術講演会概要集，第1部，pp.726-727，1995.
- 1-13-9)古家彦，磯江浩，大串弘幸：生口橋箱桁内の腐食環境調査，本四技法，Vol.27，No.100，pp.38-45，2003.
- 1-13-10)小林裕介：Development of an Automatic Continuous Real-time Remote Monitoring System for Bridge Maintenance，東京工業大学学位論文，2004.
- 1-13-11)寺尾圭史，奥村健，小山明久：太陽光発電を用いた鋼製箱桁内の換気システムおよび箱桁内の環境調査，土木学会第59回年次学術講演会概要集，第1部，pp.169-170，2004.
- 1-13-12)廖金孫，松井繁憲，篠原正，藤野陽三：除湿剤を用いた鋼製箱桁内部防錆システムの開発，クリモト技法，No.52，pp.2-12，2004.
- 1-13-13)川口喜史，大垣賀津雄，高島顕，梅田聡，上野善彦，阿部和浩，岩崎英治：金属の変色を利用した鋼構造物の腐食因子特定に関する研究，土木学会第59回年次学術講演会概要集，第1部，pp.199-200，2004.
- 1-13-14)阿部和浩，川口喜史，大垣賀津雄，梅田聡，上野善彦，高島顕，岩崎英治：腐食環境センサーを用いた腐食環境の定量化と鋼橋への適用，土木学会第59回年次学術講演会概要集，第1部，pp.255-256，2004.
- 1-13-15)大垣賀津雄，梅田聡，上野善彦，岩崎勇人，高島顕，海老原竜司：各種耐候性試験における腐食環境センサーの色差定量化に関する研究，土木学会第60回年次学術講演会概要集，第1部，pp.47-48，2005.
- 1-13-16)海老原竜司，梅田聡，上野善彦，大垣賀津雄，高島顕，岩崎勇人：腐食環境センサ(Type-B)の開発と腐食速度の推定，土木学会第60回年次学術講演会概要集，第1部，pp.51-52，2005.
- 1-13-17)大垣賀津雄，梅田聡，上野善彦，海老原竜司，岩崎勇人，高島顕：腐食環境センサによる鋼構造物の診断技術，検査技術，pp.59-64，2005.12.

1-14. センサネットワーク

1-14-1. センサネットワークとは

センサネットワークとは文字通りに、センシングしたデータをネットワークを介して他の場所へ伝えるためのデバイス、端末を総称したものである。広義にはセンサ群を有線 LAN で接続したシステムもあてはまるようであるが、狭義には微細加工を施したセンサを無線 LAN で接続しているものをさす。

近年、特にセンサネットワークに関する研究が多くなってきているが、その背景として、いくつかの理由があげられる¹⁻¹⁴⁻¹⁾。

- i)テロリスト対策など安全確保のための監視が必要となっている。
- ii)Micro Electro Mechanical System (MEMS) に代表されるような微細加工技術の進展。
- iii)ネットワークプロトコルの発展。
- iv)構造物モニタリングにおける電源の問題。

センサネットワークは 1970 年代のアメリカの国防総省高等研究計画局 (Defense Advanced Research Projects Agency :DARPA) で開発されたのが始まりである¹⁻¹⁴⁻²⁾。冷戦時に潜水艦や戦闘機の検知のために海底にマイクを備えたり、レーダーを配置することが当初の目的であった。その後、大学との連携もあり、マサチューセッツ工科大学と開発したセンサネットワークはマイクを地上に置き、低空飛行する飛行機の位置を逐次追跡することが可能なものであった。

DARPA がセンサネットワークを開発当初に念頭に入れていたのは「Smart Dust」である。スマートダストプロジェクトは体積 1.5mm^3 以下、重さ 5mg 以下のサイズで、演算処理機能、センシング機能、通信機能をもたせるものであり、現在においても究極のセンサネットワークの姿ともいえるものである^{1-14-3),1-14-4)}。現在の微細加工技術では、 1.5mm^3 とまではいかないまでも数 mm 角の基板上に加速度、温度などの各種のセンサと搭載することも可能である。

DARPA はインターネットの元となった ARPANET を開発したが、現在のインターネットにおいても、ネットワーク上の一つのコンピュータが機能しなくても別の経路を使って目的のコンピュータへたどりつくといった経路探索 (ルーティング) するようになっており、センサネットワークも同様のコンセプトに基づいている¹⁻¹⁴⁻²⁾。

スマートダストを実現するには、一つ一つのセンサ (ノード) での消費電力も極力おさねなければならない。消費電力が小さいことはノード間で通信できる距離も短くなってしまふことでもあり、ノード間でデータを共有しながらサーバへとデータを伝送することになる。

ワイヤレス通信の消費電力に着目したプロトコルの研究が盛んに行われている。代表的なものとして、微弱無線、Bluetooth, ZigBee などがあり、いずれも送信出力が 1mW 以下と小さく、消費電力を低く抑えることができる¹⁻¹⁴⁻⁵⁾。

微弱無線とは、伝送距離が数 m のセンサネットワークに適用しやすい方式である。データ伝送速度はそれほど高くないものの、電池の寿命を伸ばすことができるため、電源を確保できないような場所にセンサを設置する場合に向く。加えて、無線局の免許や製品の端末認定を取得する必要がない。

Bluetooth は通信モジュールを小型化することを優先する場合に適した方式である。携帯電話機や PDA など携帯型機器への搭載を目指して開発が進んできたため、外形寸法が 10mm 角以下と非常に小さく、かつ消費電力も小さい。ただし、端末認定やロゴ認証の取得といった手続きが必要になるため、導入コストに課題がある。

ZigBee は Bluetooth よりもさらに消費電流が低く、頻繁に通信した場合でも単 3 乾電池 2 本で 1 年以上の駆動が可能である。米国で標準化作業中の近距離無線方式「IEEE802.15.4」に完全準拠している。また、簡易な変調方式を採用することで、無線送受信回路の構成を単純にし、安価なチップセットの実現を目指している。

1-14-2. センサネットワークのシステム構成

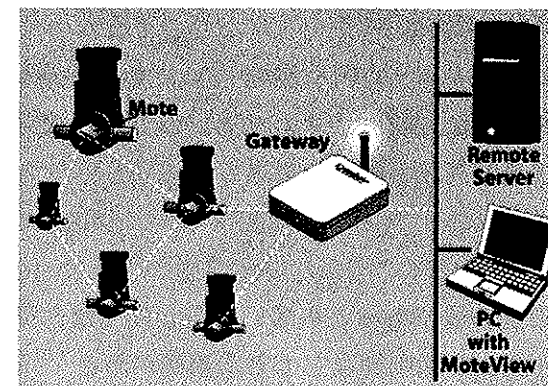


図. 1-14-2-1 センサネットワークの構成例¹⁻¹⁴⁻⁶⁾

センサネットワークのシステム構成は各システムに固有なケースがあるので、一般的に示すのは難しいが、図. 1-14-2-1 に示すように、ノード、ゲートウェイおよびサーバから成り立つ。各ノードを構成するデバイスは通信モジュール、センサ機能部、マイクロプロセッサおよび電源である。

マイクロプロセッサは 8 ビットあるいは 16 ビット程度で、数 MHz～数 10MHz の動作周波数の組み込み用マイコンが用いられている。マイコンの中でも Atmel 社の AVR が多く用いられている。マイクロプロセッサの役割はセンサからデータを取得することとそのデータを目的地に送り届けることであり、それほど高度な性能は要求されていない。また同様に、マイクロプロセッサはたとえば Linux のような高度なオペレーティングシステムは必要としない。カリフォルニア大学バークレー校で開発された TinyOS が一般的である^{1-14-3),1-14-4)}。

電源は単 3 電池 1 個か 2 個程度の電源しか必要とせず、電池だけでも数か月はデータ取

得が可能なものが多い。電源はモニタリングにおいてしばしば問題となるものの一つであるが、消費電力を極力おさえるためにも、微細加工は必要であった。また、その他に、太陽電池を内蔵しているものもある。図.1-14-2-2 は光センサノードを示している¹⁻¹⁴⁻¹⁾。大きさは直径約 30mm, 円筒部の長さは約 40mm である。

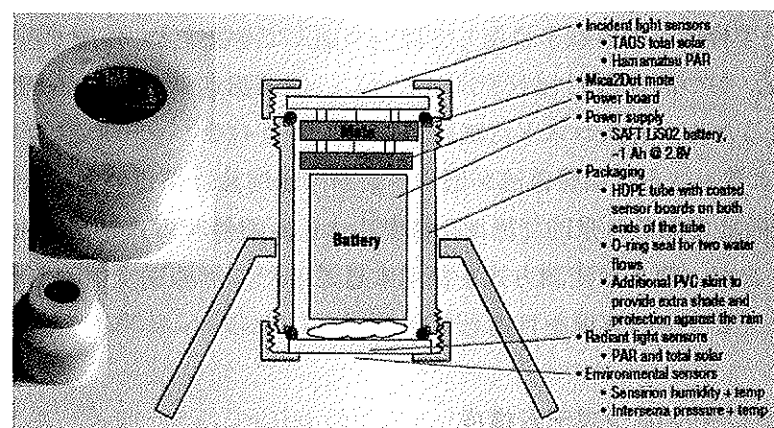


図.1-14-2-2 光センサノードの例¹⁻¹⁴⁻¹⁾

センサとしては、照度、気圧、GPS、磁気、音(マイクロフォン)、温度、湿度、加速度などを計測できるものがある。不審者侵入監視などに使用できるカメラも存在する。

1-14-3. センサネットワークの適用範囲

センサネットワーク適用に関する研究の中でもっとも多い分野としては、気象観測や環境モニタリングであろう。その他に水文、交通制御などでも応用例がある^{1-14-3),1-14-4)}。

気象観測では、天気予報や現在の天気などに必要な一般気象、飛行機の離発着のために必要な航空気象、道路の交通に必要な道路気象、植物育成のための農業気象などで、データが必要となる。これらに必要な気象要素には雨量、風向、風速、気温、湿度、日照、気圧などがあげられる。また、緑の効果を調べることを目的として、木の最上部と下部などいくつかのポイントで気温、湿度を計測する例もある。

水文分野も気象観測と同様の測定を行うが、特に雨量や河川の支流および本流の流量を観測し、洪水予測を行って、避難勧告するものである。

交通制御では、雨量、積雪、風向、風速を観測したり、カメラで交通流を観測することにより、目的地への予想到達時間を予測したり、渋滞情報を提供したりするものである。渋滞状況により信号の現示時間を変更するといったことも行われている。

環境モニタリングに関しては、生態調査や農業生産支援などが含まれるが、特に前者の生態調査にセンサネットワークが利用されていることが多い¹⁻¹⁴⁻⁷⁾⁻¹⁻¹⁴⁻⁹⁾。アメリカでは警戒心の強いウミツバメの生態調査でセンサネットワークでの観測を行っている。ウミツバメの営巣地に小型のセンサノードを設置し、巣の外と内の温度、湿度、気温、明るさ、風の

強さなどを測定した。その結果、巣穴の環境変化と産卵の関係や親鳥の習性に関する知見が得られた。

構造物に対する適用例は生態調査などと比べるとそれほど多くないのが現状である。Xu ら¹⁻¹⁴⁻¹⁰⁾はトラス構造の大型屋根をもつ建築物のモニタリングを検討している。常時振動を加速度センサで計測しようとするものであるが、大型建築物においては、ノード数が膨大になってしまうので、ウェーブレットによる情報圧縮を試みている。しかしながら Xu らの検討は、実際の構造物での応用例というよりも波形処理に重点がおかれていると読みとれる。他の文献においても、構造物のヘルスマニタリングへの適用の可能性を記述しているものの、実際の適用例はそれほど多くないと思われる。

その他の分野として医療においても、被験者の血圧、心拍数などを計測し、サーバで監視するといった応用例もある^{1-14-3),1-14-4)}。

1-14-4. 鋼橋への適用に対する課題

センサネットワークは軍事目的から開発された技術であり、鋼橋のニーズにあわせて発展してきたというよりもむしろ、構造物へのシーズの適用といった側面のほうが強い。

現在一般的に指摘されているセンサネットワークの問題点は次のようである¹⁻¹⁴⁻⁵⁾。第一に、スタンダードが欠如しており、IEEE802.11 などに代表される無線 LAN や Bluetooth など、既にスタンダードを持つ技術が適用される場合を除き、ほとんどの製品が標準に準拠してない独自技術となっている。

第二にリソース分配の衝突として、全てのセンサノードが全ての情報をルーティングできる状態にあるため、ネットワークリソースの割り当てに衝突が生じる可能性があることがあげられる。

第三に情報処理量に関して、ダイナミックルーティングとマルチホップ機能による多量な流通データにより、本来のネットワーク情報処理量が結果的に制限されてしまうことがある。

第四に信頼性とセキュリティのリスクに関して、公共または共同のネットワークシステムの場合、センサノードによるデータ送受信が他のネットワーク管理下にあるセンサー端末からの情報により干渉する可能性がある。

構造物のモニタリングに関して、センサネットワークの問題点をあげるとすると、Xu らの研究でも述べられていたように、大量のデータをどのように処理するかも問題であろう。また、加速度センサはあるが、ひずみを計測するためのセンサはまだないように思われる。

【参考文献】

1-14-1) Culler, D., Estrin, D., and Srivastava, M.: Overview of Sensor Networks, IEEE Computer, pp.41-49, 2004.

1-14-2) Chong, C-Y and Kumar S.P.: Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges, Proceedings of IEEE, Vol.91, No.8, pp.1247-1256, 2003.

1-14-3)安藤繁, 田村陽介, 戸辺義人, 南正輝 編著: センサネットワーク技術, 東京電機大学出版会, 2005.

1-14-4)阪田史郎 編著: ユビキタス技術 センサネットワーク, オーム社, 2006.

1-14-5) <http://www.bcm.co.jp/site/2003/2003Nov/techo-trend/03techo-trend11-sensa.htm>

1-14-6) <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=158>

1-14-7) A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, and J. Zhao., Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology., ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean, 2001.

1-14-8) A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson, Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring, WSNA'02, 2002.

1-14-9) Robert Szewczyk, Alan Mainwaring, Joseph Polastre, David Culler, An Analysis of a Large Scale Habitat Monitoring Application, ACM Sensys, 2004.

1-14-10) N. Xu, S. Rangwala, K. Chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan, and D. Estrin, : A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring, Proc. of the ACM Sensys, pp. 13-24, 2004.

1-15. RFID タグや音声認識等を活用した統合型設備管理システム¹⁻¹⁵⁻¹⁾

1-15-1. 原理 (システム概要)

統合設備管理システムとは、土木構造物、信号設備、軌道設備等を対象とした、

①図面や台帳の電子管理

②現場にける PDA 端末による情報管理

・インターネットによるデータ参照及び検査結果入力

・RFID タグによる、設備情報の取得

・音声認識によるハンズフリーかつ対話的な検査データ入力

等を統合したシステムである (図. 1-15-1-1)。以下に個々のモジュールを示す。

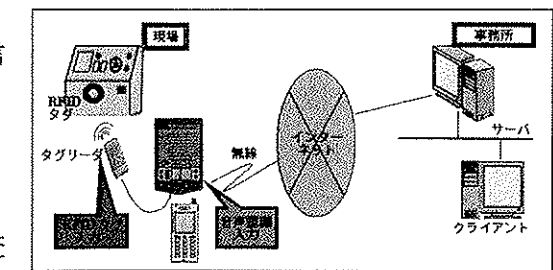


図. 1-15-1-1 統合型設備管理システムイメージ

(1) 設備管理システム

一般的な設備管理システムでは、設備に関するデータは、台帳及び図面の 2 種類の形で存在し、紙面において管理されている。工事等の設備更新時には、台帳と図面の両方に関して整合性を図りながら修正する必要があるが、当該作業は煩雑であり非常に時間と労力を要する。電子設備管理システムでは、設備を定義するテキストデータ (設備台帳データ) から、設備図面の自動生成を行う機能を有しており、設備の更新時にはテキストデータを修正することで設備図面も自動的に更新される。

(2) PDA 端末

保守作業の省力化・効率化を目的として、保守データを現地で簡便に入力できるよう PDA (Personal Digital Assistant) 等の携帯端末を用いる (図. 1-15-1-2)。主な機能としては以下の通りである。

① インターネットを利用して、上記設備管理システムにアクセスし、現場においてデータ参照や検査結果入力及び作業計画の参照・更新を行う。

② 写真、グラフ、CAD 図面の表示、音声記録等の機能を有する。

③ RFID タグを利用し、検査対象設備の自動認識を行う。

④ 音声認識によるハンズフリーかつ対話的な検査データ入力を行う。



図. 1-15-1-2 PDA, タグリーダー

(3) RFID タグ

RFID (Radio Frequency Identification) タグは無線技術を応用した ID 認識方式であり、タグに IC チップが組み込まれており、IC チップに持たせたデータを無線で読み書きすることができる。設備を特定する IC を書き込んだ RFID タグを検査対象設備に貼付け、設備検査を実施する場合の設備特定に用いる。タグには電源が不要であるため、タグ取替の必要がない。

(4) 音声認識によるデータ入力

現場において PDA を利用する場合、検査と結果入力を同時に行なう必要があるが、入力において、

- ・ PDA などのタッチパネル式の画面入力は項目の選択や、数値や文字の入力が容易でない
 - ・画面の切り替えやスクロールが多くなるため入力に時間がかかる
- といったデメリットが生じる。また、一般的な橋梁の検査現場においても、雨天時には記録用紙等をビニール袋などに入れ、記入する度に出し入れをする煩雑が生じている。

ハンズフリーによる音声認識とすることで、データ入力の省力化・効率化を図る。さらに、ユーザーが PDA を通して自然文による対話をしながら疑問点等を解決できるよう、データベース化されたマニュアルの文書・検査データ等から回答を返す機能を有することによって、検査業務を効果的にサポートする。

1-15-2. 実用のために克服すべき課題

[システム全体に関して]

- ・システムの導入コスト（初期費用）が高額すぎる。
- ・過去の検査データをデジタル化することに時間と労力を要する。

[設備管理システムに関して]

- ・軌道設備や信号設備のように、レール方向に対する位置座標とパターン化された設備の種別のみで図面が生成できるものに使用が限られる。（橋梁のような構造図面をテキストデータで管理することは困難）

[RFID に関して]

- ・データの読み書きが可能な RFID の場合、データ記憶可能な年数が 10 年程度と言われており、記憶データを定期的にリフレッシュする必要がある。

[音声認識に関して]

- ・音声による入出力操作では、大きく分けてシステム主導型とユーザー主導型のインター

フェースに分類される。システム主導型インターフェースは、システムが対話の主導権を握り「A, B, C の中から選択して下さい」「A でよろしいですか。はい、いいえで答えて下さい」といった対話が繰り返される。本インターフェースは構築が容易であるというメリットがあり、定型的な業務に対しては十分有効であると考えられる。しかし、橋梁のように個々の構造が異なり発生する変状も千差万別である対象における検査といった非定型的な業務に対しては、ユーザーからの自然文での発話によるユーザー主導型のインターフェースが求められる。このとき、自然文を解釈するための複雑な機構が必要となってしまう。

- ・音声入力において誤認識を回避するためのシステムを開発する必要がある。

→ 現在は、入力した情報をコンピューターが合成音声によって繰り返し確認しているが、

- ・むしろこの確認作業に時間がかかってしまう
- ・検査員のストレスになる
- ・意識がそちらに集中してしまい、その他の音（警報など）を無視し危険といったデメリットが生じている。

【参考文献】

- 1-15-1) 佐藤紀生：音声技術や RFID タグを活用した設備管理システム，鉄道総研月例発表会講演要旨，2005。
- 1-15-2) 佐藤紀生，八木雄策：無線タグを利用した設備管理システム，鉄道総研報告，Vol.17，No.12，pp.49-54，2003。
- 1-15-3) 宮下美貴，佐藤紀生，野末道子，渡辺義大：自然分による音声対話を用いた信号設備情報提供システム，鉄道総研報告，Vo.20，No.2。pp.41-46，2006。
- 1-15-4) 野末道子，佐藤紀生，渡辺義大：携帯端末を活用して沿線設備の保守作業を支援する，RRR (Railway Research Review)，Vol.63，No.9，pp.22-25，2006。

1-16. Bridge Weigh-In-Motion

1-16-1. 原理

近年、トラック等の大型車の性能が向上し積載荷重が増加したことにより、橋梁の設計荷重を大幅に超える重量の車両の走行が確認されている。Weigh-In-Motion とは、これらの車両重量を車両が走行している状態で計測するシステムのことで、道路構造物や舗装などの維持管理、もしくは交通規制（高速道路などへの侵入の防止）に役立てることが目的である。

Weigh-In-Motion は大別すると、一般的な軸重計を舗装に埋め込むタイプと、橋梁をバネばかりとして利用するタイプ（Bridge Weigh-In-Motion（以下 BWIM））の2種類に分類できる。BWIM は、1970 年代にアメリカの F.Moses によって提案された手法¹⁻¹⁶⁻¹⁾で、橋梁上を車両が通過した際に橋梁部材で生じるひずみ履歴から、影響線を用いて逆解析によって車両重量を算出する手法である。測定に用いるセンサは一般的なひずみゲージ等であるため、軸重計を用いる場合と比べ、測定機器にかかる費用や施工費が安価といった利点がある。また、車両重量の測定と同時に橋梁部材のひずみ応答値も取得できることから、橋梁の維持管理には適したシステムでもある。以下に車両重量算出のアルゴリズムを示す。

車両が橋梁を通過する際に、軸荷重によって橋梁部材にひずみが生じる。主桁*i*の対象断面に生じるひずみは、影響線を用いて時間*t*の関数として表せる。ひずみ $\varepsilon_i(t)$ は橋上を通過する車両の軸荷重 A_n の影響を考えると、次式で表わされる。

$$\varepsilon_i(t) = \sum_{n=1}^{N_{ax}} A_n \cdot I_{ni}(t) \quad (1-16-1-1)$$

N_{ax} は橋上にある総車軸数、 $I_{ni}(t)$ は時刻*t*における車軸*n*の位置での測定位置*i*に対するひずみの影響線縦距を表わす。影響線は車両が走行する車線ごとに定めることとする。

ここで、ひずみの計算値 $\varepsilon_i(t)$ と実測値 $\varepsilon_i^*(t)$ との差の2乗和*E*は、次式で表わされる。

$$E = \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{j=1}^{N_T} [\varepsilon_i(j\Delta t) - \varepsilon_i^*(j\Delta t)]^2 \quad (1-16-1-2)$$

N_T はひずみデータの総サンプリング数、 Δt はデータサンプリング時間間隔、 N_G はひずみの測定位置の箇所数を表わす。

次式のように*E*が最小となるように偏微分を行い、最小二乗法により軸荷重を求める。

$$\frac{\partial E}{\partial A_n} = 2 \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{j=1}^{N_T} \left[\sum_{n=1}^{N_{ax}} A_n \cdot I_{ni}(j\Delta t) \right] I_{ni}(j\Delta t) - 2 \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{j=1}^{N_T} \varepsilon_i^*(j\Delta t) I_{ni}(j\Delta t) = 0 \quad (1-16-1-3)$$

以上のように、影響線を予め求めておき、各時刻でのひずみと車両の走行位置を測定すれば、軸重を推定することが可能となる。

1-16-2. 適用段階

我が国では、これまでにさまざまな橋梁部材の応答を利用した BWIM が考案されている。三木ら¹⁻¹⁶⁻²⁾は、車両重量を算出するための橋梁部材の応答として主桁下フランジのひずみを利用したシステムを構築した上で、東名高速道路の片山高架橋（鋼橋部）において実測定を行い、本線に設置されている軸重計によって測定された結果と比較しその精度を検証している（表.1-16-2-1）。なお、本システムでは、車両の走行位置の検知に光電スイッチと鉛直ステイフナから得られるひずみ履歴を利用している。

松井ら¹⁻¹⁶⁻³⁾は RC 床版下面のひび割れ開閉幅を利用したシステムを、小塩らは縦桁に生じるひずみ¹⁻¹⁶⁻⁴⁾や支点反力¹⁻¹⁶⁻⁵⁾を利用したシステムを構築している。これらのシステムでは、影響線長が短い部位における活荷重応答履歴を利用したことで、一つの波形から軸重、車両速度、軸間距離等を測定していることに特徴がある（図.1-16-2-1）。なお、小塩らは1週間の連続した測定を実施し、対象路線における大型車のタイプ別の台数等の特性を調査している。また、その調査の中で、約 100tf のトラッククレーン（本来はボギー（約 50tf）とブーム+旋回体（約 50tf）に分離して搬送する必要がある）が通過していたことも確認している。

三木ら^{1-16-6),1-16-7)}は、車両重量の算出過程で必要となる温度応力の補正や車両位置の検知のアルゴリズムを考案し、全自動かつリアルタイムに車両重量を測定できるシステムを開発している。本システムを用いることにより、大阪橋、荒川河口橋、玉川高架橋の3橋において1年以上にわたって連続して車両重量の測定を実施し、国道 246 および国道 357 の交通荷重の実態調査を行なった（図.1-16-2-2）。なお、三木らは上記システムにおいて、FBG センサ（光ファイバセンサ）を適用したシステムも構築し¹⁻¹⁶⁻⁸⁾、その精度の検証も行なっている（図.1-16-2-3）。

表.1-16-2-1 軸重計と BWIM による車両重量測定値の比較

| 諸 量 | 実測値 | 計算値 |
|-------------------|-------|-------|
| 総 車 両 数 (台) | 1 176 | 1 145 |
| 総 車 軸 数 | 3 020 | 2 980 |
| 平 均 値 (tf) | 14.2 | 14.5 |
| 3 乗平均値の 3 乗根 (tf) | 16.7 | 16.8 |

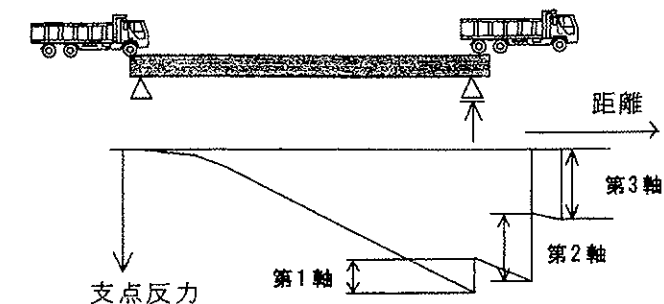


図.1-16-2-1 支点反力を利用した BWIM の概念

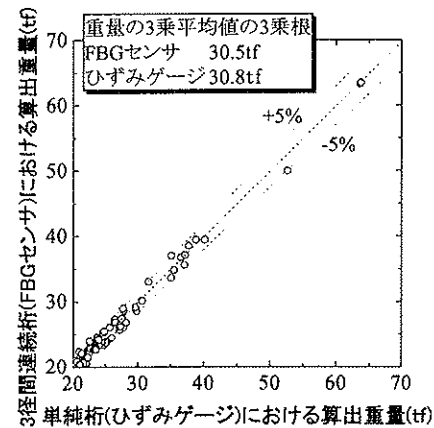
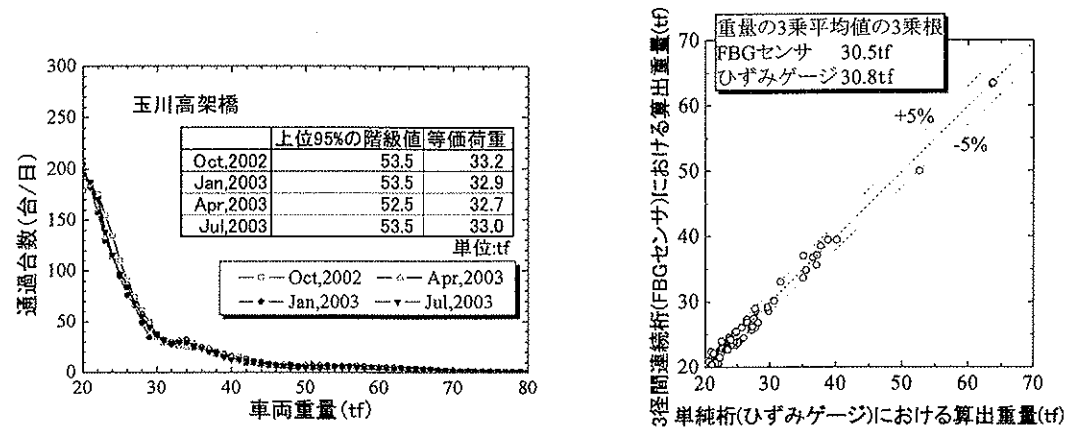


図. 1-16-2-2BWIM を利用した長期交通荷重調査結果 図. 1-16-2-3 FBG センサによる BWIM の精度

1-16-3. 実用のために克服すべき課題

以下、BWIM を実用する、もしくは商用する場合の克服すべき課題について述べる。

[ひずみの測定箇所について]

- ① 車両重量算出、もしくは車両位置の検知に適したひずみ履歴を測定する箇所を選定するためには、ある程度の専門的知識が必要となる。特に、車両位置の検知には、ひずみ波形が鋭敏に立っている必要があり（波形の山の頂点を車軸の通過時とみなすため）、場合によっては測定箇所選定のための予備測定が必要となる。
- ② 車両重量算出に用いるひずみ履歴を、影響線長が短い部位において測定した場合、一つのひずみ波形から車両重量、軸間距離等を推定できるが、衝撃の影響等を除去するのが困難なため、重量の算出精度が若干劣る。
- ③ 車両重量算出に用いるひずみ履歴を、影響線長が長い部位において測定した場合、波形が時間的に長い分、衝撃等の影響の除去が容易で重量の算出精度が高いが、車両位置や軸間距離等を検知するために、別途測定点や別のセンサを設ける必要がある。

[影響線について]

- ① BWIM では、車両重量算出に用いるひずみの測定点における影響線を予め取得しておく必要があり、車両重量が既知であるトラック（約 20tf）を用いた走行試験（キャリブレーション試験）を実施する必要がある。
- ② 数年にわたる長期間で測定を行う場合、橋梁の可動部の摩擦増加や耐荷力低下などに伴い影響線形状が変化する可能性があり、定期的に走行試験により影響線形状を確認する（更新する）必要がある。

[重量解析プログラムとユーザーインターフェース]

- ① BWIM によって車両重量を算出する場合、コンピュータによる解析処理が必要となるが、解析に用いるプログラムやそのユーザーインターフェースに汎用のものがないため、その都度開発する必要がある。

【参考文献】

- 1-16-1) F.Moses : Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges, *ASCE*, Vol.105, No.TE3, pp.233-249, 1979.
- 1-16-2) 三木千壽, 村越潤, 米田利博, 吉村洋司 : 走行車両の重量測定, 橋梁と基礎, Vol.21, No.4, pp.41-45, 1987.
- 1-16-3) 松井繁之, Ahmed EL-HAKIM : RC 床版のひびわれの開閉量による輪荷重の測定に関する研究, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.407-417, 1989.
- 1-16-4) 小塩達也, 山田健太郎, 小林直人, 水野良由 : 鋼 I 桁橋の縦桁を用いた Bridge Weigh-In-Motion システムの開発, 構造工学論文集, Vol47.A, pp.1082-1091, 2001.
- 1-16-5) 小塩達也, 山田健太郎, 若尾政克, 因田智博 : 支点反力による BWIM を用いた自動車軸重調査と荷重特性の分析, 構造工学論文集, Vol49.A, pp.743-753, 2003.
- 1-16-6) 三木千壽, 水ノ上俊雄, 小林裕介 : 光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発, 土木学会論文集, No.686/VI-52, pp.31-40, 2001.
- 1-16-7) 小林裕介, 三木千壽, 田辺篤史 : リアルタイム全自動処理 Weigh-In-Motion による長期交通荷重モニタリング, 土木学会論文集, No.773/I-69, pp.99-111, 2004.
- 1-16-8) 小林裕介, 三木千壽, 佐々木栄一 : FBG 光ファイバセンサによる Weigh-In-Motion システムの構築, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1009-1016, 2003.