

§ 2.歪・応力計測技術

2-1.歪・応力計測技術の現状と課題

一般的に、従来の歪・応力計測では、ひずみゲージやひずみゲージ式変換機を用いて有線で、応力や変位量を計測することが多い。図 2-1 に計測機器の組合せの一例を示す。計測機器やセンサは、この他にも様々な種類があり、目的や計測方法に応じて組合せを変え、適切な計測が行われている。また、データ収集方法については、インターネット経由で収集できるものもある。

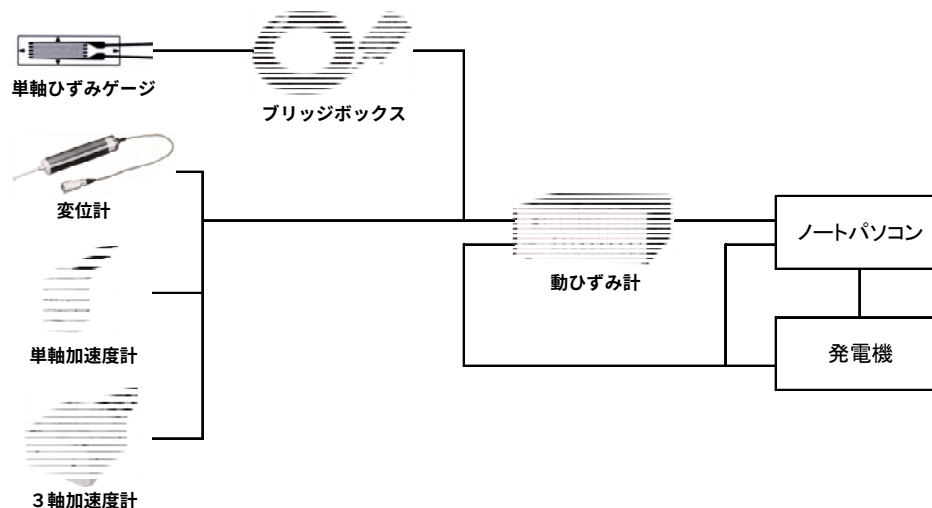


図 2-1 計測機器の組合せ例

しかし、このような技術、機材があっても実務において適用されることが少ないというのが現状である。その理由としては、以下の様なことが挙げられる。

【計測機材や周辺資機材における問題】

- ・ゲージ貼付後の発生応力しか計測出来ない。
→死荷重応力や残留応力の計測が困難である。
- ・計測点の塗膜除去・ゲージの設置撤去・補修塗装が必要となる。(図 2-2 参照)
→準備時間を要し、迅速な計測が行えない。塗装費用も発生する。
- ・使用する計測機器やケーブルが多い。(図 2-3 参照)
→運搬が大変なうえ比較的広い設置、配線スペースが必要となり、場合によっては計測用足場の設置が発生する。結果的に準備期間、費用の増加につながる。
- ・簡易に計測できる機械とその使用用途が一般的に知られていない。
→計測は時間とお金がかかるものとのイメージが先行してしまう。



(a) 塗膜除去状況



(b) ひずみゲージ貼付状況

図 2-2 ひずみゲージ設置状況



(a) 設置状況全景



(b) ケーブル結線・配線状況

図 2-3 計測機器設置状況

【適用の可否や要領・評価における問題】

- ・実施要領に関する図書が少ない。

→計測技術に関する認知度が高まらず、計測方法や有効性が分からないため、計測を実施する判断に至らない。

- ・評価手法に関する図書が少ない。

→適当な計測規模、適切な計測位置、解析・評価手法など、作業全体の枠が決められないため、計測業務が立案されなくなってしまう。

これら問題のうち、計測機器に関しては小型軽量化や塗膜上から計測可能なセンサなどの改良、開発が進められている。また、無線でのデータ回収機器も開発されてきており、需要の増加に応じて計測機器は更に使いやすいものに更新されていくものと考えられる。

このため、計測技術や最適な適用方法、解析・評価手法が図書や文献により広まっていくことが計測

技術を適用する機会の増加につながり、それにより更に高度な技術、製品が生まれてくるものとする。

後述する非破壊での計測技術は、その多くが研究レベルにあるが、これらも計測技術や適用機会の拡がりにより、実用化が進むと期待される。

2-2.歪・応力計測技術の調査結果

本節では、以下に示す計測技術を対象として文献調査を行い、それぞれの計測技術の原理、長所・短所、適用事例、今後の展望をまとめた。

- ・磁歪法
- ・応力聴診器
- ・ワイヤレスひずみ計
- ・赤外線サーモグラフィ
- ・応力発光体
- ・中性子イメージング
- ・3MA
- ・光ファイバセンサ
- ・音弾性法
- ・画像計測

次項以降では、各計測技術の詳細について紹介する。

2-2-1.磁歪法

計測の原理

鉄鋼などの強磁性体は、引張応力の作用方向に磁化しやすく、それと直角方向には磁化しにくくなる。磁気ひずみ応力測定法（以下、磁歪法）は、応力による透磁率の変化と方向（磁気異方性）を検出し、その材質に発生している応力を測定するものである。

応力検出用磁気プローブ

プローブの例を図 2-4 に示す。

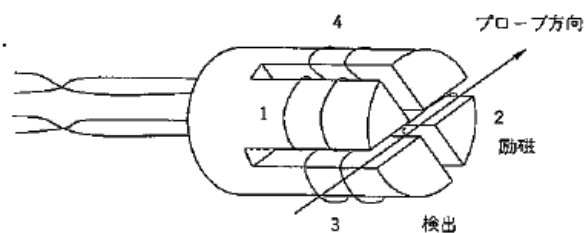


図 2-4 磁気プローブの例¹⁾

励磁コイルに交流を流し、鋼板に押し当てると、検出子には応力状態に応じた磁極分布が現れる。図 2-5 は応力方向（鉛直方向）に磁化し易い状態を示す。

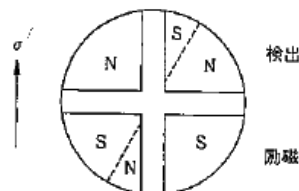


図 2-5 応力方向による磁極分布¹⁾

ここで、検出部にコイルを配置すると、応力に応じた電圧を測定することができる。この電圧は次の式で表される。

$$V = k (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta$$

σ_1 , σ_2 は鋼板に作用している主応力であり、 θ はプローブ方向と σ_1 方向とのなす角である。 k は応力と出力電圧を関係付ける係数であり、材料により異なるため、あらかじめ応力と出力電圧の関係を示す較正曲線を作る必要がある。

計測方法

応力が未知の鋼板にプローブを押し当て、回転させながら出力電圧が最大になる方向を求める。プローブの向きが主応力方向であり、出力電圧から主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) を知ることができる。

計測対象に発生している主応力の方向は、プローブで測定された主応力差と方向を元に、せん断応力差積分法で算出する。概要を図 2-6 に記す。

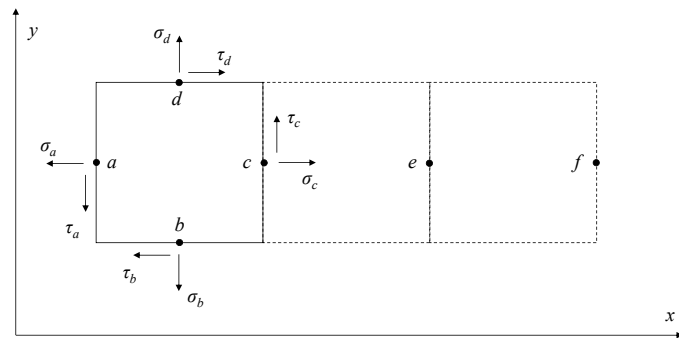


図 2-6 せん断応力差積分法¹⁾

せん断応力差積分法による応力の算出方法

b, d 面に作用するせん断力 (弾性解析より)

$$\tau_b = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta$$

この式中の ($\sigma_1 - \sigma_2$) と θ は測定で得られる。

x 方向の力のつり合いより

$$\sigma_c = \sigma_a + (\tau_a - \tau_b)$$

a 点が部材端部 ($\sigma_a = 0$) であれば σ_c が得られ、順次 e, f と算出。このようにして σ_x が得られると、一方の σ_y は、

$$\sigma_y = \sigma_x - (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta$$

で与えられる。

$$p = \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_x + \sigma_y$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_2$$

とすると、主応力は、

$$\sigma_1 = (p + q) / 2$$

$$\sigma_2 = (p - q) / 2$$

として求められる。

計測の仕組み

本計測技術は鋼材に発生している全応力を非破壊で簡易的に測定できるが、鋼材の表面状態の影響を受け易い等の特徴を有する。本技術の長所と短所を以下に列記する。

長所

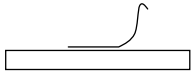
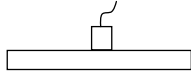
- ・非破壊で残留応力、死荷重応力などの全応力が測定できる。
- ・非接触で測定できるため、塗膜除去や表面処理が不要である。
- ・計測機器がコンパクトであり、作業性が良い。

短所

- ・プローブタッチ面に不陸があると計測が困難である。
- ・表面残留応力の影響を受ける。
- ・リフトオフ（計測面とプローブの離れ）の影響を受ける。
- ・計測対象素材の性質（化学組成など）で、応力感度が異なる。

長所・短所

表 2-1 ひずみゲージ法と磁歪法の比較¹⁾

	ひずみゲージ法	磁 歪 法
計 測 点	点	線・面
概 要 図		
前 処 理	・塗膜除去 ・表面研磨 ・ゲージ接着 ・結線	な し （塗膜上から測定できる）
測定機器	・スイッチボックス ・ひずみ測定器	・磁歪式応力測定器 ・パソコン
後 処 理	・ゲージ結線除去 ・補修塗装（3回）	な し
応 力 測 定 の 特 徴	ゲージ取付け時点を応力=0 と考え、以降のひずみ変化を電氣的に捉え応力に換算する。 鋼材表面のひずみ変化を捉えるので、材質的な影響はない。	材料に応力が加わることによる磁性の変化を電氣的に捉えるので、初期応力、拘束応力を捉えることができる。 鋼材の結晶粒径、熱履歴、化学組成等により磁気ひずみ感度（応力感度）が異なる。
そ の 他	使用実績が多い。	使用実績が少ない。 実用化データが少ない。

- ・ EM センサによる張力管理計測^{2), 3)}

鋼材の磁気特性を検出する EM センサが、切土斜面に設置されたグラウンドアンカーの張力管理に適用された事例である。参考文献 2) では、約 1 年半の計測により、アンカーの張力が保持されていること、夏冬の温度変化により最大約 1.4tf の荷重変動があったこと等を確認している。これらの結果より、EM センサがアンカーの張力管理に有用であると評価している。

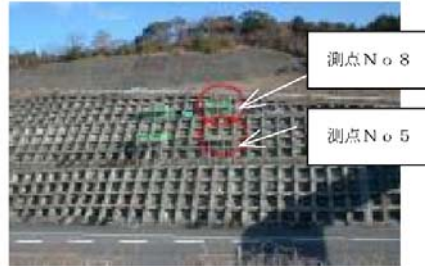


図 2-7 設置斜面²⁾



図 2-8 EM センサ設置状況²⁾

表 2-2 ひずみゲージ法と磁歪法の比較²⁾

測定日	5-1 tf	5-2 tf	5-3 tf	合計 tf	温度 ℃	8-1 tf	8-2 tf	8-3 tf	合計 tf	温度 ℃
2001/2/8						7.6	8.6	8.1	24.4	13.8
2001/2/15	7.9	8.9	7.8	24.5	12.6	7.7	8.7	8.2	24.5	0.3
2001/2/22	7.7	8.8	7.7	24.2	17.4	7.6	8.5	8.1	24.2	17.3
2001/3/8	7.8	8.8	7.8	24.3	1.7	7.5	8.5	8.0	24.0	-2.3
2001/3/15	7.8	8.8	7.7	24.3	9.1	7.6	8.6	8.1	24.2	8.3
2001/8/11	7.6	8.5	7.6	23.8	27.3	7.5	8.4	7.2	23.1	27.7
2001/11/8	7.6	8.5	7.6	23.7	22.1	7.4	8.3	7.9	23.7	22.8
2001/12/21	7.7	8.6	7.7	23.9	7.2	7.5	8.4	8.0	23.9	6.9
2002/2/6	7.9	8.8	7.8	24.5	6.7	7.7	8.7	8.2	24.6	7.0
2002/8/1	7.6	8.5	7.6	23.7	41.5	7.5	8.4	7.9	23.8	41.5

適用事例

- ・ 鋼橋部材の応力測定^{4), 5), 6), 7), 12), 13)}

磁歪法を新設橋梁や既設橋梁の応力状態の測定に適用する事例である。参考文献 6) では、昭和 30 年代に建造された鋼単純下路式曲弦ワーレントラス橋部材の応力状態を確認している。

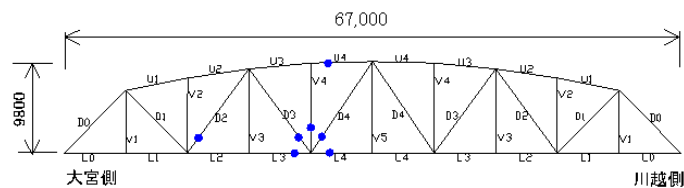


図 2-9 計測箇所⁶⁾

上弦材、下弦材、斜材等を現地計測した結果、応力の傾向は把握できたが、リベット位置や曲げ加工位置で乱れがあった。このため、磁歪法を用いた古い橋梁での応力測定では、次の 2 点を課題に挙げている。

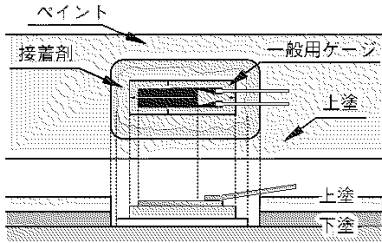
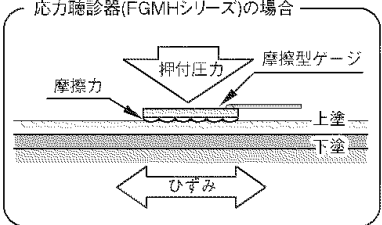
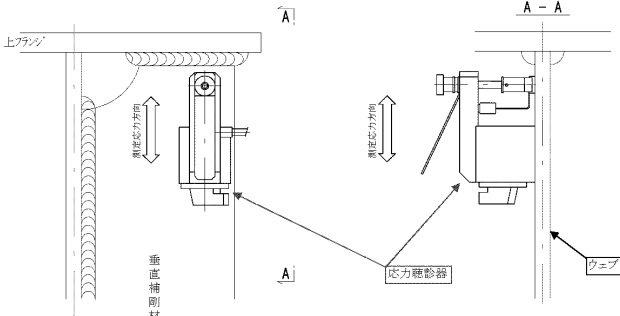
- ① 鋼材の表面残留応力の影響の考慮、除去
- ② 古い鋼板の時歪感度の確認

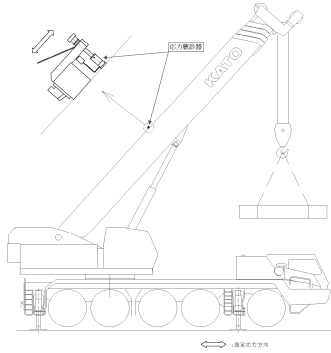
また、参考文献 8) では、参考文献 6) で計測した橋梁の撤去部材を利用して、磁歪感度特性の分析を実施し、現地計測結果の精査を実施している。古い鋼材の作用応力レベルと磁歪出力のデータを蓄積し、設計資料などから実橋作用応力レベルを確認することで、測定に適した磁歪感度を設定できるとしている。

今後の展望	<u>現状の課題</u> ・表面処理や塗膜厚さ等による影響を軽減する方法として、励磁電流の周波数を下げる事や、インピーダンスを規格化した較正曲線が提案、検証されている^{8), 11), 12)}。一方で、溶接部の近傍では残留応力の影響などによる計測誤差が大きく、応力状態の傾向把握は可能であるが、実用化にはさらなる検証が必要と考えられる。 ・新設構造物では本体構造とほぼ同条件の試験片により較正曲線が作成できるが、試験片の得られない既設橋では類似の試験片等により対応している状況と考えられる¹⁰⁾。 ・磁歪法で得られる応力は、グリッドで囲まれた中の平均応力であり、局部応力を計測するのは困難である。 <u>今後の展望</u> ・磁歪法の計測誤差が大きい理由の一つに、残留応力の影響がある。残留応力は溶接によるものだけではなく、圧延、切断によるものもあり、それらがどの程度の大きさなのか不明である。よって、残留応力の評価方法の確立が必要である。 ・文献9)ではミルメーカーにより応力感度の違いが報告されているほか、古い構造物では類似試験片が得られないケースも考えられる。このため、ミルメーカー、製造年代、材質毎の較正曲線を作成・収集し、データベースを構築する必要がある。また、架設時期の古い橋梁に対しては、更新により撤去される構造物からデータを収集する事も有効である。 ・4章で示す2主鈑桁橋の計測では、下フランジ1断面で約90分を要した。実際のモニタリング技術として適用するには、計測時間を短縮する計測方法の構築が必要である。 ・現状では主応力方向が明確な場合は、適用が比較的容易であるが、例えば、鋼製橋脚の隅角部のように、複雑な応力場では、せん断応力差積分法における適切な応力の零点設定など計測方法の構築が望まれる。
参考文献	1) 安福精一，藤井堅，末宗仁吉，境禎明，村井亮介，池田誠：磁気を用いた鋼構造物の応力測定，橋梁と基礎，pp.33-39，2001. 2) 高橋洋一，徐光太，久保良雅，宮本則幸，佐々木義則：EM センサによる張力管理計測事例（その2）－西九州自動車道グラウンドアンカー張力管理－，土木学会年次学術講演会概要集，CS1-017，2003. 3) 芥川真一，有村有紀，森本紘太郎，中森絵美：PS アンカーの作用軸力を推定するためのナットの非破壊応力測定，土木学会年次学術講演会概要集，3-073，2007. 4) 金島也恵子，和田信良，岡俊蔵，坂手道明：橋台移動により拘束された鋼桁内在応力の推定方法について，土木学会年次学術講演会概要集，V-465，2000. 5) 柳沢栄一，和田信良，坂手道明，山本信哉，村井亮介：橋台移動により拘束された鋼桁内在応力の推定方法について（その2：磁歪法による夏・冬の内在応力変動の測定性と再現性について），土木学会年次学術講演会概要集，I-284，2002.

- | | |
|--|---|
| | <p>6) 川合一嘉, 星野辰雄, 野村直茂, 中谷眞二, 柳沢栄一: 磁歪式応力計測法の鋼橋への適用に関する研究 (第7報: 昭和30年代の古い鋼橋材の応力測定結果に関する検討その1), 土木学会年次学術講演会概要集, I-286, 2002.</p> <p>7) 岡俊蔵, 星野辰雄, 野村直茂, 中谷眞二, 村井亮介: 磁歪式応力計測法の鋼橋への適用に関する研究 (第8報: 昭和30年代の古い鋼橋材の応力測定結果に関する検討その2), 土木学会年次学術講演会概要集, I-287, 2002.</p> <p>8) 池田誠, 黒瀬義幸, 松岡敬, 安福精一: 磁歪式応力測定法の実構造物への適用化研究その1 (プローブ, 素材), 土木学会年次学術講演会概要集, IV-126, 2000.</p> <p>9) 黒瀬義幸, 池田誠, 松岡敬, 安福精一: 磁歪式応力測定法の実構造物への適用化研究 補足実験その2 (材質, 板厚, 表面処理), 土木学会年次学術講演会概要集, IV-127, 2000.</p> <p>10) 芥川真一, 中森絵美, 森本紘太朗, 口池尚子: 磁歪法による既設鋼橋の応力測定に関する検討, 土木学会年次学術講演会概要集, I-116, 2007.</p> <p>11) 佐藤悠樹, 宮下剛, 長井正嗣, 奥井義昭, 安福精一: 表面処理の影響を受けにくい磁氣的残留応力の測定方法, I-419, 2009.</p> <p>12) 佐藤悠樹, 宮下剛, 長井正嗣, 稲葉尚文, 矢吹太一: 表面処理の影響を受けにくい磁氣的応力測定法の実橋への適用, 土木学会年次学術講演会概要集, I-252, 2010.</p> <p>13) 渡辺剛, 稲葉尚文, 平山繁幸, 木村啓作: 既設橋拡幅工事における施工時応力の計測及び長期計測方法の検討, 土木学会年次学術講演会概要集, I-255, 2010.</p> |
|--|---|

2-2-2. 応力聴診器

計測の仕組み	通常のひずみゲージは、接着物を介して対象構造物に追随しゲージの電気抵抗変化量から発生ひずみを測定する。これに対し応力聴診器は、マグネットで構造物に吸着し受感部の摩擦型ゲージを対象部位に押し当て、界面に発生する摩擦によってひずみを測定する（図 2-10）。   (a) ひずみゲージ (b) 応力聴診器 図 2-10 ゲージ設置のイメージ ⁴⁾
長所・短所	<u>長所</u> ・ 接着剤が不要で、設置も容易なため、移動しながら何箇所も測定出来る。 ・ 塗膜上から設置、測定を行える。 ・ 何度でも使用出来る。 ・ 比較的精度の高い測定を行える（ただし、ひずみゲージよりは低い）。 <u>短所</u> ・ 塗膜のひずみを測定するため実際の鋼材発生ひずみと差違が発生する。 ・ 塗膜状況によって測定精度の低下や、適用出来ない場合がある。 ・ 本体サイズの問題から、狭い間隔での測定点設定は行えない。 ・ 価格の問題から、多点数での同時測定は困難である。
適用事例	・ 橋梁各部の発生ひずみレベルの測定 ¹⁾⁻³⁾ → 設置の容易さと、実発生ひずみとの差違などから、対象部位における発生ひずみレベルの測定に用いられることが多い。この結果を基に詳細測定を行う、または大凡のひずみ値とその変動を把握したい際の測定などで適用されている。以下に適用事例を示す。 ・ 塗膜剥離ができない新設橋梁や塗り替え直後の橋梁の応力レベル測定 ・ 疲労亀裂箇所近傍での事前予備計測 ⁴⁾（図 2-11） → 垂直補剛材上端回し溶接部近傍に塗膜上から聴診器を設置し、活荷重による発生応力レベルを測定する。  図 2-11 垂直補剛材上端測定事例 ⁴⁾

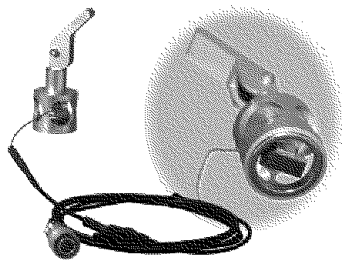
	・クレーンにおける荷吊り時のアームでの発生ひずみ測定⁴⁾ (図 2-12) →クレーンのアーム部に聴診器を設置し, 荷吊り時の安全管理を目的としてアーム軸方向の発生応力レベルをリアルタイムに測定する。  図 2-12 応力聴診器適用事例⁴⁾
参考文献	1) 小塩達也, 山田健太郎, 齋藤, 好康, 椎名政三: 摩擦型ひずみゲージによる応力聴診器の開発と構造物の健全度診断への応用, 土木学会年次学術講演会概要集, 6-128, 2005. 2) 小塩達也, 山田健太郎: 摩擦型ひずみゲージを用いた塗膜上ひずみ測定, 土木学会年次学術講演会概要集, I-294, 2002. 3) 佐光浩継, 古市亨, 福田浩之, 村上郷太, 青山裕士: 摩擦型ゲージ(応力聴診器)の現場適用性に関する試験結果, 土木学会年次学術講演会概要集, I-169, 2006. 4) 株式会社東京測器研究所ホームページ: http://www.tml.jp/index.html
今後の展望	<u>現状の課題</u> ・応力聴診器使用の現状としては, 開発主旨として「簡易に対象部位の応力レベルを測定する」といったことがあり, 前述のような予備試験に適用されるケースが多いようである。製作メーカーに問い合わせてみたところ, 鉄道や道路の橋梁管理者からの購入実績が多く, 小型の動ひずみ計とセットで購入し, 日常点検に合わせて活荷重による発生ひずみを測定しているのが実態である。 ・使用実績が低い要因として, まだ一般的に広く認知されていないことが考えられるが, ひずみゲージと比較し 1 測点の単価が高額でニーズの低さと合わせて測定業者が自社購入していない(→持っていないから使わない)こともその要因である。 <u>今後の展望</u> 今後この測定技術が広く使われていくには, その他の技術も含め, 今回の報告書を使って橋梁管理者, 計測業者にアナウンスすることも必要だが, 色々な適用方法を提示することが重要であることからいくつか適用方法(案)を列挙する。 ①健全度判定における標準化 「既設橋梁の耐荷力照査実施要領(案)(平成 8 年 3 月(財)道路保全技術センター)」では, 対象橋梁の発生応力はひずみゲージと応力頻度計を用いて計測することとなっており, この方法は今でも広く用いられている。 この測定センサとして応力聴診器を用いることを提案してはどうかと考える。設置の容易性, 塗膜除去復旧の不要を考えれば, 明らかに聴診器は有効であり, 測定方法が認知されてくれば, 自ずと計測業者も機材を取り扱うようになる。ただ単にゲージから聴診器への変更ではなく, 8 点ないしは 16 点程度で, この測定における測点も明確に(出来れば構造物形式別)すれば, より適用しやすくなると考える。

②ワイヤレスシステムでの測定

計測の利便性向上に向けては、後述するワイヤレスシステムと応力聴診器を組み合わせた計測システムが有望である。センサの設置が容易であり、さらに煩雑なワイヤリング作業からも解放され、複数点の同時計測が可能となるからである。

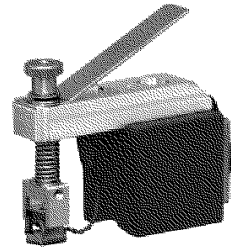
しかし、現状のワイヤレスシステムは、最小インターバルや可能収録データ数などにより動的計測への適用が困難であるうえ、通信距離が短いといった短所があり、現時点での適用は困難である。今後、システムの改良が期待されるところである。ワイヤレスシステムの短所や、改良に関しては後述する。

今後の展望



単軸 (¥55,000/台)

(a) 初期モデル



単軸 (¥59,000/台)

(b) 最新モデル



3 軸 (¥95,000/台)

図 2-13 応力聴診器 (価格は 2013 年 7 月時点)

2-2-3.ワイヤレスひずみ計

計測システムは、ワイヤレスコントローラー1台とワイヤレスモジュール測定点数分で構成される（図 2-14）。モジュール（図 2-15）は 3500 データ記録可能であり、A/D変換器も内蔵しており、デジタルデータをそのままコントローラー（図 2-15）へ無線で送信する形式となっている。重量は 60g+電池重量で、電池寿命はインターバル1時間で約1年間である。測定インターバルは最小1分である。コントローラーはUSBで電源を確保し、最大100台のモジュールを接続出来る。いずれも通信距離は見通しで50mとなっている。

また、中継機能を利用することで、キロ単位の広域に点在する測定ポイントからデータを収集するシステムも開発・販売されている。このシステムは、通信経路をメッシュ状に構成できるため、ある通信経路が遮断されても、自動的に通信経路を選択するため、信頼性が高い（図 2-16）。

計測の仕組み

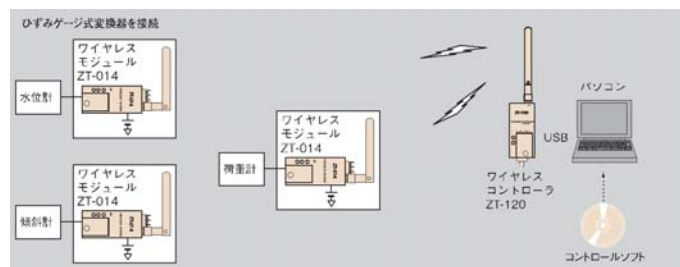


図 2-14 システムの構成 1)



左：モジュール（\98,000/台）

右：コントローラー（\198,000/台）

図 2-15 本体の外観 1)

（価格は 2013 年 7 月時点）

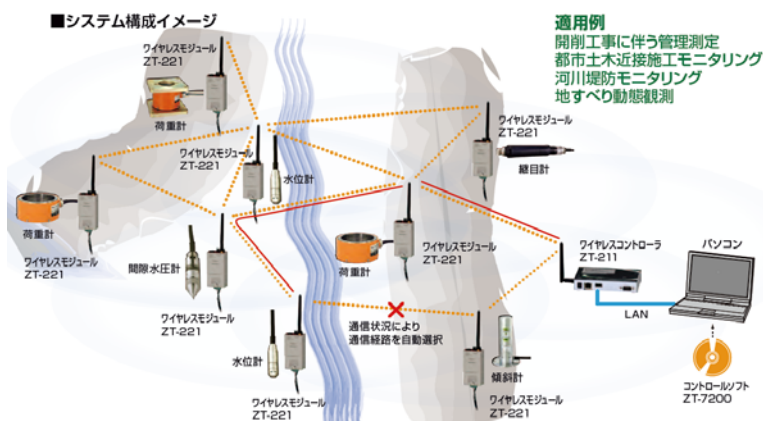
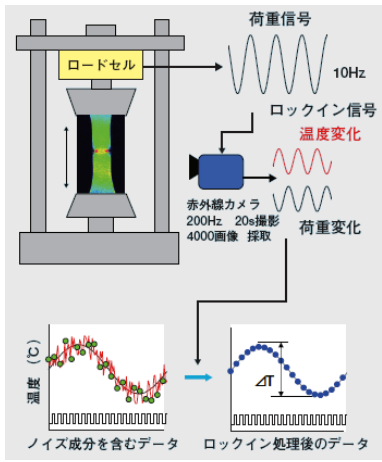


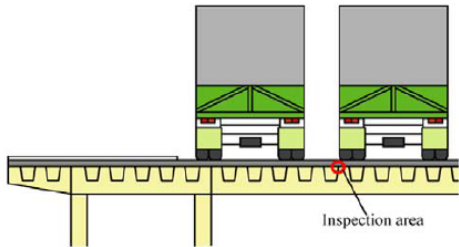
図 2-16 システム構成のイメージ 1)

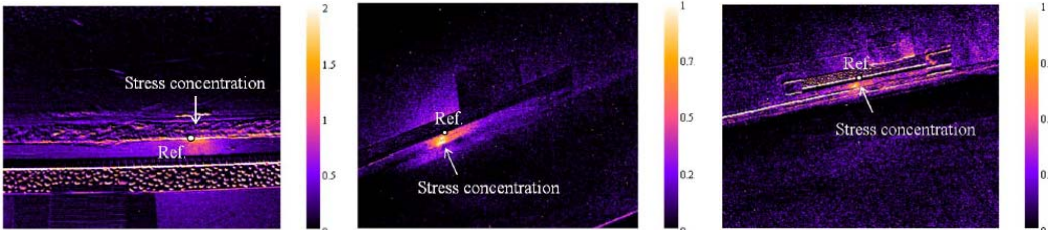
長所・短所	<u>長所</u> ・無線化によりケーブルが不要となる。 ・ひずみゲージやゲージ式変換器近傍でデジタル処理するためノイズに強い。 ・重量が軽く、設置も容易である。 ・中継機能により広域の測定点からデータを収集できる。 <u>短所</u> ・静的载荷計測対応となっており、動的計測への適用が困難。（最小インターバル、データ集録数より） ・通信距離が短く、広域測定するためには多くの中継器が必要となる。 ・電池寿命の点からも動的計測への適用は困難。また、本体サイズの問題から、測定点を狭い間隔で設定することが難しい。
適用事例	・観測井戸の動態観測¹⁾ →観測井戸内部に設置した水位計にワイヤレスモジュールを取り付け、パソコンとワイヤレスコントローラーにより外部から定期的に水位の変化を測定する。 ・擁壁の傾斜測定や補強部既設アンカー緊張力の経年変化測定¹⁾（図 2-17） →擁壁上に設置した傾斜計や、アンカーに設置した荷重計にワイヤレスモジュールを取り付け、パソコンとワイヤレスコントローラーにより路面から定期的に傾斜度、アンカー緊張力を測定しその変化を確認する。 図 2-17 アンカー緊張力の長期計測事例¹⁾
参考文献	1) 株式会社東京測器研究所ホームページ：http://www.tml.jp/index.html

今後の展望	<u>現状の課題</u> 紹介したシステムは、適用事例で挙げた測定を目的として開発されており、長期的かつ測定間隔の長いものを対象にしていることから、動的な連続測定は出来ない状況にある。このような測定技術の場合、適用範囲が非常に限られてくる。 <u>今後の展望</u> 開発されて日が浅いため適用実績が少ないものと考えられるが、実業務への適用を考えた場合、システムを改良し適用範囲を広げる必要があると考える。今後考えられる適用事例とそのための改良点を以下に列記する ①データ記録数の増加・サンプリング間隔の短縮 鋼橋への適用を考えた場合、静的载荷を行うケースは限られていることから、データ記録数増加とサンプリング間隔短縮の改良を行い、車輛走行時の動的計測データを収録出来るようにする。この結果、適用可能な計測ケースが増えることが期待される。 ②通信距離の延長 見通しで50mとなると、既設橋の足場や裏面吸音板の内部で全点を同時にコントロール出来る範囲は20m強になると思われ、ワイヤレスの優位性が失われる。中継機能を付加したメッシュ型ワイヤレスシステムも開発・販売されているが、中継用のモジュールが必要となり非効率である。通信延長が増せば、①で記載した動的計測の同時測定範囲が広がるとともに、必要最小限の中継機材で測定可能となる。 ③応力聴診器との併用 鋼橋の各管理者からは、必要性よりもコストと作業性の観点から、ひずみ測定が敬遠されてしまっている。上記①②の改良が出来た場合、応力聴診器と併せて使用することにより、測定の準備、片付け時間が大幅に短縮されるとともに塗装処理も無くなり、結果的に16点程度であれば安価で短期間の測定が可能となり、適用しやすい状況が生まれることになる。
--------------	---

2-2-4.赤外線サーモグラフィ

計測の仕組み	物体に断熱的に変形（応力変動）が生じると、微少な体積変化によりこれに対応する温度変動が生じる（熱弾性効果）。この熱弾性効果による温度変動 ΔT は、次の基本式により与えられる。 $\Delta T = -k T \Delta \sigma$ ここで、k：熱弾性係数（軟鋼：$3.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$） T：材料の絶対温度 $\Delta \sigma$：主応力和の変化量 本手法では、この微少な温度変動 ΔT を、赤外線サーモグラフィを用いて計測することにより、主応力和の変動 $\Delta \sigma$ を計測することができる。 測定システムの構成を図 2-18 に示す。システムは、赤外線サーモグラフィとサーモグラフィからの出力信号を処理する装置で構成されている。先に述べた通り、本方法では温度変動を測定するが、熱弾性効果による温度変動は非常に小さいため、得られた温度変動をそのまま換算しただけでは、十分な精度を得ることはできない。そこで、本方法では、測定対象物へ繰返し荷重を与え、荷重信号と同期して変動する温度変動だけを抽出し、さらにこれを荷重サイクルごとに平均化することで、高精度の測定を可能としている。荷重信号と同期する温度変動の抽出には、ロックイン処理と呼ばれる手法が用いられている。  図 2-18 赤外線サーモグラフィによる応力測定の概要²⁾
長所・短所	<u>長所</u> ・遠隔から非接触に測定できる。 ・応力分布が画像化されるので、応力集中部位の評価などに有用（点情報であるひずみゲージに対して、応力集中部等を見逃す危険性は少ない）。 ・軟鋼応力測定の分解能で約 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 程度を達成している¹⁾ <u>短所</u>

長所・短所	<u>短所</u> ・温度変化の発生しない一定荷重や残留応力などは、現段階では基本的に測定できない。 ・各応力成分を分離して直接計測できない（主応力和の変動量が計測される）¹⁾。 ⇒ただし、問題克服のために応力成分分離法の開発も進んでいる¹⁾。 ・測定対象以外の物体（電気機器や照明など）の熱源に注意が必要となる¹⁾。 ・測定体の表面反射は、赤外線放射量を低下させることで計測精度の低下を招くことから、反射率を小さくするため、黒体化塗装等の反射率（放射率）補正が必要となる¹⁾。ただし、鋼床版の疲労き裂検出など、応力の相対分布を計測する場合であれば、一般的に表面反射の影響は小さく、特別な処置は不要である¹⁾。 ・円孔縁等の応力集中部や薄肉断面の応力計測では、熱伝導現象により計測精度が低下する^{3), 4)}。 ・応力変動による温度変化は微少であるため、熱伝導の影響を小さくするためには比較的早い繰返し荷重か高速荷重が必要となる^{2), 3)}。 ・遠距離計測（10m 前後以上）になると計測精度が低下する（空気中の炭酸ガスや水蒸気により赤外線が吸収され、減衰するため）⁵⁾。
適用事例	赤外線サーモグラフィによる応力計測を応用したモニタリング技術として、近年、鋼床版の疲労亀裂検出技術の開発が実用化に近い成果を挙げている^{5), 6)}。本手法では、応力集中部や亀裂先端近傍など特異な熱弾性応力変動分布を画像中で識別することにより、構造的な欠陥を検出する。以下にその計測事例を示す。 <u>鋼床版の疲労亀裂検出事例</u>⁵⁾ 【計測対象】 対象橋梁：供用下の道路橋（図 2-19） 対象部位：輪荷重の影響を強く受ける車両タイヤ直下の鋼床版（図 2-20） 対象亀裂：デッキプレートとトラフリブ間の溶接ビードにおけるビード貫通型亀裂   図 2-19 測定対象の鋼橋⁵⁾ 図 2-20 測定対象部と走行レーンの位置関係⁵⁾

適用事例	【計測条件】 床版上を車両が通過した時に発生する亀裂先端近傍での熱弾性温度変動を赤外線サーモグラフィにより計測した。計測は、高所作業車により検査箇所へ接近して行う近距離計測と、望遠レンズを使用して地上から行う遠距離計測（8m および 12m）を行った（図 2-21）。なお、測定体の疑似黒体化塗装は行わず、防食塗装の塗膜除去も行わない。  図 2-21 遠隔からの赤外線計測⁵⁾ 【計測結果】 計測で得られた時系列の赤外線計測データに対して、自己相関ロックイン処理⁷⁾を施し、亀裂先端近傍の相対応力分布を求めた結果を図 2-22 に示す。計測の結果、以下の事項が確認できた。 ①自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィによる計測の結果、計測距離が長くなるほど、自己相関ロックイン処理画像の領域全体にムラが現れ、計測精度が低下するものの、遠隔からの亀裂位置同定が可能であることが示された。 ②疑似黒体化の塗料無し、防食塗装有りの測定対象に対して遠隔測定を行うという、現場での最も厳しい条件下においても亀裂の検出が可能であることが確認できた。  (a)近接測定結果 (b)距離 8m での測定結果 (c)距離 12m での測定結果 図 2-22 遠隔からの赤外線計測⁵⁾
参考文献	1) 坂上隆英：サーモグラフィによる熱弾性応力測定，溶接学会誌，第 72 巻，第 6 号，pp.51-55，2003. 2) JFE テクノリサーチ株式会社ホームページ： http://www.jfe-tec.co.jp/infrared-camera/ 3) 本田尚，佐々木哲也，大塚輝人，橘内良雄：赤外線応力測定における測定精度に及ぼす熱伝導の影響，機械学会論文集 A，Vol.67，No.659，pp.1248-1254，2001. 4) 田村栄一，杵渕雅男，十代田哲夫：赤外線サーモグラフィによる応力評価に対する面外曲げ変形の影響，神戸製鋼技報，Vol.57，No.2，pp.78-81，2007.

参考文献	5) 鎌田敏郎（研究代表者）：各種道路橋床版における疲労損傷の非破壊検査システムに関する研究開発, 道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート, No.19-3, 2010. 6) 和泉遊以, 阪上隆英, 久保司郎, 玉越隆史：自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による鋼床版デッキ貫通型疲労き裂の検出, 機械学会論文集A, Vol.76, No.766, pp.723-729, 2010. 7) 阪上隆英, 西村隆, 久保司郎, 崎野良比呂, 石野和成：自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔非破壊検査技術の開発(第1報 溶接試験片を用いた基礎的検討), 機械学会論文集A, Vol.72, No.724, pp.1860-1867, 2006.
今後の展望	<u>現状の課題</u> 【計測される応力】 本手法では, 応力変動に相関のある温度変動を計測することで主応力和の変動を計測することから, 温度変化の発生しない一定荷重や残留応力などは原理的には測定できない。よって, 既設橋梁への適用においては, 死荷重を含めた全応力の測定や評価を行うことは難しく, 例えば活荷重などの不定期荷重による構造物の変動応力分布から構造的異常・欠陥を検出する手法(例: 鋼床版の疲労き裂検出)などへの適用に限定される。 【計測精度】 既設橋梁現場にて計測を行う場合, 測定物の断面や表面処理だけでなく, 表面反射や他設備の熱源などの周辺環境により計測精度が影響を受ける。よって, 変動応力の計測・評価を行う場合には, 影響因子の排除や管理方法の確立が必要となる。なお, 前述の応力計測による鋼床版の疲労き裂検出技術では, 特異な応力変動分布を画像中で識別することにより欠陥を検出するため, 周辺環境などが検出精度に与える影響は比較的小さい。 【計測範囲・効率】 本手法では, 赤外線カメラを使用することから, 計測距離および計測装置の空間分解能が計測精度や効率に大きな影響を与える。例えば, 鋼床版の疲労き裂検出技術において, 望遠レンズを用いて約9m離れた場所から計測した場合での測定可能な視野範囲は500mm四方程度である。よって, より広範囲を効率的に測定するためには, 計測機器の改良や自動化が必要となる。 <u>今後の展望</u> ・ 計測機器の自動化, 空間分解能の向上 ・ 一定荷重や残留応力の評価手法の開発 ・ 実橋計測における影響因子排除や管理方法の確立

2-2-5.応力発光体

応力発光体は産業総合研究所九州センターで開発された素材で、粉末状のセラミックス粒子からなる。外部から加えられたエネルギーを可視光に変換することができる（図 2-23）。この微粒子を含有する塗料を対象物に塗布すると、応力集中が個々の微粒子の発光となって現れる。



(a) 発光するボール¹⁾ (b) 発光する紙コップボール²⁾

図 2-23 応力発光体の発光状況

計測の仕組み

単純な応力条件下では、応力発光強度と応力の二乗、ひずみエネルギーと直線比例の関係があることが確認されている（図 2-24）。複雑な応力条件下では、発光強度の分布が、ミーゼス応力と比較的よく一致していることが確認されている。

応力を値として把握するには、別途、発光強度分布をモニタリングする画像センサ（カメラ）が必要となる。

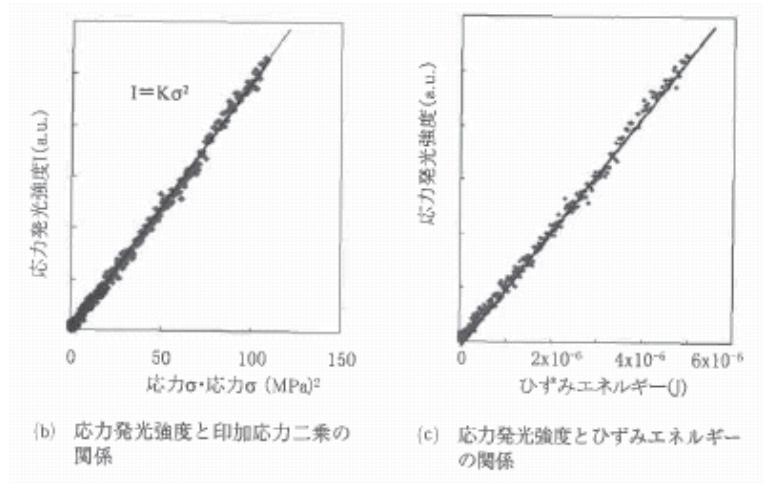


図 2-24 発光強度と応力・ひずみの関係¹⁾

長所・短所	<u>長所</u> ・き裂の形状分布や進展具合，き裂先端の応力集中をリアルタイムに可視化できる。 ・目視では確認できないき裂（マイクロクラック）についても，応力発光により検出できる。 ・ひずみゲージが点情報として，ひずみを計測するのに対し，応力発光体は面的にひずみを捉えることが出来る。 ・ステンレス系基板を用い，弾性限界の 80%に相当するひずみ量（1,600 μ ひずみ）を 1 0 0 万回繰り返して加えた後も，応力発光特性の低下が見られず，耐久性に優れている。 ・栈橋上部工のような暗視野環境下においてもき裂を検出することが可能である。 <u>短所</u> ・カメラが設置できない場所では応力値を把握できない。 ・応力発光は動的な現象であり，材料に加えられる力が時間的に変化しているときに発光する。そのため，供用後の死荷重応力などは確認できない。 ・日常において暗視野とならない箇所については，夜間に計測する，暗幕で覆って計測する等の対策が必要となる。
適用事例	① R C 橋における計測事例³⁾ 【計測対象】 構造形式：3 径間連続 T 桁橋 橋長：2 4 . 4 0 m，幅員：7 . 8 9 m 建設年：昭和 3 4 年 3 月（築 5 0 年経過） 【計測結果】 応力発光体を塗布したシートをウェブ表面に貼り付けた（図 2-25）。応力発光体で得られたひずみ値とひずみゲージを比較したところ，応力発光とひずみの大きさに相関があり，ひずみゲージに 700 $\mu \varepsilon$ 以上のひずみが発生したときに，応力発光が見られた（図 2-26）。  図 2-25 発光シートの貼付状況³⁾  図 2-26 ひび割れでの発光状況³⁾

②鋼橋における計測事例⁴⁾

【計測対象】

構造形式：鋼ゲルバートラス橋（鳥飼大橋）

橋長：546.000m，幅員：7.500m

建設年：昭和29年

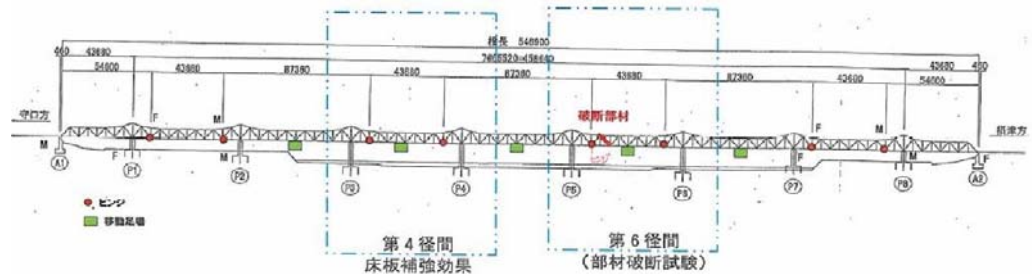


図 2-27 対象橋梁の側面図⁴⁾

【計測結果】

荷台に鉄板を載せ、総重量を26.3tfとした大型トラックを走行させ（走行速度：20，40km/h），ひずみゲージおよび応力発光体により計測した。ゲルバートラスの6径間目の斜材を事前に切断し，斜材をセンターホールジャッキで固定した状態（図 2-28）と解放した状態の2パターンで計測を行った。応力発光体はシート状のものを使用し，凹凸がある場合にはスプレー状のものを塗布した。

適用事例



図 2-28 センターホールジャッキによる斜材の固定状況⁴⁾

計測の結果，以下の事項が確認された。

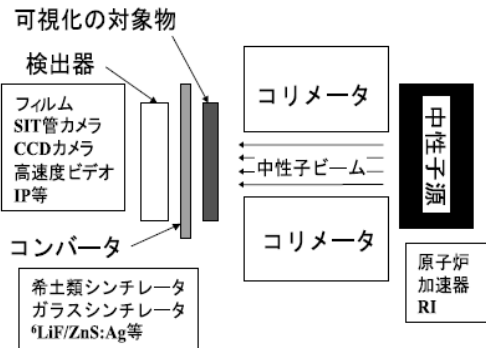
- ①き裂先端のストップホール付近に応力発光シートを塗布し，き裂以外にも応力集中箇所や新たなき裂が発見できるかを確認した（図 2-29）。

適用事例	図 2-29 ストップホール部での発光状況⁴⁾ ②ゲルバートラスの斜材固定時と切断時の発光状態を比較することで、応力発光シートが橋梁の応力状態に追随できることを確認。 ③RC床版の鋼板接着補強部の発生応力確認しようとしたが、発生応力は5.7N/mm^2であった。応力発光シートの検出能は産総研の公表用資料からも10N/mm^2といわれており、今回の微小な応力では検出できなかった。
参考文献	1) 徐超男:「見えない」危険を可視化する技術, 検査技術, Vol.14, No.9, pp.1-10, 2009. 2) 大光炉材株式会社ホームページ: http://www.taiko-ref.com/index.html 3) 篠川俊夫, 徐超男, 寺崎正, 上野直広, 安達芳雄: 応力発光体を用いた実橋梁ひずみ計測実験, 土木学会年次学術講演会概要集, VI-157, 2010. 4) 保田, Luiza, 寺崎ほか: 応力発光シートを用いた橋梁鋼部材の変状検出能力, 日本設備管理学会秋季研究発表大会/第3回検査・評価・保全に関する連携講演会, 2010 5) 産総研プレスリリース: 応力発光体を用いた安全管理モニタリングシステム, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20091109/pr20091109.html, 2009.11.9 6) 川端雄一郎, 徐超男, 小野大輔, 岩波光保, 李シンシュ: 暗視野下におけるコンクリートのひび割れ検出への応力発光センサの適用, 土木学会年次学術講演会概要集, V-255, 2010. 7) 李シンシュ, 川端雄一郎, 徐超男, 小野大輔, 李承周: 応力発光センサを用いた鉄筋コンクリートの破壊予測の検討, 土木学会年次学術講演会概要集, V-256, 2010. 8) 川端雄一郎, 小野大輔, 李シンシュ, 川崎悦子, 岩波光保, 加藤絵万, 上野直広: 応力発光センサによる暗視野下におけるコンクリートのひび割れ検出に関する基礎的検討, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.3, 430-435, 2011.

今後の展望	<u>現状の課題</u> 参考文献では発光強度と応力値とのキャリブレーション方法が明らかにされていない。また、応力値によっては発光しないとの報告もされており、使用環境や材質、構造等により発光強度と応力値との関係は変わってくるものと考えられ、キャリブレーション方法が課題となると考える。 <u>今後の展望</u> 鋼橋用の塗料に混入しても、塗装の耐久性を低下させずに発光可能であればセンサの設置が容易である。新設橋は工場塗装時に応力発光体が混入された塗料を使用することで、既設橋でも塗装塗替え時に応力発光体が混入された塗料を使用することで、センサの埋め込みが容易にできると考える。
--------------	---

2-2-6.中性子イメージング

(1) 中性子ラジオグラフィ

計測の仕組み	中性子ラジオグラフィとは、中性子が物体内部を透過するという性質を利用して、非破壊で物体内部を観察する技術である。計測の仕組みは、鋼橋の非破壊検査で一般的に使用される放射線透過試験（R T）と同じであり、透過特性の違いにより、R Tと相補的な情報を得ることができる。 典型的な中性子ラジオグラフィ装置は、中性子源、コリメータ、検出器で構成されている（図 2-30）。中性子源としては、原子炉、加速器および放射性同位元素が一般的である。このうち、原子炉の中性子源強度が他の2つと比べて大きいため、現在最も多くの中性子ラジオグラフィ装置で利用されている。コリメータとは、中性子源より放射された中性子束を平行ビームに整える装置である。検出器は、対象物を透過してきた中性子ビームの強度分布を可視化する部分である。従来の出力方法としては写真フィルムによる方法があるが、高感度の測定には不向きという弱点があることから、現在は中性子用イメージングプレートと呼ばれる特殊なフィルムに置き換えられつつある。 中性子ラジオグラフィは、1960年代から海外で始められた。中性子の発生は、X線またはγ線と比べてコストがかかるため、X線またはγ線では検出が困難なものを対象とされている。使用済み原子炉燃料の検査が最も特徴的なものである¹⁾。  図 2-30 中性子ラジオグラフィ装置の構成
長所・短所	<u>長所</u> ・電荷を持たないため様々な物質の奥深くまで透過することが可能 ・非接触計測、高速度撮影、多次元計測（C T）、光学的に不透明な流体の可視化 <u>短所</u> ・中性子源は、原子炉や大型加速器を用いたものが主流で、実験レベルの簡易測定、現場での適用が困難 ・コスト高 ・安全性の確保（必要な遮蔽厚の確保、放射化による検討対策）

中性子ラジオグラフィによる流体可視化・計測
 矩形管内気液二相流撮影，水中に落下した熔融金属塊の中性子透過像

【事例 1】

下図は，アルミ製矩形容器に満たした重水中に約 600℃に加熱熔融したウッズメタルを落下させ，毎秒 500 コマの撮像速度で撮影した中性子透過画像である²⁾。

図の上側は 30ms ほどの原画像であり，黒い部分は熔融したウッズメタルの液滴，灰色の部分は重水，明るい部分は気泡を表す。図の下側は二値化画像であり，画像処理により現象の特徴をより明確に観察できることがわかる。

中性子ラジオグラフィにおいても適当なトレーサ粒子を使って PIV あるいは PTV 法により流体内の速度ベクトルを計測することができる。

適用事例

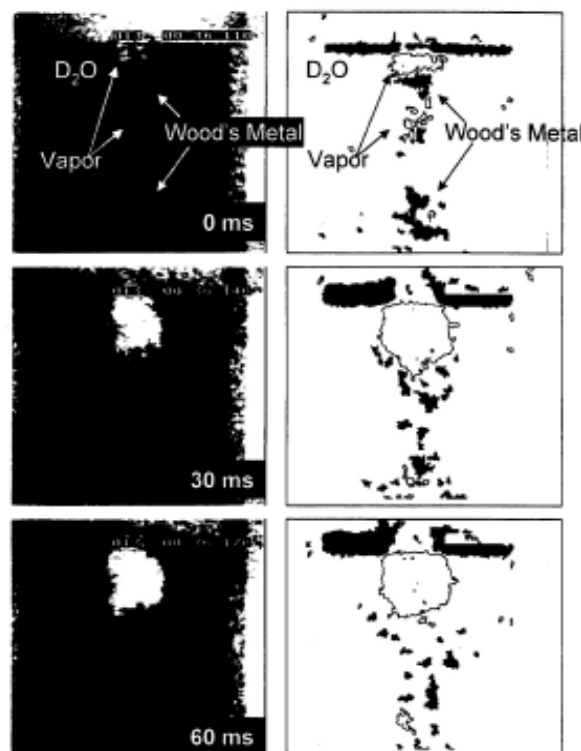


図 2-31 水中に落下した熔融金属塊の中性子透過像³⁾

【事例 2】

直方体容器に満たした溶融鉛－ビスマス合金に気泡を吹き込んだときの液相内の速度ベクトル分布を、トレーサとして金－カドミウム合金粒子を混入させて PIV 法により測定した結果である。

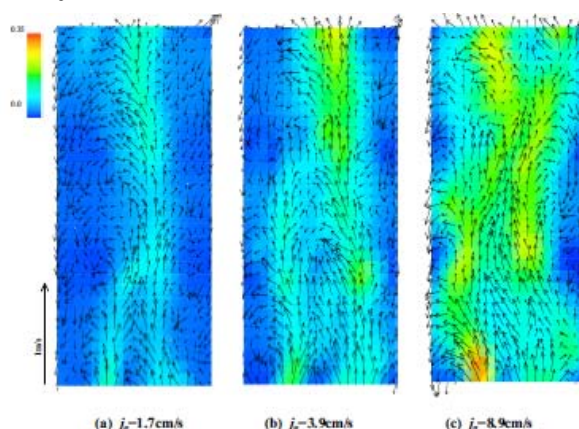


図 2-32 直方体容器内の溶融金属－窒素ガス二相流の液相速度およびボイド率分布 ⁴⁾

【事例 3】可視化の対象となった流体现象まとめ（2000 年までの事例）

表 2-3 可視化の対象となった流体现象

容器	流体	測定・観察項目
アルミ管, SUS 管	空気－水	流動様式, ボイド率
アルミタンク	溶融ウッズメタル－重水	液滴・気泡挙動, ボイド率
アルミタンク	SUS 鋼球－重水	気泡挙動, ボイド率
真鍮管, SUS 管	溶融Pb/Bi	速度ベクトル
SUS タンク	溶融Pb/Bi－水	流動様式, 気泡挙動, ボイド率
SUS タンク, チタンタンク	溶融Pb/Bi－窒素ガス	気泡挙動, ボイド率
アルミ管	液体窒素	流動様式
アルミ管, 銅管, 鋼管	フロン	流動様式, ボイド率
アルミタンク	砂－空気	流動様式, ボイド率, 速度ベクトル

参考文献

- 1) 日本原子力学会 熱流動部会 発表資料 三島 嘉一郎（京都大学原子炉実験所）
- 2) Mishima, K., Hibiki, T., Saito Y. et al., Nucl. Eng. Design 189,391-403 (1999).
- 3) Takenaka, N., Asano, H., Fujii, T. et al., 5th World Conf.Neutron Radiography,Berlin, Germany (1996).
- 4) Saito, Y. et al., Proc. 9th Int. Symp. on Flow Visualization,Edinburgh,UK (2000).
- 5) RADIOISOTOPES, 57, 207-217 (2008) 連載講座
中性子イメージング技術の基礎と応用（応用編 1 1 回） 小林久夫（立教大学名誉教授）
- 6) 理化学研究所/土木学会 合同シンポジウム「中性子による橋の透視への挑戦」, 67-71 (2010.06.30)
- 7) 中性子の安全性 柴田徳思（日本原子力研究開発機構 J-PARC センター）

今後の展望	<u>現状の課題</u> ⁵⁾ (1) 技術上の課題 1) 中性子ビームの限定的利用 現在, 熱中性子ビームの利用が大勢を占めている(次いで, 熱下, 冷中性子ビーム)。極冷中性子ビーム, 超高速中性子などは研究段階。 2) 散乱線の発生 ダイナミックレンジ^{※1}の下限拡大, 画質劣化原因となる。 ※1: ダイナミックレンジ: フィルムにおいて特性曲線(中性子量(光量)と濃度の関係)として, 定義され, 直線性の保たれる領域をいう。 通常の撮像系では, 取得可能な最大識別信号と最小識別信号の比で表す。最大識別信号は, 撮像系の飽和条件, 最小識別信号は, 主に増幅器初段の雑音で決まる。 3) 画像取得関連 中性子1個の作る信号量がX線と比較して大きいため, 少量の中性子数でも画像化が可能だが, 中性子の量子総計による揺らぎが画質に現れやすい。 (2) 操作上の課題 可搬性の無さ, 放射化, 照射物の放射線管理の問題が発生する。 検査施設(原子炉設備)の解放性の問題 ⇒日常的利用は困難, 一般事業者の利用より, 研究プロジェクトが事実上優先されている。 (3) 業務内容と画像の秘匿性の問題 日本原子力研究開発機構では, 産学連携推進部知的財産管理課による秘密情報保持契約の締結が必要 (4) 高額な経費と維持費 米国では1974年よりアエロテスト・オペレーションズ社が事業化, 中性子ラジオグラフィだけを運営している(利用施設が限定される。)。カナダでは, チョーク・リバー研究所が事業化したものの, 利用料金の問題で施設は休眠状態である。
--------------	--

今後の展望	国内では、サイクロトロンを用いた検査を行っている企業もあるが、事業面で苦戦している。中性子ラジオグラフィ施設は国立の研究施設での利用に限定される。 (5) 資格と教育の特殊性 国内では、JIS の「非破壊試験-技術者の資格および承認」で規格化 中性子ラジオグラフィについては、上記規格の中の「放射線透化試験」を適用 当該規格は IS09712 に準拠（米国非破壊検査協会の諸規定に基づく） (6) ビーム及び画像の規格化 各種の中性子ビームについては、線質が微妙に異なり、取得する画像の品質管理の問題から規格化の現状は未だ道遠しの感がある。 <u>今後の展望</u> ⁵⁾⁶⁾⁷⁾ ・安全性の確保の検討と関連する法整備 ・国際協力・連携による施設利用の拡大 ・小型中性子源の開発から可搬性小型中性子源の開発 ・より大きい被写体への運用のため、透過力の大きい高速中性子の利用が期待される。 そのためには、高速中性子に対して特性のよいコンバータの開発とエネルギー変化に対応する画像定量化法の理論的検討および開発が必要である。 ・新型中性子源（核破壊中性子源など）への適用に対して、中性子エネルギー範囲の差異、連続ビーム・高繰り返し型パルスビームに対応した中性子ラジオグラフィ技術の開発が必要である。
--------------	---

(2) 中性子応力測定

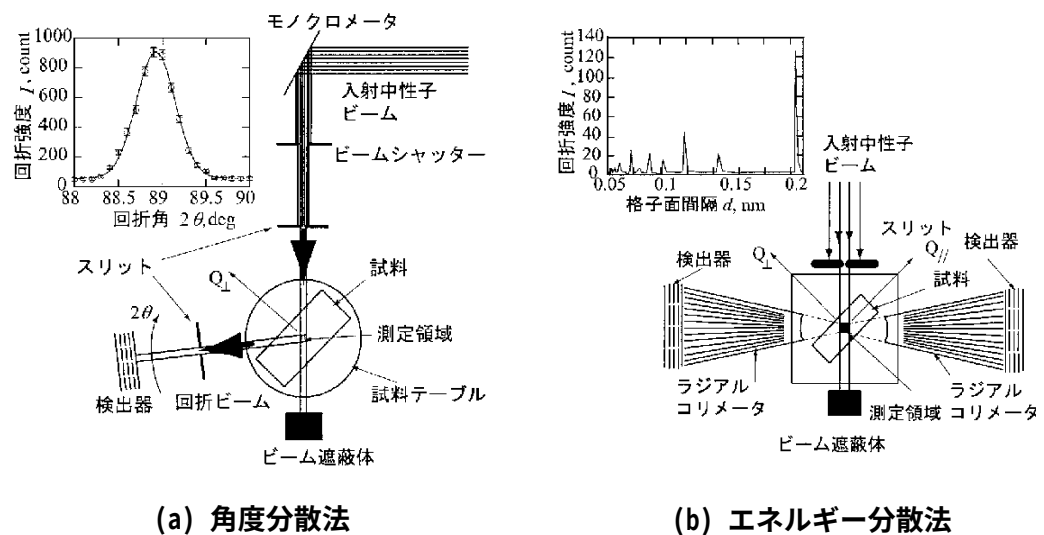
計測の仕組み

中性子回折法によるひずみ測定（中性子応力測定法）は、中性子を当てて原子間距離の変化量を計測することで、非破壊でひずみを計測する技術である。原子間距離の計測方法としては、角度分散法とエネルギー分散法（飛行時間法）がある。

角度分散法（図 2-33(a)）は、単色化（波長 λ ：一定）された中性子を当てて格子面で回折するときの回折角 2θ を計測し、計測した回折角を以下の式に代入することで原子間距離が求められる。

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

エネルギー分散法（図 2-33(b)）は、白色中性子（回折角 θ ：一定）を照射することで、波長 λ が測定できるため、上記の式から原子間距離を求めることができる。



(a) 角度分散法

(b) エネルギー分散法

図 2-33 中性子応力測定模式図¹⁾

角度分散法では、外力が負荷される前後の回折角の変化量 $\Delta 2\theta$ を計測し、それを下記の式に代入すれば、ひずみが求められる。

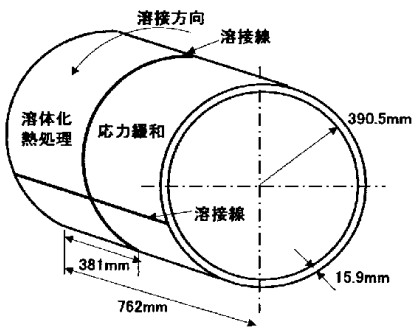
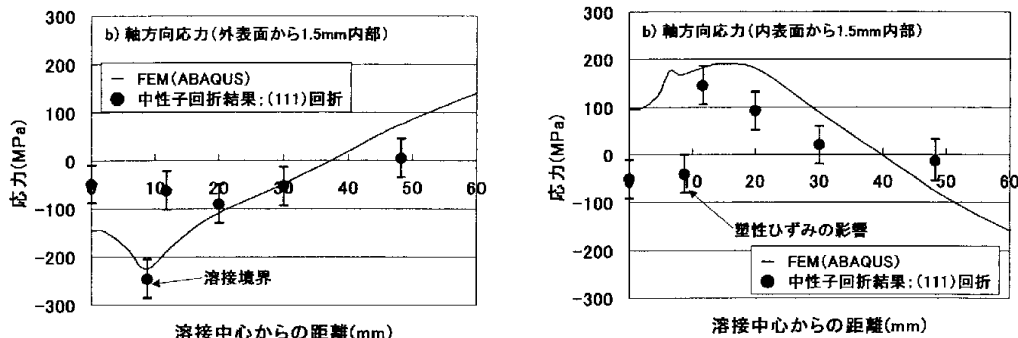
$$\varepsilon = \Delta d/d_0 - \Delta 2\theta/2 \times \cot 2\theta_0/2$$

エネルギー分散法では、時間変化 Δt を計測し、それを下記の式に代入すれば、ひずみが得られる。

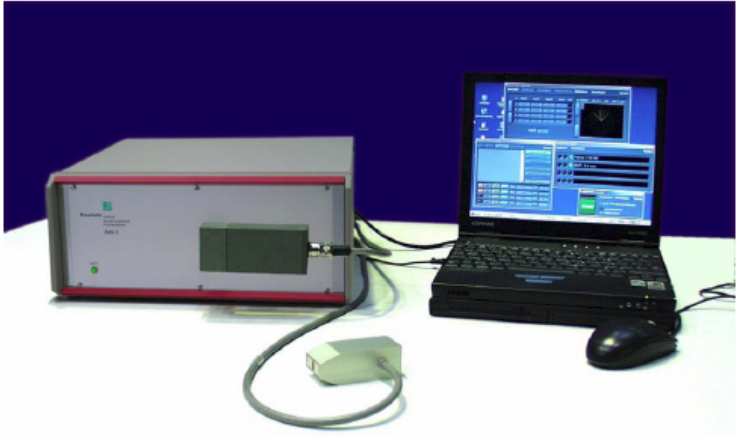
$$\varepsilon = \Delta t/t_0 = t - t_0/t_0$$

中性子回折法により求めたひずみにフックの法則を適用すれば、物体内部に発生する応力を定量的に評価することができる。

長所・短所	<u>長所</u> ・中性子は電荷をもたないため、物質中でも電子との相互作用がなく、深くまで侵入することができる。そのため、X回折法は表面の侵入深さが数μm～数十μmであるのに対し、中性子回折法では数mmの深さまで侵入することができる。 ・応力計算に必要な3方向以上のひずみを測定できる。 <u>短所</u> ・局所ひずみは計測できない。 ・測定時間が比較的長い。 ・中性子回折装置は国内に3台（角度分散型2台，エネルギー分散型1台）しかないため、現場測定は不可能。 ・核反応によって試料が放射化するため、測定後の資料の移動は容易ではない。
適用事例	①スポット溶接部の残留応力評価²⁾ 板厚1.4mmの軟鋼をスポット溶接で接合し、図 2-34に示すA～Cの3ラインの残留応力を計測した。計測結果を図 2-35に示す。A、B、C近傍のいずれの場所においても、X、Y、Z方向の応力は深さ方向にほぼ同様な分布を示していることが確認された。 図 2-34 残留応力計測位置²⁾ (a) A点 (b) B点 (c) C点 図 2-35 残留応力分布²⁾

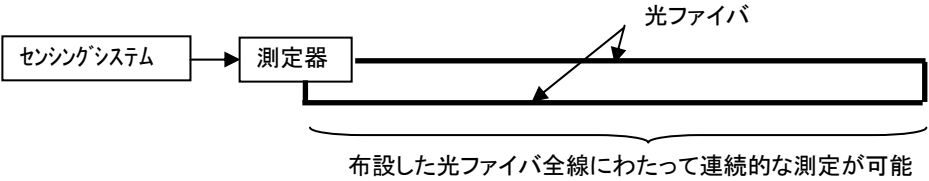
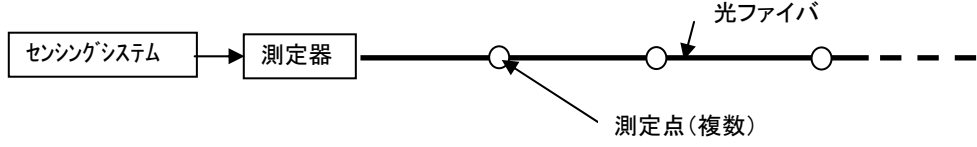
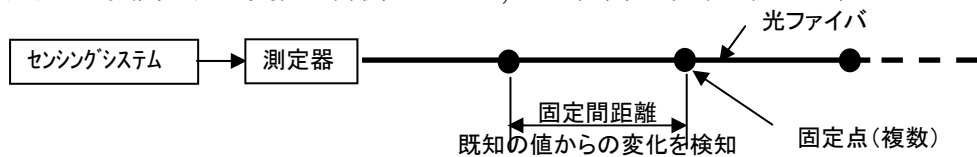
適用事例	②配管溶接部の残留応力評価³⁾ 外径 781mm、板厚 15.9mm の配管（図 2-36）の溶接部を対象として、残留応力の評価を行った。溶接は、V形開先加工後、サブマージアーク溶接でシール溶接を行っている。測定結果と F E M解析で得られた残留応力分布を図 2-37 に示す。塑性ひずみの影響があるものの、測定データは解析から得られた残留応力分布の傾向と合っていることが確認できる。  図 2-36 溶接配管³⁾  図 2-37 残留応力分布の測定結果と解析結果の比較³⁾
参考文献	1) 秋庭義明：新しい光源による応力評価 3. 中性子回折法による応力測定，材料，Vol.54，No.7，pp.785-790，2005. 2) 鈴木環輝，杉山昌章，及川初彦，野瀬哲郎，今福宗行，友田陽，鈴木裕士，盛合敦：中性子回折法による鋼材溶接部の残留応力評価技術，新日鉄技報，第 390 号，pp.49-53，2010. 3) 大城戸忍，盛合敦：新しい光源による応力評価 4. 中性子応力測定の実機への適用，材料，Vol.54，No.8，pp.895-900，2005.
今後の展望	<u>現状の課題</u> 短所でも挙げた様に，中性子回折装置は，装置が大型であり，我が国に 3 台しかないため，橋梁での適用は不可能である。 <u>今後の展望</u> 数 mm～数十 mm の深さまで非破壊で応力を計測できるという長所は非常に魅力的である。今後，技術革新が進み，中性子回折装置の小型化が望まれる。

2-2-7. 3MA (Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis)

計測の仕組み	3MA は同時に複数のマイクロ磁気パラメータを計測することで、鋼材（強磁性材料）の機械的性質等を把握する計測方法である（図 2-38）。  図 2-38 3MA の外観²⁾ 3MA デバイスは、さまざまなマイクロ磁気パラメータの測定のためのモジュール、アナログインタフェースの制御ユニット、コンピュータ、電源ユニットから構成されている。主なマイクロ磁気パラメータは以下の通りである。 <u>バルクハウゼンノイズ（BN）</u> バルクハウゼンノイズの振幅対磁界強度（H）の記録 測定パラメータ ・ Mmax：最大 BN ・ HCM：BN の保磁力 ・ ΔH_m：別の M の値での M の幅（H） 鋼材表面が軟化すると、BN 信号が大きくなり、硬化すると、BN 信号が小さくなる。ミクロ組織が一定の場合、表面の残留応力がより引張り側になると、BN 信号が大きくなり、圧縮側になると、BN 信号が小さくなる。 <u>増分透磁率</u> 増分透磁率に対する接線方向の磁界強度を測定する。 測定パラメータ ・ μ_{MAX}：$\mu \Delta$ の振幅 ・ $H_{c\mu}$：保磁力 $\mu \Delta$ ・ $\mu \Delta$ の H_{μ} 幅 <u>磁界強度の時間信号（HT（T））</u> 接線磁界強度の録音時間の信号 測定パラメータ ・ HD：高調波歪率 ・ HCO：保磁力
--------	--

	<u>マルチ周波数渦流探傷（3 周波数で計測）</u> 測定パラメータ ・コイルのインピーダンス
長所・短所	<u>長所</u> ・活荷重による応力の増加分ではなく，残留応力や死荷重応力など発生している全応力を，ピンポイントに非破壊で測定できる。 ・高速で鋼材の機械的性質を連続して把握できる。 ・リアルタイムで計測（1 測点の計測時間は 20～30 秒）できる。 <u>短所</u> ・強磁性材料だけに適用可能である。 ・屋外での長期的な適用事例が少ない。 ・キャリブレーションは必要である。センサの摩擦等による再キャリブレーション方法が課題である。
適用事例	・鋼板の品質検査（降伏強度，引張強度などの機械的性質に関する検査） ・厚板の残留応力の調査 ・自動車のエンジンのシリンダーに使用されている鋳鉄の微視構造の調査 ・ベアリングの残留応力調査
参考文献	1) Gerd Dobmann, Iris Altpeter, Bernd Wolter, Rolf Kern : Industrial Applications of 3MA – Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis, 5th International Conference Structural Integrity of Welded Structures (ISCS2007), 2007. 2) E. Schneider : Evaluation of Stress States of Components using Ultrasonic and Micro Magnetic Techniques, 2009 ASME Pressure Vessels & Piping Conference, 2009.
今後の展望	<u>現状の課題</u> ・鋼板などの硬度管理に用いられる場合が多く，応力測定への適用事例は少ない。 ・超音波測定と組み合わせてコンクリート橋の応力測定に適用した事例がある。 ・既存の測定器具よりも高価である。 ・個々のマイクロ磁気パラメータを用いた計測技術は国内でも開発されているが，複数のパラメータを組み合わせた計測技術の開発は少ない <u>今後の展望</u> ・応力測定に応用可能な技術と考える。 ・鋼橋での測定事例を積み重ねる必要がある。 ・3MA が応力測定の実用技術の一つとして確立されれば，短時間で測定できるという長所を生かして，採用される可能性がある。

2-2-8.光ファイバセンサ

計測の仕組み	光ファイバにパルス光を入射して、その戻り光の周波数からひずみ変化量を測定する。入射したパルス光は、ファイバ内で散乱し、入射した端に後方散乱光として戻る。光ファイバの伸縮でひずんだ箇所からくる後方散乱光は、伸縮が無い箇所から来る散乱光と異なる。異なった周波数の散乱光が戻る時間から、ひずみが生じた箇所を特定する。国内で使用実績のある光ファイバセンサは、分布型、多点型、広域型である。 分布型：連続的に変化するひずみ分布を示す。従来製品は距離分解能が 1m と不十分であったが、近年数 cm の分解能で測定できる新技術が製品化されている。  多点型：計測点がクラック上にあれば、大きなひずみを示し、クラック以外の位置にあれば、顕著なひずみを示さない。  広域型：2 点間の長さ変化を計測するので、その区間の平均ひずみを示すことになる。 
長所・短所	<u>長所</u> ・従来のひずみゲージなどにより“点”で監視していた構造物の変形を本手法では“線”で監視できる。 ・ひずみ計測だけでなく、クラック幅の変化を計測するためのπ型センサが存在、近年測定器の高精度化や光ファイバセンサの開発により、クラックの検知にも対応が可能、目的に応じた使いわけができる。 ・軽量で可とう性がある。 ・光を用いているので電氣的なノイズを受けない。 ・電源を近くに必要としない。 ・非腐食である。 <u>短所</u> ・現状では、光ファイバセンサは、損傷の有無と発生した概ねの位置を検知するだけに留まっている。詳細な検査は別途行う必要がある。

適用事例：FBG 光ファイバセンサを用いた Weigh-In-Motion システムの開発

【対象橋梁】

構造形式：3 径間連続 6 主桁桁橋＋単純 6 主桁桁橋

橋長：109.5m (3@36.5m) +35.6m, 幅員：17.5m

建設年：1974 年

【測定方法】

FBG センサは 3 径間連続桁橋梁に、ひずみゲージを単純桁橋梁に設置した（図 2-39）。いずれの橋梁も RC 床版を有す 6 主桁プレートガーダー橋であり、片側 2 車線の対面交通となっている。FBG センサの設置では、エポキシ系接着剤で接着し、ポリエステル系の樹脂でコーティングをした。

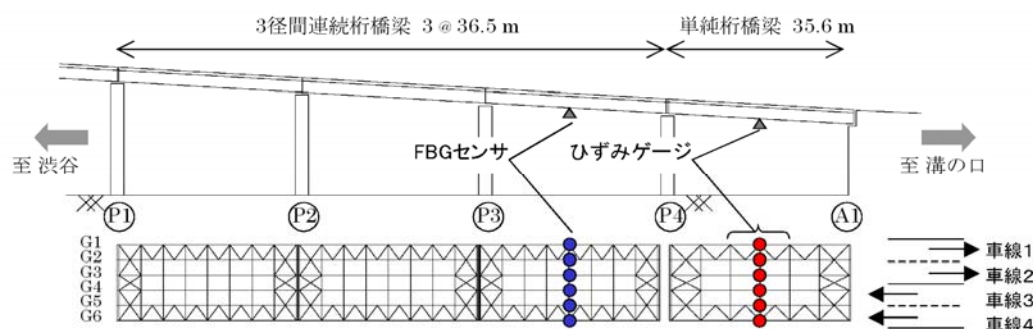
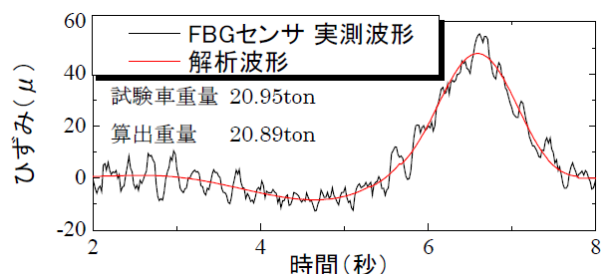


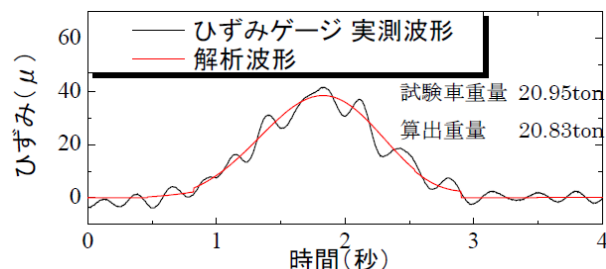
図 2-39 対象橋梁の概要とセンサ設置位置¹⁾

【計測結果】

走行試験で得られたデータをリサンプリングして Weigh-In-Motion (W.I.M.) を行った。FBG センサの測定精度が、W.I.M.による荷重算出における精度に及ぼす影響について検討するために、走行試験の測定波形から W.I.M.を行った。FBG センサとひずみゲージによる実測波形と W.I.M.による解析結果を図 2-40 に示す。試験車重量 20.95t に対して、FBG センサで算出した重量は 20.89t であり、精度良く重量が求まっている。また、ひずみゲージで算出した重量との差は 0.06t (0.3%) となっており、ひずみゲージと同程度の精度であることが確認できた。



(a) FBG センサで得られた波形



(b) ひずみゲージで得られた波形

図 2-40 FBG センサとひずみゲージの波形の比較¹⁾

参考文献	1) 小林祐介, 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, 土木学会応用力学論文集, Vol.6, pp.1009-1016, 2003. 2) 黒川章二, 羅黄順, 嶋野慶次, 青木優介: 光ファイバを用いた断面修復済み鉄筋コンクリート梁底面の引張変位計測, 土木学会応用力学論文集, Vol.6, pp.1017-1024, 2003. 3) 西尾真由子, 武田展雄: 分布光ファイバひずみセンサを用いた変位同定法による境界条件変化を考慮した構造物の変形モニタリング, 土木学会応用力学論文集A, Vol.66, No.2, pp.229-238, 2010. 4) 門万寿夫, 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, 土木学会応用力学論文集, Vol.6, pp.1105-1112, 2003. 5) 恒國光義, 加藤佳孝, 魚本健人: 既設プレストレスコンクリート道路橋の構造劣化診断, 生産研究 58 巻, 3 号, 2006. 6) 鹿島建設株式会社ホームページ: 光ファイバセンサによる新しい構造物モニタリングシステムの開発 http://www.kajima.co.jp/news/press/200603/30clfo-j.htm 6) 李哲賢, 津田勉, 澤貴弘: PPP-BOTDA を用いた高分解能 (10cm) かつ高速 (10Hz) 分布計測の実現, 電子情報通信学会技術研究報告, 0FT2008-42, pp.39-44, 2008. 7) 淡路動太, 福田和寛, 平野宏幸, 横山光徳, 松田公彦: PPP-BOTDA 方式光ファイバ計測による超長尺先受け鋼管のひずみ挙動, 土木学会年次学術講演会概要集, VI-022, 2012. 8) 岸田欣増, 李哲賢, 山内良昭, 横山光徳, 松田公彦: 光ファイバモニタリングが必要とする測定・解析・情報管理技術, 電子通信情報学会ソサイエティ大会, BCI-1-4, 2012. 9) NETIS ホームページ (NETIS 番号: KT-000059-A): http://www.netis.mlit.go.jp/
今後の展望	<u>現状の課題</u> 光ファイバの種類によって特徴が違っているので, 目的に合ったセンサを選択することが重要である。また, センサ本体の長期耐久性, 安定性, 設置方法についても検討の余地がある。下記①～④に方式ごとにまとめる。 ①FBG 方式, FPI 方式 分解能が高く, 動的測定も可能。複雑な形状の構造物のひずみ計測や, 局所的なひずみ計測に有効である。また, TDM (時間分割多重化) 方式の FBG (FSI ユニットを使用) は, 最大 100 点を 1 本のファイバに配置し計測することができる。



FBG センサ
(\40,200/個)

■FSIユニット



FBG 用 FSI ユニット
(1ch : 350 万円/機, 4ch : 420 万円/機)

図 2-41 FBG センサとユニット (価格は 2013 年 7 月時点)

② BOTDR/BOTDA 方式

数百 m から数kmにわたり大型構造に対して、面的にファイバを張り巡らし計測ができる。BOTDR は日本で最も古くから実験が行われ、実績も多い。しかし、一般的に距離分解能は 1m 程度に留まる。また、BOTDA は光ファイバのループ構造が必要である。近年、BOTDA を改良した PPP-BOTDA 方式の登場により、分解能は最高 2cm まで向上、また計測速度の向上で動的計測も可能になった。測定時間は、FBG 方式に比べ長くなる。



表面ひずみ検出ファイバ BOTDA センサ



PPP-BOTDA 測定用ユニット

図 2-42 PPP-BOTDA 用センサとユニット

③ OSMOS 方式

土木・建築分野や念頭に開発されたセンサである (図 2-43)。10 年近くの連続モニタリングの実績があり、局所的な計測に適している。

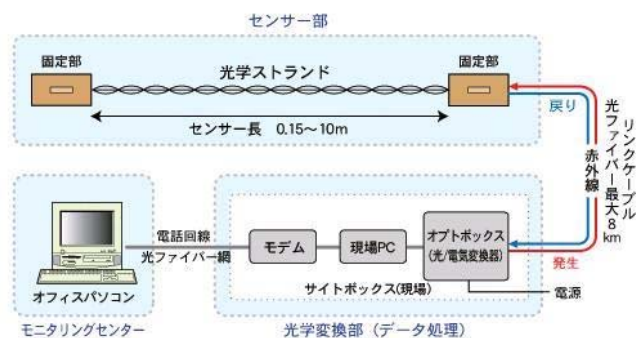


図 2-43 OSMOS の構成¹¹⁾

今後の展望	<u>今後の展望</u> 老朽化が進んだ構造物の場合、クラックの発生状況や、材料特性の変化などがあり、管理値を決めることは難しい。しかし、光ファイバによる長期連続モニタリングにより、管理値に加え、変形量の変化速度（変化率）によっても評価することが可能になり、絶対値管理(管理値)から傾向管理が可能になる。 光ファイバは、計測物理量に応じたセンサ構成を選択することで、多岐多様な物理量(地震、水位、ひずみ等)を短時間で高い精度でセンシングでき、さらには、遠隔操作により、それら複数の物理量を複合して長距離伝送できる機能が期待される。
--------------	--

2-2-9. 音弾性法

計測の仕組み

応力を受けた物体には力学的な異方性が生じる。これにより、主応力方向に振動する二つの横波の速度に違いが生じる。音弾性による応力測定では、この差が主応力差に比例することを利用する。つまり、主応力方向に偏向した2つの横波の速度差そのものを測定する必要がある。例えば、軟鋼に対しては単位応力あたりの相対速度差は $7 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ であることから、厚さ 15mm の試験片に対しては1往復の伝播時間はおよそ $10 \mu\text{s}$ ($= 15 \times 2 / 3000 \times 1000$) となる。このため、10MPa の分解能で応力を測定するには 7×10^{-10} 秒 ($= 10 \times 7 \times 10^{-6} \times 10^{-5}$)、すなわちおよそ 1ns の精度で速度差を測定しなければならない。ただし、2つの横波の相対速度差である音響複屈折量は、組織効果と応力効果の和として与えられるため、音響複屈折量を応力効果と組織効果に分離する必要がある。

線形弾性論におけるひずみと応力の定義式、運動方程式、応力-ひずみ関係式を対応する非線形の関係で置き換えて基礎式を得る。これより初期変形による応力を受けた弾性体における弾性波の伝播速度が求められる。弱い直交異方性を有する圧延板に x あるいは y 方向に振動し、厚さ z 方向に伝播する横波を入射するとき (図 2-44)、この板が x, y 方向に主応力 σ_1, σ_2 をうける平面応力状態 ($\sigma_3 = 0$) のもとにあれば、横波の伝播速度を与える式は、弾性定数における等方性からの変化と初期ひずみを微小な量と考え、高次の微小量を省略することで次式 (複屈折音弾性法則) が得られる。

$$\frac{V_{zx} - V_{zy}}{V_T} = \frac{\Delta C_{55} - \Delta C_{44}}{2\mu} + \frac{1}{2\mu} \left(1 + \frac{\nu_3}{\mu} \right) (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

ここで、 ν_3 は等方性弾性体の3次の弾性定数、 $V_T = (V_{zx} + V_{zy})/2$ は2つの横波の平均速度であり、右辺の第1項が組織効果、第2項が応力効果である。このようにして測定される応力は厚さにわたって平均した値である。 $(1 + \nu_3/\mu)/2\mu$ は、複屈折における音弾性定数で C_A の記号で表される。また、左辺の相対速度差が測定により求められる量で音響複屈折とよぶ。複屈折音弾性法則以外に、縦波の速度変化を利用する音弾性法則

$$\frac{V_{zz} - V_{zz}^0}{V_{zz}^0} = C_L (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2)$$

と、横波の平均速度の変化を利用する音弾性法則

$$\frac{V_T - V_T^0}{V_T^0} = C_T (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3)$$

も同様に導くことができる。ここで、 V_{zz}^0 と V_T^0 は、それぞれ無応力状態における縦波と横波の平均速度である。また、縦波の速度と横波の平均速度の比は音速比音弾性法則を与える。

$$\frac{V_{zz}}{V_T} = R_0 + C_R (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (4)$$

計測の仕組み	ここで、R_0は無応力時の音速比、C_Rは音速比法の音弾性定数である。以上、4種の音弾性法則は、すべて板状試料の面内に存在する平面応力を板厚方向に伝播する横波あるいは縦波を用いて測定する場合である。 もう一つ重要な応用として、単軸応力をその応力軸の方向に伝播する縦波を用いて測定する場合がある。これは超音波によるボルトの軸力測定において、応力の存在による縦波の速度変化を与える音弾性法則を利用する場合である。 図 2-44 各種音弾性法則における応力状態と伝播速度¹⁾ これらの音弾性法則における音弾性定数は、2次および3次の弾性定数で表すことができるが、通常、対象物と同じ材料より製作した較正用試験片に短軸負荷試験を行って得た速度－応力関係の傾斜からこれらの定数を求めておく。平面応力状態に対して組織異方性と無応力音速比が既知の場合には、複屈折法と音速比法より主応力σ_1、σ_2を分離して求めることができる。
長所・短所	<u>長所</u> ・ 非破壊で負荷応力、残留応力の測定が行える。 <u>短所</u> ・ 音速を高精度に測定する必要がある（10万分の1の精度）。 ・ 音弾性応力測定で必要となる音響複屈折量（2方向に偏向した横波の相対速度差）は、材料に依存する組織効果と応力効果の和として与えられるため、両者を分離する必要がある。 ・ 音弾性定数を、通常、対象物と同じ材料より製作した較正用試験片に短軸負荷試験を行って得た速度－応力関係の傾斜から求める必要がある。 ・ 音弾性定数や音速の温度依存性を考慮する必要がある。
適用事例	①残留応力測定 複屈折音弾性法で測定した音響異方性には、2次元平面応力場の主応力差と、材料の組織異方性とは含まれるので、組織異方性を分離しなければ、応力を測定することができない。この分離が可能なのは次の2つのケースに限られる。 ケース1：無応力時に音弾性測定を実施して測定点の組織異方性が既知である。 ケース2：材料の組織異方性が一様でかつ応力分布の幾何学的な特徴が利用できる。

ケース 1 が利用できるのは、実験室レベルに限られる。この理由は、事前に全領域の組織効果を計測しておくことができないためである。ケース 2 が適用できるのは、応力分布に対称性があるか、あるいは応力が解放されている自由端があるか、さらに材料が均質で、組織異方性の分布が一様である場合に限られる。

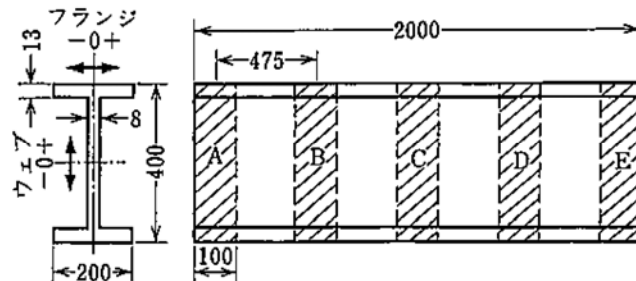


図 2-45 測定対象¹⁾

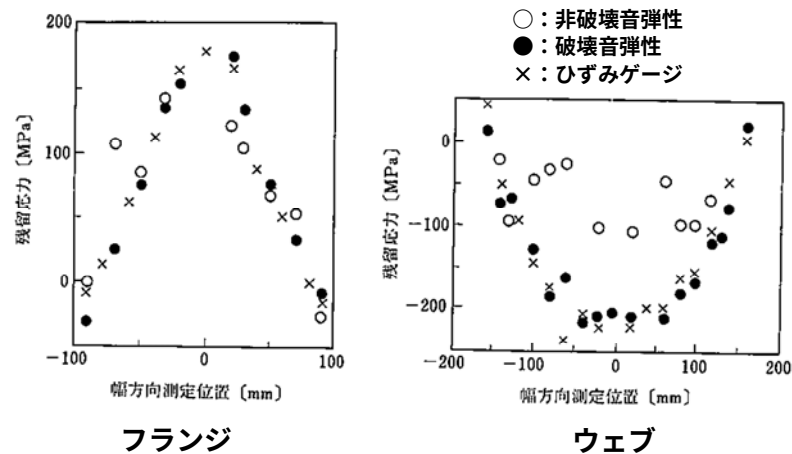


図 2-46 残留応力測定結果¹⁾

適用事例

- ・ 図 2-45 に示す 5 か所の斜線領域で音響異方性を測定。
- ・ 音響異方性から残留応力成分を分離するために、以下の仮定を行った。
軸方向の応力が主で、横方向の応力が無視できる。
両端部の A と E の領域で軸応力が解放される。
同一圧延線上で組織異方性が一定である。
- ・ 両端部での測定値から同一圧延線上の組織異方性を推定し、領域 B～D で測定した音響異方性からこの組織異方性を差し引いて、残留応力が得られる。
- ・ 図 2-46 中の黒丸●は、切断後にもう一度音弾性測定して真の組織異方性を求め、切断前の音響異方性からこの組織異方性を差し引いて求めた、破壊的な音弾性測定による応力値である。非破壊的な音弾性測定は組織異方性の推定が正しくできる場合には有効であるが、そうでないとき、測定誤差が大きくなる

適用事例	この測定から複屈折音弾性法の適用の難しさが良くわかる。一般に組織異方性の小さい材料では、その値のばらつきも小さく、複屈折音弾性法の信頼性があがる。板厚が厚く、圧延温度が高いほど組織異方性が小さくなる。フランジでは音響異方性の均一性が良く、ウェブではその均一性が悪い。
参考文献	1) 福岡秀和, 戸田裕己, 平尾雅彦: 音弾性の基礎と応用, オーム社, 1993. 2) 福岡秀和: 音弾性法による残留応力の測定, 溶接学会誌, Vol.58, No.1, pp.65-72, 1989. 3) http://www.laser-measurement.com/product/sintec/ultramars.html
今後の展望	- 音弾性法では、物体内を伝播する音速を非常に高精度で計測する必要がある。音速を高精度に計測する手法としては、絶対的音速測定法としてシングア라운드法やパルス・エコーオーバーラップ法, 相対的音速測定法として位相干渉法などがある。これらの手法には、それぞれ独自のノウハウがあり、さらに計測時には音速の温度依存性も考慮する必要がある。よって、物体内を伝播する音速を簡易かつ高精度に計測することが可能な手法の開発が必要と考える。 - 音弾性法で計測される 2 方向に偏向した横波の相対速度差である音響複屈折量は、材料に依存する組織効果と応力に起因する効果の和として与えられるため、両者を分離する必要がある。両者の分離では、材料の組織異方性が一様であるとし、ある部分の組織異方性を全体の組織異方性と仮定することがある。しかし、一般に古い経年材では、材料の均質性が悪く、この仮定を満たすことが難しい。よって、組織効果と応力効果を適切かつ効率的に分離する手法の開発が必要と考える。 - 音弾性法では、計測対象物と同じ材料より製作した較正用試験片によるキャリブレーション試験が必要である。このため、音弾性法の効率化に向けては、キャリブレーション試験結果のデータベース化が求められる。

2-2-10.画像計測

計測の仕組み	構造物において、ひずみを計測したい領域に標点を設け、複数台のデジタルカメラで計測対象とする領域の変形前と変形後を撮影し、コンピュータに画像を転送する。撮影の際の構造物とカメラの距離は 300mm 程度である。 撮影された画像には、計測領域以外の周辺環境も写りこんでいる。その画像をそのまま処理を行うことは、処理に時間がかかるだけでなく、標点を認識する際のエラーの要因にもなり得るため、まず計測領域を抽出する。 抽出した計測領域に対して、ある画素数以下の領域はノイズ成分と判断し、除去する。これにより標点のみが抜き出される。抜き出した標点にラベリングを行い、行、列を規則正しく並べる。 画像計測で最も問題となるのは、片方のカメラで撮影した画像に写っている標点が、他方のカメラで撮影した画像のどの標点に対応するのかを判定することである。そのために、テンプレートを用いてテンプレートの標点と画像の標点をマッチングさせることで、画像間の標点を対応づけている。欠落した標点がある場合には、周辺の標点の座標から補完する。 上記の処理を行い抽出した標点の変形前後における標点間距離の変化から、ひずみが求められる。 図 2-47 計測システムの例
長所・短所	<u>長所</u> ・非接触でひずみを計測することができる。 ・市販のデジタルカメラを用いるため、計測に要するコストが抑えられる。 ・数十%といった高塑性領域のひずみを計測したい場合、ひずみゲージでは 15%程度が限界であるのに対し、画像計測ではそれ以上のひずみでも計測が可能である。 ・ひずみゲージを用いた場合にはゲージを貼付した位置のひずみ値しか計測できないが、画像計測であれば広い領域のひずみ分布を計測することができる。 <u>短所</u> ・対象となる構造物の標点と画像上の標点を関連付けるために、キャリブレーションが必要となる。

適用事例

①突合せ溶接継手の低サイクル疲労試験²⁾

鋼素材を対象とした低サイクル疲労試験において、高塑性域のひずみを計測するために、画像計測システムを開発している。画像計測で得られたひずみ値と塑性域も計測できるひずみゲージで得られたひずみ値を比較した結果、両者は非常によく一致しており、画像計測システムの妥当性を確認している（図 2-48、図 2-49）。

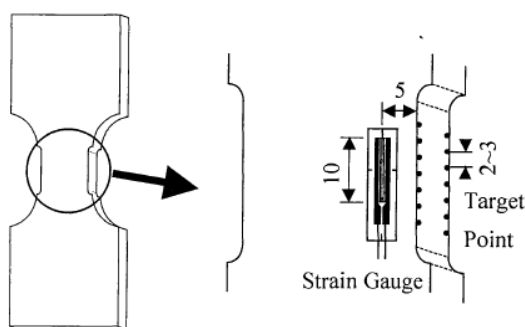


図 2-48 ひずみゲージと標点の位置

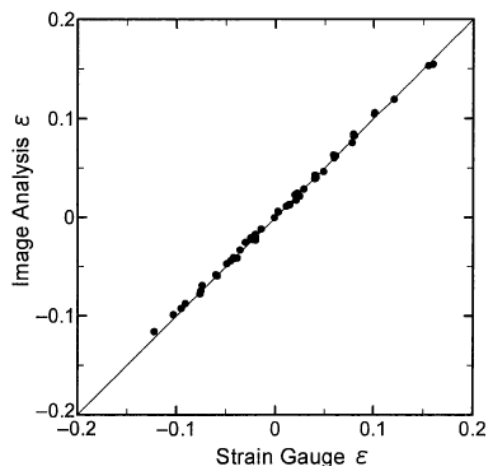


図 2-49 ゲージの値との比較

②せん断型ダンパーのひずみ分布特性の把握³⁾

せん断型ダンパーのパネル（図 2-50）面内のひずみ分布を、画像計測技術により確認している。画像計測により得られたひずみと試験体に貼付した 3 軸ゲージ（図 2-51）で得られたせん断ひずみを比較した結果、3 軸ゲージは 0.05 までしか計測できなかったものの、その範囲内では両者はほぼ一致していた（図 2-52）。

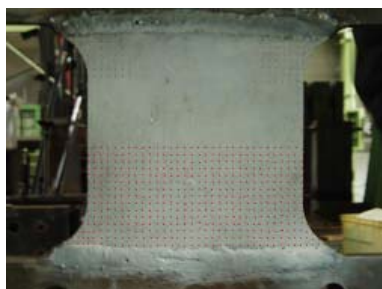


図 2-50 せん断パネル試験体

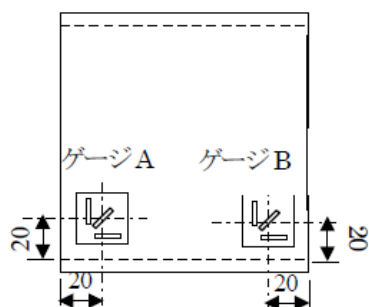


図 2-51 ひずみゲージの位置

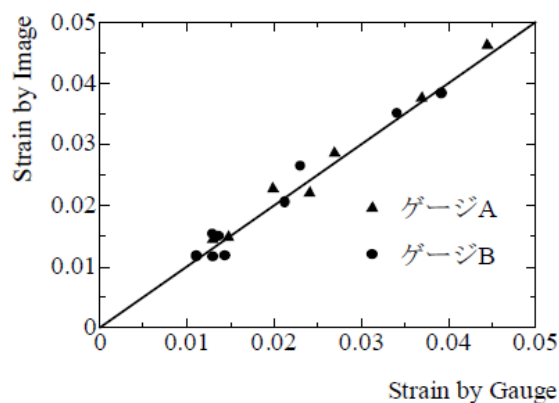
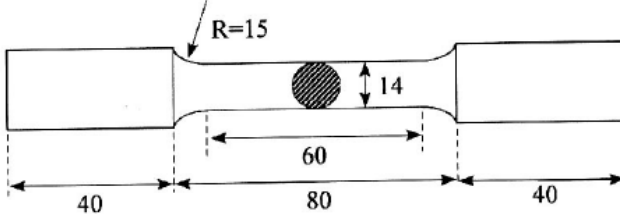


図 2-52 画像計測とひずみゲージの比較

適用事例	③鉛の力学挙動の把握⁴⁾ 制震デバイスは、大変形下において、材料の不均一性に起因するくびれ現象などの著しい局部変形を生じるため、力学特性に不明な点が多い。本論文では、エネルギー吸収材料として用いられる鉛の力学挙動を把握するために、画像計測技術で大変形下のひずみを計測した。ダンベル形の試験片（図 2-53）を用いて各種試験を行い、30% 程度までのひずみを計測することができた。  図 2-53 試験片の形状と寸法
参考文献	1) 館石和雄：デジタルステレオビジョンによる広領域ひずみ場計測システムの開発，土木学会論文集，No.693/VI-53，pp.87-94，2001. 2) 館石和雄，判治剛：画像計測を用いた試験システムによる突合せ溶接継手の低サイクル疲労強度の検討，土木学会論文集，No.752/I-66，pp.277-287，2004. 3) 劉陽，水野千里，青木徹彦：画像計測を利用したせん断型ダンパーのひずみ分布特性の把握，構造工学論文集，Vol.54A，pp.394-402，2008. 4) 吉田純司，阿部雅人，Alessandro BEGHINI，藤野陽三，横川英彰：画像計測を利用した鉛の力学特性の把握，土木学会論文集，No.724/I-62，pp.127-139，2003.
今後の展望	画像計測技術を用いた適用事例の多くが，地震のような大ひずみ条件下での計測データである。上記文献には，計測精度は 0.1mm～0.2mm という記述もあることから，現状では通常時の長期モニタリング技術として，画像計測により車両走行時に発生するひずみを計測することは難しい。 ただし，最近ではデジタルビデオカメラを使って主桁下フランジの変位を計測した事例もあるため，たわみ計測であれば適用できる。また，技術革新が進み，現在よりも更に高性能のデジタルカメラが開発されれば，活荷重作用時のひずみを計測できる可能性もある。