

実構造物の維持管理に適用できる
モアレ縞を用いたひずみ可視化デバイス

(Strain Visualization Device capable of
Structural Health Monitoring using Moiré Fringes)

学位取得年月 2021 年 9 月

梅 本 秀 二

目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 社会インフラの維持管理における現状と課題	4
1.3 論文の構成と概要	7
第2章 ひずみ可視化デバイスの測定原理と基本仕様	9
2.1 概説	9
2.2 モアレ縞の原理	10
2.3 高拡大率かつ明瞭な格子のパターン	12
2.4 モアレ縞による文字の表示	13
2.5 画像処理によるひずみ値の抽出方法	14
2.5.1 輝度値の \sin 曲線近似	14
2.5.2 位相とひずみ	15
2.6 ひずみ可視化デバイスの基本仕様	17
2.6.1 ひずみ可視化デバイスの基本構造	17
2.6.2 格子パターン仕様	18
2.6.3 ガラスプレートの仕様	18
2.7 本章のまとめ	20
第3章 自己温度補償	21
3.1 概説	21
3.2 自己温度補償構造とその原理	23
3.3 自己温度補償型ひずみ可視化デバイス	24
3.4 温度特性試験	25
3.4.1 試験体	25
3.4.2 試験方法	27
3.4.3 試験結果	28
3.5 本章のまとめ	28
第4章 ひずみ可視化デバイスの計測精度	30
4.1 概説	30
4.2 変位ステージによる精度検証	30
4.2.1 試験装置	30

4.2.2	画像処理によるひずみの計測精度	32
4.2.3	目視によるひずみ計測精度	33
4.3	引張試験による比較検証	34
4.3.1	検証方法	34
4.3.2	検証結果	35
4.4	本章のまとめ	37
第5章	撮影角度がひずみ算出精度に与える影響	38
5.1	概説	38
5.2	撮影角度がひずみ算出精度に与える影響と対策	38
5.3	撮影角度とひずみ算出精度	40
5.3.1	試験装置	40
5.3.2	試験方法	41
5.3.3	撮影角度とひずみ算出精度	42
5.4	本章のまとめ	42
第6章	曲げ変形を受ける部材のひずみ計測	45
6.1	概説	45
6.2	曲げ変形を受ける部材の計測位置の曲率	46
6.3	補正係数	48
6.4	曲げ変形を受ける部材のひずみ計測実験	49
6.4.1	実験計画	49
6.4.2	実験装置	50
6.4.3	実験方法	52
6.4.4	実験結果	52
6.5	本章のまとめ	54
第7章	実構造物への適用	55
7.1	概説	55
7.2	コンクリート橋（RC）の荷重試験への適用	55
7.2.1	コンクリート橋の概要	55
7.2.2	ひずみ可視化デバイスの設置	55
7.2.3	計測方法	60
7.2.4	計測結果	60
7.3	コンクリート橋（PC）の荷重試験への適用	63
7.3.1	コンクリート橋の概要	63
7.3.2	ひずみ可視化デバイスの設置	63

7.3.3	計測方法	66
7.3.4	載荷方法	66
7.3.5	載荷試験結果	67
7.4	送電鉄塔の載荷試験への適用	69
7.4.1	試験概要	69
7.4.2	計測機器の設置	69
7.4.3	計測方法	71
7.4.4	計測結果	71
7.5	走行疲労試験への適用	75
7.5.1	概要	75
7.5.2	試験装置および試験体	75
7.5.3	計測器の設置と計測方法	76
7.5.4	輪荷重によるひずみの応答	77
7.6	地下トンネルの維持管理への試験適用	78
7.6.1	概要	78
7.6.2	計測器の設置	78
7.6.3	計測結果	79
7.7	本章のまとめ	80
第8章 結 論		82
参考文献		86
謝 辞		89

第1章 序論

1.1 研究の背景

我が国は、1950年代～1970年代にかけて、戦後の経済復興とともに急速に高度経済成長を遂げた。この間、1964年の東京オリンピック、1970年の大阪万博の開催を機に1964年に東海道新幹線が開業。その後1972年には山陽新幹線が一部開業し、1975年には博多駅まで開通した。また、モータリゼーションを背景に、1963年に名神高速道路の栗東IC～尼崎IC間が開通し、1965年には名古屋～阪神地区が高速道路で結ばれた。このように、高度経済成長期に幹線道路や幹線鉄道などの多くの社会インフラが建設され、これら社会インフラが、また、日本の経済成長を支えてきた。

我が国には、現在、全国に道路橋約73万橋、道路トンネル約1.1万本、治水・利水に関する河川管理施設約1万施設、港湾岸壁約5千施設が存在する。これらの多くが、高度経済成長期に建設された構造物であり、建設から相応の年数が経過している。Fig. 1.1 に、建設後50年以上を経過する社会インフラの割合のグラフを示す。今現在で社会インフラの30～40%が、建設後50年以上を経過していると想定され、十数年後の2033年には、建設後50年以上を経過した社会インフラは50%

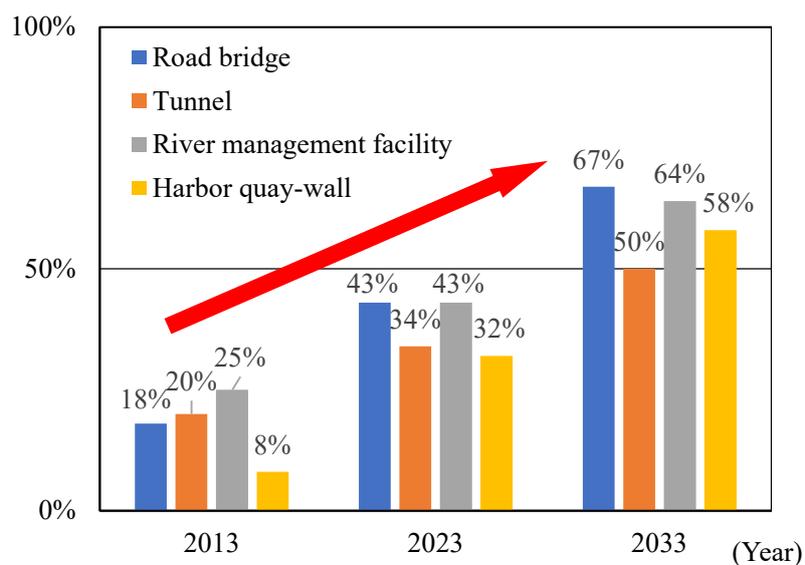
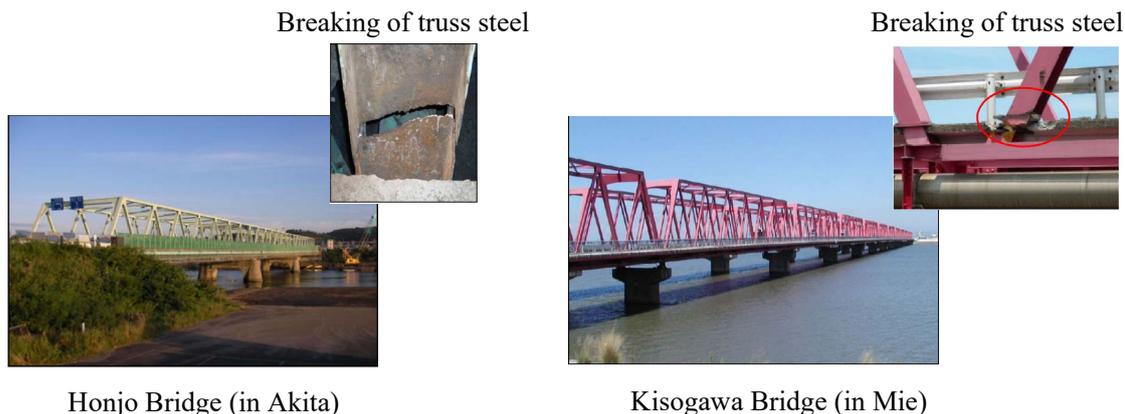


Fig. 1.1 Percentage of social infrastructure more than 50 years after construction



Honjo Bridge (in Akita)

Kisogawa Bridge (in Mie)



Sasago tunnel (Chuo Expressway)

Fig. 1.2 Cases of damage to social infrastructure[3] [4]

～70%近い割合に達すると予測されている[1] -[3].

近年，建設後の経過年数の増加に伴い経年劣化が急速に進行し，次々と損傷が顕在化している．
 Fig. 1.2 に示すように，2007年には秋田県の国道に架かる本荘大橋（1966年建設）のトラス鋼材が破断，三重県の国道に架かる木曾川大橋（1963年建設）のトラス鋼材が破断するなど，日本全国の多くの橋梁で損傷が見つかった[4]-[7]．また，2012年には，中央自動車道（上り線）笹子トンネル（1977年建設）の天井板の落下により9名の方が亡くなった事故[8]は，記憶に新しいところである．本荘大橋は建設後41年，木曾川大橋は建設後44年，中央自動車道笹子トンネルは，建設後，まだ35年しか経過しておらず，建設後50年の経過を待たずして，多くの社会インフラに損傷が発生し，国民の生活に支障を来し始めている．

中央自動車道（上り線）笹子トンネル天井板落下事故を機に，国民が安心して生活できる，安全で

強靱なインフラシステムを構築するため、以下のように、様々な形でセンサやロボットを用いた社会インフラの維持管理が国策として掲げられている。

○インフラ長寿命化基本計画[9]

【目指すべき姿】

国内の重要インフラ・老朽インフラの全てで、センサー、ロボット、非破壊検査技術等を活用した高度で効率的な点検・補修を実施（2030年）

○科学イノベーション総合戦略[10]

【重きを置くべき取組】

センサで計測したデータを、高信頼かつ超低省電力で収集する通信技術等の開発と現場への導入

○世界最先端IT国家創造宣言工程表[11]

【IT利活用の更なる推進のための重点項目】

高度なセンサ、ロボット、非破壊検査、情報化施工などの技術を開発・活用することにより、社会インフラの実態を正確に把握・蓄積し、「見える化」することで、社会インフラをより安全により長く利用できることにつなげる取組を推進

上記のような国策のもと、内閣府は、2013年に戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）を立ち上げ、日本再生の鍵を握るプログラムの1つとして「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」を掲げるとともに、インフラを支える技術開発やインフラシステムの開発を行ってきた[12]。また、国土交通省は、「I-Construction」を掲げ、調査・設計から維持管理に至るまで3次元のデータを活用して、建設生産システム全体の生産性向上を図り、もって魅力ある建設現場を目指す取組みを2016年から始めている[13]。

このように、高度経済成長期に建設され、経年劣化が急速に進む膨大な数の社会インフラを、効率的かつ効果的に維持管理するために、様々な施策、技術開発、実構造物への導入が、今まさに盛んに行われている。

1.2 社会インフラの維持管理における現状と課題

2012年の中央自動車道（上り線）笹子トンネル天井板落下事故を機に、社会インフラの本格的な維持管理に舵が切られた。2014年の道路法改正により、橋梁およびトンネルは、国が定める統一的な基準により、5年に1度、近接目視による全数監視を実施する点検基準の法令化がなされた。また、インフラ長寿命化基本計画の策定が地方自治体に義務付けられた。さらに、前節で示したように、センサやロボットを用いた社会インフラの維持管理を国策として掲げ、新しい技術の開発やその導入が推進されている。

ところが、全国にある道路橋約 73 万橋のうち 9 割以上に当たる 66 万橋、道路トンネル約 1.1 万本のうち約 8 割に当たる 8 千本は、地方自治体が管理する社会インフラである[2]。地方自治体は、維持管理すべき社会インフラを多く抱えているにも関わらず、厳しい財政状況の中での維持管理を強いられており、1回/5年の目視点検を実施するのが精一杯な状況である。

一方で、人口減少、少子高齢化による生産年齢人口の減少に伴い（Fig. 1.3）、建設分野に従事する技術者が減少している（Fig. 1.4）。建設業に従事する就業者は、2010年からは横ばいで推移しているが、外国人労働者が寄与するところが少なくない。また、Fig. 1.5 に示すように、建設業に従事する

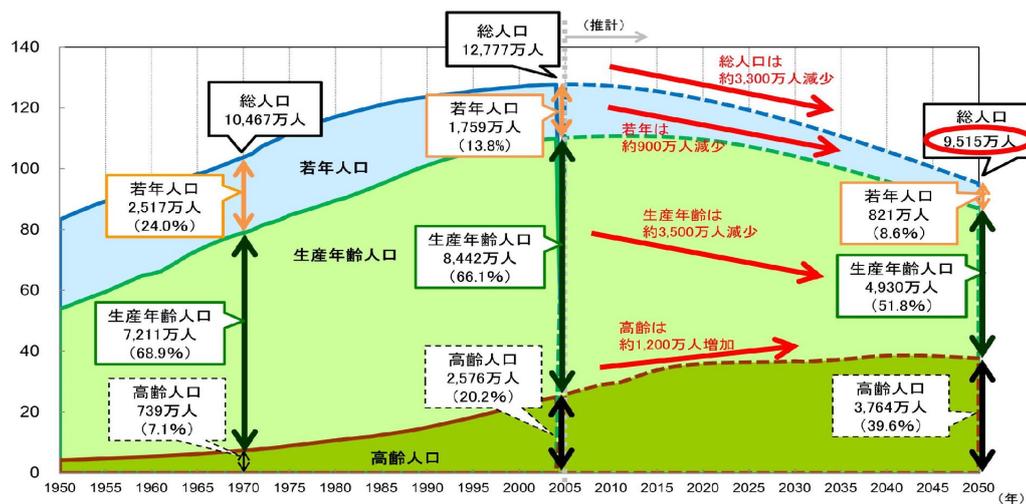


Fig. 1.3 Long-term changes in the total population in Japan (by age group 3) [14]

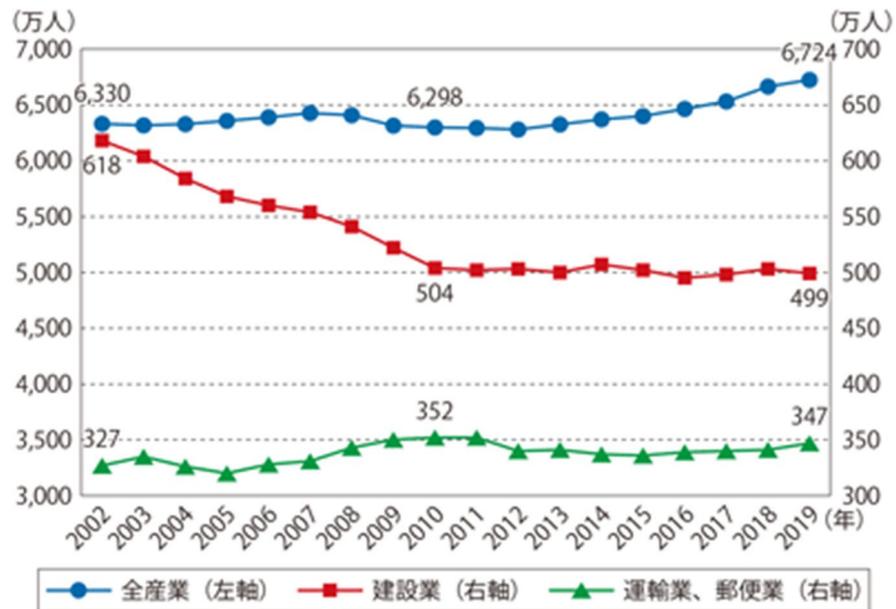


Fig. 1.4 Changes in the number of employees by industry [1]

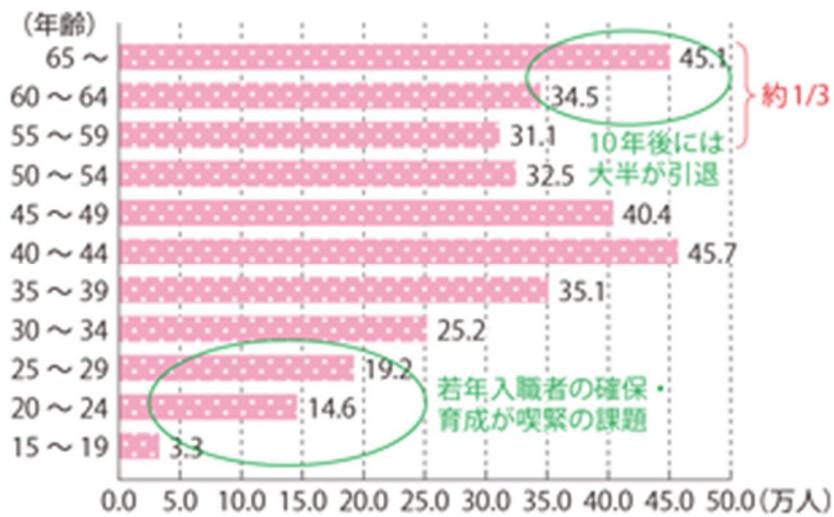


Fig. 1.5 Prospects for mass turnover of older people in the construction industry [1]

就業者のうち技能労働者は約 326 万人といわれるが、その 1/3 が高齢者であり、将来的には大量に離職することが予想される。いわゆる団塊の世代の離職である。これに対し、新規に就業する若者は非常に少ない状況であり、建設技術者不足も大きな問題となっている[1]。

このような状況下において、膨大な数の社会インフラをスクリーニングするとともに、適切な時期に、適切な方法で、補修・補強あるいは更新を実施していくためには、センサによる社会インフラのヘルスマonitoringが非常に有効な手段となる[15]。

社会インフラのセンサによるヘルスマonitoringの項目は、対象とする構造物やその劣化状態により異なるが、コンクリート構造物や鋼構造物に共通して重要な項目として挙げられるのが、“ひずみ”である[16][17]。なぜなら、構造部材の弾性係数を乗じることにより、部材に作用する応力が分かるからである。現在、社会インフラのヘルスマonitoringで使用されているひずみのセンサは、主として、ひずみゲージ、ひずみ計と呼ばれる様々な測定原理の電気式変換器や光ファイバなどが挙げられる[16]-[21]。これらのセンサは、信頼性の高い計測データが得られることから、様々な構造物を対象とした計測で長く適用されている。一方で、システムの導入や維持にかかるコスト、過酷な環境下における安定的な動作、インフラの寿命や点検サイクルに対するシステムの寿命、電源の確保など、多くの課題も残されている[16][17][22]。構造部材の応力を計測する手法は、一部で研究開発されているものの[23]、依然としてひずみゲージやひずみ計のような電気式センサを使用する方法が主流である。このようなセンサを多点に設置する場合、各測点まで信号線を介して外部電源を供給するか、センサに内蔵電源が必要となる。さらに、センサからの測定データを、有線あるいは無線によって伝送しなければならない。そのため、計測するためのシステムの規模が大きくなり、コストが増す傾向にある。したがって、如何にして、効率的・効果的かつ合理的な社会インフラのヘルスマonitoringを低コストで実現するかが課題となっている。

これらの課題を解決する手段の1つとして提案するのが、「モアレ縞を用いたひずみ可視化デバイス」である。

ひずみ可視化デバイスは、次のような特徴を有している。

- ①定量的にひずみを可視化できる。
- ②電氣的な要素を一切使用しないため、電源が不要で、電氣的な寿命を持たない。

- ③同理由により，電氣的ノイズの影響を受けない．
- ④一般的なデジタルカメラ等を用いて，遠隔・非接触でひずみを計測できる．
- ⑤メンテナンスが容易である．

このひずみ可視化デバイスを実構造物の維持管理に適用できれば，有効な情報を低コストで，誰でも簡単に取得することができる．そこで，実構造物の維持管理に適用できるモアレ縞を用いたひずみ可視化デバイスを実用化することを研究テーマとする．

1.3 論文の構成と概要

本論文では，屋外で計測する場合に必ず問題となる温度影響に対し，温度の影響を受けない原理と構造を提案し，自己温度補償型のひずみ可視化デバイスを実現する．また，実現場での計測を想定して，実構造物に適用したひずみ可視化デバイスをデジタルカメラで撮影する際の誤差を評価して誤差の少ない撮影方法を提示するとともに，曲げ変形を受ける構造部材へ適用する場合の補正係数を示し，その妥当性を検証する．最後に，実構造物に適用することにより，実構造物の維持管理へのひずみ可視化デバイスの適用性を実証する．本論文は，以下に示す 8 章から構成される．

第 1 章では，我が国における社会インフラの維持管理の現状と課題を示すとともに，その維持管理におけるセンサを用いたヘルスマニタリングの重要性とその課題など研究に至った経緯について述べる．第 2 章では，ひずみ可視化デバイスの測定原理を示し，新たな格子パターンによる高拡大率の実現およびモアレ縞の視認性を向上させる方法，モアレ縞を用いてひずみを可視化する方法およびモアレ縞のデジタル画像からひずみを算出する方法を示す．また，高い耐久性を持つひずみ可視化デバイスの基本仕様を示す．第 3 章では，ひずみ可視化デバイスが温度影響を受けない自己温度補償の原理・構造を提案する．また，それをひずみ可視化デバイスに実装し，温度特性試験を実施する．試験結果より，ひずみ可視化デバイスの温度影響が $\pm 1.0 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 未満であることを示し，ひずみ可視化デバイスが自己温度補償できていることを示す．第 4 章では，ひずみ可視化デバイスの目視による計測の目標精度 ($\leq 50 \mu\epsilon$)，デジタル画像処理による計測の目標精度 ($\leq 20 \mu\epsilon$) を満足するかを検証するため，変位ステージによる精度検証および引張試験による従来のひずみ計測手法

との比較を行う。精度検証では、変位ステージで発生させたひずみに対し、ひずみ可視化デバイスのデジタル画像の画像処理による計測精度が $\pm 20 \mu\epsilon$ 以下、目視による計測精度が $\pm 50 \mu\epsilon$ 以下であることを示す。一方、引張試験では、従来のひずみゲージと比較して、その差が $20 \mu\epsilon$ 以下であることを示す。第5章では、現場において、ひずみ可視化デバイスをデジタルカメラで撮影する際に、撮影角度がひずみ算出精度に与える原因と影響を実験によって明らかにし、目標計測精度を確保する撮影角度を示す。第6章では、曲げ変形を受ける部材のひずみ計測へのひずみ可視化デバイスの適用性を検証する。適用する際の補正方法について提案し、実験により実証する。第7章では、2つの橋梁および送電鉄塔を対象とした載荷試験、走行疲労試験におけるひずみ計測にひずみ可視化デバイスを適用する。また、実際に、地下トンネルの維持管理に試験適用し、実構造物の維持管理への適用性を実証する。第8章では、本研究を総括し、今後の研究展望について述べる。

第2章 ひずみ可視化デバイスの測定原理と基本構造

2.1 概説

提案するモアレ縞を用いたひずみ可視化デバイスは、文字通り、モアレ縞の原理を用いてひずみを計測する。モアレ縞は古くから研究されており[24][25]、変位の計測に応用されてきた。構造物の維持管理への適用技術としては、コンクリート構造物のひび割れ幅の変位を計測する手法として、モアレを利用した変位計測システムが開発されている[26]。また、撮影した画像にサンプリングモアレ法の位相解析を適用したサンプリングモアレカメラが開発され、実橋梁のたわみ計測に適用されている[27]。同様にサンプリングモアレ法を用いて、周期模様を有する構造物をデジタルカメラで撮影することで高精度な変形分布計測も行われている[28]。サンプリングモアレ法は、遠隔・非接触で、動的な変位を高分解能で計測できる点において優れており、社会インフラの効率的・効果的な維持管理に寄与することが期待される。ただし、これらの技術は、構造物の変位を対象とした技術である。

本論文で提案するのは、モアレ縞を用いてひずみを計測し、さらにひずみを定量的に可視化することのできる、ひずみ計測用センサ“ひずみ可視化デバイス”である。ひずみ可視化デバイスのコ

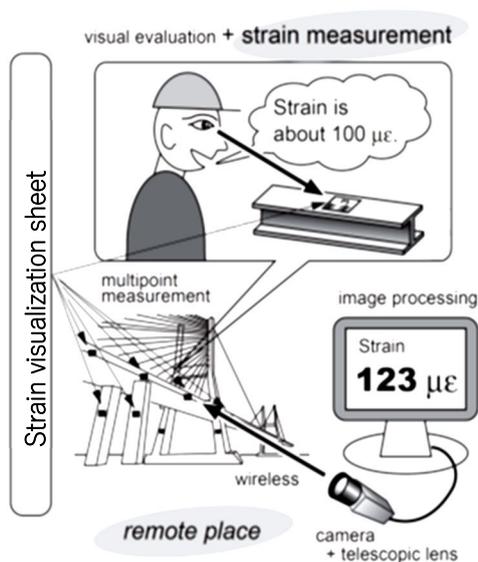


Fig. 2.1 Concept of a proposed strain visualization device

コンセプトを Fig. 2.1 に示す。ひずみ可視化デバイスは、アンプ、信号線、ひずみゲージのような電氣的な要素を使用せず、文字や縞模様によって概略のひずみ情報を目視で確認することができる。また、デジタルカメラ等で撮影したデジタル画像を画像処理することにより、ひずみの正確な数値を得ることができる。望遠レンズを取り付けたカメラを使用すれば、この値を遠隔から計測することも可能である。そして、このデバイスは安価で、電源供給や信号伝送の設備を必要としないことから、多点のひずみ計測においてかなりの低コスト化を図ることができる技術である。

本章では、ひずみ可視化デバイスの測定原理であるモアレ縞の原理を示し、モアレ縞をさらに高拡大率かつ明瞭にする新たな格子のパターンおよびモアレ縞によるひずみの可視化方法を提案するとともに、モアレ縞のデジタル画像からひずみを算出する方法を示す。また、高い耐久性を持つ、ひずみ可視化デバイスの基本仕様を示す。

2.2 モアレ縞の原理

Fig. 2.2-(1) のように、ピッチ p の直線格子 1 とそのピッチよりも $\Delta p (\ll p)$ ほど大きいピッチ $p+\Delta p$ の直線格子 2 を重ねると、これらの直線格子 1, 2 より大きなピッチ W のモアレ縞と呼ばれる縞が現れる。このモアレ縞は 2 つの直線格子を重ね合わせることにより生じ、これらの関係は、Eq.(2.1)となる[29]。

$$W = \frac{p+\Delta p}{\Delta p} p \quad (2.1)$$

Fig.2.2-(2) のように直線格子 1 を(A)の方向にピッチ p ほど動かすと、モアレ縞は(A)の方向にピッチ W ほど動く。つまり、変位 Δx を視覚的に $(p+\Delta p)/\Delta p$ 倍に拡大表示することができる。この拡大率を M とする。ここで、モアレ縞の移動量を Δx_m とすると、これらの関係は Eq.(2.2)となる。

$$\Delta x_m = M \Delta x \quad (2.2)$$

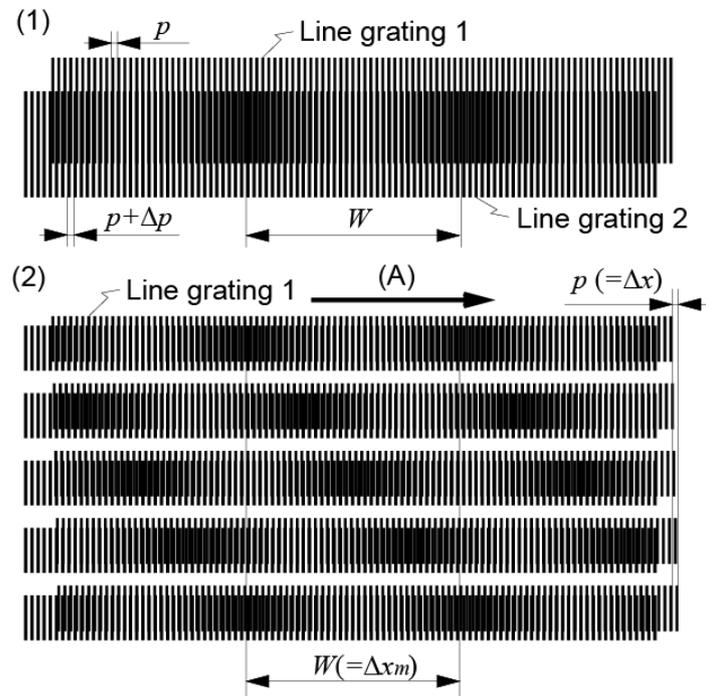


Fig. 2.2 Example of a moiré fringe

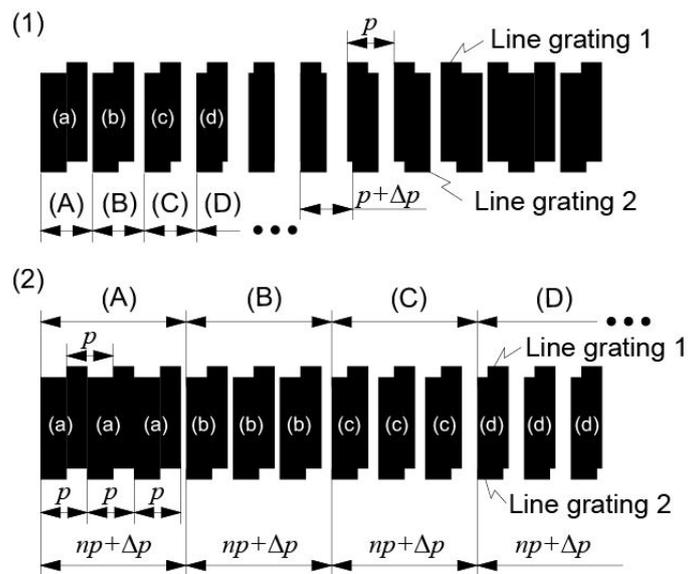


Fig. 2.3 Fine moiré fringe with new line grating pattern

2.3 高拡大率かつ明瞭な格子のパターン

次に、視認性を向上させるため、高拡大率かつ明瞭なモアレ縞を得るための新たな直線格子のパターンを示す。高拡大率のモアレ縞を得るために、Fig.2.3 に示すように、直線格子2を n 個のピッチ p の縞を一塊として、これを $np+\Delta p$ おきに配置することを考える。

発生するモアレ縞のピッチ W は、

$$W = \frac{np + \Delta p}{\Delta p} p (=Mp) \quad (2.3)$$

となり、拡大率 M は $(np+\Delta p)/\Delta p$ となる[30]。ここで、印刷できる最小の単位を u とし、直線格子1, 2のピッチを $9u$, $10u$ とした場合のモアレ縞を Fig. 2.4-(1) に示す。このとき、拡大率 M は Eq.(2.2)より10倍となる。一方、直線格子1は上記と同じ $9u$ としたまま、直線格子2を $p=9u$, $\Delta p=u$, $n=3$ としたときのモアレ縞を Fig. 2.4-(2) に示す。このとき、拡大率 M は Eq.(2.3)より28倍となり、より大きな拡大率 M が得られることが分かる。この新たな格子パターンを用いることにより、 $1 \mu\text{m}$ の変位計測を実現できる[31]。

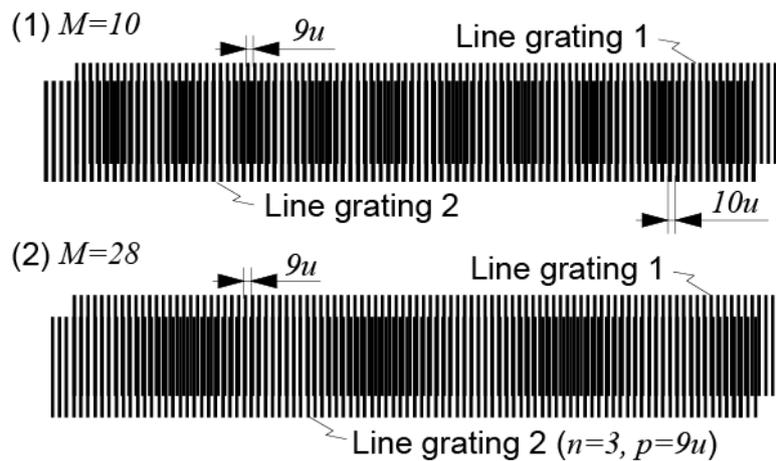


Fig. 2.4 Moiré fringe and magnification M

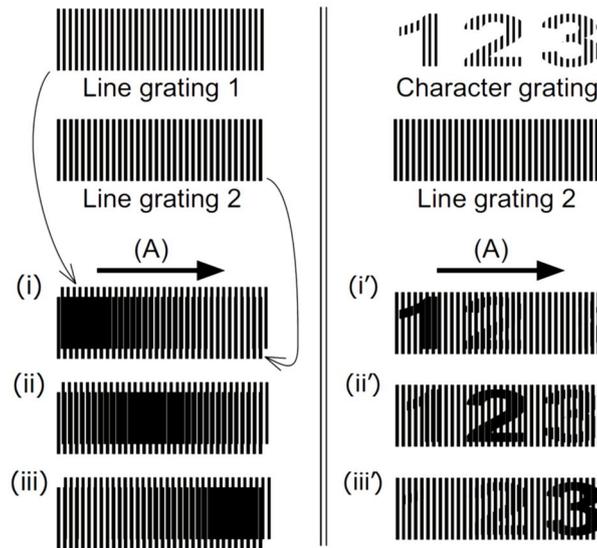
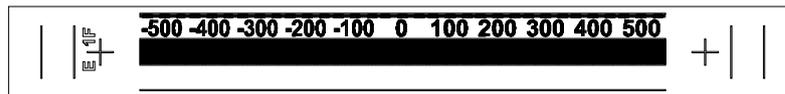


Fig. 2.5 A moiré fringe with characters

(a) Character grating and line grating 1



(b) Line grating 2



Fig. 2.6 Characters arranged in a scale

2.4 モアレ縞による文字の表示

Fig. 2.2 で示したモアレ縞は単なる縞模様であるため、視覚的にひずみ値を読み取ることができない。そこで、モアレ縞で文字を表示する方法を示す[32]。ひずみによって生じる変位 Δx に応じ、モアレ縞が動く様子を Fig. 2.5 の左側に示す。Fig. 2.2 と同様に、直線格子 1 と直線格子 2 を重ね直線格子 1 を(A)の方向に動かすと、モアレ縞は(i)～(iii)のように動く。次に、文字を表示するため、Fig. 2.5 の右側のように直線格子 1 の代わりに文字の形状をした格子を用いることを考える。これを文字格子と呼ぶこととする。この文字格子と直線格子 2 を重ねて文字格子を(A)の方向に動かすと、(i')～(iii')のように文字を順に表示することができる。ひずみ可視化デバイスは、この要領で、Fig. 2.6 に示すような $100 \mu\text{m}$ 毎の文字を目盛状に配置して、ひずみ値として読み取れるようにしている。

2.5 画像処理によるひずみ値の抽出方法

モアレ縞の文字格子による可視化だけでは、ひずみの計測精度に限界がある。そこで、デジタルカメラやデジタルビデオカメラなどでモアレ縞を撮影した画像から詳細なひずみ値を抽出する方法を示す。

2.5.1 輝度値の sin 曲線近似

撮影した画像よりモアレ縞をトリミングし、Fig. 2.7-(i)のように i, j 軸を定義する。トリミングした画像の大きさを (I, J) とし、 (i, j) の位置にある画素の輝度値を $e(i, j)$ とする。また、撮影した画像では、単位長さが l 画素で撮影されたとする。

まず、それぞれの i における j 軸方向の輝度値の平均 $f(i)$ を求める。 $f(i)$ は、

$$f(i) = \frac{\sum_{k=0}^{J-1} e(i, j)}{J} \quad (2.4)$$

となる。次に、 $f(i)$ を下式の sin 曲線 $g(i)$ に近似する。

$$g(i) = A \sin\left(\frac{2\pi}{lW} i + \theta\right) + B \quad (2.5)$$

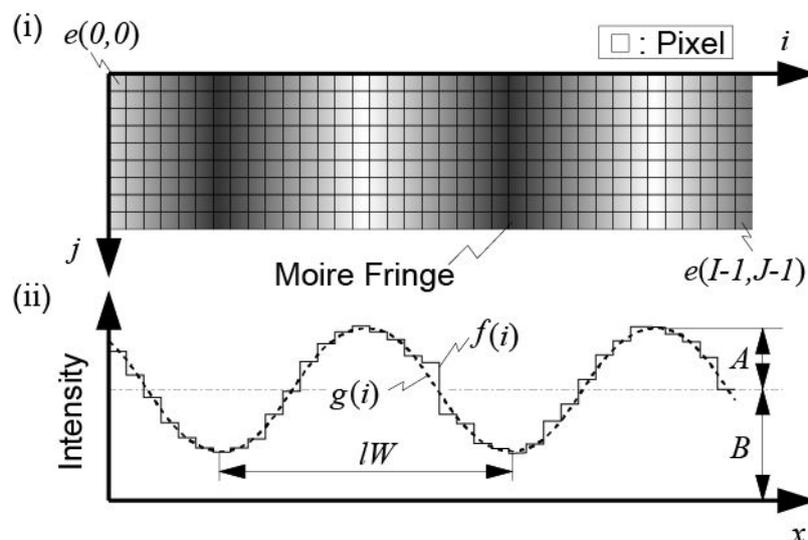


Fig. 2.7 Intensity of a moiré fringe and corresponding fitted curve

$f(i)$ と $g(i)$ の例を Fig. 2.7-(ii)に示す. $g(i)$ に近似するためには, モアレ縞の輝度値の振幅 A , 輝度値のオフセット B , モアレ縞の位相 θ を求める必要がある.

そこで, Eq. (2.5)を

$$\begin{aligned} g(i) &= A \cos \theta \sin \frac{2\pi}{lW} i + A \sin \theta \cos \frac{2\pi}{lW} i + B \\ &= A_1 k_1(i) + A_2 k_2(i) + B \end{aligned} \quad (2.6)$$

とする. ただし,

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= A \cos \theta \\ A_2 &= A \sin \theta \\ k_1(i) &= \sin \frac{2\pi}{lW} i \\ k_2(i) &= \cos \frac{2\pi}{lW} i \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

である. このとき, 最小二乗法により A_1 , A_2 , B を求めることができる.

そして, 振幅 A および位相 θ は, 2変数逆正接 $\text{atan}2(x, y)$ を用いると, 次のように求まる.

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \quad (2.8)$$

$$\theta = \text{atan}2(A_1, A_2) \quad (2.9)$$

ただし, 以上の方法では, $|\Delta\theta|$ が π より大きくなる場合, 圧縮または引張方向かの判断ができなくなる. そのため, $|\Delta\theta|$ が π 未満となる頻度で撮影する必要がある.

2.5.2 位相とひずみ

次に, 変位 Δx が生じていないときのモアレ縞の画像を Fig. 2.8-(i)とする. モアレ縞の輝度値を Eq. (2.5) に近似し, そのときの位相 θ を θ_0 とする(Fig. 2.8-(iii)における曲線(a)). 変位 Δx が生じ

ると、モアレ縞は Eq. (2.2) より Δx_m だけ移動する.

よって、画像上では $l\Delta x_m$ だけ移動し、Fig. 2.8 -(ii)の画像となる. 位相 θ が Fig. 2.8 -(iii)における曲線(b)のように位相 θ_0 に対し $\Delta\theta$ だけ移動した場合、これらの関係は、

$$l\Delta x_m = \frac{lW}{2\pi} \Delta\theta \quad (2.10)$$

となる. Eq. (2.2), (2.3), (2.10)より、変位 Δx は次式となり求めることができる.

$$\Delta x = \frac{p}{2\pi} \Delta\theta \quad (2.11)$$

標点間距離を L とすると、ひずみ ε は、Eq. (2.11)より、次式で算出することができる.

$$\varepsilon = \frac{p}{2\pi L} \Delta\theta \quad (2.12)$$

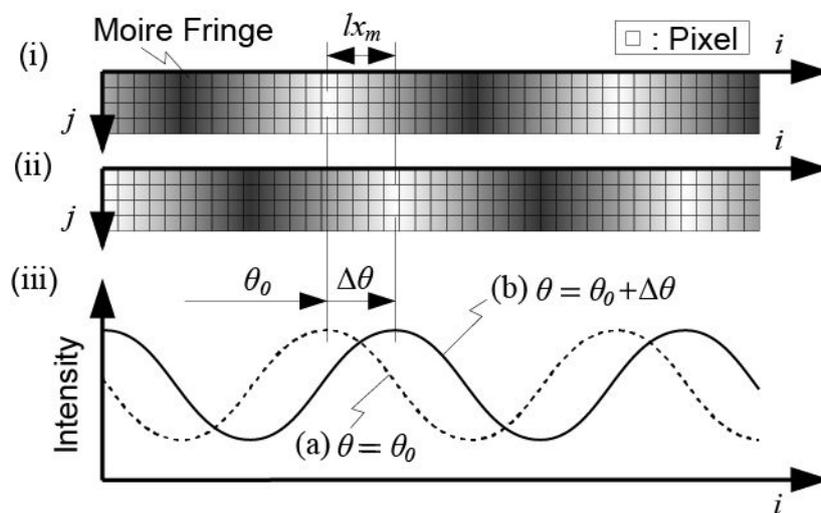


Fig. 2.8 Phase of a moiré fringe

2.6 ひずみ可視化デバイスの基本仕様

2.6.1 ひずみ可視化デバイスの基本構造

ひずみ可視化デバイスの外観を Fig. 2.9 に、基本構造を Fig. 2.10 に示す。Fig. 2.6-(a)の格子パターンが生成されたフロントプレート、Fig. 2.6-(b)の格子パターンが生成されたリアプレートの2枚の厚さ 1 mm のガラスプレートから構成され、亜鉛ニッケル合金メッキを施した鋼製の固定リングでユニット化している。ひずみ可視化デバイスの長さ、幅、厚さは、それぞれ 120 mm、17 mm、5.2 mm であり、ひずみを求める際に基準となる標点間距離 L は 105 mm である。また、ひずみ可視化デバイスは3種類の縞で構成している。上段は、ひずみ値を肉眼で直読することのできる $100 \mu\epsilon$ 毎の目盛状の文字縞であり、中段は、画像処理によるひずみ計測のための単純なモアレ縞である。下段は、画像処理時の画像の切り抜き精度向上のための参照縞である。

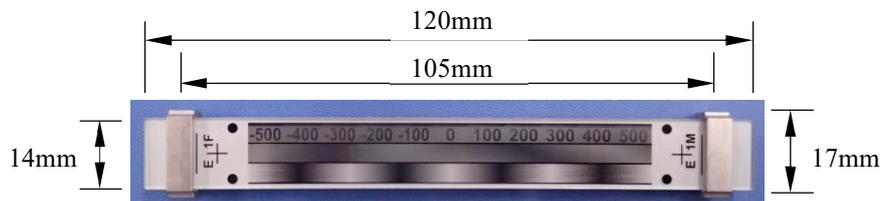


Fig. 2.9 Appearance of strain visualization device

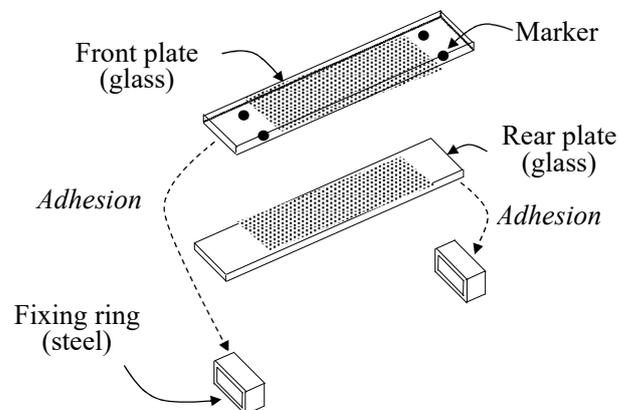


Fig. 2.10 Basic structure of strain visualization device

2.6.2 格子パターンの仕様

プレートに生成された格子パターンは、2.3節で示した格子パターンを採用している。上段の可視化部分の格子パターンは、 $p : 0.1 \text{ mm}$ 、 $\Delta p : 0.01 \text{ mm}$ 、繰り返し回数 $n : 73$ 回とし、拡大率 M は 731 倍である。中段の画像処理部分の格子パターンは、 $p : 0.07 \text{ mm}$ 、 $\Delta p : 0.00025 \text{ mm}$ 、繰り返し回数 $n : 1$ 回とし、拡大率 M は 281 倍である。格子パターンの生成にフォトマスクング技術を適用することで、中段の画像処理部分の格子パターンのピッチ p および Δp を非常に細かく設定できるようになり、繰り返し回数 1 回でも高拡大率を得ることに成功している。

2.6.3 ガラスプレートの仕様

ひずみ可視化デバイスを実構造物に適用するためには、プレートは、自然環境下において長期間耐える材質でなければならない。当初、より軽量で、より低コストのポリエステルをプレートの材質に選定した[33]-[36]。しかし、Fig. 2.11 のポリエステルのプレートを用いたひずみ可視化デバイスの温度特性試験の結果に示すように、湿度によって温度影響が変化することが分かった。これは、ポリエステルが湿潤膨張しているものと考えられた。そこで、検討・実験を重ね、以下の特徴をも

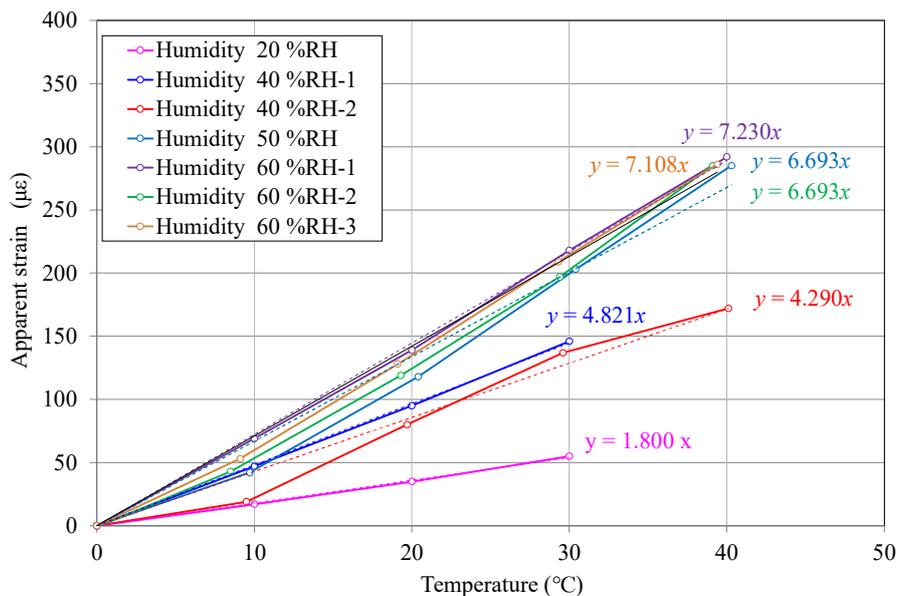


Fig. 2.11 Temperature characteristics of strain visualization device using polyester plate

つ結晶化ガラス[37]を採用することとした。

【結晶化ガラスの特徴】

- ・耐酸性，耐アルカリ性，耐海水性に優れる
- ・吸水率がゼロ
- ・耐摩耗性に優れる
- ・曲げ強度は天然石の3倍で，板を薄く加工できる
- ・白いガラスを製作できる

Fig. 2.12 にガラスプレートの詳細図を示す。フロントプレートは透明の結晶化ガラス，リアプレートは白色の結晶化ガラスを採用した。フロントプレートおよびリアプレートの格子パターンは，プレートを重ね合わせた際に内側となる面に，クロムマスクで生成している。生成の際，調光することで金属の光沢を抑えている。また，クロム膜が錆びないようにガラスコーティングによりパターンを保護している。さらに，2枚のプレート間の摺動性および撥水性を確保するため，各プレートのガラスコーティングの上にフッ素コーティングを施している。なお，本ガラスプレートおよび亜鉛ニッケル合金メッキを施した鋼製の固定リングで構成されるひずみ可視化デバイスは，耐候性促進試験において自然環境下 10 年相当以上の耐候性，複合サイクル試験において自然環境下 19 年相当以上の耐腐食性が確認されている [38]。

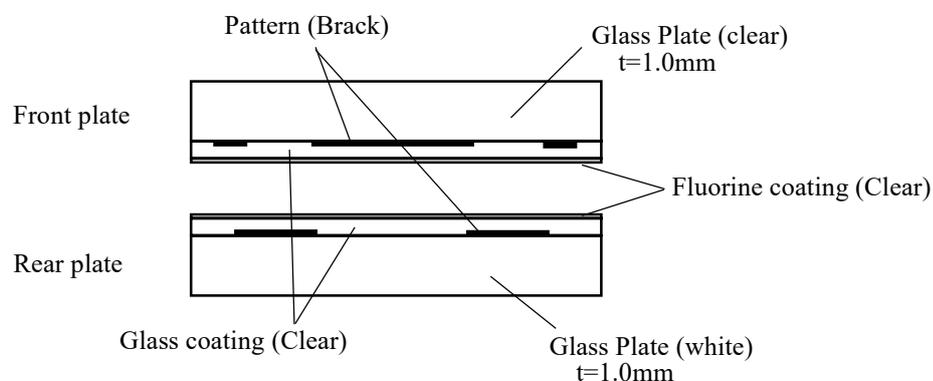


Fig. 2.12 Details of glass plates

2.7 本章のまとめ

本章では、モアレ縞を用いたひずみ可視化デバイスのひずみの測定原理および可視化方法を示すとともに、モアレ縞のデジタル画像からひずみを算出する方法を示した。また、これらの原理・方法に基づき製作した、高い耐久性を持つひずみ可視化デバイスの基本仕様を示した。

まず、モアレ縞の原理によって、微小変位を拡大表示できることを示した。その拡大率を大きくするとともに、視認性を向上させるため、直線格子 2 を n 個のピッチ p の縞を一塊にして、 $np+\Delta p$ おきに配置する新たな格子パターンを示した。この格子パターンにより、画像処理から $1\mu\text{m}$ の微小変位を計測できるようにするとともに、ひずみの可視化部分の明瞭化を行った。また、直線格子 1 の代わりとなる文字格子を $100\mu\text{m}$ 毎の目盛状に配置することにより、ひずみ値を視覚的に見ることを可能とした。

次に、デジタルカメラやデジタルビデオカメラなどでモアレ縞を撮影した画像から、目視では読み取ることのできない、詳細なひずみ値を抽出する方法を示した。モアレ縞の輝度分布を \sin 曲線近似し、変位後の \sin 近似曲線との位相差から変位を算出し、ひずみ可視化デバイスの標点間距離 L で除すことによりひずみを算出する。

最後に、原理・方法に基づき製作したひずみ可視化デバイスの基本仕様を示した。モアレ縞は、格子パターンが生成された 2 枚の透明のガラスを重ね合わせることによって生じさせる。表示部分は、ひずみを可視化するモアレ縞、画像処理用のモアレ縞、画像処理の精度向上のための参照縞から構成され、ひずみを可視化する部分のモアレ縞は、拡大率を 731 倍とした。また、画像処理用のモアレ縞は、拡大率が 281 倍となるように格子パターンを生成し、高精度な変位計測を可能にした。ひずみ可視化デバイスを構成する部品は、自然環境下において長期間耐えうる材質を選定した。フロントプレートとリアプレートには、湿潤膨張が無く、あらゆる環境性能に優れた結晶化ガラスを採用するとともに、これらをユニット化する鋼製の固定リングには亜鉛ニッケル合金メッキを施し、耐候性、耐腐食性共に自然環境下 10 年相当以上を有する、実構造物の維持管理に適用できる耐久性の高いひずみ可視化デバイスを実現した。

第3章 自己温度補償

3.1 概説

センサを実構造物に適用する場合に特に問題となるのは、温度の影響である。Fig. 3.1 に示すように、自然環境下にある実構造物は、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +40\text{ }^{\circ}\text{C}$ の気温にさらされる[39]。構造部材が地表面からの輻射熱を受ける場合は、部材温度は $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 近くに達する場合もある[40]。センサが温度の影響を受けると、得られた計測値は温度影響を含んだ値となり、そのままでは構造物の挙動を評価することができない。もちろん、事前にセンサの温度特性を把握しておき、センサとともに温度計を実構造物に設置・計測すれば、温度影響を除去することができるが、その分コストが増加し、データ処理の手間も増える。ひずみ可視化デバイスが、温度の影響を受けない自己温度補償型のセンサであれば、実構造物の維持管理への適用性が向上する。

構造部材に設置したひずみ計測用センサは、外力によるひずみ以外に温度変化があると、構造部材とひずみ計測用センサの線膨張係数の違いにより見掛けのひずみが生じる。これが、温度による誤差として表れる。自己温度補償型ひずみ計測用センサとは、温度変化により発生する見掛けのひ

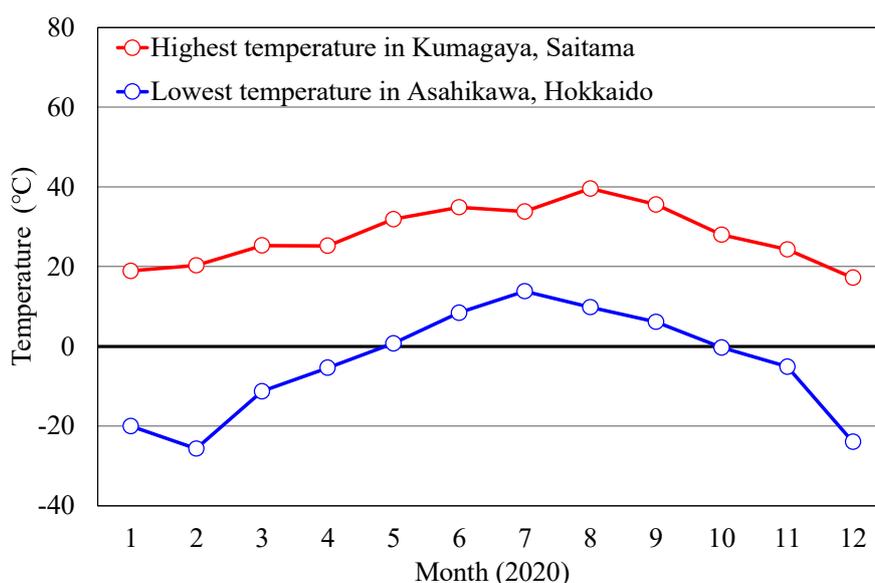


Fig. 3.1 Environmental temperature to which a structure is exposed

ずみを最小にしたセンサのことを指す。ひずみゲージを例に挙げると、ひずみゲージを適合材に設置した場合、規定された温度範囲において、見掛けのひずみが $\pm 1.8 \mu\epsilon/\text{C}$ 以内のものが自己温度補償ゲージと呼ばれている。一般的な自己温度補償型ひずみゲージの見掛けのひずみ特性例を Fig. 3.2 に示す。使用頻度の高い $20\sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 間は $\pm 1 \mu\epsilon/\text{C}$ 以内となっている [41]。自己温度補償されたひずみ計測用センサは、単体で、温度変化により発生する見掛けのひずみをキャンセルし、外力により生じるひずみのみを出力することができる。

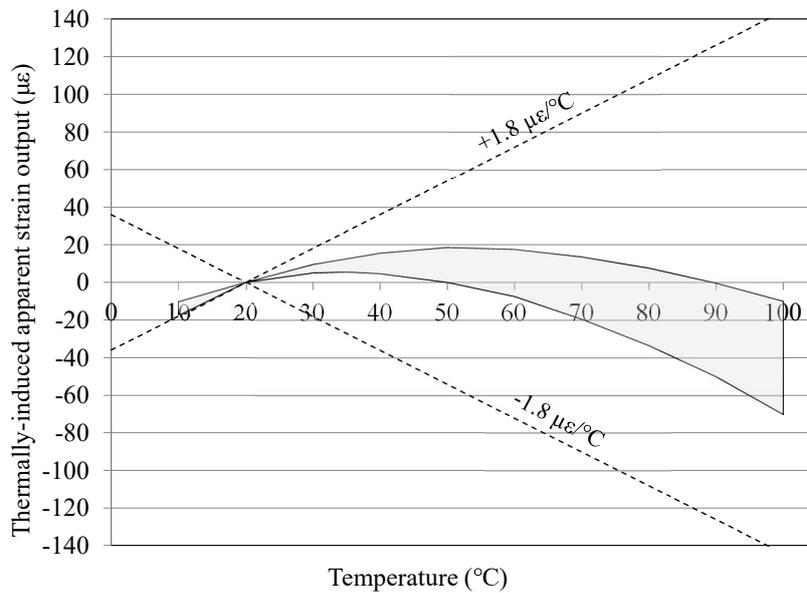


Fig. 3.2 Typical characteristic curve of thermally-induced apparent strain with strain gauges [24]

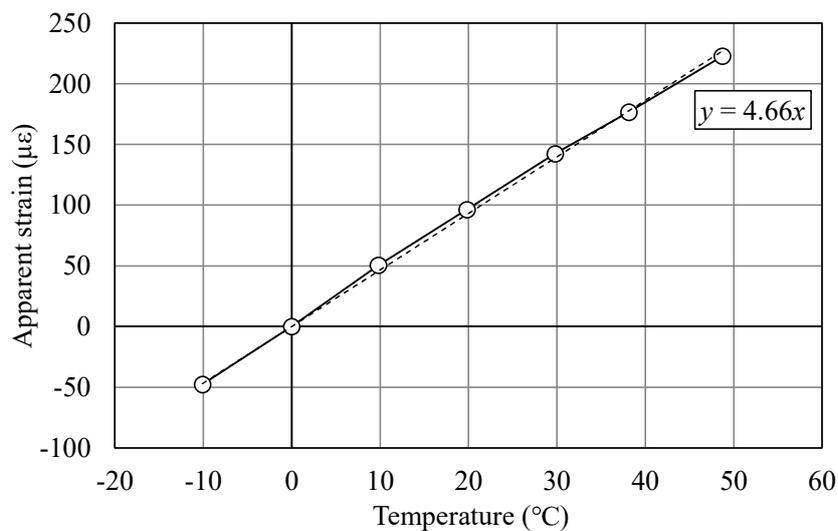


Fig. 3.3 Temperature characteristics of strain visualization device with basic structure

このような自己温度補償型センサに対し，前節で示した基本構造を持つひずみ可視化デバイスの温度特性は Fig. 3.3 の通りで，見掛けのひずみは 1°C 当たり約 $4.7\ \mu\epsilon$ 発生しており，自己温度補償されていない．そこで，本章では，ひずみ可視化デバイスが温度の影響を受けない自己温度補償の構造とその原理を提案する．また，その構造をひずみ可視化デバイスに実装し，温度特性試験により検証する．

3.2 自己温度補償構造とその原理

Fig. 3.4 に示すように，ひずみ可視化デバイスの基本構造に温度補償板を組込んだ構造を考える．温度変化 Δt を受ける構造部材に応力 σ が作用する場合，構造部材の長さ l_m の変化量 Δl_m は，応力 σ による長さの変化量と温度変化 Δt による長さの変化量の和となる．構造部材の弾性係数を E ，線膨張係数を β_1 とすると Eq.(3.1) となる．

$$\Delta l_m = l_m \frac{\sigma}{E} + \beta_1 l_m \Delta t \quad (3.1)$$

その時の温度補償板の長さ l_s の変化量 Δl_s は，温度補償板の線膨張係数を β_2 とすると Eq.(3.2) となる．

$$\Delta l_s = \beta_2 l_s \Delta t \quad (3.2)$$

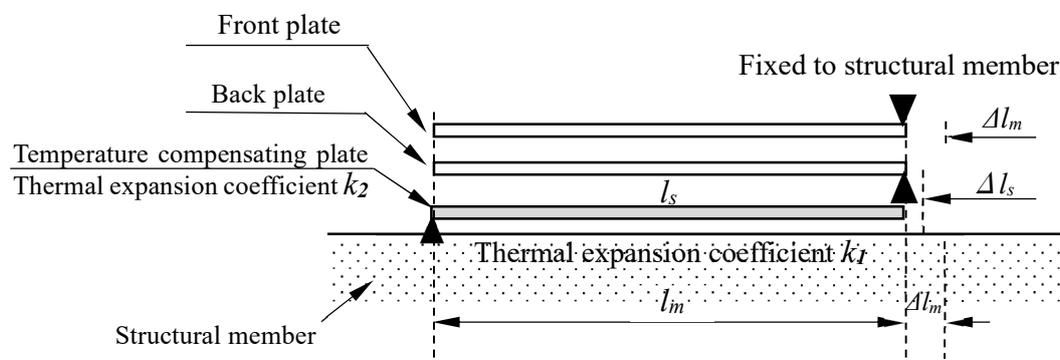


Fig. 3.4 Proposed self-temperature compensated

フロントプレートの変位量は被測定材の長さの変化量 Δl_m と同じであり、バックプレートの変位量は温度補償板の長さの変化量 Δl_s と同じであるから、フロントプレートとバックプレートの相対変位量 Δx は、次式となる。

$$\Delta x = \Delta l_m - \Delta l_s \quad (3.3)$$

Eq.(3.1), (3.2), (3.3)より,

$$\Delta x = l_m \frac{\sigma}{E} + \beta_1 l_m \Delta t - \beta_2 l_s \Delta t \quad (3.4)$$

となり, $l_m = l_s$, $\beta_1 = \beta_2$ とすると,

$$\Delta x = l_m \frac{\sigma}{E} \quad (3.5)$$

となる.したがって、被測定材と温度補償板の長さおよび線膨張係数を等しくすることにより、フロントプレートとバックプレートの相対変位量 Δx は、作用する応力 σ によってのみ生じ、温度変化 Δt による相対変位は発生しない。

3.3 自己温度補償型ひずみ可視化デバイス

上記の自己温度補償構造を実装した自己温度補償型ひずみ可視化デバイスの外観を Fig. 3.5 に、構造を Fig. 3.6 に示す。温度補償板は、測定対象となる鋼製やコンクリート製の構造部材と同じ線

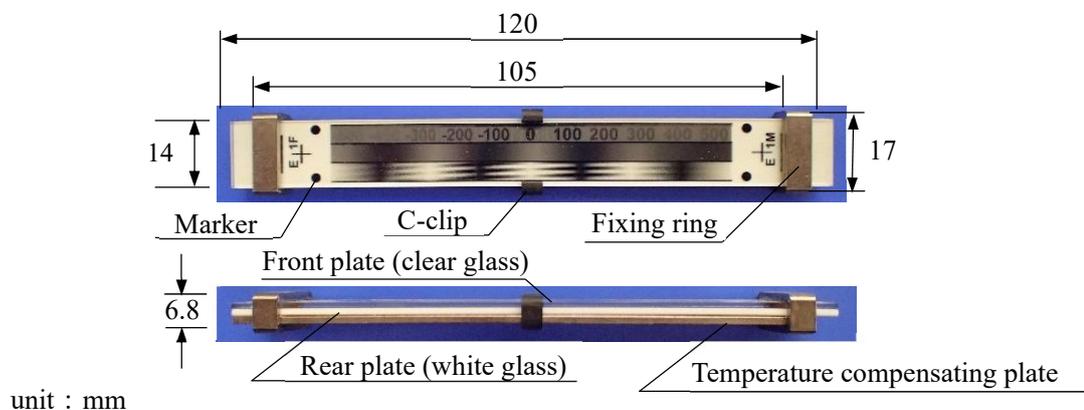


Fig. 3.5 Appearance of self-temperature compensated strain visualization device

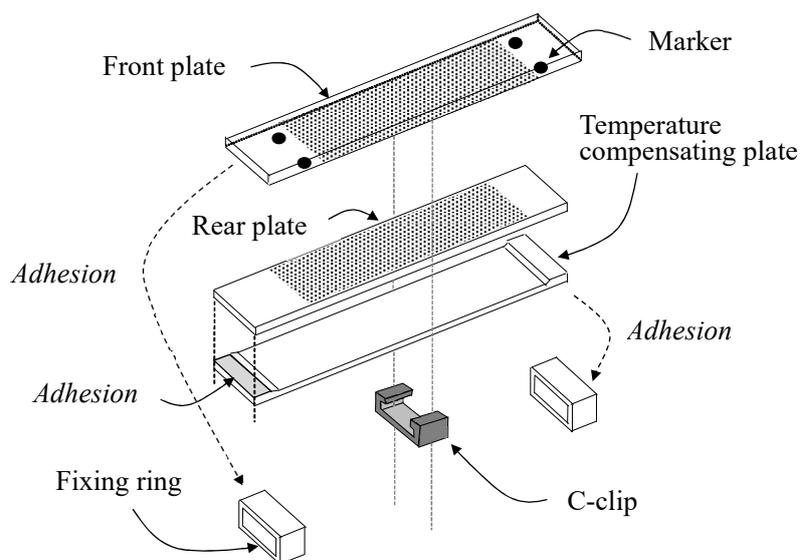


Fig. 3.6 Structure of self-temperature compensated strain visualization device

膨張係数 $11.7 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ の鋼製プレート ($t=1.6 \text{ mm}$) とし、長さは構造部材のひずみ検出範囲と同じ長さとした。外形寸法は $17 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 、厚さ 6.8 mm であり、標点間距離は 105 mm である。ひずみ可視化デバイスに表示される 3 種類のモアレ縞の構成は、2.6 節で述べた基本構成と変わらない。なお、鋼製の温度補償板は、固定リングと同様に亜鉛ニッケル合金メッキを施している。

3.4 温度特性試験

3.4.1 試験体

寸法 $50 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ($t=1.6 \text{ mm}$) の鋼板 (SPCC : 線膨張係数 $11.7 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$) を試験体として使用した。試験体のセンサ配置図を Fig. 3.7 に、センサの設置状況を Fig. 3.8 に示す。鋼板の表面にひずみ可視化デバイスと比較対象用の自己温度補償型ひずみゲージ (ゲージ長 $L=90 \text{ mm}$) を設置し、裏面にも同ひずみゲージを設置して、温度による鋼板の曲げの発生の有無を確認した。なお、鋼板の温度を計測するため、鋼板裏面に熱電対温度計を設置した。

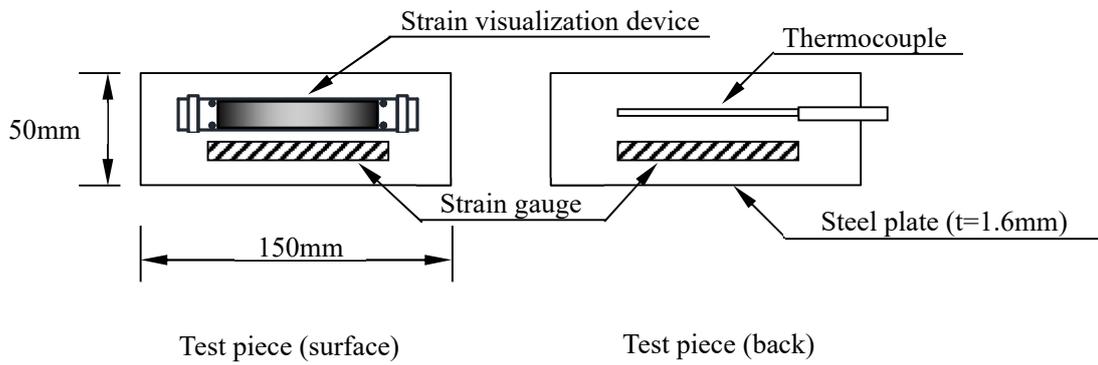


Fig. 3.7 Sensor arrangement



Fig. 3.8 Installation of sensors



Fig. 3.9 Thermostatic chamber

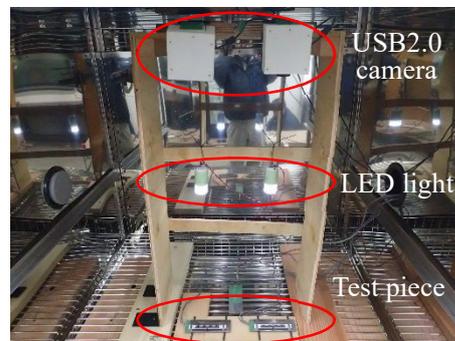


Fig. 3.10 Installation of test piece and USB camera in the thermostatic chamber

3.4.2 試験方法

検証で使用した ESPEC 社製の恒温恒湿器 (ARS-1100-J 型) を Fig. 3.9 に示す. 恒温恒湿器 (ARS-1100-J 型) の仕様は, 温度範囲は $-65\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度変動幅は $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温湿度範囲 $10\sim 95\text{ }^{\circ}\text{C}/10\sim 98\text{ \%rh}$, 湿度変動幅は $\pm 2.5\text{ \%rh}$ である. Fig. 3.10 に示すように, この恒温恒湿器内に, 温度変化に伴って自由に伸縮できるように Fig. 3.8 の試験体を設置し, 試験体を上部から撮影するために, ガゾウ社製の 200 万画素の USB2.0 カメラ (VC-4302) を設置した. また, 恒温槽内を一定の明るさにするため, LED ライトを設置した.

USB2.0 カメラを恒温恒湿器外部に設置したリアルタイム画像処理装置に接続するとともに, ひずみゲージおよび熱電対の各信号線を同様に外部のデータロガーに接続した. データ収録システム図を Fig. 3.11 に示す.

試験は, 初期値を計測したのち, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ピッチで温度を変化させ, 試験体の温度がその設定温度に達した際のひずみ可視化デバイスおよびひずみゲージの値を記録した.

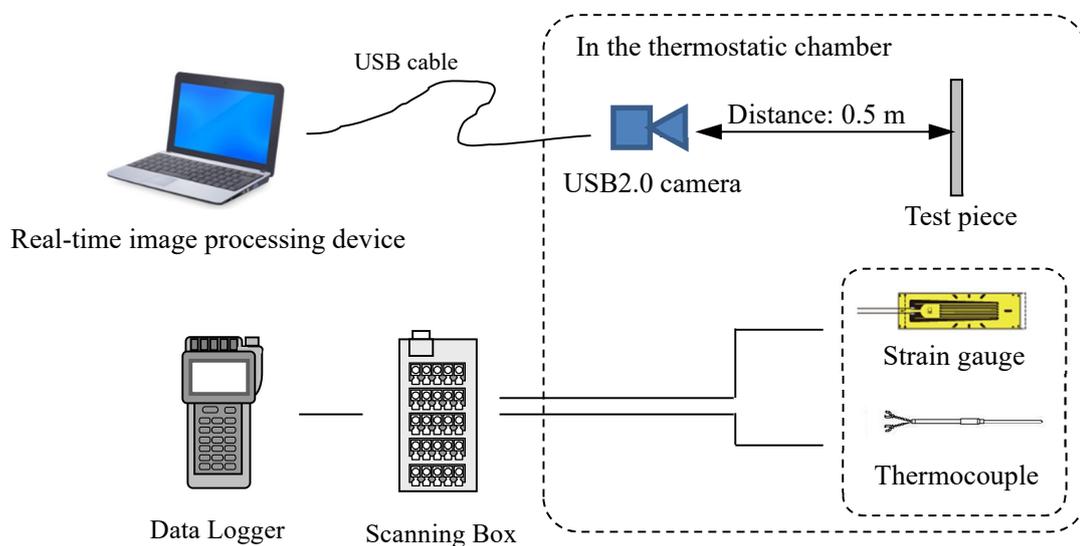


Fig. 3.11 Data recording system

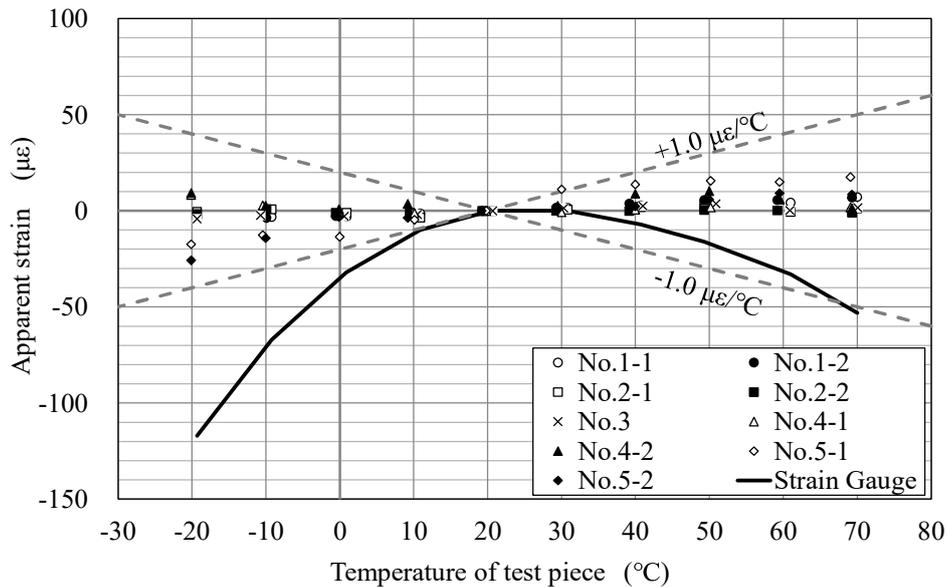


Fig. 3.12 Relationship between temperature and apparent strain of test piece

3.4.3 試験結果

試験体の温度と見掛けのひずみの関係を Fig. 3.12 に示す。また、自己温度補償型ひずみゲージの各試験体温度における見かけのひずみを併記する。ひずみ可視化デバイスの見掛けひずみは、 -20°C ~ 70°C の範囲において $\pm 1.0 \mu\epsilon/\text{C}$ 未満であり、自己温度補償されていることから、提案した自己温度補償の構造と原理が実証された。また、特筆すべきは、ひずみ可視化デバイスの見掛けのひずみは、 70°C の高温下においても $20 \mu\epsilon$ 程度、 -20°C の低温下においても $-20 \mu\epsilon$ 程度と見掛けのひずみが非常に小さく、自己温度補償型ひずみゲージと比べても優れた温度特性を持っていることが確認された。

3.5 本章のまとめ

本章では、ひずみ可視化デバイスを実構造物に適用する場合に問題となる温度影響をキャンセルするため、温度の影響を受けない自己温度補償の構造と原理を提案した。また、その構造をひずみ可視化デバイスに実装し、温度特性試験により検証した。

まず、温度特性 $4.7 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ の自己温度補償されていないひずみ可視化デバイスの基本構造に対し、温度補償板を追加する構造を提案した。温度補償板の長さを構造部材のひずみ検出範囲と同じ長さにし、温度補償板の線膨張係数を構造部材と同じにすることで、温度の影響をキャンセルし、構造部材に応力が作用した場合のみ、ひずみを検出する原理を示した。

次に、測定対象となる鋼製やコンクリート製の構造部材と同じ線膨張係数 $11.7 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ で、標点間距離 105 mm と同じ長さの鋼製プレート ($t=1.6 \text{ mm}$) を温度補償板とし、これを実装した自己温度補償型ひずみ可視化デバイスを製作した。

自己温度補償型ひずみ可視化デバイスの温度特性試験を実施した結果、ひずみ可視化デバイスの見掛けひずみは、 $-20^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ の温度範囲において $\pm 1.0 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 未満であることが確認され、 $\pm 1.8 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 未満といわれる自己温度補償型センサの温度特性を十分に下回った。また、 70°C の高温下においても $20 \mu\epsilon$ 程度、 -20°C の低温下においても $-20 \mu\epsilon$ 程度と見掛けのひずみが非常に小さく、自己温度補償型ひずみゲージと比べて優れた温度特性を持っていることが検証できた。

よって、温度の影響を受けない、実構造物の維持管理に適用できる自己温度型ひずみ可視化デバイスを実現できた。

第4章 ひずみ可視化デバイスの計測精度

4.1 概説

一般的に実構造物に適用されているひずみ計測用センサは、ひずみゲージ、電気式ひずみ計、BOTDR方式の光ファイバーセンサなどがある。それらの計測精度は、ひずみゲージで±数 $\mu\epsilon$ 程度、電気式ひずみ計で±50 $\mu\epsilon$ 程度である。また、BOTDR方式の光ファイバセンサの計測精度は、沖電気工業社製の測定器で計測すると±20 $\mu\epsilon$ (1 σ) である[42]。このうち、実構造物の維持管理に適用できるのは、耐久性を踏まえれば、電気式のひずみ計や光ファイバとなる。したがって、ひずみ可視化デバイスのデジタル画像処理によるひずみの計測精度は、これらのセンサと同等の精度を目標とする。一方、目視によるひずみ計測は、特に、コンクリートのひび割れの発生の監視などに適していると考えられる。コンクリートの圧縮強度によって異なるが、概ね100 $\mu\epsilon$ ~200 $\mu\epsilon$ を超えるとコンクリートにひび割れが発生する[43]。この兆候を捉えるためには、少なくとも、目視によるひずみ計測精度は±50 $\mu\epsilon$ が必要と考える。

上記を踏まえ、第3章で実現した自己温度補償型のひずみ可視化デバイスに対し、デジタル画像処理によるひずみの計測精度±20 $\mu\epsilon$ 、目視によるひずみ計測精度±50 $\mu\epsilon$ を目標精度とし、変位ステージによる精度検証を行うとともに、構造部材への適用を想定して、鋼製の試験体にひずみ可視化デバイスを設置して、引張試験による従来型のひずみゲージとの比較検証を実施する。

4.2 変位ステージによる精度検証

4.2.1 試験装置

試験装置は、Fig. 4.1に示す自動検定装置を用いた。自動検定装置は、USB2.0カメラ、サブミクロンフィールドバックステージ、ステージ制御装置、ステージの制御を兼ねたリアルタイム画像処理装置で構成される。USB2.0カメラは、温度特性試験で使用したカメラと同じカメラを使用した。サブミクロンフィールドバックステージは、ストローク20mm、最小分解能100nm (1/10000mm)、位置

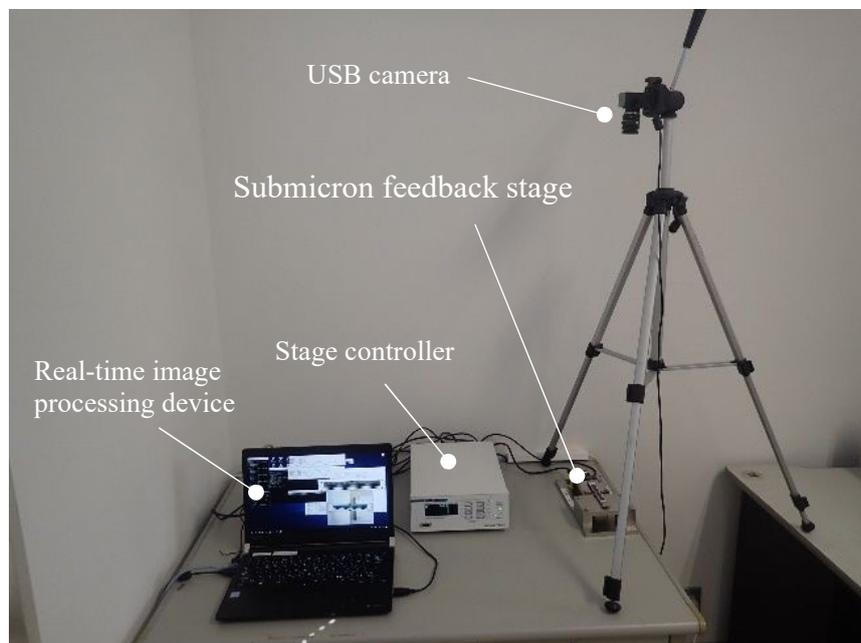


Fig. 4.1 Automatic verification device

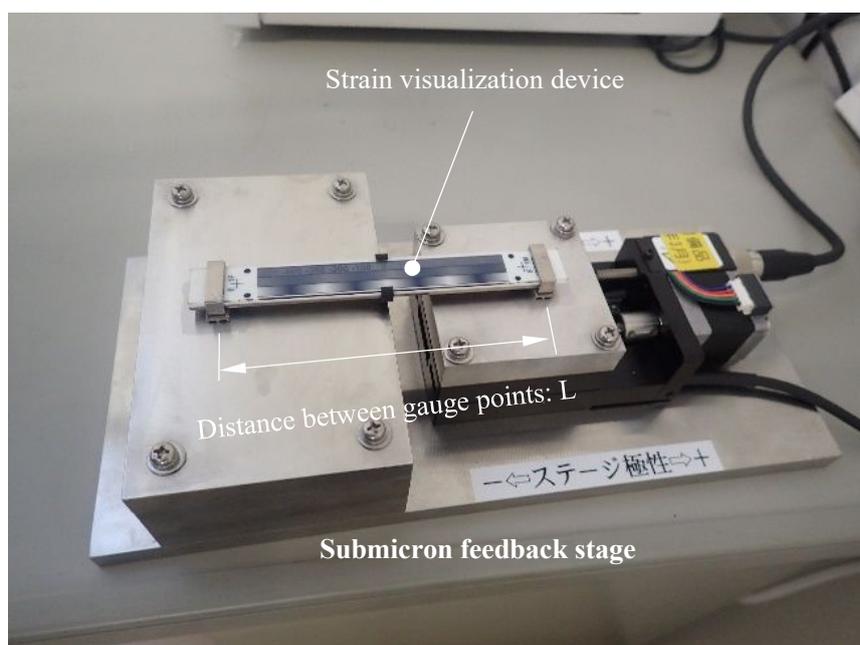


Fig. 4.2 Strain visualization device set on a submicron feedback stage

決め精度 $\pm 200\text{ nm}$ である。Fig. 4.2 に示すとおり、標点間距離 L が 105 mm となるように、ひずみ可視化デバイスをサブミクロンフィードバックステージにセットし、これを初期状態とした。

4. 2. 2 画像処理によるひずみの計測精度

画像処理によるひずみ計測精度の検証では、サブミクロンフィードバックステージで $2.1\text{ }\mu\text{m}$ ピッチで変位を与えることで、ひずみ値を $20\text{ }\mu\epsilon$ ずつ増減させ、 $\pm 500\text{ }\mu\epsilon$ までひずみを発生させた。その間、USB2.0 カメラでひずみ可視化デバイスを連続撮影し、撮影したデジタル画像は、リアルタイム画像処理装置にてリアルタイムにひずみを算出し、発生ひずみ $20\text{ }\mu\epsilon$ 毎の値を記録した。

変位ステージで発生させたひずみに対する、ひずみ可視化デバイスの画像処理による計測結果を Fig. 4.3 に示す。画像処理によるひずみ計測結果は、理論値（グラフ内実線）と非常によく一致し、誤差は $-12\text{ }\mu\epsilon\sim +2\text{ }\mu\epsilon$ となった。以上の結果より、ひずみ可視化デバイスの画像処理による計測精度は、目標精度の $\pm 20\text{ }\mu\epsilon$ 以下を満足することが検証できた。

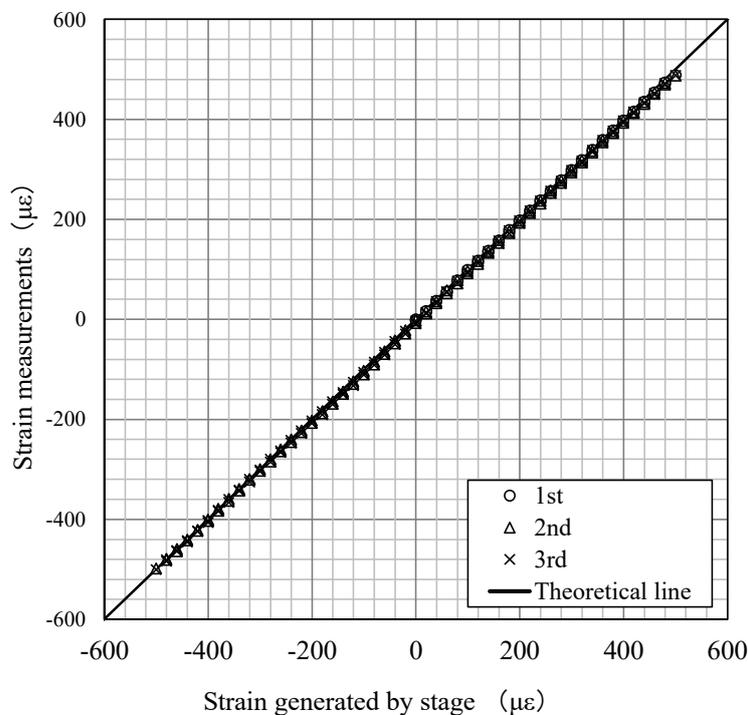


Fig. 4.3 Strain visualization device set on a submicron feedback stage

4.2.3 目視によるひずみ計測精度

目視によるひずみ計測精度の検証では、ステージで $10.5\ \mu\text{m}$ ピッチで変位を与えることで、ひずみ値を $100\ \mu\epsilon$ ずつ増減させ、 $\pm 500\ \mu\epsilon$ までひずみを発生させた。その間、USB2.0 カメラでひずみ可視化デバイスを連続撮影し、 $100\ \mu\epsilon$ 毎の画像を抽出した。Fig.4.4 に可視化部分のひずみ値の変化を示す。目視によるひずみ計測値は、確認できる数字の 1/2 まで読み取ることで得られる。

可視化部分の数値を目視で読み取った結果、 $100\ \mu\epsilon$ 毎の発生ひずみに対して、 $\pm 50\ \mu\epsilon$ の計測精度

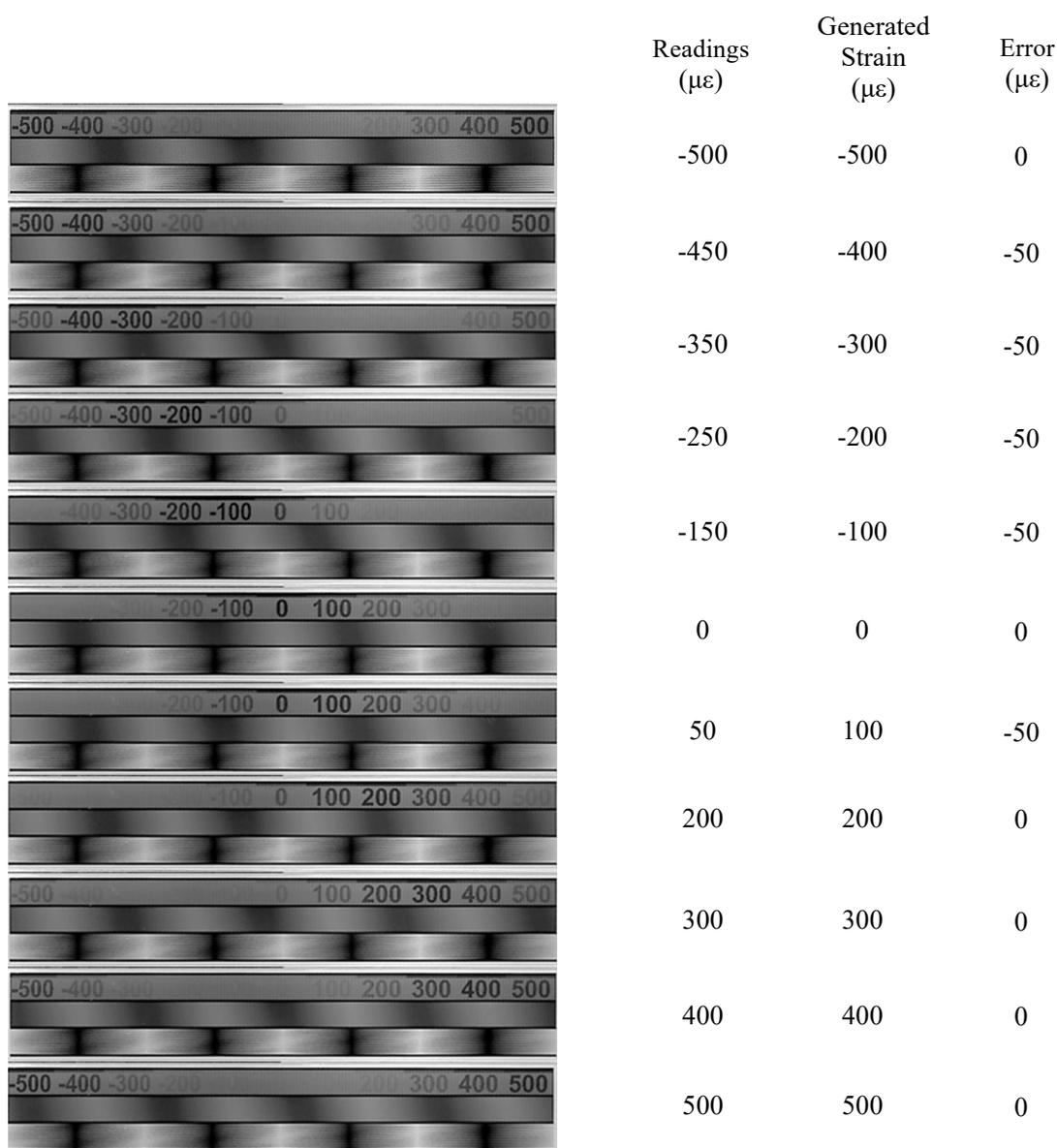


Fig. 4.4 Changes in strain value and measurement accuracy of the visualized part

で、目視によりひずみを計測できた。以上の結果より、ひずみ可視化デバイスの目視による計測精度は、目標精度の $\pm 50 \mu\epsilon$ 以下を満足することが検証できた。

4.3 引張試験による比較検証

4.3.1 検証方法

構造部材への適用を想定して、鋼製の試験体にひずみ可視化デバイスを設置して、引張試験による従来型のひずみゲージとの比較検証を実施した。Fig. 4.5 に引張試験の試験体（JIS Z2201 14号）を示す。試験体中央の表裏面にひずみ可視化デバイスおよび比較対象用のひずみゲージを隣り合うように設置した。なお、ひずみゲージのゲージ長は90 mmである。その試験体を Fig. 4.6 の島津製作所製万能試験機（定格容量 1000 kN）にセットした。

まず、馴染みを取るため 10 kN の荷重を載荷した。異常がないことを確認した上で、試験体に衝撃を与えないように、一様な速度で 20 kN ずつ、最大荷重 140 kN まで載荷した。その後、同様の方

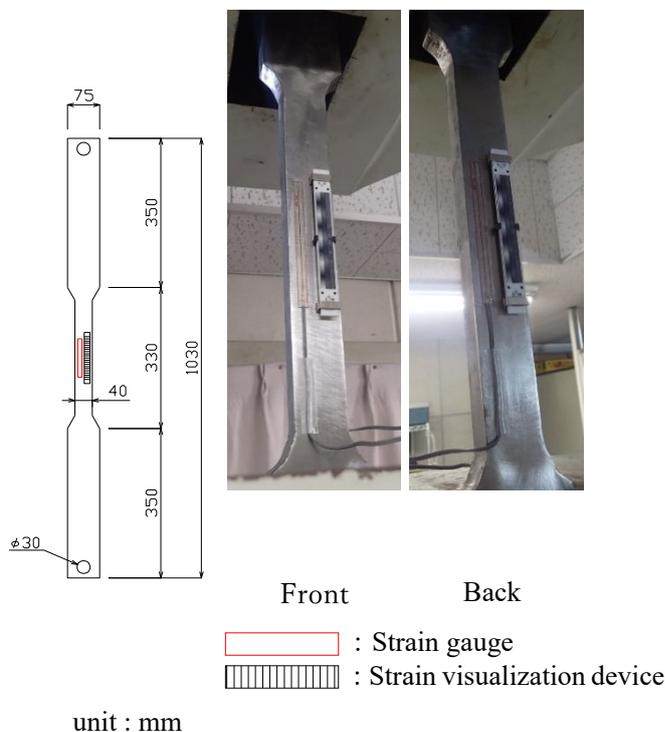


Fig. 4.5 Test Piece for Tensile Test



Fig. 4.6 Universal testing machine



OLYMPUS STYLUS TG-3 Tough

Fig. 4.7 Digital camera

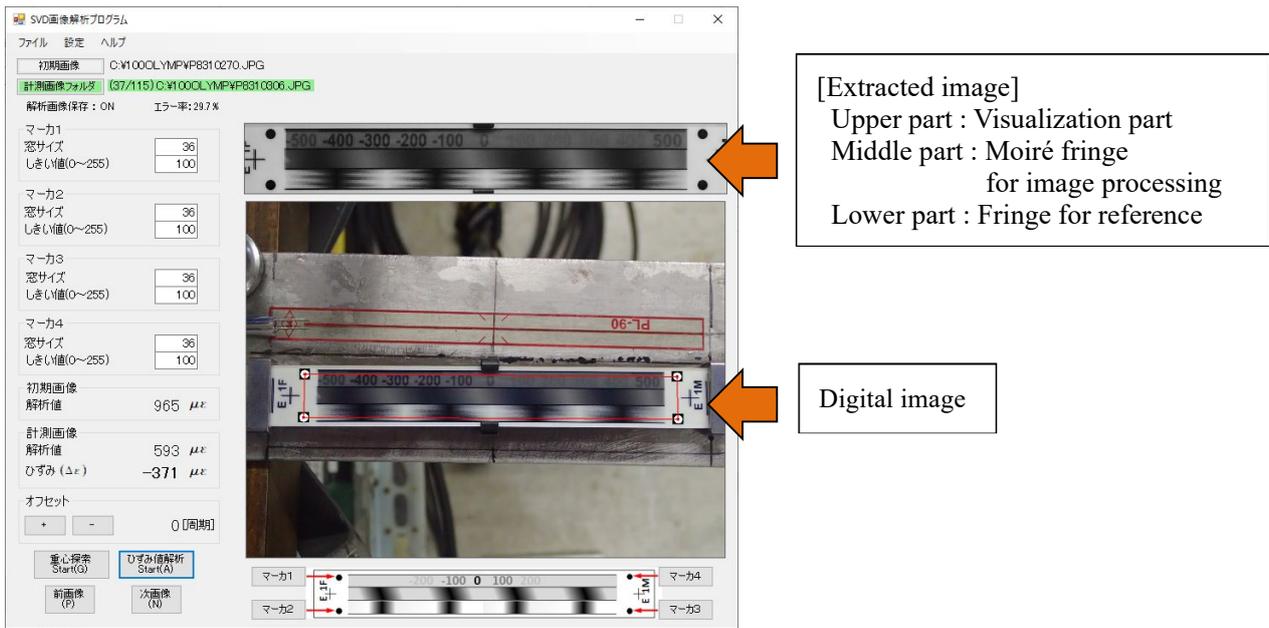


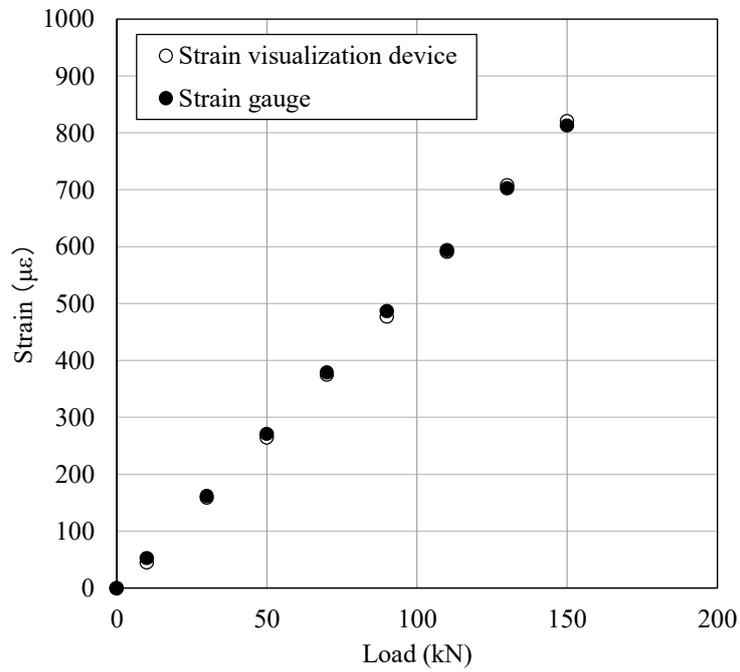
Fig. 4.8 Strain calculation application

法で除荷した。20 kN 毎に荷重を保った状態で、Fig. 4.7 に示す OLYMPUS 社製のデジタルカメラ (STYLUS TG-3 Tough) にて、試験体両面のひずみ可視化デバイスを撮影した。また、その時のひずみゲージの値を記録した。画像処理によるひずみ値の算出は、Fig. 4.8 に示すひずみ算出アプリケーションを用いて行った。ひずみ算出アプリケーションは、誰でも簡単にひずみを算出できるように作成しており、実際の操作は、ひずみ可視化デバイスのデジタル画像ファイルを読み込み、デジタル画像に写る 4 隅の黒丸を指定する順番に選択したのち、解析ボタンをクリックするだけである。

4.3.2 検証結果

Fig. 4.9-(a)に載荷時の、Fig. 4.9-(b)に除荷時の荷重とひずみの関係を示す。ひずみゲージ、ひずみ可視化デバイスともに試験体両面のひずみを平均し、軸ひずみを示している。載荷時、除荷時共に、ひずみ可視化デバイスの値は、ひずみゲージの値と非常によく一致した。ひずみゲージとの差は、載荷時で $-8 \mu\epsilon \sim 10 \mu\epsilon$ 、除荷時で $-12 \mu\epsilon \sim 8 \mu\epsilon$ であった。以上の結果より、実構造物での適用を想定したこの比較検証においても、目標精度 $\pm 20 \mu\epsilon$ 以下を満足することが検証できた。

(a) Loading



(b) Unloading

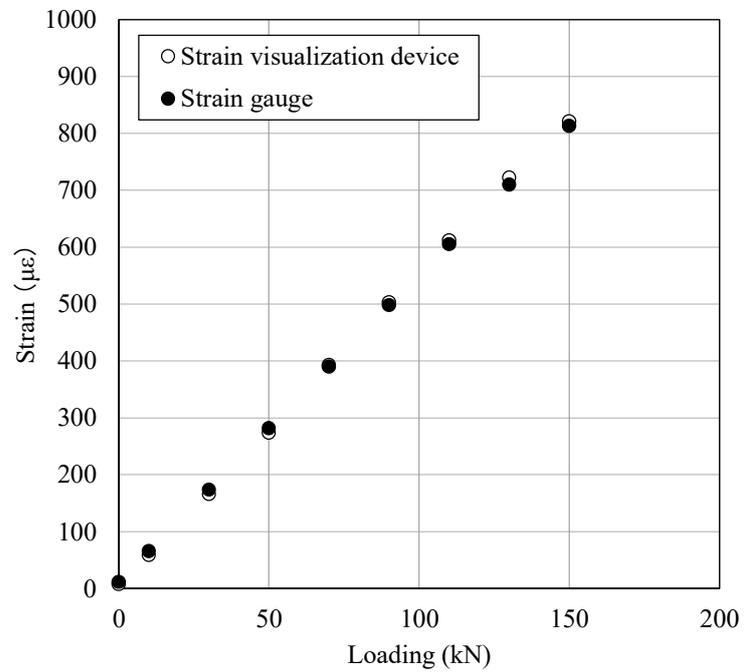


Fig. 4.9 Relationship between loading and strain

4.4 本章のまとめ

第3章で実現した自己温度補償型のひずみ可視化デバイスに対し、デジタル画像処理によるひずみの計測精度 $\pm 20 \mu\epsilon$ 、目視によるひずみ計測精度 $\pm 50 \mu\epsilon$ を目標精度とし、変位ステージによる精度検証を行うとともに、構造部材への適用を想定して、鋼製の試験体にひずみ可視化デバイスを設置して、引張試験による従来型のひずみゲージとの比較検証を実施した。

まず、画像処理によりひずみを算出する方法では、ひずみ可視化デバイスの計測範囲である $-500 \mu\epsilon \sim +500 \mu\epsilon$ の間を、サブミクロンフィードバックステージを用いて $20 \mu\epsilon$ ずつ変化させ、 $20 \mu\epsilon$ 毎にUSB2.0カメラでデジタル画像を取得し、画像処理によりひずみを算出した。サブミクロンフィードバックステージで発生させたひずみに対し、ひずみ可視化デバイスは $-12 \mu\epsilon \sim +2 \mu\epsilon$ の精度で計測でき、目標精度 $\pm 20 \mu\epsilon$ を満足することを検証した。目視による計測方法では、サブミクロンフィードバックステージを用いて $100 \mu\epsilon$ ずつ変化させ、同様にUSB2.0カメラで $100 \mu\epsilon$ 毎にデジタル画像を取得し、可視化部分の文字を読み取った。その結果、目標精度 $\pm 50 \mu\epsilon$ を満足することが検証できた。

次に、実構造物での適用を想定し、鋼製の試験体にひずみ可視化デバイスを設置し、万能試験機を用いて、試験体の引張試験を実施し、従来型のひずみゲージと比較検証した。計測方法は、一般的なデジタルカメラでデジタル画像を取得し、ひずみ算出アプリケーションにてひずみを算出する方法とした。試験の結果、ひずみゲージとの差は目標精度 $\pm 20 \mu\epsilon$ 以下を満足し、構造部材にも適用できることが検証できた。よって、ひずみ可視化デバイスは、実構造物の維持管理に適用できる計測精度を有することが実証できた。

第5章 撮影角度がひずみ算出精度に与える影響

5.1 概説

ひずみ可視化デバイスの計測方法は、目視による読み取りおよびデジタルカメラで撮影し、画像処理にてひずみを算出する方法がある。ひずみ可視化デバイスをデジタルカメラで撮影し、画像処理にてひずみを算出する場合、精度の高いひずみ値を得るためには、定点かつ同条件で撮影することが求められる。しかしながら、Fig. 5.1 に示すように、実構造物に適用したひずみ可視化デバイスをデジタルカメラで撮影する場合、定点かつ同条件で撮影することは簡単ではない。そのため、ひずみ可視化デバイスを実構造物へ適用する上で、撮影角度とひずみ算出精度の関係を明らかにしておく必要がある。したがって、本章では、撮影角度がひずみ算出精度に影響を与えてしまう原因を示し、対策を行った上で、実験により、ひずみ可視化デバイスの撮影角度とひずみ算出精度の関係を明らかにする。

5.2 撮影角度がひずみ算出精度に与える影響と対策

直線格子 1 が生成されたフロントプレートと直線格子 2 が生成されたリアプレートとの間に隙間 d が存在する場合、Fig. 5.2 のように異なる方向から撮影すると、実変位 Δx に伴うモアレ縞の移動量が

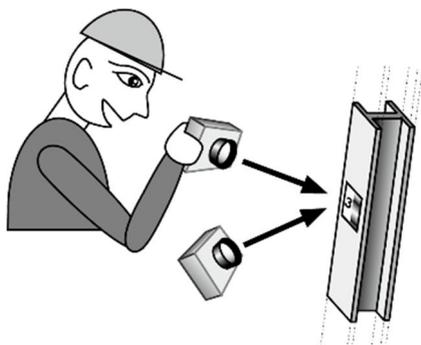


Fig. 5.1 Shooting image with a digital camera on site

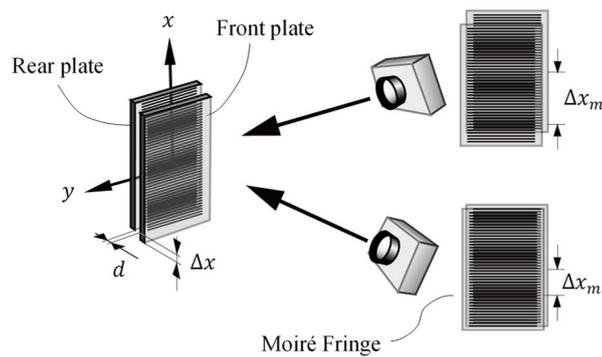


Fig. 5.2 Difference in the amount of moiré fringes movement depending on the shooting angle

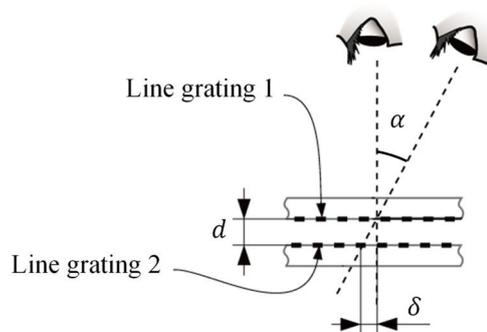


Fig. 5.3 Difference in overlapping linear grids due to parallax

Δx_m が異なって見える。これは、Fig. 5.3 に示すように、視差の影響により 2 枚のプレートに生成された直線格子の重なり見え方に違いが生じるためである。角度 α の方向から観察すると、直線格子 2 は δ だけずれて重なりが観察される。このとき、 δ は次のように表される。

$$\delta = d \tan \alpha \quad (5.1)$$

その結果、デジタル画像解析におけるひずみの誤差 ε_{error} は、

$$\varepsilon_{error} = \frac{d \tan \alpha}{L} \quad (5.2)$$

として算出される。先で述べたように 2 つのプレートの間に隙間 d が生じると、画像解析時にひず

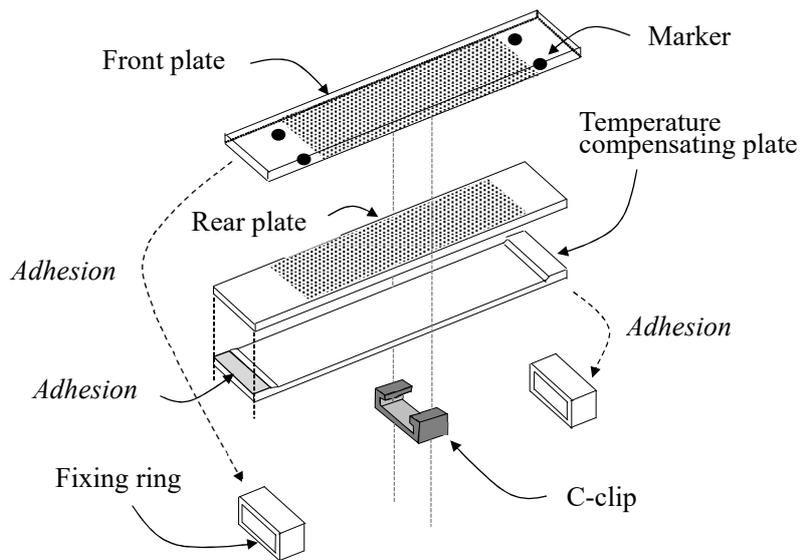


Fig. 5.4 Structure of strain visualization device

み算出誤差が生じる。したがって、2つのプレートは接触し、隙間 d が 0 となることが好ましい。そこで、Fig. 5.4 に示すように C 留具を用いて2つのプレートをそれぞれ押しえつける方向に力が加わるようにし、常に接触が保たれるようにした。

しかしながら、第2章で示したように、自然環境下 10 年相当以上の耐候性、耐腐食性を確保するために、フロントプレートおよびリアプレートの重なる部分には、ガラスコーティングおよびフッ素コーティングを施していること、格子を形成しているクロムの薄膜に厚みおよび表面の粗さが影響して、隙間 d を 0 にすることはできない。

したがって、ひずみ可視化デバイスの撮影角度とひずみ算出精度の関係を明らかにするため実験を行った。

5.3 撮影角度とひずみ算出精度

5.3.1 試験装置

試験装置を Fig. 5.5 に示す。試験装置は、カメラ取付治具と回転プレートから構成される。カメラ取付治具は、被写体との撮影距離を調整できるようスライド式とし、回転プレートは、底部の目盛

り版で角度を読取れる構造とした。また、 y 軸回りに撮影角度を変える場合は、Fig. 5.6-(a)に示すように、 x 軸回りに撮影角度を変える場合は Fig. 5.6-(b)に示すように、回転プレートにひずみ可視化デバイスを設置した。なお、撮影に使用したデジタルカメラは、Fig. 4.7 で示した OLYMPUS 社製のデジタルカメラである。

5.3.2 試験方法

試験は、回転プレートを各軸回り -50° ~ 50° 範囲を 10° ピッチで回転させることで撮影角度を変更し、各角度で画像を撮影・画像処理によるひずみの算出を行った。この試験を 10 回繰り返し、デジタルカメラに正対した撮影角度(0°)に対する各角度のひずみ算出結果の差を求め、誤差とした。ひずみの算出はひずみ算出アプリケーションにて実施し、10 個のデータのうち最大と最小の値を外れ値とし

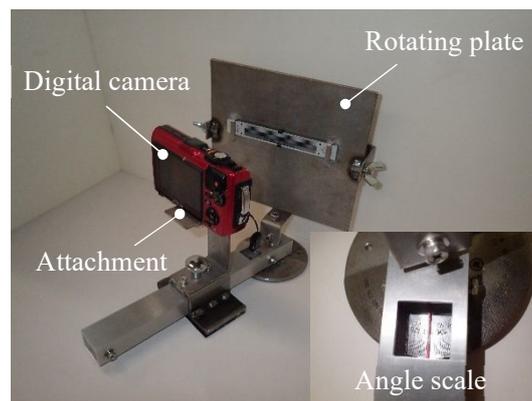


Fig. 5.5 Experimental device

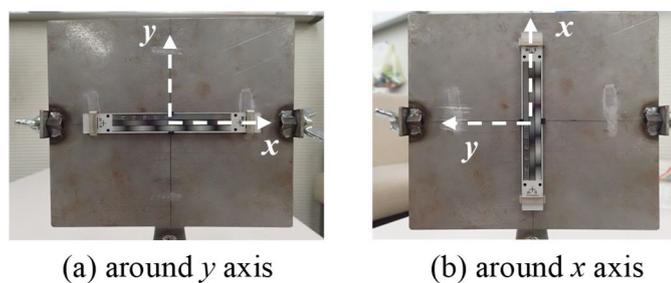


Fig. 5.6 Installation direction of strain visualization device

て残りの 8 点の平均値を求めた。撮影条件は、撮影距離 16.5 cm, 画素数 1920 px×1440 px, 焦点距離 8 mm とし, フラッシュ無しで撮影した。

5.3.3 撮影角度とひずみ算出精度

Fig. 5.7 に試験結果を示す。図中のエラーバーは、標準偏差を示している。

y 軸回りに撮影角度を変えた場合 (Fig. 5.7-(a)), 撮影角度 $\pm 10^\circ$ の範囲におけるひずみ算出誤差は $\pm 10 \mu\epsilon$ 未満であったが, 撮影角度が $\pm 20^\circ$ 以上になると $\pm 20 \sim 30 \mu\epsilon$ のひずみ算出誤差が認められた。ひずみ算出結果の標準偏差は, 撮影角度 $\pm 10^\circ$ の範囲で $3 \sim 5 \mu\epsilon$, 撮影角度 $\pm 20^\circ$ 以上で $1 \sim 6 \mu\epsilon$ と撮影角度による大きな差異は認められなかった。

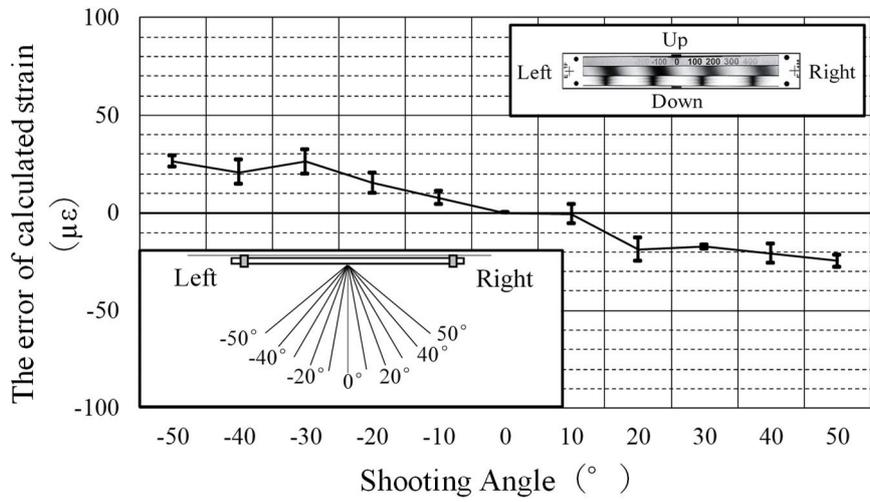
試験結果を Eq.(5.2)の \tan 曲線で近似して, フロントプレートとリアプレートの隙間を算出すると $2.7 \mu\text{m}$ と求められた。製造上の仕様では, 各プレートの格子を形成するクロムの厚みが $0.20 \mu\text{m}$, そのコーティングの膜厚が $0.07 \mu\text{m}$ であるため, 表面の粗さによって約 $2 \mu\text{m}$ 相当の隙間 d があることが分かった。

次に, x 軸回りに撮影角度を変えた場合 (Fig. 5.7-(b)) では, 撮影角度に依らず, ひずみ算出誤差は $\pm 10 \mu\epsilon$ 未満であった。この結果は, x 軸回りに撮影角度を変えても視差の影響がないことを示している。一方で, ひずみ算出結果の標準偏差は, 撮影角度が $\pm 30^\circ$ の範囲では $2 \sim 4 \mu\epsilon$ であるが, $\pm 40^\circ$ を超えると $6 \sim 9 \mu\epsilon$ と大きくなった。

試験結果より, 撮影角度とひずみ算出誤差の関係が明らかとなり, y 軸回りの撮影角度を $\pm 10^\circ$ の範囲, x 軸回りの撮影角度を $\pm 30^\circ$ の範囲とすることで, ひずみ算出精度は, ひずみ可視化デバイスの目標精度 $20 \mu\epsilon$ 以下を満足することが検証された。

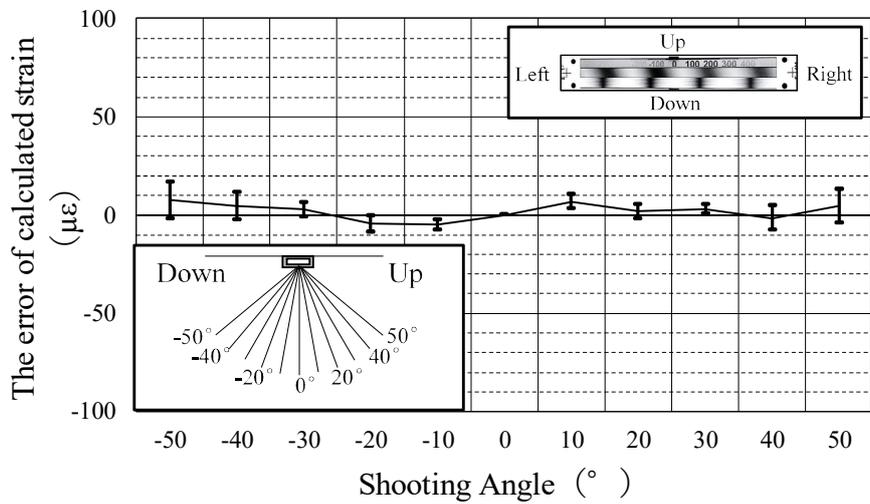
5.4 本章のまとめ

本章では, ひずみ可視化デバイスを実構造物に適用してデジタルカメラで撮影する場合を考え, 定点かつ同条件で撮影できない場合に撮影角度がひずみ算出精度に影響を与える原因を示すとともに, 対策を行った。その上で, 実験により, ひずみ可視化デバイスの撮影角度とひずみ算出精度の



*Error bar: Standard deviation

(a) Shooting angle around y axis and strain calculation accuracy



*Error bar: Standard deviation

(b) Shooting angle around x axis and strain calculation accuracy

Fig. 5.7 The relationship between the shooting angle and strain measurement accuracy

関係を明らかにした。

異なる方向から撮影すると、実変位 Δx に伴うモアレ縞の移動量 Δx_m が異なって見える。この原因は、視差の影響により、ひずみ可視化デバイスのフロントプレートとリアプレートの間隙があると、2枚のプレートに生成された直線格子の重なり見え方に違いが生じることを示した。その対策として、C留具を用いて2つのプレートをそれぞれ押さえつける方向に力が加わるようにし、常に接触が保たれるようにした。

C留具を用いても、フロントプレートとリアプレートには、ガラスコーティングおよびフッ素コーティングを施していること、格子を形成しているクロムの薄膜に厚みおよび表面の粗さが影響して2つのプレートの間隙を0にすることはできないことから、実験により、ひずみ可視化デバイスの撮影角度とひずみ算出精度の関係を検証した。その結果、撮影角度とひずみ算出精度の関係が明らかとなり、 y 軸回りの撮影角度を $\pm 10^\circ$ の範囲、 x 軸回りの撮影角度を $\pm 30^\circ$ の範囲とすることで、ひずみ可視化デバイスの目標精度 $20 \mu\epsilon$ 以下を満足することが検証された。

よって、実構造物にひずみ可視化デバイスを適用しデジタルカメラで撮影する場合、本章で明らかとなった撮影角度に留意して撮影すれば、計測精度が確保できることが明らかとなった。

第6章 曲げ変形を受ける部材のひずみ計測

6.1 概説

計測対象となる社会インフラの構造部材は、軸力部材としてだけでなく、曲げ部材としても広く使用されている。そのため、構造部材のひずみを計測するセンサは、曲げ変形を受ける部材に対しても精度よく計測できる必要があり、曲げ変形を受ける部材に対するひずみ可視化デバイスの適用性を確認しておく必要がある。Fig. 6.1 に示すように、従来のひずみゲージは、部材表面に貼り付けるため、部材に曲げ変形が生じた場合でも、部材表面に発生するひずみを正確に計測することができる。一方で、ひずみ可視化デバイスを部材に設置して計測する場合、ひずみの検出位置が部材表面から離れた位置になるため、部材が曲げ変形を受けた時、部材表面に発生するひずみを大きく評価してしまう。そこで、本章では、ひずみ可視化デバイスを曲げ変形を受ける部材のひずみ計測に適用する場合の補正方法を示し、室内実験においてその妥当性を検証する。

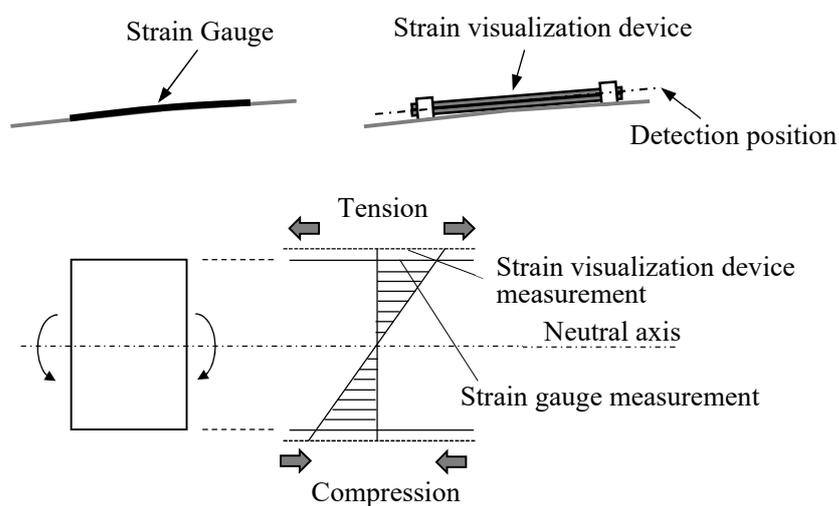


Fig. 6.1 Difference between strain gauge and strain visualization device measurements

6.2 曲げ変形を受ける部材の計測位置の曲率

部材が曲げ変形を受ける場合の曲がり具合を曲率で示す。部材が曲げ変形を受ける場合、どの程度の曲率が発生し得るのか、代表的な構造部材である SS400 の H 形鋼を例に求めてみる。計算条件を Fig. 6.2, Table 6.1, Table 6.2 に示す。構造形式は、最もシンプルな片持ち梁（長さ $l=5.0$ m）・先端荷重とし、最大応力が発生する梁固定端部を計測位置とした。Fig. 6.2 に示すように、計測位置にひずみ可視化デバイスを設置すると仮定し、部材固定端部に鋼材の許容応力相当の 140 N/mm² が発生するときのひずみ可視化デバイス設置箇所の曲率を求めた。曲率は、上記条件で部材が変形した際の、梁固定端部から 0 mm, 105 mm の位置（ひずみ可視化デバイスの両固定リング部）およびひずみ可視化デバイスの中央のたわみ δ_x を Eq. (6.1) で算出し[44]、この 3 点を通る円の曲率とした。

ここで、 P は先端荷重、 E は部材の弾性係数、 I は部材の断面 2 次モーメント、 x は先端から測定点までの距離である。

$$\delta_x = \frac{Pl^3}{3EI} \left(1 - \frac{3x}{2l} + \frac{x^3}{2l^3} \right) \quad (6.1)$$

Fig. 6.3 に各サイズの H 形鋼の曲げ剛性と計測位置の曲率の関係を示す。Fig. 6.3 で分かるように、H 形鋼の曲げ剛性が大きくなると計測位置の曲率は小さくなる。

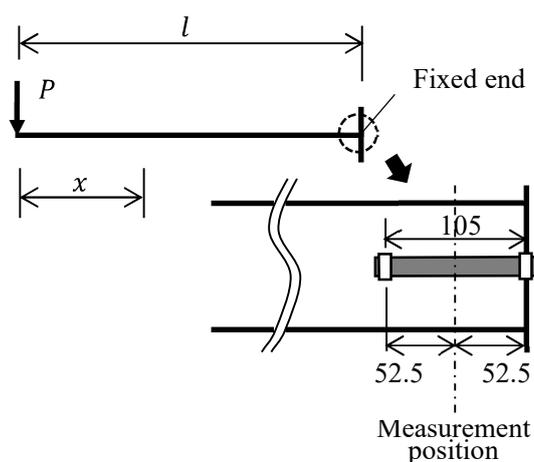


Fig. 6.2 Calculation condition

Table 6.1 Calculation condition

Structure	Cantilever wing beam
Length of girder l	5 m
Loading condition	Tip load P that generates long-term allowable stress 140 N/mm ² at the measurement position
Structured member	H-steel (SS400) H100, H150, H200, H250, H300, H350, H400

Table 6.2 Cross-sectional specifications of H- steel

Member	Elastic modulus	Section of modulus	Cross-sectional secondary moment
	E(N/mm ²)	Z(cm ³)	I(cm ⁴)
H100	200000	75.6	378
H150	200000	216	1620
H200	200000	472	4720
H250	200000	880	10700
H300	200000	1350	20200
H350	200000	2280	39800
H400	200000	3330	66600

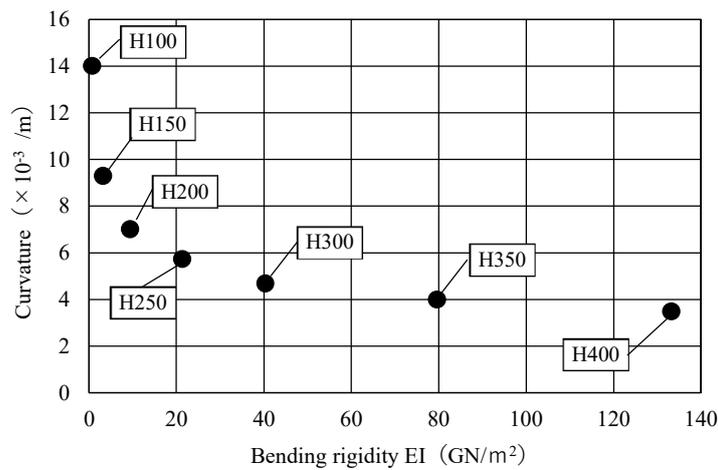


Fig. 6.3 Relationship between flexural rigidity and curvature on the measurement point

6.3 補正係数

曲げ変形を受ける部材のひずみ計測において、ひずみ可視化デバイスを適用する場合の補正方法について考える。ひずみ可視化デバイスを構造部材に設置した場合の、部材の中立軸とひずみ可視化デバイスのひずみ検出位置の関係を Fig. 6.4 に示す。Fig. 6.1 で示したように、曲げ変形を受ける部材のひずみの大きさは中立軸からの距離に比例する。したがって、ひずみ可視化デバイスの計測値は、ひずみ検出位置が部材表面よりも中立軸からの距離が離れている分だけ大きく出力される。ひずみ可視化デバイスの出力を部材表面のひずみに換算するため、ひずみ可視化デバイスの出力値に中立軸からの距離の比率 R （以後、補正係数という）を乗じて補正する必要がある。補正係数 R は、部材の中立軸と表面までの高さを y 、部材表面からひずみ可視化デバイスのひずみ検出位置までの高さを h とすると、Eq. (6.2)で求めることができる。

$$R = \frac{y}{y + h} \quad (6.2)$$

なお、構造部材に軸方向の応力成分が含まれる場合には、その成分を除いた後に補正係数を乗じる必要がある。ひずみ可視化デバイスを構造部材に適用する場合の、中立軸から部材表面までの距離と補正係数の関係を Fig. 6.5 に示す。中立軸から部材表面までの距離が 200 mm 以上になると、補正係数はほぼ 1 となる。

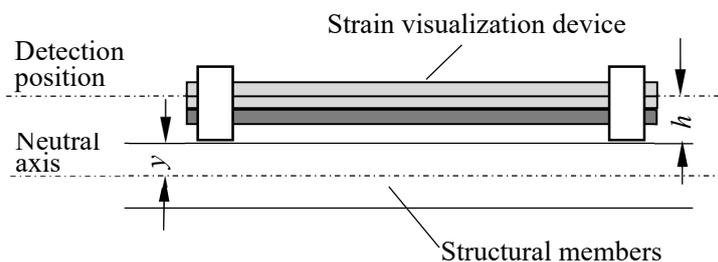


Fig. 6.4 Member neutral axis and detection position of strain visualization device

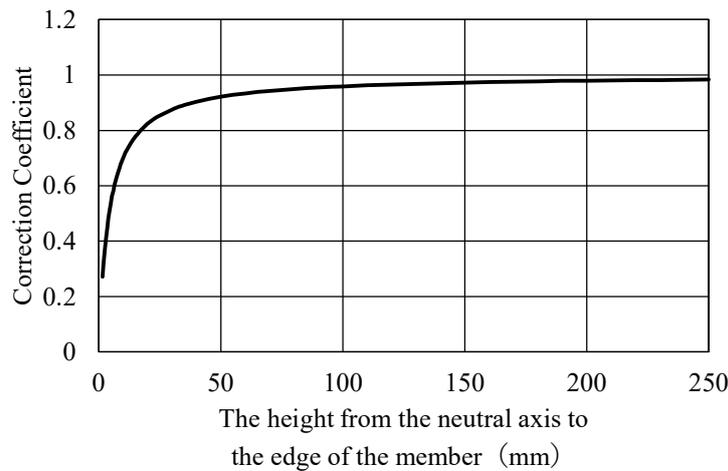


Fig. 6.5 Relationship between the height from the neutral axis to the edge of the member and the correction coefficient

6.4 曲げ変形を受ける部材のひずみ計測実験

6.4.1 実験計画

前節の補正係数の妥当性を実験によって検証する。実験では、曲がり易さを考慮し、構造部材と比べ極端に剛性の小さい、幅 50 mm、厚さ 6.0 mm の鋼製フラットバー (FB) を試験体とする。試験体を片持ち梁状に 450 mm 張り出し、梁固定端部から 100 mm の位置をひずみ計測位置とする。実験の方法は、試験体先端に 0.4 mm ずつ 4 mm まで強制変位を与え、ひずみ計測位置の曲率と生じるひずみおよびひずみ可視化デバイスの出力を得ることとする。実験に先立ち、まず、この条件で事前検討を行った。事前検討におけるひずみ計測位置の曲率は、6.2 節で述べた方法で求めた。また、計算上求まる計測位置のひずみは、強制変位を与えるために必要な先端荷重を求め、先端荷重と载荷位置から求まる計測位置の曲げモーメントを断面係数および弾性係数で除すことで求めた。ひずみ可視化デバイスの出力は、補正係数($R = 3 / (3 + 4.3) = 0.41$)の逆数を乗じて算出した。FB の断面諸元を Table 6.3 に、事前検討結果を Fig. 6.6 に示す。事前検討結果より、中立軸から部材表面までの距離が短い FB では、部材表面に発生するひずみとひずみ可視化デバイスの出力には、大きな差異が生じることが分かる。

Table 6.3 Cross-section specifications of FB

Cross-sectional area	A	300 mm ²
Elastic modulus	E	200000 N/mm ²
Section of modulus	Z	300 mm ³
Cross-sectional secondary moment	I	900 mm ⁴

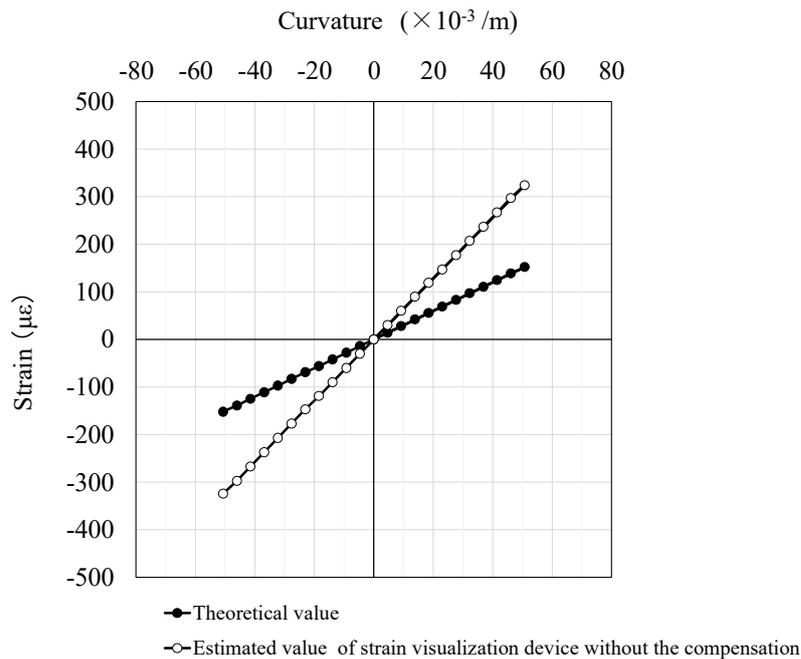


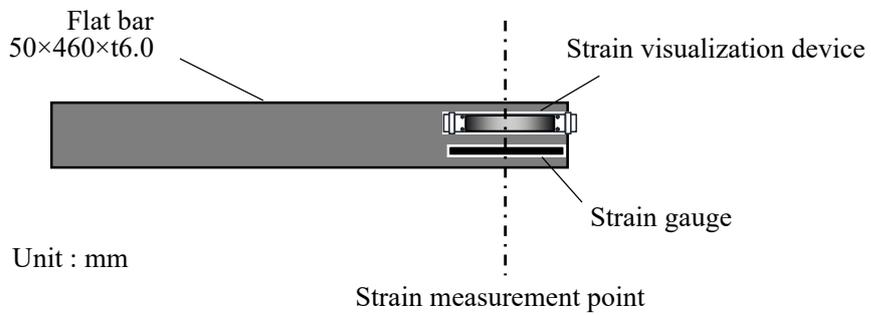
Fig. 6.6 Calculation result

6.4.2 実験装置

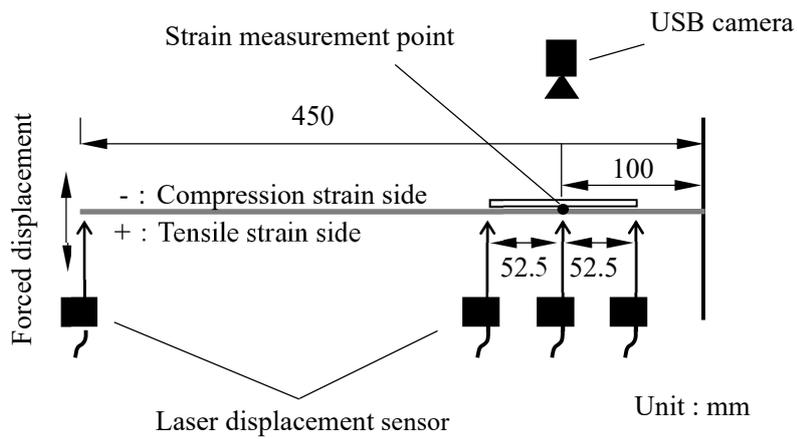
Fig. 6.7 に実験装置の外観を示す。また、Fig. 6.8 に実験装置の詳細を示す。FB の固定端から 100 mm 位置を計測位置とし、ひずみ可視化デバイスおよびゲージ長 90mm のひずみゲージを設置した (Fig. 6.8-(a))。その FB を、張り出し長さ 450 mm となるように実験装置にセットした。ひずみ可視化デバイスの計測用に 200 万画素の USB2.0 カメラを設置し、各位置のたわみを計測し、その後ひずみ計測位置の曲率を求めるために、ひずみ可視化デバイスの両固定リングの位置およびその中央、FB 先端の 4 箇所にキーエンス社製の高精度レーザ変位計を配置した (Fig. 6.8-(b))。高精度レーザ変位計の仕様を Table 6.4 に示す。



Fig. 6.7 Appearance of experimental device



(a) Installation of strain visualization device and strain gauge on the side of a flat bar



(b) Arrangement of measuring instruments (plane figure)

Fig. 6.8 Details of experimental device

Table 6.4 Specifications of laser displacement

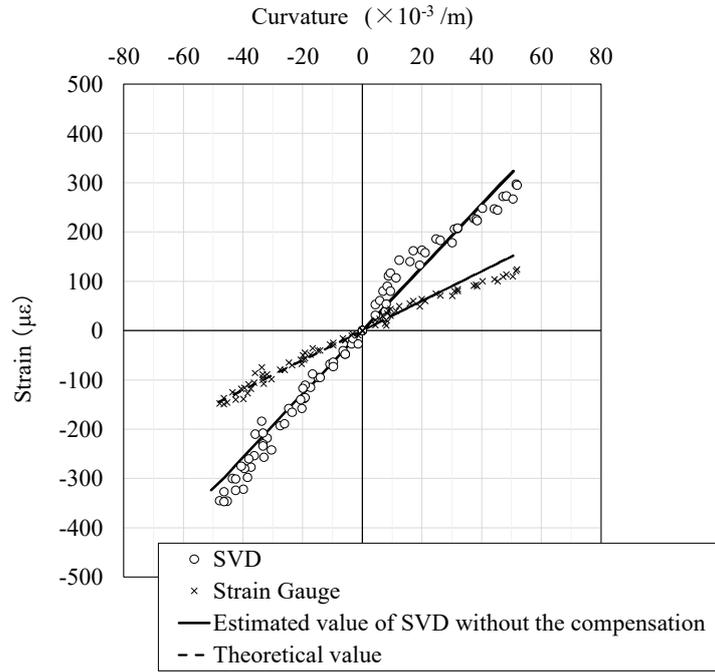
Range	±100 mm
Light source	Red semiconductor laser Wavelength : 655 nm
Non-linearity	±0.05 % of F.S. (F.S.=±100 mm)
Repeat accuracy	2 μm
Sampling cycle	20, 50, 100, 200, 500, 1,000 μs

6.4.3 実験方法

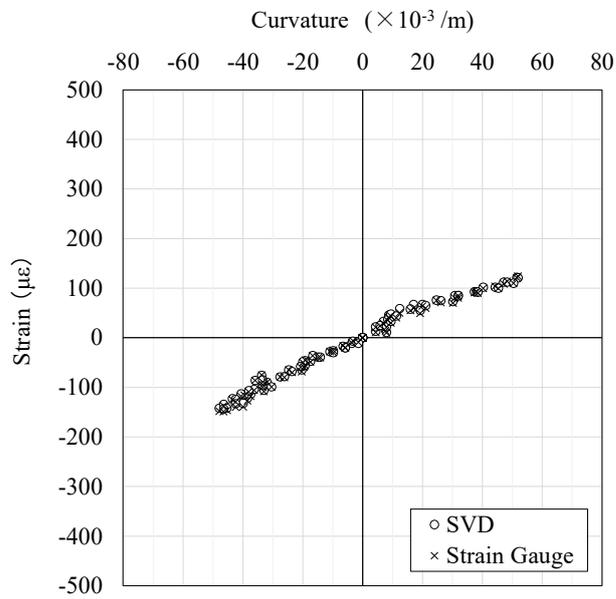
実験は、計測位置に圧縮ひずみ、引張ひずみが発生する各方向に、フラットバーの先端を 0.4 mm ずつ±4 mm まで強制変位を与え、計測位置に曲げ変形を発生させた。計測は、先端変位 0.4 mm 毎に実施した。ひずみ可視化デバイスの計測は USB2.0 カメラで実施し、撮影したデジタル画像からリアルタイム画像解析装置を用いてひずみを算出した。30 フレーム分のひずみ算出結果の平均値をひずみ可視化デバイスの計測結果とした。ひずみゲージおよび高精度レーザ変位計は、それぞれ専用の測定器で計測した。高精度レーザ変位計で計測された、計測位置および計測位置±52.5 mm の位置（ひずみ可視化デバイスの両固定リング）の 3 点の変位計測結果をもとに、この 3 点を通る円の曲率を求めた。

6.4.4 実験結果

計測位置の曲率とひずみの関係を Fig. 6.9-(a)に示し、事前検討結果を併記する。実験の結果、計測位置の曲率とひずみの関係は、事前検討結果と同様の結果が得られた。次に、ひずみ可視化デバイスの出力に対して、補正係数 $R = 0.41$ を乗じた補正後の結果を Fig. 6.9-(b)に示す。ひずみゲージと補正したひずみ可視化デバイスの計測値を比較すると、誤差は±10 με の範囲であり、両者は非常に良く一致している。実構造部材の例として挙げた H 形鋼に生じうる曲率の $3.5 \times 10^{-3} \sim 14 \times 10^{-3}/\text{m}$ の範囲において、誤差は±5 με 未満であった。これらの実験結果から、補正を適用することで、ひずみ可視化デバイスが、曲げ変形を伴う部材のひずみ計測に適用できることが検証された。



(a) Strain visualization device (SVD) without the compensation



(b) Strain visualization device (SVD) with the compensation

Fig. 6.9 Relationship between curvature and strain at the measurement position

6.5 本章のまとめ

本章では、曲げ変形を受ける部材のひずみ計測にひずみ可視化デバイスを適用する場合の補正係数の算出方法を示し、実験でその妥当性を示した。

まず、代表的な構造部材である H 形鋼を例に、曲げ変形によって生じ得る曲率を求めた。次に、構造部材にひずみ可視化デバイスを適用する場合の補正係数の算出方法を示し、中立軸から部材表面までの距離と補正係数の関係を示した。

算出した補正係数の妥当性を検証するため、構造部材と比べ極端に剛性の小さい鋼製フラットバー (FB) を試験体として、FB に曲げ変形を与えて、ひずみ可視化デバイスとひずみゲージで部材表面のひずみを計測する実験を行った。曲げ変形の大きさについては、先に算出した構造部材に生じ得る曲率を踏まえて設定した。補正前の実験結果は、事前に計算した部材表面のひずみおよびひずみ可視化デバイスの想定値と一致し、ひずみゲージの計測値に対し、ひずみ可視化デバイスの計測値が非常に大きくなった。補正係数を適用した補正後の実験結果は、ひずみゲージの計測値とひずみ可視化デバイスの計測値は一致し、補正係数の妥当性を検証できた。

このように、補正係数を適用することにより、曲げ変形を受ける剛性の小さい部材のひずみ計測に対しても、ひずみ可視化デバイスが適用できることを検証でき、実構造物への適用性を示すことができた。

第7章 実構造物への適用

7.1 概説

これまで、ひずみ可視化デバイスを実構造物の維持管理に適用すべく、温度の影響を受けない自己温度補償型ひずみ可視化デバイスを開発した。また、計測精度の検証を行い、計測精度を確保できる撮影角度を明らかにし、曲げ変形を受ける部材に対する適用性を検証してきた。しかしながら、ひずみ可視化デバイスが本当に実構造物に適用できるかは、実際に実構造物に適用してみなければわからない。ただ、実構造物にひずみ可視化デバイスを設置するだけでは、荷重が変わらない限りひずみは発生しないため、適用性の実証は難しい。つまり、実構造物に対する適用性を短期間で実証することができない。そこで、実構造物の載荷試験におけるひずみ計測にひずみ可視化デバイスを適用し、従来型のひずみゲージと比較することにより、実構造物への適用性を実証する。本章では、4つの実構造物の載荷試験にひずみ可視化デバイスを適用し、その適用性を検証する。あわせて、実構造物に適用する際のひずみ可視化デバイスの設置手順を示す。最後に、地下トンネルの維持管理に試験適用した事例を示す。

7.2 コンクリート橋（RC）の載荷試験への適用

7.2.1 コンクリート橋の概要

コンクリート橋は、長崎県内の国道に架かるRC（鉄筋コンクリート）構造のT桁橋である。単径間の橋梁で、径間の長さは約8mである。1954年にG2～G6が架設され、1959年にG1、G7が増設された現在7主桁で構成される。架設後、約60年が経過し、撤去が予定されている橋梁である。Fig. 7.1に外観を、Fig. 7.2に概略の構造寸法図を示す。

7.2.2 ひずみ可視化デバイスの設置

Fig. 7.3に示すように、設置位置をG4桁およびG7桁の中央とした。設置箇所は、桁下面とし、橋



Fig. 7.1 Appearance of RCT girder bridge

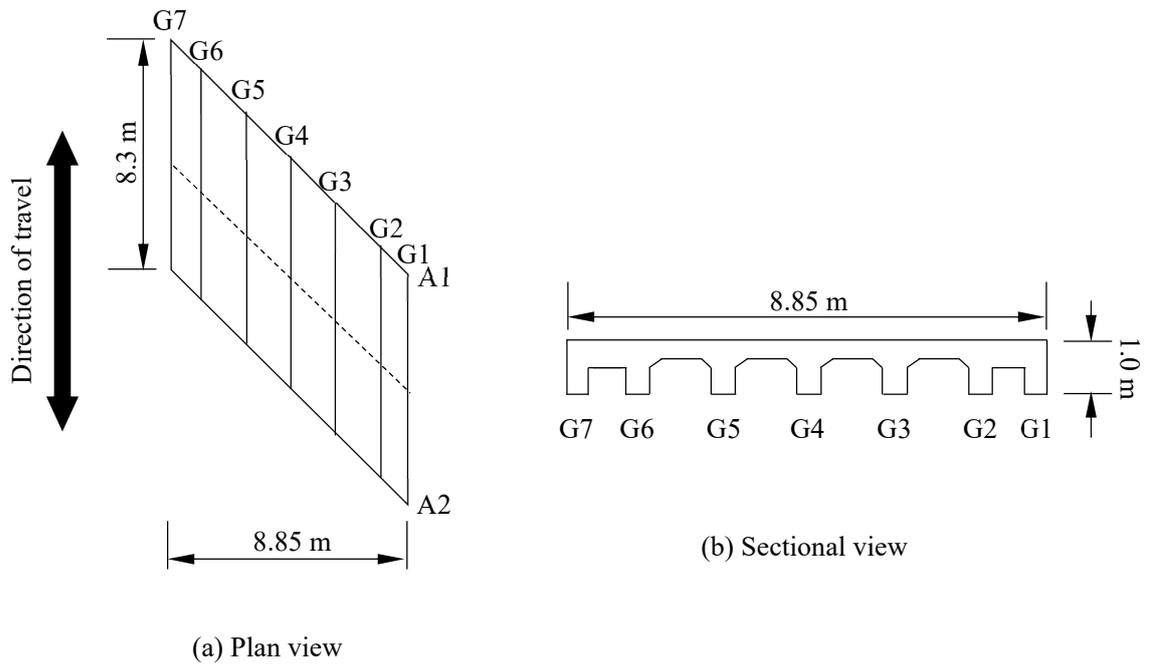


Fig. 7.2 Schematic structural dimensions



Fig. 7.3 Installation of strain visualization devices

軸方向に設置した。あわせて、比較対象用に、設置箇所に隣接してひずみゲージを設置した。なお、ひずみゲージは、コンクリートの被り部分をはつり、鉄筋に設置した。

ひずみ可視化デバイスの設置手順は、以下の通りである。

- (1) ひずみ可視化デバイスの設置箇所をベルトサンダー等により研磨し、アセトン等で研磨箇所を清掃する (Fig. 7.4)。

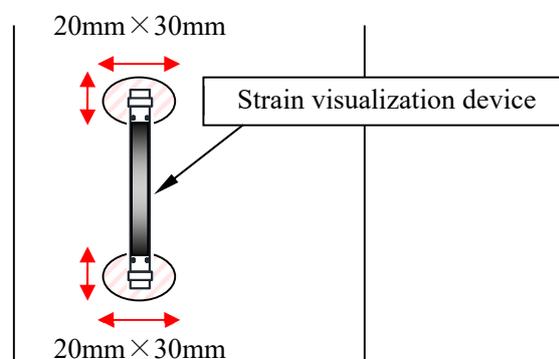


Fig. 7.4 Polishing the installation position

(2) 専用の取付治具に、取付コマ (Mounting pieces) をセットする。このとき、2つの溝がある方を上にする (Fig. 7.5)。なお、専用の取付治具は、ひずみ可視化デバイスの標点間距離 L が 105 mm となるように製作した治具である。

(3) 取付コマに接着剤をながす

取付コマの2つの溝に瞬間接着剤 (推奨: アロンアルファ EXTRA ゼリー状) を適量ながす (Fig. 7.6)。

(4) 研磨・清掃したひずみ可視化デバイス設置箇所を取付コマを設置する (Fig. 7.7)。

取付コマがセットされた取付治具を設置対象に押し当て、1分程度押さえて取り外す (Fig. 7.8)。

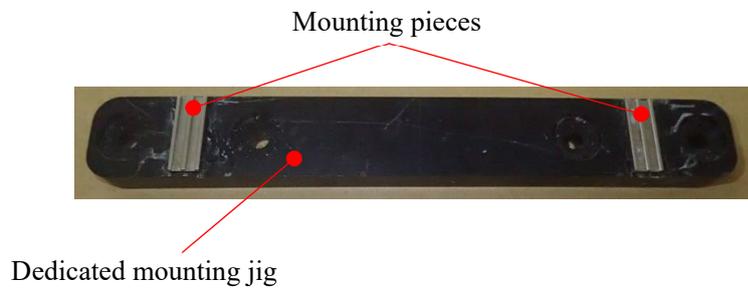


Fig. 7.5 Setting mounting pieces

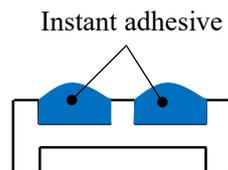


Fig. 7.6 Cross section of mounting pieces

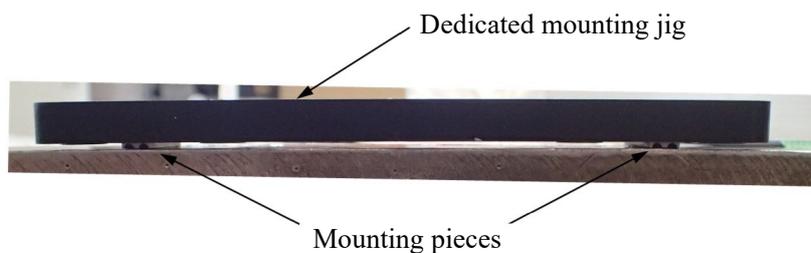


Fig. 7.7 Fixing of mounting pieces



Fig. 7.8 Completed fixing of mounting pieces

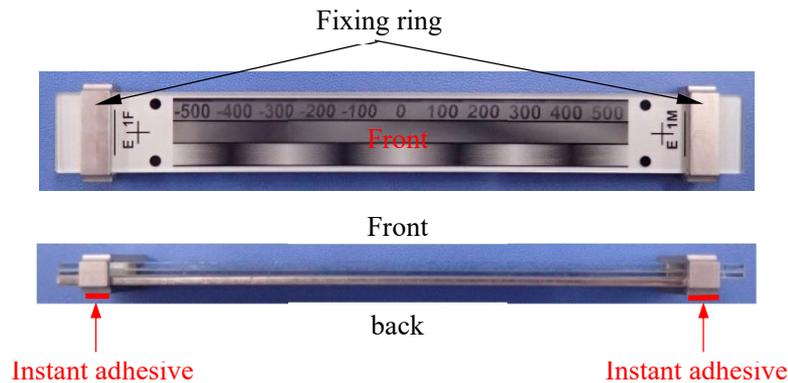


Fig. 7.9 Applying instant adhesive to strain visualization devices



Fig. 7.10 Installation completion of strain visualization device

(5) ひずみ可視化デバイスの設置

- ① ひずみ可視化デバイスの拘束バンド裏面に、瞬間接着剤（アロンアルファ EXTRA ゼリー状）を薄層に塗る（Fig. 7.9）。この際、瞬間接着剤の塗布量が多いと、取付コマに接着した際に拘束バンド両側面に接着剤が回ってしまうので注意する。
- ② 設置対象に設置された取付コマに拘束バンドをはめ込んで、1分程度押さえ、ひずみ可視化デバイスを固定する。この際、ひずみ可視化デバイスの数値部分（最上段）の0の付近が最も濃くなるように微調整して固定する（Fig. 7.10）。

7.2.3 計測方法

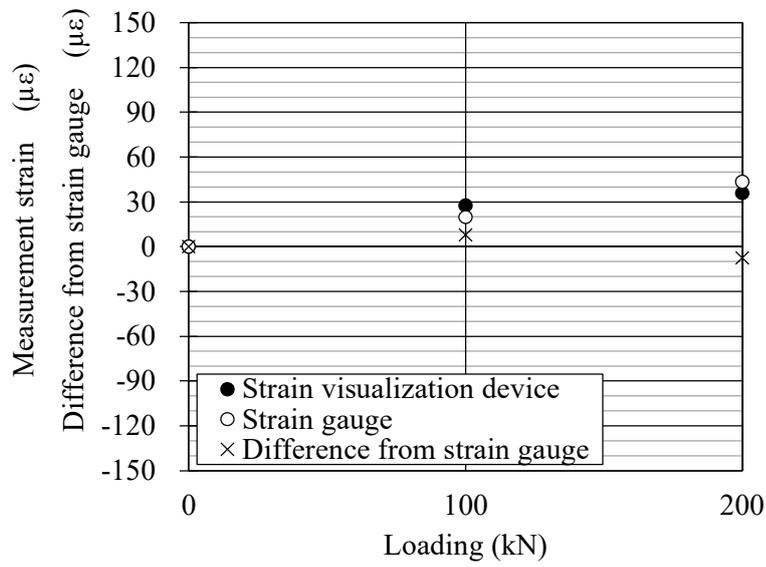
Fig. 7.3 に示すひずみ可視化デバイス設置位置直上の橋面に、100 kN および 200 kN 載荷した時のひずみを計測した。載荷は、100 kN/個のコンクリートブロックを1個または2個を載荷位置にセットすることで行った。計測は、一般的なデジタルカメラ（STYLUS TG-3 : OLYMPUS）を用いた。第2章で述べた画像処理を確実にできる画像が1枚あれば十分な精度でひずみを計測できるが、現場で効率よく画像を取得するためにデジタルカメラを手持ちで撮影することを考えると、手振れやピンボケなど的人為的なミスが生じる可能性がある。本計測もデジタルカメラを手持ちで撮影したため、人為的なミスを回避するために5枚ずつ撮影した。撮影条件は、撮影距離約15 cm、解像度1920 px×1080 px、焦点距離7 mm、フラッシュ無しとし、視差によるひずみ算出誤差をできるだけ小さくするため、橋軸方向の撮影角度が $\pm 10^\circ$ 以内、橋軸直角方向の撮影角度が $\pm 30^\circ$ 以内となるように留意して撮影した。ひずみ算出アプリケーションを用いて、撮影したデジタル画像からひずみを算出し、平均値を求めた。

7.2.4 計測結果

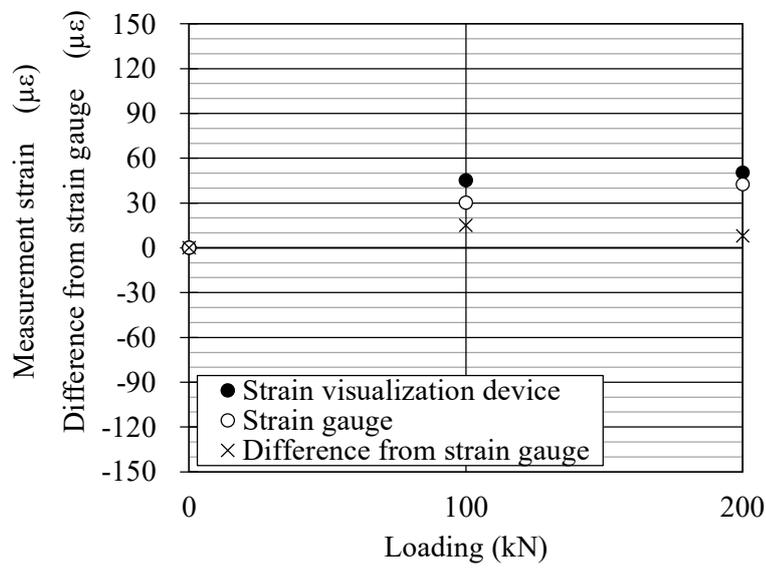
測点 G4 の計測結果を Fig. 7.11-(a)に、測点 G7 の計測結果を Fig. 7.11-(b)にそれぞれ示す。また、隣接の鉄筋に設置されたひずみゲージの計測結果を併記する。ひずみ可視化デバイスとひずみゲージとの差は、測点 G4 で $\pm 8 \mu \varepsilon$ 、測点 G7 で $8 \sim 15 \mu \varepsilon$ の範囲となり、目標精度 $\leq \pm 20 \mu \varepsilon$ を満足する結果が得られた。

次に、撮影画像から目視で読み取ったひずみの計測結果を Table 7.1 に示す。ひずみゲージの計測結果に対して、概ね $\pm 50 \mu \varepsilon$ の誤差の範囲内で計測できており、目標精度 $\leq \pm 50 \mu \varepsilon$ を満足した。

以上の計測結果から、ひずみ可視化デバイスによって、概略のひずみを目視で確認できるとともに、ひずみ可視化デバイスを一般的なデジタルカメラで撮影するだけで簡単にひずみを測定できることが確認でき、実構造物のひずみ計測へのひずみ可視化デバイスの適用性が実証された。



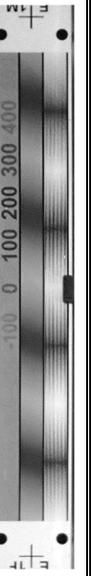
(a) G4 measurement result



(b) G7 measurement result

Fig. 7.11 Measurement results and difference from strain gauge

Table 7.1 Visual measurement results

+:Tension -:Compression		Strain visualization device				Strain gauge	
Measurement point	Loading	Visually		Image processing Strain($\mu\epsilon$)	Strain gauge Strain($\mu\epsilon$)		
		Image	Reading				
G4	0 kN		200	0	0		
	100 kN		250	50	11		
	200 kN		300	100	27		
G7	0 kN		100	0	0		
	100 kN		150	50	43		
	200 kN		200	100	50		

7.3 コンクリート橋（PC）の載荷試験への適用

7.3.1 コンクリート橋の概要

コンクリート橋は、鹿児島県内に架かる PC（プレストレスト・コンクリート）構造の T 桁橋である。3 径間ポストテンション方式の橋梁で、径間の長さは 30～40 m である。1975 年に架設された 5 主桁で構成される。架設後、約 46 年が経過し、アルカリ骨材反応によるひび割れが主桁の橋軸方向に多数発生している。Fig. 7.12 に橋梁の外観を、Table 7.2 に対象橋梁の諸元を示す。

7.3.2 ひずみ可視化デバイスの設置

Fig. 7.13 に配置図を示す。設置位置を A1-P1 径間および P1-P2 径間の支間中央とし、A1-P1 径間では G3 桁と G4 桁に、P1-P2 径間では G1 桁と G4 桁とした。設置箇所は、各主桁下面とし、橋軸方向に設置した。あわせて、比較対象用に、設置箇所に隣接してひずみゲージを設置した。Fig. 7.14 にひずみ可視化デバイスの設置状況を示す。



(a) Bridge deck



(b) Bottom surface of bridge

Fig. 7.12 Appearance of the bridge

Table 7.2 Specifications of the bridge

Bridge length	102.230 m
Girder length	30.750 + 40.750 + 30.550 m
Span length	30.050 + 39.950 + 29.850 m
Effective width	Vehicle road: 6.750 m, walk way: 1.500 m
Total width	9.250 m
Superstructure construction system	Post-tensioned PC simple T-girder bridge (5 girders)
Year of construction	1975

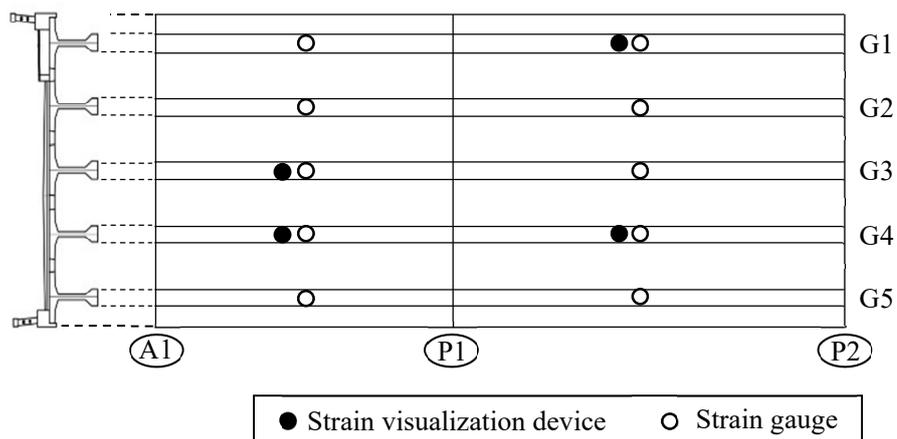


Fig. 7.13 Arrangement of measuring devices

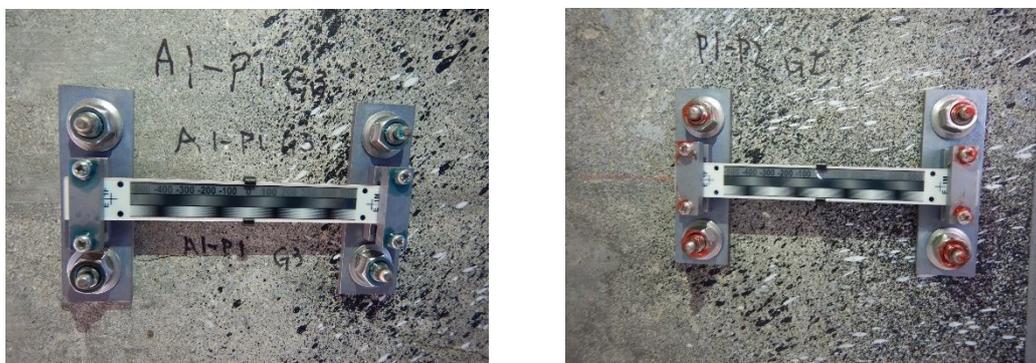


Fig. 7.14 Installation of the strain visualization device

ひずみ可視化デバイスの設置手順は、以下の通りである。

(1) ダミープレートの取付

平面上に取付脚を置き、ダミープレート両端の凸部を取付脚の凹部にはめ込み4本のネジで固定する。なお、ダミープレートは、ひずみ可視化デバイスの標点間距離Lが105mmとなるように製作したプレートである。

(2) コンクリート表面の処理

ひずみ可視化デバイス設置箇所が平滑でない場合、コンクリート表面をグラインダー等で平滑にする。コンクリート表面が平滑でない場合、ひずみ可視化デバイスに無理な力が生じ、破損等の原因となる。

(3) オールアンカー施工位置の位置出し

(1) の取付脚を測定位置に置き、アンカー施工位置(4箇所)を位置出しする。

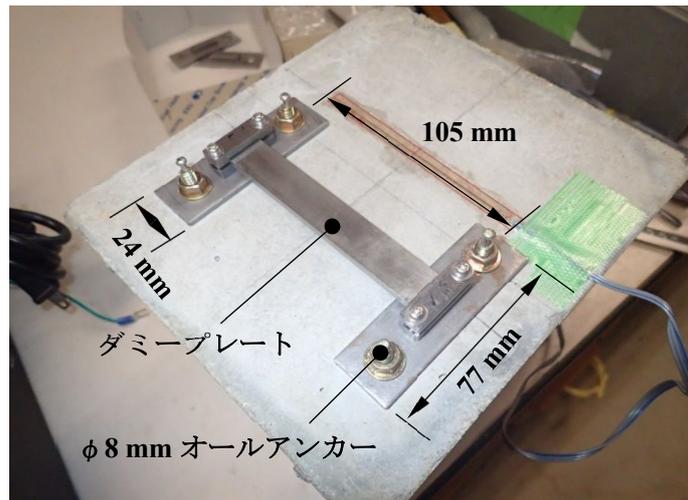


Fig. 7.15 Fixing the mounting legs with all anchors

(4) 削孔

オールアンカー施工位置 4 箇所をハンマードリルで削孔($\phi 8.5 \text{ mm}$)し、穴の内部を清掃する。

(5) オールアンカーの固定

取付脚を置いた状態で削孔した穴にオールアンカーを挿入し、オールアンカーの芯棒をハンマーでたたき込み、オールアンカーを固定する。

(6) 取付脚の固定

オールアンカーのナットをスパナで締め込み、取付脚を測定位置に固定する (Fig. 7.15)。

(7) ひずみ可視化デバイスの取り付け

ダミープレートを固定しているネジを緩め、ダミープレートを取り外し、ひずみ可視化デバイスを取り付ける。

(8) ひずみ可視化デバイスの調整

ひずみ可視化デバイスのフロントプレートとリアプレートの十字が重なっていることを確認し、可視化部分の 0 が最も濃く表示されるようにフロントプレートとリアプレートの距離を微調整しながらネジを締め込み、ひずみ可視化デバイスを固定する。

(9) 取り付けの確認

固定完了後はひずみ可視化デバイス本体を指で軽く押して、縞模様が大きく変動したり、指を離した際に縞模様が元に戻らない場合は、締め付け部の緩みなどがいないか確認して再調整する。

7.3.3 計測方法

計測は、一般的なデジタルカメラ（STYLUS TG-3 : OLYMPUS）を用いた。はじめに無載荷状態で初期の画像を、次に載荷ケース毎に複数枚ずつ撮影した。撮影条件は、撮影距離約 15 cm, 解像度 1920 px×1440 px, 焦点距離 4 mm, フラッシュ無しとした。前節のひずみ算出アプリケーションによって、撮影した画像からひずみを算出し、平均値を求めた。なお、ひずみゲージの計測は、専用の測定器で行った。

7.3.4 載荷方法

Fig. 7.16 に載荷試験の車両載荷ケースを示す。事前に計量した 200 kNのダンプトラックを載荷荷重とし、上り線に載荷するケース、下り線に載荷するケースおよび上り線と下り線の両方に車両を載荷するケースをそれぞれの径間で実施した。なお、ダンプトラックは、各径間の支間中央に車両の後輪中央が載荷されるようにした。Fig. 7.17 にダンプトラックの載荷状況を示す。

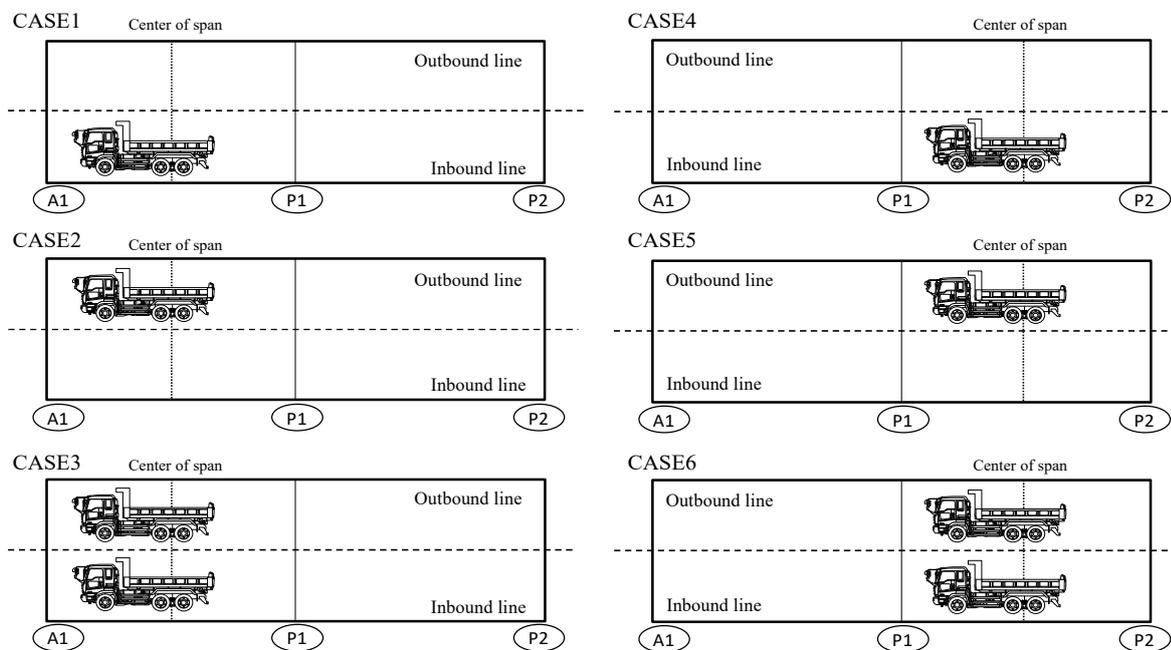


Fig. 7.16 Loading cases



1 dump truck



2 dump trucks

Fig. 7.17 Loading by dump truck

7.3.5 載荷試験結果

ここでは、ひずみ可視化デバイスとひずみゲージの両方を設置した A1-P1 径間の G3 桁・G4 桁，P1-P2 径間の G1 桁・G4 桁のひずみ測定結果について示す。Table 7.3 に載荷試験時のひずみ測定結果を示す。

CASE4 および CASE5 における P1-P2 径間 G1 桁は、他の桁と比較して $4\ \mu\epsilon \sim 26\ \mu\epsilon$ と発生ひずみが小さくなった。また、CASE5 の G1 桁では、ひずみ可視化デバイスの値が、ひずみゲージの $1/3$ 以下の値を示した。これは、G1 桁の橋面側は歩道になっており、直上に載荷されていないために発生ひずみが小さくなったと考えられる。これに対し、ひずみ可視化デバイスは、最大で $\pm 20\ \mu\epsilon$ の誤差が生じる可能性があるため、CASE4 および CASE5 の G1 桁については、ひずみ可視化デバイスの計測値の信頼性は低いと考えられる。CASE4 および CASE5 の G1 桁を除けば、ひずみ可視化デバイスとひずみゲージは概ね同様の結果が得られており、ひずみ可視化デバイスとひずみゲージの差は最大で $18\ \mu\epsilon$ であった。この結果は、ひずみ可視化デバイスの目標精度 $\pm 20\ \mu\epsilon$ を満足するものであり、ひずみ可視化デバイスの実構造物への適用性が実証された。なお、発生ひずみが $20\ \mu\epsilon$ 程度までの構造物部材にひずみ可視化デバイスを適用する場合は計測値の信頼性が低いため、適用にあたっては留意が必要である。

Table 7.3 Results of strain measurements in loading test

CASE	Strain Visualization Device ($\mu\epsilon$)				Strain Gauge ($\mu\epsilon$)			
	A1-P1		P1-P2		A1-P1		P1-P2	
	G3	G4	G1	G4	G3	G4	G1	G4
CASE1	24	53	-	-	30	52	-	-
CASE2	27	43	-	-	37	25	-	-
CASE3	52	63	-	-	66	77	-	-
CASE4	-	-	3	21	-	-	4	27
CASE5	-	-	8	20	-	-	26	18
CASE6	-	-	20	42	-	-	33	45

7.4 送電鉄塔の載荷試験への適用

7.4.1 試験概要

高さ約 30 m の送電鉄塔の耐荷力試験において、ひずみ可視化デバイスを適用して、送電鉄塔脚部のひずみ計測を実施した[45]. 本論文においては、機密情報に当たる鉄塔の構造の詳細や載荷荷重についての記述は差し控える. 試験は 2 ケースについて実施し、ケース 1 は鉄塔の弾性域での載荷試験、ケース 2 は鉄塔の破壊まで載荷する耐荷力試験である.

7.4.2 計測機器の設置

Fig. 7.18 に計測位置を示す. 計測対象は、載荷方向に対して背面側（引張ひずみ発生側）の鉄塔脚部とした. 計測器の設置箇所は Fig. 7.19 に示す通りで、脚鋼材の L アングル各面にひずみ可視化デバイスを設置し、その下側の同軸上に比較用の防水型ひずみゲージを設置した. また、ひずみ可視化デバイスを撮影するための USB2.0 カメラをひずみ可視化デバイスから約 750 mm 離れた位置に設置した. なお、防水型ひずみゲージとは、一般的なひずみゲージ表面をエポキシ樹脂等でコーティングして耐水構造としたひずみゲージであり、屋外でのひずみ計測等に適している.

Fig. 7.20 に計測器の設置状況を、Fig. 7.21 に USB2.0 カメラの設置状況を示す.

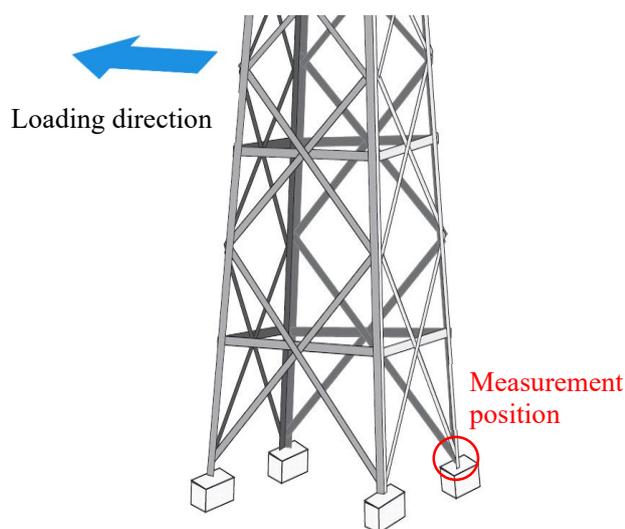


Fig. 7.18 Measurement position

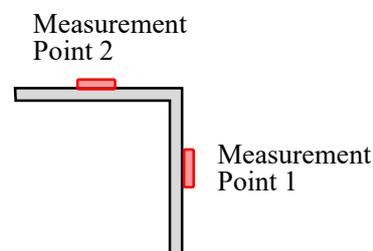


Fig. 7.19 Leg shape and Sensor arrangement

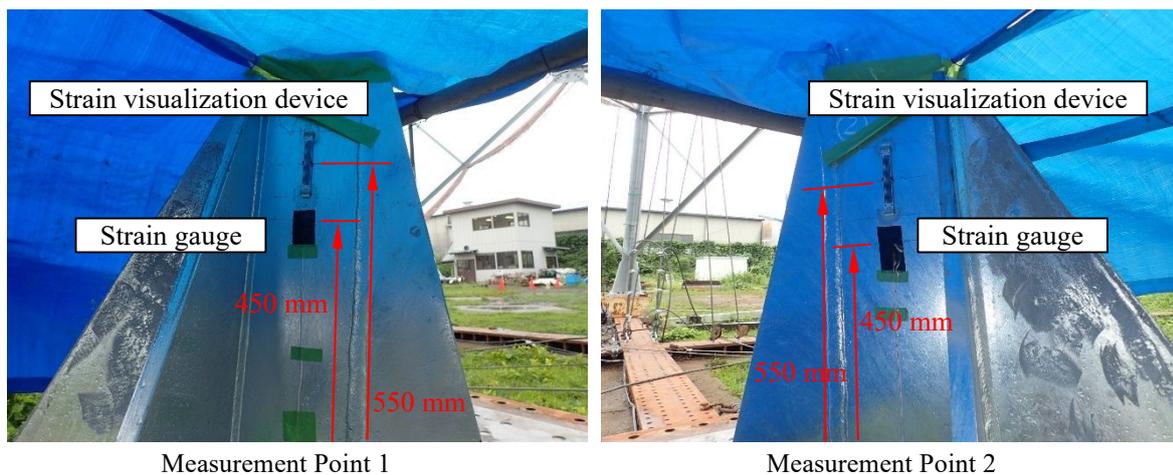


Fig. 7.20 Installation of strain visualization device and strain gauge

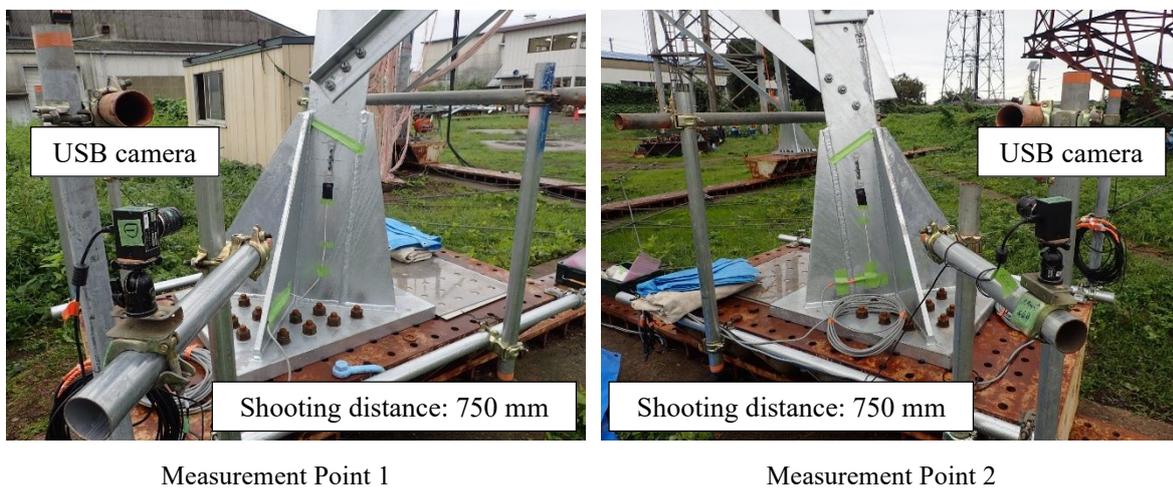


Fig. 7.21 Installation of USB camera

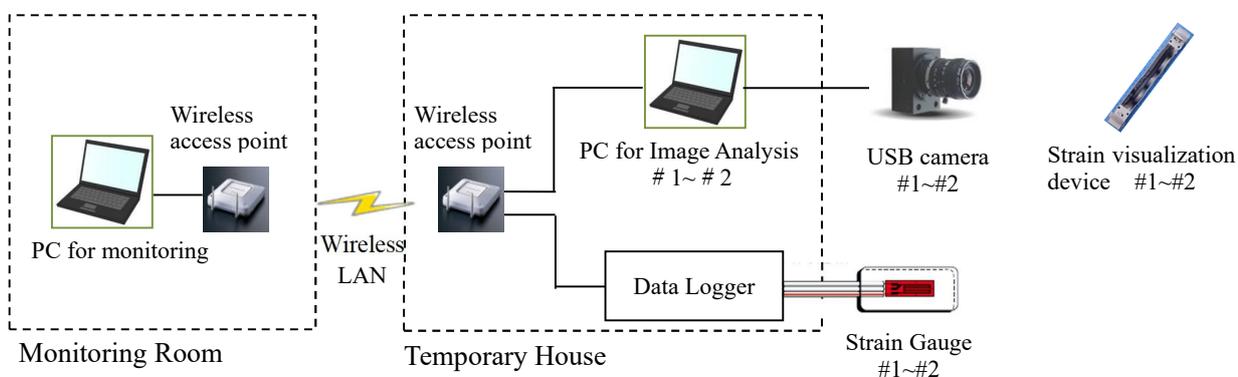


Fig. 7.22 System block diagram

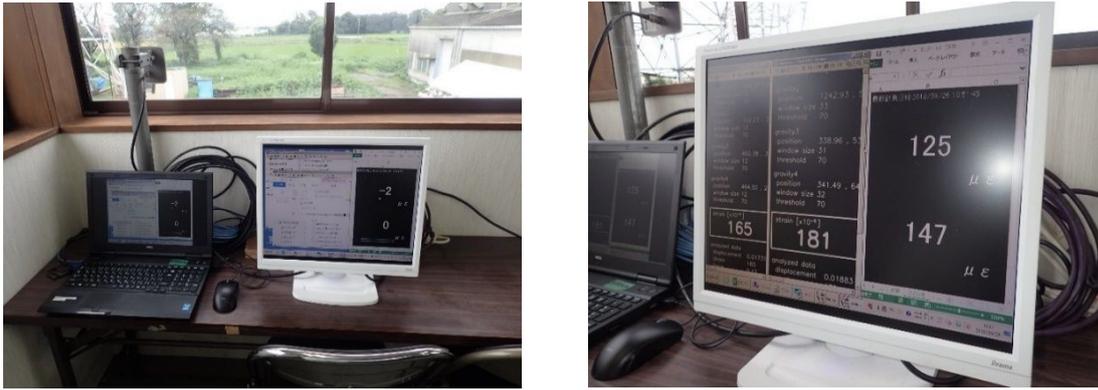


Fig. 7.23 PC for monitoring in the monitoring room

Table 7.4 Measurement results (Maximum values)

(μ ϵ)	Case1			Case2		
	Point 1	Point 2	Average	Point 1	Point 2	Average
Strain Visualization Device	166	182	174	298	340	319
Strain Gauge	161	192	176	275	344	310
Difference	5	-10	2	23	-4	9

7.4.3 計測方法

Fig. 7.22 にシステムブロック図を示す。载荷試験中は鉄塔に近づくことができないため、ひずみ可視化デバイスの画像処理結果およびひずみゲージの計測値を、少し離れたモニタリングルームから遠隔で確認できるモニタリングシステムを構築した (Fig. 7.23)。各载荷試験ケース共に、ひずみ可視化デバイスは USB カメラ(200 万画素)で、ひずみゲージは専用のデータロガーでそれぞれ計測し、载荷開始から設定荷重に達するまで連続的に計測した。

7.4.4 計測結果

計測結果を Table 7.4, Fig. 7.24, Fig. 7.25 に示す。ひずみ可視化デバイスとひずみゲージの設置高さの違いにより鋼材の断面積が異なるため、ひずみ可視化デバイスの計測データを断面積比で補正して、ひずみゲージと比較した。なお、ひずみゲージのデータの欠落は、通信不良によるものである。Table 7.4 によると、ひずみ可視化デバイスと防水型ひずみゲージの最大値の差は-10 $\mu\epsilon$ ~ 23 $\mu\epsilon$ と

なり、実構造物のひずみ計測に対しても、ひずみ可視化デバイスの目標精度 $\pm 20 \mu \varepsilon$ をほぼ満足した。また、Fig. 7.24, Fig. 7.25の経時変化図でも、ひずみ可視化シートの計測データは、防水型ひずみゲージの計測データと比較して概ね $\pm 20 \mu \varepsilon$ の差で推移した。以上のことから、ひずみ可視化デバイスの実構造物への適用性を検証できたと言える。併せて、鉄塔のひずみ計測への適用性も確認することができた。

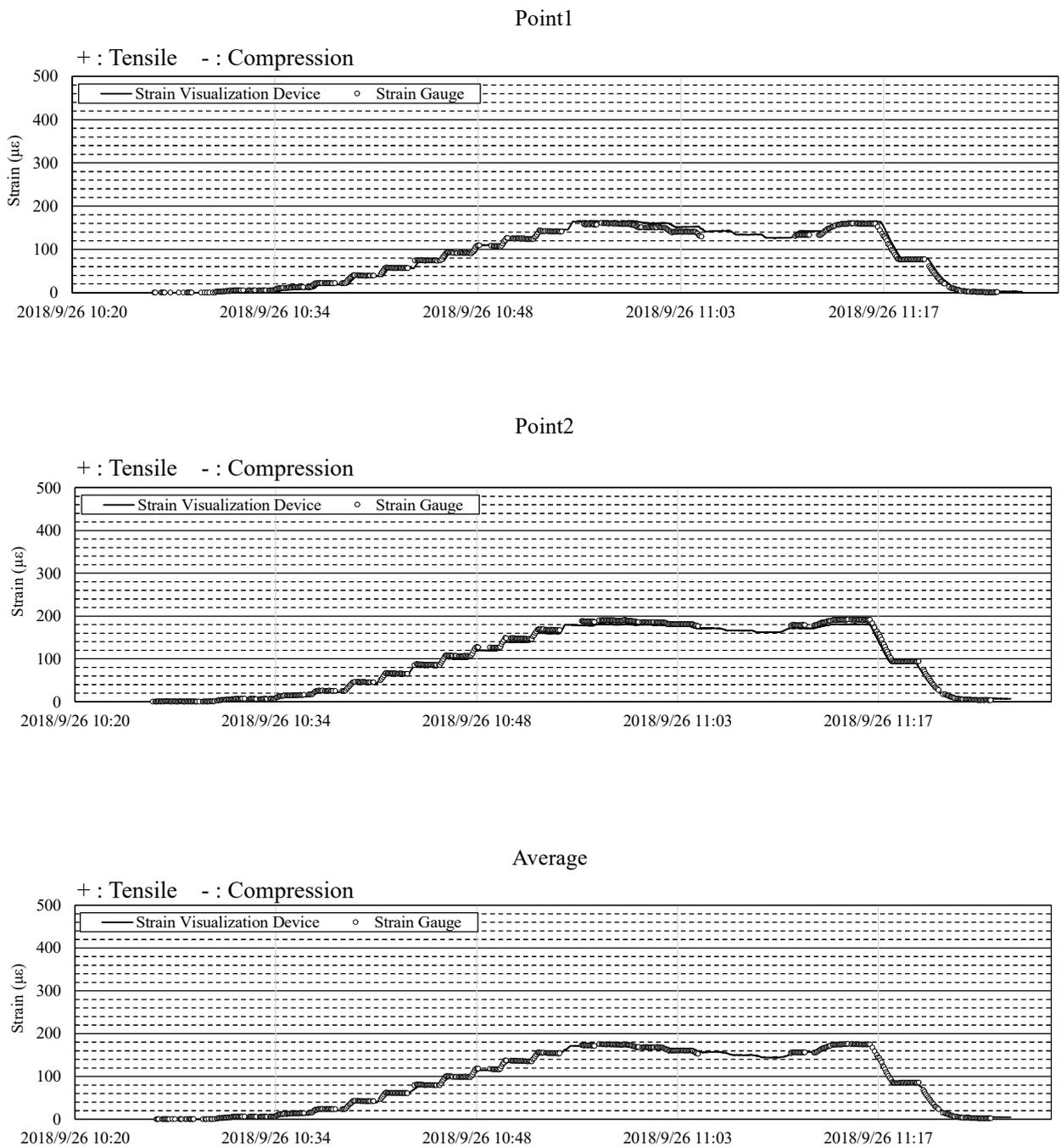
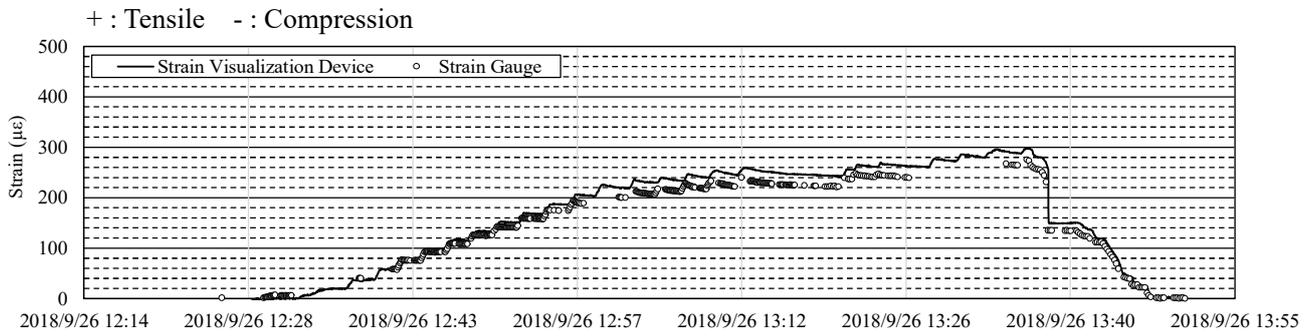
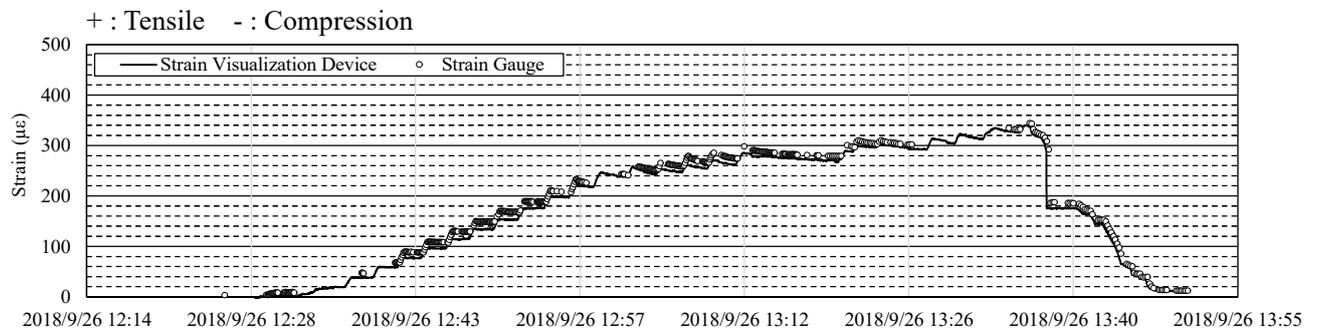


Fig.7.24 Measurement results (Case1)

Point1



Point2



Average

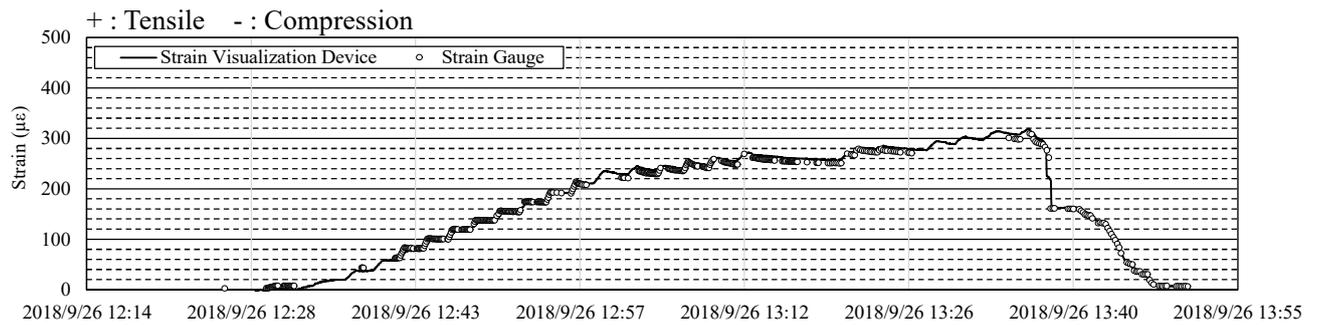


Fig.7.25 Measurement results (Case2)

7.5 走行疲労試験への適用

7.5.1 概要

構造物のひずみは収縮や温度変化などによっても生じるため、定期点検など異なる条件のなかで確認したひずみを単純に比較することはできない。このため、点検やモニタリングに適用した場合には、同じ重量の車両を通行させることで生じるひずみや一定時間車両を通行させてその間に生じるひずみの量と頻度で評価することも考えられる。そこで、輪荷重の走行により生じる動ひずみの計測への適用性を検証した[46]。

7.5.2 試験装置および試験体

走行疲労試験装置を Fig. 7.26 に、床版の形状と走行範囲を Fig. 7.27 に示す。走行疲労試験を行う試験体は、長さ 2.06 m、幅 2.8 m、厚さ 220 mm で直角方向にプレストレスを導入した床版 2 体を幅 380 mm の間詰を介して RC 構造で接合した長さ 4.5 m（床版支間 2.5 m）の床版である。試験は、床版上に並べた 500 mm×200 mm のブロックの中央より±1.5 m の範囲を時速 7.2 km（2400 回/h）で鉄輪を走行させて行う。走行荷重は、350 kN である。ひずみ可視化デバイスは、床版下面で直角方向に 1 ヶ所（測点 A）、走行方向に 2 ヶ所（測点 B,C）設置した。また、ひずみ可視化デバイスに近接して、ひずみゲージを設置した。



Fig.7.26 Driving fatigue testing machine

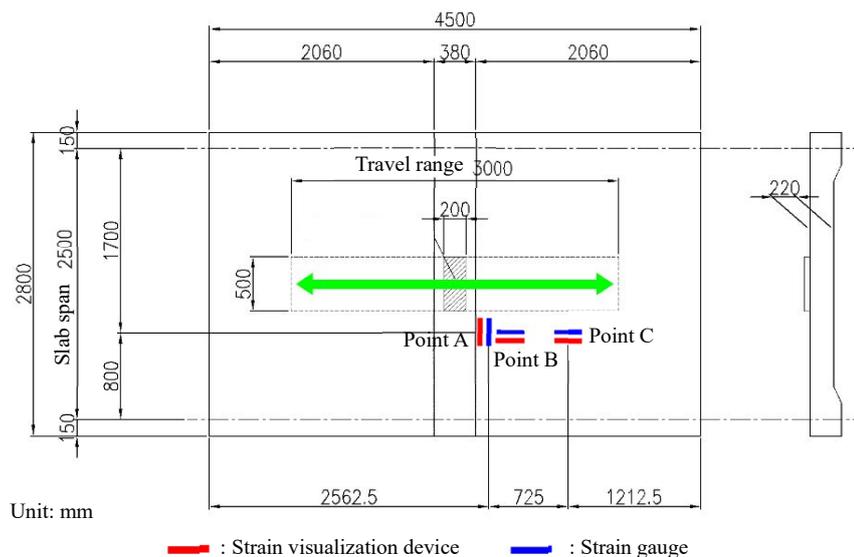


Fig.7.27 Specimen and sensor arrangement (underside of slab)

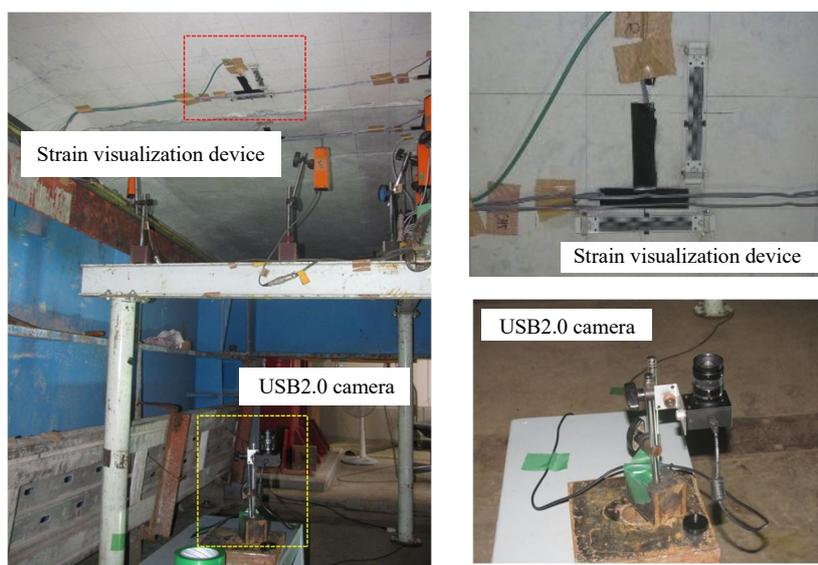


Fig. 7.28 Installation of measurement equipment

7.5.3 計測機器の設置と計測方法

ひずみの計測位置を Fig. 7.27 に、計測機器の設置状況を Fig. 7.28 に示す。ひずみ可視化デバイスの設置方法は、7.2 節の手順通りとした。動画の撮影には解像度 200 万画素の USB2.0 カメラを使用し、フレームレートを測点 A, B は 5 Hz, 測点 C は 15 Hz とした。撮影した画像をリアルタイムに画像処理してひずみを算出した。

7.5.4 輪荷重によるひずみの応答

Fig. 7.29 に測点 A および測点 C における輪荷重によるひずみの応答を示す。ここで、ひずみの応答は、ひずみ可視化デバイスとひずみゲージの比較のため、下側のピーク値が概ね一致するようにひずみ可視化デバイスのひずみ値を圧縮側にスライドさせている。測点 A では Fig. 7.27 の右側から来た鉄輪が中央を過ぎて左側で折り返す前後で、測点 C では左側の折り返し時点で差異が見られる。ひずみ可視化デバイスの構造上、強制的なひずみの発生には追従するが、瞬間的なひずみの解放に対して若干遅れている可能性がある。ただし、応答とそのピーク値はほぼ一致しており、輪荷重の走行により生じる動ひずみの計測への適用性が実証された。

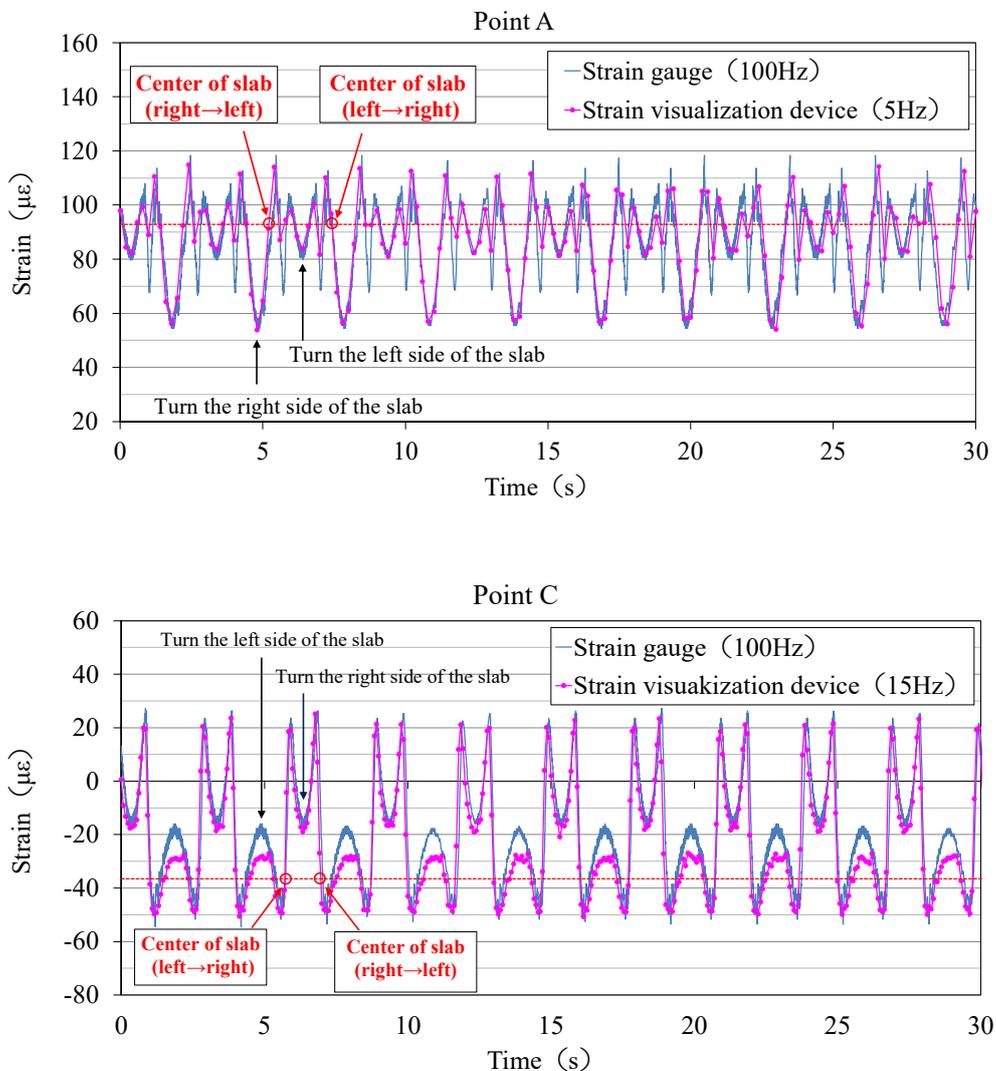


Fig.7.29 Strain response due to running wheel load

7.6 地下トンネルの維持管理への試験適用

7.6.1 概要

Fig. 7.30 に示す東京都内の地下トンネルの維持管理を目的として，試験的に，ひずみ可視化デバイスおよび比較的長期の寿命をもつ従来型のひずみ計を覆工コンクリートに設置し，定期的に計測を行っている．計測を開始してから，ちょうど2年が経過しようとしている．今節では，実構造物の維持管理への適用事例として示す．

7.6.2 計測器の設置

地下トンネルの指定の断面（1断面）の覆工コンクリートにおいて，縦断方向にひずみ可視化デバイスを設置し，その近傍に比較対象としてひずみ計（標点間距離 100 mm）を設置した．ひずみ可視化デバイスは，取付脚を用いて設置し，その設置方法は前節に示す通りとした．ひずみ計の設置方法も，ひずみ可視化デバイスと概ね同じ設置方法である．あわせて，外気温を把握するために熱電対型温度計を取り付けた．Fig. 7.31 にひずみ計の仕様を，Fig. 7.32 に計測機器の設置状況を示す．

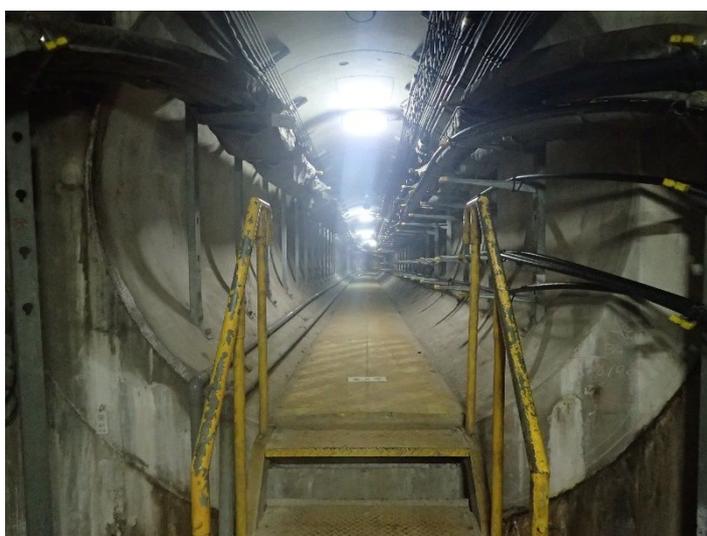


Fig.7.30 Tunnel for communication cables



Manufacture name	Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.
Type	KM-100B
Capacity	±5000 με
Non-linearity	1%RO
Temperature range	-20~+80 °C

Fig.7.31 Specification of strain transducer

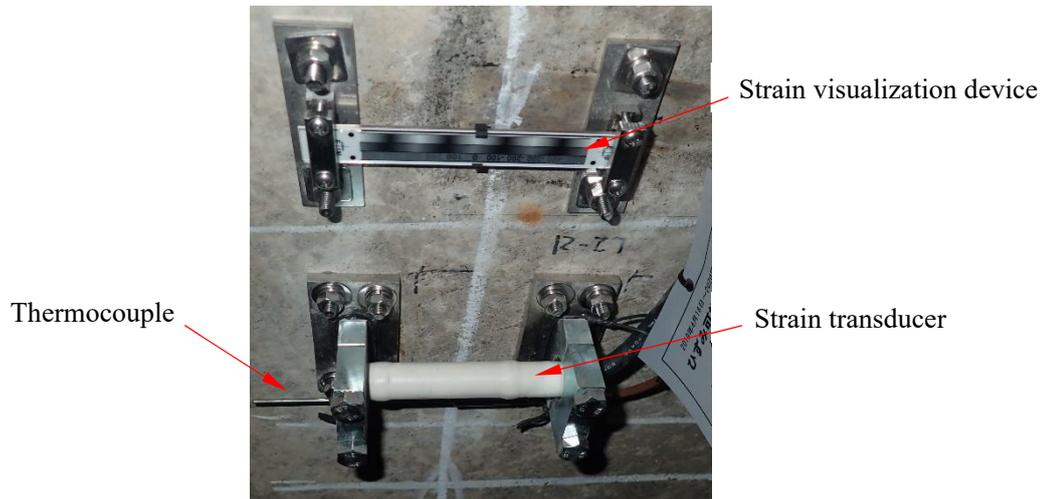


Fig.7.32 Installation of measurement equipment

7.6.3 計測結果

Fig. 7.33 にひずみの経時変化図を示す。計測頻度は、1 回/月である。ひずみ可視化デバイスの計測は、計測の都度、地下トンネルにデジタルカメラを持ち込んで撮影し、ひずみ計の計測は専用の測定器を用いて実施している。ひずみ可視化デバイスのひずみ値は、ひずみ算出アプリケーションを用いてデジタル画像から算出したものである。

地下トンネル内の温度は、計測期間を通じて 20 °C 付近で一定であり、長期計測で問題となる温度

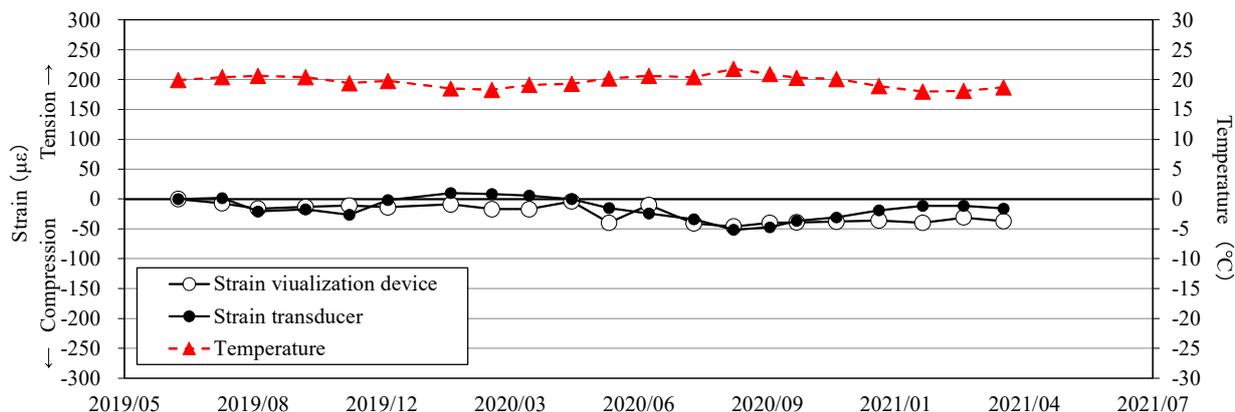


Fig.7.33 Time change chart of strain

影響はほぼ無視できる。ひずみ計の精度を踏まえれば、ひずみ可視化デバイスとひずみ計の値は、計測期間を通じて概ね一致している。地下トンネルの覆工コンクリートのひずみは、急激な変動は示しておらず安定しており、地下トンネルに異常は認められていない。このように、約2年間の計測を通じ、ひずみ可視化デバイスが地下トンネルの維持管理に適用できることを実証できた。

7.7 本章のまとめ

本章では、4つの実構造物の载荷試験にひずみ可視化デバイスを適用し、その適用性を実証した。また、最後に、地下トンネルの維持管理に試験適用した事例を示した。

構造の異なる2橋梁の载荷試験では、桁の下面のひずみ計測に適用した。载荷荷重は、コンクリートブロックとダンプトラックで異なったものの、ともに橋面上に载荷し、桁のたわみに伴い発生するひずみを計測した。計測は、一般的なデジタルカメラで行った。従来のひずみゲージの計測結果との差は $20\mu\epsilon$ 未満となり、目標精度 $\pm 20\mu\epsilon$ 以下を満足する結果を得た。ここでは、ひずみ可視化デバイスの設置方法も示した。

送電鉄塔の载荷試験では、载荷に伴い発生する鉄塔の脚部のひずみ計測に適用した。鉄塔の破壊ま

で載荷する耐荷力試験であった。送電鉄塔近くでの計測は危険なため、USB2.0 カメラで連続的に撮影し、遠隔からひずみ計測値を取得した。載荷開始から破壊まで精度よくひずみを計測することができた。従来のひずみゲージの計測結果との差は $20\ \mu\epsilon$ 未満となり、目標精度 $\pm 20\ \mu\epsilon$ 以下を満足する結果を得た。

走行疲労試験では、床版下面に発生する動的ひずみの計測に適用した。計測は、USB2.0 カメラで連続的に撮影し、リアルタイム画像処理装置にてリアルタイムにひずみを得た。鉄輪の折り返し時点で差異が見られることもあったが、応答とそのピーク値はほぼ一致しており、輪荷重の走行により生じる動ひずみの計測への適用性が実証された。

最後に、地下トンネルの維持管理へ試験的に適用した。現在、約 2 年間の継続計測を行っている。計測の都度、デジタルカメラを地下トンネルに持って入って撮影し、ひずみ算出アプリケーションにてひずみを算出した。ひずみ計の精度を踏まえれば、ひずみ可視化デバイスとひずみ計の値は、計測期間を通して、概ね一致している。ひずみ可視化デバイスによって、地下トンネルの覆工コンクリートに異常が認められないことを確認できており、約 2 年間の計測を通じ、ひずみ可視化デバイスが地下トンネルの維持管理に適用できることを実証した。

4 つの実構造物の載荷試験への適用および地下トンネルの維持管理への試験適用により、実構造物への適用性が実証でき、実構造物の維持管理に適用できるモアレ縞を用いたひずみ可視化デバイスの実用化に成功した。

第 8 章 結論

本研究では、以下の特徴をもつ、モアレ縞を用いたひずみ可視化デバイスを効率的・効果的かつ合理的な社会インフラのヘルスマonitoringに適用できるものにする事、つまり、実構造物の維持管理に適用できるモアレ縞を用いたひずみ可視化デバイスの実用化をテーマとした。

- ①定量的にひずみを可視化できる。
- ②電氣的な要素を一切使用しないため、電源が不要で、電氣的な寿命を持たない。
- ③同理由により、電氣的ノイズの影響を受けない。
- ④一般的なデジタルカメラ等を用いて、遠隔・非接触でひずみを計測できる。
- ⑤メンテナンスが容易である。

ひずみ可視化デバイスを実構造物の維持管理に適用できれば、有効な情報を低コストで、誰でも簡単に取得することができるようになる。

そこで、測定原理を示すとともに、高い耐久性をもつひずみ可視化デバイスの仕様を示した。また、実構造物の維持管理に適用する際に問題となる温度の影響を受けない、原理と構造を考案し、自己温度補償型ひずみ可視化デバイスを実現した。次に、現場で計測する(画像を撮影する)ことを想定し、撮影角度が画像処理によるひずみ算出精度に与える影響を明らかにし、計測精度を確保できる撮影角度を示した。また、曲げ変形を受ける部材のひずみ計測に適用するため、補正係数を示し、その妥当性を検証した。最後に、実構造物にひずみ可視化デバイスを適用し、実構造物の維持管理に適用できるひずみ可視化デバイスであることを実証し、実構造物の維持管理に適用できるひずみ可視化デバイスを実現した。

以下に、本論文の各章に対する概要と結論を総括する。

第 2 章では、モアレ縞の原理によって、微小変位を拡大表示できることを示し、その拡大率をさらに大きくするとともに、視認性を向上させるための新たな格子パターンを示した。この格子パターンにより、画像処理で $1\ \mu\text{m}$ の微小変位の計測が可能となるとともに、ひずみの可視化部分の明瞭化を図った。また、直線格子 1 の文字格子を $100\ \mu\text{m}$ 毎の目盛状に配置することにより、ひずみ値を視覚

的に見ることを可能とした。その格子パターンを適用して製作したひずみ可視化デバイスの基本仕様も示した。ひずみ可視化デバイスを構成する部品は、自然環境下において長期間耐えうる材質を選定した。フロントプレートとリアプレートには、湿潤膨張が無く、あらゆる環境性能に優れた結晶化ガラスを採用するとともに、これらをユニット化する鋼製の固定リングには亜鉛ニッケル合金メッキを施し、耐候性、耐腐食性共に自然環境下 10 年相当以上を有する耐久性の高いひずみ可視化デバイスを実現した。

第 3 章では、自己温度補償されていないひずみ可視化デバイスの基本構造に対し、温度補償板を追加する構造を提案した。温度補償板の長さを構造部材のひずみ検出範囲と同じ長さにし、温度補償板の線膨張係数を構造部材と同じにすることで、温度の影響をキャンセルし、構造部材に応力が作用した場合のみ、ひずみを検出する原理を示した。鋼製やコンクリート製の構造部材と同じ線膨張係数 $11.7 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ で、標点間距離 105 mm と同じ長さの鋼製プレート ($t=1.6 \text{ mm}$) を温度補償板とし、これを実装した自己温度補償型ひずみ可視化デバイスを製作した。温度特性試験を実施した結果、ひずみ可視化デバイスの見掛けのひずみは、 $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ の温度範囲において $\pm 1.0 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 未満であることが確認され、従来の自己温度補償型ひずみゲージと比べても優れた温度特性を持った自己温度補償型ひずみ可視化デバイスを実現した。

第 4 章では、高耐久性を有する自己温度補償型のひずみ可視化デバイスに対し、デジタル画像処理によるひずみの計測精度 $\pm 20 \mu\epsilon$ 、目視によるひずみ計測精度 $\pm 50 \mu\epsilon$ を目標精度とし、変位ステージによる精度検証および引張試験による従来のひずみゲージとの比較検証を実施した。画像処理によりひずみを算出する方法では、目標精度 $\pm 20 \mu\epsilon$ を満足することを検証した。目視による計測方法では、目標精度 $\pm 50 \mu\epsilon$ を満足することが検証できた。次に、実構造物の構造部材への適用を想定し、鋼製の試験体にひずみ可視化デバイスを設置して、試験体の引張試験を実施し、従来のひずみゲージと比較検証した。その結果、ひずみゲージとの差は目標精度 $\pm 20 \mu\epsilon$ 以下を満足し、構造部材にも適用できることが検証できた。

第 5 章では、現場において、ひずみ可視化デバイスをデジタルカメラで撮影する場合を考え、フロントプレートとリアプレートの間に隙間があると、視差の影響により、2 枚のプレートに生成された直線格子の重なり見え方に違いが生じることを示した。C 留具を用いて 2 つのプレートをそれぞれ

れ押さえつける方向に力が加わるようにし、常に接触が保たれるようにしたうえで、実験により、ひずみ可視化デバイスの撮影角度とひずみ算出精度の関係を明らかにした。その結果を踏まえ、計測精度を確保する撮影角度を示した。実構造物にひずみ可視化デバイスを適用しデジタルカメラで撮影する場合、本章で明らかとなった撮影角度に留意して撮影すれば、計測精度が確保できることが明らかとなった。

第 6 章では、曲げ変形を受ける部材にひずみ可視化デバイスを適用する場合の補正係数の算出方法と中立軸から部材表面までの距離と補正係数の関係を示した。補正係数の妥当性を検証するため、構造部材と比べ極端に剛性の小さい鋼製フラットバー（FB）を試験体として、FB に曲げ変形を与えて、ひずみを計測する実験を行った。その結果、補正係数を適用することで、精度よくひずみが計測でき、曲げ変形を受ける部材にひずみ可視化デバイスを適用できることを実証した。

第 7 章では、4 つの実構造物の載荷試験にひずみ可視化デバイスを適用し、その適用性を実証した。また、最後に、地下トンネルの維持管理に試験適用した事例を示した。

構造の異なる 2 橋梁の載荷試験では、橋面上に載荷し、桁のたわみに伴い発生するひずみを計測した。従来のひずみゲージの計測結果との差は $20 \mu\epsilon$ 未満となり、目標精度を満足する結果を得た。送電鉄塔の載荷試験では、載荷に伴い発生する鉄塔の脚部のひずみ計測に適用した。載荷開始から破壊まで、精度よくひずみを計測することができ、従来のひずみゲージの計測結果との差は $20 \mu\epsilon$ 未満となり、目標精度以下を満足する結果を得た。走行疲労試験では、床版下面に発生する動ひずみの計測に適用した。一部、従来のひずみゲージと差異が見られることもあったが、応答とそのピーク値はほぼ一致し、動的ひずみの計測への適用性が実証された。最後に、地下トンネルの維持管理へ試験的に適用した。約 2 年間の継続計測を行った結果、ひずみ可視化デバイスとひずみ計の値は、計測期間を通じて概ね一致し、ひずみ可視化デバイスが地下トンネルの維持管理に適用できることを実証した。このように、4 つの実構造物の載荷試験への適用および地下トンネルの維持管理への試験適用により、実構造物への適用性が実証でき、実構造物の維持管理に適用できるモアレ縞を用いたひずみ可視化デバイスの実用化に成功した。

本研究によって、実構造物の維持管理に適用できるひずみ可視化デバイスの実用化を図ることができた。引き続き、スマートフォンでひずみを計測するためのアプリケーション、遠隔あるいはドロ

ーンを用いてデジタル画像を撮影してひずみを算出する方法，走行車両によりデジタル画像を撮影してリアルタイムにひずみ算出する方法など，ひずみ計測の効率化について研究を進める予定である。

今後も，社会インフラの老朽化は進行し，損傷の顕在化が増えていくと考えられる。本研究を基礎として適用事例を重ね，ひずみ可視化デバイスをより実用的なものにすることで，社会インフラの維持管理に貢献していきたい。

参考文献

- [1] 国土交通省：国土交通白書 2017，日経印刷株式会社 (2016)
- [2] インフラ再生研究会：荒廃する日本，日経 BP (2019)
- [3] 国土交通省：社会インフラの維持管理の現状と課題，社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会（第1回）資料2，<http://www.mlit.go.jp/common/001016260.pdf> (2013)
- [4] 国土交通省：鋼橋（上部構造）の損傷事例，
https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_1.pdf (2009)
- [5] 山田健太郎：木曾川大橋の斜材の破断から見えるもの，土木学会誌，93-1，pp.29-30 (2008)
- [6] 伊藤久也，鈴木哲也，河野英一，青木正雄：C/S マクロセル腐食による老朽化が顕在化した鋼製パイプラインの非破壊評価に関する実証的研究，開発学研究，22-3，pp. 24-33 (2012)
- [7] 池田学，谷村幸裕：鉄道構造物(主として鋼橋)のメンテナンスの現状と最近の取り組み，材料と環境，65-7，pp. 287-293 (2016)
- [8] 国土交通省：第42回基本政策部会資料，<https://www.mlit.go.jp/common/000987373.pdf> (2013)
- [9] 国土交通省：インフラ長寿命化基本計画，<https://www.mlit.go.jp/common/001040309.pdf> (2013)
- [10] 内閣府：科学イノベーション総合戦略 2016，
<https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2016/honbun2016.pdf> (2016)
- [11] 首相官邸：世界最先端 IT 国家創造宣言工程表，
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20160520/koteihyo_kaitei.pdf (2016)
- [12] 内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)，
<https://www8.cao.go.jp/cstp/panhu/sip2020/p72-73.pdf> (2018)
- [13] 国土交通省：i-Construction，<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html> (2015)
- [14] 国土交通省：国土審議会政策部会第3回長期展望委員会資料，
https://www.soumu.go.jp/main_content/000273900.pdf (2011)
- [15] 土木学会：センシング情報社会基盤，丸善出版，pp. 1-16 (2015)
- [16] 国土交通省：モニタリング技術の現状と課題，社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会（第1回）資料3，<https://www.mlit.go.jp/common/001016261.pdf> (2013)
- [17] 国土交通省：センサ技術の現状と課題，第2回社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会資料 資料2-1，<http://www.mlit.go.jp/common/001023294.pdf> (2013)
- [18] 今井道夫，五十嵐由一，水野秀太郎，三浦悟：光ファイバセンサによるアスファルト構造物のひずみモニタリング手法に関する研究，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.68，No.3，pp.696-706 (2012)
- [19] 岩城英朗，田村和夫：長大 PC 斜張橋の長期モニタリングに向けた分布型光ファイバセンサの適用性に関する研究，土木学会構造工学論文集，62A，pp. 41-54 (2016)
- [20] 大窪一正，今井道夫，曾我部直樹，中上晋志，千桐一芳，二羽淳一郎：緊張管理・維持管理に適用可能な光ファイバを用いた PC 張力分布計測技術の開発，土木学会論文集 E2，76-1，pp. 41-54 (2020)

- [21] 藤田数正, 末吉良敏, 松下博通: 計測機器の現状と展望, コンクリート工学, 44-5, pp.13-17 (2006)
- [22] 細野貴彦, 加藤絵万, 山路徹, 星野正彦: 栈橋の点検診断の高度化のためのセンサモニタリング技術の導入, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.74, No.2, pp.113-118 (2018)
- [23] 石川敏之, 田村隆佳, 奥村徹, 松村寿男, 内山宗久, 藤井通之: 残留応力計測による疲労き裂検出法に関する研究, 土木学会構造工学論文集, 63A, pp. 517-526 (2017)
- [24] Reid, G. T.: Moiré fringes in metrology, Optics and Lasers in Engineering, 5, pp.63-93 (1984)
- [25] Rowlands, R. E., Beazley, P. K. and Gunderson, D. E.: Moiré strain analysis of paper, Tappl Journal, 66-8, pp.81-84 (1983)
- [26] 堀内宏信: モアレを利用した変位計測システム, 土木建設技術発表会概要集, pp.67-72 (2010)
- [27] 栗林賢一, 藤垣元治, 木村元哉, 丹波雄一郎: たわみ角を管理指標として用いた鉄道橋の健全度評価手法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.62A, pp. 617-629 (2016)
- [28] 津田浩, 李志遠, 王慶華: サンプルングモアレ法を用いた橋梁の変形分布計測, 精密工学会誌, 83-12, pp. 1071-1075 (2017)
- [29] 山田朝治, 横関俊介: モアレ縞・干渉縞応用計測法, コロナ社, pp. 1-46 (1996)
- [30] 高木健, 岡本卓慈, 宮本則幸, 梅本秀二, 大畑秀之, 松尾恵輔: 歪計測方法, 歪計測装置, 及び格子パターン, 特許第 6304655 (2018)
- [31] 高木健, 石井抱, 梅本秀二, 大畑秀之, 宮本則幸, 岡本卓慈: $1\mu\text{m}$ が測定できる微小変位可視化シールの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1P1-F08 (2011)
- [32] 高木健, 岡本卓慈, 宮本則幸, 梅本秀二, 大畑秀之: 歪量表示方法及びその装置, 特許第 5843256 (2015)
- [33] 梅本秀二, 大畑秀之, 宮本則幸, 岡本卓慈, 高木健, 藤井堅: モアレ縞を用いたひずみ可視化シートの開発, 土木学会 第 66 回年次学術講演会講演概要集, 66, pp. 509-510 (2011)
- [34] 梅本秀二, 大畑秀之, 宮本則幸, 岡本卓慈, 高木健, 藤井堅: ひずみ可視化シートを用いた曲げ載荷試験におけるひずみ測定, 土木学会 第 67 回年次学術講演会講演概要集, 67, pp. 499-500 (2012)
- [35] 高木健, 田ノ上誠次, 梅本秀二, 宮本則幸, 青山忠義, 石井抱: ひずみ可視化シールを用いたコンクリート表面のひずみ計測, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 論文集 2A2-P24 (2013)
- [36] 梅本秀二, 大町正和, 宮本則幸, 岡本卓慈, 高木健, 石井抱, 青山忠義: ひずみ可視化シートの改良とコンクリートへの適用, 土木学会 第 68 回年次学術講演会講演概要集, 68, pp. 215-216 (2013)
- [37] 二宮正幸: 結晶化ガラスの製法と機能物性, 精密工学会誌, 70-4, pp. 451-454 (2004)
- [38] 小林崇, 赤松輝雄, 梅本秀二, 大町正和: モアレ縞の原理を用いたひずみ可視化デバイスの実用化に向けた検証, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 29, pp.147-150 (2020)
- [39] 国土交通省気象庁: 過去の気象データ, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2020)
- [40] 中村秀治, 小林精一: 管路の温度上昇に対する気象および環境効果の統計的一考察, 土木学会

論文報告集, 1980 卷 300 号 pp. 1-11 (1980)

- [41] 共和電業：自己温度補償型ゲージとは, https://www.kyowa-ei.com/jpn/technical/strain_gages/selcom_gages.html (2021)
- [42] 羽田匡彦, 浅林一成, 小泉健吾, 村井仁：光ファイバーセンサーを用いた鉄筋コンクリート橋梁のヘルスマニタリング, OKI テクニカルビュー, 第 234 号, 86-2, pp. 36-39 (2019)
- [43] 閑田徹志：ひび割れ発生条件, コンクリート工学, 43-5, pp. 60-66 (2005)
- [44] 土木学会：構造力学公式集, 土木学会, p. 129 (1997)
- [45] 山崎智之, 河原章夫, 高橋圭一, 本郷榮次郎, 中村秀治：基礎変位鉄塔のボルト滑りを考慮した耐荷力解析法に関する検討, 土木学会構造工学論文集, 58A, pp. 744-755 (2012)
- [46] 田中良樹, 村越潤, 長屋優子, 吉田英二：鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性に関する最近の研究, 土木技術資料, 56-3, pp. 30-35 (2014)

謝 辞

本研究は、私が広島大学大学院工学研究科サイバネティクス専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものです。ここに、本研究の遂行に際して、ご指導、ご助力を賜った方々のお名前を記して、心からお礼を申し上げます。

広島大学大学院工学研究科 高木健 教授には、本研究を進めるにあたり、常に暖かいご助力と、ご指導を賜りました。社会人学生として研究と仕事の両立に苦心し、思うように研究が進まない中、寛大なご配慮を賜りました。広島大学大学院工学研究科 石井抱 教授、栗田雄一 教授には、副指導教員として、ご指導を賜りました。長崎大学大学院工学研究科 松田浩 教授、山口浩平 准教授、藤井堅 広島大学名誉教授には、土木的な見地からご指導賜りました。

株式会社 IHI インフラシステム 廣井幸夫 氏、株式会社 IHI インフラ建設 中村定明 氏、小林崇 氏には、多大なるご助言、ご助力、また、叱咤激励を賜りました。鹿児島県担当部局ならびに株式会社久永コンサルタント 内村正樹 氏には、実橋梁への適用に当り、多大なるご協力を頂戴しました。電源開発株式会社ならびに日本鉄塔工業株式会社 本田誠 氏には、送電鉄塔への適用に当たり、多大なるご協力を頂戴しました。オオアサ電子株式会社 長田克司 氏、鈴木豊 氏には、ひずみ可視化デバイスの開発に当たり、多大なるご協力を頂戴しました。

ここに感謝の意を表します。

また、株式会社計測リサーチコンサルタント 花倉宏司 代表取締役社長、岡本卓慈 相談役、事業推進部 大町正和 課長をはじめとする同部職員には、ご支援とともに多くの助言を頂戴しました。特に、岡本卓慈 相談役には、研究当初からご指導、ご助言を賜り、私の背中を押し続けて頂きました。心より、感謝致します。

本研究は、多くの素晴らしい方々と機会に恵まれたことで完成したものです。研究を進めるにあたり、ご支援、ご協力を頂きながらここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々を含め、改めて皆様に心より感謝申し上げます。最後に、私のことを応援し、支え続けてくれた妻 千佳子に心から感謝の意を表し、謝辞と致します。

2021 年 9 月 梅本 秀二