

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

テンプレートマッチングを用いた 実橋梁変位計測

毛利宏輔

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 松島亘志

2018年 3月

概要

我が国には長さ 2.0m 以上の橋梁が約 70 万基存在する．老朽橋梁の増加に伴い，維持管理の効率化は喫緊の課題である．道路構造物の定期点検が法律で義務付けられたことで，地方公共団体の負担が増加したことで，維持管理業務の効率化に対する大きな需要が見込まれる．

本研究では画像分析技術の一種であるテンプレートマッチングに着目した．高解像度カメラから得られたデータにテンプレートマッチングを適用することで，たわみ計測，ひずみ計測を行うことで，点検コストの削減，橋梁健全度の客観的評価を目指す．

予備実験として，屋内に単純梁を模擬した供試体を用意し，載荷試験を実施した．たわみ計測，ひずみ計測および鋼材ヤング率の推定を行い，精度の検証を行った．実橋梁においても，たわみ計測，ひずみ計測および，ひずみ分布の推定を行い，屋外での適用性を確認した．

目次

第1章	はじめに	4
1.1	橋梁の点検・診断需要の増大とその対応策について	4
1.2	既往の研究	4
第2章	画像分析	6
2.1	テンプレートマッチングとは	6
2.2	一致度評価値	6
2.3	サブピクセル補間	7
第3章	鋼材中央載荷試験	9
3.1	実験概要	9
3.2	撮影機材と実験材料	9
3.3	実験方法	10
3.4	分析手法	10
3.5	結果と考察	11
第4章	実橋梁計測実験	14
4.1	実験概要	14
4.2	対象橋梁, 撮影機材	14
4.3	計測概要	14
4.4	分析手法	16
4.5	結果と考察	18
第5章	まとめ	28
謝辞		29
参考文献		30

図目次

図 2-1	折れ線近似	8
図 2-2	放物線近似	8
図 2-3	正規分布近似	8
図 3-1	中央載荷試験の様子	9
図 3-2	サブセットおよびひずみ計測区間の名称	10
図 3-3	計測時間 37 秒—38 秒の 左端サブセットにおけるマッチング変位	11
図 3-4	計測時間 105 秒—106 秒の 左端サブセットにおけるマッチング変位	11
図 3-5	荷重と変位の関係	12
図 3-6	変位の誤差率	12
図 3-7	荷重とヤング率の関係	12
図 3-8	推定ヤング率の誤差率	12
図 3-9	横方向変位と荷重の関係	13
図 3-10	中央部補正込の横方向近似変位と荷重の関係	13
図 3-11	荷重とひずみの関係	13
図 4-1	バイパス橋外觀図	14
図 4-2	たわみ計測概略図	15
図 4-3	たわみ計測撮影画像	15
図 4-4	ひずみ計測概略図	15
図 4-5	ひずみ計測撮影画像	15
図 4-6	各走行車両	16
図 4-7	橋梁進入時	17
図 4-8	橋梁中央部通過時	17
図 4-9	サブセット	17
図 4-10	サブセット名称およびひずみ区間名称	17
図 4-11	各サブセット	18
図 4-12	車両未走行時の縦方向マッチング変位（暫定サブセット）	18
図 4-13	橋脚部の縦方向マッチング変位	19
図 4-14	車両走行時の縦方向マッチング変位（最適サブセット）	20
図 4-15	車両未走行時の横方向マッチング変位（暫定サブセット）	21
図 4-16	移動フィルタによる平滑化処理後の 車両未走行横方向マッチング変位（暫定サブセット）	21
図 4-17	車両走行時の横方向変位（最適サブセット）	22
図 4-18	横方向変位差（上部）	23
図 4-19	横方向変位差（下部）	24
図 4-20	横方向ひずみ（上部）	25
図 4-21	横方向ひずみ（下部）	26
図 4-22	推定したひずみ分布	27

第1章 はじめに

1.1 橋梁の点検・診断需要の増大とその対応策について

我が国には長さ 2.0m 以上の橋梁が約 70 万基存在する^[1]。2016 年時点で建設後 50 年が経過した橋梁は全体の 20%に及び、その 10 年後には 44%に達すると見込まれている^[2]。このような状況を受け、橋梁を含む社会資本の戦略的維持管理は喫緊の課題として取り組まれてきた^[3]。平成 24 年、道路構造物の定期点検の法定化が進み、橋梁は 5 年に一度の近接目視点検が義務付けられた^[4]。しかし、同時に、中小スパン橋を多数抱える地方公共団体は、橋梁点検費用増加という負担を抱えることとなった^[5]。このことから、維持管理業務の効率化に対する需要は高いといえる。

現在の主な点検手法は近接目視点検である。近接目視点検の精度は、点検技術者の錬度に依存している。しかし、今後、老朽化橋梁の数が増加する中で、熟練技術者の確保はますます困難が予想される。したがって、点検技術者の錬度に依存しない客観的な点検手法との併用が求められる。

近年、様々な診断技術が研究、開発されている。これらは概ね 2 種類に分類できる。ひとつは、近接目視点検の予算低減や安全性向上を目指したコスト削減型である。例として、点検ロボットシステム^[6]や、ドローンを使用しての橋梁撮影^[7]が挙げられる。コスト削減型の場合、得られる点検結果は近接目視点検と同様のものである。撮影した画像からひび割れや腐食を人の目、もしくは画像分析で検出する。そのため、コスト削減型においては、従来の評価指標を運用することが可能である。しかし、橋梁の種類や、それを取り巻く環境は多様であるため、必ずしも適切な場所に設置できるとは限らない。もうひとつは、近接目視点検に替わる客観的な評価指標の獲得を目指した、評価指標代替型である。例えば、センサ等で計測された加速度やひずみから力学的特性を推定することで、健全性や損傷度を判断する^[8]。しかし、損傷を十分に同定できる評価指標を得るには精度の高い計測機器が必要となり、コストの観点からも実用化には至っていない。そこで、容易にデータを取得し、簡易に物理的特性を分析できる手法が求められている。本研究では、コスト削減型と評価指標代替型の両方の利点を得られるハイブリッド方式として、画像分析に着目した。

近年、デジタルカメラの高性能化により、容易に高解像度画像の撮影が可能になった。これにより、撮影者の技量や技能に依存せず必要な画像の取得が可能になったため、橋梁点検の低コスト化に貢献できる。類似する従来の点検手法として、遠望目視点検がある。これは、近接目視点検が義務化される以前に盛んに行われていた。特に予算、人員が少ない地方自治体で採用された点検手法である。しかし、遠望目視点検は見落とし率が高いといった欠点がある。したがって、点検手法としての信頼性は低いと言える。画像分析において、表面に現れた損傷を発見するだけでなく、橋梁耐荷性能を同定することが出来れば、近接目視点検の頻度低減および、つまり、道路管理団体の負担軽減に繋げることが可能である。

1.2 既往の研究

画像分析の研究は 1960 年代に本格的に開始され、1970 年代になると大型汎用計算機の普及により、様々な応用研究が行われるようになった^[9]。出水らは、H 鋼を対象として、カメラの角度や距離、シャッター速度やサブセットサイズといった各パラメータがひずみ計測精度

に与える影響を評価した^[10]。また、畝田らは、アルミニウム試験片を用いて、ひずみ発生状態を基本測定条件としたときの各撮影パラメータが与える影響を評価した^[11]。さらに、複合材料の試験体を対象にしたものとして、出水らが行った、撤去された PCT 桁橋の変位・ひずみ・ひび割れ計測^[12]や、渡辺らの鉄筋コンクリート部材のリアルタイム画像解析^[13]が挙げられる。これらは精度検証を主とした屋内での実験による検証である。

橋梁分野において、主桁や床板におけるたわみやひずみは、直接的に損傷の程度を表す指標であり^[14]、健全度評価の指標となりうる。例えば、川合らは、橋梁上に設置した複数のカメラで撮影した画像からたわみ角・たわみを計測し、スプライン関数と区分多項式を用いた平滑化により計測誤差の低減を可能にした^[15]。また、藤垣らは、1 枚の二次元格子画像から、二方向の位相分布を同時に求めるサンプリングモアレ法により、列車走行時の動的たわみ計測や、たわみ角計測^{[16],[17]}を行っている。しかし、これらは計測時に二次元格子パターン等のあらかじめ用意されたターゲットの設置を要する。そのため、ターゲット設置が困難な橋梁への適用は難しい。一方で、坂本・小野らによって、ターゲットの設置を必要とせず、たわみ変形量を測定する技術が開発されている^{[18],[19]}。しかし、たわみに比べ変位量の小さいひずみの計測はあまり行われていない。

浅川らは、高解像度での撮影が可能な 4K カメラに着目し、既知のターゲットを設置せずにテンプレートマッチングを適用することで、実橋梁のたわみを計測した。そして、曲げ剛性の推定を行うと同時に、軸重推定法により適用性を検討した^[20]。そこで、本研究では、4K カメラをもちいることで既知のターゲットを必要とせずに撮影した実橋梁画像から、ひずみおよびたわみを計測し、さらに、ひずみ分布の推定を行うことを目的とする。

第2章 画像分析

2.1 テンプレートマッチングとは

画像分析とは、対象物に関する何らかの情報を画像から取得する手法である。本研究では画像分析の中の一手法であるテンプレートマッチングに着目した。テンプレートマッチングとは、サブセットと呼ばれる小領域と入力画像領域の一致度を評価し、変位量を求める手法である。

テンプレートマッチングにはいくつかの種類が存在し、そのひとつがチャンファーマッチングである。これは画像から取得されたエッジ情報を基に、サブセットと入力画像領域の一致度を評価する手法である。特徴として、画像全体のゆがみやノイズに強く、変形を良く観察することが出来る一方で、特徴点以外で変形を認識することは出来ない。橋梁は桁部などの荷重変形領域では形状の変化が小さく、適用性は低いと言える。画素値をそのままサブセットとして使用する手法は、一般的に、入力画像の全領域で評価するため、一致度評価の計算コストが大きいうという欠点がある。しかし、本研究では橋梁の弾性変形域における変形を観察対象としているため、一致度評価する比較画像領域を、狭い範囲に限定することができる。したがって、本研究では画素値の小領域をサブセットとしたテンプレートマッチングを採用する。

2.2 一致度評価値

サブセットと入力画像の一致度は、画像のピクセル単位の輝度を用いて、各領域の相関係数から評価を行う。一致度評価値の種類として、SAD（差分絶対値和：Sum of Absolute Differences）、SSD（差分2乗和：Sum of Squared Difference）やZNCC（ゼロ平均正規化相互相関：Zero-means Normalized Cross-Correlation）等が挙げられる。SADは、

$$R_{SAD} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} |I(i,j) - T(i,j)| \quad (1)$$

と表される。 $T(i,j)$ はサブセットの輝度であり、 $I(i,j)$ は入力画像領域の輝度である。 N は画像の水平方向サイズ、 M は垂直方向サイズを表す。SADは座標が一致するピクセルごとに差分を計算し、全てのピクセルごとに足し合わせている。

SSDは、

$$R_{SSD} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (I(i,j) - T(i,j))^2 \quad (2)$$

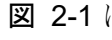
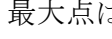
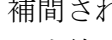
と表される。SSDもSAD同様にピクセルごとに2乗差を計算し、全てのピクセルごとに足し合わせている。SSD、SAD共に、評価値が0に近づくほど、サブセットと入力画像領域が類似していることを意味する。

一方、ZNCCは、

$$R_{ZNCC} = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (I(i,j) - \mu_I)(T(i,j) - \mu_T)}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (I(i,j) - \mu_I)^2 \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (T(i,j) - \mu_T)^2}} \quad (3)$$

と表される． μ_I, μ_T はそれぞれ，入力画像領域とサブセットの輝度平均である．ZNCCはSADやSSDと異なり，画像のピクセルを統計量として扱い，評価値が1に近いほど，類似性を示す．また，各ピクセルの輝度を輝度平均で引いているため，他の評価値に比べ，画像間の全体的な明るさ変化に強い．他の評価値より計算コストが大きいものの，本研究では橋梁の変位を対象とするため，評価対象領域を狭い範囲に限定出来る．したがって，計算コストの抑制が可能である．ゆえに，性能の良いZNCCを採用する．

2.3 サブピクセル補間

一致度評価値を用いると，最小1ピクセルの変位量を求めることが出来るが，橋梁の変位量が1ピクセル未満の場合，評価することが出来ない．1ピクセル未満の変位量を推定するために，サブピクセル補間^{[21],[22]}を導入する．サブピクセル補間は，一致度評価によって得られた最良一致点の評価値 $R_{\max}(0)$ と，その隣接2点の評価値 $R_{\max}(-1)$ ， $R_{\max}(1)$ を相関関数に当てはめることで，ピクセル間の一致度を連続的に表現するものである．相関関数として， 2-1に示す折れ線近似， 2-2に示す放物線近似， 2-3に示す正規分布近似等がある．最大点は最良一致点からの相対変位なので，最良一致点と最大点の値を足し合わせた値が，補間された変位量である．

直線近似の場合，サブピクセル補間により推定された変位量 d_s は， $R_{\max}(-1) > R_{\max}(1)$ のとき，

$$d_s = \frac{R_{\max}(-1) - R_{\max}(1)}{2(R_{\max}(-1) - R_{\max}(0))} \quad (4a)$$

$R_{\max}(1) > R_{\max}(-1)$ のとき，

$$d_s = \frac{R_{\max}(1) - R_{\max}(-1)}{2(R_{\max}(1) - R_{\max}(0))} \quad (4b)$$

である．放物線近似の場合は，

$$d_s = \frac{R_{\max}(-1) - R_{\max}(1)}{2(R_{\max}(-1) - 2R_{\max}(0) + R_{\max}(1))} \quad (5)$$

である．正規分布の場合は， $R_{\max}(-1) > R_{\max}(1)$ のとき，

$$d_s = \frac{\ln(R_{\max}(-1)/R_{\max}(1))}{2 \ln\left(\frac{R_{\max}(-1)R_{\max}(1)}{R_{\max}(0)^2}\right)} \quad (6a)$$

$R_{\max}(1) > R_{\max}(-1)$ のとき，

$$d_s = \frac{\ln(R_{\max}(1)/R_{\max}(-1))}{2 \ln\left(\frac{R_{\max}(-1)R_{\max}(1)}{R_{\max}(0)^2}\right)} \quad (6b)$$

である．一致度評価値としてSSDやZNCCを採用する場合，放物線近似を相関関数として用いると精度が良いとされる^[21]．したがって，本研究ではサブピクセル補間に放物線近似を用いる．

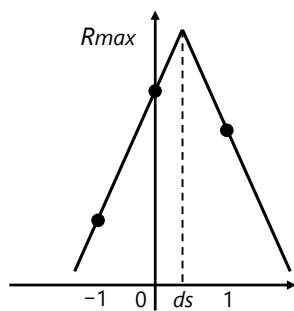


図 2-1 折れ線近似

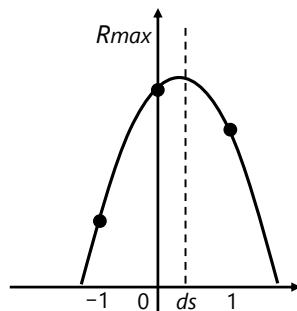


図 2-2 放物線近似

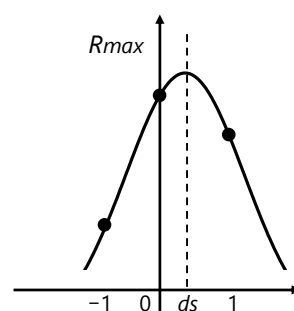


図 2-3 正規分布近似

第3章 鋼材中央載荷試験

3.1 実験概要

屋外実橋梁計測の予備実験として，屋内での鋼材中央載荷試験を実施した．図 3-1 に示した長方形断面を有する鋼板に対して中央載荷を行い，3.2 撮影機材と実験材料で述べる 4K カメラを用いて鋼板の変形を撮影する．撮影画像にテンプレートマッチングを適用し，サブセットの移動量から変位（以後，マッチング変位と呼ぶ）を求める．このとき同時に，高感度変位計によって変位（以後，計測変位と呼ぶ）を計測し，マッチング変位との比較を行う．さらに，変位と荷重の関係からヤング率を推定し，物性値と比較することで，ヤング率推定精度を検証する．

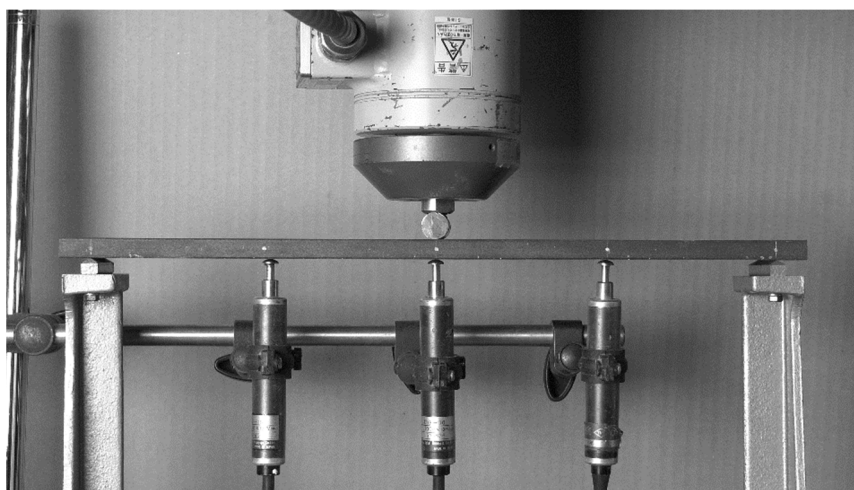


図 3-1 中央載荷試験の様子

3.2 撮影機材と実験材料

本実験で使用した撮影機材とその設定を表 3-1 に示す．また，実験に用いた鋼板のパラメータを表 3-2 に示す．

表 3-1 機材設定

撮影機材	AG-DVX200
動画画素数[pixel]	3840×2160
動画フレームレート[fps]	59.94
撮影距離[m]	0.95

表 3-2 鋼板パラメータ

厚さ[mm]	11.76
奥行[mm]	49.84
スパン[mm]	400
断面 2 次モーメント[mm ⁴]	6755
ヤング率[N/mm ²]	2.06×10^5

3.3 実験方法

アムスラー式万能試験機にスパン 400mm の支承を乗せ、その上に鋼板を設置する。そして、鋼板側面の 4 分割点にマーカで白点をつけ、その下部に変位計を取り付けた。载荷がピン支点で行われるよう、鋼板の上に鋼棒を乗せ、その上部を固定した。カメラは 0.95m 離れた位置に設置し、撮影を行う。試験機台を上昇させることで荷重を加え、鋼板の変形をおよそ 10 分間、撮影および計測を行った。中央部の変位計での計測値がおよそ 0.05mm ごとに、荷重と変位の記録を行う。

3.4 分析手法

分析を行うにあたり、まず、動画データの画像化を行う。全ての動画データを画像化するとデータ容量が増大するので、処理効率化のために一定時間おきに 1 秒間の動画を画像化する。本実験では、計 20 区間の画像を作成した。次に、画像から輝度行列の抽出を行う。ここでもデータ容量軽量化のため、鋼板領域とその周囲のみを抽出する。そして、未载荷状態の鋼板白点位置に計 5 つのサブセットを設定し、テンプレートマッチングおよびサブピクセル補間を行うことで、縦・横それぞれのマッチング変位を算出する。サブセットの名称および、サブセット間の区間名は図 3-2 中に示したものに従う。

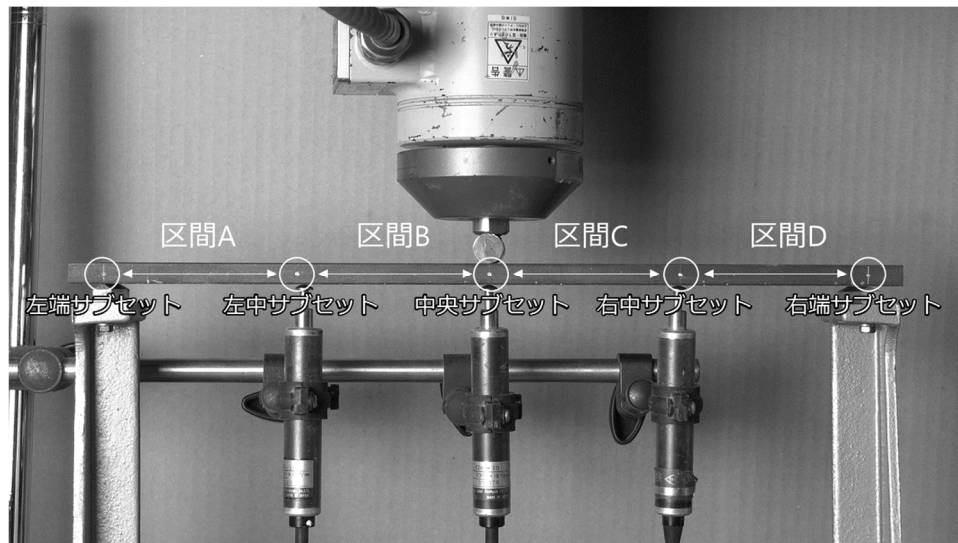


図 3-2 サブセットおよびひずみ計測区間の名称

次に、マッチング変位からヤング率の推定およびひずみ量の算出を行う。本実験の構造を、長方形断面の単純梁に集中荷重が中央部に加えられているものとしてモデル化する。荷重 P 、スパン長 l 、断面二次モーメント I 、中央部のたわみ量を δ としたとき、ヤング率は次の式で表される。

$$E = \frac{Pl^3}{48\delta I} \quad (7)$$

既知である、荷重、スパン長および断面二次モーメントと、算出したマッチング変位を代入することで、ヤング率を求める。また、ひずみ量は、端点からの距離を x 、中立軸からの距離を y としたとき、次の式で表される。

$$\varepsilon(x, y) = \frac{P}{2EI} xy \quad (8)$$

これらの式で与えられる理論解と、マッチング変位から推定されたヤング率およびひずみ量の比較を行う。

3.5 結果と考察

ここで示す変位は、画像内の左端点最上部を基準に、右方向及び、下方向を正としている。一例として、図 3-1 に計測時間 37 秒—38 秒、図 3-2 に計測時間 105 秒—106 秒の左端サブセットの縦方向マッチング変位と、その近似直線を示す。図から右上がりの傾向が確認できる。これは、鋼板中央部が固定され、徐々に端点が押し上げられている実験の様子と一致する。また、上下に振動が見られるが、サブピクセルオーダーでの推定を原因とする誤差だと考えられる。

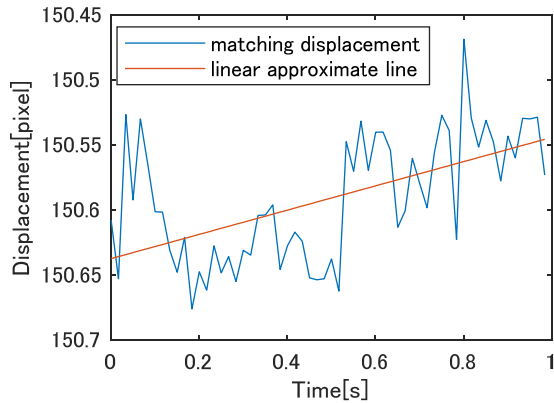


図 3-3 計測時間 37 秒—38 秒の左端サブセットにおけるマッチング変位

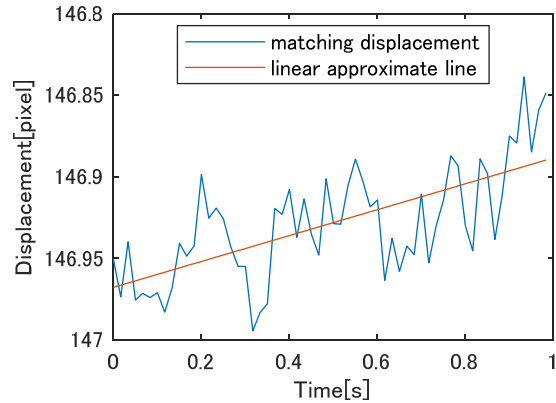


図 3-4 計測時間 105 秒—106 秒の左端サブセットにおけるマッチング変位

各計測区間における近似直線の初めの値をその計測時間のマッチング変位とし、マッチング変位、計測変位を図 3-5 に示す。グラフが概ね一致していることが確認できる。ここで、縦軸は実長さを示しており、実際の鋼板の厚さを、画像から判断できる鋼板厚み部分のピクセル数で除すことで、1 ピクセル当りの実長さを算出し、変換を行っている。ただし、画像からサブピクセルオーダーで厚さを判断することは出来ず、実長さへの変換手法に関しては改善の余地が残されている。図 3-6 にマッチング変位と計測値の誤差率を示す。一点目のみが大きな誤差率を示しているのは、このときの変位量が 0.025mm と小さく、計測誤差が相対的に大きく影響したためである。一方で、この点を除いておよそ±5%以内での誤差に収まっており、この精度での推定が可能であると言える。

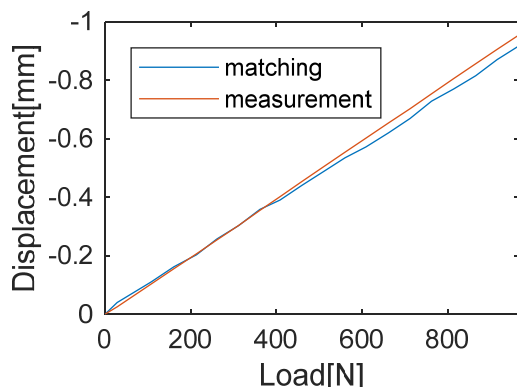


図 3-5 荷重と変位の関係

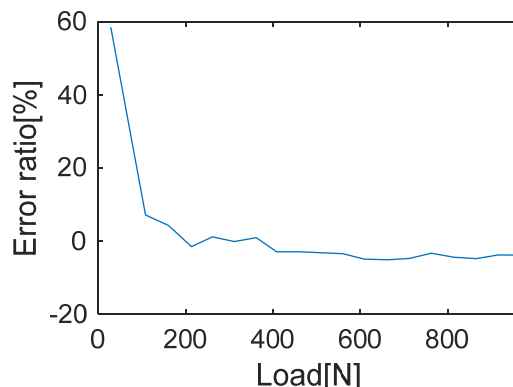


図 3-6 変位の誤差率

次に、ヤング率の推定を行う．式(7)に材料パラメータとマッチング変位を代入することでヤング率を算出した．結果を図 3-7 に示す．また，計測変位から求まるヤング率と既知のヤング率を同じく図 3-7 に示す．前述と同様の理由で，一点目に差異が確認されるが，概ね良好な結果を示している．マッチング変位，計測変位それぞれから求まるヤング率の誤差率を図 3-8 に示す．この結果から $\pm 5\%$ 程度の精度でヤング率の推定が可能であると言える．

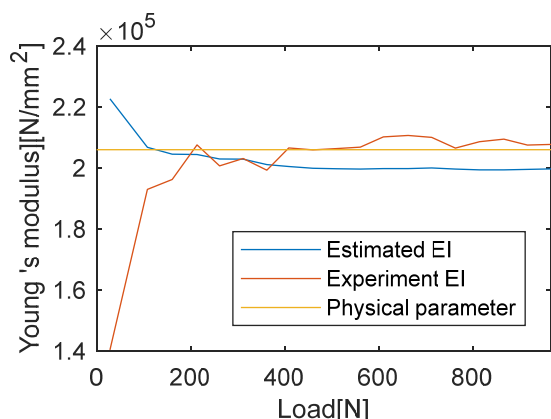


図 3-7 荷重とヤング率の関係

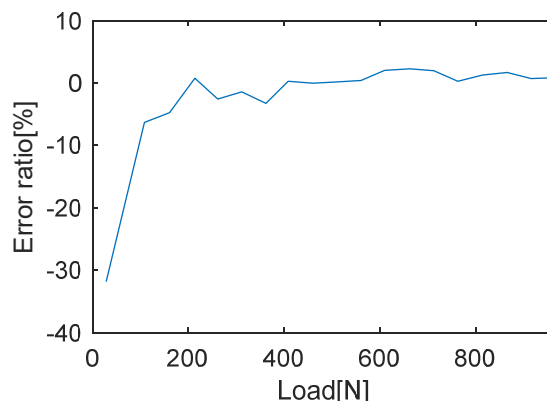


図 3-8 推定ヤング率の誤差率

ここからは，横方向変位の計測結果を示す．各サブセットの横方向変位量と荷重の関係を図 3-9 に示す．全体が右下がりの傾向を示すことが確認できる．本来，中央サブセットは横方向の変位を持たない．ピン支点部の滑り等が影響して，鋼板全体が左方向への変位を持っていると考えられる．そこで，これらの変位を直線近似したのち，各変位量から中央サブセットの変位量を差し引いたものを図 3-10 に示す．左端および左中サブセットは右側への変位をもち，右端および右中サブセットは左側へ変位をもつという結果を表し，鋼板の定性的な挙動と一致する．しかし，右端および右中サブセットにおいて，517N 付近で変位量の大小関係が入れ替わっている．これは直線近似の影響で，未載荷状態にもかかわらず，右中サブセットが変位量を持っていることが原因である．

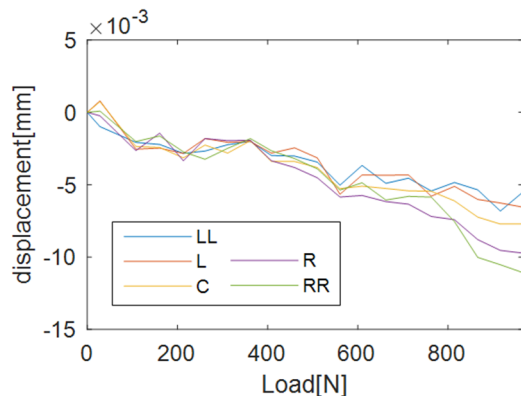


図 3-9 横方向変位と荷重の関係

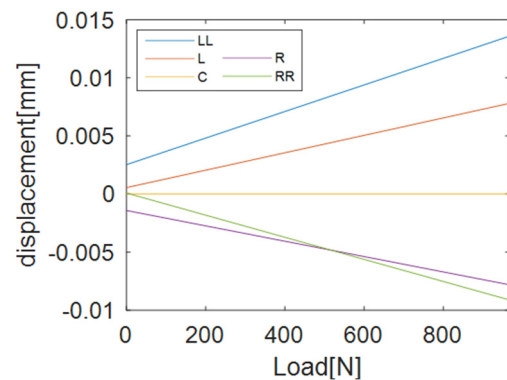


図 3-10 中央部補正込の横方向近似変位と荷重の関係

次に、ひずみ量を求める．横方向変位差を画像間のピクセル数で除すことでひずみ量を算出する．結果を図 3-11 に示す．式(8)より，鋼板の中立軸が断面中央部に位置するならば，全ての区間でひずみ量は 0 となる．しかし，全てのひずみ計測区間で圧縮ひずみが増加している．ひずみが値を持つ原因として，白点マーカーが鋼板側面の中心に正確に位置していないこと，すなわち，中立軸からの距離 y をもっていることが考えられる．その一方で，実際には支点部の滑りの影響で内側方向への変位が発生しており，図 3-11 の傾向と一致している．

この中央載荷試験で，外的要因の比較的小さい屋内環境におけるテンプレートマッチングを用いた変位計測およびヤング率の推定精度を確認した．

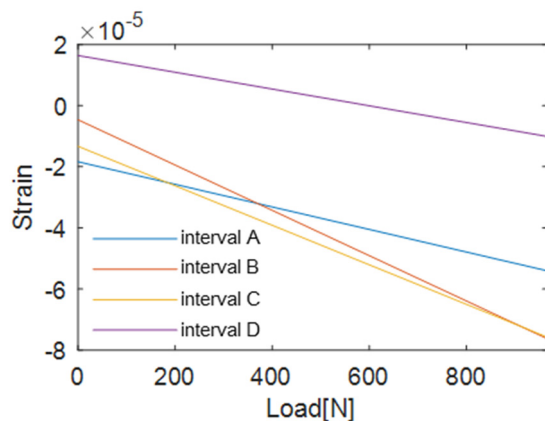


図 3-11 荷重とひずみの関係

第4章 実橋梁計測実験

4.1 実験概要

実橋梁計測実験では、たわみ計測とひずみ計測の二種類を実施する。車両通行によって励起される縦・横方向の変位を 4K カメラで撮影し、動画データから橋梁のたわみ量および、ひずみ量を算出する。また、求めたひずみ量からひずみ分布を算出する。

4.2 対象橋梁，撮影機材

対象橋梁は、国道 6 号土浦バイパスにおける桁橋の 1 スパンとした。バイパス橋の外観図を図 4-1 に示し、概要を表 4-1 に示す。バイパス橋は 4 主桁の鋼橋であり、その上を片側二車線の道路が通っている。インターチェンジや工業団地とのアクセスがよく、トラックやバス等の重量車両が多数走行することから、車両通行によって励起される変位計測に適した橋梁といえる。

本実験では、たわみ計測とひずみ計測の二種類の撮影を同時に実施し、3.2 撮影機材と実験材料で用いたカメラと同様のものを 1 台ずつ計 2 台使用した。また、フレームレートや画素数も同様である。



図 4-1 バイパス橋外観図

表 4-1 バイパス橋概要

構造形式	桁橋
主構造材料	I 型鋼材
桁数	6 主桁
スパン長[m]	41.3
車線	片側 2 車線

4.3 計測概要

たわみ計測の概略図を図 4-2 に、撮影画像を図 4-3 に示す。スパン中心と橋梁右端部が画像内に収まるよう距離を取り、22m 離れた位置にカメラを設置した。この時、スパンの半分のみを撮影したのは、橋梁全体が収まるような遠距離撮影ではたわみ量が非常に小さく検出されなかったためである。また、スパンの右半分のみを撮影したのは、車両が橋梁へ侵入するタイミングを捉えるためである。

撮影時のカメラ設定は、ズームなしのオートフォーカスとした。屋外での撮影かつ主桁部分が影になりやすい位置であったため、アイリスの設定はマニュアルで行い、主桁部分が鮮明になるよう調整した。また、カメラ内部での処理が行われていないデータを得るため、自動補正機能を切って撮影した。

次に、ひずみ計測の概略図を図 4-4 に、撮影画像を図 4-5 に示す。主桁中央部が画像内に収まるようカメラを設置し、仰角およそ 45 度の角度で撮影を行った。撮影時のカメラ設定

は、たわみ計測と同様、ズームなしのオートフォーカスとし、アイリスはマニュアルでの調整、自動補正機能を切った状態で撮影を行った。

ひずみ計測では車両位置が確認できないため、たわみ計測の画像から車両位置を参照する。そのため、カメラ間での時刻同期が必要となる。同軸ケーブルを BNC コネクタで接続し、タイムコードを共有することで時刻同期を行った

本実験では、計 8 ケースの車両走行変位を計測した。図 4-6 に各走行車両を示し、表 4-2 に各車両の種類をまとめる。図 4-6 からわかるように、手前側を走行する車両の下半分を見ることは出来ず、奥側の車線を走行する車両は確認できない。したがって、分析時には奥側の車線を走行する車両の可能性を考慮する必要がある。なお、この点に関しては撮影方法によって改善が可能であり、解決すべき課題である。

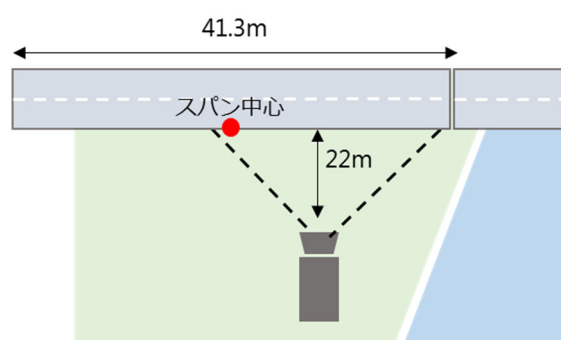


図 4-2 たわみ計測概略図



図 4-3 たわみ計測撮影画像

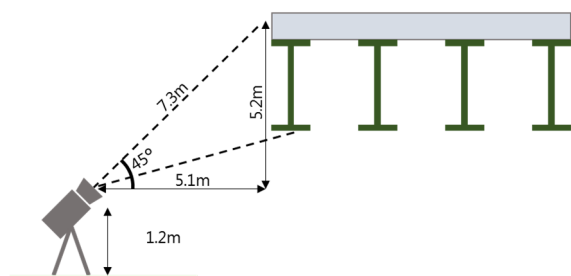


図 4-4 ひずみ計測概略図



図 4-5 ひずみ計測撮影画像



(1) ケース 1



(2) ケース 2



(3) ケース 3



(4) ケース 4



(5) ケース 5



(6) ケース 6



(7) ケース 7



(8) ケース 8

図 4-6 各走行車両

表 4-2 各車両の種類

走行ケース	走行車両	走行ケース	走行車両
ケース 1	中型トラック	ケース 5	中型トラック
ケース 2	中型トレーラー+軽	ケース 6	大型トラック
ケース 3	大型トラック	ケース 7	中型トラック
ケース 4	中型トラック 2 台	ケース 8	小型トラック

4.4 分析手法

分析を行うに際して、まず、走行ケースごとに画像化を行う。各ケースの動画は、図 4-3 に示すように、橋梁の右半分のみを撮影しているため、車両の退出を確認することが出来ない。そこで、車両速度は橋梁上で一定とし、図 4-7 に示した橋梁進入時画像および図 4-8 中央部通過画像の時間から車両退出時間を推定する。

次に、サブセットの設定を行う。たわみ計測では、画像左端に位置する橋梁中央部のフックに縦横 27×19 [pixel] の暫定的なサブセットを設定した。サブセット画像を図 4-9 に示す。

一度テンプレートマッチングを行った後、平滑化処理および、その平均値をとることで、最適なサブセットの選定を行う。そして、車両走行時も含め、再度テンプレートマッチングを行う。また、画像全体の揺れを補正するために、右端の橋脚部においても同様にマッチング変位を算出し、平滑化を行う。そして、中央サブセットの変位量から、橋脚部の平滑化された変位量を差し引くことで、橋梁のたわみ量を算出する。

ひずみ計測においては、画像から車両位置を判断することが出来ないため、たわみ計測と同時刻のデータを画像化する。サブセットは主桁上下部それぞれ5地点のフックに設定した。

サブセット名称および、ひずみ計測区間名を図 4-10 中に示す。たわみ計測と同様の方法で最適サブセットを選定する。これらの拡大画像を図 4-11 に示し、それぞれのサイズを

表 4-3 サブセットサイズにまとめる。また、最適サブセットと各区間の画像でテンプレートマッチングを行い、横方向変位を求めた後、各サブセット間の距離で除すことにより、ひずみを求める。対象橋梁は、I 型断面の単純梁に前後の車軸から等しく荷重が加えられているものとしてモデル化する。車両が橋梁中央部に位置するとき、前後の車軸それぞれの荷重を P 、ヤング率 E 、スパン長 l 、断面二次モーメント I 、端点からの距離を x 、中立軸からの距離を y とすると、車軸間のひずみは次の式で表される。

$$\varepsilon(y) = \frac{Pl}{EI}y \quad (9)$$

つまり、中立軸からの距離が一定のとき、ひずみは一定となる。各フック間の距離は、ビューワ上で、目視でピクセル数を確認する。第 3 章鋼材中央載荷試験と同様、フック間距離をサブピクセルオーダーで算出することが出来ないため、改善の余地が残されている。最後に、算出したひずみをもとに、主桁のひずみ分布を求める。



図 4-7 橋梁進入時



図 4-8 橋梁中央部通過時



図 4-9 サブセット

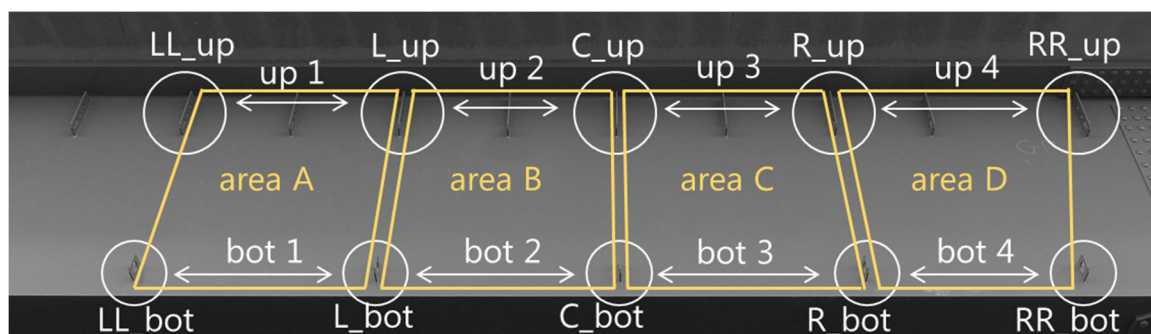


図 4-10 サブセット名称およびひずみ区間名称

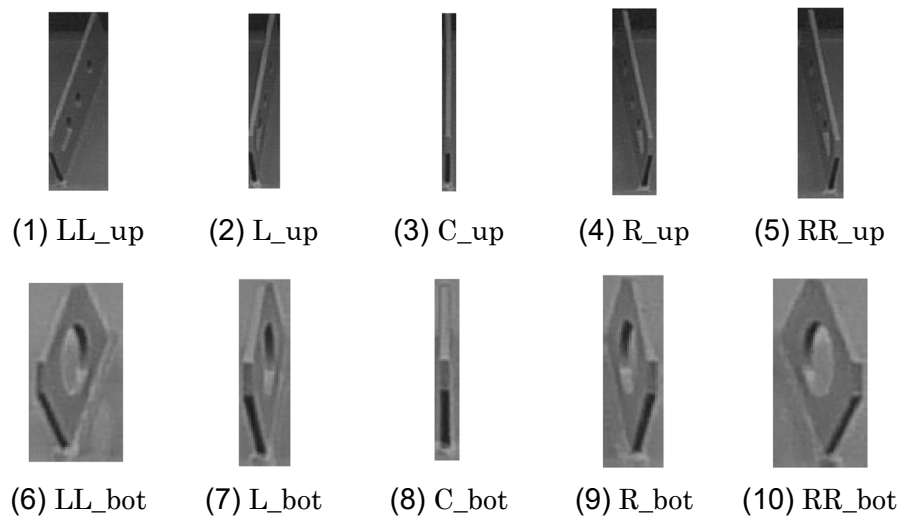


図 4-11 各サブセット

表 4-3 サブセットサイズ

サブセット名	サイズ[pixel×pixel]	サブセット名	サイズ[pixel×pixel]
LL_up	157×52	LL_bot	96×50
L_up	155×27	L_bot	96×26
C_up	156×12	C_bot	100×13
R_up	158×37	R_bot	98×30
RR_up	157×68	RR_bot	95×47

4.5 結果と考察

まず，たわみ計測実験の結果を示す．スパン中央部に設定した暫定サブセットに対して，車両が走行していない状態の各ケース先頭 100 フレームを入力画像として，テンプレートマッチングを行う．縦方向マッチング変位を 8 ケース連続して図 4-12 示す．荷重が加わっていないため，本来であれば変位は 0 を示すが，低周期に上下の振動を示している．この短周期の振動は外乱による不確定性である．一方，ケース 1, 2 に見られる長周期の変位は，画像には映らない奥側車線を走行する車両の影響と考えられる．

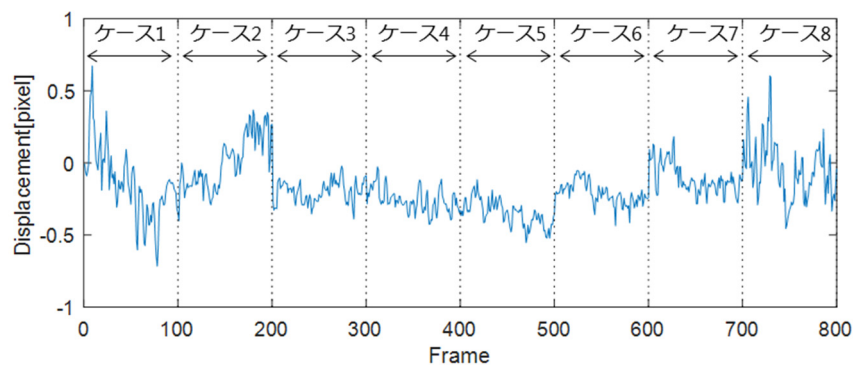


図 4-12 車両未走行時の縦方向マッチング変位（暫定サブセット）

次に、固定点である橋脚部の平滑化したマッチング変位をケースごとに図 4-13 に示す。固定点である橋脚部の変位は本来 0 であるため、上下に現れている変位はカメラの揺れであると言える。

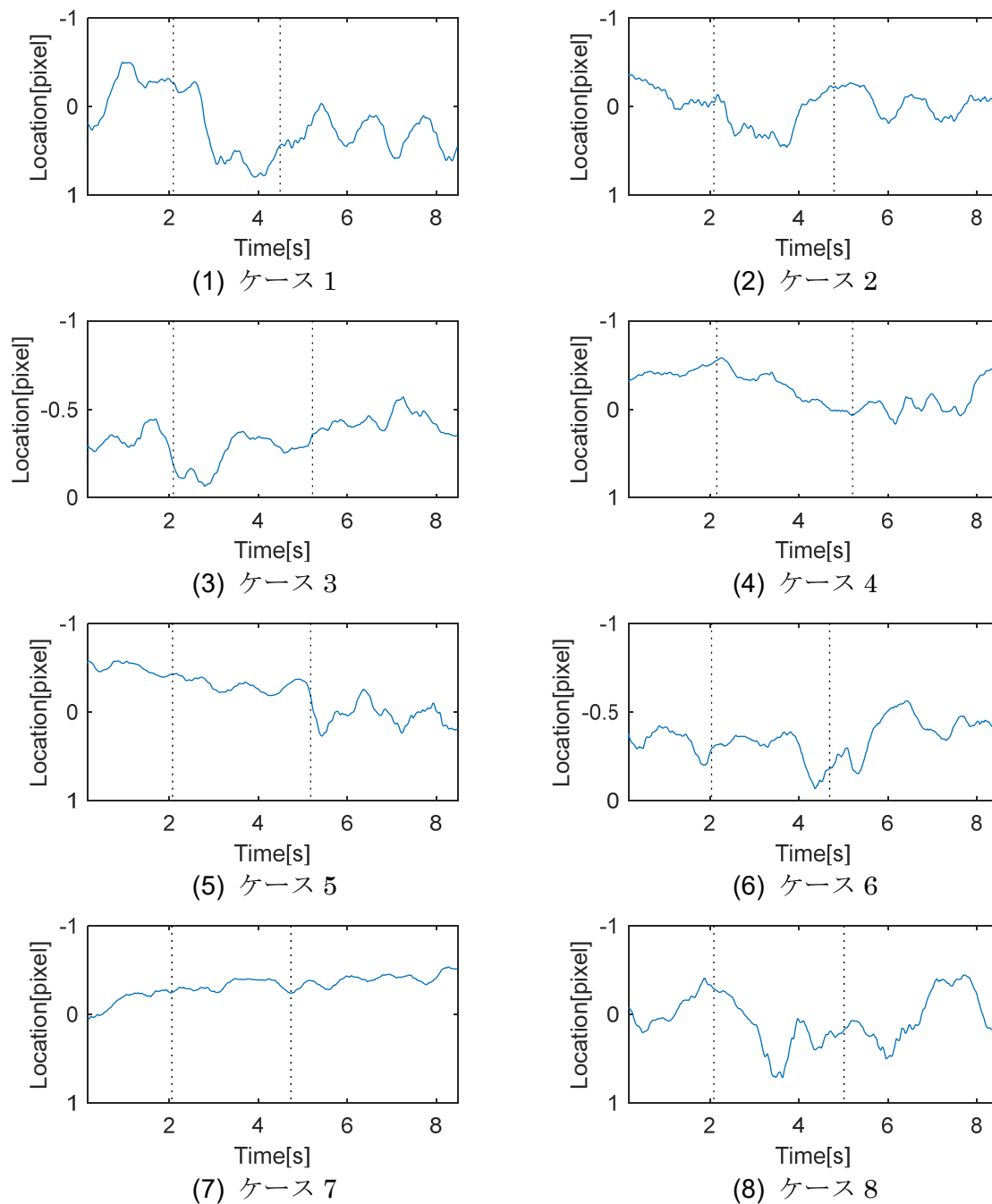


図 4-13 橋脚部の縦方向マッチング変位

次に、橋梁中央部における変位の平均値から最適サブセットを設定し、車両走行部も含めて再度テンプレートマッチングを行った。そして、マッチング変位を平滑化したものから、橋脚部におけるマッチング変位を差し引いたものを図 4-14 に示す。また、図中に車両の進入・退出のタイミングも示す。すべてのケースで車両通行中に明確なたわみを確認することが出来ていない。理由として、対象橋梁とカメラの距離が遠く、かつ、やや上向きでの撮影によって、見かけのたわみ量が小さくなり、検出限界を下回ったと考えられる。したがって、撮影距離や撮影角度といった撮影設定の改善を試みる必要がある。

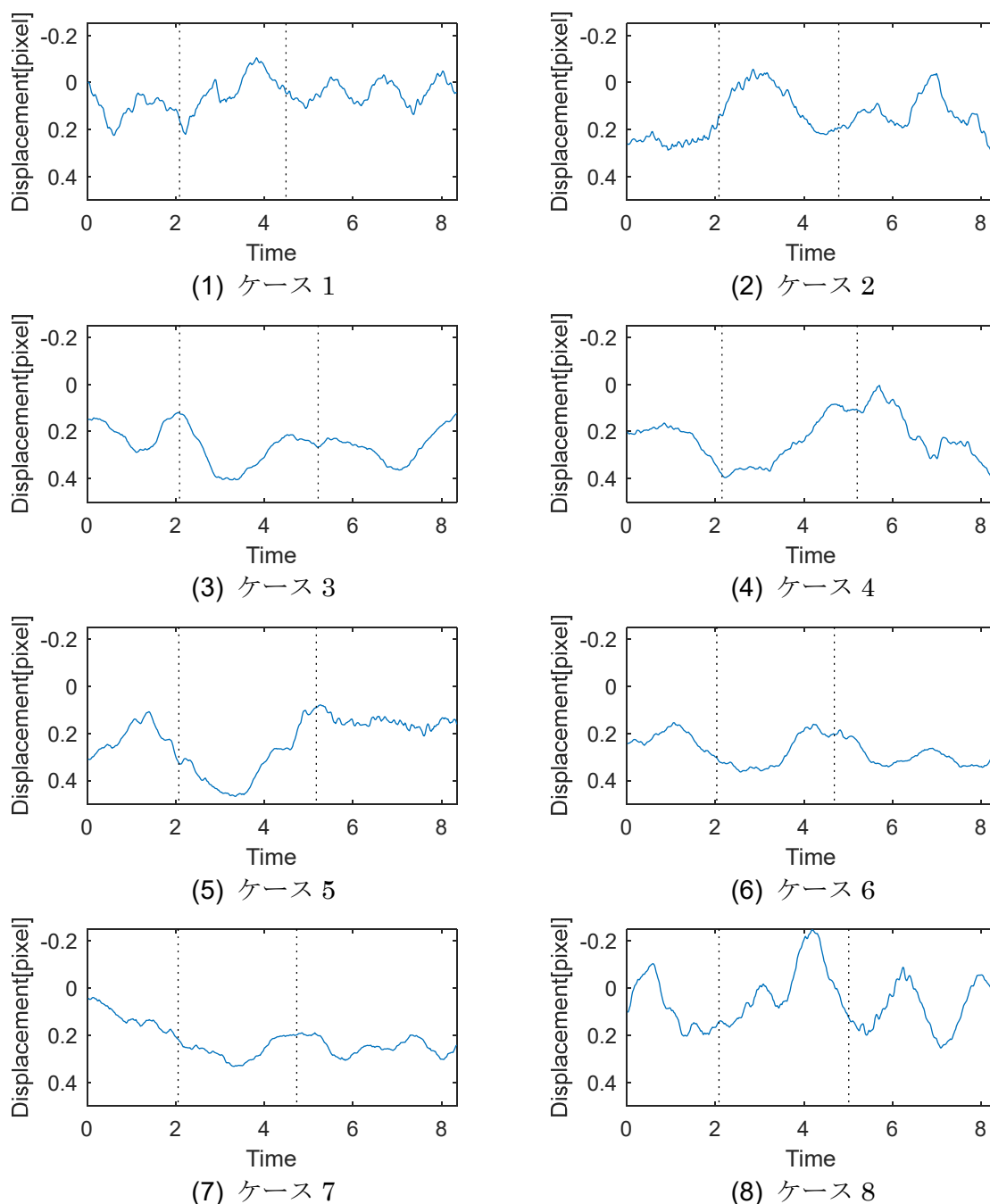


図 4-14 車両走行時の縦方向マッチング変位（最適サブセット）

次にひずみ計測実験の結果を示す．まず，図 4-15 に，車両が走行していない状態の各ケース先頭 100 フレームに関して，横方向マッチング変位を 8 ケース連続して示す．荷重が加わっていないため，本来であれば変位は 0 を示すが，左右に振動しながら変位を示している．短周期の振動は外乱の不確定性であると考えられる．短周期の振動を除去するために，ケースごとに移動平均フィルタで平滑化処理を行った．結果を図 4-16 に示す．低周期成分が取り除かれ，ケース 1，3，5，7，8 では変位量 0 付近で一定の推移を示したが，ケース 2，4，6 では，長周期の変位が見られる．長周期が見られたケースは奥側の車線を走行した車両の影響を受けていると考えられる．しかし，たわみ計測で長周期が見られたケース 1，2 と一致するのはケース 2 のみであり，ケース 1，4，6 は他の外的要因による影響である．

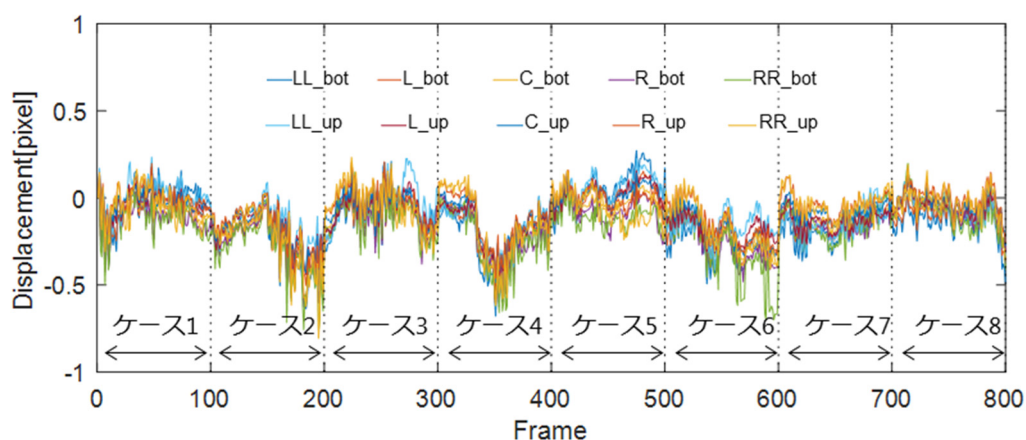


図 4-15 車両未走行時の横方向マッチング変位（暫定サブセット）

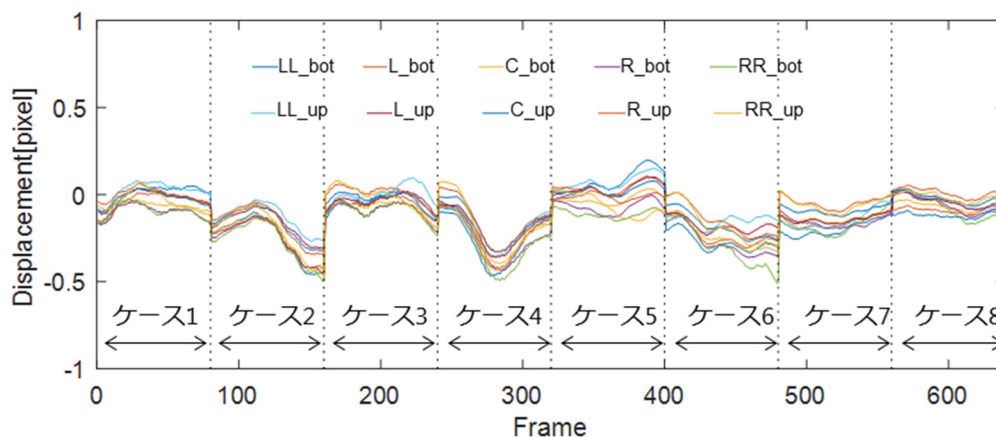


図 4-16 移動フィルタによる平滑化処理後の
車両未走行横方向マッチング変位（暫定サブセット）

平滑化処理したデータの平均値に最も近いものを最適サブセットとしたのち、車両走行部も含め、再度テンプレートマッチングを行った。マッチング変位を平滑化したものを図 4-17 に示す。また、図中に車両の進入・退出のタイミングも示す。車両走行区間において、サブセットごとに変位量の差が現れていることが確認できる。しかし、図 4-17(1), (5), (6)において、車両進入と波形の分離にずれが生じている。これは、車両進入のタイミングを目視により確認していることで生じるずれである。また、図 4-17(1), (4)において車両退出と波形の統合にずれが生じている。これは、車両進入から中央部までの走行時間から算出した退出時間の推定値だからである。

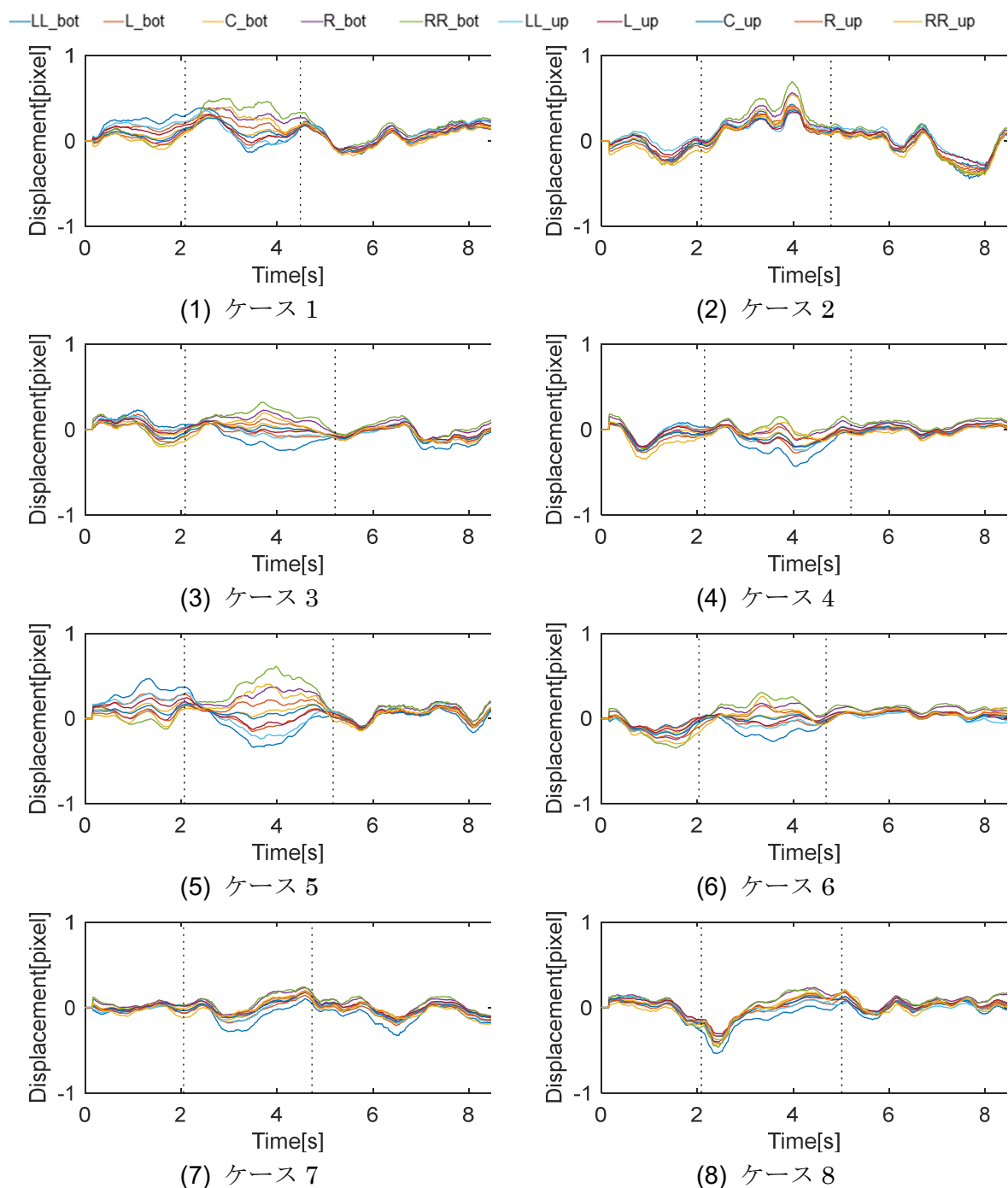


図 4-17 車両走行時の横方向変位（最適サブセット）

次に、平滑化したマッチング変位から、上部区間の差をとったものを図 4-18 に、下部区間の差をとったものを図 4-19 に示す。全体の傾向として、車両走行区間において正方向に凸な変位が見られる。これは、部材が一度伸びた後、縮むという挙動を示している。しかし、図 4-18(8)のようにピークを示さないケースがある。これは他のケースに比べて通行車両の重量が小さく、変化量が小さかったことが原因だと考えられる。

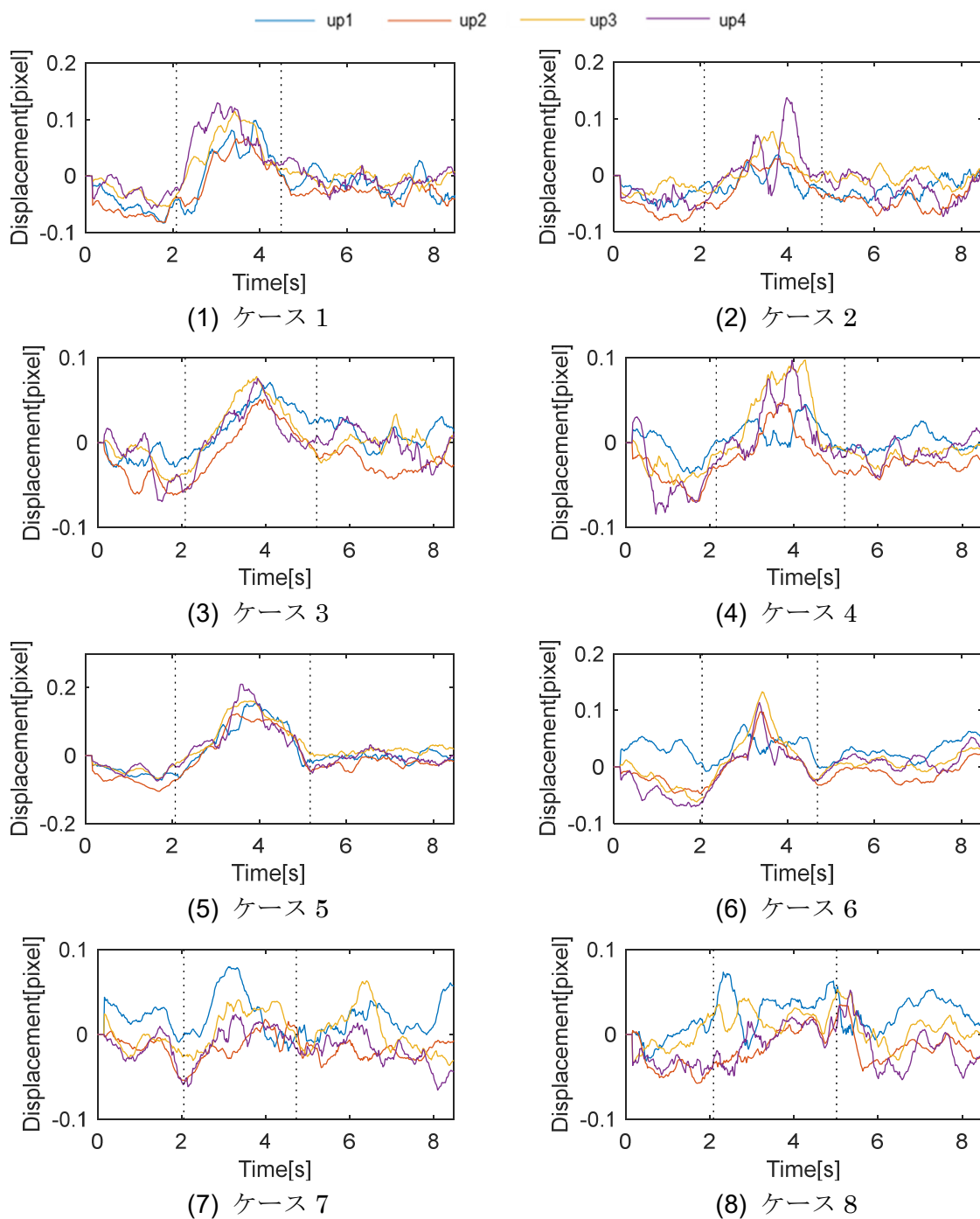


図 4-18 横方向変位差（上部）

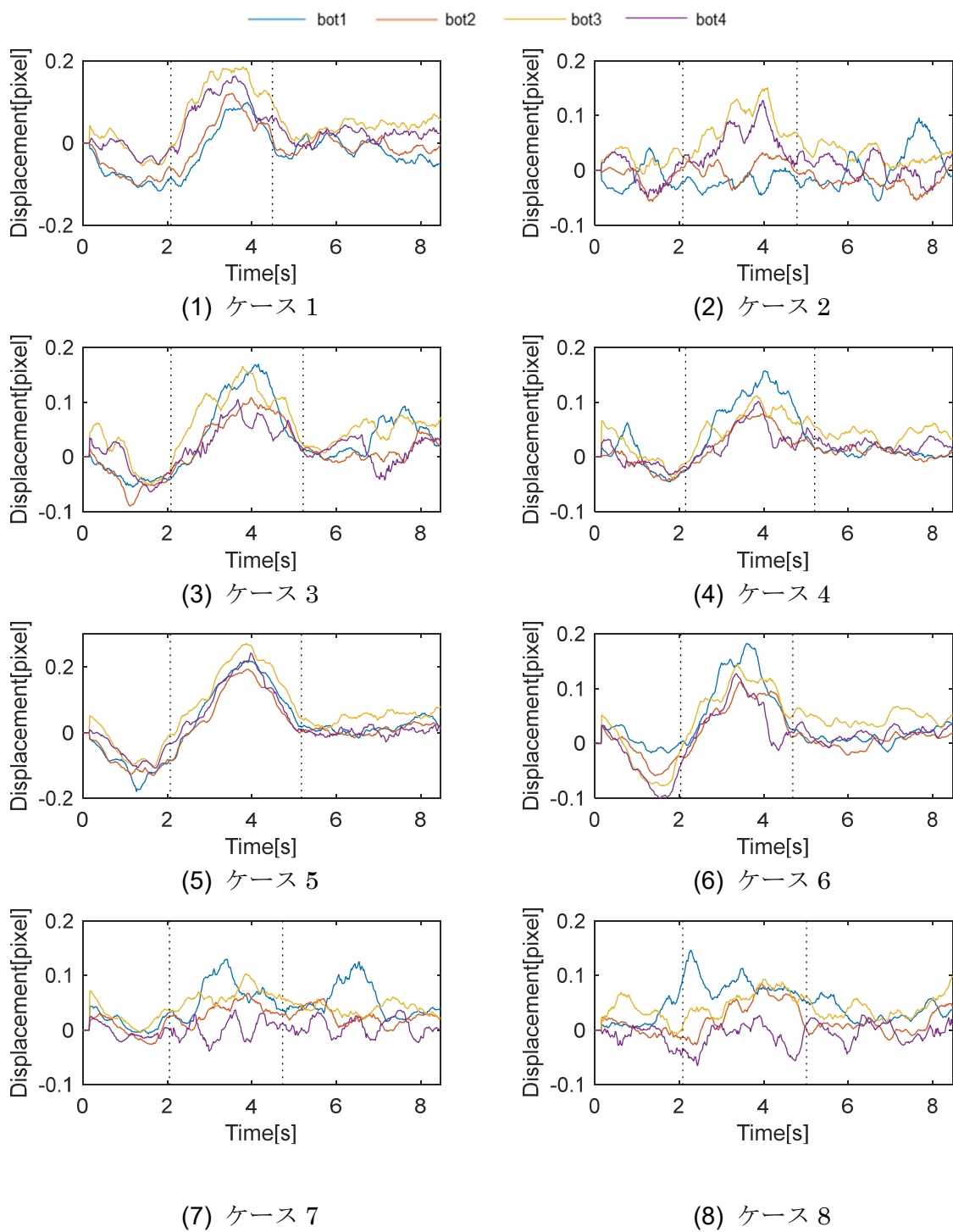


図 4-19 横方向変位差（下部）

次に、それぞれの変位差をサブセット間距離で除することで算出したひずみを図 4-20、図 4-21 に示す。図 4-18、図 4-19 に示した横方向変位差と概形は変わらない。これにより、サブセットの移動量が小さく、サブセット間の距離の違いが大きく影響されないことがわかる。

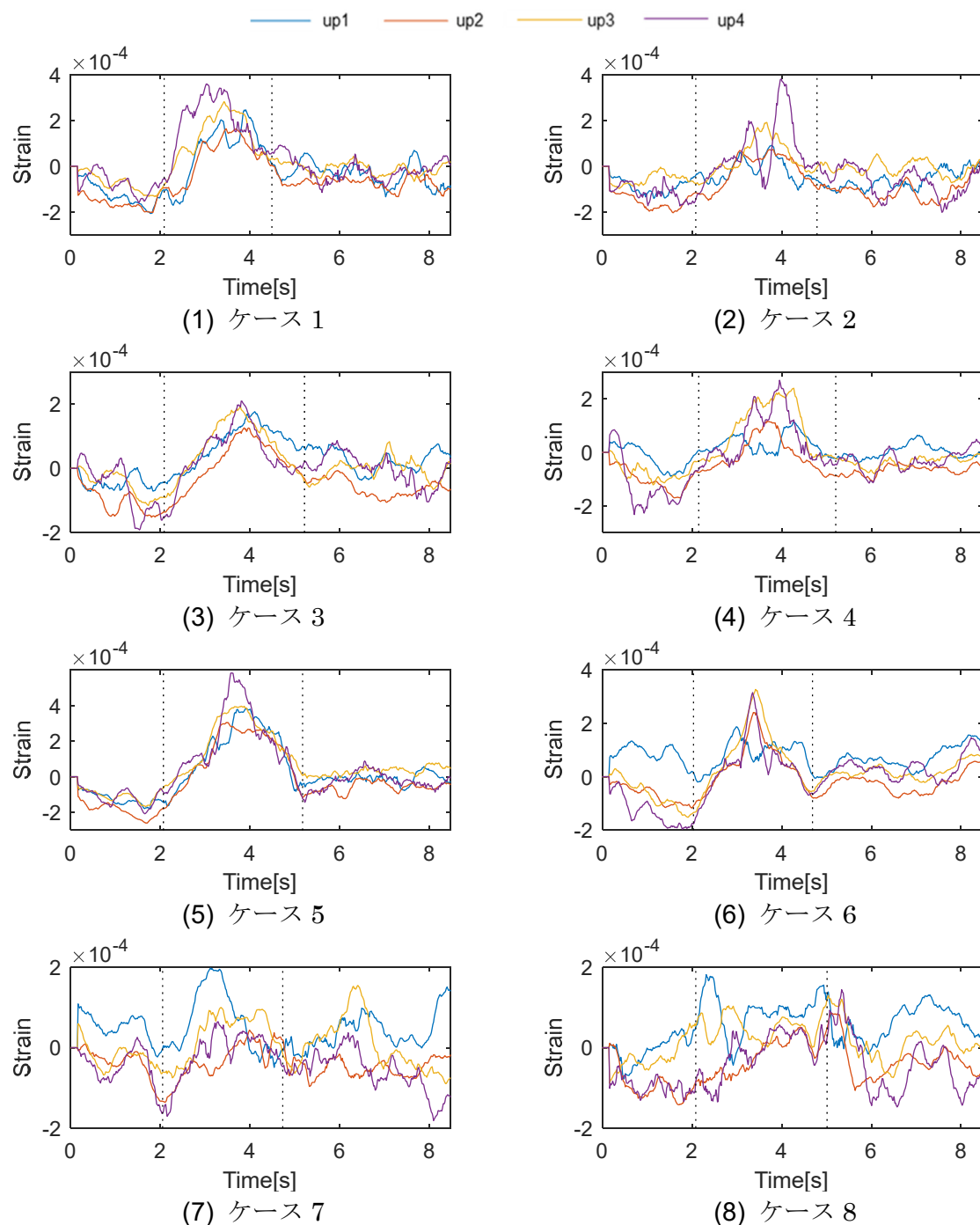


図 4-20 横方向ひずみ（上部）

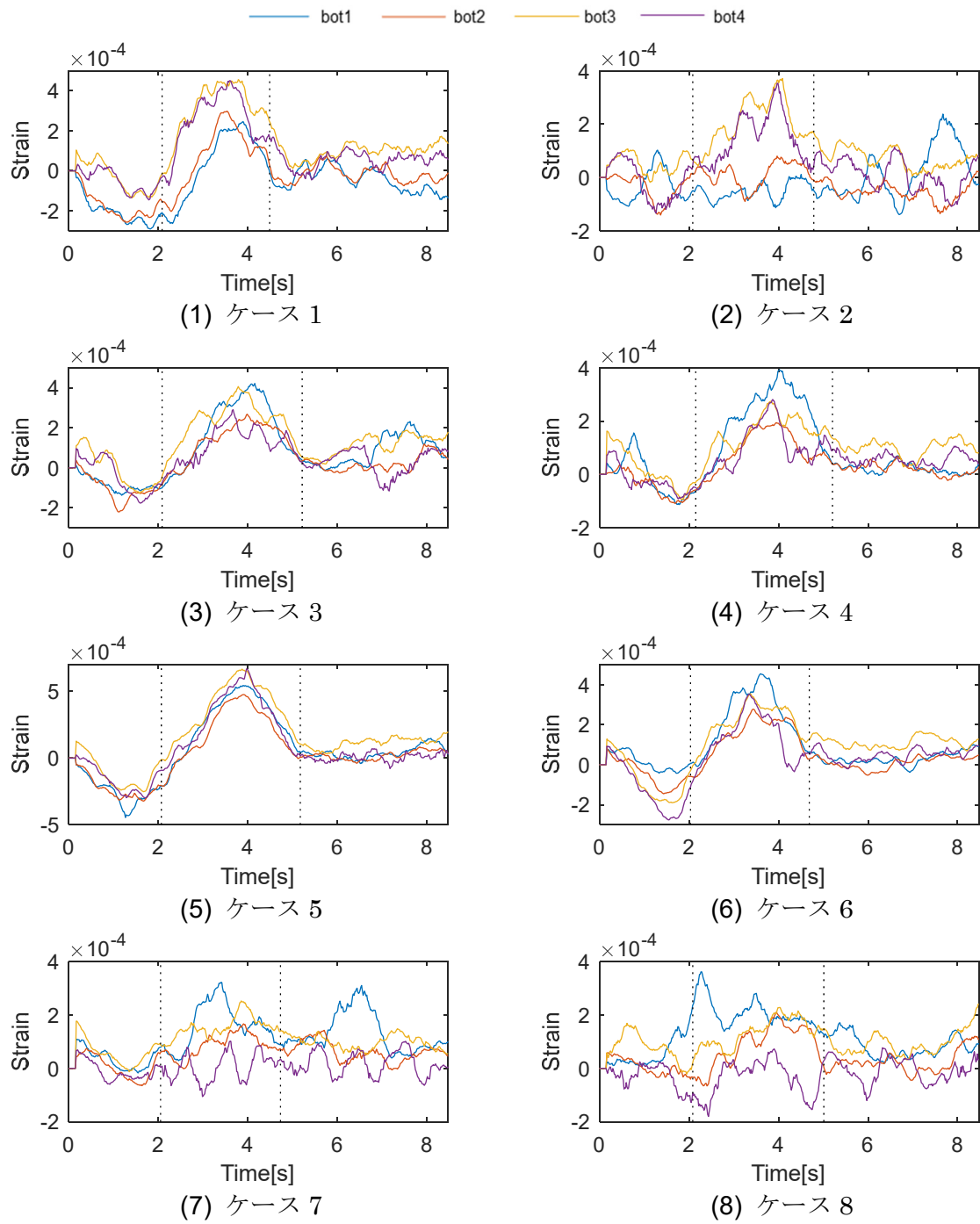


図 4-21 横方向ひずみ（下部）

最後に、得られたひずみ量から、ひずみ分布を推定する。横軸に、車両が中央部走行時のひずみ量、縦軸に、下部サブセットを基準とした画像内の高さとしたとき、下部ひずみと上部ひずみの点を直線で繋ぐことでひずみ分布を求めた。そして、直線とひずみ量 0 との交点を中立軸とした。各ケースのひずみ分布を図 4-22 に示す。図中の点線は上から、フランジ上端位置、上部サブセット位置、下部サブセット位置を示し、縦軸の下端はフランジ下端を示す。

式(9)より、車両が中央部走行時、車軸間のひずみ分布は等しくなる。図 4-22 のうち全ての区間において同様に右下がりの傾向を示しているのが、(1), (3), (5), (6)であり、最大ひずみ量は 500μ 前後である。鋼材の弾性域をひずみ量 $0.2\%(=2000\mu)$ までとすると、算出されたひずみ量は、弾性域の約 25% 程度であるといえる。

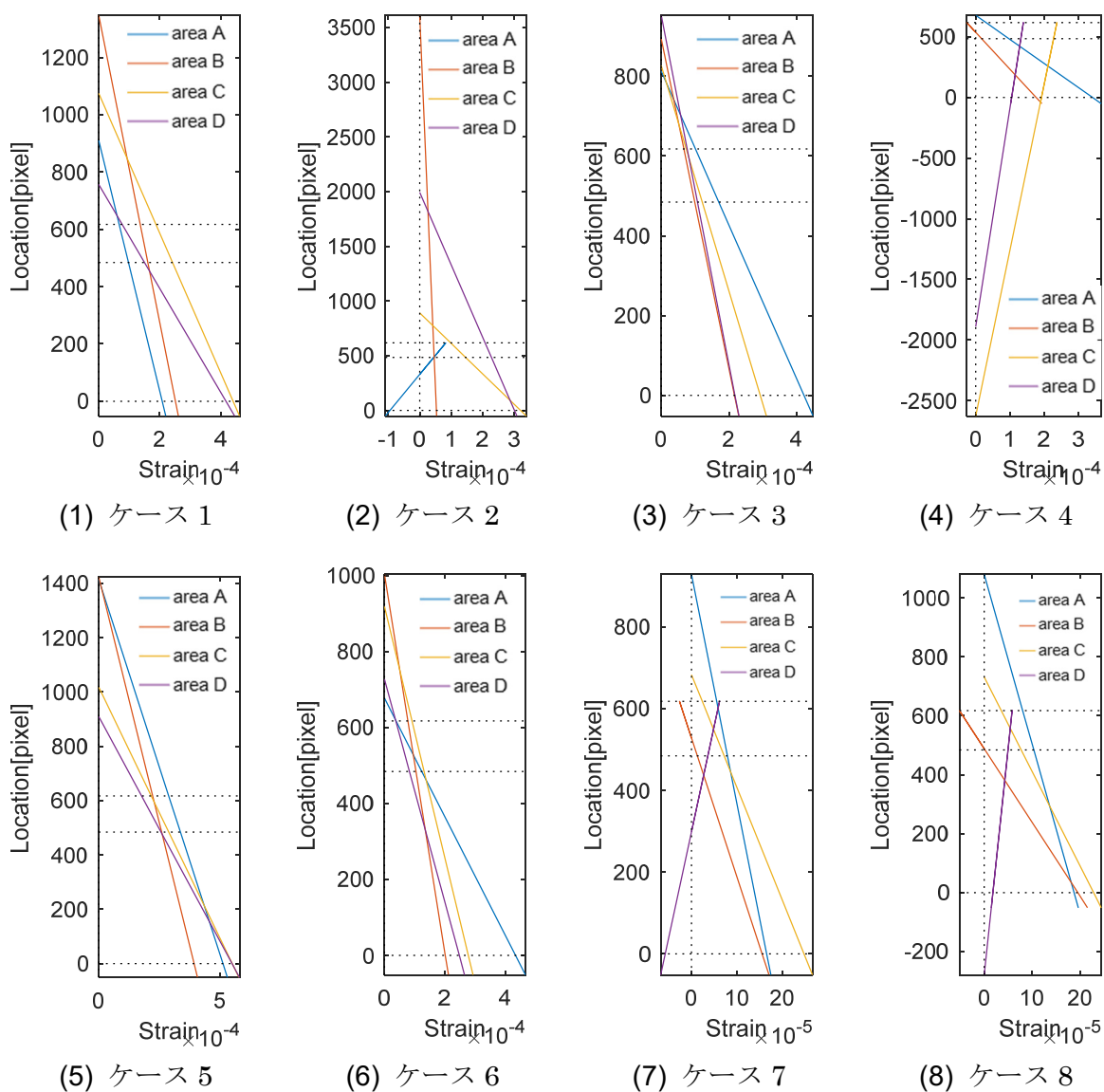


図 4-22 推定したひずみ分布

第5章 まとめ

本研究では、まず、予備実験として鋼材中央載荷試験によりテンプレートマッチングによる変位計測の精度を検証した。次に実橋梁において、たわみ計測およびひずみ計測を実施し、ひずみ分布の推定を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

1. 外乱の少ない屋内環境での中央載荷試験においてテンプレートマッチングを適用したたわみ計測では、 $\pm 5\%$ 程度の誤差でたわみを計測することが出来る。また、計測したたわみから同程度の誤差で曲げ剛性を推定することが出来る。
2. 実橋梁計測において主桁のたわみ計測を行ったが、下方向にたわむという定性的な挙動を観測することが出来なかった。
3. 主桁のひずみ計測を行い、車両が橋梁中央部を走行するとき、車軸間の領域においてひずみ分布は等しい分布を示すという仮定のもと、それに近い傾向をもったひずみ分布を確認することが出来る。

一方で、計測・分析共に課題を残したため、それらを以下にまとめる。

1. 実橋梁計測でたわみを撮影する際、橋梁上を走行する全ての車両が確認できるよう、撮影位置や角度を工夫する必要がある。また、これに伴い、撮影角度や撮影距離等、各種パラメータの変化が与える影響を検証する必要がある。
2. ひずみ算出時に必要となるサブセット間距離を、目視による手動の抽出ではない境界検出技術を導入する必要がある。
3. 縦方向、横方向共に、変位量を算出する際、画像内でのゆがみを考慮することが出来ない。アフィン変換や射影変換等を用いて適切に補正を加える必要がある。

謝辞

本研究に際して，丁寧なご指導を頂きました山本亨輔先生と松島亘志先生に深謝いたします．両先生には学内の研究に限らず，国外での活動にも挑戦する機会をいただき，多くの力を身に付けさせていただきました．また，撮影機材をご提供くださいましたパナソニック株式会社の今川太郎様，日下博也様に深く御礼申し上げます．また，実験機材の準備から測定までご協力いただきました大学技術職員の小島篤志様に心より感謝申し上げます．最後に，日々の生活から研究までお世話になったフロンティア工学研究グループの皆様，そしていつも支えてくれた家族に心より感謝いたします．

参考文献

- [1] 国土交通省, 道路メンテナンス年報データ集 (集計表), 2017
- [2] 国土交通省, 老朽化対策の取組み
- [3] 尾藤文人, 阪井暖子, 田中文夫, 社会資本の維持管理・更新のための主体間関係に関する調査研究 (中間報告) 国土交通政策研究所報第 56 号, 2015 年春季, pp.48-67
- [4] 国土交通省道路局, 道路橋定期点検要領, 2014
- [5] 川西寛, 丸山收, 三木千壽, 市町村の橋梁点検業務の費用分析と対策について, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.459-471, 2016
- [6] 和歌山昌信, 橋梁点検ロボットシステム『橋竜』による点検, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.9, pp.575-576, 2016
- [7] 岡田佳都, 岡谷貴之, 橋梁点検を代替するための受動回転球殻を有するマルチコプタの開発と実橋梁における点検性能評価, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.2, pp.119-122, 2016
- [8] 渡邊学歩, 友廣郁也, 後藤悟史, 江本久雄, 橋梁振動実験に基づく橋梁の固有振動数の同定と部材の損傷が振動特性に及ぼす影響に関する基礎的検討, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.513-521, 2014
- [9] 大町真一郎ほか, 未来へつなぐデジタルシリーズ 28 画像処理, 白鳥則郎監修, 共立出版株式会社, pp.4, 2014
- [10] 出水享, 板井達志, 藤野義裕, 山下務, 松田浩, 撮影・解析条件がデジタル画像相関法のひずみ計測精度に及ぼす影響, 長崎大学大学院工学研究科研究報告第 41 巻第 77 号, pp.45-52, 2011
- [11] 畝田道雄, 奥畑峻, 石川憲一, デジタル画像相関法を用いた全視野変形・ひずみ測定の精度評価研究, 日本機械学会論文集 C 編 76 巻 763 号, No.09-0809, pp.119-126, 2010
- [12] 出水享, 松田浩, 伊藤幸広, 木村嘉富, デジタル画像相関法を用いた撤去 PCT 桁橋の載荷時における変位, ひずみ, ひび割れ計測, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1411-1416, 2012
- [13] 渡辺健, 東広憲, 三木朋広, 二羽淳一郎, コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.94-106, 2010
- [14] 土木学会構造工学委員会 構造物ヘルスマonitoringにおける意思決定手法研究小委員会, 構造ヘルスマonitoringにおける意思決定 活動報告書, pp.17, 2017
- [15] 川合忠雄, 水本裕之, 画像計測を用いた橋梁の損傷検知手法に関する研究, Dynamics & Design Conference, No.12-12, 2012
- [16] 藤垣元治, 原卓也, 生駒昇, 村田頼信, 列車通過時における鉄道橋の動的な変位計測へのサンプリングモアレカメラの適用, 実験力学, Vol.12, No.3, pp.179-184, 2012
- [17] 藤垣元治, 富田大樹, 村田頼信, サンプリングモアレ法による動的たわみ角分布計測, 実験力学 Vol.15, No.4, pp.315-319, 2015
- [18] 坂本保彦, 近藤健一, 織田和夫, 内田修, 小野徹, デジタルカメラ画像を利用した簡易型非接触式たわみ量算出方法, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, I-258, 2010
- [19] 小野徹, 近藤健一, 坂本保彦, 内田修, 民生用デジタルカメラを利用した簡易型非接触式たわみ測定器の実用化, 土木学会第 66 回年次学術講演会概要集, 第 IV 部門, IV-

253, 2011

- [20] 浅川一樹, 画像認識を用いた橋梁耐荷性能の同定に関する基礎的検討, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文 pp.1-22, 2017
- [21] Masao Shimizu, Masatoshi Okutomi, Sub-Pixel Estimation Error Cancellation on Area-Based Matching, International Journal of Computer Vision, Vol.63(3), pp.207-224, 2205
- [22] 清水雅夫, 奥富正敏, 画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J85-D2, No.12, pp.1791-1800