

光学的全視野計測によるコンクリート現有応力推定に関する基礎的研究

出水 享¹、松田浩¹、伊藤幸広²、肥田研一³

長崎大学工学部、佐賀大学理工学部、(株)K&Tこんさるたん

概要：本研究は、光学的全視野計測法の一つであるデジタル画像相関法により精度よく全視野に応力開放ひずみを測定するための基礎的研究として、全視野ひずみ計測装置である CIS スキャナの各種誤差要因の検討やコンクリート部材への適用に関して検討を行った。

1. はじめに

我が国のインフラ構造物は、戦後の高度経済成長とともに着実に整備され一定のストックを形成するに至っているが、今後は、こうしたストックのうち高齢化したものの割合が急速に増加するという課題に直面することになる。そのような中、アメリカミネソタ州の橋梁が突然崩壊（写真 1）し、多くの死者を出し、土木構造物に対する国民の安心感・信頼感が大きく損なわれた。このような重大な事故や損傷の発生を防ぐため、橋梁の状態を適宜適切に評価し、適切な補強を行う予防保全システムの構築が必要となっている。



写真 1 崩壊事故

コンクリート構造物は、耐久性が高くメンテナンスフリーと信じられてきたが、近年、塩害、中性化、アルカリ骨材反応などの劣化により、ひび割れ、鉄筋腐食などの変状が顕著に現れてきている。例えば PC 構造物のポストテンション部材では、グラウトの充填不良箇所により水素脆化、中性化、塩害などが原因で PC 鋼材の発錆、腐食、破断（写真 2）が発生する。PC 構造物は、設計値以上のクリープ現象によりプレストレスが減少し、異常たわみが発生することもある¹⁾。プレストレスの減少は、直接耐荷力に影響し、安全性の低下に繋がるため PC 構造物を適切に維持するためには、現有応力の推定を行う必要



写真 2 PC 鋼材の破断

がある。

現有応力の推定方法の一つに応力開放法が用いられている。その原理は、コンクリート構造物を穿孔するときに生じる開放応力（ひずみ）を測定すれば、それが即ち構造物の現有応力（ひずみ）に等しいというものである。既存の研究では、その開放応力（ひずみ）をひずみゲージで測定する手法が主であるが、測定値には、骨材、温度変化、施工、接着剤などの誤差要因が含まれることや、局所的な計測しかできないなどの問題点があり、精度よく現有応力を推定するまでに至っていない。

我々は、これまでに、ひずみゲージを用いて塩害を受けた PC 橋梁をコア削孔（写真 3）によるコア周辺の開放応力（ひずみ）からプレストレストコンクリートの現有応力の推定を行ってきた^{2) 3)}。我々が行ってきた応力開放法によるコア周辺ひずみ計測は、以下の手順で行う。

- ① 鉄筋探査を行い、削孔位置を出す。
- ② ひずみゲージを貼付する。
- ③ 削孔前のひずみを計測する。
- ④ コアカッターで削孔する。
- ⑤ 削孔後のひずみを計測する。
- ⑥ 削孔前と削孔後のひずみより応力開放された周辺ひずみを求める。
- ⑦ コア周辺の計測した開放ひずみを有限要

素解析などから逆算して現有応力状態を求める。

図1は、以上の手法で求めたPC桁断面に作用する死荷重応力分布の例を示している。計測結果は、誤差を多く含んだバラつきがあることが分かる。

ひずみゲージは、施工(接着処理、貼付け角度)、温度(リード線、見かけひずみゲージ率)、ノイズ、粗骨材などの影響により、測定値にさまざまな誤差要因が含まれることと言われており、その誤差要因を完全に除去することは、困難である。このようなことからひずみゲージを用いて応力開放法によるコンクリート部材の現有応力の推定には限界がある。

そこで、本研究は、光学的全視野計測法の一つであるデジタル画像相関法により精度よく全視野に開放ひずみを測定するための基礎的研究として、全視野ひずみ計測装置の一つCISスキャナの各種誤差要因の検討やコンクリート部材への適用に関して検討を行った。

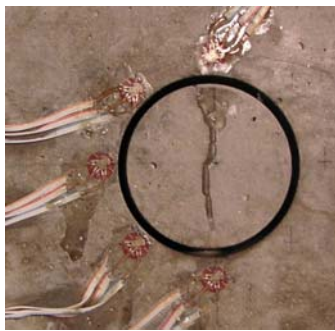


写真3 コア削孔 (応力開放)

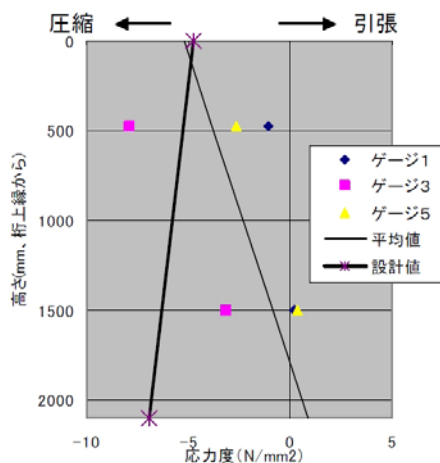


図1 応力開放からのひずみ分布

2. デジタル画像相関法

2.1 デジタル画像相関法について

デジタル画像相関法は、測定対象物表面の模様ランダム性を基にして、変形前後の測定対

象物表面をCCDカメラやCMOSカメラで撮影したデジタル画像を画像処理することにより、計測範囲全体にわたって変形の大きさと方向を求めることができる計測方法である。デジタル画像相関法の特長として、測定空間の揺らぎには比較的強いこと、また2台のカメラを用いることで、三次元変形量、変形方向および形状を計測することが可能である。

既に、機械・材料分野では集積回路の熱膨張や窒化ケイ素のき裂開口機構の解明をはじめ、多岐にわたる研究に活用されている²⁾。また、農学分野では、栄養生長期の小麦における植被率に関する研究に用いられている³⁾。医療分野においても、X線CTによる生体組織内部の非侵襲力学場計測の応用として用いられている⁴⁾。

2.2 デジタル画像相関法の原理

デジタル画像相関法で解析する際に重要になるのが、任意の点の移動量の算出である。デジタル画像相関法の解析原理は、デジタル画像が一般的に256濃度階調で表現される画像から構成された濃淡のある画像であることを利用したものである。

まず、変形前の画像において、任意の点(1画素)を中心とした $N \times N$ 画素の任意領域(サブセット)を指定する(図2(a))。計測対象物に変位を与えると、変形後の画像でのサブセットの位置は変化する(図2(b))。変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索する。このサブセット中心の点の移動より変形方向、変形量を算出する。また、ひずみ解析は、以上の手法により得られた変位計測結果を利用してひずみ分布を求める。これはあらかじめ求めたい点を中心として、ある画素数だけ離れた点の変位を基に、変形後の2点間の長さの変化を求め、計測点のひずみとする解析手法である。この解析手法の特長として、水平、垂直、斜めと3軸のひずみゲージと同じ解析を行い、最大主ひずみ、最小主ひずみの値と方向を求めることが可能であること、任意に解析点の距離を変えること、すなわちゲージ長の自由な選択が可能となることなどが挙げられる。

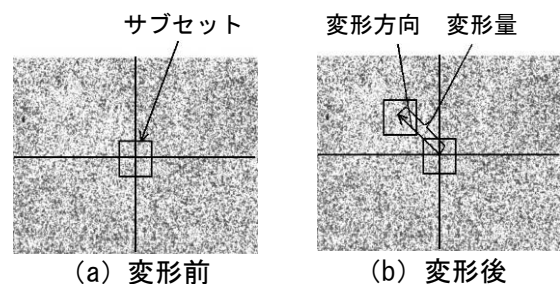


図2 変形前と変形後のデジタル画像

3. 全視野ひずみ計測装置の概要

従来、コンクリートの表面ひずみを計測する方法としては、ひずみゲージや変位計を直接対象物に取り付け計測してきたが、最近、対象物の表面画像を画像処理によって解析し、ひずみや変位量を計測する方法が開発されている。その代表的なものとして、スペックルパターン干渉法やデジタル画像相関法がある。これらは、ひずみ発生前後の画像をデジタルカメラや CCD カメラ等で撮影するだけで画像平面内の全方向（全視野）のひずみの計測が簡易にできるという特徴がある。しかし、これらの方法はレンズ付きのカメラで画像を取得する方法であるため、光源などの撮影環境の変化による影響やレンズ収差による誤差から高精度なひずみ計測は実現できていない。

本研究では、レンズ付き CCD カメラの持つ

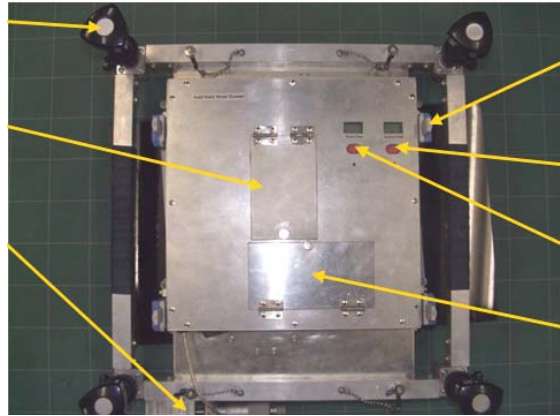
問題を解決する方法として、光源を内蔵する密着型のラインセンサスキャナ装置を用いてコンクリート表面の変形前後のデジタル画像からデジタル画像相関法によりひずみを算出する。

ここで用いたラインセンサスキャナは、市販の CIS タイプのフラットベッドスキャナをひずみ計測用に改造したものである（以下、CIS スキャナ）。CIS スキャナは、内部に一定光源を持ちレンズを使用しない密着型のスキャニング装置であるため、外乱の影響を受けず照明の調整が不要であり、また、焦点距離が一定であるため画像の縮尺がほとんど変化しないという特徴がある。装置の外形寸法は、W374×L387×H182mm で重さは 8kg、撮影範囲は最大 210mm×210mm であり、最高解像度は 1200dpi である。CIS スキャナの外形と背面を写真 4、5 にそれぞれ示す。

装置固定ボルト

計測表面観察窓

スキャン角度調整用マイクロメータ



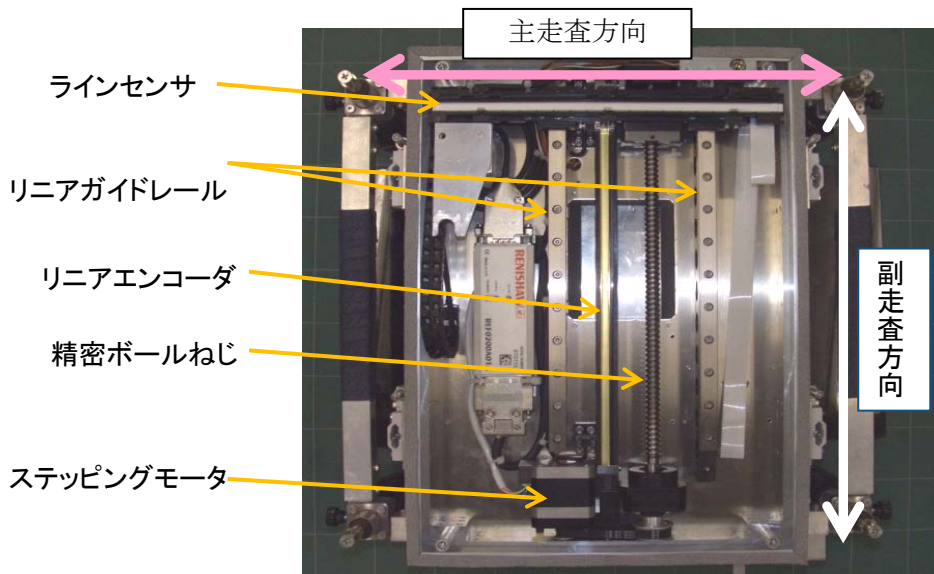
焦点距離測定用デジタルメータ

温度計(計測表面)

温度計(センサ部)

電池ボックス蓋

写真 4 CIS スキャナ外観



主走査方向

ラインセンサ

リニアガイドレール

リニアエンコーダ

精密ボールねじ

ステッピングモータ

副走査方向

写真 5 CIS スキャナ背面

4. 試験概要

ここでは、CIS スキャナをコンクリート部材へ適用するために、以下の項目について検討を行う。

- ① 焦点距離の変化が計測誤差に及ぼす影響
- ② 装置の取り外しによる計測誤差
- ③ 主走査方向のひずみ計測精度

4.1 焦点距離の変化が計測誤差に及ぼす影響

・試験概要

CIS スキャナは、密着型のスキャニングセンサであり計測面との焦点距離がひずみ計測精度に大きく与えることから、今回、CIS スキャナと計測面と焦点距離の変化が計測誤差に与える影響について検討を行った。

方法としては、計測面と CIS スキャナの焦点距離を変化させながら各焦点距離毎にスキャニングを行い、取得した画像をデジタル画像相関法にてひずみを算出し、計測値、目視による確認により焦点が最も合う距離の選定を行う。今回、被写体としては、白黒のランダムパターンが鮮明である QR コードを利用して行った。試験概要図と被写体を図 3 と写真 6 にそれぞれ示す。

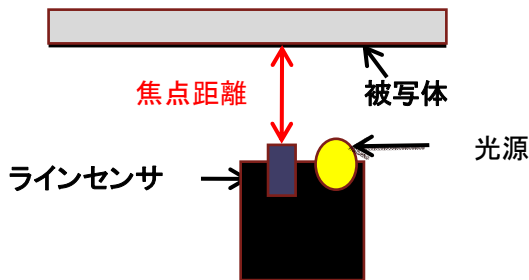


図3 試験概要図



写真6 被写体 (QRコード)

・試験結果

焦点距離を 0.0mm から 3.0mm まで変化させてデジタル画像相関法により算出した各焦点距離に対するひずみ値と標準偏差を図 4、5 に示し、

焦点距離 0.0mm、1.0mm、1.2mm、2.0mm のときのスキャニング画像の拡大図を写真 7 に示す。図 4、5 からひずみや標準偏差に影響が少ないのは、焦点距離が 0.6mm~1.2mm であることが確認でき、写真 7 から焦点距離が 1.2mm で撮影した画像が最も鮮明に認識できる。よって、これらから CIS スキャナによる焦点距離が 1.2mm の場合が最も計測誤差が少ないことが確認できた。

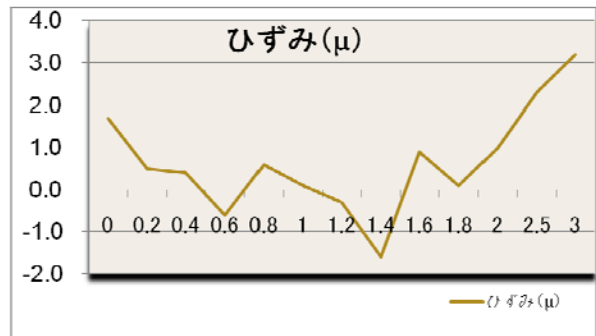


図4 焦点距離とひずみ値の関係

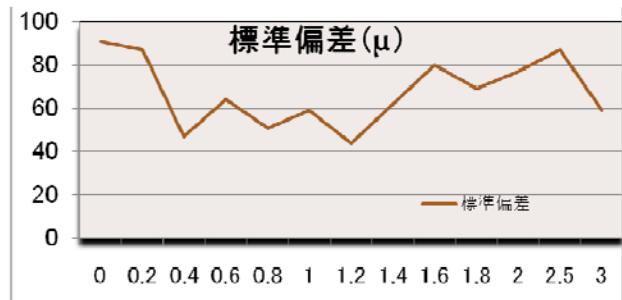


図5 ひずみ値の標準偏差

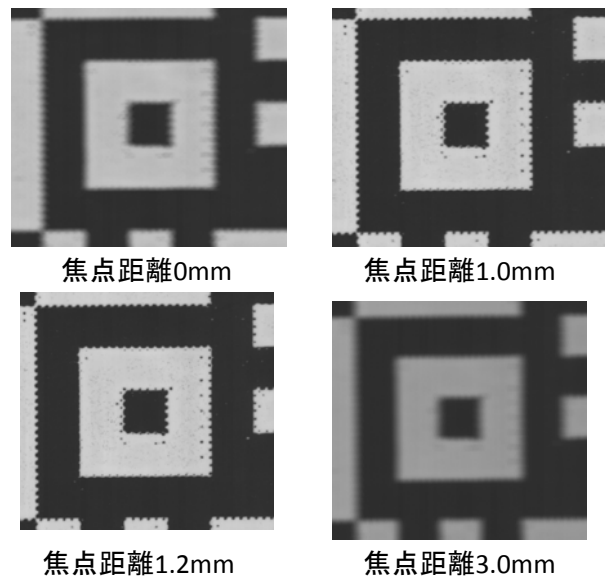


写真7 スキャニング画像の拡大図

4.2 装置取り外しによる計測誤差

・試験概要

CIS スキャナは、コンクリート表面から簡単に取り外しができるように治具を取り付けている。ここでは、装置の取り外しが計測誤差に与える影響について検討を行う。

方法としては、CIS スキャナをコンクリート試験体に取り付けてコンクリート表面をスキャンニングし、その後、CIS スキャナ装置の取り外しを行う。この操作を3回繰り返す。この取得した画像からデジタル画像相関法によりひずみを算出し、装置の取り付け、取り外しによる誤差を検討する。

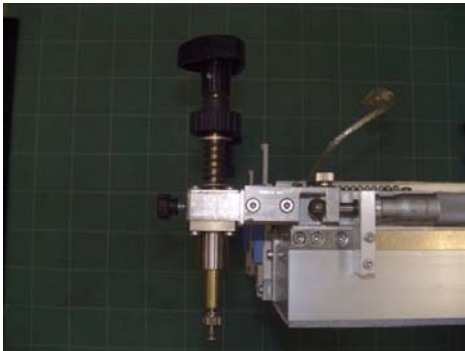


写真8 固定部（装置側）



写真9 固定部（計測対象物側）

・試験結果

撮影順によるひずみ値の差分・標準偏差と移動画素絶対値平均(pixel)を表1、2にそれぞれ示す。表より大きな誤差が確認でき、取り外しにより画像の位置が移動しており、1回目と3回目が一番大きい誤差を生じている。画像移動量を画像処理により低減することができるが、今後取り付け方法の改善が必要だと思われる。

表1 ひずみ解析結果

撮影順による組み合わせ	ひずみ (μ)	標準偏差 (μ)
1回目—2回目	-9.1	145
1回目—3回目	-26.0	190
2回目—3回目	-18.5	91

表2 移動画素絶対値平均(pixel)

撮影順による組み合わせ	X方向	Y方向
1回目—2回目	16.51	9.52
1回目—3回目	17.07	7.65
2回目—3回目	0.56	1.87

4.3 主走査方向のひずみ計測精度

CIS スキャナによるひずみ計測精度の検証は、コンクリート試験体を用いて試験体表面に貼付したひずみゲージの計測値と比較することによって行った。試験方法としては、圧縮試験機で試験体を一軸載荷し、表面ひずみを発生させ、軸方向ひずみをCIS スキャナとひずみゲージにより同時に計測した。

試験方法は、ひずみゲージを添付したコンクリート試験体にCIS スキャナを設置し、試験体に一定の荷重をかけ試験体中央鉛直方向のひずみゲージ値を 0μ に設定し、CIS スキャナにより画像を撮影する。その際の画像を初期画像とする。荷重を増加させ、ひずみゲージ値で 100μ 毎 500μ まで載荷する。各ひずみ段階ごとにCIS スキャナで画像を3枚取得する荷重を除荷させ各ひずみ段階毎にCIS スキャナで画像を3枚撮影する。初期画像と取得した画像からデジタル画像相関法によりひずみを算出し、そのひずみ値とひずみゲージ値を比較する。

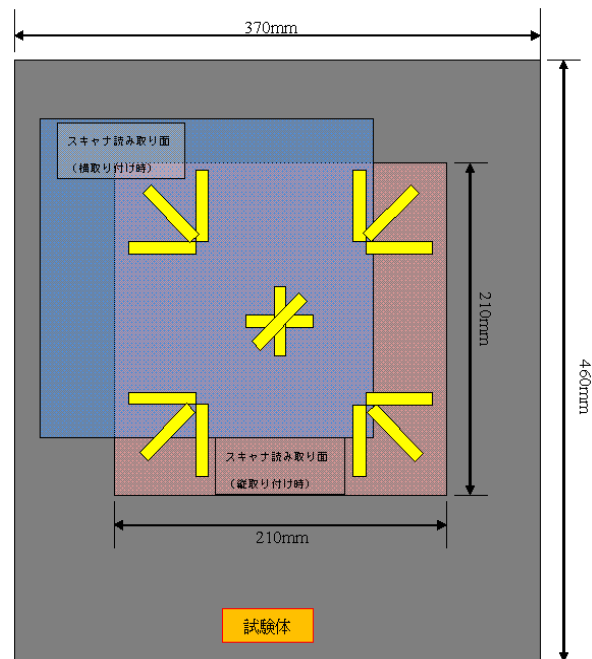


図6 試験体寸法とゲージの配置状況

・試験結果

ひずみゲージと CIS スキャナのひずみ値の関係を図 7 と表 3 に示す。図 7 から、ひずみゲージと CIS スキャナのひずみ値の相関係数が 0.99 とほぼ一致している結果となった。

表 3 の誤差値は、CIS スキャナにより求めたひずみ値とひずみゲージ値の差を表している。この誤差要因として考えられるのは、圧縮試験機の操作が難しく、スキャンニング中に一定の荷重に保つことができなかつたことや、ひずみゲージの施工や粗骨材などの影響が考えられる。

誤差があつたとはいえ、測定値はほぼ正確な値が出たといえる。コンクリート試験体に対して問題なく使用できるレベルだと思われる。

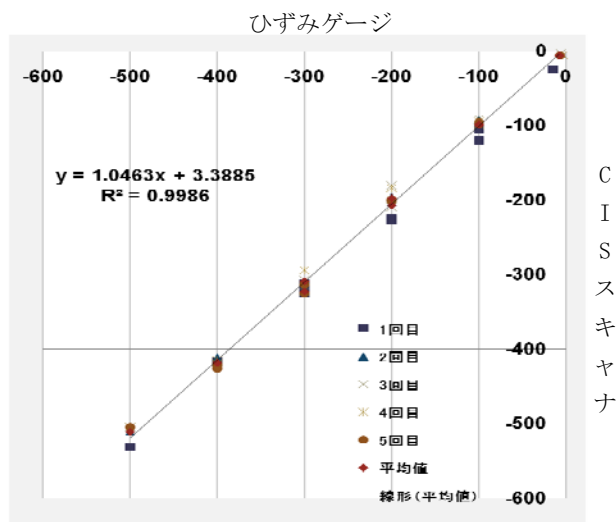


図 7 CIS スキャナとひずみゲージ値の関係

表 3 CIS スキャナとひずみゲージ値の関係

ゲージ値 (μ)	CIS スキ ャナ (μ)	標準偏差 (μ)	誤差 (μ) ()内 (%)
-100	-99	8	1 (1)
-200	-207	11	-7 (-4)
-300	-323	14	-23 (-8)
-400	-419	19	-19 (-5)
-500	-511	23	-11 (-2)
-400	-418	18	-18 (-5)
-300	-309	16	-9 (-3)
-200	-198	11	2 (1)
-100	-99	9	1 (1)
-8	-6	10	2 (33)

5. まとめ

光学的全視野計測法の一つであるデジタル画像相関法により精度よく全視野に開放ひずみを測定するための基礎的研究として、全視野ひずみ計測装置の一つ CIS スキャナの各種誤差要因の検討やコンクリート部材への適用に関して検討を行った結果以下のことが確認できた。

- ・ CIS スキャナと計測面との焦点距離の変化が計測誤差に及ぼす影響について検証を行った結果、焦点距離が 1.2mm のときに誤差が少ないことが確認できた。
- ・ CIS スキャナ装置取り外しによる計測誤差の検証を行なった結果、大きな誤差が確認できたため、取り付け方法や取付け治具の改善が必要だと思われる。
- ・ CIS スキャナによるひずみ計測精度の検証を行った結果、ひずみゲージとほぼ同じ値を示し、コンクリート試験体に対して問題なく使用できることが確認できた。

参考文献

- 1) : 若林常次、橋本孝夫、高龍、中央ヒンジを有する PC ラーメン部材による補強、橋梁と基礎第 43 巻第 7 号、pp.21-26、2009
- 2) : 肥田研一、神野人志、永吉竜二、高橋洋、出水享、有ヒンジ PC 箱けた橋の応力開放法によるプレストレス推定と中央ヒンジ部の異常たわみ原因の推定、土木構造・材料論文集 21 号、土木学会西部支部、九州橋梁・構造工学研究会、pp.129-134、2005
- 3) : 出水享、高橋洋一、肥田研一、神野人志、応力解放法による残存プレストレス量の推定、土木学会第 60 回年次学術講演会概要集、V-558、pp.1113-1114、2005
- 4) : 西川出・小倉敬二・M.A.Sutton、デジタル画像相関法による微小変位計測システム、応用力学研究所研究集会報告 14ME-S4 実験力学における計測・データ処理の問題点・ノウハウ・工夫、pp.43-47、2002
- 5) : 福嶋陽：デジタル画像を利用した栄養生長期の小麦における植被率の簡易推定法、日本作物学会紀事 vol.70 (別 1)、pp.236-237、2001
- 6) : 桑水流理・中本与一・吉川暢宏：X 線 CT による生体内非侵襲力学場評価、日本機械学会第 15 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集、pp.423-424、2003