

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月7日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360217

研究課題名（和文） 光学的手法によるリアルタイム非接触振動計測法の開発と  
非破壊検査への応用研究課題名（英文） Development of real-time non-contact vibration measurement  
by optical methods and application to nondestructive testing

研究代表者

松田 浩（MATSUDA HIROSHI）

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：20157324

研究成果の概要（和文）：

(1)非接触全視野非破壊試験法の開発とその応用：レーザシェアログラフィを用いた欠陥検知への有効性について検討した。また、超高速カメラを用いた動的変位計測システムによる振動計測法の有効性を確認した。

(2)常時微動計測に基づく構造同定及び健全度評価への応用：耐震補強前後の実橋脚を対象として、レーザドップラ速度計による振動試験と FE 解析から振動モード同定を実施した。補強前後の固有振動数の変化を実振動計測および振動解析で確認することができた。

研究成果の概要（英文）：

(1)Development and application of non-contact full-field non-destructive testing : We investigated the effectiveness of defect detection using a laser shearography, in addition, confirmed the effectiveness of the vibration measurement using dynamic displacement measurement system with two ultra-high-speed camera.

(2)Structure identification based on microtremor measurement and application for the health evaluation : As for the piers of the bridge before and after the actual seismic retrofit, vibration mode identification was carried out from the vibration test by laser doppler velocimeter (LDV) and finite element (FE) analysis of the entire mode of vibration. Using the actual vibration measurement and vibration analysis, we were able to see the change of natural frequency before and after reinforcement.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2010年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：維持管理工学，光学的非接触全視野計測法

## 1. 研究開始当初の背景

構造部材の変位やひずみの計測法として主に変位計や歪ゲージを用いた計測が行われてきた。歪ゲージ法は適切な位置、方向、状態、環境の下で信頼性の高い値を得ること

ができるが、得られるひずみ値は定点のゲージ長の平均ひずみであり、対象物全体のひずみ分布を得るには多くのゲージと複雑な配線作業が必要となる。また、対象物にゲージを貼付できない環境条件においては計測が

制限される。以上に鑑み、申請者はここ数年、光学的手法を用いた非接触全視野計測による変位・ひずみ・応力計測の研究を行っている。従来の歪ゲージによる計測では、斜めひび割れが、“いつ”、“どの位置に”、“どのように”発生するかを計測することが困難であったが、電子スペックルパターン干渉計測（ESPI）を用いることにより RC はりの斜めひび割れの発生と進展を可視化することができた。また、三次元デジタル画像相関計測法（3D-DIC）を用いた円筒シェルの変位座屈試験においては、座屈前後の変位が計測でき、ダイヤモンド座屈の発生過程を可視化することができた。Arbocz, J. Babcock, C.D. や Batista, R.C. Croll, J.G.A. が苦勞して計測した結果と極めて良く対応した軸方向一波の座屈モードが精度よく計測されている。このような現象はこれまで FEM 解析等で確認されてきたが、実験的に明確に可視化された事例は極めて少なく、光学的計測法の有効性と有用性を確認することができた。さらに、曲面の共振時の振動モードをレーザーホログラフィ干渉法による振動モード計測を実施している。高次の振動モードを鮮明に計測することができるが、暗室で行わなければならないこと、時間平均法を用いているため、写真撮影後再生させる必要があり、時間がかかることがデメリットであった。しかし、この手法を欠陥を模擬した切欠板に応用すると、固有振動数の低下および振動モードの変化を確認することができた。このことは欠陥検知への適用可能性を示唆するものである。

## 2. 研究の目的

構造物の健全性診断法としては、目視や打音検査などの経験的方法のほか、定量的検査が可能な非破壊検査技術の開発が進められている。しかし、既存の非破壊検査技術は構造物のスケールや現場での悪計測環境下で適用するには経済的・技術的困難があり、構造物への一般的な適用としてはまだ実用化に至っていない。本研究では、構造物の健全性診断の際に必要な空間的に分布したミクロからマクロに至るまでの劣化・変状を容易に取得する計測法として、光学的計測法による変位・ひずみ計測技術を振動計測に拡張するとともに、レーザドップラ振動計測と併用して、実時間・非接触振動計測によるロバスト性の高い非破壊検査手法を確立することを目標とする。

### (1) 光学的非接触全視野振動計測装置の開発と非破壊試験法への適用

構造的な欠陥は不均一な変形の微分値として観察されるので、変形の空間分布を計測することにより欠陥を識別することができる。光学的全視野計測を用いると、欠陥は外

部の負荷や振動によって不均一な変形の微分値によって特定される。本研究では、現有計測機器を改良し、上記原理に基づく計測装置を開発する。

① 現有の二次元面内計測 ESPI 装置の解析ソフトを用いて、レーザージャログラフィシステムを開発する。加振器によりクラックや積層の剥離や接着不良などの欠陥を局部的に励振させる。このときの振動を全視野計測することにより欠陥検知が可能となる。

② 現有の二次元面内計測 ESPI 装置を面外変位も計測可能な三次元変位計測装置に改良する。

③ 3D-DIC 装置に高解像度高速度カメラを使用し、振動計測装置に改良する。

### (2) 常時微動計測に基づく健全度評価法確立

橋梁や風力発電施設の全体振動モードや部材の局所モードなどの振動特性を、レーザドップラ速度計（LDV）を用いた実構造試験によって解明するとともに、それによる健全度評価法を確立する。

### (3) 振動計測に基づく実構造物の復元力特性算定システムの構築

震動台実験では、レーザ変位計やロードセルを使って変位と力を計測することができるが、実構造物ではこのような計測器を設置することはできない。それに代わるものとして、時刻同期を取ったレーザドップラ速度計（LDV）を複数設置し、相対変位は時間積分により、力は加速度から算定し、実構造物の復元力特性を算定するシステムを構築する。LDV を用いるのは遠距離常時微動計測が可能であるためである。

## 3. 研究の方法

本研究では、振動計測データに基づく構造物の健全度を評価するために、光学的非接触全視野振動計測装置を開発するとともに、非破壊検査への適用性について検討する。また、レーザドップラ振動計測を応用して、実橋供用時微動計測に基づく橋梁の全体振動モードや部材の局所モード計測による健全度評価法について検討する。さらに、時刻同期を取ったレーザドップラ速度計（LDV）を複数設置し、実構造物の復元力特性を算定するシステムを構築する。

### (1) 非接触全視野非破壊試験法の開発

① 構造的な欠陥は不均一な変形の勾配として観察されるので、変形の空間分布を全視野計測することにより欠陥を識別することができる。光学的全視野計測を用いると、欠陥は外部の負荷や振動によって不均一な変形の勾配によって特定される。本研究では、現有計測機器を改良し、上記原理に基づく計測装置を開発する。現有の 2D 面内レーザスペックル干渉計測装置のセンサー部をシェアリングセンサーに取替え、ポータブルコントローラ

一を用いて、レーザーシェアログラフィシステムを開発する。解析ソフトは現有ソフトをそのまま用いることができる。ピエゾ加振器等によりクラックや積層の剥離や接着不良などの欠陥を局部的に励振させ、このときの振動を全視野計測することにより欠陥検知への適用性について検討する。

②超高速デジタル画像相関計測装置の開発

現有の3Dデジタル画像相関計測装置のカメラを高解像度ハイスピードカメラに交換することにより、高速現象や過渡現象を捉えることができ、材料や部材の実構造における変形や振動を全視野データとして捉えることができる。ソフトは現有のものをそのまま活用する。3D-ESPIよりも精度は劣るが、レーザー光を用いていないので、土木工学分野に適したロバスト性の高い計測装置を開発できるものとする。

(2)常時微動計測に基づく健全度評価法確立

橋梁や風力発電施設の全体振動モードや部材の局所モードなどの振動特性を、有限要素解析、レーザドップラ速度計(LDV)、前記の非接触全視野計測装置を用いた実構造試験によって解明するとともに、それによる健全度評価法を確立する。具体的には以下のような研究を進める。

①橋梁や風量発電施設の3D-FEM解析を行い、支持条件、主構造のモデル化が固有振動特性に及ぼす影響を解明する。図面がない構造物に対しては3D計測を実施する。

②全体モード、局所モード、部材間の内部共振連成等の固有振動特性について詳細に調べる。また、各部材の損傷や破断を想定して固有振動解析を実施し、損傷が及ぼす固有振動数の変化について解明する。

③LDVおよびワイヤレスLAN速度計を用いた実構造の常時微動による振動計測を実施し、それぞれの実測結果を比較するとともに、FEM解析結果と比較し、本手法の有効性について検討する。

④常時微動データの非正常性を考慮し、時間変動モード特性の同定をウェーブレット解析により行い、解の安定性、精度、時間的変化について検討し、モード同定の高精度化に向けて基礎データを蓄積する。

(3)振動計測に基づく実構造物の復元力特性算定システムの構築

①複数台のLDVを用いて、同期された振動データを取得する装置を開発する。LDVを用いるのは数十mの距離からも計測可能であるためである。

②時刻同期を取った複数のレーザドップラ速度計(LDV)を用いて常時微動計測によって得られる加速度の時系列データを算出する。振動計測用レーザーとワイヤレスLAN速度計を用いた計測データと比較検討し計測結果を評価する。

③地震等による構造物の被害度を推定するために、計測データから、相対変位は時間積分により、力は加速度から算定し、実構造物の復元力特性を算定するシステムを構築する。

4. 研究成果

(1)非接触全視野非破壊試験法の開発とその応用(論文④⑩)

高速カメラを用いたデジタル画像相関法によるアルミ試験片の動的変位計測を実施した(図1)。アルミ試験片の定常振動状態及び減衰振動状態においてDICMによる動的変位計測精度は非常に良く、その有効性が確認でき、FFT解析により固有振動数の特定が可能である。

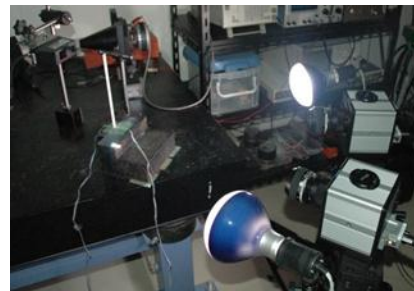
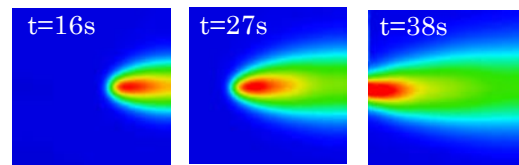


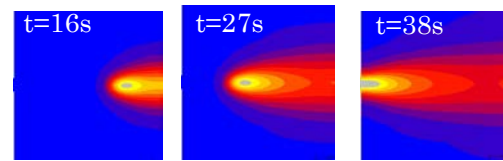
図1 動的変位計測

(2)溶接部材の過熱・冷却過程におけるひずみ挙動と3D弾塑性FE解析(論文①⑬)

DICMにより計測した変形・ひずみ計測を実施し、結果の妥当性を評価するために3D熱弾塑性FE解析を実施した。

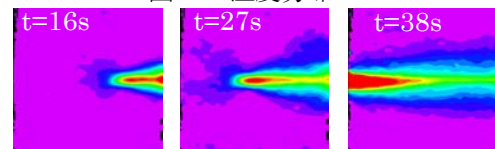


(a) 赤外線サーモグラフィ

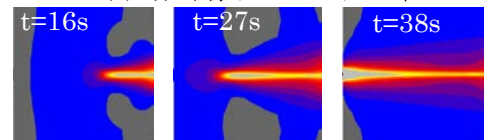


(b) FEM

図2 温度分布



(a) 赤外線サーモグラフィ



(b) FEM

図3 y方向ひずみ分布

- ・赤外線サーモグラフィにより計測した温度分布・温度履歴に一致するような入熱温度、表面熱伝達率をパラメトリック解析により算出することができた。

- ・パラメトリック解析で算出した入熱温度、表面熱伝達率を使用した際の解析結果は、DICM の変形・ひずみ分布および履歴を定性的・定量的にほぼ一致した。

### (3)応力解放法による PC 構造物の現有応力推定法 (論文⑤⑬)

光学的全視野計測法と応力解放法を併用してプレテンション PC 桁の現有作用応力をスリット応力解放法により推定した。スリット近傍の微小領域まで高精度に解放ひずみ分布を計測できるため、解放ひずみ分布から現有作用応力を精度よく推定できた。



図4 プレテン PC 実験桁

また、ASR を生じたポステン PC 合成 I 桁橋梁の有効プレストレス推定に本手法を適用した。その結果、以下のことが確認された。

- ・有効プレストレス量の推定値/設計値は、G4 主桁：95.4%、G5 主桁：104.4%となり、有効プレストレス量の大きな減少はなく、耐荷力を十分保有していることが確認された。
- ・対象点距離変化率分布において計測値が乱れた。これは ASR の膨張力により応力が乱れていることが考えられる。

- ・橋軸直角方向には、圧縮応力が作用している結果を得た。これは ASR の膨張力による影響であると考えられる。



(a)スリット切削 (b)ひずみ計測

図5 実橋における計測

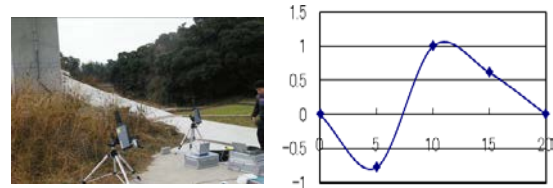
### (4)LDV を用いた振動計測による実橋梁の構造同定 (論文⑦)

遠距離・非接触計測が可能な LDV を使用して既設橋梁の振動計測を実施し、得られた計測結果から固有振動数、振動モードの算定を行った。以下の結果が得られた。

- ・3次元 FE 解析との比較を行った結果、各次数の固有振動数はほぼ一致しており、振動

モードについても類似の形状を示した。

- ・耐震補強前後の橋脚 (図 7) の振動計測の結果、固有振動数から耐震補強による剛性の変化を定量的に評価することができた (表 1)。



(a)計測状況 (b)振動モード

図6 実橋の振動計測

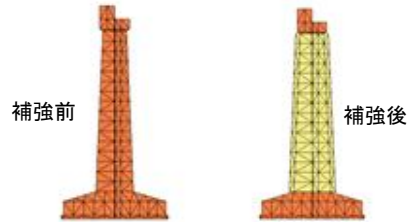


図7 耐震補強橋脚

表1 計測結果(橋脚)

Mode	補強前		補強後	
	計測値	解析値	計測値	解析値
1次	6.05	5.92	6.25	6.17
2次	12.30	12.57	13.28	13.33

### (5)3D レーザスキャナを用いた軍艦島の 3D 計測とモニタリング (論文⑨)

崩壊が進行している近代化産業遺産である軍艦島を対象として 3D レーザを用いた AsBuild データ取得とその利活用法について検討した。大規模で劣化の進んだ不整形な構造物に対し、形状をあるがままに取得できる 3D レーザ計測は有効であり、また稜線抽出処理を行うことで破損図作成までを支援することがわかった。特に抽出された稜線データの容量は取得した点群データに比べ 100 分の 1 程度まで低減されているにもかかわらず、三次元での形状の再現性もあり今後の利活用の幅が広がるものと考えられる。

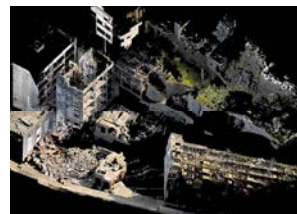


図8 3D 計測データの合成



図9 3D 計測データからの稜線抽出図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

- ① 出水享, 松田浩, 藤野義裕, 伊藤幸広, 趙程, 溶接中および冷却過程における鋼材の変形・ひずみ挙動の光学的全視野計測と三次元熱弾塑性FE解析, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 58A, pp. 40-49, 2012. 3
  - ② 出水享, 松田浩, 高橋洋一, 伊藤幸広, 甲斐靖志: 48 年供用されたポストテンションPCT桁橋の実橋載荷試験と現有作用応力測定, 土木構造・材料論文集, 査読有, 第 27 号, pp. 34-41, 2011. 12
  - ③ 牧野高平, 増山雄大, 松田浩, 上里尚也, 牟田庄吾: コンクリート構造物の温度挙動同定に関する解析的研究, 土木構造・材料論文集, 査読有, 第 27 号, pp. 61-68, 2011. 12
  - ④ 出水享, 板井達志, 松田浩, 森田千尋, 伊藤幸広: デジタル画像相関法による動的変位計測に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 19 巻, pp. 671-676, 2011. 11
  - ⑤ 出水享, 伊藤幸広, 松田浩, 出雲真仁: 光学的全視野ひずみ計測法を用いた応力解放法によるASRが生じたポストテンションPC合成I桁橋の現有作用応力測定, 第 20 回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, 査読有, pp. 473-478, 2011. 10
  - ⑥ 松田浩, 伊藤幸広: 解説/光学的全視野計測法によるインフラ構造物の施工と維持管理, 実験力学, 査読有, Vol. 11, No. 3, pp. 3-12, 2011. 9
  - ⑦ 牧野高平, 松田浩, 森田千尋, 一宮一夫: レーザドップラ速度計を用いた振動計測による実橋梁の構造同定, 実験力学, 査読有, Vol. 11, No. 3, pp. 43-50, 2011. 9
  - ⑧ 出水享, 松田浩, 伊藤幸広, 内野正和, 肥田研一, 岡本卓慈: 光学的全視野ひずみ計測法を用いた応力解放法によるプレテンションPC桁の現有作用応力測定, 実験力学, 査読有, Vol. 11, No. 3, pp. 51-56, 2011. 9
  - ⑨ 西村正三, 木本啓介, 出水享, 松田浩: 3Dレーザスキャナを用いた軍艦島の計測とモニタリング~3Dレーザー・稜線抽出処理~, 実験力学, 査読有, Vol. 11, No. 3, pp. 63-70, 2011. 9
  - ⑩ 出水享・松田浩・伊藤幸広・甲斐靖志, [報告] 48 年経過したポストテンションPCT桁橋の復元設計のための各種調査, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 33, No. 2, pp. 1483-1488, 2011. 7
  - ⑪ 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, 長崎大学工学部研究報告, 査読無, 41 (77), pp. 45-52, 2011. 7
  - ⑫ 伊藤幸広, 松田浩, 内野正和, 出水享: 全視野ひずみ計測装置による施工・維持管理, 土木技術, 査読有, 技術開発最前線, 66 巻, 4 号, pp. 48-53, 2011. 4
  - ⑬ 出水享, 松田浩, 伊藤幸広, 森田千尋, 藤野義裕: 光学的手法による鋼部材の加熱・冷却過程におけるひずみ分布計測, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 57A, pp. 86-93, 2011. 3
  - ⑭ 森田千尋, 池田喜輝, 松田浩, 出水享, 白濱敏行: 架設環境の異なる耐候性鋼橋梁の劣化環境評価に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, Vol. 18, pp. 571-578, 2010. 11
  - ⑮ 出水享, 肥田研一, 伊藤幸広, 松田浩: 応力解放法によるPC構造物の現有作用応力の推定方法の開発, 第 19 回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, 査読有, pp. 241-246, 2010. 10
  - ⑯ 森田千尋, 趙程, 牧野高平, 宮崎翼, 松田浩: 実形状初期不整データを用いた薄肉円筒シェルの座屈解析, 鋼構造年次論文集, 査読有, Vol. 18, 2009. 11
  - ⑰ Cheng Zhao, Hiroshi Matsuda, Chihiro Morita and Mingrong Shen. Study on Failure Characteristic of Rock-like Materials with an Open-hole under Uniaxial Compression. Strain-International Journal of Experimental Mechanics, 査読有, 2009. 10
  - ⑱ 内野正和, 岡本卓慈, 肥田研一, 伊藤幸広, 松田浩: デジタル画像相関法を用いたマルチロゼット解析法による円孔周辺のひずみ解析手法の検討, 実験力学, 査読有, Vol. 6, No. 2, pp. 96-102, 2009. 6
- [学会発表] (計 16 件)
- ① 森崎雅俊・出水享・内野正和・松田浩, 有孔板の引張試験におけるマルチロゼットひずみ計測, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, I-10, pp. 19-20, CD-ROM, 2012. 3. 3, 鹿児島大学
  - ② 徳永裕二・佐川康貴・松田浩・牧野高平: 非接触振動計測を用いた実橋梁の振動特性把握に関する研究, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, I-18, pp. 35-36, CD-ROM, 2012. 3. 3, 鹿児島大学
  - ③ 池田遼介・佐川康貴・松田浩・牧野高平: 非接触振動計測を用いた実橋梁の健全度診断に関する研究, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, I-19, pp. 37-38, CD-ROM, 2012. 3. 3, 鹿児島大学
  - ④ 戸次翔・出水享・藤野義裕・松田浩: デジタル画像相関法のひずみ計測精度に及ぼす撮影・解析条件の影響, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, I-61, pp. 121-122, CD-ROM, 2012. 3. 3,

- 鹿児島大学
- ⑤ 藤野義裕・出水亨・松田浩：鋼材の溶接・冷却過程における温度・ひずみ計測および解析に関する基礎的研究，平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，I-62，pp.123-124，CD-ROM，2012. 3. 3，鹿児島大学
- ⑥ 板井達志・松田浩・出水亨・伊藤幸広・木村嘉富：光学的全視野計測を用いたPCT桁の載荷試験時における非接触変位・ひずみ分布計測，平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，V-2，pp. 727-728，CD-ROM，2012. 3. 3，鹿児島大学
- ⑦ 藤野義裕，出水亨，松田浩，伊藤幸広：光学的手法による鋼部材の加熱および冷却過程におけるひずみ・温度分布計測，土木学会第 66 回年次学術講演会，I-230，pp459-460，2011. 9. 8，愛媛大学
- ⑧ 板井達志，出水亨，御舟研二，松田浩：デジタル画像相関法によるアルミ試験片の動的変位計測に関する基礎的研究、土木学会第 66 回年次学術講演会。I-629，pp1257-1258，2011. 9. 9，愛媛大学
- ⑨ 谷本健太，伊藤幸広，原田耕司，松田浩，出水亨，内野正和：光学的全視野ひずみ計測法を用いた鉄筋腐食モニタリングに関する一実験，土木学会第 66 回年次学術講演会，V-054，pp107-108，2011. 9. 9，愛媛大学
- ⑩ 牧野高平，松田浩，森田千尋，永山隼，柳井茂：C112 レーザドップラ速度計の実橋梁振動計測への適用，2011 年度実験力学学会年次講演会，pp. 159-162，2011. 8. 30，奈良県文化会館
- ⑪ 西村正三，木本啓介，松田浩：C113 レーザ・全方位カメラを用いた軍艦島の計測とモニタリング，2011 年度実験力学学会年次講演会，pp. 221-228，2011. 8. 30，奈良県文化会館
- ⑫ 永山隼，松田浩，牧野高平，宮崎翼：レーザドップラ速度計を用いた固有振動計測とその実橋梁へのメンテナンスへの応用に関する研究，平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，I-061，pp. 121-122，CD-ROM，2011. 3. 5，九州工業大学
- ⑬ 板井達志，松田浩，出水亨，御舟研二：デジタル画像相関法による動的変位計測に関する基礎的研究，平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，I-067，pp. 133-134，CD-ROM，2011. 3. 5，九州工業大学
- ⑭ H. Goda, M. Hibino, M. Uchino, K. Yamaguchi and H. Matsuda : Base study on measure of transformation of concrete structures used by digital image correlation method, Proc. of the 5th IABMAS symposium, pp. 2518-2524, 2010. 7. 12, Philadelphia
- ⑮ C. Morita, C. Zhao, A. Demizu, K. Makino, H. Matsuda and K. Ichimiya : 3D profile measurement and buckling simulation on thin-walled cylindrical shells under compression by utilizing 3D-digital image correlation method, Proc. of the 5th IABMAS symposium, pp. 2550-2556, 2010. 7. 12, Philadelphia
- ⑯ 宮崎翼，川林大祥，松田浩，森田千尋：LDVを用いた長距離固有振動数計測による構造健全度評価に関する基礎的研究，平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，I-20，pp. 39-40，CD-ROM，2010. 3. 6，崇城大学
- [その他]  
ホームページ等  
<http://www.st.nagasaki-u.ac.jp/ken/matsuda/research/research.html>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
松田 浩 (MATSUDA HIROSHI)  
長崎大学・工学研究科・教授  
研究者番号：20157324
- (2) 研究分担者  
木村 吉郎 (KIMURA KICHIRO)  
東京理科大学・理工学部・教授  
研究者番号：50242003  
河村 進一 (KAWAMURA SHINICHI)  
呉工業高等専門学校・准教授  
研究者番号：70315224  
森田 千尋 (MORITA CHIHIRO)  
長崎大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：60230124  
才本 明秀 (SAIMOTO AKIHIDE)  
長崎大学・工学研究科・教授  
研究者番号：00253633  
森山 雅雄 (MORIYAMA MASAO)  
長崎大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：00240911  
出水 亨 (DEMIZU AKIRA)  
長崎大学・工学研究科・産学官連携研究員  
研究者番号：00533308  
牧野 高平 (MAKINO KOUHEI)  
長崎大学・工学研究科・産学官連携研究員  
研究者番号：80568478
- (3) 連携研究者  
豊岡 了 (TOYOOKA SATORU)  
埼玉大学・理工学研究科・名誉教授  
研究者番号：99999999  
上半 文昭 (UEHAN FUMIAKI)  
(財) 鉄道総合技術研究所・主任研究員

研究者番号 : 99999999