

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19360205

研究課題名（和文）

光学的非接触全視野計測法による建設構造物のマルチスケール損傷診断法の開発

研究課題名（英文）

Development of multi-scale structural damage identification by utilizing full-field optical sensing techniques

研究代表者

松田 浩（MATSUDA HIROSHI）

長崎大学・工学部・教授

研究者番号：20157324

研究成果の概要：

構造物の構造健全度を診断するためには、構造物に空間的に分布したマイクロからマクロに至るまでのマルチスケールでの変形・ひずみデータを計測することが必要となる。本研究ではそのための実用的計測法として、光学的計測法の高精度、非接触、全視野計測が可能というメリットに注目し、デジタル画像相関法、電子スペckルパターン干渉計測、棒状スキャナ、レーザードップラ速度計などの光学的手法を用いてロバスト性の高い計測・解析システムを開発した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2008 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
年度			
総計	15,700,000	4,710,000	20,410,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・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

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内・国外の研究動向及び位置づけ

トンネルのコンクリート片剥落事故、鋼製橋脚の疲労き裂発生を契機として、維持管理の大切さ、診断業務の難しさが如実に示されるとともに、効率的・高精度な面的探傷技術の研究開発が望まれるようになった。例えば、H18 年度土木学会年次大会では、1、5、6 部門、共通セッションにおいて、維持補修、点検・診断技術に関する研究発表が多数あり、さらにインフラ維持管理に関する 4 テーマが研究討論会として実施されている。また、

コンクリート工学(2006.6、Vol.44、No.5)には“最新コンクリート計測技術”が特集され、歪ゲージ、電磁波レーダ、超音波法、磁歪型センサ、光ファイバなどについての最新技術について紹介され、維持管理に関する計測法の研究開発が精力的になされている。しかしながら、スペckル干渉法やデジタル画像相関法などの光学的手法に基づく計測法については、“Imaging Technologies”に関する国際会議(ASCE、1993、1997)、“実験力学会”や“Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003”において光学的計

測法という分野で精力的に研究が推進されているにもかかわらず、建設工学の分野ではあまり系統立てて取り上げられていない。

一方、測量学は国際的には Surveying から Geomatics あるいは Geoinformatics へと、すなわち、測量学から空間情報工学へと様変わりをしている。この背景には測量界における技術革新があったわけであるが、高分解能人工衛星およびレーザースキャナはその代表的なものである。高分解能人工衛星からは 1 m 程度の分解能で地上の空間データを取得でき、また、レーザースキャナからは計測対象物に対する高密度三次元点群データをリアルタイムに取得できるようになった。また、一方において最近の高解像度・低価格な民生用デジタルカメラの普及は、各種のデジタル・アーカイブ化と相互に関係し、民生用デジタルカメラによる 3 D 計測という分野を活性化させている。

(2) マルチスケール健全度診断法

社会基盤施設の非破壊検査として用いられている計測手法は、機械、金属等の分野で開発が進められている原理をそのまま利用していることが多く、そのため構造物内部の各種欠陥や、ひび割れ等を探査する手法が利用されてきた。しかし、橋梁などの大型構造物の場合には、局所的な欠陥だけを調べても全体的な安全性や使用性をチェックすることができない。構造物が要求される性能には、安全性、使用性、第三者影響度、耐久性能などがあるが、これらの性能を検査するためには、段階ごとに異なった情報が必要となる。

これまで行われてきた非破壊検査の大部分は構造物の局所的な欠陥検出等に集中したものである。既存インフラの維持管理を考えると、本来の非破壊検査の役割としては、構造物全体としての性能についても検査できることが重要である。すなわち、建設分野においては、構造物全体としてのマクロ的な問題から局所的なミクロの問題までもカバーすることが必要となる。また、構造物全体としての性能を調べるためには非破壊検査ばかりでなく、三次元非線形有限要素解析などによる構造解析技術が必要となる。この構造解析技術を合理的に適用することも、既存インフラの維持管理を考える上で不可欠な重要事項である。

(3) これまでの研究成果

本研究グループ（平成 17-18 年度科学研究費補助金：基盤研究 B）は、これまでに、スペックル及びホログラフィ干渉法、デジタル画像相関法など、機械、金属等の分野で開発が進められている光学的計測法を用いて土木構造物の非接触での変状計測に対する有効性と有用性を検証するとともに、“スキャナによる変位およびひずみ計測方法”（特願 17032）や“棒形スキャナによるコンクリ

ート構造物内部検査法”などのように建設分野で要求されるロバスト性の高い新しい計測機器を開発してきた。さらに、3 D レーザースキャナ、3 D デジタル写真計測による 3 次元計測データの FE メッシュ作成から FE 解析までの一連の計測・解析システムを開発してきた。これらの研究成果は、実験力学会とコンクリート工学協会九州支部とのジョイントセミナー（2005. 12. 22）や日本コンクリート工学協会九州支部での講習会（2006. 12. 11）を実施した。

2. 研究の目的

建設構造物の構造健全性の診断法としては、目視や打音検査などの経験的方法のほか、定量的・客観的検査が可能な非破壊検査技術の研究・開発が試みられている。しかし、既存の非破壊検査技術は、建設構造物のスケールや、また、現場での悪計測環境下で適用するには、経済的かつ技術的困難があり、建設構造物への一般的な適用としては、まだ実用化には至っていない。そこで、本研究では、建設構造物の構造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までのマルチスケールでの変形・ひずみデータを容易に計測する実用的方法として、光学的計測法の高精度、非接触、全視野計測が可能というメリットに注目し、悪環境下での計測が可能なロバスト性の高い計測・解析システムを開発することを目標に研究を進める。本研究グループは、鋼・コンクリート構造の研究者と光学的計測機器自体の開発に携わっている研究者との協同により研究開発を推進する。

3. 研究の方法

下記の 5 項目について研究を進める。

(1) ラインセンサスキャナタイプ全視野ひずみ計測装置の開発

小型軽量で操作性の良いラインセンサタイプの全視野（全方向）ひずみ計測装置の開発および高精度なひずみ解析プログラムの開発を行う。また、施工管理および維持管理のための検査装置としての適用範囲を調べ、検査可能な項目について施工管理・維持管理手法の確立を行う。

(2) 特殊カメラを用いた全視野変位/ひずみ計測装置開発

テレセントリックレンズを装着したカメラによる変位/ひずみの全視野計測装置および解析プログラムの開発を行う。

(3) スペックル干渉計測、デジタル画像相関法を用いた非接触計測法の確立

(a) 鋼部材の残留応力計測、溶接鋼構造部材のき裂進展計測・解析、(b) 異方性 FRP 複合材の振動計測・応力計測および接着不良等の欠陥検知、(c) き裂を有するエポキシ樹脂試験

片の圧縮破壊試験の計測・解析、(d)コンクリートの硬化過程における収縮、温度ひび割れの計測・解析、(e)短繊維補強 RC 梁のせん断耐力、(f)塩害・アルカリ骨材反応による模擬試験体のコンクリートの劣化メカニズムの解明、などへの適用性と有用性を検証する。(4)棒型スキャナを利用したコンクリートの微非破壊検査

土木構造物の検査・診断にあたってコア抜き調査ではドリルで鉄筋を傷つけてしまうことがある。ここでは、小口径のドリルで削孔し、より小さな径のコアを採取したり、内部を内視鏡で確認したりする微破壊検査に注目して、構造物検査用スキャナやマイクロ스코プを用いたコンクリートの変状検査法について検討する。

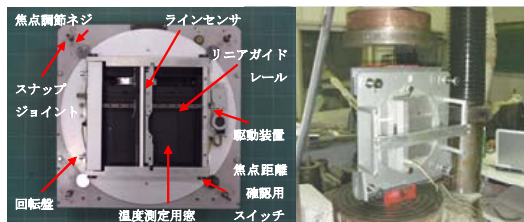
(5)3D計測データを用いたFE解析と常時微動計測による遠距離計測

三次元計測・解析システムの精度を確認するために、実測可能な煙突構造物を対象として、配線作業を必要としない無線 LAN 加速度計を用いて加速度計測を行い振動実験を実施する。また、レーザードップラ速度計を用いて振動計測を行い、構造物の常時微動計測による高密度ヘルスマonitoringへの適用可能性について検討する。

4. 研究成果

(1)ラインセンサスキャナタイプ全視野ひずみ計測装置の開発

小型軽量で操作性の良いラインセンサタイプの全視野(全方向)ひずみ計測装置(図1a)を試作するとともに、高精度なひずみ解析プログラムを開発した。計測装置の計測精度を検証するため、通常の方法試験において歪ゲージによる計測結果と比較した(図1b)。さらに、コンクリート施工管理への適用性について検証実験を行った。



(a)計測装置 (b)検証実験
図1 スキャナタイプ全視野ひずみ計測装置

(2)特殊カメラを用いた全視野変位/ひずみ計測装置の開発

通常のレンズを用いた場合はレンズの偏差ひずみのため、デジタル画像相関法によるひずみ計測結果は歪ゲージによる計測結果をは大きな誤差が認められた。テレセントリックレンズを装着したカメラ(図2)による変位/ひずみの全視野計測装置および解析プログラムの開発を行うとともに、コンクリ

ート構造物のひずみ計測のフィールド実証試験を行った。



図2 テレセントリックレンズを装着したカメラ

(3)スペックル干渉(ESPI)、デジタル画像相関法(DIC)を用いた非接触計測法の確立

これまで歪ゲージや変位計を用いて計測されてきた構造工学分野の実験に対して、ESPIやDIC等の光学的計測法を用いて計測を実施した。顕著な計測結果として、RC はりは曲げひび割れ、斜めひび割れの発生から進展に至る状況が明確に捉えられており、特に斜めひび割れの発生・進展状況を可視化した例はこれまでにない可視化事例と思われる(図3)。また、薄肉円筒シェルの分岐座屈挙動においては、座屈前にバルジ型の変形状態からダイヤモンド型座屈変形状態へ分岐する現象が明確に捉えられており、Arbocz, Babcock や Batista, Croll が苦労して計測した結果と極めて良く対応した軸方向半波の座屈モードが測れており、この種の座屈問題の一番難解な座屈モードの選択性が明瞭に捉えられることができた(図4)。

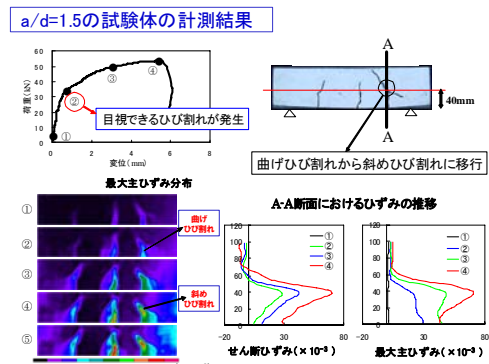


図3 RC はりのひび割れの可視化

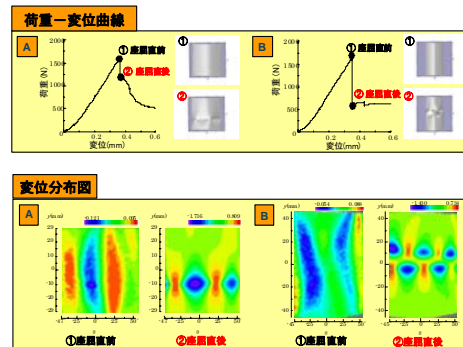


図4 軸圧薄肉円筒シェルの座屈実験・解析

(4)棒型スキャナを利用したコンクリートの微非破壊検査

図5の棒型スキャナを開発するとともに、80年供用されたRC桁の状況を調査するため、ドリル削孔による本計測法のフィールド実験を行った。中性化試験、内部のひび割れ状況などを調査することができることを検証した。



図5 棒型スキャナによる微非破壊検査

(5)3D計測データを用いたFE解析と常時微動計測による遠距離計測

平和祈念像などの大型構造物を3D計測を行い、計測データを用いてFEメッシュを作成し、地震応答解析するシステムを構築した(図6)。さらにレーザードップラ速度計を用いて常時微動、衝撃加振による固有振動計測を実施し、同じ結果が得られることを確認した。本計測・解析システムの構築により3Dデジタル情報をデータベースとして構築することができ、維持管理の電子カルテとしての有効性と有用性が期待される。



図6 3D計測データを用いたFE解析

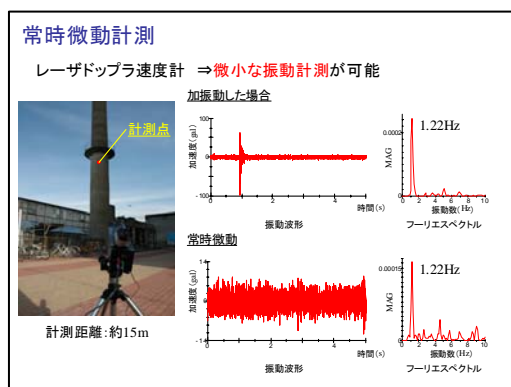


図7 常時微動計測による遠距離計測

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 36 件)

(2008 年度)

[1]A. Saimoto, A. Toyota, Y. Imai: Compression induced shear damage in brittle solids by scattered microcracking, International Journal of Fracture, 査読有, DOI 10.1007/s10704-008-9296-1, 2009

[2]F. Motomura, Y. Imai, A. Saimoto : Effects of support and heat dissipation in thermal stress cleaving of thin glass plates, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, , 査読有, 2009

[3]松田浩, 趙程, 他 3 名: 光学的全視野計測法による円筒シェルへのねじり座屈挙動の解析, 鋼構造年次論文報告集, 第 16 巻, (社) 日本鋼構造協会, 査読有, pp.77-82, 2008

[4]安東祐樹, 小島悟, 山本健太, 松田浩: 溶接継手の疲労き裂に対する延命対策の検討, 鋼構造年次論文報告集, 第 16 巻, (社) 日本鋼構造協会, 査読有, pp.571-578, 2008

[5]森田千尋, 魚住正春, 他 3 名: 耐候性鋼橋梁の腐食評価および概観評価に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 16 巻, (社) 日本鋼構造協会, 査読有, pp.657-662, 2008

[6]M. Huang, H. Matsuda, C. Morita, C. Zhao : Free Vibration Analysis of Shear Deformable Rectangular Plates with a Line Hinge, Journal of Applied Mechanics, 査読有, Vol.11, pp.49-56, 2008

[7]M. Huang, H. Takahashi, H. Matsuda, C. Morita : An Improvement of the Discrete Method For Analyzing the Bending Problem of Plates, Journal of Applied Mechanic, 査読有, Vol.11, pp.185-192, 2008

[8]内野正和, 岡本卓慈, 肥田研一, 他 2 名: マルチロゼット解析法を用いたデジタル画像相関法の検討, 日本実験力学会講演論文集, 査読有, No. 8, pp. 134-137, 2008

[9]T. Nyomboi, 松田浩, 山下務, 大原智裕: Strength and deformation behavior of steel reinforced normal concrete by optical (ESPI) methods, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Technical Paper, Vol.30, No.3, pp.1489-1494, 2008

[10]安東祐樹, 浦田美生, 山本健太, 松田浩: 鋼板の接着幅が端部ではなく離現象に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.30, No.3, pp.1603-1608, 2008

[11]C. Zhao, H. Matsuda, C. Morita, : Visualization of buckling on thin-walled cylindrical shell by digital image correlation method, ICTWS2008, Proc. of 5th Int. Conf. on Thin-Walled Structures, 査読有, Recent Innovations and Developments, pp.829-835, 2008

[12]C. Morita, H. Matsuda, M. Huang: Vibrati

on study of thin-walled specimens using holographic interferometry, ICTWS2008, Proc. of 5th Int. Conf. on Thin-Walled Structures, 査読有, Recent Innovations and Developments, pp.837-842, 2008

[13]松田浩：歴史的建造物の光学的手法による3D形状・振動計測とその計測データを用いたFE解析による地震応答解析, 建設の施工企画, 査読無, No. 5, pp. 25-30, 2008

[14]A. Murdani, C. Makabe, A. Saimoto, Y. Irei, T. Miyazaki: Stress concentration at stop-drilled holes and additional holes, Engineering Failure Analysis, 査読有, Vol.15 Issue 7, pp. 810-819, 2008.10

[15]G. Shatil, A. Saimoto, X. J. Ren: Ductile-brittle fatigue and fracture behavior of aluminum /PMMA bimaterial 3PB specimens, Engineering Fracture Mechanics, 査読有, Vol.75, 3-4, pp.674-681, 2008

[16]T. Aoki, D. Sabia, D. Rivella : Influence of Experimental Data and FE Model on Updating Results of a Brick Chimney, Journal of Advances in Engineering Software, 査読有, Vol. 39, No. 4, pp. 327-335, 2008

(2007年度)

[17]安東祐樹, 松田浩, 浦田美生, 佐野正: 鋼板接着端部のはく離現象に関する解析的研究, 土木構造・材料論文集, 査読有, 第23号, 論文No.7 (CD-ROM版), 2007

[18]井上賢優, Achfas Zacoeb, 伊藤幸広, 石橋孝治, 松田浩, 山本康雄, 片山強: ラインセンサを用いた建造物の表面変状計測装置の開発, 平成19年度土木学会西部支部技術発表会論文集, 査読無, pp. 39-44, 2007

[19]S.Sumitro, H.Matsuda, Y.Itoh and T.Okamoto: Dynamic Structural Analysis Using Spatial Data Monitored by 3-D Laser Scanner, The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 査読有, paper-No.78, 2007

[20]松田浩, 趙程, 古屋瞬, 上妻隼人, 山下務: 光学的全視野計測法を用いた薄肉円筒シェルの振動・座屈の計測, 鋼構造論文報告集, 査読有, Vol.15, pp. 153-160, 2007

[21]森田千尋, 原栄二, 松田浩, 黄美, 白濱敏行: 写真計測による耐侯性鋼橋梁の外観評価に関する研究, 鋼構造論文報告集, 査読有, Vol.15, pp. 591-596, 2007

[22]A.Zacoeb, K.Ishibashi, Y.Ito, N. Miyamoto and M.Sogabe: Development of Advanced Inspection Device for Inside Concrete Structures, EACEF - The 1st International Conference of European Asian Civil Engineering Forum, 査読有, pp. D32- D38, 2007

[23]伊藤幸広, 高橋洋一, 宮本則幸: コンクリート建造物検査用棒形スキャナの開発, 建設の施工企画, 査読無, No.10, pp.19-24, 2007

[24]松田浩, 趙程, 古屋瞬, 他3名: デジタル画像相関法を用いた薄肉円筒シェルの座屈挙動の可視化, 日本実験力学会講演論文集, 査読有, No.7, pp.12-17, 2007

[25]S.Sumitro, H.Matsuda, S.Nishimura Y.Itoh: Application of smart 3-D laser in structural health monitoring, World Forum on Smart Materials and Smart Technology, 査読有, Paper ID 526, 2007

[26]N.Miyamoto, T.Okamoto, S.Sumitro, H. Matsuda: The frontiers of smart monitoring technology, World Forum on Smart Materials and Smart Technology, 査読有, Paper ID 320, 2007

[27]佐川康真, 尾上幸造, 内野正和, 松下博通: 一軸圧縮力を受けるモルタル供試体のひずみ計測へのデジタル画像相関法の適用性に関する検討, 実験力学会誌, 査読有, Vol.7, pp.114-120, 2007

[28]松田浩・本郷真樹・鶴田聡・山下務・黄美・西村正三・出水享: 建造物の三次元デジタル写真計測とそれを用いた三次元有限要素自由振動解析, 構造工学論文集, 査読有, Vol.53A, pp.33-40, 2007

[29]松田浩, 伊藤幸広, 内野正和: 土木建設工学分野における光学的計測—社会基盤建造物のメンテナンスへの応用—, 実験力学会誌, 査読無, Vol. 7, pp.3-10, 2007

[30]M. Huang, X. Q. Ma, 他3名: Free vibration analysis of rectangular plates with variable thickness and point supports, Journal of sound and vibration, 査読有, 300, pp.435-452, 2007

[31]M. Anggit, 真壁朝敏, 才本明秀, 他2名: 補助穴の加工によるストップホールからの疲労き裂発生の新抑制手法, 材料, 査読有, 第56巻, 第12号, pp. 1139-1144 2007

[32]A. Purnowidodo, S. Fukuzato, A. Saimoto, : Crack growth behavior in overloaded specimen with sharp notch in low carbon steel, J. of Testing and Evaluation, 査読有, Vol. 35, No. 5, pp. 1-6, 2007

[33]A. Saimoto, 他2名: Development of damage zone by scattered cracking around crack tips in brittle solids under compression, Key Engineering Materials, , 査読有, Vols.348-349, pp. 965-968, 2007

[34]A. Toyota, A. Saimoto, Y. Imai: Compression induced localization of tensile micro-cracks, Proc. of Int. Conf. on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2007 (ATEM'07), 査読有, Fukuoka, Japan, CD-ROM, 2007

[35]奥松俊博, 岡林隆敏, 田代大樹, 要谷貴則, Jawaid Bashir Ahmad: 橋梁遠隔モニタリングシステムによる鋼ランガートラス橋の固有振動数の推移観測, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 53A, pp. 844-852, 2007

[36]T.Aoki, D.Sabia, D.Rivella, T.Komiyama: Structural Characterization of Rakanji Stone Arch Bridge by Experimental Tests and Numerical Model Updating, International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration, 査読有, Taylor & Francis, Vol.1, Issue 3, pp.227-250, 2007.9

[学会発表] (計 42件)

川林大祥, 松田浩, 山下務: 三次元写真計測と実振動計測を利用した構造物の劣化・耐震性評価に関する研究, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, CD-ROM, I-451, 2008

以下 42 件

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

ひずみ計測方法、ひずみ計測システム、内野正和、岡本卓慈、肥田研一、福岡県、株式会社計測リサーチコンサルタント、株式会社K&Tこんさるたん、特許、特願 2008-84560, H20.3.27, 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 浩 (MATSUDA HIROSHI)
長崎大学・工学部・教授
研究者番号: 20157324

(2) 研究分担者

- ①森田 千尋 (MORITA CHIHIRO)
長崎大学・生産科学研究科・准教授
研究者番号: 60230124
- ②中村 聖三 (NAKAMURA SHOZO)
長崎大学・工学部・准教授
研究者番号: 40315221
- ③才本明秀 (SAIMOTO AKIHIDE)
長崎大学・生産科学研究科・准教授
研究者番号: 00253633
- ④森山 雅雄 (MORIYAMA MASAO)
長崎大学・工学部・准教授
研究者番号: 00240911
- ⑤黄 美 (HUANG MEI)
長崎大学・工学部・助教
研究者番号: 00346933
- ⑥山下 務 (YAMSHITA TSUTOMU)
長崎大学・工学部・技術職員
研究者番号: 90404243

⑦奥松 俊博 (OKUMATSU TOSHIHIRO)
長崎大学・工学部・助教
研究者番号: 30346928

⑧原田 哲夫 (HARADA TETSUO)
長崎大学・工学部・教授
研究者番号: 50136636

⑨佐川 康貴 (SAGAWA YASUTAKA)
九州大学大学院・工学研究院・助教
研究者番号: 10325508

⑩山口 浩平 (YAMAGUCHI KOHEI)
九州大学大学院・工学研究院・助教
研究者番号: 60336013

⑪一宮 一夫 (ICHIMIYA KAZUO)
大分高等工業専門学校・准教授
研究者番号: 00176306

⑫伊藤 幸広 (ITO YUKIHIRO)
佐賀大学・理工学部・准教授
研究者番号: 90223198

⑬合田 寛基 (GODA HIROKI)
九州工業大学大学院・工学研究院・助教
研究者番号: 20346860

⑭添田 政司 (SOEDA MASASHI)
福岡大学・工学部・教授
研究者番号: 50148871

⑮内野 正和 (UCHINO MASAKAZU)
福岡県工業技術センター
研究者番号: 30416507

⑯青木 孝義 (AOKI TAKAYOSHI)
名古屋市立大学芸術工学研究院・准教授
研究者番号: 10202467

(3) 連携研究者

- ①岡本卓慈 (OKAMOTO TAKUJI)、(株)計測リサーチコンサルタント・代表取締役社長
- ②宮本則幸 (MIYAMOTO NORIYUKI)、(株)計測リサーチコンサルタント・企画開発部長
- ③高橋洋一 (TAKAHASHI YOICHI)、(株)計測リサーチコンサルタント・九州事業部長
- ④肥田研一 (HIDA KENICHI)、(株)K&Tこんさるたん・代表取締役
- ⑤川村淳一 (KAWAMURA JUNICHI)、日本コンクリート工業(株)・都市基盤建材事業部長
- ⑥原田耕司 (HARADA KOJI)、西松建設(株)・土木営業7部・課長

(4) 研究協力者

- ①ティモテイ・ニヨムボイ (Timothy Nyomboi)、長崎大学大学院生産科学研究科博士後期課程2年生
- ②趙程 (Zhao Cheng)、長崎大学大学院生産科学研究科博士後期課程2年生
- ③安東祐樹 (Andoh Yuki)、長崎大学大学院生産科学研究科博士後期課程3年生