

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560536

研究課題名(和文) 応力発光体を用いた構造物のイメージング異常検出技術の開発

研究課題名(英文) Development of structural imaging diagnosis technique by using mechanoluminescence material

研究代表者

上野 直広 (Ueno, Naohiro)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50356557

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：応力発光体は、力学的刺激を直接光信号に変換する機能を持ち、その微粒子をバインダとなる塗料に混合し構造物の表面に塗布すると動的な応力分布を発光強度分布として画像情報化することができる。まず、応力発光センサを炭素繊維強化型高圧圧力容器表面に塗布して疲労試験を行い、内部に圧力を印加したときの発光パターンの収集を行った。容器を加圧する際に得られる応力発光時系列画像を超空間の1点として、その分布状態に主成分分析を適用して得られた特徴イメージの変動から、貫通前の疲労亀裂位置および発生時間の特定に成功した。また、残光と応力発光の独立性に着目した残光パターン除去法を提案し、有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is development of the novel diagnosis technique of the structure (carbon fiber reinforced composite pressure vessel) using mechanoluminescent (ML) sensors. The ML materials are able to convert mechanical action to light intensity directly. The ML sensor was applied to the composite pressure vessel surface and fatigue tests were performed by the pressurization repeatedly. By observing the ML pattern, fatigue cracks of pressure vessel before that was breaking were successfully detected. The principal component analysis (PCA) was utilized for ML time series images. By comparing the first component of PCA results, singular ML pattern is obtained and fatigue crack position is successfully identified. In addition, by subtracting computed afterglow pattern from observed images during some load working, ML patterns are successfully extracted. This technique is based on the ML characteristic that the ML is independent to afterglow.

研究分野：センシング工学

キーワード：応力発光 疲労亀裂 主成分分析

1. 研究開始当初の背景

応力発光体とは材料の弾性変形領域内における動的変形により光を発する非常にユニークな新機性能発光材料である。1990年代半ばに産業技術総合研究所の徐超男により開発され「応力発光体」と名づけられた[1]。その後、徐の研究グループが中心となり新しい応力発光体の開発とその物性解明が精力的に進められてきた。同時に応力発光体の応力センシングや光源としての技術開発も活発に進められており、基礎・応用の両面から大きな関心が寄せられている。その大きな特徴は、応力発光体をナノサイズの微粒子にすると、それらの微粒子一つ一つがセンサ機能を有し、ミクロな分解能を有しながら、マクロなセンシング領域を実現可能なことである。したがって、それらの微粒子をバインダとなる塗料に混合し、構造物の表面に塗布すると動的な応力分布を発光強度分布として画像情報化することができる。通常、構造物に亀裂などの損傷が存在すると、その部分に応力集中などの異常な応力分布が発生するため、この応力発光センサを用いると、その応力分布に対応した応力発光強度分布画像が得られ、根本となる構造物の損傷を検出することができる。

一方、水素は石油や石炭などの化石燃料に換わる次世代のエネルギー源として、地球温暖化問題への対応も含め、大きな期待がかけられている。主に燃料電池のエネルギー源として利用され、自動車や船舶などの移動機械、家庭用、業務用の電源として期待されている。この他にも、水素の直接燃焼による水素エンジンや水素燃焼タービンなどでの利用が研究されている。来るべき水素エネルギーシステム社会の実現に向けて様々な社会インフラの整備が望まれており、実証段階として水素ステーションの建設などが進んでいる。ただし、水素エネルギーシステムは、燃焼範囲が広いにも拘らず体積エネルギー密度が低いことに起因する高圧貯蔵・輸送の必要性が一つの課題となっており、炭素繊維強化型高圧圧力容器が開発されている。これは、内部のアルミニウム製のライナーに樹脂を含浸させた炭素繊維巻きつけ、強度と軽量化を両立させた新しい容器である。燃料自動車への搭載や水素ステーションにおける水素貯蔵容器として採用が進んでいる。この圧力容器の強度検査は、基本的に破壊試験であり、いつ、どこで内部のアルミ層に疲労亀裂が発生し、外部まで進展・貫通したか把握されていない。

2. 研究の目的

一般に構造物内部に亀裂などの損傷が発生すると、そのまわりで応力場の分布が形成されるため、構造物表面にその影響が現れる。応力発光センサは、構造物表面の応力分布を画像情報として取得できることから、その発生位置・時間が未知である損傷の発生を包括

的に捉えることができる。したがって、応力発光体を用いた応力分布計測は、通常の応力計測に用いられるひずみゲージと異なり、同時多点計測となるため、その解析には既存の画像解析技術を適用することができる。また、構造物の応力分布異常が必ず何らかのパターンを伴うことに着目すると、この問題は一般的には画像の成分分析問題に帰着される。

本研究の目的は、応力発光体を用いた構造物のイメージング異常検出技術を開発することであるが、構造物として高圧水素用炭素繊維強化型高圧圧力容器を対象とし、その表面に応力発光センサを塗布し、周期的な加圧による疲労試験を行う。得られた画像データに対して、成分分析を行い、その疲労亀裂の位置・発生時刻の特定を、亀裂貫通前に行うことを目指す。これによって、圧力容器の新しい非破壊的な検査技術を提供することで、社会の安全・安心に貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 炭素繊維強化型高圧圧力容器の疲労試験

図1に炭素繊維強化型高圧圧力容器の概要を示す。外側の炭素繊維を含む樹脂層外面に応力発光塗膜センサを塗布し、内部に正弦波状の変動水圧を印加する。これらを図2に示すように、周方向4箇所、上下方向2箇所に設置したCCDカメラによって、応力発光画像を取得する。変動水圧は、圧力容器に疲労亀裂が発生し、内部のアルミライナーを貫通して外部に水が漏洩するまで行う。

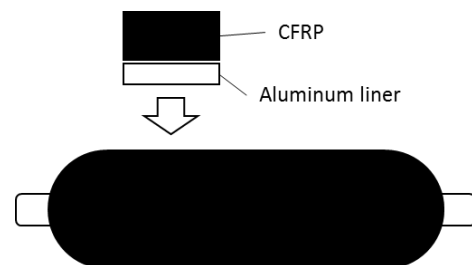


図1：炭素繊維強化型高圧圧力容器

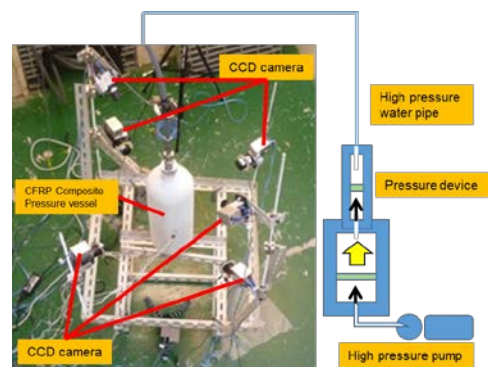


図2：疲労試験装置概要

(2) 主成分分析を用いた疲労亀裂位置の特定

データ群の統計的な解析手法の一つとして、主成分分析が知られている。画像に対し

ての適用も研究されており、顔認識などへの応用例が報告されている。主成分分析の特徴は、データの説明変数を、その分散が大きくなるように再構成することである。

一方、応力発光画像の各パターン成分は、 $\text{応力発光画像} = \text{正常応力発光パターン} + \text{異常応力発光パターン} + \text{ノイズパターン} + \text{背景パターン}$

としてモデル化される。最終的に分離したいのは異常応力発光パターンであるが、これは構造物に何らかの力が作用した時に発現するものであり、同時に正常応力発光パターンも発現する。正常応力発光パターンは構造物領域全体において存在し、作用力と常に相関があるが、構造物形状や応力発光センサの塗りムラ等の影響を受ける。異常応力発光パターンは、構造物領域の局所に発生し、発生と同時に作用力と相関性を有する。ノイズパターンは主に撮像素子の熱雑音に起因し、作用力とは相関がなく画像全体に分散する。背景パターンは、構造物領域外の時間的に固定なパターンである。ここで、ランダムノイズが付加された一連の時系列応力発光画像を、その各画素値を説明変数とする超空間内の1点と考えると、その分布は、応力が印加されたとき、ある方向へ偏ったものとなるのが容易に予想される。したがって、主成分分析におけるデータ説明変数の再構成の特徴を利用すると、応力印加による応力発光の方向（特徴画像）を抽出することができる。これは、前出の「正常応力発光パターン+異常応力発光パターン」に相当するものである。「正常応力発光パターン」は時間的にはほぼ変動がないものと考えられるが、「異常応力発光パターン」は疲労亀裂などの発生によって生成されるため、あきらかに時間的な変動がある。

そこで、炭素繊維強化型高圧圧力容器の疲労試験によって得られたデータに対して主成分分析を適用し、ある一定の試験サイクル毎に応力発光の特徴画像を抽出する。これの時間軸方向における変動を計算し、パターン変動から疲労亀裂の位置・発生時刻の特定を行う。

(3) パターンをベースとした残光成分の除去

応力発光体の特性の一つに「残光」がある。これは、正確には「りん光現象」であり、紫外線ランプや青色LEDなどの光源によって励起された応力発光体が放射する光で、応力が存在しなくて時間とともにその発光強度が逓減していく。この「残光」は応力発光画像の成分モデルで「背景パターン」に相当するが、緩やかながら時間的な変動を伴うので、主成分分析を行う前にできるだけ除去しておきたい。実験的な観測データから、この残光の時間的な変化は、応力印加によって観測される応力発光の前後で変化しないことがわかっている。したがって残光成分は応力発光成分と独立に、加法的に現れる。従来は、

応力発光画像の画素1点について、その画素値の時間的な変化をプロットして応力が付加されていない状態のデータから外挿的に時間変化曲線を求め、応力印加時の画素値から減産を行っていた。この方法の問題点は、画素値に加わっているノイズの存在である。ノイズレベルが大きい場合には、外挿の精度が悪くなり、応力発光強度をうまく抽出することができない。

そこで、応力発光画像に含まれるノイズが空間的・時間的にランダムである性質を利用する。また、残光の逓減関数が初期残光強度のみに依存し、観測された画像中における全画素の逓減関数がすべて同一であると仮定する。応力印加前の残光のみの状態の画像からノイズ成分がほとんど含まれていない残光パターンを生成し、その成分値の時間的変動から逓減曲線を求め、残光成分を残光パターンとして観測画像から除去し、応力印加時の応力発光パターンを抽出する。

4. 研究成果

(1) 主成分分析を用いた疲労亀裂位置の特定

① 疲労亀裂発生時の応力発光パターン

まず、圧力容器アルミ層内に疲労亀裂が発生した場合に、容器外面にどのような応力発光パターンが観測されるか、実験的に検証を行った。図3左および中央に試験片の概要を示す。試験片はアルミニウム層と炭素繊維強化樹脂層(CFRP)を張り合わせたもので、アルミ層側に擬似的な疲労亀裂として深さそれぞれ0.64[mm]、0.37[mm]、0.28[mm]のノッチをあらかじめ形成している。CFRP層の表面には、応力発光塗膜センサを塗布している。材料試験機を用いて引っ張り試験を行うと、図3右の応力発光画像が観測された。

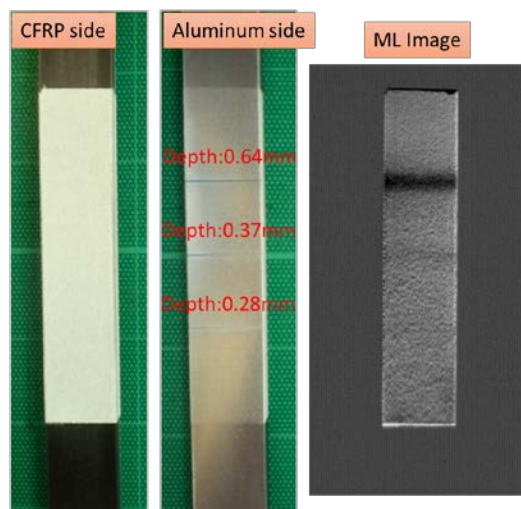


図3：2層試験片の実験結果

結論として、ノッチ直近のCFRP表面においては、応力発光強度が弱くなり、その程度はノッチの深さと相関していることがわかった。この試験では一方向の引張りであり、

圧力容器の内部に水圧をかける場合には、ほぼ等方的な引張り状態となるため、厳密には同一の条件下の実験ではないものの、疲労亀裂発生時に観測される応力発光パターンも亀裂直近の表面における発光が弱くなることが予想される。

② 圧力容器実験データの解析

図4に、加圧過程2サイクル分の応力発光画像に主成分分析を適用した結果を示す。主成分のうち第1成分、第2成分、第3成分の成分値の時間変化をプロットしている。第2成分や第3成分に比較して、第1成分が大きなエネルギーを持っていることがわかる。したがって、超空間内における応力発光画像のなす点は、第1成分方向に沿うように変化しているとみなしてよい。

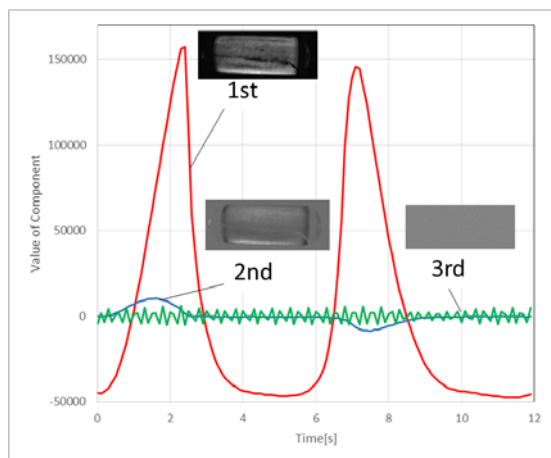


図4：各成分値の時間変化

そこで、疲労試験において一定の加圧サイクル毎に第1成分を計算し比較を行った。図5は、4200サイクルと4400サイクルの第1成分画像である。なお、4437サイクル目に亀裂が貫通し、水の漏洩が発生した。

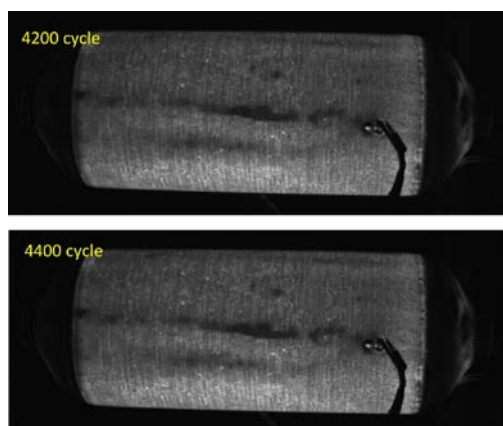


図5：第1成分画像

このままでは、変化がないように見えるが、それぞれの第1成分画像を差し引きすると、図6上に示すように、ノイズとは異なるパターンが発生しているのがわかる。図6下に、このパターンの位置と、圧力容器の明視野画像との対応を示す。

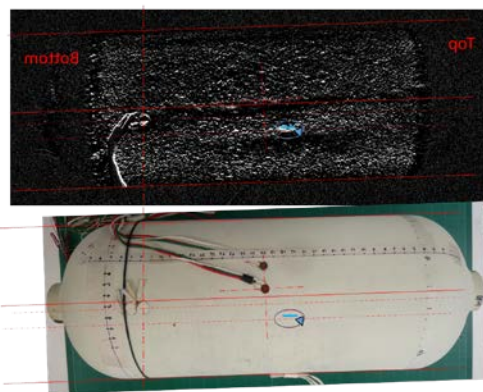


図6：第1成分画像の差分と圧力容器の明視野画像

亀裂貫通時の水漏れは、一箇所から噴出すのではなく、亀裂から漏洩した水が樹脂層をつたって外部に出てくることので、あるエリアから一様に浸出する。したがって水漏れのエリアの位置と亀裂貫通位置は正確には一致しない。図7は、疲労試験終了後に圧力容器を切断・分解し、内部のアルミ層を目視できるようにした写真である。浸透液法により貫通亀裂を探索し、その場所を特定した。内部の長さ8.5mm、幅10 μ mの貫通亀裂1箇所が特定された。

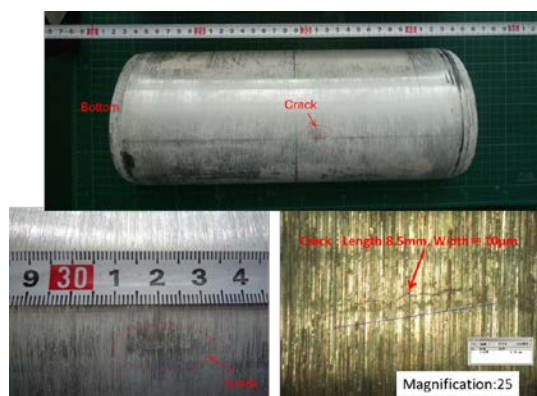


図7：疲労試験後の圧力容器アルミ層

貫通亀裂の位置は、第1成分画像の差分画像に現れたパターン位置と完全に一致する。

(2) パターンをベースとした残光成分の除去

応力を印加しない状態（待機状態）の発光画像は、残光とノイズの2成分となる。残光は時間的に逓減していくが、ノイズはランダムに出現するため、複数枚の待機状態の平均画像を計算すると、ノイズ成分を抑制することができる。図8は、表面に応力発光塗膜センサを塗布した鋼製圧力容器の待機状態の平均画像である。ノイズが抑制されていることがわかる。この平均画像のノルムを1に正規化し、残光パターンの基底パターンとする。個々の画素値の残光の逓減関数は、時間フィルタも用いるほかノイズ除去の方策がな

いため、最小二乗法を用いて近似関数を構成しても、加圧状態での外挿の精度が担保されない。そこで、残光の基底パターンの成分値の時間変動から、残光パターンの逓減関数を求める。

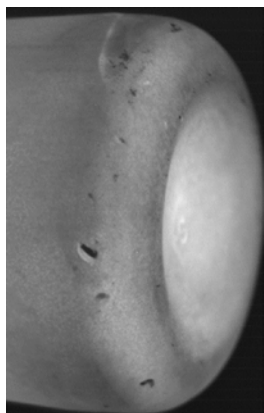


図 8 : 待機状態平均画像

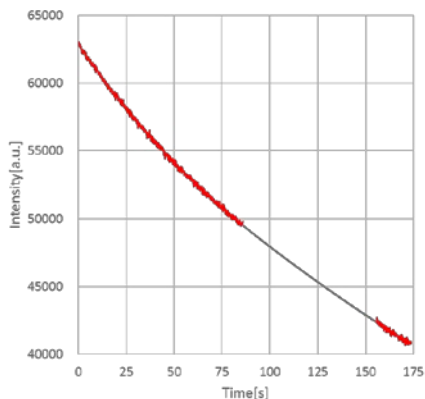


図 9 : 残光パターンの逓減関数

図 9 中の点は、観測画像と残光の基底パターンの内積値をプロットしたものである。単一の画素値を用いた場合に比較して、大幅にノイズの影響を抑制することができている。この逓減関数を、応力印加状態に外装するため、多項式近似を行った。次数は5次である。図 9 中の曲線は、その近似曲線をプロットしたものである。応力印加状態が終了した後の待機状態の近似も、誤差が小さい曲線となっている。

この近似曲線から、応力印加状態の残光パターン成分値を計算し、応力発光画像との差分を求めると応力発光パターンを抽出することができる。図 10 左は抽出前の元画像、右は抽出後の応力発光パターンである。压力容器底部に観測される帯状の発光パターンがコントラストよく抽出されているのがわかる。疲労試験後に压力容器を分解したところ、帯状の発光パターンが出現した箇所に、貫通前の疲労亀裂が確認された。

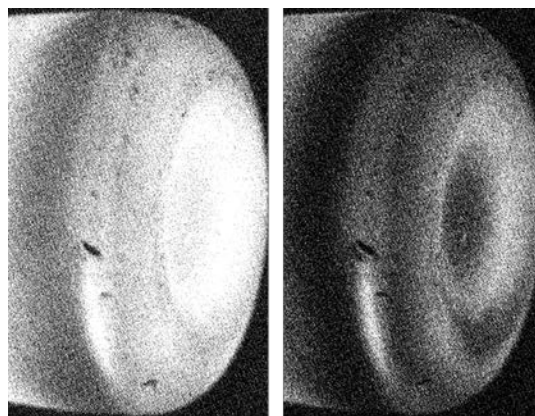


図 9 : 応力印加状態における残光パターン除去前と除去後の応力発光画像

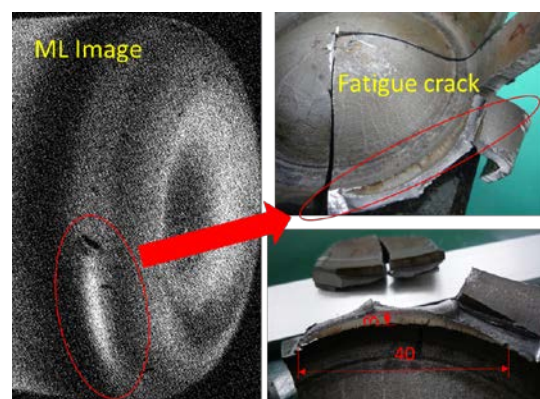


図 10 : 压力容器底部の貫通前疲労亀裂

[1] 徐 超男 セラミックス 44. 154-160 (2009).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

- ① N. Ueno, K. Iwasaki, C. N. Xu, Y. Fujio, "Extraction of Mechanoluminescent Pattern Based on Afterglow Images", Proceedings of 4th International Conference on Informatics, Electronics & Vision, (Accepted), 2015/06, (査読あり)
- ② N. Ueno, C. N. Xu, S. Watanabe, "Fatigue Crack Detection of CFRP Composite Vessel Using Mechanoluminescent Sensor", Proceedings of The IEEE SENSORS 2013, 1851/1854, 2013/11, (査読あり)
- ③ N. Terasaki, C. N. Xu, C. Li, L. Zhang, Y. Sakata, N. Ueno, K. Yasuda, L. H. Ichinose, "Fatigue crack detection of steel truss bridge by using mechanoluminescent sensor", Proceedings of The 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2542/2549, 2012/07, (査読あり)

- ④ Y. Liu, T. Nagatake, K. Takase, D. Ono, H. Yamada, C. N. Xu, C. Wu, N. Ueno, “Evaluation of Thermal Stress Distribution With Elasticoluminescent Materials”, Proceedings of the 20th International Conference on Nuclear Engineering, 1/6, 2012/07, (査読あり)
- ⑤ N. Terasaki, C. N. Xu, C. Li, Z. Li, L. Zhang, D. Ono, M. Tsubai, Y. Adachi, T. Shinokawa, Y. Imai, N. Ueno, “Visualization of active crack on bridge in use by mechanoluminescent sensor”, Proceedings of SPIE SMART STRUCTURES/NDE, Vol.8348, No.2, pp. 8348D-1/ 8348D-6, 2012/03, (査読あり)
- ⑥ 上野直広, 小野大輔, 徐超男, “構造物の応力分布に起因した応力発光のパターン検出”, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.1, pp.67/72, 2012/01, (査読あり)

[学会発表] (計 4件)

- ① N. Ueno, K. Iwasaki, C. N. Xu, Y. Fujio, “Extraction of Mechanoluminescent Pattern Based on Afterglow Images”, 4th International Conference on Informatics, Electronics & Vision, 2015/06, (福岡・北九州市)
- ② 藤尾侑輝、徐超男、寺澤佑仁、坂田義太郎、山辺純一郎、上野直広、渡邊正五、村上敬宜、“応力発光による水素用蓄圧器の損傷診断”、電気化学会、2015/03, (神奈川・横浜市)
- ③ N. Ueno, C. N. Xu, S. Watanabe, “Fatigue Crack Detection of CFRP Composite Vessel Using Mechanoluminescent Sensor”, IEEE SENSORS 2013, 2013/11, (U.S.A)
- ④ N. Ueno、C. N. Xu、S. Watanabe、“A Study of Pattern Analysis of Mechanoluminescence Images”、2nd International Conference on Mechanoluminescence and Novel Structural Health Diagnosis、2013/11, (China)

[図書] (計 1件)

- ① 上野直広 他、NTS 出版、応力発光による構造体診断技術、2012、321

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0件)
- 取得状況 (計 0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上野直広 (UENO Naohiro)

佐賀大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：50356557

(2) 連携研究者

徐超男 (XU Chao-Nan)

独立行政法人産業技術総合研究所・生産計

測技術研究センター・研究チーム長

研究者番号：70235810