

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 4 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560079

研究課題名（和文） ジュール発熱の熱変形を利用した自己損傷検知複合材料構造

研究課題名（英文） Self-damage detection composite structure using thermal deformation caused by Joule heating

研究代表者

轟 章（TODOROKI AKIRA）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50211397

研究成果の概要（和文）:

炭素繊維強化プラスチック積層板の強化繊維の炭素繊維をそのままセンサとして用いる自己損傷検知手法に熱変形の前後で電気抵抗を測定して差異を統計的に判定する手法を提案している。ジュール発熱を利用し、冷却過程でブロックごとの電気抵抗を測定し、電気抵抗変化の統計的関係の変化から、周囲との差異を検出する。この手法を衝撃荷重後の損傷、初期欠陥に適用し、実験的に検証した。また、電極損傷時にも有効に損傷の有無を検知できることを実験的に検証した。

研究成果の概要（英文）:

Self-sensing method is focused on here. In the present study, statistical monitoring method is applied for the electrical resistance changes of several segments before and after the Joule heating. After Joule heating, electrical resistances of several segments are measured. Using the statistical similarity tests, the damaged area of the CFRP is detected. The method is applied to the CFRP plates here. Impact load tests were performed and damage at the electrode was also performed here. The method is experimentally proved to be effective for the detection of the delamination cracks.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：破壊，複合材料，CFRP，層間はく離，電気抵抗

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化複合材料 (CFRP) は次世代航空機構造材料や自動車用構造部品にも将来の適用が予定されている。しかしながら、CFRP は高性能であるが、従来の目視検査では欠陥が発見できないという欠点を有している。これに対して CFRP の電気抵抗変化から損傷を検知するシステムが提案されている。申請者はこの著しい導電率異方性を積極的に利用して CFRP 構造に複数の電極を設置した構造から電気抵抗の分布を求めその分布からはく離やマトリックス割れなどの損傷の位置や大きさを同定する電気抵抗変化法を提案し、有効性の実証をしてきた。

電気抵抗変化法は CFRP 構造を対象としたモニタリング手法である。CFRP の導電性を利用した破壊検知方法は、Schueler らの電極を CFRP 平板周囲端部に設置する方法⁽¹⁾や Wang と Chung らの4電極法⁽²⁾などがある。いずれの方法も電気抵抗変化を測定し、破壊を検知することに成功している。しかし、CFRP の実積層板で破壊発生の位置やき裂の大きさを検知することはできていない。

申請者の電気抵抗変化法は CFRP 構造の表面に多数の電極を設置し、表面層の繊維方位に電流を流すことで導電性の異方性を積極的に利用した破壊モニタリング方法である。従来の方法では電極部分に損傷が発生すると CFRP 構造の損傷発生と同じ電気抵抗変化をもたらすために、損傷発生との区別ができない問題が存在した。また、測定開始時からの電気抵抗変化から損傷を発見するために成形時に発生する初期欠陥を検知できないという問題が存在していた。

統計的判定手法はセンサ間の関係式を多項式で近似し、この多項式関係式をモニタリングデータで作成しなおす際の変化を統計的に判定する手法であり、ひずみゲージを用いたジェットファンの異常モニタリングで既に実機トンネル内環境で3年にわたり運用され、高ノイズ環境での評価を得ている。既に前年度までに銅めっきを用いた電極で信頼性の高い長期運用可能な電極を開発し、実験的に検証してきた。

2. 研究の目的

電極の破損は電気抵抗の増加をもたらす、さらに CFRP の損傷モードの判断などの複雑なモニタリングには電気抵抗変化だけでは困難な場合もある。そこで、本研究では、電気抵抗変化法と同じ電極を用いて直流電流を負荷し、ジュール発熱によって CFRP 構造に熱変形を発生させることで、損傷時の熱変形の差異から電気抵抗変化によって損傷の発生を容易に検知する自己損傷検知 CFRP を実験的に検証することを目的とする。

単純な電気抵抗変化だけでなく、温度変化時のピエゾ抵抗変化も考慮することでより複雑な損傷モードの検知も可能となるばかりでなく、常温時を初期状態とすることで電極破損にも対応可能であるという利点を有している。従来の電気抵抗変化法の発展的な手法である。

この研究では、CFRP 構造のジュール発熱時の電気抵抗変化による損傷検知を目的としており、

(1)ジュール発熱時のはく離損傷の温度変化と熱変形の検討

(2)電気抵抗変化測定

(3)統計的判定手法

による損傷判定の3つの作業がある。

本研究においては、ジュール加熱と電気抵抗測定に適した回路を開発した後に、CFRP 平板を用いて統計的判定手法 (SI-F 法) を用いて実際の衝撃破壊損傷の検知、電極損傷の影響評価、初期欠陥の検知を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

(1) SI-F 法

SI-F 法とは System Identification・F test method の略であり、統計的にシステムの変化を同定する手法である⁽³⁾。

SI-F 法では、健全性が確認されている構造から取得したデータからセンサ出力間の応答曲面を作成する。そして診断プロセスにて、健全性が未知である構造からデータを取得し、応答曲面を作成し、この関係式である応答曲面の差異を統計的に判定して損傷発生の有無を診断する。

既存の SI-F 法では、無損傷時のセンサ出力を学習する必要があるが、本手法で提案する改良型の SI-F 法においては、温度変化の前後での比較をするだけであり、無損傷時の学習データは不要である。

CFRP の強化材料である炭素繊維は繊維方向に高い導電性を有する。一般に炭素繊維は温度上昇に伴って電気抵抗は減少する。また荷重を受けた場合にも、ピエゾ抵抗効果による比抵抗の変化より電気抵抗は変化する。CFRP 積層構造内に層間にはく離が生じると、局所的に層間の相互拘束が解放されて構造の熱変形が周囲の健全部分と比較して差異が生じる。構造の熱変形の差異は熱ひずみの差異であるため、層間にはく離周辺部と健全部ではピエゾ抵抗効果によって電気抵抗変化にも現れる。すなわち、層間にはく離により電気抵抗の温度特性が変化する。

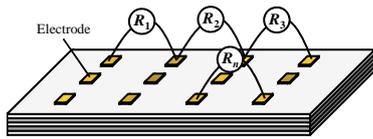


図1 試験片とモニタリングシステム

図1に示すように CFRP 構造を n 個の区間に分け、区間の抵抗値を R_1, R_2, \dots, R_n とする。このとき各区間は電気的に独立していると仮定する。全区間を均等に加熱したときの、区間番号 i の室温状態を基準とした抵抗変化量 R_i を応答、他区間の抵抗変化量 $R_1, R_2, \dots, R_{i-1}, R_{i+1}, \dots, R_n$ を説明変数として関数 f により近似する。

$$\Delta R_i = f(\Delta R_1, \dots, \Delta R_{i-1}, \Delta R_{i+1}, \dots, \Delta R_n) + \varepsilon \quad (1)$$

構造が健全なら、すべての抵抗変化量は同じである。ある区間にはく離が発生すると、熱変形が変化し、ピエゾ抵抗効果により他区間と抵抗変化量が異なる。これにより回帰モデル f が変化する。温度変化の前で応答曲面を作成し、この変化を F 検定により検出することで、層間はく離の有無を判定できる。

電極が損傷すると接触抵抗が変化するため室温状態の電気抵抗は変化する。しかし構造が健全である限り、室温電気抵抗を基準とした温度変化による抵抗変化量は、温度変化後も変わらないため、回帰モデル f は変化しない。したがって電極損傷と構造損傷を区別できる。

初期欠陥がある場合も初期欠陥がある区間だけが熱変形が異なるために SI-F 法によって初期欠陥が検知できる。

本章では、回帰モデルとして二次多項式を用いる。

(2) 実験手法

試験片は、三菱レーヨン製一方向 CFRP プリプレグ PYROFIL#380 により成形した擬似等方性積層板（積層構成： $[0/\pm 45/90]_S$, 250 mm × 200 mm, 厚さ 1.6 mm 程度）から、長さ 112 mm、幅 76 mm に切り出した薄板構造であり、図2に示すように 四つの三電極区間を有している。積層板は、電気炉、真空ポンプ、プレス型治具を用い、130 °C、0.7 MPa の成形条件を 90 分間一定に保ち成形する。

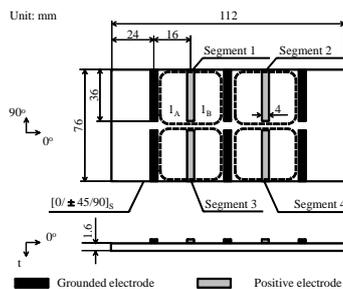


図2 試験片形状

電極は銅めっきにより、幅 4 mm、電極中心間隔 16 mm として作製する⁽⁵⁾。各電流負荷電極に 3.5-4A (約 0.20 V) の定電流を負荷し、抵抗熱により定常になるまで 4 分間加熱する。加熱電流を停止後、温度降下中に電気抵抗変化率を測定する。加熱停止直後の 10 秒間に測定した四区間の電気抵抗変化率から二次応答曲面を作製し、健全時と損傷時の応答曲面の同等性を F 検定により判定する。加熱および電気抵抗変化測定には、図3で示したリレー接点の接触抵抗の影響を受けない電気回路を用いる。図3中に示したすべてのリレー回路を同時に切替え、加熱電流を停止した後の構造温度降下中に、ブリッジ回路を用いて区間 1, 2, 3, 4 の電気抵抗変化率を同時に測定する。ブリッジ電圧を 1 V とし、サンプリング周波数 50 Hz、ローパスフィルタ 10 Hz とし、加熱と測定を 5 回繰り返す。

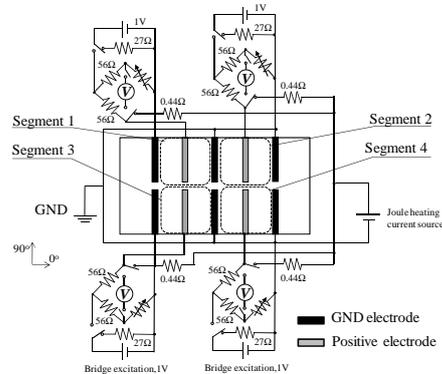


図3 測定用電気回路

その後、試験片に各種損傷を付与した後に同様の加熱・測定を 5 回繰り返して抵抗温度特性を測定する。損傷として

圧子の静的押し込みによる層間はく離

図4に示すように、区間1に圧子をクロスヘッド速度 1 mm/min で押し込み付与する。直径 9, 16 mm の球形圧子と内径 40, 50, 60 mm の治具の組合せにより層間はく離の大きさを変化させることができる。7 枚の試験片を用意し、それぞれ区間1に直径 27.7・63 mm の大小様々の層間はく離を付与した。

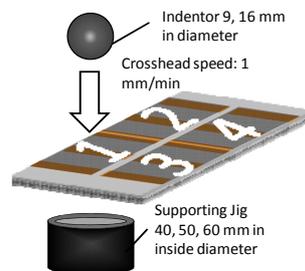


図4 圧子押し込み試験

区間 1 の電流負荷電極を，1/8，2/8，3/8，4/8 と段階的に切り取り（図 5 参照），欠損させていく．欠損で抵抗温度特性が変化しないことを実験的に確認することを目的とする．

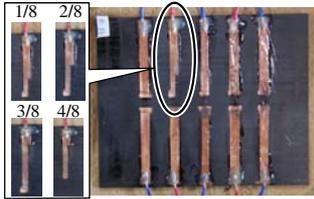


図 5 電極欠損試験片

落錘衝撃による層間はく離

実機構造の層間はく離は衝撃荷重（動的荷重）により生じる場合が多い．本手法の実用化には，衝撃荷重による損傷を対象とした検証実験が不可欠である．

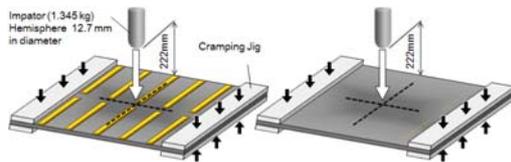


図 6 衝撃試験装置

実機構造の衝撃損傷を模擬するために，図 6 のように CFRP 試験片の中央に落錘の低速衝撃を付与し，本手法による衝撃損傷検出の可能性を検証する．衝撃子を電極設置面に落下させる場合と，裏面に落下させる場合の二通りの試験を行う．下端に直径 12.7 mm の半球を持つ棒状の衝撃子（1.345 kg）をガイドに沿って 222 mm の高さから垂直に落下させる．衝撃エネルギーを衝撃子重量と落下距離の積とすると 2.93 J（単位厚さ当たり 1.72 J/mm）となる．電極部を固定することを避け，二辺の固定のみとした．

落錘衝撃による電極損傷

実機では，小さな衝撃荷重（構造損傷を生じさせない）による電極の CFRP 構造からはく離などが考えられる．そこで，電極上に，構造損傷を生じさせない低エネルギー衝撃を与え，層間はく離を生じさせずに電極接触部に損傷を与える．試験片両端を幅方向にわたって固定し（破線は固定治具を示す），区間 1 の陽極中央に 1.345 kg の衝撃子を 38.7 mm の高さから落下させて 0.51 J（0.30 J/mm）の衝撃を与える．試験片の底面全面の厚さ方向変位を拘束し，さらに試験片底面と治具の間にゴムシートを挿入することで層間はく離の発生を抑制する．同様の衝撃を 3 度与え，衝撃付与毎に電気特性を測定する．

初期成形欠陥

本手法は健全材のデータを用いずに損傷

を検出可能であるため，構造の初期欠陥検査（製品検査）にも原理上，適用可能である．初期欠陥として，積層板の第 1 層と 2 層の間に，電気絶縁体であるテフロン製のシート（厚さ 0.05mm）を二つ折りにして挿入することで成形欠陥を付与した．層間にはく離と同様，異物混入により層間拘束が局所的に開放されるため，健全部とは異なる熱変形性向および異なる抵抗温度特性を示すと考えられる．

デントのみの試験片

層間にはく離発生の原因となる面外方向荷重は，構造表面にデントを生じさせる．CFRP 積層構造の機械特性はデントによる低下は小さいと考えられ許容できる．そこで圧子を準静的に押し込み CFRP 構造にデントのみを与える．試験片底面と治具の間にゴムシートを挿入する．電極設置面の区間 1 左側中央に直径 9.0 mm の球形の圧子を押し込み，デントを発生させる．荷重が 1.5 kN に達するまでクロスヘッドを 0.5 mm/min の速度で押し込む．

4. 研究成果

(1) ジュール加熱

4 分間の抵抗加熱により定常状態に達した試験片の表面温度分布をサーモグラフィ（Mobic®M3）により撮影した．画像を図 7 に示す．最大温度は 43 °C 以下であり，本試験片に用いた三菱レーヨン製一方向 CFRP プリプレグ PYROFIL #380 の運用許容温度 90 °C を下回っている．したがって，力学的特性に影響しないと考えられる．

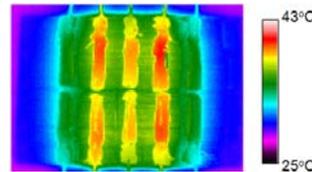


図 7 加熱時の温度変化

(2) はく離発生の確認

超音波探傷装置（日本 Krautkramer 社 SDS5400R）により撮影した，層間にはく離の C スキャン投影画像（厚さ方向投影形状を可視化したもの）の一例を図 8 に示す．探傷には縦波探触子（10MHz）を用いた．層間にはく離の最大径は 27.7mm（投影面積 261 mm²）であった．

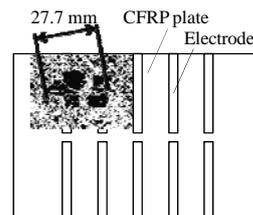


図 8 C スキャンによるはく離

(3) SI-F 法による検知結果

図 9 に圧子の静的押込みによる層間はく離の SI-F 法による検定結果を示す。縦軸が F_0 値であり、横軸が発生したはく離の投影最大寸法である。図中で灰色部分が信頼区間である。信頼区間外にある場合が異なる応答曲面と判断された結果である。

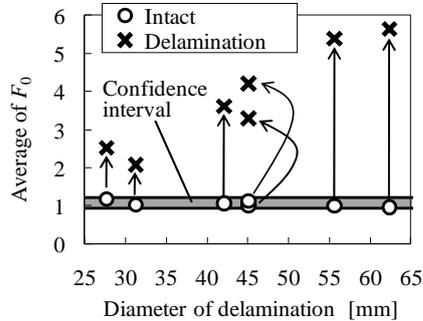


図 9 圧子の静的押込みによる層間はく離の SI-F 法による検知結果

すべての試験片において、層間はく離の有無を正しく判定でき、少なくとも直径 27.7mm の埋没した層間はく離を検出可能であることが示された。

図 10 に電極欠損の影響の結果を示す。区間 1 の電流負荷電極を、1/8、2/8、3/8、4/8 と段階的に欠損させていき、室温状態の電気抵抗変化を測定した。欠損面積の増大に伴い 2 電極法で測定する電気抵抗は徐々に増加する。2 電極法で電気抵抗変化を利用する従来手法では、このような構造の健全性と無関係の抵抗変化は誤判定につながる危険性がある。

F 検定結果から、3/8 面積以下の電極欠損が F 検定結果に影響を与えない (F_0 を上昇させない) ことを確認した。4/8 面積の欠損は表面繊維方向に貫通している部分があり、電流経路が大きく変化しており、電流経路変化の影響が大きいと思われる。

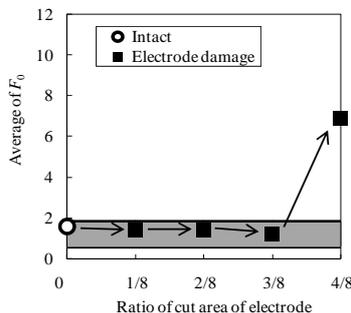


図 10 電極損傷の影響評価

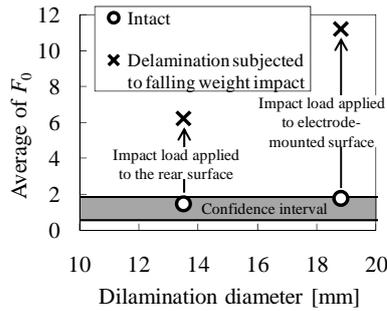


図 11 落錘衝撃試験結果

落錘衝撃試験の結果を図 11 に示す。超音波 C スキャンで測定した層間はく離はそれぞれ、最大径 18.8 mm (投影面積 138 mm²)、最大径 13.5 mm (投影面積 105 mm²) であり、衝撃点には、深いデント (深さ 35μm 程) が発生していた。横軸は投影層間はく離部の最大径である。表裏どちらの面から衝撃荷重を受けた場合にも、少なくとも最大径 18.8 mm (投影面積 138 mm²) 程の衝撃損傷を正しく検出可能であることを確認した。

落錘衝撃による電極損傷の影響の測定結果を図 12 に示す。横軸は衝撃荷回数である。目視検査および超音波探傷の結果、落錘衝撃により電極周辺にはデントや内部欠陥などの構造損傷は生じていなかった。断面の顕微鏡観察結果から、この抵抗増加は CFRP と電極界面に微小なはく離が発生していた。F 検定結果から、電極のはく離は抵抗温度特性を大きな影響を与えず、3 度の衝撃付与後においても異常なしという判定結果が得られた。このような構造損傷を生じさせない小さな衝撃を繰返し受けても、提案手法の診断結果は影響を受けないことが期待できる。

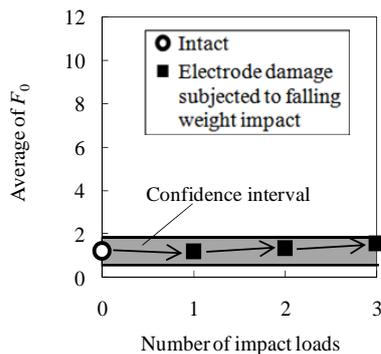


図 12 電極の衝撃損傷の結果

初期欠陥として 20 mm × 28 mm の絶縁体シートを区間 1 の層間に挿入して模擬した成形欠陥有する試験片の結果を図 13 に示す。 F_0 の平均値は信頼区間外を大きく上回る値をとっており、模擬成形欠陥のような損傷をも検出可能であることを確認した。本手法の、従来手法では不可能であった初期欠陥検査 (製品検査) への適用可能性についても期待

を持つことができる。

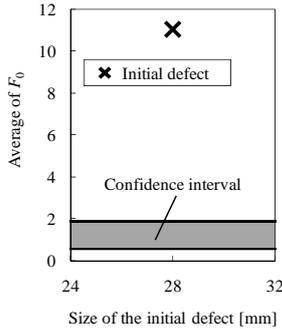


図 13 初期欠陥の結果

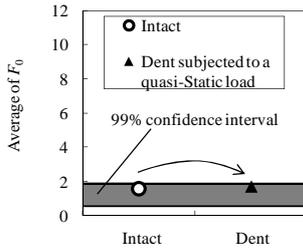


図 14 圧子押し込み試験の結果

圧子の静的押し込みによるデントの結果を図 14 に示す。圧子の押し込み部には深さ 35 μm 程のデントが生じていた。超音波探傷 C スキャンの結果、押し込み部周辺には、内部欠陥は生じていない。圧子押し込み後は、厚さ方向の導電率変化によって電気抵抗は変化しているが⁽⁶⁾、この手法で作成して圧子押し込みによるデントでは損傷は生じていない。F 検定結果から、静的圧子押し込みにより付与した損傷のないデントは CFRP 構造の抵抗温度特性を大きく変化させることはなく、F 検定結果に影響を与えない (F_0 を上昇させない) ことが示された。

(4) まとめ

以上得られた結果を要約すると以下の通りである。

ジュール加熱を用いた熱変形による電気抵抗変化を統計的に判断する方法によって、衝撃時の CFRP はく離損傷が検知可能であることが実証された。

提案手法は電極の損傷に対して誤判定しにくい実用的な方法であることが実証された。

初期欠陥も検知可能であることが実証された。

【参考文献】

(1) R. Schueler, S. P. Joshi and K. Schulte, Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping, Composites Science and Technology, 61-6, 2001, pp.921-930.

(2) X. Wang, X. Fu and D.D.L. Chung, Strain sensing using carbon fiber, J. Material Research, 4-3, 1999, pp.790-802.

(3) 岩崎篤, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 自己学習型損傷検出知的構造のための統計的診断手法, 日本機械学会論文集, A 編, 67-656(2001), pp.771-776.

(4) Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, Wiley Series in Probability and Statistics, 2002.

(5) Akira Todoroki, Kensuke Suzuki, Yoshihiro Mizutani and Ryosuke Matsuzaki, Durability Estimates of Copper Plated Electrodes for Self-sensing CFRP Composites, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.4, No.6, (2010), pp.610-620.

(6) Akira Todoroki, Yuusuke Samejima, Yoshiyasu Hirano, Ryosuke Matsuzaki and Yoshihiro Mizutani, Electrical Resistance Change of Thick CFRP Laminate for Self-Sensing, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.4, No.6 (2010) pp.658-668.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

鈴木良郎, 轟章, 水谷義弘, 松崎亮介, 健全データ学習不要の電気抵抗変化法による CFRP 平板の統計的損傷, 日本機械学会論文集 A 編, 77 巻 773 号, (2011), pp181-189 (査読有)。

Yoshiro Suzuki, Akira Todoroki, Yoshihiro Mizutani, Ryosuke Matsuzaki, Impact Damage Detection in CFRP Using Statistical Analysis of Resistance Temperature Characteristics, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, JSME, Vol.5, No.1 (2011), pp.33-43 (査読有)。

鈴木良郎, 轟章, 高橋航圭, 水谷義弘, 松崎亮介, 抵抗温度特性変化を利用した CFRP 平板の統計的層間はく離検出, 日本機械学会論文集, A 編, 76 巻, 767 号 (2010), pp.961-967 (査読有)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

轟章 (TODOROKI AKIRA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 50211397

(2) 研究分担者

水谷義弘 (MIZUTANI YOSHIHIRO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 40337879