

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2006～2010

課題番号：18106014

研究課題名(和文) 複合材構造の損傷許容設計実現のための光ファイバセンサ監視システム

研究課題名(英文) Optical Fiber Sensor Monitoring System of Composite Structures for Damage Tolerance Design

研究代表者

武田 展雄 (TAKEDA NOBUO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：10171646

研究成果の概要(和文)：本研究では、航空宇宙機複合材構造の損傷許容設計実現のための光ファイバセンサ監視システムを実用化するための基礎・基盤研究として、まず土台となる「損傷プロセスの観察と定式化」を進めた。また、「弾性波計測による監視システム」、「分布ひずみ計測による監視システム」両者の適用化に取り組むとともに、両者の特性を組み合わせることで、より信頼性と診断精度の高い監視システムを構築した。

研究成果の概要(英文)：This study deals with the fundamental study of a novel optical fiber sensor monitoring system to realize the damage tolerance design of aerospace composite structures. First, “Visualization of damage initiation and growth and its theoretical formulation” is conducted for current advanced composites as a basic background research for the following health monitoring development. Then two different optical fiber sensor monitoring systems are developed to monitor the damage evolution in aerospace composite structures. One is “Monitoring system with Lamb wave detection” and the other is “Distributed strain monitoring system”. Both optical fiber sensor monitoring systems are designed to characterize the damage evolution in composite structures in particular. Combination of two systems provides a more reliable and accurate characterization of the damage evolution in practical aerospace composite structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	22,700,000	6,810,000	29,510,000
2007年度	21,400,000	6,420,000	27,820,000
2008年度	12,900,000	3,870,000	16,770,000
2009年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2010年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
総計	79,400,000	23,820,000	103,220,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学、複合材料・物性、光ファイバセンサ、モニタリング

1. 研究開始当初の背景

近年、航空機の軽量化を図るため、主要な一次構造部材にも、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)複合材料を適用されている。しかし、CFRP複合材料の破壊プロセスは複雑であり、微視的な内部損傷は、従来の金属材料用非破壊検査手法のみでは検出することは困

難である。そのため、センサを構造材料自身に組み込んで、健全性を常時診断できるヘルスマニタリング技術の適用が、構造健全性確保の面から、また、実用メンテナンスコストの削減要求の面からも強く要望されている。

研究代表者らは、その一つとして、材料中に埋め込みが可能な非常に細い光ファイバ

を開発し、それにグレーティングを書き込んだ細径FBG (Fiber Bragg Grating) センサを作成して、CFRP 積層板内部の微視的損傷検出を可能にしてきた。そして近年、日立電線株式会社と共同で、FBG センサの反射光波長を高速で検出し、約 1MHz 強までの計測速度を達成している。よって、圧電セラミックス (PZT) で発振して、CFRP 積層板中を伝播させた数百 kHz 程度の超音波も検出でき、その弾性波の伝播特性から積層板中の損傷を長期にわたって診断可能となってきた。

一方、大型構造物のひずみ分布を計測する目的で、分布型光ファイバセンサ計測技術である BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) 法が発達してきた。しかし、通常の BOTDA は計測分解能がメートルオーダーであったため、航空機の損傷検出には不十分であったが、近年開発されたパルス・プリポンプ式 BOTDA (PPP-BOTDA) は空間分解能が 10cm、ひずみ計測精度が $\pm 25\mu\epsilon$ と格段に性能が向上しており、航空宇宙構造物の内部損傷検出にも適用可能と考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、航空宇宙機を想定した複合材構造の損傷許容設計実現のための光ファイバセンサ監視システムを実用化するための基礎・基盤研究として、まず土台となる「損傷プロセスの観察と定式化」を進めた。また、「弾性波計測による監視システム」、「分布ひずみ計測による監視システム」両者の適用化に取り組むとともに、両者の特性を組み合わせることで、より信頼性と診断精度の高い監視システムを構築することとした。

3. 研究の方法

「損傷プロセスの観察と定式化」では、複合材料構造の損傷進展プロセスの解明と定式化による損傷発生・進展シミュレーション手法の提案と実証を行う (購入設備: 微視損傷観察用試料結合ホルダ+ピエゾドライバ)。「弾性波計測による監視システム」では、接着層剥離損傷検出を想定した弾性波受振 FBG センサシステムの提案と実証を行う (購入設備: 光ファイバ自動調芯装置)。「分布ひずみ計測による監視システム」では、空間分解能 10cm、ひずみ計測精度 $\pm 25\mu\epsilon$ の特徴を最大限に生かしたグローバル損傷検出法の検討や実証を行う (購入設備: PPP-BOTDA システム及びその改善)。

4. 研究成果

(1) 「損傷プロセスの観察と定式化」

複合材構造は、通常、直径数ミクロンの強化繊維を一方にひき揃え樹脂中に含浸させた一層 125 ミクロン程度の単層板を、繊維方向を組み合わせた擬似等方性積層板 (例え

ば、[45/0/-45/90/90/-45/0/45] など) として用いられるが、損傷形態は積層板中の繊維垂直方向の樹脂中亀裂 (transverse crack, splitting)、層間剥離 (delamination) の微視的損傷発生・進展を経て、繊維破断を伴う最終破壊に至る。筆者らは、各種顕微鏡負荷その場観察に基づく実験結果を再現できる損傷発生・進展シミュレーション手法の研究を進めて世界的な評価を得てきた。

本研究では実用的なノッチ部や円孔部などの応力集中部が存在する構造部材中の樹脂中亀裂・層間剥離の損傷発生・進展シミュレーションを効率的に行える手法を提案し、損傷に伴う応力集中部近傍のひずみ分布変化を計算した。さらにその結果より光導波理論を用いて光反射スペクトル分布を計算し、複合材積層板に埋込まれた FBG センサによる測定結果との良好一致を得ることに成功している。また、上記理論解析法を拡張し、光反射スペクトル分布変化からひずみ分布変化を、さらには損傷形態・寸法を推定する逆問題アルゴリズムを構築し、その有効性を実証している。

図 1 に、FBG センサゲージ中の格子間隔が線形に増加する、チャープ型 FBG センサを用いて CFRP 直交積層板の円孔部周りに生じる複雑な多数の損傷形態・寸法を推定することに成功した例を示す。各損傷形態や発生位置も含め、チャープ型 FBG センサを用いた損傷同定が可能となっている。

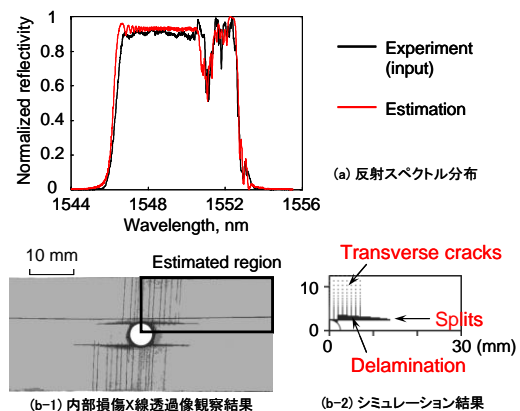


図 1 チャープFBGセンサの反射スペクトル分布を目的関数とした、CFRP直交積層板内部損傷の同定

次に、CFRPを表皮に用いたフォームコアサンドイッチ構造について、埋込みFBGセンサを用いた剥離損傷モニタリングに関する研究を進めた。このようなサンドイッチ構造では、衝撃荷重などにより生じるCFRP表皮/フォームコア間の剥離が重要設計因子の一つであることから、局所的に剥離進展を抑制する目的でクラックアレスターが提案されている (図 2(a))。この場合、剥離発生・

進展位置を検出できることが、クラックアレスタの効果を構造健全性評価に反映させるために重要である。そこで、一方向 CFRP からなるクラックアレスタ部材に、予め FBG センサを埋め込むことにより剥離発生・進展の位置検出を可能とするシステムを構築した。剥離がクラックアレスタに近づいてくると図 2(b)に示すように、クラックアレスタが応力を受けるようになり、クラック先端の応力は低下し、剥離進展が抑制される。また、クラックアレスタ部材の端部に埋め込まれた FBG センサには、光ファイバ軸方向に垂直な応力成分が発生し、複屈折効果が生じる。これにより、FBG センサのスペクトルは二つのピークに分離されてくるが、ピーク間の距離は剥離進展位置と関係付けられる (図 2(c))。

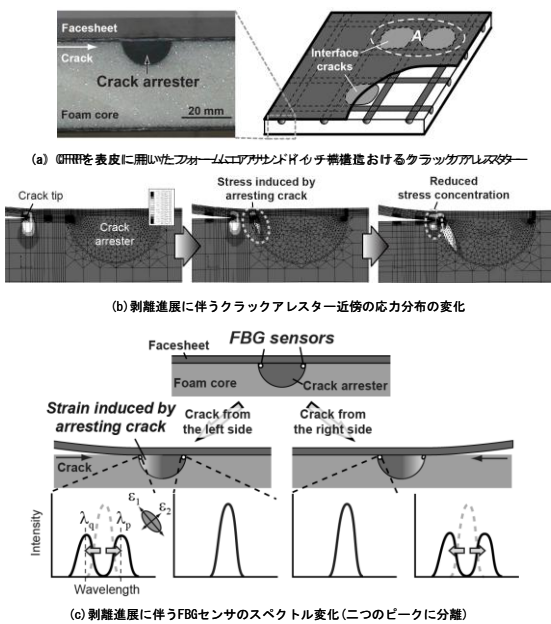


図2 クラックアレスタ付きCFRPフォームコアサンドイッチ構造の剥離位置検出

(2) 「弾性波計測による監視システム」

ここでは、突発的な衝撃損傷などFBGセンサから離れた場所に発生する損傷であっても計測できるシステムの開発研究を行った。複合材構造表面に貼り付けられた圧電セラミック(PZT)で発振し、CFRP積層板中を伝播させた数百kHz程度の弾性波をFBGセンサで高速検出する装置(企業と共同開発済)を用いて、その弾性波の伝播特性から積層板中の損傷を長距離にわたって診断可能とした。接着層剥離損傷検出を想定した弾性波受振FBGセンサシステムの基礎・応用研究や、衝撃剥離損傷を持つ複合材構造の損傷許容設計法の検討に成果を挙げている。図3には、CFRPハット型補強構造の接着層剥離長さ同定を行った例を示す。剥離長さに伴い、初動弾性

波が迂回し到着時間が遅れること、最大振幅が現象していくことをウェーブレット変換結果により明確化するとともに、波形変化を定量化する損傷指標により、接着剥離長さの定量評価に成功した。

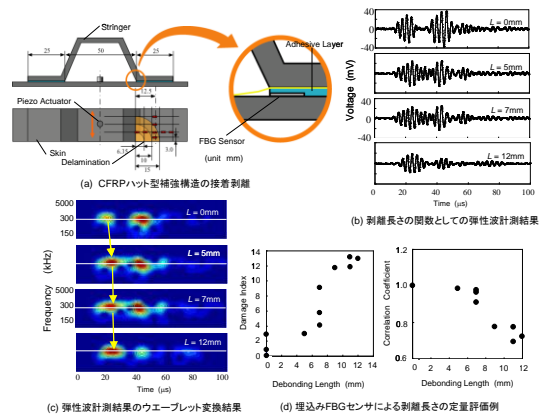


図3 PZT-FBGハイブリッド弾性波計測システムによる接着剥離長さの同定

(3) 「分布ひずみ計測による監視システム」

パルス・プリポンプ式BOTDA(PPP-BOTDA)システムを用いて、FBG計測では困難な広領域に渡るひずみ計測を有効に利用した航空宇宙複合材構造の内部損傷検出にも適用するための基盤研究を行った。図4には、接着層埋込み光ファイバネットワークを用いたCFRPサンドイッチ構造の衝撃損傷検出を行った例を示す。衝撃損傷後の除荷時に残るCFRP表皮の凹みや残留ひずみを計算できる理論モデルを構築し、光反射スペクトル分布を計算するソフトを開発した。距離分解能

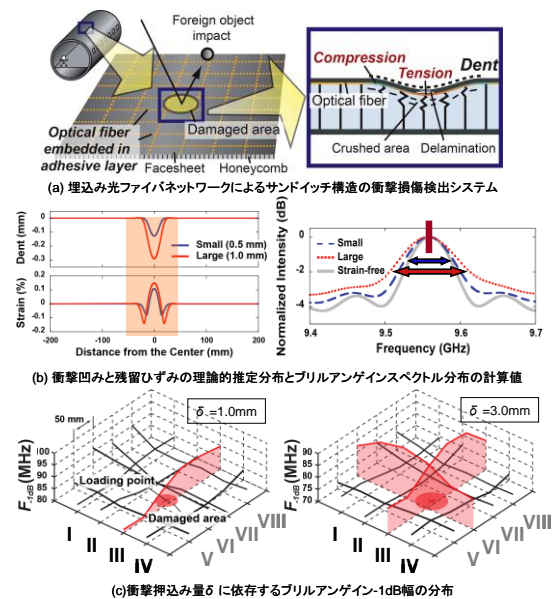


図4 ppp-BOCDA分布ひずみ計測システムを用いたCFRPサンドイッチ構造衝撃損傷検出結果

10cm 内のひずみ分布状態は反射スペクトルのスペクトル幅と対応する現象を利用し、スペクトル幅の空間分布を可視化することにより衝撃損傷（とくに接着層剥離領域）の定量化に成功した。わずかな衝撃損傷後の CFRP 表皮くぼみを見逃さない手法として画期的であり、学術性、応用性両方に優れたものとして高い評価を得ている。風力発電用の複合材ブレードへの応用も期待されている。また、サンドイッチ構造で問題となる内部漏水の検知システムとしての有効性も実証している。計測の高速化、高距離分解能化などについては、さらに装置開発メーカーと協力して進めている。

また、複合材構造中に埋め込んだ光ファイバによる分布ひずみから構造物の変位・形状同定や境界条件変化同定を行うシステムの開発にも成功している。ひずみ分布形状不均一度評価を行い、構造物の変位境界条件の変化を検出し、同定における最適な構造有限要素モデルの改良に利用する手法を提案した（図 5）。変位境界条件の変化を反映させたアップデート有限要素モデルにより、高い精度で変位が同定できることを証明した（図 6）。

さらに、樹脂硬化中にもセンサ出力を取得することで成形モニタリングを行い、成形中に発生する熱残留応力の発生メカニズムの解明に取り組んだ（豪州 CRC-ACS との共同研究）。使用した光ファイバ埋込み補強 CFRP パネルを図 7 に示す。繊維プリフォームを用いた板厚変化もある、樹脂真空含浸法（VaRTM）による成形板であり、1 本の光ファイバのみが同一部分を 2 度通過するものとして、データの再現性を調べるとともに、多点光ファイバセンサである FBG センサや光ファイバ利用樹脂流れ位置センサも併用した。また、曲げ

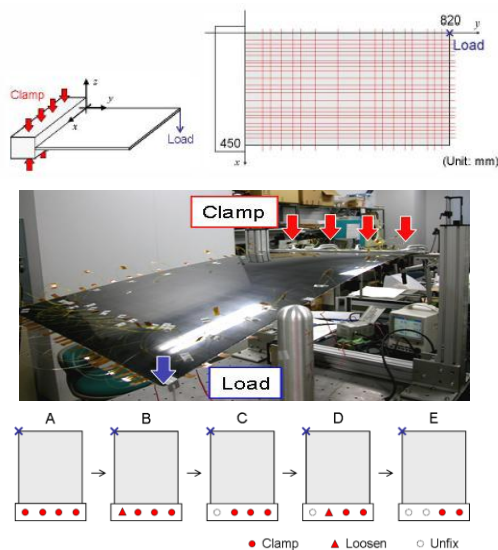
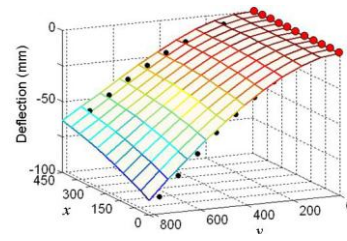
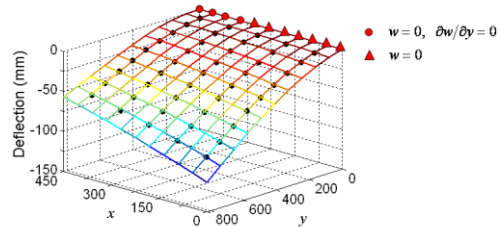


図 5 光ファイバ埋込み CFRP 片持ち板の端部曲げ試験と固定端部の境界条件変化



(a) 完全固定端モデル



(b) クランプ状態 C のアップデートモデル

図 6 CFRP 片持ち板の変形同定結果 (クランプ状態 C)

による光損失の少ない光ファイバの利用、光ファイバ取り出し法の工夫などのノウハウが使われている。昇温・降温過程でのモニターも行い、成形途中の繊維プリフォームの状態変化が明確となった。図 7 には、成形後に治具から取り外した後の、残留ひずみ分布（ほぼ $250\mu\epsilon$ 程度）の測定結果を示す。この結果は理論シミュレーション結果ともほぼ一致する。

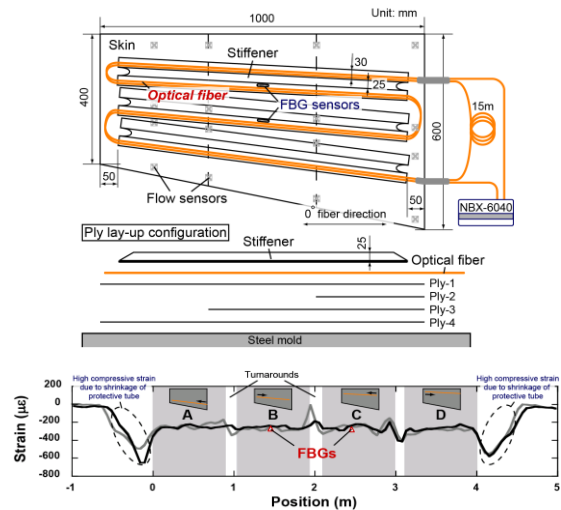


図 7 光ファイバ埋込み補強 CFRP パネルと成形後に治具取り外し後の残留ひずみ分布測定結果

このパネルは、その後、低速衝撃試験に供せられた。衝撃負荷後のひずみ分布の測定結果を図 8 に示す。外観からは見分けにくい低速衝撃損傷を受けた補強パネルの層間剥離

の存在を検知することに成功した。

上記の例のように、埋込み光ファイバセンサにより、CFRP 構造の成形から運用までの、構造の品質・健全性を保証するライフサイクルモニタリング技術の有用性が証明された。日本独自の特徴のある技術であると考えら

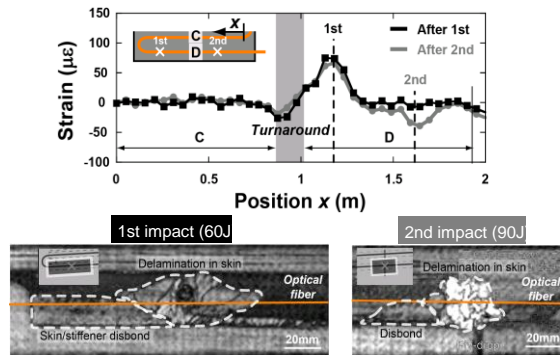


図 8 低速衝撃負荷後のひずみ分布測定結果と損傷の超音波反射画像

れ、今後のライフサイクルモニタリング技術の発展がさらに期待される。

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] (すべて査読有、計 38 件、総説 7 件を含む)

- ① S. Minakuchi, Y. Yamauchi, N. Takeda and Y. Hirose, “Detecting an Arrested Crack in a Foam-Core Sandwich Structure Using an Optical Fiber Sensor Embedded in a Crack Arrester”, *Advanced Composite Materials*, 2011, in press. (掲載確定)
- ② 武田展雄, 越岡康弘 “航空宇宙機の構造ヘルスマニタリング技術の進展,” *非破壊検査*, Vol. 60, No. 3, 2011, pp. 157-164.
- ③ S. Minakuchi, N. Takeda, S. Takeda, Y. Nagao, A. Franceschetti and X. Liu, “Life Cycle Monitoring of Large-Scale CFRP VARTM Structure by Fiber-Optic-Based Distributed Sensing”, *Composites: Part A* (2011), pp. 669-676.
- ④ 西尾真由子, 武田展雄, “分布型光ファイバひずみセンサを用いた変位同定法による境界条件変化を考慮した構造物の変形モニタリング”, *土木学会論文集*, Vol. 66, No. 2, 2010, pp. 229-238.
- ⑤ 水谷忠均, 武田展雄, “光ファイバセンサによる極低温でのひずみ計測技術とその航空宇宙分野における応用”, *日本航空宇宙学会論文集*, Vol. 58, No. 672, 2010, pp. 24-30.
- ⑥ M. Nishio, T. Mizutani and N. Takeda,

“Structural Shape Reconstruction with Consideration of the Reliability of Distributed Strain Data from a Brillouin-Scattering-Based Optical Fiber Sensor”, *Smart Materials and Structures*, Vol 19, 2010, 035011(14pp).

- ⑦ S. Minakuchi, Y. Okabe, T. Mizutani and N. Takeda, “Barely Visible Impact Damage Detection for Composite Sandwich Structures by Optical-Fiber-Based Distributed Strain Measurement”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, 2009, 085018.
- ⑧ S. Minakuchi, T. Mizutani, H. Tsukamoto, M. Nishio, Y. Okabe, and N. Takeda, “Brillouin Spectral Response depending on Strain Non-uniformity within Centimeter Spatial Resolution and its Application to Internal Damage Detection in Large-scaled Composite Structures,” *Structural Durability & Health Monitoring*, vol. 4, No. 4, 2008, pp. 199-219.
- ⑨ Y. Okabe, S. Minakuchi, N. Shiraishi, K. Murakami and N. Takeda, “Smart Honeycomb Sandwich Panels With Damage Detection and Shape Recovery Functions,” *Advanced Composite Materials*, Vol. 17, 2008, pp. 41-56.
- ⑩ S. Minakuchi, Y. Okabe and N. Takeda, ““Segment-Wise Model” for Theoretical Simulation of Barely Visible Indentation Damage in Composite Sandwich Beams: Part II – Experimental Verification and Discussion,” *Composites Part A*, 38, 2008, pp. 2443-2450.
- ⑪ S. Minakuchi, Y. Okabe and N. Takeda, ““Segment-Wise Model” for Theoretical Simulation of Barely Visible Indentation Damage in Composite Sandwich Beams: Part I– Formulation,” *Composites Part A*, Vol. 39, 2008, pp. 133-144.
- ⑫ S. Yashiro, K. Murai, T. Okabe and N. Takeda, “Numerical Study for Identifying Damage in Open-Hole Composites with Embedded FBG Sensors and its Application to Experimental Results,” *Advanced Composite Materials*, Vol. 16, No. 2, 2007, pp. 115-134.
- ⑬ S. Takeda, Y. Yamamoto, Y. Okabe and N. Takeda, “Debonding Monitoring of Composite Repair Patches Using Embedded Small-diameter FBG Sensors,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, 2007, 763-770.
- ⑭ S. Minakuchi, Y. Okabe and N. Takeda, “Real-Time Detection of Debonding between Honeycomb Core and Facesheet

- Using a Small-Diameter FBG Sensor Embedded in Adhesive Layer,” Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 9, No. 1, 2007, pp. 9-33.
- ⑮ S. Yashiro, T. Okabe and N. Takeda, “Damage Identification in a Holed CFRP Laminate Using a Chirped Fiber Bragg Grating Sensor,” Compos. Sci. Tech., Vol. 67, 2007, pp. 286-295.
- ⑯ Y. Okabe, J. Kuwahara, K. Natori, N. Takeda, T. Ogisu, S. Kojima and S. Komatsuzaki, “Evaluation of Debonding Progress in Composite Bonded Structures Using Ultrasonic Waves Received in Fiber Bragg Grating Sensors,” Smart Materials and Structures, Vol. 16, No. 4, 2007, pp. 1370-1378.
- ⑰ 岡部洋二, 武田展雄, 萩巢敏充, 小島正嗣, “弾性波受信 FBG センサを用いた CFRP 構造体中の剥離進展の評価,” 検査技術, Vol. 12, No. 9, 2007, pp. 1-7.
- ⑱ N. Takeda, S. Minakuchi and Y. Okabe, “Smart Composite Sandwich Structures for Future Aerospace Application-Damage Detection and Suppression-: a Review,” Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 1, No. 1, 2007, pp. 3-17.
- ⑲ N. Takeda, Y. Okabe and T. Mizutani, “Damage Detection in Composites Using Optical Fibre Sensors,” Proc. IMechE Part G: J. Aerospace Engineering, Vol. 221, 2007, 497-508.
- [国際学会発表] (計 65 件)
(基調・招待講演 23 件)
- ① N. Takeda, I. Takahashi and Y. Ito, “Visualization of Impact Damage in Composite Structures Using Pulsed Laser Scanning Method”, (Invited) Proc. 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, April 11, 2010, Orlando, FL, USA, AIAA-2010-2529, 8p.
- ② N. Takeda, “Damage Growth Prediction in Fiber Reinforced Composites and Structural Health Monitoring”, (Plenary) RAMM & ASMP ‘09, 2009, June 1, Penang, Malaysia.
- ③ N. Takeda, “Recent Development of Structural Health Monitoring Technologies for Aircraft Composite Structures”, (Plenary) 26th Cong. Inter. Council of Aeronautical Sci. (ICAS 2008), Sept. 14-19, 2008, Anchorage, AL, USA.
- ④ N. Takeda, “Fiber Optic Sensor-Based SHM Technologies for Aerospace Applications in Japan”, (Invited) 5th Int. Symp. SPIE Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San

Diego, March 10, 2008.

- ⑤ N. Takeda, (Featured Lecture) “Research on Multifunctional Materials & Structural Health Monitoring in Japan”, SAMPE Fall Technical Conference and Exhibition, 2008, September 8-11, Memphis, Tennessee, USA.
- ⑥ N. Takeda, “Optical fiber sensor based structural health monitoring of aerospace composite structures”, (Invited) 4th Int. Conf. on Fatigue of Composites, VW, Kaiserslautern, Germany, Sept. 26-28, 2007.
- ⑦ N. Takeda, “Recent Developments of Optical Fiber Sensor Based SHM Technologies for Aerospace Composite Structures in Japan”, (Invited) 6th Int. Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Sept. 11-13, 2007.

[その他]

ホームページ等

<http://www.smart.k.u-tokyo.ac.jp>

N. Takeda, "2010 Person of the Year", Structural Health Monitoring: An International Journal (構造ヘルスマニタリング国際年間最優秀個人賞) イタリア、ソレントにて受賞。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 展雄 (TAKEDA NOBUO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：10171646

(2) 研究分担者

岡部 洋二 (OKABE YOJI)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：90313006

水谷 忠均 (MIZUTANI TADAHITO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教 (H18-H19)

研究者番号：00401232

水口 周 (MINAKUCHI SHU)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教 (H20 より)

研究者番号：70512359

(3) 連携研究者

青木 雄一郎 (AOKI YUICHIRO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・研究員

研究者番号：00371112

(H18-H19 研究分担者)

西川 雅章 (NISHIKAWA MASA AKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授 (H18-H20 研究分担者)

研究者番号：60512085

(4) 研究協力者

岸田 欽増 (KISHIDA KINZO)

ニューブレクス株式会社・代表取締役