

## 「特別推進研究」研究期間終了後の効果・効用、波及効果に関する自己評価書

- 研究代表者氏名 保立 和夫（東京大学・大学院・工学系研究科・教授）
- 研究分担者氏名 山下 真司（東京大学・大学院・新領域創成科学研究科・助教授）  
何 祖源（東京大学・大学院・工学系研究科・研究拠点形成特任教員（常勤形態））
- 研究課題名「痛みの分かる材料・構造・通信網の為の高分解能・高機能光ファイバ連続分布量計測技術」
- 課題番号 13002003
- 補助金交付額（直接経費のみ）

平成13年度	65,000千円
平成14年度	44,000千円
平成15年度	38,000千円

### 【研究期間終了後の効果・効用、波及効果に関する内容】

#### 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか。

##### (1) 概要

本特別推進研究では、研究代表者の提案した連続光波の干渉状態を任意に合成できる独自技術、「光波コヒーレンス関数の合成法」を活用して、高い空間分解能、速い測定速度、測定点へのランダムアクセス機能等、他の手法では実現が困難な機能を有する複数の光ファイバ連続分布量計測技術を提案・実現した。これら技術は、光ファイバを航空機翼、橋梁・橋脚、パイプライン等々に張り巡らすことで、これら構造・材料の歪や温度の分布状況を計測する「光ファイバ神経網」として機能し、「痛みの分かる材料・構造・通信網」が実現される。ファイバブリルアン光相関領域解析法（BOCDA 法；連続歪分布測定技術）、分布型側圧センシングシステム、光ファイバ加入者網診断技術、光ファイバグレーティング（FBG）多点型歪センシング技術等で、斬新な機能を発揮させることができ、特別推進研究の事後評価（平成16年度）では[A+]の評価を得た。

平成16年度からは、特別推進研究で得た成果を格段に発展させることを目的に立案した研究計画が認められ、学術創成研究「安全・安心の為のファイバセンサフォトニクスー光ファイバ神経網技術の極限性能追求ー」が採択され、平成21年3月まで継続している。本学術創成研究では、BOCDAの極限性能実現、同一波長FBG多重化技術、光ファイバ神経網のバリエーション拡大、センシング用光ファイバの提案・解析、高機能な痛みの分かる材料・構造の実現をサブテーマに掲げ、いずれのテーマでも新たな手法を提案・実証した。達成された空間分解能1.6mmは従来手法の約500倍、測定速度1kHzは約10万倍であり、本書執筆時点では温度と歪を高精度に同時に分布測定できる技術も提案・確認できているなど、多くの新たな知見を蓄積している。土木建設企業、航空宇宙企業、計測器企業、通信企業等との共同研究も進み、BOCDA可搬型試作機も完成した。小型ビジネスジェット機にBOCDA装置を搭載して、飛行中での機体の変形の様子を分布的・動的に捉えることにも成功し、新聞等で報道された。

平成16年度以降の成果は、学術論文33件（内、招待論文2件）、国際会議発表70件（内、招待講演21件）、依頼解説記事7件等にて発表し、特許6件を申請して、先に申請していた関連特許2件が成立した。本研究に関連して平成16年度以降だけで5件の受賞がある。多くの招待講演や受賞から、本研究が関連研究領域において注目されていることが分かる。学術創成研究の中間評価（平成18年度）でも[A+]を頂いた。

このように、特別推進研究での成果を基盤に、その後の5年間で、学術創成研究により新たな技術を提案・実証することができ、活力ある研究の展開が図られている。また、本研究課題を主たるサブテーマのひとつとして本研究代表者がリーダーとして申請したグローバルCOEプログラム「セキュアライフ・エレクトロニクス」も、平成19年度に重点課題として採択されている。

##### (2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など

本特別推進研究の発展として発表した平成16年度以降の代表者の論文等は以下の通りである。

- \* 学術誌論文(査読つき): 33 件、IEEE J. of Lightwave Technol., IEEE Photonics Technol. Letters, OSA Optical Express, OSA Optics Letters, IOP Measurement Science and Technol., IEICE Trans. on Electronics, 等 (内、招待論文 2 件) (代表的な論文 12 件を2(2)項に示す)
  - \* 国際会議発表(査読つき): 70 件、Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS), Conf. on Optical Fiber Communications (OFC), European Conf. on Optical Communications (ECOC), Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO), 等 (内、招待論文 21 件)
- 以下に、学会誌招待論文と国際会議招待講演のリストを示す。

#### [学会誌招待論文](2004 年 4 月 1 日以降)

1. K. Hotate and Z. He, "Synthesis of optical coherence function and its applications in distributed and multiplexed optical sensing," IEEE J. of Lightwave Technol., Vol.24, No.7, pp.2541-2557, July 2006.
2. K. Hotate, H. Arai and K.-Y. Song: "Range-enlargement of simplified Brillouin optical correlation domain analysis based on a temporal gating scheme," SICE J. of Control, Measurement, and System Integration, Vol.1, No.4, pp.271-274, July 2008.

#### [国際会議招待講演](2004 年 4 月 1 日以降)

1. K. Hotate: "Trends and prospects for optical distributed sensing –Fiber-optic nerve systems for smart materials and smart-structures–," SPIE Vol.5502, Second European Workshop on Optical Fiber Sensors, Santander, pp.51-58, June 2004.
2. K. Hotate: "Potential applications of optical fiber sensing technology for future society," International Symposium on Network and Center-Based Research for Smart Structures Technologies and Earthquake Engineering, Osaka, July 2004.
3. K. Hotate: "Fiber optic nerve systems for smart materials and smart structures," SPIE Optics East 2004, Philadelphia, 5604-1, pp.1-10, Oct. 2004.
4. M. Enyama and K. Hotate: "Dynamic and random-access strain measurement by fiber Bragg gratings with synthesis of optical coherence function," SPIE Optics East 2004, Philadelphia, 5589-20, pp.144-153, Oct. 2004.
5. Z. He and K. Hotate: "Application of synthesized coherence function to distributed optical sensing," SPIE APOC2004 Conference, Beijing, 5623-84, pp.554-568, Nov. 2004.
6. K. Hotate: "Fiber optic nerve systems with optical correlation domain technique for smart structures and smart materials," North American Euro-Pacific Workshop on Sensing Issue in Civil Structural Health Monitoring, Hawaii, Nov. 2004.
7. K. Hotate: "Correlation-based continuous-wave technique for optical fiber distributed strain measurement using Brillouin scattering," 17th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-17), Bruges, Tu-1, pp.62-67, May 24 (23-27), 2005.
8. K. Hotate: "Materials that feel pain – distributed strain sensing by optical fibers embedded in structures and materials," IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMs and Their Applications, Oul, PLE2, pp.5-6, Aug. 1 (1-5), 2005.
9. K. Hotate: "Distributed and multiplexed fiber optic sensors and their applications to smart structures and smart materials," the 2005 Optical Amplifiers and Their Applications Meeting, Budapest, TuA4, Aug. 9 (7-11), 2005.
10. Z. He and K. Hotate: "Distributed photonic sensing with synthesized optical coherence function," SPIE International Congress on Optics and Optoelectronics, Vol.5952, Warsaw, pp.147-161, Aug.31- Sept.3, 2005.
11. K. Hotate: "Photonic sensing," MOC'05, TW2, p.6, Tokyo, Oct.30-Nov.2, 2005.
12. Z. He, S. Horie, K. Hotate, M. Ishikawa, and Y. Yoshikuni: "Unification of input and output ends in polarization-maintaining optical fiber stress sensor by synthesis of optical coherence function," Proc. SPIE International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT 2005), Vol.6049, pp. 25-36, Sapporo, Dec. 2005.
13. Ohno, A. Kurokawa, T. Kumagai, S. Nakamura and K. Hotate: "Applications and technical progress of fiber optic gyros in Japan," 18th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-18), Cancun, MA4, Oct. 23 (23-27) 2006.
14. K. Hotate: "Fiber-optic nerve systems for non-destructive diagnosis of structures and materials," Tenth Intern. Symp. on Contemporary Photonics Technology (CPT 2007), Tokyo, I-1, pp.127-128, Jan. 12 (10-12), 2007.
15. K. Hotate: "Fiber-optic nerve systems for materials and structures that can feel pain," World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology, Chongqing, May 23 (22-24), 2007.
16. K. Hotate: "Fiber optic nerve systems for materials that can feel pain," CLEO/Europe-IQEC 2007, Munich, CH1-3, June. 18 (16-20), 2007.
17. K. Hotate: "Fiber optic nerve systems for materials and structures that can feel pain," SMSST07, Tokyo, July 21 (21-22) 2007.
18. K. Hotate: "Fiber optic nerve systems for materials and structures that can feel pain," MEMS 2008, Tucson, pp.98-103, Jan. 16 (15-18), 2008.
19. K. Hotate: "Distributed optical fiber sensors and their applications," 19th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-19), Tutorial workshops, Perth, Apl. 14 (14-18), 2008.
20. K. Hotate: "Fiber Optic Nerve Systems for Smart Materials and Smart Structures," IEEE Topical Meeting on Microwave Photonics (NWP2008), Gold Coast, pp.31-34, Oct.1 (Sept. 30 - Oct. 3), 2008.
21. Z. He and K. Hotate: "Dynamic grating in optical fiber: synthesis and sensing applications," 1st Asia-Pacific Optical Fiber Sensors Conference (APOS-2008), Chengdu, China, Nov. 8(7-9), 2008.

#### (3) 研究費の取得状況(研究代表者として取得しているもののみ)

下記の学術創成研究を、特別推進研究終了直後から5年間、研究代表者として頂戴した。

- \* 学術創成研究: 平成 16-20 年度、「安全・安心のためのファイバセンサフォトニクス—光ファイバ神経網技術の極限性能追求—」、代表者 保立和夫、直接経費 26,470 万円、[中間評価:A+]
- なお、本研究代表者は、グローバル COE プログラム「セキュアライフ・エレクトロニクス」(平成 19 年度～23 年度)の拠点リーダーも務めている。

#### (4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

上記の学術創成研究は、本特別推進研究で蓄積した成果を格段に発展させるために、将来性のより大きいテーマに絞込み、さらに新たな光ファイバ神経網技術も創案して加えつつ展開したものである。つまり、学術創成研究での5年間の成果が、正に、本報告書に書くべき新たな発見・知見である。学術創成研究のサブテーマごとに具体的な発見・知見を記述する。

##### **サブテーマ1:「連続光波の相関制御法による光ファイバ神経網技術」**

###### **[1-1] ブリルアン光相関領域解析法(BOCDA法)の極限性能実現**

① **BOCDA 基本システムの極限性能の実現:** 本独自技術では、光ファイバに互いにブリルアン散乱周波数シフト量に等しい周波数差(約11GHz)を有するポンプ光とプローブ光を対向伝搬させて誘導ブリルアン散乱を起こす。ただし、当研究室独自の連続光波の干渉特性を制御する技術によって両光の干渉が光ファイバに沿うある1点でしか生じないようにし、誘導散乱を位置選択的に発生させる。本散乱の周波数シフト量は光ファイバの伸縮歪に比例するので、この測定点を掃引することで分布的な歪情報が得られる。学術創成研究では、測定点以外でのブリルアン散乱が雑音スペクトルとなる様子を把握する新たな「時間領域シミュレーション」を開発して、本雑音を低減する「光強度変調併用法」を提案・実証した。また、ブリルアン周波数シフト相当の周波数差をポンプ・プローブ光間に与える方法として、「単一側波帯光周波数変調法」を導入した。不要反射光雑音を信号から分離する方法として「ビートロックイン法」と「ダブルロックイン法」も発明した。ポンプ・プローブ光の相対的な偏波状態変動による雑音を除去する手法として「偏波ダイバーシティ法」も提案・実現した。これらを統合した新システム構成(図1)により、空間分解能と測定レンジ(繰り返し現れる相関ピーク間隔)の比率を約15倍改善し、分解能28cmで測定レンジ1kmを達成した(図2)。分解能1.6mmも実現した(図3)。光パルスで位置分解する従来法の原理的限界を約500倍凌ぐ性能である。土木建設分野からの要求(約10cmの分解能で500mの測定レンジ)や航空機分野からの要求(重要部分ではmmの空間分解能)を満たす実験データの取得に成功した。

② **BOCDA 簡素化システムの高機能化:** BOCDA 基本システムではポンプ・プローブ光周波数差をマイクロ波掃引発振器と光強度変調器で実現しており、価格低減・簡素化を阻害する。そこで半導体レーザの直接周波数変調特性で11GHzの周波数差を時分割発生させる「ポンプ・プローブ時分割発生法」を考案し、性能向上を図った。レーザと駆動回路の伝達特性を補償する波形合成手法を確立した。複数存在する相関ピーク間隔の光パルスを併用して測定レンジを延伸する「時間ゲート法」を「ポンプ・プローブ時分割発生法」に整合させ、分解能7cmで測定レンジ1,000mを達成した(図4)。分解能・レンジ比は14,000を上回る。基本BOCDAでの記録を17倍凌ぐ1,000サンプル/秒の高速化も達成した(図5)。

[1-2] **同一波長光ファイバグレーティング多重化技術:** デルタ関数型コヒーレンス関数合成で、複数の同一波長FBG(反射率数%)の反射光から一つのみを選択し、歪情報を得る独自のFBG多点化技術を考案・実現した。高速測定時の合成コヒーレンス関数形状の変形対策を発明し、測定速度を100倍高めて10,000サンプル/秒を実現した(図6)。可干渉長を超える長尺ファイバに沿って配置された複数FBGにも本多点型構成が適用できる方法を発明し、1km長に分散配置した複数FBGの多点・動的歪センシングにも成功した。位相の異なる正弦波で光源周波数を交互に変調し、この位相差を掃引して複数のコヒーレンスピークを平行移動できる新たな技術「時分割位相変調法」を考案し、測定レンジ内に配置した複数のピークと複数のFBGから一組のみを空間的に一致させることで多点化を実現する「時分割位相変調方式バーニア法」も提案・実証した。

[1-3] **光ファイバ神経網技術のバリエーション拡大:** 光加入者系用遠方監視リフレクトメトリでも可干渉長を超える遠方での分布測定を実証した。光源中心周波数を変化させつつ平均操作を行ない、反射率測定精度を向上させる方法も発明・実証した。測定速度を向上させて全分布を数秒で得る技術も確立した。偏波維持エルビウムドープ光ファイバの一偏波モードにて対向する二光波が作る定在波によって利得飽和現象を介して利得グレーティングを形成し、その反射スペクトルを直交偏波で測定することで歪や温度分布測定を実現する新技術も提案・実証した。偏波維持光ファイバの直行偏波モード間の側圧による結合を利用した側圧分布センシングの簡素化にも成功した。

[1-4] **光ファイバ構造提案・機能解析:** 光ファイバの高次音響モードによる本散乱と基底散乱の温度・歪依存性から温度と歪を分離測定する目的で、種々の光ファイバ散乱特性の解析手法と、精緻に特性測定する技術を実現した。コア・クラッド間にフッ素ドープ層があると分離感度が向上し、作成時の巻き取り力により散乱特性が異なること、等の知見を得た。

##### **サブテーマ2:「痛みの分かる材料・構造の実証研究」**

[2-1] **高機能な痛みの分かる材料・構造の実現:** 鹿島建設との共同実験において実物大トンネル構

造モデルに BOCDA 法を適用し、歪分布測定に成功した。秋葉原新開発地区の最新構造歩道橋で BOCDA により振動状態を計測し、複数紙に取り上げられた。MU-300 ビジネスジェットに、当研究室、三菱重工、横河電機で開発した BOCDA 可搬型装置を搭載し、実機にて飛行時と駐機時の動的・分布型歪モニタリングを実施し(3(1)項)、日経新聞(2008年10月6日)に報道された。

**新サブテーマ:「ここ1年以内に想起して開始した新テーマ」**

偏波維持光ファイバの一偏波モードでのブリルアン特性と他偏波での反射スペクトル特性から温度と歪の高精度・同時・分布測定が可能なることを示し、2量をそれぞれ BOCDA 原理で分布測定することにも成功した(図7)。自然ブリルアン散乱を光相関領域法で分布測定する技術 BOCDA 法を発明し、分解能 13mm、測定速度 50 サンプル/秒、測定レンジ 1km 超を実現した(図8)。長尺 FBG 内ブラッグ波長分布を光相関領域法で分布測定する新技術も提案・実証した(図9)。

これら成果は、前述のとおり、査読付き論文 33 件、国際会議論文 70 件にて発表され、この内に招待論文 2 件、国際会議招待講演 21 件がある。学術創成研究開始以降、研究代表者は、電子情報通信学会フェロー称号(光ファイバセンシング、04 年)、OFS-17 優秀論文賞(BOCDA 法、05 年)、応用物理学会 JAP 論文賞(BOCDA 法、06 年)、OFS-18 最優秀論文賞(BOCDA 法、06 年)、応用物理学会フェロー称号(光ファイバセンシング、08 年)の 5 件を受賞し、大学院生は 5 つの学術奨励賞を受けた。また、BOCDA 法ならびに BOCDA 法に関して 4 件の新たな特許を申請し、この内 2 件は海外申請(合計 6 件)も行った。また、以前に申請していた BOCDA 法の基本特許とその発展特許の 2 件が成立した。また、学術創成研究の中間評価(平成 18 年度)でも「A+」の評価を頂いた。

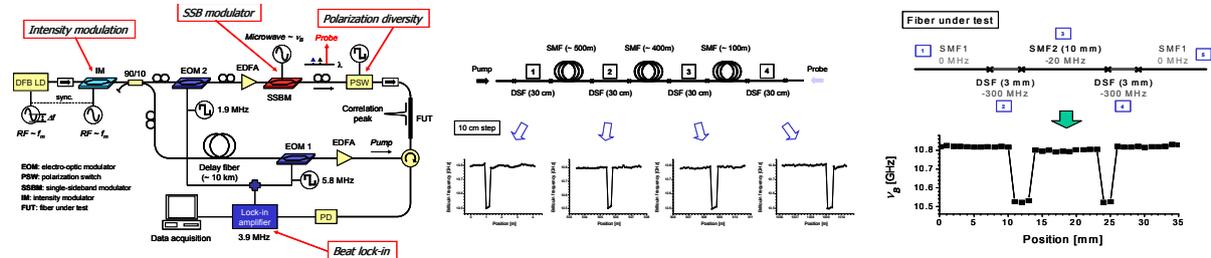


図1 BOCDA の最新システム 図2 分解能 28cm・測定レンジ 1km の達成 図3 分解能 1.6mm の達成

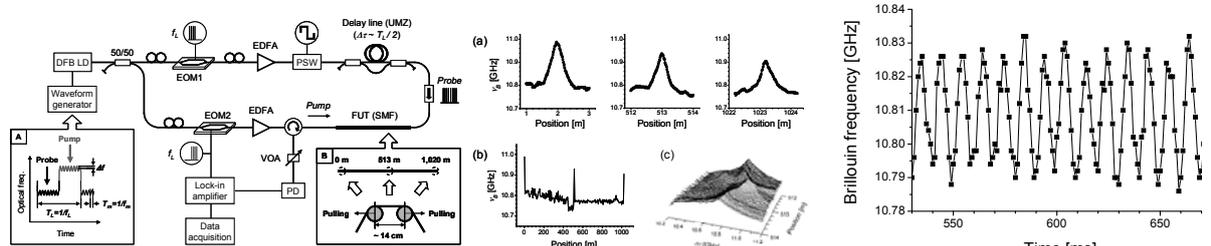


図4 簡素化 BOCDA 法による測定レンジの延伸(1km) 図5 BOCDA での高速測定(1kHz)

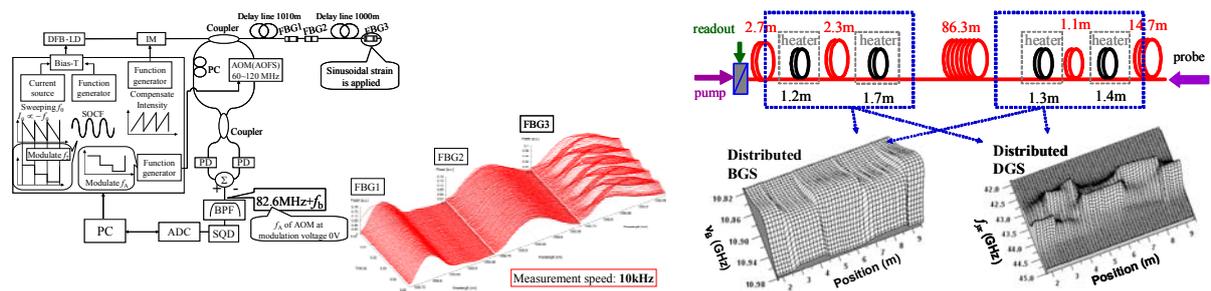


図6 FBG 多点歪センシングの高速化(10kHz) 図7 偏波維持光ファイバの 2 偏波による温度・歪同時計測

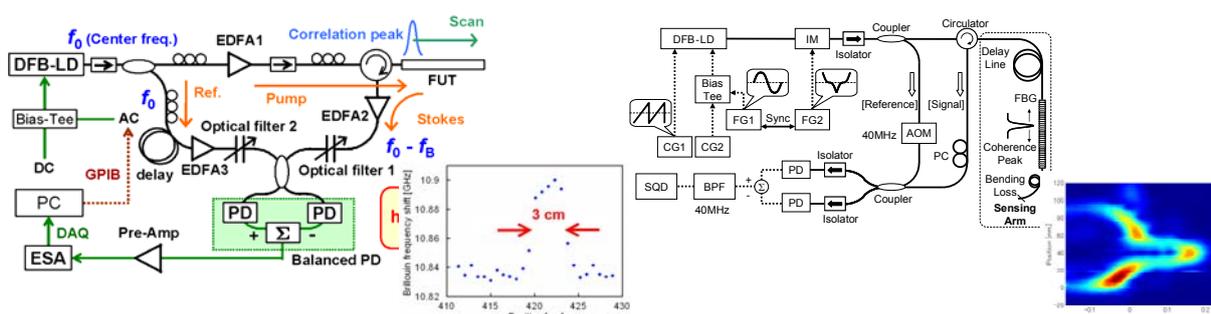


図8 自然ブリルアン散乱で歪分布を計る BOCDA 法 図9 長尺 FBG 内の歪分布センシングシステム

## **2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況はどうか。**

### **(1) 学界への貢献の状況**

上述のとおり、本研究へは複数の受賞があり、また多くの国際会議で招待講演を依頼されていて、関連学会へ大きなインパクトを与えていることが分かる。光センシングの会議のみならず、光アンプ、光マイクロ波技術、光 MEMS、さらには MEMS の国際会議でも招待講演を依頼されている他、構造物ヘルスマニタリング関連等の本技術を利用する側の複数の国際会議からも招待を受けていて、関心の範囲が広がっていることが分かる。

研究代表者は、複数の企業と本研究で提案・開発した技術の実用化についての共同研究を実施してきたが、当グループとは独自に他のグループが本研究成果を具体的に利用した研究を進めている。以下に、両ケースにつき、特別推進研究終了後に行なわれた実例を紹介する。

#### **[当グループとの共同研究による他の研究グループの活動]**

- ・ **鹿島建設**：本研究グループとの共同研究として、鹿島建設研究所内に BOCDA システムを構築し、コンクリート構造や鉄骨構造に光ファイバを張り巡らせて、加重時等での歪分布をセンシングする実用化研究が展開された。実物大のトンネルモデルでの加重試験結果等が、土木学会、米国土木関連国際会議等にて共著で発表された。また、秋葉原に同社が新設した特殊な歩道橋に光ファイバを貼り付け、橋の振動状況等をモニタリングする試験も実施し、複数の業界紙（建設通信新聞、平成 18 年 3 月 31 日等）に報道された。
- ・ **三菱重工/横河電機/RIMCOF**：本研究グループとの共同研究として、BOCDA の可搬型試作機を作成した。空間分解能 3cm、測定レンジ 500m、サンプリング速度約 60Hz が達成された。航空機分野や土木・建設分野での要求に整合した性能が実現できた。平成 19 年 11 月に、本試作機を三菱重工ビジネスジェット MU-300 に搭載して、胴体部分の歪を分布的かつ動的に捉えることに成功した。駐機時と飛行時で歪分布が変化する様子や、急降下時の動的な歪変化など、貴重なデータが得られた。本実用化研究は、日本経済新聞に取り上げられた（平成 20 年 10 月 6 日）。本共同研究は、経済産業省の航空機開発に関する研究委託を RIMCOF（(財)次世代金属・複合材料開発研究協会）が受託し、その中のサブテーマ「光相関ブリルアン散乱計測法による航空機構造センシング技術の開発」として進めたものである。つまり、経済産業省の航空機ヘルスマニタリング技術の開発研究に、本グループの BOCDA 技術が採用されている。さらに、RIMCOF はヨーロッパエアバス社とも提携研究関係にあり、本共同研究は航空機製造企業と連携した研究となっている。詳細を 3(1) 項に述べる。
- ・ **東京大学航空宇宙工学専攻**：本研究グループとの共同研究として、CFRP 複合材料中に埋め込んだ光ファイバにより、BOCDA 技術で歪分布を cm の分解能で測定して、連結ボルトの欠落や連結部の材料劣化が識別できることを見出している。近々、学会発表の予定である。
- ・ **鉄鋼企業**：本研究グループとの共同研究として、BOCDA の高い空間分解能を生かして、製鉄用特殊装置の温度分布を測定する研究を開始した。
- ・ **通信企業**：本研究グループとの共同研究として、光波コヒーレンス関数の合成法による高空間分解能・遠方監視用光ファイバ診断技術の研究を進めている。通信基地局から数 km から十数 km 離れた遠方の不具合を診断するリフレクトメトリ技術であり、光ファイバ加入者網が拡充する中、必要性が高まっている技術である。

#### **[他の研究グループ独自の活動]**

- ・ **ローザンヌ工科大学(EPFL)**：同大学の Prof. L. Tevenaz らは、BOCDA 法のためのポンプ光とプローブ光の周波数差を安定して実現するひとつの技術として半導体レーザのモードロック現象を使った技術を研究・発表した。（OFS-16, Nara, Oct. 2003, IOP MST, 2004）
- ・ **住友電気工業**：同社は、BOCDA の実験系を自ら構築し、その高い空間分解能を生かして、光ファイバの複屈折の分布状況を計測する技術を開発して発表した。cm オーダーの空間分解能が本応用にとって重要であり、このような高い空間分解能は他の技術では実現が難しい。（ECOC-2007、電子情報通信学会全国大会 2007 年 3 月）
- ・ **住友電気工業**：同社は、光ファイバ加入者系において基地局から十数 km 離れた遠方の不具合を数 cm の空間分解能で診断するリフレクトメトリ技術を、光波コヒーレンス関数の合成法を活用して開発している。本研究グループが既に提案・開発してきた成果を改良したシステム構成での研究である。（NFOEC-2009、March 2009）
- ・ **三菱重工業**：同社は、自ら BOCDA 装置を開発し、航空機のヘルスマニタリング用に適合する性能が得られるかどうかの基礎的な検討を行ない、結果を国際会議（SPIE センサ関連会議）で発表

した。この検討の結果、BOCDA 技術は、その高い空間分解能、速い測定速度、測定点へのランダムアクセス性等のユニークな特徴によって、航空機ヘルスマonitoringに最適な技術であると、同社は判断した。その結果、上述のような当研究グループとの具体的な共同研究が開始された。

- ・ **鹿島建設/大阪住友セメント**: 鹿島建設は本研究グループとの共同研究で蓄積した成果を基に、住友大阪セメントに小型 BOCDA 装置の試作を委託し、最近完成している。この BOCDA 装置を用いて、コンクリート材料の目視以下のひび割れ検出に成功している。(光波センシング技術研究会、2008年12月)
- ・ **東京農業工業大学**: 同大学は、光波コヒーレンス関数の合成法のコンセプトを基盤にして、等間隔周波数スペクトルを有するコム光源を用いた干渉系システムにより分布計測システムを構築した。応用は、表面形状計測ならびにトモグラフィである。(Optics Letters, July 2006)

上記に例示したように、本研究グループが提案して研究を蓄積してきた「光波コヒーレンス関数の合成法」ならびに、「ブリルアン光相関領域解析法(BOCDA 法)」は、複数の他の研究グループの研究において採用されて具体的に活用され、また新たな隣接技術と応用を生んでいることが分かる。

## (2) 論文引用状況

以下に、研究期間中ならびに研究期間終了後に発表された論文(計47件)の内から20件を選び、論文概要と引用数を示す。本研究は、フォトニクス技術による機能性センシングシステムを実現する研究であり、成果を活用するのは主にユーザであり、従って論文引用数はあまり大きくはならない研究領域である。

調査日 2009年1月15日

### 研究期間中に発表された論文

1. K. Hotate and M. Tanaka: "Correlation-based continuous-wave technique for fiber optic distributed strain measurement using Brillouin scattering with cm-order spatial resolution - Applications to smart materials -," IEICE Trans. on Electronics, Vol.E84-C, No.12, pp.1823-1828, Dec. 2001 <Invited>. 「BOCDA法によりcmオーダーの空間分解能で歪分布センシングが実現できることを述べた招待論文」 16件
2. K. Hotate and M. Tanaka: "Distributed fiber Brillouin strain sensing with 1cm spatial resolution by correlation-based continuous-wave Technique," IEEE Photonic Technology Letters, Vol.14, No.2, pp.179-181, Feb. 2002. 「BOCDA法により1cmの空間分解能を達成できたことを述べた論文」 49件
3. M. Tanaka and K. Hotate: "Application of correlation-based continuous-wave technique for fiber Brillouin sensing to measurement of strain distribution on a small size material," IEEE Photonic Technology Letters, Vol.14, No.5, pp.675-677, May. 2002. 「直径15cmのパイプ周囲の歪分布を1cmの空間分解能で測定し、高空間分解能を有するスマートマテリアルを実証した論文」 16件
4. Z.-Y. He and K. Hotate: "Distributed Fiber-optic stress-location measurement by arbitrary shaping of optical coherence function," Jour. of Lightwave Technology, Vol.20, No.9, pp.1715-1723, Sept. 2002. 「いろいろな形状のコヒーレンス関数を合成して、複数の手法で偏波維持光ファイバを分布型側圧センシングヘッドとして機能させ得ることを述べた論文」 24件
5. K. Hotate: "Application of synthesized coherence function to distributed optical sensing," IOP Measurement Science and Technology, Vol.13, No.11, pp.1746-1755, Nov. 2002. 「光波コヒーレンス関数の合成法の原理と分布型センシングへの種々の応用を述べた論文」 24件
6. K. Hotate and S.S.L. Ong: "Distributed dynamic strain measurement using a correlation-based Brillouin sensing system," IEEE Photonics Technology Letters, Vol.15, No.2, pp.272-274, Feb. 2003. 「BOCDA法で歪の動的測定も可能であることを実証した論文」 29件
7. K. Hotate, M. Enyama, S. Yamashita and Y. Nasu: "A multiplexing technique of fiber Bragg grating sensors with the same reflection wavelength by the synthesis of optical coherence function," Measurement Science and Technology, Vol. 15, No.1, pp. 148 - 153, Jan. 2004. 「同一反射波長を有する複数の光ファイバグレーティング歪センサを複数個配置した多点型構成を光波コヒーレンス関数の合成法で実現した論文」 17件
8. K. Hotate, A. Kuramoto and Z.-Y. He: "Optical fiber stress-location measurement by synthesis of binary optical coherence function," IEEE Photonic Technol. Lett., Vol. 16, No.2, pp. 578 - 580, Feb. 2004. 「矩形波状のコヒーレンス関数を合成しそのゼロクロス位置を2分法の原理で移動させて光ファイバへの側圧印加位置を検出する技術を述べた論文」 8件

## 研究期間終了後に発表された論文

9. X. Fan, Z. He and K. Hotate: "Novel distributed fiber-optic strain sensor by localizing dynamic grating in polarization maintaining erbium-doped fiber: proposal and theoretical analysis," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, No.2, pp.1101-1106, Feb. 2005. 「エルビウムドープ光ファイバ中を対向伝搬させた光の干渉により利得飽和による回折格子が形成でき、これを光波コヒーレンス関数の合成法によって局在化することで分布型歪センシングを実現する方法を提案して理論解析した論文」 8件
10. X. Fan, Z. He, Y. Mizuno and K. Hotate: "Bandwidth-adjustable dynamic grating in Erbium-doped fiber by synthesis of optical coherence function," OSA Optics Express, Vol.13, No.15, pp.5756-5761, July 2005. 「エルビウムドープ光ファイバに形成したダイナミックグレーティングを光波コヒーレンス関数の合成法により局在化させて大域幅が可変な光フィルタを実現した論文」 9件
11. X. Fan, Z. He, and K. Hotate: "Novel strain- and temperature-sensing mechanism based on dynamic grating in polarization-maintaining erbium-doped fiber," OSA Optics Express Vol.14, No.2, pp.556-561, Jan. 2006. 「偏波維持エルビウムドープ光ファイバのひとつの偏波軸で形成したダイナミックグレーティングによる他方の偏波光の反射スペクトルから温度と歪の測定が可能であることを述べた論文」 6件
12. K.-Y. Song and K. Hotate: "Enlargement of measurement range in a correlation-based Brillouin sensing system using double lock-in amplifiers and a single-sideband modulator," IEEE Photonics Technology Letters, Vol.18, No.3, pp.499-501, Feb. 2006. 「BOCDAでの雑音を低減する手法として2つのロックインアンプを使う方法を発明して実証した論文」 8件
13. K.-Y. Song, K.-S. Abedin, K. Hotate, M.-G. Herráez and L. Thévenaz: "Highly efficient Brillouin slow and fast light using  $As_2Se_3$  chalcogenide fiber," OSA Optics Express, Vol.14, No.13, pp.5860-5865, June 2006. 「カルコゲナイトファイバの強い非線形光学効果を活用し、BOCDAシステム構成を利用して、ブリルアン散乱現象によってスローライトとファストライトを実現した論文」 23件
14. K. Hotate and Z. He, "Synthesis of optical coherence function and its applications in distributed and multiplexed optical sensing," IEEE J. of Lightwave Technol., Vol.24, No.7, pp.2541-2557, July 2006, <Invited>. 「光波コヒーレンス関数の合成法の原理とその分布型センシングへの応用について述べた招待論文」 7件
15. K.-Y. Song, Z. He and K. Hotate: "Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis," Optics Letters, Vol.31, No.17, pp.2526-2528, Sep. 2006. 「BOCDA法により1.6mmの空間分解能を実現したことを述べた論文」 8件
16. W. Zou, Z. He and K. Hotate: "Two-dimensional finite-element modal analysis of Brillouin gain spectra in optical fibers," IEEE Photonics Technology Letters, Vol.18, No.23, pp.2487-2489, Nov. 2006. 「光ファイバ中のブリルアン散乱スペクトルを精緻に計算するために開発した2次元有限要素法について述べた論文」 9件
17. K. Hotate, "Fiber Sensor Technology Today," Jpn. J. of Appl. Physics, special Issue for Microoptics, Vol.45, No.8B, pp.6616-6625, Dec. 2006. 「光ファイバ神経網技術や光ファイバジャイロ等の光ファイバセンシング技術の動向を述べた論文」 7件
18. K.-Y. Song and K. Hotate: "25 GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers," Optics Letters, Vol.32, No.3, pp.217-219, Feb. 2007. 「BOCDAシステムを活用し、新たな光源の変調方法を提案して、狭いパルスにも適用できるブリルアン散乱現象によるスローライトの実現手法を述べた論文」 26件
19. W. Zou, Z. He, M. Kishi and K. Hotate: "Stimulated Brillouin scattering and its dependences on strain and temperature in a high-delta optical fiber with F-doped depressed inner cladding," Optics Letters, Vol.32, No.6, pp.600-602, Mar. 2007. 「フッ素ドープインナクラッドを有する光ファイバのブリルアン散乱特性を解析し、温度と歪の分離測定の可能性を議論した論文」 7件
20. K.-Y. Song, Z. He and K. Hotate: "Effects of intensity modulation of light source on Brillouin optical correlation domain analysis," J. of Lightwave Technology, Vol.25, No.5, pp.1238-1246, May 2007. 「BOCDA法において光源の周波数変調に同期して適当な波形で強度変調も併用することで、測定可能な最大歪を大きくでき、また被測定光ファイバ長も延伸できることを述べた論文」 4件

### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報。

#### (1) 研究成果の社会への還元状況

本研究は、他の手法では果たせない斬新な機能を有する分布型・多点型光ファイバセンシング技術の実現を狙ったものである。まだこれらセンシングシステムにはさらなる新機能の付与が可能であり、そのための基礎研究を続行している。しかし、一方で、達成できた性能・機能の範囲でも、上述のように、既に応用サイドからも具体的な適用対象を念頭に置いて注目され、実用化に向けた共同研究を進めている他、他の研究機関・企業でも独自に実用化のための研究が進められている。

鹿島建設は、当グループとの共同研究により BOCDA システムを研究所内に構築し、前述のように、実物大トンネルモデルでの加重試験等を実施し、秋葉原の新設特殊歩道橋のヘルスマonitoringに BOCDA 法を適用した他、最近では、独自に可搬型 BOCDA 装置を試作して応用実証実験を進めるなど、BOCDA 法による土木・建設構造物のヘルスマonitoring技術の実用化研究を進めている。

住友電工は、光波コヒーレンス関数の合成法により、光ファイバ加入者網の診断システムを研究・構築して機能実証を行い、近々、通信事業者によりこのシステムの評価を実施することとされている。

三菱重工、横河電機、RIMCOF と当研究室との共同研究も、旅客機のヘルスマonitoringに BOCDA 法を適用することを具体的な目的とした実用化研究である。RIMCOF は、平成 15 から 19 年度に通商産業省から「次世代航空機構造部材創製・加工技術開発」の委託を受け、大学や重工各社がチームを組んで複数のサブテーマの研究・開発を進めていた。そのひとつのテーマに「複合材料健全性診断技術開発」があった。三菱重工は、当初より光ファイバ分布型歪センシング技術を次世代の航空機材料であるカーボンファイバ強化プラスチック(CFRP)に適用する研究を進めていた。

三菱重工は、はじめ、他の分布型歪センシング技術の活用を考えていたが、研究期間開始後に当研究室を訪ねてこられ、研究代表者と技術的な意見交換を行った。その結果、BOCDA 技術が航空機のヘルスマonitoringに最適であると認識され、本技術の採用を決められた。具体的には、空間分解能の高さ(mm オーダーまで実現できる)、測定速度の速さ(数十サンプル/秒)、ならびに測定位置へのランダムアクセス機能が注目された。そして、本研究期間の後半からは当研究グループにも RIMCOF 研究チームに参画し、技術移転と指導をして欲しいとの要望があり受諾した。横河電機と当研究室は、以前、BOCDA の初期の段階で試作を協働した経緯があり、本研究代表者から依頼してチームに加わって頂いた。RIMCOF の経費は主に三菱重工と横河電機が使用して BOCDA 可搬型試作機の製作を進めた。当研究グループは、学術創成研究費にて BOCDA 技術に新たな機能を



図 10 BOCDA 第一試作機



図 11 飛行試験機(MU-300)



図 12 MU-300 内の BOCDA 試作機

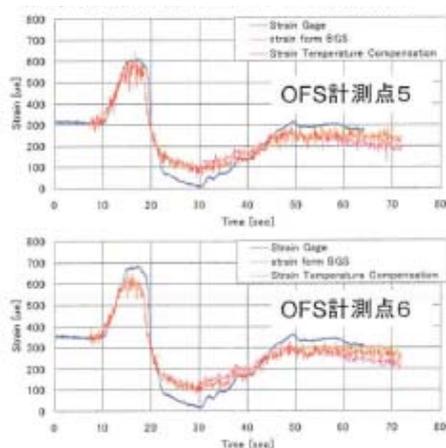


図 13 急降下・急機首上時の多点ダイナミック歪計測

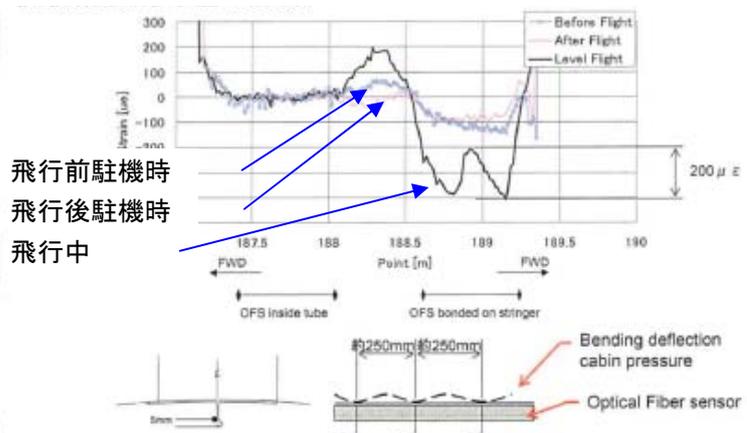


図 14 駐機時と飛行時の胴体上部の歪分布測定

開拓する基礎研究を進めるのと平行して、既に機能実証を済ませた部分技術について両社に技術を提供し、第一試作機が完成した。

図 10 が、第一試作機の外觀である。性能としては、空間分解能 3cm、測定レンジ 500m、サンプリング速度約 60Hz、歪感度約 10 マイクロストレイン ( $10^{-5}$ ) が実現された。これらは、光パルスによる時間分解法では実現できない性能である。航空機機体を定期的に検査する際には広く張り巡らせた光ファイバ神経網により機体全体の歪分布の経時変化をモニターし、飛行時には BOCDA 技術のランダムアクセス機能と高速測定機能を活用して、脚部分や翼と胴体の取り付け部分等につき、ダイナミックな歪印加状況をモニターする。このように、歪の分布状況と時間変化の両者をセンシングできる光ファイバ分布型歪センシング技術は他にはない。図 11 は、平成 19 年 11 月に本 BOCDA 試作機を搭載して飛行中ならびに駐機中の胴体部分の歪分布とその時間変化を測定する実験を行ったビジネスジェット機 (MU-300) である。図 12 は、機体内部に設置された BOCDA 可搬型試作機である。光ファイバ神経網は、胴体内壁を剥がして機体外板の内側に樹脂系接着剤で貼り付けている。図 13 は、2.7G の重力加速度が加わる急降下・急機首上時のダイナミックな歪変化である。予め設定した 6 点につき、同時にダイナミック測定を実施している。図 14 は、駐機時と飛行時の機体外板内側の歪分布の測定結果である。飛行時には歪分布が変化することが分かる。これら実験により、BOCDA 法が航空機のヘルスマonitoring に適用可能であることが実証された。

本開発プロジェクトは、「複合材構造健全性診断技術開発」(平成 20 から 24 年度)として継続し、本チームは引き続き、BOCDA 技術の航空機ヘルスマonitoring への実用化研究を続行している。当研究室は、BOCDA 法での温度と歪の同時・分布センシング等の新しい機能開拓や新センシング技術の提案等の基礎研究を進める一方で、この基礎研究により確立できた機能を順次本チームでの実用化研究へと移転する役割を担っている。新機能を創造する基礎研究を続行するために、本書執筆時現在、科学研究費補助金「基盤研究 S: 痛みの分かる材料・構造の為の光相関領域法による光ファイバ神経網技術の機能進化」を申請中である。

\* T. Yari, K. Nagai, M. Ishioka, K. Hotate, and Y. Koshioka: "Aircraft structural health monitoring using on-board BOCDA system," 15th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, SPIE 6933-29, San Diego, Mar. 2008. (飛行実験結果に関する発表文献)

\* Y. Kumagai, S. Matsuura, S. Adachi and K. Hotate: Enhancement of BOCDA systems for aircraft health monitoring," Intl. Conf. on Instrumentation Control and Information Technology (SICE annual Conf. 2008), Tokyo, 2B02-2, pp.2184-2187, Aug. 22-23, 2008. (第一試作機に関する発表文献)

## (2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況

本特別推進研究は、平成 13 年度から平成 15 年度の 3 年間にわたって行なわれた。この間、当研究室に在籍し、本研究テーマに関与した者は、特任講師(助手)1名、ポスドク1名、博士課程院生3名、修士課程院生13名、卒論生9名である。以下に、特任講師(助手)1名、ポスドク1名、博士課程院生1名のその後の動向につき記述する

[何 祖源博士 (Dr. Zuyuan He)]

何 祖源博士は、本特別推進研究を申請した当時(平成 12 年秋)は、当研究室の助手を務めていた。もともと、同博士は当研究室にて博士課程を修了したが、そのとき以来、光波コヒーレンス関数の合成法を活用して、可動部分もデータの数値解析も不要な独自の分布量センシング技術として、光コヒーレンストモグラフィ、光ファイバ分布型側圧センシング、光ファイバ加入者系用遠方監視リフレクトメトリ技術等を提案・実証して、成果を蓄積していた。平成 13 年 2 月には、これまでの研究実績が評価されて、米国の光波長多重通信システム開発企業であるシエナ者から招聘された。ここでは、光ファイバ加入者系や光ファイバ伝送装置内の故障診断用リフレクトメトリの開発に携わり成果をあげた。平成 14 年度に、本研究代表者が 21 世紀 COE プログラムのリーダーに着任した際、何博士は再び東大に招聘されて、21 世紀 COE 特任講師に着任し、本特別推進研究での研究に復帰した。

以来、同博士は本研究代表者とチームを組み、光通信システムのヘルスマonitoring 技術の研究を中心に、BOCDA 技術や多点型 FBG センシング等、上述した当研究室での光ファイバ神経網技術全般についての研究を推進するとともに、大学院生、卒論生の指導にあたっている。21 世紀 COE プログラムでは、特任教員として、研究面のみならずその運営にも尽力した。博士課程 RA プログラム、博士院生海外武者修行プログラム、「私のオリジナリティ」講演会等、本 COE の各種スキームの立案と実行での立役者であり、本 COE プログラムがその中間審査ならびに最終審査にて 5 段階評価の最上位の評価を得る上でも大きく貢献した。平成 17 年 4 月には COE 特任助教授に昇任し、本 21 世紀 COE プログラム終了後は、本学工学系研究科電気系工学専攻の准教授に着任して現在に至っている。平成 19 年度からは、当研究代表者が再度リーダーを務めることとなったグローバル COE

プログラム「セキュアライフ・エレクトロニクス」において、「痛みの分かる材料・構造・通信網の為の光ファイバ神経網」技術の研究、ならびに COE 運営面での幹事として、活躍している。

光ファイバセンシング分野の研究者として世界的にも目立った存在となっており、1(2)項に示した招待論文ならびに国際会議招待講演の5件は何准教授との共著である。上海交通大学やイタリアのピサ工科大学からは特別講演を招請され、光ファイバセンシングについての集中講義(ピサ、平成18年度)を行なっている。光関連の国際会議として主要なもののひとつである Conference on Laser and Electro-Optics: CLEO(米国 IEEE-LEOS ソサイエティならびに米国光学会(OSA)主催)ではセンシング部門のプログラム委員を務めている他、応用物理学会光波センシング技術研究会では常任幹事を務めている。

何准教授と本研究代表者らが発表した国際会議論文は、光ファイバセンシング分野で最も権威の高い国際会議である光ファイバセンサ国際会議(International Conference on Optical Fiber Sensors: OFS)で最優秀論文賞を受賞している(K. Y. Song, Z. He and K. Hotate: “Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis and beat lock-in detection scheme,” OFS-18, ThC2, Cancun, Oct. 26, 2006)。競争的研究資金についても、たとえば、平成18-19年度に基盤研究Bを、また平成20-22年度にも基盤研究Bを取得している。さらに、平成20年度からは、NTTアクセスサービスシステム研究所と共同研究契約を結び、光ファイバ加入者系用リフレクトメリの研究を深めている。

このように、何准教授は、本特別推進研究で行なった研究成果を基盤に、その後も「痛みの分かる材料・構造・通信網の為の光ファイバ神経網技術」についての研究を進展させ、科学研究費補助金基盤研究BやNTT共同研究費の獲得、国際会議最優秀論文賞の受賞、国際会議での招待講演、海外大学からの特別講義の招聘、学会委員就任等と、国際的に大きく活躍している。

#### [朱 冰博士 (Dr. Bing Zhu)]

朱博士は、平成14年3月に、本研究代表者の研究室にて博士課程を修了し、その後平成15年6月まで、本特別推進研究費にてポスドクとして研究に従事した。当時の朱博士の研究テーマは、光ファイバ干渉系型センサの多重化技術、ならびにエルビウムドープ光ファイバの利得飽和現象と光波コヒーレンス関数の合成法を活用した分布型センシングの研究であった。後者に関しては、本光ファイバ中を対向伝搬する2光の干渉状態を光波コヒーレンス関数の合成法で制御して、光ファイバに沿う定在波のエンベロープ形状を任意に合成し、その結果として任意形状の利得グレーティングを光ファイバに沿う任意の位置に形成するものである。同博士は、この独自の提案技術を実証する実験を行い、反射スペクトル特性が可変なダイナミックグレーティングの実現に世界で初めて成功した。朱博士は、その後、出身元である中国合肥科学技術大学に助教授として帰任し、現在は教授に昇任して、光エレクトロニクスの教育・研究に当たっている。本特別推進研究における博士課程ならびにポスドクとしての研究業績が、朱博士が中国で助教授職を得て、また教授に昇任する上でも評価されている。

#### [樊 昕昱博士 (Dr. Xingyu. Fan)]

樊博士は、平成14年度から本研究室に博士課程院生として在籍し、本特別推進研究に関するテーマにて、平成17年3月に博士号を取得した。この間、エルビウムドープ偏波維持光ファイバのひとつの偏波軸において上記の利得グレーティングを形成し、他の偏波軸にてこのグレーティングの反射スペクトルを計測する技術を世界で初めて実現した。この技術に光波コヒーレンス関数の合成法を適用して、光ファイバに沿う局在したある位置にのみグレーティングを形成して掃引しつつ、直交偏波の反射スペクトルを分布測定することで、温度や歪の分布測定ができることを、やはり世界に先駆けて提案・実証した。さらに、光波コヒーレンス関数の合成法によるリフレクトメリの反射光測定精度を向上させる目的で光波中心波長を変化させて平均処理をする技術も提案・実証した。これら成果が評価されて、博士号取得とともに、NTT アクセスサービスシステム研究所に就職した。その後、光ファイバ加入者系診断用リフレクトメリ技術として、従来技術を凌ぐ測定精度と測定速度を有する独自の技術を発明・実証するなど、本分野の若手研究者として目立った存在となっている。平成20年度から何准教授を中心として本研究グループとNTTとで開始した光ファイバ加入者系診断技術開発の共同研究においても、NTT側の中心的役割を果たしている。

以上、本特別推進研究において研究成果の蓄積に貢献した特任教員、ポスドク、ならびに博士課程院生3名のその後の動向について紹介した。いずれも、本研究での成果を生かして就職し、その後も研究や教育において世界的に活躍している。その他の大学院生についても、電気関連企業、通信関連企業、計測器関連企業、特許庁等で活躍し、複数人は現在海外の機関、大学等にて活動している。