

航空機の点検コスト低減技術

Cost Reduction Technology for Airframe Maintenance



鎗 孝志*¹
Takashi Yari

齋藤 望*²
Nozomi Saito

保立 和夫*³
Kazuo Hotate

松浦 聡*⁴
Satoshi Matsuura

榎本 清志*⁵
Enomoto Kiyoshi

現在の航空機構造の大部分は損傷許容設計を採用しており、機体構造の耐空性は整備計画で規定された定期検査により、損傷が致命的なものになる前に検出し修理することにより維持されている。航空機構造の状態及び耐空性を継続的に監視できる健全性診断技術が確立されれば、現状の点検期間及び点検コストを低減することでより効率的な運航が期待できる。筆者らは、光ファイバセンサを用いた航空機構造広域診断システムを開発、飛行実証試験を行い、運航中の航空機構造の状態監視が可能であることを確認した。

1. はじめに

航空機運航において、航空機の点検期間の短縮及び点検費用の削減は経営効率を上げるためにも求められている項目の一つである。このため、航空機運航中に機体構造の点検を代替可能な構造健全性診断 (Structural health monitoring, 以下 SHM と略) システムの実用化が期待されている。

SHM システムを実現するための手法は様々あり、実用化に向けた研究開発が盛んに行われている。この中で筆者らは、軽量・電磁干渉・複合材への埋込み可能な光ファイバセンサを用いて、広域診断が可能なブリルアン光相関領域解析法 (Brillouin optical correlation domain analysis, 以下 BOCDA と略) 技術を SHM システムへ適用した実用化システムの研究開発を行っている。

BOCDA 計測は光ファイバ全長におけるひずみ分布及び任意箇所における動的計測が可能であるといった特長を有している。このような特長を生かした SHM システムへの適用構想を [図1](#) に示す。機体構造全域に配置した光ファイバセンサの、分布ひずみの変動による損傷発生の変動あるいは動的ひずみ計測による疲労損傷度・構造寿命評価を行うことを計画している。

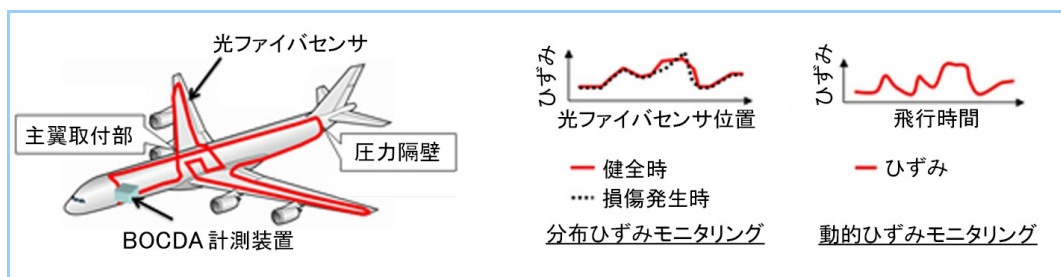


図1 SHM システム適用構想

*1 技術統括本部 名古屋研究所 主席チーム統括

*2 技術統括本部 名古屋研究所

*3 東京大学 教授 博士号

*4 横河電機株式会社 マネージャ

*5 (一財)素形材センター 主幹

これまでに、分布型光ファイバセンサにより航空機構造の剥離などの損傷を検出する技術を開発してきた⁽¹⁾。本研究開発では、航空機に搭載可能な BOCDA 計測システムを開発・試作し、飛行実証試験において運航中損傷モニタリングへの適用可能性を確認した。

2. BOCDA-SHM システムの開発

BOCDA 計測は光ファイバ全長におけるひずみ分布及び任意箇所における動的計測が可能といった特長を有している。BOCDA 計測原理及び航空機搭載可能な BOCDA 計測システム開発についてまとめる。

2.1 BOCDA 計測原理

BOCDA は光ファイバ両端から光変調を施したレーザ光を対向入射し、光ファイバ内で生じるブリルアン散乱現象により、光ファイバのひずみ及び温度を測定する技術である。対向入射するレーザ光はポンプ光及びプローブ光と称し、それぞれ一定の条件に従い周波数を変調させることで光ファイバの任意の点(相関ポイント)のブリルアン散乱光を取得することができる⁽²⁾。

ブリルアン散乱光周波数はひずみ及び温度に比例して変化するため、航空機構造のひずみを計測するために温度を同時に計測する必要がある。そこで、光ファイバに偏波保持ファイバを使用し、ブリルアン散乱光周波数変動に加え偏波保持光ファイバの複屈折性変動を計測することで、光ファイバのひずみ及び温度を同時に計測することが可能となる⁽³⁾。計測原理図を図2に示す。偏波保持光ファイバのX軸にポンプ光及びプローブ光を入射しブリルアン散乱光周波数を、Y軸にリードアウト光を入射し光ファイバの複屈折性に比例して変動するBDG(Brillouin Dynamic Grating)周波数を取得する。ブリルアン散乱光周波数変動と複屈折性(変動)は異なる物理現象であるため、それらの変動からひずみ及び温度を算出することができる。

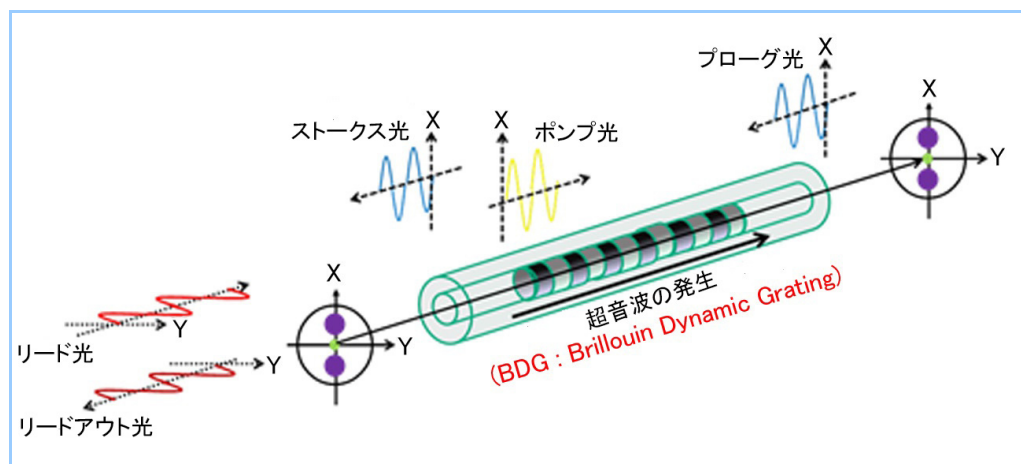


図2 ブリルアン散乱光計測原理

2.2 航空機搭載型 BOCDA システム開発

光ファイバセンサの分布・動的ひずみ及び温度を計測する BOCDA 計測システムを航空機に搭載可能なデバイスとして試作した。アビオニクス搭載規格 ARINC600 に適合させることで民間航空機への搭載が容易になるため、ARINC600 適合ラックに搭載可能なインタフェースを有するシステムを試作した(図3)。試作したシステムは、DC28V 電源で稼働し、幅 388mm、高さ 193mm、奥行き 421mm、重量 14kg である。

光ファイバに約 4m、1.5m の昇温区間と、約 1m のひずみ付与区間を与えた計測結果を図4に示す。ひずみ付与区間の両端でひずみ・温度算出誤差があらわれているが、ブリルアン散乱光計測区間と複屈折性計測区間が異なることによるノイズであり、除去可能である。また、航空機搭載環境に対する耐環境性評価試験を実施し、搭載環境下での正常動作を確認した。環境耐久性評価試験結果を表1に、耐久性試験状況を図5に示す。



図3 SHM デバイス外観

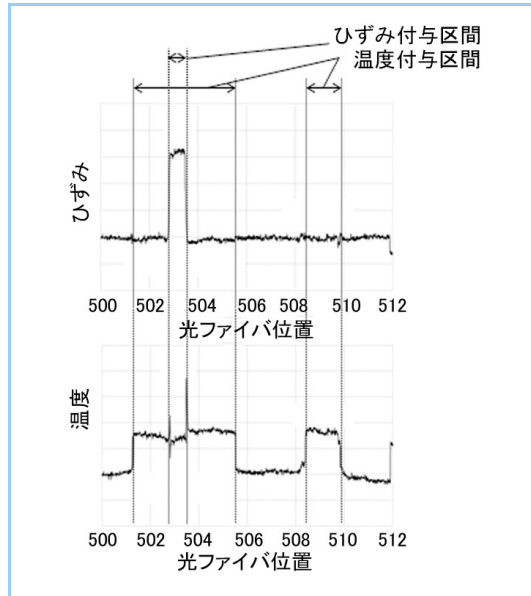


図4 BOCDA 計測によるひずみ・温度の分離

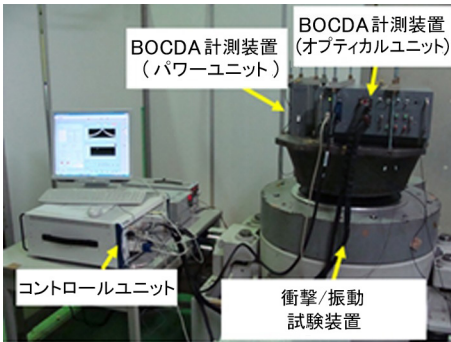


図5 環境耐久性試験状況

表1 環境耐久性評価試験結果

No.	項目	仕様	結果
1	振動環境	10~2000Hz, 0.74G (RTCA-DO-160 カテゴリ S2)	装置故障無
2	衝撃環境	6G, 11ms (RTCA-DO-160 カテゴリ A)	装置故障無
3	EMI	飛行試験機搭載状態での 試験機との相互影響評価	正常動作

3. 飛行実証試験

3.1 試験方法

飛行実証試験は、ビジネスジェット(MU-300, 全長 14.7m, 全幅 13.7m, 11 人乗り)をテストベッドとして使用した。光ファイバセンサをテストベッドの垂直尾翼前縁桁に貼付け、客室に設置した航空機搭載型 BOCDA 計測装置に接続し、飛行中にひずみ及び温度を計測した。センサ設置状況及び BOCDA 計測装置の搭載状況を図6に示す。

テストベッドに搭載した BOCDA 計測装置での航空機構造のひずみ・温度計測は、離陸上昇時、水平飛行時、旋回時に行った。離陸上昇時にはひずみ及び温度の動的変動を、水平飛行時には分布ひずみ及び温度分布を、旋回時にはひずみ変動にフォーカスして計測を行った。

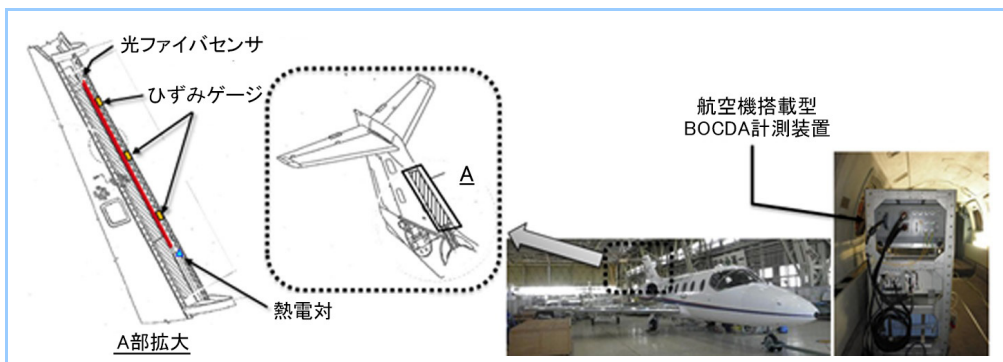


図6 SHM システム搭載状況

3.2 試験結果及び考察

離陸上昇時, 水平飛行時, 旋回時の計測結果を図7~9に示す。離陸上昇ケース(図7)では, 上昇に伴う構造温度低下を計測できていることが分かる。しかしながら温度がマイナスになる 700 秒付近から従来計測との誤差が発生している。光ファイバセンサの貼付が蛇行するなど構造の圧縮ひずみを正しく光ファイバに伝えていないことが考えられる。水平飛行時(図8)にはひずみ・温度分布は従来計測と概ね同じ値を示している。旋回ケース(図9)では, 従来計測と良く一致しており, 実運航環境下での計測機能を確認できる。

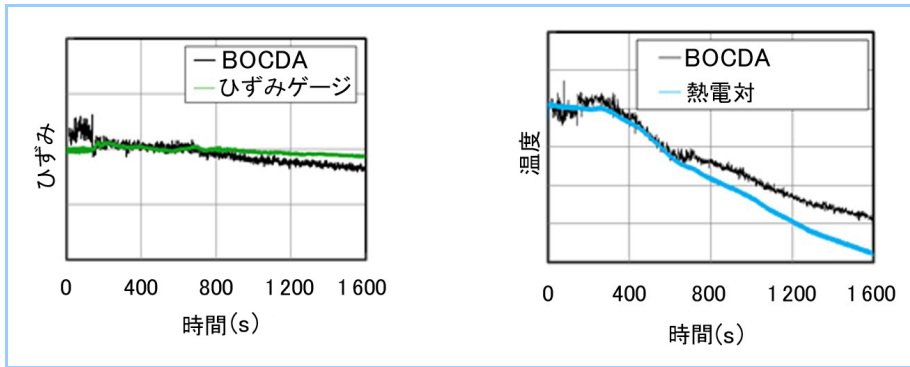


図7 実証試験結果(離陸上昇時)

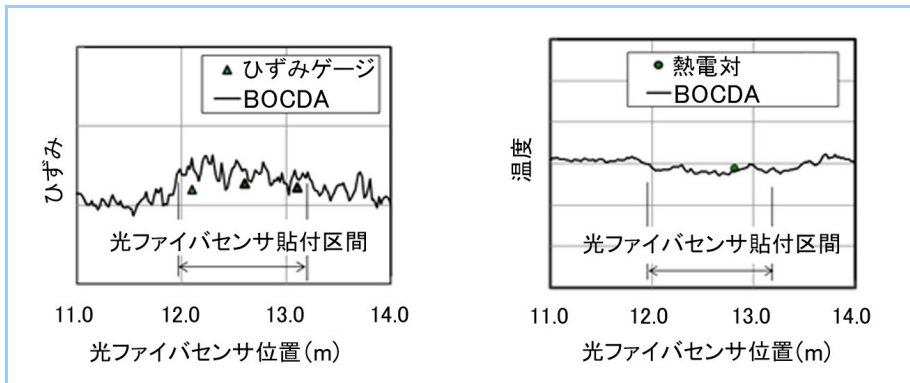


図8 実証試験結果(水平飛行時)

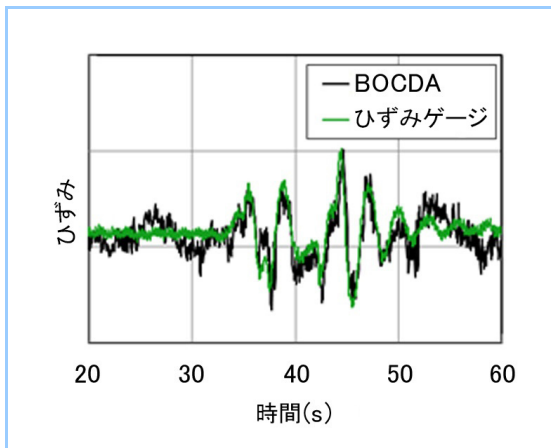


図9 実証試験結果(旋回ケース)

4. まとめ

航空機構造診断システム実用化に向けた実証試験の一環として, 試作した分布型光ファイバセンサシステムを用いて, 航空機運航中の航空機構造のひずみ及び温度変動を計測した。結果を以下にまとめる。

- 民間航空機搭載規格に適合し、搭載環境に耐えうる BOCDA 計測システムを試作した。
- 飛行中の航空機構造のひずみ・温度をモニタ可能であることを示した。但し、低温域での精度向上を行う必要がある。

今後は、BOCDA 計測器の計測精度向上、構造点検への適用時のコストメリット評価、認証計画及び適合性評価など実用化に向けて開発を行う。最後に、本研究は、経済産業省「次世代構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの一環として、(一財)素形材センターとの契約に基づき実施したものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) Nozomi Saito, Takashi Yari, Kanehiro Nagai and Kiyoshi Enomoto, "Damage detection method for CFRP bolted joints using embedded BOCDA optical fiber sensor", Proc. of IWSHM, no. 1(2011): 455-462
- (2) Kazuo Hotate, "Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques, Optical Fiber Technology", 19, (2013): 700-719
- (3) Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Demonstration of Brillouin distributed discrimination of strain and temperature based on a polarization-maintaining optical fiber", IEEE Photon. Technol. Lett., 22, no. 8 (2010): 526-528.