

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2011 ～ 2012
課題番号：23760779
研究課題名（和文） 分布センサ情報を用いた荷重同定に関する研究
研究課題名（英文） Study on load identification based on information obtained from distributed sensors
研究代表者
村山 英晶 (MURAYAMA HIDEAKI)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：10361502

研究成果の概要（和文）：約 6m の複合材料製翼ボックスおよび約 1m のアルミ製風洞模型に光ファイバセンサを設置し、構造試験または風洞試験で得られたひずみ情報をもとに逆解析手法を用いて荷重を同定した。複合材料製翼ボックスには、1 系統あたり 30～40 個の光ファイバひずみセンサを直列に配置し、翼長手方向に 7 系列設置した。極めて高い精度でひずみ分布が測定でき、同定した荷重もよい推定精度を示した。アルミ製風洞模型には、母材、フラップ、スラットに全長にわたりひずみ計測が可能な 1 または 2 本の光ファイバひずみセンサを設置し、風洞試験時の測定ひずみから圧力を同定し、おおよそ良い一致を示した。

研究成果の概要（英文）：We applied invers analysis to identification of distributed loads on 6-m CFRP wing structure and 1-m aluminum wind tunnel model. These structures were equipped with fiber-optic strain sensors and the applied loads were estimated based on strains measured by the sensors. Seven fiber-optic strain sensor arrays which have 30 – 40 FBGs in each were bonded on the wing in the longitudinal direction. Measured strains show excellent accuracy and the estimated load coincided with the actual one. In the wing tunnel model, the applied pressure distribution could be also estimated by several fiber-optic strain sensors which can measure strain at an arbitrary position along fibers.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：材料・構造力学

1. 研究開始当初の背景

ナホトカ号、エリカ号など大規模な油流出を起こしたタンカー事故を契機に、高齢化したシングルハル (SH) タンカーの早期市場撤退を促すことが国際的に支持されている。タンカーに関してはダブルハル (DH) 化することで、衝突・座礁による油流出防止の観点からは優れた性能を示すが、経年劣化による強

度不足が原因の構造破壊に対してはSHに比べて大きな効果は期待できない。今後も運用段階での強度と負荷荷重の評価の重要性は変わらないと言える。また、近年の原油高、環境問題への意識の高まりは、構造物の安全性、経済性、環境性に対してより高いハードルを求めており、安全性・信頼性を確保する技術をもとに長寿命化をはかることで、それらの

要求に応える必要がある。寿命を決定する主な要因は疲労による亀裂損傷と腐食である。疲労強度評価、防食や亀裂と腐食が混在する場合の腐食疲労評価などについて、これまで様々な検討が行われている¹。また、耐航性を評価する目的で船体運動およびそれによる波浪変動水圧などをストリップ法やCFDにより計算することで、それらは比較的良好な精度で推定できるようになった。荷重の推定が正確であれば、経年劣化の見積もりや実際の検査を含めたうえで、構造解析による設計時の強度評価および運用中の余寿命評価の精度を向上させることができる²。省エネ・環境を考慮した新機種・新構造方式の船舶の出現や設計寿命の増加が予測される現在、荷重同定およびそれを基盤として海象から構造応答を関連付けた設計・運用・保守管理が益々重要になると考える。

荷重推定・構造解析技術を統合して強度評価をした例として倉本らの研究がある³。ここでは、想定する荷重に対応して多数の単位荷重に対する構造応答を有限要素法により予め求め、一方でストリップ法により船体運動およびそれによる波浪変動水圧などを決定し、それら各荷重成分の線形結合により応力の応答関数を求めている。これは順解析である。一方、損傷許容設計が主体の航空機分野でも荷重推定技術に対する関心は高く、運用中の信頼性を向上させようとする構造ヘルスマニタリング (SHM) の研究分野で荷重推定に関する研究が進められている。航空機分野でのSHMでは①構造要素の応力と変形の同定、②外荷重の同定、③亀裂、剥離、腐食等重要な損傷の検知という3つの側面があり、各種センサ情報からこれらを実現する⁴。経年機の運用延長が求められている民間エアラインへの適用が期待されている。しかし、ひずみゲージや変位計から得られる限られたデータと荷重の間

に単純な比例関係を仮定する従来手法⁵では、センサ誤差や計測位置の影響、適用妥当性の評価に問題がある。近年、荷重とセンサ出力との力学的な関係から荷重を同定する研究が進められており、多くが逆問題として扱われている。例えば、NASAラングレー研究所のグループは、独自に開発した有限要素を用いたinverse FEMと光ファイバセンサの使用を前提とした荷重同定に関する系統的な研究を進めている⁶。

当該研究者は、後者の研究により近い方法を用いた荷重同定について研究を実施してきた（平成20～21年度・若手研究 (B) ・分布センサ情報を用いた荷重の逆解析手法に関する研究）。ここでは、CADモデルをもとに連続荷重を離散化し、離散化された位置の単位荷重に対するひずみ測定位置での応答を有限要素法 (FEM) により求めておく。本手法では荷重と測定量 (ひずみ・変位など) の関係を示す行列の逆行列を求めておけば、逆解析により測定量から荷重をリアルタイムに推定できる。ここで、荷重推定点と測定点の数は一般的に異なるため、求める逆行列は一般化逆行列となる。順解析である倉本らの手法では、ストリップ法から位相差も考慮して入力としての波浪変動圧やタンク内圧などをまずは求める必要があるが、本手法では構造モデルとセンサ情報のみを入力として逆解析により荷重を求めることができる。また、Tesslerらの手法と異なり、一般的なFEMモデルを利用しており、かつ荷重推定点と測定点を一致させる必要がないため、より汎用的・拡張性の高い手法である。これまで、単純化したボックス構造や複合材料製翼構造 (図1参照) に対して適用し、高い精度での静的な荷重同定および各部の応力の再構成ができることを確認した⁷。また、2次元構造ではあるが2m×1mの亚克力平板に分布荷重を負荷し、

ひずみゲージの測定値からその分布荷重を実用的精度で推定できることを確認した。逆解析による荷重同定の精度を実験的に示した数少ない例である。さらに、当該研究者は光ファイバセンサの船体構造ヘルスマモニタリングへの応用を早くから検討してきた⁸。実構造物への適用として複合材料製アメリカズカップ用大型帆走船やボックス翼実証試験構造の構造モニタリングを行い、従来の電気センサに対して優れた信頼性と精度を有することを実証し、また世界最高水準のサブミリオーダーの高い空間分解能を有する分布型光ファイバセンサの開発に成功した⁹。現在、偏波面保持型光ファイバを用いたひずみと温度の同時計測手法の開発も進んでおり¹⁰、さらにH22年度に20Hzの動的計測にも成功し、実構造物の荷重同定にも利用できるセンシング技術として大きく前進している。図1に示した荷重同定は、センサ配置に関する定量的な検討後、開発された分布型光ファイバひずみセンサの現実的な配置で得られるひずみ情報（誤差を含む）をもとに実施した例である。

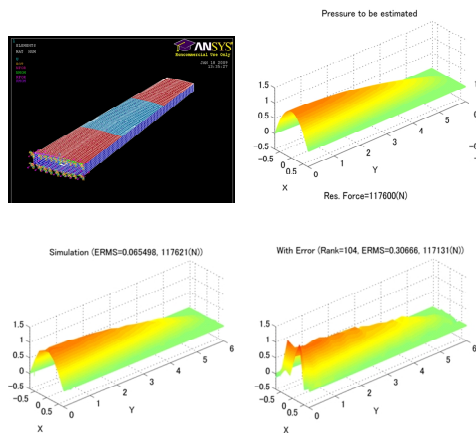


図1 左上から CFRP 製ボックス翼の FE モデル, 負荷圧力, 推定圧力 (センサ誤差なし), 推定圧力 (センサ誤差あり)

2. 研究の目的

これまで当該研究者による荷重同定手法が、複雑な3次元構造、異方性材料構造への高い適用性が確認されているが、船体構造へのさら

なる適用性を高めるため以下の課題が挙げられる。

- ①慣性力を伴う動的問題への適用。
- ②湾曲する面あるいは複数面の荷重同定への適用。
- ③局所的な荷重・応力やタンク内圧など内荷重の同時同定への適用。
- ④実験的な適用性の検証。
- ⑤残存強度・寿命予測手法との連携。

本研究では以上の5つの課題のうちおもに②～⑤に取り組み、分布型光ファイバセンサの情報をもとに、航行中の船体構造に負される荷重・応力を逆解析によりリアルタイムに推定・再構成し、さらに各部位の残存強度・寿命予測を可能とする手法の研究を行う。本研究の同定手法および計測技術は、当該研究者らが開発した極めて独自性の高いものであり、またその成果は船舶・航空機の実働荷重のリアルタイム同定およびそれらを利用した信頼性の向上技術の進展に大きく寄与すると考える。

3. 研究の方法

本手法では、CADモデルをもとに連続荷重を離散化し、離散化された位置の単位荷重に対するひずみあるいは変位測定位置での応答をFEMにより求めておく。荷重と測定量（ひずみ・変位など）の関係を示す行列の逆行列を求めておけば、逆解析により測定量から荷重をリアルタイムに推定できる。ここで、荷重推定点と測定点の数は一般的に異なるため、求める逆行列は一般化逆行列となる。荷重同定の精度と安定性は、主に荷重推定点と計測点の数、センサの精度および一般化逆行列（Moore-Penroseの擬似逆行列）の特異値分解から得られる条件数によって影響されることが分かっている。これに対して、荷重推定点は想定される荷重の分布形状から分解能を決めることが可能で、計測点は基本的

に推定点よりも多く設定し（過決定問題），かつ構造にほぼ均一に配置することが精度・安定性向上に有効であることが分かった。またセンサ誤差により安定性の問題が生じるが，ランク低下法によって安定性が大幅に向上させることができ，推定荷重の誤差（合力として1%以内）および再構成された応力の誤差（運用荷重で標準偏差0.3 MPa程度）も実用的には問題のない結果になる。

上記のこれまでの知見を踏まえ，本手法の共同開発者であるJAXA研究員と情報交換をしながら手法の改良を行い，検証には多くの計算を必要とするため大学院生と協力して研究を進めた。

本研究では，JAXAで設計・開発された複合材料製翼ボックス構造と風洞試験用のアルミ製翼模型を用いて，実験による検証を中心に研究を実施した。それぞれに対応した光ファイバセンサを設置した試験体を作製して，実験的な検証を行った。これまで実構造物に発生するような分布荷重を発生させた荷重同定手法の実験的検証は国外にも見当たらない。

4. 研究成果

図2に示す真空樹脂含浸製造法（VaRTM：vacuum assisted resin transfer molding）により作成した全長約6mにわたるCFRP製翼供試体の内外面に，FBGセンサを取り付け，制限荷重試験下におけるひずみ測定を行った。本試験では，温度補償用にゲージ長約20mmのFBGセンサをひずみフリーにして，それを用いて温度補償を行った。

本試験では図3に示すように4つのアクチュエータを使用し，16点に下面から上面に向かう方向に集中荷重をかけた。ひずみ測定に使用したセンサは，ゲージ長10mmのグレーティングを100mm間隔で多重化した，ひずみの準分布測定を行うA系統のセンサ群と，

ゲージ長300mmまたは500mmのグレーティングをもつ，ひずみの分布測定を行うB系統のセンサ群に分けられる。A系統は7本あり，翼の長手方向に貼り付け，翼全体の変形をモニタリングすることを目的とした。B系統は14本あり，ストリンガのフランジ部分やメンテナンスホール周りなど応力集中部のひずみをモニタリングすることを目的とした。センサ配置を図4に示す。



図2 CFRP製翼供試体

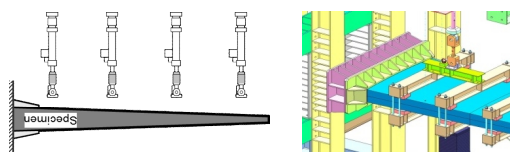
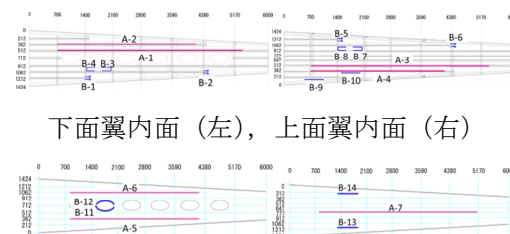
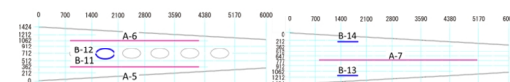


図3 試験装置



下面翼内面（左），上面翼内面（右）



下面翼外面（左），上面翼外面（右）

図4 センサ配置

図5に行った試験の一部（積載荷重/制限荷重=0, 20, 40, 60, 80, 100%）について，A-1から得られたひずみ測定結果とFEM解析によって得られたひずみ値を比較したグラフを示す。点がひずみ測定結果，線がFEM解析による結果である。グラフより測定されたひずみは非常によい精度でFEM解析値に一致していることがわかる。図6にはB-1から得られた結果を示す。B-1はストリンガの

ランアウト部にフランジの縁に沿って設置されたセンサである。ランアウト部の応力集中をよく表していることが分かる。

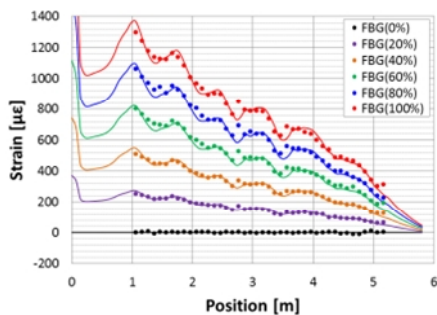


図 5 A-1 のひずみ測定結果

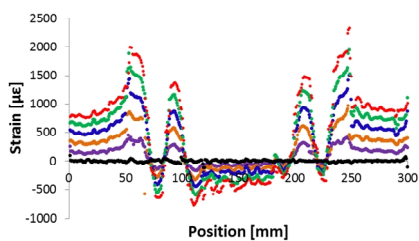


図 6 B-1 のひずみ測定結果

図 7 は A 系統で測定されたひずみを用いて付加された 16 点の荷重を求めた結果である。概ねよい一致を示しているが、翼根元の固定点付近で誤差が大きいことが分かる。これは当該箇所にセンサがないことが原因である。センサを追加した場合、全体的により一致を示すことがシミュレーションで確認された。図 8(a) は実際の荷重を負荷させた時の最大主応力を FEM によって求めたものであり、(b) は同定された荷重を FEM に入力して求めた応力である。全体的によく一致しており、疲労度推定などに用いることができる。

以上の光ファイバセンサによるひずみ測定および荷重同定の結果は、実スケールの CFRP 構造によって検証されている非常に貴重なものである。海外の研究者からも大きな反響を頂いた。

図 9 と図 10 はそれぞれアルミ製の風洞模型と光ファイバセンサの位置である。風洞模型は母翼、フラップ、スラットの複数面を持

っており、それぞれにセンサを設置した。図 11 は測定されたひずみをもとに同定した母翼部分の圧力分布である。精度の検証は今後の課題となっているが、このように風洞模型試験の試験時のひずみ分布を測定し、荷重を同定している例はほかに見当たらない。

本研究によって得られた成果をまとめる。複合材料製翼ボックスおよびアルミ製風洞模型による実験を通して (課題④)、湾曲面および複数面をもつ構造に対する荷重同定手法の適用性の検証 (課題②)、長ゲージ長の光ファイバセンサによって局所的に大きく変動する応力の変化を取られることの確認 (課題③)、再構成された応力を用いた疲労度予測の検討 (課題⑤) を行った。これらの成果は、構造ヘルスマニタリングの分野において極めて重要なものであると言える。

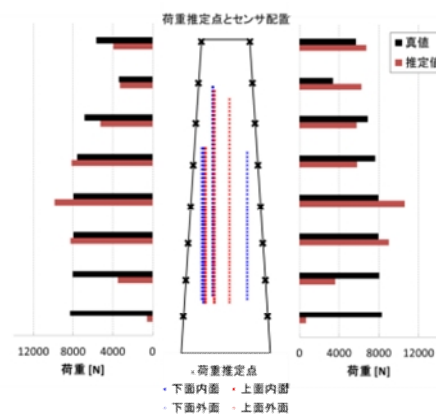
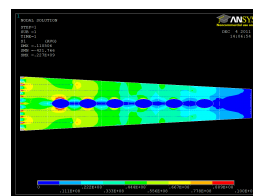
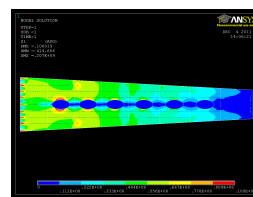


図 7 荷重同定結果



(a) 計算値



(b) 推定値

図 8 最大主応力の再構成



図9 アルミ製風洞模型

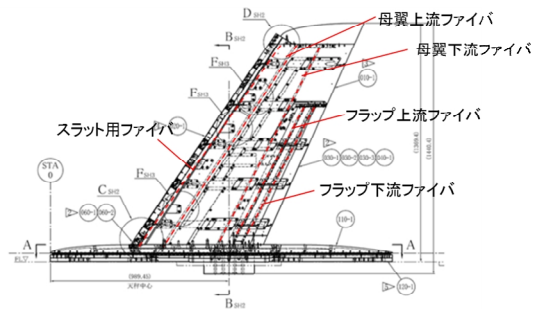


図10 センサ位置

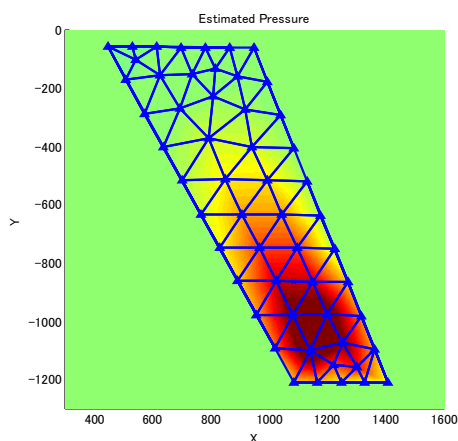


図11 同定された圧力分布

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0件)

[学会発表] (計4件)

(1) K. Tachibana, H. Murayama, H. Igawa, T. Nakamura, J. Yokokawa, Measurement of distributed strain and deformation and load identification using optical fiber strain sensors, IWSHM2011, September 13-15, 2011, Stanford, USA.

(2) H. Murayama, K. Tachibana, H. Igawa, Y. Hirano, Y. Aoki, K. Kageyama, K. Uzawa, Strain monitoring of 6-m composite wing

structure by fiber-optic distributed sensing system with FBG, ECCM-15, July 24-28, 2012, Venis, Italy.

(3) 井川寛隆, 中村俊哉, 橘和希, 村山英晶, 横川譲, 平野義鎮, 光ファイバひずみセンサを用いた翼構造体の荷重逆推定, 第54回構造強度に関する講演会, 平成24年8月1日~3日, 熊本.

(4) H. Murayama, K. Tachibana, Y. Hirano, H. Igawa, K. Kageyama, Distributed strain and load monitoring of 6 m composite wing structure by FBG arrays and long-length FBGs, OFS-22, October 15-19, 2012, Beijing, China.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村山 英晶 (MURAYAMA HIDEAKI)
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号: 10361502

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: