

平成 22 年 6 月 8 日現在

研究種目：若手研究（B）
研究期間：2008～2009
課題番号：20760557
研究課題名（和文） 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
研究課題名（英文） Load identification by inverse analysis based on information of distributed sensors
研究代表者
村山 英晶（ HIDEAKI MURAYAMA ）
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）：

本研究では、船体・航空機構造の安全性・信頼性向上および長寿命化を目的とし、広範囲の効率的なひずみ計測を可能とする分布型センサを用いて、そのひずみ情報から構造に負荷される分布荷重を逆解析によりリアルタイムに推定し、さらに各部位の応力を求める手法について検討した。単純な平板モデルについて、実験とシミュレーションにより本手法の精度・安定性を確認し、さらに先進複合材料製航空機翼構造モデルについて適用したところ、高い精度で荷重を同定できることをシミュレーションにより確認した。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is to improve the reliability and safety of ships and airplanes. I have developed the real-time prediction technique of the distributed loads on a ship structure or an airplane fuselage based by inverse analysis based on strain distributions measured by fiber-optic sensors. In this study I confirmed good accuracy and stability of this technique for a simple plate model by simulations and experiments. Then I could identify various load distributions on the wing structures made of advanced composite materials in simulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：船舶工学，航空宇宙工学，構造工学・地震工学，スマートセンサ情報システム，長寿命化，光ファイバセンサ，逆解析，構造ヘルスマニタリング

科学研究費補助金研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

近年の事故、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、構造物の安全性・信頼性を確保する技術をもとに長寿命化をはかることによってそれらの要求に応える必要がある。

船体の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¹。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は、これまで様々な検討が行われている²。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。現在では、これらの変動荷重（流体力）は CFD によって計算される場合もある。荷重の推定が正確であれば、疲労や腐食による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可能である。

荷重推定技術と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ておき、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って応力の応答関数を求めている。これは順解析である。

一方、主に運用中の信頼性を向上させようとする研究として構造ヘルスマニタリングがある。構造物を知能化しようとする研究の一つであるが、生物が持つ自己診断性を構造物に付与しようとするものであり、神経網となるセンサを構造物に一体化し、常時あるいは定期的なモニタリングにより構造健全性を評価する。もとは 1990 年代初頭から航空機の事故を減少させるために欧米から始められたが、現在では土木構造物に実証例が多く見られる。また、最近では欧米でも船舶への応用が注目されている⁴。損傷検知技術に多くの研究例があるが、船舶適用では荷重の推定も注目されるようになってきた。

当該研究者は、光ファイバセンサの船体構造ヘルスマニタリングへの応用を早くから検討してきた^{5,6}。光ファイバセンサは、細径・軽量で可とう性を持ち、強度・耐久性に優れ、耐電磁ノイズ、防爆性を有するといった特徴を持つ。さらに分布測定が可能である。すなわち、線状の光ファイバの任意または複数の特定位置を測定点とすることが可能で、電気的センサでは困難であった大型構造物における効率的なモニタリングシステムを構築できる。これまで、複合材料製の超軽量

大型帆走艇に分布型光ファイバひずみセンサを適用し、主に全体的な変形から構造物の剛性変化や損傷を検知する構造ヘルスマニタリングシステムを構築してその有効性を示した。また、サブミリオーダーの空間分解能を有する分布型光ファイバひずみセンサの開発に成功した⁷。分布型光ファイバセンサとして、ブリルアン散乱光を利用したものが国内外で盛んに研究されているが、空間分解能は最新の成果でセンチオーダーである。さらに、開発したセンサを応用して高精度のロゼットゲージセンサモジュールを考案した。これにより、1本の光ファイバで多数のポイントのひずみ場を求めることができるようになった。

荷重推定についても後述する連携研究者と研究を開始し、分布ひずみセンサ情報を用いて逆解析によって分布荷重を推定する手法の検討を行っている⁸。この手法では、連続荷重を離散化し、それらの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により求めておく。ここまでは倉本らの手法に近い。本手法では荷重と測定ひずみの関係を示す行列の逆行列を求めておけば、逆解析により測定ひずみから荷重をリアルタイムで推定できる。ここで、荷重推定点とひずみ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とは、入力値も異なることになる。これまでもひずみセンサ情報から逆解析による荷重推定の検討は行われているが、主に集中荷重を対象としている。また分布荷重推定では、関数形を仮定したもの、あるいは経験則や学習によって求める手法があるが、この場合、ひずみと荷重の関係はブラックボックスとなり、当該研究者の手法のように入出力の力学的な関係から荷重を同定するものに比べ、適用性に問題があると考える。

以上のことから、構造健全性をリアルタイムで評価し、運用中の信頼性を向上させる構造ヘルスマニタリングの一つの技術要素として、荷重推定技術は有効であり、当該研究者がこれまで行ってきた分布センシング技術および逆推定手法を組み合わせることで、精度・安定性および適用性の高い手法を開発可能であると言える。

【参考文献】

1. 重見利幸, 日本造船学会誌, 825, pp.3-8 (1998).
2. 富田康光ほか, 日本造船学会論文集, 170, pp.631-644 (1991).
3. 倉本美男ほか, 日本造船学会論文集, 170, pp.425-437 (1991).
4. P.E. Hess, Structural Health

Monitoring 2007, DEStech Publications, pp.3—15 (2007).

5. 影山和郎, 村山英晶ほか, 日本造船学会論文集, 182, pp.579-587 (1997).
6. 村山英晶ほか, 日本複合材料学会誌, vol.28, no.5, pp.176-188 (2002).
7. 村山英晶ほか, 溶接学会平成 19 年度秋季全国大会, フォーラム「溶接構造物の疲労健全性モニタリング」, PREPRINTS OF THE NATIONAL MEETING OF J.W.S., NO.81, F-31-F-36 (2007).
8. 中村俊哉, 井川寛隆, 小林俊一, 村山英晶ほか, 日本機械学会 2007 年度年次大会, pp.203-204 (2007).

2. 研究の目的

本研究では, 船体・航空機構造の安全性・信頼性向上および長寿命化を目的とし, 分布型センサ情報を用いて, 船体構造に負荷される荷重を逆解析によりリアルタイムに推定し, さらに各部位の応力を求める手法について研究する. その適用性はシミュレーションと実験により検証する. 研究期間は 2 年とする. 最終的には, 実用的に設置可能な最小限のセンサ数で高精度の荷重および応力推定を目指す.

3. 研究の方法

(1) ひずみセンサを用いた連続荷重分布の推定

圧力分布 p は x - y 平面内に分布するものとし, $p = p(x, y)$ とする. 有限要素法においては変位ベクトルが要素ごとに定義される形状関数によって節点での値により離散表現される. 圧力も同様に, ある要素 e の圧力は節点での圧力値 p_i^e により離散近似することができる. 三角形要素では形状関数 $n_i^e(x, y)$ を用いて,

$$p^e(x, y) = \sum_{i=1}^3 n_i^e(x, y) p_i^e \quad (1)$$

と書ける. 圧力が作用する領域全体ではこれを重ね合わせることににより,

$$p(x, y) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y) p_i = \sum_{i=1}^n \hat{p}_i(x, y) \quad (2)$$

と書ける. ここで, n は総節点数であり, p_i ($i = 1, \dots, n$) は各節点における圧力値である. また, $N_i(x, y)$ は式(1)の形状関数 $n_i^e(x, y)$ の重ね合わせにより構成される関数である.

ここで線形弾性を仮定すると, 任意の位置のひずみは, 式(2)により, 圧力 $\hat{p}_i(x, y)$ により生じるひずみ $\hat{\epsilon}_{*i}(x, y)$ の線形和として近似できる. また, $\hat{\epsilon}_{*i}(x, y)$ は圧力 $\hat{p}_i(x, y)$ に比例する. 即ち,

$$\epsilon_* = \sum_{i=1}^n \hat{\epsilon}_{*i} = \sum_{i=1}^n \hat{s}_i' \hat{p}_i = \sum_{i=1}^n \hat{s}_i' N_i p_i = \sum_{i=1}^n s_i' p_i \quad (3)$$

と書ける. ただし, ϵ_* は対象とするひずみ成分である ($* = x, y, z, xy, yz, zx$). 測定されるひずみ (m 個) を ϵ_{*j}^{meas} ($j = 1, \dots, m$) とすると, 式(3)より,

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{*1}^{meas} \\ \vdots \\ \epsilon_{*m}^{meas} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

と書ける. この式より, s_{ji} は節点 i のみに単位圧力 $p_i = 1$ を設定したときの, 測定点 j におけるひずみである. したがって, 行列 $[s]$ (以降 s -matrix) は通常の FEM などにより予め求めることができる. すると, $[s]^+$ を $[s]$ の一般逆行列とすると, 圧力は

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{pmatrix}^+ \begin{pmatrix} \epsilon_{*1}^{meas} \\ \vdots \\ \epsilon_{*m}^{meas} \end{pmatrix} \quad (5)$$

のように, 実測ひずみから求めることができる.

上記のように一般逆行列から求められる推定解は次式で定義される条件数によってその安定性をはかることができる.

$$Cond(s) = \sigma_1 / \sigma_r \geq 1 \quad (6)$$

ただし σ_1 は $[s]$ の最大の特異値, σ_r は 0 でない最小の特異値を表す. 条件数が大きくなると観測値の誤差に対して過度に敏感になり, 解の安定性が悪くなる. このように不適切な問題となるとき, 極端に小さい特異値を 0 とおき, ランクを落とし解の平滑化を行うことで推定精度を高めることができる.

(2) 推定圧力の評価

逆解析手法では得られた解の評価方法が重要な検討項目となる. 本研究では推定圧力分布を,

$$ERMS = \sqrt{\sum_i^n (p_i - \tilde{p}_i)^2 / \sum_i^n \tilde{p}_i^2} \quad (7)$$

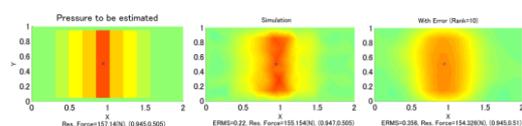
で表わされる ERMS を用いて本手法の精度を評価する. ここで \tilde{p}_i ($i = 1, \dots, n$) は求める圧力分布(真値)を表す. これは圧力推定面全域での誤差を表す.

4. 研究成果

(1) 平板モデルへの適用

いま, (0.05, 0.05), (0.05, 0.95), (1.95, 0.50) の 3 点で支持された $t 1.5 \text{ mm} \times 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ のアルミニウム合金相当の平板に図 1 エラー! 参照元が見つかりません。(a) に示す圧力分布が加わるとする. カラーマップは最大圧力 250 Pa で正規化されている. このとき圧力推定点数 $n=104$ 点, ひずみ測定点数 $m=194$ 点の条件で測定したひずみをそのまま用いて

得られる推定圧力分布, 平均 $0\mu\epsilon$, 標準偏差 $10\mu\epsilon$ の正規分布に従う乱数で誤差を与え, 解の平滑化後に得られる推定圧力分布はそれぞれ図 1 (b),(c)のように求まった. この両者の圧力分布の合力およびその作用位置は表1のように求まった. これよりひずみ誤差を含む場合も, 解の平滑化を行うことで ERMS とともに合力の大きさおよび作用位置は真値に近づき, その誤差は 1%程度に抑えられることが分かった. 他の荷重ケースでも合力の作用位置も良い精度で一致していた. 以上の検討より, 本手法の与える圧力推定解の高い精度が確認された. また, 実験によっても同等の推定が可能であることを確認した.



(a) 推定する圧力 (b) 誤差なし (c) 誤差含
分布

図 1 平板モデルの荷重推定

表 1 平板モデルにおける ERMS, 合力および作用位置の比較

	推定する 圧力分布	誤差なし	誤差含
ERMS	—	0.220	0.356
合力 (N)	157.14	155.15 (1.27%)	154.33 (1.79%)
位置 (x,y)	(0.945, 0.505)	(0.947, 0.505)	(0.945, 0.510)

(2) 航空機翼構造への適用

ここでは航空宇宙研究開発機構 (JAXA) で開発した複合材翼供試体のモデル (図 2) に適用することで, 実構造への適用性を確認することとした. なおここでは JAXA から提供を受けた FEM モデルを用いる. この翼供試体は, 薄板ボックス構造の内側にストリンガとフレームが施されている.

ここでは図 4 に示す 2 次関数で表わされる分布で翼の上面に負の圧力で与え, 上面に働く分布荷重を逆推定する. ここで最大圧力は 39379.4 Pa であり, 翼面に働く分布荷重の合力は 117600 N となりこの翼の制限荷重と一致する. ここでは圧力推定点とひずみ測定点をそれぞれ $n=66$, $m=696$ としたときに得られる逆推定結果を示す. なお, センサの配置は光ファイバセンサを適用することを前提に考えている. それぞれの位置を x - y 平面に投影すると図 3 のように表わされる. ひずみは圧力推定面上でひずみは翼のストリン

ガートとフレーム上でそれぞれ長手方向, 鉛直方向のひずみを測定しており, 誤差を平均が $0\mu\epsilon$, 標準偏差が $10\mu\epsilon$ の正規分布に従う乱数で与えている. 以上の条件のもとで逆解析を行い, 解の平滑化を行って得られた推定圧力分布を図 5 に示す. これより, 非常に良い精度で分布荷重を推定できていることが分かる. 圧力推定点とひずみ測定点を適切に配置したことで剛性の変化の影響を抑え, また条件数を低下させることでひずみ誤差の影響を上手く抑えた結果, 安定した解が得られたといえる. 以上の検証により, 実構造への高い適用性が示された.

また本研究では, ひずみセンサからの情報を積分し, 変位情報として逆推定に利用できることをシミュレーションおよび実験から確認した.

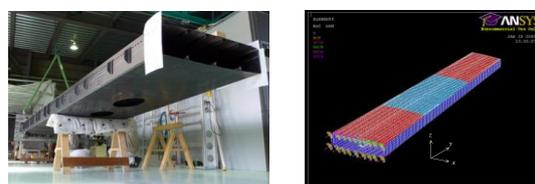


図 2 複合材翼供試体

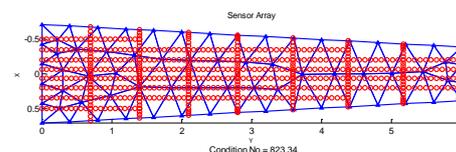


図 3 圧力推定点とひずみ測定点の配置

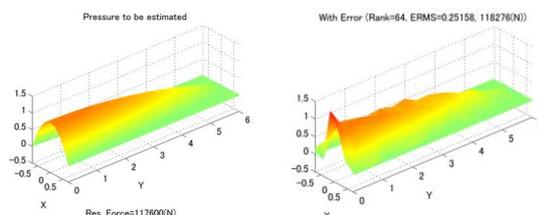


図 4 推定する圧力分布

図 5 推定圧力分布

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 2 件)

- 小林俊一, 秋山学朗, 村山英晶, 影山和郎, 鶴沢潔, 金井誠, 中村俊哉, 井川寛隆, ひずみセンサを用いた分布荷重推定手法の板構造への適用, 日本機械学会 2008 年度年次大会 講演論文集 Vol.5, pp. 333-334, 2008/08/04, 横浜国立大学, 横浜

2. H. Murayama, G. Akiyama, H. Igawa, T. Nakamura, K. Kageyama, K. Uzawa, Y. Hirano and Y. Aoki, Application of Inverse Analysis of Distributed Load with Strain Sensors to Wing Structures, Structural Health Monitoring 2009 (Proc. of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring), Vol. 1, DEStech Publications, Inc., pp. 75-82, September 9-11, 2009, Stanford, USA.

[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

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村山 英晶 (HIDEAKI MURAYAMA)

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

なし

(3) 連携研究者

井川 寛隆 (HIROTAKA IGAWA)

宇宙航空研究開発機構

研究者番号：

中村 俊哉 (TOSHIYA NAKAMURA)

宇宙航空研究開発機構

研究者番号：