

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04069

研究課題名（和文）積層複合材構造の実時間衝撃荷重同定の高精度化と高速衝撃荷重同定への応用

研究課題名（英文）Highly Accurate Real-time Impact Force Identification of Laminated Structures and Its Application to High-speed Impact Force Identification

研究代表者

亀山 正樹（Kameyama, Masaki）

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：30302178

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、構造物に内蔵したセンサからの計測情報により構造健全性を自動・実時間で監視する構造ヘルスマニタリング技術に着目し、レーザ・アブレーションを用いた高周波数帯域の加振実験に基づいて作成される圧電ひずみセンサのセンサ応答と低速～高速衝撃荷重を関係づける「実験的変換行列」を用いた荷重位置・荷重履歴の実時間同定法の有効性に関して検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、複合材構造に内蔵した圧電センサネットワークによる、異物の秒速200メートル程度までの低速～高速衝突を受ける複合材構造の実時間衝撃荷重同定法を開発し、複合材構造の安全性・信頼性の向上を図ることを目的とした。本研究課題を通して、提案する実時間衝撃荷重同定法の有効性が明らかとなった。構造ヘルスマニタリングを実用化に向けて飛躍的に発展させることが可能となり、将来の航空機や高速車両などで用いられる複合材構造の実時間・自動的な衝撃損傷評価法として、その信頼性・安全性の向上および適用範囲の拡大に大きく貢献できる。

研究成果の概要（英文）：The present research deals with structural health monitoring techniques in order to monitor the structural integrity automatically and in real time based on the measured data obtained by sensors embedded in the structures. We examined the effectiveness of the method of real-time identification of the location and force history of impact force acting on structures by using experimental transfer matrices, which relate the low- to high-speed impact force and the responses of piezoelectric strain sensors. Here, the transfer matrices are preconstructed from the measured data obtained by the impact tests based on pulsed-laser ablation excitation.

研究分野：構造力学

キーワード：複合材料 高速衝撃 衝撃荷重同定 レーザ・アブレーション 圧電センサ

## 1. 研究開始当初の背景

航空機や高速車輛などで用いられる複合材構造は、異物衝突時の衝撃荷重によって生じる層間はく離や母材き裂などの目視による検出が困難な内部損傷により、衝撃後圧縮残留強度などの著しい低下をもたらす。このため、構造物に内蔵したセンサからの計測情報により構造健全性を自動・実時間で監視する構造ヘルスマニタリングは、複合材構造の信頼性・安全性の向上および適用範囲の拡大を図るにあたって極めて重要な技術である。特に、前出のような衝撃損傷を対象としたヘルスマニタリング技術の確立が強く求められる。

衝撃損傷モニタリングに適した損傷検出法として、センサ応答より損傷の要因となる衝撃荷重の作用位置・荷重履歴を同定し、同定結果に基づいて損傷の位置や程度、さらには残留強度を推定する方法が有望視されている。この方法においては「構造物が受ける衝撃荷重の作用位置・荷重履歴の高精度な同定」を実現することが重要な鍵となる。

工具落下などの比較的低速の異物衝突によって複合材構造に作用する衝撃荷重を対象とした場合について、インパルスハンマ打撃試験に基づき作成されるセンサ応答と衝撃荷重を関係づける変換行列を用いて、逆解析により衝撃荷重の作用位置・荷重履歴を同定する有効な荷重同定法が既に開発されている。ただし、本同定法の適用範囲は、同定対象となる衝撃荷重によるセンサ応答が、変換行列の作成に用いた応答より低い周波数成分のみを含む場合に限られることから、これまで、秒速 200 メートル程度までの高速衝突を受ける複合材構造の実時間衝撃荷重同定法の開発については、今後の重要な検討課題とされてきた。一方、レーザ・アブレーションを用いることにより、対象とする構造物に対して理想的なインパルス加振力を負荷し、高周波数帯域の加振を高い再現性をもって実現できることから、レーザ加振を用いた振動試験に基づいて実験的変換行列を作成すれば高速衝撃荷重の実時間同定が可能となることを予想した。さらに、本同定法が低速～中速衝撃荷重同定の効率化・高精度化につながると同時に、低速～高速衝撃荷重を対象とした包括的な実時間衝撃荷重同定法となることを予想した。

構造ヘルスマニタリングは、構造物の安全性と信頼性を格段に向上させるだけでなく、定期検査に伴うメンテナンス・コストを大幅に削減できる重要な技術となり得ることから、国内外の研究機関で活発に研究が進められている。インパルスハンマ打撃や落錘衝撃によって模擬できるような、異物の低速衝突を受ける複合材構造の実時間衝撃荷重同定に関しては、既に有効な方法が提案され、国際・国内学術論文として公表されている。一方、高速衝突を受ける複合材構造の実時間衝撃荷重同定に関しては、航空機構造に対する鳥衝突（バード・ストライク）を初めとした、異物の高速衝突に伴う複合材構造の破壊現象に関する数値シミュレーション・実験が行われているものの、高速衝突問題が構造物の損傷や波動伝播などにより複雑な応答を示す現象であり、その逆問題である衝撃荷重同定問題はさらに複雑で難解な問題であることから、まだ有効な方法は確立されていない。

本研究課題を通して、提案する実時間衝撃荷重同定法の有効性が明らかになれば、構造ヘルスマニタリングを実用化に向けて飛躍的に発展させることが可能となり、将来の航空機や高速車輛などで用いられる複合材構造の実時間・自動的な衝撃損傷評価法として、その信頼性・安全性の向上および適用範囲の拡大に大きく貢献できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、複合材構造に内蔵した圧電センサネットワークによる、異物の秒速 200 メートル程度までの低速～高速衝突を受ける複合材構造の実時間衝撃荷重同定法を開発し、複合材構造の安全性・信頼性の向上を図ることを目的とする。すなわち、(課題 1) 圧電ひずみセンサのセンサ応答と秒速 200 メートル程度までの低速～高速衝撃荷重を関係づける実験的変換行列に基づく、荷重位置・荷重履歴の実時間同定法の構築、(課題 2) 提案する実時間衝撃荷重同定法の衝撃試験に基づく検証、を行う。

## 3. 研究の方法

本研究において提案する、異物の低速～高速衝突を受ける複合材構造の実時間衝撃荷重同定法の有効性について、数値シミュレーション、および実験の両面から検討を行う。

数値シミュレーションでは、擬スペクトル・ミンドリン板要素を用いる有限要素解析を行う。本研究では、ミンドリン板要素として 36 節点要素を用いることとし、要素補間関数にはチェビシェフ多項式を用いる。一方、実験では、インパルスハンマによる打撃（低速衝撃）、エアソフトガンによるプラスチック BB 弾の打ち込み（中速衝撃）、およびパルスレーザを用いたレーザ・アブレーション（高速衝撃）による加振実験を行う。

圧電ひずみセンサのセンサ応答と衝撃荷重を関連づける変換行列を決定するための数値最適化問題を解くにあたり、IMSL 数値計算ライブラリにおける特異値分解に基づく解法を用いる。また、衝撃荷重の荷重履歴・作用位置を同定するための数値最適化問題については、それぞれ IMSL 数値計算ライブラリにおける二次計画法、および ADS プログラムにおける DFP 可変計量法を用いて解く。

#### 4. 研究成果

- (1) 初めに、低速衝撃を受けるアルミニウム合金平板の衝撃荷重作用位置・荷重履歴同定シミュレーションを実施した。圧電ひずみセンサのセンサ応答と衝撃荷重を関連づける変換行列を決定する際に作用させる面外方向荷重の加振振動数が、同定対象となる面外方向荷重の加振振動数と同じ、もしくは高い場合に、精度良い荷重位置・履歴同定が可能であることが確認できた。  
次に、高速衝撃を受けるアルミニウム合金平板の衝撃荷重履歴同定シミュレーションを実施した。変換行列を決定する際に作用させる面外方向荷重の加振振動数が、同定対象となる面外方向荷重の加振振動数と同じ、もしくは高い場合に、精度良い荷重履歴同定が可能であることが確認できた。しかし、変換行列を決定する際に作用させる面外方向荷重の加振振動数が、同定対象となる面外方向荷重の加振振動数に比べて非常に高い場合には、正解の荷重履歴を中心に振動する荷重履歴が同定結果として得られ、同定精度が低下することが確認できた。(以上、学会発表1)
- (2) 前項の結果を踏まえ、初めに、荷重の導関数に関する制約を導入した衝撃荷重履歴同定方法により荷重作用位置および荷重履歴ともに精度の良い同定が実現できることを、数値シミュレーションを通じて明らかにした。なお、この方法では、荷重履歴同定結果から衝撃損傷の有無や損傷程度の同定を行うことを視野に入れた場合に引き続き検討が必要となることを確認した。  
次に、異なる加振振動数成分を有する複数の衝撃荷重を用いて決定される変換行列を用いることにより、衝撃荷重履歴同定結果の不安定性は緩和されるとともに衝撃荷重の最大値の同定精度を向上できることを、数値シミュレーションを通じて明らかにした。また、荷重作用位置についても精度の良い同定が実現できることを、数値シミュレーションを通じて明らかにした。
- (3) アルミニウム合金平板を対象とした衝撃荷重位置・履歴同定において、変換行列を高速衝撃荷重により決定することが同定精度におよぼす影響について、数値シミュレーションに基づく検討を行った。同定対象を加振振動数が非常に低い低速衝撃荷重とした場合に、荷重の導関数に関する制約を導入しない場合の荷重履歴同定において同定値が正解値のまわりを振動する様子が確認された。  
一方で、衝撃荷重位置同定においては、正解値のまわりを振動するような荷重履歴を用いる場合にも精度良く同定が行えることを確認した。(以上、学会発表2)これに対し、荷重の導関数に関する制約を導入する場合については、荷重履歴および荷重作用位置ともに精度良く同定が行えることを確認した。
- (4) 前項までの結果を踏まえ、アルミニウム合金平板の衝撃荷重履歴同定実験を実施した。初めに、エアソフトガンによるプラスチック BB 弾の打ち込み、およびインパルスハンマによる打撃を用いて加振した際のセンサ応答、および平板に作用する面外方向荷重の荷重履歴から決定される実験的変換行列と、荷重の導関数に関する制約を導入した衝撃荷重履歴同定方法を用いることにより、広い振動数帯域の加振振動数を有する低速～中速衝撃荷重の荷重履歴を精度良く同定できることを明らかにした。(学会発表3、同4)  
次に、本研究において提案する、パルスレーザを用いたレーザ・アブレーションによる加振実験に基づいて決定される実験的変換行列を用いることにより、低速(インパルスハンマ打撃)衝撃荷重の荷重履歴を精度良く同定できることを明らかにした。(学会発表5)

以上、研究期間全体を通じて、圧電ひずみセンサのセンサ応答と秒速 200メートル程度までの低速～高速衝撃荷重を関係づける実験的変換行列に基づく、荷重位置・荷重履歴の実時間同定法の構築を行うとともに、提案する実時間衝撃荷重同定法の有効性について、アルミニウム合金平板、および複合材積層板を対象とした数値シミュレーション、および低速(インパルスハンマ打撃)～中速(エアソフトガンを用いたプラスチック BB 弾の打ち込み)～高速(パルスレーザ照射)衝撃試験を通じて明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中村卓哉・後藤航・亦賀一起・亀山正樹
2. 発表標題 アルミニウム合金平板の高速衝撃荷重同定に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第57期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤航・亦賀一起・中村卓哉・亀山正樹
2. 発表標題 高速衝撃荷重により決定された変換行列を用いる衝撃荷重位置・履歴同定方法の検討
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亦賀一起・亀山正樹・後藤航・津川尚斗
2. 発表標題 アルミニウム合金平板の高速衝撃荷重同定に関する実験的検討
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀山正樹・亦賀一起・津川尚斗
2. 発表標題 実験的変換行列を用いた平板の中速衝撃荷重履歴同定
3. 学会等名 第64回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津川尚斗・亀山正樹・亦賀一起
2. 発表標題 レーザー加振実験により決定された変換行列を用いる平板の衝撃荷重履歴同定
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2023年合同講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	榎原 幹十朗 (Makihara Kanjuro)  (60392817)	東北大学・工学研究科・教授   (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------