放射音を用いた CFRP 積層板の実験的衝撃荷重同定^{*1}

Experimental Identification of Impact Forces Acting on CFRP Laminated Plates Using Radiated Sounds

跡 部 哲 士^{*2}・小 林 洸 貴^{*2}・胡 寧^{*3}・福 永 久 雄^{*2}
Satoshi ATOBE, Hirotaka KOBAYASHI, Ning HU and Hisao FUKUNAGA

Key Words: Identification Method, Impact Location, Force History, Sound Pressure

Abstract: In this paper, a method for identifying an impact force acting on a CFRP laminated plate is proposed. The location and force history of the impact force are identified using the sound radiation from the impacted plate. Microphones are used to measure the sound pressures at multiple locations. The impact location is identified from the arrival times of the sound wave to the microphones. For the force history identification, experimental transfer matrices which relate the impact force and the measured sound pressures are used. The force history is identified by minimizing the deviation between the measured and estimated sound pressures where the estimated ones are obtained using the experimental transfer matrices. The validity of the proposed method is verified experimentally by performing impact force identification of CFRP laminated plates. In addition, the effect of background noise on the accuracy of the identification results is also examined. The results reveal that the proposed method is capable of accurately identifying the impact location and force history from the radiated sound.

1. 緒 言

航空機構造には、その製造、運用、整備点検などのあらゆる過程において、異物衝突による衝撃荷重を受ける可能性がある。衝撃荷重は、構造物に損傷を生じさせて構造健全性を損なわせる危険性があり、重大な事故の原因となりうる。特に、様々な工業分野で構造物の軽量化が厳しく要求される昨今において、構造材料としての適用範囲が拡大している炭素繊維強化プラスチック (CFRP) などに代表される先進複合材料は、従来の金属材料と比べて比強度・比剛性といった点において優れた機械的特性を有する一方で、主に一方方向強化材を重ね合わせて製造される複合材構造は、衝撃荷重に弱く、外見上識別困難な衝撃損傷が容易に生じる¹⁾。構造物にセンサを内蔵して実時間で衝撃荷重のモニタリングができれば、運用中における構造物の安全性・信頼性を保証するにあたって有用な荷重位置・荷重履歴の情報が得られる。そこで、衝撃荷重同定が重要な研究課題となる。

一般的に衝撃荷重の直接計測は困難であるため、衝撃荷重同定に関する従来の多くの同定手法では、センサで計測した構造物の動的応答から逆解析で衝撃荷重を推定する間接的手法が用いられている²⁾。衝撃荷重同定に用いるセンサとしては、構造物に貼付または埋め込まれたひずみゲージ³⁻⁵⁾、加速度計⁶⁻⁹⁾、圧電素子¹⁰⁻¹⁷⁾、光ファイバセンサ^{18, 19)}などが用いられてきた。これらのセンサは衝撃

応答の計測には適しているが、構造物に内蔵して衝撃荷重を実時間でモニタリングする場合、構造物の剛性特性・強度特性に及ぼす影響や、貼付・埋め込み可能位置の制約、センサの補修の困難さなどが欠点になる。そこで、非接触型センサを用いた衝撃荷重同定法の確立も必要となる。辻ら²⁰⁻²³⁾はマイクロホンで計測した振動放射音を計測情報として用いる同定法を提案している。文献 20) においては、予備実験を行って決定した衝撃力と放射音を関係づける伝達関数を用いた荷重履歴同定法を、文献 21) においては、有限要素解析により求めた関係性に基づく荷重履歴同定法を報告している。また、文献 21) の同定法を発展させてアルミニウム平板に衝撃体 (アルミニウム棒) が衝突した際の衝撃位置や荷重履歴などの同定を行っている^{22, 23)}。

構造物に作用した衝撃荷重に関する情報を多く含み、かつ非接触型センサであるマイクロホンで計測可能な振動放射音は、衝撃荷重同定に用いる計測情報として有望である。しかし、これまでに報告されている同定法²³⁾では、構築できる有限要素モデルの精度に同定精度が大きく依存し、同定作業で行う繰り返し計算も同定所要時間の長時間化につながると考えられる。そこで本研究では、放射音圧を用いた衝撃荷重の位置・荷重履歴の実験的同定法を提案する。本同定法は、衝撃荷重の作用位置から各マイクロホンに放射音が到達するまでの時間差より荷重位置を同定する。そして、荷重位置同定後、衝撃荷重と音圧の計測値を関係づける実験的変換行列²⁴⁾に基づいた手法で荷重履歴同定を行う。まず、CFRP 積層板を対象として静寂な実験室内で衝撃荷重同定実験を行い、本同定法の妥当性を検証する。次に、ホワイトノイズを加えた音圧計測情報を用いることで、騒音環境下における荷

^{*1} © 2013 日本航空宇宙学会

平成 24 年 11 月 3 日原稿受付

^{*2} 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

^{*3} 千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻

重位置・荷重履歴の同定精度について検討する。

2. 実験的衝撃荷重同定法

2.1 荷重履歴-音圧履歴の変換行列 第 1 図に面外方向から衝撃荷重が作用する CFRP 積層板を示す。座標系としては、 x - y 平面が積層板の上面と一致するような直交座標系 (x, y, z) を採用する。衝撃荷重 $f(t)$ は積層板上の点 $(x_F, y_F, 0)$ に垂直に作用するものとし、放射音を $I (\geq 3)$ 個のマイクロホンで計測する。このとき、 i 番目マイクロホンの計測位置 (x_{Si}, y_{Si}, z_{Si}) における音圧履歴 $\{p_i\}$ と荷重履歴 $\{f\}$ は次式のように関係づけられる。

$$\{p_i\} = [G_i]\{f\} \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \{p_i\} &= [p_i(t_1) \ p_i(t_2) \ \cdots \ p_i(t_N)]^T, \\ \{f\} &= [f(t_1) \ f(t_2) \ \cdots \ f(t_N)]^T, \\ [G_i] &= \begin{bmatrix} g_{i,1} & 0 & \cdots & 0 \\ g_{i,2} & g_{i,1} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ g_{i,N} & g_{i,N-1} & \cdots & g_{i,1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $p_i(t_n)$ および $f(t_n)$ は、サンプリング間隔 Δt_s で計測した時刻 $t_n = n \Delta t_s$ ($n=1, \dots, N$) における音圧および荷重である。 $[G_i]$ は Green 関数により構成される変換行列であり、衝撃荷重の作用位置 $(x_F, y_F, 0)$ とセンサの位置 (x_{Si}, y_{Si}, z_{Si}) によって決定される。

変換行列の成分からなるベクトル $\{g_i\}$ を用いると式 (1) は次式のように表すことができる。

$$\{p_i\} = [F]\{g_i\} \quad (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \{g_i\} &= [g_{i,1} \ g_{i,2} \ \cdots \ g_{i,N}]^T, \\ [F] &= \begin{bmatrix} f(t_1) & 0 & \cdots & 0 \\ f(t_2) & f(t_1) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ f(t_N) & f(t_{N-1}) & \cdots & f(t_1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

第 1 図 衝撃荷重を受ける CFRP 積層板

変換行列の成分は、インパルスハンマによる打撃試験で得たセンサ応答および荷重履歴の計測値を用いて実験的に求める²⁴⁾。計測誤差の影響を小さくして高精度な変換行列を得るために K 回の打撃試験の計測情報を用いると、変換行列の成分は次式の最小二乗問題を解くことにより求められる。

$$\begin{aligned} \text{minimize : } & \sum_{k=1}^K \|\{\tilde{p}_i^k\} - [\tilde{F}^k]\{g_i\}\|^2 \\ \text{variables : } & \{g_i\} \end{aligned} \quad (5)$$

なお、アクセント記号 ($\sim$) はベクトルまたは行列の成分が実験の計測値であることを表している。

変換行列 $[G]$ は衝撃荷重の作用位置およびセンサの位置の関数であるため、同定領域内の任意の作用位置における各センサの変換行列が必要となる。そこで、第 2 図 (a) のように同定領域を格子状に分割し、式 (5) より、各節点上に衝撃荷重が作用する場合の実験的変換行列をセンサごとに予め決定しておく。要素内においては、第 2 図 (b) に示すように、その要素を構成する 4 節点における実験的変換行列と、有限要素解析で用いられる二次元アイソパラメトリック 4 節点要素の形状関数を用いて補間する²⁴⁾。

2.2 荷重位置同定 衝撃荷重の作用位置は、各マイクロホンへの放射音の到達時間 T を用いて同定する。荷重位置とセンサ間の距離を r 、音速を v とすると、 i 番センサと j 番センサで生じる放射音の到達時間の差 ΔT_{ij} は次式のように表される。

$$\Delta T_{ij} = T_j - T_i = \frac{r_j}{v} - \frac{r_i}{v} \quad (6)$$

計測した放射音の到達時間の差 $\Delta \tilde{T}_{ij}$ と、式 (6) から計算される時間差の残差二乗和を最小化することにより荷重位置を同定できる。

$$\begin{aligned} \text{minimize : } & \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j=i+1}^I \left\{ \Delta \tilde{T}_{ij} - \left(\frac{r_j}{v} - \frac{r_i}{v} \right) \right\}^2 \\ \text{variables : } & x_F, y_F \end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) の無制約最小化問題を解くにあたり、最適化手法としては共役勾配法 (Fletcher-Reeves 法) を、一次元探索には黄金分割法を用いた。

第 2 図 実験的変換行列の作成 (a) および補間 (b)

なお、本研究ではマイクロホンの数は $I=4$ を用いており、各マイクロホンにおける放射音の到達時間の計測値は予め実験的に設定した閾値によって決定する。また、音速 v は室内の摂氏温度 T_{air} を計測して次式より求める。

$$v = \sqrt{\frac{\gamma R}{M}(T_{\text{air}} + 273.15)} \quad (8)$$

ここで、 γ は比熱比、 R は気体定数、 M はモル質量である。

2.3 荷重履歴同定 荷重履歴は、各時刻 t_n ($n = 1, 2, \dots$) における音圧の計測値と、実験的変換行列を用いて式 (1) から求められる計算値の残差 2 乗和を最小化することにより同定する。第 3 図に示すように、荷重の情報が放射音として i 番目マイクロホンに伝わるには T_i の時間を要するため、荷重履歴を同定する時間を t_{N^*} とすると、時刻 $t = t_{N^*} + T_i$ までの音圧計測情報が必要になる。したがって、荷重履歴同定式は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \text{minimize} : & \sum_{i=1}^I \|\tilde{\mathbf{p}}_i^* - [\mathbf{G}_i^*] \{\mathbf{f}^*\}\|^2 \\ \text{subject to} : & f(t) \geq 0 \\ \text{variables} : & \{\mathbf{f}^*\} \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \{\tilde{\mathbf{p}}_i^*\} &= [\tilde{p}_i(t_1) \quad \tilde{p}_i(t_2) \quad \cdots \quad \tilde{p}_i(t_{N^*+\lambda_i})]^T, \\ \{\mathbf{f}^*\} &= [f(t_1) \quad f(t_2) \quad \cdots \quad f(t_{N^*})]^T, \\ [\mathbf{G}_i^*] &= \begin{bmatrix} g_{i,1} & 0 & \cdots & 0 \\ g_{i,2} & g_{i,1} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ g_{i,N^*} & g_{i,N^*-1} & \cdots & g_{i,1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{i,N^*+\lambda_i} & g_{i,N^*-1+\lambda_i} & \cdots & g_{i,1+\lambda_i} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $\lambda_i = T_i / \Delta t_s$ である。衝撃荷重が平板に対して引張りとならないよう非負制約を導入しているため、式 (9)

第 3 図 荷重履歴および放射音圧

を解く最適化手法としては二次計画法を用いる。

3. 実験概要

3.1 試験片および実験装置 同定実験で試験片として用いる CFRP 積層板は、第 4 図に示すような、積層構成が $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$ の擬似等方性積層板である。ここで、CFRP 単層板の厚さは 0.125 mm であり、繊維配向角 θ の 0° 方向は x 軸と一致しているものとする。境界条件は四隅固定支持とし、平板の四隅をそれぞれ治具により 35 mm 四方固定した。

実験装置の構成を第 5 図に示す。インパルスハンマ（小野測器, GK-3100）によって試験片に衝撃荷重を作用させ、放射音圧を 1/2 インチ計測用マイクロホン（小野測器, MI-1234）で計測する。マイクロホンからの信号はプリアンプ（小野測器, MI-3110）と 2 チャンネルセンサアンプ（小野測器, SR-2200）を介してからデジタルオシロスコープ（キーエンス, GR-7000）で記録する。この計測情報を用いてパソコンにより衝撃荷重同定を行う。なお、インパルスハンマ出力も実験的変換行列の作成や荷重履歴同定結果との比較のために計測する。

インパルスハンマの先端チップは、ゴム製のソフトチップとプラスチック製のハードチップの 2 種類を使い分けた。4 式のマイクロホンは、各々の先端の中心が第 1 表に示す 1 辺の長さが 60 mm である正四面体の各頂点の位置と一致するよう配置した。マイクロホンとインパルスハンマから

第 4 図 試験片概略図

第 5 図 実験装置の構成

第 1 表 マイクロホンの配置 (単位: mm)

Microphone 1	Microphone 2	Microphone 3	Microphone 4
(150,150,248)	(185,150,297)	(133,180,297)	(133,120,297)

得られる音圧と荷重を計測する時間間隔は $0.1 \mu\text{s}$ とした。

3.2 衝撃荷重同定 第 4 図に示すように、衝撃荷重の同定領域は 1 辺が 120 mm の正方形領域とし、実験の変換行列を求めるにあたっての分割は 20 mm 間隔とした。変換行列は、ソフトチップを用いて得た荷重・音圧計測情報から作成したものと、ハードチップによるものとの 2 種類を作成した。なお、式 (5) において、各節点につき行う打撃試験の回数は $K=5$ とした。荷重位置同定で用いる音速 v は、温湿度計 (LUFFT, E200) で計測した実験時の室温 $T_{\text{air}}=24.4^\circ\text{C}$ と式 (8) より 346.04 m/s と求めた。

3.3 騒音環境下における音圧計測情報 騒音がある状況下での衝撃荷重同定では、静寂な実験室内で計測された衝撃荷重作用時の放射音圧 $\tilde{p}(t)$ にパソコンで発生させたホワイトノイズを加えることにより、騒音環境下での各マイ

クロホンの音圧計測情報 $\tilde{p}_{\text{noise}}(t)$ を模擬した。

$$\tilde{p}_{\text{noise}}(t) = \tilde{p}(t) + \tilde{p}_{\text{max}} \times \frac{Q}{100} \times w(t) \quad (11)$$

ここで、 $\tilde{p}_{\text{max}}$ は計測時間内における $\tilde{p}(t)$ の最大音圧である。 Q は騒音の大きさを指定する変数であり、本研究では $Q=2, 4, 6, 8, 10$ の 5 通りを検討した。また、 $w(t)$ は $-1 \leq w(t) \leq 1$ の一様乱数である。

第 6 図に式 (11) より求めた音圧計測情報の FFT 解析結果の一例を示す。騒音がない場合の音圧 ($Q=0$) にホワイトノイズを加えることにより、広帯域の周波数に対してノイズを導入できていることがわかる。

4. 同定結果および考察

4.1 騒音がない場合 まずは、静寂な実験室内で行った衝撃荷重同定実験の結果について述べる。第 7 図に、マイクロホンへの放射音の到達時間を用いた荷重位置同定の結果を示す。図において、 $\times$ は荷重位置の同定結果を、 $\square$ は計測値を表している。同定実験はソフトチップおよびハードチップの各先端チップにつき 36 の位置で行った。図より、先端チップの剛性に関係なく荷重位置が精度良く同定されていることがわかる。同定結果と計測値との間の距離を同定誤差とすると、ソフトチップでは平均で 4.7 mm 、最大で 8.9 mm であった。また、ハードチップにおいては、平均誤差は 2.9 mm 、最大誤差は 6.0 mm であった。

荷重位置同定誤差が最大となった第 7 図中の点 A および点 B の荷重履歴同定結果をそれぞれ第 8 図および第 9 図に示す。なお、荷重履歴同定はソフトチップ製の実験の変換行列を用いる場合とハードチップ製の場合の 2 通りで行った。荷重履歴同定の時間間隔は $20 \mu\text{s}$ 、同定時間は 14 ms とした。第 8 図より、ソフトチップによる衝撃荷重は、変換行列の作成に用いた先端チップの種類によらず精度良く荷重履歴が同定されていることがわかる。一方、ハードチップによる衝撃荷重の場合は、同じハードチップで作成した変換行列でしか良好な同定結果が得られないことが第 9 図

第 6 図 音圧計測情報に含まれる周波数成分: $(x_F, y_F) = (150, 150)$, 1 番マイクロホン

第 7 図 騒音がない環境下での荷重位置同定結果

第8図 騒音がない環境下での荷重履歴同定結果 (衝撃荷重: ソフトチップ, 点 A)

第9図 騒音がない環境下での荷重履歴同定結果 (衝撃荷重: ハードチップ, 点 B)

第2表 騒音がない場合における荷重履歴同定誤差

Impulse hammer tip		Error of identified force	
Identification	Transfer matrix	Average	Maximum
Soft tip	Soft tip	1.9%	5.4%
Soft tip	Hard tip	3.1%	9.8%
Hard tip	Soft tip	36.4%	63.4%
Hard tip	Hard tip	5.8%	17.2%

よりわかる。第6図に示したソフトチップ・ハードチップで打撃した場合の音圧計測情報に含まれる周波数成分を比較すると、ソフトチップの場合における放射音圧には低周波数の成分しか含まれていないのに対し、ハードチップでは低周波数から高周波数までの幅広い帯域の成分が含まれていることがわかる。よって、ソフトチップの荷重・音圧計測情報から作成した変換行列を用いてハードチップの衝撃荷重を同定した場合、第9図(b)のように、ソフトチップの変換行列に情報が含まれていない高周波数の成分がノイズとして荷重履歴同定結果に現れ、同定精度が悪くなる。

荷重履歴の同定精度を定量的に評価するため、同定誤差を次式のように定義する。

$$E_F = \frac{|f_m^{\max} - f_{id}^{\max}|}{|f_m^{\max}|} \quad (12)$$

ここで、 $f_m^{\max}$ および $f_{id}^{\max}$ は、荷重の計測値および同定値の同定時間内におけるそれぞれの最大値である。第2表に、同定実験を行った全36点での荷重履歴同定誤差の平均値および最大値を示す。

先端チップの剛性によらず高精度な荷重履歴同定結果を得るには、広帯域の周波数成分が含まれるハードチップの荷重・音圧計測情報から作成した変換行列を用いることが

重要であることがわかる。

以上の結果から、非接触型センサであるマイクロホンで計測した振動放射音を計測情報とする本同定法により、構造物に貼付したPZT圧電センサを用いる衝撃荷重同定法¹⁶⁾と同等の精度で、荷重位置および荷重履歴を同定できることが明らかとなった。

4.2 騒音がある場合 衝撃荷重作用時の放射音圧を用いる本同定法の場合、その有用性を検討するうえで騒音環境が同定精度に及ぼす影響は重要な検討項目である。そこで、式(11)により模擬した騒音環境下における音圧計測情報を用いて、前節の騒音がない場合と同じ全36点で衝撃荷重同定を行った。

第10図に、騒音の大きさを $Q=10$ とした場合の騒音環境下での荷重位置同定結果を示す。なお、図の見易さを考慮して第10図には12点の結果のみを示した。図より、騒音がない場合の第7図と比べて両先端チップとも荷重位置同定精度が大きく低下していることがわかる。騒音に含まれる高周波数領域の雑音は、閾値を用いて検出される各マイクロホンにおける衝撃音の到達時間に誤差を生じさせ、この誤差が荷重位置同定誤差の原因となる。そこで、本研究では周波数フィルタを用いて高周波数領域の雑音を低減することで騒音環境下における荷重位置同定精度の向上を図る。衝撃音の情報が損なわれないよう第6図で示した放射音圧に含まれる周波数成分を考慮し、ローパスフィルタの遮断周波数は10kHzとする。第11図に、周波数フィルタを導入した場合の荷重位置同定結果を示す。第10図との比較から、ローパスフィルタで高周波数領域の雑音を低減することにより、騒音環境下でも精度良く荷重位置が同

第 10 図 荷重位置同定結果 (騒音の大きさ $Q=10$ の場合) 第 11 図 ローパスフィルタを用いた荷重位置同定結果 (騒音の大きさ $Q=10$, 遮断周波数 10 kHz の場合)

定可能となることがわかる。

第 12 図に、騒音の大きさ Q と荷重位置同定誤差の関係を、フィルタ使用の有無で比較して示す。図において、マーカーは同定誤差の平均値を、垂線は誤差の範囲を表している。図より、両先端チップとも、騒音が大きくなるに伴って位置同定誤差も大きくなるが、周波数フィルタで騒音の高周波数成分を除去することで誤差が低減されることがわかる。なお、ソフトチップのほうが騒音による同定精度の低下、および、フィルタを導入した際の同定精度の向上がハードチップの場合よりも著しいが、これは各々の先端チップで打撃した場合の放射音圧に含まれる周波数成分の違いによるものと考えられる。ソフトチップで打撃した場合、平板の振動は低次の振動モードが支配的となるため、第 13 図に示すように、放射音圧の立ち上がりがハードチップの場合と比べて緩やかとなる。このため、高周波数領域の雑音があると、ソフトチップのほうが閾値で検出される放射音の到達時間の誤差が大きくなり、結果的に位置同定誤差も大きくなる。ゆえに、周波数フィルタを導入した際の効果もソフトチップのほうが大きくなる。

騒音の大きさ Q と荷重履歴同定誤差との関係を第 14 図に示す。なお、ここでの荷重履歴同定はハードチップで作成した実験の変換行列を用いて行った。第 14 図 (a) より、衝撃音に含まれる高周波数成分が小さいソフトチップでは、騒音の大きさや周波数フィルタの有無で荷重履歴同定誤差

(a) ソフトチップ

(b) ハードチップ

第 12 図 騒音と荷重位置同定誤差の関係

(a) ソフトチップ

(b) ハードチップ

第 13 図 平板中央を打撃した場合の 1 番マイクロホンにおける音圧履歴

が大きく変動しないことがわかる。一方で、衝撃音の高周波数成分が大きいハードチップの場合は、騒音環境下における荷重履歴同定精度が周波数フィルタの有無に大きく依存することが第 14 図 (b) よりわかる。

以上の結果から、周波数フィルタを導入して高周波数領域の雑音を除去することで、騒音環境化においても本同定法により良好な荷重位置・荷重履歴の同定結果が得られることが示唆された。

5. 結 言

本研究では、非接触型センサによって構造物に作用する衝撃荷重を同定する手法の構築を目的として、マイクロホンで計測した放射音圧を用いる荷重位置・荷重履歴同定法を検討した。なお、提案した同定法は構造物の解析モデルを必要とせず実験データのみで構築可能な実験的同定法である。

第14図 騒音と荷重履歴同定誤差の関係

本同定法の妥当性を検証するため、擬似等方性の CFRP 積層板を対象に、騒音のない静寂な環境下で衝撃荷重同定実験を行った。その後、騒音がある場合における本同定法の精度について検証した。その結果得られた結論は以下のとおりである。

- ・騒音がない場合においては、衝撃体の剛性に関係なく、本同定法により衝撃荷重の作用位置および荷重履歴が同定可能であり、精度も貼付型の PZT 圧電センサを用いた従来の手法と比べて遜色がないことがわかった。
- ・騒音がある場合においても良好な荷重位置・荷重履歴の同定結果を得るためには、周波数フィルタを用いて高周波数領域の雑音を低減することが有効であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) Abrate, S.: Impact on Composite Structures, Cambridge University Press, New York, 1998.
- 2) Inoue, H., Harrigan, J. J. and Reid, S. R.: Review of Inverse Analysis for Indirect Measurement of Impact Force, Appl. Mech. Rev., **54** (2001), pp. 503–524.
- 3) Chang, C. and Sun, C. T.: Determining Transverse Impact Force on a Composite Laminate by Signal Deconvolution, Exp. Mech., **29** (1989), pp. 414–419.
- 4) Wu, E., Yeh, J. C. and Yen, C. S.: Identification of Impact Forces at Multiple Locations on Laminated Plates, AIAA J., **32** (1994), pp. 2433–2439.
- 5) Jones, R. T., Sirkis, J. S. and Friebele, E. J.: Detection of

- Impact Location and Magnitude for Isotropic Plates Using Neural Networks, J. Intell. Mater. Syst. Struct., **7** (1997), pp. 90–99.
- 6) 狼 嘉彰, 田中秀樹: 宇宙機に働いた衝撃力と位置の推定, 日本機械学会論文集 C 編, **63** (1997), pp. 4246–4252.
- 7) 小野崎徹, 関根英樹: 矩形複合材積層板上に作用する点衝撃の位置および荷重履歴の同定に関する実験的検証, 日本航空宇宙学会論文集, **50** (2002), pp. 236–241.
- 8) Adams, R. and Doyle, J. F.: Multiple Force Identification for Complex Structures, Exp. Mech., **42** (2002), pp. 25–36.
- 9) Lee, S. K., Banerjee, S. and Mal, A.: Identification of Impact Force on a Thick Plate Based on the Elastodynamic and High-Order Time-Frequency Analysis, J. Mech. Eng. Sci., **221** (2007), pp. 1249–1263.
- 10) Tracy, M. and Chang, F. K.: Identifying Impacts in Composite Plates with Piezoelectric Strain Sensors, Part II: Experiment, J. Intell. Mater. Syst. Struct., **9** (1998), pp. 929–937.
- 11) Seydel, R. and Chang, F. K.: Impact Identification of Stiffened Composite Panels: I. System Development, Smart Mater. Struct., **10** (2001), pp. 354–369.
- 12) 田島賢典, 松本 賢, 福永久雄: PZT 圧電センサによる CFRP 積層板の衝撃荷重同定 (第 2 報, 実験による検証), 日本機械学会論文集 A 編, **70** (2004), pp. 1747–1754.
- 13) Wang, B., Takatsubo, J., Akimune, Y. and Tsuda, H.: Development of a Remote Impact Damage Identification System, Struct. Control Health Monit., **12** (2005), pp. 301–314.
- 14) 海埜孝夫, 三浦裕樹, 杉本 直, 亀山正樹, 胡 寧, 福永久雄: 多点荷重を受ける CFRP 補強パネルの実験的衝撃荷重同定, 日本複合材料学会誌, **35** (2009), pp. 106–111.
- 15) Park, J., Ha, S. and Chang, F. K.: Monitoring Impact Events Using a System-Identification Method, AIAA J., **47** (2009), pp. 2011–2021.
- 16) 跡部哲士, 胡 寧, 福永久雄: 実験的変換行列を用いた平板の実時間衝撃荷重同定, 日本航空宇宙学会論文集, **60** (2012), pp. 48–55.
- 17) Gaul, L. and Hurlbauss, S.: Determination of the Impact Force on a Plate by Piezoelectric Film Sensors, Arch. Appl. Mech., **69** (1999), pp. 691–701.
- 18) Akhavan, F., Watkins, S. E. and Chandrashekhara, K.: Prediction of Impact Contact Forces of Composite Plates Using Fiber Optic Sensors and Neural Networks, Mech. Compos. Mater. Struct., **7** (2000), pp. 195–205.
- 19) 水口 周, 水谷忠均, 秋野 望, 武田展雄, 筒井寛明, 平野憲芳, 木元順一, 越岡康弘: 多重化 FBG 光ファイバセンサの動ひずみ計測による CFRP フォームコアサンドイッチ構造の衝撃同定, 日本航空宇宙学会論文集, **59** (2011), pp. 212–221.
- 20) 辻 知章, 川田祐嗣, 鈴木喜浩, 山口友康, 野田直剛: 被衝撃体からの放射音による衝撃力の同定 (逆問題解析を用いた非接触測定による同定実験), 日本機械学会論文集 A 編, **65** (1999), pp. 701–707.
- 21) 辻 知章, 栗本貴文, 渋谷寿一: FEM 解析を併用した放射音圧測定による平板の衝撃力の同定, 日本機械学会論文集 A 編, **74** (2008), pp. 858–863.
- 22) Tsuji, T., Kurimoto, T. and Shibuya, T.: An Identification Method of the Time Dependence of the Impact Force by Using Acoustic Response and FEM Analysis, Mechanics and Model-Based Control of Smart Materials and Structures, Springer, New York, 2010, pp. 173–192.
- 23) 辻 知章, 伊藤康司, 嶋田英昭, 富永裕也: 放射音測定と FEM 解析を用いた衝撃位置, 衝撃力, 被衝撃体の縦弾性係数, 衝撃半径の同定, 日本機械学会論文集 A 編, **77** (2011), pp. 1433–1443.
- 24) 宮澤英晃, 杉本 直, 胡 寧, 福永久雄: CFRP 複合材構造の実験的衝撃荷重位置・履歴同定, 日本複合材料学会誌, **33** (2007), pp. 87–94.