

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 2 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420034

研究課題名(和文)放射音測定による被衝撃体の機械的性質，欠陥，衝撃力の同時同定手法の開発

研究課題名(英文) A development of the method in order to determine the mechanical properties, defect and impact force at the same time by measuring the sound pressure from the impacted body.

研究代表者

辻 知章 (Tsuji, Tomoaki)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：80188531

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)： 衝撃時に被衝撃体から発生する放射音の平面的分布を，擬似的に測定する装置を考案し製作し，以下の成果が得られた．1) 衝撃圧力の空間および時間分布を同定する手法を提案し，実際の実験により確認が行われた．これにより，被衝撃体に与えられる外部からの衝撃力の位置，空間分布，および時間変化の同定が，放射音測定により可能であることが明らかになった．2) 被衝撃体表面の凹みの位置および形状を同定する方法を提案し，その手法を使い種々の欠陥の同定ができることが確かめられた．直接衝撃ではなく，既知の音を被衝撃体に入力することも可能であることから，本手法を使えば，被接触で欠陥の同定が可能であることが明らかになった．

研究成果の概要(英文)：The equipment to measure the distribution of the sound pressure fictionally is invented. By measuring the sound pressure with this equipment, the following outcomes are given. 1) The method in order to determine the distribution of the impact pressure is invented. By the actual experiment, the efficiency has been confirmed. It becomes clear, that the possibility to determine the placement, space distribution and time-dependence by measuring the distribution of the sound pressure from the impacted body. 2) The method in order to determine the placement and shape of the defect in the surface of the impacted body is invented. By the present method, the placement and shape of the dent at the surface of the impacted body can be determined. Since the sound pressure can be applied to the impacted body as the impact force, the non-contact measurement of the defect should be possible.

研究分野：材料力学

キーワード：衝撃力 衝撃音 被接触 欠陥同定 衝撃力同定

1. 研究開始当初の背景

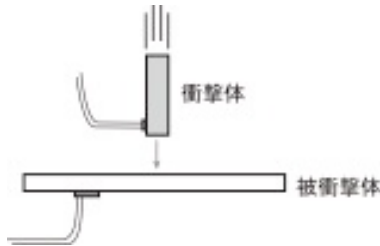


図1 衝撃体あるいは被衝撃体にはりつけたゲージによる衝撃力の測定

物体の破損に関する衝撃力を測定することは重要であり、これまでに衝撃力を同定する研究が多数報告されている。例えば、井上らは、図1のように、衝撃力が加えられた弾性体に生じるひずみ応答を用いて衝撃力の同定を行っている。この方法では、あらかじめ実験により衝撃力とひずみ応答との伝達関数を求める必要がある。しかし、衝撃力の正確な測定には困難を伴う事が多い。また、ひずみゲージによる測定には、衝撃力を直接測定できない、衝突による破損の恐れ、測定対象への貼り付けの手間がかかる、などの欠点がある。

これらの欠点を克服するため、研究者らは有限要素法解析より求めた衝撃力と放射音との関連性を利用して、測定した放射音より衝撃力を同定する研究を行ってきた(業績13)。この方法では、FEM解析により求めた任意の衝撃力に対する音圧のシミュレーション値を基に、未知係数を用いて未知の衝撃力と音圧を級数表示する。この未知の音圧と測定した音圧を用いて、最小二乗法により未知係数を決定し、衝撃力を同定している。そのため、衝撃力と放射音との伝達関数を求める予備実験を行う必要がなく、非接触で衝撃力同定の可能性が明らかにされた。さらに、2個のマイクロフォンの情報を用いて、衝撃力以外の情報として、衝撃位置、衝撃半径、あるいは被衝撃体の弾性係数を同時に同定する試みを行っている。

2. 研究の目的

(1) 理論解析による衝撃時に発生する放射音のメカニズムの解明

FEM解析と実験だけでは、放射音の持つ情報と、衝撃力および被衝撃体の弾性係数等の情報の関連性がブラックボックスとなってしまっている。そこで、任意の衝撃力を受ける円板から生じる放射音を弾性論および音場の理論を用い、理論解析により数式で表現する。そして、実験値やシミュレーションで得られた値と比較検討することにより、放射音発生メカニズムを解明する。

(2) 衝撃実験の自動化および同定の高速化

これまでの研究では、音圧の測定、音圧のシミュレーション、最小二乗法による同定値の算出をそれぞれ異なるシステムで行なってきた。そのため、データの読み取り、書き込

み、転送などを全て手作業によるオフラインにより行なっていた。そこで、同定値の算出までを一括して行なうシステムを構築するとともに、衝撃力の自動発生装置を作成する。これらを一つにまとめ、「衝撃力の発生」⇒「衝撃力の測定」⇒「同定値の算出」までの一連の動作を完全に自動化することにより、測定から同定までの時間を数十秒以内で行なえるシステムの構築を目指す。

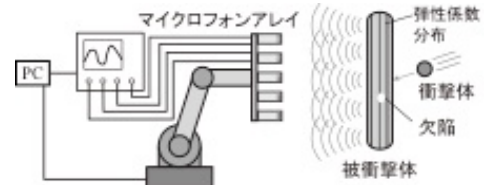


図2 マイクロフォンアレイを用いた同定システム

(3) マイクロフォンアレイを模擬した衝撃実験装置の開発

これまでの研究では、2個のマイクロフォンの情報より、例えば、被衝撃体の縦弾性係数と衝撃力の時間変化が同時に同定できることが確認されている。本研究では、数個のマイクロフォンを移動させながら、同じ衝撃力を複数回測定することにより、擬似的に、多数のマイクロフォンでの測定データを作成し、衝撃力同定の精度向上を図るとともに、衝撃力以外の機械的性質や欠陥の同時同定が行なえることを示す。理論的には、被衝撃体から放射されるあらゆる方向の音圧の時間変化を計測し、被衝撃体の機械的性質や内在する欠陥等の様々な情報の同定を目指す。

(4) 内部欠陥の同定方法の開発

衝撃力により発生した応力波が被衝撃体を伝わり、表面を変形させることにより、被衝撃体表面から放射音が生じる。そのため、放射音には、被衝撃体内部の欠陥に関する情報が含まれている。複数のマイクロフォンから得られる情報を種々に組み合わせることで、被衝撃体の欠陥、特に内部欠陥の同定を試みる。

(5) き裂や塑性変形等のダメージの同定

被衝撃体にき裂や塑性変形が生じるような、大きな衝撃力を受けた場合において、変形状態や、降伏領域の同定を行なう方法を提案する。

(6) 複合材料、生体、木材等の内部構造が様でない材料内の機械的性質の同定

内部構造が種々に変化する材料について、(3)、(4)で得られた知見を基に、衝撃力と放射音を用いて、内部で変化する弾性係数等の分布を同定する方法を提案する。

3. 研究の方法

まず、詳細な理論解析を行なうことにより、

放射音と被衝撃体が持つ様々な情報との関連を明確にする。そして、理論解析による音圧のシミュレーションを従来の手法に組み込み、衝撃力同定の高速化を実現させる。また、自動衝撃装置を作成し、衝撃実験、放射音測定、シミュレーション、同定値算出までの一連の動作を自動的に行なえるシステムを構築する。さらに、マイクロフォン位置の自動設定装置を作成し、マイクロフォンの設置位置を変化させ、同じ衝撃力実験を繰り返すことにより、擬似的に数百、数千個のマイクロフォンアレイを模擬した実験が行なえる装置を開発する。これらの装置を用い、内部欠陥、ダメージ、内部構造が複雑な材料の弾性係数の同定手法の開発を順次行なう。

4. 研究成果

(1) マイクロフォンアレイを模擬した衝撃実験装置

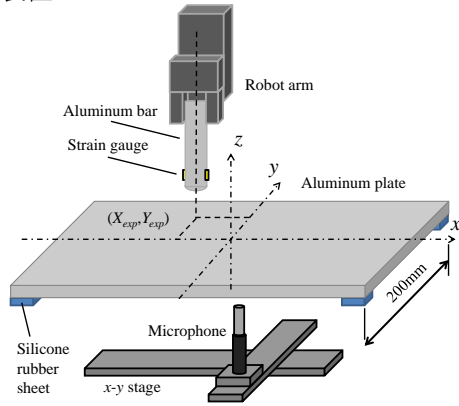


図2 衝撃棒自動落下装置（上）、被衝撃板、マイクロフォン自動移動装置（下）

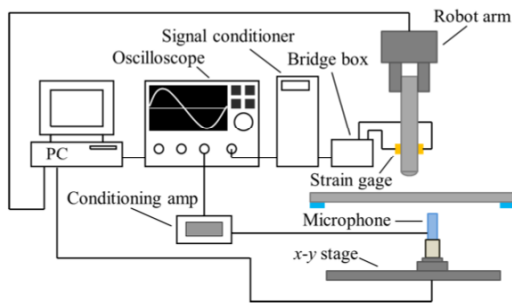


図3 衝撃実験装置概略

図2に示すように衝撃体と被衝撃体の衝突動作を繰り返しながら、測定素子であるマイクロフォンを移動させることで、放射音圧分布を測定する装置を作製した。衝撃体としてアルミニウム丸棒(φ30 mm×300 mm)を、被衝撃体としてアルミニウム平板(500 mm×200 mm×10 mm)を用いている。衝撃体(アルミニウム丸棒)の先端は直径10 mmの円形平面になっており、側面を丸めている。平板の四隅の下に厚さ5 mm、一辺20 mmの正方形のシリコンラバーシートを設置し、支持してある。アルミニウム丸棒をロボットアームによって把持し、一定の高さまで持ち上げてから離し、自由落下させることにより、同じ衝撃力をアルミニ

ウム平板に自動的に加えることができる。マイクロフォンはx-yステージに設置してあり、その移動分解能は2μm、可動域は200 mm×200 mmである。衝撃位置は板中心を原点、板の長手方向をx方向とし、 (X_{exp}, Y_{exp}) で表す。衝撃体の先端から20 mmの所にひずみゲージを貼り、衝撃体に生じるひずみ変化から衝撃圧力を測定する。この測定値は放射音圧分布から求めた衝撃圧力の同定値の精度確認のために用いている。

図3に測定システム概略を示す。各測定装置をPCで制御することにより、ロボットアームによる衝撃体の把持、ロボットアームの上昇、衝撃体の落下、放射音圧とひずみの測定、記録、マイクロフォンの移動までの全動作を自動化している。衝撃体の上昇から落下までの動作を繰り返しながらマイクロフォンの位置を動かしていくことで、アルミニウム平板の下面から10 mm($z = -20$ mm)の平面上における放射音圧の分布を測定できる。

図4に、アルミニウムの丸棒を高さ $H = 10$ mmからアルミニウム平板の中央 $(X_{exp}, Y_{exp}) = (0, 0)$ [mm]の地点に繰り返し自由落下させながら、マイクロフォンによって $z = -20$ mm, $x = -50 \sim 50$ mm, $y = -50 \sim 50$ mmの正方形領域の音圧分布を1 mmの分解能で測定した衝撃音圧の平面分布の時間変化を示す。測定点の数は10201点(101×101)である。図より、衝撃が加わった平板中央下部付近において最も早く音圧が増加しており、音が同心円状に伝わっていく様子が確認できる。

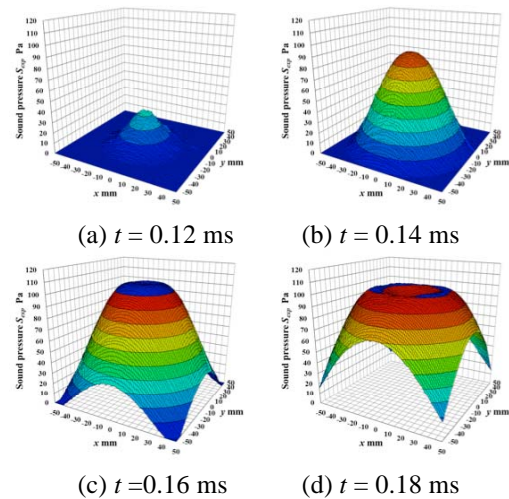


図4 測定された衝撃音圧の平面分布

(2) 平面上の放射音圧分布測定による衝撃力及び衝撃位置の同定原理

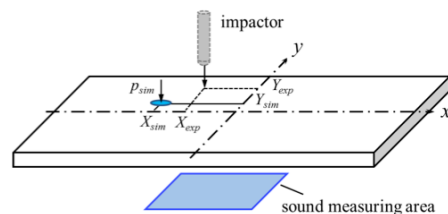


図5 仮想衝撃位置および音圧測定面

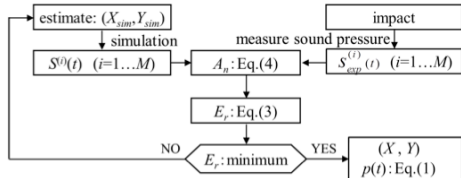


図 6 衝撃力および衝撃位置の同定手順

図 5 に示すように、衝撃実験における実際の衝突位置 (X_{exp}, Y_{exp}) に衝撃が加えられたときの衝撃位置と衝撃力の時間変化を同定する。ここで、衝撃が加えられたと予想される位置を (X_{sim}, Y_{sim}) とする。FEM 解析においてこの位置に既知の衝撃圧力の時間変化を与え、放射音圧の解析値を得る。このとき、既知の入力としてデルタ関数あるいはステップ関数を用いることが一般的であるが、FEM 解析において結果が不安定になることが多い。そこで、次式で表される滑らかに立ち上がるステップ関数状の圧力の時間変化 $p_{sim}(t)$ を衝撃が加えられたと予想される点 (X_{sim}, Y_{sim}) に与える。

$$p_{sim}(t) = p_0 \left[\frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos\left(\pi \frac{t}{T}\right) \right\} H(t)H(T-t) + H(T-t) \right] \quad (1)$$

ここで、 T 、 p_0 、 $H(t)$ はそれぞれ、立ち上がり時間、衝撃圧力の大きさ、ヘビサイドのステップ関数である。以降、立ち上がり時間 $T = 0.1$ ms、衝撃圧力 $p_0 = 1$ MPa としている。

次に、 $p_{sim}(t)$ の重ね合わせにより、任意の衝撃圧力の時間変化 $p(t)$ を次のように未知係数 A_n で表す。

$$p(t) = \sum_{n=1}^N A_n p_{sim}(t - t_n) \quad (2)$$

ここで、 $t_n = \Delta t \times (n-1)$ 、 Δt は時間刻み、 N は重ね合わせ回数である。FEM 解析において、点 (X_{sim}, Y_{sim}) を中心とする半径 5 mm の円形領域に衝撃圧力 $p_{sim}(t)$ が加わった時の、解析音圧を $S_{sim}^{(i)}(t)$ で表す。ここで、 i は衝撃実験を行った際の音圧の測定位置に対応する番号である。衝撃圧力と放射音圧の間には線形関係があるとすれば、式(2)で表される衝撃圧力 $p(t)$ による衝撃音圧の時間変化 $S^{(i)}(t)$ は、 $S_{sim}^{(i)}(t)$ を用いて以下のように表すことができる。

$$S^{(i)}(t) = \sum_{n=1}^N A_n S_{sim}^{(i)}(t - t_n) \quad (3)$$

衝撃実験において、ある位置で測定された音圧の時間変化 $S_{exp}^{(i)}(t)$ と式(3)の解析音圧の差の二乗平均を以下のように全ての音圧の測定位置 ($i = 1 \sim M$) のデータを用いて表す。

$$E_r = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{K_{max}} \left\{ S^{(i)}(t'_k) - S_{exp}^{(i)}(t'_k) \right\}^2$$

$$= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{K_{max}} \left\{ \sum_{n=1}^{N_{max}} A_n S_{sim}^{(i)}(t'_k - t_n) - S_{exp}^{(i)}(t'_k) \right\}^2 \quad (4)$$

ここで、 t'_k ($k = 1, 2, \dots, K_{max}$) は音圧を測定した時刻、 K_{max} は測定時刻の総数、 M は音圧の測定位置の個数である。最小二乗法によれば、 A_n は次の連立一次方程式の解として得られる。

$$\sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{K_{max}} S_{sim}^{(i)}(t'_k - t_n) S_{sim}^{(i)}(t'_k - t_m) \right\} A_n$$

$$= \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{K_{max}} S_{exp}^{(i)}(t'_k) S_{sim}^{(i)}(t'_k - t_m) \quad (m = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

$S_{sim}^{(i)}(t)$ を計算するためには、衝撃位置 (X_{sim}, Y_{sim}) が必要であるが、 E_r は $S_{sim}^{(i)}(t)$ に対して非線形のパラメータであるため、繰り返し計算により式(5)を最小にする衝撃位置 (X_{sim}, Y_{sim}) の値を決定する。図 6 に衝撃時の音圧測定から、衝撃位置の決定、衝撃力の時間変化の同定までのフローチャートを示す。衝撃位置 (X_{sim}, Y_{sim}) を変化させて E_r を繰り返し計算し、 E_r を最小にする (X_{sim}, Y_{sim}) を求め、衝撃位置の同定値 (X, Y) とする。そして、式(3)よりこの位置での衝撃力の時間変化を求める。

(3) 衝撃位置と衝撃力の同定結果

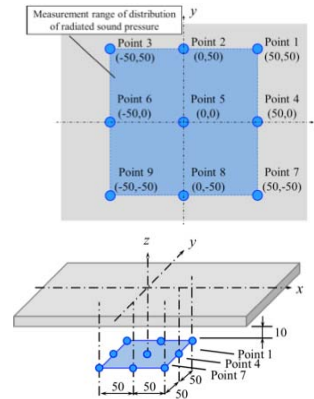


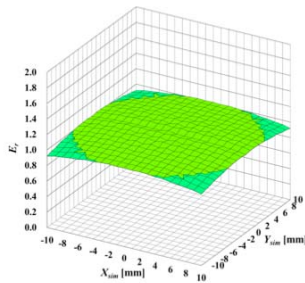
図 7 衝撃音の測定位置 (Point 1~Point 9)

図 7 に示す $z = -20$ mm、 $x = -50 \sim 50$ mm、 $y = -50 \sim 50$ mm の平面内の音圧データを用いて、 $X_{sim} = -10 \sim 10$ mm、 $Y_{sim} = -10 \sim 10$ mm の平板上における E_r の分布を算出した。図 8 に E_r の (X_{sim}, Y_{sim}) に関する分布を示す。図 8 (a), (b), はそれぞれ図 7 に示す Point 1~9 において、(c) は 1 mm 間隔 ($101 \times 101 = 10201$ 点) で測定した音圧から求めた E_r の分布である。ここで、音圧の測定時刻 $t'_k = k \Delta t'$ ($\Delta t' = 0.005$ ms, $k = 1 \sim K_{max}$, $K_{max} = 70$)、 A_n の個数 $N = 30$ とした。

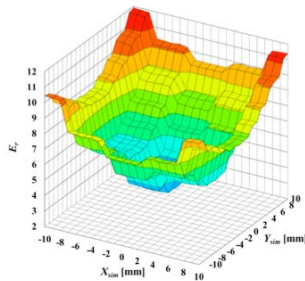
図 7 (a) より、使用する音圧の測定位置が 1 点の場合には、 E_r はほぼ一定の値をとってお

り, $X_{sim}, Y_{sim} = -10 \sim 10$ mm の範囲内では明らかな極小値は判別できず, 衝撃位置を同定することができない. 図 10 (c)は x 軸方向, y 軸方向共に複数の測定位置でのデータを用いているため, 同定位置を求められるが, E_r の分布は, 5 mm 間隔の階段状となっているため, 衝撃位置同定の分解能は 5 mm 程度である. 図 8 (c)に示した 1 mm の分解能で測定した音圧分布から得られた E_r は明確な極小値を持った下に凸な分布となっている.

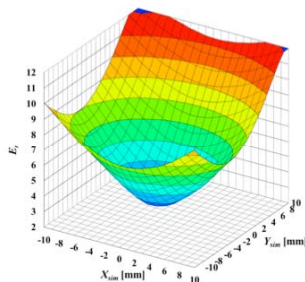
図 9 に同定された衝撃力の時間変化を示す. 多くの情報を使うに従い, 安定した衝撃力の時間変化となり, 若干であるが, 衝撃棒に貼り付けたひずみゲージから算出した衝撃力の時間変化の分布に近づき値行くことがわかる. また, 1 mm 程度の空間分解能で音圧を測定できれば, 1 mm 程度の誤差で衝撃位置同定が可能であると考えられる.



(a) point No.5, 1 点



(b) Point No. 2, 4, 5, 6, 8, 5 点



(c) 1mm 間隔, 10201 点

図 8 種々の音圧測定量における E_r の分布

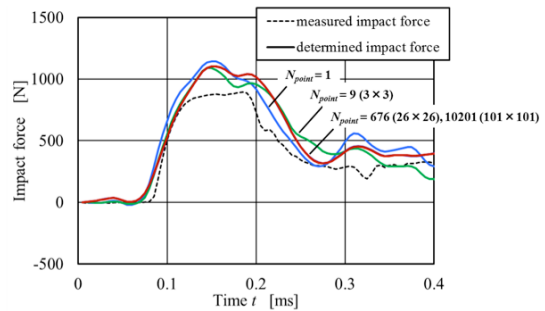


図 9 同定された衝撃力の時間変化

(4) 衝撃圧力の同定

$(X_{exp}, Y_{exp}) = (5, 5)$ [mm]に衝撃体を落下させたときの $z = -20$ mm, $x = -45 \sim 45$ mm, $y = -45 \sim 45$ mm の平面内の $M = 100$ 点の音圧データを用いて, $x = -10 \sim 10$ mm, $y = -10 \sim 10$ mm の衝撃領域における平板上面で衝撃圧力の同定値を算出した. 図 10 に, 種々の時刻における領域内の衝撃圧力の分布を示す. ここで, 図に示す領域の衝撃圧力は一定と考え, 4 つの領域各々の衝撃圧力の同定を行っている. 実際に衝撃を加えた位置の衝撃圧力が最も大きくなり, 衝撃圧力の平面分布の同定ができていることが分かる. 分割を大きくすると解が発散してしまった. 正則化手法を取り入れることで, 発散を抑えて空間分解能を上げることが可能であると考えている.

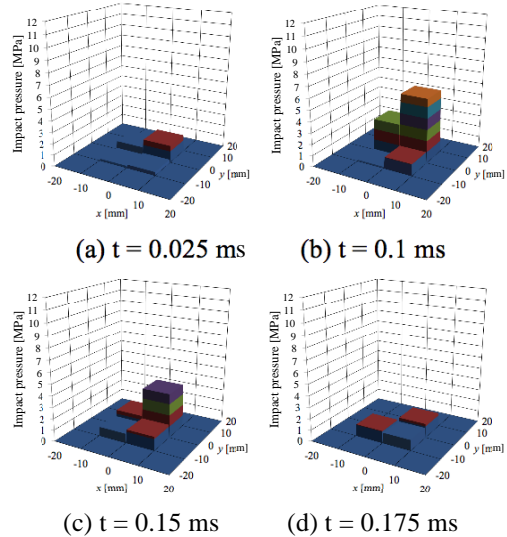


図 10 種々の時刻における衝撃圧力の分布

(5) 欠陥位置および形状の同定

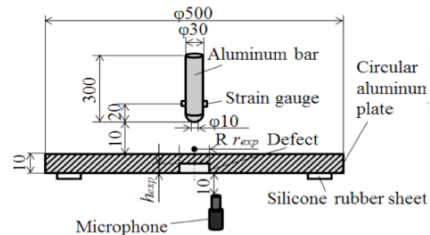


図 11 平板下部に凹みを付けた円盤の衝撃

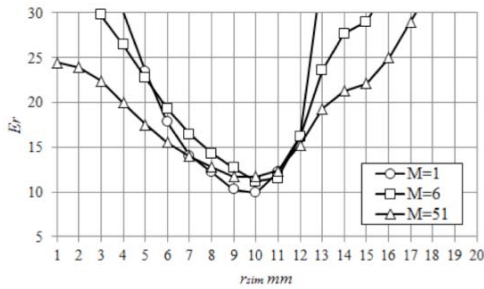


図 12 凹み半径 r_{sim} と E_r の関係
(M は放射音の測定位置の数)

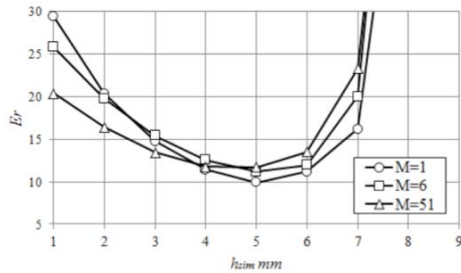


図 13 凹み深さ h_{sim} と E_r の関係
(M は放射音の測定位置の数)

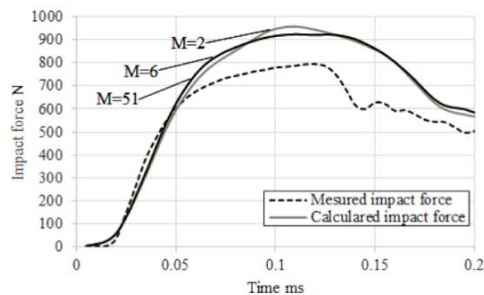


図 14 欠陥を有する被衝撃体に対して得られた衝撃力の時間分布
(M は放射音の測定位置の数)

図 11 に示すように、平板下部に円柱状の凹みを付け、凹み半径 r 、深さ h の同定を行った。衝撃位置の同定を行う手法の拡張として、有限要素法解析において、凹み半径 r_{sim} 、深さ h_{sim} を変化させながら式(4)で示す E_r を算出し、 E_r が最小となる欠陥位置や形状の値を同定値として求めることができる。図 12 に凹み半径 r_{sim} と E_r の関係を示す。図より、 $r_{sim} = 10\text{mm}$ で E_r は最小となり、実際の凹み半径と一致している。図 13 に凹み深さ h_{sim} と E_r の関係を示す。図より、 $h_{sim} = 5\text{mm}$ で E_r は最小となり、実際の凹み深さと一致している。これより、凹み半径および高さは、 1mm 程度の誤差で同定できることが確認された。図 14 に得られた衝撃力の時間変化を示す。放射音の測定位置の点数が増加しても、衝撃力の時間変化はあまり変化せず、円形状のくぼみの場合は、2 点以上の情報があれば衝撃力が同定できることがわかった。欠陥形状が複雑な場合には、多数の位置での音圧分布を用いることにより、

同定精度が向上できると考えている。

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)

[学会発表] (計 5 件)

① FEM 解析を利用した放射音による平板上の二点に加えられた衝撃力と衝撃位置の同定、土屋右騎、辻 知章、武田 俊、日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス、2013. 10.

② AN IDENTIFICATION OF THE IMPACT FORCE IMPACTED BY THE HOLLOW CYLINDER BY USING, Takayuki Isaka, Tomoaki Tsuji, Yuya Tominaga, 2013 Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials & Structures (JSMAMS), 2013.11, 杭州 (中国)

③ 平面上の放射音圧分布の測定による衝撃力と衝撃位置の同定、八尋祥吾、辻知章、土屋右騎、査読無し、日本機械学会 第 27 回計算力学講演会、2014. 11.、岩手大学

④ 衝撃を受ける平板から生じる放射音の測定と有限要素法解析、西河 武、辻 知章、八尋 祥吾、飯野 将吾、日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス、2015. 11.、東京工業大学

⑤ 衝撃を受ける円板からの放射音による円板内欠陥の同定、飯野 将吾、辻 知章、日本材料学会関東支部 学生交流会、2015. 11.、東京都市大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 知章 (TSUJI, Tomoaki)

中央大学理工学部・教授

研究者番号：80188531