

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)辻 知章\*<sup>1</sup>, 川田 祐嗣\*<sup>2</sup>, 鈴木 喜浩\*<sup>2</sup>  
山口 友康\*<sup>2</sup>, 野田 直剛\*<sup>1</sup>Identification of an Impact Force by Radiated Sound  
from the Impacted body  
(Non-Contact Measuring Experiments of the Identification  
by the Inverse Analysis)Tomoaki TSUJI, Yuji KAWADA, Yoshihiro SUZUKI,  
Tomoyasu YAMAGUCHI and Naotake NODA

The radiated sound from the impacted body must have the information with respect to the impact force. We have proposed the method in order to identify the impact force by analyzing the radiated sound from the impacted body. This sound is measured by the microphone and the impact force can be given by the inverse analysis using FFT. In this paper, availability of the method is studied by the many experiments. It is confirmed that the impact force can be given when the microphone is set at far from the impacted body. Moreover, the efficiency of this method for the inelastic body is concerned.

**Key Words:** Stress Wave, Inverse Problem, Experimental Stress Analysis, Nondestructive Inspection, Non-Contact Measurement, Impact Force, Impact Sound, Radiated Sound, FFT

## 1. 緒言

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<sup>(1)~(3)</sup>は、衝撃力を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。この方法は衝撃力と衝撃体のひずみ応答との間の関係が畳み込み積分で表されることを利用したもので、予め実験によって衝撃力とひずみゲージにより測定したひずみ応答との間の伝達関数を求めておき、この伝達関数を用いて任意の衝撃力が与えられたときのひずみ応答から、その衝撃力を同定するものである。一方、衝撃により生じる放射音には、衝撃力に関する何らかの情報が含まれているはずである。放射音の測定による衝撃力の同定が出来れば、衝撃体や被衝撃体から離れた位置に置いた測定素子による非接触測定が可能であり、また、ひずみゲージによる測定のように、測定素子の張り付け等の手間がいらぬ。衝撃により放射される音を測定し、衝撃力を同定する実験的試みが著者らにより報告されている<sup>(4),(5)</sup>が、衝撃体としては丸棒(ジュラルミン)、被衝撃体としては角棒(鋼材)のみの結果であり、また、被衝撃体と音の測定に用いたマイクロフォンとの距離が数ミリメートルと非常に小さい値であった。そこで本論

文では、上記の衝撃体と被衝撃体に加え、衝撃体として軟鋼球を、被衝撃体として軟鋼丸棒、アクリル丸棒、ポリエチレン丸棒、木材の角棒を用いるとともに、マイクロフォンを1メートル程度離して衝撃力の測定実験を行い、衝撃音による衝撃力の同定が実用上十分可能であることを実証する。

## 2. 放射音による衝撃力の同定システム

2.1 同定原理 ひずみと衝撃力との関係と同様に、衝撃力 $f(t)$ とマイクロフォンにより測定される音の時間変化 $p(t)$ との間が以下のたたみ込み積分で表わされると考える。

$$p(t) = \int_0^t h(t-\tau) \cdot f(\tau) d\tau \quad (1)$$

ここで、 $h(t)$ はシステムのインパルス応答関数であり、式(1)をラプラス変換すれば、畳み込み則により次式を得る。

$$P(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (2)$$

ここで、 $\omega$ は周波数を表し、大文字はラプラス変換を表す。(2)より、音圧と衝撃力はラプラス変換された領域において線形性を持つ事が分かる。従って、伝達関数 $H(\omega)$ が与えられれば、衝撃力 $f(t)$ は、音の時間変化のラプラス変換値 $P(\omega)$ を用いて、次式により与えられる。

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} H(\omega)P(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (3)$$

\* 原稿受付 1998年3月20日。

\*<sup>1</sup> 正員、静岡大学工学部 (〒432-8561 浜松市城北3-5-1)。\*<sup>2</sup> 静岡大学工学部大学院。

E-mail: t-tsuji@shizuoka.ac.jp

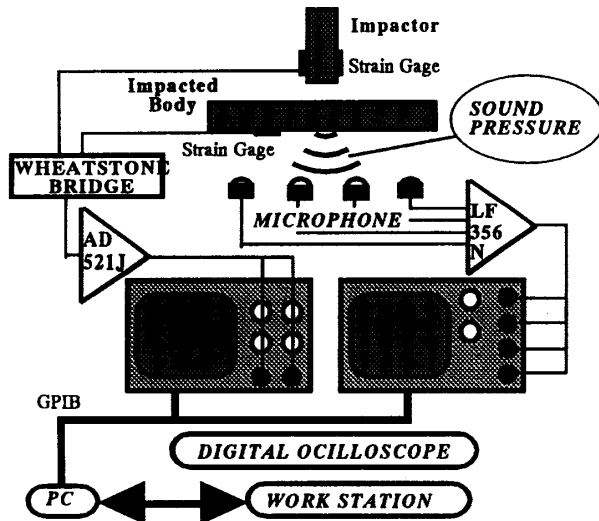


Fig.1 The measuring system of the sound and the strain.

上式により衝撃力を同定するには、伝達関数  $H(\omega)$  が事前に決定されている必要がある。本研究では、予備実験を行い、後述の衝撃体に取り付けられたひずみゲージで直接的に与えられる衝撃力  $f_0(t)$  と音の時間変動  $p_0(t)$  より、 $F_0(\omega)$ 、 $P_0(\omega)$  を求め、次式より伝達関数  $H(\omega)$  を決定する。

$$H(\omega) = \frac{F_0(\omega)}{P_0(\omega)} \quad (4)$$

また、ラプラス変換や式(3)で表わされる逆ラプラス変換は、高速フーリエ変換 (FFT) を用いて行う。

2.2 測定システム 本研究で用いた測定システムを図1に示す。衝撃棒に張り付けたひずみゲージによる衝撃力の直接測定と、被衝撃体に取り付けたひずみゲージによる衝撃力の同定<sup>(1)</sup>も同時に出来るように、2チャンネルと4チャンネルのデジタルオシロスコープから構成されている。被衝撃体からの放射音は、無指向性の小型コンデンサーマイク ( $\phi 10$  mm) により捕えられ、オペアンプを通してデジタルオシロスコープで8ビットのデジタルデータに変換される。一方、ひずみゲージ (KYOWA, KSP-2-E4) により捕えられたひずみデータは、ブリッジ回路、アンプを介してデジタル化される。デジタルオシロスコープにより記録されたデータは、GPIB を介してパソコンに送られ、前処理を施した後に、ワークステーション上で逆問題解析が行われる。ここで、本実験システムでは、被衝撃体以外 (主に衝撃体) から来る音も混入したデータを測定していることになるが、被衝撃体以外の音圧のレベルが相対的に小さければ、同定が可能であると考えられる。

2.3 予備実験と同定実験 2.1 節で述べたように、衝撃力の同定を行うには伝達関数が決定されていなければならない。本実験では、予備実験を行い、被衝撃体の

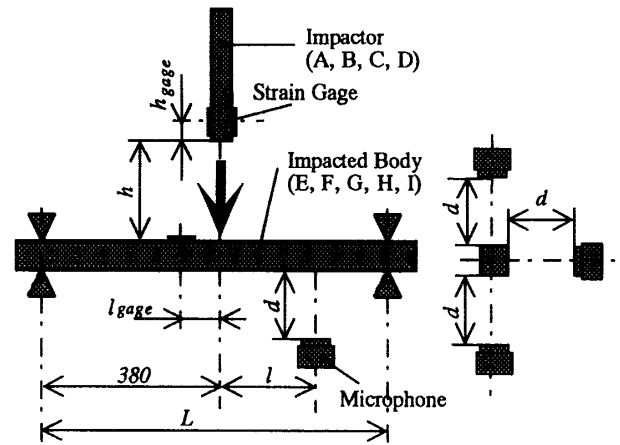
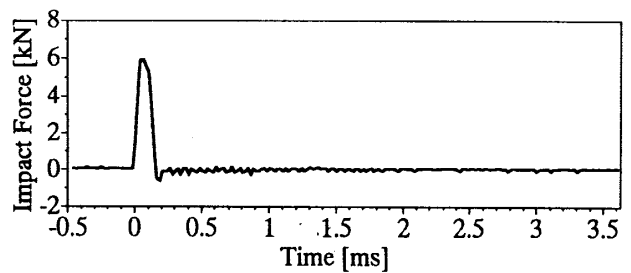
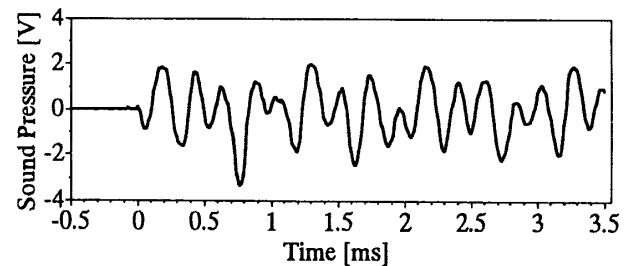


Fig.2 Experimental setting up.



(a) Impact force by the strain gage.



(b) Sound pressure.

Fig.3 The time dependence of the impact force by the strain gage and the sound pressure by the microphone (The microphone was set at  $l = 200$  mm,  $d = 10$  mm. Impacted by the bar A with  $h = 120$  mm).

伝達関数を決定する。予備実験、同定実験共に、衝撃は図2に示すように、高さ  $h$  からガイドを通して衝撃体を自由落下させて被衝撃体に衝突させることにより与えている。被衝撃体には、両端支持された棒を用いている。支持される部分の長さは、以下の実験において全て  $L=760$  mm である。図中  $d$  は、被衝撃体の上面、下面、側面からマイクロフォンまでの距離、図中  $l$  は、衝撃点、すなわち、被衝撃体のスパンの中央からマイクロフォンまでの水平距離である。被衝撃体には  $l_{gage} = 154$  mm (被衝撃体 E)、130 mm (被衝撃体 F) の位置にひずみゲージも取付けてあり、井上ら<sup>(1)</sup>の方法によるひずみデ

Table 1 Summary of the experiments.

N of Fig.	Im-pacted body	Placement of microphone		Calibration		Identification	
		$l$ [mm]	$d$ [mm]	im-pactor	$h$ [mm]	im-pactor	$h$ [mm]
4	E	200	10	A	120	B	120
5	E	200	10	A	240	B	40, 140
6	E	200	10	A	160	C, D	160
7, 8	E	20-280	10	A	100	B	100
9, 10(a)	F	200	20-280	A	100	B	100
9, 10(b)	F	100	200-1000	A	150	B	150
11(a)	G	100	10	A	150	B	150
11(b)	H	100	10	A	150	B	150
11(c)	I	100	10	A	150	B	150

Table 2 The configuration of the impactors A, B, C and D.

	Configuration	Material
A	Circular rod $\phi 20\text{mm} \times 300\text{mm}$	duralumin
B	Circular rod $\phi 20\text{mm} \times 150\text{mm}$	duralumin
C	Sphere $\phi 20\text{mm}$	steel
D	Sphere $\phi 25\text{mm}$	steel

ータを用いた同定値も同時に求められる。衝撃時に放射される音のデータは、サンプリング間隔  $1\mu\text{s}$  で 4096 点、すなわち、 $T = 4.096\text{ ms}$  時間測定され、演算処理され、式 (3) の定数  $\gamma$  は  $5/T$  とした。

予備実験では、図 2 に示すように、細長い衝撃棒からなる衝撃体の先端から  $h_{\text{gage}} = 14\text{ mm}$  に取付けたひずみゲージを用い衝撃力  $f_0(t)$  を測定し<sup>(6)</sup>、同時に音の時間変動  $p_0(t)$  も測定する。図 3 に、ジュラルミン棒により軟鋼棒を衝撃した場合に、衝撃棒に貼り付けたひずみゲージより直接得られる衝撃力 (a)、およびマイクより測定した音圧の時間変化 (b) を示す。得られた  $f_0(t)$ 、 $p_0(t)$  を FFT を用いてラプラス変換し、式 (4) より伝達関数  $H(\omega)$  を決定する。なお、衝撃力、衝撃音ともに波の立ち上がりを時刻 0 としている。

衝撃力の同定実験では、衝撃により生じる音の時間変動  $p(t)$  を測定する。この時、衝撃力  $f(t)$  は不明である。 $p(t)$  をラプラス変換し  $P(\omega)$  を得、予備実験により決定されている  $H(\omega)$  を用いて、式 (3) より衝撃力の時間変動  $f(t)$  を決定する。

### 3. 衝撃実験結果

表 1 は、本研究で行った様々な放射音による衝撃力の同定実験をまとめたものである。また、表 2 と 3 に、衝撃体と被衝撃体それぞれの形状と材質を示す。以下種々の実験結果を示して行く。

Table 3 The configuration of the impacted bodies E, F, G, H and I.

	Configuration	Material
E	Rectangular rod $25 \times 25 \times 860\text{mm}$	mild steel
F	Circular rod $\phi 32\text{mm} \times 860\text{mm}$	mild steel
G	Circular rod $\phi 30\text{mm} \times 1000\text{mm}$	acryl
H	Circular rod $\phi 30\text{mm} \times 1000\text{mm}$	polyethylene
I	Rectangular rod $43 \times 43 \times 1000\text{mm}$	wood (japanese cedar)

3.1 丸棒および球による角棒の衝撃 図 4, 5, 6 に、軟鋼角棒からなる被衝撃体 E の中央に衝撃を加えた場合の結果を示す。マイクロフォンは、衝撃位置より水平方向に  $l = 200\text{ mm}$ 、被衝撃体 E 表面より  $d = 10\text{ mm}$  の位置に設置した。

図 4 は、衝撃棒 A を用いて予備実験を行い伝達関数を求め、衝撃棒 B による衝撃音から衝撃力を同定した結果である。マイクロフォンは、被衝撃体の上面、側面、下面の 3 箇所を設置してあり、同時に 3 箇所からの音のデータを測定し、それぞれから衝撃力の時間変化を同定している。太線で、衝撃棒 B に張り付けたひずみゲージから求めた衝撃力の実測値の時間変化を示してある。被衝撃体の上面 (d) と下面 (f) のマイクロフォンからの同定結果は、実測値と良く一致している。これに比べ、側面に設置したマイクロフォンからの同定結果 (e) は、実測値と若干のずれがある。音圧の時間変化の図 (a) ~ (c) を見ると、側面からの音のレベル (b) は、上、下面からのレベルに比べ  $1/5$  程度と小さく、特に、立ち上がり付近の減少は著しい。この理由としては、衝撃力により被衝撃体内を伝わり表面に達する弾性波は、最初、主に衝撃力方向に振動しており、時間がたつに従い屈折し、衝撃力に垂直な方向の成分が生じ、側面からの音として観測されるに至るためと考えられる。従って、被衝撃体側面方向に設置したマイクロフォンからの音のデータでは、被衝撃体以外からの音の情報量が相対的に大きくなり、衝撃力方向に設置したマイクロフォンからの同定結果に比べ、実測値との誤差が大きくなっていると考えられる。また、側面からの音圧が小さいことから、衝撃力方向に設置したマイクロフォンからの音のデータにおいては、被衝撃体以外からの成分は相対的にかなり小さいものと考えられる。言い換えれば、衝撃力方向にマイクロフォンを設置することにより、精度良い同定結果が得られる。

図 5 に、衝撃棒 A を  $h = 240\text{ mm}$  の高さから落下させて予備実験を行い伝達関数を求め、次に、衝撃棒 B を高さ  $h = 40\text{ mm}$  と  $h = 140\text{ mm}$  から落下させ、その時の衝撃音から衝撃力を同定した結果を示す。衝撃棒に貼ら

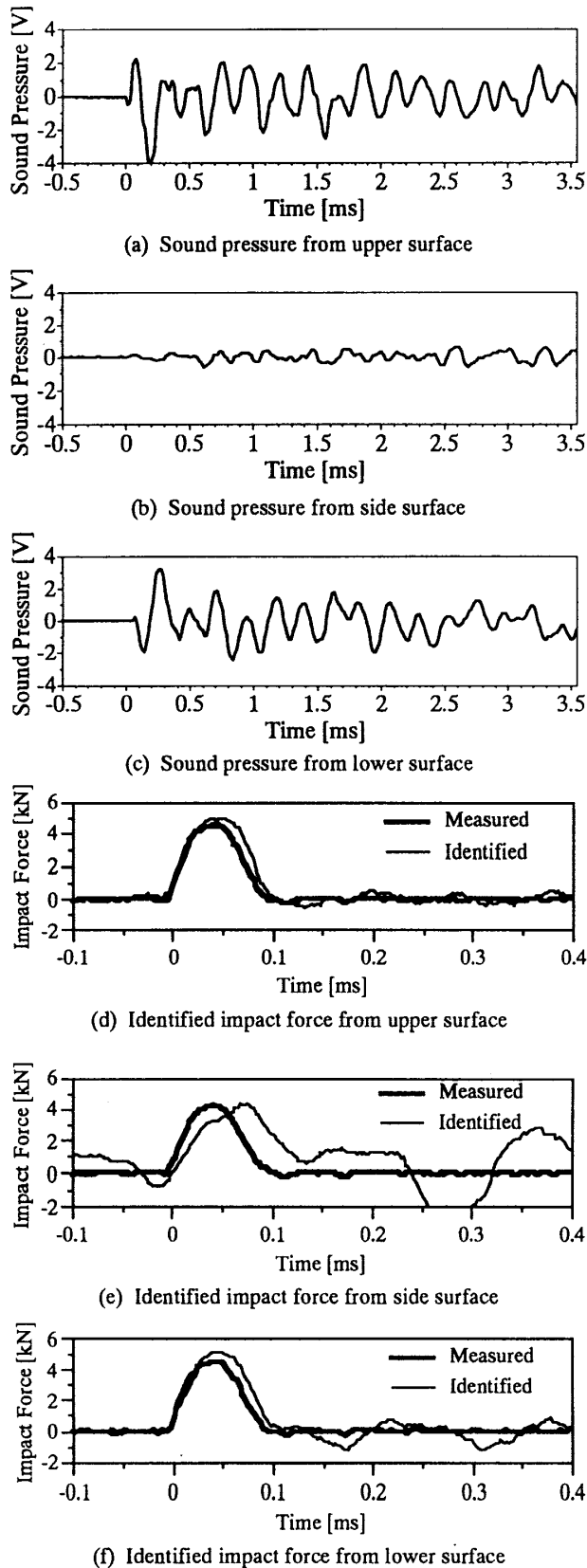


Fig. 4 Time dependence of the sound pressure by the microphone and the identified impact force by the impactor B with  $h = 120$  mm. (The microphones are set at  $l = 220$  mm,  $d = 10$  mm from upper, side and lower surface of the impacted body E. The impactor A with  $h = 120$  mm was used to obtain the transfer function.)

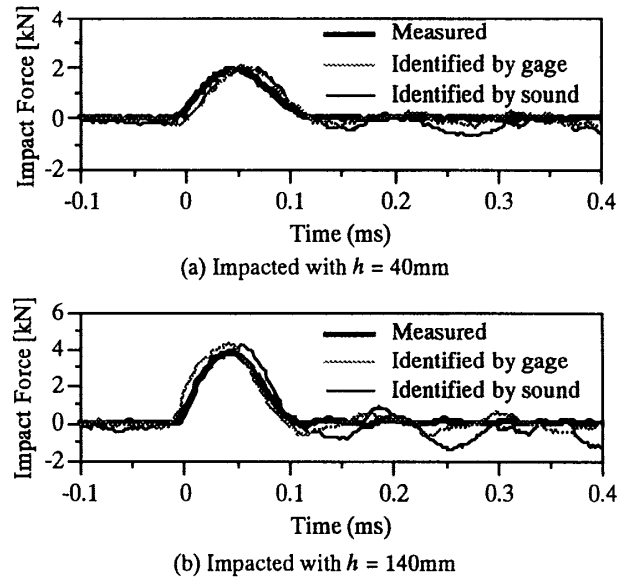
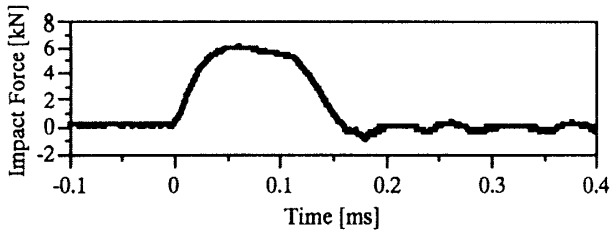


Fig. 5 Time dependence of the identified impact force by the impactor B with  $h = 40$  and  $140$  mm. (The microphone was set at  $l = 200$  mm,  $d = 10$  mm from the upper surface of the impacted body E. The impactor A with  $h = 240$  mm was used to obtain the transfer function.)

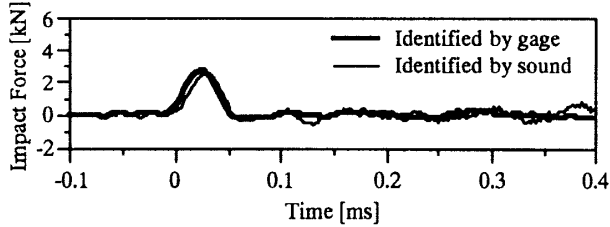
れたひずみゲージからの実測値と、被衝撃体 E の上面、中央より  $150$  mm の位置に貼られたひずみゲージから同定した結果も同時に示してある。落下高さが  $h = 40$  mm と弱い衝撃力においても、良好な同定結果が得られている。また、 $h = 140$  mm の場合の同定結果も、良好な同定結果が得られている。

図 6 は、球 C, D による衝撃力の同定結果である。予備実験は、衝撃棒 A を用いて行われ、伝達関数を決定した。被衝撃体に貼られたひずみゲージにより同定した結果も同時に示してある。ひずみゲージによる同定結果と音による同定結果は良く一致している。予備実験で用いた衝撃体と、形状の全く異なる衝撃体による衝撃力も精度良く同定出来ることが分かる。衝撃体の形状が異なれば、衝撃体から来る音のデータはかなり違うものと考えられる。衝撃体に棒を用いて決定した伝達関数から、球による衝撃力が精度良く同定できたことから、ここで測定している音のデータに含まれる衝撃体からの情報は、相対的に小さいものと考えられる。

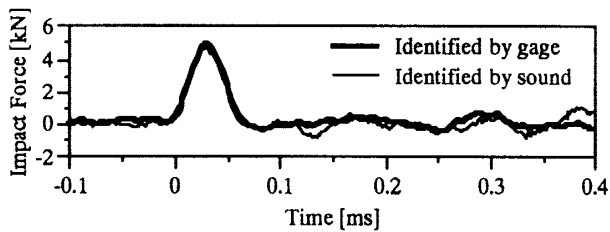
3.2 マイクロフォンの位置による影響 (丸棒による丸棒の衝撃) マイクロフォンの位置は、3次元的に自由に変更することが可能である。まず、被衝撃体表面からの距離を  $d = 10$  mm と固定し、上面、側面、下面の 3 方向にマイクを設置し、被衝撃体に沿ってマイクを移動させて、すなわち  $l$  を変化させて測定を行った。全て、予備実験には衝撃棒 A を、同定実験では衝撃棒 B を、高さ  $h = 100$  mm から、丸棒からなる被衝撃体 F



(a) Impact force impacted by rod A to obtain the transfer function.



(b) Identified impact force impacted by sphere impactor C.



(c) Identified impact force impacted by sphere impactor D.

Fig. 6 Time dependence of the impact force to obtain transfer function and the identified impact force by the sphere impactor C and D with  $h = 160$  mm. (The microphone was set at  $l = 200$  mm,  $d = 10$  mm from the upper surface of the impacted body E. The impactor A with  $h = 160$  mm was used to obtain the transfer function.)

に落下させて行った。図 7 は  $l = 80, 280$  mm の同定結果である。被衝撃体として丸棒を用いても本法による同定は有効な事が分かる。また、マイクの水平位置が変化してもさほど同定結果は変っていない。しかし、側面に設置したマイクによる同定結果は、上、下側表面の結果に比べ、衝撃音が小さいため誤差が比較的大きくなっている。より詳しくマイクの水平位置  $l$  の影響を調べるために、次式で表される、同定結果  $F_{ident.}$  と直接測定による結果  $F_{mea.}$  の二乗平均誤差  $R$  を、最大衝撃力  $F_{max.}$  で規格化した値、 $R/F_{max.}$  を用いる。

$$R = \sqrt{\frac{M}{\sum_{n=1}^M} \frac{(F_{ident.}^{(n)} - F_{mea.}^{(n)})^2}{M}} \quad (5)$$

図 8 は、 $l$  と二乗平均誤差  $R/F_{max.}$  の関係を表わしたものである。ここで、式 (5) による誤差は、時刻  $t = -0.15$  から  $0.35$  ms ( $M = 500$  点) において計算している。側面のマイクからの測定は、上、下面に比べかなり大きな誤差を

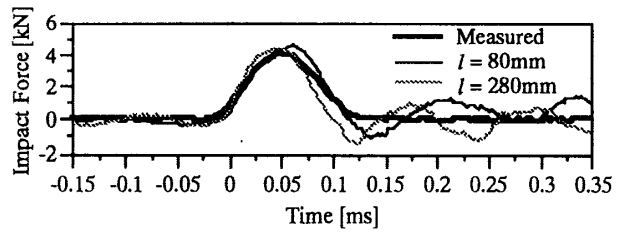


Fig. 7 Time dependence of the identified impact force with respect to the horizontal placement of the microphone. (The microphone was set at  $l = 80$  and  $280$  mm,  $d = 10$  mm from the upper surface of the impacted body F. The impactor A with  $h = 100$  mm was used to obtain the transfer function and the impactor B with  $h = 100$  mm was used to estimation.)

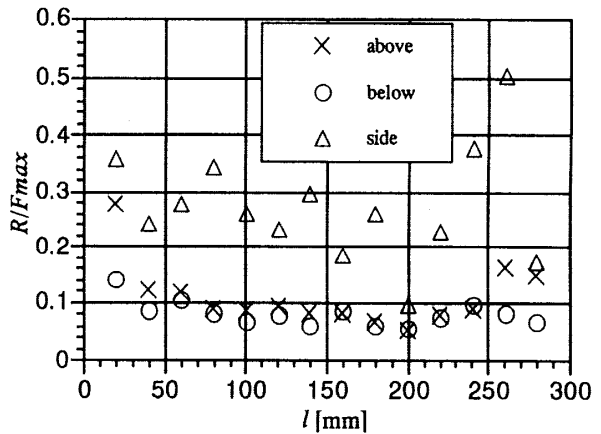


Fig. 8 Relationship between the least square error  $R$  and the horizontal position of the microphone  $l$ . (The microphone was set at  $l = 20$  to  $280$  mm,  $d = 10$  mm from the upper, side, and lower surface of the impacted body F. The impactor A with  $h = 100$  mm was used to obtain the transfer function and the impactor B with  $h = 100$  mm was used to estimation.)

含むものの、上、下面の結果はマイクの水平位置  $l$  の値に関係無く、ほぼ一定の精度で測定出来ることが分かる。

次に、マイクロフォンの水平位置は固定し、被衝撃体の下面に設置し、下面からマイクロフォンまでの距離  $d$  を変化させて測定した結果を図 9, 10 に示す。図 9(a) は、 $d = 100, 280$  mm ( $l = 200$  mm,  $h = 100$  mm) の結果を、図 9(b) は、 $d = 500, 1000$  mm ( $l = 100$  mm,  $h = 150$  mm) の結果をそれぞれ示している。遠方に離れるに従い音圧が小さくなることから、同定結果と実測値の差は大きくなるものの、図 9(b) より、 $d = 1000$  mm に置いたマイクロフォンを用いても、最大衝撃荷重および衝撃力の時間変化とも十分同定可能であることが分かる。図 10 は、式 (5) に示した二乗平均誤差と、マイクロフォンと被衝撃体の距離  $d$  との関係を示し、横軸に  $d$  の対数を取り示してある。下面からのマイクロフォンの距離  $d$  が離れるに従い、誤差は増加して行くが、1 m 程度離れた所で

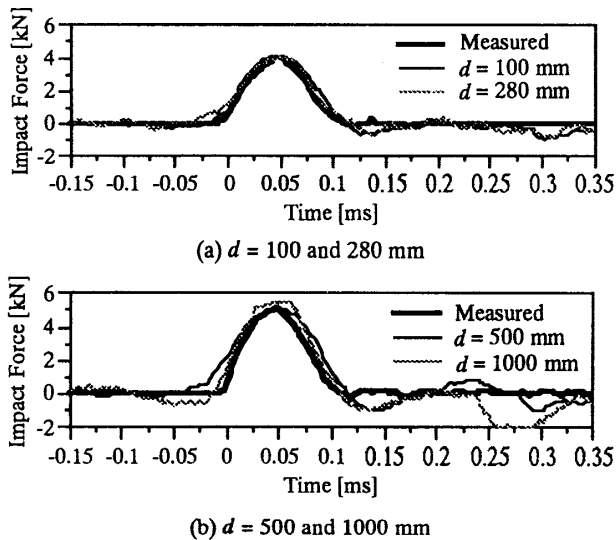


Fig.9 Time dependence of the identified impact force with respect to the distance between the microphone and the impacted body. (a) The microphone was set at  $l = 200$  mm,  $d = 100$  and  $280$  mm from the lower surface of the impacted body E. The impactor A with  $h = 100$  mm was used to obtain the transfer function and the impactor B with  $h = 150$  mm was used to the identification. (b) The microphone was set at  $l = 100$  mm,  $d = 500$  and  $1000$  mm from the lower surface of the impacted body E. The impactor A with  $h = 150$  mm was used to obtain the transfer function and the impactor B with  $h = 150$  mm was used to the identification.

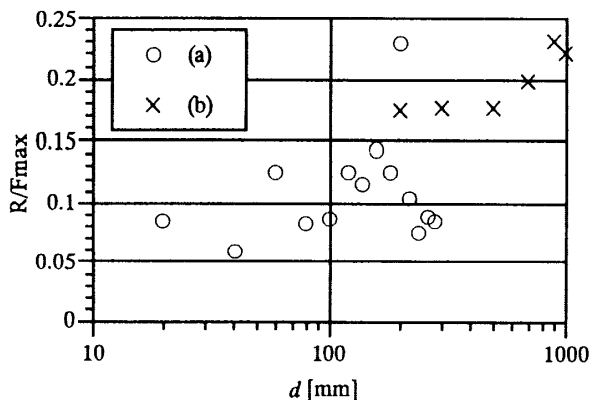


Fig.10 Relationship between the least square error  $R$  and the distance between the microphone and the impacted body  $d$ . (a)  $l = 200$  mm,  $d = 20$  to  $280$  mm,  $h = 100$  mm for the transfer function and  $h = 100$  mm for the identification. (b)  $l = 100$  mm,  $d = 200$  to  $1000$  mm,  $h = 150$  mm for the transfer function and  $h = 150$  mm for the identification.

も、二乗平均誤差は最大衝撃力の2割程度である。点音源からの音圧のエネルギーは距離の2乗に比例して減少すること、本装置は無指向性のマイクロフォンを使っていることを考えると、パラボラ状の集音装置等を用いるなどして拡散した音を集音すれば、より遠方からの測定でも、1 m 程度離れた位置で測定した結果と同程度の精度で同定することも可能であると考えられる。

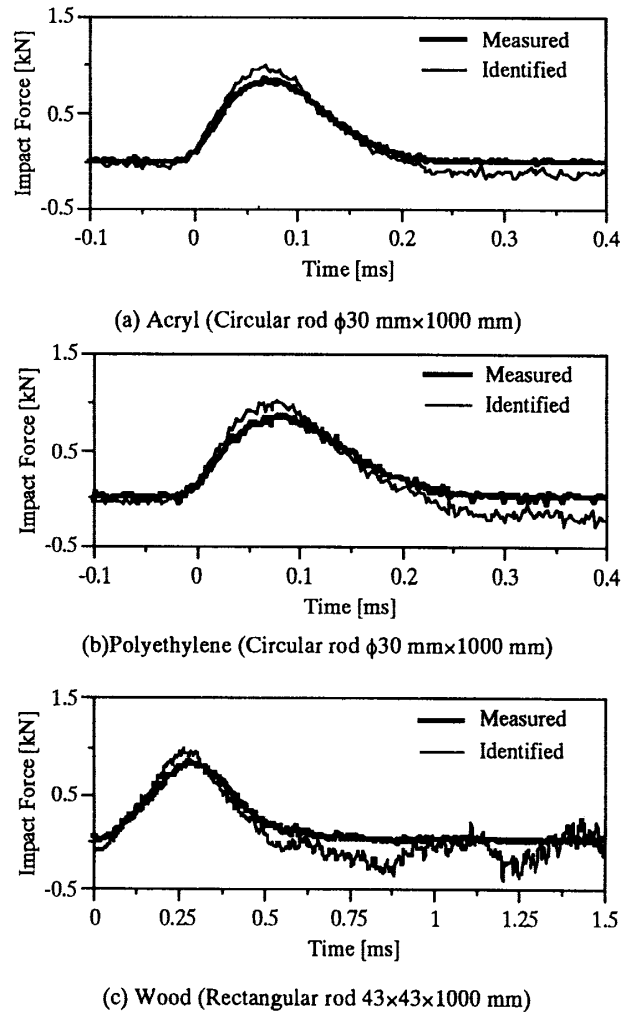


Fig.11 Time dependence of the impact force for the impacted body (a) acryl, (b) polyethylene and (c) wood. (The microphone was set at  $l = 100$  mm,  $d = 10$  mm from the lower surface of the impacted body. The impactor A with  $h = 150$  mm was used to obtain the transfer function and the impactor B with  $h = 150$  mm was used to identification.)

### 3.3 金属以外の丸棒被衝撃体からの音による同定

本研究で提案している音による衝撃の同定システムは、被衝撃体に接触させることなく測定出来ることから、ひずみゲージ等の接触型のシステムに比べ、被衝撃体の材質や形状に左右されないと考えられる。そこで、金属以外の高分子材料や木材に衝撃を加えて、本システムにより衝撃力の同定を行った結果を図11に示す。被衝撃体として、表3に示すアクリル丸棒 G、ポリエチレン丸棒 H、木製の角棒 I を用い、衝撃棒 A を 150mm の高さから落下させて予備実験を行い、衝撃棒 B を 150mm の高さから落下させた時の衝撃力の同定を行った。これらの材料は、軟鋼に比べ柔らかいため、衝撃力の最大値も小さく、また衝撃力はなだらかな時間変化を示す。衝撃棒に張り付けたひずみゲージから測定した衝

撃力の時間変化と、音による同定結果は、G, H, I いずれの被衝撃体に対しても良く一致している。ここで用いた高分子材料や、木材のようなひずみゲージによる測定が難しい被衝撃体を用いても、本システムにより衝撃力の同定が可能であることがわかる。

#### 4. 結 言

本論文では、衝撃時に生じる音を測定することにより、衝撃荷重の時間変化が実用上十分な精度で同定可能であることを、以下に示す種々の条件、材料等に対して実験的に示した。

- 1) 丸棒による、角棒と丸棒の衝撃力の同定
- 2) 鋼球による衝撃力の同定
- 3) 遠距離に置かれたマイクロフォンによる同定
- 4) アクリル、ポリエチレン、木材に衝撃を加えた時の同定

本システムにより同定を行うには、衝撃力と被衝撃体から発生する音圧の間に線形関係が成立することが必要であり、また、精度良く同定を行うには、負荷の作用方向からの音を測定することが必要であることが分かった。さらに、本研究で行った範囲では、衝撃体、被衝撃体の形状、材質を変化させても十分同定が可能であることが確認された。

#### 文 献

- (1) 井上・渡辺・渋谷・小泉, 非破壊検査, 37-4, (1988), 337.
- (2) 井上・岸本・渋谷・小泉, 非破壊検査, 39-5, (1990), 390.
- (3) 井上・上林・岸本・渋谷・小泉, 機論(A), 57-542, (1991), 245.
- (4) 川田・辻・野田・井上, 機講論, 940-37, (1994), 6.
- (5) K. Inoue, T. Tsuji, N. Noda, Experimental & Theoretical Mechanics '93, (1993), 315.
- (6) 渋谷・小泉・津田・奥屋, 非破壊検査, 25-12, (1976), 795.