

# プレス加工中の金型内部の材料挙動の可視化

神奈川県立大学 創造工学部 自動車システム開発工学科

教授・石濱 正男 名誉教授・遠藤 順一 助教・加藤 俊二 非常勤講師・萩野 直人  
(平成 22年度一般研究開発助成 AF-2010018)

キーワード：薄板金属成型、測定、平面、接触条件、超音波、モニタリング

## 1. 緒言

近年、ディスクドライブ用流体動圧軸受や医療器具など、精密部品の大量生産の要求が高まり、ネットシェイプ加工による量産化技術の開発が行われている。ネットシェイプ加工をプレス加工法で実現する場合、金型形状が製品に高い精度で転写されなければならない。近年、導入が進んでいるサーボプレスは、サーボモータを用いてスライドを昇降させる構造であるため、精度の高い加工を行うことが可能である。しかしながら、加工中においてプレスベッド、スライド中央部がたわみ、金型にわずかな隙間が生じる場合がある。このような場合、従来は熟練技術者の経験により、スライドの下死点位置の微調整や金型にシムを入れる等の対策を行っていた。プレス加工において、このわずかな隙間をセンサにより検出し、サーボ機構にフィードバックさせて、金型のモーショング・下死点を制御すればネットシェイプ加工が可能となる。しかしながら、接触式や光学式センサを用いる場合、金型にセンサを設置するための穴を追加しなければならず、金型の精度・剛性の低下を招く恐れがある。そのようなことから、金型に加工をせず計測を行うためには、非破壊検査に使用される超音波を利用することを考えた。

従来、金属接触面の面圧を、超音波を用いて計測した研究<sup>1),2)</sup>が行われ、それらを基に、動作中の軸受けの接触状態をインプロセスで計測した研究<sup>3),4)</sup>も行われている。また、竹内らは、2つの異なる材質の接触面積に比例して超音波の反射強度が変化することを示している。

本研究は金型と被加工材の接触状態を、超音波により測定する技術を確認することを目的とし、本論文では、超音波の反射・透過が接触状態によりどのように変わるかを実験的に調べた結果について報告する。まず平面のモデル金型に対し、超音波により接触状態を計測できるかどうかを調べ、次に、この手法を実際のプレス加工に適用し、隙間の変化を時系列で計測した。さらに、平面金型を用いて、超音波の反射・透過特性に対する、製品の材質および板厚の影響を調べた。

## 2. 計測原理

計測原理を Fig.1 に示す。超音波探触子より媒質 1 に入射された超音波は、材質の異なる媒質 1 および媒質 2 の境界面で透過波と反射波に分離する。この境界面における超

音波の反射率は音圧反射率と呼ばれ、式(1)で表される<sup>1)</sup>。

$$|R| = \left| \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right| \quad (1)$$

ここで、 $Z_1$  および  $Z_2$  は媒質 1 および 2 の音響インピーダンスであり式(2)で与えられる。

$$Z = \rho C \quad (2)$$

$\rho$  は媒質の密度、 $C$  は媒質内の音速である。

金属と空気の接触面においては、音圧反射率はほぼ 1 となる。そのため金型と被加工材の間に隙間が生じている場合、その隙間に存在する空気と金型の境界面では超音波がほぼ全反射し反射波が増加する。一方、透過波は減少する。

この反射および透過波を計測することにより、隙間の増減を計測することができる。実験に使用した試験片および金型の音響インピーダンスと、媒質 1 を金型としたときの反射率を Table 1 に示す。

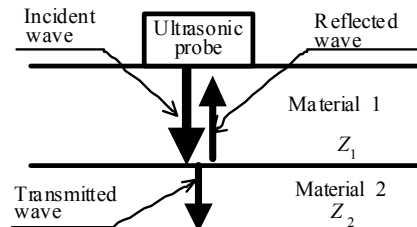


Fig.1 Propagation of ultrasonic waves at boundary between different materials

Table 1 Acoustic impedance and sound pressure reflectance

	Acoustic impedance $Z$ [Ns/m <sup>3</sup> ]	Sound pressure reflectance (material 1 is steel) $R_r$
Steel (Die)	$46.4 \times 10^6$	0.0
Air	$0.0004 \times 10^6$	1.0
Stainless steel	$45.7 \times 10^6$	0.008
Copper	$42.2 \times 10^6$	0.047
Aluminium	$17.5 \times 10^6$	0.452

## 3. 薄板を挟んだ場合の反射および透過特性

### 3.1 実験装置および実験方法

金型-試験片の境界面における超音波の反射・透過特性

を調べるための実験装置を Fig.2 に示す<sup>5)</sup>。反射および透過波を同時に計測するために、2 台の超音波探傷器 (UI-25: 菱電湘南エレクトロニクス) を使用した。超音波センサ (探触子) は直径 10mm の振動子を有し、上金型の上部および下金型の下部に設置されている。超音波は、マスター側の探傷器に接続された探触子 1 から入射される。反射波および透過波は、それぞれ探触子 1 および探触子 2 で受信され、それぞれの探傷器を介してコンピュータに保存される。これらの探傷器は、同期ケーブルで接続されており、探傷器間での時間遅れが生じないようにした。荷重は油圧を用いた 10kN の汎用加圧器を用いた。実験では探触子・金型・試験片の各境界面にグリセリンを塗布した。

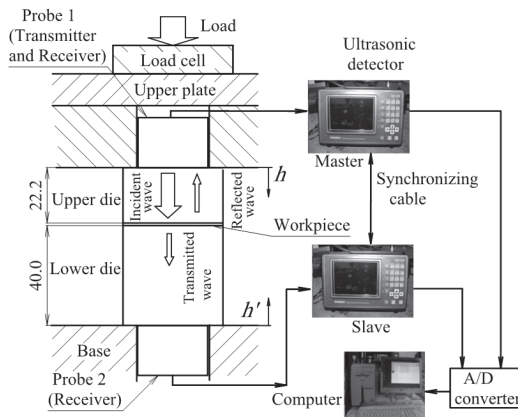


Fig. 2 Experimental apparatus used to investigate reflection characteristics at boundary between work-piece and die

モデル金型の間には薄板の試験片をはさみ、汎用加圧器を用いて鉛直下向きに荷重を加えた。モデル金型の材質は S45C とし、上型の形状は 40×40×100mm の直方体である。下型の形状は 22.2×40×100mm である。上金型の表面に隙間を模した矩形の溝を加工した金型と溝のない金型を用いた。溝の深さは 0.08mm とし、溝幅を 0.5, 1.0, 2.0mm とした。接触面圧  $P$  は式(3)を用いて求めた。

$$p = F/A \quad (3)$$

$F$  は上プレートに設置した荷重計で計測された荷重であり、 $A$  は金型と試験片の接触面積で、

接触面の寸法は 20×40mm である。

金型内に隙間が存在すると、Fig.3 に示すように反射波強度の計測結果にピークが現れる。このピークの高さを反射波高  $e_R$  とした。また、超音波の透過波も同様なピークが現れるため、そのピーク高さを透過波高  $e_T$  とした。実験は荷重を変更させながら、反射および透過波高を計測した。各条件で実験を 5 回行い、その平均を算出した。

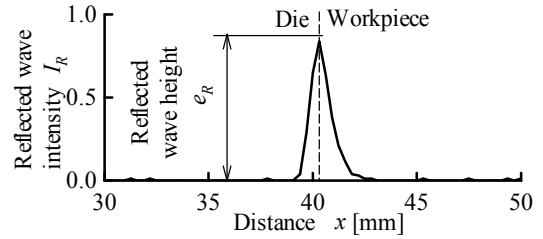


Fig. 3 Example of measured ultrasonic wave

### 3.2 実験結果および考察

まず、溝がないモデル金型を使用し、試験片を挟まない場合における超音波の反射特性を調べた。その結果を Fig.4 に示す。入射超音波の周波数を 5 MHz とした。

荷重を加えない場合、図中の上下金型の接触面 (B 面) での反射によるピークのみが見られる。これは、B 面で超音波が下型に透過せず、全反射していることを示している。金型間に空気層が存在しているためである。荷重を加えると B 面での反射が減少し、ベースと下金型の接触面 (C 面) での反射によるピークが現れる。荷重により上下金型の接触面の空気の層が減少し、超音波が透過して反射量が減少したためである。

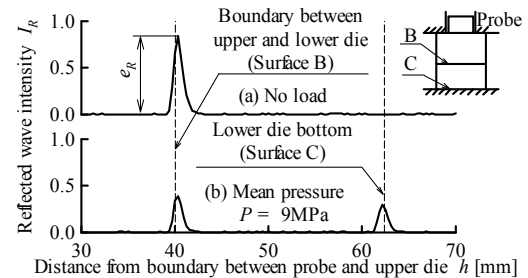


Fig. 4 Effect of pressure on reflected wave intensity of ultrasonic waves without work-piece mounted

試験片の影響を調べるために、上下金型間に厚さ  $t = 0.2\text{mm}$  のステンレス板 (SUS30) を挟み実験を行った。そのときの反射および透過波高比を Fig.5 に示す。 $E_R$  は反射波高比、 $E_T$  は透過波高比であり、式(4)、式(5)で定義される。

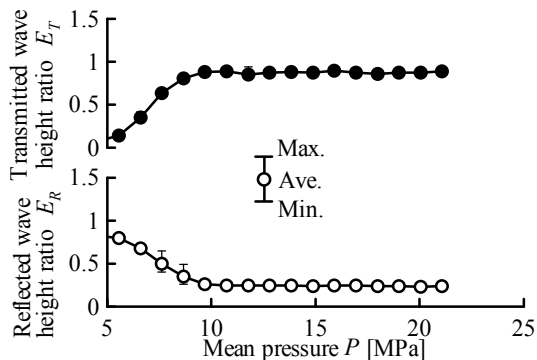
$$E_R = e_R/e_{R0} \quad (4)$$

$$E_T = e_T/e_{T0} \quad (5)$$

$e_R$  はプレス加工中に計測された反射波高、 $e_{R0}$  は無荷重の場合における反射波高、 $e_T$  はプレス加工中に計測された透過波高、 $e_{T0}$  は試験片を挟まず、上下の金型を密着させた状態の透過波高比である。

接触面圧が増加すると、反射波高比は減少し、透過波高比は増加した。これは、接触面圧の増加とともに金型と試験片の接触面積が増加し、境界面において超音波が透過し

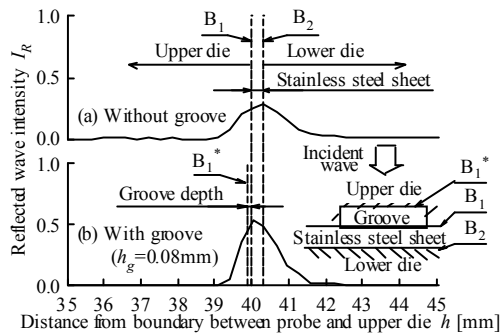
やすくなったためと考えられる。また、ある面圧以上になると反射および透過波高比がほぼ一定となる傾向が見られた。



**Fig. 5** Effect of mean pressure on height ratio of ultrasonic waves with work-piece mounted

反射および透過波高比の値がほとんど変化しないことは接触状態が変化しない、すなわち金型と試験片が密着状態になったと考えられる。この一定となる圧力を密着圧力とした。

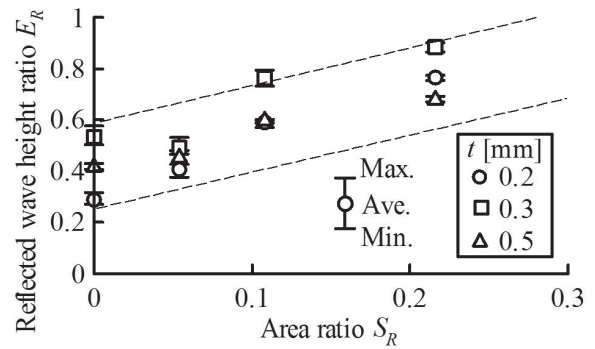
金型の間に板厚  $t = 0.3\text{mm}$  の SUS304 薄板を挟み、溝がある金型（溝幅 2mm）を用いて計測を行った。その結果を Fig.6 に示す。接触面圧は、密着圧力以上の 20MPa とした。溝がない場合に比べ、溝を加工した金型を使用した場合は、反射波高が高くなった。試験片の板厚より浅い溝の検出が可能であることを示している。



**Fig. 6** Effect of groove on reflected wave intensity with work-piece mounted

溝付型での見かけ接触面積と波高比の関係を調べた。金型と製品の境界面における超音波の照射面積  $A=109\text{mm}^2$  と隙間の面積との面積比を  $S_R$  とし、反射波高との関係を調べた結果を Fig.7 に示す。図中  $t$  は試験片板厚である。反射波高比は溝の面積に比例して増加した。

Fig.6 と Fig.7 は金型と被加工材の間に隙間がある場合に、これを超音波の反射波・透過波から計測できることを示している。



**Fig.7** Effect of groove area on reflected wave height ratio with work-piece mounted

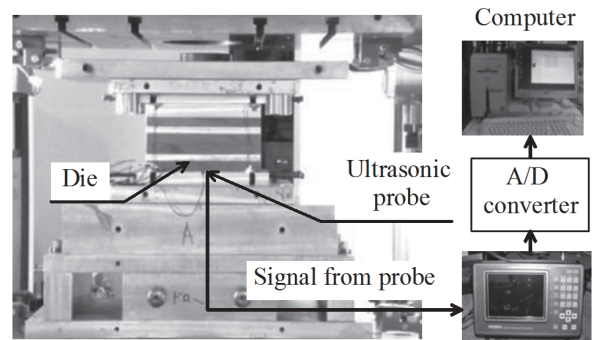
#### 4. サーボプレスを用いたインプロセス計測

本計測システムを、サーボプレスを用いた薄板のプレス加工に適用し、その有効性を検証した。

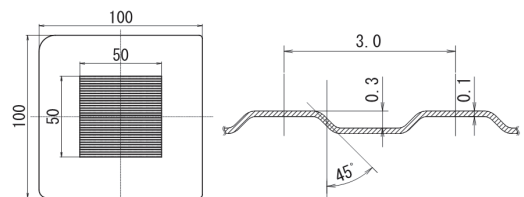
##### 4.1 実験装置および実験方法

加工中の試験片と金型の接触状態の変化を計測するシステム<sup>9),7)</sup>を Fig.8 に示す。ダブルスライド構造を有するサーボプレス（放電精密加工研究所：ZENFormer）を用いた。探触子は、下金型の下面に取り付けられ金型に密着させてある。計測データは、A/D コンバータを経由しコンピュータに保存される。入射超音波の周波数を 10 MHz とした。

加工実験では、Fig.9 に示す燃料電池用セパレータを対象とした。試験片の板厚は 0.1 mm、材質は SUS304 とした。



**Fig.8** Apparatus for measuring contact condition between work-piece and die during stamping



**Fig.9** Metallic fuel cell separator

## 4.2 実験結果および考察

実験結果の一例を Fig.10 に示す。時刻  $T = 3.5$  s 付近では、アウト・スライドが下死点近傍まで下がり、急激に反射波高比が低くなる。アウト・スライドは  $a$  点で下死点に到達し、 $a$  点まで反射波高比はほぼ一定となった。その後、インナ・スライドは緩やかに下死点へ到達し、反射波高比は少し減少した。インナ・スライドが下死点に到達すると、反射波高比が最小値かつ、ほぼ一定となった。インナ・スライドが上昇すると、反射波高比は増加した。試験片が金型より離れたことを示す。

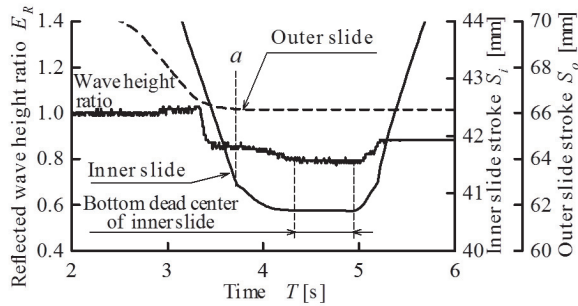


Fig.10 Example trace of reflected wave height ratio during stamping

つぎに、低周波振動モーション<sup>7)</sup>を用いて加工を行ったときの結果を Fig.11 に示す。ただし、インナ・スライドの下死点における加工打数  $N_p = 4$  とし、振幅  $A_p$  を変更した場合の計測結果である。振幅を大きくすると、反射波高比の変動幅も大きくなることが分かった。荷重の変動に伴い、隙間の大きさが変化したと考えられる。また、4 打目において、振幅が増加すると反射波高比が低下している。振動の振幅を増大させると溝の成形性が向上する<sup>7)</sup>。低周波振動の効果により金型-試験片間の隙間が減少するので、超音波の透過量が増加したと考えられる。

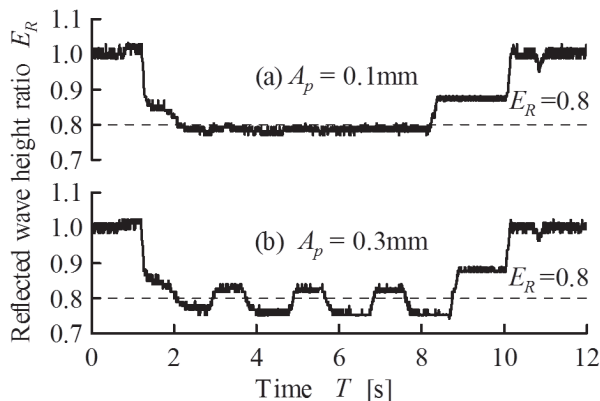


Fig.11 Example traces of reflected wave height ratio when inner slide has oscillating motion

Fig.12 に加工後の試験片と金型の隙間の形状の一例を示す。低周波振動モーションを用い、振幅 0.1mm、加工打数 4 の場合である。試験片表面形状はレーザ変位計を用い非接触計測した。図中に示したように、金型の角部に隙間が現れる。この隙間の大きさより、Fig.10 および Fig.11 の下死点における反射波高比が変化していると考えられる。

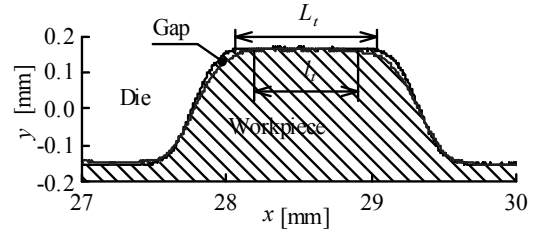


Fig.12 Gap shape between work-piece and die

そこで、隙間の大きさと反射波高比の関係を探るために下式を用いて充填率  $\tau_i$  を算出した。

$$\tau_i = l_i / L_i \quad (6)$$

$l_i$  は加工後の試験片における溝頭頂部の平坦長さ、 $L_i$  は金型における溝頭頂部の平坦長さである。 $\tau_i = 1$  の場合、金型の形状が正確に試験片に転写されていることとなる。

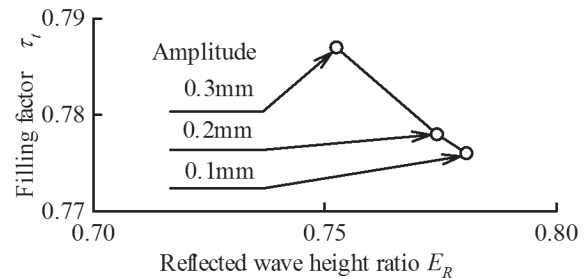


Fig.13 Relationship between filling factor and reflected wave height ratio

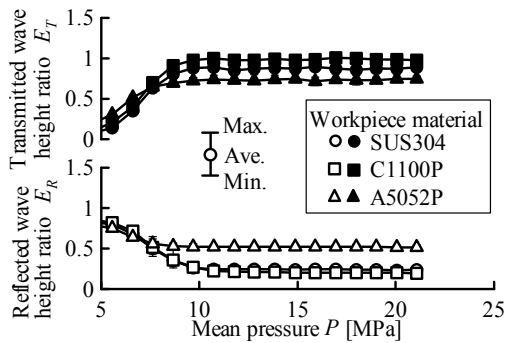
Fig.13 には 4 打目の反射波高比と充填率の関係を示す。振幅が増加すると、反射波高比は減少し、充填率は増加する。これは、Fig.7 に示した平面金型における隙間面積と波高比の関係と同様の傾向を示している。一方、セパレータ溝の傾斜面では反射した超音波が探触子に戻らない。傾斜面が多く存在する時はその影響を考慮する必要がある。超音波を用いて実際のプレス加工中の隙間の変化を計測できることが分かった。

## 5. 試験片の板厚および材質の影響

本手法を実際のプレス加工に適用するためには超音波の反射・透過特性に対する試験片の影響を調べる必要があ

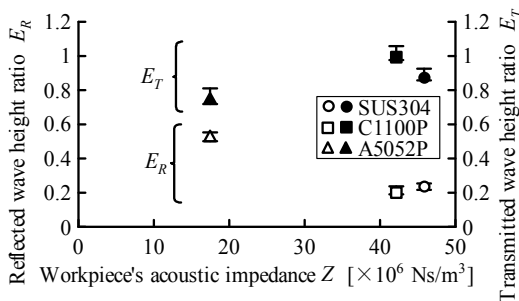
る。そこで、反射および透過波高比に対する試験片の厚さと材質の影響を調べた。

試験片の板厚を  $t = 0.5\text{mm}$  とし、試験片の材質を SUS304, C1100P, A5052P として実験を行った。実験には Fig.2 に示す装置を用い、モデル金型は溝なしを用いた。その結果を Fig.14 に示す。いずれの材質でも接触面圧の増加に伴い、反射波高比は急激に減少し透過波高比は増加する傾向が見られた。これは、前に述べたように、荷重の増加に伴い、金型と製品の接触面積が増加するためである。材質により、密着圧力が異なることが分かる。また、材質によって波高比も異なる。



**Fig. 14** Effect of work-piece material on reflection and transmission characteristics of ultrasonic waves at flat surface

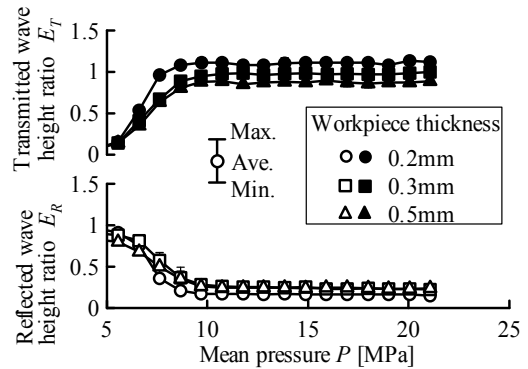
Fig.15 には反射波高比および透過波高比と試験片の音響インピーダンスの関係を示す。ただし、波高比は密着圧力より大きい場合の平均値を用いた。試験片の音響インピーダンスが大きくなると、反射波高比は減少し、透過波高比は増加することが分かった。これは、試験片の音響インピーダンスが小さくなると式(1)の音圧反射率が増加する、すなわち金型と試験片の境界での超音波の反射が増加するためである。



**Fig. 15** Effect of work-piece material on reflected and transmitted wave heights at flat surface when contact conditions are stable

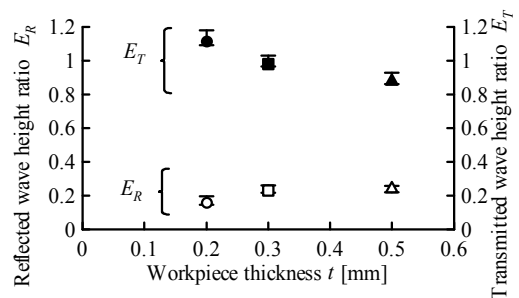
波高比に対する試験片厚さの影響を調べた。Fig.16 には試験片の材料を SUS304 とし、板厚を変更した場合の

実験結果を示す。試験片厚が異なっても、接触面圧が増加すると、反射波高比は減少し、透過波高比が増加した。しかし、密着圧力は、板厚を変更しても大きく異なることはない。密着圧力は材料による影響が大きいと考えられる。



**Fig. 16** Effect of work-piece thickness on reflection and transmission characteristics of ultrasonic waves at flat surface

さらに、反射波高比および透過波高比と試験片板厚の関係を調べた。その結果を Fig.17 に示す。図中の波高比は密着圧力より大きい場合の平均値を用いた。板厚の違いにより、反射および透過波高比が変化した。プレス加工中では、金型と試験片の境界面が2つ存在する。超音波が入射されると、それぞれの面で超音波の反射が生じ、試験片内に透過した超音波が第1および第2境界面の間で反射を繰り返す。その反射波の一部が第1境界面にて反射された反射波に加わり、その合成波が反射波として検出されると考えられる。また、同様に、試験片内で反射を繰り返した超音波の一部が第2境界面を透過してくる透過波に加わり、その合成波が検出されると考えられる。板厚が異なると、試験片内部で超音波が伝播する距離が変化する。そのため、合成波の振幅が変化することが考えられる。



**Fig. 17** Effect of work-piece thickness on reflected and transmitted wave heights at flat surface when contact conditions are stable

## 6. 結 言

本研究では、プレス加工において金型と製品の接触状態を計測する手法の開発を目的とし、実験的研究を行った。その結果、超音波の反射・透過波高を用いて金型-製品間の接触状態の変化を計測可能であることが分かった。また、それらの波高は試験片の材質および厚さに影響されることも分かった。

本研究に対し、公益財団法人天田財団より研究助成を受けた。記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 益子正己・伊東 誼：日本機械学会論文集, **34**– 257 (1968), 191–198.
- 2) 稲場千佳郎・朝永祐・伊東 誼・斎藤義夫：日本機械学会論文集C 編, **66**– 645 (1999), 1674–1680.
- 3) 竹内彰敏・木村好次・若林利明・石丸裕・森久和：日本機械学会論文集 C 編, **69**– 687 (2003), 3086–3091.
- 4) 竹内彰敏・佐藤光正・小野沢元久・菅原康則・青木弘：日本機械学会論文集 C 編, **65**– 640 (1999), 4767–4773.
- 5) Hagino, N., Endou, J., Katoh, S., Okudera, S., Maruyama, M. & Kubota, M.: Visualization of Contact Condition between Workpiece and Die During Stamping, Steel research int. 2011 Special Edition, (2011), 390–395.
- 6) Hagino, N., Endou, J., Katoh, S., Okudera, S., Maruyama, M., Kubota, M. & Murata, C. : In-process monitoring for press forming, Steel research int. 81(9), (2010), 674–677.
- 7) Hagino, N., Endou, J., Katoh, S., Okudera, S., Maruyama, M. & Kubota, M. : Processing of a metallic fuel cell separator by stamping, Proceeding of ICTP2008, (2008), 974–979.