

プレス加工中の金型内部の材料挙動の可視化

神奈川工科大学 自動車システム開発工学科
助教 小宮 聖司
(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017029)

キーワード：薄板金属成型，接触条件，超音波，FDTD，可視化

1. 緒言

プレス加工において，加工中に生じる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やスライド下死点を制御すれば，ネットシェイプ加工が可能となるだけでなく，機械を停止せずに調整が行え，全自動プレス加工システムの実現が期待される．また，数値シミュレーションによる変形解析が多くなされているが，製品形状は金型が開いた加工終了後でなければ確認することができない．解析精度を向上させるためには，加工中の製品形状を把握し，その結果を解析に反映させるシステムが求められる．

そこで，著者らは超音波を用いてプレス加工中の被加工材と金型の接触状態をインプロセスで計測するシステムの開発を行っている^{1)~10)}．この手法は，異なる材質の境界面で超音波が反射する性質を利用している^{1),11)}．

従来の研究で，平行金型や V 字型金型を用いた実験および超音波伝播シミュレーションにより被加工材の材質，厚さと金型形状に超音波の反射・特性が影響されることが分かっている．一般的に使用される垂直探触子から入射される超音波は縦波であるが，入射波が金型と被加工材の境界面に斜め入射すると縦波と横波に分かれ，接触面付近の音場は複雑となる．したがって，インプロセス計測の精度向上には縦波・横波の伝播特性を詳しく調べることが必要である．縦波の波面は進行方向に対して平行に変動し，その変動によって垂直応力が発生する．一方，横波は進行方向に対して垂直に変動し，せん断応力が生じる．そのため縦波・横波の伝播は，それぞれ垂直応力，せん断応力を用いてある程度調べることは可能である．しかし，例えば縦波の振幅の分布が一様でない場合，その不均一によってせん断応力が生じる．そのため，たとえ入射波が縦波のみであったとしても，せん断応力が生じる．よって応力分布のみで縦波，横波を分離して調べることは困難である．

弾性波の基礎式に，速度ベクトルより定義されるスカラーおよびベクトル速度ポテンシャルを用いることにより，それぞれ独立に縦波と横波の波動方程式を満たすことが知られている^{10)~12)}．したがって，速度ポテンシャルを用いれば，縦波，横波の伝播をより詳細に調べることができる．

本研究では，速度ポテンシャルを金型内の超音波の伝播解析を用いることにより，円弧金型における超音波伝播を調べた．数値解析手法には主に電磁波の伝播に用いられる有限差分時間領域法 (Finite difference time domain method, 以下 FDTD 法)^{5)~9),14),15)}を使用し，金型内の超音波音場の可視化および波高比の予測技術の開発を行った．

2. 計測原理

図 1 に示すように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．

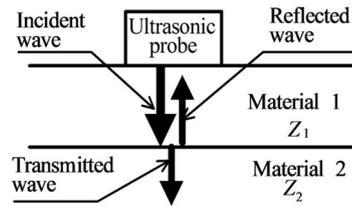


図 1 異なる媒質の境界面における超音波の反射と透過

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，縦波平面波がその波面に平行な面に入射する場合，式(1)で表される^{1),11)}．

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

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．

$$Z = \rho \times c_l \quad (2)$$

ρ は媒質の密度， c_l は媒質内の縦波音速である．

表 1 に各材質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示す．金属と空気の接触面においては，表 1 に示す様に音圧反射率はほぼ 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，その隙間の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．

薄板 V 曲げ加工を例に，超音波を用いて接触状態を調べる手法の概要を図 2 に示す．金型と被加工材が密着し，隙間がなくなると，超音波の反射量が減少し透過量が増加する．この反射波および透過波を計測することにより，接触状態の変化を調べることができる．

表 1 音響インピーダンスと音圧反射率

	Acoustic impedance $Z [\times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})]$	Sound pressure reflectance (material 1 is steel) R
Steel	46.4	0.0
Air	0.0004	1.0
Stainless steel	45.7	0.008
Copper	42.2	0.047
Aluminium	17.5	0.452

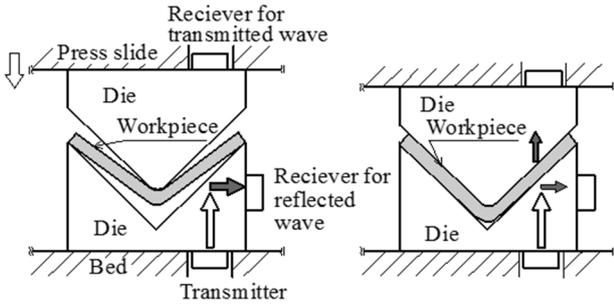


図2 薄板V曲げ加工における接触状態のインプロセスモニタリング

3. 実験装置および実験方法

まず、金型の円弧面による超音波の拡散を調べた¹⁰⁾。実験装置を図3に示す。下型のみを使用し円弧部分の曲率半径 $R=20\text{mm}$ である。金型材質はS45Cとした。金型底面に2つの探触子を設置した。探触子1は送信用、探触子2は受信用である。探触子1より入射した超音波は曲面で反射し、底面に向けて拡散していく。超音波の拡散を調べるために、探触子2を金型底面に設置した。探触子2を底面に沿って移動させ、曲面によって反射された超音波の波高を測定した。

図4には、円弧金型と被加工材の接触面における反射特性を調べるための実験装置を示す¹⁰⁾。モデル金型の間に薄板の被加工材をはさみ、重りを用いて鉛直下向きに荷重を加えた。接触面圧 P は式(3)を用いて求めた。

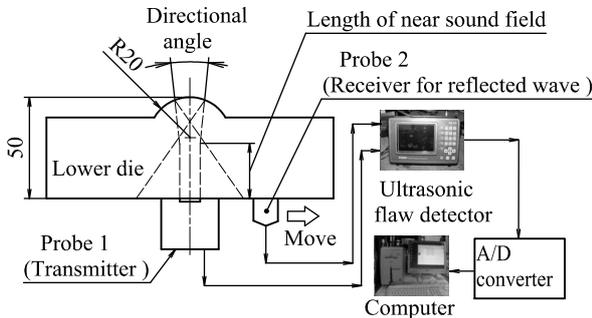


図3 金型の円弧面による超音波の拡散を調べるための実験装置

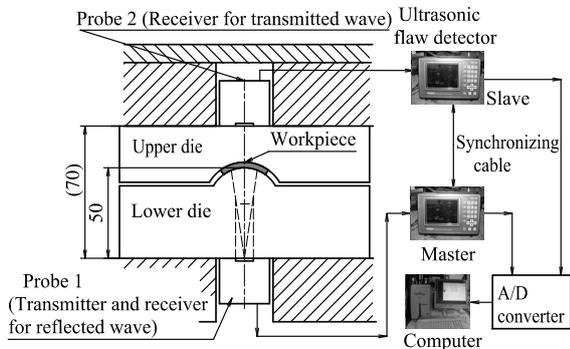


図4 円弧金型と被加工材の接触面における反射特性を調べるための実験装置

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

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 は金型と被加工材の接触面積である。超音波の周波数は 5MHz とした。モデル金型の材質はS45Cであり曲率半径を変更して実験をおこなった。被加工材はアルミ材 (A5052) 厚さを $t=0.13\text{mm}$ とした。

4. 実験結果

まず、超音波の反射特性に対する金型曲率半径の影響を調べた。その結果を図5に示す。計測された超音波の反射波高は、探触子1の中心から離れると一旦増加し、その後減少することが分かる。 $x=37\text{mm}$ において波高比のピークが現れた。 $x=50\text{mm}$ を超えると反射波高は計測されなかった。このことから、超音波は曲面で反射して金型の底面に広く拡散することが分かった。

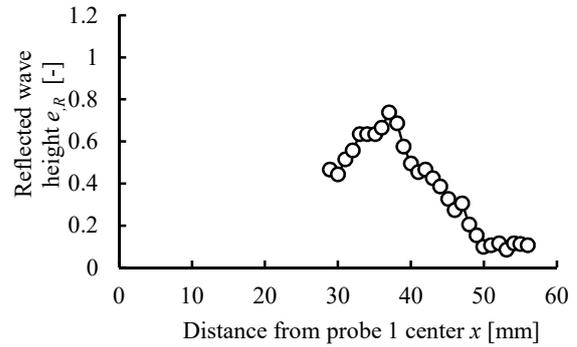


図5 型の円弧面による超音波の拡散

図6および図7は超音波の反射および透過特性に対する金型の影響を示す¹⁰⁾。図中の横軸は曲率半径の逆数、縦軸は反射波高比 $E_{R,F}$ および透過波高比 $E_{T,F}$ は次式で求められる¹⁰⁾。

$$E_{R,F} = e_R / e_{R,0} \quad (4)$$

$$E_{T,F} = e_T / e_{T,0} \quad (5)$$

ここで、 e_R と e_T はそれぞれ反射および透過波高、 $e_{R,0}$ は金型を挟まない場合の反射波高である。

図中の $1/R=0\text{mm}^{-1}$ は曲率半径無限大であり、平行金型を表す。

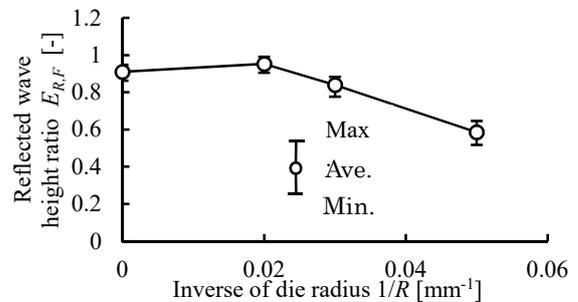


図6 反射特性に対する金型曲率半径の影響

図6より、反射特性は金型の曲率半径による影響が大きいことが分かる。反射波は図8に示すように、円弧形状の

境界面の影響を受けて、一点に集中すると考えられる。

また、接触面への入射波の入射角は、接触面に沿って連続的に変化すると考えられる。そのため、反射波の受信器を焦点付近に設置できれば、増幅された反射波を計測することができる。しかし、受信器が焦点位置から離れるにつれて反射波の強度が低下し、反射波の測定が困難になる。

このようなことから、仮に焦点位置で反射波を計測できれば、接触状態の計測に有効である。しかし、反射波の受信器が焦点位置から外れると、被加工材と金型との接触状態を測定できない場合がある。

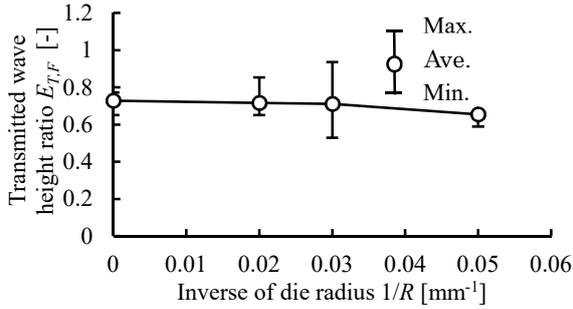


図7 透過特性に対する金型曲率半径の影響

一方、図7に示す様に透過波は金型の曲率半径に大きく影響されない。透過波は接触面1および2を通過する際にそれぞれの接触面で屈折する。接触面1においては密度の大きな媒質（鉄鋼）から密度の小さな媒質（アルミ薄板）に伝播する。その際に図8の矢印のように屈折する。接触面2では密度の小さなアルミ薄板から密度の大きな鉄鋼に透過するため、透過波は接触面1の場合とは逆方向に屈折する。被加工材が薄板の場合、その被加工材内の経路は極めて短い。そのため、透過波が入射する角度はほとんど変化しない。したがって、接触面1, 2を通過して上型へ伝播した超音波の伝播方向は、送信器から下型に入射した超音波の伝播方向とほぼ同じとなる。よって被加工材が薄板の場合、円弧状接触面を通過した透過波は、金型形状に影響を受けにくいといえる。

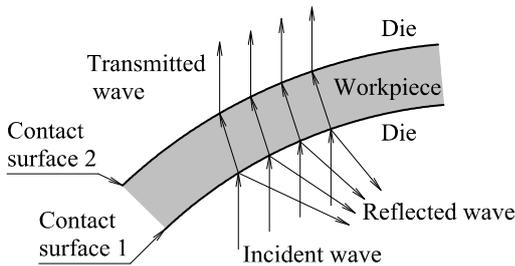


図8 被加工材と円弧金型の接触面周りにおける超音波の伝搬方向

5. FDTD法による超音波伝播解析

前章で述べたように、実験の結果より反射波は金型の形状の影響を受けやすく、透過波は円筒状の金型の形状の影響をあまり受けないことがわかった。一方、実験のみでは金型内で超音波がどのように伝播しているのかを検証することは困難である。そこで、FDTD法による超音波伝播解析を行い、実験結果との比較をおこなった。

5.1 基礎式および計算方法

超音波探触子から入射した超音波は、塑性変形を伴わず、弾性波として媒質内を伝播する。等方性を有する媒質において、 y 方向の音場が一樣とした場合の弾性波の基礎式を式(6),および式(7)に示す^{13),14)}。式(6)はフックの法則、式(7)は粒子の運動方程式である。

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{zz} \\ T_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{13} & 0 \\ c_{13} & c_{33} & 0 \\ 0 & 0 & c_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} \\ \frac{\partial \dot{w}}{\partial z} \\ \frac{\partial \dot{u}}{\partial z} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \\ \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 T_{xx}, T_{zz} は x, z 方向の垂直応力、 T_{xz} はせん断応力、 \dot{u}, \dot{w} はそれぞれ x, z 方向の粒子速度である。また c_{ij} はスティフネス行列の成分、 ρ は媒質密度である。

入射した縦波は進行方向に対して平行に変動し、その変動によって垂直応力が発生する。一方、横波は進行方向に対して垂直に変動し、せん断応力が生じる。そのため縦波・横波の伝播は、それぞれ垂直応力、せん断応力を用いてある程度調べることが可能である。しかし、振幅分布が一樣でない場合、その進行に伴ってせん断応力が発生する。また、異なる材質の境界面に斜め入射によって縦波から横波へのモード変化が生じ、縦波、横波を分離して識別する事は難しい。

一方、弾性波の基礎式に速度ベクトルより定義されるスカラおよびベクトル速度ポテンシャルを用いると、それらはそれぞれ独立に縦波と横波の波動方程式を満たすことが知られている^{12)~14)}。このスカラ・ベクトル速度ポテンシャルを超音波伝播解析に適用した^{9),10)}。

粒子速度ベクトル $\dot{\mathbf{u}} = [\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}]$ をスカラ速度ポテンシャル ϕ およびベクトル速度ポテンシャル $\Psi = [\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3]$ を用いて表すと、下式のようなになる。

$$\dot{\mathbf{u}} = \text{grad}\phi + \text{rot}\Psi \quad (8)$$

一方、式(8)より粒子速度 \dot{u}, \dot{w} は速度ポテンシャルを用いると下記のように表せる。ただし $\Psi = \Psi_2$ として再定義した。

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \dot{w}}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (10)$$

式(6),(7),(8)~(10)より、

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = c_{11} \left(\frac{\partial \dot{u}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial z} \right) \quad (11)$$

$$\rho \frac{\partial \Psi}{\partial t} = c_{55} \left(\frac{\partial \dot{u}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{w}}{\partial z} \right) \quad (12)$$

ここで $\dot{\phi} = \partial\phi/\partial t$ 、 $\dot{\Psi} = \partial\Psi/\partial t$ である。また $\rho\dot{\phi}$ および $\rho\dot{\Psi}$

は応力の単位を持つ。そこで $\rho\dot{\phi}$ をスカラ速度ポテンシャル応力、 $\rho\dot{\psi}$ をベクトル速度ポテンシャル応力と定義した。式(11),(12)はそれぞれ縦波および横波の伝播を表す。

超音波の伝播解析には有限差分時間領域法(Finite-Difference Time Domain Method)を用いた^{12),13),15),16)}。FDTD法は主に電磁場解析に用いられてきた。本計算法は、空間および時間領域で弾性波の式を差分方程式に展開して逐次計算を行い、弾性波の時間応答が計算できる¹⁶⁾。図9に示す様に速度ポテンシャルと粒子速度は異なる格子点に配置され、時間領域では蛙跳び差分を行う。

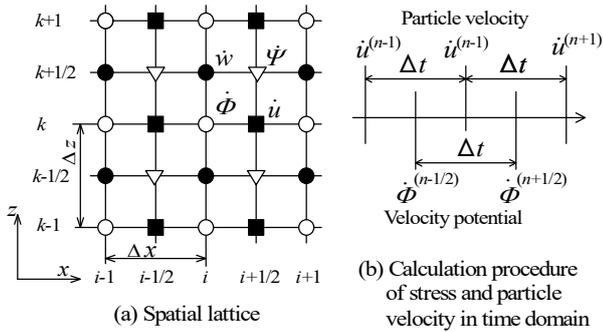


図9 計算格子および応力と粒子速度の計算手順

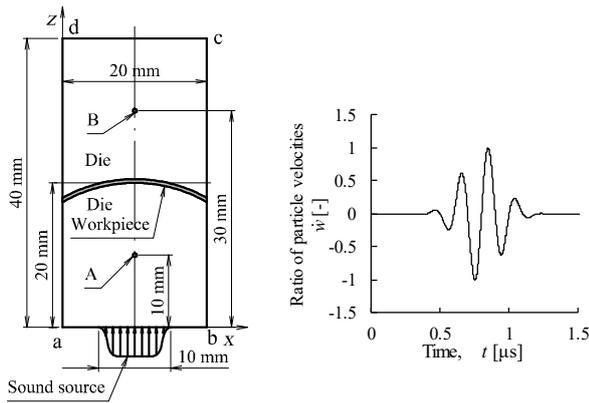


図10 解析モデル(円弧金型)と入射波形

図10には円弧金型の計算モデルを示す。計算領域は $20 \times 40 \text{ mm}$ の長方形であり、 $x=10 \text{ mm}$ の軸線上 $z=20 \text{ mm}$ の位置に被加工材が配置されている。音源は下部中央に設置し、長さを 10 mm とした。音源には z 方向の粒子速度を与える方法を用い、図10(b)に示すガウシアンパルスを入力した。ただし図中の縦軸は入射波の最大振幅で除した粒子速度比である。入射波の振幅は図10(a)に示すように、音源の両端でサインカーブを描く分布とし、急激な振幅の変化がないようにした。入射波の周波数は 5 MHz とした。

図中に示すAおよびBは透過および反射波の振幅の観測点である。金型と被加工材の境界は連続とし、材質のみが異なることとした。境界条件はモデルの下部を自由境界とし、それ以外の面では不要な超音波の反射を防ぐため、吸収境界とした。吸収境界条件はMurの1次吸収境界とした¹⁴⁾。

FDTD法の解の安定条件は二次元音場で格子間隔が $\Delta x = \Delta z = \Delta h$ の場合、次式で得られる¹⁵⁾。

$$\alpha = c_{\max} \frac{\Delta t}{\Delta h} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

ここで、 α はクーラン数、 c_{\max} は媒質内の音速の最大値である。FDTD法の時間ステップは $\Delta t = 2 \text{ ns}$ 、格子間隔は $\Delta x = \Delta z = \Delta h = 20 \text{ nm}$ とした。

計算に用いた金型と被加工材の物性値を表2に示す。表中の c_l は縦波、 c_s は横波の音速である。

表2 超音波伝播解析に用いた金型と被加工材の物性値

Material	Longitudinal elastic modulus E [GPa]	Density ρ [kg/m^3]	Poisson's ratio ν [-]	Wave velocity	
				c_l [m/s]	c_s [m/s]
Steel (die, S45C)	206	7850	0.29	5864	3189
Aluminum (workpiece, A5052)	70	2960	0.33	5919	2982

5.2 計算結果および考察

計算結果を図11に示す。図中のスカラ速度ポテンシャル応力比 P_L は次式で求めた。

$$P_L = (\rho\dot{\phi}) / (\rho\dot{\phi}_0) \quad (14)$$

ここで、 $\rho\dot{\phi}_0$ はスカラ速度ポテンシャル応力の最大値である。実験で使用した超音波センサは、主に縦波成分のみを検出することができる。 P_L は縦波の成分を記述している。したがって、 P_L を用いて縦波の伝播を調べることができる。

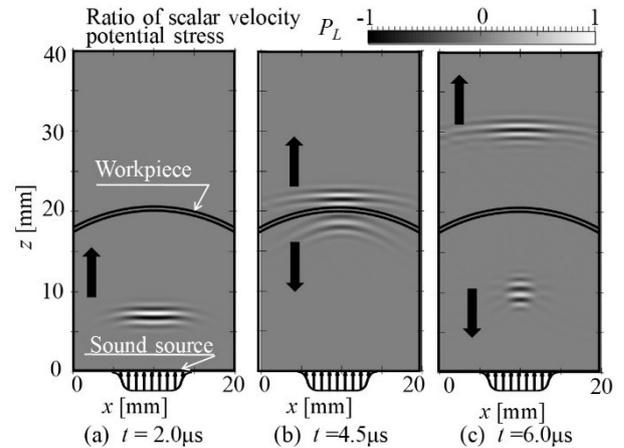


図11 被加工材と円弧金型の境界面付近におけるスカラ速度ポテンシャル分布($R=20 \text{ mm}$, $t=0.5 \text{ mm}$)

金型と被加工材の接触面付近の超音波伝播を縦波成分のスカラ速度ポテンシャル応力比分布を用いて調べた。入射波は、図11(b)に示すように、接触面で透過波と反射波に分かれる。透過縦波は入射波と同様の形状をしており、その振幅は入射波よりも若干小さいが、透過波は接触面の影響を大きく受けていない。反射波は接触面で反射した後、図11(b)のように変形する。図11(c)に示すように、接触面への入射波の入射角が接触面に沿って連続的に変化するため、円筒面の影響で反射波が一点に集中する。金型の曲率半径を $R=20 \text{ mm}$ としたとき、反射波の焦点は $z=8 \text{ mm}$ 付近であった。焦点を超えると反射波は広がり、その振幅

は減少する。さらに、円弧金型の曲率半径が透過・反射波の振幅に与える影響を調べた。その結果を図 12 および図 13 に示す。これらの図において、 A_{LR} 、 A_{LT} は、反射波および透過波の振幅比であり、以下のように定義される。

$$A_{LR} = P_{LR} / P_{L0} \quad (15)$$

$$A_{LT} = P_{LT} / P_{L0} \quad (16)$$

ここで、 P_{L0} はスカラー速度ポテンシャル応力比の最大振幅、 P_{LR} と P_{LT} はそれぞれ反射波と透過波のスカラー速度ポテンシャル応力比の最大振幅である。

図 12 は、図 10(a)の計算モデルにおいて点 A を通過する反射波のスカラー速度ポテンシャル応力比の最大振幅を表している。この図より金型と被加工材の接触面で反射される超音波の特性は、図 6 の実験結果と同様に金型曲率半径の影響を大きく受けることが分かった。

これは図 8 に示すように、接触面への入射波の入射角は、接触面に沿って連続的に変化する。これにより反射波が焦点に集中するためと考えられる。従って、この反射波の受信部を焦点近傍に設置できれば、増幅された反射波を計測することができる。このように、数値シミュレーションに反射波の特性を可視化でき、最適なセンサの取り付け位置を推定できる。

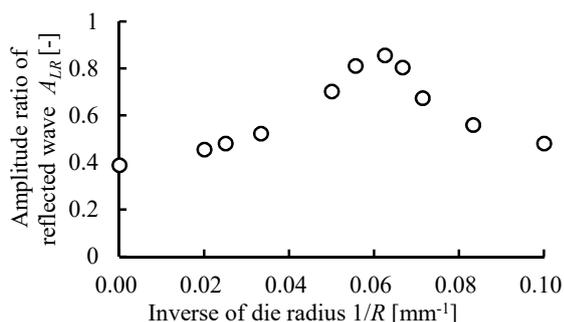


図 12 反射特性に対する金型曲率半径の影響 (計算結果)

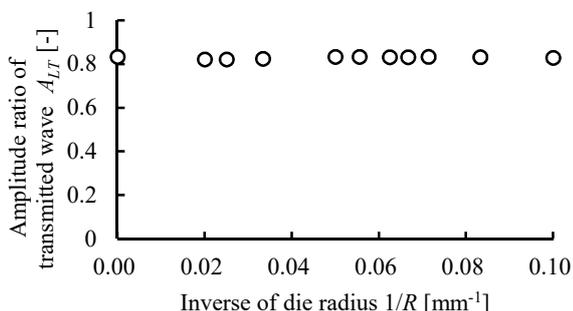


図 13 透過特性に対する金型曲率半径の影響 (計算結果)

図 13 は、図 10(a)の B 点を通過する透過波のスカラー速度ポテンシャル応力比の最大振幅を表す。透過縦波の最大振幅は、金型の曲率半径の影響を受けにくく、平行金型の場合とほぼ同じである。よって FDTD 法を用いた解析結果は、図 7 に示す実験結果と同様の傾向を示し、透過波は金

型半径の影響を受けにくい。図 11 に示すように、透過波は下型と被加工材の接触面 1 と被加工材と上型の接触面 2 の両接触面で屈折しており、透過波の伝搬方向は入射波の伝搬方向とほぼ同じであると考えられる。したがって、透過波を用いれば、金型形状の影響を受けずに接触状態を計測することができると考えられる。

6. 結言

超音波を用いて被加工材と円弧形状のプレス金型の接触状態を測定する方法を開発した。これにより、1)超音波の反射は金型の形状に影響されること、2)薄い金属板をプレス金型に密着した場合、透過波は金型の形状に大きく影響されないことが分かった。このようにして得られた接触情報をサーボプレスにフィードバックしてプレススライドを制御できれば、隙間の解消が期待できる。またインプロセス計測を行うことで、接触状態から被加工材の変形の経時変化を追尾できる可能性がある。さらに本手法はプレス加工だけでなく、他の塑性加工にも応用可能であり、特に金型鍛造での未充填欠陥の検出に有効であると考えられる。

謝辞

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

- Hagino, N., Endou, J., Katoh, S., Okudera, S., Maruyama, M., Kubota, M. & Murata, C. : Steel res. int. **81-9** (2010), 674-677.
- Hagino, N., Endou, J., Katoh, S., Okudera, S., Maruyama, M. & Kubota, M.: Steel res. int. 2011 special edition, (2011), 390-395.
- Hagino, N., Endou, J., Katoh, S., & Ishihama, M. : Steel res. int. special edition 2012, (2012), 319-322.
- 萩野直人・遠藤順一・加藤俊二・石濱正男：塑性と加工, **54-632** (2013), 826-830.
- Hagino, N., Endou, J., Ishihama, M., Komiya, S. & Katoh, S. : Procedia Eng. **81** (2014), 1073-1078.
- Hagino, N., Komiya, S. & Ishihama, M. : Proc. IN-TECH2015, (2015), 50-53.
- 萩野直人・小宮聖司・遠藤順一・石濱正男：塑性と加工, **57-669** (2016), 983-990.
- Hagino, N., Komiya, S., Endou, J. & Ishihama, M. : Key Eng. Mater., **716** (2016), 528-535.
- 萩野直人・小宮聖司・遠藤順一・石濱正男：塑性と加工, **58-681** (2017), 929-935.
- Hagino, N., Komiya, S., Endou, J. & Ishihama, M. : Sensor and Materials, Vol.3,1No.10(2)(2019),pp3129-3140.
- 益子正己・伊東誼：日本機械学会論文集, 34-257 (1968), 191-198.
- 山本美明：超音波基礎工学, (1981), 日刊工業新聞, 39-40.
- Sato, Y : Dansei-Hadou-Ron, (1978), Iwanami shoten, 32-38.
- Sato, M. : Acoust. Sci. & Tech., **24-6** (2003), 415-418.
- Nagatani, Y., Murakami, M., Hara, Y., & Watanabe, Y. : IEICE Tech. Rep. Ultrasonics, **104-14** (2004), 1-4.
- 木村友則・三須幸一郎・和高修三・小池光裕：電子情報通信学会技術研究報告.US,超音波, 105-619, (2006), 11-16.
- Sakamoto, S. : J. INCE Jpn., **31-4** (2007), 263-270.