

半溶融鍛造における凝固・離型状態の ポータブル超音波診断器の開発

熊本大学 工学部 知能生産システム工学科

教授 濟木弘行

(平成9年度研究開発助成 AF-97023)

キーワード：超音波，反射強度，接触状態

1. 研究の目的と背景

半溶融鍛造においては液層成分と固相成分が共存し、凝固が完全に終了するまでに大きな凝固収縮が生ずるので、製品欠陥を防ぎ、良好な形状・寸法精度を得るためには収縮分を予測して加圧成形する必要がある。この予測には過去の経験や成形数値シミュレーション等が重要な役割を果たす。これらにも増して、加工中の欠陥発生状況や凝固収縮状況に関するインプロセス情報は生産現場で強く要求されているものの一つである。このような情報を計測できれば、金型内の材料凝固・離型状態に応じて加圧量を最適に制御することが可能となる。このことは製品の品質化及び高精度化を容易にする。金型内部の状況や金型と被加工材料との接触状態の変化をとらえる方法として、超音波の反射波を利用することが有効であると考えられる^{1)~4)}。そこで本研究では実際の生産現場において、半溶融金属の凝固収縮にともなう生ずる金型との離型状態の計測および材料内部の欠陥検出がインプロセスでできるポータブル超音波診断器の開発を行う。この診断器の利用は、成形プロセスの最適化を容易にかつ迅速に行うことを可能にする。

2. 超音波反射特性の検討

金型と被加工材料の離型状態は接触界面の超音波反射強度から評価することが可能である。ここでは、超音波の一般的な基礎特性を把握するために、金型と被加工材料間に存在する空気層や介在物などによって反射特性がどのように変化するか調べることにする。図1に示す三層のモデルを考えると、金型と被加工材およびその中間に介在物が存在する場合の音圧反射強度は式(1)で評価することができる⁵⁾。

$$T_1 = (4Z_1/Z_3) / \{ (Z_1/Z_3 + 1)^2 \cos^2 \theta + (Z_1/Z_2 + Z_2/Z_3)^2 \sin^2 \theta \} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\theta = 2\pi L/\lambda_2$

Z_1, Z_2, Z_3 は、音響インピーダンス、 L は中間層異質膜の厚さ、 λ_2 は中間層異質膜中の波長である。

また、音圧反射率 r_1 は音圧往復通過率 T_1 により式(2)で表される。

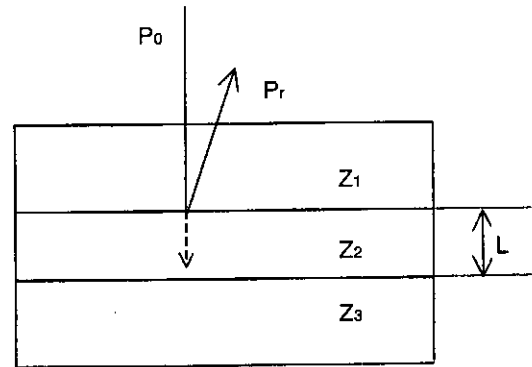


図1 界面における超音波の反射及び透過

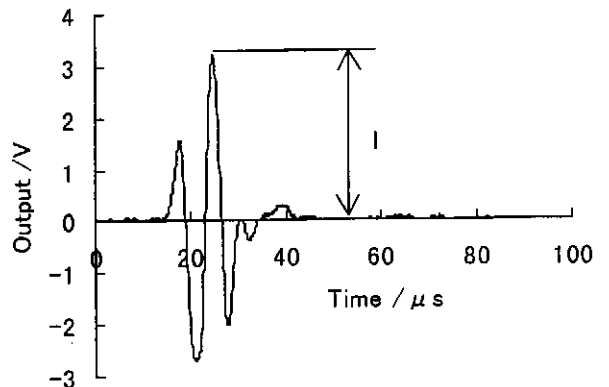


図2 超音波反射波形の例

$$r_1 = Pr/P_0 = (1 - T_1)^{1/2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

これより、相対反射強度 I/I_0 は、式(3)表される。

$$I/I_0 = Pr/P_0 = r_1 = (1 - T_1)^{1/2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 I は界面で反射した超音波の最大強度である(図2参照)。超音波が界面で全反射したときの最大反射強度を I_0 で表す。相対反射強度 I/I_0 は反射状況を表す尺度として用いることができる。

図3に中間層異質膜として空気が介在する場合の相対反射強度と空気膜厚との関係を超音波の周波数を変更して示す。ここでは空気層が鋼の間に介在する場合を考えている。周波数が小さいほど、より厚い空気膜を音波が通過することがわかる。空気膜厚が 1nm

以上では、超音波は全反射している。同様にして中間層異質膜として潤滑膜が存在するような場合では、図4に示す結果が得られる。超音波周波数が2.25MHzと低い場合は、潤滑膜厚さが1mm程度で入射した超音波の約80%は潤滑膜を透過することがわかる。100MHzの場合では、潤滑膜厚さ1mm程度で全反射している。図5及び図6に中間層異質膜の厚さをパラメータにとり、超音波周波数と相対反射強度との関係を示す。それぞれ、中間層が空気膜および潤滑膜の場合を示す。

上記の理論的考察にあわせて、超音波反射特性を実験でも調べた。一對の平板工具(SKD11)で鋼製の円柱試験片を弾性変形範囲で加圧し接触界面で反射する超音波の特性を周波数ごとに調べた。工具および試験片の表面粗さRzは、それぞれ0.4 μm および0.5 μm である。図7に無潤滑の場合を示す。負荷荷重

の増加と共にそれぞれの周波数において、相対反射強度が減少している。この原因の一つとして、負荷荷重増加に伴う接触界面における接触率(見かけの接触面積に対する真実接触面積の割合)の増加があげられる。同一の負荷荷重(同じ接触率)においては、7.5MHzの結果を除けば周波数が低いと相対反射強度も低くなっている。このことから、非接触部の面積が同一であることを考えれば、低い周波数の超音波ほど空気膜を透過していることがわかる。図8に潤滑膜が中間層異質膜として存在する場合を示す。潤滑剤としてはVG2を用いた。この場合も7.5MHzの場合を除けば、同一の負荷荷重においては、周波数が低い超音波ほど潤滑膜を透過していることがわかる。このような相対反射強度に及ぼす周波数、接触率および中間層異質膜の影響をさらに解明することで、非定常接触における潤滑膜などの中間層異質膜の平均厚さと接触界面における接触率の同時評価が可能となる。

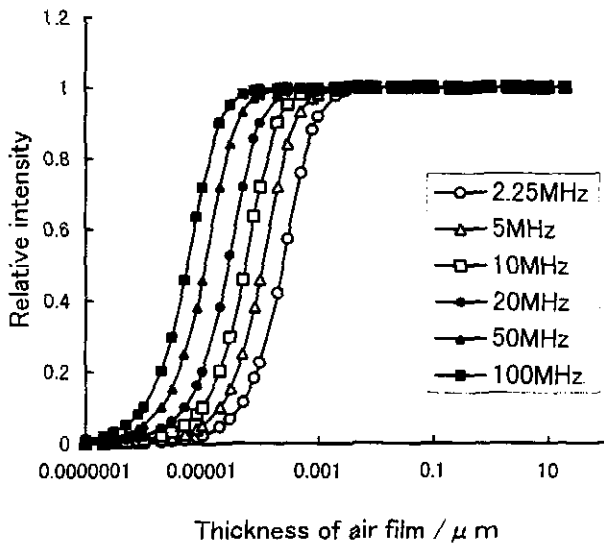


図3 反射率に及ぼす中間層異質膜(空気)の影響

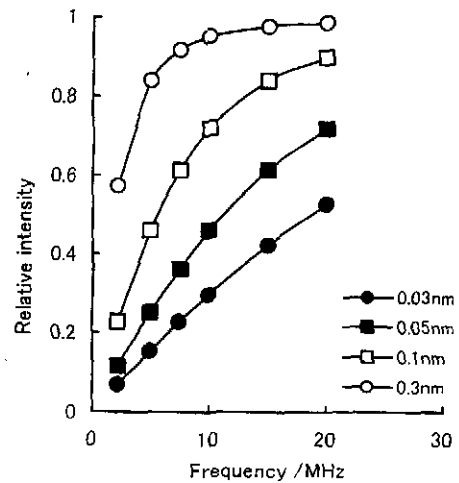


図5 反射率に及ぼす超音波周波数の影響(中間層異質膜(空気)が存在する場合)

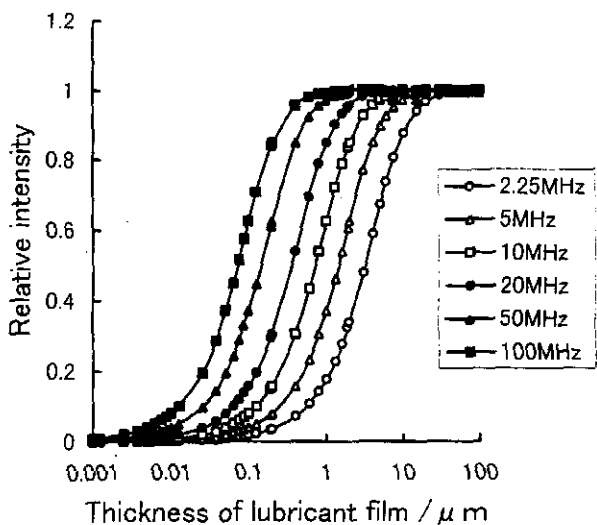


図4 反射率に及ぼす中間層異質膜(潤滑膜)の影響

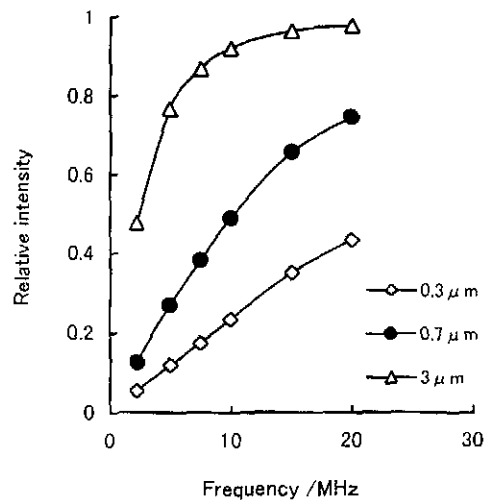


図6 反射率に及ぼす超音波周波数の影響(中間層異質膜(潤滑膜)が存在する場合)

なお、7.5MHz の場合において傾向が異なる結果があらわれているが、この点は現在検討中である。

3. 超音波探触子内蔵型診断プローブ

図 9 に設計製作した超音波探触子内蔵型診断プローブを示す。超音波探触子⑥は探触子ホルダー③にはめ込まれ、上部外枠⑤および下部外枠①で構成されるプローブ本体に内枠②と共に組込まれる。上部外枠⑤の内側上部と探触子ホルダー③の外側上部にはねじを切っており、上部外枠⑤を回転させることで超音波探触子を上下に移動させることができる。用いた超音波探触子（パナメトリクス製、10MHz、集束探触子、焦点距離 162mm）は 50℃未満で使用しなければならないので、高温の金型表面に直接接触させることはできない。そこで、高温金型表面と超音波探触子の間に液体を介在させ水深法で計測を行うことになる。この場合、液体は高温の金型から加熱されるので、測定中は液体を循環させ昇温を防ぐ必要がある。ここでは

液体として取り扱いの容易な水を利用した。水中からの発泡を防ぐため無害の消泡剤を水にまぜて使用する。冷却に必要な流量は有限要素法を利用した非定常熱

- 1 Lower outer case
- 2 Inner case
- 3 Probe holder
- 4 Holding plate
- 5 Upper outer case
- 6 Ultrasonic probe

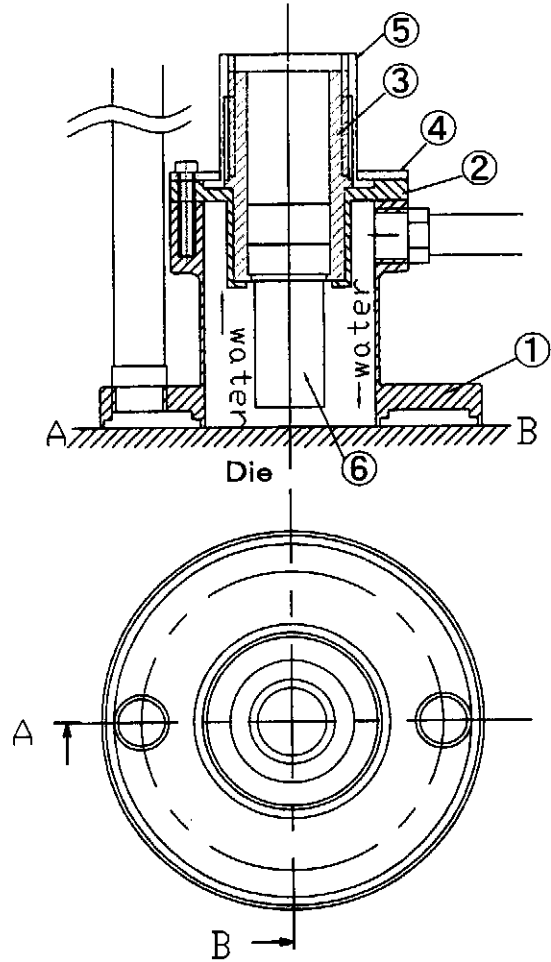


図 9 超音波探触子内蔵型診断プローブ

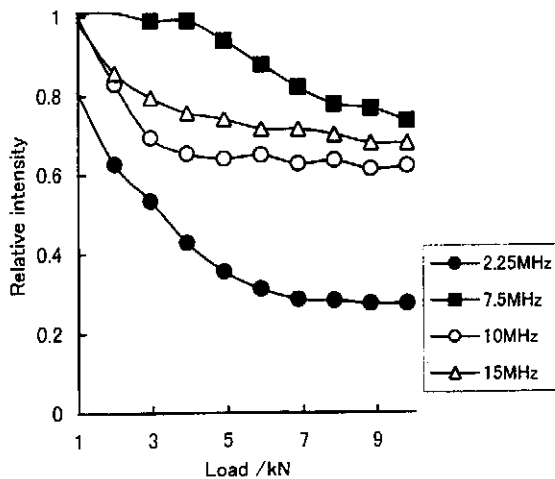


図 7 相対反射強度におよぼす超音波周波数および負荷荷重の影響（潤滑剤無し）

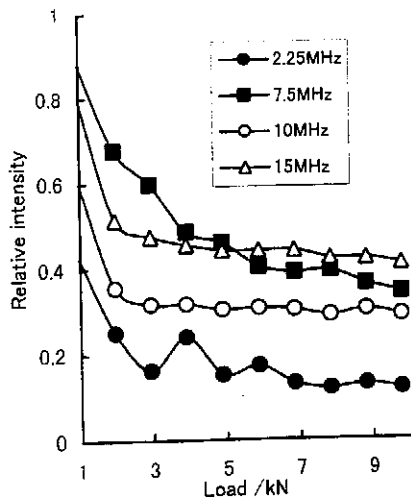


図 8 相対反射強度におよぼす超音波周波数および負荷荷重の影響（潤滑剤: VG2）

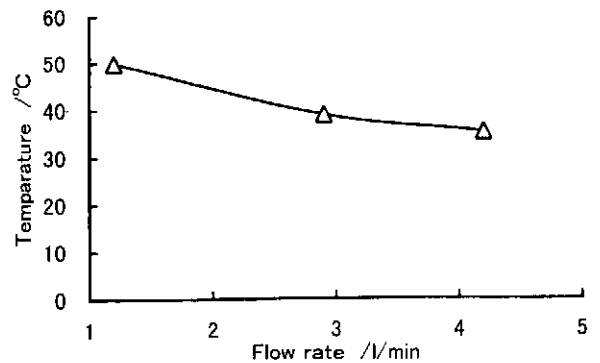


図 10 冷却水量と水温の関係

解析と実験により決定した。図 10 に金型外表面から 1mm における冷却水の温度と流量との関係を示す。1.2 l/min を越える流量で水温は 50℃未満となる。超音波探触子表面と金型外表面との距離が 8mm であるので、1.2 l/min を越える流量があれば冷却に充分である。

診断プローブと金型表面が密着するように、診断プローブは耐熱性シリコンを介して金型表面と接触する。密着力を高めるため接触部は真空ポンプで減圧するようになっている。また、密着力を低減させないように冷却水は出口側からポンプで吸引して循環させるようにしている。

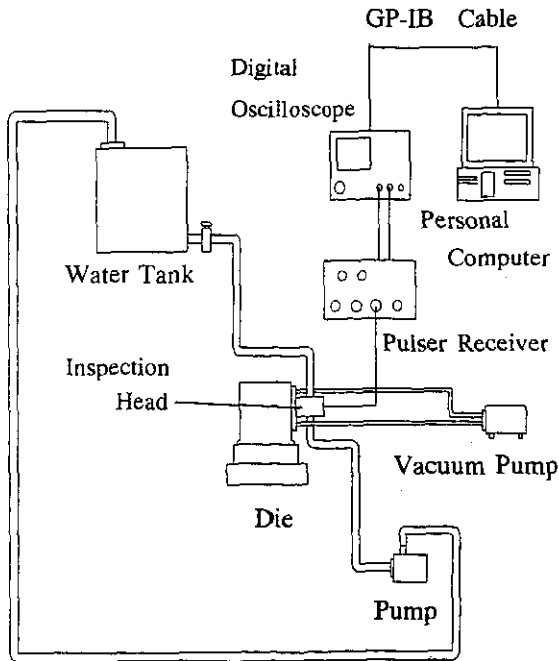


図 11 超音波診断計測システム

- | | |
|---------------|-------------------|
| 1 Base plate | 2 Lower die |
| 3 Upper die | 4 Eject pin |
| 5 Lower plate | 6 Inspection head |

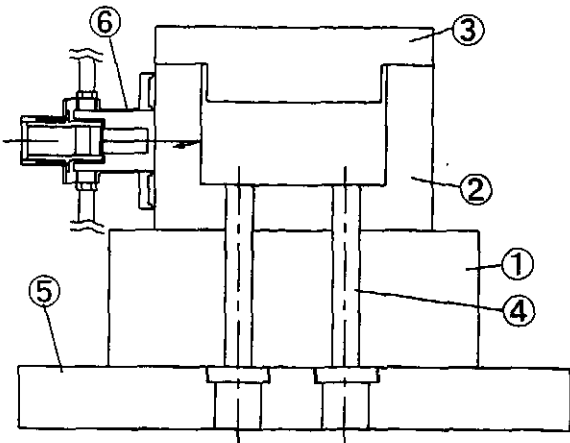


図 12 計測実験用金型

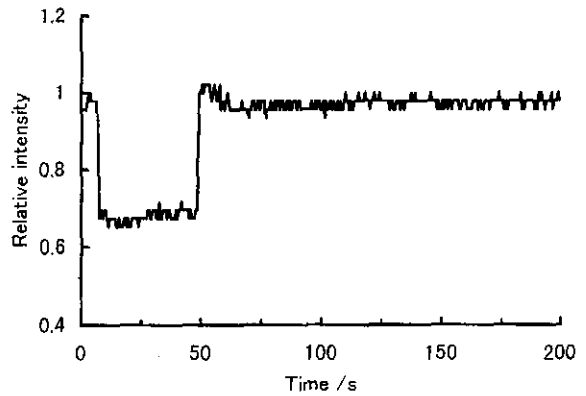


図 13 加工中の超音波反射強度の変化

4. 超音波計測システム

図 11 に設計製作した全体の計測システムの概略を示す。金型表面に接触した診断プローブに内蔵された超音波探触子から超音波を発生させ、金型内部からの反射波を計測し反射波強度を評価する。診断プローブはパルサーレシーバー、デジタルオシロスコープ（300MHz サンプリング）を介し、GP-IB ケーブルでパーソナルコンピュータに接続される。反射波はコンピュータに連続で取りこまれる。計測データ取込みの制御には Visual Basic で作成したプログラムを利用した。冷却水はタンクから診断プローブに供給され、再びポンプに戻るようになっている。

5. 超音波試験

溶融したウッドメタルを金型（図 12）に流し込んで超音波計測を行った。超音波反射強度の時間的变化を図 13 に示す。ウッドメタルを流し込んだ直後に相対反射強度が約 70%程度まで急減している。凝固後は相対反射強度が 95%程度となっており、ウッドメタルが型より離れていると考えられる。

6. 結言

1. 異なる周波数の超音波を用いて接触界面からの反射強度を計測することで、接触界面における接触率と接触界面に存在する中間層異質膜の平均厚さを同時に評価することが可能である。

2. 超音波探触子内蔵型の診断プローブによる計測システムを開発した。本計測システムにより半溶融鍛造中の凝固・離型状態の計測が可能となる。今後、被加工材料として他の金属を用いて検討を進めていく。

参考文献

- (1) 濟木ほか, 機論, 59-562, C(1993), 1934.
- (2) 西脇ほか, 成形加工, 5-11(1993), 772.
- (3) 飯田ほか, トライボロジスト, 37-1(1992), 69.
- (4) 水口・春日, 非破壊検査, 40-9(1991), 609
- (5) 日本学術振興会編, 超音波探傷法, (1974), 昭晃堂.