

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月 1日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23760123

研究課題名（和文） 金属板の加工プロセスにおける温度モニタリング法の開発

研究課題名（英文） study on the new ultrasonic method for measuring temperature distributions in metal plates

研究代表者

高橋 学（TAKAHASHI MANABU）

仙台高等専門学校・機械システム工学科・助教

研究者番号：00585292

研究成果の概要（和文）：材料内部で反射した超音波を温度測定の際に用いた手法について新たな視点から研究を試みた。はじめに、材料中を伝搬する際に干渉波が連続的に発生する機構についてシミュレーションを用いて検証を行った。その結果、干渉波の間隔は温度分布及びその温度の高低によって変化することが確認された。また、シミュレーションの妥当性を検証するため、実際の金属板（アルミ合金A2017）を用いて干渉波の計測を行った。

研究成果の概要（英文）： The purpose of this study is T. D analysis by simulation using ultrasound. Simulation is performed assuming a T. D inside the material. In addition, ultrasonic wave is incident from one end of the material. This study explores changes in the interference wave due to change in T. D. As a result, a clear trend of changes in the waveform could not clearly know. However, the author considers that T. D can be measured by using ultrasound.

交付決定額

(金額単位：円)			
	直接経費	間接経費	合 計
交付決定額	2, 100, 000	630, 000	2, 730, 000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：超音波計測、温度計測、非破壊計測

1. 研究開始当初の背景

近年、自動車産業など日本のものづくりの現場において物体の内部温度を精度よく測定するための技術が必要とされている。とくに溶接や鋳造など加熱、冷却を伴う材料の加工プロセスにおいて、材料内部の温度分布を測定する技術へのニーズがある。また近年、超音波パルスエコー計測と熱伝導解析を効果的に組み合わせた温度分布計測法が新たに研究されている。この測定の原理は材料中を伝搬する超音波の音速の温度依存性を用いたもので、これまでの検証（アルミのダイ

キャストプロセスを想定した鋳造模擬実験、レーザー超音波法による非接触の温度モニタリング実験など）を通じて本手法の工業プロセスへの有効性を確認した。

2. 研究の目的

本課題では、材料内部で反射した超音波を解析の際に用いて材料内部の温度分布を測定する新たな手法の開発を目的として各種検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 超音波が材料中を伝搬する過程をシミュレーションによって解析し、材料中を伝搬する際に干渉波が連続的に発生する機構について材料内部に温度分布を与えた条件でのシミュレーションを繰り返し行うことで検証を行った。

(2) シミュレーションの妥当性を検証するため、実際の金属板（アルミ合金 A2017）を用いて干渉波の計測を行った。

4. 研究成果

(1) シミュレーション

・シミュレーション解析の条件

シミュレーション解析では、材料内の温度分布について複数の条件を設定し、解析を行う。解析に用いる超音波の伝搬速度には、事前の実験で得られた実測値(式 1、2)を用いた。

数値シミュレーションの解析条件を以下に示す。また、シミュレーションモデルを図 1 に示す。解析のモデルに想定した材料は工業の分野で用いられる事例の多いアルミニウム板材とした。送信波は干渉波を観測しやすくするため、Sine Gaussian 波（縦波）を 1 パルスとした。

$$V_L = -0.921T + 6465.0 \text{ (m/s)} \quad (1)$$

$$V_T = -0.942T + 3242.9 \text{ (m/s)} \quad (2)$$

ここで、 V_L ：縦波音速、 V_T ：横波音速、 T ：温度(°C)である。

材料：アルミニウム合金（A2017）

入力波形：Sine Gaussian 1MHz 1pulse

超音波送信機と受信機の大きさ：15mm

モデル形状：D=15mm、 $L_x=100\text{mm}$

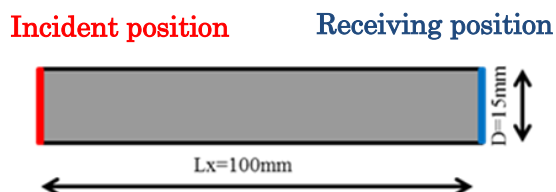


図 1 解析モデル

・温度分布条件

材料内部の温度分布には以下の 2 種類の条件について実施した。

①入射位置からの高温部の距離

超音波送信機から高温部の位置までの距離を変化させた場合の干渉波の伝搬時間の変化を調査した。材料内部の高温部の温度は $T=200^\circ\text{C}$ 、そのほかの部分は 20°C とした。温度分布条件のモデルを図 2 に示す。高温部分は a~j の 10 種類とした。図 2 の a の部分が $L_x=0\sim10\text{mm}$ であり、この部分を高温にした場合を例として橙色で示している。

高温部： $L_x=0\sim10$ 、 $10\sim20$ 、 $20\sim30\cdots\cdots80\sim90$ 、 $90\sim100\text{ (mm)}$

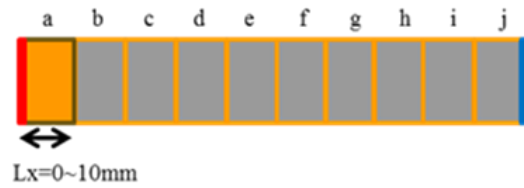


図 2 入射位置からの高温部の位置

②壁面の高温部の厚さ

板の厚さ方向に温度分布がある場合について検討を行った。①の温度分布では材料内部の一部分（例えば $L_x=10\text{mm}$ ）としたが、この場合にはさらに板の厚さ方向に 10 分割し、板の上下面側から加熱された場合を想定している。B は 10 分割した上下両方の壁面からの高温部の厚さを表している。温度分布条件のモデルを図 3 に示す。シミュレーションは高温部を順次増加させた場合について、 $B=1\text{mm}$ から $B=7.5\text{mm}$ ($D=15\text{mm}$) までの合計 9 パターンについて行った。高温部の温度は $T=200^\circ\text{C}$ 、そのほかの部分は 20°C とし、入射位置からの距離 L_x 、高温部の厚さ B は次の条件で行った。

高温部： $L_x=10\sim20$ 、 $20\sim30$ 、 $30\sim40\cdots\cdots70\sim80$ 、 $80\sim90\text{ (mm)}$

高温部厚さ： $B=0$ 、 1 、 2 、 3 、 4 、 5 、 6 、 7 、 7.5 (mm)

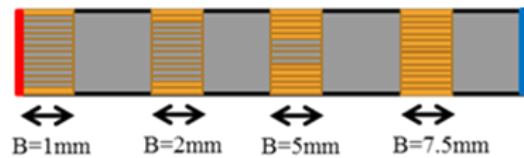


図 3 壁面の高温部の厚さ

解析結果・考察

図 4 に数値解析結果の代表的な波形を示した。縦軸は超音波振幅、横軸は伝搬時間である。図中の波形には 7 つのピークが明瞭に確認することができ、超音波が材料内部を伝搬した距離の短い（受信側への到達時間が早い）ピークから順番に番号をつけた。番号 1 のピークは材料内部を超音波が直進することで得られた波形であり、その後続く 2~7 番のピークが材料内部を伝搬するに当たって生じた干渉波である（干渉波の形成機構については補足説明を参照）。本報告では、温度分布の変化に伴い、各ピークの伝搬時間がどのように変化するかについて検証を行った。

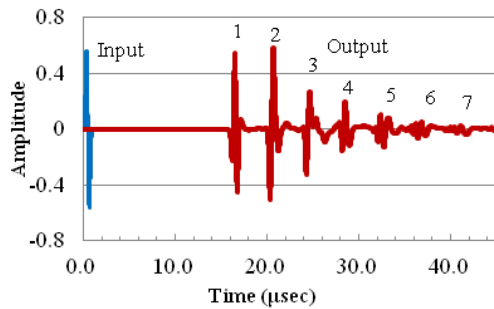


図 4 受信波形

入射位置からの高温部の距離

高温部の位置を変更したときのピーク No. 1～4 の伝搬時間の変化を図 5 に示す。横軸は L_x (mm)、縦軸は各ピークにおける伝搬時間 (nsec) を示している。なお、ピーク No. 5 以降にも温度分布の変化に伴う伝搬時間の変化が確認されたが、特徴のよく見られるピーク No. 1～4 について考察する。

まず、No. 1 は、高温部の位置による伝搬時間の差は見られなかった。これは、No. 1 が干渉波ではなく、入射面から受信側まで直接到達した波であり、反射によって横波となる経路がないため、伝搬速度が高温部の位置に影響されないためである。一方、壁面での反射を伴う No. 2 以降については高温部の位置によって伝搬時間が変化していることが分かる。No. 2 は高温部が中央付近の場合、伝搬時間が短くなっている。一方、No. 3、4 は高温部位置が中心に近いほど、伝搬時間が長くなっている。以上のような伝搬時間の変動は一般的な超音波の測定装置を用いて測定することが比較的容易な変化量であり、現実には材料が加熱、冷却されるのに伴って各ピークの到達時間の変化を計測できる事が確認された。

この結果から、干渉波が温度分布の変化に感度を持ち、各ピークの変化を指標とした解析から材料内部の温度分布の変化の測定が可能であることを示唆している。特に No. 3 は伝搬時間が 250nsec 程度明確に増大した。さらに、変化の傾向は、No. 2～4 でそれぞれ異なっており、これは、温度分布の測定の精度や効率がピークの到達時間を 2 つ以上併用することで改善できると考えられる。

この原理によって、金属内部の温度分布を高速に非破壊的に測定することが可能となれば、製品の品質管理や歩留まりの改善等、製造技術の向上が期待できる。

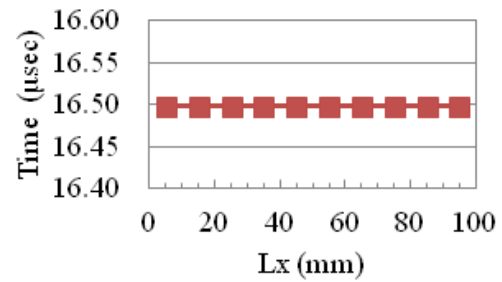


図 5 (a) ピーク No. 1 の伝搬時間変化

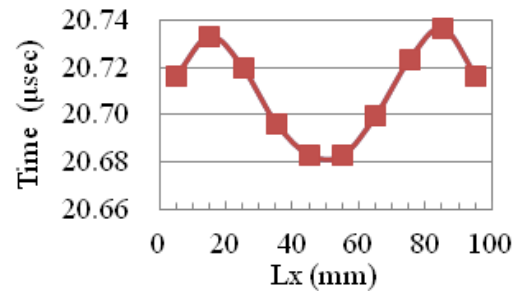


図 5 (b) ピーク No. 2 の伝搬時間変化

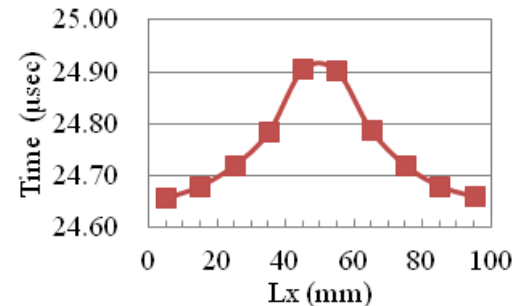


図 5 (c) ピーク No. 3 の伝搬時間変化

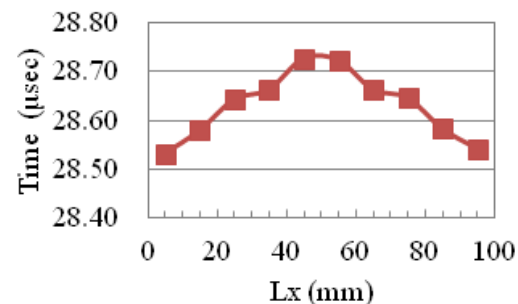


図 5 (d) ピーク No. 4 の伝搬時間変化

図 5 (a)～(d) 各ピークにおける高温部位置と伝搬時間の関係について。

壁面付近の高温部の厚さ

壁面付近の高温部の厚さが変化したときのピークの伝搬時間の変化について、代表例としてピーク No. 2, No. 3 の結果を図 6、図 7 に示す。横軸は高温部の厚さ B (mm)、縦軸は

伝搬時間(μsec)を示している。図 6, 7 の結果のように、ほとんどの結果は高温部の厚さ B の増加に伴って、伝搬時間が単調に増加することが確認できる。また、No. 3 は高温部が材料中央に近いほど、高温部の幅 B による影響も大きくなっている。一方、No. 2 は高温部が材料中心付近にある場合、伝搬時間の増大が高温部の厚さ B が 5mm 程度で最も大きくなっていることが確認できる。

これらの結果より、材料内部の温度分布について、各ピークの伝搬時間は高温部分の厚さに応じて変化することから、超音波測定の結果は表面近傍の温度状態だけに影響されず、内部の温度分布の計測に有効であることが分かる。よって、材料波を伝搬する過程で形成される干渉波を用いることで、材料内部の高温部分の位置、厚さを解析できる可能性がある。

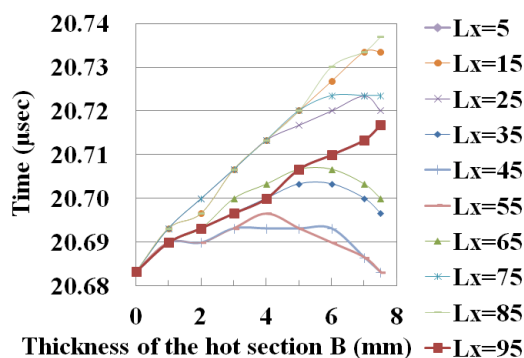


図 6 ピーク No. 2 における高温部厚さによる伝搬時間の変化

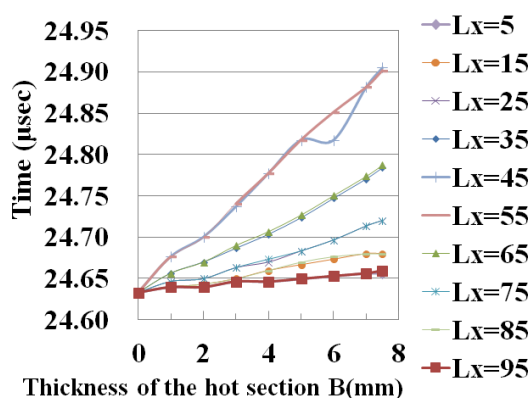


図 7 ピーク No. 3 における高温部厚さによる伝搬時間の変化

(2) 超音波計測機を用いた干渉波の計測

数値シミュレーションに加え、実際の実験によって、超音波の干渉波が観測できるか調査した。シミュレーションに用いたモデルと

同一の寸法を持つアルミ板の両端に超音波探触子を接触させ、一端から超音波を入射し、もう一端側で超音波を受信した。入射波形等の実験条件は数値シミュレーションと同様で、温度分布は 20℃ 一様としている。

図 8 に実際の実験で測定した超音波波形を示した。図中には複数の干渉波のピークが明確に判別できる。これにより、入射した 1 パルスが材料内部を伝搬する過程で複数の干渉波を構成し、その干渉波が計測可能であることが確認できる。また、図 4 に示したシミュレーションによる解析の結果と比べると、各ピークの伝搬時間がほぼ一致しており、シミュレーションの解析条件が妥当なものであることが確認された。

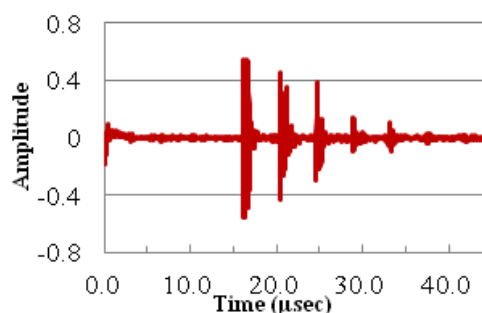


図 8 計測した超音波波形

まとめ

本課題では、材料内部の温度分布計測について、超音波の伝搬を数値シミュレーションによって解析し、超音波の干渉波を用いた温度分布解析法の検討を行った。

材料内部の温度分布による超音波の変化の傾向として、高温部の入射部分からの距離、および高温部の厚さによって各ピークの伝搬時間が変化することが数値シミュレーション結果から確認できた。また、実際の金属板を用いた計測よりシミュレーションの妥当性も確認できた。しかしながら、今回の当初の狙いであった温度分布を同定するには解析結果が不足しており、今後は様々な温度分布条件で解析を行い、より明確な傾向を見出すことが必要である。

超音波の干渉波の傾向について研究を続けることで、既存の温度センサに頼ることなく、超音波を用いて材料内部の温度分布解析が可能であると推測できる。

補足 干渉波の形成プロセスについて

本報告で、主に考察対象とした超音波の干渉波について形成プロセスを説明する。

図 9 は、干渉波の形成過程の模式図を示している。超音波の縦波が境界面に入射したとき、反射によって縦波だけでなく、横波も形成される。このときの反射角度は式 3、4 で求め

られる。同様に、この反射によって生成された横波も反射するときに、縦波を形成する。この横波によって形成された縦波が干渉波である。この反射は何度も繰り返されるため、複数の干渉波が励起される。

$$\frac{V_L}{V_T} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \quad (3)$$

$$\Delta t = \frac{D\sqrt{V_L^2 - V_T^2}}{V_L^2 - V_T^2} \quad (4)$$

V_L : 縦波の速度 (m/s)

V_T : 横波の速度 (m/s)

θ_1 : 縦波の反射角度 (degree)

θ_2 : 横波の反射角度 (degree)

Δt : 干渉波間の伝搬時間 (sec)

D: 境界面間距離 (m)

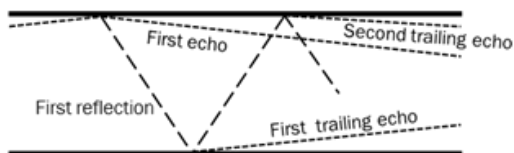


図9 超音波の干渉波の形成プロセス

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

(1) Koki OKADA, Manabu TAKAHASHI, Ikuro IHARA, Study on the use of ultrasonic trailing echoes for measuring temperature distributions in aluminum plates, 2012 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS 2012), 査読有, CD-ROM, pp. 176 - 179, 2012

〔学会発表〕(計2件)

①岡田康喜, 高橋学, 井原郁夫, 加熱したアルミ板内部を伝搬する超音波遅れエコーの計測, 日本機械学会東北学生会 第43回学生員卒業研究発表講演会, 2013年3月11日, 一関高専

②岡田康喜, 高橋学, 井原郁夫, 超音波遅れエコーを利用した材料の温度分布計測に関する検討, 日本機械学会第20回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2012), 2012年11月30日~12月2日, 大阪工業大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 学 (TAKAHASHI MANABU)

仙台高等専門学校・機械システム工学科・助教

研究者番号: 00585292