432

材料内部温度モニタリングへの超音波法の適用に関する検討

〇高橋学 長岡技科大院 井原郁夫 長岡技科大 釜親大輔 長岡技科大院

Application of Ultrasonic Technique to Internal Temperature Monitoring Manabu TAKAHASHI, Ikuo IHARA, and Daisuke KAMOYA

1 緒言

工学・工業の幅広い分野において物体内部の温度をリ アルタイムで精度よく測定したいというニーズは数多く ある。著者らはこの要求に応えるべく超音波法の適用に ついて検討している。この手法の基本原理は音速の温度 依存性を利用するもので^{1), 2)}、従来の温度計測法よりも 時間応答性にも優れている。本報ではダイカスト型材と して用いられている SKD 鋼を対象として、その内部温 度モニタリングに関する基礎的検討を行った。SKD 鋼板 の片面に溶融アルミニウムを接触させたときの超音波パ ルスエコーのリアルタイム計測から、SKD の温度変化に ともなう超音波伝播時間(音速)の変化を測定し、本手 法の鋳造プロセスなどの過渡現象のモニタリングへの適 用について検討した。

2 原理

ある物体内の温度分布が一次元であるとき、その物体 内を伝播する超音波の伝播時間 t_L は(1)式で表すことが できる。

$$t_{L} = 2 \int_{0}^{L} \frac{1}{V(T)} dx$$
 (1)

ここで、*V*(*T*)は温度*T*の関数として表される物体固有の 音速で、近似的に(2)式で表すことができる。

$$V(T) = -\mathbf{A}T + \mathbf{B} \tag{2}$$

ここで、A、Bはそれぞれ物体固有の定数である。物体内の温度分布 *T*(*x*)は境界条件に依存するが、ここでは近似的に(3)式のような指数関数を仮定する。

$$T(x) = C \exp(Dx) + E$$
(3)

ここで、xは距離、C、D、Eは定数である。超音波パル スエコー計測により物体内の超音波伝播時間1, を精度よ く計測すれば、上記の式から物体内の任意の位置での温 度を求めることができる。また、近似的に内部の温度勾 配を推定することもできる。なお、本報では伝播時間に 加えて物体内の一点の温度を既知情報として用いること とする。

3 実験方法

本研究で用いた実験システムの概略図をFig.1に示す。 溶融アルミニウムが注入可能な鋳型の上部に厚さ 30mm の SKD 板が固定されており、SKD 板の上面には周波数 2MHz の高温超音波探触子が設置されている。高温用カ プラントを使用することで室温から350℃までの超音 波パルスエコー計測が可能である。また、温度の参照値 を計測するために SKD 内部の5箇所、SKD 上面の1箇 所および溶融アルミ内部のそれぞれに熱電対が設置され ている。超音波パルスエコーと温度を同時計測するため に汎用ソフトウェア LabVIEW を用いたリアルタイムモ ニタリングシステムを構築した。超音波波形と温度はそ れぞれ7 回/秒の速度で記録される。800℃の溶融アルミ ニウム合金 (ADC12) を SKD 底面に接するまで鋳型に 流し込み、アルミが凝固する過程の超音波と温度の変化 をモニタリングした。

4 結果と考察

Fig.2はSKD鋼の音速の温度依存性を計測した結果で ある。この実験は別途用意した加熱用ヒータを用いて SKD板の板厚方向の温度を均一にした状況で行った。こ



Fig. 1 Schematic diagram of the developed system for monitoring ultrasound pulse-echo and temperature.



Fig. 2 Temperature dependence of the sound velocity of SKD steel used.

の結果より、この温度範囲内では(2)式で仮定したように 音速は温度の一次式で表せることがわかる。後の温度推 定にはここで最小二乗法により求めた関係式を用いた。

Fig. 3はSKD板にアルミニウム溶湯が接触する前後の、 SKD 板の底面からの反射エコー強度と SKD 内の2点 (TC1とTC5)の温度の変化を示す。反射エコーに着目 すると、点 a において強度の減少が明瞭に確認される。 これはアルミニウム溶湯が SKD 板の底面と接触したこ とにより、超音波エネルギーの一部が SKD 底面から溶 湯へ透過したことによるものである。このような反射強 度の挙動からアルミニウム溶湯の接触状況を正確に捉え ることができる。以後、このa 点を接触開始の基準時間 とする。なお、底面から最も近い位置にある熱電対 TC1 に温度上昇が見られるのはa 点から約 1.7 秒後であるこ とから、超音波振幅による溶湯接触状況モニタリングは 熱電対によるものよりも時間応答性に優れていることが わかる。底面から遠い位置にある熱電対 TC5 の温度変化 は当然のことながら TC1 よりも緩慢である。

Fig. 4 は溶湯接触後の SKD 板内部の温度分布の変化を 示す(熱電対により測定)。接触後の熱伝達にともなう 温度分布は時間の経過とともに緩やかになるとともに全 体的に温度が上昇しているのがわかる。底面から数ミリ の領域には極めて急激な温度勾配が発生していることが 予想される。また、SKD 上面では温度の低下が見られる が、これは熱電対が外気と接触しているための放熱によ るものである。本報では底面近傍の温度上昇を指数関数 により近似しているため、上面付近の温度低下をモデル 化することは困難である。本報での内部温度の推定には 超音波伝播時間と上面付近の温度を既知情報として用い るが、ここでは SKD の表面に最も近い TC5 の温度を既 知情報とすることとした。

Fig. 5 は底面に最も近い TC1 の位置での温度変化を推定した結果である。比較のために熱電対 TC1 による測定結果も示した。両者はよく一致しており、本手法の有効性が確認された。今後、熱伝導解析を援用することで、底面近傍に存在する急激な温度勾配の推定について検討を行う。超音波を用いた内部温度モニタリングは鋳造プロセスなどの過渡現象の温度モニタリングにも有効であると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたりトヨタ自動車㈱計測技術部の奥 野友和氏の協力を得た。また科学研究費補助金 B17360351による援助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Tzu-Fang Chen, et al, Meas.Sci.Technol., 10, 139 (1999).
- Krishnan Balasubramainiam, et al., Rev. Sci. Instrum., 70-12, 4618 (1999).







Fig. 4 Variation of temperature distribution in SKD plate with elapsed time after contact with molten Al.



