

超音波を用いた金型内部の温度計測技術の開発

(地独) 大阪産業技術研究所 加工成形研究部

主任研究員 四宮 徳章

(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014013)

キーワード：温度計測，超音波，ラミノグラフィ

1. 研究の目的と背景

近年，IoT の普及が拡大しており，生産現場において機器の診断や製品の不良を検知するためにビッグデータの活用が期待されている．なかでも，塑性加工の分野では，高強度材料を加工する際の素材温度の上昇や，熱間加工時の金型の温度管理など，加工中の温度計測を望むケースが多い．例えば，加工中の素材の発熱に伴う温度上昇により，成形品の寸法精度が悪くなる事例や潤滑性が変化して成形不良となる事例が報告されている．また近年需要の高いハイテン等のホットプレス成形においても，成形後の製品強度に及ぼす成形温度の影響が著しいため，成形中の温度計測が大変重要となっている．

成形中の金型温度を計測する場合，一般的には金型に孔をあけて熱電対を挿入して計測する．実際に温度を計測したい部分は加工部の直下であるが，その位置までの孔を加工することは困難で，また挿入孔をあけることによる強度低下も懸念される．さらに多点測定を行う場合には多数の孔をあける必要があり，実用上ほぼ不可能である．

一方で，超音波と熱伝導方程式の逆問題解析を用いて試料内部の温度分布を計測する方法が，これまでにいくつか報告されている¹⁻³⁾．超音波の音速は温度依存性があり，音速を求めることで対象材料の温度を得る方法である．超音波による温度計測は，応答性が良く，また測定対象物に孔が必要でないため強度低下のデメリットがない．本研究は，超音波温度計測に傾斜型 CT の断層画像を生成する方法（ラミノグラフィ⁴⁾）を応用することで，金型内部の温度計測が可能となる画期的な技術を開発するものである．

2. トモグラフィとラミノグラフィの原理

トモグラフィとは X 線 CT で主に用いられている断層画像を得るための技術である．図 1 は二次元平面におけるトモグラフィの原理を説明したものである．測定対象物を挟むように X 線源と検出器を配置し，測定対象物を中心とした円周方向（180 度以上）に X 線源と検出器を回転させて，それぞれの方向からの X 線の吸収率の一次元分布を取得する．次に，X 線源と検出器の回転角度ごとに吸収率の一次元分布を配列することでサイノグラムと呼ばれる投影データ群を作成する．このサイノグラムの一次元フーリエ変換は，対象物の二次元フーリエ変換に等しいという Radon の画像再構成則から，サイノグラムの一次元フーリエ変換像を二次元フーリエ逆変換すれば，対象物の断層画像が得られる．一般に，得られたサイノグラムから断層画

像を計算する過程は再構成と呼ばれており，本報でも，以後，そのように表記する．

ラミノグラフィはトモグラフィと同様に断層画像を得る手法であるが，具体的な原理は，図 2 に示すように，X 線源を左右にずらして撮影したデータを適切な条件でずらして重ね合わせることで特定の画像を鮮明に得るものである．つまり，このラミノグラフィも X 線経路の吸収率の積算値を入力条件として，内部の吸収率の分布を求める手法である．

本研究は，トモグラフィあるいはラミノグラフィに用いられている X 線の吸収率，具体的には X 線の通過経路における吸収率の積算値を，超音波の通過経路における音速の平均値と読み替えることによって，対象物内部の音速分布を得て，音速の温度依存性を利用して対象物内部の温度分布を求めるものである．

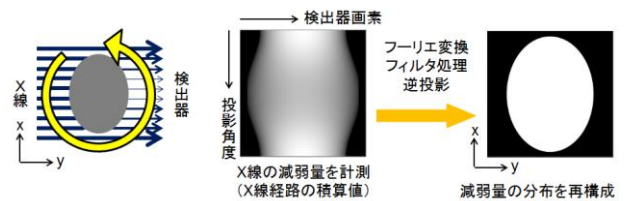


図 1 トモグラフィの測定方法

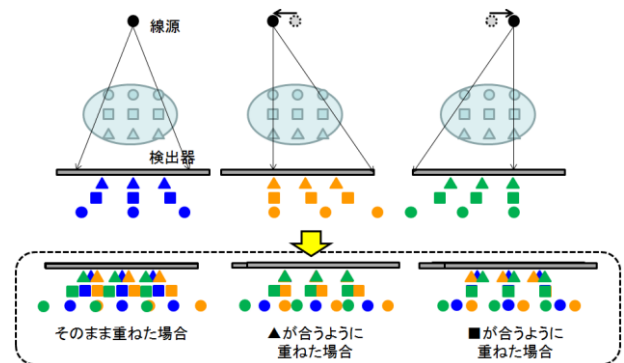


図 2 ラミノグラフィの測定方法

3. 実験方法

3.1 数値シミュレーション

ラミノグラフィの原理を利用した金型材内部の温度分布測定の可能性を検証するために数値シミュレーションを行った．ラミノグラフィの原理は，トモグラフィにおけ

る円周方向の回転において角度に制限がある場合と同じ考え方とも言える⁵⁾ので、ここではトモグラフィにおける円周方向走査の角度制限により得られたサイノグラムから、断層の温度分布を得る数値シミュレーションプログラムを作成した。なお、数値シミュレーションのコードは参考文献 5)および 6)を参考にして C++で記述した。簡単なフローチャートを図 3 に示す。

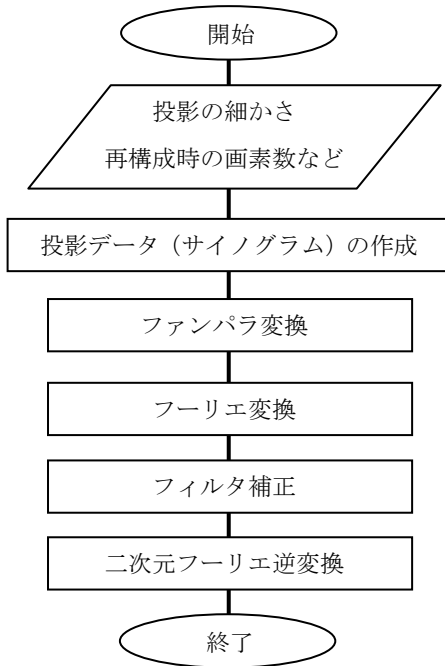


図 3 ラミノグラフィによる温度分布再構成プログラムのフローチャート

まず、投影データを取得する角度、ピッチ、温度分布の再構成時の画素数などの数値シミュレーションに必要な情報を指定する。その後、温度分布の存在するブロック材における超音波路程ごとに、温度の積算値に相当する投影データを作成する。得られた投影データは超音波の広がり を考慮したものであるので、平行ビームの路程とした場合の投影データへ変換する (ファンパラ変換⁵⁾)。ファンパラ変換後の投影データをフーリエ変換し、画像の不鮮明さを除去するフィルタ補正を行った後に、二次元のフーリエ逆変換を行うことで、任意断層の温度分布を得た。

3・2 超音波音速の温度依存性

超音波の発振や受信には図 4 に示すような装置が必要になる。本研究では、オシロスコープ (横河電機製, DLM2022), パルサ・レシーバ (オリンパス製, 5072PR) プリアンプ (オリンパス製, 5676), 探触子 (オリンパス製, V1091, 5MHz, φ3mm) を用いた。

超音波の音速を測定する場合、通常は超音波の発振から受信までの時間とあらかじめ測定した路程長から速度を算出する。ここで重要なことは、発振のタイミングと受信

のタイミングを正確に測定できるかという点である。ブロック材上面から鉛直下方向に超音波を入射すると図 5 のようなエコーを得る。始めに現れるパルス波形のピークは発振された超音波のパルスを受信したためである。また、二つ目のピーク波形はブロック材底面からのエコー (第一底面エコー) である。三つ目以降は、底面エコーがさらに上面で反射し、再び底面で反射したエコーを捉えたピーク波形である。一般に、探触子とブロック材の間には油等の液体を塗布して、微小な空気層を排除して測定を行うが、ここでの油膜厚さが測定における発振から受信までの時間に影響を及ぼす。そのため、音速測定における一般的な方法としては、1 回目の底面エコーと 2 回目の底面エコー

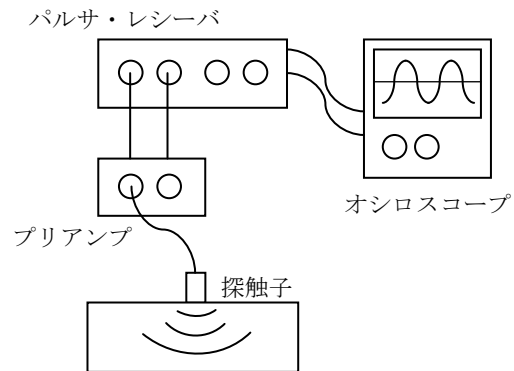


図 4 超音波音速の測定装置

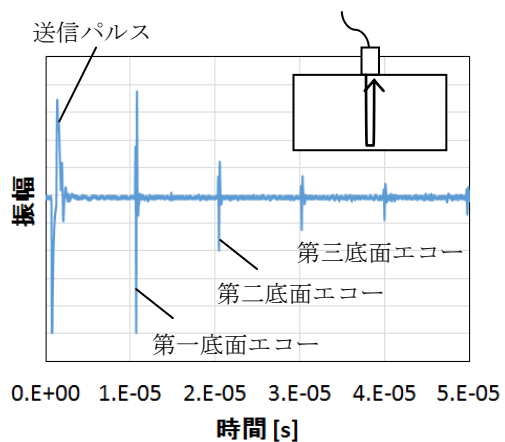


図 5 垂直方向のパルスにより得られる底面エコー

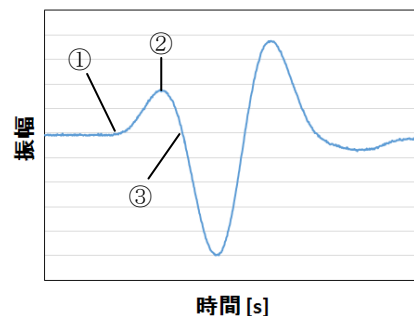


図 6 底面エコー波形の拡大図

の時間間隔を発振から受信までの時間とし、ブロック材の厚みの2倍を路程長として、路程長÷時間間隔の関係より音速を得る。

次に、1回目の底面エコーを拡大した波形を図6に示す。エコー波形はパルサや探触子により異なるが、本実験で使用した探触子では、図のような波形となる。ここで、基準となる計測点を定める必要があるが、波形の立ち上がり①、ピーク②、横軸との交点③が考えられる。事前に行った検討から、①立ち上がりでは、なだらかに振幅が上昇するため測定が難しいこと、横軸との交点では、0補正時の誤差や振幅の異なる波が合成された場合に交点がずれるなどといった問題点から、基準となる計測点は②ピークを用いた。また、鋼球の打撃試験によるコンクリート内部の欠陥検出の自動化に検討されているヒルベルト変換⁷⁾を波形に加える方法についても併せて検討した。

超音波音速の温度依存性を調べる試験片材料は、プレス金型で多く用いられるSKD11を対象にした。試験片の公称寸法は60×60×30mmとして、送風型恒温炉(ヤマト科学製、DKN302)にて、室温～65℃の範囲で加熱した。所定の温度で一定時間保持した後、恒温槽内で探触子を当て、底面エコーを測定した。

3・3 金型材内部の温度分布計測

金型材内部の温度分布計測には、図7に示すSKD11製の試験片(公称寸法は80×100×30mm)を用いた。試験片の幅方向中央部にはφ10のヒータを挿入し、試験片を加熱するとともに、ヒータの挿入面と対面側の底面をペルチェ素子により冷却、またその他の底面を断熱した。試験片の側面からφ1のK型シーース熱電対を8本挿入し、加熱実験中の温度分布を計測した。熱電対による温度計測を行う

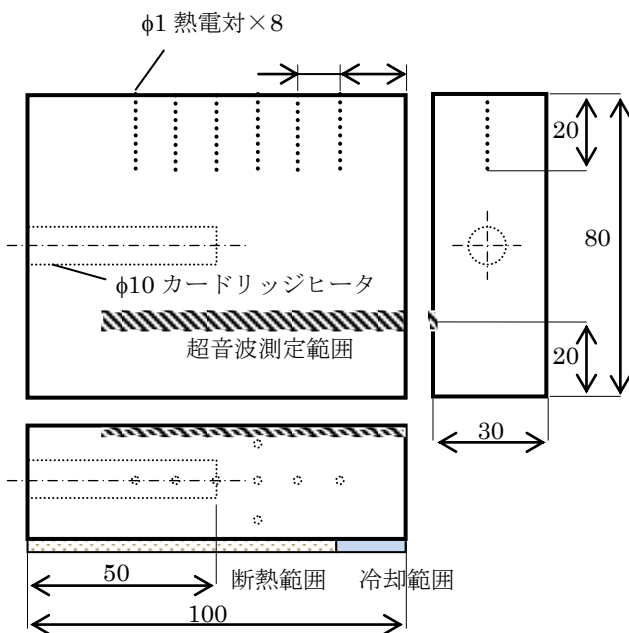


図7 温度分布測定用試験片

位置に対してヒータ位置を対称面とした反対側を超音波探触子の走査場所とした。

超音波音速の計測について、ラミノグラフィのアルゴリズムによる温度分布再構成に必要なビーム路程は、図8に示すように、探触子から試験片に対して垂直方向に発振・受信する路程(a)、および、斜め方向に発振・受信する(斜角)路程(b)の二つである。路程(a)については、一般的な超音波による探傷や板厚測定に用いられる方法であり、高精度な測定が可能と思われる。路程(b)は通常は斜角探触子を用いて、探触子ごとに使用角度の決まった測定を行うものであるが、本研究では、必要な角度ごとに探触子を使い分けると測定の迅速性を低下させること、また斜角探触子の使用できる角度の種類が少ないことから、二つの垂直探触子を用いて、斜角路程の計測を試みた。

垂直探触子を用いた斜角路程の計測については、二つの探触子の距離が10mmピッチで一定値を維持できる治具を作製し、治具を取り付けた状態で水平方向に走査することによって探触子間の距離が変化しないように配慮した。なお、実際には探触子間の距離を10, 20, 30, 40, 50mmのそれぞれに固定して測定を行った。

再構成については、ラミノグラフィの最も基本的な方法として、図9に示すような方法を用いた。まず、試験片の温度分布測定断層を8×6のセル(1セル、幅10mm、厚み5mm)に分割する。あらかじめ求めたビーム路程ごとのセルを通過する面積分値(重み)を路程ごとの音速に乗じて各セルに加算し、すべてのビーム路程の加算後に重みの積算値で除することで、各セルの音速を求めた。事前に取得した音速と温度の関係から、各セルの音速を温度に換算することで、温度分布を求めた。

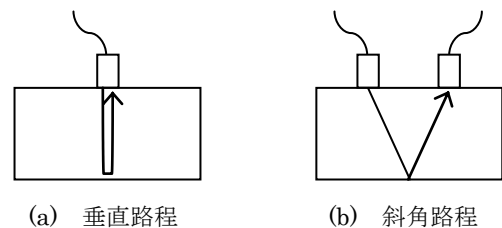


図8 ラミノグラフィに必要なビーム路程

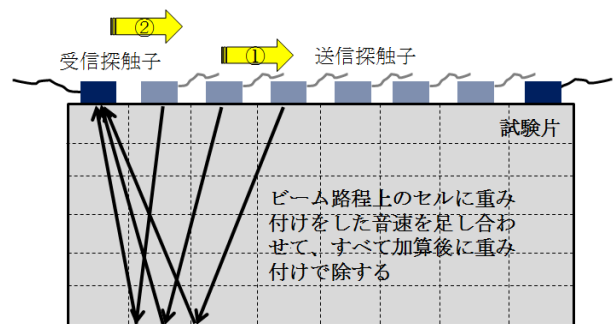


図9 実験に用いたラミノグラフィの方法

4. 実験結果

4.1 数値シミュレーション

図10に作製した温度分布モデルを示す。試験片厚み方向中央部を50℃、また周辺に向けて徐々に低温になる分布にした。探触子は試験片表面を左右に走査するものとし、超音波入射角度45度、再構成時の画素数は512×512として、内部の温度分布を数値シミュレーションにより求めた。投影により得たサイノグラムおよび温度分布再構成結果を図11に示す。再構成で得られた温度分布では、中央部温度が65℃程度になったことや斜め方向に筋状のノイズが発生していることを除けば、温度分布を傾向的に再現できており、超音波とラミノグラフィの原理を用いた内部温度分布測定の可能性が数値シミュレーションにより示唆された。

4.2 超音波音速の温度依存性

まず、室温一定の状態では、垂直路程により音速測定を行った。測定は6回行い、その平均値から音速を求め、加えて6回の測定の標準偏差も求めた。ヒルベルト変換を行わない場合においては、音速は6137.7m/s、標準偏差は2.1m/sであったのに対して、受信波形にヒルベルト変換を施すと音速は6135.4m/s、標準偏差は0.8m/sと測定誤差を大幅に小さくすることができた。よって、以後、音速測定を行う場合はヒルベルト変換を用いた。

また、斜角における音速測定について、プリアンプの有無による測定精度の違いを調べた。測定は5経路について

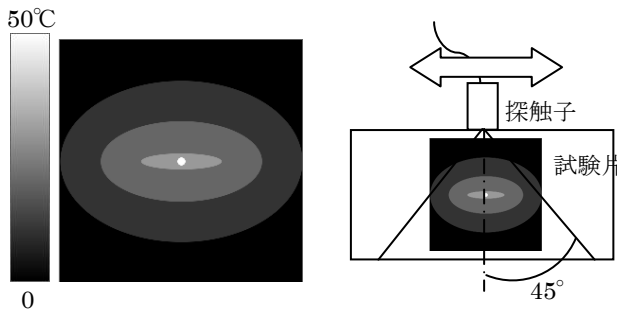


図10 数値シミュレーションに用いた温度分布とシミュレーションでの測定条件

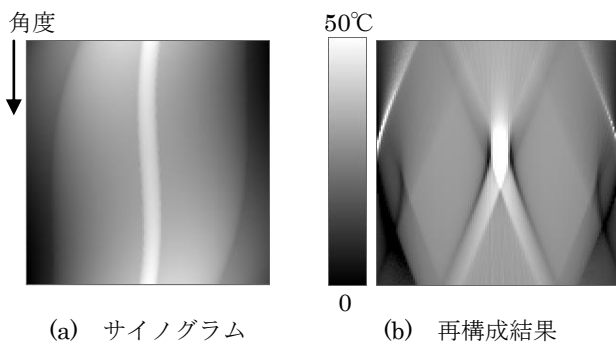


図11 底面エコー波形の拡大図

各2回ずつ行い標準偏差を求めた。プリアンプを用いない場合は、標準偏差が3.2m/sであったが、プリアンプを用いた場合には標準偏差が1.3m/sになり、プリアンプを用いることで斜角の音速測定について精度を大幅に向上できた。

次に、送風型恒温炉内で試験片を一樣加熱し、音速の温度依存性を調べた。結果を図12に示す。なお、図中、熱膨張考慮とは、室温時の試験片の厚みと熱膨張係数および試験時の温度から、昇温時の試験片の厚みを求め、その厚みを用いて音速計算を行ったものである。図より、温度が高くなるほど音速はほぼ線形的に遅くなるのがわかる。また、熱膨張の考慮の有無で音速の温度依存性が少し異なり、その影響は高温部ほど大きいことがわかる。ここで算出した音速の温度依存性の結果は次節の内部温度計測に用いた。

4.3 金型材内部の温度分布計測

まず、室温において、いずれの角度の路程でも音速が一定になるかを調べた。表1に測定結果を示す。なお、表中横軸は発振探触子-受信探触子の距離、縦軸は、受信探触子の測定位置、数値は音速を示す(図9参照)。

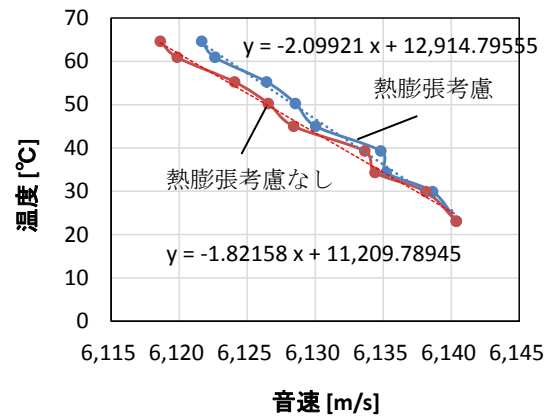


図12 超音波音速の温度依存性の測定結果

表1 室温における斜角の超音波音速測定結果

		発振探触子-受信探触子の距離 [mm]				
		10	20	30	40	50
受信探触子の位置	1	5,645	5,675	5,698	5,740	5,765
	2	5,647	5,675	5,707	5,740	5,768
	3	5,648	5,675	5,701	5,740	5,767
	4	5,649	5,674	5,708	5,738	
	5	5,649	5,673	5,706		
	6	5,648	5,673			
	7	5,648				
平均[m/s]		5,648	5,674	5,704	5,740	5,766

単位：m/s

試験片は室温で一定のため、ビーム路程に関わらず音速は一定値になるはずであるが、表より、ビーム路程によって音速が大きく異なることがわかる。ここでの音速の誤差は最大で 120m/s にもなり、温度差に換算すると約 220°C に相当する。これは、垂直探触子を斜角で用いることによる探触子固有の測定誤差であると考え、垂直路程から求めた正確な音速を用いて、ビーム路程ごとの補正係数を求め、ビーム路程ごとに補正係数を乗ずることとした。

次に、ヒータと冷却板により試験片内部に温度分布を生じた状態で音速測定を行った。なお、ヒータおよび冷却板の電源を投入した後十分に時間保持し、温度分布が定常になった時点で測定を開始した。図 13 は音速測定時の熱電対による温度測定結果である。図中、基準温度位置は、後述する温度分布再構成時に用いた基準温度位置である。なお、この基準温度位置は、今回の試験では試験片内部の温度を用いたが、試験片表面でも問題はない。

図 14 に、試験片の熱膨張を考慮しない場合と、考慮した場合の温度分布再構成結果を示す。

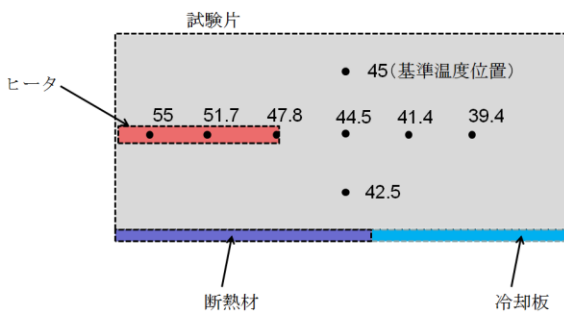


図 13 試験片の熱的境界条件と熱電対による測定結果

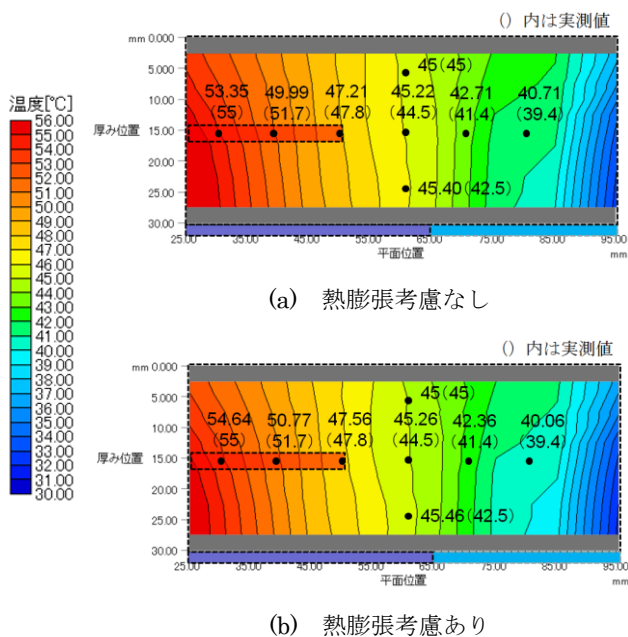


図 14 温度分布測定結果

熱膨張を考慮しない場合、熱電対による測定温度と再構成した温度分布は概ね良い一致を示すが、試験片左右の高温部および低温部においては誤差が 1.5°C 程度であり、やや誤差の大きい値になった。一方で、熱膨張を考慮した場合は熱電対による測定とさらに良い一致を示し、試験片左右の高温部および低温部でも誤差が 0.5°C 程度であった。しかし、両測定とも、断熱材に近い試験片底部では熱電対による測定温度と再構成より求めた温度に差が大きい。この点については、再構成プログラムの高度化など今後の改善が必要と思われる。

5. まとめ

本研究において、超音波温度計測に傾斜型 CT の断層画像を生成する方法 (ラミノグラフィ) を応用することで、金型内部の温度計測を試みた結果、以下のことがわかった。

1. 数値シミュレーションより、超音波とラミノグラフィの原理を用いることで内部の温度分布の測定が原理上可能である。
2. 超音波音速には温度依存性があり、温度が上がるほど音速は下がる。
3. 金型材内部に生じた温度分布を測定したところ、ラミノグラフィの最も基本的な方法で温度分布を概ね再現することができ、また金型材の熱膨張を考慮することで測定の高精度化ができた。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2014013) により行われました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 井原郁夫・高橋学・鎌親大輔：特許 4843790, 「超音波を用いた温度測定方法」。
- 2) リラン・シュウフェンファン・コクセンチョン・アンツアントラン・近藤敏志：特願 2012-533401, 「温度推定方法、温度推定装置及びプログラム」。
- 3) 飯塚幸理・橋本達也：特願平 10-289809, 「鋼材の内部温度の測定方法および装置」。
- 4) 星野真人・上杉健太郎・竹内晃久・鈴木芳生・八木直人：X 線ラミノグラフィによる大面積平板試料の 3 次元構造解析、放射光、26-5 (2013), 257。
- 5) 篠原広行・梶原宏則・中世古和真・橋篤志・橋本雄幸：トモシンセシスから 3 次元ラドン逆変換まで、(2014), 49, 医療科学社。
- 6) 篠原広行・中世古和真・陳欣胤・坂口和也・橋本雄幸：コーンビーム CT 画像再構成の基礎、(2013), 50, 医療科学社。
- 7) 大野健太郎・山下健太郎：コンクリートの衝撃弾性波法における到達時刻決定方法と伝播経路の整理と課題、非破壊検査、65-9 (2016), 444。