

2 アルミビレット加熱装置における温度計測技術の開発

長岡孝、森下勇樹、府山伸行、藤本直也、伊東徹也*、緒方康博*、正孝幸*、瀬尾真之*

Development of temperature measurement method for aluminum billet heating equipment

NAGAOKA Takashi, MORISHITA Yuki, FUYAMA Nobuyuki, FUJIMOTO Naoya,
ITO Tetsuya, OGATA Yasuhiro, SHO Takayuki and SEO Masayuki

This study aimed to establish a method to determine the radial temperature distribution in an aluminum billet rotating in a strong DC magnetic field. The investigation revealed that in aluminum billet heating equipment, the change in rotational speed can be determined by observing the change in the rate of rise of the radiation thermometer detection value. Furthermore, it is possible to determine the temperature distribution on the surface and inside of the aluminum billet during heating by measuring the temperature of the billet with a radiation thermometer and correcting the detected value using the temperature correction formula obtained by heating the object to be measured with a heater.

キーワード：アルミ押出成形、超電導マグネット、誘導加熱、温度測定、二色放射温度計

1 緒 言

アルミニウムは、密度が銅や鉄の約 1/3 であり、軽量かつ、加工性に優れているため、輸送機器や建築業界など様々な分野で用いられている。その中で、アルミ押出成形品は産業機械のフレームや自動車部品、鉄道車両の構造材など広く利用されている。一般的に、アルミ押出加工におけるアルミビレットの加熱工程は、高周波誘導加熱式が採用されているが、磁場及び周波数の増加に制約があり、さらなる効率や加熱電力、加熱速度の向上には限界がある。

筆者らは、2019 年度よりサポイン事業(戦略的基盤技術高度化支援事業)を活用して、新潟大学や中部電力(株)、産業技術総合研究所らと共同で、高温超電導コイルにより発生した直流強磁場中で円柱形状のアルミビレットを回転させることで加熱する直流誘導加熱装置の開発を行ってきた。その中で、高周波誘導加熱式よりも直流誘導加熱式の方が、アルミビレット表面に投入される誘導電力が分散しやすいため、アルミビレットの径方向及び軸方向の 3 次元的な温度分布を把握することは、押出加工品の品質を管理する上で非常に重要である。

そこで本研究では、直流強磁場中で回転するアルミビレットにおいて、二色放射温度計を用いた非接触での加熱中の温度推移データを取得することにより、温度補正方法も併せて、径方向の温度分布を把握する方法を構築することを目的とした。

2 実験方法

2.1 温度補正式の導出

本研究における加熱中のアルミビレットにおける温度分布評価は、**図 1**に示すようにアルミビレット(A6063)の表面及び深さの異なる 2 か所の穴底の温度測定から、径方向の温度分布を推定する方法を試みた。

強磁場下で高速回転するアルミビレットの温度を計測するため、温度計には磁場の影響を受けず応答性に優れた二色放射温度計を採用し、**図 1**に示すように鉄心からアプローチする必要があるため、温度計の先端が光ファイバーとなっている光ファイバー型二色放射温度計を用いた。

一般的に二色放射温度計は、放射率又は検出値を補正する必要があるため、本研究では、熱電対の検出値を真値として、二色放射温度計の検出値を補正する式を導出した。

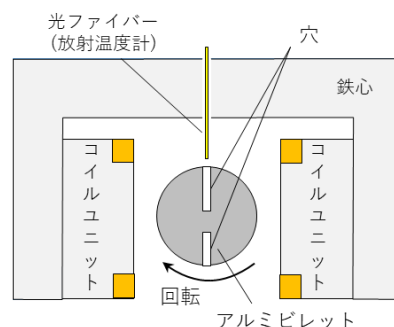


図 1 加熱時におけるアルミビレットの温度計測方法

*テラル株式会社

磁気加熱式アルミビレット加熱装置では、約 1 T の強磁場下でアルミビレットが径方向に回転するため、熱電対による真値の測定が困難である。そのため、温度補正式の導出は、測温対象物をヒーターで加熱する方式により、熱電対と二色放射温度計の検出値との関係を調査した。

2.1.1 表面温度補正式の導出

図 2 に表面温度補正式導出実験の構成を示す。アルミブロックは、実機加熱実験に用いるアルミビレットにおける外周部を切り出したものである。温度計測箇所には、黒体スプレーを塗布し、ヒーターを用いて加熱する際の、二色放射温度計と K 熱電対との検出値を比較し、表面温度補正式を導出した。

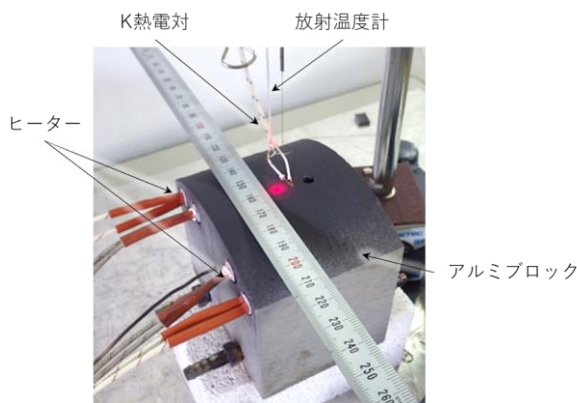


図 2 表面温度補正式取得実験の構成

2.1.2 内部温度補正式の導出

図 3 に内部温度補正式取得実験用サンプルの構成図を示す。穴径は $\phi 20$ mm とし、穴深さ 75 mm と 55 mm の二条件で測定した。サンプルの表面状態は、表面及び穴の側面は機械加工ままとし、穴底のみ機械加工面の上から黒体スプレーを塗布した。表面と穴底で温度差をつけるため、表面付近にニクロム線を巻き付けて、ニクロム線に電圧を印加することでサンプルの加熱を行った。二色放射温度計は、サンプルに加工した穴と同軸かつ、光ファイバー先端とサンプル表面との距離は約 10 mm となるように配置した。参照用として、表面及び穴底の温度を K 熱電対により計測し、加熱時及び表面と穴底が同様の温度の時の、二色放射温度計の検出値と、表面 K 熱電対、穴底 K 熱電対の温度の関係から、数理最適化により内部温度補正式の係数を求めた。

2.2 アルミビレット加熱装置における温度測定

図 4 に実機での加熱実験に用いたアルミビレットの寸法と黒体スプレーを塗布した箇所を示す。実機での加熱実験は、 $\phi 155$ mm $\times$ 515 mm のアルミビレットを用いた。駆動側の端部を基準として、基準から 267 mm の位置に、

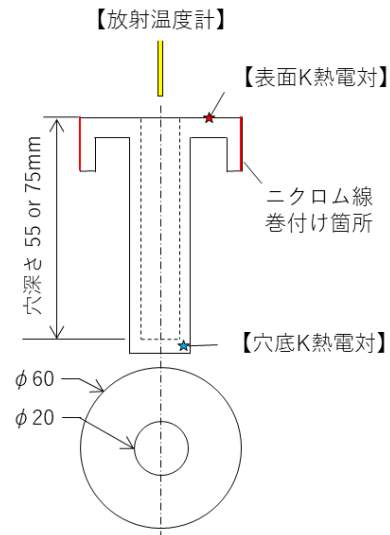


図 3 内部温度補正式取得用実験の構成

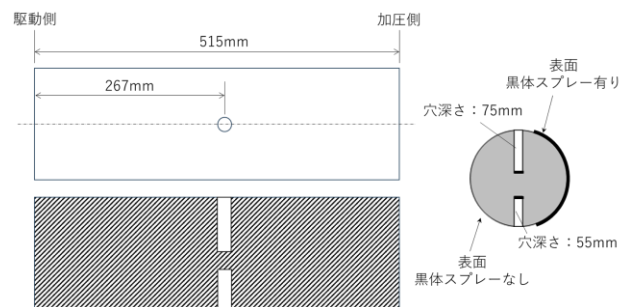


図 4 実機加熱実験に用いたアルミビレット

$\phi 20$ mm $\times$ 75 mm と $\phi 20$ mm $\times$ 55 mm の穴加工が施されている。黒体スプレーは、図 4 に示すビレット表面及び穴底にのみ塗布した。本研究における二色放射温度計が検出する順番は、アルミビレットの回転方向との関係から、黒体スプレーを塗布した深さ 75 mm の穴底、アルミビレット表面、深さ 55 mm の穴底、黒体スプレーを塗布していないアルミビレット表面となる。

図 5 に実機における加熱パターンを示す。磁気加熱式による加熱時の加熱電力は、周波数の 2 乗及び磁束密度の 2 乗と比例関係にある。ここで、本研究の加熱機構では、回転速度が周波数に相当するため、アルミビレットの回転速度を調整することで、加熱電力の制御を行った。加熱は、まず 10 秒で 750 rpm まで回転速度を上げ、その速度を 10 秒間維持し、その後 450 rpm、270 rpm に段階的に減速し、54 秒で終了するパターンとした。回転速度が速いほど加熱電力が大きく、表面に電流が集中する表皮効果が表れるため、表面と内部で温度差が生じると予想されることから、径方向の温度制御区間として、加熱の後半に比較的表皮効果が生じにくい 270 rpm にて 18 秒

間の加熱区間を設けた。

加熱時のアルミビレットにおける表面及び内部の温度測定には、光ファイバー型の二色放射温度計を用いた。二色放射温度計は、サンプルに加工した穴と同軸かつ、光ファイバー先端とサンプル表面との距離は約 10 mm となるように配置し、高速電圧ユニットにより取込間隔 100 μ s で計測を行った。取得した温度波形と表面または内部温度補正式から、計測箇所ごとの表面及び内部温度を求め、加熱時におけるアルミビレットの温度分布を評価した。

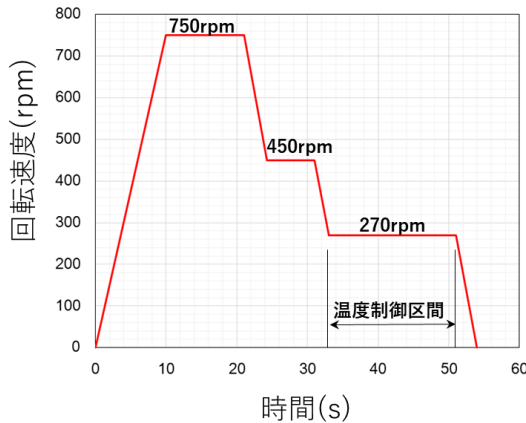


図5 加熱パターン

3 結果及び考察

3.1.1 表面温度補正式の導出

図6にK熱電対温度と二色放射温度計検出値との関係を示す。検出値の比較を行った結果、K熱電対と二色放射温度計の検出値は比例関係にあることが分かり、二色放射温度計の検出値をX、アルミビレットの熱電対温度をYとして(1)式の表面温度補正式を得た。

$$Y = 0.98377 \cdot X - 1.3014 \quad (1)$$

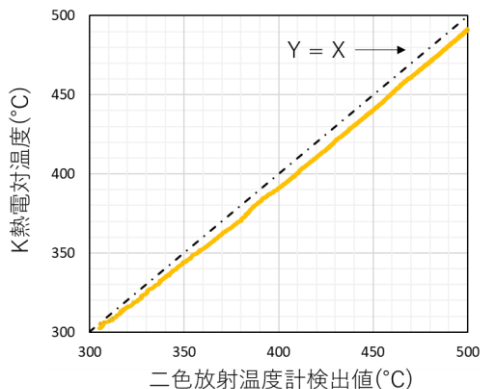


図6 表面温度補正式取得用実験結果

3.1.2 内部温度補正式の導出

取得した温度データから、二色放射温度計の検出値をX、表面温度をY、内部温度をZとして、(2)式に示すように一次の比例関係にあると仮定し、数理最適化により(2)式中の係数a、b及び切片cを求めた。なお、データ点数は穴深さ 75 mm が 1977 点、穴深さ 55 mm が 2118 点であった。

$$Z = a \cdot X + b \cdot Y + c \quad (2)$$

表1に内部温度補正式の係数及び切片を示す。すべての計測点において、穴深さ 75 mm と 55 mm の内部温度補正式を用いて穴底温度の実測値と計算値を比較し、それぞれZとZ'として(3)式により平均誤差を求めた。その結果、穴深さ 75 mm は 0.68%、穴深さ 55 mm は 0.24%と平均誤差 1%以内であることが確認された。また、内部温度補正式の導出にあたって、二色放射温度計の検出値と、表面温度、内部温度は、それぞれ一次の比例関係にあると仮定しており、計測したすべての温度範囲で実測値と計算値との誤差が 3%以上となった計測点は無かったため、上記の仮定は成立すると考えられる。

$$\text{平均誤差} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(Z-Z')}{Z} \times 100 \right| \quad (3)$$

表1 (2)式の係数及び切片

係数及び切片	穴深さ	
	55mm	75mm
a	0.741834	1.671587
b	0.217905	-0.63994
c	-19.1523	-44.7951

3.2 アルミビレット加熱装置における温度測定

図7に実機でのアルミビレット加熱時における温度波形を示す。本研究で用いた二色放射温度計の検出下限値が 300℃であったため、加熱装置開始から 10 秒程度、検出値は 300℃を示した。その後アルミビレットの温度を検出し始め、加熱終了まで検出値は上昇したものの、約 8 秒と約 18 秒、38 秒に昇温速度の変化点が観られた。加熱電力は回転速度の 2 乗と比例関係にあるため、上記変化点は回転速度制御の変化点であると考えられる。また、変化点間の時間は、一つ目と二つ目が 10 秒間、二つ目と三つ目が 20 秒間であり、これは加熱パターンの 450 rpm と 270 rpm の区間と一致する。そのため、図7に図示している範囲が、各回転速度で加熱した時間帯であると考えられる。

加熱中のアルミビレットは、表皮効果により表面が内部よりも高い温度で推移し、計測中は表面と穴底の温度が一定周期で検出される。また、回転速度が速いほど表皮効果が表れるため、表面と内部で温度差が生じると予想されることから、**図7**に示すような表面と穴底の温度差として幅を持った温度波形が得られると推測される。しかし、回転速度が速い750 rpmや450 rpmよりも270 rpmの方が幅を持った温度波形が得られた。本研究では、 $\phi 155$ mmのアルミビレットに対して穴底温度測定用に $\phi 20$ mmの穴を設けて計測を行っており、二色放射温度計の応答速度の制約から、穴底温度が適切に計測できていない可能性が示唆された。

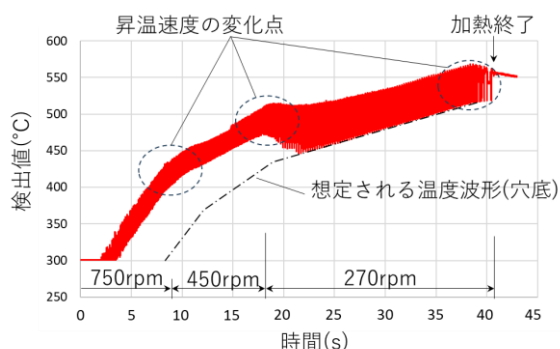


図7 実機におけるアルミビレットの温度波形

図8に実機におけるアルミビレットの温度波形について、加熱終了時点を時間軸0秒として整理した時の、加熱終了15秒前の温度波形を示す。本研究で用いた二色放射温度計は、これまでの経験から放射率が高いほど検出値が低くなる傾向にある。この経験則と検出の順番から、180度振りで施された深さの異なる穴の区別を行った。また、加熱終了15秒前において、アルミビレットは270 rpmで回転しており、このことから1回転に要する時間は約0.22秒である。**図8**中の深い穴の検知する間隔とおおよそ一致する。検出値に関しては、黒体スプレーを塗布した表面が497°C、穴深さ55 mmと75 mmがそれぞれ460°C、463°Cであった。これらの検出値と(1)式及び(2)式を用いて温度を算出した結果、表面温度が約488°C、深さ55 mmが約428°C、深さ75 mmが417°Cであり、これは表面に電流が集中する表皮効果により表面と内部で温度差が生じる傾向と一致することが確認された。このことから、ビレットに穴加工を施して二色放射温度計を用いて計測を行い、測温対象物をヒーターで加

熱する方式により取得した温度補正式により検出値を補正することで、加熱時におけるアルミビレットの表面及び内部の温度分布を把握することが可能であることが示された。

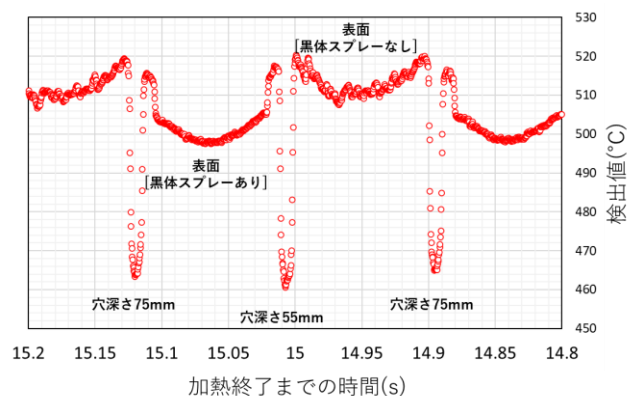


図8 加熱終了15秒前の温度波形

5 結 言

磁気加熱方式の押出加工用アルミビレット装置における加熱中のアルミビレットの温度分布評価手法の構築を試み、以下の知見を得た。

- (1) $\phi 20$ mm $\times$ 75 mm、55 mmの穴に対して、穴と同軸かつ、光ファイバー先端とサンプル表面との距離は約10 mmとなるように配置して温度計測を行った場合、二色放射温度計の検出値と、表面温度、内部温度は、それぞれ一次の比例関係にある。
- (2) アルミビレット加熱装置において、二色放射温度計の検出値の昇温速度の変化から、回転速度の変化を把握することが可能である。
- (3) 穴加工を施したアルミビレットに対して二色放射温度計を用いて温度計測を行い、測温対象物をヒーターで加熱する方式により取得した温度補正式により検出値を補正することで、加熱時におけるアルミビレットの表面及び内部の温度分布を把握することが可能である。

文 献

- 1) 伊東、福井、河島、緒方、正、古瀬、渡部、長屋、小川、森下、長岡、府山、縄稚/低温工学 58巻3号 (2023) P. 124-131