研究論文

誘導加熱したビレットの温度分布解析*

沖 善成**・吉田 善博***
井上 雅夫***・山下 友一****

Analysis of temperature distribution in a
billet by induction heating*

Yoshinari OKI**, Yoshihiro YOSHIDA***
Masao INOUE*** and Tomokazu YAMASHITA****

In order to understand the temperature distribution in a billet at the induction heating stage of extrusion process, a computer analysis program is developed and some results of its application are presented in this work. Three coils were linearly arranged, and two billets were inserted into the coils one after another, and then were heated up to the pre-determined temperature in two steps, that is, pre-heating step and main heating step. Repeated numerical calculation were carried out, considering Joule heat due to induced current, heat conduction and radiation from surface of the billet. The temperature distribution in the billet at pre-heating step, main heating step and just before insertion into the container were given on an isothermal map. The computer analysis on 155, 204, 254 and 307 mm diameter billets showed that the thicker billet had the more uneven radially temperature distribution, and that at the warming-up stage of induction heater for the thicker billet each main heating time was unstabler, and the poorer temperature distribution was obtained.

Keywords: aluminum alloy billet, extrusion, induction heating, temperature distribution, computer analysis

(Received December 28, 1989)

1. 緒 言

アルミニウム合金の熱間直接押出しにおいて、ビレットの加熱に誘導加熱装置を用いることが多い。押出し前工程のビレット加熱は、押出しの安定性、巻き込み等の不良発生に大きく影響し、適切なテーパーヒート、変動の無い温度分布が求められる。しかしながら押出し現場では、誘導加熱の特性としての径方向の温度不均一や、加熱ごとのテーパーヒート状態、温度分布の変動は経験的にしか把握されていないのが実状である。特に太径ビレットほど加熱ごとのテーパーヒート状態や温度分布状態が不安定になりやすく、品質に大きく影響することが現場経験的につかまえているが、その対策は誘導加熱装置の操業条件の変更などの試行錯誤的対応にならざるを得ないのが実状である。

従来から誘導加熱の特性やビレット温度分布の解析に関する報告^{1),2)}はあるが、実際の現場に使用されている形態の炉に適用できる報告は少なく、特に太径ビレットでの問題点を扱ったものはみあたらない。

本研究では、実際の押出し現場に多く使用されている3ゾーンタイプの誘導加熱炉で、2本のビレットを同時に予熱および加熱する装置を対象とし、その誘導加熱によるビレット温度分布やその経時変化、変動を数値的に把握しうる解析プログラムの開発を試みた。そして、ビレットの温度分布状態やその状態に及ぼす径の影響などを解析、検討した。

* 軽金属学会第76回春期大会（平成元年5月）で一部発表。

** 三協アルミニウム工業(株)（高岡市）。Sankyo Aluminium Industries Co., Ltd. (Takaoka-shi, Toyama)。

*** 富山軽金属工業(株)（新湊市）。Toyama Light Metal Industry Co., Ltd. (Shinminato-shi, Toyama)。

**** 富山合金(株)（新湊市）。Toyama Alloy Co., Ltd. (Shinminato-shi, Toyama)。

2. 実験方法

Fig. 1 に誘導加熱の原理^{3)~5)}を示す。コイルに交流電流を通じると、コイルの内側に磁場を生じる。この中に導電体が置かれると、電磁誘導作用により磁束 (ϕ) と直角方向に、導電体(被加熱材)内部にコイル電流 (I_c) と反対向きの誘導電流 (I_w) が生じ、そのジュール熱によって被加熱材が加熱される。

誘導電流は被加熱材の表面に最も強く発生し、その分布は、表面電流を I_0 、表面から任意の距離 x の内部電流を I_x とすれば、一般式として

$$I_x = I_0 \times e^{(-x/\delta)} \quad (1)$$

と表され、**Fig. 2** に示すような分布になる。この現象を誘導電流の表皮効果と呼んでおり、誘導加熱ではほとんどの熱が表皮近傍で発生し、中心部は熱伝導によって昇温してゆく。

ここで、 δ は電流浸透深さと呼び、次式で表される。

$$\delta = 5.03 \times \sqrt{\rho/(\mu \times f)} \quad (2)$$

Fig. 1 Schematic illustration of induction heating fundamentals.

Fig. 2 Skin effect of induced current.

Fig. 3 Schematic analysis model of the series billet heater.

Fig. 4 Schematic model of heat conduction and Joule heat on each lattice point.

ρ : 被加熱材の比抵抗, μ : 被加熱材の比透磁率, f : 加熱電源周波数

比抵抗 ρ は温度によって変化し、次式で表される。

$$\rho = 2.69 + 4.2 \times 10^{-3} \times T \quad (3)$$

T : 被加熱材の温度

また、被加熱材に流れる表面電流 I_0 は、次式で表される。

$$I_0 = \sqrt{2} \times I_N / \delta \quad (4)$$

I_N : 一次側実効電流

以上、(2)~(4)式での μ , f , T , I_N が既知になれば、(1)式の任意の位置での誘導電流 I_x が求められ、この I_x によって発生するジュール熱 H_x を次式によって求めることができる。

$$H_x = I_x^2 \times R / J \quad (5)$$

R : 被加熱材の抵抗, J : 4.1852

次に、今回開発した解析プログラムの解析対象とした誘導加熱装置のモデルを **Fig. 3** に示す。テーパークヒートを得るために3個のコイルが直列に配置された3ゾーンタイプで、2本のビレットを同時に予熱および加熱するものである。ビレットは右側から挿入され、まず予備加熱される。左側のビレットが加熱完了後排出されたら、次に挿入されるビレットに押されて左側に移動し、設定温度まで本加熱される。温度コントロールは出口側ビレット端面に熱電対を押し当て、設定温度に達したら加熱を終了し、所定の保持時間を経た後、排出される。

解析プログラムでは、この誘導加熱装置によるビレット温度分布を求めるため、**Fig. 3** のようにビレット縦断

Fig. 5 Schematic flow chart of billet heating analysis program.

面をメッシュ分割したモデルを考えた⁶⁾。Fig. 4 に示すように、上記(1)～(5)の基本式に沿って計算される各格子点での誘導電流によるジュール熱 (H_j) と、隣接格子点との熱移動 (C) の収支を繰り返し法によって逐次計算し、熱量変化から温度変化を求め、ビレット全体の温度分布を計算している。また、排出後のビレットについては、表面からの放熱も考慮した計算も行っている。

Fig. 5 に本解析プログラムのフローチャートを示す。解析は、加熱工程、保持工程、搬送工程と三つに分けられる。

まず、入力条件として、ビレットサイズ、ビレット加熱本数、加熱温度、保持時間、搬送時間、室温、コイルタップ電圧等を入力すると、加熱工程の解析に入る。

加熱工程は予備加熱と本加熱に分けられる。予備加熱では、前のビレットが本加熱によって所定の温度に達する間加熱され、解析結果として予備加熱終了時のビレット縦断面等温分布図を出力する。

予備加熱後、本加熱終了ビレットが排出されるまで所定時間保持され、この保持後の等温分布図も出力する。保持後、前に送られて本加熱に入り、熱電対設置位置の温度が設定加熱温度に達するまで加熱され、本加熱終了時の等温分布図を出力する。本加熱終了後、所定時間保

Table 1 Analysis conditions of 155 mm diameter billet heating

Conditions		Input values
Billet diameter	(mm)	155
Billet length	(mm)	642
Heating temperature	(°C)	450
Holding time	(s)	5
Carrying time	(s)	30
Room temperature	(°C)	5

Fig. 6 Results from the computer analysis of the 155 mm diameter billet after pre-heating.

持され、保持後の等温分布図も出力する。保持後、排出されてコンテナに搬送されるが、この間の放熱も考慮した計算を行い、コンテナ挿入直前の等温分布図を出力する。以上の解析フローを所定の加熱本数繰り返し計算するものである。

3. 結果および考察

本解析プログラムを利用した解析例を以下に示す。まず、155 mm 径のビレットを Table 1 の条件で解析した加熱 5 本目の結果を Fig. 6～Fig. 8 に示す。

Fig. 6 は予備加熱での加熱終了時および保持後の等温分布図を示している。加熱終了時の等温分布図から、誘導電流の表皮効果のため、ビレット外周部の温度が高く、中心部が低い分布になっているのがわかる。また、電圧の異なるコイルにまたがるため、ビレット頭部の温度が高く、尾部が低いテーパーヒートになっていることもわかる。保持後の等温分布図では、熱伝導により中心

Fig. 7 Results from the computer analysis of the 155 mm diameter billet after main heating.

Fig. 8 Results from the computer analysis of the 155 mm diameter billet just before insertion into the container, and the measured temperature in parenthesis.

部の温度が上昇し、径方向の温度差が緩くなっていることがわかる。

Fig. 7 は本加熱での加熱終了時および保持後の等温分布図を示している。予備加熱と同様に、加熱終了時には外周部の温度が高く、保持によって径方向の温度差が緩くなっている。

Fig. 8 はヒーターから排出され、30 s 間搬送されてコンテナに挿入されるとき等の等温分布図を示している。この等温分布図から、搬送中の熱伝導および表面からの放熱により、径方向の温度差はほとんどなくなり、長さ方向に緩やかなテーパヒートがかかっていることがわかる。また、図中の () 内は本条件での実測値で、解析結果は実測値とほぼ良好な一致を示しているが確認された。

次に、204, 254, 307 mm 径のビレットを、Table 2 の条件で解析したコンテナ挿入時の結果を Fig. 9 に示す。これも加熱 5 本目の解析結果である。204 mm 径の

Table 2 Analysis conditions of 204, 254 and 307 mm diameter billet heating

Conditions		Input values		
Billet diameter	(mm)	204	254	307
Billet length	(mm)	785	1100	1200
Heating temperature	(°C)	470	460	450
Holding time	(s)	5	10	10
Carrying time	(s)	45	50	50
Room temperature	(°C)	5	5	5

Fig. 9 Results from the computer analysis of the 204, 254 and 307 mm diameter billet just before insertion into the container.

ビレットでは155 mm 径のビレット同様、径方向の温度差は少なく、良好なテーパヒートがかかっているが、254, 307 mm と径が大きくなるに従って中心部への熱伝導が遅れるため、誘導電流の表皮効果の影響が大きく残り、径方向の温度差が大きくなっている。

径方向の温度差が大きいとメタルフローのバランスがくずれ押出しが不安定になるため、押出し現場では、太径ビレットのときは加熱後一定時間保持したり、外周部を冷却したりしてソーキングを行い、径方向の温度分布を均一にしている。

次に、太径ビレットでの加熱終了後の保持時間の影響について解析した結果を Fig. 10 に示す。これは、307 mm 径のビレットにおいて、本加熱終了後の保持時間を10 s と180 s 取ったコンテナ挿入時の解析結果である。保持時間180 s の方が径方向の温度差が少なく、テーパヒート状態も大差はない。このように、太径ビレットでは押出しの安定のため、ソーキングが必要であるといえる。

また、太径ビレットの加熱の問題点の一つとして、休日明けの立ち上げ（室温からの加熱立ち上げ）の際、1

Fig. 10 Effect of the soaking on temperature distribution in the 307 mm diameter billet just before insertion into the container.

Fig. 11 Change of heating time and taper-heat from the start-up heating stage of the 307 mm diameter billets.

本ごとの加熱時間が大幅に変動したり、押出しの安定性が悪いことが上げられる。そこで、本解析プログラムで、307 mm 径のビレットにおける加熱立ち上げ連続シミュレーションを行ってみた。

Fig. 11に307 mm 径のビレットを室温状態から順次加

熱していった場合の加熱時間とテーパーヒート状態の変化の解析結果を示す。この図から、加熱立ち上げ初期において、ビレットごとの加熱時間が振動し、テーパーヒート状態も変動して、約5本目以降にはほぼ安定していることがわかる。この原因は、1本目の加熱が室温からの本加熱になるため、加熱時間が長くなり、その間に予備加熱される2本目の温度が高くなって本加熱時間が短くなり、3本目の予備加熱時間が短く、本加熱時間が長くなるといった現象が繰り返されるためである。この加熱時間の変動に起因して、テーパーヒート状態も変動する。この現象を防ぐ手段としては、適切な加熱タイミング、ソーキングが必要となり、その条件検討に当たって、本解析プログラムが有効に活用できた。

4. 結 言

実際の押し現場に多く使用されている3ゾーンタイプの誘導加熱炉で、2本のビレットを同時に予熱および加熱する装置を対象とした誘導加熱解析プログラムを開発し、ビレットの温度分布状態やその状態に及ぼすビレット径の影響を解析、検討したところ、以下の結論が得られた。

- (1) 3個のコイルを直列に配置した3ゾーンタイプのビレット誘導加熱装置によるビレット温度分布の経時変化を、数値計算で得ることができるようになった。
- (2) ビレット径が大きくなるほど、径方向の温度差が大きくなり、加熱後の保持時間の調整が必要であることがわかった。
- (3) 太径ビレットの休日明け加熱立ち上げ初期は、加熱時間やテーパーヒート状態が大きく変動することがわかった。

参 考 文 献

- 1) 竹山良雄, 十河吉昭: 富士時報, **51** (1978), 361.
- 2) A. A. Tseng, J. J. Mills and S. H. Maslen: Material Science & Technology, **4** (1988), 361.
- 3) 藤室雅志: 三菱電気技報, **43** (1969), 363.
- 4) 前田史裕: 電気計算, **48**, No. 4 (1980), 58.
- 5) 親見明彦: 電気計算, **48**, No. 14 (1980), 196.
- 6) 小泉睦男: 移動・速度論, (1967), 51, 昭晃堂.