

# 誘導加熱による長尺アルミビレットの加熱過程の解析

## Analysis of Long Aluminium Heating Process by Using the Induction Heating Device

竹山良雄\* Yoshio Takeyama・十河吉昭\*\* Yoshiaki Sogoh

### I. まえがき

アルミ押出し工場における省資源、合理化対策の一つとして、第1図(b)のように鑄造されたままの長尺ビレットを加熱し、ホットシャーにて押し出し材の長さに応じてこれを切断し、成形押し出しが行われている。

これは、通常の定寸切断ビレット〔第1図(a)〕を加熱し、押し出す方法に比べて、

- (1) ビレットの輸送費と置場面積が減少する。
- (2) のこぎりによる定寸切断の際に生じる切粉の損失が全くない。
- (3) 切断及び切断されたビレットの分類などの作業に時間を要さない。
- (4) 押し出し材の長さに最適な長さずつビレットを切断できるのでむだがない。

などの利点がある。

現在、実用されている長尺ビレットの加熱炉は、燃焼炉がほとんどであるが、これを第1図(c)の誘導加熱で行う時は、更に①公害対策、②作業環境の向上、③押し出し工程から要求される温度分布が得られるなどの利点がある。しかし、コイル内の昇温部分から未加熱部分への熱の流れがあるため、加熱方法に工夫を必要とする。

今回、コイル内でのビレット表面への供給電力密度分布を種々変更して加熱する場合、加熱後の押し出し工程までのビレットの熱履歴も含めて、押し出し工程に必要な温度分布、昇温特性の解析をデジタルシミュレーションにより検討したので報告する。

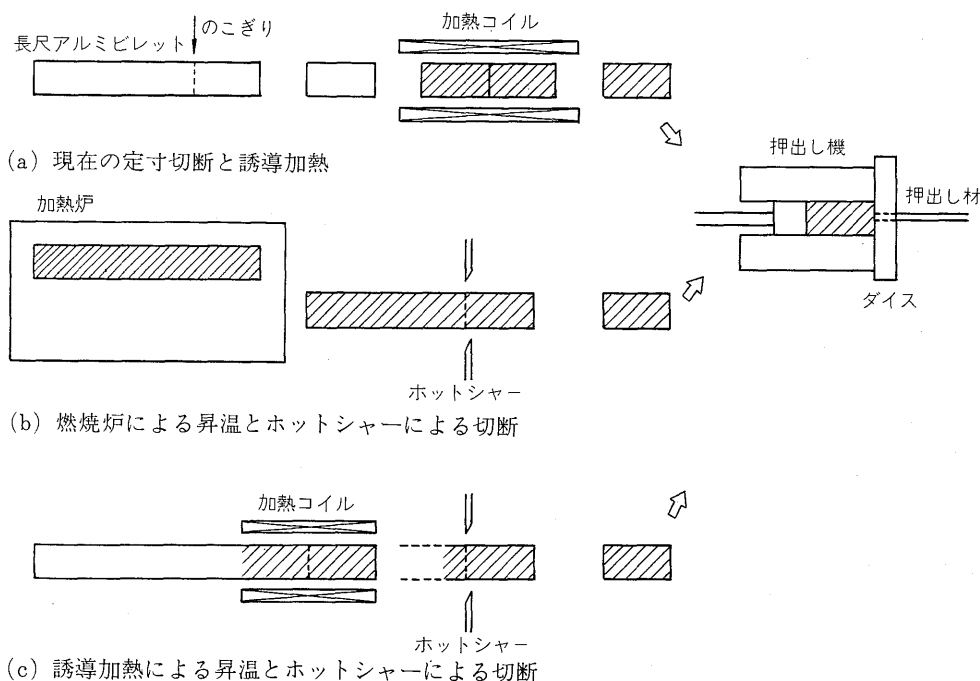
### II. 計算方法

円形断面のアルミ合金(63S相当)長尺ビレットを、誘導加熱コイルで昇温する場合のビレット内の熱伝導問題を次の前提条件のもとで計算する。

- (1) 加熱エネルギーは、コイル内のビレット表面でだけ生じるものとする。
- (2) ビレット内部の温度分布は、二次元円筒座標系で表し、ビレット中心軸まわりの温度分布は一様と考える。
- (3) 熱伝導率、比熱、熱伝達係数などの定数の温度依存性、空間依存性はないものとする。
- (4) ビレット支持機構などのビレットと接触する部分への伝熱は、無視できるものとする。

#### 1. 計算モデル(第2図)

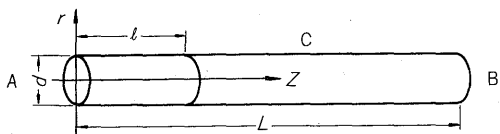
前提条件(1)~(4)により、ビレット内部の二次元熱伝導は円筒座標を用いて次のように表される。



第1図 長尺アルミビレットの各種加熱方式と切断、押し出し工程の概要

Fig. 1. Three heating processes of long aluminium billet and outline of cutting, extruding process

\* 富士ファコム制御 \*\* 富士電機エンジニアリング



第 2 図 長尺アルミビレットの円筒座標系  
(L:全長, l:加熱長)  
Fig. 2. Cylindrical coordinate system of long aluminium billet (L:total length, l:heating length)

1)  $r \neq 0$  の場合

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right] \dots\dots\dots(1)$$

境界条件として、ビレットの両端面と非加熱部分の表面からの熱放散は、

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} = h(T - T_0) \quad (\text{A 面, B 面}) \dots\dots\dots(2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_0) \quad (\text{C 面}) \dots\dots\dots(3)$$

で与えられる。コイル内の加熱部分では、

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = q \dots\dots\dots(4)$$

で与えられる。

2)  $r = 0$  の場合

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[ 2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right] \dots\dots\dots(5)$$

半径方向の温度分布の対称性から、ビレットの中心軸面を断熱面とすれば、境界条件は、

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \dots\dots\dots(6)$$

で与えられる。

ビレットの初期温度は、雰囲気温度に等しく一様な温度分布であるとす。

ただし、 $T$ :時刻  $t$  でのビレット位置  $(r, Z)$  の温度

$\rho$ :ビレットの密度,  $c$ :ビレットの比熱

$\lambda$ :ビレットの熱伝導率

$h$ :ビレットの熱伝達係数

$q$ :ビレット表面での発熱量 (供給電力)

$T_0$ :ビレットの雰囲気温度

2. 長尺ビレットの加熱方法

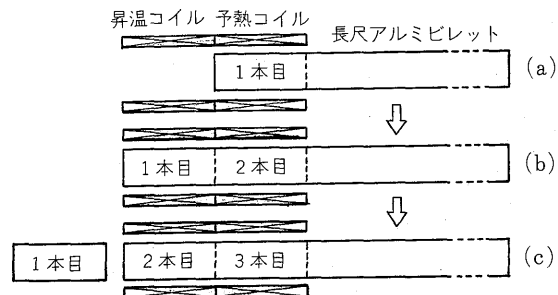
(1) 長尺ビレットを加熱する方法として、種々の方法が考えられるが、全長  $L$  の長尺ビレットから押し出し材の長さに応じて加熱されたビレットを、長さ  $l$  ごとに切断して行く場合、切断長さと同じ長さの加熱コイル 1 個だけでは十分な昇温、温度分布特性が得られないため、それぞれ切断長さと同じ長さのコイル 2 個を設けて予熱コイル、昇温コイルとする。

第 3 図に長尺ビレットが最初の 1 本目から順次押し出しに必要な長さだけ加熱されて、連続的に処理される工程を示す。すなわち、第 3 図の(a)~(c)の各工程は次の内容を表している。

(a) 最初の 1 本目のビレットの予熱工程

(b) 1 本目のビレットの昇温と 2 本目のビレットの予熱工程

(c) 1 本目のビレットの切断、2 本目ビレットの昇温及び 3 本目ビレットの予熱工程



第 3 図 長尺アルミビレットの加熱方法  
Fig. 3. Heating process of long aluminium billet by using induction heating device

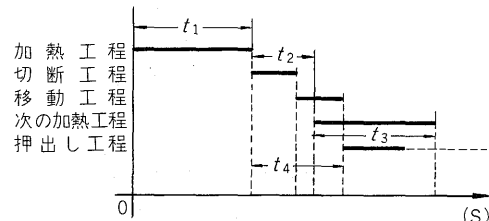
(2) タイムスケジュールを第 4 図に示す。第 4 図の  $t_1 \sim t_4$  は次のことを意味する。

$t_1$ :  $n$  本目ビレットの昇温と、 $(n+1)$  本目ビレットの予熱時間

$t_2$ : 非加熱時間であり、加熱が完了した  $n$  本目ビレットの切断と、切断のための長尺ビレットの移動時間

$t_3$ :  $(n+1)$  本目の昇温と、 $(n+2)$  本目の予熱時間

$t_4$ :  $n$  本目ビレットの加熱完了から、押し出し開始までの時間



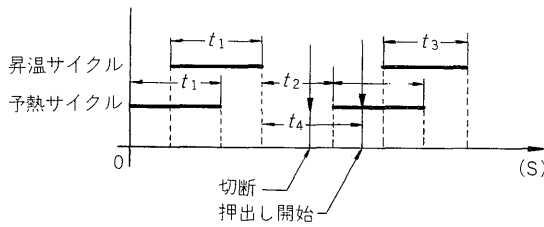
第 4 図 加熱開始から押し出し工程までのタイムスケジュール  
Fig. 4. Time schedule from the start of heating to the extruding process

(3) ビレット表面への電力供給パターンとしては、ビレットの長さ方向に対して一様な温度分布、あるいは押し出し工程から必要とされる温度こう配をビレットに与えることが必要なので、次の三つの様式を採用した。

① 予熱コイル、昇温コイルに一様な電力密度分布を与える。

② 予熱コイル、昇温コイルとも軸方向に対して任意形状の電力密度分布を与える。

③ ①, ②の電力密度分布で、予熱と昇温時間をずらせる。第 5 図にこの場合のタイムスケジュールを示す。 $t_1 \sim t_4$  の意味は第 4 図と同じである。すなわち、予熱時間と昇温時間がずれを持って、予熱開始から昇温完了までの時間は第 4 図に示す加熱時間に一致し、 $t_2, t_4$  も一致する。



第5図 予熱サイクルと昇温サイクルに時間差をもつタイムスケジュール  
Fig. 5. Time schedule having difference of time between preheating and heating up cycle

### 3. 温度分布の計算と結果の例

式(1)~(5)の熱伝導式及び境界条件のもとに、第3図及び第4図、第5図に示した加熱手順、タイムスケジュールに従って、ビレットの半径方向と軸方向の昇温特性及び押し開始時点での温度分布特性を、供給電力のパターンと大きさを変えてシミュレーションにより検討した。計算に用いた定数などの代表例は次のとおりである。

#### (1) ビレット寸法

- 長尺ビレットの全長  $L : 5.5 \text{ m}$
- ビレットの切断長  $l : 0.75 \text{ m}$
- ビレットの直径  $d : 0.228 \text{ m}, 0.178 \text{ m}$

#### (2) 温度条件 (ユーザから参考として示された値)

- ビレット初期温度 :  $20^\circ\text{C}$
- ビレット雰囲気温度 :  $20^\circ\text{C}$
- 昇温する温度 :  $450^\circ\text{C}$  (平均)
- 加熱中の表面温度 :  $600^\circ\text{C}$  以下
- 表面と中心の温度差 :  $150^\circ\text{C}$  以下

ビレット前端から後端までの温度分布：

テーパ加熱(前端温度>後端温度), 温度差 $45\sim 90^\circ\text{C}$

#### (3) 熱定数

- 熱伝導率  $\lambda : 0.035 \text{ kcal/m}^\circ\text{C s}$
- 比熱  $c : 0.22 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$
- 比重  $\rho : 2,700 \text{ kg/m}^3$
- 熱伝達係数  $h : 0.0033 \text{ kcal/m}^2\text{C}^\circ\text{C s}$

#### (4) タイムスケジュール

ビレットの処理本数として、長さ $0.75 \text{ m}$ のビレットを30本/h加熱切断する条件により、

- ビレットの加熱時間  $t_1, t_3 : 78 \text{ s}$  (第4図)
- $53 \text{ s}$  (第5図)

長尺ビレットの移動時間  $t_2 : 42 \text{ s}$

加熱完了から押し開始までの時間  $t_4 : 60 \text{ s}$

とする。

なお、いずれの場合も加熱完了後 $60 \text{ s}$ における切断されたビレットの軸方向(150mmごと)における中心、及び表面の温度分布を示す。

- 1) 加熱電力密度が一様分布である場合の温度分布  
ビレット軸方向に一様に加熱電力密度が分布する場合

で、温度分布を第6図に示す。

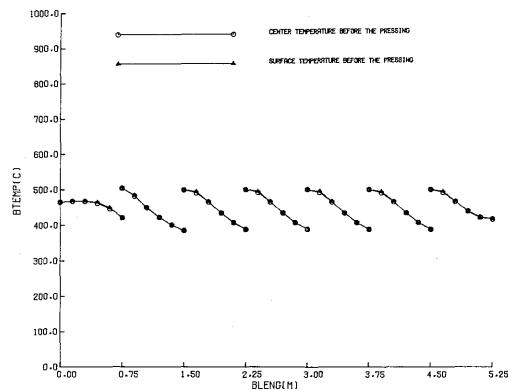
加熱電力密度は以下のとおりである。

- 予熱コイル : 1本目ビレット  $50 \text{ W/cm}^2$
- 2本目以降  $40 \text{ W/cm}^2$

昇温コイル :  $20 \text{ W/cm}^2$

ビレット直径  $d = 0.228 \text{ m}$

1本目のビレットの温度分布は、2本目以降と著しく異なる。軸方向の温度差は $45\sim 120^\circ\text{C}$ であり、最大値は $505^\circ\text{C}$ 、最小値は $389^\circ\text{C}$ である。表面と中心部の温度差はわずかで、 $5^\circ\text{C}$ 以下である。なお、この加熱方法で電力密度を変更して計算したが、いずれも1本目の温度分布は他と大きな差があり、類似な温度分布を得ることは困難であった。



第6図 押し開始時の各ビレットの軸方向における表面と中心軸の温度分布  
Fig. 6. Temperature distribution on the surface and central axis of billet for the axial direction of it before the extruding process

#### 2) 加熱電力密度が任意分布である場合の温度分布

ビレット軸方向に階段状に加熱電力密度が分布する場合で、第7図に温度分布を示す。加熱電力密度は次のとおりである。

- 予熱コイル : 1本目ビレット  $0\sim 300 \text{ mm} = 55 \text{ W/cm}^2$
- $300\sim 450 \text{ mm} = 45 \text{ W/cm}^2$
- $450\sim 750 \text{ mm} = 35 \text{ W/cm}^2$

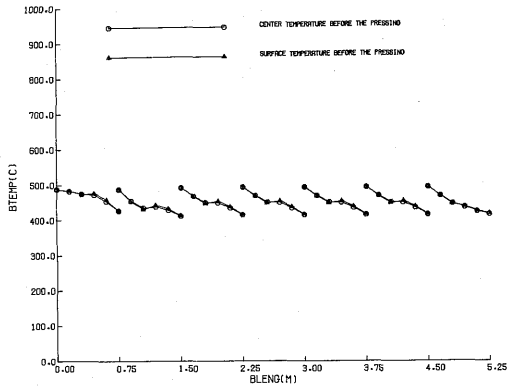
(\* ビレット前端からの長さを表す。)

- 2本目以降  $0\sim 750 \text{ mm} = 30 \text{ W/cm}^2$
- 昇温コイル :  $0\sim 300 \text{ mm} = 20 \text{ W/cm}^2$
- $300\sim 450 \text{ mm} = 25 \text{ W/cm}^2$
- $450\sim 750 \text{ mm} = 35 \text{ W/cm}^2$

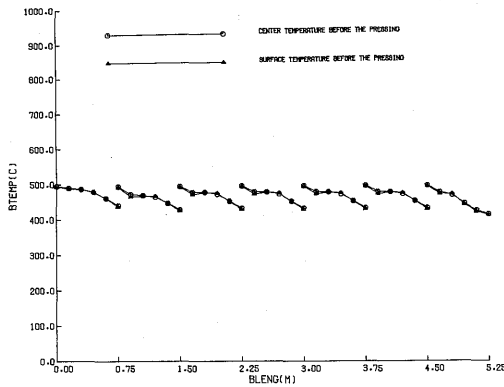
ただし、7本目ビレットだけ  $450\sim 750 \text{ mm} = 30 \text{ W/cm}^2$

ビレット直径  $d = 0.228 \text{ m}$

1本目のビレットから類似な温度分布パターンが得られ、軸方向の温度差は $61\sim 78^\circ\text{C}$ である。ビレット前端の最大値は $495^\circ\text{C}$ 、後端の最小値は $412^\circ\text{C}$ で温度条件をほぼ満たしていると思われる。半径方向の温度差は $5^\circ\text{C}$ 以下である。ビレット直径 $d$ が $0.178 \text{ m}$ の場合の温度分布を第8図に示す。加熱電力密度は次のとおりである。



第 7 図 押し出し開始時の各ビレットの軸方向における表面と中心軸の温度分布  
Fig. 7. Temperature distribution on the surface and central axis of billet for the axial direction of it before the extruding process



第 8 図 押し出し開始時の各ビレットの軸方向における表面と中心軸の温度分布  
Fig. 8. Temperature distribution on the surface and central axis of billet for the axial direction of it before the extruding process

予熱コイル：1 本目ビレット 0~300mm=45 W/cm<sup>2</sup>  
300~450mm=30 W/cm<sup>2</sup>  
450~750mm=25 W/cm<sup>2</sup>  
2 本目以降 0~750mm=22.5 W/cm<sup>2</sup>  
昇温コイル： 0~300mm=15 W/cm<sup>2</sup>  
300~450mm=25 W/cm<sup>2</sup>  
450~750mm=30 W/cm<sup>2</sup>

ただし、7 本目ビレットだけ 450~750mm=22.5W/cm<sup>2</sup>  
ビレット直径  $d=0.178$  m  
ビレット前端と後端の温度差は57~72°Cで、ビレット前端の最大値は493°C、後端の最小値は411°Cである。

この場合も1 本目のビレットから類似な温度分布が得られる。また、半径方向の温度差は5°C以下である。

3) 加熱電力密度が一様分布で、予熱と昇温の開始時刻に差がある場合の温度分布

第 5 図に示すタイムスケジュールに従って、予熱と昇温を行う。 $t_1, t_3$ は53s、予熱と昇温開始の時間差は25s、予熱開始から昇温完了までの時間は78sである。第 9 図にこの場合の温度分布を示す。

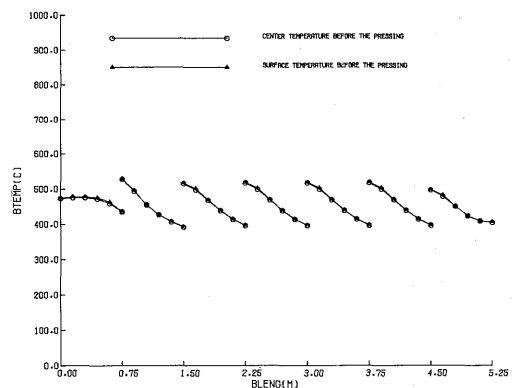
加熱電力密度は次のとおりである。

予熱コイル：1 本目ビレット 0~750mm=70 W/cm<sup>2</sup>  
2 本目以降 0~750mm=55 W/cm<sup>2</sup>  
昇温コイル： 0~750mm=35 W/cm<sup>2</sup>  
ただし、7 本目ビレットだけ 0~750mm=30 W/cm<sup>2</sup>

ビレット直径  $d=0.228$  m

1 本目のビレットの温度分布と残りのビレットの温度分布は著しく異なる。ビレット前端と後端の温度差は39~137°Cで、前端の最大値は529°C、後端の最小値は392°C、半径方向の温度差は5°C以下である。

この加熱方法では、1)と同様1 本目から類似な温度分布を得ることは困難であった。



第 9 図 押し出し開始時の各ビレットの軸方向における表面と中心軸の温度分布  
Fig. 9. Temperature distribution on the surface and central axis of billet for the axial direction of it before the extruding process

4) 加熱電力密度が任意分布で、予熱と昇温の開始時刻に差がある場合の温度分布

加熱のタイムスケジュールは3)と同じであり、この場合の温度分布を第10図に示す。

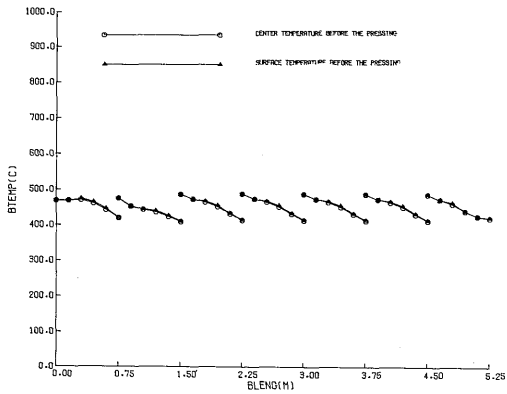
加熱電力密度は次のとおりである。

予熱コイル：1 本目ビレット 0~300mm=80 W/cm<sup>2</sup>  
300~450mm=70 W/cm<sup>2</sup>  
450~750mm=60 W/cm<sup>2</sup>  
2 本目以降 0~750mm=55 W/cm<sup>2</sup>  
昇温コイル： 0~300mm=25 W/cm<sup>2</sup>  
300~450mm=35 W/cm<sup>2</sup>  
450~750mm=40 W/cm<sup>2</sup>

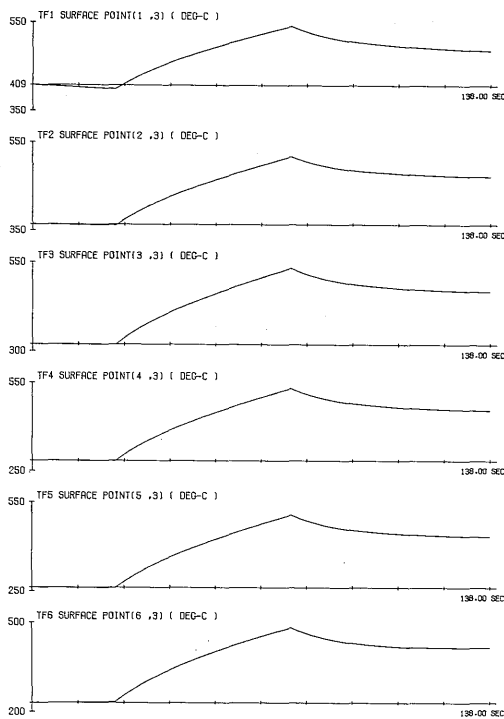
ただし、7 本目ビレットだけ 300~750mm=35 W/cm<sup>2</sup>  
ビレット直径  $d=0.228$  m

1 本目ビレットと残りのビレットの温度分布の差は小さく、ほぼ類似のパターンが得られる。ビレット前端と後端の温度差は47~73°Cであり、前端の最大値は489°C、後端の最小値は411°Cで温度条件をほぼ満足している。

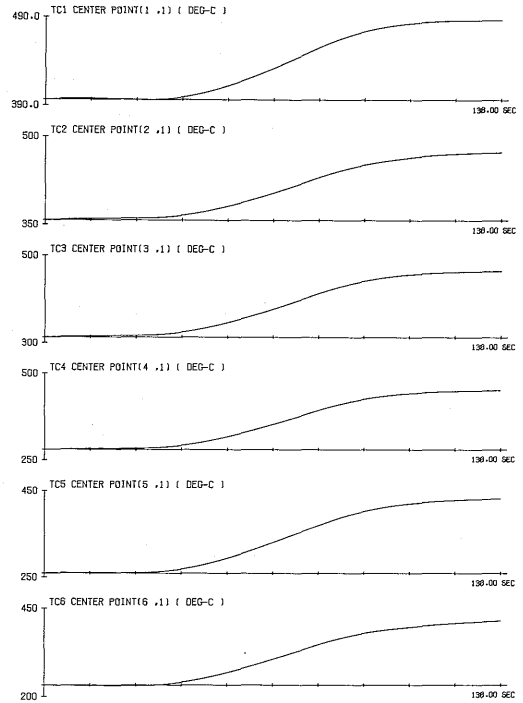
また、半径方向の温度差は5°C以下である。なお、この場合の3 本目のビレットの表面及び中心軸の予熱開始から押し出し開始までの昇温特性を第11図、第12図に示す。



第 10 図 押し出し開始時の各ビレットの軸方向における表面と中心軸の温度分布  
Fig. 10. Temperature distribution on the surface and central axis of billet for the axial direction of it before the extruding process



第 11 図 ビレット表面各部の昇温特性 (3 本目)  
Fig. 11. Temperature responses on the surface of aluminium billet (cutting No. 3)



第 12 図 ビレット中心軸各部の昇温特性 (3 本目)  
Fig. 12. Temperature responses on the central axis of aluminium billet (cutting No. 3)

方法は長尺ビレットの加熱に対して有効な方法と考えられる。

予熱と昇温サイクルに時間差を導入すれば、予熱と昇温時間が少なくなり、わずかではあるが省エネルギーが可能である。

加熱装置としては、ビレットの切断長に応じてコイル長を変更し、かつ所要の供給電力密度分布を得るために各コイルにタップを設けておき、可変電力源に接続することが必要である。

作業中でのマシントラブルや休憩による加熱の中断後の再加熱に対しては、供給すべき電力密度分布の再設定を行う。また、長尺ビレットの加熱、切断作業の途中で切断長に大幅な変更が生じた場合も電力密度分布の設定変更が必要となり、加熱装置と計算機システムとの結合が考えられる。

### III. 考察

長尺ビレットの誘導加熱に際して、押し出し材の品質管理上、

- (1) 切断されたビレットのすべてが同じような温度分布であること
- (2) 押し出し工程から要求される任意の温度分布 (均一加熱, テーパー加熱) が得られることが必要である。今回の計算結果から明らかのようにビレット軸方向での供給電力密度分布の検討は重要であり、階段状の電力密度分布はビレットの直径や予熱サイクルと昇温サイクルの時間差によらず、押し出し工程からの要求を満たし得る温度分布を 1 本目のビレットから実現できるため、この加熱

### IV. あとがき

長尺アルミビレットの誘導加熱は、押し出し工場における合理化対策として望まれているので、二、三の仮定のもとに二次元熱伝導式を用いてビレットの昇温特性、温度分布について基礎的な計算を行った。

周囲環境条件 (雰囲気, 支持機構への熱伝導など) の変化や温度条件が厳しくなった場合、及び加熱中断後の再加熱、加熱と切断工程での切断長さの大幅な変更に対する電力密度分布の検討は今後の研究課題として残される。

今回の報告に際し、御指導を賜ったユーザの皆様はじめ、関係各位に感謝の意を表する次第である。



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。