

通電による温度制御を用いた半熔融鍛造法の開発

大阪大学 大学院基礎工学研究科

講師 塩見 誠規

(平成10年度奨励研究助成 AF-98021)

キーワード：半熔融，鍛造，通電加熱，温度分布

1. 研究の目的と背景

半熔融加工は素材を加熱し、固体と液体が共存する状態で加工する方法で、難加工性材料の成形、ニヤネットシェイプ化、製品の材質向上が可能な方法である。現在半熔融状態を利用したマグネシウム合金の射出成形¹⁾あるいはアルミニウム合金のダイキャスト^{2),3)}などが実用化されており、鍛造においても研究開発が行われている^{4),5)}。半熔融鍛造では素材を炉で加熱した後金型で成形を行うが、射出成形に比べて成形速度が遅いため、加工中材料が金型に接触し冷却されて温度分布が生じ、材料の流動性が悪くなる。このため型への充填過程における未充填部あるいは割れの発生原因となり、複雑または薄肉部分のある形状の製品を製造する場合、加工中の素材の温度制御が重要である。

そこで本研究では、加工中の金型冷却による材料内の温度分布発生を防ぐため、通電加熱による温度制御について検討する。金型を電極として通電することにより、材料を金型の中で自ら発熱させて加熱を行い半熔融状態の作成および維持を試みる。また、通電加熱による材料の温度分布を調べ、電流、電圧、荷重等の条件が半熔融加工に与える影響について調べる。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置を示す。電極には、電気抵抗が小さい銅を用いた。上電極は軽量化のために、縦150mm、横350mm、高さ5mmの板を、下電極は熱伝導を考慮して、縦100mm、横97mm、高さ50mmの直方体ブロックを使用した。また絶縁・断熱用石膏・アクリル板・絶縁シャフトを用いて、これらを水平に設置し、ダイセットに取り付けた。本装置において、上電極に電源端子を固定し配線した状態で、重量は約12kgfとなった。電源には中央製作所製直流電源装置(MB7C-060-102)を使用し、最大6V・1000Aの電流を流せるようにした。この電源装置は電流または電圧の変動を抑えてほぼ一定にする制御機能を有している。電流・電圧の測定は、電源装置の測定用端子から、ADボードを用いコンピューターに取込むようにした。温度測定には、表面の温度分布を画像に表示する日本電子(株)製サーモビューアー(サーモグラフィー JTG-4200)を使用した。カメラを試験片と水平の位置に設置して、測定間隔3.54秒にて温度分布の測定を行い、熱電対を用いて測定温度の校正を行った。サーモグラフィーの温度測定範囲は400～2000℃である。本実験装置における金型電極を短絡させて測定した回路抵抗は325mΩであり、この値を用いて素材の電気抵抗値を補正した。

実験は、S45Cの円柱状試験片を上下の銅電極に挟み、電流を流して所定の値にまで上昇させる。電源装置の電流一定制御を利用して通電加熱を行い、電流、電圧、温度を測定し、試験片の温度分布、昇温時間に対する電流量の影響について調べる。また、通電加熱により半熔融状態を作成してすえ込み実験を行い、圧力の影響についても調べる。

実験における電流の評価として、単位断面積当たりを流れる電流量を表す電流密度を用いる。

$$i_c = \frac{I}{\pi r^2} \quad (1)$$

ここで、 i_c は電流密度[A/mm²]、 I は電流[A]、 r は試験片の半径[mm]である。以下では、初期形状に対する電流密度を用いる。表1に実験条件を示す。試験片直径と電流の組み合わせにより電流密度を変化させた。

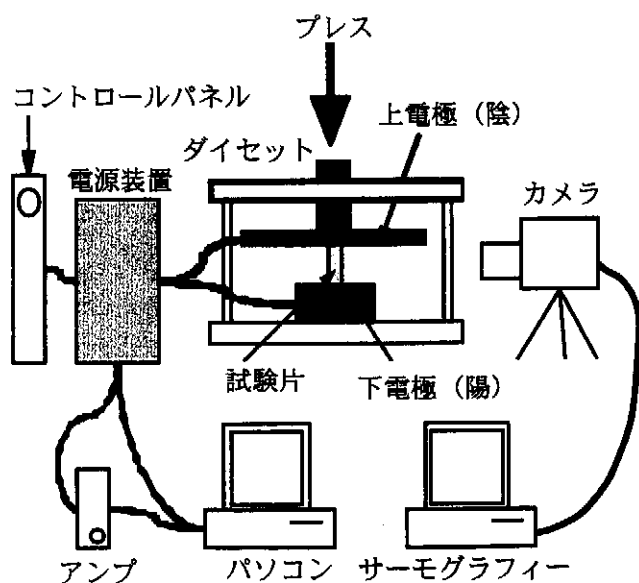


図1 通電加熱圧縮試験装置

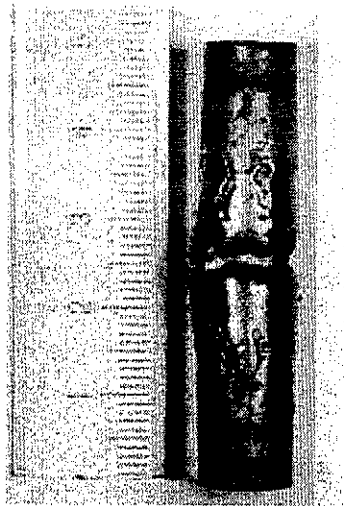
3. 実験結果および考察

3.1 電流密度と温度の関係

図2に電流密度 $10.1\text{A}/\text{mm}^2$ および $12.2\text{A}/\text{mm}^2$ により通電加熱した後の試験片形状をそれぞれ示す。試験片に電流

表1 実験条件

試験片直径 / mm	6.0 ~ 9.94
試験片高さ / mm	50
電流 I / A	700 ~ 945
電流密度 i_c / A/mm^2	7.6 ~ 24.5



(a) 電流密度 $i_c=10.1\text{A}/\text{mm}^2$



(b) 電流密度 $i_c=12.2\text{A}/\text{mm}^2$

図2 通電加熱後の試験片形状

が流れると赤熱が起こり、電流密度が $10.1\text{A}/\text{mm}^2$ に達した時点で試験片中央部表面から火花が飛散した。さらに電流量を上げると、試験片中央部から溶融した材料が飛散り、その後銅電極の重量により圧下されて崩壊した。電流密度 $10.1\text{A}/\text{mm}^2$ による通電加熱の場合、試験片は中央部に火花の飛散による窪みが生じ、酸化膜で覆われているが、電流密度 $12.2\text{A}/\text{mm}^2$ の場合は内部の材料が外側に押出されて崩壊している。

試験片の溶融状態を調べるために試験片の内部組織を観察した。図3に電流密度 $10.1\text{A}/\text{mm}^2$ にて通電加熱した試験片の断面観察位置を、図4に顕微鏡写真を示す。試験片中央部付近では結晶に大きな変化が見られず、通電加熱中も固体状態である。これに対して表面付近では溶融金属の凝固により現れる柱状晶組織が見られ、加熱により溶融した素材が結晶粒界を通過して表面にしみ出た後、空冷されて生じたものと考えられる。したがって、本実験における電流密度 $10.1\text{A}/\text{mm}^2$ による通電加熱は溶融した

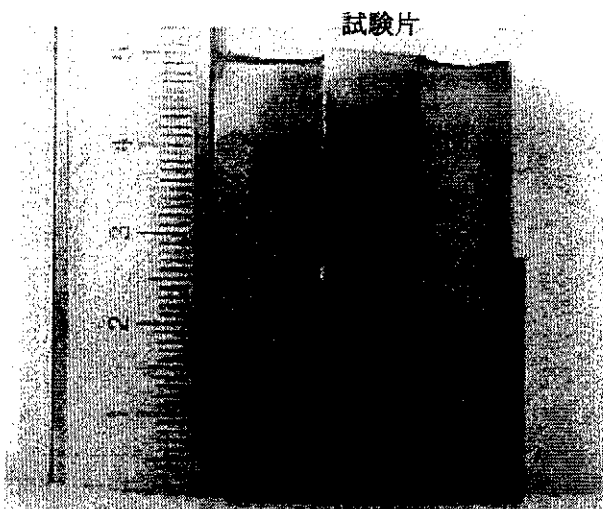
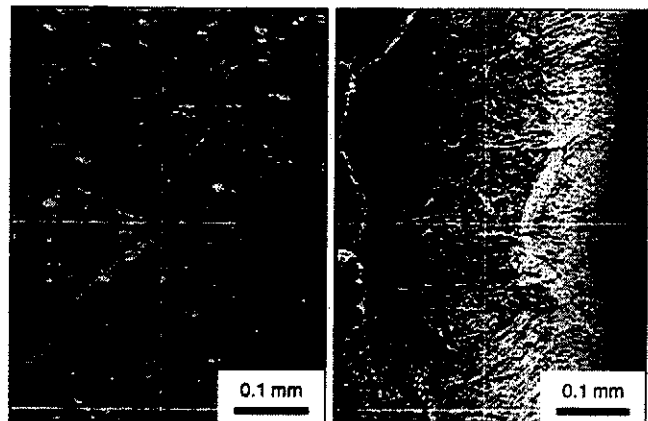


図3 試験片断面における観察位置 ($i_c=10.1\text{A}/\text{mm}^2$)



(a) 中央部 (図3部分1) (b) 表面部 (図3部分2)

図4 通電加熱後の素材断面組織

素材が内部から表面にしみ出している状態であり、固相率の高い巨視的な半熔融状態であるといえる。通電加熱により素材を十分に加熱でき、半熔融状態を作成および維持できることがわかる。

図5に通電加熱中の試験片中央部表面温度と時間の関係を示す。通電により試験片自身が発熱して温度は上昇し、同時に外気に対して放熱をする。放熱量は外気との温度差に応じて増加し、やがて発熱量と放熱量が等しくなり温度が一定になる。通電開始直後の初期加熱では、電流密度が高い方が温度上昇は速く、達する温度も高い。しかしながら、電流密度12.2A/mm²の場合、昇温中に素材温度が融点以上に達し、熔融崩壊が生じて通電状態が変化したため、約100秒以降の温度は、電流密度が低い10.1A/mm²の方が電流密度12.2A/mm²の場合よりも高い。

図6に昇温速度と電流密度の関係を示す。昇温速度は通電開始から各温度に達するまでの平均時間を用いて計算した。電流密度の上昇にしたがい、昇温速度は速くな

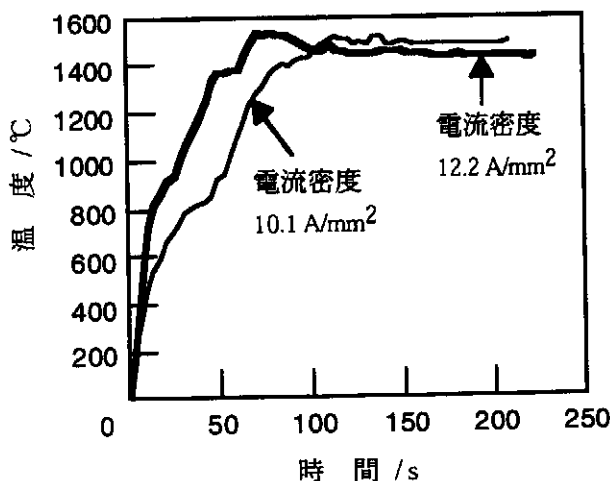


図5 通電加熱中の素材中央部表面温度の時間変化

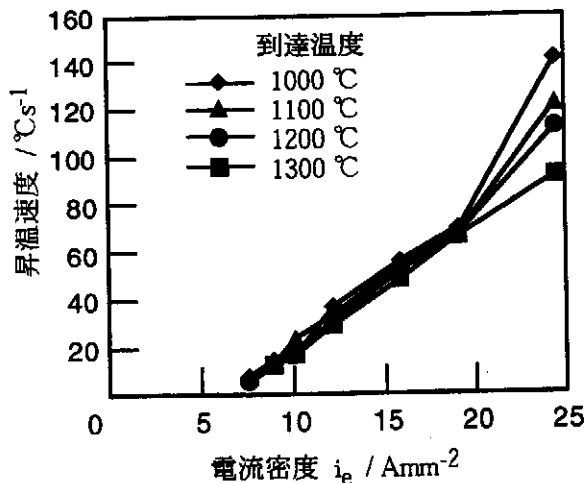


図6 昇温速度と電流密度の関係

る。電流密度19A/mm²では昇温速度は約66°C/sであり、約15秒で試験片は1000°Cに達している。本実験における電流密度25A/mm²以下の範囲においても昇温速度は100°C/s以上になった。炉による加熱の昇温速度は約8°C/sであり、通電加熱は炉による加熱より十分に速い。

図7に電流密度を変化させた場合の試験片の温度分布を示す。電流密度が高くなれば、試験片温度の均一な部分が増えることがわかる。本実験では電極金型に冷却性の良い銅を使用したため、電極による冷却の影響を受けている部分は約10mmと大きく無視できない。しかしながら電流密度が高くなれば、つまり試験片の発熱量が増加すれば、試験片両端部での電極への熱伝達による冷却の影響部分が小さくなり、温度が均一になる部分が増えると考えられる。電極付近以外の部分では外気への輻射が支配的で、温度はほぼ均一となっている。

3.2 半熔融すえ込み

通電加熱を利用したすえ込み実験を行った。実験は、まず試験片に電流を流して加熱し、巨視的な半熔融状態を作成した後、油圧プレスにより圧縮・除荷を数回繰り返して行い、試験片温度、電流、電圧を測定した。各圧縮において負荷する荷重は200kgfとした。

図8にすえ込み過程における試験片の温度変化を、図9に試験片電気抵抗の変化をそれぞれ示す。試験片に荷重を加えると試験片の温度と電気抵抗は下がり、除荷により元に戻る。一般に金属材料の電気抵抗は温度に依存し、温度が上昇すると電気抵抗は増加する。また、固体と液体では液体状態の方が電気抵抗は高い。したがって通電加熱により温度が上昇し、さらに半熔融状態になるにしたがい素材の電気抵抗は増加する。しかしながら、半熔融状態にある素材内部において、荷重を加えることにより結晶粒同士の接合状態が良くなり、電気抵抗は減少すると考えられる。そのため負荷により素材の温度が低下したと考えられる。金型を電極とした通電加熱により素材を高湿状態に維持しながら加工を行う場合、低圧で成

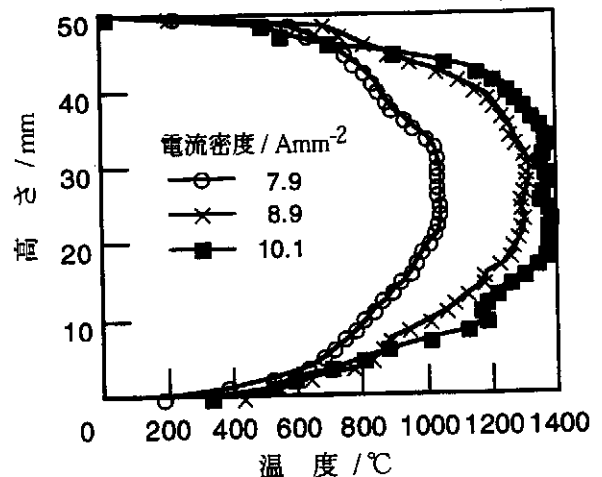


図7 試験片高さ方向の表面温度分布

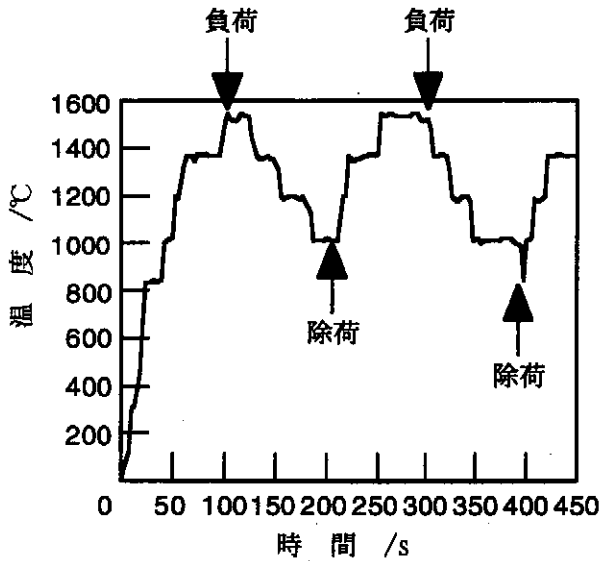


図8 通電加熱を利用した半熔融すえ込みにおける温度の変化

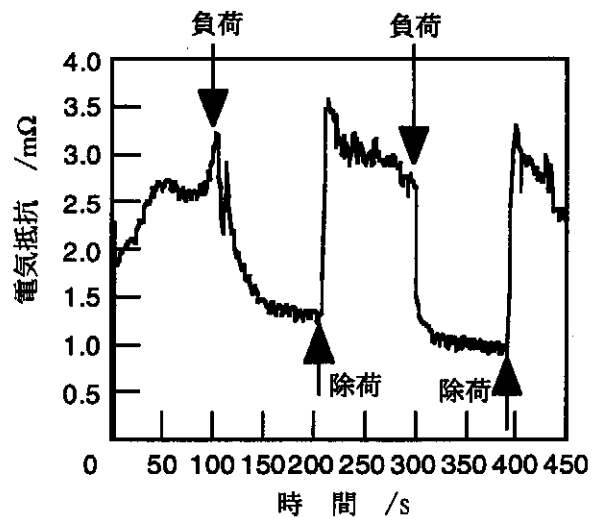


図9 すえ込み過程における素材電気抵抗の変化

形を行うか、あるいは加工中圧力に応じて電流量を増減する必要がある。

4. 金型冷却領域

本研究では、半熔融加工における素材の温度を制御するために通電加熱の利用について実験的に検討した。しかしながら、冷却性の良い銅電極を金型として使用したため、本実験で用いた最大電流量ではその冷却の影響を無視することはできない。そこで、金型冷却領域への通電加熱の効果について考察する。

通電加熱により生じる素材の温度分布は、図7に示すように、金型付近において冷却の影響を大きく受ける部分と、通電によるジュール発熱量が外気への輻射放熱量とつり合い均一な温度分布をなす部分とに大別できる。そこで、図10に示すように、通電加熱されている素材の上半分について2つの領域に分割する。金型表面から高さHまでの領域1では、金型への熱移動量が外気への熱伝達量に比べて十分に大きいと仮定し、外気への熱伝達量が無視した金型方向への1次元熱伝導領域とする。領域2では均一な温度領域とする。

領域1において図10のように座標を定めると、定常状態における1次元熱伝導方程式は次のようになる。

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + \rho_e i_e^2 = 0 \quad (2)$$

ここで、 λ は熱伝導率、 ρ_e は素材比抵抗、 i_e は電流密度である。上式を $x=0$ において温度勾配が零、 $x=H$ において素材の表面温度が T_s である以下の境界条件の下で解く。

$$x=0: \frac{dT}{dx} = 0 \quad (3a)$$

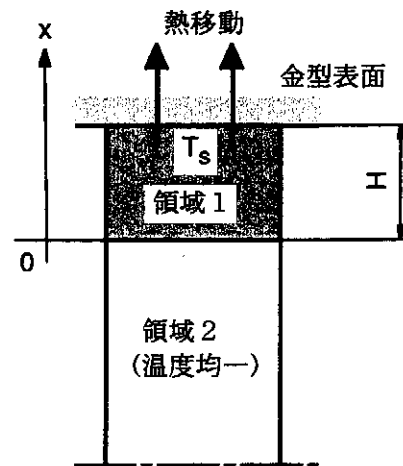


図10 計算モデル

$$x=H: T = T_s \quad (3b)$$

領域1における温度分布は次のようになる。

$$T(x) = -\frac{\rho_e i_e^2}{2\lambda} x^2 + T_s + \frac{\rho_e i_e^2}{2\lambda} H^2 \quad (4)$$

したがって、金型冷却域Hと素材の内部と表面との温度差 ΔT および電流密度との関係を求めると以下のようになる。

$$H = \frac{1}{i_e} \sqrt{\frac{2\lambda\Delta T}{\rho_e}} \quad (5)$$

式(5)より、 $\lambda=0.0269\text{W}/(\text{mm}\cdot\text{K})$ 、 $\rho_e=0.0026\Omega\cdot\text{mm}$ 、 $\Delta T=1000\text{K}$ の場合について計算した結果を図11に示す。また、実験において約1000°Cの温度差を示す領域の金型表

面からの距離も示す。金型冷却域は電流密度に反比例して減少すると考えられる。本実験条件の下で市販で購入可能な10000Aの大電流電源を用いた場合、Hは約1.4mmとなる。通電量の増加により金型冷却域を小さくすることが可能である。

5. 結 言

半熔融鍛造における通電加熱を利用した温度制御について検討し、以下の結果を得た。

- 1) 金型を電極として利用した通電により素材は十分に加熱され、熔融状態および巨視的な半熔融状態となり得る。
- 2) 電流密度の上昇にともない昇温速度は増加する。本実験装置において100°C/sの昇温速度を得た。
- 3) 通電加熱を用いて素材を半熔融状態にし、すえ込み実験を行った。圧力が上昇すると電気抵抗が低下し、ジュール発熱が減少して温度が低下する。圧力が減少すると電気抵抗が増加し、温度は上昇する。通電加熱を用いた半熔融加工を行う場合、高温状態を維持するためには低圧での成形、あるいは圧力に応じて通電量の増減を行う必要がある。
- 4) 金型冷却領域への通電加熱の効果について、温度分布をモデル化し熱伝導計算を行った。金型冷却領域と電流密度は反比例の関係にあり、大電流電源の使用により金型冷却域を小さくすることが可能である。

謝 辞

本研究は平成10年度天田金属加工機械技術振興財団奨励研究助成により行われたことを記し、謝意を表します。

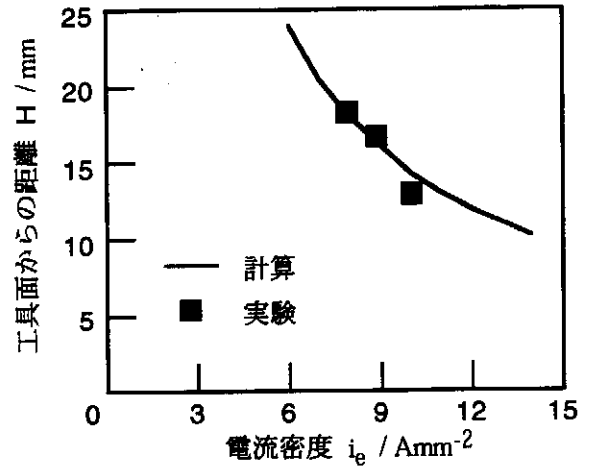


図11 工具面からの距離と電流密度との関係

参考文献

- 1) 斉藤研ほか3名：日本製鋼所技報，53(1997)，1-7.
- 2) 吉田千里：鑄造工学，71-4(1999)，279-287.
- 3) 佐藤智：日本鉄鋼協会鑄鍛品工学フォーラムシンポジウム，1999，35-39.
- 4) 木内学，杉山澄雄，新井勝男：塑性と加工，37-430(1996)，1219-1224.
- 5) J. C. Choi, H. J. Park and B. M. Lee: J. Material Processing Technology, 80-81(1998)，450-457.
- 6) C. G. Kang, J. S. Choi and D. W. Kang: J. Material Processing Technology, 73(1998)，289-302.