

通電による温度制御を用いた半熔融鍛造法の開発

塩見誠規*

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加工方法である。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⁾⁻⁶⁾。

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。成形における素材の流動性を十分に得るためには、半熔融素材の固相率を小さくする必要がある。しかし低固相率の半熔融素材は自重により崩壊するため、炉から金型への搬送が極めて困難となる^{7),8)}。また鍛造は、射出成形に比べて成形速度が遅いため、加工中に素材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、半熔融素材の搬送を省略し、加工中の金型冷却による素材内部の温度分布発生を防ぐために、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加工を試みる。

2. 通電加熱実験

図1に実験装置を示す。上電極は軽量化のために縦

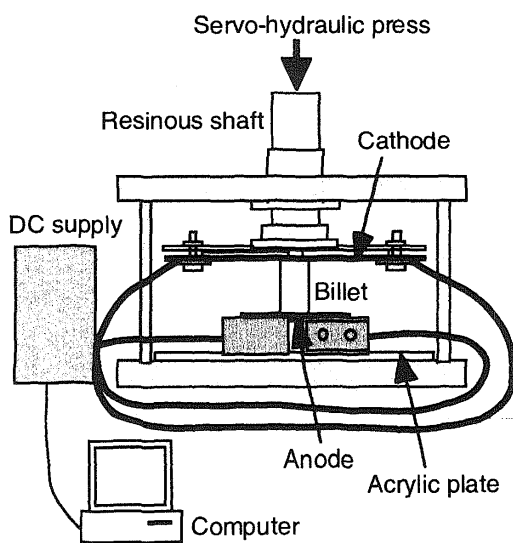


図1 通電加熱圧縮装置

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。また断熱・絶縁のために、石膏・アクリル板・絶縁シャフトを使用した。これらを水平に設置し、上電極が正確に上下移動ができるように、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ボードを用いてコンピュータ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で表示する日本電子(株)製サーモビューアー(工業用サーモグラフィ 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。

通電加熱では素材の体積電気抵抗率の影響が大きいと考えられる。そこで素材の電気抵抗が通電加熱に与える影響を調べるため、炭素鋼(S45C)および鋳造用アルミ合金(AC4CH)を用いて通電加熱を行った。加熱実験は、炭素鋼またはアルミ合金で作成した円柱試験片を鋼または鉄電極に偏当りしないように挟み、電源装置の電流制御を利用して一定電流で通電しながら試験片を加熱し、温度分布を測定した。試験片は、炭素鋼は丸棒より、またアルミ合金はインゴット材を一旦直径14mm、高さ65mmの円柱に鋳造した後、切削加工により作成した。

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

$$i_e = \frac{4I}{\pi d^2} \quad (1)$$

ここで、 i_e は電流密度(A/mm²)、 I は電流(A)、 d は素材直径(mm)である。

3. 実験結果

3.1 炭素鋼

直径10mm、高さ50mm炭素鋼試験片の通電加熱を行った。電流密度が7.64A/mm²(電流値600A)程度では、通電当初は上下端部より赤熱するが、やがて中央部が赤熱するとともに上下端部の赤熱はなくなる。電流密度値を10.1A/mm²(795A)にした場合、さらに温度が上昇し中央部表面から熔融した材料の飛散が見られた。さらに電流密度が高い12.2A/mm²(960A)の場合、電極の重量により

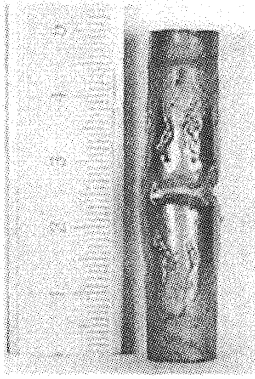
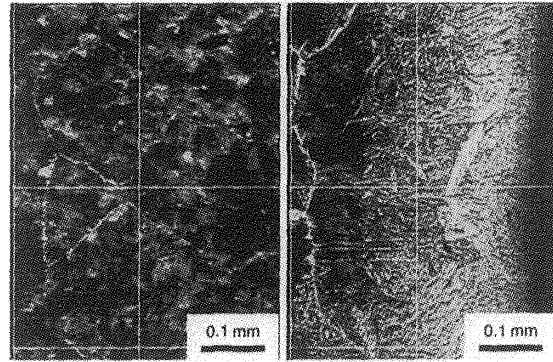


図2 通電加熱した炭素鋼
(直径10mm, 高さ50mm, $i_e = 10.1 \text{ A/mm}^2$)



(a) 中央部 (図3 部分1) (b) 表面 (図3 部分2)

図4 炭素鋼試験片断面組織

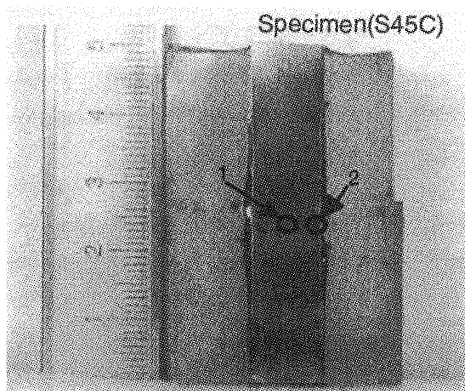


図3 炭素鋼試験片断面における観察位置
($i_e = 10.1 \text{ A/mm}^2$)

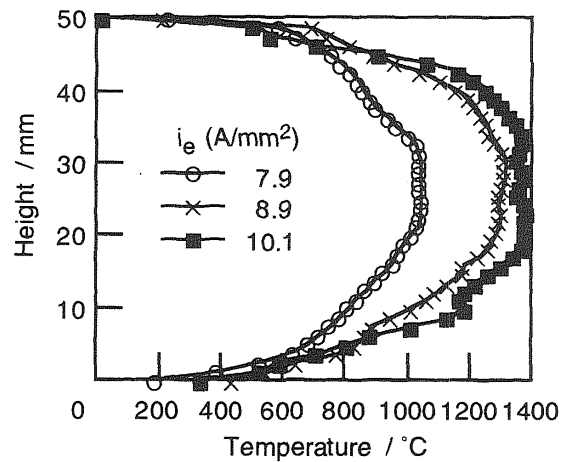


図5 試験片高さ方向の温度分布

圧下されて崩壊した。図2に電流密度 10.1 A/mm^2 により通電加熱した試験片を示す。試験片中央部には酸化膜が生成している。

試験片の加熱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 A/mm^2 にて通電加熱した試験片の断面内の観察位置を、図4に組織を示す。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熔融金属の凝固により現れる柱状晶組織が見られ、加熱により熔融した素材が結晶粒界を通過して表面にしみ出た後、冷却されて生じたものと考えられる。したがって、本実験において電流密度 10.1 A/mm^2 による通電加熱では、熔融した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といえる。通電加熱により素材を十分に加熱し、半熔融状態を作成および維持できることがわかる。

図5に各電流密度における試験片表面の温度分布を示す。電流密度の上昇とともに試験片中央部の最高温度も高くなる。また、中央部では外気への輻射が支配的であり、温度はほぼ均一になっている。しかしながら、電極

付近では電極への熱移動をとまなうため冷却が生じ、その影響を受けている部分は端部約10mmと大きく無視できない。

3.2 アルミ合金

半熔融加工に実際利用されているアルミ合金についても同様に通電加熱実験を行った。直径10mm, 高さ50mmのアルミ合金試験片において、電流密度 12.7 A/mm^2 (1000 A)で熔融崩壊が生じた。図6に熔融崩壊後のアルミ合金を示す。炭素鋼の場合と同様に、電極との接触部付近において冷却部分が存在している。熱伝導率の高いアルミ合金では、炭素鋼に比べて工具冷却の影響は大きい。

炭素鋼およびアルミ合金を用いた通電加熱より、素材固有の電気抵抗の影響は小さく通電加熱は可能であるが、工具冷却の影響を大きく受けるため、金型を電極にただけでは通電加熱による温度分布は均一にならない。

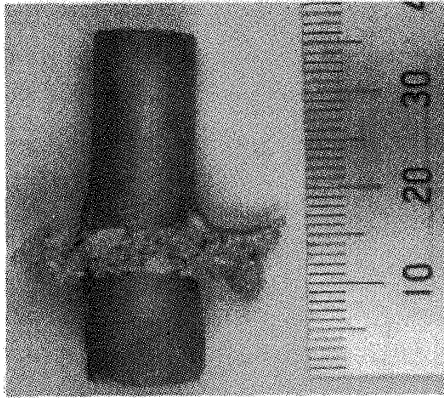


図6 通電加熱により溶融崩壊したアルミ合金
($i_e = 12.7 \text{ A/mm}^2$)

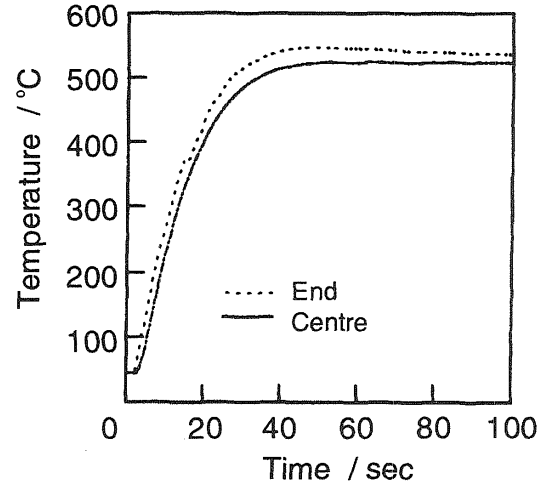


図8 接触抵抗を利用した通電加熱におけるアルミ試験片
端部および中央部表面の温度変化
(直径12mm, 高さ18mm, $i_e = 0.86 \text{ A/mm}^2$)

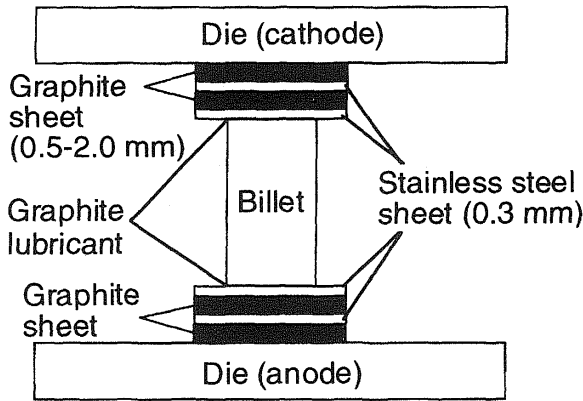


図7 黒鉛およびステンレス板の積層板を利用した
通電加熱

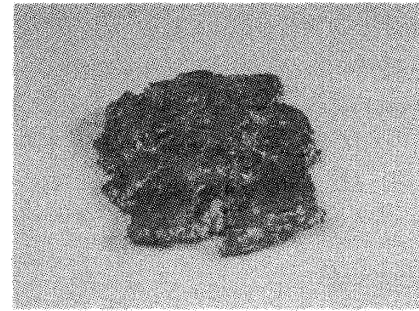


図9 接触抵抗を用いた通電加熱により溶融崩壊した
アルミ合金 ($i_e = 0.88 \text{ A/mm}^2$)

4. 接触抵抗を利用した加熱

通電加熱における工具冷却を防ぐために、工具と素材との間の接触電気抵抗を利用した加熱を検討する。接触抵抗を利用した通電加熱を実現し、均一温度分布を得るために、黒鉛粉末の圧粉による薄板とステンレス板を使用する。黒鉛板を挟む目的は発熱と電極への断熱であり、ステンレス板を挟む目的は脆い黒鉛板が圧縮時に崩壊するのを防ぐことである。黒鉛板は直径17mm, 厚さは約0.5~2.0mm, 相対密度0.87~0.93(平均0.91)である。またステンレス板は、厚さ0.3mmの薄板から直径17mmに切断し、プレスで加圧してそりをなくす。ステンレス板と黒鉛板の間にはさらに黒鉛粉を塗布し、接触を改善して片当たりを防ぐ。試験片、接触抵抗部、電極の状態を図7に示す。電極には鋼板を使用した。温度測定にはK型(クロメル-アルメル)熱電対(径0.1mm)を中心部と端部より試験片高さの約10%の位置(高さ18mmでは2mm)に取付けた。加熱は直径12mm, 高さ18mmの丸棒試験片を電流一定制御を利用して行った。

図8に接触抵抗を利用した通電加熱による昇温履歴を

示す。電流密度は 0.86 A/mm^2 である。黒鉛板とステンレス板1組づつを試験片と電極間の上下接触抵抗部にそれぞれ用いた。試験片温度は約50秒でほぼ定常状態となっている。試験片端部の温度は常に中央部の温度よりも高い。接触抵抗部の発熱により試験片が加熱されていることがわかる。試験片内における最高温度と最低温度との差は約7°Cとなった。

さらに電流密度を 0.88 A/mm^2 にした場合、溶融崩壊が生じた。崩壊後の試験片を図9に示す。図6に見られるような工具による冷却部分は見られず、素材全体が崩壊している。接触抵抗を利用した通電加熱によりほぼ均一に半溶融状態に達したと考えられる。

黒鉛板の枚数を変化させたときの実験装置全体の抵抗の変化を図10に示す。黒鉛板の厚さは0.5mmである。すべての温度域で黒鉛板の枚数が増加するとともに電気抵抗は増加する。黒鉛板の増加は黒鉛-ステンレス板の接触面数の増加である。黒鉛-ステンレス板1組の接触抵

抗は約0.03Ωと推定される。

図11に、黒鉛板の厚さを変化させたときの装置全体の抵抗と黒鉛板の厚さとの関係を示す。黒鉛-ステンレス板を試験片上下端部に1組づつ使用した。黒鉛板の厚さの増加にともなう電気抵抗の増加は見られない。アルミ試験片の抵抗値は計算より34 μΩであることから、抵抗値の変化は黒鉛-ステンレス板の部分と考えられ、接触抵抗による発熱が支配的と考えられる。接触抵抗は接触面の数が重要であり、黒鉛板の厚さは抵抗値とは関係ないため、黒鉛板はできるだけ薄く成型すればよいことがわかる。

図12に実験装置全体の抵抗と接触面圧との関係を示す。黒鉛-ステンレス板は1組、黒鉛板厚さは1mmである。すべての温度域で、面圧の増加により電気抵抗は減少する。面圧の増加により接触実面積が増加するため、電流が流れやすくなると考えられる。接触抵抗を利用して効率良く加熱するには、加熱時における負荷制御が必要である。

5. 半熔融圧縮試験

半熔融鍛造への通電加熱の利用を検討するために、金型内で通電加熱により半熔融状態を作成して圧縮を行い、変形抵抗の測定を行った。実験は通電加熱装置を油圧式複動サーボ試験機(島津製作所製、島津サーボパルサ)に据えつけ、圧縮できるようにする。上電極と試験機のラムとは固定しない。本装置を試験機に設定した場合、上電極の重量は配線後約14kgである。電極の材料には鋼板を使用する。

黒鉛板およびステンレス板ははじめ直径17mm、厚さ0.3mmを使用した。圧縮中に黒鉛板が変形、破損が見られたため、圧縮試験では直径30mmを使用した。変形抵抗の測定は、直径12mm、高さ18mmのアルミ合金素材の端部および中央部に熱電対を取付け、通電加熱装置に試験片を設置する。定電圧制御を利用して加熱を行い、温度が急激に上がらないように注意しながら試験片温度を目標値に近づけ、目標温度に達したときに上部のアクチュエータを作動させて一定速度で圧縮する。圧縮速度は12.0mm/sおよび1.0mm/sとした。

アルミ合金の融点近傍における変形抵抗曲線について、圧縮速度12mm/sの場合を図13に示す。温度の上昇とともに変形抵抗は減少している。特に、556℃と566℃の間に比較的大きな差が見られる。素材が半熔融状態に達すると液相が存在するため急激に変形抵抗は低下する⁹⁾。類似のアルミ合金の熔融開始点は555℃であることから固相線温度(熔融開始温度)が560℃付近にあり、それ以上の温度域が半熔融域であると考えられる。通電による加熱により半熔融状態が得られており、その状態での変形抵抗が測定されている。

圧縮速度が1mm/sと低速の場合、圧縮開始直後に素材の自重崩壊が生じたため、変形抵抗曲線を得ることはで

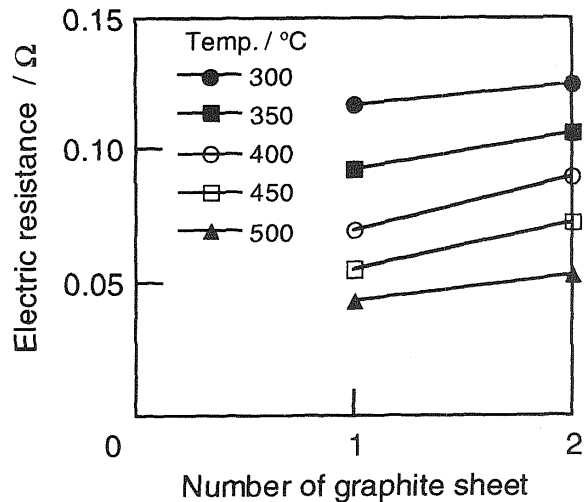


図10 電気回路抵抗と黒鉛板の関係 (黒鉛板厚さ0.5mm)

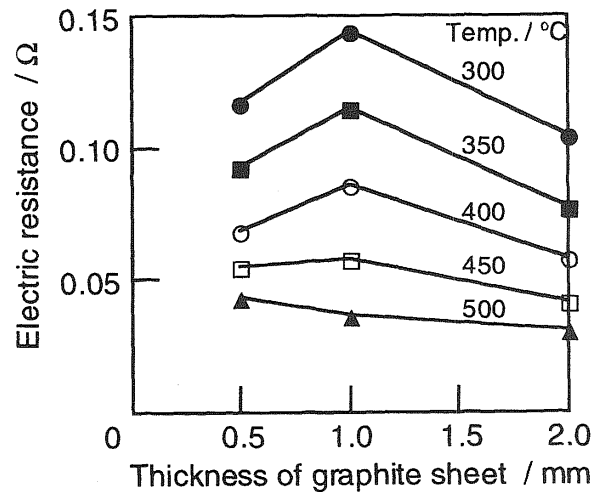


図11 電気回路抵抗と黒鉛板厚さの関係 (黒鉛-ステンレス板1組)

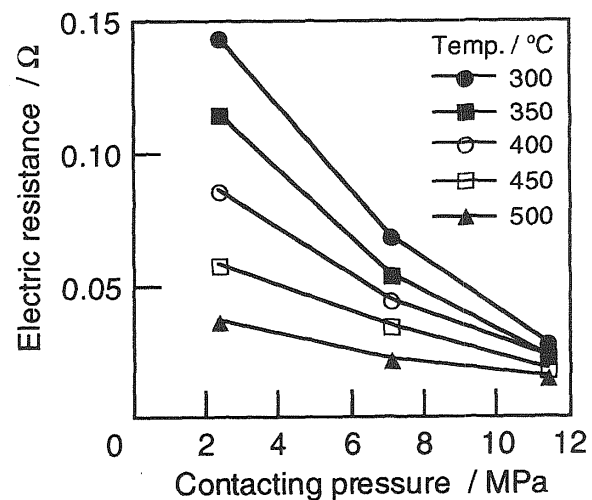


図12 電気回路抵抗と接触圧力の関係 (黒鉛-ステンレス板1組、黒鉛板厚さ1mm)

きなかった。

6. 結言

半熔融加工における素材の搬送省略および加工中の冷却防止のために、金型を電極として素材に通電し、素材を金型内で加熱する方法について検討した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 炭素鋼およびアルミ合金を用いて通電加熱試験を行い、温度分布を測定した。素材固有の電気抵抗の影響は小さく、炭素鋼およびアルミ合金において半熔融状態を得ることができた。しかしながら、電極による冷却の影響が大きく、金型を電極にただけでは温度分布は均一とはならない。
- (2) 黒鉛およびステンレス板を用いた積層板を作成し、接触抵抗を利用した通電加熱を行った。接触抵抗を利用することにより工具冷却を防ぎ、アルミ合金を均一に加熱することが可能となった。
- (3) 接触抵抗を利用した通電加熱では黒鉛板の厚さよりも接触面数の影響が大きいため、薄い黒鉛板でも効果は得られる。また、接触面圧の増加にともない接触抵抗が低下するため、効率良く加熱するには負荷制御が必要である。
- (4) 通電加熱を用いて融点近傍における圧縮試験を行い、圧縮速度 12mm/s における半熔融状態にある素材の変形抵抗を測定した。

謝 辞

本研究の一部は平成 10 年度天田金属加工機械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。

参考文献

- 1) 斎藤研ほか 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：日本鉄鋼協会鑄鋼品工学フォーラムシンポジ

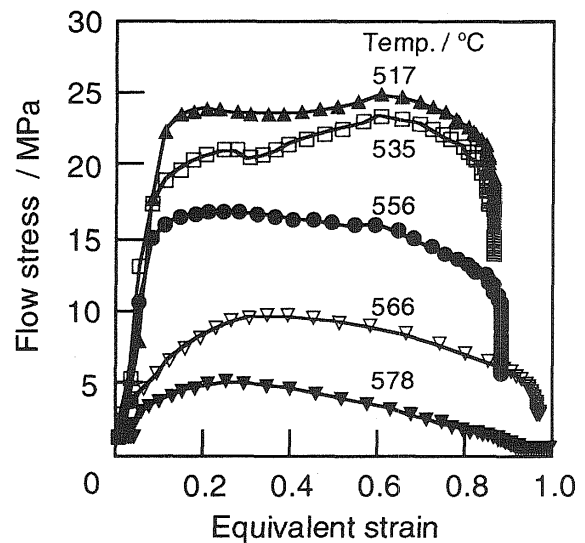


図 13 積層板を利用して通電加熱されたアルミ合金の圧縮試験 (圧縮速度: 12.0 mm/s)

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.
- 7) R. Kopp, D. Neudenberger and G. Winning: Proc. AFDM'99, 1999, 107-112.
- 8) C. G. Kang, H. K. Jung and Y. J. Jung, Proc. 6th ICTP, 3 (1999)，1689-1694.
- 9) 木内学，福岡新五郎，新井勝男：塑性と加工，17-186 (1976)，595-602.