

各種アルミニウム合金の変形抵抗

中西賢二*・上谷俊平*・中原幸喜**
清水良員***・松田豪彦****

Flow Curves of Some Aluminum and Its Alloys

Kenji NAKANISHI, Shunpei KAMITANI, Kouki NAKAHARA,
Yoshikazu SHIMIZU and Takehiko MATSUDA

Aluminum and its alloys have preferable properties such as light weight with high strength, excellent corrosion resistance, excellent electrical and thermal conductivity and good formability. So, plastic forming of those materials has been applied for the production of many industrial products. In the present investigation, the authors carried out some series of uni-axial compressive tests to measure the uni-axial compressive true stress and true strain relations, called flow curves, of Aluminum and its alloys. Deformation conditions were some combined conditions of strain rate selected in the strain rate range, $1\sim 50\text{s}^{-1}$, and temperature selected in the temperature range, Room temp. $\sim 500^\circ\text{C}$. In addition, both strain rate and temperature were constant values in the deformation process of a compressive test. Those flow curves measured by the above tests reveal characteristics of plastic deformation of Aluminum and its alloys in cold and hot working processes. Furthermore, an equation of effective stress prediction in the metal forming processes can be formulated with referring to these flow curve data.

Key Words : Cold Working, Hot Working, Flow Curve, Aluminum, Aluminum Alloy, Deformation Resistance

1. はじめに

素材固有の塑性を利用して成形加工を行う塑性加工技術が様々な工業製品の製造に使われている。金属塑性加工の特徴は成形速度が速いことに加えて、所定形状への成形と同時に変形に付随する内部組織の変化を利用して機械的性質の向上をはかることができる点と言える。¹⁾ 塑性加工製品の内部組織は成形過程における素材内部のひずみ速度分布およびひずみ分布と関連が深く、加工力および製品の内部欠陥の発生箇所は変形領域内部の相当応力分布ならびに応力成分の分布と関連が深い。また、相当応力を相当ひずみに関して積分した加工仕事は塑性変形に伴う変形熱となり加工温度に影響を及ぼす。以上のことから、塑性加工のプロセス設計では、成形加工品

の寸法、形状および内部組織を使用目的に合致させるために適当な加工方法が選定され、さらに加工工具(型)ならびに加工条件(加工温度、加工速度、潤滑条件など)が最適化される。最適化の手順では加工の所要動力計算、加工過程の変形機構解析が行われる。^{2, 3)} また、複雑な加工工程の場合は加工シミュレーションによる検討作業が進められる。⁴⁻⁶⁾ 加工の所要動力計算、応力解析ならびにシミュレーションにおける加工エネルギー計算と変形応力計算を行うには変形過程におけるひずみ、ひずみ速度および温度の変化に対応する加工素材の変形抵抗(相当応力)値を算定する計算式(変形抵抗推算式)が必要となる。すなわち、変形過程における加工素材内部の多軸応力成分はミーゼスの式により相当応力に換算され、多軸ひずみ速度成分は相当ひずみ速度に換算される。また、塑性流れに沿って計算する相当ひずみ速度の時間積分値は相当ひずみを表す。以上の相当応力、相当ひずみ速度および相当ひずみはそれぞれ単軸圧縮変形の応力、ひずみ速度およびひずみに相応する物理量である。したがって、変形過程の応力計算を行うには加工素材について求めた単軸圧縮変形における応力、ひずみ、ひずみ速

平成11年5月31日受理

*機械工学科

**博士前期課程機械工学専攻(現, ㈱アドバンスディスプレイ)

***博士前期課程機械工学専攻(現, アルプス電気㈱)

****博士前期課程機械工学専攻(現, ㈱鹿児島頭脳センター)

度および温度の関係を定式化した変形抵抗推算式を準備しておく必要がある。

本研究では、機器の軽量化、高性能化ならびに素材のリサイクル利用に有利な特性を持つことから近年各種の運輸機器、家電製品および建材用素材として多用されつつある各種実用アルミニウム合金の変形抵抗を単軸圧縮試験により詳細に調べた。変形抵抗試験の条件は、通常の塑性加工の変形条件に相応させて、温度を室温から100℃きざみで500℃まで6種類設定し、変形のひずみ速度を1~50s⁻¹の範囲で3~4種類に設定して、各温度とひずみ速度を組み合わせた変形条件下で変形抵抗を測定した。また、本データを今後の変形抵抗推算式作成の基礎資料として利用できるように、温度およびひずみ速度を変形中一定値に保持した試験を行った。

2. 試験装置、試験条件および試験方法

変形過程中のひずみ速度を一定値に保持した単軸圧縮試験を行うための、カム・プラストメータを用いた変形抵抗試験装置概略図を Fig.1 に示す。変形の進行に伴っ

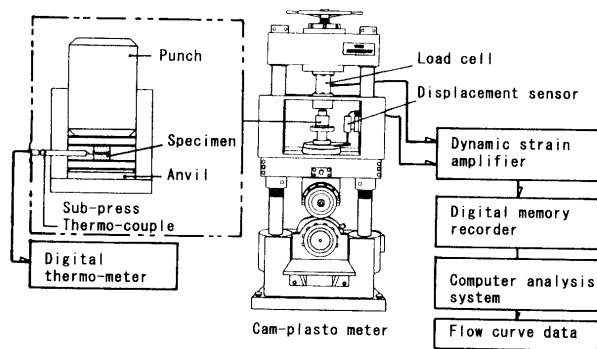


Fig.1 Schematic diagram of the data acquisition system of the flow curves (compressive true stress and true strain relations).

た試料の圧縮変形量と変形に要する力は変位計、荷重計、動ひずみ増幅器およびデジタルメモリーで構成した計測装置を用いて変形開始から時系列データの形態で計測・記録した。さらに、パーソナルコンピュータによるデータ処理を施し単軸圧縮真応力-真ひずみ曲線を求めた。なお、変形過程中の温度を一定とした変形抵抗試験を実現するための温度保持装置として、熱容量の大きなサブプレスを用いた。室温以上の変形温度における変形抵抗試験では、円柱形状試験片（側面に温度測定用アルメルクロメル熱電対を細い金属線で圧着してある）をサブプレス内に設置し、サブプレスごと電気炉で加熱昇温した。同サブプレスを試験温度以上の温度まで昇温後カムプラストメータ上に移し、温度低下を監視して、試験設定温度となった時点で圧縮試験を開始した。単軸圧縮試験で重要な試験機工具面と試験片端面の接触界面の摩擦抵抗を小さくする潤滑剤として、また、高温変形における試験片の酸化抑止剤としてコロイド状黒鉛（商品名：Oil-Dag）を用いた。試験条件を Table 1 に示す。

3. 試験材料

実用アルミニウム合金を数種類選定して、各材料毎に熱間押し出し加工で成形した円柱棒材から機械加工により

Table 1 Test conditions.

| |
|--|
| Dimensions of the test piece: 10 mm diameter and 10 mm height cylindrical specimen. |
| Test result: Flow curve (Uni-axial compressive true stress and true strain relation) |
| Deformation condition: Both temperature and strain rate are constant values in a deformation process. |
| Temperature: Room temp. ~500°C, Strain rate: 1~50s ⁻¹ |
| Lubricant: Colloidal graphite (Product name: Oil-Dag) |

Table 2 Materials (Chemical compositions and heat treatment conditions).

| Materials | Chemical compositions (mass%) and Heat treatment conditions |
|-----------------------|---|
| Aluminum (1050) | Si:0.07, Fe:0.12, Cu:0.01, Mn:0.01, Mg:0.01, Ti:0.01, Al:Bal. Annealing (350°C, 30 min hold and furnace cooling) |
| Aluminum (1100) | Si:0.04, Fe:0.02, Cu:0.01, Mn:<0.01, Mg:0.01, Cr:<0.01, Zn:0.01, Ti:<0.01, Al:Bal. Annealing (350°C, 30 min hold and furnace cooling) |
| Al-Mn alloy (3003) | Si:0.1, Fe:0.4, Cu:0.15, Mn:1.08, Ti:0.005, Al:Bal. Annealing (350°C, 30 min hold and furnace cooling) |
| Al-Mg alloy (5052) | Si:0.1, Fe:0.25, Cu:0.07, Mn:0.03, Mg:2.43, Cr:0.23, Zn:0.01, Ti:0.02, Al:Bal. Annealing (350°C, 30 min hold and furnace cooling) |
| Al-Mg-Si alloy (6061) | Si:0.71, Fe:0.16, Cu:0.19, Mn:0.06, Mg:1.03, Cr:0.09, Zn:0.05, Ti:0.01, Al:Bal. Annealing (350°C, 30 min hold and furnace cooling) |
| Al-Mg-Si alloy (6063) | Si:0.46, Fe:0.21, Cu:0.02, Mn:0.02, Mg:0.48, Zn:0.01, Ti:0.01, Al:Bal. Annealing (350°C, 30 min hold and furnace cooling) |
| Al-Zn-Mg alloy (7075) | Cu:1.65, Mg:2.55, Cr:0.19, Zn:5.65, Ti:0.01, Al:Bal. Annealing (350°C, 2 hour hold and furnace cooling) (Hardness as received Hv=108.2, Hardness as annealed Hv=56.9) |

直径10mm, 高さ10mmの円柱状圧縮試験片を作成した。また, 試料は熱処理により焼鈍処理材とした。供試材料の種類, 各材料の化学成分および試験前熱処理条件をTable 2に示す。

4. 試験結果および考察

温度およびひずみ測度を変形中一定値に保持した試験で得た単軸圧縮真応力-真ひずみ曲線(あるいはフローカーブ)をFig.2~Fig.7に示す。以下, 単軸圧縮真応

力-真ひずみ曲線を単に変形抵抗曲線(フローカーブ)と呼ぶ。

すべての変形抵抗曲線が変形温度が高くなるほど変形抵抗が低下し, ひずみ速度が高くなるほど変形抵抗が高くなる変形特性(動的回復ならびに加工硬化特性)を示す。一般に室温付近(冷間加工温度)よりも高温(熱間加工温度)での変形抵抗のひずみ速度依存性が顕著であることが知られているが, 今回の試験材料では, Al-Mn合金(3003)において, 室温付近の変形抵抗曲線,

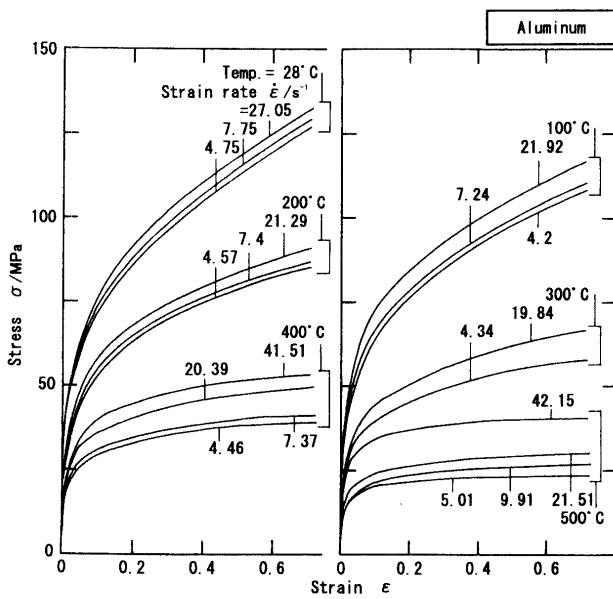


Fig.2 Flow curves of Aluminum (1050) measured at some constant strain rates and at some constant temperatures.

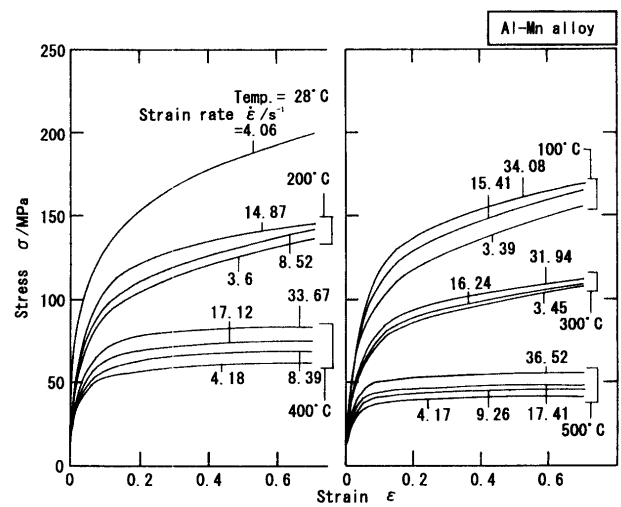


Fig.3 Flow curves of Al-Mn alloy (3003) measured at some constant strain rates and at some constant temperatures.

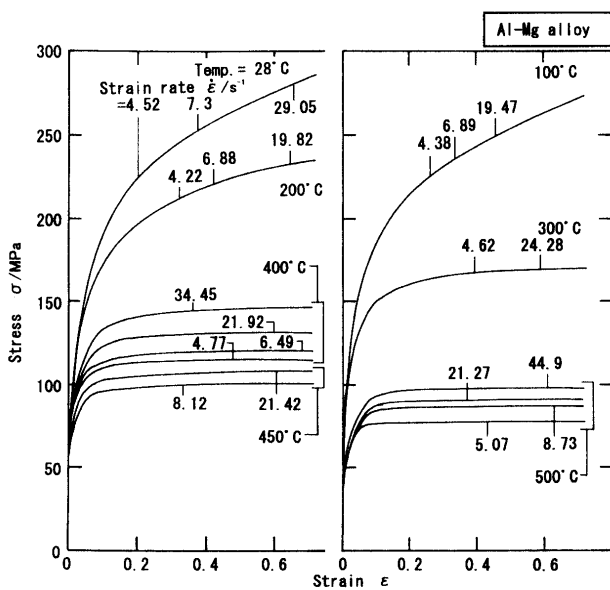


Fig.4 Flow curves of Al-Mg alloy (5052) measured at some constant strain rates and at some constant temperatures.

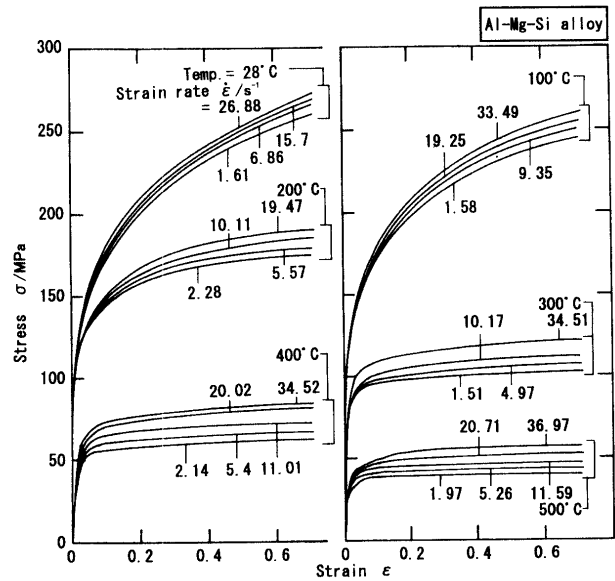


Fig.5 Flow curves of Al-Mg-Si alloy (6063) measured at some constant strain rates and at some constant temperatures.

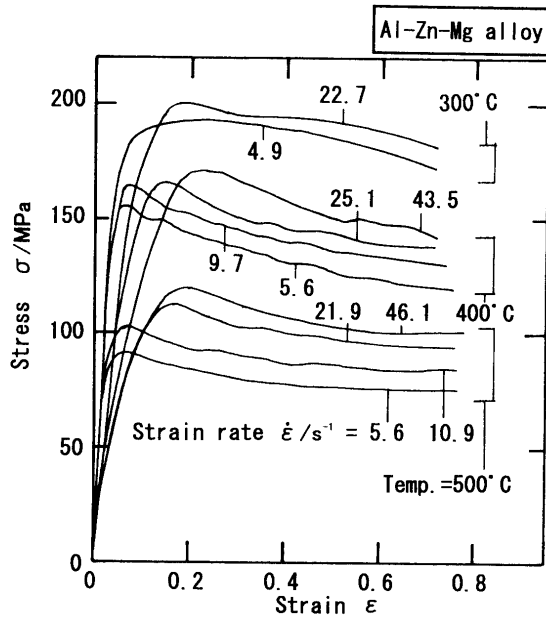


Fig. 6 Flow curves of Al-Zn-Mg alloy (7075) measured at some constant strain rates and at some constant temperatures.

ならびに Al-Mg 合金 (5052) において、室温から 300°C の変形抵抗曲線がひずみ速度の影響をほとんど受けないことを示している。また、Al-Mn 合金 (3003)、Al-Mg 合金 (5052)、Al-Mg-Si 合金 (6063) の 400°C および 500°C 変形抵抗曲線はこの温度では、変形抵抗はひずみが 0.15 付近以上の大きさの領域でひずみに関わりなく一定値となることを示している。このような変形状態は定常変形と呼ばれていて、変形中の加工硬化速度と動的回復速度がほとんど釣り合った状態で変形が進む変形現象である。一方、Al-Zn-Mg 合金 (7075) の 300°C 以上の変形温度における変形抵抗曲線は変形抵抗がひずみの増加とともに低下する、いわゆる軟化現象を示すことがわかる。この現象は変形過程で、結晶粒界に微細な再結晶が発生することによる動的再結晶の発現による軟化現象として知られている。⁷⁾ 常温におけるアルミニウムおよびアルミニウム合金の変形抵抗曲線を相互に比較した図を Fig. 7 に示す。アルミニウム合金の常温変形抵抗は純アルミニウムと比較して高い値となり、ひずみ 0.4 で比較した場合、Al-Mn 合金 (3003) で 1.7 倍、Al-Mg-Si 合金 (6063) で 2.24 倍、Al-Mg 合金 (5052) で 2.46 倍、Al-Zn-Mg 合金 (7075) で 2.88 倍となることがわかる。さらに、Al-Zn-Mg 合金 (7075) の未焼鈍材 (Hv=108.2) はひずみ 0.15 付近で変形抵抗値は 400MPa に達している。ただし、同材料は延性が低く、ひずみが 0.18 付近で試験片表面に微細なクラックが現れる。同じ Al-Zn-Mg 合金 (7075) でも、焼鈍材 (Hv=56.9) は変形抵抗が低下すると同時に延性が増加し試験片側面に破断クラックを生

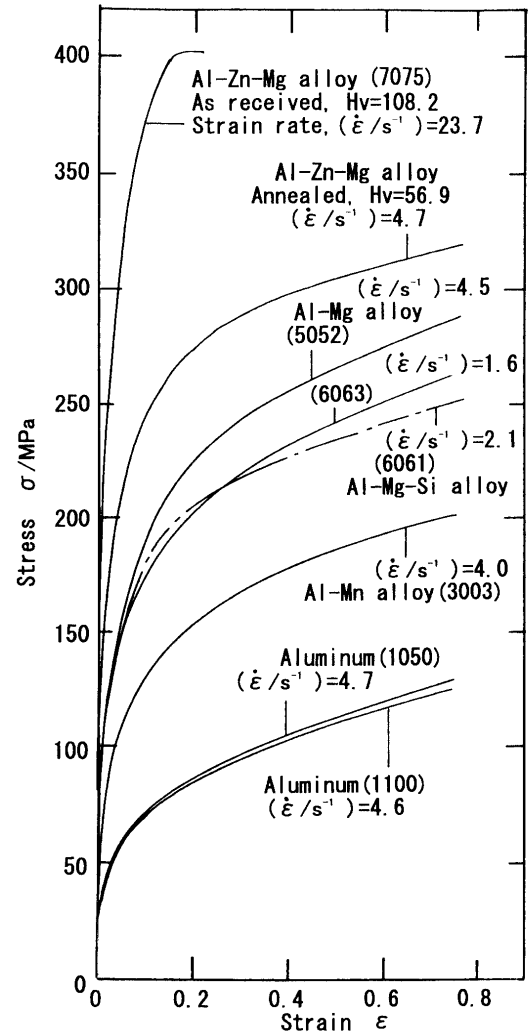


Fig. 7 Flow curves of Aluminum and Aluminum alloys measured at some constant strain rates and at room temperature.

じることなく変形することが分かる。

5. 変形抵抗推算式と加工応力計算への応用

鍛造加工、圧延加工、押し出し加工など各種塑性加工過程の加工所要動力計算、応力解析ならびに加工シミュレーションを行うには、変形抵抗曲線（フローカーブ）データを用いて加工過程における任意の変形条件下で材料が示す相当応力を推算する変形抵抗推算式を作成しておく必要がある。ほとんど全ての塑性加工過程で変形のひずみ速度、ひずみおよび温度は変形領域内部で場所毎に異なる値を示し同時に変動することから、変形過程の相当応力推算を正確に行おうとする場合、塑性流れの経路に沿って連続的に変化するひずみ、ひずみ速度および温度の影響を考慮できる変形抵抗推算式が必要となる。^{8) 12)} この要件を満足する計算式の一つとして、先に中西は加工硬化率式を提示した。^{10) 11)} 加工硬化率式に含まれる材

料因子は本研究で得た変形抵抗曲線データを参照した数値解析で確定することができる。¹⁰⁻¹²⁾

6. おわりに

実用アルミニウム合金の変形抵抗ならびに変形特性を明らかにする目的で、カム・プラストメータを用いて、室温～500℃の温度範囲および1～50s⁻¹のひずみ速度範囲の変形条件下でひずみが0.8までの単軸圧縮試験を行った。本研究のまとめを以下に記す。

- (1)常温変形では、アルミニウムは合金化により変形抵抗(強度)が増大するとともに、主要添加元素の種類(本研究では、Mn, Mg, MgとSi, MgとZn)により増大の様相が大きく変わることを定量的に明らかにした。また、常温変形抵抗のひずみ速度依存性は少なく、合金によってはひずみ速度の影響をほとんど受けないことが分かった。
- (2)高温変形では変形中の動的回復が大きくなり、温度およびひずみ速度一定試験ではフローカーブは定常変形状態を示す。Al-Zn-Mg合金(7075)の場合は前述の動的回復現象に加えて変形過程中に再結晶が起こることによる、すなわち動的再結晶による加工軟化現象を示すことを定量的に明らかにした。
- (3)実際の塑性加工の変形条件に対応させた温度およびひずみ速度範囲で系統的に試験温度と試験ひずみ速度を変えるとともに、両変形条件をそれぞれ変形過程で一定値に保った試験を行うことにより、加工過程の相当応力計算に必要な変形抵抗推算式の構成に有用な基礎資料となる変形抵抗曲線データを得ることが出来た。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究に必要な各種アルミニウム合金を提供して頂きました昭和アルミニウム(株)研究開発部技術研究所のご厚意に厚く感謝致します。

引用文献

- 1) 植木 正憲, 中村 正久, 塑性と加工, 26-288, 14 (1985)
- 2) 中西賢二, 牟禮雄二, *ibid*, 36-418, 1300(1995)
- 3) S.Kikuchi, M.Sukimoto and K.Nakanishi, Proc. 4th International Aluminum Extrusion Tech. Seminar, Vol. 2, 343 (1988)
- 4) 牟禮雄二, 中西賢二, 日本機械学会講演論文集, No.968-2, 46 (1996)
- 5) G.J.Li, W.T.Wu, A.Arvind and J.P.Tang, Advanced Technology of Plasticity (5th ICTP), Vol. 1, 479 (1996)
- 6) 小坂田宏造, 金炫琪, 塑性と加工, 39-454, 1107 (1998)
- 7) K.J.Gardner and R.Grimes, Metal Science, March-April, 216 (1979)
- 8) 宮川 英明, 吉武 秀介, 中島 英治, 吉永 日出男, 日本金属学会誌, 55-9, 928(1991)
- 9) 宮川 英明, 吉武 秀介, 中島 英治, 吉永 日出男, 九州大学大学院総合理工学研究科報告, 13-4,325 (1992)
- 10) K.Nakanishi, 鹿児島大学研究報告, 30, 13 (1988)
- 11) 中西賢二, 塑性と加工, 30-337, 262 (1989)
- 12) K.Nakanishi, S.Kamitani and Y.Fukui, 鹿児島大学研究報告, 36,19 (1994)