

研 究 解 説

半溶融/半凝固金属の変形特性

Deformation Characteristics of Mushy/Semi-Solid Metals

木 内 学*

Manabu KIUCHI

1. ま え が き

高温下での金属材料の加工法は多岐に及んでいるが、更に新しい加工法・加工技術の開発も目覚しく進んでいる。筆者らが開発を進めてきた半溶融/半凝固加工法は、内部に固相成分と液相成分が共存または並存する金属素材に荷重または圧力を加え、変形、流動・接合あるいは分離させて所要の形状・寸法を有する製品を得ようとするものであって、鑄造・熱間塑性加工・溶接・溶断などのいわば境界領域に位置する新しい加工技術と考えることができる。この半溶融/半凝固加工技術は、加工法の形態として種々のものが考えられるばかりでなく、加工力の著しい低下、加工機械・設備の小型化、高加工率の達成、難加工材への適用、さらには溶湯からの一貫した連続創形プロセスへの適用、など多くの利点および将来への可能性を含んでいる。

半溶融/半凝固加工技術の持つ可能性を大きく伸ばし、新たな加工プロセス、加工機械、加工製品などの開発と応用を進めていく上で、半溶融/半凝固金属素材の変形および流動に関する特性、即ち、変形抵抗、構成方程式、流動則などについて知ることが不可欠である。しかしながら、この問題について十分な研究がなされているとは言い難く、筆者らの一連の研究^{1)~3)}を除けば、極く限られた結果が発表されているに過ぎない。本稿においては、半溶融/半凝固金属素材の変形抵抗・流動抵抗について、これまで得られている知見と問題点について説明する。

2. 高固相率域での半溶融金属（合金）の変形抵抗の測定

2.1 測定方法

以下の説明では半溶融/半凝固状態を表示するパラメータとして固相率 ϕ 、即ち金属素材内に含まれる固相成分の重量パーセントを用いる。説明および図・表中に示す固相率 ϕ の値は、いずれも熱分析により固相線温度と液相線温度を求め、平衡状態図を参照にして得た値、あるいは、実

用多元合金であって、固相率 ϕ と温度 T の関係を直接的に求めることができない合金については、後述する考察に基づき、便宜的に固相率 ϕ を推定する方法を採用した。

筆者らは、固相率が比較的高い半溶融状態下で、種々の金属素材（合金）の一軸圧縮試験を二段階に分けて行い、変形抵抗の測定を進めるとともに、変形挙動および内部組織について観察を試み、幾つかの知見を得た（Fig. 1 参照）。

一軸圧縮試験の第一段階で用いた供試材は、Al-5.7 % Cu, Al-0.93 % Si, Al-13.7 % Mg, 高力アルミ 7075 等のアルミ系合金と、Cu-35 % Zn, 快削黄銅 C 3602 BD, C 3604 BD の銅系合金である。これらのうち、市販の高力アルミ 7075, 快削黄銅 C 3602 BD 及び C 3604 BD 以外は、半溶融状態を外部から制御し易いという観点から、本研究のために特に溶製したものである。この場合の試片は通常用いられる円柱形試験片であり、その寸法は $\phi 26 \times 23 \text{ h mm}$ である。

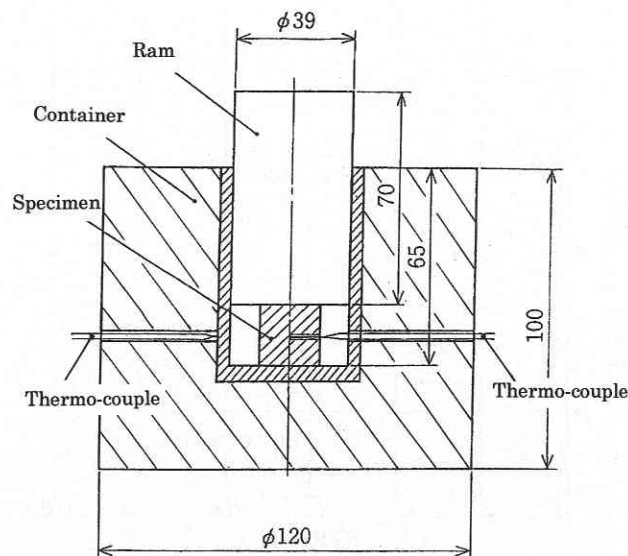


Fig. 1 Configuration of apparatus for compression test

*東京大学生産技術研究所 情報・システム大部門

続いて第二段階では 28 種類のアルミ系合金について一軸圧縮試験を行った。その際の試片の基準寸法は $\phi 12 \times 18$ mm である。

圧縮ひずみ速度は 0.2 sec^{-1} を基準とし、試験温度範囲は、対象とする合金により異なるが、固相線以下の温度から固相率が 40 % 程度に相当する温度までである。

圧縮試験の手順・方法の詳細は参考文献¹⁾を参照されたい。測温は試片側壁から中心部に達する穴 ($\phi 1$ mm) に挿入した A-C 熱電対で行った。試片端面は毎回 1500 番の耐水ペーパーで磨き、摩擦条件が一定となるように努めた。

圧縮後の内部組織の観察には金属顕微鏡を用い、また圧縮装置付高温顕微鏡を用い、真空中及びアルゴンガス雰囲気中で一部の供試材を半溶融状態まで加熱して液相成分の発生状況の観察を行った。さらに、同装置を用いて半溶融状態下で試片に微小荷重を付加して、粒界と液相の変形あるいは流動の挙動などについても観察を試み、半溶融金属の変形挙動について考察する際の参考とした。

2.2 測定結果：応力—ひずみ線図

Fig. 2～5 には Al-5.7 % Cu 合金、Al-13.7 % Mg 合金、高力アルミ 7075、快削黄銅 C 3602 BD について、平均圧縮応力 σ_f —圧縮対数ひずみ e 関係の測定結果を示す。

これらの測定結果を通して、半溶融状態下での応力—ひずみ線図の形態を模式的に示すと Fig. 6 のようになり、その変化の過程は概略 3 段階に分けて考えることができる。

まず第 I の過程は、圧縮の初期段階（ひずみ e が高々 0.05 以下）で、変形量も少なくかつ変形が試片全体にわたってほぼ均一に起り、粒界に集中的に存在する液相成分の流動もあまり大きくない範囲である。一般に液相成分の存在により、固相成分である結晶粒は相互の束縛が緩和され、

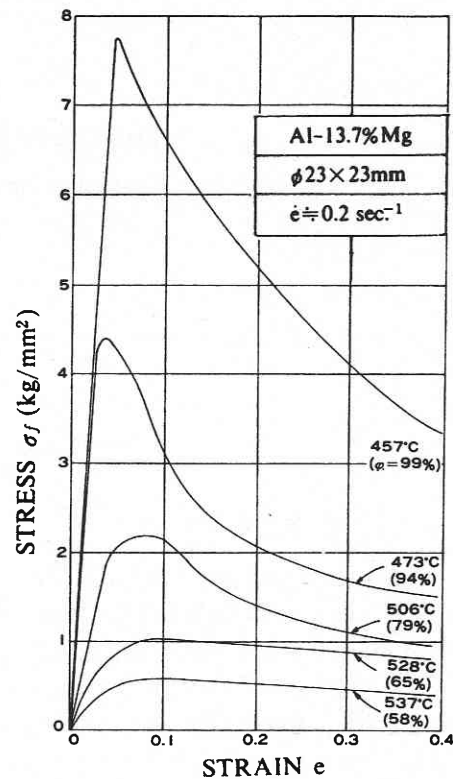


Fig. 3 Stress (σ_f)–Strain (e) curve of Al-13.7%Mg

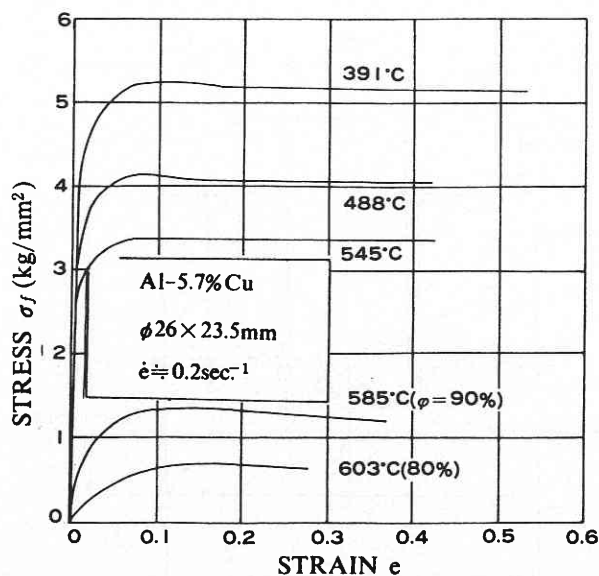


Fig. 2 Stress (σ_f)–Strain (e) curve of Al-5.7%Cu

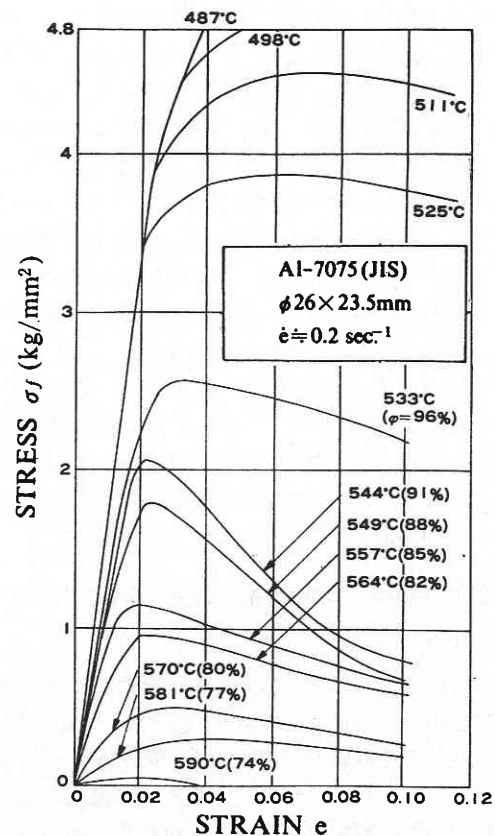


Fig. 4 Stress (σ_f)–Strain (e) curve of Al-7075 (JIS)

粒界におけるすべり、粒自体の変形、粒の回転、などが容易になる。(Fig. 7 参照) 巨視的にみた圧縮変形が始まると、微視的にみた個々の結晶粒の粒界すべり・回転・変形が誘起されるが、巨視的な変形量に含まれるそれらの微視的な移動量・回転量・変形量の割合は、液相成分の量によって異なる。液相成分が多いほど、即ち固相率 ϕ が低いほど、結晶粒自体の変形量が占める割合が低くなり、このこ

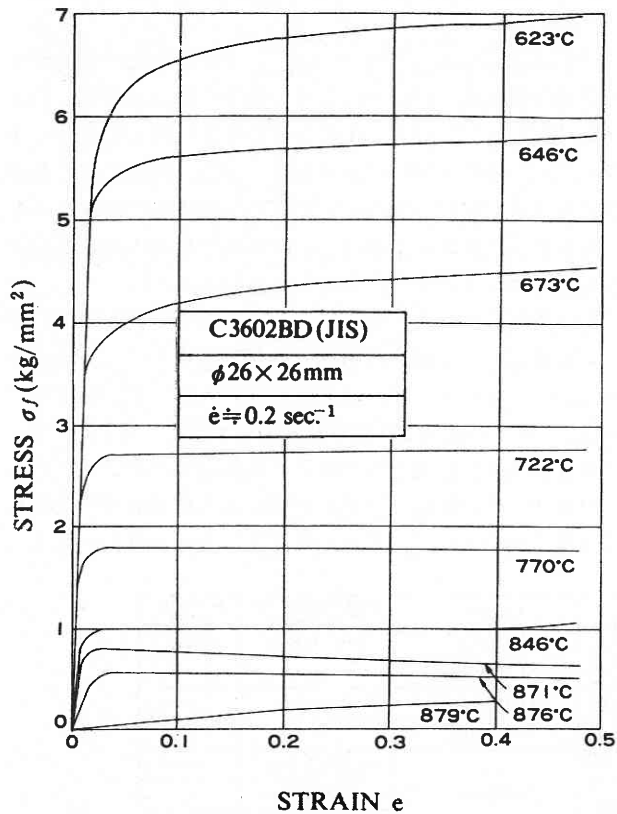


Fig. 5 Stress (σ_f) - Strain (ϵ) curve of C3602 BD (JIS)

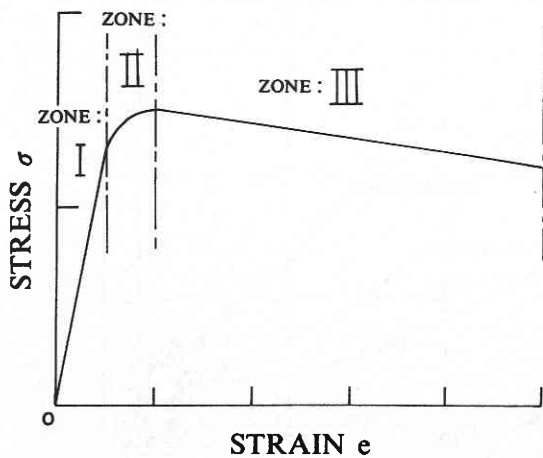


Fig. 6 General pattern of Stress (σ_f) - Strain (ϵ) curve in mushy (mushy/semi-solid) state

とが、固相率の低下に伴って圧縮初期の応力 σ_f の立ち上がりが穏やかになってくる原因と考えられる。

第Ⅱの過程は、圧縮変形量が次第に増加し、試片内部の液相成分が側壁部（自由表面）に向って流動し、さらには流出し、あるいはまたその一部は結晶粒界にとじこめられた状態となり、粒界に滞留する液相成分の減少により、結晶粒の微視的な移動・回り・回転を緩和する効果が下限に近づく段階であり、そのために応力 σ_f の値は次第に増大しつつも飽和してくる (Fig. 8 参照)。

この飽和の過程が急速に進行する場合と、ゆるやかに進行する場合があり、特に初期固相率 ϕ が低く初期の液相成分の量が多い場合には、大きなひずみ範囲に渡って応力 σ_f がゆるやかに増加していく傾向が顕著となる。この過程における応力 σ_f の挙動は、変形過程において試片が液相成

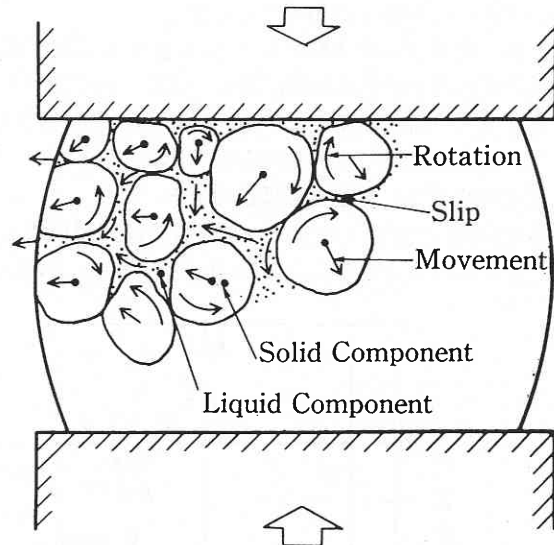


Fig. 7 Mechanism of deformation of mushy/semi-solid metallic material

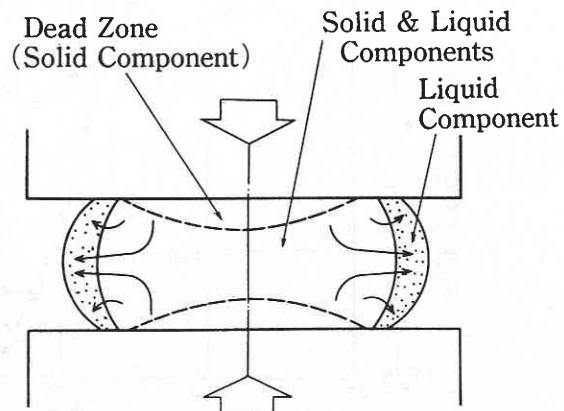


Fig. 8 Schematic illustration of flow of liquid component in mushy/semi-solid metallic material

分を内部に保持する能力の大小と結びついており、液相成分の側壁方向への流動が起りにくいあるいは側壁からの流出が起りにくい場合には、応力 σ_f の飽和がゆるやかになる。したがってこの σ_f の飽和挙動は、試片の形状・寸法あるいはひずみ速度などの影響を受ける。例えば、試片の径に対して高さを減少させると、液相成分を内部に保持し続ける能力が高まり、大きなひずみ範囲まで σ_f が増加し続ける現象があらわれてくる¹⁾。

第Ⅲの過程は、液相成分の試片側壁部からの流出が顕著になり、併せて側壁部から内部に向かって崩壊が進行する過程である。液相成分の集中とその流出により、側壁部近傍の結晶粒間の結合力は弱まり、相互に容易に分離して移動し、ある種の崩壊現象を起こす。圧縮変形量の増大とともにこの現象が内部に進行していくが、このような状態になると、この部分の負荷能力が急速に低下していくので、結果的には応力 σ_f の低下を招くことになる。

以上は、固相率 ϕ が100%から50%前後までの半溶融域における応力-ひずみ線図に関して検討した結果であるが、それ以下の固相率 ϕ になると試片の自重による流動が始まり、通常の意味での圧縮試験はできなくなる。

2.3 固相率の低下に伴う変形抵抗の低下

半溶融/半凝固金属(合金)の変形抵抗は、固相率 ϕ の減少とともに急速に低下する。この低下の傾向とその特性

を調べるために、各金属素材について、4%圧縮ひずみ時の変形抵抗 $(\sigma_f)_{0.04}$ と温度との関係をまとめてFig. 9に示す。

図から明らかなように、いずれの材質についても、固相線温度を越えると、 $(\sigma_f)_{0.04}$ は急激に低下する。但し、Al-0.93% Si合金だけはこの減少の度合いがゆるやかであり、他の材料と異なる特性を示している。これは、この合金のみが他に比較して、異常に大きい結晶粒を有していたことによる。

図が示す固相線温度での $(\sigma_f)_{0.04}$ (換言すれば熱間域での限界変形抵抗)が材質によって大きく異なること、およびCu系合金のそれが、Al系合金のそれに比して著しく小さいこと、は興味深い結果である。また、図において熱間域における $(\sigma_f)_{0.04}$ の値を半溶融域へ外挿した破線を示しているが、これは半溶融域での固相成分自体の変形抵抗を示すものとして理解されることに注意されたい。

既に述べたように、半溶融状態で変形抵抗が急激に減少する理由としては、液相成分の存在により、(1) 結晶粒界におけるすべり、(2) 結晶粒自体の変形、(3) 結晶粒の回転、に対する拘束が緩和されるためと考えられる。一方、固相成分の変形抵抗と液相成分の流動抵抗の間には大きな差があり、その差は、材質の相違による液相成分の流動抵抗の差に比較すれば、相対的に非常に大きいものと考えら

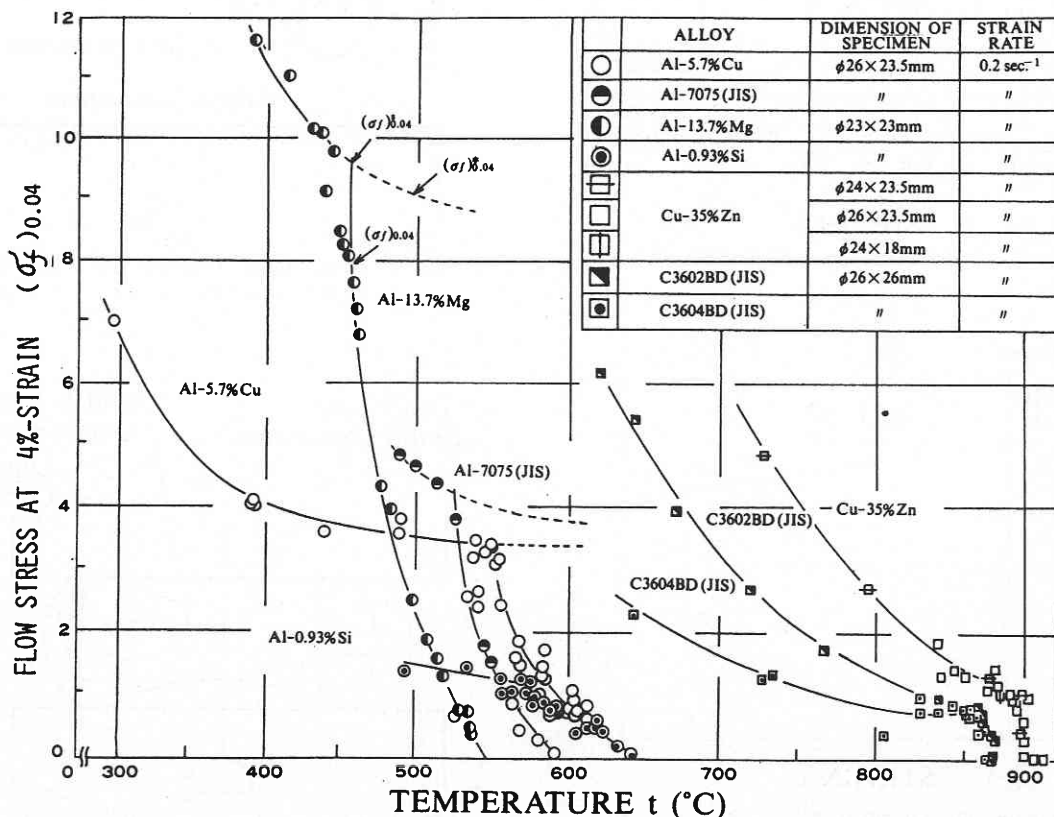


Fig. 9 Relationship between Flow Stress at 4%-Strain $(\sigma_f)_{0.04}$ and Temperature (t)

れる。そこで、各材質について、結晶粒の形状や粒度がほぼ等しいか、あるいはまた試片の寸法に比較して個々の結晶粒の寸法が十分小さい場合には、液相成分の存在による変形抵抗の低下の度合は、主として液相成分の量によって支配され、材質が異なっても低下の度合は殆ど変わらないことが予想される。

このような推定の妥当性を確認するために、液相成分の存在による変形抵抗の低下の度合を示すパラメータとして無次元化変形抵抗 σ_n すなわち、圧縮ひずみ 4% での変形抵抗 $(\sigma_f)_{0.04}$ と、同ひずみ時の固相線温度 (固相率 $\phi = 100\%$) での変形抵抗 $(\sigma_f)^s_{0.04}$ または外挿法で得た固相成分自体の変形抵抗 $(\sigma_f)^*_{0.04}$ との比、即ち、 $\sigma_n = (\sigma_f)_{0.04} / (\sigma_f)^s_{0.04}$ または $\sigma_n = (\sigma_f)_{0.04} / (\sigma_f)^*_{0.04}$ の概念を導入し、固相率 ϕ と σ_n の関係をプロットした結果を Fig. 10 に示す。

図から明らかなように、Al-0.93% Si 合金を除く他の合金類については、多少のバラツキはあるものの、 ϕ と σ_n の関係はほぼ同一の直線で示され得ることが判る。Al-0.93% Si 合金のみがこの関係から外れている理由は、その結晶粒の大きさにあり、上述の液相成分の効果が十分現われ得ないためである。尚、この Fig. 10 に示す結果を逆利用して、多元合金のように固相率 ϕ を簡単に知ることができない実用合金に対しても、各温度での無次元化変形抵抗を測定することにより、便宜的に対応する温度での固相率を推定することができる。

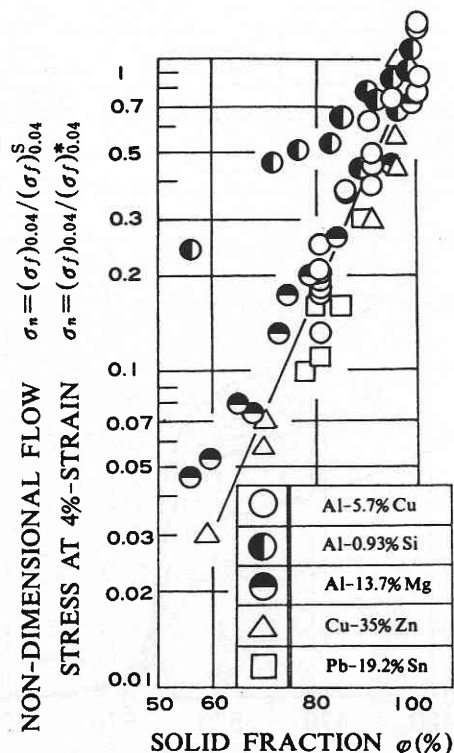


Fig. 10 Relationship between Non-Dimensional Flow Stress (σ_n) and Solid Fraction (ϕ)

3. 半熔融/半凝固域全域でみた変形抵抗・流動抵抗

3.1 固相線温度直下での変形抵抗

一般に、固相金属材料の変形抵抗 K_f は、ひずみ ϵ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 、温度 T 、の関数 $K_f = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$ で表わし得るとされており、具体的な関数形としては、

$$K_f = K_0 \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot \exp(A/T) \dots\dots\dots (1)$$

がよく知られている。ここで、 n , m , A , K_0 は材料定数である。これまで、この式から派生した様々な表示式及びそれらに伴う係数を確定するための研究が広く行われてきたが、中でも、炭素鋼に関する美坂の式⁴⁾、志田の式⁵⁾、アルミ合金に関する本村の式⁶⁾などがしばしば引用されている。

しかしながら、それらの式は、いずれもいわゆる熱間加工域を対象とした変形抵抗の表示式であり、熱間域と半熔融域との境界近傍、即ち、固相線温度又はその直下での変形抵抗については、特に示されていない。例えばアルミ合金の変形抵抗式として、本村らは次式を提示しているが、この式もいわゆる熱間域を対象としている。

$$K_f = \left(a + \frac{b}{T} + \frac{c}{T^2} \right) \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \dots\dots\dots (2)$$

但し、 $0.1 < \epsilon < 0.6$, $1.0 \cdot s^{-1} < \dot{\epsilon} < 12.0 \cdot s^{-1}$, $300^\circ C < T < 500^\circ C$, a, b, c = 材質及び変形条件により定まる定数。

いまこの式の形を踏まえ、A 3003 について筆者らが得た測定結果を用いて、本村らの式が対象とする上限温度 T^* から固相線温度 T_s までの範囲における A 3003 の変形抵抗の表示式を構成すると、係数 a を定数とするのではなく、 T の関数として、次の形を採用する場合は、実測値をよく表示できることが判明している。

$$a = a^* : (T \leq T^*) \\ a = a^* - \frac{h}{T^* - T_s} (T^* - T) : (T^* \leq T \leq T_s) \dots\dots\dots (3)$$

但し、 a^* , h , T^* , T_s は材料固有の定数および温度

上式に示す結果は一例であり、固相線温度又はその近傍における金属素材の変形抵抗を測定あるいは予測する研究は未だ少なく、今後に残された大きな課題である。

3.2 固相線温度以上高固相率半熔融域での変形抵抗

前節では、一軸圧縮試験によって測定される応力—ひずみ線図および 4% ひずみ時の変形抵抗が、固相率の低下に伴って示す変化について示した。以下では、金属素材が固相線温度を越えた後に、4% ひずみ時の圧縮変形抵抗 $(\sigma_f)_{0.04}$ が低下する挙動について、更に細かく検討した結果を示す。

既に指摘したように、半溶融域に入ると、結晶粒界から溶解が始まり、微視的にみれば結晶粒相互の束縛が緩和され、巨視的にみれば金属素材の変形や流動が容易となる。その際、結晶粒の大きさ、形、配列の仕方などにより、同一の固相率の下でも、上記の変形の容易化の程度が異なる。即ち、変形抵抗の固相率に対する低下の度合が異なる。

Fig. 11 と Fig. 12 は、その相違を図示したものであり、例えば、Fig. 11 のように結晶粒が大きく異形の場合には、結晶粒間の拘束が外れ難く、固相率の低下に伴う変形抵抗の低下はゆるやかとなり、変化を示す曲線の形は上に凸 (convex 形) となる。Fig. 12 に示すように結晶粒が細か

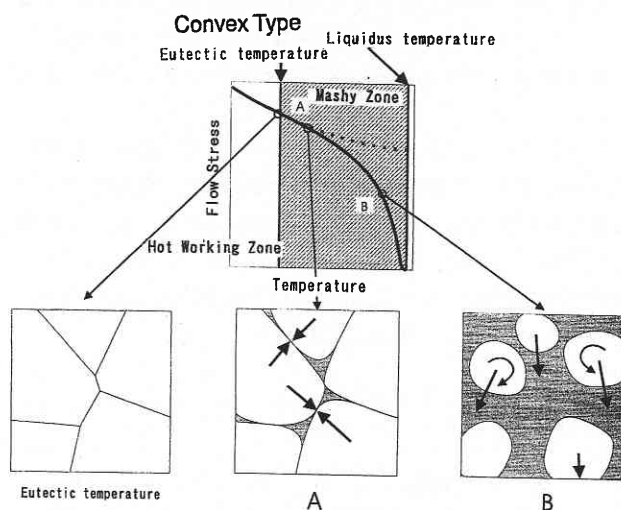


Fig. 11 Schematic illustration of flow stress drop (convex type) due to partial melting

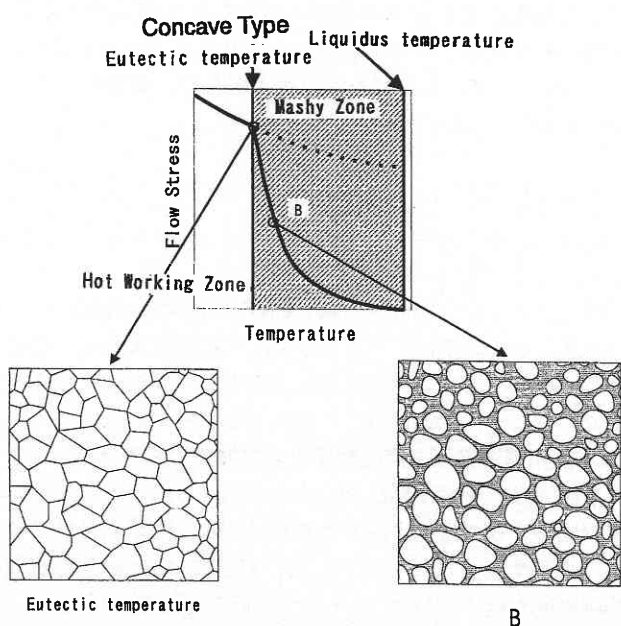


Fig. 12 Schematic illustration of flow stress drop (concave type) due to partial melting

く、形状が球形に近い場合には、わずかの液相の発生によっても結晶粒間の束縛が緩和され、変形抵抗は急激に減少し、変化を示す曲線は下に凹 (concave 形) となる。

このような変形抵抗の変化を示す例を Fig. 13 と Fig. 14 に示す。Fig. 13 に示す A 7075 の例は、特に結晶粒が大きかった訳ではないが、変形抵抗の変化は明瞭な convex 形を示しており、Fig. 14 に示す A 5056 の場合には、逆に concave 形を示している。

この温度域での変形抵抗に関して注目すべき点として以下の事項が挙げられる。

- (1) 半溶融域における変形抵抗は、予想されるように、ひずみ速度の影響を強く受ける。
- (2) 但し、その影響の度合は、固相線温度以下の固相域において変形抵抗が受けるひずみ速度効果をそのまま引継ぐ程度であり、それ以上ではない。
- (3) 固相率が低下し、固相粒即ち結晶粒相互間の束縛が或る水準まで緩和されると、換言すれば、半溶融金属素材が崩壊状態となると、ひずみ速度効果は急速に少なくなる。
- (4) 故に、半溶融域の変形抵抗に対するひずみ速度効果は、変形抵抗の低下の傾向が concave 形の場合よりも convex 形の場合の方が大きく現れる。

半溶融温度域における変形抵抗の測定結果は、試片の寸法にも影響を受けるので、注意を要する。Fig.15 と Fig.16

	Material	Dimension of specimen/mm	Strain rate/sec-1
◇	A7075	φ 12 × 18	About 0.5
○			About 2.5
□			About 10.0

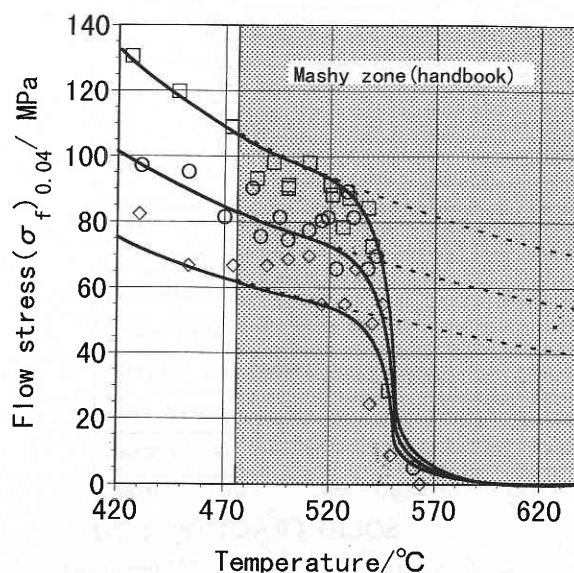


Fig. 13 (Flow Stress)-(Temperature) relationship of A7075

	Material	Dimension of specimen/mm	Strain rate/sec-1
△	A5056	φ 12×18	About 0.2
◇			About 0.5
○			About 2.5
□			About 10.0
×			About 20.0

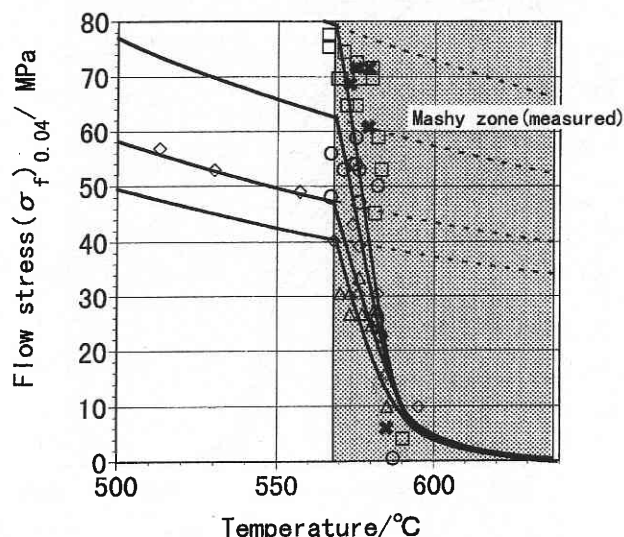


Fig. 14 (Flow Stress)-(Temperature) relationship of A5056

	Material	Dimension of specimen/mm	Strain rate/sec-1
▲	A5056	φ 12×3	About 0.5
◆		φ 12×6	
●		φ 12×12	
■		φ 12×18	

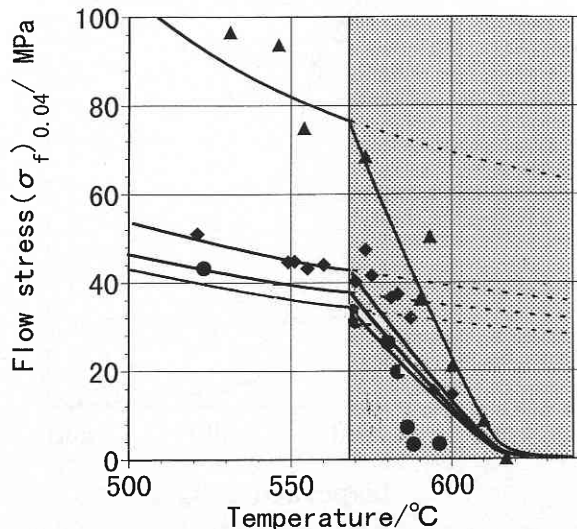


Fig. 15 (Flow Stress)-(Temperature) relationship of A5056

	Material	Dimension of specimen/mm	Strain rate/sec-1
◆	A6061	φ 12×6	About 0.5
●		φ 12×12	
■		φ 12×18	

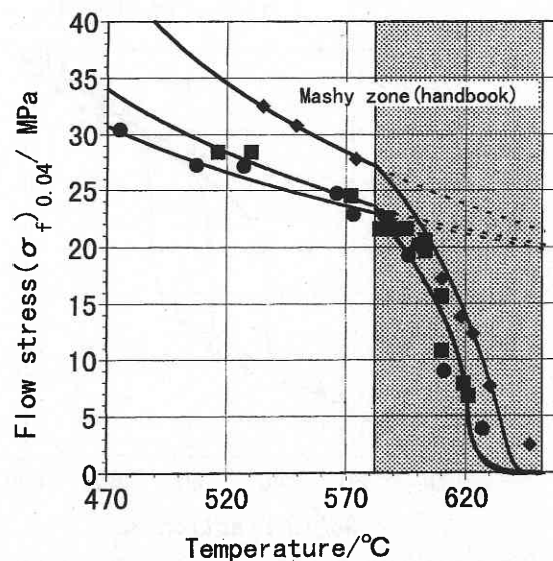


Fig. 16 (Flow Stress)-(Temperature) relationship of A6061

にはその一例を示す。但し、これらの場合も、固相線温度以下の固相域における寸法効果をそのまま引継ぐ結果となっており、それ以上の寸法効果が現れる訳ではない。むしろ固相率の低下と共に、寸法効果の度合は急速に小さくなるということができる。

3.3 低固相率半溶融/半凝固域における流動抵抗

半溶融金属素材の固相率が大概 40～50%以下になると、固相（結晶）粒間の結束は殆どなくなり、金属素材は柔らかいスラリーあるいは粘性流体と同様の流動挙動を示す。

金属溶湯およびその中に固相粒が分散した半凝固スラリー（又は半凝固溶湯）の粘度を知るとは、鑄造の分野では必須の条件である。何故ならば、鑄造品質を左右する最大の因子である鑄型への充填度は、いわゆる湯流れの良し悪しによって定まり、その湯流れの良し悪しは、粘度に大きく依存するからである。

このため、金属溶湯あるいは半凝固スラリーの粘度を測定する試みは数多く行われており、多数の測定データが報告されている⁷⁾。その際の手法としては、半凝固スラリーを入れた円筒中で同軸の円柱を回転させ、円柱の回転トルクを測定し、その値より粘度を推定する方法が広く用いられてきた。そこでこれらの測定値より次式を用いて、半凝固スラリーのせん断変形抵抗 τ を求める試みを行った。

$$\tau = 2 \cdot \mu \cdot \omega \cdot R_2^2 / (R_1^2 - R_2^2) \dots\dots\dots (4)$$

但し, R_2 = 円筒の内径, R_1 = 円柱の外径, ω = 円柱の回転角速度, μ = 粘度

上式で計算されたせん断変形抵抗より, 仮の垂直変形抵抗を $(\sqrt{3} \times \tau)$ として求めると, その結果は Fig. 17 のように

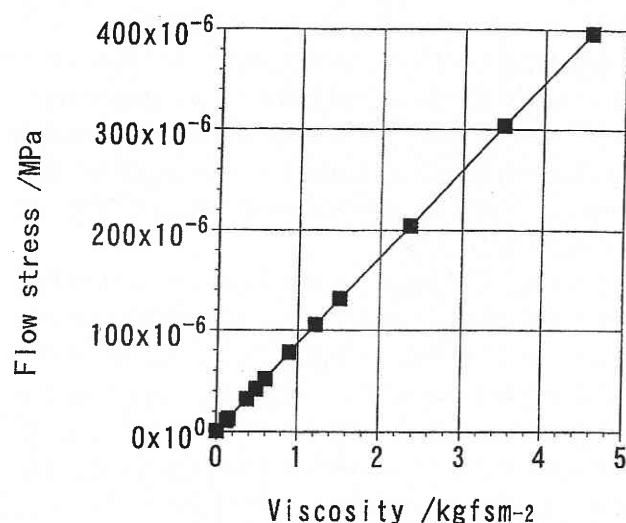


Fig. 17 (Flow Stress)-(Viscosity) relationship in low solid fraction range

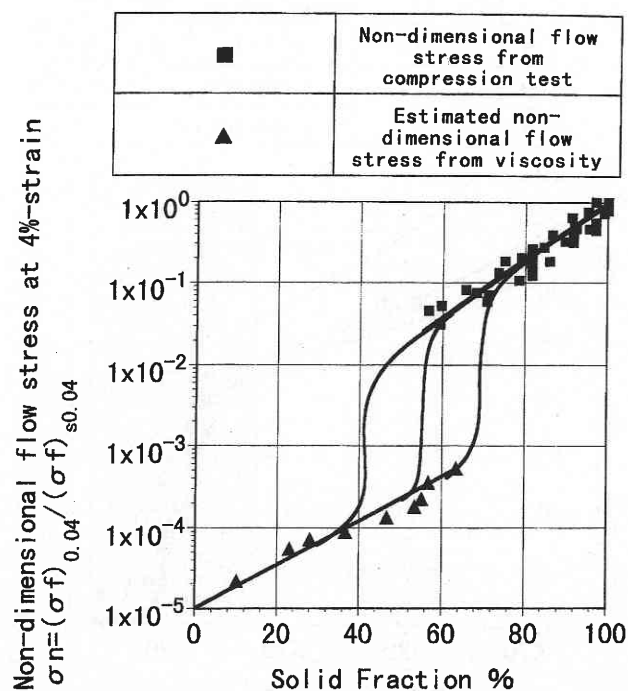


Fig. 18 (Non-dimensional Flow Stress at 4% Strain)-(Solid Fraction) relationship

	Material	Dimension of specimen/mm	Strain rate/sec-1
△	A2014	φ 12×18	About 0.2
◇			About 0.5
○			About 2.5
□			About 10.0

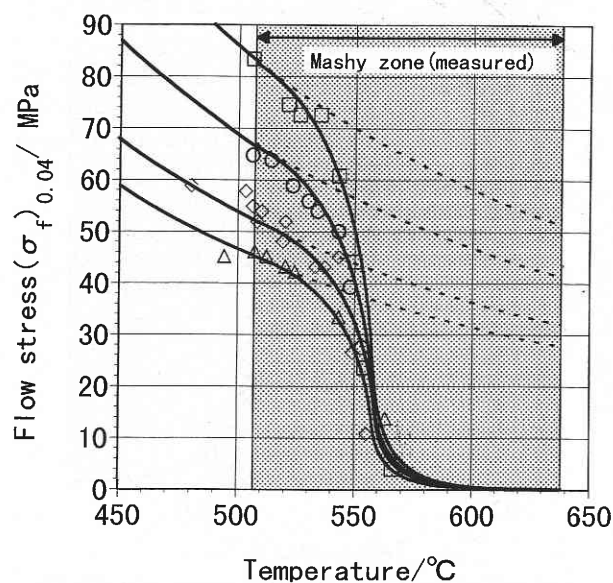


Fig. 19 (Flow Stress)-(Temperature) relationship of A2014

	Material	Dimension of specimen/mm	Strain rate/sec-1
△	A2014	φ 12×18	About 0.2
◇			About 0.5
○			About 2.5
□			About 10.0

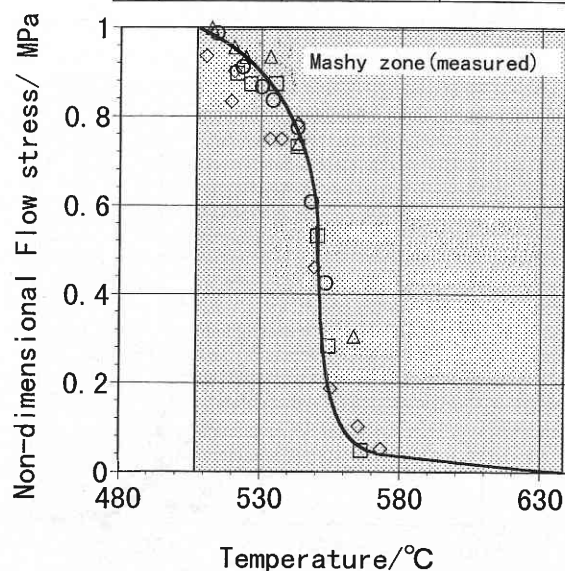


Fig. 20 (Non-dimensional Flow Stress)-(Temperature) relationship of A2014

なる。

このようにして、低固相率域での半凝固スラリーの粘度を、高固相率域で測定した変形抵抗と比較し得る値に変換できるので、これらを用いて半溶融/半凝固全域での金属素材の変形抵抗を、統一的に表示することが可能となる。

そこで、第2節で示したように、横軸に固相率を、縦軸に無次元化変形抵抗 σ_n をとり、両者の関係をプロットした結果がFig. 18である。

これにより半溶融/半凝固域での変形抵抗の変化の枠組を理解することができる。高固相率域で低下してきた変形抵抗が、固相率がある限界値以下になると、結晶構造の崩壊とともに、急激に低下し、スラリー状となり、以後は粘性流体としての挙動が主体となる。但し、図中にプロットされた記号は、Fig. 10にも示したように、各種の金属素材に関する測定値を含んでいる。測定時のひずみ速度および試片寸法は一定としてあるが、測定条件の相違により若干の変化が起り得ることに注意されたい。

しかしながら、無次元化変形抵抗 σ_n に対するひずみ速度効果については、あまり顕著にはあらわれないとの測定結果も得られている。Fig. 19とFig. 20には、A 2014について、異なるひずみ速度の下で変形抵抗を測定した結果を示す、変形抵抗そのものに対しては、当然の如く、顕著なひずみ速度効果が見られるが、Fig. 20に示すように、無次元化変形抵抗 σ_n に換算してまとめると、固相率（温度）に対する変化は、ほぼ一本の曲線に集約できる。

この理由は、以下のように説明できる。

- (1) 従来言われてきた金属素材の変形や流動に対するひずみ速度効果は、固相材料、液相材料、あるいはそれらの一定の混合体などに対するものであるが、対象となる金属素材の相状態はあくまで一定の範囲にある場合の効果である。
- (2) ここで問題にしている無次元化変形抵抗 σ_n は、固相100%の状態に比して、固相率が低下し、液相が混じってきた場合の変形抵抗の低下の度合を示しており、その低下の度合に対する影響としては、液相の混じっている割合がいくらであるかという状態パラメータ、即ち固相率中の影響の方が、ひずみ速度の大小による影響よりも、はるかに大きい。

4. 結 言

本稿では、半溶融/半凝固状態下にある金属素材の変形抵抗あるいは流動抵抗の基本的特性、具体的な値について、特に固相率との関係を見ながら説明した。半溶融/半凝固金属素材の内部構造は、通常の固相金属素材のそれとは大きく異なり、そのために、変形・流動抵抗をはじめとする変形特性・流動特性も著しく異なる挙動を示す。

これらの点に関する研究は少なく、不明な点も多いが、本稿にて示したように、少しずつではあるが、変形・流動にかかわる本質的なメカニズムが解明されつつある。その全体像が遠からず明らかになり、かかる状態下での金属素材の変形・流動を予測し、制御し、管理することが可能になると考えられる。

また、本稿においては、紙面の制約のために説明を省略したが、半溶融/半凝固金属素材の変形・流動を理論的に解明し予測するための数学的モデルの構築も進んでおり、筆者らによる新解析モデルの提案もある⁸⁾。これらの内容とその応用の可能性については、別の機会に紹介したい。

半溶融/半凝固加工技術は、21世紀を支える環境保全対応型金属加工技術の中核をなすものとしても期待されており、その更なる発展を促進するためにも、本稿で示した基盤的な知識や技術情報・データが大きな役割を果たすものと考えられる。

(2000年7月4日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内学・福岡新五郎・新井樽男：塑性と加工，17-186 (1976)，596.
- 2) 木内学・杉山澄雄・新井樽男：塑性と加工，20-223 (1979)，762.
- 3) M.Kiuchi, S.Sugiyama & K.Arai: Proc. 20 th Int. Machine Tool Design and Research Conf. (1979), 71.
- 4) 美坂佳助・吉本友吉：塑性と加工，8-79 (1967)，414.
- 5) 志田茂：塑性と加工，10-103 (1969)，610.
- 6) 本村貢・島村三郎・西村孝：軽金属，26-9 (1976)，432.
- 7) 素形材技術調査報告書（Ⅱ）：（財）素形材センター凝固制御，凝固加工技術調査部会 (1986).
- 8) 木内学・柳本潤・横林寛：平12年度 塑性加工春期講演会講演論文集 (2000)，277.