

© 1992 ISIJ

論 文

スラリー状半凝固金属の粘度におよぼす 合金成分の影響

平居 正純*・竹林 克浩*²・吉川 雄司*³

Effect of Chemical Composition on Apparent Viscosity of Semi-solid Metals

Masazumi HIRAI, Katsuhiko TAKEBAYASHI and Yuji YOSHIKAWA

Synopsis :

Stirring experiments of Al, Cu and Fe semi-solid alloys on continuous cooling were carried out to investigate the effect of chemical composition and stirring conditions on the apparent viscosity of semi-solid metals.

The apparent viscosity of every alloy increased with increasing solidification rate and decreasing shear rate and the critical fraction solid for fluidity increased with decreasing solidification rate and increasing shear rate. The equation for apparent viscosity η_a of semi-solid alloy is proposed as follows,

$$\eta_a = \eta_{La} \left\{ 1 + \frac{\alpha \rho_m C^{1/3} \dot{\gamma}^{-4/3}}{2[1/f_s - 1/(0.72 - \beta C^{1/3} \dot{\gamma}^{-1/3})]} \right\} \quad (\text{Pa}\cdot\text{s})$$

$$\alpha = 2.03 \times 10^2 (X/100)^{1/3}$$

$$\beta = 19.0 (X/100)^{1/3}$$

where η_{La} is the apparent viscosity of liquid, ρ_m is the density of alloy, C is solidification rate, $\dot{\gamma}$ is shear rate and f_s is fraction solid. The α, β values depended on chemical composition of alloys and became larger with increasing solute content X . These results were explained by the shape parameter value of suspended particles and the trapped liquid volume in suspended particles in semi-solid metals.

Key words : viscosity ; semi-solid metal ; viscosity equation of semi-solid metal ; shear rate ; critical fraction solid for fluidity ; solidification rate.

1. 緒 言

金属の凝固中に攪拌を与えて固相と液相が混在したスラリー状の半凝固金属を製造し、その铸造や加工を行うプロセスにおいて、半凝固金属の粘度を知ることは重要である。半凝固金属の粘度については多くの研究者によって研究^{1)~10)16)}されており、筆者ら¹¹⁾も先に Al-10 mass% Cu 半凝固金属の実験を行い、その粘度におよぼす固相率や懸濁結晶の形態および冷却速度や剪断歪速度の影響について定量化した。しかし、合金成分の影響については、定量的に整理されたものはなかった。本報では、Al-4.5 mass% Cu, Al-10 mass% Cu, Al-15 mass% Cu, Al-3.6 mass% Si および Cu-8 mass% Sn, 2.5 mass% C 鋳鉄, 0.8 mass% C 鋼の成分系の半凝固金属製造実験を

行い、半凝固金属の粘度におよぼす成分系の影響について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。Fig. 1 (a) の装置ではステンレス製のるつぼと黒鉛製パドル型攪拌子を用い、Fig. 1 (b) の装置では黒鉛るつぼ内にアルミなるつぼ (鉄合金実験用) または黒鉛るつぼ (Al, Cu 合金実験用) を挿入した高周波溶解炉と、アルミ系キャスト製丸型攪拌子を用いた。

Fig. 1 (a) の装置は主に Al-10 mass% Cu の実験に用い、Fig. 1 (b) の装置は実験装置の影響調査のために行った Al-10 mass% Cu の実験の他に、他の全ての成分

平成 4 年 2 月 5 日受付 平成 4 年 6 月 5 日受理 (Received on Feb. 5, 1992 ; Accepted on June 5, 1992)

* (株)レオテック (Rheo-Technology, 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)

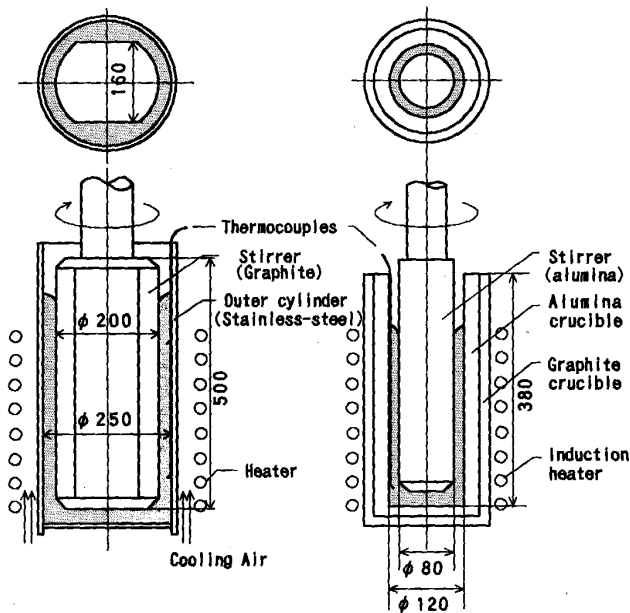
*² (株)レオテック (現:川崎製鉄(株)) (Rheo-Technology, Now Kawasaki Steel Corp.)

*³ (株)レオテック (現:トピー工業(株)) (Rheo-Technology, Now Topy Industries, Ltd.)

Table 1. Experimental conditions.

Alloy	Experiment numbers	Stirrer size	Mean shear rate/s ⁻¹	Mean cooling rate/K·s ⁻¹	Mean df_s/dt rate/s ⁻¹	Regression results	
						a value	f_{scr} value
Al-10%Cu	18	φ200 mm*	90~280	0.05~0.84	0.0012~0.0209	5.89~92.7	0.32~0.60
Al-10%Cu	3	φ230 mm*	250~500	0.06~0.45	0.0015~0.0107	3.38~22.0	0.49~0.61
Al-10%Cu	5	φ 80 mm	25~200	0.03~0.05	0.0007~0.0013	14.1~144	0.44~0.58
Al-4.5%Cu	3	φ 80 mm	25~140	0.02~0.45	0.0010~0.0267	5.87~120	0.33~0.70
Al-15%Cu	2	φ 80 mm	25~75	0.04	0.0006	96.5~362	0.52~0.54
Al-3.6%Si	2	φ 80 mm	25~75	0.03	0.0007	71.0~80.2	0.62~0.63
Cu-8%Sn	8	φ100 mm	55~460	0.18~0.73	0.0020~0.0070	14.2~632	0.30~0.43
Fe-0.8%C	4	φ100 mm	55~460	0.04~0.07	0.0006~0.0011	9.50~264	0.63~0.67
Fe-2.5%C	4	φ 80 mm	50~125	0.05~0.09	0.0003~0.0006	55.5~225	0.42~0.61

* Paddle type



(a) For Al-10mass%Cu (b) For all alloys
Fig. 1. Experimental apparatus.

系の実験に用いた。

実験材料の溶解は Fig. 1 (a) の実験では別の溶解炉で溶解し、Fig. 1 (b) の実験ではるつぼ内で高周波加熱によって溶解した。また、実験中の温度測定は、Fig. 1 (a) の装置では高さ方向2点、深さ方向2点、Fig. 1 (b) の装置では底から20mmの位置の円周方向に3点熱電対を設置して測定した。

2.2 実験条件

各実験条件および実験材料の組成をそれぞれ Table 1, 2 に示す。

これらの装置において攪拌中の粘度は、攪拌子上部に取り付けられたトルクメータによって攪拌トルクを測定し、(1)式⁵⁾によってみかけ粘度として η_a を求めた。

$$\eta_a = \frac{(r_2^2 - r_1^2) G}{4 \pi r_1^2 r_2^2 \Omega L} \dots \dots \dots (1)$$

ここでの実験条件は Reynolds 数が 8500 以上となり、Taylor 渦が発生する乱流域¹²⁾と考えられる。なお、

Table 2. Chemical compositions.

Alloy	Chemical composition/mass%							
	Al	Si	Cu	Sn	C	Mn	P	S
Al-4.5%Cu	94.5	—	4.5	—	—	—	—	—
Al-10%Cu	90	—	10	—	—	—	—	—
Al-15%Cu	85	—	15	—	—	—	—	—
Al-3.6%Si	96	3.6	0.4	—	—	—	—	—
Cu-8%Sn	—	—	92	8	—	—	—	—
Fe-0.8%C	0.03	0.25	—	—	0.8	0.5	0.01	0.01
Fe-2.5%C	0.03	0.25	—	—	2.5	0.5	0.01	0.01

剪断歪速度 $\dot{\gamma}$ は平均剪断歪速度として次式によって求めた。

$$\dot{\gamma} = 2 r_1 r_2 \Omega / (r_2^2 - r_1^2) \dots \dots \dots (2)$$

固相率は各成分系の平衡状態図をもとに熱電対による測温値から換算した。多元系の 2.5 mass% C 鋼鉄、0.8 mass% C 鋼については、Fe-C 平衡状態図¹³⁾をもとに液相線および固相線温度補正¹⁴⁾をした平衡状態図を求め、その状態図をもとに計算した。

3. 実験結果

3.1 各種成分系の半凝固金属の粘度

Al-4.5 mass% Cu, Al-10 mass% Cu, Al-15 mass% Cu, Al-3.6 mass% Si, 2.5 mass% C 鋼鉄, Cu-8 mass% Sn の各合金についてみかけ粘度と固相率との関係を測定した結果の例を Fig. 2 に示す。

なお、固相率が高くなり粘度が上昇すると攪拌子がスリップし、流動が不均一となる現象が発生したが、粘度の解析に当たってはこの部分は除外し、また、トルク値には機械損値が含まれるためこれを差し引いて補正した。

いずれの成分系においても、ある固相率でみかけ粘度は急激に増加した。また、冷却速度が大きいほど、攪拌速度が小さいほど低固相率から粘度が上昇する傾向があった。

3.2 半凝固金属の粘度におよぼす冷却速度、攪拌速度の影響

各成分系の実験で得られた凝固過程におけるみかけ粘

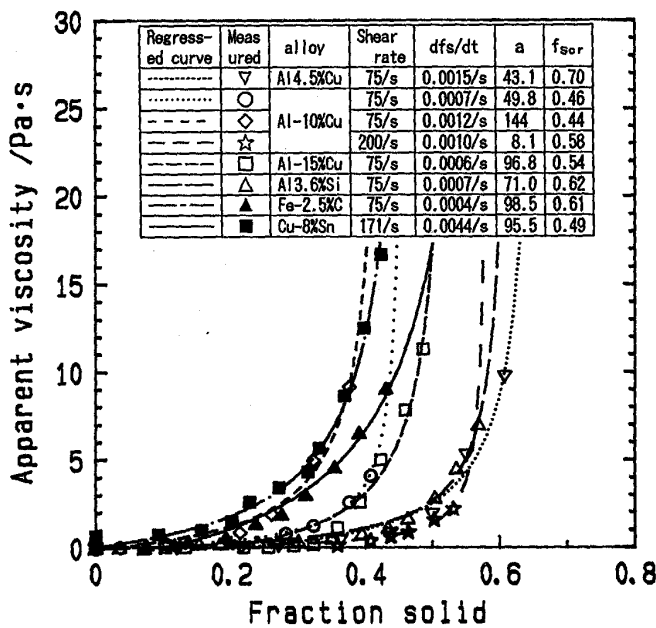


Fig. 2. Relationship between fraction solid and apparent viscosity. The lines are regressed results.

度と固相率の関係について、前報の Al-10 mass%Cu 合金の実験結果と同様に懸濁した固相の形状の影響を考慮し、森、乙竹の理論粘度式¹⁵⁾を基本とした(3)式で半凝固金属の製造条件および合金成分との関係を解析した。

$$\eta_a = \eta_{La} \left\{ 1 + \frac{d \cdot S_r}{2 \left(\frac{1}{f_s} - \frac{1}{f_{scr}} \right)} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、実際の半凝固金属においては、(3)式の $d \cdot S_r$ の値は凝固過程における経時変化とともに、チクトロピー (Thixotropy) 性流体として攪拌によって粘度が変化する現象も含まれるので、ここでは(4)式に示すように形状パラメーター a ($d \cdot S_r$ に比例する物性値) として解析を行った。

$$\eta_a = \eta_{La} \left\{ 1 + \frac{a}{2 \left(\frac{1}{f_s} - \frac{1}{f_{scr}} \right)} \right\} \text{ (Pa}\cdot\text{s)} \dots (4)$$

また、 η_{La} 値は本装置の精度では実測が困難なため次の計算値を用いた。攪拌によって発生する Taylor 渦を考慮したトルクを求める式がいくつか提案されている中で、高レイノルズ数の場合によく一致すると考えられる Wendt の式¹⁸⁾からみかけ液相粘度 η_{La} として求めた。ここで、残溶湯の真粘度 η_L は熔融金属の粘度推定式¹⁹⁾から求めた計算値を使用した。

連続的に得られたトルクデータに対し、(4)式をもとに最小二乗法による非線形回帰により形状パラメーター

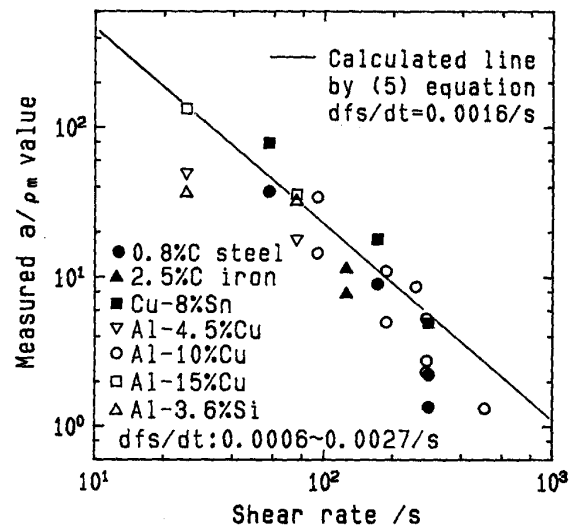


Fig. 3. Effect of shear rate on a/ρ_m value.

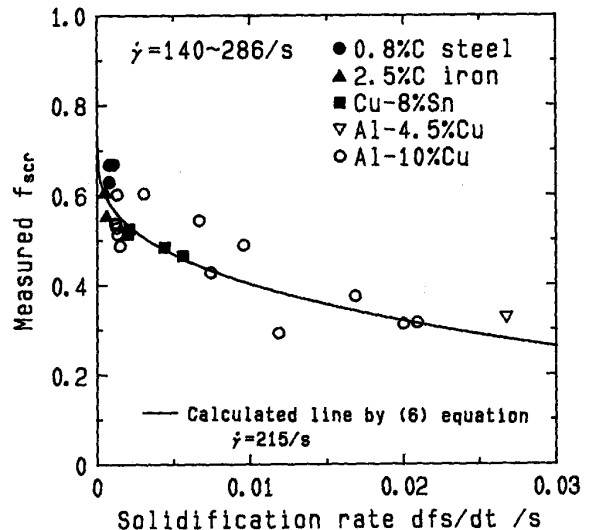


Fig. 4. Effect of solidification rate on critical fraction solid.

a および流動限界固相率 f_{scr} の値を求めた。Al-4.5 mass% Cu, Al-10 mass% Cu, Al-15 mass% Cu, Al-3.6 mass% Si, 2.5 mass% C 鑄鉄および Cu-8 mass% Sn の回帰結果の例を先の Fig. 2 に示す。各種成分系半凝固金属の粘度挙動も(4)式で精度よく整理でき、 a 値および f_{scr} 値はいずれも凝固速度 df_s/dt と剪断歪速度との間に強い相関が見られた。ただし、同じ凝固速度および剪断歪速度でも a および f_{scr} 値は成分系によって異なる傾向が見られた。各実験で得られた a および f_{scr} の値の範囲を先の実験条件を示した Table 1 にまとめて示す。また各種成分系について得られた a および f_{scr} の値と凝固速度および剪断歪速度との関係についての例を Fig. 3, 4 に示す。各合金とも凝固速度が大きいほど、

また剪断歪速度が小さいほど結晶形状パラメーター a 値は大きく、流動限界固相率 f_{scr} は小さくなる傾向がみられたが、その程度は成分系によって若干差があった。

Table 3. α and β values in equation (5), (6).

Alloy	α	β	alloy content /mass%	ρ_m /Kg·m ⁻³
Al-4.5%Cu	72.2	6.76	4.5	2460
Al-10%Cu	94.2	8.82	10.0	2560
Al-15%Cu	108	10.1	15.0	2680
Al-3.6%Si	67.0	6.27	3.6	2140
Cu-8%Sn	87.5	8.19	8.0	7960
Fe-0.8%C	40.6	3.80	0.8	7000
Fe-2.5%C	59.4	5.56	2.5	7000

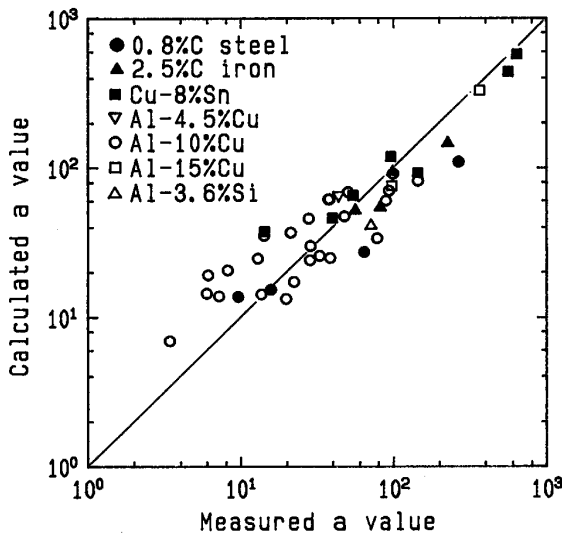


Fig. 5. Comparison of calculated and measured a values.

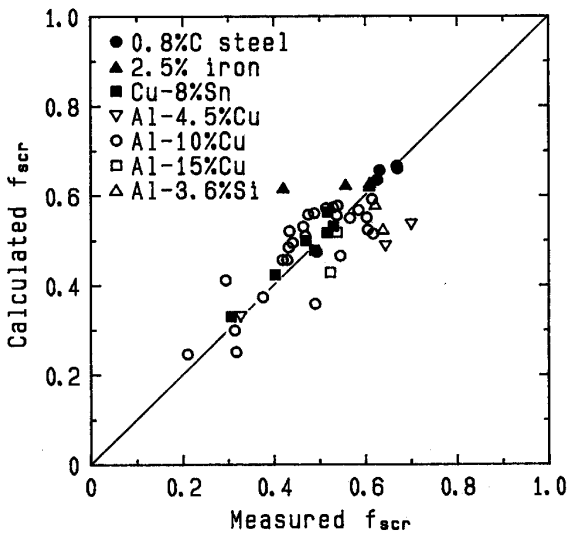


Fig. 6. Comparison of calculated and measured values of critical fraction solid f_{scr} .

a 値および f_{scr} 値は先に得られた Al-10 mass% Cu¹¹⁾ 合金の関係式を基本とした(5),(6)式の関係が得られ、(5)および(6)式の係数 α , β の値を合金の種類によって変えるだけで測定値と計算値がよく一致することがわかった。ここで得られた各合金での α , β はまとめて Table 3 に示す。

$$a = \alpha \rho_m C^{1/3} \dot{\gamma}^{-4/3} \quad (\text{形状パラメーター}) \dots\dots(5)$$

$$f_{scr} = 0.72 - \beta C^{1/3} \dot{\gamma}^{-1/3} \quad (\text{流動限界固相率}) \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 $C > 0$, $\dot{\gamma} > 0$, $f_{scr} > f_s \geq 0$ である。

a 値および f_{scr} 値について(5), (6)式の α , β をそれぞれ Table 3 の値から求めた計算値と測定値を比較し Fig. 5, 6 に示す。また、各種成分系における固相率と粘度の関係について、(4), (5), (6)式によるみかけ粘度の計算値と実測値の比較例を Fig. 7 に示すが、両者はほぼ一致した。ただし、形状パラメーター a はその合金の密度を掛けた値となった。

上記の結果から Al 合金, Cu 合金, 鉄鋼も含めた各種成分系の半凝固金属のみかけ粘度と凝固速度, 剪断歪速度の製造条件との関係は(4), (5), (6)式により統一的に整理できることがわかった。

3.3 半凝固金属のみかけ粘度におよぼす実験装置の影響

半凝固金属の粘度値におよぼす実験装置の違いの影響について調査するため、実験装置規模および攪拌子形状の異なる Fig. 1 (a) と Fig. 1 (b) の装置を用いて

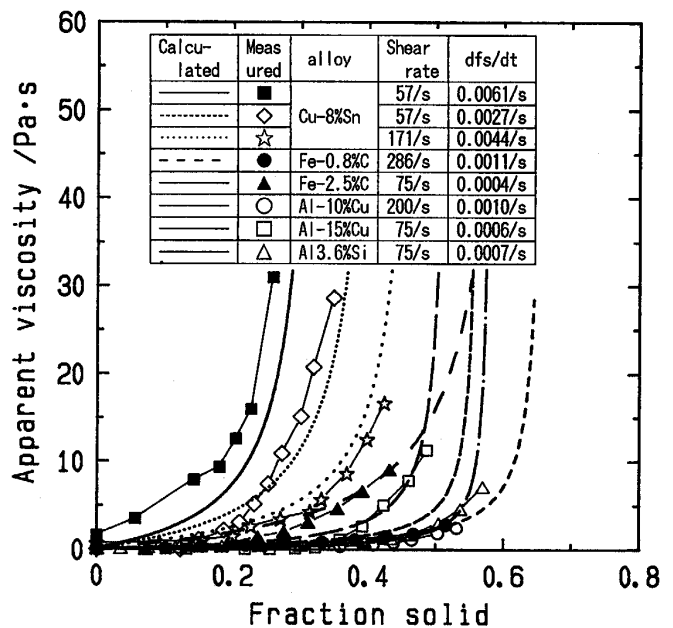


Fig. 7. Comparison of measured and calculated viscosities.

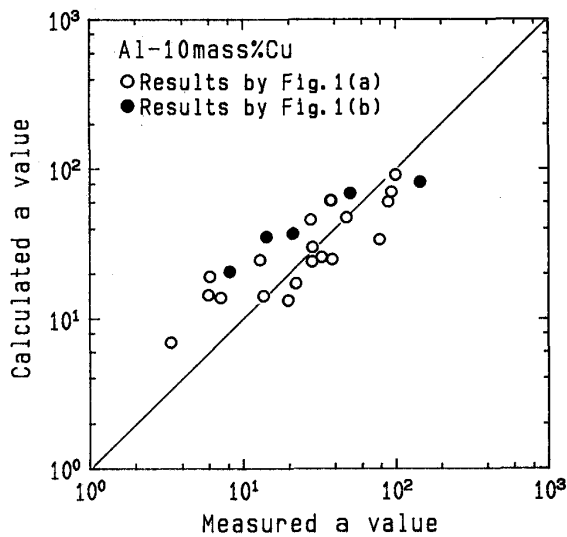


Fig. 8. Effect of experimental apparatus on a value.

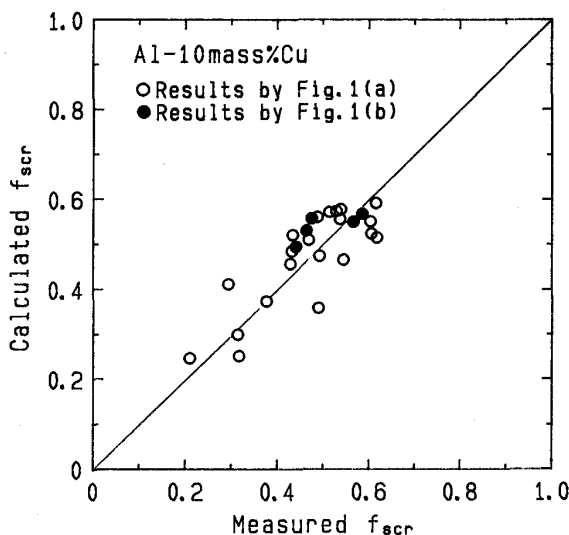


Fig. 9. Effect of experimental apparatus on critical fraction solid.

Al-10 mass% Cu 合金の攪拌凝固実験を行った。その実験結果から(4)式の粘度式による回帰結果から得られた各実験の a および流動限界固相率 f_{scr} の値を Table 1 に示し、粘度式(4), (5), (6)に、Al-10 mass% Cu の同じ α , β 値を使用した計算値と測定値の関係を Fig. 8, 9 に示す。両実験装置の測定値はともに計算値とよく一致しており、実験装置間の差の影響はほとんどなかった。

4. 考 察

4.1 半凝固金属みかけ粘度式の係数の意味

前述したように、実験データの解析結果から、各合金

の半凝固金属のみかけ粘度の推定式として(4), (5), (6)式の関係が得られ、形状パラメーター a の係数 α および流動限界固相率 f_{scr} の係数 β 値は合金によって異なる結果となった。 α および β 値は Table 3 に示したが、それぞれ次式のような合金成分の溶質濃度の関数式

$$\alpha = 2.03 \times 10^2 (X/100)^{1/3} \dots\dots\dots (7)$$

$$\beta = 19.0 (X/100)^{1/3} \dots\dots\dots (8)$$

では整理できた。

半凝固金属の攪拌冷却途中における急冷試料の結晶組織写真の例を Photo. 1, 2 に示すが、懸濁結晶の形状 ($d \cdot S_r$) は製造条件とともに合金によって差があった。

溶質濃度が高い合金ほど、枝葉の多いばら花状結晶になりやすく、凸凹の大きい比較的表面積の大きな結晶となったため、結晶形状パラメーター a が大きくなるとともに、結晶内に捕捉される液相量が多くなって流動限界固相率 f_{scr} が小さくなり、みかけ粘度が高くなったものと考えられる。

すなわち、形状パラメーター a の関数の係数 α や流動限界固相率 f_{scr} の係数 β の値が合金組成によって違った理由として、結晶の凝固成長や肥大化成長 (Ostwald ripening) が冷却速度とともに合金組成によって決まる(9)式で示す結晶肥大化速度パラメーター W 値に比例するとされており¹⁷⁾²⁰⁾、特に溶質濃度によって結晶形状や形態に差があったためと考えられる。

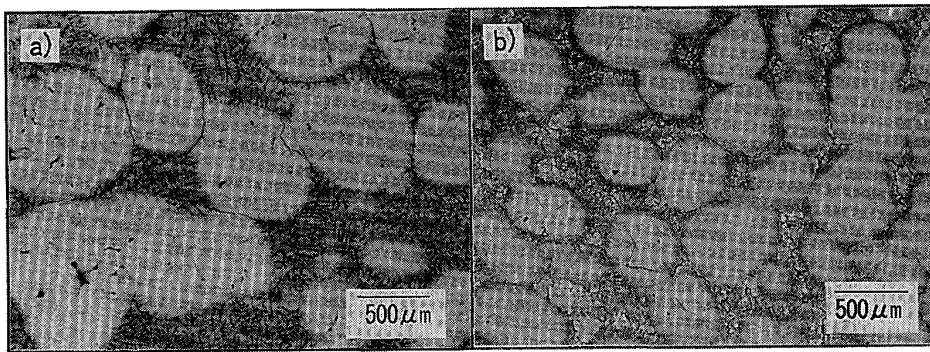
$$W = AC_L^{-1/3}, A = [\sigma DT/H(1 - k_0)m]^{1/3} \dots (9)$$

これは半凝固金属の凝固速度や剪断歪速度などの製造条件の違いによって懸濁結晶の形態が変わり、みかけ粘度に大きく影響した¹¹⁾現象と同じと考えられる。

高合金や高冷却速度ほど結晶粒径は小さくなり²⁰⁾、比表面積の大きいばら花状結晶やネットワークを組んだ大きな合体粒となりやすく、また剪断歪速度の増加がネットワークの分断や結晶粒状化に効果があったものと考えられる。ただし、先の(9)式の A 値は溶質元素の種類によって異なる値であり、(7), (8)式の係数は厳密には溶質の種類によって異なり、この分は実験誤差および推定誤差となっていると考えられる。

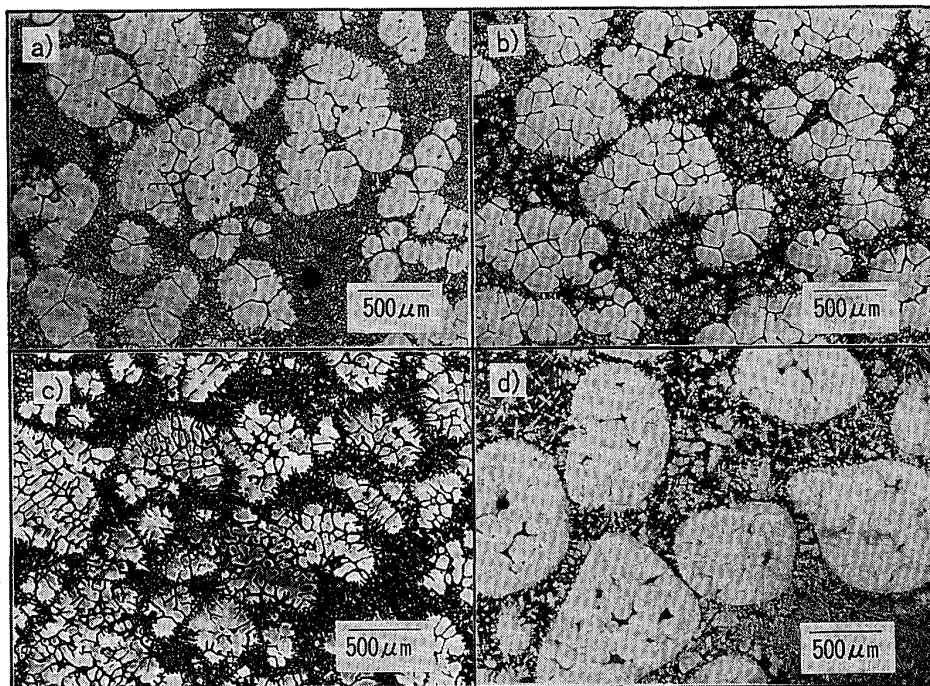
また、(5)式の a は合金の密度を掛けた関係式で整理できたが、これは非ニュートン流体の乱流域のスラリー状半凝固金属の粘度に対する密度差による慣性力の影響、または Wendt の式¹⁸⁾から求めた乱流域の η_{La} 値の推定精度などが原因と考えられる。

一方、流動限界固相率 f_{scr} の最大値が 0.72 となったが、懸濁固相の形状が等径球の場合の最疎充填状態 (cubic packing) となる固相率は 0.52¹⁵⁾、無規則充填状



a) Shear rate = 171/s, $df_s/dt = 0.0008/s$
 b) Shear rate = 457/s, $df_s/dt = 0.0008/s$

Photo. 1. Microstructures of water quenched semi-solid 0.8mass% C-steel ($f_s = 0.4$).



a) Al-4.5 mass% Cu Shear rate = 75/s, $df_s/dt = 0.0015/s$
 b) Al-10 mass% Cu Shear rate = 75/s, $df_s/dt = 0.0007/s$
 c) Cu-8 mass% Sn Shear rate = 57/s, $df_s/dt = 0.0027/s$
 d) 2.5 mass% C-iron Shear rate = 57/s, $df_s/dt = 0.0004/s$

Photo. 2. Microstructures of water quenched semi-solid alloys ($f_s = 0.2 \sim 0.4$).

態 (random close packing) で 0.64^8 、最密充填状態 (hexagonal close packing) で 0.74^8 、2 種球径の混合物の場合の最大充填固相率で 0.85^{23} となることから考えて妥当な値と考えられる。

4.2 各種成分系における粘度式による計算値と文献値の比較

半凝固金属のみかけ粘度に関する文献データの中で、Joly ら²⁾ および Nan ら⁷⁾ の Sn-15 mass% Pb 合金の例について、(4)、(5)、(6)の粘度式による計算値と比較し Fig. 10, 11 に示す。半凝固金属の粘度挙動と冷却速度および剪断歪速度との関係は実験条件の差および初

晶の沈降や浮上の影響が入りやすいなど粘度測定 of 困難さを考慮すれば傾向はよく一致しているといえる。

これらの結果から、実験データのない成分系のみかけ粘度も(4)、(5)、(6)の粘度式によって概略推定できるものと考えられる。ただし、共晶合金の場合は凝固形態が通常の成分系に比べ差が大きく、攪拌凝固した半凝固金属の懸濁結晶は比較的細かな粒状晶となり粘度挙動も異なると考えられるため、流動限界固相率以下の固相率の残溶融金属の組成が共晶組成になる合金は適用できないと考えられる。

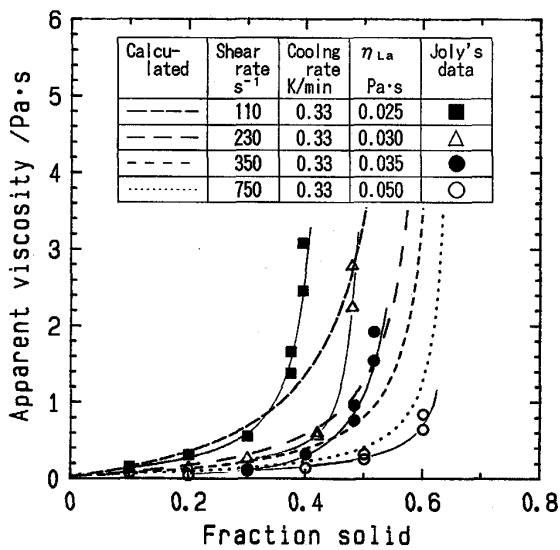


Fig. 10. Calculated results of apparent viscosity of Sn-15mass%Pb alloy. The data of solid symbols are the results of Joly's in Ref. (2).

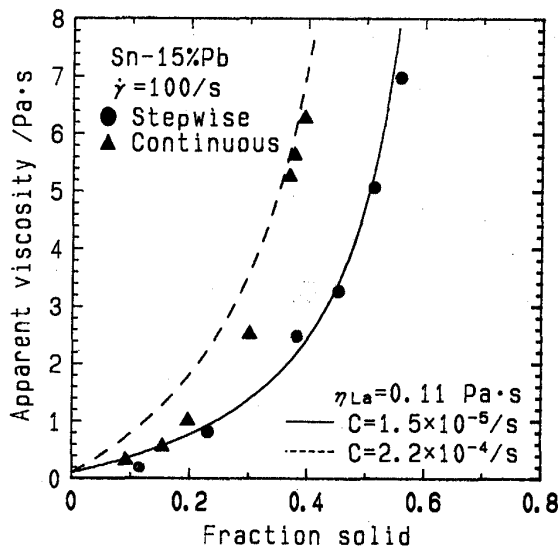


Fig. 11. Calculated results of apparent viscosity of Sn-15mass%Pb alloy. The data of solid symbols are the results of Nan's in the stepwise (●) and continuous (△) cooling in Ref. (7).

4.3 粘度におよぼす冷却パターンの影響

半凝固後に等温保持をした場合または段階的冷却をした場合の半凝固金属の粘度は連続的に冷却した場合と比較して差があるため、前者を定常状態の粘度として区別している文献が多い。しかし、等温保持や段階的冷却の場合は半凝固状態の時間が長くなるため、その間での懸濁結晶の粗大化や球状化が促進され、結晶形状や形態が変化する²¹⁾ため、粘度もそれに伴って当然変化すると

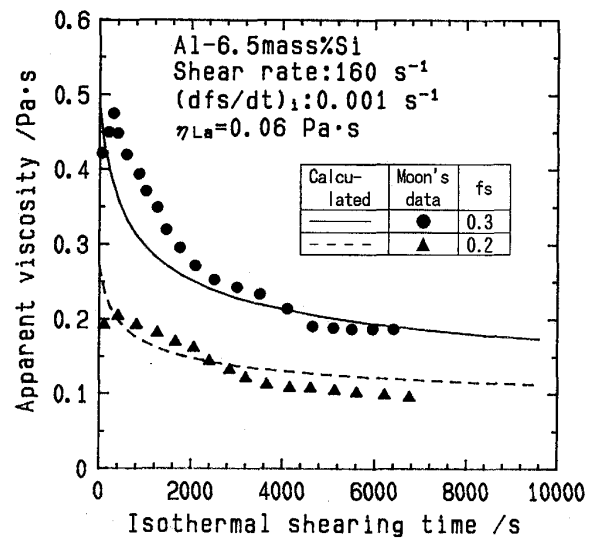


Fig. 12. Change in apparent viscosity of Al-6.5 mass%Si alloy during isothermal shearing. The data of solid symbols are the results of Moon's in Ref. (22). The $(df_s/dt)_i$ is initial solidification rate.

考えられる。(4), (5), (6)式は連続冷却法によって求めた粘度式であり、凝固速度は固相率が0~0.4の平均凝固速度から求めたが、等温保持や段階的冷却の場合は凝固時間に等温保持時間も加えた平均凝固速度で粘度計算すればよいと考えられる。先の Fig. 11 に示した Nan ら⁷⁾の段階的冷却法と連続的冷却法の粘度の比較において、上述の方法で求めた平均凝固速度の差で説明できた。また、Fig. 12 に示すように Al-6.5 mass%Si 合金の等温保持実験²²⁾における半凝固金属の粘度の低下挙動も、この考え方の計算値とよく一致した。

すなわち、等温保持によって結晶の形状が粗大化、および粒状化が促進されるが、連続冷却の場合も冷却速度が遅い場合には等温保持と同様に結晶の粗大化と粒状化が促進される。すなわち、結晶の形状は主に結晶の Ostwald ripening 現象²¹⁾によって左右されるものと考えられ、半凝固金属の粘度は連続冷却や段階的冷却または等温保持の場合でも、その状態に到るまでの全時間を含めた平均凝固速度 (Ripening に対する時間指標) によって主に左右されるものと考えられる。

ただし、Fig. 12 の結果から見られるように、等温保持時間と粘度の関係の低下程度は計算推定値の方が文献の測定値に比べてやや小さくなっているが、これは測定値には保持によるチクソトロピー性²³⁾の影響もあるためと考えられる。

なお、(5), (6)式の凝固速度は固相率の0~0.4の間の平均凝固速度としたが、実際には固相率0からそ

それぞれの粘度測定時までの平均凝固速度とした方が推定精度は高くなるものと考えられる。

5. 結 言

7種類の合金の攪拌凝固実験を行い半凝固金属の粘度におよぼす合金成分の影響を調査し、以下の結果を得た。

(1) 各合金とも、固相率とみかけ粘度の関係は凝固速度と剪断歪速度に影響され、凝固速度が小さいほど、また剪断歪速度が大きいほどみかけ粘度が低く流動限界固相率は大きくなる傾向があった。

(2) 半凝固金属の粘度は懸濁結晶のパラメーターと流動限界固相率の関数で整理でき、みかけ粘度と凝固速度および剪断歪速度の関係は、各合金とも先に得られたAl-10 mass% Cu合金の粘度式¹¹⁾の係数の値を変えるだけで統一的に整理できた。各係数の値は合金の密度と溶質量の関数式となった。

$$\eta_a = \eta_{La} \left\{ 1 + \frac{\alpha \rho_m C^{1/3} \dot{\gamma}^{-4/3}}{2 \left(\frac{1}{f_s} - \frac{1}{0.72 - \beta C^{1/3} \dot{\gamma}^{-1/3}} \right)} \right\} \quad (\text{Pa}\cdot\text{s})$$

$$\alpha = 2.03 \times 10^2 (X/100)^{1/3}$$

$$\beta = 19.0 (X/100)^{1/3}$$

が得られた。

(3) 合金成分の濃度が大きいほど、 α 、 β の値が大きく粘度が高くなる傾向がみられた。これは合金濃度が大きいほど懸濁結晶の形状パラメーター値および結晶内にトラップされた液相量が大きくなるためと考えられる。

最後に、本研究にあたって、ご助言をいただいた(株)レオテックの郡司好喜顧問に深く感謝いたします。

記 号

- C : 固相率 0~0.4 までの凝固速度 df_s/dt (s^{-1})
 C_L : 液相溶質濃度 (mass%)
 D : 溶質の拡散係数 ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
 G : 攪拌トルク ($\text{N}\cdot\text{m}$)
 H : 溶解のエンタルピー ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)
 L : 攪拌子浸漬長さ(幾何学的に求めた値) (m)
 S_r : 懸濁結晶の比表面積(表面積/体積) (m^{-1})
 T : 液相温度 (K)
 W : 結晶肥大化速度パラメーター
 X : 合金中の主溶質濃度 (mass%)
 a : 懸濁結晶の形状パラメーター

d : 懸濁粒子の平均径 (m)

f_s : 固相率

f_{scr} : 流動限界固相率

k_0 : 平衡分配係数

m : 液相線勾配 ($\text{K}\cdot\text{mass}\%^{-1}$)

r_1 : 攪拌子半径(パドル型攪拌子の場合は長軸値) (m)

r_2 : 攪拌槽半径 (m)

$\dot{\gamma}$: 剪断歪速度 (s^{-1})

η_a : 半凝固金属のみかけ粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

η_{La} : 液相みかけ粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

ρ : 残溶融金属と同じ組成の凝固密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

ρ_m : 合金の液相線温度での密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

σ : 固液の界面張力 ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)

Ω : 攪拌角速度 ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)

文 献

- 1) D. B. Spencer, R. Mehrabian and M. C. Flemings: Metall. Trans., **3** (1972), p. 1925
- 2) P. A. Joly and R. Mehrabian: J. Mater. Sci., **11** (1976), p. 1393
- 3) 市川理衛, 三輪謙治: 日本金属学会誌, **42** (1978), p. 1023
- 4) 森 信孝, 大城桂作, 松田公扶: 日本金属学会誌, **48** (1984), p. 936
- 5) 渋谷明彦, 有原和彦, 中村 泰: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1550
- 6) V. Laxmanan and M. C. Flemings: Metall. Trans. A, **11** (1980), p. 1927
- 7) W. Nan, S. Guangji and Y. Hanguo: Materials Trans. JIM, **31** (1990) 8, p. 715
- 8) L. Turng: Rheological modelling and numerical simulation of semi-solid Sn-15% Pb alloy for netshape die-casting process, Cornell University (1990)
- 9) T. Z. Kattamis and T. J. Piccone: Material Sci. Eng., **A**, **131** (1991), p. 265
- 10) S. B. Brown and P. Kumar: Int. Conf. on Semi-Solid Process., Sophia-antipolis, France (1990)4
- 11) 平居正純, 竹林克浩, 吉川雄司, 山口隆二: 鉄と鋼, **78** (1992), p. 902
- 12) 機械工学便覧(新版)(日本機械学会編)(1987), p. A5-128
- 13) 田中良平: 鉄と鋼, **53** (1967), p. 1586
- 14) 平居正純, 金丸和男, 森 久: 学振 19 委, 凝固現象協議会資料, 凝固 46 (1968)
- 15) 森 芳郎, 乙竹 直: 化学工学, **20** (1956), p. 488
- 16) K. Ichikawa, S. Ishizuka and Y. Kinoshita: Trans. Jpn. Inst. Met., **29** (1988), p. 598
- 17) 岡本 平: 日本金属学会会報, **17** (1978), p. 731
- 18) F. Wendt: Ingen. Arch., **4** (1933), p. 577
- 19) 平居正純: 鉄と鋼, **78** (1992), p. 399
- 20) T. Z. Kattamis, M. C. Flemings: Trans. Metal. Soc. AIME, **239** (1967), p. 1504
- 21) 野田真人, 古川雅三, 木島三樹男, 岩田至弘: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 688
- 22) H.-K. Moon: Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (1990)
- 23) R. K. McGeary: J. Amer. Ceram. Soc., **20** (1937), p. 155