

技術報告

UDC 532.13 : 669-404.8 : 669.14 : 669.45'6 : 669.35'71 : 669.15'24'26-194

固相・液相共存下における鉄および非鉄合金のみかけの粘性の測定結果—Fe-C, Sn-Pb, Al-Cu, Fe-Cr-Ni-C 合金*

渋谷 明彦**・有原 和彦***・中村 泰****

Measurement of Apparent Viscosity of Ferrous and Non-ferrous Alloys in Liquid/solid Coexisting State—Fe-C, Sn-Pb, Al-Cu and Fe-Cr-Ni-C Alloys

Akihiko SHIBUTANI, Kazuhiko ARIHARA, and Yasushi NAKAMURA

Synopsis:

Measurement was made on viscosities of partially solidified binary alloys Fe-C (3 and 4% C), Sn-Pb (1.0, 1.5, 5, 15, 25, and 45% Pb), and Al-Cu (4.5 and 10% Cu), and iron-base alloys (Fe-2% Cr-1.5% C, Fe-25% Cr-20% Ni-0.4% C, and Fe-28% Cr-0.4% C). A rotating coaxial cylinder viscometer was used. Solid fraction was calculated for the observed temperatures with the aid of the equation proposed by Scheil. The viscosities were found to depend on the solid fraction, the cooling rate, and the shear rate, as has been reported by FLEMINGS.

When the calculated value of solid fraction was more than 0.6 at the eutectic temperature, the relation between the viscosity and the solid fraction was similar to that for dispersed systems; that is, the viscosity increased remarkably in the range of solid fraction over about 0.5. When the calculated solid fraction at the eutectic temperature was less than 0.6, the viscosity rapidly increased after the temperature of alloy reached the eutectic one.

The viscosity of the iron-base alloys was found to be affected more intensively by the cooling rate than by the shear rate.

1. 緒 言

合金を固液共存の温度域におき、まず攪拌によりスラリー状にし、ついで铸造する方法はレオキャストング (Rheocasting) と呼ばれている。レオキャストングに関しては多数の研究結果が発表されている^{1)~16)}。スラリー状の合金の粘性は、レオキャストング技術において基本となる性質である。この粘性の測定は、非鉄の2元系合金については詳しく検討されてきた^{1)2)4)10)~16)}。その結果によると、みかけの粘度は固相率の増加とともに徐々に増加するが、固相率が約0.5を超えると急速に増加する (粘度はせん断ひずみ速度、冷却速度にも依存する)。

しかし、高濃度の鉄合金や鋼についてのみかけの粘度測定はほとんど行われていない。わずかに铸铁の例がみ

られる程度である¹⁵⁾¹⁶⁾。そこで、著者らは鉄合金について粘性の測定を試みたが、その際、0.5 よりかなり小さいとみられる固相率でも粘度が急速に増加する例があることをみいだした。この問題を明確にするために、あらためて Fe-C, Sn-Pb, Al-Cu 2元系合金について系統的に濃度を変えて粘度を測定した。その結果、濃化残留融体が共晶温度に到着した時の固相率の値が0.5以下であれば、共晶温度に到着するまではあまり粘度は増加しないが、共晶温度到着後は時間経過とともに粘度が急速に増加することが判明した。

本技術報告は、上記の推論を得た実験結果を提示することを主目的として、併せていくつかの鉄基合金 (多成分系) の粘度測定結果を参考資料として紹介する。

* 昭和 54 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 54 年 12 月 28 日受付 (Received Dec. 28, 1979)

** 新日本製鉄(株)基礎研究所(現:釜石製鉄所) (Fundamental Research Laboratories, Now Kamaishi Works, Nippon Steel Corp.)

*** 新日本製鉄(株)基礎研究所 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

**** 新日本製鉄(株)基礎研究所 理博 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

2. 実 験

2.1 装置と操作

本研究に使用した実験装置の概要を Fig. 1 に示す。合金の加熱は、黒鉛を誘導加熱する方式である。電源は 30 kW-max., 30 kHz である。るつぼは、外側からアルミナるつぼ、黒鉛筒、アルミナるつぼの順になつていて三重構造のものである。内側のアルミナるつぼの寸法は、 $50^{\text{OD}} \times 40^{\text{ID}} \times 150^{\text{H}}$ mm である。中央の黒鉛は発熱体の役目をし、寸法は $66^{\text{OD}} \times 52^{\text{ID}} \times 200^{\text{H}}$ mm である。内るつぼの位置は、溶融合金が概略黒鉛筒の中央にくるようにきめてある。内るつぼ底部と頂部の温度差は 3°C 程度である。内るつぼの底部には、熱電対を装入するアルミナ管がとりつけてある。その先端はるつぼ底面より 20 mm の高さである。

攪拌棒は、モリブデン棒が封入してあるアルミナ製である。その断面は、Fig. 2 に示すように、だ円形に近い形状である。寸法は Fig. 2 に示してある（長軸が 32 mm である）。攪拌棒の上部には市販の回転トルク・メー

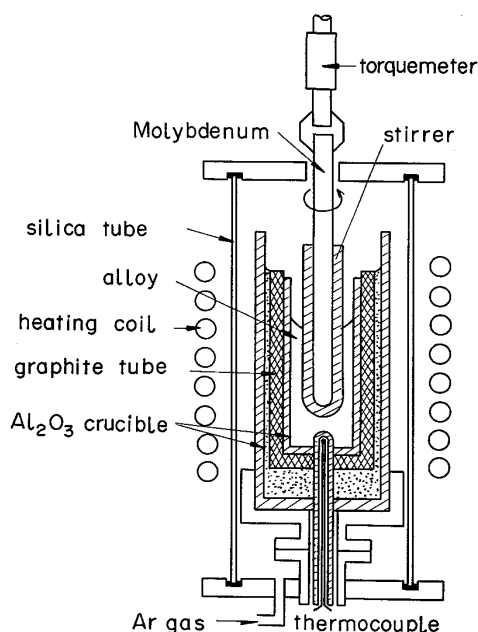


Fig. 1. Experimental apparatus.

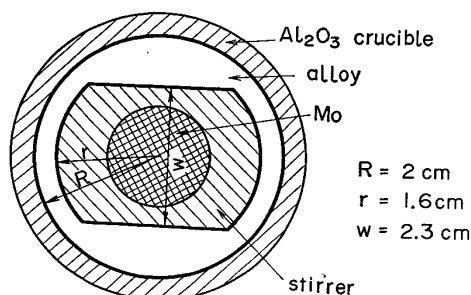


Fig. 2. Cross-section of a stirrer and a crucible.

タ（測定範囲 0~1 kg-cm, 読み取り誤差 ± 0.02 kg-cm）がとりつけてある。

合金の原材料は、市販の電解鉄、電解クロム、高純度黒鉛、試薬一級の純度の Sn, Pb, Al である。溶解量は、Pb-Sn 合金や鉄合金、鋼では約 400 g, Al-Cu 合金は密度が小さいので 200 g である。いずれも合金を溶解し攪拌棒を浸漬した時、溶融合金の高さがるつぼ底面から約 7~8 cm になる重量が選ばれている。

操作方法は次のとおりである。

まず炉内の雰囲気アルゴンに置きかえる。ついで、合金を溶解し、上部より熱電対を合金中に浸漬する。合金の温度を徐々に低下させ、合金の液相線温度を測定する。その間に、るつぼ底部に装入した熱電対の起電力を測定し、後にこの熱電対のみで合金の温度が推定できるように補正しておく。これらの操作は各実験ごとに行う。

再び温度を上昇させて液相線より $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 上の温度に合金を保持する。上部から装入した熱電対を取り除き、あらたに攪拌棒を降下させる。攪拌棒の先端は、るつぼ底部のアルミナ管の先端の上 3~5 mm の位置にする。直ちに攪拌棒を一定速度で回転させる (300, 500, 700 rpm)。この時点でトルクの値を測定して基準値とする (約 0.2 kg-cm)。電力を手動で制御して一定冷却速度 ($0.3\sim 6.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$) で合金温度を低下させる。液相線温度を通過すると、トルクの値は上昇してくる。一定時間ごとにトルクの値を読みとり、その値と先に求めた基準値との差を、合金の粘性によるトルク量とする。なお、温度が共晶温度になる直前から入力は一一定にして冷却した。

2.2 成分の選定

Table 1 に本実験で使用した合金の成分が示してある。合金は、2 元系と多元系に分類される。

2 元系合金としては、一般的な共晶反応をとる Fe-C, Sn-Pb, Al-Cu の各組成を選んだ。その組成は次のように 2 とおりの領域に分けることができる。一つは合金の平均組成 (C_0) が、共晶温度における固相の溶質溶解度 (C_{SM} , 以下略記) より小さい領域である。この領域では C_0 での固相線温度 (T_s) は共晶温度 (T_E) より高い。またもう一つは、 C_0 が C_{SM} と C_E (共晶点濃度) の間にある領域で、 T_s は T_E に相当する。Table 1 に示した成分は、上記の分類法にしたがって各領域について適宜に選択した。

多成分系としては鉄基合金で、固液共存温度域が比較的広い成分である。これは実験を容易にするためであるが、実用鋼にできるだけ近い成分を選択した (Fe-2 %

Table 1. Compositions of alloys used, C_0 .

Binary alloy ($C_0 < C_{SM}$)				Binary alloy ($C_{SM} \leq C_0 < C_E$)				Iron-base alloy	
Composition	K	$T_L [^\circ\text{C}]$	$f_s(E)$	Composition	K	$T_L [^\circ\text{C}]$	$f_s(E)$	Composition	$T_L [^\circ\text{C}]$
1) Al-4.5% Cu	0.171	651	0.93	1) Al-10% Cu	0.171	631	0.80	1) Fe-2%	1 407
2) Sn-1.0% Pb	0.068	230.7	0.98	2) Sn-5% Pb	0.068	226	0.89	Cr-1.5% C	
3) Sn-1.5% Pb	0.068	230.0	0.97	3) Sn-15% Pb	0.066	212	0.62	2) Fe-25% Cr-20%	1 380
				4) Sn-25% Pb	0.066	200	0.33	Ni-0.4% C	
				5) Sn-45% Pb	0.318	202	0.19	3) Fe-28%	1 456
				6) Fe-3% C	0.433	1293	0.58	Cr-0.4% C	
				7) Fe-4% C	0.475	1174	0.18		
Fe-C				Sn-Pb				Pb-Sn	
$T_M [^\circ\text{C}]$				232				327	
$T_E [^\circ\text{C}]$				183				183	
								548	

 K : equilibrium distribution ratio T_L : observed liquidus temperature T_M : melting point of solvent element T_E : eutectic point $f_s(E)$: calculated solid fraction at T_E C_{SM} : solubility of solute in a solid phase at T_E C_E : eutectic composition

Cr-1.5%C: 軸受鋼 SUJ-2, 3, ロール鋳物; Fe-25% Cr-20%Ni: 耐熱合金鋳物 ASTM-A-297-67 (Grade HK), ASTM-A-351-71 (Grade HK 40); Fe-28%Cr-0.4%C: 耐熱合金鋳物 ASTM-A-297-67 (Grade HC).

2.3 粘度の計算

粘度の値は、式(1)を利用して計算で求めた。

$$\eta' = \alpha N(1 - \beta^2) / 4\pi r^2 L \Omega \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 η' はみかけの粘度、 Ω は回転数、 N はトルク量、 r は攪拌棒の半径 (実際には長軸の値) L は攪拌棒の浸漬長さ、 β はるつぼ径と攪拌棒の径の比である。 α は補正係数である。

$\alpha = 1$ の時、式(1)は二重円筒管内に液体があり、内筒または外筒を Ω で回転した場合の内筒の受ける N を示す式である。液体の流れは層流で、底部や上端の影響は無視できるものとする。したがって、本実験のようにだ円形の攪拌棒を使用した場合、式(1)の適用性には問題が残る。本報告では、理論からのずれはすべて α の項に含めることにし、 α の値は別の実験から求めた。

すなわち、本実験装置で2種類の粘度校正用標準液 (JIS 500: 3 poise, JIS 2000: 12 poise) の粘性を測定した。その結果、 α の平均値として300 rpmで1.0, 500 rpmで1.1₂, 700 rpmで1.1₇となつた。本報告は、この α の値をそのまま使用した。各実験の N , Ω , L , r の測定誤差を考慮すると、 η' の誤差は2 poise 付近で ± 1 poise, 30 poise 付近で ± 3 poise とみられる。

2.4 固相率の計算

2元系合金の固相率は、次の式¹⁷⁾¹⁸⁾にしたがつて求めた。

$$f_s = 1 - (T_M - T_L / T_M - T)^{1/(1-k)} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 f_s は固相率、 T_M は純金属の融点、 T_L は液

相線温度、 T は温度、 k は平衡分配係数である。式(2)は2元系のみに適用でき、次の仮定から導出される: (イ) 固/液界面は平衡で、 k は濃度に依存しない定数、(ロ) 液体中の濃度分布は完全に均一、(ハ) 固体内の拡散は無視できる。これらの仮定はかなり理想的なもので、現実的であるかどうかについては議論の余地がある。しかしながら、これを詳細に検討することは本報告の目的でないので、得られた実験結果が他の報告結果と比較しやすいように固相率、 f_s の値はすべて式(2)にしたがつて求めることにした。計算に使用した T_L , T_M , k の値はTable 1に示してある。

k の値が一定の条件は高濃度域まで必ずしも成立しない。状態図¹⁹⁾²⁰⁾を検討すると、Table 1に示すようにSn-Pb, Al-Cu合金の k の値はほぼ一定とみなせるが¹⁹⁾、Fe-C合金では成立しない²⁰⁾。その上、Fe-C合金 ($L \rightarrow \gamma$ の領域)では T_M の定義にも問題がある。しかし、式(2)を導いた微分方程式を k の値が可変として数値解析を実施しても、計算上の f_s の値の差は0.02 ($f_s \leq 0.6$ の範囲)の程度しか生じない。したがって、本報告の範囲内では式(2)をそのまま適用して求めた f_s を基に議論を進めても本質的な影響を受けることはなかつた。

3. 結果と考察

3.1 2元系合金の結果

Fig. 3は C_0 が C_{SM} より小さい成分系について実験から求めた固相率(f_s)とみかけの粘度(η')との関係を示す。いずれも f_s が0.5付近以上になると f_s のわずかな変化で急速に増大する (少なくとも本実験の範囲では、 $C_0 < C_{SM}$ であれば、 f_s が0.5以下で η' が極

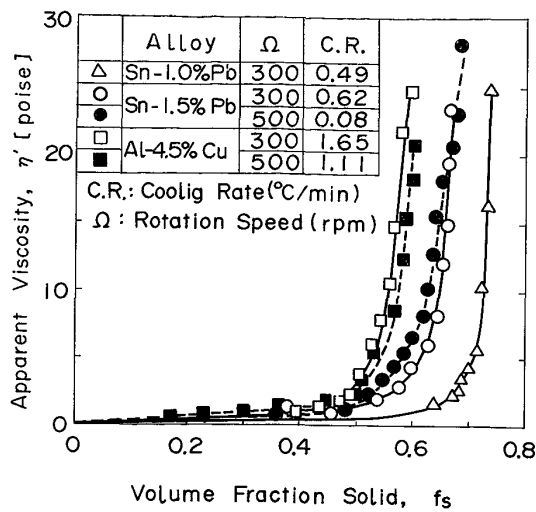


Fig. 3. Plot of observed value of apparent viscosity against calculated one of volume fraction solid in the case of $C_0 < C_{SM}$ for the binary alloys.

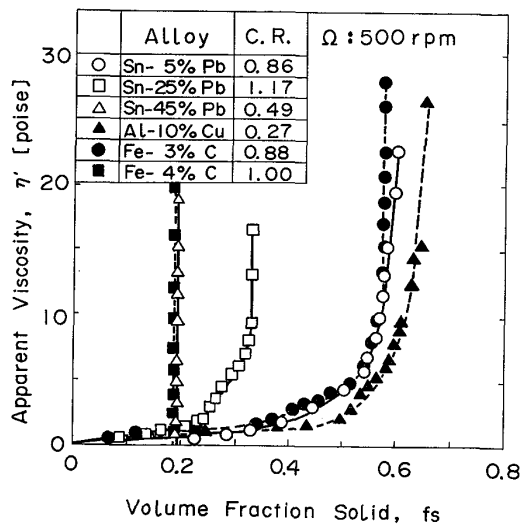


Fig. 4. Relation between the values of apparent viscosity and volume fraction solid in the case of $C_{SM} < C_0 < C_E$.

端に上昇する例はみられなかった), 一方, C_0 が C_{SM} と C_E の間にある成分系の場合, Fig. 4 に示すように η' はある固相率になると, そこで急激に増大する. その f_s の値は 0.2~0.6 の範囲にわたり, 組成に依存する. たとえば, Sn-45%Pb と Fe-4%C では f_s が 0.18 で η' の上昇がみられる. Sn-25%Pb, Fe-3%C では, その f_s の値は 0.33, 0.58 である. これらの f_s の値は, まさに共晶温度に到着した時の固相率 ($f_{s(E)}$) の計算値に一致する (Table 1 参照). しかし, $f_{s(E)}$ が 0.6 を超える例では, $C_0 < C_{SM}$ の場合と同様に f_s が 0.5 を超えると η' が f_s の増加とともに急速に上昇する (ただし, 例外として Sn-15%Pb ($f_{s(E)} \approx 0.62$) では $f_s \approx$

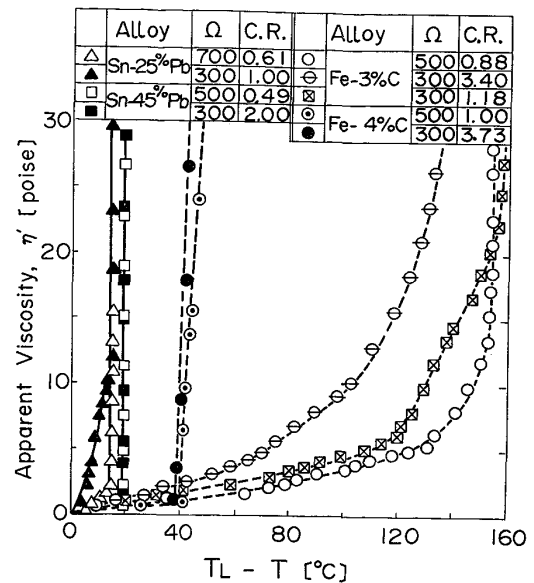


Fig. 5. Plot of observed apparent viscosity against the difference between the temperatures of liquidus and of partially solidified alloy with $f_{s(E)} < 0.6$.

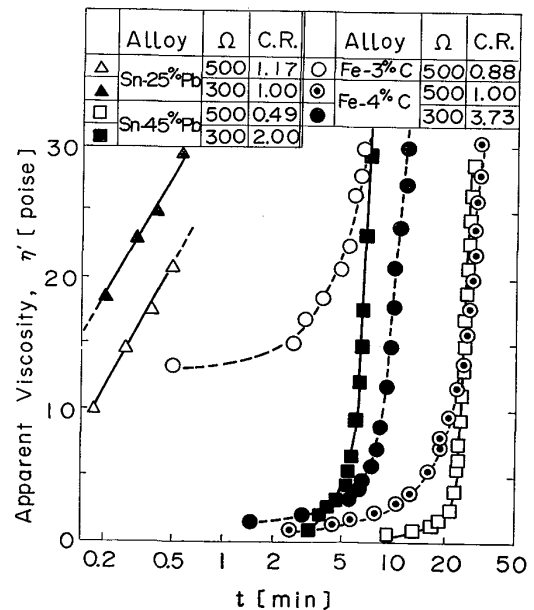


Fig. 6. Time dependence of observed viscosity after the temperature of alloy reaches the eutectic one.

0.4 から η' の上昇する場合がある. Fig. 7 参照).

Fig. 5 は, $f_{s(E)} < 0.6$ の測定例について η' と ($T_L - T$) の関係が示してある. η' が急激に変化する温度はほぼ T_E (共晶温度) に一致することがわかる. Fe-3%C, Sn-25%Pb の例では, T_E に到着するまでに η' の増加がみられる. その間の η' の増加は回転数の増加や冷却速度の減少で小さくなる傾向がみられる. Fe-3%C の例では冷却速度の効果の方が大きいように考えられる.

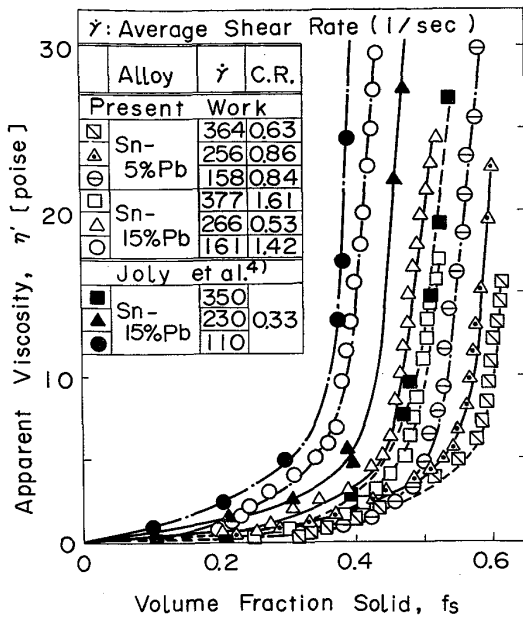


Fig. 7. Comparison of the results with that of JOLY et al.⁴⁾ for Sn-Pb alloys.

Sn-45%Pb, Fe-4%C の例では実験条件に関係なく, T_E に到着するまでは η' は小さく, T_E に到着すると以後 η' は急激に変化する.

T_E 到着後の η' の時間変化が Fig. 6 に示してある. 短時間に粘性が増加していることがわかる. 比較のおそい変化を示す例でも, 最初の 10~20 min の η' の変化は緩やかであるが, 以後は急激に上昇する.

3.2 既報告値との比較

Fig. 7 に Sn-15%Pb, Sn-5%Pb の結果と, 比較のために JOLY and MEHRABIAN⁴⁾ の Sn-15%Pb の結果が示してある. 図中には実験条件が比較しやすいように, せん断ひずみ速度 ($\dot{\gamma}$) と冷却速度 (C. R.) の値が記してある. ここで, せん断ひずみ速度 (平均) は次のように定義する¹⁾.

$$\dot{\gamma} = (2\beta/1-\beta^2)\Omega \quad \dots\dots\dots (3)$$

JOLY ら⁴⁾ は Sn-15%Pb について冷却速度一定 (Fig. 7 の場合, $0.33^\circ\text{C}/\text{min}$) のもとで $\dot{\gamma}$ を減少すると η' は増加することを見出した. 本実験の Sn-5%Pb についても同じ傾向がある (冷却速度は正確には一定でないが). 本実験の Sn-15%Pb についても同様の関係がみられる. しかも, 本実験と JOLY らの結果とをとおしてみた時, $\dot{\gamma}$ の減少の順序と η' の大きさや増加傾向の順序が一貫しているように考えられる. しかし, JOLY らは 0.33 と $25^\circ\text{C}/\text{min}$ の時の実験値を比較して冷却速度を増加させると, η' は増加するとのべている⁴⁾. 本実験の冷却速度 ($0.5\sim 1.6^\circ\text{C}/\text{min}$) は JOLY らの値

($0.33^\circ\text{C}/\text{min}$) より大きいので, 本実験の結果の妥当性を論じるには, さらに検討が必要であろう.

市川ら¹⁴⁾は, Al-Cu 系について Cu の増加とともに粘度が増加すると報告している. 本実験結果も同様の傾向を示している (Fig. 3, 4 参照).

3.3 考 察

$f_{S(E)} > 0.6$ の場合, 固相率が 0.5 付近以上になると, みかけの粘度が高い値になることがわかった. その理由は, すでに SPENCER ら¹⁾ が指摘しているように, 粒子間の結合を切断するに十分な攪拌があれば, 分散系でみられる一般的な性質として定性的に説明できる. 攪拌が弱くなると, 粒子間に結合が生じ, ある構造的なつながりを形成し, 粘度が高くなる. 冷却速度が大きくなると, 粒子同志が結合 (付着) する速さがそれを切断する速さより大きくなり, やはり粘度が増加する. 本実験の結果も, すべてこのような機構で定性的に説明することができる.

本実験で得られた他の重要な結果は, $f_{S(E)} < 0.6$ の場合に共晶温度に到着してからみかけの粘度が急速に増加することである. (Fe-3%C のように共晶温度到着前のある程度粘性が増加している例もあるが, これは固相率がすでに高くなり, 上記の分散系の一般的な性質が現れているためと考えられる). 共晶温度での粘性の測定例は少なく, 加山ら¹²⁾が Sn-38.1%Pb (共晶成分) について一例発表している. それによると共晶温度到着後, 最初の粘性の値の増加はみられないが, 10 min 経過後に急速に粘性の値は変化する. この後半の部分が本実験の結果と対応するものとみられる.

共晶温度到着以降の固相率の変化は, 実験的には検討していない. 先にのべたごとく, 電力は一定に保持していることから, 共晶温度付近での粗い近似として次の関係が成立する*.

$$P - H_{ex} = mH_m \frac{df_s^E}{dt} = mH_m \cdot \left\{ (C_p/H_m) + \epsilon f_{S(E)} \right\} \left(\frac{dT}{dt} \right)_{T \rightarrow T_E} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで, P : 入力, H_{ex} : 放熱量, m : 合金の量, H_m : 溶融熱, f_s^E : 共晶温度到着以降の固相率, C_p : 比熱, $(dT/dt)_{T \rightarrow T_E}$: 共晶温度到着直前の冷却速度, $\epsilon = (1/(1$

* 共晶温度 (T_E) 直前の熱収支を考える. 一定の電気入力, P , に対して系の熱は次のようになる.

$$P \, dt = mC_p dT - mH_m df_s^E + H_{ex} dt$$

一方, 本文中の式(2)より次の関係を得る.

$$df_s^E = -\epsilon f_s^E dT$$

この関係を最初の式に代入する. ただし, $f_s \approx f_{S(E)}$ とした.

$$P - H_{ex} = m(C_p + \epsilon H_m f_{S(E)}) (dT/dt)$$

同様に, 共晶温度に到着した後の熱収支を計算する.

$$P - H_{ex} = mH_m (df_{S(E)}/dt)$$

H_{ex} の値は概略一定とみなせる. したがって, 上の2式を組み合わせると, 本文の式(4)が得られる.

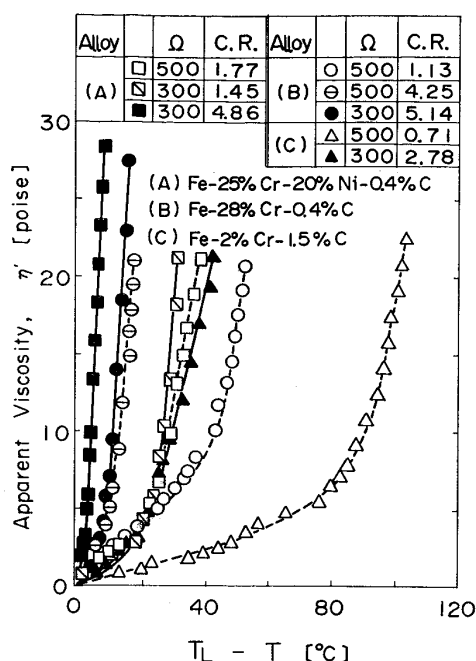


Fig. 8. Experimental result for the iron base alloy.

$-k)(T_L - T_E))$, t : 時間である。式(4)は H_{ex} , H_m , C_p は一定と仮定して求めている。 H_m , C_p の概略の推定値を代入して df^s/dt を求めると、本実験の範囲では $0.04 \sim 0.005$ (1/min) 程度の値になる。Fig. 6 に示した Sn-45%Pb, Fe-4%C について具体的に示すと、粘性の値が急上昇をしている時点(約 10 poise)での固相率は、各々 0.44, 0.26(冷却速度依存性は鈍感)と計算される。したがって、粘性値の上昇は単に固相率の増加のみでは説明できない。他の機構を考慮する必要がある。ひとつの可能性として、粒子表面が共晶組成になると、分散粒子同志が付着しやすい性質となり、それが系の粘度を増大させたとも考えられる。この点に関して本実験からは結論を下すことはできないが、将来より綿密な研究が行われるべきであろう。

3.4 多成分系鉄合金の結果

Fig. 8 に3種類の鉄合金のみかけの粘度の測定結果が示してある。横軸は $(T_L - T)$ で、冷却速度一定であるから液相線通過後の時間を表す。Fe-28%Cr-0.4%C の例についてみると、粘度の上昇は回転数の減少よりも冷却速度の増加 ($1.13 \rightarrow 4.25^\circ\text{C/min}$) の影響の方がはるかに大きいようにみられる。すなわち、固相率が小さいと思われる高温側ですでに高い粘性値を示す(別の表現をすると短時間で粘性値が急上昇する)。同様の結果は、Fe-25%Cr-20%Ni-0.4%C(HK-40) についてもみられる。Fe-3%C でも冷却速度の影響が大きいことは、すでに Fig. 5 で示した。木口ら¹⁶⁾は Fe-2~3%Si-3~

3.8%C 系について粘性測定結果を発表している。それによると、粘性の値は 5 min 以内に急上昇している。(冷却速度 $1.2 \sim 4.3^\circ\text{C/min}$, せん断速度不詳)。このように鉄合金は冷却速度の影響が強いように考えられる。将来鉄合金のレオキャストングを実施する際、かなり冷却速度に制約を加えることが操業のトラブルを防ぐ重要な因子になることが予想される。

4. 結 言

固相・液相共存下における鉄および非鉄合金の粘性について検討した。得られた結果は次のとおりである。

- 1) みかけの粘度は FLEMINGS らが報告したように、固相率、冷却速度およびせん断速度に依存する。
- 2) 計算上の固相率が共晶温度で 0.6 を超える場合には、固相率とみかけの粘度の関係は分散系の関係に類似する。すなわち、固相率が 0.5 を超える領域でみかけの粘性は著しく増加する。
- 3) 共晶温度に対応する計算上の固相率が 0.6 以下の場合には、みかけの粘度は合金の温度が共晶温度に到達してから急速に増加する。
- 4) 鉄合金のみかけの粘度は、せん断速度よりも冷却速度によつて強く影響される。

文 献

- 1) D. B. SPENCER, R. MEHRABIAN, and M. C. FLEMINGS: Met. Trans., 3 (1972), p. 1925
- 2) M. C. FLEMINGS and R. MEHRABIAN: Trans. AFS, 81 (1973), p. 81
- 3) R. G. RIEK, A. VRACHNOS, K. P. YOUNG, N. MATSUMOTO, and R. MEHRABIAN: Trans. AFS, 83 (1975), p. 25
- 4) P. A. JOLY and R. MEHRABIAN: J. Mat. Sci., 11 (1976), p. 1393; R. MEHRABIAN and M. C. FLEMINGS: New Trends in Materials Processing, (1975), p. 98 [American Society for Metals, Ohio]
- 5) E. F. FASCETTA, R. G. RIEK, R. MEHRABIAN, and M. C. FLEMINGS: Trans. AFS, 82 (1974), p. 95
- 6) J. M. OBLAK and W. H. RAND: Met. Trans., 7B (1976), p. 699
- 7) J. M. OBLAK and W. H. RAND: Met. Trans., 7B (1976), p. 705
- 8) R. MEHRABIAN, R. G. RIEK, and M. C. FLEMINGS: Met. Trans., 5 (1974), p. 1899
- 9) M. C. FLEMINGS, T. Z. KATTAMIS, 渋谷明彦: 鉄と鋼, 64 (1978), S 16
- 10) 千々岩健児, 福岡新五郎: 生産研究, 24(1972), p. 61
- 11) 安江和夫, 小坂岑雄, 磯谷三男: 鋳物, 46 (1974), p. 36

-
- 12) 加山延太郎, 村井香一, 佐藤万企夫, 木口昭二:
鑄物, 47(1975), p. 485
 - 13) 木口昭二, 佐藤博之, 加山延太郎: 鑄物, 50
(1978), p. 8
 - 14) 市川理衛, 三輪謙治: 日本金属学会誌, 42
(1978), 1023
 - 15) 村井香一, 木口昭二, 佐藤博之, 加山延太郎:
鑄物, 48(1976), p. 211
 - 16) 木口昭二, 加山延太郎: 日本金属学会誌, 43
(1979), p. 140
 - 17) E. SCHEIL: Z. Metallk, 34 (1942), p. 70
 - 18) W. G. PFANN: Trans. AIME, 194 (1952), p. 747
 - 19) M. HANSEN: Constitution of Binary Alloys,
(1958), [McGraw-Hill Book Co., Inc., New
York]
 - 20) 田中良平: 鉄と鋼, 53 (1967), p. 1586
-