

熔融純鉄および鉄-アルミニウム, 鉄-ケイ素, 鉄-酸素 2 元希薄溶液の粘性について*

中西恭二** 斎藤恒三*** 白石 裕***

Kyoji Nakanishi, Tunezo Saito and Yutaka Shiraishi: On the Viscosity of Molten Iron and Its Dilute Binary Alloys of Aluminum, Silicon and Oxygen. Viscosities of molten iron and its dilute binary alloys of aluminum, silicon, and oxygen have been measured by the oscillating crucible method, as a part of the study concerning the physical properties of molten iron and its alloys.

The results are summarized as follows:

(1) Viscosity of pure iron between 1820°K and 1970°K is expressed as

$$\eta \text{ (m poise)} = 2.76 \exp(10.8 \times 10^3 / RT).$$

(2) The addition of aluminum causes the decrease of viscosity which is larger than in the case of silicon. When the concentration of solute is 1 atomic %, the decrease of viscosity is about 36% by the addition of aluminum and about 15% by the addition of silicon.

(3) The addition of oxygen causes the increase of viscosity. The increase of the viscosity is 0.4 m poise/100 ppm O.

(4) Viscosity of molten aluminum containing dispersed alumina has been measured, and it has been shown that the increase of viscosity, compared with molten aluminum, is less than 1% when the volume fraction of dispersed alumina ($\sim 10 \mu$) is 0.3%.

From these results, some considerations were given to the change of fluidity of steel in the deoxidation process. Thus, it has been concluded that the fluidity of steel does not change remarkably in the deoxidation process, provided that the products of deoxidation are uniformly dispersed.

(Received February 21, 1967)

I. 緒 言

熔融金属の粘性は製錬過程における金属の物理的, 物理化学的挙動を決定する因子として重要であり, また熔融金属の構造を知るための一性質としても重要である。したがって従来より多くの研究がなされてきたが, いままでの研究は低融点金属に関するものが主であり, 熔融鉄系に関する研究は今後にもっとところが多い。本実験は熔融鉄系の粘性に関する研究の一環として, 鋼の脱酸過程における粘性の変化と密接に関連する題記各系の粘性測定を行なつたものである。

II. 実 験

1. 測定装置および予備実験

粘性測定には種々の方法があるが, 熔融金属のように低粘度, 高密度に適する方法として毛細管法と回転振動法が挙げられる。毛細管法は測定原理が簡単であるが, 高温に耐える寸法精度のよい毛細管を入手することが難しい。そこで本実験はルツボ回転振動法によることにした。この方法は吊線により支持されたルツボ中に試料を満たし, 適当な初期振巾の回転振動を与え, 振巾の減衰と周期を測定す

ることにより粘度を求めるもので, ルツボとして平底円筒を用いたとき試料の粘度 η と振巾の対数減衰率 δ との間にはつぎの実験式が成立する⁽¹⁾。

$$\delta \left(\frac{T^2}{T_0^2} + 1 \right) = A(\rho \eta T)^{1/2} + B(\eta T) + C \left[\frac{(\eta T)^3}{\rho} \right]^{1/2} \quad (1)$$

ここで, T, T_0 はそれぞれルツボに一定容積の試料を入れたとき, 空のときの周期, ρ は試料の密度, A, B, C は装置定数である。

また球形ルツボを使用した場合は次式が成立する。

$$\delta \left(\frac{T^2}{T_0^2} + 1 \right) = A'(\rho \eta T)^{1/2} + B'(\eta T) \quad (2)$$

いま $(\eta T/\rho)^{1/2} < 1$ でかつ $T \approx T_0$ なるとき, (1), (2) 式は (3) 式で近似できる。

$$\delta = \alpha(\rho \eta)^{1/2} + \beta \quad (3)$$

ここで α, β は装置定数である。

したがって円筒丸底ルツボを使用した場合 (1), (2) 式の重ね合わせとして (3) 式によつて取り扱つてさしつかえない。なお α, β を求める際, 被測定試料の η/ρ 値を挟むように標準試料を選ぶ必要がある。

本実験に使用した測定装置を Fig. 1 に示す。吊線には 0.3 mm ϕ の市販ピアノ線を用いた。回転安定板は 150 mm ϕ \times 3 mm の真鍮製で軸対称に孔を明け約 330 g の重量をもっている。ルツボ, 試料などピアノ線にかかる全負荷は約 620 g であつて, これはピアノ線強度の約 5% に相当している。この振動系の周期は 9.0~9.3 sec, $T/T_0 = 0.998$ 程

** 川崎製鉄株式会社 本社 技術研究所 (Technical Research Laboratory, Kawasaki Steel Corporation, Kobe)

*** 東北大学 選鉱製錬研究所 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University, Sendai)

* 1965 年 4 月本会東京大会に発表; 熔融鉄系の粘性に関する研究 (第 1 報)

(1) M.R. Hopkins and T. C. Toye: Proc. Phys. Soc., **63 B** (1950), 773.

度であるが、この周期は (3) 式を成立させる条件とスケールの読み取りやすさとの兼ね合いにより決定されたものである。

より懸垂した。試料の加熱には Fig.2 に示すような黒鉛製発熱体を用い、その外部に黒鉛製および Mo 製の輻射シールド円筒を置いた。この発熱体に 500 A×11 V の電力を供給することにより試料をほぼ 1600 °C に加熱することができた。測温は Pt-6% Rh/Pt-30% Rh 熱電対により行なわれた。

振動の対数減衰率を測定するため Fig.1 の鏡より 2400 mm 隔てた点に 1 mm 分割の直線スケールを置き 18" 望遠鏡 (32 倍) によつてスケールの目盛を読み取つた。

本測定装置を使用するに当たり、装置定数の決定をはじめ二、三の測定条件を定める必要がある。そのため以下の予備実験を行なつた。

振巾をどの程度にするかを最初に決定せねばならない。本測定装置で直線スケールを用いたことによる誤差は振巾を小さくすることにより少なくすることができるが、一方振巾を小さくすると目盛の読み取り誤差が大きくなる。そこで Hg 20 cc を用い種々な初期振巾を与えて最適の振巾を求めた。その結果、初期振巾 ± 120 mm、最終振巾 ± 99mm、10 周期の測定より求める場合、対数減衰率のパラッキが最も少なく、10 測定の変動係数は 0.13% であつた。

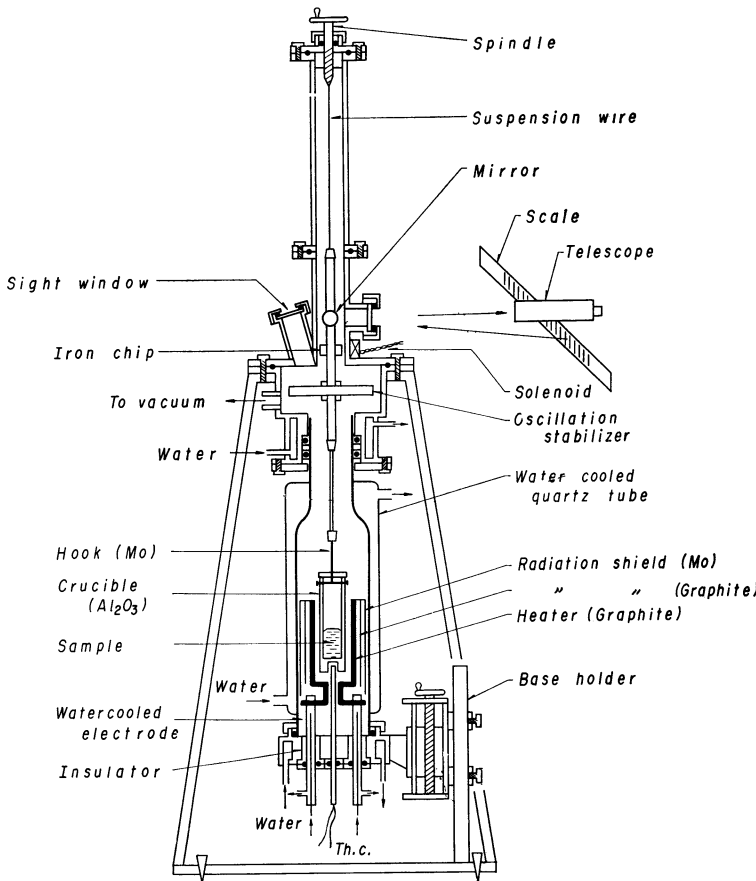


Fig.1 Apparatus for viscosity measurement.

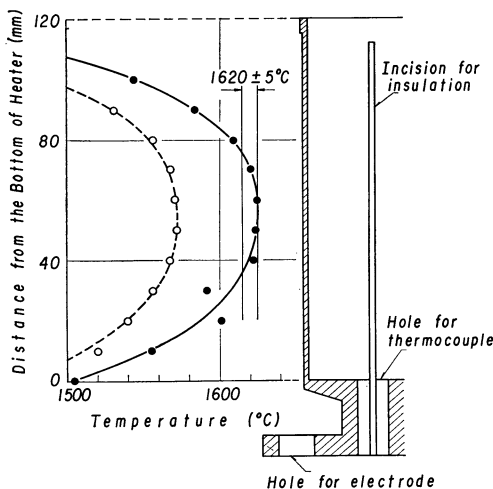


Fig.2 Sectional view of graphite heater and temperature distribution.

ルツポには内径 26 mm の平底ルツポ (熔融 Al₂O₃ 質) および内径 24 mm の市販丸底ルツポ (SSAH) を用い、ルツポ上部に超音波加工による卵型の孔を明け、Mo 製支持具に

また試料容積が変化すると当然 δ の変化をひき起こす。そこでルツポ中の Hg 量を 20~24 cc と変えて δ の変化を調べた結果、Fig.3 のように δ は試料容積の増加とともに直線的に増加することが判つた。この結果は所定温度と測定温度間に差があるとき、試料容積の所定量よりの変化に基づく δ 値の補正を行なうために用いることができる。

ルツポ内径の変化も δ に利く。ルツポ内径の変化による δ の変化を Fig.4 に示す。Fig.4 より明らかなように δ はルツポ内径の変化に敏感であり、実験条件を一定に揃えるためにはルツポ内径を厳密に規定する必要がある。しかしこれは実際上非常に困難なため本実験においては個々のルツポにつき Hg による検定を行なつた。

つぎに粘度を求めるため ρ, η 既知の物質により検量線を作る必要がある。このため標準物質として H₂O, Sn, Pb, Cu,

† δ は連続する二つの振巾の角度 θ_{n-1}, θ_n を用いて

$$\delta = \log(\theta_{n-1}/\theta_n) = \log(\theta/\theta - d\theta)$$
 で与えられる。一方直線スケールの読みを用いたものは

$$\delta' = \log(x/x - dx)$$
 となり、これによつて生ずる誤差は

$$(\delta - \delta')\delta \approx 1 - (\sin 2\theta)$$

Hg を用いた。使用したルツボは黒鉛製でアルミナルツボと同一の形状に旋盤加工したものである。測定試料はそれ

高温における測定を行なうとき試料内の温度分布はとくに重要である。試料内の温度分布を推定するため融体に對

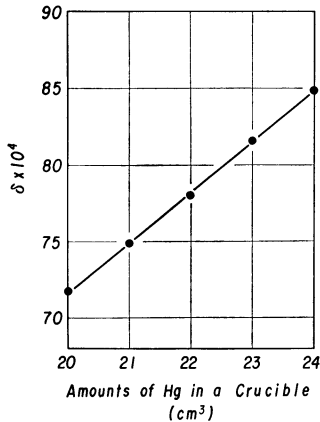


Fig. 3 Relationship between logarithmic decrement and amounts of Hg in a crucible. (at 24°C)

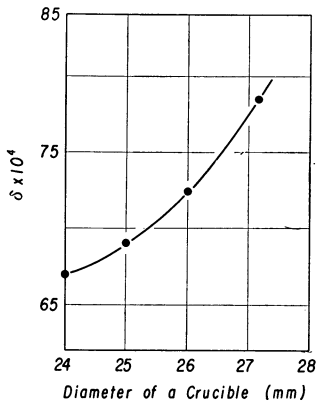


Fig. 4 Relationship between logarithmic decrement and diameter of a crucible containing 20 cm³ Hg. (at 22°C)

ぞれ一級試薬の Sn, Pb, 電解銅, 蒸溜水, 蒸溜 Hg である。このようにして得られた検量線を **Fig. 5** に、また採用した諸数値^{(2)~(6)}を **Table 1** にそれぞれ示す。Fig. 5 より (3) 式の関係が成立していることが判り、また測定対象である溶鉄の η/ρ を Hg と H₂O で挟んでいる。本実験装置では検量線を空ルツボと Hg の値を結んだ直線で置き換えても本研究の測定範囲で δ における差は約 1.5% であるから、ルツボ内径の不揃いを考慮すると個々のルツボについて空の場合と Hg を満たした状態で δ を求め、これに補正を施して検量線におき換えるほうが実際的である。以下の測定はこのような手続きによつて遂行された。

- (2) E. N. Da C. Andrade : Proc. Phys. Soc., **48** (1936), 247.
- (3) H. J. Fisher and A. Phillips : Trans. AIME, **200** (1954), 1060.
- (4) F. Sauerwald : Z. Allgem. Anorg. Chem., **223** (1938), 204, 223.
- (5) R. N. Barfield and J. A. Kitchener : J. Iron and Steel Inst., **180** (1955), 324.
- (6) S. Erk : Z. Physik, **47** (1928), 886.

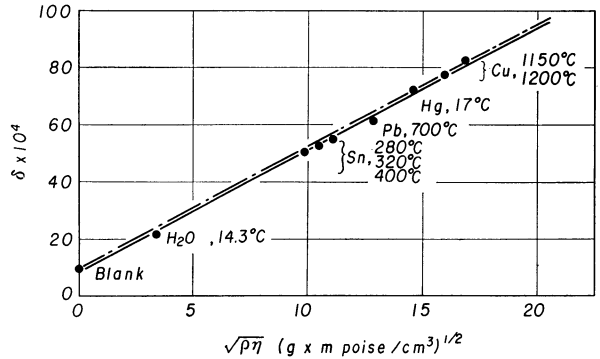


Fig. 5 Calibration curve for the apparatus on the basis of various standard materials.

Table 1 Densities and viscosities of standard substances.

Substance	Temp. (°C)	Density ρ (g/cm ³)	Viscosity η (m poise)	$(\rho\eta)^{1/2}$	Authors
Water	14.3	0.999	11.65	3.41	Andrade ⁽²⁾
	280	6.95	17.5	11.05	
Sn	320	6.92	16.0	10.54	Fisher and Phillips ⁽³⁾
	400	6.87	14.0	9.83	
	700	10.15	13.8	12.83	
Pb	1150	7.98	35.4	16.82	Sauerwald ⁽⁴⁾
	1200	7.94	32.0	15.94	
Cu	1300	7.86	27.5	14.72	Barfield and Kitchener ⁽⁵⁾
	17.0	13.61	15.7	14.62	
Hg	17.0	13.61	15.7	14.62	Erk ⁽⁶⁾

応させる黒鉛をルツボに挿入し、その中心に 8 mmφ の孔をあけ、測定時と同位置に置いて熱電対により温度分布を求めた。その結果は Fig. 2 に示されるように 1620°C において ±5°C の範囲に試料を保持できることを示している。

2. 試料および操作

純鉄試料は電解鉄を真空溶解し真空中で 30 mmφ の金型に铸込んだものであり、Fe-Al, Fe-Si 試料は電解鉄の真空溶解時に純 Al, フェロシリコンをそれぞれ添加し金型に铸込んだものである。これら試料の粘度測定前後における分析結果を **Table 2** に示す。

Table 2 Results of analysis of samples.

Sample	C (%)	Si (%)	Al (%)	O (ppm)
Fe	0.006 (0.006)	0.005 (0.005)	0.002 (0.002)	(~200)
Fe-1% Si	0.006 (0.006)	0.91 (0.89)	0.002 (0.001)	(20)
Fe-3% Si	0.008 (0.014)	2.91 (2.88)	0.006 (0.003)	(15)
Fe-0.1% Al	0.002 (0.006)	0.01 (0.017)	0.119 (0.11)	(43)
Fe-0.5% Al	0.002 (0.008)	0.01 (0.021)	0.48 (0.43)	(26)
Fe-1% Al	0.004 (0.009)	0.039 (0.046)	0.84 (0.80)	(23)

() indicates the value after the experiment.

Fe-O 系試料は純鉄試料に 4 mmφ × 30 mm の孔をあけ、この孔に一級試薬 Fe₂O₃ を所定量充填、溶解したものであ

る。この試料の測定後の酸素分析値を **Table 3** に示す。
酸化物が融体中に懸濁した場合の粘度におよぼす影響を

Table 3 Oxygen content of samples of Fe-O system.

Sample	O at the top of sample	O at the bottom of sample	Mean values
Fe*			198 ppm
Fe+0.07% Fe ₂ O ₃	726 ppm	870 ppm	798
Fe+0.14% Fe ₂ O ₃	1311	1163	1243

*: Vacuum melted electrolytic iron.

知るため、簡単なモデル実験として Al-Al₂O₃ 系を取り挙げて測定したが、この試料は黒鉛ルツボを用いたタンマン炉で溶解した Al に研磨用アルミナを添加攪拌して金型に铸込んだものである。粘度測定後、試料の Al₂O₃ 分散状態を調べるため無作為に選んだ 20 視野を 400 倍で検鏡した。

Table 4 にその結果とそれより計算した体積分率を示す。

Table 4 Particle size and distribution of dispersed Al₂O₃ in Al.

Sample		Diam. of dispersed particle (μ)			Vol %	Mean vol %
		10~25	25~50	50~75		
Pure Al	Top	2	0	0	~0.03	~0.01
	Middle	0	0	0	0	
	Bottom	0	0	0	0	
Al-Al ₂ O ₃	Top	12	1	0	~0.3	~0.3
	Middle	13	0	0	~0.2	
	Bottom	6	2	0	~0.4	

Figures of dispersed particle represent a summation of 20 fields of vision. Diameter of field of vision is about 125μ.

測定操作はつぎのとおりである。あらかじめ空ルツボと Hg で検定を行なったルツボに所定温度で 20 cc となるように試料を秤取る。吊線位置を調節してルツボを所定位置に懸垂し、水冷シリンダー、発熱体を取り付けたベースを装着する。全系を排気し 10⁻³ Torr 以下になつてから加熱、昇温する。所定温度に到達後 10~15 min 間その温度に保持し測定を開始する。電磁石により初期振動を与え、所定振幅において 5~10 周期のスケールの読みから δ を求めて一つの測定点とした。このような測定点を一定温度で数点とり、その平均をもつて最終測定値とした。

本実験においては試料を所定容積にするため、および δ より η を求めるときに密度の値を必要とする。本実験において採用した値は純鉄に関しては Lucas⁽⁷⁾ のもの、Fe-Al, Fe-Si に関しては Ericson⁽⁸⁾ のものである。Ericson は 1600 °C における値しか与えていないので、本実験の測定温度における値は純鉄の密度を規準にし、Ericson の値を平行移動させて推定した。

3. 実験結果

(1) 純鉄

純鉄の 1500°~1700°C における粘度測定結果を従来の報

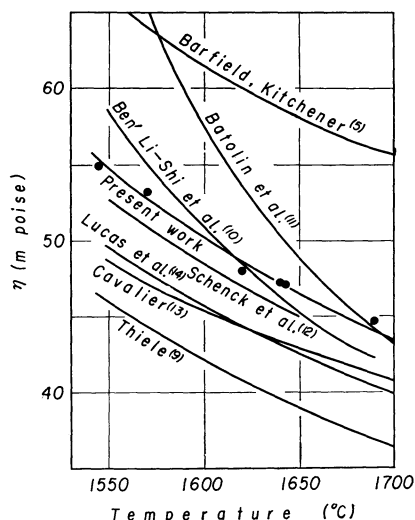


Fig. 6 Relationship between viscosity coefficient of iron and temperature.

告値^{(9)~(14)}とともに **Fig. 6** に示す。この測定値より log η と 1/T に対する回帰直線を求めると次式を得る。

$$\log \eta (\text{m poise}) = 0.441 + 0.236 \times 10^4/T \quad (4)$$

この回帰直線は相関係数 0.989, 危険率 0.5% である。また粘性流動の活性化エネルギーは 10.8 ± 0.3 kcal/mol である。

(2) Fe-Al, Fe-Si 系

1615°C において行なつた測定結果を **Fig. 7** に示す。Al は 1 wt% まで、Si は 3 wt% まで測定した。同図には比較のため Romanov, Kochegarov⁽¹⁵⁾ の測定した動粘性係数より求めた η 値を併記した。

(3) Fe-O 系

1600°C において行なつた測定結果を **Fig. 8** に示す。横軸は粘性測定後の試料酸素分析値である。未溶解の Fe₂O₃ の存在を調べるため、Fe₂O₃ 1.4% 添加の測定後の試料につき、400 倍で無作為に選んだ 40 視野を観察して酸化物系介在物の個数と大きさを測定した。その結果を **Table 5** に示す。なお **Fig. 8** には比較のため従来の報告値^{(10) (16)} を併記した。

- (7) L.D. Lucas: *Compt. rend.*, **250** (1960), 1850.
- (8) G. Ericson et al: *Arch. Eisenhütt.*, **3** (1926), 43.
- (9) M. Thiele: *Dr. Ing. Dissertation*, Berlin, (1958).
- (10) Ben' Li-shi and P. P. Arsentév: *Izv. Vuzov. Cher. Met.*, 1961, No. 7, 5.
- (11) N. A. Batolin, A. A. Bostryakov and O. A. Fsin: *Fiz. Metal. Metallov.*, **15** (1963), 222.
- (12) H. Schenck, M. G. Froberg und K. Hoffmann: *Arch. Eisenhütt.*, **34** (1963), 93.
- (13) G. Cavalier: *Compt. rend.*, **256** (1963), 1308.
- (14) L. D. Lucas and P. Pascal: *ibid.*, **259** (1964), 3760.
- (15) A. A. Romanov and V. G. Kochegarov: *Fiz. Metal. Metallov.*, **17** (1964), 300; *Fiz. Akad. Nauk SSSR, Met. i Gorn. Delo.* 1964, No. 4, 41.
- (16) A. A. Romanov and V. G. Kochegarov: *Fiz. Akad. Nauk SSSR, Met. i Gorn. Delo.*, 1964, No. 3, 63.

(4) Al-Al₂O₃ 系

融体と分散粒子の反応がなく, かつ比較的粒子が揃つ

vol% Al₂O₃ 系ともに 12.0 m poise の値を示し, Table 4 に示す分散粒子の影響は測定にかからなかつた。

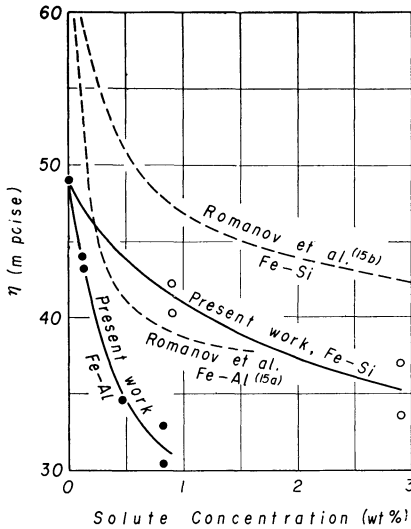


Fig. 7 Effect of solute concentrations on the viscosity of iron. (1615°C ± 5°C)

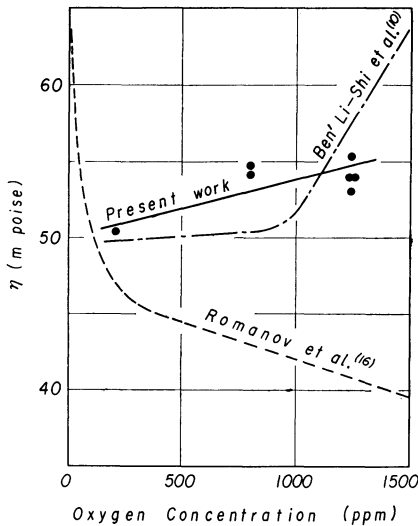


Fig. 8 Effect of oxygen concentrations on the viscosity of iron. (1600°C ± 5°C)

Table 5 Distribution of oxide inclusions in samples of Fe-O system.

Location of sample	Diam. of inclusion (μ)			Vol %	Mean vol %
	5~10	10~25	25~50		
Top	43	29	0	0.63	0.35
Middle	35	10	0	0.30	
Bottom	37	0	0	0.11	

Figures of inclusion represent a summation of 40 fields of vision. Diameter of field of vision is about 80 μ.

ていて一様に分散しやすい Al-Al₂O₃ 系で粘度測定を行なつたが, 825°C における測定結果は純 Al, および Al-0.3

III. 考 察

1. 測定誤差

測定誤差としてつぎの諸因子が考えられる. (i) 直線スケールの使用, (ii) 測定前後の零点移動(±1 mm), (iii) プランク点と Hg 点のみにより検量線をおきかえたこと, (iv) 温度分布(±5°C), 測温誤差によるもの, (v) Hg と測定試料におけるルツボ壁との接触面積の差. (i), (ii), (iii) の誤差は予備実験の結果より粘度に対してそれぞれ ±1%, ±2%, ±3% と評価される. (iv) の温度分布, 測温による誤差は大きくみても ±10°C であり, (4) 式より η に対しては ±1.4% と見積られる. (i)~(iv) の誤差は Gauss 分布にしたがいが, かつ 2σ に対応するものと考えると, (v) の誤差は不定誤差ではないので標準偏差は ±2% となる. (i)~(iv) の誤差と区別しなければならぬが, 試料の表面張力 σ とルツボとの接触角 θ および密度 ρ を用いて誤差の最大値を推定することができる。

いまルツボ壁と接触していない液体の体積を v で表わすと, v によつておよぼされる圧力はルツボ周辺の表面張力と平衡する. ルツボ中心部における液面の曲率を零と見なすとルツボ半径を r として

$$v \rho g = 2 \pi r \sigma \cos \theta \quad (5)$$

本実験においては Hg を標準物質として用いたので, 測定誤差に利いてくるのは Hg と試料の v の差額である. したがつて実効的な容積誤差は

$$\frac{v_S - v_{Hg}}{V_{Hg}} = \frac{2 \pi r}{g V_{Hg}} \left\{ \frac{\sigma_S}{\rho_S} \cos \theta_S - \frac{\sigma_{Hg}}{\rho_{Hg}} \cos \theta_{Hg} \right\} \quad (6)$$

ここで添字 S, Hg はそれぞれ試料, Hg を満たした場合を示し, V_{Hg} は Hg の規準容積である. θ_S の実測値はないが, 純鉄の凝固試料について測定してみると平均 113° であつた. そこで σ_{Fe} = 1835 dyne/cm, ρ_{Fe} = 7.2 g/cm³, σ_{Hg} = 470 dyne/cm, ρ_{Hg} = 13.6 g/cm³, θ_{Hg} = 135° として (6) 式を計算すると, 容積誤差は 3.2% となる. v が η の測定に全く利かないとすると, この容積誤差は溶鉄の η に対し最大 -4.5% まで利いてくることになる。

2. 実験結果

(1) 純 鉄

Fig. 6 に示したように純鉄に関する本実験結果は Schenck らと比較的よく一致している. 本実験による粘性流動の活性化エネルギーは 10.8 kcal/mol であつて溶鉄の自己拡散の活性化エネルギーの理論的計算値 11.43 kcal/mol⁽¹⁷⁾ に近い.

Grosse⁽¹⁸⁾ は溶融金属の粘性の活性化エネルギーと融点との間に, ある一定の関数関係が存在すると報告しているが, それによると Fe の E_η は 5.1 kcal/mol になり, 実測値の

(17) V.I. Meshkov: *Cher. Met.*, **11** (1960), 88.

(18) A.V. Grosse: *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **23** (1961), 333.

約 50% にすぎない。また Ni, Co についても同様に 40~50% 低い結果を与える。これらの事実により Grosse の考え方は金属のタイプによつて補正を施されなければならない。

Andrade⁽¹⁹⁾によると融点における粘度は次式で与えられる。

$$\eta_{mp} \text{ (m poise)} = 5.7 \times 10^{-3} \sqrt{A \cdot T_m} / V^{2/3} \quad (7)$$

ここで A は原子量, T_m は融点 (°K), V はモル容積 (cm^3/mol) である。(7)式によつて Fe についての計算を行なうと $\eta_{mp} = 46.8 \text{ m poise}$ となり、実測値との差は約 -20% である。(7)式は Na, K, Hg などの simple metal についてよく成立することが知られており、溶鉄における比較的大きな喰い違いは (7) 式を導く際仮定している粒子の対称性に問題があるのではないと思われる。

(2) Fe-Al, Fe-Si 系

Nissan ら⁽²⁰⁾ は 2 元系溶液の粘度 η_s をつぎの (8) 式より純粋液体の粘度 η_1, η_2 と関係づけている。

$$\ln \eta_s = x_1 \ln \eta_1 + x_2 \ln \eta_2 + x_1 x_2 d \quad (8)$$

ここで x_1, x_2 は成分 1, 2 のモル分率, d は成分 1, 2 間の相互作用エネルギーと温度の関数である。

いま注目する系が正則溶液であるとすれば

$$d = -\alpha W/RT = (-\alpha \ln r_1) / x_2^2 \quad (9)$$

ここで α は正の定数, r_1 は成分 1 の Raoult 規準の活量係数である。

いま $x_2 \ll 1$ とすると, (8), (9) より

$$\log(\eta_s/\eta_2) = [\log(\eta_1/\eta_2) - \alpha \log r_1] x_1 \quad (10)$$

液体金属について α は 1/8~1/30 の値をとるといわれている⁽²¹⁾ ので、仮にその平均 1/12 を代入して Al, Si が 1 at% 溶鉄に添加されたときの粘度変化率を計算し、実測値と比較してみると Table 6 のようになる。計算結果は実

Table 2 に示したように純鉄試料には酸素が含まれており、Fe-O 系の粘度は Fig.8 に示したように酸素の増加によつて増大する。したがつて Al, Si のような脱酸剤の添加による粘度変化を調べる際、溶鉄中の酸素含量の変化も考慮に入れる必要がある。しかし Fe-O 系の測定結果を考えに入れても、上記の理論式はよい一致を与えず、現在のところ理論との定性的一致で満足せざるを得ない。

(3) Fe-O 系

Fig.8 に示した結果より、酸素の溶鉄粘度におよぼす寄与は約 0.4 m poise/100 ppm O 程度である。しかし Table 5 にみられるとおり、酸素分析値は粘度測定時における未溶解の酸化物を含んでいる可能性があるためこの効果を考えに入れなければならない。Table 5 の酸化物分布より、介在物をすべて Fe_2O_3 としてその酸素量を見積ると 760 ppm となる。この介在物がすべて粘度測定の際にも介在物として存在していたものとしても、それによる粘度変化は無視してさしつかえないことが Al- Al_2O_3 系モデル実験から推論される。

(4) Al- Al_2O_3 系

実験結果は 0.3 vol% 程度の Al_2O_3 粒子が存在しても Al 融体の粘度におよぼす影響は無視できることを示した。分散粒子を含む液体の粘度に関して Einstein⁽²⁵⁾ の関係式がある。

$$\eta = \eta_0(1 + 2.5\phi) \quad (11)$$

ここで η は分散粒子を含む液体の粘度, η_0 は溶媒の粘度, ϕ は分散粒子の容積分率である。

(11) 式を用いて本実験における理論推定値を計算すると $\eta/\eta_0 = 1.008$ となり実験事実とよく一致する。

3. 脱酸剤添加時の溶鋼の湯流れ

Table 6 Changes of viscosity of molten iron by an addition of 1 at % of Al or Si.

Alloying element	Temp. (°C)	η_1 (m poise)	η_2 (m poise)	$\log r_1$	$\log(\eta_s/\eta_2)$	
					calc.	obs.
Al	1615	4.96 ⁽²³⁾	49	-1.18 ⁽²⁴⁾	-0.0090	-0.139
Si	1615	6.25 ⁽²²⁾	49	-2.88 ⁽²⁴⁾	-0.0066	-0.047

Subscripts 1, 2, and s represent the solute, solvent (iron), and solution respectively.

測値に比してはるかに小さい粘度変化を与えるに過ぎないが、定性的には一致した傾向を示している。

(19) E.N.Da C. Andrade: Phil. Mag., 17(1934), 497.

(20) L.Grunberg and A.H.Nissan: Nature, 164(1949), 799.

(21) S.Glasstone, K.J.Laidler and H.Eyring: Theory of Rate Processes, McGraw-Hill, (1941), 496.

(22) B.M.Turovskii and A.P.Lyubimov: Izv. vuzov. Chernaya Met., 1960, No.1, 24.

(23) T.P.Yao and V.Kondic: J.Inst. Metals, 81(1952), 17.

(24) J.F.Elliott, M.Gleiser and V.Ramakrishna: Thermochemistry for Steelmaking, 2, Addison-Wesley, (1963).

脱酸時に溶鋼の湯流れが変化するということがしばしばいわれている。このことに関し本実験によつて得られた結果を通して考察してみる。

脱酸過程において湯流れに影響する諸因子としてつぎのようなものが考えられる。(i) 添加脱酸素素の溶解, (ii) 溶鋼中の溶解酸素量の減少, (iii) 非金属介在物の分散, (iv) その他(ガス吸収, 温度低下など)。

仮に脱酸剤として Al または Si を約 0.2% 添加したとして、これら脱酸剤が溶解してゆく過程において、(i) の効果は Al では約 -10%, Si では約 -4% である。しかし

(25) C.E.H.Bawn: Trans. Faraday Soc., 47(1951), 97.

脱酸反応の進行に伴ない溶鋼中の脱酸剤濃度は低下し、最終的には脱酸剤の粘度におよぼす効果はほとんどなくなる。脱酸剤添加前の溶鋼中酸素量が 500 ppm であつたとすると、(ii) の効果は約 -10% である。生成した介在物が 1 vol% 程度 (Al 0.2% 添加に対応) であり、かつ一様に分散したとすると、(iii) は約 +3% の効果を示す。(iv) のガス吸収については推定の基礎をもたないが、温度効果については仮に 1620°C の出鋼温度が 30°C 低下したとして約 +10% の変化がある。結局以上 (i) ~ (iv) の効果は互いに打ち消し合つて、粘度は脱酸前後において大差ないと考えられ、脱酸生成物が局在しないかぎり粘度の著しい増大は考えられない。

IV. 結 び

溶融鉄, Fe-Al, Fe-Si, Fe-O 2 元系および Al-Al₂O₃ 系の粘度を測定しつぎの結果を得た。

(1) 溶融純鉄の粘度と温度の関係は次式で示される。

$$\eta (\text{m poise}) = 2.76 \exp\left(\frac{10.8 \times 10^3}{RT}\right)$$

(T: 1820°~1970°K)

(2) 溶融鉄の粘度におよぼす Al, Si の影響はともに粘度を低下させるが、その効果は Al の方が大きく、1 at% の添加量により Al は 36%, Si は 15% の粘度低下をもたらす。

(3) 溶融鉄の粘度におよぼす酸素の影響は 0.4 m poise/100 ppm O の割合で粘度を増大させる。

(4) Al-Al₂O₃ 分散系の粘度測定より ~10 μ 程度の介在物が 0.3 vol% 混在していても、分散粒子の粘度におよぼす寄与は高々 1% であると推定される。このことより溶鉄中の脱酸生成物も均一な分布をしているかぎり、粘度に与える影響は無視してさしつかえない。

本研究を遂行するに当たり実験装置の作製に御協力下さつた九州大学川合教授および実験に協力して下さつた選鉱製錬研究所、高野技官に厚く感謝します。