溶鉄と Al_2O_3 , SiO_2 との間のぬれについて*

向井 楠宏** 坂尾 弘*** 佐野 幸吉***

Kusuhiro Mukai, Hiroshi Sakao and Kôkichi Sano: On the Wetting of Al_2O_3 and SiO_2 by Liquid Iron and Fe-C Alloys. For the purpose of making clear the behaviour of Al_2O_3 and SiO_2 particles in liquid steel in terms of the wettability, we determined the surface tension of liquid pure iron and Fe-C alloys and the contact angles of Al_2O_3 and SiO_2 formed with liquid pure iron and Fe-C alloys at 1240° , 1435° and 1560°C by the sessile drop method.

The main results obtained are summarized as follows: (1) Measurements at 1240°C with the use of Fe-C alloy containing about 3.90% carbon show that the contact angle increases rapidly with increasing surface roughness of the SiO_2 substrate and decreases to a constant value in the first few minutes after melt down of Fe-C alloy, while in the case of the Al_2O_3 substrate, it decreases more slowly. They also show that the SiO_2 substrate is considered to be slightly more wetted than Al_2O_3 substrate. (2) Measurements at 1435°C show that the wettability of Al_2O_3 and SiO_2 by liquid Fe-C alloys is considered not to vary very much in the range of about 1.7~3.3% carbon content. (3) From the results obtained it may be concluded that both Al_2O_3 and SiO_2 particles tend to aggregate in liquid pure iron and Fe-C alloys and that the wetting of Al_2O_3 and SiO_2 by liquid Fe-C alloys is induced by the chemical interaction at the boundary of separation.

(Received December 7, 1966)

I. 緒 言

溶鋼と各種酸化物の接触によつて生ずる両者の界面の諸性質は製鋼過程で問題となる非金属介在物、溶鋼による耐火物の侵食、およびスラグ-メタル間の反応に重要な役割を演ずる。溶鋼中の非金属介在物については、溶鋼を分散媒、非金属介在物を分散相とする一つの分散系とみなすことができ、分散相としての非金属介在物の挙動は、その界面の性質と密接な関係があるはずである。そしてこれら界面の性質の中でも、分散相が固体の場合“ぬれやすさ”が非金属介在物の挙動すなわち、分散、凝縮したがってその浮上に大きな影響を与える因子であることは界面化学の見地から容易に推測される。

そこで本研究では、非金属介在物および耐火物の主要成分である Al_2O_3 , SiO_2 について溶鉄とのぬれやすさを調べるために、溶鉄の表面張力および溶鉄- Al_2O_3 , 溶鉄- SiO_2 間の接触角を静滴法を用いて測定した。

II. 実 験

1. 測定原理

ぬれやすさの尺度としては、ぬれに際しての系の表面自由エネルギーの減少量 W を用いるのが妥当である。拡張、

浸漬、付着のいずれの種類のぬれがおこるにしても、それに際しての表面自由エネルギーの減少量 W は液体の表面張力 σ および液体と固体の接触角 θ で表わされるから、 σ と θ を同時に測定することができれば W は求まることになる。したがって高温で、液体の表面張力および液体と固体の接触角を同時に測定するのに最適と考えられる静滴法を用いればつぎのようにして σ と θ が求められる。

表面張力 σ は Fig.1 に示す x と z を測定すれば、Bash-

Fig.1 Sketch of sessile drop of liquid iron showing elements of measurements.

forth and Adams の表⁽¹⁾から次式によつて求められる。

$$\sigma = gd (b^2/\beta) \quad (1)$$

ただし g は重力加速度、 d は液体の密度、 b は Fig.1 の液滴の O 点における曲率半径、 β は Bashforth and Adams の表⁽¹⁾を用いて x/z の値から求められる一種のパラメーターである。

(1) 式で σ を算出するのに必要な液体の密度 d は接触角

(1) F. Bashforth and S.C. Adams: *An Attempt to Test the Theories of Capillarity*, Cambridge Univ. Press, (1883).

** 名古屋大学大学院 (Student of Graduate School, Nagoya University, Nagoya)

*** 名古屋大学工学部 (The Faculty of Engineering, Nagoya University, Nagoya)

* 溶鉄の St, Mn, Al による単独および複合脱酸の研究 (第1報)。

Table 1 Impurities of raw irons.

(%)	C	O	N	S	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	Cu	V
Electrolytic iron	—	—	—	0.001	0.04	0.01	0.006	0.02	0	0	0.02	0
Pure iron*	0.03	0.01	0.01	0	3ppm	2ppm	0	2ppm	0	0	2ppm	0

* Manufactured by Johnson, Matthey & Co., Limited.

θ がわかれば同じ Bashforth and Adams の表⁽¹⁾ から求められる。

接触角 θ は, Fig.1 でさらに h を測定すれば, Bashforth and Adams の表⁽¹⁾ をもとにしてつくられた液滴の形状から間接的に θ を算出する間接法⁽²⁾ により求めることができる。この際の表面張力, 密度, 接触角の最大測定誤差はそれぞれ約 $\pm 3\%$, $\pm 4\%$, $\pm 1^\circ$ である。

2. 実験装置

実験装置は Fig.2 に示す加熱炉と液滴撮影のための光

Fig.2 Schematic cross section of the electric furnace portion of the heating microscope.

1. Furnace proper	6. Thermocouple
2. Cooling chamber	7. Molybdenum tube
3. Gas inlet	8. Drop support (Substrate)
4. Gas outlet	9. Iron drop
5. Specimen carrier	

学装置を兼ね備えたライツ社製の高温顕微鏡を用いた。加熱炉は Pt-Rh 抵抗炉で内径 19 mm, 長さ 160 mm の内容積をもち, その中に炉内温度の均一化ならびに炉管の汚染を防ぐために Mo の保護管を入れた。鉄試料およびその支持台となる固体の SiO_2 , Al_2O_3 は Fig.2 に示すように熱電対の保護管を兼ねた支持棒上においた。測温は PtRh 30%-PtRh 6% 熱電対を用いて試料直下で行なった。支持台面を水平にすることは光学系に内蔵されている十字線をあらかじめ水平に調節しておき, これを基準にして行なった。撮影倍率ならびに像の歪みについては真球度のよい (JIS 規格一級) 5 mm ϕ の鋼球を写真にとつて調べた結果, 倍率として, 2.644 ± 0.005 を得, かつ特定方向の像の歪みは検出されなかつた。また撮影のビントのずれによる倍率の変化も像が鮮明な範囲ではほとんど認められなかつた。炉内はアルゴンと水素の混合ガス気流により, 酸素の排除に努めた。ガスの精製はアルゴンを水素と混合した後アスカライト, P_2O_5 , ついで 450°C の銅網炉, 550°C のマグネシウム炉を通して行なった。

(2) G.L.Mack: J.Phys.Chem., 40 (1936), 169.

3. 試料

鉄試料—Table 1 に示す 2 種類の鉄をもとにつぎの 3 種類の作成法によつて鉄試料をつくつた。

(1) Table 1 の電解鉄を精製アルゴン気流中のタンマン炉内の黒鉛ルツボで 1250°C 約 1 時間溶解した後, 内径 5 mm ϕ の石英管で吸上げた炭素飽和鉄。

(2) Table 1 の市販分光分析用純鉄に Fig.3 に示すよう

Fig.3 Cross section of iron rod used to prepare the Fe-C alloy samples at measurements.

にドリルで炭素量に応じて深さを調節した 2~3 mm ϕ の穴をあけ, その中に黒鉛ルツボを削りとつた炭素粉をつめ測定時に直接合金させて得たもの。

(3) Table 1 の市販分光分析用純鉄—純鉄試料として使用。

測定にあつては (1), (3) の棒状試料 (5 mm ϕ) を長さ 5~6 mm に切断し, 清浄な鉄ヤスリで磨き, エチルアルコールで洗浄した。試料重量は 0.7~0.8 g であつた。

SiO_2 , Al_2O_3 試料— Al_2O_3 試料として 10 mm 角, 厚さ 3 mm に成形された市販の焼結アルミナ (アランジット) を用い試料面は最終的にダイヤモンドペーストパフで研磨 (D.P 研磨) して仕上げたもの, SiC 400 番エンドレスベルト研磨のみのもの, 市販品そのままのもの 3 種類とし, これらを塩酸で約 1 時間煮沸洗浄, 蒸留水で 3 回おのおの 10 分間煮沸洗浄後 900°C で空焼きした。

SiO_2 試料として 10 mm 角, 厚さ 3 mm に成形された市販の表面が鏡面状態の透明石英製板を用い, 試料面は市販のままの鏡面状態のもの, D.P. 研磨を施したもの, SiC 400 番エンドレスベルト研磨を施したもの, 鏡面および D.P. 研磨面の中央部に径 2 mm の凹みをつけたものの 4 種類とし, Al_2O_3 と同様の洗浄処理を施した。

4. 操 作

鉄試料を支持台上にのせ、炉内に挿入し、支持台表面が水平になるようにセットする。精製アルゴン-水素混合気流 ($\text{H}_2/\text{A}=1/7$, 流量 330 cc/min) を 1 時間通した後昇温する。鉄試料が溶解後所定温度に達すれば時間とともに必要枚数写真撮影を行なう。滴の形状はそれ自身の発光で十分撮影できた。炉内温度は所定温度に対して $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内に調節した。鉄試料中の炭素と珪素の濃度は、測定の前後に化学分析を行なった。鉄試料中の酸素濃度は、純鉄試料についてのみ真空溶融法により分析した。

5. 測 定

撮影したネガフィルムの像の解析には直角な方向におおの 1/1000 mm まで読みとれるコンパレーターを使用した。Fig. 1 の x , h は容易に精度よく測定できるが、 z の測定は Baes ら⁽³⁾ の方法にしたがつた。

Fig. 4 Diagram of method used to determine z of sessile drop.

すなわち Fig. 4 に示すようにネガフィルムに液滴の像の端 (D) から約 0.1 mm の間隔をおいて底面に垂直な 4 本の割線を想定し、この割線と液滴の像が交わつてできる二つの交点 A, B の中点 C を求める。点 C と直線 l からの距離 (z') を、像の端 (D) からの割線の距離 (x') に対してプロットし、 z' を零に外挿した点での z' を、求める z とした。

III. 実 験 結 果

測定装置および方法を検定する意味で水銀の表面張力と密度の測定を行ない、 20°C で表面張力 $\sigma=474 \pm 2$ dyne/cm, 密度 $d=13.6 \pm 0.2$ g/cm³ を得た。文献の値⁽⁴⁾ によれば $\sigma=475$ dyne/cm, $d=13.55$ g/cm³ でよい一致を示す。

1. 1240°C で の 測 定

- (3) C.F. Baes and H.H. Kellog: J. Metals, 5 (1953), 643.
(4) 日本化学会論: 化学便覧, 丸善・東京, (1958)。

鉄試料の作成法の項の (1) の方法で得た炭素飽和鉄試料を用いて実験の比較的容易な 1240°C で種々の実験条件の検討およびその温度での測定値を求めた。実験条件としては表面張力と接触角について、それぞれ鉄試料溶融後の時間の変化、 Al_2O_3 , SiO_2 の表面のあらさの影響、炉内に通すガス流量および水素対アルゴン比 (H_2/A) の影響について調べた。

鉄側試料溶融後の表面張力、接触角の時間的変化—Fig. 5 に示すように表面張力は他の実験条件の変化に関係なく、 Al_2O_3 , SiO_2 支持台ともに溶融後 3 分経過すれば大略最大測定誤差範囲内 (± 50 dyne/cm) で一定になる。ただ水素混合比 H_2/A を $1/3$ にした場合だけは、Fig. 5 (c) に示すように増加する傾向にある。つぎに接触角 θ は Fig. 5 (a), (b), (c) に示すように SiO_2 と Al_2O_3 で変化の様子が明らかに

Fig. 5 Variations of σ and θ of Fe-C alloy with time under the various conditions of the atmosphere (H_2/A : the flow ratio of hydrogen to argon gas) and the surface roughness of Al_2O_3 or SiO_2 substrate at 1240°C . Smooth*: The surface of Al_2O_3 is polished with diamond paste buff (D.P. polish) and the surface of SiO_2 is the quartz glass one mentioned in the present report. Rough: polished with SiC 400# endless-belt grinder.

異なり、 SiO_2 では鉄側試料溶融後 3 分で θ は一定になるのに対して、 Al_2O_3 では溶融後 25 分を過ぎてもわずかに減

少する傾向にある。

他の実験条件の検討と 1240°C での測定値 - 前述の σ , θ に関する時間的変化の結果を考慮すれば, 1240°C での測定値を代表するものとして SiO_2 支持台の場合, σ , θ ともに鉄側試料溶融後 3 分以後の測定値の平均をとり, Al_2O_3 支持台の場合, 一連の測定値のうちの最後の値 (25 分以後) をとるのが妥当である. このようにして得た測定値は Fig. 5 からも明らかなように, θ についてとくに SiO_2 支持台の表面のあらさの影響がはつきりと認められる他は, 表面張力, 接触角ともに他の実験条件の変化によつてほとんどその影響を受けない. したがつて, 実験条件としてガスの水素混合比 $\text{H}_2/\text{A}=1/7$, 流量 330 cc/min, 支持台の表面状態を Al_2O_3 は D.P. 研磨, SiO_2 は鏡面状態とした場合の 1240°C での炭素含有鉄と SiO_2 , Al_2O_3 との間のぬれに関する諸量, 浸漬仕事 w_i (ergs/cm²), 付着仕事 w_a (ergs/cm²) の測定値は, Al_2O_3 , SiO_2 に対してそれぞれ w_i が -660 と -540, w_a が 790 と 870 となり, いずれも Al_2O_3 の方が SiO_2 より小さい傾向になつてゐる. 凝固後の炭素含有鉄の炭素濃度は 3.80~4.00%, SiO_2 支持台で測定したものについては珪素濃度も分析した結果 0.007~0.01% Si の範囲にあつた. なお測定前の炭素含有鉄 (炭素飽和鉄試料) の炭素濃度と珪素濃度はそれぞれ 4.39% と 0.007% である. 溶鉄の密度は各測定値の平均 6.97 g/cm³ をとつた.

2. 種々の炭素濃度における 1435°C での測定

1240°C での実験結果をもとにつぎのように実験条件を設定した. ガスの水素混合比 $\text{H}_2/\text{A}=1/7$, 流量 330 cc/min で支持台表面は Al_2O_3 が D.P. 研磨, SiO_2 は鏡面あるいは Al_2O_3 と同様の D.P. 研磨を施したものの表面の中央部に

ドリルで径 2 mm の凹みをつけたものを用いた. この凹みをつけることにより溶鋼を支持台上の定位置に安定させることができ, かつ接触角が鏡面状態とかわらないことが 1240°C での実験で確かめられた. 鉄側試料は鉄試料作成法の項の (2) の方法によつて測定時に純鉄と炭素粉を直接合金させて得たものである.

鉄側試料溶融後の表面張力, 接触角の時間的変化—Fig. 6 にその結果を示す. SiO_2 支持台では表面張力, 接触角ともに値はバラついてゐるが, 表面張力は最初増大して後減少する傾向にあり, 逆に接触角は減少した後増大する傾向が認められる. Al_2O_3 支持台では表面張力は SiO_2 と変化の様子が似てゐるが接触角は 20 分以後ほとんど一定になる.

炭素濃度による変化—Fig. 7 にその結果を示す. 図中の各測定点は, SiO_2 支持台で測定中に鉄側試料の C, Si の成分の移動がかなりあるので一連の測定値の最後のものを取り, それと比較する意味で Al_2O_3 支持台でも同様最後の測定値をとつた. 接触角は 1240°C での測定値とは逆に SiO_2 の方が Al_2O_3 よりも約 15° 大きくしたが SiO_2 の方がぬれにくい結果となつてゐる. 表面張力は炭素濃度とともにわずかに減少しているが炭素濃度によるぬれの諸量に大きな変化は認められない.

3. 1560°C での純鉄と Al_2O_3 間のぬれ

測定温度が 1560°C である他は 1435°C での測定と同じ条件で行なつた. 鉄側試料溶融後の時間的変化を Fig. 8 に示す. 接触角は溶融直後を除いてほとんど一定の値を保つが, 表面張力は 24 分のところにわずかなピークがある. 表面が粗 (市販品そのままのもの) な支持台では滑 (D.P. 研磨) なものより接触角が 2° 大きくなつてゐる. 溶融後 24 分における滑面での接触角と表面張力は, それぞれ 141° と

Fig. 6 Variations of σ and θ with time in the case of the various carbon concentrations of iron drops and Al_2O_3 and SiO_2 substrate at 1435°C.

Fig. 7 σ , θ and w_i of Fe-C alloys at 1435°C.

Fig.8 Variations of σ and θ with time in the case of pure iron drop and Al_2O_3 and SiO_2 substrate at 1560°C .

1680 dyne/cm であるから w_i , w_a はそれぞれ -1310 ergs/cm², 370 ergs/cm² となる。測定後の鉄試料の酸素分析値は $0.0014 \sim 0.0024\%$ の範囲にあつた。Tsarevskii ら⁽⁵⁾ は本実験と同じ静滴法を用いて 1560°C での Al_2O_3 と純鉄との間の付着仕事 w_a として 380 ergs/cm² を得ているがこれは本実験結果とよい一致を示す。

IV. 考 察

1. 測定上の問題点

SiO_2 支持台では測定時溶鉄との反応によつてその表面が粗面になる。 1435°C での測定に用いて表面があらくなつた SiO_2 支持台をそのまま用いて 1240°C で測定したところ $\theta = 139^\circ$, $\sigma = 1370$ dyne/cm という結果を得た。これより接触角 θ は他の条件を同じにして 1240°C で測定した鏡面での値より 25° 以上大きくなつてゐる。 1240°C での測定でも SiO_2 支持台の表面は肉眼で識別できる程度に粗面化されている。なお D.P. 研磨のものと鏡面のものとの間に接触角の差が認められなかつたが、これはしたがつて鏡面のものでも測定中に研磨面のあらさ以上に表面があらくなつて、両者の差がなくなつてしまつたものとも考えられる。 Al_2O_3 支持台で D.P. 研磨と SiC 400 番エンドレスベルト研磨との間に接触角の差がほとんど認められないのは、両者の研磨面の断面の顕微鏡観察から推して、焼結アルミナであるための粒間間げきの凹凸によるあらさが支配的になつてゐるのであらうと考えられる。

Wenzel⁽⁶⁾ によれば粗面の場合の接触角はみかけのもので、その場合 Young 式 (2) は成立しなくてつぎの (3) 式にかわるべきだといふ。

$$\sigma_s - \sigma_i = \sigma_l \cos \theta \quad (2)$$

$$r(\sigma_s - \sigma_i) = \sigma_l \cos \theta' \quad (3)$$

ただし σ_s , σ_l はそれぞれ固体、液体の表面張力、 σ_i は固-液界面の界面張力、 r は粗度因子 (= 固体表面の実面積/見かけの幾何学的面積)、 θ , θ' はそれぞれ真の接触角と見か

けの接触角である。(2) と (3) 式を組合わせれば、 $r > 1$ だから $\theta > 90^\circ$ すなわち、真の接触角が 90° より大きい場合 r が大きくなるほど θ' は大きくなる。この逆も成り立つ。したがつて Al_2O_3 , SiO_2 の場合にも (3) 式が成り立つとすれば、本実験結果より、各測定温度において Al_2O_3 , SiO_2 とともに真の接触角は 90° より大きいとみなしてよいであらう。

1240°C での測定で接触角が SiO_2 支持台では鉄側試料溶融後 3 分ほどで一定になるのに対して、 Al_2O_3 支持台では 25 分後も依然わずかではあるが減少している。表面張力が 3 分後に両者ともに一定になつてゐることを考へ

ると、これは溶鉄- SiO_2 界面と溶鉄- Al_2O_3 界面では界面への不純物の吸着平衡到達時間が異なることによるのか、あるいは Al_2O_3 表面と SiO_2 表面での表面状態のちがひによつて (2) あるいは (3) 式が成立するための力学的な平衡への到達時間が異なることによるのかは、本研究結果のみでは明らかにできない。

SiO_2 支持台では鉄側試料中の炭素との反応によつて SiO_2 が還元されて Si が溶鉄に溶け込む。 1435°C では測定時に溶鉄中にガス気泡の発生が顕著にみられ、したがつて平衡接触角の測定条件は満たされなかつたと考えられる。

2. むれについて

本実験で得られた接触角 θ はすべて $\theta > 90^\circ$ であると見せるところから、これらの系では付着ぬれ以外のぬれは自然にはおこらないと考えられる。したがつて本実験条件下の溶鉄内に SiO_2 , Al_2O_3 粒が自然に懸濁することはないであらう。分散相の凝集は固-液界面が消失して、固-固界面があらわれる変化であり、その場合の表面自由エネルギーの変化は $\sigma_{ss} - 2\sigma_i$ となる。ただし σ_{ss} は分散質の固-固界面の界面エネルギー。 Al_2O_3 , ZrO_2 についての σ_{ss} の実測値のは σ_s の約 $1/2$ になつてゐる。 SiO_2 にもこの関係が適用できるとすれば、本実験結果より Al_2O_3 , SiO_2 とともに $\sigma_{ss} - 2\sigma_i < \sigma_s - \sigma_i (= w_i) < 0$ となり、本実験条件下の溶鉄内では SiO_2 , Al_2O_3 粒の凝集が積極的に起こると考えてよい。実際の製鋼過程では他の合金元素の影響を考える必要があるが、これら他元素が少ない鋼種については、 Al_2O_3 , SiO_2 粒は溶鋼内で凝集する傾向にあると考えるとよいであらう。

ぬれが自然におこるために必要なその系の表面自由エネルギーの減少が電子、原子の交換を含めた化学的相互作用によるものか単に分子間力によるものなのか、本実験結果をもとに若干考察してみる。いま 1 mol の物質が 1 原子 (分子) の厚さの膜に広がつてぬれる場合の表面自由エネルギーの変化 $w_{a, \text{mol}}$ は w_a (ergs/cm²) とつぎの関係にある⁽⁸⁾。

$$w_{a, \text{mol}} = w_a (M/\rho)^{2/3} \cdot N^{1/3} \cdot k \quad (4)$$

(5) B.V. Tsarevskii and S.I. Popel: *The Role of Surface Phenomena in Metallurgy*, Consultants Bureau Enterprises, Inc., N.Y., (1963), p.96.

(6) R.W. Wenzel; *Ind. Eng. Chem.*, **28** (1936), 988.

(7) W.D. Kingery; *J. Amer. Ceram. Soc.*, **37** (1954), 42.

(8) V.N. Eremenko: *The Role of Surface Phenomena in Metallurgy*, Consultants Bureau Enterprises, Inc., N.Y., (1963), p.1.

ただし M は分子量, ρ は密度, N はアボガドロ数, k は Packing coefficient で通常 $k=1$ である. Al_2O_3 の場合 $\rho=3.99 \text{ g/cm}^3$, $M=102$, $N=6.03 \times 10^{23}$ とすれば, Al_2O_3 と溶鉄との間の w_a は本実験結果より 1240°C , $3.95\% \text{ C}$ の溶鉄で 790 ergs/cm^2 , 1435°C , $1.69\% \text{ C}$ の溶鉄で 1310 ergs/cm^2 , 1560°C の純鉄で 370 ergs/cm^2 であるから (4) 式によつて $w_{a,\text{mol}}$ はそれぞれ $14, 23, 6.5 \text{ kcal/mol}$ と算出される. SiO_2 の場合 $\rho=2.3 \text{ g/cm}^3$ とすれば 1240°C , $3.88\% \text{ C}$ の溶鉄で w_a は 870 ergs/cm^2 であるから $w_{a,\text{mol}}=15 \text{ kcal/mol}$ となる.

分子間力だけが働くと考えてよい分子性結晶の結合のエネルギーが $5\sim 10 \text{ kcal/mol}$ であることを考えると, 純鉄と Al_2O_3 間のぬれを除いて他はすべてぬれに際して化学的相互作用が関係しはじめる段階にあると考えてよい.

V. 結 論

静滴法によつて炭素含有溶鉄と Al_2O_3 , SiO_2 間のぬれに関する諸量を測定した. 1240°C では SiO_2 と Al_2O_3 についてのぬれやすさの差はほとんどなくわずかに Al_2O_3 の方がぬれにくいと考えられる. SiO_2 は表面のあらさが増すとともに接触角が増す. 接触角 θ が一定の値に落ちつくまでに要する時間は SiO_2 に比べて Al_2O_3 の方がはるかに長時間を必要とした. 1435°C での測定結果は SiO_2 の表面が激しくあらされる結果みかけ上 SiO_2 の方がぬれにくい結果を得た. また 1435°C におけるぬれの諸量は $1.7\sim 3.3\%$ の炭素濃度の範囲内で大きな変化が認められなかつた. 得られた結果の考察から, 本実験条件下の溶鉄内では, Al_2O_3 , SiO_2 粒はともに積極的に凝集を行なうと考えられ, また純鉄と Al_2O_3 間のぬれは分子間力によると考えられるが, 炭素含有鉄と Al_2O_3 , SiO_2 間のぬれは化学的相互作用が関与する段階にあるものと推定した.