

# 物性物理的手法による 鉄鋼製錬研究へのアプローチ

森田 善一郎\*

Zen-ichiro MORITA, Dr.Eng, D.Sc

An Approach to Basic Studies on Iron- and Steelmaking by Physical Methods



大阪大学名誉教授  
北京科技大学名誉教授  
ノッティンガム大学国際顧問教授  
住友金属工業(株)顧問  
森田 善一郎

1930年	5月17日生
1953年	大阪大学工学部冶金学科卒業
1959年	同上大学院工学研究科冶金学専攻博士課程 修了, 工学博士
1971~72年	英国ウェールズ大学客員教授
1973年	大阪大学教授
1994年	D.Sc(ドクター・オブ・サイエンス, 英国 ノッティンガム大学)
1994年	大阪大学停年退官, 大阪大学名誉教授
現在	住友金属工業(株)顧問

## 1 はじめに

このたび、はからずも名誉ある西山賞を受け、かつ特別講演の機会を与えられ、大変光栄に存じている。また今回の受賞は、決して筆者個人に対するものではなく、長年にわたり筆者の研究を支えていただいた共同研究者を含めて、恩師、諸先輩、同輩の方々のご支援ご協力の成果に対するものと理解している。ここにこれらご関係の皆様へ厚くお礼申し上げる。

筆者は1953年大阪大学工学部冶金学科を卒業以来今日に至るまで、一貫して鉄冶金学(鉄鋼製錬工学)の基礎に関する教育と研究に従事してきた。今回の受賞の対象となったのは、筆者がその間かかわってきた「鉄鋼製錬の熱力学と輸送現象および冶金融体の物性と構造に関する研究」であり、これは具体的には次の三つの研究に大別できる。

- (1) 鉄鋼製錬反応および鋼の凝固現象に関する熱力学的研究
- (2) 冶金融体の物性と構造に関する研究
- (3) インジェクション冶金ならびに鉄浴式溶融還元に関する基礎的研究

これらの中(1)および(3)の範疇の研究については、国内外の多くの研究者がこれまで実施してきているのに対し、(2)の分野ではとくに鉄鋼製錬の立場から行われた研究はきわめて少ないように思われる。そこで本日は標題のもとに筆者がこの分野に関してこれまで行ってきた研究を中心にお話したい。

## 2 鉄鋼製錬と物性

鉄鋼製錬に課せられる使命は、如何にして合理的、経済的に可及的良質の鋼を製造するかにあり、そのための技術開発とそれを支える基礎科学の発展が不可欠であることは、今更その言をまたない。ところで鉄鋼製錬プロセスは製鉄と製鋼の二つのプロセスに大別され、また後者は精錬と鑄造・凝固のプロセスに分けられる。したがって、基礎研究の立場から上述の目的達成のためには、まずこれらのプロセスにおける、反応や現象の解明が必要であり、そのためには、製錬に関与する物質の性状に関する情報が必要となり、またさらにこれらの成果をもとにして、プロセス制御と操業の最適化をはかる必要がある。そのための基本的なアプローチとしては、大別して物理化学的ならびに化学工

平成6年3月本会講演大会における西山賞受賞記念特別講演 平成6年10月7日受付 平成6年11月4日受理 (Received on Oct. 7, 1994; Accepted on Nov. 4, 1994)

\* Executive Consultant, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-8 Fuso-cho Amagasaki 660

Professor Emeritus, Osaka University; Honourable Professor, University of Science and Technology, Beijing, China; International Consultant, University of Nottingham, U.K.

Key words: physical property; viscosity; diffusivity; network parameter; physical method; estimation; measurement; model theory; metallurgical substance; iron and steel; slag; iron and steelmaking.

学的方法があり、具体的には、物性、熱力学、動力学(速度論)、輸送現象、流体工学などの手法により製錬プロセス操業の最適化に役立つ情報を得ることが必要である。最近の鉄鋼の製錬に関する研究は全てこのような立場からなされているとあってよい。しかし、これらの中で、製錬にかかわる物質の物性に関する研究は従来比較的少なく、その理由としては、高温における物性測定のための技術的困難さのほか、測定結果やその理論解析が製錬技術に直接かかわることが少なく、結果としてこのような研究に対し製錬工学の立場からは高い評価が与えられなかったことによるものと思われる。

ところで、1960年代後半の頃から溶鉄、溶鋼、スラグなどの冶金物質の密度、粘度、表面張力、拡散係数などの正確な物性値が、製錬プロセスの解明のために必要であることが認識されるようになった。しかしながら、当時、実用鋼は勿論のこと、純鉄、鉄合金、スラグなどの溶融状態でのこれら物性の測定値がきわめて少なく、またあったとしても、Fig. 1 に示す溶融純鉄の粘度の従来の測定結果にみられるように<sup>1)</sup>、測定者による結果の不一致が大きく、これらの中からもっとも確からしい値を見出すことはきわめて困難であった。さて、Fig. 2 は1976年以前に測定された室温における水銀の表面張力の値を時代とともに示したものである<sup>2)</sup>。すなわち20世紀前半の頃までばらついてきた測定値は

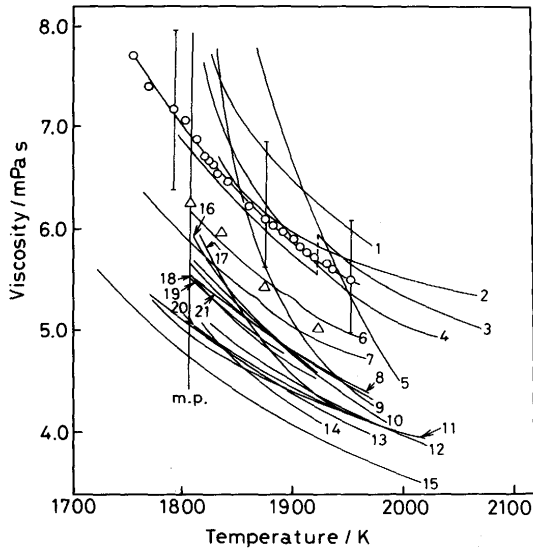


Fig. 1. Viscosity of liquid iron as a function of temperature.

○ : Measured by Morita and Iida.<sup>9)</sup>  
 △ : Calculated using equation (1).  
 Identification numbers are: (1)Arsentiev et al., (2)Barfield and Kitchener, (3)Nobohatskii et al., (4)Romanov and Kochegarov, (5)Samarin, (6)Ogino et al., (8)Nakanishi et al., (9)Vatolin et al., (10)Frohberg and Cakici, (11)Cavalier, (12)Saito and Watanabe, (13)Lucas, (14)Kawai et al., (15)Thiele, (16)Avaliani et al., (17)Wen Li-shi and Arsentiev, (18)Schenck et al., (19)Frohberg and Weber, (20)Narita and Onoe, (21)Krieger and Trenkler. (after Morita and Iida<sup>9)</sup>)

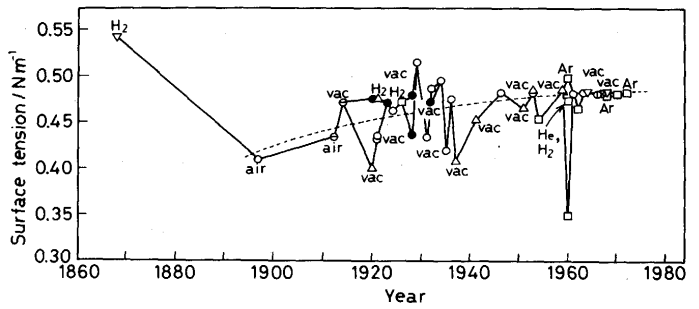


Fig. 2. Surface tension for liquid mercury at room temperature as a function of year (after Morita, Iida and Kasama<sup>2)</sup>). Methods of surface tension measurement: ○ Sessile drop, □ Maximum bubble pressure, △ Maximum drop pressure, ● Drop weight, ▽ Pendant drop, ⊖ Oscillating jet, ⊗ Capillary depression, ⊕ Contact angle. Data from Lang (1973).

1960年代にはいって収斂しており、このことから常温における測定技術ならびに測定値は、現在ではほぼ確立されたものと考えてよい。しかしながら融点近傍における溶鉄の表面張力についてはFig. 3 に示すように<sup>1)</sup>、従来の測定値は、高温における測定技術の困難さのためばらついてはいるものの、時代の経過とともにある一定の領域の値に収斂する傾向がみられる。このことから考えると、従来の諸物性の測定値を年代に対してプロットすることは、それら物性値の推定のためには有効であるかもしれない。

さて正確な物性値を得るためには、基本的には、信頼性と精度の高い測定法を確立し、実験的に、それらの値を決定することである。このような立場からこれら物性の測定技術について多くの検討がなされてきてはいるが、溶鋼のような高温における融体を対象とするような場合には、高温に起因する多くの技術的困難さのため、現在においてもそれらの適用に限界がある。したがって実用鋼のような実

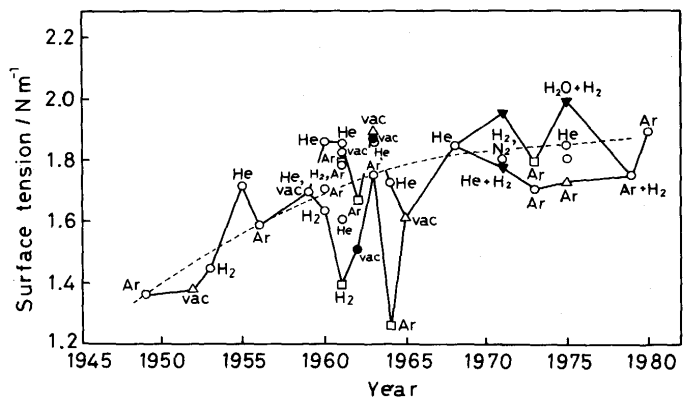


Fig. 3. Surface tension for liquid iron near its melting points as a function of year. Methods of surface tension measurement: ○ Sessile drop, □ Maximum bubble pressure, △ Pendant drop, ▽ Oscillation drop, ● Drop weight. Data from Allen (1972); Murarka, Lu and Hamielec (1975); Kawai and Mori (1979); Ogino, Nogi and Yamase (1980).

際操業に関連した冶金融体の物性については従来ほとんど測定されていないか、あったとしてもそれらが必ずしも正しい値であるとは断定し難い。このような場合これらの物性値を理論的に計算または推算できれば便利である。粘度などの物性値については、理論的立場から種々の研究がなされてきている。たとえば分布関数を用いた統計力学的手法による理論<sup>3)</sup>は、物理学的には厳密で正統的ではあるが、計算が繁雑で、しかも適用に限界があり、鉄鋼などのような実用合金系に対する適用は、ほとんど不可能に近い。そこで物理的な厳密さには欠けるが、物理学的意味を失うことなく近似的手法でこれらの値を推算できればきわめて好都合である。筆者はこのような立場から溶鉄を中心とした溶融金属の密度、粘度、表面張力、電気抵抗などを測定するとともに、これら融体の構造に関する知見を得るためX線および中性子線回折、陽電子消滅などの実験を行うとともに、模型理論による諸物性値の推算を試みてきた。これらの全てをここで紹介することは不可能であるので、以下に主として筆者が共同研究者とともにやってきた粘性の研究の一部を中心に紹介したい。

### 3 溶鉄の粘度の測定

液体の粘性測定法としては細管法、回転振動法、回転円筒法、落体法、平行平板法、振動片法などがあるが、溶鉄のような高温低粘度融体の粘度測定には回転振動法が適しており、事実これまで多用されてきている。筆者らは鉄鋼製錬における融体の粘度の重要性に着目し、高温液体金属の粘度を精度よく測定することを目的として、粘性測定法に関する基本的諸問題に検討を加え<sup>4)</sup>、従来にない、すぐれたるつば回転式粘度計を試作し<sup>4)</sup>、溶鉄の粘度測定を行った<sup>5)</sup>。この方法では、液体試料の入った容器(るつば)に回転振動を与えたとき液体の粘性によって回転振動は次第に減衰していくが、その減衰の度合から液体の粘度を計算で求める。しかし、当時、この振動挙動から粘度を導出するための完全な理論式はなく、筆者らは当時多用されていたKnappwostの関係式<sup>6)</sup>を用いて粘度を求めた<sup>5)</sup>。しかし後になってこの測定法には、容器端面や試料の滑りなど計測上の補正が必要であり、またRoscoeの関係式に基づく計算が好ましいことがわかり<sup>7)</sup>、筆者らは、これらの新しい知見のもとに溶鉄の粘度を再測定した<sup>9)</sup>。この結果は前出のFig. 1中に○印で示してあり、これは実験的に求めた値としては現在もっとも確からしい値であると考えている。しかしながら、この場合においても、粘度値の算出に用いた補正係数には未だ不確かさがあり、それを考慮すれば、その測定値には同図中縦棒線で示す範囲の不確かさがあることになる。したがって現在の測定技術でもってしても、鉄のような高温融体の、絶対的に正しい粘度値を決定することはきわめて困難である。この不確かさの幅を如何にして小さくす

るかが、今後の計測上の大きな課題であり、とくに粘度値を利用する立場から、この点に関する理解と認識が大切である。

## 4 模型理論による融体物性値の推算

粘度や拡散係数のような製錬プロセス解析に必要な物性値としては、できるだけ正確な値が望ましいことは言うまでもない。しかし、実際には必ずしも高精度の値でなくともよい場合があり、むしろそれらの値の温度や組成に対する依存性を必要とするような場合が多い。とくに測定値のない、あるいはあったとしてもそれらのばらつきから正しい値あるいはその傾向を判定し難いような冶金融体系について、実験によらず、理論的あるいは現象論的にそれらの値を推算できればきわめて好都合である。しかも鉄鋼製錬のような応用的立場からは、できるだけそれらの計算が簡単であることが望ましい。そこで筆者は1975年頃から共同研究者とともに物理的厳密さは欠くものの、物理的意味ならびに一貫性を失うことなく、しかも簡単な物理量を用いて各種金属、合金、スラグなどの融体の密度、粘度、拡散係数、表面張力、音速、熱伝導度、蒸気圧などの物性値を推算することを目的として一連の研究を実施してきた。これらの結果を全て、ここで紹介することは不可能であるので、それらの中、粘性と拡散に関する筆者らの研究の一部を紹介したい。

### 4・1 純金属液体の粘度の推算

筆者らは金属液体の粘度を理論的に導出するために、まず次のような仮定をおいた<sup>10)</sup>。

1. 液体金属の原子分布は二体分布関数 $g(r)$ によって表される。
2.  $g(r)$ によって表される原子分布は、全時間にわたる平均的な分布であり、液体金属の各原子は一定位置に留まって振動し、その後運動エネルギーの揺らぎのため他の位置に自由に移動する。
3. 一つの原子が一定の位置に留まっている確率すなわち平均寿命は、その熱平衡温度 $T$ に依存する。
4. 理論的取り扱いを簡単にするため、振動している原子を調和振動子とみなす。

以上の仮定のもとに、筆者らは次に示すような純金属液体の粘度を推算する近似式を導いた<sup>11)</sup>。

$$\eta \approx 4.5g(r_m)(1 - r_0/r_m) \frac{v_0 P(T)_m}{a} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $\eta$ は液体の粘度、 $r_m$ および $r_0$ は二体分布関数 $g(r)$ の第1ピークならびに左端部の位置、 $v_0$ は原子の偏位のない場合の振動数に相当する定数、 $a$ は平均原子間距離を示し、また確率関数 $P(T)$ は次のように表される。

$$P(T) = 1 - \int_w^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{W^2}{2}\right) dW,$$

$$W = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{T_b - T}{T} \right), \quad T_b: \text{沸点}$$

この式の導出過程の詳細については原論文<sup>11)</sup>または共同研究者(飯田)の著書<sup>1)</sup>を参照されたい。Table 1は19種の純金属の融点近傍の粘度の従来の測定値 $\eta_{obs}$ と、筆者らの(1)式による計算値 $\eta_{cal}^a$ ,ならびに従来融点近傍の粘度に関する代表的な経験式であったAndradeの式<sup>12)</sup>

$$\eta = 1.8 \times 10^{-4} \frac{(MT_m)^{1/2}}{V_m^{2/3}} \dots\dots\dots (2)$$

$M$ : 原子量,  $T_m$ : 融点,  $V_m$ : 融点における原子容

による計算値 $\eta_{cal}^b$ を比較したものである<sup>11)</sup>。筆者らの式による計算値は、Andradeの式による計算値よりも実測値に近く、筆者らの式が、純金属の粘度の推算に有効であることを示している。

次に筆者らの(1)式によって求めた純鉄の粘度の計算値を前掲のFig. 1中に△印で示す。計算値は筆者らの実験値<sup>9)</sup>よりはやや低い値となっているが、従来の測定値のばらつきから考えれば、この推算値はほぼ妥当なものとなしてよいであろう。

一方筆者らは、前述のAndradeの融点近傍における粘度式に改良を加え、純金属液体の粘度を簡単な物理量のみで表式化を試み、次式のような近似式を導いた<sup>10)</sup>。

$$\eta = 1.8 \times 10^{-7} \frac{(MT_m)^{1/2}}{V_m^{2/3}} \frac{\exp(H_\eta/RT)}{\exp(H_\eta/RT_m)} \text{ (in SI units)} \dots (3)$$

$$H_\eta = 5.1 T_m^{1/2}$$

この式による計算値は、アルカリ金属や半金属のような比

Table 1. Comparison of calculated and observed values for viscosity of liquid metals at their melting points.

Metal	Viscosity (mPas)		
	$\eta_{cal}^a$	$\eta_{cal}^b$	$\eta_{obs}$
Na	0.68	0.62	0.70
Mg	1.22	1.39	1.25
Al	1.90	1.79	1.2~4.2
K	0.50	0.50	0.54
Fe	6.37	4.55	6.92
Co	5.93	4.76	4.1~5.3
Ni	5.64	4.76	4.5~6.4
Cu	4.07	4.20	4.34
Zn	2.65	2.63	3.50
Ga	2.00	1.63	1.94
Ag	3.53	4.07	4.28
In	1.97	1.97	1.80
Sn	2.04	2.11	1.81
Sb	2.23	2.68	1.43
Au	5.50	5.80	5.38
Hg	2.31	2.06	2.04
Tl	2.55	2.85	2.64
Pb	2.52	2.78	2.61
Bi	2.13	2.54	1.63

較的融点の低い金属の粘度の測定値とよく一致するが、鉄、ニッケル、コバルトのような高融点金属の粘度については測定値とよい一致を示さない。

#### 4.2 希薄合金液体および二元系合金液体の粘度の推算

製錬に關与する融体は、一般に多成分系からなるため、そのような合金やスラグの粘度を実験によることなく推算できれば好都合である。筆者らは、まずその第一歩として、上述の純金属液体の粘度の推算式を発展的に展開し、希薄合金液体ならびに二元系合金液体の粘度を表す近似式を導いた<sup>10)13)14)</sup>。これらの式の導出過程ならびに表式にはかなりの紙面を要するので、ここでは省略し、計算結果の二例を紹介する。なおこれらの式の詳細については原論文<sup>10)13)14)</sup>を参照されたい。Fig. 4およびFig. 5にFe-C系およびFe-Si系溶融合金の粘度の従来の測定値と筆者らの計算値の比較を示す<sup>9)10)</sup>。両結果とも測定値のばらつきや測定者間の結果の

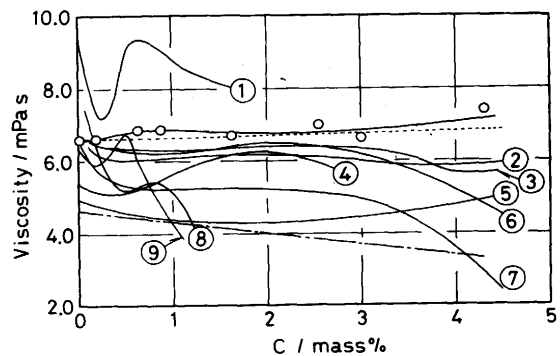


Fig. 4. Viscosities of liquid Fe-C alloys at 1823K.   
 ○ measured by Morita and Iida<sup>9)</sup>   
 - - - calculated by Iida and Morita<sup>10)</sup>   
 — calculated by Hirai<sup>15)</sup>   
 ①Arsentiev et al., ②Vostryakov et al., ③Turovskii, Lyubimov, ④Krieger, Trenkler, ⑤Lucas, ⑥Barfield, Kitchener, ⑦Vatolin et al., ⑧Krashennnikov, Filippov, ⑨Wen Lishi, Arsentiev.

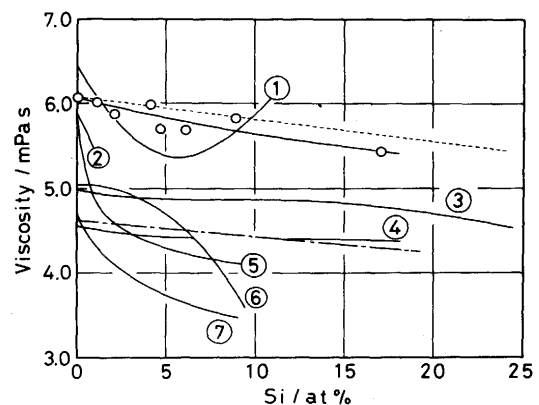


Fig. 5. Viscosities of liquid Fe-Si alloys at 1873K.   
 ○ measured by Morita and Iida<sup>9)</sup>   
 - - - calculated by Iida and Morita<sup>10)</sup>   
 — calculated by Hirai<sup>15)</sup>   
 ①Arsentiev et al., ②Kisuniko et al., ③Krieger, ④Kawai et al., ⑤Romanov, Kochegarov, ⑥Suzuki, Maekawa, ⑦Nakanishi et al.

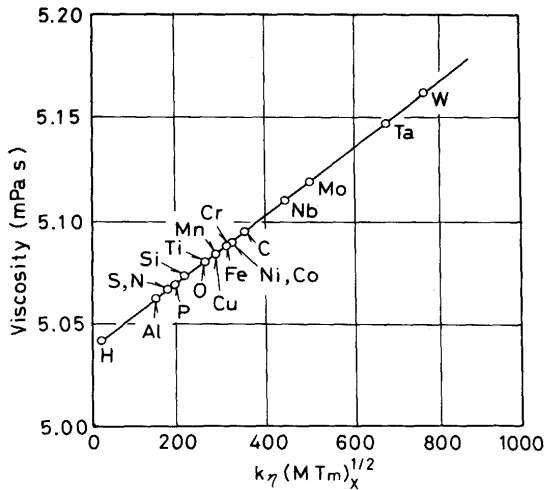


Fig. 6. Calculated values for viscosity of liquid Fe-1at% X alloys at 1873K.

差異を考慮すれば、筆者らの計算結果は従来の測定値とは矛盾しない。またFig. 6は鉄鋼製錬への応用の立場から溶鉄が各種元素を1at%含む場合の1873Kにおける粘度を推算したもので<sup>10)</sup>、この結果によると炭素は鉄の粘度を僅かに増大させ、珪素は逆に減少させることになる。

ところで1975年頃に筆者らによって始められた物性値の推算に関する研究は、それ以降、筆者のグループによる研究以外には報告されていないが、最近になって二、三の研究が報告されている<sup>15)16)</sup>。すなわち平居<sup>15)</sup>は、筆者らと同様の立場から粘度をAndrade型の式 $\eta = A \exp(B/RT)$ で表し、定数 $A, B$ をそれぞれ簡単な物理量によって記述し、この方法により、いくつかの二元系合金の粘度を推算した結果、それらは実測値とよく一致することを示すと同時に、この推算式が多成分系合金の粘度に対しても適用できると報告している。参考までに、彼の計算結果を前出のFig. 4およびFig. 5にあわせて示す。

一方Du Sichen<sup>16)</sup>は多成分系の金属およびイオン性融体の粘度をAndrade型の式

$\eta = A \exp(\Delta G^*/RT)$ ,  $\Delta G^*$ : 活性化自由エネルギーで表し、 $A$ を簡単な物理量でまた $\Delta G^*$ を温度および組成の関数として種々のモデルによって求める粘度推算法を示すと同時に、二元系ならびに多元系のいくつかの合金やスラグについて、測定値と彼らの計算値を比較し、彼らの結果が実験結果とよく一致すると報告している。

筆者らのものを含めて上記の推算式はいずれも半経験式であって、それぞれ特徴があり、ここでそれらの優劣を論ずることはできないが、いずれにしても最近になって、このような現象論的理論に基づく物性値の推算が注目されるようになったことは、製錬のような物性値を応用する立場からは大変喜ばしいことである。

#### 4.3 金属および合金液体における自己拡散係数および溶質拡散係数の推算

溶融金属やスラグ中の成分の拡散係数は、粘度や表面張

Table 2. Comparison of calculated and observed values of solute diffusivity in liquid iron at 1873K.

Solute	Calculated $\times 10^9 m^2 s^{-1}$	Observed $\times 10^9 m^2 s^{-1}$
C	4.8	4.0~20
Si	6.0	2.5~12
Mn	4.6	3.5~20
P	7.4	2.5
S	8.7	4.5~20
O	8.5	2.5~20
H	150	80~200
N	12	6~20
Ni	4.2	4.5~5.6
Co	4.2	3.5~5.0
Cr	4.3	3.0~5.0
Al	8.6	10
V	4.4	4.0~5.0
Mo	2.6	3.8~4.1

力などと同時に製錬プロセスを速度論的に考察するに際して最も重要な物性である。しかし粘度の場合と同様、溶鉄のような高温における融体成分の拡散係数の信頼性の高い測定値は少なく、またあったとしても、測定値には測定者によって大きな差異がある。このような場合、拡散係数を理論的立場から求めることができれば好都合である。

さて液体の自己拡散係数と粘度の間には、たとえばSutherland-Einsteinの理論<sup>17)</sup>によって示されるような密接な関係がある。このことは金属の粘度値が明らかであれば、その値から拡散係数の値を導出できる可能性があることを意味している。筆者らはこの点に着目して、模型理論により拡散係数に検討を加えるとともに、前節(4.1, 4.2)で述べた金属および合金液体の粘度の推算式を発展させ、金属および合金液体における自己拡散係数および溶質拡散係数を推算するための表式化を試みた<sup>12)</sup>。なおこれらの式ならびにその導出過程については紙面の都合上、省略するので、それらの詳細については原論文<sup>11)10)</sup>を参照されたい。

ところで、これまで実験的に求められてきた13種の金属(Li, Na, K, Cu, Zn, Ga, Rb, Ag, Cd, In, Sn, Hg, Pb)の自己拡散係数の値は、いずれも筆者らの方法で計算された値とよく一致しており<sup>11)12)</sup>、この事実からFeのような従来測定値のない金属の自己拡散係数を推算することが可能である。参考までにこの方法で鉄について1873Kにおける値を計算すると $4.8 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$ となる。一方、溶質拡散係数についても、多くの合金系について従来の測定値と筆者らの計算値はよく一致している<sup>11)12)</sup>。Table 2は鉄鋼製錬に関与する溶鉄中の各種溶質の拡散係数の1873Kにおける計算値を従来の測定値と比較して示したものであるが<sup>10)</sup>、計算値はいずれも測定値のばらつきの中にあり、測定値をよく再現している。以上のことから、このような手法による溶質拡散係数の推算は実用的に有効であるものと考えられる。

#### 4.4 融体の他の物性値の推算

上述の粘度、拡散係数と同様の手法により筆者らは金属やスラグ等の融体の密度、表面張力、音速、圧縮率、熱伝

導度、蒸気圧などを簡単な物理量によって表式化することを試みた。これらについては紙面の都合で省略するので、詳細については文献<sup>1)18)~21)</sup>を参照されたい。

## 5 酸化物融体のネットワーク・パラメータ

スラグ等の酸化物融体の物性、構造、反応性などについては物理化学的あるいは冶金学的重要性に鑑み古くから検討され、多くの知見が得られている。たとえば珪酸を含む酸性酸化物融体では、いわゆる珪酸イオンの網目(ネットワーク)構造の存在が明らかにされており、それらの物性や反応性の説明に定性的に用いられてきている。しかしながらこの網目構造に関する定量的な定義あるいは表現は現在のところ存在しない。

ところで網目構造のある融体では、それが流動単位(フロー・ユニット)として粘性に対する質量効果を与えるので、同一組成で網目構造のない仮想的な融体よりも高い粘度値を与えるはずである。一方液体の粘性は一般にその構造に対して敏感であるので、融体における網目構造の量的割合と融体の見掛け粘度の増加量との間には何らかの相関があることが考えられる。筆者らはこのような仮定のもとに、以下に示すような融体の網目構造を定量的に表すネットワーク・パラメータ $\Psi$ を定義した<sup>22)</sup>。

$$\Psi = \log\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right)^2 \approx \log\frac{M^*}{M} \dots\dots\dots (4)$$

ただし $\eta$ は網目構造のある融体の見掛けの粘度、 $\eta_0$ は網目構造のない仮想的な同一組成の融体の粘度、 $M$ および $M^*$ はそれぞれ網目構造のない仮想融体ならびに網目構造のある融体の流動単位の質量を表す。ここで $\eta_0$ は、純酸化物の場合前述の(3)式によって求めることができ、また多成分系の場合には、その粘度値とそれを構成する純酸化物の粘度値の間に加成性が成り立つという仮定のもとに、推算が可能である。したがって酸化物の粘度測定値 $\eta$ が明らかな場合には、(4)式の関係を用いて $\Psi$ を求めることができる。

そこで筆者らは、鉄鋼製錬において重要な役割を演ずるスラグ系の中で粘度値が報告されている二、三の系について(4)式を用いて $\Psi$ を求め、それらのスラグの格子エネルギー $\bar{E}_c$ 、光学的塩基度 $\Lambda$ 、サルファイド・キャパシティ $C_s$ と対比したところ、大変興味ある結果が得られた<sup>22)</sup>。すなわち $\Psi$ と $\bar{E}_c$ の間には、Fig. 7に示すように、スラグの種類にかかわらず一つの曲線で表される関係が存在し、また $\Psi$ と $\Lambda$ の間には、スラグの種類によって異なるがFig. 8に示すような相関があり、 $\Psi$ と $\log C_s$ の間にはFig. 9に示すように、CaO-MnO-SiO<sub>2</sub>系以外の系については直線関係が成立している。CaO-MnO-SiO<sub>2</sub>系に対しては別の直線関係が成り立っているが、その理由については今のところ明らかではない。いずれにしても $\Psi$ とスラグの脱硫能を示す $C_s$ との間にこのような相

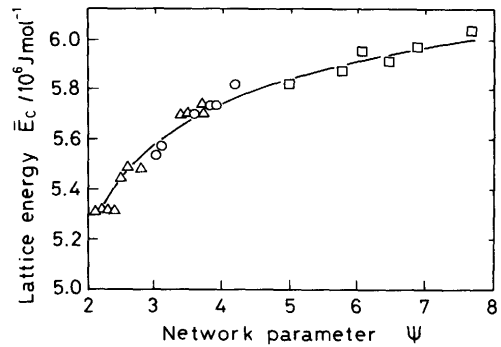


Fig. 7. Relationship between network parameter and lattice energy for molten slags at 1773K.   
○ CaO-SiO<sub>2</sub>, △ CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>, □ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-SiO<sub>2</sub>

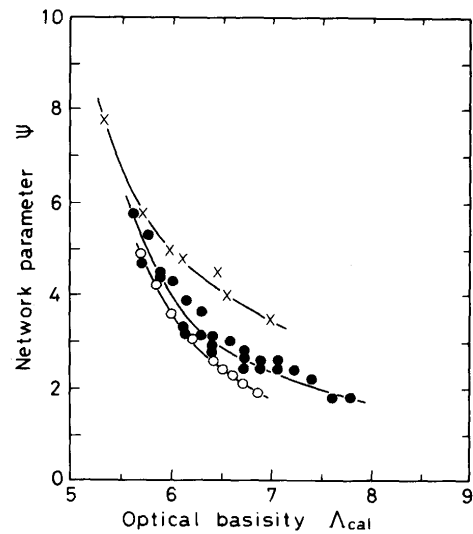


Fig. 8. Relationship between network parameter and optical basicity for molten slags at 1773K.   
○ CaO-SiO<sub>2</sub>, ● CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, × SiO<sub>2</sub>-BaO

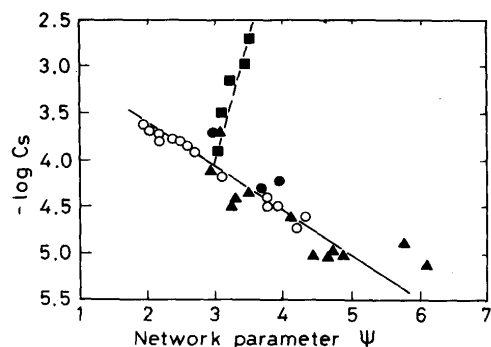


Fig. 9. Relationship between network parameter and sulphide capacity for molten slags at 1773K.   
○ CaO-SiO<sub>2</sub>, ● CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, ■ CaO-MnO-SiO<sub>2</sub>, ▲ CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO

関があることは、鉄鋼製錬におけるスラグの精錬能を示すパラメータである各種キャパシティが、スラグの構造と関係があることを示唆している。

## 6 粘度迅速測定用振動片粘度計の開発

細管法や回転振動法などにみられるように、従来の液体の粘度測定には時間の経過を要し、したがってこれらの方法で得られた粘度値は、その時間的経過における平均値であって、ある特定された時刻における瞬時的な値ではない。したがって、もし液体の粘度が瞬間的に得られるならば、粘度の連続測定も可能となり、また粘度計をセンサーとして応用できる可能性もあり、実用上きわめて便利である。筆者らは、このような特性を有する粘度計の開発を目的として、従来の振動片粘度計の特徴を活かし、それに改良を加え、瞬間的に液体の粘度を測定し得る装置の試作に成功した<sup>23)~25)</sup>。この粘度計の出現によりフラックスや連铸パウダーなど高温融体の粘度の迅速測定が可能となり、現在、鉄鋼製錬プロセスにおいても有効に利用されている<sup>26)</sup>。紙面の都合上これらの全てをここで紹介することはできないので、これらの詳細については、文献<sup>23)~25)</sup>を参照されたい。

## 7 高温X線回折による溶鉄と平衡する窒化物の構造の直接同定

溶鋼と平衡するスラグや鋼中介在物の組成や構造の同定は、従来凝固したスラグ試料あるいは鋼中より抽出した介在物の化学分析あるいはX線回折などの物理分析によってなされてきた。一方筆者らは液体金属の構造に関する情報を得るためにこれらの金属や合金のX線ならびに中性子線回折を実施してきたが、その製錬プロセス研究への応用として、製鋼温度で溶鋼と平衡するニオブ窒化物をX線回折によって直接同定することを試み、それに成功した<sup>27)28)</sup>。この方法には実験技術上の問題点も多く、多くのスラグや介在物系に対して広く適用できるような状態には至っていないが、それにもかかわらず筆者はこの手法が高温での冶金物質の構造解析や同定に将来役立つことを期待している。

## 8 おわりに

今回の筆者の受賞対象となった「鉄鋼製錬の熱力学と輸送現象および冶金融体の物性と構造に関する研究」の中から、本講では、主として筆者の研究室で鉄鋼製錬に関連して物性物理学的立場から実施されてきた研究成果のいくつかを紹介した。この分野の研究者や技術者のご参考になれば幸いである。従来高温冶金プロセスに関する研究手段として主流であった熱力学ならびに速度論をベースとする反応物理化学あるいは反応工学的立場からの研究が鉄鋼製錬の学術、技術の進歩に大きく貢献してきたのに比べると、

物性物理学的立場からの成果は相対的に少なく、この分野の研究の更なる発展が望まれる。

本講を閉じるにあたり、今日まで筆者をご指導いただいた恩師ならびに学界の諸先輩の方々、この分野を含めて研究全般にわたり筆者の研究室においてご協力いただいた多くの教官、学生、ならびに国内外の共同研究者の方々、ならびに筆者らの研究に対しご支援いただいた産業界の関係者の各位に対し心からお礼を申し上げる。

### 文 献

- 1) T.Iida and R.I.L.Guthrie: The Physical Properties of Liquid Metals (1988), Oxford Science Publications
- 2) 森田善一郎, 飯田孝道, 笠間昭夫: 日本金属学会会報, 15 (1976), p.743
- 3) たとえば, M.Born and H.S.Green: Proc. Royal Soc., A-190 (1947), p.455
- 4) 森田善一郎, 荻野喜清, 射場 毅, 前花忠夫, 足立 彰: 鉄と鋼, 56 (1970), p.1613
- 5) 荻野喜清, 森田善一郎, 前花忠夫, 横谷勝弘, 足立 彰: 鉄と鋼, 56 (1970), p.1633
- 6) A.Knappwost: Z.Metallkunde, 39 (1948), p.314
- 7) 飯田孝道, 佐藤明夫, 石裏真治, 石黒 進, 森田善一郎: 日本金属学会誌, 44 (1980), p.443
- 8) 飯田孝道, 熊田登志也, 鷲尾 勝, 森田善一郎: 日本金属学会誌, 44 (1980), p.1392
- 9) Z.Morita and T.Iida: Proc. First Sino-Japanese Symp. on Iron and Steel, (1981), p.103
- 10) T.Iida and Z.Morita: Proc. Third Intern. Iron and Steel Congress, (1978), p.104
- 11) T.Iida, Z.Morita and R.I.L.Guthrie: Can. Met. Quart., 27 (1988), p.1
- 12) E.N.Andrade: Phil. Mag., 17 (1934), p.497, 692
- 13) 飯田孝道, 上田 満, 森田善一郎: 鉄と鋼, 62 (1976), p.1169
- 14) Z.Morita, T.Iida and M.Ueda: Proc. Third Intern. Conf. on Liquid Metals, (1976), p.600
- 15) 平居正純: 鉄と鋼, 78 (1992), p.399
- 16) Du Sichen, J.Bygden and S.Seetharaman: Metal. and Mater. Trans. B, 25 B-No.4 (1994), p.519
- 17) W.Sutherland: Phil. Mag., 9 (1905), p.781
- 18) 森田善一郎, 飯田孝道: 学振140委員会報告, (1980), No.105
- 19) T.Iida, T.Mizobuchi and Z.Morita: Proc. Joint Symp. on Molten Salts (1987), p.146
- 20) T.Iida, Z.Morita, K.C.Mills and T.Mizobuchi: Proc. Third Intern. Conf. on Molten Slags and Fluxes, (1988), p.226
- 21) T.Iida, Y.Kita and Z.Morita: ISIJ International, 33 (1993), p.75
- 22) T.Iida, Z.Morita, K.C.Mills and T.Mizobuchi: Proc. Third Intern. Conf. on Molten Slags and Fluxes, (1988), p.199
- 23) 森田善一郎, 飯田孝道, 川本正幸, 毛利 晃: 鉄と鋼, 70 (1984), p.1242
- 24) 飯田孝道, 川本正幸, 藤本慎司, 森田善一郎: 鉄と鋼, 71 (1985), p.1490
- 25) 飯田孝道, 川本正幸, 森田善一郎: 日本金属学会会報, 24 (1985), p.410
- 26) たとえば田村 明, 安元邦夫, 郡司好喜, 森田善一郎, 飯田孝道, 川本正幸: 鉄と鋼, 71 (1985), S1005
- 27) Z.Morita, Y.Kita, W.G.Jung and T.Yanai: Trans. JIM, 27 (1986), p.167
- 28) W.G.Jung, Y.Kita, T.Tanaka and Z.Morita: Trans. JIM, 29 (1988), p.71