The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	溶融鉄合金の表面張力と粘度
Author(s)	田中, 敏宏; 原, 茂太
Citation	日本金属学会会報. 1997, 36(1), p. 47-54
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/26060
rights	Copyright © 社団法人 日本金属学会
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

集録

溶融鉄合金の表面張力と粘度

田中敏宏* 原 茂太**

1. はじめに

各種金属材料素材プロセスにおいて，新たにプロセス設計を行ったり，既存のプロセスをより効率化するための解析を行う際，信頼できるデータの確保が重要となるが，必要となるデータを即座に取り揃えることは困難な場合が多い．そのため，近年，データの蓄積，推奨値の評価ならびにその利用方法の検討が積極的に行われ，物性値データベース構築の要求が高まり，その具体的作業も行われている(1)-(3)．特に，熱力学データベースに関しては，いくつかの問題が残されているものの，その内容は実用的な利用が可能な水準に達しつつある(1)-(8)．各種物性値のデータ集については，熱力学データの場合には，例えば文献(9)～(11)などの優れた書籍が発行されているが，ここで述べているデータベースとは「情報を計算機可読の形に整理・統合した情報ファイルの集合体」(1)という定義に基づくデータ集を対象にさせていただくことにする．

素材プロセスの解析のためには，熱力学量のみならず，表面張力や粘度などの他の物性値に関してもデータベースの構築が望まれている．しかしながら，特に高温プロセスに関係する溶鉄，溶融スラグなどについては物性値の収集が進みつつあるが，現時点ではデータ収集作業にとどまり，その推奨値の評価にまでは必ずしも至っていないのが現状である．また，現状のあるいは近い将来に構築されるであろう物性値データベースは，系統的な測定を考慮せずに蓄積されてきた過去のデータを収集，整理，評価したものであるため，物質系によるデータの分布や精度に偏りがある．そのため，ある種の物質系は報告例が多く，データの信頼性も高いが，別の物質系ではわずかひとつのデータでも推奨値になる可能性がある．また，データ数が多くても，その値のばらつきが大きいため，確定的な値を定めるのが困難な物質系も存在する．したがって，今後データベースを構築する上で，あるいはデータベースを実際に利用する立場からも，物性値の蓄積状況を把握しておくことはきわめて重要であると考えられる．

本稿では，データのばらつきが特に大きいことが以前から指摘されている溶融鉄合金の表面張力と粘度について，最近の報告値の文献情報とその内容の概観ならびに問題点を特にデータベース構築を考えた立場からの一考察として述べたいと思う．また，著者らは，熱力学データベースを利用して溶融合金，混合溶融塩などの物性値の推算，評価を行っており(1)(2)(12)(13)，推算モデル構築の観点からの物性値の収集ならびにその評価に関する考察も付け加えることにした．

2. 表面張力

(1) 溶融純鉄の表面張力

図1に溶融純鉄の表面張力の報告例を示す．同図はKeeneによる溶融2元系鉄合金の表面張力のデータ集(14)から引用したものである．各データの詳細については，Keeneの文献(14)をご参照いただきたい．また，図1には，**表1**に示す最近の溶融純鉄の表面張力の報告値(15)-(19)も追加して示した．表1のデータはNogiら(15)の報告を除いていずれも後述の溶融2元系鉄合金に関する報告から引用したものであるが，ここでは，溶融純鉄の表面張力の温度依存性を明確に式で述べた報告だけを取り上げて同表に示した．溶融純金属の表面張力については，1993年にKeeneによるデータ集"Review of data for the surface tension of pure metals"(20)が報告されており，平均値としての推奨値も示されている．また，森田らの解説(21)，Iida & Guthrieの著書"The Physical Properties of Liquid Metals"(22)にも詳細なデータとその解説が述べられている．溶融純鉄の表面張力は図

* 大阪大学助教授；工学部材料開発工学科(〒565 吹田市山田丘2-1)
** 大阪大学教授：工学部材料開発工学科
Surface Tension and Viscosity of Liquid Iron Alloys; Toshihiro Tanaka, Shigeta Hara (Department of Materials Science and Processing, Faculty of Engineering, Osaka University, Suita)
Keywords: *surface tension, viscosity, liquid iron, iron alloys databases*
1996年8月20日受理

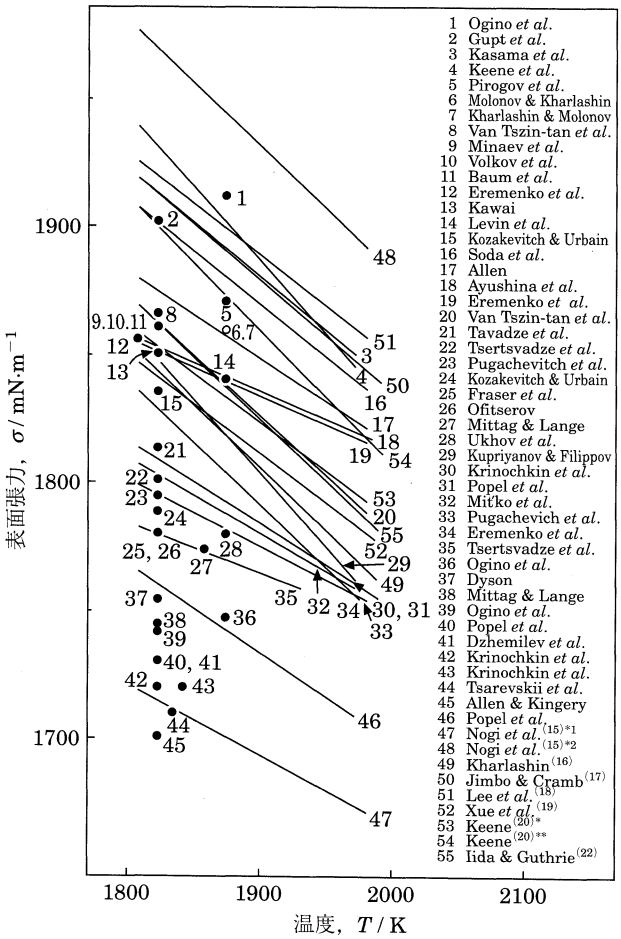

図1　溶融純鉄の表面張力.
図中1から46の報告値の詳細については文献(14)参照.
*1：静滴法，*2：レビテーション利用による振動法.
*：文献(20)において溶融純鉄の表面張力の全報告値の平均をとった値.
**：文献(20)において溶融純鉄の表面張力の全報告値の内，表面張力の値が高い11個の報告値の平均をとった値.

1に示すように，報告値のばらつきが大きく，主として，高温の実験であることに加え，表面張力の場合には試料中のわずかな酸素，硫黄の存在や，基板，るつぼなどの接触物質の状態が物性値決定上大きな影響をもっていることが，データのばらつきの原因であると考えられる．なお，図1，表1には，Keeneによる集録[20]，Iida & Guthrieの著書[22]に記載されている溶融純鉄の表面張力の値も合わせて示した．

(2) 溶融2元系鉄合金の表面張力

溶融2元系鉄合金の表面張力については1987年にKeeneによる詳細なデータ集"Review of data for the surface tension of iron and its binary alloys"[14]が報告されている．また，日本鉄鋼協会から出版されている"Handbook of Physico-chemical Properties at High Temperatures"[23]にもいくつかの系について結果がまとめられている．ここでは

表1　溶融純鉄の表面張力に関する報告例.

表面張力 σ/mN·m^{-1}	文献番号
1720-0.29(T-Tm)	(15)*1
1978-0.49(T-Tm)	(15)*2
1850-0.49(T-1812)	(16)*1
1918-0.43(T-1811)	(17)*1
1925-0.396(T-Tm)	(18)*2
1848-0.4(T-1811)	(19)*1
1862-0.39(T-1803) *(全報告値の平均)	Keene(20)*
1909-0.52(T-1803) **(表面張力の値が高い11個の報告値の平均)	Keene(20)**
1872-0.49(T-1808)	Iida & Guthrie(22)

注）T/K，またTmは純鉄の融点(文献(22)ではTm=1808.15 K)
実験方法 *1：静滴法，*2：レビテーション利用による振動法

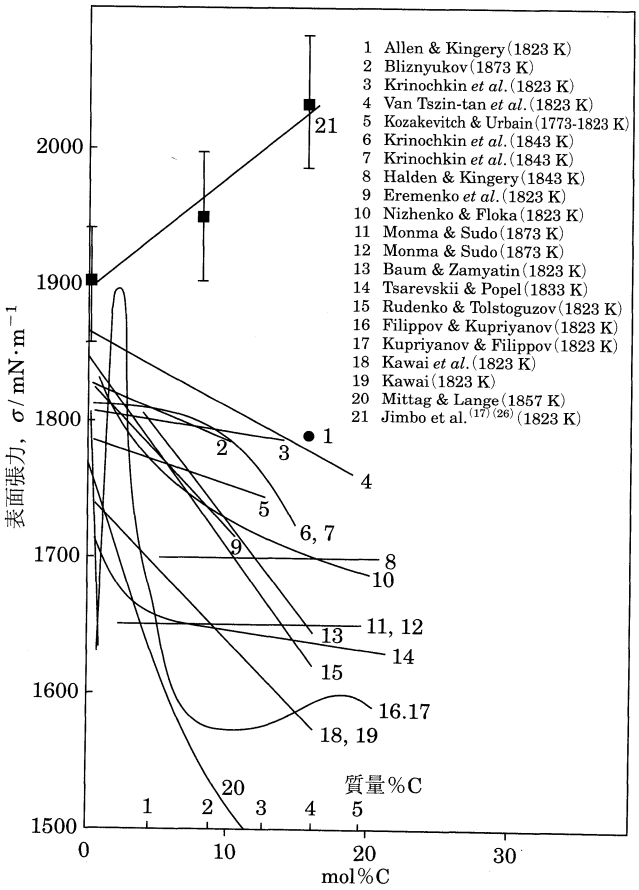

図2　溶融Fe-C 2元系合金の表面張力.
図中1から20の報告値の詳細については文献(14)参照.

Keeneのデータ集[14]との重複を避けるため，**表2**に同データ集[14]に収められている2元系合金の種類とそこでまとめられている文献の数(Keeneの文献番号(14)に続く[　]内の数値)をまとめて示した．また，同表にはKeeneのデータ集に収録されていない主として1987年以降に報告された溶融2元系鉄合金の表面張力に関する文献も示した[16]-[19],[24]-[49]．さらに，同表には，Keeneのデータ集[14]にまとめられている表面張力の濃度係数も併せて示した．

表2　溶融鉄基2元系合金の表面張力に関する報告例.

合金系 (Fe-X)	文献番号	$\frac{d\sigma}{d[原子\%X]}$ at [原子%X]→0	左記の値の適用濃度範囲 [原子%X]
Fe-Al	(14)-[3]	−18	0〜10
Fe-As	(14)-[3] (16)*1, (24)*3	−540	0〜1
Fe-Au	(25)*4		
Fe-B	(14)-[3]	−25	0〜10
Fe-C	(14)-[28] (17)*1, (26)*1	−4	0〜10
Fe-Ce	(14)-[2]	0 or −1750	0〜0.04
Fe-Co	(14)-[5] (27)*1	−2	0〜10
Fe-Cr	(14)-[19] (28)*2, (29)*1	−7	0〜10
Fe-Cu	(14)-[3] (28)*2, (30)*1, (31)	−30	0〜10
Fe-Ga	(14)-[1]	−30	0〜10
Fe-Ge	(14)-[3]	−55	0〜5
Fe-La	(14)-[1]	0 or −1500	0〜0.4
Fe-Mn	(14)-[12] (32)*1, (33)*1	−50	0〜5
Fe-Mo	(14)-[3]	+5	0〜10
Fe-N	(14)-[6]	−1400	0〜0.1
Fe-Ni	(14)-[12] (18)*2, (26)*1, (27)*1, (34)*2, (35)*2, (36)*2	−2	0〜20
Fe-O	(14)-[22] (17)*1, (37)*1, (38)*1, (39)*1, (40)*1, (41)*1, (42)*1, (43)	−7490	0〜0.03
Fe-P	(14)-[8] (19)*1, (44)*1	−14	0〜1
Fe-Pd	(14)-[4]	−17	0〜5
Fe-Pt	(14)-[3]	−5	0〜10
Fe-Rh	(14)-[1]	0	0〜20
Fe-S	(14)-[15] (31), (45)*1, (46)*1, (47)*4	−6310	0〜0.05
Fe-Sb	(14)-[1]	−2200	0〜0.1
Fe-Se	(14)-[7]	−35000	0〜0.01
Fe-Si	(14)-[23] (48)*1	−13	0〜5
Fe-Sn	(14)-[4] (28)*2, (49)*4	−1630	0〜0.15
Fe-Te	(14)-[3]	−190000	0〜0.0025
Fe-Ti	(14)-[3]	0 or −230	0〜0.25
Fe-V	(14)-[2]	+4	0〜5
Fe-W	(14)-[3]	0	0〜5
Fe-Y	(14)-[2]	−2200 or −6700	0〜0.03
Fe-Zr	(14)-[2]	−1000	0〜0.1

実験方法 *1：静滴法，*2：レビテーション利用による振動法，*3：最大泡圧法，*4：計算値

表2に示した2元系合金の中で，報告数が多いが，データのばらつきの大きい系として，Fe-C系，Fe-Cr系，Fe-O系が挙げられる．これらの系の報告値をそれぞれ**図2**(14)(17)(26)，**図3**(14)(28)(29)，**図4**(14)(17)(37)-(42)に示す．Fe-C系については，炭素濃度の増加とともに，表面張力の値が増加するもの，減少するもの，またほぼ一定とみなしてよいとするデータなど様々であり，鉄合金の中で最も基本かつ重要と考えられる合金系であるにもかかわらず，いまだ明確な結論は得られていない．

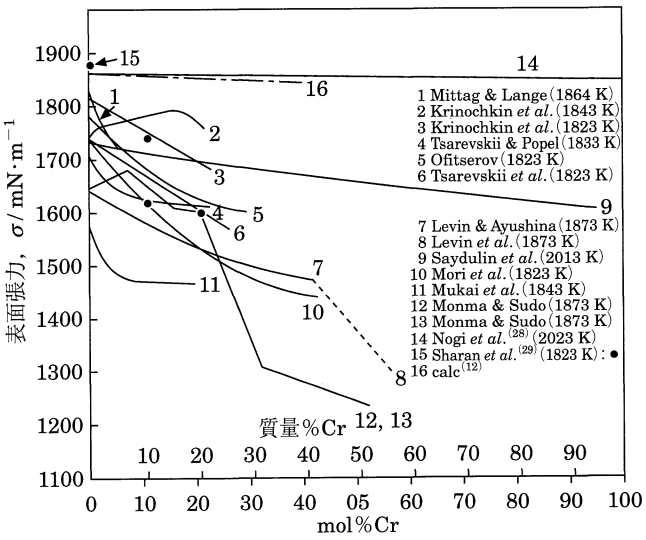

図3　溶融Fe-Cr 2元系合金の表面張力.
図中1から13の報告値の詳細については文献(14)参照.

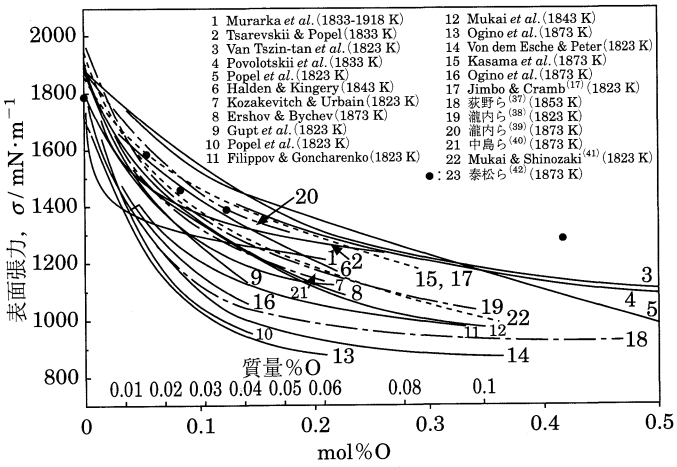

図4　溶融Fe-O 2元系合金の表面張力.
図中1から16の報告値の詳細については文献(14)参照.

さらに，鉄合金の重要な系のひとつであるFe-Cr系についても図3に示すように，Cr濃度の増加とともに表面張力が急激に下がる結果を示すものや濃度依存性が小さい結果を示す報告値に分かれることが認められる．著者らは，2.(4)で述べるように，平衡状態図を計算するために構築された熱力学データベースを利用して溶融合金の表面張力の評価を行っているが(1)(2)(12)(13)，その際，合金構成成分の純粋状態の表面張力の値が必要となる．しかしながら，Crは高融点であるため，溶融鉄合金の表面張力が測定されている温度(1873 K近傍)での値が明確でないため，溶融Fe-Cr系の表面張力については，計算による評価の立場からも確定値を決定し難い状況にある(12)．したがって，同系は今後，積極的に検討されるべき合金系のひとつであると考えられる．なお，図3には，Iida & Guthrieの著書(22)の純Crのデータを用いた場合の著者らの計算結果(12)も併せて示してある．また，この

表3　溶融 Fe-C 基合金の表面張力の報告例.

合　金　系	文　献　番　号
Fe-C-Cr	(51)*4, (52)*1
Fe-C-Mn	(53), (54)
Fe-C-Ni	(55)*1
Fe-C-P	(53)
Fe-C-S	(26)*1, (53), (56)*1
Fe-C-Se	(57)
Fe-C-Si	(58)*1, (59)
Fe-C-Ti	(60)*1
Fe-C-Y	(61)*1
Fe-C-Si-Al, Ti, N	(62)*3
Fe-C-Si-Mn	(63)

実験方法 *1：静滴法，*2：レビテーション利用による振動法，*3：最大泡圧法，*4：計算値

計算では熱力学データは一連の鉄合金の平衡状態図を計算した Kaufman による値[50]を利用した．計算の詳細は文献(12), (13)をご参照いただきたい．

(3) 3元系以上の溶融鉄合金の表面張力

Fe-C 基合金の表面張力の報告例[26][51]-[63]を**表3**に，また，その他の多成分系溶融鉄合金に対する報告例[24][29][31][64]-[82]を**表4**に示す．溶融 Fe-C, Fe-O 系多成分合金の表面張力については必ずしも報告数は多くなく，今後系統的なデータの蓄積が必要であると考えられる．特に，純鉄よりも酸素(または炭素)との親和力が大きな溶質元素と小さな溶質元素を第3元素としてそれぞれ添加した場合の表面張力の値の変化に及ぼす酸素(または炭素)の影響を整理することができれば，これらの合金系に対してもある程度の表面張力の濃度依存性の系統的な予測が可能となるであろう．また，第3成分の濃度をゼロに外挿することによって，データにばらつきのある Fe-C, Fe-O 各2元系の表面張力の値に関しても濃度依存性を明確にする知見が得られることが期待できる．なお，表1～4に示した溶融鉄合金の表面張力の測定方法として，最近レビテーションによる振動法を用いた実験結果が多数報告されていることがわかる．この方法は，液滴を浮遊させ，振動を与えて球体から楕円体に変化する様子から，表面張力と粘度を測定する手法で，容器との接触の問題を回避でき，また，微小重力下での実験との対応も検討できるため，近年盛んに行われている．この方法に関する詳細は，文献(83)-(88)を参照されたい．

(4) 溶融鉄合金の表面張力の推算モデル

物性値データベース構築の観点からは，(1)これまでに報告されているデータを詳細に収集，整理する，(2)データの偏り，信頼性の評価を行い，その結果に基づいて系統的な測定を進める，(3)濃度依存性，温度依存性に関して，経験的な回帰式の作成とともに，成分間の相互作用を考慮した物理モデルの作成を進める，ことが重要である．熱力学データに関しては，これまでに状態図の計算を主目的として，上記(1)(2)(3)のプロセスに基づいてデータベースが構築されてきた．溶融合金の表面張力については，理想溶体に近い系でも濃度に対して加成性がなりたたない場合が多く，3元系以上の系についてもデータの蓄積を増やして，合金成分間の相互作用の影響と表面張力の値の関係を整理する必要がある．そこで，溶融合金の表面張力の濃度依存性の整理ならびに予測を目的として種々のモデルが提案されてきている．**表5**には溶融合金

表4　その他の多成分系溶融鉄合金の表面張力の報告例.

合　金　系	文　献　番　号
Fe-As-Sn, Si, Mn, Cr	(24)
Fe-Co-O	(64)*1
Fe-Cr-N	(29)*1
Fe-Cr-O	(65)
Fe-Cu-S	(31)
Fe-Ni-S	(66)*2
Fe-O-S	(67), (68)*1, (69)*1, (70)*4
Fe-P-O	(71)
Fe-Cr-Mn	(72)*1
Fe-Cr-Ni	(73)*1
Fe-Cr-Ni-S	(74)*4
ステンレス鋼＋S	(75)*2
ステンレス鋼＋S, Si	(76)*2
ステンレス鋼	(77)*2
Fe-Mn-Si	(78)*1
Fe-Ni-B	(79), (80)
Fe-Se-Mn	(57)
Fe-Si-B	(79)*3, (80), (81)*1, (82)
Fe-Si-B-Te	(79)*3

実験方法 *1：静滴法，*2：レビテーション利用による振動法，*3：最大泡圧法，*4：計算値

表5　溶融鉄合金の表面張力の推算に関する参考文献.

門間，須藤[89][90]	バルク相と平衡する“表面相”の過剰自由エネルギーを合金とイオン性融体に対して導出．ただし，正則溶体近似
Bernard, Lupis[91]	Fe-O 系の表面張力に対し表面層に酸化物を仮定した統計力学モデル
Joud ら[92][93]	Surrounded Atoms Model を適用した統計力学モデル
Belton[94]	Langmuir の等温吸着式と Gibbs の吸着式より溶融金属の表面張力の酸素濃度，硫黄濃度依存性を再現する式を提示
Utigard, Toguri[95]	理想溶体近似で表面張力を推算
Speiser ら[96][97]	Butler の式[98]を利用して，バルク相と平衡する“表面相”の過剰自由エネルギーについてはバルク相と同じ温度・濃度関数を利用するという仮定を導入．
Sahoo ら[99]	Belton の手法[94]を拡張して，Fe-O, Fe-S. Fe-Se 系のパラメータの温度依存性も考慮
Hajra ら[100]	相互作用母係数を用いた溶融合金の表面張力の推算式
Lee ら[101]	Speiser らのモデル[96][97]を3元系合金に拡張
Hajra ら[47]	Fe-S 系を Fe-FeS 系として扱い，上記文献(97)の手法で計算
Tanaka, Iida[12]	Butler の式[98]と Speiser ら[96][97]の手法を用いて一連の溶融鉄合金の表面張力を Kaufman による熱力学データベースを利用して計算
Tanaka ら[13]	Butler の式[98]と Speiser ら[96][97]および門間＆須藤[89][90]の手法を組合せて，熱力学データベースを利用して溶融合金，溶融塩，溶融酸化物の表面張力を計算
Small ら[70]	Gibbs の吸着式を利用して溶融 Fe-O-S 系の表面張力を推算
Hajra, Divakar[102]	Fe-O-S 系に対する Butler の式[98]を用いた推算方法の提案
McNallan, Debray[74]	Speiser らの手法[96][97]を溶融 Fe-Cr-Ni-S 系に適用

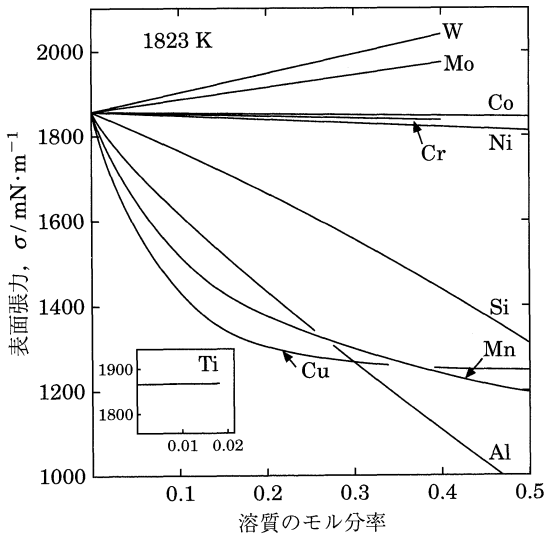

図5　溶融鉄基2元系合金の表面張力の計算結果.

の表面張力の推算モデルの報告例[12][13][47][70][74],[89]-[102]をまとめた．これらの中で，特にSpeiserら[96][97]のモデルは，溶融合金の活量を利用して溶融合金の表面張力を計算でき，さらに実験値の再現性も優れている．著者らは，状態図計算用の熱力学データベースを利用して，表面張力の計算システムの構築を進めているが[1][2][12][13]，その際，Speiserら[96][97]のモデルの考え方を用いている．しかしながら，彼らのモデルは，溶融塩や溶融酸化物の表面張力の計算には直接適用が困難で，また，酸素の影響に関しても直接的な取り扱いができないため，モデルにいくつかの改良を加え，熱力学データベースとの連結作業を進めている．現時点では，Butlerの式[98]にSpeiserらの取扱い[96][97]，および門間&須藤[89][90]によるイオン性融体への拡張方法を組合せた手法を利用して，熱力学データベースと連結させて溶融鉄合金，低融点合金，混合溶融塩などの表面張力の計算を行っている[1][2][12][13]．**図5**は溶融鉄基2元系合金のいくつかの系についての表面張力の計算結果である．この計算では，熱力学データは前述のKaufmanによる値[50]を利用した．また，純成分の表面張力のデータはIida & Guthrieの著書[22]に掲載された値を用いた．計算方法の詳細ならびに実験値との比較については文献(12)(13)をご参照いただきたい．この種の計算方法では純成分の表面張力のデータを必要とするため，純成分の表面張力のデータの推奨値の確定作業も併せて進める必要がある．このため溶融純金属の表面張力の推算式についても検討が必要であるが，これに関してはIida & Guthrieの著書[22]に詳しく述べられている．また，最近，Chhaba[103]が相応状態の理論を用いたモデルも報告している．

3. 粘　　度

(1) 溶融純鉄の粘度

溶融純鉄の粘度の報告例を**図6**に示す．同図はIida & Guthrieの著書[22]ならびに飯田 & 森田の解説[104]から引用したものである．各データの詳細に関しては，これらの文献[22][104]をご参照いただきたい．同図より，溶融純鉄の粘度についても報告例は多いが，そのばらつきも大きいことがわかる．なお，図6には，Handbook of Physico-chemical Properties at High Temperatures[23]に記載されている下記の溶融純鉄の表面張力の値も合わせて示した．

$$\mu/\mathrm{mPas}=0.3147\exp(46480/RT) \qquad (1)$$

また，Chhabra & Sheth[105]は各種溶融純金属の粘度を温度係数も含めて整理しているが，溶融純鉄に対しては次式を提示している．図6には，Chhabra & Sheth[105]の下記のデータも示した．

$$\mu/\mathrm{mPas}=0.4847\exp(35010/RT) \qquad (2)$$

(2) 溶融鉄合金の粘度

溶融2元系鉄合金については，日本鉄鋼協会発行の「溶鉄・溶滓の物性値便覧」[106]やHandbook of Physico-chemical Properties at High Temperatures[23]にいくつかの溶融鉄合金に対してデータが収録されているが，これらの中で扱われたデータも含めて，**表6**に報告例をまとめた[23][106]-[139]．**図7**に上記文献(23)，(106)に収められていないFe-Ti, Fe-Sc系に対する最近の報告例[136]を示す．また，3元系以上の溶融鉄合金の粘度については，**表7**に報告例[23][106][110][115][120][133][140]-[147]をまとめた．同表より，最近の傾向として，アモルファス状態の鉄合金の粘弾性挙動との関連から，Fe-B系溶融鉄合金の粘度に関心が集まってい

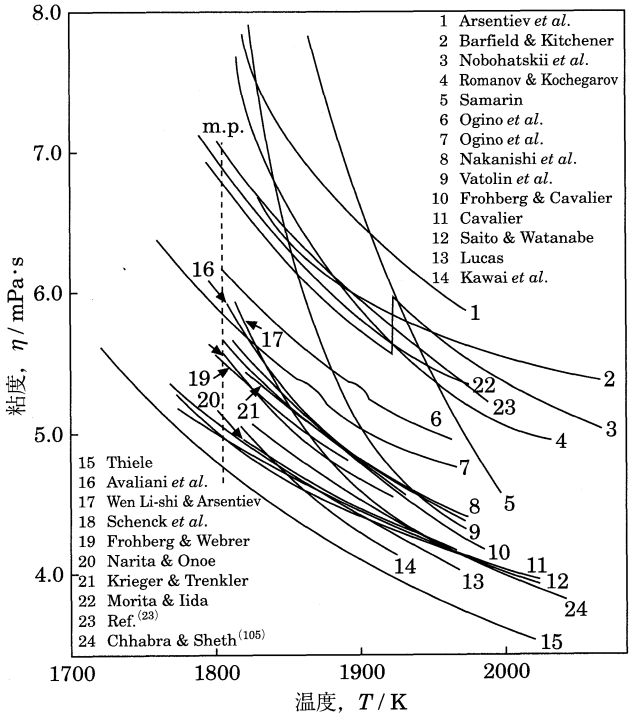

図6　溶融純鉄の粘度.
図中1から22の報告値の詳細については文献(22)，(104)参照.

表6　溶融鉄基2元系合金の粘度に関する報告例.

合金系	文　献　番　号
Fe-Al	(106), (107), (108)
Fe-As	(23), (109)
Fe-B	(110)
Fe-C	(23), (106), (109), (110), (111), (112), (113), (114), (115), (116), (117), (118), (119), (120), (121)
Fe-Ce	(106), (122)
Fe-Co	(23), (106), (123), (124), (125)
Fe-Cr	(23), (106), (109), (116), (124), (126), (127), (128)
Fe-Ge	(23), (129)
Fe-Mn	(23), (106), (109), (127), (128)
Fe-Mo	(23), (109), (124)
Fe-Nb	(23), (124)
Fe-Ni	(23), (106), (109), (124), (128), (130), (131), (132)
Fe-O	(106), (113), (133)
Fe-P	(106), (120), (127), (134), (135)
Fe-Pd	(23), (109)
Fe-S	(106), (133), (135)
Fe-Sc	(136)
Fe-Si	(23), (106), (137), (138), (139)
Fe-Ti	(136)
Fe-V	(23), (106), (124), (127), (136)
Fe-W	(23), (109), (124)

表7　その他の多成分系溶融鉄合金の粘度の報告例.

合　金　系	文　献　番　号
Fe-C-Cr	(106), (133), (140)
Fe-C-Mn	(106), (115)
Fe-C-O	(23), (141)
Fe-C-P	(110)
Fe-P-Ce	(120)
Fe-S-P-O	(23), (142)
Fe-C-P-S-O	(23), (143)
Fe-B-Si	(144)
Fe-B-Si-Cr	(145)
Fe-Ni-P-B	(146), (147)

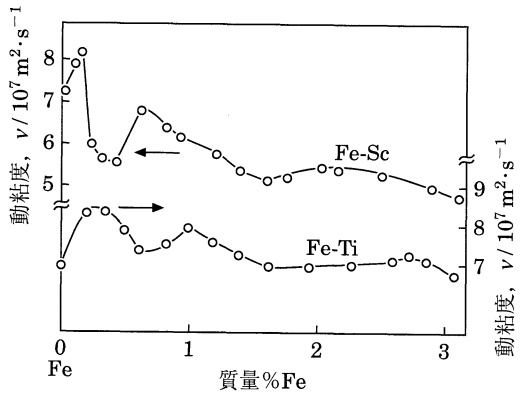

図7　溶融 Fe-Sc, Fe-Ti 2元系合金の粘度[136].

ることが伺える．この点については，NATO-Advanced Research Workshop on Undercooled Metallic Melts: Properties, Solidification and Metastable Phases (June 6-12, 1993, Ciocco, Italy)というシンポジウムが行われ，その詳細は文献(148)に粘度以外の各種物性値に関する報告とともに収録されている．

表8　溶融鉄合金の粘度の推算に関する参考文献.

飯田ら[149]	2元系合金の粘度を構成成分のイオン半径，原子質量，混合熱を利用して評価
Ya ら[150]	合金成分の濃度の一次式で整理した実験式を提示
Nishi & Yoshihiro[151]	溶融 Fe-C-B-P 系合金の粘度の推算
Kucharski[152]	原子が移動する際の活性化状態を考慮したモデル
Battezzati, Greer[153]	Andrade の式[154]に基づいて，液相線温度をパラメータとして導入したモデル．主として共晶系，化合物形成系合金が対象
Chhabra[155]	自由体積をパラメータとして Hildebrand の式[156]を利用
平居[157]	Andrade の式[154]に基づいて，液相線温度をパラメータとして導入したモデル．
Stremousov[128]	Fe-Ni, Fe-Mn, Fe-Cr 系の粘度を自由体積理論で計算
Seetheramann, Sichen[158]	Arrehnius の式における活性化エネルギー項に合金の過剰自由エネルギー項を考慮したモデル

(3)　溶融鉄合金の粘度の推算式

溶融合金の粘度についても，推算式の提出がいくつか成されており，それらの報告例[128][149]-[158]を**表8**にまとめた．溶融合金の粘度の推算式については，各モデルとも一部の合金系に対してはよく実験値を再現するが，広い範囲の合金系に対して適用可能なモデルは現在のところないと言ってよい．また，3元系以上の合金系への拡張についても，系統的な測定例が少ないため，モデルの妥当性の確認作業は困難な状況にある．

4.　お　わ　り　に

本稿では，溶融鉄合金の表面張力と粘度について，主として文献情報を中心に報告例の収録を行い，特にデータのばらつきが大きく，今後さらなるデータの蓄積を必要とする合金系について考察を加えた．材料物理化学の一分野として，熱力学量についてはデータベースの構築が進んでおり，表面張力や粘度などの融体物性値に関しても，データベース化の進むことが望まれている．その際，実験値の蓄積のみならず，理論的取扱いによるデータの評価や，物理的意味を明確にした推算式の構築も併せて必要であると考えられるため，本稿では上記物性値に関する推算モデルに関しても報告例の収録を行った．

データベースに関しては情報処理分野の華やかさに目を奪われがちであるが，地味な作業である物性値の測定，蓄積がデータベースの根幹であるという認識が忘れられないよう注意すべきである．現状の物性値の蓄積状況を認識し，系統的なデータの蓄積，評価の必要性に対する理解が進み，それに対する関心が高まることを望んでいる．その際，本稿が議論の叩き台となり，また具体的作業の一助となれば幸いである．

最後になりましたが貴重なデータをご提供いただきました東海大学教授 神保 至先生に感謝申し上げます．

文　献

(1) 田中敏宏，飯田孝道：日本金属学会会報，**32**(1993), 535.
(2) 田中敏宏，原　茂太：素材プロセス研究：希少金属素材の再資源化，アグネ，(1996), 147.
(3) H. A. Friedrichs and L. W. Ronkow: Steel Research, **66**(1995), 110.
(4) C. W. Bale and G. A. Iron: Proc. 2nd Intern. Symp. on Computer Software in Chemical and Extractive Metallurgy, Quebec, (1993 August).
(5) 日本金属学会シンポジウム予稿集「材料化学におけるデータベース利用の現状と問題点」，(1993).
(6) 「新熱測定の進歩」日本熱測定学会編集，(1990).
(7) 日本金属学会セミナーテキスト「材料開発・設計における状態図の基礎と応用」，(1994).
(8) C. W. Bale and G. Eriksson: Can. Metall. Quart., **29**(1990), 105.
(9) R. Hultgren, P. D. Desai, D. T. Hawkins, M. Gleiser and K. K. Kelley: *Selected Values of the Thermodynamic Properties of Binary Alloys*, ASM, Metals Park, Ohio, (1973).
(10) D. R. Stull and H. Prophet: *JANAF Thermochemical Tables*, 2nd ed. NSRDS-NBS-37 (1971); M. W. Chase *et al*: J. Chem. Ref. Data 3 (1974), 311; **4**(1975), 1; **7** (1978), 793; **11**(1982), 695.
(11) I. Barin: *Thermochemical Data of Pure Substances*, Part I & II, VCH Verlag, (1989).
(12) T. Tanaka and T. Iida: Steel Res., **65**(1994), 21.
(13) T. Tanaka, K. Hack, T. Iida and S. Hara: Z. Metallkunde, **87**(1996), 380.
(14) B. J. Keene: Intern. Mater. Rev., **33**(1988), 1.
(15) K. Nogi, K. Ogino, A. McLean and W. A. Miller: Metall. Trans. B, **17B**(1986), 163.
(16) P. S. Kharlashin: Izv. VUZ Chernaya Metall., No. 7, (1991), 1.
(17) I. Jimbo and A. Cramb: Intern. ISIJ, **32**(1992), 26.
(18) H-K. Lee, M. G. Frohberg and J. P. Hajra: Steel Research, **64**(1993), 191.
(19) X. M. Xue, H. G. Jiang, Z. T. Sui, B. Z. Ding and Z. Q. Hu: Metall. Mater. Trans. B, **27B**(1996), 71.
(20) B. J. Keene: Intern. Mater. Rev., **38**(1993), 157.
(21) 森田善一郎，飯田孝道，笠間昭夫：日本金属学会会報，**15**(1976), 743.
(22) T. Iida and R. I. L. Guthrie: *The Physical Properties of Liquid Metals*, Clarendon Press, Oxford, (1988).
(23) Y. Kawai and Y. Shiraishi ed.: *Handbook of Physico-chemical Properties at High Temperatures*, ISIJ, (1988).
(24) V. M. Chumarev, V. M. Sholokhov, A. I. Okunev and V. P. Chentsov: Izv. Akad. Nauk. SSSR Met., No. 4, (1979), 34.
(25) V. P. Nizhenko, L. I. Floka and G. P. Khilya: Izv. Akad. Nauk SSSR Met., No. 3, (1991), 43.
(26) I. Jimbo, A. Sharan and A. W. Cramb: Prod. 76th Steelmaking Conf., Dallas, Texas, Iron and Steel Inc., USA, (1993), 485.
(27) 荻野和己，泰松　斉，中谷文忠：日本金属学会誌，**46**(1982), 1049.
(28) K. Nogi, W. B. Chung, A. McLean and W. A. Miller: Mater. Trans. JIM, **32**(1991), 164.
(29) A. Sharan, T. Nagasaka and A. W. Cramb: Metall. Mater. Trans. B, **25B**(1994), 626.
(30) 笠間昭夫，乾　隆信，森田善一郎：日本金属学会誌，**42**(1978), 1206.
(31) K. S. Filippov: Izv. Akad. Nauk SSSR Met., No. 1, (1992), 56.
(32) J. Wang, M. Bian and L. Ma: Acta Metall. Sin., **22** (1986), A270.
(33) 野城　清，荻野和己：耐火物，**41**(1989), 27.
(34) K. Eckler, I. Egry and D. M. Herlach: Mater. Sci. Eng. A, **A133**(1991), 718.
(35) I. Egry: J. Mat. Sci., **26**(1991), 2997.
(36) I. Egry, G. Lohoefer, P. Neuhaus and S. Sauerland: Int. J. Thermophys., **13**(1992), 65.
(37) 荻野和己，原　茂太，三輪　隆，木本辰二：鉄と鋼，**65**(1979), 2012.
(38) 瀧内直祐，谷口貴之，篠崎信也，向井楠宏：日本金属学会誌，**55**(1991), 44.
(39) 瀧内直祐，谷口貴之，田中泰邦，篠崎信也，向井楠宏：日本金属学会誌，**55**(1991), 180.
(40) 中島邦彦，滝平憲治，森　克巳，篠崎信也：日本金属学会誌，**55**(1991), 1199.
(41) K. Mukai and N. Shinozaki: Mater. Trans. JIM, **33**(1992), 45.
(42) 泰松　斉，野城　清，荻野和己：高温学会誌，**18**(1992), 14.
(43) K. L. Lin, C.-Y. Lee and M.-Y. Hwang: J. Mater. Sci. Lett., **14**(1995), 1314.
(44) X. M. Xue and J. T. Wang: J. Non-Cryst. Solids, **156-158**(1993), 841.
(45) K. Ogino, S. Hara, T. Niwa and S. Kimoto: Trans. ISIJ, **24**(1984), 522.
(46) 野城　清，荻野和己：高温学会誌，**16**(1990), 20.
(47) J. P. Hajra, M. G. Frohberg and H.-K. Lee: Z. Metallkd., **82**(1991), 718.
(48) 野城　清，荻野和己：高温学会誌，**15**(1989), 204.
(49) V. I. Nizhenko, L. I. Floka and G. P. Khilya: Zh. Fiz. Khim, **65**(1991), 791.
(50) L. Kaufman: CALPHAD, **1**(1977), 7.
(51) S. M. Kaufman: Acta Metall., **15**(1967), 1089.
(52) T. J. Whalen, S. M. Kaufman and M. Humenik, JR: Trans. ASM, **55**(1962), 778.
(53) Z. Adolf, J. Plira and V. Parma: Hutn. Listy, **42**(1987), 537.
(54) V. A. Rudenko and N. V. Tolstoguzov: Izv. VUZ Chernaya Metall., No. 12, (1968), 64.
(55) 原　茂太，渡辺雅信，野城　清，荻野和己：日本金属学会誌，**58**(1994), 330.
(56) 門間改三，須藤　一：日本金属学会誌，**24**(1960), 611.
(57) Yu. V. Sveshkov: Izv. VUZ Chernaya Metall., No. 7, (1973), 15.
(58) 川合保治，森　克巳，岸本　誠，石倉勝彦，下田俊郎：鉄と鋼，**60**(1974), 29.
(59) V. I. Nishenko, L. I. Floka: Adgeziya Rspl. Pajka Mater., No. 17, (1986), 21.
(60) 岸本　誠，森　克巳，川合保治：日本金属学会誌，**48**(1984), 413.
(61) R. Mrdjenovich, S. M. Kaufman, T. J. Whalen and C. L. Corey: Metall. Trans., **1**(1970), 2175.
(62) N. Ohara and E. Kato: Metall. Trans. B, **24B**(1993), 200.
(63) V. G. Antipin, V. I. Chebotarev, V. F. Korotkikh, L. Yu. Fedoseeva and N. F. Bakhcheev: Izv. Akad. Nauk. SSSR Met., No. 1, (1978), 62.
(64) 荻野和己，泰松　斉，中谷文忠：日本金属学会誌，**46**(1982), 957.
(65) E. E. Tret'yakova, B. A. Baum, V. E. Sidorov and M. V. Rovbo: Adgez. Rasplav. Pajka Mater., No. 20, (1988), 18.
(66) H-K. Lee, M. G. Frohberg and J. P. Hajra: Intern. ISIJ, **33**(1993), 833.
(67) S. I. Popel, B. V. Tsavevskii, V. V. Pavlov and E. L. Furman: Izv. Akad. Nauk. SSSR Metall., No. 4, (1975), 54.
(68) 荻野和己，野城　清，細井千秋：鉄と鋼，**69**(1983), 1989.
(69) H. Gaye, L. D. Lucas, M. Olette and P. V. Riboud: Can. Metall. Quart., **23**(1984), 179.
(70) W. M. Small, P. Sahoo and K. Li: Scr. Metall. Mater., **24**(1990), 1155.
(71) S. E. Volkov, N. P. Levenets and A. M. Samarin: Izv. Akad. Nauk. SSSR Metall., No. 1, (1965), 71.
(72) A. A. Ofitserov: Russ. Metall., No. 4, (1971), 64.
(73) 森　克巳，岸本　誠，下瀬敏憲，川合保治：日本金属学会誌，**39**(1975), 1301.
(74) M. J. McNallan and T. Debroy: Metall. Trans. B, **22B**(1991), 557.
(75) K. C. Mills and R. F. Brooks: Mater. Sci. Eng. A, **A178**(1994), 77.

(76) D. M. Grant and J. V. Wood: Powder Metall., **35**(1992), 43.
(77) B. L. Keene, K. C. Mills, A. Kasama, A. McLean and W. A. Miller: Metall. Trans. B, **17B**(1986), 159.
(78) S. I. Popel, N. K. Dzhemilev and B. V. Tsarevskii: Russ. J. Phys. Chem., **40**(1966), 836.
(79) H. H. Liebermann: J. Mat. Sci., **19**(1984), 1391.
(80) H. H. Liebermann: J. Non-Cryst. Solids, **61-62**(1984), 719.
(81) A.-R. Yavari: Z. Metallkd., **79**(1988), 591.
(82) S. V. Lukin, V.I . Zhuchkov and N. A. Vatolin: J. Less-Common Met., **67**(1979), 399.
(83) D. M. Herlach, R. F. Cochrane, I. Egry, H. J. Fecht and A. L. Greeer: Intern. Mat. Rev., **38**(1993), 273.
(84) I. Egry, S. Sauerland: Mater. Sci. Eng., **A178**(1994), 73.
(85) S. Sauerland, G. Lohofer and I. Egry: J. Non-Cryst. Solids, **156-158**(1993), 833.
(86) S. Sauerland, K. Eckler and I. Egry: J. Mater. Sci. Lett., **15**(1992), 330.
(87) 日比谷孟俊：まてりあ，**33**(1994), 1011.
(88) 野城　清：まてりあ，**35**(1996), 405.
(89) 門間改三，須藤　一：日本金属学会誌，**24**(1960), 117.
(90) 門間改三，須藤　一：日本金属学会誌，**25**(1961), 65.
(91) G. Bernard and C. H. P. Lupis: Sur. Sci., **42**(1974), 61.
(92) P. Laty, J. C. Joud and P. Desre: Surf. Sci., **60**(1976), 109.
(93) L. Goumri and J. C. Joud: Surf. Sci., **138**(1984), 524.
(94) G. R. Belton: Metall. Trans. B, **7B**(1976), 35.
(95) T. Utigard and J. M. Toguri: Metall. Trans. B, **18B**(1987), 695.
(96) R. Speiser, D. R. Poirier and K. S. Yeum: Scripta Metall., **21**(1987), 687.
(97) K. S. Yeum, R. Speiser and D. R. Poirier: Metall. Trans. B, **20B**(1989), 693.
(98) J. A. V. Butler: Proc. Roy. Soc., **A135**(1932), 348.
(99) P. Sahoo, T. Debroy and M. J. McNallan: Metall. Trans. B, **19B**(1988), 483.
(100) J. P. Hajra, H-K. Lee and M. G. Frohberg: Z. Metallkd., **82**(1991), 603.
(101) H-K. Lee, J. P. Hajra and M. G. Frohberg: Z. Metallkd., **83**(1992), 638.
(102) J. P. Hajra and M. Divakar: Metall. Mat. Trans. B, **27B**(1996), 241.
(103) R. P. Chhabra: High Temp. -High Press., **21**(1990), 171.
(104) 飯田孝道，森田善一郎：日本金属学会会報，**19**(1980), 655.
(105) R. P. Chhabra and D. K. Sheth: Z. Metallkd., **81**(1990), 264.
(106) "溶鉄・溶滓の物性値便覧"，日本鉄鋼協会，(1971).
(107) 斎藤恒三，中西恭二，白石　裕：日本金属学会誌，**31**(1967), 881.
(108) A. A. Romanov and V. G. Kochegarov: Izv. Akad. Nauk SSSR, Met. i Gorn Delo., No. 1, (1964), 41.
(109) V. I. Arkharov, V. Z. Kisunko, I. A. Novokhatskii and V. P. Khalievskiii: Teplofiz. Vysok. Temp., **15**(1977), 6, 1208.
(110) Y. Nishi and A. Yoshihiro: Scr. Metall., **19**(1985), 1023.
(111) L. D. Lucas: Compt. Rend., **259**(1964), 3760.
(112) R. N. Barfield and J. A. Kichener: J. Iron Steel Inst., **180**(1955), 324.
(113) Wen Li-shin and P. P. Arsentyev: Izv. VUZ Chern. Met., No. 7, (1961), 5.
(114) N. V. Vatolin, A. A. Vostryakov and O. A. Yesin: Fizika Metall., **15**(1963), 222.
(115) P. P. Arsentev, B. G. Vinogradov and S. I. Filippov: Izv. VUZ Chern. Met., No. 3, (1963), 11.
(116) A. A. Vostryakov, N. A. Vatolin and O. A. Yesin: Fizika Metall., **16**(1963), 675.
(117) B. M. Turorskiy and A. P. Lyubimov: Izv. VUZ Chern. Met., i Gorn Delo., (1960), No. 2, 15.
(118) A. A. Romanov and V. G. Kochegarov: Izv. Akad. Nauk SSSR, Met. i Gorn Delo., No. 3, (1963), 89.
(119) M. G. Krasheninnikov and S. I. Filippov: Izv. VUZ Chern. Met., No. 9, (1961), 21.
(120) Y. Nishi, H. Watanabe, K. Suzuki and T. Masumoto: J. Phys. Colloq., **41**(1980), C8/359.
(121) M. I. Avaliani, A. B. Kaplun, M. F. Krutko and I. A. Vashukov: Ivz. VUZ. Chernaya Met., No. 2, (1977), 123.
(122) A. A. Romanov and V. G. Kochegarov: Izv. Akad. Nauk SSSR, Met. i Gorn Delo., No. 6, (1964), 86.
(123) M. G. Frohberg and R. Weber: Arch. Eisenhüttenw., **35**(1964), 885.
(124) G. S. Ershov and A. A. Kasatkin: Izv. VUZ Chernaya Met., No. 4, (1976), 141.
(125) N. E. Bodakin, B. A. Baum and G. V. Tyagunov: Ivz. VUZ Chernaya Met., No. 7, (1978), 9.
(126) I. A. Pavars, B. A. Baum and P. V. Geld: Zhur. Fiz. Khim., **43** No. 11, (1969), 2744.
(127) A. A. Romanov and V. G. Kochegarov: Fizika Metall., **18**(1964), 869.
(128) V. I. Stremousov, V. M. Pivovarov and V. V. Tekuchev: Russ. Metall., No. 5, (1993), 41.
(129) V. N. Zamaraev, E. S. Levin, M. S. Petrushevskii and P. V. Geld: Ivz. VUZ Chernaya Met., No. 12, (1976), 8.
(130) N. E. Bodakin, B. A. Baum and G. V. Tyagunov: Ivz. VUZ Chernaya Met., No. 5, (1977), 18.
(131) B. A. Baum, Yu. A. Bazin, I. N. Igoshin and V. E. Sidorov: Metallofizika, **9**(1987), 98.
(132) D. K. Belachenko: Doklady Akd. Nauk SSSR, **117**(1957), 98.
(133) A. A. Romanov and V. G. Kochegarov: Izv. Akad. Nauk SSSR, Met. i Gorn Delo., No. 3, (1964), 63.
(134) I. Dragomir, A. F. Vishkarev and V. I. Javojskiy: Izv. VUZ Chern. Met., No. 7, (1964), 48.
(135) A. A. Vostryakov, N. A. Vatolin and O. A. Yesin: Fizika Metall., **18**(1964), 476.
(136) I. N. Igoshin, Yu. A. Bazin and B. A. Baum: Ukr. Fiz. Zh., **32**(1987), 585.
(137) B. M. Turovskiy and A. P. Lyubimov: Izv. VUZ Chern. Met., No. 1, (1960), 24.
(138) A. A. Romanov, V. G. Kochegarov: Fizika Metall., **17**(1964), 300.
(139) A. B. Kaplun and M. F. Krutko: Izv. Akd. Nauk. SSSR, Metally, No. 3, (1979), 78.
(140) B. A. Baum, P. V. Gelyd and P. V. Kocherov: Izv. Akad. Nauk SSSR, Metally, No. 2, (1968), 85.
(141) B. A. Baum, M. N. Kushnir, N. E. Bodakin and G. V. Tyagunov: Steel USSR, 6 No. 6, (1976), 303.
(142) N. E. Bodakin, M. N. Kushnir and B. A. Baum: Ivz. VUZ Chernaya Met., No. 5, (1976), 9.
(143) N. E. Bodakin, B. A. Baum, G. V. Tyagunov and M. N. Kushnir: Izv. Akd. Nauk. SSSR, Metally, No. 2, (1977), 71.
(144) 山崎　徹，嶋田辰夫，荻野喜清：日本金属学会誌，**56**(1992), 1229.
(145) H. Chiriac and M. Tomut: J. Alloys Compd., **215**(1994), 289.
(146) H. Chiriac and M. Tomut: J. Mater. Sci. Lett., **12**(1993), 763.
(147) J. Steinberg, S. Tyagi and A. E. Lord, Jr.: Acta Metall., **29**(1981), 1309.
(148) D. M. Herlach, I. Egry, P. Baeri and F. Spaeper (ed.): Mater. Sci., **A178**(1994), 1.
(149) 飯田孝道，上田　満，森田善一郎：鉄と鋼，**62**(1976), 1169.
(150) L. Ya, L. M. Romanov, A. P. Pod'yachev, N. N. Petrov and O. V. Kostygova: Izv. VUZ Chernaya Metall., No. 5, (1982), 1.
(151) Y. Nishi and A. Yoshihiro: Metall. Trans. A, **17A**(1986), 901.
(152) M. Kucharski: Z. Metallkde., **77**(1986), 393.
(153) L. Battezzati and A. L. Greer: Acta metall., **37**(1989), 1791.
(154) E. N. da C. Andrade: Phil. Mag., **17**(1934), 497.
(155) R. P. Chhabra: Z. Metallkd., **80**(1989), 658.
(156) J. H. Hildebrand: *Viscosity and Diffusivity-A Predictive Treatment*, Wiley Interscience, New York, (1977).
(157) 平居正純：鉄と鋼，**78**(1992), 399.
(158) S. Seetharaman and D. Sichen: Metall. Mat. Trans. B, **25B**(1994), 589.