

Title	溶融合金・混合溶融塩の表面物性の推算予測
Author(s)	田中, 敏宏; 平井, 信充
Citation	表面科学. 2003, 24(11), p. 694-699
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/26064
rights	Copyright © 2003 公益社団法人 日本表面科学会
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

表面科学 Vol. 24, No. 11, pp. 694-699, 2003

# 研究紹介

## 溶融合金・混合溶融塩の

## 表面物性の推算予測

## 田中 敏宏・平井 信充

大阪大学大学院工学研究科マテリアル応用工学専攻 📼 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

#### (2003年3月25日受理)

#### Evaluation of Surface Properties of Liquid Alloys and Molten Salt Mixtures

Toshihiro TANAKA and Nobumitsu HIRAI

Department of Materials Science and Processing, Graduate School of Engineering, Osaka University 2–1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565–0871

(Received March 25, 2003)

Various thermodynamic databases have been compiled to be mainly applied to the calculation of phase diagrams of alloys, ceramics and so on. The accumulation and assessment of thermodynamic data and phase equilibrium information to establish those databases is sometimes called CALPHAD (Computer Calculation of Phase Diagrams) approach. The CALPHAD has been recognized to be useful in various aspects of materials science and engineering. If the thermodynamic databases could be used to evaluate surface properties of liquid solutions as well as phase equilibria, we would be able to widen not only the applicability of those thermodynamic databases but also the further understanding of the surface properties of liquid alloys and molten ionic mixtures. On the basis of the above concepts, we have applied the thermodynamic databases to the calculation of the surface tension of liquid alloys and molten ionic mixtures. In this paper, we described some of the examples obtained from the above evaluation of the surface properties.

### 1. 緒

溶融合金や溶融塩の表面物性については、表面極近傍 の原子層でその特徴的な物性が支配されているが、その 内側はバルク層と繋がっており、表面物性といえどもバ ルクの性質を無視して表面物性を評価することはできな い。特に各種表面物性の中でも「表面張力」は最も基本 的な物性のひとつであるが、基本的には表面とパルクの 結合エネルギーの差を基にしてその物性が決まってい る。このことから、溶融金属や溶融合金、混合溶融塩の 表面張力を表面構造の特徴を考慮して、バルクの性質か ら推算・評価できれば、表面物性の理解のために有効で あろう。一方、金属やセラミックスを対象とする分野で は、バルクの熱力学的情報のデータベース化が進んでお

言

り、その情報を基にして多成分系・多相平衡系の状態図

#### 2. 溶融合金, 混合溶融塩の表面張力の計算式

溶融合金・混合溶融塩の表面張力の計算には Butler の 式<sup>(5)</sup>を利用しており,まずこのモデルについて説明する。

や化学反応の計算ができるソフトウエアや計算システム が完備されつつある<sup>1-5</sup>)。これらのバルクの情報を基に して、上記の表面張力の推算・評価ができれば、相平衡 条件や各種化学反応の評価とともに表面物性の推算を同 時に行えることになるため、表面を含む系の材料開発に 大きく寄与できることになる。著者らは数年前から、こ のような考え方のもとに溶融合金・混合溶融塩の表面張 力の推算システムの構築を進めている<sup>6-14</sup>)。本稿では、 表面張力の計算モデルや計算例の紹介を行うとともに、 バルクの熱力学的性質と表面張力の関係について述べ る。

E-mail: tanaka@mat.eng.osaka-u.ac.jp

Butler は表面最外 1 原子層を "表面"とみなして,次式 に示すように成分 i の表面の化学ポテンシャル μ<sup>5urface</sup> と 液体内部(以下バルク "Bulk"と呼ぶ)の化学ポテンシ ャル μ<sup>Bulk</sup>の関係を導出した。

$$\mu_i^{\text{Surface}} = \mu_i^{\text{Bulk}} + \sigma \cdot A$$
(1)  
ここで  $\sigma$ :表面張力、A:モル表面積である。

$$\mu_i^{Bulk} = \mu_i^{0 Bulk} + RT \ln a_i^{Bulk} = \mu_i^{0 Bulk} + RT \ln \gamma_i^{Bulk} + RT \ln \gamma_i^{Surface} + RT$$

ここで、 $\mu^{p}$ は純粋成分 i の化学ポテンシャル、 $a_i^{p} \ge \gamma_i^{p}$ はそれぞれ成分 i の活量および活量係数である (P =Surface or Bulk)。

(2) 式の関係を(1) 式に代入し、さらに次の(3) 式 で示す純粋成分の表面張力とバルクおよび表面の化学ポ テンシャルの関係を利用すると、A-B2成分系溶融合 金・混合溶融塩の表面張力σに対して最終的に(4),(5) 式が得られる。

$$\sigma_i^{Pure} = \frac{\mu_i^{0} Surface - \mu_i^{0} Bulk}{A_i} \tag{3}$$

$$\sigma = \sigma_A^{Pure} + \frac{RT}{A_A} \ln \frac{N_A^S}{N_A^B} + \frac{1}{A_A} \{ G_A^{ES}(T, N_B^S) - G_A^{EB}(T, N_B^B) \}$$

$$(4)$$

$$\sigma = \sigma_B^{Pure} + \frac{RT}{A_B} \ln \frac{N_A^S}{N_B^B} + \frac{1}{A_B} \{ G_B^{E,S}(T, N_B^S) - G_B^{E,B}(T, N_B^B) \}$$

(5)

-33 -

ここで,次式の活量係数と部分モル過剰自由エネルギー の関係を利用している。

 $RT\ln\gamma_i^P = G_i^{E,P}(T, N_B^P) \quad (P = B \text{ or } S)$ (6)

(4), (5) 式において,  $\sigma_i^{Pure}$ は純液体成分 i の表面張 力,  $A_i = LN_0^{1/3}V_i^{2/3}$  (ここで,  $N_0$ :アボガドロ数, L = 1.091(金属), L = 1: (溶融塩)) は純液体成分 i のモル表面積 であり, 純液体 i のモル体積  $V_i$ から計算できる。添え 字の B と S はバルクと表面を表わしている。 $N_i^P$  は成分 i のモル分率である。 $G_i^{EP}(T, N_d^P)$  はバルク (P=B) お よび表面 (P=S) における成分 i の部分モル過剰自由エ ネルギーで, 括弧内の温度  $T \ge B$  成分のモル分率  $N_B$  の 関数である。(4), (5) 式においてバルクにおける  $G_i^{EP}$ ( $T, N_d^P$ ) は熱力学データベースから直接得られるが, 表 面に対する  $G_i^{E,S}(T, N_d^S)$  については, Speiser ら<sup>16,17)</sup>の 提案に基づく次式を利用する。

 $G_i^{E,s}(T, N_b^s) = \beta^{MIX} \cdot G_i^{E,B}(T, N_b^s)$  (7) ここで, (7) 式は $G_i^{E,s}(T, N_b^s)$ が $G_i^{E,B}(T, N_b^s)$ と同じ関 数形を有しているが,濃度が $N_b^s$ に置き換わっているこ

とを示している。さらに右辺には β<sup>MIX</sup> が掛けられてい る。β<sup>MIX</sup> は表面とバルクにおける配位数の比 Z<sup>Surface</sup>/Z<sup>Bulk</sup> に対応するパラメータである。例えば、Speiser ら<sup>16,17)</sup> は最密充填構造を仮定して B<sup>MIX</sup>=Z<sup>Surface</sup>/Z<sup>Bulk</sup>=9/12= 0.75 と考えている。しかしながら、B<sup>MX</sup> の値については、 液体に対する Z<sup>Surface</sup>/Z<sup>Bulk</sup>の値を厳密には評価できず. さらに、表面における緩和構造の形成など、Z<sup>Surface</sup>/Z<sup>Bulk</sup> 以外の因子の影響も受けると考えられる。特にイオン性 融体については表面における分極の効果が自由エネルギ ーに影響するため、配位数の比だけでは B<sup>MX</sup> の値は決 らないことが明らかとなった8~13)。そこで、イオン性融 体に対しては表面において電荷の中性を保持することに 関係して、表面緩和が生じることによりイオン間距離が バルクに比べて変化するという Sawada と Nakamura<sup>18)</sup>の 指摘に着目し、著者らは表面緩和の影響やイオン性融体 における分極の効果を考慮して次の関係を導出し た8~13)。

$$\beta^{MIX} = \frac{Z^{Surface}}{Z^{Bulk}} = 0.83$$
 :溶融合金 (8)  
 $\beta^{MIX} = \frac{Z^{Surface}}{Z^{Bulk}} \cdot \frac{1}{\zeta^4} = 1.1$  :混合溶融塩,溶融スラグ

ここで、 $Z^{Surface}/Z^{Bulk}$ は表面とバルクの見かけの配位数の 比であり、混合溶融塩に対しては 0.94 となる<sup>8-13</sup>)。 くは イオン性融体における表面緩和によるイオン間距離の変 化率で、Sawada と Nakamura<sup>18</sup>によるとバルクのイオン 間距離に対して、表面では平均してイオン間距離が 2.5 %小さくなることから  $\zeta=0.97$  とした<sup>8-13</sup>)。(9) 式の詳 細については著者らの前報<sup>8-13</sup>)をご参照いただきたい。

なお、上述の表面とバルクの見かけの配位数の比は次 のようにして評価した<sup>7,8,11</sup>)。今、純粋成分 X について 考える。表面に存在する原子とバルクに存在する原子の 結合エネルギーを原子対のエネルギー $\varepsilon_{xx}$  ( $\leq$ 0) と配位 数 Z で近似することを考える。バルクでの配位数を Z<sup>Bulk</sup> とし、その一部が引き剥がされて、配位数 Z<sup>Surface</sup> (<Z<sup>Bulk</sup>) の表面ができたとする。それに要する単位面積あたりの エネルギーを表面張力と近似する。すなわち、表面にお ける 1 モル 当たりの結合エネルギー  $U_x^{Surface} = Z^{Surface} \cdot$  $\varepsilon_{xx} \cdot N_0/2$  とバルクにおける結合エネルギー  $U_x^{Bulk} =$ Z<sup>Bulk</sup>  $\cdot \varepsilon_{xx} \cdot N_0/2$  を用いて、

$$\sigma_{x}^{Pure} \cdot A_{x} = U_{x}^{Surface} - U_{x}^{Bulk}$$
$$= Z^{Surface} \cdot \frac{\mathcal{E}_{XX}}{2} \cdot N_{0} - Z^{Bulk} \cdot \frac{\mathcal{E}_{XX}}{2} \cdot N_{0}$$

$$= \left\{ -Z^{Bulk} \cdot \frac{\varepsilon_{XX}}{2} \cdot N_0 \right\} \cdot \left( 1 - \frac{Z^{Surface}}{Z^{Bulk}} \right)$$

$$= \{-U_X^{Bulk}\} \cdot \left(1 - \frac{Z^{Surface}}{Z^{Bulk}}\right)$$
(10)

ここで、パルクの1モル当たりの結合エネルギーを近似 的に 融点における 純粋液体 金属の 蒸発 熱<sup>19</sup> $\Delta H_{x}^{Yap}$ (= $-U_{x}^{Bulk}$ ) で置き換え、また、モル表面積  $A_{x}$  は上述 のようにモル体積の (2/3) 乗に比例すると仮定する。

$$A_{x} = \left(\frac{V_{x}}{N_{0}}\right)^{2/3} \cdot N_{0} = V_{x}^{2/3} \cdot N_{0}^{1/3}$$
(11)

これより、(10) 式は次のようになる。

$$\sigma_{X}^{Pure} = \left(1 - \frac{Z^{Surface}}{Z^{Bulk}}\right) \cdot \frac{\Delta H_{X}^{Vap}}{V_{X}^{2/3} \cdot N_{0}^{1/3}}$$
(12)

この(12)式の関係を融点における種々の純粋液体金属 に対して図示すると Fig.1の関係が得られる<sup>7,8,11</sup>。同



Fig. 1 Surface tension of pure liquid metals.

図中の直線関係の傾きから表面とバルクの見かけの配位 数を求めると(8)式に示すように0.83となった<sup>7,8,11</sup>)。 溶融塩に対しても同様な関係を求め,見かけの配位数の 比として0.94という値を得た<sup>7,8,11</sup>)。

#### 3. 溶体の表面張力の計算手順

溶体の表面張力 σ は (4)~(9) 式を用いて次の手順 で計算できる。

 1) 温度 T と溶体の濃度 N<sup>g</sup> を設定し、その温度に対 する純成分の表面張力とモル体積のデータを(4)、(5) 式に代入する。

2) 上記の温度, 濃度に対するバルク相の部分モル過 剰自由エネルギーを求め, (4), (5) 式に代入する。

3) これより, (4), (5) 式は N<sup>2</sup><sub>8</sub> と σ の 2 つを未知数 とする連立方程式になる。そこで, (4), (5) 式を数値 解析により解いて N<sup>2</sup><sub>8</sub> と σ を求める。

#### 4. 溶融合金の表面張力

ここでは計算例として, Fig. 2 に示すように, 溶融 Cu-Pb, Fe-Si 合金に対する結果<sup>8,11)</sup>を述べる。これらの系 では Fig. 2 の上部の小さな図面の活量曲線が示すよう に, バルクの成分活量がそれぞれ大きく正および負に偏 倚している(過剰自由エネルギーはそれぞれ正および負 の値をとる)。過剰自由エネルギーのデータ<sup>20,21</sup>はヨー ロッパの SGTE (Scientific Group Thermodata Europe)の データベースから引用した。Fig. 2 に示すように, 表面 張力の計算結果は実験値(文献<sup>8,11)</sup>参照)と良い一致を 示している。同図中の小さな四角の中の曲線はバルクと



Fig. 2 Surface tension of liquid Fe-Si and Cu-Pb alloys.

696

表面における成分濃度の関係を示している。バルクにお いて溶媒-溶質間にプラスの相互作用が働く系(活量が 正に偏倚する系、過剰自由エネルギーが正の系、例えば Cu-Pb 系)においては、表面偏析の傾向が強いことがわ かる。すなわち、Cu-Pb 系においては、バルクにおいて Pb 濃度が 10% 程度でも、表面では 90% 以上の濃度で 偏析していることがわかる。その結果, 10% 程度 Pb を 添加すると、表面がほぼ Pb で覆われるため、表面張力 の値は純粋な Pb と同程度の値を示し、Cu に Pb を添加 すると、急激に表面張力が減少すると考えられる。また、 過剰自由エネルギーが正の値をとる場合(活量が正に偏 倚する場合)には溶融合金の表面張力は理想溶体に対す る値よりも負に偏倚し、一方、過剰自由エネルギーが負 の値をとる場合(活量が負に偏倚する場合)には溶融合 金の表面張力は理想溶体に対する値よりも正に偏倚する 傾向のあることがわかる<sup>8,11</sup>)。このように溶融合金の表 面張力の濃度依存性はバルクの熱力学的性質と密接に関 連していることが明らかとなった。

#### 5. 混合溶融塩の表面張力

前節で述べたように、溶融合金の表面張力については、 バルクの熱力学量と表面/バルク間の配位数の比を考慮 することによって推算できる。しかしながら、イオン性 融体に対しては、溶融合金に対する表面張力の計算手法 がそのままの形式では適用できないことが明らかとなっ たため<sup>8-13</sup>、前述のように表面の配位数以外に表面緩和 の効果を表面におけるイオン間距離の変化として考慮 し、表面の過剰エネルギーの評価式((7),(9)式)を 導出した。Fig. 3 は混合溶融塩の表面張力の計算結果と NIST (National Institute of Standards and Technology)の データベースに保存されている実測値<sup>22</sup>)との比較を示し たものである。ここでは、Pelton<sup>23,24</sup>が構築した混合塩 に対する熱力学データベースを利用している。アルカリ-ハライド系混合溶融塩の表面張力についてはこれまでに さまざまな計算モデルが提案されているが、実測値を再 現できるモデルはなく、上述のように配位数と表面緩和 の影響を考慮することによってバルクの熱力学量から表 面張力の濃度依存性を推算できるようになった。しかし ながら、表面緩和の影響を過剰自由エネルギーの中に取 り込む過程についてはさらに検討を進める必要があり、 バルクの熱力学量と対比させた表面構造の情報の蓄積が 今後の大きな課題である。

### ナノ粒子系2元合金の平衡状態図の計算の 試み

前節までの取り扱いにおいて,熱力学データベースを 利用して平衡状態図と表面物性の計算を同時にできるこ とから,単位体積当たりの表面の割合が非常に大きな微 粒子系合金の相平衡に及ぼす表面物性の影響を評価でき ると考えられる。本節では,表面張力の熱力学計算を利 用したナノ粒子系2元合金の平衡状態図の計算を試みた 結果を述べる<sup>25,26</sup>。固相-液相平衡を対象とした場合, 平衡状態図が液相と純粋な固相から成る場合には,純粋 な固相を自由エネルギーの基準に選択すると,液相の自 由エネルギー曲線だけから平衡状態図を評価できる。こ のとき,半径rの微粒子系全体の液相の自由エネルギー *ΔG<sup>Toud</sup>* は次の(13)~(14)式で表現できる<sup>25,26</sup>。

 $\Delta G^{Total} = \Delta G^{Bulk} + \Delta G^{Surface}$  (13) (13) 式において  $\Delta G^{Bulk}$  は A-B 2 元系合金のバルクに対 する自由エネルギーで  $r = \infty$ に対する  $\Delta G^{Total}$  に相当し, 熱力学データベースを用いてバルクの平衡状態図を計算 する際の自由エネルギーである。(13) 式の  $\Delta G^{Surface}$  は 微粒子系全体の自由エネルギーに対する表面の影響を表 しており,次式で表現できる<sup>25,26</sup>)。



Fig. 3 Surface tension of molten salt mixtures.

$$\Delta G^{Surface} = \frac{2\sigma^L V^L}{r} - \frac{2(\sigma_A^S V_A^S + \sigma_B^S V_B^S)}{r}$$
(14)

ここで  $\sigma^t \geq V^t$  は溶融合金の表面張力とモル体積で ある。r は微粒子の半径,  $\sigma_i^s \geq \sigma_i^s$  ならびに  $V_i^s \geq V_i^s$  は 純成分 A と B の固体状態の表面張力とモル体積である。 (14) 式に示すように, 純成分 i の固体状態の表面張力 の値が必要となるが,実測値を整理すると融点における 純成分 i の固体状態の表面張力は平均して液相のそれよ りも 25 % 大きいと仮定できる<sup>25</sup>)。そこで, 純固体 i の 表面張力  $\sigma_i^s$  を次の (15) 式のように仮定した<sup>25,26</sup>)。

$$\sigma_i^{S} = 1.25 \,\sigma_{i_{mp}}^{L} + \frac{\partial \,\sigma_{i}^{L}}{\partial \,T} (T - T_{i_{mp}}) \quad (i = A \text{ or } B) \quad (15)$$

ここで、 $\sigma_{t,mp}^{t}$ は融点  $T_{i,mp}$ における液相の表面張力である。また  $\sigma_{i}^{s}$ の温度依存性を液相の表面張力  $\sigma_{i}^{t}$ と等しいと仮定した。ただしここでは  $\sigma_{i}^{s}$ に対する固体の結晶構造(表面の結晶面)の影響は考慮していない。

(14) 式の液体合金のモル体積 V<sup>L</sup> については加成性 が成り立つと仮定する。液相の表面張力 σ<sup>L</sup> については, 組成および温度依存性を先に述べた手法によって評価す れば,純粋固体を自由エネルギーの基準として上で述べ た式から液相の自由エネルギー ΔG<sup>Total</sup> を任意の温度お よび組成に対して計算できる。液相の自由エネルギー曲 線が得られれば,純粋固体を自由エネルギーの基準にと っているので,純粋固体 A および B の化学ポテンシャ ルがゼロとなるように液相の自由エネルギー曲線に接線 を引くと,その接点から純粋固相と平衡共存する液相の 組成,すなわち液相線を求めることができる<sup>25,26</sup>)。

また,純粋金属 i の微粒子系に対する自由エネルギー は (13), (14) 式から,次式のようになる。

$$\Delta G^{\text{Total}} = \Delta G_i^{\text{LS Bulk}} + \frac{2 \sigma_i^L V_i^L}{r} - \frac{2 \sigma_i^S V_i^S}{r}$$
(16)

上の(16)式において AG<sup>LS Pault</sup> はバルクにおける純 成分 i の融解の自由エネルギー変化である。(16)式に おいて, AG<sup>Total</sup>=0を与える温度 T が半径 r の微粒子の 融点に相当する。Fig.4 は純 Au の融点の粒子径依存性 の計算結果を実測値<sup>27)</sup>とともに示している。Fig.5 には 一例として Cu-Pb 2 元系合金の平衡状態図を r=20 nm, 10 nm, 5 nm およびバルクサイズに対して計算した結果 を示している。固溶体が存在する場合の計算例は文献<sup>26)</sup> に記載している。これらの計算から,バルクにおいて溶 媒-溶質間の相互作用がプラスの場合(例えば Cu-Pb 系) には,前述のように表面張力の濃度依存性が大きく下に 凸の形状を示すが,その影響が微小粒子の平衡状態図に も影響し,バルクにおいて過剰自由エネルギーがプラス の系で,その過剰自由エネルギーの絶対値が大きな系ほ ど,微小粒子系において平衡状態図の形状がバルクに比



**Fig. 4** Change in the melting point of pure Au with particle radius.



Fig. 5 Dependence of phase diagram of Cu-Pb alloy on particle size.

べて大きく変化することなどが明らかとなった25,26)。

以上の計算では表面張力に及ぼす粒子径の曲率の影響 や、固相の面方位の影響などを無視しており、これらの 影響の考慮が今後の課題である。

#### 7. 結 言

本稿では、溶融合金と混合溶融塩の表面張力をバルク の熱力学データを利用して計算する手法を紹介した。ま た、これらの熱力学データは平衡状態図を計算するため のデータベースに収録されているので、表面物性の計算 を併用すれば微小粒子系の相平衡の推算にも利用できる 可能性があることを示した。さらにこれらの計算を通じ て、溶融合金や混合溶融塩の表面張力はバルクの性質を 反映して決まることも明らかとなった。混合溶融塩につ いては、表面における電荷の中性保持という条件を満た すために表面緩和が生じていると考えられ、計算の精度 を向上させるためには、今後イオン系物質の表面構造に 関する詳細な情報の蓄積が必要である。

#### 文 献

- 1) C.W. Bale and G. Eriksson: Can. Metall. Quar. 29, 105 (1990).
- 2) T. Nishizawa: Mat. Trans. JIM. 33, 713 (1992).
- 3) 田中敏宏, 飯田孝道: 日本金属学会会報 32,535 (1993)
- 4) 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",金属,臨時増刊号,アグネ,147 (1996).
- 5) 田中敏宏, 飯田孝道: 熱測定 18, 174 (1991).
- 6) T. Tanaka and T. Iida: Steel Research 65, 21 (1994).
- 7) T. Tanaka, K. Hack, T. Iida and S. Hara: Z. Metallkunde 87, 380 (1996).
- 8) T. Tanaka, K. Hack and S. Hara: MRS Bulletin 24, 45 (1999).
- 9) T. Tanaka, S. Hara, M. Ogawa and T. Ueda: Z. Metallkunde 89, 368 (1998).
- 10) T. Tanaka, S. Hara, M. Ogawa and T. Ueda: Molten Salt Forum 5/6, 213 (1998).
- 11) T. Tanaka and S. Hara: Electrochemistry 67, 573 (1999).
- 12) T. Ueda, T. Tanaka and S. Hara: Z. Metallkunde 90, 342 (1999).

- 13) T. Tanaka and S. Hara: Z. Metallkunde 90, 348 (1999).
- 14) T. Tanaka and S. Hara: Steel Research 72, 439 (2001).
- 15) J.A.V. Butler: Proc. Roy. Soc. A. 135, 348 (1932).
- 16) R. Speiser, D.R. Poirier and K. Yeum: Scripta Metall. 21, 687 (1987).
- 17) K.S.Yeum, R. Speiser and D.R. Poirier: Metall. Trans. B, 20 B, 693 (1989).
- 18) S. Sawada and K. Nakamura: J. Phys. C 12, 1183 (1979).
- 19) T. Iida and R.I.L. Guthrie: "The Physical Properties of Liquid Metals" (Clarendon Press, Oxford, 1988).
- 20) J. Lacaze and B. Sundman: Metall. Trans. A, 22 A, 2211 (1991).
- 21) F.H. Hays, H.L. Lukas, G. Effenberg and G. Petzow: Z. Metallkde. 77, 749 (1986).
- 22) NIST molten salt database, National Institute of Standards and Technology (1987).
- 23) A.D. Pelton: CALPHAD 12, 127 (1988).
- 24) "Phase Diagrams for Ceramists", Vol.VII, ed. by L.P. Cook and H.F. McMurdie (The American Ceramic Society, Westerville, 1983).
- 25) T. Tanaka and S. Hara: Z. Metallkunde 92, 467 (2001).
- 26) T. Tanaka and S. Hara: Z. Metallkunde 92, 1236 (2001).
- 27) J.R. Sambles: Proc. Roy. Soc. Lond. A 324, 339 (1971).

<section-header>
 Bookstand
 MAH学シリーズ
 結晶成長
 たなどの基礎理論を理解してこの結晶成長メカニズムの解明となる。そのため、結晶成長の
 などの基礎理論を理解してこの結晶成長メカニズムを研究することにより、高純度で物性の優れた材料や
 などの基礎理論を理解してこの結晶成長メカニズムを研究することにより、高純度で物性の優れた材料や
 薄膜を作製することができるようになる。本書では、基礎的な相平衡の熱力学的な取り扱いから解説し、結
 晶成長を支配する要因のひとつの表面エネルギーを議論し、結晶面での核形成が表面エネルギーにより支配
 されることを説明している。金属の表面エネルギーを議論し、結晶面での核形成が表面エネルギーにより支配
 されることを説明している。とのように、結晶成長メカニズムの解明結晶の各種成長形式と不純物元素の振舞
 がから格子欠陥などのテーマについて幅広く解説が行われている。また実際に結晶を作製している読者にた
 いから格子欠陥などのテーマについて幅広く解説が行われている。また実際に結晶を作製している読者にた
 いための教育の開発を行う研究者にたいして非常に参考になると考える)
 ぼんの表面がなされている。このように、結晶成長メカニズムの基礎から応用まで総合的に解説
 されているため新材料の開発を行う研究者にたいして非常に参考になると考える)