

Title	溶融スラグ編-7 性質を調べよう(3) 表面張力
Author(s)	田中, 敏宏; 原, 茂太
Citation	金属. 1999, 69(7), p. 629-636
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/26053
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

溶融スラグ編-7 性質を調べよう(3) —表面張力

田中 敏宏, 原 茂太

表面張力とは

「ものづくり」に関係する液体の物性値としては、 粘度,密度,熱伝導度などがあり,その定義に基 づいてデータの蓄積が進められている.表面張力 もそのひとつであり、表面張力が関係する現象は 日常の生活の中でも目にすることが多い. 例えば, 図1に示すように、コップにすれすれに入れた水が コップの縁で少し盛り上がって曲面をつくったり, コップの中の水がコップの縁を少し這い上がって 曲面をつくる場合もある.この曲面を液体の「メ ニスカス | という、また、葉っぱの上の水滴が丸 くなっていることを見つけることもある. これら はすべて、液体の表面では、その表面積をできる だけ小さくして丸くなろうとする力が働いている ことを示しており、この力が表面張力である.液 体は通常固体と接して存在し、図2に示すように、 その固体と濡れるか濡れないかで液滴の形状も変 化する.この濡れ現象と表面張力が絡んだ現象は 日常よく出会う. 例えば、細い管を液体に立てた 際、その管の中を液体が吸いあがるのは「毛細管 現象」として知られており、タオルやティッシュ



図1 コップの中の水がつくるメニスカス

ペーパーの細かな繊維の間に水が吸いあがるのも 同様である.この毛細管現象も液体が固体と濡れ るか濡れないかで図3に示すようにその挙動は異な る.表面張力という力は、日常出会う様々な「力」 に比べると大変弱いものであるが、小さな部分に 着目するとその威力は無視できない.小さな虫が 誤って水に触れたとき、もしその足が水に濡れると メニスカスが形成され、そこから飛び立つのは命懸 けとなる.将来マイクロマシンが開発された際、 液体と接触した場合の濡れ現象や表面張力は、マ イクロマシンが威力を発揮するためにはその影響



図2 固体基板上の液滴の濡れ性と接触角





を十分に考えておかなくてはならないと言われてい る¹⁾.また,宇宙空間のような重力が非常に小さな 環境では,それまで無視されていた表面張力に基 づく力が大きく現れてくることが指摘されている.

このように、表面張力は液体が伴う「ものづく り」において今後ますますその重要性が増してくる ことが予想される物性のひとつであるが、表面張 力という物性値の大小を直感的に理解するのは非 常に難しい.粘度の場合には液体をかき混ぜると その大きさを実感できるし、密度はその重さから も値の大小を実感できる。しかしながら、表面張 力については、液体の表面をさすったり、押して みてもその大きさを実感することはむずかしい.

通常,我々は上で述べたように固体壁近傍の濡 れ現象を伴った液体表面の形から表面張力の存在 を知るが,固体と液体が濡れることによって生じ る「付着力」と表面張力は別のものであり,表面 張力はあくまでも液体固有の物性値である.表面 張力の測定には,測定装置の一部である固体との 濡れ現象そのものが関与するため,液体の物性値 としての表面張力の値を測定するには多くの困難 が伴い,密度などの物性値に比べればデータの蓄 積も少なく精度も高くないようである.

表面張力の定義

表面張力の単位は Nm⁻¹ (ニュートン パー メートル)であり、液体の表面の単位長さにかか る力として定義されている. mNm⁻¹(ミリ ニ ュートン パー メートル) で表示されている場 合や、古い文献ではdyne/cm (ダイン パー セ ンチメートル)で表されている。単位体積当たり の質量である密度や、単位面積を単位時間に伝わ る熱エネルギーとして定義されている熱伝導度の ように、我々が通常知っている物理量で定義され る他の物性値と違って表面張力をその単位から理 解するのはなかなか難しい.表面張力の単位の分 母と分子に長さの単位を掛けると単位面積当たり の仕事の大きさとなり、表面を単位面積だけ大き くするのに必要な仕事量とも解釈できる. さらに 熱力学的には単位面積あたりの自由エネルギーの 変化として厳密に考えるべきであるが、ますます その理解は難しくなる²⁾.

液体の表面にはそれに平行な方向に収縮しよう とする力が働いているために液体ならばその形を 球状にしようという力が働いていることは自然に 存在する液滴やメニスカスの形を見れば理解でき るが,その形状から厳密に定義された表面張力の 値の大小を実感するのは困難である.

そこで、本稿では高温融体の表面張力の測定に 用いられている実験方法を紹介し、それぞれの測 定方法の原理を通して、表面張力の定義やその表 面張力の大きさの大小が得られるしくみを理解し ていくことにしよう.

高温融体の表面張力を測定するには

最大泡圧法

最初に最大泡圧法を紹介する.この方法は、半 径rの細管を用いて液体表面に泡をつくり、その泡 が破裂するときの気体の圧力Pが液体の表面張力γ と釣り合っていると考えて表面張力を測定するも のである.

 $\pi r^2 P = 2\pi r \gamma$ (1) ただし、実際には図4に示すように、細管を液体の 中に挿入し、その先端の深さHに相当する液体自 身の重さによる圧力も考慮しなければならないた め、力の釣り合いは次の式のようになる。

 $\pi r^2 P = 2\pi r \gamma + \rho g H$ (2) この式を変形し,

 $P = 2\gamma/r + \rho gH/\pi r^2$ (3) (3)式に従って細管の深さHを変えて、その際に泡 が破裂する圧力Pを測定すると両者の間に直線関係 が成り立ち、図5のようにH = 0(液体表面に相当







図5 最大泡圧法における最大泡圧*P*と細管先端部の 深さ*H*の関係

する)の縦軸の切片から表面張力($\gamma = P_0 r/2: P_0$ はH = 0に対する値)が、また、直線の傾きから密 度が求められる ($\rho = \Delta P / \Delta H$).

この方法は、表面張力の定義を理解するのに比 較的容易な実験方法である.また,密度も求めら れることから、本シリーズにおいて密度の性質を 調べるところで、白石によって実験方法が詳しく 説明されている³⁾.この方法は,溶融塩,溶融スラ グの表面張力の測定にはしばしば用いられており, 著者らの研究室で使用している装置(図6)4を紹介 する、 炉はモリブデン線を発熱体とする高温加熱 炉である、白金製のるつぼ(内径25mm,深さ 30mm)と気泡生成用の白金製毛細管(内径約1.6 mm, 外径約2.5mm)を用いている. この毛細管 をアルミナ製の保護管にガラス粉を混ぜたセラ ミックス用の接着材で接合し、さらに銅製のパイ プに接続している.融体中にこの毛細管を用いて Arガスを送り込み、約30秒に1個の割合で気泡を生 成した時、計測される最大圧力Pを毛細管の深さH を変化させて計測している. 圧力は差圧電送器 注 を用いて電圧に変換して計測する. マノメータを 用いて水柱の高さから得られる圧力と差圧電送器



図6 最大泡圧法の実験装置

の示す電圧値の間の変換式を予め作成しておく.

実際の測定では、上の(2)または(3)式ではなく て、次のシュレーディンガーの式から融体の表面 張力を求めている.この(4)式は、気泡の先端部 と細管の先端部の間に存在する液体柱に相当する 圧力差を考慮したものである.気泡の大きさが非 常に小さい場合には先ほどの(3)式を用いること ができるが、実際の測定では一般にシュレーディ ンガーの式が用いられている.

$$\gamma = \frac{rP_0}{2} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{rg\,\rho}{P_0} \right) - \frac{1}{6} \left(\frac{rg\,\rho}{P_0} \right)^2 \right\}$$
(4)

ここで, rは毛細管の半径, gは重力加速度, ρは 融体の密度である.

また,毛細管の移動装置の変位から読み取れる 浸漬深さは,浸漬により毛細管が排除する融体の 体積分だけ真の深さとは異なるため,見かけの浸 漬深さと真の浸漬深さとの間の補正も考慮する必 要がある.さらに,測定温度における毛細管の内 径は室温での測定値と毛細管の材質の熱膨張率か ら決定する.また,この方法では,液体が細管の 材料と濡れる場合には,管の半径が泡の径と直接 関係して適切な測定ができるが,濡れない場合に

注)差圧電送器:筆者らの研究室で使用している差圧電 送器は横河電機製で「電子式差圧電送器」という名前が ついている.ダイアフラム(金属製の薄膜)の両側の圧 力差によって生じた変位を,差動トランスを用いて直 流電流として出力させた後,100Ωの抵抗を有する「デ ストリビュータ」によって直流電圧に変換し、この値を 計測している.

は管の外径にまで泡が膨らみ細管の内径rの値が使 えないなどの注意が必要である.

静滴法

次に紹介する静滴法は,液体が丸くなろうとす る表面張力による力そのものを液滴の形から測定 する方法である.この方法も密度の測定に用いら れるため,この方法についても実験方法の詳細は 本シリーズにおいて密度の性質を調べるところで 白石によって詳しく説明されている³³.そこでここで は静滴法による表面張力の求め方と,著者らの研 究室で用いている実験装置の特徴を説明しよう.

今,液体と濡れない材質の水平に置かれた基板 上に液滴を作ると、地上では重力がかかるため液 滴の形状は真球からずれて図7に示すような形状に なる、図7に示した液滴の輪郭は次に示すラプラス の式で表すことができる.

$$P = \gamma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right) \tag{5}$$

ここで, Pは輪郭上の座標 (x, z) の点における液体の圧力, R, R'はこの点において直交する2つの 主曲率半径である.紙面を含む平面上の曲線に対するRについては次の関係がある.

$$\mathrm{d}x/\mathrm{d}\phi = R\cos\phi \tag{6}$$

$$\mathrm{d}z/\mathrm{d}\phi = -R\sin\phi \tag{7}$$

$$R = \frac{1}{q_3(q_1 - z) + q_2 - (\sin \phi/x)}$$
(8)

ここで、 $q_1 = h$, $q_2 = 2/b$, $q_3 = \rho g/\gamma$, ϕ は垂 直軸と輪郭上の点 (*x*, *z*)の法線とのなす角度であ る. *h*は液滴の高さ、*b*は液滴頂点での曲率半径, ρ は液滴の密度、*g*は重力加速度である。ラプラス の式は表面張力の解説には必ず登場し、その詳細 は物理化学の教科書⁵⁾を見ていただくことにする



図7 静滴法

が、元の(5)式は簡潔な形をしているのに、実際の 取り扱いは何やら複雑なように見えるためついつ い敬遠したくなる.しかしながら、次に述べるよ うな方法で解くことができる.すなわち、上の(6) ~(8)式を次のように書き換える.

$$x_{i+1} - x_i = R_i \cos \phi_i \ (\phi_{i+1} - \phi_i) \tag{9}$$

$$z_{i+1} - z_i = -R_i \sin \phi_i \ (\phi_{i+1} - \phi_i) \qquad (10)$$

$$R_{i} = \frac{1}{q_{3}(q_{1} - z_{j}) + q_{2} - (\sin\phi_{i}/x_{i})}$$
(11)

i=0のとき, $x_0=0$, $z_0=h$, $\phi_0=0$ とし, 例え ば, $\Delta \phi = \phi_{i+1} - \phi_i = 0.01$ と設定して, $\phi_i = 0$ から π (=3.14)まで順に x_{i+1} , z_{i+1} を計算する. $z_{i+1} \leq 0$ になったとき計算を終了させる.このとき, bというパラメータを与えなければならないが, 液 滴が基板と濡れない場合には接触角 θ は180°であ り,上の計算でz=0のとき, $\phi_{z=0}=\theta=180^\circ$ となる ので, $\phi_{z=0}=\theta=180^\circ$ となるように少しずつbの 値を変化させて, (9)~(11)式の計算を行うと接触 角 $\theta=180^\circ$ の液滴の輪郭が計算できる.パソコン の表計算ソフトを用いても簡単に計算でき, ラプ ラスの式を身近に感じられるようになる.

液滴の形状は上で述べたように表面張力によっ て変化するので、逆に液滴の形状を正確に測定す れば、その形から上の(9)~(11)式を満たすよう に表面張力の値を決定できる.

液滴の作り方については、目的とする大きさに 相当する試料を基板上に置いて昇温すればよいの であるが、基板の表面状態や試料と基板の濡れ性 の影響で、試料の一部が基板に接している位置か ら液滴が広がらなくなり、その接触点で接触角が 決まってしまい液滴の形状が非対称になったり, 真の接触角とは異なる場合がある.そこで融解さ せる前の固体試料の底部を細くして基板に立てる ことによって、液体に変化した際、液体の縁と基 板の接触部が最初の接触個所の影響を受けないよ うな工夫もされている、著者らの研究室では、 図 8に示すように、基板上部に底に小さな穴をあけた るつぼを設置し、試料を融解させた後、上部から 押し棒で液滴を落下させる方法を用いている. 著者らの研究室では、液滴形状を液滴の背後から レーザー光線を当ててシルエットとしてCCDカメ ラで捉えてその形状を記録し、パソコンで画像処

(632)



図8 静滴法の実験装置

理して輪郭を測定している. CCDカメラで記録し た液滴像はコンピュータ上で、2値化という画像処 理を行い、液滴の形とそれ以外の周辺部を白と黒 の2色に分けて輪郭を決定する、その際、白と黒に 分けるにはその中間色に相当するある濃さの色を 閾値として定め、それよりも黒ければ「黒」、それ よりも白ければ「白」とする. 閾値の設定も大切 であるが、高温測定の場合、特に溶融金属の場合 にはそれ自体が発光し、さらにその表面が鏡面と なって炉内の液滴の周辺の模様を写しだす.この 場合、かなり強い光線を液滴の背後から当てない と、その光よりも液滴の自発光による光のほうが 明るくて、カメラには液滴の表面上の模様が映し 出される.このような場合に2値化の作業を行うと 液滴表面の模様の影響がでて、2値化ができなかっ たり輪郭がぼやけたりする. そこでレーザー光を 用いることによって高温で明るくて肉眼では到底 見えないような液滴像でもシルエットとして明瞭 な白黒画像を記録できるようになった. これ以外 にレーザーを用いる利点としては, 平行光線が得 られることから、液滴と同じ大きさの像が明瞭に カメラに記録されることによる精度の向上も期待 できる.ただし、著者らの研究室で用いている装 置は液滴を基板の上方から落下させる手法を用い ているため、液滴は実験の度にわずかに落下する 位置が異なる、そのため、 レーザーの位置とそれ を記録するカメラの位置を常に液滴を中央に挟ん で同一直線上に移動させなければいけないなどの 工夫が必要となっている.



図9 Bashforth & Adamsの方法による静滴の計測

計測した液滴形状からラプラスの式を解いて表 面張力を数値計算で求めることができるように なったのはパソコンの発展と関係し、それ以前に はBashforthとAdams⁶⁾による数値計算の結果の 一覧表を用いた方法が使われていた.文献を調査 するとこの手法を用いた表面張力の測定方法によ く出会う.BashforthとAdamsは上の(5)式を変 形して、次式を導いた.

$$\frac{1}{(\rho/b)} + \frac{\sin\phi}{(x/b)} = 2 + \frac{\beta z}{b}$$
(12)

$$\beta = \frac{g \rho b^2}{\gamma} \tag{13}$$

ここで、bは頂点における曲率半径である.実際の 表面張力の計算では、図9に示すように $\phi = 90^{\circ}$ の ときに相当するx, zの値を測定して、Bashforth とAdamsが作成した表からbおよび β の値を求め、 液滴の体積と重量から求められる密度の値ととも に上の(13)式に代入して表面張力 γ を求めること ができる.

金属 Vol.69 (1999) No.7

ペンダントドロップ法

液滴の形状が表面張力と釣り合って決まる場合 には基板の上に置けばよいのであるが,基板と液 体が濡れる場合には液滴を作るのが難しい.特に, 溶融塩や酸化物融体と濡れない材質の基板を見つ けるのは難しいので,静滴法をこれらの物質系に 適用した例は多くない.そこで基板を使わずに図 10に示すように液滴を上から垂らして支柱との濡 れ性を生かす方法がある.これをペンダントド ロップ法(懸滴法)という.

液滴が図10に示すような形状をとるとき,表面 張力は次の式で与えられる.

 $\gamma = \rho g (d_e)^2 F$ (14) ρ は液滴の密度, gは重力加速度, d_e は液滴の直 径, 縦方向にも d_e 分計ったところでの液滴の直径 を d_s とした場合, Fは d_s/d_e の関数としての補正係 数で, Fordham⁷⁾がその値を表にまとめている. 向井ら⁸⁾による測定装置(図10)では, 溶融スラグ 滴はPtRh製の細管(内径2.9mm, 外径3.5mm) の先端から垂れ下がり, 液滴の大きさは溶融スラ グ上面に接触させたPtRhコイルを上下させて調整 したようである.

液滴重量法

ペンダントドロップ法において、ぶら下がった 液滴の大きさが増すと液体の表面張力が液滴の重 量を支えきれなくなって液滴が落下する.このと き液滴を半径rの管の円周が支えているとすれば、 落下した液滴の重量 $mg \ge 2\pi r \gamma \ge 0$ が等しくなる ため、落下した液滴の質量から表面張力を求める ことができる.この方法を液滴重量法という.実 際にはHawkins \ge Brown⁹⁾によって導かれた補正 係数fを含む次式の関係から表面張力が求められて いる¹⁰⁾.

$$m g = 2 \pi r \gamma f \tag{15}$$

リング引き上げ法

液体表面に作用させた力と表面張力との釣り合いから表面張力を測定する方法には,先に述べた 最大泡圧法以外に次のような方法がある.

円筒(リング)(外径2r₁,内径2r₂)の先端を液体に漬けた後、リングを持ち上げると浸漬位置よ



図10 ペンダントドロップ法



図11 リング引き上げ法

りhだけ上方でリングは液体から離れる(図11). この時、リングに働く力をFとすると表面張力 γ は次式から求められる⁵⁾⁹.

$$\gamma = \frac{F}{2\pi (r_1 + r_2)} - \frac{r_1 - r_2}{2} g \rho h$$
(16)

リング引き上げ法では、液体がリングと濡れるこ とを条件としているが、濡れすぎるとリングの側 面に液体が付着するなどの問題が生じるため、 様々な改良が提案されている.次に述べるコーン 引き上げ法もそのひとつである.

コーン引き上げ法

Padday¹¹⁾は図12に示すように、コーン型の浸漬 子を液体に浸けた場合、部分的に浸けたコーンに かかる力Fはメニスカスにそって作用する表面張 力、液体の表面より上の部分に吸いあがった液体 の重さ、およびコーンに働く浮力からなると考え、 上記の力Fがキャピラリー定数 $k(k^2 = \gamma / \rho g)$ を

金属 Vol.69 (1999) No.7



図12 Padday コーン引き上げ法

用いて,次式で表されることを示した¹²⁾.

 $F/\gamma k = V/k^3$ (17) ここで、Vは液体の表面よりも上に吸いあがった液 体の体積から液体の表面よりも下の部分にある コーンの体積を引いたものに相当する. コーンを 浸漬後引き上げる時、メニスカスがなくなる前に コーンにかかる力は最大値を示す. Paddayは種々 の ψ ($\theta = 0$) に対する V/k^3 の最大値を計算して おり、 V/k^3 の最大値を定数 $C = V_{max}/k^3$ で定義す る. コーンにかかる最大の力F = fgを測定すれば 表面張力は次式から求められる.

$$fg/\gamma k = C \tag{18}$$

$$\gamma = g \ \rho^{1/3} \left(f/C \right)^{2/3} \tag{19}$$

メニスカス形状から表面張力を求める方法

最近向井ら¹³⁾は,液体に浸漬した円筒と液体の 接触部のメニスカス形状から表面張力を求める方 法を報告している.

この方法ではまず,水平に設置した白金るつぼ に液体を満たしその真ん中に白金円筒を垂直に浸 漬する.白金円筒の周囲に形成される液体のメニ スカスの形状を測定し,ラプラスの式を用いて解 析することによって表面張力を測定する.るつぼ と白金円筒との間に形成される液体のメニスカス 形状は図13に示すようにz軸に対称な回転体と考え てよい.メニスカスの液面線は次のラプラスの式 で表される.

$$\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \rho g h + C_0 \tag{20}$$

$$1/R_{1} = (\partial^{2} z / \partial x^{2}) / (1 + (\partial z / \partial x)^{2})^{3/2}$$
(21)

図13 円筒周辺のメニスカス形状から表面張力の測 定法

 $1/R_2 = (\partial z / \partial x) / [x \{1 + (\partial z / \partial x)^2\}^{3/2}]$ (22) ここで、 γ は表面張力、 R_1 、 R_2 は表面上の任意の 点における主曲率半径、zはるつぼの上端からの液 面の高さ、g は重力加速度、 C_0 は定数である、図 13に示すように、変曲点Aでは

$z = Z_A$]
$x = X_A$	(22)
$R_1 = \infty$	(23)
$R_2 = -\sin(\alpha)/X_A$	J

が成立する.これを(20)式に代入すると

 $C_0 = -(\gamma \sin(\alpha)/X_A + \rho g Z_A)$ (24) (24)式を(20)式に代入すると次式が得られる.

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = (\rho g / \gamma)(z - Z_A) - \gamma \sin(\alpha) / X_A \quad (25)$$

(23)式の境界条件を用いれば(25)式は数値的に 解ける.このようにして計算されるメニスカスの 液面線は(25)式から明らかなように(ρg/γ)のみ の関数である.したがって,実測したメニスカス 形状に最もよく一致する(ρg/γ)を(25)式からコ ンピュータを用いて求めることができる.密度が 既知の場合には表面張力が求められる.この方法 は溶融塩や溶融酸化物に対して濡れ性の悪い基板 を見つけるのが困難なとき静滴法の実験装置を利 用して表面張力を測定できるという利点がある.

溶融スラグの表面張力の大きさは?

以上が,高温融体に対して用いられている表面 張力の測定方法の主なものである.最大泡圧法や,

57

表1 種々の液体の表面張力とその温度係数

液体	温度(K)	γ (Nm ⁻¹)	$\frac{d \gamma}{Mr^{-1}K^{-1}}$
Не	1. 2	0.00037	-0.01
Ar	90.2	0.01186	-0.25
H ₂ O	293. 3	0.0728	-0.16
ベンゼン	293. 2	0.0289	-0.13
Hg	235. 2	0.498	-0.2
Fe	1810	1.872	-0.49
Zn	693.2	0.782	-0.17
Re	3453	2.7	-0.34
NaCl	1076	0.114	-0.07
$NaNO_3$	581.2	0.1166	-0.05
Al_2O_3	2354	0.606	
SiO ₂	1993	0.305	+0.031
$30\%SiO_220\%CaO$	1673	0.470	
50% Fe _x O			

リング引き上げ法の原理は、表面張力の定義を理 解するには最も適当である.しかしながら両者と も実際の測定では測定装置の一部と液体の濡れ現 象の影響を考慮しなければ正確な測定値は得られ ない.また、これらの方法は液体が接触する固体 と濡れることを条件とした測定方法であるが、静 滴法の場合には基板とは濡れないことが条件であ るなど、それぞれの測定方法に対して、対象とす る物質の「濡れ性」を予め知っておく必要がある. 溶融塩や溶融酸化物の場合には測定装置を構成す る物質と濡れることが多く静滴法以外の方法が一 般には用いられている.一方、溶融金属・合金の 場合には濡れにくいセラミックスを選ぶことがで き、静滴法がよく用いられている.

溶融金属,溶融酸化物などの測定値を概観する と,表1⁵⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾に示すようにほぼ不活性液体< (水,有機溶媒)<(溶融塩,溶融酸化物)<溶融金 属の順に表面張力の値が大きくなっていることが わかる.また温度が上昇すると液体の表面張力の 値は一般に小さくなるが,SiO₂,GeO₂,B₂O₃な どの表面張力は融点付近の温度では温度上昇とと もに増加することが報告されている.

おわりに

本稿で述べたように液体の表面張力の測定では,

(636)

実験に用いる器具との濡れ性が測定方法の選択や 測定値の精度に直接関係する.また,実際の材料 製造プロセスでは,表面張力の値そのものの大小 だけでなく,周囲の材料との濡れ性がそのプロセ スに大きな影響を与える場合が非常に多い.表面 張力の値の大小が実際に材料をつくるプロセスと どのような関係にあり,またどのような場面で濡 れ性が顔を覗かせているかについては,次回の「液 体と固体の濡れ現象」でご紹介したいと思う.

参考文献

- 1) 那野比古:マイクロマシン,講談社現代新書, (1993).
- 2) 井本 稔:表面張力の理解のために,高分子刊行会, (1993).
- 3) 白石 裕:金属,アグネ,69 (3) (1999), pp.239-246.
- 4) 池宮範人,原 茂太,牧 博文,荻野和巳:電気化学 および工業物理化学,58 (1990), p.156.
- 5) 小野 周:表面張力,共立出版,(1980).
- 6) F. Bashforth and J. C. Adams: An Attempt to Test the Theory of Capillary Action, Cambridge University Press, (1883).
- 7) S. Fordham : Proc. Roy. Soc., 194 A (1948), p.1
- 8) 向井楠宏,石川友美:日本金属学会誌,45 (1981), pp.147-154.
- W. D. Harkins and F.E. Brown: J. Amer. Chem. Soc., 41 (1919), 499.
- A. I. Rusanov and V. A. Prokhorov : Interfacial Tensuimetry, (1996), Elsevier, New York.
- J. F. Padday : J. Chem. Soc. Faraday Trans.
 I, 75 (1979), pp.2827-38.
- M. Kidd and D. R. Gaskell: Metall. Trans. B, 17 B (1986), pp.771-776.
- 13) 余 仲達,向井楠宏:日本金属学会誌,59 (1995), pp.806-813.
- 14) 原 茂太,池宮範人,荻野和巳:鉄と鋼,76 (1990), pp.2144-2151.
- 15) Molten Salt Database, National Institute of Standard Technology, USA, (1988).
- K.C. Mills and B.J. Keene : Intern. Mater. Rev., 32 (1987), pp.1-120.

(たなか・としひろ,はら・しげた/ 大阪大学大学院工学研究科)