



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	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

溶融スラグ編ー7

性質を調べよう(3) ー表面張力

田中 敏宏, 原 茂太

表面張力とは

「ものづくり」に関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り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り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

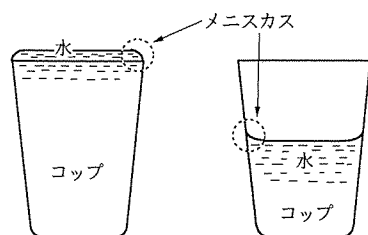


図1 コップの中の水がつくるメニスカス

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

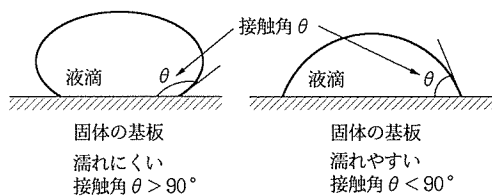


図2 固体基板上の液滴の濡れ性と接触角

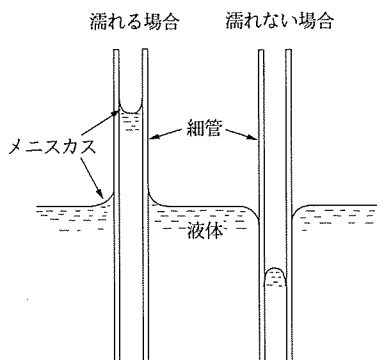


図3 毛細管現象

を十分に考えておかな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、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。

$$\pi r^2 P = 2\pi r \gamma \quad (1)$$

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ようになる。

$$\pi r^2 P = 2\pi r \gamma + \rho g H \quad (2)$$

この式を変形し、

$$P = 2\gamma/r + \rho g H / \pi r^2 \quad (3)$$

(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

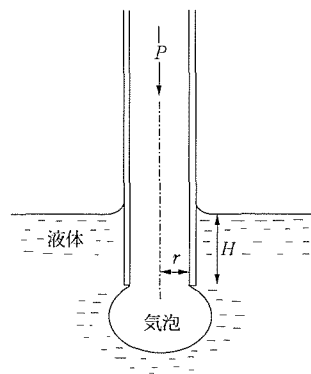


図4 最大泡圧法

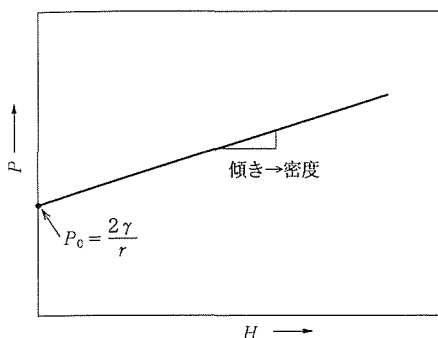


図5 最大泡圧法における最大泡圧 P と細管先端部の深さ H の関係

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、熔融塩、熔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25 mm、深さ30 mm)と気泡生成用の白金製毛細管(内径約1.6 mm、外径約2.5 mm)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

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。ダイヤフラム(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、100 Ω 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。

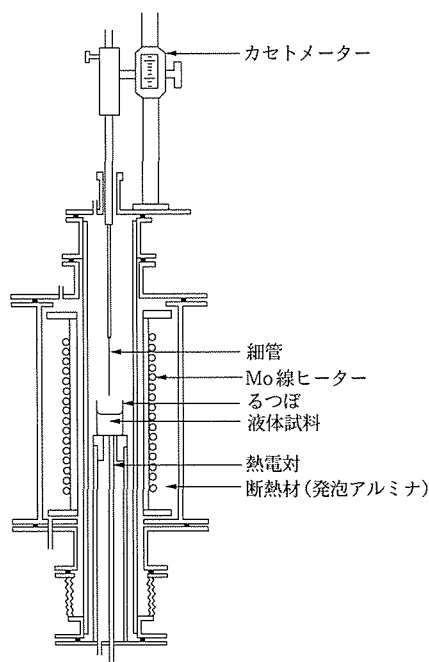


図6 最大泡圧法の実験装置

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。

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

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

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³⁾。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。

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

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。

$$dx/d\phi = R \cos \phi \quad (6)$$

$$dz/d\phi = -R \sin \phi \quad (7)$$

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

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

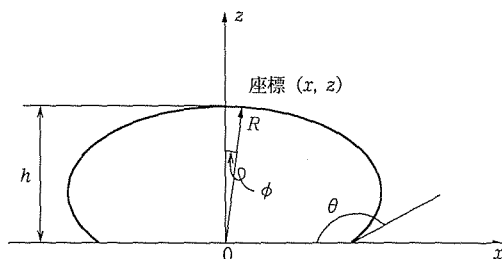


図7 静滴法

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。

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

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

$$R_i = \frac{1}{q_3(q_1 - z_i) + q_2 - (\sin \phi_i / x_i)} \quad (11)$$

$i=0$ 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 $\pi (=3.14)$ 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、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う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

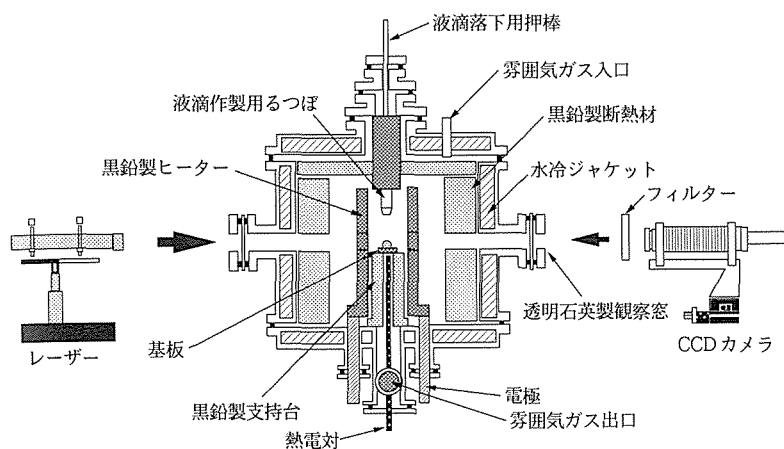


図8 静滴法の実験装置

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、特に熔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。

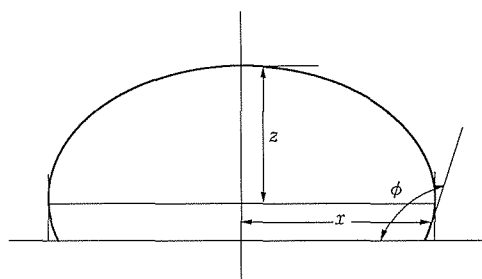


図9 Bashforth & Adamsの方法による静滴の計測

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。

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

$$\beta = \frac{g \rho b^2}{\gamma} \quad (13)$$

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。

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、熔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。

$$\gamma = \rho g (d_e)^2 F \quad (14)$$

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、熔融スラグ滴はPtRh製の細管(内径2.9 mm, 外径3.5 mm)の先端から垂れ下がり、液滴の大きさは熔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。

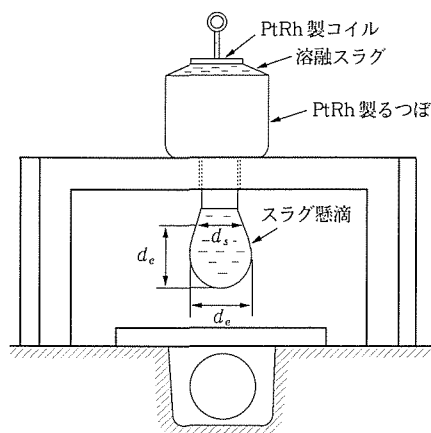


図10 ペンダントドロップ法

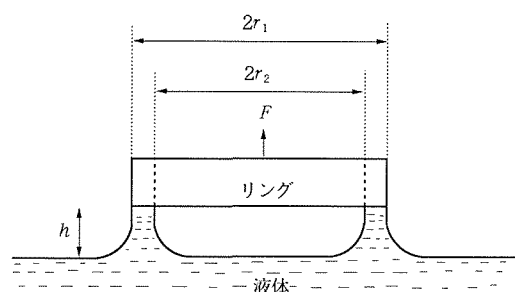


図11 リング引き上げ法

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 と $2\pi r \gamma$ とが等しくなるため、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と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⁾。

$$mg = 2\pi r \gamma f \quad (15)$$

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 $2r_1$, 内径 $2r_2$)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

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⁹⁾。

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

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

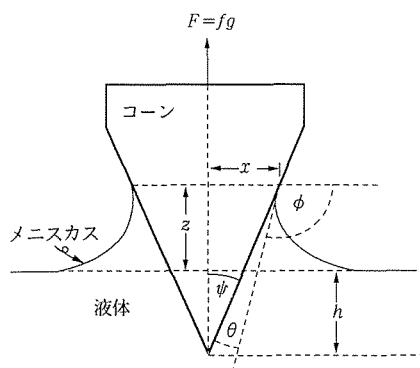


図12 Padday コーン引き上げ法

用いて、次式で表されることを示した¹²⁾。

$$F/\gamma k = V/k^3 \quad (17)$$

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。

$$fg/\gamma k = C \quad (18)$$

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

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ぽに液体を満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。るつぽ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。

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

$$1/R_1 = (\partial^2 z / \partial x^2) / (1 + (\partial z / \partial x)^2)^{3/2} \quad (21)$$

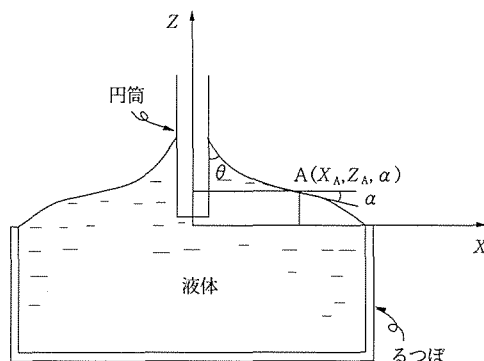


図13 円筒周辺のメニスカス形状から表面張力の測定法

$$1/R_2 = (\partial z / \partial x) / [x \{1 + (\partial z / \partial x)^2\}^{3/2}] \quad (22)$$

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 はるつぽ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

$$\left. \begin{aligned} z &= Z_A \\ x &= X_A \\ R_1 &= \infty \\ R_2 &= -\sin(\alpha)/X_A \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

が成立する。これを(20)式に代入すると

$$C_0 = -(\gamma \sin(\alpha)/X_A + \rho g Z_A) \quad (24)$$

(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)式から明らかのように $(\rho g / \gamma)$ 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 $(\rho g / \gamma)$ 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。この方法は熔融塩や熔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。

熔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、

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)	$d\gamma/dT$ (Nm ⁻¹ K ⁻¹)
He	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 ₂ O ₃	2354	0.606	
SiO ₂	1993	0.305	+0.031
30% SiO ₂ -20% CaO- 50% Fe _x O	1673	0.470	

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、

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と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。
- 9) W. D. Harkins and F.E. Brown：J. Amer. Chem. Soc.，41 (1919)，499。
- 10) A. I. Rusanov and V. A. Prokhorov：Interfacial Tensimetry，(1996)，Elsevier，New York。
- 11) J. F. Padday：J. Chem. Soc. Faraday Trans. I，75 (1979)，pp.2827-38。
- 12) 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)。
- 16) 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)