

Title	壁を這い登る液体-He II と類似の室温での現象-
Author(s)	佐々木, 祥介
Citation	大阪大学低温センターだより. 1987, 57, p. 10-13
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/11543
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

壁を這い登る液体 ——HeIIと類似の室温での現象——

教養部 佐々木 祥 介 (豊中 5244)

1. はじめに

HeIIの現象のうちで、ビーカーに入れられた液体HeIIが、その壁面を這い登りこぼれ出す現象は、次の意味で、他の現象とは少し変わっています。それは、この現象がHeIIの性質だけでなく、壁面の物質の性質も効いており、それらの間の相互作用に由来しているという点です。私は、この現象がどのようにして起るのか不思議に思っていました。それで、「HeIIは真空の壁を登れない。」を標語にかかげ、この流体の運動方程式を解きたいと思いました。その時、未知の要素の存在する超流体でなく、常流体でもこのことが起ればおもしろいし、又その運動方程式を解くことも可能だと思いました。同時に、教養の先生がこのような古典物理の問題が解けないようでは恥かしいとの思いもあり、努力してみますと、意外にも美しく解けるではありませんか。これと同時に、室温で且つ常流体で、HeIIと同様な現象のあることを見つけるために、簡単な実験を行い、液体としてパーフルオロケロセンを使うとうまくいくことが分りました。これらの結果が得られたので、関連文献を色々調べてみますと、驚いたことに、私と同様な考えを40年以上も前に考えておられた先人がいることを知りました。一人はFrenkelで、同様な考えで、運動を解こうとしましたが、ナビエーストークスの方程式の解には到達せず、静止流体の厚みのみ正しく求めました。もう一人は永宮健夫先生で、「液体ヘリウム」という本に同様な考察と静止表面流の厚さを計算され、「表面膜ができるのは液体ヘリウムIIに特有な現象ではないようである。」と指摘されています。これらの仕事を知るにつけ、誰の考えも同じだと思おう一方、流体力学の解が残されていたこと、又室温での実証が残されていたという幸運に感謝しました。ここにその解と、室温での簡単な実験の結果を報告します。

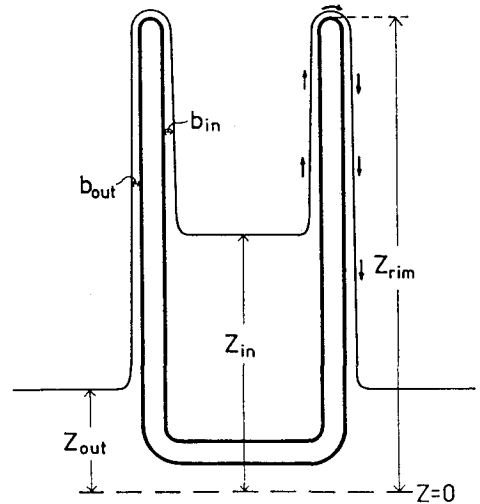


図1. ビーカー内壁面を昇り、外へこぼれ出す表面流

2. 固体壁上の表面流

図2の如く、 z 方向の垂直固体壁を登る表面流のナビエーストークスの運動方程式を書くと、

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \text{grad}) \mathbf{v} = -\text{grad } P + \mathbf{f} + \eta \Delta \mathbf{v} \quad (1)$$

z_{in} : ビーカー内液面の高さ
 z_{out} : ビーカー外液面の高さ
 z_{rim} : ビーカーの最上部の高さ

となる。但し ρ は流体の密度、 \boldsymbol{v} は流速、 P は圧力、 η は粘性係数であり、 \boldsymbol{f} は体積力である。この力 \boldsymbol{f} は固体壁からうける分子間の引力による力と、重力との合力であり、

$$\boldsymbol{f} = -\rho g \boldsymbol{e}_z - (\rho/m) \text{grad } U(x, y, z) \quad (2)$$

ここで、 U は位置 (x, y, z) にいる液体分子 1 個がうけるポテンシャルエネルギーであり、 m はその 1 分子の質量であり、 (ρ/m) は単位体積中の分子数を表わす。ここで定常流を考え、又表面流では流速が非常に小さいので、 \boldsymbol{v} の 2 次の項を省略すると、(1)式は、

$$\eta \Delta \boldsymbol{v} = \text{grad } P + \rho g \boldsymbol{e}_z + (\rho/m) \text{grad } U \quad (3)$$

となる。一方連続の方程式は、非圧縮性、定常流では

$$\text{div } \boldsymbol{v} = 0 \quad (4)$$

となり、この(3)(4)の連立方程式を解けばよい。

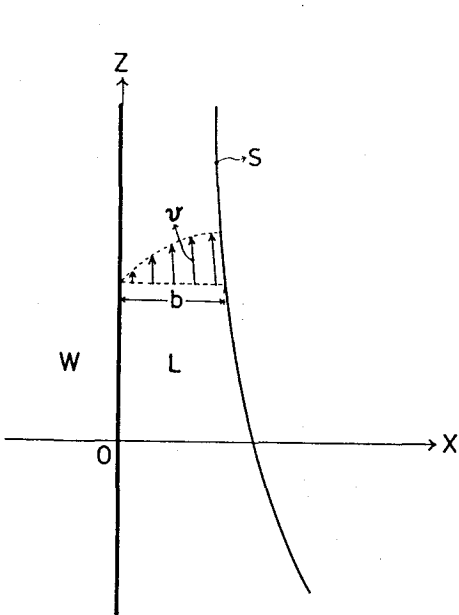


図 2. 表面流の拡大図

W : 固体壁 L : 液体
S : 飽和蒸気との境界面
b : 表面流の厚さ
v : 流速

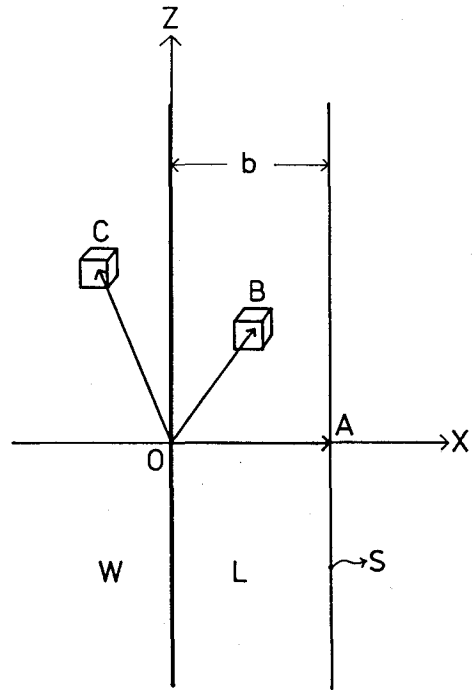


図 3. 表面上の点 A に働く分子間力の計算図

B : A に引力を及ぼす液体部の微小体積
C : " 固体部の "
W : 固体壁
L : 液体

さて、この流れを生み出すポテンシャル U について少し考える。表面流の厚さ $b(z)$ は z 依存性がゆるく、その厚み b の数十～数百倍程度の高さの変化に対しては、ほとんど変わらないため、図 3 の如く平面で U を計算してよい。この時、図 3 の A 点にある液体分子の感じるポテンシャルを、bulk liquid の表面 (容器から充分離れた水平の液体表面) でのポテンシャルを基準として求める。この値は、固体壁

の所を液体におきかえた時とのポテンシャル差であり、分子間ポテンシャルが距離の n 乗に反比例するときには、積分結果は

$$U(x=b) = -\alpha / b^{n-3} \quad (5)$$

となる。ここで、固体・液体間の引力が液体・液体間の引力に比べて大きい時は $\alpha > 0$ となる。この時は、固体壁面上に液体が拡がり、今問題としている表面流が生じる。このポテンシャル(5)式に対して、前述のナビエーストークスの方程式が解け、膜厚 $b(z)$ は、例えば $n=6$ の時(ファンデワールス力の時)には、

$$b(z) = \sqrt[3]{\xi / [\exp\{\xi m g (z - z_0) / \alpha\} - 1]} \quad (6)$$

但し、 z_0 は下部液体の水平表面の高さ、 $\xi = 3\eta\sigma / (\rho g)$ 、 σ は単位長さ幅の表面を流れる流量である。又流速は、

$$v_z(x, z) = -\frac{3\sigma}{2b^3(z)} (x^2 - 2xb(z)) \quad (7)$$

で与えられる。今までは、這い登る表面流、すなわち図1での内壁面流を考えたが、同様に流下する外壁面流も計算でき、ビーカー上端 $z = z_{rim}$ でこの二つの解を接続すると流量 σ が次の方程式の根として決まる。

$$\exp\{\xi m g (z_{rim} - z_{in}) / \alpha\} + \exp\{-\xi m g (z_{rim} - z_{out}) / \alpha\} = 2 \quad (8)$$

$n \neq 6$ の時も同様に解を求めることができる。

3. 室温での実験

前節で述べたように、固体壁をぬらす液体でないこの現象が起らないので、化学教室の方々から色々知識を借りて、パーフルオロケロセンという液体でやっとこの現象を観測することに成功した。それは図4のように、三角フラスコ内に小ビーカーをつくり、ビーカー内及びフラスコ下部にパーフルオロケロセンを入れ密封したものを、大ビーカー内の水中に断熱材Hをして固定した。Sは外からの光による蒸発を防ぐためのシールドで、この一部に窓をあけ、時々ぞいで液滴の落下するのを観察した。2ヶ月の観察で20滴の落下を観測し、約3日に一滴のわりで落ちることがわかった。

そのほかの液体も可能性のあるものが2~3種あるが、もっと流量が小さく、装置を改良しないと、明確な結果を出せない。又固体壁はバイレックスガラスだけを用了が、不透明なものでよければ種々

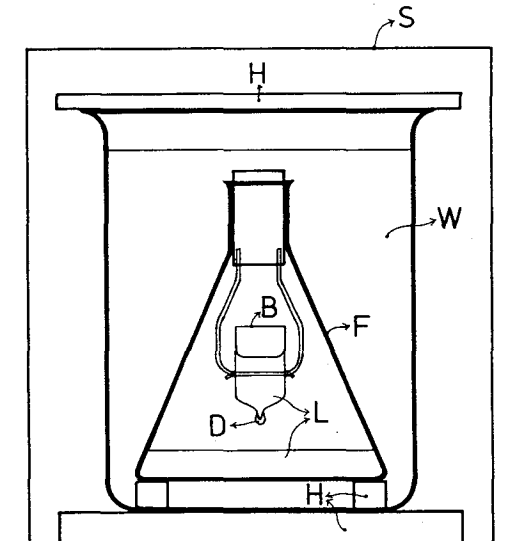


図4. 室温での簡単な実験

B : 小ビーカー F : フラスコ
L : パーフルオロケロセン D : 液滴
H : 断熱材 W : 水
S : 光をさえぎる保温箱

考えることができる。ここで、数人の方から聞かれた質問について答える。それは、この液滴はまわりの飽和蒸気の凝結したものではないかとの質問である。飽和蒸気は液滴につくとその半径を大きくし、表面エネルギーが大きくなる。そのためむしろ蒸気がフラスコ内壁面についての方がエネルギー的に得となる。事実、他の液体で表面流があまり大きくない時には、始めに液滴がついていても、飽和蒸気圧下で液滴がどんどん小さくなり液滴からフラスコ内面へ蒸気を通して移動する現象を観測した。すなわちこの落下液滴は表面流により作り出されたものである。

4. 夢

この一見、特異にみえる現象がもっと自然界にないだろうか。夢、夢、夢……。植物が、木が見えてくる。ひょっとしたら、水が導管内を上昇していくのは、今考えてきた現象と同じものではないか。水の双極子と導管壁のセルロースの双極子とが強い引力で引かれ、移動しているのではないか。導管壁は死んだ細胞らしいし、100 mをこえる木もあるから、大気圧、毛細管現象、浸透圧では木の最上部まで水が上がることを説明するのはむづかしい。私は今この夢にとりつかれている。生物学研究者をはじめとして、もし興味のある方は、是非御一報下さい。一緒に調べてみたいものです。

5. おわりに

理論物理専攻の私が、火遊び的な実験をすることを許して下さった教養部物理教室全員の方々に感謝します。とりわけ、今まで、砂川重信先生、斉藤晴男先生、大塚穎三先生、又同僚の癸生川武次、北野保行、藤田佳孝、大山忠司、諸兄に大変お世話になり、感謝しております。末筆ながら、私の論文をよんで親切な手紙を下された永宮健夫先生にお礼申し上げます。最後に、頑固一徹の私でも自由にやってこれた教養部物理教室の学究的雰囲気は今後も続くことを夢みて筆を置きます。

〔参考文献〕

J. Frenkel, J. Phys., 2 365 (1940)

永宮健夫 「液体ヘリウム」(物理学集書7)昭和22年 河出書房