寄 書

微小重力下におけるシリコンオイルと
ガラス容器の濡れ挙動鈴木俊夫^{*1} 茂木徹一^{*2}佐久田博司^{*3} 栗林一彦^{*4}^{*1}東京大学工学部^{*2}千葉工業大学工学部^{*3}青山学院大学理工学部^{*4}宇宙科学研究所

Wetting Behavior of Silicone Oil in Glass Vessels under Microgravity

Toshio Suzuki^{*1}, Tetsuichi Motegi^{*2},
Hiroshi Sakuta^{*3} and Kazuhiko Kuribayashi^{*4}^{*1}Faculty of Engineering, the University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo^{*2}Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba^{*3}Aoyama Gakuin University, Setagaya, Tokyo^{*4}Institute of Space and Astronautical Science, Sagami-hara, Kanagawa**Keywords:** silicone oil, microgravity, wet angle, meniscus shape

I. 結 言

微小重力下における容器と液体の濡れ挙動の理解は、凝固や溶液からの結晶成長実験を考える上で重要である。フローティングゾーン法や浮遊凝固法では融液表面の温度差によりマランゴニ対流が生じ、これが良好な結晶の成長を阻害するとされている。このマランゴニ対流は液体の表面張力とともに、容器や固体との濡れにより決まる自由表面形状に依存する。これを解析するためにシリコンオイルなどのモデル物質を用いた短時間微小重力実験が試みられているが、実験開始以前に容器と液体の濡れによる自由表面形状が想定した形状から変化することなど、適切な実験条件を得ることが難しい場合も生じている。このため、容器中の液体の濡れ挙動の重要性があらためて認識され、濡れ挙動の観察実験⁽¹⁾や、微小重力下での液の安定性、平衡形状についての解析も試みられている⁽²⁾。また、新たな計画として微小重力下で成長した微粒子を容器壁に付着させたシリコンオイルに回収する実験なども考えられており、実用的にもシリコンオイルの濡れ挙動を予測することが求められている。

ここでは、簡単な実験装置により自由落下中のシリコンオイルとガラス容器の濡れ挙動の観察し、その結果より短時間の微小重力下で実現するメニスカス形状や容器形状の影響を検討した結果を報告する。

II. 実 験 方 法

北海道砂川町の無重力実験施設で実験を行った。落下キャセル内に設置したガラス容器中に粘度 10cSt および 100cSt のシリコンオイルを入れ、落下前および落下中の液面形状をビデオカメラに記録し、その画像を出力、解析した。用いた容器は、断面形状が4角形および円形のガラス容器で、内寸は角柱容器の幅が 20 mm、奥行きが 1, 5, 10, 20 mm の4種類、円柱容器の内径が 5.7, 9.8, 18.5 mm の3種類である。いずれも高

さは 200 mm で、約1/3の高さまでシリコンオイルを注入した。なお、エッジ角の影響を比較するために、頂角が30°, 150°の菱形柱容器を用いた実験も行った。

III. 実験結果および考察

1. 円柱容器での液面形状

Fig. 1に円柱容器を用いた場合の落下中のシリコンオイルメニスカス形状を示す。図の左側が粘度 10cSt、右側が 100cSt のシリコンオイルで、容器内径はそれぞれ左より 5.7, 9.8, 18.5 mm となっている。落下直後の2.3秒間にシリコンオイルは容器壁に沿って上昇し、その後の落下中のメニスカス形状は一定となる。この時の形状はほぼ球面であり、このような挙動はシリコンオイルの粘度や容器の内径に依存していない。また、シリコンオイルのように濡れ角の小さい液体は壁面に沿ったマクロ的な液の先端部前方に極めて薄い液膜を形成することも報告されているが⁽³⁾、そのような領域は確認できない。

容器中の液体のメニスカス平衡形状は容器との濡れ角 θ とラプラスの式より求められる。微小重力下では液内の圧力はいたるところで等しいことから、円柱容器でのメニスカス平衡形状は球面となる。また、簡単な計算により容器壁と中心部のメニスカス高さの差 h は、濡れ角 θ と容器内径 d により求められ、

$$h = \frac{1 - \sin \theta}{2 \cos \theta} d$$

となる。

前述のように落下中のメニスカス形状はほぼ球面となっており、上式が成立していると見なせる。**Fig. 2**に写真から読みとったメニスカス高さの差 h と容器内径 d の関係を示す。いずれの粘性のシリコンオイルでも両者はほぼ同一の直線関係にある。しかし、直線の傾きから算出した濡れ角は18.5°となり、通常報告されている値に比べ大きい⁽³⁾。これは、メニスカスの移動時に測定される濡れ角は静的な場合に測定される濡れ角に比べ大きくなることが報告されており⁽³⁾⁽⁴⁾、本実験中のメニ

Fig. 1 Surface shapes in cylindrical vessels. Viscosity: 10cSt (left), 100cSt (right).

Fig. 2 Inner diameter of vessels vs. difference of the liquid height at the center and at the wall of vessels.

カスはずかに移動を続けていることを示唆している。したがって、ここで求めた濡れ角は、短時間の微小重力下で実現するマクロ的なメニスカス形状を予測する上での実効的な値と考えれば良い。

2. 角柱容器のメニスカス形状

Fig. 3 に角柱容器を用いた場合の自由落下中のメニスカス形状を示す。いずれも左から容器奥行きが 1, 5, 10, 20 mm となっている。Fig. 3(a) の 100cSt シリコンオイルでは、容器奥行きが増加につれ容器エッジ部での液上昇が著しい。Fig. 3(b) に示す 10cSt の場合も基本的には同様の挙動を示すが、容器エッジ部での液上昇はより顕著である。奥行き 20 mm の容器では容器エッジ部での液上昇が著しく、一部は落下中に容器外に流出した。しかし、いずれのシリコンオイルでも容器奥行きの減少につれエッジ部の液上昇は低下し、奥行き 1 mm の容器では幅方向に円弧状となる。

エッジ部での液の安定性はエッジの角度 2α と濡れ角 θ により決定され、

$$\alpha + \theta < \pi/2$$

を満足する場合には、液は安定で分離した液滴を作ることなくエッジを濡らしていく⁽²⁾。

上述のように、シリコンオイルとガラスの濡れ角が 18.5° 、エッジ角度が 90° であることから、シリコンオイルはガラス容器のエッジ部で安定であり、エッジ部で液が上昇し続けることが理解できる。さらに、エッジ部のメニスカス幅は液量に依存するので、十分な液があればエッジ部が互いに干渉し、エッジ部の特異性は失われることが理解できる。Fig. 2 に示した奥行き 1 mm の容器の結果はこの場合に対応し、メニスカス形状は容

Fig. 3 Surface shapes in rectangular vessels. Depth of the vessels is 1, 5, 10 and 20 mm from left. Viscosity: (a) 100cSt, (b) 10cSt.

器の奥行きと幅にも依存することが分かる。なお、菱形柱容器を用いた実験では、エッジ角が 75° であるので、上式からすれば液はエッジ部で不安定となりエッジ部で液は上昇しないこととなる。にもかかわらず、エッジ部での液の上昇が観察された。このことは、Fig. 2 から求めた濡れ角は見かけのものであり、液の安定性を記述する静的な濡れ角よりも大きな値であることに対応している。

IV. 結 言

落下塔を用いた微小重力実験により円柱および角柱ガラス容器中のシリコンオイルメニスカスの形状変化を観察し、濡れ挙動を検討した。円柱容器ではシリコンオイルのメニスカス形状はほぼ球面となり、その形状より算出した濡れ角は 18.5° であった。この値は報告されている値より大きく、短時間の微小重力実験では平衡メニスカス形状が実現しないことを示している。角柱容器ではシリコンオイルはエッジ部で著しく上昇した。この挙動はエッジ部での液の安定性条件から説明できる。これらの観察結果から、角柱容器を用いる限りエッジ部に半径を付けてもシリコンオイルの上昇を避けられないこと、すなわち、十分な液が容器にある場合にはエッジ部の平面部で液は接するので、平面部のエッジ角と濡れ角で決まる安定性が支配することになり、エッジ部に半径を付けたことの効果はなくなることが考えられる。したがって、角柱容器におけるメニスカス形状は容器寸法だけでなく、液の総量にも依存することになる。また、平面壁を薄い液膜で濡らすには、一定の間隔で壁にエッジ部やリッジ部を設ける必要があることなどが予測され、微小重力実験での適切な容器形状選択の重要性があらためて指摘できる。

最後に、有益な助言をいただいた(株)三菱総合研究所 石川正道博士、本研究にご援助頂いた石油公団、三菱原子力工業(株)、実験遂行にご協力頂いた(財)産業創造研究所、(株)地下無重力実験センターに謝意を表します。

文 献

- (1) D. Langbein, W. Heide and R. Großbach: *7th European Symposium on Materials and Fluid Science in Microgravity*, ESA SP-295, Paris, (1989), 389.
- (2) P. Concus and R. Finn: *Acta Math.*, **132**(1974), 177.
- (3) 青柳成俊, 福沢 康, 古口日出男, 岩里直久, 岡田昌章, 小島 陽: 日本マイクログラビティ応用学会誌, **7**(1990), No. 2, 55.
- (4) K. Schwerdtfeger: *Proc. of COMMP'93*, Tokyo, ISIJ, (1993), 1.

(1993年 8 月12日受付)