

微小重力環境下における液柱形状に対する
固液界面の濡れ性の効果

Effects of the Wettability for Liquid Bridge Shapes at the Solid-Liquid Interface Under Microgravity

福沢 康 ⁽¹⁾	小島 陽 ⁽¹⁾	佐久田 博司 ⁽²⁾
Yasushi.Fukuzawa	Yo.Kojima	Hiroshi.Sakuta
岡田 昌章 ⁽³⁾	小藤 晃弘 ⁽⁴⁾	依田 真一 ⁽⁵⁾
Masaaki.Okada	Akihiro.Kofuji	Shinichi.Yoda
井村 貞治 ⁽⁶⁾	石倉 精三 ⁽⁶⁾	田中 健男 ⁽⁷⁾
Sadaji.Imura	Seizo.Ishikura	Tateo.Tanaka

(1) 長岡技術科学大学 工学部

Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology

(2) 青山学院大学 理工学部

Department of Mechanical Engineering College of Science and Engineering
Aoyama Gakuinn University

(3) 筑波技術短期大学 機械工学科

Department of Mechanical Engineering Tsukuba College of Technology

(4) 長岡技術科学大学 大学院

Graduate course Nagaoka University of Technology

(5) 宇宙開発事業団

National Space Development Agency of Japan

(6) (財) 宇宙環境利用推進センター

Japan Space Utilization Promotion Center

(7) 轟産業株式会社

Todoroki Industries,Ltd

ABSTRACT

It is well known that some material scientific and biological experiments came out to be a failure due to neglect the wetting phenomena at the liquid (molten material)-solid(container material) interfaces on space. Thus, it is required to estimate the gravitational effects on the wetting behavior between the liquid-solid interface. Though many attempts had been tried to evaluate precisely the value of the static wetting phenomena on the ground, the dynamical and statical wetting problems on space had remained unsolved. So in this report, we discuss the wettability on the liquid-solid interface considering the gravitational effects and the dynamical conditions by liquid bridge method. The experimental results were evaluated from the liquid bridge shapes and the contact angles using an aircraft in parabolic flight. The liquid bridge shapes were observed by CCD video recording system and analyzed by using the technique of digital image acquisition and processing.

1. 緒言

宇宙空間において材料実験を行う場合、固液界面の濡れ性を無視できない場合があることはよく知られている⁽¹⁾。微小重力環境下においては、体積力が無視できるため、濡れ性は地上における挙動とは異なる。この濡れ性に対する考慮がなされていないため、液体（熔融）材料を容器中に保持して宇宙で材料実験を行う際に、液体が容器の内壁を伝わってあふれ出たり（濡れ性が良い場合）、液体が容器から剥離し、表面張力によって球状になり浮遊した（濡れ性が悪い場合）という例が、実際の宇宙実験報告にもある。この濡れ性の問題を解明するために、多くの理論解析及び実験が行われ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾、次のような科学的因子が濡れ挙動に関与することが判明している。（1）重力（体積力）、（2）実験条件（試験温度、湿度、雰囲気、固体表面性状）、（3）履歴、（4）動的濡れ挙動。

著者らは、微小重力環境下での材料と容器の適合性評価技術開発の一環として、固液界面の濡れ挙動変化を観察する手法とその解析方法の開発を目的とした実験、解析を行ってきた。本報告では、航空機による放物弾道飛行実験により、濡れ挙動におよぼす動的、静的な問題や、重力の効果について、調査・検討を行った結果について述べる。

2. 実験方法

供試材には固体試料に純ニッケル、液体試料に市販のグリセリンを用い、濡れ挙動は、固液界面に形成される接触角により評価した。従来のリキッドブリッジ法は、微小重力下において、流体力学的に解析する方法に用いられ、濡れ挙動を評価することはなかった。そこで、本報告ではリキッドブリッジ法による新しい濡れ挙動評価システムを提案した。実験装置の系統図を図1に示す。

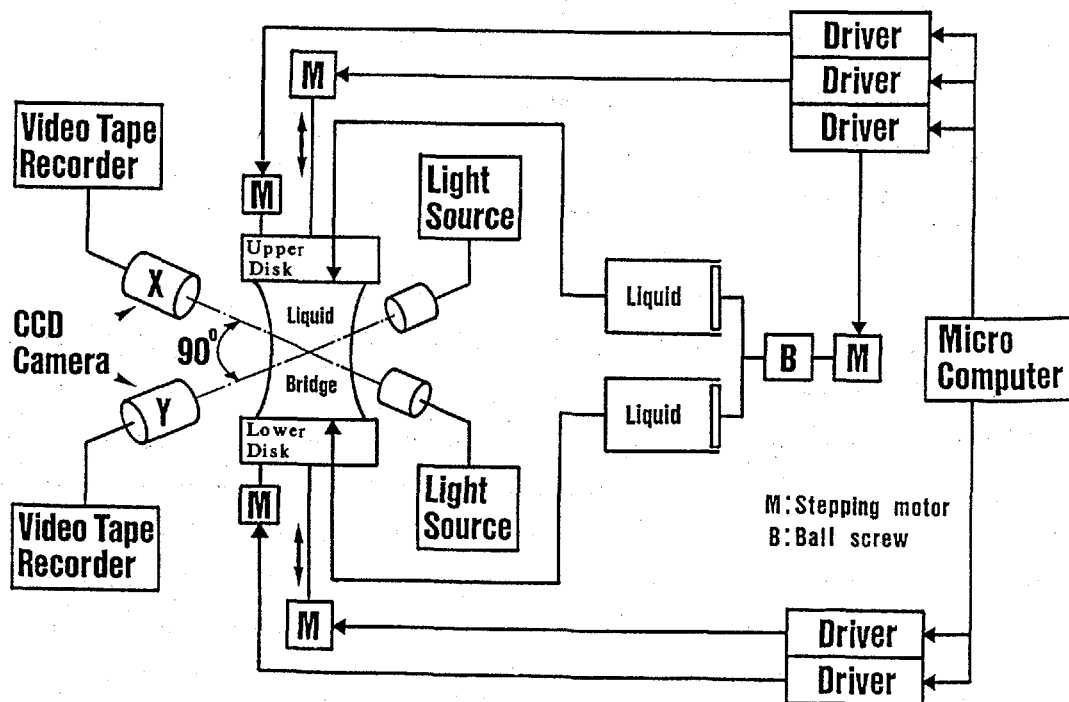


図1 実験装置系統図

Fig. 1. Block diagram of experimental system.

実験装置は次の4つの主要部分から構成されている。(a)液体押出、引抜き装置、(b)液柱形成装置、(c)液柱形状記録装置、(d)機構制御装置。液柱は、微小重力環境開始と同時に、予め設定した体積で平行固体平板間に形成される。動的及び静的濡れ挙動を得るため、次の2種類の液柱形成過程について実験を行った。(a)連続引き伸ばし、(b)任意の距離まで引き伸ばした液柱を微小重力終了まで保持する。微小重力の始めから放物弾動飛行の終わりまでのデータについて固液界面の接触角の解析を行い、これにより、 μg から2.2gまでの重力変化に対する濡れ挙動の評価を行った。液柱形状はCCDカメラで記録し、画像処理を用いて解析を行った。本報告では、次の科学的因子について評価を行った。(1)液柱体積、(2)履歴、(3)動的及び静的濡れ挙動、(4)重力の効果。

3. 結果及び考察

液柱の形状は、機体進行方向(X軸方向)及び横方向(Y軸方向)の2方向について計測を行った。図2に微小重力環境下における、静的な状態の液柱形状の例を示す。経過時間に対する、上下界面の代表的な接触角変化を図3に示す。この図では、方向による重力の影響を検討するため、1回の実験についてX及びY軸方向の結果を併せて示した。微小重力環境下において、接触角は平板の上下、機体進行方向または横方向の重力軸に関係なく、ほぼ一定の値を示した。この結果より、今回の実験のように非常に低い重力レベル下では、液柱は軸対称形状に形成され、静的濡れ挙動は上下平板上で同等に扱えることがわかった。

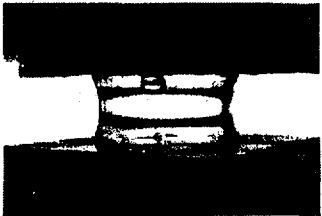
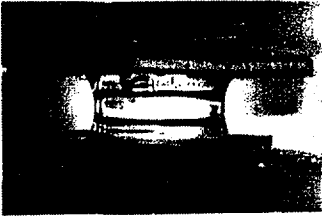
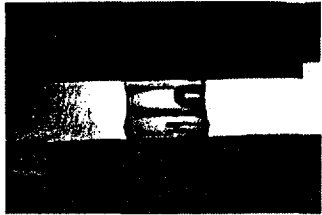
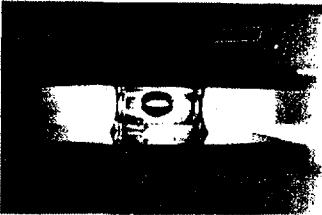
Liquid Volume (mm ³)	X direction	Y direction
1200	 0.02 g	 0.02 g
500	 0.01 g	 0.01 g

図2 微小重力環境下における
静的液柱形状(X軸、Y軸方向)



10 mm

Fig. 2. Typical liquid bridge shapes of x and y axis at static condition under microgravity.

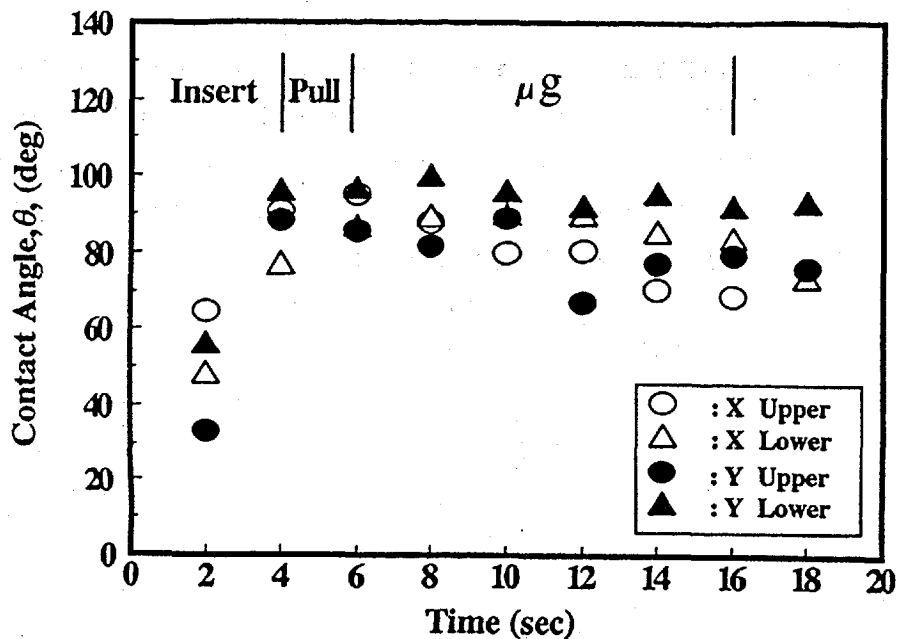


図3 微小重力環境下における経過時間に対するX軸・Y軸方向の接触角変化 (体積 500 mm³)
 Fig. 3. Variation of the contact angle, θ , with the time elapsed at x and y axis under microgravity. (volume 500 mm³)

図4は0.2gにおける静的接触角の変化を示している。上部平板側の接触角は下部平板側の接触角よりも大きく、微小重力環境下におけるものとはほぼ似た値を示した。従って、下部平板における濡れ挙動は、上部平板に比べ重力の影響を受けやすいものと考えられた。

次に液柱の体積の効果について評価を行い、図5にその結果を示す。この場合、静的濡れ性は体積の減少とともに悪くなるが、体積が十分大きくなると、任意の値に収束した。

本研究では、履歴の効果についても検討を行った。その結果を図6に示す。静的後退接触角は、前進接触角よりも小さくなった。結果をアスペクト比及びボンド数により整理した。図7に経過時間とアスペクト比の関係を示す。微小重力環境下においては、体積に関わらずアスペクト比は一定の値を保った。このことより、微小重力状態の間、液柱形状は任意形状を保つことがわかった。図8にボンド数と接触角の関係を示す。一般にボンド数は(1)式のように定義される。

$$B = \rho g D^2 / \gamma \quad (1)$$

ここで、 ρ : 液体の密度, g : 重力, D : 液柱の直径, γ : 液体の表面張力である。しかし本報では、アスペクト比を含んだ重力の効果解析するため、次の式を用いた。

$$B_0 = B (L/D) = \rho g D L / \gamma \quad (2)$$

ここで、 L : 液柱の高さである。

$B_0=1$ 以下では接触角は若干のばらつきはあるものの、ある範囲内で一定の値を示しているが、 $B_0 > 1$ の領域では、接触角は明らかに減少している。このことより、濡れ性に及ぼす重力の効果はボンド数で評価できることがわかった。

次に、アスペクト比と接触角との解析結果を、図9に示す。これより、接触角はアスペクト比にも関係づけられ、アスペクト比の増加とともに増大する。またこの関係は0.2gにおいても同様の傾向が認められた。従って図8と図9の結果から、静的濡れ性は、重力の状態(ボンド数)と液柱のアスペクト比の大きさによりほぼ評価できる可能性があることがわかった。

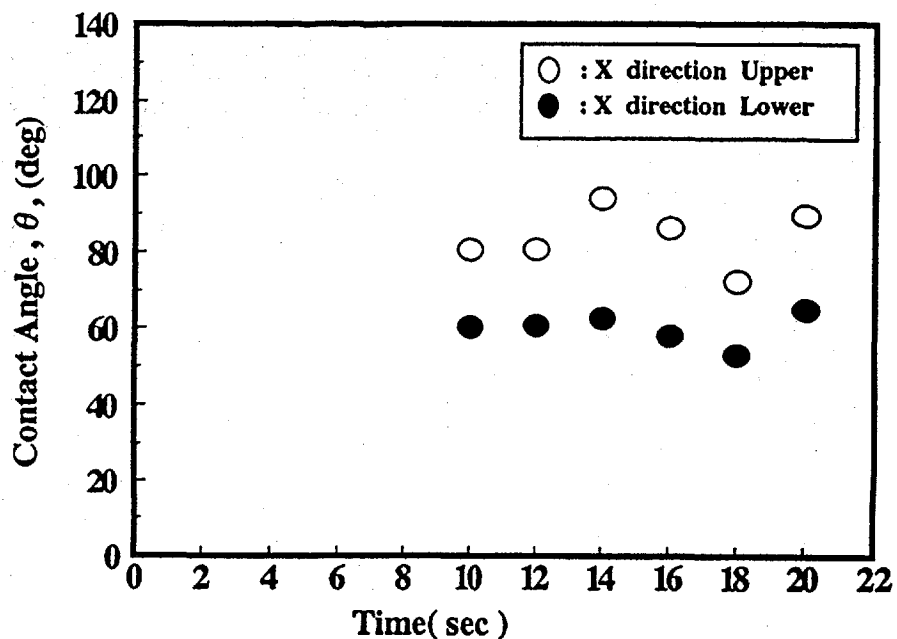


図4 0.2gにおける経過時間に対する接触角変化
 Fig. 4. Variation of the static contact angle, θ , with the time elapsed at 0.2 g.

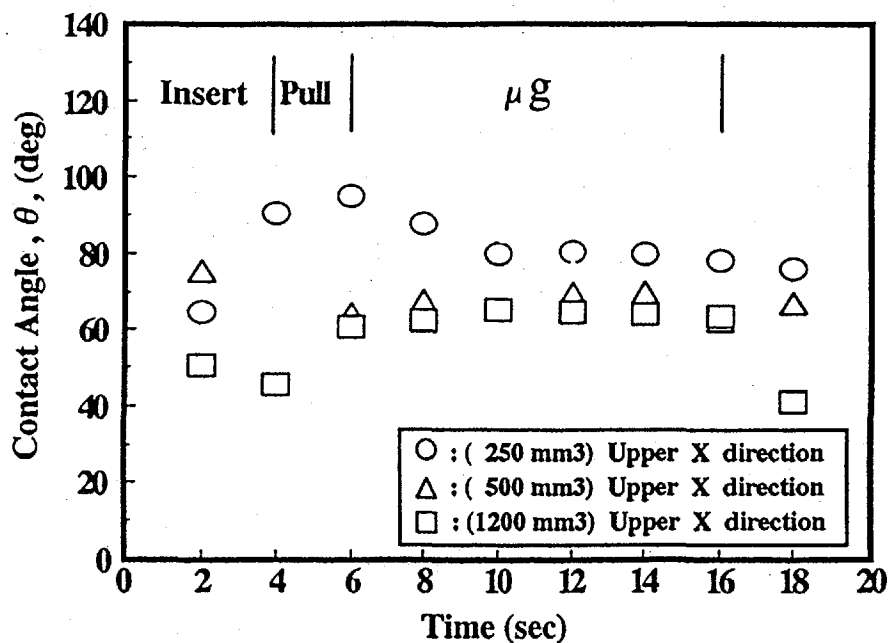


図5 微小重力環境下における静的濡れ挙動に及ぼす体積の影響

Fig. 5. Liquid volume effect on the static wetting behavior under microgravity.

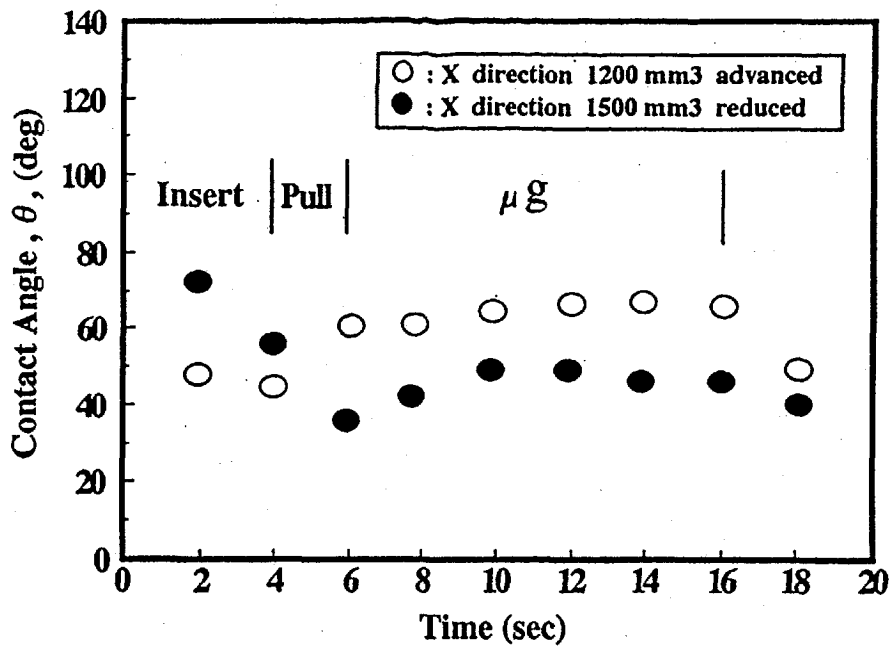
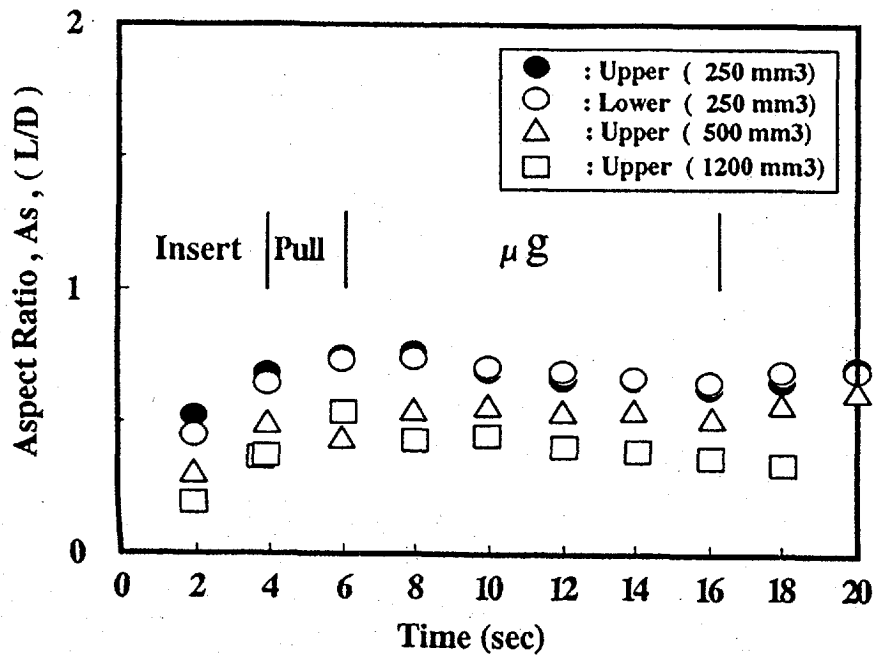


図6 微小重力環境下における静的濡れ挙動に及ぼす履歴の影響

Fig. 6. Hysteresis effects on the static wetting behavior under microgravity.



L : Bridge Height
D : Bridge Diameter

図7 微小重力環境下における静的濡れ挙動のアスペクト比変化

Fig. 7. Variation of the aspect ratio on the static wetting behaviors under microgravity.

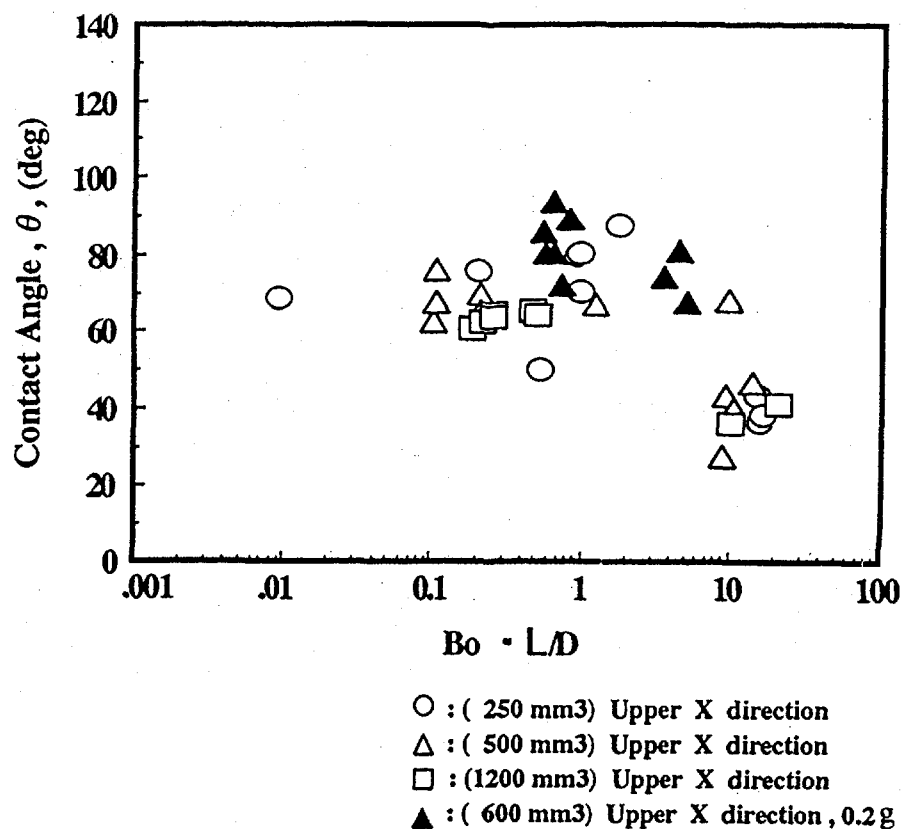


図8 ボンド数と接触角の関係

Fig. 8 Correlation between Bond number, Bo , and contact angle.

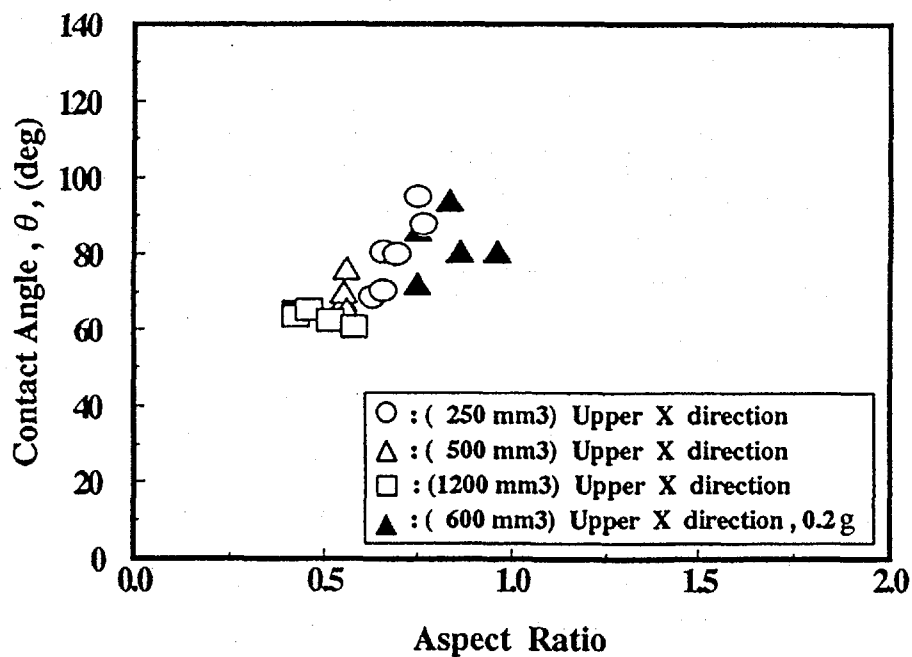


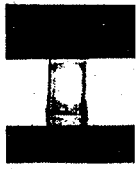



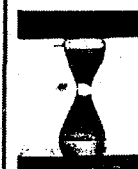
図9 アスペクト比と接触角の関係

Fig. 9. Correlation between aspect ratio and contact angle.

動的濡れ挙動は、微小重力環境下において液柱を連続的に引張り、(1) 航空機の進行方向・横方向の重力軸方向、(2) 固体平板の上下、による相違に注目して接触角の変化から観察した。

図10に動的濡れ挙動におけるアスペクト比に対する液柱形状の変化を、図11に経過時間と接触角の関係を示す。経過時間に対して(1)及び(2)は各々同じ傾向であったことから、微小重力環境下における動的濡れ挙動は、航空機の重力軸方向(進行方向・横方向)や界面の上下位置に依存せず、全ての液柱形状は軸対称双曲面であることがわかった。

また、動的状態におけるアスペクト比と接触角の関係を図12に示す。この関係と、図11の液柱形状とを比較すると、次のようなことがわかる。動的状態ではアスペクト比が大きい領域では、接触角はアスペクト比に比例して大きくなる。しかしアスペクト比が小さい領域では、接触角は逆に小さくなる傾向が認められた。アスペクト比が小さくなるにつれて、液柱形状は円柱形状から、液柱の中ほどがくびれて、上下界面の直径より細くなる。この液柱形状変化に従って接触角は減少する一方、アスペクト比の大きい場合、静的濡れ挙動と同様に、接触角はアスペクト比に依存するが、その比率は静的な場合に比べて小さく、その依存性は少なくなることがわかった。

Time (sec)		4	6	8	10	12
Aspect Ratio (-)	Upper	1.26	1.44	1.75	1.82	2.06
	Lower	1.18	1.35	1.65	1.77	2.00
Liquid Bridge Shapes		 0.01 g	 0.02 g	 0.03 g	 0.01 g	 0.00 g



 10 mm

図10 微小重力環境下における動的液柱形状変化
 Fig. 10. Typical continuous elongated liquid bridge shapes under microgravity.

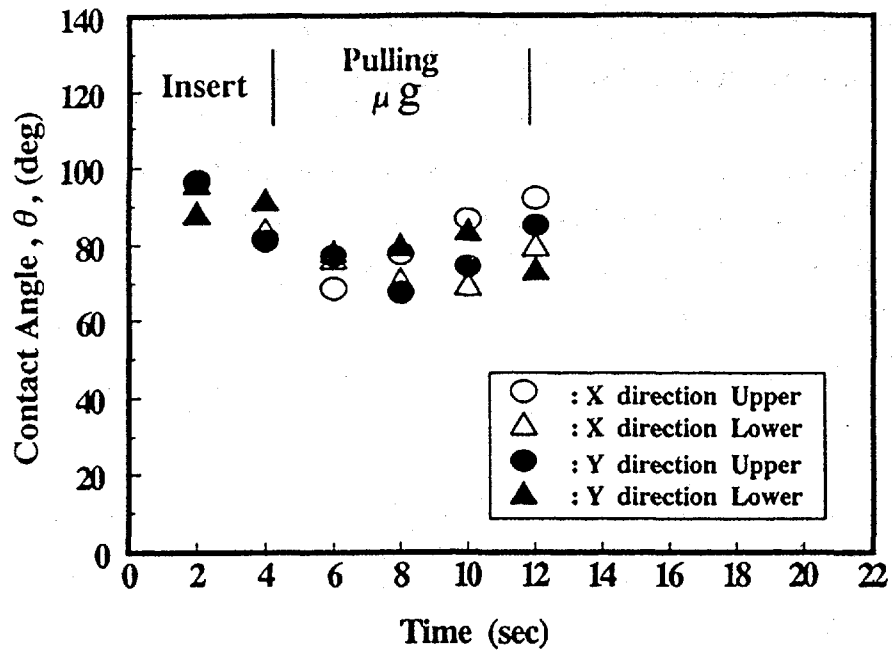


図11 微小重力環境下における動的液柱の経過時間に対する接触角変化

Fig. 11. Variation of contact angles during continuous pulling liquid bridge under microgravity.

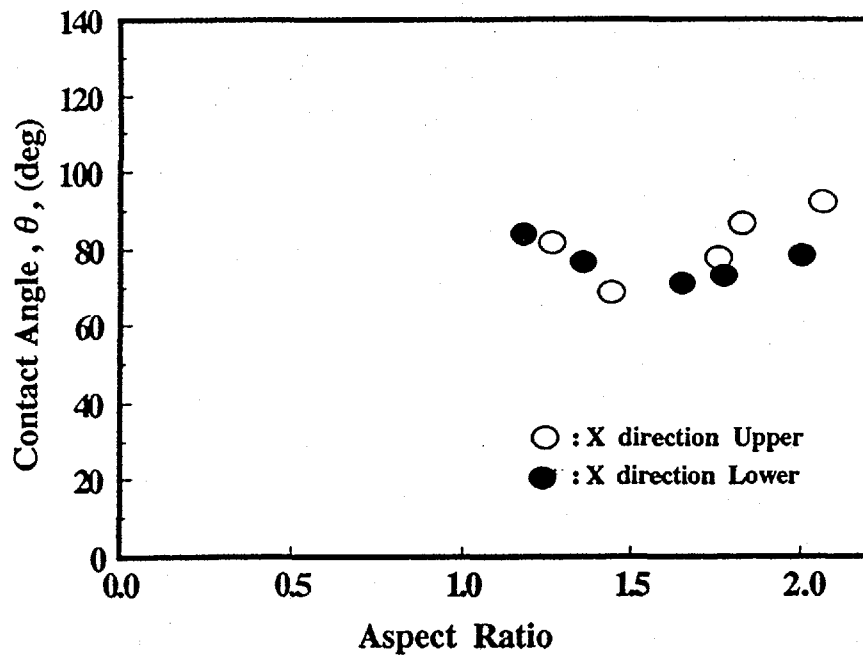


図12 微小重力環境下における動的液柱のアスペクト比と接触角の関係

Fig. 12. Correlation between aspect ratio and contact angle at continuous elongated liquid bridge under microgravity.

4. 結言

固液界面における濡れ性の、重力に対する影響及び動的な効果について、リキッドブリッジ法による微小重力実験で調査した。要点を以下にまとめる。

- (1) 微小重力環境下において、液柱は軸対称双曲面形状を形成する。
- (2) 静的後退接触角は、前進接触角よりも小さい。
- (3) 静的濡れ性は、重力の状態（ボンド数）と液柱のアスペクト比で整理できた。
- (4) 動的濡れ挙動は、静的な場合と同じく、アスペクト比に関係するが、その依存性は小さい。

謝辞

本研究を行うにあたり、多大なご支援を賜ったダイヤモンドエアサービス（株）の皆様へ深く御礼申し上げます。

参考文献

1. H.C.de.Groh III and H.B.Probst, "Effects of Crucible Wetting During solidification of Immiscible Pb-Zn Alloy," AIAA, 89304, Jan.1989, pp.1-6.
2. A.Sanz and I.Martinez, "Minimum Volume for a Liquid Bridge between Equal Disks," J.Colloid Int.Sci.,93,1983,pp.235-240.
3. A.Sanz, "The Influence of the Outer Bath in the Dynamics of axisymmetric Liquid Bridge," J.Fluid Mech.,156,1985,pp.101-140.
4. J.Meseguer, "The Influence of Axial Microgravity on the Breakage of axisymmetric Slender Liquid Bridge," J.Crystal Growth,62,1983, pp.577-586.