HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	部分的な濡れ性変化が微小重力下で形成する液体プラグ長さに及ぼす影響
Author(s)	吉田, 仁; 熊谷, 剛彦; 井口, 学
Citation	実験力学, 4(2), 115-119 https://doi.org/10.11395/jjsem.2001.4.115
Issue Date	2004-06-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/75039
Type	journal article
File Information	J. JSEM 4.115.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

論 文

部分的な濡れ性変化が微小重力下で形成する液体プラグ長さに及ぼす影響

吉田仁*、熊谷剛彦**、井口学***

Effect of local wettability change on liquid plug length in microgravity

Jin YOSHIDA, Takehiko KUMAGAI, and Manabu IGUCHI

Liquid plugs are generated in a partially filled horizontal circular pipe during the period from normal gravity to microgravity. If the liquid plugs are solidified, the structure of the pipe will be like a bamboo having low weight and high strength. The structure however is uniquly determined provided that the size of the pipe and the physical properties and the volume of the liquid are given. In this study the possibility of changing the structure was investigated by varying the wettability of the inner wall of the pipe. The wettability of the inner wall was locally varied by coating repellent on the wall. It was possible to make liquid plugs of different structures by this method.

Key words: Microgravity, Liquid Plug, Liquid Bridge, Wettability, Bamboo, Micro Machine, Surface, Interface

1. 緒論

近年，マイクロマシンが脚光を浴びており，様々な研究が行われている[1-4]．マイクロマシンは，動力源も微小であるために，可動部分の軽量化が望まれる．軽量で高強度の構造物を得るためには，軽量で高強度の材料の選択と構造物の構造設計の二種類の方法が考えられる.本研究では，材質に関わらない後者に焦点を絞る．板材においては，ハニカム構造という優れた強化法がある．しかしながら，マイクロマシンを設計するにあたり様々な形状の部品が必要であると考えられる．板材に次いで基本的な形状としてロッド材がある．身近にあるシンプルな構造で，軽量かつ高強度を有したロッド状の素材として，「竹」が挙げられる．竹の内部に一定間隔で存在する「節」は，竹が軽量かつ高強度を有する上で大きな役割を果たしている[5].竹の構造を有した構造物を簡単に作成できれば，マイクロマシンに応用することができると考えられる．

竹状の構造物を作成するには，地上重力場から微小重力場へ遷移した際に管路内で生成する液体プラグ[6-10]が一つの手掛かりとなる(Fig.1)．それは,生成した液体プラグを凝固させると，鋳ぐるみで竹と同様の強化機構を有する構造物を作成することができるからである．

地上重力場から微小重力場へ遷移したときに液体プラグが生成するのは，液体の挙動が体積力支配から表面力支配となり，地上重力場では水平であった気液界面が「曲率一定」という平衡状態に至ろうとするからである[6].ナノ・マイクロスケールにおいても液体の挙動は表面力支配であるために，表面力支配の観点から微小重力とナノ・マイクロスケールにはアナロジーがある．

なお，地上重力場においても管内の液体の挙動が表面力支配となる内径1～2mmの細管を用いれば,本研究のような大掛かりな落下装置を用いなくとも同様の実験を行うことができる．しかしながら，細管で実験を行うと撥水剤を正確に塗布することが困難なだけでなく，撥水剤の透明性が良くないために管内の液体の挙動の観察および可視化が困難となる.したがって筆者らは,JAMICの落下塔[11]を利用して実験操作および可視化が容易な大きなスケールのガラス管で液体プラグの生成挙動を調査してきた[9,10].JAMICの落下塔[11]は，炭鉱跡の立坑を利用して建設された落下実験用施設である．残念ながら既に閉鎖されたが，実

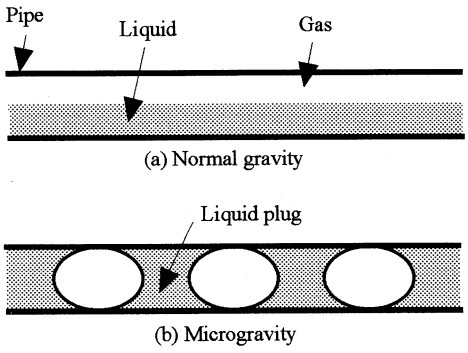


Fig.1 Liquid plug.

原稿受付 2003年9月29日

* 非会員 科学技術振興機構 研究成果活用プラザ北海道(〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西11丁目)
** 非会員 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
*** 正会員 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

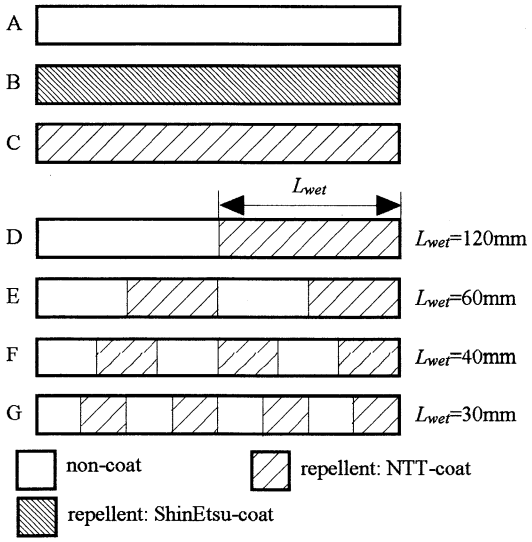


Fig.2 Glass pipes used in this study.

Table1 Physical properties of liquids at 298K.

	Density (kg/m^3)	Kinematic viscosity (mm^2/s)	Surface tension (mN/m)
Water	996	1.0	72.0
Silicone oil	818	1.0	16.9

Table2 Contact angles.

	Water	Silicone oil
non-coat	27deg.	0deg.
ShinEtsu-coat	104deg.	59deg.
NTT-coat	144deg.	

験装置を組み込む落下カプセルの自由落下距離は約490mであり，約10秒の微小重力環境が得られた．また,竹状構造物の強度を上げるためには，節である液体プラグの数を多くすることで応力を分散させ，軽量化のために膜厚を薄くする必要がある．しかしながら，管路における液体プラグの間隔および幅(膜厚)は管の直径,液体の充填率等によって一意的に決まってしまう[8-10]．表面力が支配的な環境において液体の挙動をコントロールするには，固液間の濡れ性を利用する方法が有効であると考えられる[12-18]．固液間の濡れ性を利用した工学プロセスは現在ほとんどなく，筆者らは濡れ性を利用した気液分離法を考案して成果を上げている[17,18]．本研究では，濡れ性を変化させることで液体プラグの生成位置，形状のコントロールを試み，液体プラグの生成に及ぼす管路内壁の濡れ性の影響を調査した．

2 実験方法

Fig.2に示すように,アルコールで十分に洗浄した内径D=22mm,長さL=240mmのガラス管内に撥水剤を塗布した．撥水剤には，NTTアドバンステクノロジー社製と信越シリコーン社製の二種類を使用した．その後，それぞれの管に液体を体積率β=0.5となるように,ガラス製の蓋で封入した．以降，それぞれをNTTコート，信越コートと呼ぶ．NTTコートで局部的にガラス管の濡れ性を悪くする場合は，ガラス管路を等間隔に分割するようにNTTコートを塗布し，コーティングの境界間距離L_{wet}をL_{wet}=30, 40, 60, 120mmとした．撥水剤のコーティング法は次のとおりである．信越コートは液状であるために管内に流し込み回転させながら塗布し，乾燥させた．それに対して，NTTコートはスプレータイプである．そこでガラス管の片方の端部をバキュームポンプに接続し，吸引しながら他方の端部から少しずつNTTコートをスプレーすると撥水剤の一部が管内に付着する．管内の気流が乱流であるために，撥水膜を管の円周方向に対してほぼ均一に作成することができる．さらに管の吸引側と吹き込み側を何度か交換してコーティングを

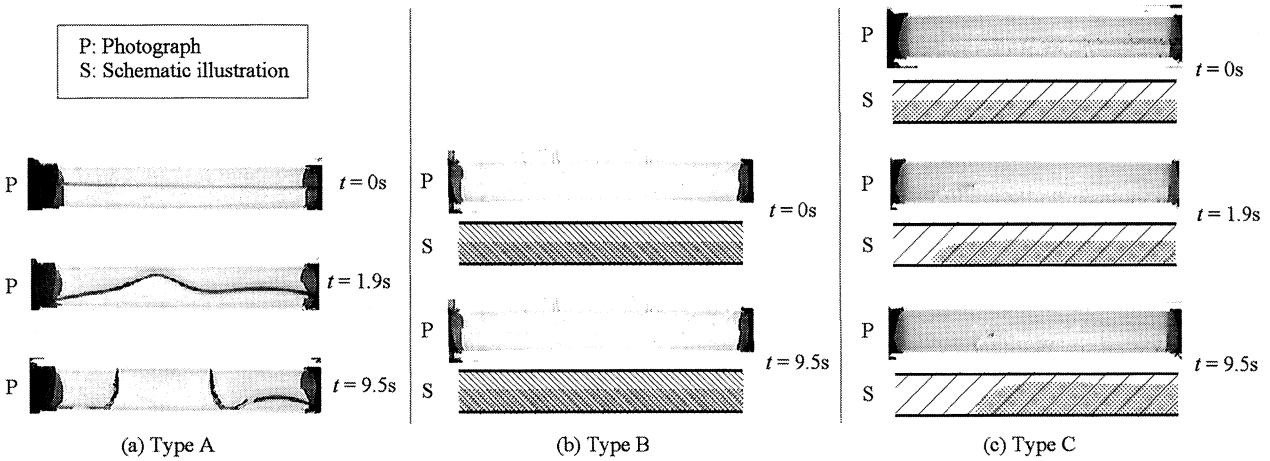


Fig.3 Photographs and schematic illustrations of behavior of water [Type A to C].

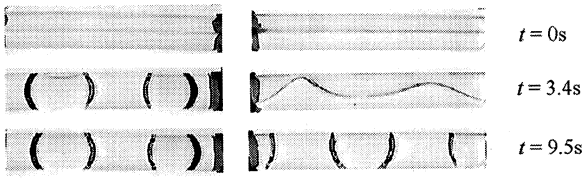


Fig.4 Photographs of behavior of silicone oil [Type A and B].

行い，長手方向に対する膜の均一性を高めた．コーティング後の管内に水滴を滴下し，撥水膜との接触角を測定することで撥水性が均一であることを確認した．撥水膜の膜厚は，約2～3 μmである．TypeD～Gにおいて，未コーティング部にはあらかじめ紙でマスキングを行ってから撥水剤をコーティングした．なおマスキング紙は，接着性の物質を使用せずにバネを用いて管壁に固定した.本実験で用いた液体は水とシリコンオイルであり，物性値をTable 1に示す．水はFig.2のType A～Gのガラス管に，シリコンオイルをType A, Bのガラス管にそれぞれ封入した．なお，液体とガラスおよび液体と撥水剤を塗布したガラスの接触角をTable 2に示す．接触角θ_cが0deg.≦θ_c<90deg.の場合を「濡れ性が良い」，90deg.≦θ_c≦180deg.を「濡れ性が悪い」と定義する．それにともない，NTTコートで局部的に管路の濡れ性を悪くした場合は，NTTコートを塗布しない領域を濡れ性の良い領域，塗布した領域を濡れ性の悪い領域と呼ぶ．

液体を封入したガラス管をアクリル平板で挟んで固定し，落下カプセル内に水平に設置した．ビデオカメラを用いて，気液界面の挙動を撮影した．

3 実験結果と考察

3.1 管路全体の濡れ性を変化させた場合

落下実験における微小重力度g_rは，1.3×10^{-3}であった．

Fig.3は,管路全体の濡れ性を変化させた場合の水の挙動を表している．濡れ性が良いθ_c=27deg.のとき，液体プラグは一つ生成した(TypeA).信越コートを塗布したθ_c=104deg.のときは接触角が90deg.に近く,管路に対する水の表面張力の接線方向成分が小さかったために，水は静止したままであった(Type B). NTTコートを塗布したθ_c=144deg.の場合，濡れ性が悪いために管路壁に対する水の表面張力の接線方向成分が下方向へ働いた．その結果，水は丸くなろうとして一体のまま静止した(Type C).

シリコンオイルに関して，管路全体の濡れ性を変化させたときのシリコンオイルの挙動をFig.4に示す.シリコンオイルは，TypeA, Bともに接触角がθ_c <90deg.であるために，カプセルの落下直後からシリコンオイルが管壁を移動して液体プラグを生成した．θ_c =0deg.のとき，カプセル落下開始から液体プラグの形状が平衡に至るまでの過渡時間は5.5秒であった(TypeA). それに対してθ_c =59deg.では，液体プラグの形状が平衡に至るまでの過渡時間が長くなり，過渡時間は6.7秒であった(TypeB). これは，接触角が90deg.に近づくと，シリコンオイルの管路壁に対する表面張力の接線方向成分が小さくなるためである．

3.2 局部的に管路の濡れ性を悪くした場合

3.2.1液体の挙動

Fig.5は，ガラス管を局部的にNTTコートで塗布した場合の水の挙動を表している．カプセルの落下後，濡れ性の良い領域では水が管路壁面に沿って上方へ移動した．それに対して濡れ性の悪い領域において，水は管路壁面に沿って下方へ移動した．その結果，濡れ性が悪い領域から良い領域へ水が移動して液体プラグが生じた．このとき，水の移動にともない濡れ性の悪い領域の水が減少すると水は分裂し,濡れ性の良い領域へ移動しない液滴が発生した．L_{wet}=120mmでは,コーティングの境界でまず水が分断し，それぞれの領域において平衡状態に至った(TypeD).濡れ性の悪い領域では,外に凸の液体プラグが生成した．L_{wet}=60,40,30mmのとき,水の移動にともない濡れ性の悪い

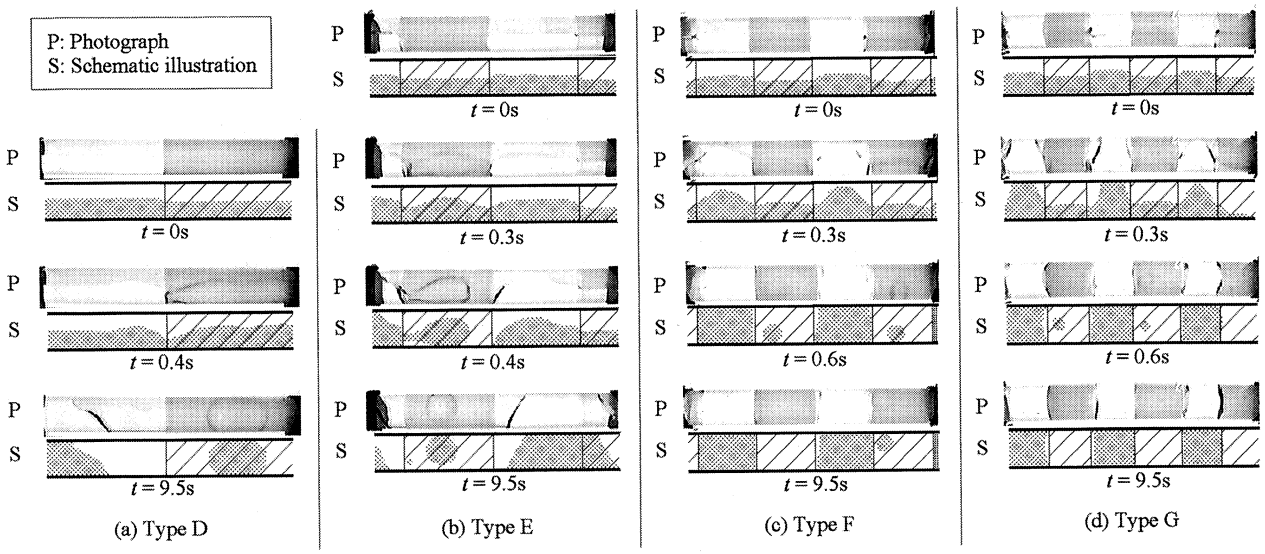


Fig.5 Photographs and schematic illustrations of behavior of water [Type D to G].

領域の液体が減少し,コーティングの境界において分断し,濡れ性の悪い領域で液滴となった(TypeE～G). なお, 液滴とはその直径が管路の直径よりも小さいものを言う. 液体の分断は, 必ずしも左右対象に行われずに多少のタイムラグがあった. 例えば, ある濡れ性の悪い領域における左側のコーティングの境界で液体が分断すると, 表面張力により液体は右側へ移動し始める. その直後, 右側のコーティングの境界で液体が分断して液滴となり, 右側へ移動し始めていたときの慣性力から液滴は少し右側へ移動する. L_{wet}=30mm (TypeG)では, 液滴と液体プラグ間距離が小さいために, 移動した液滴は液体プラグと接触して合体し, 最終的に濡れ性の悪い領域の液体は濡れ性の良い領域へ完全に移動した.

以上より, 管路におけるコーティングの境界間距離L_{wet}が小さいほど, 濡れ性の悪い領域に残留する水の量が少なくなり, 濡れ性の悪い領域から良い領域への水の移動率が高いことが分かる. 固液間の濡れ性を利用した液体プラグの間隔および幅(膜厚)の制御能力を論じるために, 管路全体の濡れ性が良いときに生成する液体プラグの中心間距離λに着目した. Takamatsuら[8]は, λに関して式(1)を提案している.

$$\lambda=4.45D\,[\beta\,(1-L/L_{tp})]^{0.5} \qquad (1)$$

ここで,L_{tp}は地上重力場の管路内において気液が上下に分かれている部分の長さを表す.式(1)は微小重力下における環状液膜の線形安定性解析から導出されており,λは液体の物性の影響を受けない. また, 水, メタノール, シリコンオイルを用いた実験からも液体の物性の影響を受けないことが確認されている.式(1)に本実験条件を代入し,さらに本実験では気液が管路端部で分かれていたためにL/L_{tp}=1とするとλ=69mmとなる.局部的に管路の濡れ性を悪くした場合,Fig.6に示すように液体プラグの中心間距離は$2L_{wet}$に対応している. L_{wet}=30mm (TypeG)のとき, $2L_{wet}$<λであり,この場合においてのみ完全分離が可能であった. したがって, 濡れ性の良い管路で生成する液体プラグの中心間距離より狭い間隔の液体プラグを生成するためには, 本研究の手法が有効であることが分かる. すなわち本手法は, 膜厚の薄い節が狭い間隔で存在する竹状構造材の作成に適していると考えられる.

また, 液体が濡れ性の悪い領域の中心部で分断せずにコーティングの境界で分断するのは, 液体の接触角によるものと考えられる. Table 2より, ガラス管と水の接触角はθ_c=27deg.であるのに対し,NTTコートを施したガラス管と水の接触角はθ_c=144deg.である.水を管路に沿って移動させる駆動力は,管路に対する表面張力の接線方向成分である. 表面張力をσとおくと, 濡れ性の良い領域において管路に対する表面張力の接線方向成分はσcos27≒0.89σであり, 濡れ性の悪い領域ではσ cos(180-144)≒0.81σ である. つまり, 濡れ性の悪い領域において水が弾かれて丸まろうとする力より, 濡れ性の良い領域における水が管路壁を濡れ上がろうとする力の方が大きい.したがってFig.7に模式的に示すように, 濡れ性が悪い領域から流出する水の量より濡れ性が良い領域が吸引する水の量の方が多いために, コーティングの境界近傍の水は減少するにしたがって細くくびれていく. 濡れ性の悪い領域において, 水が多いときは管路の断面に沿って液面に曲率があり,水は管路断面に沿って丸まろうとする. しかし, 水が減少してコーティングの境界近傍で細くくびれると, 管路の長手方向に沿って液面に曲率が生じ, 水は管路の長手方向に対しても丸まろうとする. その結果, くびれた部分の水は左右に移動し, 液面の変形が進行して分断に至ると考えられる.

3.2.2 液体プラグが生成するまでの過渡時間

Fig.8は, Type DからType Gのガラス管において液体プラグが生成するまでの過渡時間T_sを表している.L_{wet}≦40mmにおいて, 過渡時間は非常に小さくなっていた.これは,L_{wet}が小さくなると液体が移動する距離が小さくなるためである. 過渡時間が急激に変化するL_{wet}の境界は, 濡れ性の良いガラス管内における液体プラグ間隔λ によって概算することができると考えられる. つまり, λ よりL_{wet}が短いと液体プラグが生成するために液体が移動する距離が短くなり, 過渡時間も小さくなると考えられる. Fig.6に示すように,濡れ性の良いガラス管内における液体プラグ間隔λ は, 局所的に濡れ性を変化させたガラス管における$2L_{wet}$に相等するために, L_{wet}=λ /2となる. したがって, 式(1)より求めたλ からL_{wet}=34.6mmとなる. Fig.8においてL_{wet}の境界を実線で表しており,プロットから推測されるL_{wet}の境界の40≦L_{wet}≦60より多少小さく見積られているが,L_{wet}=λ/2によってある程度近似できるものと考えられる.

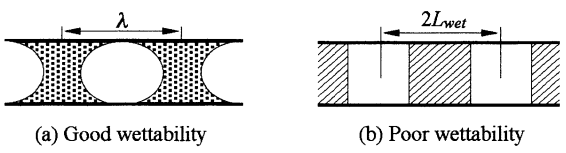


Fig.6 Relation between λ and L_{wet}.

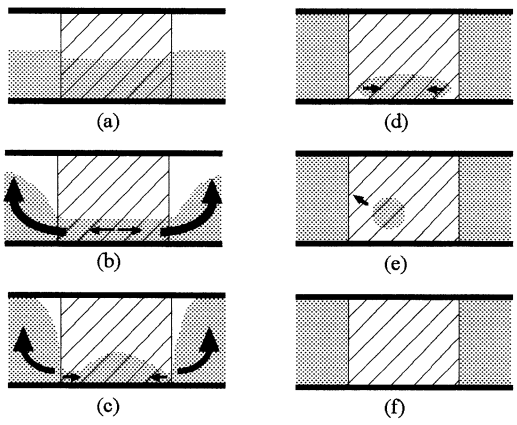


Fig.7 A Model for mechanism of generation of droplet at poor wettability region.

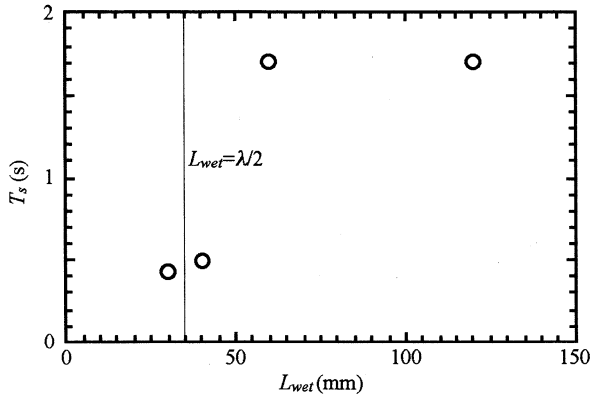


Fig.8 Transient time for liquid plug formation [Type D to G].

4 結言

本研究で得られた知見を以下にまとめる.

1) 管路全体の濡れ性を変化させた場合, 液体プラグが生成する場合の過渡時間は, 濡れ性が良いほど短かった.

2) 局部的に管路の濡れ性を悪くすることで, 濡れ性の良い管路で生成する液体プラグよりも狭い間隔の液体プラグを生成できた.

記号

D	: ガラス管の内径	(mm)
g_r	: 微小重力度	(-)
L	: ガラス管の長さ	(mm)
L_{tp}	: 地上重力場の管路内で気液が上下に分かれている部分の長さ	(mm)
L_{wet}	: コーティングの境界間距離	(mm)
t	: 時間	(s)
T_s	: 液体プラグ生成に要する過渡時間	(s)
β	: 液体の充填率	(-)
θ_c	: 固液間の接触角	(deg.)
σ	: 液体の表面張力	(mN/m)

参考文献

1) 北原時雄: マイクロ理工学, 日本機械学会誌, 103 (2000), 725-726 .

2) 早乙女康典: マイクロマシンのためのミクロな材料特性,日本機械学会誌, 103 (2000), 727-728.

3) 森誠之: ナノ・マイクロトライボロジー, 日本機械学会誌, 103 (2000), 729-731.

4) 畑村洋太郎: ナノ・マイクロ世界での加工と組立て, 日本機械学会誌, 103 (2000), 732-735.

5) 天田重庚: バイオミメティックデザインの応用で新材料を, 未来材料, 1 (2001), 11-19.

6) M.Kuramae and M.Suzuki: Two-Component Heat Pipes Utilizing the Marangoni Effect, J. Chem. Eng. Jpn, 26 (1993), 230-231.

7) M.R.Sasges and C.A.Ward:Equilibrium Fluid Configurations in low gravity, J. Appl. Phys., 79 (1996), 8770-8782.

8) H.Takamatsu, M.Fujii, H.Honda and H.Uchiyama: Stability of Annular Liquid Film in Microgravity, Microgravity Sci. Technol., 9 (1999), 2-8.

9) 吉田仁, 井口学: 地上重力から微小重力に至る過渡時間内の円管内液体プラグの挙動,日本マイクログラビティ応用学会誌, 17 (2000), 190-195.

10)吉田仁, 井口学: 地上重力から微小重力に至る過渡時間内の傾斜円管内液体プラグの挙動, 日本マイクログラビティ応用学会誌, 18 (2001), 205-210.

11)小出彰: 地下無重力実験センターの微小重力環境10秒間の高精度落下実験施設, 日本マイクログラビティ応用学会誌, **18** (2001), 136-139.

12)市川直樹: 微小重力環境下での管内キャピラリー流れにおける界面挙動と濡れ現象, 機械技術研究報告, 179 (1998).

13)佐藤正秀, 新木浄, 松浦高洋, 遠藤敦: 微小重力環境下での濡れ性勾配・温度勾配を有する科学的表面処理されたガラス表面上での液滴の挙動, 宇宙利用シンポジウム, 16 (2000), 231-264.

14)太田淳一, 生水出淳史, 村井祐一, 山本富士夫: 狭い水平矩形縮小流路内にある液体ブリッジの研究, 日本機械学会論文集(B編), 68 (2002), 1095-1103.

15)J.Bico and D.Quere: Self-Propelling Slugs, J. Fluid Mech., 467 (2002), 101-127.

16)S.L.Waters and J.B.Grotberg: the Propagation of a Surfactant Laden Liquid Plug in a Capillary Tube, Phys. Fluids, 14 (2002), 471-480.

17)井上努, 井口学, 水野義照: T字型分岐管の濡れ性の差を利用した気液分離, 混相流, 15 (2001), 158-164.

18)水野義照, 井口学: 濡れ性を利用した水平Y字型分岐管による気液分離, 日本機械学会論文集(B編), 68 (2002), 34-39.