

形状の異なるガラス細管中の微小重力下における毛管上昇

丸尾 裕一¹・佐藤 直人¹・登尾 浩助²

Capillary Rise under Microgravity in Variously-Shaped Capillary Glass Tubes

Yuichi MARUO¹, Naoto SATO¹ and Kosuke NOBORIO²

Abstract

Water movement plays an important role to grow crops under microgravity. Previous research reported that water hardly moved in porous media whereas water in capillary tubes rose to the top of the tubes under microgravity. Another study reported that water hardly moved on concave surfaces under microgravity. Our objective of this study was to evaluate the effects of surface shape and junction of capillary tubes on water movement driven by the capillary force under microgravity. We used several shapes of tube (straight, concave-convex, wide-narrow, narrow-wide, Y-shaped, T-shaped and spiral) and observed water movement in the tubes during drop-tower induced microgravity. Water in concave-convex, wide-narrow tubes moved beyond concave and convex surfaces under microgravity. Water in narrow-wide tubes, however, stopped on their concave surfaces. In the Y- and T-shaped glass tubes, water movement was restricted after the junction of glass tubes by viscous force.

Keyword(s): Water movement, Capillary force, Porous media, Space agriculture, Long-term space mission

Received 13 November 2018, Accepted 15 February 2019, Published 30 April 2019

1. 背景

火星や月での活動を見据えた長期有人ミッションが計画されており、その際には宇宙空間あるいは地球外で食料生産を行う必要が生じる。宇宙空間で作物を育てるメリットは：(1)安全で栄養に富んだ、新鮮な食物を供給できること、(2)植物体が光合成により二酸化炭素を吸収し、酸素を放出することで空気のリサイクルを行うことができること、(3)植物体が蒸発散を行うことで排水を処理し、きれいな水を供給できること、(4)宇宙船内という極限環境下で生活をしている宇宙飛行士に心理的な癒しを与えることが挙げられる¹⁾。宇宙空間で生じる微小重力下において作物を育てる試みは、国際宇宙ステーション (ISS) における植物栽培モジュール VEGGIE¹⁾や LADA²⁾などを利用して多数行われている³⁻⁵⁾。これらの実験では液状水をポンプで加圧することによって給水を行っており、栽培媒体が小さい (VEGGIE の場合 0.11 m^2)¹⁾。根圏が媒体のほぼ全域に

及んでいると考えられるので、毛管力による水分移動はあまり問題となっていない。NASA は長期有人宇宙ミッションにおいて、宇宙飛行士の栄養要求を満たすため、宇宙農業によって栽培したニンジン (*Daucus carota*) やサツマイモ (*Ipomoea batatas*)、ジャガイモ (*Solanum tuberosum*) といった根菜類を献立に加える必要性を指摘している⁷⁾。これらの作物の栽培には大きな栽培媒体が必要となるため、根圏が栽培媒体全域に及ぶとは限らず、毛管力による水分移動も無視できない。しかし微小重力下において毛管力によって駆動される水の挙動は不明な点が多い。

毛管中と多孔質体中の水の上昇高 h は

$$h = \frac{2\gamma\cos\theta}{r\rho_w g} \quad (1)$$

で表される⁶⁾。ここで γ は水の表面張力、 θ は水の接触角、 r は毛管半径または多孔質体では等価毛管半径、 ρ_w は水の

1 明治大学大学院農学研究科 (〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1)
Graduate school of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan.
2 明治大学農学部 (〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1)
Department of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan.
(E-mail: noboriok@meiji.ac.jp)

密度, g は重力加速度の大きさである. また毛管内の水面にかかる毛管上昇圧力 P は

$$P = P_0 - \frac{2\gamma\cos\theta}{r} \quad (2)$$

で表される⁹⁾. ここで P_0 は大気圧である. 毛管の水面と水源を大気に開放した場合, P_0 は無視することができるため

$$P = -\frac{2\gamma\cos\theta}{r} \quad (3)$$

で表される. 佐藤ら⁹⁾は微小重力下において毛管中の水位が(1)式に従い最大値をとり, 微小重力下においても毛管力が存在することを明らかにした. Yendlerら¹⁰⁾はMIR宇宙ステーションにおいて, ガラスビーズ中の水の浸潤速度が地上よりも遅いことを示唆している. Heinseら¹¹⁾はISSにおいてポンプを使って土中の水を移動させることに成功している. 彼らがISSで作成した水分特性曲線は, 浸潤過程では1G下と微小重力下において大きな違いがあるようには見えない. つまり微小重力下においても, 多孔質体中の水に1G下と同様に毛管力が働いていると考えられる.

以上の先行研究より, 微小重力下において多孔質体中では毛管力が働いているにも関わらず, 1G下と比較して毛管力による浸潤の速度を低下させる何らかの原因が存在すると予想できる. 佐藤ら⁹⁾の実験で用いた毛管は通直であるが, 多孔質体の間隙中には多数の凹凸面や分岐, 屈曲が存在している(Fig. 1). Naguraら¹²⁾は微小重力下において水が凸面上を越えづらいと報告している. しかしNaguraら¹²⁾の研究で用いた多孔質体模擬間隙の大きさは13.5 mmから32.7 mmと大きかったために水が上昇しなかった可能性を否定できない. また多孔質体中の浸潤への分岐や屈曲の影響は不明である. そこで本研究ではNaguraらの実験¹²⁾よりも小さな間隙径を持ったガラス管に凹凸, 分岐, 屈曲の加工を施し, 微小重力下において管内の毛管上昇の様子を観察した. 本研究の目的は微小重

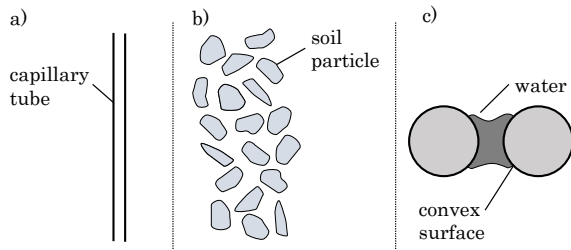


Fig. 1 Diagrams of a) capillary tube used in Sato et al.⁹⁾ and b) soil c) difficulty of water movement, and convex surfaces under microgravity.

力下において毛管力によって駆動する水が(1)凹凸を越えることができるのか, (2)分岐の前後での水面の速度がどのように変化するのか, そして, (3)屈曲によって水面の移動速度がどのように変化するのか調査した.

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験は2015年9月29日から10月1日にかけて計6回, 北海道赤平市の(株)植松電機敷地内にある落下塔コスモトーレを使用して行った. コスモトーレの利用は北海道宇宙科学技術創成センター(HASTIC)を通して行った. コスモトーレでは40 mの自由落下により約2.5秒の微小重力環境を得た.

実験ラックは上段, 下段の2段構成になっており, どちらの段にも実験モジュールとビデオカメラを設置した(Fig. 2). 実験モジュールにはガラス管および水源となる塩ビ管を設置した. 様々な形状と内径のガラス管を, 穴を開けた塩ビ管の上に垂直に設置した(Fig. 2). ガラス管は落下実験ごとに異なる種類のものに交換した. また塩ビ管にはシリンジで真空引きすることで作成した脱気水を注入した. 塩ビ管内の脱気水がガラス管の中を自由に移動できるようにするため, 塩ビ管の上部には調圧口を設け, 脱気水の水面を大気圧に開放した. 塩ビ管はガラス管の管径に合わせ大小2種類用意した. 塩ビ管(大)は内径(ϕ)3.1 cm, 長さ24 cm, 調圧口は ϕ 2.5 cmであり, ϕ 9.7-5.5 mmのガラス管に用いた. また塩ビ管(小)は ϕ 2.5 cm, 長さ24 cm, 調圧口は ϕ 1.2 cmであり, その他のガラス管に用いた.

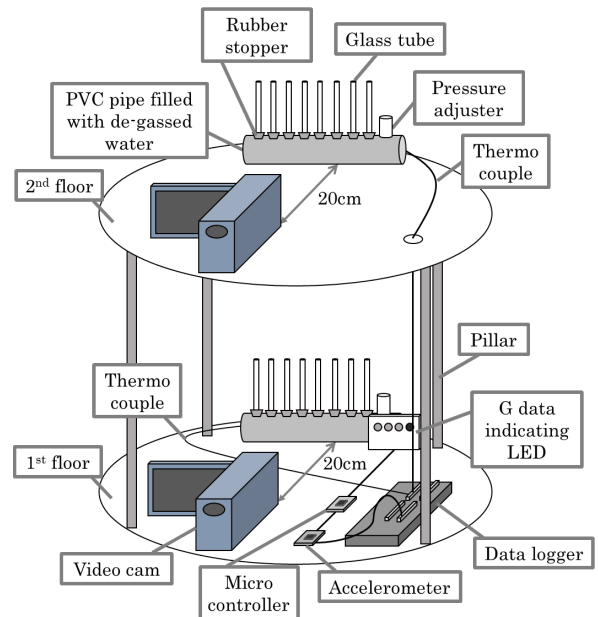


Fig. 2 Experimental apparatus for capillary rise.

実験モジュールから 20 cm 離れた位置にビデオカメラ (上段: HDC-TM60, Panasonic 下段: HDR-CX700V, Sony) を設置し, ガラス管内の水の動きを撮影した (Fig. 2). 撮影した動画は動画解析ソフト (VirtualDub) によって静止画抽出し, 画像解析ソフト (ImageJ) によって解析した. 重力加速度をスマートフォン (SO-04E) にインストールしたアプリケーション (Accelerometer Analyzer) によって 50 sps で測定した. また塩ビ管内に熱電対を設置し, CR1000 データロガー (Campbell Scientific; Logan Utah) により脱気水の温度変化を 0.2 秒おきに記録した.

2.2 ガラス管の形状

2.2.1 直管

微小重力下においてガラス管内を水が上昇することを確認するための対照として, $\phi 0.8$ mm, $\phi 2.3$ mm, $\phi 5.5$ mm の 3 種類の径の真っ直ぐなガラス管を用いた (Fig. 3).

2.2.2 凹凸を持つガラス管

微小重力下において毛管力によって駆動する水が凹凸を越えることができるのかを調査するため, ガラス管には壁面形状の異なる 3 種類 (凹凸管, 太-細管, 細-太管) を用いた (Fig. 3). 凹凸管はガラス管をガスバーナー (GT3000S, Prince) で加熱し, 引き伸ばすことでガラス管内に凹凸を作った. 内径が最大 $\phi 4.0$ mm, 最小 $\phi 2.0$ mm のもの ($\phi 4.0$ - 2.0 mm), 最大 $\phi 9.7$ mm, 最小 $\phi 5.5$ mm のもの ($\phi 9.7$ - 5.5 mm) の 2 種類用いた. 太-細管と細-太管はそれぞれ $\phi 2.3$ mm と $\phi 0.8$ mm のガラス管をバーナ

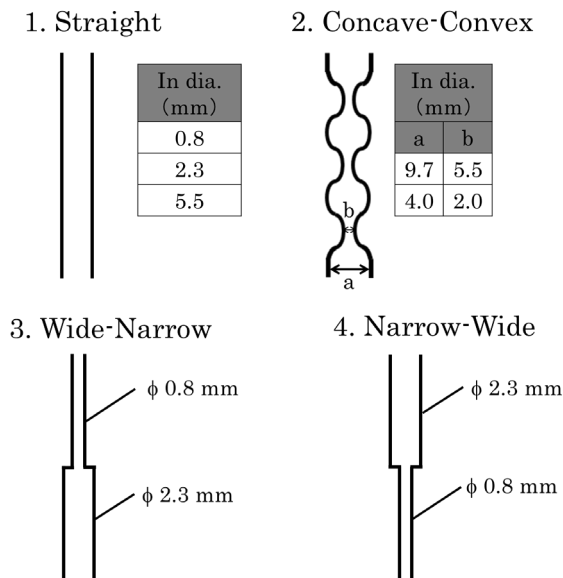


Fig. 3 Shapes and inner diameters of straight and bumpy glass tubes.

ーで加熱し, 接続することで作成した. 太-細管は $\phi 2.3$ mm, $\phi 0.8$ mm, 細-太管は下から $\phi 0.8$ mm, $\phi 2.3$ mm となるように設置し, 水が接続部分の凹凸を移動できるかを観察した.

2.2.3 分岐を持つガラス管

微小重力下における分岐の前後での水面の移動速度の変化を調査するため, 3 種類の Y 字型, T 字型のガラス管を用いた (Fig. 4). Y 字型のガラス管は真っ直ぐなガラス管をガスバーナーで加熱し, 約 30 度曲げ, 両端を封入した後, 曲げた部分を再度加熱し, ガラス管内部の空気の熱膨張により穴をあけ, そこに別のガラス管を接合することで作成した. T 字型のガラス管は両端を封入した真っ直ぐなガラス管を加熱し, ガラス管内部の空気の熱膨張によってあけた穴に別のガラス管を接合することで作成した.

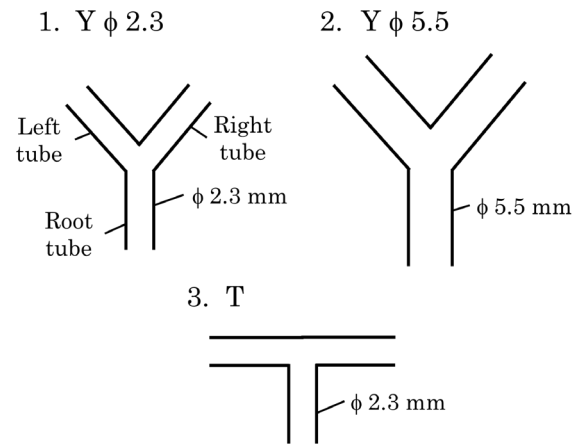


Fig. 4 Shapes and inner diameters of Y- and T-shaped glass tubes.

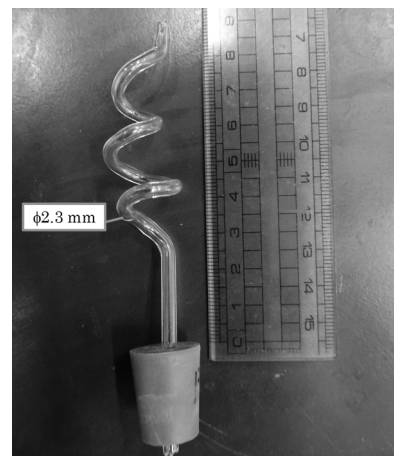


Fig. 5 Shape and inner diameter of the spiral glass tube.

2.2.4 屈曲をもつガラス管

微小重力下における屈曲による水面移動の様子の変化を調査するため、螺旋型のガラス管を用いた (Fig. 5). 螺旋型のガラス管はφ 2.3 mm の通直のガラス管をガスバーナーで少しずつ加熱し、徐々に円形に曲げることで作成した.

3. 結果・考察

3.1 直管・凹凸面における水の動き

微小重力下における直管, 凹凸管, 太-細管, 細-太管中の水位変化を Fig.6 に示した. 直管ではすべての管径において, 重力加速度が小さくなると同時に水位が上昇した (Fig. 6 a). また水面の上昇速度はφ 0.8 mm ≒ φ 5.5 mm < φ 2.3 mm となった. この結果は, φ 2.3 mm の速度が大きかったことによるのではなく, φ 5.5 mm の速度が極端

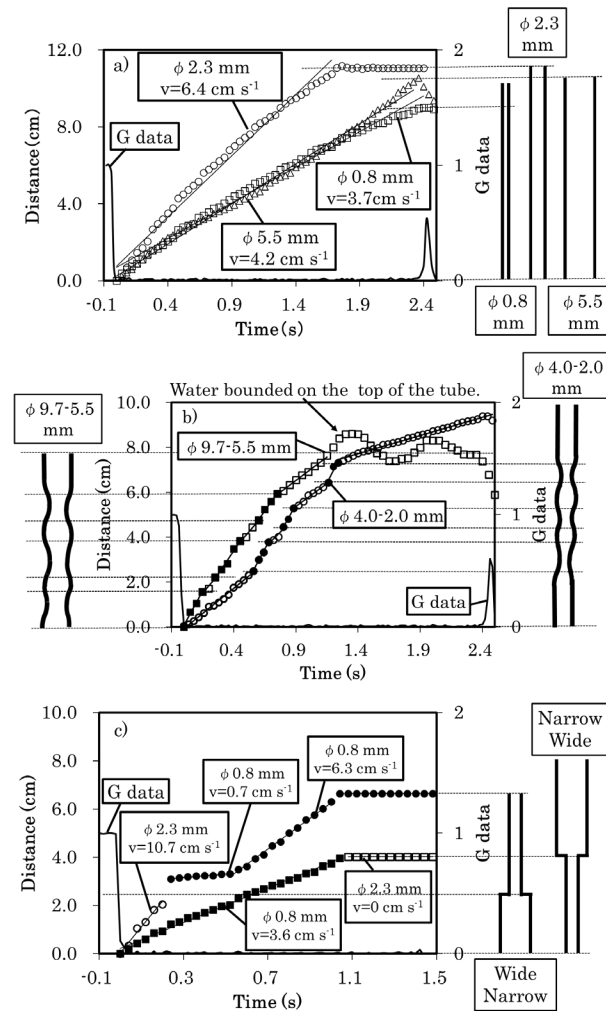


Fig. 6 Water movement in a) straight, b) concave-convex, c) wide-narrow, and narrow-wide tubes under microgravity. v is the velocity of water flow (cm s^{-1}).

に遅かったためだと考えられる. 1G 下における接触角はそれぞれ, 45° ($\phi 0.8 \text{ mm}$), 32° ($\phi 2.3 \text{ mm}$), 61° ($\phi 5.5 \text{ mm}$)であり, $\phi 5.5 \text{ mm}$ が最も大きな接触角であった. また, 表面張力に対する重力の大きさを定量する指標であるボンド数 ($Bond = \rho_w g r^2 / \gamma$)¹³⁾はそれぞれ, 0.02 ($\phi 0.8 \text{ mm}$), 0.18 ($\phi 2.3 \text{ mm}$), 1.01 ($\phi 5.5 \text{ mm}$)であり, 1G でφ 5.5 mm の界面が最も重力の影響を受けて変形している, 即ち接触角が小さくなっていると考えられる. したがって, 重力による界面の変形が最小となる微小重力下における接触角は特にφ 5.5 mm において増加するはずで, φ 0.8 mm やφ 2.3 mm に比べてはるかに大きな接触角となった可能性があり, そのためφ 5.5 mm の水分移動速度が最大に遅くなったと考えられる. なお, 浸潤速度の比較に用いた管 ($\phi 0.8 \text{ mm}$, $\phi 2.3 \text{ mm}$, $\phi 5.5 \text{ mm}$)では実験中の温度差が最大でも 0.1°C 程度しかなく, この温度差による粘性の差は 10^{-5} Pa s 以下であるので, 水温による浸潤速度への影響はほとんど無視できると考えた. また, φ 2.3 mm では管の上端において液面の振動が観察された. Fig. 7 はφ 2.3 mm の上端における水面の高さの変異を示したものである. 水面がガラス管の上端に到達後 0.4 秒程度振動し, その後水位が安定した.

凹凸管においても, すべての管径において水の上昇が確認された (Fig.6 b). すなわち微小重力下において水は緩やかな拡張部・縮小部を超えて移動することがわかった. またガラス管内の水面の上昇速度は管径が小さい部分で大きかった. また, φ 2.3 mm で観察されたのと同様にφ 9.7-5.5 mm においてガラス管上端における水面の振動が観察された. このような振動は水面がガラス管上端に到達した際に, 慣性力によって一度毛管の外に飛び出た後, 管端における表面張力によって引き戻されるために起こったと考えられる. 毛管上昇が停止する際, 振動する現象は 1G 下においても 100%エーテル溶液で報告例がある^{14, 15)}.

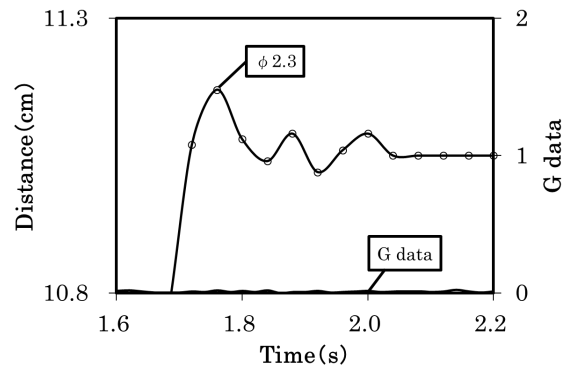


Fig. 7 Magnified figure of the water movement on the top of φ 2.3 mm straight tube (Fig. 6 a) that water oscillation was observed.

太一細管ではガラス管の縮小部を越えたのち、0.28 秒間水の上昇速度が低下した (Fig. 6 c). また細一太管では拡張部において水の上昇が停止した (Fig. 6 c). 縮小部における水の上昇速度の低下と拡張部における水の停止の原因について以下の仮説を立てた. Fig. 8 に太一細管, 細一太管内の水面移動の模式図を示した. どちらのガラス管でも接続部分において, $\phi 2.3$ mm, $\phi 9.7$ - 5.5 mm の管で見られた振動が起こったと考えられる. 太一細管では振動が起こった際に水面が飛び出し, $\phi 0.8$ mm の管壁に触れることができる (Fig. 8 a). しかし接続部分を越えた水面の上昇速度は管路が急激に狭まったことによる管路摩擦の増大によって低下する. すると管の縮小部以降でも水面が振動すると考えられる. 水面が振動している間, 水面の凸面が下に向いている場合には上向きの表面張力が, 上に向いている場合には下向きの表面張力がかかるため, 表面張力は水面の駆動にあまり関与しない. この結果, 太一細管では接続部を越えた後, 振動が収まるまでの約 0.3 秒間水面の移動速度が低下したと考えられる (Fig. 6 c). 一方, 細一太管では水面は $\phi 2.3$ mm の管壁面に触れることができなかつたと予想される (Fig. 8 b). 細一太管では凸面の上部で水理学的連続性が保てないため, 水の上昇が停止したと考えられる.

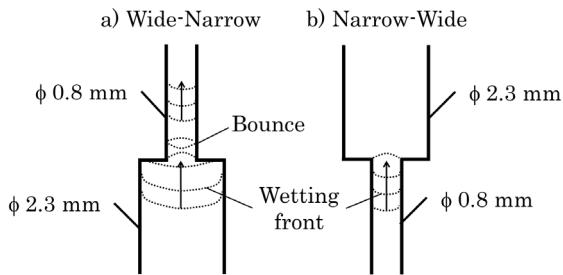


Fig. 8 Water movement on sharp a) convex and b) concave surfaces were assumed from the experimental results.

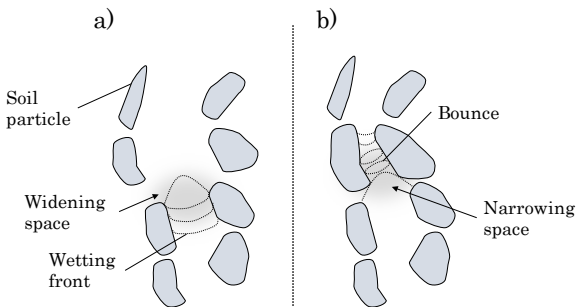


Fig. 9 a) Widening and b) narrowing spaces between soil particles.

これらの急な拡張部・縮小部における水面移動の障害は多孔質体中においても起こる可能性がある. 多孔質体中の間隙表面には無数の拡張部・縮小部が存在する (Fig. 9). 拡張部において水面は細一太管と同様に振動し, 飛び出すと予想されるが, 距離が大き過ぎて次の土粒子の表面に触れることができないと水面が停止すると考えられる (Fig. 9 a). また次の土粒子の表面に触れることができたとしても, 太一細管と同様に飛び出した先において水面が振動し, 水面の移動速度が低下すると考えられる (Fig. 9 b). その結果, 先行研究^{9,10}で報告されたように微小重力下における水面の移動速度は 1G 下と比較して遅くなるのではないかと考えられる.

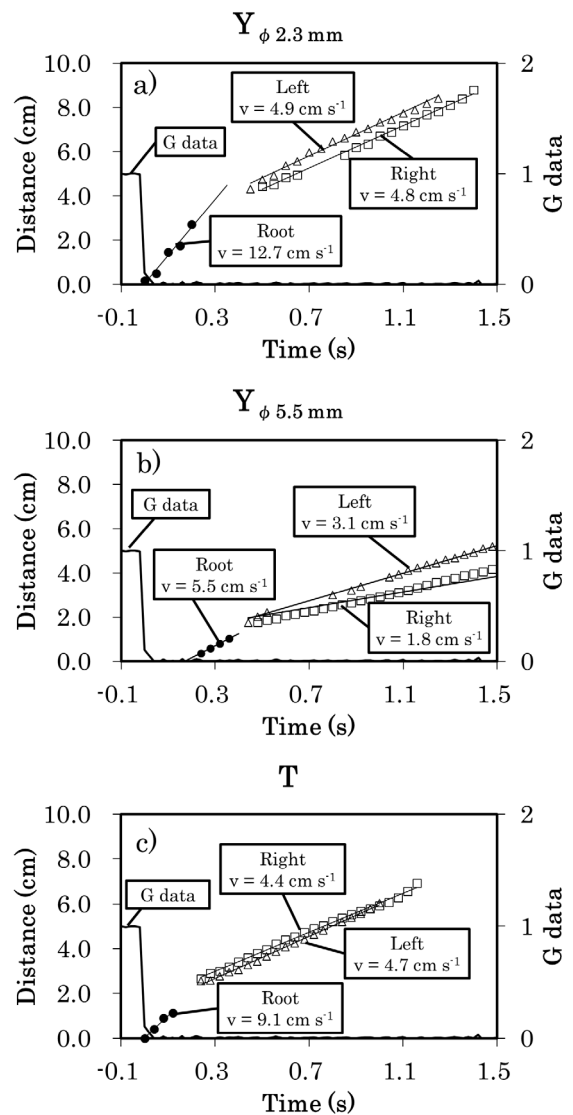


Fig. 10 Water infiltration in a) Y (small) shaped tube, b) Y (large) shaped tube, and c) T shaped tube under microgravity. v is the velocity of water infiltration (cm s^{-1}).

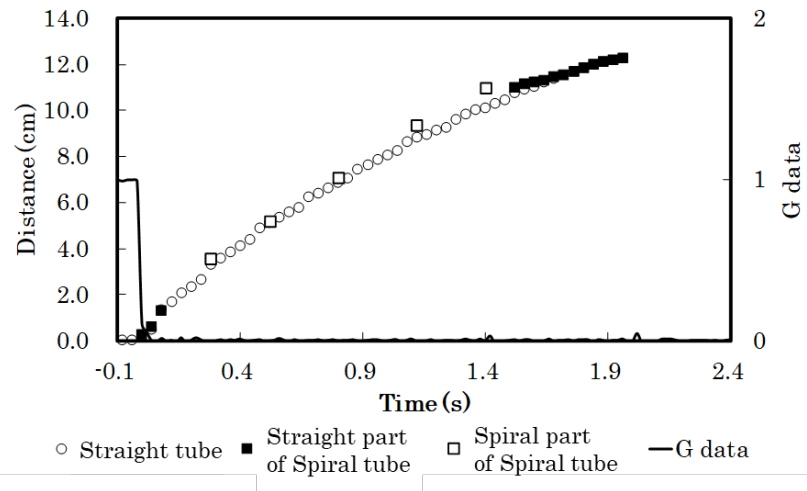


Fig. 11 Water movement in the straight tube (ϕ 2.3 mm) and in the spiral tube (ϕ 2.3 mm).

3.2 分岐における水の動き

微小重力下における Y 型管, T 型管中の水の動きを Fig. 10 に示した. すべての種類の管において水面は分岐点を越えることができたが, 分岐後の移動速度は分岐前と比較して半分かそれ以下に減衰した. (4) 式より水面移動の駆動力である毛管上昇圧力は管径に反比例する. 管径が一樣である $Y_{\phi 2.3}$, $Y_{\phi 5.5}$, T 型管では分岐の前後での駆動力の変化はない. 駆動力に差がなければ分岐後の移動速度は分岐前とほぼ同一となるはずであるが, 前述したように分岐後の左右各管内の移動速度は分岐前の約半分となった (Fig. 10). これは根元の立ち上がり管内における摩擦力と水の粘性が分岐前後の毛管上昇圧力よりもはるかに大きいためであると考えられる. すなわち微小重力下における Y 字型, T 字型水路内の分岐後の移動速度は毛管力ではなく, 粘性力と摩擦力によって支配されていると考えられる.

3.3 屈曲による減衰

螺旋型の毛管中の水は管上端まで上昇した (Fig. 11). また螺旋型の毛管中の上昇速度は ϕ 2.3 mm の真っ直ぐなガラス管とほとんど変化しなかった. よって, 屈曲による移動速度の減衰はほとんど起こらないと考えられる.

4. 結論

微小重力下におけるガラス管中の水の挙動について実験を行い, 以下の結論を得た.

- 水はすべての縮小部を越えることができた. また緩やかな拡張部を越えることができるが, 急な拡張部を越えることができなかった.

- 管上端では慣性力による水面の振動が起こった. 急な縮小部における一時的な水面の移動阻害はこの振動によって引き起こされたと考えられる.
- 分岐の前後で水面の移動速度は約半分に阻害された. これは根元の立ち上がり管内における摩擦力と水の粘性が分岐前後の毛管上昇圧力よりもはるかに大きいためであると考えられる.
- 本研究で見られた水の移動阻害が多孔質体中における浸潤阻害^{9,10}の要因であると考えられる.
- 間隙構造が多孔質体中の巨視的な水分移動の遅速に与える影響をどのように定量化するかは今後の課題である.

謝辞

本研究の一部は科研費 (挑戦的萌芽研究, 課題番号: 26660192) の助成により実施した.

参考文献

- 1) G.D. Massa, R.M. Wheeler, R.C. Morrow and H.G. Levine: *Acta Hort.*, **1134** (29) (2016) 215.
- 2) G.E. Bingham, T.S. Topham and J.M. Mulholland: *SAE International Technical Paper*, (2002) 2002-01-2388.
- 3) G.E. Bingham, S.B. Jones, D. Or, G. Podolski, M.A. Lecinskikh, V.N. Sytchov, T. Ivanova, P. Kostov, S. Sapunova and I. Dandolov: *J. Plant Physiology*, **47** (2000) 839.
- 4) A. Hoehn, P. Scovazzo, J. Clawson, T. Geissinger, W. Kalinowski and J. Pineau: *SAE International Technical Paper*, (2003) 2003-01-2614.
- 5) F.B. Salisbury, G.E. Bingham, W.F. Campbell,

- J.G. Carman, D.L. Bubenheim, B. Yendler and G. Jahns: *Life Support & Biosphere Science*, **2**(1) (1995) 31.
- 6) W.A. Jury and R. Horton: *SOIL PHYSICS*, 2.1.2, 45, John Wiley & Sons, Hoboken, 2004.
- 7) A.J. Hanford: *Advanced Life Support Baseline Values and Assumption Document*, ed. Lockheed Martin Space Operations, 4.3.6, 63, NASA, Houston, 2004.
- 8) P. Gennes, F. Wyart and D. Quere: *Capillarity and Wetting Phenomena*, ed. A. Reisinger, 2.4, 53, Springer, New York, 2004.
- 9) 佐藤直人, 登尾浩助, 丸尾裕一, 名倉理沙, 上出稜: *Proceedings of The Thirtieth Space Utilization Symposium*, **30**, Sagamihara, Japan, 1 2016, G-01.
- 10) B.S. Yendler, B. Webbon and R.J. Bula : *Advances in Space Research*, **18**(4-5) (1996) 233.
- 11) R. Heinse, S.B. Jones, D. Or, I. Podolskiy, T.S. Topham, D. Poritz and G. E. Bingham: *Vadose Zone Journal*, **14**(6) (2015) 10.2136/vzj2014.10.0135.
- 12) R. Nagura, Y. Watanabe, N. Sato, S. Komiya, S. Suzuki, K. Katano, H. Minami and K. Noborio: *Advances in Space Research*, **63** (2019) 589.
- 13) M. Stange, M.E. Dreyer and H.J. Rath: *Physics of Fluids*, **15** (2003) 2587.
- 14) D. Quéré : *Europhysics Letters*, **39**(5) (1997) 533.
- 15) D. Quéré and É. Raphaël: *Langmuir*, **15** (1999) 3679.