

小型気泡ポンプの性能測定

増淵 寿*1

Performance Test on a Small-sized Airlift Pump

Hisashi MASUBUCHI

This paper reports an experimental investigation of the airlift pump used in the plant factory. We made a small-sized airlift pump which would operate in the nutriculture device for personal use. In the nutriculture, airlift pump has two important functions which are circulation and aeration of nutrient medium. We focused on the former function and quantity of water delivered was measured in order to understand the effects of riser tube dimensions on the pump performance. The results were compared with analytical calculation which was based on the momentum equation. As a result, it was found that the pump performance was seriously affected by riser tube dimensions and water flow rate of the pump changed in the same direction as analytical suggestion.

KEYWORDS : Airlift pump, Two-phase flow, Fluid machinery, Nutriculture

1. 緒言

1.1 植物の養液栽培

近年、安全かつ安定した食糧供給源として食物工場が注目¹⁾されている。工場での食物の生産は土壌を使用しない「養液栽培」が主流であるが、一般家庭でも、この方法による植物栽培を趣味として楽しみたいというニーズが高じている。その影響を受け、栽培装置の自作法を紹介する書籍²⁾が出版され、さらに装置自体の販売³⁾も行われている。アマチュア用の小型栽培器では、ベッド内に一定量の培養液を蓄えておく湛液型水耕⁴⁾という手法を使うことが多いが、そこでは培養液の強制循環と爆気（液に空気を混入すること）が植物の生育促進のポイントとされている。

1.2 研究の目的

ところで小型の栽培器ならば、循環させる培養液の流量も揚程も小さくてよいと予想されるため、図1のように、栽培器に「気泡ポンプ」を組み込んで、液の循環と爆気との2つの機能を同時に果たせれば、装置が簡略化できて好ましい。気泡ポンプは古い技術で、その工学的理論はほぼ確立されている⁵⁾が、そこで取り上げられるデータは産

業用の大規模な装置を対象とするもので、小型栽培器の用途に適合するような小型の気泡ポンプに関するデータは見当たらない。さらに、栽培器の製作法を紹介した書籍²⁾でもポンプの具体的な仕様については全く触れられていない。

そこで、小型の養液栽培器での使用を目的として小さな気泡ポンプを自作し、その基本性能（流量、揚程、効率）の測定を行い、加えて従来の理論との整合性を確かめることを本研究の目的とする。

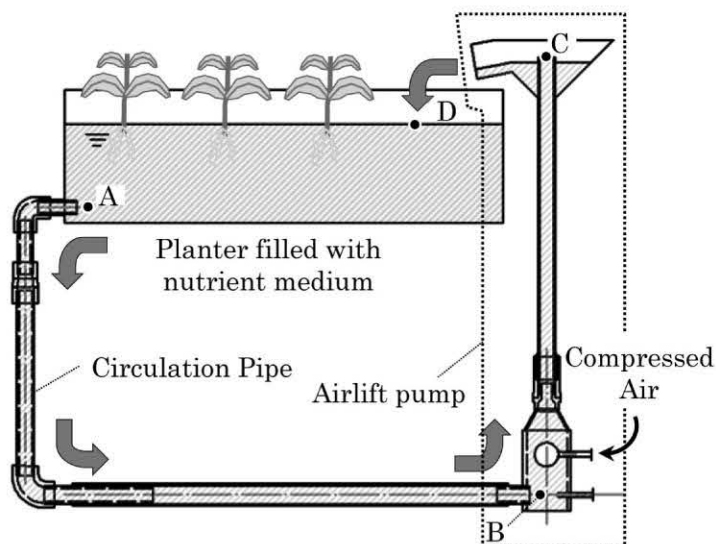


Fig.1 Sample of hydroponic culture device.

*1 機械工学科 (Dept. of Mechanical Engineering), E-mail:masubuti@oyama-ct.ac.jp

2. おもな記号

d : 揚水管内径	m
L : 揚水管長さ	m
A : 揚水管断面積 = $\pi d^2/4$	m ²
D : ロート部最大直径	m
f : 液体体積率	
Q _l : 揚水量	//min
Q _g : 供給空気量	//min
u _{l0} : 管内のみかけの液流速 = Q _l /A	m/s
u _l : 管内の液流速 = Q _l /fA	m/s
u _{g0} : 管内のみかけの気体流速 = Q _g /A	m/s
u _g : 管内の気体流速 = Q _g /(1-f)A	m/s
η : 気泡ポンプの揚水効率	
H _d : 吐出し揚程	m
H _s : 浸水深さ	m
ρ _l , ρ _g , ρ _{TP} : 水, 空気, 二相流の密度	kg/m ³

3. 実験装置と実験方法

3.1 気泡ポンプ

図 2 に実験に使用する気泡ポンプを示す. 一部が水中に没している揚水管の下端から圧縮空気を吹き込むと, 揚水管内の水と空気との混合体は外部の水の密度より小さくなるため, 浮力によって管内を上昇して上端から吐出され, 結果として揚水することができる. 気泡ポンプ自体には可動部がないことが利点だが, 一般に効率が低いとされている⁶⁾.

このポンプの性能に影響を与える因子として, 第一に揚水管の寸法が挙げられる. そこで, 管の直径(内径)と長さを表 1 のように変化させて実験を行う. このポンプは小型養液栽培器を用途とすることを考慮し, 管長は 500mm 以下と定めた. 内部の二相流の様子が観察できるように, 透明のアクリル製のパイプを揚水管として使用する.

Table1 Specification of riser tube of the pump.

Diameter	10, 14, 18 mm
Length	300, 400, 500 mm

圧縮空気の供給源には, 魚類の飼育に用いる市販のエアポンプ(ニッソー Nα 6000, 公称流量 Q_g=1.5~6.0//min)を使用する. 本研究では, 気泡ポンプに揚水だけでなく爆気の効果も期待しているため, 圧縮空気は球形のエアストーン(直径 D_a=30mm)で細かい気泡にして水中に噴出させ, 揚水管下端に取り付けた漏斗(最大直径 D=70mm)で気泡を漏れなく管内に導くよう工夫した.

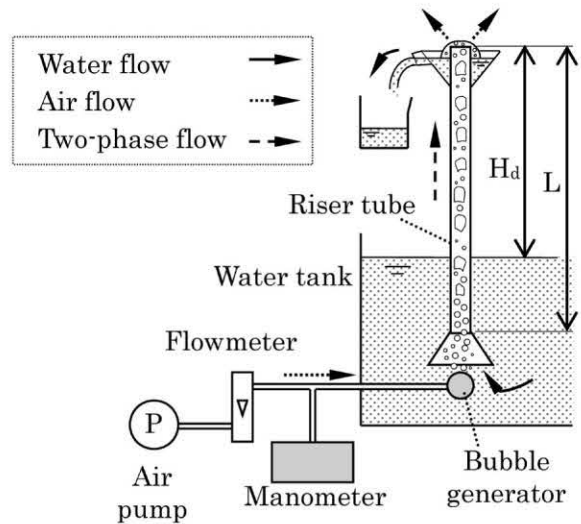


Fig.2 Experimental Apparatus.

3.2 性能試験法

実験は, 揚程が所定の値となるようにポンプを設置し, 圧縮空気の流量をエアポンプの最大出力から徐々に減少させていき, 順次, ポンプの揚水量を測定する方法をとった. ポンプの揚程は, 図 2 の水面から揚水管上端までの高さ H_d であるから, 貯水タンク内に沈める揚水管の深さで調整できる. 空気量 Q_g はエアポンプとエアストーンとの間に設置した面積式流量計(コフロック, RK200, Q_g=0~5.0 //min)から読み取り, 揚水量 Q_l は管上部から吐出された水をビーカーで汲み取って, 質量法で算出した.

さらに, 圧縮空気の圧力 P_g を電子圧力計(YOKOGAWA, MT110, 最大圧力 10kPa)で測定し, これを用いてポンプの揚水効率を次式で求める⁶⁾. P_s は大気圧である.

$$\eta = \frac{\text{揚水の得た動力}}{\text{空気の等温圧縮動力}} = \frac{\rho_l Q_l g H_d}{P_s Q_g \ln(P_g/P_s)} \dots\dots\dots(1)$$

4. 気泡ポンプの性能予測

気泡ポンプの揚水量を推定する方法としては, 管の部分に運動量方程式を適用する方法が提案されており^{5,7)}, 本研究もこの手法に則って計算を行う. 解析モデルの作成時には次の仮定を設けた.

- 空気の運動量変化は, 水のそれと比べて著しく小さいので無視する.
- 液体体積率 f は, 揚水管内で一様とする.
- 空気と水との二相流流動形式は, スラグ流とする.

・揚水管下端に設置された漏斗部と球形のエアストーンの間に流れる二相流による損失はこれを無視する. この部分を図3のようにモデル化し, 空気と水とが有する力学的エネルギーが漏斗入口①から揚水管入口②まで保存されるものと仮定する. これは, 漏斗部の断面積が揚水管のそれと比べて大きい場合, 平均流速が小さくなり, 損失は揚水管内の摩擦損失に比べて無視できると考えた結果である. したがって, 漏斗部入口における水の入口損失も無視している.

上記の仮定のもとに, 定常的な揚水状態にある気泡ポンプを考える. 図3の揚水管の断面②~③において, 運動量方程式を記述すると次式を得る.

$$\rho_l Q_l u_{p2} - \rho_l Q_l u_{p3} = Ag \int_0^L \rho_{TP} dz + \pi d \int_0^L \tau_{TP} dz - Ap_2 \dots (2)$$

ここで, 左辺は水の運動量変化を表しており, 液体体積率 f が管内で一様であるならば, 連続の式から $u_{p2} = u_{p3} (=Q_l/Af)$ なので, その値は0である.

右辺の第1項は, 揚水管内の流体の重量である. $\rho_l \gg \rho_g$ であることを考慮すれば, $Ag \int_0^L \rho_{TP} dz \approx AgL f \rho_l$ となる.

右辺の第2項は, 揚水管における摩擦力である. 垂直管内二相流の摩擦損失の式として, 斯波・山崎⁸⁾の $\Delta P_{TP} / \Delta P_l = f^{-1.75}$ を使用すれば, 管摩擦係数を λ_{10} として, 次式のように記述できる.

$$\pi d \int_0^L \tau_{TP} dz = A \Delta P_{TP} = A f^{-1.75} \Delta P_l = A f^{-1.75} \lambda_{10} \frac{L}{d} \frac{\rho_l u_{l0}^2}{2} \dots (3)$$

右辺の第3項は, 揚水管の下端面②において, 揚水管内の流体が受ける圧力合力である.

以上をまとめると, 次式が得られる.

$$gL f \rho_l + f^{-1.75} \lambda_{10} \frac{L}{d} \frac{\rho_l u_{l0}^2}{2} = p_2 \dots (4)$$

次に, 漏斗部の断面①~②において, 空気と水の力学的エネルギーが保存されるという仮定から次式を得る.

$$Q_l \left\{ \frac{\rho_l}{2} (u_{l2}^2 - u_{l1}^2) + \rho_l g L' + (p_2 - p_1) \right\} + Q_g \left\{ \frac{\rho_g}{2} (u_{g2}^2 - u_{g1}^2) + \rho_g g L' + (p_2 - p_1) \right\} = 0 \dots (5)$$

さらに $u_{l1} = \frac{Q_l}{A_1} = \frac{A}{A_1} u_{l0}$, $u_{l2} = \frac{u_{l0}}{f}$, $\rho_l \gg \rho_g$, $p_1 = \rho_l g H_s$ を考慮して, 圧力 p_2 を求める式に変形すれば次式を得る.

$$p_2 \approx \rho_l g H_s - \frac{1}{1 + \frac{Q_g}{A u_{l0}}} \left[\frac{\rho_l}{2} \left\{ \frac{1}{f^2} - \left(\frac{A}{A_1} \right)^2 \right\} u_{l0}^2 + \rho_l g L' \right] \dots (6)$$

ただし, $A_1 = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_a^2)$ である.

式(6)を(4)へ代入して, 漏斗と揚水管とを接続すれば次式を得る.

$$gL f \rho_l + f^{-1.75} \lambda_{10} \frac{L}{d} \frac{\rho_l u_{l0}^2}{2} = \rho_l g H_s - \frac{1}{1 + \frac{Q_g}{A u_{l0}}} \left[\frac{\rho_l}{2} \left\{ \frac{1}{f^2} - \left(\frac{A}{A_1} \right)^2 \right\} u_{l0}^2 + \rho_l g L' \right] \dots (7)$$

供給空気量 Q_g を与えて上式を解き, 揚水管内の見かけの水の流速 u_{l0} , ひいては揚水量 Q_l を推定したいのだが, そのためには, 液体体積率 f の値が必要である. f の値を定めるため, 円管中の二相流において気体スラグの上昇速度を求める Nicklin ら⁹⁾の式(8)を利用する.

$$u_g = 1.2(u_{g0} + u_{l0}) + 0.35\sqrt{gd} \dots (8)$$

さらに, 液体体積率 f と気体体積率 f_g の関係を利用すれば, 次式を得る.

$$f = 1 - f_g = 1 - u_{g0} / u_g \dots (9)$$

式(9)へ(8)を代入して, f を求める式(10)を得る.

$$f = 1 - \frac{u_{g0}}{1.2(u_{g0} + u_{l0}) + 0.35\sqrt{gd}} \dots (10)$$

気泡ポンプへの供給空気量 Q_g を与えれば, 管内の空気の見かけの流速は $u_{g0} = Q_g/A$ で定まる既知量となる. したがって, 式(7)と(10)とは f と u_{l0} とを未知数とする連立非線形方程式を構成する. これを, 表計算ソフト Excel のソルバー機能を利用して解き, 気泡ポンプの揚水量の推定を行う.

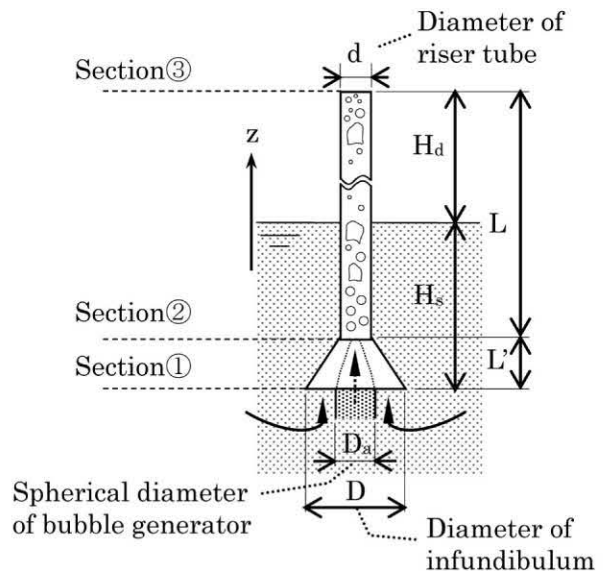


Fig.3 Analytical model

5. 実験結果

5.1 供給空気量による影響

図4に、揚程が150~300mmの場合について、供給空気量を変えて揚水量を測定した結果を示す。図中の破線(a)(b)の間では、揚水量は空気量とともに増加するが増加率は次第に鈍っていき、(b)を超えると、空気量を増やしても揚水量は変化しなくなる。

空気量を増やせば、揚水管内の液体体積率 f が小さくなり、これは二相流の密度 ρ_{TP} と管内流体の重量 (式(7)の左辺第1項) の減少につながる。その結果として、二相流の流量は増加するものと期待された。ところが、流速が増せば、式(7)の左辺第2項で代表される流動損失も増加するから、これにより流量の増加が抑制される。加えて、 f の減少は、二相流の合計流量ほどは液体の揚水量が増加しないことを意味し、さらには二相流の流量が増加したとしても液体の揚水量は却って減少する可能性もある。このように、空気量を増やすことは、揚水量増加と減少の両方の効果を併せもち、空気量が少ない間は前者の、多くなると後者の効果が顕著になるため、図4のような特性を示すと考えられる。なお、轟ら⁵⁾は、空気量をさらに増加させた場合に、揚水量が緩やかに減少するという実験結果を提示している。このことは、今回の小型ポンプにおいても、図4よりも細い $d=8\text{mm}$ の揚水管を用いた実験、および前述した性能予測の解析結果で再現されていた。

次に、空気量を破線(a)よりも少なくすると、揚水管内の上昇流れが間欠的になり、定常的な揚水にならなかった。この流れを観察すると、管内に上昇流れが発生せずにほとんど揚水しない時間と、

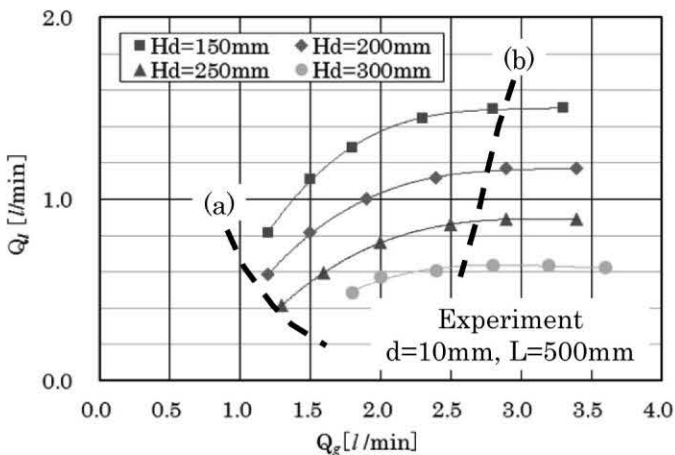


Fig.4 Relation between air flow rate and quantity of water delivered when pump head was changed.

管内を流体が高速で上昇して、上端から気液混合流体が噴き出す瞬間とが繰り返されていた。その周期は1s程度で、空気量にはほとんど影響を受けないことも分かった。今回は、このような間欠的な流れが発生した場合には、揚水量を測定せずに実験を打ち切った。したがって、グラフにプロットされている左端の点は、各条件において安定した揚水が可能であった最小流量の値を示している。

5.2 揚水管直径による影響

図5,6は、直径の異なる10,14,18mmの揚水管について、実験結果を比較したものである。揚水量を比較した図5からは、管の全長と揚程とを同一にして比較すると、揚水量が最も大きくなる「最適な」径の太さは、供給される空気量によって異なることが分かる。

内径が太い管を使用した場合、断面積が大きくなるために、ある揚水量を発生させるための見かけの流速 u_{10} は遅くてよい。これにより、揚水管における流動損失が、細い管に比べてかなり小さくて済むため、揚水量を増加させる効果が大きい。一方で、太い揚水管は管内の体積が大きいため、同じ空気量を供給しても液体体積率 f と密度 ρ_{TP} とが相対的に大きくなり、揚水管内の二層流体の重量が大きい。このため、空気量が少ない場合に太い管を使用した場合には、流動損失の減少によるプラスの効果よりも、重量が大きいことによるマイナスの効果が顕著になり、揚水量が細い管よりも小さくなってしまふものと考えられる。

図6は、式(1)で求めたポンプ効率を図示したもので、相対的に揚水量が大きい管を使えば、ポンプ効率 η も高くなることが分かる。また、 η の最大値は、管径が太くなるにつれて増加傾向にある。次に、1本の揚水管で空気量と η との関係に注目すると、 η は、空気量とともに揚水量が増加する範囲、すなわち図4では破線(a)と(b)の間で最大となっており、最高効率 η と最大揚水量 Q_l を発生させる空気流量は一致していない。なお、効率 η は揚程の影響をあまり受けず、図4のいずれの H_d の場合も図6の $d=10\text{mm}$ に近い η の値を示した。

以上をまとめると、気泡ポンプに多くの空気を供給できる場合には、太い管を用いる方が、 Q_l が多く η も高くなるために望ましい。一方で、太い管において空気量が減少した場合には、揚水量が減少するばかりでなく、図5の $d=18\text{mm}$ の線が $Q_g \approx 2.6\text{l/min}$ で途切れているように、細い管の場合に比べて揚水が脈動的になりやすい。

次に、式(7)と(10)とから計算によって求めた揚水量の予測値を、図7に示す。図5の実験結果と比較すると、定性的な傾向はよく一致しており、各線が交差する空気量 Q_g の値も近い。したがって、この解析モデルは、揚水量の相対比較を行って最適な揚水管太さを選択するという場合には、必要な精度を有しているといえる。しかし、計算によって得られた揚水量の値自体は実測値に比べてかなり多く、特に細い管ほどその差が大きかった。

解析モデルが、実測値と異なる流量を予測する主な原因としては、次の2点が挙げられる。

① 無視された流動損失：モデルを簡略化するため、摩擦以外の流動損失を無視し、漏斗内の流れに対しては力学的エネルギーの保存を仮定してしまった。無視された損失をモデルに追加すれば、揚水量が減少するのは明らかである。

② モデルで使用する「気液二相流の摩擦損失」および「気体スラグの上昇速度」の計算式：今回は、轟らのモデル⁹⁾が小型ポンプでも利用できるかを調査するために、いずれも彼らと同じ式(3)と式(8)とを使用してしまった。本来は、我々のポンプの揚水管内の流れが、これらの実験式を使用できる条件を満足しているかを確認し、満足していないならば使う式を改める必要がある。

また、モデル計算において、揚水を行うのに必要な最小空気量の値は、Nicklinの式(8)において揚水量 $Q_l = 0$ の条件、すなわち $u_{l0} = 0$ を代入すれば定まる。しかし、こうして得られた値は、実機で揚水が脈動的になる空気量に比べてはるかに小さく、解析モデルは脈動現象を再現できていない。

5.3 揚水管長さによる影響

揚水管長さが 300,400,500mm の気泡ポンプの揚水量を比較したものを図8に示す。揚程は同一であるから、管長が短いほど浸水深さ H_s (または浸水率 $\sigma = H_s/L$) が小さくなる。管長の短縮化は、栽培装置のコンパクト化につながるため実用化にあたっては効果大きい。しかし、同一の空気量で比較すると、管長が短いほど揚水量が少なく性能が低下している。

そもそも管内に上昇流を発生させる力の源は、漏斗下端における圧力 $\rho_l g H_s$ であるから、 H_s が浅くなれば、揚水量が減少するのは致し方ない。ただし、管長が短い $L=300\text{mm}$ の場合には、脈動を起こさずに揚水するための最低空気量が 3.8/min であり、他の2本に比べて極端に多くの空気を必要としている。短い揚水管を使用する場合には、

揚水量の大小を議論する以前の問題として、脈動対策が重要であることが分かる。

なお、管長により空気量の上限に違いがあるのは、エアポンプの特性が原因である。つまり、長い揚水管ほど H_s が大きくなるため、エアストーン

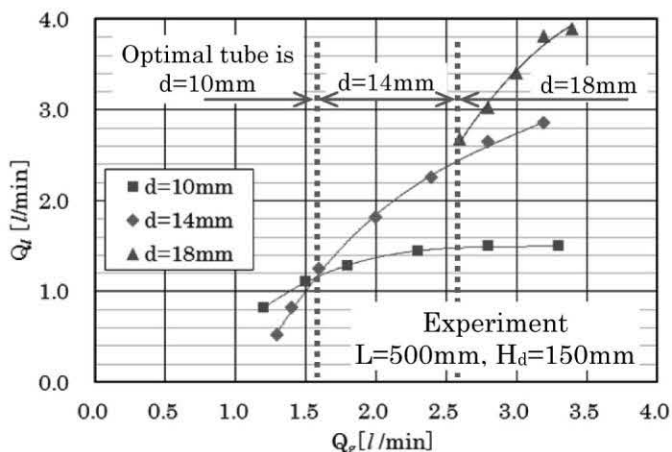


Fig.5 Relation between air flow rate and quantity of water delivered with different diameters of riser tube.

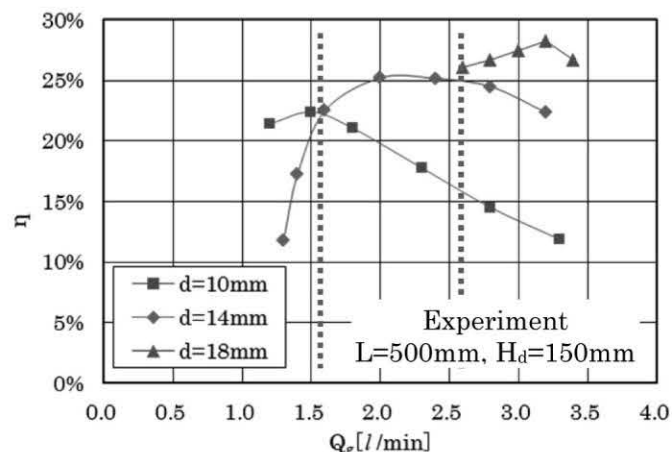


Fig.6 Relation between air flow rate and pump efficiency with different diameters of riser tube.

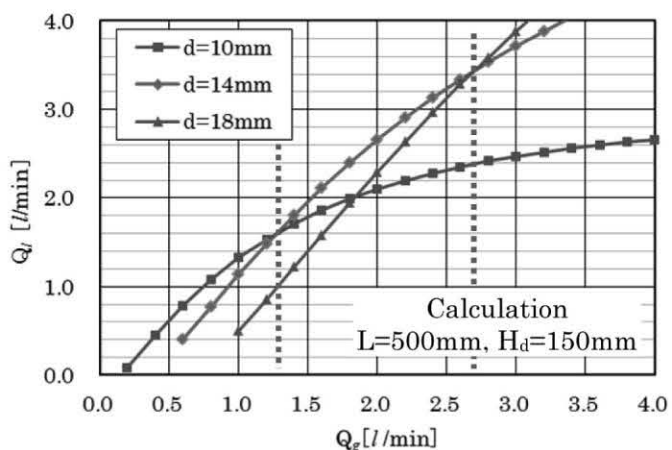


Fig.7 Relation between air flow rate and quantity of water delivered with different diameters of riser tube.

の水深が深くなって静水圧が大きくなる。このため、供給空気の必要圧力が高くなり、(エアポンプの性能特性にしたがって) 空気量が減少したものと考えられる。

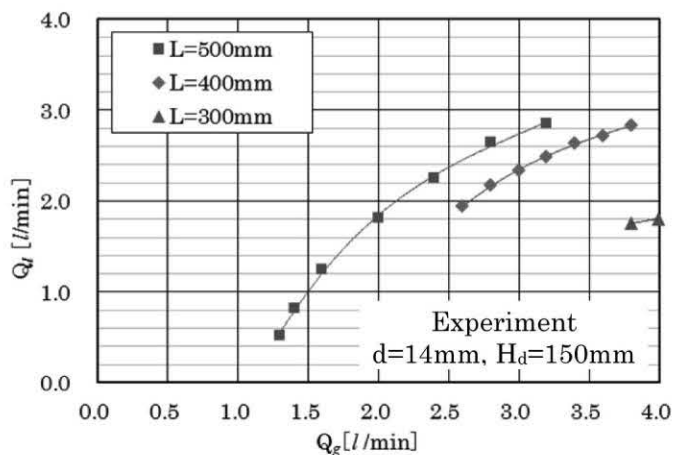


Fig.8 Relation between air flow rate and quantity of water delivered with different lengths of riser tube.

6. 結言

小型の植物養液栽培器での使用を目的として小型気泡ポンプを自作し、主に揚水量の測定を行った。次に、運動量理論に基づいた解析モデルを利用して性能予測計算を行い、実験結果と比較した。実験からは、小出力のエアポンプを圧縮空気の供給源とする小型気泡ポンプでは、揚水量が揚水管の寸法（径および長さ）によって大きく変化することが分かった。このため、揚水管の選択にあたっては細心の設計が必要となるが、その設計には、本研究の解析モデルを改良すれば利用できるものとする。以下、実験および解析を通して明らかになったこと、加えて今後の課題を列挙する。

- (1) 供給空気量による影響：揚水量は空気量とともに増加するが、ある値を極大値としてそれ以上には増加しない。これは、轟ら⁵⁾の長さ7.5mの揚水管による結果と同一の傾向であり、ポンプの大小に関係なく成立する特性と考えられる。また、ポンプ効率が最大となる空気量と、揚水量が最大となる空気量とは異なる値であった。
- (2) 管径による影響：管長と揚程とが同一という条件下で比較すると、揚水量が最大となる揚水管の直径は空気量に依存して変化する。多くの空気量を供給できる場合は、太い管を使用すれば、揚水量も多く効率も高くなる。反対に少ない空気量しか供給できない場合には、細い管の方が揚水量は多くなる。
- (3) 管長による影響：一般に、管長が長い方が揚

水量は多くなる。極端に短い管を使用した場合、揚水量が減少するばかりでなく、脈動が発生して定常的な揚水ができなくなる危険性が高まる。

- (4) 管内に発生する脈動：気泡ポンプに定常的な圧縮空気を供給しても、ある条件下では管内の上昇流が不安定になり、脈動が発生することがある。この脈動は、空気量が少なく、管径が太く、管長が短く、揚程が大きい（最後の2条件から浸水率 σ が小さい）場合に発生しやすい。脈動発生のメカニズムと発生条件とを明らかにすることが当面の課題である。
- (5) 解析モデルの妥当性：作成した解析モデルは、定性的には正しい揚水量変化の方向を示すため、揚水量の相対的な比較の用途には利用できる。しかし、実測される揚水量との間には差が大きく、定量的な性能予測にはまだ使える段階にない。摩擦以外の損失を無視していることが、誤差の主要原因と予想される。揚水管が長い大型の気泡ポンプでは、摩擦損失が他の損失を圧倒して支配的となるため、このモデルでも十分な精度を有すると予想されるが、今回のような管長の短い小型ポンプでは摩擦損失と副損失とが同程度のオーダーを有すると想定されるため、後者を無視することができなくなる。したがって、小型気泡ポンプ用にモデルを改良することが必要である。

参考文献

- 1) リバネス出版、植物工場物語、塚田周平ほか、(2010)。
- 2) グラフィクス社、これからのガーデニング 水栽培野菜づくりの愉しみ、矢野謙介、(1999)、pp.50-51。
- 3) 例えば、共和株式会社、ホームハイポニカ、<http://www.kyowajpn.co.jp/index.html>
- 4) 農文協、養液栽培／養液土耕、岩崎泰永ほか、(2004)、pp.231-245。
- 5) 気泡ポンプの揚水特性、轟一郎ほか、機論、38-312 (1972)、pp.2085-2092。
- 6) 丸善、機械工学便覧 流体機械、日本機械学会編、(2007)、p.114。
- 7) 電解気泡ポンプの揚水特性に関する研究、中山昭男・高宮義弘、化学工学論文集、(2002)、pp.772-774。
- 8) 垂直円管内の気液二相流の摩擦損失、斯波正誼・山崎彌三郎、機論、32-240 (1966)、pp.1231-1238。
- 9) D.J.Nicklin, J.O.Wilke and J.F.Davidson : Two-Phase Flow in Vertical Tubes, Trans. Inst. Chem. Engr., 40-1 (1962), pp.61-68。

【受理年月日 2011年 9月29日】