

エアリフトポンプを利用した深層水揚水に関する研究

Experimental and Analytical Study of Drawing up Deep Seawater With Air-Lift Pump

山本亮介¹・田中伸和²・大澤弘敬³・鷲尾幸久⁴・矢木橋清智⁵・石井健一⁶

Ryosuke YAMAMOTO, Nobukazu TANAKA, Hiroyuki OSAWA,
Yukihisa WASHIO, Kiyotomo YAGIHASHI and Kenichi ISHII

Abstract

Deep seawater commands much attention recently because of its low temperature, rich nutrition and cleanliness. For the purpose of drawing up deep-sea water constantly and inexpensively, the authors are considering to use air-lift pump. This report describes both the experimental and analytical investigation for air-lift pump performance in case of being used for drawing up deep-sea water. The numerical simulation code based on two-fluid (gas-liquid) model was developed, and the results were compared with that of experiments. Consequently, the analytical volume flow rate of lifted water was proved to have a tendency to be larger than that of experimental one in cases the length of suction pipe was quite long, or void rate was very small.

Key Words: Air-lift pump, gas-liquid flow, two fluid model

1. はじめに

低温で清浄、富栄養という特徴を持つ海洋深層水は、その利用価値の高さから、近年その需要が増している。この深層水を安定かつ安価に汲み上げる装置として、著者らはエアリフトポンプを提案している。エアリフトポンプは気泡ポンプとも呼ばれ、気液の密度差を利用した押し上げ作用による揚液装置である。そのエアリフトポンプを利用した深層水揚水概念図を図-1に示す。エアリフトポンプは流路内に機械的な駆動部がないため保守が容易であるという特徴を持ち、沈砂池の排砂、海底のヘドロの汲み上げなどに使用された実績もある。また、空気を注入して揚水を行うため、深層水揚水に利用した場合、深層水中の溶存酸素量を増加させる効果も期待でき、深層水の水産養殖への直接利用時の利点にもなる。そして、安価な夜間電力を利用して圧縮空

気を作って貯蔵し、揚水時に利用することも検討されており、経済的な有利性も期待できる。ただし、エアリフトポンプで効率良く揚水を行うためには、その機構上、鉛直管部が必要となるため、洋上揚水を行う場合は問題にならないが、浅海域沿岸に設置するためにはピットを掘るなどの工夫が必要となる。

エアリフトポンプに関する研究は、古くは轟¹⁾ら、Stenning ら²⁾によって運動量保存則を元にした揚

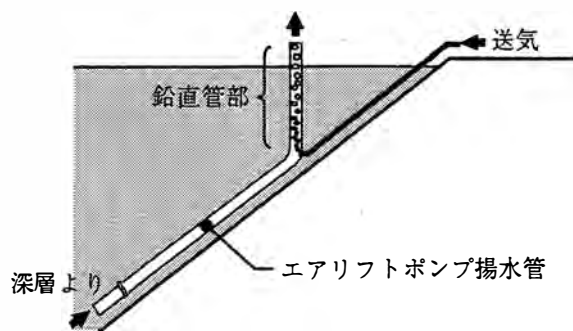


図-1 エアリフトポンプによる深層水揚水概念図

^{1, 2} 電力中央研究所水理部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 番地)

^{3, 4} 海洋科学技術センター海洋技術研究部 (〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2 番地 15)

^{5, 6} 古河電気工業(株)研究開発本部千葉研究所 (〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通 6 番地)

水理論が提示されている。また、固体粒子の水力輸送を目的としたエアリフトポンプの研究が斉藤ら^{3)~5)}によって室内規模の実験から実海域実験まで行われている。エアリフトポンプ揚水管内の流動は気泡と海水が複雑に混ざった気液二相流であり、深層水を大量に揚水するためには管径が大きく、且つ、管長の長い揚水管が必要となる。ところが、大口径管内の気液二相流はその流動様式など、現状では未解明な点が多い。著者らはエアリフトポンプの基本的揚水特性の把握を目的として、過去に実験室規模の揚水実験を行い、また、同時に代表的な気液二相流解析モデルである二流体モデルを用いて、エアリフトポンプ揚水特性数値解析コードを作成してきた^{6), 7)}。そして、これらの研究の中でエアリフトポンプの送気量と揚水量・揚程の関係、管内ボイド率や気泡上昇速度などの特性を明らかにし、実験結果と数値解析結果を比較することによって、数値解析コードの妥当性についても確認を行ってきた。

本論文では、エアリフトポンプの深層水揚水への適用性を検討するために新たに実施した深層水揚水模擬実験について報告する。これは、エアリフト揚水管の先端に抵抗板を装着することにより、装置での水深よりもさらに深層の水を汲み上げる状態を模擬し、その揚水特性を把握するものである。また、

数値解析も同時に行い、各結果との比較も行う。

2. 実験装置

試験装置の概略図を図-2に示す。試験装置は深さ16mの水槽内に設置した長さ14.05m、内径0.15mの揚水管（塩化ビニル製、可視化部分のみアクリル製）、エアーコンプレッサー（定格出力7.5kW）、送気空気量計測用の質量流量計、揚水管入り口流量計測用の電磁流量計からなる。送気にはエアーコンプレッサーを用い、管内での偏流を防ぐために同水深の管壁面4方向から送気した。また、揚水管の先端には銅板で作製したオリフィス板を装着して揚水管入り口部に抵抗を付けられる構造とした。これは、オリフィス板による管入り口における損失を仮想導水管の管長分の壁面摩擦損失と同等と見なすことにより、実験装置における実管長よりも長い揚水管を模擬するためのものである。そして、オリフィス板の開口径を調整して入り口損失の値を変えることにより、模擬水深を変化させるものとした。実験では、水槽内の水位は揚水管出口部と同じ高さ、即ち揚程0とし、水深13.2mの位置から送気を行った。実験における揚水の様子を付録の写真1~4に示す。

3. 数値解析

代表的な気液二相流解析モデルである二流体モデルを用いて、気相と液相に対してそれぞれ質量、運動量の保存式を立てて1次元数値解析を行った。ただし、ここでは管路内での温度変化は無視できると仮定して、エネルギー保存式は用いないものとした。以下に基礎方程式を示す。

気相の質量保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g \alpha_g u_g) = \Gamma_g$$

液相の質量保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \alpha_l) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_l \alpha_l u_l) = \Gamma_l$$

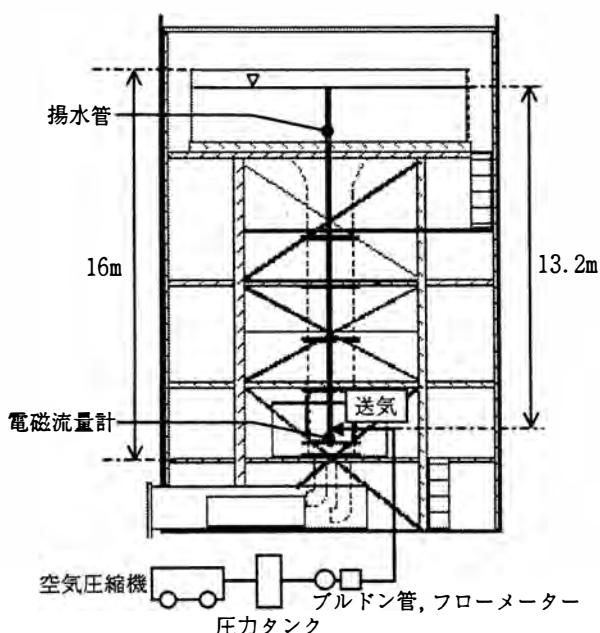


図-2 実験装置概略図

実験装置の写真



写真-1 空気注入部

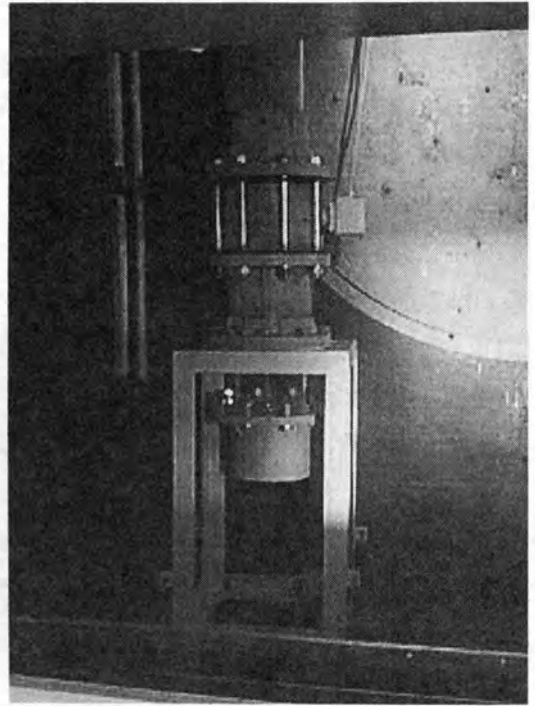


写真-2 管入り口部



写真-3 揚水管出口部

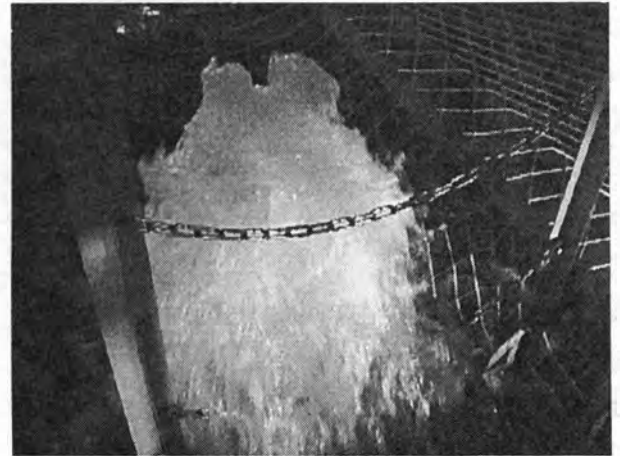


写真-4 揚水の様子

気相の運動量保存式

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{FI_g}{\rho_g \alpha_g} |u_g - u_l| (u_g - u_l) + \frac{FW_g}{\rho_g \alpha_g} |u_g| u_g = G$$

液相の運動量保存式

$$\frac{\partial u_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial u_l}{\partial x} + \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{FI_l}{\rho_l \alpha_l} |u_l - u_g| (u_l - u_g) + \frac{FW_l}{\rho_l \alpha_l} |u_l| u_l = G$$

ここで、 α_g , α_l は気相、液相の管内断面平均ボイド率（体積分率）であり、 $\alpha_g + \alpha_l = 1$ である。そして、 u_g , u_l は気相、液相の管内断面平均流速（m/s）、 ρ_g , ρ_l は気相、液相の管内断面平均密度（kg/m³）、 P は管内断面平均圧力（N/m²）、 G は外力（重力加速度 9.8 m/s²）、 FI_g , FI_l はそれぞれ気相、液相の

相対速度に起因する界面剪断応力係数, FW_g , FW_l は気相, 液相の壁面剪断応力係数である. また, Γ_g , Γ_l はそれぞれ単位時間・単位体積あたりの気相, 液相の生成量であるが, ここでは水-空気系における溶解・発泡量は無視できるものとして, $\Gamma_g = \Gamma_l = 0$ として解析を行った. そして, ここでは気相, 液相の密度は管内温度を一定としているので流体圧 P のみの関数形で与えるものとし, 上記の基礎方程式を閉じるための密度と圧力・温度の関係を規定する熱的状态式として, Hirtらの式⁸⁾を用いた.

エアリフト揚水管内気液二相流の流動様式は気泡流, 即ち, 連続した液相中に小気泡が分散して流れであるとし, 気泡形状を球形と仮定すれば, 気液界面剪断応力係数は界面積と抵抗係数の相関式を組み合わせて以下のように表される.

$$FI_g = FI_l = \frac{1}{8} C_D A_{int} \rho_l$$

ここで, C_D は気泡の流動抵抗係数, $A_{int}(\text{m}^2/\text{m}^3)$ は気泡界面積濃度である. 気泡の流動抵抗係数 C_D は流体の物性や気泡径に加え, 液相の汚れ度にも依存することが知られている. 富山らは液相の汚れ度に応じた静水中の単一気泡の流動抵抗係数 C_{DT} について, 数値計算で利用しやすい形で整理している⁹⁾. また, 気泡群の抗力係数についても単一球形気泡の抗力係数 C_{DT} を用いて整理している¹⁰⁾. 本研究での実験体系は十分汚れているとして, 富山らの式より以下のように気泡の流動抵抗係数 C_D を表した.

$$C_D = \max \left\{ \frac{24}{Re} \left(1 + 0.15 Re^{0.687} \right), \frac{8}{3} \frac{E}{E+4} \right\} \times \alpha_l^{-0.5}$$

ここで, Re は気泡レイノルズ数, E はエトベス数で浮力と張面表力の比を表す.

気泡界面積濃度 A_{int} については, 気泡を球形と仮定すると気泡の平均体積等価直径 d_b を用いて以下のように表される.

$$A_{int} = \frac{6\alpha_g}{d_b}$$

次に, 気泡は壁面には接触しないものとして気相の壁面摩擦は無視するものとする, 気相の壁面剪断応力係数 $FW_g = 0$ であり, 液相の壁面剪断応力係

数 FW_l は, 管壁面摩擦係数を, λ , エアリフト揚水管径を D とすると, 以下のように表される.

$$FW_l = \frac{\lambda}{2D} \rho_l$$

ここで, 管壁面摩擦係数 λ は管壁面がなめらかであるとして, 液相のレイノルズ数に応じて, Blasius 式もしくは Nikuradse 式を適用した.

以上の構成方程式を用いて, 基礎方程式を差分法で離散化し, 完全陰解法により解析を行った. 離散化メッシュは等分割とし, スタッガードメッシュを用いた. すなわち, 速度をセルエッジ, 他の量はセル中心で与えた. また, 時間変化項と移流項の離散化は1次風上差分, 圧力勾配は, 中央差分とした.

次に境界条件について述べる. エアリフトポンプ最下端部から空気注入位置までの管内は液相のみであるので, 気液二相流解析は空気注入位置から管上端出口部のみで行い, 空気注入位置から管最下端の間(導水管部)では入り口部と出口部(空気注入位置との接合部)で運動量保存式が成り立つ様に計算を行い, 接合部での境界条件として圧力を与えた. また, 揚水管出口部については大気圧解放とした.

4. 実験および解析結果

(1) 深層水揚水模擬実験結果

深層水揚水模擬実験では, 揚水管の先端にオリフィス板を取り付けることにより意図的に入り口損失をつけ, その損失分を管壁摩擦損失とみなすことにより実管長より長い導水管を持つ状態の仮想揚水管を模擬した. そして, オリフィス板の開口径を調整することにより様々な長さのエアリフトポンプ揚水管を模擬した. ここで, オリフィス板による入り口損失の算出には Idelchik らが整理した式¹¹⁾を用い, 壁面摩擦損失から仮想導水管長の算出には, 管入り口流速に応じて Blasius 式もしくは Nikuradse 式を用いて壁面摩擦係数を決めて算出した.

実験結果を図-3に示す. 図-3は送気水深 13.2 m で, 揚水管長さを 14.05 m (オリフィス板なし) から開口径の異なる数種のオリフィス板を装着して約 1,000 m までを模擬した実験結果である. また, 送気量は 2.7 から 45 Nm^3/h である. なお, こ

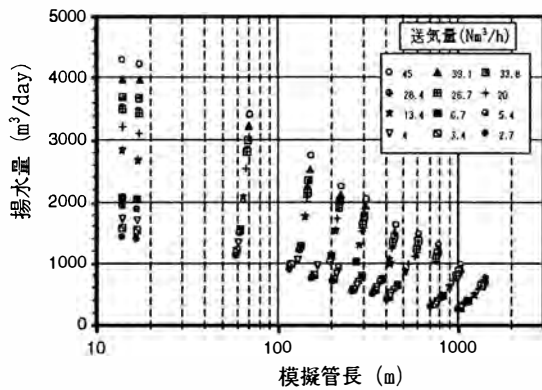


図-3 模擬揚水管長と揚水量の関係

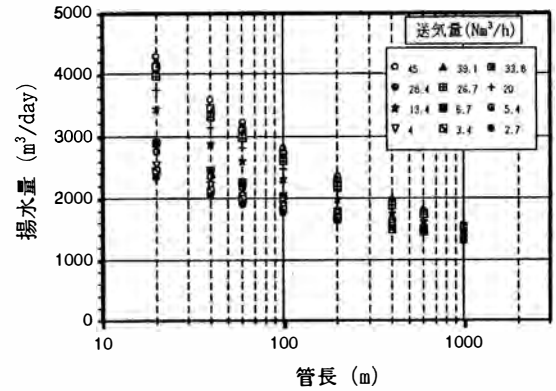


図-4 揚水管長と揚水量の関係 (数値解析)

での揚水量とは、揚水管入り口部で電磁流量計を用いて測定した管入り口部の液流量のことである。

図-3より、模擬揚水管長が長くなるに従い、揚水量は0に漸近し、また、送気量が減少するに従い、揚水量も減少していることがわかる。また、エアリフトポンプの基本特性により、一般的には送気流量を増加させていくと、ある量を境に揚水量は減少していくが、本実験での最大送気量 $45 \text{ Nm}^3/\text{h}$ では、まだその揚水量の極大値には達していないものと推定される。なお、測定装置の制限から本実験での最大送気量は $45 \text{ Nm}^3/\text{h}$ であったが、使用したエアーコンプレッサーの能力的には $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 程度まで送気することが可能である。

(2) 数値解析結果

数値解析は空気の注入位置、管径、送気量などの条件を深層水揚水模擬実験と同様の値にして計算を行った。数値解析結果を図-4に示す。

図-4より、送気量が少ないほど、実験結果と数値解析結果に差があり、計算値が模擬実験値より大きい傾向があることがわかる。これは既に過去の実験の際に明らかになっている本実験解析コードの特徴である。送気量が少ない場合、つまり管内のボイド率が小さい場合は、実現象として気泡は自由に管内断面横方向にも運動し、らせん状もしくはジグザグ状に上昇する。そのため、気泡による鉛直方向への駆動力が減少し、結果として揚水量も減少するのである。しかしながら、数値解析では二流体モデルを使った1次元解析であり、気泡の断面方向の動きは考慮していないため、実験結果と差異が出てく

るものと考えている。過去の実験結果より、最大の揚水量を得ることができる管出口部のボイド率は約0.6であり、その条件では本数値解析コードを用いた解析結果は実験結果と良く一致することがわかっている。低ボイド率時にも精度良く解析できるモデルの構築は今後の課題である。

また、同じく図-4より、揚水管長が長くなるに従い、揚水模擬実験結果と比較して数値解析結果が大きく異なり、揚水量を多く見積もっていることがわかる。これは今回初めて明らかになったことであるが、同送気量で導水管部分長くなるほど、差違が大きくなっていることから、管壁面摩擦の算定式などを再検討する必要があるものと考えらる。

(3) 考 察

全国数カ所で行われている深層水取水は、主として渦巻き式ポンプを利用している。その中でも、高知県海洋深層水研究所での取水装置は、ポンプ出力 7.5 kW 、取水管径 125 mm と、ほぼ本研究の実験装置と同規模であり、また、取水時の平均使用電力量も約 5 kWh とほぼ同じである。そして、取水深度約 320 m からの渦巻きポンプによる取水管一本分の揚水実績値は平均 $530 \text{ m}^3/\text{day}$ 程度であった。取水管のレイアウトや総管長が異なるために直接の比較はできないが、本模擬実験結果(図-3)によると、エアリフトポンプを用いて海上で鉛直下方向水深約 320 m から取水をした場合、送気量 $45 \text{ Nm}^3/\text{h}$ で約 $2,000 \text{ m}^3/\text{day}$ の量を取水できることがわかる。ただし、本実験での揚程は0であるため、揚程を高くした場合、つまり海面より高い位置

に揚水する場合には、得られる揚水量は減少する。過去の実験²⁾では、本実験装置において揚程を0から送気水深の3割程度の長さに変化させると、得られる揚水量は約半分に減少した。

5. おわりに

本研究ではエアリフトポンプによる深層水揚水模擬実験・数値解析結果について報告を行ったが、ここで示した量よりもさらに多くの揚水量を得るためには、①送気水深をさらに深くする。②送気量を多くする。③揚水管径を大きくする。④揚水管の本数を増やす。などの事項が有効であろう。また、より深層から揚水するためにも、①や②の事項は有効である。①について、送気可能な水深はエアーコンプレッサーの能力に依存する。例えば本実験で使用したエアーコンプレッサーの最大吐出圧は6気圧程度であるので、理論上、水深60m近くまでは送気することが可能である。ただし、水頭圧が大きくなるので、当然、送気可能な最大量は送気位置が深くなるほど少なくなる。②についても、エアーコンプレッサーの能力に依存してくるが、送気量を多くすることにより、揚水起動力が増し、揚水量も増加させることができる。ただし、送気量が多ければ多い程良いわけではなく、揚水量が増加するのは、ある送気量までであり、それ以上の送気を行うと、壁面摩擦や気液界面摩擦などの水力学的損失の増加が顕著となり、逆に揚水量は減少する傾向を示す。これはエアリフトポンプの特徴の一つである。本実験装置を用いた筆者らの過去の実験では、最大揚水量を得ることができる送気量は、管出口部のボイド率(水中に占める空気の体積割合)が0.6程度となる送気量の場合であった。③について、揚水管の管径を大きくすれば、それに応じて揚水量も増加するものと考えられるが、揚水に必要な送気量も増加するであろう。また、管径が非常に大きくなった場合、たとえ管内のボイド率を管径が小さい場合と一致させたとしても、管内の流動様式(気泡の大きさ、分布の状態)が変化する可能性が大きい。特に管径が大きくなってくると、気泡が管中央部のみに集まって上昇することも予想され、全体で見ると揚水の駆

動力が減少し、揚水量も逆に減少する可能性もある。エアリフトポンプによる揚水量は管内の気泡の流動様式に大きく左右されるため、揚水管の管径の選定には注意が必要である。④については、当然、揚水管の本数分の揚水量が得られるが、エアリフト揚水管の設置費、コンプレッサーの電気代などのコストは揚水管本数分増加する。

6. 今後の予定

今後は、実海域上でのエアリフトポンプ揚水試験を行う予定である。海水中では気泡の大きさや挙動などの性質が淡水中でのそれとは異なってくる可能性がある。前述のように、エアリフトポンプの揚水特性は管内の流動様式に影響を受けやすいので、エアリフトポンプの揚水特性も海水中では、淡水を揚水する場合と異なってくる可能性が大きい。実海域実験ではその点について重点をおいて調査する予定である。また、波浪や潮流などの外的要因がエアリフトポンプシステムに及ぼす影響についても調査・検討する予定である。

また、今回明らかになった問題点を含め、数値解析コードのモデルを改良し、より精度良くエアリフトポンプによる揚水特性を解析できるようにし、エアリフトポンプ実機設計に資する。

参考文献

- 1) 轟ほか：気ほうポンプの揚水特性，機論，38-312，pp. 2085-2092, 1977.
- 2) Stenning, A.H. and Martin, C.B: An Analytical and Experimental Study of Air-Lift pump Performance, Trans. ASME, J. Eng. Power, 90-2, pp. 106-110, 1968.
- 3) 斉藤ほか：エアリフトポンプによる固体粒子の水力輸送に関する研究(第2報)，採鉱と保安，Vol. 28, No.1, pp. 2-13, 1982.
- 4) 宇佐美，斉藤ほか：エアリフトポンプによる固体粒子の輸送特性(第2報)，日本鉱業会誌，98 [1127], pp. 29-34, 1982.
- 5) 斉藤ほか：エアリフトポンプによるマンガン団塊の揚鉱特性に関する研究(第1報)，採鉱と保安，Vol. 32, No.10, pp. 540-551, 1986.
- 6) 山本・田中ほか：圧縮空気を利用した深層水汲み上げ技術に関する研究，土木学会第53回年講概要集第2部，pp. 630-631, 1998.

- 7) 山本・田中ほか：深層水揚水を目的としたエアリフトポンプの揚水特性に関する研究，土木学会第 54 回年講概要集第2部，pp. 174-175, 1999.
 - 8) Hirt C. W. and Romero N. C: Application of a Drift-Flux Model to Flashing in Straight Pipe, La-6005-MS, 1975.
 - 9) 富山ほか：気泡の抗力係数に関する研究（第 1 報，静止液中単一気泡の抗力係数），日本機械学会論文集 B 編，Vol. 61, No.587, pp. 2357-2364, 1995.
 - 10) 富山ほか：気泡の抗力係数に関する研究（第 2 報，気泡群の抗力係数と非定常流への適用性），日本機械学会論文集 B 編，Vol. 61, No. 588, pp. 2810-2817, 1995.
 - 11) I. E. Idelchik: Coefficients of Local Resistance and of Friction, HANDBOOK OF HYDRAULIC RESISTANCE, IPST Ltd., 1966.
- (2000.2.29受付)