

圧縮空気を利用した海水汲み上げ技術の研究開発

大澤 弘敬^{*1} 鷲尾 幸久^{*1}
田中 伸和^{*2} 山本 亮介^{*2}
石井 健一^{*3}

海洋エネルギーは洋上で得られる自然エネルギーであるが、経済性と共に海洋における効果的な利用法が課題とされている。本研究では波エネルギー応用技術を用いた底層貧酸素水塊や深層水の汲み上げ技術として、波エネルギーで製造された圧縮空気を利用するため、エアリフト方式に関する技術的な検討を行った。このエアリフト方式は、海水に可動部を持たないため簡便な新しい海水汲み上げ技術として注目されており、海水取水管の没水部に圧縮空気を注入し空気の力で海水を汲み上げる方式である。

特に、本論ではエアリフト方式を用いた海水汲み上げ技術の研究開発の第1段階として、圧縮空気の送気量、送気方法と海水汲み上げ量の関係を数値計算並びに水槽実験により定量的に把握すると共に、その基本特性に関する検討を行った。

キーワード：圧縮空気、海水汲み上げ、エアリフト方式、波エネルギー利用

R & D on artificial sea-water upwelling using compressed air

Hiroyuki OHSAWA^{*4} Yukihiisa WASHIO^{*4}
Nobukazu TANAKA^{*5} Ryosuke YAMAMOTO^{*5}
Ken-ichi ISHII^{*6}

An important research and development objective associated with ocean energy conversion is cost-effective operation in the ocean. To that end, the present work investigates utilization of wave energy to power artificial upwelling of deep-sea-water for useful purposes. One method to achieve this is to use wave-energy-generated compressed air to draw up deep-sea-water via a water-intake pipe. This so called "air-lift method" has received considerable attention due to its overall simplicity and the absence of moving parts in water.

This paper describes the first phase of an engineering evaluation of the air-lift system. In particular, the objectives are to understand the basic characteristics of the system and to determine the relationships between the required air-flow flux, air-supply method, and sea-water intake. The study is based on numerical calculations and wave-tank tests in the laboratory.

Key Words : compressed air, sea-water upwelling, air-lift system, wave energy

* 1 海洋技術研究部
* 2 電力中央研究所
* 3 古河電工（株）
* 4 Marine Technology Development
* 5 Central Research Institute of Electric Power Industry
* 6 The Furukawa Electric Co., Ltd

1 はじめに

海洋エネルギーは洋上で得られる自然エネルギーであるが、経済性と共に海洋における効果的な利用法が課題とされている。一方、沿岸海域の、とりわけ閉鎖性内湾域においては生活排水流入と過度な水養殖により水質・底質の汚濁が進行しており、この改善のために海洋において得られるクリーンなエネルギーを活用することが考えられる。

特に、夏季の成長期には底層において貧酸素水塊が形成され、底質からの栄養塩の溶出を加速し、富栄養化、赤潮発生の原因となっており、閉鎖性水域の水質改善のために底層貧酸素水塊を解消することが重要とされている。この底層貧酸素水塊を解消するには、底層水を汲み上げ、効率よく表層水と混合させると共に、溶存酸素を増大させることが効果的であると言われている。

その一方で、栄養塩に富み、低温かつ清浄であるため各方面でその利用が期待されている海洋資源として深層水がある。しかしながら現状では深層水を安定かつ安価に大量に汲み上げるための決定的な技術が確立されているとはいえないものと考えられる。

そこで、本研究では図1に示すような波エネルギー応用技術を用いた底層貧酸素水塊や深層水の汲み上げ技術として、波エネルギーで製造された圧縮空気を利用したエアリフト方式に関する技術的な検討を行った。このエアリフト方式は、海水に可動部を持たないため簡便な新

しい海水汲み上げ技術として注目されており、海水取水管の没水部に圧縮空気を注入し空気の力で海水を汲み上げる方式である。

特に、本論ではエアリフト方式を用いた海水汲み上げ技術の研究開発の第1段階として、圧縮空気の送気量、送気方法と海水汲み上げ量の関係を数値計算並びに水槽実験により定量的に把握すると共に、その基本特性に関する検討を行った。

2 気液二相流解析理論

エアリフト方式の海水取水管内は気相と液相が複雑に混ざった気液二相流である。そこで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数値解析を行う。基礎式の導入に当たり、以下の仮定を設ける。

- (1)流れは1次元である。すなわち、気相と液相それぞれのボイド率、流速、温度、圧力などの諸量は流路断面内において一様であるとする。
- (2)壁面からの流体の流入と流出はない。
- (3)流路面積は一定である。

二流体モデルは気相と液相に対してそれぞれ質量、運動量、エネルギーの各保存式をたてることにより、二相流を取り扱うものであるが、ここではエアリフトポンプ揚水管内での温度変化は無視できるものとし、質量保存式と運動量保存式から基礎方式を構成する。以下に基礎方程式を示す。

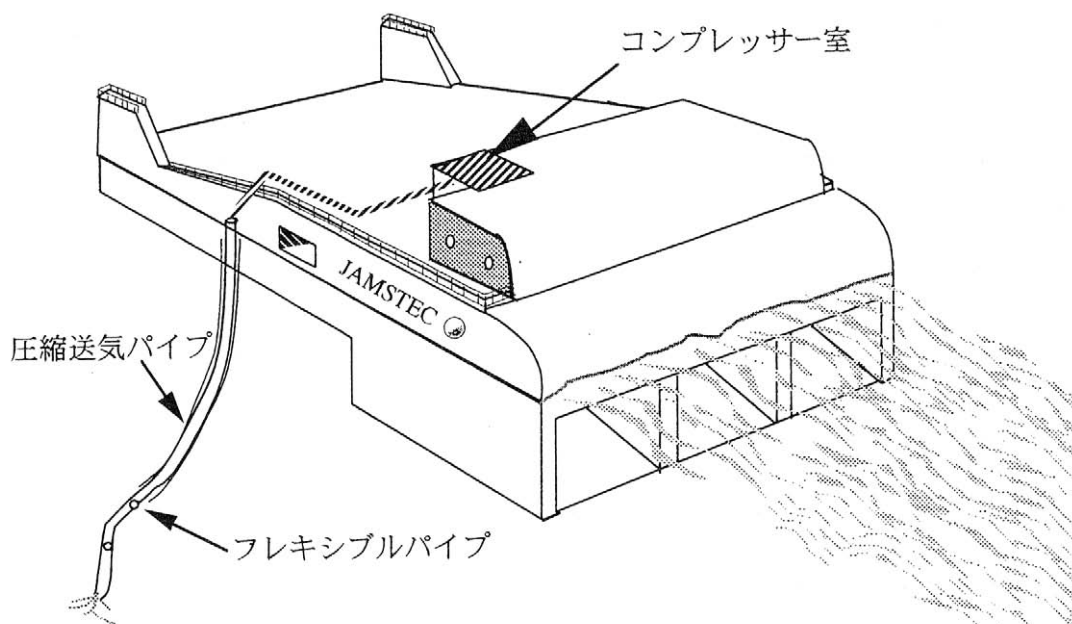


図1 エアリフト方式取水システム

Fig. 1 air lift of water intake system of "Mighty Whale"

気相の質量保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g \alpha_g u_g) = \Gamma_g \quad (1)$$

液相の質量保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \alpha_l) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_l \alpha_l u_l) = \Gamma_l \quad (2)$$

気相の運動量保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{FI_g}{\rho_g \alpha_g} |u_g - u_l| (u_g - u_l) \\ + \frac{FW_g}{\rho_g \alpha_g} |u_g| (u_g) = G \end{aligned} \quad (3)$$

液相の運動量保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial u_l}{\partial x} + \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{FI_l}{\rho_l \alpha_l} |u_l - u_g| (u_l - u_g) \\ + \frac{FW_l}{\rho_l \alpha_l} |u_l| (u_l) = G \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 α_g 、 α_l は気相、液相の管内断面平均ボイド率であり、 $\alpha_g + \alpha_l = 1$ である。また 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9.8m/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・発泡量は極めて少ないと考え、 $\Gamma_g = \Gamma_l = 0$ として解析を行う。

次に構成方程式について示す。界面剪断応力係数は、気泡の流動抵抗係数 C_D と気泡界面積濃度 A_{int} (m²/m³)を用いて次のように表される。

$$FI_g = FI_l = \frac{1}{8} C_D A_{int} \rho_l \quad (5)$$

ここで、気泡群の抗力係数は単一球形気泡の抗力係数 C_{DT} を用いて次のように表される¹⁾。指数 n は1.5から2.0の間の値であり、ここでは代表値1.75を用いる。

$$C_D = C_{DT} \alpha_l^{3-2n} \quad (6)$$

単一球形気泡の流動抵抗係数 C_{DT} は中程度の汚れ系静水中の場合、以下のように表される²⁾。

$$C_{DT} = \max \left[\min \left\{ \frac{24}{R_{ep}} \left(1 + 0.15 R_{ep}^{0.687} \right), \frac{72}{R_{ep}} \right\}, \frac{8}{3} \frac{E_0}{E_0 + 4} \right] \quad (7)$$

ここで、 R_{ep} は気泡レイノルズ数、 E_0 はエトベス数で、それぞれ以下のとおりである。

$$R_{ep} = \frac{|u_g - u_l| d}{\nu_l} \quad (8)$$

$$E_0 = \frac{|G| (\rho_l - \rho_g) d^2}{\sigma} \quad (9)$$

なお、 d は気泡径、 ν_l は液体の動粘性係数、 σ は気液界面の表面張力である。

また、 A_{int} は気泡界面積濃度 (m²/m³) であり、界面長さのスケールの逆数に比例し、気泡を球形と仮定すると以下のように書ける。

$$A_{int} = \frac{6 \alpha_g}{d_b} \quad (10)$$

ここでは d_b 気泡の平均体積等価直径である。

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。壁面剪断応力係数 FW_g 、 FW_l は以下のよう表される。

$$FW_g = 0 \quad (11)$$

$$FW_l = \frac{\lambda_B}{2D} \rho_l \quad (12)$$

ここで D は配管径である。また、 λ_B は管摩擦係数で、滑らかな管に対してはブラジウスの式より以下のように表される。

$$\lambda_B = 0.3164 R_{eb}^{-0.25} \quad (13)$$

また、管壁に粗度があると考えられる場合にはコールブツクの式を用いる。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_B}} = 1.74 - 2 \log_{10} \left(\frac{\kappa}{D} + \frac{18.7}{R_{eb} \sqrt{\lambda_B}} \right) \quad (14)$$

ここで κ は壁面粗度高さ (m)、 $R_{eb} = (|u_l| D) \gamma_l$ である。

次に、基礎式を閉じるために用いた密度と圧力、温度の関係を規定する熱的状态式を示す。ここでは、気相、液相の熱的状态式としてHirtら³⁾の式を用いた。それぞれの状態方程式を以下に示す。

$$\pi_g = \frac{P}{e_g(\gamma-1)} \quad (15)$$

$$\rho_l = 1000 - 2 \times 10^{-5} e_l - 1.5 \times 10^{-10} e_l + 0.657 \times 10^{-6} P \quad (16)$$

ここで γ は比熱比である。また、 e_g は気相内部エネルギー、 e_l は液相内部エネルギーで、それぞれ以下のように表される。

$$e_g = 2.506 \times 10^6 + 667(T_g - 373) \quad (17)$$

$$e_l = 4.174 \times 10^5 + 4434(T_l - 373) \quad (18)$$

以上の構成方程式を用いて基礎方程式を離散化し、完全陰解法により解析を行う。離散化メッシュは等分割とし、スタaggerメッシュを用いる。すなわち、速度をセルエッジ、他の量はセル中心で与え、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する。なお、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、本解析で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部の間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ように計算を行い、接合部での境界条件として与える。そして、圧力についての方程式を解き、流速、密度、ボイド率を計算する。

3 揚水特性基礎実験

3.1 実験装置

エアリフトポンプの基本的な揚水特性及び数値解析法との比較・検討をするため基礎実験を行った。図2に試験装置の概略図を示す。試験装置は幅2,000mm、奥行き2,000mm、高さ4,200mmの水槽内に設置した揚水管、エアコンプレッサ(7.5kW)、送気量を計測するための質量流量計、揚水量を測定するための電磁流量計、超音波流量計から成る。試験は水槽の水位と管出口面の高さを一致させ、二種類の径の揚水管(長さ3,050mm、内径50mm及び150mm)に対して、それぞれ空気注入位置(上部(A)、中部(B)、下部(C))と送気量を変化させて行った。ここで空気の注入は揚水管側面一カ所からノズルを用いて行い、揚水管の入口流量と出口の中心位置における平均ボイド率の計測を行った。なお、今回は揚水管上端を水槽液面と一致させ、吐き出し高さが0の場合についての実験結果について述べる。実験装置と実験時の揚水の様子を写真1～2に示す。なお、実験時における揚水管内の

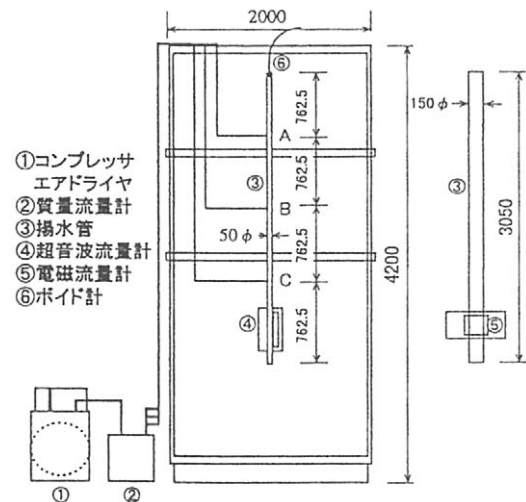


図2 揚水特性実験装置概略図

Fig.2 experimental device of water intake system



写真1 揚水特性実験(吐き出し部)

Photo 1 water intake up test (top of hose)



写真2 揚水特性実験(揚水管内の様子)

Photo 2 water intake up test (inside of hose)

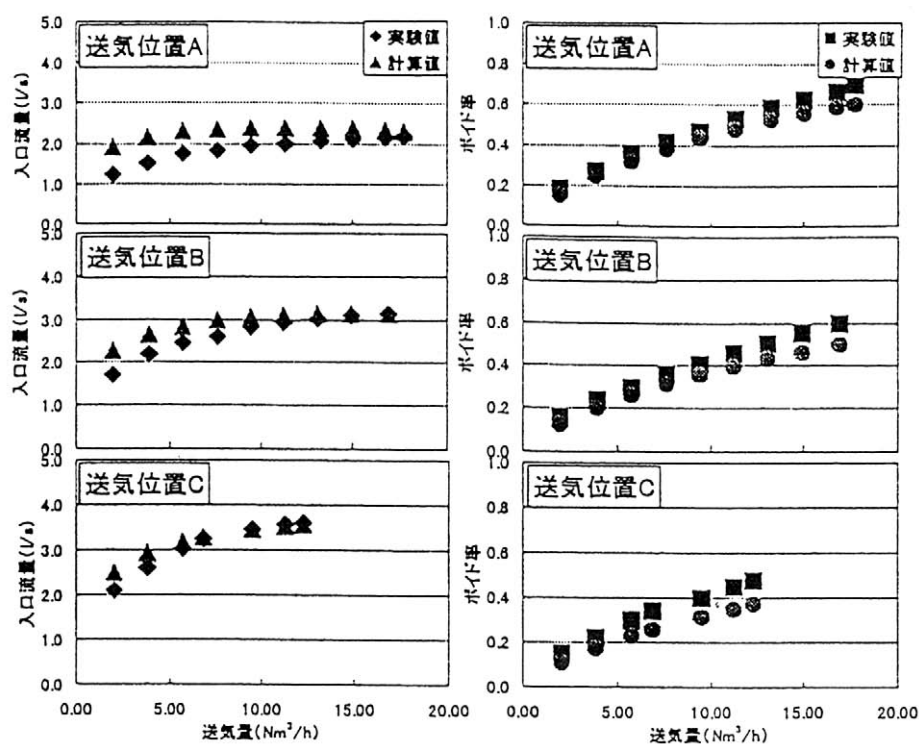


図3 送気量(a)入り口流量、(b)ボイド率の関係 ($\phi=50\text{mm}$)

Fig.3 the relationship between air supply quantity (a) water intake quantity, (b) void coefficient ($\phi=50\text{mm}$)

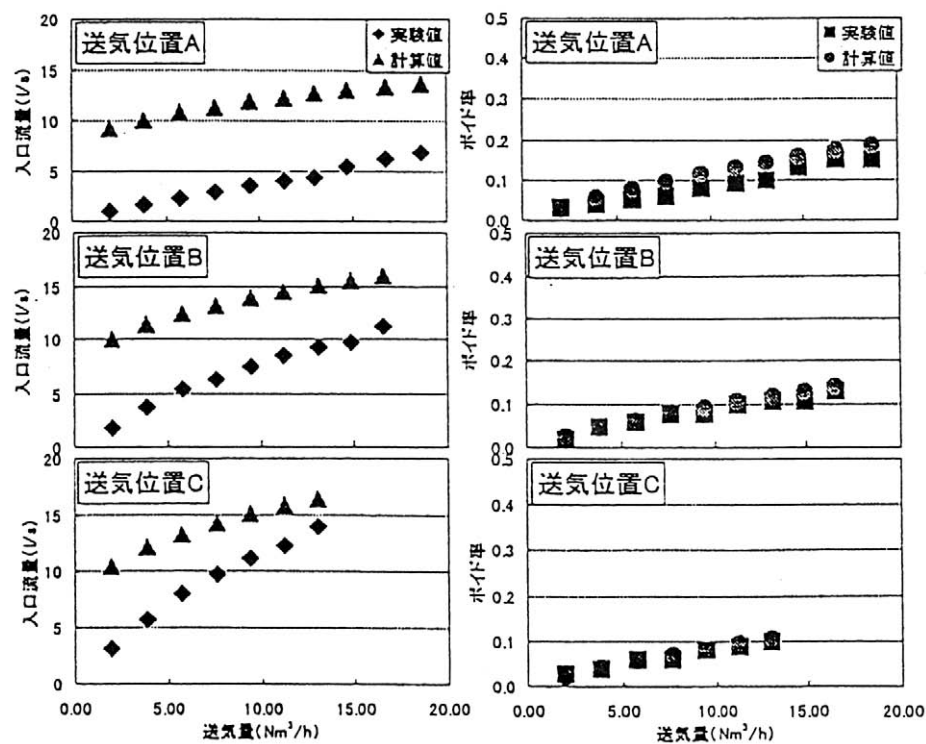


図4 送気量(a)入り口流量、(b)ボイド率の関係 ($\phi=150\text{mm}$)

Fig.4 the relationship between air supply quantity (a) water intake quantity, (b) void coefficient ($\phi=150\text{mm}$)

平均気泡径は約8mm程度であった。

3.2 実験結果及び考察

(1)管径50mmの場合

この場合の揚水特性試験と数値解析結果の比較を図3に示す。入口流量については、ほぼ実験結果と数値解析結果は一致しているが、送気量が少ない場合、実験結果と解析結果に差があり、計算値が実験値より大きい傾向がある。これは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、気泡は自由に管内断面方向にも動くため、気泡による鉛直方向への駆動力が減少する。そのため入口流量も減少するが、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おらず、実験結果と差異が出てきたものと考えられる。出口ボイド率については上部から送気するほど実験結果と解析結果に差異があり、計算値が実験値より大きい傾向がある。実験では壁面一カ所より空気注入を行っているため、気泡がやや偏流して上昇している。気泡が偏流した状態から管内一様に上昇するまでには、ある程度の管の長さが必要であり、上部から空気注入した条件(A)では偏流したまま出口に達している。気泡群と壁面との摩擦が増大することにより、エアリフトポンプの駆動力が減少し、揚水量も減少する。数値解析は管断面に一様に気泡が存在しているものと仮定しているため、結果に差が出たものと考えられる。

(2)管径150mmの場合

次に揚水管径150mmの場合の結果を図4に示す。全体的に入口流量の計算結果と解析結果には差異がある。これは送気量を多くしても管径が大きいためボイド率は小さく、管径50mmの場合同様、数値計算では気泡の管断面方向への運動を考慮していない影響が出たためと考えられる。また、空気注入位置が上部にあるほど、実験結果と解析結果の差異は大きくなる。これも前述の偏流の影響が大きいと思われる。出口ボイド率については、管径50mm、150mm共に実験結果、解析結果共にほぼ一致している。ただし、実験ではボイド計を管出口中央部の一点でしか計測していないため、管径に対し気泡が少ない時、または極端に多い場合はボイド計による測定誤差があるものと思われる。なお今回、管径150mmの条件では空気ノズルの形状、数及び送気配管の長さから20Nm³/h以上の送気を行うことができなかった。そのため、ボイド率が大きい場合について数値解析結果と比較を行うことはできなかったが、図4(a)より送気量を多くしていくと数値解析結果と実験結果は一致してくることが予想される。

4 深層水汲み上げのための揚水特性解析

圧縮空気を用いた海水汲み上げ技術の応用として、数値解析法を用い、エアリフトポンプによる深層水揚水特性について検討した。現在、高知県室戸岬にある高知県海洋深層水研究所では深度約350mの深層水取水が行われ、エネルギー分野、医療、食品開発など多様な利用研究が進められており、深層水取水には渦巻きポンプが用いられている。その取水装置の概要及び海底勾配モデル

表1 取水装置概要

Table 1 particulars of deep-sea water intake system

取水管総延長	2,650m
取水深度	約350m
取水ポンプ	7.5kW 渦巻きポンプ
取水管径	直径125mm
取水管材質	鉄線鍍製硬質ポリエチレン管
平均取水量	22.084m ³ /h (=6.134 l/s)

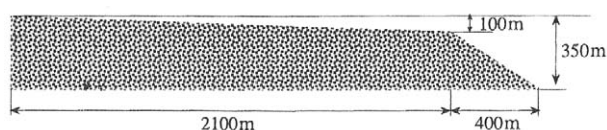


図5 現地海底勾配モデル

図 Fig.5 calculation model of sea bottom slope

図を表1と図5に示す。

渦巻きポンプによる上記実海域深層水揚水データと比較検討を行うために、エアリフトポンプを用いた場合の揚水特性を上記現地パラメータと同じ条件で数値解析した。なお、ここでは圧縮空気の送気に出力7.5kWのコンプレッサーを用いるものと想定し、その送気流量を65Nm³/hと仮定した。エアリフトポンプで効率よく揚水するためには、その空気注入位置より上部の揚水管は鉛直であることが望ましい。これは傾斜管であると管内の気相部と液相部が上下二相に分離し、エアリフトの駆動力が減少するため揚水量も減少するからである。そこで、エアリフトポンプ揚水管の鉛直管部を図6のようにモデル化した。ここで鉛直管の長さは10m、送気位置を水深5、7、9mとして計算を行った。数値解析結果を表2に示す。

同じ出力の渦巻きポンプによる平均取水量の実績値が6.134 l/sであるので、ほぼそれと同量かそれ以上の揚水量をエアリフトポンプで得ることが十分に可能であると推定される。さらに、また電力量に関してもエアリフトポンプのコンプレッサーは渦巻きポンプと違い常時運転し続けるのではないので、同じ出力でも使用電気量は低く抑えられるためコスト的に有利であるものと考えられる。また今回は揚水地点を岸からあまり遠くない地点にするために鉛直管長を10mに設定したが、エアリフトポンプでは空気注入位置が深いほどエアリフト駆動部が長くなり、その揚水量も多く得られる。そのため、岸近くでも海底の立杭型ピットなどを掘って鉛直管長を長くすることにより、より多くの揚水量を得られることができ、深層水の汲み上げ技術としても応用できるものと考えら

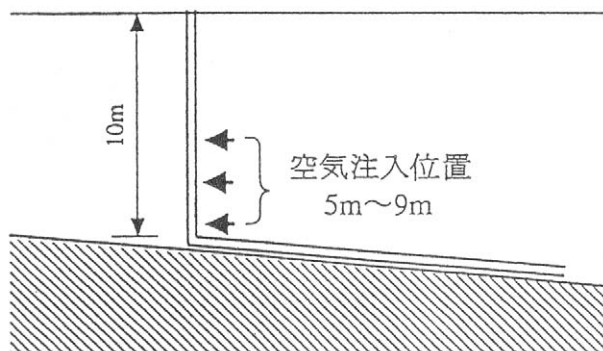


図6 鉛直管部モデル図
Fig.6 verticals part of hose model

表2 数値計算結果
Table 2 calculation result

送気位置(m)	揚水量(l/s)
9	6.803
7	5.837
5	5.541

れる。

5 おわりに

圧縮空気を用いたエアリフトポンプによる海水汲み上げ技術の検討として、室内規模の揚水特性実験と数値解析を行った。揚水特性実験結果と数値解析結果を比較したところ、揚水管内のボイド率が比較的大きい条件の場合では両者は一致するものの、ボイド率が小さい場合ではその結果に差違が出るということがわかった。今後は、さらに大型模型を用いた揚水実験や実規模のエアリフトポンプの揚水特性の数値解析を行い、「マイティーホエール」上に設置予定のエアリフトポンプを用いて現地実験を実施し、室内実験との比較や揚程等の実用化に必要なデータの収集・検討を行う。

参考文献

- 1) 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、2810-2817、(1995)。
- 2) 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、2357-2364、(1995)。
- 3) 山本、田中、大川、エアリフト式ポンプによる深層水揚水の数値解析、土木学会第51回年次学術講演会概要集第2部、526-527、(1996)。

(原稿受理：1999年8月6日)