永久塩泉を用いた海洋深層水汲み上げによる 沖ノ鳥島海洋緑化に向けた 湧昇パイプ展開方法の提案

古川 琢磨¹・矢吹 崇²・知崎 正純¹・守谷 修一²・岡島 淳之介²・
小宮 敦樹²・竹原 洋一郎³・石川 陽一⁴・塩原 泰⁵・市川 正和⁶・
円山 重直²

¹非会員 東北大学大学院工学研究科 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻6-6)
E-mail: takuma@pixy.ifs.tohoku.ac.jp

²非会員 東北大学流体科学研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1)
E-mail: okajima@pixy.ifs.tohoku.ac.jp

³正会員 五洋建設株式会社 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)
E-mail: Youichirou.Takehara@mail.penta-ocean.co.jp

⁴非会員 五洋建設株式会社 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)
E-mail: Youichi.Ishikawa@mail.penta-ocean.co.jp

⁵非会員 海洋産業研究会 (〒105-0003 東京都港区西新橋1-19-4難波ビル7階)
E-mail: y-shiobara@rio.or.jp

⁶非会員 東京製綱株式会社 (〒103-8306 東京都中央区日本橋3-6-2)
E-mail: ichikawa.masakazu@tokorope.jp

沖ノ鳥島の漁場開発のため本提案では永久塩泉を用いた、湧昇パイプによる海洋深層水汲み上げ手法を検討している。海洋でパイプを係留する時、海流によるパイプの傾きを考慮しなければならない。本研究では沖ノ鳥島周辺海域での湧昇パイプ係留に向け、コンテナ投下法を用いた流線形湧昇パイプ展開方法を提案し、流線形湧昇パイプの展開条件の設計とコンテナ投下法を用いたパイプ展開方法の有用性評価を行った。流線形湧昇パイプの展開条件を設計するため、水槽での抗力試験で測定した流線形湧昇パイプの抗力係数を使用し海流によるパイプ挙動のモデル化を行い、流線形パイプに必要なブイの浮力の算出を行った。またコンテナ投下法の有用性評価を行うため長さ25 mの流線形湧昇パイプの展開実験を行い、パイプ展開の観察とコンテナ落下運動の解析を行った。

Key Words : perpetual salt fountain, upwelling pipe, drag force testing, ocean experiment

1. 緒言

近年の人口増加に伴い、食糧の増産が必要とされている。しかし、陸上の耕作には限界があり、大規模な耕地拡大は現実的に不可能であるので広大な面積を持つ海洋での生産性が期待される。

図-1に国際連合¹⁾によって算出された1950年代から2010年代までの南太平洋の漁獲量を示す。図-1に示される様に1950年代から1990年代までは技術進歩とともに漁獲量は増加している。その一方1990年代から2010年現在に至るまでは漁獲量が停滞し頭打ちの状態になっており、現

代の漁獲量は海の生産性の限界値に到達した可能性が考えられる。つまり広大な面積の海洋の生産を利用するためには、陸上の耕作と同等の海洋の一次生産性の活性化が不可欠となる。

図-2にNASA²⁾の衛星によって観測された世界のクロロフィル濃度分布を示す。クロロフィルは植物プランクトンが含有する葉緑素であり、海の一次生産性の指標となる。図-2に示されるように、大陸沿岸部ではクロロフィル濃度が高い。これは大陸沿岸部ではエクマン輸送により栄養塩を含んだ深層水が有光層まで汲み上げられ、植物プランクトンが光合成を行い、一次生産性が高くなる

ためである。一方大西洋、太平洋等の海洋中心部では図-2に示されるようにクロロフィル濃度は低い。海洋では栄養塩を含んだ深層水が汲み上げられる湧昇が発生せず、植物プランクトンが光合成を行えず一次生産性が低いためである。つまり海洋の一次生産性の活性化を図るためには栄養塩を含んだ深層水汲み上げ技術の開発が不可欠である。この深層水汲み上げ技術としてStommelら³⁾は塩分差、温度差によって駆動される自然対流を利用した永久塩泉の原理を提唱した。図-3に永久塩泉の概略図を示す。

図-1 南太平洋における漁獲量¹⁾

図-2 クロロフィル濃度分布²⁾

図-3 永久塩泉³⁾

海洋では上層が高温・高塩分、下層が低温・低塩分の準安定な成層となっている。この成層中に、図-3のように鉛直にパイプを設置し、パイプ内を下層の低温・低塩分の海水で満たす。すると、パイプ内の海水はパイプ外の海水により温められ、やがてパイプ内外は同じ温度となる。その結果、塩分差による密度差が発生し、パイプ内に浮力が発生する。この浮力により上昇流が発生する。上昇流は、海洋中の成層が保たれる限り、無動力で半永久的に継続するものである。永久塩泉が適している海域として塩分極小層が水深300-600 mに存在する亜熱帯の海域が挙げられる。

2001年にMaruyamaら⁴⁾、Tsubakiら⁵⁾は、マリアナ海域付近で300 mの湧昇パイプを展開させ、内部に永久塩泉による湧昇流が発生することを世界で初めて実証した。図-4に本実験で使用した湧昇パイプを示す。図-4に示されるように、湧昇パイプは浮遊型で設計しており、1-2ヶ月の実験期間で数百km程浮遊することが判明している。また続く2002年、2004年の実験の実験結果からZhangら⁶⁾は永久塩泉による湧昇量を40-80 t/dayと見積り、パイプ内の流速分布の定量的な評価を行った。

またMaruyamaら⁸⁾は衛星が取得したクロロフィル分布の画像解析を行い、永久塩泉によるクロロフィル濃度増加の可能性を示した。これらの結果から永久塩泉を用いた海洋緑化技術は実用段階直前まで到達しており将来、生産性の低い海域での湧昇パイプの実用化が求められる。

我が国で湧昇パイプを展開するに適した海域として沖ノ鳥島周辺海域が挙げられる。沖ノ鳥島周辺は生産性の低い海域であり湧昇パイプを用いて海洋緑化を行えば、沖ノ鳥島周辺海域の漁場開発が可能となる。

図-4 湧昇パイプ^{4),5)}

図-5 湧昇パイプ係留の概略図

沖ノ鳥島周辺海域での海洋緑化に向け、湧昇パイプは数百本程度展開させ、かつ図-5に示されるようにアンカーで3000m - 5000mの海底に固定したロープにパイプを取り付け、係留する必要がある。海洋産業研究会が算出した報告書⁹⁾によると大型船舶のクレーンを用いたパイプ展開方法では、パイプを数本程度展開するだけで3億円程度のコストが試算されている。また海底でパイプを係留する時、海洋の流れによる抗力のためにパイプが傾き、パイプ上端部が有光層より深く沈むことが想定される。パイプ上端深度が表層に達しないと表層に栄養塩を供給できない。また海流によってパイプの深度が大きく変動するとパイプ内外の密度差が小さくなり湧昇が停止する可能性も考えられる。

したがって本研究では上記の問題点を解決するために断面が流線形を有する流線形パイプを用いた展開方法を提案する。図-6にコンテナを用いた流線形パイプ展開の概略図を示す。本展開方法で使用する流線形パイプはゴムで枠組みを製作するとし、水圧で容易に圧縮可能とする。図-6に示されるように、流線形パイプを積載したパイプ収容コンテナは船舶から投下される。そしてコンテナが落下すると同時にパイプは上端から順次展開する。パイプ展開途中、パイプは水圧で圧縮状態となっている。パイプ全体が展開した後、パイプ枠組みのゴムの復元力によってパイプが膨らみ、パイプ上端、下端から海水が流入していく。本手法はコンテナでパイプ展開を行うため、大型船舶を使用せず大幅なコストカットに繋がる。また流線形のパイプを用いるため海流の影響の軽減が可能となる。

図-6 コンテナを用いた流線形湧昇パイプの展開図

図-7 セグメントnのパイプが受ける力

本研究では沖ノ鳥島周辺海域におけるコンテナ投下法を用いた流線形湧昇パイプ展開方法を実現するべく、最適な流線形湧昇パイプの設計とコンテナ投下法を用いた湧昇パイプ展開方法の有用性評価を行った。最適な湧昇パイプを設計するために本研究では円形パイプ、楕円形パイプ、流線形パイプの抗力試験を行い海流によって変化する抗力係数の測定を行った。さらに、湧昇パイプを沖ノ鳥島周辺海域に係留することを想定し、湧昇パイプを含む係留系に必要な条件を調べた。沖ノ鳥島周辺海域の海域条件を調べるにあたり、海洋観測データや人工衛星による海面高度観測データを用い、海洋物理学的な解析を行った。またコンテナ投下法を用いた湧昇パイプ展開方法の有用性の評価を行うために、長さ25mのパイプの展開実験を行いコンテナ落下運動の解析と湧昇パイプの展開挙動の観察を行った。

2. 流線形湧昇パイプの展開条件の設計

(1) 海流による流線形パイプ挙動のモデル化

海流による流線形パイプの挙動をモデル化する時、パイプ全体を N 個のセグメントに分割する。パイプ下端から n 番目のパイプが受ける力は図-7に示される。

図-7に示されるようにセグメント n のパイプが鉛直方向に対して θ_n [°]で傾く時、パイプの上部、下部から張力 T_n [N], T_{n+1} [N]が働く。さらに水平方向には海流による抗力 G_n [N]が働く。海流の流速が定常状態で有る時パイプの張力と抗力は力学的に釣り合い、平衡状態下におけるパイプの水平方向の力の釣り合いの式は次式によって示される。

$$G_n = T_{n+1} \sin \theta_{n+1} - T_n \sin \theta_n, \quad (1)$$

海流によるパイプの抗力 G_n は次式によって示される。

$$G_n = \frac{1}{2} \rho_w U_n^2 C_D \frac{L}{N} \cos \theta_n, \quad (2)$$

ここで ρ_w [kg/m³]は海水の密度、 U_n [m/s]はセグメント n のパイプの水深位置における海流の流速、 C_D [-]はパイプの抗力係数、 L [m]はパイプの全長、 N [-]はパイプのセグメントの数である。パイプが海流によって傾くとき、パイプの投影面積は鉛直時のパイプの投影面積に対して $\cos \theta_n$ を乗じた値となる。パイプの傾きが0-10°程度であると仮定するとパイプの張力の大きさはパイプの自重とパイプ上端に接続したブイの浮力とで計算され、次式によって示される。

$$T_n = F_B + \rho_p L \frac{(n-N)}{N}, \quad (3)$$

ここで F_B [N]はパイプ上端に接続するブイの浮力、 ρ_p [kg/m]はパイプの単位長さ辺りの密度である。本研究では上記の式(2), (3)を用いて反復計算を行い、式(1)の力学的平衡状態となる時の θ_n を導出する。本研究では流線形パイプを用いた時のパイプ挙動解析を行うため、式(2)で使用される流線形パイプの抗力係数を、水槽を用いた抗力試験によって測定を行った。また抗力試験では比較のため、円形パイプ、楕円形パイプの抗力試験も行った。

(2) 抗力試験

試験水槽として三井造船昭島研究所の曳航水槽を使用した。水槽は長さ100m、幅5m、深さ2.65mで重量12tの曳引車で装置を曳引した。パイプは厚さ0.55mmの塩化ビニル樹脂製シートで、Maruyamaら⁴⁾、Tsubakiら⁵⁾が用いたものと同じ材質である。断面形状維持のための直径5mmの鉄製リングが250mm間隔に入っている。パイプ模型として3種類のパイプを用いた。各パイプの断面は、直径500mmの円(図-8(a))、長軸600mm短軸300mmの

楕円(図-8(b))、縦横比4:1の翼型¹⁰⁾の後縁を丸めて縦横比3:1とした長軸900mm、短軸300mmの流線形(図-8(c))とした。

海洋に設置するときは鉛直に設置するが、この実験では横向きで、長さ1480mmのパイプをアルミ板で挟んで曳引した。パイプを挟む治具の模式図を図-9、曳引されるパイプを図-10(d)に示す。

図-8 各パイプの断面図

(a)円形パイプ、(b)楕円形パイプ、(c)流線形パイプ

図-9 パイプ固定治具

図-10 実験装置

(a)円形パイプ、(b)楕円形パイプ、(c)流線形パイプ
(d)試験装置全体図

模型パイプをはさむ厚さ10mmのアルミ製側板は、鉄製のコの字型の天板で接続し、上部に検力計に接続するための鉄製フランジをとりつけた。補強のための鉄板を天板に溶接してある。なお、実際に実験をするにあたり強度が不足していることが明らかになったので、側板にアルミ製角型パイプ(20mm×40mm, 長さ100mm, 厚さ2mm)をとりつけて補強し、ウレタンカバーで覆って抵抗を減じる処理をした。治具の抵抗は、直径216mmの塩化ビニル製パイプを取り付けて実験を行い、得られた抵抗値からパイプの抵抗を減じることで推定した。流体中のパイプの受ける単位長さ当たりの抗力 $F[N]$ は次式を用いて計算する。

$$F = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D S, \quad (4)$$

ここで、 $\rho[\text{kg/m}^3]$ は流体の密度、 $U[\text{m/s}]$ は流速、 $C_D[-]$ は流れに対するパイプの抗力係数、 $S[\text{m}^2]$ は流れに対するパイプの投影面積である。治具抵抗計測のための塩化ビニル製パイプの抗力係数は滑らかな円柱の抗力係数の値として $1.2^{10)}$ を用いた。

また実際の海洋で用いることを想定し、係留に用いるロープの効果も調べた。直径9mmのロープを用い、パイプに取り付けた接続用の円形リングにつける。ロープは3本用い、横向きにしたパイプの前面と上下面につけた。

装置を検力計にとりつけ、前後方向の力をサンプリング周波数100Hzで60秒間記録した。この検力計の定格負荷は50kgfで、非直線性はその0.5%であった。

a) 治具抵抗

治具抵抗計測には、理論的に抗力の計算できる直径216mmの塩化ビニル製のパイプを用いた。曳航速度は0.2m/sから0.8m/sまで0.1m/s間隔で7回行った。ただし、速度0.7m/sと0.8m/sでは、前後方向の振動が生じたため、このデータは使用しない。得られた時系列の例を図-11に示す。

時系列には周期0.5秒以下の細かい振動が見られる。この振動が全体のシステムに影響することはないと考え、e-folding スケール0.32秒のガウシアンフィルターで短周期成分を除去し、記録開始15秒後から安定した部分の平均値と標準偏差を計算した。

図-11 曳航速度0.6m/sにおける試験パイプの抗力の時間変化

流速0.2-0.6m/sではレイノルズ数は 10^4 - 10^5 程度で、この領域において滑らかな円柱の抗力係数は1.2である¹⁰⁾。抗力係数1.2から計算される円柱部分の抵抗を引くと治具部分の抵抗が得られる。式(4)において、 S を正確に測定するのは困難なので $S \times C_D$ を定数として計算し、 0.06m^2 から 0.10m^2 の間の値を得た。今後、治具抵抗を計算するときにはこの値の平均値 0.079m^2 、標準偏差 0.045m^2 を用いる。

b) 円形パイプ

円形パイプはロープをつけた状態で、曳航速度0.1m/sから0.6m/sまで0.1m/s毎に測定した。得られた時系列の例を図-12に示す。e-folding スケール0.32秒のフィルターで短周期成分を除去し、記録開始から15秒後の安定した部分の平均値と標準偏差を計算した。レイノルズ数 $Re[-]$ と抗力係数の関係を図-13に示した。レイノルズ数 Re はパイプ幅 $W[\text{m}]$ (0.5mまたは0.3m)、動粘性係数 $\nu[\text{m}^2/\text{s}]$ を用いて次式によって示される。

$$Re = \frac{UW}{\nu}. \quad (5)$$

図-13に示されるように低レイノルズ数領域では比較的抗力係数は大きいですが、 $Re > 10^5$ で円柱パイプの抗力係数は0.7-0.8で、経験的に知られる円柱の抗力係数 $1.2^{10)}$ よりも小さい。低流速時には比較的大きいが、流速が速くなり抗力係数が小さくなるのはパイプ表面シートの凹凸が乱流遷移を促進して剥離が後退するためと考えられる。

図-12 曳航速度0.6m/sにおける円形パイプの抗力の時間変化

図-13 抗力係数とレイノルズ数との関係

図-14 曳航速度 0.6 m/s における楕円形パイプの抗力の時間変化

図-15 曳航速度 0.6 m/s における流線形パイプ（ロープ 3 本取り付け時）の抗力の時間変化

図-16 曳航速度 0.6 m/s における流線形パイプ（ロープ無し）の抗力の時間変化

c) 楕円形パイプ

円形パイプ同様にロープをつけた状態で、曳航速度 0.1 m/s から 0.6 m/s まで 0.1 m/s 毎に測定した。測定された時系列の例を図-14 に示す。統計値の計算法は前述の円形パイプと同じである。図-13 に示される様に楕円形パイプの抗力係数は 0.6-0.8 となり、経験的に知られた楕円の抗力係数 0.6¹⁰⁾に近い値である。低流速時には比較的大きいが、 $Re > 10^5$ の流速の早い条件下では 0.6 程度になる。

d) 流線形パイプ

ロープのない状態での実験とロープをつけた状態での実験を行った。曳航速度 0.1 m/s から 0.8 m/s まで 0.1 m/s ごとに測定し、再現性を調べるためロープをつけた状態での 0.2 m/s, 0.4 m/s, 0.6 m/s, 0.8 m/s では 2 回ずつ測定した。測定された時系列の例をロープ有り、ロープ無しの場合を図-15, 図-16 に示す。統計値の計算法は前述の円形パイプと同じである。図-13 に示される様に、ロープの有る状態では流線形パイプの抗力係数は 0.4-0.5, ロープ無し状態では 0.2-0.3 の値が得られた。このことからロープの影響が大きいことが明らかとなった。そこで、どのロープの影響が大きいかを調べた。まず、前側のロープをはずし上面と下面のロープがついた状態で実験を

行い、次に上のロープをはずし下側のロープのみの状態で実験を行った。図-13 に示される様に、前面、上面、下面にロープ 3 本が取り付けられた状態の流線形パイプの抗力係数は 0.4-0.6 で、前面のロープをはずしたロープ 2 本の状態では抗力係数は変化しなかった。下面のロープ 1 本だけの状態では流線形パイプの抗力係数は 0.3-0.4 で、これはロープがない状態とロープを 3 本つけた状態のほぼ中間の値となった。また、ロープをつけた状態で 2 回実験を行った結果として、ほぼ同じ値が得られた。前部のロープは流線のよどみ点近傍のため抗力の増大はほとんどない。一方、両側面のロープ周辺は流速が増大しているので抗力の増大が大きい。

以上の結果から、流線形パイプは円形パイプ、楕円形パイプよりも抗力係数が小さく海流の影響の軽減が可能となり、流線形パイプの使用が将来のパイプ展開で望まれる。また流線形パイプは前面につけたロープの抗力係数への影響はほとんどなく、上下面につけたロープが抗力係数に大きく影響することがわかった。実際に海洋に設置するにあたり、ロープをパイプ内部に入れる、前面のロープのみにするなど、ロープの取り扱いが重要であり本試験結果はパイプ設計の指針となる。

(3) 沖ノ鳥島における流線形湧昇パイプ係留時のパイプ挙動の解析

a) 沖の鳥島周辺海域の海洋環境の推定

沖ノ鳥島は 20°25'N, 136°05'E に位置する日本最南端の島である。この海域は北赤道海流のため平均的に西向きの流れがあるが、気候値データ WOA05 から得られる地衡流速は 0.05 m/s 程度である。Kobashi and Kawamura¹¹⁾によれば、中規模渦とよばれる 100 km 程度のスケールの渦が卓越する海域であり、中規模渦による流れを考慮する必要がある。このスケールの流速変動特性は衛星高度観測データから決定される。Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic Data (AVISO) において週毎、1/3 度格子の海面地衡流速データを Ducet¹²⁾は公開している。公開されている 1992 年 10 月 14 日から 2007 年 5 月 23 日までの沖ノ鳥島に近い格子点 (20.46°N, 136.0°E) において、平均流速は 0.26 m/s であった。図-17 に示す海面流速の頻度分布図にみられるように、0.8 m/s より強い流れが観測されることはなく、0-0.7 m/s が 99% を占めている。水産総合研究センター¹³⁾は 2005 年 10 月にこの周辺の調査をしており、音響流速 Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) による観測では、20-100 m の層の平均流速は北向きの 0.5 m/s 程度であった。この流速は衛星高度観測による地衡流速とよく一致している。このことから衛星高度観測による流速は地衡流平衡を仮定しているものの、現場流速として扱える。

海洋内部における流速の鉛直分布を推定するにあたり、

以下のような手法を用いた。Boyer ら¹⁴⁾による World Ocean Database 2005 (WOD05) の高解像度 Conductivity-Temperature-Depth profiler (CTD) データと低解像度 CTD データのうち 19.5°–21.5°N, 134.5°–137.5°E の範囲にある 120 点から、深度毎の 2000 dbar 基準のジオポテンシャルアノマリを計算した。地衡流速は力学高度の水平微分として計算されるが、観測データが少ないために流速の統計値を得ることはできない。そこで、ジオポテンシャルアノマリの変動幅と流速の変動幅が比例関係にあると仮定した。例えば、海面におけるジオポテンシャルアノマリの標準偏差は $1.56 \text{ m}^2/\text{s}^2$ で、200 dbar におけるジオポテンシャルアノマリの標準偏差は $0.95 \text{ m}^2/\text{s}^2$ だったので、海面流速が 1.0 m/s のときの 200 dbar 深における流速は 0.61 m/s となる。図-18 に海面流速が 1.0 m/s のときの流速の鉛直プロファイルを示す。

b) 計算条件

本研究では式(1), (2), (3)に示されるパイプ挙動の物理モデルを用いて流線形パイプの挙動の数値解析を行う。パイプのセグメント数 N は 20, パイプの自重を 20 kg/m として式(1)に示される張力 T を計算した。海底深度は 3000 m とし、直立した状態でのパイプの上端, 下端深度をそれぞれ 30 m 深, 600 m 深とした。海流の抗力のおおよその値を概算するため海水の密度は真水の密度である, 1000 kg/m^3 を用いた。パイプ幅は 300 mm , 抗力係数 C_D は、流線形パイプでロープを内側に入れることや前面のみにすることでロープ無しの実験で得られた抗力係数が実現できるとする。本計算では海面流速を $0\text{--}1 \text{ m/s}$ の範囲で計算を行うので, Re 数は $10^4\text{--}10^6$ の範囲である。

図-13 から Re 数が $10^4\text{--}10^6$ の範囲ではロープ無しの流線形パイプの抗力係数は $0.2\text{--}0.3$ であった。本研究では抗力を大きく見積もるために、抗力係数を 0.3 一定として仮定した。海面流速の鉛直分布は前述した推定方法で導出した。ブイの浮力は 5000 kgf , 10000 kgf , 20000 kgf の 3 通りについて計算した。上端は自由端としブイが受ける抗力を水平方向に加え、下端は係留索に接続するとする。パイプ上端, 下端の境界条件はそれぞれ式(6)と(7)で示される。

$$G_N + F_{\text{buoy}} = T_{N-1} \sin \theta_{N-1} \quad (6)$$

$$G_i = T_0 \sin \theta_0 - T_i \sin \theta_i \quad (7)$$

ここで $F_{\text{buoy}} [\text{N}]$ はブイの受ける抗力, $T_0 [\text{N}]$ は係留索の張力, $\theta_0 [^\circ]$ は係留索の角度, $N []$ はパイプのセグメント数である。ブイの抵抗も式(2)で与え、投影面積 10 m^2 , 抗力係数は 1.2 とした。また係留索には $\phi 15 \text{ mm}$ 程度のロープを使用するため、流れに対する投影面積は小さく係留索にかかる抗力は無視できると仮定した。計算で得られた海中のパイプの形状を図-19 に示す。

図-17 沖ノ鳥島周辺海域の海面速度の分布 (実線は 99% 以内, 破線は 95% 以内を示す。)

図-18 海面流速が 1.0 m/s 時の沖ノ鳥島における海流の鉛直分布

図-19 海面流速 0.8 m/s 時における湧昇パイプの水平変位の鉛直分布 (太線はパイプ, 破線は係留索を示す。)

図-20 パイプ上端と海面流速との関係

ここでは一例として海面流速が 0.8 m/s のときのパイプ形状を示している。比較のため円柱パイプの抗力係数 $1.2^{10)}$ を用いた計算結果も示した。図-19 に示される様に3通りのブイの浮力でも流線形湧昇パイプの傾きはほぼ垂直となっている。一方円形湧昇パイプの場合、ブイの浮力が 5000 kgf の時パイプは大きく沈み込みパイプ上端の水深が 200 m 以深に沈んでしまい、さらにパイプの傾きも大きい。

図-20 に海面流速と推定したパイプ上端深度の関係を示す。比較のため、円柱の抗力係数 $1.2^{10)}$ を用いた計算結果も示してある。 C_D を 1.2 つまり円柱パイプを湧昇パイプとして使用した場合、浮力 5000 kgf としたとき、海面流速 0.5 m/s より強いとパイプ上端は 100 m より深く沈んでしまう。Lalli and Persons¹⁵⁾によれば亜熱帯域の有光層は海面から $100\text{--}150 \text{ m}$ 程度であり、深層の栄養塩を生物生産につなげることができない。海面流速 0.8 m/s のときにパイプ上端を表層 100 m に保つためには、 20000 kgf の浮力が必要である。抗力係数が 0.3 である流線形パイプを湧昇パイプとした場合、海面流速 0.8 m/s でもパイプ上端を 100 m に保つために必要な浮力は 5000 kgf でよい。以上の結果から海面流速が $0.8\text{--}1.0 \text{ m/s}$ と大きい時、流線形湧昇パイプを表層 100 m 付近に保つために必要なブイの浮力は円形湧昇パイプに必要なブイの浮力の $1/4$ 程度でよいことが分かった。

3. コンテナを用いた湧昇パイプ展開法の評価

(1) 実験装置

本研究では将来の沖ノ鳥島におけるコンテナを用いた流線形パイプ展開法の有用性の評価を行うため、相模湾近海で長さ 25 m の流線形湧昇パイプのコンテナを用いた展開実験を行った。実験装置全体図を図-21 に示す。

図-21 実験装置全体図

流線形パイプは 10 m 長さ2ユニットと 5 m 長さ1ユニットを連結し全長を 25 m とした。流線形パイプの枠組みは前述の抗力試験で試験した流線形パイプと同等の形でかつフィンの取り付けが可能なゴム製フランジで製作した。流線形パイプの各ユニットは多数のパイプが塩化ビニルの生地で複数連結されて構成している。図-22 に流線形ゴムフランジを示す。また流線形パイプの生地には厚さ 0.03 mm の塩化ビニル製シートを用いた。パイプ側面2箇所には $\phi 10 \text{ mm}$ のタフレープ (東京製綱) を通しパイプ支持が可能な構造とした。またロープの長さをパイプの長さよりも 5% 程短くすることでパイプへのテンション負荷の軽減を図った。パイプ上端に接続するメインブイは 12G-1 型ブイ (気泡材研究所) を9個用い、計 180 kgf の浮力とした。また 10B-8 型ブイ (気泡剤研究所) を2個用い海面に浮上するマーカーブイを製作した。水深、水温を測定する Compact-TD 計はパイプ上端とコンテナ底部に設置し、水温、水深の測定間隔は 1 s とした。図-23 に示されるパイプ収容コンテナは $\phi 50 \text{ mm}$ の足場パイプを用い $1.1 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$ サイズの枠組みを製作し、足場パイプ内側にベニヤ板を取り付けた。

図-22 流線形ゴムフランジ

図-23 パイプ収容コンテナ

(2) 実験方法

以下に本実験の実験方法を示す。初めに船舶で海底深度が 30 m 程度の実験海域まで移動した。その後塩分、水温、水深を測定する Compact-CTD 計を用い実験海域の水深の測定を行った。実験海域の水深が目標水深である 35 m に到達していた場合アンカーを打ち出し、船舶の固定を行った。次に船に取り付けられている大型クレーンを用い海表面近くまでパイプを収容したコンテナを移動させ、ダイバー2名が海中に潜水しパイプ展開の撮影準備を行った。底部が海面と接しているコンテナをクレーンから投下させ、パイプが展開する様子をダイバーが撮影した。本実験ではこのコンテナを用いたパイプ展開を2度行った。

(3) 実験結果

パイプ落下途中の様子である図-24 に示されるように、本実験ではパイプを上端から順次展開する様子が観察された。また一方で海流の影響によるコンテナの傾斜も観察された。図-25 にコンテナ底部に設置した TD 計が測定したコンテナの落下速度の時間変化を示す。図-25 に示されるように、着底までの時間はおおよそ 25 秒程度、要することが分かった。

図-24 コンテナ落下

図-25 コンテナの落下速度の時間変化

図-26 コンテナ着底直後のパイプ

次に展開後のパイプへの海水流入の様子についての考察を行う。図-26 にコンテナ着底直後のパイプの様子を示す。図-26 に示される様に、コンテナ着底直後ではパイプが水圧で圧縮されていることが観察された。これはパイプが展開途中にもパイプ上端から流入する海水が、パイプの圧縮によりパイプ下端まで完全に到達していないためである。次に図-27 にコンテナ着底後から 3 分後のパイプの様子を示す。ゴムフランジの復元力によりコンテナ着底後から 3 分後ではパイプは完全に膨張しており、中心部でも海水がパイプ内に充満され、展開方法の利点であるパイプ内への容易な海水注入を観察することが出来た。

図-27 コンテナ着底3分後のパイプ

(4) コンテナ落下運動のモデル化

パイプを収容したコンテナが落下する時、コンテナには抗力及びコンテナ自身の重力が加わる。またブイの浮力により、パイプが上端から順次展開していくためコンテナの重量は減少していく。この落下運動をモデル化すると以下の式で表される。

$$(M - \rho_p x) \frac{d^2 x}{dt^2} = (M - \rho_p x) g - \frac{1}{2} C_D \rho_w S_c \left(\frac{dx}{dt} \right)^2, \quad (8)$$

ここで $x[\text{m}]$ は海面を 0 としたコンテナの深さ方向の位置、 $M[\text{kg}]$ はコンテナとパイプの水中での総質量、 $\rho_p[\text{kg/m}]$ はパイプの単位長さ当たりの水中での質量、 $t[\text{s}]$ は時間、 $g[\text{m/s}^2]$ は重力加速度、 $C_D[-]$ はコンテナの抗力係数、 $\rho_w[\text{kg/m}^3]$ は海水の密度、 $S_c[\text{m}^2]$ はコンテナの底板の面積とする。本研究ではこの式(8)を離散化することによって数値解析を行った。以下に離散化方程式を示す。

$$x_i = v_{i-1} dt + x_{i-1}, \quad (9)$$

$$v_i = a_{i-1} dt + v_{i-1}, \quad (10)$$

$$a_i = \frac{-\frac{1}{2} \rho_w C_D S v_i^2 + (M_i - \rho_p x_i) g}{(M_i - \rho_p x_i)}. \quad (11)$$

ここで $v[\text{m/s}]$ はコンテナの落下速度、 $a[\text{m/s}^2]$ は加速度である。これらの離散化方程式を陽的に解くことで、位置、速度、加速度を導出した。

次に海水の密度 ρ_w の取り扱いについて説明する。海水の密度は水深が深くなるにつれて増加する。よって ρ_w を解析モデルにおいて一定とはみなせない。そこで本研究では実験海域の圧力、温度、塩分の鉛直分布から海水の状態方程式を用いて海水密度の計算を行った。

作成した解析モデルを本実験結果と比較することで、モデルの妥当性の評価を行った。本実験で使ったコンテナの構成材料から概算したコンテナの水中重量は 180kg とした。

図-28 コンテナ水深の時間変化の比較

図-29 コンテナ落下速度の時間変化の比較

パイプの単位長さ当たりの質量は 4.1 kg、パイプ長さは 25 m、海底深度は 32 m、コンテナの底部の面積は 1.68 m² とした。本研究ではコンテナは足場パイプで枠組みを製作しているため、実際のコンテナの抗力係数は理想的な直方体の抗力係数よりも構造体の複雑性により高くなることが考えられる。よって落下速度評価の上ではアスペクト比 1 の平板の抗力係数を用いた計算が安全な評価であると考えた。そこで本計算ではコンテナの抗力係数は平板の抗力係数である 1.12 を用いた。

図-28、図-29 に本数値解析結果と本実験結果との比較を深度、落下速度の時間変化で示す。これらの図が示すように、実験結果と数値解析結果には 5 秒程度の時間差異が生じている。コンテナ投下時、圧縮されたパイプ内には空気が残留しており、その残留空気による浮力が原因で前述した時間誤差が生じたと考えられる。しかし残留空気が存在する空間は小さく、この浮力は微量である。このことから 5 秒程の時間誤差があるものの、図-29 に示されるように、相模湾実験と解析モデルの落下速度はほぼ一致した。つまり本数値解析モデルにより、落下速

度および着底までの時間を予測することが可能であることが分かった。

沖ノ鳥島で湧昇パイプを展開させる場合、湧昇パイプの長さは 600m 程度必要である。600m の長さのパイプをコンテナ投下によって展開し海底で固定する場合、投下海域では海底が平坦であることが望ましい。よって本研究では沖ノ鳥島周辺海域における深度分布について着目した。

沖ノ鳥島周辺では東経 136 度以西において海底深度 5500m の大陸棚が広く分布している。つまりこの大陸棚付近でのコンテナを用いたパイプ展開を行うことが適していると考えられる。よって海底深度 5500m におけるコンテナ落下運動の評価の必要性があり、本研究では前述した解析モデルを使用することで、この落下運動の評価を行った。

湧昇パイプを沖ノ鳥島に数百本程度設置するためには低コストの設置が求められる。円形パイプは流線形パイプより高い抗力係数を有しているが、流線形パイプに比べ安価に製作することが可能である。つまり安価かつ海流によって傾かない湧昇パイプを製作するためには、円形パイプと流線形パイプの適切な併用が必要である。沖ノ鳥島周辺海域では深度 50-60m で流速が深度 300m の 2 倍の値となっている。よって海流によるパイプの傾きを防止するために深度 50-60m であるパイプ上端から 10m 部分の領域で、流線形パイプを使用することが必要となる。そこで本研究ではパイプ上端から 10m までを流線型パイプ、上端 10m からパイプ下端までを円形パイプと設定し、およそのコンテナの落下時間を推定するため本条件でコンテナの落下運動の評価を行った。コンテナの質量は 10^4 kg、流線形のパイプの単位長さの質量 4.1 kg、円形パイプの単位長さの質量 3 kg、海底深度を 5500m、コンテナ底部の面積を 7.24 m^2 、コンテナの抗力係数を 1.12 とした。図-30 に沖ノ鳥島におけるコンテナ落下の深度及び落下速度の時間変化を示す。この図が示す様に、コンテナが着底するまでの時間は 1200s と 20 分程度かかり、コンテナの最高速度は 2.4m/s、最大圧力は 15500Pa であった。

図-30 コンテナの水深、落下速度の時間変化

つまり沖ノ鳥島でコンテナを用いたパイプ展開の場合、コンテナの落下運動は長時間要することが予想される。よって、将来のパイプ展開ではコンテナ落下途中における海流の影響の軽減やコンテナの重心の安定化させるためにコンテナ形状の改良や湧昇パイプ収容方法の工夫が必須である。

4. 結言

本研究では沖ノ鳥島での最適な湧昇パイプの展開を目的とし、パイプ係留時のパイプ挙動解析と長さ 25m の湧昇パイプの展開実験を行い以下の知見を得ることができた。

- 1) 沖ノ鳥島周辺海域の海面流速が 0.8-1.0m/s の時、流線形パイプを係留した場合に必要なブイの浮力は円形パイプに必要なブイの浮力の 1/4 程度で済ませられることが分かった。
- 2) コンテナを用いた長さ 25m のパイプ展開実験から海水がパイプ上下端から容易に海水が流入されることが観察され、コンテナ投下法の有用性を評価することが出来た。また展開実験とコンテナ落下運動の数値解析によりコンテナ展開法では海流の影響の軽減やコンテナの重心の安定化を図るために、コンテナ形状の改良や湧昇パイプ収容方法の工夫が必須であることが分かった。

謝辞：本研究は、東京都の委託による共同研究であり、「沖ノ鳥島活用推進プロジェクト」の一環として行った。パイプの製造にはフジモリ産業株式会社で製作した。特に同社の村田正樹氏には多大な協力を頂いた。抗力測定実験は三井造船昭島研究所の水槽を使用させて頂き、実験の実施には同研究所の方々に助力を頂いた。これらの方々に御礼申し上げる。

参考文献

- 1) Food and Agriculture Organization of the United Nations, <http://www.fao.org/fishery/statistics/>
- 2) SeaWiFS, The Global Biosphere, Sep. 1997-Aug. 2000, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>
- 3) Stommel, H., Arons, A. B. and Blanchard, D. : An oceanographical curiosity: the perpetual salt fountain, *Deep-Sea Res.*, Vol. 3, pp. 152, 1956.
- 4) Maruyama, S., Tsubaki, K., Taira, K. and Sakai, S. : Artificial Upwelling of Deep Seawater Using the Perpetual Salt Fountain for Cultivation of Ocean Desert, *J. Oceanogr.*, Vol. 60, pp. 563, 2004.
- 5) Tsubaki, K., Maruyama, S., Komiya, A. and Mitsugashira, H. : Continuous Measurement of an Artificial Upwelling of Deep Sea Water Induced by the Perpetual Salt Fountain, *Deep-Sea Res. I*, Vol. 54, pp. 75, 2007.
- 6) Zhang, X. R., Maruyama, S., Sakai, S., Tsubaki, K. and

- Behnia, M. : Flow Prediction in Upwelling Deep Seawater-the Perpetual Salt Fountain, *Deep-Sea Res. I*, Vol. 51, pp. 1145, 2004.
- 7) Zhang, X. R., Maruyama, S., Tsubaki, K. and Sakai, S. : Mechanism for Enhanced Diffusivity in the Deep-Sea Perpetual Salt Fountain, *J. Oceanogr.*, Vol. 62, pp. 133, 2006.
- 8) Maruyama, S., Yabuki, T., Sato, T., Tsubaki, K., Komiya, A., Watanabe, M., Kawamura, H. and Tsukamoto, K. : Evidences of increasing primary production in the ocean by Stommel's perpetual salt fountain, *Deep-Sea Res. I*, Vol. 58, pp. 567, 2011.
- 9) 沖ノ鳥島周辺海域における海洋深層水による漁場造成に関する研究報告書, 国立大学法人流体科学研究所, 2012.3.
- 10) 日本機械学会 : 機械工学便覧 基礎編 4 流体工学, pp. 229, 2006.
- 11) Kobashi, F. and Kawamura, H. : Variation of sea surface height at periods of 65-220 days in the subtropical gyre of the North Pacific, *J. Geophys. Res.*, Vol. 106, pp. 26817, 2001.
- 12) Ducet, N., Le Traon, P. -Y. and Reverdin, G. : Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2, *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, pp. 19477, 2000.
- 13) 水産総合研究センター : 平成 17 年度沖ノ鳥島周辺海域浮漁礁設置調査海底地形及び海洋基本構造に関する資料調査海洋基本構造資料報告書, pp. 47, 2006.
- 14) Boyer, T. P., Antonov, J. I., Garcia, H. E., Johnson, D. R., Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Pitcher, M. T., Baranova, O. K. and Smolyar, I. V. : World Ocean Database 2005, S. Levitus, Ed., NOAA Atlas NESDIS 60, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., pp. 199, 2006.
- 15) Lalli, C. M. and Parsons, T. R. : *Biological Oceanography: An Introduction*, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, pp. 314, 1997.

(2013.9.3 受付)

PROPOSAL OF METHOD FOR SPREADING THE UPWELLING PIPE TO FERTILIZE THE OCEAN AROUND THE OKINOTORI-SHIMA BY DEEP SEAWATER UPWELLED BY PERPETUAL SALT FOUNTAIN

Takuma KOGAWA, Takashi YABUKI, Masazumi CHISAKI, Shuichi MORIYA, Junnosuke OKAJIMA, Atsuki KOMIYA, Yoichiro TAKEHARA, Yoichi ISHIKAWA, Yasushi SHIOBARA, Masakazu ICHIKAWA and Shigenao MARUYAMA

In order to develop the fish place around Okinotori-Shima, it has been required that the fertilization of ocean by the nutrient-rich deep seawater. In this proposal, the upwelling method by perpetual salt fountain has been investigated. When the upwelling pipe is moored at the bottom of the ocean, it has a possibility of gradient of the upwelling of pipe. In this study, to moor the upwelling pipe at Okinotori-Shima, the method which spread the streamline upwelling pipe by using container is proposed. To establish this method, the spreading condition of upwelling upwelling pipe was designed and the availability of spreading method of pipe using container was evaluated. The gradient of pipe was modeled with drag coefficient measured by drag force measurement experiment and the buoyancy of the buoy to moor the streamline upwelling pipe at the bottom of the ocean was calculated. And also, the experiment of spreading of the 25 m upwelling pipe was conducted and the spreading of the pipe and the movement of dropping of container were observed. Using this experimental result, dropping movement of container at Okinotori-shima was evaluated.