

海洋肥沃化装置「拓海」の開発

Development of the Ocean Nutrient Enhancer (ONE) “ TAKUMI ”

宮 部 宏 彰 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド開発部 課長代理
小 林 日出雄 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド開発部 部長
萩 原 誠 功 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド 技監 工学博士

沖合での新しい漁場造成を目的として社団法人マリノフォーラム 21 が 2000 年から開発を進めている海洋肥沃化装置は、深層水をくみ上げ、太陽光の届く有光層に放水し、植物プランクトンの増殖を促す装置で、「拓海」と命名された。本装置は、2003 年 5 月に相模湾に設置され、2 年間の実海域実験中である。本稿では、株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッドが担当した浮体の設計・製作を中心に、技術的課題と解決策を報告するとともに、これまでの観測から得られた海洋肥沃化効果の知見の一部を紹介する。

Development of the Ocean Nutrient Enhancer (ONE) is a project promoted by Marino-Forum 21 (MF21) to generate new fishery grounds by harnessing Deep Ocean Water (DOW). This ONE named “ TAKUMI ” is a floating device to make the euphotic zone more fertile in phytoplankton by emitting nutrient-dense DOW. IHIMU took charge of design and production. “ TAKUMI ” was moored at Sagami bay in May 2003 and began sea experiments for 2 years. Technical problems and solutions on the floating structure of “ TAKUMI ” are discussed. In addition, some findings of the ocean fertilization effect obtained by observation in summer 2003 are described.

1. 緒 言

地球規模の環境問題、人口増加に伴う食料不足の懸念が叫ばれて久しいが、世界的にみても砂漠緑化による農地拡大など、その対策は緒についたばかりといえる。我が国における水産資源は、近年自給率が低下傾向にあり、食糧資源セキュリティの観点から農林水産省は「つくり育てる漁業」を重点施策として推進している。

世界の漁場は、海洋の総面積の 0.5% にしか過ぎない、盛んなゆう昇流の存在する海域に集中しており、その漁獲高は世界の総漁獲高の 50% を占める。これらの海域では、ゆう昇流によって栄養に富んだ深層水が表層に大量に移送され、光合成による盛んな一次生産（植物プランクトンの生産）が行われ、食物連鎖に従い、動物プランクトン、魚類と大量な二次生産が行われる。

海洋肥沃化装置は、ゆう昇域での漁業に着目し、深層水のゆう昇域を人工的に発生させることによって、沖合いに新しい漁場造成を実現しようとする試みであり、水産庁の外郭団体である社団法人マリノフォーラム 21（以下、MF 21 と呼ぶ）の深層水活用型漁場造成技術開発委員会を中心に、国内のメーカ 19 社がコンソーシアムを組み、2002 年から 5 年計画で開発が実施されている。第 1 図に各工事

の主担当各社のプロジェクト体制図を示す。

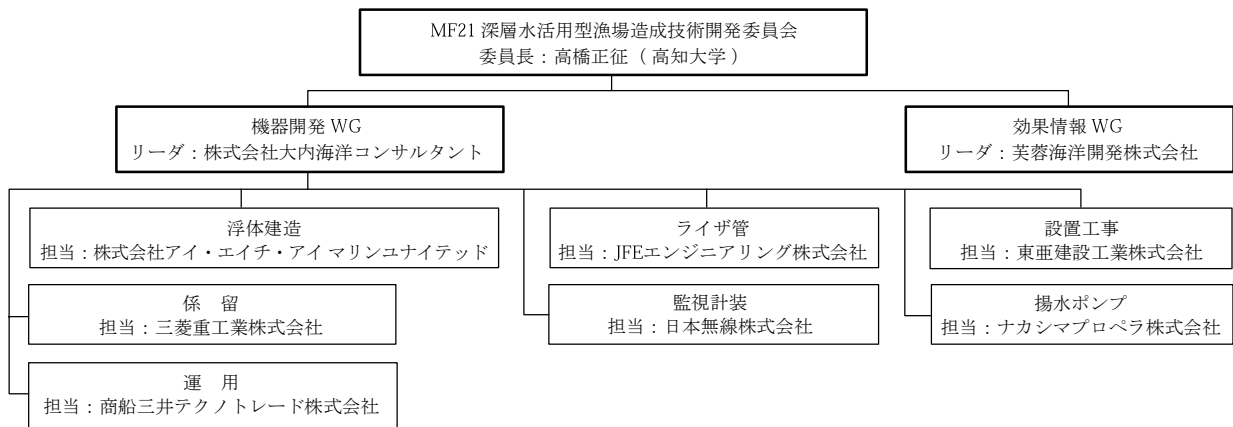
株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド（以下、IHIMU と呼ぶ）は、「拓海」の浮体部分の設計・製作および総合組立を担当した。浮体部は 2003 年 5 月に IHIMU の関係会社である株式会社アイ・エイチ・アイ・アムテックで製作後、IHIMU 横浜工場にえい航され、深層水取水管の連結、諸計測機器の取付けなど総合組立を終えた後、相模湾にえい航・設置された。

本稿では、この「拓海」の設計・製作を中心に海洋肥沃化装置の技術課題と解決策の報告に加え、2003 年の観測で得られた肥沃化効果に関する知見の一部を紹介する。

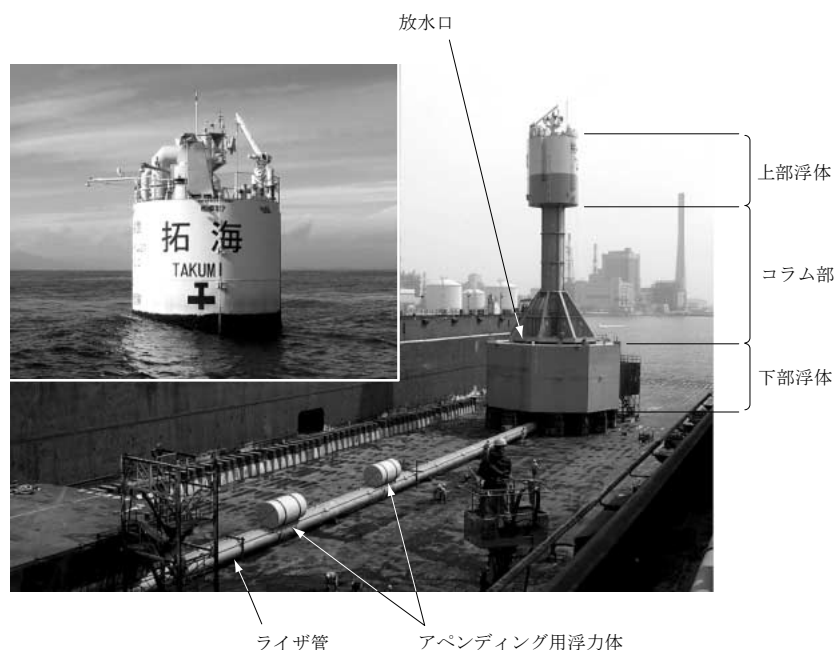
2. 「拓海」の概要

「拓海」の主要目を次に示し、全景を第 2 図に示す。

全 高	約 213 m
長 さ	16.8 m
幅	16.8 m
喫 水（稼働時・浮体部）	約 28 m
排 水 量	約 1 700 t
ライザ管内径	1.0 m
ライザ管長さ	175 m
放水口直径	10.0 m



第 1 図 プロジェクト体制図
Fig. 1 Project organization



第 2 図 「拓海」 全景
Fig. 2 Overview of "TAKUMI"

放水口深度	約 20 m
係留方式	一点緩係留
係留深度	約 980 m
揚水インペラ直径	2.35 m
揚水ポンプ軸馬力	約 23 kW
発電用ディーゼル機定格出力	115 kW
深層水汲上能力	約 10万 m ³ /d
表層水取水能力	約 20万 m ³ /d
放水能力	約 30万 m ³ /d

「拓海」の設計波浪条件は、① 本装置の実験期間 ② 設置海域周辺の気象・海象データならびに、③ 周辺の浮き漁礁の設計条件などを参考にし、再現期間 30 年に相当す

る有義波高 10 m, 平均波周期 14.9 秒とした。相模湾においては、養殖漁業などに被害をもたらす急潮⁽¹⁾の発生がたびたび観測されている。したがって、設計潮流条件は、風によって引き起こされる吹送流および定常的な潮流に加え、急潮も考慮し、表層で最大 1.9 m/s とした。

装置は浮体および深層水取水管（ライザ管）で構成される。浮体は、八角柱形状の下部浮体と円筒形の上部浮体を細い円柱（コラム）で接続している。コラムの下部浮体基部に深層水くみ上げと表層水吸引を同時に行い、混合し放水する揚水ポンプを配置しており、下部浮体上面に沿って混合した海水（肥沃化海水）を四周に放水する。上部浮体には制御室、発電機室および上部バラストタンク、コラ

ム部は表層水取水管とアクセストラックが設けられ、下部浮体はポンプ室、下部バラストタンクから成る。

本装置は、水深約 200 m の海中から栄養塩に富んだ深層水を毎日 10 万 m^3 くり上げ、太陽光が届く水深約 20 m の有光層に放水する装置である。光合成を促進するためには有光層に深層水を滞留させる必要があるが、深層水は冷たく重いため、そのまま放水すると表層にとどまることなく、すぐに下降してしまう。このため本装置では、表層の暖かい海水も吸い込み、深層水と混合し、深層水を放水水深の海水密度と同程度の密度にして放水している^{(2), (3)}。

肥沃化の効果をより高めるためには、海流などによる栄養塩の拡散と希釈が少ない海域に設置し、肥沃化海水を可能な限り長時間有光層に滞留させ、植物プランクトンの増殖を促すことが重要である。相模湾には、第 3 図に示すように流速 0.1 ~ 0.5 ノットの循環流が存在しており⁽⁴⁾、その循環流の中心はおよそ三浦海丘近傍に存在していることが明らかになっている。相模湾の環流模式図を第 3 図に示す。このため、「拓海」の設置場所は水深約 980 m の三浦海丘近傍の海域とした。

3. 「拓海」の設計課題

「拓海」の開発では、「拓海」を単なる実験機として造るのではなく、実機に要求されるように安価に製作・設置できる概念を迫及した。「拓海」は推進器をもたない浮体であることから、荒天時における浮体の動揺性能と、それに伴うライザ管の健全性確保および設置工事時を含む、さま

ざまな状態における浮体の安定性をいかに確保するかが課題となった。

また、通常の短管接合による工事では、係留索と同様に工事期間が長く、品質確保の難しい鋼製ライザについても、洋上で安全かつ経済的に設置し、荒天時でも浮体から安全に支持できるライザの実現が大きな研究開発テーマとなった。これらの課題をどのように解決したか、以下に報告する。

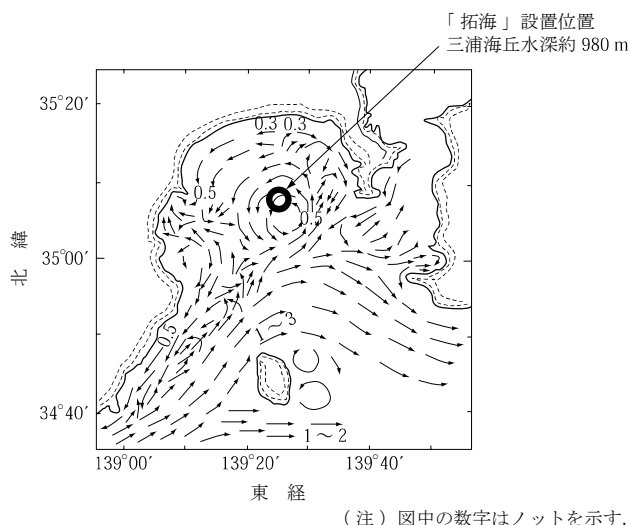
3.1 「拓海」の安定性の確保

「拓海」は係留索で海底につなぎ止められており、荒天時に避難することはできない。浮体の形状は、一般に波浪中応答性能が優れているとされる細長い柱状浮体（スパー型）形状を基本とし、風波の影響を受けやすい水線面を極力小さくした。同時に浮体の安定性を確保するため、バラストなどをできるだけ下部に配置し重心位置を極力下げる必要がある。バラストの搭載のためには、ある程度の浮体容積が必要となるが、こうした部分は没水部に配置し、浮体の稼働時には風波の影響を受けにくいよう配置した。また、没水部は一点係留浮体であることを考慮し、振れ回り運動などに対して適度な抵抗をもたせるために八角形の形状とした。

「拓海」は肥沃化海水を水深約 20 m で放水するが、放水部には揚水ポンプ（水中モータ）があり、インペラと機械的な可動部のメンテナンスを行うため、保守時には揚水ポンプが気中に出るまで浮体を浮上させる。稼働時と保守時の喫水差約 20 m の浮沈の途中段階ではコラム位置で喫水線を切ることになり、水線面積が非常に小さくなるが、その状態でも浮体の安定性を満足する必要がある。保守点検時の浮沈時に転覆の危険を回避するためには、重心を下げ、浮体の安定性を確保する必要があるが、稼働時喫水の状態では重心が下がり過ぎ、浮体の動揺固有周期が設置海域の波周期やライザ管の振動固有周期に近づいてしまい、稼働時に「拓海」全体が共振するなど性能上好ましくない状態となり得ることが問題となった。

ライザ管の固有周期は基本的に長さに依存し、この長さは深層水の取水深度によって決定しているため、ライザ側の固有周期を大きく調整することはできない。したがって、浮体とライザの共振に対しては、浮体側で固有周期を調整する必要があった。

このような複合的な制約条件を満足させるために、固定バラストで基本的な重心高さを十分に下げるといった一般的な対策に加え、バラストタンクを下部浮体と上部浮体の両



第 3 図 冬季相模湾の還流模式図（岩田 ほか⁽⁴⁾の図に「拓海」設置位置を追記）

Fig. 3 Schematic view of surface circulation during the winter season in Sagami Bay. Positioning of “TAKUMI” after Iwata et al.⁽⁴⁾

方に配置した。これにより、浮体を稼働時喫水にした後に双方のタンク間でバラスト水を移動させることで、喫水を変化させることなく、浮体の重心高さを適正に維持し、固有周期との共振現象を回避できる。このバラストシステムを第4図に示す（特許出願中）。

以上から、製作途中での浮上時・えい航時・設置工事時・稼働時・保守時およびこれらの過渡状態いずれの状態においても、浮体の安定性を確保すると同時に、浮体とライザ管双方の健全性を確保することが可能となった。

3.2 ライザ管の接続機構

「拓海」は、水深約200mの海中から10万m³/dの深層水を取水するため、浮体下部から内径1m、長さ175m、水中質量約120tの鋼製のライザ管を備えている。

浮体と深層水を取水するライザ管の接続部は、剛体としての浮体の波浪中動揺と、弾性体としてのライザ管の挙動双方の影響を受けることになる。浮体の形状をスパー型とするなど、浮体運動を極力低減する対策を講じているが、荒天時の浮体運動を制御することは困難であり、溶接やフランジ接合などの剛な接合では、浮体とライザ管の相対変位によって接続部で発生する応力を内径1mの細い構造で支えることは極めて困難であると判断した。一般に知られ

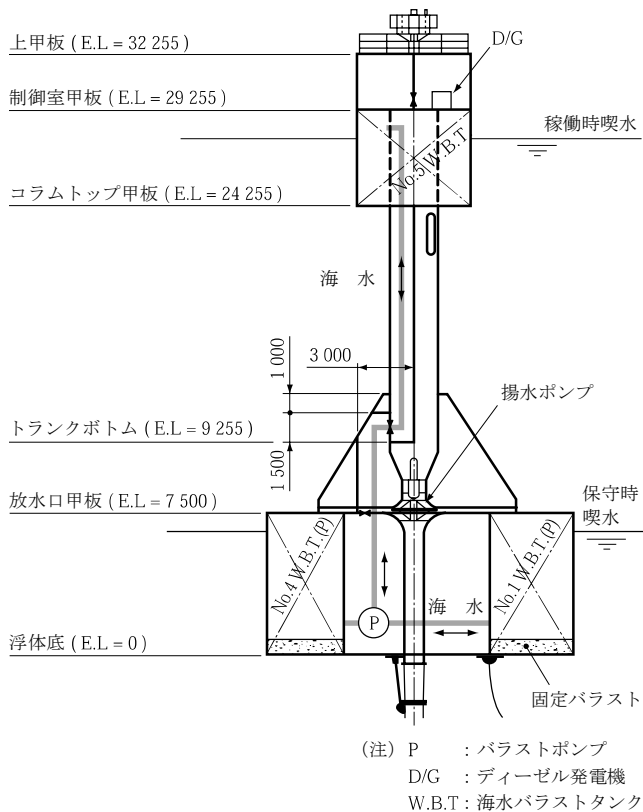
ている金属や、ゴム系材料の可とう継手やベローズの適用も検討したが、こうした製品では浮体とライザ管の相対変位を吸収しきれないということが明らかになった。

このため、相互の相対動揺によるモーメントの発生をチェーンによる吊り下げ機構として回避すると同時に、ライザ管の自重をチェーンで支え、導水管部はスーパー繊維シートを利用したフレキシブルジョイントを新規に開発・採用した。フレキシブルジョイントを第5図に示す（特許出願中）。以上から、接続部構造の曲げモーメント発生を完全に回避する接続機構（ピンジョイント構造）が実現した。

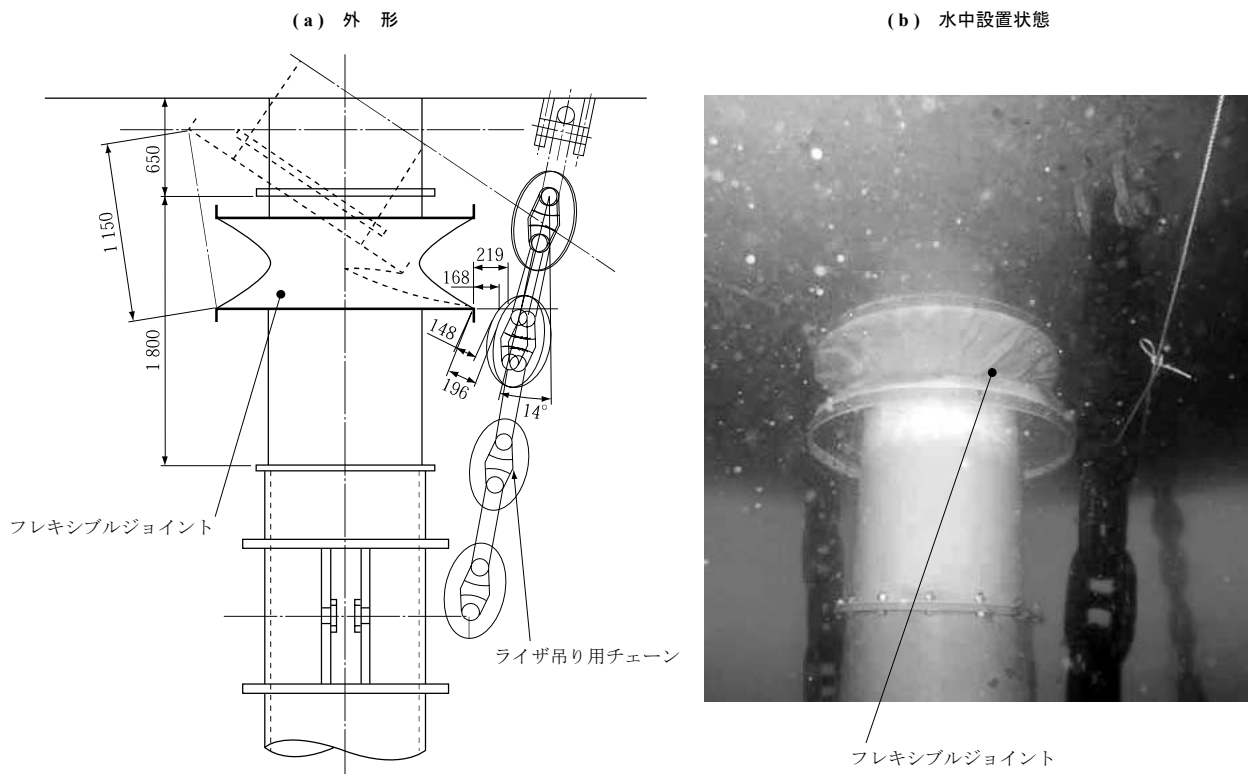
3.3 ライザ管の設計と設置工法

大口径で長尺の鋼製ライザ管を設置する際、一般的に採用されている設置工法は、大型のフローティングクレーンや「やぐら」などを使用しての現地工事となる。外洋上での工事は天候・海象の制約を受けるため、中断または中止を余儀なくされることが多く、工事が長期にわたり、設置費用が多額になる懸念がある。同時に、水中部のライザ管は細い糸のように弾性挙動にさらされるため、洋上接続部の工作精度の確保も困難である。

こうした課題を解決するため、陸上で一体物として製作されたライザ管の上端を浮体にピン結合で吊り下げ、下端を作業台船で吊り下げ、ライザ管を海中に水平状態で吊ったまま設置海域までえい航した。設置海域では台船側の吊り具を切り離すことによって、浮体に接続されたライザ管を重力にまかせ一気に直立させるアペンディング工法（特許出願中）を採用した。このアペンディング工法は過去に例がなく、実施に当たっては慎重なエンジニアリングと模型実験などによる事前確認が要求された。そのため、ライザ管の設計に際しては設置工事、稼働時に破損することがないように、アペンディング時の応力解析はもちろんのこと、稼働時の疲労強度、渦励振（VIV：Vortex Induced Vibrations）の発生の可能性などを検討し、十分なライザ管強度を確保した。ライザ管のアペンディング時の挙動については、JFEエンジニアリング株式会社（以下、JFEと呼ぶ）において詳細なシミュレーション解析を行った後、水槽実験を実施し解析の妥当性を確認した。解析の結果、直立まで約50秒のアペンディング中、開始後約9秒でライザの中央部近傍でサギングモーメントによる曲げ応力が最大となり、許容応力を超える可能性があることが判明した。これを回避するため、ライザ管の中間部に約200kNの浮力体を取り付けることで、アペンディング時のライザ管の健全性が確保できることを確認した。



第4図 バラストシステム（単位：mm）
Fig. 4 Ballasting system (unit: mm)



第 5 図 フレキシブルジョイント (単位: mm)
 Fig. 5 Overview of flexible joint (unit: mm)

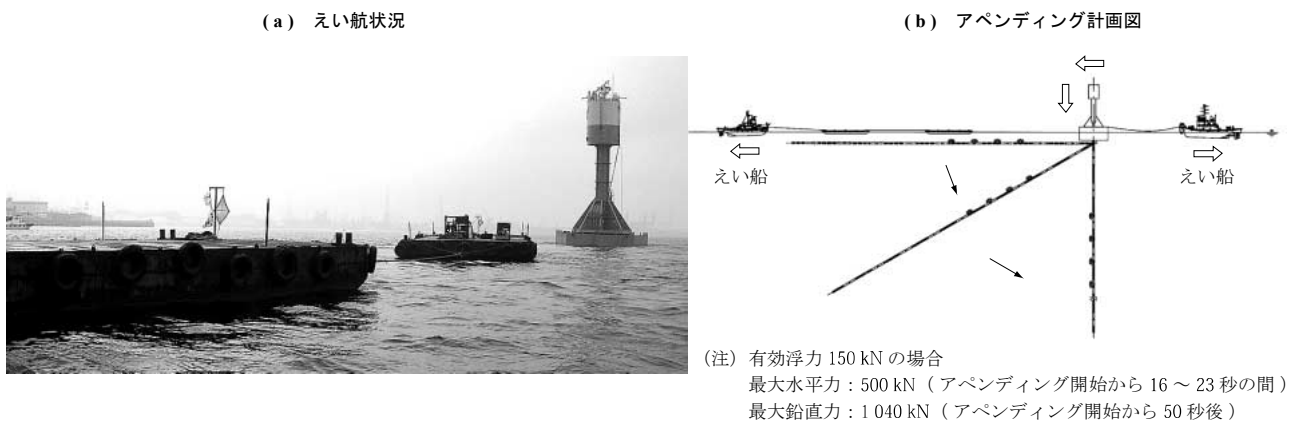
一方、ライザ管の稼働時の設計荷重については、上端がピン支持、下端が自由端という端部条件における時刻歴の弾性応答解析を IHIMU とライザ管の製作担当である JFE の両社が実施し確認した。その結果を基に疲労強度の確認を実施し、ライザ管の肉厚（板厚）の決定に反映した。

また、VIV の発生可能性については、大阪府立大学の大塚耕司助教授の協力を得て、上端ピン支持の状態における VIV 実験結果を基に、その発生領域を海域の波周期とライザ管の固有振動数を指標として評価した。これにより、設

置海域での浮体の応答とそれに伴うライザ管の強制動揺の状態が、VIV の発生領域に至らないことを確認した。

設置工事を担当した東亜建設工業株式会社の指揮のもと、2003 年 5 月 20 日早朝に IHIMU 横浜工場を出渠した「拓海」は、設置海域である相模湾中央に曳航され、同日夕刻アペンディングは無事成功した（第 6 図）。

「拓海」は設置海域において 2003 年 6 月から 8 月までに 4 回の台風に遭遇したが、「拓海」の構造には何ら影響を受けることなく稼働を継続している。



第 6 図 えい航状況とアペンディングの計画図
 Fig. 6 Tow situation and schematic drawing of upending

4. 「拓海」の肥沃化効果の検証

— 謝 辞 —

「拓海」は2003年7月から本格的な稼働を始め、定期的な保守作業時以外は無人で、2004年4月末現在で6000時間以上、順調に肥沃化海水の放水を続けている。その間、MF21のもとで芙蓉海洋開発株式会社を中心に、肥沃化の効果検証が進められており、現在までに

① 「拓海」からおよそ3 km 下潮側で採水された海水の T-S（水温-塩分）ダイアグラムが周辺の海域と異なり、「拓海」放水口直近のそれと比較して大きな差異が見られない。

② この水塊が水深 22 m から 29 m の間に見られ、当初のねらいどおり有光層に肥沃化海水が水塊として広がっていることが確認された。

などが報告されている⁽⁵⁾、⁽⁶⁾。

肥沃化効果検証には、長期にわたって多数の観測データを取得し、多角的な解析評価が必要であり、海中の生産活動が活性化する2004年の夏季に行われるさらなるデータ取得に期待している。

5. 結 言

「拓海」は、海洋肥沃化装置の技術的実現性を明らかにし、沖合いでの深層水活用による漁場造成の事業化の可能性を示した。MF21での開発研究では2004年度も引き続き「拓海」による海洋肥沃化の実海域検証実験を行い、現在、本装置には肥沃化の効果確認のため、光量子計、蛍光光度計、潮流計が設置され連続計測を行っている。

今後、海洋肥沃化装置の実用化に向けて、装置規模の拡大、海洋温度差発電（OTEC：Ocean Thermal Energy Conversion）などの再生可能エネルギーの利用、海水淡水化装置や希少資源の採取装置との複合利用など、多目的な洋上プラットフォームへの発展につながっていくことが期待される。

海洋肥沃化装置の開発の一端を報告するに当たり、多大なご協力をいただいた社団法人マリノフォーラム 21 および深層水活用型漁場造成技術開発委員会の高橋正征委員長（高知大学）、大内一之 機器開発 WG リーダ（株式会社 大内海洋コンサルタント）をはじめとする推進委員各位、ならびに、本委員会のコンソーシアム参加各社、独立行政法人海上技術安全研究所の関係各位のご協力に、深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 松山優治：定置網に被害を及ぼす相模湾の急潮について—その観測から予報まで— ていち 99号 2001年 pp.56-66
- (2) S. Ogiwara, Y. Awashima, H. Miyabe and K. Ouchi : Conceptual Design of a Deep Ocean Water Upwelling Structure for Development of Fisheries ISOPE-OMS (2001) pp.150-157
- (3) K. Ouchi : Ocean Nutrient Enhancer “TAKUMI” for the Experiment of Fishing Ground Creation ISOPE (2003) pp.37-42
- (4) S. Iwata and M. Matsuyama : Surface Circulation in Sagami Bay Journal of the Oceanographical Society of Japan Vol.45 (1989) pp.310-320
- (5) 大村寿明, 井関和夫 : 放流域の水塊分布から見た汲み上げた深層水の移動・拡散-1 日本海洋学会春季大会 2004年3月
- (6) 池谷 透, 吉田次郎, 北出裕二郎, 高橋正征 : 放流域の水塊分布から見た汲み上げた深層水の移動・拡散-2 日本海洋学会春季大会 2004年3月