

深層水汲み上げによる海洋肥沃化実験 - 拓海プロジェクト -

THE SEA FERTILIZATION EXPERIMENT BY UPWELLING
DEEP OCEAN WATER – TAKUMI PROJECT -

大内 一之¹
Kazuyuki OUCHI

¹工博 (株)大内海洋コンサルタント (〒389-0001 長野県軽井沢町塩沢湖野村C-11)
Ph.D., Ouchi Ocean Consultant, Inc.

The research and development project to create the fishing ground in the open ocean by upwelling Deep Ocean Water (DOW) and discharging it in the euphotic layer where photosynthesis can be done with DOW's rich nutrient salt has been carried out since April 2000, sponsored by Japanese Government Fisheries Agency and Marino-Forum 21. In the open ocean, there are no successful means to meet such a mission, so far. Therefore, the focus of the project is a creation and proposition of the concept of the ocean nutrient enhancer nicknamed TAKUMI to contribute for increasing primary production and fish production at the open sea. The requisite technologies such as a density current generator, a spar type floating structure, a steel riser pipe, a set-up way of upending, etc. is discussed and integrated to create the concept of TAKUMI, whose principal particulars are the 100,000m³/day DOW upwelling capacity, the about 1,700tons displacement, and the 100KW Diesel engine. In May 2003, TAKUMI was set-up at the point of 1,000m depth in Sagami Bay, and has been continuing experiment of DOW upwelling.

Key Words : Deep Ocean Water (DOW), Upwelling, Primary Production, Fishing Ground, Offshore Floating Structure, Riser Pipe, Upending,

1. はじめに

地球上の低緯度海域では、海洋水の表層部が太陽光及び大気温により常に暖められ、温度の低い海底の深層水との対流が殆ど起こらないため、一年中成層した状態となっている。このような成層した海域では植物プランクトンの発生は少なく、従って魚類生産力も小さい。その理由は窒素・リン等の光合成に必須な栄養塩を多量に含んだ深層水が、海が成層して鉛直混合しないため、有光層にまで達しないためと云われている。従って、低緯度成層海域の表層は「海の砂漠」とも呼ばれ、上下層の循環の起こる中高緯度海域に比べ表層有光層に栄養塩が少ないため、基礎生産力が貧困であり魚類も少ない。

但し例外もあり、例えば南米ペルー沖の太平洋では、季節風が定常的に吹く結果、陸からの表層離岸流が生成され、これを補うために沿岸湧昇流が発生しており、低温で栄養塩豊富な海洋深層水が大規模に表層有光層

に湧昇している。このため、ペルー沖はアンチョビーの大漁場となっており、海表面温度も赤道直下にしては5℃以上も低くなっている。表1に示すように、地球上にはこのような湧昇海域は全海洋面積のわずか0.1%しかないと云われているが、世界の魚類生産の約半分がこの0.1%の海域で生産されており、残りの半分が沿岸海域で生産されていると見積られている¹⁾。さて、もしわれわれがこのような湧昇流を人工的に起こすことが可能になれば、人工的な漁場造成による漁獲量の増大が期待出来ると考えられ²⁾、その実現は海洋学・水産学における長年の夢であった。

一方、陸域では気候の砂漠化、或いは灌漑用地下水の大量汲み上げによる地下水源の枯渇等の問題が

表1 海洋での生物生産量の見積

	Sea Area		Primary Production		Fish Production	
	(square km)	Ratio(%)	(tonC/year)	Ratio(%)	(ton/year)	Ratio(%)
Ocean Area	336*10 ⁶	90.0	16.3*10 ⁹	81.5	0.16*10 ⁶	0.07
Coastal Area	36*10 ⁶	9.9	3.6*10 ⁹	18.0	120.00*10 ⁶	49.97
Upwelling Area	0.36*10 ⁶	0.1	0.1*10 ⁹	0.5	120.00*10 ⁶	49.97
Total	372*10 ⁶	100.0	20.0*10 ⁹	100.0	240.16*10 ⁶	100.00

(J .Ryther : Science Vol.166, 1969.)

表2 研究参加会社（*印：リーダー会社）

全体システム	: (株)大内海洋コンサルタント*
浮体及び装置組立	: (株)IHIマリンユナイテッド
ライザー管	: 日本鋼管(株)
揚水ポンプ・ディーゼル発電機	: ナカシマプロペラ(株)
監視計装通信機器	: 日本無線(株)、(株)システムインテック
灯火設備等	: (株)ゼニライトバイ
係留システム設計	: 三菱重工業(株)
設置工事	: 東亜建設工業(株)
運用及びメンテナンス	: 商船三井テクノトレード(株)

徐々に進行しており、陸域での農業による食糧生産は頭打ちとなり、将来的に今以上の増産は難しいと考えられている。従って、海洋における魚類増産は、今後の急激な世界的な人口増加に対する食糧資源確保のための有力な手段と考えられ、深層水の人工湧昇による漁場造成の夢を現実のものとする時期にさしかかっていると思われる。

実海域での深層水汲み上げによる漁場造成の試みは、世界的にも1989年に富山湾での「豊洋」による深層水汲み上げ量2.7万m³/日の実海域実験があるのみだが、この実験ではその後の実海域計測において有意な効果を見出せないまま、荒天等によるライザー管の破損等のトラブルもあり、設置後2年を経ずに撤去となっており、世界的にもそれ以降の実海域での実験例はない。

2000年4月より(社)マリノフォーラム21では5年計画で「深層水活用型漁場造成技術開発委員会」（委員長：高橋正征高知大学教授）を発足させ、深層水による人工湧昇漁場の世界初の実海域での実現に向けて水産庁からの補助金を得て、表2に示す民間企業10社の参加による研究開発プロジェクトを発足させた。

本稿では、本プロジェクトにおいて最新の海洋工学・技術を駆使して研究開発された、海洋深層水を使った新しいコンセプトに基づく海洋肥沃化実海域実験装置「拓海」の概要及び技術的特徴について述べる。また、拓海は2003年7月18日より相模湾中央部にて水深約200mから10万m³/日の深層水を連続的な汲み上げ実海域実験を開始しているが、その運用状態及び実験結果の一部について報告する。

2. 拓海の概要と特徴

(1) 肥沃化メカニズム

拓海が作動することにより漁場を造成するメカニズムを図1に示す。拓海はディーゼル発電機の動力によりポンプを回し、水深200mの海洋深層水を10万トン/日、水深5mの表層を20万トン/日を取水・混合して、合計30万トン/日の窒素・リン等の栄養素を

豊富に含んだ海洋深層水入りの水を水深20mに水平に吐出する大規模な混合ポンピング装置と言える。

吐出水は暖かく軽い表層水とブレンドされているため、冷たく重い深層水だけの場合と違い海底に落下することなく海水の密度の同じ層に水平に広がって行く密度流が形成される³⁾。そのため、常に太陽光の届く水深（有光層）に深層水に含まれる窒素やリン等の栄養（肥料）物質が滞留することで、

光合成が活発になり植物プランクトンが増殖する。

このようにして植物プランクトンが大量に発生すれば、それを食べる動物プランクトンが発生し、更にそれを食べる小魚、それを食べる大魚という食物連鎖が形成され、周辺海域に豊かな漁場が生まれ出されることとなる。

拓海はこのように、海洋表面の有光層に不足している栄養物質を深層水の汲み上げにより補給し、海に生物が繁殖するための手助けをする装置ということが出来る。

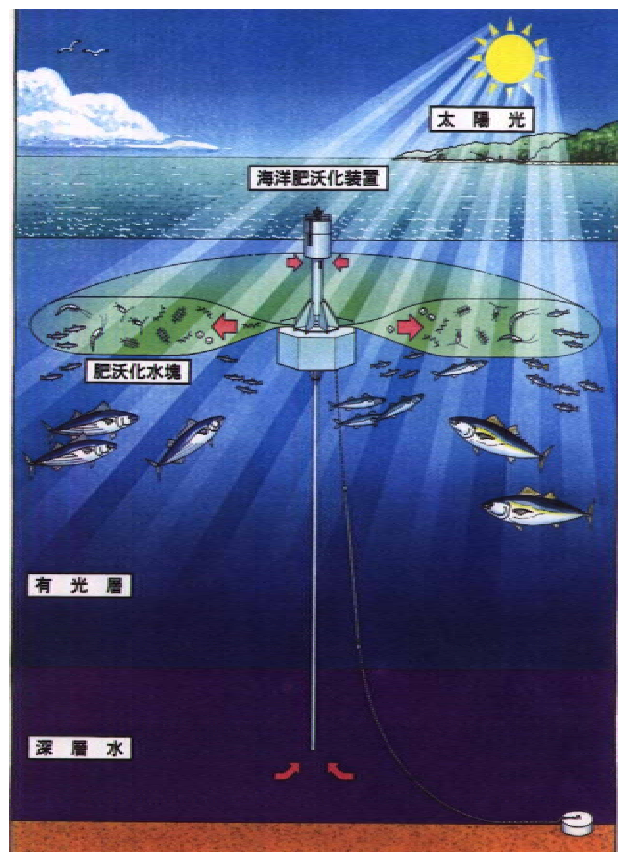


図1 拓海の作動概念図

(2) 耐荒天構造

水深200m以上の海域は、風、波、潮流の厳しい外洋であり、汲み上げ装置の動揺、構造、強さ、係留方法などは台風等の直撃も考え十分に安全に設計される必要がある。

特に浮体形状の設計は、風波の影響を受けにくく動揺を少なくすることで取水管（ライザー管）や搭載機器の強度と安全性を大幅に向上させる効果があるため非常に重要であり、拓海では図1に示す様な没水型で縦長のスパーと呼ばれる動揺の少ない浮体形状を採用している。また、浮体底部にはポンプや機器類の点検時に浮体を浮上させるための水バラストタンクも装備している。

深層水の汲み上げに使う長さ約200mの取水管は鋼製とし、浮体との接続をフレキシブルな構造として浮体との相対運動を吸収する方式をとっている。係留に関しては、ワイヤー、チェーン、シンカーを用いた従来型のカテナリー方式の一点係留システムを採用しており、これらの設計条件は、相模湾の設置海域の海象に合わせて平均風速約50m/秒、最大波高約18m、最大潮流約4m/秒に耐えられるものとしている。表3に拓海の主要目を示す。

表3 主要目

Total Height	213m
Maximum Breadth	16.8m
Draft	205m
Displacement	1,700t
Diameter x Length of Riser Pipe	1.0m x 175m
Mooring System	Single Point Catenary
Depth of Mooring	980m
Output of Diesel Generator (Max.)	115kw
DOW Rising Depth x Capacity	205m x 100,000m ³ /day
Surface Suction Depth x Capacity	5m x 200,000m ³ /day
Discharge Depth x Capacity	20m x 300,000m ³ /day

(3) 相模湾への設置

拓海は相模湾の平塚南方沖約20km、水深1,000mの海域に、2003年5月に設置された。この海域は、図2に示すように反時計周りの潮流の中心にあたる海域で⁴⁾、放水した栄養豊かな水がなるべく希釈せずに滞留する海域として選定された。

設置工事は本プロジェクトにて開発した世界初の新工法アペンディング方式で行われた。この方式は従来の短管を現地で一本毎につなぎ合せながら取水管を垂直に設置していく方式でなく、図3に示すように、取水管を全長200mにわたり予め陸上で製作しバargeに吊り下げ水平にして曳航し、現地にて吊り下げワイヤーを切断して90°水中で自然落下させ建てあげるものであり、取水管の要所に過大曲げ荷重防止用浮力体を取り付けて施工し、ワイヤー切断後わずか1分で建て上げに成功した。この工法により最も手間の掛かる取水管設置工事の大幅な工期及びコストの短縮と安全性の確保が図られた。

(4) 拓海の運転

拓海は無人運転として計画されており、そのため取水水温度、エンジン及びポンプの運転状態等を1

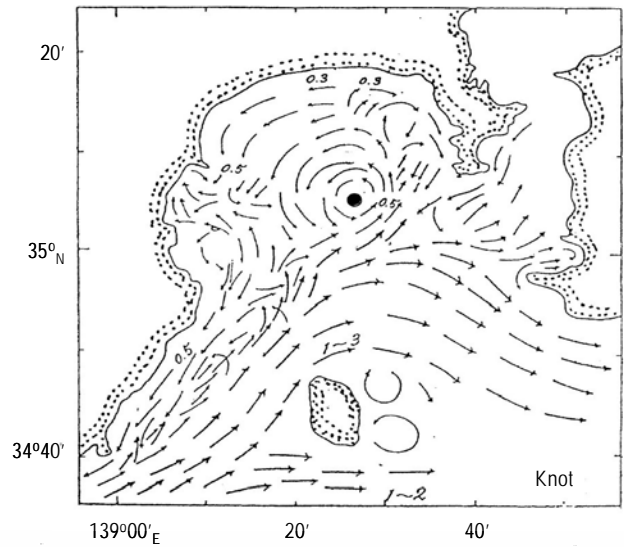


図2 拓海の設定海域

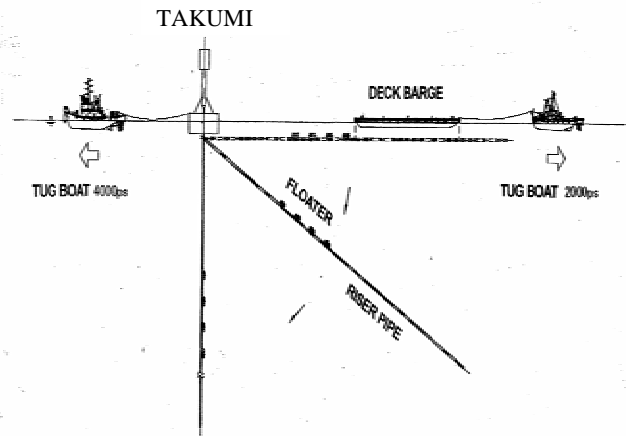


図3 アペンディング工法



図4 稼動中の拓海

時間毎に無線で陸上に発信し、関係者がパソコンにデータを受け取り監視している。現場でのメンテナンスに関しては、月1回の潤滑油関係の点検、3ヶ月に1回の燃料（A重油）補給、年1回の各部総点検を

行うこととして、陸上より通船により支援を行っている。2003年7月に連続運転を開始してから約2年間、軽微な故障等はあったものの、度重なる台風等に対しても十分な安定性を示し、連続的に海洋深層水を汲み上げ続け肥沃化の実海域実験を継続している。図4に稼動中の拓海の写真を示す。

3. 実海域実験結果

(1) 放流水の滞留

実験開始後何回かの海洋計測を行い、拓海からの放流水が密度流として有光層である水深25~40mの層に漂っていることが確認された。図5に拓海から出た塩分の薄い放流水が潮下約3km離れた位置で明確に確認されているデータを示す。また、図6にこの時の放流水の希釈率の時系列データを示す。

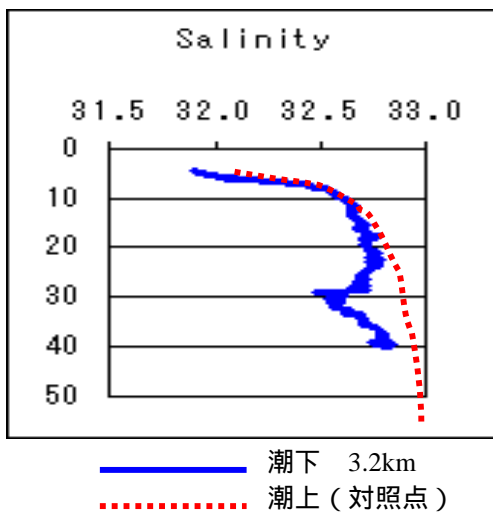


図5 放流水の鉛直分布

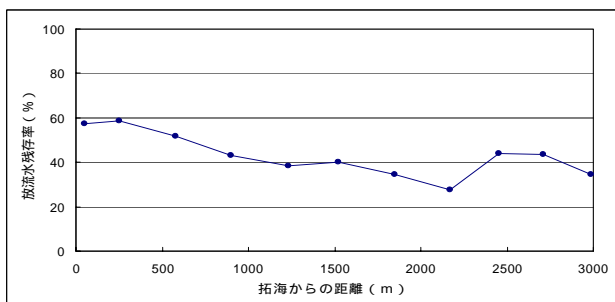


図6 放流水の残存率

これらのデータより、拓海より放水された深層水を含む水塊は、有光層に密度流として滞留し、その希釈率もノズルを出た後海中を漂っている間に急激には希釈せず残存しているという結果が得られた。

光合成が活発になり一次生産が増加するのは、栄養塩が取り込まれてから2~3日かかると言われてお

り、今後は、更に長い時間スケールと空間スケールで植物プランクトン及び魚の定量的な変化を観測し、海洋肥沃化装置の実用化に向けて実験の評価を行う計画である。

(2) 浮体の移動量

拓海は水深約1,000mの海域にシンカー、チェーン、

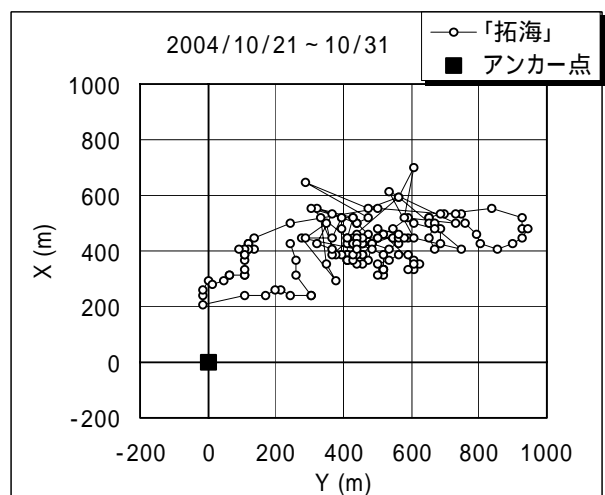
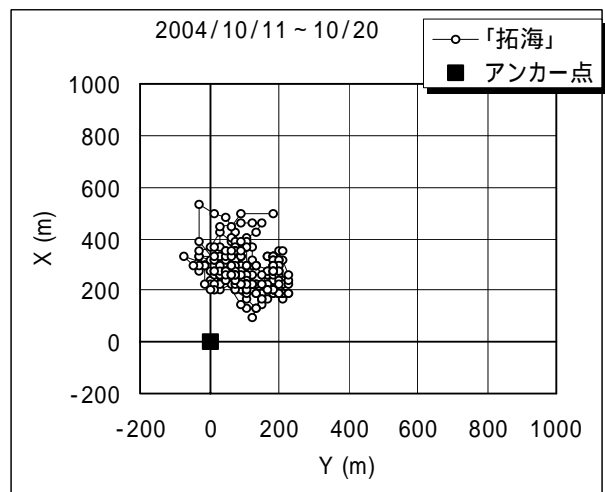
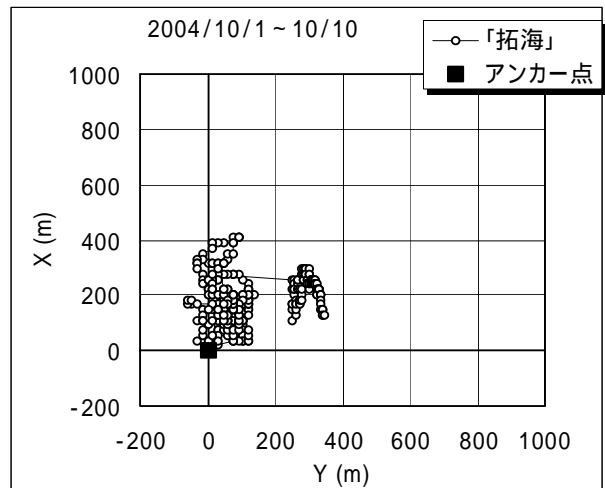


図7 拓海の移動量

ワイヤーで一点係留されており、潮流・風浪の力により振れ回り移動する。図7に拓海に搭載したGPSで測位した移動量について、2004年の10月のデータを示す。この内の最下段のデータは、10月21日に台風23号が相模湾を通過し、その後10月23日には1.2ノットの潮流が流れた厳しい状況下でのデータである。ここでは、最大で東西に1,000m、南北に500mの振れ回りが観測された。

(3) 浮体・ライザーの応答

荒天時に浮体とライザー管がどのような応答を示

すのか、2004年10月21日の台風23号通過前後の風速風向、波高波向、縦横揺れ角度、3軸の加速度、ライザー間中央部（約100m水深）の応力レベル、応力の周期についての観測値を図8にまとめて示す。

このデータから10月21日に有義波高で10mを超えたと思われるが、浮体の同様としては横揺れは 10° 、縦揺れは 7° 程度、加速度も0.35G程度に収まっており、この浮体の運動によるライザーの応力レベルも 10kgf/mm^2 程度であり、初期の設計の範囲に十分な余裕を持って納まっていることが確認された。

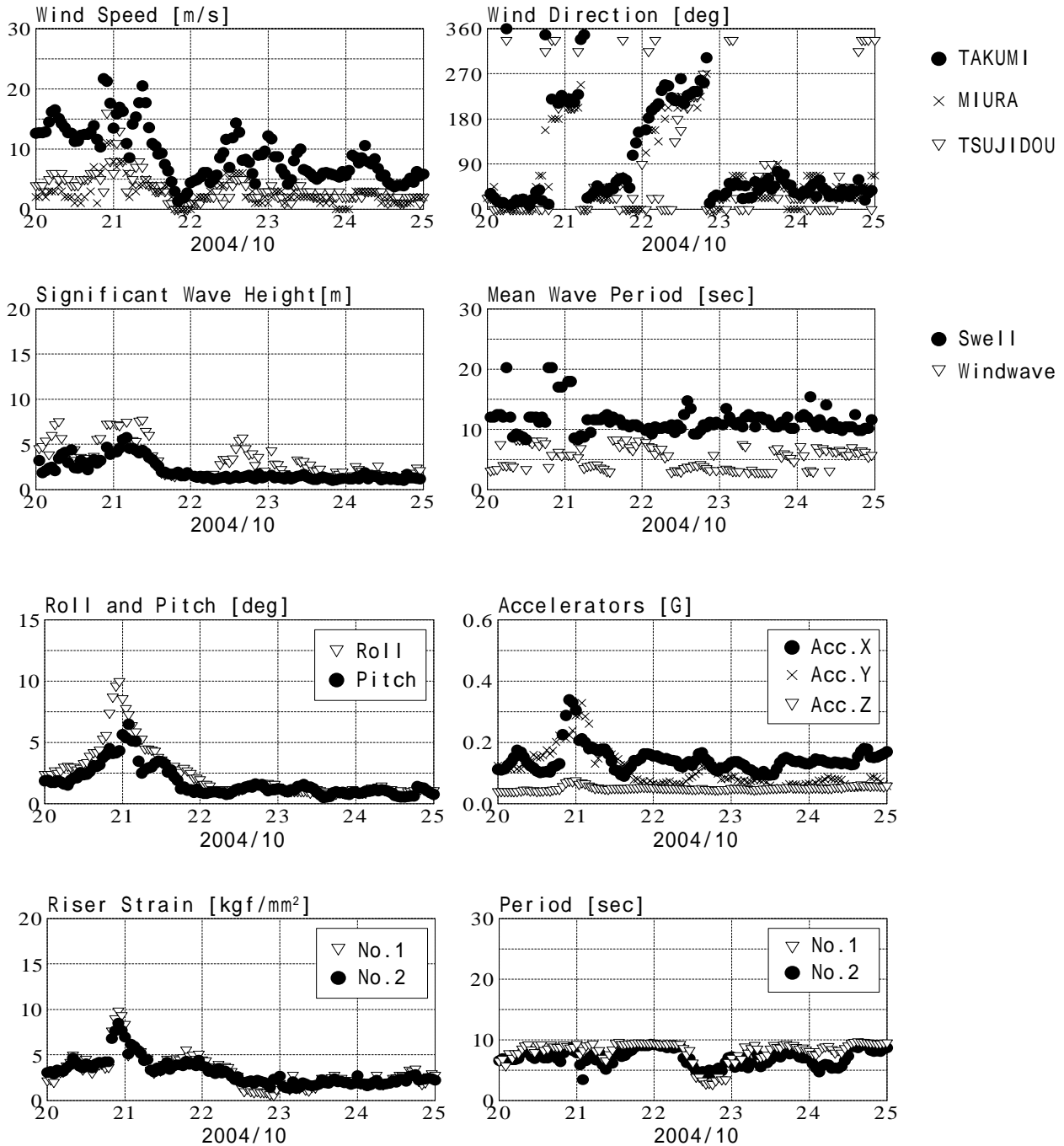


図8 荒天時の海気象と浮体・ライザーの応答

(4) 生物付着状態

2004年12月（設置後約1年半後）に拓海のバラスト水を排出しメンテナンス喫水まで約20m浮上させ、各部の点検とメンテナンスを行った。図9に浮上時の全体写真、表層取水口の写真、の写真を示す。



図9 生物付着状況



図9に示すように外部の防汚塗装をしていない部分にはかなり厚くフジツボ等の貝類を中心とした海中生物付着が、厚いところでは10cm以上の厚みで付着していたが、取水口より内部の水路及びインペラ・吐出口にはシリコン系の防汚塗装をしているため、海中生物の付着は少なかった。

4. 結論と今後の課題

本プロジェクトの目的は沖合いでの魚類生産力の増大というわが国の水産基本法の根幹の部分に位置するものであり、機器の開発とそれに伴う海域での効果が判明すれば、水産業の直面する諸問題への貢献度としては非常に大きい。その意味で、本プロジェクトにおいて拓海というハード部分がほぼ目標通り達成されて、その第一歩を印した意義は大きい。

また、世界的にも本プロジェクトは洋上型人工湧昇海域肥沃化装置を、約4年というある程度長期間

にわたって台風の直撃を含む荒天の実海域での稼働実績を残した初めての例であり、それに寄与した要素技術として、密度流の利用、浮体・ライザーの動的挙動の解析、超大容量低水頭揚水ポンプ開発、アペンディング工法の技術開発等の研究開発が行われ、夫々の分野で最先端の技術を結集した総合的・独創的装置であると評価される。

平成17年度から新たに、拓海を運転することにより海域の一次生産の増加を定量的に把握するための本格的調査研究と、それに伴い水産基盤整備事業のメニューとしての実用化に向けた海洋肥沃化装置の仕様についての検討を行うための、拓海の第2期の研究プロジェクトである「海洋肥沃化システム技術確立事業」（委員長：高橋正征高知大学教授）がマリノフォーラム21にて3年計画で発足した。現時点での参加企業は以下の9社である。

（株）大内海洋コンサルタント、芙蓉海洋開発（株）、（株）IHIマリンユナイテッド、（株）システムインテック、（株）ゼネシス、東亜建設工業（株）、ナカシマプロペラ（株）、日本無線（株）、（株）間組、（ 幹事会社、副幹事会社）

この第2期プロジェクトでは、東京大学の「淡青丸」、東京海洋大学の「青鷹丸」、水産工学研究所の「たか丸」、神奈川県水産技術センターの「うしお」等の研究船の協力で、拓海による周辺海域の水質、一次生産、魚類等の変化について定量的な調査を行い、海洋肥沃化装置の実用化に向けての肥沃化効果に関するデータ収集及び解析・検討に全力を挙げる計画である。

謝辞：

本プロジェクトの遂行にあたり物心両面からのご支援とご指導をいただいた（社）マリノフォーラム21の弓削志郎理事長をはじめとした担当者各位、及びプロジェクト推進委員会の高橋正征委員長をはじめとした委員各位に深く感謝の意を表するとともに、海洋データを解析・提供いただいた（独）海上技術安全研究所海洋研究部門の大川豊グループ長をはじめとする担当者各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) John Ryther : Photosynthesis and Fish Production in the Sea, Science vol.166, 1969
- 2) 高橋正征：海にねむる資源が人類を救う、あすなる書房、1991
- 3) 大内一之、山磨敏夫、小林勝弥、中村充：密度流拡散装置の研究開発、日本造船学会論文集第183号、1998
- 4) Iwata, S., Matsuyama, M., " Surface Circulation in Sagami Bay The Response to Variations of the Kuroshio Axis -, Journal of the Oceanographical Society of Japan, 45, Tokyo Japan, 1989