

海洋肥沃化実験装置「拓海」

大内 一之

(株)大内海洋コンサルタント

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おいて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ペルー沖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る 2) 3) 4) 陸上で農業による食糧増産が頭打ちになっている現在、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しての食糧資源確保のための有力な手段となり得るであろう。

表 1 世界の海洋面積と魚類生産

	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.)

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（装置概要及び稼動中写真を図 1 に示す）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

験例はない。

(社)マリノフォーラム21では平成12年度より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、所謂、深層水による人工湧昇流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日より杵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、その実験結果の一部についても報告する。

HOYO Project in Toyoma Bay

DOW Suction:26,000m³/day,

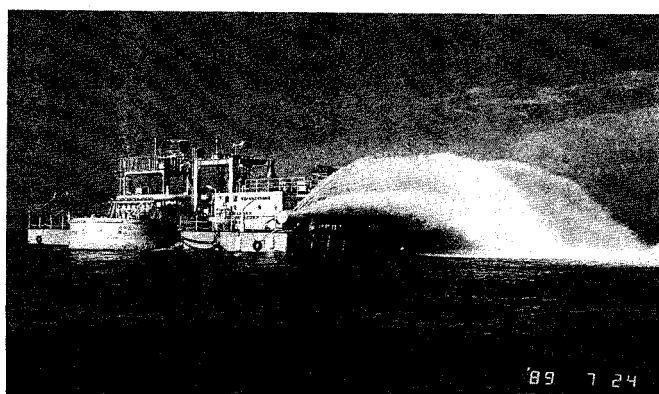
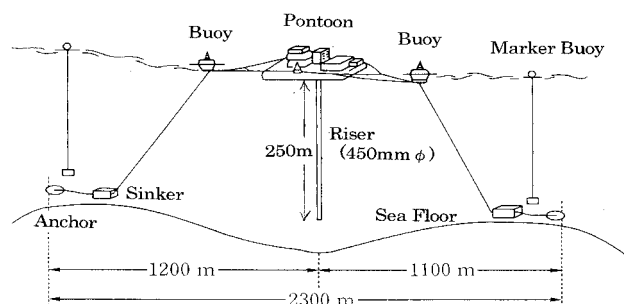


図1 豊洋の富山湾での実海域実験

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)
揚水ポンプ及びディーゼル発電機	: 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)ゼニライトブイ
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)

2. 拓海の概要

2.1 設置場所の選定

肥沃化の実海域実験において、効率よく肥沃化を達成するには、汲み上げた栄養塩をなるべく希釈させずに濃度の濃いままで滞留させることが重要である。そのためには、強い潮流の中へ放水による移流拡散を防ぐために、実験海域としては潮流が殆どない海域や渦の中心部のような、水の滞留しやすい海域を実験場所として選ぶ必要がある。深層水を取水できる水深があり、かつ上記のような条件

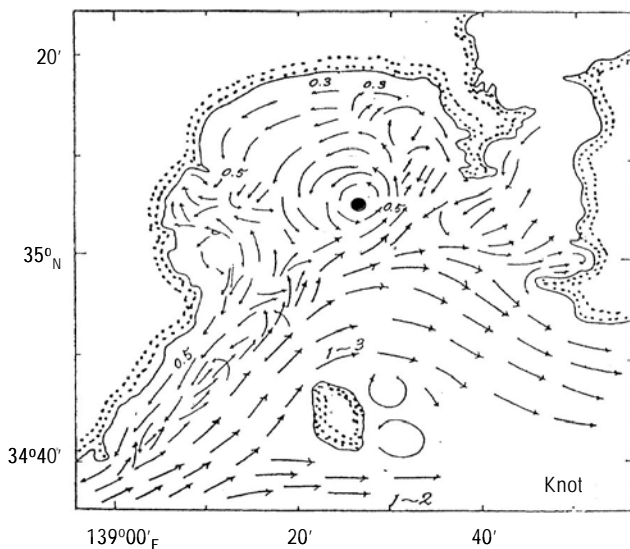


図2 拓海の設置位置

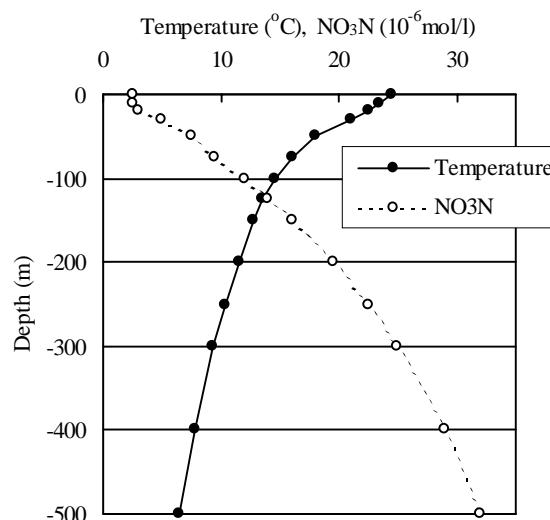


図3 相模湾の水質鉛直分布

を満たす海域として、本プロジェクトでは図2に示すように、黒潮により反時計回りの還流5)が生成される頻度が多い相模湾中央部三浦海丘近傍海域(平塚南方沖約25km、北緯35°05'22"、東経139°25'29"水深約1,000m)を選定した。このような還流域の中心付近では、一度栄養塩が添加された海水が再度還流により戻ってきて再添加されることとなり、より高い栄養塩濃度が得られることが期待できる。さらに、還流中心であれば海水は殆ど動かないと考えられ、栄養塩濃度の希釈もあまり起こらないと予想される。小さな装置で大きな効果を出すためには、まず設置場所の選定が重要である。

図3に上記設置場所における夏場の水温と栄養塩濃度(硝酸塩濃度)の鉛直分布を示す。これにより、今回計画している取水深度の200m水深で、十分な栄養塩があり且つ後述する密度流による栄養塩の滞留に有効な温度成層も存在していることが分かる。

2.2 密度流による栄養塩の滞留技術

深層水の持つ栄養塩を光合成の可能な有光層へ一定時間(少なくとも2~3日)滞留させることにより、植物プランクトンが増殖し漁場造成が可能となる。そのためには、冷たく重い深層水を有光層の暖かく軽い表層水の中に放水した場合の落下を防止し、深層水を有光層内に留らせることが必要である。

図4に示すように本プロジェクトにおいて開発した海洋肥沃化装置「拓海」では冷たい深層水と暖かい表層水とインペラにて混合させ密度調整し同じ密度の層に放水し、密度成

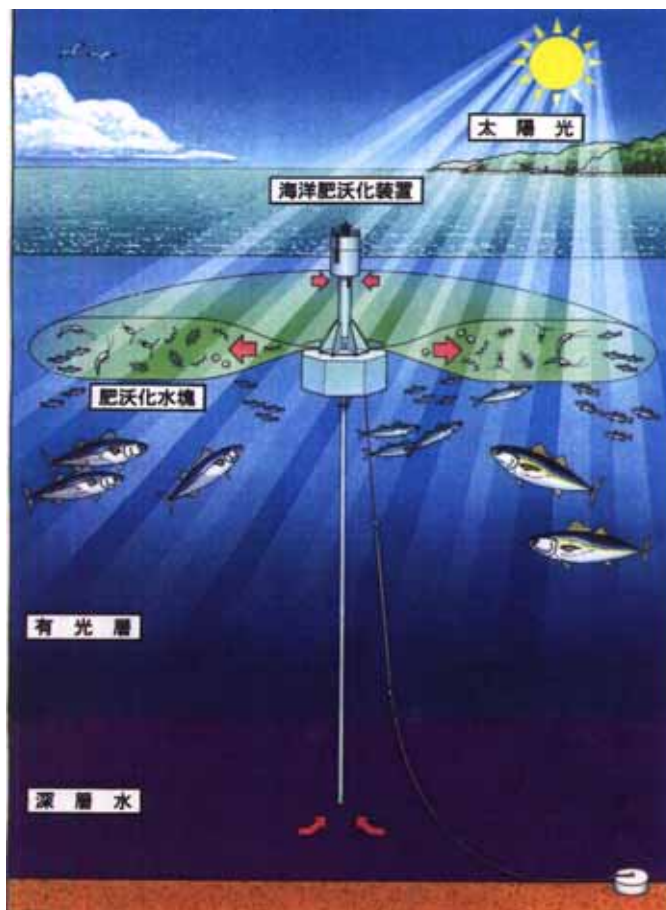


図4 拓海の作動概念図

層している有光層に密度流を生成させ、栄養塩濃度を保ちながら層状に水平滞留させる技術を採用している。この密度流発生技術は、筆者らの開発による密度流拡散装置（1997年よりプロトタイプ機が三重県五ヶ所湾にて稼動中）の技術を更に検討改良して本プロジェクト用に応用開発したものである。6）7）

本プロジェクトでは、実際に相模湾と相似な1/200スケールの夏場の密度成層状態を水槽にて作製し、そこへ海洋肥沃化装置から密度調整した水を流し、成層流体中において密度流がどのような挙動を示すかを調べる水槽実験を行った。

図5に実験の写真を示す。上の写真は密度成層のない水槽に同じ密度の水を放水した場合であり、下の写真は鉛直方向に密度成層した水槽に上下の平均密度の水を同じ密度の深さに放水した場合である。成層のない場合は放出水は拡散希釈しているが、成層のある場合は上下拡散は起らず、濃度の濃いまま密度流として水平に広がって行くことが判る。本実験において、相模湾の夏場の成層状態では約10m程度の厚みの密度流が生成されること、また、ノズルからの放水速度を減少させることにより、放出水の希釈率が減少する

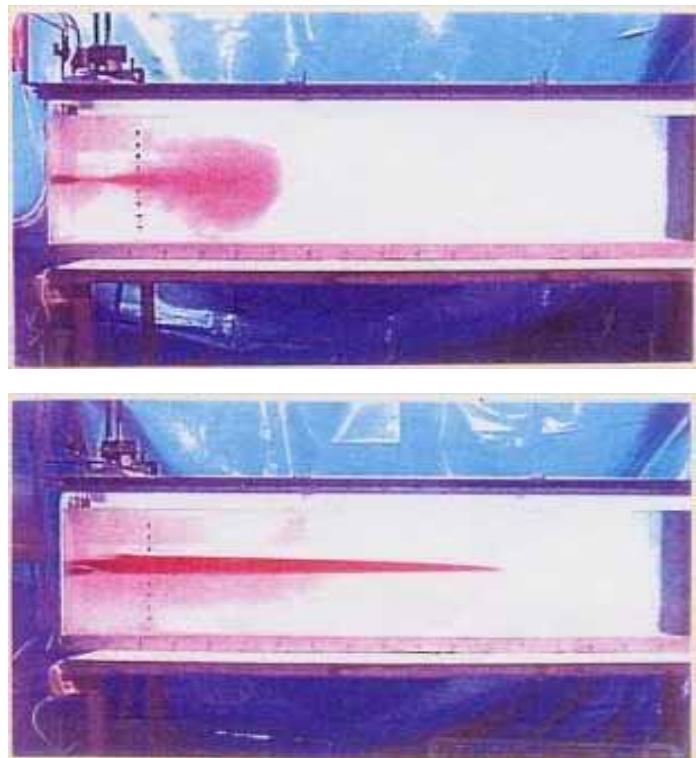


図5 密度流の水槽実験

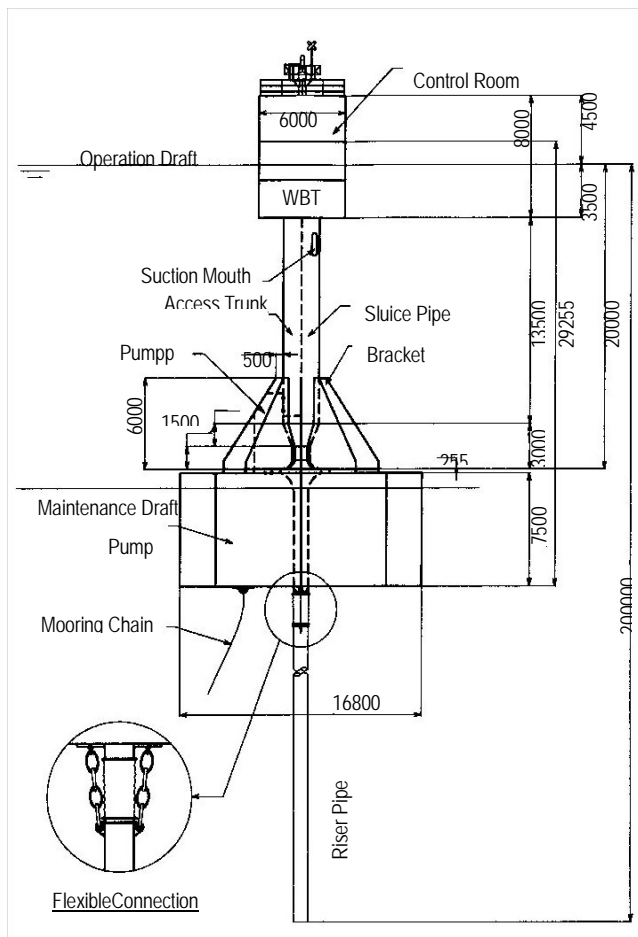
定量的計測を行う等の、貴重なデータを入手することが出来た8）

2.3 拓海の仕様概要

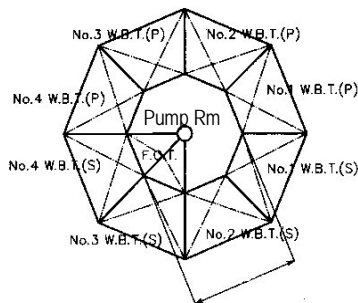
(1) 浮体形状

海洋肥沃化実験を充分に行うためには、風浪の厳しい外洋海域に於いて長時間連続して深層水を放水し続けることが求められるが、過去のこの種の洋上型取水装置は富山湾の豊洋も含めて、風浪が厳しくなると装置を避難させると云うコンセプトが殆どであった。しかし、実際の運用上は台風等からタイミングよく避難することは非常に難しく、荒天による装置の破損等のトラブル例が非常に多く発生している。これらに鑑み、本プロジェクトでは設置海域である相模湾で起こりうる最大級の海気象に耐えられる全天候対応の駆体装置及び係留系の開発を行った。その結果、従来の台船型の浮体に比べて風浪からの荷重を受けにくく、抜本的に動揺の少ない没水型の縦長のスパー型浮体形式を採用することとした9）

図6に海洋肥沃化装置「拓海」の浮体の一般配置図を示す。動揺軽減の顕著な例として、本浮体方式と従来型台船方式の不規則波中の横揺れ（ローリング）についてのコンピューターシミュレーション12）による結果を図7に示す。このように本装置の運動性能は従来型の台船方式に比べて大幅に改善されており、装置の基本的強度・安全性、耐久性に関して大きな利点となっている。なお、本プロジェクトにおける浮体・ライザー管・係留系の挙動・強度及び安全に関する検討は、相模湾の海象デ



(Profile)



(Plan)

図 6 拓海一般配置図

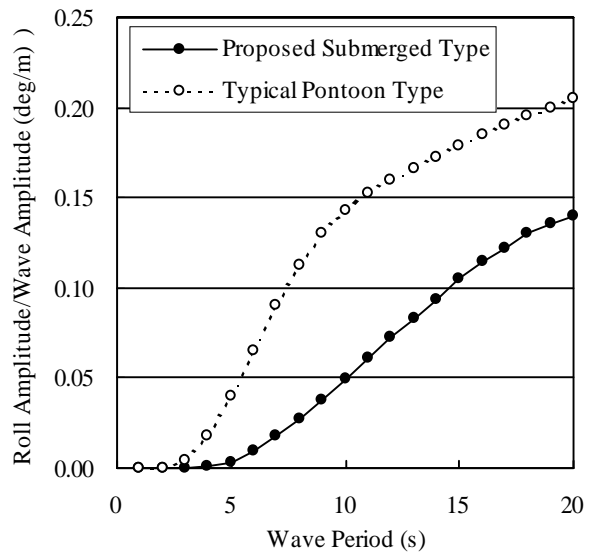


図 7 横揺れ性能比較

表 3 設計条件

風速(1分間平均)	50m/s
波浪(有義波高) (有義波周期)	10.0m 14.9s
表層潮流(吹送流、急潮を含む)	1.9m/s

表 4 拓海主要目

全高	約 213m
最大幅	16.8m
喫水	約 205m
排水量	約 1,700t
ライザー管内径x長さ	1.0m x 175m
係留方法x水深	一点緩係留 x 約 1,000m
ディーゼル発電機出力(定格)	115kw
深層水汲上げ水深x量	約 205m x 10万 m ³ /日
表層水取水水深x量	約 5m x 20万 m ³ /日
放水水深x量	約 20m x 30万 m ³ /日

ータを考慮の上、表 3 に示す設計条件に従って行われた。

(2) 一般配置

本装置の一般配置図を図 6 に、主要目を表 4 に示す。浮体は、ディーゼル発電機とその制御設備及び陸上への通信設備等を格納した上部浮体、水バラスタタンク・燃料油タンク及びポンプ室等を内蔵した下部浮体、及び上下の浮体を連結した柱状のコラム(柱の内部半分が表層取水管・残り半分が上下部浮体間のアクセストラック)からなっており、下部浮体から 2 本チェーンにより内径 1m・長さ 175m の鋼製ライザー管を吊り下げ、ライザー管からフレキシブルパイプにより深層水を浮体内部に導いている。

深層水は、水深 205m のライザー管の下端から 10 万 m³/日を取水し、水深 3.5m から 20 万 m³/日取水

される表層水と混合し密度調整され、水深 20m の下部浮体の上部の放水口から 30 万 m³/日の容量となり、ゆっくりした速度で水平に全方向へ放水される。深層水・表層水の取水比率及び放水水深については相模湾の夏場の密度成層の状態及び有光層の深さを考慮して決定された。

また、本浮体は通常オペレーション時の喫水の他に、放水口レベルにある揚水ポンプ等のメンテナンスを考慮して、水バラストを排出することにより放水口デッキを水面上に浮上させることを可能にしている。

(3) ライザー管

拓海の設計において、ライザー管の設計は、浮体の動揺による加振、浮体運動との共振、潮流等による渦励振 (VIV) 設置工事の項で述べる Upending 時の曲げモーメント、等多くのファクターを考慮する必要があり、また、通常の強度条件だけでなく、波による繰り返し疲労強度についても検討が行われた。その結果ライザー管は高張力鋼を使用し肉厚は 31mm と言う圧肉管を使用し、応力集中を避けるため円周溶接部は溶接ビードをグラインダーにて滑らかにする等の注意を払うこととなった。

ライザー管の強度解析例として、有義波高 10m 波周期 10 秒の不規則波中におけるライザー管の変形量及び曲げモーメントに関するコンピューター・シミュレーション 10) 結果を図 8 に示す。この結果より、拓海のライザー管の波浪中の挙動は 1 節振動であり最大モーメントはほぼ管の中央部で発生することが分かる。

(4) 揚水ポンプ及び動力

本装置駆動のためのエネルギー源は、本装置が大量の低温の深層水と高温の表層水を取水しているため、その一部を利用して海洋温度差発電 (Ocean Thermal Energy Conversion : OTEC) を行うのが、深層水を有効活用する意味でも最適である 11) 。 OTEC については Fig.10 に基本的なランキンサイクルの概念図を示すが、近年では佐賀大学上原教授の研究によるウエハラサイクル、高効率チタン製熱交換プレートの開発等の高効率・高信頼化が行なわれており、技術的にもコスト的にも大いに実現が可能であると考えられる。また、エネルギー源である海洋の深層と表層の温度差が常に一定の海域では、OTEC は太陽光・風力・波力等に比べて常に安定した発電量を連続的に確保できるという特長も有しており、電力の貯蔵の必要がない質の高いエネルギー源であるといえる。しかしながら、本プロジェクトにおいては予算上の制約その他から OTEC の採用は見送り、現在、最も安価で信頼性の高いディーゼル発電機により動力を賄うこととなった。

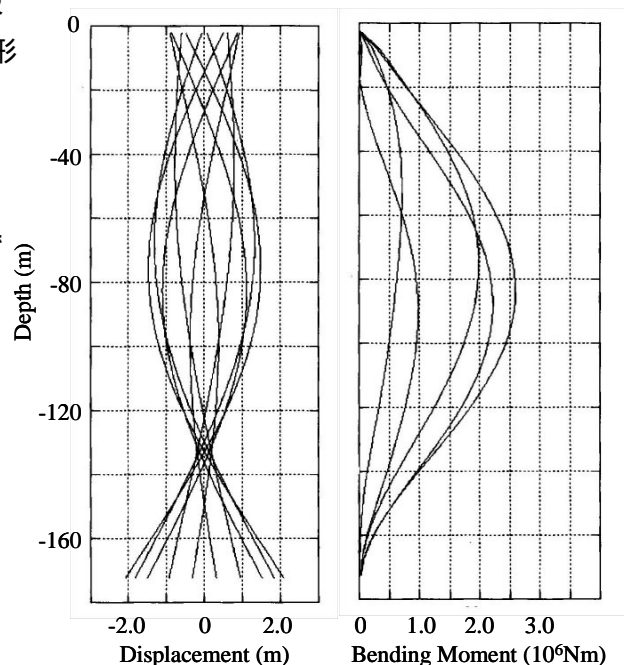


図 8 ライザーの変形と曲げモーメント

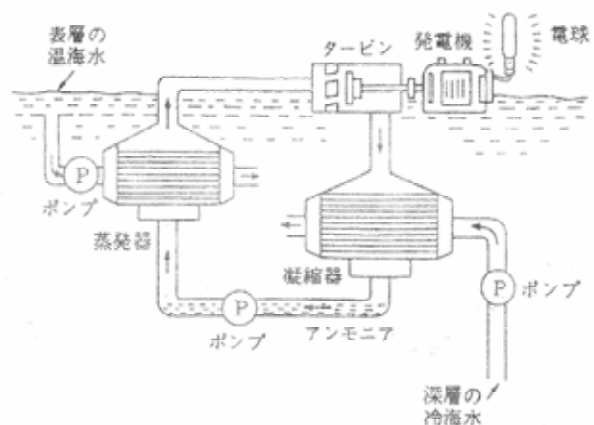


図 9 OTEC 概念図

揚水ポンプについては、駆動用電動モーターに水中ポンプを採用し、軸系・モーター格納場所等のスペースの軽減を図った。

(5) 係留

深層水の汲み上げは海底油田掘削とは異なり、ライザー管の下端を決まった位置に固定する必要が無く、多点係留で浮体位置を定点に保持する必要が無いため、拓海の場合は予算の制約もあり一点係留方式を採用した。係留仕様は、シンカー（水中重量 80t）とチェーン（56mm）及びワイヤー（53mm）によるカテナリー係留とし、水深約 1,000m に対して総計 1,800m の係留系長さとしている。設計条件における係留シミュレーションによる検討の結果、浮体のアンカー点からの水平移動距離は最大で 340m 程度であり、チェーンに掛かる最大荷重は 100 トン余と算定されている。

2.4 設置工事

波高の高い沖合にこのような海洋肥沃化装置を設置する場合の確実に安価な工事方法の開発が必要となる。石油掘削リグのように大容量のクレーンでライザー管を溶接しながら垂直に継ぎ足していく方法を採用する場合、本装置のように没水型駆体の場合は大型クレーン船を雇わない限り難しい。また、そのクレーン船にしても波高の高い沖合での稼働率は低く、安価で確実な施工方法とは言いがたい。

本問題の解決策として、図 10 に示すようなライザー管全長を予め総組したものを現場で一気に立てる Upending 技術等の、出来る限り海上現場工事のない駆体構造と施工方法の開発が必要である。本プロジェクトにおいては拓海を設置工事方法として、ライザー管の Upending 工法に関する研究開発を進めており、コンピューターシミュレーションによる Upending 時のライザー管の変位量・曲げモーメント等の時刻歴に関する検討の一例を図 11 に示す。ライザー管の適当な場所に適量の浮力体を装備することにより Upending 時の変位と曲げモーメントを軽減することが出来、水平にして曳航してきたライザー管の片端を海中にて 90° 自由落下させ垂直に立てる工法が可能となる。今回の拓海の Upending の場合は約 1 分で直立させることが可能であることが示されている。

上記のような水中重量の重い長大ライザー管の

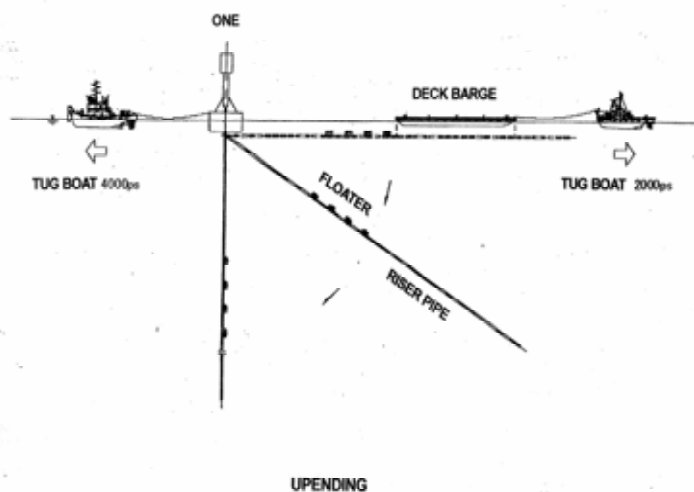


図 10 Upending 工法

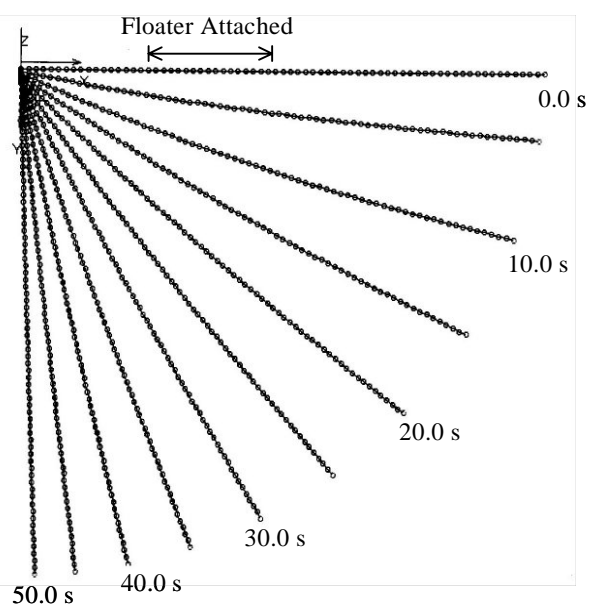


図 11 Upending 時のライザー管変位時刻歴

Upending は実海域では世界にも施工例がないので、本プロジェクトでは約 1/50 のスケールモデルを使って Upending の水槽実験を行った結果、VIV によるライザー管の多少の振動が観測されたが、総合的に問題になるほどの影響は無く、ほぼシミュレーションどおり挙動・応力となることが確認された。図 12 に設置直前の I H I M U 横浜工場でのファイナルドックにおいて、拓海の最終組立完了時の写真を示す。



図 12 最終組立完了した拓海

3 . 実海域実験

3 . 1 運用

相模湾に設置後の拓海の運転は無人運転をベースとしており、ディーゼル発電機及び揚水ポンプの運転状況、浮体の姿勢等、運転時に監視が必要な項目は、城ヶ島の神奈川県水産総合研究所へ適宜無線送信され、陸上より監視可能としている。但し、機器類の操作に関しては危急停止項目を除き、遠隔操作は行わず、現場で人間が操作を行うこととしている。図 13 には相模湾にて稼動中の拓海の写真を示す。



拓海は本プロジェクトが終了する 2005 年 3 月まで約 2 年間、基本的には保守点検等の

図 13 稼動中の拓海

期間を別にすれば、24 時間 365 日連続運転を行い肥沃化実験を行う計画であり、特にディーゼル発電機の監視とメンテナンスが重要となる。そのため、月に 1 回は要員が拓海へ乗船し、点検・メンテナンスを行うこととしている。また、年に 1 回は拓海を放水口デッキまで浮上させ、ポンプ・モーターの点検、装置内部水路の海中生物の点検・除去等の作業を行う計画である。

拓海は 2003 年 7 月の連続運転開始から現在まで約 1 年に近い期間、連続して 10 万トン/日の深層水を汲み上げ続けている。

3.2 海洋調査

平成 15 年 9 月 12 日、調査船による拓海の潮下 3km 以上にわたって水深方向の塩分濃度計測結果を行った結果、図 14 に示すように水深 20~30m 層に拓海から放水された塩分の薄い密度流の水塊が潮下 3km でもはっきりと滞留しているのが観測された。ここで、拓海からの放流水の塩分濃度が 20m 層の海水より薄い理由は、相模湾では表層水の塩分濃度が河川からの影響等で 10m 層以深の海水より薄いためであり、従って表層水を深層水の 2 倍量含んでいる放流水の塩分濃度も当然薄くなるからである(2)。

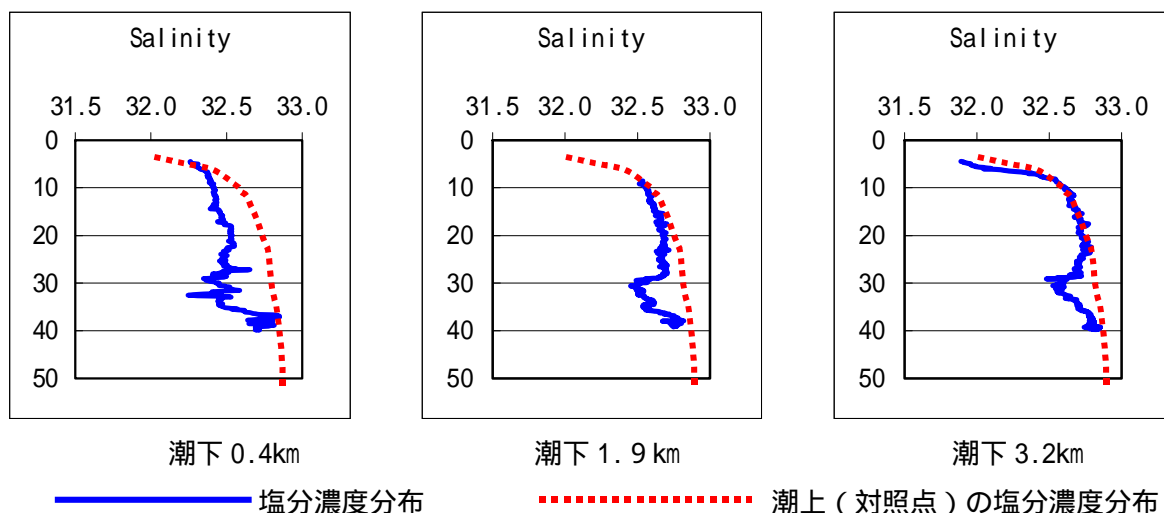


図 14 実海域における密度流の滞留

深層水を含む水塊が有光層に滞留していることが確認されたことを受けて、今後、一次生産の増加を確認するために、これらの水塊における栄養塩濃度及び植物プランクトン濃度の時系列的变化の長期間の調査が必要となる。栄養塩が光合成により植物プランクトンに取り込まれる反応時間は、3日~1週間と見積もられ、その間の栄養塩濃度の減少と植物プランクトンの増殖の時間的な変化について継続的な海洋調査の必要がある。マリノフォーラム 21 では平成 17 年から 3 年間引き続き拓海による実海域肥沃化実験を継続し、定量的な一次生産及び魚類生産増加に関する調査・研究を多角的に行う予定である。

4. おわりに

2005 年 3 月で、マリノフォーラム 21 の深層水活用型漁場造成技術開発委員会の海洋肥沃化装置「拓海」開発及び実海域実験プロジェクトは終了予定であるが、現時点で本プロジェクトでは以下のような成果をおさめている。

スパー型浮体構造と鋼管ライザーの採用により、動揺の少ない荒天対応の全天候型のシステムとなり、チェーン・ワイヤーによるカテナリー方式の一点係留システムも併せて、約1年間台風等にも遭遇しながらも、安全に安定した稼動状態が保持された。

ディーゼルエンジン、揚水ポンプを含む取放水システムに関しても、月1回の現場でのメンテナンスを行うことにより、軽微なトラブルはあったものの概ね1年間の連続運転・汲み上げを達成することが出来た。

放水した深層水を含む密度流の水塊については、海洋調査の結果、かなり遠方に潮で流されても有光層の20~30m水深に滞留していることが確認され、今後の更に長期間の調査による一次生産力の調査結果が期待される。

2005年度からの第2タームの調査研究も含め、深層水による人工湧昇流漁場の実現と実用化に向けて更なる努力の傾注と多方面からの支援とを望むものである。

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) 井関和夫 : 海洋深層水による洋上肥沃化、月刊海洋号外 No.22、海洋出版(株)、2000
- 4) Liu, C.K., "Artificial Upwelling and Open Ocean Mariculture – Formation of a Nutrient-rich Deep Ocean Water Plume", Proc., International OTEC/DOWA Conference 99, Saga University, Saga Japan, 1999
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 大内一之 : 密度流拡散装置による閉鎖性内湾の浄化 - 三重県五ヶ所湾での3年間の実海域実験結果 -、テクノオーシャン神戸2000論文集、2000
- 8) 大内一之、福宮健司、山磨敏夫、荻原誠功 : 成層海域における密度流の挙動に関する実験的研究、日本造船学会論文集第191号、2002
- 9) 荻原誠功、粟島裕治、宮部宏彰、大内一之 : 深層水洋上汲み上げ装置の概念設計 - 新しい漁場の造成を目指して -、第16回海洋工学シンポジウム論文集、日本造船学会、2001
- 10) Kitakoji, Y., Inoue, K., Matsunaga, K., Ohkusu, M., "Development of Dynamic Simulator for Marine Riser System", IHI Engineering Review, Tokyo Japan, 1994
- 11) 大内一之、山磨敏夫、實原定幸 : 海洋肥沃化装置における最適駆動システムの研究、第16回海洋工学シンポジウム論文集、日本造船学会、2001
- 12) 大内一之、大村寿明 : 海洋肥沃化装置「拓海」の実海域実験、第8回海洋深層水利用研究会入善大会論文集、2004