

海洋深層水の有効利用技術に関する研究（その1）

—海洋深層水取水装置の開発と基本特性の調査—

萩原 運弘
(技術研究所)

森野 仁夫
(技術研究所)

§ 1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

一般に、海洋の水深数百メートル以深の深層の水は低温であり、かつ硝酸塩やリン酸塩などの無機栄養塩類が豊富に含まれており、さらに溶存有機物や汚染物が少ない等の特徴を有している。Ryther¹⁾は、深層の水が有光層に運ばれる自然の湧昇海域の平均基礎生産力は外洋海域の約6倍、沿岸海域の約3倍であり、しかも全海洋面積の0.1%に過ぎない湧昇海域での魚類生産は、全海洋での魚類生産の1/2を占めると見積もった。また、中島・豊田²⁾は伊豆諸島の三宅島東側海域に形成される湧昇域では、周辺域に比べ植物プランクトン現存量が数倍高く海藻類、貝類、えび類などの漁獲生産量も大きいという結果を報告している。このように、深層水は植物プランクトンや食物連鎖系の高次の諸生産に対して、直接または間接的に生産を高める効果を有しており、技術的に深層水の諸特性の有効利用を図ることにより、有用な海洋生物の生産やその資源の増大を可能にすることが期待できる。

深層の水に起因し大きな生物生産をもたらす湧昇海域の自然現象は、「深層水人工湧昇」という技術により深層水の潜在的生物生産力を引き出そうとする考え方を刺激し、1970年初頭から深層水を活用し、食物連鎖の基底に位置する植物プランクトンや高次の貝類、魚類等の生産を可能とする技術の研究が米国で開始された³⁾⁴⁾。1980年代に入ると、ハワイ島のハワイ州立自然エネルギー研究所(NELH)では深層水取水管を敷設し、深層水の富栄養、清浄、低水温特性を利用して OTEC (海洋温度差発電) を中心とした深層水の多角的利用技術(淡水化、空調、マリカルチャー、農業等)の研究開発を行なっている⁵⁾。そして、NELH で行なわれた基礎的な研究のうち、商用化の見込みのついたものを大規模に企業化するための場としてハワイ海洋科学技術パーク(HOST park)が隣接して設立された。現在、アロビ、サケ、ヒ

ラメ等の魚介類、ケルプ、ノリ、オゴ等の海藻類、およびスピルリナ、ドナリエラ等の微細藻類による健康食品が商用化されている⁶⁾。またノルウェーにおいても、年間を通じて水温が7~8℃、塩分35パーミルと安定し、魚介類の病原菌(特に、ビブリオ菌)が少なく、栄養塩も豊富であるという特性を持つ水深30m以深のフィヨルド水を利用し、基礎および応用の面から研究が行なわれている⁷⁾。

一方、我が国においては1970年後半に海洋科学技術センターにより生物生産への深層水利用技術として、①陸上生産型深層水利用技術、②浅海底生産型深層水利用技術および③海域基礎生産力強化型深層水利用技術の3タイプの技術概念が提唱され⁸⁾、1980年前半には深層水利用による餌料植物プランクトンの連続生産の可能性が屋内レベルで実証された⁹⁾。さらに、1985年には陸上生産型深層水利用技術の実用化を図るために清水建設との共同研究が実施された¹⁰⁾。こうした成果は、1986年から5年計画で始まった科学技術庁科学技術振興調整費「海洋深層資源の有効利用技術の開発に関する研究」に結びつき、高知県において「陸上設置型深層水利用技術の開発」が、また富山県においては「洋上設置型深層水利用技術の開発」が実施された。しかしながら、技術的に実用性が極めて高い陸上設置型深層水利用技術さえ我が国では実海域での基礎的研究が始まった段階であり、商用レベルでの実用化を進めるためには深層水取水施設の建設技術、深層水を利用した生物飼育技術や生物環境制御技術等の多くの課題が残されている。そこで、その後も清水建設と海洋科学技術センターでは陸上設置型深層水利用技術のうち、大波浪条件下で安定取水が確保され、かつ経済的な深層水取水施設の設計・施工技術、および深層水の低水温性を利用した水温制御技術等について引き続き共同研究を実施してきた。

本研究では、図-1に示す高知県室戸岬東岸海域に建設された我が国最初の深層水有効利用実験施設のうち、共同研究の成果が反映された深層水取水管の設計と施工

について述べるとともに、深層水取水管の設置直後から実施された深層水取水口近傍の底層域での流況特性、および深層水を陸上施設に供給する深層水取水装置に関連する基本特性の調査結果について示す。

1.2 深層水の諸特性¹⁾

深層水の定義は一般的には確立されていないが、本研究では生物生産を取り扱う意味から、植物プランクトンなどの光合成藻類が成長できない有光層以深の水を深層水と呼ぶことにする。ここでは、深層水の持つ諸特性について述べる。

1.2.1 低水温特性

我が国周辺海域における水温の鉛直分布を図-2に示す。水温は深度が増すほど低下する傾向があり、その季節変化は表層では大きい、深度200m以深では殆ど見られない。室戸岬東岸海域では、深度300mで10℃前後である。また、低緯度になるほど同一深度ではおおむね表層、深層とも水温が上昇する傾向が見られる。

1.2.2 富栄養特性

海水中の主たる栄養塩類としては、硝酸塩、亜硝酸塩、アンモニウム塩、リン酸塩および珪酸塩等があるが、このうち深層水中では硝酸塩、リン酸塩および珪酸塩が重要なことが知られている。また、これらの組成比率は深度、海域を問わずかなり安定しており、これを元素比で表わすと、窒素：リン：珪素が日本周辺の太平洋海域では約14：1：36と報告されている。したがって、深層水中の栄養塩類濃度を論じるときは、これらの栄養塩類のうちの1項目の濃度が分かれば他の濃度も大まかに予測することができる。ここでは、栄養塩類の指標として硝酸

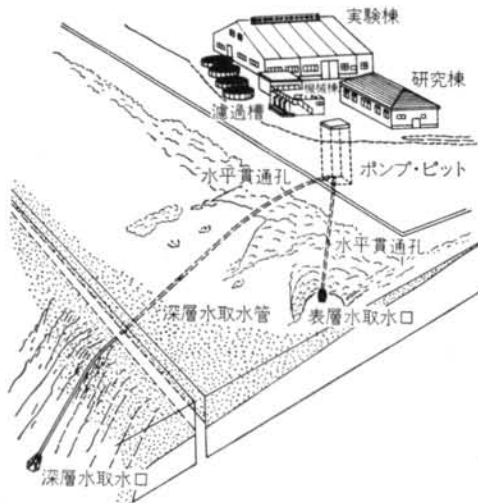


図-1 深層水有効利用実験施設

塩を用いることとし、硝酸態窒素濃度の鉛直分布を図-3に示す。深層水の富栄養特性を利用した餌料植物プランクトンの連続生産実験(屋内レベル)によると、安定した植物プランクトンの連続生産は深層水中の硝酸態窒素濃度が15 $\mu\text{g at/l}$ 以上で達成されたことが報告されている。室戸岬東岸海域でこの条件を満足する深度は250m以深であることが分かる。

1.2.3 清浄特性

Oguraによると、西部北太平洋においては溶存有機炭素濃度が表層で1.0mgC/l前後であり、これに比べて200~300m以深では0.6mgC/lと少ないのは、従属栄養細菌によって分解された結果である。したがって、深層に残っている溶存有機物はこれらの細菌による分解の残渣であり、そのため増殖に必要な栄養源となる物質は殆ど無く、結果として従属栄養細菌数も少ない。Rheinheimerは、南カルフォルニア沿岸においては従属栄養細菌の数は植物プランクトンが多量に分布する表層に多いが、下層になるほど少なくなり、200m以深では著しく少くなると述べている。このように、深層水には従属栄養細菌の栄養源としての溶存有機物が殆ど無く、その細菌数も表層に比べて著しく少ない。また、深層水中には人工汚染物も少ないと考えられる。このような特性を、こ

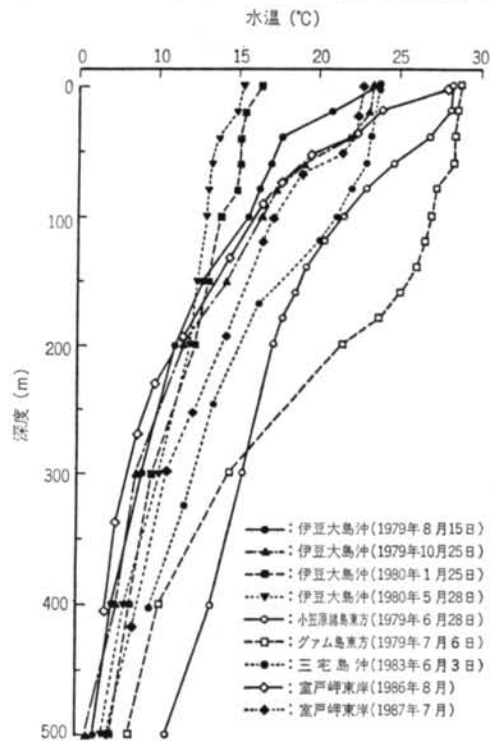


図-2 水温の鉛直分布

では「清浄」と表わすことにする。現状では、深層水の清浄性に関する知見は乏しい。

§ 2. 深層水取水管の設計と施工

1989年3月に高知県室戸岬東岸海域に完成した、我が国最初の生物生産のための深層水取水施設は、海象条件の厳しい海域に建設された世界で初めての例である。ここでは、深層水取水管に係わる海域調査、設計および施工について述べる。

2.1 海域調査

設計・施工に先立ち、図-4に示す地点において1986年12月に地形および地質調査を音響測深機と地層探査機を用いて、また流況調査を長期巻自記流速計により実施した。その結果、岸から約200mは転石のある起伏の大きい岩地形で、これより沖側約1800mは海底勾配が 1° ~ 10° の砂質地盤が続く、その先から岩地盤になり、急激に落ち込む地形(最大傾斜約 37°)であることが分かった。図-5に海底地形、地質縦断を示す。一方、水深50, 100, 260mの海底面上10mに設置した流速計の48時

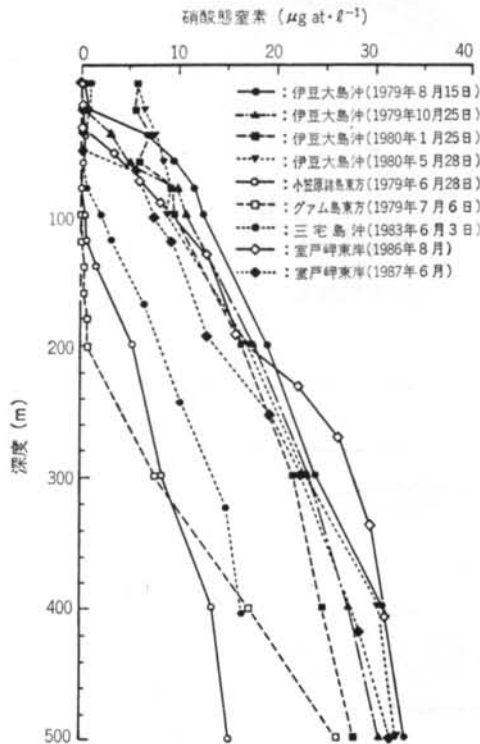


図-3 硝酸態窒素濃度の鉛直分布

間連続記録より、最大流速はそれぞれ0.42, 0.23および0.25m/sが得られた。

2.2 深層水取水管の設計

2.2.1 条件

深層水取水施設には、水産への利用面から表-1に示す取水量、取水深度の確保のほか、低水温、水質の保持に係わる基本要件条件が課せられた。また、深層水取水管は台風襲来頻度が高く、設計最大波高約17mという非常に厳しい自然条件下に設置されるため、設計においては上記の基本要件条件を満足し、かつ大波浪に耐えるとともに低コストのものになるように留意した。表-2に設計条件を示す。

2.2.2 管径

取水方式としては、地下ビットが比較的浅く小さくて済み、低コストで建設できること、およびメンテナンス

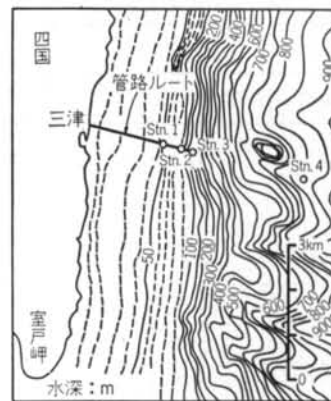


図-4 位置図

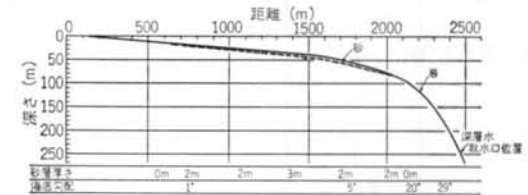


図-5 海底地形・地質縦断図

項目	条件
深層水取水量	460 m^3 /日以上
深層水取水深度	250m以深
陸上施設へ供給時の深層水温度	通年 20°C 以下
水質	施設から金属成分が溶出ししないこと
深層水供給揚程	18m
耐用年数	10年以上

表-1 基本要件条件

が容易なことからポンプ揚水方式を採用した。この方式では、管径を小さくするほどポンプ取水時の管内摩擦抵抗が増大し、所定の取水量を得るためにはポンプ設置レベルを下げなければならない、逆に管径を大きくすると管材費が大きくなる。そこで、ポンプピットが現実的な深

項目	条件
潮位	HWL=DL+1.8m, LWL=DL±0m
波浪	(完成後) $H_{max}=17.1m, T=15sec$ 波向 SSE±15° (施工時) $H_{max}=2.0m, T=10sec$ 波向 SSE±15°
潮流	(完成後) $V_{max}=0.5m/sec$ (海底面) (施工時) $V_{max}=1.0m/sec$
海底地形	図-5 参照
海底地質	図-5 参照
海水	(水温) 図-2 参照 (密度) 1.03 t/m ³

表-2 設計条件

項目	鋼管	FRP管	塩ビ管	硬質ポリエチレン管	鉄線鍍装硬質ポリエチレン管
金属成分の溶出	△	○	○	○	○
可とう性	×	△	△	○	○
耐衝撃性	○	△	×	△	○
強度	○	△	×	×	○
耐久性	×	○	△	○	○
断熱性	×	○	○	○	○
管敷設実績	○	△	△	○	○
総合評価	×	△	×	△	○

(注) ○：優れる, 多い, △：中間, ×：劣る, 少ない

表-3 管材材料の特性比較

さとなり、土砂等の管内堆積が起きない流速 (0.3m/s以上) を満足する管径 100, 125, 150mm の 3 ケースのコスト比較を行なった結果、建設コストと10年間のランニングコストの和が最小となる管径 125mm を採用した。

2.2.3 管材料

深層水取水の管材料は、生物生産への利用上から生物の成育に有害あるいは影響のある成分を溶出せず、深層水の低水温を保持する断熱性が、また管敷設上、完成後の安全上からは可とう性、耐衝撃性、強度特性、耐久性などに優れていることが必要となる。表-3に、管材料に要求される諸特性の比較を、適用可能性のある5種類の管材料について行なった結果を示す。その結果、これらの条件を満足する管材料として、鉄線で補強した硬質ポリエチレン管を採用した。鉄線鍍装硬質ポリエチレン管の断面を図-6に示す。管長1m当たりの重さは空中で32.5kg、水中で20kgである。

2.2.4 管路設置構造

管路設置標準を図-7に示す。水深8.5m以浅の浅海域の管路は完成後に大きな波力を受け、転石の衝突が考えられるため鍍鉄防護管(100kg/m)を取り付けたいえ、基岩にバンドで固定する形式を採用した。これより沖側

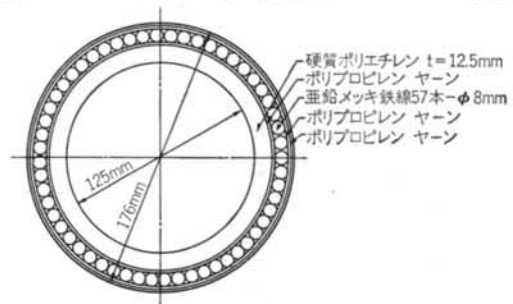


図-6 深層水取水管断面

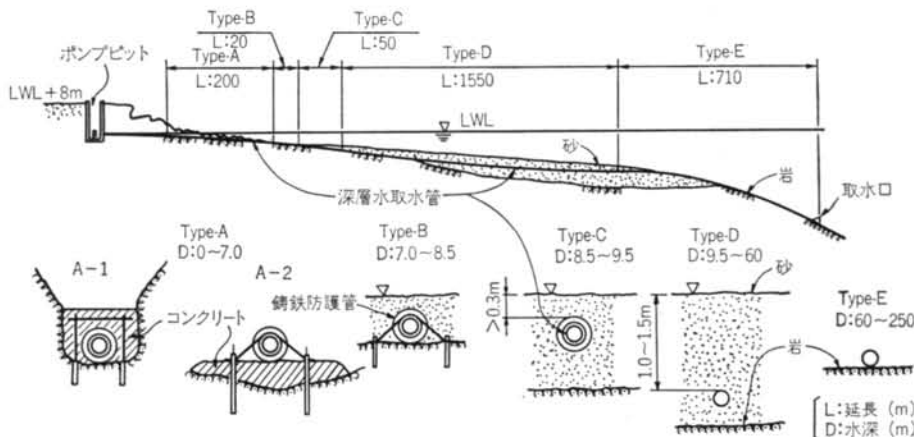


図-7 深層水取水管設置図

(水深8.5~60m)では、土中に深さ1.5mで埋設することにより波、流れ、投錨、漁業等への影響を防止した。水深60m以深は海底面に直接置く自然着底方式とした。また、取水口には海底に堆積する土砂の吸い込みを防止するため、正六角形、ラップ形の骨組構造から成る取水枠を取り付けた。

2.3 深層水取水管の施工

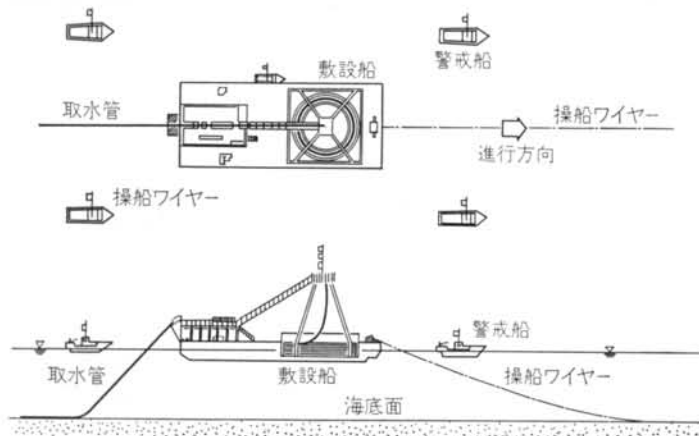
2.3.1 取水管の敷設

現有の敷設工法を表一4に示す。敷設工法は、これら4工法の中から管路仕様と現地環境条件に対して敷設位置精度確保と管破損防止が図れ、かつ敷設費が安価となる工法を選択するものとし、海岸部岩礁域の延長270mには浮遊曳航法、また沖合2380mにはアンカー方式のリールバージ法を採用した。敷設は、全長2650mの1本物で工場製作した管を敷設船に搭載して現地搬入した後、管陸上げと沖合側敷設を行なった。管陸上げは、敷設船が入船できない海岸部岩礁域の敷設であり、写真一1に

示すように対岸300m位置に敷設船を係留し、浮体がセットされた管を陸上のウインチで所定長浮かせて引き出し、陸の管と仮接続した後、順次岸側より沈設させた。一方、沖合側敷設は図一8に示すように、ルート上の海底に予め敷設した操船ワイヤーを敷設船の船首ウインチで巻取りながら前進させ、テンショナーを介した管を船尾のシュータから順次送り出す方法で行なった。なお、



写真一1 管陸上げ状況



図一8 アンカー方式リールバージ敷設法

浮遊曳航法	海底曳航法	レイバージ法	リールバージ法
<p>陸上あるいは海上で長管を接続し、フロートを取り付けて所要延長分海上に引き出した後、敷設位置を調整してフロートを切り外し沈設する方法</p>	<p>陸上のパイプヤードで長管を製作し、これを沖合に配置したウインチ台船またはタグボート、あるいは対岸にウインチを設置して、海底面上を引きずり敷設する方法</p>	<p>船上で短管を一本ずつ接続し、その都度敷設船の位置を移動することで管の送り出しと沈設を同時に行ない敷設してゆく方法。なお、敷設船の移動は係留アンカーを用いる場合と曳船を用いる場合が一般的である</p>	<p>工場より所要延長分の管をリール状に巻いて積載した敷設船を敷設場所まで曳航した後、レイバージ法と同要領で敷設船を移動、リール状の管を巻き戻すことで敷設する方法</p>

表一4 敷設工法

取水口深度は管先端にトランスポンダーを取り付けておき三次元座標で確認した。その結果、余長147m（全長の5.5%）の殆どが深度増大に寄与したことで、計画していた深度250mに対して深度320mとなった。

2.3.2 取水管の機械埋設

今回、最大施工深度60mに加え、取水管路としてエア一溜りを生じない縦断線形の確保と、海域の漁業に対して音、濁りの少ない方式が要求されたので、流動化方式埋設機を採用した。機械埋設は、予め敷設台船移動用アンカーを所定位置に配置しておき、**図-9**に示す要領で順次陸上から行ない、延長1540mを2日で完了した。

§ 3. 底層域における流況特性

深層水取水管敷設直後から、深層水取水口近傍の底層域（水深約300m）における流況特性を把握する目的で実施した流速、流向および水温に関する1年間の長期観測結果について述べる。

3.1 観測方法

深層水取水管先端近傍の流速、流向および水温の測定を、**図-10**に示すように深層水取水口から30m離してフロート係留された水温センサ付きの流向流速計により、1988年12月7日から1989年12月15日までの約1年間実施した。流向流速計は記録器内蔵型のロータ型であり、流速、流向および水温のデータを毎正時10分間取得し、そ

の平均値を順次記録装置に収録した。そして、1年後に切離し、装置を作動させて回収した。

3.2 観測結果

図-11に、1988年12月7日から1989年10月8日までの約10カ月間における、水深約300mの底層域での流速、流向、流速の北方および東方成分、水温の経時変化を示す。

3.2.1 流速

時刻歴データによると、1988年12月から1989年5月中旬までの流速はそれ以降に比べて変動が大きく、最大流速11.0cm/sも1989年4月5日に出現している。また、N-COMPの経時変化記録から、このときには南向きの流速成分が卓越していた。前述したように、1986年12月に深層水取水管の設計・施工に先立ち行なった浅海域における48時間流速観測結果によると、水深50、100および260mの海底面上10mの最大流速はそれぞれ0.42、0.23

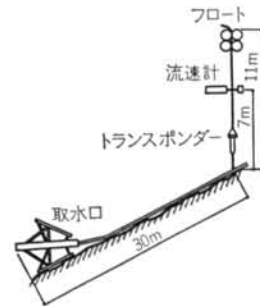


図-10 流速計設置状況

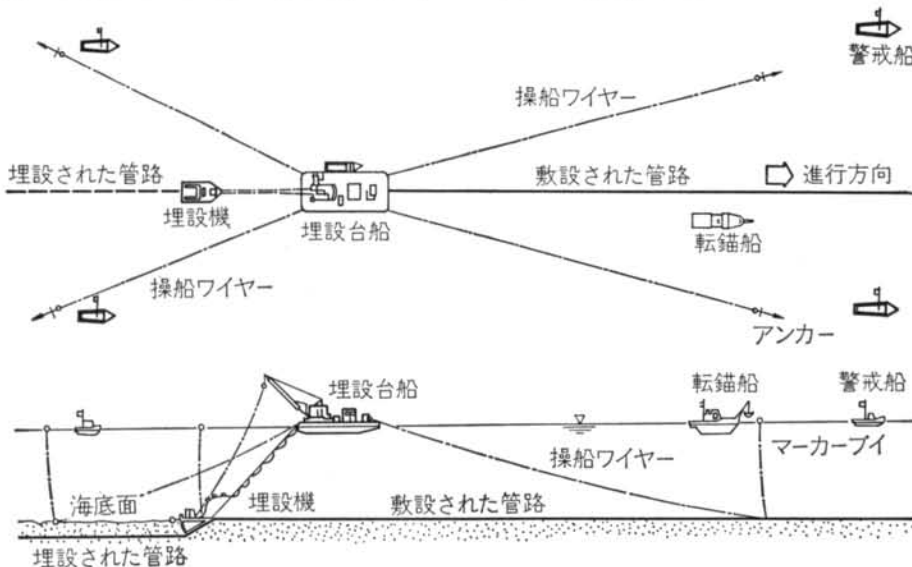


図-9 埋設作業図

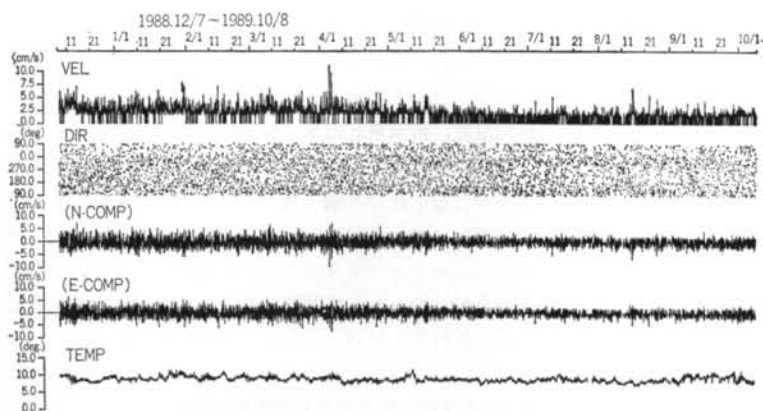


図-11 流速および水温の経時変化

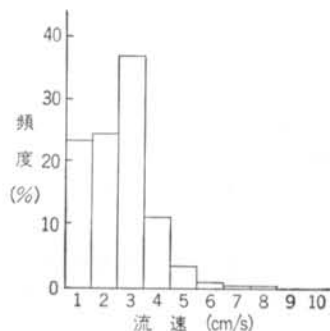


図-12 流速頻度分布

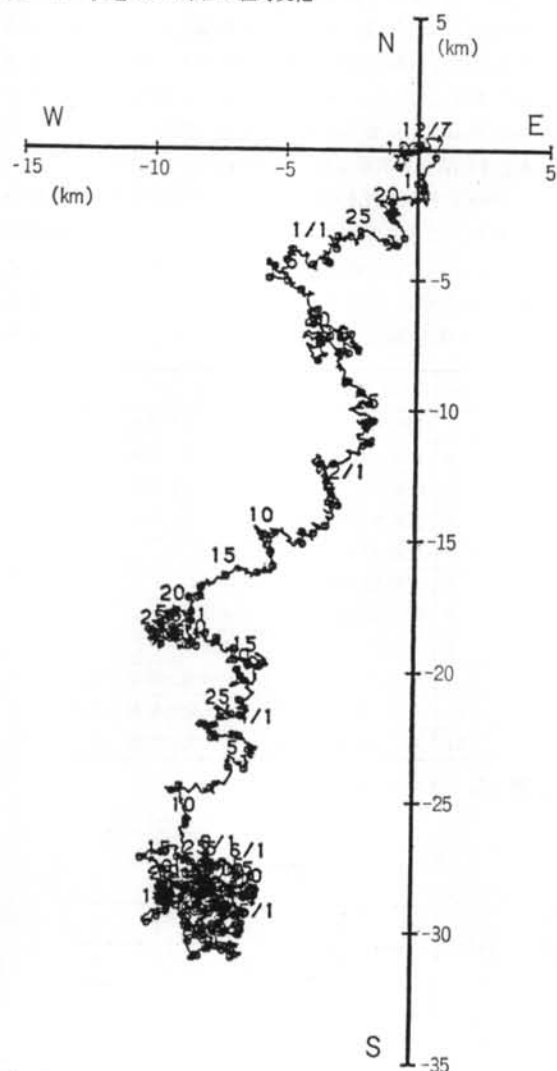


図-14 進行ベクトル

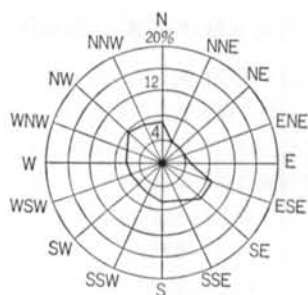


図-13 流向頻度分布

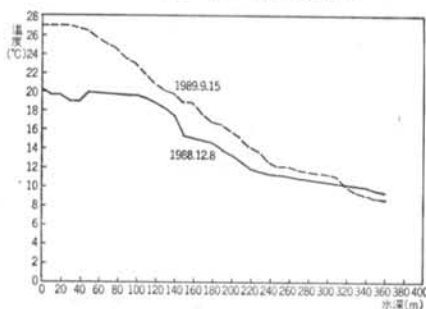


図-15 鉛直水温分布

および0.25m/sであり、これらに比べて今回の底層域の流速は微弱であった。図-12, 13に流速および流向の頻度分布を示す。2~3cm/sの流速の出現頻度が最も多く、全体の48%であった。また、6cm/s以下の流速が全体の95%の割合を占めていた。一方、流向は全方位で出現しているが、南東方向の流れが全体の25%を占めていた。図-14は全期間の流速の進行ベクトルである。全体的に南西向きの流れが卓越しているが、これはこの海域では室戸岬沖を通過する黒潮の一部が紀伊半島に衝突するため、反時計回りの環流が生じていると地元でいわれていることと一致している。しかし、こうした動きは1989年4月中旬までで、それ以降は殆ど変動が見られない。

3.2.2 水温

時刻歴データを見ると、1988年12月から1989年5月中

旬までの水温の変動がそれ以降に比べて大きく、流速の変動と密接に関係していることが分かる。しかし、その変動範囲は小さく、水深約300mの底層域での水温は年間を通して7℃(1989.4.11)~11℃(1989.5.11)の範囲であった。図-15は、XBTによる冬季(1988.12.8)と夏季(1989.9.15)の水温の鉛直分布を示したものである。海面水温は冬季で20℃、夏季では27℃と非常に変動が激しいが、水深約300mの底層域での水温は冬季も夏季もほぼ10℃程度であり、非常に安定している。

§ 4. 深層水取水装置の基本特性

深層水取水施設の開発・設計・施工は我が国で初めてのことであり、取水装置の運転状態における基本的な特性を知ることは、今後の取水装置の設計や深層水利用技術の研究進展に係わる基礎データを得るために重要である。特に取水地点から陸上施設までの水温上昇の程度、年間にわたる水温の変動状況、取水量の経年変化および取水に要する電力量などのデータは、今後の深層水有効利用技術の開発で予定している水温制御技術の開発や、運転コストの経済性の評価のために不可欠であり、これらの特性を明らかにすることを目的として取水装置の特性調査を行なった。

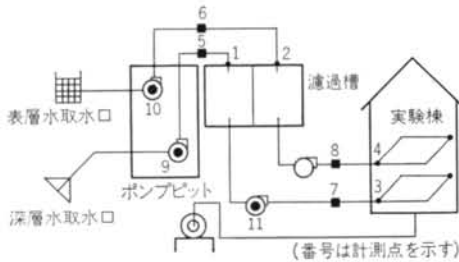


図-16 計測点配置図

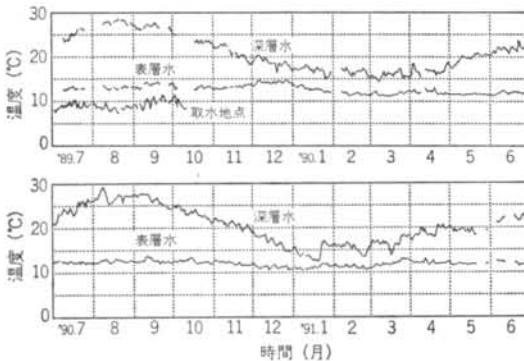


図-17 実験棟供給水温の変動

4.1 計測方法

取水装置の特性調査のための計測は研究施設完成後の1989年7月から始められ、深層水と表層水の陸上部での供給温度、取水量と取水に要する電力量などのデータを連続的に計測した。これらの計測は、濾過槽、機械室、実験棟などに設けた図-16に示す計測点で、表-5に示す計測器によって行なった。計測装置にはパーソナル・コンピュータとデジタル・データロガーを用い、5分間隔の自動計測とし、計測値は常時モニターできるようにした。これらの計測は現在まで継続されている。

4.2 実験棟供給温度の長期変動特性

1989年7月から1991年6月までの深層水と表層水の供給温度(計測点3, 4)の日平均温度と、深層水取水地点における水温の変動を図-17に示す。ただし、取水地点の水温は毎日12:00の値であり、1989年4月1日から1989年10月10日までのデータを示した。

4.2.1 深層水供給温度の変動特性

1989年度の深層水の供給温度は7月以降やや上昇傾向にあり、12月にピークを示し、以後3月末まで連続的に低下しているが、表層水と比べると年間の変動は少なく安定している。深層水の供給温度が12月にピークを示すのは、一般に海域の鉛直方向の温度分布で観測される水

No.	計測項目	計測器
1	深層水取水温度	シース型T熱電対
2	表層水取水温度	シース型T熱電対
3	深層水給水温度	シース型T熱電対
4	表層水給水温度	シース型T熱電対
5	深層水取水量	流速計
6	表層水取水量	流速計
7	深層水給水量	流速計
8	表層水給水量	流速計
9	深層水取水電力量	パルス発信型電力量計
10	表層水取水電力量	パルス発信型電力量計
11	深層水給水電力量	パルス発信型電力量計

表-5 計測点一覧

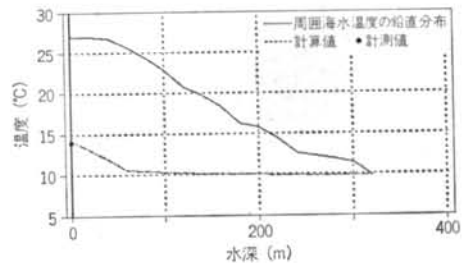


図-18 水温上昇計算の結果

深に依存した水温変動の季節的な遅れが影響していると考えられる。この期間の実験棟への深層水の供給温度は平均12.9℃であり、最高水温は15.2℃(1989.12.19/11:00)、最低水温は10.8℃(1990.3.8/23:00)であった。

1990年度のデータを1989年度と比較すると、深層水の供給水温は1989年には7月から12月にかけてやや上昇する傾向を見せているのに対し、1990年にはこの傾向が観測されず、むしろ12月から1月にかけて低水温を記録した。深層水の供給水温は、取水地点(水深320m)から陸上まで達する間に周囲海水との熱交換による影響を受ける。この期間の深層水供給水温の低下は、取水地点における深層水の季節的な温度変動よりも、この期間の表層水の水温低下による影響をより大きく受けたことによるものと推定される。1990年度の深層水の供給水温は平均で11.9℃、最高水温は14.2℃(1990.9.10/18:00)、最低水温は10.0℃(1991.2.26/23:00)であった。

1989年度からの長期観測より、深層水の供給水温には規則的な季節変動の傾向が見い出せないものの、その水温変化は10~15℃程度の範囲内にあり、陸上施設において年間を通して安定した水温で利用できることが明らかになった。なお、1日の間における深層水供給水温の変動は、季節によらず1℃以内であった。

4.2.2 表層水供給温度の変動特性

表層水の供給水温は夏期に最高値を示し、秋季から冬季に向けて徐々に低下し、3月には15℃程度まで低下しており、陸上気象の影響を受けて大きく変動していることが分かる。1989年度の表層水の平均供給水温は20.3℃であり、最高水温は29.7℃(1989.8.20/16:00)、最低水温は13.7℃(1990.3.8/9:00)であった。

一方、1990年度の表層水供給水温は平均で20.3℃、最高水温は30.3℃(1990.8.8/16:00)を記録し、最低水温は11.9℃(1991.1.19/6:00)であった。両年度の表層水供給水温の変動傾向を比較すると、1990年7月から11月までは1989年度と同様の傾向を見せているが、1990年12月から1991年1月中旬までの間は1989年度と比べて低めに推移し、1991年1月中旬には12℃程度まで低下した。これは、表層において冷水塊が一時的に観測されたものと推定される。その後、表層水供給温度は1月中旬以降急激に上昇し1989年度と同等程度に回復している。

4.2.3 取水地点からの水温上昇

深層水が取水地点から陸上部に達するまでの水温上昇の原因は、延長2650mにおよぶ取水管とその周囲の海水との伝熱によるものであり、周囲海水温度が季節によって変化するため、水温上昇の程度もこの影響を受けて

変化する。取水地点における水温(平均温度約9℃)との差から深層水の水温上昇を検討すると、冬期において1~2℃、夏期には4~6℃程度であった。

4.3 取水温度上昇の予測計算

一般に、ある雰囲気中に置かれた管路を流れる流体の温度は、微分方程式(1)を境界条件(2)で解くことによって式(3)のように求められる。

$$\pi \cdot D \cdot K \cdot (\theta_0 - \theta_w) dl = C_p \cdot G \cdot d\theta_w \quad \dots\dots(1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{境界条件: } l=0 \text{ のとき, } \theta_w = \theta_{en} \\ \quad \quad \quad l=L \text{ のとき, } \theta_w = \theta_{ex} \end{array} \right\} \quad \dots\dots(2)$$

$$\theta_{ex} = \theta_0 - (\theta_0 - \theta_{en}) \cdot \exp(-\pi \cdot D \cdot K \cdot L / (C_p \cdot G)) \quad \dots\dots(3)$$

ただし、

D : 管径(m)

K : 熱貫流率(kcal/(mf・hr・℃){W/(mf・K)})

C_p : 定圧比熱(kcal/(kg・℃){kJ/(kg・K)})

G : 流量(kg/hr)

L : 管長(m)

θ_0 : 雰囲気温度(℃)

θ_w : 管内流体温度(℃)

θ_{en} : 流体入口温度(℃)

θ_{ex} : 流体出口温度(℃)

取水温度の水温上昇の検討は設計段階において行なったが、実際の取水深度が計画と異なったため、また施設完成後に陸上における深層水の供給温度と海水の鉛直温度分布が計測されたことから、これらの計測結果をもとに水温上昇予測手法の検証を行なった。

検証に用いた海水の鉛直温度分布は、1989年9月15日に計測を行なったXBT(投込式水温・塩分・濃度計測器)の記録を用いた。取水管理設部の周囲温度は、底質の温度状況が不明であるため周囲海水の温度と同じとした。埋設深度が深くなると周囲海水との温度差が想定され、今後調査が必要な点である。海水の鉛直温度分布、計算結果と実験棟での深層水の供給温度(計測点3)を図-18に示す。

この結果、計算値は14.2℃となり、1989年9月15日の実験棟供給水温の日平均値13.8℃とほぼ一致し、取水温度と海水の鉛直温度分布が分かれば、陸上部での供給温度は設計段階で予測できることが確認された。

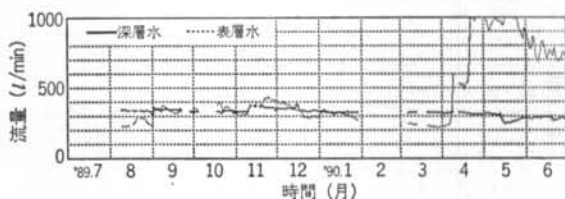


図-19 深層水と表層水の取水量

4.4 取水量と取水電力

1989年8月から1990年7月までの深層水、表層水の取水量と取水電力の日平均値の変化を図-19, 20に示す。

深層水の取水量はほぼ安定しており、変動が少ない。表層水の取水量は、流量計に短期間で汚れが付くため保守を中止した1990年4月以降は計測値が大きく乱れている。1990年4月以降の流量計測は、深層水、表層水とも超音波流量計による定期計測に切り換えた。取水電力は深層水、表層水とも若干の変動がみられるものの、ほぼ安定している。取水電力の変動要因は、波浪や気圧などの気象外乱による影響と思われる。

1989年度の計測結果から取水に要した電力は深層水で4.8kW、表層水で4.3kWであり、深層水の取水量は平均346.7l/分(20.8m³/h)、表層水の取水量は平均354.7l/分(21.3m³/h)であった。この結果、単位取水量あたりに要した電力量は深層水で0.25kWh/m³、表層水で0.20kWh/m³となり、深層水取水に要する電力量の方が15%程度大きかった。

1990年度の計測結果による取水電力は、深層水側が4.7kW、表層水側が4.5kWとなっている。超音波流量計の計測をもとにした1990年度の深層水の取水量は平均302.6l/分(18.2m³/h)、表層水の取水量は平均328.1l/分(19.7m³/h)であり、単位取水量あたりに要した電力量は深層水で0.25kWh/m³、表層水で0.23kWh/m³となり、両方とも1989年度に比べて増加の傾向が見られるが、その差は10%程度に減少している。取水電力の増加は、取水管の劣化や生物付着などによる配管の内表面摩擦抵抗の増加と考えられ、長期的な経年変化の特性を明らかにするために今後継続的な計測を行なっていく必要がある。

1990年度の計測結果より、四国電力の電力料金体系をもとに(26円/kWhとする)単位取水量あたりの電力料金を計算すると、深層水で6.5円/m³、表層水で6円/m³であった。

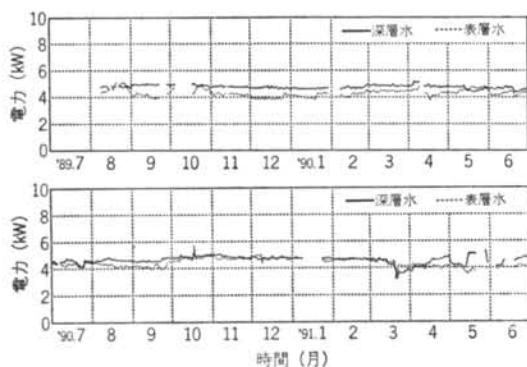


図-20 深層水と表層水の取水電力

§ 5. おわりに

我が国において初めての海洋深層水取水施設の設計・施工、底層域での流況観測および1989年度の施設の運用開始から現在までの2年半に及ぶ取水装置の特性調査と運転経験より、今後の取水施設の設計に係わる基礎データや貴重なノウハウを得ることができた。これらのデータは、今後の深層水有効利用技術の開発における施設の設計や、深層水利用の経済性評価などの基礎資料として価値のあるものである。

海洋深層水は、その特性から水産分野を始めとして空調、農業、化学、医薬品、レジャー、食品産業、海洋療法など多くの分野での利用が検討されている。しかし、これらの研究開発は開始されて間がなく、建設費を含めた経済性を考えると現状では経済的に成立するまでには至っていない。深層水利用の経済性の評価は、初期建設コスト、運用コストと生産利益を総合して考慮する必要があり、今後は経済的な深層水取水施設の開発に一層の努力をするとともに、現状では不明な深層水の利用効果の定量化を、用途開発研究を通して強力に進めて行く必要がある。また、陸上利用施設における深層水の多段式利用やカスケード利用、集約的な生産方法など、生産工程での経済性向上のための技術開発も重要となる。

一方、今後の深層水利用の規模の拡大を考えると、生産施設で利用した後の排水が沿岸域におよぼす影響の評価が不可欠であり、沿岸域における放出水の挙動評価手法の研究が、また浅海域での利用を考える場合には、沿岸域での藻場造成や藻類生産のための海域制御技術の研究開発が必要となる。

陸上設置型深層水利用技術の研究開発は、第1期の「深層水取水施設の開発」、第2期の「深層水利用・生産技術の開発」、第3期の「浅海域利用技術の研究開発」という計画で進められており、現在は第1期を終了し、第2期を進めている段階である。今後は、第2期に残された課題の研究開発を進めて行くとともに、将来の工程として想定している第3期の研究開発へ向けて研究計画を進展させて行く予定である。

謝辞 本研究は、海洋科学技術センターとの共同研究の一部である。調査の実施に当たっては、高知県海洋深層水研究所の方々にご協力をいただいた。また、海洋深層水取水装置の設計・施工は当社が担当したものである。これらの関係各位に、感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) J. H. Ryther: "Photosynthesis and Fish Production in the Sea" Science, Vol. 166 (1969)
- 2) 中島敏光, 豊田孝義: "深層水利用による海域の肥沃化" 海洋科学技術センター試験研究報告資料 No. 3 (1979年)
- 3) O. Roels: "Artificial Upwelling" Sea Grant NOAA #1-35354 (1974)
- 4) R. A. Nove, R. C. Clasby, J. J. Goering & D. W. Hood: "Enhancement of Primary Productivity by Artificial Upwelling" Marine Science Communications (1976)
- 5) National Energy Laboratory of Hawaii: "Annual Report" (1983)
- 6), 7) 海洋科学技術センター, 清水建設, 日本水産, 日本郵船: "深層水有効利用技術の実用化に関する研究—海外の研究開発動向調査—" 海洋科学技術センター (1989年)
- 8) 海洋科学技術センター: "海洋生物生産のための深層水利用技術に関する研究" 内部資料 (1984年)
- 9) 海洋科学技術センター: "深層水利用による *Chaetoceros ceratosporum* の連続培養について" 内部資料 (1985年)
- 10), 11) 海洋科学技術センター, 清水建設: "深層水供給システムに関する調査研究" 海洋科学技術センター (1986年)

