

日本海深層水と内部波の挙動解析

The Characteristics of Internal Waves in the Sea of Japan.

瀬戸雅文*・大竹臣哉**・奥野充一***・中村充**

Masabumi Seto, Shinya Otake, Zyuichi Okuno and Makoto Nakamura

Abstract

The characteristics of the internal waves that propagate on the density interface in the Sea of Japan around Hokkaido are studied in this paper. The survey ship enforced the observation of internal waves. Wave height of the internal wave was measured about 34 meter over. Calculating biological productivity of case that upwelling deep sea water by utilizing the energy of internal waves, promising sea area to utilize deep sea water artificially was selected.

Keywords: nutrient, internal wave, density interface

1. はじめに

近年、底層水の栄養塩を人為的に有光層まで湧昇させることにより、海域の基礎生産力の向上や水産餌料環境の底上げなどに基づく広域的な漁場の形成を目指した試みを実施されはじめている。本研究は、北海道日本海をケーススタディとして日本海深層水の自然エネルギーによる人為的湧昇の可能性、及び生物生産性について検討したものである。北海道日本海は、潮位変動が他の海域と比較して極端に小さい反面、密度躍層面に内部波が発達し、津軽海峡の脈動流を起源として推定される内部波エネルギーは、潮汐波と同等以上のエネルギー量で安定的に存在していることが前回の報告で明らかにされている¹⁾。本報告では、北海道深層水の形成状況について更に詳細に検討するとともに、調査船を配して内部波の直接観測を実施した。更に、既存の人工湧昇流発生構造物を指標として内部波の伝搬に伴う流れエネルギーより発生する湧昇流の規模や新たな生物生産量を試算し、湧昇利用のための有望海域について検討した。

2. 北海道深層水の形成状況

2-1. 利用水深

北海道日本海を巨視的に検討すれば、対馬暖流の消長に依存する上層部（平均 150~200m 程度）とそれ以深の周年的に安定な日本海深層水（日本海固有水）でモデル化される。図-1 は、津軽海峡西側端部の定点 (41N, 140E) における $\sigma_t = (\rho - 1) \times 1000$, ρ : 大気圧下における現場海水密度) の鉛直分布の季節変化を示したものであるが、 $\sigma_t = 27.0$ 付近を境として季節躍層が発達していることがわかる。また、前回の報告¹⁾より、深層水に溶存する各種栄養塩類は、北海道日本海の何れの定点においても $\sigma_t = 27.0$ 等密度面に対応する濃度はほぼ一定の値（磷酸塩 $0.8 \sim 1.0 \mu\text{g-at/l}$, 硝酸塩 $10.0 \mu\text{g-at/l}$, 珪酸塩 $15.0 \mu\text{g-at/l}$ ）をとることがわかっている。従って、 σ_t の鉛直分布を $\sigma_t = 27.0$ で基準化し、栄養塩濃度の鉛直分布を $\sigma_t = 27.0$ 等密度面における値で基準化すれば、 $\sigma_t = 27.0$ 等密度面の形成水深がわかれば任意の水深における栄養塩濃度を推算することが可能となる。図-2 は、北海道日本海の各沿岸域における $\sigma_t = 27.0$ 等密度面の存在水深の年最大値、最小値、平均値、更に等密度面の年最大変動幅を示したものである。これより、等密度面は積丹半島以南で平均 150m 程度、以北では徐々に上昇しながら稚内では平均 80m 程度へ達している。また、局所の変動としては、奥尻島、及びその東岸に位置する熊石~瀬棚の檜山海域で

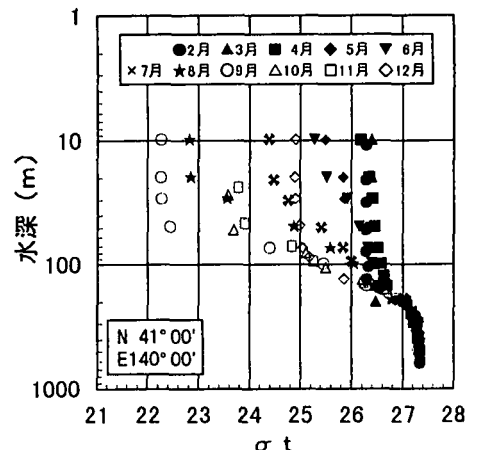


図-1 σ_t の季節変化

* 正会員 北海道立中央水産試験場 水産工学室 (046-0021 北海道余市郡余市町浜中町 238)

** 正会員 福井県立大学 生物資源学部 海洋生物資源学科

*** 福井県立大学大学院

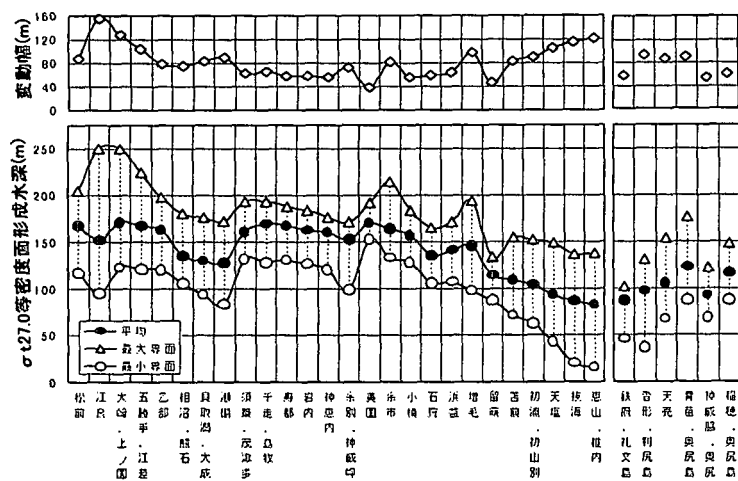


図-2 $\sigma_t 27.0$ 等密度面の形成状況

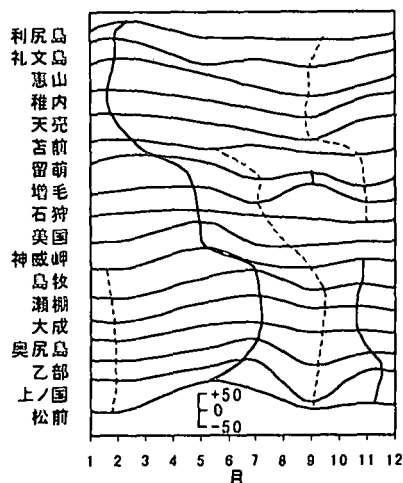


図-3 等密度面季節変化

周辺と比較して 40~50m 程度密度面が上昇している。また、密度面の年変動幅は、南北両端で増大する傾向が認められるが、これは津軽・宗谷両海峡付近における流量の分配機構に起因しているものと考えられる。図-3 は、各海域における $\sigma_t 27.0$ 等密度面の月変動特性を示したものである。等密度面の動態は、津軽暖流と分岐後北上する対馬暖流の消長と密接に関わりながら変動している。一般に津軽暖流量は 3 月最小、9 月最大、宗谷暖流量は 12~2 月最小、5~夏季にかけて最大となり、後者は前者より 2~3 ヶ月変動の位相が進んでいるが、等密度面の季節変動もこれと同様な傾向を呈している。また、瀬棚の北側に位置する茂津多岬、積丹半島先端の神威岬、苫前付近を境に季節変動の位相が急変しており、同海域を境に季節変動の周期的な性質も違っている。更に、石狩湾の湾口部に位置する美国周辺と雄冬岬北側に位置する留萌周辺で年変動が極めて小さい海域が存在していることがわかる。図-4 は、透明度の既存海洋観測データより補償深度を各海域毎に計算し示したものである。補償深度は、植物プランクトンが光合成によって生存可能な光エネルギーを得られる最大深度を指し、一般に海面に到達した太陽光の 1%~0.1% が到達可能な深度と言われており、北海道日本海海域においては、概して 4 月に最低値、9~10 月に最大値をとる。北海道日本海は他の海域と比較して透明度が卓越し、9 月の最大時には 24m 程度と太平洋側の 2 倍程度まで達している。

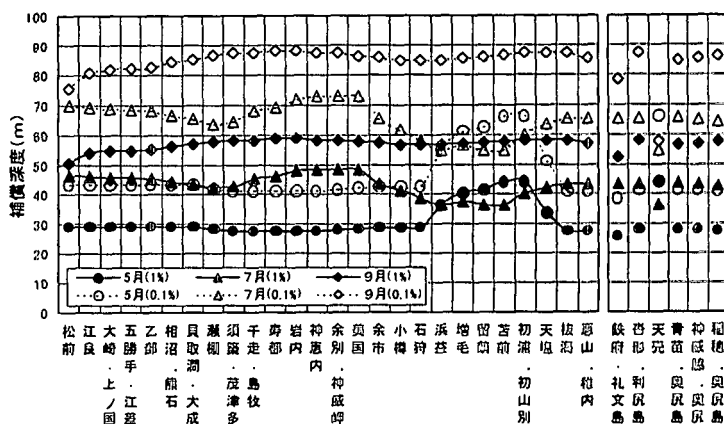


図-4 補償深度の季節変化

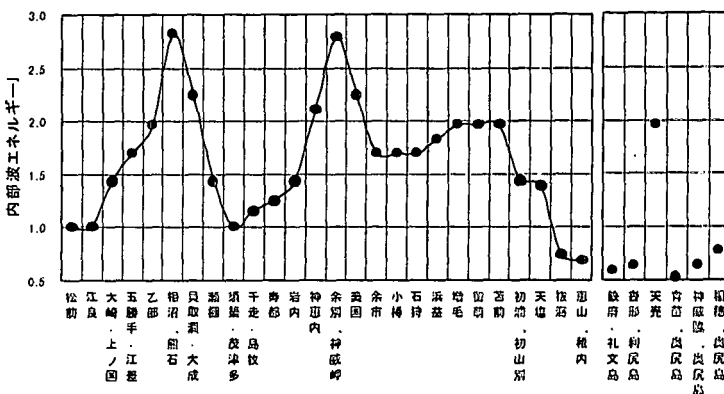


図-5 内部波エネルギーの分布状況

2-2. 内部波特性及び有望海域

図-5 は、津軽海峡入り口付近の内部波エネルギーを基準とした、各海域における内部波エネルギー分布を示したものである。内部波の計測は、コリオリ力を再現可能な大型回転水槽（福井県立大学所有、直径 8 m のターンテーブル上に縦 6.3m 横 4.0m、最大水深 1.0m の矩形水槽が固定されている）を使用して実施した（詳細については前報¹⁾参照）。図-5 より、乙部~大成、及び神恵内~美国周辺に内部波エネルギーの収束域が存在して

いることがわかる。前者の奥尻海峡周辺では、内部波の発生源が近いため大きな減衰なしに内部波が到来し、海峡地形による狭窄が内部波の発達や密度界面の上昇を促したと考えられる。また後者の積丹半島周辺海域は、内部波の屈折によるエネルギーの集中が波高値の増大を促したものと推察される。

一般に、深層水に含まれる栄養塩濃度は、水深が深くなるに従って増大するが、湧昇方式による利用は、深層水が光の補償深度以浅まで人為的に湧昇することにより効果を発揮できる。従って、栄養塩が十分な濃度で安定的に存在している水深帯と補償深度の差（湧昇必要高さ）が小さいことが湧昇利用の適地選定の重点となる。更に、内部波を利用して湧昇流の発生や内部砕波による上下混合の促進を図るためには、内部波エネルギーが収束していることが選定要素となる。

図-6は、図-2～図-5の結果をもとに、内部波エネルギー基準点において内部波の振幅が20mの場合の湧昇必要距離を示したものである。これより、 $\sigma_t 27.0$ 等密度躍層の形成が顕著となる7月～9月にかけての平均的な湧昇必要高さが小さくなる海域として、鉄府（礼文島）、稲穂（奥尻島）、大成、瀬棚、などが上げられる。

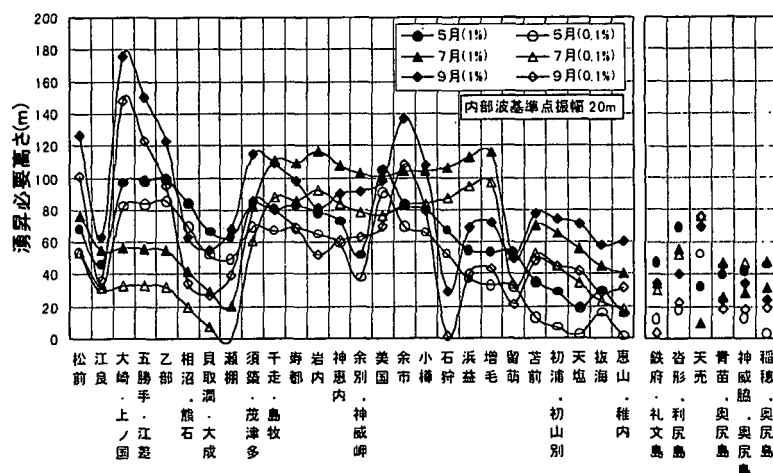


図-6 湧昇必要高さ

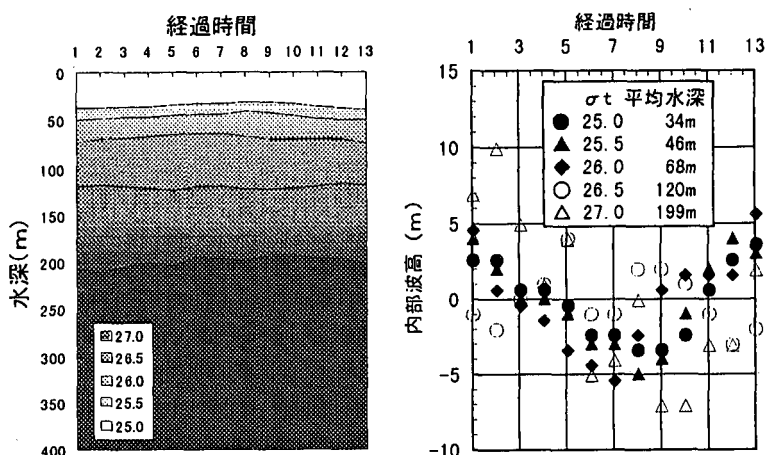


図-7 等密度面の経時変化(N43° 30', E140° 20')

3. 内部波観測

3-1. 調査方法

平成9年9月16日～17日の期間内において、北海道立中央水産試験場所属の調査船おやしお丸（178ton）を用いて、積丹半島沖の定点（北緯 43° 30'，東経 140° 20'）においてCTD (Sea-Bird's 911 plus)を用いた内部波の直接観測を実施した。観測方法は、1時間間隔でCTDを0～500mまで降下させ、水温・塩分・海水密度の鉛直分布を連続的に計測するもので、当初24時間以上の連続観測を実施する予定であったが、台風19号の接近に伴う天候悪化のため12時間の連続観測に短縮された。

3-2. 調査結果

図-7は観測期間中の密度鉛直分布の経時変化を示したものである。これより、各等密度面には周期的な変動が認められ、かつ上下層と連動しながら変動していることがわかる。更に、各等密度面の平均形成水深を基準とした場合の密度偏差の経時変化をプロットすると右図となる。これより、密度躍層は連続成層的に運動し、各等密度面ともに12時間で半周期程度の周期性が認められ、また最大振幅は $\sigma_t 27.0$ 等密度面上に形成され、17m程度（波高換算で34m程度）の内部波が観測された。

4. 深層水の湧昇利用

4-1. 検討方法

北海道日本海において深層水を用いた湧昇利用を検討するためには、各市町村等の沿岸漁業振興計画との整合性や、既存の沿岸漁場造成施設等との関連性を考慮した上で、漁獲増加目標の設定など利用規模や効果について検討する必要がある。しかしながら、本研究においては、本道日本海沿岸域の各地先において、深層水の栄養

塩を人為的に湧昇し、生物生産力の向上に結びつけることが可能か否かを検討することに重点を置き、そのための指標として、既存の人工湧昇流発生構造物を各沿岸地先に1基設置した場合の有効性等について検討する。これまでに衝立型、マウント型、円筒型、円錐型、シート型などの様々な形状・特性を有する人工湧昇流発生構造物が提案されているが、内部波エネルギーの利用を目的とした構造物に関する研究はほとんど実施されていない。そこで、今回は実海域における報告のある複列衝立型構造物²⁾(衝立高さ10m、設置最大幅45m)を指標構造物として、以下の手順で検討した。①σ_t27.0等密度面の形成水深を基準に栄養塩濃度の鉛直分布を与える。②内部波の波動運動より指標構造物の設置水深帯に発生する水平流速を計算する。③内部波により発生する水平流速をもとに指標構造物に発生する湧昇流量を計算する。④湧昇流量及び指標構造物設置水深帯における深層水の栄養塩濃度をもとに栄養塩の補償深度で浅への輸送量を計算する。⑤指標構造物の設置水深を変化させながら、各月毎に上記の計算を実施し、年間を通して栄養塩の補償深度で浅への輸送量が最も多くなる設置水深を決定する。

以上の計算を各沿岸海域ごとに実施すれば、指標構造物の最適設置水深、及び湧昇効果を推算することができる。内部波により発生する水平流速は、北海道日本海沿岸海域の海洋構造を深層水と上層水の上下2層の密度成層でモデル化し、密度境界面を伝播する内部波により生ずる水平流速を使用した。また、内部波が沿岸域に接近し、下層の層厚が次第に小さくなると、下層側の水平流速は急激に増大するが、流速値は内部波の波速以上には発達しないものと考えられるため、内部波の波速を水平流速値と見なし、かつ、近似的に上層層厚 h_1 を $h_1 - \eta_{max}$ 、下層層厚 h_2 を η_{max} と置き換えて次式により水平流速を計算した。

$$u_{max} = \sqrt{eg \frac{(h_1 - \eta_{max}) \eta_{max}}{h_1}}$$

ここに、 η_{max} は内部波による下層層厚の最大増加量であり、内部波の波高値として近似的に与えた。また、 ε は $(\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ 、 $\rho_{1,2}$ は上層及び下層の海水密度である。内部波の波高(振幅)については、現段階では確定できないため、図-5の内部波エネルギー基準点における内部波振幅を10m、20m、30mと変化させた場合の各々のケースについて検討した。今回対象とした指標構造物の湧昇特性については、水理模型実験に基づいた評価がなされており²⁾、湧昇効率(構造物の壁面と垂直に衝突した流量(構造物の幅×高さ×水平流速)が、ある湧昇高さ以上まで上昇する割合)などが求められている。従って、補償深度まで到達する湧昇流量、及び湧昇流とともに補償深度まで輸送される栄養塩量は、湧昇高さを0.1%補償深度までの湧昇必要距離として湧昇効率を用いて以下ようになる。

- ・湧昇流量(m³/s) = 湧昇効率×構造物の横幅(m)×高さ(m)×底層流速(m/s)
- ・湧昇栄養塩量(ton-at/月) = 湧昇流量(m³/s)×底層栄養塩濃度(μg-at/m³)×10⁻⁹×60×60×24×各月の日数

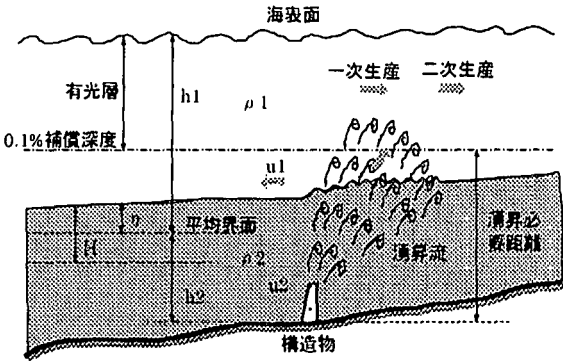


図-8 湧昇利用概念図

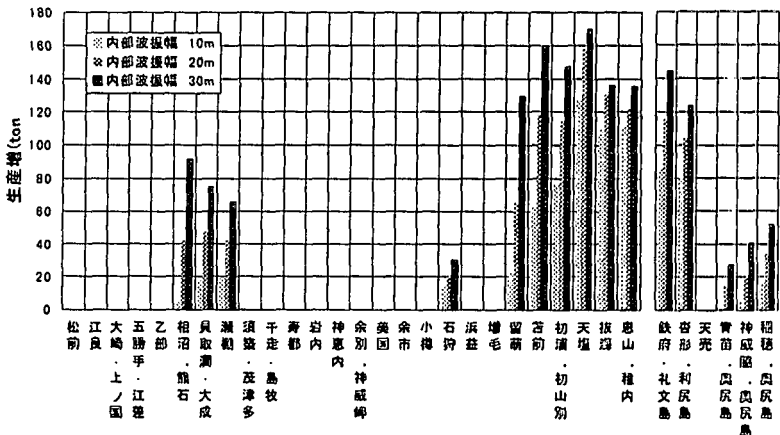


図-9 生物生産増の試算結果

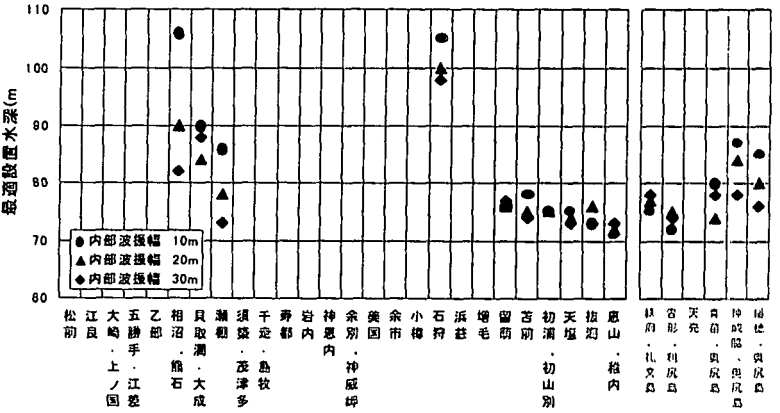


図-10 施設最適設置水深

4-2. 湧昇利用の可能性

指標構造物設置による効果を推定するためには、補償深度以浅に添加された栄養塩が周辺生態系に及ぼす効果を把握する必要がある。Ishizaka ら³⁾は模擬湧昇水中でNの値を変化させた場合の植物プランクトンの増殖応答について検討を行い、最大クロロフィル量 ($\mu\text{gchl}a/l$) とN ($\mu\text{g-at}/l$)濃度の関係式を導いた。また、植物プランクトンのクロロフィル a 量 ($\mu\text{gchl}a/l$)と炭素 ($\mu\text{g-at}/l$)の比についてはいくつかの知見があり (例えば Strickland⁴⁾)、植物プランクトンの種類や生理条件に依存して 2.9~4.2(炭素の単位が $\mu\text{g}/l$ であれば 35~50)の値をとる。従って、Nを指標とする栄養塩 ($\mu\text{g-at}/l$)から、炭素量換算で 4.0~6.3 倍の純一次生産 ($\mu\text{g-at}/l$)が得られることとなる。更に、炭素量と植物プランクトン生重量との換算より植物プランクトン生重量としての一次生産量を計算する。植物プランクトンにより生成された有機物は、食物連鎖を通して様々な消費者に受け渡されてゆくが、食物連鎖の栄養段階数と各段階への転換効率の関係についてはいくつかの知見がある。Ryther⁵⁾は、一次生産の大きさの違いに着目して、海洋を外洋域、沿岸域、湧昇域の3つの海域に分類した上で、湧昇域が最も栄養段階が少なく1.5段階、次いで沿岸域の3、外洋域の5とした。更に、一次生産から最終栄養段階までの平均転換効率については、湧昇域で20%、沿岸域で15%、外洋域で10%と試算している。また、本道日本海沿岸域における湧昇流発生の効果は、スケトウダラ、ホッケ、ハタハタ、ニシンなどの各魚類で構成される浮遊生態系、及びウバガイ、エゾバカガイなどの二枚貝、タコ類、などで構成される底生生態系に影響を及ぼすが、浮遊系から底生系への栄養供給について、Riley⁶⁾は Long Island Sound において一次生産の30~40%がベントスにより消費されていると推算した。更に、Berger ら⁷⁾は、補償深度以浅で固定された炭素量の補償深度以深への沈降量について、外洋域で10%、沿岸域で25%が沈降していると推定している。これらの結果より、本報告においては各栄養段階の転換効率は浮遊、底生生態系の何れにおいても0.15(沿岸域の値)、更に一次生産(浮遊生態系)から底生生態系への移送効率は30%として検討する。また、浮遊、底生生態系の何れにおいても2栄養段階と3栄養段階について検討し、各生態系におけるそれらの割合を半々として算定した。本道日本海沿岸の各海域ごとに、深層水に溶存する栄養塩の湧昇効果を算定し、補償深度以浅まで湧昇した栄養塩に基づく新たな生物生産増を算定した結果を図-9に示す。また、各海域ごとの指標構造物の設置水深(年間を通して最も湧昇効果が最大となる施設の設置水深)を図-10に示す。これより、有望海域を中心として生物生産増の見込まれる海域が推定された。また、何れの海域においても指標構造物の設置水深は75~100m程度となり、既存の沿岸漁場造成事業が実施されている水深帯でもあることから施工技術的には現有技術を応用・開発するなどして対応できるものと考えられる。また、試算された生産増は周辺海域の年間漁業生産量の数千分の1~数百分の1程度とかなり大きな値となっているため、今後、自然死亡率や漁獲率などの効果を慎重に検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では、北海道日本海の海洋観測データの解析及び水理模型実験をもとに、日本海深層水を人為的に湧昇させるためのエネルギーとして内部波エネルギーの利用が有望であることを明らかにするとともに、湧昇効果の程度について検討を試みた。その結果、熊石~瀬棚、石狩、留萌以北の海域で深層水を用いた湧昇利用の可能性が示唆され、特に、苫前~天塩にかけての海域は有望海域として位置付けられた。また、今回実施した海洋観測より内部波の存在が確認できたが、その挙動を正確に把握することは本調査で開発された手法を有望海域に適用し湧昇効果を検討するために極めて重要である。従って、海洋観測を中心に内部波調査などを実施して、有望海域における内部波の動態をより詳細に解明していく努力が望まれる。

参考文献

- 1) 瀬戸雅文・大竹臣哉・奥野充一・中村充(1997): 日本海栄養塩の内部波による沿岸輸送について、海洋開発シンポジウム論文集, 第13巻, pp.165-170.
- 2) (社)マリフォーラム 21(1992): 人工湧昇流発生パイロット事業報告書, 339p.
- 3) Ishizaka, J., M. Takahashi and S. Miyachi (1983): Evaluation of coastal upwelling effects on phytoplankton growth by simulated culture experiments, Mar Biol., Vol. 76, pp.271-278.
- 4) Strickland, J. D. H. (1969): Chemical Oceanography I, Academic Press, London and New York, pp.477-610.
- 5) Ryther, J. H. (1969): Photosynthesis and fish production in the sea, Science, Vol. 166, pp.72-77.
- 6) Riley, G. A. (1956): Oceanography of Long Island Sound, 1952-1954, IX, Production and utilization of organic matter, Bull. Bingham Oceanog., Vol. 15, pp.324-344.
- 7) Berger, W. H., V. S. Smetacek and G. Wefer (1989): Ocean productivity and paleoproductivity (1989): John Wiley & Sons Ltd., pp.1-34.