

石狩湾周辺海域における内部波の形成と湧昇流の発生機構

THE GENERATION MECHANISM OF INTERNAL WAVE AND UPWELLING IN THE ISHIKARI BAY CIRCUMFERENCE

瀬戸雅文¹・大竹臣哉²・奥野充一³・中村充²

Masabumi SETO, Shinya OTAKE, Zyuichi OKUNO and Makoto NAKAMURA

¹正会員 水博 北海道立中央水産試験場 水産工学室 (〒046-8555 北海道余市町浜中町 238)

²正会員 農博 福井県立大学 海洋生物資源学科 (〒917-0003 福井県小浜市学園町 1-1)

³ 福井県立大学大学院 海洋生物資源学科 (〒917-0003 福井県小浜市学園町 1-1)

Observation of an internal waves was carried out by a baymouth of the Ishikari bay. In order to ask for the internal wave height of the Ishikari bay and the Shakotan peninsula circumference ocean space, the Coriolis tank was used and Hydraulic model test was carried out. Consequently, the internal waves of a reverse phase angle was observed the almost same period as tide waves in the 40m of the maximum wave height. Moreover, internal wave energy concentrates and the ocean space of 80m or more of wave height accepted to the Ishikari bay and the Iwanai bay. By this investigation, possibility of upwelling utilization using internal wave energy was verified.

Key Words: Internal wave, Upwelling, Isikari bay, Hydraulic model test

1. はじめに

前回までの報告^{1),2)}により, 北海道日本海における深層水の汲み上げ, 及び湧昇利用のための適地が検討されてきた。さらに, 湧昇利用に対しては, 太平洋など他の海域と比較して潮位差が極めて小さく, かつ季節による波浪変動が極めて大きい特徴を有する日本海において, 深層水の栄養塩を人工構造物などによって安定的に有光層以浅まで湧昇させるために利用可能な自然エネルギーとして, 内部波エネルギーの有効性が示された。本研究では, 北海道日本海に位置する石狩湾および積丹半島周辺海域を対象として, 湾口部にサーミスターチェーンを設置するとともに, 湾奥部に配置されたテレメータブイを用いて, 内部波の連続観測を実施するとともに, 水理模型実験を実施して, 積丹半島から石狩湾周辺海域に及ぶ内部波高の平面分布特性を明らかにした。更に, 気圧, 潮位, 密度構造データをもとに当該域における湧昇流の発生機構についても考察した。

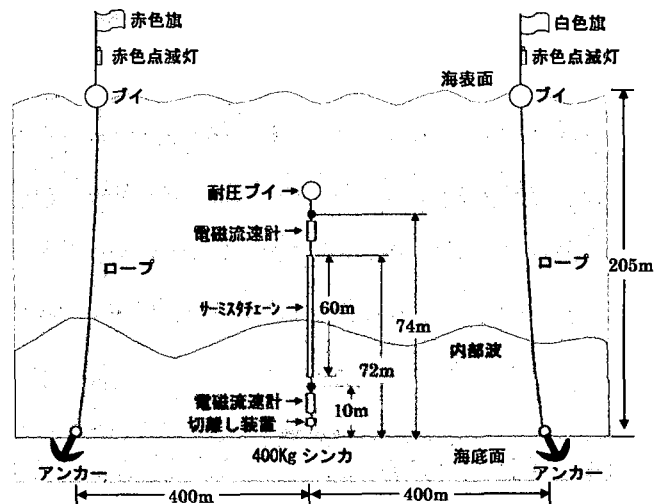


図-1 内部波観測用係留系

2. 方法

(1) 海洋観測による調査方法

今回使用した内部波観測用の係留系は, 北海道立中央水産試験場所属のおやしお丸によって, 石狩湾湾口部の水深205mの地点に平成10年9月7日に設置した。係留系の概要図を図-1, 設置位置図を図-2

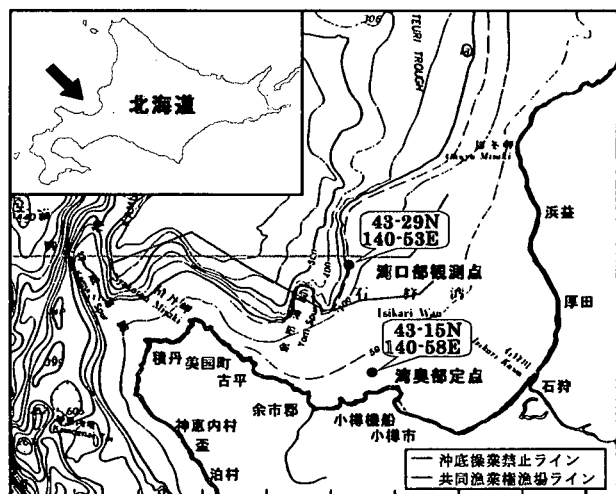


図-2 内部波観測位置図

に示す。調査では、海底面より係留系を鉛直に立ち上げ、底面上 10m 上方に自記式電磁流速計を固定した上で、その上端より約 60m 上方までの区間に亘ってサーミスタチェーンを設置し 2m ピッチで断面水温変動を記録した。更に、サーミスタチェーンの上端にも電磁流速計を設置し、内部波の上下層における変動流速を計測した。係留系は、同月 22 日に回収後、福井県立大学に輸送し記録データを解析した。

更に、北海道立中央水産試験場により、小樽沖の石狩湾湾奥部（北緯 43 度 14.9 分、東経 140 度 58.0 分、水深約 40m）に設置された、テレメータブイを用いて、表層及び鉛直 5m ピッチの断面水温変動データを収集・解析し、当該域における内部波の季節的消長や湾口部の内部波変動との関係などについて検討した。

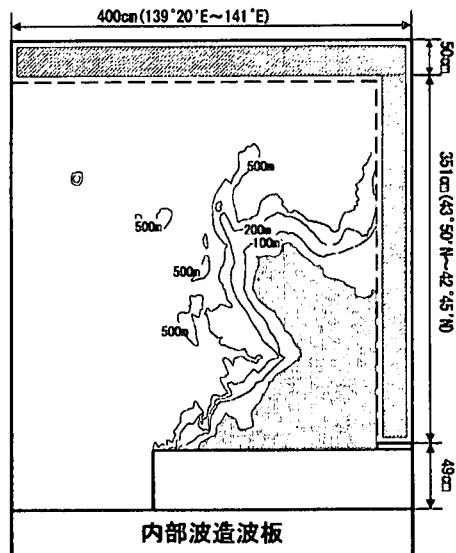


図-3 水理模型実験概要図

(2) 水理模型実験による調査方法

供試模型は、図-3 に示すように、積丹半島周辺～石狩湾に及ぶ北緯 42 度 45 分～43 度 50 分、東経 139 度 20 分～141 度 0 分の海底地形模型（水平縮尺 1/38474、鉛直縮尺 1/2500）を福井県立大学所有の回転水槽（直径 8 m）内に再現し、真水と塩水（密度 1.002）で日本海の海洋構造を二層近似した上で、相似則をもとに周期 109 秒で水槽を回転させながら、内部波発生装置で密度界面上に現地換算で 24 時間周期の内部波を形成し、内部波高計及び導電率計を用いて対象海域における内部波高の平面分布及び波向きを計測した。

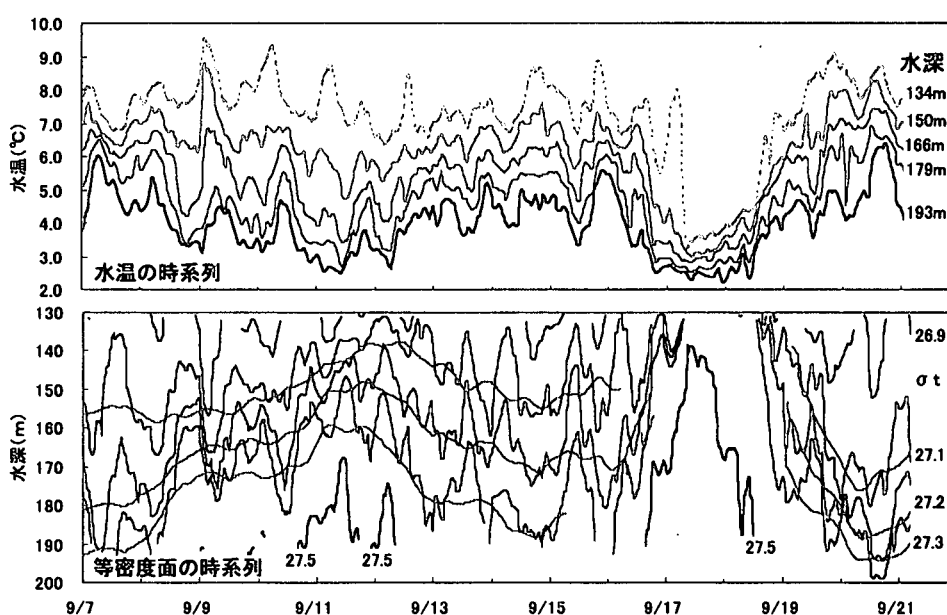


図-4 水温及び等密度面の時系列（湾口部）

3. 結果及び考察

(1) 湾口部における内部波の諸特性

石狩湾湾口部の内部波観測期間中における水温の時系列、及びこれより計算された等密度面の変動状況を図-4に示す(ここに、 $\sigma_t = \{(\rho - 1) \times 1000\}$, ρ (g/cm³):海水密度)。図より、各等密度面は周期的な変動が認められる。更に、9月17日~19日にかけて大規模な湧昇が発生し、これに伴い海底近傍より等密度面が約80m以上浅い水深帯まで急上昇し、例えば水深134mにおいては短期間(3~4時間)で約5℃程度の急激な水温低下が生じている。

図-5は、湧昇期以前(9/7~9/15までの期間)の $\sigma_t 27.1$ の変動より24時間の移動平均に基づくトレンド成分を消去後のパワースペクトル、及び潮位と同等密度面の相互相関を計算したものである。

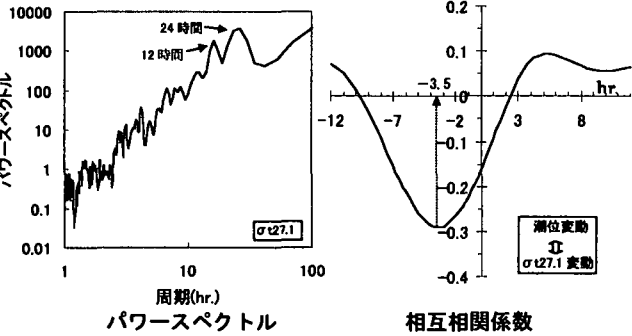


図-5 内部波の諸特性

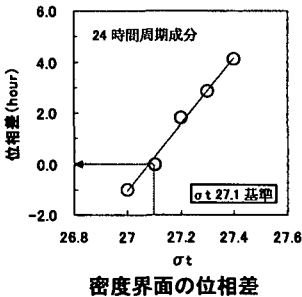
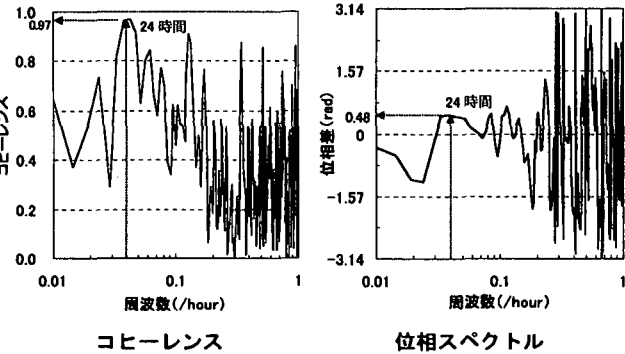


図-6 内部波相互の位相関係

これより、 $\sigma_t 27.1$ の変動は、潮位変動とほぼ逆位相で、潮位変動と同様に24時間及び12時間周期成分が卓越する内部潮汐波と考えられ、観測期間中

の最大波高は30~40m程度を記録した。

図-6の上図は、 $\sigma_t 27.1$ 等密度面と $\sigma_t 27.2$ 等密度面上に形成される内部波のコヒーレンスと位相スペクトルを示したものである。これより、内部波の主体成分で関連性の大きい24時間周期は $\sigma_t 27.2$ が $\sigma_t 27.1$ の内部波変動より約0.48rad位相が進んでいることがわかる。同様に $\sigma_t 27.1$ を基準に各密度面上に形成される内部波の位相差を示したものが図-6下図である。これより、位相は σ_t が大きくなるに従ってほぼ線形的(勾配13.1hr./ σ_t)に進む傾向が認められる。

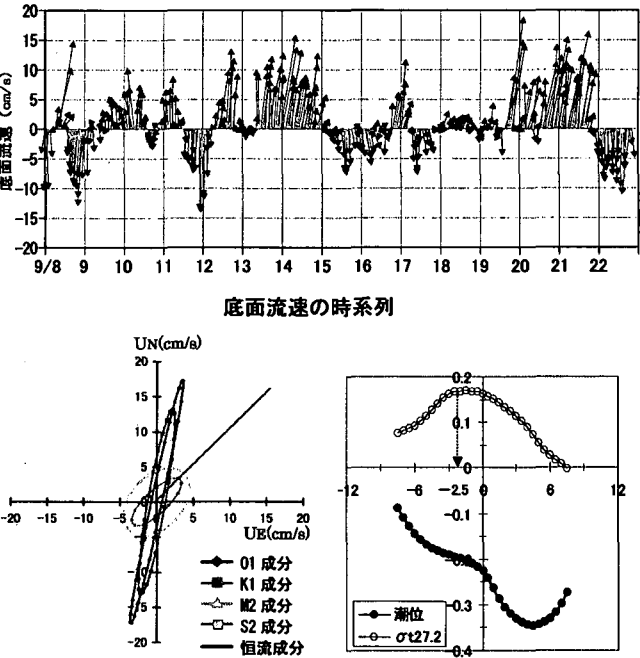


図-7 底面流速の諸特性

図-7上図は、サーミスタチェーンの下端(水底より約10m上方)における内部波観測期間中の水平流速の経時変化を示す。左下図は、流速の時系列を調和解析し潮流楕円で示したものである。

これより、底面流速の時系列も水温変動などと同様に周期的な変動を示し、潮流楕円より、当該域においてはO₁潮、K₁潮が卓越し、24時間周期(流速振幅で15cm/s程度以上)が強いことが示された。更に、流軸は、ほぼ南北方向に形成されるとともに、恒流成分は北東方向に存在し、強さは23cm/s程度であった。また、図-7右下図は、流速時系列の南北成分に対する潮位変動と $\sigma_t 27.2$ 等密度面変動の相互相関係数を示したものである。これより、流速変動は潮位変動とほぼ逆位相の関係になるのに対して、等密度面変動とは約2.5時間程度位相差が進みながら変動しており、底面流速の変動成分は主として内部波により形成されていることがわかった。

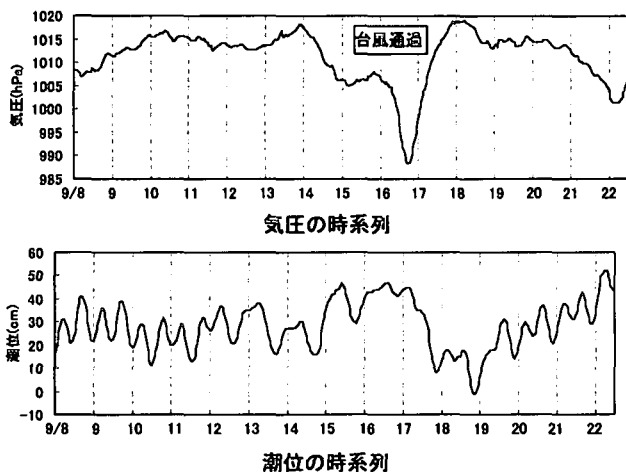


図-8 気圧及び潮位の時系列

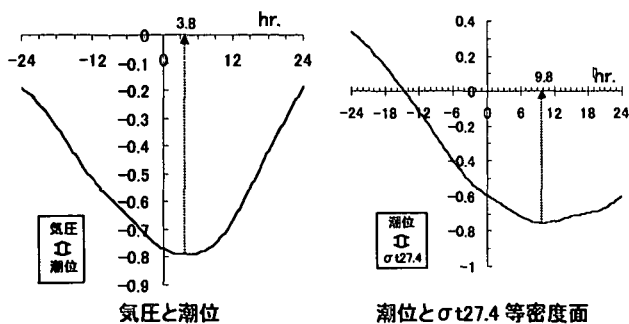


図-9 気圧・潮位・内部波間の相互相関係数

(2) 湾口部における湧昇の発生状況

小樽港で観測された気圧及び潮位データの時系列を内部波観測期間について示すと図-8となる。更に、図-9は、湧昇発生前後の9月14日～9月21日間の気圧変動と潮位変動の相互相関係数、及び潮位変動と $\sigma_t 27.4$ 等密度面変動の相互相関係数を示したものである。これより、湧昇期の気圧変動と潮位変動には強い負の相関が認められ、気圧の極大値は

約3.8時間程度潮位の極小値より位相が進んでいる。

更に、潮位変動と等密度面変動の間にも負の強い相関性が認められる。すなわち、今回観測された湧昇現象は、9月17日の台風通過に伴う気圧の急激な上下動（最大変動幅で約30hPa）により、海面水位が約20cm上昇後、急激（約1.5日で35cm程度）に低下したのに併せて発生していることがわかる。

(3) 湾奥部への内部波の伝播状況

内部波観測期間中における、石狩湾湾奥部のテレメータブイによる水温の時系列、及びこれより計算された等密度界面（ $\sigma_t 23.9 \sim 25.6$ ）の変動状況を図-10に示す。

これより、観測期間中の等密度面は、概して水深20m以深に形成される $\sigma_t 24.1$ 以上の等密度面においては湧昇期以前（9/7～9/15）まで周期的な変動が認められ、それ以浅は密度勾配が小さく、かつ表層の波浪による混合効果などで明確な内部波は形成されないものの、下層の内部波のピークに合わせた等密度面の上下動が認められる。一方、9月17日～19日にかけての湧昇期においては、湧昇前に平均水深25m程度に形成されていた $\sigma_t 24.4$ の等密度界面が一気に表層まで上昇し、表面水温を約半日間に亘って 1.5°C 以上低下させた。

図-11左上図は、湧昇以前の $\sigma_t 24.1$ 等密度面の変動より24時間の移動平均に基づくトレンド成分（図-10参照）を消去後の振幅スペクトルを計算したものである。これより湾口においても、内部波の変動は24時間周期（振幅2.3m）が卓越した内部潮汐波の性質を有していることがわかる。図右上は、湧昇期について湾口部の $\sigma_t 27.1$ 等密度面の変動に対する湾奥部の $\sigma_t 24.4$ 等密度面変動の相互相関を

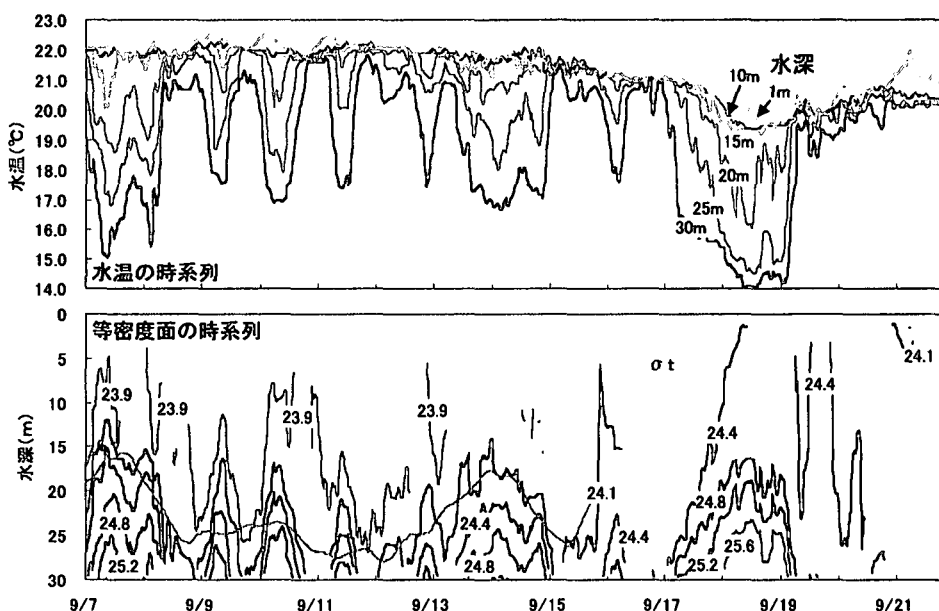


図-10 水温及び等密度面の時系列（湾奥部）

示したものである。これより、湾口部で発生した湧昇は、約 18 時間後に湾奥浅海部に到達していることがわかる。更に、図 11 下図は、湾奥部に形成された各等密度面相互の位相スペクトルより求まる位相差を示したものである。これより、湾口部においては、位相差は密度増加と正の相関が認められたのに対して、湾奥部では、逆に浅いほど位相の前進が認められた。これらは、内部波エネルギー特有の進行特性に起因するものと考えられるが、詳細については今後の検討が必要である。今回の調査で、湾口部に形成される内部波の波動が、沿岸浅海域まで達し、当該域の理化学環境、に支配的な影響を与えていることが示唆された。

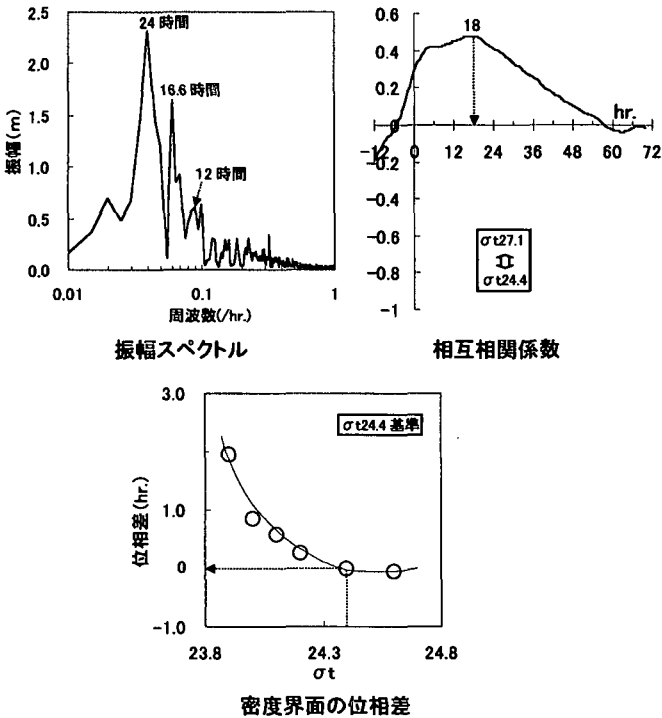


図-11 気圧及び潮位の時系列

(4) 内部波高の平面分布

図-12 は、水理模型実験より明らかとなった石狩湾周辺海域における内部波の波高比分布をもとに、内部波観測点における内部波高を 40m と概算した場合の、石狩湾及び積丹半島周辺海域における内部波高の平面分布、及び内部波の進行方向ベクトルを示したものである。これより、当該域においては、内部波の波高は全体的に沿岸域で大きく、岸より遠ざかるに従って小さく減衰する傾向が見られる。また、陸棚域の値を等深線に見ていくと、高低を繰り返しており、内部波が陸棚波状に伝播していることが伺えた。更に、波向分布より各湾に向うベクトルが認められるが、内部波エネルギーの集中する海域では波高の極大海域が認められ、石狩湾においては、今回内部波観測を実施した地点より若干南側の北緯

140 度 50 分、東経 43 度 25 分において、最大波高 80m が推定され、岩内湾においても北緯 43 度、東経 140 度 20 分において最大 100m 程度の最大内部波高が推定された。

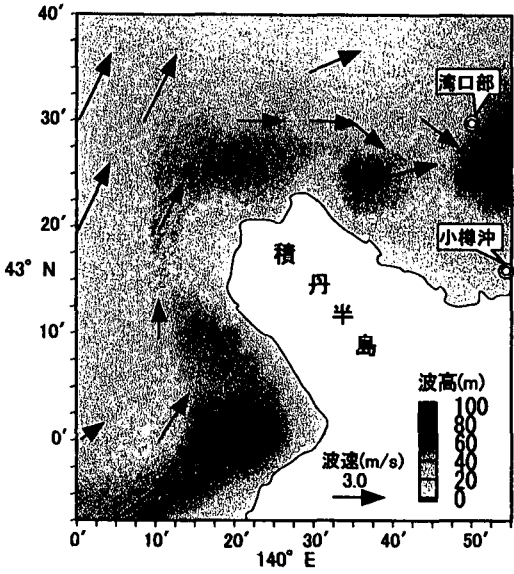


図-12 内部波高・波向分布

4. おわりに

本研究では、石狩湾の湾口部及び湾奥部の何れにおいても、24 時間、12 時間と長周期を除くと潮汐周期成分の卓越した内部波が観測された。また、観測期間内において、湧昇が確認され、これをもとに湾口部と湾奥部の内部波の位相差が約 18 時間であることが推定された。本位相差は、湾口部における等密度界面の上層（低密度界面）への位相遅れよりほぼ推定できる。また、湧昇は、気圧変動に伴う水位の上下動と対応して発生しており、今後、当該域における海洋構造や海面水位の季節変化と気圧変動との相関を検討することによって、気圧変動より当該域における湧昇の有無を推定できる可能性が示唆された。深層水の湧昇は、基礎生産に基づく生態系の強化や、回遊性漁獲対象資源の産卵時期の推定など水産資源の消長や適正管理手法の確立に不可欠な現象であることから、今後、更なる研究の進展が望まれる。

参考文献

- 1) 瀬戸雅文, 大竹臣哉, 奥野充一, 中村充: 日本海栄養塩の内部波による沿岸輸送特性について, 海洋開発論文集, 第 13 巻, pp. 165-170, 1997.
- 2) 瀬戸雅文, 大竹臣哉, 中村充: 日本海深層水と内部波の挙動解析, 海洋開発論文集, 第 14 巻, pp5-10, 1998.