

成層の発達した海峡の流動構造と 内部波の発生機構

CURRENT STRUCTURE AND INTERNAL WAVES DEVELOPMENT AT STRATIFIED STRAIT

山中亮一¹・西田修三²・中辻啓二³

Ryoichi YAMANAKA, Shuzo NISHIDA and Keiji NAKATSUJI

¹正会員 博(工) 大阪大学大学院研究生 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²正会員 工博 大阪大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

³正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Field measurements of current and density fluctuations were conducted at the mouth of Mutsu Bay in the end of August, 1999 and 2000. In both years, the physical characteristics are almost similar, however the slopes of water level at the Tsugaru Strait connecting the Japan Sea to Pacific Ocean are much different. The detailed mechanisms are discussed on the basis of 3-D numerical simulation using ODEM after the model can simulate the primary feature of field observation results. Both field surveys and numerical simulation clarify that flow and density structures in Tsugaru Strait has a great influence on the occurrence and development of internal waves.

Key Words : *Mutsu Bay, Flow Structure, Density Field, Internal Wave, Water Exchange*

1. はじめに

本研究の対象とする陸奥湾は青森県北部に位置し、幅約10.5kmの平館海峡を通じて津軽海峡に繋がる閉鎖性の強い内湾である。湾内の水質は比較的良好な状態にあるものの、近年の流入負荷量の増加傾向や時折生じる急激な水質変化などの問題を抱えており、海水交換の定量的な把握や、流動と水質の変動特性の解明と予測が望まれている。筆者らは1995年から毎年夏季に海水交換や物質交換機構の解明に向けた現地観測を行ってきた。その結果、湾口部横断面における流動と密度は時空間的に不定性を示し、日本海と太平洋の水位バランスにより決定される海峡部の流動と地形性循環流の発生がこの不定性の要因であることがある程度明らかとなった¹⁾。しかし、このような流動と密度の変動の発生機構や、それが海水交換に及ぼす影響については未だ明らかにされていない。

そこで本研究では、日本海と太平洋の水位バランスの状況が異なる時期に陸奥湾湾口部において連続観測を実施し、津軽海峡の海象変化が陸奥湾の水交換に及ぼす影響について明らかにする。また、観測時の再現シミュレーションを実施し、湾口部における流動構造と密度構造の不定性の要因と考えられる内部波の発生

機構を解明する。

2. 陸奥湾湾口部の内部構造の現地観測

(1) 現地観測の概要

1999年と2000年の夏季に、陸奥湾湾口部において流速と水温・塩分の1潮汐期間連続観測を実施した。

a) 観測方法

計測は、図-1に示す陸奥湾湾口部を東西に横断する距離約10kmの観測線で1999年8月31日と2000年8月29日に実施した。観測線上を東西に往復し、1潮汐間に1999年は3.5往復、2000年は4往復の流況・水質観測を実施した。測定項目は、流速、水質(水温、塩分、クロロフィルa)と観測地点の座標位置である。測定には、流速はADCP(米国RD Instruments社製, 300kHz)、水質はクロロフィルセンサー付きSTD、観測位置はD-GPSを使用した。

b) 観測時の海象と気象

図-1の下北、函館、青森、深浦における観測日前後の実測潮位(TP高)を図-2に示す。これらの観測地点の潮位変動は日本海洋データセンターより得た。図-2(a)に示す1999年8月31日の観測日前後は、全地点で日潮不等が小さく半日周潮が卓越する潮位変動を示していた。一方、図-2(b)に示した2000年8月29日の観測日

前後は1999年と異なり、陸奥湾内の青森では1999年と同様の日潮不等の小さい潮位変動を示していたものの、湾外の3地点(下北、函館、深浦)では、比較的大きな日潮不等が認められる。このように、1999年と2000年の観測日前後の潮位変動特性は湾外で大きく異なっていたことがわかる。

観測時の風況は図には示さないが以下のものであった。1999年は弱い南風、2000年は観測線西側のみ強い東風が連吹していた。青森県水産増殖センターのテレメータ観測によると、観測時の湾中央部の海上風は、1999年は欠測のため不明、2000年は風速約8m/sの東風が連吹していた。しかし、この東風の連吹は観測日の日中約7時間にとどまり、湾口部の流動構造を大きく変化させるには至らなかったと考えられる。

(2) 湾口部の流動構造と密度分布

湾口部横断面における上げ潮時の流動と密度構造を図-3に示す。各図とも縦軸は水深、横軸は西岸からの距離を示している。流動は図中の方位に倣った流速ベクトルで、密度は σ_t の等値線として表している。図-3(a)は1999年、図-3(b)は2000年の観測結果である。下げ潮時の観測結果を図-4(a), (b)に同様に示す。

1999年と2000年の上げ潮時の流動構造は、西岸から1kmから5kmまで、かつ海面から水深50mの断面でのみ南向きの流れを生じているが他の断面では流速・流向ともに異なっている。密度は、表層と底層の密度差は両年で同様であるが、水深50m以深の密度分布は1999年には傾斜しているが、2000年には水平になっている。

下げ潮時は、1999年の流動構造は水深30mを境に上層で北流、下層で南流を明瞭に示しているが、2000年の流動構造は水深42mを境界にして上・下層の流速ベクトルが異なっている。一方、密度分布は両年ともに成層化傾向を呈しているが、1999年の密度分布は表層から底層まで密度が緩やかに変化しているのに対して、2000年の密度分布は水深42mより上層では一様化し、水深42mで強い密度成層が発達している。

(3) 湾口部の通過流量

湾口部横断面の通過流量を図-5に示す。図には、湾口部の水位の目安として、下北と深浦の平均水位(H)をとり、その時間変化量($\Delta H / \Delta t$)もあわせて図示している。図-5(a), (b)はそれぞれ1999年、2000年の測定値を示す。いずれも左軸は通過流量(北向きを正とする)、右軸は水位の変化量(減少を正とする)、横軸は時刻を示している。

1999年の通過流量の経時変化はほぼ半日周期を示し、潮位変動に対応している。北向き(湾内から流出)の最大流量と南向き(湾内に流入)の最大流量に相違が認められるが、これは観測時に通過した低気圧の影響によるものと考えられる。一方、2000年の通過流量の経時

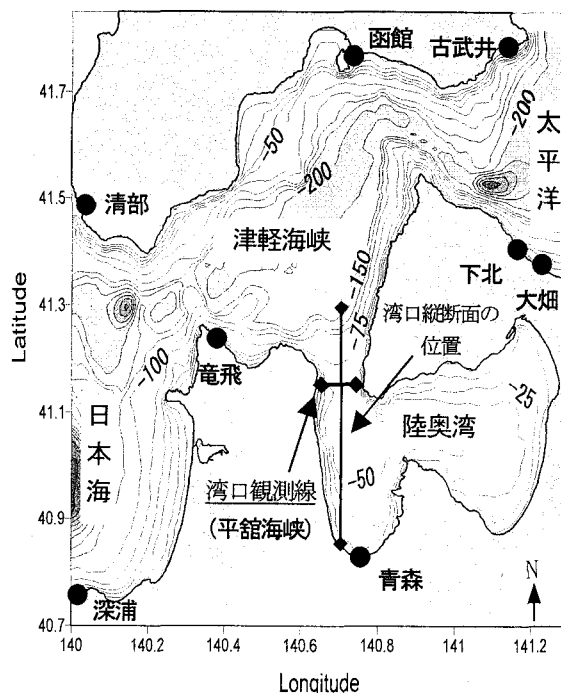
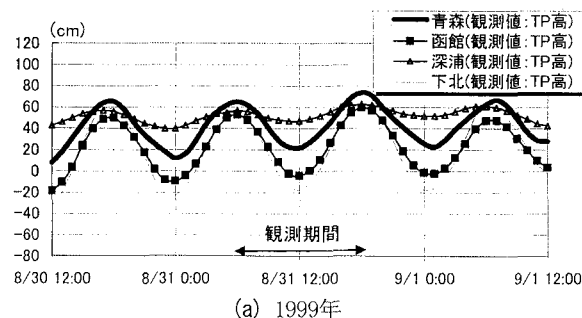
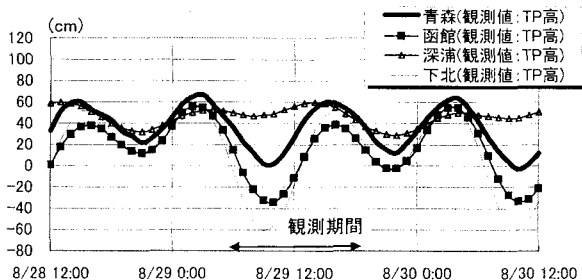


図-1 陸奥湾周辺海域 (図中の等値線は水深:m)



(a) 1999年



(b) 2000年

図-2 観測日前後の潮位変動

変化は、1999年の結果と大きく異なり、半日で1周期としない変動を示している。最大流量を比較すると、北向きと南向きともに2000年の値が1999年のそれより大きい値を示している。これは2000年の方が潮差が若干大きかったことによるものである。また、湾口部の通過流量は図-5に示すように、湾口部の水位変化量($\Delta H / \Delta t$)と良い対応関係を示しており、湾口部の通過流量は湾口部の潮位変動に対応して変化している。湾口部の水位は太平洋と日本海の水位差でほぼ決定されることから、湾口部の通過流量は潮差の大きい太平洋の水位変動の影響をより大きく受けると言える。

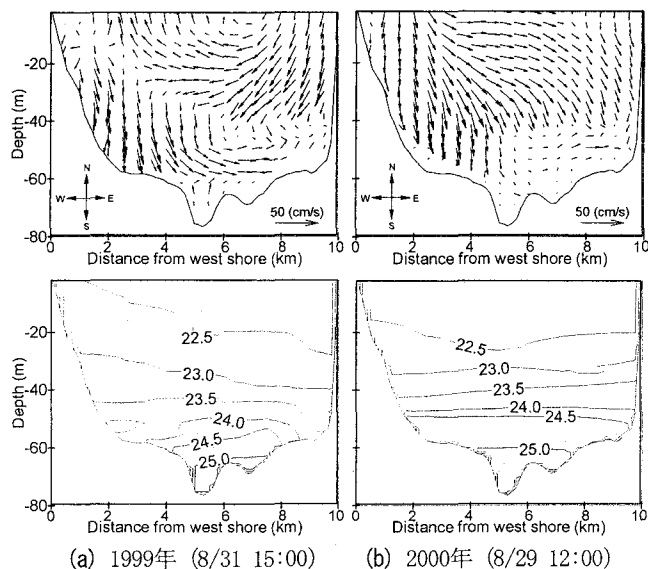


図-3 上げ潮時の湾口部横断面の
流動構造(上図)と密度構造(下図)

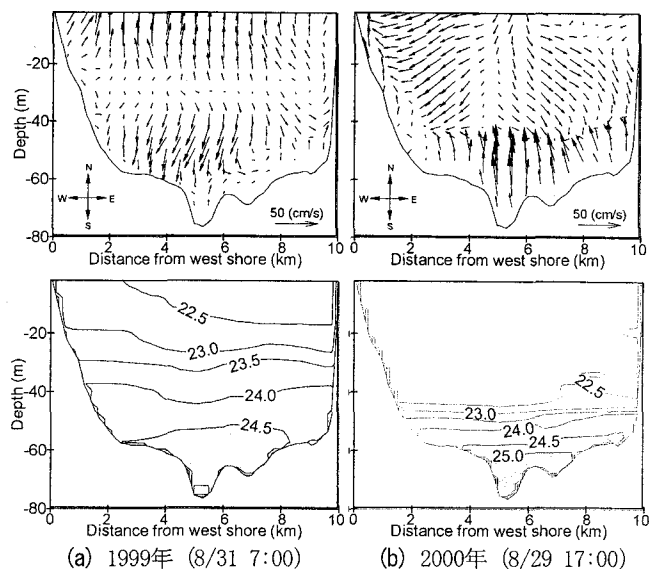
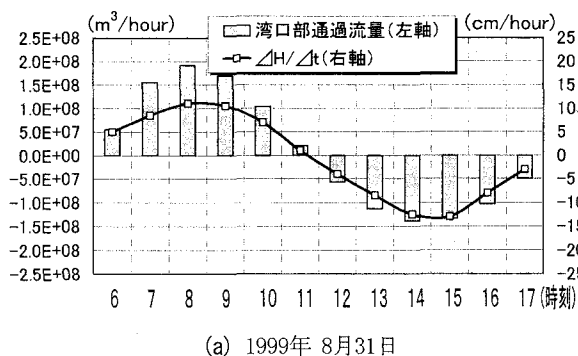
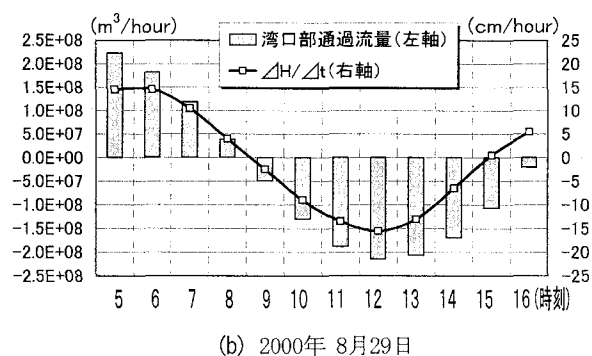


図-4 下げ潮時の湾口部横断面の
流動構造(上図)と密度構造(下図)



(a) 1999年 8月31日



(b) 2000年 8月29日

図-5 湾口部通過流量と下北と深浦の平均水位の時間変化量 ($\Delta H/\Delta t$) の経時変化

3. 湾口部の内部構造の変動機構

陸奥湾湾口部の流動と密度構造が大きな不定性を有する原因を明らかにするため、現地観測時に対応した数値シミュレーションを実施した。

(1) 数値シミュレーションの概要

1999年の観測時に対応した数値シミュレーションを実施した。数値モデルは、バロクリニック流れの再現性に優れた3次元流動モデルのODEM²³⁾を使用した。計算対象領域は図-1に示した範囲とし、東西方向と南北方向にいずれも1km間隔、鉛直方向に水深200mまでを25層に格子分割した。境界条件として開境界上で水位変動を与えた。西側境界では北端の清部と南端の深浦の予測潮位を線形補間した水位を、また、東側境界は北端の古武井と南端の大畑の予測潮位を基に算出した水位を与えた。ここで、予測潮位は主要16分潮まで考慮して算出した。調和定数は調和定数表⁴⁾より得た。水

温と塩分の初期値は関係機関より得た観測値を空間補間して与えた。開境界における水温と塩分はThatcherらの関係式⁵⁾を用いて設定した。河川からの淡水流入は陸奥湾内のみ主要53河川⁶⁾について考慮した。気温と日射の影響は8月の典型的な日変動を与えることで考慮した。風や気圧変動、降雨の影響は本計算の目的から判断して考慮していない。その他の係数は表-1にまとめて記した。

計算手順を以下に示す。はじめに計算の安定化のため、密度差の影響を考慮しないバロトロピック流れの助走計算を1999年8月1日から8月7日までに対応した7日分実施した。続いて、この計算結果を流速の初期値とし、初期密度値を設定し、8月8日から8月31日までの24日分のバロクリニック流れのシミュレーションを実施した。図-6に示した青森と函館の潮位の計算結果をみると、8月24日の潮位変動特性が、前節で解析を行った2000年の観測時と類似していることがわかる。そこで、8月24日を湾外で日潮不等が認められた2000年の観測時に対応すると考え2000年型と呼ぶ。8月31日を湾内外ともに日潮不等が認められなかった1999年の観測時に対

表-1 計算パラメータリスト

格子数	東西方向:110, 南北方向:126, 鉛直方向:25
格子間隔	東西方向:1km, 南北方向:1km 鉛直方向(海表面から海底):2m×3, 4m×1, 5m×15, 10m×2, 15m×1, 20m×1, 30m×2
底面摩擦係数	2.6×10^{-3}
壁面摩擦係数	1.0×10^{-4}
コリオリパラメータ	$9.568 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$
水平方向渦動粘性係数の下限値	$0.1 \text{ m}^2/\text{s}$
中立状態の鉛直方向渦動粘性係数	$0.005 \text{ m}^2/\text{s}$
日射量	日変化 最大 176.5 W/m^2
気温	日変化 $17^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$
差分時間間隔	15 s

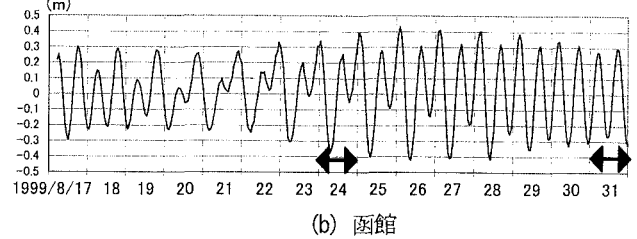
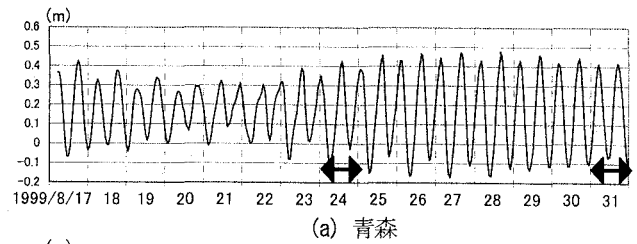


図-6 潮位変動 (計算値)

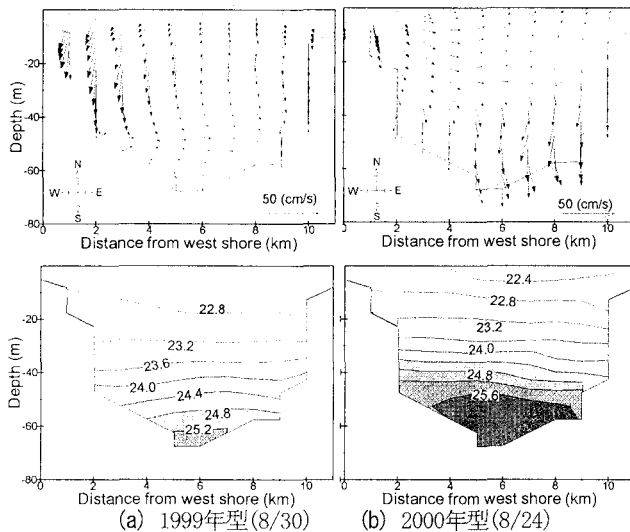


図-7 数値計算による上げ潮時の湾口部横断面の流動構造(上図)と密度構造(下図)

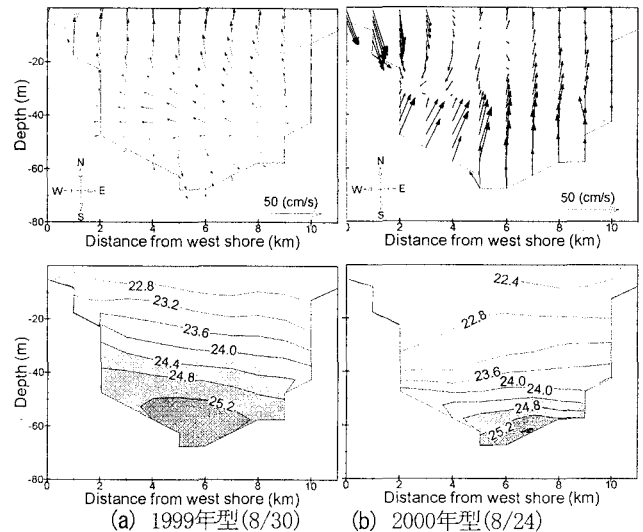


図-8 数値計算による下げ潮時の湾口部横断面の流動構造(上図)と密度構造(下図)

応するものと考え1999年型と呼び、以下の解析を行うことにする。

(2) 計算の再現性

計算の再現性を確認するため、前節で示した湾口部横断面における観測結果(図-3と図-4)に相当する計算結果を図-7と図-8に示した。上げ潮時と下げ潮時ともに、流動構造は表層の一部で観測値との若干の相違が、密度構造はその絶対値の相違が認められるものの、特徴的な分布特性は合致しており再現性は高いと言える。すなわち、計算結果は物理機構を模擬できたと判断できる。

(3) 湾口部周辺の内部構造

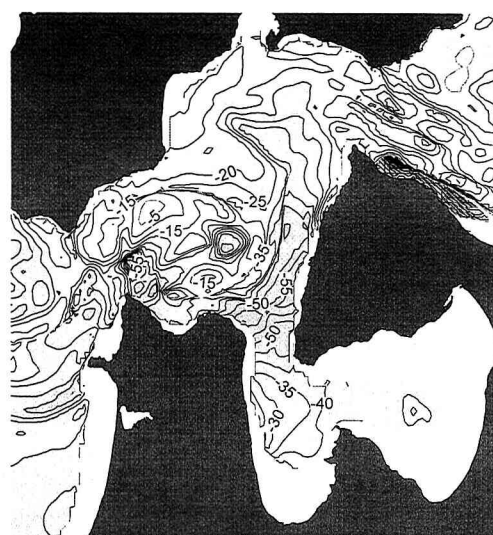
これまでに実施された現地観測により陸奥湾湾口部

において内部波の存在が示唆されており⁷⁾、湾口部の流動構造は内部波の時空間変動の影響を強く受けているものと考えられる。ここでは、内部波の構造を明らかにするため、潮位変動特性の相違に対応して流動と密度構造に大きな相違が認められた下げ潮時に着目する。図-7, 8の湾口部横断面の中層に位置する密度 $\sigma_t=24$ の等密度面の空間分布を図-9に示した。図中の等値線は等密度面の位置する水深(単位:m)を示している。

図-9(a)と図-9(b)を比較すると、等密度面の形状がまったく異なることがわかる。湾口部周辺では、1999年型では等密度面が津軽海峡から陸奥湾内に向かって徐々に高くなるように傾斜しており、湾口部で落ち込むような分布形状を有する2000年型とは大きく異なっている。このような等密度面の形状の相違は津軽海峡でも認められる。津軽海峡では竜飛沖で共通して等密度面が落ち込む形状をしているが、竜飛から陸奥湾湾口部周辺に至る海域での等密度面形状は大きく異なっ

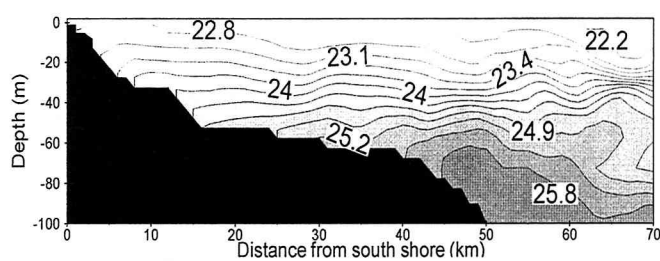


(a) 1999年型(8/31)

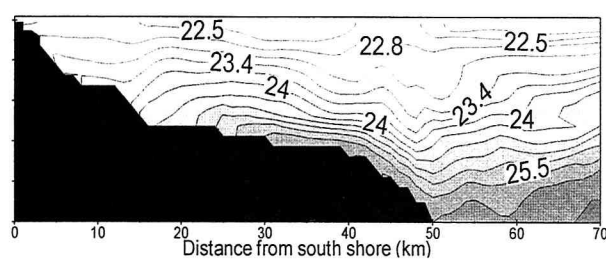


(b) 2000年型(8/24)

図-9 下げ潮時の等密度面形状(密度 $\sigma_t=24$)



(a) 1999年型(8/31)



(b) 2000年型(8/24)

図-10 下げ潮時の陸奥湾湾口部縦断面における密度の鉛直分布

ている。陸奥湾内においても両年型の分布形状は異なり、とくに西岸に沿ってみられる等密度面上昇位置が異なっている。この相違は図-10に示した観測線の中央を南北に縦断する鉛直断面の密度構造でさらに明瞭に確認することができ、とくに南岸(青森)から約45kmに位置する湾口部周辺における密度の鉛直分布は1999年型と2000年型で大きく異なっている。

以上より、湾外の潮位変動特性が異なると同一潮時であるにもかかわらず、陸奥湾とその周辺海域の内部構造が大きく異なることがわかった。

(4) 内部波の発生機構

陸奥湾湾口部の内部波の発生機構を解明するため、1999年型の計算結果を基に、水深40mにおける流動構造の経時変化を図-11に、密度 $\sigma_t=24$ の等密度面の経時変化を図-12に、湾口部中央を通る南北縦断面における密度構造を図-13に示す。

流動は、下げ潮時(図-11(a))に津軽海峡の竜飛沖から陸奥湾湾口部に至る海域に東西に2つの循環流が認められる。津軽海峡の東西方向の水位差が最大になる干潮時(図-11(b))になると、北東向きの強い流れが生起し、循環流は下げ潮時に西方に存在した循環流が津軽海峡中央に移流し、東方に存在した循環流は消滅して

いる。その後上げ潮時(図-11(c))には、再び竜飛沖に循環流が発生しているのがわかる。このように下げ潮時から上げ潮時にかけて津軽海峡の流動構造は大きく変化する。

等密度面の形状も上述の流動構造の変化に対応して大きく変化している。とくに湾口部周辺では、下げ潮時(図-12(a))には湾口部北西部に存在する水深約40mの領域が干潮時(図-12(b))には湾口部へ移動し、上げ潮時(図-12(c))にはその領域はさらに南下しているのがわかる。このことから、湾口部周辺でみられた内部波は、津軽海峡で発生した循環流の消長により津軽海峡の密度構造が変化し、それが湾口部方向に伝播し、湾内に入射したものと考えられる。これは図-13に示した密度の鉛直分布からも確認することができる。南岸から45kmの湾口部周辺に着目すると、下げ潮時から上げ潮時にかけて、湾外の急激な密度構造の変化により生じた内部波が湾内へ伝播している様子が確認できる。

湾口部周辺の内部構造が不定性を示すのは、津軽海峡の潮位変動特性の違いが海峡内の流動の変動特性を変化させ、その結果、海峡部竜飛沖で発生し湾口部に伝播する内部波の伝播特性が変化したことが原因であると考えられる。

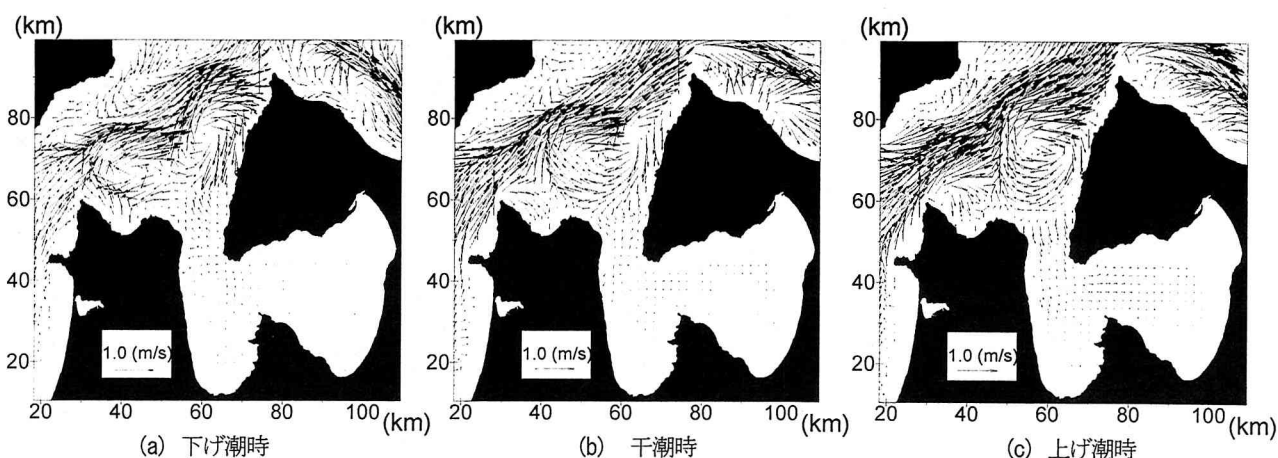


図-11 陸奥湾周辺の流動：水深40m, 1999年型(8/31)



図-12 陸奥湾周辺の等密度面形状：1999年型(8/31)

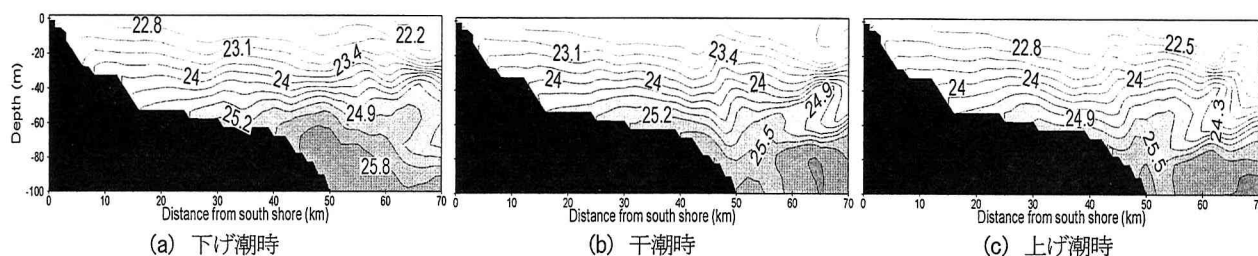


図-13 陸奥湾湾口部縦断面における密度の鉛直分布：1999年型(8/31)

4. おわりに

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 日本海と太平洋の水位バランスに対応して湾口部の流動・密度構造が大きく変化する。
- (2) 陸奥湾の水交換量は潮差の大きい太平洋の水位変動の影響を顕著に受ける。
- (3) 湾口部における流動と密度構造の不定性は、津軽海峡で生じた循環流の消長と、それにとまう内部波の発生・伝播により生じている。

謝辞：研究を進めるにあたり、青森県水産増殖センターより観測データの御提供を受けた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 西田修三, 山中亮一, 西尾岳裕, 福島博文, 田代孝行, 中辻啓二：陸奥湾の流動構造とその影響因子に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 416-420, 2000
- 2) 中辻啓二, 許再寧, 室田明：三次元表層密度流の数値実験, 土木学会論文集, 第432/II-15, pp. 214-218, 1991
- 3) 山中亮一, 西田修三, 鈴木誠二, 川崎浩司, 田代孝行, 中辻啓二：気象擾乱を考慮した陸奥湾の流動解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 401-405, 2002
- 4) 海上保安庁：日本沿岸潮汐調和定数表, p. 267, 1992
- 5) Thatcher, M. L. and R. F. Harleman : A Mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries, Massachusetts Institute of Technology, Report no 144, 1972
- 6) 青森県：陸奥湾窒素・磷環境基準型指定に係る水質シミュレーション調査報告書, p. 273, 1997
- 7) 中辻啓二, 崔成烈, 西田修三, 福島博文, 湯浅泰三：陸奥湾の湾口部における密度構造と流れ, 水工学論文集, 第40巻, pp. 467-472, 1996

(2002. 9. 30受付)