

陸奥湾の流動構造とその影響因子に関する研究

西田修三* ・山中亮一** ・西尾岳裕***
福島博文****・田代孝行*****・中辻啓二*****

1. はじめに

本州最北の青森県に位置する陸奥湾は、湾北西部の幅約 10 km の平館海峡を通じて津軽海峡と繋がる閉鎖性の強い内湾である。現在、湾内の水質は比較的良好な状態にあり、他の閉鎖性海域で見られるような赤潮等の発生とそれによる水質被害はほとんど見られない。その一方で、急激な水質の変化や、外海性プランクトンによる貝毒の発生と養殖貝の成長不良など、陸奥湾特有の水産問題を抱えている。これらはいずれも流動と深く関係しており、湾内の流動構造と水交換機構の解明に向けた調査研究がなされてきた。(例えば、大谷, 1977; 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編, 1992) しかしながらその詳細については未だ明らかにされていない。

筆者らは 1995 年より毎年夏季に陸奥湾湾口部を中心に流動と密度構造の実態把握に向けた観測を行ってきた(中辻ら, 1996; 福島ら, 1996; 崔ら, 1997; 西田ら, 1999)。その結果、湾口の潮位変動は日潮不等が小さく、かつ、潮差も同程度であったにもかかわらず、湾口部における流動とフラックス構造は、強い時空間的不定性を有することが明らかとなった。そして、この不定性には周辺海象、特に日本海と太平洋の水位バランス、さらに、風や気圧変動など周辺海域の気象状況が大きく作用していることが示唆された。しかし、流動に及ぼす気象・海象の影響を定量的に明らかにするためには観測データの蓄積とともに数値シミュレーションによる解析が有効であると思われる。

本研究では、1999 年夏に行われた陸奥湾湾口部における現地観測結果と過去の観測結果について、気象・海象を考慮した比較を行い、流動構造の普遍性と不定性の要因を考察し、あわせて数値シミュレーションにより津軽海峡と陸奥湾の流動構造とその変動特性を明らかにする。

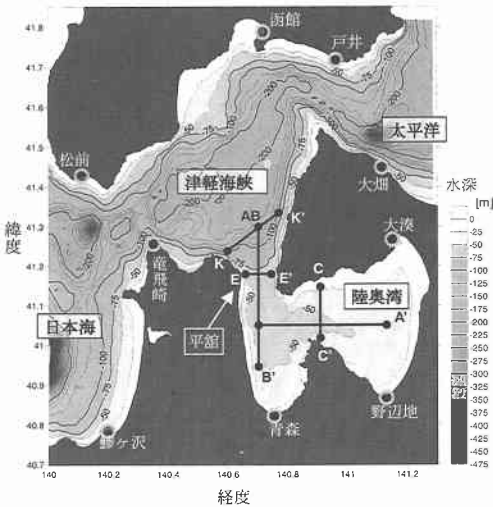


図-1 対象海域と観測線

2. 現地観測

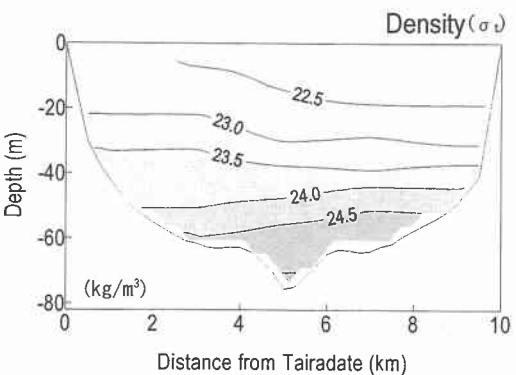
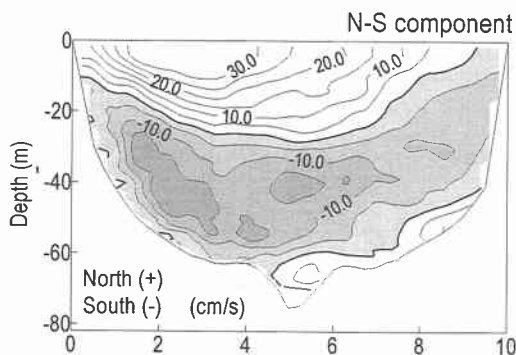
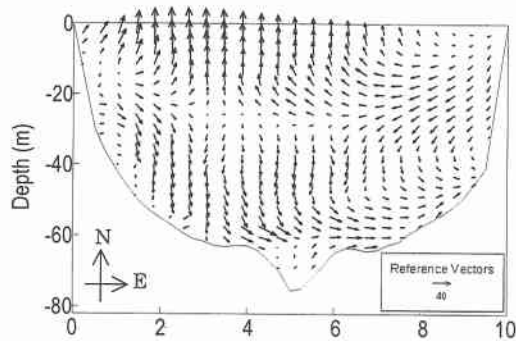
(1) 観測概要

湾口部における流動とフラックス構造の時空間変化と海水交換の定量的な把握を目的とし、1999 年 8 月 31 日に図-1 に示す E-E' 測線(北緯 41°10'12")において、流況と水質の 13 時間連続観測を行った。流速の断面構造の観測には ACDP (300 kHz) を用い、船を低速走行させながら水深 2 m ピッチの計測を行った。水質観測は、測線上の 5 地点において停船させ、クロロフィルセンサー付き STD を用いて 0.1 m ピッチの鉛直プロファイルの計測を行った。観測期間の潮位変動は湾内外とも日潮不等の小さい半日周期のパターンを示していた。気象条件は小雨が時折あったものの、前日までの強風も朝にはおさまリ、測線上ではおおむね無風に近く風の状態であった。

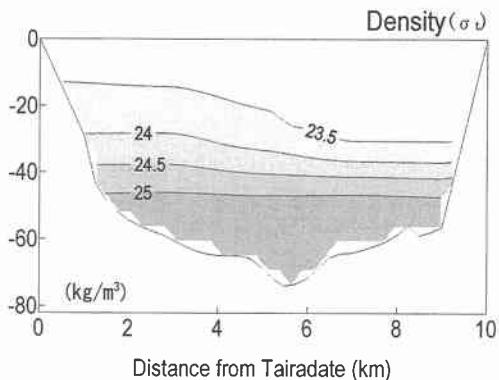
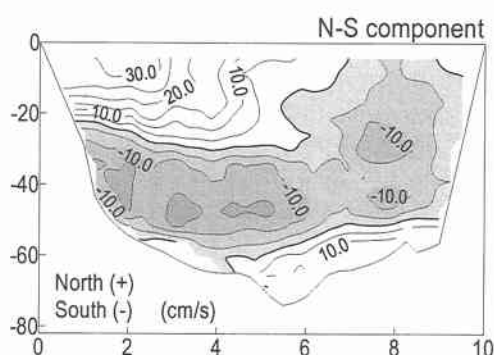
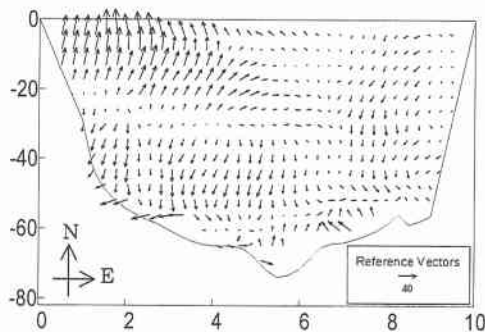
(2) 観測結果

図-2 に湾口断面における残差流ベクトルとその南北(流入流出)成分、および、平均密度分布を示す。残差流の算出法は杉山ら(1995)に倣った。図-2 (a) に示された 1999 年観測の結果から、水深約 30 m 以浅の上層と底層で湾外への流出が卓越し、中層では広範囲にわたり

* 正 会 員 工博 大阪大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻
** 学生会員 工修 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻
*** 正 会 員 工修 (株)ニュージェック
**** 正 会 員 (株)建設技研研究所 大阪支社 情報技術部
***** 正 会 員 総合科学(株) 環境評価第二部
***** 正 会 員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻



(a) 1999年8月31日



(b) 1996年8月31日

図-2 観測で得られた残差流と平均密度の湾口断面分布

流入していることがわかる。最大流速は、北向き成分では西岸寄りの表層部で約 35 cm/s、南向き成分では西岸から中央部にかけての水深 40 m 付近において約 15 cm/s を示している。このような湾口部の残差流構造は 1999 年と同様の潮位変動パターンを示した 1996 年の結果 (図-2 (b)) にも現れている。1996 年の結果では上層の北流成分が西岸側に偏位し、東岸上層に南流成分が現れているが、これは観測時の強い東風の連吹によるもので、湾内水の吹き寄せによる西岸のセットアップに起因した表層水の流出と東岸表層で生じた補償流の流入によるものと考えられる。一方、外海の潮汐パターンが日潮不等

の大きい日周期を示していた 1995 年の観測結果 (中辻ら, 1996) では、水深約 50 m までの計測しかなされていないが、得られた残差流構造はまったく異なった性状を示している。以上の結果と、1995~1999 年の過去 5 年間の湾口断面における流況観測結果から、以下のことが明らかとなった。

日潮不等の小さい半日周期の潮汐変動に対しては、おおむね、上層で流入、中層西岸寄りで流入の傾向を示す。しかし、流況は外海の潮位変動の影響を顕著に受け、とくに太平洋の強い日潮不等の影響により、湾口部の流動構造は大きく変化する。また、東風の連吹は、湾口西岸

表層部に強い北流（流出）を生じさせ、湾内水の交換に寄与している。

3. 数値シミュレーション

現地観測結果の解析により、湾口部の流動構造には外海の潮位変動パターンが大きく影響していることが示唆された。そこで、図-3に示すような(a)日潮不等のない半日周期の潮位変動と、(b)日潮不等の大きい日周期の潮位変動を、津軽海峡両端で与え、湾口部周辺における流動構造の数値解析を行った。

(1) 数値モデル

ここでは中辻(1994)が大阪湾の流動解析に用いた準三次元バロクリニックモデル(ODEM)を用いて計算を行った。数値モデルは、連続式、運動方程式、水温・塩分の拡散方程式、海表面での熱収支式および密度の状態方程式で構成され、静水圧近似とブシネ近似を仮定している。水平方向の渦動粘性係数、渦動拡散係数にはSGS粘性係数を用いて時空間変化を考慮し、鉛直方向の渦動粘性係数、渦動拡散係数はリチャードソン数の関数として、成層効果を取り込んでいる。

(2) 計算条件

a) 計算領域

計算は図-1に示した陸奥湾・津軽海峡を含む領域を対象とし、1 km メッシュで東西方向に 109、南北方向に 125 分割した。鉛直方向には湾内の流動・密度の鉛直方向の分布を考慮して不規則厚とし、表層から 2 m×3 層位、4 m×1 層位、5 m×8 層位、10 m×3 層位、20 m×3 層位、30 m×2 層位の全 20 層位とした。計算負荷の軽減のため海峡内にわずかに存在する 200 m 以深の領域については一様に水深 200 m とした。

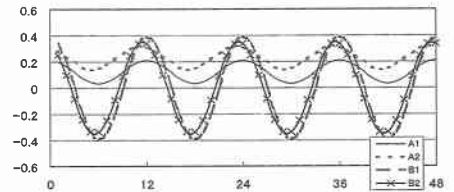
b) 初期条件

初期の水温・塩分分布は、関係機関で実施された 8 月の観測値を空間補間して与えた。また、1 計算ステップに対応する時間間隔は計算の安定性を考慮し 15 秒とした。

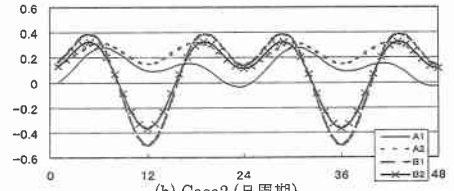
c) 境界条件

日本海側と太平洋側の開境界の北端と南端（日本海側：A1, A2, 太平洋側：B1, B2）で典型的な潮汐パターンとして図-3に示す半日周期（Case 1）と日周期（Case 2）に対応した潮位変動をそれぞれ繰り返し入力した。Case 1 は 1996, 1998, 1999 年の観測時の潮位変動に、Case 2 は 1995, 1997 年の観測時の潮位変動にそれぞれ対応している。開境界上の計算点では、それぞれ北端と南端の値を線形補間した水位を与え、流入水塊の水温・塩分値は前述の 8 月の観測値を空間補完したものを与えた。また、今回の計算では簡単のため、川からの淡水流入、海表面の熱交換、風の影響に関しては考慮していない。

(単位: 縦軸 m, 横軸 時間)

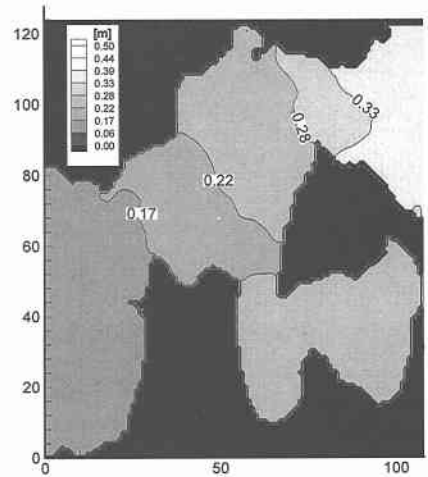


(a) Case1 (半日周期)

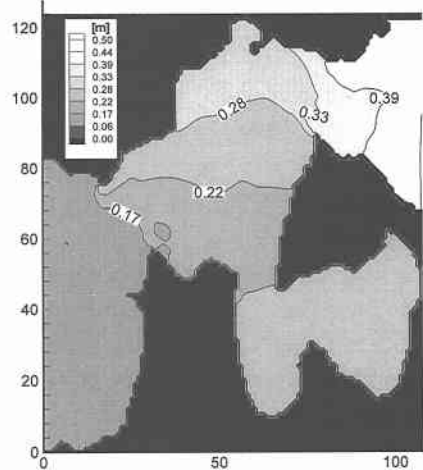


(b) Case2 (日周期)

図-3 計算にもちいた潮位変動



(a) Case1 (半日周期)



(b) Case2 (日周期)

図-4 潮差の空間分布

(3) 計算結果

Case 1, Case 2 それぞれについて、成層を考慮しないバロトロピック流れと成層を考慮したバロクリニック流れの計算を行った。計算は解が安定するまで繰り返し行い、最終の1日の流動と密度場の時間変化を最終結果とした。バロトロピック流れでは、Case1・2とも3日間、またバロクリニック流れでは60日間の計算を行なった。

図-4は計算より得られた等潮差図である。Case 2の日周期の場合は、太平洋側の低潮位の影響で、海峡東側において大きな値を示しているが、海峡中央から西側にかけては、半日周期のCase 1と同等の値を示し、東側海域において潮差が急変していることがわかる。陸奥湾の流況に大きな影響を及ぼすと考えられる湾口北側の海峡中央部では、等値線がCase 1では南北方向に、Case 2では東西方向に広がっており、潮差の絶対値ばかりではなく、その構造も異なっていることがわかる。このことは、潮流の速さだけでなく流動構造の変化をも生じていることを意味し、このような構造の違いは既往の研究(久保

田・岩佐, 1961)にも示されている。

図-5はバロトロピック計算によって得られた湾口部周辺の水深3 mにおける残差流ベクトル(日平均流速)である。また、図中の実線は平均水位の等値線を表している。これらの結果は成層化の弱い冬季の流況に対応すると考えられる。ちなみに、計算された海峡通過流量はCase 1では $1.72 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、Case 2では $1.06 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。流量の差違は、開境界で与えた潮汐パターンに依存しており、Case 1の方がCase 2に比して太平洋側の平均水位が低いことによる。津軽海峡の通過流量は日本海側と太平洋側の水位差に支配されることは、既往の研究(力石ら, 1989; Toba ら, 1992)でも示されており、また、計算で得られたこれらの流量は実測流量と同程度の値を示している。Case 1, Case 2 いずれの結果も龍飛崎から東方に大規模な地形性の循環が形成されていることがわかる。しかし、その形状はCase 1とCase 2では異なり、Case 1の方が東西方向に扁平し、さらにその強度も大きい。水位の等高線と流動ベクトルを比較すると、

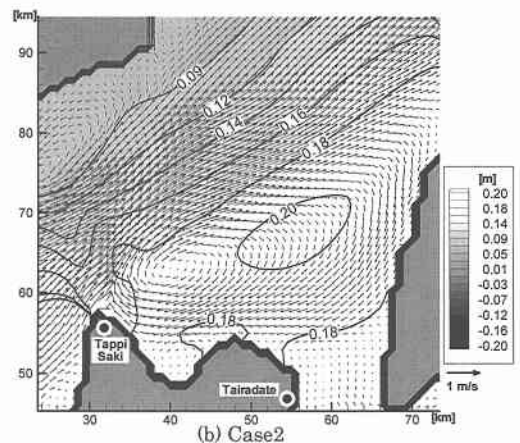
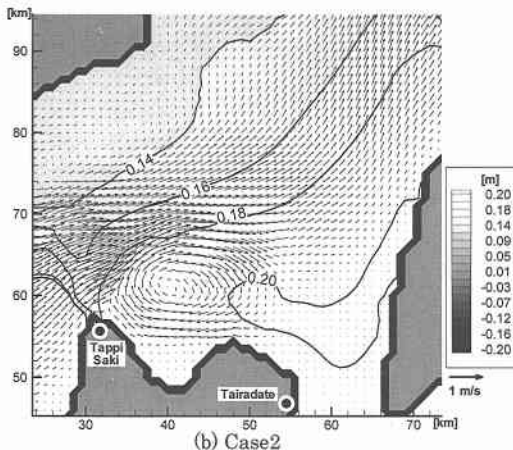
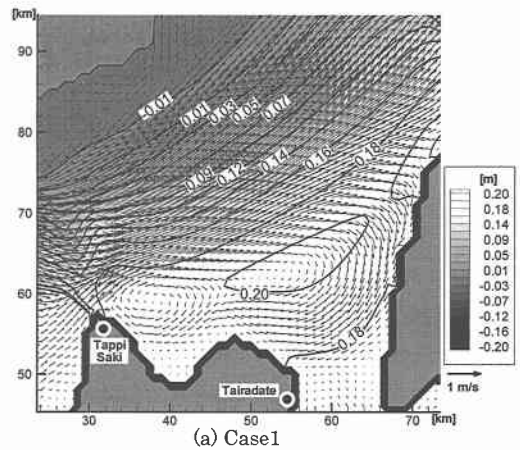
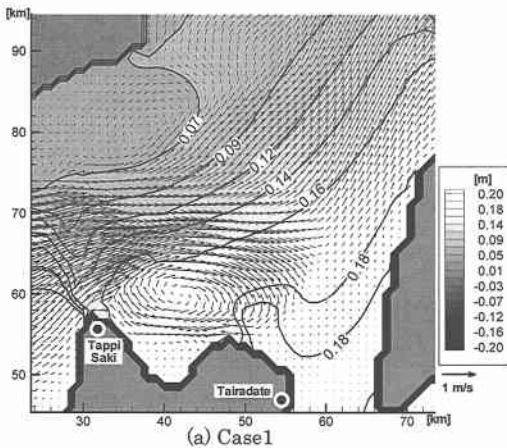


図-5 湾口周辺の残差流と平均水位
(バロトロピック)

図-6 湾口周辺の残差流と平均水位
(バロクリニック)

海峡部の流れはほぼ地衡流的な流動を示していることがわかる。しかし、龍飛崎周辺では高い流速値を示すとともに、等高線に直交した流動を示している。流況の経時変化を解析してみると、潮位変動に対応して龍飛崎で発生した渦は、流れに乗って流下成長を繰り返すことによってこの残差流系の循環が形成されていることがわかった。また、この循環の形状の違いにより、湾口周辺の水位分布にも違いが生じ、湾口部周辺の流況に変化がみられる。つまり、津軽海峡の潮汐パターンの違いに起因した龍飛崎東方の渦の消長が、湾口部周辺の流動に大きな影響を与えていると考えられる。

図-6 は成層を考慮したバロクリニック計算の結果であり、夏季(8月)の流況に対応している。図-5と同様に日平均して得られた残差流と平均水位を示している。前述の潮汐パターンによる龍飛崎東方の循環流の形態の違いが、顕著に現れている。Case 1, Case 2 いずれも循環域の東端が、湾口東部の下北半島まで達しているのがわかる。これは、龍飛崎付近の流速が増加して強い渦が発生・放出され、消滅せず下北半島西岸まで移流するためである。非成層期の結果同様、湾口付近の平均海面高の空間分布も Case 1, Case 2 では異なる。その影響を受けて湾口部での流況も変化しており、非成層期以上に海峡部の水位変動特性が流況に大きな影響を及ぼしていると言える。

4. おわりに

本研究により得られた主たる結果をまとめると以下のようになる。

(1) 1999年の観測によって得られた湾口断面の残差流は、1996年の観測結果と定性的に良い一致を示した。両年とも観測時における津軽海峡の海面高の時空間的変動パターンが類似しており、湾口部における複雑な流動構造は周辺海象による影響が大きいたことが確認された。

(2) 風の流動への影響に関しては東風時に西岸上層で北流速を生じさせ、海水交換に大きく寄与していることが現地観測よりわかった。

(3) 数値実験により龍飛崎から東方に伸びる地形性の循環流が陸奥湾湾口部にまで達し、その消長が湾口部周辺の流動に大きな影響を与えることがわかった。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費補助金（基盤研究(C)：研究代表者 西田修三）によって実施されたことを付記する。

参考文献

- 大谷清隆(1977): むつ湾の湾内水の更新, 沿岸海洋研究ノート, 第14巻, 第1・2合併号, pp. 1-9.
- 久保田照身・岩佐欽司(1961): 津軽海峡の流れについて, 水路要報, 65号, pp. 19-26.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾(1995): ADCPによる伊勢湾の流動構造調査, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1096-1100.
- 崔 成烈・入江政安・福島博文・西田修三・中辻啓二(1997): 陸奥湾湾口部における流動構造と流れ, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 381-385.
- 中辻啓二(1994): 大阪湾における残差流系と物質輸送, 水工学シリーズ 94-A-9, 土木学会水理委員会, pp. A 9. 1-28.
- 中辻啓二・崔 成烈・西田修三・福島博文・湯浅泰三(1996): 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.
- 西田修三・中辻啓二・西尾岳裕・福島博文・西村和雄・田代孝行(1999): 陸奥湾湾口部における流動構造の不定性に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 421-425.
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編(1992): 日本全国沿岸海洋誌, pp. 137-207.
- 福島博文・崔 成烈・西田修三・中辻啓二・湯浅泰三(1996): 陸奥湾湾口部における物質輸送機構, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 326-330.
- 力石國男・長沼光亮(1992): 津軽暖流と対馬暖流北上流の流量の分配機構, 海と空, 第68巻, 第2号, pp. 27-38.
- Yoshiaki Toba, Kazumi Tomizawa, Yoshikazu Kurasawa and Kimio Hanawa (1982): Seasonal and Year-to-Year Variability of the Tsushima-Tsugaru Warm Current System with its Possible Cause, La mer, 20, pp. 41-51.