

気象擾乱を考慮した陸奥湾の流動解析

山中 亮一* ・ 西田 修三** ・ 鈴木 誠二***
川崎 浩司**** ・ 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 の狭口部（平館海峡）を介して津軽海峡と繋がる閉鎖性の強い内湾である（図-1 参照）。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水質被害はほとんど確認されていない。その一方で、漁業被害をもたらすような急激な流動の発生や水質の変化など、陸奥湾特有の水産問題を抱えており、その発生機構の解明が強く望まれている。これまで陸奥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が（大谷, 1977 など）、その詳細については未だ不明な点も多い。

筆者らは陸奥湾の水交換機構の把握を目的に、1995 年より毎年夏季に現地観測を行い、あわせて数値シミュレーションによる解析を行ってきた（中辻ら, 1996；福島ら, 1996；崔ら, 1997；西田ら, 1999；西田ら, 2000）。その結果、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し、日本海と太平洋の水位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明らかとなった。さらに、風や気圧変動による気象擾乱が湾口部周辺の流動特性に大きく作用し、それらにより大規模な水交換が生じている可能性を示唆する結果が得られた。しかし、流動と水交換に及ぼす気象擾乱の影響を定量的に明らかにするには至っていない。

そこで本研究では、陸奥湾に設置されているブイによる連続観測データと気象データを用いて湾口部で発生する特異な水質変化の抽出を行い、気象擾乱が流動と水質（水温・塩分）に与える影響について解析を行う。さらに、特異な現象が発生した 1997 年 6 月初旬を対象に、気圧の移動とそれに伴う風場の変化を取り込んだ数値シミュレーションを実施し、気象擾乱に起因した湾口部周辺の

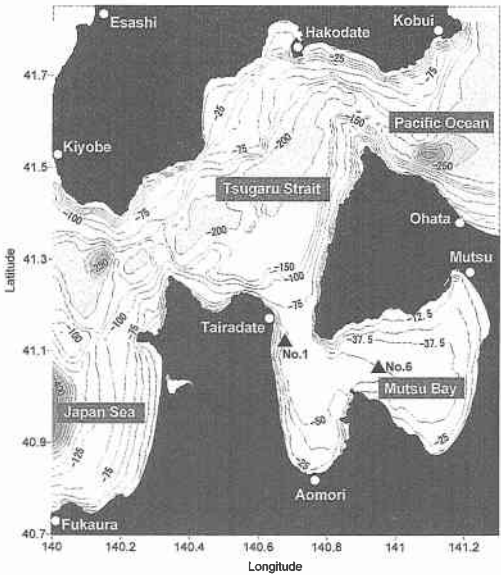


図-1 陸奥湾周辺図

流動と密度構造の変動特性を明らかにする。

2. 湾口部の流動・水質と気象の関係

（1）ブイ観測データの概要

陸奥湾では 1970 年代から湾内 6 定点（現在は 4 定点）においてブイによる流動・水質・気象の連続観測がなされている。本研究では、図-1 に示した 1 局（平館）ブイと 6 局（東湾）ブイで観測されたデータを解析に用いた。1 局ブイでは水温・塩分を 4 水深（1 m, 15 m, 30 m, 45 m（海底上約 2 m））で、流向・流速を 2 水深（15 m, 30 m）で観測しており、6 局ブイでは、その他に 2 水深（30 m, 46 m（海底上約 2 m））で溶存酸素を、また海上において風向・風速・気温を観測している。

（2）陸奥湾の海象と気象要素の関係

気象要素（風・気圧）が湾口部の流動・水質と湾内の潮位変動に与える影響を把握するため、前述のブイ観測データと気象庁年報の海面気圧、青森港での実測潮位を用いて、各要素の相関解析を行った。解析にはデータ欠損の少ない 1997 年 6 月のデータを用いた。

* 学生会員 修(工) 大阪大学大学院 土木工学専攻
** 正 会 員 工 博 大阪大学大学院助教授 土木工学専攻
*** 学生会員 大阪大学大学院 土木工学専攻
**** 正 会 員 博(工) 大阪大学大学院助手 土木工学専攻
***** 正 会 員 総合科学(株) 海域環境部第三課
***** 正 会 員 工 博 大阪大学大学院教授 土木工学専攻

ここでは湾口部の各層における流速・密度と、以下の4つの気象要素との相関解析の結果について述べる。

- (a) 6局ブイ (湾中央部) の東西方向の風速 (東風を正),
- (b) 6局ブイ (湾中央部) の南北方向の風速 (北風を正),
- (c) 青森の海面気圧,
- (d) 青森と函館の気圧差 (青森－函館)

湾口部1局ブイで観測された水深15mの南北流速 (北流を正) との相関解析の結果を図-2に示す。湾口部の南北流速と東西風速に高い相関が認められる。現地観測 (崔ら, 1997) により東風時に北向きの流れが卓越することが見いだされており、本解析の結果と定性的に一致する。また、気圧と相関が低い気圧差との相関が高い。これは気圧が変動しても気圧勾配が小さく風を伴わなければ流速の変化には結びつかないことを示唆しており、表層の流動には風が大きな影響を及ぼしていることを示している。なお、その他の相関解析からは気象要素との有意な相関は認められなかった。

海底近傍の密度変動と気象にも同様の傾向がみられ、底層密度の変動は東西風と相関が高かった。しかし、水深15mの密度変動に関してはすべての気象要素に対して相関が低かった。陸奥湾では成層期の躍層位置は水深30m付近に存在し、上層では密度の一様化が進んでいる。そのため、擾乱を受けても、有意な密度変化が生じないことに起因しているものと考えられる。

青森における実測潮位と予報潮位の偏差と、気象要素との相関解析の結果を図-3に示す。流動と異なり水位

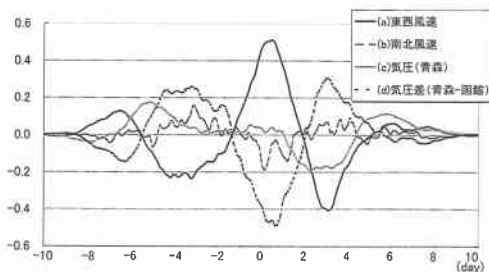


図-2 南北流速と気象要素との相関

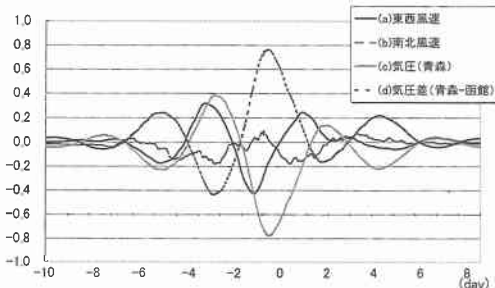


図-3 青森の潮位(予報潮位からの偏差)と気象要素との相関

変動の場合には風速との相関は低く、気圧や気圧差と高い相関を有している。つまり水位変化には気圧が大きく影響し、風の影響は弱いと言える。

以上の結果より、湾口部の流動と水質変動には東西風や気圧勾配が大きく作用し、湾内の潮位変動に対しては気圧の影響が大きいことが明らかとなった。時折観測される特異な流動や、突発的な水交換の機構を明らかにするためには擾乱因子として風と気圧の両方を加味する必要があると考えられる。

(3) 湾口部における特異な水質変化とその抽出

図-4は、1997年6月に湾口ブイ(1局)において観測された水深30mの水温変化とその24時間移動平均、およびそれらの偏差の絶対値を示している。9日、14日、21日、25～29日に偏差が大きくなっており、水温が急変したことがわかる。図-5には6月5日から15日の水温の鉛直分布の経時変化を示した。9日から10日にかけて全水深にわたり水温が低下し、特に底層では他には見られない11°Cの低水塊が出現していることがわかる。この期間、塩分も水温と同様に急激な変化が認められた。このような急激な水質変化発生時の気象状況を調べてみると(図-6参照)、その前後で風と気圧が大きく変化していることがわかる。したがって、このような急激な水質

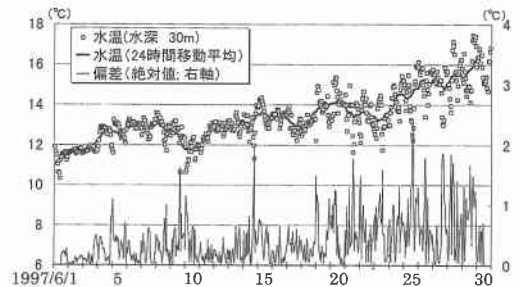


図-4 湾口部の水温(水深30m)の経時変化

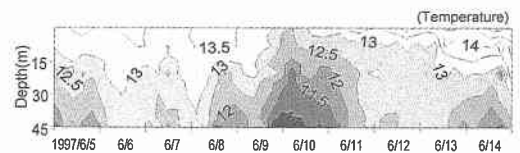


図-5 湾口部の水温の経時変化

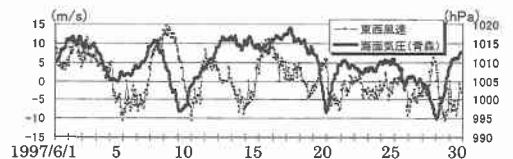


図-6 湾中央の東西風(西向き正)と海面気圧(青森)

構造の変化は気象擾乱により引き起こされた可能性が高く、陸奥湾の水交換に少なからず影響を及ぼしていることが考えられる。

3. 気象擾乱を考慮した再現シミュレーション

湾口部における急激な流動・水質変化の発生は、気象擾乱と関係があることが示唆された。そこで、前章で解析した1997年6月初旬を対象として、気圧の移動とそれとともなう風場の変化を動的に考慮した再現シミュレーションを行い、その発生メカニズムの解明を試みた。

(1) 数値モデルの概要

ここでは中辻(1994)が大坂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、静水圧近似とブジネス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、成層効果を取り入れた。さらに、海上風による混合作用を考慮するために中立状態の鉛直渦動粘性係数の算定にHenderson-Sellors(1995)による算定式を用いた。また、移流項の算定には最大2次精度の風上差分となるTVDスキームを採用した。TVDスキームで用いる流速制限関数については、様々な形のものが提案されているが、ここではOuahsineら(1999)が行った流速制限関数の比較検討で最も高精度とされたSuperbeeリミターを採用した。気圧の効果は、圧力値の算出時に水表面における大気圧を付加することで取り込んだ。

(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 間隔で東西方向に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×15層位、10 m×2層位、15 m×1層位、20 m×1層位、30 m×2層位の合計25層位とした。また、計算負荷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

水温と塩分分布の初期値は、関係機関で実施された6月の観測値を空間補間して与えた。また、計算時間間隔は計算の安定性を考慮し20秒とした。

c) 境界条件

日本海側と太平洋側の開境界における水位の境界条件は、主要6分潮(M2, S2, K2, K1, O1, P1)を考慮した潮位変動として与えた。調和定数は日本海側では深浦と清

部、太平洋側では大畑と古武井の値を使用した。気圧の境界値は広域の気圧分布を考慮することを目的に、周辺8地点(函館、青森、江差、深浦、むつ、室蘭、八戸、浦河)における気象庁年報の毎時海面気圧を時空間補間して与えた。風の平面分布は得られた気圧分布より各計算格子上で傾度風速を算出し、それを高橋(1947)の提唱した経験式に従い風速を0.67倍、風向を低気圧側に17度回転させ換算したものを海上風とした。河川からの淡水流入は陸奥湾内のみ53河川において平均流量を連続して与えることで考慮した。また、熱収支計算に必要な気温と全天日射量は気象庁年報の5地点(函館、青森、江差、深浦、むつ)の観測値を用いて、気圧と同様の時空間補間を施し計算ステップ毎に与えた。雲量値は青森の6月の平均値を一定値として与えた。なお、降雨は考慮していない。

d) 計算手順

計算は3段階に分けて行った。はじめに初期流動場作成のため密度効果を考慮しないバロトロピック流れ計算を5日分(1997年5月26日から5月30日に対応)行った。次に密度の効果を考慮したバロクリニック流れ計算を8日分(5月31日から6月7日まで)行った。ここでは風と気圧の効果は考慮していない。最後の6日分(6月8日から6月13日まで)の計算では、気象擾乱の影響を把握するため、「風と気圧を未考慮(Case 0)」、「気圧のみ考慮(Case 1)」、「風のみ考慮(Case 2)」、「風と気圧を同時に考慮(Case 3)」の4ケースの計算を行い、解析に用いた。

e) 風場の再現性の検討

まず、計算結果に大きな影響を及ぼすと考えられる風の平面分布の再現性を検討した。再現性の評価には6局ブイの風向・風速データを使用した。図-7には、風速の計算値とブイによる観測値をあわせて図示した。ただしブイによる風向・風速は海上10 mのものに補正した値を示している。東西風速は6月10日の風速、風向の反転などおおむね再現されている。一方、南北風速に関しては6月8日から10日にかけて計算値が観測値より約3

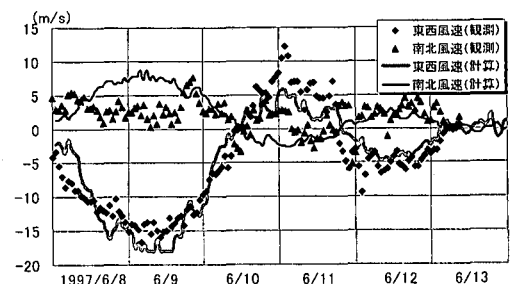


図-7 6局ブイにおける東西・南北風速(東向き・北向き正)

m/s の過大評価となっている。6 局ブイの南北には夏泊半島、下北半島があり、南北風は地形の影響を受けていることが推測される。

(3) 計算結果

図-8 に青森で観測された実測潮位と Case 2 と Case 3 の計算で得られた潮位を示す。この期間中、低気圧が日本海から北東に進行しながら津軽海峡を通過しており、実測潮位は、予測潮位より最大 15 cm 上昇していた。図から明らかなように風のみを考慮した場合は潮位の再現性が低いが、風と気圧を考慮した場合には、十分な精度で再現されている。

湾口部 1 局ブイの設置位置における水温と流速の計算結果 (Case 0, Case 3) を図-9 に示す。Case 0 では 6 月 10 日に観測された水温の急変 (図-5 参照) は再現されていないが、Case 3 の結果には水温の急変が再現されている。また、流動構造も Case 0 と Case 3 で大きく異なる。図には示していないが、風のみを考慮した場合 (Case 2) も Case 3 と同様の結果が得られた。このことから、この水温の急変現象は気圧にはあまり依存せず、風の影響を考慮することにより再現が可能であり、風が支配因子となっていることがわかる。また冷水塊の起源を明らかにするために Case 0 と Case 3 の計算で得られた水温分布を比較した。図-10 にそれぞれの計算で得られた湾口周辺の水深 40 m における水温分布を示す。Case 0 と Case 3 の水温分布は大きく異なり、Case 3 で

は湾外から水温 11°C の低温水塊が流入してきている様子がわかる。また、低温水塊の流入は湾口の西半分のみで東側はむしろ水温は高くなっていることもわかる。湾口部で観測された水温の変化は、気象擾乱の影響により湾外の流動・水質構造が変化し、その影響が湾内まで及んだものと考えられる。

次に、湾口断面における気象擾乱に起因した流量変化について解析を行なった。Case 1, 2, 3 それぞれの場合に得られた日流量について、Case 0 の場合を基準とした偏差量で表したのが図-11 である。湾口部の水交換に及

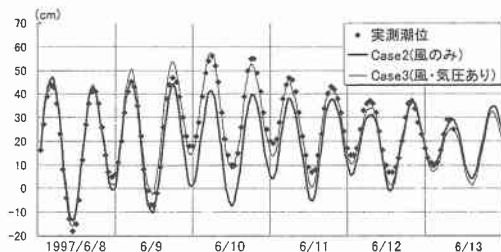


図-8 青森における潮位変動

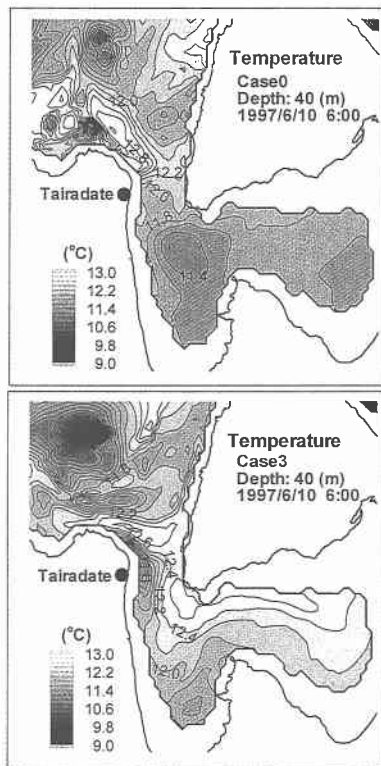


図-10 水温分布の比較

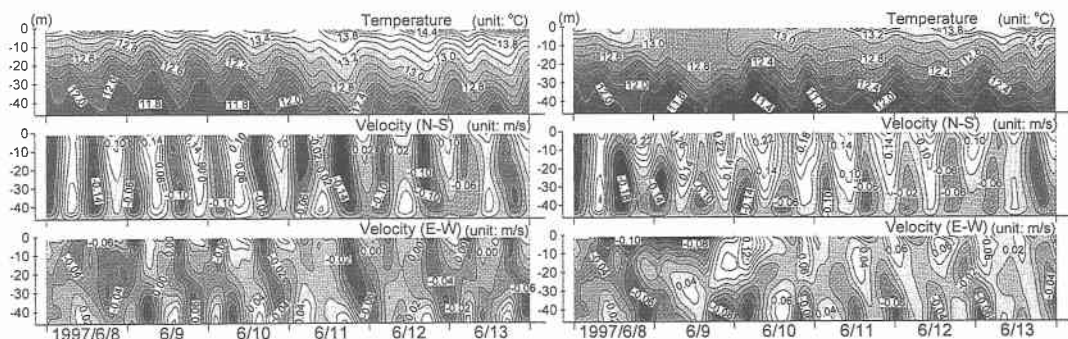


図-9 湾口部における水温・流動構造の鉛直分布の経時変化 (左: Case 0, 右: Case 3)

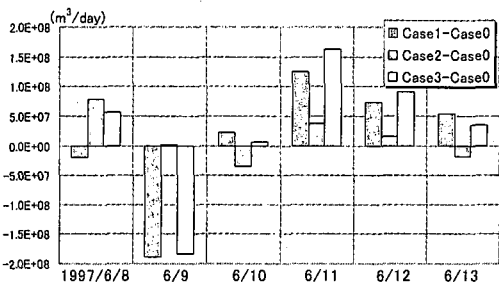


図-11 湾口部通過流量収支の比較

ばす風と気圧の影響の大きさは、日ごとに異なり、例えば6月8日では風のみを考慮した場合 (Case 2) と風と気圧を考慮した場合 (Case 3) とで同程度の値を示しており、水交換に気圧変動は大きな影響を及ぼさないと考えられるが、6月8日と同様に強い東風が卓越していた6月9日には逆に水交換に風の影響がほとんど表れておらず気圧が強い影響因子となっている。すなわち、湾口部の通過流量に及ぼす風と気圧の影響は、擾乱の時空間構造に依存し、風と気圧をそれぞれ分離しては議論できず、両方を取り入れた解析が必要であることがわかる。

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) 相関解析の結果、湾口部の南北流速成分は湾中央部の東西風速成分と高い相関を有し、また、青森の実測潮位と予報潮位の偏差は気圧と高い相関を示すことが明らかとなった。

(2) 風速や気圧の急変時には湾口部において急激な水質 (水温・塩分) 変化が発生する頻度が高い。

(3) 気圧と風の効果を動的に取り込んだ数値モデルで水質の急変時の再現シミュレーションを行った。その結果、湾口部でみられる急激な水質変化は主に風の影響

により引き起こされたことが明らかとなった。

(4) 湾口断面における通過流量に及ぼす気象擾乱の影響の大きさは、その時々気象条件により異なることがわかった。したがって水交換機構の解明と定量的評価のためには、気圧と風の両方の効果を取り入れた解析が必要である。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (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.
- 高橋浩一郎 (1947): 外挿法に基づく量的天気予報の研究 (その1), 気象庁研究速報, 第13号.
- 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. A9.1-28.
- 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.
- 西田修三・山中亮一・西尾岳裕・福島博文・田代孝行・中辻啓二 (2000): 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.
- 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.
- Quahsine, A. and Smaoui, H. (1999): Flux-Limiter schemes for oceanic tracers: application to the English Channel tidal model, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 179, pp. 307-325.
- Henderson-Sellors (1985): New formation of eddy diffusion thermocline models, Appl. Math. Modeling, Vol. 9, pp. 441-446.