

陸奥湾湾口部における流動・密度構造

——1996年夏の観測——

崔 成 烈* ・ 入江 政 安** ・ 福島 博文***
西田 修 三**** ・ 中辻 啓 二*****

1. はじめに

近年津軽海峡の流況や水質を中心に活発な研究（例えば、中辻ら（1996）、福島ら（1996）、力石ら（1992））が行われるようになったが、日本海を含む外海が陸奥湾に及ぼす影響などについての手掛かりは究明できていない。これに加えて、陸奥湾湾内の流動や物質循環の過程などについても未だ明らかになっていない状況にある。大谷（1973）によれば、陸奥湾の流動には恒流的な流れや循環流はなく、流れは風などの局所的な気象要因に依存すると推定されている。このような状況の下で、陸奥湾湾口部での流動特性や残差流系および物質輸送を解明するために1995年夏に湾口部での観測を実施したが、観測機器の精度の制限で湾口部において50 m水深までの流速しか観測できなかった。そこで、1996年夏に再度ADCPとSTDを用いた現地観測を陸奥湾湾口部周辺海域において実施した。

観測の内容は1995年夏（中辻ら、1996；福島ら、1996）と同様であり、湾口部横断方向における断面での残差流系の把握と物質輸送量の算出と、湾口部の縦断方向における内部波の特性の定量的な把握である。また、水温、塩分等に加え生物プランクトン量の指標であるクロロフィルの観測も行った。観測期間中には約9 m/sの東風の連吹のために、1995年夏の流動・密度構造とはかなり異なった興味ある結果を得たので報告する。

2. 現地観測

2.1 観測位置および観測内容

図-1は陸奥湾の地形と観測線を示す。1996年夏の観測では観測する横断面をもう少し湾外に設定する予定であったが、波が高く、観測の危険性から、横断観測線⑩を1995年の横断観測線と同じ位置に設けた。縦断方向の観測線も青森湾に至る測線⑧と縦断線から直角に曲がって湾中央部に向かう測線⑨の二通りを設けた。また、内

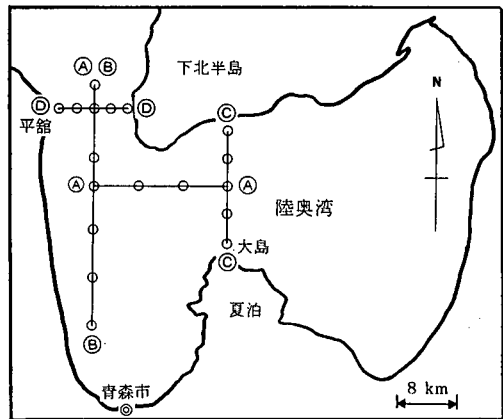


図-1 陸奥湾の地形と観測線

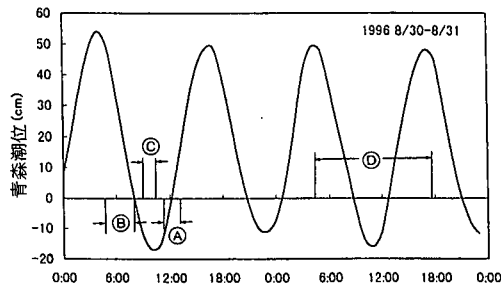


図-2 観測期間の青森港における潮位

湾（東湾）への流入出形態を確認するため、夏泊北端の大島と下北半島南端を結ぶ測線⑨を設けた。

観測にはADCPを用いた流速測定と、STDによる水温、塩分、そしてクロロテックによるクロロフィルのデータ収集を8月29日から8月31日の3日間行った。29日には機器の調整とテスト観測を行い、翌30日にはA～Cの3測線上の各測点を移動しながら、主に縦断方向の流況・水質の観測を行った。31日にはADCPとSTDを用い、湾口部の測線⑩に沿って横断断面の連続観測を一潮汐間5往復を実施した。天気不順のために、1996年夏の6.5往復と比較すると計測精度が少し悪い。湾口部の最大水深75 mでの流速計測が可能のように300 kHzの

* 工博 (株)建設技術研究所 大阪支社
** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻
*** 正会員 (株)建設技術研究所 大阪支社
**** 正会員 工博 八戸工業大学助教授 工学部土木工学科
***** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

ADCPを用い、水深1 m ピッチの鉛直方向データのサンプリングを行った。STDは10 cm ピッチで計測した。

2.2 観測期間の気象及び海象

観測期間中の日潮不等による潮汐の変化を避けるため、1996年夏の観測も図-2のように潮位変動が正弦波形となる期間を選定した。各観測線の観測期間は図中の(A)~(D)に示している。30~31日のほぼ全観測期間にかけては東風が強かった。とくに、横断観測時には図-3に示すように約9 m/sの東風が連吹していた。後述するがこの風は今回の観測に当たって非常に重要な役割を果たしている。

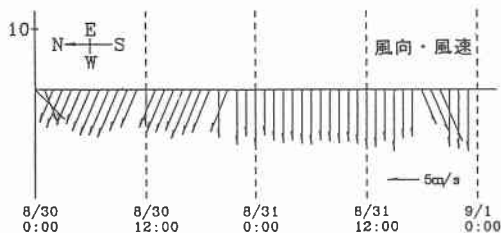


図-3 湾中央部で観測された海上での風速変動

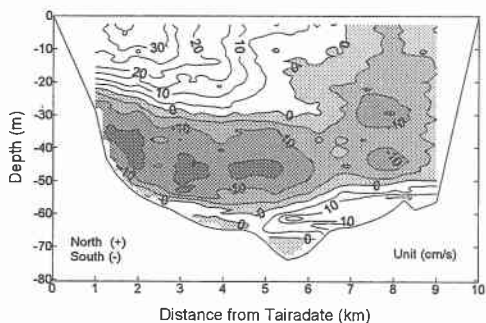


図-4 残差流の南北成分流速の横断面内分布

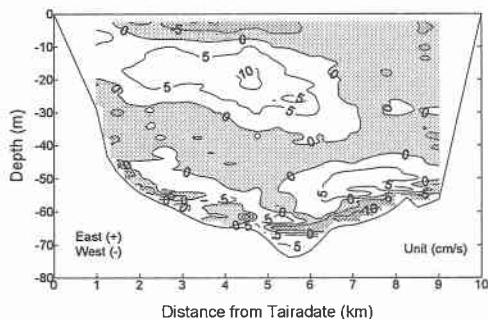


図-5 残差流の東西成分流速の横断面内分布

3. 横断方向の観測

3.1 残差流の南北ならびに東西方向成分

1996年夏の断面内の流速分布の特徴は、全観測期間を通して西岸側の上層では北流が観測されたことである。上げ潮時においても、西岸から4 km、水面から20 mの範囲で最大30 cm/sの北流が見られる。また、東岸の海底部60 m以下の水深においても、常時北流が観測されている。この流動の時間変化は残差流系に直接影響を与えることになる。図-4と図-5は湾口横断面で得られた残差流の南北成分と東西成分の断面内分布を示す。残差流の算出方法は杉山ら(1995)に詳細に記述してある。図-4の正の値は北流、つまり湾外への流出を、負の値は

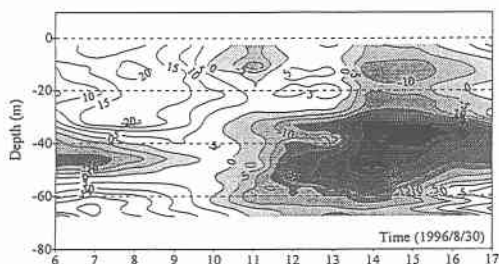


図-6 横断観測線①~④中央部での南北流速の経時変化

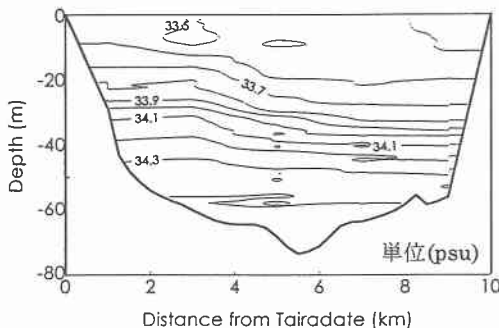


図-7 1潮汐平均した塩分の横断面内分布

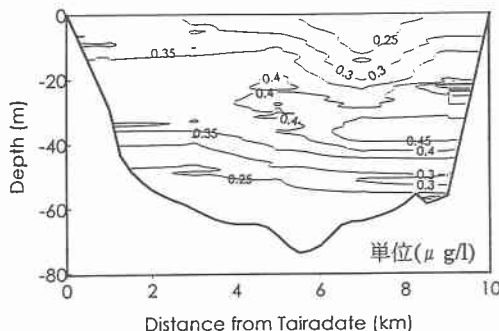


図-8 1潮汐平均したクロロフィルの横断面内分布

南流, 湾内への流入を示す。同図より西岸表層と東岸海底部では北流, その他の断面では南流の残差流系が認められた。最大値はそれぞれ 35 cm/s, 16 cm/s と予想以上に大きい。図-3 に示すように, 約 9 m/s の東風が定期的に吹いており, 風応力とコリオリ力によりエクマン螺旋が形成され, それが地形の影響で方向を変えて湾口部で現れているものと思われる。水表面から水深 12 m 付近で北西向きの吹送流が発達している様子が図-5 の残差流の東西成分からも明らかに分かる。ちなみに, エクマン層の厚さを推算してみると約 14 m であり, 図-3 の北西流が卓越している断面の厚さとほぼ同じ値を呈している。また, エクマン層の流速は風速の 3.5% に相当すると言われており, 実測した流速の約 30 cm/s に近い値を呈している。

もう一つ注目すべきことは, 流動が断面内で三層構造を呈していることである。この三層構造の原因は未だに確定はできていないものの, 1995 年夏と 1996 年夏とにおいて共通して認められる現象である。但し, 風の影響を受けて, 表層流出する断面位置は両年で異なっている。図-6 に示す湾口部横断測線の中央での南北方向流速の時間変化を見ると, 外界からの流入は水深の中央部から始まっている。また, 両年ともに湾口の縦断方向に明瞭な密度界面が観測されている。外海水と湾内水の関係で三層構造が形作られる可能性も指摘できるが, 今のところ類推の域を出ない。湾口の縦断方向の精度の高い観測が必要である。

3.2 塩分とクロロフィルの分布

本研究で用いている塩分単位は電気伝導度より得られるユネスコ実用塩分 psu を使っており, 図-7 の一潮汐平均した塩分の断面内分布は 1995 年夏の観測では地衡流バランスで傾斜する傾向にあったが, 1996 年夏における等密度線は西岸約 3 km 以内の海域において緩やかに傾斜するが, それ以外の横断面では密度分布は水平になっている。つまり, 図-4 および図-5 から分かるように, 東風の連吹によって低塩分の湾内水が西岸の上層部を通過して外海へ出ていく。その過程で, 上層水は下層水を取り込むために等密度線は西岸側で高くなっている。西岸 3 km 内の水深 10 m から 20 m まで続く 33.9 psu の緩やかな等塩分線と残差流の流出入の境界が一致しているのも吹送流の影響が及んでいる証拠だといえる。

図-8 は一潮汐平均したクロロフィルの横断面内分布を示す。陸奥湾の湾口部は水深 15 m 付近の海底がきれいに見えるぐらい透明度を保っている。植物性プランクトン量の大小の目安であるクロロフィルは $1 \mu\text{g/l}$ より低い値が観測された。その内, 水深 20 m から 40 m の中層のクロロフィル量が多く, 表層と下層は少ない。とく

に, 東岸約 4 km 範囲内の中層のクロロフィル量が高いのは後述する密度構造と関連している。また, 西岸側より東岸側のクロロフィル量が高かったのは, 栄養塩類の主な流入域が東半分の中層であることと一致している。一般に, 陸奥湾では栄養塩類の現存量は外海の方が高いことが報告されている (大谷 (1973))。

4. 縦断方向の観測

4.1 流速の縦断方向構造

図-9 は下げ潮時に測線⑧において, また, 図-10 は上げ潮時に測線④において実施した縦断観測の結果を示したものである。図中, 流速ベクトルは北方流速と東方流速の合成ベクトルとして表し, 横軸の測線⑧の縦断距離は湾口部横断観測線①~⑧の中央点からの加算距離を示している。なお, 測線④の観測では縦断距離が約 10 km の地点で, 南から東へ進路を転じた観測を行ったが, 図-10 には連続した 1 断面として描いている。

図-9 に示した下げ潮時の結果から, 湾口部において流速が三層構造をなしていることがわかる。中層部においては, 下げ潮時にもかかわらず南向き流速が観測され, 残差流計算の示すとおり流入 (南流) が卓越していることがわかる。また, 下層部の流動域は湾内急拡部以南の湾内にまで達し, 30 cm/s にも及ぶ流速を示している。一方, 上層の流速は急拡部で西向きの大きな流速を示し, 湾奥に向かって断面の急拡にともなう流速の急激な低下がみられる。

上げ潮時の結果を示す図-10 では, 湾口部の中層部において層厚 40 m にもおよぶ流入層が現れ, その最大流速は 50 cm/s に達している。また, 底層部では上げ潮時にも流出傾向がみられ, 下げ潮時と同様に流動の多層構造を示している。縦断距離が 10 km 以上の東西断面の観測域では, 表層約 10 m で北西向きの卓越流が生じており, 湾口部の横断観測で得られた結果と同様に強い東風の吹送効果が顕著に現れている。なお, 測線④の観測結果にも断面内表層部で卓越した吹送流が認められるとともに, 図-10 と同様に流速構造は概ね三層を呈していた。しかし, 地形の影響を受けて, 水深および横断方向に流況は複雑に変化していた。

4.2 密度とクロロフィルの縦断方向構造

図-9, 10 に示すように, 水温と塩分は一部逆転域が存在するものの, ほぼ上層で高水温低塩分, 下層で低水温高塩分の傾向を示し, 密度的には安定した構造を示していた。しかし, 等密度面は空間的に大きく変動し, 内部波の存在が認められるとともに, 湾内急拡部にかけて特に大きな変動振幅を有している。上述の流速構造と比較すると, 密度の遷移層で流向が反転し, 大きな流速値を示している。このことから, 1995 年夏の観測結果と同様に,

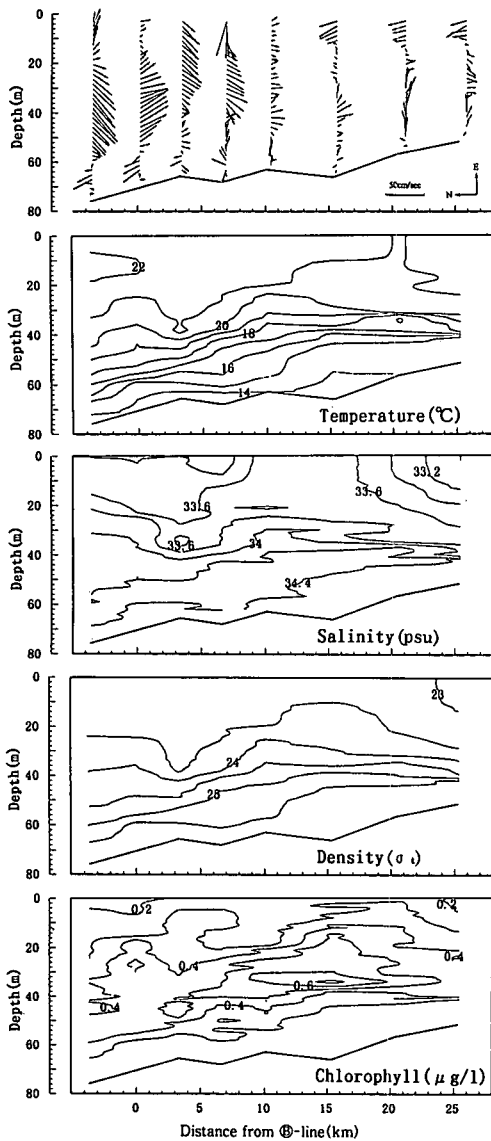


図-9 測線Bでの流速・水温・塩分・密度の縦断構造

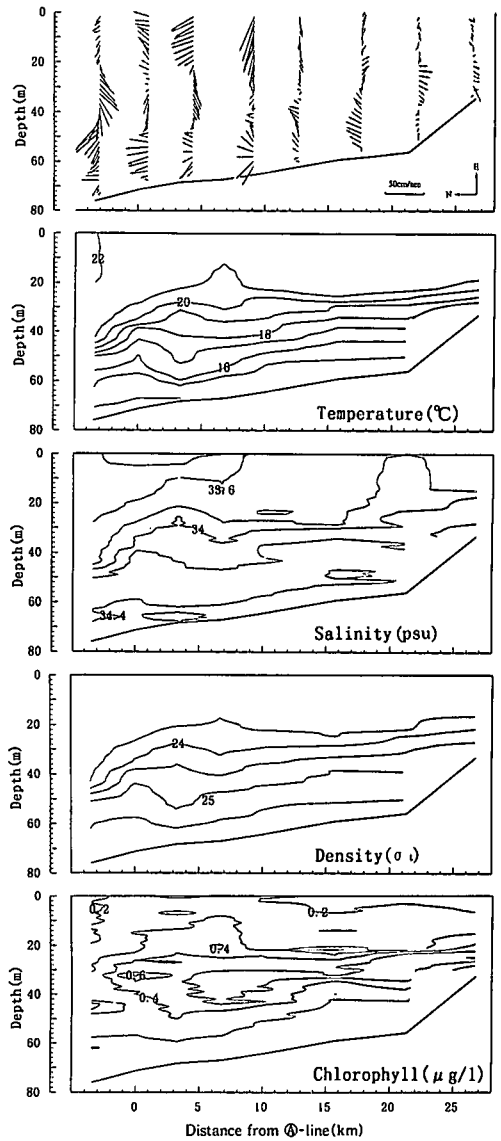


図-10 測線Aでの流速・水温・塩分・密度の縦断構造

流速と密度構造には良好な相関が認められ、内部潮汐波の湾内への伝播を示唆する結果となっている。また、測線A、Bともに、等密度面が湾奥に向けて約20 mも上昇しており、連吹にともなう大きな内部の流動構造の変化が認められる。

図-11, 12は、1996年7月24日、25日に実施した観測で得られた測線A、Bにおける密度構造を示したものである。測線A、Bともに1996年8月の観測よりも湾奥まで観測を実施している。測線Aの観測時の風速は4 m/s以下、また、測線Bの観測時は2 m/s以下の微風であり、ほぼ風の影響のない観測例と考えられる。1996年8月の観測結果と同様に密度の成層化と内部的な変動は

みられるが、湾奥に向けての等密度面の急な上昇は認められない。この結果からも等密度面の上昇は吹送効果によるものと考えられる。

縦断観測で観測されたクロロフィルは最大で約0.6 $\mu\text{g/l}$ と小さな値であったが、中層部の密度遷移層付近($\sigma_t=24\sim25$)にそのピークを有する分布形状を示し、密度構造との相関は極めて高い。また、中層部は横断観測の解析で得られたように流入残差流を示す層であり、このクロロフィルが外海から供給されたものとも考えられるが、観測データが少なく現段階では結論を得るには至っていない。

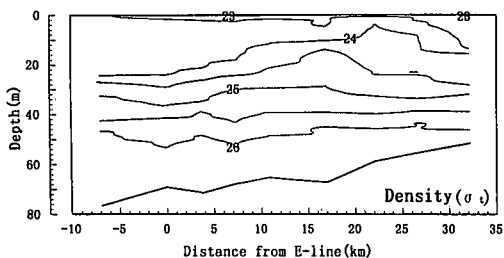


図-11 測線Aでの密度の縦断構造 (1997年7月)

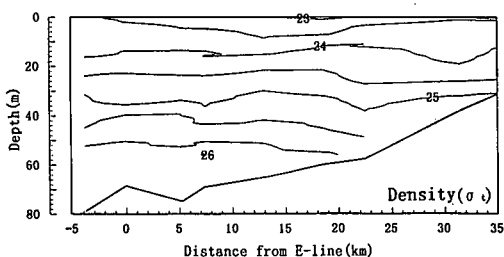


図-12 測線Bでの密度の縦断構造 (1996年7月)

5. 結 論

1995年夏の陸奥湾湾口断面の観測に引き続き、1996年夏にも ADCP, STD およびクロロテックによる観測を行った。観測時には約 9 m/s の東風が連吹しており、吹送流の影響を受けた湾口での流動、残差流及び密度構造を観測することができた。共通していえることは、湾口

部の流動は基本的に三層構造を呈していることである。その原因は今のところ明確ではないが、湾口部の縦断方向観測で得られた内部波および内部境界面の存在と三層構造とは強く関わっていると推察できる。とくに、観測時の内部境界面が 10 km の水平距離に対し 20 m も上昇していることは今後の研究を進めるにあたり、貴重な観測データであるといえる。

謝辞：調査研究を進めるにあたり、青森県水産増殖センターの多大な御協力と八戸工業大学環境工学講座の学生諸君の助力を、また、通産省資源技術総合研究所から ADCP の使用許可と運輸省青森港工事事務所からは潮位データの御提供を頂いた。記して感謝の意を表するとともに、本研究の一部は日産科学振興財団の研究助成(代表：東北大学工学部・澤本正樹教授)によってなされたことを付記し、あわせて謝意を表する。

参 考 文 献

- 大谷清隆 (1973): 陸奥湾の沿岸流に関する調査, 陸奥湾における沿岸流に関する調査報告書, 110 p.
- 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.
- 中辻啓二・崔 成烈・西田修三・福島博文・湯浅泰三 (1996): 陸奥湾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.
- 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, 海洋工学論文集, 第 43 巻, pp. 326-330.
- 力石国男・長沼光亮 (1992): 津軽暖流と対流暖流北上流の流量の分配機構, 海と空, 68 巻, pp. 27-38.