

陸奥湾湾口部における物質輸送機構

福島博文*・崔成烈**・西田修三***
中辻啓二****・湯浅泰三*****

1. はじめに

陸奥湾は本州最北の青森県に位置し、幅 10 km の直線水路型湾口部（平館海峡）を介して津軽海峡に繋がっている閉鎖性内湾である。外海水との海水交換は平館海峡を通して行われる。津軽海峡の流況に関する研究は少なく、岩尾（1991）や力石ら（1992）の報告があるに過ぎない。また、湾口部での流動・密度構造や物質輸送に関しても余り知られていない。青森県水産増殖センターでは湾内のほたて貝などの水産養殖のために海象や気象の計測用の固定式、簡易式ブイを湾内 6ヶ所に設けている。

単純な形をした湾口において流入期と流出期の流速の断面内分布は大きく異なっていることから、中辻ら（1996）は 1995 年 8 月に陸奥湾湾口部で ADCP と STD を用いた 3 方向流速、水温、塩分の連続計測を一潮汐期間にわたって実施した。

計測されたデータの解析から、平館海峡部の縦断方向の密度の鉛直分布には 2 層構造の潮汐内部波の存在が認められた。また、湾口中央部において南北方向流速、密度、および塩分の鉛直分布の経時変化から、流出期と流入期において流速の断面分布が大きく異なることを明らかにした。

本研究では陸奥湾湾口部での海水交換機構をさらに明確にするために、塩分フラックスに着目したデータ解析を行い、その断面内分布特性や経時変化から物質輸送に関する諸過程の貢献度に関して検討を行った。

2. 計測内容

計測は青森港での実測潮位を参考にして、日潮不等による海象の乱れが少なく、且つ水温成層の発達が予想される 1995 年 8 月 29 日と 30 日に実施した。29 日に湾口断面に直交する縦断面（St. 1～St. 7；約 15 km）を計測し、30 日に平館地点での横断面（No. 1～No. 9；約 10 km）での計測を行った。3 方向流速の計測には ADCP

（RD Instruments 社製、600 kHz）を使用した。また、水深方向のデータ採集は 1 m ピッチで行った。水温と塩分の測定には STD を用いて 0.2 m 水深間隔で計測した。図-2 に計測を実施した期間（網掛けで表示）を青森港の実測潮位とともに示す。本論文が対象とする 8 月 30 日の計測は下げ潮が始まる 6 時 45 分から 20 時 15 分までの計測期間である。その内容は湾口横断面で、船の側面に可動状態に設置した ADCP を水中に降ろしたまま約 5 ノットの速度で航行する片道 1 時間の計測を、連続的に計 13 回実施した。つまり、半日以上のデータを計測したことになり、残差流系の断面内分布の算出が可能となる。また、STD 計測は別の観測船を使い ADCP の流速計測に合わせて各測点で予め船を待機させ、水温と塩分の鉛直方向の測定を行った。用いた ADCP は 600 kHz の機種であり、水深 60 m までしか計測できない。水表面近傍の 0.5 m と計測可能最大水深付近 5 m で得たデータは乱反射現象などで信頼度が落ちるため、信頼できるデータの計測範囲は水表面下 0.5 m から水深 55 m までであった。

3. 塩分フラックスの計算

一般に、潮汐が流動の駆動力とする海域において、任意時間で得た流速や塩分等の計測値は潮汐振動成分と残差流成分に分けて考えられる。さらに、残差流成分の時間平均とその平均値からの偏差（乱れ成分）で残差流成

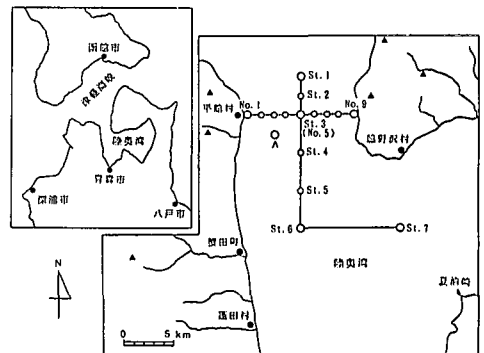


図-1 陸奥湾の地形および計測位置

- | | |
|----------------|--------------------|
| ・ 正 会 員 | (株)建設技術研究所 大阪支社 |
| .. 工 博 | 大阪大学客員研究員 工学部土木工学科 |
| *** 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 |
| ***** 学生会員 | 大阪大学大学院 土木工学専攻 |

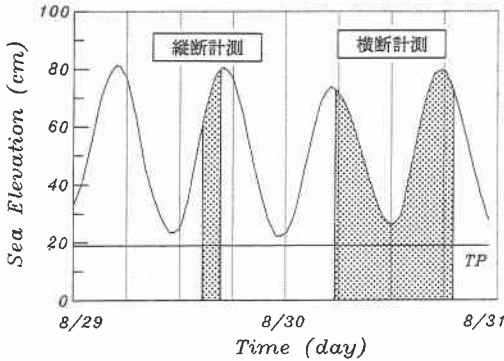


図-2 計測期間の青森港の潮汐

分を表すと、流速および塩分はその変動周期によって以下のように三つの成分に分解される。

$$\left. \begin{aligned} v &= \bar{v} + V + v' \\ s &= \bar{s} + S + s' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、右辺第一項は残差流成分の時間平均成分（残差流）、第二項は潮汐振動成分、そして第三項は乱れ成分である。また、上記の潮汐振動成分は約半日または1日の正弦関数であるため、この周期の長さの整数倍にわたって時間平均を施すと潮汐振動成分は0となり、流速の平均値と残差流は近い値になる。したがって、毎時間ごとに計測された流測値を24時間50分にわたって平均し、その値を残差流とすることもある。しかしながら、観測時間が半日であれば、時間平均により半日周期の潮汐振動成分はほぼ0となるが、日周期の潮汐振動成分は0にならない。すなわち、計測期間が半日より短い場合、既存の調和解析法では残差成分と半日周期、日周期を分離して求めるのは困難であるため、計測データの平均値は残差流成分の平均値に潮汐振動成分の平均値が加わったものであり、真の残差流とは異なってくる。これらのことから、本研究では半日周期のデータから潮汐振動成分の影響を補正して残差流を求める杉山ら（1995）の方法にしたがって潮汐分解を行った。

さらに、これらの各項を湾口断面での空間平均（ $\langle \rangle$ で表す）とそれからの断面偏差（添字 d で表す）に分解すると、上記の流速・塩分は次式のように分けられる（藤原ら、1995）。

$$\left. \begin{aligned} v &= \langle \bar{v} \rangle + \bar{v}_d + \langle V \rangle + V_d + \langle v' \rangle + v'_d \\ s &= \langle \bar{s} \rangle + \bar{s}_d + \langle S \rangle + S_d + \langle s' \rangle + s'_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

物質の移動量を表すフラックスとは単位時間の間に単位断面を通過した物質質量の速さと定義されるので、塩分フラックス（ F ）は塩分（ s ）と流速（ v ）の積として与えられる。したがって一潮汐間に湾口断面を通過した塩分フ

ラックスの時間空間平均は

$$\begin{aligned} \overline{\langle vs \rangle} &= \overline{\langle \langle \bar{v} \rangle + \bar{v}_d + \langle V \rangle + V_d + \langle v' \rangle + v'_d \rangle \cdot \langle \langle \bar{s} \rangle + \bar{s}_d + \langle S \rangle + S_d + \langle s' \rangle + s'_d \rangle} \\ &= \overline{\langle \bar{v} \rangle \langle \bar{s} \rangle + \langle \bar{v}_d \bar{s}_d \rangle + \langle V \rangle \langle S \rangle} \\ &\quad + \overline{\langle V_d S_d \rangle + \langle v' \rangle \langle s' \rangle + \langle v'_d s'_d \rangle} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

と表すことができる。ここで、式（3）の右辺第一項は流れの移流によって運ばれる塩分フラックスであり、他の項は分散によって運ばれる塩分フラックスである。さらに、分散項は第二項の残差流シア項、第三項の表面潮汐項、第四項の内部潮汐項、第五項および第六項の乱れ項に定義される。このようなフラックスの分類は任意断面での物質輸送がどのような物理機構によって支配されているかを知るための重要なパラメーターである。

4. 計測結果・考察

（1）塩分潮汐振動成分の経時変化

本研究では杉山らの手法を用いて計測値を残差流と潮汐振動成分、および乱れ成分に分けている。そこで、潮汐振動成分は以下のように水面上昇による湾口断面での断面平均流速（ $X(t)$ ）と各観測地点での鉛直平均流速（ $u(x, t)$ ）の回帰分析から得られる固有値（ $B(x)$ ）と断面平均流速の積から求められる。したがって、潮汐振動成分は観測地点毎に異なった値を持つことになる。

$$u(x, t) = B_0(x) + B(x) \cdot X(t) + \text{error} \dots\dots\dots (4)$$

図-3は式（1）の塩分の潮汐振動成分を上記の手法にしたがって求めた値を断面平均からの偏差分布（式2の S_d 項）の形で、計測地点（No.1～No.9）に対して経時的に表示したものである。断面中央部（No.5）は断面の平均的な値であるのに対して、両岸のばらつきは大きい。すなわち、下げ潮期の潮汐振動成分は東岸に卓越するのに対して上げ潮期には西岸で卓越する断面中央軸に関し

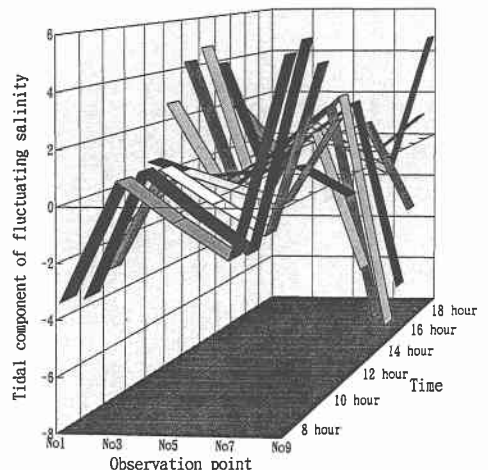


図-3 塩分の潮汐振動成分の経時変化

て逆対称となる特徴が認められる。

(2) 塩分フラックスの流出・流入構造

図-4(a)~(d)は横断計測時の下げ潮最盛期(9時30分)、憩流期(11時頃)、上げ潮最盛期(15時頃)、および憩流期(17時)における塩分フラックスの断面内分布を示している。網掛けした部分は負の塩分フラックス、つまり流入成分を示す。対応する時間における南北流速の断面内分布は中辻ら(1996)の論文の図-8(a)~(d)に掲載している。

これらの図から塩分フラックスの流入、流出の時間変動的パターンに関して次のようにまとめられる。下げ潮最盛期にはほぼ湾口断面全体で流出が生じている。とくに、東岸上層と40 m水深以下での流出が大きい。しかしながら、湾口断面の西岸の水表面近傍(A)と水深25 m以下の領域(B)において流入フラックスの存在が認められる。この水表面の流入成分は時間経過とともに湾口断面中央部へと広がっていく様子が見られる。図には示さないが、続く10時にはこの傾向が次第に広がるにつれて、東岸でも流入が始まり、11時には両側の流入フラックスの領域が繋がる分布(C)になる(図-4(b)参照)。このような分布は領域を広げながら下げ潮の終盤まで続く。上げ潮になると、湾中央部の40 m以下の流出フラックス領域を除いて全断面が流入フラックス領域にな

る。そして、上げ潮最盛期になると(図-4(c))、わずかながらD、E、F領域に流出フラックスの領域が出現する。上げ潮の終盤になるにつれて湾口断面の右半分の中央部の表面(G)の流出フラックス領域は湾口断面の中央部に広がる(図-4(d))。図には示さないが、この時の流入フラックス領域は下げ潮が始まる時の分布と同じであり、上述した塩分フラックスの挙動が周期的に繰り返していると言える。

上述したように今回の計測では水表面から55 mの範囲しかADCPでの流速計測は困難であった。しかしながら、図-4(c)~(d)に見られるように水表面下40 mで特異な分布形状を示していることから海底部近傍の流速の情報が必要である。以上の塩分フラックス分布の経時変化から、陸奥湾湾口部での海水交換は、下げ潮期においての西岸から湾口断面中央部にかけての上層(18 m以浅)での流入と、上げ潮期においての東岸から湾口断面中央部の上層(20 m以浅)にかけての流出が潮汐との時間遅れを生じながら行われていることが分かる。中辻ら(1996)の論文中の図-8(a)~(d)の流速分布と比較すると、図-4(a)での西岸の流入領域が若干変わることを除いてほぼ同じ断面分布構造を示している。

(3) 塩分フラックスの断面収支

概略的な塩分フラックスの流出入パターンは上述の通

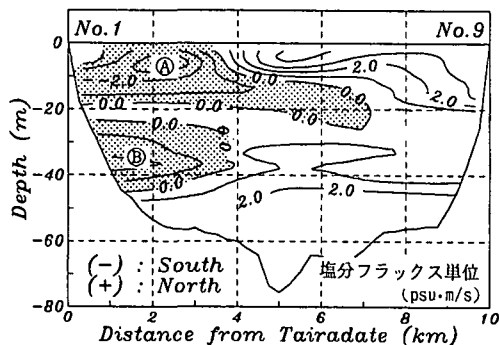


図-4(a) 下げ潮最盛期の塩分フラックス

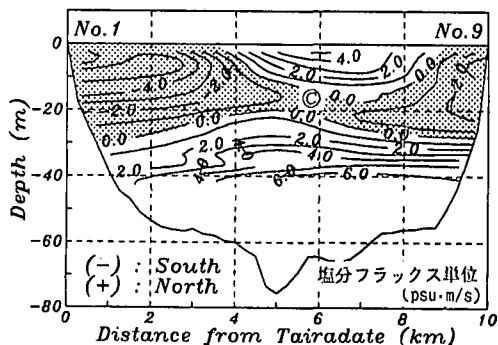


図-4(b) 上げ潮に向かう憩流期の塩分フラックス

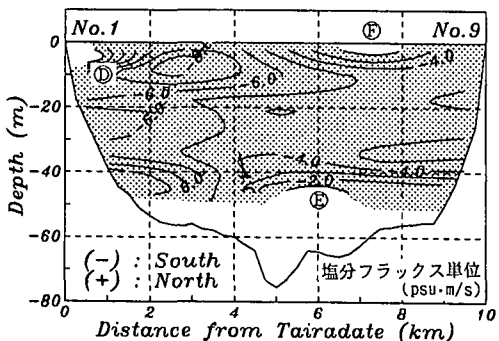


図-4(c) 上げ潮最盛期の塩分フラックス

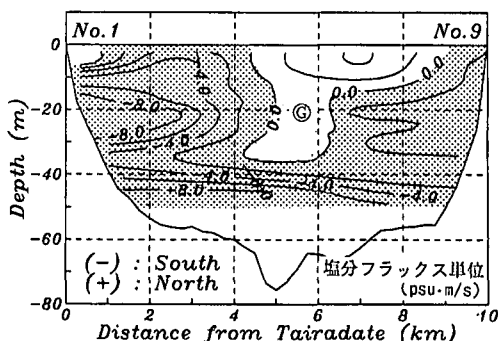


図-4(d) 下げ潮に向かう憩流期の塩分フラックス

りであるが、物質輸送を定量的に評価するためには、それらの総量の収支を知る必要がある。この総量は湾口断面を直交する流速の南北方向成分による塩分フラックスを一潮汐間積分して得られる。図-5は一潮汐間に湾口断面を通過した総塩分量を一潮汐間平均して得られる塩分量の断面内分布を示す。塩分の断面内分布は流速分布に比べてそれほど大きく変化しないため、図-5の断面分布は図-6に等値線で示した残差流の南北方向成分の断面内分布と非常に似ていることが分かる。すなわち、湾内への塩分フラックスの流入は西岸沖1 km～4 kmの全水深と東岸沖で生じている。一方、湾外への流出は主に湾口中央部から東岸沖に向う5 km～9 kmの海表面近傍で起こっており、また、西岸からの1 kmの範囲、そして湾口中央部の深層部でも生じている。このような流入パターンは全体的に密度の大きい外海水が西岸沖の全水深から流入し、東岸沖の表層部ならびに、断面中央部の30～50 mの水深から流出する構造を持っていることを示している。つまり、湾口部での流動場は密度場によって決まっていなかったことを示している。

つぎに、図-7は各計測時間に計測範囲の湾口断面を通過した総塩分量の経時変化を南北成分に分けて示している。北向き成分(●)は湾外への流出を、また南向き成分(○)は湾口を通過しての湾内への流入を示す。この図から流出成分が卓越しているはずの下げ潮期において、流出成分に匹敵する流入成分が見られるのに反して、上げ潮期には流出の北流成分がほとんど見られないことが分かる。したがって、一潮汐間の総塩分量の経時変化曲線は歪んだ正弦波模様を示す。横断計測時期における単位時間当たりの総流入塩分量は 99×10^3 (psu·m³/sec)程度であり、反対に総塩分流出量は 51×10^3 (psu·m³/sec)であった。その結果、塩分の実質流入する量が 48×10^3 (psu·m³/sec)も生じている。この時期の流速の南北成分による流量収支の経時変化は図-7とほぼ同じ形をしている。ちなみに、単位時間に湾口断面を通過した総流入流量は 3.02×10^3 (m³/sec)、総流出流量は 1.83×10^3 (m³/sec)で流入流量が 1.19×10^3 (m³/sec)程度上回る。

但し、前述したように ADCP (600 kHz) の性能から計測範囲は0.5 m～55 mにならざるを得なかった。しかしながら、図-4や図-6から推察できるように湾口地形はその中央部では水深70 mにも及んでおり、しかも海底部における流速が予想以上に大きいものと考えられる。したがって、上記の塩分フラックスや後述する表-1はあくまで信頼できる流速の計測範囲での値を採用していることを付記しておきたい。

(4) 塩分フラックス成分の寄与率

表-1は式(3)で示した塩分フラックスの時間空間平均で得られる各塩分フラックス成分を南北成分に分けて

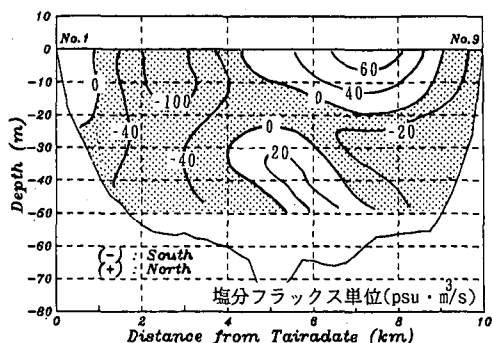


図-5 一潮汐間平均した塩分量の断面分布

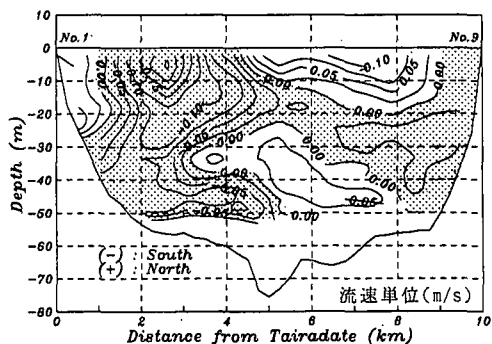


図-6 残差流の南北成分の等値線分布

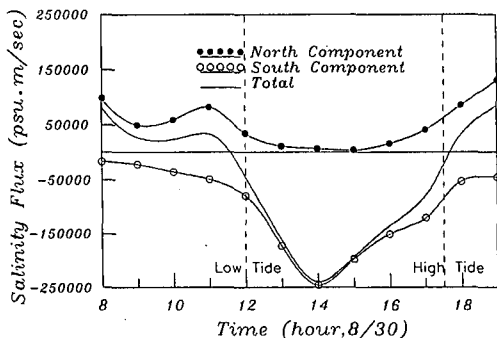


図-7 塩分量の断面収支の経時変化

表している。上表より湾口部断面での塩分の輸送は主に移流輸送によって行われていることが分かる。また、その移流方向は湾内に向かう南方向成分が卓越している。そして、分散項による輸送は移流項に比べて1%にも至っていない。その中で比較すれば残差流のシアアの占める割合が大きい。乱れ成分も認められるが、残差流シアアに比べれば5%～10%ぐらいであり大した量ではない。また、表面潮汐と内部潮汐による分散の寄与はほんのわずかであることが認められる。

表-1 塩分フラックス成分の寄与率

(単位: psu·cm/s)			
項		南向成分	北向成分
移 流		97.94	—
分 散	残差シア	0.658	—
	表面潮汐	—	0.0063
	内部潮汐	—	0.0098
	乱れ	—	0.0624

5. 結 論

本研究は陸奥湾における海水交換機構の解明を目的に、直線水路型湾口部での現地計測の結果をまとめたものである。海水交換の目安となる塩分フラックスを用いて検討した結果を要約すると、以下のようである。

(1) 塩分フラックスの流入パターンは西岸の表面から湾口断面の中央部にかけて広がり、反対に流入パターンは東岸の表面から湾口中央部にかけて広がる。塩分フラックスの一潮汐平均分布から判断して見ると、西岸沖1 km~4 km までの全水深と東岸沖での流入と、湾口中央部から東岸沖に向う海表面近傍(約10 m)、西岸から1 km 領域、そして湾口中央部の深層部での流出に分けて考えられる。

(2) 塩分量の断面収支は流入成分が流出成分を約 48×10^3 (psu·m³/s) 上回っている。これは断面収支の経時変化から明らかなように、流出が卓越するはずの下げ潮期にも流入成分が相当存在する陸奥湾湾口部の特徴で

ある。

(3) 塩分の潮汐振動成分の寄与は、両岸においてのばらつきが大きく、湾中央部では平均的な潮汐振動成分を値を持っているのが認められる。また両岸での潮汐振動成分の卓越位置は上げ潮期と下げ潮期で逆対称に現れる特徴がある。

(4) 湾口部断面での物質輸送はほとんど移流によって行われている。分散による輸送は移流項の1%にも満たない。

謝辞：本研究を実施するにあたっては青森県水産増殖センターと運輸省青森港工事事務所から海況データの提供を頂いた。計測においては八戸工業大学土木工学講座の学生諸君の助力を得た。また、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）を受けた。記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 岩尾尊徳 (1991): 月刊海洋, 24 巻, pp. 226-229.
- 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.
- 藤原建紀・高橋鉄哉・阿保勝之・杜多 哲 (1995): 内部潮汐による五ヶ所湾の海水交換, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1111-1115.
- 力石国男・長沼光亮 (1992): 海と空, 68 巻, pp. 27-38.