

陸奥湾の湾口部における密度構造と流れ

Density Structure and Flow Pattern in the Mouth of Mutsu Bay

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

By Keiji NAKATSUJI, Songyeol CHOI, Shuzo NISIDA, Hirohumi FUKUSHIMA and Taizou YUASA

The three-dimensional velocities, salinity and temperature were measured at the mouth of Mutsu Bay in a spring tide by using ADCP's and STD's. The cross-sectional distributions of velocities depict complicated flow patterns depending on tidal cycle and density field. There are no uniform velocity in the vertical direction. One tidal-averaged residual flow and density also indicated that the velocity fluctuations are affected by stratification and the earth's rotation. Their vertical profiles clarify existence of an internal wave in the longitudinal direction across the bay's mouth.

Key Words : Strait, Field Observation, Flow Pattern, Density Structure, Residual Current

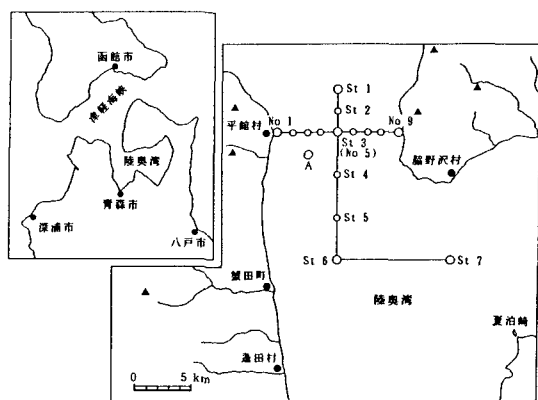
1. はじめに

陸奥湾は本州最北に位置し、約10kmの湾口狭窄部を介して津軽海峡に繋がっている閉鎖性の湾である。湾に注ぐ一級河川はない。また、多くの中小河川からの流入量も少ない。湾内への水供給と水交換は主として津軽海峡の外海水によって行われている。湾内では栽培漁業が盛んである。加えて、青森市、野辺地町、陸奥市の3市町からの汚濁水流入と、上述した閉鎖性のために水質悪化が懸念されている。

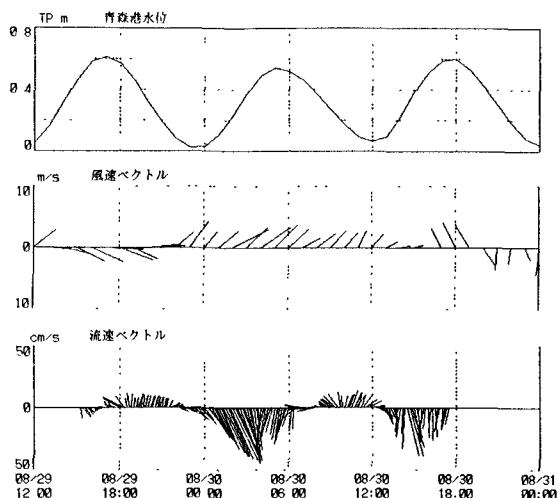
陸奥湾の海況計測は青森水産増殖センターによって湾内6地点で実施されている。それらは漁業関連の水質モニターのための水温計測を中心として行われている。また、湾外の津軽海峡における流況に関しては、岩尾(1991)、力石ら(1992)等の報告がある。しかし、湾内水との水交換機構の把握を目的とした密度構造や流動構造に関する調査研究はほとんど見られない。

本研究では、陸奥湾の水交換の機構を定量的に明らかにすることを目的に、湾口部においてADCPとSTDとを用いて湾口の横断面ならびに直交断面の計測を一半日周期間実施した。また、計測結果を一潮汐平均して得られる残差流についても検討した。

-
- * 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 大阪府吹田市山田丘2-1)
** 正会員 工博 大阪大学研究員 工学部土木工学科 (〒565 大阪府吹田市山田丘2-1)
*** 正会員 工博 八戸工業大学助教授 土木工学科 (〒031 青森県八戸市妙大開88-1)
**** 正会員 (株) 建設技術研究所 大阪支社河川本部 (〒540 大阪府中央区大手前1-2-15)
***** 学生会員 大阪大学大学院 工学研究科 土木工学科専攻



図－1 計測地点



図－2 計測時の水位、風速、流速の経時変化

2. 計測内容

計測は日潮不等の小さい8月下旬の大潮期

(1995年8月29日、30日)に実施した。前日の28日は低気圧の通過のため、強風が吹き、白波が高かった。観測時の気象は無風あるいは北よりの微風で、波浪もなく風状態であった。29日に湾口断面に直交する縦断計測を湾外から湾内にかけて、また、翌30日に湾口部横断面計測を行った。流速測定にはADCP(600kHz)を使用し、水深ピッチ1mでデータのサンプリングを行った。また、水温と塩分の測定はSTDを用いて、水深0.2mピッチの計測を行った。

(1) 計測方法

縦断計測は、東経140°43.5'を計測線に、北緯41°12'から41°4'までの約15km(St.1～St.6)までと、湾中央寄りのSt.7の計7地点で鉛直分布の計測を実施した(図-1)。ADCPによる流速計測は船を各測点で停留させ、データを約3分間採集し、平均化処理を施した。また、STDによる計測は流速計測するときに合わせて同時に実施した。計測は北端St.1より開始し、高潮時を挟んだ15時30分から17時30分まで行った。

湾口の横断方向の計測は北緯41°10'の西岸から東岸までの約10kmの区間としNo.1からNo.9の9測点を設けた。ADCPによる流速計測は約5km/hの船速で航行しながら連続的に片道1時間の計測を6.5往復、計13回実施した。また、STDによる計測は別船を使い、往路は奇数番号の各測点で予め船を待機させ、ADCPによる計測に合わせてデータの採集を行った。復路は計測線中央のNo.5において計測を行った。計測は30日6時から19時までの13時間にわたり実施した。また、西岸(平館)より設けたSt.A(水深49m)に2次元電磁流速計を設置し、29日15時から30日17時30分まで1秒間隔で流速の連続計測を実施した。

(2) 計測時の気象・海象

図-2は湾の西南端に位置する青森港での推算潮位、湾中央部で計測された風速変化、そして、St.Aで計測された流速ベクトルの経時変化を示した。図-2の潮位曲線を見ると日潮不等は小さく、水位変動は全振幅0.5mのほぼ正弦波形を示している。また、潮位変動に対応した半日周期の流速変動が認められ、流速の最大値は0.5m/s近くにも達していることもわかる。一潮汐平均では湾内に向かう南流が卓越していることがわかる。但し、後述の横断計測の結果に示されるように、流速構造は水深方向とともに横断方向にも大きく変化している。図-2の流速・流向は湾口断面の代表値を示すものではない。

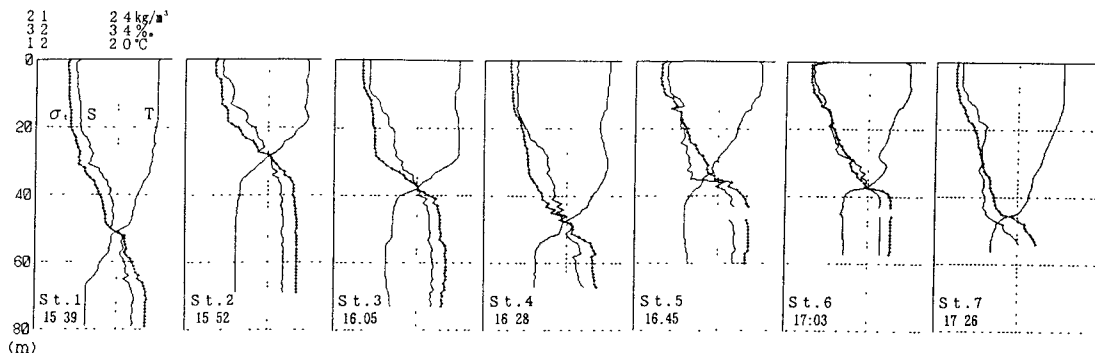


図-3 縦断方向の水溫、塩分、密度の鉛直分布

3. 計測結果

(1) 縦断方向の密度構造と流動構造

縦断計測によって得られた各測点の水溫、塩分と密度の鉛直分布を図-3に示す。また、図-4は図-3より得られた密度の等値線と、各測点における密度勾配および流速ベクトルの縦断方向分布を示す。流速ベクトルは、南北方向の流速と鉛直流速の合成ベクトルで表し、左方向を北成分に、上方向を鉛直上昇成分として示している。なを、図には陸奥湾中央部のSt. 7のデータも併せて図示している。

図-3のSt. 4の水深30 m付近に見られるように、水溫分布に幾つかの逆転域が存在する。しかし、塩分の影響が大きく、密度的には全層ほぼ安定な構造を示していることがわかる。ただ、水溫に比べて塩分の鉛直分布には小スケールの変動が認められ、その結果、急拡部のSt. 4、St. 5の密度遷移層内では、僅かながら密度の逆転が生じており、乱れの発生が予想される。表層と底層の相対密度差は各測点とも0.003程度の値を示しているが、遷移層の水深と厚さは各測点で異なる。とくに、湾口部のSt. 1からSt. 4にかけては大きく変化している。また、密度構造は概ね2層構造と見られるが、湾口から湾内に向けて表層部に高温低塩の層が存在し弱い3層構造をなしていることもわかる。図-4(a)の密度構造の縦断方向分布からは密度遷移層の内部波的な変動が見てとれる。流速分布も遷移層の上下で流向が反転

し、内部波の伝播に起因した流動と同様の特性を示していることがわかる。ちなみに、2層モデルによる内部波速を計算してみると、 $C=0.7$ m/s が得られた。図-4(a)より内部波の全振幅を20 mと考えると、上層流速は約0.3 m/sであり、計測された流速と同程度の値を示している。また、伝播の方向は湾内向きであることより、内部潮汐の入射に起因したものであると推定される。ただし、急拡部のSt. 5以南では、後述の横断計測に見られるように流況と密度は横断方向に大きく変化していると考えられる。

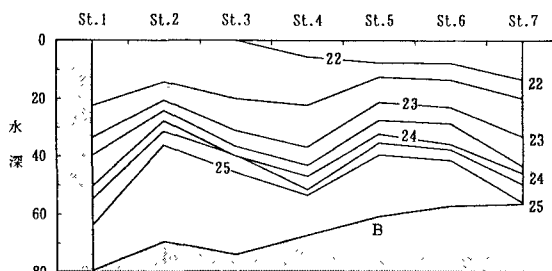


図-4(a) 密度の縦断面構造

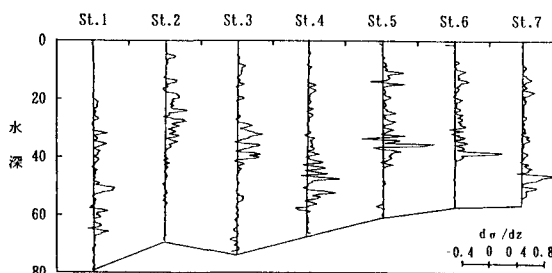


図-4(b) 密度の鉛直方向勾配の縦断面構造

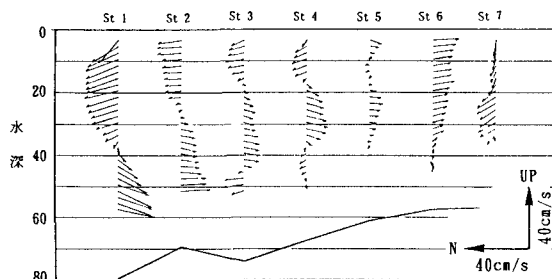


図-4(c) 流速の縦断面構造

(2) 湾口中央部で計測された時系列特性

湾口中央部St. 3 (No. 5)で計測された流速、塩分ならびに密度の鉛直分布の経時変化を、それぞれ図-5～図-7に示す。図中の縦軸の実線は青森港における低潮(12時頃)、高潮(17時40分頃)を示す。また、図-5は湾口の横断面に直交する南北方向の流速分布を示す。網掛け部の負の流速は南流、つまり陸奥湾へ流入する流れを示す。計測は下げ潮が始まる午前6時45分頃からほぼ一潮汐の期間行った。いずれの時間においても南北方向の流速は鉛直方向に一樣になることはない。図-5より湾口では非常に複雑な流動を示していることが分かる。東西成分は図には示さないが、8時までの水深30m～50m、および18時以降の海表面近くを除いて常時東向きに流動している。また、その流速値が南北流の流速値に匹敵する時間帯があることから、流動の複雑さが想像できる。下げ潮の最盛期8時30分頃には全鉛直断面において北流が卓越して、陸奥湾からの流出が生じている。しかし、下げ潮最盛期のすぐ後には、水深18m～27mの中層に外海水が流入してくるのが認められる。この南向きの流動は低潮時には水面から水深40mまで拡がっている。上げ潮期になると、南流に変わるが、40m以下では、なお北流が存在している。同様に、17時40分以降の下げ潮期には35m水深以深で南流が存在している。つまり、水深40m以下の南北流の時間変化は潮汐の変動と約2時間の遅れで生じている。その結果、水深40mを境界として、上層と下層で流入と流出が異なるという興味深い傾向を示している。

今回計測で用いたADCPが600kHzであることから水深60m(実質50m)の範囲しか計測できなかった。水深40m～60mで水温や塩分がこのような変化するとは予想しなかった現象である。このような水深40m～60m付近での海水の流入・流出は塩分や密度の鉛直分布に直接影響を与える。図-6や図-7に示した塩分と密度の鉛直分布の経時変化からも、この水深で塩分や密度の鉛直方向勾配を急増大していることが分かる。外海水が水深40m付近に流入してくる17時頃の塩分と密度の勾配は最も急になっている。

(3) 湾口断面における流速分布

図-8(a)～(d)は湾口で計測した南北方向流速の横断面内分布を示す。低潮、高潮に加えて、下げ潮最強時(8時30分頃)、上げ潮最強時(15時頃)での横断面内分布を示している。網掛けした部分の負の流速は南流、つまり陸奥湾への流入流速成分を示す。

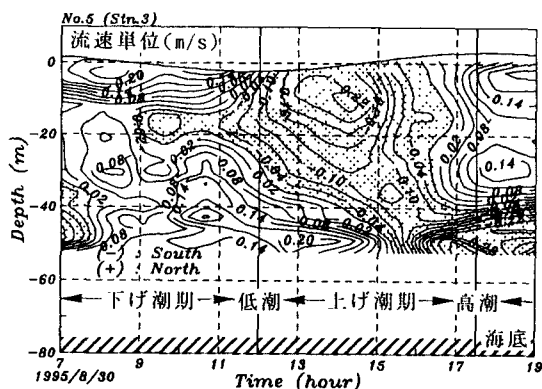


図-5 南北方向流速の鉛直分布の経時変化

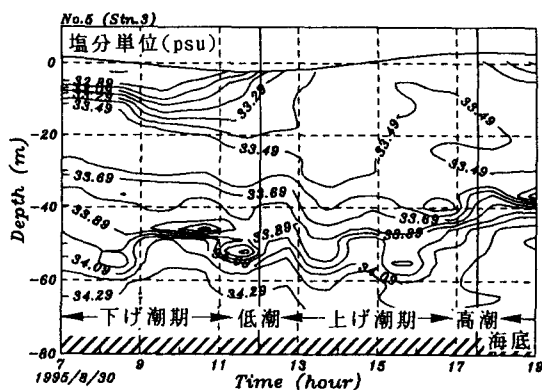


図-6 塩分の鉛直分布の経時変化

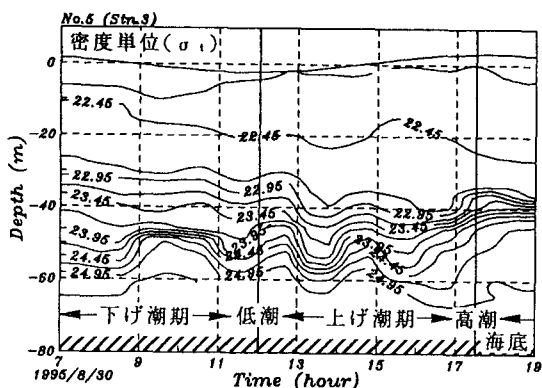


図-7 密度の鉛直分布の経時変化

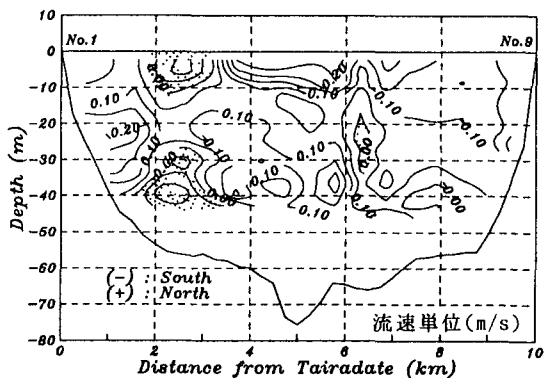


図-8(a) 下げ潮最強時の流速の断面分布

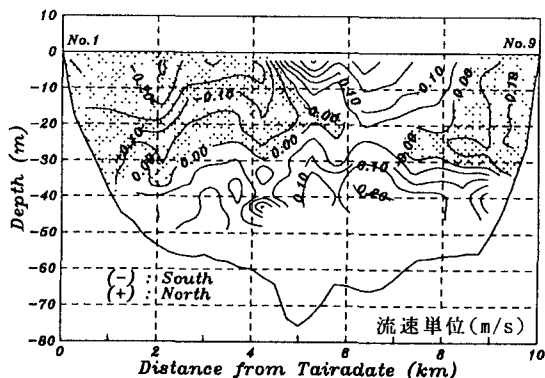


図-8(b) 上げ潮に向かう憩流時の
流速の断面分布

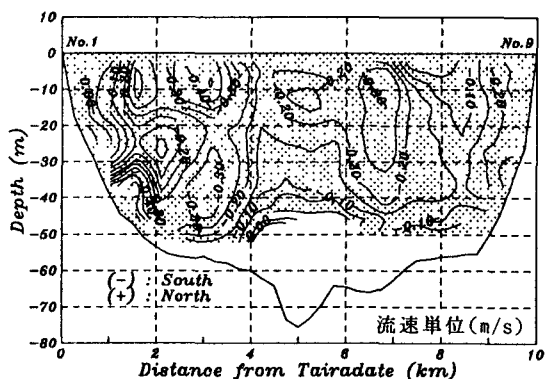


図-8(c) 上げ潮最強時の流速の断面分布

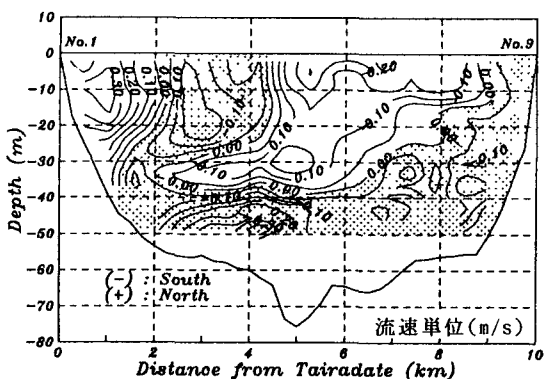


図-8(d) 下げ潮に向かう憩流時の
流速の断面分布

下げ潮の最強時には湾口中央の海表面近傍で最大流速 0.26 m/s が認められ、断面内流速も概ね陸奥湾から流出する北流となっている。しかしながら、西岸から $1.8 \text{ km} \sim 3.3 \text{ km}$ の水深 30 m 以下の下層、ならびに $6.2 \text{ km} \sim 6.5 \text{ km}$ の水深 $20 \text{ m} \sim 30 \text{ m}$ の中層において、南流つまり流入が認められる。この傾向は下げ潮最強前2時間においても計測されている。また、平館から $2 \text{ km} \sim 3 \text{ km}$ の水表面 10 m においても南流が現れている。下げ潮最強後1時間においては、この海表面近くの南流の領域は西岸側で鉛直方向に拡がるとともに、湾口中央部の水深約 10 m から 30 m まで拡がる。

一方、南流が東岸に現れるのは下げ潮最強後2時からである。このような傾向は続く低潮時(12時頃)の流速分布である図-8(b)からも明らかである。南流の領域は 30 m を越えて鉛直下方に拡がらないのが特徴である。

低潮から上げ潮期に入ると、全断面で南流つまり陸奥湾への流入が始まる。図-8(c)は上げ潮の最強時の流速分布を示しており、断面平均して約 0.23 m/s 流速を示す。唯一気になることは、湾口中央の水深 50 m に北向き流れ(0.1 m/s)が認められることである。前述したようにこの水深は今回の計測の限界にある。原因を検討するためには、新たな計測結果を待たざるを得ない。上げ潮最強後2時から北流が現れるが、その領域は湾口中央部と西岸の表面から始まり、北流の範囲が増大してくる。

図-8(d)はその典型的な断面内分布を示す。西岸側では等流速分布は鉛直方向に一樣であり、最大値は 0.35 m/s と大きい。一方、中央部の最大流速は海表面で 0.25 m/s である。海表面の流速分布を見ても、西岸から北流、南流、北流、そして東岸までは南流と非常に複雑な流れであることが分かる。

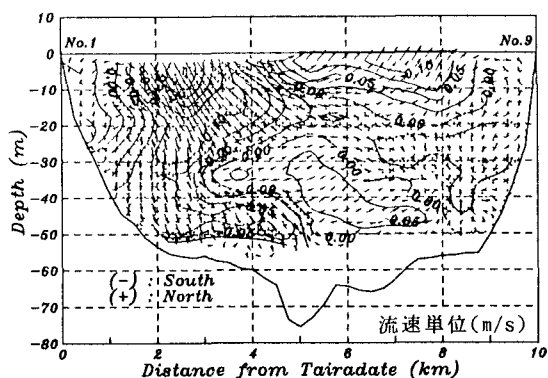


図-9 湾口における残差流の断面内分布
(等値線は南北方向成分を示す)

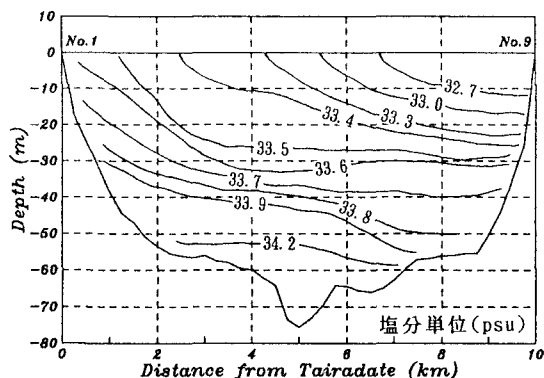


図-10 湾口における一潮汐平均した
塩分の断面内分布

(4) 残差流と一潮汐平均塩分の湾口断面内分布

残差流の算出法は杉山ら(1995)に倣った。図-9は残差流ベクトルと南北方向の流速成分の等値線を示す。各計測点における水平方向のベクトルを上方向に北成分、右方向に東成分として描いた。網掛け部は南流成分を示しており、表層では西岸から4.3 km地点から9 kmの範囲と、湾口中央部の水深30 mから50 m範囲、そして西岸から1 kmの範囲で認められる。それ以外は南流である。流速ベクトルに着目して考えると、西岸から1～3 kmの南流の領域では海表面から海底まで0.06 m/s以上、最大0.21 m/sの流速で南東方向へ流入している。一方、北向き流れが卓越した表層部および中央部ではそれぞれ平均流速0.06 m/s、0.01 m/sで北東方向に流出している。概算ではあるが、流入量が流出量を上回っていることが分かる。

これに対して、図-10は一潮汐平均した塩分の断面内分布を示している。33.4 psu以下の塩分は東岸から西上がりに傾いているが、33.5～33.7 psuの塩分の等値線は水深30 mから40 mの水深で水平となり、成層化傾向にあることがわかる。湾口横断面の西岸3 kmの範囲では等値線が急勾配で岸に向かっており、水深20 mより浅い水域では圧力が西岸から沖に向かって減少傾向にある。西岸に沿った北向き流れは地衡流バランスによって生じるものであると推定される。

4. あとがき

閉鎖性内湾の水質を考える上で外海水との水交換や物質交換を考えることは重要である。とくに、我が国の内湾の多くは、流速ならびに鉛直混合の大きな海峡と、停滞気味で成層化した浅い海盆から構成されている。したがって、密度流、吹送流や地球回転等、潮汐以外の要因が流れや物質輸送に関与することになる。単純な地形であることを理由に選んだ陸奥湾の湾口部でも、ADCPやSTDを用いた計測結果は、流れは密度分布と関与して非常に複雑であることを示している。まだ、一次処理した観測データの考察の段階にあるが、長期計測や3次元数値実験により陸奥湾の海水交換機構を解明する予定である。

本研究を実施するにあたっては青森県水産栽培センターと運輸省青森港工事事務所から海況データの御提供を頂いた。計測においては八戸工業大学環境工学講座の学生諸君の助力を頂いた。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、感謝の意を表する。

参考文献 (1) 岩尾尊徳(1991): 月刊海洋、24巻、pp.226-229.

(2) 力石国男、長沼光亮(1992): 海と空、68巻、pp.27-38.

(3) 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾(1995): 海岸工学論文集、42巻、pp.1096-1100.