

— 論文 —

夏季の北部根室海峡における風による宗谷暖流の流入過程*

佐藤政俊[†]・河野時廣[†]・川崎康寛[‡]

要旨

1987年の8~9月において知床東岸域でCTD繰り返し観測および係留観測を実施した。繰り返し観測による水温と塩分の断面は風による沈降と湧昇を示唆した。しかし湧昇を示した北東向きの風の卓越時でも鉛直断面分布は表層水温・塩分の上昇を示すとともに、係留系の水温も上昇しており、この沿岸域への高温高塩分水塊の流入を示した。また80 m深付近における塩分極大値の分布から、北東向きの風のとき宗谷暖流のコアは海峡中央部に分布していた。1972~2000年の7~9月における羅臼のデータを解析したところ、風速は常に北東向きが卓越しており、北東向きの風の強さと沿岸水温の時間変化率が有意な相関を示していた。現実的な海底地形を導入した数値モデルを用いて風応力の時間変化に対する流れ場と塩分場の応答を調べた。風を与えずに準定常状態としたのち、南西向きの風を吹かせると、海峡の東側からの流入がわずかに見られるものの、海峡中央と知床西岸からの流入は見られない。その後、北東向きの風を与えると知床西岸から知床岬の先端を迂回して海峡中央への宗谷暖流の流入がみられた。この結果は観測結果と矛盾せず、風による海峡への暖流の流入の可能性が示された。

キーワード：知床半島，宗谷暖流，流入過程，根室海峡，数値モデル

1. 緒言

根室海峡は知床半島と国後島に挟まれた海峡である (Fig. 1)。根室海峡は世界遺産として登録された知床半島と豊富な水産資源により特徴付けられ、自然保護と観光や水産業などによる開発の両立が課題となっている。また、とりわけ重要な水産資源のオニコンブが7月頃までに最もよく繁茂し水温の上昇に伴って先枯れすることや (黒木等, 1979)、6月~8月にはホタテガイ

の貝毒プランクトンが海峡に流入し、漁業に大きく影響することが知られている (西浜, 1994)。したがって、この海域における水温の季節的变化や海水交換を明らかにすることは、水産資源の維持や増大にとって重要である。

知床半島東岸の沿岸域は1月から4月にかけて80 m深まで水温0°C以下、塩分33以下の低温低塩分水に占められる。その後、水温が上昇し7月から8月は水温15°C以上の水塊が大部分を占め、水深100 m前後に塩分33.5以上の塩分極大層がみられ、10月頃には、海面から100 m深は高温高塩分水で占められる (角田, 1990)。宗谷暖流は日本海とオホーツク海の水位差によって駆動される順圧流の特徴を備えており、夏季~秋季に強勢となることから (Takizawa, 1982; 青田等,

* 2006年5月19日受領; 2007年7月31日受理
著作権: 日本海洋学会, 2007

[†] 北海道東海大学理工学研究科
〒005-8601 北海道札幌市南区南の沢5条1丁目1-1
Corresponding author 河野時廣
e-mail address: tkono@dm.htokai.ac.jp

[‡] 北海道区水産研究所 亜寒帯海洋環境部
〒085-0802 北海道釧路市桂恋116番地

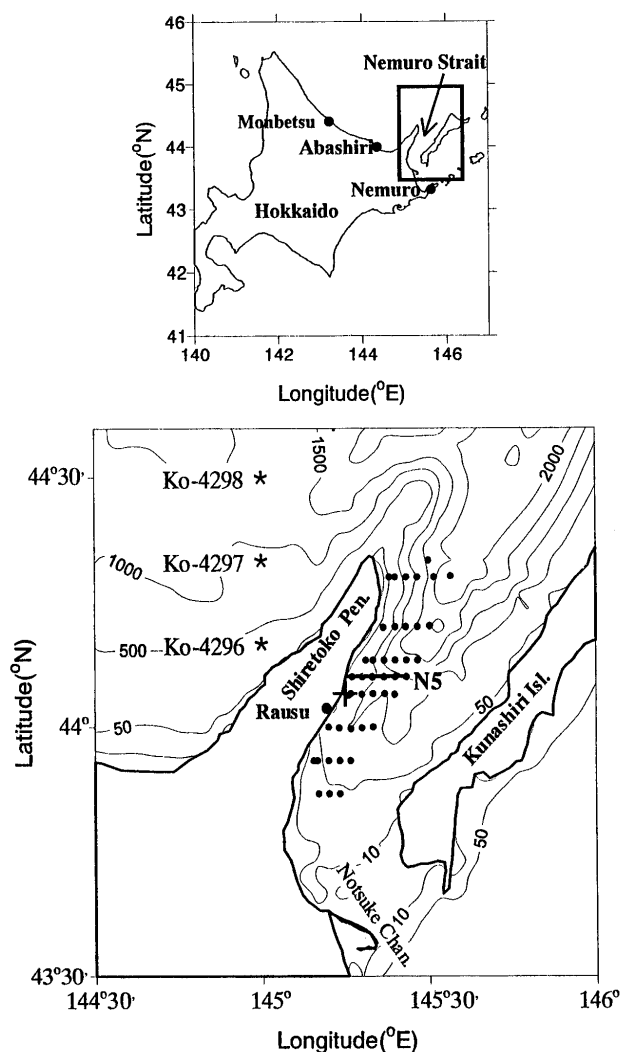


Fig. 1. Locations of the observational stations. Small dots and asterisks denote the stations of the repeated CTD observation and the observation by the meteorological agency, respectively. The location of the mooring station is shown by the cross on the east coast of Shiretoko Peninsula. The atmospheric pressure was observed in Abashiri and Nemuro, the coastal temperature was in Monbetsu and Rausu.

1985; 松山等, 1999; Itoh and Oshima, 2000), 海峡で7~10月に見られる高温高塩分水は宗谷暖流起源の海水と考えられる。また Takizawa (1982) によれば, 5月には宗谷暖流を示す高温高塩分水は紋別に達するものの, 知床半島西岸にはそれより低温な宗谷暖流前駆水が200~400 m 深付近に分布しており, 宗谷暖流は見られない。したがって, 宗谷暖流水は5月から7月

の間にこの海峡に達するといえる。このことは, 宗谷, 紋別, 羅臼の沿岸水温が4月から10月にかけて増加し, その時間変化に西から東へと位相の遅れがみられる(河野・井上, 1987) ことと対応する。

一方, 羅臼以南に目を向けると, 海峡北部で海底深度2,000 m 以上ある海底地形は南に向かって急に浅くなり海峡中間部の野付水道では海底深度15 m 以下になっている (Fig. 1)。この水道は断面積が宗谷海峡の6分の1以下であり, 宗谷暖流および融氷水がこの海峡を通過して太平洋へと流出する流量は, 上流の宗谷暖流に比べごくわずかであると考えられる。

このため, 宗谷暖流が定常的に海峡へ流入し, その大部分が太平洋へと流出していくとは考えにくいものの, 宗谷暖流水の影響が夏季の海峡内で強く見られることから, 何らかの流入過程が存在すると考えられる。しかし, 海峡内の流動構造のみならず, 水温塩分分布やその変動も明らかではない。

本研究では, 1987年8月から9月にかけて北海道区水産研究所によって実施された調査船観測および, 係留観測のデータに函館海洋気象台による所定層水温塩分データを加えて解析し, 夏季の知床半島東岸域における海洋構造とその変動過程, そしてそれらと風の応力との対応を解析した。解析においては, 調査船観測データだけでなく沿岸水温や気圧を指標とした風の長期変動データも用いた。また断片的な観測結果を補うために, 数値モデルを用いて風に対する海峡の流動場の応答を調べ, 海峡への流入機構についても考察を行った。

2. 観測および資料

2.1. 繰り返し観測

1987年の夏季に水産庁北海道区水産研究所所属の探海丸により知床半島東岸域で繰り返し観測が実施された。観測は8月29日から8月30日, 9月2日から9月3日, 9月7日から9月10日の3回にわたって Fig. 1 に示す定線で行われた。この観測期間中の9月1日前後には台風が北海道を通過しており, 天候の悪化の為に一回目の観測は8月30日に中断され, 9月2日に二回目の観測として再開された。繰り返し観測の詳細を Table 1 に示す。この観測では ALEC メモリ CTD-

Table 1. Detail of the repeated observation.

Observation	Station	Date	Latitude (N)	Longitude (E)
1 st	N12 – N14	29th Aug. 1987	43°52'	145°10.2' – 145°14.0'
	N21 – N25	29th Aug. 1987	43°56'	145°09.3' – 145°15.9'
	N31 – N35	29th Aug. 1987	44°00'	145°12.0' – 145°20.0'
	N52 – N57	30th Aug. 1987	44°06'	145°16.3' – 145°26.0'
	N62 – N67	30th Aug. 1987	44°08'	145°18.7' – 145°28.0'
2 nd	N41 – N46	2nd Sep. 1987	44°04'	145°15.6' – 145°23.9'
	N52 – N57	2nd Sep. 1987	44°06'	145°16.7' – 145°26.0'
	N71 – N75	2nd Sep. 1987	44°12'	145°21.9' – 145°30.2'
	N81 – N86	3rd Sep. 1987	44°18'	145°23.0' – 145°34.0'
	N4	3rd Sep. 1987	44°20'	145°30'
3 rd	N12 – N14	10th Sep. 1987	43°52'	145°10.0' – 145°14.0'
	N21 – N25	10th Sep. 1987	43°56'	145°09.2' – 145°16.0'
	N32 – N35	10th Sep. 1987	44°00'	145°14.0' – 145°20.0'
	N41 – N46	8th Sep. 1987	44°04'	145°16.0' – 145°23.9'
	N52 – N57	8th Sep. 1987	44°06'	145°17.0' – 145°26.0'
	N62 – N67	8th Sep. 1987	44°08'	145°18.4' – 145°28.0'
	N71 – N75	7th Sep. 1987	44°12'	145°22.0' – 145°30.0'
Japan	Ko-4296	19th Aug. 1987	44°10'	145°00'
Meteorological	Ko-4297	19th Aug. 1987	44°20'	145°00'
Agency	Ko-4298	19th Aug. 1987	44°30'	145°00'

ASTDMrk2 を用いて水温、塩分データが得られ、それらの精度は水温 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 、塩分 ± 0.02 である。さらに北海道区水産研究所は観測期間を含む 1987 年 8 月 20 日から 9 月 30 日において $44^\circ 04' \text{N}$ 、 $145^\circ 15' \text{E}$ の海底深度 40 m の測点でアーンドラー RCM4S を係留し 5 m および 35 m 深での水温および流れを 10 分ごとに連続的に計測した。水温計の精度は $\pm 0.05^\circ\text{C}$ である。35 m 深の流速計は不調により測定不能であったため、本研究ではそのうち 5 m 深の水温および流れと 35 m 深の水温を解析に用いた。

2.1.1. 海峡における風速の推定

観測期間において台風のため強い風が継続して吹いていた。沿岸域の流動場の形成およびその変動要因のひとつ

として風の応力が挙げられ (例えば Csanady, 1982; 清水・磯田, 1997; 大島・三宅, 1990; 宇野木, 1993), 対象海域の海水交換過程を明らかにするためには水塊構造および流れの変動を風速のそれと比較する必要がある。本研究では繰り返し観測の期間中に調査船上で風向および風速を観測していたものの、観測位置が移動するとともに観測期間が限られているため (Table 1), 時間的にも空間的にも離散的となった。

このため Fig. 1 に示す網走と根室の気圧差を知床半島の岸に平行な北東向き成分と対応させて、気圧による風速の推定を試みた。両地点の気圧として気象庁 (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) から両地点における 3 時間ごとの平均気圧を取得して用いている。調査船による風の北東向き成分と気圧差の相関をとったところ、相関係数は 0.31 となり、標本数 130 で

の t 検定によれば 1% の危険率で有意となった。すなわち、この時空間スケールにおける地衡風の関係が示唆されるため、本研究では回帰式を用いて風の北東向き成分を推定した。しかし、気圧差と風速を比べると風向の急変するときは必ずしも良い対応は望めない可能性があるため、本研究ではこのことに注意しつつこの回帰式による推定値を解析に用いる。

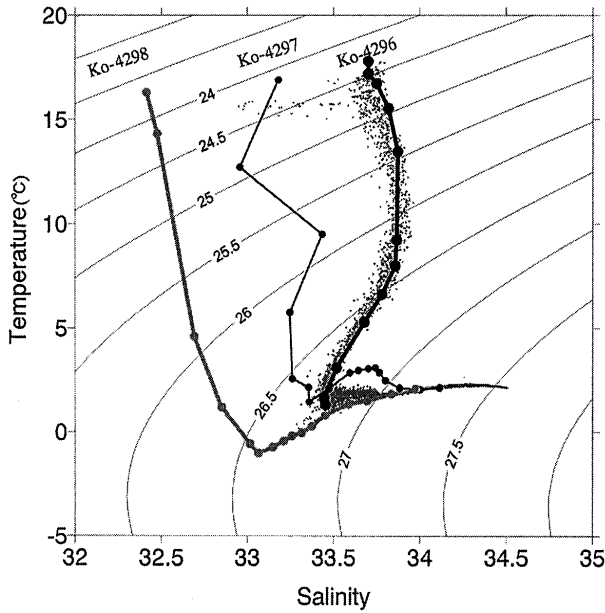


Fig. 2. T-S diagram for the stations in the Okhotsk Sea and the Nemuro Strait. The gray dots denote the T-S relations for the repeated observation in the Nemuro Strait, the gray, thin, and black lines for Sta. Ko-4298, Sta. Ko-4297 and Sta. Ko-4296 in the Okhotsk Sea, respectively.

3. 結果

3.1. 知床半島東岸域の海洋構造

1987年8月から9月の繰り返し観測で得られた海峡内のCTD観測結果のT-S図をFig. 2に示すとともに、知床半島西岸域の三測点で観測されたCTD結果(Fig. 1; 気象庁, 1987)と比較した。実線で示された三測点でのT-S関係のうち沖側の二測点(Sta. Ko-4297, Sta. Ko-4298)は $26.6 \sim 26.8\sigma_t$ 前後で折れ曲がりオホーツク海水の特徴である中冷構造と呼ばれる水温極小構造を示している。中冷水の水温塩分は沖ほど

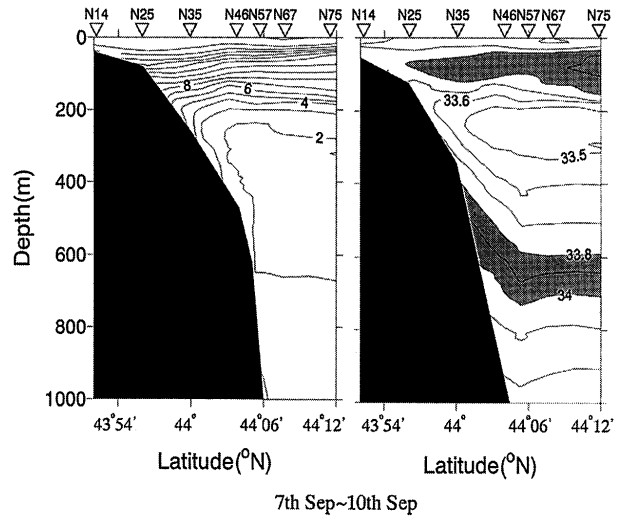


Fig. 3. Vertical sections of temperature (left) and salinity (right) in the Nemuro Strait along the easternmost stations in the third observation. See Fig. 1 for their locations. The areas between 33.8 and 34.0 in salinity are shaded.

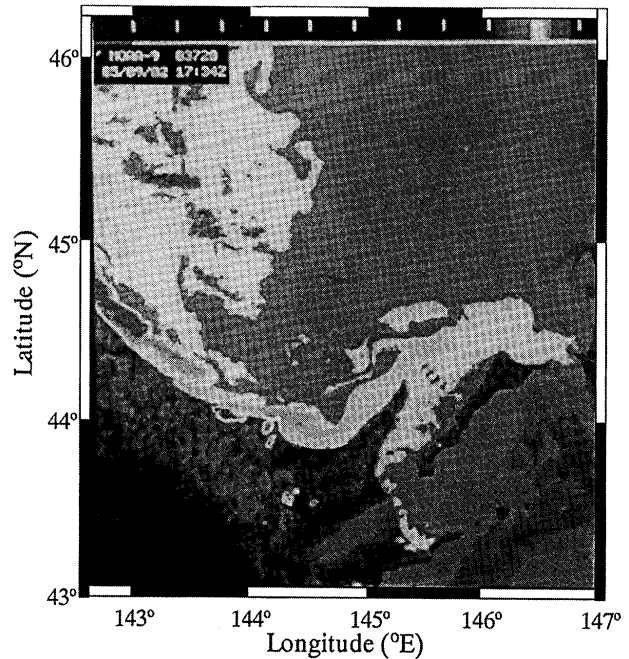


Fig. 4. An infrared image of the Northern Nemuro Strait taken from the NOAA-9 on 2 September 1985. White areas are higher in temperature than gray areas.

低く、最も沖合のSta. Ko-4298では -1°C , 33.1に達する。中冷層よりも低密度な($\sigma_t < 26.5$)表層では、いずれの測点でも中冷層以深に比べ塩分の鉛直変化が小

さく、沖から岸に向かって増加している。最も岸に近い測点 (Sta. Ko-4296) では $25.0\sim 26.3\sigma_t$ を中心として水温 $8\sim 15^\circ\text{C}$ 、塩分 33.8 前後で塩分極大を示している。この塩分極大構造をもつ亜表層水塊は宗谷暖流である。また、これは Takizawa (1982) の水塊分類とも一致する。この測点では塩分極大層より高密度な層に向かって水温と塩分が減少し、 $26.75\sigma_t$ 付近で沖側の測点 Sta. Ko-4297 の中冷水とほぼ一致する。Sta. Ko-4297 では $2\sim 3^\circ\text{C}$ 、33.7 を中心として水温極大がみられ、塩分は低いものの宗谷暖流前駆水と考えられる。一方、最も沖合の Sta. Ko-4298 では中冷層から密度の増加とともに緩やかに水温が上昇し $27\sigma_t$ まで Sta. Ko-4297 よりも低温で、オホーツク海水の鉛直分布の特徴を示している。

知床半島東岸域における T-S 関係は Fig. 2 の灰色点で表すように、 $26.75\sigma_t$ より低密度で Sta. Ko-4296 の T-S 関係のまわりに分布し $26.75\sim 27.0\sigma_t$ において低温低塩分な Sta. Ko-4298 と宗谷暖流前駆水を示す Sta. Ko-4297 の T-S 関係の間に散らばっている。すなわち、知床半島東岸域では亜表層において西岸沿いを流れる宗谷暖流が流入し、その下層ではオホーツク海水と宗谷暖流前駆水の混合水が分布している。東岸域における T-S 関係をみれば $26.75\sigma_t$ 以下の低密度層では密度の減少とともにばらつきが大きく、 $25.0\sigma_t$ 以下では 16°C のまわりに塩分が 33.8 から 32.9 まではばらついておりオホーツク海の表層水の流入と混合が伺われる。

最も東にある観測点を通る、繰り返し観測三回目の水温塩分の南北断面図を Fig. 3 に示す。測点名や日時を Table 1 に、測点の位置を Fig. 1 にそれぞれ示す。南北断面には水深 80 m を中心として宗谷暖流を示す 33.9 以上の極大をもつ高塩分の貫入が $43^\circ 50' \text{N}$ までみられ、その下層にあたる 250~650 m 深では 2°C 以下のオホーツク海中冷水の構造がみられる。また 250 m 深を中心として塩分極小構造もみられる。図は示さないものの同様の構造が 1985 年の夏季における南北断面でもみられた。

次に水平的な構造を見るため、年は異なるものの同季節にあたる 1985 年の 9 月 2 日の人工衛星赤外画像を示す (Fig. 4)。この日の網走根室間の気圧差から回帰式を用いて風向を推定すると、海峡内では南西向きの

風が卓越している。Fig. 4 で海峡内の表面水温の分布を見ると、高温な水塊は知床半島西岸に沿って北上し半島を離れたのちも、本流はそのまま国後島の北側まで到達し、一部は知床半島東岸に沿って根室海峡に流入していることが伺われる。海峡内の分布を見てみると北部に比べて海峡の南側は水温が低く、宗谷暖流は $43^\circ 50' \text{N}$ には達していないことが示唆され、南北断面 (Fig. 3) の結果と矛盾しない。

3.2. 知床半島東岸域の風による水塊構造と流れの変化

繰り返し観測三回のすべてで観測された N5 線の水温塩分の東西断面を Fig. 5 に示す。測点名や日時を Table 1 に、測点の位置を Fig. 1 にそれぞれ示す。観測一回目において、75 m 以浅の表層では水温の等値線は緩やかに沖に向かって下がっており、また表層 25 m 以浅では塩分 33.2 から 33.4 の低塩分な水塊が表層を覆っている。一方、二回目は一回目の観測で表層に観測された低塩分な水塊が存在しておらず、代わりに塩分 33.7 以上で水温 15°C 前後の水塊が表層を覆っている。さらに、水温 15°C の等温線が岸に向かって大きく下降している。続いて三回目では、表層から少なくとも 180 m 深までの等温線が二回目とは逆に沖に向かって下降しており、その傾向は塩分断面でもみられる。

一方、回帰モデルによる風速と、観測された風速の北東向き成分は、ともに三回の繰り返し観測時それぞれ北東向き、南西向き、北東向きを示しており (Fig. 6a)、エクマン輸送による湧昇と沈降が伺われる。しかし三回目の断面をみれば、40 m 以浅では二回目よりも水温および塩分がともに増加する傾向にあり、風による上昇流に加え、水平移流の影響を受けている可能性がある。

観測期間を含む 8 月 21 日~9 月 12 日に行われた係留観測結果から、5 m 深の流速は少なくとも係留期間ではほぼ岸に平行な流速成分が卓越しているため岸に平行な北東向きの流速成分を Fig. 6b に示した。岸に平行な流速は日周潮が卓越しているのでガウシアン フィルター (e-folding time=25.2h) をかけ、1 日間より短周期の変動を除去した。この平滑化した流速成分は、9 月 1 日と 6 日の風の極大に対し流れは強い南西向きを示していることを除き、ほぼ風の変化に対して流れの変

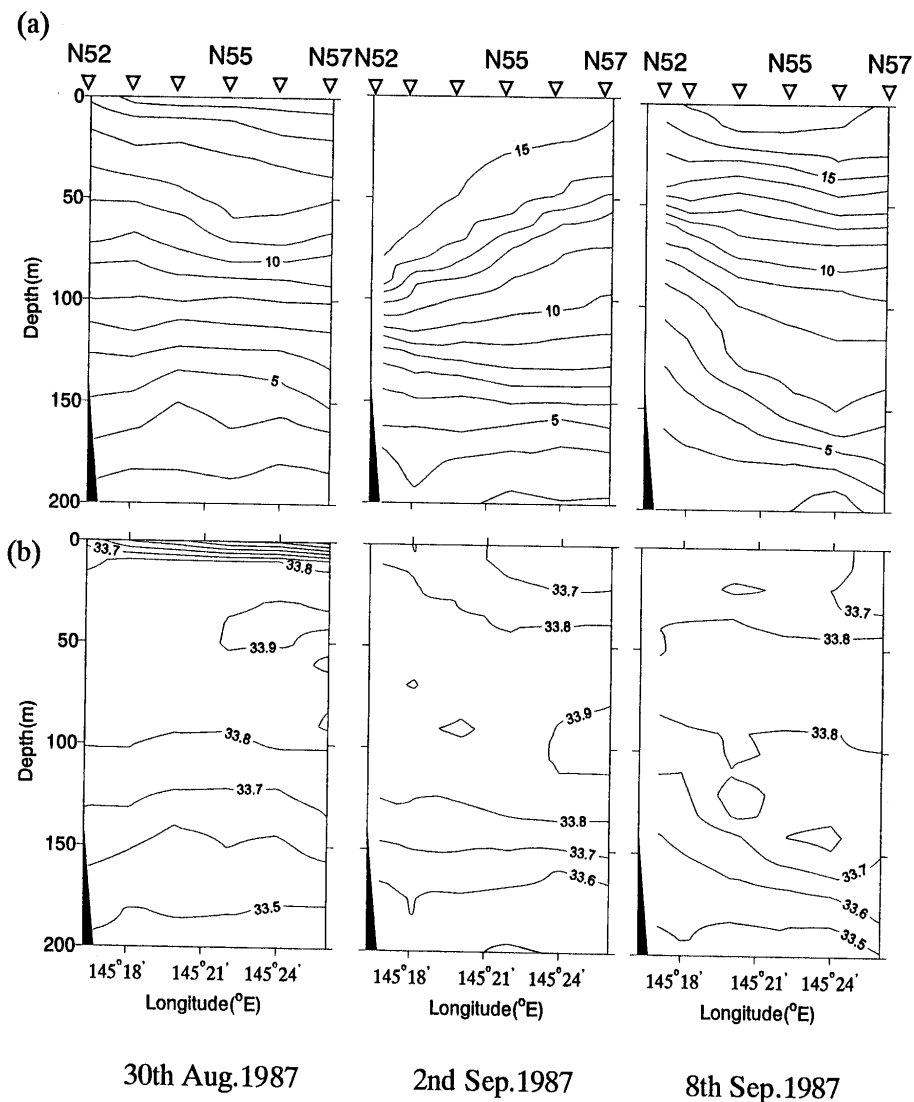


Fig. 5. Vertical sections of (a) temperature in °C, (b) salinity along the N5 line whose location is shown in Table 1 and Fig. 1. The observed date was shown on the bottom of each figure.

化が対応しており、相関係数はラグなしで0.41を示した。係留観測結果による水温の時系列を Fig. 6c に示す。5 m 深と 35 m 深の水温のどちらも、一回目と二回目の繰り返し観測時には、それぞれ減少および増加し水温断面で示唆された湧昇および沈降を支持する。

しかし、三回目の観測期間中の水温を見ると 5 m 深と 35 m 深共に上昇傾向にあり三回目の観測の最終日 9 月 10 日に水温は極大を示す。これは断面構造の変化から示唆される湧昇と対応しておらず、むしろ表層の高温高塩分化と対応している。三回目の観測時における風の変化を見ると水温が極大を示す 9 月 10 日は弱い北

東向きだが、その 3~4 日前に北東向きの風が極大を示した。また繰り返し観測以前の 8 月 24 日から 27 日も北東向きの風に対し水温は上昇しており、この時も北東向きの風の極大から 3~4 日遅れ程度で水温は極大を示していた。

こういった知床半島東岸域での表層の高温高塩分化の要因として、海峡外からの高温な宗谷暖流の流入や混合が考えられる。3.1. 節で示したように宗谷暖流水は知床半島西岸域において塩分極大層としてみられ、東岸域においてもその構造は維持される。そこで亜表層の塩分極大値を各測点で鉛直分布から読み取り、宗谷

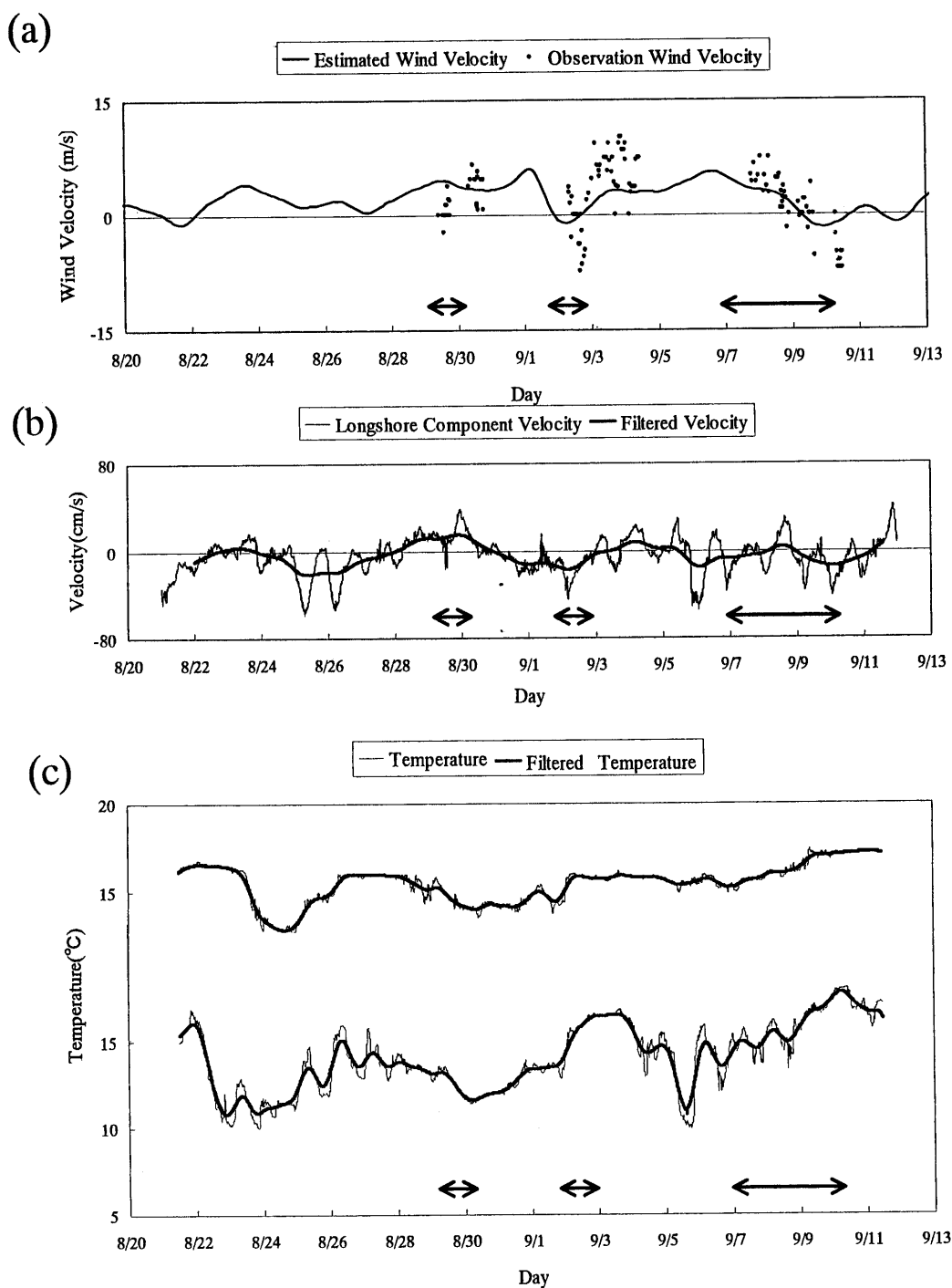


Fig. 6. (a) Time variation of the alongshore component of the wind velocity estimated from the atmospheric pressure difference between Abashiri and Nemuro. The black dots denote the alongshore component of the observation wind velocity. (b) Time variation of the alongshore component of the current velocity obtained by the moored current-meter. The crude and the filtered velocities are denoted by the gray and black lines, respectively. (c) Time variation of temperature from the mooring observation at the 5 m depth (upper) and the 35 m depth (lower). The gray line shows crude data and the black line filtered for each data. It is noted the scales in the vertical axis are different between the upper and the lower variations. The arrows in each panel show the periods of the 1st, 2nd, and 3rd observations from left to right.

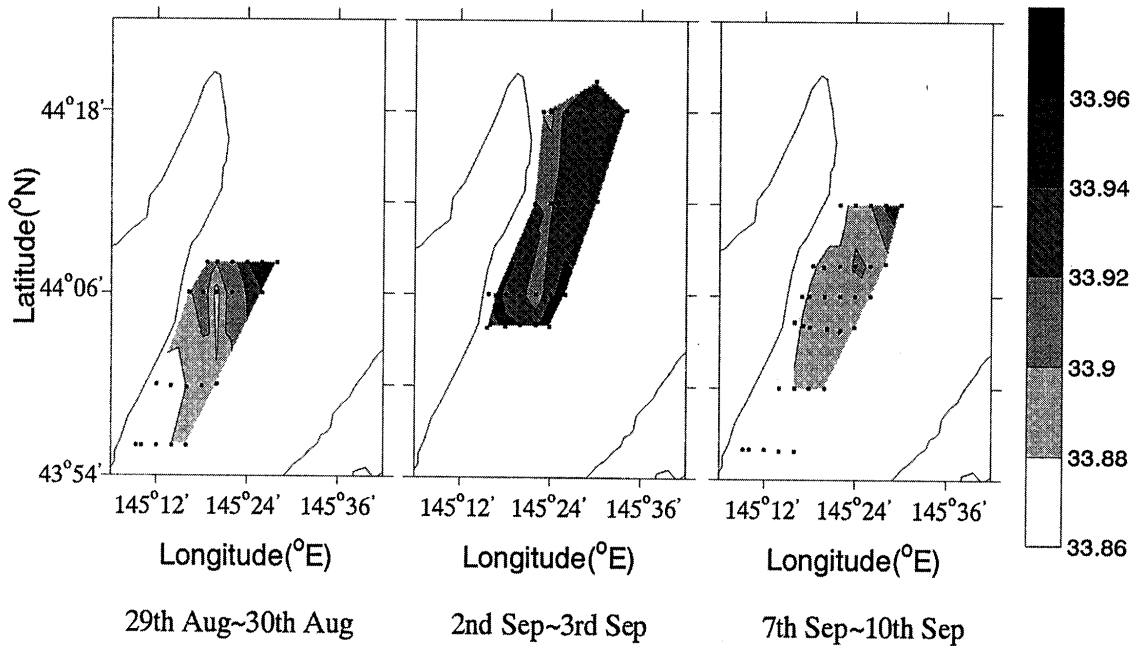


Fig. 7. Horizontal distributions of the surface salinity maximum for the first (left), the second (center), and the third (right) observations.

暖流水コアの水平分布を繰り返しの観測ごとに Fig. 7 に示した。北東向きの風が吹いていた一回目と三回目の分布をみれば沖合の $44^{\circ}10'N$, $145^{\circ}20'E$ と $44^{\circ}12'N$, $145^{\circ}30'E$ に高い値が存在していた。流入の経路は不明ながら、いずれも海峡の中央部に宗谷暖流が分布していたことが示された。南西向きの風が吹いていた二回目では全体的に他の二観測よりも値が高く、海峡中央部の $44^{\circ}06'N$ の最も岸側と沖側の測点、および $44^{\circ}04'N$ の測線には高い値がみられ、 $44^{\circ}06'N$ 線付近に前線を形成し、その南側に宗谷暖流が分布していた。また、図には示さないものの、三回目の観測で高塩分なコアが見られた海峡中央の Sta.N75 では表層に $16^{\circ}C$ 以上で塩分 33.8 前後の宗谷暖流水が分布しており、二回目の観測に比べ高温高塩分であった。

観測回数が少なく、観測海域も限られているものの、これらの結果は根室海峡における宗谷暖流の分布は風の向きに対応して観測期間内に大きく変化していたことを示唆する。暖流水コアの分布から北東向きの風ときは海峡中央部から流入したのかもしれない。

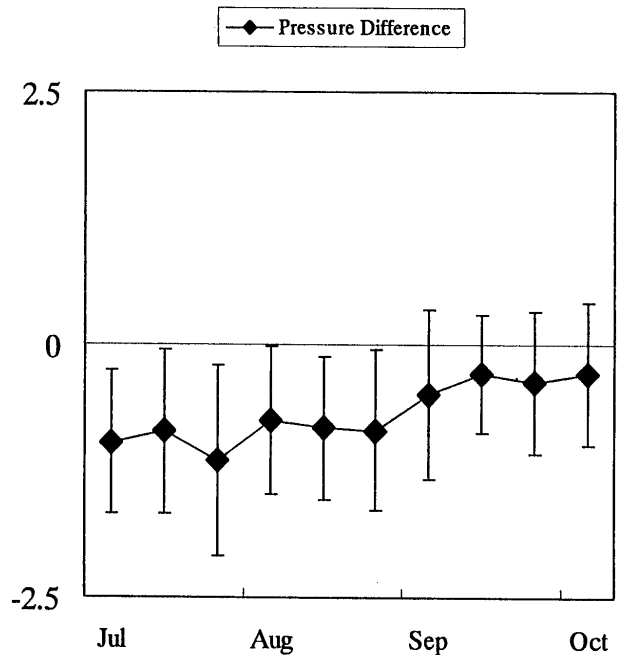


Fig. 8. The seasonal variation in difference of atmospheric pressure between Monbetsu and Nemuro with standard deviations using the data from 1972 to 2000. Standard deviation are shown as error bars.

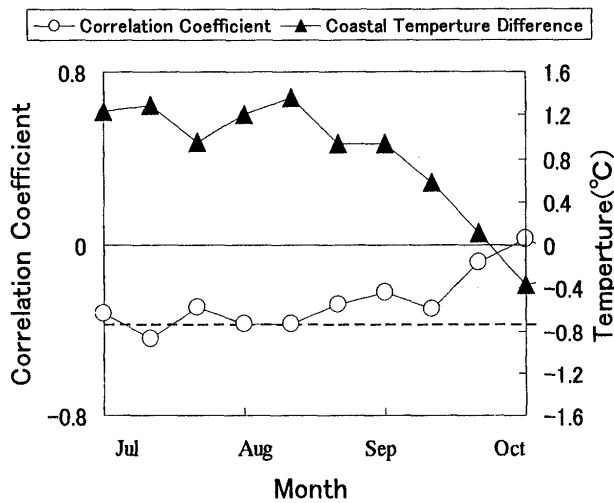


Fig. 9. The coastal temperature difference between Monbetsu and Rausu (black triangle) and the correlation coefficient between the time derivative of the coastal temperature in Rausu and the atmospheric pressure difference between Abashiri and Nemuro (white circle). The broken line shows the significance level of 95% for the correlation in the lower panel.

3.3. 長期データを用いた風による宗谷暖流水の流入過程

1987年の調査船による繰り返し観測と同時期の係留観測から、北東向きの風が卓越する際に断面は湧昇を示唆するにも関わらず、表層水温は上昇することが示された。こういった風に起因する現象が頻度高く起きているか検証するために、1972年から2000年までの羅臼沿岸水温(旬ごと)の変動と気圧差の対応を調べた。角田(1990)によれば、7月には宗谷暖流が知床半島の北側まで到達するため7月から9月は海峡外と海峡内の水温の差が大きくなると考えられる。そこで7月から9月の旬別沿岸水温の増加率と根室海峡での風の並岸成分を指標する網走根室間の気圧差を比較した。

旬ごとの平均をみれば、この期間の気圧差は概ね負であり北東向き成分の風が卓越していた(Fig. 8)。沿岸水温データ(北海道栽培漁業振興公社, 1972~2000)から旬ごとに次旬への水温上昇率を計算し、気圧差との相関をFig. 9に示した。これを見ると7月上旬から8月中旬にかけて相関係数が高く7月中旬, 8月上旬

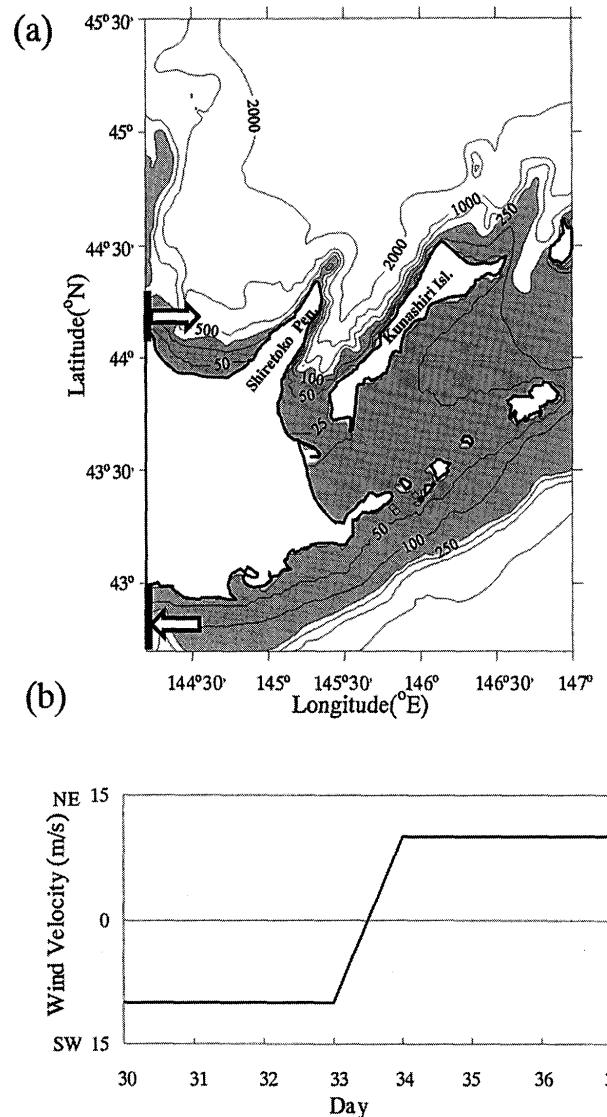


Fig. 10. (a) The domain of the numerical model with the bathymetry used for the calculation. The areas shallower than 250 m are shaded. The eastward and westward arrows denote the inflow and outflow as the boundary conditions. (b) Time evolution of the wind velocity given in the numerical model.

では5%の有意水準を越える有意な相関を示した。このことは北東向きの風が連吹したとき、断面の構造は湧昇を示唆しているにもかかわらず、水温が上昇した係留観測の結果と一致する。すなわち、夏季の知床東岸域において、北東向きの風が吹くと沿岸域の水温は上昇する傾向にあることが示唆された。また相関の低下する8月下旬以降は、紋別-羅臼の水温差も同様に減少

Table 2. Boundary conditions for the sensitivity analysis. Mass transport and water properties were changed along the western boundary as an inflow of the Soya Warm Current as shown in Fig. 10 (a).

Case	Transport ($10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity
A	0.2	2.32 – 18.8	33.55 – 33.97
B	0.3	2.32 – 18.8	33.55 – 33.97
C	0.5	2.32 – 18.8	33.55 – 33.97
D	0.37	4.32 – 20.8	33.75 – 34.17
E	0.2	4.32 – 20.8	33.75 – 34.17
F	0.3	4.32 – 20.8	33.75 – 34.17
G	0.5	4.32 – 20.8	33.75 – 34.17
H	0.37	0.32 – 16.8	33.35 – 33.77
I	0.2	0.32 – 16.8	33.35 – 33.77
J	0.3	0.32 – 16.8	33.35 – 33.77
K	0.5	0.32 – 16.8	33.35 – 33.77

しており興味深い。

4. 数値モデルによる流動場の変動

調査船による繰り返し観測および係留観測によって1987年夏季の知床東岸域では北東向きの風に対して高温化が起こっていることが示された。その高温化には海峡中央部から流入する宗谷暖流が影響している可能性が考えられる。しかしこれらの観測データは限られた海域のものであるため、数値モデルを用いて風による宗谷暖流の流入の可能性を調べてみる。

モデルには Regional Ocean Modeling System (ROMS) を用い、風に対する流速および水塊分布の変化を計算した。このモデルは SCRUM (Song and Haidvogel, 1994) を基礎とし、自由海面、曲線座標系でプリミティブ方程式を解くもので、さまざまな目的で用いられている (Rutgers IMCS Ocean Modeling Group; <http://marine.rutgers.edu/po>)。計算領域は Fig. 10a に示すように $144^{\circ}12' \sim 147^{\circ}\text{E}$, $42^{\circ}42' \sim 45^{\circ}30'\text{N}$ で、水平分解能を 2 km とし、鉛直には 15 層で 200 m 以浅での分解能を高めており表層混合層では 5 m 前後の層厚である。すべての境界は開境界とし、境界条件として

Flather (1976) および Chapman (1985) の放射条件を用いるとともに、岸は free-slip とした。またすべての境界では流速、水温、および塩分分布を与え 1 日の時間スケールで緩和しつつ復元した。

鉛直拡散係数の見積もりには Umlauf and Burchard (2003) のクロージャー スキームを用い、鉛直拡散係数は $5.0 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の範囲であった。海底地形には日本海洋データセンターが提供する 500 m 水平分解能の水深データ (http://www.jodc.go.jp/index_j.html) を平滑化して用いた。北部根室海峡の海水交換に大きく影響を与えると考えられる野付水道 (Fig. 1) では最浅で海底深度 20 m に設定しており、実際の海底地形になるべく近づけるようにモデル化した。初期条件として全領域に夏季に観測されたオホーツク海の水温塩分プロファイルを一様に与え、西側境界のうちオホーツク海北海道沿岸にあたる領域から夏季に観測された宗谷暖流域の鉛直プロファイルを持つ水塊を $0.37 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 程度流入させ、同じく西側境界の太平洋側から $0.15 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 程度流出させた (Fig. 10a)。これら流出入を時間一定で与えるとともに、流速を与えた領域以外の境界では常に流速は 0 としている。

これらの条件のもとで、風を与えずに計算を始める

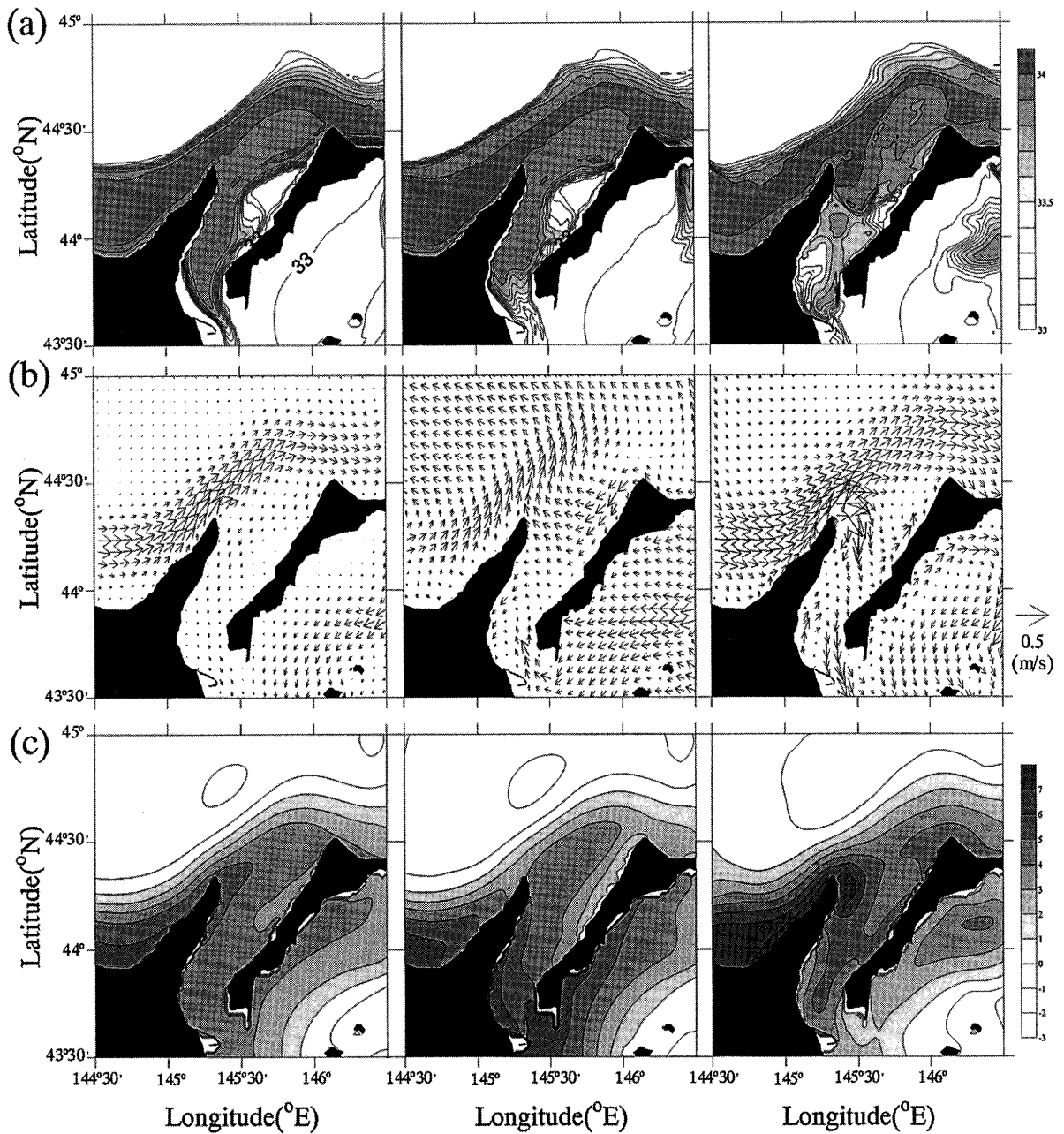


Fig. 11. Maximum salinity between 0 m and 100 m (upper), velocity (middle), and sea-surface height (lower) from the numerical model, which are the results after 30 days (left), 31 days (middle), and 36 days from the beginning of the calculation, respectively. The contour intervals are 0.1 for the salinity map as shown in a scale bar. For the sea-surface height maps, the contour intervals are 1 cm.

と、最初の20日間で根室海峡内に高温高塩分水が流入するものの、15日目以降は海峡内の水位の上昇とともに流入量は少なくなり30日目以降はほぼ定常的な流れ場が見られた (Fig. 11 左列)。準定常状態における0~100 m層での塩分最大値、0~20 m層の流れ、および海面の水位の各分布を見れば、高塩分な宗谷暖流水

のほとんどは水位フロントに沿って海峡の北側を通過し国後島北側を東へ流れており、ごく一部が国後島北部沿岸および知床半島沿岸に沿って海峡内に流入している。これは人工衛星による海面水温分布 (Fig. 4) およびこれまでの観測結果 (Takizawa, 1982) と矛盾しない。この30日目から、Fig. 10b に示す時系列で、北東

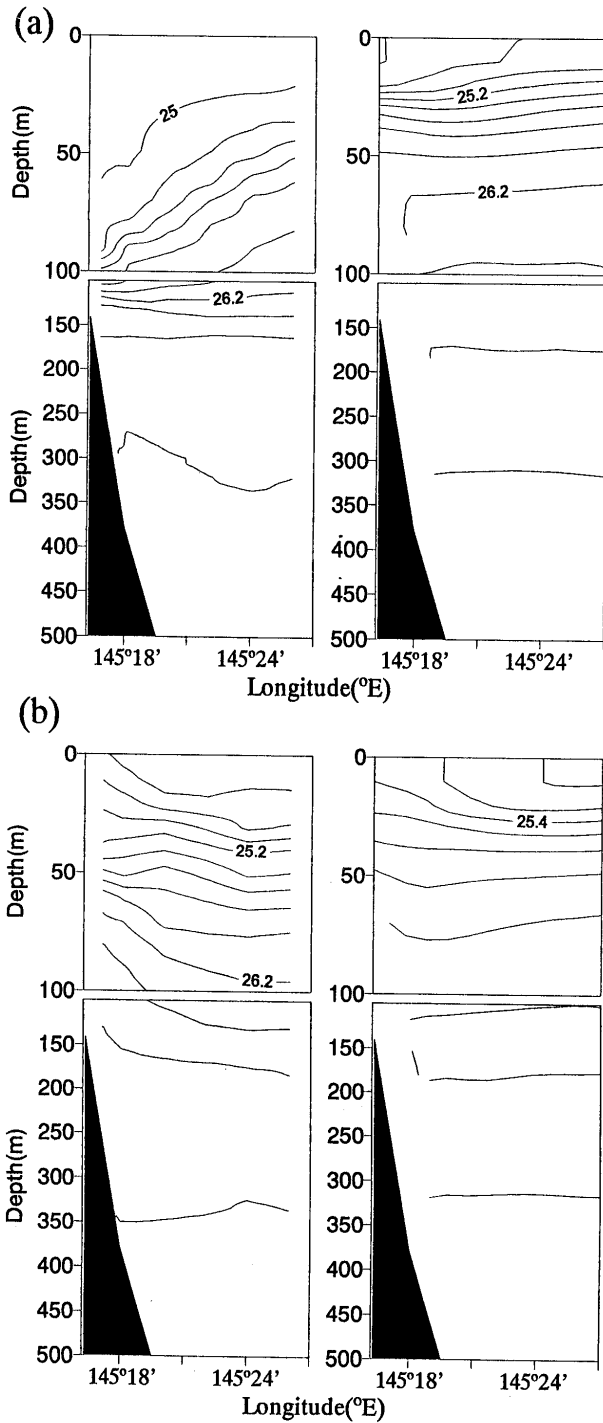


Fig. 12. Potential density vertical sections from the CTD observations (left) and the numerical model (right) along the observational line N5 when the wind blew. The upper panels (a) show the sections for the southwestward wind and the lower panels (b) for the northeastward wind.

及び南西向きの風応力を計算領域全域で一様に与えて計算を継続した。風応力を与えて計算した場合の密度

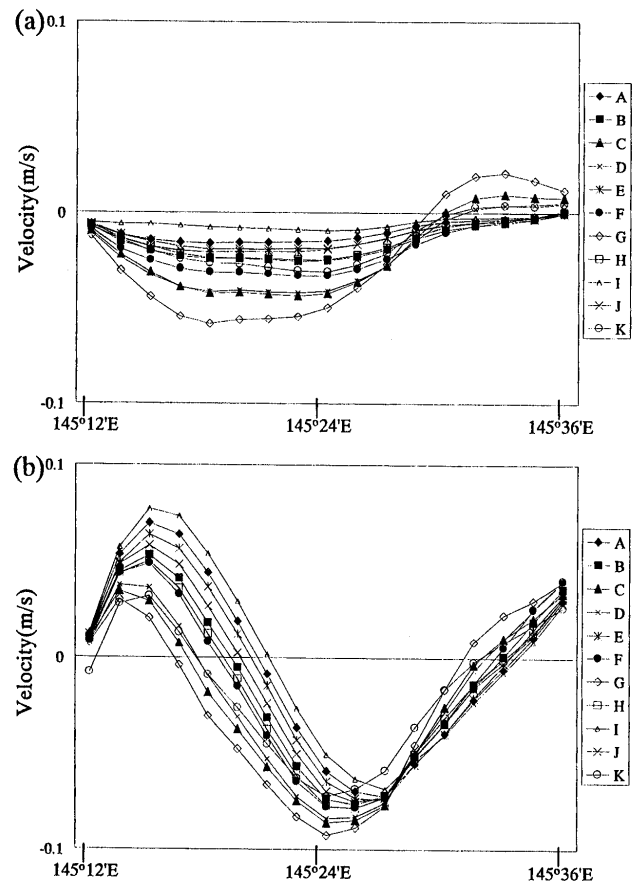


Fig. 13. Mean northward velocity component between 0 m and 20 m crossing the parallel of 44°N from the west coast to the east in the Nemuro Strait at (a) the 30 days and (b) the 36 days after the start of the calculation. A-K denote the cases as shown in Table 2.

構造を N5 線での東西断面を用いて観測結果と比較した (Fig. 12)。図の (a) と (b) では 31 日目および 36 日目における計算結果と繰り返し観測の二回目と三回目の密度断面をそれぞれ対応させている。モデル結果は表層混合層の位置や鉛直傾度の大きさなどにおいて観測結果と異なるものの、南西向きと北東向きの風に対応して知床半島東岸域で沈降、湧昇をそれぞれ示唆する密度構造を示しており風向きの違いによる力学構造の変化は定性的には再現されている。

風の変化に対応する塩分、流れ、水位の水平分布を Fig. 11 に示す。モデル時間 31 日目の塩分の分布 (Fig. 11a 中央列) を見ると高塩分水は知床半島東岸域に存在しているが 30 日目の塩分値から変化しておらず、南西向きの風が吹いた後の二回目の観測で塩分極

大の値が全域で増加していた結果 (Fig. 7) とは対応していない。流速分布 (Fig. 11b 中央列) をみれば、国後島西岸域の南西流は $44^{\circ}10'N$ で西向きに転じ、知床半島東岸に至ったのち、一部は岸沿いを北に向かっている。このループ流は南限位置が異なるものの二回目の塩分極大分布 (Fig. 7) に見られた $44^{\circ}05'N$ のフロントと同様なパターンを示しており興味深い。水位の分布 (Fig. 11c 中央列) をみれば海峡内では南から北へ向けての圧力勾配が形成されている。北東向きの風が最大となって2日後のモデル時間36日目には $44^{\circ}N$ 以北の海峡中央部に高塩分な水塊が見られる (Fig. 11a 右列)。この高塩分な海域では、知床東岸に存在する高気圧性循環の東縁に沿っての強い流れが知床半島西岸からの暖流水を海峡内へと運んでいる。この流れは国後島西岸での北東流と一部バランスするとともに、一部は海峡南部の流れと連なり、残りの一部は知床半島東岸での北向きの弱い流れにつながって渦を形成している。これらの海峡内の流れは、30日目や南西向きの風応力を与えた31日目よりも大きい。

このようにモデルにおいて、南西向きの風のときは国後島西岸域から流入し、知床半島東岸及び海峡中央部から流出するのに対し、北東向きの風のときは中央部から流入して国後島西岸域から流出する傾向が見られた。一方、風の場に依存した知床半島西岸域から国後島沖合にかけての海洋構造の変化をみれば、エクマン輸送で表層の流れは変化しているものの、水位フロントの位置は変わらないうえ、フロント北側の水位場に大きな変化はない。すなわち、風の場は海峡の北側を北西に流れる宗谷暖流の力学構造に大きな影響を与えていないと考えられる。

前述のように、モデルは平均的な宗谷暖流の海洋構造を示したものの、オホーツク海の宗谷暖流の流路は、宗谷暖流の流量の変化によって大きく変化する可能性がある (Uchimoto *et al.*, 2007)。そこで、西側境界から流入させる宗谷暖流の水温塩分および流量を変化させて計算結果を比較した。感度解析のための宗谷暖流の流入条件を Table 2 に示す。すべての結果を用いて海面から20 m までの北向き流速成分を海峡内の $40^{\circ}N$ 線上でプロットしたところ (Fig. 13), 流速は流入条件によらずほぼ一様な分布をしている。すなわち無風条件下

(Fig. 13a) では知床半島東岸沿いに南向きの流れがあり、国後島付近で弱い北向きに転じている。それに対しモデル時間36日目北東向きの風の条件下 (Fig. 13b) では、海峡の中央では南向きの流れが卓越し、知床東岸と国後西岸域では北向きの流れが卓越する結果となった。

すなわち、海峡内の流速場からは北東向きの風によって海峡中央部から宗谷暖流の流入する可能性を示すことができた。

5. 考察

1987年の8~9月において知床東岸域で実施された繰り返しCTD観測と係留観測結果を解析した。根室海峡には高塩分な水塊が $43^{\circ}50'N$ の海底深度100 mの地点まで分布し、海峡内への宗谷暖流の流入が伺われる。また知床東岸域において風向の変化に対して、流速が位相差なしで変化し風と同方向の流れがみられるとともに、繰り返し観測による水温断面は大きく変化しており、沈降と湧昇が示唆された。しかし、北東向きの風が卓越した観測時には湧昇の状態であるにもかかわらず、係留系による水温と断面の表層水は高温化していた。この高温化は鉛直流では説明できず、宗谷暖流水を示す80 m深付近の塩分極大値の分布から、この北東向きの風に対する高温化は海峡中央部から流入する宗谷暖流の影響である可能性が考えられる。この仮説は長期データの解析結果と数値モデルによっても支持された。この節ではこれら二つの結果について考察する。

沿岸水温と気圧差の長期データを用いた解析によって、少なくとも7月中旬と8月上旬には北東向きの風のとき羅臼の沿岸水温が上昇していたことが統計的に示された。相関係数の季節変化を詳細にみれば、沿岸水温の上昇率と気圧差の相関は8月の下旬以降低くなっており、この変化は紋別-羅臼間の水温差の減少と対応している。これは海峡外と海峡内の水温差が小さくなるために風による宗谷暖流の流入が強化されても水温は上昇せず、結果として水温上昇率と気圧差の相関が低くなると考えれば、8月下旬以降も風による流入の可能性はある。

根室海峡における風に対する流動場の変動を考える

とき、この海峡は $44^{\circ}20'N$ では海底深度が最大で 500 m 以深であるのに対し $43^{\circ}50'N$ 以南では最大でも 50 m 以浅と、南部の海底深度が浅いため湾と同様な海水交換機構をもつことが期待される。Csanady (1982) および宇野木 (1993) は、U 字型の断面をもつ細長い閉じた海域で湾口-湾奥方向に一様に吹く風応力と圧力傾度力のみを仮定すれば、深い中央部と浅い沿岸部で異なる向きの流れが生じるとした。さらに大島・三宅 (1990) や清水・磯田 (1997) は Csanady にコリオリ力と海底摩擦を加えたモデルを同様の海底地形をもつ噴火湾に適用させて互いに同様の流れのパターンを得ている。とりわけ、清水・磯田 (1997) はコリオリ力を考慮したモデル ($f \neq 0$) と考慮しないモデル ($f = 0$) の結果を比較して議論している。これらの結果は、本研究の観測結果における沿岸の係留系の流速変動が風向きに対応している事や、北東向きの風に対して海峡中央部で風とは逆向きに北からの宗谷暖流の流入が見られた事と矛盾しない。

しかし 3.1. 節で示したように、北部根室海峡は海底深度 500 m 以上の海域が 50% 程度を占めるうえ、夏季には低密度な宗谷暖流水が水深 80 m を中心として厚さ 100 m 程度で流入しているため、この過程に対して密度構造が重要であると考えられる。そこで風に対する海峡への宗谷暖流の流入について密度構造を考慮した数値モデルを用いて調べた。モデルによる風応力の変化に対する流れの変動をみれば、南西向きの風的时候は国後島西岸域から根室海峡へ流入し、知床半島東岸及び海峡中央部から流出した。北東向きの風的时候は、海峡中央部から流入して国後島西岸域から流出した。海底の浅い海域が知床半島東岸より広い国後島西岸域では、風と同方向に順圧的な流れが存在し、この沿岸流と海峡中央部および知床半島東岸域の深い海域における流れの一部がバランスしている。このときの $44^{\circ}N$ 以北の海峡における水位分布を流れと比較すれば、南西向きの風的时候における流れは水位の等値線を横切って流れているのに対し、北東向きの風による流れは水位の等値線に沿っており地衡流的である。これらの水位分布はそれぞれ清水・磯田 (1997) による、 $f = 0$ および $f \neq 0$ のパターンと類似している。しかし、海峡中央部の流れと水位の分布をみれば、北東向きの風の

ときは知床半島東岸で強い高気圧性循環を示しており、この点において風のみを駆動要因とした彼らのモデル結果とは大きく異なる。基本場としての宗谷暖流の流れと流域の密度構造の影響がうかがわれる。

本研究では、モデルによって、観測結果と矛盾しない宗谷暖流の流入過程が示唆されたものの、南西向きの風に対する海峡内の塩分分布は観測結果と対応していない。また観測結果も時間的、空間的に限られ、宗谷暖流の流入過程について力学を議論するまで至っていない。今後観測やモデル結果の解析によるさらなる検証を必要とする。しかし流入過程を調べる上で重要な海域である国後島西岸域における観測結果が十分ではないうえ、国際情勢から調査船や係留系による新たな観測が困難である。今後人工衛星を用いたより時間分解能の高いデータや、より現実的な水塊・流動構造を再現するモデルを用いて解析を進める必要がある。

謝 辞

調査船観測にあたっては探海丸の加賀船長をはじめ乗組員の皆様方に多大な協力をいただいた。また係留系の設置にあたっては津山 弘之氏にもお世話いただいた。編集委員の岩坂 直人先生をはじめ査読者の方々から貴重な意見をいただいた。研究の発表が遅れたこととお詫びするとともに深くお礼を申し上げます。この研究は科学研究費補助金基盤研究 (A) 「知床世界自然遺産エリアの保全と順応的管理：海域-陸域生態系の相互作用」の補助を受けた。計算には農林水産技術会議筑波計算機センターの計算機を使用した。

References

- 青田 昌秋, 永田 豊, 稲葉 栄生, 松山 優治, 小野 延雄, 金成 誠一 (1985): 宗谷暖流の流動特性とその維持機構. 海洋科学, **17**, 588-594.
- Chapman, D. C. (1985): Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 1,060-1,075.
- Csanady, G.T. (1982): Chapter 4, The subtle effects of topography, p.105-139. In *Circulation in the Coastal ocean*, Reidel Publishing Company, Dordrecht and Boston and London.

- Flather, R. A. (1976) : A tidal model of the north-west European continental shelf. *Mem. Soc. R. Sci. Liege.*, **10**, 141-164.
- 北海道栽培漁業振興公社 (1972~2000) : 養殖漁場海況観測取まとめ, 2~30.
- Itoh, M. and K, I. Ohshima (2000) : Seasonal Variations of water masses and sea level in the southwestern part of the Okhotsk Sea. *J. Oceanogr.*, **56**, 643-654.
- 角田 富男 (1990) : 根室海峡の栄養塩濃度の季節変化, p. 498-503, 続・日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, 東京.
- 気象庁 (1987) : 函館海気象台海洋速報. 25.
- 河野 時廣, 井上 尚文 (1987) : 北海道各地の沿岸水温の変動特性. 北水研報告, **51**.
- 黒木 宗尚, 山田 家正, 増田 道夫 (1979) : 知床半島東岸ラウス海域の海藻相とその植生.
- 松山 優治, 青田 昌秋, 小笠原 勇, 松山 佐和 (1999) : 宗谷暖流季節変動. 海の研究, **8**, 333-338.
- 西浜 雄二 (1994) : 第 8 章 貝毒, p. 169-190. オホーツクのホタテ漁業, 北大図書刊行会, 札幌.
- 大島 慶一郎, 三宅 秀男 (1990) : 北海道南方陸棚域および噴火湾における風による循環に関する数値的研究. 海と空, **66**, 53-66.
- 清水 学, 磯田 豊 (1997) : 冬季噴火湾におけるスケトウダラ卵の輸送過程. 水産海洋研究, **61**, 134-143.
- Song, Y. and D. B. Haidvogel (1994) : A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *J. Comp. Phys.*, **115**, 228-244.
- Takizawa, T (1982) : Characteristics of the Soya Warm Current in the Okhotsk Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan.*, **38**, 281-292.
- Uchimoto, K., H. Mitsudera, N. Ebuchi, and Y. Miyazawa (2007) : Anticyclonic eddy caused by the Soya Warm Current in an Okhotsk OGCM. *J. Oceanogr.*, **63**, 379-391.
- Umlauf, L., H. Burchard, (2003) : A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. *J. Mar. Res.*, **61**, 235-265.
- 宇野木 早苗 (1993) : 風と流れ, p. 235-279. 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 東京.

Inflow of Soya Warm Current Induced by Wind in the Northern Nemuro Strait in Summer

Masatoshi Sato *, Tokihiro Kono*, and Yasuhiro Kawasaki †

Abstract

The repeated CTD observation and the mooring observation were carried out on the east coast of the Shiretoko Peninsula in the Nemuro Strait in August and September 1987. Vertical sections of temperature and salinity from the repeated observation suggest the costal upwelling and downwelling caused by wind. However, temperature and salinity increased in the surface layer in these sections and temperature increased at the mooring site in the upwelling phase, suggesting warm and saline water flowed into this coast. Based on the maps of the surface salinity maximum from these observations, the Soya warm water was located in the middle of the strait when the wind blew northeastward. The time derivative of coastal temperature between July and September from 1972 to 2000 in Rausu was compared with wind velocity. Northeastward wind, which dominated throughout the period, was significantly correlated with increase rate of coastal temperature. Temporal changes of the velocity- and salinity fields were simulated depending on wind using the numerical model with the realistic bathymetry. We gave the southwestward wind after the model reached a quasi-steady state to obtain the result showing the Soya Warm Current did not flow into the western- or the middle strait either but a weak current flowed into the eastern strait. We changed the wind into northeastward in the model, which showed the Soya Warm Current on the west coast of Shiretoko Peninsula turned around the cape flowing into the middle strait. These model results do not disagree with our observations. Though this process is not clear, we can assume the Soya Warm Current flows into the strait strongly when the wind blows northeastward.

Key words: Shiretoko Peninsula, Soya Warm Current, Nemuro Strait,
water exchange, numerical model

(Corresponding author's e-mail address: 06sgb105@gbs.htokai.ac.jp)

(Received 19 May 2006; accepted 31 July 2007)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2007)

* Graduate School of Science and Engineering, Hokkaido Tokai University, 1-1 Minaminosawa, Minamiku, Sapporo, Hokkaido, 005-8601, Japan

† Hokkaido National Fisheries Research Institute, 116, Katurakoi, Kusiro, Hokkaido, 085-0802, Japan