

— 論 文 —

## 春季および初夏の根室湾における海水の鉛直輸送\*

小熊 幸子<sup>†1\*\*</sup>・東屋 知範<sup>†1</sup>・門谷 茂<sup>†2</sup>・永田 光博<sup>†3</sup>

### 要 旨

2007年および2008年の4月から7月にかけて行われた根室湾調査観測によって得られた水温・塩分データを用いて、根室湾内の海水輸送量の季節変化を調べた。湾内の水質分布から根室湾を2層の成層構造とし、湾外との熱および塩分の収支をもとにボックスモデルで見積もった。その結果、湾内の上下層間の鉛直混合は、体積輸送量としては水平混合と同程度であるが、密度成層が水温に依存する時期は小さくなる傾向にあった。それに対し、風に起因する鉛直移流は鉛直混合の1割未満であった。しかし、塩分収支において鉛直移流は鉛直混合に対して数倍となり、水平混合に匹敵する寄与を示した。熱と塩分では鉛直方向の伝わり方に差がみられたものの、根室湾の海水輸送に対する鉛直混合および鉛直移流の寄与は大きいことが示された。

キーワード：根室湾，鉛直輸送，熱塩収支

### 1. 背 景

根室湾は Fig. 1 にあるように北海道東部沿岸に位置し、野付半島および野付湾を北端、根室半島を南端とする半円型で、根室海峡に面した開放湾である。Fig. 2 に示すように、本研究においては野付半島先端の竜神岬と根室半島のノッカマップ岬の間を湾口とし、そこを境界として湾奥側を湾内とする。流入する河川は主に西別川、

床丹川、風蓮川であるが、風蓮川については河口と根室湾の間に汽水域の風蓮湖がある。根室湾の海底は平均水深約 15 m の浅い椀状で、湾口から国後島西岸域の間も 30 m 以下の遠浅な海底地形となっている。野付半島より北側の水深の深い海域に比べると、浅い海底地形によって宗谷暖流水やオホーツク海中冷水の影響を受けにくく、宗谷暖流の流れが最も強まる秋季でも塩分が 33.0 以上になることは少ない（藤井・阿部，1982；小熊ら，2007）。

World Ocean Database 2005 のような歴史的データから得られる平均場において、春季の根室湾は根室海峡内でも特に塩分の低い海域となり、湾口に塩分フロントが形成される（小熊ら，2007）。また、春季における湾内の流れ場は、湾口から根室半島の根元へ向かう南下流でオホーツク海側から一度湾内に入り、根室半島に沿った東向きの流れで太平洋側に流出するとされる（森ら，2010）。一方で、MODIS Near Real Time Data ホームページ（[http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/ADEOS/mod\\_](http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/ADEOS/mod_)

\* 2011年3月3日受領；2011年6月22日受理  
著作権：日本海洋学会，2011

†1 独立行政法人水産総合研究センター 北海道区水産研究所  
〒085-0802 北海道釧路市桂恋 116

†2 北海道大学大学院環境科学院  
〒060-0810 北海道札幌市北区北 10 条西 5 丁目

†3 地方独立行政法人北海道総合研究機構 水産研究本部  
さけます・内水面水産試験場  
〒061-1433 北海道恵庭市北柏木 3-373

\*\* 連絡先 e-mail: [soguma@affrc.go.jp](mailto:soguma@affrc.go.jp)  
tel: 0154-92-1722, fax: 0154-91-9355

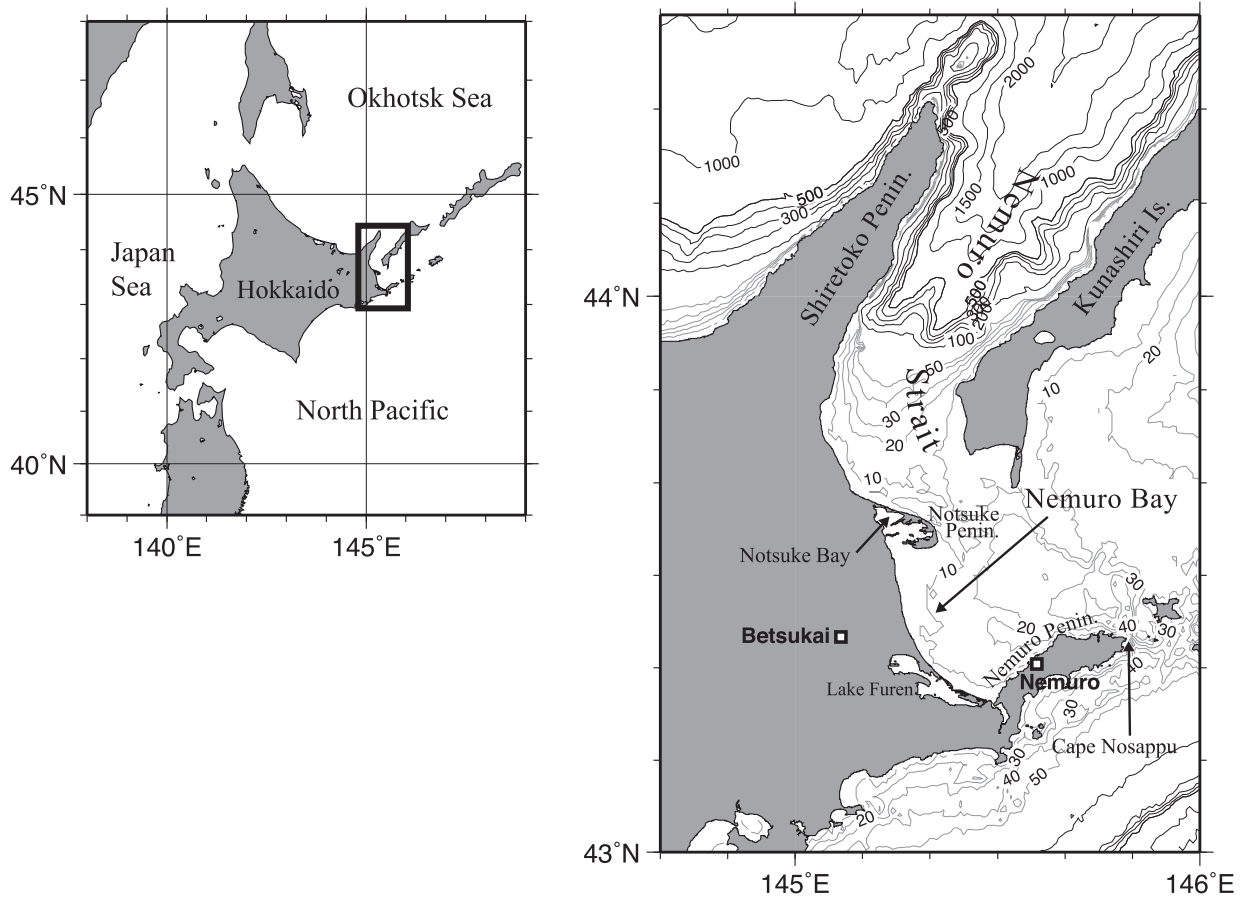


Fig. 1. Bathymetry of Nemuro Bay and Nemuro Strait.

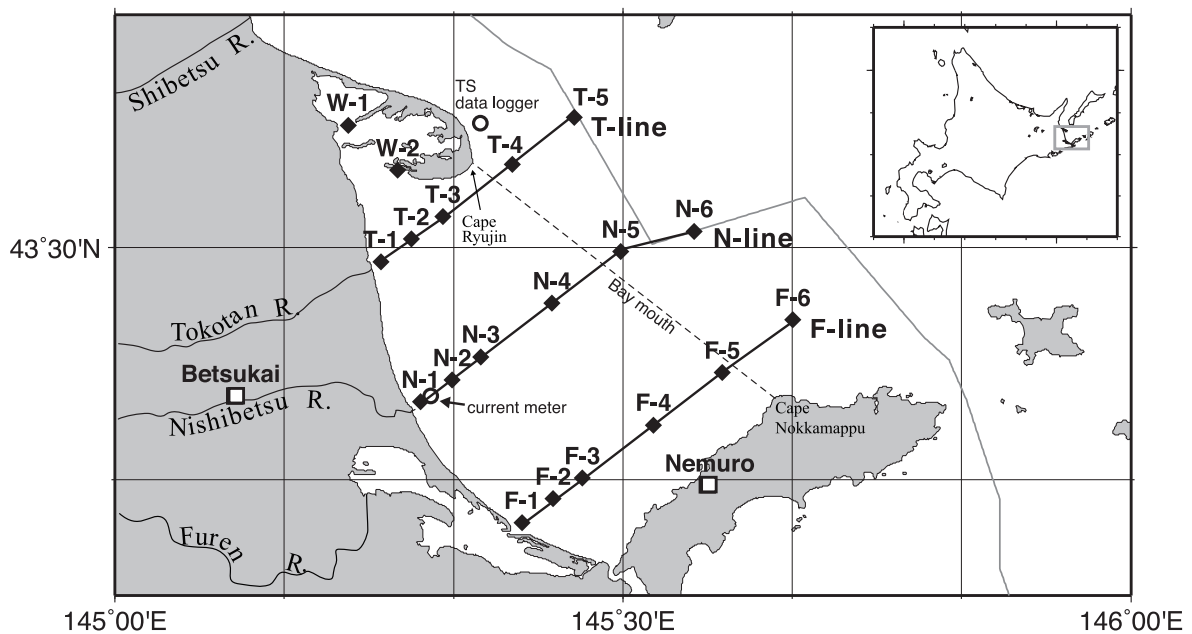


Fig. 2. Location of observation stations.

**Table 1.** List of oceanographic observation cruises in Nemuro Bay.

cruise	date	interval day	Cruise Interval # (CI)
2007			
0704-3	April 24		
0705-1	May 10	16	1
0705-2	May 15	5	2
0705-3	May 28	13	3
0706-1	June 5	8	4
0706-2	June 13	8	5
0706-3	June 26	13	6
0707-1	July 4	8	7
0707-2	July 12	8	8
0707-3	July 24	12	9
2008			
0804-3	April 24		
0805-1	May 8	14	1
0805-2	May 15	7	2
0805-3	May 29	14	3
0806-1	June 4	6	4
0806-2	June 17	13	5
0806-3	June 27	10	6
0807-1	July 8	11	7
0807-2	July 16	8	8
0807-3	July 23	7	9

nrt/) より公開されている 1 km 分解能のクロロフィル *a* 濃度分布を見ると、根室湾を含む野付半島以南の海域で高濃度になることがある。根室海峡北部の知床半島東岸域と連続する分布ではないことから、森ら (2010) の指摘するような根室海峡内の流れだけでなく、野付半島以南の局所的なプロセス、たとえば根室湾の底層からの栄養塩供給の存在が推測される。しかしながら、これまでの研究は水平方向に関する議論が中心で、鉛直方向の物質収支を明らかにした例はない。

本研究では春季から初夏にかけての根室湾について、表層の生物活動を支える底層からの物質輸送を調べる第一段階として、熱塩収支のボックスモデルを用いて湾内の海水の輸送量を見積もり、鉛直混合および鉛直移流の寄与を評価する。

## 2. データ

調査観測は野付漁業協同組合所属の調査船のつけ丸により、2007 年および 2008 年の 4 月下旬から 7 月下旬まで、旬 1 回間隔で各年度につき 10 回ずつ行われた。観測日を Table 1 に示す。後に各観測日の間における輸送量を見積もる都合上、その間を「航海間隔 (Cruise Interval, CI)」と称し、年代と共に順に番号を付す (例えば 0704-3 と 0705-1 の間は 07-CI1)。本研究の解析に用いた測点は床丹川沖の T ラインに 5 点、西別川沖の N ラインおよび風蓮湖口沖の F ラインに 6 点、野付湾に 2 点で合計 19 点である。そのうち、先述の湾口位置の定義により湾内の測点は 14 点、湾外は 5 点である。各ラインにおける測点の河口 (湖口) からの距離は 1, 4, 7, 14, 21, 28 km である。測点の配置を Fig. 2 に示す。水温および塩分分布の解析には、STD (JFE ALEC 社製, AST200-PK) データを用いた。測定間隔は 0.2 m, 範囲は海面から海底直上 1 m までである。STD 観測は全測点で行われたが、野付湾の 2 点については 2007 年に 1 回、2008 年に 4 回欠測している。

船舶観測に加え、データロガーによる連続観測も行った。野付半島に沿う流れの水質変化を示すデータとして、野付半島沖 1km 地点に設置されたデータロガー (JFE アドバンテック社製, Compact CTW) の水温・塩分値を用いた。また沿岸流速データとして、西別川河口 1.4 km 沖に設置されたデータロガー (JFE アドバンテック社製, Compact EM) の値を用いた。毎正時に得られる 20 秒間の流速をベクトル平均して 1 時間おきの値とし、さらに 1 日 24 点分をベクトル平均して日平均流速とした。なお、これらのデータロガー観測は 2008 年開始のため、2007 年の値はない。

河川流量の見積りには、釧路総合振興局釧路建設管理部 (旧釧路土木現業所) 中標津出張所より提供された西別川流量データを用いた。また根室湾の周辺環境を表すために用いた根室の風向・風速データは、気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>) より取得した。

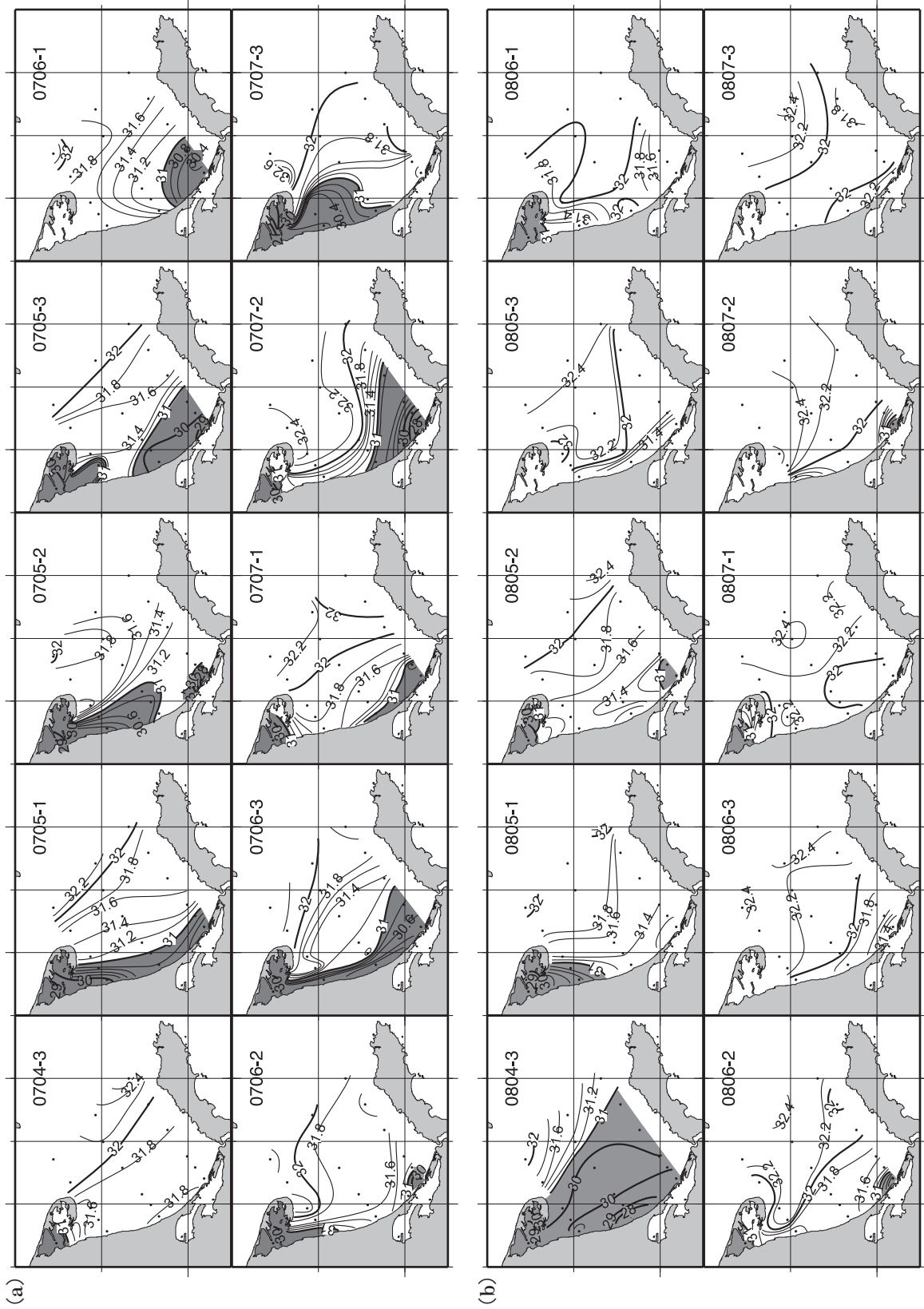


Fig. 3. Horizontal distribution of salinity at 1 m depth from late April to late July, in (a) 2007 and (b) 2008. Dark shadings show areas where water has salinity less than 31.

### 3. 観測結果

#### 3.1 水質分布

2007年および2008年の水深1mにおける水平塩分分布をFig. 3に示す。観測期間中、湾内は塩分32.4未満の水が大半を占め、特に沿岸域では河川から流入する淡水の影響により塩分31未満の低塩分水が見られる。低塩分水の広がり方として、2007年5月上旬(0705-1)のように野付湾から岸に細長く沿う場合と、2007年6月上旬(0706-1)や7月下旬(0707-3)のように風蓮湖口周辺、もしくは野付湾・床丹川河口付近に偏る場合がある。低塩分水の分布形状が海岸線と必ずしも平行ではなく、塩分31未満まで低塩分化する時期や程度が河口・湖口によって異なる。

湾内の鉛直断面を代表して、湾のほぼ中央を通るNラインにおける水温・塩分・密度分布をFig. 4に示す。2007年は、5月までは水深5~10m前後に塩分躍層が見られる一方で、6月以降は海面からの水温上昇に伴い水深10~20mに水温躍層が形成されている。密度分布は、5月下旬(0705-3)までは塩分依存が顕著で、6月上旬(0706-1)以降は水温と塩分の双方の躍層を反映した分布となっている。2008年は、湾外まで及ぶ顕著な塩分躍層が認められたのは4月下旬(0804-3)のみで、塩分の鉛直勾配が2007年に比べて全体的に緩い。その一方で水温躍層は顕著で、海面からの加温と底層からの低温・高塩分水の流入で、7月中旬(0807-2)から7月下旬(0807-3)にかけて水温躍層が湾内の水深6m付近および湾外の10~20mに形成されている。密度躍層は水温躍層の位置と対応しており、密度分布は塩分よりも水温に依存する。

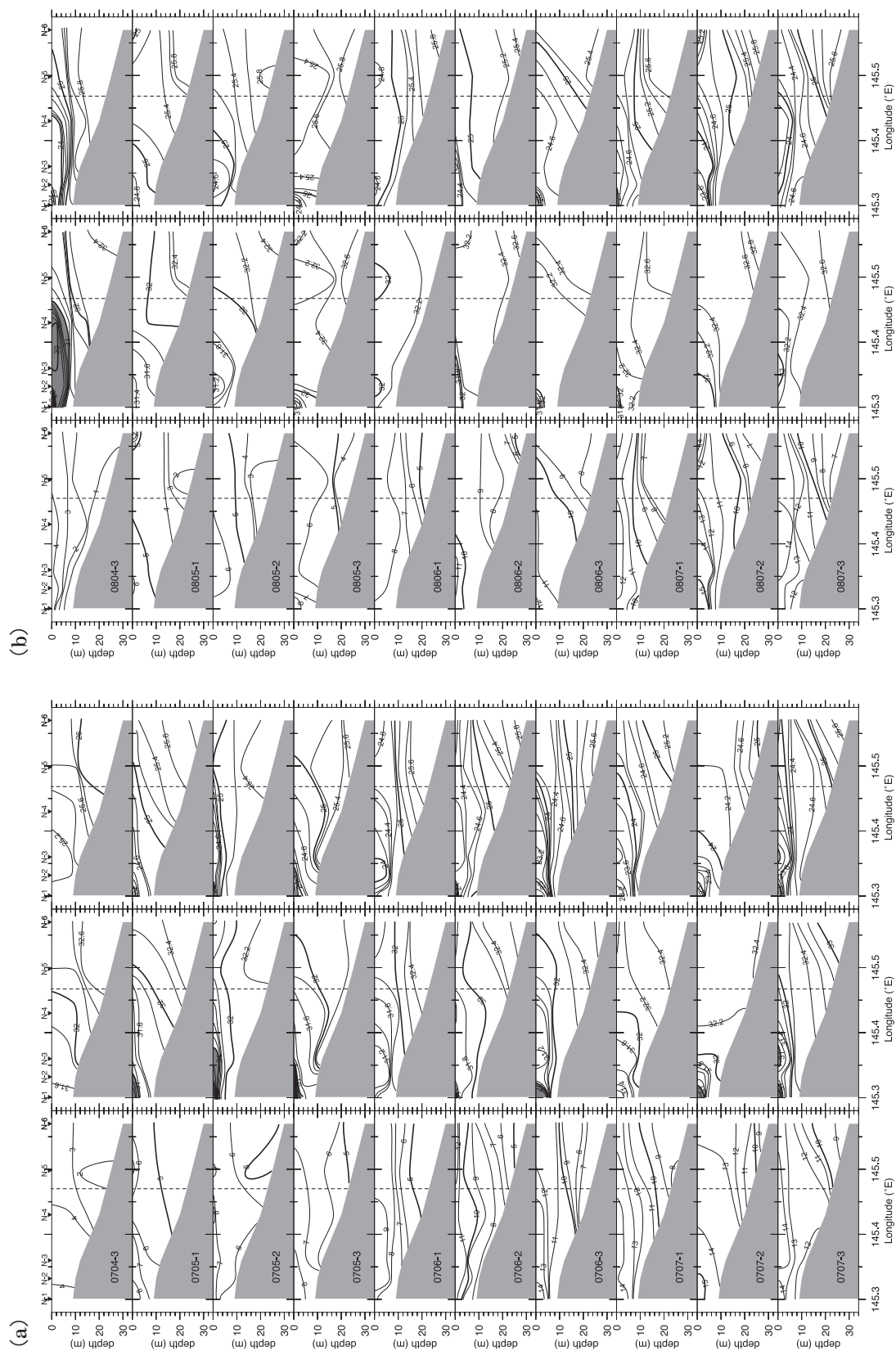
#### 3.2 野付半島沖の水温および塩分

2008年4月から7月末までの野付半島沖およびSts. T-3, T-4, T-5の表層水温・塩分をFig. 5に示す。野付半島沖では潮汐の影響が顕著に見られ、塩分は大きいときで1以上の振幅で日周期変動している。水温は季節と共に上昇するが、別海の気温と比較すると変化は緩

やかで、気温よりも5℃近く低い日もある。Tラインの3測点との水温差は殆どなく、変動パターンも一致する。塩分も大きく振動しながらも徐々に上昇するが、5月末までは31未満の水が観測されている。Tラインの3測点のうち、St.T-4の塩分は野付半島沖と比較的よく対応している。St.T-3は5月下旬まではSt.T-4よりも塩分が低く、6月以降はSt.T-4が下回る場合がある。その一方で、St.T-5では、6月中旬まではSt.T-4よりも高塩分の水が現れ、それ以降は野付半島沖との対応が見られるようになる。Fig. 3(b)と比較すると、特に塩分の低くなる5月まではSt.T-4より岸側を流れてSt.T-3付近を経て湾内へ向かい、6月以降はSt.T-5のある沖側へ広がりながら南下すると考えられる。

#### 3.3 沿岸域の流速と根室の風向・風速

西別川河口沖1.4km点における2008年4月から7月末までの日平均流速をFig. 6(a)に示す。岸に近く水深が約10mと浅いこともあり、海岸線に沿った方向の流れが卓越する。この沿岸流速について5日移動平均すると、Fig. 6(b)に示すように10日前後の周期的変動が現れる。そこで風向として海洋の流向に合わせて風の吹き去る方向をとり、2007年および2008年の根室における風速をFig. 7に示す。そのうちFig. 7(b)の2008年の5日移動平均について、Fig. 6(b)の流向と比較すると、両者はよく対応している。さらに2008年の流向と風向の関係について、西別川河口付近における海岸線の向きを軸にとり、軸から流向(もしくは風向)のずれた角度を $\Delta\text{deg}$ としてFig. 6(c)に示すと、Fig. 4にて比較的低温高塩分の水が海底に沿って現れていた4月下旬、5月中旬、6月上旬、7月上旬に、岸を左手に見る北寄りの風が吹くと同時に、沿岸湧昇を示唆する沖合方向の流れが生じている。逆向きの右手に見る南寄りの風による押し込みについては、岸向きの流れとして明確には見られない。2007年の流速データはないが、2008年の結果に基づき、Fig. 7の風速データを用いて沿岸域における鉛直移流の時間変動を推測することは可能と考えられる。



**Fig. 4.** Vertical sections of (left) temperature, (middle) salinity and (right) density along N-line, off Nishibetsu River in (a) 2007 and (b) 2008. Dark shadings show where water has salinity less than 31. Dotted lines show position of baymouth at N-line.

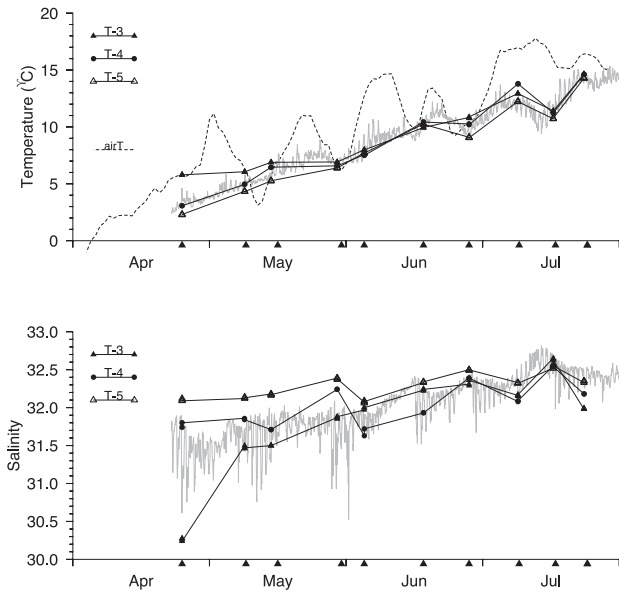


Fig. 5. Time series of (upper) sea surface temperature (SST) and (lower) sea surface salinity (SSS) at Sts. T-3, T-4, T-5, and off Notsuke Peninsula. Air temperature at Betsukai is shown with SST (upper).

### 3.4 西別川流量と別海の降水量

Fig. 8 に河口上流 14 km 地点における西別川の日平均流量と、西別川の中流域にあたる別海における日降水量を示す。4 月前半は降水が少ないにも関わらず増水していることから、融雪水が多く流入したと考えられるが、4 月下旬以降の本研究の観測期間中は降水日から 2-3 日後に増水している。4 月から 7 月にかけての平均流量および積算降水量は、2007 年は  $9.52 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , 507 mm, 2008 年は  $8.50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , 359 mm である。

## 4. 考察

### 4.1 2 層ボックスモデルの設定

Fig. 4 の鉛直水質分布から、密度分布の水温および塩分依存性に変化はあるものの、春季から初夏にかけても根室湾内は大方 2 層構造が維持されていると考えられる。そこで 2 層ボックスモデルを用いて海水輸送量を見積もる。

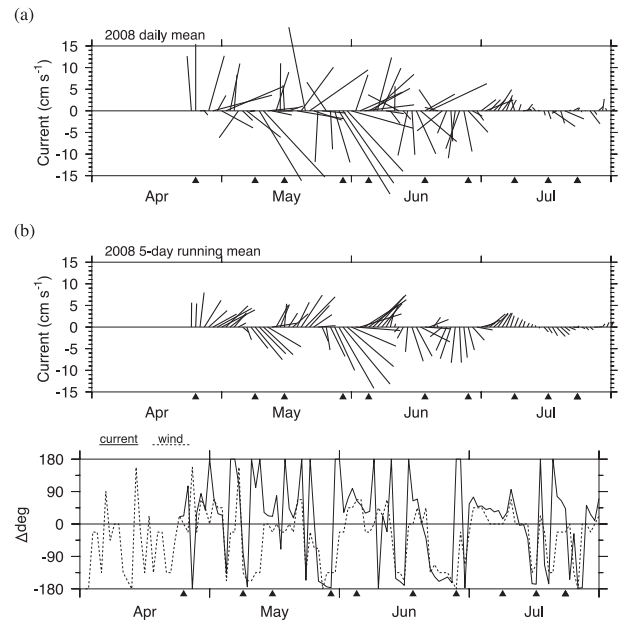


Fig. 6. Stick diagrams of (a) daily mean and (b) 5-day running mean current and (c) time series of direction of daily current (solid line) or daily wind (dotted line) in April-July, 2008 at 1.4 km off Nishibetsu River. The direction is defined by difference between the coast line around river mouth of Nishibetsu River and current (or wind) direction. Positive and negative values correspond to clockwise offshore and anti-clockwise land, respectively, directions. Black triangles indicate observation date (see Table 1).

ボックスの概略図と設定対象海域を Fig. 9 に示す。湾内の上層および下層を Box 1 と 2, 湾外の上層と下層を Box 3 と 4 とする。そして湾外のうち St.T-4 と野付半島の東岸域は、3.2 節で述べた野付半島沖の南下流域とする。上層および下層における湾口を挟んだ水平混合  $Q_{h1}$ ,  $Q_{h2}$ , 上下層間の鉛直混合  $Q_T$ ,  $Q_S$ , 鉛直上向きおよび下向きの鉛直移流  $Q_{w+}$ ,  $Q_{w-}$ , 野付半島沖の南下流  $Q_{sh}$  で各ボックス間の海水輸送を構成する。水平混合には、海岸線に沿った水平移流によって湾口の両端で交換される分も含まれる。藤原ら (1996) のように水平混合を湾口の鉛直断面積に比例させる方法があるが、久保 (1982) の報告では上層と下層の日平均流速に顕著な差が示されている。よってここでは水平混合  $Q_{h1}$ ,  $Q_{h2}$  は独立したパラメータとして扱う。鉛直移流は、後述のよ

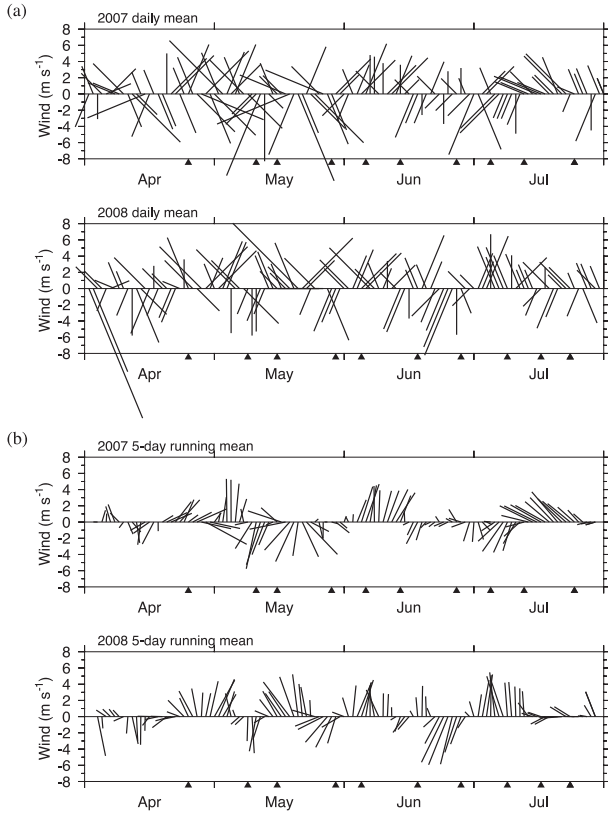


Fig. 7. Stick diagrams of (a) daily mean and (b) 5-day running mean wind speed at Nemuro in April–July, (upper) 2007 and (lower) 2008. Black triangles indicate observation date (see Table 1).

うに海上風による沿岸湧昇もしくは岸方向への押し込みを表す。水温と塩分の混合について水平方向 ( $Q_{h1}$ ,  $Q_{h2}$ ) は同程度とするが、Fig. 4 の鉛直分布から熱と塩分との間で輸送の強さに差があると思われるので、宇野木 (1974) に倣い鉛直混合は水温  $Q_T$  と塩分  $Q_S$  とで分ける。Box 1 および Box 2 の熱および塩分収支は以下のようになる。

$$V_1 \frac{dT_1}{dt} = Q_{h1}(\overline{T}_3 - \overline{T}_1) + Q_T(\overline{T}_2 - \overline{T}_1) + Q_{w+}(\overline{T}_2 - \overline{T}_1) + Q_{w-}(\overline{T}_3 - \overline{T}_1) + Q_{sh}(\overline{T}_{sh} - \overline{T}_1) + SH, \quad (1)$$

$$V_1 \frac{dS_1}{dt} = Q_{h1}(\overline{S}_3 - \overline{S}_1) + Q_S(\overline{S}_2 - \overline{S}_1) + Q_{w+}(\overline{S}_2 - \overline{S}_1) + Q_{w-}(\overline{S}_3 - \overline{S}_1) + Q_{sh}(\overline{S}_{sh} - \overline{S}_1) - Q_f \overline{S}_1, \quad (2)$$

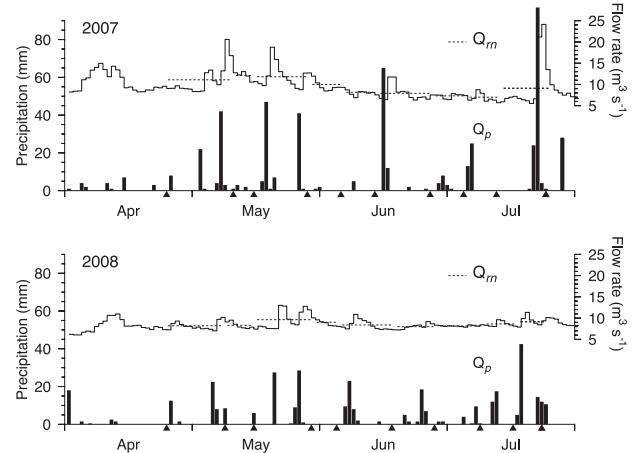


Fig. 8. Daily mean flow rate of Nishibetsu River and daily precipitation at Betsukai in April–July, (upper) 2007 and (lower) 2008. Dotted lines show mean flow rate during each cruise interval  $Q_m$ . Black triangles indicate observation date (see Table 1).

$$V_2 \frac{dT_2}{dt} = Q_{h2}(\overline{T}_4 - \overline{T}_2) + Q_T(\overline{T}_1 - \overline{T}_2) + Q_{w+}(\overline{T}_4 - \overline{T}_2) + Q_{w-}(\overline{T}_1 - \overline{T}_2), \quad (3)$$

$$V_2 \frac{dS_2}{dt} = Q_{h2}(\overline{S}_4 - \overline{S}_2) + Q_S(\overline{S}_1 - \overline{S}_2) + Q_{w+}(\overline{S}_4 - \overline{S}_2) + Q_{w-}(\overline{S}_1 - \overline{S}_2), \quad (4)$$

ここで、 $Q_f$  は淡水付加量、 $V_i$  はボックスの体積 ( $V_1 = 3.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,  $V_2 = 3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ ),  $dT_i/dt$ ,  $dS_i/dt$  は各航海間隔におけるボックス内平均水温・塩分の時間変化、 $\overline{T}_i$ ,  $\overline{S}_i$  は各航海間隔の前航海と後航海の塩分平均値 ( $i=1, 2, 3, 4$  はボックスの番号,  $sh$  は野付半島沖の南下流域) を表す。Box 1 と 2 には湾内 12 点, Box 3 と 4 には St.T-4 を除く湾外 4 点のデータを適用し、ボックス内で平均する場合は測点間隔を元に面積的な重みをかける。密度躍層のおおよそその位置から、上下層間の境界水深  $z_0$  を 7 m とする。根室湾内の平均水深は約 13 m なので、この境界面はほぼ中間にあたる。野付半島沖の南下流域の水温と塩分 ( $\overline{T}_{sh}$ ,  $\overline{S}_{sh}$ ) について、2007 年は観測データがない。Fig. 5 で示したように水温は St.T-4 の表層水温で代用できる。しかし、塩分については野付半島沖の方が値が低いうえに変動幅が大きく、St.T-4 の値では表しきれない。海水輸送量の見積もりにおい



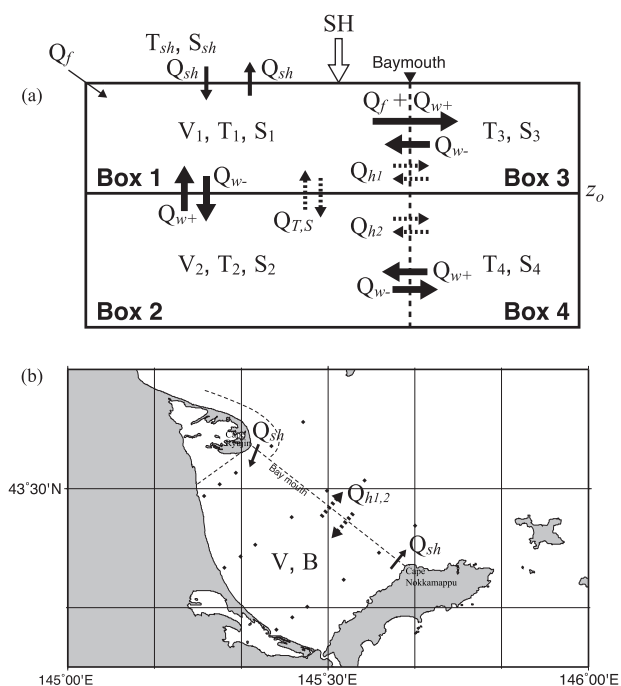


Fig. 9. (a) Schematic view of box model and (b) geometrical boundary of boxes.  $Q_{h1}$ ,  $Q_{h2}$ ,  $Q_T$ ,  $Q_S$ ,  $Q_{w+}$ ,  $Q_{w-}$ , and  $Q_{sh}$  are volume transports of horizontal mixing at upper layer and lower layer, vertical mixing of heat and salinity between Box 1 and Box 2, vertical advection, and southward advection from off Notsuke Peninsula, respectively.  $Q_f$  stands for fresh water input, and SH for heat transport at sea surface.  $T_i$ ,  $S_i$  and  $V_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) are mean temperature, mean salinity, and volume of each box.

て無視できない値であるが、本研究の目的は鉛直輸送の寄与の評価にあって、輸送量の定量的な算出ではない。そこで、野付半島沖の低塩分水の水源として標津川河口沖を中心に分布する低塩分水（小熊ら，2007）を想定し、World Ocean Database 2005 収録の5月の標津川河口沖データを元に得た平均値 30.5 を両年ともに採用する。塩分値を一定とすることで、実際にはより低塩分の水が流入した場合は輸送量が過剰に、より高塩分の水の場合は過少に見積もられることになる。野付湾の2点については、特に2008年に欠測が多く、また湾の大部分がアマモの繁殖する水深1m未満の浅瀬であるのに測点自体は滞筋にあって代表性に乏しいことから、本研究における収支計算からは除外する。

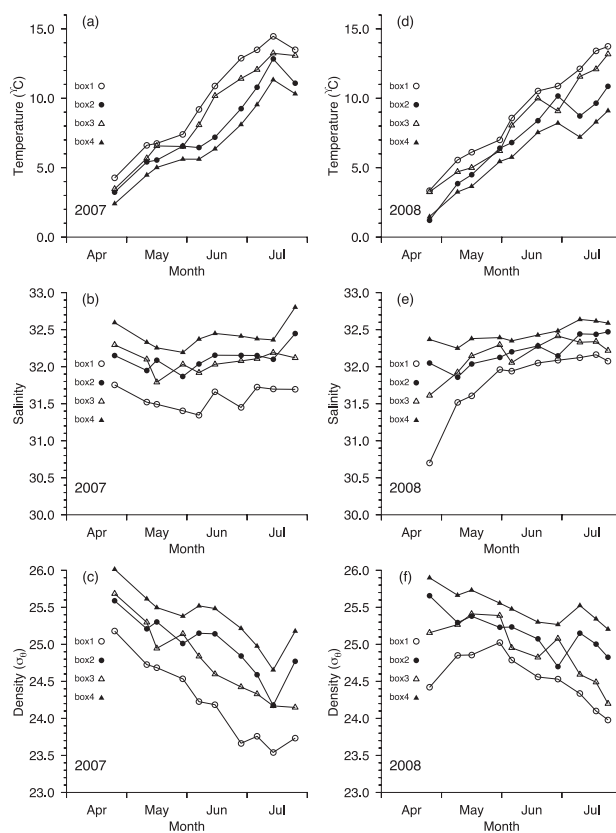
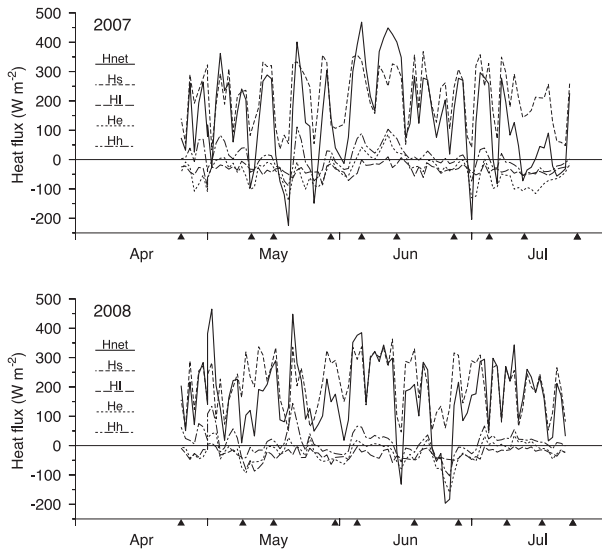


Fig. 10. Seasonal changes of (a,d) mean temperature, (b,e) mean salinity and (c,f) mean density of each box in (a,b,c) 2007 and (d,e,f) 2008.

#### 4.2 各ボックスの平均水温・塩分・密度

各ボックス内の平均水温・塩分・密度の時間変化を Fig. 10 に示す。4ボックスを通じた全体的な傾向として、2007年の平均塩分は5月下旬を極小とする季節変化が見られるが、6月から7月にかけて塩分が増加し始めても水温上昇によって密度は7月中旬まで下降し、湾外下層のBox 4でも  $25.0\sigma_\theta$  を下回った。5月上旬から中旬 (07-CI2), 5月下旬から6月上旬 (07-CI4) にかけて、Box 1の塩分が低下する一方でBox 2の塩分は上昇している。また7月中旬から下旬 (07-CI9) にはBox 2とBox 4で急激な塩分増加が認められるが、Box 1とBox 3にはそれがない。一方2008年は、5月下旬から6月上旬 (08-CI4), 6月中旬から7月上旬 (08-CI7) にみられるBox 2とBox 3の塩分・密度差の顕著な反転が特徴的であるが、4ボックスとも塩分が



**Fig. 11.** Time series of heat flux at sea surface in (upper) 2007 and (lower) 2008.  $H_s$ ,  $H_l$ ,  $H_e$ ,  $H_h$ , and  $H_{net}$ , are heat fluxes of short-wave radiation, long-wave radiation, latent heat transfer, sensible heat transfer, and total heat transfer, respectively.

ほぼ常に増加傾向にある。塩分の上昇により、水温が季節と共に上昇しても、密度は2007年ほど下がっていない。

### 4.3 海面熱輸送量

式(1)の根室湾の海面における熱輸送量  $SH$  について、気象庁ホームページより公開されている根室の気象データの日平均値を用いて、バルク法(磯田・長谷川, 1997)にて算出した。正味の熱輸送量  $SH$  は、

$$SH = H_s + H_e + H_h + H_l \quad (5)$$

で表される。ここで  $H_s$ ,  $H_e$ ,  $H_h$ ,  $H_l$  はそれぞれ短波放射量、潜熱輸送量、顕熱輸送量、有効長波放射量である。潜熱輸送量  $H_e$  および顕熱輸送量  $H_h$  の見積もりで用いる風速については、陸上観測の風を海上風に近づけるため、風速値を2倍にして代用した。日平均海面水温値は、ボックス内の水温は瞬時にして一様になるという前提で、各航海間隔の前航海と後航海のBox 1内の平均水温(Fig. 10(a), (d))を航海間隔日数にて線形補間した。

**Table 2.** List of physical parameters for Nemuro Bay.

$A$	size of vertical section at baymouth	$5.62 \times 10^5 \text{ m}^2$
$B$	area of bay	$6.00 \times 10^8 \text{ m}^2$
$C_L$	length of coast line	$3.32 \times 10^4 \text{ m}$
$D_B$	mean depth of Nemuro Bay	13 m
$R$	flow area of rivers facing to Nemuro Bay	$2.13 \times 10^9 \text{ m}^2$
$R_n$	flow area of Nishibetsu River	$4.50 \times 10^8 \text{ m}^2$
$V$	total volume of bay	$7.60 \times 10^9 \text{ m}^3$

磯田・長谷川(1997)のバルク式を用いて算出した日平均熱収支をFig. 11に示す。各海面熱輸送量の正は気から海への放射量を示す。短波放射量  $H_s$  は6月下旬に最大で  $340 \sim 360 \text{ W m}^{-2}$  に達する一方で、雨天時は  $35 \text{ W m}^{-2}$  を下回る。有効長波放射量  $H_l$  は、両年ともほぼ常時海から気へ輸送されている。潜熱輸送量  $H_e$  および顕熱輸送量  $H_h$  は、2008年の気温変動(Fig. 5)に見られるように、急激に気温が上昇して海面水温と大きく差が生じる時期は気から海へ輸送されている。

### 4.4 淡水付加量

湾内上層へ流入する淡水付加量  $Q_f$  は、

$$Q_f = Q_r + Q_p + Q_e, \quad (6)$$

で表される。ここで  $Q_r$ ,  $Q_p$ ,  $Q_e$  はそれぞれ河川流入量、降水量、蒸発量である。河川流入量には、本来根室湾へ流入する全河川の流量を用いるべきである。しかし、流入河川のそれぞれについて詳細な時間変動は得られていない。そこで、本研究では根室湾に流入する河川の代表値としてFig. 8にて示した西別川の日平均流量  $Q_m$  を航海間隔ごとに平均した値を適用し、西別川と全河川の流域面積比  $R_n/R$  を用いて河川流入量  $Q_r = Q_m \times R_n/R$  とする。 $R_n$  および  $R$  にはTable 2の値を用いる。各航海間隔の  $Q_m$  はFig. 8にて点線で示してある。2007年および2008年の各航海間隔における平均流量  $Q_m$  は、それぞれ  $7.0 \sim 12.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $8.0 \sim 9.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  である。Fig. 3の水平塩分分布にて示したように、塩分31未満まで低塩分化する時期や程度が河口・湖口によって異なっており、床丹川や風蓮川など他の河川が必ずしも西別川と同

じような時間変動をしているとは限らない。

降水量  $Q_p$  は、Fig. 8 にて示した別海の日降水量を航海間隔日数で平均して用いる。蒸発量  $Q_e$  は、前節で見積もられた潜熱輸送量  $H_e$  から、

$$Q_e = H_e \cdot B \cdot L^{-1} \times 10^{-3}, \quad (7)$$

により算出する (長谷川・磯田, 1997)。ここで  $B$  はボックスモデル設定海域の面積、 $L$  は水 1 kg が蒸発する際に奪われる熱量 ( $= 2.46 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ )、 $10^{-3}$  は蒸発量を質量に直すための係数である。

#### 4.5 沿岸湧昇に伴う鉛直移流

鉛直移流による輸送量  $Q_{w+}$ 、 $Q_{w-}$  について、密度分布に塩分依存性が見られることからエスチュアリー循環を想定し、藤原ら (1996) と同様の塩分収支のみによるボックスモデルを用いて湾内の下層から上層に向かう方向を正として計算したが、熱収支を加えたところで輸送量が負の値となって破綻した。Fig. 10(b), (e) で示すように、ボックス内平均塩分は殆どの観測時において  $\text{Box 1} < \text{Box 2} < \text{Box 3} < \text{Box 4}$  となっており、また根室湾に流入する河川流量が少ないため、湾外の  $\text{Box 3}$  から  $\text{Box 1}$ ,  $2$  へ塩分が流入するように輸送が向けられてしまうことなどが要因として挙げられる。しかし、Fig. 6 (c) に北寄りの風に対して沿岸湧昇を示唆する沖向きの流れが見られており、鉛直移流が全く生じないとは言えない。そこで、鉛直移流のプロセスとして、岸を左手に見て吹く風による鉛直上向きの沿岸湧昇、および右手に見て吹く風による下向きの押し込みの適用を検討する。

沿岸湧昇による輸送量の見積もりの前に、その影響が及ぶ領域を調べる。沿岸湧昇が有意に出現するのは岸から Rossby の内部変形半径  $\lambda$  の範囲とされる (宇野木, 1993)。 $\lambda$  を

$$\lambda = \frac{NH}{f} \approx \frac{Nd}{f}, \quad (6)$$

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}} \approx \sqrt{-\frac{g}{\rho_0} \frac{\Delta \rho}{d}}, \quad (7)$$

として、密度の鉛直勾配に Sts.T-1, N-1, F-1 の表

層 1 m および海底直上 1 m の密度差  $\Delta \rho$  と 3 測点のおよその平均水深  $d = 6.5 \text{ m}$ 、 $\rho_0$  に表層密度と海底直上の密度の平均値を用いると、2007 年は  $\lambda = 2.2 - 3.4 \text{ km}$ 、2008 年は  $\lambda = 1.4 - 2.7 \text{ km}$  であった。つまり、Fig. 4 の最も岸側の部分に湧昇の影響が見えるか見えないかの程度で、沿岸湧昇を適用するのは妥当と考えられる。沿岸湧昇は海岸線の単位長さあたりに単位時間に  $\tau_s / f \rho$  だけ運ばれる (宇野木, 1993)。海面の風応力  $\tau_s$  はバルク法により、

$$\tau_s = C_d \rho_a U^2, \quad (8)$$

で得る。ここで  $C_d$  はバルク定数  $1.0 \times 10^{-3}$ 、 $\rho_a$  は大気密度  $1.2 \text{ kg m}^{-3}$ 、 $U^2$  は風速である。沿岸湧昇による鉛直輸送量は、海岸線の長さを  $C_L$  (Table 2) とすると  $C_L \tau_s / f \rho$  で得られる。ここで、 $\rho$  に先の Rossby の内部変形半径  $\lambda$  の計算時に用いた沿岸 3 測点の平均密度  $\rho$  を適用する。この鉛直輸送量を、北寄りの風が吹いたときの沿岸湧昇  $Q_{w+}$  と、南寄りの風が吹いたときの押し込み  $Q_{w-}$  として、 $Q_{w+}(Q_{w-})$  には Fig. 7(a) の日平均風速のうち各航海間隔中に吹いた北寄り (南寄り) の風による  $\tau_s$  を足し合わせ、航海間隔の日数で平均する。

#### 4.6 海水輸送量の見積もり

式 (1)–(4) に対して残る未知数は  $Q_{h1}$ 、 $Q_{h2}$ 、 $Q_T$ 、 $Q_S$ 、 $Q_{sh}$  の 5 つであるが、ここで塩分の鉛直混合  $Q_S$  を

$$r = Q_S / Q_T, \quad (9)$$

と表す (宇野木, 1974)。 $r$  が 1 より小さい場合、塩分を海水のトレーサとすると、海水自身の拡散が抑えられ熱だけがより伝わる状況を表すと考えられる。式 (1)–(4) に式 (9) の  $Q_S$  を代入し、 $r$  を順次変えて  $Q_{h1}$ 、 $Q_{h2}$ 、 $Q_T$ 、 $Q_{sh}$  が正になる値を求める。その際、解は一意ではなく、いずれも起こり得る値とする。

ボックスモデルの計算結果を Table 3 に、また各航海間隔の  $r$  の平均値に対する  $Q_{h1}$ 、 $Q_{h2}$ 、 $Q_T$ 、 $Q_{sh}$  の時間変化を Fig. 12 に示す。4 つの輸送量のうち、いずれかが負になった航海間隔については空白となっている。有意

**Table 3** Flux values of vertical circulation for each cruise interval.

year	CI	$Q_T(\text{m}^3\text{s}^{-1})$	$Q_{sh}(\text{10}^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1})$		$Q_{hl}(\text{10}^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1})$		$Q_{h2}(\text{10}^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1})$		$Q_T(\text{10}^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1})$		$r(=Q_S/Q_T)$	$Q_w(\text{10}^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1})$	
			mean	mean	mean	mean	mean	mean					
2007	1	77.8	2.38-3.53	3.11	0.24-9.30	6.03	0.00-9.07	3.28	5.48-13.10	8.23	0.26-0.81	0.54	0.04
	2	51.3	1.08-2.61	2.05	0.28-8.90	5.73	4.84-12.90	7.80	3.79-8.69	5.59	0.01-0.51	0.26	-0.15
	3	95.1	0.21-1.72	1.16	1.08-7.65	5.22	0.18-6.81	2.63	3.29-7.81	4.96	0.42-0.56	0.49	-0.08
	4	42.3	3.07-4.74	4.36	0.02-8.53	6.58	2.87-14.03	5.43	1.05-6.52	2.31	0.01-0.96	0.49	0.02
	5	51.7	6.60-6.94	6.81	16.80-21.79	19.81	2.03-8.35	4.53	1.80-3.42	2.44	0.01-1.00	0.51	0.09
	6	76.6	1.01-1.88	1.57	0.08-7.31	4.72	0.06-9.82	3.56	1.94-4.67	2.91	0.01-0.97	0.49	-0.01
	7	37.0	0.01-0.37	0.21	3.76-5.90	4.94	0.16-3.03	1.44	2.72-3.80	3.20	0.01-0.33	0.17	-0.04
	8	48.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	9	97.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2008	1	58.1	11.32-12.49	11.87	11.31-15.79	13.68	0.09-10.47	4.98	4.29-5.10	4.67	0.18-1.00	0.59	0.07
	2	34.1	1.72-1.84	1.77	1.77-7.18	5.02	3.25-10.66	6.22	3.78-6.98	5.06	0.01-1.00	0.51	-0.03
	3	78.5	1.04-2.28	1.88	0.31-14.84	10.12	0.91-16.55	5.99	6.18-18.73	10.25	0.01-0.85	0.43	0.05
	4	32.5	0.27-0.74	0.55	0.04-8.61	5.31	2.72-8.66	5.01	4.77-9.73	6.68	0.01-0.61	0.31	0.03
	5	59.6	0.29-2.03	1.49	0.18-31.11	21.58	1.88-19.89	7.43	3.67-12.47	6.38	0.01-0.87	0.44	0.02
	6	45.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	7	45.8	1.66-1.80	1.75	14.29-16.80	15.92	4.42-6.05	5.00	0.92-2.32	1.41	0.01-1.00	0.51	0.07
	8	69.0	0.41-0.74	0.63	10.69-18.68	15.85	0.01-5.29	1.88	1.39-3.45	2.12	0.10-1.00	0.55	0.04
	9	99.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

な結果が得られたのは、全 18 航海間隔のうち 14 航海間隔であった。上下層間の鉛直混合 $Q_T$ と風に起因する鉛直移流 $Q_w(=Q_{w+}+Q_{w-})$ は、それぞれ 2007 年は $1.05-13.10 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 、 $-0.15-0.09 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 、2008 年は $0.92-18.73 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 、 $-0.03-0.07 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ となった。体積輸送量としては、 $Q_T$ は $Q_{hl}$ 、 $Q_{h2}$ と同程度であるが、密度成層の塩分依存性の強い 07-CI3 までに比べ、07-CI4 以降（もしくは 2008 年の全航海間隔）は $Q_T$ が小さくなっている。塩分鉛直勾配の大きくなる 07-CI7 などでは $r$ 値が特に小さく、熱と塩分で上下層間の伝わり方に顕著な差が生じることが分かる。 $Q_w$ は $Q_T$ の 1 割未満で、 $r$ 値によっては 07-CI4 のように $Q_T$ が 6 倍近く変化する場合もあるが、鉛直輸送全体に対して鉛直移流の占める割合が低い傾向は変わらない。

水平方向の輸送では、 $Q_{hl}$ 、 $Q_{h2}$ が主として湾口における潮汐混合を現すとして、湾口における上下層の断面積 $A_{13}=2.05 \times 10^5 \text{ m}^2$ 、 $A_{24}=3.57 \times 10^5 \text{ m}^2$ を用いて、水平流

速を

$$u_1 = Q_{hl}/A_{13}, \quad (10)$$

$$u_2 = Q_{h2}/A_{24}, \quad (11)$$

として求めると、2007 年は $u_1=2.3-9.7 \text{ cm s}^{-1}$ 、 $u_2=0.34-2.1 \text{ cm s}^{-1}$ 、2008 年は $u_1=2.4-10.5 \text{ cm s}^{-1}$ 、 $u_2=0.53-2.1 \text{ cm s}^{-1}$ であった。実際の根室湾の流速と比較すると、1979 年 6 月下旬の湾口の水深 5 m における水平流速（久保，1982）のベクトル平均値は $3.2-5.5 \text{ cm s}^{-1}$ でオーダーとして同程度である。一方、野付半島沖の南下流 $Q_{sh}$ が $Q_{hl}$ に対し平均で 30%、最大で 08-CI1 にて 87%の寄与を示している。野付半島から St.T-4 までの数キロ内の狭く浅い海域から流入する低塩分水により、湾外や下層から供給される塩分が上層から相当量運び出されていることが分かる。 $S_{sh}=30.5$ で固定して計算したため、体積輸送量の定量的な議論はできないが、

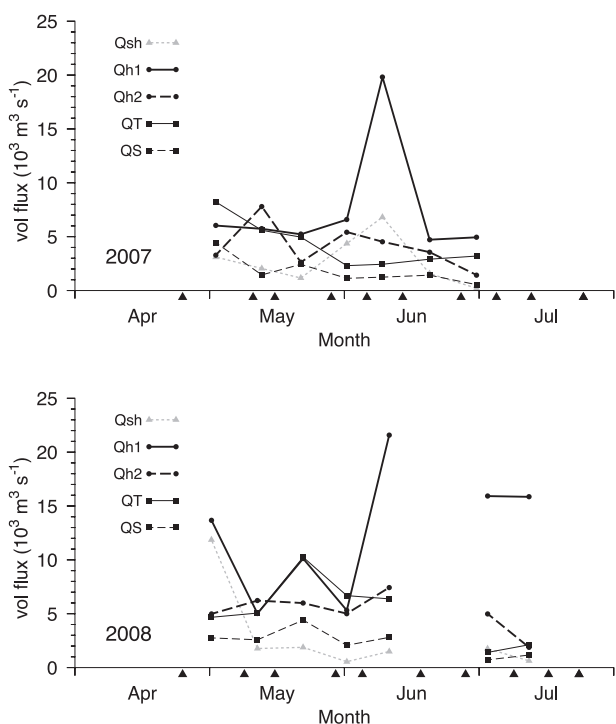


Fig. 12. Seasonal changes of volume fluxes ( $\times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) in 2007 (upper) and 2008 (lower). Black triangles indicate observation date (see Table 1).

08-CI1 のように  $Q_{sh}$  が  $Q_{hl}$  に近い輸送量で見積もられた場合、実際の  $S_{sh}$  はもっと低いと考えられる。

全航海間隔の中で、例として 07-CI2 と 07-CI5 におけるボックスモデルで得られた熱塩収支をそれぞれ Fig. 13 に示す。07-CI2 は  $r$  の値が 14 航海間隔中で最小になった一方で、鉛直輸送は下向きだった。07-CI5 は  $Q_{hl}$  が 2007 年で最も大きく、上向きの鉛直輸送が両年で最大であった。07-CI2 では、下層の熱は上層との鉛直混合によって供給されるが、塩分は湾口を挟んだ水平混合によって供給されている。Fig. 4 に示されるように、塩分躍層の発達によって密度成層も強化され、塩分の鉛直輸送が水温に比べて抑えられていることを反映している。07-CI5 では、海面から供給される熱輸送量が 07-CI2 の 3.5 倍と大きく、上層の水平混合  $Q_{hl}$  と下層との鉛直混合  $Q_T$  による熱輸送量も 5.4 倍および 1.2 倍となっている。しかし、 $r=0.51$  と塩分による密度成層を仮定して計算されているため、塩分の水平混合は 07-CI2 の 3.5 倍、鉛直混合はほぼ等倍と熱輸送量ほど増加していない。

両航海間隔の共通点として、鉛直移流による体積輸送量が、鉛直混合に比べて数パーセント以下であるにも関わらず、塩分収支において数倍の寄与となっている点が挙げられる。鉛直移流により流入した熱や塩分はほぼそのまま流出するので、湾内の熱・塩分の増減には寄与しないが、海水中の物質輸送量としては鉛直混合に対して 07-CI2 では下向きで 6.5 倍、07-CI5 では上向きで 4.2 倍に達し、水平混合に匹敵する量となった。

#### 4.7 根室湾内の成層構造と鉛直混合

Fig. 4 の鉛直断面図で示したように、2007 年は密度成層構造が顕著で、5 月までは密度分布が塩分に依存していたが、6 月以降に密度分布が水温依存へ移行し、熱と塩分とで鉛直輸送の強さに差が生じたと推測される。一方で 2008 年は 7 月上旬までは水温と塩分の両方で勾配が緩いため密度成層も弱く、08-CI8 と 08-CI9 にて季節的な昇温によって成層が強まっている。各航海間隔の  $r$  値の上限を比較すると、2007 年は上限が 1 だったのは 07-CI5 だけで、2008 年は 4 航海間隔で 1 であった。つまり、2007 年の方が塩分の鉛直混合が制限されており、密度成層の塩分依存性が高かったと言える。

両年とも湾内下層から上層への鉛直輸送において鉛直混合の占める割合が大きく、水平混合と同等以上であった。ここで、 $r=1$  の場合において  $Q_T$  の値を鉛直拡散係数  $K_z$ 、湾内の平均水深  $D_B$ 、湾内面積  $B$  で表すと、

$$Q_T \approx K_z \frac{B}{D_B/2}, \quad (12)$$

となるので、Table 2 の諸元量から  $K_z$  を計算すると、2007 年は  $2.5-8.9 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、2008 年は  $1.5-11.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  に相当する。根室湾について  $K_z$  を議論した研究はこれまで無いが、二村ら (2005) の瀬戸内海燧灘における値と  $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  のオーダーでおおよそ一致する。塩分の鉛直拡散  $Q_s$  は、河川の増水等によって表層の低塩分化が進むなどして塩分鉛直勾配が大きくなった 07-CI2 や 07-CI7 では小さくなると考えられるが、ボックスモデルで得た  $r$  値はそれに対応して小さくなっている。

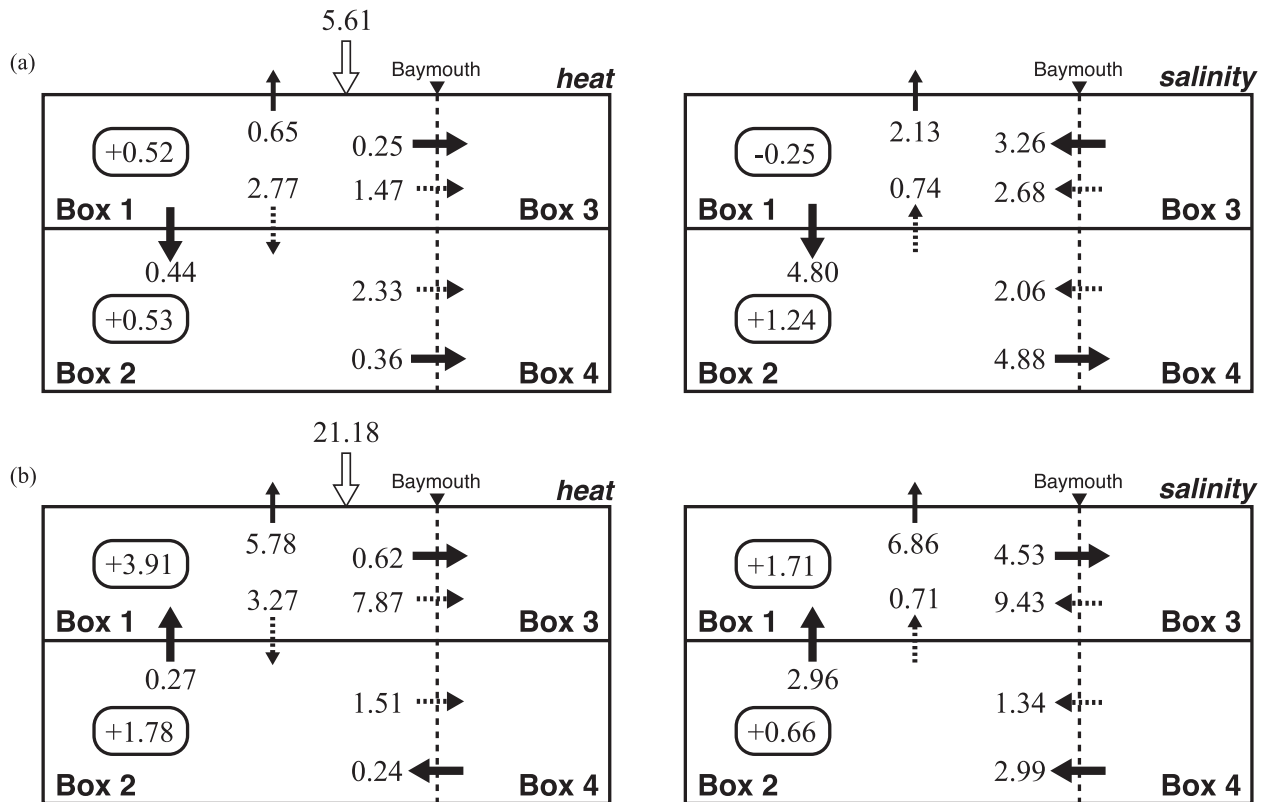


Fig. 13. Schematic views of (left) heat ( $\times 10^{10} \text{ J s}^{-1}$ ) and (right) salinity budgets ( $\times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) during (a) 07-CI2 and (b) 07-CI5. Values in round boxes show temporal changes of heat and salinity in each box ( $V_1 \cdot d\bar{T}_1/dt$ ,  $V_2 \cdot d\bar{T}_2/dt$ ,  $V_1 \cdot d\bar{S}_1/dt$ ,  $V_2 \cdot d\bar{S}_2/dt$ ). Solid thick arrows denote directions of advective fluxes by  $Q_{w+}$ ,  $Q_{w-}$  and  $Q_f$ . Solid thin arrows in upper layer denote advective fluxes by  $Q_{sh}$ . Dotted arrows denote directions of fluxes by horizontal mixing,  $Q_{ht}$ ,  $Q_{h2}$ , or vertical mixing,  $Q_v$ ,  $Q_s$ .

## 5. 結論

春季から初夏の根室湾について、表層の生物活動を支える底層からの物質輸送の寄与を調べるため、鉛直移流による海水輸送量を見積もった。熱塩収支の2層ボックスモデルを用いて輸送量を見積もった結果、上下層間の鉛直混合と沿岸湧昇に起因する鉛直移流は、それぞれ2007年は  $1.05 - 13.10 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $-0.15 - 0.09 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , 2008年は  $0.92 - 18.73 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $-0.03 - 0.07 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  となった。体積輸送量としては、鉛直混合は水平混合と同程度であるが、密度成層が塩分依存から水温依存へ変化するにつれて、鉛直混合が小さくなる傾向が見られた。それに対し、鉛直移流は鉛直混合の体積輸送量の1割未満で、鉛直輸送全体に占める割合は小さかった。

しかし、塩分収支では鉛直移流は鉛直混合に対して数倍となり、水平混合に匹敵する寄与を示した。熱と塩分では鉛直方向の伝わり方に差がみられたものの、根室湾の海水輸送に対する鉛直混合および鉛直移流の寄与は大きいことが示された。

本研究の主目的は鉛直混合・鉛直移流の評価にあるが、鉛直輸送の計算において野付半島沖から南下する低塩分水の存在を無視できず、水平方向の海水輸送過程の議論も必要であることが示唆された。しかし、野付半島沖における海洋観測データは非常に限られ、 $Q_{sh}$ の評価には不足である。藤井・阿部(1981)が「南下沿岸水」として野付半島以北からオホーツク海起源の水塊が流入すると記述しているが、本研究のFig. 5に示したように、南下流の水質や流れの強さ(流幅)に季節変化があり、単一水塊の移流だけでは説明しきれないと思われる。根

室湾と、標津川河口沖を含む野付半島以北との関わりは、熱塩収支のみならず、栄養塩供給過程、サケ稚魚とその餌生物の移動経路にも関わるため、今後も詳細な調査が必要である。

## 謝 辞

根室湾の調査観測に携わりました野付漁業協同組合所属指導船のつけ丸の乗組員の皆様、故富田秋男船長、独立行政法人水産総合研究センターさけますセンター根室事業所他プロジェクト参加機関の皆様に、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。また本研究をまとめるにあたり、有益なコメントをお寄せ頂きました二人の査読者と編集委員の東海大学の轡田邦夫教授、北海道区水産研究所の小椋恒夫主幹研究員に深く感謝致します。

なお本研究は、社団法人根室管内さけ・ます増殖事業協会からの委託を受け、地方独立行政法人北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場（旧道立水産孵化場）道東支場を中心とするプロジェクト「根室南部沿岸調査」の一貫として行われました。

## References

- 藤井 浄・阿部深雪（1981）1979年の根室湾内の海洋構造の特徴. 漁場海況概報（北海道区水産研究所海洋部），37-46.
- 藤井 浄・阿部深雪（1982）根室湾および周辺海域の海洋構造の特徴とその季節変化. 昭和56年度根室湾海域総合開発事業調査報告書（北海道区水産研究所担当分），27-38.
- 藤原建紀・福井真吾・杉山陽一（1996）伊勢湾の成層とエスチュアリー循環の季節変動. 海の研究，5，235-244.
- 二村 彰・武岡英隆・郭 新宇（2005）燧灘成層域における流動・海水交換と熱収支. 海の研究，14，429-440.
- 長谷川伸彦・磯田 豊（1997）噴火湾の水収支. 海と空，73，11-19.
- 磯田 豊・長谷川伸彦（1997）噴火湾の熱収支. 海と空，72，93-101.
- 久保 正（1982）根室湾における海水の流動機構. 昭和56年度根室湾海域総合開発事業調査報告書（北海道区水産研究所担当分），17-26.
- 森 文洋・磯田 豊・阿部祥子・小林直人・矢幅 寛・磯貝安洋（2010）根室海峡における表層流の季節変化. 海の研究，19，89-110.
- 小熊幸子・川崎康寛・東屋知範（2007）根室海峡における春季および秋季の水質変化過程. 海の研究，16，361-374.
- 宇野木早苗（1974）内湾の海水交流と鉛直混合に関する一考察. 沿岸海洋研究ノート，11，85-95.
- 宇野木早苗（1993）第9章，成層海域の循環，p398-479. 沿岸の海洋物理学，東海大学出版会.

## Vertical volume fluxes in Nemuro Bay during spring and early summer

Sachiko Oguma<sup>†1</sup>, Tomonori Azumaya<sup>†1</sup>,  
Shigeru Montani<sup>†2</sup> and Mitsuhiro Nagata<sup>†3</sup>

### Abstract

We estimated sea water budget caused by vertical mixing and vertical advection in Nemuro Bay using oceanographic data obtained from April to July in 2007 and 2008. Based on vertical distributions of temperature and salinity, we applied two-layer box model adjusting to heat and salinity budgets between inside and outside of Nemuro Bay. It was also examined how the difference between thermal and salinity diffusion affects to vertical transport of sea water. Vertical volume fluxes caused by vertical mixing and vertical advection were  $1.05-13.10 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  and  $-0.15-0.09 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  in 2007 and  $0.92-18.73 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  and  $-0.03-0.07 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  in 2008. It was suggested that vertical mixing as well as horizontal mixing largely contributed among the processes of sea water transport in Nemuro Bay.

**Key words:** Nemuro Bay, vertical transport

(Corresponding author's e-mail address: [soguma@affrc.go.jp](mailto:soguma@affrc.go.jp))

(Received 3 March 2011; accepted 22 June 2011)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2011)

---

<sup>†1</sup> Hokkaido National Fisheries Research Institute,  
Katsurakoi 116, Kushiro, Hokkaido, 085-0802 Japan.

<sup>†2</sup> Hokkaido University,  
North 10 West 5, Sapporo, Hokkaido, 060-0810 Japan.

<sup>†3</sup> Hokkaido Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute,  
Kita-Kashiwagi 3-373, Eniwa, Hokkaido, 061-1433 Japan.