

冬季噴火湾におけるスケトウダラ卵の輸送過程

清水 学*・磯田 豊*

The Transport Process of Walleye Pollock Eggs into Funka Bay in Winter

Manabu SHIMIZU* and Yutaka ISODA*

Abstract

To examine the transport process of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) eggs from the spawning area on the shelf off Funka Bay into the bay in winter, a barotropic model with the Euler-Lagrange method to describe particle distribution was used. The only force considered in the model was the daily mean wind stress, because the calculated flow field forced by wind recorded in winter of 1995 accurately simulated the time series data of current vectors observed in the center of the bay. The duration of embryonic developmental stages in our model was estimated based on the laboratory experiment by NAKATANI and MAEDA (1984). Specific features of egg distribution observed in and near Funka Bay in winter of 1987 were compared to the patterns predicted by this model. The transport time for particles placed daily on the shelf off Funka Bay to travel through the central part of the bay mouth to the end of the bay was about 10 days. They then dispersed throughout the entire bay. Such trajectories of particle eggs are clearly the result of two vortices, which were generated by the combination of the predominantly northwesterly winds in winter and the parabolic bottom topography of Funka Bay.

1. はじめに

北海道南東部に位置する噴火湾周辺の陸棚域一帯は、冬季にスケトウダラの産卵場が形成され、噴火湾内はその稚仔魚の成育場として利用されている(中谷, 1994)。スケトウダラの産卵は噴火湾口から湾外の水深100~120mの陸棚上から陸棚縁で行なわれ、産卵時期は例年12~3月までの比較的長期間であると言われている(中谷・前田, 1987)。卵は表面から50m層まで広く分布し、その分布の中心は10~30m深層にある(KAMBA, 1977)。産卵場から成育場へのスケトウダラ卵の輸送メカニズムとして、前田ら(1979)は例年2月~3月に湾外から湾内へ流入する沿岸親潮に伴う密度流を挙げている。しかし、近年の卵稚仔調査によって、沿岸親潮が流入する時期よりも前に、湾内にはスケトウダラの卵や仔魚が存在し(例えば、NAKATANI

and MAEDA (1988), 中谷(1996)など)、我々は沿岸親潮による密度流以外の輸送メカニズムが存在しているのではないかと考えた。そこで、本研究では、冬季卓越する北西の季節風によって形成される噴火湾内から陸棚域まで拡がる水平循環流の卵稚仔輸送に及ぼす影響について検討することにした。

中谷(1996)は、三原ら(1995)によって調べられた最近20年間のスケトウダラの各年級群累積漁獲統計を用い、以下のように示唆している。スケトウダラの漁獲尾数は1980~1982年級群が多く、この年級群が産んだ稚魚が成長して漁獲対象となる1984~1987年に豊漁(9.2~10.7万トン)となった。しかし、その稚魚が漁獲対象となる1988~1991年漁獲量は4.7~6.6万トン程度と決して多くはなかった。このようにスケトウダラの親と子に数量的な関係がみられないことから、中谷(1996)は生活史初期の生き残りが資源量変動にとって重要ではないかと指摘している。すなわち、スケトウダラの長期資源量変動の問題を考える際、統計解析結果が示唆する稚仔の生残に関係する産卵場から成育場への卵稚仔輸送メカニズムの経年変化も重要な要因

1997年3月6日受理

* 北海道大学水産学部

Faculty of Fisheries, Hokkaido University, 3-1-1 Minatocho, Hakodate 041, Japan

Eメール: shimizu @ sola 3. fish. hokudai. ac. jp.

と考えられる。

2～4月の噴火湾には、低温・低塩分の親潮系水（沿岸親潮）が高塩分で特徴づけられる冬季噴火湾水の表層に覆いかぶさる密度流として流入してくる（大谷・木戸，1980）。この密度流は冬季卓越する流れとして強調されてきた（大谷，1981）。しかし，沿岸親潮が湾内に流入する前後の期間，噴火湾海上に冷たい北西季節風が連吹き海面冷却により湾内外の水塊は鉛直的に一様となる。この風応力によって駆動される流れを決して無視することはできない。大谷・出口（1983）と大谷・村上（1987）は，冬季における噴火湾周辺の海況は沿岸親潮による密度流の影響を除けば北西季節風による吹送流が潮流よりも相対的に重要な役割を演じると述べている。

本研究は沿岸親潮流入前の冬季噴火湾を対象とし，スケトウダラの産卵場（湾外）から成育場（湾内）への卵の輸送メカニズムを明らかにすることを目的に，風強制による水平二次元流動場と卵輸送の数値実験を行なった。そして，本数値実験では次の三点について特に着目することにした。

- (1) 陸棚上で産み出された卵がどのような経路で湾内に輸送されるのか。
- (2) 湾内に輸送された卵は，その後どの程度湾内で滞留することができるのか。
- (3) 再現された流れ場の持続性はどのような物理メカニズムによって支配されているのか。

2. 発生段階別スケトウダラ卵の空間分布特性

Fig.1は1987年2月18～21日における Norpac net の鉛直曳により採取された発生段階別スケトウダラ卵の水平分布図である（NAKATANI and MAEDA, 1988）。卵の発生段階に応じ湾口から湾奥へ卵の分布域が広がっている様子が示されている。各発生段階の卵の拡がり方の大まかな特徴は以下ようになる。発生段階1から3（受精後約0～5日）の産卵直後のものは湾口付近のみで見られ，湾内には全く存在していない。発生段階4および5（約5～15日後）の卵の分布密度の高い海域は湾口部から湾内中央部に移動し，仔魚期（約15日以上）になると湾奥で高密度に分布している。冬季の噴火湾には，シベリア寒気団より吹き込む寒冷で強い北西～西風が連日吹き続くことが知られている（大谷，1981）。この風によって励起される流れ場の存在と卵が陸棚上で長期にわたり継続的に産卵していることを仮定すれば，Fig.1のスケトウダラ卵稚仔の水

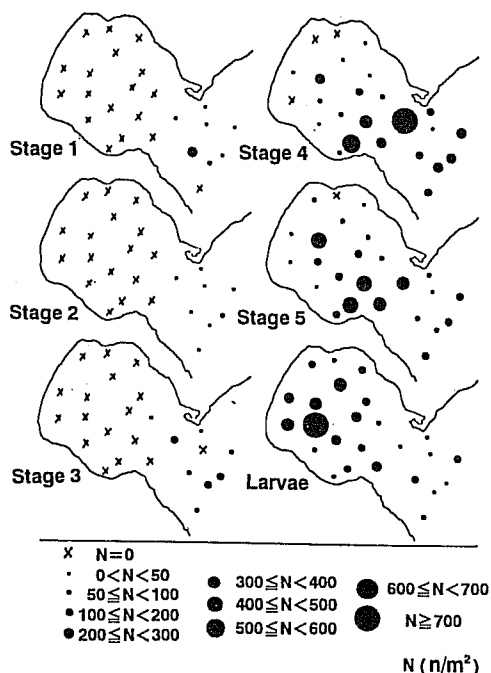


Fig. 1. Distribution and abundance of five developmental stages of eggs and larvae of walleye pollock during 18 to 21 February 1987. Samples were collected by vertical hauls of a Norpac net from the sea bottom to the surface. (after NAKATANI and MAEDA, 1989)

Stage 1: Fertilization ~ morula stage. Stage 2: Blastula ~ first gastrula stage. Stage 3: Apparent germ ring near an equatorial position ~ blastopore just before closing. Stage 4: Completely closed blastopore ~ embryo reaching three-fourths of the yolk circumference. Stage 5: Embryo reaching over three-fourths of the yolk circumference

平分布の高密度域の移動は湾口部付近で産み出された卵が流れに乗って湾奥へ輸送されていると解釈することができる。

次に，この1987年2月のスケトウダラ卵稚仔調査時前後における湾内 St. 30と湾外 St. 3の水温・塩分場をイソプレット図としてFig.2に示す。スケトウダラの産卵期である12～3月は湾内・湾外とも鉛直混合していることがわかる。ただし，2～3月の湾外 St. 3には湾内よりも低温・低塩分の海水が現れ始め，沿岸親潮が噴火湾湾口に存在していることが示唆される。しかし，少なくとも卵稚仔分布調査時の2月18～21日には，まだ沿岸親潮は湾内に現れていない。

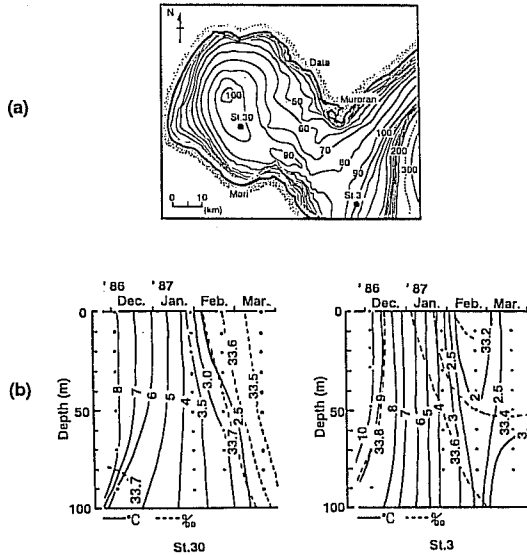


Fig. 2 (a) Locations (St. 30 and St. 3) of observations on temperature and salinity. (b) Isotherms of temperature (solid line) and salinity (broken line) at both stations from December 1986 to March 1987. (after NAKATANI and MAEDA, 1988)

3. 数値モデル

前節で見たように、沿岸親潮が流入する前の12~2月の噴火湾は鉛直的によく混合していることから、単層で f 平面近似(f はコリオリパラメータ)の水平二次元モデルを用いた。モデルの強制力は風応力のみを考えた。なお、均一流体において多層モデルではなく、エクマン層を表現できない単層モデルを用いた理由を付録に記述する。

数値モデルの計算領域は噴火湾だけでなく、その沖合いの陸棚域を含め、水平2.5kmの格子で陸岸及び海底地形を表現した。Fig. 3に本計算に用いたモデル地形を示す。モデル地形の図中右側は開放境界とし、その他は壁境界を設定してある。また、計算中内部で発生する擾乱波の反射を防ぐ為に図中の影を付けた領域は開放境界側に向かって水平渦動粘性係数 A_h を $10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ から $10^7 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ へ線形に大きくし、図中右側の開放境界においては下記のゾンマーフェルトの放射条件を適用した。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = C \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、 η は水位偏差、 $C = \sqrt{gH}$ 、 $g (= 980 \text{ cms}^{-2})$ は重力加速度、 H は水深を示す。

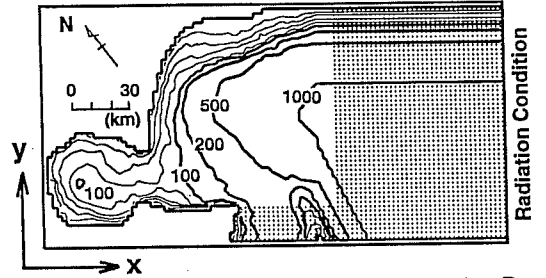


Fig. 3. Model domain around and off Funka Bay, southern Hokkaido. Solid lines indicate isobaths in meters. Shaded region indicates the area of large horizontal eddy viscosity.

計算に用いた運動方程式および連続式は、下記の(2)~(4)式である。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = \\ -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_x - \tau_{bx}}{\rho_0(H+\eta)} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = \\ -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_y - \tau_{by}}{\rho_0(H+\eta)} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \{ (H+\eta)u \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (H+\eta)v \} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

ここで、 u, v はFig. 3に記した x, y 方向の鉛直平均流速成分、 $\rho_0 (= 1 \text{ gcm}^{-3})$ は海水密度、 $f = 9.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ である。 τ_x, τ_y は、 x, y 方向の海面風応力を示し、以下の式で表わされる。

$$\tau_x = \rho_a C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (5)$$

$$\tau_y = \rho_a C_d W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (6)$$

ここで、 $\rho_a (= 0.0012 \text{ gcm}^{-3})$ は大気密度、 $C_d (= 0.0013)$ は海面抵抗係数、 W_x, W_y は x, y 方向の風速(cms^{-1})を示す。 τ_{bx}, τ_{by} は x, y 方向の海底摩擦応力を示し、摩擦の2乗則に従い以下の式で表される。

$$\tau_{bx} = \rho_0 \gamma_b^2 u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (7)$$

$$\tau_{by} = \rho_0 \gamma_b^2 v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (8)$$

ここで γ_b^2 は海底摩擦係数であり、 $\gamma_b^2 = 0.0026$ とした(例えば、宇野木, 1993)。陸岸の境界条件は全て non-slip 条件を用いた。

スケトウダラ卵を模したモデル粒子の追跡には、流動場計算の1ステップ毎にオイラーラグランジェ法を

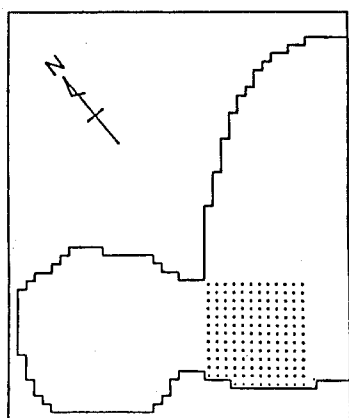


Fig. 4. Points where model particles representing walleye pollock eggs were placed every day.

用いた。すなわち、ある時刻 $t = n\Delta t$ に $X_n(x_n, y_n)$ の場所に存在した粒子の $t = (n+1)\Delta t$ 時間後の位置は次式を用いて計算される。

$$X_{n+1} = X_n + V \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dt} V \cdot \Delta t^2 \quad (9)$$

ベクトル V は x, y 方向の流速成分 u, v を示す。

スケトウダラ卵を模したモデル粒子の投入地点を Fig. 4 に黒丸印で示した。これらの地点は水深100m前後の陸棚上にあり、スケトウダラの産卵親魚が放卵することのできる浅海域である (中谷・前田, 1987)。本モデル計算は卵の定量的な存在量を見積もることが目的ではなく、定性的な卵分布域の時間変化を追うことにある。よって、モデル粒子は各計算格子に1個ずつ配列した。さらにスケトウダラの産卵期間は12~3月までと長期にわたることから、モデル産卵域には毎日定期的 (24時間毎) に新しい粒子を配置し計算を行なった。

4. 計算結果

4.1 冬季噴火湾の海上風の推算

風応力をモデルの強制力とし湾内の流れ場を定量的に議論するためには、海上風速を正しく推算することが大切である。そこで、噴火湾内 (湾中央部 St. 30) で連続流速観測が行なわれた1994年12月3日~95年2月8日の流速時系列 (ANON., 1995) をモデルで再現することによって海上風の推算を行った。一般に、地上で測定された風速値と海上の風速値とは数倍海上風の方が大きいと言われている。モデル計算では同時期の室蘭における日平均風速に1倍から3倍まで0.5

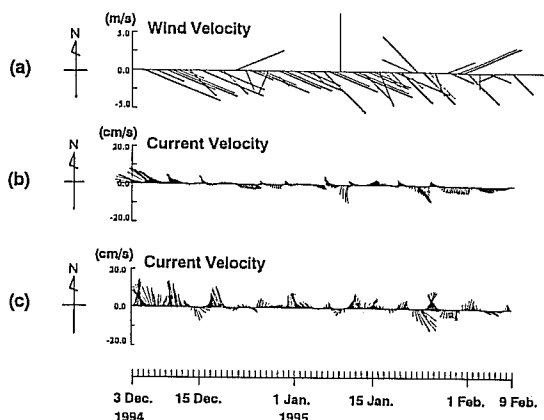


Fig. 5. (a) Time series of observed daily mean wind vectors at Muroran. (after Japan Weather Association [1994, 1995]). (b) Time series of calculated current vectors at the grid nearest to St. 30 based on a doubling of the observed wind velocity. (c) Time series of current vectors measured at 80m depth at St. 30 from December 1994 to February 1995. (after ANON., 1995)

倍つづ値を増加させた風速係数を乗じ、海上風として妥当な係数値を見積もった。この時期卓越する北西季節風の風下側に位置する噴火湾口部で沖合いに突き出た岬にある室蘭で観測された風を噴火湾の代表的な風として用いた。室蘭が、冬季の噴火湾海上を実際に吹いた風を最もよく代表している場所と考えたからである。

観測値に最も近い値が得られたときの風速係数値は2倍であった。Fig. 5 (a) に室蘭の日平均風速ベクトル、(b) に2倍の風速係数を乗じた場合のモデルで再現された St. 30に最も近い格子点における流速ベクトル、(c) に St. 30で実際に観測された80m深の流速ベクトルの各時系列図を示した。なお、(c) の時系列は10分毎に得られた流向・流速の観測値を1時間平均し、そして25時間移動平均を行なって6時間毎にプロットしたものである。風速ベクトル時系列は冬季の噴火湾に北西の季節風が卓越していることを示しており、約4~5日程度の変動が重なっているが、その風向までは大きく変化していない。モデルで再現された流速ベクトル時系列は、観測された約4~5日周期の北流と時折逆風によって現れる南流をよく再現している。このことは、冬季の噴火湾の流れ場が確かに吹送流によって支配されていることを示している。また、風向 (a) と計算結果 (b) 及び観測 (c) の両者の流向には興味

深い関係がみられる。北西風が数日連吹するとき、湾中央部の St. 30 付近の流れは風の方向とは全く逆向きの北流成分が卓越する点である。同様に、南東風が短期間でも吹くと流れはやはり逆向きの南流成分が変わる。このような流れ構造の変化についての物理的な検討は 5 節において行なう。

4.2 モデル粒子の追跡計算結果

モデルで再現する発生段階別スケトウダラ卵の水平分布として、Fig. 1 に示した 1987 年 2 月 18~21 日の観測結果を選んだ。海上風推算値は前節で議論したように、1987 年の室蘭における日平均風速を 2 倍した値を用いた。モデル計算に用いた時期の室蘭の日平均風を Fig. 6 に示す。1987 年も先に示した 1995 年の風変動と同様に、北西の季節風が数日変動を伴いながら連吹していた。

スケトウダラ卵の各発生段階に進むまでに必要な日数は室内実験によって、その概算値が求まっている(中谷・前田, 1984)。Fig. 7 は $-1\sim 13^{\circ}\text{C}$ における環境水温別に求めた各発生段階に進むまでの累積日数を示している。Fig. 2 (b) に示したように 1987 年冬季噴

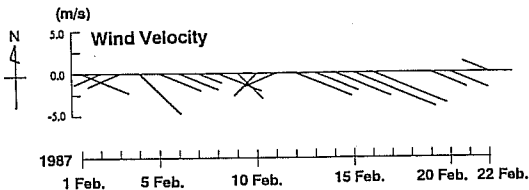


Fig. 6. Time series of observed daily mean wind vectors at Muroran in February 1987. (after Japan Weather Association, 1987)

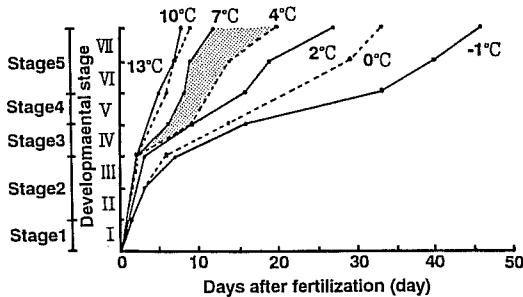


Fig. 7. Relation between the embryonic developmental stages of walleye pollock eggs and the number of days after fertilization for 7 temperatures from -1°C to 13°C . Dotted area indicates fertilization range used in calculation of the model. (after NAKATANI and MAEDA, 1983)

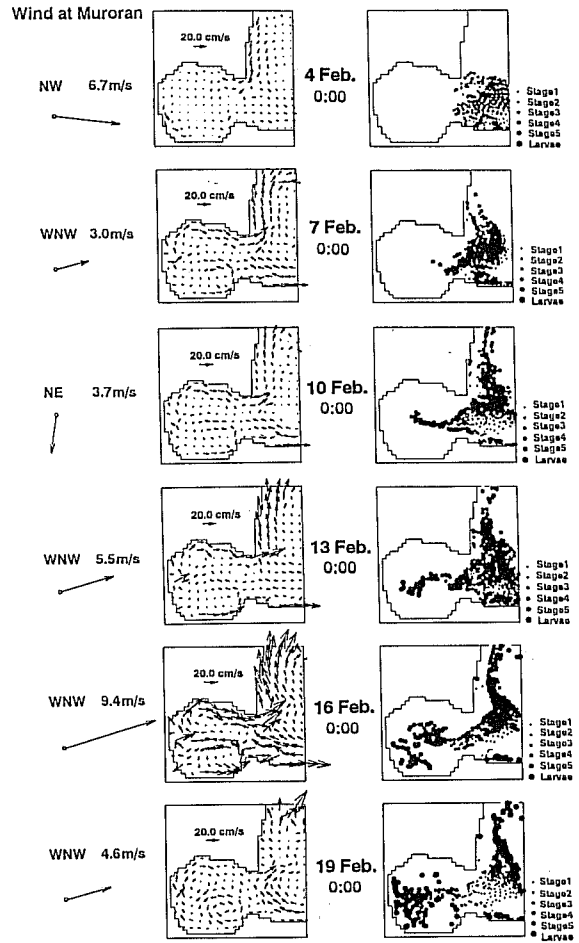


Fig. 8. Instantaneous fields of the calculated current vectors (left panel) and the horizontal distributions of modeled walleye pollock eggs (right panel) at 3-day intervals.

火湾の水温は $3\sim 8^{\circ}\text{C}$ の範囲にあったことがわかる。そこで我々は、Fig. 7 の $4\sim 7^{\circ}\text{C}$ (点線域) の発生段階別累積日数値を用いてモデル粒子投入後の日数をカウントし各発生段階を決定した。モデルに使用した各発生段階日数の詳細を Table. 1 に示す。モデル計算において、約 15 日で仔魚に成長すると設定したことにより、2 月 22 日 0 時の発生段階別卵分布を再現するためには 15 日以上前から計算を開始すればよいことになる。よって、本モデル計算は 2 月 1 日を計算開始日とした。

計算開始後 3 日毎の噴火湾周辺の流れ場とモデル粒子分布を Fig. 8 に示す。卵の各発生段階は黒丸印の大

Table 1. Duration and description of each embryonic developmental stage. The duration of each stage was estimated based on the laboratory experiment by NAKATANI and MAEDA (1984). (see Fig. 7).

Stage	Days	Condition
1	0~1day	fertilization ~ morula stage
2	1~2day	blastula ~ first gastrula stage
3	2~5day	apparent germ ring near an equatorial position ~ blastopore just before closing
4	5~10day	completely closed blastopore ~ embryo reaching three-fourths of the yolk circumference
5	10~15day	embryo reaching over three-fourths of the yolk circumference
Larvae	15day~	

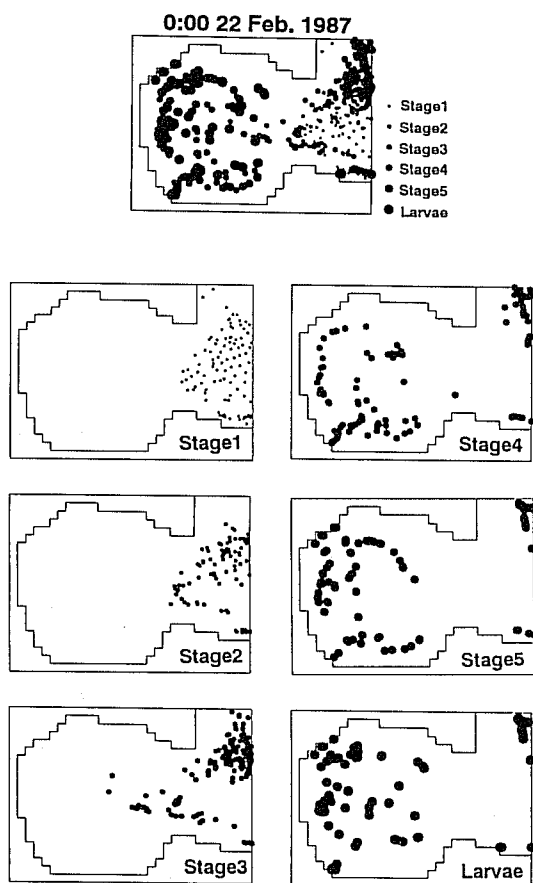


Fig. 9. Horizontal distributions of five embryonic development stages and larvae of modeled walleye pollock on 22 February 1987.

きさで表現した。湾口近くの陸棚上に配置したモデル粒子の一部は、陸棚に沿って北東向きに輸送されたが、時間の経過と共に、残りのモデル粒子は湾口から湾中央部に向かって侵入した。この侵入方向は風向きとは全く逆方向である。風の日変化 (Fig. 6) はあるもの

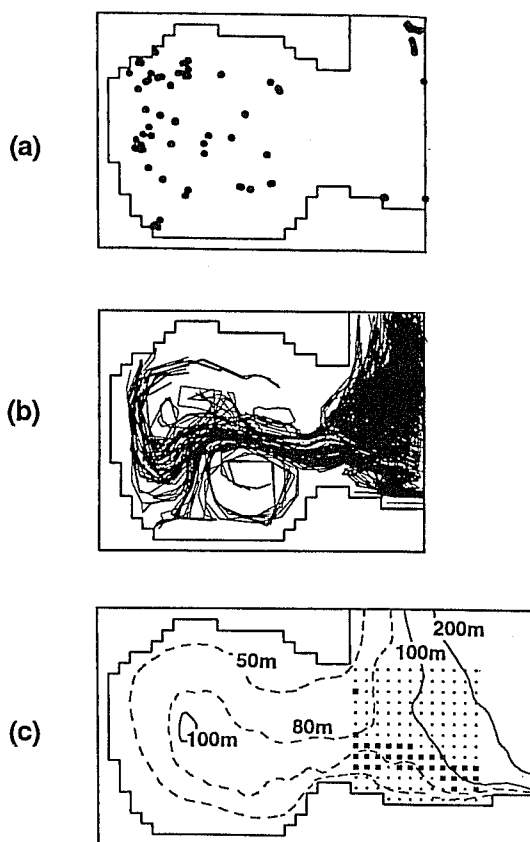


Fig. 10. (a) Horizontal distributions of modeled larvae on 22 February 1987. (b) Traces of modeled eggs from initial injection points to their positions on 22 February 1987. (c) Points where modeled particles were placed. Closed rectangles represent initial positions of particles that entered and remained within the bay until 22 February 1987. Closed circles represent initial positions of particles not found in the bay on 22 February 1987.

の、再現された流れ場には共通の特徴が見られる。すなわち、湾口中央部には粒子を湾内に移流させる湾奥向きの流れが存在し、この流れは湾奥で分岐し時計回りと反時計回りの二つの渦を形成していた。

次に Fig. 1 に示した 2 月 18~21 日の観測結果と 2 月 22 日 0 時のモデル計算結果との比較を行なう。Fig. 9 の上段に 2 月 22 日 0 時のモデル卵稚仔分布を示す。この図から各発生段階別の卵と仔魚の水平分布図を個別に作成し、Fig. 9 の下段に示した。モデル計算において、発生段階 1 から 3 に要する時間は Table. 1 に示すように 5 日間である。この日数ではモデル粒子は湾

口から湾内へ侵入するだけに留まり、観測で得られた分布 (Fig. 1) とよく似ている。発生段階 4 から 5 へは、さらに10日間を要し、湾中央部より湾奥側にモデル粒子の分布の重心は移動した。しかし、観測で得られた分布は湾奥よりもまだ湾中央部に片寄った分布を示している。粒子投入15日以後における仔魚をモデル化した粒子の分布は観測分布と同様に湾奥部へその重心が移動した。観測された卵稚仔分布と比較してモデル計算された分布の方が、少し早く湾奥側に到達しているものの、卵は北西風とは逆向きに湾口中央部から湾内に侵入し、仔魚期には重心を湾奥に移動させるという移動経路に関して全体的によく再現されている。

Fig. 10は22日0時に仔魚になっているモデル粒子の水平分布 (a)、その粒子が過去に辿った軌跡 (b)、モデル粒子の中で湾内に侵入してきた粒子の出発点 (c) を示している。Fig. 10 (b) をみると、湾内で仔魚となった粒子は湾口中央から湾内に侵入した後、湾内の大きな二つの渦に取り込まれながら湾奥で分散していく様子がよくわかる。Fig. 10 (c) をみると、湾内に侵入してきたモデル粒子は湾口陸棚上の非常に狭い海域に限られていることがわかる。その海域は渡島半島側の水深50~100mの等深線の間分布している。

5. 考 察

以上のモデル計算結果から、陸棚域から噴火湾へのスケトウダラ卵の輸送及び湾内の分散過程において、北西季節風により励起された湾内の二つの渦が重要な役割を演じていることがわかった。また、北海道東部の陸棚海域一帯がスケトウダラ産卵場になってはいるものの、吹送流によって噴火湾内に卵が侵入できる海域はさらに限定された場所であることを示唆している。

モデル粒子の方が実際の観測で得られた結果よりも少し早く湾奥に到達した理由として、Table. 1 に設定した発生段階日数の見積りもりの妥当性が挙げられる。実際の現場海域では、卵の鉛直移動に伴う水圧変化や卵の密度効果などによる発生段階日数の変化が考えられるが、このような効果がどれほど室内実験で得られた発生段階日数に影響してくるのか、現段階ではまだよくわかっていない。

大島・三宅 (1990) も我々と同じ水平二次元モデル (順圧モデル) を用いて、風強制によって噴火湾内に二つの渦が形成されることを示している。彼らはこの渦の形成理由として、海面境界層におけるエクマン輸送と岸境界によって海底斜面上での水柱の伸縮が起

り、その結果渦対が発生すると解釈している。しかし、彼らのモデルも我々のモデルと同様に海面境界層を陽に表現できない順圧モデルであり、モデル結果の解釈としては不十分である。そこで、ここでは順圧モデルから得られた流れ場をあくまでも単一水柱の力学バランスからの議論を行なう。

これまで、噴火湾のようなお腕状の海底地形における風の応答問題は、BIRCHFIELD (1967) をはじめ、SIMONS (1974)、BENNETT (1977) など多くの研究者によって調べられてきた。BIRCHFIELD (1967) は理想的な放物線状の海底地形を持った海に一樣風が強制された場合の定常解を求め議論している。円周に沿った浅い領域では風応力と海底摩擦力がほぼバランスした境界流が形成され、風向と同じ向きの流れが形成される。一方、湾中央部の水深の深い領域では、風応力とコリオリ力がバランスした単一水柱全体のエクマン流 (海面境界層内ではない) が形成される。その結果として、円錐海底地形を持った海には時計回りと反時計回りの二つの渦が形成されると説明している。噴火湾の海底地形も中央部の水深が100mに達する直径約50 kmの放物線状の海底地形であるため、上記の理論と同様なメカニズムによる二つの渦が形成されている可能性が考えられる。しかしながら、噴火湾の地形を用いてコリオリのない ($f=0$) 場合の計算を行なっても、湾内に二つの渦が形成される。風速 10ms^{-1} の一樣風を湾奥から湾口へ吹かせ、ほぼ定常状態になった5日後の流れ場と水位分布の計算結果をFig. 11に示す。 $f \neq 0$ のケースの流れ場と水位分布を (a) と (b) に、 $f = 0$ のケースの計算結果をそれぞれ (c) と (d) に示す。両ケースともほぼ同じ流速値を持った二つの渦が湾内に形成されている。一方、水位分布は全く異なった形状を示している。 $f=0$ のケースの水位分布 (b) は流れ場に対応したS字分布を示し、湾中央部の流れ (a) は風向とは全く逆向きであり、少なくとも風向に対し右向きに流れるエクマン流では説明することができない。 $f=0$ のケースの水位分布 (d) は、湾口から湾奥に向かって減少する一樣な水位勾配を示す。これは湾中央部に形成された湾奥向きの流れが風応力と圧力勾配がバランスした流れであることを示している。 $f \neq 0$ のケースの水位分布と流れ場を比較すると、湾中央部の流れに沿って水位分布も湾奥に向かって減少していた。以上のことから、噴火湾中央部の流れは浅い沿岸域で形成された境界流の補償流として説明することができる。また、この補償流はFig. 8に見られ

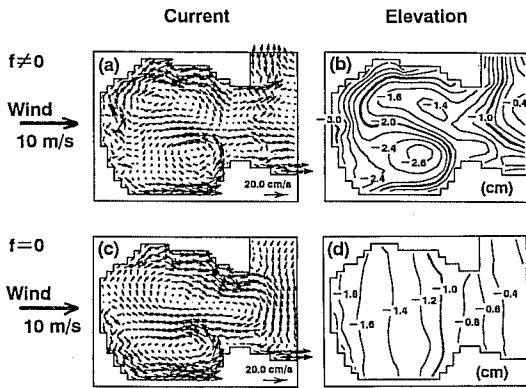


Fig. 11. Horizontal distributions of current field (left panel) and elevation contours (right panel) under uniform northwesterly wind conditions on the fifth day of the model simulation. Wind velocity is 10ms^{-1} . In upper figures (a, b), $f \neq 0$; in lower figures (c, d), $f = 0$.

るように噴火湾口部で陸棚域の流れと接続し、湾外陸棚域の時計回りの流れが湾口中央部を通じ湾内に流入し二つの渦につながる形状を示している。

噴火湾とその沖合いの時計回りの循環流の一連の流れは、湾外のスケトウダラ卵を含んだ水塊を湾内に輸送する一方、逆に湾内の水塊も湾外に流出させている。すなわち、湾内に輸送された卵もずっと湾内に留まることはできない。そこで最後に、一旦湾内に入った物質が湾内に滞留することのできる時間スケール、平均滞留時間を計算する。ここでは卵が海水と全く同じ挙動すると仮定し、TAKEOKA (1984) の海水交換の定義に従い、湾内物質濃度の残余関数から平均滞留時間を見積もった。平均滞留時間 (τ_r) は、

$$\tau_r = \int_0^{\infty} r(t) dt \quad (10)$$

で定義され、 $r(t)$ は湾内物質濃度の残余関数を示す。

Fig. 12 (b) の 0 日に示したように、モデル内の初期場として単位濃度 1 を湾内に設定する。そして、流れ場の計算と同時に移流拡散方程式を数値積分し湾内の残留濃度を計算した。物質の広がりを示す水平渦動拡散係数は、流れの水平シアを示す水平渦動粘性係数に比べ、一般に 1 オーダー小さな値を示すと言われている (柳, 1989)。ここではこの柳 (1989) の指摘に従い、本計算に用いる水平渦動拡散係数は、運動方程式に用いた水平渦動粘性係数より 1 オーダー小さい $10^4\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ の値を試算した。計算開始日は北西の季節風が安定して吹き始めた 1986 年 12 月 1 日とした。計算

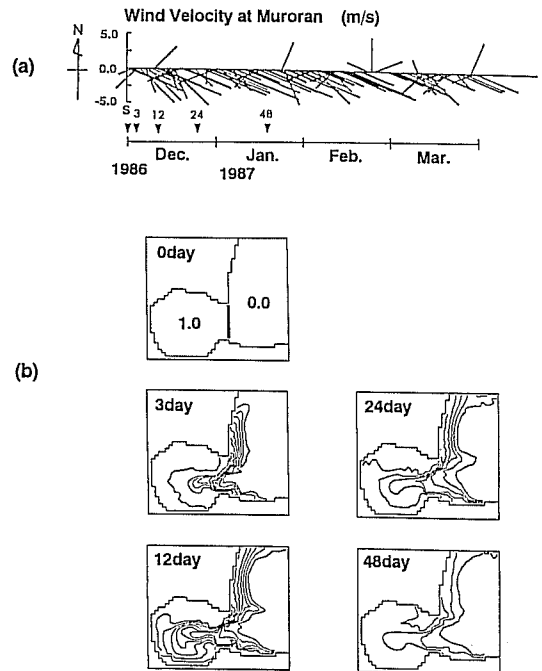


Fig. 12. (a) Time series of observed daily mean wind vectors at Murooran from 1 December 1986 to 31 March 1987. (after Japan Weather Association [1986, 1987]) (b) Instantaneous fields of the horizontal distributions of passive tracer concentrations. Initial concentration index within bay = 1.0. Contour interval is 0.1.

に用いた室蘭の日平均風速ベクトルの時系列と濃度の水平分布の時間変化を Fig. 12 (a) (b) に示す。噴火湾内に形成された渦対によるシア分散により湾内外の水は効率よく交換されている。

湾内残留濃度の時間変化を示した残余関数を Fig. 13 に示す。濃度は指数関数的に減少していることから、残余関数を

$$r(t) = e^{-at} \quad (11)$$

で近似した。(10) と (11) 式から平均滞留時間は $\tau_r \sim a^{-1}$ となる。TAKEOKA (1984) によれば、初期濃度の e^{-1} になる時間が平均滞留時間なので、Fig. 13 から約 40 日が求まる。これは水平渦動拡散係数を $10^4\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ として計算した場合には湾外から湾内に輸送されたスケトウダラ卵の粒子が、平均約 40 日で再び湾外に流出することを意味する。もしこの計算結果が現実を反映していると仮定すると、40 日という値は産卵されて仔魚に成長する日数 (約 15 日) の 2 ~ 3 倍程度の値であ

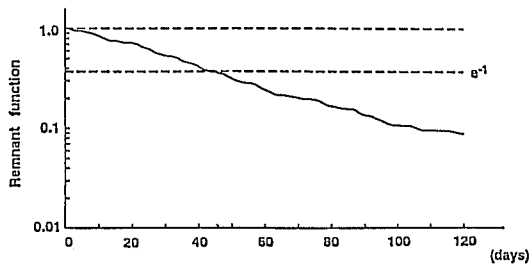


Fig. 13. Remnant functions of passive-tracer concentrations throughout all of Funka Bay based on the calculation used in Fig. 12.

るので、湾内で孵化した仔魚がすぐに湾外に流出することはない。そして、湾内で孵化した仔魚が湾外に流出されるまでの間に、良い餌環境（春季ブルーミング）に出会えるかどうか、稚魚期まで達する為の仔魚の生き残りに大きな影響を及ぼすことになる。

6. おわりに

北西季節風を強制力としたモデル計算結果と湾内の直接流速観測結果とを比較し、冬季の噴火湾の流れ場がほぼ吹送流で説明できることを確認した。また、1987年冬季に観測されたスケトウダラの卵・仔魚分布の特徴をモデル粒子を用いたオイラーラグランジェ法で再現計算を行った。再現されたモデル粒子分布の挙動と流れ場の計算結果から、産卵域である陸棚域から噴火湾内への卵輸送メカニズムと卵・仔魚の生き残りに関する物理条件をまとめると以下ようになる。

- (1) 陸棚域で産卵されたモデル卵粒子は湾中央部から湾口にかけて形成された風向とは逆向きの流れによって湾内に侵入し、湾中央を真っ直ぐ湾奥に達した後、湾内に形成された二つの渦に取り込まれて分散していく。
- (2) 湾内の二つの渦は北西の季節風によって形成され、浅い沿岸域は風応力と海底摩擦力が主にバランスした境界流と湾中央部でのその補償流から成る。また、この補償流は風応力と圧力勾配が主にバランスした流れである。
- (3) 陸棚域から噴火湾内へ卵を輸送できる海域は、湾口南部陸棚上の約80m等深線に沿った比較的狭い海域に限られる。
- (4) 水平渦動拡散係数を $10^4 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ とすると、冬季季節風が卓越する時期の噴火湾内水の平均滞留時間は約40日と見積られる。

本モデルで再現された吹送流が支配的となる時期は、

沿岸親潮が流入する前の12～2月と考えられる。今後、我々は2月以降の沿岸親潮流入期における密度流と吹送流の相互作用、そしてその相互作用の結果生じる流れ場によって輸送されるスケトウダラ卵分布の違いについて調べていきたいと考えている。

最後に本研究を進めるにあたり、スケトウダラ卵の生態について有益な御意見を頂いた北海道大学水産学部中谷敏邦助教授、噴火湾内の流速観測資料を快く提供して頂いた同学部三宅秀男助教授、そして本稿をまとめるにあたり御指導して頂いた同学部 J. R. Bower 博士、編集委員および査読者の方々に感謝の意を表します。なお本研究は、ホクサイテック財団研究開発支援事業補助金による科学研究「噴火湾のスケトウダラ卵輸送を対象とした生態数値モデル開発」の一部であることを付記する。

付 録

均一流体の単層モデルと多層モデルの比較実験を行なった。実験は、同じ風条件下のもと（北西風 10ms^{-1} ）で行ない、5日後の流速場の計算結果をFig. 14 (a) (単層)とFig. 14 (b) (多層)に示した。多層モデルは鉛直方向に6層（0～10m, 10～30m, 30～60m, 60～100m, 100～150m, 150m～海底）とした。このような層厚に区切るにより、湾内は4層で表現される。なお、多層モデルの鉛直渦動粘性係数は $10 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ とした。単層モデルの結果は、本文中にも見られるように湾内には時計回りと反時計回りの二つの渦が形成される。多層モデルの場合は、1層目は風の吹きさる方向に対して右向きエクマン輸送が形成され、2層目より下の層では、単層モデルと同様に湾中央部を湾奥に向かう風向きとは逆方向の流れが形成される。この多層モデルの流れ場を用いて鉛直平均した流れ場をFig. 15に示す。多層モデルにおいても鉛直平均すれば、その結果は単層モデルの流れ場と同じ渦対パターンとはほぼ同程度の流速値を示すことがわかる。

KAMBA (1977) の噴火湾におけるスケトウダラ卵稚仔の量は、MTDネットを用いた鉛直分布調査から、表層から50mまで幅広く分布し、その分布の中心は10mから30mにあることがわかる。また、NISHIYAMA *et al.* (1986) もベーリング海南東部における同様の観測から、やはり表層から40mまで幅広い分布を示すことを報告している。このような卵稚仔の鉛直分布より、我々はスケトウダラ卵稚仔輸送過程をモデルを用いて調べる場合、エクマン輸送による表層の移流効果を表

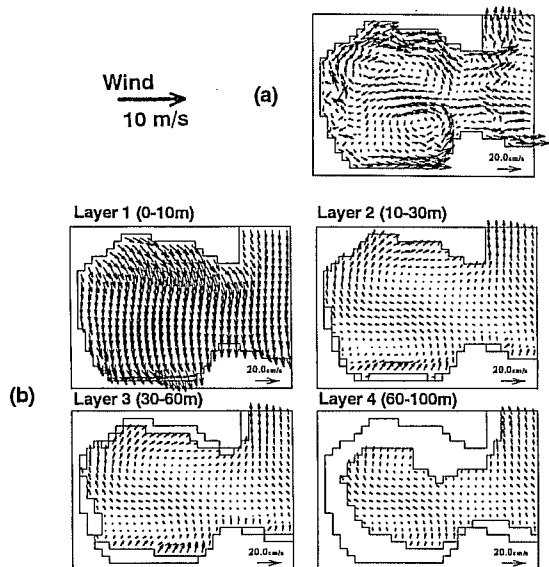


Fig. 14. Horizontal distributions of current field under uniform wind conditions calculated by single layer model (a) and multi-layer model (b). The wind blows from left to right, and wind velocity is 10ms^{-1} .

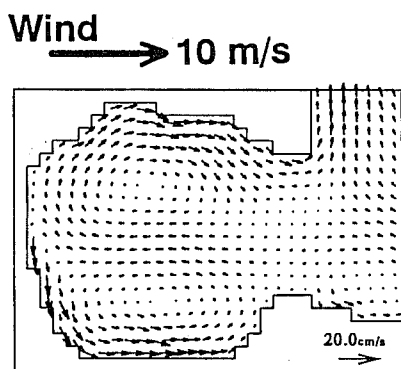


Fig. 15. Horizontal distributions of vertically averaged currents estimated by the results from the multi-layer model.

現できる多層モデルを用いなくても、鉛直積分した平均流が表現できる単層モデルで十分に卵稚仔分布を記述できると考えた。

文 献

ANON. (1995) 噴火湾の沿岸流の短周期変動の予測システム開発に関する研究. 平成5年度共同研究報告書, 北海道立地下資源調査所・北海道大学, 31-33.
 BENNETT, J. R. (1974) On the Dynamics of Wind-Driven

Lake Currents. *J. Phys. Oceanogr.*, 4, 400-414.
 BIRCHFIELD, G. E. (1967) Horizontal transport in a rotating basin of parabolic depth profile. *J. Geophys. Res.*, 72, 6155-6163.
 日本気象協会 (1986-1987) 北海道の気象, 31 (12)-32 (3).
 日本気象協会 (1994-1995) 北海道の気象, 38 (12)-39 (2).
 KAMBA, M. (1977) Feeding Habits and Vertical Distribution of Walleye Pollock, *Theragra chalcogramma* (Pallas), in Early Life Stage in Uchiura Bay, Hokkaido. *Res. Inst. N. Pac. Fish., Hokkaido Univ., Spe. Vol.*, 175-197.
 三原行雄・上田吉幸・夏目雅史 (1995) 道南太平洋海域のスケトウダラ漁況について. 北海道立函館水産試験場支場, 1-16.
 中谷敏邦・前田辰昭 (1984) スケトウダラ卵の発生に対する水温の影響およびその浮上速度について. *日本水産学会誌*, 50, 937-942.
 中谷敏邦・前田辰昭 (1987) 噴火湾およびその周辺海域におけるスケトウダラ仔魚の分布と餌生物環境. *日本水産学会誌*, 49, 183-187.
 中谷敏邦 (1994) 噴火湾におけるスケトウダラ. 魚類の初期減耗研究 (田中克・渡邊良朗編), 恒星社厚生閣, 東京, 122-133.
 NAKATANI, T. and T. MAEDA (1988) Distribution of Copepod Nauplii During the Early Life Stage of Walleye Pollock in Funka Bay and Vicinity, Hokkaido. in "Proc. Int. Symp. Biol. Mgmt. walleye pollock; Alaska Sea Grant Report", No. 89-1, Univ. Alaska, Fairbanks, 217-240.
 NISHIYAMA, T., K. HIRANO and T. HARYU (1986) The early history and feeding habits of Larval Walleye Pollock *Theragra Chalcogramma* (Pallas) in the southeast Bering Sea. *INPFC Bull.*, 45, 177-227.
 前田辰昭・中谷敏邦・高橋豊美・上野元一 (1979) スケトウダラ稚仔の沿岸域での生活. *水産海洋研究報*, 34, 81-85.
 大島慶一郎・三宅秀男 (1990) 北海道南方陸棚域及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.
 大谷清隆・木戸和男 (1980) 噴火湾の海洋構造. *北海道大学水産学部研究彙報*, 31, 84-114.
 大谷清隆 (1981) 噴火湾の物理環境. *沿岸海洋研究ノート*, 19, 1, 68-80.
 大谷清隆・出口良二 (1983) 渡島半島東岸の沿岸湧昇-2. *北海道大学水産学部研究彙報*, 34, 291-311.
 大谷清隆・村上敬 (1987) 沿岸境界流-北海道沿岸の流動特性. *海洋科学*, 199, 13-20.
 SIMONS, T. J. (1982) Verification of numerical models of Lake Ontario. I. Circulation in spring and early summer. *J. Phys. Oceanogr.*, 4, 507-523.
 TAKEOKA, H. (1984) Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Contin. Shelf Res.*, 3, 311-326.
 宇野木早苗 (1993) 沿岸の海洋物理学. 東海大学出版会, 59pp.
 柳哲雄 (1989) 沿岸海洋学-海の中でものはどう動くか-. 恒星社厚生閣, 96-112.