

三陸沖暖水渦内の層別流量とその収支

誌名	東北区水産研究所研究報告
ISSN	0049402X
巻/号	59
掲載ページ	p. 73-81
発行年月	1997年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



三陸沖暖水渦内の層別流量とその収支

友定 彰・横内 克巳・杉崎 宏哉・松尾 豊

Volume transport in a warm-core ring and water exchange with surrounding water masses

Akira TOMOSADA, Katsumi YOKOUCHI, Hiroya SUGISAKI
and Yutaka MATSUO

Abstract Total volume transport in a warm-core ring and total water exchange surrounding water masses have been reported by TOMOSADA et al. (1996). Data are based on closely-spaced ADCP and fluorometer surveys on board the R/V Wakataka Maru in July 1994. In this paper, volume transport and water exchange are calculated 16 meter thick layers of the water column. The method of volume transport calculation is slightly revised from the previous paper for the boxes where the 7°C isotherms intersect.

By the revised method, the volume transport does not vary significantly but the water exchange is slightly different from the previous paper. The volume transport is at a maximum from the north-side sector and a minimum from the west side sector of the warm-core ring. The surface layer water of the Oyashio 1st branch flows into the warm-core ring from the north-west side and 40% flows out to the Oyashio 2nd branch from the north-east side of the ring, and the warm-core ring water flows out from the mid-layer to the south-west side from the ring. This suggests the warm-core ring water is fertilized by the supply of the nutrient rich water of the Oyashio.

Keywords Warm-core ring, Volume transport, water exchange, ADCP

はじめに

黒潮統流から切離して混合水域に形成される暖水渦は浮魚類の漁場形成に大きな影響を与えているだけでなく、亜熱帯循環系と亜寒帯循環系の相互作用過程を解明するために重要な中規模海洋構造である。暖水渦はしばしば直径 200 km、深度 600 m で深に及ぶ (TOMOSADA, 1978)。暖水渦の直径を 200 km、深度を 600 m とし、暖水渦の境界の断面形状を放物線で近似すると、その体積は $1 \times 10^{13} \text{ m}^3$ と概算される。黒潮統流の幅を 100 km、深さを 600 m とすると、この体積の暖水渦を作るために約 300 km の黒潮統流が切れたことになる。日本で最大の平均河川流量をもつ石狩川の前平均流量は $520 \text{ m}^3/\text{sec}$ である (理科年表, 1995)。暖水渦の体積 $1 \times 10^{13} \text{ m}^3$ を升として、この升を石狩川の流量で満杯にするためには、実に 600 年以上の年月を要する。暖水渦と周囲の海水の温度差を 5°C とすると、 5×10^{19} グラムカロリーの熱量差を持っている。これだけ大量で大熱量の黒潮系の水が混合水域に放出されて、しかも、暖・冷水ストリーマを介して周囲の海水との交換を行っているという事実が衛星写真あるいは

海洋観測から指摘されていて (稲掛・友定, 1988, 稲掛, 1991, 為石・杉本, 1994, 友定他, 1996)、暖水渦は混合水域を温める巨大なカイロになっていると考えられる (友定, 1991)。

友定他 (1996) は 1994 年 7 月に暖水渦とその周辺海域で行った ADCP と蛍光光度計による空間的に密な調査から、親潮の水が暖水渦の北西側から流入し、南西側から渦内の水が流出していることを示し、暖水渦が肥沃化していることを示した。その中では、暖水渦の中心から東西南北の 4 方向で 100 km まで、 7°C 以上の水温範囲の全流量を求め、4 断面の流量差から暖水渦内外の海水交換量を求めた。

本稿は、その続報であり、海面下 20 m から 16 m 毎に ADCP によって測流した結果から暖水渦内の 7°C 以上の水温範囲の層別流量と測線間の層別流量差を求めた結果を示す。

資料と方法

調査は 1994 年 7 月 7 日～7 月 14 日に東北区水産研究所所属の漁業調査船「わかたか丸」(174 トン)で行っ

た。調査時の東北海区の海況、調査方法、ADCP データの補正・処理方法、暖水渦の中心を求める方法等は友定他 (1996) (以後、前報と呼ぶ) に詳述している。

前報の水溫断面図(前報, Fig. 2)に示されるように、暖水渦の主温度躍層の中央の水溫は 7°C であるので、7°C 以上の水溫範囲で暖水渦の流量計算を行った。ADCP 流速を内挿した位置を 7°C 等温線が横切る深度を Table 1 に示す。Table 1 に示されるように、流速は東西南北の 4 測線で暖水渦の中心から 8 km の地点から 4 km 毎に、中心から 100 km まで求めた。7°C 線は暖水渦の中心から遠ざかるにつれて浅くなり、暖水渦の中心から 100 km の点では、北側で 100 m より浅く (97 m)、他の 3 測線では概ね 300 m 深にある。流量を計算した各層の厚さは、海面から ADCP の第 1 層まで

は 20 m、それ以深は 16 m とした。海面の流速は第 1 層 (20 m 深) の流速に等しいとした。Fig. 1 に流量計算ボックスと 7°C 等温線が交差する様子を模式的に示した。

前報では、7°C 等温線が交差する流量計算ボックスの取り扱いを以下のようにしていた。Fig. 1A のように等温線が交差する場合は、領域 a-1-2-b の範囲の流量を求めた。点 1, 2 の流速はそれぞれ a と c, b と d の流速を一次内挿して求め、流量は台形の面積に点 a, b, 1, 2 の平均流速を乗じて求めた。Fig. 1B の場合は、1-d-2 を頂点とする三角形の面積は小さいであろうから、この部分を無視して a-c-b-d の面積にこれら 4 点の平均流速を乗じて流量とした。Fig. 1C の場合も、Fig. 1B と同様に a-c-b-d の流量を求めた。Fig. 1D の

Table 1. Depth of the 7°C isotherm intersecting the interpolated location of the ADCP in the east, west, north and south sectors.

Distance from center (km)	Depth (m) of 7°C isotherm			
	North sector	East sector	South sector	West sector
0	567	567	567	567
8	534	548	558	534
12	518	538	553	517
16	502	529	548	500
20	486	519	543	493
24	469	510	539	485
28	453	500	531	478
32	436	491	513	471
36	420	481	496	463
40	403	472	479	456
44	386	460	461	449
48	370	445	444	436
52	353	431	427	422
56	333	417	412	408
60	309	402	402	394
64	285	388	390	379
68	260	374	380	365
72	236	361	368	351
76	212	354	358	339
80	188	347	346	333
84	167	340	336	327
88	150	333	325	321
92	132	326	315	315
96	115	318	304	309
100	97	309	293	303

North and south sectors : from CTD

East and west sectors : from XBT

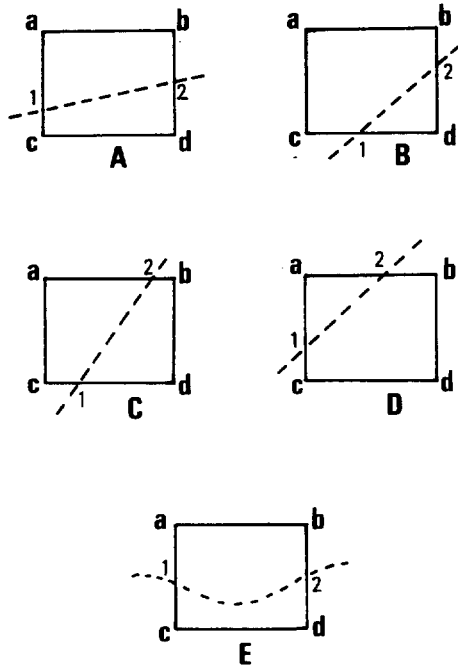


Fig. 1 Schematic pattern of the 7°C isotherm intersecting a box of volume transport calculation. The volume transport and water exchange are calculated for 16 m thick depth layers except for the surface to 20 m because the shallowest depth of ADCP velocity is measured at a depth of 20 m. From Fig. 2 to 4, the thickness of volume transport calculation is 20m at the shallowest layer.

場合は流量計算から除外した。Fig. 1 の a-b 間の距離は中心から第 1 の内挿点までが 8,000 m, それより外側で 4,000 m, a-c 間の厚さは 16 m あり, 1 つのボックスの面積は 128,000 m² 又は 64,000 m² になる。これに流速を乗じると, 無視した部分及び加算した部分の流量が積み重なって誤差を生じている。

そこで, 本報では点 1, 2 が交差する線上で点 1, 2 の流速を一次内挿によって求め, Fig. 1A では a-1-2-b で囲まれた台形, Fig. 1B では a-c-1-2-b で囲まれた五角形, Fig. 1C では a-c-1-2 で囲まれた台形, Fig. 1D では a-1-2 で囲まれた三角形, それぞれの面積に平均流速を乗じて流量を求めた。しかし, Fig. 1E のように, 流量計算ボックス内に水温観測点があつて, ボックス内で 7°C 線が曲線になっている場合は Fig. 1A と同様に, a-1-2-b の台形の流量を求めた。

結 果

暖水渦の全流量と収支

暖水渦の中心から 100 km 以内の 7°C 以上の範囲の流量は Fig. 2 のようになる。前報で求めた流量は, 中心-北で 19.8 SV, 中心-東で 20.4 SV, 中心-南で 20.6 SV, 中心-西で 13.0 SV であった。Fig. 2 とこれらの値を比べると, 中心-北で 1.6 SV 程流量が増え(約 7% 増), 他の測線ではわずかの差しかない。

測線間の流量収支は, 前報では, 北西側から 6.8 SV の流入, 北東側から 0.6 SV の流入, 南東側から 0.2 SV の流入, 南西側から 7.6 SV の流出と見積もった。今回の方法では, 暖水渦の北西側からの流入量が 1.6 SV 増え, 北東側から流出, 南西側から流出となり, 流入と流出が逆転したのは北東側である。7°C 線が流量計算ボックスと交差する所を処理する方法として用いた前報と本報の方法では, 流量には最大で 7% 程度の差異しかなかった。それに対して, 流入・流出量は流量に対して 1 桁小さいので, 流入・流出が逆転する可能性がある。しかし, 北西側からの流入, 南西側からの流出は前報と同様である。Fig. 2 の流入・流出量は全層を積分した量であり, 流入層, 流出層の流量は, 後述するように, 例えば, 北東側の全流出量 1.3 SV より大きい。つまり, 北東側では, 前報に対して, 全体として流入・

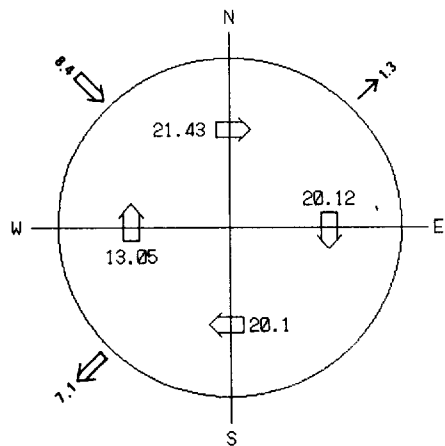


Fig. 2 Volume transport (SV: $\times 10^6$ m³/sec) of the east, west, north and south sectors in the warm-core ring, and the outflow or inflow from the surrounding water masses. Volume transport is calculated in the range of 100 km from the ring center and in the temperature range of more than 7°C.

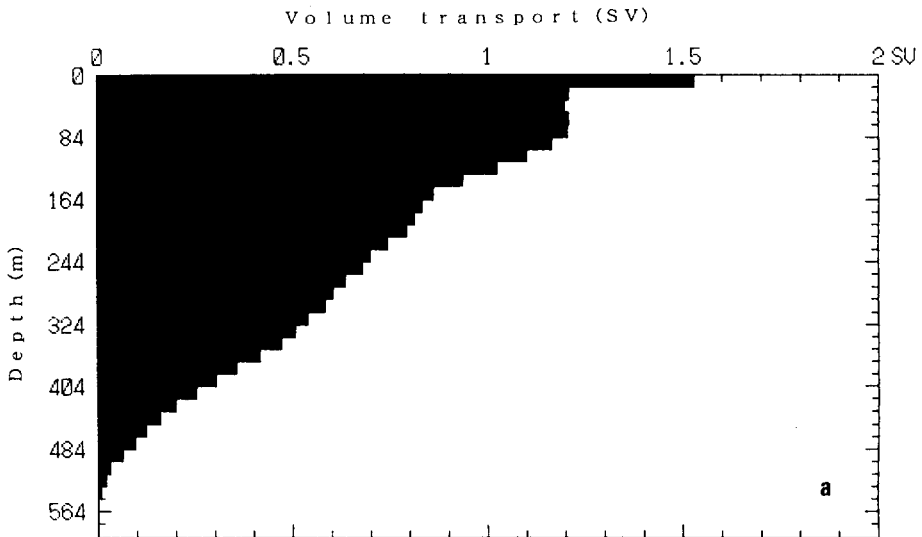
流出が逆転したが、これは流入・流出量の総和が逆転したのであって、どの層から流入し、どの層から流出したかの傾向は変わらない。層別に、暖水渦の外部の水がどの深度範囲から流入し、あるいは渦内の水がどの深度範囲から流出しているかを大まかに見るには支障はないであろう。

暖水渦の層別流量と収支

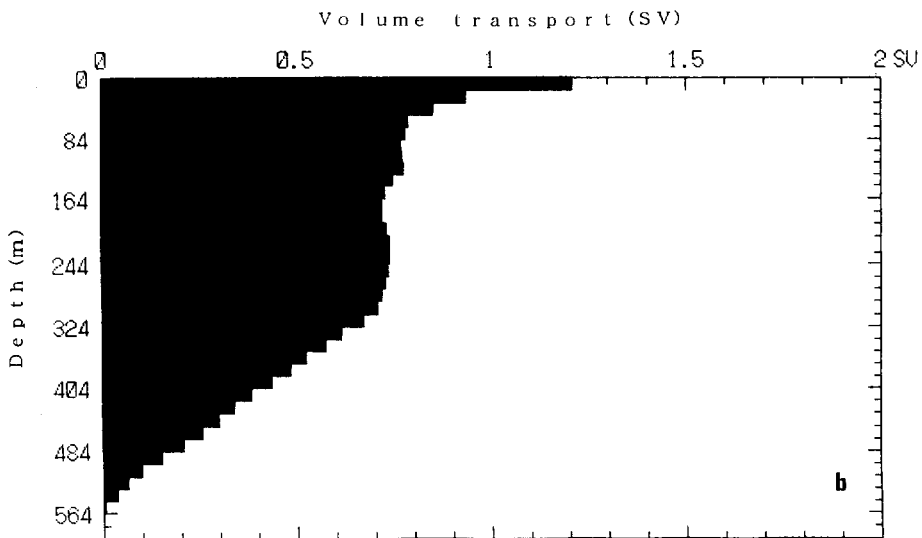
処理方法で記述したように、海面～20 m の流量は 20 m 深の流速を用いて、層厚 20 m の流量を求めてい

る。他の層の厚さは 16 m であるから、海面の流量を 0.8 倍すると、他の層と同じ流量になる。

各断面の層別流量を Fig. 3 に示す。中心-北の断面 (Fig. 3a) では、海面近くの流量が 1.5 SV を越え、深くなるにつれて、ほぼ直線的に減少している。中心-東の断面 (Fig. 3b) では、海面近くで 1 SV を越え、300 m 付近まで 0.8 SV 程度で、それ以深で直線的に減少している。中心-南の断面 (Fig. 3c) の流量は中心-東の断面に類似している。中心-西の断面 (Fig. 3d) では、他の断面に比べてどの層でも流量は小さく、0.5 SV



(a)



(b)

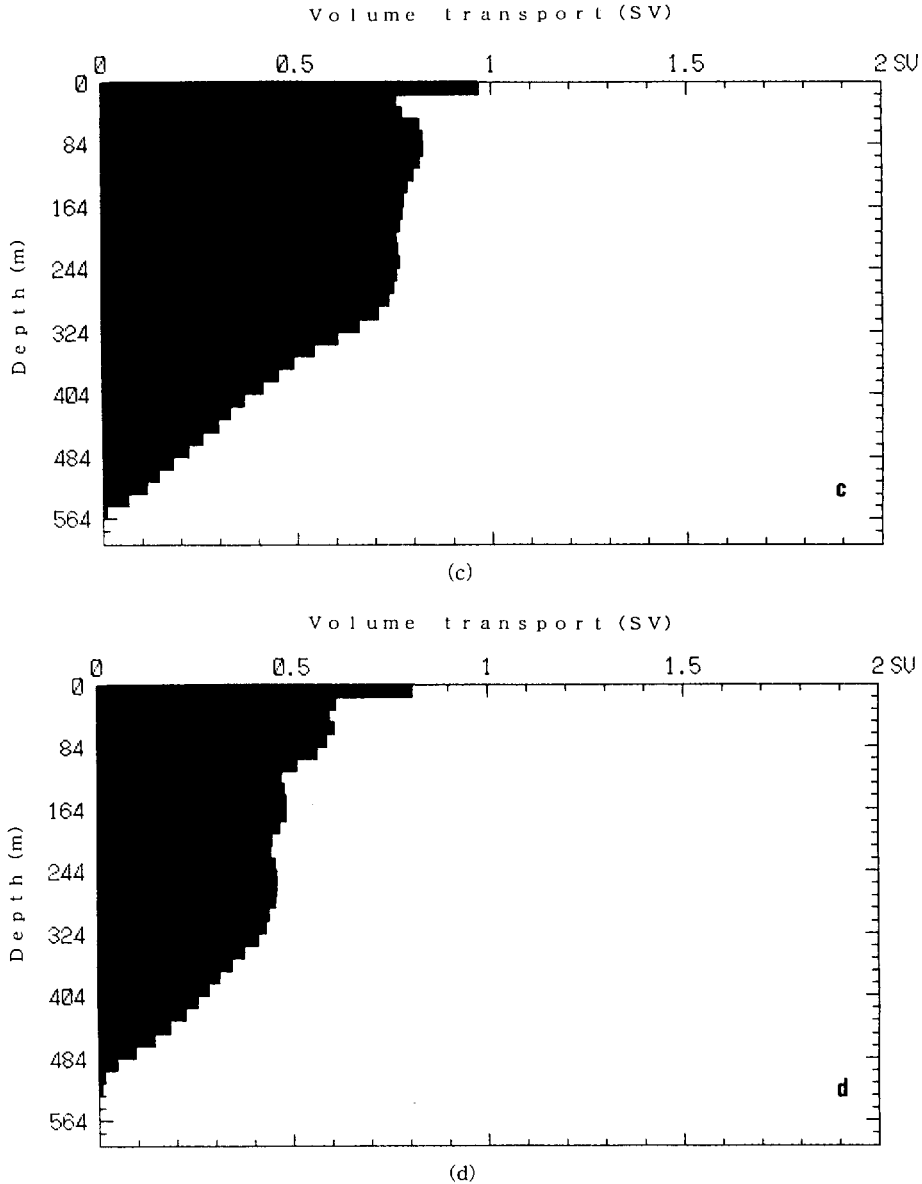


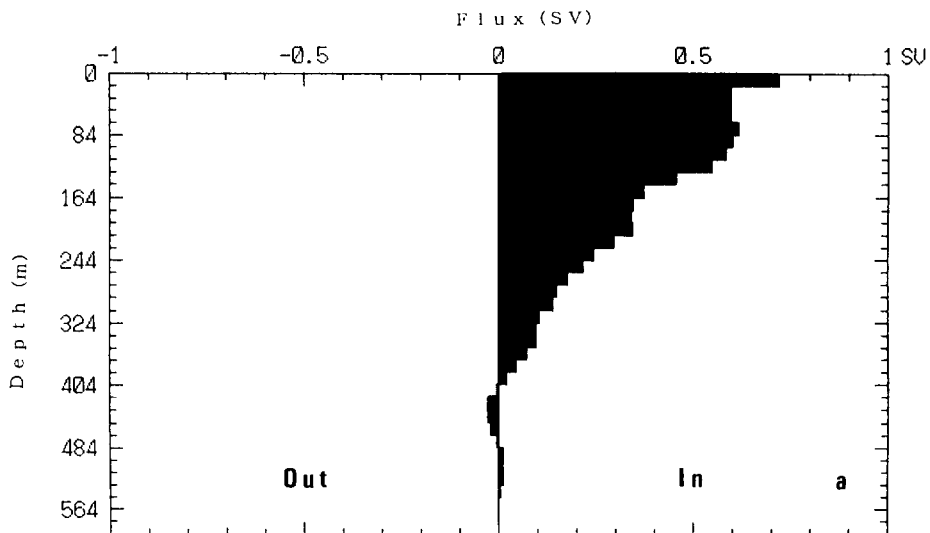
Fig. 3 Volume transport for 16 m thick depth layers in the 4 sectors from the ring center to 100 km in the temperature range of more than 7°C.

(a) North sector, (b) East sector, (c) South sector and (d) West sector

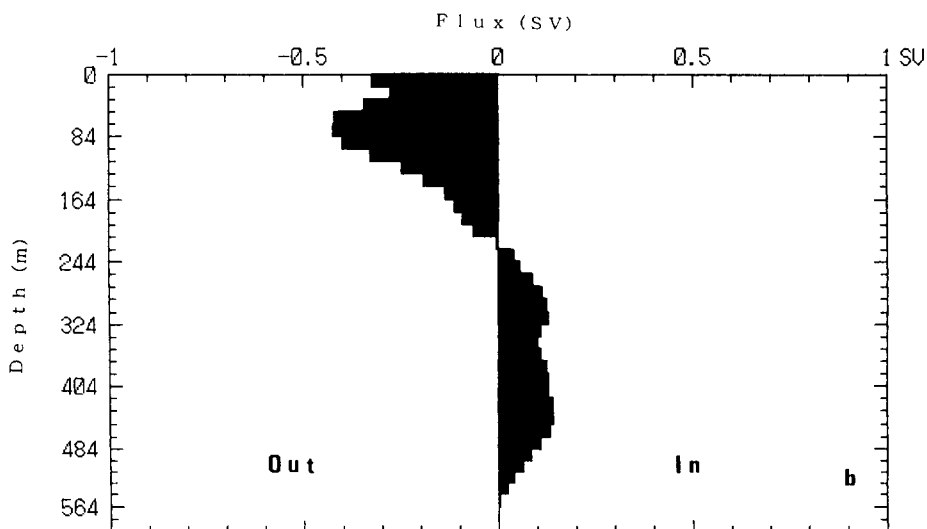
程度の流量が深度 100~300 m にあり、それ以深で直線的に減少している。いずれの断面でも、海面から 20 m までの流量が大きい。層厚 20 m を 16 m に換算すると、20 m 以深の浅い層の流量とほぼ等しくなる。

Fig. 4 は (a) (中心~北)–(中心~西), (b) (中心~東)–(中心~北), (c) (中心~南)–(中心~東),

(d) (中心~西)–(中心~南) の流量差を層別に示したものである。Fig. 4 中のプラス側は流入を、マイナス側は流出を表す。暖水渦の北西側では表層での流入量は大きく、深くなるにつれて小さくなっている (Fig. 4a)。暖水渦の北東側では 200 m 以浅で流出、それ以深で流入している (Fig. 4b)。暖水渦の南東側 (Fig. 4c)



(a)



(b)

では、表層で0.2 SV程度の流出はあるものの、流入・流出ともに小さく、東側と南側ではいずれの層でも、ほぼ同じ流量になっている。南西側 (Fig. 4d) ではいずれの層でも暖水渦内の水が流出していて、流出量のピークは100~300 mの中層に見られる。

考 察

前報では、7°C以上の範囲を積分した流入・流出量を議論した。その中で、暖水渦の北西側から親潮系の水

の流入、南西側から渦内の水の流出があることを指摘した。層別の流量差 (Fig. 4) によると、北西側からの流入は親潮表層の水であることになる。北西側から流入した親潮表層の水の一部は北東側の表層から流出している。400 m以浅で北西側から流入する水の流量は8.4 SVであり、北東側の228 m以浅で流出している水の量は3.3 SVである。このことは暖水渦の北西側から渦内に流入した親潮第1分枝の水のうち、約40%が暖水渦を経由して親潮第2分枝側へ供給されて、残りの60%が渦内に留まっていることになる。暖水渦内に流

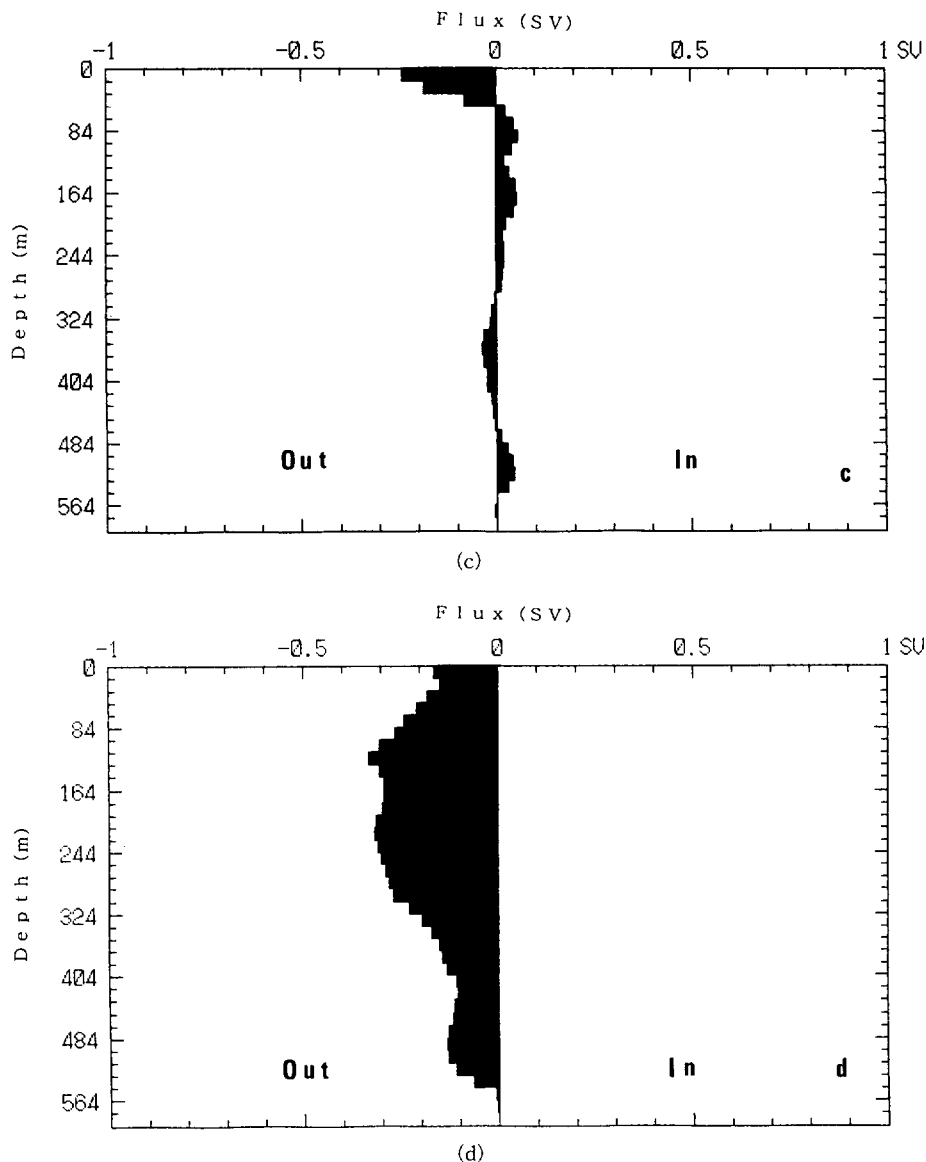


Fig. 4 Water exchange for each 16 m thick depth layers. plus: inflow, minus: outflow
 (a) Northwest side (North sector)-(West sector)
 (b) Northeast side (East sector)-(North sector)
 (c) Southeast side (South sector)-(East sector)
 (d) Southwest side (West sector)-(South sector)

入した親潮第1分枝の水が暖水渦の水とどの程度混合して親潮第2分枝側へ流出しているかの評価は難しいが、蛍光光度計による海面近くの蛍光値の分布は暖水渦の北半分が南半分より大きい(前報, Fig. 9 参照)ことから判断すると、北西側から流入した親潮第1分枝の水は暖水渦の水とあまり混合しないで、北東側から

親潮第2分枝側へ供給されていると考えられる。親潮第1分枝と第2分枝の間に暖水渦がはさまっているような場合には、親潮第1分枝の水と暖水渦の水が多少混合した水が親潮第2分枝側に供給されていることになる。

Fig. 5 に渦と周辺の水の交換を模式的に示した。図

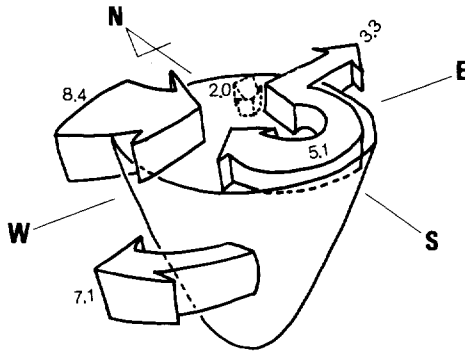


Fig. 5 Schematic diagram of water exchange among the warm-core ring and the surrounding water masses.

The numerals indicate the volume transport (SV) and the arrows indicate the direction of flow.

The dashed arrow on the northeast side indicates an inflow into the sub-surface layer.

中の暖水渦の北東側の点線で示した矢印は北東側の中層からの渦内への流入を表す。渦の南西側からは中層での流出量が多い。従って、暖水渦の北西側から親潮系の水が流入し、南西側から暖水渦の中層の水が流出し、表層では流入量が超過、中層では流出量が超過していることになる。暖水渦の規模が水平、鉛直方向とも時間的に大きな変化をしていないとすると、表層で超過した流入量が中層の流出量を補わなければならない。そのために表層の水が中層に潜り込んでいることが考えられる。このような作用によって、暖水渦が肥沃化しているものと考えられる。

暖水渦の西側が三陸沿岸に近い時に、西側の流速が小さくなる例が報告されている(友定, 1975, 横内他, 1992) ので、暖水渦が三陸沿岸近くにあつて、その西の境界が陸棚斜面に近い時には、ここで記したような現象がしばしば起つていているものと考えられる。

ここで行った流量と収支の計算で問題となるところは、7°C線が流量計算ボックスと交差する所の処理法ではなく、暖水渦の流量計算範囲を100 kmまでとしていることである。例えば、暖水渦の流量計算範囲が10 km増えて、110 kmになり、厚さ100 mの間で10 cm/secの流れがあつたとすると、半径が10 km増えることによって流量は0.1 SV増える。流量計算では大きな差異はないが、収支を求める際には、この効果は無視できない。しかし、現在の調査では、暖水渦の規模を厳密に決定することは困難である。

結 論

暖水渦の半径を100 kmとして、7°C以上の水温範囲で厚さ16 m毎に層別の流量及び外部との海水交換量を見積もった。流量計算を行う際に、前報で行った7°C等温線と交差する流量計算ボックスの流量計算法を一部改良して行った。その結果、以下のことが言えた。

(1) 前報で行った流量計算と今回の計算法で流量に大きな違いは見られない。

(2) 暖水渦の北西側の表層から親潮第1分枝の水が渦内に流入し、その内40%は北東側の表層から親潮第2分枝へと流出している。

(3) 暖水渦内の蛍光値が渦内の北半分で大きい(前報, Fig. 9)ことは、上記親潮第2分枝へ流出している水は渦内の水とあまり混合していない親潮第1分枝の水と推定される。

(4) 暖水渦の南西側からは、渦内の中層の水が流出している。

(5) 親潮系の水の表層からの流入、渦内の中層の水の流出によって、親潮系の水が渦内に残ることになり、暖水渦が肥沃化していることが示唆された。

おわりに

東北区水産研究所のわかたか丸の代船として若鷹丸が1995年に就航した。若鷹丸にはコンテナラボとして、NOAA HRPT 画像を受信する装置がある。本装置によって受信した衛星写真を見ると、暖水渦とその周辺の海況は常に変動しているように見える。本論で示した結果が、暖水渦の一般的な特徴であるかどうかは、今後も調査を重ねることによって明らかにする必要がある。

旧わかたか丸はわずか174トンしかなく、沖合に出る調査航海には厳しいものがあつた。船長をはじめ乗組員の方々には、最良のデータを得るべく最大限の努力をしてもらった。又、海洋動態研究室の皆様から貴重な助言をもらった。記して感謝する。

文 献

- 稲掛伝三・友定彰 (1988) 海洋生物資源の把握に関する研究。昭和62年度海洋遠隔探査(海洋リモートセンシング)技術の開発研究—研究成果集—。科技庁研究開発局宇宙開発課, 43-53

- 稲掛伝三 (1991) 熱赤外画像に見られる小規模現象の海洋構造。日本リモートセンシング学会誌, **11** (2), 110-117
- 理科年表 (1995) 国立天文台編, 丸善, pp 1046.
- 為石日出男・杉本隆成 (1994) 東北海区におけるマイワシの北上回遊と接岸に果たす暖水渦と暖水ストリーマの役割。水産海洋研究, **58**(2), 77-90
- 友定 彰 (1975) 本州東方海域で黒潮から切離する暖水塊について。東海水研報, **81**, 13-85
- TOMOSADA, A. (1978) A large warm eddy detached from the Kuroshio east of Japan. *Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab.*, **94**, 59-103
- 友定 彰 (1991) 水産海洋研究のための東北海区の海洋研究に関するレビュー。水産海洋研究会報, **55** (2), 151-159
- 友定 彰・横内克巳・杉崎宏哉・松尾 豊 (1996) 三陸沖暖水渦内の流動の一観測例。東北水研研報, **58**, 1-9
- 横内克巳・安田一郎・前川秀則・上野俊士郎 (1992) 春季三陸沖暖水塊前線域におけるクロロフィル a と栄養塩類の深層分布。東北水研研報, **54**, 11-22
-
- 東北区水産研究所業績第 550A 号
(1996 年 10 月 21 日受理)

Address: TOMOSADA, YOKOUCHI, SUGISAKI and MATSUO, Tohoku National Fisheries Research Institute, 3-27-5 Shinhamma, Shiogama, Miyagi 985, Japan (東北区水産研究所)