

特集「北西太平洋・日本周辺海域における海流系の流量・熱輸送量の変動」

琉球海流系の流量変動（観測船データの解析）*

村上 潔**

要 旨

気象庁の海洋気象観測船によって、2003年春季から2006年秋季にかけて年4回行ってきた海洋観測のデータを使用し、奄美大島の南東に存在する北東向きの流れである琉球海流系及び黒潮について、インバース法による解析で見積もられる流量の変動を調査した。その結果、琉球海流系の流量は、2003年から2006年までの期間の12回の解析結果の平均で $(13.6 \pm 6.6) \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ であった。これは、Ichikawa *et al.* (2004) による琉球海流系の流量の平均 $16 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ に近い値となった。今回の解析において正味の黒潮流量の平均は、東シナ海のPN線で $(30.1 \pm 4.0) \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 、トカラ海峡のTK線で $(28.1 \pm 3.9) \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 、四国沖のASUKA線で $(42.2 \pm 5.6) \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ であった。また、奄美大島南東の琉球海流系へと続く沖縄南東の北上流は、平均 $(6.1 \pm 3.7) \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ であった。なお、琉球海流系の熱輸送量は平均0.70PWで、約半分が沖縄南東から供給され、残り半分は本州南方の再循環流から供給されていた。琉球海流系の流れの構造については、その範囲が深層にまで及ぶことがあり、流量を見積もる上で影響を無視することはできない。

1. はじめに

黒潮は、台湾と先島諸島の間を通過して太平洋から東シナ海に入り、大陸棚斜面に沿って北東に流れた後、屋久島の西方で南東に向きを変え、トカラ海峡を通過して再び太平洋に流れ出ている。その後、北東に向きを変え、九州から四国・本州の南岸に沿って東に流れている（第1図）。また、北太平洋の亜熱帯循環の一部である黒潮は、赤道域から極域への熱の南北輸送において重要な役割を果たしている。

黒潮の流量は、四国沖で平均 $42 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ という大きな流量を示す (Imawaki *et al.*, 2001)。一方、

その上流に当たる東シナ海のPN線（第2図）で長崎海洋気象台がこれまで観測した黒潮流量は、 $25 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 程度である。また、多くの研究者によりPN線での黒潮流量は見積もられており、その流量は $19 \sim 28 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ と見積もられている（例えば Ichikawa and Beardsley, 1993 ; Kawabe, 1995 ; Ichikawa and Chaen, 2000）。つまり、四国沖の黒潮流量は、東シナ海における黒潮流量の2倍近い大きな値となっている。このことは、四国沖の黒潮の流れは、東シナ海からの流入のみで形成されるのではなく、別の四国沖に流れ込む北東向きの流れによっても形成されていることが示唆

* Variability of Volume Transport by the Ryukyu Current System (Analysis of Research Vessel Data)

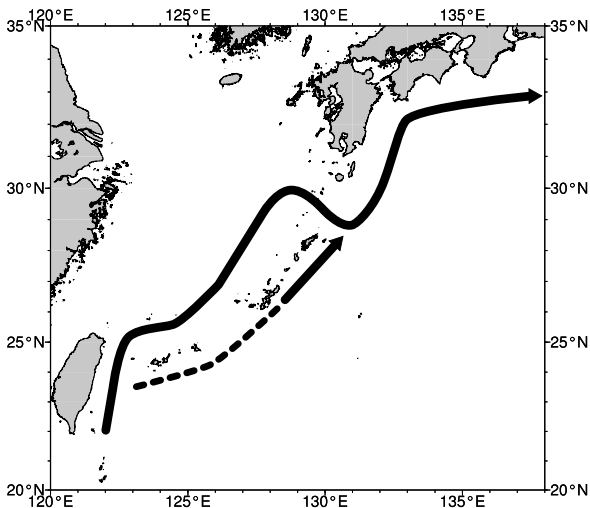
** Kiyoshi Murakami

Oceanographical Division, Nagasaki Marine Observatory (長崎海洋気象台海洋課)

されてきた。

Ichikawa *et al.* (2004) は、奄美大島の南東に琉球海流系と呼ばれる流れが存在することを観測により明らかにし、その流量が平均で $16 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ と見積もり、四国沖での黒潮の供給元の一つであると提唱している。また、Zhu *et al.* (2003) は、IES (inverted echo sounder) と係留系を用いて、沖縄の南東に北東向きの流れが存在することを確認した。8 か月平均での北東向きの流量は $6.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ であった。これは Ichikawa *et al.* (2004) の示した奄美大島南東の流量のおよそ 1/3 の流量である。Zhu *et al.* (2006) は、2000 年秋の海洋観測データを使って、東シナ海と本州南方の黒潮及び沖縄諸島から奄美諸島南東の琉球海流について流速構造と流量を求め、琉球海流が九州の南東方で黒潮と合流していることを示した。このときの本州南方の黒潮流量は $64 \sim 79 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ で、東シナ海から $27 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の流量が供給され、沖縄の南東から $13 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 供給されていると見積もっている。残りの $24 \sim 39 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の流量は四国南方の黒潮の再循環によって供給されていると推定している。

今回、これまでの研究と比べて長期間の海洋気象観測船による観測データを用いて、沖縄から四



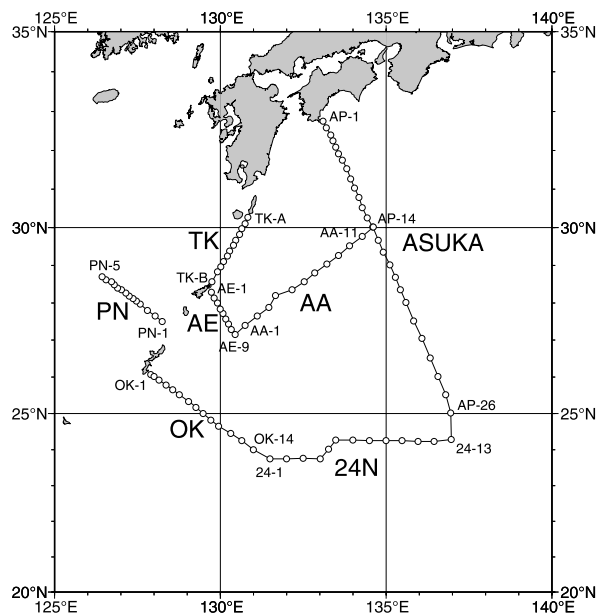
第 1 図 東シナ海及び本州南方を流れる黒潮と奄美大島南東の琉球海流系の流れの典型例

実線は黒潮及び琉球海流系の流れを示し、破線は過去の研究で推定された琉球海流系の流れを示す。

国沖に及ぶ、より広範囲の琉球海流系及び黒潮の平均的な流量を見積もることを目的として、東シナ海の PN 線、トカラ海峡の TK 線、沖縄南東の OK 線、OK 線の南端から東に向かう 24N 線、足摺岬南東の ASUKA 線、奄美大島南東の AE 線及び AE 線の南端から ASUKA 線にかけて北東に向かう AA 線で構成する閉じたボックス (第 2 図) において、インバース法を用いて解析を行った。2003 年春季から 2006 年秋季まで実施された 15 回の海洋観測航海の内、第 2 図のような観測ラインでボックスを組むことができた 12 回の航海について解析を行い、奄美大島南東に存在する琉球海流系の流量変動について調べた。

2. 海洋観測データとインバース法による解析

2003 年春季から 2006 年秋季までに実施した 15 回の海洋観測航海で、PN 線、TK 線、OK 線、24N 線、ASUKA 線、AE 線、AA 線の各観測ラインを観測した期間は第 1 表のとおりである。そのうちすべての観測ラインを観測することがで



第 2 図 CTD 観測点配置図

○は、PN 線、TK 線、OK 線、24N 線、ASUKA 線、AE 線、AA 線の各観測ライン上の CTD による観測点である。各観測点には、例えば ASUKA 線の場合 AP-1 から AP-26 のように測点番号を付けており、図中の各観測ラインの始点及び終点には、それぞれの番号を記した。

きた航海は12回であった。この12回の航海では、主に長崎海洋気象台の長風丸により電気伝導度水温水深計 (Conductivity Temperature Depth profiler) による観測 (以下CTD観測) を行ったが、2004年冬季、2005年秋季、2006年冬季及び2006年秋季のASUKA線については啓風丸 (神戸海洋気象台)、2006年夏季のAE線とAA線については凌風丸 (気象庁) がCTD観測を行った。各測点におけるCTD観測は、いずれの観測船でもSea-Bird Electronics社製のSBE911plusを使用して、春季の観測では海面から海底付近まで、それ以外の季節の観測では海面から深度2000mまで行った。また、ADCP (acoustic Doppler current profilers) による海流観測は、長風丸では古野電気製のCI-20-Hを、啓風丸と凌風丸ではRD社製のVM-75を使用して行った。

インバース法による解析では、測点間の基準面流速を未知数として地衡流計算を行い、等密度面で分けた層ごとにボックス内で流量が保存するという条件で連立方程式を作り、その連立方程

式を解くことで基準面の流速を求める (Wunsch, 1978)。本解析でインバース法を使って基準面の流速を求めるに当たり、連立方程式に組み込む流量は、 $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ 又はCTD最大観測深度を基準面として求めた。このとき使用する水温、塩分データは、CTDによる観測値を基に最適内挿法 (Roemmich, 1983) によって客観解析したものをを用い、斜面部の外挿を行っている。さらに、連立方程式に組み込むADCPデータから求めた基準面流速は、児玉・金子 (2004) による方法でCTD観測時の停船中に観測した50m深の平均ADCPデータを測点間で平均し、その平均流速から温度風の関係式を使って基準面流速を求めた。なお、VM-75では直接50m深のADCPデータを取得することができなかつたため、50m深の上下の観測層のADCPデータから内挿して求めている。ADCPデータから求めた基準面流速を連立方程式に組み込んだ場合、連立方程式の方程式の数が未知数より多い、いわゆる *overdetermined* となり、最小二乗解が得られる。そこで解は、解ノル

第1表 各観測ラインの観測を行った期間

表中の*1は啓風丸、*2は凌風丸、*3は啓風丸と長風丸、その他は長風丸による観測を行った期間。

航海	PN	TK	OK-24N	ASUKA	AE-AA
200304	4/25-4/26	5/22-5/22	5/2-5/7	5/7-5/13	5/22-5/26
200306	7/12-7/13	7/11-7/11	7/18-7/22	7/22-7/25	8/3-8/6
200310	10/20-10/21	10/18-10/19	10/29-11/2	11/3-11/6	
200401	2/1-2/2	1/30-1/31	2/10-2/14	2/23-2/27*1	2/17-2/19
200404	4/22-4/24	4/21-4/22	4/30-4/24	5/5-5/12	5/22-5/25
200406	7/15-7/16	7/14-7/14	7/22-7/26	7/26-7/29	8/6-8/9
200410	10/22-10/23	10/14-10/16		11/2-11/5*3	10/31-11/3
200501	1/29-1/30	1/26-1/27		2/23-2/26	2/6-2/9
200504	4/22-4/24	4/21-4/21	4/28-5/3	5/3-5/9	5/17-5/20
200506	7/14-7/16	8/8-8/9	7/25-7/29	7/29-8/1	8/6-8/8
200509	10/17-10/18	11/4-11/4	10/25-10/30	11/3-11/8*1	10/2-10/6
200601	1/27-1/29	1/26-1/26	2/5-2/9	2/21-2/27*1	2/11-2/14
200604	5/1-5/2	4/29-4/29	5/10-5/15	5/15-5/21	5/29-6/2
200606	7/22-7/24	7/21-7/22	7/31-7/24	8/4-8/11	7/25-7/28*2
200609	9/30-10/1	9/28-9/28	10/10-10/18	10/15-10/19*1	10/28-10/30

ムと残差ノルムの関係から高次解を切り捨てる切捨て解を採用した。

インバース法による解析を行うためには、岸から岸までといった観測ラインによる閉じたボックスを作成する必要がある。そこで本解析では、PN 線 - OK 線 - 24N 線 - ASUKA 線で囲んだボックス (BOX1), TK 線 - AE 線 - AA 線 - ASUKA 線 (北緯 30 度以北) で囲んだボックス (BOX2), OK 線 - 24N 線 - ASUKA 線 (北緯 30 度以南) - AA 線 - AE 線で囲んだボックス (BOX3), PN 線 - TK 線で囲んだボックス (BOX4), TK 線のみで囲んだボックス (BOX5) 及び PN 線のみで囲んだボックス (BOX6) の計六つのボックスで構成するマルチボックスを組んだ。なお、PN 線と TK 線間の海底地形の影響を考慮して、BOX4 においては $\sigma_\theta = 27.2$ より浅い層のみ、BOX5 及び BOX6 においては $\sigma_\theta = 27.2$ より深い層のみで保存式が成り立つとして仮定している。本解析に使用したマルチボックスでは、欠測がない場合、観測点数は 99 点で、隣り合う観測点のペアの数は 97 個となる。保存条件に使用したポテンシャル等密度面と予想誤差を第 2 表に示す。ただし、冬季などポテンシャル密度 $24.5 \sigma_\theta$ の面が海面に達してしまう場合は、海面に達しないより深い等密度面を選択している。計算に使用する保存式の数、ボックス全体で質量 (流量) 保存が 31 個、熱流量保存が 27 個、塩分流量保存が 27 個の計 85 個の保存式が得られ、ADCP から求めた基準面流速による条件 97 個を

第 2 表 海面から 2000m までのデータでインバース法の解析を行うに当たって保存条件に使用した等密度面と各層の予想誤差
 σ_θ は、海面を基準圧力としたポテンシャル密度。

Layer	Potential Density	Expected error($10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
1	Surface - $24.5 \sigma_\theta$	3.0
2	$24.5 \sigma_\theta$ - $25.5 \sigma_\theta$	1.0
3	$25.5 \sigma_\theta$ - $26.5 \sigma_\theta$	1.0
4	$26.5 \sigma_\theta$ - $27.2 \sigma_\theta$	1.0
5	$27.2 \sigma_\theta$ - $27.5 \sigma_\theta$	1.0
6	$27.5 \sigma_\theta$ - $27.62 \sigma_\theta$	1.0
	Total	1.0

加えると方程式の数は 182 個となった。また、各ボックスにおいて、対馬暖流として $2 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の流量が東シナ海北部へ流出し、大隅海峡、豊後水道、奄美大島と沖縄本島の間では流量収支が 0 と仮定して解析を行った。なお、本解析では海面から $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ までの CTD データを使って各航海の解析を行っているが、春季の観測においては、海底付近まで CTD 観測を行っているため、春季については海底付近までのデータを使用したインバース法による解析も行った。

3. インバース法による解析結果

3.1 2000m 深までのデータを使用した解析結果 (2003 年夏季の解析例)

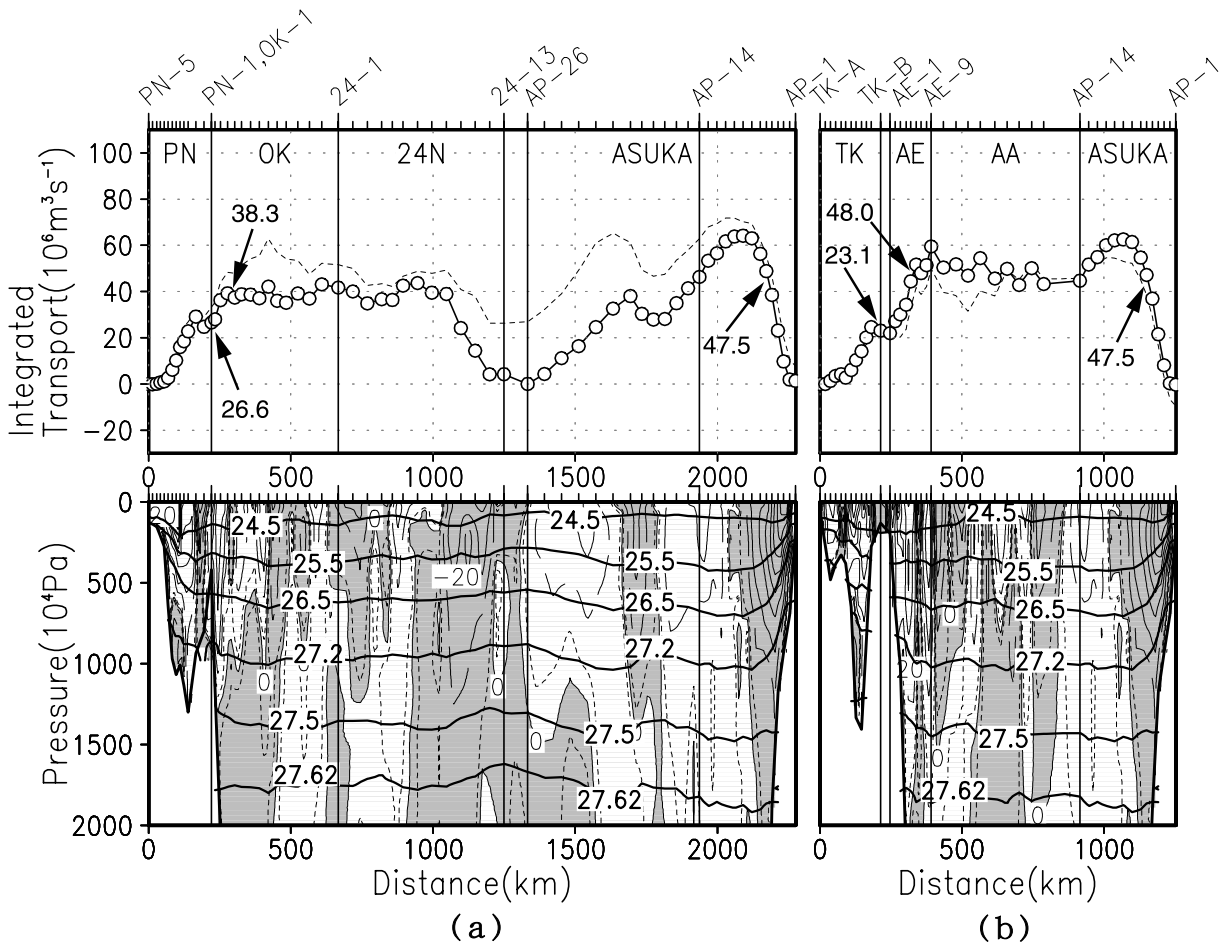
2003 年夏季のインバース法による解析の結果を第 3 図に示す。海流のボックスへの流入を正、流出を負とすると、解析を行う前の BOX1 への流入量から流出量を差し引いた流量残差は $+7.7 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ あったが、解析後の流量残差は $+1.3 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ となった。また、BOX2 の流量残差についても $-9.5 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ あった流量残差が、解析後は $-0.3 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ となった。PN 線での北東向きの流れから南西向きの流れを差し引いた正味の黒潮流量は、 $33.3 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ から $26.6 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ に減り、TK 線での正味の黒潮流量は、 $20.4 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ から $23.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ に増加した。OK 線から ASUKA 線にかけての解析前後の積分流量の変化をみると、OK-4 から OK-9 にかけての流入と OK-9 から 24-6 にかけての流出は共に減り、24-6 から ASUKA 線の南端に当たる AP-26 にかけての測点では流出が増え、ASUKA 線の AP-22 から AP-9 にかけての測点では流入が増える結果となった。また、AE 線から AA 線にかけての測点については、AE-1 から AE-9 にかけての測点では流入が増え、AE-9 から AA-6 にかけての測点では流出が増えているのが分かる。

奄美大島南東での琉球海流系及び四国沖での黒潮の流れは、それぞれ AE 線の AE-1 ~ AE-9 のボックスへの流入域と、ASUKA 線の AP-1 ~ AP-9 のボックスからの流出域に対応し、AE-9 と AP-9 に積分流量のピークがみられる。AE-9 は AE 線と AA 線が交差するボックスの角に当たる

測点で、このような測点では AE 線から流入した流れがすぐそばの AA 線から流出する流れとなって現れていることが考えられる。また、AP-9 において黒潮の南側にある四国沖の暖水渦などの再循環の流れが存在していることが考えられる。それぞれの正味の流量を見積もるにはこれらの流れを取り除いてやる必要がある。しかし、この第3図だけからは AE-9 や AP-9 を中心にどのくらいの範囲が再循環に対応する流れなのかを判別できない。

再循環の成分を取り除くに当たって、再循環に対応する流れがあるところでは同じ性質の水塊が

存在し、周囲の水塊との違いがあると考えられる。そこで、ポテンシャル密度を縦軸にとった塩分とポテンシャル渦度の断面図（第4図）により、水塊の分布をみた。塩分の断面図をみると、 $26.5 \sim 27.0 \sigma_\theta$ の層に 34.2 以下の塩分極小が存在する海域と存在しない海域の分布がみられる。さらに、ポテンシャル渦度の断面図をみると、 $25 \sigma_\theta$ 付近の層に $2.0 \times 10^{10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 以下のポテンシャル渦度の極小層が存在する海域と存在しない海域の分布がみられる。黒潮の流入域である PN 線や TK 線では 34.2 以下の塩分極小層はみられず、ASUKA 線で黒潮の流れがある岸側の測点にも



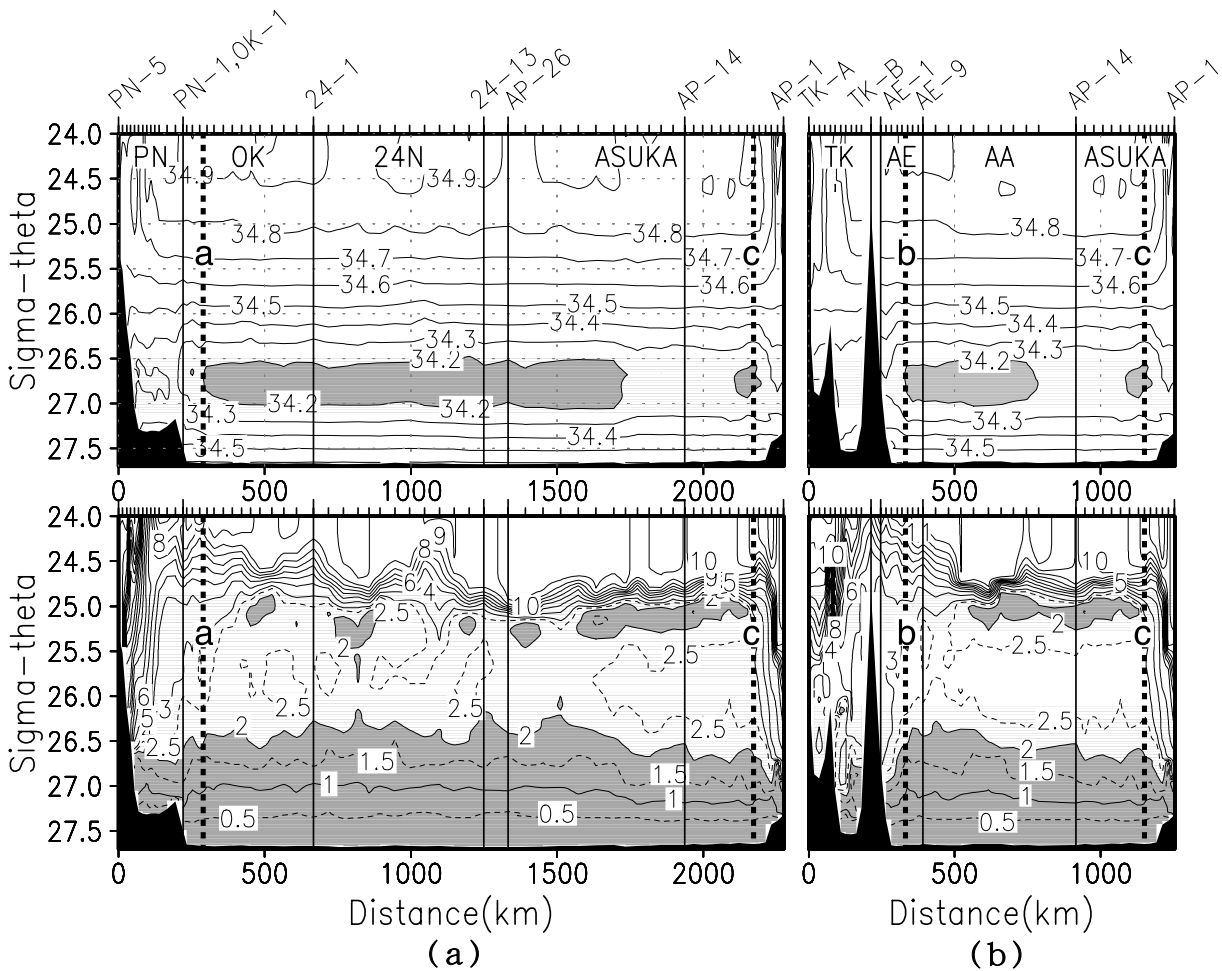
第3図 2003年夏季のPN線-OK線-24N線-ASUKA線で囲んだBOX1 (a) とTK線-AE線-AA線-ASUKA線で囲んだBOX2 (b) の積分流量及び流速断面図

2000 × 10⁴Pa までのCTDデータを用いたインバース法による解析結果。上段の図は、PN-5からの積分流量 (a) とTK-Aからの積分流量 (b) で、実線がインバース法による解析を行った結果、点線が解析を行わない場合の結果を示す。下段の図は、流速断面図で、ボックスに入る向きを正、ボックスから出る向きを負(灰色で表示)で表す。流速は、実線で20cm s⁻¹間隔に表示し、長破線は10cm s⁻¹及び-10cm s⁻¹の、短破線は2cm s⁻¹及び-2cm s⁻¹の値を示す。太線は解析に使用したポテンシャル密度σ_θの等密度面を表す。横軸はPN-5及びTK-Aからの積算距離。

34.2以下の塩分極小層はみられない。同様に黒潮の流れの存在する測点では、ポテンシャル渦度が $2.0 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 以下の極小層はみられない。一方、AP-9周辺の測点では $25 \sigma_\theta$ 付近にポテンシャル渦度が $2.0 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 以下の極小層が存在し34.2以下の塩分極小層もみられるなど、再循環に対応する水塊と黒潮の水塊との性質の違いがみられる。これらを考慮すると、AE線では水塊の境界がAE-5とAE-6の間にあると考えられる。AE-5とAE-6の間までが四国沖の黒潮へつながる流量であるとする、TK-AからAE-5とAE-6の中

間までの各測点間の流量を積分した流量は $48.0 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ となり、TK-Bまでの積分流量 $23.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ を差し引くと、奄美大島南東の琉球海流系の流量は $24.9 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ と見積もられる。同様に、ポテンシャル渦度や塩分の極小層の分布からAP-1からAP-6までを四国沖の黒潮と考えることができ、その流量は $47.5 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ となり、TK線の黒潮流量と琉球海流系をあわせた流量 $48.0 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ とほぼ一致する。

次に、沖縄南東での流れについてみると、第3図のOK-1～OK-4に流入域があり、第4図の



第4図 2003年夏季のPN線-OK線-24N線-ASUKA線で囲んだボックス(a)とTK線-AE線-AA線-ASUKA線で囲んだボックス(b)で縦軸をポテンシャル密度 σ_θ にとった塩分断面図(上)とポテンシャル渦度断面図(下)

塩分は、実線で 0.1 間隔に表示し、 34.2 以下の値を灰色で表示している。ポテンシャル渦度は、実線で $1 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 間隔に表示し、 $2.5 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 以下の値については、破線で $0.5 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 間隔に表示している。また、 $2 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 以下の値を灰色で表示している。図中a, b, cの各破線は、沖縄南東の北上流、奄美大島南東の琉球海流系及び四国沖の黒潮の水塊の境界をそれぞれ示す。横軸はPN-5及びTK-Aからの積算距離。

OK-1～OK-4の測点では34.2以下の塩分極小層がみられないなど、奄美大島南東の琉球海流系の水塊の性質と似た水塊がみられる。また、OK-1～OK-4とPN-5からの積分流量の値が同じで24N線の流出域である24-9～24-10における両者の水塊の性質が違ふことから、OK-1～OK-4の北上流が奄美大島南東の琉球海流系へとつながる流れであると考えられる。そこで、OK-4とOK-5の間中までが沖縄南東での北上流とすると、その流量は $11.8 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ であった。奄美大島南東の琉球海流系の流量 $24.9 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ との差は $13.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ である。この差については、沖縄南東の北上流以外に東方からの流入があると考えられる。

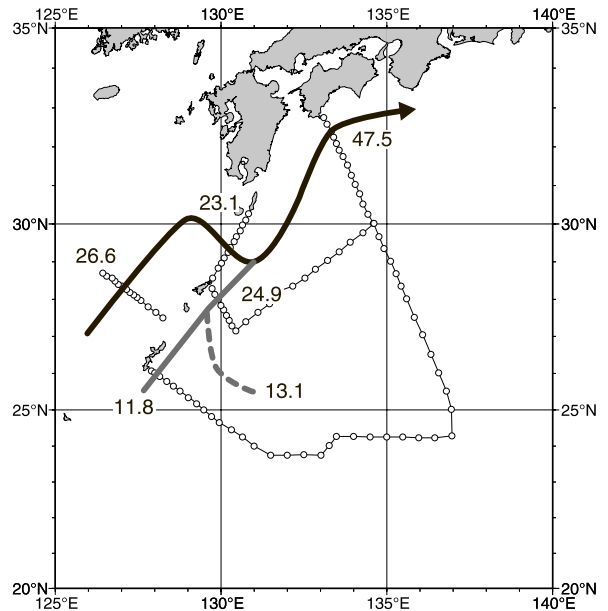
以上の結果からとりまとめた2003年夏季の黒潮及び琉球海流系の流量は、第5図のとおりである。

3.2 海底付近までのデータを使用した解析結果 (2004年春季の解析例)

海底付近までのデータを使用したインバース法による解析を行うに当たり、保存条件に使用したポテンシャル等密度面と予測誤差は第3表のとおりである。計算に使用する保存式の数、ボックス全体で質量(流量)保存が46個、熱流量保存が42個、塩分流量保存が42個の計130個の保存式が得られ、ADCPから求めた基準面流速による条件97個を加えると方程式の数は227個となった。

2004年春季の海底付近までのデータを使用し、 $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ 基準で解析を行った結果を第6図に示す。この観測期間中は足摺岬付近に黒潮の小蛇行があったため、黒潮が足摺岬で離岸し、ASUKA線の岸側ではボックスへ流入する流れがみられた。解析を行う前のBOX1とBOX2の流量残差は、それぞれ $-4.5 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ と $-5.4 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ であったが、解析後の流量残差は、それぞれ $2.4 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ と $-0.4 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ になった。また、PN線での正味の黒潮流量は $36.9 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ から $33.3 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ に減り、TK線での正味の黒潮流量は $22.0 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ から $31.7 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ に増える結果になった。前節と同様に、水塊の性

質からみた奄美大島南東の琉球海流系の範囲は岸からAE-6とAE-7の間中までで、その流量は $6.7 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ であった。同様に沖縄南東のOK線での北上流の範囲はOK-2とOK-3の間中までで、その流量は $5.5 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ であった。



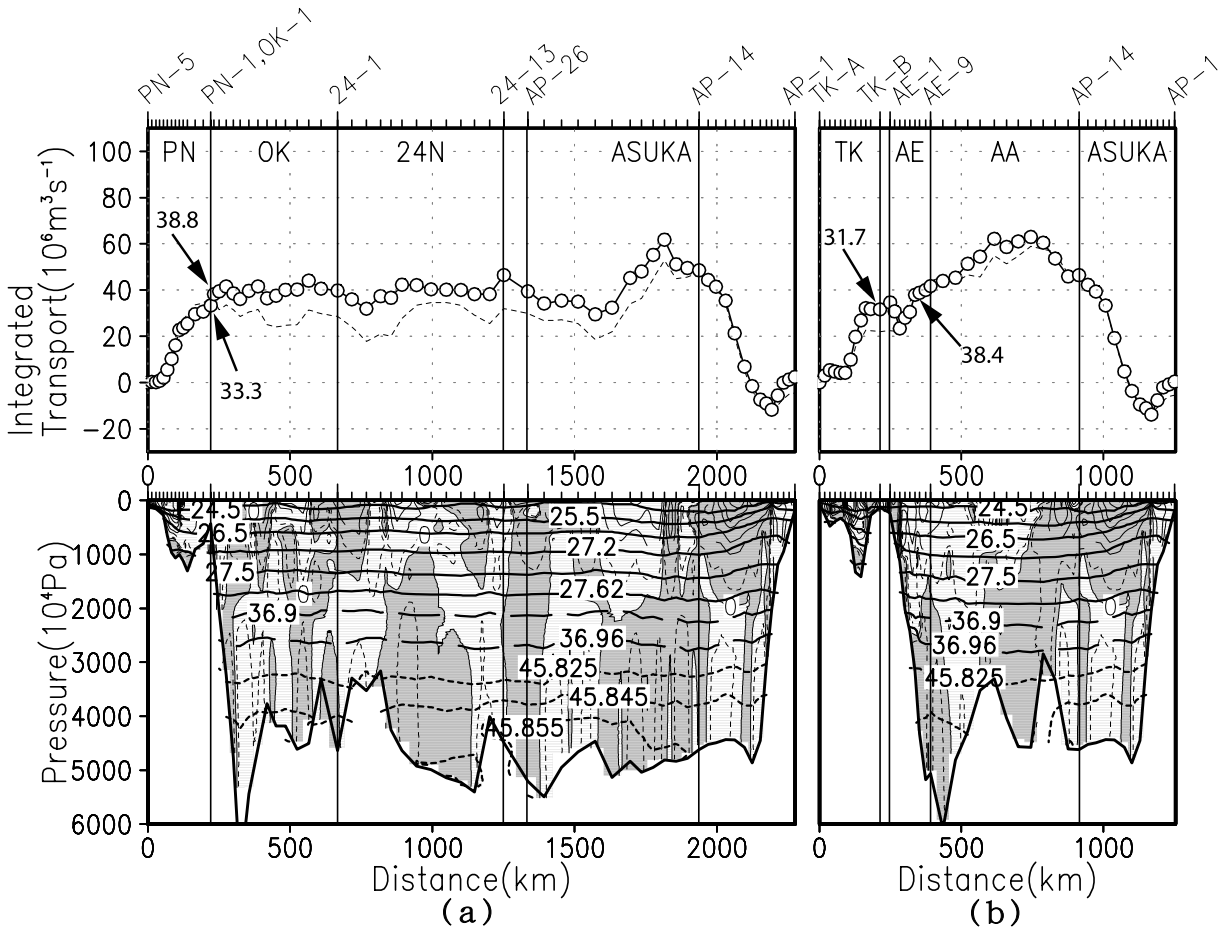
第5図 2003年夏季における黒潮と琉球海流系の流量の概要

図中の数字は、PN線、TK線、ASUKA線での黒潮、AE線での琉球海流系、OK線での沖縄南東の北上流及び沖縄南東の北上流以外の東方から琉球海流系に流入する流れの流量($10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$)。

第3表 海面から海底付近までのデータでインバース法の解析を行うに当たって保存条件に使用した等密度面と各層の予想誤差

σ_0 は海面を、 σ_2 は $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ を、 σ_4 は $4000 \times 10^4 \text{Pa}$ を基準圧力としたポテンシャル密度。

Layer	Potential Density	Expected error($10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
1	Surface - $24.5 \sigma_0$	3.0
2	$24.5 \sigma_0$ - $25.5 \sigma_0$	1.0
3	$25.5 \sigma_0$ - $26.5 \sigma_0$	1.0
4	$26.5 \sigma_0$ - $27.2 \sigma_0$	1.0
5	$27.2 \sigma_0$ - $27.5 \sigma_0$	1.0
6	$27.5 \sigma_0$ - $27.62 \sigma_0$	1.0
7	$27.62 \sigma_0$ - $36.9 \sigma_2$	1.0
8	$36.9 \sigma_2$ - $36.96 \sigma_2$	1.0
9	$36.96 \sigma_2$ - $45.825 \sigma_4$	1.0
10	$45.825 \sigma_2$ - $45.845 \sigma_4$	1.0
11	$45.845 \sigma_2$ - $45.86 \sigma_4$	1.0
	Total	1.0



第 6 図 2004 年春季の PN 線 - OK 線 - 24N 線 - ASUKA 線で囲んだ BOX1 (a) と TK 線 - AE 線 - AA 線 - ASUKA 線で囲んだ BOX2 (b) の積分流量及び流速断面図

海底付近までの CTD データを使用して $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ を基準層としたインバース法による解析結果。上段の図は、PN-5 からの積分流量 (a) と TK-A からの積分流量 (b) で、実線がインバース法による解析を行った結果、点線が解析前の結果を示す。下段の図は、流速断面図で、ボックスに入る向きを正で、ボックスから出る向きを負 (灰色で表示) で表す。流速は、実線で 20cm s^{-1} 間隔に表示し、長破線は 10cm s^{-1} 及び -10cm s^{-1} の、短破線は 2cm s^{-1} 及び -2cm s^{-1} の値を示す。解析に使用したポテンシャル密度で海面を基準圧力とした σ_θ の等密度面を太い実線で、 $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ を基準圧力とした σ_2 の等密度面を太い長破線で、 $4000 \times 10^4 \text{Pa}$ を基準圧力とした σ_4 の等密度面を太い短破線でそれぞれ表す。横軸は PN-5 及び TK-A からの積算距離。

3.3 2000m 深までのデータを使用した解析と 海底付近までのデータを使用した解析の比較

2003 年から 2006 年の春季の各航海では海面から海底付近まで CTD 観測を行っており、 $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ までのデータを用いた場合と、海底までのデータを用いた場合でインバース法による解析結果の違いを調べた。ここでは、

- ① $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ までのデータで $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠で ADCP データを組み込んだ場合
- ② $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ までのデータで $2000 \times 10^4 \text{Pa}$

準拠で ADCP データを組み込まなかった場合

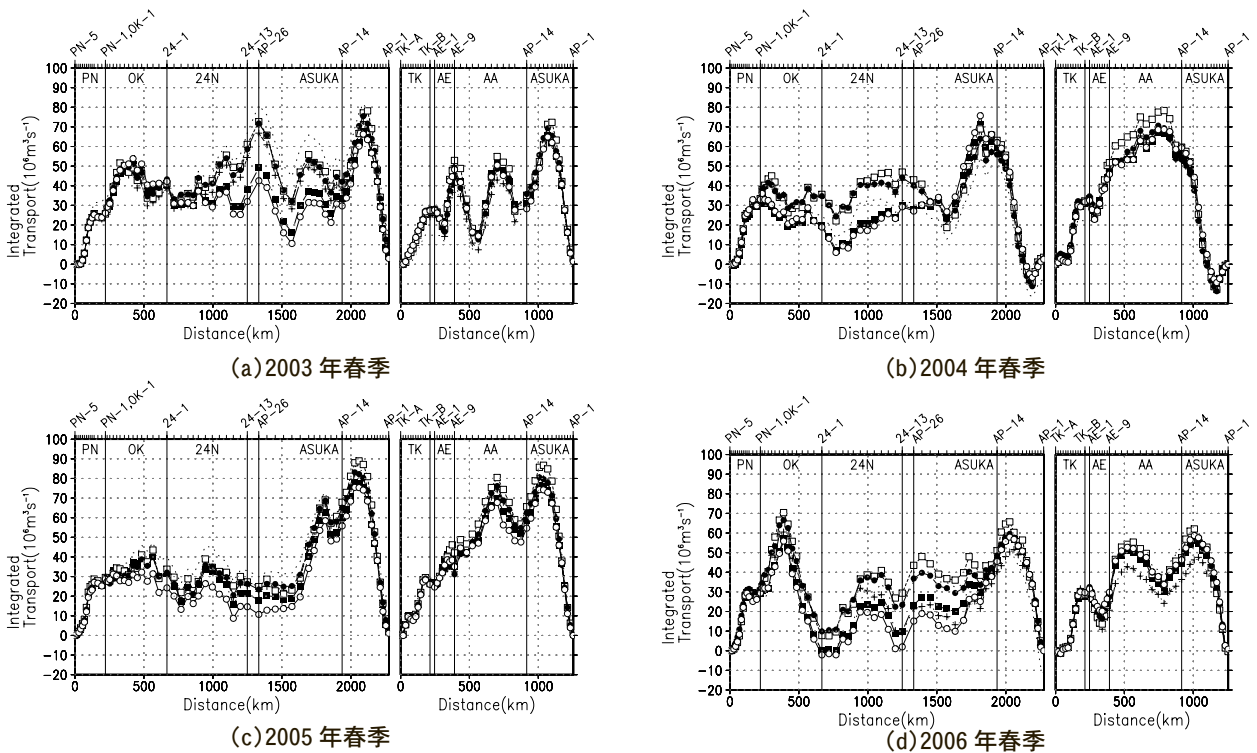
- ③ 海底付近までのデータで $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠で ADCP データを組み込んだ場合
- ④ 海底付近までのデータで $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠で ADCP データを組み込まなかった場合
- ⑤ 海底までのデータで海底準拠で ADCP データを組み込まなかった場合

の計 5 通りのインバース法による解析を行い、それぞれの解析結果より海面から 2000m 深における各測点間の流速から求めた流量の PN-5 と

TK-A からの積算値を第7図に示す。

2003年春季, 2005年春季及び2006年春季の航海では, 各解析結果に変動の量に差はあるものの, 流入と流出のパターンが変わるような大きな違いはみられなかった。しかし, 2004年春季の解析結果については, 2000×10⁴Pa までのデータで解析を行った場合(①, ②)と海底付近までのデータで解析を行った場合(③, ④, ⑤)に違いがみられた。すなわち, ADCP データを組み込んだ場合と組み込まなかった場合の差や基準面による違いによる差よりもどの深度まで解析を行ったかによる差の方が大きくなる結果となった。海面から海底付近までのデータを使用した場合(③, ④, ⑤)の解析結果では, OK線から ASUKA線の AP-24 付近にかけての海域で OK線の岸寄りを通る流れがあり, OK-4 付近から 24-13 付近

にかけて 40×10⁶m³s⁻¹ 前後で推移し, 24-13 から AP-24 にかけて流出する流れがあるため, AP-24 では 30×10⁶m³s⁻¹ 程度になっている。一方, 海面から 2000×10⁴Pa までのデータで解析を行った場合(①, ②)の結果では, OK線の岸寄りを通る流出するパターンになっており, 24-3 から流入するパターンに転じ, AP-24 で 30×10⁶m³s⁻¹ 程度になるという変化を示した。このようなパターンの違いに対する主な原因は, 沖縄南東の OK-2 から OK-4 における流れの違いがみられるため, 2000×10⁴Pa までのデータで解析した結果は, ほぼ南西向きの流れ(流出)であるのに対し, 海底までのデータで解析した結果は, 1000×10⁴Pa 以深の斜面に沿って北上する流れが大きく, 流入量が増える結果となったためである。もともと解析前の 2000×10⁴Pa 準拠の地衡流は, 南西向きの



第7図 海面～2000m 深における積分流量

2003年春季(a), 2004年春季(b), 2005年春季(c), 2006年春季(d)について海面から 2000×10⁴Pa までの流速で求めた流量の PN-5 及び TK-A からの積算流量。横軸は PN-5 及び TK-A からの積算距離。図中の○, ■, ●, + 及び□は, 次の5通りの解析結果を示す。

- : ①海面から 2000×10⁴Pa までのデータで 2000×10⁴Pa 準拠で ADCP データを使用した場合
- : ②海面から 2000×10⁴Pa までのデータで 2000×10⁴Pa 準拠で ADCP データを使用しない場合
- : ③海面から海底付近までのデータで 2000×10⁴Pa 準拠で ADCP データを使用した場合
- + : ④海面から海底付近までのデータで 2000×10⁴Pa 準拠で ADCP データを使用しない場合
- : ⑤海面から海底付近までのデータで海底準拠で ADCP データを使用しない場合

流れとなっており、 $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ までのデータだけではパターンを変えることができなかつたと考えられる。これまでの他の研究成果も踏まえると沖縄南東での北上流は中層に無視できない流れがあり、その流れは 2000m 以深に及ぶこともあるので深層までの観測は必要と考えられる。

4. 琉球海流系と黒潮の変動

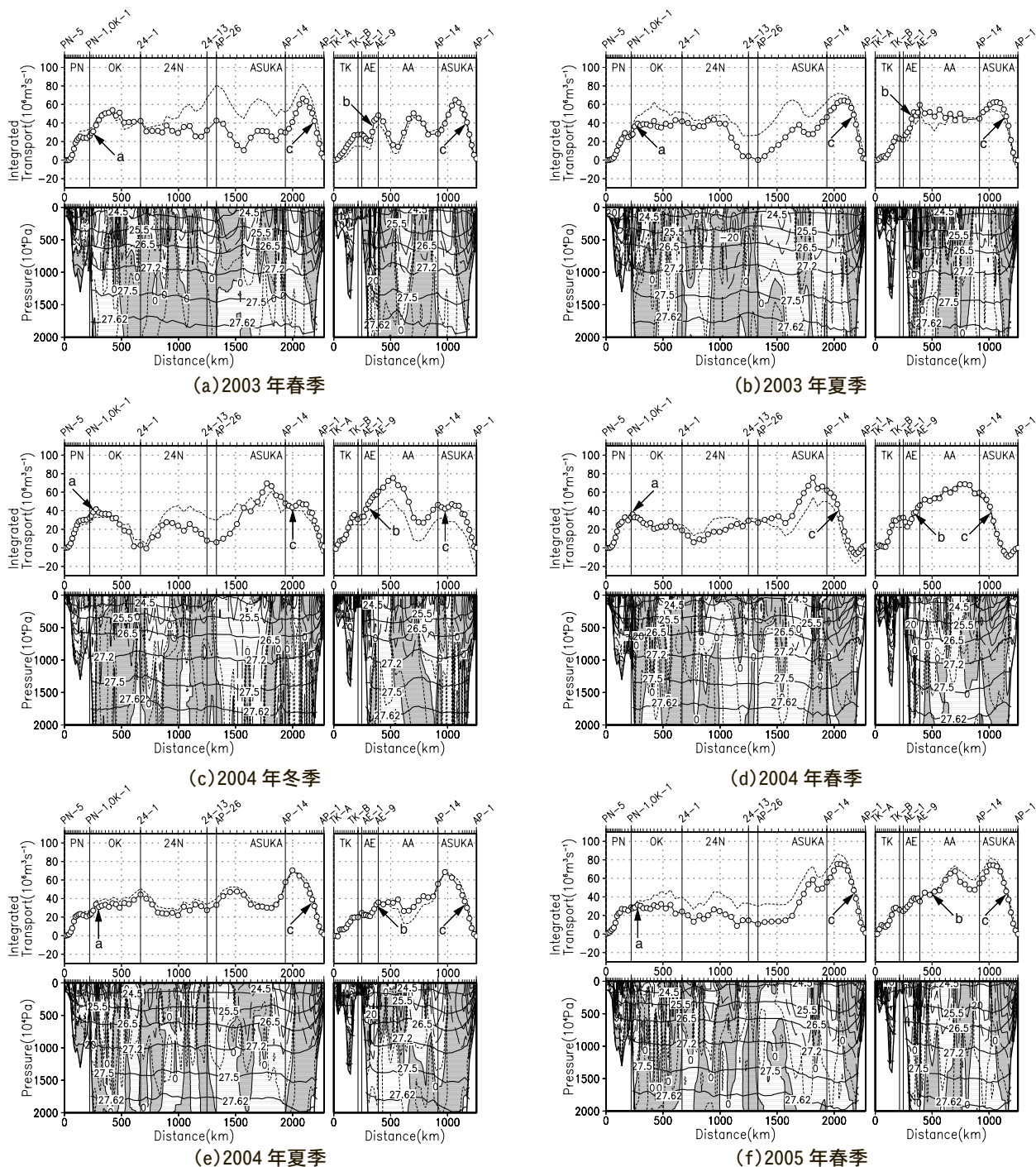
海面から $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ までのデータで $2000 \times 10^4 \text{Pa}$ を基準面として ADCP データを組み込んだインバース法による解析を行った 12 回の航海の解析結果を第 8 図に示す。TK 線での黒潮の流量についてみると、いずれの航海でも TK 線の黒潮流量が解析前と比べて同じか増える結果となった。海底地形の複雑な TK 線においては、これまで PN 線よりも少ない流量しか算出できないことが多かったが、インバース法による解析によってこれまで見積もられていなかった流量を引き出すことができたと考えられる。

奄美大島南東の AE 線では、航海ごとに範囲や流量の差がみられるものの、12 回の解析結果すべてで北上流が観測された。12 回の解析結果より各観測ラインにおける黒潮及び琉球海流系の流量を第 4 表に示す。琉球海流系の流量は、12 回の解析結果の平均で $13.6 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $6.6 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) であった。また、奄美大島南東の琉球海流系に流入する沖縄南東の北上流の平均は、 $6.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $3.7 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) であった。12 回の解析結果から得られた奄美大島南東の琉球海流系と沖縄南東での北上流の流量時系列を比較すると、琉球海流系の流量の方が常に多いが、変動傾向は同じである (第 9 図)。季節ごとに平均した琉球海流系の流量変動をみると、冬季と秋季の解析がそれぞれ 2 例と少ないが、冬季の流量の平均は、 $17.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $9.0 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) で、4 季節の中で一番多くなった。また、春季と夏季の流量の平均は、ともに $12.4 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (春季の標準偏差 $5.6 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 、夏季の標準偏差 $9.4 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) で、一番少なくなった。ただし、事例が少ないため、このような季節変動が平年と言えるかどうかについては、今後事例を増やした場合、変わる可能性がある。

PN 線での正味の黒潮流量は、12 回の解析結果の平均で $30.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $4.0 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) であった。また、TK 線での正味の黒潮流量は、平均で $28.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $3.9 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) であった。季節変動については秋季に PN 線と TK 線ともに最大でそれぞれ $32.7 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $5.6 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) と $30.3 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $4.2 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$)、夏季に PN 線と TK 線ともに最小でそれぞれ $28.7 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $5.6 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) と $26.2 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $5.7 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) であった。しかし、長崎海洋気象台で現業的に行っている客観解析による斜面部の外挿を行った水温と塩分データから $700 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠の地衡流計算により算出した PN 線での正味の黒潮流量の季節ごとの平年値は、夏季に最大で $27.2 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (1971 ~ 2000 年の平均)、秋季に最小で $24.2 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (1972 ~ 2000 年の平均) となる変化を示しており、Ichikawa *et al.* (2000) は、1981 ~ 1992 年の PN 線の海洋データより、正味の黒潮流量を、夏季に最大で $28.5 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 、冬季に最小で $14.2 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ と見積もっている。これらの結果と今回の解析結果に差がみられるが、観測期間が違う上に、春季と夏季の解析事例がそれぞれ 4 回、冬季と秋季の解析事例がそれぞれ 2 回と元々少ないため琉球海流系の場合と同様に、今後事例を増やした場合、変動の特徴が異なってくる可能性はある。

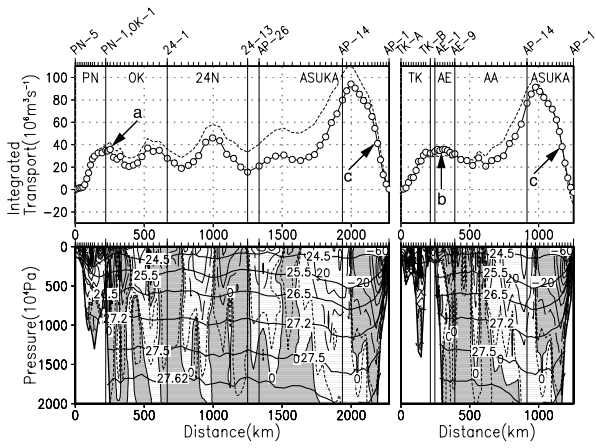
インバース法による解析結果より PN 線の黒潮と琉球海流系の流量変動を比較すると、2003 年から 2005 年の 8 回の観測での相関係数は -0.6 と逆相関の傾向を示したものの、2006 年の 4 回の観測では相関係数は -0.2 と低い相関を示した (第 10 図)。また、12 回全部の観測での相関係数は -0.4 で、両者の変動に関係があるかどうかは、今回の解析結果からは認められなかった。

12 回の解析結果より求めた平均的な黒潮と琉球海流系の流量についてまとめたものを第 11 図に示す。東シナ海では、 $30.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の黒潮が流れ、 $28.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の流量がトカラ海峡から太平洋に流れている。沖縄南東からは $6.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の北上流量が琉球海流系へと通じており、奄美大島南東で $13.6 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の流量が琉球海流系の北

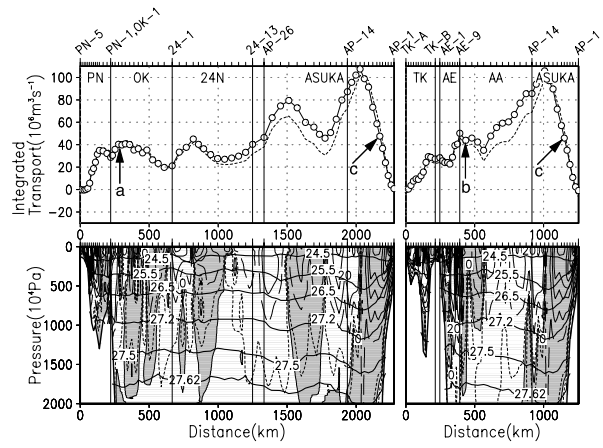


第 8 図 2003 ~ 2006 年の 12 回の航海における積分流量及び流速断面図

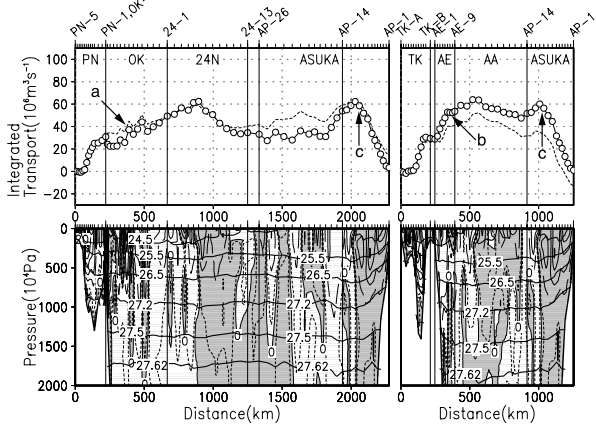
各航海における PN-5 からの積分流量 (左上) と TK-A からの積分流量 (右上). 実線がインパース法による解析結果, 点線が解析を行わない場合の結果を示す. (下) 流速断面図. ボックスに入る向きを正で, ボックスから出る向きを負 (灰色で表示) で表す. 流速は, 実線で 20cm s^{-1} 間隔に表示し, 長破線は 10cm s^{-1} 及び -10cm s^{-1} の, 短破線は 2cm s^{-1} 及び -2cm s^{-1} の値を示す. 太線は解析に使用したポテンシャル密度 σ_θ の等密度面を表す. 図中 a, b, c は第 3.1 節と同様に求めた異なる水塊の境界を示している. a での積分流量と PN-1 での積分流量の差が沖縄南東での北上流の流量, b での積分流量と TK-B での積分流量の差が奄美大島南東の琉球海流系の流量, c での積分流量と AP-1 での積分流量の差が四国沖での黒潮の流量にそれぞれ相当する. 横軸は PN-5 及び TK-A からの積算距離.



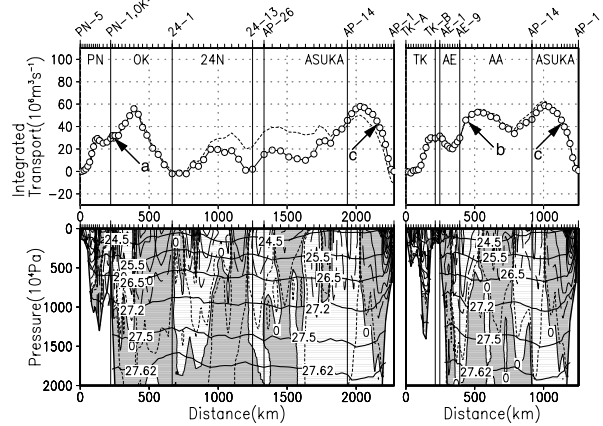
(g) 2005 年春季



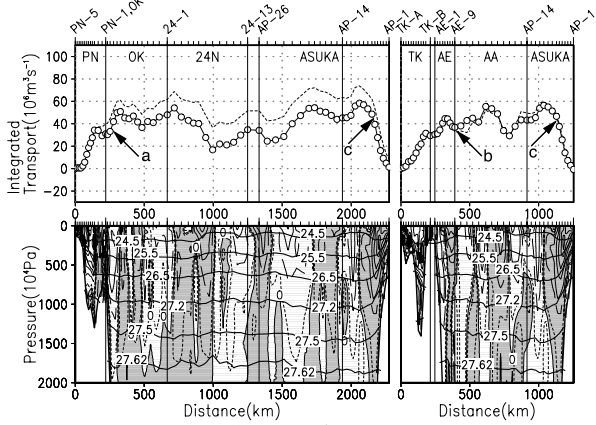
(h) 2005 年秋季



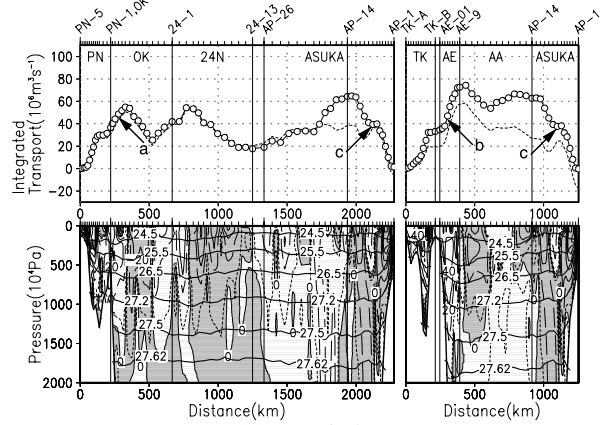
(i) 2006 年冬季



(j) 2006 年春季



(k) 2006 年夏季



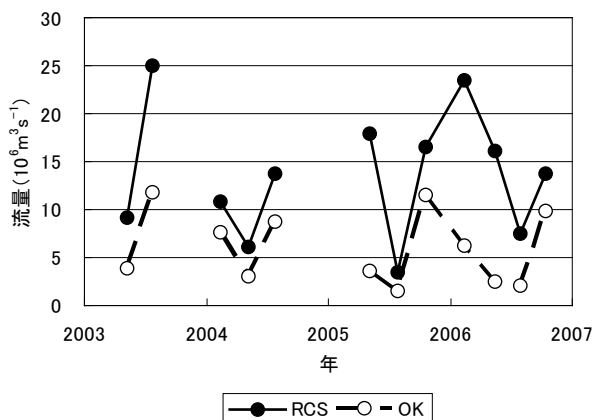
(l) 2006 年秋季

第8図 つづき

第4表 黒潮及び琉球海流系の平均流量

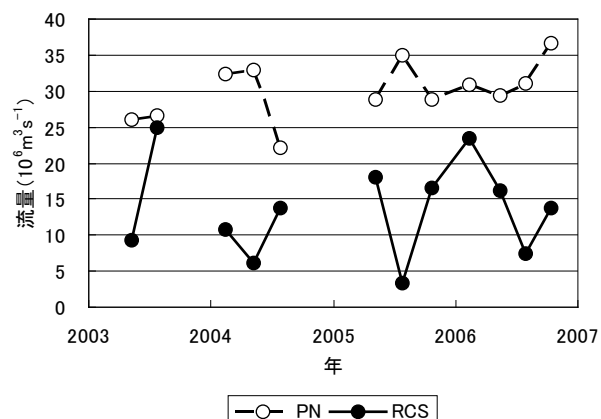
各観測ラインを通過する黒潮及び琉球海流系の12回(2003~2006年)の航海の平均流量と各季節の平均流量($10^6\text{m}^3\text{s}^{-1}$)。値には、±で標準偏差を付した。

	黒潮			琉球海流系	沖縄南東の北上流
	PN	TK	ASUKA	AE	OK
12航海の平均	30.1±4.0	28.1±3.9	42.2±5.6	13.6±6.6	6.1±3.7
冬季	31.7±1.1	30.1±1.0	48.7±9.3	17.1±9.0	7.0±1.0
春季	29.3±2.8	28.0±2.6	39.9±2.4	12.4±5.6	3.3±0.6
夏季	28.7±5.6	26.2±5.7	41.3±5.5	12.4±9.4	6.0±5.0
秋季	32.7±5.6	30.3±4.2	42.3±6.3	15.2±2.0	10.7±1.3



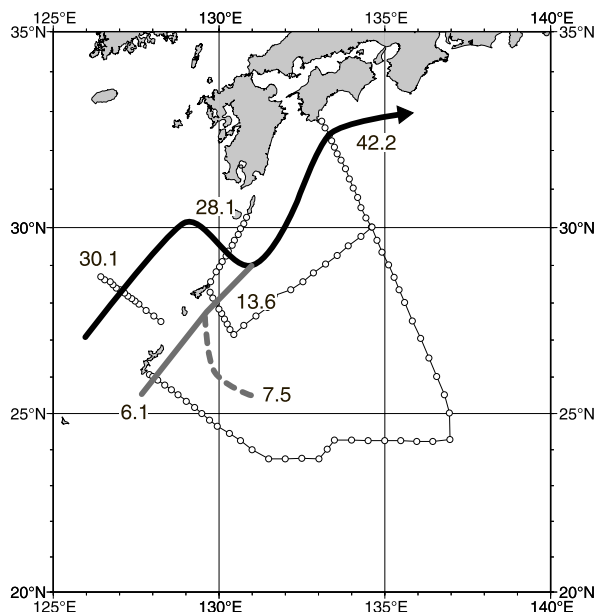
第9図 奄美大島南東の琉球海流系の流量と沖縄南東の北上流の時系列

実線は奄美大島南東の琉球海流系(RCS: Ryukyu Current System)の流量を、点線は沖縄南東(OK線)の北上流の流量をそれぞれ示す。



第10図 琉球海流系と東シナ海の黒潮の時系列

実線は奄美大島南東の琉球海流系(RCS)の流量、点線は東シナ海(PN線)の黒潮の流量をそれぞれ示す。ともにインパース法による解析の結果。



第11図 2003~2006年の12回の航海での解析結果から求めた黒潮と琉球海流系の平均流量の概略
図中の数字は、PN線、TK線、ASUKA線での黒潮、AE線での琉球海流系、OK線での沖縄南東の北上流及び琉球海流系に流入する本州南方の黒潮再循環の流量($10^6\text{m}^3\text{s}^{-1}$)。

上流として流れている。沖縄南東の北上流と琉球海流系の流量の差は、本州南方の黒潮再循環の流れ($7.5 \times 10^6\text{m}^3\text{s}^{-1}$)と考えられる。その後、琉球海流系の流れは、トカラ海峡からの黒潮と合流して四国沖での黒潮の流量は $42.2 \times 10^6\text{m}^3\text{s}^{-1}$ となり、東に流れるという結果になった。

次に12回の航海の解析結果より得られた各測点での積分流量の平均を流線関数として第12図に示す。この図から平均的な流れとして、約 $28 \times 10^6\text{m}^3\text{s}^{-1}$ の流量が東シナ海からトカラ海峡を抜けた後、四国沖へと流れていることが分かる。また、沖縄南東からは約 $7 \times 10^6\text{m}^3\text{s}^{-1}$ の北上する流れが、奄美大島南東の琉球海流系の流れに通じており、約 $18 \times 10^6\text{m}^3\text{s}^{-1}$ の琉球海流系の流れが四国沖へと流れていることが分かる。さらに、ASUKA線の北緯31度付近を中心として四国沖暖水渦の約 $16 \times 10^6\text{m}^3\text{s}^{-1}$ の流れがみられ、四国沖暖水渦の南側には西向きの流れが存在している。そして、その西向きの流れの一部が奄美大島南東の琉球海流系への流れに通じているのが分かる。

5. PN線及びTK線での黒潮流量

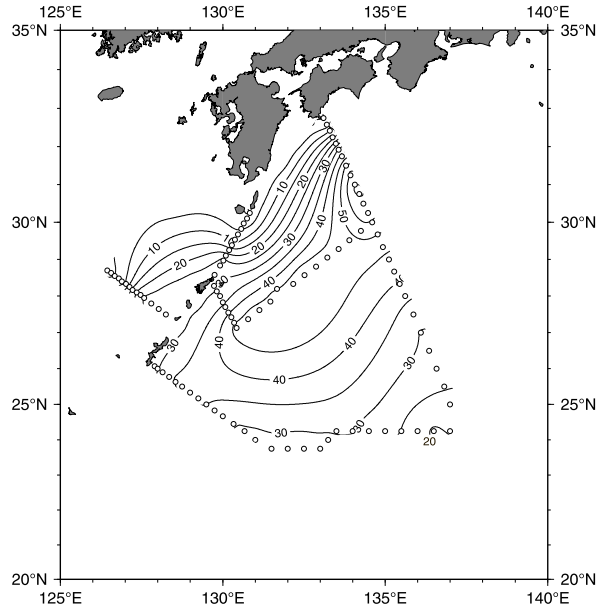
長崎海洋気象台では、航海ごとにPN線とTK線において水温と塩分データの客観解析による斜面部の外挿を行い、 $700 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠の地衡流計算により黒潮流量を算出してきた。この $700 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠の正味の黒潮流量とインバース法による解析結果より得られた海面から $700 \times 10^4 \text{Pa}$ までの正味の黒潮流量の比較を行った(第13図)。なお、ここでいう正味の黒潮流量とは、PN線では北東向きの流量から南西向きの流量を差し引いた流量、TK線では南東向きの流量から北西向きの流量を差し引いた流量をいう。

解析を行った12回の航海で、PN線での正味の黒潮流量は、インバース法による解析結果の平均で $30.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $3.5 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$)、 $700 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠の地衡流計算の平均で $25.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $4.4 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) であった。多くの航海でインバース法による解析結果の方が $700 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠の黒潮流量より大きく、平均で $5.0 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (約1.2倍) 増加している。また、TK線においても、インバース法による解析結果の平均は $28.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (標準偏差 $3.8 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) で、 $700 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠の黒潮流量(平均 $22.0 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 、標準偏差 $5.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) より平均で $6.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (約1.3倍) 増加している。PN線とTK線におけるインバース法による解析結果の黒潮流量と $700 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠の黒潮流量との相関係数は、PN線で約0.4、TK線で約0.1と低く、相関がみられなかった。

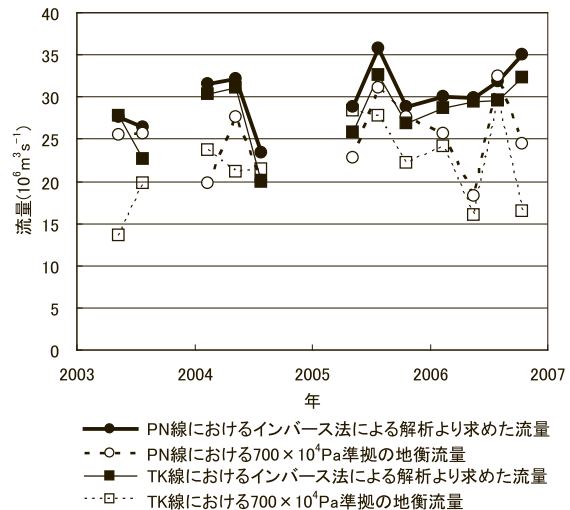
6. まとめと考察

本解析を行った海域は、黒潮という強い流れが存在し、さらに中規模渦の伝播があるなど、変化の激しい海域である。また、解析を行ったボックスでは、九州の西側や奄美大島から沖縄本島にかけての海域などすきまが存在する。このように時間的にも空間的にも閉じたボックスを組むことが難しい海域ではあるが、12航海についてインバース法による解析を行った結果、第12図のような平均的な流れの分布を求めることができた。

今回の解析では、塩分やポテンシャル渦度など水塊の性質の違いから黒潮や琉球海流系の流



第12図 2003～2006年の12回の航海での解析結果から求めた積分流量を平均した流線関数平面図
コンター間隔は $5 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 。



第13図 PN線とTK線における黒潮流量の時系列
インバース法による解析で得られた海面から $700 \times 10^4 \text{Pa}$ までの正味の黒潮流量と最適内挿法を用いた客観解析によって斜面部を外挿したデータに基づく $700 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠の地衡流計算による正味の黒潮流量。PN線については北東向きの流量から南西向きの流量を差し引いた流量、TK線については南東向きの流量から北西向きの流量を差し引いた流量を正味の黒潮流量とした。

れの範囲を決め、その流量を見積もった。この方法による黒潮の12航海の平均流量は、PN線で $30.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 、TK線では $28.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 、ASUKA線では $42.2 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ と見積もられ、沖縄南東での北上流は $6.1 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 、奄美大島南東の琉球海流系の流量については $13.6 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ と見積もることができた。これは、流れの範囲の決め方について、単純に水塊特性の違う二つの測点の中間で分けてしまうといった方法で求めた値ではあるが、Ichikawa *et al.* (2004) による奄美大島南東での琉球海流系の平均流量 $16 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ に近い値を示しており、琉球海流系の流量を見積もる方法としては一定の成果があったと考えられる。しかし、この方法では、ボックスにおける水塊の出入りのバランスは崩れることが多く、正確に見積もることはやはり難しい。より正確な見積もり方を検討する必要があると思われる。

次に、今回の解析結果から黒潮と琉球海流系の熱輸送量について考察した。観測ラインを通過する熱輸送量 H は、

$$H = \iint \rho C_p \theta u dx dz$$

で定義される。 ρ は海水の現場密度、 C_p は海水の熱容量、 θ はポテンシャル水温、 u は流速である。座標軸 x と z は、それぞれ観測ラインに沿った軸と鉛直方向の軸である。単位容積当たりの海水の熱容量 ρC_p を一定 ($4.1 \times 10^6 \text{Jm}^{-3} \text{K}^{-1}$) と近似して (市川・ASUKAグループ, 1998; Ichikawa and Chaen, 2000)、各観測ラインにおける黒潮及び琉球海流系の熱輸送量を見積もった結果を第5表に示す。黒潮による12航海の平均の熱輸送量は、PN線で2.29PW (1PW = 10^{15}W)、TK線で2.09PW、ASUKA線で2.76PWとなった。また、沖縄南東での北上流による熱輸送量は0.35PWで、奄美大島南東の琉球海流系による熱輸送量は0.70PWであった。沖縄南東よりも下流側である奄美大島南東の熱輸送量が約2倍に増えており、約50%の熱量が東方(内部領域側)から供給されていると考えられる。

Nagano *et al.* (2007) は、2002年の3回の奄美大島から沖縄本島の南東海域で行った海洋観測の

第5表 黒潮及び琉球海流系の平均熱輸送量

各観測ラインを通過する黒潮及び琉球海流系の12回(2003~2006年)の航海の平均熱輸送量と各季節の平均熱輸送量(PW)。値には、±で標準偏差を付した。

	黒潮			琉球海流系	沖縄南東の北上流
	PN	TK	ASUKA	AE	OK
12航海の平均	2.29±0.33	2.09±0.31	2.76±0.34	0.70±0.43	0.35±0.25
冬季	2.19±0.12	2.04±0.08	2.86±0.36	1.01±0.41	0.35±0.07
春季	2.16±0.16	2.06±0.17	2.47±0.18	0.57±0.32	0.17±0.04
夏季	2.36±0.48	2.07±0.53	2.91±0.27	0.64±0.64	0.39±0.35
秋季	2.54±0.39	2.25±0.22	2.96±0.58	0.77±0.13	0.63±0.11

結果、琉球海流系の流速構造が $26 \sigma_\theta$ 面の上層と下層の2層に分けられることを指摘し、上層の流れに内部領域からの流れが加わることで、沖縄南東での北東向きの流れよりも奄美大島南東での北東向きの流れは増加しており、40%以上の流量が、東方から奄美大島南東での流れに供給されていることを示し、下層の流れについては、沖縄南東からの流れのみで、東方からの流れには影響されていないことを示している。さらに、上層では東方からの暖水の移流によって熱がもたらされており、沖縄南東での北上流の水温に比べ、奄美大島南東での北上流の水温が平均 0.5°C 上昇していることを示している。今回の12航海の解析においても奄美大島南東の琉球海流系の流量及び熱輸送量についてみると、沖縄の南東の北上流のほかに東方からの供給がみられる結果となった。ただし、奄美大島南東での琉球海流系の流れにおいて上層と下層に恒常的な違いがみられるかどうかについては、今回の解析では検証を行っておらず、今後検証を行う必要があると考えられる。

PN線とTK線のインバース法による解析結果による黒潮流量と、長崎海洋気象台で現業的に $700 \times 10^4 \text{Pa}$ 準拠の地衡流で見積もった黒潮流量との比較においては、多くの場合、インバース法による解析結果の方が大きな値となったが、両者に相関が無く、過去の流量を再評価するような方法をみいだすことはできなかった。

第12図をみると、ASUKA線のAP-16から24N線の24-12の測点ではボックス(BOX1, BOX3)に流入する西向きの流れが存在し、一部は琉球海流系の流れとして四国沖の黒潮の流れに取り込まれ、また一部はOK線のOK-7から24N

線の 24-12 の測点でボックスの外へと流れている。沖縄南東での北上流については、この OK 線の OK-7 から 24N 線の 24-12 の測点で流出した流れの一部が再び北上したものである可能性は否定できない。また、ASUKA 線の南部分での流入する流れの起源が、ASUKA 線より東の黒潮下流域からの再循環であると考えた場合、日本の南での海域における海洋の循環の強度を監視する上で特に PN 線－OK 線－24N 線－ASUKA 線で囲まれた海域を観測することは今後有効であると考えられる。

参 考 文 献

- 市川洋・ASUKA グループ (1998) : 東シナ海および四国南方の黒潮によって運ばれる熱量と塩分量。海と空, **74**, 51-61.
- Ichikawa, H. and R. Beardsley (1993) : Temporal and spatial variability of volume transport of the Kuroshio in the East China Sea. *Deep-Sea. Research*, **40**, 583-605.
- Ichikawa, H. and M. Chaen (2000) : Seasonal variation of heat and freshwater transports by the Kuroshio in the East China Sea. *J. Mar. Sys.*, **24**, 119-129.
- Ichikawa, H., H. Nakamura, A. Nishina and M. Higashi (2004) : Variability of northeastward current southeast of northern Ryukyu Islands. *J. Oceanogr.*, **60**, 351-363.
- Imawaki, S., H. Uchida, H. Ichikawa, M. Fukasawa, S. Umatani and the ASUKA Group (2001) : Satellite altimeter monitoring the Kuroshio transport south of Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 17-20, 2001.
- Kawabe, M. (1995) : Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander. *J. Phys. Oceanogr.*, **25** (12) , 3103-3117.
- 児玉裕樹・金子郁雄 (2004) : インバース法を用いた黒潮ネット地衡流量決定の試み。測候時報, **71**, 特別号, S149-S160.
- Nagano, A., H. Ichikawa, T. Miura, K. Ichikawa, M. Konda, Y. Yoshikawa, K. Obama and K. Murakami (2007) : Current system east of the Ryukyu Islands. *J. Geophys. Res.*, **112**, doi : 10.1029/2006JC003917.
- Roemmich, D. (1983) : Optimal estimation of hydrographic station data and derived fields. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 1544-1549.
- Wunsch, C. (1978) : The North Atlantic general circulation west of 50°W determined by inverse methods. *Rev. Geophys.*, **16**, 583-620.
- Zhu, X.-H., I.-S. Han, J.-H. Park, H. Ichikawa, K. Murakami, A. Kaneko and A. Ostrovskii (2003) : The northeastward current southeast of Okinawa Island observed during November 2000 to August 2001. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi : 10.1029/2002GL015867.
- Zhu, X.-H., J.-H. Park and I. Kaneko (2006) : Velocity structures and transports of the Kuroshio and the Ryukyu Current during fall of 2000 estimated by an inverse technique. *J. Oceanogr.*, **62**, 587-596.