

南極定常観測における東経150度線の海洋観測結果について

木下 秀樹：海洋研究室（第43次南極地域観測隊）

及川 幸四郎：航法測地室（第37, 38次南極地域観測隊）

Results of Routine Oceanographic Observations by Japanese Antarctic Research Expeditions along 150E line in the Southern Ocean

Hideki KINOSHITA : Ocean Research Laboratory (43rd Japanese Antarctic Research Expedition)

Koshiro OIKAWA : Geodesy and Geophysics Office (37th and 38th Japanese Antarctic Research Expedition)

1 はじめに

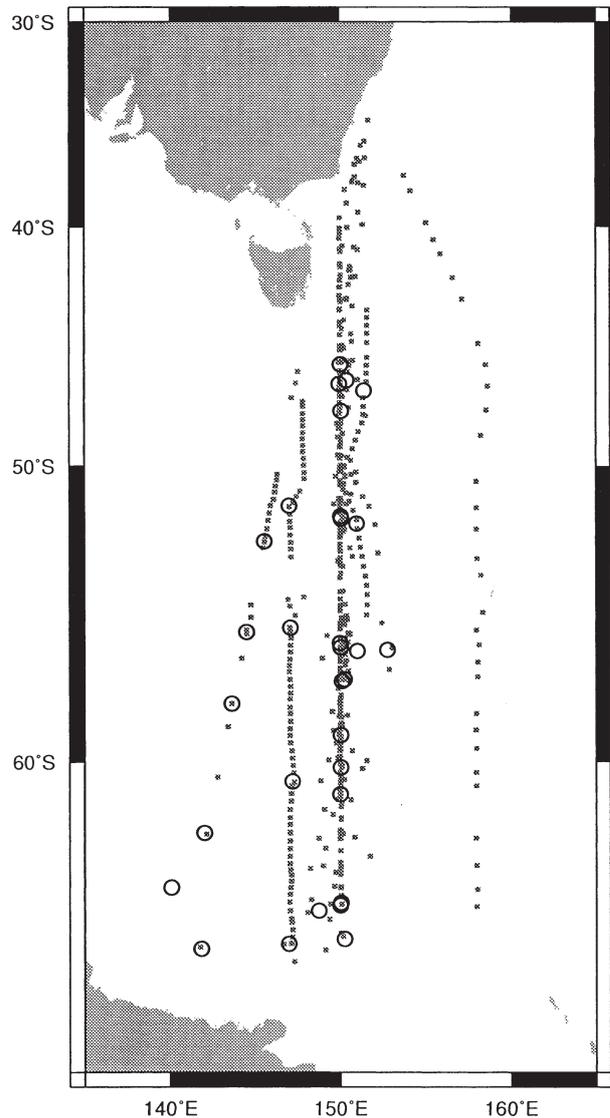
日本南極地域観測隊（JARE）による海洋観測は、1965年に定常観測として本格的に開始された。日本と昭和基地の間を往復する航路上で実施する海洋観測は、当初、南極海インド洋セクターが中心であったが、1987年（第29次南極地域観測隊：JARE29）以降は、復路において、南緯60度付近の東航航路上及び東経150度付近の北上航路上へと観測線を変更し、現在に至っている。

南極海は、現在も世界の海洋の中で観測データの最も希薄な海域であり、いまだに海洋構造が明らかになっていない海域がある。こうした現状から、JAREは海洋物理、海洋化学観測を定常観測として、基礎データの整備を図っている。しかし、東経150度線付近の各層観測は、南緯65度から南緯42度の間において、例年3から5測点しか実施していないため、空間的に詳細なデータが得られているとは言い難いのが実状である。そのため、今後のJAREにおいても更なるデータの収集と蓄積を行うこととしている。

本報告では、JARE29以降これまでに東経150度線付近の北上航路上で実施された観測の成果をまとめた。以後本文中では、日本南極地域観測の各隊次をJARE ○○として表記する。

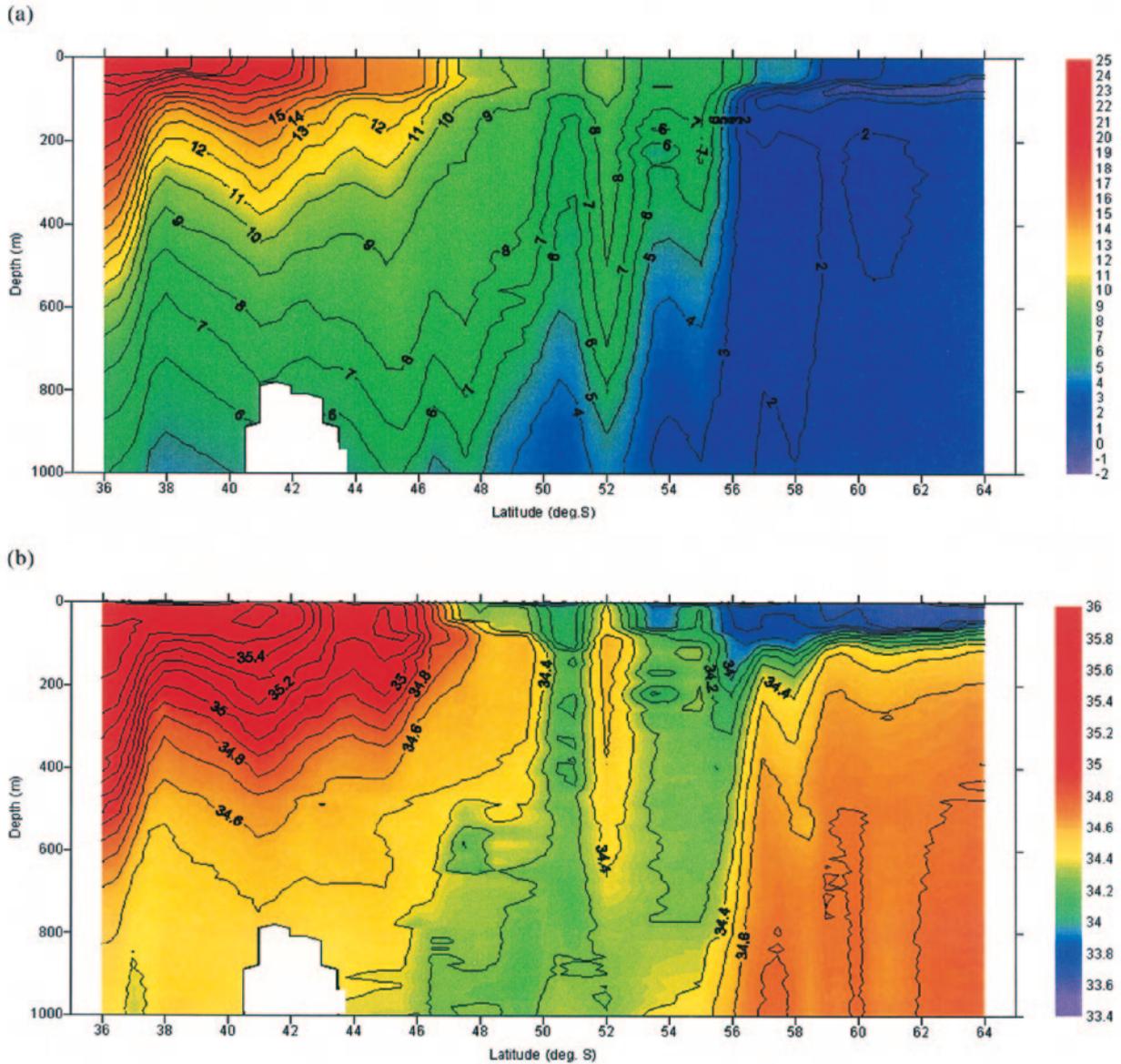
2 使用したデータ

第1図に JARE29から JARE43 (2001-2002年) の



第1図 日本南極地域観測隊による東経150度線付近の全観測点図。・は、XBT/XCTD 観測点。○は、CTD 観測点。

Fig. 1 Map of observed stations near 150E by Japanese Antarctic Research Expedition. Dots indicate XBT/XCTD stations. Circles indicate CTD stations.



第2図 JARE43のXCTD観測結果による東経150度線に沿った(a)水温及び(b)塩分鉛直断面図。
 Fig. 2 Vertical sections of (a) temperature and (b) salinity along 150E, which are measured with XCTD in JARE43.

東経150度線付近における、CTD各層観測、XBT及びXCTD観測点を示す。各層観測の採水分析項目は、塩分、溶存酸素量(DO)、pH、栄養塩類(リン酸塩:PO₄-P、ケイ酸塩:SiO₂-Si、硝酸塩:NO₃-N、亜硝酸塩:NO₂-N、アンモニア:NH₄-N)である。東経150度線付近の観測は、南極地域での観測行動の最後、シドニー入港前に実施しているため、観測時期は例年3月中旬と固定されている。隊によっていくらかのバラツキはあるものの、東経150度線付近における観測は定常的に蓄積されてきている。

本報告においては、東経150度線付近の表層の海洋

構造、前線の位置等検出のためにJARE29~JARE43によるXBT及びXCTD観測データを使用した。また、化学成分の比較のためにJARE31(1989-1990年)、JARE34(1992-1993年)~JARE38(1996-1997年)の各層観測データを、南極周極流の流量計算のためにJARE35(1993-1994年)~JARE43のCTD観測データを使用した。

3 表層の水温塩分構造とフロント位置

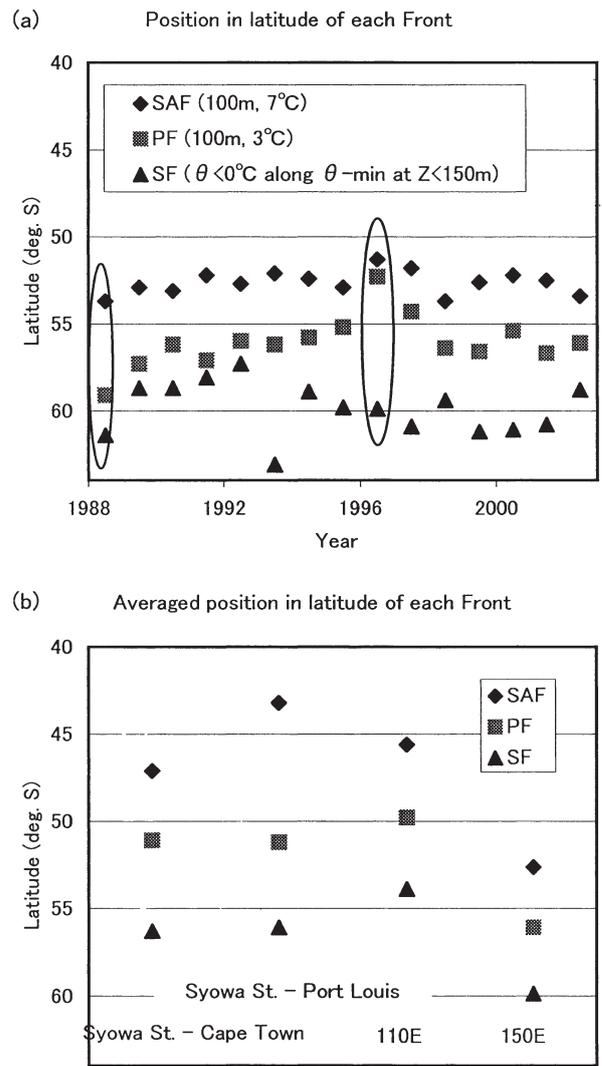
各隊による海洋観測結果はデータレポート(Takahashi *et al.*, 2002; Shimazaki and Nakauchi, 2002; Masuyama and Shimizu, 2002等)としてま

とめられ、XBT 観測等による水温鉛直断面図も掲載されているため、ここでは全てを再掲することはない。代表として、本報告執筆時点で最新の観測である JARE43 の XCTD 観測による水温、塩分の鉛直断面図を第 2 図に示す。

第 2 図(a)の水温鉛直断面によれば、南極大陸氷縁から続くと考えられる中冷構造は南緯57度付近まで張出し、その北に南北径が150~200km程の渦状の構造が複数存在し、さらに北の亜熱帯系の海洋構造へと遷移している様子が捉えられている。第 2 図(b)の塩分鉛直断面によれば、大陸側の中冷コア以深には 34.5psu 以上の比較的高塩分の水塊が存在するが、北に向かうと南緯56度付近において等塩分線がほぼ鉛直となり強いフロントを形成している。こうした、水温塩分の分布は例年の観測においてほぼ同様である。

第 3 図に Nagata *et al.* (1988) の指標水温を使用して検出した東経150度線付近の水温フロント (Sub-Antarctic Front (SAF) : 水深100m で 7℃, Polar Front (PF) : 水深100m で 3℃) 及び Orsi *et al.* (1995) の指標水温を使用して検出した東経150度付近の southern ACC Front (150m 以浅において 0℃ 以下の北限) の位置をまとめた。第 3 図(a)は、15年間の変化をプロットしたものであり、第 3 図(b)は、東経150度付近の各水温フロントの15年間の平均位置及び Nagata *et al.* (1988) によって過去の南極地域観測資料よりまとめられた南極海インド洋セクターの水温フロントの平均位置を示した。なお、第 3 図(a)中、楕円印を付した JARE29 及び JARE37 は観測線の経度が他の年と異なっているため、経年変化の議論には注意が必要である。JARE29 では観測線は東寄り (東経158度), JARE37 では観測線は西寄り (東経144~146度付近) であり、それぞれ PF が他の年と比較して南寄り及び北寄りであった。

第 2 図(b)の塩分鉛直断面図に見られる上記の塩分フロントの位置は、第 3 図(a)によれば PF であることがわかる。こうした一致は、十分な XCTD 観測が実施された第39, 40, 42次隊の結果においても同様であり、PF が極表層以深においては非常に強い塩分フロントで特徴づけられていることを示してい



第 3 図 XBT / XCTD 観測結果より Nagata *et al.* (1988) 及び Orsi *et al.* (1995) の水温指標を使用して検出した各水温フロントの位置。(a) JARE29~JARE43, 東経150度線付近の各フロントの位置。(b)東経150度線付近の各フロントの平均位置及び南極海インド洋セクターにおける各フロントの平均位置 (Nagata *et al.* (1988)).

Fig. 3 Positions in latitude of temperature Front found in results of XBT/XCTD with temperature index, which is introduced by Nagata *et al.* (1988) and Orsi *et al.* (1995). (a) Positions in latitude of each Front near 150E in JARE29-JARE43. (b) Mean position in latitude of each Front near 150E and in Indian Ocean sector of Southern Ocean (Nagata *et al.* (1988)).

る。

第3図(b)において、南極海インド洋セクターと東経150度付近の各水温フロントを比較すると、東経150度付近では、各フロントは全体に南極大陸に近い位置にあった。

4 採水分析結果から見た海洋構造の特徴

JARE31, JARE34~JARE38によって実施された各層観測資料を用いて、各採水分析成分とフロント等の海洋構造の特徴を記述するため、採水分析結果を東経150度線付近のフロント位置で整理し、 θ -Sダイアグラム及び各採水成分の鉛直プロファイルを描いた(第4図)。

(1) T-S ダイアグラム

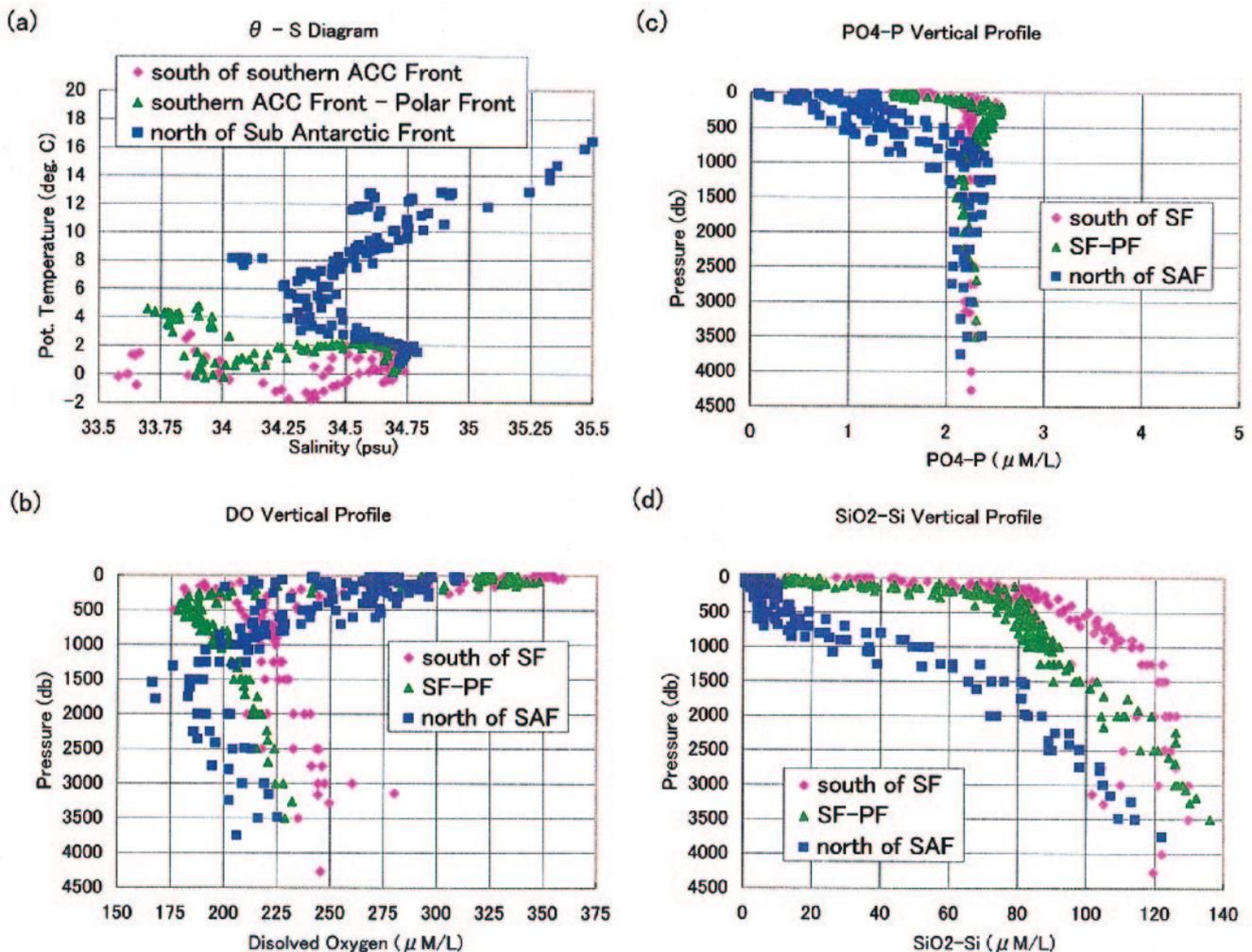
第4図(a)によれば、southern ACC Front 以南に見られる中冷水において水温0℃以下の塩分は、約34.0psu~34.5psuの塩分濃度を示している。中冷水以深の深層では最大34.69psuまで高塩分化し、水温も0度以下の南極底層水がみられた。

southern ACC Front-PF間では、表層から中冷水にかけての塩分が34psu以下と比較的薄く、中冷水が最も深くまで浸透していた。

SAF以北では、中層において最小約34.2psuと塩分極小を示す南極中層水がみられた。なお、最北の観測点では、表層で34.9~35.0と高塩分を示した。

(2) DO 鉛直プロファイル

第3図(b)によれば、PF以南の表層で南極表層水が315~360 μ M/Lと高酸素濃度を示している一方



第4図 (a)ポテンシャル水温-塩分ダイアグラム並びに(b)溶存酸素, (c)リン酸塩濃度及び(d)ケイ酸塩濃度の鉛直プロファイル。プロット点の印は、フロント位置による海域分けに従って整理した。

Fig. 4 (a) θ -S diagram and vertical profiles of (b) DO, (c) PO₄-P and (d) SiO₂-Si.

Marks in each diagram and profiles are plotted in accordance with the areas in which observation stations are divided by positions of each front.

で、中冷水以深の DO は $250\mu\text{M/L}$ 以下と非常に薄く、この海域が湧昇域であることと対応している。SAF の北では、表層の水温が上昇するに従って、DO は次第に減少し、最北部の観測点では、 $175\sim 230\mu\text{M/L}$ であった。

(3) $\text{PO}_4\text{-P}$ 及び $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 鉛直プロファイル

$\text{PO}_4\text{-P}$ は、約 1500m 以深で $2.1\sim 2.6\mu\text{M/L}$ であった。表層では、鉛直プロファイルは各フロントによって明確に区分されていた。PF の南の表層では、ほとんど $1.5\mu\text{M/L}$ 以上の濃度を示し、SAF の北の表層では、水温上昇とともにリン濃度は線形に減少する傾向となっていた。

$\text{SiO}_2\text{-Si}$ は、 $\text{PO}_4\text{-P}$ と同様に深層で高濃度、表層で低濃度である。鉛直プロファイルは、各フロントによってその性質が明確に区分され、PF 以南では、表層から中層にかけて $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 濃度が急激に増大し、この海域が湧昇域であることと対応している。

5 南極周極流の地衡流量

(1) 地衡流量の地理的分布

JARE39以降、毎年実施している XCTD 観測は、CTD 観測と比較して観測精度及び観測可能水深 (XCTD は 1000m まで) が劣るものの、格段に高密度の観測を実施することを可能とした。そこで、JARE39～JARE43の XCTD 観測結果から、計測最深層を基準とした東経 150 度付近の東向き地衡流量の分布を緯度 1 度間隔で計算した (第 5 図)。

XCTD 観測開始当初はコンバータの性能等の制約から、水深 $700\sim 800\text{m}$ 以深のデータが取得できないケースが多く、JARE39及び JARE40の地衡流量の計算は、水深 700m を基準とせざるを得なかった。また、JARE40及び JARE41では、荒天のために XCTD 観測を実施できなかった区間について流量計算を行っていない。

第 5 図によれば、南極周極流の東向き流量が特に大きかったのは、各フロント位置に対応する緯度帯であった。各年で最大流量が計算された緯度帯は、JARE42では SAF 近傍、それ以外では PF 近傍であった。また、各フロントの間もしくは隣の緯度帯においては西向きの反流が見られた。特に、JARE43

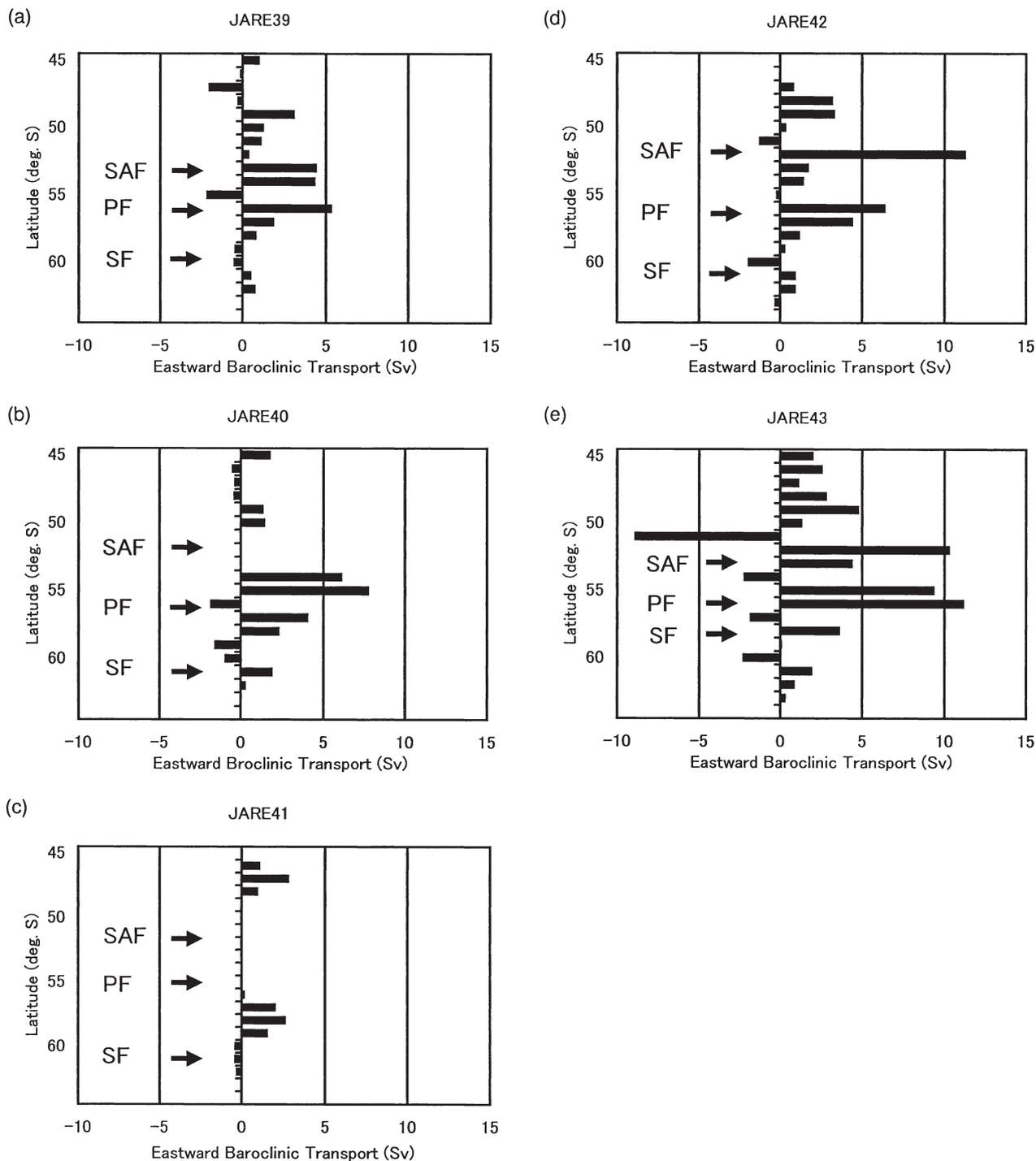
の南緯 $51\sim 52$ 度では、西向き流量が約 9 Sv であり、南緯 $52\sim 53$ 度における東向き流量約 11 Sv と対になって、第 2 図(a)にある当該海域付近に存在する渦状の構造との良い対応を示していた。

(2) 東経 150 度線を横切る全地衡流量

南極周極流の全地衡流量については、これまでの研究において様々な値が報告されてきた。菱田と西田 (1975) は、1965年から1974年の JARE の各層観測資料を用いてインド洋セクターにおける南極周極流の地衡流量を計算し、 2500db 基準で 100 Sv 、 3000 db 基準では平均約 140 Sv であることを示した。Orsi *et al.* (1995) は、過去に南極海で実施された13例の観測断面で 3000m 又は最深層を基準に計算した結果、その平均値が 97 Sv であること、また、南緯 30 度以南における過去のあらゆる観測データを使用してドレーク海峡を挟む南岸から北岸までの 3000m 基準の地衡流量を計算した結果が約 100 Sv であったこと等を示した。

本報告では、JARE の東経 150 度線付近の観測が例年ほぼ同じ観測線を維持していることから、CTD 観測結果をもとに各年の地衡流量を計算し、各年の流量の変化を示すことを試みた。第 1 表は、JARE-35～JARE43において実施された東経 150 度線付近の CTD 最北観測点及び最南観測点のデータから計算した東向き地衡流量をまとめたものである。地衡流計算は、 $3,000\text{db}$ 若しくは観測最大水深を基準として行った。機器故障により CTD 観測が実施されなかった JARE41並びに観測最大水深及び観測点間隔が全く不十分であったため地衡流量が 30 Sv 以下と計算された JARE37及び JARE40を除き、計算された地衡流量に対して次のとおり解釈を試みた。

十分な観測水深と観測点間隔を確保できた JARE35、JARE36及び JARE43では、南極周極流のほぼ全地衡流量を計算することができ、その値は $114\text{ Sv}\sim 126\text{ Sv}$ 、平均約 118 Sv と従来の知見と比較して若干過大であった。JARE39では観測水深がやや不十分のため、JARE35、JARE36及び JARE43と比較すると地衡流量は 94 Sv と若干少なめであった。観測水深がやや不十分であるのに加えて最北観測点が SAF のすぐ北側、他の年と比較して緯度が約 4 度南



第 5 図 JARE39から JARE43の東経150度線付近の緯度別東向き地衡流量。(a)及び(b)は700m を基準として、(c)、(d)及び(e)は1,000m を基準として計算した。

Fig. 5 Eastward geostrophic transport distribution in latitude near 150E for (a) JARE39, (b) JARE40, (c) JARE41, (d) JARE42, (e) JARE43. Each transport in (a) and (b) are calculated as reference to 700 m. Each transport in (c), (d) and (e) are calculated as reference to 1,000m.

第1表 東経150度付近の南極周極流の全東向き地衡流量。

Table 1 Total eastward geostrophic transport of Antarctic Circumpolar Current near 150E.

	Reference Pressure	Northernmost and Southernmost Latitude	Eastward Transports
JARE35	2,870 db	46.60 S - 64.86 S	126Sv
JARE36	3,000 db	47.03 S - 64.14 S	115Sv
JARE37	2,770 db	52.78 S - 65.10 S	24Sv
JARE38	2,500 db	51.50 S - 64.98 S	73Sv
JARE39	2,363 db	45.95 S - 63.52 S	94Sv
JARE40	1,136 db	47.83 S - 57.46 S	29Sv
JARE41	-	-	-
JARE42	2,250 db	51.87 S - 63.93 S	72Sv
JARE43	3,000 db	46.75 S - 63.99 S	114Sv

寄りであった JARE38及び JARE42では、72Sv~73 Svであった。第5図に見るとおり、いずれの年においても SAFの北にも東向き流量が観測されていたことを考えると、JARE38及び JARE42の流量は他の年と比較しても小さかったとはいえない。

東経150度線上の最南観測点は、例年南緯64~65度であり Orsi *et al.* (1995)が計算した zero-transport contour (力学的海面高がドレーク海峡における南極周極流の南限のものと一致する線)におおむね一致しているため、南極周極流の全東向き流量を評価する場合の不確定性は最北の観測点の位置と観測最大水深からくることになる。さらに、東経150度線付近の場合、南極周極流の北限を決定するのは難しく、南極周極流の全東向き流量を正確に評価することは困難である。こうした困難性はあるものの、JARE35, JARE36及び JARE43の観測結果から計算した全東向き地衡流量は平均約118Svであり、妥当な数値を得ることができたと考える。

6 まとめ

本報告では、日本南極地域観測事業において、1965年に開始された海洋定常観測の結果のうち、特に第29次隊 (1987-1988年)以降の東経150度付近で実施

された南北観測線上の観測成果をまとめた。各観測年毎の水溫、塩分データから、東経150度付近におけるフロントの位置を決定するとともに、フロント位置と各化学分析データを関連づけることによって、海洋構造の概略を記述した。

近年開始されたCTDによる高精度観測、XCTDによる高密度観測データを用いて、南極周極流における3,000db基準の地衡流量を計算した結果、全地衡流量は118Svであり、過去に南極海の様々な南北観測断面において計算された流量と大きな違いは無く妥当な結果を得ることができた。

JAREによる南極海における海洋観測は、これまでの各観測隊員の努力の結果、観測データの蓄積が進んできてはいるものの、例年の観測実績を見ると、対象海域における気象条件の厳しさ等の理由から、必ずしも毎年満足な結果が得られているとはいえない状況である。また、本解析の過程において、残念ながら過去に観測精度及びデータチェックが不十分なデータも見受けられた。

今後、経年変化若しくは変動現象と関連づけた解析を行うためには、これまで以上に観測精度を向上させ、高密度観測を実施することが求められる。JARE43では、CTDに超音波流速計(LADCP)を取り付けることにより、水溫、塩分とともに流速の鉛直高密度観測を開始した。今後もJAREによる海洋観測を「しらせ」で実施する限り、観測時間及び資源の制約は避けられないものであることから、こうした既存の観測資源の多機能化、自動化等によって、観測の高精度化、高密度化、さらには省力化を図っていくことが必要である。

謝辞

JAREの定常海洋観測は、現場で作業を実施したしらせ乗組員、観測隊員をはじめとして、国立極地研究所、文部科学省等、多くの関係者の支援によって維持されています。ここに感謝の意を表します。

参考文献

菱田昌孝, 西田英男: ケープタウン-南極大陸間の流量経年変化について, 水路部研究報告, 10,

61-68, (1975).

Masuyama, A. and J. Shimizu: Oceanographic Data of the 40th Japanese Antarctic Research Expedition from November 1998 to March 1999, *JARE Data Reports*, **264**(Oceanography 24), (2002).

Nagata, Y., Y. Michida and Y. Umimura: Variations of Positions and Structures of the Oceanic Fronts in the Indian Ocean Sector of the Southern Ocean in the Period from 1965 to 1987, *Antarctic Ocean and Resources Variability*, 92-98, (1988).

Orsi, A. H., T. Whitworth III and W. D. Nowlin Jr.: On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current, *Deep-Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*, **42**(5), 641-673, (1995).

Shimazaki, T. and H. Nakauchi: Oceanographic Data of the 41st Japanese Antarctic Research Expedition from November 1999 to March 2000, *JARE Data Reports*, **265**(Oceanography 25), (2002).

Takahashi, W., T. Kojima and N. Seo: Oceanographic Data of the 42nd Japanese Antarctic Research Expedition from November 2000 to March 2001, *JARE Data Reports*, **266**(Oceanography 26), (2002).