1967 年度岡田賞受賞記念講演

太平洋の赤道潜流*

土屋 瑞樹**

太平洋の赤道海域の研究が、脚光を浴びるようになったのは、1950 年の初めに、ハワイの Pacific Oceanic Fishery Investigations (POFI) が、中部太平洋赤道域の大々的観測を始めてからであろう。やがて 1952 年には CROMWELL, MONTGOMERY, & STROUP¹⁾ によって、赤道潜流が発見され、さらに 1958 年に KNAUSS²⁾ が 140°W で潜流の構造を詳しく測定した上、この潜流を赤道にそって東はガラパゴス諸島付近まで追跡した時には、世界の海洋学者の赤道海洋学への関心は、まさに極点に達したかの観があった。この海流を理論的に説明しようとする試みが、数多く現われたのもこの直後であった。

私が、この海域の海洋学に興味を持ち始めたのは、確か 1953 年の秋、日高孝次先生がアメリカでの一年の滞在を終えて御帰国になり、私達に赤道潜流の発見についてお話し下さった時に始まる。その年の春、大学院に入ったばかりであった私は、早速日高先生から、この潜流を力学的に解明する仕事を試みるようにと、おすそめを受けたことを記憶している。ところが、不肖の弟子の私の関心は、同じ現象を対象とはすれ、恐らく先生が私に期待されたのとは、全く違った方向に向いてしまった。というのは、当時私たちに知れていたことは、すべて日高先生から間接に伺ったこと、すなわち、赤道直下の海面下に、表層の西流とは全く逆の、狭く薄い東流が観測されたということだけであった。こういう時期に、私の考えたことは、「現象自体が未だ明確に知れていない時に、その力学的解明など俺にできる筈がない。日高先生のように卓抜した海洋力学者には、現象を見ずとも、高まいた理論に基づき、高級な数学を駆使して、現象の予言すら可能だろうが、俺にはそんな芸当はとても無理だ。まず、現象自体を把握することから始めてみよう。」

こういう次第で、ハワイの POFI に依頼して、海洋観測資料を送ってもらい、この資料や、山積していた旧

海軍による西太平洋赤道域の戦前の観測資料を用い、赤道域の海流を推定することを試みた。よく知られている通り、いわゆる力学計算の方法は、低緯度では通用しないということになっており、当時 POFI から続々出版されていた、AUSTIN, CROMWELL, STROUP 等による観測報告の中でも、赤道から 3° 以内の範囲は力学計算から除外されていた。しかし、観測資料を吟味しているうちに、コリオリ・パラメタが赤道に向って小さくなるにつれ、圧力の南北傾度も一般に小さくなり、小さいコリオリ・パラメタと、小さい圧力傾度が帳消しになって、流速の東西成分はもっともらしい値を与えることが多いのに気づいた。いいかえれば、赤道付近でも流速の東西成分は地衡流平衡にあると見てよい。このことを、運動方程式の各項を、大雑把に見積ることによって確認(?)し、計算の実例と共に報告したのが、1955 年の論文である。一般的にいって、流速の東西成分は、従来考えられていたよりもずっと低緯度まで、多分 1°N, 1°S 位まで、地衡流平衡にあり、従って圧力の観測から、実用に耐え得る程度の近似で推算し得る可能性を指摘したのが主な結果であると思っている。この論文で、赤道直上の地衡流を、運動方程式の微分型から求める方法の妥当性も検討したが、論文に引用した通り、JERLOV³⁾ の行なったことを追試・再検討したに過ぎず、決して私、あるいは他の人の独創ではない。この方法は普通の力学計算と本質的に全く同じであり (MONTGOMEY & STROUP, 1962, p. 49⁴⁾)、余り実用価値を持たぬと、現在では考えている。なお、流速の南北成分は、地衡流平衡にあるとは考えられず、従って、力学計算では求め得ないことを、あらためて指摘しておきたい。

こうして、赤道付近の海流を海洋観測資料から、大した見通しもなく、むやみやたらに推算しているうちに、旧海軍の西太平洋観測データにも、赤道のごく近くで東向きの潜流を示すものが多いことがわかってきたので、1957 年の終わり近くになって、旧海軍のデータを網らして、西太平洋の赤道海流、とくに赤道潜流——その時はまだ西太平洋に存在するかどうか、余りははっきりはしていなかったが——についても、出来る限りの情報を

* 1967 年 4 月 8 日東京水産大学において講演 (代読)
The Pacific Equatorial Undercurrent

** Mizuki TSUCHIYA Department of Oceanography,
The Johns Hopkins University

引き出すことを目的とする研究に本格的に着手した。

まず、1941 年までのデータのうち、使えるものはことごとく使って、諸要素の断面、水平分布図を、山のよう

Fig. 1. Temperature in Celsius along approximately 169°E. *Kosyu* cruise 43, stations 21-36, December 1936 to January 1937. Vertical exaggeration 5550.

で、「膠州」による、169°E にそう水温断面である。ほぼ 3°N-9°N の thermocline の傾きは、東向きに北赤道反流を示している。3°N 付近から、thermocline 上部の等温線は、赤道に向かって逆に上昇し、西向きの、いわゆる南赤道海流の領域に入ったことを暗示するが、thermocline 下部の等温線は、反流域におけると同じく、依然として下降を続け、赤道付近で最も深くなり、この図では見られぬが、南半球に入ると再び浅くなるのが常である。つまり赤道付近で、thermocline は上下に、とくに下にふくらみ、東向きの潜流の存在を示す。このような温度場構造は、私の解析した、175°E 以西の、ほとんどの断面に見られ、また中部・東部太平洋の典型的な温度場構造と大変よく似ている（たとえば、MONTGOMERY & STROUP, 1962, Fig. 6⁹⁾ 参照）。しかし、中部・東部太平洋との注目すべき差異の一つは、thermocline 下部の等温線の傾きである。中部・東部太平洋では、ther-

mocline 下部の等温線は、北赤道反流域で赤道に向かって下降し、その南で一度上向きに転じた後、2°N 付近から再び赤道に向かって下降する。この差異を、中部・東部太平洋の赤道潜流が、北赤道反流とは西流によって切り離されているのに反し、西太平洋のそれは、北赤道反流と海面下で連続した東流でつながっていることを示すものと解釈した。この解釈は吉田昭三ら⁵⁾の 1958 年の直接測流結果とも矛盾しないし、また、直接・間接の証拠が、高橋、茶円、山中ら⁶⁾⁷⁾の日本の、BURKOV, OVCHINIKOV, KOSHLIAKOV, NEIMAN ら^{8)~10)}のソヴェトの海洋学者の報告に見られる。一方、赤道潜流の南限はどうなっているかという点については、資料のほとんどが赤道以北に限られていたため、はっきりした結論は得られずに終わった。

このように、温度場構造からみると、西太平洋にも赤道潜流が存在していることが、定性的に推定できるので、これをもう少し定量的に議論するべく、力学計算と、旧海軍の行なった、相当の数に達する EKMAN 流速計による測流結果の解析を行なった。

力学計算は、個々の断面について行なったのでは、圧力傾度が小さく、その小さな値が大きな流速に相当するので、観測値に含まれているとは思われる、地衡流としては現われない、短周期——たとえば内部波による——変動や、その他の観測誤差などによって結果が大きく左右され、信頼できる流速が、なかなか得られぬことが、だんだん明らかになってきた。そのため、ある種の、時間的・空間的平均状態をとり扱うことにし、大体同じ経度で、同じ時に観測された 3°N と赤道上の観測点を対にして、このような対を出来るだけ沢山選び出した。そうして、各対について、各深さでの thermosteric anomaly の差をプロットすると、Fig. 2 の通りになる。この図でわかるとおり、東の方（下の二つ）では、200 m-600 m の範囲で、thermosteric anomaly の差（3°N の値-0°の値）が負になる傾向が顕著である。いいかえると、赤道の水が 3°N の水よりも軽い、すなわち暖いということになる。このことは、Fig. 1 の水温断面でいうと、thermocline 下部の等温線が赤道付近で深くなることに相当する。各深さの thermosteric anomaly の差を、すべての観測点の対について平均してしまうと、Fig. 3 の○のようになり、この事情はもっとはっきりする。

この thermosteric anomaly の差の平均を、深さについて積分すると*、3°N と 0° との間の、各等圧面の

* 比容のアノマリ (δ) の中の圧力項 ($\delta_{t,p}, \delta_{s,p}$) は無視しても大きな誤差はない¹¹⁾。

Fig. 2. Difference in thermosteric anomaly in centiliters per ton between 3°N and the equator.

geopotential anomaly の差が得られる。もともと統計的な議論なので、この○で示した平均値を数値積分する代わりに、実線のような、600 m 以下では thermosteric anomaly の差がゼロとなるようなモデルを仮定し、これを 600 m から深さについて積分し、各深さでの geopotential anomaly の 3°N と 0° の値の差を求めたのが、Fig. 3 の滑らかな曲線である。そのスケールは、dynamic centimeter 単位で、図の下側に示す。さらにその下のスケールは、3°N と 0° の真中である 1°30'N におけるコリオリ・パラメタで割った、地衡流の速さを cm/sec 単位で示す。3°N と 0° という、300 km 以上離れた 2 点の geopotential の差がたった 5 dyn. cm で

も、40 cm/sec の流速に相当するのだから、これを黒潮域での状況と比較すれば、赤道付近の海流の力学計算がいかにむずかしいか理解できよう。

Fig. 3 で明らかなように、160°E-175°E (右下) では約 200 m に最大流速をもち、3°N-0° の間を平均して約 1 kn の東向きの潜流がある。この潜流は、西の方では流速が減ると共に、流速極大が多少深い層へ移り、130°E-140°E (左上) では余り明瞭ではなくなる。この 200 m という深さは、中部太平洋の潜流の深さよりも深く、また流速値はとにかく時間・空間的に平均したもので、その変動は相当大きなものと期待される。

一方、既述した EKMAN 流速計による測流結果は、そ

Fig. 3. Mean difference in thermosteric anomaly (circles) in centiliters per ton and mean difference in geopotential anomaly in dynamic centimeters or the mean east component of geostrophic flow in centimeters per second (smooth curve) between 3°N and the equator.

の精度の判定が非常に困難で、従ってその解釈もまた困難であるが、3°N-3°S で行なわれた観測をまとめて眺めると、やはり 200 m 前後の深さで東流を示す傾向が顕著に認められる。この測流結果は、すぐ後に MONTGOMERY¹²⁾ が「さつま」、*「拓洋」* の新しいデータも加えて統計的に解析しており、その原論文の図 (Fig. 4) を参照されたい。彼の図からも、150 m-200 m で 1 kn 程度の東流が頻繁に観測されていることがわかる。

こうして、西太平洋にも平均状態として赤道潜流が存在すること、しかし中部・東部太平洋と比べると、多少深い層に最大流速をもち、時間的変化も大きいらしいこと、また北赤道反流と連続しているのがノーマルな状態であるらしいこと等の結論に達し、1961年に結果を印刷

発表した。この論文が、今回の受賞の主な対象となったものと了解している。この仕事を終えた時の私の印象は、当時未だ印刷出版されておらず、私のとり扱うことの出来なかった、化学成分の分布からもっと情報が得られるかも知れないが、既存の温度、塩分のデータからは、これ以上のことは引き出せぬであろう。次にすべきことは、もっと系統的な西太平洋赤道域の観測であるということであった。

しかし、その後約4年間研究から遠ざかることを強いられ、空白の期間を過した。1964年秋、現在勤務するジョンス・ホプキンス大学海洋学教室のMONTGOMERY教授のもとで再び研究生活に戻った。それ以来現在まで行ってきた研究が、やはり受賞の対象となったという

ことであるので、それについても述べねばならぬと思うが、その結果は未印刷で、ここに図を挙げて説明することが出来ないで、要点だけをごく簡単に述べるに止める。

この仕事は、太平洋 20°N-20°S の範囲の上層水の特性の分布、その運動をいわゆる等エントロピー解析 (isanostric analysis というのがもっと適当な呼び方であろう) によって調べたものである。

Thermocline の下に位置する, thermosteric anomaly 160, 200 cl/t という面の上の酸素量分布は、赤道にそって極大値を示し、ほとんど全太平洋を横断して赤道潜流が存在していることを明らかにする。また塩分、酸素の分布は、潜流水の主な源が、西部南太平洋にあることを暗示する。一方 thermocline 内、すなわち赤道潜流の核心に当る, thermosteric anomaly 300 cl/t という面上の塩分分布は、赤道潜流を高塩分の舌として示し、かつこの潜流の核心をなす高塩分水は明らかに南半球に源をもっている。しかしこの高塩分核は、大変薄く、狭いので、いわゆる「標準深度」で観測したのでは完全に見落してしまう。事実、既存のデータでこの核を明確にとらえたものは少なく、この高塩分水が南半球から、どのように潜流に入ってくるかは、依然明瞭とはいえない。元来「標準深度」というのは北欧の海洋学者が、彼等の海に適するように作ったものだそうであり、どこかの海でも使えるというものではない。赤道域は、「標準深度」での観測が最も使いものにならぬ場所であるにもかかわらず、「海洋観測指針」に従って無批判に使うという態度は反省せねばならぬ。

とにかく、太平洋の赤道潜流がどこから来ているかということとは、大よその見当がつけられたといってよいと思う。もっと詳しい過程、季節によってその過程がどうちがうか等の問題はなお未解決で残っている。その解答は今後の観測によるしかないと断言してもさしつかえない。しかも、日本付近で行なっているような普通の観測を、ただ赤道域に延長した種類のデータをいくら蓄積しても、何の役にも立たぬことも断言してよい。既に述べた通り、私は前の研究が終った時に、次になすべきことは系統的観測であると指摘した。6 年以上経った今日、再び同じことを指摘せねばならぬのは、ある意味で不幸なことである。しかし、今は、どういう観測をどういうふうに行なわねばならぬかは、前よりもずっと明らかになっている。一方大西洋では、ウッズ・ホール海洋研究所の手で、赤道潜流の源域の綿密な観測が行なわれ、太平洋とよく似た、しかしもっとはっきりした結果が得ら

れている (未発表)。太平洋の源域については、これ程綿密な観測は、未だ存在しないが、いずれ近い将来に解決されることであろう。

太平洋赤道海流系の研究が、私の受賞課題ということであるが、問題を赤道潜流だけにしぼった。最後に、私が日本で行なった研究は、吉田耕造先生の、アメリカで行なった研究は、R. B. MONTGOMERY 先生の御援助と激励によってのみ、初めてなし得られたことを述べ、改めて心からの感謝を表明したい。

引用文献

- 1) CROMWELL, Townsend, R. B. MONTGOMERY, and E. D. STROUP (1954): Equatorial Undercurrent in Pacific Ocean revealed by new methods. *Science*, **119**, 648-649.
- 2) KNAUSS, J. A. (1960): Measurements of the Cromwell Current. *Deep-Sea Res.*, **6**, 265-286.
- 3) JERLOV, N. G. (1953): Studies of the equatorial currents in the Pacific. *Tellus*, **5**, 308-314.
- 4) MONTGOMERY, R. B. and E. D. STROUP (1962): Equatorial waters and currents at 150°W in July-August 1952. *Johns Hopkins Oceanogr. Stud.*, **1**, 68 p.
- 5) 吉田昭三, 二谷頼男, 鈴木成二 (1959): 赤道海域一斉海流測定 (国際地球観測年) について (1958 年1~2月). *水路要報*, **59**, 1-30.
- 6) TAKAHASHI, Tadao, Masaaki CHAEN, and Soichi UEDA (1960): Report of the Kagoshima-maru IGY cruise, 1958. *Mem. Fac. Fish. Kagoshima Univ.*, **8**, 82-86.
- 7) 山中 一, 安楽 昇, 森田二郎 (1965): 西部太平洋における海況変動. *南海区水産研究所報告*, **22**, 35-70.
- 8) BURKOV, V. A. and I. M. OVCHINNIKOV (1960a): Structure of zonal stream and meridional circulation in the central Pacific during the northern hemisphere winter (露文). *Trud. Inst. Okeanol. Akad. Nauk SSSR*, **40**, 93-107.
- 9) BURKOV, V. A. and I. M. OVCHINNIKOV (1960b): Investigations of equatorial currents to the north of New Guinea (露文). *Trud. Inst. Okeanol. Akad. Nauk SSSR*, **40**, 121-134.
- 10) KOSHLIAKOV, M. N. and V. G. NEIMAN (1965): Some results of measurements and calculations of zonal currents in the equatorial part of the Pacific Ocean (露文). *Okeanologiya*, **5**, 235-249.
- 11) MONTGOMERY, R. B. and W. R. WOOSTER (1954): Thermosteric anomaly and the analysis of serial oceanographic data. *Deep-Sea Res.*, **2**, 63-70.
- 12) MONTGOMERY, R. B. (1962): Equatorial Undercurrent observations in review. *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, 20th Anniv. Vol., 487-498.