

日本南方東経130度線における海洋観測結果 — 耕洋丸第77次航海報告 —

柏野祐二^{1†}, 鎌野忠¹

Ocean observation results along 130° E line south of Japan — Observational report during Koyo-maru 77th cruise —

Yuji Kashino and Tadashi Kamano

Abstract : Ocean observations were conducted along 130° E on the way to Koror (Republic of Palau) during Koyo-maru 77th cruise on October 2018. During the cruise, the North Equatorial Current (NEC) was observed with geostrophic volume transport exceeding 70 Sv (1Sv=10⁶m³/s) above 1000 dbar between 8° N and 24° N. In particular, it was strong north of 18° N. We found that surface (<100m) high temperature (>25°C)/ low salinity (<34.5PSU) water existed not only at southern part but also at northern part of the 130° E line. Because we could not find cloud cluster associated with the Intertropical Convergence Zone around the northern part of 130° E, it is suggested that the surface high-temperature/ low-salinity water was advected by the NEC. Thus, we suggest that change of the NEC should be monitored and discussed because the boundary of this low-salinity water is thought to be the landmark of the spawning ground of Japanese eel in the NEC region.

Key words : North Equatorial Current, surface low-salinity water, Japanese eel, Koyo-maru 77th cruise, Ocean circulation

1. 緒 言

日本の南岸を西岸境界流である黒潮が流れている。黒潮は常に一定の流路を流れるのではなく、沿岸を流れる流路（非大蛇行接岸流路）、紀伊半島で離岸して八丈島の南を流れる非大蛇行離岸流路、そしていわゆる大蛇行流路の3つに分類される¹⁾。特に黒潮大蛇行は十数年に一回のペースで発生する現象で、最近では2017年秋に発生して2019年3月の時点で継続中である（海洋速報&海流推測図, <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>）。黒潮は日本の南方から水温が高い海水を運ぶ暖流であることから、その変動は様々な影響を及ぼす。例えば気候の面では、冬季の太平洋側に雪を降らせる南岸低気圧は黒潮の流路によりその経路が変動することが示されている²⁾。

気候の面のみならず、水産業の面においても黒潮の変動

は大きな影響を及ぼす。例えば、2004～2005年に黒潮大蛇行が発生した時は、シラスが不漁であった。黒潮大蛇行が発生すると遠州灘沖に冷水渦が出現するが、その周辺海域で毎年漁獲される水産生物は水温変動や黒潮流路の変動のため、その生息域や産卵域、回遊経路などに影響が生じるのである。このため、我が国の水産業においても黒潮の変動はモニタリングするべき重要な要因となっている。

黒潮は亜熱帯循環の一部であり、その起源は北緯10度～20度の緯度帯を西に向かって流れる北赤道海流である（Fig.1）。北赤道海流は北太平洋を西方に向かって流れ、最終的にフィリピン東岸で南北に分岐するが、その北への分枝が黒潮となる。このことは北赤道海流の変動が黒潮にも及ぶことを意味する。

実際に北赤道海流がどの緯度で分岐するかにより、北への分枝である黒潮と南への分枝であるミンダナオ海流の流量が変動すること（例：Kim et al., 2004³⁾）、さらにはそれ

¹水産大学校海洋生産管理学科（Department of Fisheries Science and Technology, National Fisheries University）
別刷り請求先：kashinoy@fish-u.ac.jp

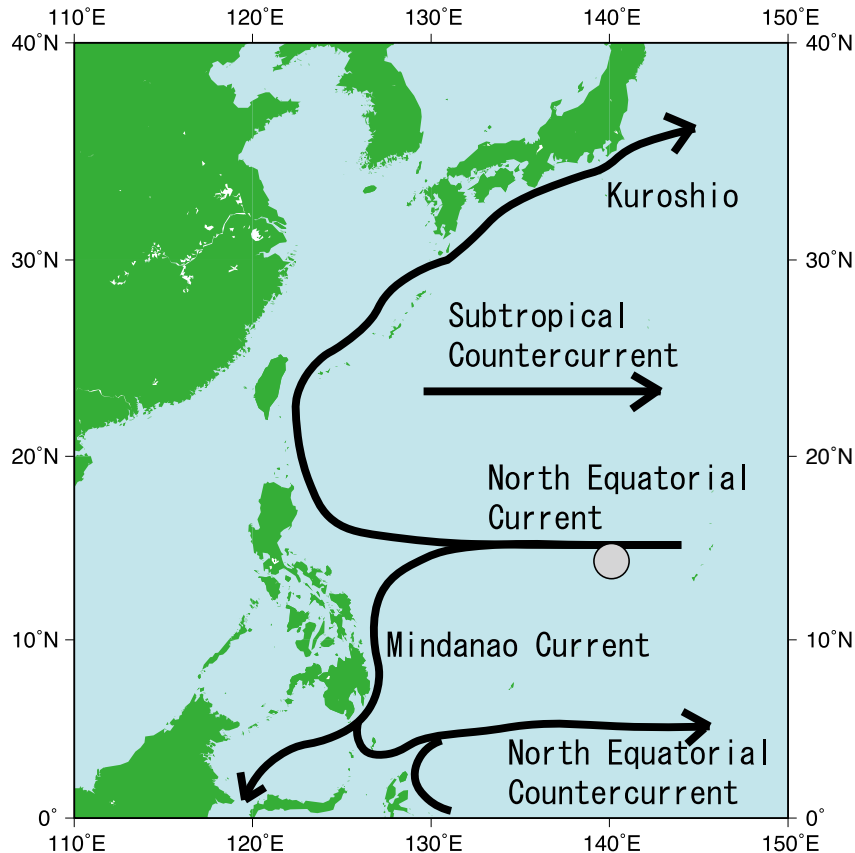


Fig. 1. Schematics of major currents in the observation area of Koyo-maru 77th cruise. A gray circle around 14° N, 140° E denotes the spawning ground of Japanese eel found by Tsukamoto (1992)⁵⁾.

らの海流の流量も、エルニーニョ／ラニーニャ現象によっても変動することが示されている⁴⁾。

ところで、ニホンウナギの産卵場が北赤道海流の流軸の中心である北緯15度東経140度付近のマリアナ諸島の西方に発見されている⁵⁾。そのため、日本に回遊するニホンウナギは北赤道海流から黒潮への一連の流れに移流されて日本まで到達するものと考えられている（例：Kimura et al., 1999⁶⁾）。したがって、北赤道海流の分岐する緯度や流量が変動すると、ニホンウナギの日本への回遊の様子が変動すると考えられている。例えば、Kim et al. (2007)⁷⁾は、海洋数値シミュレーション結果を用いて粒子追跡実験を行い、エルニーニョ現象が発生すると北赤道海流が変動することにより、黒潮よりもミンダナオ海流の方にニホンウナギが移流され、日本に回遊する個体数が減少することを示唆している。さらには、最近台湾－フィリピン振動と名付けられた大気・海洋相互作用に伴うフィリピン海の変動が見つかり、この現象に伴う北赤道海流の変動がニホンウナギの回遊に影響を及ぼしていることも示唆されている⁸⁾。

西部熱帯太平洋は熱帯収束帯の存在のため降水量が多いことから、海洋付近の塩分が低い淡水プール⁹⁾と呼ばれる領域が存在する。その淡水プールの境界が塩分フロントとして、ちょうどニホンウナギの産卵場付近に存在しており、ニホンウナギの産卵場におけるランドマークになっていると考えられている（例：Kimura and Tsukamoto, 2006¹⁰⁾）。つまり、北赤道海流域の流れだけでなく、水塊もニホンウナギの産卵に影響を及ぼしている。

以上のことから、黒潮周辺に生息する水産資源および日本の南方から回遊する魚類は、黒潮だけでなく北赤道海流の変動にも大きく影響を受けるといえる。このため、日本の南方の水産資源を議論するには、黒潮だけでなく北赤道海流域も含めて考える必要がある。これらの背景を受けて、2018年10月に実施した耕洋丸第77次航海の途中で、これまで観測があまりなされていない日本南方の東経130度線に沿って行った海洋観測の結果を報告する。

本報告の構成は次の通りである。第2章では耕洋丸第77次航海の概要と観測について解説する。第3章では耕洋丸

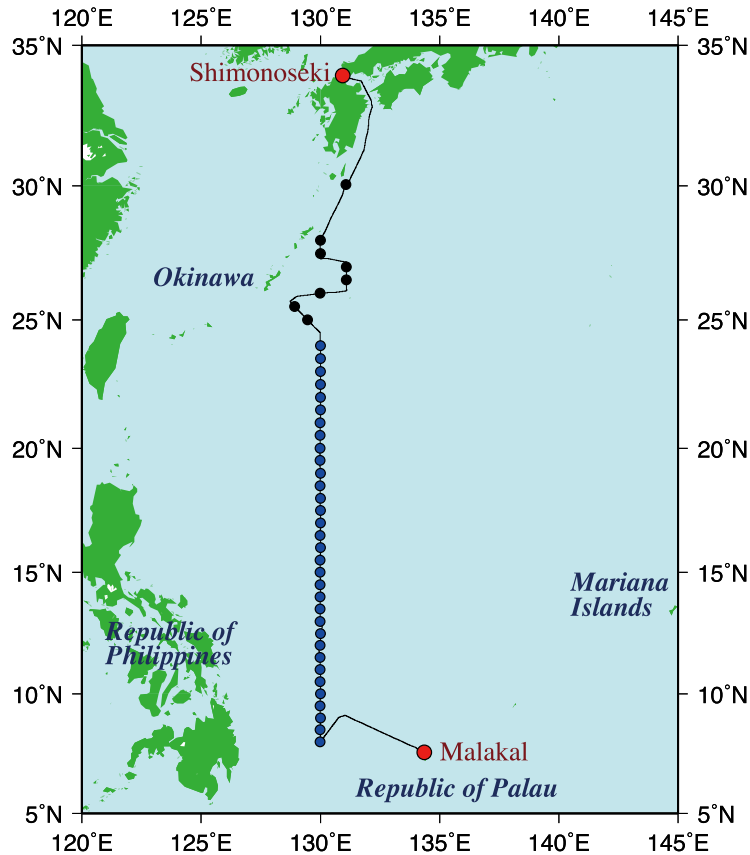


Fig. 2. Cruise course with CTD observation stations denoted by black and blue circles from Shimonoseki to Malakal during Koyo-maru 77th cruise. CTD data used in this report is obtained at the stations denoted by blue circles.

第77次航海の観測の結果について記述する。第4章では、その観測結果を同じ海域で行われた1996年のWorld Ocean Circulation Experiment (WOCE) 観測の結果および海洋観測による全球客観解析データセットであるWorld Ocean Atlas 2013 (WOA13, <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>) と比較し、考察を行う。第5章でまとめる。

2. 観測の概要

本報告の観測は2018年度の耕洋丸第77次遠洋航海において行われた。この航海では、下関を2018年10月21日に出港後、豊後水道を太平洋に出て沖縄南に向かって航走し、沖縄の南から北緯8度まで南下し、パラオ共和国のマラカル港に10月31日に入港した。

観測はその航海中に日本の領海・経済水域内、および公海において行った (Fig.2)。ただし、沖縄近海は海上自衛隊による演習海域のため、それを避けてジグザグ航行を

行ったが、本報告ではそのジグザグ航行中の結果については触れず、北緯24度以南のデータを使用した。

観測項目はCTD (Conductivity-Temperature-Depth profiler) による温度・塩分観測、船舶搭載型ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) による航路に沿った流向・流速観測、各種気象観測である。そのうち本報告ではCTDとADCPの観測結果について報告する。本報告で用いたCTDの観測データは東経130度の経線にそって北緯24度から北緯8度まで30マイルおきに行った計33点のものをを用いた。ADCP観測は日本出航後、パラオ共和国の排他的経済水域に入域するまでに行ったが、ADCPのデータは北緯24度～北緯8度の間のものをを用いた。CTD観測の鉛直解像度は1m、ADCPの時間解像度は1分、鉛直解像度は16mである。

CTDにはSea Bird社のSBE911plusに温度・電気伝導度・溶存酸素・蛍光センサーを取り付け、深度1000mまで観測を行った。採水は行わなかった。CTD断面図の描画には深度4mから鉛直解像度8mのデータを作成して行っ

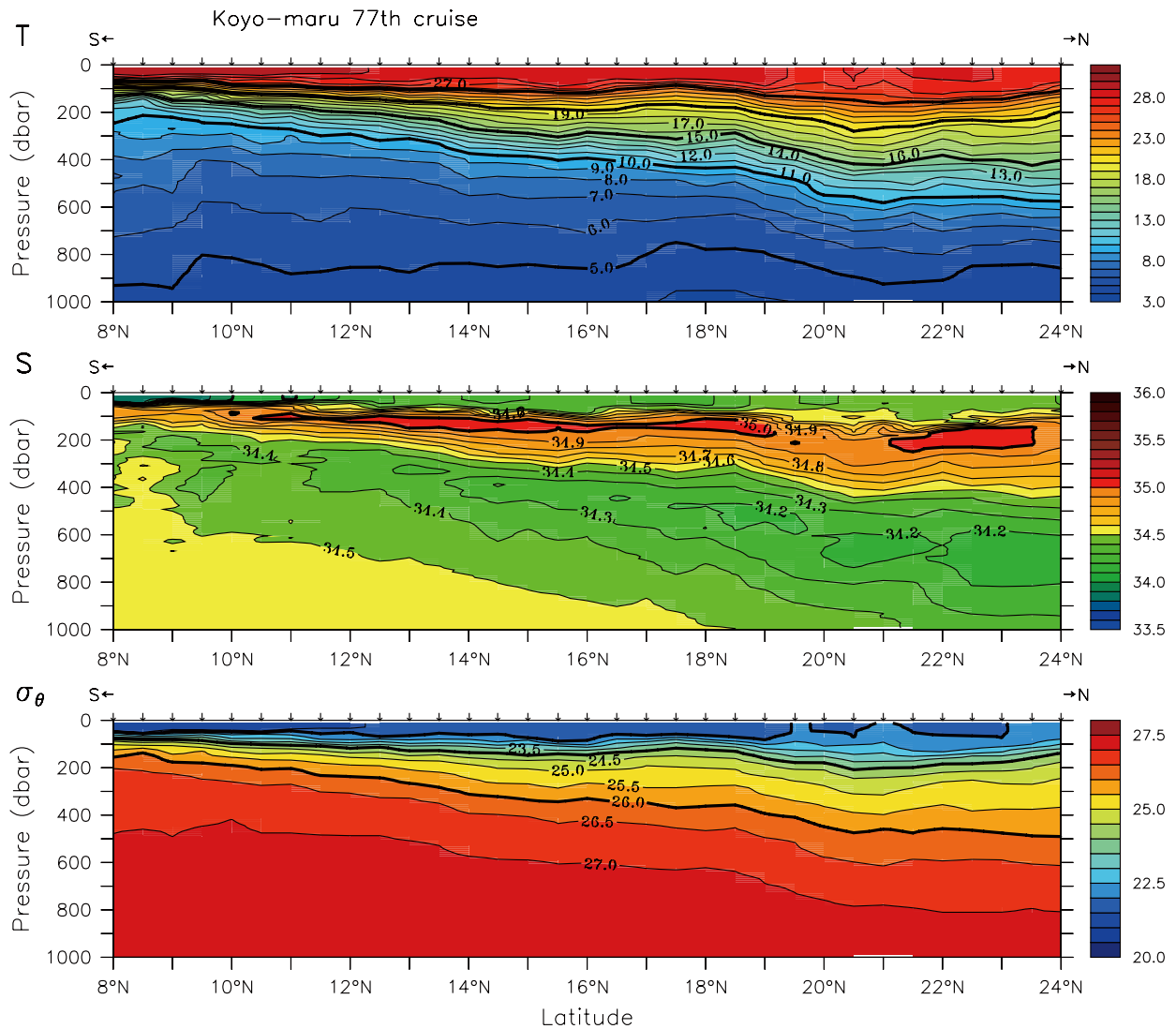


Fig. 3. CTD-measured Temperature (upper panel), salinity (middle panel) and potential density (lower panel) sections along 130°E during Koyo-maru 77th cruise. Units in the upper, middle and lower panels are $^{\circ}\text{C}$, practical salinity unit, and kg/m^3 , respectively.

た。ADCPはTeledyne RD Instruments社のOcean Surveyor (75kHz) を用いて、深度約500mまで流向・流速の観測を行った。

ちなみに、米国大気海洋庁の気候変動予測センター (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>) によると、観測が行われた2018年10月はエルニーニョ/ラニーニャ現象の目安となるNino 3.4インデックスの偏差が0.86となっており、平常時よりややエルニーニョ現象の状態に近い状況であった。

3. 観測結果

Fig.3に東経130度における温度・塩分・ポテンシャル密度の断面を示す。まず注目すべきことは、温度が28 $^{\circ}\text{C}$ を越え、塩分が34.5PSUを下回る海面付近の高温低塩分水が測線の南側のみならず、北の方まで存在していることである。特に北緯18~24度ではその海水が海面から深度100mにも達している。第4章で述べる通り、通常このような高温低塩分水は北緯15度以南に限られていることから、大変

興味深い。

次に温度断面 (Fig.3上段) に着目すると、全体的に等温線が南から北に傾いている、つまり、同じ深度で見れば北側の方が温度が高いことがわかる。全球的にみれば、南側 (赤道側) より北側 (極側) の方が冷たいように思われるが、この温度構造はそのようにはなっていない。これはこの緯度帯に西向きに北赤道海流が流れていて、その西向きの流れに対する地衡流バランスにより北側の方が高温となる構造となるためである。また、北緯8度付近で温度躍層が浅くなっているのは、西部熱帯太平洋のこの緯度帯にミンダナオドーム (Masumoto and Yamagata, 1991¹¹⁾; Kashino et al., 2011¹²⁾) が存在するためである。

温度断面の構造を詳しく見ると、単純に南から北に等温線が傾いているのではなく、所々で凸凹しており、また、北緯20度以北では深度300m以浅で等温線が逆に北から南に傾いている。つまり、躍層温度の鉛直勾配が北に行くほど小さく (等温線の間隔が広く) なっている。特に17~18℃付近の等温線の間隔が広がっている。これは亜熱帯モード水の特徴を示している¹³⁾。また北緯20度より北側の深度300m以浅で北から南に等温線が傾いているのは、その緯度帯に東向きの流れが存在していることを示唆している。この流れは亜熱帯反流であろう¹⁴⁾。

塩分の断面 (Fig.3中段) の構造に着目すると、深度100m~200mの亜表層に最大で35PSUを越える塩分極大層が、その下の深度300m~1000mの中層には34.5PSU以下の塩分極小層が見られる。塩分極大層は北太平洋回帰線水と呼ばれる水塊によるもので、ハワイ諸島周辺で強い海面での蒸発により高められた海面塩分により海面から亜表層に沈み込んで北赤道海流により移流されたものである¹⁵⁾。実際、塩分値が35PSUを上回っている箇所は測線上で連続しているのではなく、北緯10~19度、および北緯21度~24度に限られている。つまり、この範囲において東方から北太平洋回帰線水が移流されてきていることが示唆される。

その下層にある低塩分の水は北太平洋中層水で、主にオホーツク海を起源とし、日本東方の混合域で黒潮・親潮前線を越えて亜熱帯循環に流れ込んでいる水塊である¹⁶⁾。この水塊はポテンシャル密度が $26.8\sigma_\theta$ 付近に存在しているが、フィリピン沿岸などの熱帯域に到達すると、存在する密度面が $\sigma_\theta = 26.5$ 付近と浅くなるのが特徴である¹⁷⁾。実際、本観測の東経130度線においても、北緯10度以南では塩分値が34.5PSUを下回る海水は深度250m以浅の $\sigma_\theta = 26.5$ 付近に存在している。

T-Sダイヤグラム (Fig.4) は上述の水塊の変質をよく示している。全体的な傾向としてポテンシャル密度が小さい層 (すなわち浅い層) に北太平洋回帰線水に伴う塩分極大層、大きな層 (すなわち深い層) には北太平洋中層水に伴う塩分極小層が存在している。詳しく見ると、北太平洋回帰線水については測線の北端 (北緯24度) と南端 (北緯8度) で塩分がやや低く、その2点を除けば北側 (黒線) の方が南側 (赤線) より塩分が高い傾向がある。また、北側は南側に比べ塩分極大となるポテンシャル密度が約 $0.5(\text{kg/m}^3)$ 大きくなっている。

次に深い層に存在する塩分極小層に着目すると、明らかに北から南に行くにつれて塩分極小層の塩分値が上がっている。同時に塩分極小層のポテンシャル密度が南に行くにつれて小さくなっている。これは北太平洋中層水が南に行くにつれて変質していることを示している。特に北緯8度では、塩分極小層が壊れていて、T-S曲線がジグザグしている。これは、この付近で北太平洋中層水と熱帯赤道域の中層水による混合が起こっている可能性を示している。

ニホンウナギの産卵場のランドマークとされている海洋付近の低塩分フロントについては、本観測では塩分の水平勾配は北緯10度~11度付近で大きくなっている (Fig.3 中段)。しかし、Kimura and Tsukamoto (2006)¹⁰⁾ が塩分フロントの目安としている34.5PSUの値の低塩分水は本測線の南側から北緯24度まで広がっており、この値を目安とすることはできないといえる。しかも、北緯18~24度にかけては、上述の通り34.5PSU以下の低塩分水が海面から深度100mを越えて厚くなっている。同時に海面付近の水温も高く、本測線の大部分で28度を越えている。

次に本測線における流れの構造に着目すると (Fig.5)、流速の東西成分は大部分でマイナス、すなわち西向きとなっており、先に述べた通り北赤道海流に伴う流れがこの本観測の測線を占めていると言える、特に北緯19度付近の深度100m以浅で強く、0.8m/sを越える西向き流が見られる。北緯16度以南でも流れは広く西向きとなっており、0.2~0.4m/sの流れが深度300m以浅にみられる。

東向きの流れもところどころにみられ、例えば北緯21~24度においては東向きの流れとなっており、亜熱帯反流の存在を示唆している。また、北緯16~18度の東向きの流れについては、その流れの以北における西向きの流れおよび北緯17~20度における北向きの流れ (Fig.5下段) を併せた流速構造となっていることから、反時計回りの渦の一部になっているように見える、すなわち冷水渦の存在を示し

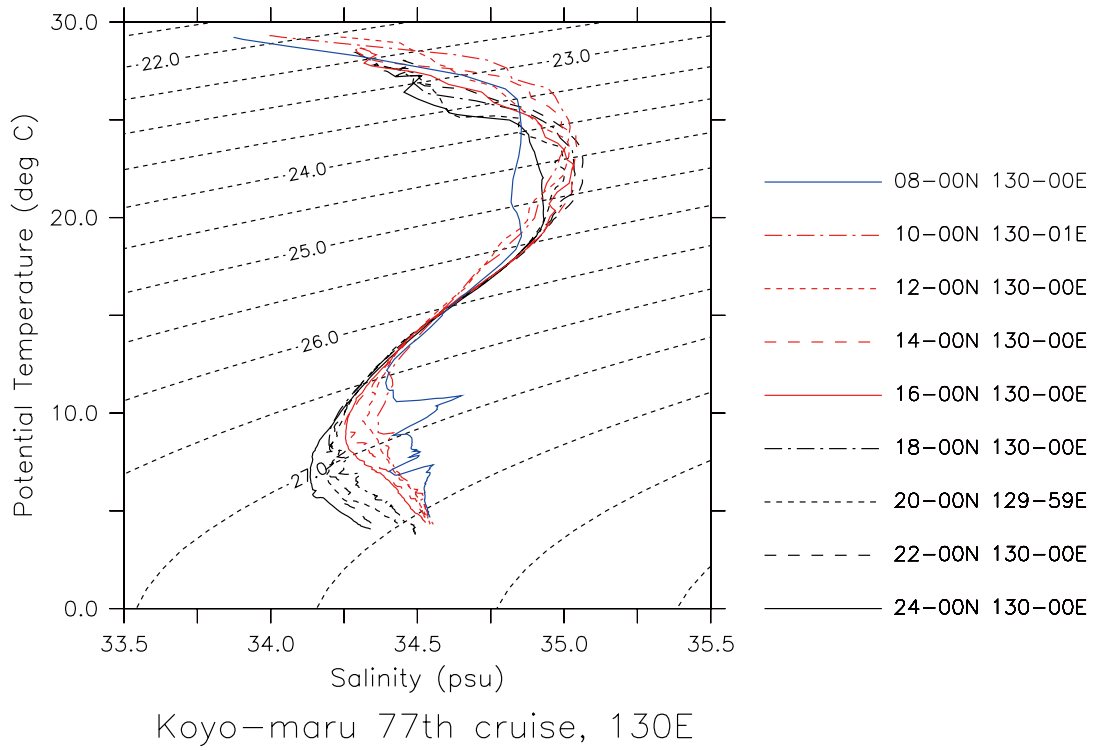


Fig. 4. Potential temperature-salinity relationships at the stations of every 2 degrees along 130°E during Koyo-maru 77th cruise.

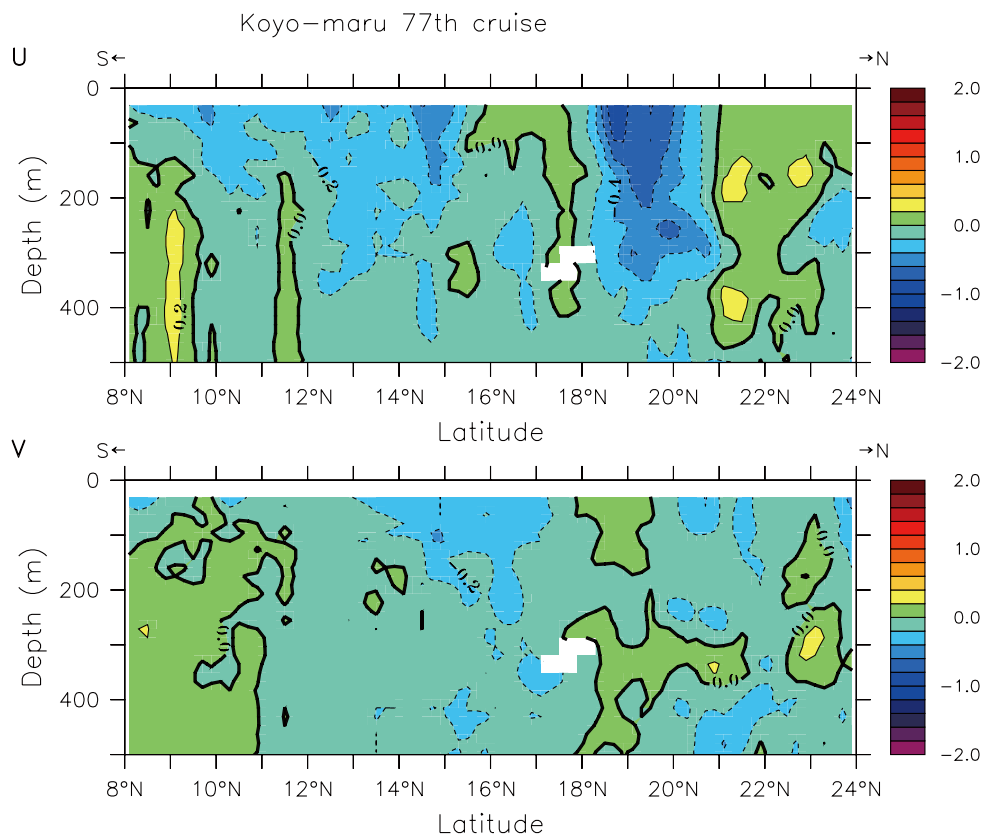


Fig. 5. ADCP-measured zonal velocity (upper panel) and meridional velocity (lower panel) sections along 130°E during Koyo-maru 77th cruise. Unit is m/s. Positive values mean eastward (upper panel) and northward (lower panel) velocities.

ている。実際Fig.3上段・下段の温度・密度分布をみると、その周辺で温度（密度）躍層が持ち上がっている。

他に東向きの流れは、北緯11~12度、および北緯10度以南の深度200m以深にみられる。特に北緯9度付近で強く、0.2m/sを上回っている。これはQiu et al. (2013)¹⁸⁾で初めて存在が示された北赤道潜流 (North Equatorial Undercurrent) である。この流れについては発見されてから時間が経過していないことから、そのメカニズムなどについてはまだ十分わかっておらず、またその存在場所からニホンウナギの回遊にも影響を与えられ考えられるが、水産学の観点からこれまで議論されたことはない。今後海洋物理学の面だけでなく、水産学の面でもこの海流について研究が進むことが期待される。

4. 考 察

4.1 1996年6月 (WOCE P8) の観測時との違い

1996年6月に水産庁の開洋丸および海洋科学技術センター（現海洋研究開発機構）の「かいよう」により、東経130度線（P8線）に沿って世界海洋大循環実験 (World Ocean Circulation Experiments, 略してWOCE) に基づいたワンタイム観測（以下、WOCE P8と略す）が行われた。本項では耕洋丸第77次航海（以下、本観測と略す）とWOCE P8の観測結果の違いについて考察する。なお、WOCE P8のデータは<http://www.ewoce.org/>にて公開されている。

Fig.6にWOCE P8における観測結果を示す。まず着目す

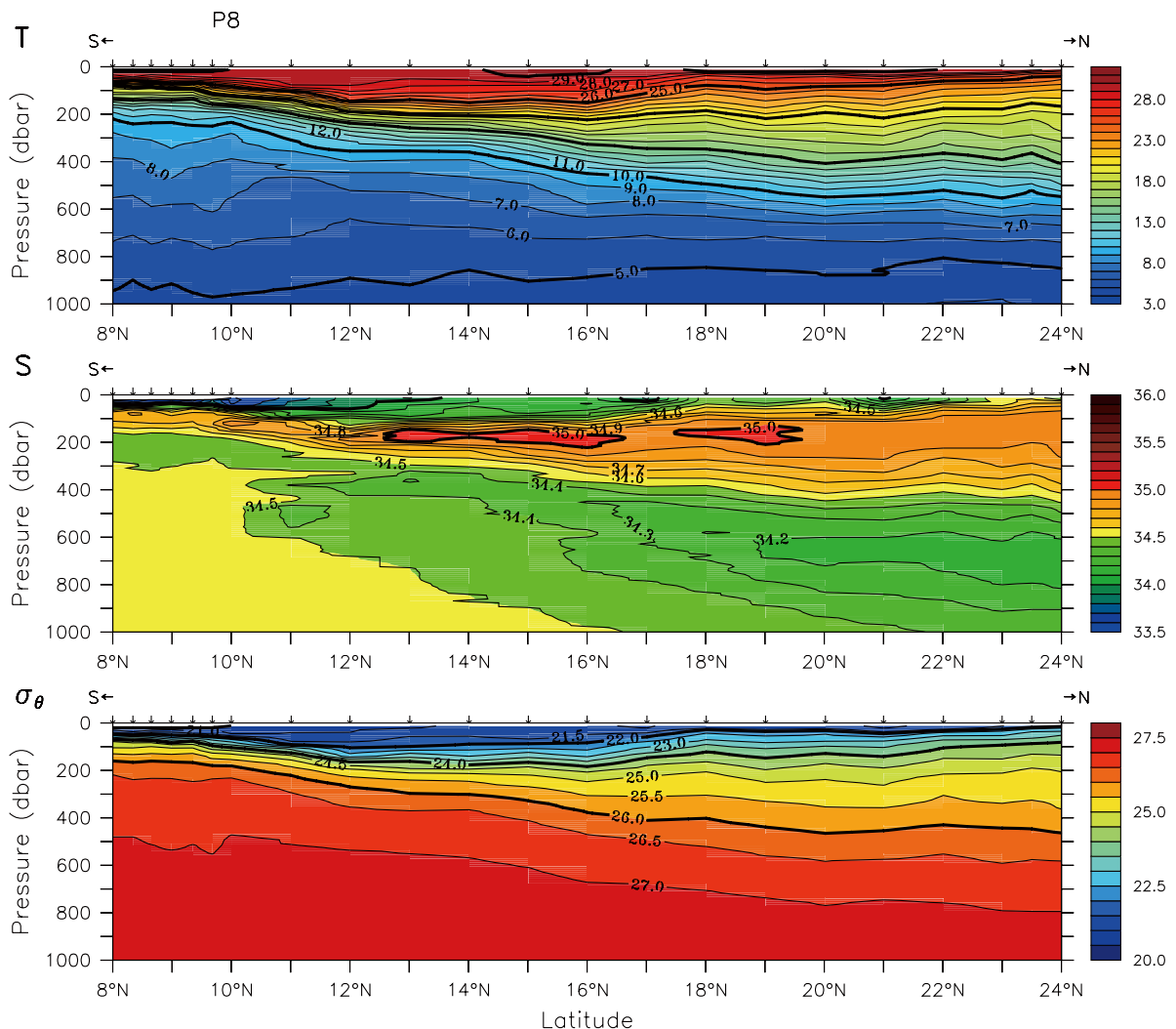


Fig. 6. Temperature (upper panel), salinity (middle panel) and potential density (lower panel) along the sections of World Ocean Circulation Experiment P8 (130°E) in June 1996. Observation cruises were conducted by Kaiyomaru of Fisheries Agency and R/V Kaiyo of Japan Agency for Marine Science and Technology. Units are as the same as that of Fig.3.

るのは、海面付近の温度・塩分の違いである。WOCE P8の観測においては、本観測時に比べ海面温度が高く、所によっては30℃を上回っている。塩分についても、特に測線の南部で低くなっており、33.5PSU以下の箇所がみられる。これはWOCE P8が実施された時期が北半球の夏であり、熱帯収束帯 (Intertropical Convergence Zone) がこの付近に存在したため、降雨量が多かったためと推測される。北側に行くほど温度躍層が浅くなり、海面付近の温度も下がっている。同時に34.5PSUを越える海水が海面付近にみられる。

亜表層 (深度100~400m) に着目すると、北太平洋回帰線水の塩分極大層が広く分布している。ところが、本観測時は北緯21度~24度に35PSUを越える高塩分水が観測されているが、WOCE P8ではこのような高塩分水はみられない。中層水に着目すると、WOCE P8の測線の南側で北太平洋中層水の塩分が本観測時に比べ高くなっており、深度300mより深いところでは34.5PSUを上回っている。これらの違いは季節の違いに主に起因すると考えられるが (特に海面付近)、Nino 3.4インデックスの偏差が-0.33とエルニーニョ現象の観点からみるとほぼ年並みとなっていることから、経年的な違いにも多少起因しているものと考えられる。

4.2 平均の秋との違い

本観測の結果は2018年10月におけるスナップショットともいえるものである。そこでこの時期 (北半球の秋) における東経130度の海洋構造が平均と本観測の結果とどのように異なるかを考察する。なお、平均のデータにはWOA13の秋季 (10月~12月) のデータを用いた。

Fig.7にWOA13の秋季における東経130度の平均的な温度・塩分および密度断面図を示す。本観測時とWOA13との最も大きな違いは、海面付近の温度にみられる。WOA13では、海面付近の水温が28℃を上回るのは北緯18度以南に限られるが、本観測時では、北緯20度~23度付近にもそのような高温水が海面付近に見られる。さらにはその付近での温度 (密度) 躍層がWOA13に比べ50m以上深くなっている。

塩分についても、本観測時は深度100m~300mに存在する北太平洋回帰線水の塩分がWOA13より高くなっていて、かなり広範囲で35PSUを上回っている。WOA13では北緯11度~21度の範囲で34.9PSUを越える高塩分水が見られるが、本観測時では北緯21度~24度にも35PSUを上回る

高塩分水が見られる。また、深度100m以浅でも低塩分水 (<34.5PSU) がWOA13より北方に広がっている。つまり、温度場と併せて考えると北緯21度以北で、本観測時は平均の秋より深度300m以浅の海洋構造がかなり違っているとと言える。

4.3 総合考察

4.1および4.2の結果との比較から、耕洋丸第77次航海が行われた2018年10月では、測線の北側まで高温低塩分水が存在していることがわかる。深度100~300mの亜表層においても、起源がハワイ諸島周辺にある北太平洋回帰線水¹⁵⁾の塩分が高くなっていることから、この本観測時においては、亜熱帯反流は存在しているもののその強さはWOCE P8と同程度で、北赤道海流は強くなっているものと考えられる。例えば地衡流の計算結果 (Fig.8) においては、本観測結果がWOCE P8に比べ、北緯18度~21度にかけて強い西向き北赤道海流の存在を示している。実際、北緯8度~24度、0~1000m間の地衡流量 (1000dbar面基準) は本観測時が70Sv ($1\text{Sv} = 10^6\text{m}^3/\text{s}$) であったが、そのうち北緯18度~21度の0~200mの狭い範囲に18.2 Svもの西向き流量があった。ちなみに、WOCE P8ではその範囲で6.5 Svであった。つまり、この海域の水塊の変動は、北赤道海流や亜熱帯反流の強さに大きく依存していることが言える。

また、本観測においてはWOA13より北の方まで塩分が低いことも特筆すべきである。日本の南方には熱帯収束帯に伴う淡水プールが存在しているが、本観測時には熱帯収束帯は赤道より南に位置していて、本観測の海域に存在していない。衛星画像 (デジタル台風: <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>) を見るかぎり、台風のような強い雨を降らせるまとまった雲も、この時期にこの海域には存在していない。したがって、北緯20度以北の海面付近の低塩分水はどこか別な海域から運ばれてきているものと推測できる。

この海面付近の淡水プールは、周辺海域の高塩分水とフロントを形成していて、Kimura and Tsukamoto (2006)¹⁰⁾によれば、そのフロントがニホンウナギの産卵場のランドマークになっていることが示されている。ニホンウナギの産卵時期が6月~8月であるため (塚本, 2012¹⁹⁾、本観測時とは時期がずれているが、仮に6月~8月に本観測のような塩分分布となっていたとすれば、ニホンウナギの産卵に影響が生じたと考えられることができるだろう。したがって、

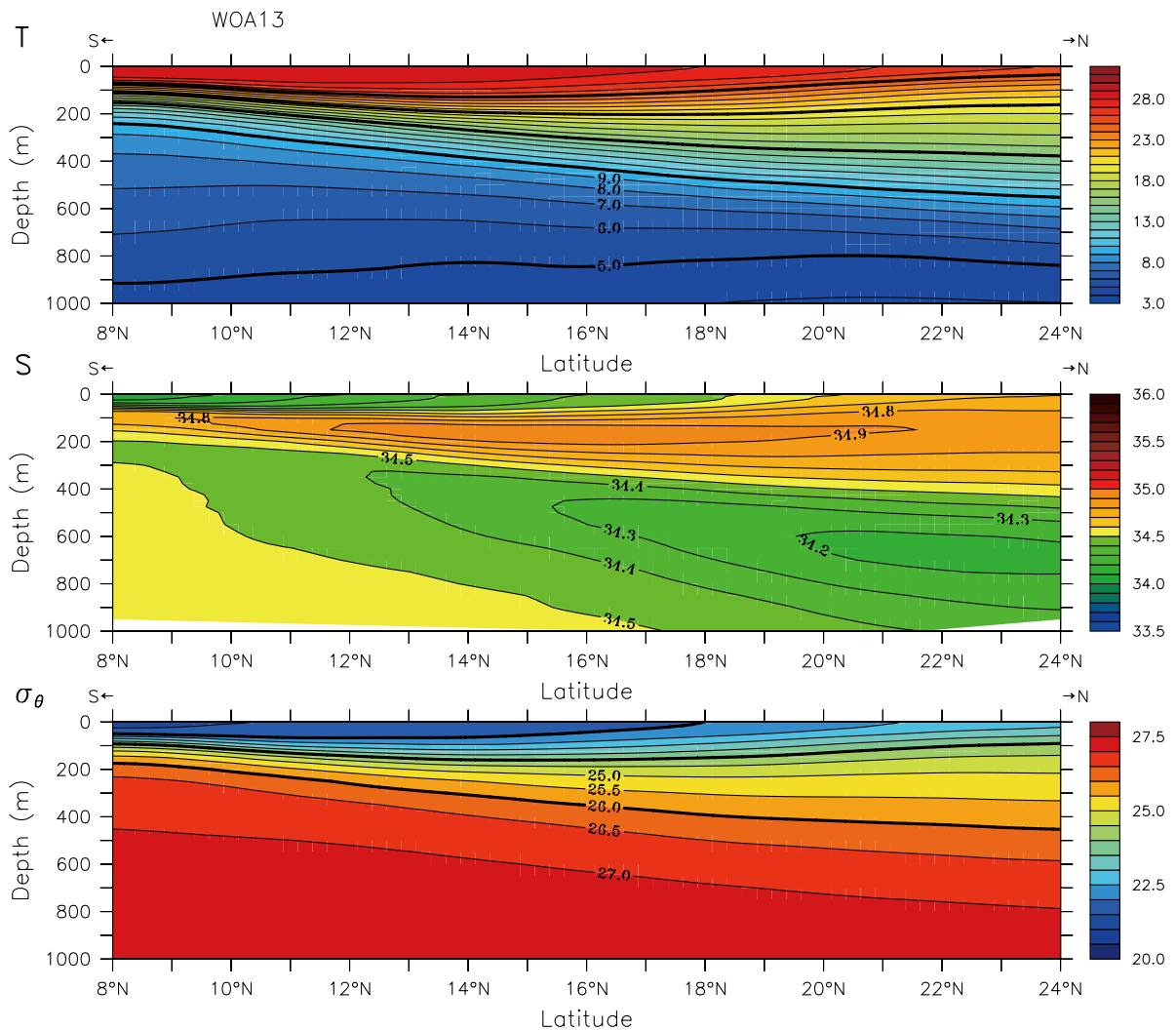


Fig. 7. Temperature (upper panel), salinity (middle panel) and potential density (lower panel) sections along 130° E during boreal autumn season (October–December) derived from World Ocean Atlas 2013 (WOA13). Units are as the same as that of Fig.3.

水産学の面からも、この淡水プールの動向、それを形成する熱帯収束帯、この海域に低塩分水が輸送される過程を調べるのが重要であるといえるが、それらについては今後の研究課題としたい。

5. まとめ

2018年10月に耕洋丸第77次航海（下関～マラカル）において、東経130度線に沿ってCTDによる温度・塩分観測、およびADCPにより流速観測を行った。その結果をまとめると次の通りとなる。

1) 測線の北側の北緯24度まで、平年より高温低塩分水が海面近くから深度100mまで観測された。本観測の時

期には熱帯収束帯が観測海域には存在せず、また、降雨を降らせるまとまった雲も衛星画像には見られないことから、この高温低塩分水は北赤道海流によって東部から運ばれてきているものと推測できる。

2) この測線においては広く西向き北赤道海流が観測された。特に北緯18度～21度にかけて流速が0.8m/sを上回る強い西向き流が観測されていた。亜熱帯反流はその緯度以北に弱いながら観測された。平年より塩分が高い北太平洋回帰線水が観測されたが、これは強い北赤道海流の影響によるものと考えられる。

4.2の総合考察で述べた通り、この緯度（北緯8度～24度）の海流と水塊はニホンウナギの産卵及び回遊に大きな影響を及ぼすものと考えられることから、今後としては、

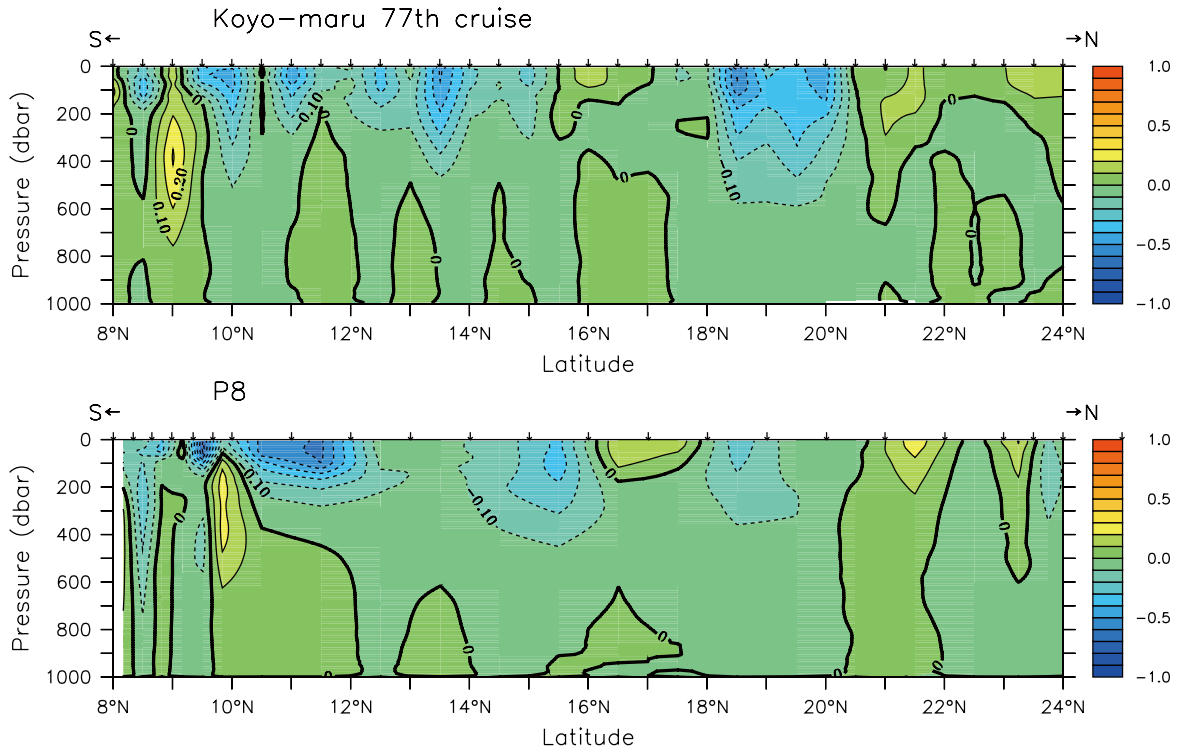


Fig. 8. Geostrophic current velocity section along 130°E. Upper and lower panels are for Koyo-maru 77th cruise and WOCE P8, respectively. Geostrophic calculation was conducted refer to 1000 dbar. Unit is m/s. Positive values mean eastward flow.

継続した観測が必要で、海洋学のみならず気象学の面からも観測結果を検討・考察することが水産学の観点で重要であり、今後の研究課題としたい。

6. 謝 辞

本観測を支援してくださった耕洋丸の乗組員の皆様、および耕洋丸第77次航海に乗船してCTD観測を手伝った海洋生産管理学科4年生（当時）の皆様に深く感謝します。

参考文献

- 1) Kawabe, M.: Variations of Current Path, Velocity, and Volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander, *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 3103–3117 (1995)
- 2) Nakamura, H., A. Nishina, and S. Minobe: Response of storm tracks to bimodal Kuroshio path states south of Japan. *J. Climate*, **25**, 7772–7779 (2012)
- 3) Kim, Y. Y., T. Qu, T. Jensen, T. Miyama, H. Mitsudera, H. W. Kang, and A. Ishida: Seasonal and interannual variations of the North Equatorial Current bifurcation in a high-resolution OGCM, *J. Geophys. Res.*, **109**, C03040, doi:10.1029/2003JC002013 (2004)
- 4) Kashino, Y., N. España, F. Syamsudin, K. Richards, T. Jensen, P. Dutrieux, and A. Ishida: Observations of the North Equatorial Current, Mindanao Current, and Kuroshio Current system during the 2006/07 El Niño and 2007/08 La Niña, *J. Oceanogr.*, **65**, 325–333 (2009)
- 5) Tsukamoto, K.: Discovery of the spawning area for Japanese eel, *Nature*, **356**, 789–791 (1992)
- 6) Kimura, S., K. Dōōs, and A. C. Coward: Numerical simulation to resolve the issue of downstream migration of the Japanese eel, *Mar Ecol. Prog. Ser.*, **186**, 303–306 (1999)
- 7) Kim, H., S. Kimura, A. Shinoda, T. Kitagawa, Y. Sasai, and H. Sasaki: Effect of El Niño on migration and larval transport of the Japanese eel (*Anguilla*

- japonica*), *ICES Journal of Marine Science*, **64**, 1387-1395 (2007)
- 8) Chang, Y-L., J. Sheng, K. Ohashi, M. Béguer-Pon, and Y. Miyazawa: Impacts of interannual ocean circulation variability on Japanese eel larval migration in the western north Pacific ocean, *PLoS ONE* **10** (12), e0144423. doi:10.1371/journal.pone.0144423 (2015)
- 9) Delcroix, T., and J. Picaut: Zonal displacement of the western equatorial Pacific "fresh pool", *J. Geophys. Res.*, **103**, 1087-1098 (1998)
- 10) Kimura, S., and K. Tsukamoto: The salinity front in the North Equatorial Current: A landmark for the spawning migration of the Japanese eel (*Anguilla japonica*) related to the stock recruitment, *Deep-Sea Res. II*, **53**, 315-325 (2006)
- 11) Masumoto, Y. and T. Yamagata: Response of the western tropical Pacific to the Asian winter monsoon: the generation of the Mindanao Dome. *J. Phys. Oceanogr.*, **21**, 1386-1398 (1991)
- 12) Kashino, Y., A. Ishida, and S. Hosoda: Observed ocean variability in the Mindanao Dome region, *J. Phys. Oceanogr.*, **41**, 287-302 (2011)
- 13) Bingham, M. F.: Formation and spreading of subtropical mode water in the North Pacific, *J. Geophys. Res.*, **97**, 11177-11189 (1992)
- 14) Uda, M., and K. Hasunuma: The Eastward Subtropical Countercurrent in the Western North Pacific Ocean, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **25**, 201-210 (1969)
- 15) Tsuchiya, M., Upper waters of the intertropical Pacific Ocean, *Johns Hopkins. Oceanogr Stud.*, **4**, 50 pp. (1968)
- 16) You, Y., N. Sugino, M. Fukasawa, H. Yoritaka, K. Mizuno, Y. Kashino, and D. Hartoyo: Transport of North Pacific Intermediate Water across Japanese WOCE sections, *J. Geophys. Res.*, **108**, 3196, doi:10.1029/2002JC001662 (2003)
- 17) Bingham, F., and R. Lukas : The southward intrusion of North Pacific Intermediate Water along the Mindanao coast, *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 141-154 (1994)
- 18) Qiu, B., D. L. Rudnick, S. Chen, and Y. Kashino: Quasi-stationary North Equatorial Undercurrent jets across the tropical North Pacific Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2183-2187, doi:10.1002/grl.50394 (2013)
- 19) 塚本勝巳: ウナギ 大回遊の謎, P H Pサイエンス・ワールド新書 (2012)

