

## 論文内容の要旨

### 論文題目 **Formation and distribution of North Pacific Intermediate Water in the Subarctic Frontal Zone**

(亜寒帯前線帯における北太平洋中層水の形成と分布)

増島 雅親

北太平洋中層水 (North Pacific Intermediate Water, NPIW) は密度  $26.6-26.9\sigma_\theta$  に存在する鉛直的な塩分極小とその周辺の水として定義され、亜熱帯海域の 300~800 m の深さに広く分布する。NPIW 形成には、降水過剰により表層が低塩分である亜寒帯海域の低塩分水が亜熱帯中層に輸送される必要がある。低塩分亜寒帯水が亜熱帯海域へ輸送される過程に関する仮説は 2 つに大別される。一方は、北太平洋スケールで存在する亜寒帯前線周辺において、渦輸送によって亜寒帯水が拡散的に輸送されるという説である。もう一方は、オホーツク海を始点とする熱塩循環の一部として、亜寒帯/亜熱帯循環境界を横切って、亜寒帯水が亜熱帯海域へ直接輸送される、という説である。しかし、これらの NPIW 形成過程に関する仮説は定性的な議論に留まっており、定量的議論をする必要がある。そこで本研究は、(1) 東経 150 度以西の本州東方海域での亜寒帯水流入と NPIW 形成を詳細な現場観測から定量的に明らかにすること、(2) 北太平洋スケールの塩分極小水の変質を調べることにより、北太平洋における NPIW の分布と NPIW 形成プロセスの関係を明らかにすることを目的とした。目的 (1) に対し、1998 年 5 月、2000 年 10 月、2001 年 5 月の混合水域における集中観測で取得された水温塩分データと垂下式超音波流速系データ (水平流速) を用いた。また、目的 (2) に対し、東経 150 度以西で形成された塩分極小水の輸送と、その経路上での塩分変質を調べるため、気候値データを基に、粒子追跡と等密度面移流拡散モデルを用いて、変質過程を議論した。本研究では従来の研究と異なり、超音波流速系による直接流速観測やインバース法により求めた絶対地衡流流速場を用いて議論する点が新しい。

東経 150 度以西では、北海道南を亜寒帯前線を横切って南西向きに輸送される亜寒帯水と、混合水域内沖合の亜寒帯前線を横切って輸送される亜寒帯水がみられた。沿岸の亜寒帯前線を横切って輸送される亜寒帯水流量は、観測平均の流量として、 $4.2 \text{ Sv}$  ( $26.6-27.4\sigma_\theta$  密度間) と見積もられ、春に多く ( $5-10 \text{ Sv}$ )、秋に少ない ( $0-4 \text{ Sv}$ ) という季節による違いがみられた。また、この亜寒帯水は、ほぼその性質を保って本州東方沿岸に沿って黒潮続流まで到達し、亜熱帯水と混合し、黒潮続流周辺の NPIW を形成していたことがわかった。この輸送は熱塩循環による

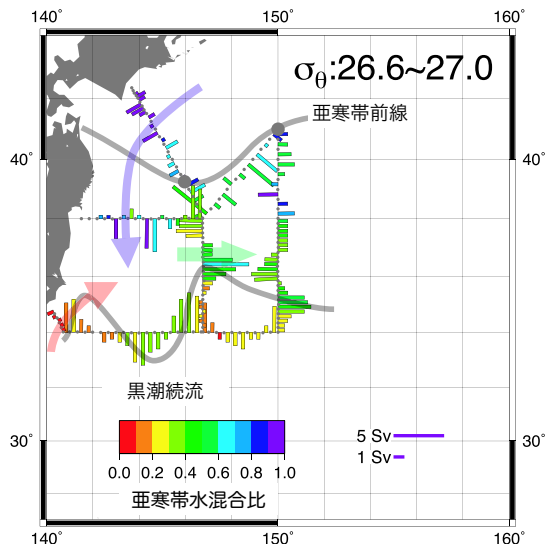


図 1: 混合水域を流出入する流量と亜寒帯水混合比 (単位: Sv = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s)

循環境界を横切る亜寒帯水の輸送過程の結果生じたものと示唆される。一方、沖合の亜寒帯前線を横切る亜寒帯水流量は、沿岸の亜寒帯前線を横切る亜寒帯水と同程度の、6 Sv (26.6-27.4 $\sigma_\theta$  密度間) の流量と見積もられた。この亜寒帯水が亜寒帯前線周辺で中規模渦を伴って観測されたことから、混合水域内沖合の亜寒帯前線を横切る亜寒帯水の輸送は、拡散的な渦輸送が関与していることが示唆される。粒子追跡実験と等密度面移流拡散モデルによって、東経 150 度以西の塩分極小水の輸送過程と、塩分変質過程を調べた。黒潮続流周辺の塩分極小水は黒潮続流/亜熱帯循環に沿って輸送されていた (図 2 上)。その間、上中層共に低塩分化していたが、常に上層が中層より高塩分であり、塩分極小構造を保持していた。この塩分変化は主に水平拡散に起因していた。東経 149.5 度、北緯 37.5 度から放出した粒子が NPIW 分布域の北縁を移動していたことから (図 2 下)、亜熱帯海域に分布する NPIW の起源は黒潮続流周辺 (東経 149.5 度、北緯 35.5 ~37.5 度) の塩分極小水であることがわかった。

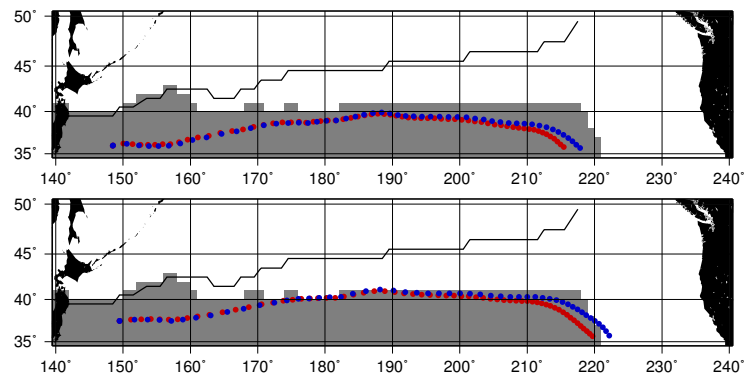


図 2: [上] 黒潮続流周辺を始点とする粒子の軌跡、[下]NPIW 分域北縁を移動する粒子の軌跡 (青: 26.5 $\sigma_\theta$ 、赤: 26.7 $\sigma_\theta$ ).

混合水域北部 (東経 149.5 度、北緯 38.5~40.5 度) の塩分極小水は移行領域へと輸送されていた (図 3 上)。東経 155 度 ~165 度では上層が中層よりも大きく低塩分化するため、移行領域に移動する間に塩分極小構造が消滅していた (図 3 下)。この塩分変化は等密度面移流拡散モデルでは再現されなかった。

混合水域北部の塩分極小水が移行領域へ輸送される間に塩分極小構造を失うプロセスを吟味するため、中層密度面 (26.7 $\sigma_\theta$ ) 追従型フロートによる観測データの解析を行った。このフロートは、混合水域北部から、粒子追跡

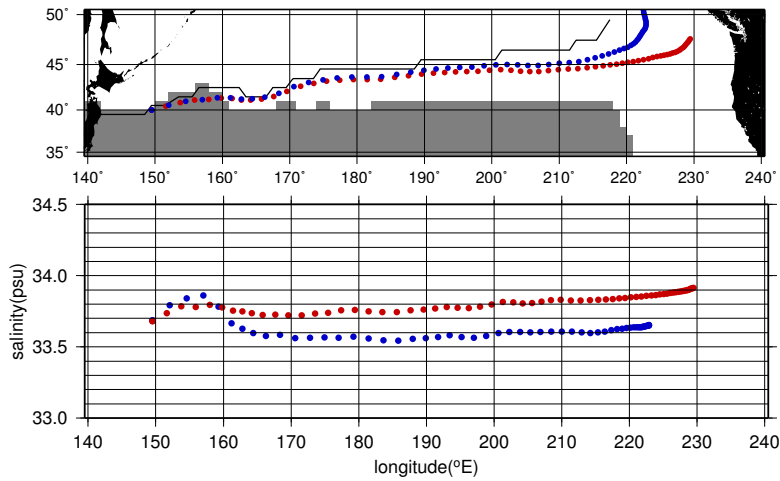


図 3: [上] 混合水域北部の塩分極小水の軌跡と、[下] 軌跡上の塩分 (青:  $26.5\sigma_\theta$ 、赤:  $26.7\sigma_\theta$ )。

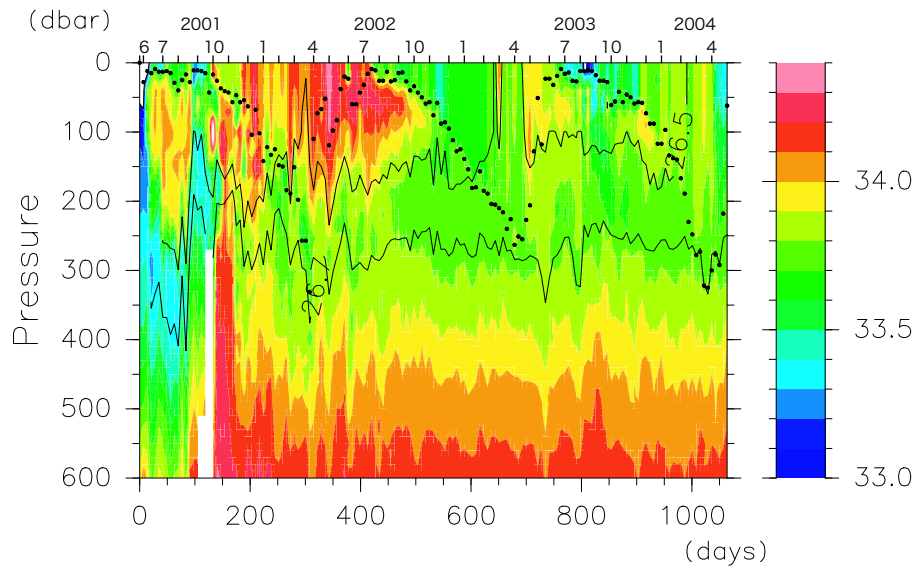


図 4: 等密度面 ( $26.7\sigma_\theta$ ) 追随型フロート観測での塩分時系列断面図 (色: 塩分、コンター:  $26.5\sigma_\theta$  (上) と  $26.7\sigma_\theta$  (下)、黒点: 混合層深度 (表面密度より  $0.125\sigma_\theta$  大きい密度である深さとして定義))

実験により塩分極小消失が見られた海域へと移動していたものである。フロート観測の塩分時系列断面 (図 4)) から、塩分極小消失が見られた海域では、夏季に中層に塩分極小が存在し、秋から冬にかけて表層に低塩分水が現れ、この低塩分水を取り込みながら混合層が深化するため、冬季 (1~3 月) に密度  $26.5\sigma_\theta$  が低塩分化し、塩分極小構造が消失することがわかった。月平均気候値データ解析の結果、塩分極小消失が見られた海域 (東経 150 度-160 度、北緯 40 度-45 度) では、3 月に混合層が水深 200 m 以上に達し、混合層密度が  $26.5\sigma_\theta$  以上となることが分かった。フロート観測で見られた季節変化は月平均気候値データからも確認された。

冬季低塩分混合層形成に必要な低塩分の供給源を調べるため、風によるエクマン輸送を考慮した粒子追跡実験を行った。その結果、秋から冬にかけて強まる偏西風に対応したエクマン移流によって亜寒帯海域から輸送された表層低塩分水が、混合層が深く発達する海域の表層を覆うことがわかった。つまり、エクマン輸送された低塩分の亜寒帯水を取り込みながら、秋から冬にかけて混合層発達するため、冬季混合層は低塩分になる、というプロセスが示唆される。また、中層粒子がこの海域を通過するのに 1 年以上かかるので、混合水域北部から輸送された塩分極小水は、冬季低塩分混合層により、少なくとも 1 度は上層 ( $26.5\sigma_\theta$ ) が低塩分化し、塩分極小構造を失う。

気候値データの解析を基に、冬季低塩分混合層形成により塩分消失が起きている海域の東方での塩分プロファイルの季節変化を調べた。塩分消失海域に隣接する海域(東経 170 度付近)でも、夏季に塩分極小構造が存在し、冬季に低塩分混合層が形成されていた。しかし、これらは密度  $26.5\sigma_\theta$  面よりも浅い密度面で見られる季節変化であり、密度面  $26.5\sigma_\theta$  面上での塩分の季節変化は混合層が  $26.5\sigma_\theta$  面まで到達していた海域よりも小さかった。さらに、東の東経 175 度では、 $26.5\sigma_\theta$  面以浅の塩分は西の海域より低塩分となり、年間通じて塩分極小構造が見られなかった。

塩分極小消失過程は次のようにまとめられる。塩分極小水は亜寒帯海域から風由来のエクマン輸送された表層低塩分水を取り込みながら形成された冬季低塩分混合層により、上層 ( $26.5\sigma_\theta$ ) が低塩分化することで塩分極小構造を失っていた。さらに塩分極小構造を失った海水はその構造をほぼ保って東方の移行領域へ輸送されることがわかった。

本研究の結果、亜熱帯海域に分布する NPIW の主な起源は、北太平洋西部の混合水域西端で直接的に黒潮続流まで到達した亜寒帯水が、亜熱帯水と混合することで形成された塩分極小水であることがわかった(図 5)。また、混合水域内の沖合の亜寒帯前線を横切って亜寒帯水が混合水域へ流入していた。この流入は中規模渦による渦輸送に起因し、混合水域北部の中層を低塩分化すると考えられる。混合水域北部の塩分極小水は、冬季混合層が発達する海域に輸送され、低塩分な混合層の発達により、上層が低塩分化し、塩分極小構造を失い、移行領域へと輸送される。このため、移行領域では塩分極小構造が存在しないと考えられる。

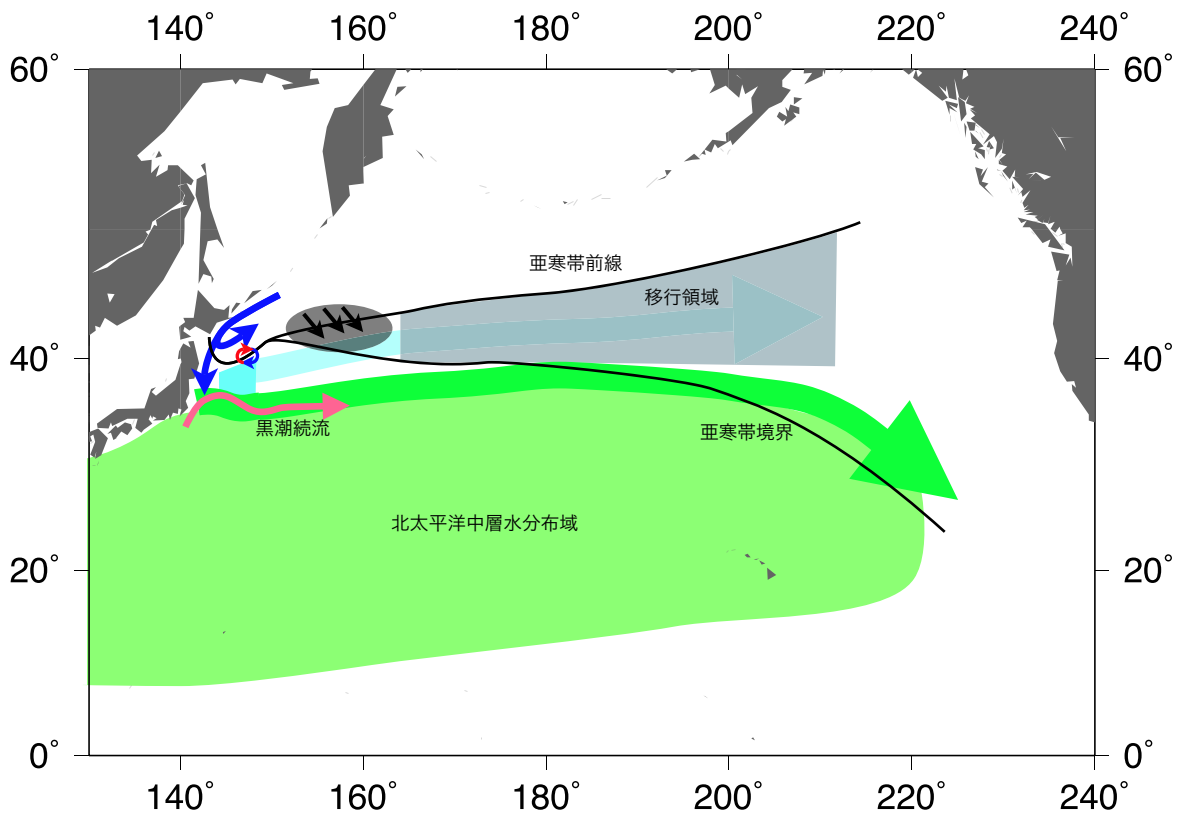


図 5: NPIW の分布と形成・変質過程の模式図