

論文内容の要旨

論文題目 **Frontal waves and salinity minimum formation along the Kuroshio Extension**

(黒潮続流における前線波動と塩分極小形成)

氏名 瀬瀬 慎也

1 はじめに

本研究の対象海域である日本東方沖は、親潮によってもたらされるオホーツク海起源の低塩・低温・低渦位の水塊と黒潮に輸送される亜熱帯の高温・高塩な水塊が合流・混合することにより、北太平洋中層水が形成される海域として知られている。北太平洋中層水は、密度 $26.6 - 26.9\sigma_\theta$ 、深度 200 - 800m に存在する鉛直的な塩分極小で特徴付けられ、北太平洋亜熱帯域の中層に広く分布する水塊である。この北太平洋中層水は、千島列島付近の強い鉛直混合及びオホーツク海北西部での海水形成に伴う高密度水から形成される低渦位の性質を持つ水塊を起源水としており、渦位の輸送を通じて北太平洋の成層構造・循環に影響を与えていると考えられている。また、亜寒帯の豊富な栄養塩を北太平洋亜熱帯の亜表層に供給し、鉛直的な拡散を通じて北太平洋亜熱帯における生物生産に関わる水塊としても注目されている。さらに、北太平洋中層水の循環に伴い亜寒帯表層で大気と接触した水塊が、海洋中層に輸送され、人為起源炭素の隔離に関わる水塊であると考えられている。

このような北太平洋中層水の形成過程については、その主な形成域は日本東方沖の黒潮続流域であり、黒潮続流域における等密度面混合が重要であること (Yasuda et al. 1996) が指摘されているものの、その具体的な形成プロセスについては明らかではなかった。

本研究は、黒潮続流における北太平洋中層水の形成過程に関わる具体的な現象として、続流流軸付近において顕著な鉛直的な塩分極小構造がしばしば観測されるという事実 (図 1) に注目する。黒潮続流流軸付近の顕著な塩分極小構造は、過去の研究においてもその存在が指摘されている (例 Maximenko et al. 1997; Okuda et al. 2001) が、その詳細な構造は明らかではなかった。本研究では、2001 年・2002 年の 2 回にわたり続流流軸付近の詳細な観測を行い、そのデータを解析することで続流における顕著な塩分極小構造の形成過程について明らかにすること、及び、その結果を理論的に解釈することを目的とした。

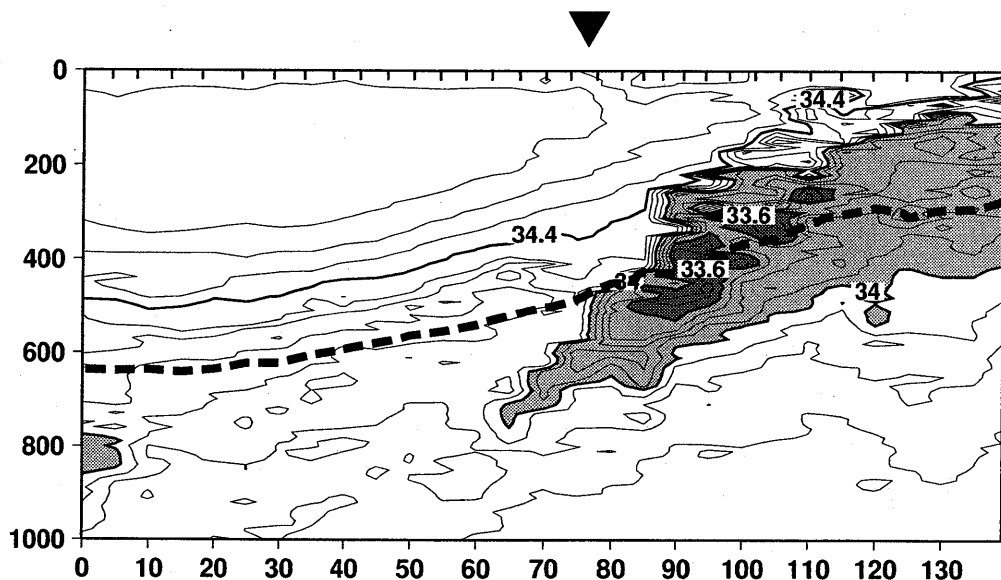


図1 黒潮統流を横切る断面の観測塩分断面分布 (本研究の観測より): 流軸 (▼) 中層に 33.6psu を下回るような低塩な水塊が北 (図右) から貫入している様子がわかる。

2 観測資料

本研究で用いた観測データは、2001年5月～6月(調査船: 高風丸・蒼鷹丸・北光丸・凌風丸)と2002年8月28日～9月8日(調査船: 蒼鷹丸)の2期のものである。2001年の航海においては、CTD・ADCP・LADCPによる観測、2002年の航海においては、CTD・LADCPによる観測を行った。それぞれの観測において水温・塩分・圧力・流速のデータを取得した。

各々の観測において水平的な構造を調べるために最適内挿法(Lc Traon 1990)を用いて水平的に内挿し3次元的な温度・塩分・流速の分布を求め解析を行った。

3 結果

2001年の観測結果として、黒潮統流中層塩分前線において波長約100kmの波動状構造が存在することが明らかとなった(図2)。この波動に伴ない波動の谷では、図1に示したような統流北側の低塩な水塊が統流流軸を横切り貫入し、顕著な塩分極小となっていた。この中層前線波動の谷での貫入は、過去に観測された顕著な塩分極小と対応していると考えられる。また、この中層前線波動は、下流ほどその振幅が大きくなっており、145°E以東では、切離し孤立渦になっている様子が捉えられた。これは、黒潮統流中層における前線波動が渦の切離などの過程を経て、統流流軸付近での混合や流軸を横切る輸送に寄与する可能性を示唆するものである。

この観測では、統流流軸に沿う方向の観測間隔が前線波動の波長100kmに比べて長かった。より詳細な構造を調べるため、2002年の観測においては、観測領域を限定し5日間という短時間で観測を行った。その結果、観測領域中央に顕著な中層塩分極小を捉え(図3右)、さらに上層においても同程度の波長を持つ波動を捉えることが出来た(図3左)。このデータを元に前線波動の構造の詳細を調べると共に、衛星画像からの海面水温データと比較することで波動の伝搬について明らかにした。

船舶観測期間中の海面水温の前線に見られる擾乱は、約200km波長をもっており、下流方向に約0.2m/sで伝搬していた。一方、船舶による観測で得られた擾乱のスケールは2001年の観測で捉えられた波長と同様約100kmであっ

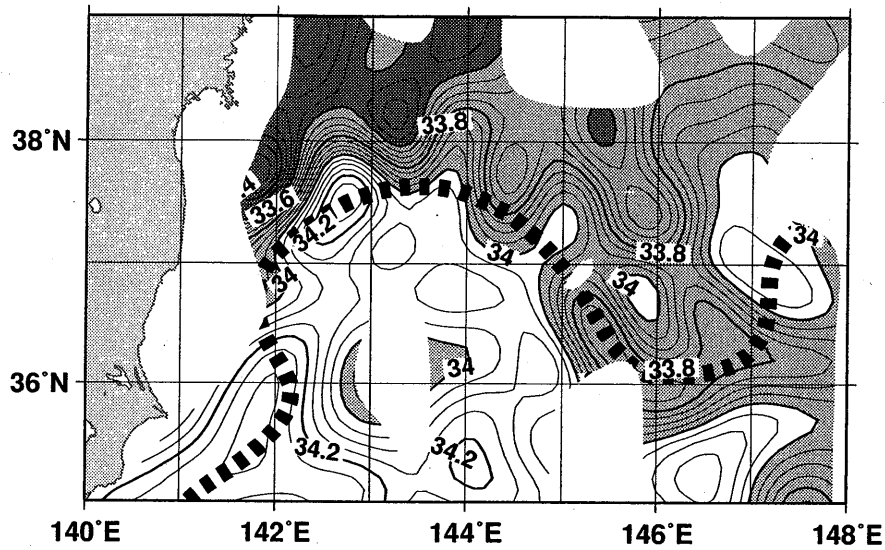


図2 中層 $26.7\sigma_\theta$ 等密度面上の塩分水平分布: 太い破線 (黒潮主流表層流軸) に沿って塩分の等値線が南北に込み入った前線に細かいスケール (約 100km) の前線波動の存在が確認できる。

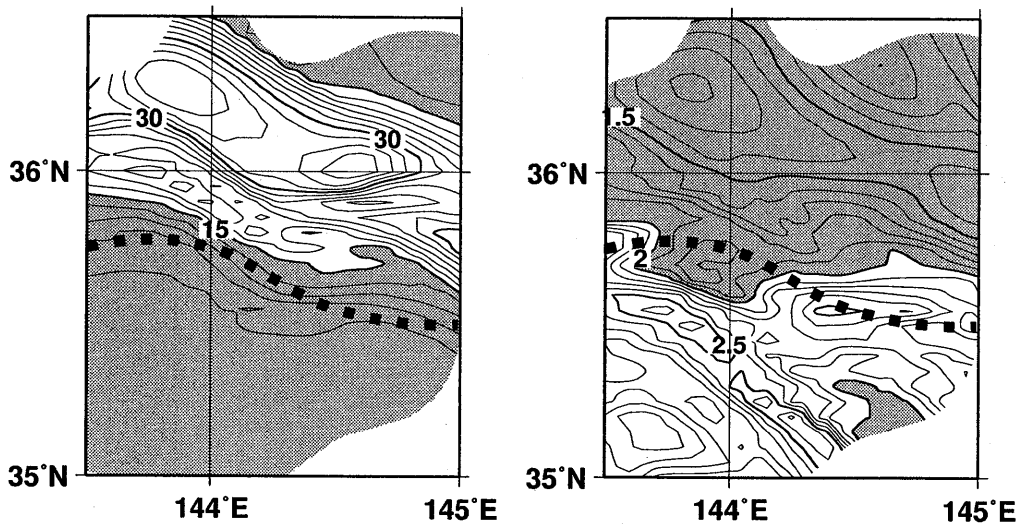


図3 $25.5\sigma_\theta$ (左) と $26.8\sigma_\theta$ (右) 面における渦位前線波動: 上層 ($25.5\sigma_\theta$) の低渦位領域が 144°E 以西にあるのに対し中層 ($26.8\sigma_\theta$) の低渦位領域は下流にずれて 144°E を中心として分布している様子が捉えられている。中層低渦位領域は、低塩分親潮水の性質を持つ。

た. 船舶による観測は、5日間かけて下流から上流に向けて行ったため、上流から伝搬してくる波動を観測した場合、波は折畳まれて観測され実際の波長より短く観測される。このことを考慮に入れ、海面水温前線における擾乱の位相速度 0.2m/s で船舶によって捉えられた擾乱も移動していたと考えれば、実際の擾乱の波長は、約 200km と推定され海面水温前線における擾乱のスケールと一致する。この事実は、海面水温衛星画像の解析から、過去の研究で報告されていた表層前線波動に対応する波動が中層にも存在し、中層ではその振幅が大きく鉛直的な塩分極小構造を伴うことを示唆している。

また、本観測で捉えられた黒潮主流における前線波動は渦位の分布にも表われていた (図3)。渦位場で擾乱を上・中層で比較すると上層に対し中層の低渦位領域が下流に約 $1/4$ 波長程度ずれていた。上層における低渦位の水塊は亜熱

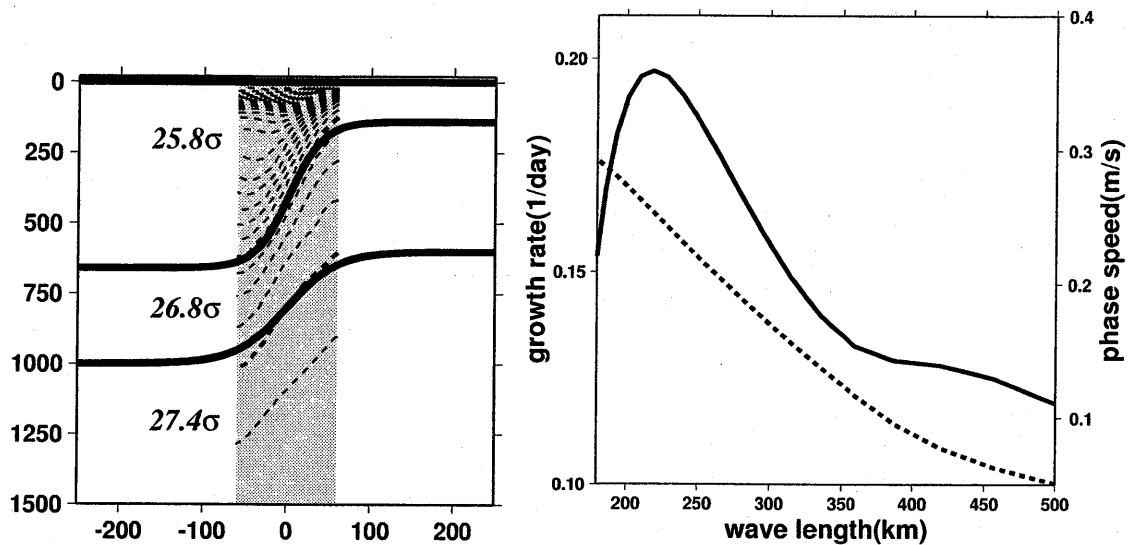


図4 線型不安定解析に用いた平均場(左)と成長率(実線)・位相速度(破線)(右図): 成長率最大となる波動の波長は約220km、位相速度下流に0.25m/s、その時の成長率は約5日でe倍になる程度

帯起源の高塩水であり、中層における低渦位水は、親潮によって運ばれてきた低塩な水塊であるため、表・中層で波動の位相がずれて重なった部分では鉛直的に顕著な塩分極小となる。

黒潮続流は、表層では南が低渦位(層厚が厚い)で北が高渦位(層厚が薄い)であるのに対し、中層では北が低渦位で南が高渦位である。また、鉛直的な流速の変化が大きいため、黒潮続流の流速・成層構造は不安定波動を形成する可能性がある。

観測された波動状構造の成因の物理的解釈を行うため、黒潮続流での観測結果を模した平均場(図4左)のもとで線型不安定解析を行った。その結果、最大成長率を与える不安定波動は、その構造・波長・位相速度が観測と概ね一致していた(図4右)。このことから、観測で捉えられた前線波動は表・中層の渦位勾配に起因する不安定波動であると推測された。波動が発達することで、最終的に砕波が起きれば続流によって隔てられている親潮水・黒潮水の混合を促進し、北太平洋中層水の形成に寄与するものと推測される。また、中層の南北渦位傾度を変えた実験を行い、続流中層北側に低渦位の水塊が存在していることが、この不安定波動に必要な条件であることが確認された。このことは、オホーツク海起源の低渦位の水塊が親潮によって続流中層北側に輸送されて来るという黒潮続流特有の成層構造により、大きな水平混合を生み、流軸を横切る輸送を促進する可能性を示唆するものである。

また、本研究で対象とした黒潮続流における前線波動に伴う流速構造は、メキシコ湾流域における等密度面フロートの挙動と良い一致を示しており、本研究の結果は、続流のみならず、湾流における流軸を横切る水塊交換についても同様のメカニズムが働いている可能性を示唆している。

4 まとめ

黒潮続流流軸付近について詳細な観測を行い、波長約200kmの波動状構造が中層に存在することを初めて指摘した。この波動状構造は、上層にも存在するが、上層塩分前線の波動の谷に対し中層塩分前線の波動の谷は上流にずれて存在しており、さらに中層の波動の振幅が大きいため、上層前線波動の峰から谷に移行する領域で中層では低塩水が貫入して、過去の研究でも報告されている顕著な塩分極小を形成することが明らかとなった。

この顕著な塩分極小を伴う前線波動は、線型不安定解析から、上・中層で南北渦位傾度が逆転しているという黒潮続流の成層構造に起因する不安定波動である可能性が示唆された。前線が不安定に発達することで砕波・渦の切離などの過程を経て続流における等密度面混合・続流を横切る輸送に寄与すると考えられる。