

論文の内容の要旨

Structure and Variability of Surface Layer Salinity in the Subtropical Pacific

(太平洋亜熱帯域における表層塩分の構造と変動)

氏名 桂 将太

塩分は水温と並び、海洋物理学における最も基本的なパラメーターである。外洋の表層塩分の分布と変動は、主に海面での淡水フラックスを反映する。同時に、塩分の変動は、海水の密度を変動させることで海洋循環をコントロールする。塩分の変動を知ることは、大気海洋間の熱・淡水交換を正確に見積もるだけでなく、気候・水循環の変動を理解する上で重要である。これまでに塩分の長期変化が調べられ、全球的な塩分分布のコントラスト強化から、水循環の強化が示唆されてきた(e.g., Wong et al. 1999)。一方で、塩分の季節・経年変動の調査は、時系列データのある限られた海域でのみ可能であった(e.g., Lukas 2001)。近年、アルゴフロートによる観測網の構築により、任意の海域で表層塩分の変動が調査可能になった。

亜熱帯の表層循環は高気圧性の亜熱帯循環と、表層の水が主密度躍層へと沈み込むサブダクションで特徴づけられる。サブダクトした水は、等密度面に沿って熱帯域へと移流される。サブダクション・移流を介して、亜熱帯域の水温偏差が熱帯域へと伝わることによる、長期気候変動の存在の可能性が指摘されている(Gu and Philander 1997)。アルゴデータの蓄積によって、等密度面上における水温・塩分偏差が地衡流によって伝播する様子が捉えられた(e.g., Sasaki et al. 2010)。その形成要因、伝播過程、下流域への影響を詳細に調べるには、亜熱帯域の表層塩分構造とその変動を知る必要がある。亜熱帯域では蒸発が降水よりも大きいために、海面塩分(SSS)極大が位置する。ここでサブダクトした塩分極大水は回帰線水と呼ばれ、亜熱帯域の水温・塩分偏差を下流へと伝えるほか、下流域の成層構造に影響すると考えられている。SSS 極大の赤道側ではバリアレイヤー(BL)と呼ばれる塩分成層構造が形成される。BLは海洋表層から海洋内部への熱・運動量フラックスのバリアとして働くことから、亜熱帯域の水温・塩分偏差に影響する可能性がある。亜熱帯 BL の形成要因として、回帰線水のサブダクションの寄与が指摘されている(e.g., Sato et al. 2004)。これまでに下流域における回帰線水の変動が調べられたが(Kessler 1999; Suga et al. 2000)、回帰線水の形成域における変動、サブダクション・移流過程、BL 形成への寄与を調べることはできなかった。本論文では、主にアルゴデータを用いて、北太平洋回帰線水(NPTW)および南北太平洋亜熱帯域の BL の構造と変動を調べた。

本論文では NPTW の形成・サブダクション・移流過程およびそれらの経年変動を調べた(第2章)。NPTW 形成域である北太平洋の SSS 極大内には、東西に分かれる2つのサブ極大が存在した(図1a)。

これら 2 つのサブ極大では混合層塩分(MLS)の変動が大きく異なり、東側では季節変動が卓越する一方で、西側では経年変動が卓越していた (図 1b, c)。これらの MLS の変動メカニズムを調べるため、各種フラックスデータおよび MLS 収支式(Ren and Riser 2009)を用いた収支解析を行ったところ、東側の季節変動は蒸発、降水、混合層の下からの低塩分水のエントレインメントという鉛直プロセスによって支配されていた。一方で、形成域西側ではエントレインメントの寄与が小さく、蒸発過多となり収支は閉じなかった。

次に、NPTW のサブダクション・移流過程を調べた。冬季にアウトクロップする密度面が NPTW 形成域の東西で異なり、東側ではポテンシャル密度 $\sigma_\theta = 24.5 \text{ kg m}^{-3}$ 、西側では $\sigma_\theta = 24.0 \text{ kg m}^{-3}$ の NPTW がそれぞれサブダクトしていた。形成域よりも西側の下流域では、 $\sigma_\theta \sim 24.0 \text{ kg m}^{-3}$ の亜表層塩分極大が形成されていた。さらに、 $\sigma_\theta = 24.0 \text{ kg m}^{-3}$ の等密度面上では形成域西側から地衡流線に沿って塩分極大が伸びていたほか、この密度面上の塩分偏差は形成域西側の経年変動を反映していた。このことから、下流域の亜表層塩分極大は形成域西側からサブダクトした NPTW であると考えられる。

形成域西側では MLS の収支が閉じなかったが、これは水平拡散によって説明できる可能性がある。水平拡散係数の分布(Zhurbas and Oh 2004)を見ると、NPTW 形成域西側では東側よりも水平拡散係数が大きく、その値から見積もられる水平拡散の寄与は収支の不一致分と同等であった。また、形成域西側における残差項と渦運動エネルギー(EKE)を計算し、比較したところ、両者はよく似た経年変動を示し、高い正の相関を示した。北太平洋亜熱帯域の EKE の変動と PDO index には正の相関があることが報告されている(Qiu and Chen 2013)。そこで、NPTW の経年変動と PDO の関連を調べるため、気象庁の東経 137 度線データを解析した。東経 137 度における NPTW の塩分極大値と PDO index のラグ相関をとったところ、両者は 3 年のラグで負の相関を示した。この 3 年のラグは PDO index と EKE 間のラグ 1 年に NPTW 形成域から東経 137 度までの移流期間 2 年を足したものとよく一致する。以上より、形成域西側の蒸発過多は渦拡散と釣り合っている可能性があり、そこでの NPTW の経年変動は渦拡散を介して PDO と関連している可能性がある。

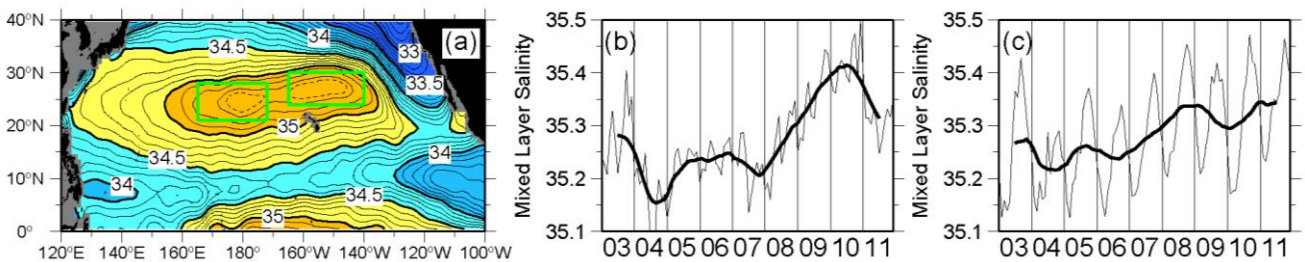


図 1 (a)2003–11 年の北太平洋の平均海面塩分分布。破線は 35.35 の等値線を示す。緑の長方形は東西 2 つのボックスを表す。(b, c) 西側(b)および東側(c)のボックスにおける 2003–11 年の混合層塩分の時間変化 (細線) とその 12 ヶ月移動平均 (太線)。

続いて、南北太平洋の亜熱帯域における BL の季節・経年変動および形成メカニズムを調べた (第 3 章)。アルゴの格子化データでは、BL は各半球の冬季に亜熱帯域の SSS 極大の赤道側にある SSS フロントに伴って広く分布し、先行研究と整合的な季節・分布特性を示した (図 2)。アルゴフロートによって観測された BL はその頻度と厚さが北半球では 2 月、南半球では 8 月にそれぞれ極大を示し、その頻度は冬季でも約 35%であった。これは先行研究によって示唆された、亜熱帯域 BL が空間スケールの小さい現象であることと整合的である。さらに、70%以上の BL が同一のアルゴフロートによって連続観測されていなかったことから、BL の時間スケールが 10 日程度であると見積もられた (図 3)。

続いて、亜熱帯域 BL の形成メカニズムを調べた。まず、回帰線水のサブダクションによる亜表層の高塩化を調べるため、WHP の冬季の南北断面観測データを解析した。両半球で、SSS フロント付近に BL が形成されていた。しかし、観測された BL 内では溶存酸素が飽和していたほか、BL を含めた等温層内で鉛直に一律な値を示すことから、BL 内の高塩分水は回帰線水のサブダクションに伴ったものではないと考えられた。次に、海面付近の低塩化の寄与を調べるため、MLS 収支式を用いて降水と Ekman 輸送の寄与を比較したところ、極向き Ekman 流による低塩分水輸送の寄与が卓越していた。しかし、BL の季節性を十分に説明することはできず、先行研究(e.g., Mignot et al. 2012)によって示唆された BL の秋季から冬

季にかけての成長には、BLの時間スケールは短い。以上の結果から、亜熱帯域 BLの本質的な形成メカニズムは極向き Ekman 移流による SSS フロントの tilting であると考えられる。この考えは、SSS フロント域では、海面密度の南北勾配に対して SSS の南北勾配が支配的な寄与を持つこと、等温層深度と BLの季節性がよく対応することからも支持される。また、海洋大循環モデルのアウトプットデータの解析では、BLが等温層内の塩分輸送の強い鉛直シアーに伴って分布する傾向があること、等温層内の流速の鉛直シアーは非地衡成分が卓越することが確認でき、Ekman 流に起因する SSS フロントの tilting による BL 形成を支持する結果であった。

冬季 BLの頻度と厚さは南北太平洋で共に経年変動を示した。北太平洋では両者は負の相関を示した一方で、南太平洋では正の相関を示した。南北ともに、BL厚の経年変動は等温層深度の経年変動を反映していた。北太平洋では、BL厚と等温層深度が PDO index と負の相関を示した。これは PDO の warm phase に貿易風が弱まることで等温層が浅くなり (Carton et al. 2008)、それに伴い BL厚が小さくなるという関係を示していると考えられる。一方で、南太平洋では BL厚と ILD 共に Niño3 index と負の相関を示した。これは La Niña 時には貿易風が弱まることで、等温層が浅くなることと整合的である (Carton et al. 2008)。以上より、冬季 BL厚は貿易風強度を介して、北太平洋では PDO、南太平洋では ENSO と関連していると考えられる。

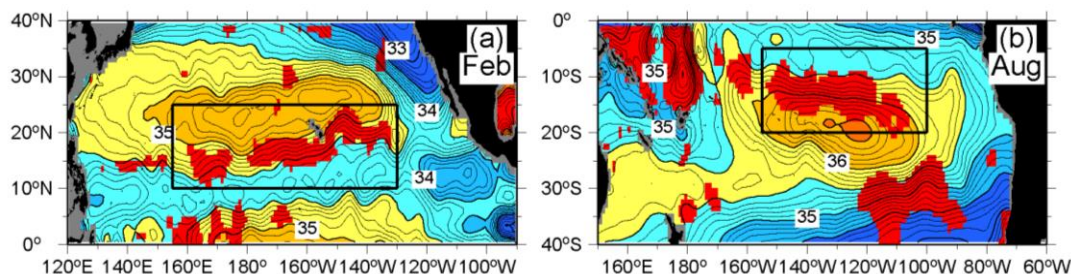


図2 MOAA_GPVによる2003-12年の北太平洋の2月(a)と南太平洋の8月(b)の平均海面塩分分布。赤色部は厚さが20 dbar以上のBL域を示す。黒長方形はボックスを表す。

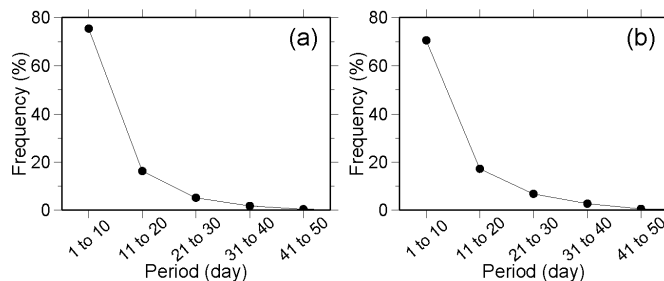


図3 2003-12年に図2の北太平洋(a)と南太平洋(b)のそれぞれのボックスの海面塩分フロントにおいて、アルゴフロートが厚さ10 dbar以上のBLを連続観測した期間の割合

本研究は、NPTW および南北太平洋亜熱帯 BLを調べることで、太平洋亜熱帯域の表層塩分の構造と変動に関する描像を提示した (図4, 5)。NPTW のサブダクション・移流によって、PDOに関連した水温・塩分偏差を下流域へと伝えていたが、南太平洋においても PDOを反映した偏差が南太平洋回帰線水のサブダクションを介して下流域へと伝播することが報告されている (Zhang and Qu 2014)。このことから、PDOが両半球から回帰線水の移流を介して熱帯域へと影響する可能性が考えられる。

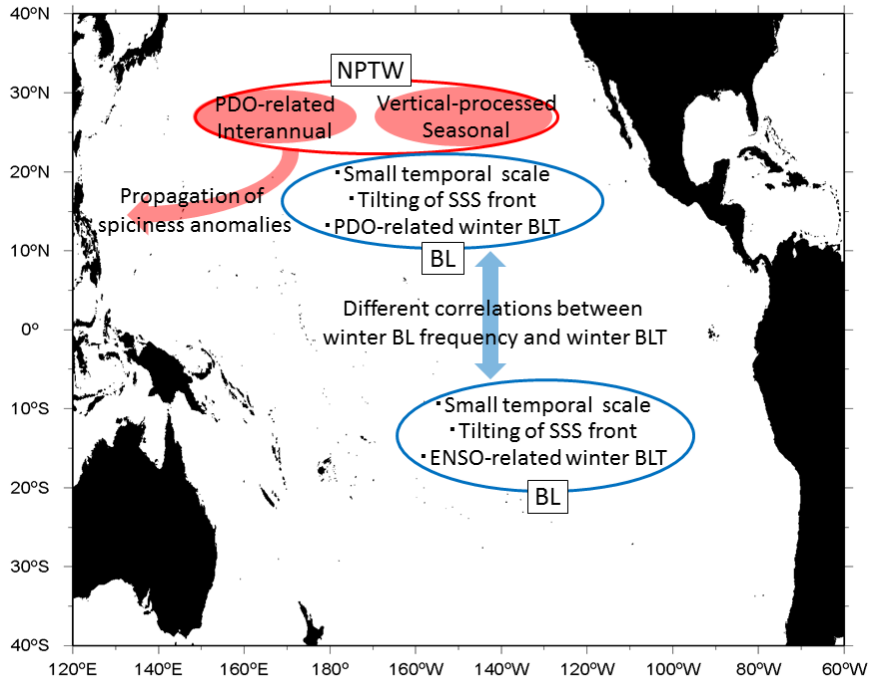


図 4 本研究で明らかにした太平洋亜熱帯域の表層塩分の構造と変動の模式図

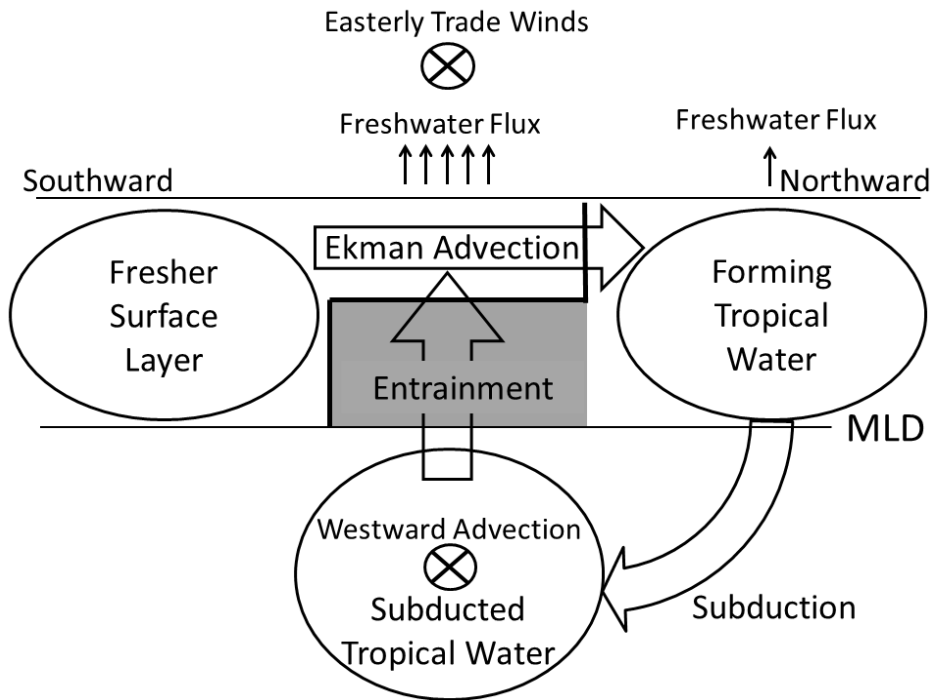


図 5 北太平洋亜熱帯域における表層塩分の南北一鉛直構造と回帰線水の南北循環の模式図。陰影は *tilting* で形成された BL を示す。