

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 31 年度

受付番号 201960210

氏 名 桂 将太

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。
なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： サンディエゴ（国名：アメリカ合衆国）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
東部熱帯太平洋におけるバリエイヤーの特性、形成メカニズム、変動の観測的研究
3. 派遣期間：平成 31 年 4 月 1 日 ~ 令和 3 年 9 月 30 日（914日間）

4. 受入機関名及び部局名

受入機関名：カリフォルニア大学サンディエゴ校部局名：スクリプス海洋研究所5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**

【記載事項】

- ・ 研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等
 - ・ 新型コロナウイルス感染症の影響にかかる特例措置のうち、国内採用開始・採用期間延長・翌年度渡航のいずれかの適用を受けた場合は、当該措置の適用による影響等
- (注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

(1) 本研究課題の背景と目的

本研究課題の目的は、東部熱帯太平洋におけるバリエイヤーの特性、形成メカニズム、変動を海洋観測データによって明らかにすることである。通常、海面からある程度の深さまでは、混合により水温・塩分・密度が鉛直に一様な値を示し、混合層と呼ばれる。いくつかの海域では、水温が鉛直に一様である等温層内に、塩分による密度成層があるために、等温層深度よりも浅い混合層が分布する。このような場合、両者の間の層をバリエイヤー (BL) と呼ぶ

(図 1)。BL は、混合層の底での鉛直混合による冷却効果が阻害するなど、海洋表層から内部への熱・運動量輸送のバリアとして働き、大気海洋相互作用に重要な役割を果たす。太平洋における BL は、その存在が初めて報告された西武熱帯太平洋において盛んに研究されてきた。一方で、本研究課題の対象域である東部熱帯太平洋では、気候値データの解析により BL 厚が西部に比べて小さく、BL の影響は小さいと考えられてきた。しかし、東部熱帯域では混合層深度が他の海域よりも極端に浅いことが知られており、BL 厚が小さくても、海面近くに分布しているために海面水温に大きな影響を持つ可能性を示唆している。派遣 1 年目は、自動観測フロート (アルゴフロート) による観測データを主に

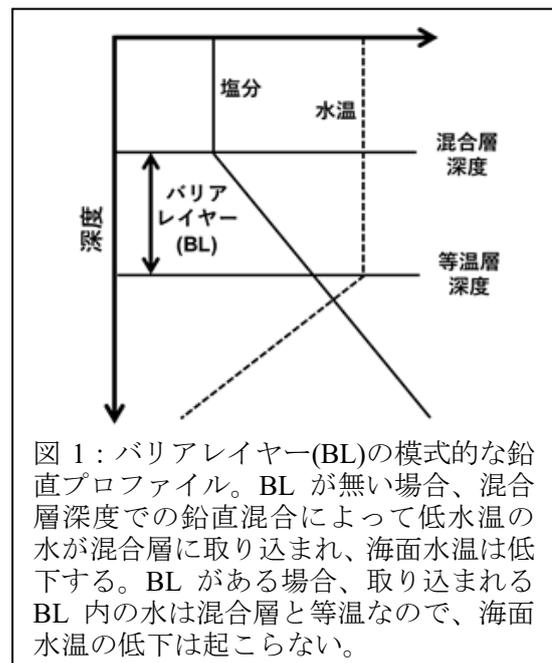


図 1：バリエイヤー (BL) の模式的な鉛直プロファイル。BL が無い場合、混合層深度での鉛直混合によって低水温の水が混合層に取り込まれ、海面水温は低下する。BL がある場合、取り込まれる BL 内の水は混合層と等温なので、海面水温の低下は起こらない。

使用し、北太平洋東部熱帯域における BL の季節性と形成に関する研究を行った。派遣 2 年目および新型コロナウイルス感染症の影響にかかる特例措置による採用期間延長中は、船舶観測データによるより小さい時空間スケールの BL 形成に関する研究、係留系の時系列観測データを用いた、BL 形成と BL が海面水温に及ぼす影響に関する研究を行った。

(2) 本研究課題の進捗状況および成果

①アルゴデータを用いた BL と水温逆転の季節性および形成に関する研究

まず、2003 年から 2018 年までのアルゴデータを用いたほか、衛星による海面塩分および海面水温データを使用した。太平洋における BL の分布を調べたところ、北太平洋東部熱帯域では、夏季から秋季にかけて厚い BL が形成され、海面塩分極小域（淡水プール）の南に位置する海面塩分フロントに沿って分布していた（図 2a）。また、BL に伴って、BL 内の水が海面よりも高温である水温逆転が観測され、西部と東部の暖水プールの間に分布していた（図 2b）。この BL および水温逆転が観測された海域にボックスを設定し（図 2）、ボックス内における両者の季節変動を調べたところ、BL の観測頻度は 7 月および 10 月にピークを示し、BL 厚は 10 月に最も厚かった。水温逆転は頻度・大きさ共に 9 月–10 月にピークを示し、BL の季節性に対応していた。次に、観測された BL の形成メカニズムを明らかにするため、混合層塩分の収支式を用いた解析を行い、降水およびエクマン移流、地衡流移流による低塩化の寄与を調べた。夏季には降水による低塩化が東部熱帯域で広く分布し、BL の広い分布と対応していることから、7 月の BL 観測頻度のピークは降水によるものだと考えられる。しかし、BL 厚の極大域は降水による低塩化の極大域の南に位置し、南北方向のずれが見られた。BL が最も厚くなる秋季においては、降水による低塩化の範囲が狭くなり、夏季同様の南北方向の位置のずれが見られた。次に、エクマン流による低塩化を調べたところ、海面塩分フロントに沿って低塩化の東西バンドが形成され、夏季・秋季の BL の分布と良く対応していた（図 3a）。この海域では、夏季から秋季にかけて風向きが変わり、北東方向の風が卓越していた。これに伴い、南東向きのエクマン流が駆動され、淡水プール内の低塩分水が移流されることで夏季と秋季に低塩化の東西バンドが形成されることがわかった。同様に、エクマン流による水温の移流の寄与を調べたところ、BL に伴う水温逆転の分布域において、夏季と秋季にエクマン流による低温化が起こっていることがわかった。以上の結果より、北太平洋東部熱帯域における BL および水温逆転の形成は、主にエクマン流による水平移流によるものであり、降水の寄与は二次的であると示唆された。しかしながら、エクマン流による BL・水温逆転の形成には、塩分の水平勾配による密度の水平勾配への寄与が水温の水平勾配による寄与よりも大きくなければならず、さらに、水温逆転の形成には、両者は密度補償する関係になければならない。この条件が、BL が分布する海域で満たされるかどうかを確かめるために、南北密度比というパラメーター (R_y) を導入し、その分布を調べた。(BL 形成のためには $-1 < R_y < 1$ を満たす必要があり、水温逆転形成のためには $0 < R_y < 1$ を満たす必要がある。) 北太平洋東部熱帯域では、BL が分布している淡水プールの南にある海面塩分フロント域で、BL 形成の条件が満たされており、さらにその北部では水温逆転形成の条件が満たされていることが分かった（図 3b）。これにより、この海域の BL は主にエクマン流による海面塩分フロントの

tilting によって形成されることが示唆された（図 4）。これらの研究結果は、これまで着目されてこなかった東部熱帯太平洋において、BL に伴って強い水温逆転が分布することを報告し、BL が従来考えられていたよりも海面水温に大きな影響を持つ可能性を示す。以上の研究内容は、米国気象学会誌 (Journal of Physical Oceanography) に投稿し、受理・掲載されたほか、シンポジウム・国際学会で発表した。

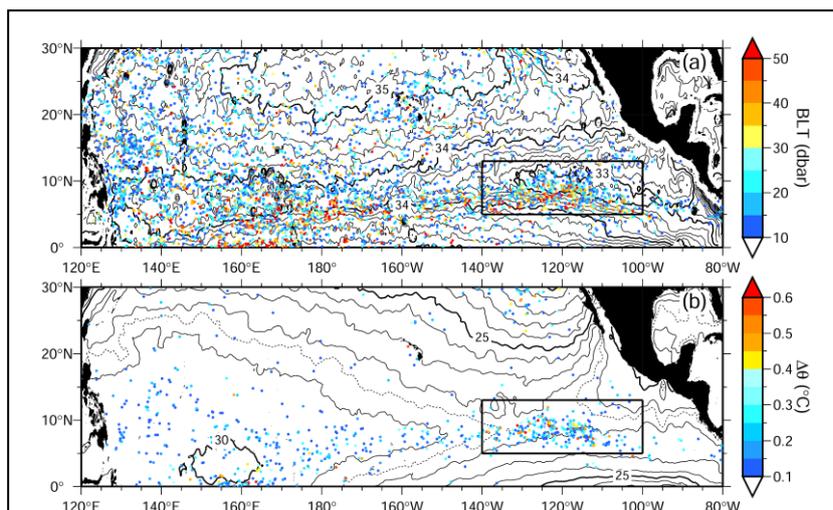
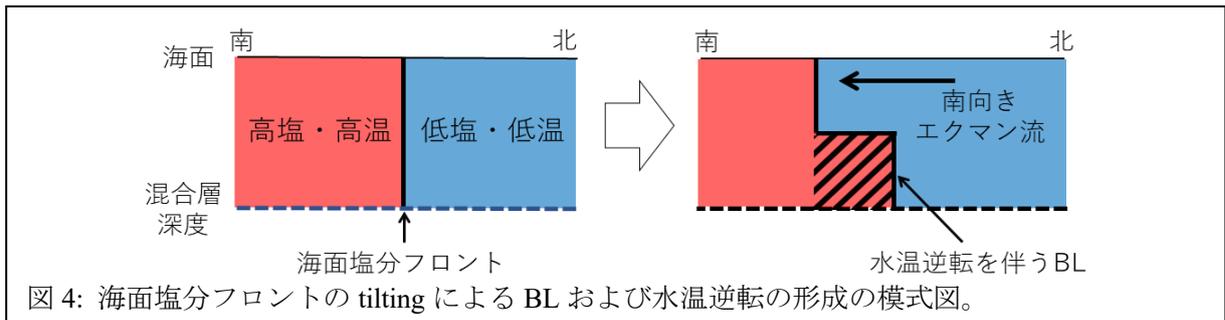
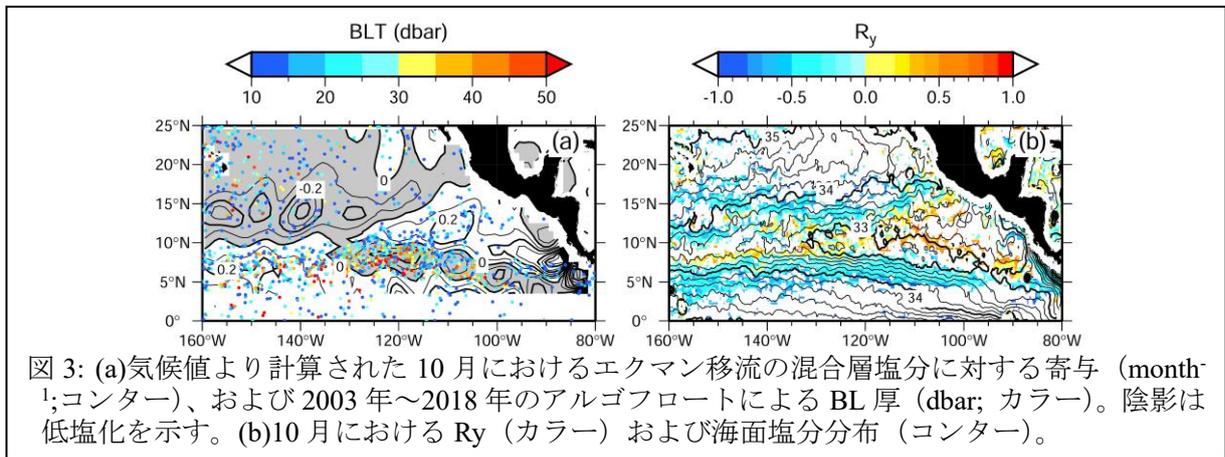
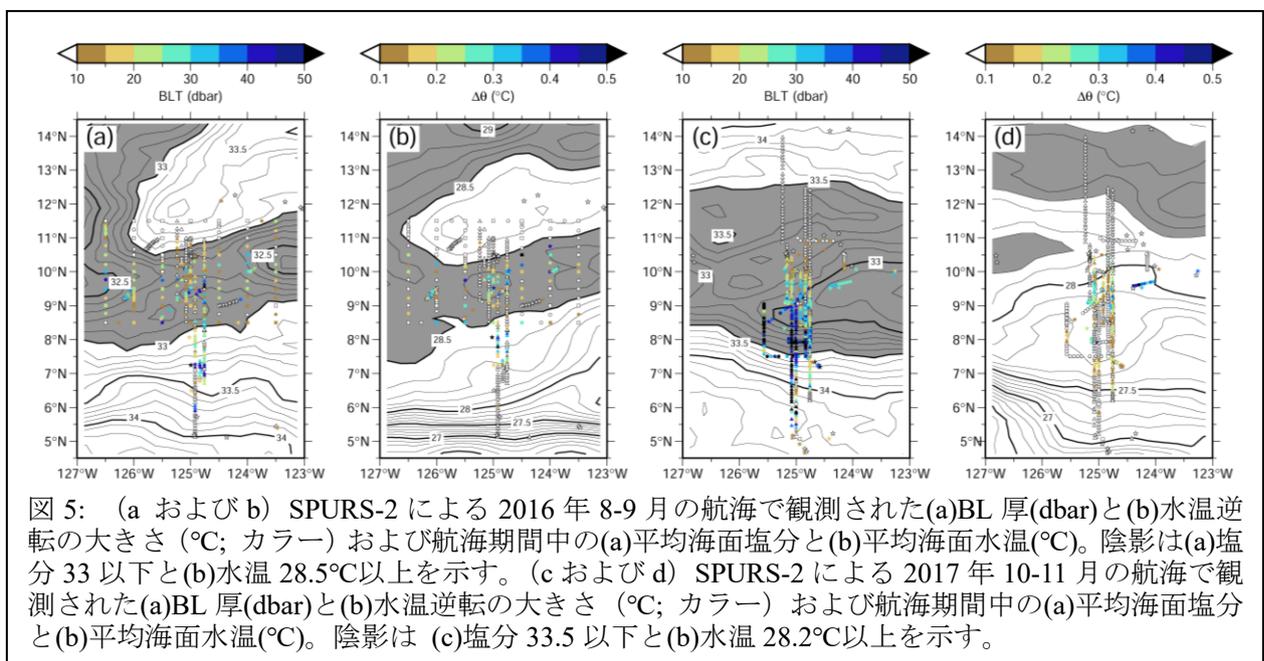


図 2: 2003 年～2018 年における、アルゴフロートによる(a)BL 厚 (dbar)と(b)水温逆転の大きさ(°C) (カラー)、および 10 月の(a)平均海面塩分と(b)海面水温 (コンター)。



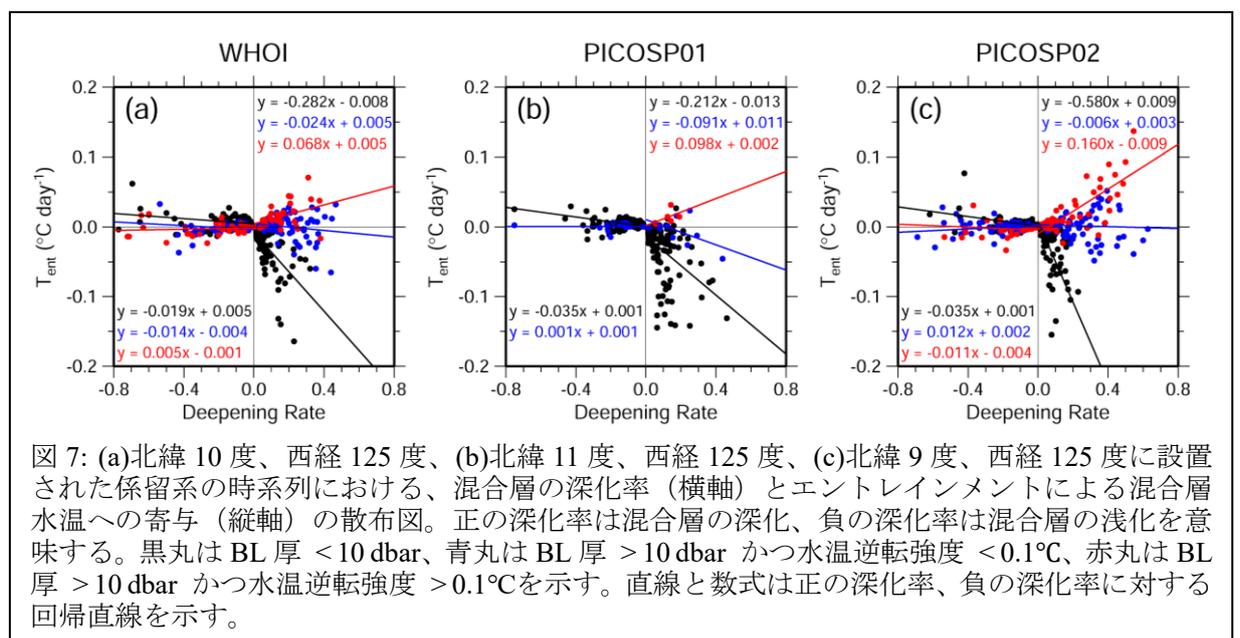
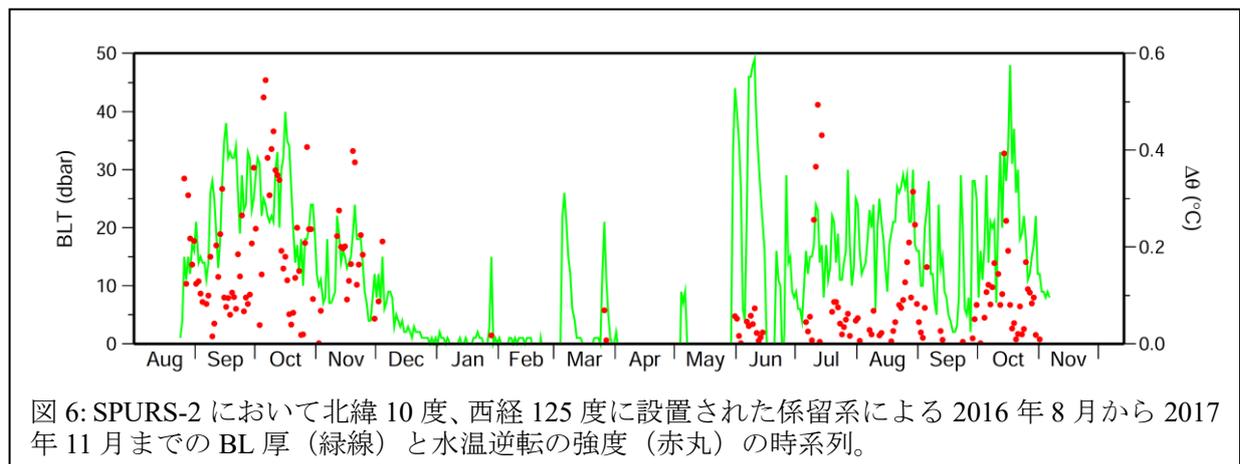
②高解像度船舶観測データを用いた BL および水温逆転の特性、形成に関する研究

上記のアルゴフロートによる観測データを用いた研究に引き続き、NASA による北太平洋東部熱帯域の観測プロジェクト (SPURS-2) のデータを用いて、BL と水温逆転の特性・形成に関してより詳細な解析を行った。SPURS-2 では 2016 年 8-9 月と 2017 年 10-11 月に船舶観測が行われ、それぞれの航海で空間的に高解像度な船舶観測が行われた。それぞれの航海で、強い水温逆転を伴う厚い BL が観測された (図 5)。2016 年夏季の航海では、BL と水温逆転が淡水プール内、海面塩分フロント域、および両者の移行域で観測された (図 5a, b)。2017 年秋季の航海では、BL および水温逆転は淡水プールの南部から海面塩分フロント域にかけて観測された (図 5c, d)。2016 年夏季と 2017 年秋季の両航海において、上記①のアルゴフロートによる研究結果と同様、移行域および海面塩分フロント域の BL の分布と降水の極大には南北のずれが見られた。また、両航海において、海面塩分フロント域ではエクマン流による海面の低塩化・低温化が BL と水温逆転の形成に支配的であり、①のアルゴデータによる研究成果と整合的であった。淡水プール域と海面塩分フロント域の間に位置する移行域では、地衡流が BL と水温逆転の形成に支配的であるという、①のアルゴデータの解析では捉えられなかった、新たな知見が得られた。両航海期間中、海面塩分フロ



ントは海面密度の勾配に支配的な寄与を持ち、水平移流による BL・水温逆転形成を支持するものであった。また、2016 年夏季の航海で取得された溶存酸素のプロファイルと比較すると、水温逆転の深度と垂表層の酸素極大の深度が良く対応しており、水平移流による BL および水温逆転の形成と対応していると考えられる。以上の内容は、米国地球物理学会誌(Journal of Geophysical Research)に投稿し、受理・掲載されたほか、国際学会で発表した。

③係留観測の時系列データによる BL と水温逆転の時間変動および海面水温への影響に関する研究
 SPURS-2 では、②の船舶観測のほか、3 系の係留系が設置され、2016 年夏季から 2017 年秋季かけて水温・塩分の鉛直プロファイルの時系列データが得られた。これらの係留観測では、夏季と秋季に厚い BL とそれに伴う強い水温逆転が観測され、アルゴデータの解析で見られた季節性と整合的であった(図 6)。係留系で観測された BL および水温逆転の形成メカニズムを明らかにするため、混合層塩分および水温の収支解析を行った。混合層塩分収支解析によって、BL がまず水平移流による海面の低塩化によって夏季に形成された後、降水によって BL が維持されることが明らかになった。また、混合層水温収支解析により、混合層の底から下向きの短波放射の透過による垂表層の高温化が、水温逆転に支配的な寄与を持ち、地衡流による海面の低温化は 2 次的な寄与を持つことが明らかになった。また、混合層が深化した際に下層にある水を取り込むこと(エントレインメント)による混合層水温への寄与を計算したところ、BL が存在するときにはエントレインメントによる冷却効果が阻害されていること、BL が水温逆転を伴う場合には、冷却効果を阻害するだけでなく、混合層水温を上昇させていることがわかった(図 7)。さらに、BL が存在するときには、混合層の海面淡水・熱フラックスに対する感度が、混合層深度が浅いために高くなることが分かった。特に、BL の存在によって垂表層への短波放射の透過量が大きくなり、水温逆転の形成を促進することが分かった。以上の結果は、学会・国際シンポジウムで発表したほか、投稿論文として準備中である。



④新型コロナウイルス感染症の影響にかかる特例措置（採用期間延長）の適用による影響

新型コロナウイルス感染症の影響にかかる特例措置により、採用期間を6ヶ月延長していただいた（2021年4月～9月）。派遣2年目は新型コロナウイルス感染症の影響により、受入研究機関のオフィスでの研究活動ができず、研究の進捗に遅れが出ていた。6ヶ月間の延長期間中に滞っていた研究内容、特に上記の「③係留観測の時系列データによるBLと水温逆転の時間変動および海面水温への影響に関する研究」を発展させることができ、まもなく論文投稿できる状況である。