

論文内容の要旨

論文題目：

Generation mechanisms of seasonal and interannual variations in the Hawaiian Lee Countercurrent and a role of local air-sea interactions on the variations

(ハワイ風下反流の季節・経年変動機構とそれらに対する局所的な大気海洋相互作用の影響)

氏名： 佐々木 英治

1. はじめに

熱帯域では、エルニーニョ／南方振動 (El Niño/Southern Oscillation; ENSO) に代表される大規模な大気海洋相互作用が気候変動に影響を及ぼすことが知られているが、中緯度域では、海洋は単に大気に応答するだけで、大気に大きく影響を及ぼすとは考えられてこなかった。しかし、近年の高解像度衛星観測データから、中緯度域のサブメソスケール現象に伴い、海面水温と海上風との高い相関が示され (Chelton and Xie, 2010)、またメキシコ湾流や黒潮流域の海洋前線上で、海面水温の影響が対流圏全体に及ぶことも明らかにされ (Minobe et al., 2008; Tokinaga et al., 2011)、熱帯域以外での大気海洋相互作用の重要性が強く指摘されている。

ハワイ風下反流 (Hawaiian Lee Countercurrent; HLCC) は、熱帯域以外で顕著な大気海洋相互作用を伴うもう一つの事例と考えられている。HLCC は、ハワイ諸島から日付変更線を越えて西に延びる東向きの反流で、貿易風がハワイ諸島で遮られた島影に励起されるダイポール構造の風応力カールで生成されると考えられており (Xie et al., 2001)、その流軸はやや南西方向に傾いている。また、HLCC は海面水温極大を伴い、その上空では海上風の収束と活発な雲の生成が報告されており (Xie et al., 2001)、これらの大気応答に伴う海洋への熱的フィードバックも示唆されている (Xie et al., 2001; Hafner and Xie, 2003)。また、熱帯収束帯の南北移動と関連して、夏から冬に強く春に弱くなる季節変動が示されているほか (Kobashi and Kawamura, 2002)、経年変動の存在も示唆されている (Sasaki et al., 2010)。HLCC は主要な大陸から離れた場所に存在しているため大気海洋相互作用の研究に適しているが、その季節・経年変動機構や局所的な大気海洋相互作用の詳細は、未だに明らかにされていない。

そこで本研究では、HLCC の季節変動、経年変動のメカニズムおよび海面水温極大が引き起こす大気海洋相互作用の詳細について、衛星観測、アルゴフロートデータおよび大気海洋結合モデルを用いて調べた。

2. ハワイ風下反流の季節変動機構

HLCC の季節変動機構を調べるため、AVISO による水平解像度 0.25 度の海面高度データ (1993 年から 2008 年) とその海面高度データから求めた地衡流、J-OFURO データセットに含まれる水平解像度 0.5 度の QuikSCSAT 風応力データ (2000 年から 2008 年) (Kubota et al., 2002)、および水平解像度 0.25 度の TRMM 衛星による海面水温データ (2001 年から 2008 年) に見られる気候値の季節変動を解析した。

衛星観測データから得られた地衡流、海面水温、風応力の季節変動は、先行研究と同様に、HLCC が夏から冬にかけて海面水温極大と風応力の収束を伴って強化されることを示している。また、この季節変動は熱帯収束帯の南北移動に関連して島影の風応力カールが 4 月から 10 月にかけて強化されることと同期している (図 1)。一方、海面高度の季節変動は、HLCC の南側で顕著で、その変動に伴い HLCC に対応する地衡流の季節変動が励起されていることが示唆された (図 1)。また、この海面高度の変動は、風応力カールにより励起されたロスビー長波の伝播によりもたらされていることが明らかとなった。

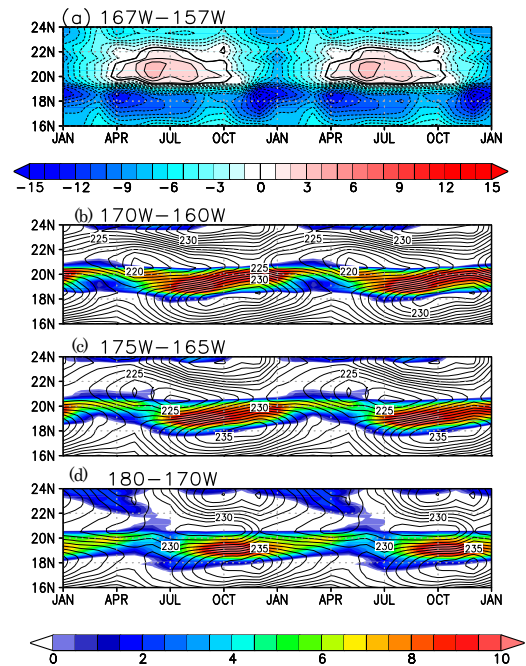


図 1. (a) QuikSCAT 風応力のハワイ付近 (167–157° W) の風応力カール (10^{-8} N/m^2) の季節変動. AVISO 海面高度 (cm) とその東向き地衡流 (cm/s) の東西 10 度平均 ((b): 170–160° W, (c): 175–165° W, (d): 180–170° W) の季節変動。

3. 局所的な大気海洋相互作用の影響

HLCC に伴う局所的な大気海洋相互作用の詳細を明らかにするため、まず 150 年間の積分実験が実施されている大気海洋結合モデル CFES 中解像度版 (Taguchi et al., 2011 など) で再現された HLCC の構造を調べた。CFES 中解像度版の大気モデルは水平解像度 1 度、鉛直 48 層、海洋モデルは水平解像度 0.5 度、鉛直 54 層である。積分開始後 115 年目の夏季 (7–9 月) に見られる HLCC はハワイから日付変更線付近まで伸び、その東向き流に沿って海面水温極大と海上風の収束も現実的に再現されていた (図略)。そこで、115 年目の夏季のケースを標準実験とし、海面水温極大による局所的な大気海洋相互作用の影響を調べる感度実験を行った。感度実験では、海洋モデルから大気モデルへ与える海面水温場に関して、HLCC に沿った海面水温極大を除くように、180°–165°W, 15°N–23°N の範囲で海面水温を南北方向に平滑化した。

標準実験と感度実験の結果を比較することにより、海面水温極大に伴う局所的な大気海洋相互作用とその海洋へのフィードバック機構について、特にこれまでほとんど調べられていない力学的なフィードバック過程に注目して解析を行った。標準実験の結果は感度実験の場合と比較して、HLCC に沿う海域で海上風の収束と雲水量 ($> 30 \text{ g/m}^2$) が大きく、海面水温極大による大気応答の違いが示された。また、雲量の増加による短波放射の遮蔽および風-蒸発-海面水温 (WES) フィードバックによる海面冷却が感度実験の結果に比べて標準実験で顕著 ($> 5 \text{ W/m}^2$) であり、海洋への熱的なフィードバックも存在していることが分かった。

一方、標準実験の HLCC に伴う東向き海面流速は感度実験より最大 2 cm/s 程度強く、その差は HLCC の南側で特に大きい (図 2a)。また、その流速差の鉛直分布には、混合層内と密度躍層付近に明確な極大があることも分かった。これらの流速差分布の特徴は、以下のように説明できる。まず海面水温極大

に向かって収束する海上の南北風は、海洋表層のエクマン流を励起し、HLCC の北側で西向き、南側で東向きの流れを作り、それぞれ HLCC を減速、あるいは加速することになる。また、収束する海上の南北風はコリオリ力により偏向し、HLCC の北側で北東風、南側で南西風の傾向を示す。これにより HLCC 直上では正の風応力カールが生成され、エクマンサクシオンにより海洋内で上昇流が励起される。これに伴い HLCC 直下の水温躍層が浅化し、反時計回りの循環をもたらす。その結果、水温躍層付近では HLCC の南側で東向きの流れが加速され、北側では減速する。このような力学的なフィードバック機構によって、HLCC が加速され、その流軸も南側へ数十 km 程度ずれることが分かった。さらに、南側で顕著な HLCC の加速により西側からの暖水移流が促進されることで、標準実験における海面水温極大の位置も、感度実験の結果に比べて数十 km 南側に移動する (図 2b)。海洋の表層混合層内の熱収支解析から、この暖水移流の強化が HLCC 付近の局所的な温度場の変動に影響を及ぼしていることも示された。大気海洋結合過程と海洋への力学的なフィードバック機構は、HLCC が季節的に顕著となる夏季に強く働くため、HLCC の季節変動を増幅していることが示唆される。

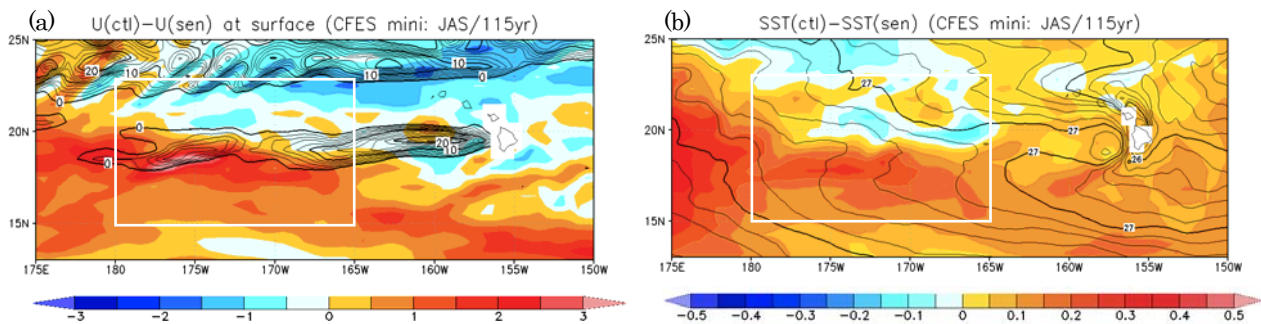


図 2. (a) 東向き海面流速 (cm/s)、(b) 海面温度 (°C). (色) [標準実験]-[感度実験]、(コンター) 標準実験. 感度実験では BOX 内の海面温度を平滑化.

4. ハワイ風下反流の経年変動機構

衛星観測の海面高度と風応力データに加え、OISST.v2 の海面水温データを用いて、HLCC の経年変動を調べた。海面高度分布から求めた海面における地衡流は、西経 165 度を境に、その東西で異なる経年変動を示す。西経 165 度からハワイ諸島の近傍までの海域では、HLCC に伴う東向き流に ENSO 現象に関連する経年変動が見られるが、その地衡流の流量の経年変動の標準偏差 ($4.6e3 \text{ m}^2/\text{s}$) は、西経 165 度以西のハワイから離れた領域 ($6.9e3 \text{ m}^2/\text{s}$) と比較して小さい。一方、西経 165 度以西で顕著な経年変動は ENSO にほぼ同調する風の変動では説明できず、異なる原因によって経年変動がもたらされている可能性が示唆される。この経年変動の原因を明らかにするため、亜熱帯反流の生成メカニズムとして考えられている亜表層の低渦位水の影響に注目し、HLCC の経年変動と海洋亜表層の変動との関連を検討した。海洋亜表層の解析には主にアルゴフロートデータを用い、最適内挿法で構築された 2001 年から 2008 年までの水平解像度 1 度の格子の水温、塩分および海面力学高度データ (MOAA GPV データセット) を用いた (Hosoda et al., 2008)。

ハワイの遠方では 2003 年および 2005 年に HLCC が強く、その時には HLCC の北側の海洋亜表層に低渦位偏差が広く分布していることが分かった (図 3)。この低渦位偏差領域の上部では、亜表層の等密度面が上昇し、等密度面の南北勾配を強化する。これは、温度風の関係から、HLCC の強化と整合的である。特に 2003 年は $25.0\sigma_\theta$ 密度面、また 2005 年には $25.4\sigma_\theta$ 密度面に顕著な低渦位偏差が HLCC 付近に分布していることが分かった (図 3)。これらの低渦位偏差は、それぞれ東亜熱帯モード水および亜熱帯モード水と関連して北太平洋中東部域から HLCC 付近へ進入していることが示唆された。また、季節変

動と同様、局所的な大気海洋相互作用による海洋へのフィードバック過程は、HLCC の経年変動も増幅する傾向がある。

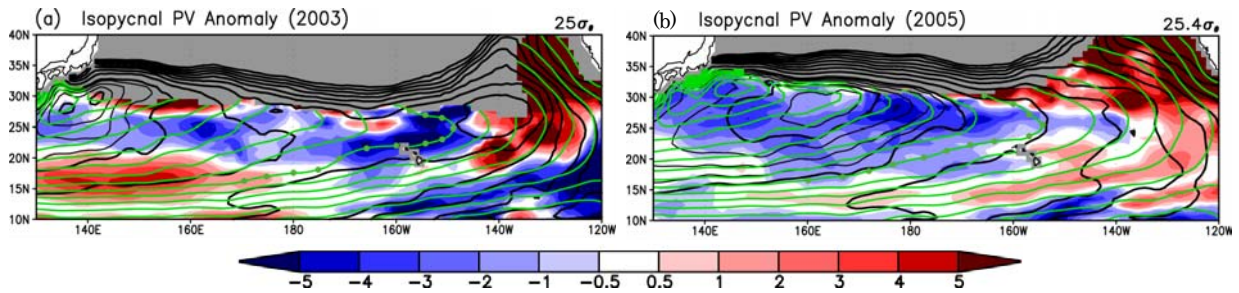


図3. (a)2003年の $25.0\sigma_{\theta}$ 等密度面における2001-2008年の平均からの渦位偏差($1e-10$ 1/m/s)。 (b)2005年の $25.4\sigma_{\theta}$ 等密度面の渦位偏差。

5. まとめ

本研究では、亜熱帯域に分布するHLCCの季節および経年変動に重要な過程を明らかにし、HLCCに伴う局所的な大気海洋相互作用のメカニズム、特に海洋へのフィードバック機構を明らかにした。本研究で得られた結果は、海洋の前線構造に伴い、熱帯域以外でも顕著な大気海洋相互作用が存在することを示し、気候変動システムの重要な要素として近年注目されている亜熱帯域や中緯度域での大気海洋相互作用の研究に貢献するものである。