

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 201960138

氏名 升永 竜介

(氏名は必ず自署すること)

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：ホノルル（国名：米国）
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。
海面水温の微細構造が大气へ及ぼす影響の包括的研究
3. 派遣期間：令和 1年 10月 22日 ～ 令和 2年 5月 16日
4. 受入機関名及び部局名
ハワイ大学 海洋学部門 国際太平洋研究センター
5. 所期の目的の遂行状況及び成果

始めに

赤道海域において、海面水温の暖水上で海上風が加速され、逆に冷水上で減速される関係にあることが知られており、そのメカニズムの解明のために多くの観測・理論的研究が行われてきた。一方、中緯度海洋は熱帯域に比べて海面水温が低いために、大気に対して顕著な影響は及ぼさないと長い間考えられてきた。また、中緯度海洋は熱帯域に比べて温帯低気圧などの移動性擾乱活動が活発であるため、海洋が大気へ及ぼす能動的な影響を純粹に抽出することは困難であった。

しかしながら、近年の高解像度衛星観測や数値モデルの急速な発展とデータの蓄積により、黒潮やメキシコ湾流、アガラス反転流などの中緯度西岸境界流付近における海面水温のメソスケール（概ね 100km 程度）の構造が、海面から大気への活発な顕熱放出や水蒸気供給を通じて大気境界層を変質させることで、中緯度においても海上風の局所的な加速・減速をもたらすことが見出された。こうした海面水温のメソスケール構造の影響は海面付近に留まらず、対流圏における上昇流の分布に影響を与え、さらに雲や降水の分布に及ぼすことも指摘されている。

海上風を加速・減速させる主要なメカニズムとして、鉛直混合メカニズムと圧力調節メカニズムが長い間着目されてきた。鉛直混合メカニズムとは、海面水温の暖水上で大気成層が不安定になることにより、上空の大きな運動量が海上まで輸送されることで海上風を加速する過程を表す。圧力調節メカニズムとは、暖水上で大気が加熱されることで海面気圧が低下し、海上風が駆動される過程である。圧力調節メカニズムが有効に働くためには大気境界層が十分に加熱される必要があるため、このメカニズムは、メソスケールの範囲内において、比較的大きなスケールやより弱い背景風においてより効率的に働くことが示唆されている。このように、海上風の応答は、水平スケールや背景風速、大気境界層の高度へ依存する可能性が指摘されているが、適切な診断ツールが存在していなかったため、その詳細についての理解はまだ十分ではない。さらに、それらの海域依存性や季節性についても十分に調査されていない。本課題では、波数空間上における回帰係数である応答関数を本研究分野としては初めて適用し、海面水温のメソスケール構造に対する海上風の線形応答を調査した。

手法

主に、衛星観測に基づく高解像度の海上風と海面水温のデータを用いて解析を行った。必要に応じて大気モデルや大気再解析データに基づく海上風データも用いている。先行研究でよく調べられているアガラス反転流域、黒潮続流・親潮域、メキシコ湾流域を主な解析対象とし、海域間の比較を行った。季節性を明らかにするために、北半球夏季（6、7、8月）と冬季（1、2、12月）に分けて調査を行った。

本研究では、海面水温の構造に対する海上風の線形的な応答を応答関数を用いて表現する。応答関数は波数空間上で表現される回帰係数に対応するものであり、逆フーリエ変換として以下のように表現される。

$$\mathbf{u} = \frac{1}{2\pi} \int d\vec{k} \tilde{A} \tilde{T} e^{-i\vec{k}\cdot\vec{x}} + \delta\mathbf{u} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{u} は海上風、 \vec{k} は空間波数ベクトル、 \tilde{A} は応答関数、 \tilde{T} は海面水温のフーリエ係数、 \vec{x} は物理空間上の位置ベクトルを表す。 $\delta\mathbf{u}$ は残差である。応答関数は一般に複素数であり、実部と虚部は海面水温の構造に対して同位相、位相が90度ずれる応答成分をそれぞれ表

す。もしくは、応答関数の逆フーリエ変換であるインパルス応答関数 (A) を用いて、

$$u = \frac{1}{2\pi} \int d\vec{\tau} T(\vec{x} - \vec{\tau}) A(\vec{\tau}) + \delta u \quad (2)$$

と表すこともできる。

従来用いられてきた物理空間上における回帰係数と異なり、応答関数は波数展開を行うことにより海面水温構造に対して位相がずれる海上風応答をも捉えることが出来る。さらに、海上風応答の空間スケール依存性が波数依存性として表現される。背景風強度に対する依存性も評価できるように定式化を行っており、 \bar{A} は背景風強度、背景風について風下を向く波数、それに直交する向きの波数の関数である。さらに応答関数の物理空間上における表現であるインパルス応答関数も調査することで、応答の具体的な特徴を直感的に議論できる。目的に応じて両者を使い分けて考察を行う。

海上風と海面水温の日毎のデータに基づき、両者に空間的なハイパスフィルタを施した後、最少二乗法を用いて評価関数が最少になるようにして応答関数を求めた。この際、滑らかな構造をもつ応答関数を求めるために、 δu と \bar{A} のそれぞれの自乗の和を評価関数としている。任意の背景風強度と波数における応答関数の値は、幾つかの基準となる背景風強度と水平波数に対して定義される基本応答関数から線形内挿で求めている。

主な成果

衛星観測データに基づいて求められた応答関数は、背景風の風下向き波数に対して高波数域と低波数域に明瞭に分離した極大を示す。背景風が強いほど高波数域の極大が顕著になり、逆に背景風が弱い時には低波数域の極大が顕著になる傾向にある。このような特徴から、高波数域の極大は鉛直混合メカニズムに対応し、低波数域の極大は圧力調節メカニズムに対応すると考えられ、これらの主要メカニズムを波数空間上で分離して表現することに成功していると考えられる。弱い背景風下では夏季の方が強い応答を示し、強い背景風下では冬季の方がより強い応答を示すように、特徴的な季節性を持つことが示された。一方で、背景風強度が極めて強い時（概ね 20m/s 以上）には、海上風の応答は季節に依らず非常に弱いことも示された。一般的に、海上風の応答は夏季には明瞭でないと考えられてきたが、これらの結果は、海上風応答の背景風強度依存性も加味して今後調査を行う必要性を示唆している。また、海上風の応答はアガラス反転流域において最も強く、メキシコ湾流域と黒潮・親潮続流域では同程度であった。

上記のように、応答関数の振幅は特徴的な季節性を示すものの、その構造は明瞭な季節性や海域依存性を示さない。このことは、海上風の応答を引き起こす根本的な物理プロセスが季節間や海域間で同一であることを示唆している。

さらに、上記の観測データから求められた応答関数と任意の海面水温分布を用いることで、その海面水温構造に対する線形応答としての海上風の分布を高確度で再構築することが出来る。これは、第1式の右辺第1項に対応する。メキシコ湾流域北部においては、観測された海面水温分布から再構築された海上風分布は衛星観測に基づく分布を非常に良く再現した。一方、メキシコ湾流域南部については、衛星観測ではメキシコ湾流に沿って強い海上風収束の帯が捉えられているが、再構築された分布ではでは表現されていなかった。このことは、その収束場は海面水温のメソスケール構造に対する線形応答ではなく、移動性擾乱などの大気プロセスが重要な役割を果たしていることを示唆しており、最近の先行研究の結果とも整合的である。一方、黒潮・親潮域における再現性は悪く、これは活発な移動性擾乱活

動に加えて、海面水温のメソスケール構造が比較的不明瞭であることが関係していると推察される。両海域共に、背景風を向く方向の海上風成分の再現性は非常に高いものの、背景風と直交する海上風成分の再現性は高くないことも示され、各成分を主に駆動している物理プロセスが異なることを示唆している。一方、アガラス反転流域では再構築の分布は観測を非常に良く再現している。アガラス反転流域は陸地から十分に離れているためにその影響が小さいことと、移動性擾乱などの寄与が相対的に小さいことが主な要因であると推察される。

さらに、大気モデルの海上風データを用いて同様の解析を行った。大気モデルで表現される海上風の応答関数の構造は衛星観測データと定性的には同様であり、重要なプロセスは現実大気と整合的に表現されていることが示唆されている。しかしながら、大気モデルの応答関数の振幅は非常に小さく、これは先行研究で大気モデルは鉛直渦粘性係数が過小評価される傾向にあることが指摘されたのと整合的な結果である。この結果は、海上風の詳細な調査を行うに当たり、用いるデータを慎重に選ぶ必要があることを意味している。また、高解像度の大気海洋結合モデル実験において、海上風のメソスケールの構造が海洋表層へ及ぼす影響の再現性が不十分になる可能性を示唆している結果であり、今後より詳細な調査を行う計画である。

海上風の応答についてのこれらの季節性や再構築場の特徴等は本研究で応答関数を適用することで初めて明らかにされた内容である。以下にも記述するように、その応用は多岐に渡り、本解析手法の有用性を示している。

今後の展望

上記のような、海上風応答の海域依存性や特徴的な季節性の要因について今後引き続き調査を行う。先行研究から得られている知見に基づき、特に大気の成層度や大気境界層高度の変動が海上風応答へ及ぼす影響に着目して調査を進める。

海面水温のメソスケール構造は、海上風のみならず近傍の雲や降水の分布へ影響を及ぼし得ることが指摘されている。また、海面水温と海面からの乱流熱放出の相関や位相関係は、大気海洋結合変動に対して因果関係を判定するために重要であるが、これらの調査にも応答関数が有用であることが期待される。今後は、応答関数を用いてこれらの他の大気場への影響も調査を行うことで、大気応答の包括的な調査を行う。その際、多くの研究で近年用いられている 25km 解像度の大気モデルだけでなく、雲解像度である 3.5km 解像度の大気モデルも用いて調査を進める予定である。

さらに、領域海洋モデルで表現される海面水温分布と観測から得られた応答関数から海上風をオンラインで再構築し、その風応力場を用いて海洋モデルを強制する実験設定を実装済みである。これを用いて、海上風のメソスケールにおける応答が表層海洋の状態へ及ぼすフィードバックの調査が進行中である。この調査は、米国スクリプス研究所や海洋研究開発機構アプリケーションラボとの共同研究として行っている。

また、本研究で得られた応答関数は、およそ 500km のスケールで応答の極大を示し、より高波数に向かって振幅が指数関数的に減少する構造をしている。このような特徴は、簡易的な大気境界層モデルに基づく海上風の分布には見られないことから、その原因について物理的背景のみならず数理統計的な要因も含めて多角的に検証を進めている。一つの要因として、スケールの小さい構造はその性質が空間的により小さいスケールで変動することが予想されることから、変動成分の一様性を仮定するフーリエ変換ではその性質を十分に表

現することができない可能性が考えられる。また、着目する空間スケールによって、適切な背景風の定義が異なる可能性もある。これらのことから、ウェーブレット変換を元とした応答関数の見積もり手法について開発を進めている。

最後に

本課題では、応答関数という本研究分野ではこれまで試みられていない手法を用いて、海面水温のメソスケール構造に対する海上風の線形応答を調査した。これらの結果は、海上風の海面水温構造に対する応答の理解が深化するのみならず、海上風衛星観測、大気モデル、大気海洋結合モデルの性能評価を通じてそれらの品質向上へ貢献することが期待される。これらの成果は、高解像度海洋モデルに関する国際ワークショップ (IOVWSTM) や、海上風衛星観測に関する国際ワークショップ (OFES workshop)、国際測地学地球物理学連合 (IUGG)、国際海洋科学会議 (OSM) で発表を行ってきた。さらに日本地球惑星科学連合 (JpGU) でも発表予定である。これらの成果をまとめた論文を現在執筆中であり、国際学術雑誌へ近日中に投稿予定である。