

2019/2020 年冬季の成層圏周極渦強化状態とその対流圏・海洋への影響

野口 峻佑^{1,2}・小寺 邦彦²・水田 亮²・行本 誠史²

(1: 海洋研究開発機構 環境変動予測研究センター, 2: 気象研究所 気候・環境研究部)

1. はじめに

近年、成層圏から対流圏への下方影響に関して各方面で活発な調査が行われているが、その影響は更に海洋循環にまで及びることが指摘されている (e.g., Yukimoto and Kodera 2007; Reichler et al. 2012). すなわち、成層圏周極渦の極端状態により引き起こされる対流圏環状モードの偏向は、中緯度における大気海洋相互作用を変化させるが、それにより形成される偏差は海の中にまで至り、その後のより長期的な海洋から大気への影響を通じて、季節を超えた時間スケールの変動を生み出しうる。この過程は、地球システム変動の様々な局面で重要であり、例えば、太陽活動 11 年周期変動の気候影響の遅延発現 (e.g., Gray et al. 2013; Scaife et al. 2013) やオゾンなどの大気微量成分の増減に伴う気候変化 (e.g., Thompson et al. 2011; Previdi and Polvani 2014) を語る上で欠かせないものであると考えられている。

このような成層圏変動を基軸とした海洋駆動に関する研究は、当然のことながら、上記例のような長期的変化への応答に主眼が置かれる。これには、長期の時間平均操作によって、(多くは放射や化学によってもたらされる) 成層圏起源の変動を、それとは関係のない内部変動群に埋もれた状態の中から、比較的容易に抽出可能であるからという側面がある。その裏返しとして、個々の短期的な力学によって生じる成層圏周極渦極端変動イベントの海洋までの明瞭な結びつけは、一般には困難と考えられているのが現状である。実際、これまでに長期シミュレーション結果の合成解析による分析 (Reichler et al. 2012; O'Callaghan et al. 2014) は存在するが、実事例に焦点を当てる場合、観測データの解析では内部変動を打ち消すのに十分なサンプル数を準備できているとは言えず、さらにそのうちの 1 事例に着目するのでは単に影響を推察することしかできない。また、因果関係にも疑念が残る。このため、季節内スケールで発現する、極端な極渦弱体化イベントである成層圏突然昇温 (SSW) や、その対の極渦強化 (VI) イベントが、どの程度の大きさ・頑健さの海洋駆動を引き起こせるのかについて、実際の事例と紐付けての定量的評価に成功した例は知られていない。

その一方で、近年、アンサンブル積分と循環場の領域限定拘束とを組み合わせたアプローチが、SSW の影響評価において、成功を収めている。例えば、

Noguchi et al. (2020) は、SSW に伴う Brewer-Dobson 循環の強化が熱帯域の対流活動強化を引き起こすこと (e.g., Kodera 2006) を因果関係に疑念のない形で示した。そこでは、通常のアンサンブル予測 (SSW 生起を捕捉できない初期値から積分開始) と、それと同一の初期値を用いるが成層圏循環場を再解析データで拘束したアンサンブル擬似予測とを比較することによって、成層圏から対流圏への有意な影響を特定している。上記は大気大循環モデルによる積分期間 2 か月程度の実験であるが、同様のアプローチを拡張し、海洋との結合を含めた多要素のモデルを用いて、より長期にわたる積分実験を行えば、先述の定量的評価を実現することが可能はずである。

そこで本研究では、成層圏周極渦極端変動が対流圏・地表ひいては海洋循環へ及ぼす影響を明らかにすることを目的に、地球システムモデルを用いた成層圏循環規定アンサンブル実験を行った。それにあたっては、南半球において SSW、北半球において VI が発生し、両半球において極端な成層圏周極渦状態となった 2019/2020 年を対象事例として選定した。前者は Noguchi et al. (2020) で取り扱った SSW 事例であり、観測史上最大規模の成層圏周極渦の弱体化とそれに対応する負の南半球環状モード偏差の下方影響が観測されている (e.g., Lim et al. 2021)。これにより形成された循環場は、オーストラリアにおいて過去最悪と言われる大規模な山火事に加担したとされる。また、この SSW によって、南極域のオゾンホール面積は顕著に縮小し、1990 年以降で最小となった。その一方で、後者は北半球晩冬・春季において過去最大規模の低温偏差を形成した VI 事例であり、これによって北極域では大規模なオゾン破壊が引き起こされたと報告されている (e.g., Manney et al. 2020; Lawrence et al. 2020)。また、対象 VI は、同時期に卓越した対流圏における正の北半球環状モード (NAM) 偏差、もしくは地表における正の北極振動 (AO) / 北大西洋振動 (NAO) パターンの卓越に大きく寄与したと考えられており、東アジアやヨーロッパを含んだ中緯度域において記録的に暖湿な気候状態をもたらした要因の 1 つとされる。このように対照的な南北両半球における極端イベントを対象とする本実験は、先例の地球システムモデルによる追試と、南極海や北大西洋における最大規模 (かつ逆符号) の海洋への影響の調査を同時に行っていると言える。また付加的に、各イベント時の循環場の再現

性と化学組成変動との関係にも迫ることができる。

ただし、紙面の都合上、本稿では、北半球 VI 事例の下方影響に限定して、解析結果を紹介する。特に、成層圏循環規定により形成された北大西洋域の偏差が、どの程度の海洋駆動を引き起こせるかに焦点を当て、実事例によるインパクトの詳細を述べていく。

2. 実験設定

実験には、気象研究所地球システムモデル (MRI-ESM2.0) を第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP6) 参加時と同様の設定で用いた。これは、大気モデル (MRI-AGCM 3.5)、海洋モデル (MRI.COM v4)、エアロゾル (MASINGAR mk-2r4c)、化学モデル (MRI-CCM 2.1) の 4 つのコンポーネントからなる。設定について一応軽く触れておくと、大気モデルの解像度は、水平 T_L159 (格子間隔は約 110 km)、鉛直層数 80 (上端 0.01 hPa) となっている。エアロゾル / 化学モデルの水平解像度はそこから少し粗くなり、T_L95 (約 180 km) / T42 (約 280 km) となっている。また、海洋モデルの解像度は、経度 1 度-緯度 0.5 度刻み (ただし南緯 10 度から北緯 10 度にかけては緯度 0.3 度刻み)、鉛直層数 60 (海面から深度 200 m までは刻み幅 10 m 以下) の設定となっている。採用しているスキーム等のモデル設定およびその基本特性の詳細については、Yukimoto et al. (2019) を参照されたし。

このモデルを用いて、以下の一連の計算を行った。(1) まず、大気場を再解析 (JRA-55) へ拘束した状態で、1979 年以降、40 年以上の Spin-up ランを行った。これは、CMIP6 提出の Historical ラン (既に産業革命前の条件で 1000 年積分がなされ、1850 年から 1979 年まで CMIP6 Historical 外力条件下での積分が行われた状態) から分岐させる形で実施しており、十分に馴染んだ状態から可能な限り海洋を現実に近い状態へと強制しつつ、各物理量のモデル格子上で気候値を作成する意図で行われた。(2) そこから、2019 年 6 月上旬から 2021 年終わりまでの約 2 年半のアンサンブル予測積分 (以降、FREE ランと呼称) を実施した。2019 年 6 月 1 日から 10 日の期間について 6 時間刻みで予測開始タイミングを変え (i.e., 時間ずらし法)、40 メンバーのアンサンブルを構成した。(3) さらに、上記と同一の初期値より、成層圏周極渦領域のみを再解析へと拘束した状態で、アンサンブル擬似予測積分 (以降、NUDGE ランと呼称) を実施した。ただし、拘束は積分開始から約 1 年の 2020 年 6 月 30 日までであり、2020 年 7 月以降は FREE ランと同様の手放し状態へと移行している。

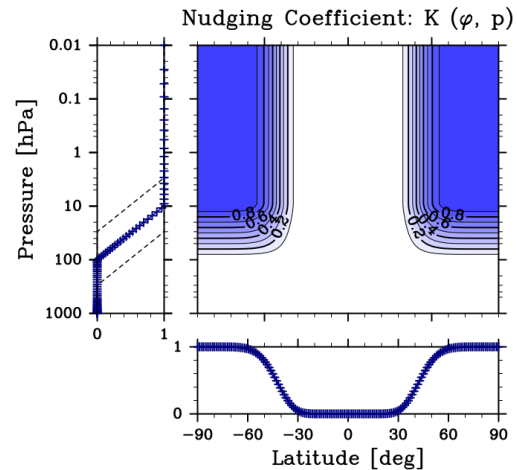


図 1. ナッジングの際にかかる係数の緯度高度分布. 点線で示すように循環拘束の開始高度を変えた 3 種類の拘束仕様で実験を実施. それぞれ pt3 / 10 / 30 (3 / 10 / 30 hPa 以高は係数 1 となる設定) と呼称. 等値線図は pt10 の分布を示す.

NUDGE ランにおける成層圏に限定した循環拘束は、ナッジングの際の修正項に対して、図 1 に示すように緯度高度に依存した係数をかけることによって実現した。拘束強度は緩和時間 6 時間とし、拘束対象変数は水平風のみとしている。なお、循環拘束の開始高度に対する依存性を確認するために、3 種類の拘束仕様で、それぞれ 40 メンバーのアンサンブル擬似予測積分を行なっている。以降、3 / 10 / 30 hPa 以高の係数が 1 となる仕様での拘束積分を NUDGE_pt3 / 10 / 30 ランと呼称する。また、係数の緯度依存性に関して、このように赤道域を拘束しないのは、NUDGE と FREE の差異を吟味する際に、成層圏赤道域に端を発する遠隔影響を除外して、純粋に成層圏周極渦変動の影響を評価するのを意図してのことである。長期積分にあたってはモデルにおける成層圏赤道域の準 2 年周期振動 (QBO) の再現能力がしばしば問題となるが、MRI-ESM2.0 の FREE ランにおける QBO は次第に現実から乖離してしまっていたため、NUDGE ランにおいても赤道域上空をモデル内で自由に時間発展させ、その出来・不出来による影響を問わないこととしている。

3. 解析結果

3-1. 強風偏差の下方伝播

本節では、成層圏 VI 状態が対流圏へ及ぼした影響およびその再現性を、NUDGE_pt3 / 10 / 30 ランの FREE ランからの偏差の比較を通じて確認する。

まず、図 2 に示した帯状平均東西風の時間-高度断面で確認できる通り、下部成層圏まで循環場を拘束する pt30 においてのみ、対流圏までの有意な強風偏差の下方伝播が観察できる。この設定においては、1 月から 4 月にかけて、季節程度の時間スケールで、対流圏の西風が強化されており、特に 1 月中旬と 2 月中旬から 3 月にかけての、大きく分けて 2 回の強化傾向が確認できる。その一方で、pt10 および pt3 においては、それ以前の 12 月に成層圏から対流圏へと伝播している西風の弱化傾向が長引いてしまい、特に pt3 では 1 月中旬の強化傾向がなくなっている。その後のより急激な 2 月中旬から 3 月にかけての挙動に関しても、成層圏内での西風強化傾向を（強度は不完全ながらも）一応表現しているが、pt10 と pt3 のどちらも、その対流圏への侵入は表現できていない。

本稿では以降の部分の紹介に紙面を割くため、詳細は割愛するが、これら西風強化傾向（特に 2 月中旬からの急激な西風強化）の発現には、成層圏での惑星規模波の反射および下方伝播が関わっており、pt30 以外の拘束仕様では、そのタイミングや規模を十分に再現できていなかった。すなわち、今回の対象 VI 事例の発達および対流圏との結合には、成層圏へ上方伝播してきた惑星規模波の下方伝播への転換過程が密接に関わるが、この過程は不確定性が大きく、下部成層圏まで含めた循環拘束によりそれらのある程度規定しなければ、アンサンブル平均として有意な対流圏への影響を捉えることができないことがわかった。

なお、ここで示しているのはあくまで NUDGE ランの FREE ランからの偏差であり、本研究で焦点を当てて考えているのは、FREE ランでは捕らえられない成層圏内での短期的な力学的変動に起因する差異が下方へ及ぼす影響についてであることには注意されたい。実際、本研究の FREE ランは、気候値と比べて若干の西風強化傾向を示しており、中高緯度大気以外の変動に起因する予測可能成分やモデルバイアスの存在が推察される。これらは NUDGE と FREE との差と比べて小さいものではあるが、これらも含んだ成層圏偏差の対流圏への下方影響についての評価を実施するには、成層圏状態を気候値へと緩和する類のアンサンブルランとの比較を行う必要がある。

以上の強風偏差の下方伝播の差異は、図 3 の地表循環（海面更正気圧）の水平分布に示される通り、それと整合的な AO/NAO パターンの差異を生み出している。すなわち、対流圏まで西風偏差が伸びた pt30 においてのみ、極域で低気圧性偏差、中緯度（特に大西洋域と太平洋域）で高気圧性偏差が出てお

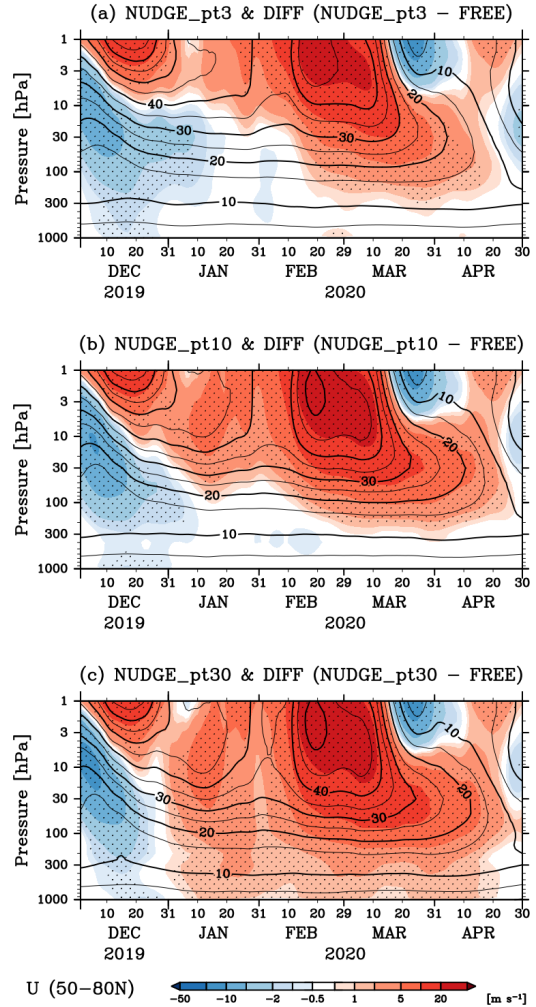
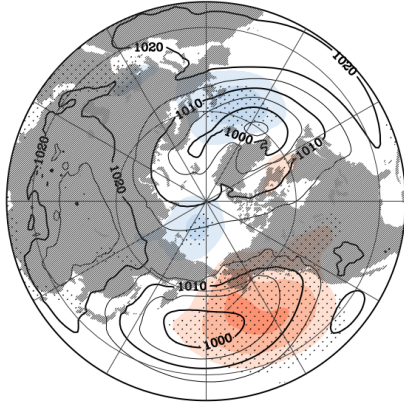


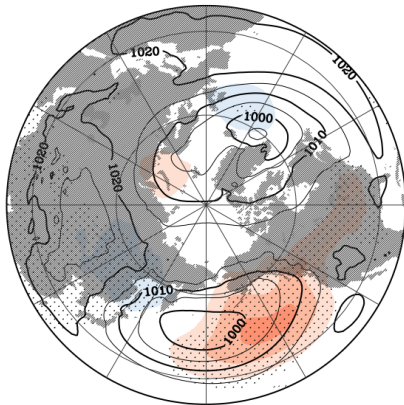
図 2. 各拘束実験における極渦強度の時間高度断面。北緯 50 度から 80 度で領域平均した東西風について、NUDGE 実験のアンサンブル平均（等値線、間隔: 5 m s^{-1} ）とその FREE 実験のアンサンブル平均からの偏差（色）を表示。平滑化（15 日移動平均）処理済み。偏差が統計的に有意（Welch の t -検定で 90% 以上）な領域をドットで示す。

り、正の AO パターンが有意に発現していることがわかる。その一方で、西風偏差が対流圏まで十分には至らなかった pt10 と pt3 では、極域の低気圧性偏差がほとんど出ていない。一応、太平洋域の高気圧性偏差（アリューシャン低気圧の東側でのその勢力弱化）は有意な影響として出てはいるものの、大西洋・ヨーロッパ域の高気圧性偏差はほとんど出ていない。このように、pt10 と pt3 においては、正の NAO パターンとして投影されるような偏差が、成層圏規定の効果としては現れなかったと言える。

(a) NUDGE_pt3 & DIFF (NUDGE_pt3 - FREE)



(b) NUDGE_pt10 & DIFF (NUDGE_pt10 - FREE)



(c) NUDGE_pt30 & DIFF (NUDGE_pt30 - FREE)

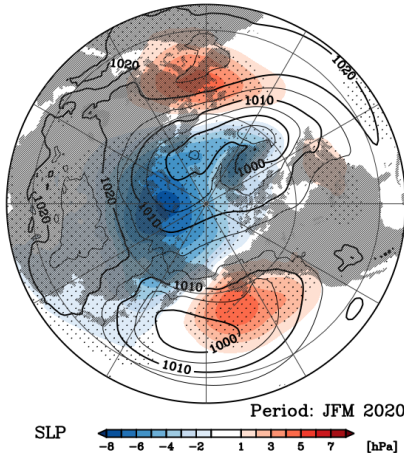


図 3. 各拘束実験における地表循環の水平分布. 2020 年の 1-3 月で期間平均した海面更生氣圧について, NUDGE 実験のアンサンブル平均 (等値線, 間隔: 5 hPa) とその FREE 実験のアンサンブル平均からの偏差 (色) を表示. 偏差が統計的に有意 (Welch の t -検定で 90% 以上) な領域をドットで示す.

3-2. 北大西洋域における大気海洋相互作用

以降, 成層圏での VI 状態の卓越に伴う有意な西風偏差が対流圏・地表にまで及び, それと対応して北大西洋域において正の NAO パターンが卓越した pt30 の結果について, その後の海洋循環との関わりをみていく. そこで図 4 に, 海面更正気圧・海面水温 (SST)・海洋混合層深度 (MLD) について, 積分期間中の, 1 年目晩冬 (2020 年 1-3 月), 2 年目初冬 (2020 年 10-12 月), 2 年目晩冬 (2021 年 1-3 月), 3 年目初冬 (2021 年 10-12 月) における各 3 か月で期間平均した, NUDGE ランの FREE ランからのアンサンブル平均偏差の水平分布を並べて示す. また, 図 5 に, 西風の強い緯度帯で平均した北大西洋亜表層域の海水温偏差 (同じく NUDGE ランの FREE ランからのアンサンブル平均偏差) の時間高度断面を示す.

これらの図より, 成層圏規定の効果で 1 年目晩冬に形成された正の NAO 偏差によって, 海面から海洋亜表層において低温偏差が形成され, その影響はさらに海洋の深層へと波及しつつ, 少なくとも翌年の 2 年目晩冬においても, 正の NAO 偏差が大気側に出現していることがわかる.

その過程は以下のように解釈できる. まず, 1 年目晩冬の正の NAO 偏差 (図 4 a) は北大西洋上の西風が強化された状態に相当するが, これにより, 洋上における熱の水平輸送がより効率的となり, 海洋から大気への熱供給量が増加する. 実際, 海面熱フラックス (i.e., 顕熱フラックスと潜熱フラックスの合算) は, 特にメキシコ湾流上で有意に増加しており, より多くの海洋表層における熱が大気へと取り攫われていた. 結果, この海域の SST としては顕著な低温偏差が形成されており (図 4 e), MLD もより深くなっている (図 4 i) ことがわかる. なお, これらには単なる西風強化だけでなく, カナダ上空において形成された高気圧性偏差に伴う高緯度からの寒気の流出による寄与なども考えられる.

このように海洋表層において形成された海水温偏差は, (季節変化に伴い混合層が浅くなる) 続く夏季の間, 混合層下の亜表層において取り残され, 翌年の冬季に「再出現」しうることが知られている (e.g., Alexander and Deser 1995; Watanabe and Kimoto 2000; Hanawa and Sugimoto 2004). すなわち, 図 5 にみられるように, 翌年の秋季から初冬にかけて混合層が再び発達する際に, 亜表層にて生き残っていた偏差が取り込まれて, 同符号の偏差が表層まで露見するように偏差が発達する (例えば, Sugimoto and Hanawa 2007 の Fig. 10 などと見比べられたし). 実際, 本実験でも, 2 年目冬季において, メキシコ湾流およびその続流域で有意な SST 低温偏差が出現している

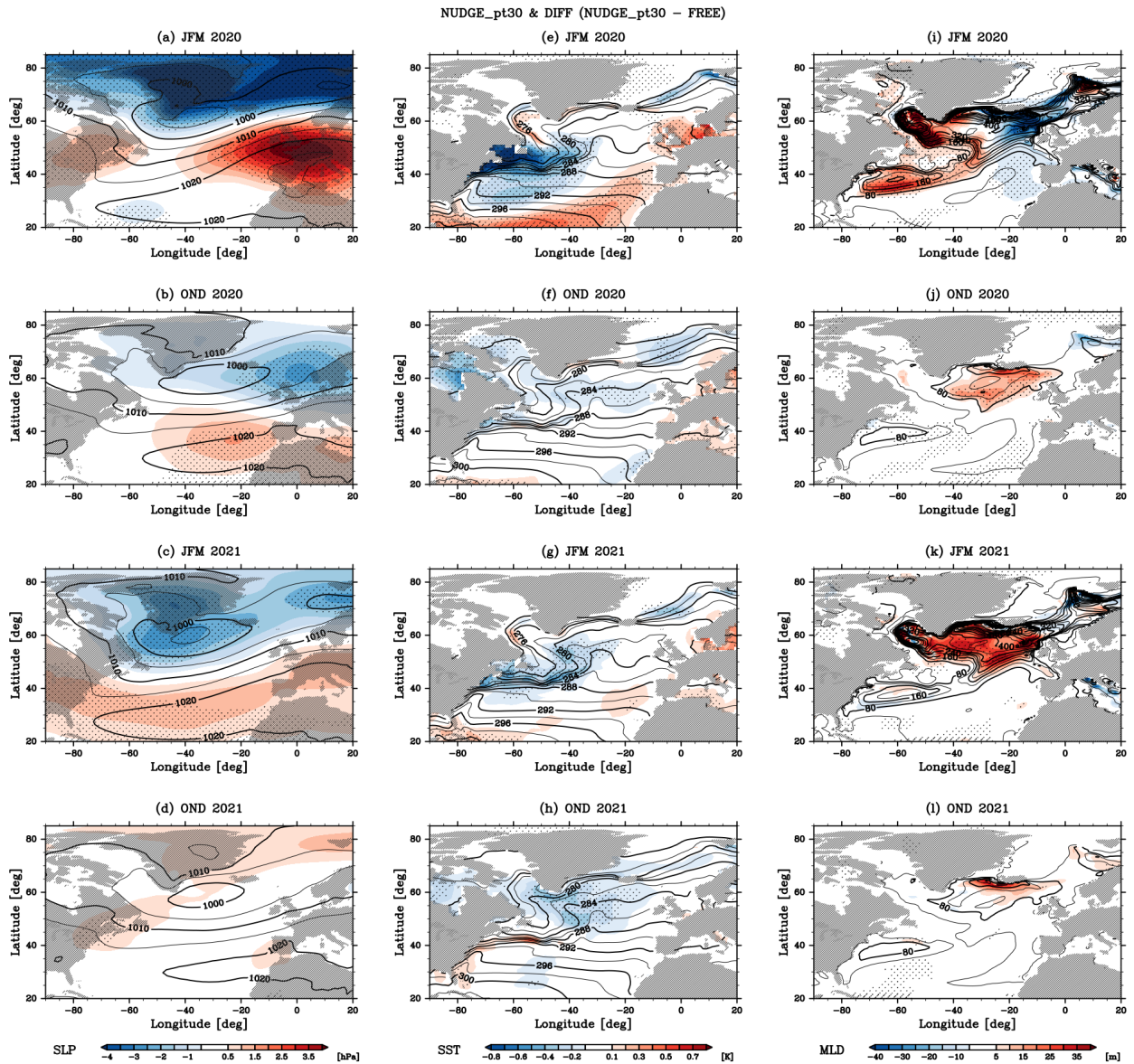


図 4. 北大西洋域における偏差形成とその後の時間発展の様子. 左から, 海面更生気圧, 海面水温, 混合層深度について, NUDGE_pt30 実験のアンサンブル平均 (等値線) とその FREE 実験のアンサンブル平均からの偏差 (色) を表示. 上段から, 2020 年 1-3 月, 10-12 月, 2021 年 1-3 月, 10-12 月の期間平均について表す. 偏差が統計的に有意 (Welch の t -検定で 90% 以上) な領域をドットで示す.

(図 4 f, g). なお, MLD としての有意な差異は, ラブラドル海からグリーンランド-イギリス諸島にかけての北側の海域で顕著に出現するようになっており (図 4j, k), また SST と MLD とともに, 混合層の季節変化を反映してか, 本実験では MLD が最も大きくなる晩冬の方が, 差異はより明瞭となっている. 北側での偏差出現に関しては, (元々北大西洋中緯度での偏差は, 西の大陸上からの気象擾乱の影響を受けての変動が大きく, 残りにくいということもあるが)

流れに乗った信号の北上と捉えられる. いずれにせよ, それら海洋側の低温偏差の再出現と整合的に, 大気側では正の NAO パターンが有意な気圧偏差として出現している様子を確認できる (図 4 b, c).

なお, 海洋表層-亜表層における低温偏差は 3 年目初冬でも発達し続けている (図 5) ことから, 同様の正の NAO パターン偏差が引き続き現れることを一見期待できるが, 実際にはそうはならなかった (図 4 d). これには, 初冬ということもあるが, 流れに乗っ

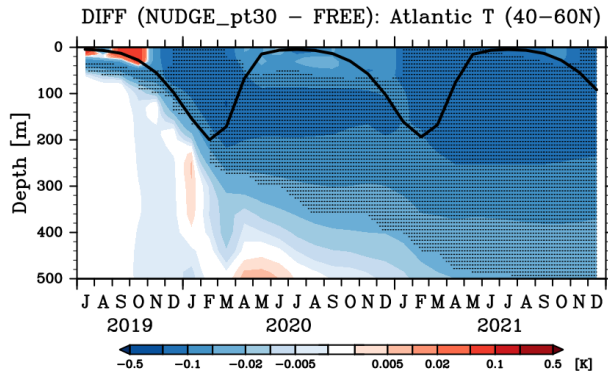


図 5. 北大西洋亜表層における海水温偏差の時間高度断面. 北大西洋域の北緯 40 度から 60 度で領域平均した月平均海水温 (温位) について、NUDGE_pt30 実験の FREE 実験からのアンサンブル平均偏差を色で表示. 偏差が統計的に有意 (Welch の t -検定で 90% 以上) な領域をハッチで示す. 合わせて、NUDGE_pt30 実験における混合層深度のアンサンブル平均を黒太線で表示.

た信号の北上に伴い、SST の低温偏差の出現域が、活発な大気海洋相互作用が生じるメキシコ湾流域 (SST 勾配の大きな前線帯) から離れてしまい (図 4 h)、海洋から大気への影響が現れにくくなったことなどがその原因として推察できる.

4. まとめと議論

本研究では、地球システムモデルを用いた成層圏循環規定アンサンブル積分実験を行い、2019/2020 年に生じた成層圏周極渦極端イベントが対流圏・地表ひいては海洋循環に及ぼす影響を評価した. すなわち、2019 年 6 月から 2 年半以上の比較的長期にわたるアンサンブル予測積分 (FREE ラン) と、それと同一の条件であるが成層圏周極渦変動を再解析データで拘束した擬似アンサンブル予測積分 (NUDGE ラン) を行い、それらを比較することによって、成層圏周極渦の極端状態が下方へ及ぼすインパクトを浮き彫りにすることを試みた. このような取り組みは、過去に成層圏において運動量強制を与えて海洋循環駆動の様子を探る理想化実験 (e.g., Yukimoto and Kodera 2007; Yukimoto et al. 2017) などが行われていたことを踏まえて、それを実際の事例の影響評価のレベルにまで昇華しようとするものとして捉えることもできる.

本稿では、北半球成層圏において発現した極渦強

化 (VI) 状態に焦点をあて、それが北大西洋域での大気海洋結合変動へ与える影響について記した. 下部成層圏まで循環場を規定することによって、この VI 状態に伴い対流圏における北半球環状モード (NAM) が偏向し、地表においては正の北極振動 (AO) / 北大西洋振動 (NAO) パターンに相当する偏差が形成される様子を捉えることができた. 特に、西風偏差の成層圏から対流圏への侵入と正の NAO 偏差パターンの形成は密接に関係しており、北大西洋上の西風強化がさらなる影響の拡大にあたっての起点となっていた. 洋上の強風偏差により、海洋から大気への海面熱フラックスが増加し、北大西洋中高緯度域の表層においては低温偏差が形成された. さらに、この低温偏差が混合層下へと侵入することで、翌冬に再出現し、有意な越年影響 (2 年目冬季における正の NAO 傾向) が発現することがわかった.

このように、本研究は、成層圏-対流圏-海洋結合変動が、極端イベント発現冬季だけでなく、その翌年に及ぶような「長期予測におけるシグナル」を生み出せることの実証に成功したと言える. このような実証に関して (少なくとも筆者は) 前例を知らない. ただし、ここで触れた過程自体は、個別にみた場合、北大西洋における大気海洋相互作用研究において、よく知られているものであることは述べておく必要がある. しかしながら、それを成層圏 VI 状態の下方影響評価の文脈の中に位置付け、実際に生じたイベントの捕捉成否によって生じる程度の差異で、明瞭に現れることを示せた点に本研究の意義がある.

また、成層圏循環の拘束仕様 (拘束開始高度) を変えた実験結果の比較からわかった通り、この VI の規模および対流圏との結合を正しく再現するためには、先行研究などで成層圏突然昇温 (SSW) を対象としていた際の基準よりも下層までの循環規定が必要であった点にも注意されたい. 対流圏との結合には、成層圏へ上方伝播してきた惑星規模波の下方伝播への転換過程が密接に関わるが、この過程は不確実性が大きい (頑健性が低い) ためである. もともと、VI 時の予測は、大規模な SSW の場合とは異なり、その発現中、成層圏状態に大きな不確実性 (アンサンブルスプレッド大の状態) が付き纏うことが知られている (野口・向川 2017). このため、予測の文脈においては、本稿でみた成層圏-対流圏-海洋結合変動への期待に関して慎重になる必要がある.

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (若手研究, 19K14798) の助成を受けたものである. 計算は全て筆頭著者が地球シミュレータ上で実施した. 作図には地球流体電脳ライブラリを用いた.

参考文献

- 野口峻佑, 向川均 (2017), 極夜ジェット振動の予測可能性と対流圏への下方影響. 2016年度研究会「長期予報と大気大循環」要旨集, 9 pages, https://www.metsoc.jp/default/wp-content/uploads/2017/03/LF2016_noguchi.pdf (2022/01/31 閲覧)
- Alexander, M. A., and C. Deser (1995), A mechanism for the recurrence of wintertime midlatitude SST anomalies. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 122–137. doi: 10.1175/1520-0485(1995)025<0122:AMFTRO>2.0.CO;2.
- Gray, L. J., Scaife, A. A., Mitchell, D. M., and co-authors (2013), A lagged response to the 11-year solar cycle in observed winter Atlantic/European weather patterns. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 13,405–13,420. doi:10.1002/2013JD020062.
- Hanawa, K., and Sugimoto, S. (2004), ‘Reemergence’ areas of winter sea surface temperature anomalies in the world's oceans. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L10303. doi: 10.1029/2004GL019904.
- Kodera, K. (2006), Influence of stratospheric sudden warming on the equatorial troposphere. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L06804. doi: 10.1029/2005GL024510.
- Lawrence, Z. D., Perlwitz, J., Butler, A. H., and co-authors (2020), The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic Oscillation and ozone loss. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2020JD033271. doi: 10.1029/2020JD033271.
- Lim, E. P., Hendon, H. H., Butler, A. H., and co-authors (2021), The 2019 Southern Hemisphere stratospheric polar vortex weakening and its impacts. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **102**(6), E1150-E1171. doi: 10.1175/BAMS-D-20-0112.1.
- Manney, G. L., Livesey, N. J., Santee, M. L., and co-authors (2020), Record-low Arctic stratospheric ozone in 2020: MLS observations of chemical processes and comparisons with previous extreme winters. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL089063. doi: 10.1029/2020GL089063.
- Noguchi, S., Kuroda, Y., Kodera, K., and Watanabe, S. (2020), Robust enhancement of tropical convective activity by the 2019 Antarctic sudden stratospheric warming. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL088743. doi: 10.1029/2020GL088743.
- O’Callaghan, A., Joshi, M., Stevens, D., and Mitchell, D. (2014), The effects of different sudden stratospheric warming type on the ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 7739–7745, doi: 10.1002/2014GL062179.
- Previdi, M. and Polvani, L.M. (2014), Climate system response to stratospheric ozone depletion and recovery. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **140**: 2401-2419. doi: 10.1002/qj.2330.
- Reichler, T., Kim, J., Manzini, E., and Kröger, J. (2012), A stratospheric connection to Atlantic climate variability. *Nature Geoscience*, **5**(11), 783-787. doi: 10.1038/ngeo1586.
- Scaife, A. A., Ineson, S., Knight, J. R., Gray, L., Kodera, K., and Smith, D. M. (2013), A mechanism for lagged North Atlantic climate response to solar variability. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 434–439. doi: 10.1002/grl.50099.
- Sugimoto, S., and Hanawa, K. (2007), Further evidence for non-reemergence of winter SST anomalies in the North Pacific eastern subtropical mode water area. *J. Oceanogr.*, **63**(4), 625-635. doi: 10.1007/s10872-007-0055-0.
- Thompson, D. W., Solomon, S., Kushner, P. J., England, M. H., Grise, K. M., and Karoly, D. J. (2011), Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nature Geoscience*, **4**(11), 741-749. doi: 10.1038/ngeo1296.
- Watanabe, M., and Kimoto, M. (2000), On the persistence of decadal SST anomalies in the North Atlantic. *J. Climate*, **13**(16), 3017-3028. doi: 10.1175/1520-0442(2000)013%3C3017:OTPODS%3E2.0.CO;2.
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., and co-authors (2019), The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **97**(5), 931-965. doi: 10.2151/jmsj.2019-051.
- Yukimoto, S., and Kodera, K. (2007), Annular modes forced from the stratosphere and interactions with the oceans. *J. Meteorol. Soc. of Jpn.*, **85**(6), 943-952. doi: 10.2151/jmsj.85.943.
- Yukimoto, S., Kodera, K., and Thiéblemont, R. (2017), Delayed North Atlantic response to solar forcing of the stratospheric polar vortex. *SOLA*, **13**, 53-58. doi: 10.2151/sola.2017-010.