

成層圏界面上昇イベントが下層大気循環に与える潜在的影響

野口峻佑¹・吉田康平¹・出牛真^{2,3}・黒田友二¹

(1: 気象研究所 気候研究部, 2: 気象庁 地球環境・海洋部, 3: 気象研究所 環境・応用気象研究部)

1. はじめに

成層圏界面上昇 (Elevated Stratopause; ES) イベントとは、大規模な成層圏突然昇温 (Stratospheric Sudden Warming; SSW) 後、稀に起こる、成層圏界面が通常よりも高い高度で再形成される現象である (e.g. Siskind et al. 2007; Manney et al. 2008). 図 1 にその一例として、2008/2009 年冬季の北極域温度の時間-高度断面図を示す。通常は高度 50-60 km に存在する成層圏界面が、極渦の崩壊現象である SSW の生起に伴い沈降した直後に、高度 80-90 km の中間圏・下部熱圏 (Mesosphere-Lower Thermosphere; MLT) 領域で再形成され、その後ゆっくりと下降している様子を見ることが出来る。このような極域での温度極大の形成はそこでの残差下降流の強化と関係することから、この現象は、MLT 領域から成層圏への物質の下方輸送を考える際に重要な役割を果たす。

ところで近年、太陽活動の地球気候への影響過程の中で、特に、高エネルギー粒子の降り込み (Energetic Particle Precipitation; EPP) の影響への関心が高まっている (e.g. Seppälä et al. 2014). EPP により生成された窒素酸化物 (NO_x) は、触媒反応を介して成層圏のオゾンを破壊するが、この過程は、上空で生成された EPP-NO_x が、それが長寿命となる極夜の成層圏へ輸送された際に、より効果的に働く (このような輸送の影響を踏まえた効果は「EPP 間接効果」と呼ばれる)。EPP 間接効果は、通常の安定した極渦状態時にも存在するが、ES に関係した MLT 領域からの NO_x の下方輸送は、それをイベント的に乱して強化するため、その寄与は北半球の NO_x 変動を考えるにあたって非常に大きいと考えられている。そのため、ES イベントは、EPP 間接効果の大きさを定量的に調査するにあたって鍵となる過程であると言え、ひいては太陽活動の地球気候への影響を考える際にも重要な過程であると言える。

しかしながら、通常の気候モデルでは、その上端が MLT 領域を解像するほど高くないため、上記の EPP 間接効果を直接的に取り扱うのは難しい。そこでモデル上端の高くないモデルでは、応急処置として、地磁気指数を入力とする半経験モデル (Funke et al. 2016) によって作成された NO_x に関わる上部境界データを与えることによってその効果を取り入れることが、第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP6)

においては推奨されている (Matthes et al. 2017). 最新の気象研究所地球システムモデル (MRI-ESM) においても、上記の処置が実装されており、CMIP6 用の計算では、EPP の効果が入れられることになる。

このように、長期の気候計算に用いられるモデルにおいて、あくまでパラメタライズされた形ではあるが、EPP の効果を取り入れる手筈が整ってきた。また、ES に伴う NO_x の下方輸送の再現性の向上は依然として課題として残っているが、上述の半経験モデルには、ES イベントに伴う下方輸送の効果を補填するオプションがあり、ES 生起日を指定することで、その効果を反映した上部境界データを作成することが可能である。このため、ES に伴う EPP 間接効果の下層大気への影響がどの程度あるのかを調査することが、MLT 領域を解像しない気候モデルにおいても可能となってきたのが現状である。

そこで本研究では、CMIP6 相当の設定の MRI-ESM を用いて、NO_x に関わる上部境界データに関する感度実験を実施することで、ES に伴う EPP 間接効果の定量的な調査を行う。特に、ES によるイベント的な輸送効果の補填がどの程度あるのか、EPP によるオゾン破壊の影響が下層大気循環にどの程度及ぶのか、を明らかにすることを目的とする。

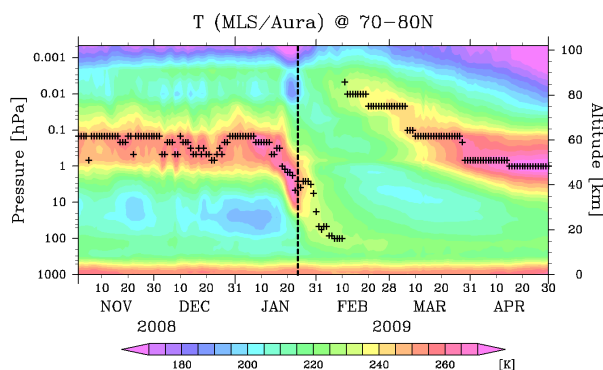


図 1. 北緯 70-80 度で領域平均した温度の時間-高度断面図。地球観測衛星 Aura のマイクロ波リムサウンダ (MLS) による観測データ (Level 2 プロダクト) を日平均して使用。SSW の生起日 (北緯 60 度, 10 hPa) における帯状平均東西風の逆転日: 1 月 24 日) を縦点線で示す。各日における成層圏界面の位置を、100 hPa 以上の温度極大として、十字点で示す。

2. 実験設定

本研究では、最新の MRI-ESM を用いて、以下の3種類の実験を行った。

- (1) まず、HEPPA-II (Funke et al. 2017) として知られる、2009年1-2月に生じた SSW-ES イベントを対象とする、NO_x 下方輸送の再現実験を行った。この実験では、対流圏-成層圏の力学場をナッジングにより再解析の場へと固定し、上空の化学種の輸送の様子を確認する。
- (2) 次に、上記の計算を拡張し、複数の ES イベントに対してナッジングランを行った。その際、EPP 強制を与えないラン (EPP_{OFF})、NO_x 上部境界条件として、ES オプションを OFF にしたラン (EPP)、ES オプションも含めて全てを取り入れたラン (EPP&ES) の3種類の条件で感度実験を実施した。これにより、北極域オゾン量への、EPP 強制の有無による影響 (EPP&ES と EPP_{OFF} との差) と ES オプションの影響 (EPP&ES と EPP との差) を確認する。
- (3) 最後に、対流圏-成層圏のナッジングを廃止したアンサンブル実験 (詳細は後述) を行った。この実験により、EPP によるオゾン破壊の下層大気循環への影響がどの程度あるのかを調査する。

全実験を通じて、MRI-ESM を海面水温 (SST) 規定型の設定で使用した。すなわち、本研究では、海洋モデル (MRI.COM) とは結合せずに、SST を COBE-SST2 に規定した。大気モデル (MRI-AGCM3.5) の解像度は、水平 T_L159、鉛直層数 80 (モデル上端 0.01 hPa) であり、これに化学モデル (MRI-CCM2.1: 水平解像度 T42) とエアロゾルモデル (MASINGAR mk2(4): 水平解像度 T_L95) が結合されている。実験 (1) と (2) におけるナッジングに関しては、1 hPa までの水平風速場 (南北風と東西風) を再解析 (JRA-55) へと拘束している。緩和時間は 24 時間である。なお、拘束を急激に止めることにより生じるショックを防ぐために、ナッジングによる修正項には、30 hPa から 1 hPa にかけて徐々に拘束が緩まるように気圧に依存した関数の重みがかかっている。

なお、実験 (2) における複数の ES は、Funke et al. (2016) において抽出される 6 イベントであり、ES 生起日は、1hPa における南北温度勾配 (北緯 70-90 度における領域平均温度の、北緯 0-30 度のそれからの差) が閾値 (-53 K) を下回った日として定義される。

3. 結果 (1): HEPPA-II 再現実験

まず、モデル-衛星観測データの詳細な相互比較が行われている再現実験を実施することで、MRI-ESM を用いて EPP の大気への影響調査が行えることを確認した。図 2 に、MRI-ESM によって再現した、北極域における NO_x 下方輸送の様子を示す。ここでは結果の概観のため、Funke et al. (2011b) の図 2 と同様の形式の絵を描いている。

図 2 とそれとを比較することで、上空で与えた NO_x の下方輸送を、モデルは概ね再現できている様子を見ることが出来る。まず、SSW の生起に伴う 1 hPa 付近を境とした残差下降流 (/上昇流) により、1 月下旬に上部成層圏 (/下部中間圏) で、NO_x 濃度が高く (/低く) なっている様子を確認できる。そして、2 月上旬にスイッチを入れた ES に伴う下方輸送の効果により、2 月から 3 月にかけて、NO_x 高濃度領域が上部成層圏にまで伸びている様子を見ることが出来る。なお、このような上部成層圏における NO_x ピークは ES のスイッチを入れない場合には再現できず、また、冬季上空における NO_x 濃度自体、EPP 強制なしでは表現できない。

ここでは衛星観測に合わせたデータサンプリングは行っていないため、厳密な比較ではないが、Funke et al. (2017) にて相互比較に参加している他のモデルによる再現結果と比べても、悪くない結果が得られていると言える。

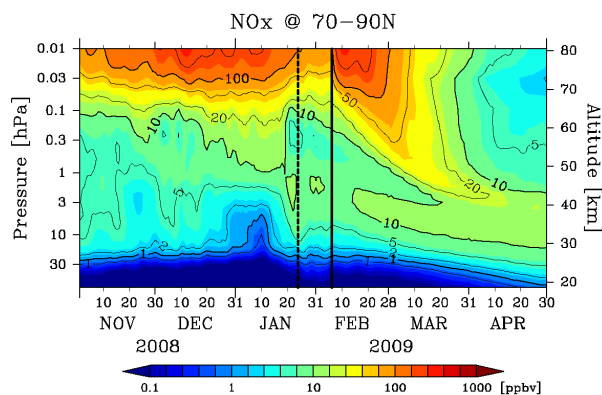


図2. MRI-ESM による HEPPA-II 相互比較実験の再現結果。北緯 70-90 度で領域平均した NO_x 体積混合比の時間-高度断面図。Funke et al. (2011b) の Figure 2 に合わせ、対数間隔のカラースケールで表示。SSW および ES イベントの生起日を、それぞれ縦点線および縦実線で表示。

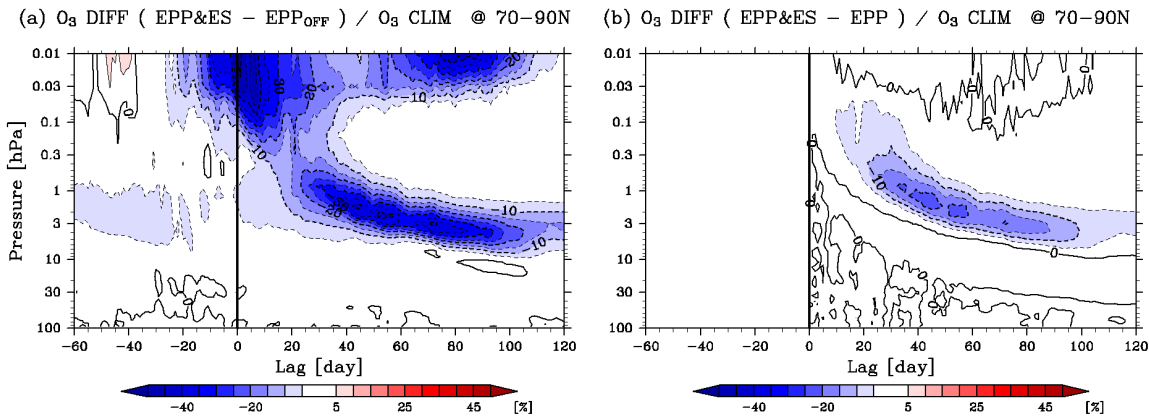


図 3. EPP の効果による、北極域 (北緯 70-90 度における領域平均) のオゾン減少量を合成した時間-高度断面図. 全 ES イベントについて、その生起日を基準 (Lag: 0) として合成を実施. (a) EPP&ES ランの EPP_{OFF} ランからの偏差. (b) EPP&ES ランの EPP ランからの偏差. 両偏差とも気候値により規格化して、[%] で表現したものを示す. ここで気候値としては、EPP ランと同様の設定で 2000 年以降 (2000/2001 年から 2013/2014 年まで) について積分し、ES イベントの含まれる冬季を除いた 10 冬を平均し、平滑化処理 (15 日移動平均) を施して作成したものを用いた.

4. 結果 (2): EPP-ES スイッチ ON/OFF 実験

上記のような ES に伴う NO_x の下方輸送の結果、成層圏オゾンがどの程度減少するのかを確かめるため、各ラン間の北極域オゾン量の偏差を調べた. 図 3 に、ES イベントの生起日を基準に合成した、北極域オゾンの規格化偏差を示す. 各図はそれぞれ、EPP 強制の有無によるオゾンの差 (図 3a) と、ES オプションの有無によるオゾンの差 (図 3b) を表す.

まず図 3 (a) より、ES 生起の 1-4 ヶ月後の期間において、上部成層圏 (3 hPa) 付近のオゾンが、最大 40% 程、減少していることがわかる. この値は、(平均的に北半球よりも大きい) 南半球での EPP による成層圏オゾンの減少量が 5-15% と推定されている (e.g. Fytterer et al. 2015; Damiani et al. 2016) ことを踏まえると、非常に大きいと言え、ES に伴うイベント的な輸送の効果の重要性を認識することができる. なお、図 3 (a) では他にも、ES 生起日付近の 0.3 hPa より上空において、大きなオゾン減少を確認できる. これには EPP-NO_x 以外にも、オゾンに関わる反応の温度依存性、すなわち SSW の生起に伴う中間圏領域の低温化、が関係していると考えられる.

次いで、図 3 (b) より、ES オプションのスイッチ ON/OFF によって、上部成層圏において最大 20% 程のオゾン減少量の差が生じていることがわかる. よって、(あくまで MRI-ESM においてではあるが、) 上記で確認した EPP による全オゾン減少 (40%) のおおよそ半分は、ES

イベントに伴う NO_x 下方輸送の補填により生じていると考えられる.

なお現在、この ES オプションは、予め ES 生起日を手動で指定し、それに対応した NO_x 上部境界データを作成・設置することで、その効果を取り込んでいる. 将来や遠い過去の気候シミュレーションにおいてこの効果を取り入れることを想定した際には、モデル積分中に ES 生起日を動的に判定して境界データを改変する処理を実装する必要がある. それはもちろん実現可能ではあるが、手間のかかるものであろう. このため、多くの気候モデルにおいて、このオプションは OFF のままで用いられていると予想できる. そのような場合、ES に伴うオゾン減少量が、過少 (おおよそ半分) に見積もられる可能性があると考えられる.

また、ここでみたオゾン減少量は、あくまで合成平均であることに留意しておく必要がある. ES に伴う NO_x の下方輸送量は、EPP の大きさや ES の生起タイミングなどに依存して、事例間でも大きなばらつきがある. 例えば、EPP が活発で、冬の早いタイミングで大規模な SSW-ES イベントが生起した 2003/2004 年には、最大 60% 以上 (ここで合成としてみた変動の 1.5 倍以上) のオゾン減少がみられている.

5. 結果 (3): アンサンブル影響評価実験

最後に、対流圏-成層圏におけるナッジングを廃止した場合に、上記のようなオゾン減少が、成層圏力学場ひいては下層大気循環にどの程度

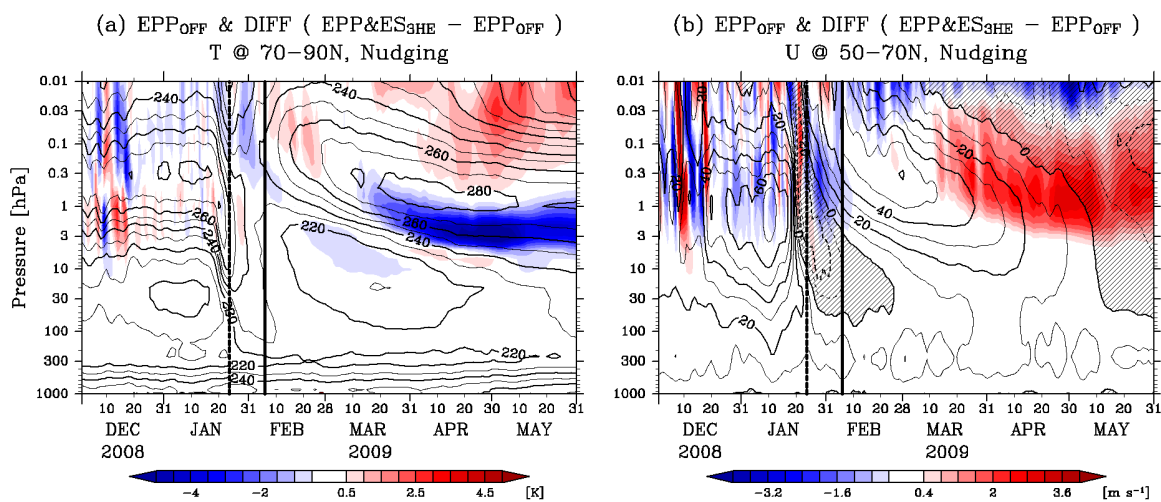


図4. 対流圏から成層圏までの循環場を再解析 (JRA-55) の場へと拘束した設定における、(a) 温度 (北緯 70-90 度で平均) および (b) 東西風 (北緯 50-70 度で平均) の時間-高度断面図. 等値線で EPP_{OFF} ランの場を、色で EPP&ES_{3HE} ランの EPP_{OFF} ランからの偏差を示す. 東西風については、東風の領域を斜線で表す. SSW および ES イベントの生起日を、それぞれ縦点線および縦実線で表示.

の影響を与えるのかを調べた. それにあたり、解釈を容易にするために、最大規模の影響が期待される、以下の仮想的なシナリオ下でのアンサンブル感度実験を行った.

まず、観測史上最大の SSW-ES イベントである 2009 年 1-2 月の SSW-ES イベントを、下層大気循環の基準として選定した. このイベントは、実験 (1) でもみたように HEPPA-II として各種モデル-衛星観測データの相互比較プロジェクトが実施されていることからわかるように、蓄積されている知見も多く、ES 時の循環場のシナリオとしては最適である. しかしながら、この時期の EPP の活動度は極端に低かったため、あまり大きな影響は期待できない. そこで、この冬に活発な EPP 状況が実現していた場合を想定し、それに合わせた NO_x に関わる上部境界データを作成した. ここでは、近年でもとりわけ活発な EPP がみられた 2003/2004 年冬季を参考に、そのピーク値が 3 倍となるように操作した地磁気指数の時系列を入力データとして半経験モデルに与えた. ここで 3 倍は、文献値を参考に、起こりうる磁気嵐として妥当な範囲内に収まるように与えた (cf. Vasiliunas 2011). なお、2003/2004 年冬季は、Halloween Event として知られる巨大磁気嵐で有名なため、以降このシナリオを EPP&ES_{3HE} と称することにする.

図4に、まずはこれまでと同様に対流圏-成層圏の力学場をナudgingによって固定したままでの、EPP&ES_{3HE} と EPP_{OFF} との差の時間-高度断面図を示す. 2 月上旬の ES イベント生起から 2-3 カ月後の 4-5 月に、北極域温度で 4 K 以

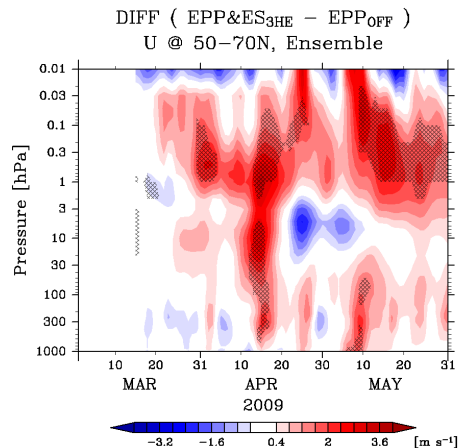


図5. 北緯 50-70 度で平均した帯状平均東西風について、EPP&ES_{3HE} ランの EPP_{OFF} ランからの偏差を示した時間-高度断面図. 各設定でのアンサンブル平均の差を色で表示. 差の統計的有意性が 95%以上と判定される領域を陰影により示す.

上、帯状平均東西風で 3 m s⁻¹ 以上の偏差が表れており、EPP-NO_x によるオゾン減少の影響が、下部中間圏-上部成層圏における力学場にまで及んでいることがわかる (なお、ここでの偏差の値は、実験 (2) の合成によって得られる同様の力学場偏差のおおよそ 2 倍程度であった). また、実験 (2) の合成図でみたオゾン減少は ES 生起の 1 カ月後から現れているのとは比べ、温度変化が顕在化するまでには若干の遅れが存在す

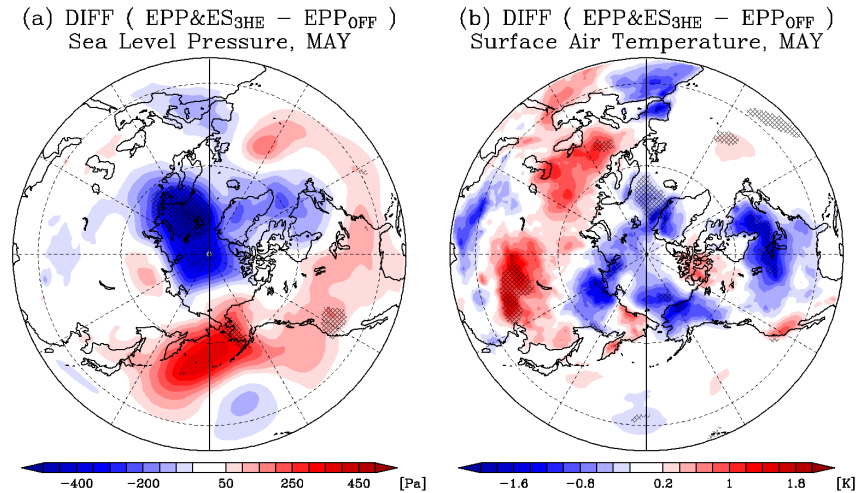


図 6. (a) 海面気圧および (b) 地表面温度について、EPP&ES_{3HE} ランの EPP_{OFF} ランからの偏差を示した水平分布図。2009 年 5 月の月平均値について、各設定でのアンサンブル平均の差を色で表示。差の統計的有意性が 95%以上と判定される領域を陰影により示す。

るが、これは極域でのオゾンの減少の影響が大きくなるのが、(上部成層圏での短波吸収が大きくなる) 極夜が明ける春季であることにより理解できる。すなわち、EPP は、春季に上部成層圏で熱源として働くオゾン破壊することで、極域の温度低下を引き起こす (図 4a)。そして、温度風の関係を考えれば自明のように、この影響は、中緯度の帯状平均東西風でみた場合には、西風加速として現れる (図 4b)。

次いで、上記の力学場の変化が顕在化してくる前の 3 月 1 日から、ナッジングを廃止した「手放し」のアンサンブルランを、EPP&ES_{3HE} および EPP_{OFF} の各シナリオについて実施した。すなわち、ナッジングランの 3 月 1 日の場から、5 月終わりまでの 3 ヶ月積分をリスタートさせた。ここで、アンサンブルは、大気モデルの初期値として 3 月 1 日の前後 4 日を含む 9 日間の 00/12UTC の場を指定し、化学モデルの初期値としては全て同一の 3 月 1 日の 00UTC の場を指定することによって構成した。つまり、各シナリオについて、それぞれ 18 メンバーの LAF (Lagged Average Forecasting) 法 (Hoffman and Kalnay 1983) もどきのアンサンブル予報を行ったことになる。

それによって得た各シナリオのアンサンブル平均の差を、図 5 に示す。時間-高度断面で、図 4 (b) と同じく帯状平均東西風の偏差を色で表している。3 月下旬より下部中間圏で顕在化してきた西風偏差が下方へ染み出し、4-5 月には対流圏-地表にまで、統計的に有意な西風偏差が表れている様子を確認することができる。なお、ナッジングにより力学場が拘束されていた図 4 とは異なり、図 5 では 4 月下旬から 5 月上旬にかけ

ての期間に偏差が乱されているが、この時期はちょうど冬循環 (西風) から夏循環 (東風) への遷移期、すなわち最終昇温の期間にあたる。対流圏からの惑星規模波の上方伝播が抑えられてくる春季には、基本的に循環場の変動は放射によって概ね支配されるが、最終昇温の直前のこの時期に限っては、惑星規模波の寄与が大きくなり、比較的内部的変動が大きくなると考えられる。そのため、現在のアンサンブル数では、それを抑えるのには不十分である可能性がある。

最後に、上空と同符号の有意な地表偏差が見られた、5 月における月平均での差の水平分布を、図 6 に示す。西風偏差の下降、すなわち正の北半球環状モード (Northern Annular Mode; NAM) の下方伝播と整合的に、地表においては、典型的な正の北極振動 (Arctic Oscillation; AO) 的な偏差が分布していることを確認することができる。海面気圧では、北極域に低気圧性偏差が卓越しており、中緯度には高気圧偏差がみられる (図 6a)。また、地表面温度では、北米東岸の特にカナダ付近に低温偏差、ユーラシア大陸の北部で高温偏差がみられる (図 6b)。

以上、実験 (1), (2) でみたように、EPP により生成された NO_x は、ES イベントにより MLT 領域から上部成層圏まで下方輸送され、成層圏オゾンの破壊を引き起こす。そして、この実験 (3) でみたように、そのオゾン破壊に伴う春季の上部成層圏における力学場の変化の影響は、正の NAM 偏差の下方伝播および正の AO パターンの卓越という形で、最終的には地表にまで及ぶ可能性がある。このような、ES イベントの潜在的影響が、本研究により明らかとなった。

6. おわりに

本研究では、NO_x に関わる上部境界に対する一連の感度実験を実施することで、ES イベントに伴う EPP 間接効果の調査を行った。

まず、MRI-ESM において、HEPPA-II の実験設定を実現し、ES に関係した MLT 領域からの NO_x 下方輸送が、概ね再現できていることを確認した。ただし、本稿の結果は衛星に合わせたデータサンプリング処理を行っていない。今後、HEPPA-II にて提出されたモデル結果および衛星観測との相互比較を行い、MRI-ESM による輸送特性をより厳密に把握する必要があるだろう。

次いで、上記設定を拡張し、複数の ES イベントに対して、上部境界条件を改変した実験を行い、それらの差を吟味することで、ES により輸送された EPP-NO_x によって、北極域オゾンが平均的にどの程度破壊されるのかを定量化した。結果、EPP の効果を含めない場合と比べて、ES 生起の 1-4 ヶ月後の上部成層圏において、最大 40% 程のオゾン減少が生じることが示された。また、このオゾン減少のうち半分程は、(通常の気候モデルでは再現することが困難な) ES に伴う下方輸送の、人為的な補填効果によって生じていた。

さらに、最大規模の ES と EPP を想定したシナリオにおいて、ES 生起後からリスタートする形でアンサンブル実験を行うことにより、上部成層圏のオゾン減少が下層大気循環にどの程度の影響を与えるかを調べた。春季における極域での熱源たるオゾンが EPP-NO_x によって減少した結果、上部成層圏には低温・西風偏差が形成されるが、その影響は NAM の下方伝播として対流圏、ひいては地表にまで伝わり、晩春に正の AO 的な偏差を形成した。

なお、このような ES に伴う EPP 間接効果とその後の力学場の変調は、影響が顕著になる時期が季節的に固定されている。これは、EPP 直接効果 (非常に大きな EPP による成層圏での直接的なオゾン破壊物質生成) による、極端イベント時の大気への影響を調べている研究 (e.g. Calisto et al. 2012; 2013; Sukhodolov et al. 2017) が、EPP タイミングへの依存性や冬季の大きな内部変動の混在によって不確定性が大きい状況であるのと比べると、下層大気への影響過程への理解を深めていくにあたっての利点であるとも考えられる。ここで特に興味深いのは、ES が関わるオゾン減少の影響が顕在化する時期と最終昇温期とが、ちょうど重なることである。最終昇温に伴い若干活発となる波-平均流相互作用を介して下層大気循環への影響が増幅することや、そもそもの最終昇温の特徴 (タイミ

ング・強度) が変化することなどが考えられるが、本実験の結果では、図 5 でみたように依然として不確実性が大きい。今後、単なる LAF ではなく、より洗練された気象研究所アンサンブル予報システム (MRI-EPS) との併用により、アンサンブルメンバー数を増強した感度実験を行い、詳細な吟味を行っていく必要があると考えている。

以上、本研究により、ES イベントの影響は、化学過程を介することで、地表にまで及ぶ可能性があり、太陽活動の地球気候への影響を考える際には、このような上空の現象の再現性を考慮することも重要であることが、実際に確認できた。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費特別研究員奨励費 (16J09665) の助成を受けたものである。作図には、地球流体電脳ライブラリを用いた。

参考文献

- Calisto, M., Verronen, P. T., Rozanov, E., and Peter, T. (2012), Influence of a Carrington-like event on the atmospheric chemistry, temperature and dynamics, *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 8679-8686, doi:10.5194/acp-12-8679-2012.
- Calisto, M., I. Usoskin, and E. Rozanov (2013), Influence of a Carrington-like event on the atmospheric chemistry, temperature and dynamics: Revised, *Environ. Res. Lett.*, **8**(4), doi:10.1088/1748-9326/8/4/045010.
- Damiani, A., B. Funke, López Puertas, M., M. L. Santee, R. R. Cordero, and S. Watanabe (2016), Energetic particle precipitation: A major driver of the ozone budget in the Antarctic upper stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 3554-3562, doi:10.1002/2016GL068279.
- Funke, B. (2011), The High-Energy-Particle Precipitation in the Atmosphere (HEPPA) Model vs. Data Inter-comparison: Lessons Learned and Future Prospects, *SPARC Newslett.*, **36**, 28-31.
- Funke, B., López-Puertas, M., Stiller, G. P., Versick, S., and von Clarmann, T. (2016), A semi-empirical model for mesospheric and stratospheric NO_y produced by energetic particle precipitation, *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 8667-8693, doi:10.5194/acp-16-8667-2016.
- Funke, B., Ball, W., Bender, S., Gardini, A., Harvey, V. L., Lambert, A., López-Puertas, M., Marsh, D. R., Meraner, K., Nieder, H., Päiväranta, S.-M., Pérot, K., Randall, C. E., Reddmann, T., Rozanov, E., Schmidt, H., Seppälä, A., Sinnhuber, M., Sukhodolov, T., Stiller, G. P., Tsvetkova, N. D., Verronen, P. T., Versick, S., von Clarmann, T., Walker, K. A., and Yushkov, V. (2017), HEPPA-II model-measurement intercomparison project: EPP indirect effects during the dynamically perturbed NH winter 2008-2009, *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 3573-3604, doi:10.5194/acp-17-3573-2017.

- Fytterer, T., Mlynczak, M. G., Nieder, H., Pérot, K., Sinnhuber, M., Stiller, G., and Urban, J.: Energetic particle induced intraseasonal variability of ozone inside the Antarctic polar vortex observed in satellite data (2015), *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 3327-3338, doi:10.5194/acp-15-3327-2015.
- Hoffman, R. N. and Kalnay, E. (1983), Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus A*, **35A**: 100–118. doi:10.1111/j.1600-0870.1983.tb00189.x
- Manney, G. L., K. Krüger, S. Pawson, K. Minschwaner, M. J. Schwartz, W. H. Daffer, N. J. Livesey, M. G. Mlynczak, E. E. Remsberg, and J. M. Russell (2008), The evolution of the stratopause during the 2006 major warming: Satellite data and assimilated meteorological analyses, *J. Geophys. Res.*, **113**, D11115, doi:10.1029/2007JD009097.
- Matthes, K., Funke, B., Andersson, M. E., Barnard, L., Beer, J., Charbonneau, P., Clilverd, M. A., Dudok de Wit, T., Haberreiter, M., Hendry, A., Jackman, C. H., Kretzschmar, M., Kruschke, T., Kunze, M., Langematz, U., Marsh, D. R., Maycock, A. C., Misios, S., Rodger, C. J., Scaife, A. A., Seppälä, A., Shanguan, M., Sinnhuber, M., Tourpali, K., Usoskin, I., van de Kamp, M., Verronen, P. T., and Versick, S. (2017), Solar forcing for CMIP6 (v3.2), *Geosci. Model Dev.*, **10**, 2247-2302, doi:10.5194/gmd-10-2247-2017.
- Seppälä, A., Matthes, K., Randall, C. E., and Mironova, I. A. (2014), What is the solar influence on climate? Overview of activities during CAWSES-II, *Progress in Earth and Planetary Science*, **1**(1), 24, doi:10.1186/s40645-014-0024-3.
- Siskind, D. E., S. D. Eckermann, L. Coy, and J. P. McCormack (2007), On recent interannual variability of the Arctic winter mesosphere: Implications for tracer descent, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L09806, doi:10.1029/2007GL029293.
- Sukhodolov, T., Usoskin, I., Rozanov, E., Asvestari, E., Ball, W. T., Curran, M. A. J., Fischer, H., Kovaltsov, G., Miyake, F., Peter, T., Plummer, C., Schmutz, W., Severi, M., and Traversi, R. (2017), Atmospheric impacts of the strongest known solar particle storm of 775 AD. *Scientific Reports*, **7**, 45257. doi: 10.1038/srep45257
- Vasyliūnas V. M. (2011), The largest imaginable magnetic storm. *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* **73**, 1444–1446, doi:10.1016/j.jastp.2010.05.012.