

近年の異常気象事例に対する温暖化の寄与(Event Attribution) - 成層圏を介した 2010 年 2 月の負の AO -

今田 由紀子(東大・AORI)・森 正人(東大・AORI)・塩竈 秀夫(国環研)・
木本 昌秀(東大・AORI)・渡部雅浩(東大・AORI)・石井正好(気象研)

1. はじめに

極端な気象イベントに対して人間活動が寄与しているのか否かという疑問に社会の関心が集まっているが、個別のイベントは人間活動による地球温暖化の有無に関わらず大気の揺らぎの中で自然に発生するため、決定論的に人間活動に起因すると判断することは不可能である。一方で、過去の人為起源の温室効果ガスやエアロゾルの排出によってそのようなイベントの発生確率がどの程度変化してきたかを評価（アトリビューット）することは可能である(Allen 2003)。このような外部要因による極端イベントの発生確率への影響を見積もる研究は Event Attribution (EA) と呼ばれ、世界的にも注目され始めている (Stott et al. 2004, Pall et al. 2011)。EA では、大気大循環モデル (AGCM) を用いて、人為起源影響がある場合とない場合という条件下で特定のイベントに対する多数のアンサンブル実験を実施し、それぞれの条件下におけるイベントの発生確率を定量化する。ここでは、文部科学省の「気候変動リスク情報創生プログラム」の一環として実施された EA における研究の成果の一部を紹介する。

近年、ユーラシア域における冬季の寒波が頻発し、その要因として負の北極振動 (AO) や海氷の減少が注目されている。2009～2010 年の冬に北半球中緯度域を襲った大寒波は、前者の負の AO の持続によりもたらされた寒波の代表例であるが、同時期に発達していた熱帯太平洋のエルニーニョ及び成層圏で発生した突然昇温がこの現象と相互に影響し合った可能性が指摘されている。この 3 つの現象の関連性について、

Ineson and Scaife (2009)では、ハドレーセンターの高解像度大気モデルで再現された 24 の El Nino の解析から、エルニーニョからのテレコネクションに伴って形成された波数 1 のプラネタリー波が成層圏まで伝播して成層圏下部に極渦弱化をもたらす、そのシグナルが 1 ヶ月程掛けて下方伝播して対流圏に AO 負のパターンを形成するというプロセスを明らかにした。更に、エルニーニョ期に成層圏突然昇温が同時に発生した場合には極渦の弱化が持続しやすく、対流圏の負の AO が 1 ヶ月以上持続することを示した。

本来、中高緯度域では大気変動が支配的であるため中長期予報は困難であると考えられてきた。一方、近年の計算機能力の向上に伴い大気海洋結合大循環モデル

(AOGCM) の中長期予測への利用が本格化し、エルニーニョ・南方振動 (ENSO) 等の熱帯海洋に起因する現象は季節スケールの予測が可能になりつつある。先に挙げた全球規模の熱帯海洋・成層圏・中高緯度大気の相互作用の存在は、本来中長期予報が難しいとされる中高緯度域の予測を可能にし得る重要なプロセスとして注目を集めている。一方、この相互作用はエルニーニョが起こった場合に必ず発生するわけではなく、観測史上の発生回数も少ないことから、その発現を左右する鍵となるプロセスは依然として明らかではない。

そこで本研究では、成層圏まで網羅する高解像度の AGCM を用いた EA 実験の豊富なアンサンブルセットを活用して、2010 年の負の AO イベントの発現の鍵となったプロセスを明らかにすることを目的として

表 1. MIROC4 AGCM を用いた EA の実験設定

		ALL	NAT	ALL-LNG
外部強制	人為起源 自然起源	20C+RCP	1850 年に固定	20C+RCP
	SST sea ice	HadISST	1850年以降の トレンドを除去	HadISST
Ensemble size		50	50	10
Period		2009-2012	2009-2012	1946-2011

いる。更に、人為起源の温暖化がなかった場合を想定した仮想実験の結果と比較することで、2010 年の寒波に対する温暖化の寄与を定量化する試みを行う。

2. 実験と解析手法

EA に用いたモデルは AOGCM MIROC4 の大気部分で、水平解像度は約 100km、鉛直 56 層（内成層圏 16 層）である。

再現実験（以下 ALL 実験と呼ぶ）では、ターゲットを近年のイベントに絞り、観測された海面水温・海水分布（HadISST, Rayner et al. 2003）と、過去の人為起源（温室効果ガス、エアロゾルなど）及び自然起源外部強制要因（太陽放射と火山活動）を AGCM に与えて、2009 年 6 月から現在までのアンサンブル実験を 50 メンバー実施した。

この ALL 実験と対になる仮想実験として、人為起源の外部強制要因を産業革命以前（1850 年）条件で固定し、海面水温と海水分布から人為起源影響シグナルを除いた実験（以下 NAT 実験）を同じく 50 メンバー実施した。海面水温に対する人為起源影響シグナルは MIROC3 による CMIP3 の 20 世紀再現実験+IPCC SRES A1B シナリオ実験の 10 メンバーの出力データから推計し、海水分布の人為起源影響シグナルは海水分布と海面水温間の経験的線形関係（Pall et al. 2011）から見積もった。

さらに、モデルの極端イベント再現成績の評価やバイアス補正のための資料として、ALL 実験を 1946 年から 2011 年に延長し

た 10 メンバーのアンサンブル実験（以下 ALL-LNG 実験）を用意した。以上の EA の実験設定の概要を表 1 に示す。

検証に用いる大気場の実況データには ERA-Interim 再解析データを用いた。

3. イベントの推移とモデルの再現

図 1 に、2009-2010 年冬季の海面水温及び 500hPa 高度の偏差場を示す。この時期、熱帯太平洋ではエルニーニョが発生しており、中緯度大気中には Pacific-North Atlantic (PNA) テレコネクションパターン（アリューシャン低気圧の強化と北米大陸上の高気圧偏差）が見られた。

この期間の ERA-Interim による成層圏温度及び極渦の時間変化を示したものが図 2a, c である。北半球中緯度対流圏では、立て続けに負の AO が発生し、東風偏差が持続した（図 2c）。特に 2010 年 1 月下旬以降の第 2 陣の負の AO は 1 月中旬に発生した成層圏突然昇温（図 2a）に起因しており、

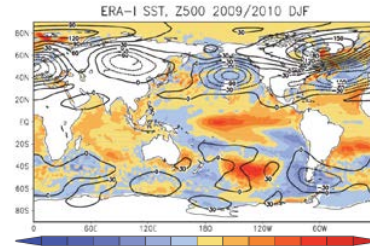


図 1. 2009 年 12 月から 2010 年 2 月で平均した海面水温[K]（色）及び 500hPa 高度[m]（線）の偏差（ERA-Interim 再解析）。

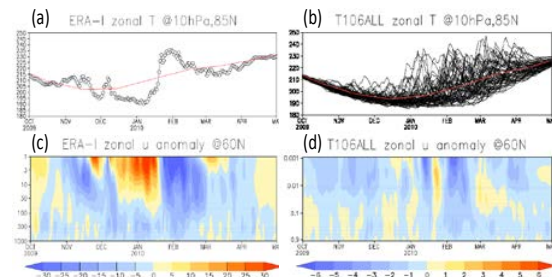


図 2. (a), (b) 北緯 85 度, 10hPa における带状平均気温[K]の時間変化。赤線は気候値。(c), (d) 北緯 60 度において带状平均した東西風速偏差 [m/s]の時間-高度プロット。(a), (c) ERA-Interim 再解析, (b), (d) ALL 実験 50 メンバーの結果。

その後1か月以上、北極域の高気圧偏差とユーラシア域の寒波をもたらした（図3左：2010年1-2月の海面気圧と地表気温偏差）。

図2b, d及び図3右図に、AGCMによる50メンバーの再現実験の結果を同様に示す。モデルでは、成層圏の偏差とは無関係に生じた12月から1月上旬の第1陣の負のAOは再現できていないものの、成層圏昇温を介した第2陣の負のAOと中緯度域の寒波が良く再現されていることが分かる。これは、海面水温・海水分布及び外部強制要因のみをAGCMに与えることで成層圏及び中緯度大気内部の変動をある程度再現できるという驚くべき結果である。一方、過去33年に渡るAOインデックス（海面気圧の主成分分析の第一モード時係数、図略）のモデルと観測間の相関係数は有意水準に満たないことから、すべてのAOがAGCMで再現されるわけではなく、第2陣のような成層圏を介したケースにおいて再現が可能となることが示唆される。

次節では、成層圏を介したAOとそれ以外のAOを分離する手法を導入し、2010年の現象の鍵となるプロセスを調べていく。

4. 結果

4.1. イベント発生のメカニズム

まず、対流圏から成層圏への惑星波の伝搬過程を見ていく。図4に、北半球中高緯度の1月の上向き Eliassen Palm (EP) フ

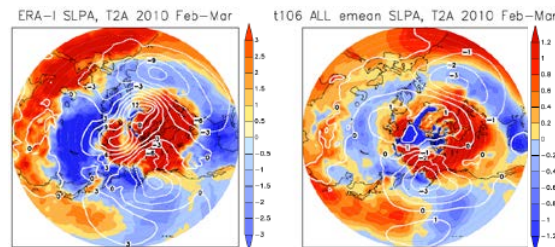


図3. 2010年2-3月の平均地表気温[K]（色）と海面気圧[hPa]（線）の偏差。左：ERA-Interim, 右：ALL実験50メンバーのアンサンブル平均。

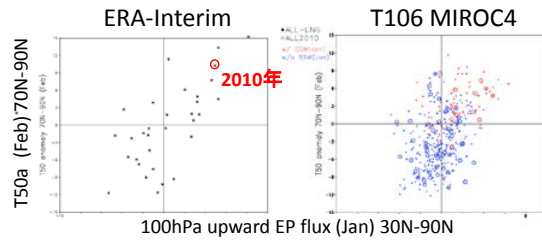


図4. 北緯30-90度で平均した1月の100hPa上向きEPフラックス偏差（横軸）と北緯70-90度で平均した2月の50hPa気温偏差（縦軸）の散布図。期間は1979年から2011年。左：ERA-Interim, 右：ALL-LNG実験（●）及び2010年のALL実験50メンバー（○）の結果。右図の赤印は成層圏突然昇温が起こったケースを表す。

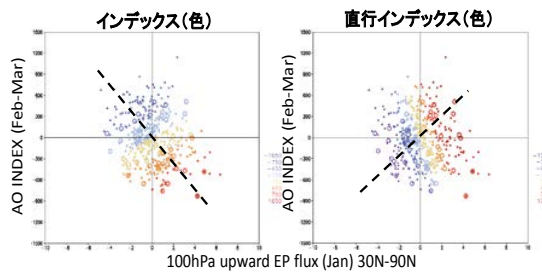


図5. 北緯30-90度で平均した1月の100hPa上向きEPフラックス偏差（横軸）と2-3月のAOインデックス（縦軸）の散布図。ALL-LNG実験の1979年から2011年（●）及び2010年のALL実験50メンバー（○）の結果。各図において、各点を黒破線に射影した値を色で示す。

ラックスと翌2月の成層圏気温の偏差を過去33年に渡ってプロットした。観測、モデル共に上向きEPフラックスとその後1ヶ月の成層圏温度との間に強い正の相関が見られ、モデルが惑星波の上方伝播プロセスを正しく再現していることが分かる。

2010年1月はエルニーニョであり、これに伴うアリューシャン低気圧の強化（図1）で惑星波の上方伝播と成層圏の昇温が特に強い年であったと考えられる（図4左）。図4右図では、2010年のALL実験の50メンバー（中抜き丸）はALL-LNG実験の他の年に比べて第一象限に偏って分布しているものの（突然昇温の発生確率はALL-LNGで16.6%, ALLで21.7%）、個々のケースを見てみると、同じエルニーニョの条件が境界条件として与えられていても、惑星波の伝搬が必ず起こるわけではないことが分

かる。

次に、ALL 及び ALL-LNG 実験結果を用いて惑星波の上方伝播に対する翌 2 月から 3 月の AO インデックスの関係をプロットしたものが図 5 である。両者には有意な相関関係は見られず、成層圏昇温が起こった後に必ずしも対流圏が負の AO になるわけではないことが分かる。そこで、図 5 左図では、EP フラックスが上向き（下向き）時に AO が負（正）になるような軸（点線）に対して各データを射影し、新しいインデックス（IDX）を定義した。同様のやり方で、図 5 右図は、左図と直行する成分を直行インデックス（IDXN）として定義した。これら二つのインデックスを用いることで、成層圏の変動を介して AO が影響を受けるケース（IDX）と、成層圏の変動とは無関係に AO が起こるケース（IDXN）を分離することができる。

各インデックスの再現を過去 33 年の観測値から同様に見積もったインデックスと比較すると、IDX の相関係数は約 0.4 と 95% 有意水準を満たすものの、IDXN の相関係数は AO インデックスを直接比較した際よりもさらに低くなる。このことは、成層圏を介して AO が発生するようなケースに絞った場合には、SST 及び海氷を与えただけの AGCM でも AO を再現できる可能

性が出て来ることを意味している。

対流圏に発生する AO が成層圏の変動に起因する場合としない場合を決定付ける大気場の要因が何であるかを調べるため、各インデックスに対して 2010 年 1 月（観測で上向き EP フラックス偏差が現れた時期）の ALL 実験 50 メンバーの 300hPa 高度を回帰した結果が図 6 の極投影図である。IDX を用いた場合（図 6 左、成層圏の変動が翌月以降の AO の発生に寄与する場合）には、太平洋から北米大陸上空に掛けては典型的な PNA パターン、大西洋には Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) パターン、ユーラシア大陸上空には南北のシーソーパターンが見られ、波数 1 の上向き EP フラックスが卓越する気圧分布となっている（図 6 右）。一方、IDXN を用いた場合（図 6 中央、成層圏の変動が関係しない場合）には、高緯度域で波数 2 型の気圧配置が強化しており、上向き EP フラックスの波数解析においても波数 2 が波数 1 と同等のパワーを示している（図 6 右）。このことから、上方伝播したプラネタリー波に伴う成層圏内の極渦弱化傾向が対流圏まで下りて来るか否かは、初期に対流圏で誘起されるプラネタリー波の波数によって決まっていることが示唆された。

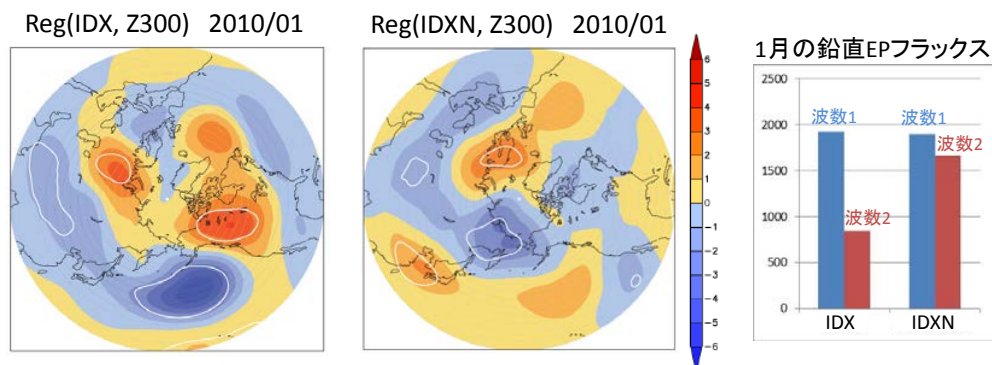


図 6. 左及び中央図：IDX（左図）及び IDXN（中央図）に対して、2010 年 1 月の ALL 実験 50 メンバーの 300hPa 高度場を回帰した結果。白線は 98% 有意水準を示す。右図：IDX（左）及び IDXN（右）に対して鉛直 EP フラックスの分布を回帰した場に対して波数解析を行った結果。青が波数 1、赤が波数 2 の結果を示す。

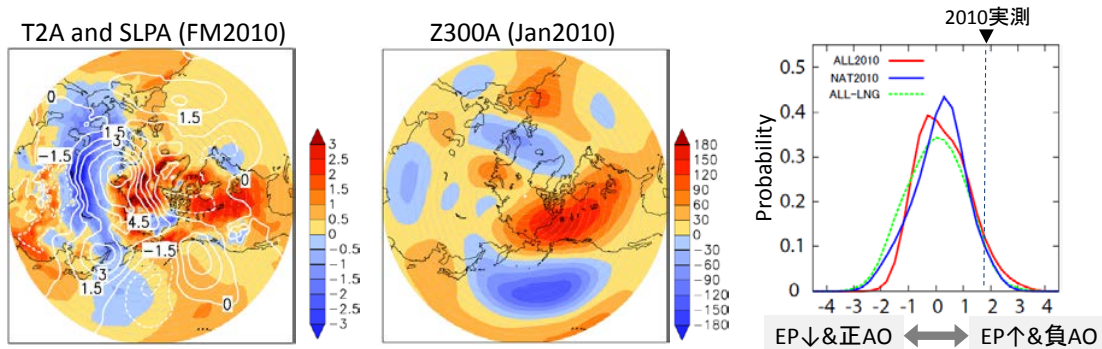


図 7. 左及び中央図：ALL 実験及び NAT 実験の上位 10%のメンバーの平均値の差（ALL マイナス NAT）。地表面気温（K, 左図影）、海面気圧（hPa, 左図白線）及び 300hPa 高度（m, 中央）。右図：IDX の確率密度分布。2010 年 ALL 実験 50 メンバー（赤）、2010 年 NAT 実験 50 メンバー（青）、及び ALL-LNG 実験 10 メンバー（緑）の 1979 年～2011 年の結果。点線は 2010 年の実測値を示す。

4. 2. 温暖化の寄与

本節では、2010 年の ALL 実験と NAT 実験の結果を比較することで、温暖化の寄与を議論する。図 7 右図に、2010 年の ALL 実験と NAT 実験各 50 メンバー、及び過去 33 年の ALL-LNG 実験について IDX の確率密度分布を示した。2010 年の実測を上回る確率は人為起源影響を含めた場合の方が高くなっていることが分かり、このことから人間活動によって 2010 年のイベントの発生確率が上がっていたと考えられる。その理由を調べるため、図 7 左図に、ALL 実験及び NAT 実験の上位 10%のメンバーの 2010 年 2-3 月の地表面気温と海面気圧の差（ALL マイナス NAT＝人為起源温暖化の寄与）を示す。人為起源影響を考慮することで、2010 年 2-3 月の極域の高気圧はさらに強化し、これに伴うユーラシア域の寒波も深刻化していることが分かる。イベントの発端となるひと月前の惑星波の特徴を見るために、図 7 中央図に 2010 年 1 月の 300hPa 高度の 2 実験間の差を同様に示した。北太平洋から北米大陸にかけて PNA-like パターンが強化される傾向が見られ、地球温暖化によって波数 1 の惑星波の伝播に好都合な場に変化していることが分かる。地球温暖化に伴う大気の PNA-like な応答は、NAT 実験において SST 境界条

件から取り除いた人為起源影響シグナルが、El Niño-like なパターンをしていることに起因するものと考えられる。（図略、El Niño-like な昇温パターンは CMIP3 及び CMIP5 の多くのモデルに共通した傾向である。）

5. まとめ

先行研究では、エルニーニョ時に成層圏を介した負の AO イベントの発生確率が上がると言われている。本研究では、MIROC5AGCM による EA 実験の豊富なアンサンブルメンバーを利用して、このイベントの発現の鍵が、初期段階に大気内で卓越する惑星波の波数構造であることを明らかにした。一連のプロセスは数か月間持続することから、大気初期値を適切に与えることでこのタイプの負の AO を季節スケールで予測することが理論的に可能であることを意味している。一方、プラネタリー波の波数構造が成層圏から対流圏へのシグナルの下方伝播にどのように寄与するかは明らかでなく、更なる解析が必要である。

2010 年に北半球中緯度域に異常な寒波をもたらした負の AO について、現実再現実験の結果を人為起源影響が仮になかったとした場合のアンサンブル実験結果と比較したところ、人為起源の温暖化がアリューシャン低気圧の強化を通してこのイベントの発生確率を増加させるように寄与してい

た可能性が示唆された。今後は GCM の将来予測実験等を用いて、地球温暖化が進行した場合に 2010 年タイプの寒波が深刻化する傾向にあるか否かを検証していく必要がある。

参考文献

- Allen, M. R., 2003: Liability for climate change. *Nature*, **421**, 891–892.
- Ineson, S., and A. A. Scaife, 2009: The role of the stratosphere in the European climate response to El Niño. *Nature Geosci.*, **2**, 32–36.
- Pall P., T. Aina, D. A. Stone, P. A. Stott, T. Nozawa, A. G. J. Hilberts, D. Lohmann, M. R. Allen, 2011: Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in 2000. *Nature* **470**, 382–386.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *J. Geophys. Res.*, **108(D14)**, 4407.
- Shiogama, H., M. Watanabe, Y. Imada, M. Mori, M. Ishii, and M. Kimoto, 2013: An event attribution of the 2010 drought in the South Amazon region using the MIROC5 model. *Atm. Sci. Lett.*, **14**, 170–175.
- Stott, P. A., D. A. Stone, and M. R. Allen, 2004: Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, **432**, 610–614.