

高解像度 MRI-AGCM アンサンブル実験を用いた 日本域の 10 年規模の気温変動に関する要因分析

今田 由紀子(気象研)・前田 修平(気象研)・渡部 雅浩(東大・AORI)・塩竈 秀夫
(国環研)・水田 亮(気象研)・石井正好(気象研)・木本 昌秀(東大・AORI)

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」の一環として作成された「に資するアンサンブルデータベース」(d4PDF)」を用いて、2000 年代の日本の気温傾向について調べた結果を紹介する。

21 世紀に入り、全球平均の地表気温の上昇傾向が停滞する“地球温暖化の停滞 (Hiatus)”が話題となったが(Meehl et al. 2011, 2013; Kosaka and Xie 2013; Watanabe et al. 2014)、同じ時期に日本の冬から春にかけての地表気温にも昇温の停滞傾向が見られた。一方で夏から秋にかけての気温はこの期間も上昇し続けているこ

とが Urabe and Maeda (2014) によって指摘された。つまり、2000 年代に日本における気温の季節差が増大していることになる。これについて Urabe and Maeda (2014) では、1990 年代の終わりから 2010 年代初頭まで持続した太平洋十年規模変動 (Inter-decadal Pacific Oscillation; IPO) の負位相 (ラニーニャに似た傾向) が、夏～秋にかけて日本上空に高気圧性の循環場偏差を作るのに対し、冬～春にかけては冬型の気圧配置を弱める循環場偏差を作ることが、季節差増大の原因となっていると説明した。この傾向は、年々変動スケールのラニーニャ現象時に日本域に見られる傾向 (寒冬暑夏傾向) にも一致する。

一方、地球温暖化については、季節を問わず日本域の気温を上昇させていることは言うまでもないが、季節差に関してはどうか? Hirahara et al. (2012) では、Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) の将来予測実験に基づいて、温暖化に伴うハドレーセルの南北方向への拡大により、将来、東アジア域ではジェットが北上する傾向にあるものの、夏季のみ例外的にジェットの南側で西風が強まる傾向が見られることを示した。結果として、東アジア域の季節差は小さくなると予想される。同様に、過去に実際に観測された日本域の気温の季節差の変化にも地球温暖化が寄与している可能性がある。

しかし、観測に基づく調査では 1 本のレコードしか存在しないため大気ノイズの影響を除外することが難しく、地球温暖化の寄与や太平洋 10 年規模変動が過去の日本

の気温変化にどの程度影響を与えたかを定量的に見積もることが難しい。実際、Deser et al. (2012) では、大気の内変動に伴うノイズが数十年の長期平均を取っても残渣として影響を持ち、温暖化初期の気候変動のトレンドと比較しても無視できない程の影響力を持つことを示している。そこで本研究では、d4PDF の豊富なアンサンブルメンバーを活かして大気ノイズに埋もれている気候変動のシグナルを取り出し、IPO と地球温暖化がそれぞれどの程度、日本の 2000 年代の気温の季節差の増加傾向に寄与したかを調査した。

2. 実験と解析手法

本研究で用いた d4PDF のデータは、MRI-AGCM3.2 (水平解像度は約 60km, 鉛直 64 層, モデルトップ 0.01hPa) を用いて計算された。

過去再現実験 (以下 HIST 実験と呼ぶ) では、観測された海面水温・海氷分布 (Cobe-SST2, Hirahara et al. 2014) 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、1951 年から現在までのアンサンブル実験を 100 メンバー実施した。

人為起源影響がない条件下での仮想実験として、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、海面水温と海氷分布から長期トレンドを除いた実験 (以下 NW 実験) を同じく 100 メンバー実施した。海面水温の長期トレンドは EOF の第一モード (1900 年~2012 年) で定義し、海氷分布のトレンドは 5 年の移動平均値で定義した。(詳細は Mizuta et al. 2016 および Shiogama et al. 2016 参照)。

検証に用いる大気場の実況データには JRA55 再解析データ (Kobayashi et al. 2015) を用いた。また、偏差場の解析に用いる気候値は、1981 年から 2010 年までの平均値で定義した。

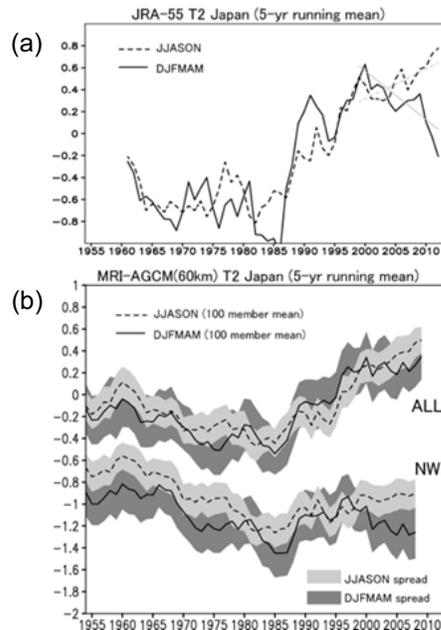


図 1. 日本の地上気温偏差の 5 年移動平均値の時系列 [K]. 破線が JJASON 平均, 実線が DJFMAM 平均を示す. (a) JRA55, (b) d4PDF. (b) において、上段は ALL 実験, 下段は NW 実験の結果, 陰影は 100 メンバーのスプレッドを示す。

3. 結果

3. 1. 日本の地表気温の過去の変動

日本の地表気温の 5 年移動平均時系列を 6~11 月 (JJASON) と 12~5 月 (DJFMAM) に分けて観測と d4PDF で比較した結果を図 1 に示す。観測では、2000 年以降の夏から秋にかけて昇温トレンド、冬から春にかけて気温減少トレンドが見られ (図 1a), Urabe and Maeda (2014) の結果とも整合的である。HIST 実験のアンサンブル平均でも、この 21 世紀の気温傾向が再現されている (図 1b)。また、1980 年代終わりから 1990 年代初頭にかけての暖かい冬春/寒い夏秋の傾向もモデルでよく再現されている。100 メンバーの個々の結果は大気ノイズの影響を受けてある程度の幅を持ってばらついているが、アンサンブル平均値でも観測と同様の傾向が見られることから、これらの気温変化傾向は偶然観測されたものではなく、外部強制や SST・海氷に含まれる時間スケールの長い現象への応答とし

て現れたシグナルであると確認することができる。

3. 2. 2000年代の大気循環場偏差

JJASONとDJFMAMに分けて計算した1999年から2010年までの平均偏差を図2に示す。SST偏差場には、両季節とも熱帯太平洋にラニーニャ型の偏差パターン、日

本の東部に暖水偏差が見られ、典型的なIPOの負位相となっている(図2aおよびb)。これに伴い、熱帯太平洋西部では暖水偏差上に負の外向き長波放射(OLR)と負の速度ポテンシャル偏差(東太平洋では正の速度ポテンシャル偏差)が見られ、海洋大陸域で対流活動が活発化しウォーカー循環が

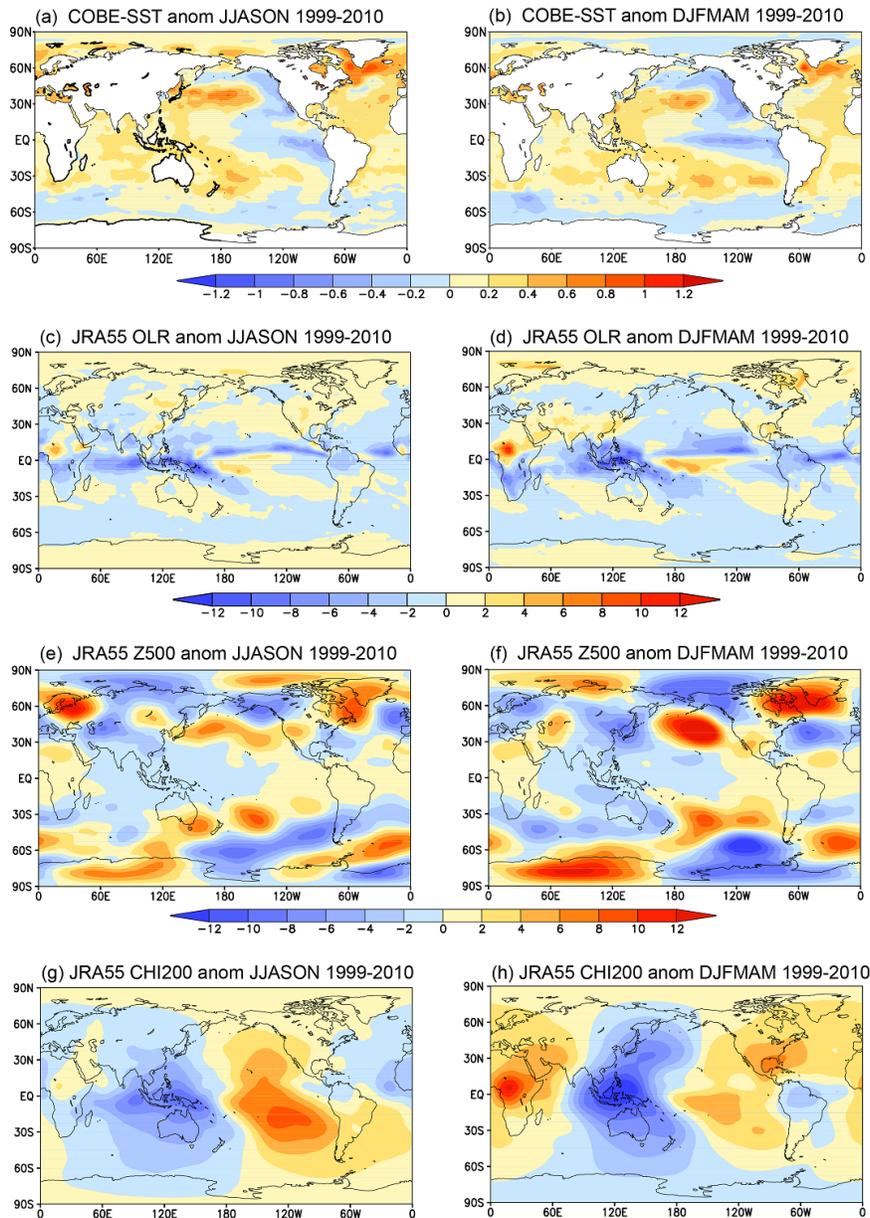


図2. 1999年—2010年で平均した観測の偏差。左がJJASON平均、右がDJFMAM平均。(a)及び(b) SST [K], (c)及び(d) OLR [W/m²], (e)及び(f) Z500 [m, 帯状平均除去], (g)及び(h) 速度ポテンシャル[10⁻⁶ m²/s]。SSTにはCOBE-SST, 大気偏差にはJRA55を用いている。

強化したことを示している。熱帯太平洋西部の対流活動に対するロスビー応答として、500hPa のジオポテンシャル高度場 (Z500) において、DJFMAM には北太平洋から北米にかけて波列が見られ、日本域では低気圧性の循環場が覆って冬型の気圧配置を強化する偏差場となっていた。一方 JJASON には、日本上空に東西方向に広く高気圧性偏差が広がっており、高温をもたらしやすい気圧場となっていた。

観測に見られたこれらの特徴は ALL 実験のアンサンブル平均偏差場でもよく再現されており (図略)、日本付近に観測された偏差場が大気ノイズによって偶発的にもたらされたものではなく、外的要因に対する応答パターンであることが示された。

3. 3. 要因分析

ここまで示した観測および ALL 実験の 12 年平均の偏差場は、地球温暖化に伴う長期的な変化および十年規模の内部変動に伴う偏差が重なった結果である。さらに実況や ALL 実験の各メンバーには大気の内変動の影響も含まれている。これらの複数の要因の中から十年規模の内部変動に伴う変動のみを議論するため、NW 実験の気温の時系列を ALL 実験の結果と比較した (図 1b)。地球温暖化の影響が存在しない NW 実験においても、日本の気温の季節

差が 2000 年以降に増加する傾向は存在し、むしろその差は ALL 実験よりも大きくなっている。このことは、IPO の負位相に伴う十年規模の内部変動が日本の気温の季節差を増大させた主要因であり、地球温暖化はその傾向を打ち消す方向に働いていたことを示唆している。このことをより定量的に議論するため、ALL 実験および NW 実験の 100 メンバーを用いて気温差 (JJASON マイナス DJFMAM) の 12 年平均値の頻度分布を比較したものが図 3 である。ALL 実験において最新の 12 年間を過去 30 年と比較すると (図 3a)、日本の気温の季節差が近年増加していることが明らかである。温暖化の影響を除いて描いた頻度分布においてもこの正方向へのシフトが同程度に見られ (図 3c)、このことから 2000 年代の日本の気温の季節差の増大の主要因が十年規模の内部変動に伴うものであることが分かる。一方、ALL 実験と NW 実験の過去 30 年の頻度分布を比較すると (図 3b)、地球温暖化が存在することで気温の季節差は減少する傾向があることを示しており、これは Hirahara et al. (2012) の調査結果とも整合的である。この効果は内部変動による正方向へのシフトを打ち消す方向に働くものの、総合すると内部変動の影響の方が大きいことが分かる。

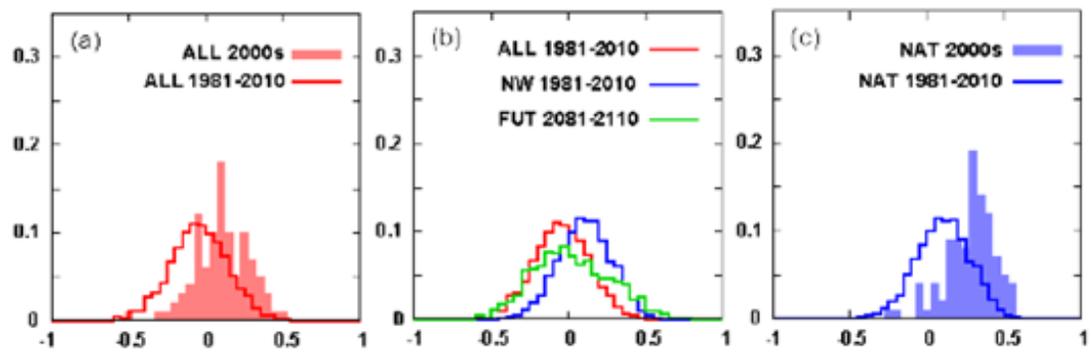


図 3. 日本の地上気温偏差の季節差 (JJASON マイナス DJFMAM) のヒストグラム。線は 1981 年から 2010 年 (FUT 実験は 2081 年から 2110 年) の 12 年移動平均値から得られたヒストグラム、陰影は 1999 年～2010 年平均値。赤は ALL 実験、青は NAT 実験、薄緑は FUT 実験。

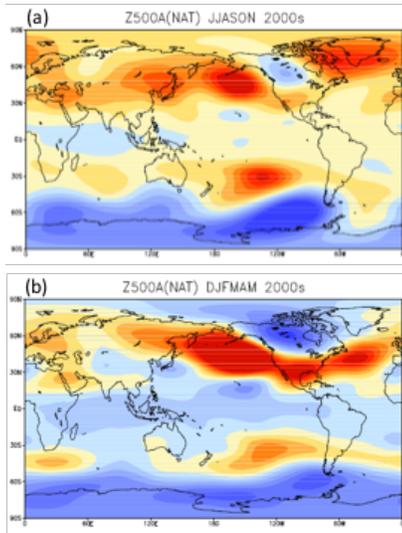


図 4. NW 実験における 1999 年から 2010 年までの平均偏差場を図 2e および f と同様に示した。

NW 実験における 2000 年代の偏差場のアンサンブル平均値を図 2 と同様に示したものが図 4 である。100 メンバーの平均を取ることで大気ノイズが取り除かれるため、ほぼ全域に統計的に有意な値が分布している。地球温暖化と大気ノイズの影響を取り除いた場においても、北太平洋上の偏差パターンは観測された偏差場（図 2）とよく一致していることから、2000 年代の東アジア上空の気圧場の季節差は十年規模の内部変動に伴って形成されたものであることが分かる。

次に、地球温暖化がどのように日本域の気温差の頻度分布に影響を与えたかを調べるため、SST および Z500 について ALL 実験と NW 実験の差を描画したものが図 5 である。SST の差は NW 実験において境界条件から取り除いた SST のトレンド成分に相当するが（図 5a）、大西洋やインド洋、および日本の周辺で速く昇温していることが分かる。太平洋内に目を向けてみると、赤道域では西部の方が東部より昇温量が大きく、西側で対流が活発化していると考えられる。これに応答する形で北太平洋には両季節とも高気圧性循環偏差が広く分布し

ているが、その振幅は DJFMAM の方が大きく（図 5b および c）、冬から春にかけての日本の気温の昇温幅が他の季節より大きくなることで季節差が狭まる結果となったと考えられる。

参考として、d4PDF の将来実験（FUT）の結果についても調べた。将来実験では、RCP8.5 の外部強制と CMIP5 の 6 モデルから得られた昇温パターンを観測値に加算した SST を AGCM に与えて、全球気温が 4°C 昇温した条件下で 90 本のアンサンブル実験を実施している。FUT 実験と ALL 実験の差を図 5 と同様に示したものが図 6 である。CMIP5 のマルチモデル平均で得られる昇温パターンは、熱帯太平洋では東側で昇温が大きくなるエルニーニョ型のパターンを示しており（図 6a）、これに伴う大気

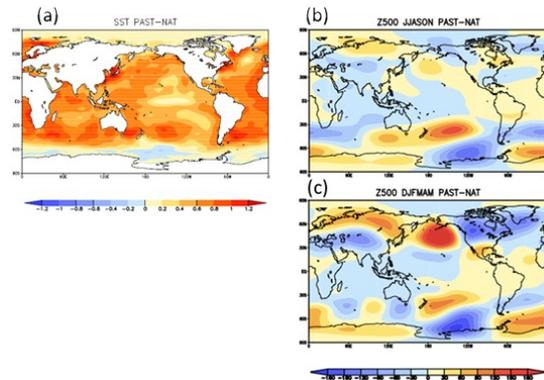


図 5. ALL 実験と NW 実験の差の 1999 年から 2010 年までの平均値。(a) SST, (b) JJASON 平均の Z500, (c) DJFMAM の Z500。

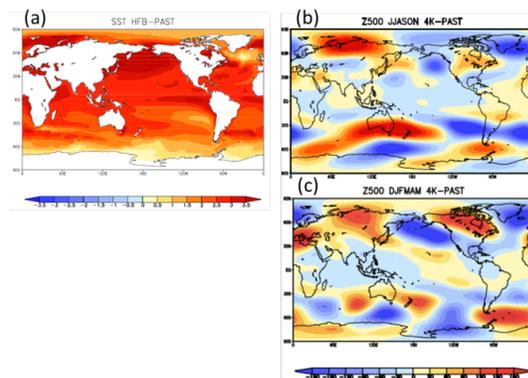


図 6. FUT 実験と ALL 実験の差を図 5 と同様に示したものの。

循環場の変化は北半球において図 5 とは全く異なる分布をしている(図 6b および c)。日本域の気温差の頻度分布でも(図 3b), ALL 実験との差は NW 実験に比べると明瞭ではない。このように, 北半球中高緯度の大気循環は熱帯太平洋の変動に敏感であり, 観測およびモデルの両方の SST 長期トレンドに不確実性が含まれる状況下では, 循環場のトレンドにも不確実性が存在すると言わざるを得ない。しかし, この不確実性を考慮した上でも, 10 年規模の内部変動による影響が 2000 年代の日本域の気温の傾向の大部分を説明するという事実には変わりはない。

5. まとめ

本研究では, AGCM によって計算された 60 年 100 メンバーの過去再現実験および非温暖化実験を用いて, 日本の地上気温の季節間のコントラストが 21 世紀に入って増加している要因を調査した。先行研究では, このような大量アンサンブル実験は現在に近い年代に絞って実施されることがほとんどであり, 解析対象も時間スケールの短い極端現象に限られていた。本研究では d4PDF の長期間にわたるアンサンブル実験を利用して, 十年規模の現象に注目した点が新しい。

本研究の結果から, 2000 年代の日本における気温の季節差の増大は主に IPO の負位相(ラニーニャ傾向の持続)によってもたらされたものであることが確認された。一方で地球温暖化はこの傾向を打ち消す方向に寄与するが, その寄与率は IPO による影響に比べると小さい。これらの結果は, 地球温暖化に負の IPO が重なることで日本の夏から秋にかけての猛暑のリスクがさらに深刻化する可能性があることを示している。

謝辞

本研究は国立研究開発法人海洋研究開発

機構が実施する「地球シミュレータ特別推進課題」の一つとして実施し, 文部科学省の気候変動リスク情報創生プログラムならびに地球情報統合融合プログラムの協力を得た。

参考文献

- Deser, C., A. Phillips, V. Bourdette, and H. Teng, 2012: Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. *Clim. Dyn.*, 38, 527-546.
- Hirahara, S., H. Ohno, Y. Oikawa, and S. Maeda, 2012: Strengthening of the southern side of the jet stream and delayed withdrawal of Baiu season in future climate. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 90, 663-671.
- Hirahara, S., M. Ishii, and Y. Fukuda, 2014: Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. Climate* 2014, 27, 57-75.
- Kobayashi, S. et al., 2015: The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 93, 5-48.
- Mizuta, R. et al., 2016: Over 5000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60 km Global and 20 km Regional Atmospheric Models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, in press, doi:10.1175/BAMS-D-16-0099.1
- Shiogama, H. et al., 2016: Attributing historical changes in probabilities of record-breaking daily temperature and precipitation extreme events. *SOLA*, 12, 225-231.
- Urabe, Y. and S. Maeda, 2014: The relationship between Japan's recent temperature and decadal variability. *SOLA*, 10, 176-179.