

Decadal ENSO に伴う陸上猛暑頻度と 熱帯対流圏上層気温の近年の変動の特徴

*釜江陽一¹, 塩竈秀夫¹, 渡部雅浩², 石井正好³, 植田宏昭⁴, 木本昌秀²

¹ 国立環境研究所 ² 東京大学大気海洋研究所 ³ 気象研究所 ⁴ 筑波大学

はじめに

1990年代には、太平洋・大西洋において海面水温（SST）の数十年規模変動の位相変化が生じた。1998年以降の最近十数年間の気候は、これらの位相の変化に伴う、大局的なSST場の入れ替わりとその影響によって大きく特徴づけられる。太平洋では、北太平洋中央部の低温と赤道東部太平洋の高温を伴う太平洋十年規模変動（Pacific Decadal Oscillation; PDO）が正から負に、大西洋では、北大西洋全体のSSTが高い大西洋数十年規模振動（Atlantic Multidecadal Oscillation; AMO）が負から正にシフトした。また、この十数年間は、全球平均地上気温の上昇が緩やかな時期でもあり（Kosaka and Xie 2013; Watanabe et al. 2013a; 2014; England et al. 2014; Trenberth and Fasullo 2014）、その気候の特徴は注目を集めている。Trenberth et al. (2014) は、負のPDOに伴って中央・西部赤道太平洋上空の非断熱加熱量が変わることによって、特に冬季に遠隔応答を介し、中緯度の低温・高温パターンの形成に寄与していることを指摘した。

この十数年間は全球平均地上気温の上昇が緩

やかであるにも関わらず、陸上で極端な高温を記録する頻度は増え続けている（Seneviratne et al. 2014）。図1は陸上・海上それぞれで平均した、季節ごとの平均気温の推移を示す。海上の気温は、特に熱帯東部太平洋の低温（Kosaka and Xie 2013; Watanabe et al. 2013a, 2014）の影響を受け、どの季節でも温度上昇が緩やかであるのに対し、陸上の平均気温は12月～2月（DJF）を除いて上昇している（冬季の陸上の低温化についてはTrenberth et al. 2014; Mori et al. 2014を参照）。夏季の陸上平均気温の上昇は、陸上で観測されている近年の極端な高

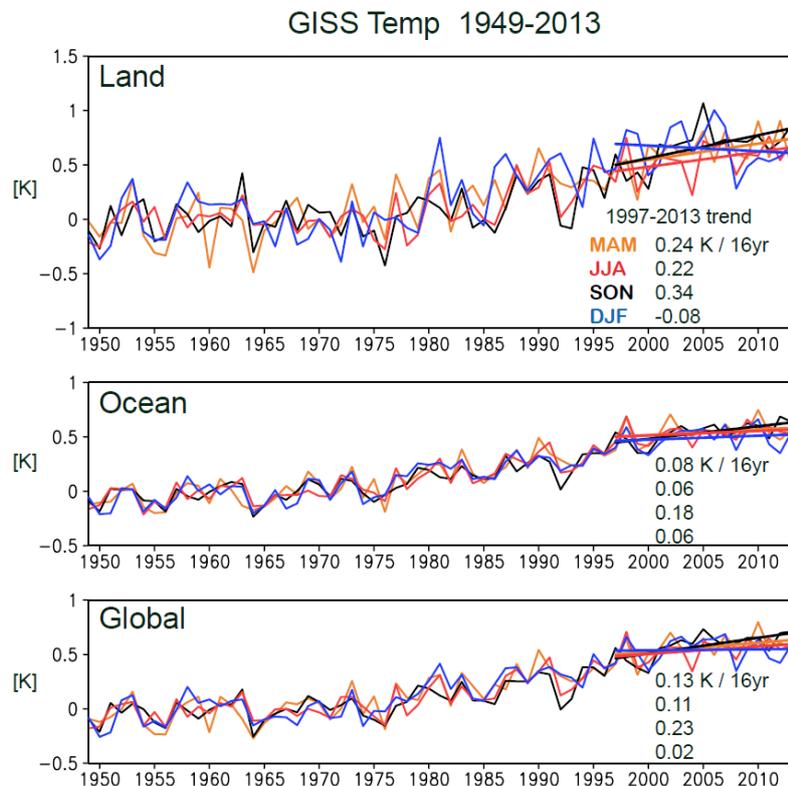


図 1. GISS 地上気温による季節ごとの陸上・海上および全球平均気温の変動。1951~1980 年平均からの偏差。直線と数値は 1997~2013 年の線形トレンド。

温（例えば2003年の欧州熱波； Sutton and Hodson 2005, 2010年のロシア熱波； Watanabe et al. 2013b）の頻度の増加（Hansen et al. 2012; Seneviratne et al. 2014）と矛盾しない。一方で、近年の陸上の夏季気温の上昇と高温頻度の増加の要因の解明は十分に進んでいない。

本研究では、大気大循環モデル（AGCM）を用いた過去再現実験と感度実験を通して、近年の高温頻度の継続的な増加の要因の特定を行った。

なお、当日は近年のPDOの熱帯対流圏上層への影響も含めて議論する予定であったが、当日の講演で触れることができたのは、陸上猛暑頻度への影響のみであった。そのため、本講演要旨ではその範囲についてのみ紹介する。

方法

観測地上気温データにはGISS TEMPの250km解像度（Hansen et al. 2010）を用いた。HadCRUT4（Jones et al. 2012）でも同様の解析を行ったが、顕著な差異は確認されなかった。200hPa高度場にはERA-I（Dee et al. 2011）を用いた。

大気大循環モデルMIROC5 AGCM（Watanabe et al. 2010）に、観測されたSST、放射強制力（GHG、火山噴火など）、土地利用変化を与え、過去63年間（1949～2011年）の再現実験（ALL run）を行った。また、人為的な強制を除いた実験（SST run）と、さらに境界条件SSTから人為的な昇温成分を除いた実験（NAT run）を行うことで、SSTを介さない人為的な寄与（ADIR）、SSTを介した人為的な寄与（ASST）、自然起源の強制による応答と内部変動（NAT）の三つに分離した。それぞれ初期値を変えた10メンバーのアンサンブル実験を行い、不確実性幅を評価した。ここで、境界条件SST

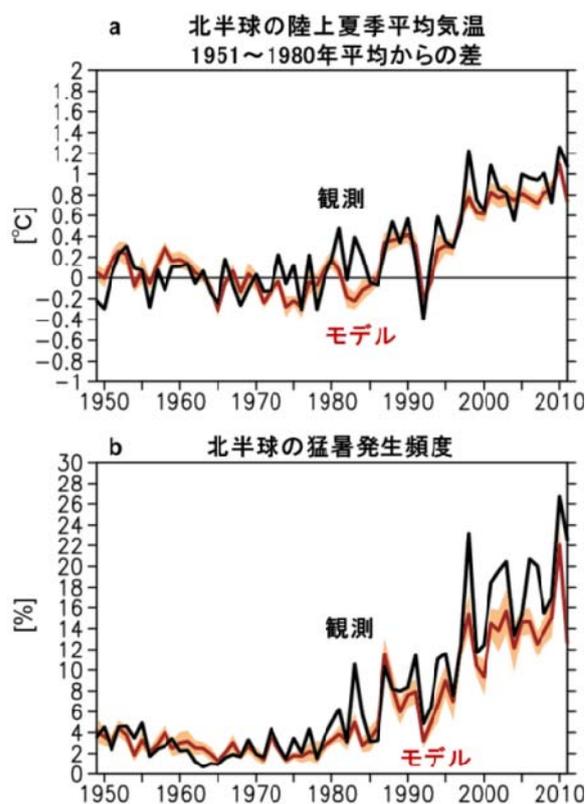


図 2. GISS および AGCM の ALL run による、(a) 北半球陸上夏季 (JJA) 平均気温 (°C) と、(b) 猛暑頻度 (%) の変動。陰影は 90%信頼区間。Kamae et al. (2014a) の図 1 をもとに作成。

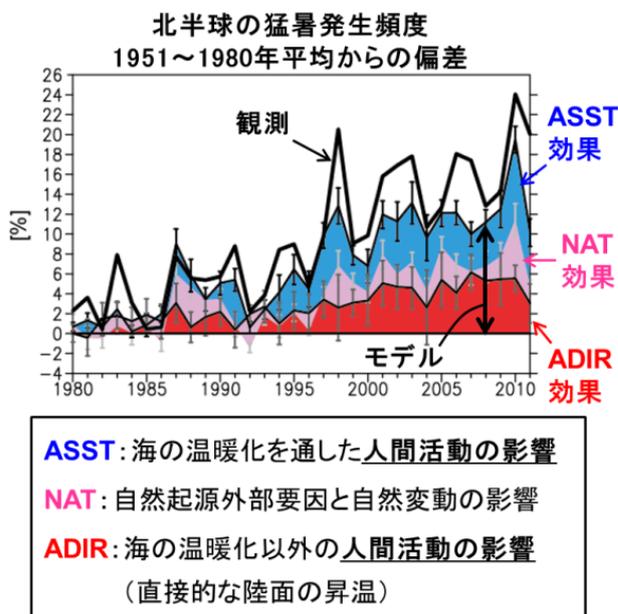


図 3. 図 2b に同じ。ただし、青・ピンク・赤はそれぞれ ASST 効果、NAT 効果、ADIR 効果を示す。Kamae et al. (2014a) の図 2a をもとに作成。

から除く人為的な寄与は、大気海洋結合モデルMIROC3を用いて行われた全強制実験と自然強制実験 (Nozawa et al. 2005) の差を、空間的・時間的に平滑化したもので定義した。

本研究では、6~8月のうち、各格子点で各月平均気温が顕著に高いときを猛暑と定義する。1951年から1980年までを基準期間に設定し、この期間の平均値よりも標準偏差の2倍以上高い月を猛暑とし (Hansen et al. 2012)、主に北半球陸上での猛暑の頻度について調べた。

結果

図2に、GISSとMIROC5 AGCMによるALL runから求められた北半球陸上の平均気温と、猛暑頻度の経年変動を示す。観測データをもとにした猛暑の頻度は、エルニーニョ・ラニーニャや火山噴火の影響による大きな年々変動を示す。また、1998年以降の期間でも、猛暑の頻度は増加している。ALL runは、これらをよく再現している。

近年の猛暑頻度の変動要因を分離する (図3) と、期間に依らず、ADIR効果が強まり続けていることがわかる。これは、大気中のCO₂濃度の継続的な上昇と整合的である。ADIR効果の空間分布を確認すると (図4)、北半球亜熱帯から中・高緯度にかけて、寄与度が大きいことがわかる。長期的な猛暑の増加には、ASST効果が最も重要である (図3、図4の左図と右図の差にほぼ相当) 一方で、亜熱帯から中・高緯度ではその寄与度が小さい。また、NAT効果は長期的な変化傾向に対しては寄与度が小さい。

一般的に、外部強制による陸上全体の気温の応答は、SSTの上昇の影響と、SSTの変化以外の影響 (陸面に働く放射強制) の二つに分けられる。前者を間接的昇温、後者を直接的昇温と呼ぶと、ASST効果は間接

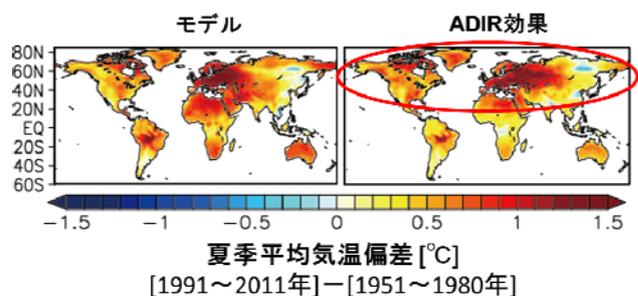


図4. 夏季平均気温の1991~2011年平均の1951~1980年平均からの差。(左図) ALL run、(右図) ADIR効果。Kamae et al. (2014a) の図3b.dをもとに作成。

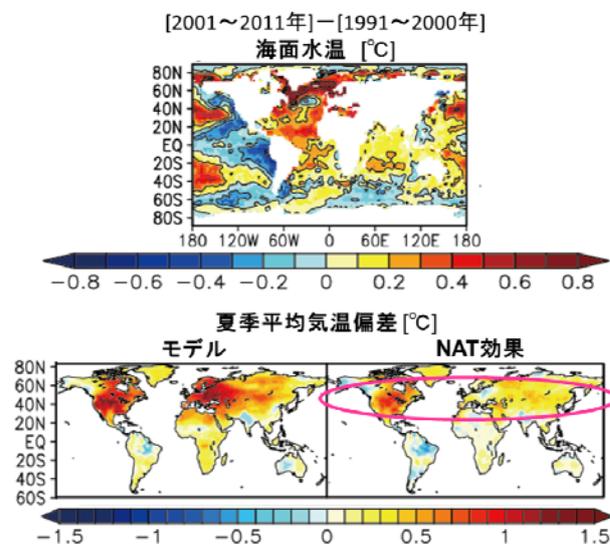


図5. (上図) 海面水温と (下図) 夏季平均気温の2001~2011年平均の1991~2000年平均からの差。(左下図) ALL run、(右下図) NAT効果。Kamae et al. (2014a) の図4b, c, jをもとに作成。

的昇温、ADIR効果は直接的昇温に分類される。大気中二酸化炭素濃度の上昇のような全球スケールの強制に対する応答では、一般に間接的昇温のほうが直接的昇温よりも重要である (例えばJoshi et al. 2008; Compo and Sardeshmukh 2009)。特に熱帯域では、海の温暖化による海上の自由大気の昇温が、重力波によって効率よく水平方向に伝播するため、陸上でも気温が大きく上昇する (weak temperature gradient; Sobel et al. 2001)。一方で北半球の中高緯度では、陸

に比べて海の割合が相対的に低緯度よりも小さく、ロスビーの変形半径も小さいため、海上の昇温が陸上に伝わりづらい。そのため、中高緯度では低緯度に比べ、直接的昇温の重要性がより大きくなる (Kamae et al. 2014b)。

一方で、1998年以降の全球平均気温上昇の停滞期に着目すると、ADIR効果の継続的な増加の他に、NAT効果の変動が寄与していることがわかる (図3)。最近の十年規模のSST変動を確認すると (図5)、太平洋での負のPDOと、大西洋での正のAMOの重ね合わせでよく特徴づけられることがわかる。大局的なSST場の変動による大気循環場、地上気温の変動はこれまでによく調べられており (Pegion and Kumar 2010)、負のPDOは遠隔応答を通してカナダに低温、中緯度北米に高温をもたらす。正のAMOは低緯度の高SSTの影響で北米亜熱帯域に高温、また北大西洋に隣接する欧州などに高温をもたらす。このように、負のPDOと正のAMOは北半球中緯度陸上の気温を上げることで、猛暑の頻度を増やす方向に働いている (NAT効果はモデルで再現される猛暑増加の40%に相当) ことがわかった。

議論

近年の地球温暖化の停滞傾向の一方で、陸上の猛暑頻度が増加していることには、人為的なCO₂濃度の継続的な上昇が寄与していることがわかった。大気中CO₂濃度は今後も継続的に上昇すると考えられるため、地球温暖化の停滞傾向が今後どの程度続くかによらず、陸上で発生する猛暑のリスクは、人為的な影響によって増え続けることが示唆される。

近年の太平洋ではラニーニャの傾向が続いているが、このような十年規模の海洋の変動は、今回紹介した猛暑の頻度に加え、

中緯度の気候にも大きな影響を及ぼす (Trenberth et al. 2014)。この影響は地上だけでなく、熱帯対流圏上層の気温上昇トレンドにも確認される。人為的な温暖化傾向との比較対象として、観測データから得ることのできる長期的あるいは短期的 (十年から数十年程度) な変化傾向を調べる際には、近年の十年規模変動の位相の変化の影響が大きい可能性を検討することが不可欠である。

謝辞：本研究は文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムの支援を受けた。

参考文献

- Compo, G. P., and P. D. Sardeshmukh, 2009: Oceanic influences on recent continental warming. *Clim. Dyn.*, 32, 333–342.
- Dee, D. P., et al. 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553–597.
- England, M. H., et al. 2014: Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Clim. Change*, 4, 222–227.
- Hansen, J., R. Ruedy, M. Sato, and K. Lo, 2010: Global surface temperature change. *Rev. Geophys.*, 48, RG4004.
- Hansen, J., M. Sato, and R. Ruedy, 2012: Perception of climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 109, E2415–E2423.
- Jones, P. D., et al. 2012: Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *J. Geophys. Res.*, 117, D05127, doi:10.1029/2011JD017139.
- Joshi, M. M., et al. 2008: Mechanisms for the land–sea warming contrast exhibited by

- simulations of climate change. *Clim. Dyn.*, 30, 455–465.
- Kamae, Y., H. Shiogama, M. Watanabe, and M. Kimoto, 2014a: Attributing the increase in Northern Hemisphere hot summers since the late 20th century. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5192–5199.
- Kamae, Y., M. Watanabe, M. Kimoto, and H. Shiogama, 2014b: Summertime land–sea thermal contrast and atmospheric circulation over East Asia in a warming climate—Part II: Importance of CO₂-induced continental warming. *Clim. Dyn.*, 43, 2569–2583.
- Kosaka, Y., and S.-P. Xie, 2013: Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 501, 403–407.
- Mori, M., et al. 2014: Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geosci.*, 7, 869–873.
- Nozawa, T., et al. 2005: Detecting natural influence on surface air temperature change in the early twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20719, doi:10.1029/2005GL023540.
- Pegion, P. J., and A. Kumar, 2010: Multimodel estimates of atmospheric response to modes of SST variability and implications for droughts. *J. Clim.*, 23, 4327–4341.
- Seneviratne, S. I., et al. 2014: No pause in the increase of hot temperature extremes. *Nature Clim. Change*, 4, 161–163.
- Sobel, A. H., J. Nilsson, and L. M. Polvani, 2001: The weak temperature gradient approximation and balanced tropical moisture waves. *J. Atmos. Sci.*, 58, 3650–3665.
- Sutton, R. T., and D. L. R. Hodson, 2005: Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science*, 309, 115–118.
- Trenberth, K. E., and J. T. Fasullo, 2014: An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*, 1, 19–32.
- Trenberth, K. E., et al. 2014: Seasonal aspects of the recent pause in surface warming. *Nature Clim. Change*, 4, 911–916.
- Watanabe, M., et al. 2010: Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Clim.*, 23, 6312–6335.
- Watanabe, M., et al. 2013a: Strengthening of ocean heat uptake efficiency associated with the recent climate hiatus. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3175–3179.
- Watanabe, M., et al. 2013b: Event attribution of the August 2010 Russian heat wave. *SOLA*, 9, 64–67.
- Watanabe, M., et al. 2014: Contribution of natural decadal variability to global-warming acceleration and hiatus. *Nature Clim. Change*, 4, 893–897.