熱帯太平洋十年規模変動に起因する地球温暖化のハイエイタス 小坂 優(東京大学先端科学技術研究センター)・謝 尚平 (スクリプス海洋研究所)

1. はじめに

全球平均気温の上昇は 1990 年代末以降停 滞しており(図1),中断を意味する「ハイエ イタス」と呼ばれている.この期間も大気中 の CO₂濃度は上昇を続けており,一見すると CO₂起源地球温暖化説と矛盾する.更なるパ ラドックスは,ハイエイタスにもかかわらず 北極海氷の減少や記録的熱波などの温暖化の 徴候が続いていることである(図1).

ハイエイタスの要因として様々な説が提 唱され、それらは大きく2つに分類できる. 一方は放射強制の減退のために強制応答とし ての昇温が停滞しているとするもので、その 要因として太陽活動の 11 年周期変動に伴う 2009年頃の極小 (Kaufmann et al. 2011), 小規 模の火山噴火 (Santer et al. 2014, Ridley et al. 2014), 人為起源エアロゾルの増加 (Kaufmann et al. 2011), メタン・フロン排出の減少(Estrada et al. 2013),成層圏水蒸気量の減少 (Solomon et al. 2010) などがある (Schmidt et al. 2014). もう一方は内部変動による全球平均気温低下 が放射強制に対する昇温を相殺しているとす るもので、この内部変動として熱帯太平洋十 年規模変動 (tropical Pacific Decadal Oscillation; rPDO) に伴うラニーニャ的低温化 (Meehl et al. 2011, Watanabe et al. 2014), 大西洋数十年規模 変動による海洋中の熱の鉛直再分配(Chen and Tung 2014) が提唱されている.

本研究は内部変動のなかでも特に tPDO の 全球気候への影響を気候モデルにより定量化 する.これにより現在のハイエイタスが,そ の季節性も含めて,熱帯太平洋低温化の影響 でほぼ説明できることを示す.

2. モデル実験と観測データ

本研究は米国地球流体力学研究所 (GFDL) の気候モデル CM2.1 (Delworth *et al.* 2006)を 用いる. CM2.1 は第 5 次気候モデル相互比較



図 1. 観測された大気 CO₂濃度,年平均全球平均気 温偏差,9月の北極海氷域,6~8月の米国南部 (30°-45°N,110°-80°Wの陸域)における気温偏差. 偏差は1980-1999年平均からの差.

プロジェクト (CMIP5)世代のもので,歴史 的放射強制 (historical 実験,2005年まで)と RCP4.5シナリオ (2006年以降)で強制したも のを HIST 実験として使用する.加えて以下の Pacific Ocean-Global Atmosphere (POGA)実験 を用いる. POGA 実験では熱帯東太平洋にお ける海面水温を,モデル気候値に観測された 偏差履歴 (HadISST の 1980-1999年平均から の偏差)を加えたものへと緩和する.これに よりモデル内のエルニーニョ・南方振動

(ENSO) 及び tPDO は観測履歴を追随する. 緩和は海洋への顕熱フラックスを上書きする ことにより行う.15°S~15°N,日付変更線から 東へ米大陸西岸までの領域(図2a内側の斜線 域)で海洋上層 50m を緩和時間10日で緩和 し,その南北及び西に設定した幅5°の衝領域 で緩和係数を線形的にゼロまで減 少させる(図 2a 外側の斜線域). この緩衝領域の外では大気と海洋 は完全に結合する. POGA 実験に 与える放射強制は HIST 実験と同 一である. HIST, POGA 実験はそ れぞれ 10 メンバーのアンサンブ ル実験からなる. 詳細は Kosaka and Xie (2013)を参照されたい.

加えて CM2.1 の大気部分であ る大気大循環モデル AM2.1 を用 いた長期 AMIP 実験(10メンバー) を,観測を補完するものとして用 いる. このモデルは HIST 及び POGA 実験で用いたものより古い CMIP3 世代のもので,20 世紀再現 実験の放射強制を与えている.

観測データとして英ハドレー 温緩和域 センターの HadCRUT4 地表面温 度 (Morice *et al.* 2012) 及び HadSLP2 海面気圧

(Allan and Ansell 2006), Global Precipitation Climatology Project (GPCP) 降水量 (Adler *et al.* 2003)を用いる。他に図 1 で米国海洋大気庁 (NOAA)のマウナロア CO₂ 濃度,米国立雪 氷データセンターの北極海氷域 (Fetterer and Knowles 2004), 図 2 で HadISST1.1 (Rayner *et*



al.2003)を用いた.

3. 年平均全球平均気温

図3は観測, HIST 実験及び POGA 実験の 年平均全球平均地表面温度を示す. 観測値が 1990 年代末頃から顕著な上昇を示さないのに 対し, HIST 実験は今世紀に入っても上昇を続 ける. 対して POGA 実験は ENSO や tPDO (図



図 3. 観測(黒線), HIST (青線)及び POGA(赤 線)実験における年平 均全球平均地表面温度 偏差. 観測は 1980-1999 年 平均, HIST 及び POGA は POGA アンサ ンブル平均の同期間平 均を参照値として備差 を定義. 水色と黄色の 陰影はそれぞれ HIST, POGA のアンサンブル 平均の 95%信頼区間を 表す. 茶色の陰影は主 要な火山噴火を示す.



図 4. 全球平均気温の十年規模変化傾向の季節性. (a, b) 2002-2012 年, (c) 1941-1951 年, (d) 1893-1902 年, (e) 1933-1942 年, (f) 1974-1983 年, 黒線は観測, 赤線及び黄色の影は POGA, 青線及び水色の影は HIST, 緑線は及び薄緑色の影は AMIP. 影はアンサンブル平均値の 95%信頼区間を表す.

2b)に対応した全球平均気温変動を示し、ハ 4. 全球平均気温の季節性 イエイタス期間を含めて観測値を精度よく再 現する.熱帯太平洋海面水温はエルニーニョ 現象に伴う1998年の極大以降低下傾向にあり

(図 2),これがハイエイタスに対応している。 明瞭な気温上昇が見られる1970年以降におい て, 観測と POGA の相関は 0.97 に達するが, その大部分は長期的な昇温傾向に起因する (観測と HIST の相関は 0.90).線型変化傾向 を除去すると HIST 実験の相関が 0.26 まで低 下するのに対し、POGA 実験の相関は 0.70 と 高い値のままである。二乗平均誤差は POGA が HIST より 54%小さい. 以上の結果は、年 平均全球平均気温上昇のハイエイタスが tPDO に伴うラニーニャ的な熱帯太平洋海面 水温低下傾向の影響でほぼ説明できることを 意味する。

年平均気気温上昇の停滞の一方で、北半球 夏季の全球平均気温はハイエイタス期間に入 っても上昇傾向が続いており、反対に北半球 冬季の気温は低下している (図 4a). POGA 実 験はこの季節性をやや弱いながらも再現する

(Fig. 4a). これは明瞭な季節性を示さない HIST 実験(Fig. 4b)とは対照的で、tPDO が ハイエイタスの季節性の起源であることを明 らかにする.

HIST 実験のアンサンブル平均は放射強制 に対する応答を捉えており、アンサンブル平 均からのずれは内部変動であると考えられる. HIST 実験のアンサンブル間偏差に8年の低周 波フィルタを施した上で、熱帯東太平洋(20° S-20°N、175°E より東へ米大陸西岸まで; Fig. 2a 外側の斜線域)海面水温変動の全球平均気



図 5.12~2 月平均(a,b)地表面温度,(c,d)海面気圧の 2001/2002 年から 2011/2012 年までの変化傾向. (a,c) 観測, (b,d) POGA. 点描域は変化傾向 (POGA についてはアンサンブル平均の変化傾向) が Mann-Kendall 検定において信頼限界 95%以上で有意であることを示す. (b)の紫で囲った領域は POGA 実験の海面水温緩和域を表す.

温に対する影響の季節性を調べた (図は省略).明する.実際,現在のハイエイタスにおいて 年平均熱帯東太平洋海面水温変化に対し、全 熱帯(20°S-20°N)平均地表面気温は北半球夏 球平均気温の回帰偏差は同じ符号で 1~3 月に 最大, 7~9 月に最小で, 最大値に比べて最小 値は 24%小さい. この季節性は現在のハイエ イタス(図 4a)と定性的に整合する。これは tPDO の季節性 (熱帯東太平洋海面水温の年平 均偏差に対する季節平均偏差の回帰)と, tPDO による全球平均気温偏差の季節性(各季 節の熱帯東太平洋海面水温 1℃ 上昇に対する 同じ季節の全球平均気温の回帰偏差)に分解 できる.熱帯東太平洋海面水温変動は 10~12 月に最大・4~6月に最小となる季節性をもち、 最大値に対し最小値は 19%小さい。一方熱帯 東太平洋単位海面水温変化あたりの全球影響 は 3~5 月に最大・8~10 月に最小で、最小値は 最大値より 29%小さい。これは熱帯から中高 緯度への渦熱輸送の季節性と、地表面温度に 影響する遠隔影響パターンの季節性によると 考えられる. これら2要素の積は熱帯東太平 洋海面水温変動による全球影響の季節性を説

季・冬季共に低温化傾向にあるが冬季の方が より顕著で、20°N 以北の地表面気温は冬季に は低下傾向なのに対し夏季は放射強制の影響 が卓越し上昇傾向にある(図は省略).このこ とはハイエイタス中も夏季の北極海氷域の減 退が続いていること (図1)とも整合する.た だしCMIP5世代のCM2.1は北極海氷の再現性 が低く、観測された海氷域変動を再現しない。

他のハイエイタスや加速温暖化(エルニー ニョ的な十年規模熱帯太平洋昇温が放射強制 への応答としての全球昇温を加速)事例にお ける全球気温変化の季節性も調べた、主要な 火山噴火を避け、10年以上の顕著な熱帯太平 洋海面水温上昇/低下が見られる事例(ハイ エイタス: 1941-1951 年;加速温暖化: 1893-1902年、1933-1942年、1974-1983年)を 選択した. これらのいずれの期間も, 全球平 均気温変化傾向は北半球冬季に最大(図4c-f) で,上の議論と定性的に整合する.



図 6. 図 5 と同様. ただし 6~8 月平均(a,b)地表面温度, (c,d) 降水量の 2002 年から 2012 年までの変 化傾向.

5. 地域気候変化

ハイエイタス期間中の北半球冬季の地表 面気温・海面気圧の変化傾向を図5に,北半 球夏季の地表面気温・降水量の変化傾向を図6 に示す.海面気圧(降水量)の熱帯太平洋に おける増加(減少)と海洋大陸域での減少(増 加)は季節を問わず見られ,ウォーカー循環 の強化を示す.また熱帯太平洋からの遠隔影 響によって冬季のアリューシャン低気圧が弱 まり,付随して中緯度北西太平洋で海面水温 が上昇し東岸では低下する(図5). 亜熱帯南 太平洋にも昇温域が見られ,これら南北太平 洋の海面水温偏差は北半球夏季にも持続する

(図 6). 冬季の北米北西部では北西風偏差に よる寒気移流が寒冬をもたらす傾向にある (図 5). 夏季南インド洋東部はニンガルーニ ーニョ傾向にあり,太平洋のラニーニャ傾向 と整合する(図 5; Feng *et al.* 2014). 夏季米国 南部は昇温・乾燥化傾向にある(図 6). POGA 実験は以上の地域的特徴を概ね再現する.

米国南部の昇温・乾燥化は,ハイエイタス にもかかわらず近年頻発する同地域の熱波・ 干ばつと整合する (図 1). 逆に 1950 年代から 90 年代まで米国南部は夏季の気温が上昇しない"warming hole"と呼ばれた地域で、特に 70 年代~90 年代の加速温暖化期には熱帯太平洋のエルニーニョ的昇温傾向が同地域の昇温の抑制に寄与したと考えられる.

冬季ユーラシア大陸には顕著な海面気圧 増加傾向が観測データに見られるが, POGA はこれを再現しない (図 5). この変化傾向は Mori et al. (2014) が示したバレンツ-カラ海の 海氷減少に対する応答に似ている.上述の通 り CM2.1 は海氷の再現性が低く,この海域の 海氷減少も再現しない.加えて大気モデルの 解像度もこの応答を再現するには十分でない 可能性がある.また,近年のバレンツ-カラ海 氷減少が放射強制のみに起因するか熱帯太平 洋や他の変動が影響したのかは明らかでない.

6. 結論

放射強制に対する応答をシミュレートす る HIST 実験は今世紀に入っても全球気温上 昇の継続を示すのに対し,熱帯太平洋海面水 温変動を追加パラメータとして導入した POGA 実験は,ハイエイタス期間を含む全球 気温変動とその季節性を高い精度で再現する. 即ち,1990年代末以降から続く熱帯太平洋の ラニーニャ的な低温化傾向は現在のハイエイ タスをほぼ説明する。加えてハイエイタス期 間に観測された地域気候変化のいくつかも熱 帯太平洋海面水温低下の影響であることが示 された.

この熱帯太平洋海面水温低下が気候の内 部変動に起因するかどうかは本研究の枠組み では明らかにできない. しかし CMIP3 及び CMIP5 の気候モデルに温暖化に伴い赤道太平 洋海面水温の低下を示すものはなく、多くの モデルはむしろ昇温の極大を示す。また熱帯 太平洋は顕著な十年規模変動を示す地域でも ある。従って近年のラニーニャ傾向が放射強 制に対する応答とは考えにくく、よって現在 のハイエイタスの大部分は気候内部変動に起 因することが示唆される. これが正しければ, 内部変動は15年ほどの時間スケールでも放射 強制に対する全球平均気温上昇を打ち消すこ とができるほど強いことが分かる.

参考文献

- Adler, R. F. et al., 2003: The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). J. Hydrometeor., 4, 1147-1167.
- Allan, R. and T. Ansell, 2006: A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850-2004. J. Climate, 19, 5816-5842.
- Chen, X. and K.-K. Tung, 2014: Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. Science, 345, 897-903.
- Delworth, T. L. et al., 2006: GFDL's CM2 global coupled climate models. Part I: Formulation and simulation characteristics. J. Climate, 19, 643-674.
- Estrada, F., P. Perron and B. Martínez-López, 2013: Statistically derived contributions of diverse human influences to twentieth-century temperature changes. Solomon, S. et al., 2010: Contributions of stratospheric Nature Geosci., 6, 1050-1055.
- Feng, M. et al., 2014: Decadal increase in Ningaloo Niño since the late 1990s. Geophys. Res. Lett., in press, doi: 10.1002/2014GL062509.
- Fetterer, F. and K. Knowles, 2004: Sea ice index mon-

itors polar ice extent. Trans. AGU, 85, 163.

- Christensen et al. 2013: Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis (eds Stocker, T. F. et al.) 1217-1308 (Cambridge University Press).
- Kaufmann, R. K., H. Kauppi, M. L. Mann and J. H. Stock, 2011. Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998-2008. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 108, 11790-11793.
- Kosaka, Y. and S.-P. Xie, 2013: Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. Nature, 501, 403-407.
- Meehl, G. A., J. M. Arblaster, J. T. Fasullo, A. X. Hu and K. E. Trenberth, 2011: Model-based evidence deep-ocean heat uptake during of surface-temperature hiatus periods. Nature Climate Change, 1, 360-364.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue and M. Kimoto, 2014: Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. Nature Geosci., 7, 869-873.
- Morice, C. P., J. J. Kennedy, N. A. Rayner and P. D. Jones, 2012: Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 data set. J. Geophys. Res., 117, D08101.
- Rayner, N. A. et al., 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. J. Geophys. Res., 108, 4407.
- Ridley, D. A. et al., 2014: Total volcanic stratospheric aerosol optical depths and implications for global climate change. Geophys. Res. Lett., 41, 7763-7769.
- Santer, B. D. et al., 2014: Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature. Nature Geosci., 7, 185-189.
- Schmidt, G. A., D. T. Shindell and K. Tsigaridis, 2014: Reconciling warming trends. Nature Geosci., 7, 158-160.
- water vapor to decadal changes in the rate of global warming. Science, 327, 1219-1223.
- Watanabe, M. et al., 2014: Contribution of natural decadal variability to global warming acceleration and hiatus. Nature Climate Change, 4, 893-897