

ハイエイタス

渡部 雅浩*

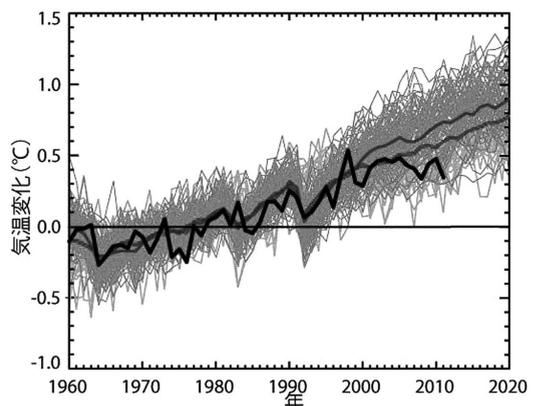
史上最大と言われた1997/98年のエルニーニョ以降、現在まで全球地表気温の上昇傾向が緩くなっている。このいわゆる地球温暖化の「停滞」現象は、ハイエイタス (hiatus : 空白, 中断, 休止などの意) と呼ばれ、専門家のみならず一般社会も関心をもつようになってきている。

ハイエイタスは、全球地表気温の時系列で見ることができる (第1図黒線)。1970年代から上昇を続けてきた全球気温は、2000年頃からはほとんど上昇しておらず、2001~2010年の線形傾向は10年あたり0.03°Cの温暖化に過ぎない。一方、温暖化予測計算をアーカイブしている第3次および第5次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP) の気候モデルは、全体として1991年のピナツボ噴火以降停滞することなく気温上昇を示しており、ハイエイタスらしきものは再現されていない (第1図灰色線)。従って、ハイエイタスに関する疑問は1) ハイエイタスの原因は何か、2) 気候モデルは何か間違っているのか、という2点に分かれる。科学的には1)の疑問が重要であるが、2)は気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の評価報告書の土台をなす気候モデル (あるいは放射強制データ) の信頼性に関わるもので、こちらも気候科学としては捨て置くわけにはゆかない。

ハイエイタスの原因としては、大きく外因と内因の2つがあり得る (最近の概説はTollefson (2014) を参照)。外因は、例えば太陽活動の低下 (Kaufmann *et al.* 2011) や成層圏エアロゾルの増加 (Solomon *et al.* 2011) などが挙げられるが、これらはどれもハイエイタスの主要因にはなっていないらしいことも指摘

されている。外因説のもっとも基本的な検証は、大気上端における正味放射収支であるが、人工衛星データから、気候システムは2000年代とそれ以前でさほど変わらない約0.5 W/m²の余剰エネルギーを受け取っていることが分かっている (Loeb *et al.* 2012)。したがって、ハイエイタスが温暖化の弱화를意味するという考えは支持されない。

大気-地表面系が受け取っている余剰なエネルギーは、系のどこかを加熱するか、海氷融解などの相変化に消費されていなければならない。まず思いつくこととして、海洋亜表層あるいは深層に熱が余分に輸送されているのではないかという可能性がある。Meehl *et al.* (2011) は、単一の気候モデルによる将来気候アンサンブル実験で、タイミングはまちまちであれハイエイタスに似た地表気温上昇の停滞が生じることを見つけ、そのときに全球海洋の700 m以深で蓄熱量が



第1図 1960~2020年の全球平均地表気温偏差 (1961~1990の30年平均からのずれ)。黒太線は観測値、2本の灰色太線は2世代のCMIPモデルのアンサンブル平均値、灰色細線は各モデルの結果を示す。

* Masahiro WATANABE, 東京大学大気海洋研究所.
hiro@aori.u-tokyo.ac.jp
© 2014 日本気象学会

増大していることを示した。ここで注意しなければならないのは、温暖化に伴う放射強制に対して、海洋の熱吸収はそもそも過渡応答として生じるので、それと区別する必要がある点である。観測にもとづく全球海洋データセットでも、1970年代以降、海面水温(SST)も700-2000 mの蓄熱量(おおまかに層の平均水温に比例する)も、長期的には上昇傾向を示す。これを仮に温暖化の応答と考えると、ハイエイタスに相当するのはもう少し時間スケールの短い変化である。具体的には、1990年代はSSTの上昇傾向が大きく蓄熱量の増加傾向は鈍っていたのが、2000年代になると逆に蓄熱量の増加が顕著になる。2000年代のSST上昇傾向が小さいのは地表気温と同様であり、その代わりに海洋深層に熱がより多く蓄えられていることを意味している。海洋熱吸収の活発化がハイエイタスの要因である直接的な証拠として、全球海水準の時系列には停滞がなく、2012年までほぼ同じ傾向で上昇し続けていることが挙げられる(Met Office 2013)。海水準上昇の最大の理由は海水の熱膨張であり、SSTが上昇していない以上海洋のどこか(具体的には温度躍層下)が暖まっているに違いない、ということである。Watanabe *et al.* (2013) は、エネルギー収支にもとづく解析から、2000年代の観測値は海洋熱吸収係数が大きい一方、CMIP 気候モデルのアンサンブルは熱吸収係数の増大を系統的に過小評価しており、そのせいで気候モデルはハイエイタスをうまく表現できていないと結論付けている。

2000年代の海洋熱吸収の活発化が生じた原因については、温暖化強制に対する応答と自然の内部変動、どちらも考え得る。結論が出ているわけではないが、最近の研究は後者を支持するものが多い。Meehl *et al.* (2011)、Watanabe *et al.* (2013) とともに、気候モデルでハイエイタスが現れるときには太平洋十年規模振動(Pacific Decadal Oscillation, PDO)の負位相によく似た(熱帯域で低温、中緯度で高温となる)SST偏差が見られることを示している。PDOの位相と海洋熱吸収変動の関係はまだよく分かっていない。Balmaseda *et al.* (2013) は、海洋客観解析で風応力を気候値にしてしまうとハイエイタスが再現されず700 m以深の蓄熱量が増加しないことから、風駆動の亜熱帯沈み込み(サブダクション)の変化が重要であると示唆している。

PDOの負位相がハイエイタスの原因である直接的な根拠は、Kosaka and Xie (2013) が行った数値実

験で与えられる。彼らは、熱帯太平洋域のSSTを観測値に緩和した大気海洋結合モデルがハイエイタスをよく再現することを示した。緩和領域のSST自体も2000年代は負偏差だが、面積としては地球全体の8%に過ぎないため、熱帯太平洋の低温化が大気のテレコネクションを通じて全球地表気温を少し下げていると解釈することができる。これは、エルニーニョ時に全球気温が高くなる(第1図黒線の1998年のピークはそれに相当する)ことを考えればさほど不思議ではないが、ハイエイタスを理解する上で有益かつ明快な結果と言える。熱帯域の大気海洋は強く結合しているので、SSTではなく風応力を観測値に緩和することで同様の結果が得られる(England *et al.* 2014)。

2000年代はラニーニャが多いわりに強いエルニーニョが起きておらず、このようなエルニーニョ・ラニーニャの発現頻度の変化とハイエイタスが繋がっている可能性も上記の研究から示唆される。次に強いエルニーニョが発現すればハイエイタス終了の契機となるという見方もあり(Tollefson 2014)、熱帯太平洋域の継続的なモニタリングが重要である。

参考文献

- Balmaseda, M. A., K. E. Trenberth and E. Källén, 2013: Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1754-1759, doi:10.1002/grl.50382.
- 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.
- 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.*, **108**, 11790-11793.
- Kosaka, Y. and S.-P. Xie, 2013: Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, **501**, 403-407.
- Loeb, N. G. *et al.*, 2012: Observed changes in top-of-the-atmosphere radiation and upper-ocean heating consistent within uncertainty. *Nature Geosci.*, **5**, 110-113.
- Meehl, G. A., J. M. Arblaster, J. T. Fasullo, A. Hu and K. E. Trenberth, 2011: Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nature Clim. Change*, **1**, 360-364.
- Met Office, 2013: The recent pause in global warming (1): What do observations of the climate system tell

- us? 28pp. [available at www.metoffice.gov.uk].
- Solomon, S. *et al.*, 2011: The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change. *Science*, **333**, 866–870.
- Tollefson, J., 2014: Climate change: The case of the missing heat. *Nature*, **505**, 276–278.
- Watanabe, M. *et al.*, 2013: Strengthening of ocean heat uptake efficiency associated with the recent climate hiatus. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 3175–3179, doi: 10.1002/grl.50541.
-