

近年の hiatus と海洋熱吸収の活発化

渡部雅浩（東京大学大気海洋研究所）

hiro@aori.u-tokyo.ac.jp

史上最大と言われた 1997/98 年のエルニーニョ以降、最近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、hiatus [haɪéɪtəs、ハイエイタス]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いる。

Hiatus は、全球地表気温の時系列で見ることができる（図 1）。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、CMIP3 および CMIP5 の気候モデルアンサンブルにおける気温変化は、全体として 1991 年のピナツボ噴火以降停滞することなく上昇を続けており、hiatus らしきものは再現されていない。従って、hiatus に関する疑問は 1) hiatus 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。Scientific には 1) が重要であるが、2) は 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。

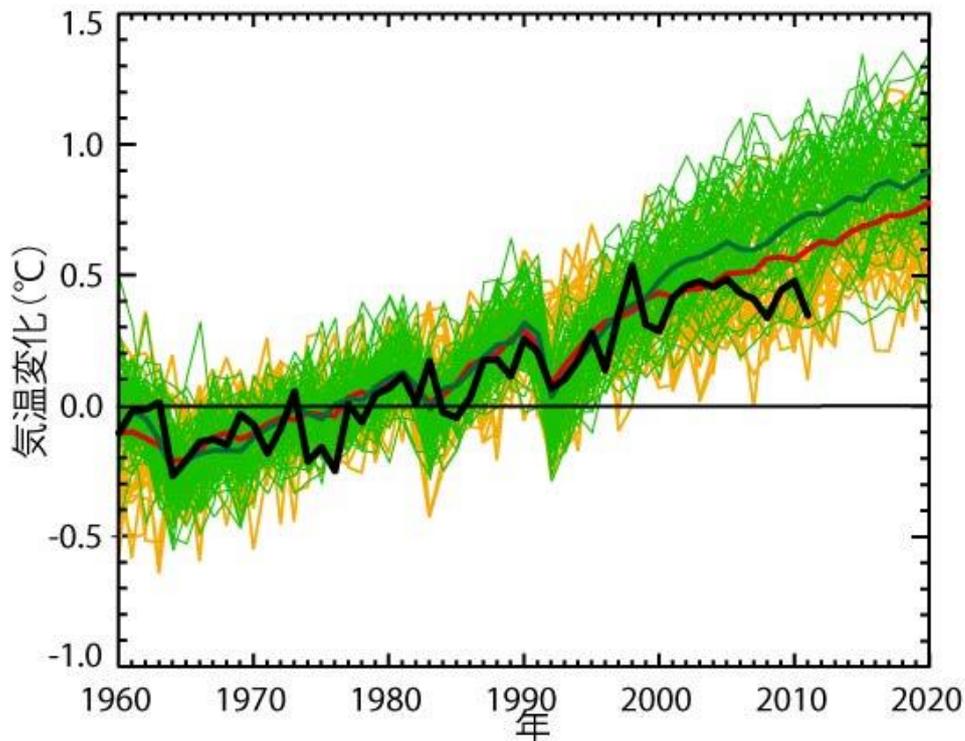


図 1 全球平均の年平均地表気温偏差：HaadCRU4 による観測値（黒線）、CMIP3 および CMIP5 のマルチモデルアンサンブル平均（赤線と緑線）。細い黄色線と緑線は、CMIP3 と CMIP5 の各モデルの結果。すべて 1961-1990 年平均からのずれ。

Hiatus 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 Held 2013 と 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 hiatus 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、衛星データからは 2000 年代もそれ以前とさほど変わらず約 0.5 W/m^2 の加熱であることが分かっている（Loeb et al. 2012）。したがって、hiatus が温暖化の弱体化であるという考えは支持されない。

大気-地表面系が正味で余剰なエネルギーを受け取っている以上、それは系のどこかを加熱するか、海氷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エネルギー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 hiatus に似た地表気温上昇の停滞が生じることを同定し、そのときに全球海洋の 700m 以深で蓄熱量が増大していることを示した。ここで注意しなければいけないのは、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。

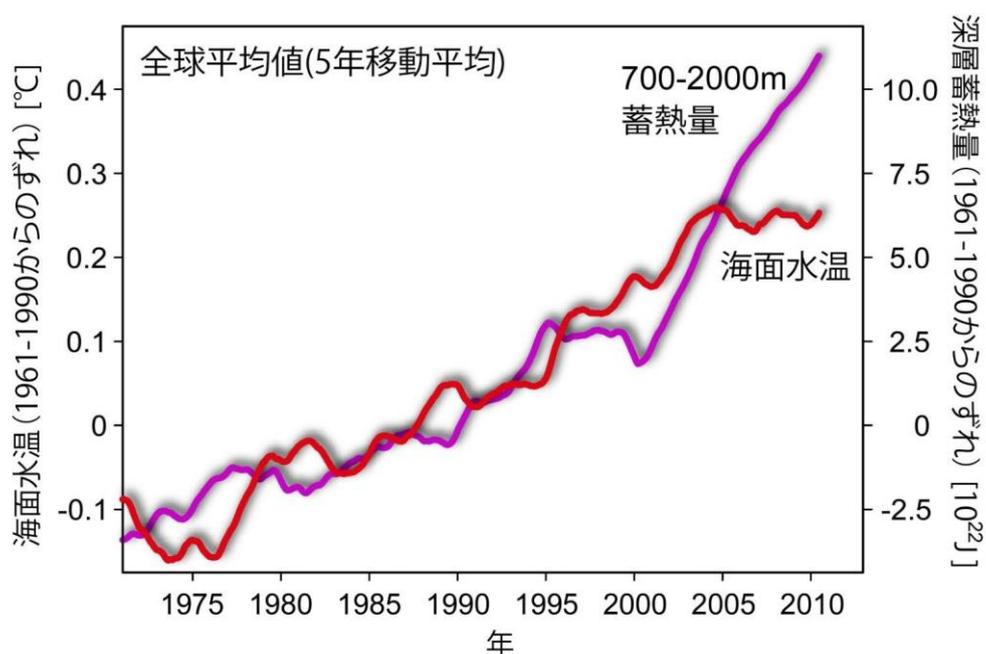


図2 全球平均の海面水温（赤線）と700-2000 mの蓄熱量（紫線）の偏差。ともに5年の移動平均をかけてある。

更新された Ishii and Kimoto (2009) の海洋データセットを用いて、以上のことを見てみよう。1970 年代以降、海面水温(SST)も 700-2000 m の蓄熱量(HC)も、おおまかには上昇傾向を示す（図 2）。これを仮に温暖化の応答と考えると、hiatus 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 HC の増加傾

向は鈍っていたのが、2000年代になると逆にHC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が図からわかる。海洋熱吸収の活発化がhiatus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。

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. (2013)は、気候モデルのコントロール実験（放射強制を産業革命前の条件で固定した長期積分）を調べ、hiatusに似て全球気温が下降傾向を示す10年は、どれも太平洋の数十年振動（Interdecadal Pacific Oscillation, IPO）の位相が負に変わるときであることを示している。Watanabe et al. (2013)では、hiatusが気候内部変動であるという仮定にたって、マルチモデルアンサンブル（MME）平均で再現できなくとも初期値アンサンブルが観測を含むと考えた。そこで、CMIP5のうち5メンバ以上あるモデルを選び、10年ごとに全球気温のトレンドを観測と比較すると、確かに2001-2010年の観測されたトレンドはアンサンブルに収まる（図3）。

図3にはMIROC5の11メンバアンサンブルも含まれており、これをさらに詳しく調べたところ、モデル内のhiatusはMeehl et al. (2013)が言うように太平洋域の自然変動と密接にかかわっていることが分かった（IPOと本質的には同じだが、ここではより広く知られたPacific Decadal Oscillation (PDO)の呼称を用いる）。いま、 i 番目のメンバにおける変数 T_i をアンサンブル平均 $\langle \rangle$ とそこからのずれ (\cdot) に分ける。

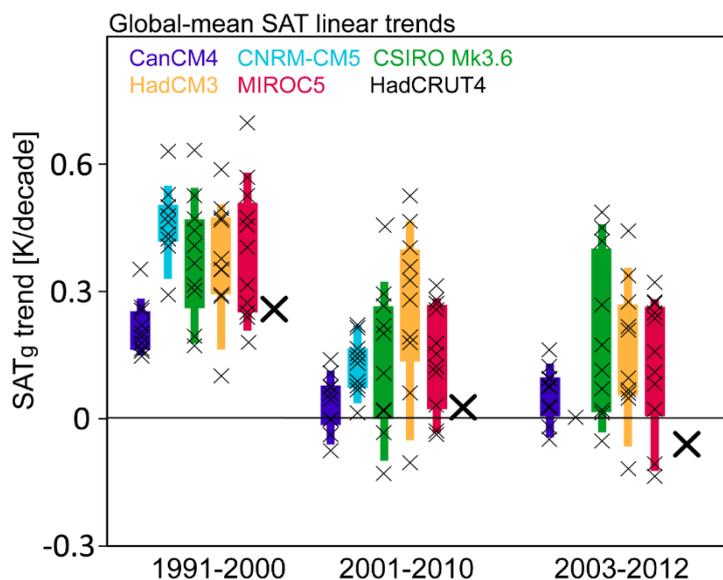


図3 3つの10年間の期間で求めた全球平均地表気温の線形トレンド。太線の×はHadCRUT4の観測値。他は5つのCMIP5モデルによる初期値アンサンブル。太い棒と細い棒は、50%および75%の範囲を示す。Watanabe et al. (2013)より。

$$T_i = \langle T \rangle + T'_i \quad (1)$$

hiatus は全球平均気温 SAT_g で定義されるので、そのパターンは

$$T_{hiatus} = \frac{\partial T'}{\partial SAT'_g} \quad (2)$$

と SAT_g (のアンサンブル平均からのずれ) に対する回帰をとることで求められる。(2)を 2001-2010 年の平均偏差について計算すると、図 4 のように MIROC5 における hiatus の構造を示すことができる。SST は PDO の負位相に似ており、熱帯太平洋では広く負、中緯度太平洋では正偏差となっている。これは、MIROC5 で 2001-2010 年の hiatus が出ているメンバではアンサンブル平均に加えて PDO の負偏差が生じていることを意味する。このとき、HC 偏差は正なので、図 2 とも整合する。海洋水温の経度平均断面を見ると、700 m 付近で昇温しているのは中緯度であり、それが 2000 m の深度では低緯度に広がっている様子が分かる。付近では、海洋循環も下向きの流れが強化されており、中緯度の暖かい海水が沈み込んだというよりも SST 偏差が駆動する風応力の変化が移流を介して 700-2000 m の層を昇温させたように見える。太平洋には熱塩循環の沈み込み域がなく、かつ PDO が深層と表層の熱交換を伴うということは言われていないため、一見すると奇妙な結果に思われるが、海洋客観解析で風応力の偏差を与えないと hiatus が再現されないという Balsameda et al. (2013) の結果も上記の見方と一致している。PDO に伴う熱吸収過程の変化については、さらに詳しい理解が必要である。

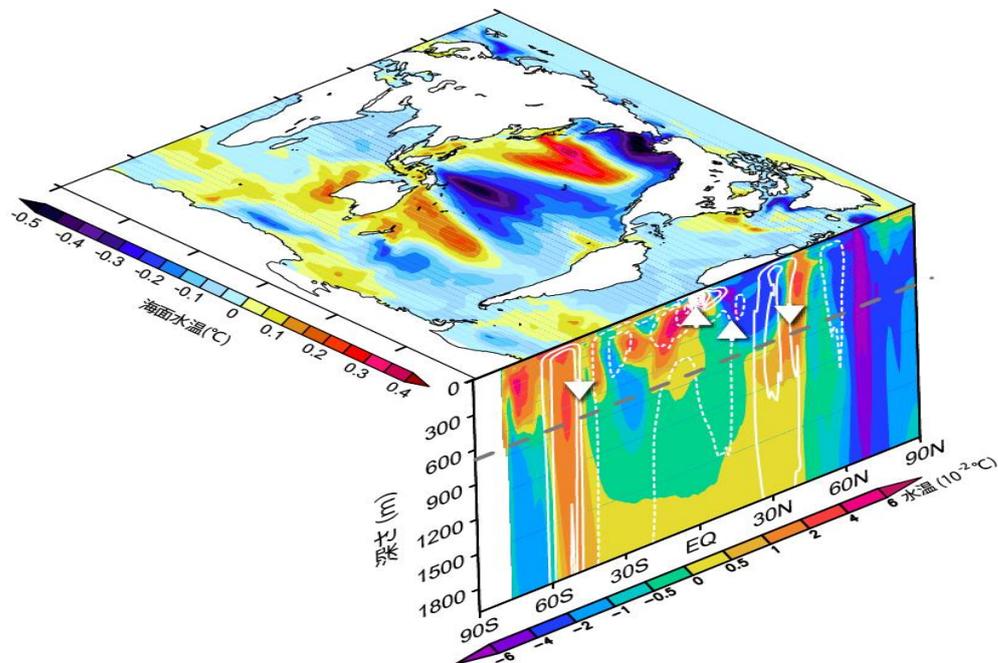


図4 MIROC5の11メンバアンサンブルにおける、hiatusに伴う2001-2010年平均のSST、経度平均水温、および経度平均流線関数(等値線)の偏差。すべて、全球地表気温のアンサンブル平均からのずれに対する線形回帰係数として求めている。Watanabe et al. (2013)に加筆修正。

PDO の負位相が hiatus の原因である直接的な根拠は、Kosaka and Xie (2013)による数値実験が与えてくれる。彼らは、熱帯太平洋域の SST を観測値に緩和した結合モデル実験が hiatus をよく再現することを示している。緩和領域の SST 自体も負偏差だが、面積としては全球の 8% に過ぎないため、熱帯太平洋の低温化が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（図 1 黒線の 1998 年のピークはまさにそれに相当する）ことを考えればさほど不思議ではないが、hiatus を理解する上で有益かつ明快な結果と言える。また、2000 年代はラニーニャが多く強いエルニーニョが起きていないが、このような ENSO サイクルの変化と hiatus が直接繋がっている可能性も示唆され、次に強いエルニーニョが発現すれば hiatus 終了の契機となるという考えもある(Tollefson 2014)。

Hiatus が自然のゆらぎだとすれば、いつ終了するのかというのは重要な疑問である。これについては、近未来気候変動予測実験が有効だと考えるが、これについては別稿で述べることにし、図 1 に見られる観測とモデルの齟齬について海洋熱吸収の観点で調べてみる。

全球のエネルギー収支式で、基準状態（ここでは 1851-1900 年をとる）からのずれ Δ について以下のように表せる。

$$\Delta F - \lambda \Delta T = \Delta N \approx -\kappa \Delta T \quad (3)$$

ここで ΔF は放射強制の変化、 ΔT は地表気温変化 ΔN は地表面での正味エネルギーをそれぞれ表す。 λ は気候フィードバックパラメータである。平衡状態では $\Delta N=0$ なので、 ΔF として CO_2 濃度倍増時の放射強制を与えれば平衡気候感度が $\Delta F/\lambda$ と求まる。ここでは過渡応答を考えるので、 $\Delta N \neq 0$ であり、海洋熱吸収項 $\kappa \Delta T$ と等しい。(3)は 2 ボックスエネルギー収支モデルを簡略化したものであり、気候モデルから ΔN と ΔT を与えることでバルクとしての熱吸収係数 κ を求めることができる。また、 ΔN の観測データはないため、 ΔF およびモデルからの推定値である λ を用いて、「観測」の κ を推定する。 ΔF はいくつかの推定方法があるが、Jim Hansen のグループが作成したデータを用いた。

(3)式の妥当性は、MME 平均の ΔN を ΔT に対してプロットすることで示せる（図 5a）。 κ は期間ごとに異なる値となり、温暖化がすすむほど小さくなる。これは、理想化した CO_2 濃度漸増実験（図 5a の黒実線と陰影）でも明らかであり、緩やかに平衡に向かう応答として理解可能である。 κ の推定には最低 30 年程度のサンプルが必要なので、1961-2030 年の期間で 10 年ずつずらしながら推定を行うと、20 世紀は「観測値」とモデルの結果が不確実性の範囲内で合っているが、21 世紀になるとずれが大きくなり、MME は「観測」の κ を過小評価するようになっている。これは、CMIP モデルが比較的素直な温暖化応答を示すのに対し、「観測」では熱吸収が活発化していることを意味している。PDO 自体は多くの気候モデルで自発的に生じるので、PDO に伴う熱吸収過程をモデルが過小評価しているのかもしれない。現在、CMIP6 に向けたモデル開発が始まっているが、2000 年代の気候の再現性は観測値がある分だけ CMIP5 よりも向上することが求められる。その過程で（モデルのスキームあるいはパラメータの変更により）海洋熱吸収の活発化が表現できているかどうかの確認が重要である。

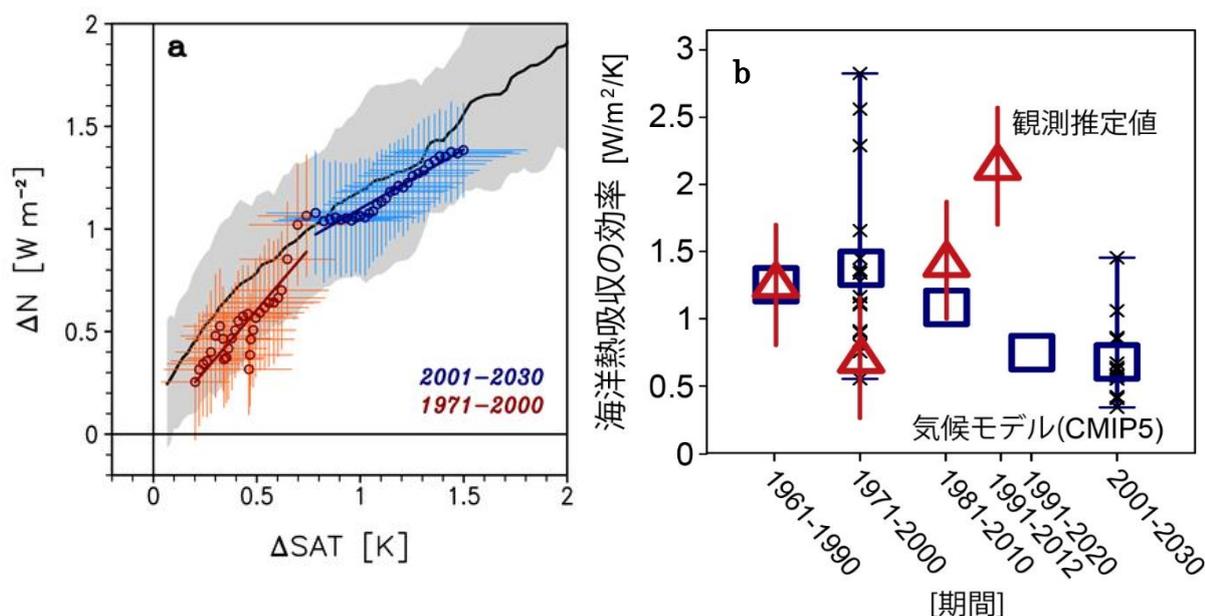


図5 (a) 全球平均地表気温の変化に対する地表正味エネルギーの変化（赤丸は1971-2000年の期間、青丸は2001-2030年の期間）。CMIP5のMME平均を用いている。黒線と陰影は、CMIP5のCO₂漸増実験の結果。各期間の回帰直線の傾きが、海洋熱吸収係数 κ に相当する。(b) 期間ごとに推定した κ の値。観測データを部分的に用いたもの（赤）およびCMIP5のhistorical/RCP4.5実験（青）を示す。変化はすべて1851-1900年を基準とし、11年の移動平均をかけている。Watanabe et al. (2013)より。

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.
- *Held, I. M., 2013: The cause of the pause. *Nature*, 501, 318–319.
- *Ishii, M., and M. Kimoto, 2009: Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections. *J. Oceanogr.*, 65, 287–299.
- *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 doi:10.1038/nature12534.
- *Loeb, N. G., et al., 2012: Observed changes in top-of-the-atmosphere radiation and upper-ocean heating consistent within uncertainty. *Nature Geo.*, 5, doi: 10.1038/NCEO1375.
- *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.

Nat. Clim. Change, 1, 360–364.

- *Meehl, G. A., A. Hu, J. M. Arblaster, J. Fasullo, and K. E. Trenberth, 2013: Externally forced and internally generated decadal climate variability associated with the Interdecadal Pacific Oscillation. *J. Climate*, <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00548.1>.
- *Met Office, 2013: The recent pause in global warming (1): What do observations of the climate system tell us? July 2013, 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: 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.