

論文内容の要旨

論文題目 : Seasonal and Interannual Variations of the Seychelles Dome

(セーシェルドームの季節・経年変動に関する研究)

横井 孝暁

1. はじめに

南西インド洋のセーシェル共和国付近には、湧昇ドームが存在している(Masumoto and Meyers 1998)。これを以降、場所に因みセーシェルドーム(以下 SD)と呼ぶ事にする。SD の経年変動は、ドームのすぐ南の海域で発生・発達するサイクロンの数と有意な相関がある(Xie et al. 2002)だけではなく、夏季インドモンスーンの開始時期にも影響を与えている(Annamalai et al. 2005; Izumo et al. 2008)。したがって、SD の変動メカニズムを正確に理解する事は非常に重要である。そこで本研究では、海洋大循環モデル (OGCM) を用いて、この SD の季節・経年変動に関するメカニズムを詳細に調べた。更に、地球温暖化予測に用いられている CMIP3 大気海洋結合モデル (CGCM) の中で、SD の季節変動メカニズムが再現されているか定量的に検証した。

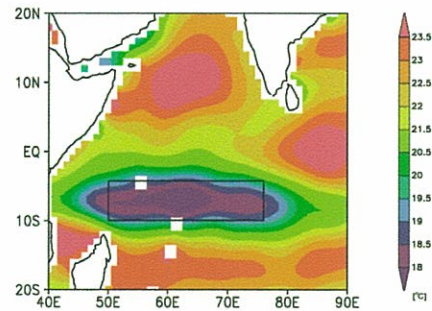


図1 WOA98 の 100m 深における年平均の水温。

2. モデルの概要

MOM3 を基にした OGCM の結果を解析した。計算領域は 14.75°E~69.25°W、52.0°S~30.0°N で、水平解像度は 0.5°、鉛直 25 層 (表層付近は 10m 間隔) である。季節変動の研究では、NCEP/NCAR 再解析データ (Kalnay et al. 1996) の年平均データにより 20 年間スピニングアップした後、月平均気候

値で9年間駆動した。その最後の5年分のデータを解析に使用した。更に、SDの季節変動に関して得られた知見を基にして、23個のCMIP3モデルの内、解析に必要な変数がそろっている22個の大気海洋結合モデルを解析した。また、経年変動の研究では、スピンアップ後、NCEP/NCAR再解析データの1978年~2007年の日平均データによりモデルを駆動した。

3. SDの季節変動

SDの季節変動メカニズムを調べる為、50°~75°E、5°~10°S、深さ約100mの矩形領域(図1参照)を考え、その領域における蓄熱量を求めたところ、顕著な半年周期の変動が表れた。同様の季節変動は観測や同化データでも見られた。この半年周期変動の原因は、熱収支解析より鉛直熱輸送が最も大きく貢献している事が分かった(図2)。そこで、鉛直熱輸送の変動を支配している鉛直流の変動を調べたところ、局所的な風応力によるエクマン湧昇の効果が支配的であり、遠方強制の効果は比較的弱い事が分かる(図3)。

$$\frac{\partial h}{\partial t} - c \frac{\partial h}{\partial x} = \text{curl} \left(\frac{\bar{\tau}}{\rho_0 f} \right) \Rightarrow \frac{1}{\rho_0 f} \text{curl} \bar{\tau} + \frac{\beta \tau^x}{\rho_0 f^2}$$

また、顕著に現れたエクマン湧昇の半年周期変動は、台形型をした $\text{curl} \bar{\tau}$ の項(上式の右辺第一項)の季節変動と、インドモンスーン(ドーム直上では、夏季のモンスーン時に南東風、冬季のモンスーン時に北西風)に伴う逆三角形型をした β の項(上式の右辺第二項)の季節変動との重ね合わせの結果である。 $\text{curl} \bar{\tau}$ の項を分解すると、 $-\partial \tau^x / \partial y$ の変動が支配的であり、 $\partial \tau^y / \partial x$ の変動はごく弱い事も分かった。これはSDがインドモンスーンの影響の及ぶ範囲と、南東貿易風が吹いていて1年中風応力の符号が変わらない範囲との境界に存在している為であると考えられる。

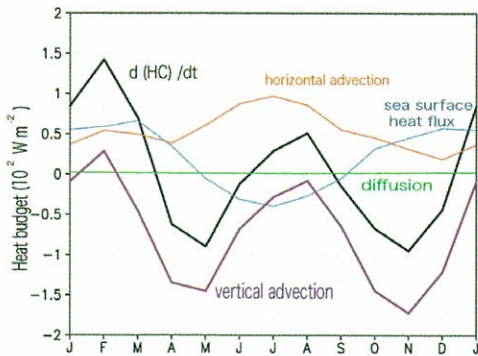


図2：矩形領域内での熱収支。

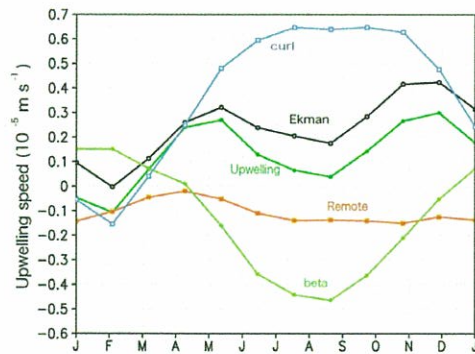


図3：矩形領域内での鉛直速度とその各成分。

4. CMIP3モデルにおけるSDの季節変動の再現性

20°C等温面の深さで見ると、ドーム自体は多くのモデルで再現されているものの、中心の位置が正確に再現できているのは5つのモデルのみである(図4)。また、SDの特徴的な半年周期変動は、ほとんどのモデルで卓越していなかった。そこで、半年周期変動が卓越する原因である、ドーム域でのエクマン湧昇の季節変動を調べたところ、惑星 β 項を含む項の逆三角形型の変動の再現性に問題が見られ(図5)、夏季のインドモンスーンが冬季のインドモンスーンに比べて強く、期間が短いという、重要な特徴を忠実に再現出来ていなかった。これは、インド洋における熱帯収束帯の季節的な南北シフトのモデルバイアスに起因する事が明らかとなった。

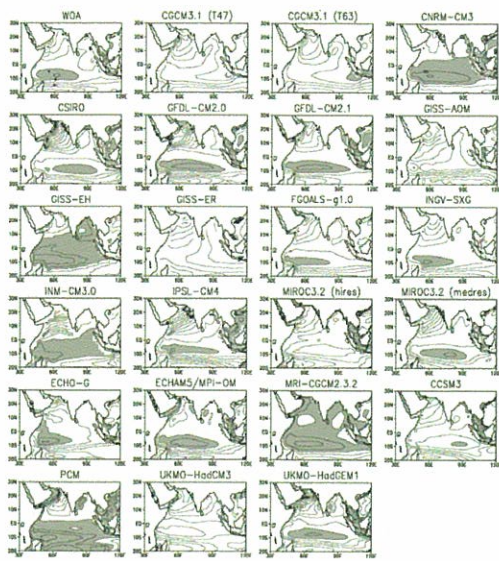


図 4 : World Ocean Atlas 1998、および 22 個の CMIP3 モデルの年平均 20°C 等温面の深さ [m]。等値線間隔は 20m で、100m よりも浅い領域に影を付けている。

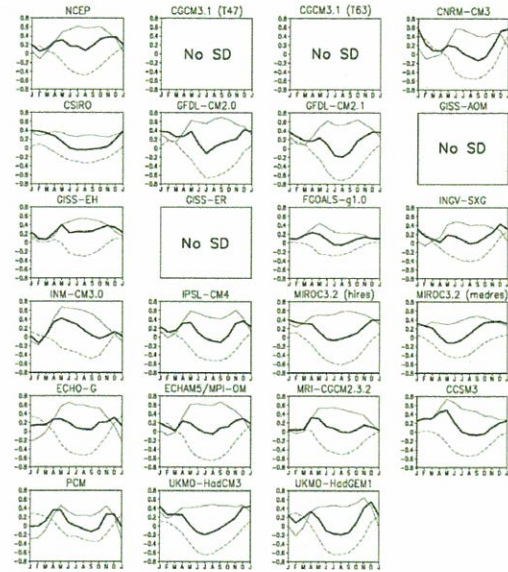


図 5 : NCEP/NCAR 再解析データ、及び CMIP3 モデル内での SD 域におけるエクマン湧昇(太実線)、風応力の curl を含む項 (灰色実線)、惑星 β 項を含む項 (破線) の季節変動 (単位 10^{-5} m/s)

5. SD の経年変動

経年変動を調べる為に、矩形領域における 20°C 等温線深度偏差で、セーシェルドーム指数を定義した。この指数には、12~2 月に最も経年変動の振幅が大きくなる季節性が見られたので、12~2 月の偏差が ± 0.9 標準偏差を超える年をイベントとして定義した。その結果、1982/83、1994/95、1997/98、2002/03、2006/07 年がドームの弱い年となったので、この 5 イベントの合成解析を行った。熱収支を計算したところ、主に鉛直移流偏差によって 5 月から 12 月にかけて、ドーム域が異常に暖められている事が分かった (図 6)。更に、沈降流偏差には、先行研究で指摘されていた、ロスビー波によるものだけでなく、局所的なエクマン沈降偏差も寄与している事が明らかとなった (図 7)。一方で、ドームの強い年は、弱い年のほぼミラーイメージで説明できるが、ロスビー波よりも局所的なエクマン湧昇偏差の寄与が大きい事が分かった。異常の経年変動は、ダイポールモード現象の影響を強く受けている事も明らかになった。

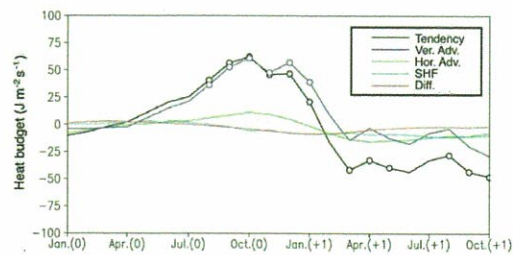


図 6 : SD が弱い年における矩形領域内の上層 100m の熱収支偏差。○印は 95% の信頼区間で有意である事を示す。

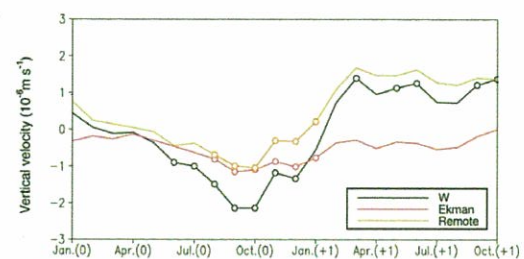


図 7 : SD が弱い年における矩形領域内の鉛直流偏差。○印は 95% の信頼区間で有意である事を示す。

6. SD 域の海面水温の季節・経年変動メカニズム

上記の SD の季節・経年変動が、その直上の海面水温に与える影響を明らかにする為、海洋表層の混合層水温の変動メカニズムを解析した。

混合層水温の季節変動は、4月に最も暖かく、8月に最も冷たくなっている事が分かった。更に混合層厚の変動を調べたところ、12月から5月にかけて薄くなっていた。そこで、混合層水温の季節変動メカニズムを調べる為に混合層水温変化率を調べた結果、海面熱フラックスが南半球の夏季から秋季にかけて薄い混合層を効率良く暖めている事が分かった。水平熱移流は10月〜4月まで海面熱フラックスに比べて絶対値が小さく、また、鉛直乱流混合に伴う鉛直過程は1年中混合層を冷却しているが、その寄与は海面熱フラックスに比べて小さい事が分かった(図8)。

また経年変動では、SDが弱い年に混合層水温が平年よりも暖かくなり、2月に正の偏差がピークになる事が分かった(強い年は、弱い年のほぼミラーイメージで説明できる)。そこで、混合層水温変化率偏差を計算したところ、鉛直過程偏差と水平移流偏差が、2月の正の混合層水温偏差に最も大きく寄与している事が明らかになった(図9)。このうち、水平移流偏差には、ドームの北側の東風応力偏差がもたらす南向きのエクマン熱輸送偏差が影響を及ぼしている。また、鉛直過程の偏差は、亜表層の温度躍層が押し下げられている事により鉛直方向の水温勾配が緩くなる為に、通常よりも冷却の効果が弱くなり、正偏差が現れている。それに対し、海面熱フラックス偏差は、水平移流偏差よりも絶対値は小さいが、混合層水温を冷却する方向に働いていた。これは、混合層厚が異常に厚くなっている為で、短波放射により混合層を暖める効率が低下するからである。

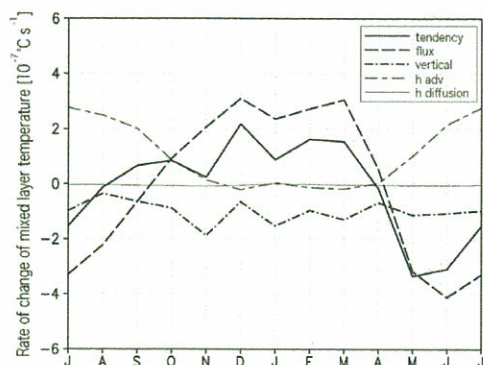


図8: 矩形領域の混合層における熱収支の季節変動。

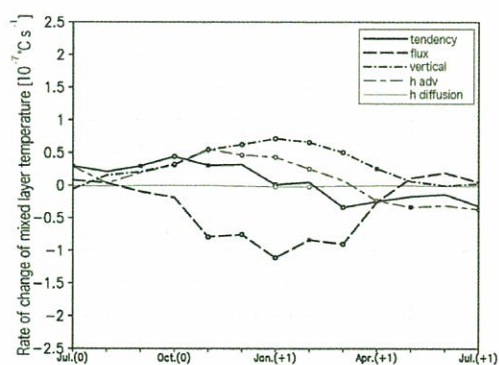


図9: SDが弱い年における矩形領域の混合層の熱収支偏差。○印は95%、■印は90%の信頼区間で有意である事を示す。

本研究の成果は、SD域の海面水温がモンスーンの開始時期やサイクロンの発生数に大きな影響を与える為、気候変動の予測精度の向上に大きく貢献する事が期待される。