

周期倍化によって生じる2層風成海洋循環の10年スケール変動

Decadal variations produced by period-doubling bifurcations in a two-layer wind-driven oceanic gyre

阪本 敏浩[1]

Toshihiro Sakamoto[1]

[1] 東大・理・地球惑星

[1] Earth and Planetary Sci., Tokyo Univ.

黒潮を含む日本南岸の海洋現象の時間スケールは、数カ月から数十年まで多岐にわたっている。これらの現象が、より大きな海盆スケールの気候変動に寄与している可能性が示唆されているが、そのメカニズムは明らかではない。また、ロスビー波やスベルドラップ流のような線形論の概念と、中規模渦などの強非線形概念との関係も明らかではない。つまり、時間的にも空間的にも、スケールの著しく異なる海洋現象の相互関係はよくわかっていない。本研究の目的は、簡単な2層モデルで再現される亜熱帯風成海洋循環の定常状態からカオス状態へ至る道筋を数値的に調べることによって、海洋における時間的なスケール間相互作用について、一つの手掛かりを提起することである。

固体壁に囲まれた一辺の長さ 1000 km の正方形領域を等間隔に分割したグリッド上で、粘性消散と時間によらない外力とを含む2層準地衡流渦度方程式を、粘着境界条件のもとで静止状態から数値的に時間積分した。パラメータには亜熱帯循環に特徴的な値を与えた。水平渦粘性係数は固定し、風応力の強さ τ を制御パラメータとした。空間差分および時間差分には、2次精度のスキームを採用した。モデル循環の力学系としての性質の変化をみるために、過渡現象が減衰した後、計算領域で平均したポテンシャルエネルギー P と運動エネルギー K の時系列データを1日間隔で取り、それぞれのパワースペクトルを計算した。

横軸に τ 、縦軸に振動数をとった平面に、スペクトルがピークをとる振動数をプロットしたものを分岐図とした。ピークのない定常状態から連続スペクトルに特徴づけられるカオス状態までが、現実的な τ の値 (0.1 Pa) を含む狭い範囲で実現している。 τ を徐々に強くすると、次のような力学レジームの遷移が確認された。(1) $\tau=0.0475$ Pa のとき、3.23 cycles per year (cpy) のピークが生じ、定常状態から単周期状態へ移行する。この振動数は τ の値とともに増加する。(P,K)図は単軌道を描く。(2) $\tau=0.055$ Pa のとき、周期倍化が起こり、1.84 cpy のピークが生じる。この振動数も τ の値とともに増加する。(P,K)図は2重軌道を描くが、 τ を強くすると軌道が変形して、 $\tau=0.0556$ Pa までには単軌道に戻る。この単軌道化はスペクトルからは識別できない。(3) $\tau=0.099$ Pa のとき、周期倍化 (1.21 cpy) が起こり、(P,K)図は再び2重軌道を描く。(4) $\tau=0.104$ Pa のとき、1.21 cpy のピークが消滅し、(P,K)図は単軌道に戻る。(5) $\tau=0.105$ Pa のとき、経年変動成分 (0.313 cpy) が現われ、準周期状態に移行する。この時点では主振動数 (2.219 cpy) との関係は明確ではないが、 $\tau=0.1063$ Pa で位相ロッキングの関係 ($2.217/0.341$ は $13/2$ に近い) が成立する。(6) この経年変動成分を起点とする連続3回の周期倍化が、 $\tau=0.10621$, 0.10689 , 0.10704 Pa において確認された。このうち2回目の分岐で10年スケール変動が生じた。4回目以降の周期倍化は今回の実験の解像度では捉えることができず、 τ をさらに強くすると急速に連続スペクトルへ移行した。最後の周期倍分岐列から得られる Feigenbaum 定数の実験値は 4.53 であり、理論値 4.669... に近いといえる。

以上の結果から、エネルギー時系列データから推測される定常状態からカオス状態へ至る道筋は、(a) 傾圧不安定渦による短周期変動に対して周期倍分岐と逆分岐とを交互に繰り返す段階と、(b) 経年変動を起点とする周期倍分岐列による連続スペクトルへの移行の二つの段階からなり、かつ(a)と(b)は位相ロックされる傾向があることがわかった。このような周期倍化を中心とする一連のシナリオを確認したことで、このモデルで再現される10年スケール変動は、より短い周期の変動から不安定と分岐とによって系統的に生じていると考えられる。このことから、現実の海洋現象にも、外力の変動によらない海洋固有の10年スケール変動が存在する可能性が示唆される。

これまでの風成循環モデル研究 (例えば、Berloff and Meacham, 1998) では、水平渦粘性係数 A を分岐パラメータとしたとき、Ruelle-Takens シナリオに特徴づけられる分岐列が確認されている。したがって、風成循環のカオス化は一通りでない可能性があるから、(τ, A) 平面におけるレジームダイアグラムが望まれる。また、今回は各々のピークを担う現象については深く考察しなかった。不安定渦、ロスビー波の海盆モード、平均流の三つの現象の相互関係を具体的に明らかにすることが、今後の課題の一つである。