

論文の内容の要旨

論文題目 A numerical study on the green Sahara during the mid-Holocene:
an impact of convection originating above boundary layer

(中期完新世の緑のサハラに関する数値的研究：
非混合層起源対流のインパクト)

氏 名 千喜良 稔

1 はじめに

花粉・動植物化石・湖の水位などの証拠により、6000~9000年前のサハラ砂漠は湿潤化し、植生が大きく広がっていたと考えられている。一方、当時の軌道要素・植生分布・SSTの変化を考慮した大気大循環モデル(GCM: General Circulation Model)による実験が多数行なわれてきたが、ほとんどのGCMでは、サハラに植生を維持するほどの降水量をもたらすことができていない。

Ding and Randall (1998) は、予報型 Arakawa-Schubert (AS) 積雲対流スキームを非混合層起源対流(COA: Convection originating from aloft) に拡張するスキームを開発した。これをGCMに組み込んだ結果によると、夏の北アフリカでは非混合層起源対流が卓越している。このことを観測的に示した研究はまだないが、サヘル地域(ニジェール)の雨量計データによると、この地域では、混合層が発達していない夜から朝にかけて降水が卓越すること(Shinoda et al., 1999)、最近の北アフリカの夏の集中観測プロジェクトの結果によると、この地域で混合層より上に高い相当温位を持った空気が存在すること(Taylor et al., 2003) などから、北アフリカにおいてCOAが重要ではないかと推測できる。

本研究では、COAを表現するASスキーム(MCB: Multiple Cloud Base)を作成し、これをGCMに組み込むことで、6000年前の実験で8-9月のサハラの降水量が大きく増加することを示す。総降水量は、サハラの南部と北西部で植生を維持しうる量となる。これまで、多くのGCMではCOAについて簡単な取扱いしかなされてこなかった。CCSR/NIES AGCM5.6で用いられている簡易ASは、混合層起源の対流しか考慮しておらず、COAは別の枠組みで処理されている。しかしそれも浅い対流しか表現できないため、非混合層起源の深い対流を表現することができない。

表 1: 基本実験の設定

実験名	積雲スキーム	軌道要素	植生分布
MCB6k	MCB	6000 年前	6000 年前
AS6k	AS	6000 年前	6000 年前
MCB0k	MCB	現在	現在
AS0k	AS	現在	現在

表 2: 追加実験の設定

実験名	積雲スキーム	軌道要素	植生分布
MCB6knoveg	MCB	6000 年前	現在
AS6knoveg	AS	6000 年前	現在

2 MCB の定式化

定式化は基本的には Ding and Randall (1998) に準ずる。これは、予報型 AS スキームにおいて、混合層より上の層でも、その層を起源とし、異なるエントレインメント率を持った複数の雲タイプを考慮したものである。本研究では、CCSR/NIES AGCM の物理過程と適合するように、緩和型 AS スキームをベースにする、境界層の取り扱いを変更するなどの修正を加えている。MCB は混合層・非混合層を区別せず、浮力を持つすべての層からマスマックスを発生させる。簡易 AS では、混合層の高さをモデル最下層の空気の持ち上げ凝結高度で診断的に求めている。MCB では、様々なタイプの湿潤対流を一つの枠組みで表現することが可能になるとともに、夜から朝にかけて地表付近に逆転層が形成されている際、簡易 AS がフィクションの混合層を仮定してしまう問題を回避することができる。

3 実験設定

CCSR/NIES AGCM5.6 をフルオプションで使用する。解像度は T42L20。便宜的なトリガリング条件を使用する。基本実験として表 1 の通り、4 つの実験を行なった。6000 年前の植生分布は、Hoelzmann et al.(1998) に基づいてサハラとアラビア半島が植生で覆われた状態を仮定する。すべての実験で SST は現在に固定する。積分は 6 年間行い、最初の 1 年をスピニングアップとした。

また、植生の影響を分離するために、表 2 の通り、追加実験を 2 つ行なった。ここでは、植生分布は変えず、軌道要素のみを 6000 年前のものとしている。その他の設定は基本実験と同じである。

4 現在の実験結果

MCB を組み込んだ GCM は現在の気候をよく再現できる。MCB は簡易 AS の欠点の多くをそのまま引き継いでいるが、変化の傾向は概ね結果を観測に近づける方向にある。モデルの結果では、COA は主として陸上と中緯度のストームトラックで卓越している。COA は、中緯度の前線、インドモンスーン地域、北米の半乾燥地域などで存在が観測的に知られているが、モデルの結果もこの地域で卓越するとの結果となっている。

5 6000 年前の実験結果

AS6k では、8-9 月の ITCZ の北端が AS0k に比べて北上し、サハラ南部に降水帯が進入する。このとき、軌道要素の違いによって北半球の夏の日射が強まること、植生の広がり仮定したことアルベドが低くなったことから、サハラの地表気温は大きく上昇している。地表気圧が低くなり、北アフリカ西岸からの水蒸気輸送は大きく増加する。混合層内では水蒸気のサハラへの進入が強まっている。また、中層の偏東風ジェット、上層の上昇流の位置も北に移動する。

MCB の導入により、AS6k で見られた変化の傾向がさらに強まり、サハラ北西部の降水量が大きく増加する。潜在植生を診断するモデル (Prentice et al., 1992) を用いると、サハラの南部と北西部に植生が広がる。このとき、COA による降水は ITCZ の北半分領域で卓越しており、ITCZ のサハラへの侵入を強める方向に作用している。一方、現在の実験では、8 月の COA による降水のピークの緯度は ITCZ の降水のピークの緯度とほぼ一致している。

現在の実験では、8 月に下層で湿潤静的エネルギー (MSE) が最大となる緯度は、上昇流が卓越する緯度とほぼ一致している。一方、6000 年前の実験では、8 月に上昇流が卓越する緯度は現在の実験と比べてわずらかしき変化しないのに対し、下層の水蒸気のピークの位置は大きく北上する。このため、6000 年前の 8 月の ITCZ は、南半分では小さな MSE、北半分では大きな MSE で特徴づけられる南北非対称な構造となっている。MSE の高い領域では、夜から朝にかけて混合層の高さが低くなるため、混合層の上で高い MSE を持つ空気が存在し、COA を形成する要因となる。6000 年前の実験において ITCZ の北半分で COA が卓越するのはこのような理由による。

AS6knoveg, MCB6knoveg においても、以上のような南北非対称な構造が見られるが AS6k, MCB6k に比べると小さい。すなわち、以上の構造は植生の存在によって強められている。また、植生があることにより、MCB のサハラの降水へのインパクトが植生がない場合よりも強められている。

夏の ITCZ の北限はサハラ南部で停滞するが、アフリカ波動に伴う低気圧がサハラの西側で北上し、中緯度の高気圧の切れ目とつながった状態になりやすい。これにより、サハラの北西部にも水蒸気が運ばれ、多くの降水がもたらされている。弱いながら現在でも以上のような傾向が見られ、6000 年前の実験では夏の ITCZ が現在より北に移動するため、こうしたプロセスが強化されることになっている。サハラの西側に植生が進出しやすいのは、このような理由によっている。

MCB6k は、サハラの南部と北西部で植生を維持しうる量の降水をもたらしている。仮定した植生分布と気候値から診断された植生分布が一致するには至っていないが、本研究により、6000 年前の緑のサハラのメカニズムについて有益な洞察を得ることができた。