

日本気象学会誌 気象集誌
(Journal of the Meteorological Society of Japan)

第91A巻 2013年9月 目次と要旨
「国際水惑星比較実験 (APE) および関連研究についての特別号」

論 文

- M. BLACKBURN・B. J. HOSKINS：国際水惑星比較実験の位置付けと目的……………1-15
- M. BLACKBURN・D. L. WILLIAMSON・中島健介・大淵 濟・高橋芳幸・林 祥介・
中村 尚・石渡正樹・J. L. MCGREGOR・H. BORTH・V. WIRTH・H. FRANK・
P. BECHTOLD・N. P. WEDI・富田浩文・佐藤正樹・M. ZHAO・I. M. HELD・
M. J. SUAREZ・M.-I. LEE・渡部雅浩・木本昌秀・Y. Liu・Z. WANG・A. MOLOD・
K. RAJENDRAN・鬼頭昭雄・R. STRATTON：国際水惑星比較実験 (APE) :
CONTROL SST 実験 ……………17-56
- D. L. WILLIAMSON・M. BLACKBURN・中島健介・大淵 濟・高橋芳幸・林 祥介・
中村 尚・石渡正樹・J. L. MCGREGOR・H. BORTH・V. WIRTH・H. FRANK・
P. BECHTOLD・N. P. WEDI・富田浩文・佐藤正樹・M. ZHAO・I. M. HELD・
M. J. SUAREZ・M.-I. LEE・渡部雅浩・木本昌秀・Y. Liu・Z. WANG・A. MOLOD・
K. RAJENDRAN・鬼頭昭雄・R. STRATTON：国際水惑星比較実験 (APE) : SST
緯度分布の変更に対する応答 ……………57-89
- 中島健介・山田由貴子・高橋芳幸・石渡正樹・大淵 濟・林 祥介：APE の結果にみられる
自発的に生成した熱帯降水構造の多様性……………91-141
- 中島健介・山田由貴子・高橋芳幸・石渡正樹・大淵 濟・林 祥介：国際水惑星比較実験に
おける熱帯 SST 異常に強制された大気構造の多様性……………143-193
- K. RAJENDRAN・鬼頭昭雄・J. SRINIVASAN：水惑星実験における海面水温変化の
熱帯収束帯への影響 ……………195-215
- 安永数明・那須野智江・三浦裕亮・高薮 縁・吉崎正憲：水惑星全球非静力学モデル
(Aqua-Planet-NICAM) でシミュレートされた午後の降水極大 ……………217-229
- D. L. WILLIAMSON：Community Atmospheric Model, Version 3 における水惑星
シミュレーションの鉛直解像度依存性……………231-242
- 三瓶岳昭・中村 尚・後藤敦史：水惑星実験により明らかになった中緯度海洋前線帯の
中緯度大気環状変動に対する潜在的影響力……………243-267
- 森 正人・渡部雅浩・木本昌秀：水惑星 GCM における東西非対称な海面水温に対する
スーパーローテーションおよびハドレー循環の非線形応答……………269-291

.◇.◇.◇.

M. BLACKBURN・B. J. HOSKINS：国際水惑星比較実験の位置付けと目的

Michael BLACKBURN, and Brian J. HOSKINS: Context and Aims of the Aqua-Planet Experiment

国際水惑星比較実験 (APE) は、はじめ、海に覆われた理想化された地球における大気大循環モデルのためのベンチマークテストとして Neale and Hoskins (2000a) により提案された。本稿では APE の実験設定とその目標について概説し、さらに、複雑なモデルの評価、および、大気現象の概念的モデルと現実的シミュレーションの関連付けのために使えるモデル階層

の中での APE の位置付けについて議論する。APE での単純化された水惑星設定は、既存のモデル階層の中に存在する断絶を橋渡しする。また、この設定は、異なるモデルの間の差異を明白にするとともに、幾つかの特定の現象、および、それらが海水温度分布の違いにどう応答するかに注目して設計されている。

M. BLACKBURN・D. L. WILLIAMSON・中島健介・大淵 済・高橋芳幸・林 祥介・中村 尚・石渡正樹・J. L. MCGREGOR・H. BORTH・V. WIRTH・H. FRANK・P. BECHTOLD・N. P. WEDI・富田浩文・佐藤正樹・M. ZHAO・I. M. HELD・M. J. SUAREZ・M.-I. LEE・渡部雅浩・木本昌秀・Y. Liu・Z. WANG・A. MOLOD・K. RAJENDRAN・鬼頭昭雄・R. STRATTON：国際水惑星比較実験 (APE)：CONTROL SST 実験

Michael BLACKBURN, David L. WILLIAMSON, Kensuke NAKAJIMA, Wataru OHFUCHI, Yoshiyuki O. TAKAHASHI, Yoshi-Yuki HAYASHI, Hisashi NAKAMURA, Masaki ISHIWATARI, John L. MCGREGOR, Hartmut BORTH, Volkmar WIRTH, Helmut FRANK, Peter BECHTOLD, Nils P. WEDI, Hirofumi TOMITA, Masaki SATOH, Ming ZHAO, Isaac M. HELD, Max J. SUAREZ, Myong-In LEE, Masahiro WATANABE, Masahide KIMOTO, Yimin LIU, Zaizhi WANG, Andrea MOLOD, Kavirajan RAJENDRAN, Akio KITOH, and Rachel STRATTON: The Aqua-Planet Experiment (APE): CONTROL SST Simulation

東西一様な表面水温の海洋からなる水惑星の条件で行われた16の大気大循環モデル (AGCM) の気候シミュレーションを比較する。この理想化された設定は、異なるモデル間の差異を明らかにするように設計されている。現実の地球との比較において、得られた気候値の基本的な様相を述べる。

16のモデルの振る舞いには幅広い差異がある。対流圏平均風の地衡流平衡成分、および、物理量の収支条件に拘束される中緯度擾乱の共分散については、モデル間のばらつきは比較的小さい。対照的に、非定常擾乱の振幅は、力学コアにおける散逸の違いに影響されて大きくばらつく。また、下部成層圏で温度がばらつくという古くからの問題は APE においても現れている。

大循環のうち、解像された流体力学とパラメタ化された湿潤過程の相互作用が直接的に駆動する現象の特徴は、モデル間で大きく異なる。熱帯のハドレー循環は赤道近傍において1本あるいは2本の熱帯収束帯 (ITCZ) を伴うが、そこでの平均降水量には大きなば

らつきがある。赤道波のスペクトルには、降水の強さと伝播特性に幅広く異なった特徴が見られる。多くのモデルでは、注目すべき一定の位相速度のケルビンモード的東進が支配的に見られる。西進成分は赤道ロスビー波よりも分散性が弱く、幾つかのモデルでは強く現れ、他のモデルでは東進するエンベロープに埋め込まれて現れる。降水の変動特性は ITCZ の平均構造と関連しており、この事は過去の研究と合致している。

水惑星設定における全球エネルギー収支がどうなるべきであるかはそもそも未知である。ここでの結果では、大気上端での全球大気正味放射フラックスのモデル間のばらつきは大変大きい。これには雲による短波放射の反射の差異が支配的に寄与している。地球気候再現に調節されていない新規開発のモデルが参加していることが、この大きなばらつきをもたらしている。地球気候を再現するよう調節されたモデル間の差異の考え得る原因についても議論した。

本研究の水惑星設定は、AGCM の評価に用いる数

値実験階層の要素の一つとして意図されている。実際、エネルギー収支に関する上の結果は、水惑星実験でのモデル間のばらつきを理解と抑制には地球気候実験との連関が有効であることを示唆している。モデル

の振る舞いの一つ一つを調査し、水惑星気候が解像度の向上とともにどのように収束するかを調べるためのモデル相互比較実験が必要である。

D. L. WILLIAMSON・M. BLACKBURN・中島健介・大淵 済・高橋芳幸・林 祥介・中村 尚・石渡正樹・J. L. McGREGOR・H. BORTH・V. WIRTH・H. FRANK・P. BECHTOLD・N. P. WEDI・富田浩文・佐藤正樹・M. ZHAO・I. M. HELD・M. J. SUAREZ・M.-I. LEE・渡部雅浩・木本昌秀・Y. Liu・Z. WANG・A. MOLOD・K. RAJENDRAN・鬼頭昭雄・R. STRATTON：国際水惑星比較実験（APE）：SST 緯度分布の変更に対する応答

David L. WILLIAMSON, Michael BLACKBURN, Kensuke NAKAJIMA, Wataru OHFUCHI, Yoshiyuki O. TAKAHASHI, Yoshi-Yuki HAYASHI, Hisashi NAKAMURA, Masaki ISHIWATARI, John L. McGREGOR, Hartmut BORTH, Volkmar WIRTH, Helmut FRANK, Peter BECHTOLD, Nils P. WEDI, Hirofumi TOMITA, Masaki SATOH, Ming ZHAO, Isaac M. HELD, Max J. SUAREZ, Myong-In LEE, Masahiro WATANABE, Masahide KIMOTO, Yimin LIU, Zaizhi WANG, Andrea MOLOD, Kavirajan RAJENDRAN, Akio KITO, and Rachel STRATTON: The Aqua-Planet Experiment (APE): Response to Changed Meridional SST Profile

本論文では大気大循環モデルによるシミュレーションの、海水面温度（SST）の緯度分布の変化に対する応答を調べる。対象とするシミュレーションは、水惑星すなわち陸も地形も海水も無く東西一様に固定された海水面温度の海に覆われた地球についてのものである。数値天気予報や気候問題への応用のために開発された14のモデルによるシミュレーションを比較する。それぞれのモデルで、SSTの緯度分布への感度を調べるために4つの実験を行った。設定されたSSTの南北分布は、SST傾度が赤道まで続くものから、赤道に近づくにつれてフラットになるものまであり、全て赤道上で同じ最高値をとる。

全てのモデルにおいて帯状平均循環はSSTの緯度分布に対して強い感度を示す。熱帯のSST分布が平坦化するにつれて、ハドレー循環は弱まり、極側にずれる。ITCZの強度、および、与えたSST群のどれで1本から2本へのITCZ構造変化が起こるかは、モデル間に大幅な違いがある。与えたSSTの分布は、赤道域のSST分布の平坦化につれて、最大南北傾度の位置が高緯度側に移り、そこでの傾度は大きくなる

ように設定されている。これとともに、中緯度のジェットは弱まり、強風軸は極側に移る。熱帯波動の活動度と熱帯降水の周波数分布も調べた。両者の詳細はモデル間で大きく異なる。この事は、個別のSST分布における結果、および、SST分布の変更に対する応答のどちらについても言える。

さらに、赤道からずれた場所に極大をもつSST分布への応答を調べる実験も行った。ハドレー循環の上昇域はSST極大緯度に追従する。赤道上でSSTが極大である場合に1本のITCZが現れるモデルでは、ITCZはSST極大の真上に移る。一方、降水極大が2本で赤道が降水極小となるモデルでは、この2本構造を保ったまま降水分布が赤道から移動し、SST極大で降水極小という構造が保たれる。どちらの場合も帯状平均降水強度分布の形状変化は目立たない。ハドレー循環の上昇域のSST極大の側の半球への移動に際し、東西平均の東西風、南北風、鉛直風の全ては、SST極大と逆側の半球でハドレー循環が優勢になることを示す。

中島健介・山田由貴子・高橋芳幸・石渡正樹・大淵 濟・林 祥介：APEの結果にみられる自発的に生成した熱帯降水構造の多様性

Kensuke NAKAJIMA, Yukiko YAMADA, Yoshiyuki O. TAKAHASHI, Masaki ISHIWATARI, Wataru OHFUCHI, and Yoshi-Yuki HAYASHI: The Variety of Spontaneously Generated Tropical Precipitation Patterns Found in APE Results

国際水惑星比較実験プロジェクト (APE) の結果を、詳細な変数が提供されているモデルにおける赤道域の降水構造に焦点をあてて調べた。統一された APE の設定にもかかわらず、モデル中の降水のホフメラー図には相当の多様性が見られる。その原因は物理過程の実装の多様性であると考えられる。一方、降水の東西波数-振動数スペクトルには、ある程度の類似性が見いだされる。パワースペクトルはケルビン波成分、西進慣性重力波成分、および移流成分に分けることができる。これら 3 つの成分の強度は、モデル間で顕著にばらつく。

時空間フィルターを通したデータを回帰分析することにより、これら 3 つの成分のそれぞれについて空間

構造のコンポジットを作成した。ケルビン波成分と西進慣性重力波成分の水平構造コンポジットはモデル間で似通っており、それぞれの浅水赤道波モードから期待される構造とも似ている。この類似性は、これらの成分の位相速度が平均帯状風の値と近くなる高度領域においては悪化する。移流成分の水平構造はモデル間で大きくばらつく。コンポジット鉛直構造には、3 つの成分の全てに関して、モデル間で非常に顕著な差異がある。コンポジットにおける対流性加熱と層状性加熱の鉛直水平構造の比較は、鉛直構造の多様性が物理過程、特に積雲対流パラメタリゼーションの実装の差異に起因することを示す。

中島健介・山田由貴子・高橋芳幸・石渡正樹・大淵 濟・林 祥介：国際水惑星比較実験における熱帯 SST 異常に強制された大気構造の多様性

Kensuke NAKAJIMA, Yukiko YAMADA, Yoshiyuki O. TAKAHASHI, Masaki ISHIWATARI, Wataru OHFUCHI, and Yoshi-Yuki HAYASHI: The Variety of Forced Atmospheric Structure in Response to Tropical SST Anomaly in the Aqua-Planet Experiments

この論文では国際水惑星実験比較プロジェクト (APE) に参加したモデルの赤道域の海水面温度 (SST) の東西非一様な偏差に対する定常応答を調べる。数値実験では、3 つの異なる SST 偏差の分布が与えられた。これらのうち 2 つは同じ形状だが強度が異なる局在した正の SST 偏差、もう一つは東西に波数 1 で変化する SST 偏差である。得られた定常応答はモデル間で顕著にばらつく。しかし、モデル間に共通する様相も存在している。

局在した正 SST 偏差に対する応答の主要な特徴は、正 SST 偏差直上の正の降水偏差、熱帯収束帯に沿って広く分布する負の降水偏差、正 SST 偏差より東側で生じる上部対流圏の高気圧偏差を起点とする中緯度西風ジェット赤道側に沿う 1 対のロスビー波列、そして傾圧帯に沿う降水とジオポテンシャルの波状の偏差である。熱帯の応答の構造は Matsuno-Gill

パターンから期待されるものと大きく異なっており、応答の強度は各モデルにおいて、SST 偏差の強さにほぼ比例する。

波数 1 の SST 偏差に対する応答には波数 1 構造が卓越する。熱帯の降水は、高い SST 偏差付近の経度では増加し低い SST 偏差付近の経度では減少する。正の降水偏差の東側において、上部対流圏の赤道近傍に存在するほぼゼロの絶対渦度の領域が南北に拡大し、中緯度西風ジェットは狭く強くなる。正の降水偏差の西側では、上部対流圏で絶対渦度がゼロの領域が南北に縮小し、中緯度西風ジェットは弱く広くなり、西風領域が赤道近傍まで侵入する。その結果、赤道付近に帯状平均西風偏差が形成される。このような上部対流圏の西風偏差と降水偏差の間の東西位置関係は、現実のウォーカー循環と海大陸の間の位置関係と際立って異なっている。

K. RAJENDRAN・鬼頭昭雄・J. SRINIVASAN：水惑星実験における海面水温変化の熱帯収束帯への影響

Kavirajan RAJENDRAN, Akio KITOH, and Jayaraman SRINIVASAN: Effect of SST Variation on ITCZ in APE Simulations

水惑星実験 (APE) シミュレーション結果を用いて、海面水温 (SST) の南北変化が熱帯大気循環に与える影響を調べた。すべての APE モデルで、CONTROL 実験における狭い SST ピーク付近の SST 南北勾配は、1 本の強い熱帯収束帯 (ITCZ, 帯状平均降水量の最大で定義) の形成に寄与している。対照的に、赤道で平坦な SST ピークをもつ実験 (FLAT 実験) では、ほとんどの APE モデルで、SST 最大域をはさむように二重 ITCZ を形成する。CONTROL 実験において、APE モデル間の ITCZ の SST 感度にはかなりの一致があるが、FLAT 実験ではモデル間に違いを生じる。また、全降水と対流性降水の応答はモデル間で似ているが、大規模凝結降水は FLAT 実験でモデル間の違いがかなり大きい。APE 相互比較実験から、ITCZ の発現と位置は主として、

SST の南北変化への応答としての境界層内の水蒸気収束に関係していることが示される。さらに、対流圏気温の南北勾配が ITCZ の位置に影響する重要な要素であることが分かった。

FLAT 実験の SST 分布は夏季のインド洋で観測される分布に似ている。この場合に二重 ITCZ を形成するモデルは赤道域 (ITCZ から約15度赤道側) に東風ジェットを作る。これは熱帯偏東風ジェット (TEJ) に類似している: TEJ は夏季モンスーン季にインド洋で観測される固有の現象であり、ジェットの中心は 12°N にあり、25°N 付近にある季節収束帯の赤道側に位置する。これらのモデルでは、正の南北気温勾配とそれに関連する東風シアアが水蒸気収束により強化されて上部対流圏まで達し、これに TEJ が温度風バランスしている。

安永数明・那須野智江・三浦裕亮・高藪 縁・吉崎正憲：水惑星全球非静力学モデル (Aqua-Planet-NICAM) でシミュレートされた午後の降水極大

Kazuaki YASUNAGA, Tomoe NASUNO, Hiroaki MIURA, Yukari N. TAKAYABU, and Masanori YOSHIKAZAKI: Afternoon Precipitation Peak Simulated in an Aqua-Planet Global Nonhydrostatic Model (Aqua-Planet-NICAM)

Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) を用いた水惑星実験では、降水の半日周期が再現された。この降水の半日周期は、深夜から明け方にかけて (3-6 時ぐらい) と、正午過ぎ (12-15 時ぐらい) に極大を持っていた。本研究では、海面温度を固定していたにも関わらず、モデルで日中に降水の極大が再現された原因について調べている。

下部対流圏の温度は、正午過ぎに極小値を示し、温

度極小の時間帯は、降水極大の時間帯と一致していた。また、この温度の低下は、非断熱過程ではなく、力学過程により生じていた。この力学過程による温度低下に伴う飽和水蒸気量の減少により、凝結する水蒸気量が增加することが、日中の降水極大の要因であることが示唆された。本論文では、この温度低下と大気潮汐との関係についても議論されている。

D. L. WILLIAMSON：Community Atmospheric Model, Version 3 における水惑星シミュレーションの鉛直解像度依存性

David L. WILLIAMSON: Dependence of APE Simulations on Vertical Resolution with the Community Atmospheric Model, Version 3

東西平均した赤道域の降水構造の鉛直解像度に対す

る収束性を、CAM3 (Community Atmospheric Model,

Version 3) のオイラー移流スペクトル変換力学コアと有限体積力学コアの両方で調べた。両方の力学コアは標準のCAM3パラメタリゼーションパッケージと結合させた。CAM3で標準である26レベル格子において水平解像度だけを上げていくと、二つの力学コアは異なった状態に向かって収束する。具体的には、降水の極大がスペクトル変換力学コアでは一つになるのに対し、有限体積力学コアでは二つになる。鉛直解像度を高めていくと、どちらの力学コアも、極大を二つ持つ構造に収束する。しかし、高鉛直解像度実験を低鉛直解像度実験と比較すると、下降域において気候学的バランスおよびパラメタ化されたプロセスによる強制が非常に異なっている。そのため、高鉛直解像度実験では、低鉛直解像度力学コアでは実現されている現実的な気候状態が得られない。

26レベルモデルで生成した初期値から出発した60レ

ベルモデルの時間積分を吟味することにより、上のようなパラメタ化された強制の差異の原因を探った。原因は浅い対流の離散近似にあることがわかった。26レベルモデルの変数を補間して得られる初期条件を60レベルモデルに与えると、26レベル格子での差分計算で浅い対流に関して気柱が不安定と判定される場合でも、60レベル格子では気柱は安定である。この状況で、パラメタ化された惑星境界層過程が水蒸気を下部対流圏に輸送すると、下層雲が非現実的なほど増加して強い放射冷却を強制する。これが気柱を不安定化し、ついには60レベル格子でも浅い対流が再び起動する。しかし、そうなるまでの間にモデル内の状態は大幅に変化し、現実の地球大気とはかけ離れたものとなる。水惑星でない現実地球的な計算においても、上と似た非現実的な振る舞いが見いだされる。

三瓶岳昭・中村 尚・後藤敦史：水惑星実験により明らかになった中緯度海洋前線帯の中緯度大気環状変動に対する潜在的影響力

Takeaki SAMPE, Hisashi NAKAMURA, and Atsushi GOTO: Potential Influence of a Midlatitude Oceanic Frontal Zone on the Annual Variability in the Extratropical Atmosphere as Revealed by Aqua-Planet Experiments

大気大循環モデルを使った水惑星実験により、中緯度海面水温前線帯の、中緯度大気の東西一様変動に対する潜在的影響力を評価した。現実の南西インド洋にみられるような急な中緯度海面水温勾配を与えた実験では、環状モードはモデル夏半球でよく再現される。南半球で実際に観測されるのと同様に、モデルの環状モードは気候平均場の中緯度西風ジェット・ストームトラック軸の周りの西風風速南北シーソーを表現しており、擾乱による運動量輸送の増加・減少とともに中緯度偏西風の強化・弱化がみられる。環状モードのこのような本質の特徴はモデル冬半球でも維持されるが、冬季は亜熱帯ジェットが強いため、構造には多少変化がみられる。海面水温前線帯を除去した別の実験では、夏半球では平均場のジェット・ストームトラッ

ク軸の移動に合わせ、環状モードに伴う西風偏差も低緯度寄りに移動する。さらに重要な事として、環状モードの振幅と持続性が大幅に弱まる。冬半球では、中緯度偏西風の環状変動の著しい弱化も起こる。海面水温前線帯が無いと地表近くの傾圧性が弱いため、擾乱による運動量輸送の偏差も大幅に減少する。こちらの実験では、観測される環状モードと異なり、冬半球の卓越変動モードは主に亜熱帯ジェットの変動を表現している。理想化実験ではあるものの、これらのモデル実験は、環状モードが冬季の亜熱帯ジェット強化に抗して通年卓越し堅固でありつづける性質に対して、中緯度海洋前線帯がストームトラック活動の強化を通じて潜在的に重要である事を示唆している。

森 正人・渡部雅浩・木本昌秀：水惑星 GCM における東西非対称な海面水温に対するスーパーローテーションおよびハドレー循環の非線形応答

Masato MORI, Masahiro WATANABE, and Masahide KIMOTO: Superrotation and Nonlinear Hadley Circulation Response to Zonally Asymmetric Sea Surface Temperature in an Aquaplanet GCM

東西波数 1 の海面水温 (SST) 偏差 (T_s^*) に対する赤道域東西風とハドレー循環の応答を、水惑星条件の大気大循環モデル (AGCM) を用いて調べた。 T_s^* の強度が増すに従って、熱帯の帯状平均非断熱加熱の減少と釣り合いつつ、ハドレーセルは弱まる。加熱の減少は降水と SST の関係の非線形性を反映している。即ち、スーパークラウドクラスターなどの深い対流は、冷たい T_s^* の上では顕著に抑制される一方、暖かい T_s^* の上での強化はわずかである。この深い対流の効果的な抑制をもたらすのは、 T_s^* が励起するウォーカー循環に伴って形成される安定な境界層と乾燥した下降流偏差である。さらに、対流の弱体化が熱力学バランスを通じて下降流の強化をもたらす。従って、この大規模循環と深い対流の正のフィードバックが SST と対流活動の関係の非線形性を決定し、ハドレー循環の強度を制御する。

また、熱帯循環のエネルギー収支から見ると、冷た

い T_s^* 上での深い対流の効果的な抑制のために熱帯域の放射冷却が増加し、これに起因する正味のエネルギー供給の減少を補償するためにハドレーセルは弱まらねばならない。

我々の AGCM の結果を、同じ SST 分布で駆動された他の 15 の水惑星 AGCM の結果と比較した。東西一様な SST に T_s^* を加えると、全てのモデルにおいてハドレー循環は弱まるが、その強さには大きなばらつきがある。このことは、物理過程の違いが東西非一様な SST に対するハドレーセルの応答の感度の違いをもたらすことを示唆する。ハドレーセルの弱体化の度合いは、熱帯域の深い対流性降水の減少量、ならびに放射冷却の増加量に近似的に比例する。この強固な関係は、先に述べたフィードバックが他の AGCM でも働いていることを示唆する。このフィードバックは現実の熱帯気候形成を理解する上でも重要だと考えられる。