CCSR/NIES 5.4g水同位体大循環モデル : 改善のための感度実験

CCSR/NIES 5.4g WATER ISOTOPE GENERAL CIRCULATION MODEL : SENSITIVITY EXPERIMENTS FOR IMPROVEMENT

石崎安洋1・芳村圭2・沖大幹3・鼎信次郎4

Yasuhiro ISHIZAKI, Kei YOSHIMURA, Taikan OKI, Shinjirou KANAE

¹ 学生会	会員 東京大学会	主産技術研究所 大	学院博士課程	(〒153-80)50 東京都目	目黒区駒場 4	4-6-1)
² 正会員	修士(工学)	東京大学生産技術	研究所 助手	(〒153-	8050 東京者	ß目黒区駒場	4-6-1)
³ 正会員	博士(工学)	東京大学生産技術	研究所 助教	授(〒153-	8050 東京都	的目黑区駒場	4-6-1)
⁴ 正会員	博士(工学)	総合地球環境学研究	究所 助教授	(〒602-08	378 京都府上	京区高島町3	35)

The stable water isotopes (H₂¹⁸O, HDO) have been included into the CCSR/NIES Atmospheric General Circulation (AGCM) 5.4g. This model reproduced global scale distribution of δ^{18} O in precipitation and the temperature effect roughly, but δ^{18} O in precipitation in arid region and in cold region was overestimated and temperature effect was underestimated. Then in this study we conducted three sensitivity experiments focusing on isotope parameterizations and horizontal resolution. In the first experiment, to control the kinetic effect in re-evaporation of precipitation below cloud base, we used the effective relative humidity. As a result, δ^{18} O in precipitation in arid region become lighter and similar to observation. In the second experiment, we focused on the treatment of ice crystals, but in this experiment, there is not strong sensitivity globally. In the third experiment, we used the high horizontal resolution with the effective relative humidity. In this experiment, in addition to arid region, δ^{18} O in precipitation in cold region become lighter and similar to observation and temperature effect is also simulated more realistically.

Key Words : stable water isotopes , water isotopes general circulation model, water cycle

1. はじめに

水は地球の気候を考える上で最も重要な物質の一つ であり、この循環を正確に把握することが気候を理解 するうえで非常に重要である。しかし、水が実際にど こからどのように輸送され、大気や地表、地中をどの ように循環しているかを知るには、従来の水収支の議 論のみでは困難である。このような問いに答え、水循 環を総合的に理解するためには、水収支の議論に加え て、物質循環の視点を導入することが必要である。

この物質循環の視点を導入するために、水循環研究 において水同位体がトレーサーとして利用されている。 しかし、この水同位体をトレーサーとして用いる研究 は実際にはあまり進んでいない。なぜなら、水に含ま れる水同位体は、水が循環する過程の中で、蒸発、凝 結、降水蒸発など様々なプロセスにより決定され、あ る変動がどの要因によるものなのかを特定し、定量化 することが極めて困難だからである。それに加えて、 水循環経路のすべての水をサンプリングすることも物 理的に極めて困難であり、大きな問題である。

これらの困難を克服するため、近年では数値気候モデ

ルを使用した研究が大きく進歩を遂げている。中でも注 目を集めているのが、大気大循環モデル(AGCM)を基本モ デルとした水同位体大循環モデル¹⁾²⁾³⁴⁾⁵⁾である。この 水同位体大循環モデルは海外の研究機関で5例ほど存在 し、GNIP(Global Network for Isotope in Precipitation)などの観測値と比較検証され、降水同 位体の月単位の時系列変動、数百キロ以上の空間変動を 精度よく再現することが確認されており、今後、同位体 を用いた広域水循環研究において有用なツールになるこ とが期待されている。CCSR(東京大学気候システムセン ター)とNIES(国立環境研究所)の共同研究により開発 された大気大循環モデル(CCSR/NIES AGCM5.4g)におい ても、同位体の分別過程が組み込まれ、水同位体大循環 モデルが開発されている。

そこで本研究では、CCSR/NIES水同位体循環モデルの 再現性をGNIPの観測値と比較検証し、このモデルが広域 水循環研究において有用なツールであるかを検証した。 また、降水同位体は、同位体パラメタリゼーションと大 気大循環モデルにより再現される水循環の精度の二つの 要因に感度が大きいと考えられる。高精度な降水同位体 を再現するには、これらの要因が降水同位体にどのよう な感度があるかを調べる必要がある。そこで、本研究で はこれらの要因に関する感度実験についても行った。

2.CCSR/NIES水同位体大循環モデル

(1) CCSR/NIES 大気大循環モデル

CCSR/NIES水同位体大循環モデルの基本モデルである CCSR/NIES大気大循環モデルは、全球3次元プリミティ ブ方程式を基礎としている。また、水平離散化として スペクトル変換法を採用し、鉛直座標として 座標系 を採用している。モデルの予報変数は流線函数、速度 ポテンシャル、大気温度、地上気圧、水蒸気の混合比 である。また、物理過程には放射、積雲対流、大規模 雲凝結過程、鉛直拡散、および重力波抵抗などが考慮 されている。積雲対流のパラメタリゼーションには簡 略化Arakawa-Schubertスキームを採用している。また、 大規模凝結には雲水予報型大規模凝結を採用していて、 陸面は一層のバケツモデルを採用している。大気中の 水蒸気の輸送にはsemi-Lagrangean法を採用している。

(2) 同位体分別過程

本モデルにおける同位体の取り扱いはGISSモデル²⁾を 基本として、いくつかの改良を加えた。他の研究機関 が開発した水安定同位体大循環モデルも同位体の取り 扱いに関してはGISSモデル²⁾とほぼ同じである。同位体 予報変数はHDO,H¹⁸0の総水量、土壌水分、積雪である。 相変化が生じるときに同位体分別が生じるので、海面 からの蒸発、降水形成時の凝結過程、雲底下における 降水蒸発⁷⁾において、平衡及び動的分別効果が組み込ま れている。平衡分別係数は、室内実験より得られた気 温の関数⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾として与えられる。陸面における同位体 の分別過程は単純化されていて、陸面からの蒸発はす べて蒸散によるものと仮定し、土壌水分の同位体比を そのまま用いている。この仮定は他のモデルの研究例 によると降水同位体への感度は小さく妥当であると考 えられるが、植生の薄い場所ではなんらかの分別作用 が働く可能性もあるので、結果を考察する際に若干の 注意が必要である。

本モデルと他のモデルでは、同位体パラメタリゼー ションにおいて若干の違いが存在する。まず、水面か らの蒸発における動的分別係数の取り扱い方が異なる。 その他のモデルでは水面からの蒸発における動的分別 効果を風速の関数として簡素化しているのに対し、本 モデルではバルク係数を求める際の分子拡散係数の違 いとして評価⁽¹⁾している。海上からの蒸発における動的 分別効果を評価するには本モデルの方が同位体の質量 数の違いから直接評価できることになり、この点で本 モデルは他のモデルよりも優れている。次に、氷晶の 形成温度とその同位体パラメタリゼーションが異なる。 本モデルでは凝結の際、大気の気温が-5 から-25 で ある場合、雲水と雲氷が共存すると仮定している。こ の雲水と雲氷の割合により、氷晶の動的分別係数を評 価する際に必要となる過飽和度を評価している¹²⁾。しか し、他のモデルでは-10 以下では雲水はすべて氷晶 と仮定し、過飽和度も気温の関数として簡素化してい る。この雲水と雲氷の共存域を想定している点、雲水 と雲氷の割合により過飽和度を評価している点で本モ デルは他のモデルより複雑な降水過程における同位体 分別を扱っている。

また、他のモデルには組み込まれていて本モデルに は組み込まれていない同位体の分別過程として、雲底 下における降水蒸発の過剰な同位体分別を抑える effective relative humidityや積雲対流と大規模凝結 における雨滴の粒径の違いを考慮して、積雲対流では 降水中の雨滴と周囲の空気塊における平衡分別の割合 を半分にしていることなどが挙げられる。

3.実験設定と実験結果

(1) 実験設定(標準実験)

大気モデルの初期条件には等温静止を用いている。実 験結果は等温静止から7年間積分し、それからさらに3 年間積分した値を気候値として求めている(本研究で は感度実験を行うので、この実験を以下では標準実験 とする)。水平分解能はt42(約2.8°×2.8°)、鉛直分 解能は11層である。SST(海面水温)などの境界条件に ついてはすべて気候値を用いた。各同位体の初期値に ついては総水量、土壌水分、積雪すべて標準海水と同 じ0‰としている。

(2) 標準実験の結果

図-1はモデルとGNIP観測の降水酸素同位体比の年平 均である。GNIP観測に見られる地球規模での降水同位 体比の最も大きな特徴は、中・高緯度で緯度が高くな るにつれ、降水同位体比が減少することである。また、 チベット高原やアンデス山脈、ロッキー山脈などの高 度の高い山脈で、高度が高くなるにつれ、降水同位体 比が減少することも大きな特徴である(高度効果)。 モデルはこれらの特徴を大まかに再現している。しか し、サハラ砂漠などの乾燥域では、GNIP観測には見ら れない過大な降水酸素同位体比が見られる。この現象 は他のモデルでは生じていない。また高緯度、特にカ ナダ北部でもGNIP観測と比べると降水酸素同位体比が 過大に評価されている。一方、他のモデルでは、GISS モデルなどがこれらカナダ北部の寒冷域をよく再現し ている。

図-2はGNIP観測とモデルの15 以下での地表面気温 と降水酸素同位体比の関係である(温度効果)。GNIP 観測での温度効果の傾きは0.53 /‰である。一方、モ



図-1 CCSR/NIES同位体大循環モデルによる年平均降水酸素同位体比(‰) 大きい値はGNIPによる観測値

デルは0.32 /‰であり、GNIP観測より弱い。特に、寒 冷域での再現が悪く、モデルの方が気温を過小評価し、 降水同位体比については過大評価しているため、温度 効果が弱くなっている。



図-2 標準実験とGNIP観測の温度効果(年平均) 白丸がGNIP観測、黒丸がモデル

4.感度実験

GNIP観測と比較した結果、本モデルは年平均の降水酸素同位体比と温度効果について大まかに再現する。しかし、観測と比較した場合、乾燥域、寒冷域でとも

に過大評価されている。他のモデルでは、これらの乾 燥域,寒冷域における降水酸素同位体比及び温度効果 は本モデルよりも観測に近いパフォーマンスを示して いる。この原因として、本モデルと他のモデルの同位 体パラメタリゼーションの違いが考えられる。既に述 べたように他のモデルとの大きな違いとして、

- 他のモデルでは、effective relative humidityを 用いて降水蒸発による過剰な同位体分別を抑えて いる。
- 2. 氷晶形成時の氷晶の割合、及び過飽和度が異なる。
- 3.他のモデルでは積雲対流における降水中、雨滴と周 囲の空気塊の間の平衡の割合が異なる。
- 4. 海面からの蒸発における動的分別効果の評価が異な る。

の大きく分けて4つの違いが存在する。

また、これらの同位体パラメタリゼーションの違いに 加え、現在使用しているt42の水平解像度では地形の解 像度が不十分であり、降水同位体を再現するのに十分 な水循環を再現できていない可能性も考えられる。そ こで、本研究では、同位体パラメタリゼーションとの 違いに注目した感度実験に加えて、現在の水平解像度 t42で与えられる地形よりもより現実的な地形を与える ことのできる水平解像度t106(約1.1°×1.1°)を使用 した感度実験も行った。本研究では、これらの感度実 験のうち、温度効果、乾燥域、寒冷域での降水同位体



図-3 感度実験 と標準実験の年平均降水酸素同位体比の差(‰) 大きい値はGNIPの観測値と標準実験の年平均降水酸素同位体比の差(‰)

比に関係が深いと考えられる3種類の感度実験の結果を 示す。

(1) 感度実験

感度実験の設定

大気大循環モデルでは雲底下における再蒸発を計算 する際、再蒸発が生じる直前の相対湿度を用いて評価 する。しかし、現実においては降水の際、蒸発により 周囲の空気塊がより湿潤になり、同位体としては分別 が抑えられると考えられる。そこで、他のモデルでは 直前の相対湿度に飽和湿度の重みを加えたeffective relative humidityを用い、降水蒸発における過剰な同 位体分別を抑えている。感度実験 では他のモデルと 同じようにeffective relative humidityを用いた。 heff=xh+(1-x)hsat (1) heff: effective relative humidity x: 重 み h:再蒸発前の相対湿度 hsat: 飽和相対湿度 重みは0.5とした。

感度実験の結果

図-3は年平均での降水酸素同位体比の感度実験から標準実験の差(‰)である。サハラ砂漠やオーストラリア、ペールー沖など、大気の乾燥した地域で大きな感度があり、降水同位体比が減少している。これは他のモデルと同様、effective relative humidityの概念を導入

することで、雲底下の降水蒸発における軽い同位体の過 剰な蒸発が抑えられため、降水同位体比が軽くなったと 考えられる。

(2) 感度実験

感度実験の設定

Jouzel et al¹³⁾では寒冷域での降水同位体比の再現 には氷晶形成時の過飽和度の評価が重要であることが 指摘されている。そこで感度実験 では氷晶形成時の 過飽和度のパラメタリゼーションに注目する。

本モデルにおける氷晶の割合は、雲水中(液水+氷 晶)の液水比*F*/は気温/により

$$Fl = 0, (T < Tw); Fl = 1, (T > Ts); Fl = \frac{T - Tw}{Ts - Tw} (Tw < T < Ts)$$
(2)

ここで、 $T_s = -5$ 、 $T_w = -25$ である と評価する。また、過飽和度Siについては $S_i = S_{i0} = 1.02 - 0.0038(T - T_0), (T < Tw)$ (3)

$$S_{i} = S_{i1} = \frac{q_{1}}{q_{i}}, (T > Ts)$$
(4)

と評価する。ここで、qi、qlはそれぞれ氷面及び水面に対する飽和比湿である。一方、他のモデルは - 10以下で雲水をすべて氷晶と仮定し、氷晶形成時における過飽和度について過飽和度Siについては、

$$S_i = 1 - 0.003 (T - T_0)$$
 (5)

と評価している。そこで、本モデルと他のモデルとの 氷晶の過飽和度の違いがどれだけ降水同位体へ感度が あるかを調べるために、感度実験 においては他のモ デルと同様に - 10 以下では雲水をすべて氷晶と仮定 し、過飽和度に関しても他のモデルが採用している評 価式(5)を用いた。

感度実験の結果

図-4は年平均における東西平均した降水酸素同位体 比の感度実験から標準実験の差(‰)である。わず かに減少している地域もあるが、寒冷域での降水酸素 同位体比への大きな感度はなく、また、温度効果につ いても0.34 /‰とほとんど変わらなかった。



(3) 感度実験

感度実験の設定

感度実験 では感度実験 における effective relative humidityに加え(重みの値は感度実験 と同じ0.5とする)、感度実験 では水平解像度t42から t106に変更して行った。

感度実験の結果

図-5 は感度実験 と標準実験の年平均における降水酸素 同位体比の差である。感度実験 と同様に感度実験 にお いても、サハラ砂漠などの乾燥域で高い感度が見られ、標 準実験で過大であった降水同位体比が改善されている。ま た、感度実験ではカナダ北部においても過大であった降 水同位体比が軽くなり、観測に近づいている。鉛直積分し た水蒸気フラックスの感度実験 と標準実験の差から、こ の地域では太平洋からの流入が減り、北極海からの水蒸気 の流入が増えている。このことから、軽い酸素同位体を多 く含む北極海からの水蒸気の流入が増えたため、カナダ北 部での降水同位体比が軽くなったと考えられる。さらに、 チベット高原などの高度の高い場所においても過大であっ た降水酸素同位体比が改善されている。また、これらの降 水酸素同位体比が改善された地域では降水量についても観 測に近づいている。さらに、温度効果についても感度実験 では0.44 /‰と標準実験よりも観測に近い値を示した。



図-5 感度実験 と標準実験の年平均降水酸素同位体の差(‰) 大きい値はGNIPの観測値と標準実験の年平均降水酸素同位体の差(‰)である

5.まとめと今後

本研究により、CCSR/NIES水同位体循環モデルが年均 降水酸素同位体や温度効果を大まかに再現することが 示された。しかし、乾燥域や寒冷域では降水酸素同位 体比は過大であり、温度効果も過小評価であった。そ こで、同位体パラメタリゼーションと水平解像度に関 する感度実験を行った。これらの感度実験の経過から 乾燥域での過大な降水酸素同位体比はeffective relative humidityの概念を導入することが重要であり、 寒冷域での過大な降水酸素同位体比と温度効果は水平 解像度を高解像度化することが重要であることが示さ れた。そして、既存のCCSR/NIES水同位体循環モデルに effective relative humidityの概念を導入し、水平解 像度を高解像度化することにより、高精度な降水酸素 同位体比と温度効果を再現することができ、CCSR/NIES 水同位体循環モデルが広域水循環研究において有用な ツールであることが示された。さらに、水平解像度を 高解像度化した際、降水量だけでなく降水同位体につ いても改善されたことを考えると、観測された降水同 位体を用いて、大気モデルの水循環に関するなんらか の検証が可能であることも考えられる。また、他のモ デルの研究によると、氷晶形成時における過飽和度の パラメタリゼーションが寒冷域で降水同位体に対し感 度が大きいと報告されていたが、本モデルにおいては、 過飽和度のパラメタリゼーションには大きな感度は見 られなかった。

今後は水循環の改善のため、鉛直解像度についても 高解像度化する必要がある。さらには、空間解像度を 高解像度化して得られた高精度な水循環場で、改めて 同位体パラメタリゼーションに関する感度実験を行い、 降水同位体への感度を調べる必要もある。また、ユー ラシア大陸の内陸部など降水に陸上起源の水が多いと 考えられる地域では降水同位体の再現が悪い。これは、 現在のモデルでは陸面の取り扱いが同位体のみならず、 通常の水に関しても非常に簡素化されているためであ ると考えられる。今後、高精度な陸面モデルを用いる ことで、これらの地域でより高精度な降水酸素同位体 比の再現が期待される。

謝辞:本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業「人間活動を考慮した世界水循環水資源モデル」(代表:沖大幹)の成果の一部です.また内閣府科学技術振興調整費、環境省地球環境研究総合推進費、からも援助を受けています。また、第一筆者は日本学術振興会21世紀COEプログラムからも援助を受けています。有益な意見を下さった三名の査読者の方に感謝致します。数値計算は東京大学気候システムセンターを利用させて頂きました。

参考文献

- Joussaume, S., R. Sadourny, and J.Jouzel, A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere, *Nature*, 311,24-29,1984.
- Jouzel, J., GL.Russell, R.F.Koster, J.W.C.WHITE, and W.S. Broecker, 1987: Simulation of the HDO and H₂¹⁸O atmospheric cycles using the NASA GISS general circulation model: The seasonal cycle for present-day conditions. *J.Geophys.Res.* 92,14749-14760
- Hoffman, G,M.Werner, and M. Heimann, Water isotope module of the ECHAM atmospheric general circulation model: A study of timescales from days to years, *J.Geophys.Res.*,103, ,16,871-16,894,1998
- Reanud Mathieu, David Pollard, Julia E. Cole, James W. C. White, Robert S. Webb, and Starley L. Thompson :Simulation of stable water isotope variations by the GENESIS GCM for modern conditions, *J.Geophys.Res.*,107,2002
- 5) David Noone and I. Simmonds, Associated between δ^{18} O of water and climate parameters in a simulation of atmospheric circulation for 1979-1995,*J.Climate*,volume15,3150-3169,2002
- 6) Numaguti,A.,M.Takahashi, T.Nakajima, and A.Sumi, Description of CCSR/NIES Atmospheric General Circulation Model. *In Climate System Dynamics and Modeling*, edited by T. Matsuno, Cent. for clim. Sys. Res. ,Univ of Tokyo,Tokyo,Japan,1995
- Stewart, M. K., Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling water drops: Applications to atmospheric processes and evaporation of lakes, *J.Geophys.Res.*,80(9),1133-1146,1975.
- Majoube,1970: Fractionation factor of ¹⁸O between water vapor and ice.*Nature*,299,1242.
- 9) Majoube,1971: Fractionnement en oxygene 18 et en deuterium entre l'eau et sa vapeur.*J.chim.Phys.*,10,1423-1436.
- Merlivat and Nief,1967 Fractionnement isotopique lors des Changementsd'etat solide-vapeur et liquide-vapeur de l'eau a des temperatures inferieures a 0 . *Tellus*,19,122-127.
- 11) 栗田直幸,1998:冬期モンスーンによってもたらされる 大気起源水蒸気量の見積もり.北海道大学大学院地球環 境研究科 修士論文
- Cais, P., and J.Jouzel, 1994: Deuterium and oxygen 18 in precipitation: Isotopic model, including mixed cloud processes. *J.Geophys.Res.*, 99, 16793-16083
- 13) Jouzel, J., R.D.Koster, R.J.Suozzo, GL.Russel, J.W.WHITE, and W.S.Broecker, 1991:Simulation of the HDO and H₂¹⁸O atmospheric cycles using the NASA GISS general circulation model :Sensitivity experiments for present day conditions. *J.Geophys.Res.*,96,7495-7507

(2005.9.30受付)