

論文の内容の要旨

論文題目 水同位体大気陸面結合モデルの開発
及び同位体気候プロキシデータによる
検証

(Development of stable water isotope
incorporated atmosphere-land coupled model
and comparison with climate proxies)

氏名 岡崎 淳史

過去の気候変動に関する知見は、気候システムを理解し、将来を予測するうえで重要である。測器観測が無い時代の気候を直接知ることはできないが、気候の代替指標（プロキシ）を用いた復元により過去の気候変動がおおまかに明らかになりつつある。プロキシから復元される情報は基本的にはプロキシが得られる場所におけるあるひとつの変数についてであるが、プロキシが得られない場所・あるいはプロキシと関係性が得られない変数についての尤もらしい情報を得るために、最近では古気候研究においても観測とシミュレーションを融合するデータ同化が利用され始めている。これまでの古気候データ同化はプロキシから復元された気温を同化してきたが、復元気温には大きな不確実性が含まれるため、プロキシを直接同化することが望まれている。一方、プロキシを同化するためには、プロキシのフォワードモデル（以下プロキシモデル）が必要である。代表的なプロキシである水の同位体比（ δD , $\delta^{18}O$ ；以下同位体）について、既にいくつかのプロキシモデルが提案されているが、これらの検証は十分に行われていない。これはプロキシモデルを走らせるのに必要な同位体の長期観測データが存在しないためであった。以上のような背景を鑑み、本研究ではプロキシデータ同化の基礎を築くことを目的とし、以下の研究を行った。まず第二章では同位体の振る舞いを最新の大循環モデル（GCM）に導入し、信頼性の高い同位

体データを作成した。第三章では、このデータを用いてプロキシモデルの検証を行った。第四章では降水同位体情報を用いたデータ同化の実現可能性について検討を行った。第五章では、開発・検証を行ったモデル群およびデータ同化技術を用いてプロキシデータ同化の実現可能性について検討を行った。以下に各章の詳細を記す。

第二章では、同位体大気陸面結合 GCM の開発を行った。同位体を導入したモデルは MIROC5 である。本モデルは IPCC にも用いられている GCM であり、その信頼性は高い。同位体はパッシブなトレーサーであり他変数には影響を与えないため、ここでは同位体の再現性についてのみ記述する。再解析データを用いてナッジングをした実験から得られた降水同位体比、水蒸気同位体比、土壌水同位体比について観測と比較し、検証を行った。降水同位体比、水蒸気同位体比の年平均値の空間分布については、気温や降水量と同程度の再現性が得られた。しかし年々変動の再現性を気温や降水量の再現性と比較すると、降水同位体比の再現性は劣ることが分かった。一方で、降水同位体比年々変動の再現性を既往の同位体 GCM と比較すると、本モデルは最高の成績を示し、この傾向は低緯度において顕著であった。これは同地域における降水量の再現性が優れているためであると考えられる。土壌水同位体比についても、地表付近では観測と合致する季節変化を再現することができた。一方で、深い点の土壌水同位体比の季節変化は再現されず、土壌中の水の移動が適切に再現されていない可能性が示唆された。土壌水同位体比の観測例は少ないため、本研究では二点のみでしか比較を行うことができなかったが、土壌中の水の移動は、河川流量等を再現するうえで非常に重要であるため、今後より精力的な検証により、モデルを鍛える必要があるだろう。

第三章では、上記の同位体 GCM の出力を用いてプロキシモデルの検証を行った。同位体 GCM シミュレーションは二十世紀再解析を用いてナッジングを行うことで、入力値の不確か性の低減に努めている。検証には再解析の信頼性が比較的高い過去五十年の出力を用いた。対象としたプロキシはアイスコア、サンゴ、樹木セルロースの同位体比であり、サンゴおよび樹木セルロース同位体比については、同位体 GCM の出力を入力値としたプロキシモデルのシミュレーション結果と比較し、アイスコア同位体比については同位体 GCM の出力である降水同位体比と直接比較した。この結果、およそ七割程度のサンゴおよび樹木セルロースのサンプルについて同位体比の年々変動を再現することができた。これは降水同位体比と同程度の再現性であり、プロキシモデルが十分にロバストであることを確認できた。一方アイスコアについては再現性が確認できたのは二割程度であった。これはアイスコアが採掘された地点における入力値、すなわち同位体 GCM の再現性が低いためであった。このことは極域における循環場の再現性が二十世紀再解析より優れる NCEP 再解析を用いたナッジング実験を使用することで同地域におけるアイスコアの再現性が向上したことからも確認できた。加えて積雪量が少ない地点で採取されたアイスコアの再現性が低い傾向も確認され、既往研究で指摘されているように、積雪量が少ない地点で採取されたアイスコア同位体比は堆積過程における影響を受けていることも示唆された。今後はプロキシ

シ採取地点における同位体の長期観測を行う事でこれらの影響を切り分けて評価することと、堆積過程を包括的に表現する堆積モデルを開発することが求められる。

第四章では、プロキシデータ同化の実現可能性を検討した。同位体情報を古気候データ同化に用いた研究は過去に例を見ないため、まずは実装および結果の解釈が容易な降水同位体比を同化する場合について、理想化実験の枠組みで評価した。プロキシの時間解像度を考慮して、降水同位体比の年平均値を同化した。ここで、降水同位体比は全 GNIP 観測点で欠損なく観測情報が入手可能であることを仮定した（全 349 点）。用いたデータ同化アルゴリズムはアンサンブルカルマンフィルタを基礎としたものであるが、同化する変数の時間解像度がモデルの予測可能時間よりもはるかに長いことから、データ同化の結果をシミュレーションにフィードバックしない「オフラインデータ同化」と呼ばれる考え方を採用しており、これに合わせて変更が加えられている。降水同位体比を同化することにより、対象としたすべての変数（降水同位体比、気温、降水量、海面気圧）について、ほぼ全球で第一推定値より解析値が真値に近づくことが確認された。降水同位体比以外の変数については低緯度において特に高い再現性が確認された。これは降水同位体比が ENSO のシグナルを強く反映しているためであることが主成分分析から明らかになった。全球を対象とした主成分分析から確認できた降水同位体比の主たるモードは ENSO および北半球環状モードだけであったが、同位体データ同化の結果では、これらに以外にも、南半球環状モードや太平洋・北米パターン、アジアモンスーン降水量、西アフリカモンスーン降水量等の主たる気候指標の年々変動を精度よく再現した。これは降水同位体比が、広域の気温や降水量に影響を受けていて、豊富な情報を保持していることを示している。実際、復元気温を同化した場合に比べて、より多くの現象・変数を精度よく再現できることが確認できた。

第五章では、第二章および第三章で開発および検証を行ったモデル群と第四章で用いたデータ同化手法を用いて、プロキシデータ同化を行った。ここでは同化する変数は降水同位体比ではなく、プロキシ同位体比である。まず前章と同様に、理想化実験を行った。この結果、降水同位体比を同化した場合とほぼ変わらないスキルを得ることができた。さらに、これらの結果がどの程度ロバストなものであるか、実際のプロキシデータ同化の条件に近づけていったときに再現性がどの程度変化するかを調査した。実際の条件とは、観測 SST が存在せず、プロキシデータのみが入手可能であるような状況である。まず観測 SST が存在しないという条件を考慮し、シミュレーションはモデル SST を用いた実験から作成した。観測値はこれまでと同様に観測 SST を用いた実験から作成している。モデル SST には大気海洋結合版 MIROC5 のヒストリカル実験を用いた。この実験による再現精度については、これまでの実験と比べて大きな変化は見られなかった。これはモデル SST の ENSO の空間パターンが現実とよく似ていることによる。続く実験では、モデル SST を用いた実験から作成したシミュレーションと実際のプロキシデータの融合を行った。この実験設定は、実際のプロキシデータ同化そのものである。この結果、同化スキルは、全体的に低下

したものの、その低下幅は、モデル SST を使用したことと、プロキシデータには欠損があることで説明できる程度であり、129 地点のデータを同化するだけで 30%以上の面積における気温を有意に再現することができた。とくに ENSO の再現性は、相関係数 0.6 ($p < 0.01$) 以上を保っており、プロキシデータ同化を用いた ENSO の再現性には大きな期待が持てる。さらに、プロキシデータ同化により再現される空間パターンは、プロキシの空間分布によって大きく変化することが分かっているが、これらの結果から、今後プロキシ情報が拡充されていくことにより、プロキシデータ同化の精度はさらに向上していくことが期待される。

第六章には全体のまとめを示した。