

課題名	RF-083 水安定同位体トレーサーを用いた気候モデルにおける水循環過程の再現性評価手法の開発		
課題代表者名	栗田 直幸（独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境変動領域）		
研究期間	平成20-21年度	合計予算額	14,360千円（うち21年度 7,080千円） ※予算額は、間接経費を含む。
研究体制	水安定同位体トレーサーを用いた気候モデルにおける水循環過程の再現性評価手法の開発（独立行政法人海洋研究開発機構）		
研究概要	<p>1. 序（研究背景等）</p> <p>最新の『気候変動に関する政府間パネル』第4次報告書(IPCC-AR4)には、気候変動に伴う降水量変動の予測に関する記述が盛り込まれ、日本を含む東アジアでは、降水量が増加すると予測されている。しかしながら、最新の気候モデルが、現在の降水量分布を正確に再現できていないという事実を鑑みると、この予測は大きな不確定性を含んでいると考えられ、気候モデルのさらなる高精度化が現在行われている。気候モデルの高精度化に対する取り組みとしては、モデルの高解像度化や、より正確なモデルスキーム開発などが中心であるが、降水量の再現性を向上させる為の最も直接的な手法としては、各地域の降水プロセスを支配する『水循環過程』を特定し、その気候モデル再現性評価を行うことである。これは気候モデルが、降水の水蒸気起源や輸送経路を正しく表現できているか評価・検証を行うことを意図するが、既存の気象データ解析結果から結論づけるのは難しく、水の起源や輸送途中の循環変化を記録する水の安定同位体比トレーサーを導入するなど、新たな手法が必要である。</p> <p>水の安定同位体比トレーサーの水循環研究への応用は以前から指摘されていたが、1) 全球データセットとしては、月単位の降水同位体データしか存在せず、気象解析を行うには不十分であった。2) 自分でデータを得るには、質量分析装置を用いた『同位体分析』が必要であり、専門的な知識が必要であった。という欠点から、潜在的な可能性が知られるにとどまっていた。しかし、近年の分光技術の進歩により、衛星やレーザー分光装置を使った全球水蒸気同位体観測が可能になり、気象現象を分解できる時空間データが得られつつある。このように、利用を躊躇させてきた問題点が克服されたことで、これまでの気候スケールではなく、より細かいスケールで、気候モデルの水循環診断を行えるようになってきた。国際的にも、古気候モデルの相互比較実験(PMIP)に同位体データの提出を含める動きが出るなど、気候モデルの性能評価への応用を期待する声が高まっており、現在、同位体トレーサーを使った気候モデル診断研究を行うことは、世界的にもインパクトを出せる成果となりうる。現在は、同位体トレーサーを使った気候モデル診断研究を行う、まさに千載一遇のタイミングであり、それを逃さぬよう本研究を実施することとした。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究では、気候モデルが、各地の降水を形成する水蒸気起源や輸送経路を正しく表現できているか、水の安定同位体比トレーサーを導入して評価・検証を行い、現在の気候モデルが抱える問題点を明示し、さらなる気候モデルの高精度化に貢献することを目指す。気候モデルは、『力学過程』と『物理過程』から成り立つが、今回用いる同位体トレーサーは、気候モデルの物理過程によってその存在比が変化する為、物理過程の不確実性評価に焦点をあてる。さらに、気候モデルによる将来予測の向上に大きく寄与することを目指し、現在の気候モデルで大きな問題となっている熱帯域での対流活動、北半球の冬期の気候に大きな影響を与える北極振動に注目して解析を行い、その低い再現性となっている原因因子の特定を行う。</p> <p>また、本研究では、同位体トレーサーを使った気候モデル診断を実施するだけでなく、同位体トレーサーが他の研究分野においても普遍的なトレーサーとして利用されるよう、1) 既存の広域同位体データセットの構築、2) レーザー分光法を用いた現場同位体分析技術の確立研究にも取り組み、同位体気象学が興るきっかけとなることを目指す。</p>		

### 3. 研究の方法

水安定同位体トレーサーを用いた気候モデルにおける水循環過程の再現性評価手法の開発

本研究課題では、安定同位体トレーサーを用いた、全球モデルにおける水蒸気起源および輸送過程（水循環過程）の評価・検証を実施するために、1）～4）の研究を実施し、将来の同位体トレーサー利用の促進を目指して、5）の研究を実施した。

#### 1) 同位体データ収集

同位体気候モデルの再現性検証をグローバルで実施するのに必要な、グローバル同位体データセットの収集を行う。本研究では、既存の月単位降水データGNIP(Global Network of Isotopes in Precipitation)以外に、以下のデータの取得し、気候モデル結果との比較に用いた。

- a) NASAのAURA衛星に搭載されたTESセンサーで計測した、全球HDO分布(2004年-2008年)
- b) アジア域における降水同位体モニタリング観測(日単位で降水試料を採取)
- c) 海洋上水蒸気同位体比モニタリング観測(12-24時間間隔で、航路上の水蒸気を採取)

#### 2) 同位体情報の水循環情報への翻訳

採取した同位体データを気象データと比較し、同位体比変動を支配している水循環因子の同定を行い、各地域の同位体比データを水循環情報に翻訳する。

#### 3) 同位体気候モデル相互比較実験

同位体気候モデルの相互比較プロジェクトである(SWING-2: Stable Water Isotope iNtercomparison Group)に参加し、他の同位体気候モデル実験結果との比較を行い、課題代表者が開発した同位体気候モデルの性能評価を行うとともに、他のモデルで用いられている同位体スキーム・パラメーターの共通化を図り、同位体スキームに依存するモデル間の差異を小さくする。その後、モデル比較を再度行い、モデルの気候再現性に依存して、同位体比分布がどの程度異なるか評価する。

#### 4) 水循環場の再現性評価

客観解析データから得られた水平風を同化(メカニカルナッジング)した現在気候の再現実験結果を、観測から得られたグローバル同位体データと比較し、その再現性の検証を行う。モデルは、AR4に用いられたMIROC3.2を用い、解像度は、T106L40とT42L20を用いる。特に、気候モデルが苦手とする熱帯域と、北半球高緯度を対象地域とし、両地域における気候モデルの問題点を明らかにする。

#### 5) 現場水蒸気同位体『計測』手法の確立

最近市販化された、米国LGR社製の水蒸気同位体レーザー分光装置を使った、環境計測手法の検討を行い、現場で水蒸気同位体比データをリアルタイムで計測するための観測手法を確立する。

### 4. 結果及び考察

#### (1) 熱帯域における気候モデルの水循環再現性検証

まず、同位体トレーサーを使った気候モデル診断を行うことの有意性を調べるために、NASAのAURA衛星に搭載されたTES(対流圏放射分光計)から得られた、対流圏中層(850hPa-500hPa平均)のHDO(重水素水)の年平均分布図と、気候モデルの再現実験結果(表層海水温度と海氷分布は観測値を用い、客観解析データの水平風を同化する)を図1に示す。

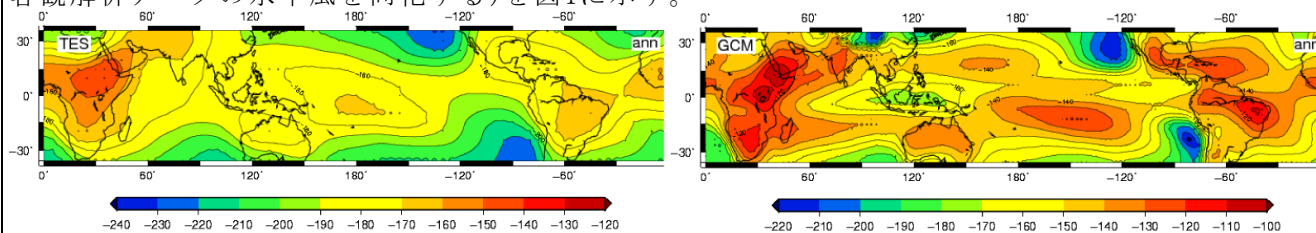


図1 衛星データと気候モデルからえられる、大気中層における年平均HDO分布図

図をみると、HDO分布のコントラストは、気候モデル結果のほうが明瞭であるという違いが目立つ

が、アフリカ大陸での極大値、北米・南米の太平洋沿岸にみられる低い同位体比など、全体的な分布はよく再現されている。しかし、両者の違いとして、気候モデルでは、(a)海大陸域で極小ピークがみられる。(b)Double-ITCZが問題になる東太平洋で極大ピークがみられる。といった、物理過程（積雲パラメタリゼーション等）の不完全性に基づく不確実性が高い地域で、観測値との大きな違いがみられる。この結果は、同位体トレーサーは、気候モデルの物理課邸の不確実性に敏感に反応しているとともに、この地域の同位体比分布を支配する因子が、気候モデルの物理課邸の不確実性の原因となっていることを示唆している。つまり、気候モデルの問題点を理解するのに同位体トレーサーは非常に有用であることを示している。

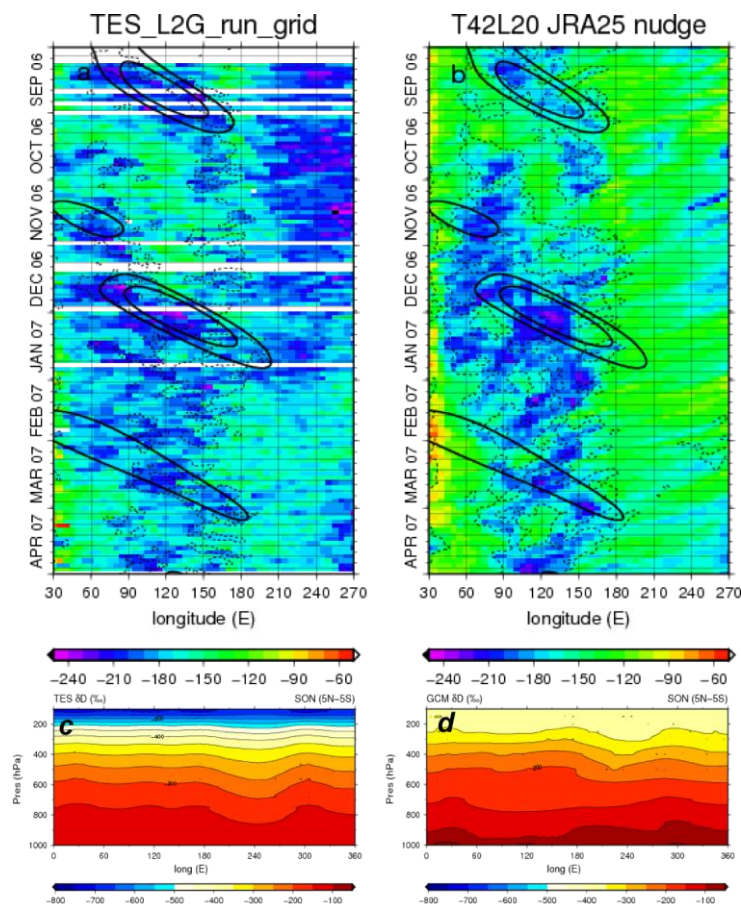


図2上段：HDO時空間変化。コンターは、MJ0と同定された対流活動が観測された時期を表す。破線は、 $OLR < 240 W/m^2$ の地域を示す(左側が衛星データ、右側がモデル結果)。下段：HDOの鉛直経度断面図(SON)

候モデルの再現実験結果を示す。図を見ると、気候モデルの結果には、東西循環の下降流に伴うHDOピークがみられない。この原因を調べるために、右下の図2dに示す鉛直経度断面図を見ると、上層には下降流に伴う同位体比ピークがみられるが、中層以下では、下降流の影響がみられない。これは、1)境界層直上のエントレイメントを過小評価しており、実際よりも積雲が立ちやすくなっていることと、2)境界層を介した水蒸気輸送が、過剰に見積もられている、という2つの原因によるものであると考えられる。

また、対流活動に伴う同位体比変化を調べると、MJ0の対流活発中心から低い同位体比をもった領域が西側に動いていく傾向がモデルでもよく再現できている。しかしモデル結果は、活発な対流域を伴いながら、低い同位体比分布が西に移動していくのに対して、衛星観測では、層状性の雲によって運ばれている。このことは、対流活発期に気候モデルは、現実よりも対流が起きやすい状態になっていることを示しており、実際よりも対流活動が組織化し、補償下降流を過大評価していることが原因であると考えられる(図2d)。この結果は、現在の積雲のパラメタリゼーション決定には問題があることを示唆しており、同位体トレーサーを使うことにより、現実に近い、鉛直循環を反映する積雲パラメタリゼーション決定が可能であることを示している。これは、不確実性が高い熱帯域における気候モデルの信頼性を向上することに非常に役立つ情報である。

次にこの熱帯域における同位体分布を作り出している水循環因子について考察を行った。図2aに、2006年9月から2007年4月までの赤道域(5N-5S)におけるHDO分布の時間変化を示す。この図から、熱帯域では、これまで知られていない顕著なHDOの時間変化があることがわかり、その特徴として、(a)東西流の下降流域で、上層からの低いHDOをもった水蒸気が移流してくる為に、対流圏中層の同位体比は極小値を取る(図2c参照)。(b)インド洋から西太平洋域では、MJ0と呼ばれるマッデン・ジュリアン振動(図のコンター線)に伴う対流活動が活発な時期にHDOの極小値がみられる。ということが明らかになった。この結果は、熱帯域では、組織化した対流活動や大規模な大気鉛直輸送に依存して同位体比が変化することを示している。対流活動に伴う鉛直循環としては、組織化した大規模積雲群が発生すると、それにとまなう補償下降流が発生し、この下降流が中・上層の低い同位体比をもった水蒸気を下層に輸送するために極小値をもつことが、本研究の成果として明らかになった。

次に、この時空間分布のモデル再現性を調べる。図2bには、同じ期間における、気



(2) 北半球寒冷域における気候モデルの水循環再現性検証

現在の衛星観測からは、北緯60度以北のデータを得ることはできない。よって、北半球高緯度の解析には、シベリア域で行われている日単位の降水同位体比データを用いた。まず、熱帯域と同様に、同位体比の時空間分布特徴を調べると、北半球の高緯度大陸域において観測された同位体比は、夏期に極大、冬期に極小を示す顕著な季節変化を伴いながら、降水イベント毎に大きく変化していた。さらにこの季節変化は、気温よりも、陸起源水蒸気の寄与率とよい相関があることが明らかになった。また、季節変化を取り除いた日単位データをフィルター処理し、その後、スペクトル解析を行うと10-15日周期をもっていることが明らかになり、これは、寒気移流を伴う発達した低気圧活動とよい相関があることがわかった。これは、擾乱の前面では、南からの暖気移流によって、相対的に高い同位体比をもった水蒸気が観測値に移流し、通過後には、寒気に伴う同位体比の低い水蒸気が高緯度から運ばれてくることを反映していると考えられる。夏期は、大陸全体が加熱され、陸起源水蒸気が大陸全体に降水をもた

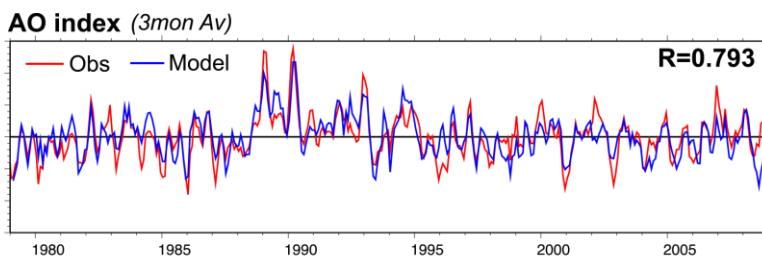


図3 AO indexの時系列変化

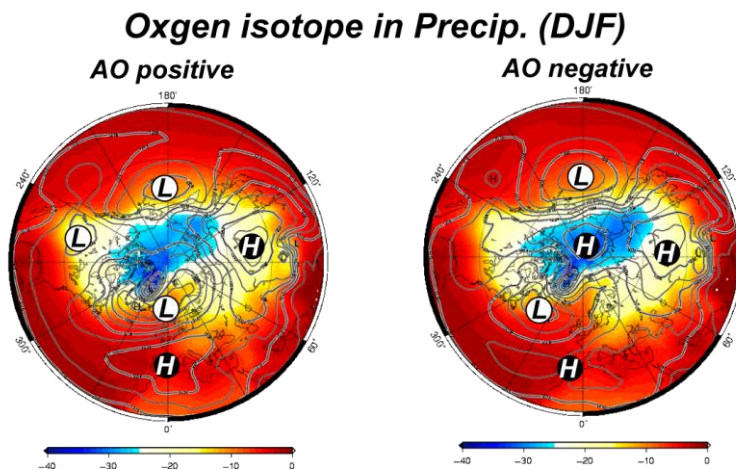


図4 AO 正偏差と負偏差の時の酸素同位体比分布

らす主要な起源になるために、擾乱通過に伴う同位体比の変動は小さいが、それ以外の時期には、非常に大きな同位体比変化を伴う。観測データの解析結果をまとめると、高緯度域における同位体比の変化は、3000-5000kmの水平スケール（総観規模）の大気循環に伴う水蒸気起源の変化を反映しており、北極振動のような気候変化に応じた同位体応答があることが明らかになった。そこで、気候モデルの再現実験結果を使って、北極振動に伴う水循環応答が現実を再現できているか解析を行った。

図3に示すように、今回の再現実験では、北極振動の構造、およびその北極振動指数の変化を非常によく再現できていた。そこで、まず北極振動の正偏差（北極振動指数+2以上）と負偏差（-2以下）の時の $H_2^{18}O$ コンジット（冬期）を作成し（図4）、北極振動に伴う同位体比応答に関して解析を行った。図4を見ると、高緯度に向かうにつれて同位体比が減少する同位体比の南北分布が卓越し、北極振動による同位体比の変化が小さく見える。しかし、平均場からの偏差でみると、正偏差と負偏差の年で有為な差異があり、1978年から

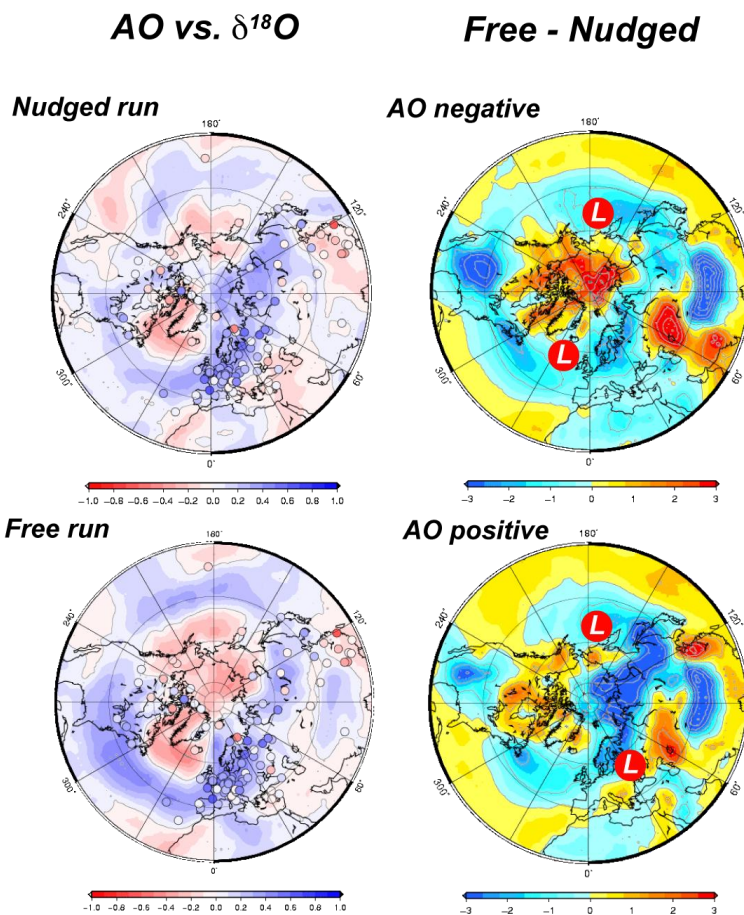


図5左：北極振動指数と酸素同位体アノマリ相関．右：気象データを同化した場合と、同化しない時の酸素同位体比の差

2008年までの同位体偏差と北極振動指数の相関を調べると、顕著な空間パターンがみられる（図5左上）。また、この相関分布は、北半球で観測が行われた降水の同位体データから得られる傾向とよく一致している（図中の

丸印）。この分布の解釈としては、ユーラシア域では、西から移流してくる低気圧が、高い同位体比をもった水蒸気を大陸内部に運び、この東進する低気圧活動が弱まる北極振動負偏差の時には、同位体比偏差も負偏差になるので、北極振動と正相関をもつと考えられる。日本周辺でも、北極振動負偏差の時には北型の気圧配置になりやすく、シベリアから同位体比が低い水蒸気が流入するために有為な正相関をもつ。このように、同位体トレーサーは、北極振動に伴う水蒸気起源・輸送経路の変化を示している。

上述した特徴は、気候モデルが北極振動に伴う水循環応答を正しく再現できるか検証する材料になり得ることを示している。そこで、データ同化を行わない実験(Free run)を行い、データ同化した場合との違いを調べることで、気候モデルの再現性に関して検証を行った。データ同化をおこなわない場合は、北極振動指数の十年スケールでの変動は再現できないが、EOF第一モードの地上気圧にみられる北極振動の構造は、観測値とよく一致していた。そこで、モデル北極振動指数を計算し、そのスコアと、同じく同位体偏差の相関を調べたところ、同化モデル結果と似たような空間パターンがみられた。これは、使用したMIROC3.2は、北半球の冬期の総観場の変化、それに伴う水循環を全体的によく再現できていることを示している。そこでもう一步踏み込み、北極振動の正負偏差の時の同位体分布の再現性を調べてみた。北極振動指数が正負偏差時のそれぞれに関して、データ同化ありと同化なし実験の差を調べると（図5右側）顕著な同位体比の差がみられた。例えば、北極振動が負偏差を持つときには、同化なし実験(Free run)結果は、北極海において、同化あり実験よりも同位体比が高い値を示しており、これは、実際よりも暖気移流によって高い同位体比が流入しやすい傾向を示唆している。一方、正偏差時には、シベリアから日本にかけて実際よりも低い同位体比を示している。これは、寒気移流が実際よりも強く、気候モデル結果は、北日本では、実際よりも寒冷傾向になりやすいことを示唆しており、将来予測結果においてもその点は加味すべきであると考えられる。

このように、同位体比の変化は、中・高緯度域の大気循環場に伴う水蒸気起源・輸送変化に敏感に応答しており、その検証材料として非常に有効である。従来は、全体的な総観規模スケールでの比較から、その空間パターンの類似性が注目されてきたが、降水量の予測を高精度化するには、大気循環に伴う水輸送パターンの再現性が重要である。近年のモデルの高精度化により、全球スケールでの気候値はモデルでよく再現できるようになってきた今こそ、次のステップとして、同位体トレーサーは、モデルのさらなる高精度化に非常に役立つと期待される。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

気候モデルの水循環場の再現性検証のツールとして、水の安定同位体利用の有効性を新しく提案した。特に、モデル物理過程の不完全性に基づく不確実性が高い熱帯地域において、その不確実性を高めている原因の探求が、同位体トレーサーを使って特定できることを示し、現在の気候モデルで問題になる、不確実性の高い積雲パラメタリゼーション決定において、同位体トレーサーを使った決定法が有効であることを示した。また、高緯度域では、同位体トレーサーは、南北水蒸気輸送のよい指標であり、北極振動等の気候変動に伴う水蒸気起源・輸送過程の再現性検証ツールとして用い得ることを示した。これは、このような知見は従来の観測結果からは得ることができず、水循環の履歴を保持する水安定同位体トレーサーを用いることの最大の利点である。これらは、気候モデルのさらなる高精度化に非常に大きな貢献をすると考えられる。

本研究では、気候モデルへ応用するために、水安定同位体を支配する水循環因子の同定を行うための詳細な解析を行い、これまでに知られていなかった新しい同位体トレーサーの解釈も提供している。高緯度域では、これまで同位体変化は、気温とよい相関があることから、古気温の指標として用いられてきたが、本研究の解析から、高緯度で、同位体トレーサーは、季節毎の水蒸気起源変化を反映して変動していることが明らかになった。熱帯域では、同位体トレーサーと降水量の間により相関があることから、降水量の指標として考えられてきたが、同位体比変動を支配しているのは、鉛直循環の活発度であり、活発な鉛直循環を引き起こす組織化した対流雲が発生する頻度が同位体比変化を支配していると考えられる。これらの知見は、同位体プロキシーを使った古気候復元研究に対して、新しい解釈を提供する。

## (2) 環境政策への貢献

本研究から得られる成果は、気候システムモデルの改善を通じて、温暖化予測の高精度化に貢献し、我が国の温暖化政策に資する。また、本課題を各地域に応用し、これをスコア化すれば、地域ごとに気候モデルの再現性診断を行うことが可能である。これは、直接的に予測精度を示すわけではないが、現在の気候モデルの信頼性を数値化でき、地球温暖化対策を立てる際に有益な提言となりうる。本課題は、2年間という限られた期間でしかなかったが、この課題研究を継続することで、温暖化政策に大きく貢献できる成果を出せると期待している。

## 6. 研究者略歴

課題代表者：栗田 直幸

1972年生まれ、東京工業大学総合理工学研究科卒業、理学博士、現在、海洋研究開発機構 地球環境変動領域 研究員

## 7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

### (1) 査読付き論文

- 1) Kurita, N., K. Ichiyanagi, J. Matsumoto, M. D. Yamanaka, and T. Ohata, J. Geochemical Exploration, 102, 113-112 (2009)  
“The relationship between the isotopic content of precipitation and the precipitation amount in tropical regions”

### (2) 査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）

特になし

## RF-083 水安定同位体トレーサーを用いた気候モデルにおける水循環過程の再現性評価手法の開発

独立行政法人海洋研究開発機構

地球環境変動領域 北半球寒冷圏研究プログラム 栗田直幸

〈研究協力機関〉 米国 Los Gatos Research 社 Douglas Bear  
 同上 Feng Dong  
 米国 コロラド大学 David Noone

平成20～21年度合計予算額 14,360千円  
 (うち、平成21年度予算額 7,080千円)

※予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 水の安定同位体トレーサーを用いた気候モデルの水循環診断研究を行う目的で、以下の4つの研究を実施した。(1)気象スケールの議論ができる全球規模の同位体観測データ収集および観測の実施、(2)同位体トレーサーの時空間変動を支配している因子を特定し、同位体情報を水循環情報への翻訳、(3)気候モデルに導入する同位体過程を他の気候モデルと共通化し、モデルの相互比較実験を実施することで、今回開発した同位体気候モデル結果の妥当性の検証、(4)現在気候の再現実験で得られた同位体分布を観測値と比較し、その時空間分布の再現性から、気候モデルが同位体を支配している水循環因子の再現性検証。これらの研究成果から、モデル物理過程の不完全性に基づく不確実性が高い熱帯地域において、その不確実性を高めている原因の探求が、同位体トレーサーを使って特定できることを示し、現在の気候モデルで問題になる、不確実性の高い積雲パラメタリゼーション決定において、同位体トレーサーを使った決定法が有効であることを示した。また、高緯度域では、同位体トレーサーは、南北水蒸気輸送のよい指標であり、北極振動等の気候変動に伴う水蒸気起源・輸送過程の再現性検証ツールとして用い得ることを示した。これらは、気候システムモデルの改善に非常に有効な知見であり、本課題を通じて温暖化予測の高精度化に貢献し、我が国の温暖化政策に資すると期待できる。

[キーワード] 水循環、同位体、気候モデル診断、海洋観測、気候モデル相互比較

### 1. はじめに

近年、気候モデルの性能は年々飛躍的に向上しているが、温暖化予測を高精度化するためには、気候モデルのさらなる改善がまだ必要である。近年の気候モデルの高精度化としては、モデルの高解像化や、気候モデルにエアロゾルの効果を導入するなど、より現実を再現できるよう複雑化が挙げられる。しかし、このよう改良が進んでも、全球の気候システムに大きな影響を与える熱帯域での降水量分布が未だに再現できない(Double-ITCZ等)、北極域では、北極振動における10年スケール変動が再現できない、そして、近年の海氷の減少など気候システムモデルで予測されるシナリオに当てはまらない事象が観測されている等の課題が残されたままである。これらの課題

を解決するための一つのアプローチとしては、この問題を引き起こしている気候システムや、それに伴う水循環（水蒸気起源や輸送過程）をモデルが正確に表現できるか検証することが考えられる。しかし、既存の大気中水蒸気の起源や輸送過程の推定は、タグトレーサーモデルや流跡線解析を用いて算出され、結果は使用するモデルに大きく依存性しているために不確実性が高い。気候モデルの検証には、観測可能な手段を用いるのが理想的であり、その一つの候補として、水の起源や輸送途中の循環変化を記録する水の安定同位体トレーサー（ $\text{HD0}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ）利用が考えられる。

水の安定同位体トレーサーは、メジャーな $\text{H}_2\text{O}$ に対する比として表記され（ $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ）、その比は、物性の違いから、蒸発、凝結といった相変化を伴う変化が起こった時にのみ変化し、大気輸送中にはその値が保存される。つまり、気候モデルが、観測される安定同位体比を正確に再現できないことは、水蒸気の起源、もしくは輸送途中におこる降水量等を正確に再現できていないことを示す。気候モデルにおいては、同位体トレーサーは、モデルの物理過程に大きく依存しており、その物理過程が正しく現実を表現できるように定式化されていなければその分布や時間変化は再現することができない。つまり、気候モデルの物理過程に基づく不確実性に大きい地域において、同位体トレーサーの再現性に影響を与えている原因を解明できれば、気候モデルの不確実性を引き起こしている因子を特定できることになる。

この、水の安定同位体比トレーサーの水循環研究への応用は以前から指摘されていたが、水の安定同位体データを取得するには、“現場で試料を採取し、実験室に持ち帰って分析する”という作業を行わねばならず、『同位体分析』を行うには専門の知識や技術が必要であるために、気象データと同じようにグローバルな高時間分解能データを得ることは困難であった。さらに、同位体分析や試料採取の簡便性から、これまでの同位体データは降水試料が中心であり、気温や比湿のような連続したデータはほとんど存在しない。唯一存在する全球データセットも、月単位の降水同位体データしか存在せず、日々の大気循環に伴う水蒸気輸送解析を行うには不十分であった。それゆえ、これまでの研究では、古気候復元のためのプロキシとして同位体トレーサーは利用されており、その気候学的なスケールでの解釈に用いられてきた。

しかし、近年行われた、GAME/GWEXプロジェクト等での同位体観測結果から、同位体トレーサーが気象・水文研究に有益な情報をもたらしてくれることが知られるようになり、同位体トレーサーを気象・水文学の分野に応用するために、日単位での試料採取等、気象データと比較可能な観測データが得られるようになってきた（海洋研究開発機構では、同位体トレーサーを用いた水循環研究を行う目的で、アジア域の22地点において、日単位の降水同位体データを採取している）。さらに、この1～2年の間に、衛星を使った同位体観測データも使えるようになり、現在では、大気下層では、SCIAMACHY、GOSAT、大気中層では、TES、高層大気では、MIPAS、ODINといった衛星によって、大気中水蒸気の $\text{HD0}$ 観測が行われるようになり、 $\text{CO}_2$ 等、他の温暖化ガスと同じレベルで、水の同位体データが得られるようになりつつある。また、近年、同位体計測に関して画期的な技術革新が起こり、過般可能なレーザー分光計を使って現場での水蒸気同位体連続観測も夢ではなくなってきた。このように、上空からの衛星観測に加えて、地上でも連続観測が可能になりつつあり、同位体トレーサーを気象・水文分野に幅広く応用する素地が整いつつある。

また、上記した同位体観測データの充実だけでなく、近年、同位体気候モデル開発も活発になってきている。ここ数年で、気候モデルに同位体スキームを組み込んだ同位体気候モデルの数が急速に増加し、2008年秋の段階で世界中で10を越える同位体気候モデルが報告されている。この



同位体気候モデルの急増を受けて、同位体気候相互比較実験（SWING-2: Stable Water Isotope iNtercomparison Group）も始まり、同位体気候モデル結果の妥当性（信頼性）の検証や、同位体の時空間分布の理解と再現性向上に関する国際協力も始まっている。

上記してきたように、現在は、同位体データの拡充、同位体気候モデルの増加といった、同位体トレーサーを気候変化研究に応用する環境がまさに整いつつある好機である。しかし、気候モデルの中では、複数の過程によってその同位体比が変化する為に、単純に、観測値と気候モデル値を比較することで、気候モデルの大気中の水蒸気起源、およびその輸送過程の再現性評価することはできない。そこで本課題では、以下の手順に従って、同位体トレーサーを使った気候モデルの性能評価を実施する。

- （１）気象現象を分解できる時空間分解能をもった同位体データセットを作成する（同位体データの取得）。
- （２）上記で収集した観測データを解析し、対象地域の同位体比変動を支配する水循環因子を解明する（水循環情報への翻訳）。
- （３）気候モデルにおける同位体分布再現性を向上させる。特に、同位体物理過程に依存する不確実性を軽減する（同位体気候モデルの開発）。
- （４）気候モデルにおいて不確実性が高い地域において、観測値の相互比較を行い、（２）で得られた知見を使って、気候モデルの不確実性を作り出している原因を明らかにする（水循環場の再現性評価）。
- （５）また、同位体トレーサー応用をさらに発展させて行くには、さらに同位体データを拡充していかなければならない。そこで、専門知識がなくても同位体データ取得ができるよう、新しい同位体分析手法の開発にも取り組む。

## 2. 研究目的

本研究課題では、気候モデルが、各地の降水を形成する水蒸気起源や輸送経路を正しく表現できているか、水の安定同位体比トレーサーを導入して評価・検証を行い、現在の気候モデルが抱える問題点を明示し、さらなる気候モデルの高精度化に貢献することを目的とする。具体的には、以下の5項目に取り組んだ。本研究課題は、単独で行ったためにサブテーマは存在しないが、説明の便宜上、本課題内で実施した研究テーマ毎に分離して成果の詳細を記す。

### （１）同位体データ収集

本課題では、気候モデルの評価のための洋上水蒸気同位体観測を実施し、降水の起源となる地域でのデータ取得を行うとともに、洋上における水蒸気同位体比の分布特徴を明らかにする。また、地上観測結果は、モデルが分解できないサブグリッドスケールで起こる現象も含まれ、さらに全球スケールのデータを得るのは容易ではない。そこで、本研究では衛星データの取得を行い、衛星データ解析を通じた全球スケールでの同位体比の時空間分布特徴も明らかにする。

### （２）同位体情報の水循環情報への翻訳

本課題では、同位体比変動や分布を支配する水循環因子を特定するために、様々なデータと比較、簡単な数値実験を用いた再現実験を行う。同位体とそれを支配する水循環因子の関係は、各

地域によって異なるが、本研究課題では、気候モデルの不確実性が高いと言われている熱帯洋上域と極域を対象地域として解析を行い、両地域の同位体比変動を支配している水循環過程を明らかにする。特に、熱帯域に関しては、『マッテンジュリアン振動として知られる対流雲群が下層の水蒸気同位体に与える影響』を引き起こす因子を特定し、その謎を解明する。

### (3) 同位体気候モデルの相互比較実験

同位体気候モデル結果の詳細な解析を行い、1) 全球のモデル同位体比の時空間分布を支配する因子の特定を行うと共に、モデルの相互比較実験結果を使って、2) 同位体気候モデルでの再現性が大きく異なる地域を明らかにする。詳細なモデル結果の比較は、後述する『水循環場の再現性評価』で行い、ここでは、今回用いる同位体気候モデルのパフォーマンスを検証することを目的とする。

### (4) 水循環場の再現性評価

本課題では、安定同位体トレーサーを用いて、気候モデルが、現実のシステムをどの程度正確に再現できるか検証を行う。熱帯域では、同位体トレーサーは大気鉛直輸送の指標として用いることができるので、気候モデルが現実の大気鉛直輸送を再現できているのか、対流活動域と非対流活動域の2つに分けて考える。また、極域では、擾乱活動に伴う南北水蒸気輸送で同位体比が変化することから、高緯度での低気圧活動と密接に関わる、北極振動に焦点を当てて解析を行う。

### (5) 現場水蒸気同位体『計測』手法の確立

本課題では、最近市販化されたレーザー水蒸気同位体分光計を用いて、その計測特性を調べ、現場で水蒸気同位体比を連続計測する為の計測システムの構築を目指す。特に、長期ドリフト効果、水蒸気濃度変化に応じた同位体感度を室内実験から検証し、最適なキャリブレーション方法を開発する。

## 3. 研究方法

### (1) 同位体データ収集

今回、洋上での水蒸気同位体データを取得するために、海洋研究開発機構が所有する、海洋地球観測船「みらい」に水蒸気捕集装置を設置し、その航路にそって試料採取を行う。装置は、清浄空気が採取できる海面高度20mの場所に空気取り込み口を設置し、試料空気を流速2-5L/minの速度で吸引してこれを-100℃に冷却された、捕集管に導入して氷の形で採取する。採取した試料は、液体に融かした後、試料瓶に詰め替えて実験室に持ち帰り同位体分析を行った。また、今回の研究には、低温域でも水蒸気を100%捕集できるよう特別に設計したのを用い、予備実験にて捕集効率の確認を行っている。観測は、2008年5月から開始し、現在も継続して行っている。また、これ以外にも、海洋研究開発機構で行っているアジア域（インドネシアからシベリア域）における降水同位体データをつかって、アジア域における、日単位同位体データセットの作成を行った。

衛星データに関しては、NASAのAURA衛星に搭載されているTES（対流圏放射分光計）から得られたHDO（重水素水）、 $\text{H}_2\text{O}$ データから計算した同位体比を用いる。この衛星は、大気鉛直プロファ

イルデータを計測することができ、大気中層（850-500hPa）に特に高い吸収感度を有している。今回は、TESデータのVersion4を用い、Worden et al., (2006)およびWorden et. al., (2007)に従って加工し、5度×5度のグリッド化したデータを用いる。空間分布の計算には、Averging Kernelによって加重平均した850-500hPaの平均値を使う。前述したように、他の衛星のデータも存在するが、後方散乱光の吸収を計測する(SCIAMACHY、GOSAT)では、晴天域しか計測が行えず、観測頻度が少なく、広域での時系列変化に不向きであるので、今回の研究には使用しない。

## (2) 同位体情報の水循環情報への翻訳

赤道付近の洋上データにみられた同位体極小ピークは、インド洋と西太平洋の2回観測されており、そのうちのインド洋での観測は、MISMO (Mirai Indian ocean cruise for the Study MJ0-convection Onset)と呼ばれる、大気から海洋までの集中観測期間中(2006年10月中旬~12月上旬)であり、様々な気象データが取得されている。その中でも2006年11月の1ヶ月間は、R/V Mirai(0N、80.5E)以外に、モルジブのガン島(0.7S、73.2E)、フルレ島(4.2N、73.5N)でもラジオゾンデを放球し、大気の水蒸気解析データを取得している。本研究では、このMISMO期間に観測されたデータを、1次元モデルを使って再現することで、対流活動とその同位体応答を明らかにする。

極域に関しては、衛星データを使うことができないので、海洋研究開発機構が行っている、シベリア域における日単位の降水同位体データ(2004年10月~)を用いる。高緯度域では、気温と正相関をもつ明瞭な季節変化があることがよく知られおり、その同位体比変化は、気温とリサイクリング率(陸面起源水が降水を形成する割合)の2変数で主に説明されると指摘されている(Kurita et al., 2004)。しかし、流跡線解析を応用したリサイクリング率の推定には問題もあり、より正確な水蒸気起源水推定法を用い再検討する必要がある。本研究課題では、客観解析データだけを使って、水蒸気起源水を計算する、新しいモデルを開発し、その結果を使って同位体比の季節変化と水蒸気起源の関係性を再検証する。そして、季節変化よりも短い、総観規模スケールでの大気循環に伴う同位体比の変動についてはまだ未解明なことが多いので、従来の季節変化以外に、総観規模スケールでの変動にも注目して解析を行う。

## (3) 同位体気候モデルの相互比較実験

本課題には、IPCC AR4に用いられた、気候モデル MIROC3.2を用い、モデルの水平解像度はT42鉛直20層版を基本とする。今回、MIROC3.2の物理過程に同位体スキームを組み込み、観測から得られた空間分布は、正しく再現できることを確認している(図(3)-1参照)。さらに本研究では、同位体トレーサー分布を支配する因子を特定する目的で、水循環診断トレーサーを用いる。水診断トレーサーとしては、地表面から蒸発後、輸送中に経験する積算降水量を指標化したRain-Out Index (ROI)を用いる。同位体気候モデルの相互比較実験に参加するために、観測された海洋表層温度、および海水分布を境界条件として用いるAMIP型実験を1978年から2008年まで行い、その結果をSWING-2に提出した。また、今回の比較実験では、客観解析データを同化した実験結果に関しても提出をもとめられており、気象庁から公開されている、JRA/JCDASの水平風を同化(メカニカルナッジング)した現実大気の再現実験結果についても報告した。再現実験の詳細な比較に関しては次章に記すこととし、本研究課題では、各モデル気候値の結果を比較し、その差異が大きい地域について考察を行う。特に、本研究では陸域の同位体比分布について調べる。

#### (4) 水循環場の再現性評価

本研究課題では、客観解析データ(JRA25/JCDAS)から得られた水平風を同化(メカニカルナッジング)し、観測されたSSTと海氷分布を境界条件として用いた、現在気候の再現実験結果を用いて観測値との比較を行う。モデルは、AR4に用いられたMIROC3.2を用い、解像度は、T106L40とT42L20を用いる。モデル結果は、日平均値を出力し、衛星データとの比較では、衛星観測日と同じ日のデータをコンポジットして、両者の比較を行った。

#### (5) 現場水蒸気同位体『計測』手法の確立

現在、Picarro社とLGR社からレーザー分光システムを使った水蒸気同位体分析計が市販されている。そこで本研究課題では、両者の装置を相互比較をして、高確度で連続した同位体データを得る為の補正方法に関して検討を行う。実験方法としては、水蒸気発生装置(LGR社製WVISS)を使って同位体比一定の水蒸気を発生させ、それをPicarro社、LGR社製の同位体レーザー分光計で検出し、1) 時間変化に対するベースラインのドリフト、2) 水蒸気濃度変化に対する同位体比変化を調べた。また、水蒸気発生装置から発生する水蒸気同位体比を変化させ、3) その応答速度(メモリー効果)に関して考察を行った。本研究は、最新のPicarro社製水蒸気同位体計測装置がある、コロラド大学で実施し、LGR社の協力を得ながら実施した。

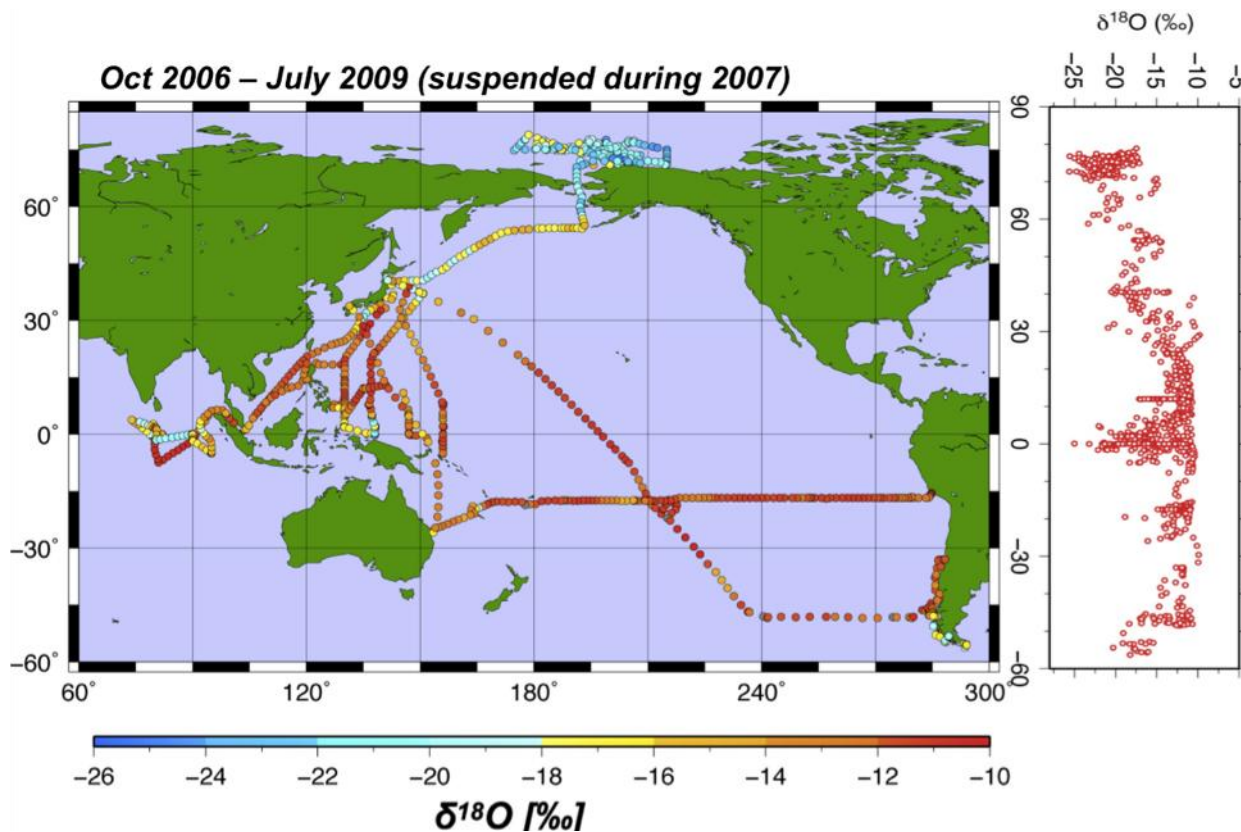
### 4. 結果・考察

#### (1) 同位体データ収集

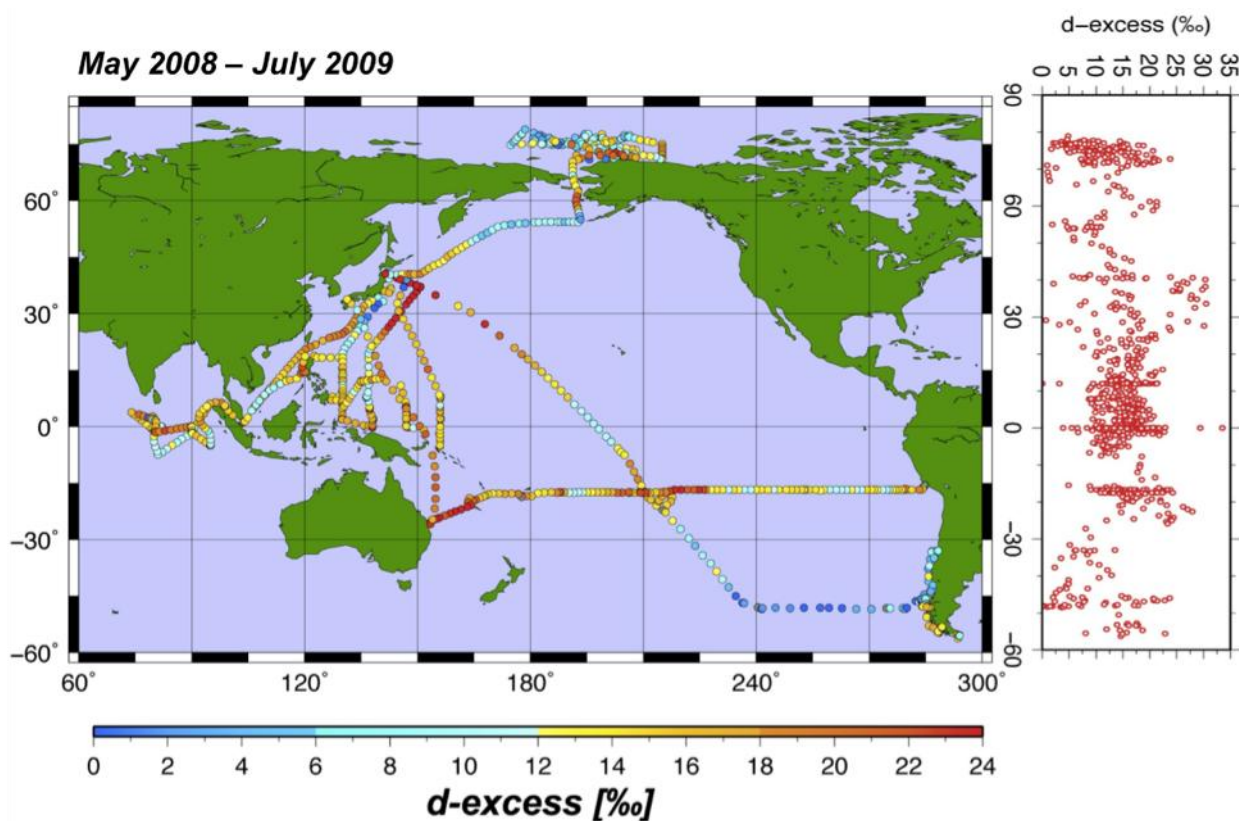
今回の観測から、世界で初めて、北極域から南緯60度近くの太平洋までの南北を横断する同位体データを得ることができた。図(1)-1に、今回の観測で得られた同位体データ(酸素同位体比)を示す(インド洋観測は、2006年に実施)。これをみると、降水の同位体データと同様に、高緯度に向かって同位体比が減少する傾向が見られる。北半球では、日本近海で次第に同位体比が減少し、南太平洋では、南緯50度で急激に同位体比が減少している。これは、蒸発水の同位体比が変化したというよりも、これらの地域に相対的に同位体比が低い大陸由来の水蒸気が寄与しはじめたためであると考えられる。また、上記したような緯度分布が見られるにも拘わらず、赤道付近では同位体比が大きくばらついており、その極小値は、北極海で観測した極小値と同程度である。次に、水蒸気の起源を表す指標として知られるd-excess ( $\delta D - 8 * \delta^{18}O$ )の分布図を調べると、こちらは酸素同位体比分布と異なり、顕著な緯度分布はなく、ランダムに変化している(図(1)-2)。これらの分布特徴を作り出している因子を探るために、気象データとの比較を行った(図(1)-3)。酸素同位体比は、SSTではなく、地表付近水蒸気量の変化とよく対応しており、水蒸気量が減少するにつれて同位体比が減少する傾向が見られた。しかし、熱帯域では( $>16g/Kg$ )、水蒸気量に依存せず、他の海域と異なる因子が影響しているようである。また、この最小値が観測された時期は、MJOと同定される組織化した対流雲と遭遇したときであり、この対流活動が極小値の原因になっているかもしれない。一方、d-excessについては、相対湿度変化とよく対応しており、湿度減少に伴い、d-excess値が上昇していた。気候モデルに組み込まれているバルク蒸発式を使った実験でも、洋上の相対湿度が低くなると、d-excess値が高くなる傾向がみられており、このことから、この指標は、洋上の蒸発環境の違いを反映していると考えられる。



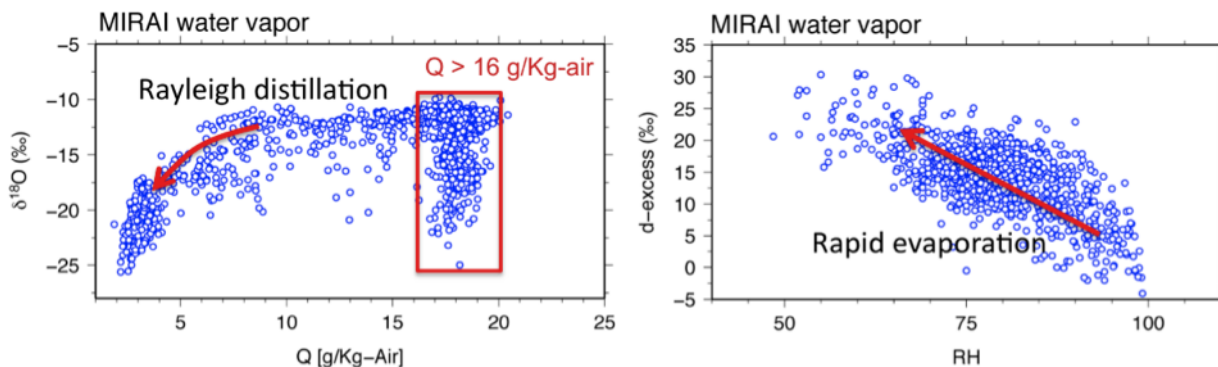
次に、TES データから得られる全球同位体分布の特徴を調べる。図(1)-4に冬期と夏期のHD0分布図(850hPa-500hPa平均)を示す。南北アメリカ大陸の西海岸では、高緯度からの寒気流入がみられるが、それ以外では境界層内の水蒸気同位体比分布と同じく、高緯度に向かうにつれて同位体比が減少している。赤道の海洋上では、大きなばらつきはみられずほぼ均一であり、上記した赤道付近の境界層内水蒸気同位体比の変化は、空間分布ではなく、時間変化に依存する変化であると考えられる。そこで、図(1)-5に示すように、赤道域における大気中層の水蒸気同位体比の時系列変化を調べると、2つの大きな特徴が観測から明らかになった。1) MJ0のような組織化した対流雲群の出現に合わせてHD0が減少する。2) 東西循環の下降流域(東太平洋)において、同位体比の減少がみられる。HD0の鉛直分布を見ると、HD0は、高度と共に減少するので、沈降流域では、上空からの同位体比が低い水蒸気が流入する為に、その同位体比が低下すると考えられる。組織化した対流雲の出現に伴う同位体減少効果については、今回の観測結果の初期解析からは解明できない。



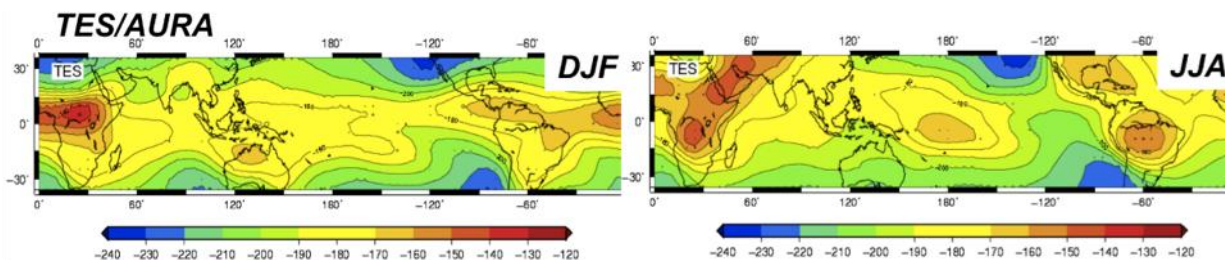
図(1)-1観測船「みらい」の航路上で観測された洋上水蒸気の酸素同位体分布



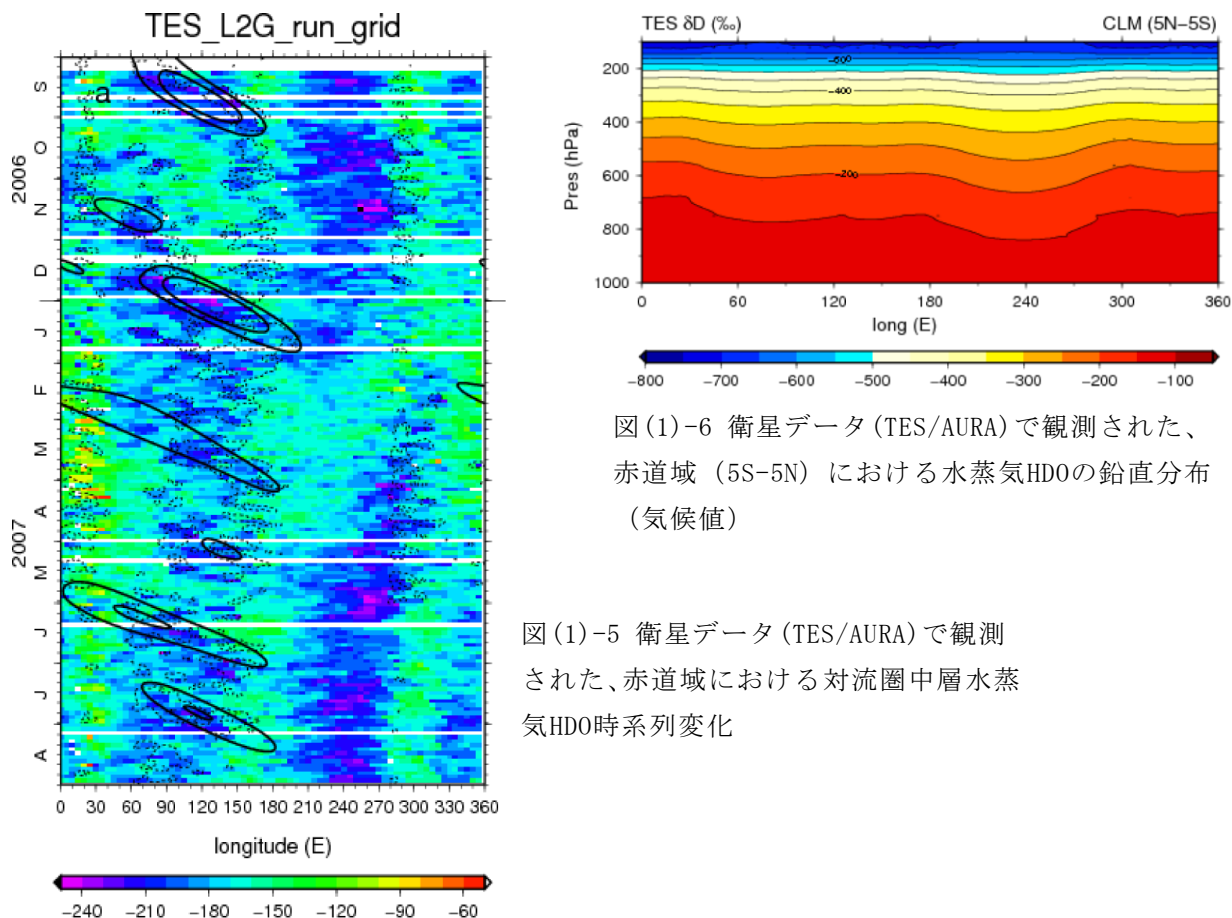
図(1)-2 観測船「みらい」の航路上で観測された洋上水蒸気のd-excess分布



図(1)-3 洋上水蒸気の酸素同位体比と地表面水蒸気量の関係（左図）、およびそのd-excessと相対湿度の関係（右図）



図(1)-4 衛星データ (TES/AURA) で観測された対流圏中層水蒸気のHDO分布



図(1)-6 衛星データ (TES/AURA) で観測された、赤道域（5S-5N）における水蒸気HDOの鉛直分布（気候値）

図(1)-5 衛星データ (TES/AURA) で観測された、赤道域における対流圏中層水蒸気HDO時系列変化

## (2) 同位体情報の水循環情報への翻訳

本課題では、気候モデルから抜き出した1次元積雲対流モデルを用い、これに、MISMOラジオゾンデ観測網から得られた大気プロファイルデータ、潜熱Fluxデータをフォーシングデータとして与えて、MISMO領域(みらい-フルレ島-ガン島で囲まれる三角形領域)観測期間中の再現実験を行った。この1次元モデル計算では、ラジオゾンデデータから計算した水平収束量、および鉛直輸送速度を使って、気温、水蒸気量、同位体比を輸送させ、大気の状態が不安定になった場合、設定された積雲パラメタリゼーションに従って対流性降雨が生じる。この時、降水に同位体水(HDO、 $H_2^{18}O$ )が濃縮して系から取り除かれるので、正確に大気中の水蒸気同位体比を再現するには、観測された降水量を再現しなければならない。本研究課題では、雲頂高度をパラメーターとして、水収支計算から計算したMISMO領域における降水量と一致するように調整している。モデル結果を、図(2)-1に示す。上図には、観測期間中の降水量がプロットされており、11月15日以降、この領域では比較的強い降水が持続していることがわかる。雲画像データをみると、ちょうどこの時期に組織化した対流性雲が、領域全体に広がりはじめ、積雲対流オンセットが起こっている。水素同位体比の変化をみると、オンセット後に、大気中層(中図)、下層(下図)ともに次第に減少していき、また、大気中層では、衛星観測値(TES)では11月中旬に極小ピークを示しているが、モデルはこれを再現できていない。この期間、観測では北西から低い同位体組成をもった水蒸気塊が大気中層に移流してきているが、数値モデルでは領域内に移流してくる同位体比プロファイルを一様と仮定している為に、この期間の極小ピークを数値モデルでは再現できなかった。しかし、この期間以外は、数値モデルの結果は、TES観測データとよく一致している。R/Vみらいで観測された地表面付近の水蒸気同位体比データとの比較では、観測値は、オンセット後、数日周期で同位体比が変化しているが、数値モデルではこれを表現できていない。この観測された同位体比変動は、雲クラスターを形成するメソスケールの雲構造に対応して変動をしており、今回の1次元モデルでは、このサブグリッドスケールの現象が再現できないので、観測された時系列変化は再現できなかったと考えられる。しかし、観測値から得られた、境界層内水蒸気同位体比と降水の同位体比の直線関係、境界層内の水蒸気同位体比とそのd-excessの負相関関係といった特徴はよく再現できており(図(2)-2参照)、同位体比変化を支配する『過程』に関しては、この1次元モデルでも再現できていると考えられる。

次に、この数値モデルの結果を使って、同位体比変化を引き起こすメカニズムを考える。図(2)-3aに、MISMO期間中の水素同位体比プロファイルを示す。これをみると対流オンセットまでは、明瞭な同位体比の鉛直プロファイルがみられるが、オンセット後は、対流の補償下降流やダウンドラフトによって、中・上層の低い同位体比が下層に輸送され、下層の同位体比が次第に減少していく様子がみられる。また、セカンドパラメーターであるd-excess( $\delta D - 8 * \delta^{18}O$ )の鉛直分布も同様であり、オンセットの後、高いd-excessをもった水蒸気が、雲頂から周囲の環境場に放出され、これが沈降流によって下層に運ばれる為に、下層のd-excessが上昇する様子が示されている(図(2)-3b)。この結果から、強い上昇流によって組織化した積雲群が発生する場合、同時に強い補償下降流が起こることで、大気下層の水蒸気同位体比の減少しており、水蒸気同位体比は、大気鉛直混合の強さの指標になっていると考えられる。

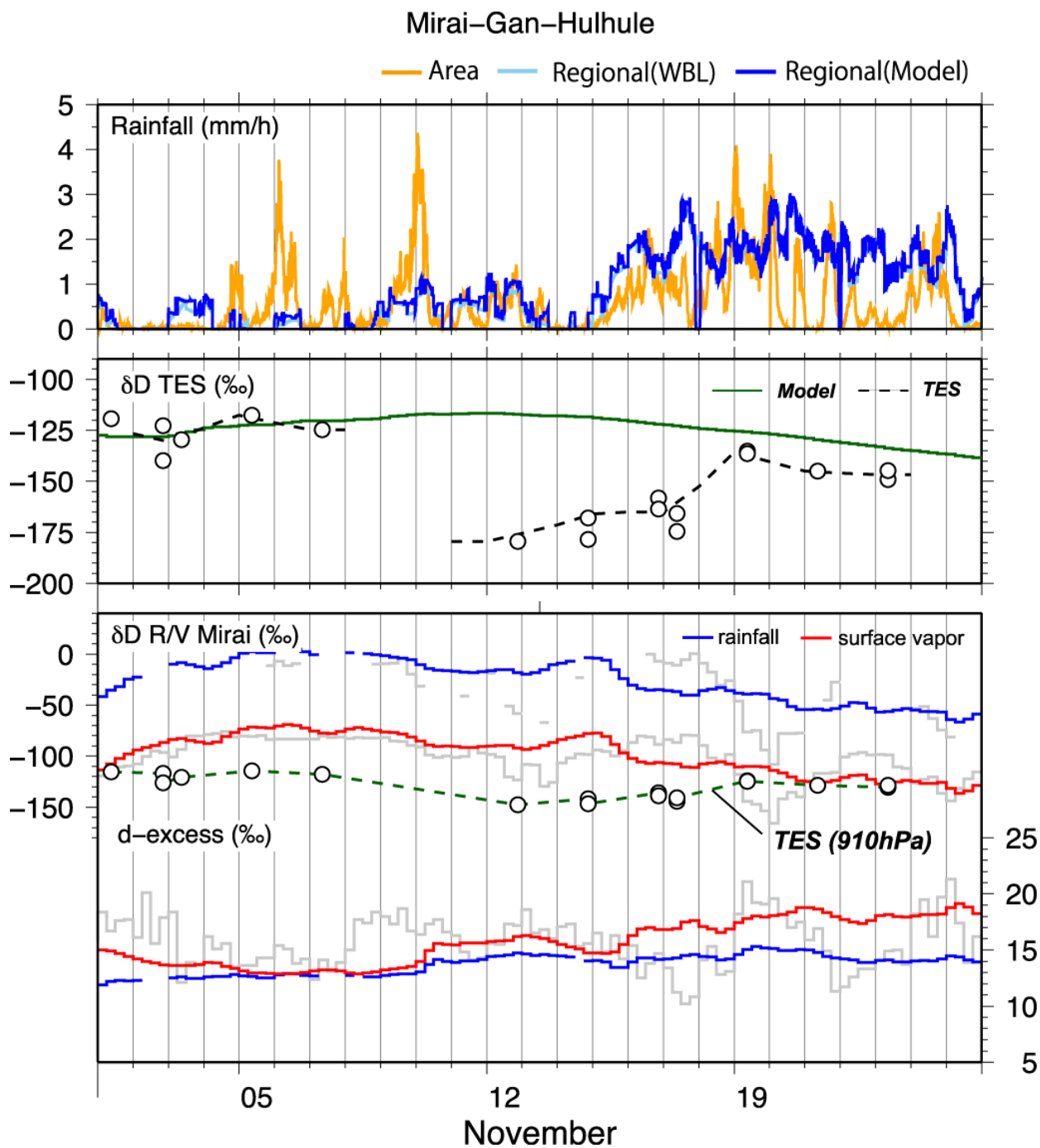
このことを定量的に裏付けるために、今回の数値モデル結果を使って、境界層内水蒸気の起源解析を行い、その同位体比変化と比較してみた。水蒸気起源は、図(2)-4に示す6つに分離した。



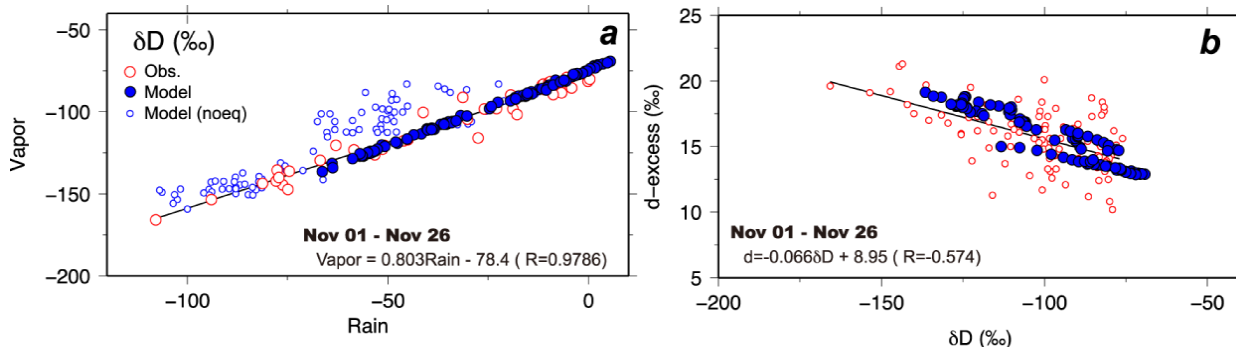
図(2)-5aにその結果を示す。これをみると、対流オンセット前には、沈降流起源水の寄与率が30%程度であったのが、オンセット後上昇し、最盛期には約60%にまで上昇していることがわかる。そしてこの沈降流の寄与率変化と境界層内の水蒸気同位体比の関係を調べると、非常に明瞭な直線関係があり(図(2)-5b)、このことから、熱帯域では、積雲対流の補償下降流の強さや持続期間によって、その同位体比が決定されていることが本課題から明らかになった。

次に、シベリア域の高緯度地点データを使って、極域の同位体比変化を支配する因子の解析を行った。まず、客観解析データを使って降水の水蒸気起源を推定し、降水の同位体比の季節変化に対する水蒸気起源の影響を考える。水蒸気起源推定には、今回新しく開発した手法を用いた。これは、起源から蒸発した水蒸気にタグをつけ、このタグ付き水蒸気を客観解析データを使って輸送するスキームである。すべての起源水蒸気の総和である総水蒸気量が、輸送後に客観解析データの水蒸気量よりも多ければ、その過剰分を降水として除去し、不足している場合は周囲のグリッドから補い、データの水蒸気量と一致させるというスキームである。今回は、気象庁から公開されているJCDAS(1.25° × 1.25°)データを使って計算を行った。図(2)-6に、東シベリアのZhigansk(66.8N, 123.4E)で観測された酸素同位体比の時系列データと水蒸気起源解析結果、そして両者の関係図を示す。これをみると、シベリアの高緯度域では、月平均同位体比の変化は、陸起源水蒸気の寄与率と非常によい相関関係( $R=0.92$ )を示しており、同位体比の季節変化は、これまで言われてきた気温ではなく、季節による水蒸気起源の変化を反映していることが新たに明になった。

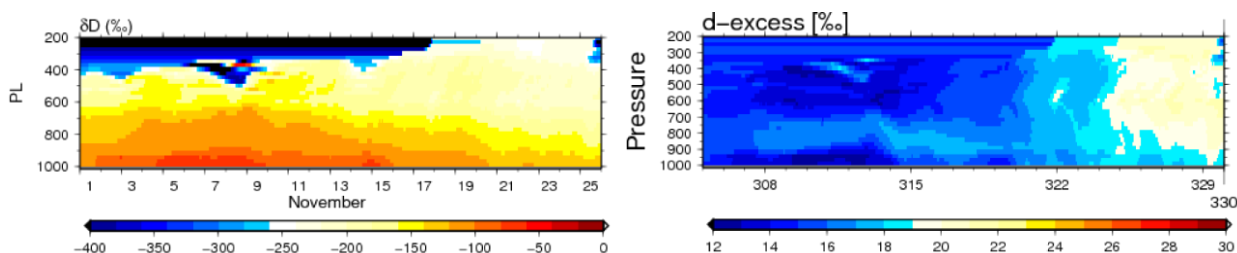
次に、季節変化成分を取り除いた短時間同位体比変動を考える。まず、観測データから季節変化成分を取り除いたアノマリ成分を抽出し、ノイズを取り除く為に、ハイパスフィルターをかけた後に、そのスペクトル解析をおこなった。すると、安定同位体比の変動は、10-15日で周期的に変化していることがわかった(図(2)-7)。次に、この周期的な同位体比の変化の原因として、擾乱活動との関係を調べてみた。今回は、擾乱活動の指標として、500hPaのジオポテンシャル高度を用い、両者の相関を調べたところ非常によい関係( $R>0.5$ )が得られた(図(2)-8)。また、高い相関が見られる地域は、西から移流してくるStorm Trackと一致しており、擾乱活動による南北循環によって、このような周期的な変化が得られることが明らかになった。しかし、同様の解析を、850hPaのジオポテンシャルで行うと明瞭な相関関係が得られず、これらの特徴を総合的に考えると、大気中層まで発達するような低気圧がつくる、large-scaleでの南北移流がこの変化を作り出していると推察できる。先の衛星データをみてもわかるとおり、同位体比は高緯度にむかう南北勾配があり、より大きなスケールで輸送されることで、低気圧の前面の南風と背面の北風時に起こる同位体比の差が顕著になる。この擾乱通過に伴う短周期同位体比変化は通年を通してみられるが、特に擾乱が活発である夏期以外の時期に明瞭であり、高緯度域での同位体比の短時間変動は、擾乱活動による水蒸気の南北輸送量を反映していることが明らかになった。



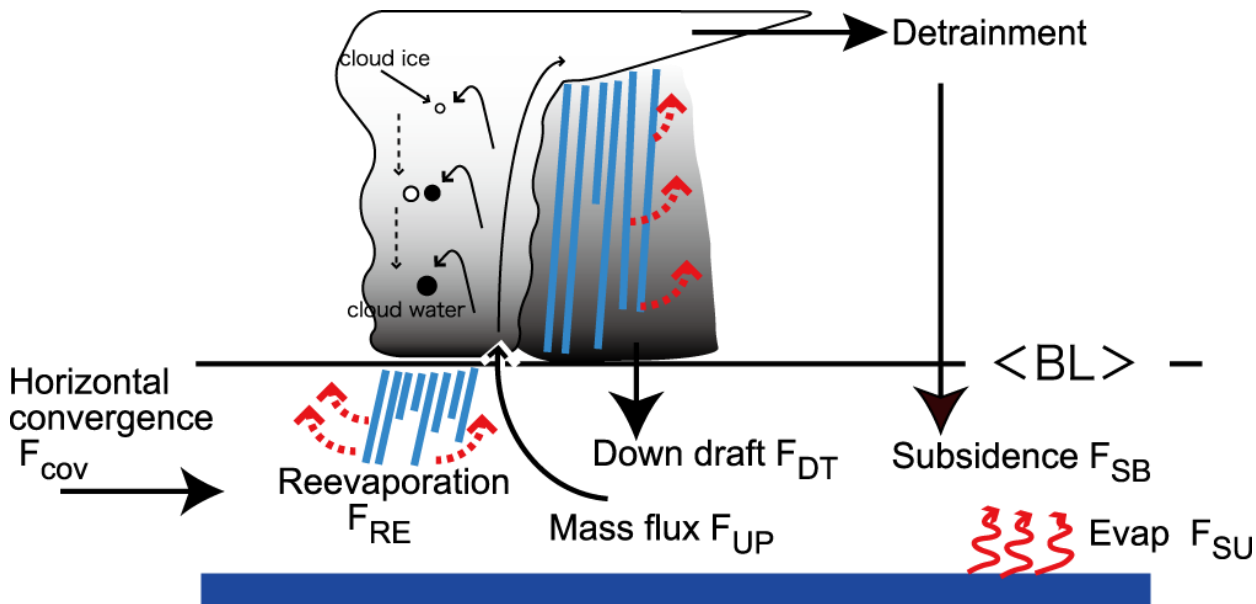
図(2)-1 1次元モデルを用いた数値実験による、MISMO観測期間中における降水量(上図)、対流圏中層水蒸気の $\delta D$ (中図)、および境界層内の $\delta D$ および $d$ -excess(下図)の時間変化



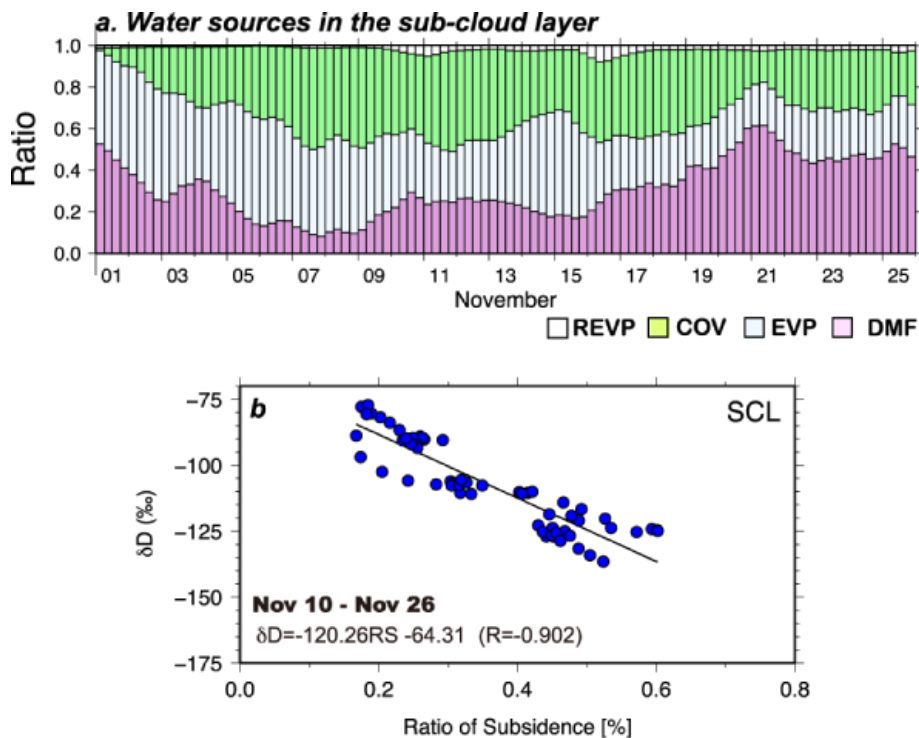
図(2)-2 MISMO観測期間中にみられた同位体特徴と数値モデル結果の比較。左：地表付近水蒸気の水素同位体比と降水の同位体比の関係、右：地表付近水蒸気の水素同位体比とd-excessの関係



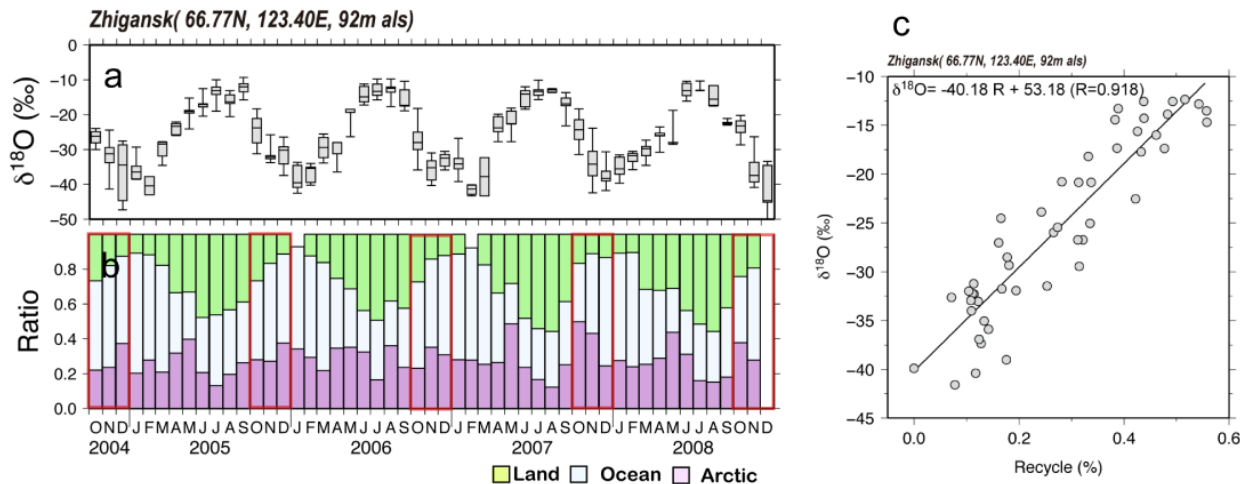
図(2)-3 数値シミュレーション結果から得られた、MISMO観測期間中の水素およびd-excess鉛直プロファイルの時系列変化



図(2)-4 1次元モデルにおける積雲対流システムに伴う水循環の概念図

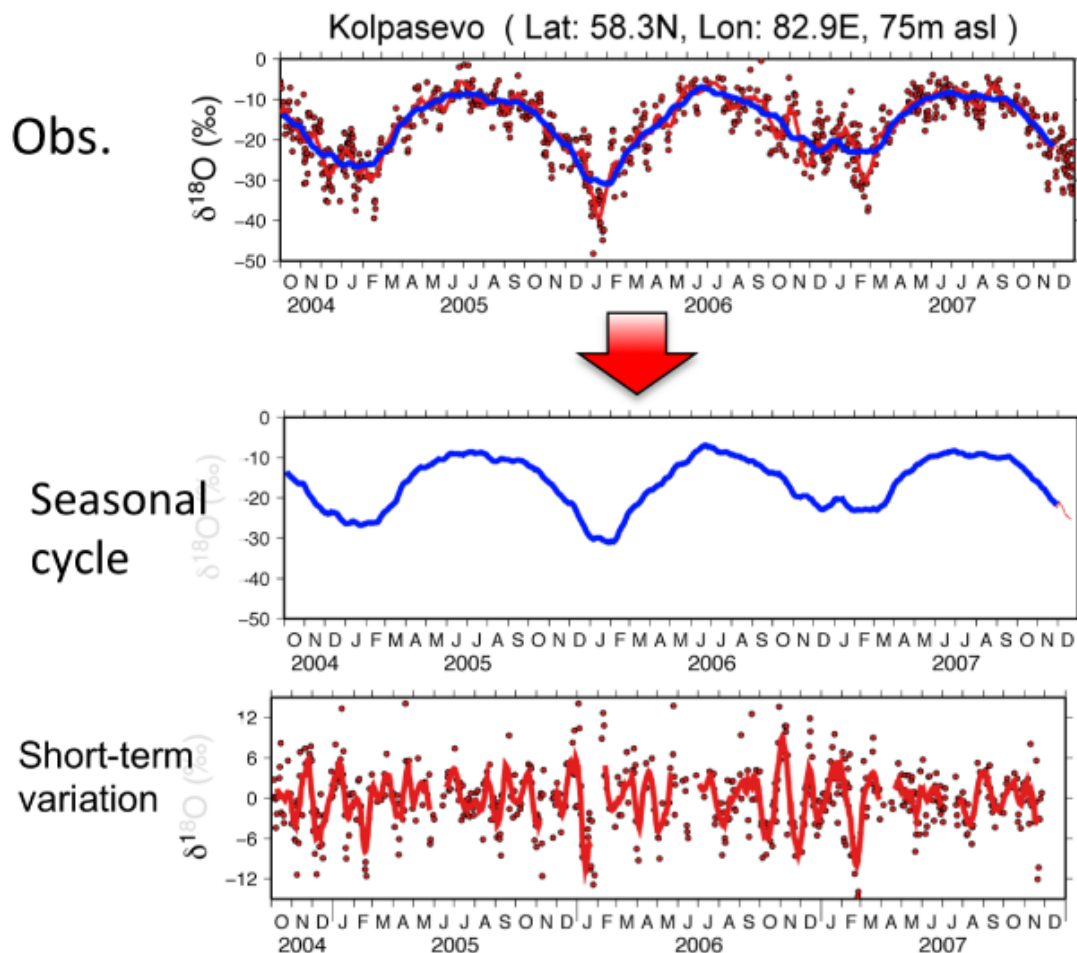


図(2)-5 上図：数値モデルから得られた、境界層水蒸気の起源（REVP:雨滴の再蒸発起源、COV:水平輸送、EVP:洋上蒸発起源、DMF:沈降水起源）下図：沈降水起源水蒸気の寄与率と水素同位体比の関係

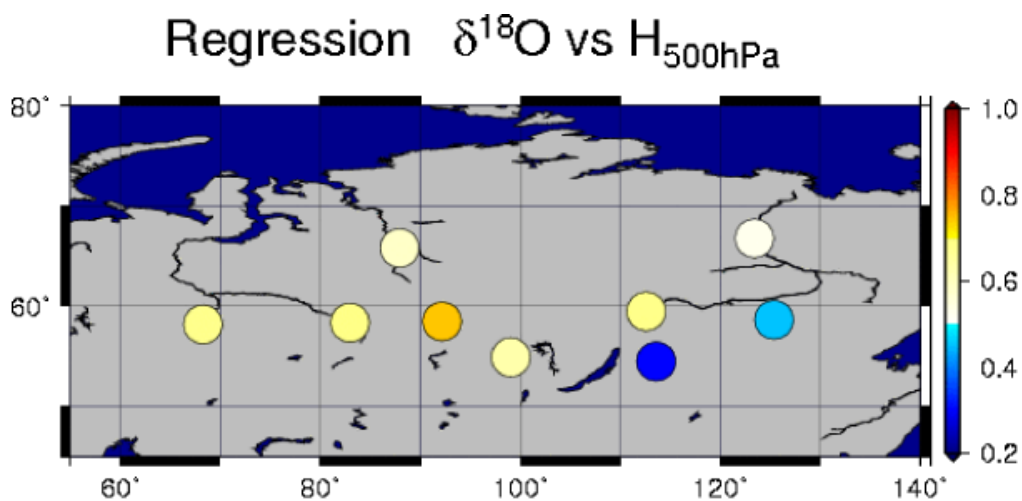


図(2)-6 a:東シベリアで観測された降水の酸素同位体比の時系列変化。b:東シベリアにおける降水の水蒸気起源(Land:陸起源水蒸気、Ocean:北極海を除く海洋起源水蒸気、Arctic:北極海起源水蒸気) c:月平均同位体比と陸起源水蒸気の寄与率との関係





図(2)-7 シベリア域における日単位降水同位体比の時系列変化(上図)。同ステーションにおける同位体比変動の季節変化成分(中図)、および季節変化成分を取り除いた短時間変動成分(下図)



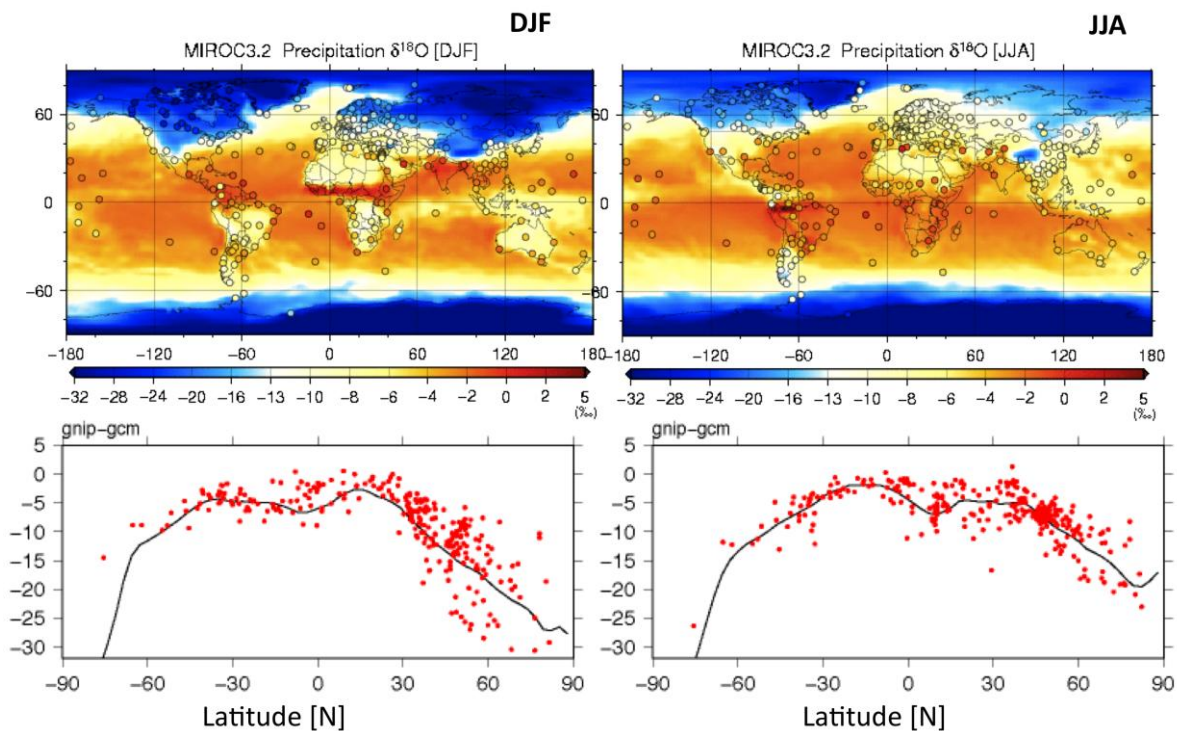
図(2)-8 降水同位体比の短時間変動成分と500hPaにおけるジオポテンシャルにおける変動成分との相関係数

### (3) 同位体気候モデルの相互比較実験

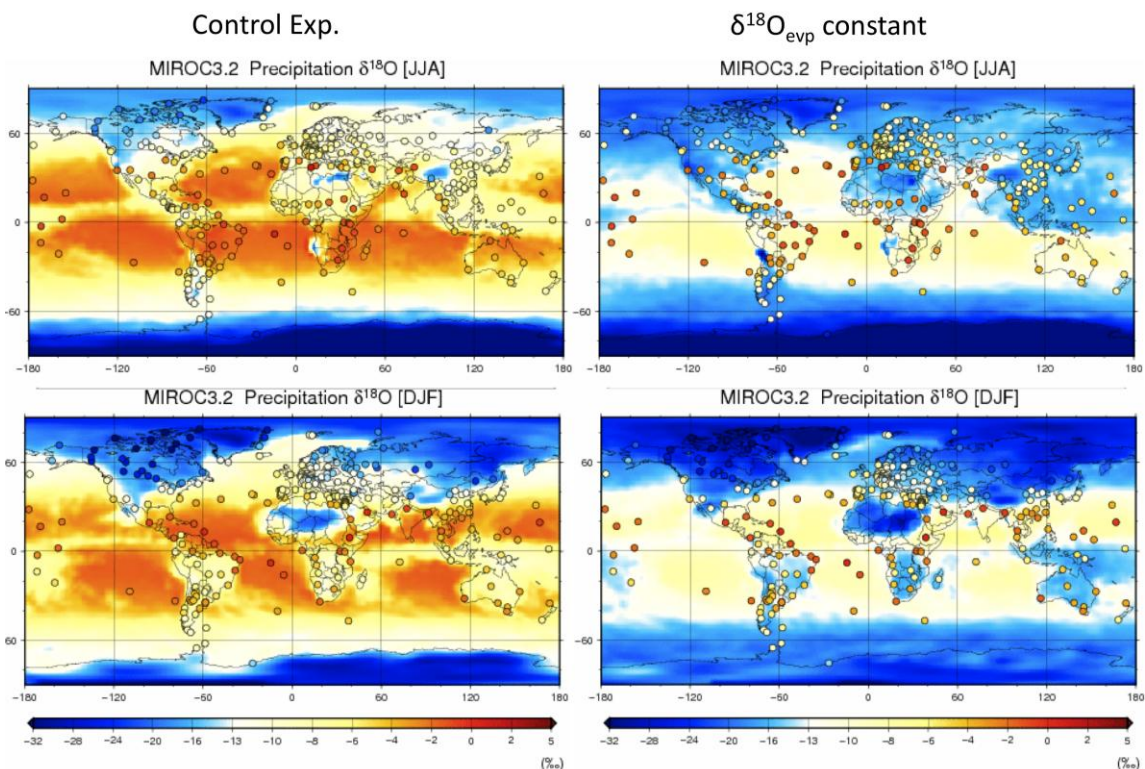
大気中の水同位体比全球分布は、地表面からの蒸発と、大気中での降水過程によって作られている。そこまず、地表面蒸発効果を検証する感度実験を行った。実験は、コントロール実験と、水蒸気同位体フラックスを一定にした実験を行い、両者を比較したところ、その絶対値は大きく異なるが、両者の同位体比分布は変化しなかった(図(3)-2)。これは、起源による効果は、絶対値には大きく影響するが、分布には影響が小さいことを示している。

次に、凝結過程の効果を見積もるために、輸送途中で水蒸気塊が経験する積算降水量を計算する診断トレーサー(ROI)を導入する。このROI指標が大きくなると、起源からの輸送途中で経験する降水量が増加することを示す。ROI=1の場合は、観測値でもたらされる降水量と同量が輸送過程で消費されたことを示す。起源の効果を見捨てる為に、水蒸気同位体フラックス一定を仮定した降水の酸素同位体分布図とROI分布図の比較を行うと、ROIと酸素同位体比分布は非常によく一致しており、輸送途中で降水量が増加する(ROIが増加)と同位体比が減少していることがわかる(図(3)-3)。さらに、両者の関係を平面図にプロットしてみると非常に明瞭な直線関係が得られる(図(3)-4)。直線は、warm rain、cold rainの2本に分離でき、これは、気-固、気-液変化時に起こる同位体分別係数の違いを反映している。このことから、全球の降水の同位体比分布図は、起源の値を切片にもち、ROIを傾きにもつ直線関係で表現することができ、長距離輸送されない熱帯域では、水蒸気起源の同位体比を反映し、水蒸気が内陸に輸送される中・高緯度地域では、起源の値に依存せず、その輸送経路上で経験する降水量に感度があることが明らかになった。

最後に、同位体気候モデルの相互比較実験結果を調べる。図(3)-5に、SWING-2に参加した10の同位体気候モデルのうち、6モデルの結果を示す。ECHAM4は、NCEPとECMWFでデータ同化した2つの実験結果、LMDZは、データ同化した場合(Nudge)と、していない実験(Free)、Hadley Centerは、海洋結合モデル(CM)と大気モデル(AM)の結果をそれぞれ載せてある。これらの結果をみると、全体の傾向としてはどれもよく一致しているが、チベット高原上やシベリア域など低い同位体比を示す地域で、その絶対値が大きく異なっている。これらの地域では、起源よりも輸送経路上での降水量がその同位体比を支配しており、降水をもたらす水蒸気起源や、その輸送経路が各モデルによって異なっていることを示している。この詳細に関しては、観測値との比較を含めて次章で議論することとする。

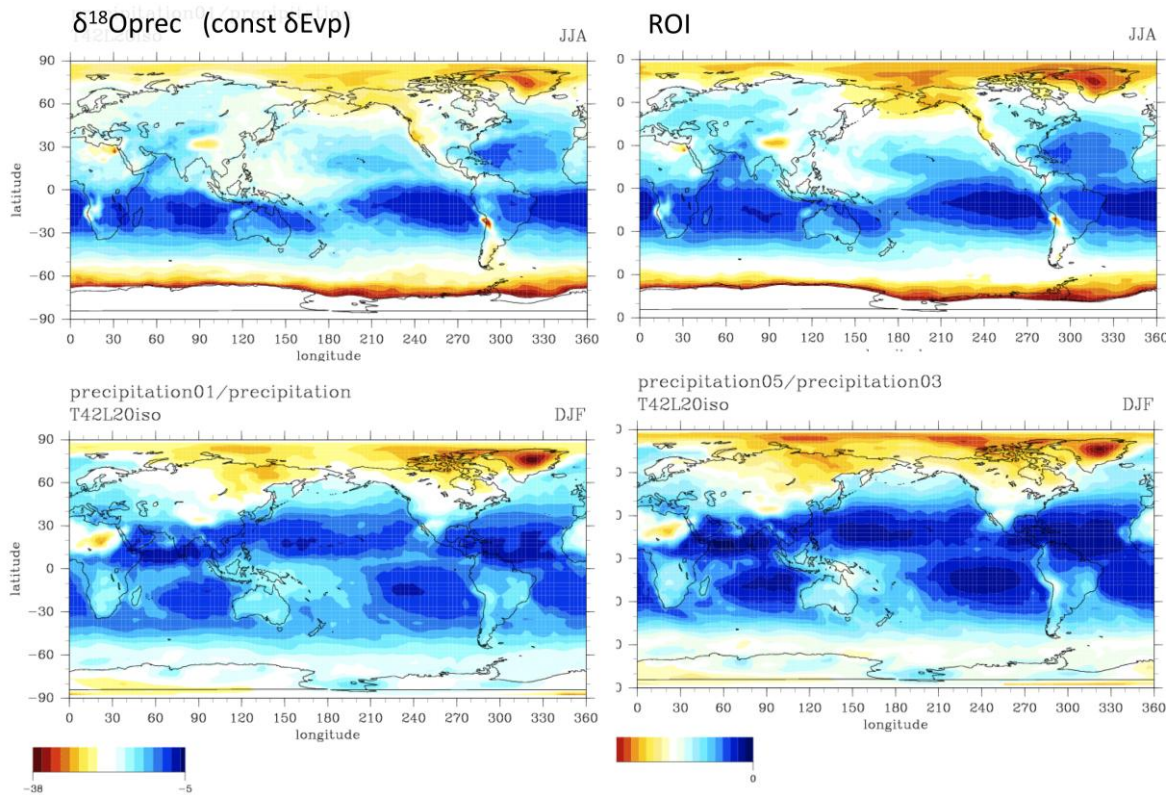


図(3)-1 上図：全球酸素同位体分布図(丸印:IAEA観測値) 下図：緯度断面図(実線:モデル経度平均値、赤丸:IAEA観測値)

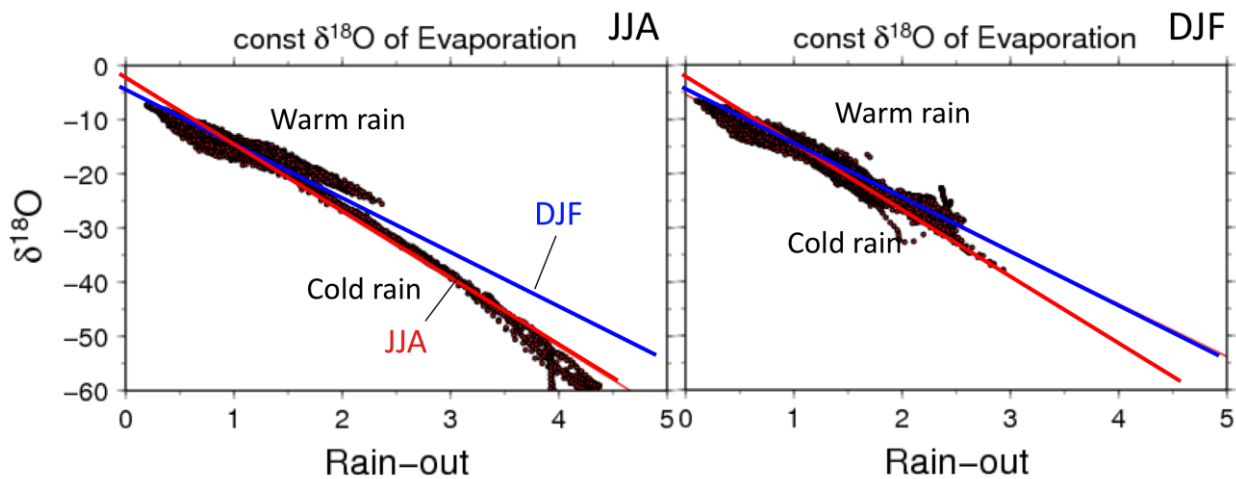


図(3)-2 同位体蒸発Fluxの感度実験結果。左側がコントロールラン、右側が地表面からの酸素同位体Flux一定 ( $\delta^{18}O_{evp} = -15\text{‰}$ ) と仮定した感度実験



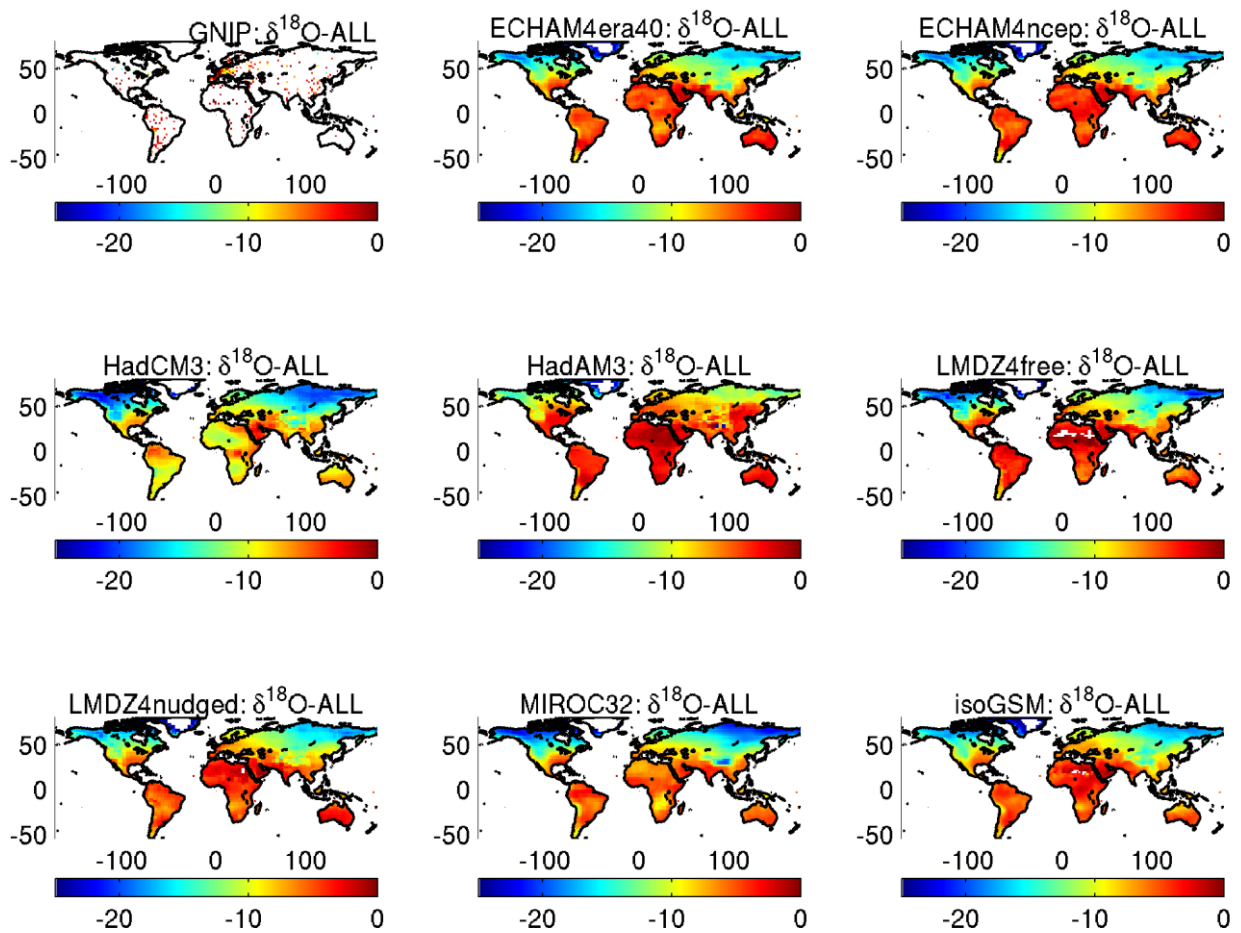


図(3)-3 地表面同位体Flux一定と仮定した感度実験による酸素同位体比分布図と、ROI指標分布(本文参照)の比較。比較しやすいよう、ROI指標は逆転させてある。



図(3)-4 ROI指標と酸素同位体比の関係





図(3)-5 SWING-2プロジェクトによる6つの同位体気候モデルの相互比較実験結果(気候値)

#### (4) 水循環場の再現性評価

上述した観測データと気候モデルの比較を行った。まず、本課題で新たに採取した洋上観測データとの比較を行ったところ、気候モデル結果は、図(1)-3に示す、洋上大気の水蒸気量との関係、湿度とd-excess値の関係をよく再現することができていた(一部極大、極小値は差異がみられた)。このことから、水蒸気起源域における地表付近の水蒸気同位体比分布は、よく再現できていると考えられる。次に、本課題で行った衛星データ解析結果との比較を検証する。図(4)-1に、HDOグローバル分布図の比較結果を記す。気候モデルの結果は、簡易的に衛星データと比較を行うために、850-500hPaの加重平均値で示している。図を見ると、気候モデルの結果は、HDO分布のコントラストが観測値よりも明瞭であるという違いが目立つが、アフリカ大陸での極大値、北米・南米の太平洋沿岸にみられる低い同位体比など、全体的な分布はよく再現されている。しかし、両者の顕著な違いとして、気候モデルでは、1)海大陸域で極小ピークがみられる。2)Double-ITCZが問題になる東太平洋で極大ピークがみられる。といった、物理過程(積雲パラメタリゼーション等)の不完全性に基づく不確実性が高い地域で、観測値との大きな違いがみられた。鉛直分布をみると、海大陸地域では、気候モデルで中層から下層にかけて沈降流に伴うとみられる同位体比の減少がみられるが、衛星データでは下層に届くような影響はみられない(図(4)-1下図)。次に、図(4)-2に示す、赤道域における大気中層の水蒸気同位体比の時系列変化(ホフメラ-図)をみると、観測データにみられる、“マッデンジュリアン振動(MJO)のような組織化した対流雲群の出現に合わせてHDOが減少する”特徴は再現されていたが、発達した対流雲域(破線:  $OLR < 210 W/m^2$ )が、観測よりも広域に広がっており(特に対流中心の西側)、観測されるよりも組織化した対流雲群が広い範囲でみられる。これらの結果は、この地域で再現される対流活動が、実際よりも強く、それに伴う補償下降流も強まっているために、下層に沈降流の影響が到達していると考えられる。

さらに、この結果は、インドネシアで行っている日単位降水同位体データとの比較結果からも裏付けられる。図(4)-3に、インドネシアバリ島で観測した、2002年から2005年までの降水の酸素同位体比( $\delta^{18}O$ )変化と気候モデルの比較結果を記す。観測値は、組織化した対流活動に伴う降水が観測される時に、酸素同位体比の顕著な減少が見られ、気候モデルもその変化をよく再現している。しかし、そのピークの絶対値は、観測値を過大評価している。さらにバリ島以外のインドネシア海大陸地域にある降水観測点において同様に時系列変化の比較を行い、その結果を図(4)-3の右図にまとめると、モデル値は、観測値よりも全体的に低い値を示しており、先のTESデータの結果と整合的である。

また、東太平洋は東西循環の沈降域に当たり、観測では、その沈降流の影響とみられる低い同位体の沈降が境界層の直上あたりまで及んでいるが(図(4)-1下図)、気候モデルの結果では500hPaあたりまでしか見られない。それゆえ、図(4)-2に示す時系列データにも、この地域でみられた低い同位体比がモデル結果にはみられない。気候モデルでは、大気が不安定になると対流活動に伴う上昇流が起り、地表付近の相対的に重たい同位体比をもった水蒸気が上空に運ばれる。しかし、観測では、乾燥空気が境界層の上空を覆っており、これが蓋の役目をして、地表面からの水蒸気輸送を妨げている。このことから、気候モデルでは、1)境界層直上でのエントレイメント率を過小評価しているために対流活動が起りやすくなっている、または、2)境界層過程での水蒸気の鉛直輸送を過大評価している、といった問題が存在すると考えられる。

このように、今回同位体トレーサーとの詳細な比較を行うことで、気候モデルにおける積雲パラメタリゼーションは、現実よりも積雲対流が起きやすいように調節されていることが明らかになった。逆に考えると、観測された同位体比に合致するようにモデルをチューニングすることで、より現実的な大気鉛直混合が得られることを示している。この件に関しては、今後、気候モデルの開発チームと連携して、検討していく予定である。

次に、極域での再現性について検証を行う。東シベリアのZhigatsnsk(66.8N, 123.4E)で観測された降水の酸素同位体比データから、総観規模スケールの変動に合わせた変化を抽出するために、まず10日移動平均値を計算し、その結果をモデルと比較してみた(図(4)-4)。結果は、夏期はよくその絶対値が再現できるが、秋期から春期にかけては、観測値よりも高い値を示していた。上述した洋上観測データでみられたように、同位体比は、水蒸気量の減少に応じて指数関数的に値が変化しており、気候モデルが、観測よりも水蒸気量を過大評価していることが原因ということも考えられる。そこで、可降水量と同位体比の関係を調べてみた。すると気候モデルは、水蒸気量は観測された値をよく再現しているが、同じ水蒸気量で比較した場合、気候モデルで見積もられる同位体比は観測値よりも高い値を示すことが明らかになった。この地域に低い同位体比をもたらすのは、北からの寒気流入に伴う場合であり、これは秋期から春期までに北極海上に存在する水蒸気の同位体比が、観測値よりも高いことを示す。秋期以降、北極海は海水で覆われ、地表面からの潜熱供給は無視できるので、この同位体比の過大評価は、この地域に移流してくる水蒸気の起源、または輸送経路に問題があることを示唆している。値が過大評価になるということは、気候モデルで再現される水蒸気起源よりもより、実際は、より遠方から水蒸気が運ばれてきていることを示している。

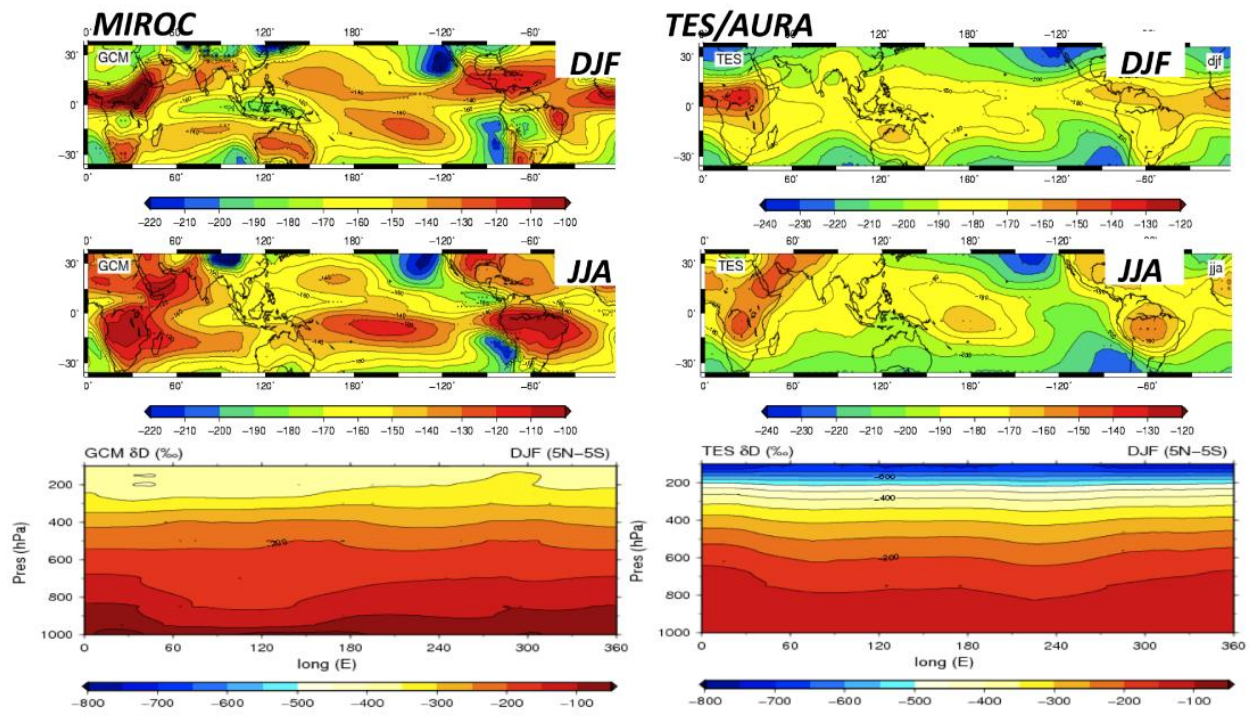
次にこの問題が、今回用いたMIROC特有のものかどうか、SWING-2に提出された他の気候モデルの冬期の平均場を調べる。ここで用いる結果は、客観解析データを同化した結果のみ用いる。結果は、MIROCによって見積もられる北極海域の同位体比は、他の気候モデルよりも低く、現実の再現性としては最も良いことがわかる(図(4)-5)。しかし、そのMIROCでも観測値を過大評価していると言うことは、気候モデル全体に共通した、極地域への水蒸気輸送に関する問題がある可能性を示唆している。

最後に、北極振動に対する水蒸気輸送場の変化の再現性について考える。図(4)-6に示すように、今回の再現実験では、北極振動の構造、およびその北極振動指数の変化を非常によく再現できていた。そこで、まず北極振動の正偏差(北極振動指数+2以上)と負偏差(-2以下)の時の酸素同位体比コンポジット(冬期)を作成し(図(4)-7参照)、北極振動に伴う同位体比応答に関して解析を行った。図(4)-7を見ると、高緯度に向かうにつれて同位体比が減少する南北分布が卓越し、北極振動による同位体比の変化が小さく見える。しかし、平均場からのアノマリで見ると、正偏差と負偏差の年で有為な差異があり、その1978年から2008年までのアノマリデータと北極振動指数の相関を調べると顕著な空間パターンがみられる(図(4)-8左上図参照)。また、この相関分布は、北半球で観測が行われた降水の同位体データから得られる傾向とよく一致している(図中の丸印)。この分布の解釈としては、ユーラシア域では、西から移流してくる低気圧が、高い同位体比をもった水蒸気を大陸内部に運んでおり、この東進する低気圧活動が弱まる北極振動負偏差の時には、同位体比アノマリも負偏差になるので、北極振動と正相関をもつと考えられる。日本周辺でも、北極振動負偏差の時には北型の気圧配置になりやすく、シベリアから同位体比が低い

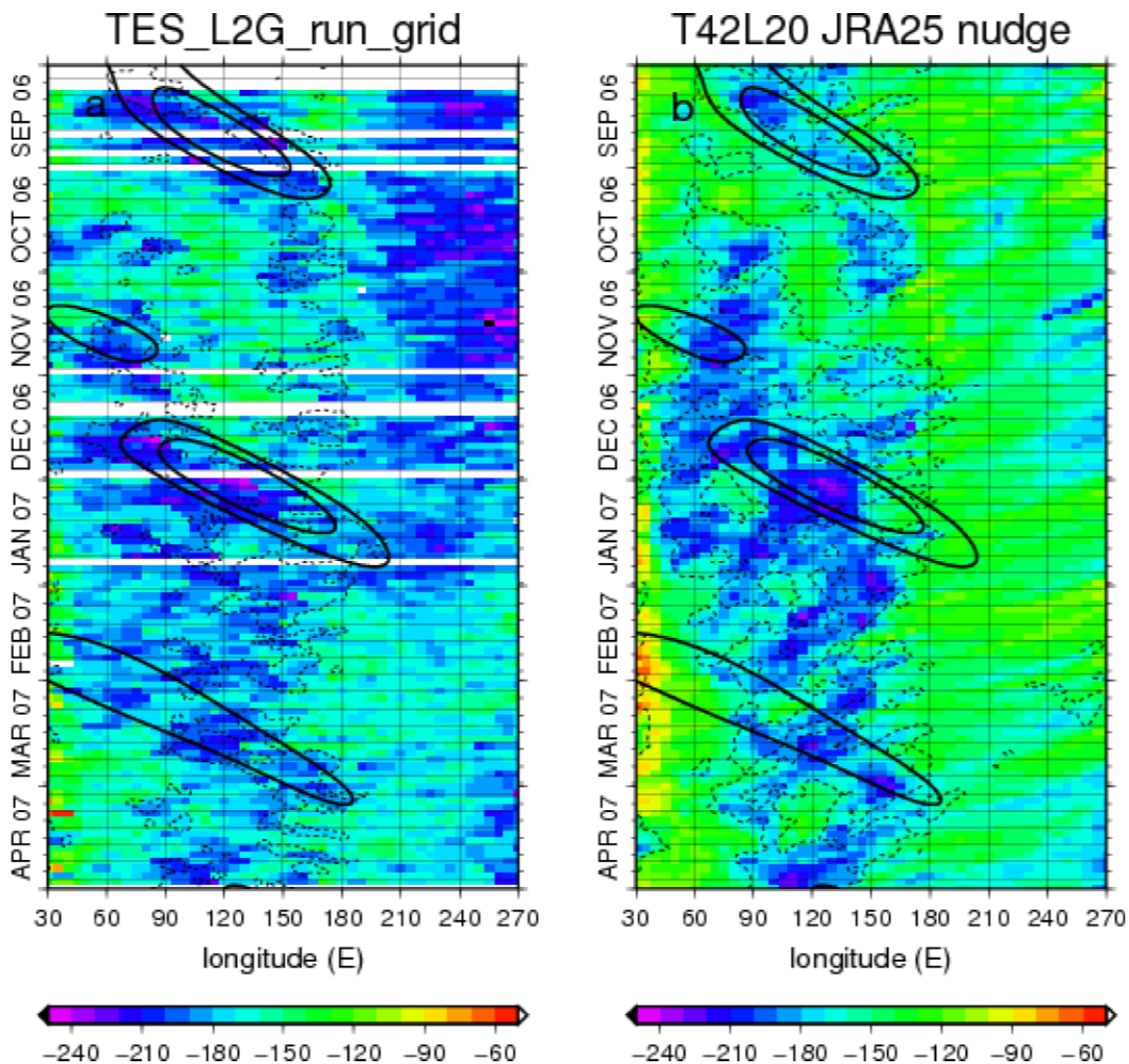
水蒸気が流入するために有為な正相関をもつ。

次に、データ同化を行わない実験 (Free run) を行った。ここでは、データ同化した場合との違いを調べることにより、気候モデル固有の再現性を検証できる。データ同化をおこなわない場合は、これまでに報告されているように、北極振動指数の十年スケールでの変動は再現できないが、EOF第一モードの地上気圧にみられる北極振動の構造は観測値とよく一致していた。そこで、モデル北極振動指数を計算し、そのスコアと同位体アノマリの相関を調べたところ、同化モデル結果と似たような空間パターンがみられた (図(4)-8左下図)。これは、使用したMIROC3.2は、北半球の冬期の総観場の変化、それに伴う水循環を全体的によく再現できていることを示している。そこでもう一步踏み込み、北極振動の正負偏差の時の同位体分布の再現性を調べてみた。北極振動指数が正負偏差時のそれぞれに関して、データ同化ありと同化なし実験の差を調べると (図(4)-8右側) 顕著な同位体比の差がみられた。例えば、北極振動が負偏差を持つときには、同化なし実験 (Free run) 結果は、北極海で同化あり実験よりも同位体比が高い値を示しており、これは、実際よりも暖気移流によって高い同位体比が流入しやすい傾向を示唆している。一方、正偏差時には、シベリアから日本にかけて実際よりも低い同位体比を示している。これは、寒気移流が実際よりも強く、気候モデル結果は、北日本では実際よりも寒冷傾向になりやすいことを示唆しており、将来予測結果においてもその点は加味すべきであると考えられる。

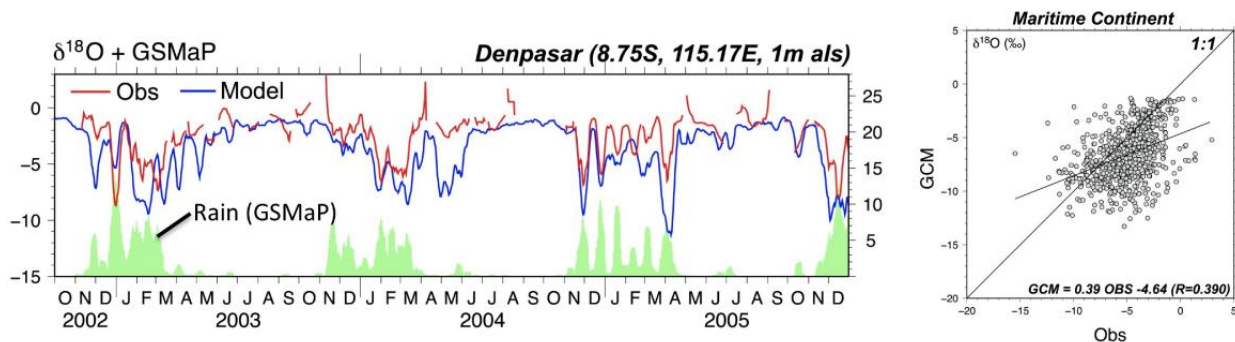
このように、同位体比の変化は、高緯度域では大気循環場に伴う水蒸気起源・輸送変化に敏感に応答しており、その検証材料として非常に有効である。従来は、全体的な総観場の比較から、その空間パターンの類似性に注目されてきたが、降水量の予測を高精度化するには、循環場に伴う水輸送パターンの再現性が重要である。近年のモデルの高精度化により、気候モデルがグローバルな気候分布をよりよく再現できるようになってきた今こそ、次のステップとして、同位体トレーサーを使った研究を行うことが有効である。



図(4)-1 衛星データ(TES/AURA)と気候モデル再現実験の比較。



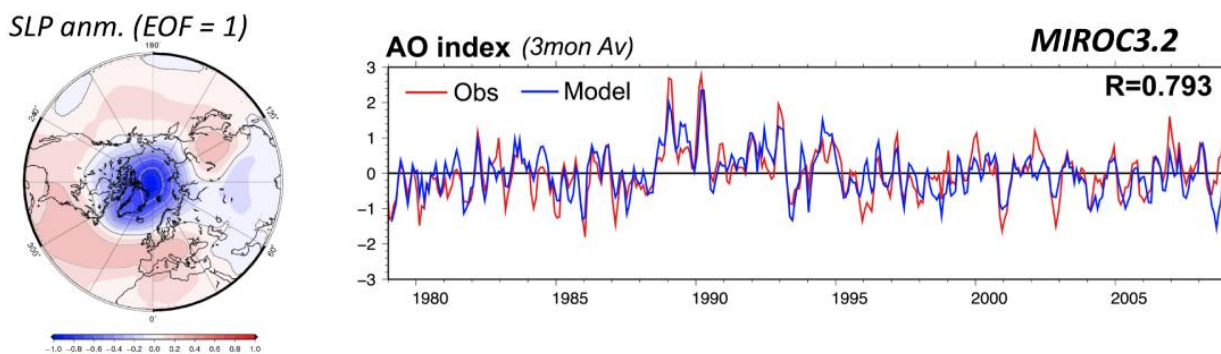
図(4)-2 衛星データ(TES/AURA)から得られた、赤道域における大気中層のHD0分布時系列データ(左図)と気候モデルの再現実験結果(右図)。図中の実線でかかれたコンターは、外向長波放射(OLR)データからMJOと同定された対流活動。破線は、OLRが $240\text{W/m}^2$ 以下の領域



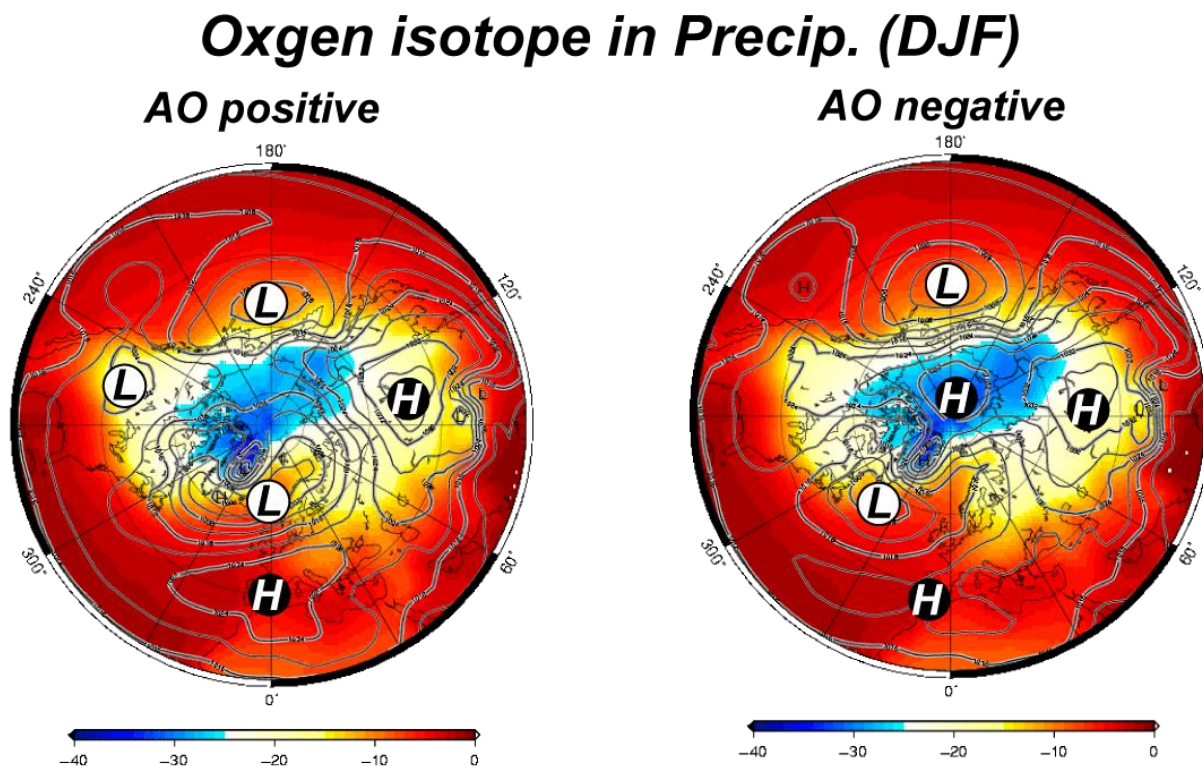
図(4)-3 左図：インドネシアバリ島で観測された降水同位体比の時系列変化データと気候モデルによる再現実験の比較。右図：海大陸地域における地点降水同位体比データ（10日平均値）と気候モデルの比較。





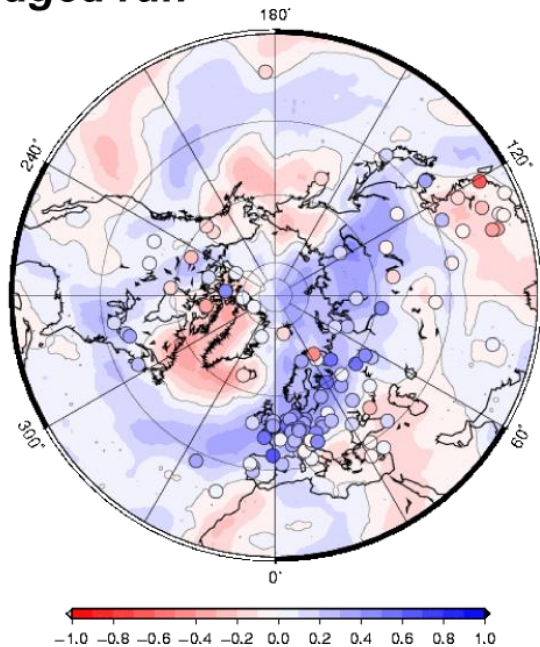
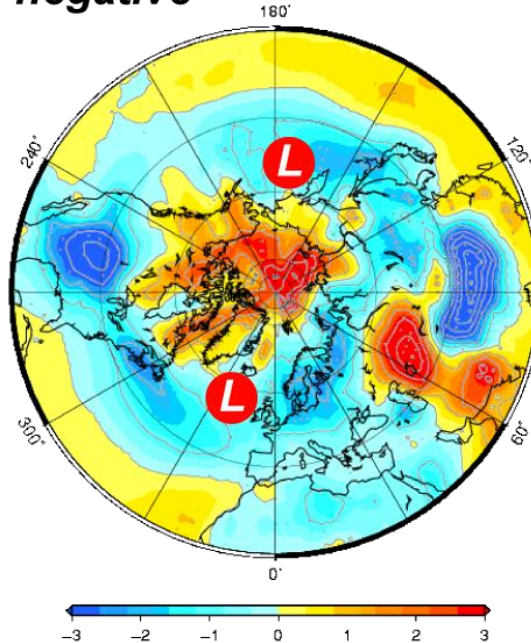
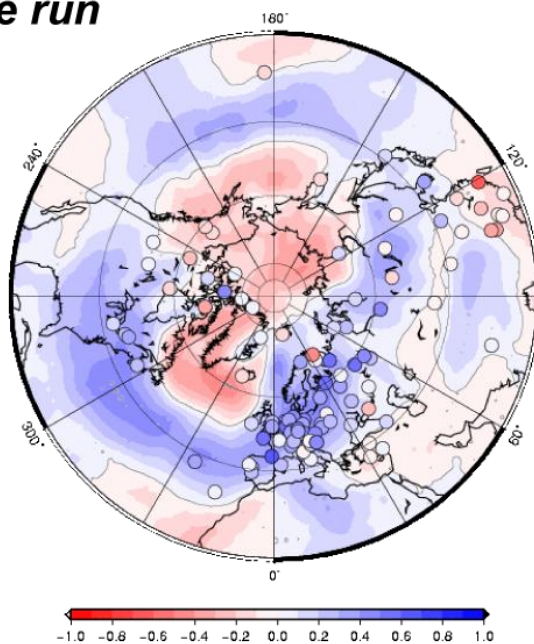
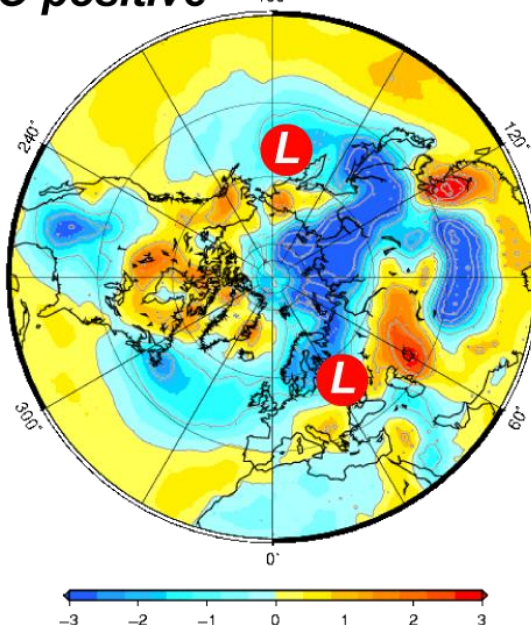


図(4)-6 データ同化した気候モデル(MIROC3.2)による、北極振動の構造と北極振動指数の再現(1978-2008)。



図(4)-7 データ同化した気候モデル(MIROC3.2)による、北半球冬期の酸素同位体比分布(降水)。左図：北極振動が正偏差(指数+2以上)。右図：北極振動指数が負偏差(指数-2以下)。



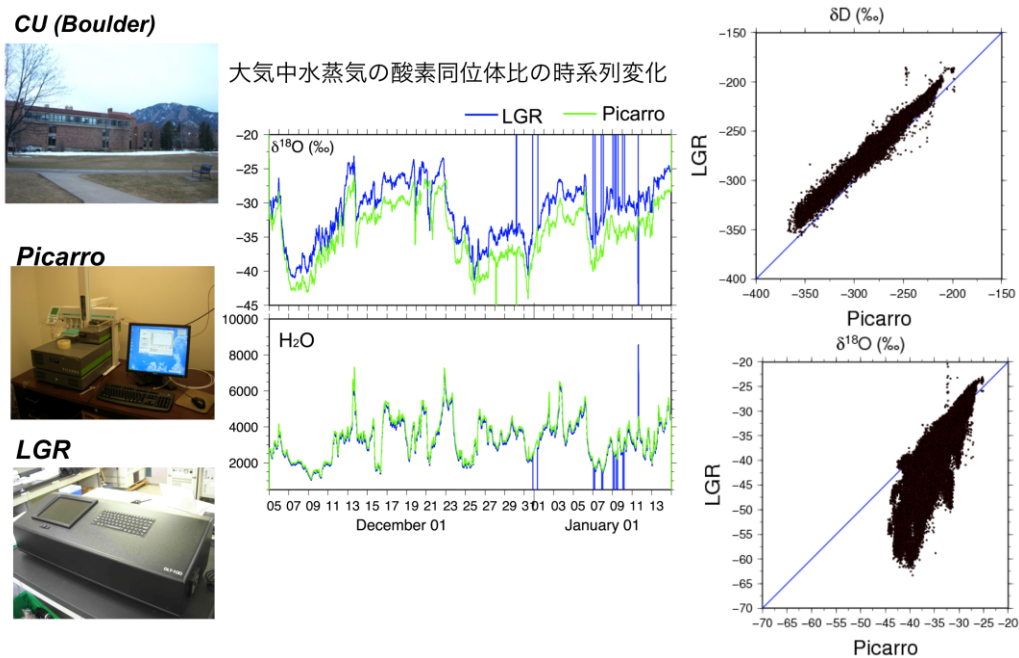
**AO vs.  $\delta^{18}\text{O}$** **Free - Nudged****Nudged run****AO negative****Free run****AO positive**

図(4)-8 気候モデルによる北極振動再現性検証。左図：酸素同位体比のアノマリと北極振動指数の相関係数分布。右図：データ同化しない実験とデータ同化ありの時の酸素同位体比の差。

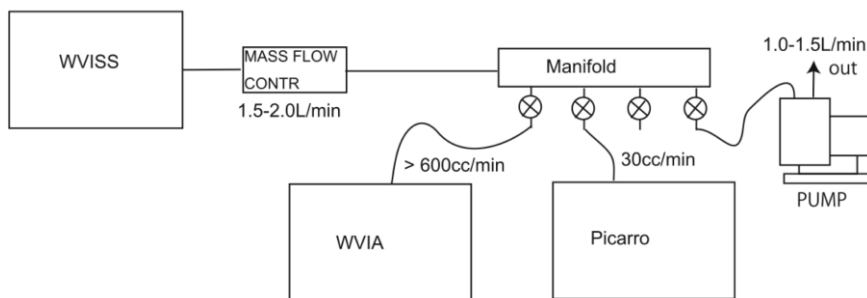
### (5) 現場水蒸気同位体『計測』手法の確立

2009年12月5日から2010年1月14日まで、米国コロラド大学において、LGRのWVIA(Water Vapor Isotope Analyzer)と、Picarro社製IWVA(Isotopic Water Vapor Analyzer)を使って、屋外から取り込んだ空気試料の連続計測を行った。結果は、図(5)-1に示すように、絶対値のずれはあるが、時系列変化はほぼ一致しており、LGRとPicarroの計測値を平面図にプロットすると、HD0は、傾き1の直線上にプロットされた(図(5)-1右上図参照)。しかし、 $H_2^{18}O$ は、水蒸気量が減少すると、LGR社製の装置は、Picarro社の結果よりも大きく低い値を示した(図(5)-1右下図参照)。これは、計測値が、水蒸気量の変化によって真値からはずれる水蒸気濃度依存性をもつことを示唆している。そこで、この水蒸気濃度依存性を定量的に評価する実験を行った(図(5)-2参照)。実験は、水蒸気発生装置を使って同位体比一様の水蒸気を生成させ、湿度を10000ppmから1000ppmまで減少させながらその同位体比応答を調べた(図(5)-3参照)。結果は、HD0と $H_2^{18}O$ 計測で異なり、特に、 $H_2^{18}O$ 計測では、LGR社製は5000ppm、Picarro社製は3000ppm以下になると、計測値が指数関数的に減少していた。また、LGR社製では、低湿環境下における水蒸気濃度依存性が大きく、図(5)-1にみられるような差が生じていた。HD0計測では、LGR社製は、 $H_2^{18}O$ 計測よりも湿度依存性が低いが、3000ppmになると次第にその計測値が減少していった。他方、Picarro社は、2000ppm以下になると $H_2^{18}O$ 計測とは逆に、水蒸気量の減少に対して計測値が増加する変化を示した。これらの結果は、現行版のシステムでは、低湿度での計測においては、互いに水蒸気濃度補正が必要であり、特にLGR社製では、実際の変化以上の補正を行わねばならない結果となった(しかし、この問題をLGR社に報告したところ、低湿度仕様のWVIAを開発し、Picarro社と同等の水蒸気依存性を示す製品を最近開発させた。この水蒸気濃度依存性の問題は、ユーザー自身がデータ補正を行うのではなく、メーカーの対応で改善されつつある)。最後に、すばやい同位体比変化に応答できるか、その反応速度実験を行った。これは、先の水蒸気発生装置を使って、室内の水蒸気同位体比よりも、約20%  $H_2^{18}O$ が濃縮している水蒸気を発生させて、その計測を行った後に、室内の水蒸気を計測して、そのレスポンス時間を計測した。結果は、LGR社製品では、ほぼリアルタイムでその変化を捕まえることができ、Picarro社では、試料空気を光学セルに吸引する速度が遅いためラグが生じたが、顕著なメモリー効果は見られなかった。

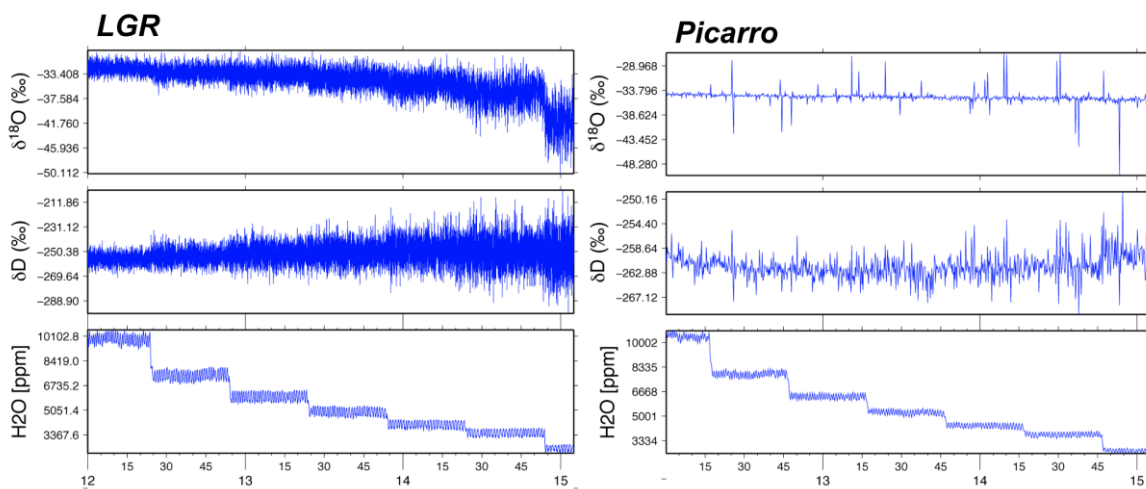
結論として、市販化されている装置はまだ開発段階であり、装置を野外フィールドに設置すれば、直ちに従来の分析法と同精度で計測ができるわけではないが、急速な勢いで進歩しており、数年以内には、気象測器と同じように同位体計測ができるようになることが本研究から明らかになった。この理由から、本課題では、最新の装置を使わず、既存の手法を使って、データ空白域での観測を実施した。



図(5)-1 LGR社製とPicarro社製の水蒸気同位体レーザー分光計の相互比較実験結果



図(5)-2 水蒸気濃度依存性試験ライン図



図(5)-3 水蒸気濃度依存性試験結果

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本課題では、最新の同位体データを使って気候モデル診断を行うという新しい課題に挑戦を行い、気候モデルの水循環場の再現性検証のツールとして、水の安定同位体利用の有効性を新しく提案した。特に、モデル物理過程の不完全性に基づく不確実性が高い熱帯地域において、その不確実性を高めている原因の探求が、同位体トレーサーを使って特定できることを示し、現在の気候モデルで問題になる、不確実性の高い積雲パラメタリゼーション決定において、同位体トレーサーを使った決定法が有効であることを示した。また、高緯度域では、同位体トレーサーは、南北水蒸気輸送のよい指標であり、北極振動等の気候変動に伴う水蒸気起源・輸送過程の再現性検証ツールとして用い得ることを示した。このような知見は従来の観測結果からは得ることができず、水循環の履歴を保持する水安定同位体トレーサーを用いることの最大の利点である。これらは、気候モデルのさらなる高精度化に非常に大きな貢献をすると考えられる。

さらに、この解釈を得る為に行った、同位体比を水循環過程に翻訳する過程では、日単位の同位体時系列データや衛星データから新しい同位体比の解釈を提案した。これは、同位体トレーサーの利用が普及している古気候復元研究に対して、新しい気候シグナルを提供することに繋がる。例えば、熱帯地域では、同位体と降水量に相関があることから、古降水量復元の指標として同位体データが用いられ、寒冷域では、気温とのよい相関を示すことから、古気温復元の指標として用いられてきた。今回の結果はそれをさらに一步すすめて、同位体比変化を直接的に決定している因子を解明することで、過去の同位体データを使って、さらに詳細なデータが得られることを示した。熱帯域では、同位体比の変化は降水量ではなく、組織化した対流雲群の通過に伴う活発な鉛直循環が同位体比の極小値を作っており、過去の同位体比変動は、その対流雲群（MJO等）の発生頻度が決めていると解釈できる。活発な雲群は、多量の香水をもたらす為に、従来の解釈も成り立つが、本研究結果から、さらにその多雨をもたらすシステムに関する情報も同位体トレーサーから得られることになる。寒冷域では、気温の変化に伴って水蒸気起源が変化し、これが同位体比の季節変化を作っていることを示した。これは、過去の同位体比変化は、現在と異なる大気循環によって水蒸気起源が変化し、これが結果として気温にも影響を及ぼしていると考えられる。このように、本研究の成果は、本研究課題が目的にしている、現在気候だけでなく、古環境復元研究にも応用できる。

また今回は、2年間という限られた時間であったので、気候変化に大きなインパクトを与える大規模現象の再現性に焦点を当てて研究を行ったが、この手法を地域スケールにも応用し、地域毎の気候モデル再現性検証を行う事も可能である。その研究を行うには、より詳細な現地データや、その地域にもたらす降水の水蒸気起源域での同位体データが必要になる。本課題では、その準備として、同位体データの空白域であった、洋上データの取得を開始するとともに、誰でも簡単に同位体計測が行える分析手法の開発作業にも取り組んだ。このデータ取得、分析法の開発に関してはまだやり残した部分も多いが、今後継続して研究を行い、本研究を更に発展させる形で、地域の水循環再現性診断の実現につながると期待される。



## (2) 地球環境政策への貢献

本研究から得られる成果は、気候システムモデルの高精度化に貢献し、温暖化予測の向上に資する。具体的には、将来予測の信頼性向上には欠かせない、積雲のパラメタリゼーションの改良に関して、同位体トレーサーを使ったチューニングを提案しており、これが実現されれば、熱帯域だけでなく、その対流活動に影響をうける中高緯度での再現性が高くなると期待できる。また、温暖化に伴う適応を検討する際には、地域毎に気候モデルが現在の水循環をどの程度正しく再現できているか情報を提供することが重要である。本課題は、2年間という限られた期間で、地域毎の評価を行うことはできなかったが、上述したように、今後の同位体データの蓄積と共に、今後引き続き挑戦していきたいと考えている。

## 6. 引用文献

J. Worden, K. Bowman and D. Noone; J. Geophys. Res. 111, D16309, doi:10.1029/2005JD006606 (2006)

“TES observations of the tropospheric HDO/H<sub>2</sub>O ratio: retrieval approach and characterization”

J. Worden, D. Noone, K. Bowman and TES science team and data contributors; Nature, 445, 528-532, (2007)

“Importance of rain evaporation and continental convection in the tropical water cycle”

N. Kurita, N. Yoshida, G. Inoue, and E.A. Chayanova; J. Geophys. Res., 109, doi:10.1029/2003JD003404, (2004)

“Modern isotope climatology of Russia: A first assessment”

## 7. 国際共同研究等の状況

国際原子力機関(IAEA)は、全球規模の水同位体観測ネットワークプログラムを実施するだけでなく、全球で観測されたデータをIAEAに集約し、すべての分野の研究者にデータを提供するサービスを行っている。申請者は、IAEAとWMOが共同で実施している、全球規模の降水同位体ネットワークプログラムであるGNIP(Global Network for Isotopes in Precipitation)のSSCメンバーであり、本研究課題で取得した洋上での水蒸気同位体観測データは、上記のデータセンターに提供して全世界のユーザーに公開することになっている。

また、本研究の成果から、熱帯対流活動観測に同位体トレーサーが非常に役立つことが実証されたことが評価され、次年度インド洋で予定されている、マッデン・ジュリアン振動(MJO)の生成メカニズム解明を目的とした国際共同観測プロジェクト(CINDY/DYNAMO 2011 <http://www.jamstec.go.jp/iorgc/cindy/index-j.html>)において、日・米・豪・仏の研究者で協力して同位体観測を行うことになった。執筆者は、日本の同位体観測チームの取りまとめを行うだけでなく、米国グループの観測プラン作成に関わり、その同位体観測記述を担当するなど、中核的な役割を担ってきた。現在は、米国チームのPI David Noone (Colorado University) 氏、豪州チームの Steven Sherwood (University of New South Wales)、仏チームの Sandrine Bony (CNRS) 氏らと協力しながらサイエンスプランの議論を行っている。

さらに北極域では、水の同位体を使って気候変化に伴う北極海の環境変化を明らかにする目的で、環北極海域に水蒸気同位体分光装置を展開して、水蒸気同位体比をリアルタイムでモニタリングする国際観測プロジェクトに関する議論も始まっている。現在のところ、コロラド大学(アメリカ)、NOAA(アメリカ)、LSCE(フランス)、コペンハーゲン大学(デンマーク)、レイキャビック大学(アイスランド)、ストックホルム大学(スウェーデン)、Environment Canada/CANDAC(カナダ)が参加する予定である。日本からは執筆者が参加し、その一環として今夏からアラスカのバロー岬にあるNOAA GMDサイトにて観測を開始する。これは、本研究課題を通じて、極地域での同位体観測の重要性だけでなく、装置開発を積極的に行った事が評価され、世界で始まろうとする国際的な枠組みに参加を要請されるだけでなく、専門家として意見を期待されるようになった。

また、気候モデルでは、2008年秋に、国際的な同位体気候モデルの相互比較を実施する為のキックオフ会議(GNIP-SWING Workshop)がIAEAの協力で開催され、申請者もその会議に参加すると共に、その相互比較プロジェクト SWING-2に参加した。現在は、この相互比較プロジェクトは、CMIP、PMIPのような気候モデル評価を行う国際組織の傘下に位置していないが、将来的に、PMIPプロジェクトの一環として行う方向で話が進んでいる。

本研究を始める前までは、日本の同位体研究は、海外の同位体研究コミュニティから軽視されがちであったが、観測空白域での観測、気候モデル開発、そして次世代の同位体分析装置の開発等を行う事により、海外からもその活動が評価され、様々な共同研究に誘われるようになり、国際共同研究の中の一部を任されるようになってきた。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) N. Kurita, K. Ichianago, J. Matsumoto, M. D. Yamanaka, and T. Ohata : J. Geochemical Exploration, 102, 113-112 (2009)

“The relationship between the isotopic content of precipitation and the precipitation amount in tropical regions”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特になし

<その他誌上発表(査読なし)>

### (2) 口頭発表(学会)

- 1) N. Kurita, SWING-GNIP WS, Vienna, Nov (2008). invited

“Diagnosis of the present hydrological cycle using MIROC GCM-iso”

- 2) N. Kurita, K. Shimada, and T. Kamoshida, ASSW 2009, Bergen, March (2009)

“Impact of the Arctic storm to accelerate autumn freeze in the Arctic Ocean”

- 3) N. Kurita, Invited seminar, LSCE, Paris, April (2009).

“Introduction of the high-frequent isotopic variation in the global hydrological

cycle”

- 4) N. Kurita, Invited seminar, University of Colorado, Boulder, July (2009).  
“Introduction of daily-basis water isotope monitoring in Asia”
- 5) 栗田直幸, 大畑哲夫: 日本気象学会 2009 年度秋季大会, 福岡, 2009 年 11 月  
シベリア域の秋期降雪にみられる北極域水循環の変調
- 6) N. Kurita, D. Noone, G. A. Schmidt, H. Yamada, K. Yoneyama, AGU fall meeting, San Francisco, December (2009).  
“Water vapor recycling induced by the MJO convection: Application of water isotope tracers to the study of tropical convection”
- 7) N. Kurita, WAVACS workshop on the water isotopologue in the atmosphere, Paris, April (2010). invited  
“Water vapor isotope monitoring and its modeling over the Ocean”
- 8) 栗田直幸, 日本気象学会 2010 年春季大会, 東京  
水同位体トレーサーを用いた気候モデルの再現性評価 (アブスト提出済み)
- 9) 栗田直幸, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 千葉  
シベリア域における北極海起源降雪の変動 (アブスト提出済み)
- 10) N. Kurita and T. Ohata, IPY conference 2010, Oslo, Norway  
“Modulation of the arctic origin snow to Siberia” (Abstract was submitted)
- 11) 栗田直幸, David Noone, 第 58 回質量分析総合討論会, つくば, 招待講演  
CRDS 同位体レーザー分光計の相互比較実験, (アブスト提出済み)

(3) 出願特許

特になし

(4) シンポジウム, セミナーの開催 (主催のもの)

特になし

(5) マスコミ等への公表・報道等

特になし

(6) その他

特になし