

# 気候変動予測とアフリカ南部における応用

— 地球規模課題対応科学技術協力課題 (SATREPS) プロジェクトの経験から



## 山形俊男

Toshio YAMAGATA

1948年栃木県生まれ。東京大学名誉教授。海洋研究開発機構上席研究員。海洋政策研究財団特別研究員。専門は海洋物理学、気候力学。太平洋のエルニーニョ現象やインド洋のダイポールモード現象などの気候変動現象の発生予測シミュレーションと予測情報の社会展開を進めている。海洋と気候変動の研究により2004年米国気象学会スベルドラップ金メダル賞受賞。

太平洋のエルニーニョ現象やインド洋のダイポールモード現象など、異常な気候変動現象の発生を予測する実験研究が近年大きく進展している。その成果を踏まえ、気候変動リスクにきわめて脆弱なアフリカ南部の異常気象にともなう被害を軽減するため、気候変動予測技術の向上にむけたプロジェクトが実践されている。

### 1 気候変動現象とは

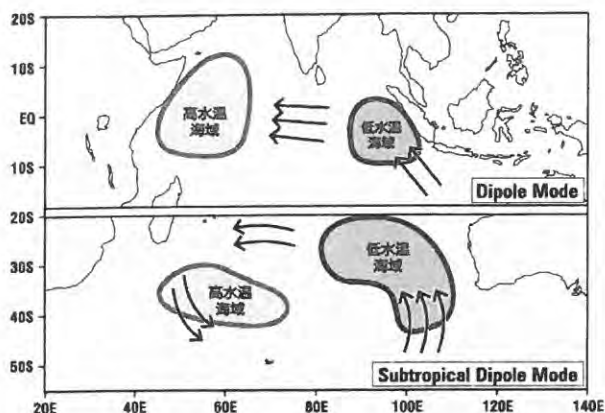
最初に意味論的な話題から入ることをお許しいただきたい。それは気候変動と気候変化の意味の違いについてである。巷間にとどまらず、政府の公文書においても、この二つの概念が縮退し、気候変動の用語で扱われている。気候変動は Climate Variations に対応する用語であり、大気や海洋の気候の平均状態からのずれ(偏差)を意味する。気候の平均状態を得るのに、気象庁では30年平均を用いている。

一方、気候変化とは Climate Change に対応する用語で、こうして得られた気候の平均状態が長期的に変化することである。気候変化を起こす主な原因は大気組成の変化、地球が受ける太陽放射量の変化など、大気海洋システムの外部にある。本来であれば気候変化というべき事柄が気候変動と呼ばれているケースがいくかに多いことか。

主要な気候変動を引き起こす大気海洋現象はあたかも生物のように数年に一回程度の頻度で発生、成長、成熟、減衰を繰り返し、気温や海水温、風系、積雲活

動などに明瞭なパターンをもって出現する。熱帯太平洋に4~5年くらいの間隔で発生し、世界各地に異常気象を引き起こすエルニーニョ現象は典型的な気候変動現象である。東部熱帯太平洋の海水温が上昇するエルニーニョ現象の発生により、わが国では1993年に冷夏に見舞われ、東北地方では稲作、とくに冷害に弱いササニシキの生産が大打撃を被った。

うって変わって1994年の夏は猛暑となり、熱中症患者が続出、また家畜の酷暑害が大きな話題になった。これはインド洋熱帯域に発生したダイポールモード現象 [Saji *et al.* 1999; 図1] によることが、その後の研究により明らかになった。2004年の猛暑の研究から、熱帯太平洋には、日付変更線付近の海水温が上昇し、東太平洋のペルー沖では下降するエルニーニョモード現象が発生していたことが明らかになった [Weng *et al.* 2007; Ashok *et al.* 2007]。地球温暖化にともなう熱は主に海洋で吸収され、地球温暖化の進行を緩和しているが、一方で海洋の温暖化が進んでいる。それが気候変動に影響し始めたのではないかと、目下、国際的に活発な研究が展開されている [Ashok and Yamagata 2009]。



	正のダイポールモード現象 (上)	正の亜熱帯ダイポールモード現象 (下)
発生海域	インド洋熱帯海域 (赤道を挟んで北緯10°～南緯10°の間)	南インド洋亜熱帯域 (南緯20°～南緯50°)
発生時期	7月～11月 (ピーク10月)	11月～3月 (ピーク2月)
最近の発生年	1961、1967、1972、1982、1994、1997	1967-68、1973-74、1975-76、1980-81、1981-82、1992-93
発達のメカニズム	赤道上で吹く風と東西の海面水温偏差が互いに助長し合って発達	高気圧周辺に吹く反時計回りの風と海面水温偏差が助長し合って発達
最終状態	西側海面：高温 東側海面：低温	南西側海面：高温 北東側海面：低温
気候変化	インド洋東部に干ばつ 東アフリカ沿岸諸国に洪水	アフリカ中部に洪水

図1 インド洋のダイポールモード現象と亜熱帯ダイポールモード現象

二酸化炭素に代表される温暖化気体の濃度は産業革命以来、一貫して上昇し、現在では390ppmを超えるに至っている。人間活動が地表温度を上昇させる可能性はスウェーデンの化学者アレニウスにより19世紀末に指摘されていたが、2007年に出されたIPCC第4次評価報告書において、両者の関係が科学的見地から確実視されるに至った。生態系を含む地球環境に長期的に大きな意味をもつ、この地球温暖化は大気組成の変化による気候変化であって、気候変動ではない。気候変化は、自然変動である気候変動現象の発生頻度、振幅、現象同士の関係、季節との関係などに長期的な変動を与えるものとして理解すべきなのである。

2009年に開催された第3回世界気候会議では気候変動現象の変調とそれによる極端現象が大きな社会・経済的被害を人類社会に及ぼしていることを受けて、気候変動予測を推進し、その結果を防災、減災に役立

させる応用研究とその社会サービスの重要性が謳われた。相変わらず地球温暖化そのもののシミュレーションとそれへの適応策に主力を注ぐわが国の体制は、冒頭で述べた意味論的な問題を超越して、先進諸国の動きに後れをとるのではないかと危惧している。

## 2 気候変動現象の予測

気候変動現象の予測 (Prediction) とは、衛星や現場観測から得られる地球観測データを初期値として、大気海洋結合大循環モデルの初期値問題をコンピュータを用いて解き、数ヶ月から数年先までの未来を実際に予測 (Predict) するものである。天気予報の延長線上にあるものといってもよい。天気予報との違いは海洋の変動も考慮していることである。地球温暖化のシミュレーションは未来社会のシナリオにもとづいて、未来の気候を予想するもので、科学に不可欠な検証プロセスは含まれない。その意味で科学の範疇にある気候変動予測とは本質的に異なるものである。わたしたちの社会や産業活動に大きな影響を及ぼす異常気象、あるいは大気や海洋の極端現象は、自然界の変動である気候変動によるので、気候変動現象とその世界各地への影響を予測することは、防災、減災に有効なだけでなく、社会生活やさまざまな産業活動に直接的に貢献することができる。

気候変動予測に必要な初期データは、主に衛星による海表面温度などの観測に依存しているが、海洋観測がこれを現場検証し、補足している。現在、熱帯太平洋に約70台のブイが係留され、リアルタイムで大気海洋データが取得できる。これらのデータを活用して大気海洋結合大循環モデルを用いた気候変動予測 (あるいは季節予測) 実験が先進各国で活発におこなわれるようになった。最近是个々のモデルのバイアスを複数のモデルを用いることで工学的に減じるMME (Multi-Model Ensemble) 予測技術が発展している。これにはヨーロッパ諸国の連合によるDEMETER (Development of a European Multi-model Ensemble

system for seasonal to interannual prediction) プロジェクト、アジアでは APEC 気候センター (釜山) を中心とする APCC/CliPAS (Asia-Pacific Economic Cooperation Climate Center/Climate Prediction and its Application to Society) プロジェクトがある。

わたしの所属する海洋研究開発機構では、同一のモデルで大気海洋間のフラックス表現を組み替えることによる一種の MME 予測実験により、2006 年に発生したインド洋のダイポールモード現象を 2005 年 11 月の時点で予測することに世界で初めて成功した。この現象にともなうオーストラリア、インドネシアの干ばつや 2006 年秋の赤道域東アフリカの豪雨も的確に予測していたことから、地域気候予測への道も拓いたといえる。しかし、インド洋には太平洋のような現場観測システムはまだ完備していない。そこで地球観測サミットのもと、全球地球観測システム GEOS (Global Earth Observing System of Systems) の一環として、日米を中心にオーストラリア、インド、インドネシア、中国などが協力してインド洋係留ブイ計画 RAMA が進行中である。海賊の出没する西インド洋が問題であるが、完備するならば、インド洋のエルニーニョ現象ともいべきダイポールモード現象の発生予測がより高い精度で可能になるであろう。

社会的にも経済的にも大きな意義をもつ気候変動予測の高度化に向けて推進すべき課題は 1) 低緯度の熱帯起源の現象だけでなく、中、高緯度起源の現象についても予測モデルを確立し、持続的に運用すること、2) さまざまなエンドユーザーや政策担当者が予測情報を利用しやすいように、予測の応用研究を進めること、3) 予測情報を途上国ユーザーに迅速に伝えるメカニズムの構築と応用技術の移転を急ぐこと、等である。

このような視点から、わたしたちのグループは科学技術振興機構 (JST) と国際協力機構 (JICA) の支援のもとで、南アフリカ共和国の政府機関、大学と連携して、地球規模課題対応国際科学技術協力 (SATREPS) 課題「気候変動予測とアフリカ南部における応用」プロジェクト (平成 21 年度～24 年度) を推



図2 南アフリカ共和国の気候研究者との連携

進してきた (図 2 および [http://www.jamstec.go.jp/apl/satreps\\_sa/index.html](http://www.jamstec.go.jp/apl/satreps_sa/index.html), <http://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~tozuka/SATREPS/index.html> 参照)。

### ③ アフリカ南部の気候変動予測

途上国の多いアフリカ南部は自然に強く依存した生産形態をとっており、気候変動リスクに対してきわめて脆弱である。異常気象にともなう被害を軽減するため、南アフリカ共和国においては大気海洋結合大循環モデルにもとづいた気候変動予測技術の向上が喫緊の課題となっている。そこで、わたしたちの SATREPS プロジェクトでは、アフリカ南部において適用可能な季節気候予測システムの能力強化をめざした ([http://www.youtube.com/watch?v=vSF0Vqt\\_qjo](http://www.youtube.com/watch?v=vSF0Vqt_qjo))。

アフリカ南部の気候変動現象の予測をおこなうには、この地域に影響を及ぼす気候変動現象を科学的に解明し、理解する必要がある。そこで、アフリカ南部の降水に大きな影響を与える南インド洋と南大西洋の亜熱帯ダイポールモード現象 [Behera and Yamagata 2001; 図 1]、およびベンゲラ・ニーニョ現象 (南半球のアフリカ西岸の湧昇域で発生する地域的な気候変動現象) の発生・減衰メカニズムの研究をおこない、その詳細を初めて明らかにした。とくに、南インド洋の亜熱帯ダイポールモード現象については先行研究ではマスカリン高気圧の強化と南偏による風系の変化により潜熱偏差が生じ、亜熱帯ダイポールモード現象が発生するとされてきたが、本プロジェクトにより、潜熱偏差により海面水温偏差が形成されるのではなく、潜熱偏差により混合層の厚さに偏差が生じ、短波放射に対する混合層温度の感度が変わることによって、海面水温偏差が形成されることがわかった。南大西洋の亜熱帯ダイポー



図3 南アフリカにおけるシンポジウムでの集合写真

ルモード現象についても、同様のメカニズムによって発生することが明らかになった。

また、IPCC が用いた最先端の大気海洋結合モデルのアウトプットを用いて亜熱帯ダイポールモード現象、アフリカ南部の降水の季節変動、およびインド洋南西部の巨大な海水湧昇現象であるセーシェルドームの再現性を調べた。さらに、不確定性の大きい積雲対流のパラメタリゼーションに注目して大気海洋結合モデルの開発をおこない、大西洋赤道域の海面水温の平均場を再現することに世界で初めて成功した。これらの成果は、気候変動予測に用いる大気海洋結合大循環モデルの精度を大きく向上させるものである。

これらの現象の把握および結合モデルの開発と並行して、海洋研究開発機構の季節予測モデル(SINTEX-F)による広域予測を毎月おこない、1年先までの季節予測を海洋研究開発機構のホームページで公開している ([http://www.jamstec.go.jp/frcgc/research/d1/iod/sintex\\_f1\\_forecast.html](http://www.jamstec.go.jp/frcgc/research/d1/iod/sintex_f1_forecast.html))。とくに、今まで予測が難しいとされてきた中緯度の気候変動現象(亜熱帯ダイポールモード現象)の予測に世界で初めて成功することができた。この広域予測結果をアフリカ南部にダウンスケールするために必要な領域大気モデル(WRF)を再構成し、ダウンスケール結果と観測データとの比較検証も進めている。さらに、海洋研究開発機構の地球シミュレータを使い、西ケープ州をターゲットとしたシームレス・ダウンスケールリングのためのモデル開発をおこない、西ケープ州のブドウの生育に重要な霧の再現にも成功した。

これらの成果をふまえ、これまで南アフリカ共和国でおこなわれてきたふるいタイプの予測手法を先端的な大気海洋結合モデルによるアンサンブル予測に移行

させる試みをおこなった。広域予測結果ならびにダウンスケールされた地域予測結果を配信するウェブサイトを構築するとともに、予測データの直接的な社会応用に向けて季節予測システムから出力されるさまざまなデータのバイアスを補正する汎用的な手法を開発した。河川水量変動予測や穀物生産量変動予測などの応用研究への活用が見えてきたところである。南アフリカの農家のほとんどはダムや灌漑設備をもたない零細農家で、降雨に頼った農業を営んでいる。水管理施設をもたない彼らにとって、降雨の不足は収穫物の品質の低下に直結する。このような状況に対し、干ばつを予測し、前もって貯水することで農作物の品質や量が落ちるリスクを軽減できる可能性がある。日本側研究者が南アフリカの零細農家を訪問した際には、季節予測結果が南アフリカで配信されることを心待ちにする声が聞かれた。

これまでに本プロジェクトでは南アフリカ側研究者と7つの国際シンポジウム(図3)、10回のワークショップを共催してきた。また日本側研究者14名が南アフリカ各地の大学で集中講義をおこない(図4)、南アフリカ側研究者27名が日本で研修をおこなうことで、能力向上にも貢献している。

技術移転に関しては領域大気モデル(WRF)のプレトリア大学への移植、東京大学理学系研究科の連携チームが開発した中解像度大気海洋結合モデル(UTCM)の南アフリカ科学産業技術研究所(CSIR)およびケープタウン大学への移植等が順調におこなわれている。「早期予測システム」のデータの配信形態については、南アフリカ科学産業技術研究所(CSIR)の全面的協力を得て、「Seasonal Forecasting Information Dissemination Workshop」が2012年4月に開催され、そこで季節予測がもつ可能性と予測データの配信についての今後のあり方が検討された。このワークショップはそれまで南アフリカ国内の諸機関で連携が取られていなかった気候変動予測の研究活動を、今後の社会的活用を視野に入れた、より包括的な活動へと発展させるモーメントを各機関が初めて



図4 南アフリカの大学生への集中講義



図5 リンポポ州に設置された自動気象観測装置(供与機材)

共有したという点においても大きな転換点になった。

本プロジェクトは、アフリカ南部の異常気象予測をターゲットとしておこなってきたが、こうして蓄積された中高緯度の異常気象予測のノウハウは、南アフリカ共和国と赤道を挟んでほぼ同じ緯度帯にある日本の異常気象予測技術の向上にも貢献することが期待される。また、数年先までの短期気候変動予測の実用化による新しいソフト産業(気候データ・サービス)の創成にもつながることが期待される。

#### 4] プロジェクトの成果と展望

本プロジェクトは気候変動リスクに脆弱なアフリカ南部において、大気海洋結合大循環モデルによる中緯度における世界初の季節予測とそのダウンスケーリング情報を展開し、異常気象による被害を軽減するシステムの能力強化をめざしたものである。1) 異常気象を引き起こす原因となる気候変動現象を解明できたこと、2) 中緯度の気候変動予測可能性を世界で初めて示すことができたこと、3) 南アフリカ気象局の協力により、気候変動予測情報を社会展開することが可能になったこと、4) 現地研究者による自動気象計を用いた現場

検証(図5)と導入したコンピュータにより、現地において大気海洋大循環モデルによる予測実験が開始されたこと、5) 農業や感染症への応用など、気候変動予測情報のさらなる発展が見えてきたことなど、本プロジェクトの本来の目標を十分達成しただけでなく、次の広範な展開も見えてきたと確信している。本プロジェクトを通して現地の機関間連携がよくなったことで感謝されたが、これは望外の喜びであった。

現地での集中講義、シンポジウム、ワークショップ、また日本での研修、シンポジウムも数多く開催され、若手、シニアを問わず両国研究者間に緊密な連携がなされるようになったのは今後に向けた大きな財産である。すでに本プロジェクト終了後の自発的な交流計画も生まれている。計画期間中に東京大学で複数の大学院生が学位を取得し、現地からも日本学術振興会の論博制度を活用して東京大学に留学中である。途上国とともに未来を拓くSATREPSプロジェクトが制度上の理由で一期計画のみで終了せざるを得ないのはとても残念である。本プロジェクトは南アフリカを対象としたが、気候変動予測は地政学的な基盤情報を与えるものであり、環境や人の健康に関係する世界各地の多くの計画に貢献できるのではないかと思った次第である。

#### 引用文献

- Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng and T. Yamagata 2007 El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research Oceans* 112:C112007, doi:10.1029/2006JC003798
- Ashok, K. and T. Yamagata 2009 Climate Change: The El Niño with a difference. *Nature* 461: 481-484
- Behera, S. K. and T. Yamagata 2001 Subtropical SST dipole events in the southern Indian Ocean. *Geophys. Res. Lett.* 28(2): 327-330
- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran and T. Yamagata 1999 A Dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature* 401: 360-363
- Weng, H., K. Ashok, S. K. Behera, S. A. Rao and T. Yamagata 2007 Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Climate Dynamics* 29: 113-129