



平成27年度 気象研究所研究成果発表会

発表要旨集

平成28年3月24日(木) 13時30分～16時30分
一橋大学 一橋講堂



気象庁気象研究所

ごあいさつ

本日は、気象研究所研究成果発表会にお越し頂き、誠にありがとうございます。

気象研究所は、気象庁付属の研究機関として、気象庁が発表する各種情報の改善に役立つ実用的な研究や、気象業務の将来を見据えた基礎的・基盤的な研究など、幅広い研究活動を通じて気象業務の発展に貢献してまいりました。特に、最近では、防災や地球環境に関わる情報の一層の精度向上を目指して、「台風・集中豪雨等対策」「地震・津波・火山対策」「気候変動・地球環境対策」の強化に関する研究を重点研究に位置づけて取り組んでおります。このような私どもの研究活動とその成果を、できるだけ分かりやすく、幅広く皆様にお知らせして、気象研究所をより身近な存在として感じて頂くために、平成 15 年度からこの研究成果発表会を実施しております。

さて、今回の発表会では、異常気象や地球温暖化などの話題を通じて皆様の関心が高いと思われる「気候変動研究の最前線」というテーマで、気候変動・地球環境分野の最先端の研究をご紹介します。

最初の講演では、当所で行っている気候変動・地球環境研究の全体像として、研究課題と気象庁業務との関係や課題間の関連についてご案内します。

2 番目は「気候変動予測研究の過去・現在・未来」と題して、当所で行っている気候変動研究の歴史と将来展望をご紹介します。気象庁は 1981 年に気候変動関連の業務を開始し、同時に当所では気候変動の研究をスタートさせました。以来 35 年間、当所は気候変動研究の主要な機関のひとつとして大きな役割を果たしています。

3 番目は、私どもが提供する地球温暖化予測の結果をどう使うのかという研究をご紹介します。地球温暖化が進むと私たちの生活にどんな影響が出るのか、それに対してどんな対策をとるべきかという問題は、農業や生態、水文等、様々な分野の研究者と一緒に研究しています。日々の天気変化や季節変化の裏で静かに進行している地球温暖化の影響を具体的に解説いたします。

4 番目は海洋の変動を予測する研究です。地球表面の 7 割を覆う海洋は気候変動で大きな役割を担っています。また、異常気象の原因として「エルニーニョ」が頻繁にメディアにも取り上げられます。この講演では、エルニーニョのような数年の時間スケールの現象から数百年後の海洋の様子まで、非常に幅広い時間スケールに及ぶ海洋の変動を予測する取り組みについてご紹介します。

最後の 5 番目は、空に目を向けて、成層圏と呼ばれる上空で起きている現象が気候に及ぼしている影響を調べた研究です。近年、大雪の原因として「北極振動」という言葉をお聞きになった方もいると思いますが、成層圏と対流圏は互いに影響を及ぼし合っており、数週間から数か月程度の天候にとって成層圏の変動は非常に重要なことが分かってきています。成層圏の現象とその影響を予測する研究をご紹介します。

今回の研究成果発表会を通じて、気象研究所の活動についてご理解を賜り、今後、一層のご支援を頂ければ幸いです。

気象研究所長 永田 雅

プログラム

菊池 真以 氏
(気象キャスター)

13:30-13:40 開会の挨拶

気象研究所長

13:40-13:50 気象研究所での気候変動研究概要

研究総務官 蒲地 政文

13:50-14:20 気候変動予測研究の過去・現在・未来

気候研究部 部長 尾瀬 智昭

14:25-14:55 温暖化予測情報をどう使うか

環境・応用気象研究部 部長 高数 出

15:00-15:10 休憩

15:10-15:40 エルニーニョなどの海洋の変化を予測するために

海洋・地球化学研究部 室長 山中 吾郎

15:45-15:15 成層圏の変動の気候への影響について

気候研究部 室長 黒田 友二

16:20-16:30 閉会の挨拶

気象研究所研究成果発表会実行委員長

気象研究所での気候変動研究概要

○蒲地政文(気象研究所研究総務官)

1. はじめに

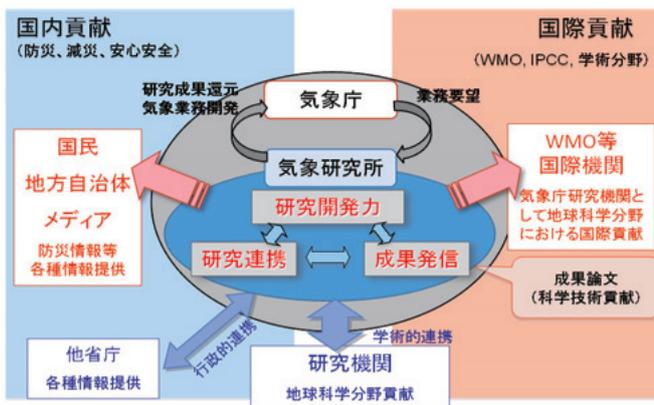
気象研究所は、気象庁に求められる諸課題に対して、科学的な知見に基づいて的確に答えられるよう、気象業務への実用的技術の提供を目指し、三つの研究分野(台風・集中豪雨等対策、地震・火山・津波対策及び気候変動・地球環境対策)の強化に関する研究を実施している。それらの研究を遂行するにあたり、5年間に達成すべき研究目標を見据えて、5年以内に業務化のめどをつける問題解決型の研究・技術開発として「重点研究課題」を設定している。また5年～10年後をめどとした実用化をめざす基盤的な研究・技術開発として「一般研究課題」を設定し、世界をリードする先進的な課題にも積極的に取り組んでいる。これらの研究の実施にあたり、基本方針として研究開発力を向上し、研究連携を促進させ、着実な成果発信につなげることに努めている(第1図参照)。

この成果発信の一つとして、毎年研究成果発表会を開催し、一般の方々に成果を広く知って頂き、また多様なご意見を頂く場の一つとしている。今年度は、気候変動研究に関するトピックを選んで、研究成果を紹介することになった。

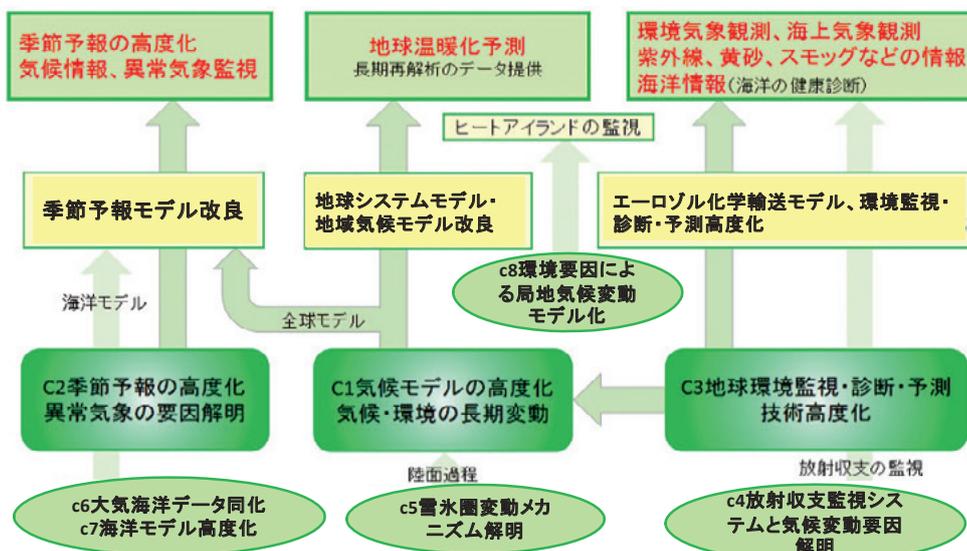
2. 気候変動研究

気候変動・地球環境研究分野では、重点研究3課題と一般研究5課題を推進している。重点研究では:C1 気候モデルの高度化と気候・環境の長期変動に関する研究、C2 季節予報の高度化と異常気象の要因解明に関する研究、C3 地球環境監視・診断・予測技術高度化に関する研究、の3課題が、また一般研究では:c4 放射収支の監視システムの高度化と気候変動要因解明に関する研究、c5 雪氷物理過程の観測とモデル化による雪氷圏変動メカニズムの解明、c6 大気海洋結合データ同化システムの開発に関する研究、c7 海洋モデルの高度化に関する研究、c8 環境要因による局地気候変動のモデル化に関する研究、の5課題が現在推進されている。それらの相関図を第2図に示す。

大気から海洋・陸面過程、熱帯から極域雪氷圏、境界面での局地的な現象から全球の気候モデルという、観測からモデルまで多種多様なテーマを上記8課題の中で研究している。本日の講演会では、それらの研究の中から、気候変動研究の全体像、温暖化、エルニーニョ、成層圏から伝搬する対流圏での気候変動への影響について、発表する。



第1図: 気象研究所での研究の基本方針



第2図: 気候変動・地球環境研究分野間と気象業務との連関

気候変動予測研究の過去・現在・未来

○尾瀬智昭(気候研究部)

1. はじめに

地球温暖化の影響が現実化するなか、昨年、日本では「気候変動の影響への適応計画」が決定され、国際的には京都議定書(1997)以来の気候変動対策の枠組みであるパリ協定が採択された。気象庁は1981年に気候変動対策室を設置し、気象研究所では地球温暖化予測研究を開始した。その成果はIPCC第1次評価報告書から貢献している(時岡, 2015)。

地球温暖化のメカニズムは昔から指摘されてきたことであったが、懐疑的な声が少なくなったのはそれほど昔のことではない。過去30年間は気候変動予測研究の飛躍の時代であり、地球温暖化や気候変動の理解、研究手法、社会への応用が大きく転換した。この中で一つの中心的な役割を果たしてきた気象研究所における気候変動予測研究について、過去から現在までの流れと将来の展望を紹介したい。

2. 天気予報と気候の予測 —似て非なる予測原理

気象研究所では天気予報の基礎となる大気の数値予報モデルに海洋の数値モデルを組み合わせた気候モデルによって、今世紀末までの地球温暖化予測実験を、おおよそIPCCの報告書に合わせて実施してきている。

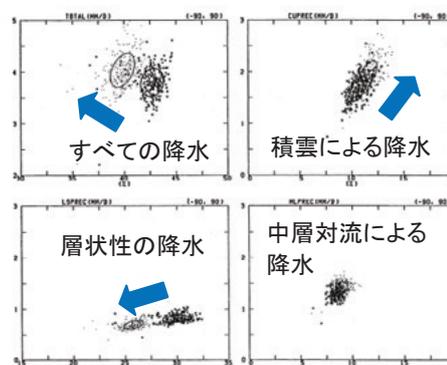
しかし、気候の予測は、今日から続く100年先までの天気予報ではない。天気予報は、大気の流れの中で日本付近に次に来る高低気圧を予測するのが目的であるが、たとえば、地球温暖化予測は、温室効果気体増加後の地球のエネルギー収支で決まる地球の落ち着き先を予測することが目的である。このため、気候モデルでは、地球のエネルギー収支に大きな影響を与える温室効果気体、雲、雪氷、海洋などすべてをもれなく、ひとまず大きなあやまりがないように数値モデル化する必要がある。同じ雲でも、天気予報モデルでは雲といえば降水現象のモデル化であるが、気候モデルでは放射に影響を与える雲のモデル化に多くの注意を払う必要がある(たとえば、Ose(1993))。

3. 過去の気候変動予測研究 —地球はどうなる？

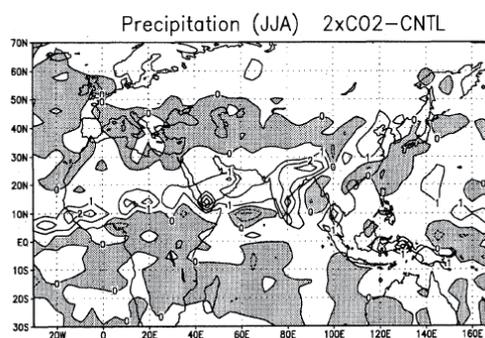
過去の気候変動予測は「もしほんとうに地球温暖化が起きたら」が前提で、ほんとうかどうか21世紀末になるまでわからないと揶揄される研究であったが、国際的にみると温暖化研究はかなり進んでいて、主な結論は今日でも大きな変更はな

い。予測結果は理論的に解析されて説明できる結果であるためだろう。気象研究所の気候予測研究から生まれた成果の中にも、今日の研究につながる重要な予測結果が生まれた。

第1図はNoda & Tokioka(1989)の結果である。層状に広がった雲からのシトシトと降る雨は地球温暖化によって減少し、積雲対流によって降る強い雨が增加することを予測している。Kitohほか(1997)は、降水量がアジアやアフリカのモンスーン地域の内陸部で増加し、地中海など乾燥域ではさらに減少する将来変化を示した(第2図)。



第1図: (縦軸)降水量(ミリ/日)と(横軸)降水面積(%), 現在と2倍CO₂時と比較。Noda & Tokioka(1989)からの引用。文字と矢印(将来変化を示す)は、発表者が追加。



第2図: 2倍CO₂時のアジアの夏季降水量変化。Kitohほか(1997)。等値線は1mm/日ごと。陰影は減少を示す。

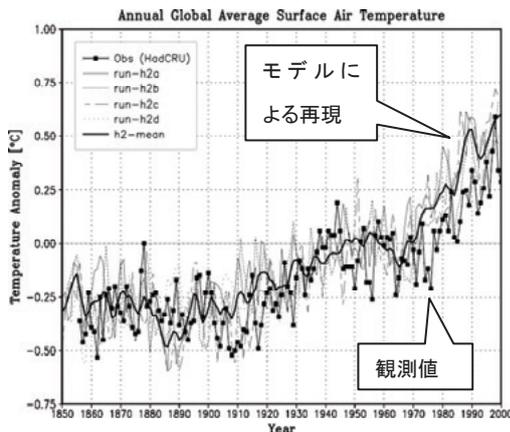
1990年代以前の気候モデルでは、梅雨や夏の太平洋高気圧、冬の低気圧などの表現が十分ではなく、世界には日本列島が無い気候モデルも多かった。気象庁の天気予報モデルを大気モデルとして利用するようになってから、気候モデルの天気表現の性能は一段と高まった。しかし、これが地球温暖

化に対する懐疑的な声が下火になった理由ではないだろう。上昇する地球平均の気温や減少する北極海の海水といった観測事実が、否定しようにも否定できない地球温暖化の証拠となって時代とともに鮮明になったからである (IPCC, 2013)。

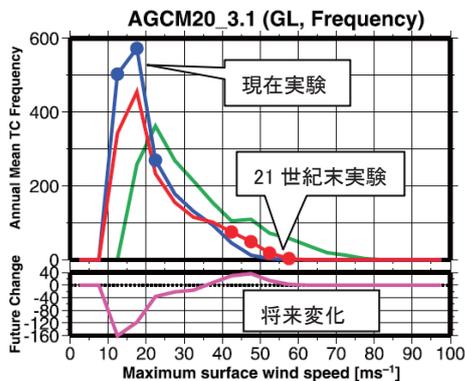
4. 現在の気候変動予測研究 -精緻化するモデル

1990年代に入ると、これまでにない高温の記録が、世界でいろいろなかたちで更新されるようになった。これは地球温暖化のせい、それともエルニーニョのせい、それとも南岸を通る低気圧からの南風のせいといった議論もあったが、世界の気温の時系列をあとから振り返ってみると、地球は温暖化していたのである (第3図)。

こうなると、気になるのは1980年代以前にどうして地球温暖化が目立たなかったかである。気象研究所を含む世界の研究機関は、気候モデルに火山や人為起源のエロゾルなどの効果も取り入れた結果、1980年代以前の温暖化の停滞も再現できるようになった (Yukimotoほか, 2006) (第3図)。現在、これらの大気化学過程を取り入れた気候モデルは、地球システムモデルと呼ばれる。



第3図: 気象研究所の地球温暖化実験における、地球平均地上気温の再現性。Yukimotoほか (2006) に基づく。



第4図: 最大風速値別の熱帯低気圧発生頻度。現在実験(青)と21世紀末(赤)を比較。Murakamiほか (2012)。

計算機の発達に伴い、日本海側と太平洋側を分ける日本列島の山々や梅雨前線、台風の表現にすぐれた、20kmから2km空間格子の大気気候モデルが利用可能になった。これを応用して、台風や日本各地域の気候の将来予測を目的とする、温暖化影響評価実験 (Kitohほか, 2009) が行われた。台風の発生数は減少するが強い台風は増加すること (Murakamiほか, 2012) (第4図)、降水の無い日も極端降水量も増加すること、梅雨明けが遅れる傾向 (たとえば、Kusunokiほか, 2011) などの結果が得られている。

無降水日や極端降水量の増加については、これを支持する観測データの解析 (Fujibeほか, 2006) も現れて、「暑いだけじゃない地球温暖化」 (高荻ほか, 2012) が見えてきた。

5. これからの気候変動予測研究 -まだまだ残る問題

何度、地球温暖化予測実験を更新しても、地球温暖化は実は間違いでしたということになるわけではないが、これからもその時代の計算機能力に対応して精度を高めた地球システムモデルを開発し、地球温暖化予測実験を含む気候変動の予測研究を続けていく必要がある。まだまだ、多くの不確実性や多くの問題が残されているからである。

世界気象機関などが支援する世界気候研究計画では、地球温暖化に関係した6つの課題を今後探求すべき問題として掲げている。(1) 雲と温暖化感度、(2) 雪氷の減少、(3) 極端気候の増加、(4) 海面水位上昇の地域性、(5) 水の利便性の変化、(6) 10年スケールの気候変動予測である。どれも人類社会にとって重大な影響を及ぼす問題ばかりである。日本では、(7) として地域の気候変化を加えるべきだろう。

6. まとめ

地球温暖化は、もはや疑いようのない事実となった。しかし、予測通りに長期変化傾向が観測されていない現象もある。事実として現れていない将来予測が完全な信頼を得られないことは、学界や社会の健全さを示しているとも言える。これらの現象の変化を重点的に監視しながら研究を続ける一方、「後悔のない対策」を考えることが大切かもしれない。

もうひとつ、この30年ほどで疑いようがなくなった事実がある。それは気候モデルによる数値実験の有用性である。モデル予測実験は、複雑なフィードバック過程を経て決まる気候変動の量的な予測という実用性のみならず、あとで解析すると理解できるものの想定外である予測結果 (弱い台風の減少など) も示してきた。これらは、気候モデルなしに人間の思考だけではとても得られなかった予測結果だと思われる。

理論と予測と観測、新たな研究方法、科学と社会を巻き込んだ気候変動予測研究は、小さなひとつの科学史と言える。

温暖化予測情報をどう使うか？

○ 高 藪 出(環境・応用気象研究部)

1. はじめに

気象研究所では地球温暖化研究が1980年代から30年以上にわたり実施されてきた(尾瀬、2016)。それらの結果は、これまで気象庁が公表している地球温暖化予測情報各巻へ利用されてきている。近年は予測精度の向上と社会の関心の増大に伴い、それらの情報を社会がどのように活用するか課題となっている。

図1は、気象研究所で開発した5km格子地域気候モデルの計算結果を用いて気象庁が作成・公表した地球温暖化予測情報第8巻(2013)の成果を、各管区气象台を通じて社会にどのように提供していくのかを表した模式図である。この図の中で情報は水道水のように様々なエンドユーザーに向かい一方方向に流れていく。

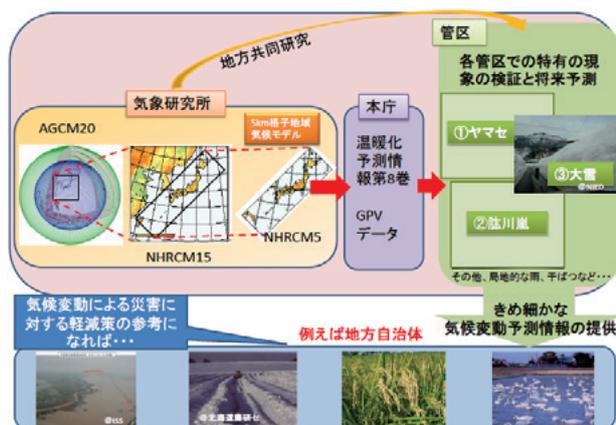


図1: 気象庁温暖化予測情報第8巻の成果活用の模式図

ところが温暖化リスクの評価を行うには、影響を被る社会の様々な要因(暴露・ぜい弱性)も同時に勘案しなければならない。それにはユーザーとの協同作業が不可欠である。以下ではそのような取り組みのいくつかを紹介したい。

2. 研究結果

2.1. 地域気候モデルシステム

気候変動が日本各地にどう影響を及ぼすのか、その研究のためには解像度の低い全球モデルの予測結果を、より解像度の高いモデルを用いて地域詳細化するダウンスケーリングという技術が必要となる。図2はその概要であるが、気象研究所ではこのシステムの開発と改良を続けている(気象研究所重点研究 C1: 気候モデルの高度化と気候・環境の長

期変動に関する研究、H26-30)。

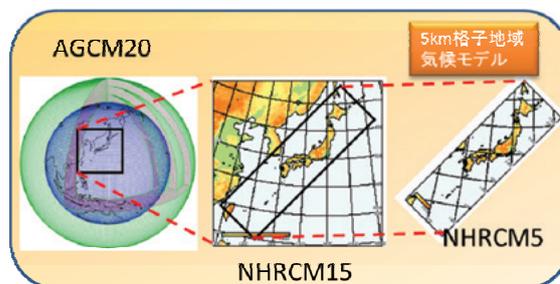


図2: 気象庁温暖化予測情報第8巻に使用した、AGCM20/NHRCM15/NHRCM05 ダウンスケーリングシステムの概念図。数字はモデルの格子間隔(km)を表す。

以下では、計算実施方法の概要を示す。全球大気モデル(AGCM20)で、現在の海面水温に温暖化予測結果による上昇分を足込んだものを用いて計算する(Mizuta et al, 2012)。その結果を基に、日本付近のみ詳細な格子モデルを用いてダウンスケーリングを実施する。ここで用いている地域気候モデル(NHRCM)は、気象庁で日々の天気予報の算出に使われていたモデル(NHM)をベースに、気候変動の研究のために改良を加えたものである(Sasaki et al, 2011)。

地域的に詳細な温暖化予測情報を得るためには、モデル解像度を高くすることが求められる。一方、解像度を上げることにより、計算格子数の増加に伴う計算量の増加に加えて粗いモデルでは考慮してこなかった様々な微細な現象を直接シミュレートする必要が生じるため、モデルはより複雑になる。現状そろっている予測データセットは次表に見る通り主に20kmから5km格子までである

予測データセット名	実験数	AGCM 格子	NHRCM 格子
温暖化予測情報第8巻	1例	20km	5km
気候変動予測等報告書	20例	60km	20km
文科省創生プログラム	4例	20km	5km
d4PDF	100例	60km	20km

表1: AGCM・NHRCMシステムにより創出されたデータセット一覧

※気候変動予測等報告書: 日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測

<https://www.env.go.jp/press/files/jp/24576.pdf>

※文科省創生プログラム： 気候変動リスク情報創生プログラム(文科省)

<http://www.jamstec.go.jp/sousei/>

※d4PDF： 地球温暖化に向けた適応策の設計に貢献する気候変動・予測データベース

<http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/>

2. 2. 様々な影響評価研究への適用

上記ダウンスケーリングにより算出されたモデル結果をユーザーに届けるにはもう1段の翻訳が必要である。ここではいくつかの適用事例を紹介する。

農業分野への適用事例として、RECCA(文科省気候変動適応推進プログラムH22-H26)での活用例を紹介する(Yoshida et al, 2015)。これは、イモチ病のリスクの将来変化を、植物体の濡れを表現する植生モデルを用いて評価したものである。イモチ病は曇天の日が続く弱い雨が継続すると発症のリスクが高まるので、このような雨の性状までを表現できるモデルの結果が必要となる。ここではRCP4.5Wシナリオ¹で計算された3種類の全球気候モデルからNHRMCMによりダウンスケーリングした結果を用いた。予測された将来季節平均降水量は増加するが、降水頻度は減りその結果降水強度は増加する。そのため図3にあるように葉面の湿り具合(LW)は減少し、イモチ病の発症頻度は減少する。

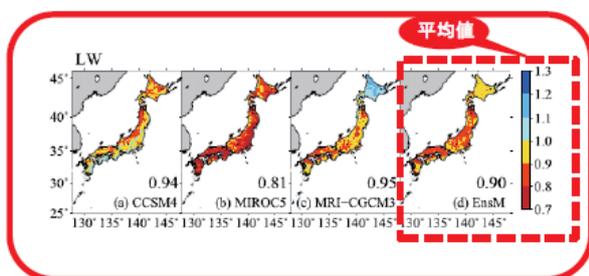


図3：イネの葉の表面の湿り具合(LW)の将来へ向けての変化の予測図。右端がモデル間平均の図。降雨強度の増加にとともに、イモチ病のリスクは減少する。(Yoshida et al, 2015)

生態系分野への適用事例として、文科省創生プログラム(文科省、H24-H28)での使用例を紹介する(創生プログラムH27年度成果報告会要旨集、2016)。竹は熱帯起源で日本の植生にとっては侵入種(インペーダー)であり、その極めて大きな成長速度(筍から1か月で20mもの高さまで成長する)から、管理放棄された竹林は近隣の生態系を脅かす。図4は、RCP8.5Wシナリオ¹で計算した結果に、機械学習法を適用して計算した現在から将来の竹林の生育適地の変遷である。現在、北海道全域はほぼ生育に適さないが、今世紀中ごろには

札幌でも生育が可能になることが示唆される。

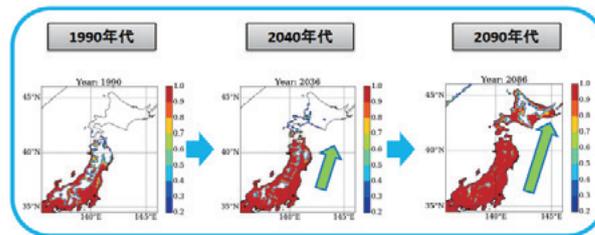


図4：竹林の生育適地の予測結果。左から1990年代、2040年代、2090年代。赤いところが生育適地。(文科省、2016 一部改変)

3. まとめ

気候変動予測の結果を地域に落とし込むにはダウンスケーリングの技術が必要になる。さらに、個別具体的な様々な要望に応じていくためには利用する各分野の研究者との協同によるもう1段の翻訳が必要である。ここに示したのはそのほんの数例である。これらの一連の研究は、気象庁気候情報課、「気候変動リスク情報創生プログラム」(文科省)、「気候変動適応研究推進プログラム」(文科省)との協力のもと実施された。

参考文献

- (1) 気象庁、2013:温暖化予測情報第8巻、気象庁、88頁
<http://www.data.jma.go.jp/cpinfo/GWP/index.html>
- (2) 尾瀬、2016:気象研究所研究成果発表予稿集
- (3) Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H.Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, and A. Kitoh, 2012: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20km grid, J. Meteor. Soc. Japan, **90A**, 233-258.
- (4) Sasaki, H., A. Murata, M. Hanafusa, M. Oh'izumi, and K. Krihara, 2011: Reproducibility of present climate in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmospheric general circulation model, SOLA, **9**, 53-56.
- (5) Yoshida R., Y. Onodera, T. Tojo, T. Yamazaki, H. Kanno, I. Takayabu, and A. Suzuki-Parker, 2015: An application of a physical vegetation model to estimate climate change impacts on rice leaf wetness, J. Appli. Meteor. Clim. **54**, 1482-1495.
- (6) 文科省、2016:気候変動リスク情報創生プログラム平成27年度研究成果報告会要旨集、文科省、252頁

¹代表濃度経路シナリオ(Representative Concentration Pathways):IPCC第5次評価報告書で設定されたシナリオ。温暖化程度が小さい方から順に2.6、4.5、6.0、8.5の4つがある。

エルニーニョなどの海洋の変化を予測するために

○山中吾郎、辻野博之、中野英之、坂本圭、浦川昇吾(海洋・地球化学研究部)

1. はじめに

現在、太平洋赤道域では、世界各地に異常気象をもたらす要因の一つとなるエルニーニョが、1997/98年以來の強い規模で発生している。また、近年の地球温暖化の停滞現象(ハイエイタス)は、海洋に熱が蓄積されているために生じていることが指摘されるなど、気候変動における海洋の重要性がより一層認識されている。

気象研究所海洋・地球化学研究部では、エルニーニョなどの気候変動を予測するため、海洋モデルの高度化や海洋モデルを用いた研究を進めている。気象研究所で開発した海洋モデルは、地球システムモデルの海洋コンポーネントとして地球温暖化予測に用いられるほか、気象庁における季節予報や海況監視予測業務などに幅広く活用されている。本発表では、海洋モデルを用いた気候変動研究に関する成果の概要を紹介する。

2. 海洋モデルを用いた気候変動研究

2.1. 海洋モデルの概要

海洋モデルでは、海洋を細かい格子に分割して、それぞれの格子における流速・水温・塩分などの時間発展を支配方程式に基づいて数値的に計算する。天気予報で用いられる気象モデルの海洋版と考えればよい。海洋モデルは、海面で風や熱・淡水フラックス等を境界条件として与えることによって駆動される。

気象研究所で開発している海洋モデル(MRI.COM)は、様々な時間・空間スケールの現象に対応できるように設計されている。また、炭素循環過程や海洋生態系過程など物質循環過程を組み込んでおり、幅広い用途に対応することができる。

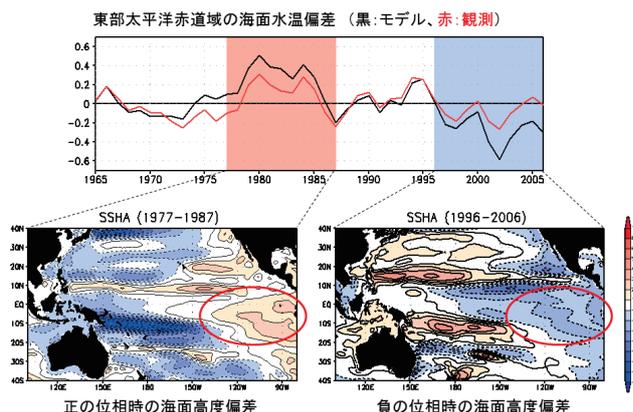
以下では、気候変動研究に用いられる低解像度全球モデルや次世代の気候モデルとして開発している高解像度全球モデルおよび熱帯高解像度モデルを用いた結果について紹介する。

2.2. 低解像度全球モデル～熱帯太平洋の十年規模変動

低解像度全球モデルの水平分解能は100kmである。海洋は大気と比較すると熱容量が大きいいため、熱的平衡に達するには長期間の積分が必要となる。低解像度全球モデルは、

計算コストが比較的小さいため、長期間(数百年以上)の積分が可能である。

熱帯太平洋の海面水温は、空間パターンがエルニーニョに似た、十年規模の変動を示すことが知られている。十年規模の変動は、海洋内部の水温構造を反映した海面水位分布においても見られる。低解像度全球海洋モデルを用いた過去60年間の再現実験によると(第1図)、東部太平洋赤道域で水温が高い正の位相時(1977-1987年)では海洋内部の昇温を反映し、海面高度が平年より高くなる一方、水温が低い負の位相時(1996-2006年)では海洋内部の冷却を反映し、平年よりも低くなる。このような十年規模変動は、熱帯表層の子午面循環(STCs)の強弱と関係がある(Yamanaka et al. 2015)。



第1図: 熱帯太平洋の十年規模変動。

近年の地球温暖化の停滞現象は、このSTCsの変動に伴う海洋内部への熱の蓄積と関連がある可能性が指摘されている(England et al. 2014)。また、低解像度全球モデルに物質循環過程を導入した実験によると、人為起源炭素の蓄積には、STCsによる海洋内部への輸送が重要な役割を担っていることが指摘されている(Nakano et al. 2015)。

2.3. 高解像度全球モデル～中規模渦や詳細な海洋構造の再現

高解像度全球モデルの水平分解能は10kmである。海洋は大気と比較すると特徴的な空間スケール(変形半径)が小さいため、大気の高気圧や低気圧に相当する、海洋の中規模渦を表現するには、10km程度の分解能が必要である。

高解像度全球モデルは、海洋の中規模渦を表現することにより、気候変動に伴う海洋内部の熱や物質の時空間変動

をより詳細に再現できることに加えて、日本近海を流れる黒潮などの強流帯の分布をより現実的に表現できる(第2図)。黒潮の現実的なシミュレーションは、近年のスーパーコンピュータの性能向上により初めて可能になった。黒潮などの強流帯は、海況の監視・予測の重要な対象であると同時に、海洋前線と呼ばれる水温が急激に変化する海洋構造を伴っており、海洋から大気への熱輸送を通じて、気候変動に影響を及ぼす可能性が指摘されている。

高解像度全球モデルは計算コストが大きいことから、現在のスーパーコンピュータの性能では海洋モデル単体としての実行が主体であるが、将来的には気候モデルの中核を担うと考えられる。

2. 4. 高解像度熱帯モデル～エルニーニョの予測精度向上を目指して

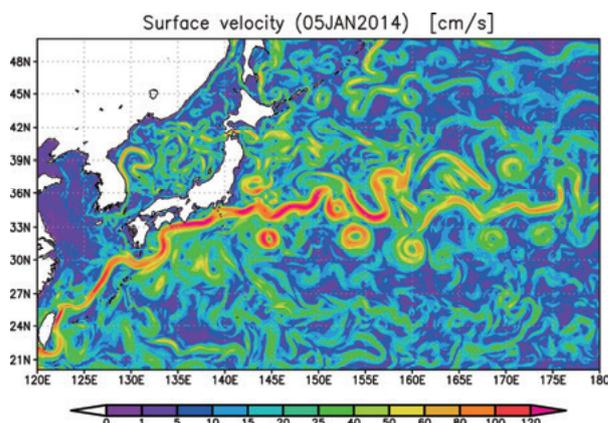
高解像度熱帯モデルは、水平分解能100kmの低解像度全球モデルに水平分解能20kmの熱帯モデルをネスティングと呼ばれる手法で入れ子にしたものである。このため、計算コストを抑えつつ、インドネシア多島海などの複雑な海岸地形を詳細に表現することができる。

高解像度熱帯モデルは、低解像度全球モデルと比較すると、熱帯域の海洋変動の再現性が向上する。例えば、東部太平洋赤道域における熱帯不安定波動(TIW)と呼ばれる波動状の構造は、高解像度熱帯モデルでより明瞭である(第3図)。TIWは海面付近の流れの水平勾配によって励起されるが、高解像度熱帯モデルは流れの水平勾配をより適切に表現するためである。TIWは南北方向の熱輸送をより活発にするため、平均場の海面水温は赤道域の北側でより上昇する。この熱輸送は、エルニーニョ時よりも、流れの水平勾配が強まるラニーニャ時により活発に見られることから、高解像度化は平均場のみならずエルニーニョ/ラニーニャなどの変動場の再現性にもインパクトを与えることが示唆される。

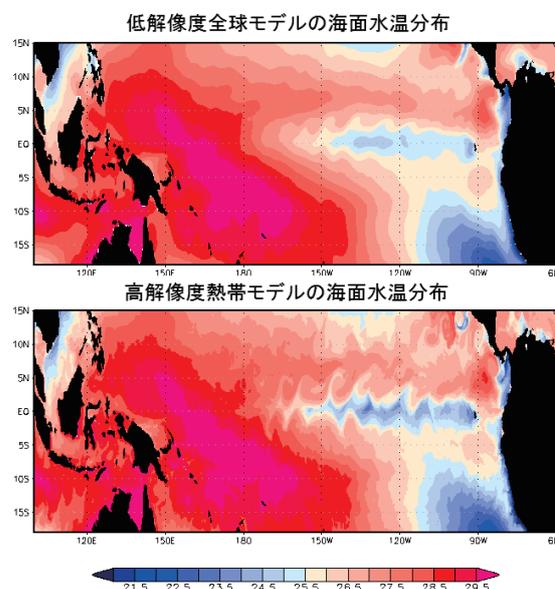
3. まとめ

気象研究所で開発している海洋モデルの高解像度化やネスティング手法を活用した新たな取組みについて紹介した。海洋モデルは、気候変動に係わる海洋変動のメカニズム解明やエルニーニョなどの海洋の変化を予測するために活用されている。

今後は、観測データとの比較を通じて海洋モデルのさらなる高度化を進めていく。それと同時に、大気モデルと結合して気候モデルとしてのパフォーマンスを向上させ、気候変動の予測精度向上を目指していきたい。



第2図: 高解像度全球モデルで再現された日本近海の海流分布。暖色系ほど強い流れを示す。



第3図: 低解像度全球モデル(上)と高解像度熱帯モデル(下)の比較。高解像度モデルでは波動状の構造をよく再現している。

参考文献

- England, M., and co-authors, 2014: Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus, *Nat. Clim. Change*, **4**, 222-227.
- Nakano, H., M. Ishii, K. Rodgers, H. Tsujino, and G. Yamanaka, 2015: Anthropogenic CO₂ uptake, transport, storage, and dynamical controls in the ocean imposed by the meridional overturning circulation: A modeling study, *Global Biogeochemical Cycles*, **29**, 1706-1724.
- Yamanaka, G., H. Tsujino, H. Nakano, and M. Hirabara, 2015: Decadal variability of the Pacific Subtropical Cells and its relevance to the sea surface height in the western tropical Pacific during recent decades, *J. Geophys. Res. Oceans*, **120**, 201-224, doi:10.1002/2014JC010190.

成層圏の変動の気候への影響について

○黒田友二(気候研究部)

1. はじめに

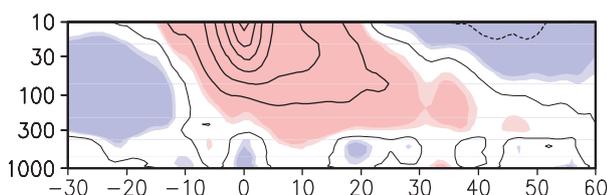
気候の形成とその変動にはさまざまな気候システムの要素が関わっている。例えば、海洋は海面水温の変化を通じて気候に大きな影響を与えている。しかし近年、大気圏の我々が住み降雨や低気圧活動などの天候変化が存在する対流圏の上部の成層圏の変動もまた気候に大きな役割を果たしていることが知られるようになってきた。

本発表では、成層圏変動が気候に果たす役割、またそれが季節予測の精度向上に果たす役割について我々の研究成果を中心に紹介したい。

2. 成層圏変動と気候

2.1. 成層圏突然昇温

成層圏(高度で約8~45km)とは対流圏の上に広がる上空ほど温度が高くて安定に成層している大気層である。ここに存在する質量は全大気の20%程度に過ぎず、また、大気は安定成層しているのに、しばしば大きな変動が発生することが知られている。図1は成層圏突然昇温(Stratospheric Sudden Warming: SSW)とよばれている現象であり、数日程度で時には50度以上もの温度上昇を伴う。



第1図:成層圏突然昇温における北極点付近の温度偏差の時間変化。多数の昇温現象について重ねた平均的描像。横軸は偏差が最大の時を0とした経過時間(日)を示している。縦軸はhPaで表した高度で上端は約30km。コンター間隔は5度で、赤(青)い部分は高(低)温で濃い影の領域は95%水準で統計的に有意であることを示す。(Kuroda, 2008a)

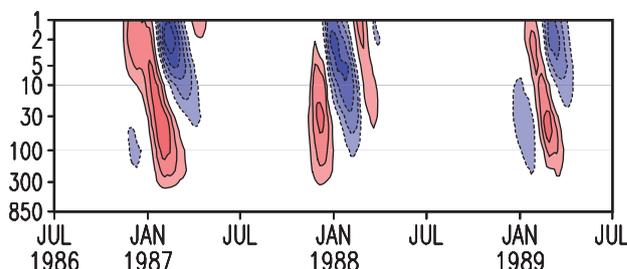
SSWは対流圏内部で何らかの理由で惑星波とよばれる東西波長が1~2万キロ程度の長波長の波が増幅して、成層圏上部にまで上方伝搬したのち、波が壊れ(砕波)て成層圏ジェットに急激な減速をもたらす、同時に極域に強い下降流を生じさせる現象である。この下降流に伴った大気の断熱圧縮により高温が生じる。

かつてはSSW生成のように、対流圏が成層圏の変動を作り

出す効果にのみ注意されていたが、近年では逆に成層圏の変動が対流圏に変化を引き起こす効果についても広く認識されるようになってきた。つまり、大気中では対流圏と成層圏が相互に影響し合って変動している。そのような結合変動の代表的なものが極夜ジェット振動である(図2)。

2.2. 極夜ジェット振動

極夜ジェット振動(Polar-night Jet Oscillation: PJO)は、大規模なSSWをその要素とするような数ヶ月にも及ぶ成層圏対流圏結合変動である。成層圏には大きな年々変動があり、数年に1回程度の頻度で明瞭なPJOが現れる。PJOはひと冬中にSSWと極渦強化(Vortex Intensification: VI: SSWの逆で成層圏ジェットが強まる現象)を準周期的に繰り返す現象である。対流圏と成層圏が相互に作用を及ぼしあうことにより、数ヶ月にわたる準周期的現象が起こる。このうち、対流圏から成層圏への影響は先に述べた惑星波による波動伝搬であり、比較的短時間で影響が伝搬する。



第2図:1987年から1989年にわたって3年連続で発生した極夜ジェット振動の様子。北極点の気温偏差(気候平均状態からのズレ)を30日移動平均して示している。赤域は高温でSSWに、青域は低温偏差でVIに相当する。コンターは±5度から5度間隔で引いている。(Kuroda and Kodera, 2001)

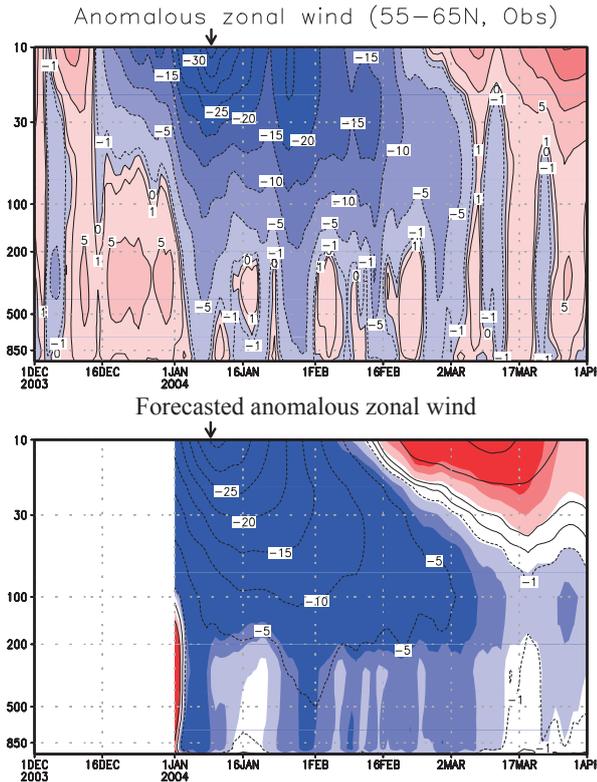
それに対して成層圏が対流圏に及ぼす影響は、成層圏の変動が時間をかけて下降する形での変動となる。例えば、SSW(VI)後の成層圏でジェットの弱風(強風)化の信号は1ヵ月程度の時間をかけて対流圏にまで下降伝搬し、地表面に負(正)極性の北極振動とよばれる変動パターンを作る。負極性の北極振動の形成は、極域の寒気の中緯度域への流出を伴うため、しばしば北日本で多量の降雪を伴った低温状態になるような異常気象をもたらすことが知られている。

波動の直接影響による対流圏から成層圏への影響に対し

て、成層圏から対流圏への影響の仕組みは複雑であり、未だ完全には解明されておらず、今後の研究課題である。

2. 3. PJOと予測可能性

PJOは前節で述べたように準周期的性質をもつため、この性質は気候予測の精度向上に利用できる可能性がある。そこで我々は典型的なPJOが起った2004年1月について、その予測可能性を調べる実験を行った(図3)。実験は、初期の気象場の状態のみを用い、どの位の期間についてどの位の精度の予測が可能かという観点で実行した。



第3図: 2003年12月1日から2004年4月1日までの、北緯60度における東西平均した東西風偏差。上の図は実況で下の図は1月1日付近を初期値とした多数の予報の平均値である。コンター間隔は5m/sで、色の赤(青)は正(負)を表す。下図の影は予測の有意性を表し濃いほど予測の信頼性が高い。矢は昇温のピーク時を現わす。(Kuroda, 2008bより)

極域に見られる大規模な変動は環状モードとよばれるものであり、北緯60度付近の平均東西風の変動をその変動の指標とすることができる。なお、北極振動とは地表面気圧に現れた環状モードの信号のことである。図3は観測データ(上図)と2004年1月1日付近を初期値とした予報から得られた北緯60度における東西風速の偏差(下図)を比較したものである。観測は、1月9日にSSWに伴う西風減速のピークが現れ、それが2ヶ月程度にもわたって下降伝搬し、対流圏に継続的な負極の北極振動を形成していたことを示している。

予測結果は観測の振る舞いを2ヶ月程度にわたって概ね良く再現している。特に、SSW後の2カ月にわたる下降伝搬す

る西風偏差と対流圏での負偏差(負極性の北極振動に対応)が良く予測できている。対流圏で予測可能性の高い領域に着目すると、成層圏のそのような領域から信号が間欠的に下降するように現れており、成層圏と強いつながって変動が現れている。また、同様な予測実験を初期値を変えて繰り返したところ、SSW期を初期値とする予測は非常に高い予測可能性を示す一方で、VI期を初期値とした場合には高い予測可能性が得られないことが分かった(Kuroda, 2010)。つまりPJOはSSW期を初期値にする場合にのみ高い予測精度で予測を行うことが可能になることを示している。

さらに、成層圏の影響を陽に調べるため、同様な実験を成層圏部分のみ鉛直方向を非常に低解像度とした数値モデルで再実行した。その結果、高い予測精度は高々10日程度になってしまうこと、つまり、モデルにおける現実的な成層圏の表現が予測可能性を顕著に高めることが分かった。

3. まとめ

成層圏変動の気候に及ぼす影響と、特にその気候予測可能性に与える影響について調べた。成層圏は冬季にしばしば非常に大きな変動を示し、さらにそれが対流圏の変動と結合する冬季の数カ月にわたる変動を作り出している。さらに、この変動を予測のための種とすることで、冬季の予測可能性が飛躍的に高まることが示された。しかし、このためには大気モデルの成層圏の表現を改良する地道な作業が必要である。

参考文献

- (1) Kuroda Y., and K. Kodera, 2001: Variability of the polar night jet in the northern and southern hemispheres, *J. Geophys. Res.*, **106**, D18, 20703–20713.
- (2) Kuroda Y., 2008a: Effect of stratospheric sudden warming and vortex intensification on the tropospheric climate, *J. Geophys. Res.*, **113**, D15110, 1–14.
- (3) Kuroda Y., 2008b: Role of stratosphere on the predictability of medium-range weather forecast -A case study of winter 2003–2004, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L19701, 1–5.
- (4) Kuroda Y., 2010: High initial-time sensitivity of medium-range forecasting observed for a stratospheric sudden warming, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L16804, 1–6.

気象研究所で行っている研究について

気象研究所では、気象庁が発表する気象や地震・火山、気候等に関する各種情報の高度化に向けた実用的な研究を重点的に実施しています。また、将来に向けた我が国の気象業務の健全な発達を図るため、長期的に各種情報の高度化等を見据えた基礎的・基盤的な研究や、世界をリードする研究を実施しています。

1 重点研究

各種防災情報や地球環境情報の高度化など気象業務への貢献を目指し、5年以内に業務化のめどをつける実用的な研究課題で、台風・集中豪雨等対策、地震・火山・津波対策及び気候変動・地球環境対策の強化に資する研究を重点的に実施しています。

1.1 台風・集中豪雨等対策の強化に関する研究

気象災害を防止・軽減するには、災害をもたらす現象の観測・解析技術及び予測技術を高度化し、予報・警報等の防災情報を避難等防災活動の早期準備や迅速・的確な実施に一層活用可能なものにしていく必要があります。このため以下の研究に取り組んでいます。

- A1 メソスケール気象予測の改善と防災気象情報の高度化に関する研究
- A2 顕著現象監視予測技術の高度化に関する研究
- A3 台風の進路予報・強度解析の精度向上に資する研究
- A4 沿岸海況予測技術の高度化に関する研究

1.2 地震・火山・津波対策の強化に関する研究

地震、火山及び津波に関する防災情報をよりの確なものとし、それらによる災害を防止・軽減するためには、発生した現象の推移をよりの確に観測・解析する技術を開発するとともに、地震の予知技術、火山噴火及び津波の予測技術の高精度化を進める必要があります。このため、以下の研究に取り組んでいます。

- B1 緊急地震速報の予測手法の高度化に関する研究
- B2 地震活動・地殻変動監視の高度化に関する研究
- B3 津波の予測手法の高度化に関する研究
- B4 大規模噴火時の火山現象の即時把握及び予測技術の高度化に関する研究
- B5 地殻変動観測による火山活動評価・予測の高度化に関する研究
- B6 海溝沿い巨大地震の地震像の即時的把握に関する研究

1.3 気候変動・地球環境対策の強化に関する研究

地球温暖化やオゾン層破壊、国境を越えた大気汚染など地球規模の環境問題が顕在化する中、環境と経済を両立し持続可能な社会の発展を実現するため、気候及び地球環境に関する信頼性の高い情報が求められています。このため、以下の研究に取り組んでいます。

- C1 気候モデルの高度化と気候・環境の長期変動に関する研究
- C2 季節予報の高度化と異常気象の要因解明に関する研究
- C3 地球環境監視・診断・予測技術高度化に関する研究

2 一般研究

気象庁が発表する各種情報の高度化等気象業務への将来の実用化を見据えた基礎的・基盤的な研究や、世界をリードする革新的テーマに挑戦する研究を推進しています。

3 地方共同研究

気象業務の現場において取り組むべき研究課題について、気象研究所と気象官署が共同し地方共同研究として実施しています。地方共同研究により、気象業務の現場における潜在的なニーズを的確に捉え、気象研究所の研究方針や内容に適宜反映させることによって、気象業務の高度化に貢献しています。さらに、研究活動を通じて気象研究所と気象官署の連携を強化し、気象官署における調査業務の支援を図るとともに、職員の資質向上にも貢献しています。

4 機動的な研究

竜巻、集中豪雨、地震、火山噴火等の大きな災害を伴う顕著現象が発生した場合は、気象庁本庁・管区気象台・地方気象台等と連携し、現地調査を含む調査研究等を機動的に実施しています。

気象研究所成果報告会 発表題目(平成18年度以降)

H26	御嶽山噴火ー水蒸気噴火のメカニズム解明に向けてー	横山 博文	火山研究部
H26	南海トラフ沿い巨大地震は予知できるか?ー地震発生シミュレーションからの知見ー	弘瀬 冬樹	地震津波研究部
H26	竜巻等突風の探知ーフェーズドアレイレーダーが切り拓く世界ー	楠 研一	気象衛星・観測システム研究部
H26	集中豪雨の発生メカニズム解明に向けてー平成26年8月20日広島豪雨事例ー	加藤 輝之	予報研究部
H26	温暖化に伴い強雨は増えるのか?ーアメダス観測が示す気温と強雨の関係ー	藤部 文昭	環境・応用気象研究部
H26	CONTRAIL プロジェクトー大型旅客機による地球規模の温室効果ガス観測ー	松枝 秀和	海洋・地球化学研究部
H25	GPSが拓く突風・大雨の予測・監視への道	小司 禎教	気象衛星・観測システム研究部
H25	局地的豪雨等の予測精度向上に向けた取り組み	瀬古 弘	予報研究部
H25	津波予測の新展開ー迫り来る津波を捉え予測するー	林 豊	地震火山研究部
H25	地球温暖化とともに変わりゆく日本の気候を考える	佐々木 秀孝	環境・応用気象研究部
H25	海洋のCO2増加と酸性化ー西部北太平洋熱帯・亜熱帯域における実態ー	石井 雅男	海洋・地球化学研究部
H24	地震の揺れのリアルタイム予測:次世代の緊急地震速報を目指して	干場 充之	地震火山研究部
H24	ヒートアイランドの現在と未来	青柳 暁典	環境・応用気象研究部
H24	グリーンランドから地球温暖化をみる	青木 輝夫	物理気象研究部
H24	つば竜巻:二重偏波レーダーによる実態解明	山内 洋	気象衛星・観測システム研究部
H24	社会的に大きな影響があった顕著現象(平成24年)〜急発達した低気圧・つば竜巻・九州北部豪雨〜	加藤 輝之	予報研究部
H23	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の地震像と巨大地震の早期規模推定に向けた取り組み	吉田 康宏	地震火山研究部
H23	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴う津波と津波即時予測の研究	対馬 弘晃	地震火山研究部
H23	2011年霧島山(新燃岳)噴火対応〜噴煙エコーの解析と降灰の量的予測に関する研究〜	新堀 敏基	地震火山研究部
H23	集中豪雨の統計的・解析的研究ー2010年10月20日の奄美豪雨ー	津口 裕茂	予報研究部
H23	福島第一原子力発電所事故に伴う大気・海洋の人工放射能の変動	青山 道夫	地球化学研究部
H22	台風に伴う竜巻等突風の発生機構ー2006年台風第13号に伴う延岡竜巻の数値シミュレーションー	益子 渉	予報研究部
H22	気候研究のための長期日降水グリッドデータの作成	上口 賢治	気候研究部
H22	数値モデルを用いた地球環境解析	眞木 貴史	環境・応用気象研究部
H22	衛星データの利用技術に関する研究	増田 一彦	気象衛星・観測システム研究部
H22	【記念講演】気象観測鉄塔	石原 正仁	気象衛星・観測システム研究部
H21	東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究	齊藤 和雄	予報研究部
H21	2008年台風特別観測(T-PARC)結果	中澤 哲夫	台風研究部
H21	伊勢湾台風再現実験プロジェクト(re-analysis/forecast of Typhoon Vera(1959) project: ReVera)	別所 康太郎	台風研究部
H21	相似地震の発生予測実験	岡田 正実(客員)	地震火山研究部
H21	地震波で地下の時間変動を監視する	吉田 康宏	地震火山研究部
H21	温暖化による日本付近の詳細な気候変化予測	行本 誠史 他	気候研究部ほか
H20	海洋における炭素循環の変動に関する観測的研究II	緑川 貴	地球化学研究部
H20	物質循環モデルの開発改良と地球環境への影響評価に関する研究	柴田 清孝	環境・応用気象研究部
H20	接地境界層における乱流の構造に関する研究	毛利 英明	物理気象研究部
H20	地震・地殻変動観測データの高度利用に関する研究	前田 憲二 他	地震火山研究部
H20	津波の予測精度向上に関する研究	林 豊	地震火山研究部
H20	火山観測データの気象補正等による高精度化に関する研究ーノイズの中から火山活動を抽出するー	山里 平	地震火山研究部
H20	新地殻変動観測手法の研究ースロースリップ検知を目指したレーザー式変位計の開発ー	勝間田 明男	地震火山研究部
H20	3次元数値モデルによる地震発生シミュレーションの研究	弘瀬 冬樹	地震火山研究部
H19	氷晶発生過程に関する研究	村上 正隆	物理気象研究部
H19	上陸台風の構造変化過程とそれに伴う暴風・豪雨・高潮の発生に関する研究	中澤 哲夫	台風研究部
H19	日本の異常気象の実態及び気候変動との関連に関する研究	藤部 文昭 他	予報研究部ほか
H19	気候システムとその変動特性のモデルによる研究	楠 昌司	気候研究部
H19	高解像度(渦解像)海洋大循環モデルの開発とそれによる水塊の形成・維持、及び変動機構の解明	本井 達夫	海洋研究部
H19	海洋データ同化システムの高精度化と海洋現象の季節から経年変動の解析	蒲地 政文	海洋研究部
H19	アジア大陸の影響による大気微量気体・エアロゾル・降水降下塵の化学組成変動に関する研究	松枝 秀和	地球化学研究部
H18	季節予測システムの構築と経年変動機構・予測可能性の研究	安田 珠幾	気候研究部
H18	エアロゾルの地表面放射への影響評価のためのエアロゾル光学特性の推定について	内山 明博	気候研究部
H18	大気エアロゾルが積雪面の放射特性に与える影響	青木 輝夫	物理気象研究部
H18	海洋における炭素循環の変動に関する観測的研究	緑川 貴	地球化学研究部
H18	【特別報告】太平洋をUターンした津波ー千島列島付近の地震による津波の数値解析結果ー	長谷川 洋平	地震火山研究部
H18	ヒートアイランド現象の再現・予測に関する基礎的研究	三上 正男	環境・応用気象研究部
H18	都市ビル群上での乱流特性の研究	栗田 進	環境・応用気象研究部
H18	衛星搭載多波長赤外サウンダの利用技術に関する研究	真野 裕三	気象衛星・観測システム研究部
H18	【特別報告】2006年11月7日の佐呂間町竜巻の現地調査報告	鈴木 修	気象衛星・観測システム研究部
H18	【特別報告】佐呂間町に竜巻をもたらしたスーパーセルの再現実験ー水平分解能250mの雲解像モデルの結果からー	加藤 輝之	予報研究部
H18	非静力学モデル(NHM)の高度化と同化技術の改善に関する研究	中村 誠臣	予報研究部

気象庁気象研究所

連絡先:気象庁気象研究所企画室
〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1
TEL 029-853-8546
e-mail:ngmn11ts@mri-jma.go.jp

ホームページアドレス:<http://www.mri-jma.go.jp>