

頂いたご質問に対する回答・補足

令和3年度気象研究所研究成果発表会で、当日いただいたご質問に対する回答の補足や、回答しきれなかったご質問への回答をまとめました。

① 地球温暖化研究と歩んだ気象研究所地球システムモデル開発 40年

Q1) CO₂濃度増加と気温上昇の真鍋モデルでは温室効果の下向放射の観測データで検証されているのでしょうか？

A1) 当日回答済ですが、補足します。

推定される放射フラックスの変化は、数十年スケールで平均してみたときに全球平均で1平方メートルあたり1ワット程度ととても小さいため、それを衛星観測などの直接観測で検出することは難しいです。ただし、海水温の観測から海洋に蓄えられたエネルギーを求めそれから逆算することで、放射フラックスの変化の間接的な証拠が得られています。

なお、真鍋モデルはあくまで、鉛直次元という簡単な系で、仮定に基づくものでもあります（一種の概念モデル）。それをそのまま現実の地球にあてはめるのは難しく、現実地球での観測に精度よく対応すべきものではないことには注意が必要です。

Q2) 大気循環モデルと、海洋循環モデルで水平解像度が異なるのはなぜですか？

A2) 当日回答済ですが、補足情報も加えて回答します。

大気と海洋とでは気候モデルで重要となる現象のスケールが異なります。たとえば南北熱輸送に重要な役割を果たす黒潮は大変狭く、これをある程度適切に表現する必要があるため、海洋モデルの方が大気モデルよりも細かい解像度を必要とします。

したがって水平解像度は異なるものにせざるを得ませんが、MRI-ESMではこの食い違いを、カップラーという、内挿等をするプログラムを使うことで解決しています。

Q3) 真鍋先生の初期の研究でもCO₂濃度と温暖化の影響を計算されていますが、当時から、環境危機の意識を持たれていたのでしょうか？あるいは、温室効果(地球の平均温度が15°Cであるとか)の確認のためでしょうか？

A3) 当日回答済ですが、補足情報も加えて回答します。

真鍋先生ご自身がお講演などで述べておられることからすると、当時は純粋に科学的興味から研究をされていたようです。温室効果の確認のような意味もあったでしょうが、当時の論文の記述内容からすると、大気の実験の鉛直温度構造がどのように決まっているか、などを理解したかったのだらうと想像します。

Q4) 熱の収支は、雲で決定されると考えますが、観測データで検証がなされないモデルはどうなんでしょうか？

A4) 検証がされていない気候モデルによる予測をするのは問題があるのではないかと

いうご指摘であろうと受け取りました。たしかに、広域・高精度の観測が困難な物理量はあるのですが、その一方で、かなり精度よく観測できる物理量も多数あります。また、気象予測のような、観測と気象モデルを利用した気象予測システムにより、より多くの物理量について相当の精度で、長期にわたって、観測に近い時間・空間分布が得られています（再解析と呼ばれます）。気候モデルもそれらを活用して検証していますので、大きな問題はない、と考えています。

以下、別の視点からの回答です。もし地球に雲がなければ、今よりもかなり高精度な気候予測ができるでしょう。

雲は時間的にも空間的にも一様でなく、空間スケールが小さい一方で、光学的に非常に独特で一律でない特徴をもっています。雲はエアロゾルを核として成長してできるので、エアロゾルの変化にも敏感だという問題もあります。そのため、雲を気候モデルにどのように組み込むのかにはまだ方法が確立されているとは言えず、気候予測の不確実性を高いものに行っている一因です。

とはいえ、気候モデルでは様々な取り組みにより、現地観測や衛星観測なども活用しつつ、雲のモデリングを改良してきました。その結果、各モデルでの精度は向上しつつあり、エアロゾルが変化してきた期間も含めて、歴史実験の再現についてはかなり共通の結果が得られるようになってきました。

地球温暖化予測でも、世界中の様々なモデルの結果を比べると、ある程度のばらつきは残っているものの、それでもかなりの精度で一致した見解を示すようになってきています。

そうした観点からも、なおも不確実性は残り、それを減らしていく努力は今後も必要とはいえ、かなり信頼するに足る結果が示されていると考えていただいてもよいと思います。

Q5) 地球システムモデルに考慮すべき要素は無限にありそうな気がするが、現在考慮されていない要素というのは微小として無視しているのでしょうか？ 計算機の限界でされていないのでしょうか？ また取り入れたい要素はあるのでしょうか？

A5) 計算機の限界で直接的には組み込めない素過程については、「パラメタリゼーション」という手法で組み込んでいる、というのは、行本研究官の発表にあった通りです。

気候変動とその予測に重要であると考えられる要素の多くは組み込んできているつもりですが、まだ理解が欠けている等の理由で組み込めていない要素もあります。(MRI-ESMには組み込まれていないけれど、世界のモデルの中にはすでに組み込まれているという要素もあります。)

今後新たに加えていく必要があると考えていることには窒素循環などが挙げられます。ただし、すでに組み込まれている要素の改良の方が重要だろうと認識しており、それらと合わせて取り組んでいくことになります。

Q6) 大気循環モデルでは、純粋理論的に雲量を決めますか？ 仮定しますか？ 実測値を使

いますか？天気予報ができていますので、海水温などで、理論的に決められる可能性があっても良いとおもいます。

A6) 現象のスケールが格子点間隔よりも小さいので、パラメタリゼーションとする必要があります。理論的に扱うようにしていますが、理論にしてもいくつもの考え方があり、どれが現実の雲の表現にふさわしいのか、というような観点でも考えていく必要があります、難しい問題です。海水温で理論的に決める、というよりは、大気中の水蒸気量、エアロゾル量などをもとに水粒・氷粒の数や形態を理論的に評価し、そこからさらに格子点スケールの雲量や雲の厚さを理論的に見積もっています。

Q7) 日本海側の積雪が予測できている図で、太平洋側の降水はなぜ現れているのでしょうか

A7) すでに回答済みですが補足します。高解像度にした結果、日本の脊梁山脈が適切にモデルに組み込まれ、日本海側の積雪が表現されたようになった、そうであれば、太平洋側は晴れて降水はないはずではないか、ところが降水があるのはなぜなのか。そういう主旨のご質問だと受け取りました。

たしかに冬季は冬型の気圧配置のことが多く、その場合は日本海側に降雪があり、太平洋側は晴れ上がります。しかし、移動性低気圧等により、太平洋側でも降水はあり、それが表現されたものと考えています。

ちなみに該当するスライドで、左はモデルですが、右は観測です。また、気象庁のホームページから、「ホーム > 各種データ・資料 > 過去の気象データ検索 > メッシュ平年値図」と辿っていただくと、各月の降水量などの平年値(30年平均値)の図をご覧ください。

② 高解像度気候モデルによる地球温暖化予測

Q8) タイムスライス実験とダウンスケールの違いをもう一度教えてください。

A8) すでに回答済みですが、補足します。

タイムスライス実験と(力学的)ダウンスケーリングとは別物と考えてください。

タイムスライス実験は、時間方向の話です。気候予測の計算をする際に、たとえば1850年を初期時刻として、2100年までの250年間のひとつながりの計算を行うことがあります。(cmipというのは、そのような計算です。)しかしここで行う計算に使うモデルは高解像度のため、250年の計算を行うのは困難です。そこで、20世紀末と21世紀末の2つの期間を選び(タイムスライス)、それぞれについて約30年程度、合計60年程度の数値計算を行うというのがタイムスライス実験です(用いる海水面温度はそれぞれ、観測値と、観測値+連続実験の結果から作成したデータです。)

ダウンスケーリングは、水平方向の話です。全球モデルで20kmメッシュの空間解像度で計算していますが、これではより細かい空間スケールの情報を作ることができません。そこで、日本周辺だけを切り出して領域気候モデルを動かします。(全球モデルの結果を境界

条件として与えます。) この結果、5km さらには 2km などの細かい空間解像度の情報を得ることができます。

Q9) 温暖化の進行によって温帯低気圧とブロッキング高気圧が減少し、強力化することでしたがその原因については解明されているのでしょうか。

A9) すでに回答済みですが、補足コメントを加えて回答します。温帯低気圧のメカニズムについては基本的なところでは解明されていると思いますが、ブロッキング(偏西風などの大規模な風の南北の蛇行等により、高低気圧が停滞する現象)については十分な解明がなされているとは言えないと考えています。

その強力化については温暖化に伴う水蒸気量の増加が、温帯低気圧の減少については大気安定度が高まることが一因と思われるのですが、十分に解明されているとは言えないと考えています。

Q10) 強い台風の頻度が変わる、その原因は何でしょうか? 長期間たまったエネルギーを一度に吐き出すのが台風、だと考えると、蓄積エネルギーを吐き出す閾値が上がって強い台風になるので、強い台風が増えるということは、閾値が上がると言うことになります。

A10) 気温の上昇により飽和水蒸気量が増加して、その結果、大気中の水蒸気量が増加することが最も大きな原因だと考えています。いったん台風が発生すると、台風は雲で雨を降らせながら、水蒸気が液水に変わるときに放出する潜熱で上昇流を強め、また、下層で吹き込む風を強めます。ここで地球温暖化時において台風の周りの大気中の水蒸気が増えていると、この潜熱・上昇流・吹き込む風がいずれも強くなると考えられるからです。そのため、同じように台風が生まれたとすれば、現在に比べて地球温暖化時の台風はより強くなると考えられます。大気の安定度は高まる等の理由により、台風のタネは減ると予測されているため微妙なところはあるのですが、風速が秒速 60m を超えるような台風の数は増えると考えられています。

最近の報道でも、強い台風が日本に来るときにその原因として、日本のすぐ南の海上の海面温度が高いことが挙げられることが多いと思いますが、それはこれに対応します。

ご質問に対しては、蓄積するエネルギーが増えている(≒水蒸気量が増えている)ことが原因であり、「吐き出す閾値」までは考えなくてもよいと考えますが、お答えになっているでしょうか?

Q11) 降水量は、太陽光の到達エネルギーで決まると考えると、年降水量は平均気温上昇で変化しないと想像できますが、「異常気象」の頻度が増える原因は、想像ができません。どういう物理でしょうか?

A11) 「異常気象」と言ってもいろいろありますのでお答えの仕方が難しいですが、たとえば大雨を例にしますと、地球温暖化に伴い飽和水蒸気量が増えて、結果、大気中の水蒸気

量が増加することは一因であろうと考えられます。

対流活動はもともと「不安定」な現象ですので、いったん発生すると下層収束が起これ、周囲の水蒸気がさらに集められて、より大きな現象になります。地球温暖化により大気中の水蒸気が増加すれば、その大きな現象へのなり方がより激しくなり、これまでにはなかったような異常気象が起これやすくなると考えられます。

Q12) 防災上は100年に1度のような大雨予測はばらつきが大切と思いますが、東京の日平均降水量では、どの程度でしょうか？

A12) 多数メンバー実験（アンサンブル実験）によりばらつきを減らすことの重要性についての質問と受け取りました。たとえば気温などに比べると、降水量は時間的にも空間的にもばらつきは激しいため、地球温暖化による変化シグナルを取り出すのが難しいことがよく知られています。多数メンバー実験の活用により、ノイズを減らすことが可能になりますので、日平均降水量のような物理量についても、多数メンバー実験は重要な意味を持つと考えています。モデルの精度向上に引き続き務めるとともに、多数メンバー実験等を用いたより正確な地球温暖化予測に努めていきたいと考えております。

Q13) ゲリラ豪雨を予測するにはいまの2km解像度である程度いけるのでしょうか。また、その精度向上にはどれくらいの解像度が必要になるのでしょうか？

A13) ゲリラ豪雨の予測では、空間解像度は2kmでは不十分で、より高解像度（たとえば100~500m、精度を上げるにはさらに高解像度）にする必要があるとされています。

なお、ゲリラ豪雨の予測では「初期値」およびそれをよくするための観測がより重要な問題です。これに対して、地球温暖化予測の分野はその多くが「境界値」に対する変化を予測する問題であることもあり、解像度を上げて、必ずしもゲリラ豪雨の将来予測には直結はしない可能性があると考えています。

Q14) 台風が強くなることがモデルで再現できるなら、台風を弱めることも可能だろうと思いますが、その研究はされているのでしょうか？

A14) われわれの数値実験結果は、地球温暖化時の条件下では現在に比べて、(秒速60m以上の)強い台風が増えることを示しています。台風の発達にとってより好適な条件のもとでは台風がより強くなるような台風の再現に成功しているとすれば、おっしゃる通り、人為的に操作可能な何らかの、台風が発達しにくくする手段を見つけることにつながるのかもしれない。気象研究所ではそうした研究はしていませんが、他機関では行っているところがあります。

なお、当日石井研究総務官が回答していたように、実際に台風を制御すること(気象改変)についても、気象研究所では行っていませんが、国内ではそうした取り組みが行われていません。

③ 地球システムモデルで探る火山噴火の気候と生態系への影響

Q15)1940年代～1970年代の弱い低温化があり、行本研究官からは人為起源エアロゾル増加によるとの説明がありました。大気圏核実験が主因と考えておられますか？ また、この時期の火山噴火等の影響は少なかったとみておられますか？

A15) 人間活動による硫黄の放出（硫黄を含む石炭や石油の燃焼、硫黄を含む鉍石の精錬等、主に対流圏へ）で硫酸エアロゾル粒子が増加したため、地表面日射が減少して低温化したと考えられます。また、1963年のアグン（インドネシア、バリ島）大噴火の影響も一時的にあると考えられます。大気圏核実験によるエアロゾル粒子も一因と考えられますが、それぞれの要因の定量的な評価は正確なモデルによる比較実験を行う必要があります。今の所分離は難しいと思われま

Q16)白頭山などの噴火実験に伴う気温変化は、年平均では負偏差ですが、季節による違いはありますか？

A16)日の良く当たる夏はそれだけ多くの日射が硫酸エアロゾル粒子により遮られるので、負の偏差は年平均より更に大きくなりました。（例えば、北半球中高緯度の陸では噴火後1年目に更に1～2℃低下）

Q17)火山の爆発で放出されるエアロゾルの総量と平均粒径は、世界の気温低下の大きさと時間変化のモデル計算との比較から見積もることができるでしょうが、吸収や散乱等で測定が可能でしょう。モデル計算とは独立した、光学的測定は行われているのでしょうか？
yesなら、どの機関が行っているのでしょうか？

A17)レーザー光の大気中微粒子による散乱を利用して、ライダー(lider: Light Detection and Ranging)による観測を気象研で行っています。1982年のエルチチョン（メキシコ）噴火や1991年のピナツポ（ルソン島）噴火によるエアロゾル粒子を観測しました。

Q18)火山噴出物の海洋pHへの影響は考慮されているのでしょうか？

A18)今の所、考慮していません。噴火により大量に硫黄が放出された場合は、そこから生成される硫酸により海洋生態系や海洋化学の状態がかなり影響を受ける可能性がありますので、モデルの今後改良すべき点の一つと考えています。

Q19)エルトギャウの影響と白頭山の影響が切り分けられないのが不思議です。シミュレーションでは収束速度が違うので地層や氷の層で解析できそうに思います。時期が重なって特定できないとかでしょうか。

A19) おっしゃる通り、グリーンランドの氷に含まれる岩石物質の分析による白頭山火山灰の特定や、噴火で死んだ木の高精度な放射性炭素年代測定等、最近の研究により、エル

トギャウ噴火は 938-939 年頃、白頭山噴火は 946-947 年頃と判明して来ています。しかし、白頭山噴火 938-939 年説の論文も未だ否定されていませんので、今回の発表では噴火時期は両方に可能性ありという曖昧な表現を使いました。また、本研究の目的は、過去の正確な再現ではなく、1991 年ピナツボ噴火の数倍の大噴火が中高緯度で起こったら気候や生態系はどの様に応答するか、地球システムに於ける重要性を探ることでしたので（又、将来起こり得る危機の考慮もあり）、10 世紀のエルトギャウと白頭山の大噴火は研究の発想の源として拝借しました。

Q20) 噴火 2 年目に火災（森林火災）が増えていますが、乾燥したとのことですが、これは降水が減ったためでしょうか。

A20) はい。モデルでは今迄の観測研究による経験則を使って、土の表面にたまっている落葉の量が多いほど、又、落葉が乾いているほど、森林火災が起こり易く設定されていますので、降水の減少（火山噴火寒冷乾燥化）により火災が増えました。

Q21) 令和 3 年 8 月の福徳岡ノ場の噴火の気候への影響は。

A21) 発表会場では、噴煙は対流圏なので影響は無いと答えましたが、対流圏は誤り。不勉強で誠に申し訳ありません。噴煙は高度 16~19km の成層圏に達していましたので、放出した二酸化硫黄の量によっては、寒冷化等、気候へ影響を及ぼす可能性があります。

※誤った回答をしたため、動画ではカットしました。ご了承ください。

④ 地球システムモデルを用いた黄砂の長期変化等について

Q22) なぜ黄砂は東日本には飛来しづらいのでしょうか？西日本のほうが正味の下降流が大きいということでしょうか？

A22) 発表会場でもお答えしましたが、補足します。黄砂の輸送を考える上でやはり日本の山の影響が大きいと考えています。西日本でも日本海側と太平洋側では黄砂の観測されやすさが異なります。

Q23) マジンガーの動画で高緯度でのエアロゾルの動きが波動のようでしたが、どのような力でこのような波の動きになっているのでしょうか？

A23) 発表会場でもお答えしましたが、補足します。エアロゾルは空気の流れ（風）に沿って移動します。上空の高気圧、低気圧の運動により波動のように見えていると考えます。

Q24) 大きな粒子はすぐに地上に落ち、微粒子はいつまでも上空を漂いますが、粒径と飛行距離の測定結果を示した図は論文発表されているのでしょうか？黄砂の、重量対粒径、の測定結果は、論文発表されていますか？重量—粒径関係は、季節依存しますか？

A24) 黄砂等のエアロゾルは粒径にもよりますが飛来距離が場合によっては数千 km にも

達することや、飛来中に凝集等で粒径が変わることもよくあるため、粒径と飛来距離を直接測定することは難しいように考えます。発生源近傍と、飛来後の黄砂の粒径分布はかなり異なるため定性的に推測する程度に留まるのではないかと思います。黄砂の重量と粒径の関係は舞い上がる砂の性質によって決まります。概ね 2.5g/cm³ 程度です。

Q25) サハラ砂漠の砂塵が西側のアメリカに進む理由は何でしょうか。貿易風とは強さも方角も違うように思います。

A25) 貿易風の大まかな定義としましては、亜熱帯高圧帯から赤道低圧帯へ恒常的に吹く東寄りの風のこと、となります。サハラ砂漠は赤道より北に位置していますが亜熱帯高圧帯から赤道よりに位置しているため貿易風の影響を受けやすいと思われれます。今回お示した動画は 2 月で太陽がやや南半球よりであったため、砂塵嵐はまず南下した後に西寄りに輸送されたものと考えています。

Q26) 天気予報のような短いスケールの予報を延長することは難しく、地球システムモデルで長いスケールの予想をすることができる理由が分かりませんでした。より誤差が大きくなりそうな感じがするのですが、そこを教えていただきたいです。

A26) ご指摘の通り、大気を持つカオス的性質のため地球システムモデルを持ってしても将来の日々の天気を予測することは困難です。気候予測では、温室効果ガスの濃度など外部強制を与えて、それに対する平均的な気象状態（気温、降水量など）を予測します。

Q27) モデルには地表面の情報も取り入れているというお話だったと思いますが、将来予測に関しては、温暖化による植生の変化も考慮されるのでしょうか。また人為的な都市開発・森林伐採等の影響はどうでしょうか。

A27) 発表でも少し触れましたが、温暖化による植生変化を考慮することは今後の目標の一つです。世界でもまだ半数以上のモデルがこのような過程を導入できていません。人為的な活動予測を取り込むことは更に難しい課題（気象とのフィードバックも考慮した将来の人間活動をモデルで考慮する必要があります）であると考えています。

Q28) PM2.5 から黄砂を分離する方法はどのようなもののでしょうか？

A28) PM2.5 はエアロゾルを大きさによって区分したもののなので、黄砂も含まれます。黄砂を分離するには組成を分析して砂漠起源のものを抽出する必要があります。

Q29) 温暖化で黄砂発生量が増える、との結論は、地表風速が大きくなるから、と理解しました。地表風速と粉塵舞い上がり量は粒径依存すると思います。この測定は論文報告されているのでしょうか？また、気温と地表風速の関係は簡単に測定できるでしょうか。測定結果は、論文報告されているのでしょうか？

A29)例えば、黄砂の舞い上がり過程を数値モデルに翻訳した論文で風速と舞い上がり量の実測値に関する論文を幾つか引用しています。

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2003JD004372>

接地境界層の観測研究例として、以下のものが挙げられるかと思います。

https://www.mri-jma.go.jp/Publish/Technical/DATA/VOL_30/30_005.pdf

https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/1999/1999_09_0585.pdf

Q30-1) 積雪量が増えると風速が大きくなるのは、土壌より雪の方が摩擦が小さいからでしょうか？

A30-1) 説明が不明確だったかもしれず申し訳ありません。積雪量が増えると地面の露出が減ることにより粗度（地面の凸凹）が小さくなり、地表付近の風速が小さくなるのではないかと考えています。

Q30-2) 積雪のある時は黄砂が少ないとの説明とは矛盾しないのでしょうか？

A30-2) 上記の通り積雪があると摩擦速度が相対的に小さくなることに加えて、砂が露出しなくなることから砂の舞い上がりそのものが抑制されます。

Q31) 地球温暖化により、春と秋のゴビ砂漠からの黄砂の飛来が増えるというお話について、積雪量の減少によって地表付近の風が強くなるという理由があまりよくわかりませんが、なぜ、風が強くなるのでしょうか？

A31) Q30-1) のようなプロセスを考えています。