



暑いだけじゃない

地球温暖化3

—日本の雨の降り方は変わるのか?—

近年、日本では記録的豪雨の頻発化など、地球温暖化に伴う「降水異変」が懸念されています。二酸化炭素などの人為起源の温室効果ガスが大気中に急速に排出され、地球温暖化はすでにまぎれもない現実として起こっています（IPCC 第5次評価報告書）。そして、地球温暖化は、じわじわと上がる地球の平均気温の一見緩慢な変化からは想像がつかないスピードで、私達の生活に影響をもたらしているかもしれません。その一つの可能性が雨の降り方の変化なのです。

将来の気候を予測するためには、気候モデル（3－4頁参照）を使ってスーパーコンピュータで数値シミュレーションを行います。気候モデルでは、大規模な大気循環の再現性や将来変化については比較的議論しやすいと考えられています。しかし、雨がどのくらいの強さで降るかなどを正確に表現することは、現在の気候モデルがまだ苦手とするところです。それは、大気の流れ、気温、湿度、陸面や海表面の状態などの環境条件がどのようになったときに、どんな雨が降るのか、ということをモデルの中で表現するためには、まだわかっていないことがたくさん残っているからです。

私達は、観測データと気候モデル実験を組み合わせる研究することにより、日本と東アジア域の雨の降り方の将来変化をより詳しく知るための取り組みをしています。今回の研究プロジェクトでは、観測データをもとに現実に起きている豪雨や降水のメカニズムを研究し、大規模な気候の状態との関係を明らかにすることに重点をおいています。たとえば、人工衛星で観測した立体的な雨のデータを利用して、雨の特徴が大規模な気候状態によってどのように決められるかを調査します。その結果を気候モデルが予測する将来の大規模な気候状態の情報と組み合わせ、雨の降り方が将来どのように変わるかを推定する研究を行っています。ここでは、一連の研究の中からいくつかをご紹介します。

「暑いだけじゃない地球温暖化3」編集委員長 高藪 緑

メーユちゃん

メーユはプロジェクトメーユ（*注）の広報大使です。

サイエンスのことはあまり知らないのですが、みんなといっしょに勉強します。



*注 “プロジェクトメーユ”とは、“東北マリンサイエンス拠点形成事業”に参画している東京大学大気海洋研究所のチーム愛称です。

赤沢クン

お友達の赤沢クンは、ものしりで研究熱心です。

گران博士と調査へ出かけたり、研究室で働いています。



گران博士

گران博士はメーユのいろいろな質問にこたえてくれます。

頭のてっぺんからは汗と知恵が出てきます。



暑いだけじゃない 地球温暖化③

—日本の雨の降り方は変わるのか?—

はじめに.....	1
降水の観測と将来予測.....	3
大気の流れと大雨.....	5
温暖化は豪雨を増やすか?.....	7
夏のジェット気流.....	9
海の効果.....	11
成層圏の影響.....	13
遠隔影響：MJO	15
遠隔影響：大陸の積雪.....	16
アジアモンスーンの将来変化.....	17
コラム1：日本の気候と豪雨	19
コラム2：降水は天からの暗号?	20
今後の取り組み.....	21
参照論文・研究参考機関.....	22

謝辞：この冊子で紹介した研究は、(独)環境再生保全機構 環境研究総合推進費課題(2-1503)「地球温暖化に伴う気候変動と日本・東アジア域の降水現象の変化に関する研究」(代表：高薮 縁 東京大学大気海洋研究所)の成果の一部です。

研究に使用したデータは、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と米国NASAによる熱帯降雨観測計画(TRMM)衛星、全球降水観測計画(GPM)主衛星などの衛星観測降水データ、気象庁の全球再解析データ(JRA55)など、様々な機関の協力の下に作成・公開されているものです。また、CMIP実験結果は世界各国の気候モデル開発研究グループの協力の下、集約されたものです。大量データの利用にあたっては、文部科学省プロジェクトDIASの協力をいただきました。東京大学大気海洋研究所特任研究員の木村詞明博士には、大変貴重なオリジナル写真のご提供をいただきました。

降水の観測と将来予測

◆降水の衛星観測

雨や雪などの観測には、雨量計によって直接測るほかに、レーダなどによって離れた場所から測る方法があります。降水レーダは電波を発射し、雨粒などで反射して戻ってくる信号を測ります。受け取った電波の強さと戻るまでの時間で、地上の雨の強さだけでなく、雨の立体的な姿を知ることができます。

太平洋の真ん中やアマゾンなど、人が住んでいない地域の降水の測定は、日々の暮らしには直接関係ないように思われますが、天気予報や気候の研究にはたいへん重要です。そこで活躍するのが地球をくまなく観測できる人工衛星です。降水レーダを搭載した衛星はこれまでに二つだけあります。1997年12月から2015年6月まで飛んでいた熱帯降雨観測計画（TRMM）衛星と、2014年2月末に打ち上げられた全球降水観測計画（GPM）主衛星（図1）です。降水レーダはいずれも日本が開発しました。衛星搭載降水レーダによる観測は約20年になり、雨の立体データ（図2）が大量に蓄積され、天気予報や気候の数値モデルの雨や雲の表現を改善する研究や、災害をもたらすようなまれな現象についての研究に役立てることができるようになってきました。

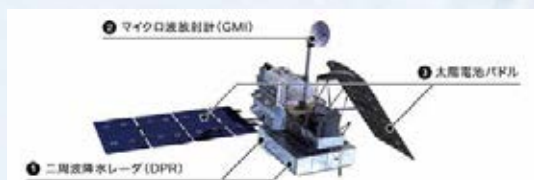


図1：GPM主衛星と、GPM搭載レーダによる1日分の降水観測例（JAXA ホームページ）。1本の幅は約250 kmで、1日に地球を約16周する。

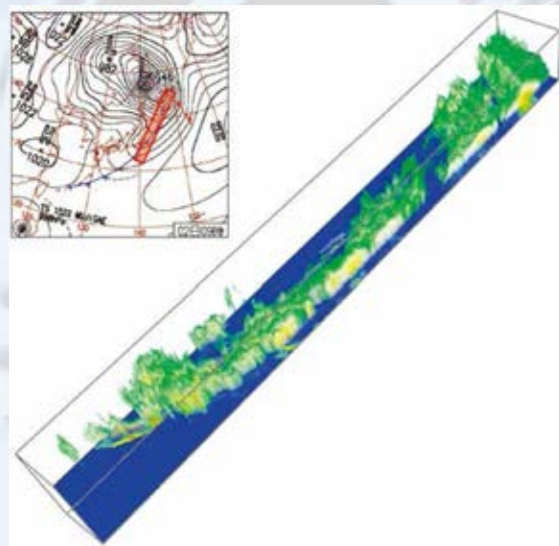


図2：2015年10月2日に日本を通過した温帯低気圧に伴う降水の立体観測。左上の天気図（気象庁ホームページ「日々の天気図」）に赤枠で示した範囲を描画している。

◆気候モデルとは

将来気候を予測するためには、気候モデルを使います。気候モデルは物理法則を表す数式のかたまりです。大きく分けて、大気の状態、海の状態、氷や陸面の状態をそれぞれ予測する3つのかたまりとそれらを繋ぐかたまりからできています。たとえば大気のモデルは大気を水平方向に約100km×100km、鉛直方向に約1kmの直方体（格子）に分け（図3）、それぞれの格子での現在の風、気温、気圧、湿度の状態から約10分後の状態を予測する数式です。

風の変化を表す数式は、実は運動の第2法則 $ma=f$ （質量 m の物体が力 f を受けるとその力の方向に

加速度 a で加速する) です。けれども、投げたボールの落下点をほぼ正確に予測できるのとは異なり、風の場合は、風自身が風を加速するといった効果をもつため、ある時の状態にほんの少しの違いがあっても、その違いが時間と共にどんどん拡張する癖があり、予測がしにくくなっています。それに加えて、たとえば大気中の塵や雲や雨などはミクロな現象であり、100km に一つの値では表現できません。それが放射熱や潜熱を通じて気候を変えるのでとてもやっかいです。そしてそのような効果を表現する方法はモデルにより様々であるため、モデルの予測する将来はなかなかぴたりとひとつには決まらないのです。

世界では 50 個以上もの気候モデルが開発されていますが、上のような理由で将来気候の予測結果は少しずつ違います。「第 5 次結合モデル相互比較計画 (CMIP5)」という国際的な研究計画は、将来の気候変化をより科学的に確からしく議論するため、これらの多くのモデルで統一的行った実験結果を集約しました。「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」の第 5 次評価報告書は、CMIP5 の実験結果をひとつの科学的根拠として使っています。

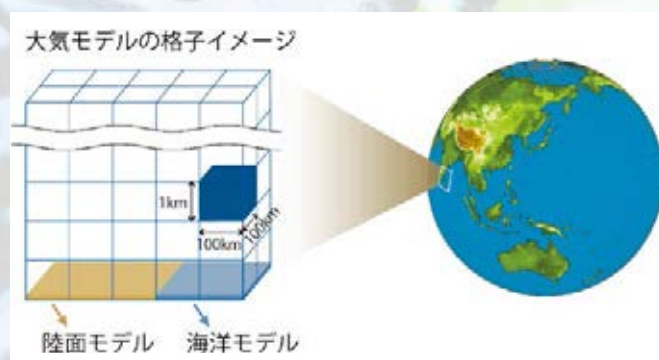


図 3：気候モデルの格子イメージ。



表：CMIP5 に参加した
54 個の気候モデルの国と地域。

◆衛星観測と気候モデルの組み合わせ

人工衛星から、地球上のありとあらゆる場所での雨や雲の立体構造、雲の核となる塵の立体分布など、雨や雲の状況を研究するためのたくさんのデータが収集されます。地球上のあらゆる条件においてどのような雨や雲が現れるかということを知ることができるのです。しかし、衛星観測からだけでは、将来、雨の降り方がどのように変わるかを知ることができません。

一方で、気候モデルは、将来の海面水温や大気循環の様子をそこそこ予測することができると考えられます。しかしながら、雨や雲の特徴を表現するのはまだまだ苦手です。

そこで、それぞれの長所を生かして研究を進めます。衛星観測データを使って、海面水温や大気循環の状態が雨の降り方や雲の様子を決める仕組みを物理的に解明します。その物理的な知見と、気候モデルが示す将来の海面水温や大気循環などの状況から、将来の雨の降り方や雲の様子を推測することができるかもしれません。また、衛星観測から得られる物理的な知見は、気候モデル自身の性能の向上にもつながります。

大気の川と大雨

平成 26 年 8 月豪雨における広島での大雨

平成 26 年 8 月豪雨では、広島市付近で形成された線状降水帯（19 頁参照）によって 3 時間に 200 mm 以上の雨が降り、多数の犠牲者を出すなど大きな被害をもたらしました。私たちは、広島市での豪雨に「大気の川（Atmospheric River）」と「寒冷渦」の相乗効果が影響したことを示しました。大気の川とは、大気中の水蒸気が細長い川のように集中して存在する領域のことで、下層だけでなく上層でも多量の水蒸気を保持しています。寒冷渦は大気の上層にできる寒気を伴った低気圧で、周辺の大気の状態を不安定にする効果を持ちます（図 1）。広島豪雨の際には、大気の川がインドシナ半島から日本周辺まで伸びていました。そこに上空の寒冷渦が近づいたことで大気の状態が不安定になり、線状降水帯が形成されたのです（図 2）。また、中国山地の地形が線状降水帯を広島付近に集中させる働きをしたことも示しました。

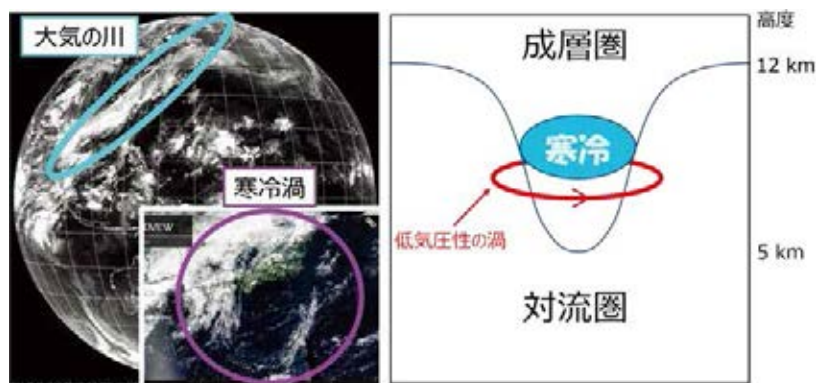


図 1：左：平成 26 年 8 月豪雨における広島での大雨時の大気の川（衛星画像、気象庁ホームページ）と寒冷渦（衛星画像、NASA EOSDIS Worldview ホームページ）。右：寒冷渦の模式図。

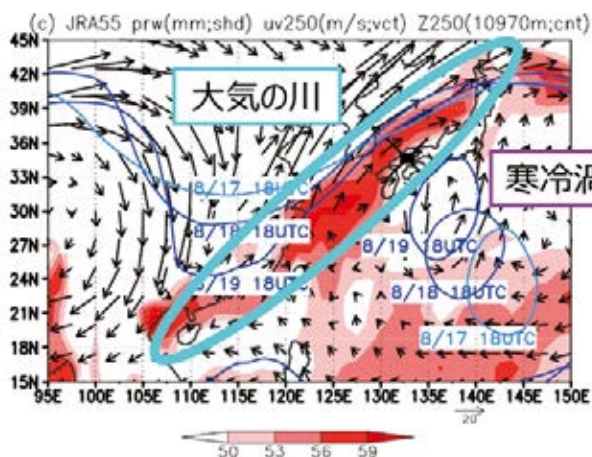


図 2：広島での大雨時の上空の風（矢印）と水蒸気量（色）。

大気の川と寒冷渦の相乗効果

大気の川と寒冷渦の相乗効果による雨は、条件がそろえばどこでも起きるものなのでしょうか？ 私たちは、14年間のデータから164個の寒冷渦を抽出し、大気の川が近くにある場合とない場合に分けて雨の降り方を比較しました。すると、大気の川、寒冷渦、雨が強まる領域の三者の位置関係が、広島豪雨の状況に驚くほどよく似ていました（図3）。さらに、気温や湿度の高度分布も広島豪雨と同じような特徴を持っていました。また、今回の解析で用いた事例のほとんどは地形の影響を受けない海の上で起きていることも明らかになりました。この結果は、広島豪雨のような雨は、地形の有無にかかわらず、大気の川と寒冷渦の位置関係や強さ次第でどこでも生じる可能性を示しています。

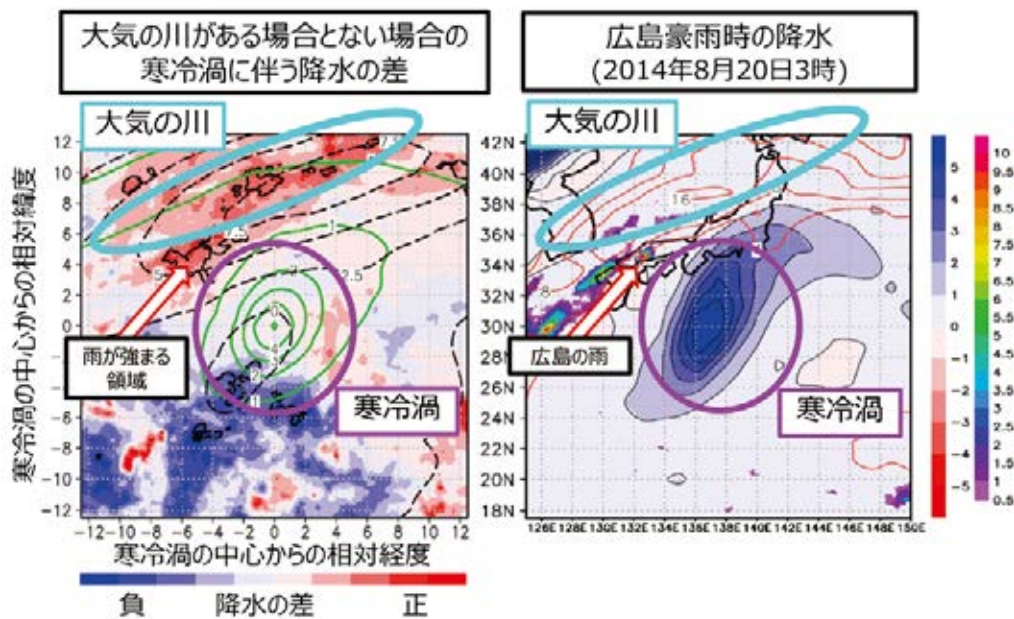
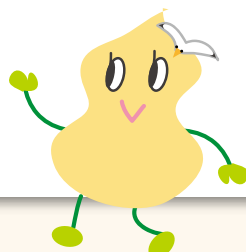


図3：左：寒冷渦の近くに大気のある場合とない場合の降水の差（色）と、寒冷渦の近くに大気のある場合の水蒸気量の平均からのずれ（破線）と寒冷渦の強さ（緑線）の平均値。右：広島豪雨時の降水（虹色）、水蒸気量の平均からのずれ（赤線）、および寒冷渦の強さ（赤一青色）。



空にも川が流れているのね。

（参照論文 1, 2）

温暖化は豪雨を増やすか？

豪雨をもたらす環境

短時間に強く降る雨は発達した背の高い積乱雲からもたらされます。では、「最も強い雨」は「最も背の高い積乱雲」から降るのでしょうか？ 私たちは、TRMM 衛星による 13 年間の降水レーダ観測データから、北緯 35 度ー南緯 35 度の世界各地における、1000 回に 1 回程度のまれな降水事例を調べました。その結果、最も強い雨は必ずしも最も背の高い積乱雲からは降らないことを見出しました。

TRMM による「最も強い雨」と「最も背の高い雨」の観測例を図 1 に示します。最も強い雨（図 1 上）は比較的背が低く、よく組織化しており、雨が地上に向かってどんどん強くなっています。このとき大気は比較的安定で、上層まで非常に湿っていました。水蒸気は凝結して積乱雲の中で成長し、やがて地上に落ちてきます。このとき大気がよく湿って多数の雨粒を含んでいると、衝突によって雨粒は加速度的に成長し、極端に強い雨になるのです。最も背の高い雨（図 1 下）では、雨粒がはるか上空に運ばれて激しい雷雨をもたらしています。近年「ゲリラ豪雨」と呼ばれている現象はこの最たる例です。

大気下層では、豪雨発生時には南から暖かく湿った空気が流入してくることは良く知られています。では、対流圏全体を深く湿らせるような多量の水蒸気はどこからやってくるのでしょうか？ 最も強い雨が発生したときの東アジア域の水蒸気の流れを調べた結果、対流圏全体にわたる多量の水蒸気が、チベット高原近くや、ときにさらに遠くの熱帯海洋上から運ばれていたことが分かりました。多くの事例には、5 ページで解説した「大気の川」が関係していることも分かりました。

日本の初夏の雨の特徴

日本の初夏（5-7 月）は、梅雨末期の豪雨からシトシトとした雨まで、雨の降り方が多様です。私たちは、衛星観測による雨の解析から、初夏の雨には①ゲリラ豪雨を含む面積の小さなタイプ、②温帯低気圧に

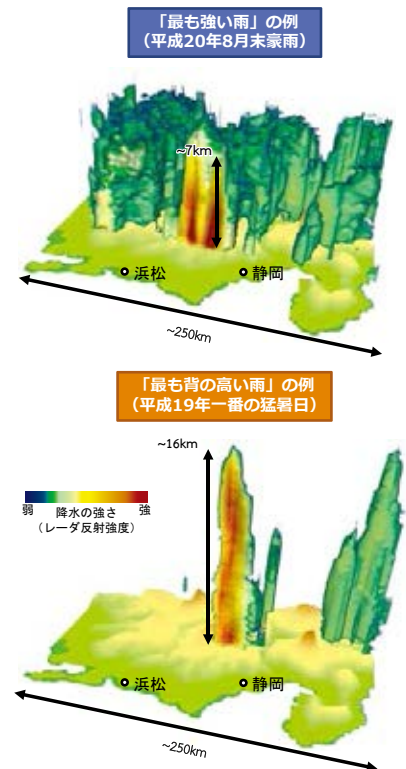


図 1: 「最も強い雨」と「最も背の高い雨」の、TRMM 降水レーダ観測例。

将来はもっと北でも豪雨が
起こりそうだね。注意が必
要だね。



伴うタイプ、③線状降水帯などの組織化したタイプがあることを見つけました。私たちの生活に大きな影響を及ぼす強い雨の多くは、組織化したタイプがもたらしています（図2）。

将来の雨の降り方はどう変わるのか？

将来の雨の変化を正確に知ることは重要な問題です。私たちは、上述の3タイプの雨が生じる環境がそれぞれ異なることに注目しました。例えば、面積の小さなタイプの雨は海面水温の高い領域で多い傾向がありますが、組織化したタイプの雨は、海面水温

だけでなく上空の亜熱帯ジェット（9頁参照）などの大気の流れの影響も受けています。このような関係を用いて、CMIP5 気候モデルが予測する将来の環境の変化から、各タイプの雨が将来どう変わるのかを推定しました。

その結果、将来は多くの地域で組織化タイプの雨が増加すると予測されました（図3）。特に、東北・関東・日本海側では、現在このタイプの雨はさほど多くはありませんが、将来は顕著な増加が予測されています。線状降水帯などの組織化タイプが増えると、豪雨の危険度が高まるので注意が必要です。

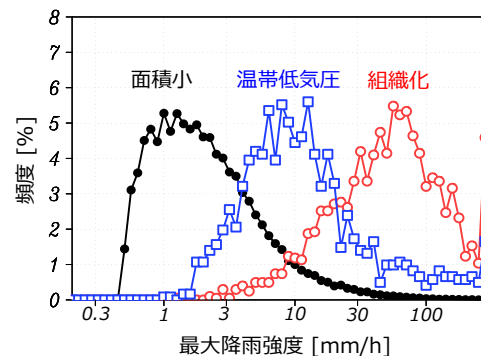


図2：日本付近で5-7月に観測された個々の雨域の最大降雨強度のヒストグラム。黒：面積小タイプ、青：温帯低気圧タイプ、赤：組織化タイプ。

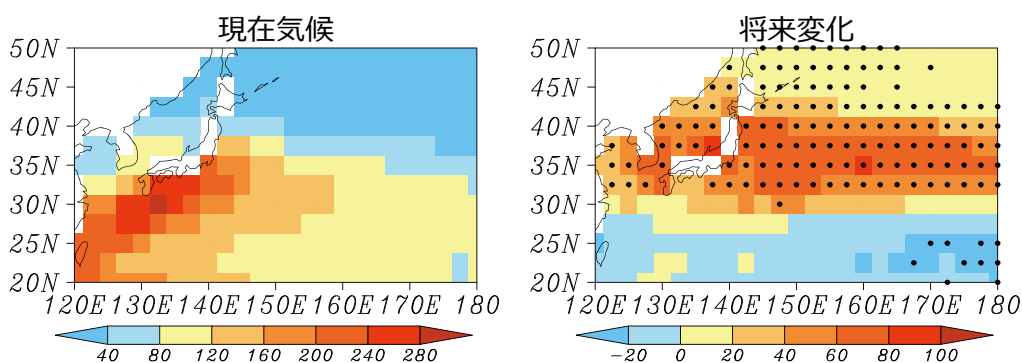


図3：24個のCMIP5気候モデルによる海面水温と大気循環（500hPaの大規模鉛直流）から推定された5-7月の組織化タイプの総雨量。左：現在（1980-2005年）、右：将来変化（2075-2100年平均と現在の差）。右図の黒点は、90%以上のモデルで変化の符号が一致する場所。

（参照論文 3-5）

夏のジェット気流

ジェット気流と降水

亜熱帯のジェット気流は、地球を東向きに巡る上空の風です。日本付近では、冬季には九州あたりの緯度でもっとも強く流れます。それが季節と共に北上し、8月には北海道あたりの緯度で最も強くなります（図1）。ジェット気流は、降水との関わりが深いことが知られています。たとえば、梅雨前線の形成には、ジェット気流に沿ったユー

ラシア大陸からの流れと、太平洋高気圧の西側で南からもたらされる水蒸気関わっています。梅雨期を含む5〜7月、ジェット気流は本州を広く覆いますが、盛夏にかけてジェット気流がさらに北上することで梅雨明けとなります。

以上は、季節進行という長い目でみた場合の話ですが、実はジェット気流は日々の降水がどこで強くなるかにも大きくかわります。

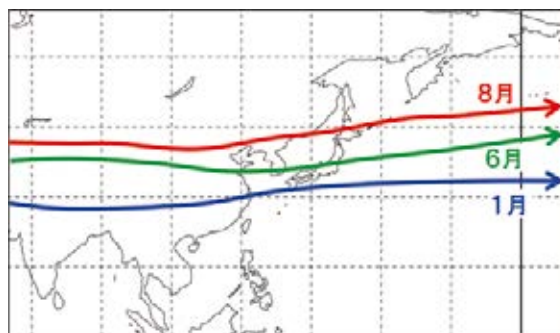


図1：ジェット気流の軸（最も速いところ）の推移。1980-1999年の風速データを用い250 hPa（高度約10 km）での各月の平均値より作図。

夏の日々の気象とジェット気流

私たちは、夏季の東アジアから北太平洋西部における日々の降水の分布とジェット気流の関係を調べました。ジェット気流の軸（最も風速が速いところ）がどこにあるかは、日々変化します。それに合わせて梅雨前線などの前線も動かされ、降水が強いところも位置を変えます（図2）。その結果、雨の多い領域が帯状に広がり、しばしば集中豪雨の背景となります。また、「大気の川」（5頁参照）と呼ばれる状態になることが良くあります。それは蛇行しうねりますので、氾濫して日々流れの場所が変わる見えない川といったイメージがふさわしいでしょう。

雨の量だけでなく、降り方についても、ジェットとの位置関係で大きく異なることがわかってきました。

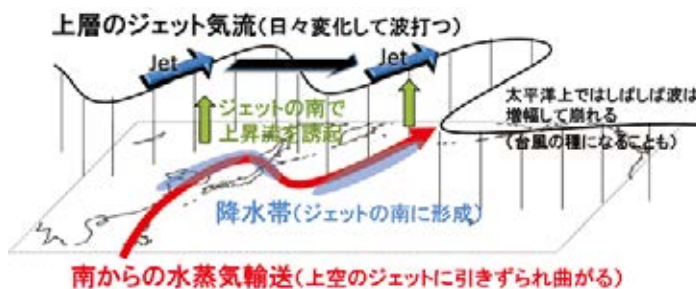


図2：日々のジェット気流と降水帯の関係の模式図。地図を斜めに投影することで立体的に表現したもの。

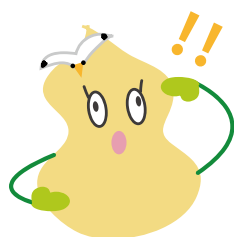
前号（「暑いだけじゃない地球温暖化2」）では、梅雨前線を挟んで雨の降り方が大きく異なることを述べましたが、ジェットという尺度でみると、より広い季節範囲について同じことが言えるのです。

地球温暖化による変化

前号では、地球温暖化が進行すると夏季のジェットの北上が遅れ、梅雨期が長引くと予想されていることを紹介しました。温暖化予測のための多数のシミュレーションの結果をみると、夏季のジェット気流は、全般的に現在よりやや南にシフトすると予想されています。このため降水の平均分布が変わりますが、さらに、ある地点でみると、ジェット軸との位置関係が変わるので、雨の降り方も変化することになります。例えば、現在、ジェットから南に離れている期間が長い地点では、将来、ジェットがより近くに来やすくなって降水が増加することが予想されます。また、現在、ジェット軸付近にある地点は、将来、ジェットより北側にいる期間が長くなり、平均的な雨量だけでなく、雨の降り方も変わると考えられます。

それでは、温暖化シミュレーションでは、日々の降水の様相は各地でどのように変わると予測されているのでしょうか。CMIP5 気候モデルによる結果を比べると、変化の仕方はまちまちであることがわかります。つまり、現時点では確かなことはなかなか言えません。それでも、気候モデルごとの変化の仕組みを調べることで、この場合はこうなる、その場合はそうなる、というようにある程度の関係性が得られることが期待されますので、私たちはそのような整理を行うべく研究を進めています。さらに、現在、IPCC の次の報告書のための気候モデルシミュレーションが行われていますので、それによってより確かなことがわかると期待されます。

全般的な地球温暖化は残念ながら疑いのないものとなっていますが、人々の暮らしに直結する、各地域で気候がどう変化するかはまだまだわからないことが多く、今後の研究が求められます。



ジェット気流と梅雨前線は
一緒に動くのね。

（参照論文 6-9）

海の効果

秋雨前線に伴う豪雨：平成 25 年 8 月島根

夏季に日本の南方海上で発達する太平洋高気圧は、南から暖かく湿った気流を日本にもたらし、日本の夏を湿潤にしています。平成 25 年 8 月下旬、太平洋高気圧の強まりによって暖かく湿った気流が山陰地方の北方にあった秋雨前線へと運ばれたことによって、島根県では記録的な豪雨に見舞われ、大きな被害が発生しました。九州の北側を流れる海流（対馬暖流）が、南からの気流を暖かく湿った状態に維持するように働いたことで、強い雨が降りやすい状況が作り出されたと考えられます。

海面水温分布を変えて数値シミュレーションを行うと、高めの海面水温を使った場合には強い雨が降ることが分かりました（図 1a,b）。この結果は、将来地球温暖化に伴って海面水温が上昇すると、より強い豪雨が発生しやすくなることを示しています。

逆に、低めの海面水温を使ったシミュレーションでは雨が弱まってしまいます（図 1c）。このように、豪雨予測においては海面水温が重要な要素の一つです。しかし、海面水温の正確な分布を完璧に知るのは困難です。雲や雨があると人工衛星からの観測は難しくなりますし、船舶による観測はまばらだからです。精度の良い豪雨予測のためには、より正確な海面水温を測定するための手法・技術の開発が望まれます。

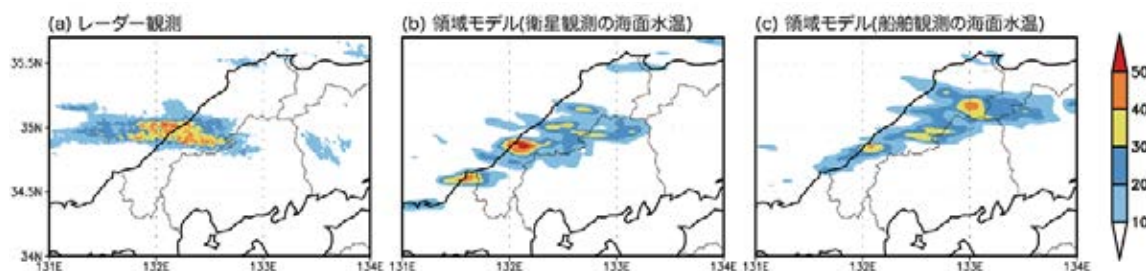
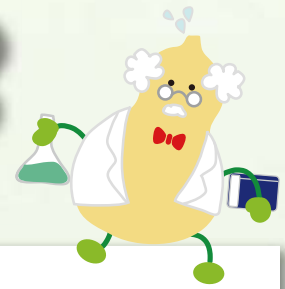


図 1: 島根豪雨時の 1 時間あたり降水量 (平成 25 年 8 月 24 日 3 ～ 4 時。単位は mm)。(a) レーダー観測、(b) 高めの海面水温 (衛星観測) を用いた数値シミュレーション結果、(c) 低めの海面水温 (船舶観測) を用いた数値シミュレーション結果。

夏季の豪雨や異常天候と PJ パターン

島根豪雨のような局地的な豪雨の背景には、何千 km にも広がる大規模な大気循環の変動があります。平成 29 年 8 月には太平洋高気圧と梅雨前線が平年よりも南寄り、さらにオホーツク海高気圧が強く、東・北日本の冷夏と各地の豪雨をもたらしました。これには「PJ パターン」と呼ばれる現象が関わっています（図 2 上）。PJ パターンとは、フィリピン周辺と日本周辺の気圧・気温・降水量が

PJパターンを通して熱帯の海の
状態を感じているのじゃな。



シーソーのように変化する現象です。日本（沖縄・奄美を除く）に冷夏・多雨をもたらす PJ パターンは、図 2 上のような偏差（平年値からの差）パターンとなります。

私たちは紙媒体でしか残されていない古い気象観測データを収集し、PJ パターンの振る舞いを表す指数を 19 世紀末までさかのぼって作成しました（図 2 下）。図 2 上のような PJ パターン（指数が正）がエルニーニョ現象直後の夏に起こりやすいことは知られていました。しかし、エルニーニョ現象や反対のラニーニャ現象と PJ パターンとの関係が、強い時代と弱い時代を過去に数十年規模で繰り返してきたことが新たにわかりました。特に 1990 年代末から 2010 年頃にかけて、エルニーニョ現象との関係の弱化に伴って PJ パターンがおとなしくなっていたこともわかりました。

この PJ パターンの性質の変化は温暖化よりも自然変動に起因すると考えられます。従って将来も PJ パターンが消えることはなく、日本の夏に異常天候をもたらし続けるでしょう。一方、地球温暖化シミュレーションでは、正符号の PJ パターンが増える傾向にあり、日本では冷夏・多雨パターンの頻度が増えると予想されます。

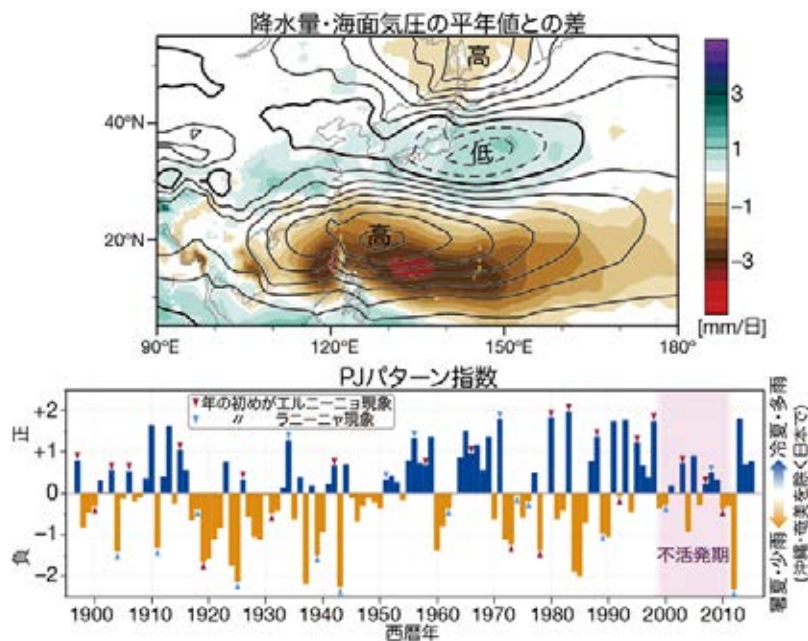


図 2: (上)PJ パターンの典型的な構造。降水量（色）と海面気圧（等値線・0.2hPa ごと）。いずれも平年値からの差。この符号の PJ パターンはオホーツク海高気圧の発達・太平洋高気圧の南下を伴い、冷涼なやませが北日本太平洋側に吹き、梅雨・秋雨前線が本州付近に停滞しやすい。(下) PJ パターン指数の時系列。年の初めにエルニーニョ現象・ラニーニャ現象が起こっていた年をそれぞれ赤・青の三角形で示す（2 年以上持続した場合は最後の年のみ）。

(参照論文 10)

成層圏の影響

私たちが住んでいる対流圏の上空には、雲の無い青々とした、成層圏と呼ばれる世界が広がっています。成層圏は高度とともに温度が上がるなど、対流圏とはずいぶん異なる特徴を持ちますが、最近の研究から、成層圏が地表付近の流れにまで影響を与えている様子が分かってきました。

成層圏大気の流れ

最初に成層圏大気の流れについて説明します。図 1a に緯度—高度方向の大気の流れを示します。緑色の大気層は対流圏とよばれ、日々の天気の変化が起きている領域です。対流圏の上空に位置する大気層（水色）は成層圏と呼ばれ、対流圏と成層圏の境目は対流圏界面と呼ばれています。成層圏には赤道域で上昇し、それから南北両半球に広がり、高緯度で下降する、ブリューワー・ドブソン循環（BD 循環）と呼ばれる大規模な流れがあります。BD 循環の下降流は、空気を圧縮し極域成層圏の大気を暖めています。北半球の冬では極域成層圏は -70°C 程度と冷たい（図 1b）ですが、BD 循環の下降流が弱くなれば、更に冷たくなります。成層圏の西風ジェットは極域の温度が低いほど強くなる性質があるため、BD 循環の下降流が弱まれば西風は強まります。

成層圏が対流圏の流れに影響

雲より高い場所にある成層圏は、対流圏の流れに影響を及ぼしているのでしょうか？ 答えはイエスです。これまでの研究で対流圏と成層圏はお互いに結びついて変動していることが知られています。成層圏を全て含む気候モデル（ハイトップ）と成層圏を十分に含まない気候モデル（ロートップ）を使ったシミュレーションを行い、両者を比較することで、成層圏の対流圏に対する影響を詳しく調べることができます。

成層圏を十分に表現できないロートップモデルでは、BD 循環をきちんと再現することができないため、極域の下降流が弱くシミュレートされてしまいます。図 2a は BD 循環が弱い場合の模式図です。下降流が弱いと ①、下降流による空気の暖め具合が弱くなり、極域の温度が下がります ②。その結果、成層圏の西風ジェットは強くなり ③、その影響で直下の対流圏の西風も強まります。この西風の強まりと対応して、地表面気圧は北側ではより低く、南側でより高くなります ④。つまり成層圏循環が変わることで、地表面気圧分布や降水分布も変わることが分かりました（図 2b）。

温暖化に伴って気候がどのように変化するか、世界中の様々な研究機関で気候モデルによるシミュ

ずいぶん高いところの流れが
地上の雨を変えるのね。



レーション・検証が行われています。現在、ハイトップモデルとロートップモデルとが混在しており、成層圏の有無がシミュレーション結果をどのように変えるのか、より詳細な検証を続けていく必要があります。

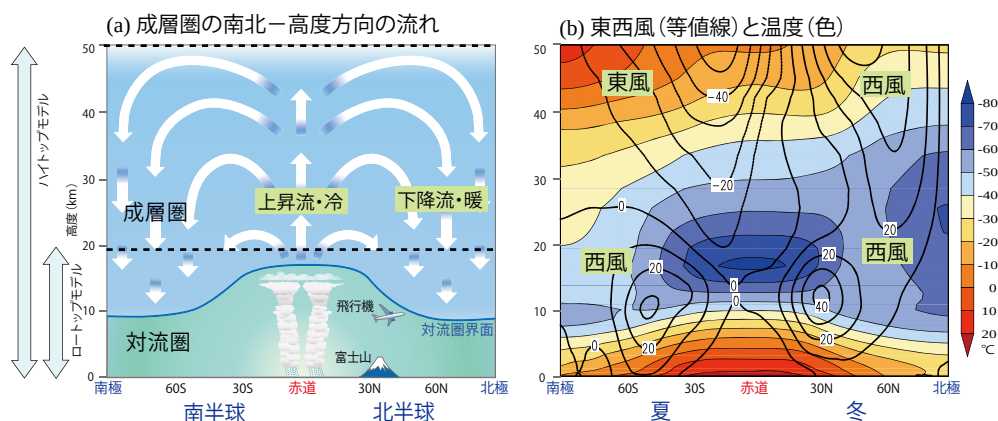


図 1：(a) 高度約 50km までの緯度－高度方向の大気の流れ。緑色の大気層は対流圏、青色は成層圏、その境界は対流圏界面と呼ばれ、飛行機が飛んでいる高度に相当する。空気は上昇流がある場所では冷やされ、下降流がある場所では暖められる。(b) 北半球冬季における経度方向に地球一周平均した東西風速（等値線）と温度（色）。等値線は正の値が西風、負の値が東風を示す。

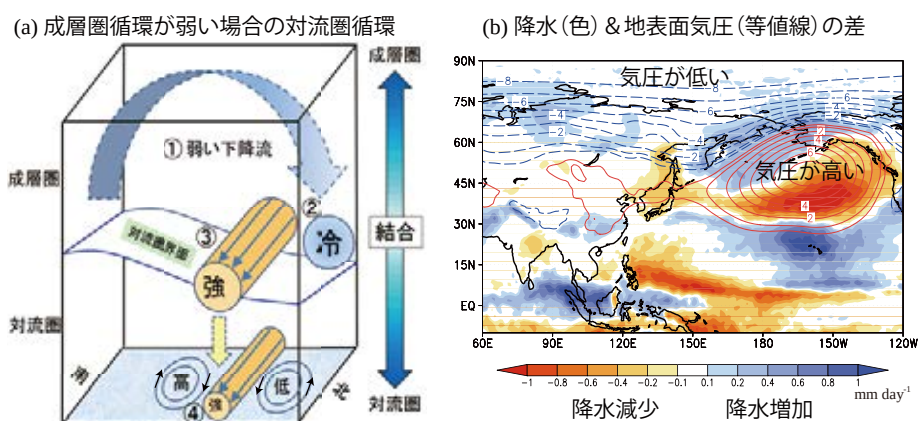


図 2：(a) BD 循環が弱い場合の模式図。①赤道から高緯度へ向かう成層圏の循環が弱くなり、②極域での下降流が弱くなり温度が下がる。③対流圏～成層圏の西風ジェットが強くなる影響が地表付近まで及び、④地表付近の西風が強まり、気圧は低緯度側で高く、高緯度側で低くなる。(b) 北半球冬季における降水（色）と地表面気圧（等値線）についてロートップモデルからハイトップモデルを引いた差。高緯度で気圧が低く、中緯度で気圧が高くなり、降水分布も変わる。

(参照論文 11)

遠隔影響：MJO

MJO と南岸低気圧

熱帯では、数千 km におよぶ積乱雲の集団がインド洋から赤道太平洋へゆっくりと東進する「マッデン・ジュリアン振動 (MJO)」とよばれる現象がみられます (図 1)。この MJO が日本の冬の雪に影響を与える可能性があります。

普段は雪の少ない本州の太平洋側の地域には、冬から春先に南岸低気圧が大雪をもたらすことがあります。南岸低気圧は亜熱帯の海の上で発生、発達するので、MJO の影響を受けそうです。そこで、南岸低気圧のうち、急速に発達する「爆弾低気圧」になったものは、MJO がどの状態になっているときに発生しやすいか、発生頻度を調べてみました。

まず、MJO が見られるときと見られないときで比べると、MJO が見られるときのほうが強い南岸低気圧が多く発生していることがわかりました。さらに、MJO がインド洋付近で見られるときに、南岸低気圧が特に発生しやすいことが明らかになりました (図 2 の 3～4 に相当)。関東地方に寒気が入っていて気温が低くなっているため、雨ではなく雪になる頻度が高くなると考えられます。

MJO を気候モデルで正確に再現することは困難ですが、いくつかの気候モデルは温暖化によって MJO が活発化する可能性を示しています。このことは、温暖化によって強い南岸低気圧の頻度が増える可能性を示しています。実際に、過去 30 年程度の観測データを調べると、南岸低気圧の影響を受けやすい関東地方南部では冬季の降水が増加していることがわかりました (図 3)。近年では温暖化によって平均気温が上昇しています。ただし、MJO の影響で南岸低気圧が増えて寒気の流入が強くなる可能性もあり、必ずしも温暖化すると雪が雨に変わるとは言いきれません。



図 1：MJO の例。ひまわり 8 号による、2017 年 2 月 4 日 12 時の雲画像。

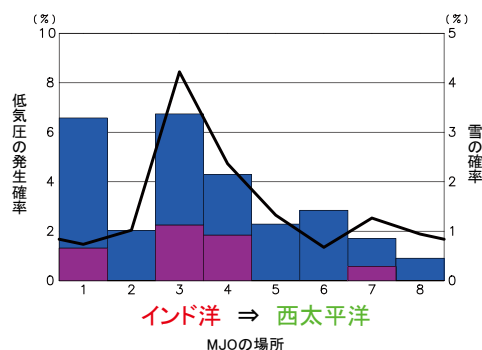


図 2：MJO の場所ごとに調べた、強い南岸低気圧が発生する確率 (折れ線) と、東京で雪が降る確率 (青)、10cm 以上の大雪が降る確率 (紫)。いずれも 1 日あたりの確率。

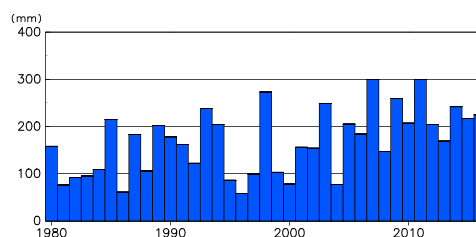


図 3：東京での冬季 (12～2 月) の降水量の長期変化。

遠隔影響：大陸の積雪

温暖化にともなう雪の変化

近年の地球温暖化にともなって、北半球陸上の積雪面積も、春から初夏にかけて急激に減少しています。このような積雪の情報は、主に人工衛星から観測することで調べられています。人工衛星による観測が始まった頃には、人工衛星から撮影した地球の画像を人間が見て、雪に覆われている領域を特定していました。しかし、その担当者が交代することで微妙なズレが生じるなどの問題がありました。現在では、地球で反射された太陽からの光や地球から放射された赤外線などのさまざまな波長の電磁波を観測し、それらを組み合わせて客観的に情報を取り出しています。雲や海陸の分布を特定した後に、海水や雪の抽出を行います。JASMES (JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies) というプロジェクトでは、この方法を過去のデータにも適用して雪に覆われた領域を推計し、長期のデータを作成しました。右の図は、このようにして得られた積雪被覆率（ある領域内のうち雪に覆われている領域の割合）が、過去 35 年間でどのように変化したかを示しています。3月から6月にかけて、積雪被覆率が有意に減少している領域が、中央アジアから北極海沿岸の北シベリアへと北東方向に推移していることが分かります。

地球温暖化にともない、これらの領域での積雪減少は、陸面や大気の変化を介して、日本や東アジア域の大気循環や降水に遠隔影響を及ぼす可能性も考えられます。私たちはその可能性を調べているところです。

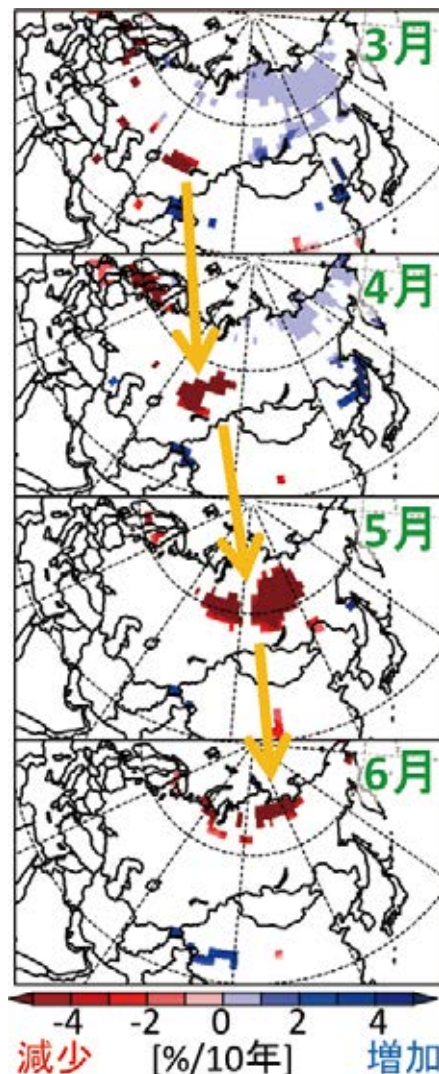
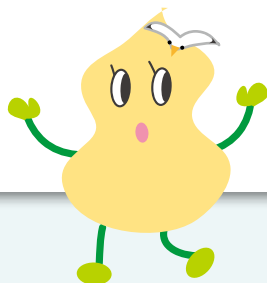


図1：1979～2015年における積雪被覆率の長期変化傾向。上段からそれぞれ3～6月を示す。信頼度95%以上の領域のみ色を付けている。



熱帯やユーラシア大陸の
雪も日本の天気に影響
するのね。

アジアモンスーンの将来変化

夏になると大陸は海洋よりも暖かくなり気圧が低くなるため、地上付近では海洋から大陸に向かって湿った風(モンスーン)が吹きます。実際にはこれに地球の自転効果が加わり、南アジアでは西寄りの風、日本を含む東アジアでは南寄りの風が吹きます。冬になると反対に、大陸は海洋よりも冷たくなり、地上付近では大陸から海洋に向かって乾いた風(モンスーン)が吹きます。ユーラシア大陸東部に位置する日本の気候はモンスーンの影響を強く受けており、梅雨はモンスーンに伴う現象として捉えることができます。ただし、梅雨前線は中緯度に存在するため、その形成には上空の強い西風(ジェット気流)も関わっており、5月から7月にかけてジェット気流の北上とともに梅雨前線も北上します。

日本の夏季降水量とアジアモンスーンの将来変化

CMIP5 気候モデルが予測する降水量の将来変化を、図 1a に示します。温暖化が進行すると、モンスーンに伴う水蒸気の流れは全体的に現在より強くなります。それは、水温が高くなった海面からの蒸発が盛んになり大気中の水蒸気量が増加する効果と、陸上の温度が海面水温以上に高くなる効果によるものです。その結果、南アジアや東アジアのモンスーン地域ではほぼ全域で降水量が増加すると予測されています。また、日本上空のジェット気流は現在よりやや南下するため、梅雨前線の北上は現在よりもやや遅れると考えられます。

温暖化に伴う降水量変化のメカニズムを知るために、海面水温上昇の効果(将来の海面水温を設定)と陸上温度上昇の効果(海面水温は現在と同じで、将来の二酸化炭素量を設定)に分けて、気候モデルによるシミュレーションを行いました。

海面水温上昇の効果(図 1b)を見ると、水蒸気の増加によって水蒸気の流れが海上で強まり、降水量は日本や東南アジアのほか海洋上で顕著に増加します。また、日本上空を通るジェット気流は強くなり南下します。陸上温度上昇の効果(図 1c)を見ると、海洋から大陸に吹き込むモンスーンの強化によって水蒸気の流れが強まり、降水量はインドや中国など大陸上で顕著に増加します。また、日本上空のジェット気流は弱くなり北上します。将来変化予測の結果(図 1a)は、この2つの効果の足し合わせになり、一部は相殺されています。

このように、日本を含むアジアモンスーン地域の降水量の将来変化を正しく予測するためには、大気中の水蒸気量の増加とともに、海洋と大陸間の温度差の変化に伴うモンスーン強度の変化を正確に予測する必要があります。

夏季（6～8月）の
降水量将来変化
（青は増加、黄は減少）

海面水温上昇による
降水量将来変化

陸面温度上昇による
降水量将来変化

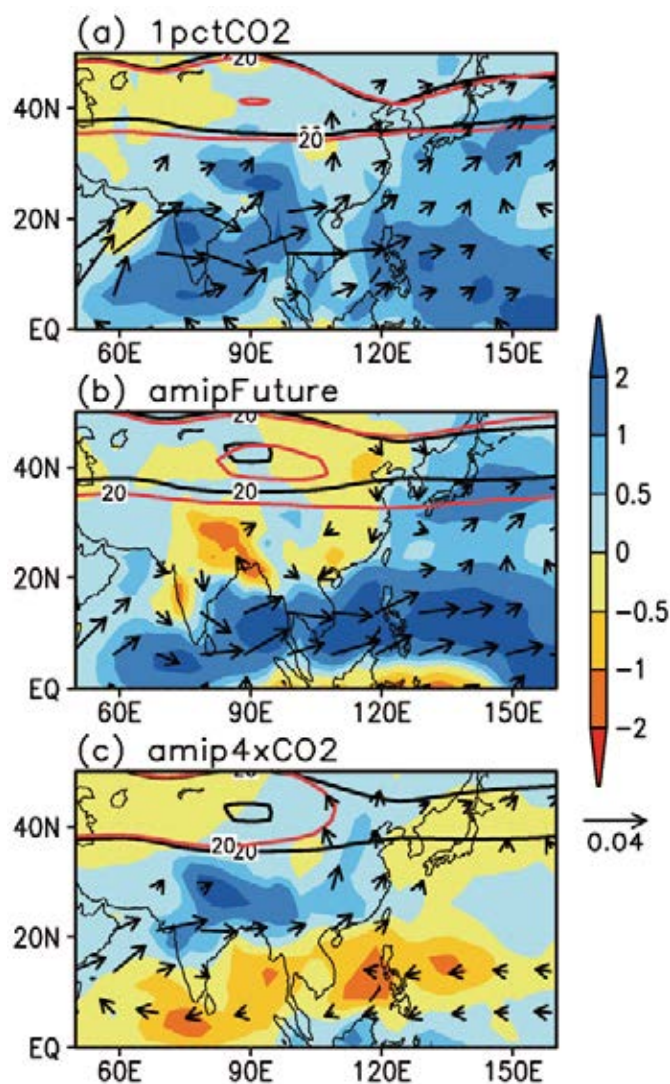
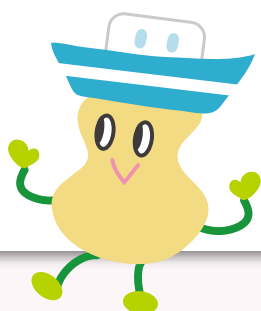


図1:夏季（6～8月）の降水量（色:単位は mm/ 日）と地表近く（850hPa）の水蒸気輸送（矢印:単位は g/kg・m/s）の変化、および上空（200hPa）の風速（黒太線は現在、赤太線は将来:単位は m/s）。(a) 将来変化予測の結果（CMIP5 二酸化炭素濃度年 1% 漸増実験）、(b) 海面水温上昇の効果、(c) 陸上温度上昇の効果。



ふむふむ。陸の効果と
海の効果が逆だとは。
雨も奥が深いねえ。

（参照論文 12, 13）

日本の気候と豪雨

日本は世界的に見ても雨の多い地域です。雨は私たちに貴重な水資源をもたらしますが、その一方で様々な形で豪雨災害をもたらします。

夏から秋にかけて日本に接近する台風は、毎年豪雨による災害をもたらします。例えば平成 29 年の台風 18 号は九州、四国、本州に上陸し、日本列島を縦断する経路をとったため、全国各地に大雨をもたらしました。

台風は中心付近の活発な雨雲が直接接近しなくても大雨をもたらすことがあります。例えば平成 27 年 9 月関東・東北豪雨では、台風 18 号が変化した低気圧と台風 17 号が同時にあったため、南から暖かく湿った気流が関東や東北地方に流入し続け、鬼怒川を氾濫させ茨城県常総市に大きな被害をもたらしました（図 1）。

台風以外にも、梅雨末期や盛夏期の日本ではしばしば豪雨が起きます。典型的な「梅雨末期の集中豪雨」は、「線状降水帯」と呼ばれる、積乱雲が幅 20 km から 50 km、長さ 50 km から 200 km 程度の範囲にまとまった（組織化した）ものによる豪雨です。線状降水帯は、暖かく湿った空気の流入と上空の冷たい空気の流入などが原因となって形成されます。線状降水帯が同じような場所で形成され続けると、甚大な災害をもたらす豪雨を引き起こします。例えば、平成 29 年 7 月九州北部豪雨でも線状降水帯が形成されました（図 2）。九州北部の地形がこの時の線状降水帯の維持に好都合だったことも重なり、同じような場所で雨が降り続き大きな被害をもたらしました。



図 1：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨において茨城県常総市で発生した鬼怒川の氾濫の様子。（写真提供：芳村 圭氏）

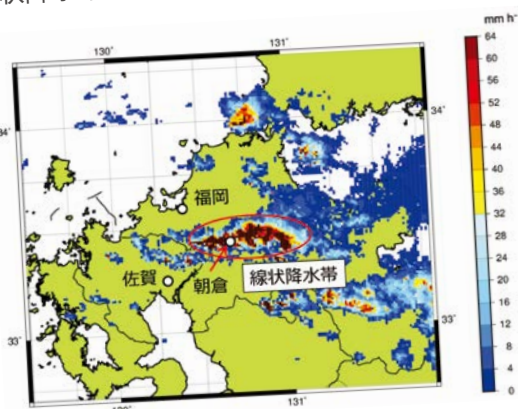


図 2：平成 29 年 7 月九州北部豪雨時における気象庁レーダーのエコー強度から換算された降水量（7 月 5 日 15 時）。





降水は天からの暗号？

皆さんは「天からの手紙」という表現に触れたことはありますか？かの高名な気象学者の中谷宇吉郎先生が、自身が専門とされていた雪のことを指して記した言葉だそうです（正確には「雪は天からの手紙」）。雪の結晶という神秘的なものから上空で起っている様々な物理現象がわかる、という意味だそうですが、実は雪に限らず、降水自体が膨大な情報を蓄えています。ですが、そう単純には全貌を明らかにしてくれず、私たち研究者は日夜それらの情報を解読しようとしています。ここではその中でもひととき難解な、同位体比という情報を取り上げたいと思います。

降水の同位体比とは、水の水素同位体比・酸素同位体比のことで、それぞれ地球上にすこしだけ存在する重水素・重酸素の含有濃度を示したものです。非常に少ない量がさらに少しだけ変化する（水の中に0.1%存在するなかで、さらに0.1%変化するという具合）という、普通の生活からみたら些細な変化なのですが、それがまさに暗号なのです。そういった変化がなぜ生じるのかというと、同位体比は、水蒸気が凝結する・水が蒸発するといった相変化に敏感に対応するからです。つまり、大気中で降水が生じる際の記録を残していつてくれているのです。とはいえ、「降水が生じる際」ということそれ自体がとても複雑なので、なかなか一筋縄ではいきません。

写真は、研究船「みらい」に積み込んだ、自動降水採取器です。熱帯で降水が発生したときに、どのような理由で同位体比が決定されるのか調べることで、降水現象のさらなる理解を進めようとしています。近年では、身の回りの降水だけでなく、人工衛星などを使うことで世界中の水蒸気の中の同位体比が測定できるようになってきています。このような「天からの暗号」を解くことは、降水現象の理解が進むことにつながり、ひいては温暖化のメカニズムの理解あるいは予測精度の向上につながるのです。



海洋研究開発機構（JAMSTEC）の研究船「みらい」に積み込んだ自動降水採取器。

➤ 今後の取り組み

—アジア太平洋域における降水のリスク情報を得るために—

2017 年は、スーパー台風 5 号、21 号、九州北部豪雨など、日本でも極端な大雨による被害が頻発しました。地球温暖化に伴い、降水の集中化、激甚化が危惧されています。雨や雪の降り方の変化によるリスクは、今後増加していくのでしょうか。これまで、私達は環境研究総合推進費課題（2-1503）「地球温暖化に伴う気候変動と日本・東アジア域の降水現象の変化に関する研究」を進めてきました。その成果として、特に西風ジェットなどの大気上層の状態が大雨に与える影響が見いだされました。通常、大雨の原因としては、大気最下層で水蒸気を集める効果が注目されがちですが、実は上空の状態にも雨を強化する仕組みがあることがわかったのです。

例えば、梅雨期の雨には、西風ジェット南側の空気の力学的持ち上げによって上空が湿ることの重要性が指摘されました。そこでさらに、衛星からの降水の立体観測データを用いて雨の特徴を抽出し、大規模な気候の状態が梅雨期の雨の特徴をいかに決めるかを調査しました。その結果、海水面温度と上空の大気循環を指標にして、この時期の日本周辺の雨が3つのタイプに分けられることがわかりました。この成果を使って、梅雨期の雨の特徴の将来変化予測を作成しました。

また、2014 年 8 月の広島県の豪雨には、上層の西風ジェットに伴う大気の川（Atmospheric River）と上層の寒冷渦の相乗効果が重要だったことが示されました。さらにこの大気の川と寒冷渦は海の上でも雨を強化することが統計的に示され、その効果が確認されました。

日本とアジア太平洋域は、降水の将来変化に対する脆弱性が指摘されています。社会が少しでも早く降水の変化に対して適応できるように、気候リスク情報の提供が重要です。しかしアジア太平洋域の雨に関して、現在の地域的な特性を決めるメカニズムはまだ十分に理解されていません。降水レーダを搭載して南北緯度 65 度という地球表面の 91%を観測できるようになった全球降水観測計画（GPM）主衛星の観測データがもうすぐ 4 年分蓄積されます。これらのデータを活用することによって、アジア太平洋の雨の地域的な特性を詳細に調べることができます。また、これまであまり注目されてこなかった、上層の大気循環の降水強度への効果も調べることが重要と考えられます。今後、気候変動に対する社会のより適切な対応を可能にするため、地域的な降水特性の変化について注目し、効果的な調査研究を継続していく予定です。

〈参照論文〉

1. Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Kato, and S. Arakane, 2016: Roles of an atmospheric river and a cutoff low in the extreme precipitation event in Hiroshima on 19 August 2014. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 1145–1160.
2. Tsuji, H., and Y. N. Takayabu, 2018: A coincidence of upper tropospheric systems can cause floods. in preparation.
3. Hamada, A., Y. N. Takayabu, C. Liu, and E. J. Zipser, 2015: Weak linkage between the heaviest rainfall and tallest storms. *Nature Communications*, 6, doi:10.1038/ncomms7213.
4. Hamada, A., and Y. N. Takayabu, 2018: Large-scale environmental conditions related to midsummer extreme rainfall events over the southern Japan region. submitted.
5. Yokoyama, C., Y. N. Takayabu, O. Arakawa, and T. Ose, 2018: Future projections of precipitation characteristics around Japan in early summer combining GPM DPR observation and CMIP5 large-scale environments. In preparation.
6. Horinouchi, T., and A. Hayashi, 2017: Meandering subtropical jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 74, 1233–1247.
7. Horinouchi, T., 2014: Influence of upper tropospheric disturbances on the synoptic variability of precipitation and moisture transport over summertime East Asia and the northwestern Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, 92, 519–541.
8. Yokoyama, C., Y. N. Takayabu, and T. Horinouchi, 2017: Precipitation characteristics over East Asia in early summer: Effects of the subtropical jet and lower-tropospheric convective instability. *J. Climate*, 30, 8127–8147.
9. Matsumura, S., and T. Horinouchi, 2016: Pacific Ocean decadal forcing of long-term changes in the western Pacific subtropical high. *Scientific Reports*. 6:37765.
10. Kubota, H., Y. Kosaka, S.-P. Xie, 2016: A 117-year long index of the Pacific-Japan pattern with application to interdecadal variability. *Int. J. Climatology*, 36, 1575–1589.
11. Gray, L. J., J. A. Anstey, Y. Kawatani, H. Lu, S. Osprey, and V. Schenzinger, 2017: Surface impacts of the Quasi Biennial Oscillation, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2017-1065>.
12. Endo, H., and A. Kitoh, 2014: Thermodynamic and dynamic effects on regional monsoon rainfall changes in a warmer climate. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1704–1710, doi:10.1002/2013GL059158.
13. Endo, H., A. Kitoh, and H. Ueda, 2018: A unique feature of the Asian summer monsoon response to global warming: The role of different land-sea thermal contrast change between the lower and upper troposphere. submitted.

〈研究参画機関(サプリーダー)〉

- (1) 温暖化に伴う水蒸気大循環・大気海洋結合変動が日本と東アジア域の降水現象に及ぼす影響
東京大学大気海洋研究所 (高菰 縁)
東京大学先端科学技術研究センター (中村 尚)
- (2) CMIPデータを用いたアジアモンスーンの現在気候再現性評価と将来変化
国土交通省気象庁気象研究所 気候研究部 (尾瀬 智昭)
- (3) 水輸送に係る対流圏上層ジェットの力学的メカニズムの解明
北海道大学地球環境科学研究科 (堀之内 武)
- (4) 温暖化に伴う北極圏雪氷の変化に起因する日本・東アジア降水への影響解明
岡山大学自然科学研究科 (野沢 徹)
- (5) 温暖化に伴う成層圏循環の変動の解明
国立研究開発法人海洋研究開発機構 統合的気候変動予測研究分野 (河谷 芳雄)
- (6) 東アジアの気象に対する熱帯擾乱の影響
国立研究開発法人海洋研究開発機構 大気海洋相互作用研究分野 (城岡 竜一)

「暑いだけじゃない地球温暖化3」編集者・執筆者

高菰縁・濱田篤・横山千恵・辻宏樹・芳村圭・小坂優・宮坂貴文・尾瀬智昭・遠藤洋和
堀之内武・野沢徹・河谷芳雄・佐藤尚毅・岩上麻里絵
写真：木村詞明 キャラクター：渡部寿賀子 印刷：株式会社 アズディップ



(独) 環境再生保全機構 環境研究総合推進費 2-1503
「地球温暖化に伴う気候変動と日本・東アジア域の降水現象の変化に関する研究」
2018 年 3 月