



# 暑いだけじゃない地球温暖化

—世界の気候モデルから読む日本の将来—



# はじめに

私たちの生活は、温帯低気圧の通過や台風の襲来、熱波や寒波、豪雨や干ばつの発生をはじめとした大気や海の現象の現れ方に大きく影響されています。一方で人間の活動によって排出された二酸化炭素などの温室効果ガスが大気中に蓄積して地球温暖化をもたらしていることがわかってきています。地球温暖化が進むと、暑くなるだけでなく、身近な気象現象も変化します。どのように変化するのでしょうか？

気候の将来を予測するためには、「気候モデル」を使ってコンピューターシミュレーションを行います。世界中の様々な機関がそれぞれの「気候モデル」を開発し、将来予測を行っていますが、実はその結果にはややばらつきがあります。私たちは、いろいろなモデルの出すいろいろな予測データから、私たちの生活に身近な現象についてより確からしい将来像を描くための方法を研究してきました。ここではそのいくつかを紹介します。

「暑いだけじゃない地球温暖化」編集委員長 高菺 縁

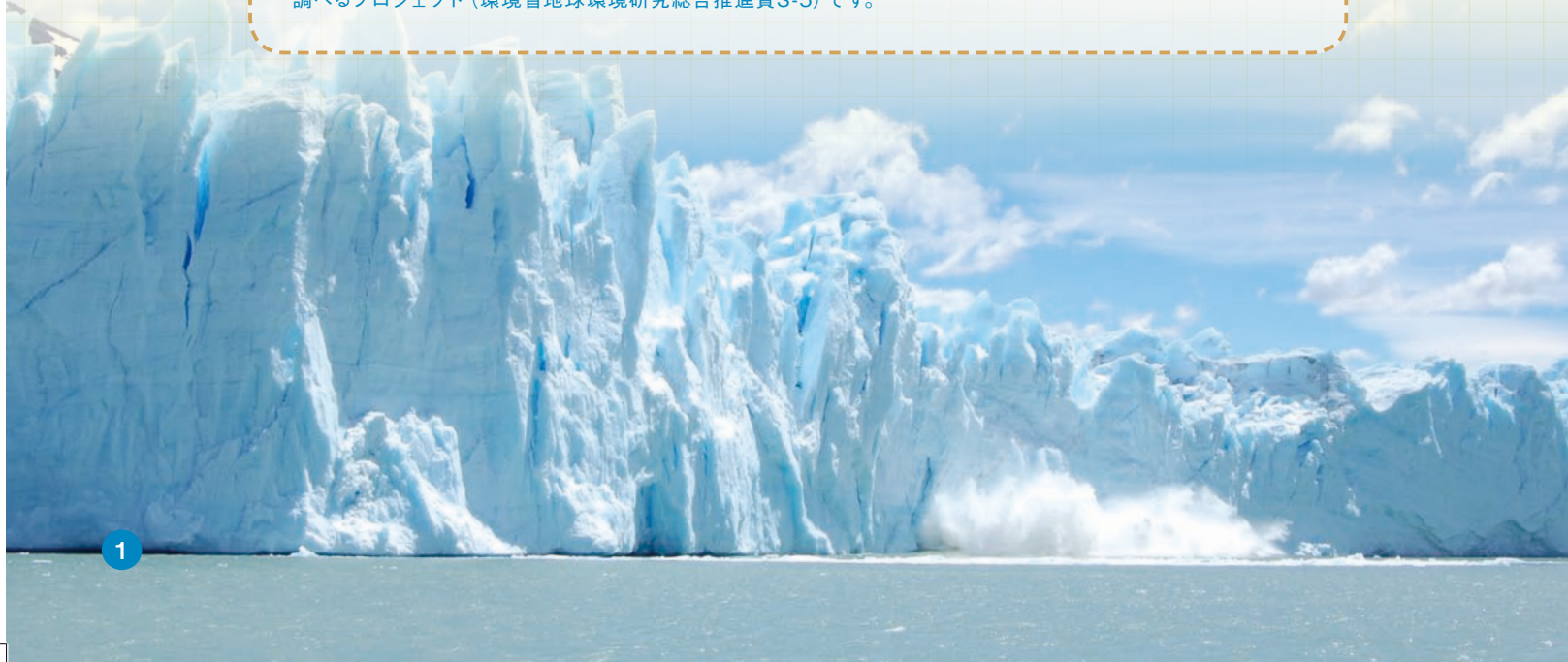
ここで紹介する研究は、環境省の地球温暖化研究プロジェクトのひとつ「地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究\*1（代表：住明正 東京大学 サステナビリティ学連携研究機構 地球持続戦略研究イニシアティブ統括ディレクター・教授）」の中のひとつのテーマ「マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究（テーマ代表：高菺 縁 東京大学大気海洋研究所 教授）」として行われてきたものです。

(\*1) 地球温暖化を多くの人により正しく実感してもらうためにはどのような工夫をしたらよいかということ調べるプロジェクト（環境省地球環境研究総合推進費S-5）です。

# 目次

## 暑いだけじゃない 地球温暖化

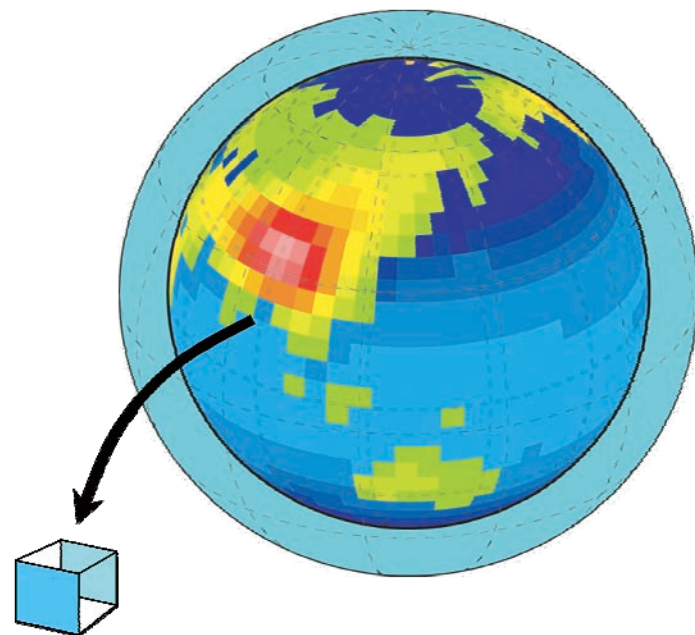
- はじめに ..... 1
- 気候モデルとは ..... 3
- マルチモデルを利用した将来予測 ..... 4
- 春一番 ..... 5
- アジアモンスーン ..... 7
- 日本の夏 ..... 9
- ヤマセ ..... 11
- 台風 ..... 13
- 太平洋10年規模変動 ..... 15
- 河川流量 ..... 17
- 【コラム】雲の効果 ..... 19
- 【コラム】マッデン・ジュリアン振動 ..... 20
- 【コラム】赤道準2年振動 ..... 20
- 今後の取り組み ..... 21
- 研究参画機関 ..... 22



## ◆ 気候モデルとは

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、大気の状態を予測するかたまり、海の状態を予測するかたまり、氷や陸面の状態を予測するかたまりからできています。たとえば大気モデルは大気を水平方向に約 100km×100km、鉛直方向に約 1km のサイコロに分け(下図)、それぞれのサイコロでの現在の風、気温、気圧、湿度の状態から約 10 分後の風、気温、気圧、湿度の状態を予測する数式です。

風の変化を表す数式は、実は中学で習う運動の法則  $ma = f$  (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、たとえば雲や雨などの所詮 100km に一つの値では表現できないミクロな現象が、放射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仕方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ったりとひとつには決まらないのです。



## ◆ マルチモデルを利用した将来予測

人間活動の影響などを考慮した将来の全球気候予測を政策者に伝えるための「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」の第 4 次報告書は、メディアでも大きく取り上げられ身近な話題となりました。この報告書の将来予測のための科学的バックグラウンドとして、「第 3 次結合モデル相互間比較計画 (CMIP3)」という国際的な研究計画の下に、世界中の様々な機関から 24 個もの気候モデルによる 20 世紀の気候の再現実験および 21 世紀の気候の予測実験が行われ、その実験結果が集められました。

前述のように、気候モデルは様々な物理過程(雲や雨や大気の乱れなど)をそれぞれの方法で組み込んでいるために、将来予測にも少しづつばらつきができます。身近な気象、例えば将来の低気圧の通り道とか、将来の日本の雨の降り方とか、様々な視点から見た将来変化について、CMIP3 の 24 個のモデル予測はいろいろな答えを示します。そこからどのようにしたらより確からしい答えを読み取ることができるでしょうか?ひとつの方法は、20 世紀実験結果を観測と詳しく比べ、気候モデルが現実に行っている現象をもっともらしく再現するかについての成績を調べることです。そして成績のよいモデルや、メカニズムがきちんと表現されているモデルを選んで将来予測を行うことです。つまり、現在を正確に再現できるモデルは、将来についてもより確からしい予測ができると考えるのです。

次の頁からは、特に台風や春一番といったいくつかの身近な現象の将来予測を例として取り上げます。たくさんの気候モデル結果を使っていかに温暖化時の日本の将来の様子を読み取るかという研究成果を一緒に見ていきましょう。

 BCCR-BCM2.0	 CSIRO-Mk3.5	 GISS-AOM	 MIROC3.2(hires)
 CCSM3	 ECHAM5/MPI-OM	 GISS-EH	 MIROC3.2(medres)
 CGCM3.1(T47)	 ECHO-G	 GISS-ER	 MRI-CGCM2.3.2
 CGCM3.1(T63)	 FGOALS-g1.0	 INGV-SXG	 PCM
 CNRM-CM3	 GFDL-CM2.0	 INM-CM3.0	 UKMO-HadCM3
 CSIRO-Mk3.0	 GFDL-CM2.1	 IPSL-CM4	 UKMO-HadGEM1

表: CMIP3 に参加した 24 の気候モデルと国



# 春一番

～ 温暖化したら「春一番」はどうか？ ～

## ◆ 「春一番」とは？

立春（2月4日）以降（春分の日までに）に初めて吹く強い南風のこと。春の気配を初めて感じさせる暖かさをもたらします。もともとは強風に注意をうながす北陸地方の漁師たちの言葉でした。

真冬の間は、西の大陸上に冷たい「シベリア高気圧」、東海上には「アリューシャン低気圧」が停滞しがちです。この「西高東低」の気圧配置に伴い、北西季節風が日本列島に寒気を南下させます（図1左）。一方、立春を過ぎると、時おり季節風が弱まって、低気圧が日本海を東進しつつ発達するようになり、このとき「春一番」が吹きます（図1右）。

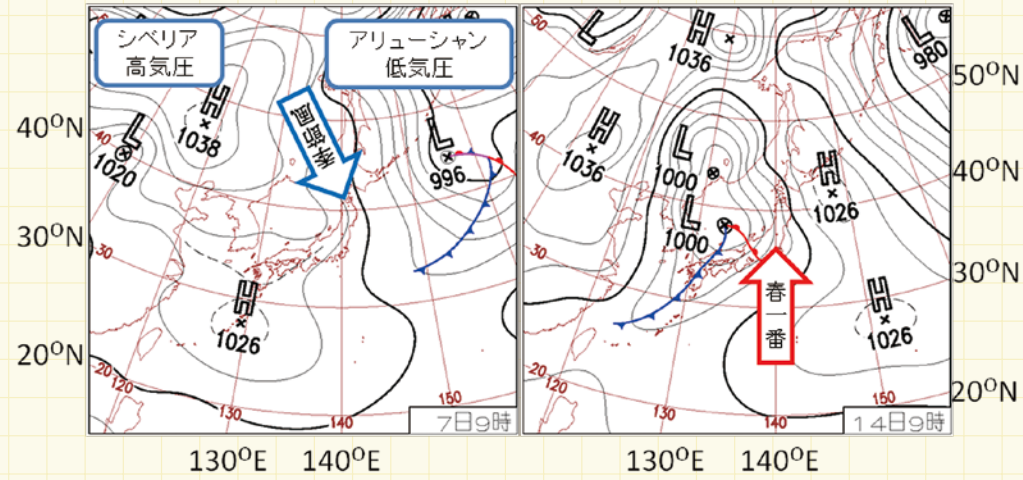


図1：冬型の天気図（左：2007年2月7日）と「春一番」の天気図（右：同年2月14日）

## ◆ 低気圧発達の仕組み

温帯低気圧は南北の気温差が大きいところで発達します。地表で気温差が大きいのは、大陸の南岸、もしくは暖流と寒流とが接する「海洋前線帯」（日本海では対馬暖流とリマン海流との境界；三陸沖では黒潮と親潮の境界）です。低気圧が発達するには、その「卵」となる渦を運ぶ上空のジェット気流が、地表の南北気温差の大きな地域の上空に位置する必要があります。

日本付近では、真冬になると季節風に伴って強い寒気が南下するため、熱帯との間に非常に強い気温差が生じ、上空10kmでは秒速70mを超えるような非常に強い西風ジェット気流が吹くようになります。これは新幹線並みの速さです。強い寒気南下のためにジェット気流は北緯30度にまで押し下げら

れてしまうため、北緯35～40度にある海洋前線帯とずれてしまい、低気圧は発達しにくくなってしまいます（図2右）。立春を過ぎると寒気南下が時折弱まり、その際にはジェット気流が北上し、日本海の海洋前線帯に沿って低気圧が発達できる状況になります（図2左）。

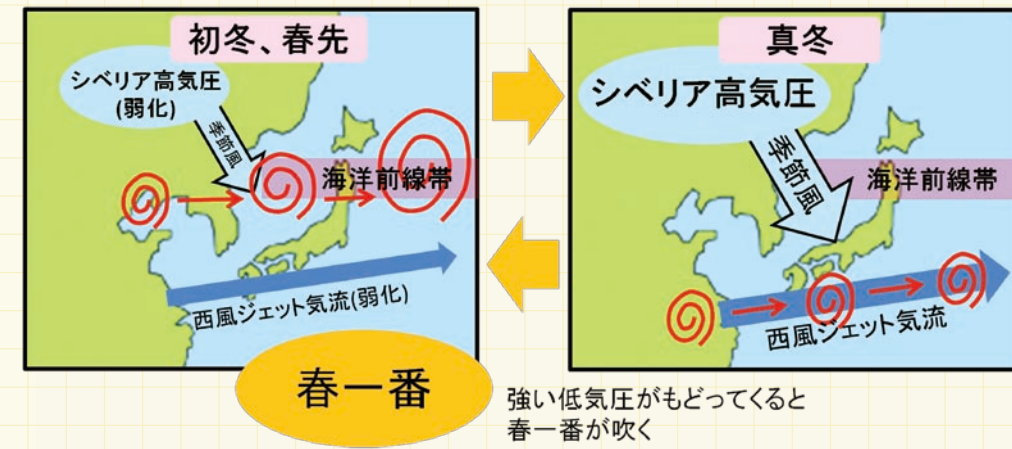


図2：日本付近での温帯低気圧発達のしくみと「春一番」の関係。

## ◆ 温暖化した将来は？

世界中の気候モデルのうち、前述の冬の低気圧活動の弱まりを現実的に再現しているモデルの結果から将来予測をしてみます。地球温暖化が今後さらに進むと、季節風による寒気南下が弱まり、真冬でも日本海で低気圧が頻繁に発達するようになる傾向が示されています。そうすると、立春直後に強い南風が吹く確率が現在よりも高まり、「春一番」が早く起きるようになるでしょう。

1980年代末以降、それ以前に比べシベリア高気圧が弱まって、日本では暖冬が起きやすくなっています。暖冬年では、真冬でも低気圧が頻繁に発達し、「春一番」の観測も早まる傾向が確認されています。



21世紀は、  
春の訪れが早くなりそうじゃな。

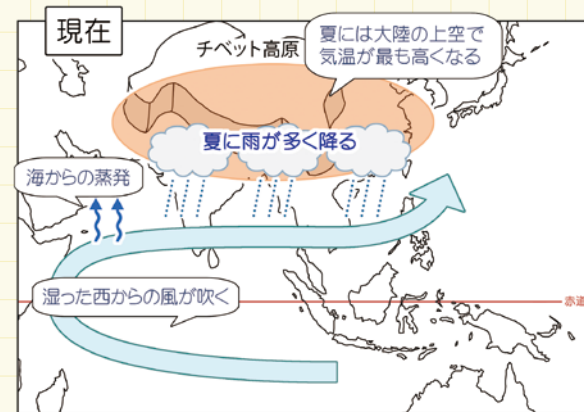


# アジアモンスーン

～ アジアモンスーンの西風と降水の将来変化 ～

## ◆アジアモンスーンとは？

インドやインドシナ半島の地上付近では、夏になると暖かく湿った西からの風（図1上の水色矢印）が吹くようになります。この風はモンスーン西風と呼ばれ、アジアの熱帯域に大量の雨をもたらし、農業などその地域の生活にとって重要な水資源となっています。



## ◆モンスーン西風と海陸気温差の関係

夏のアジアモンスーン西風は、上空約5～12kmの気温が、インド洋の赤道付近よりもアジア大陸上で、より高くなり（図1のオレンジ）、この海陸の気温差ができることにより生じます。

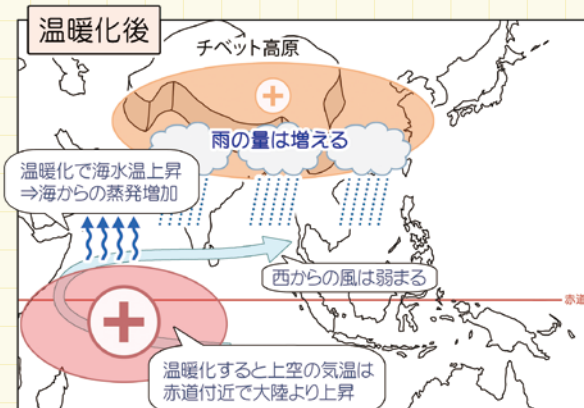


図1：(上) 現在の夏のアジアモンスーンの模式図。大陸と海との温度差を感じて湿った西風が吹く。(下) 温暖化した21世紀末での模式図。温度差が小さくなるので西風が弱まる。

## ◆温暖化するとモンスーン西風はどうか？

アジアモンスーンの西風は、温暖化に伴ってどう変化すると予測されているのでしょうか？モンスーン西風の変化を知るためには、このインド洋とアジア大陸の気温差がどう変わるのか、調べる必要があります。世界各国で開発された気候モデルの中から、アジアモンスーンが始まる5月の風がよく再現されているモデルを選んで調べてみました。

温暖化すると、インド洋でもアジア大陸でも、上空の気温は上昇します。ただし、その気温上昇の幅はインド洋でアジア大陸より大きいので、インド洋とアジア大陸上の気温差は現在に比べて小さくなり

ます（図1下の+の地域は上空の気温の上がり方が大きい）。したがって、アジアモンスーンの西風は弱まると予測されています（図1下の水色矢印）。また、同じような理由で、インドシナ半島周辺の西風が吹き始める時期（雨季の開始時期）も、遅くなると予測されています（図2）。

## ◆モンスーンに伴う雨は？

一方で雨の量は、温暖化すると増えるという予測されています。この結果はモンスーン西風が弱くなることと一見矛盾しているようにみえます。実は、インド洋の海上では海面温度の上昇に伴って蒸発が盛んになり、空気中に含まれる水蒸気量も増えるため、たとえ風が弱くなっても、インド洋からアジア大陸に向かう水蒸気は現在よりも多く運ばれ、結果として雨の量が増加すると予測されています（図1下）。

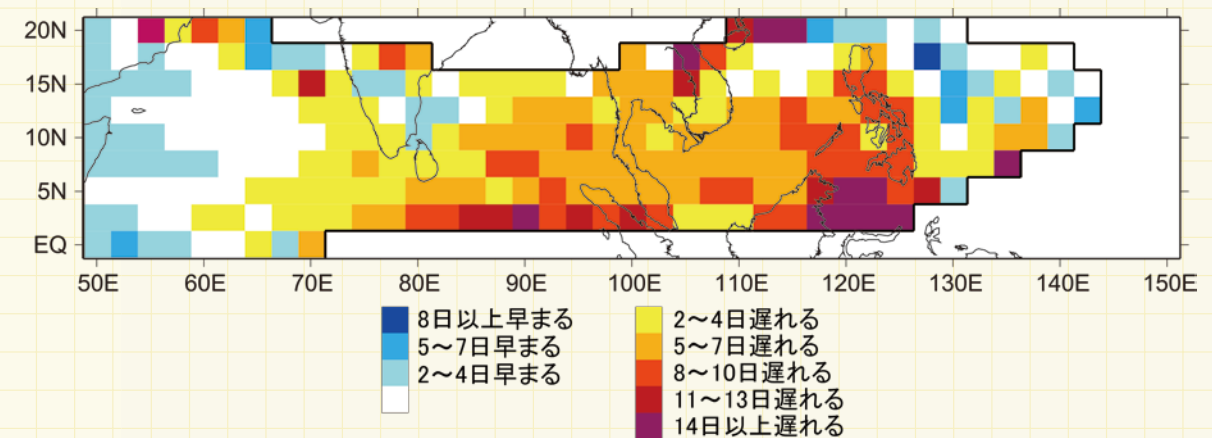


図2：地上付近でモンスーン西風が吹き始める時期（雨季の開始時期）が、温暖化によってどのように変化するかを示したものの。

温暖化すると、  
モンスーン西風は弱くなるが、  
モンスーンの降水量は増えそうじゃなの



# 日本の夏

日本の夏は梅雨入りとともに始まります。梅雨は一年のうちで最も雨の多い時期にあたり、終わり頃には局地的な大雨による被害もたらされることがよくあります。梅雨が明けると、一年のうちで最も気温の高い盛夏期が訪れます。極端に暑い日が続くと、作物や家畜に被害が出るばかりでなく、熱中症患者が増えるなど、人にも影響が及びます。

このように、梅雨の動向や真夏の天候に関する情報は、私たちの生活にとって欠かせないものとなっています。では、温暖化すると日本の夏はどのように変化してしまうのでしょうか？日本の夏の将来変化を知ることは、現在の気候に合わせてつくられた社会の仕組み（農業や治水、交通など）が、今後の変化にどう対応していくのかを考えていくうえでも重要です。

梅雨前線は、本州の南海上で発達する背の高い小笠原高気圧と北方のオホーツク海高気圧の間に現れます。季節が進むにつれ、小笠原高気圧が強まりつつ北上し、これに押し上げられるように梅雨前線も北上します。さらに、日本の上空を流れる偏西風の軸も前線の少し北側でほとんど足並みを揃えて北上することが知られています（図1）。異常気象の原因を探ったり毎日の天気を予報したりするとき、小笠原高気圧や偏西風の位置に着目することがよくあります。そこで、私たちは小笠原高気圧や偏西風の北上の様子がどのように将来変化するかを、調査の手掛かりにしようと考えました。

CMIP3の将来予測データを調べたところ、温暖化すると、小笠原高気圧や偏西風の北上が弱くなると予測する気候モデルが多いことがわかりました。北上傾向が弱まるということは、梅雨明けが遅れ、梅雨が長引くことになります。降水量はどう変化するのでしょうか。図2は、東日本付近の降水量の予測を示しています。7月のなかばに入ると雨が急に少なくなるのは、現在の梅雨明けに対応したものの（図中の青線）ですが、将来は雨があまり少なくなることが分かります（赤線）。

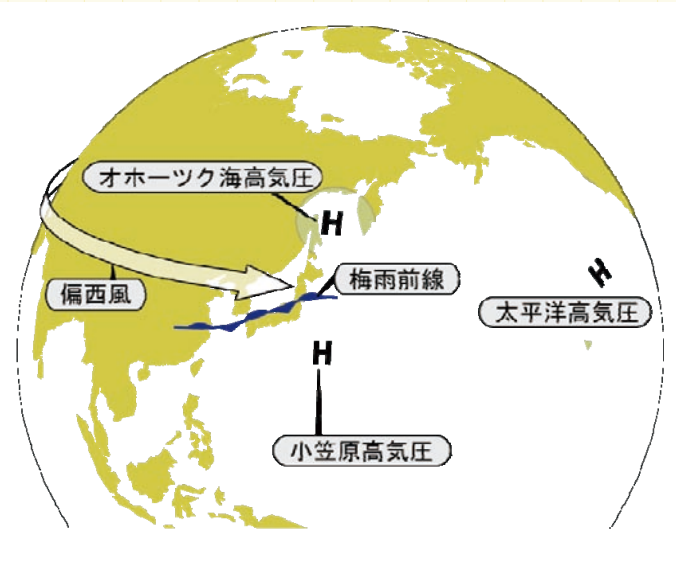


図1：7月頃の梅雨前線と高気圧、偏西風の様子（出典：現代用語の基礎知識）。

温暖化にともない気温が上がることとあわせて考えると、将来の日本の夏は、今と比べて気温が高いのに雨は多い、いわば“じめじめした夏”になりそうです。

ただし、一部の気候モデルは全く異なった予測を出していることにも注意をしなければいけません。予測がばらつく原因は、平均的な梅雨前線の特徴を気候モデルが再現することが簡単ではなく、モデルによって再現された前線の特徴が異なることと関連しているようです。従って、どの気候モデルの予測に着目すべきか、慎重に検討しなくてはなりません。

さて、お隣の国、韓国や中国にも梅雨があることを知っていますか？東南アジアの国々やインドにも雨季があり、実はこれらはお互いに密接に関係しています。つまり、梅雨という現象は地球規模で見た大気の流れの一部として形成されているのです。現在私たちは、温暖化による偏西風の流れの変化が熱帯や寒帯の大気の流れの変化とも関連しているのではないかと考えており、調査をさらに進めているところです。

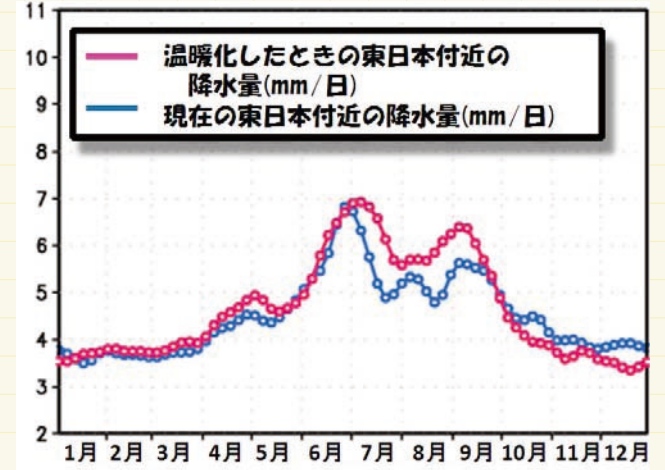


図2：東日本付近の降水量の将来変化

将来の日本の夏は、  
今まで以上にじめじめした夏に  
なるかもしれないということじゃな。





# ヤマセ

～ぐずついた天候をもたらす「ヤマセ」とその将来変化～

## ◆ヤマセとは

初夏を中心にオホーツク海方面の冷たい海洋上から吹く北東よりの風は「ヤマセ」とよばれています。北日本の太平洋側に日照の減少などぐずついた天気をもたらします(図1)。ヤマセが4～5日も続くと、気温が下がるなど農業の妨げになります。この地域の農業は昔からヤマセによる冷害で深刻な被害を受けてきました。

地球温暖化によってヤマセがどのように変化するのか、北日本で生活する人々の大きな関心事です。私たちは、世界の研究機関の18個の気候モデルによる現在再現実験(1981-2000年)と将来予測実験(2081-2100年)を比較して、ヤマセの将来変化について調べています。

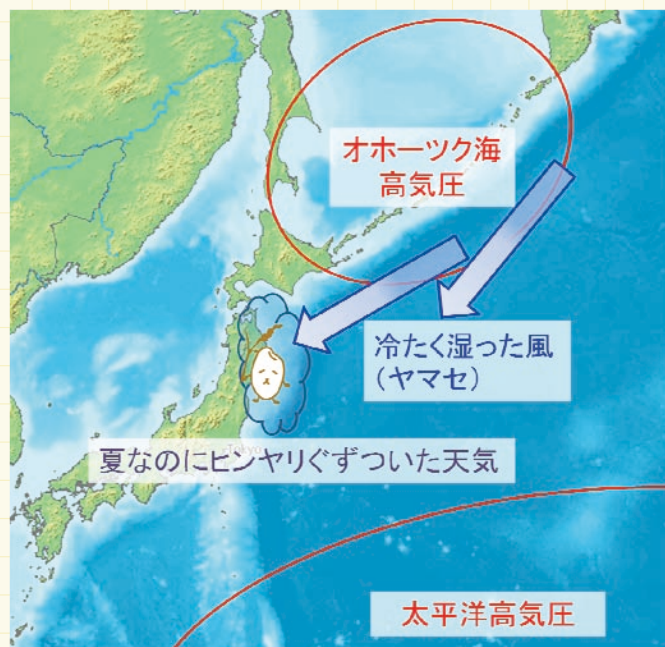


図1: ヤマセ発生の様子。オホーツク海の高気圧から時計回りに吹き出す風が、北の海洋上の冷たく湿った空気を東北地方の太平洋側に運び、ぐずついた天候をもたらす。太平洋高気圧の勢力が強いとヤマセは弱まる傾向がある。

## ◆気候モデルのヤマセ再現性をチェック

ヤマセはどの程度、気候モデルの中で現実的に再現されているでしょうか。ヤマセは、梅雨期の6月から7月中頃にかけて多く観測されています。気候モデルが再現するヤマセは、現実比べてやや少ないものの、6月下旬にピークをもつという季節変化は概ね再現しています(図2)。

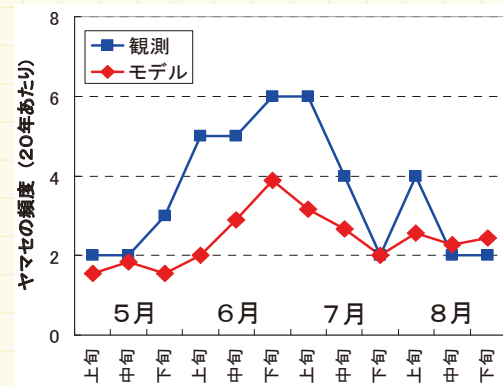


図2: 現在の20年間(1981～2000年)におけるヤマセの発生回数(20年間の合計)。青色線は観測、赤色線は全てのモデルの平均回数を示す。

## ◆気候モデルが予測するヤマセの将来変化とその原因

18個の気候モデルが予測したヤマセ発生回数(20年あたり)の増減を、気候モデルごと・月ごとに調べてみました。すると多くの気候モデルが、ヤマセが5月に減少し、8月に増加する将来変化を予測していました。特に、現在20年間のヤマセ発生回数と各月の天気図が現実と似ている上位半分(9個)のモデルは、8月のヤマセ回数の増加を一致して予測しています。

8月にヤマセの発生回数が増える原因は、日本の東海上の太平洋高気圧が弱くなり、オホーツク海高気圧の影響を受けやすくなるためです。その理由をさらに探ると、将来は赤道付近の気圧の配置が、現在のエルニーニョ発生時に似たパターンになることと関連しているようです(図3)。

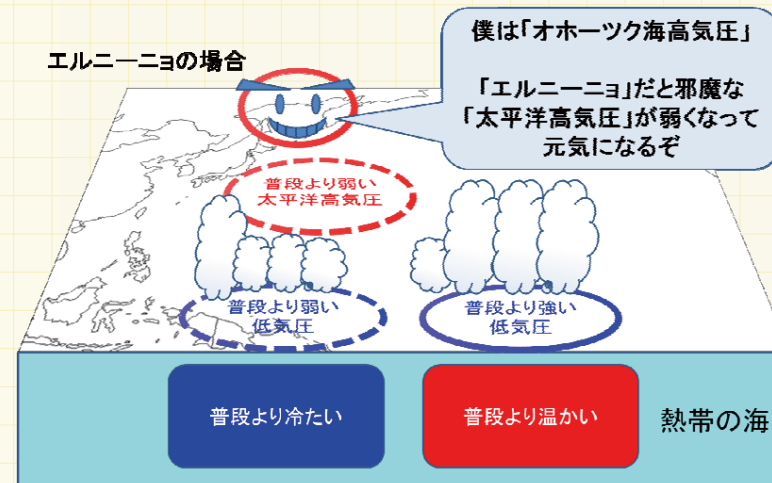


図3: エルニーニョとオホーツク海高気圧の関係を示した説明図。温かい海の上では空気が軽くなって雲や低気圧が生じ、その空気が上空から北に運ばれて北側に高気圧が出来る。エルニーニョが発生すると熱帯太平洋は西の方が普段より冷たくなるため、日本の東の海上の太平洋高気圧は普段より弱くなり、オホーツク海高気圧の影響を受けやすくなる。

将来8月のヤマセが増えると予測した13個のモデルのうち、12個のモデルが将来の気圧配置がエルニーニョ発生時の配置に近づくと予測しています。その12個のモデルには、現在のヤマセの再現性が高い上位9個のモデルのうち、8個が含まれています。

21世紀末、北日本太平洋側の夏は、曇りがちのぐずついた天気の日が8月を中心に多くなりそうじゃ。今のヤマセほど寒くはないかも知れんがの。





# 台風

台風は、暖かい熱帯の海上で発生し、風速 17m/s 以上の反時計回りの強い風と共に大量の雨を降らせる低気圧です。初夏から初秋にかけて日本に近づき、大きな被害を及ぼすと共に、貴重な水資源でもあります。ですから、地球温暖化の影響で台風の経路や強さが将来どのように変化するかは社会にとって重要な問題です。

台風は、海から供給された大気中の水蒸気が水になるときの凝結熱をエネルギー源として発達します。台風が1日に使うエネルギー量は、日本全国で使われる電気やガスなどのエネルギー量の、なんと1年分に匹敵するほどです。台風がいかに激しい現象かわかりになるでしょう。

西太平洋での年間の台風発生数は約 26 個ですが、年々の違いは大きく、少ない年は 20 個に満たず、多い年は 30 個以上も発生します。個数だけでなく、発生しやすい場所も年によって変わります。発生場所が変わるとその後の進路や影響を受ける地域が異なってきます。例えば、フィリピン近海で発生した台風の多くは東南アジアや中国に上陸します(図2の赤色矢印)。その東方で発生すると日本に接近しやすい傾向があります(橙色矢印)。さらに東側で発生した場合、多くは日本の東海上を北上し(緑色矢印)、日本への直接の影響は小さくなります。

## ◆発生域の将来変化

そこで、地球温暖化の影響で台風の発生域がどのように変わるのかを、IPCC の第 4 次報告書のための研究に利用された世界の気候モデル実験の結果を使って調べました。

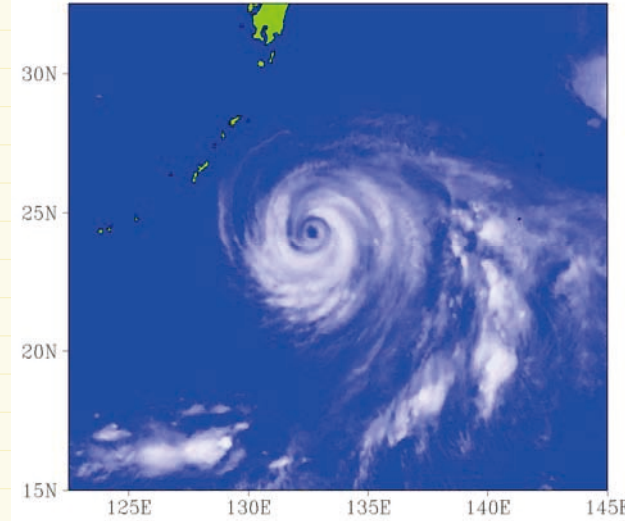


図1：台風の衛星画像

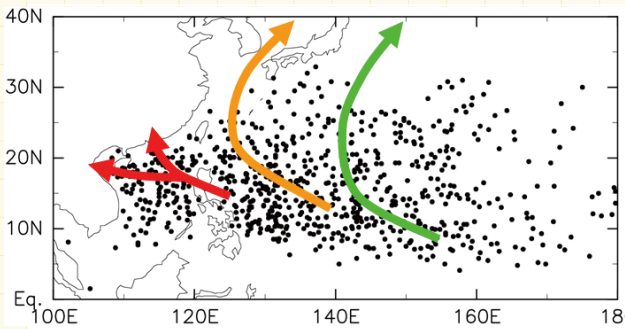


図2：1979-2008年の台風の発生地点(黒点)と発生場所ごとの台風の取りやすい経路(矢印)

気候モデルは、それぞれ性能や予測結果が少しずつ違います。より信頼できる予測結果を得るため、現在の台風発生数の平均的な分布をもっとも現実的に再現する5つの気候モデルを選び、100年後の予測結果を比べました。気候モデルのデータから台風を探すためには、強い渦で中心域が高温であるという台風の特徴を使います。

その結果(図3)、5つのモデルが共通して、東経 150 度から日付変更線にかけての地域で発生数が増え、逆に東経 110 度から 130 度の南シナ海、フィリピン近海、台湾近海で減ると予測していました。つまり、現在はフィリピンの東海上がもっとも発生しやすい海域ですが、これが将来はより東に移ると予測されます。

## ◆日本への影響は？

これに伴って日本への台風上陸数は変わるでしょうか。観測データによると、東経 150 度よりも東で発生した台風の多くは日本の東海上を北上するため、もし発生後の経路が将来も変わらないならば、上陸数は減ると考えられます。しかし、台風の進む方向や速さに影響を与える大規模な風の流れも温暖化に伴って変わるかもしれません。現在私たちは、経路の変化や上陸数への影響について、さらに研究を進めています。

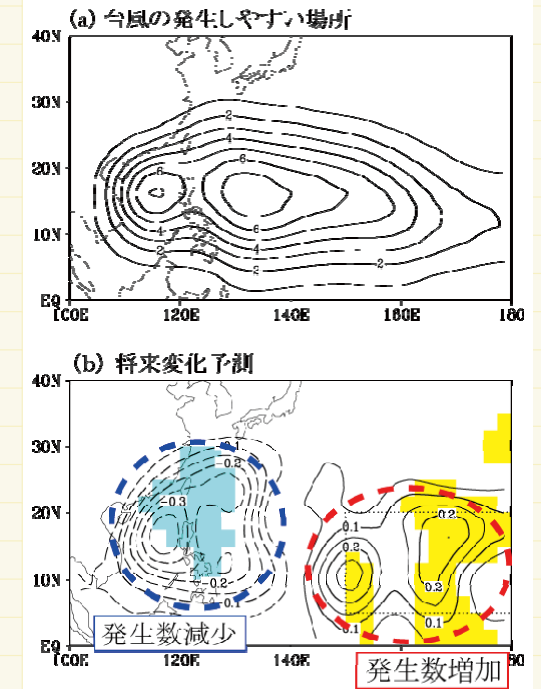


図3：(a) 5つの気候モデルが再現した台風発生数の分布。現実とよく合っている。(b) モデルが予測する、発生数の将来変化(実線は増加、破線は減少)。5つのモデルの予測傾向が一致する地域に色をつけて示してある。

将来は台風の発生域が東にずれるかもしれないということじゃな





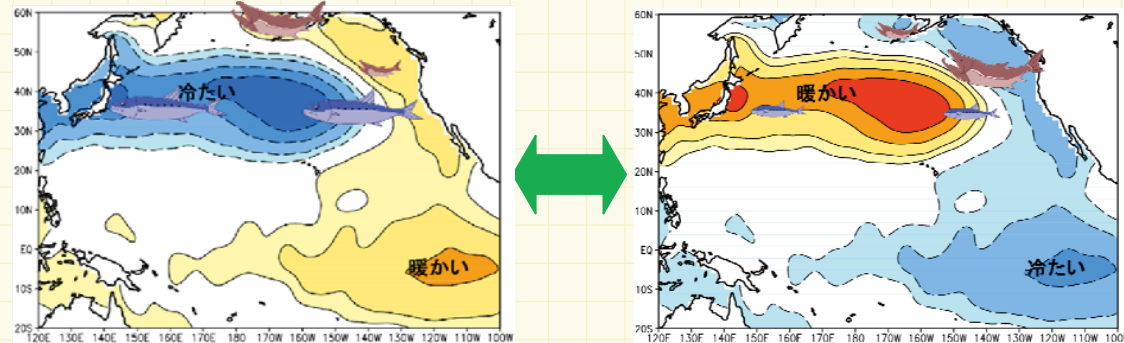


# 太平洋10年規模変動

～ 海面水温がシーソーのように入れ替わる ～

## ◆太平洋10年規模変動とは？

大気と海洋は、季節・年々・10年規模などさまざまな周期で変動しています。太平洋10年規模変動(通称 PDO) もそのひとつで、熱帯～北太平洋の海面に普段より暖かい部分と冷たい部分が生じ、10～20年くらいの間隔で暖かい／冷たいが入れ替わる現象です(図1)。日本を含む環太平洋域の気候に大きな影響を与えています。サケやイワシなどの漁獲量も左右し、社会的な影響も小さくありません。また、地球温暖化の進み具合を正しく把握するためにも、この「PDO」の状況を知っておくことは大切です。例えば PDO を知らずに日本の東海上での海面水温を調べた場合、図1左から図1右の状況へ向かうときに温暖化の進行が実際以上に早く見えたり、逆に図1右から図1左の状況へ向かうときに寒冷化しているように見えてしまいます。



🐟 : シャケ 多   🐟 : シャケ 少   🐟 : マイワシ 多   🐟 : マイワシ 少

図1: PDO に伴う海面水温の変化と、それに伴うシャケ・イワシの漁獲量の増減。左図は中部北太平洋の海面水温が平年よりも低い期間の空間パターンを、右図は反対に平年よりも高い期間の空間パターンを示しています。1930年代や1980年代には、日本付近や中部北太平洋が冷たい左図のようなパターン、1950年代や1970年代には逆に右図のようなパターンになっていました。

## ◆モデルによる再現性能のばらつきをヒントに PDO を解き明かす？

24個の気候モデルによる20世紀再現実験(1981-2000年)の結果を調べると、シミュレートされる PDO の周期や振幅、空間パターンといった特徴が観測とよく合っているモデルがある一方で、あまりよく合っていないモデルもあり、再現性能はまだまちまちです。

なぜでしょうか？ はっきりしたことは実はまだよくわかっていません。この疑問に答えるためには、PDO がどのように起こるのかを知る必要があります。

海や大気には、周りと違う部分があると波立って遠くまでその影響を伝える性質があります。水面のチャップチャブした波や音波などもその一種ですが、他にも色々な規模や性質の波が影響を遠くへ伝えています。

図1で見たように、熱帯海面が暖かい(冷たい)と中緯度の海面が冷たい(暖かい)という関係が観測されています。これは、熱帯海面の温度の影響がなんらかの波を通じて中緯度の海面へ伝わっているからだという見方が主流です。

海の波によって直接伝わるルートがすぐに思い浮かびますが、実は大気の波を経由して熱帯の海から中緯度の海へ影響が伝わるという説(図2)が注目されています。

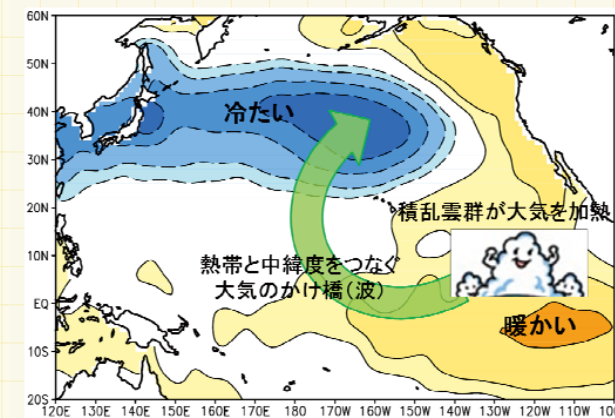


図2: 赤道域の海面水温が「大気のかげ橋」を通じて中緯度の気候・海洋に影響するという説を示した図。

熱帯の海が暖かい(冷たい)とその上で積乱雲が増え(減り)、大気に放出される熱が増加(減少)する。周りと温度差が生じた大気は波を引き起こし、遠くの中緯度の気候までその影響を伝える。中緯度の海はその上の大気の変化の影響を受けて変化する。

もしこの説が正しいとすれば、「PDOの再現性が高いモデルは大気のかげ橋(波)の再現性も高い」という関係があると予想されます。

実際に24個の気候モデルを調べてみると、PDOの再現性の高いモデルでは、大気のかげ橋(波)の特徴が現実の大気観測とよく一致していることがわかりました。このことから私たちは、気候モデルでPDOを再現する鍵は、この熱帯と中緯度をつなぐ大気のかげ橋効果なのではないかと考え、裏づけを進めています。



太平洋10年規模変動を  
しっかり監視しておかないと、  
温暖化が早くなった・遅くなったなどと  
早合点するわけじゃなく、  
魚の取れ方にも影響するので  
漁師さんも必見じゃ。



# 河川流量

～ 河川流域の水文循環とその将来変化 ～

## ◆社会を支える水資源

日本の河川は農業・工業・生活を支える大事な水資源です。全国で1年間に必要とされる水量は約831億トンで、そのうちの約66%が農業に使われています。上流で降った雨や融けた雪が集まり、川を流れて河口から海へと流れ出します(図1)。



図1：地球温暖化が河川流量に及ぼす影響の例

雨や雪が集まる範囲を「河川流域」といいます。河川の流量は河川流域の降水量に大きく依存します。しかし、降った雨はすべて川に流れるわけではありません。地面からの蒸発、森林などの葉からの蒸発散、地下への浸透などを通して降水量の約15～55%が失われます。こうした降雨/降雪-融雪-蒸発散-浸透-流出などのバランスによって河川の流量が決まります。このような一連の水の循環を「水文循環」と呼びます。

## ◆地球温暖化と水文循環

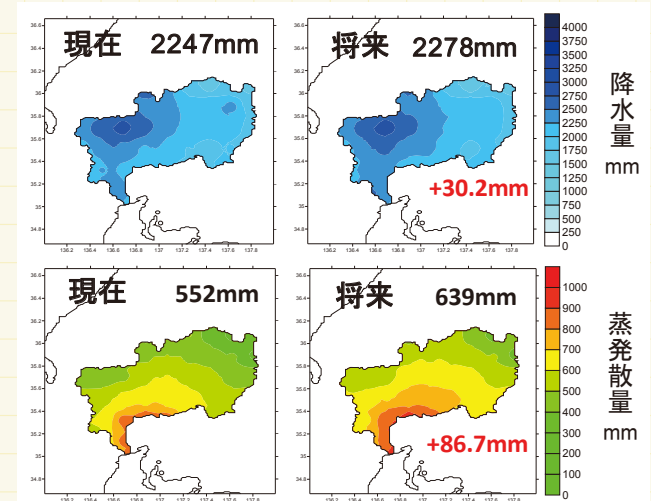
地球温暖化は気温の上昇をもたらすだけではありません。気温の上昇は蒸発散量を増加させるため、河川流量を減らす効果があります。一方で、地球温暖化により降水量が増加すると考えられており、河川流量を増やす効果もあります。また、気温が上昇すると雪が雨となって降ることも予想され、春先の雪解け水が減ることが考えられます。

この研究では、日本全国の主な河川7流域について、降水量・融雪量・蒸発散量などの将来変化を求め、河川流量への影響を調べました。河川の将来変化は、GCM(気候モデル)の出力結果(降水量・風速など)を河川モデルに与えて計算することによって調べます。河川モデルは、河川流域の地形を1km四方のメッシュにわけて、森林・田・都市などの違いも考慮して水文循環を算出します。

## ◆温暖化による年間の河川流量の変化

木曾川流域の計算例を図2に示します。21世紀末の将来には降水量は増加していますが、それ以上に蒸発散量が増加しています。その結果、木曾川の年間流量は全体としては約3%減少していました。

図2：木曾川流域における現在(左：1979-2003)と将来(右：2075-2099)の年間降水量(上)と年間蒸発散量(下)の変化。



## ◆温暖化による雪解け水の変化

気温の上昇により、北日本の雪が雨に変わること、雪解けの時期が早まることも予想されます。図3は山形県の最上川の月別流量の将来予測を示したものです。CMIP3の複数のモデルの結果を調べたところ、平均で3月～5月の流量が30%以上も減少し、逆に1月～2月の流量が80%以上も増加していました。モデルごとのばらつきはあるものの、春先の流量減少は明らかです。

北海道・東北・北陸の農業用水は232億トン利用されていて、全国合計546億トンの約42%にもなります(2007年)。河川流量の将来変化は農業へ大きな影響を及ぼします。

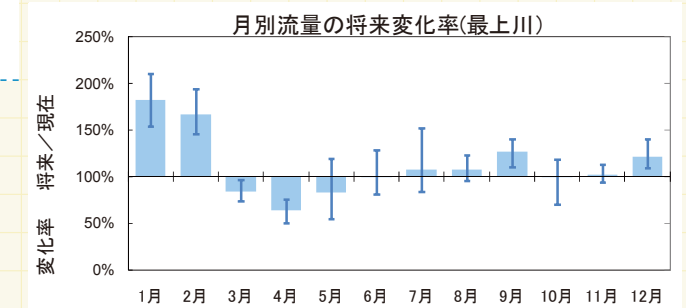


図3：最上川の月別流量の将来変化。棒グラフはCMIP3マルチモデルの平均を示し、I型の線は予測結果のばらつきを表す。



温暖化は河川の流量にも影響するのじゃ。特に春の雪解け水が大きく減るので農家の人は苦勞しそうじゃのう。

**colum** 【 雲の効果 】

雲には、地表を冷やす日傘効果と、地表を温める温室効果があります。例えば、夏の暑い日中でも、太陽が雲に隠れると、涼しく感じます(図1)。これが日傘効果です。一方、冬の朝でも、空が雲に覆われていると、地表からの熱放射が妨げられ暖かく感じます(図2)。これは、雲の温室効果です。

雲が持つ日傘効果と温室効果の大きさは、雲の形態(高さや厚さ)により異なります。例えば、低い雲は日傘効果が大きく、高い雲は温室効果が大きいことが知られています。地球温暖化に伴い、日傘効果が大きくなれば温暖化は緩和されますが、温室効果が大きくなれば温暖化が促進されます。しかし、雲が将来気候においてどのように変化するかは、未だはっきりとはわかっていません。将来起こりうる雲の変化を把握するためには、まず、現在気候における雲の性質を、モデルがどの程度再現しているかを把握する必要があります。衛星データとの比較調査の結果、モデルは熱帯域において雲の特徴を上手く再現する一方で、亜熱帯域では雲の温室効果を小さく・日傘効果を大きく見積もっていることがわかりました。この様に、衛星などの様々なデータを用いた研究を通じて雲についての不確実性を減らしていくことができると考えています。

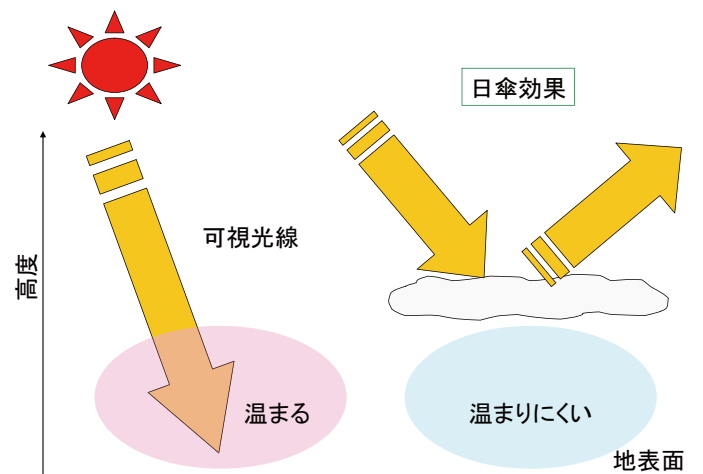


図1：雲による日傘効果の概念図

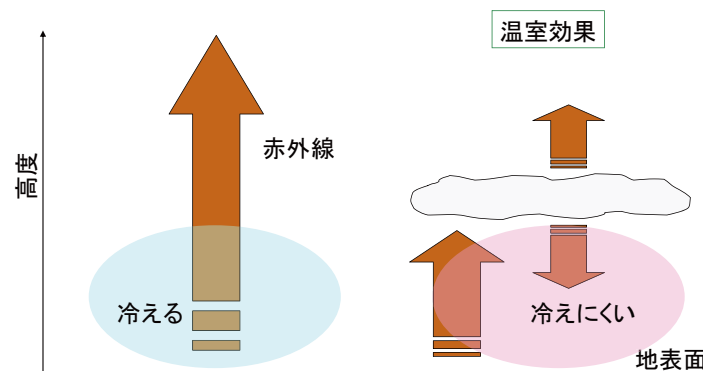
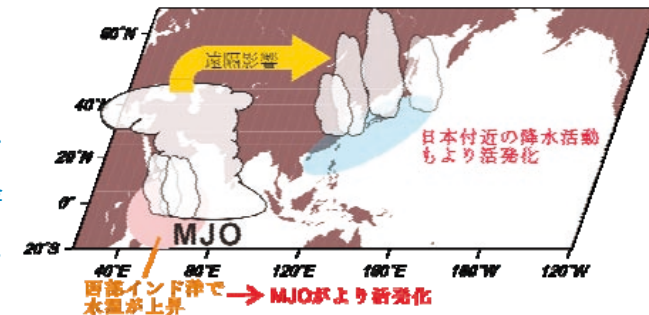


図2：雲による温室効果の概念図

**colum** 【 マッデン・ジュリアン振動 (MJO) 】

熱帯にはインド洋から中部太平洋へと巨大な雲域がゆっくりと東進する「マッデン・ジュリアン振動 (MJO)」と呼ばれる現象があります。MJOは、熱帯の降水活動のみならず、遠く離れた中緯度にも影響を及ぼします。北半球の冬季には、インド洋付近でMJOが発達すると、

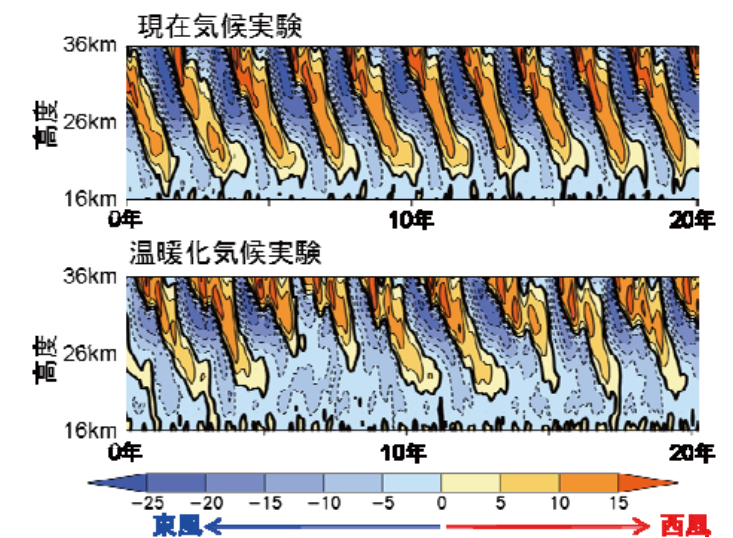


MJOと日本の冬の降水の関係と、地球温暖化の影響の模式図

日本を含む東アジアでは降水活動が活発化する傾向があります。CMIP3の気候モデルのうち、MJOの強さや東進の様子が比較的正しく再現できるモデルを用いて将来変化を調べたところ、温暖化すると冬の平均水温が上昇する西部インド洋でMJOがより活発になり、日本の降水も増える傾向がみられました。私たちは、この遠隔影響のしくみを研究しているところです。将来は、現在よりもさらに熱帯の天気を注視しなくてはならないかもしれません。

**colum** 【 赤道準2年振動 (QBO) 】

QBOは、熱帯成層圏(高度約17kmから50km)で、東風と西風が約2年の周期で交代する現象で、その影響は熱帯成層圏だけでなく、地球大気全体に及んでいます。私たちはQBOを適切に再現できる気候モデルを用いて温暖化の影響を調べました。その結果、将来は周期がやや長くなり、QBOの高度が下まで伸びにくくなるだろうと予測されました。これは、赤道付近で上昇流が強まり、QBOが下に降りようとするのを妨げる効果が強くなるためと考えています。



赤道に沿って平均した東西風(シミュレーション結果)。西風域と東風域が時間とともに上から下へと伝播しつつ交代するQBOの特徴が再現されている。

## 今後の 取り組み

2007年に発行されたIPCCの第4次報告書のために、世界のたくさんの機関で気候モデルが開発され、現在や将来の気候の計算が行われました。ここでは、そのたくさんの計算結果を集約したデータ(CMIP3)を利用した研究の成果を紹介しました。現在気候や温暖化後の世界における身近な現象を、世界の気候モデルがどのように再現もしくは予測しているかという計算結果には、いろいろな点で違いがあります。しかし、それらを様々な視点で比べ、再現性のメカニズムを詳細に調べることで、将来に起こる変化をより正確に知ることができるのではないかと考えています。

ここで使われたCMIP3の気候モデル計算は、2005年から2006年に行われたものです。それから約6年が過ぎ、コンピューターの能力も格段に向上すると共に、様々な現象の理解や物理法則の数式化の方法も進歩してきました。2011年の現在、世界の各機関では、2013年に発行予定のIPCC第5次報告書に向けて、その研究基礎を作るため、最新の気候モデルの計算結果をまさに集約しているところです(CMIP5)。最新のコンピューターの性能では、気候モデルの一つの格子(サイコロ)をCMIP3の頃よりも小さくできるため、より詳細な現象を表現できます。また、100年後の予測だけでなく、30年後のより近い将来をより正確に予測するという実験も行われています。

私たちの研究では、複数の気候モデルの比較解析が、現象のメカニズムの理解を深めるひとつの有力な方法となることがわかりました。今後は、この経験を生かして最新の気候モデル結果を比較解析していく予定です。そうすることで気候や気象の仕組みをより深く理解できるようになれば、気候モデルの精度を一層向上させることができるでしょう。そして、身近な現象についても、より正確な将来予測ができるようになることを期待されます。

## 研究参画 機関名

- (1) 熱帯亜熱帯域における雲降水現象の再現性とその将来変化に関する研究  
東京大学大気海洋研究所 気候システム研究系
- (2) 中緯度・亜熱帯循環系の季節・経年変動の再現性とその将来変化に関する研究  
東京大学 先端科学技術研究センター 気候変動科学分野
- (3) 季節予測に係わる短期気候変動の再現性とその将来変化  
国土交通省気象庁気象研究所
- (4) 中緯度大気海洋系10年スケール変動の再現性とその将来変化に関する研究  
北海道大学大学院地球環境科学研究院
- (5) アジヤモンスーンのモデル再現性と温暖化時の変化予測に関する研究  
筑波大学生命環境科学研究科
- (6) 熱帯大気海洋相互作用現象の再現性とその将来変化に関する研究  
独立行政法人海洋研究開発機構
- (7) 季節性気象現象とその放射フィードバックの再現性とその将来変化に関する研究  
独立行政法人海洋研究開発機構
- (8) 衛星等による全球雲放射と降水観測に基づく気候モデル再現性とその将来変化  
名古屋大学大学院 環境学研究科地球環境科学専攻  
<研究協力機関>名古屋大学地球水循環研究センター
- (9) CMIPマルチモデルを用いた将来気候における季節進行の変化予測  
国土交通省気象庁
- (10) 河川流域の水文循環の再現性とその将来変化に関する研究  
京都大学防災研究所

### 「暑いだけじゃない地球温暖化」編集委員会

東京大学大気海洋研究所 気候システム研究系  
高菰 緑、横井 覚、廣田 清郎、宮川 知己、柏崎 美樹  
写真：柏崎美樹 印刷：株式会社 アズディップ