

2. 領域課題（ii）汎用シナリオ整備とメカニズム解明

領域課題代表者：仲江川敏之（気象業務支援センター）

2.1. (a) 汎用シナリオ整備と顕著現象変化メカニズム解明

サブ課題代表者：仲江川敏之（気象業務支援センター）

（気象業務支援センター）高藪 出、鬼頭昭雄、尾瀬智昭、遠藤洋和、水田 亮、今田由紀子、石田春磨、吉田康平、楠 昌司、杉 正人、保坂征宏、小畑 淳、吉村裕正、川合秀明、新藤永樹、高谷祐平、庭野匡思、大島 長、伊東瑠衣、佐々木秀孝、村田昭彦、川瀬宏明、野坂真也、浦川昇吾、渡邊俊一

a. 要約

これまでに開発してきた大気全球一領域気候温暖化予測システムを用いて、自然変動による不確実性を定量化するための、全球20km、日本域5kmと2kmでの現在気候初期値アンサンブル実験一つを開始した。本実験は完了し、これまでの実験と合わせて解析を進めている。加えて、同システムによるRCP2.6の下での今世紀末の全球20km、日本域5kmと2kmでの実験を開始した。また、全球60km、日本域20kmでの100年以上連続の温暖化再現・予測シミュレーションを開始した。これらの実験開始に当たっては、領域テーマDと緊密な連携をとりながら、実験設定等を調整した。

全球60km大気モデルを用いて、将来海面水温パターンの違いがアジア・日本域における顕著現象の予測不確実性に及ぼす影響を調査した。極端降水量の変化については、Clausius-Clapeyron式による大気中の飽和水蒸気量の増加に加えて、中立浮力高度に関係することが示唆された。大規模アンサンブル実験d4PDFの実験を用いて台風の発生数、猛烈な台風の数、存在頻度分布等の低頻度の極端現象の将来変化予測を行い、例えば、全球気温4℃昇温条件下での気候では、台風発生数は、平均55.5個と現在気候の平均から33%程度の減少となった。さらに、創生プロで整備した温暖化予測データセットの、CMIP5モデルアンサンブル内での位置付けについて、顕著現象変化を中心に解析を開始した。最初に行った季節平均気候値の比較ではMRI-AGCM3.2H/Sの再現性が、CMIP5マルチモデルアンサンブル平均と同等であるという結果が得られた。

創生プロで実施した5km・2km領域モデルの現在気候実験における極端現象の気候値再現性について解析を行った。極端降水の再現性は、5kmよりも2km領域モデルの方が良い結果が得られた。北海道北西部における極端な降水量の増加メカニズムについて要因分析を行い、西風強化が主要因であることを明らかにした。積雲対流パラメタリゼーションを用いずに雲微物理過程のみで降水を計算する2km解像度のNHRCM02と、積雲スキームを用いる5km解像度のNHRCM05のダウンスケーリング実験を比較したところ、最大積雪深の標高依存性は、モデル地形標高差のみならず、モデル水平解像度に影響されることが示唆された。また、d4PDFの拡張・延長実験を行い、日降水量100ミリ以上の日数についてアンサンブル平均の年々変動を調べたところ、地域間で年々変動が大きく異なっており、それぞれの地域の豪雨発生に影響を与えるSST強制やそれに伴う大気場が異なることが示唆された。

b. 研究目的

創生プロで開発された大気全球一領域気候温暖化予測システム（図1）を用いて、気候シナリオ実験を実施すると共に、この実験を下に顕著現象の変化メカニズムについて要因を解明する。まず不確実性の定量化のために、現在気候実験のメンバー数を増やす実験を行う。次に、世紀末を対象にしたRCP8.5以外のシナリオによる気候予測実験、中解像度温暖化再現・予測シミュ

レーションロングラン（20世紀半ば～21世紀末；100年シームレス実験）を実施する。最終的に創生プロで開発された RCP8.5 将来気候シナリオと合わせて、汎用将来気候シナリオを整備する。また、AGCM-NHRCM 温暖化予測システムにより予測される将来気候予測について、CMIP5 マルチモデルとの比較を通して、その特徴を客観的に評価する。

メカニズム解明と不確実性の定量化については、梅雨など気候学的に顕著な現象や豪雨などの極端現象について、AGCM-NHRCM 温暖化予測システムを用いて、要因特定実験または SST 摂動アンサンブル実験などを実施する。

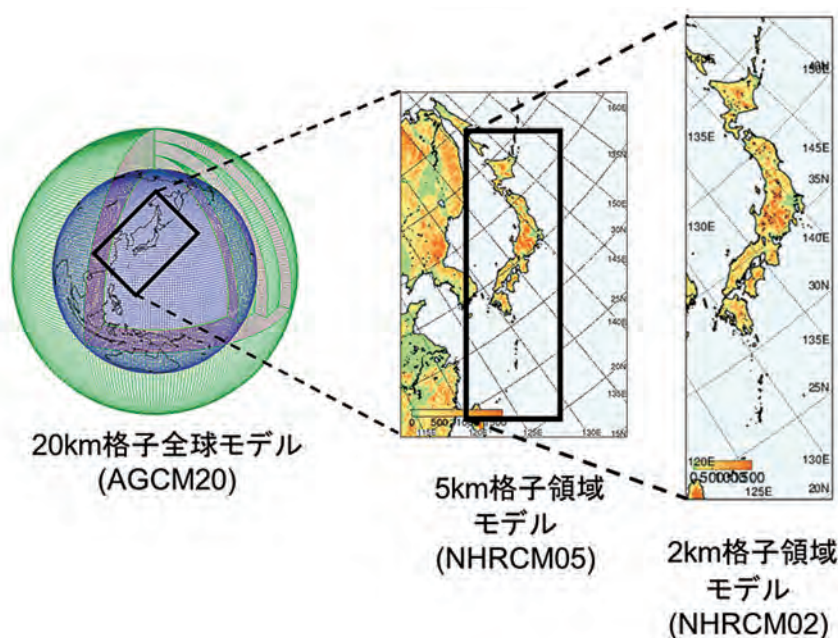


図1 MRI-AGCM3.2S と NHRCM05、NHRCM02を用いた全球－領域気候温暖化予測システム

c. 研究計画、方法、スケジュール

研究前半では、全球－領域気候温暖化予測システムを用いて、気候変動リスク情報創生プログラムで整備された RCP8.5 シナリオ下での将来予測実験結果を解析し、梅雨や台風等の顕著現象の変化メカニズムについて要因を解明する。また、大気モデルと結合モデルによる将来予測の違いについて調査する。AGCM-NHRCM 温暖化予測システムで予測される将来気候変化が、CMIP5 マルチモデルとの比較でどのように特徴付けられるか調査する。将来予測情報を充実させるために、AGCM-NHRCM 温暖化予測システムを用いて、現在気候と主に RCP2.6 シナリオ下での将来予測実験及び、100年シームレス実験を研究計画前半で実施する。

研究後半では、複数の RCP シナリオ下における顕著現象変化メカニズムの違いや、その要因を明らかにし、予測の不確実性を評価する。また、CMIP6 マルチモデルのデータが利用可能になった時点で、AGCM-NHRCM 温暖化予測システムで予測される将来気候変化の特徴を再度調査する。加えて、将来気候シナリオプロダクトを充実させるために、多様な条件での予測実験を行う。また、1km 解像度の NHRCM による実験を行い、高解像度化による顕著現象の再現性を評価する。

d. 平成29年度研究計画

全球60km 大気モデルを用いて、将来海面水温パターンの違いがアジア・日本域における顕著現象の予測不確実性に及ぼす影響を調査する。また、創生プログラムで実施した5km・2km 領域モデルの現在気候実験における極端現象の気候値再現性について解析を行う。さらに、創生プロで整備した温暖化予測データセットの、CMIP5 モデルアンサンブル内での特徴について、顕著

現象変化を中心に解析を開始する。

大気全球一領域気候温暖化予測システムを用いて、自然変動による不確実性を定量化するための、全球20km、日本域5kmと2kmでの、現在気候初期値アンサンブル実験を開始する。また、全球60km、日本域20kmでの、100年以上連続の現在気候再現・温暖化予測シミュレーションを開始する。これらの実験開始に当たっては、領域テーマDと緊密な連携をとりながら、実験設定等を調整する。

e. 平成29年度研究成果

1. 全球グループの成果

1.1. 温暖化に伴う熱帯北西太平洋の降水変化：気象研高解像度大気モデルとCMIP5モデルの比較

1.1.1. はじめに

気候変動リスク情報創生プログラムのもとで実施した高解像度全球大気モデル（MRI-AGCM3.2; Mizuta et al., 2012）による温暖化予測では、全球規模の降水変化はCMIP5大気海洋結合モデル（CMIP5-AOGCM）の平均的な特徴と類似する一方、地域スケールでは夏季熱帯北西太平洋などで異なる傾向を示す（平成26年度創生テーマC報告書 p111の図9）。熱帯北西太平洋の降水変化は、太平洋高気圧強度や台風活動の変化等を通じて日本付近の降水変化にも密接に関連すると考えられるため、この要因の理解は重要である。両者の不整合の要因としては、①モデルの違い、②大気海洋相互作用の有無、③海面水温（SST）の違い、④モデル解像度の違いなどが考えられる。

また、MRI-AGCM3.2によるCO₂増加とSST上昇（一様上昇、パターン変化）の効果を分離する感度実験の解析を行った。上述の要因①を検討する目的で同仕様のCMIP5-AGCM実験と相互比較した。さらに、CMIP5-AOGCM実験との比較から要因②について考察した。

1.1.2. 実験設定

60km格子MRI-AGCM3.2のYoshimura積雲対流（Yoshimura, 2015）バージョンを用いて感度実験を行った。実験リストを表1に示す（今年度は1999～2008年積分を追加実施）。基準実験（amip）では、大気モデルに観測された年々のSSTや温室効果ガス等を与えた。感度実験では、CO₂濃度を4倍増（amip4xCO₂）、SSTを一様に4℃昇温（amip4K）、SSTに空間パターンをもたせて昇温（全球平均が4℃昇温）（amipFuture）させた。amipFutureで与えたSST偏差（ΔSST）は、CMIP3の1%CO₂漸増実験のマルチモデル平均である（平成28年度創生テーマC報告書 p114の図10a）。感度実験の応答はamipからの偏差とした。SSTパターン効果を抽出するため、amipPattern = amipFuture - amip4Kを新たに定義した（amipFuture応答の熱帯ΔSST=4℃になるようにスケーリング）。

CMIP5-AGCM実験との相互比較においては、すべての実験データが揃う9つのAGCMを解析対象とした。なお、MRI-CGCM3の大気部分（MRI-AGCM3.3）とMRI-AGCM3.2は、放射や積雲対流（ただしチューニングパラメータは異なる）などのスキームは共通だが、雲、陸面、境界層などのスキームは異なる（Yukimoto et al., 2012）。

表1 実験設定

実験名	CO ₂ 濃度	海面水温	期間
amip	観測	観測	1979-2008年
amip4xCO ₂	観測x4倍	観測	1979-2008年
amip4K	観測	観測+4℃（一様）	1979-2008年
amipFuture	観測	観測+4℃（空間パターン）	1979-2008年

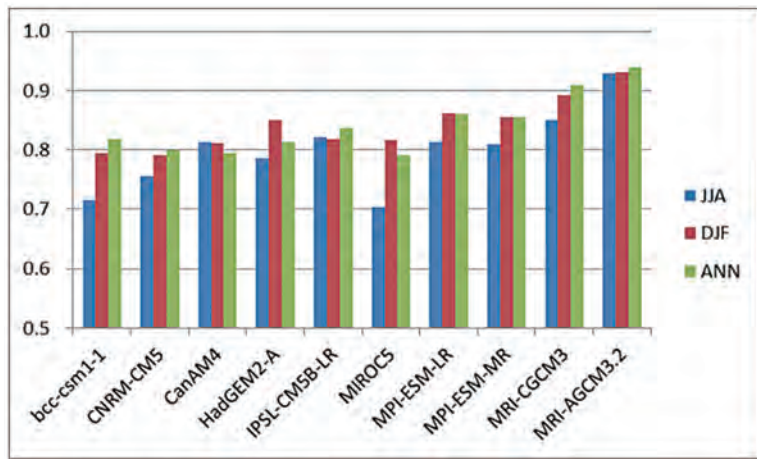


図2 基準実験 (amip) における熱帯降水量分布 (25°S-25°N) の再現性。観測 (GPCP) に対する空間相関係数を示す。青棒：6～8月平均、赤棒：12～2月平均、緑棒：年平均。

1.1.3. 結果

基準実験 (amip) における6～8月 (JJA) 平均の熱帯降水分布の再現性能について、観測 (GPCP: Huffman et al., 2009) との空間相関に基づいて定量的に評価した (図2)。MRI-AGCM3.2はCMIP5モデルよりも高い再現性能を示す。MRI-CGCM3の再現性能はCMIP5モデル群の中で最も高い。

感度実験 (amip4xCO₂/amip4K/amipPattern) におけるJJA降水量変化を図3に示す。amip4xCO₂では、海陸温度コントラスト増加によるモンスーン循環強化により (Shaw and Voigt, 2015)、降水量は大陸で増加、周辺海域で減少している。amip4Kでは、SST上昇による水蒸気増加に伴い、現在気候の降水分布を強化するような変化 (Wet-get-wetter (WeGW) パターン (Held, 2006)) を示す。SSTが4℃上昇した場合、湿度一定を仮定すると (この近似は海上では概ね成り立つ) 大気中の水蒸気量は約30%上昇する一方、大気循環はそれほど大きくは変化しないため、WeGWパターンが支配的になると考えられる。amipPatternでは、ΔSST分布に類似した降水変化分布 (Warmer-get-wetter (WaGW) パターン (Xie et al., 2010)) を示す。例えば、赤道太平洋やインド洋西部では、周辺海域よりもSST昇温量が大きいことに対応して、降水量が増加している。

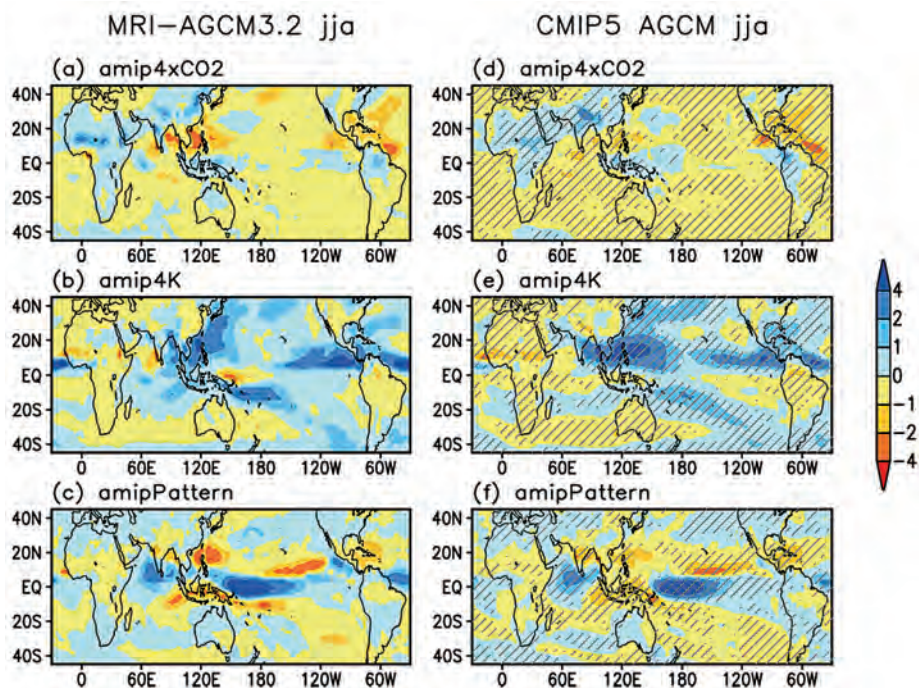


図3 感度実験における6～8月平均降水量の変化 (mm day⁻¹)。 (a) - (c) : MRI-AGCM3.2、 (d) - (f) : CMIP5の9 AGCM 平均。 (a, d) : amip4xCO₂、 (b, e) : amip4K、 (c, f) : amipPattern。 (d) - (f) では変化符号一致率が約80% (7モデル) 以上で一致する領域に斜線。

図4ではWeGW効果とWaGW効果について定量的に示す。amip4KにおけるWeGW効果とamipPatternにおけるWaGW効果は、モデル間・季節間のばらつきはあるが、すべてのモデルにおいて現れている。MRI-AGCM3.2の応答はCMIP5大気モデルと比べて特に目立った違いは見られない。

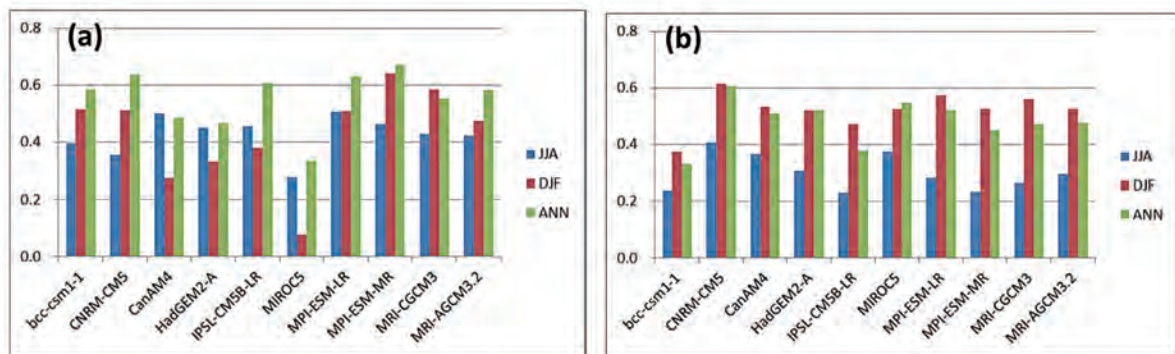


図4 熱帯域 (25°S-25°N) における (a) amip 気候値と amip4K 降水量応答との空間相関 (WeGW 効果) 及び (b) Δ SST パターンと amipPattern 降水量応答との空間相関 (WaGW 効果)。青棒：6～8月平均、赤棒：12～2月平均、緑棒：年平均。

熱帯北西太平洋では、多くのモデルは、amip4xCO2では負、amip4Kでは正、amipPatternでは負の降水量変化を示す。MRI-AGCM3.2はCMIP5大気モデルと比べて、amip4Kの降水増加量が小さく、amip4xCO2の降水減少量が大きい特徴が見られる。前者の特徴はMRI-CGCM3でも同様に見られる。

1.1.4. 考察

まず、MRI-AGCM3.2のamip4K応答の妥当性について検討する。amip4K応答において支配的なWeGW効果は現在気候の降水分布の振幅を強化するように働くことから、現在気候降水分布が現実に近いモデルほどamip4K応答の信頼性が高いと考えられる。このため、高い再現性能をもつMRI-AGCM3.2のamip4K応答は他モデルよりも信頼性が高いと考えられる。

次に、MRI-AGCM3.2のamipPattern応答の妥当性について検討する。図5は、amip実験における年々変動のローカルのSST-降水相関である。観測では、赤道太平洋など多くの領域で正相関であるが西部太平洋などでは負相関である。一方AGCMでは、全般的に観測よりもSST-降水相関を過大に表現する傾向がみられる。このようなバイアスの存在は以前から指摘されてきた (Wang et al., 2005)。

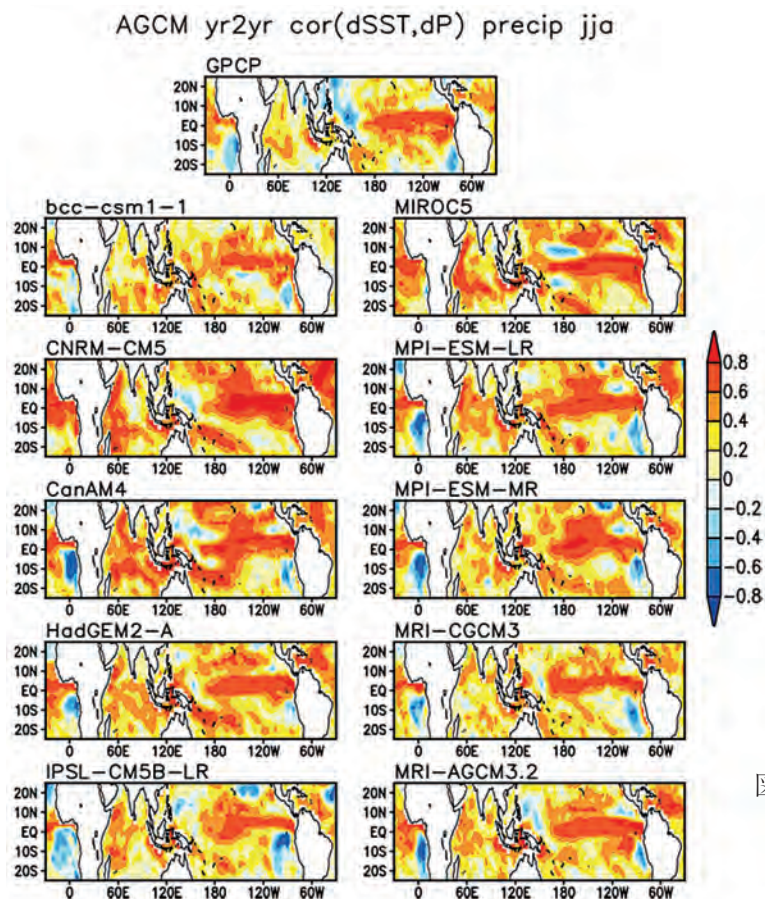


図5 現在気候の6～8月平均降水量の年々変動におけるローカル SST-降水量相関。最上段が観測、それ以外は amip 実験。

このような AGCM バイアスが温暖化予測に与える影響について考える。図6aは現在気候の年々変動におけるローカル SST-降水相関の熱帯平均 (x 軸) と Δ SST と amipPattern 降水量応答の空間相関 (WaGW 効果、y 軸) の関係である。両者には強い相関関係が認められる。AGCM のローカル SST-降水相関は観測よりも大きいことから、AGCM が表現する WaGW 効果は過大であると推定される。たとえば、amipPattern 応答で見られる熱帯北西太平洋の降水量減少 (図3c、f) は、その付近で相対的に低い Δ SST に対して過剰に応答している可能性が考えられる。

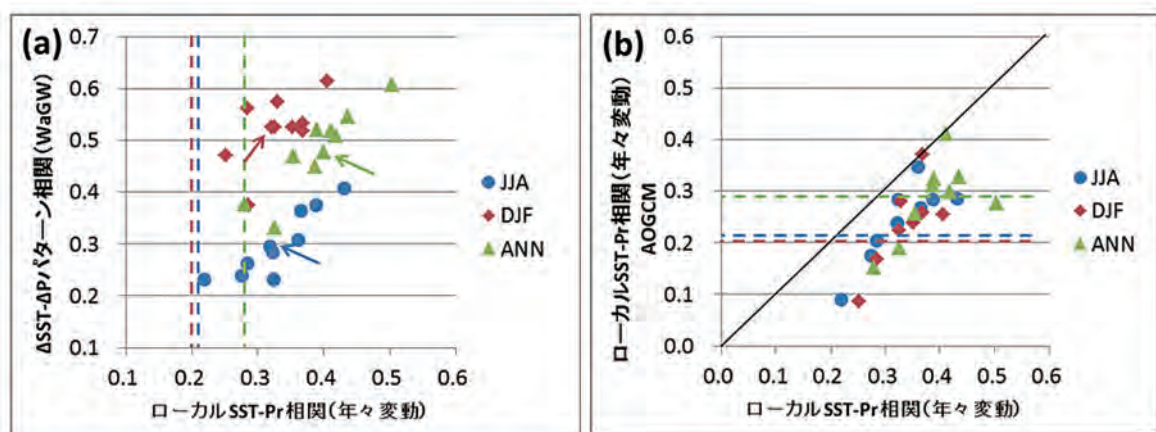


図6 (a) x 軸: amip 実験の年々変動におけるローカル SST-降水量相関の熱帯平均 (すなわち図5の空間平均)、y 軸: Δ SST パターンと amipPattern 降水量応答の空間相関 (WaGW 効果、図4bに相当)。(b) x 軸: (a) と同じ、y 軸: 対応する AOGCM による過去再現実験 (historical、1979～2005年)である以外は x 軸と同じ。破線は観測値。(a) の矢印の先は MRI-AGCM3.2。青: 6～8月平均、赤: 12～2月平均、緑: 年平均。

年々変動のローカル SST-降水相関に関する AGCM と AOGCM の違いを図 6b に示す。AOGCM は AGCM よりも相関が弱く観測値に近い。このことから、AGCM における SST-降水相関のバイアスは主に大気海洋相互作用の欠如に起因すると考えられる。

1.1.5. まとめ

- ① 熱帯北西太平洋降水量は、MRI-AGCM3.2は CMIP5大気モデルと比べて、amip4K 応答の降水増加量が小さく、amip4xCO2応答の降水減少量が多い。MRI-AGCM3.2と CMIP5大気モデルはともに、amipPattern 応答は降水減少を示す。
- ② MRI-AGCM3.2は CMIP5大気モデルに比べて降水量分布の現在気候の再現性能が高い。このことは、Wet-get-wetter (WeGW) 効果をふまえると、MRI-AGCM3.2の amip4K 応答の高い信頼性を示唆する。
- ③ MRI-AGCM3.2と CMIP5大気モデルはともに年々変動のローカル SST-降水量相関が過大であるため、大気モデル実験の Warmer-get-wetter (WaGW) 効果は過大評価の可能性はある。
- ④ MRI-AGCM3.2は CMIP5結合モデルよりも熱帯北西太平洋の降水量減少傾向を予測する要因として、MRI-AGCM3.2固有の特性 (①) 及び、大気モデル共通の WaGW 効果バイアス (③) が示唆された。

CMIP3モデル予測 SST を用いた温暖化予測実験 (革新プログラム、H19~H23年度) では、熱帯北西太平洋の降水量変化に関する MRI-AGCM3.2と CMIP3-AOGCM の差異はそれほど明瞭でなかった (平成26年度創生テーマ C 報告書 p112の図10)。CMIP3平均は CMIP5平均よりも熱帯 Δ SST 分布の一様性が高いことから、革新プログラム実験では AGCM の WaGW 効果バイアスがあまり顕在化しなかった可能性が考えられる。この点も含めて今後引き続き検討を行いたい。

1.2. 日本域の降水量の将来変化

温暖化予測では、温室効果ガスの将来の排出シナリオの違い、気候モデルの特性の違い、気候系の内部変動による年々変動のゆらぎなどの原因により不確実性が伴う。従って、変化の予測結果のみを示すのではなく、信頼性に関する情報を付加することが必要である。信頼度の情報としては、統計的有意性や複数の実験のばらつきの程度を示すことが多い。Kusunoki (2017a) は、全球20km、60km 格子大気モデル (MRI-AGCM3.2S, H) による積雲対流・海面水温アンサンブル温暖化予測実験により梅雨の将来変化を調査した。積雲対流は Yoshimura 方式 (YS; Yoshimura et al. 2015)、Arakawa-Schubert 方式 (AS; Randal and Pan 1993)、Kain-Fritsch 方式 (KF; Kain and Fritsch 1990) の 3 種類を用いた。将来の海面水温は第 5 期結合モデル国際比較計画 the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) に参加した大気海洋結合モデルの将来変化をクラスター分析した 4 種類 (C0, C1, C2, C3) を用いている (Mizuta et al. 2014; Fig. 2)。将来予測の排出シナリオは Representative Concentration Pathway (RCP; Meinshausen et al. 2011) 8.5である。月平均降水量と半旬平均降水量による解析では、6 月の日本付近で降水量が減少し、梅雨入りが遅れることがわかった。この傾向は、水平分解能、積雲対流、海面水温が異なった16個の複数の実験ではほぼ共通に見られた。

Kusunoki (2017a) の実験では、大気モデルを使用しているので大気海洋相互作用が考慮されていない。そこで、MRI-AGCM3.2に海洋を結合した準結合実験の結果と比較した。この準結合実験では、海面水温の年々変動がある程度再現できるように、熱フラックス調整を行っている。積雲対流は YS のみ、海面水温はアンサンブル平均の C0のみである。排出シナリオは RCP8.5である。実験設定の詳細は Ogata et al. (2015) を参照。さらに、Kusunoki (2017a) では気候系の内部変動によるばらつきをあまり考慮していない。そこで、気候系の内部変動のばらつきを考慮した、地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース the database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF) の結果とも比較した。この実験では60km モデルを使用している。積雲対流は YS のみである。排出シナリオは RCP8.5である。将来の海面

水温は全球平均地上気温が4℃上昇時の6つの大気海洋結合モデルの海面水温変化を用いている。海面水温に観測誤差を考慮した摂動を与え、現在気候100メンバー、将来気候90メンバーのアンサンブル実験を行った。実験設定の詳細は Mizuta et al. (2017) を参照。

図7は複数の実験による6月の降水量の変化である。(a)では西日本中心に統計的に有意な降水量の減少がみられる。60kmモデルの(b)でも、日本付近で降水量が減少しているが有意でない。60kmモデルだが異なる積雲対流を用いた(c, d)、大気海洋相互作用を考慮した(e, f)でも、日本付近で降水量が減少しているが有意でない。(g)のd4PDFは、他と実験設定が異なるので単純な比較はできないが、日本付近で統計的に有意な降水量の減少がみられる。(g)ではメンバー数が圧倒的に大きいので、統計的に有意な地域が他の実験よりはるかに広い。全体的に見ると、統計的有意性が低い実験があるものの、6月の降水量の減少傾向は共通している。1.1で議論している北西太平洋熱帯域の温暖化応答の違いは、日本付近のジェット的位置を変え、梅雨の位置や活動度を変化させる可能性があるため、MRI-AGCM3.2S, H固有の特性と大気海洋相互作用の影響を考慮した検討を引き続き行う必要がある。

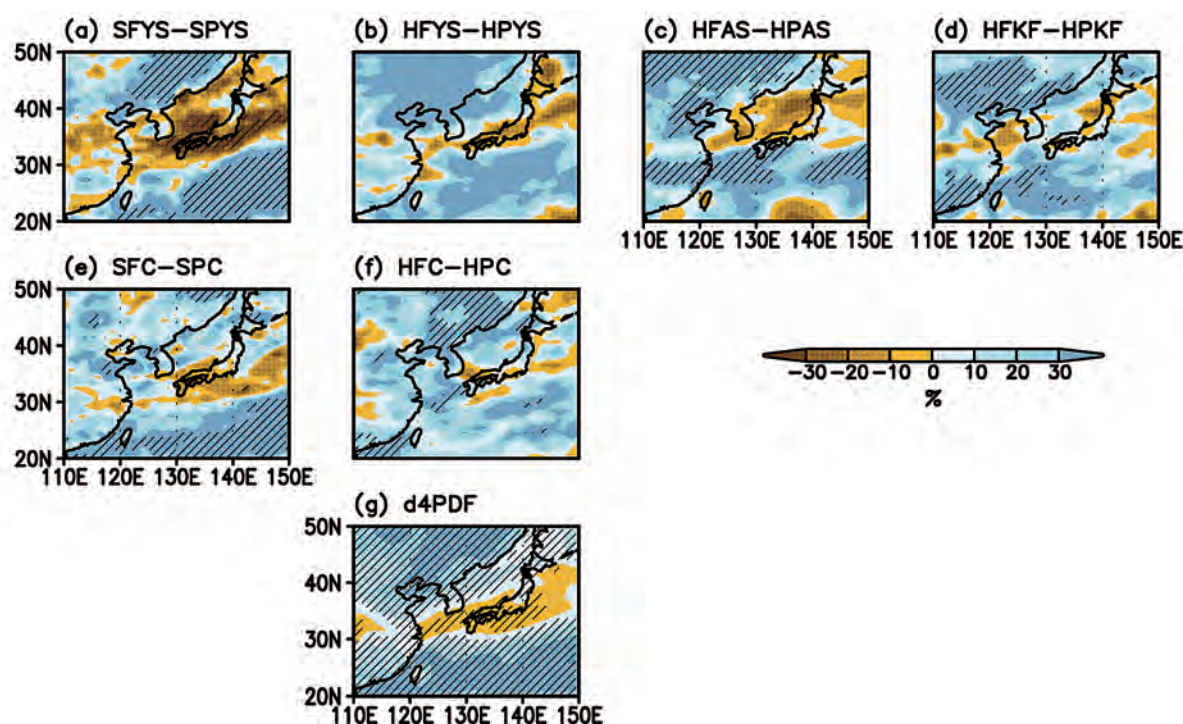


図7 気象研全球大気モデルMRI-AGCM3.2で予測された6月の降水量の将来変化。現在気候は1979-2003年の25年。将来気候は2075-2099年の25年、排出シナリオはRCP8.5、海面水温はCMIP5大気海洋結合モデルのアンサンブル平均C0 (Mizuta et al. 2014: Fig. 2a)。将来変化は、現在気候値に対する変化率(%)。斜線は変化の統計的有意水準が95%以上。(a) 20kmモデル、積雲対流はYS。(b) (a)と同じだが60kmモデル。(c) (b)と同じだが積雲対流AS。(d) (b)と同じだが積雲対流がKF。(e) (a)と同じだが大気海洋相互作用入り。(f) (b)と同じだが大気海洋相互作用入り。(g) 60kmモデルを用いたd4PDF実験。(a, e) 20kmモデル。(b-d, f, g) 60kmモデル。(a, b, e, f, g) 積雲対流がYS。

1.3. 将来の昇温量と降水変化の関係

地球温暖化による地上気温1℃上昇当たりの降水量の変化率を「降水効率」とここでは呼ぶ。降水効率は水蒸気から降水への変換効率と解釈できる。Kusunoki (2017b)は、全球60km格子大気モデルによる積雲対流・海面水温アンサンブル温暖化予測実験で降水効率を調べた。実験設定はKusunoki (2017a)と同じだが、60kmモデルのみを使用している。Vecchi and Soden (2007)によれば温暖化時の降水効率は、気温と水蒸気に関するクラジウス-クラペリオン Clausius-

Clapeyron (C-C) の関係から熱力学的に期待される値7.5 %/K より小さい。大気大循環による力学効果が局所的な熱力学的効果を打ち消すからである。

図8a は年平均降水量 PAVE の降水効率である。降水効率は全般に熱力学的な期待値より小さいが、熱帯赤道太平洋、西インド洋、南半球の高緯度地方では大きい。北半球の高緯度地方は降水の変化率が大きいものの、極域増幅 (Polar amplification) 作用によって昇温が極めて大きいので、降水効率が小さくなっている。これは Kusunoki et al. (2015) と整合する。亜熱帯地域では降水が減少するので、降水効率が負 (茶) となっている。強い降水の指標である年最大5日降水量 R5d (図8b) でも、おおむね PAVE と同様の分布を示す。しかし、亜熱帯地域では降水効率が正 (青) である地域が、PAVE よりも多い。最も強い降水を表す年最大日雨量 PMAX (図8c) でも、R5d と同様な分布を示す。

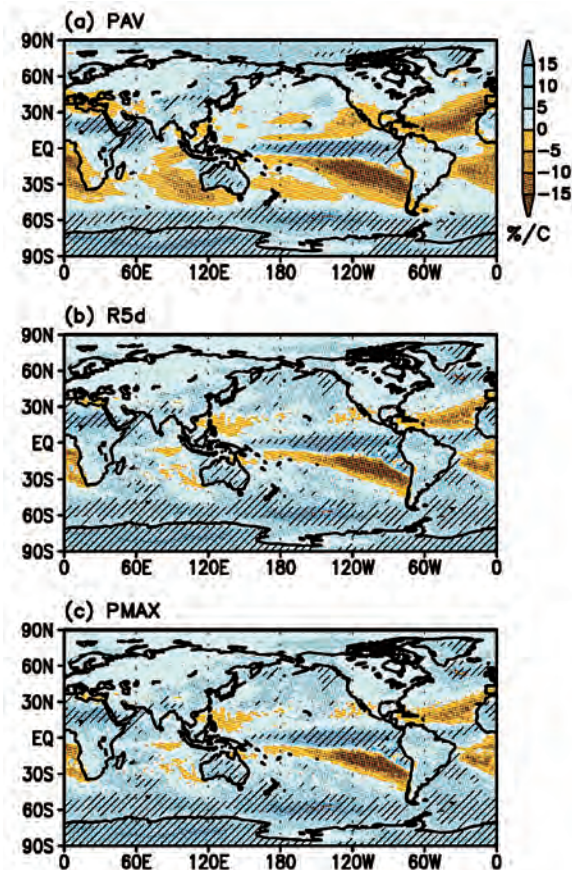


図8 降水効率 (%/K)。60km モデルによる12個の実験の平均。現在気候は1983-2003年の21年。将来気候は2079-2099年の21年。排出シナリオはRCP8.5。斜線は降水効率が熱力学理論から期待される値7.5 %/K より大きい領域。(a) 年降水量 PAVE。(b) 年最大5日降水量 R5d。(c) 年最大日降水量 PMAX。Kusunoki (2017b) の Fig. 10から引用。

図9は、全球平均した降水量変化と地上気温変化の関係を示している。図9aではPAVEについて降水効率が積雲対流と海面水温にどう依存するかを調べた。文字の違いが積雲対流の違いを表している。ASによる降水変化が大きく、YSによる降水変化が小さい。色の違いが海面水温の違いを表している。C1で気温変化が大きく、C3で小さい。気温変化は海面水温に依存し、降水変化は積雲対流に依存している。ただ、気温の違いは1℃以内、降水の違いは2%以内と小さい。図9bは降水の指標依存性を示している。記号の違いが降水指標の違いを表している。PAVEの降水変化が小さく、PMAXの降水変化が大きい。R5dは両者の中間である。特に、PMAXの降水効率は理論値に近く、きわめて効率的な水蒸気から降水への変換が行われていることがわかる。即ち、強い降水の変換効率の方が、平均的で弱い雨よりも大きい。これは Kusunoki et al. (2015) と整合する。色の違いは積雲対流の違いを表している。PAVE (×) ではAS (黒)

の変換効率が大きい(図9a)、R5d (○) と PMAX (△) では、YS (赤) の降水効率が大きい。気温の変化はどれも約3.5℃であることから、全球気温の変化は海面水温の地理分布にあまり依存しない。

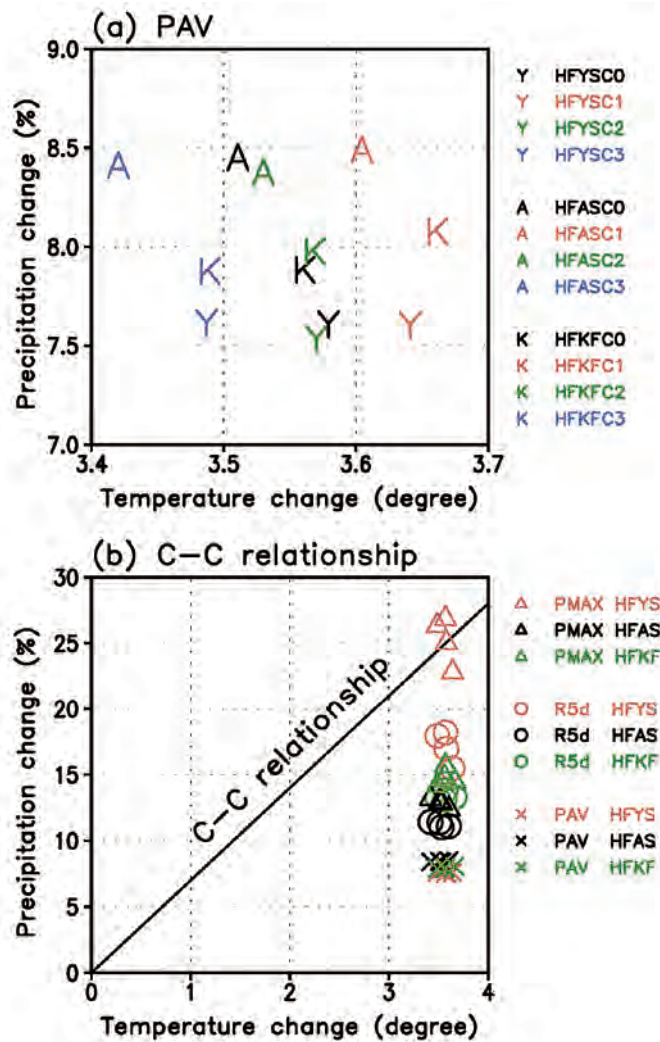


図9 降水量変化率(%)の地上気温変化(K)依存性。全球平均。実験設定は図2と同じ。(a) PAVEの積雲対流依存性(Y:YS, A:AS, K:KF)と海面水温依存性(黒:C0、赤:C1、緑:C2、青:C3, Mizuta et al. 2014: Fig. 2)。(b) 降水変化率の降水指標依存性と積雲対流依存性。×:PAVE, ○:R5d, △:PMAX。赤:YS、黒:AS、緑:KF。斜線は熱力学理論から期待される値7.5 %/K。4つの同じマークがあるのは、海面水温の違いである。×印の部分拡大したものが(a)に相当するが、色と記号が異なる。Kusunoki (2017b)のFig. 11から引用。

1.4. 極端降水量変化の要因分析

温暖化した気候の下では、1年に一度、10年に一度といった降水量の極端値が増大すると予測されている。これはClausius-Clapeyron (C-C)の式に従って気温が1℃上昇するごとに大気中の飽和水蒸気量が約7.5%増加することと関連すると考えられているが、気候モデルが予測する降水量極端値の増加率は場所により7.5%/℃とは一致しない(e.g. O’Gorman and Schneider 2009)。図10は地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF; Mizuta et al. 2017)において、過去実験における10年に一度の日降水量の分布(左)と4℃上昇実験での過去実験からの変化(右)を表したものである。ほとんどの地域で増加が見られるが、熱帯の海洋上でとくに増加が大きい。一方図11(左上)は北半球夏季の地上平均気温変化を表すが、この気温変化からC-Cの式によって算出される飽和水蒸気量の増加率(右上)は、図10(右)と一

致しない。とくに熱帯の海洋上において飽和水蒸気量の増加は20から40%程度だが、極端降水量は40%以上増加している領域が広く見られ、100%以上増加している領域も見られる。図11（下）は北半球夏季の地上平均水蒸気量の増加量と増加率を表す。水蒸気量は図10（右）の極端降水変化量よりも図11（右上）に近い変化を示していることから、地上の水蒸気量と極端降水の関係が温暖化時に変化していると考えられる。

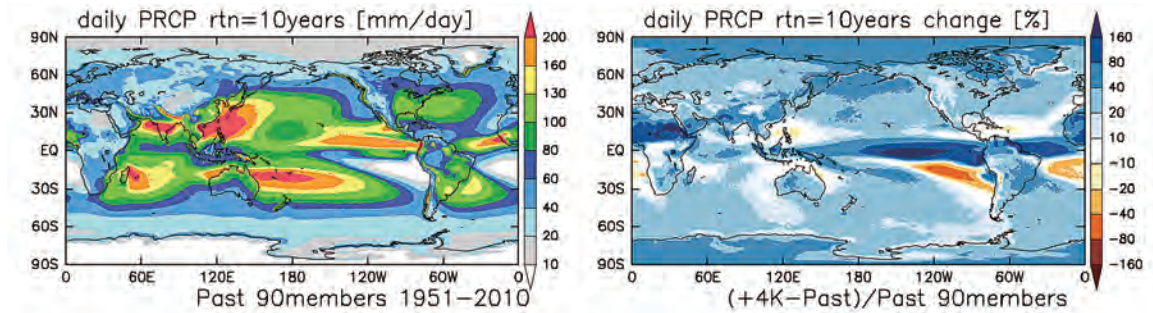


図10 10年に一度の日降水量の分布で、（左）過去実験の結果と（右）4℃上昇実験での過去実験からの変化率 [%]。

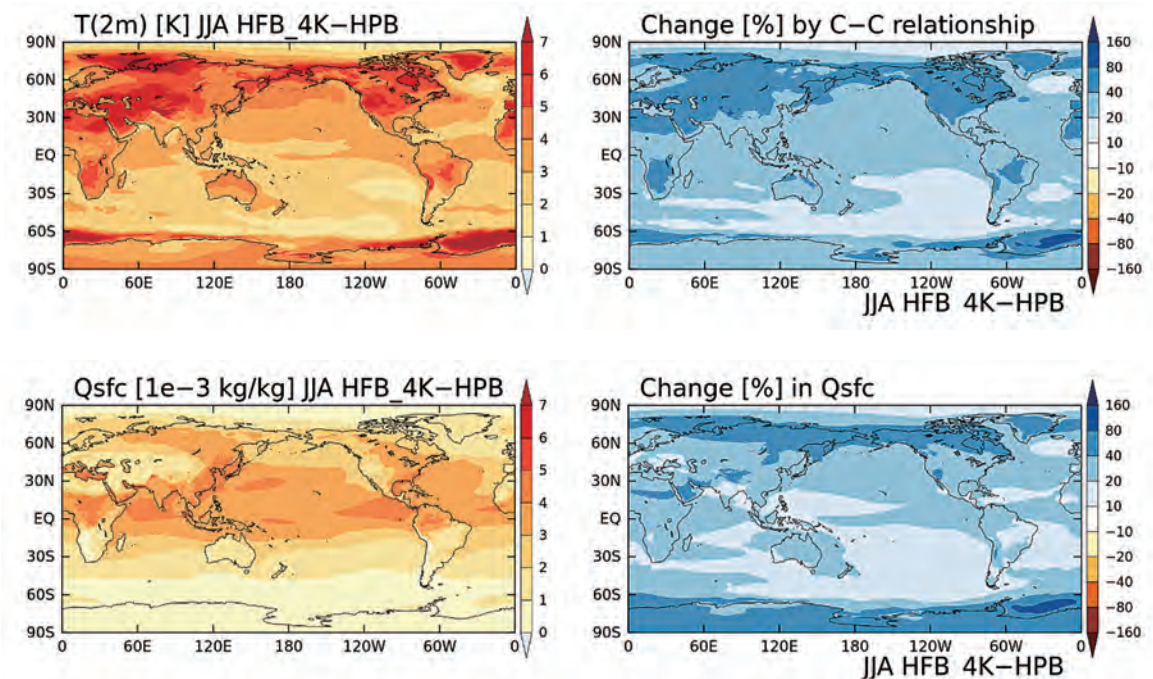


図11 （左上）6-8月平均地上気温の、過去実験から4℃上昇実験への変化量 [℃]。（右上）平均地上気温上昇幅から算出した飽和水蒸気量変化率 [%]。（左下）6-8月平均地上比湿の、過去実験から4℃上昇実験への変化量 [g/kg]。（右下）同じものを変化率 [%] で表したもの。

このような極端降水と水蒸気量など各種物理量との関係、及びそれぞれの増加の間の関連性を調べるため、各格子点で、年最大日降水量（R1d）を示す日における他の物理量（気温、水蒸気量、etc.）のコンポジットを作成した。d4PDFの過去実験・4℃上昇実験それぞれ30メンバー分の結果を使用した。1.25度、6時間のデータしかない量については（内挿せず）1.25度データを1日4回平均したものを使用した。10年に一度、100年に一度の日降水量についても同様のコンポジットを作成し、再現期間による違いも調べた。

図12は180°E, 0°Nの地点において、温位・相当温位・飽和相当温位のコンポジットをとったものである。矢印は飽和相当温位が925hPaの相当温位に一致する高度を示しており、下側は自由対流高度（LFC）、上側は中立浮力高度（LNB）に対応する。過去実験での結果（青線）と4℃上昇実験での結果（赤線）を比較すると、LFCは目立った変化が見られない一方で、LNBは顕

著に上昇していることがわかる。温暖化により上層ほど気温の上昇が大きいので、これは LNB を低下させる効果があるが、一方で水蒸気量は下層ほど多いので下層の相当温位が増加し LNB を上昇させる効果がある。図13は LFC と LNB の変化量を全球分布で見たものである。LFC の変化は小さく、目立った特徴が見られない。LNB も気候値の変化は海洋大陸からインド洋にかけての一部で増加が見られるのみであるが、極端降水日でコンポジットした場合にはとくに熱帯の海洋上で大きく増加している様子が見られる。このパターンは極端降水の変化パターン（図10右）と似ており、両者の対応関係について今後調べる必要がある。

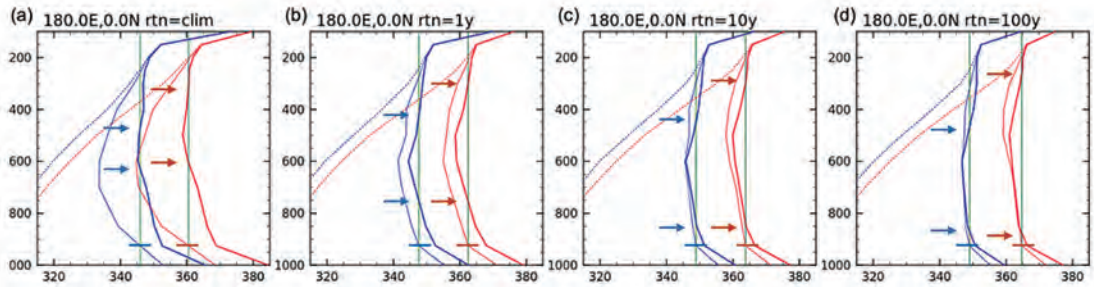


図12 180°E, 0°N の地点における温位（点線）・相当温位（細線）・飽和相当温位（太線）の鉛直プロファイル。(a) すべての日を平均したもの、(b) 年最大日降水量となった日でコンポジットしたもの、(c, d) 10年に一度、100年に一度の日降水量となった日でコンポジットしたもの。青線は過去実験、赤線は4℃上昇実験の結果を表す。

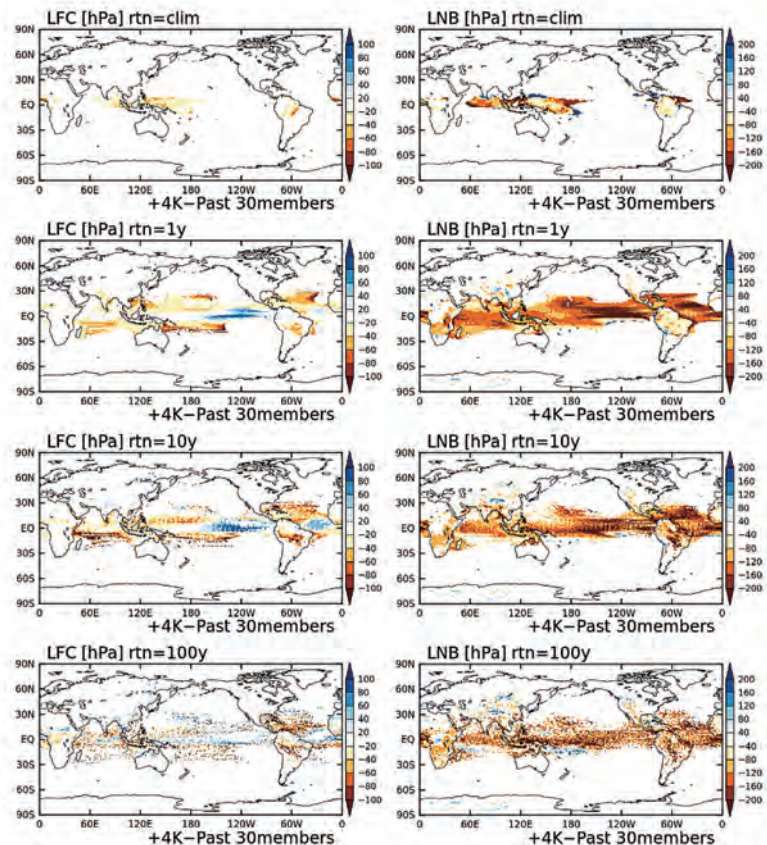


図13 (左) 自由対流高度 (LFC) (右) 中立浮力高度 (LNB) の、過去実験から4℃上昇実験への変化。上段から、すべての日を平均したもの、年最大日降水量となった日でコンポジットしたもの、10年に一度、100年に一度の日降水量となった日でコンポジットしたものを表す。

1.5. 大規模アンサンブルデータ d4PDF を用いた台風の将来変化

地球温暖化が台風（ここでは北西太平洋以外のハリケーン等もまとめて台風と呼ぶ）に与える影響はその潜在的な社会的被害の大きさから科学的・社会的な関心が高い。その一方で、台風のシミュレーションは、モデルによる再現の難しさ、現象の頻度の少なさから適切な評価が難しい。創生プログラムにて作成された地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（database for Policy Decision making for Future climate change; d4PDF）は、現在と将来の気候状態についてこれまでにない多数の高解像度シミュレーションを行うことで、台風のような発生数の少ない極端現象の年変動の傾向や将来的な変化を精度良く求めることができる。本研究はd4PDFを用いて台風の将来変化について評価した。

1.5.1. データと手法

現在及び将来気候のシミュレーションデータは上述の d4PDF を用いた。d4PDF は水平60km 解像度相当の気象研究所全球大気大循環モデル MRI-AGCM3.2H を用いて計算された。現在気候の海面水温は COBE-SST2 を用いて1951-2010年を大気初期値、海面水温摂動を用いて100メンバーのアンサンブルを行っている。将来気候は CMIP5 の 6 つのモデル CCSM4、GFDL-CM3、HadGEM2-AO、MIROC5、MPI-ESM-MR、MRI-CGCM3 の RCP8.5 シナリオ 21 世紀末の海面水温昇温を、長期トレンド除去した COBE-SST2 に与えて60年積分している。各海面水温昇温パターンは全球地表気温が産業革命前から 4 度昇温になるようにスケーリングを行っている。こちらでも大気初期値、海面水温摂動と 6 種の海面水温パターンで90のアンサンブルシミュレーションを行っている。より詳細な実験設定は Mizuta et al. (2017) や d4PDF 紹介 web ページ (<http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/>) を参照のこと。台風のベストトラックデータは Unisys Weather Hurricane/Tropical data を用いた（以下、単に観測と表記）。シミュレーションデータのうち現在気候は1979-2010年、将来気候は60年積分の最後の32年を用いて観測の信頼性が高い時期と対応させている。台風のトラッキングは Murakami et al. (2012) の吉村対流スキーム版の手法・閾値を用いた。MRI-AGCM3.2H は台風の風速強度に関して熱帯における弱バイアスと中高緯度での強バイアスがあり、適切な強度評価をするのが難しい。そのため Sugi et al. (2016) の海盆別、緯度幅 5 度ごとにベストトラックの風速強度と現在気候シミュレーションの風速強度の累積確率分布をフィッティングさせる補正を行い、強度の評価を適切に行えるようにしている。将来気候は現在気候の関係を外挿している。

1.5.2. 台風の発生数と各指標

図14は台風の全球年間発生数の確率分布をプロットしている。平均年発生数は観測が84.2個、現在気候シミュレーションが83.2個とよく一致している。その一方で確率分布の様相は大きく異なり、観測の粗い確率分布に対し全メンバーを使用した現在気候の確率分布は非常に滑らかであり、確率分布推定なしに評価可能なサンプル数を確保できていることがわかる。3メンバーと30メンバーで推定なしで取り得る確率分布の幅と、3メンバーで正規分布を仮定した際の不確実性の幅に着目すると、メンバーの増加で不確実性の幅は明瞭に減少し、典型的なメンバー数の3メンバー程度だと推定なしの30メンバーと同程度か少ない不確実性の幅に相当することが示された。将来気候に関しては、平均55.5個と現在気候の平均から33%程度の減少となった。また将来気候の台風の数が現在気候の平均を超える確率は1%以下で100年に一度もないということも評価できた。

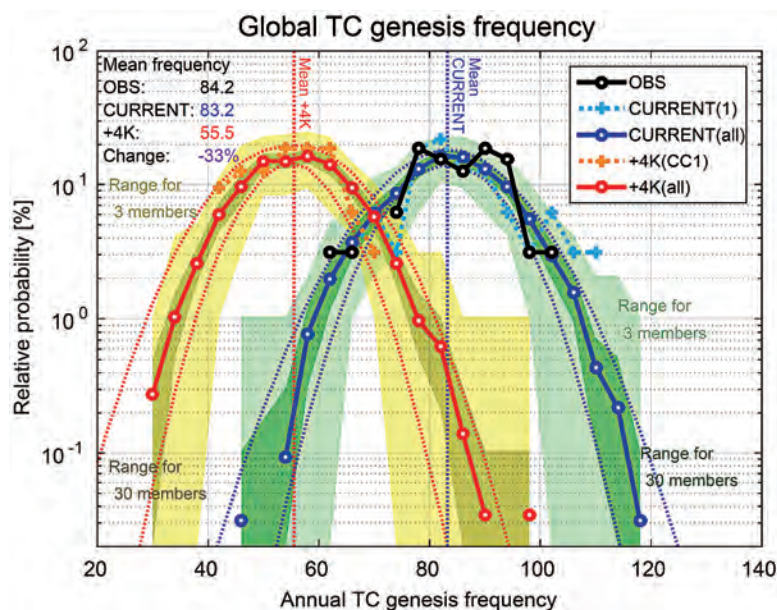


図14 台風の全球年間発生数の確率分布。実線で観測（黒）、1メンバー（薄青）と100メンバー（青）の現在気候シミュレーション、1メンバー（橙）、90メンバー（赤）の将来気候シミュレーションによる確率分布を示す。縦の点線は現在気候と将来気候の平均発生数、陰影はメンバー数を制限した場合の確率分布で95%信頼区間を示す。点線は、正規分布の仮定の下、3メンバーで確率分布を推定した場合の95%信頼区間を示す。信頼区間はブートストラップ法を用いて計算している。Yoshida et al. (2017) より引用。

図15は海域別の台風に関する各指標の将来変化率とその不確実性を示す。ここで評価している指標はIPCC第五次評価報告書ワーキンググループ1（以下、AR5と表記）で評価している指標と同様である。全球の発生数は図14で示した通り33%減少で、猛烈な（Saffir-Simpson hurricane scale 4, 5に相当）台風の数は13%減となる。台風のピーク時の最大地表風速と中心から半径200 kmの平均降水はそれぞれ9%、28%の増加となる。台風の発生数の減少と、強度の強化割合はAR5に比べて大きい傾向にある。モデルの不確実性も考慮する必要があるが、AR5の台風に関して将来シナリオに用いられているのはd4PDFで用いているRCP8.5よりも温暖化が小さいSRES-A1bであることに注意が必要である。Murakami et al. (2012)によるとMRI-AGCM3.2HでSRES-A1bシナリオの将来シミュレーションを行った場合、台風発生数の減少率は24%程度にとどまり温暖化の大きさの影響が大きいのがわかる。また猛烈な台風の数も減少を示しているが、AR5では変わらないか増加する可能性が高いとしている。この結果についても温暖化の大きさの違いが大きく影響していると予想される。個々の台風は強くなるが台風の発生数は大きく減少するため、結果的に猛烈な台風の数も減少している。しかし、全ての台風に占める猛烈な台風の割合は30%程度増加している点に注意が必要である。海域別では台風の発生数の減少が大きいのは北西太平洋（-42%）、南インド洋（-44%）、南太平洋（-40%）である。反対に北東太平洋（-4%）ではほとんど減少しない。猛烈な台風に関しては、全球的には減少するが特に北東太平洋（+88%）での増加が大きい。強度に関しては南太平洋では強化の割合が他の海域より小さい傾向があり、これはKnutson et al. (2015)など先行研究と同様の結果である。海域間の変化率の違いはKnutson et al. (2015)で議論されているように各海域の海面水温の相対的關係が重要で、どのような海面水温パターンを与えるかで将来変化率は大きく異なる。そのため、様々な海面水温を用いて将来予測を行うことが海域別の台風を評価するには必要であることが確認された。その一方で様々な海面水温を与えた状況でもロバストな変化を見せている領域は信頼性が高いと考えられる。

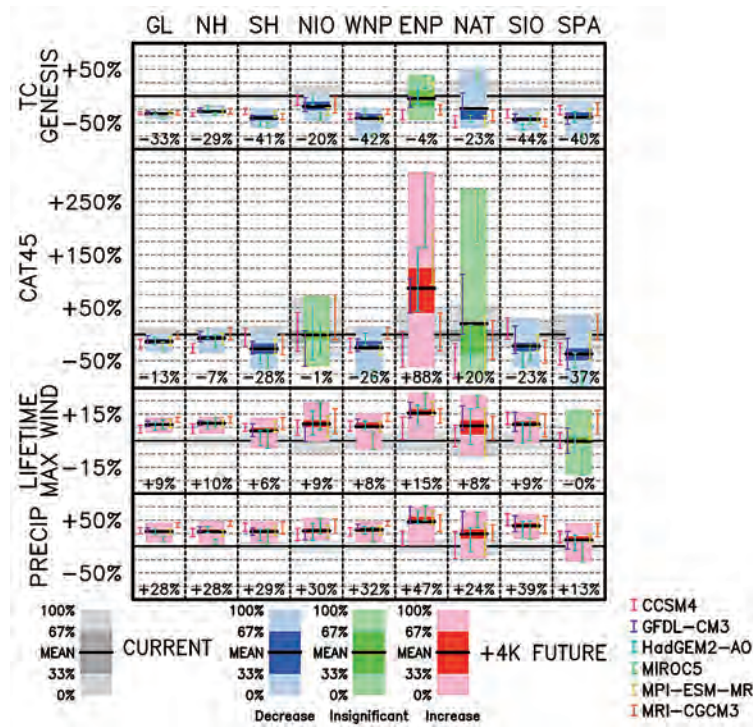


図15 台風に関連する各指標の海域別の将来変化。指標は上から、台風の発生数、猛烈な台風の数、台風ピーク時の最大地表風速、中心半径より200 km 以内の平均降水量。各海域は GL：全球、NH：北半球、SH：南半球、NIO：北インド洋、WNP：北西太平洋、ENP：北東太平洋、NAT：北大西洋、SIO：南インド洋、SPA：南太平洋を示す。エラーバーは使用している海面水温昇温パターンのモデルごとの不確実性の幅 Yoshida et al. (2017) より引用。

1.5.3. 台風の存在頻度分布

図16に全ての強度の台風と猛烈な台風の存在頻度を観測、現在気候、将来変化について示す。現在気候シミュレーションは観測の存在頻度をよく表現し、サンプル数の多さから非常に滑らかな存在頻度分布を示せていることがわかる。猛烈な台風に関しても同様に、こちらはサンプル数の多さに加え、風速強度バイアス補正の効果が大きい。全ての台風の将来変化に関しては、全球的に減少で、特に熱帯北西太平洋を中心とした台風が多い領域での減少が大きい。その一方で北半球亜熱帯以北の中央～東太平洋で広い増加域が見られる。ハワイを中心とした増加は様々な研究で示されており整合的な結果である。猛烈な台風の将来変化は、フィリピン周辺、マダガスカル北端の東海域、オーストラリア北端の東海域で主に減少、日本の南からハワイ付近、メキシコ西海域にかけた幅広い領域で増加を示しているのがわかる。これまでの結果で全球的には猛烈な台風は減少するとの結果を示してきたが、領域別でみると増加する領域があり日本付近がこれに含まれるということで今後も台風の将来変化を注視していく必要がある。

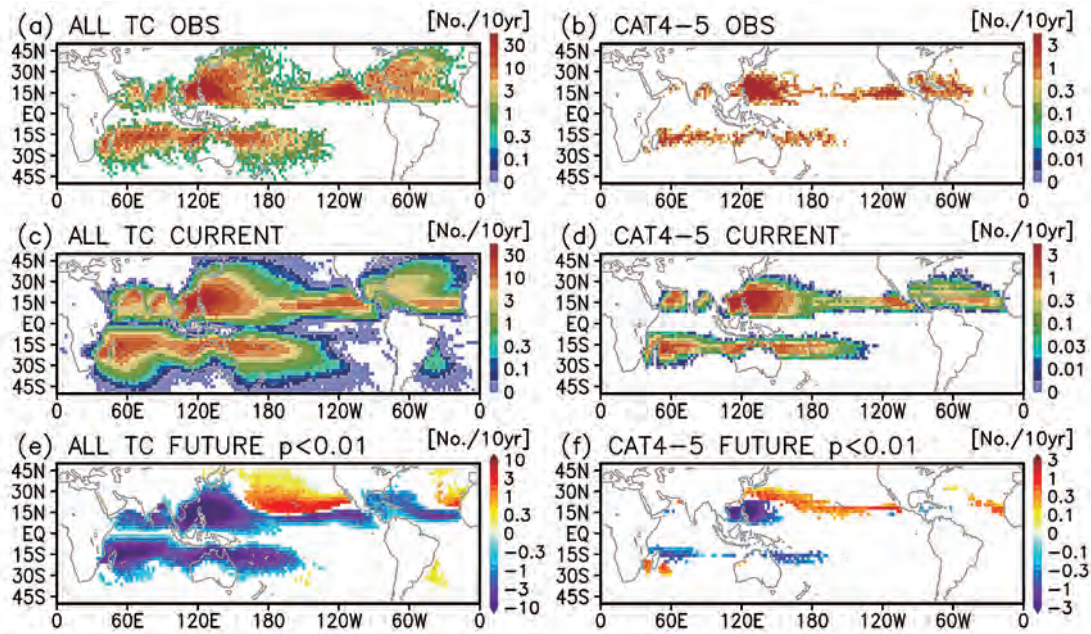


図16 全ての台風（ALL）と猛烈な台風（CAT4-5）の存在頻度で（a, b）観測、（c, d）現在実験（e, f）将来実験と現在実験との差。差に関しては99%有意な領域のみ色で表している。Yoshida et al. (2017) より引用。

図17で背景場の変化を示す。北太平洋の猛烈な台風が増加する領域について着目すると、海面水温は2～3度上昇し、27度を越えている領域に対応している。また上昇流に関しては上昇流偏差になっていて、水平風の鉛直シアも弱まっている。これらは全て台風を強める方向の変化を示しており整合的な変化である。ただし、海面水温が27度に昇温する領域すべてで猛烈な台風が増加している訳ではなく、あくまで Knutson et al. (2015) で示されたような海面水温の相対的關係に伴い関連する循環が台風を強める方向の変化となっていることが重要であると考えられる。

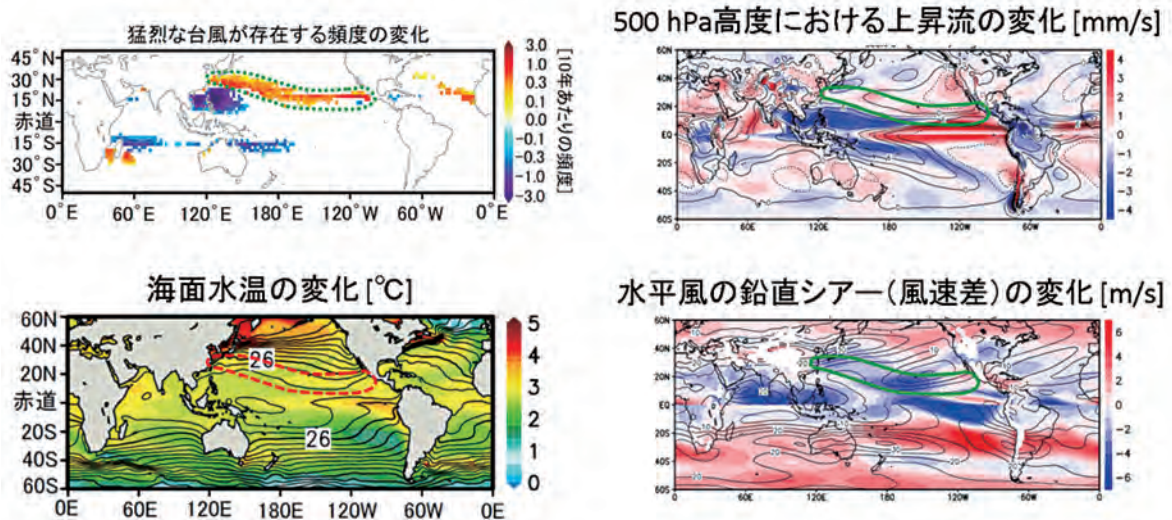


図17 左上は図16fと同様で猛烈な台風の存在頻度の変化。左下は海面水温の変化、右はそれぞれ500 hPaにおける上昇流の変化と水平風の鉛直シア（850 hPaと200 hPaの差）。上昇流と鉛直シアに関してはそれぞれの半球で台風活動が活発な時期（北半球：7-10月、南半球：1-4月）の平均。

1.6. 極端降水量の変化と台風の影響

極端降水の将来変化について、Kitoh and Endo (2016) は、全球20km 格子大気モデルによる RCP8.5シナリオでの将来気候予測実験から、年最大1日間降水量 (Rx1d) が21世紀末には世界のほとんどの地域で増加するが北西太平洋域では変化が小さいか減少する地点もあること、それは台風の存在頻度が将来減少するためであることを示した。

上記実験は現在 (1979~2003年) と将来 (2075~2099年) のタイムスライス実験であるため、途中経過はわからない。そこで全球60km 格子大気モデルによる1872~2099年の長期連続実験の結果を解析した。1872~2005年は観測された海面水温を、2006~2099年は CMIP3モデルの SRES-A1B 実験の海面水温偏差を上乗せしている。初期値の異なる3メンバーのアンサンブル実験である。

60km モデルで再現された現在気候における Rx1d は、TRMM 観測値や20km モデルに比べて若干過小評価だが、特に太平洋域における空間パターンや、台風による Rx1d を比較的良好に再現している。ここで、台風による Rx1d とは、台風中心から500 km 以内の降水と定義した。21世紀末における Rx1d の変化パターンは20km モデルによる結果と整合的であり、北西太平洋域では台風の存在頻度が減少し、台風由来の Rx1d が大きく減少していた。

30年×3ケース=90年の移動窓で、95パーセンタイル値等を計算した。図18にその結果を示す。フィリピン東方海域における台風起源の Rx1d の95パーセンタイル値は、20世紀中は減少傾向に、21世紀中は増加傾向が認められる。20世紀中の減少は台風が減少傾向にあるためであり、21世紀になると台風は引き続いて減少傾向にあるが水蒸気量増加が効いてくると考えられる。この実験結果で Rx1d の95パーセンタイル値が減少から増加に転じるのは2010年代前半であることは興味深い。

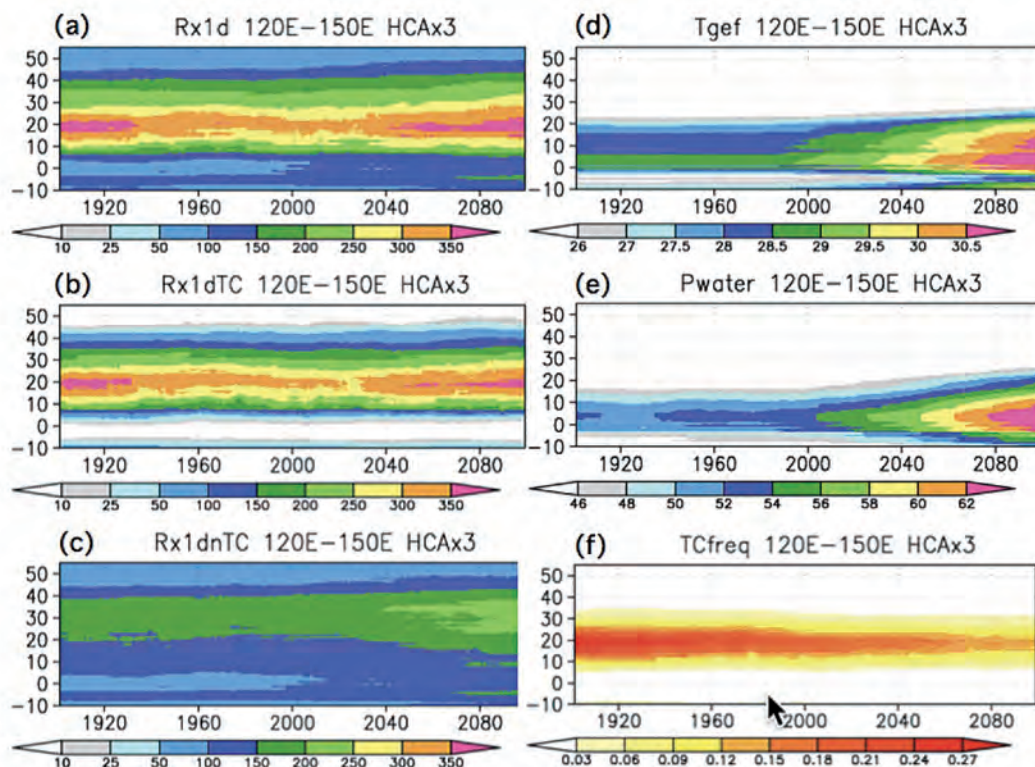


図18 全球60km 格子大気大循環モデルで計算された諸変数の時間・緯度断面図。各年の値は120°E ~ 150°E での30年移動窓かつ3 アンサンブルの90年分のパーセンタイル値または平均値。縦軸は緯度、横軸は30年移動窓終了年。(a) 年最大1日間降水量 (Rx1d) の95パーセンタイル値、(b) 台風起源の Rx1d の95パーセンタイル値、(c) 非台風起源の Rx1d の95パーセンタイル値、(d) 海面水温/地面温度、(e) 可降水量、(f) 台風存在頻度。

1.7. CMIP5マルチモデルとの比較でみる MRI-AGCM3.2H/S による気候変動予測情報の特徴：地域別の降水量と地上気温の季節平均値

気象研究所全球大気モデル MRI-AGCM3.2H と MRI-AGCM3.2S は、水平分解能がそれぞれ 60 km と 20 km の高解像度モデルである。このため、これらモデルで作成した気候データを用いて、地域規模でも気候変動の解明やその影響評価を行うことができる。「気候変動リスク情報創生プログラム」では、これら MRI-AGCM3.2H/S による気候実験が行われ、気候研究のみならず気候変動の影響評価にもすでに広く活用されてきた。また MRI-AGCM3.2H は、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF; Mizuta et al. (2017))」での大規模アンサンブルデータの作成においても使用された。

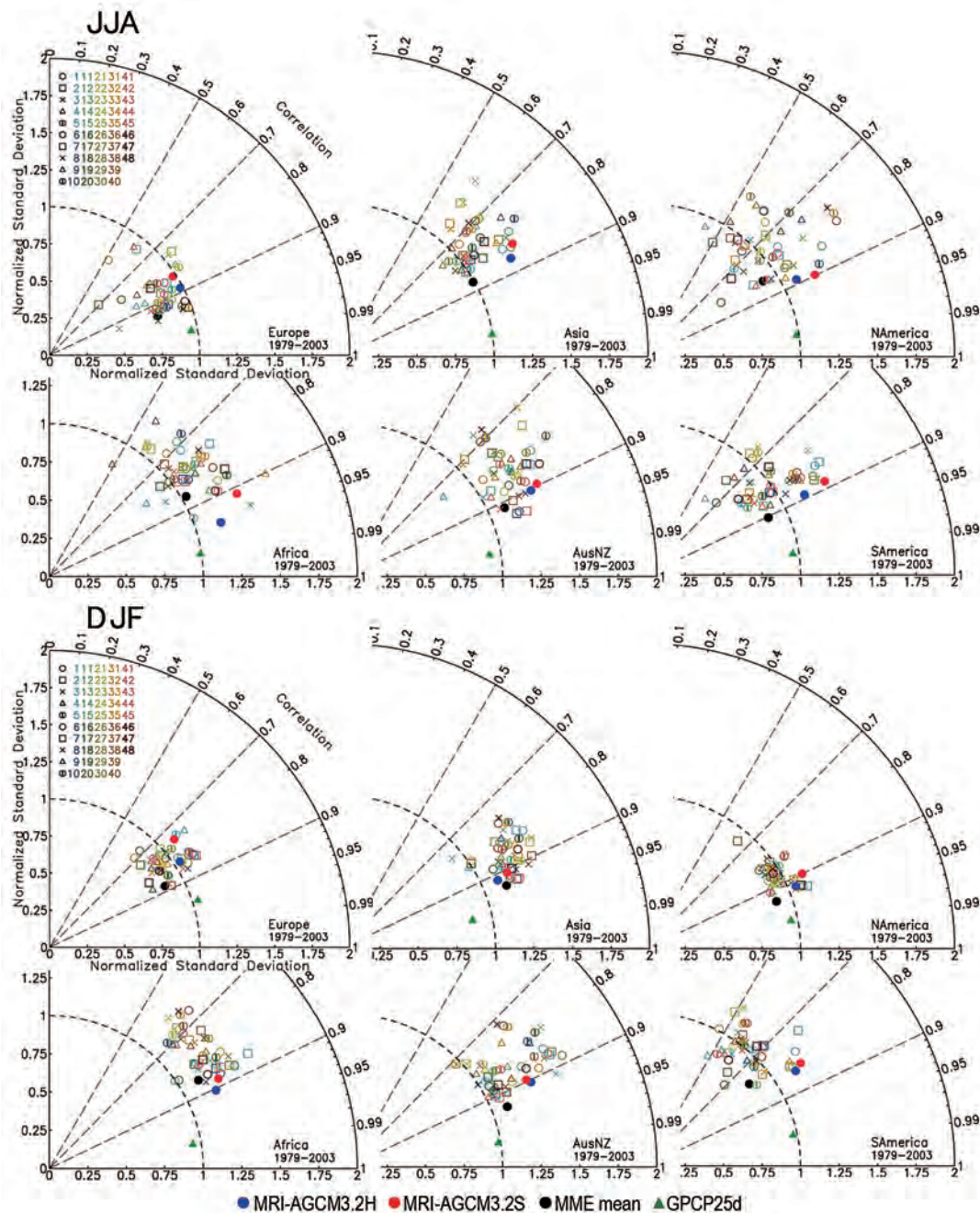


図19 季節別降水量の気候値に関するテララーダイアグラム。参照値は GPCP1dd。CMIP5結合モデルの個々の気候値は、ダイアグラム内の凡例の記号と色で表す。

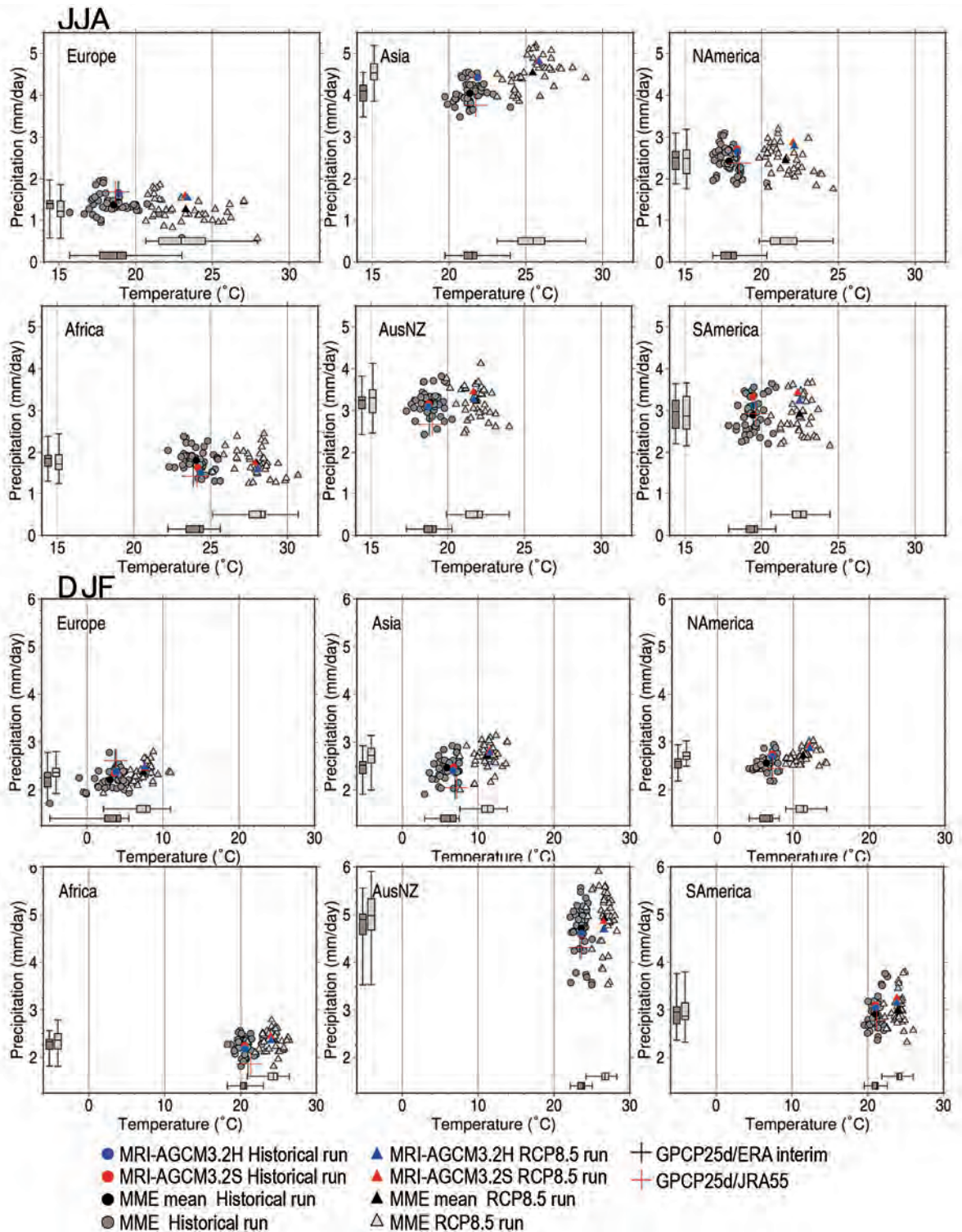


図20 地上気温と降水量の季節別気候値での関係。○は現在気候、△は将来気候。箱ひげ図はCMIP5結合モデルでの気候値を用い、ひげは最小値と最大値、箱は25%ile値、中央値、75%ile値。濃灰は現在気候、薄灰は将来気候に対応。

広く利用されているMRI-AGCM3.2H/Sだが、単一モデルで作成した気候データのみを解析する際には、その気候情報にどのような傾向があるのか、また様々な研究機関が作成する同様の気候情報とどのような関係にあるのかを理解しておく必要がある。そこで本研究では、MRI-AGCM3.2H/Sの気候情報の特徴を明らかにするため、CMIP5に参画する大気海洋結合モデル（以下、CMIP5モデル）との比較を行った。本年度は、季節平均した降水量と地上気温の各気候値

を対象にした解析を行った。

MRI-AGCM3.2H/S と比較するモデルは、CMIP5モデルのうち、現在気候については48モデル、将来気候についてはRCP8.5シナリオで実験された41モデルである。データ期間は、MRI-AGCM3.2H/S で対象とした現在気候では1979～2003年、RCP8.5シナリオ実験の将来気候では2075～2099年のそれぞれ25年分である。なお、MRI-AGCM3.2H/S のRCP8.5シナリオ実験は、CMIP モデルから選ばれた28モデルで行った同シナリオ実験でのSST 平均値を境界条件として与えている。

現在気候の再現性を評価するため、降水量については水平分解能1度であるGPCP1dd ver. 1.2、地上気温についてはJRA-55とERA interimの水平分解能1.25度の再解析データを用いた。GPCP1ddについては、1997年以降で通年データが利用できるため、1997～2014年での平均値を気候値とした。加えて、水平分解能2.5度のGPCP ver.2.2 (GPCP25d) は、分解能が粗いものの、現在気候と同期間での降水量が利用できるため、GPCP25dの25年(1979～2003年)平均値も観測の気候値として用いた。GPCP25dの気候値は、GPCP1ddを用いた空間相関を評価した際には、モデル結果と同じ期間の観測値として示し、また領域平均値を評価する際にはその参照値として用いた。

MRI-AGCM3.2H/Sの高解像度を生かし、気候値の比較は、ヨーロッパ(図19、20内、Europe)、アフリカ(Africa)、アジア(Asia)、オーストラリア(AusNZ)、北米(NAmerica)、南米(SAmerica)の6つの領域に分けて行った。

各領域での空間分布の再現性を図19に示す。アジア、オーストラリア、北南米では、夏季と冬季の両季節において、MRI-AGCM3.2H/SはCMIP5モデルのアンサンブル平均と同等の空間相関を示す。アフリカではアンサンブル平均よりも高い相関を示している。標準偏差については、夏季にはアンサンブル平均よりも大きい、もしくは同等、冬季には小さい、もしくは同等である領域の割合が多い。48のCMIP5モデルで表す標準偏差のばらつきと比べると、MRI-AGCM3.2H/Sでの標準偏差はそのばらつき内の値を示す。よって、MRI-AGCM3.2H/Sの空間分布の再現性について、空間パターンは現実をよく再現し、さらに標準偏差から、冬季ではCMIP5モデルよりも再現性が良いと言える。MRI-AGCM3.2HとMRI-AGCM3.2Sの間では、MRI-AGCM3.2Hで再現性が良いが、これは参照した観測データの解像度が原因と思われる。より細かい解像度の観測データと比較できれば、空間的に詳細な気候場を再現できるMRI-AGCM3.2Sでより高い再現性を示すと予想される。

図20には各領域で平均した降水量と地上気温の季節平均値を現在気候と将来気候について示す。全体としてMRI-AGCM3.2H/Sの降水量及び気温は、CMIP5モデルのばらつき内に分布し、CMIP5モデルと類似した気候情報として季節ごとの気候値を提供できることがわかる。観測と比べると、MRI-AGCM3.2H/Sはヨーロッパでは乾燥、その他の領域では湿潤のバイアスがある。バイアスについての同様の傾向は、夏季の南米を除いてCMIP5モデルのアンサンブル平均でも示された。アンサンブル平均に対してMRI-AGCM3.2H/Sでは、両気候条件・両季節においてヨーロッパと北南米での降水量が多く、南米では同程度の気温を再現しているにもかかわらず、降水を多く算出する傾向が示された。したがって、乾燥のバイアスを示したヨーロッパでは、MRI-AGCM3.2H/Sでそのバイアスが改善し、一方、北南米では湿潤のバイアスがさらに大きくなることもわかる。オーストラリアと冬季のアジア・アフリカでは、アンサンブル平均と同等の結果が得られた。今後は、降水の極端事象に関する指標についても比較を行い、MRI-AGCM3.2H/Sについて、CMIP5モデルの気候情報との関係性や位置付けをより明確にしていく。また、解析指標を増やすだけでなく、対象領域も増やし、全球の陸域を網羅した特徴を示していく計画である。

2. 領域グループの成果

2.1. 雲解像地域気候モデルによる極端な降水量の将来予測

2km 格子の雲解像地域気候モデル (NHRCM02) を用いた21世紀末 (2076年 9 月～2096年 8 月を想定) を対象としたアンサンブル気候実験データから、日本の極端な降水量の将来変化について解析した。NHRCM02の将来気候実験のための境界値は、5km 格子の地域気候モデル (NHRCM05) による実験結果が使われている。よって、NHRCM02の将来気候実験は、NHRCM05のものと同様に、基準実験及び海面水温を変更した三種類の実験の計 4 メンバーで構成されている。また、実験で使用されたシナリオは、代表的濃度経路高位参照シナリオ 8.5 (RCP8.5) と呼ばれているものである。このときの海面水温は、基準実験については CMIP5 で予測されたアンサンブル平均値 (以後 C0 と表記)、他のメンバーについては CMIP5 で予測された海面水温をクラスター解析によって三種類にカテゴリー化したもの (Mizuta et al. 2014) を使用している (以後 C1, C2, C3 と表記)。

極端な降水量については様々な指標があるが、ここでは各地点において以下の手順で得られた量を指標とした。まず、年毎に特定の期間 (年、月) の 1 時間降水量の 99 パーセンタイルを計算する。その上で、20 年間の 99 パーセンタイルを平均し、これを指標とする。以下では、この指標を求める際の対象期間が年、月の場合、それぞれ年間 R99、月間 R99 と表示する。解析の際には、特徴的な気候を考慮し、日本全国を七つの地域に分割する (図21)。ここで、記号の意味は、北日本 (N)、東日本 (E)、西日本 (W)、日本海側 (J)、太平洋側 (P) である。

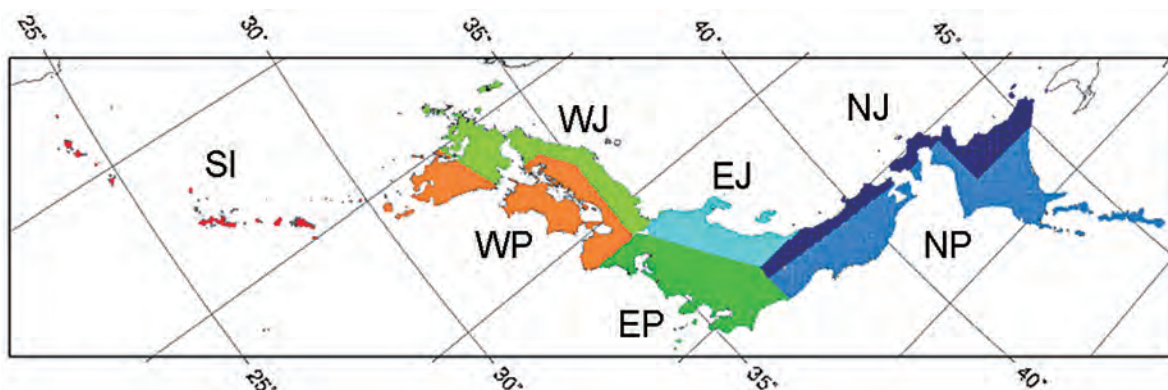


図21 分割された 7 地域：北日本日本海側 (NJ)、北日本太平洋側 (NP)、東日本日本海側 (EJ)、東日本太平洋側 (EP)、西日本日本海側 (WJ)、西日本太平洋側 (WP)、南西諸島地域 (SI)。

図22a に各地域において領域平均した年間 R99 の変化率を示す。これによると、NJ、NP、EJ 地域において、年間 R99 の増加率が高く、かつ過半数のメンバーで統計的に有意な変化を示している。一方、他の地域ではメンバー間のばらつきが大きく、統計的に有意な変化率を示すメンバーが少ない。定量的な評価が若干難しい状況であるが、年間 R99 はあまり変化しないものと考えられる。このことは、年間 R99 を日本全国で平均した場合 (図中に "AL" で表示) でも同様である。

増加傾向を示す NJ、NP、EJ 地域のうち、NJ 地域では増加率が特に高く、全てのメンバーの増加率が 15% を超えている。この増加は全てのメンバーにおいて統計的に有意である。このことから、NJ 地域の年間 R99 の増加が他の地域と比べて確度が高いものと考えられる。そこで、NJ 地域の極端降水量の将来変化について、更に詳しく調べていくことにする。

図22b に NJ 地域において領域平均した月間 R99 の変化率を示す。これによると、過半数のメンバーが統計的に有意な増加率を示す月が多いことがわかる。絶対値で比較すると夏季、特に 7 月の増加率が高い。加えて、7 月では全てのメンバーが統計的に有意な変化を示している。そこで、以下では 7 月の NJ 地域における極端降水量の将来変化に焦点を絞って解析を進めていくことにする。

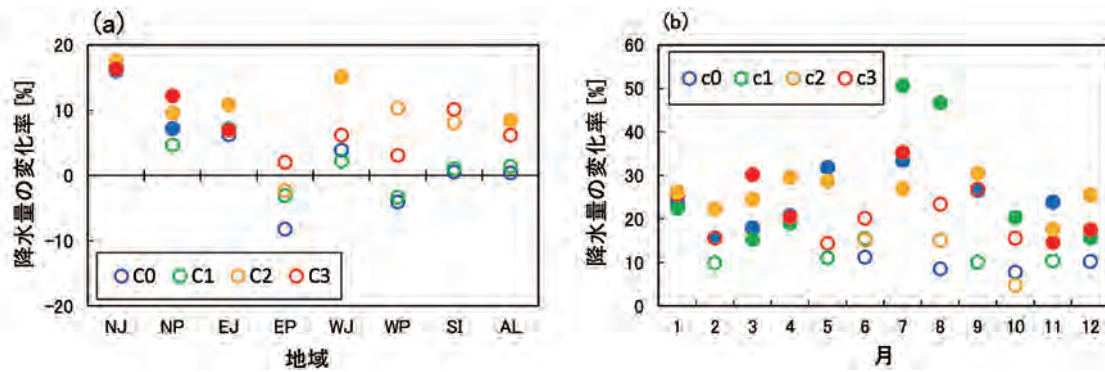


図22 (a) 各地域において領域平均した年間 R99 の変化率と、(b) NJ 地域において領域平均した月間 R99 の変化率。変化率 [%] は、 $100 \times (\text{将来} / \text{現在} - 1)$ で定義し、変化が統計的に有意 (5 % レベル) な場合にはプロットした丸を塗りつぶしてある。C0～C3 はメンバーを表す (詳しくは本文参照)。(a) の “AL” は全国平均を示す。

7 月の NJ 地域において、どの辺りの地点で極端な降水量の変化率が高いのか興味のあるところである。それを示したのが図23で、各地点 (アメダス地点に距離的に最も近い格子点) における 7 月の R99 の変化率を示す。ただし、不確実性を考慮し、全てのメンバーの変化率の符号が一致した地点のみ表示している。図23によると、東北地方よりは北海道で値の大きい地域が散見される (図中の赤くプロットされた地域)。NJ 地域 (日本海側) ということを考慮すると、札幌周辺と北海道北西部 (留萌近辺) での 7 月の月間 R99 の増加率が高い。このうち、まず北海道北西部における極端な降水量の増加メカニズムについて調べた。基本的には、西風の強化が主要因である。結果の詳細については、Murata et al. (2017) を参照されたい。

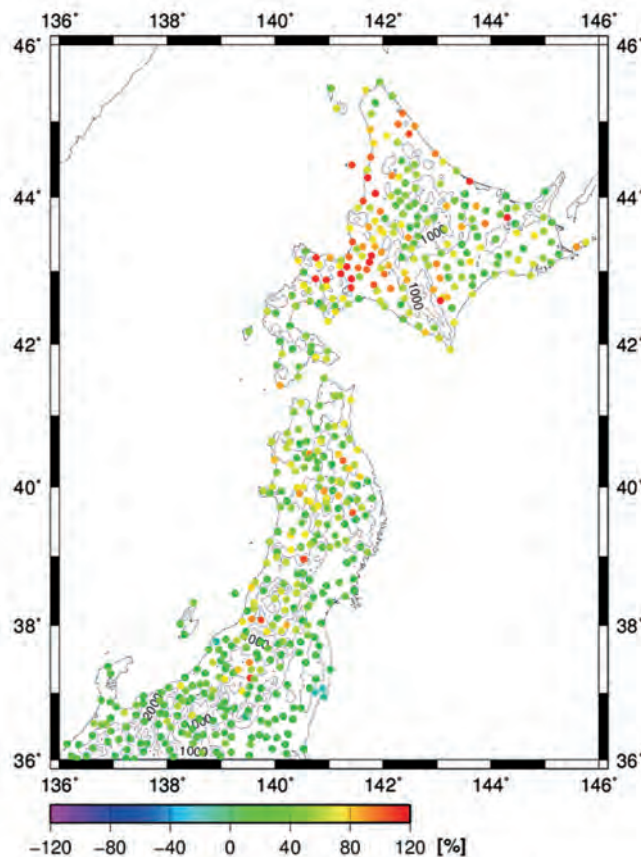


図23 NJ 地域を含む北日本における 7 月月間 R99 の変化率 [%]。四つのメンバーの変化率の符号が一致した地点のみ表示。

2.2. 中部山岳の積雪の解像度依存性～ NHRCM02と NHRCM05の比較～

統合プログラムテーマ C では、MRI-AGCM20の結果を基に5km 格子間隔及び2km 格子間隔の NHRCM を用いたダウンスケーリングを実施している (NHRCM02、NHRCM05)。NHRCM02 は積雲対流パラメタリゼーションを用いずに雲微物理過程のみで降水を計算するため、NHRCM05に比べて 1 時間強雨等の再現性が良くなることが報告されている (Murata et al. 2016)。また、NHRCM02は日本の複雑地形を解像できるようになり、やまじ風などの地域特有の気象を再現できることが、統合プログラムの前身の気候変動リスク情報創生プログラムの中で行われた研究で分かってきた。

一方、日本の中部山岳域の降雪・積雪に関しては、山岳域の観測データが少ないために、これまで NHRCM02あるいは NHRCM05の再現性を評価することができなかった。そこで今回、立山室堂平で観測された2000年以降の観測と、気象庁55年長期再解析 (JRA-55) を境界値とした NHRCM05と NHRCM02の結果を比較し、中部山岳における積雪の解像度依存性を調査した。統合プログラムにおける NHRCM の力学ダウンスケーリングは、境界値に MRI-AGCM を用いて行っているが、ここでは過去の観測と直接比較できるように再解析データを境界値に用いた。Kawase et al. (2018) は、この計算で得られた NHRCM02の結果を用いて、2015/16冬季に北アルプスで観測された少雪の特徴及びその要因を明らかにしている。なお、モデルの再現性を検証するために、富山大学をはじめとする立山積雪研究会が毎年 4 月に立山室堂平 (標高2,450m) で実施している積雪調査のデータを使わせていただいた (青木・渡辺、2009)。また、科研費若手 B の支援を受けて2014/15冬季に立山黒部アルペンルート沿いで実施した積雪観測のデータもモデルの検証に使用した。

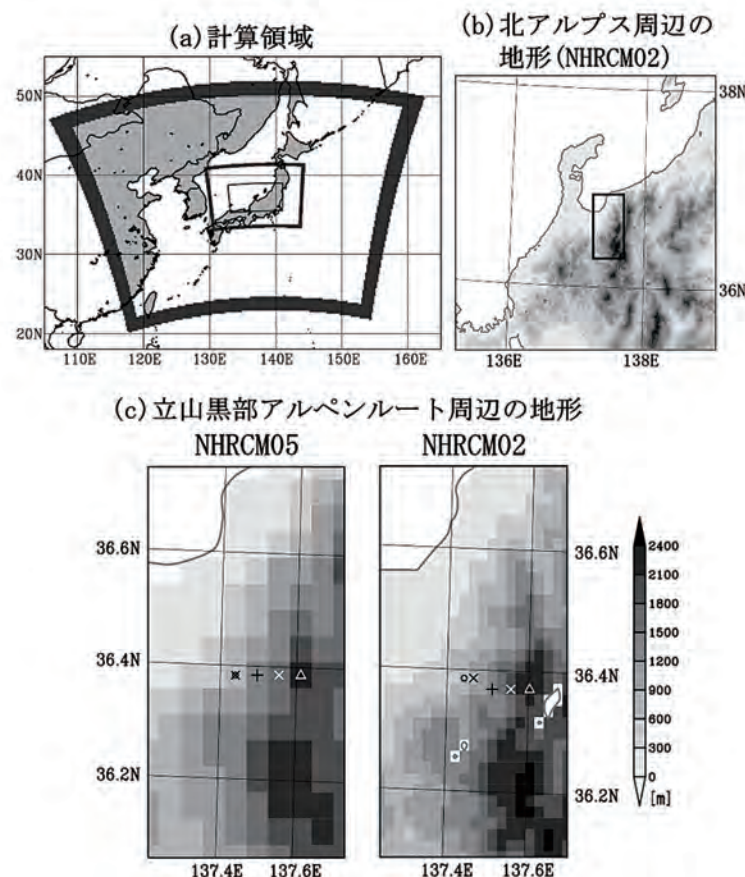


図24 (a) モデルの計算領域。計算領域は外側から20km、5km、2km の格子間隔。(b) 北アルプス周辺の NHRCM02の地形。(c) NHRCM02と NHRCM05の立山黒部アルペンルート周辺の地形。NHRCM02は (b) の黒枠に対応。白△印は室堂平、白×は弥陀ヶ原、黒+印は大観台、黒×印は美女平、○印は博物館の最寄り格子を示す。

図24に計算領域及び解析対象領域の地形を示す。NHRCM02は NHRCM05に比べ立山黒部アルペンルート付近の地形を詳細に解像している様子がわかる。図25に室堂平において観測された積雪深とモデルで再現された積雪深の年々変動を示す。室堂平では NHRCM02と NHRCM05ともに、観測された積雪深の年々変動をよく再現していた。ただし、NHRCM はやや積雪深を過大評価する傾向が見られた。

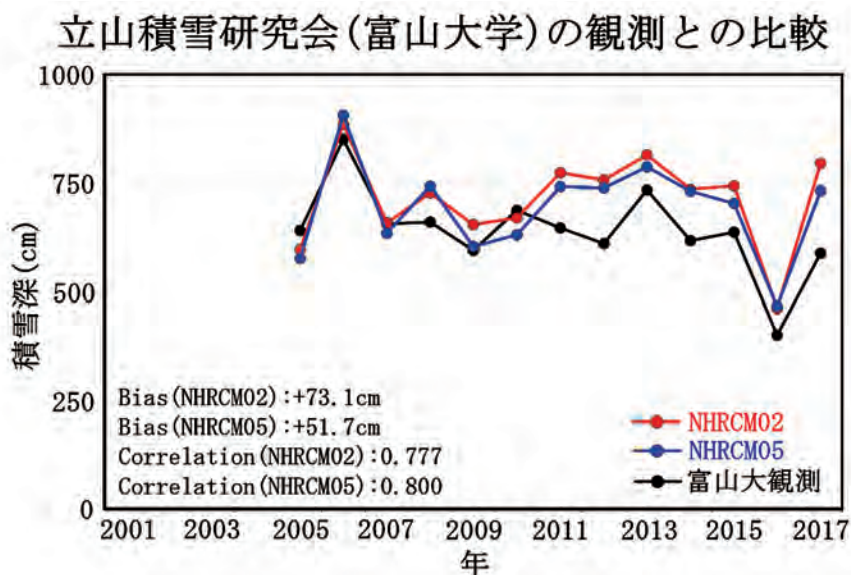


図25 室堂平において4月中旬に立山積雪研究会により観測された積雪深と同日に NHRCM05と NHRCM02によって再現された積雪深の年々変動。データの品質管理が終了した2005年以降を示す。

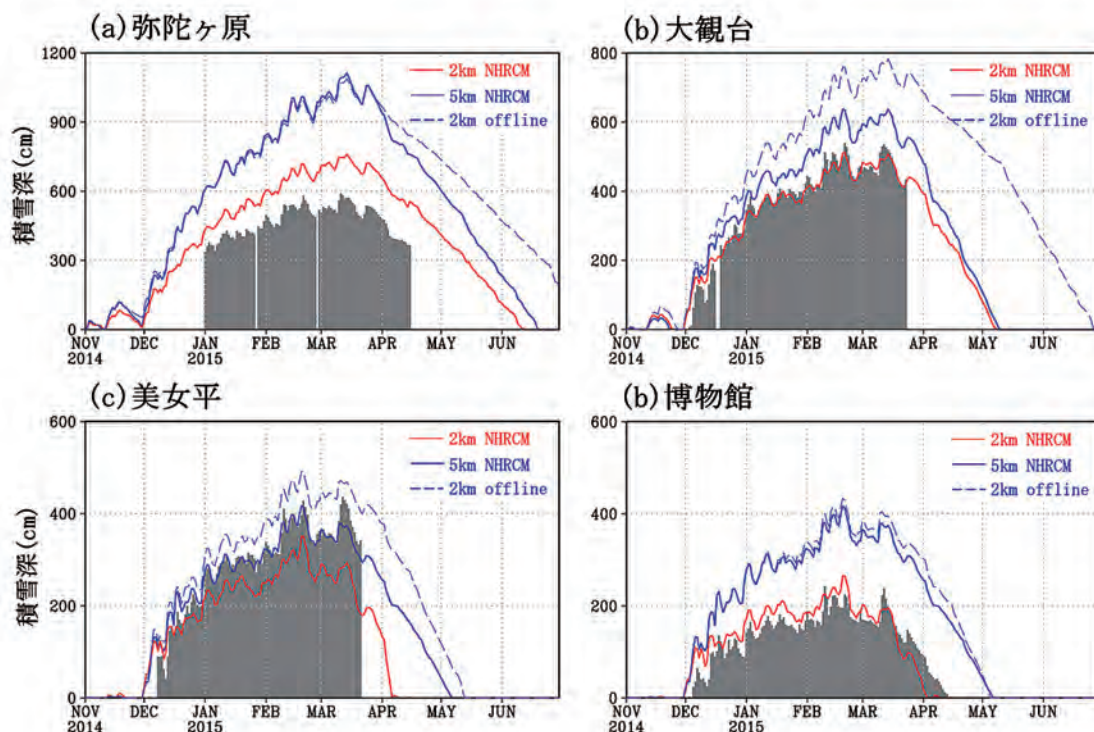


図26 2014/15にタイムラプスカメラによって観測された積雪深とモデルで再現された積雪深の比較。灰色棒グラフは観測、青実線が NHRCM05と赤実線が NHRCM02の結果。青破線は NHRCM05の気象場と2kmの地形を与えたオフライン SiBの結果。

次に、2014/15冬季にタイムラプスカメラを用いて観測した日最大積雪深と、気象モデルが再現した日最大積雪深を比較した（図26）。弥陀ヶ原（標高約2,000m）では、NHRCM05とNHRCM02のいずれも積雪深を過大評価していたが、NHRCM05の過大評価が特に顕著であった。NHRCM05は3月に1,000cmを超える積雪深が計算されており、観測された積雪深を大幅に上回った。この値は室堂平の積雪よりも多い（図25）。大観台（標高約1,500m）においては、NHRCM05はピーク時に150cm程度の過大評価がみられたが、NHRCM02は観測された積雪深及び日々の変動を非常によく再現していた（図26b）。美女平（標高約1,000m）では、NHRCM02よりもNHRCM05が観測値に近く、NHRCM02は積雪深をやや過小評価していた（図26c）。図26dに博物館で観測された積雪深と気象モデルで計算された積雪深を示す。NHRCM05は解像度が粗く、美女平と博物館の最寄り格子は同一となり（図24c）、同じ値を示している。一方、NHRCM02では異なる格子として解像され、博物館における積雪深がよく再現された。ただし、観測に比べて融雪が早い傾向がみられた。

解像度の異なるNHRCM05とNHRCM02とでは観測の最寄り点における標高が異なる。標高が異なると地上気温にも影響するため、積雪の再現性を議論する上では標高の違いを考慮する必要がある。気温に関しては、平均的な大気気温減率を用いて標高補正を行うが、積雪は降雪や融雪などを考慮する必要があるため、気温のように簡単に補正することができない。そこで、NHRCM05で計算された気温や放射、降水などの気象場をNHRCM02の格子に内挿し、NHRCM02と同じ地形を用いて陸面モデルのみを実行することで積雪の再計算を行った（オフラインSiB）。オフラインSiBの結果を図26の青点線で示す。ここで、青点線と赤実線の標高は同じである。弥陀ヶ原と博物館ではNHRCM05とオフラインSiBにほとんど違いがなかった。一方、大観台と美女平では積雪深が増加したが、NHRCM02との差はさらに拡大した。これらの結果から、NHRCM05とNHRCM02の積雪深の差は、両者の標高差がもたらす気温差だけが原因でないことが示唆される。

NHRCM02とNHRCM05で再現された17年平均年最大積雪深と標高の関係をみると、いずれも標高が高くなるほど積雪が多く、明瞭な標高依存性を示した（図27）。NHRCM05の標高依存性の勾配は、NHRCM02の勾配に比べて大きい（0.277と0.245）、NHRCM05の相関係数はNHRCM02の相関係数よりも小さかった（0.8061と0.9161）。NHRCM05には、標高1,000mから2,000m付近に多量の積雪が計算されている格子があり、これが標高依存性の勾配を大きくしたとみられる。これらの格子は図26の弥陀ヶ原や大観台と対応する。つまり、積雪の標高依存性が気象モデルの水平解像度に影響されることを示唆している。

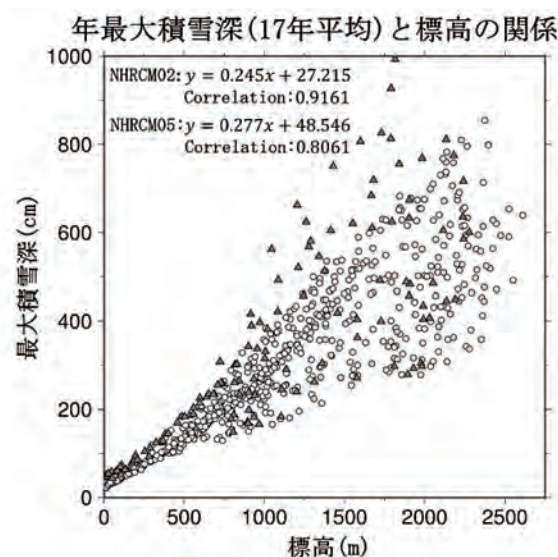


図27 NHRCM02とNHRCM05で計算された北アルプス周辺（図24c）の年最大積雪深と標高の関係。白丸がNHRCM02、灰色三角がNHRCM05の結果。

今回の結果から、標高2,450mの室堂平ではNHRCM02とNHRCM05の差は小さく、いずれも過去の積雪の年々変動をよく再現したが、NHRCM05は大観台から弥陀ヶ原あたりの標高帯（標高1,000m～2,000m）で積雪を過大評価することが分かった。これはNHRCM05が日本海上の対流性の降水を再現することができず、北アルプスの日本海側斜面に過大な降水（降雪）をもたらすことが原因と考えられる。解像度の違いは積雪の標高依存性にも影響を及ぼすため、北アルプスの積雪を精度よく再現するためにはNHRCM02のような雲解像度モデルが必要となる。

2.3. d4PDFの非温暖化実験と過去実験の追加ダウンスケーリング

地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）（Mizuta et al. 2017）は、地球温暖化の影響を評価し、適応策の策定に資するデータベースとして、文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムによって作成された。データベースは2015年末に公開され、過去の顕著気象現象の解析や、将来の気候変化予測、影響評価研究に用いられている（例えば、Kawase et al. 2016, Endo et al. 2017）。d4PDFは過去気候再現実験と産業革命以前から全球平均気温が4度上昇した将来を想定した将来気候予測実験、産業革命以前の気候を想定した非温暖化実験の3つの実験で構成されている。これらの実験は、世界全体を対象とする格子間隔約60kmの大気大循環モデル（MRI-AGCM60）と、日本周辺を詳細に計算する20kmの非静力学地域気候モデル（NHRCM20）を用いて実施された。なお、文部科学省気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）では、同様のモデルを用いて産業革命以前から2度上昇を想定した将来を想定した予測実験が行われている。d4PDFでは極端現象を再現・予測するために、大規模なアンサンブル実験が行われた。MRI-AGCM60のアンサンブル数は、過去実験と非温暖化実験がそれぞれ100メンバー（1メンバーは61年積分、計6100年）、4度上昇実験が90メンバー（1メンバー61年、計5490年）となっている。大気モデル及び実験設定の詳細はWEBページ（<http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/>）もしくは、Mizuta et al. (2017) を参照されたい。

d4PDFの非温暖化実験と過去実験を用いると、近年発生した高温や豪雨、豪雪などの極端現象が、地球温暖化の影響をどの程度受けたかを調査することが可能となる（Shiogama et al. 2016）。そのため、非温暖化実験を活用すれば、例えば2017年7月に発生した九州北部豪雨のような豪雨に地球温暖化の寄与があったのかどうかを調べることができる。一方、計算機資源の問題で、NHRCM20を用いた非温暖化実験は実施されておらず、過去実験のアンサンブルメンバー数も全球を対象とした実験のメンバー数の半分（50メンバー）となっている。しかし、日本で発生する豪雨は日本の複雑地形の影響を受けるため、豪雨を正確に評価するためにはできる限り高解像度かつ多量のアンサンブル計算を行う必要がある。そこで、統合プログラムテーマCでは、d4PDFのデータセットを拡張することを目的として、NHRCM20を用いた非温暖化実験100メンバーのダウンスケーリング及び過去実験50メンバーの追加ダウンスケーリングを実施した。一方、d4PDFは2011年までを対象としており、2012年以降の極端現象への影響は評価できなかった。統合プログラムでは、テーマAとテーマCが連携し、過去実験及び非温暖化実験を2012年以降に延長する実験も実施している。今年度は2010年までの非温暖化実験100メンバーと過去追加実験50メンバーの計算が終了した。ここではこれらの実験を用いた日本の豪雨に関する初期解析の結果を報告する。

図28に研究対象領域と領域内における豪雨日数（ここでは日降水量100ミリ以上の日数）の年々変動を示す。過去実験、非温暖化実験ともにメンバー間で年々変動は大きくばらついているのがわかる。一方、アンサンブル平均した過去実験と非温暖化実験の年々変動を比較すると、かなりよく似た変動を示しており、両者の相関が高いことがわかる。これは、過去実験と非温暖化実験の下部境界値に用いた海面水温（SST）分布と海水分布が、九州西部及び九州東部の豪雨頻度の年々変動を強制していることを意味している。ただ、九州西部と北部では、年々変動が異なっており、強制するSSTの特徴及びそれに伴う大気場の特徴が異なることが示唆される。過去実験と非温暖化実験のアンサンブル平均した豪雨頻度を比較すると、九州西部では非温暖化実験に比べて過去実験のほうが日数の多い年が多く見られた。ただ必ずしも増えているわけではなく、あ

まり変化のない年もあった。九州東部は西部に比べて両者の差が顕著ではなかった。

図29に東海、関東、北陸の豪雨頻度の年々変動を示す。北陸地方では過去実験と非温暖化実験いずれも個々のメンバーの年々変動は大きいですが、アンサンブル平均値の年々変動がかなり小さくなった。また、過去実験は非温暖化実験に比べ、ほぼすべての年で豪雨日数の増加が見られた。北陸地方の豪雨に関しては、SST による強制が小さく、気温上昇による熱力学的効果により豪雨日数が増加した可能性がある。東海や関東では、九州東部や西部同様に、過去実験と非温暖化実験で比較的似た年々変動を示した。ただし、地域間では年々変動が大きく異なっており、それぞれの地域の豪雨発生に影響を与える SST 強制やそれに伴う大気場が異なることを示唆している。

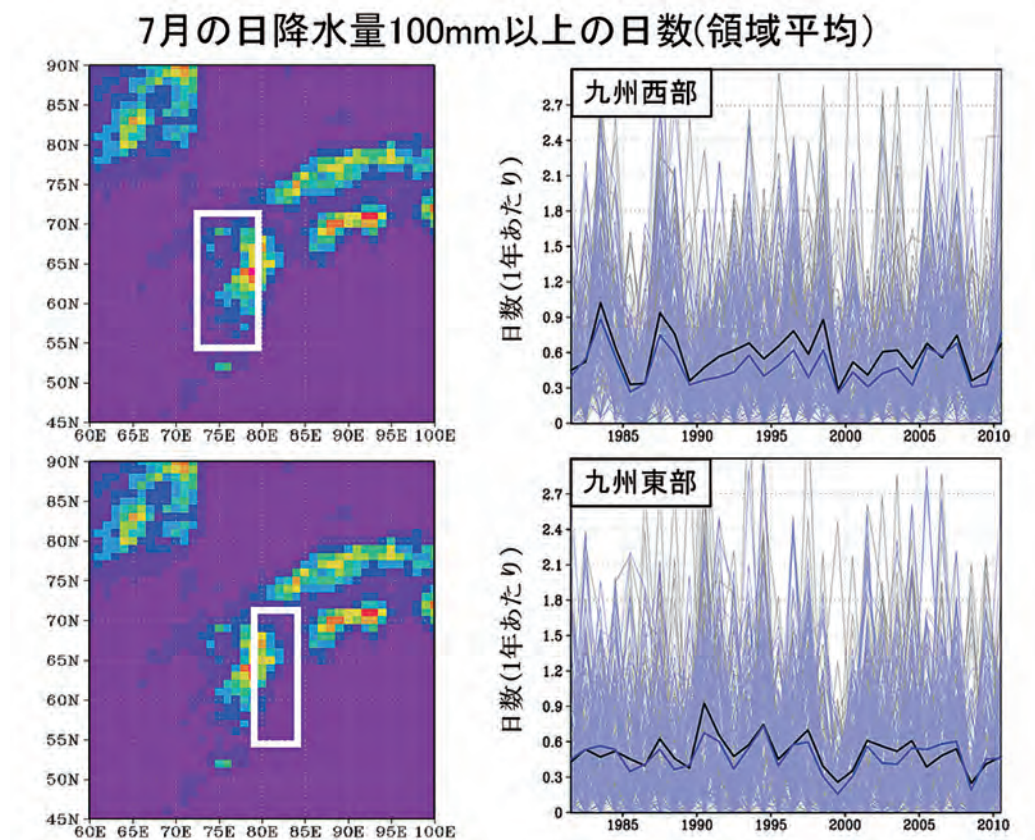


図28 (左) NHRCM20km の地形と解析対象領域。白線で囲まれた領域が本研究の解析対象領域。(右) 白枠内のグリッドにおいて日降水量が100mm を超えた日数。1 年あたり 1 グリッドあたりの数に規格化している。薄い灰色と青色が過去実験及び非温暖化実験の全100メンバー。太線はアンサンブル平均した過去実験 (黒太線) と非温暖化実験 (青太線)。

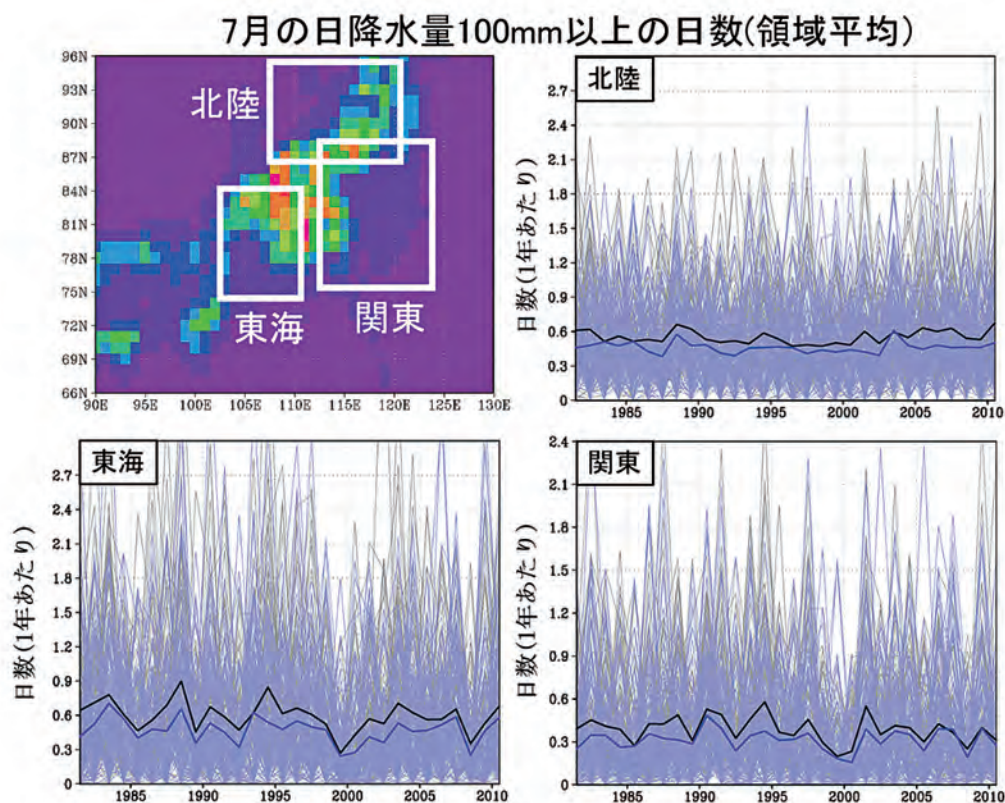


図29 図28と同様。ただし、北陸、東海、関東地方の豪雨日数の年々変動。

この解析で得られた情報を統合プログラムのテーマAに提供し、テーマAの中でMRI-AGCMの大気循環場の解析を行っている。九州西部と東部の豪雨の発生に影響を及ぼす海面水温のパターン及び循環場に関しては、本年度の統合プログラムテーマAの成果報告書に記載されているのでそちらを参照していただきたい。

2.4. 汎用気候シナリオプロダクトラン

上記にまとめた顕著現象変化メカニズム解明の研究の基盤情報として、気象研究所温暖化予測システムを用いて、全球20km、日本領域5km、2kmの汎用気候シナリオプロダクトランを実施した。現在気候ランは完了し、RCP2.6下の今世紀末気候実験は、全球20km、日本領域5kmランが完了した。全球60km、領域20kmによる、100年以上の連続ランを開始した。このランは、統合プログラムテーマDでの影響評価でも利用されるため、テーマD参画者と連携を取りながら、実験設定、出力変数調整などを行った。

f. 引用文献

- 青木一真、渡辺幸一、2009: 立山連峰における大気エアロゾル観測、エアロゾル研究、24、112-116.
- Endo, H., A. Kitoh, R. Mizuta, and M. Ishii, 2017: Future changes in precipitation extremes in East Asia and their uncertainty based on large ensemble simulations with a high-resolution AGCM. *SOLA*, **13**, 7-12, doi:10.2151/sola.2017-002.
- O'Gorman, P.A. and T. Schneider, 2009: Scaling of precipitation extremes over a wide range of climates simulated with an idealized GCM, *J. Climate*, **22**, 5676-5685.
- Held, I. M., and B. J. Soden, 2006: Robust responses of the hydrological cycle to global warming, *J. Climate*, **19**, 5686-5699.
- Huffman, G. J., R. F. Adler, D. T. Bolvin, and G. Gu, 2009: Improving the global precipitation record:

- GPCP Version 2.1, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L17808.
- Kain, J. S. and J. M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining/ detraining plume model and its application in convective parameterization, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784–2802, doi:10.1175/1520-0469(1990)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2.
- Kawase, H., A. Yamazaki, H. Iida, K. Aoki, H. Sasaki, A. Murata, and M. Nosaka, 2018: Simulation of extremely small amounts of snow observed at high elevations over the Japanese Northern Alps in the 2015/16 winter, *SOLA*, accepted.
- Kawase, H., A. Murata, R. Mizuta, H. Sasaki, M. Nosaka, and I. Takayabu, 2016: Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations, *Climatic Change*, **139**, doi:10.1007/s10584-016-1781-3.
- Kitoh, A. and H. Endo, 2016: Future changes in rainfall extremes associated with El Niño projected by a global 20-km mesh atmospheric model, *SOLA*, **12A**, 1–6.
- Knutson, T. R. et al., 2015: Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical downscaling of CMIP5/RCP4.5 scenarios, *J. Clim.*, doi:10.1175/JCLI-D-15-0129.1.
- Kusunoki, S., 2017a: Future changes in precipitation over East Asia projected by the global atmospheric model MRI-AGCM3.2, *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-016-3499-3.
- Kusunoki, S., 2017b: Future changes in global precipitation projected by the atmospheric model MRI-AGCM3.2H with a 60-km Size, *Atmosphere*, **8**, 93, doi:10.3390/atmos8050093.
- Kusunoki, S., R. Mizuta and M. Hosaka, 2015: Future changes in precipitation intensity over the Arctic projected by a global atmospheric model with a 60-km grid size, *Polar Science*, **9**, 277–292, doi:10.1016/j.polar.2015.08.001.
- Meinshausen, M., S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J-F. Lamarque, K. Matsumoto, S. A. Montzka, S. C. B. Raper, K. Riahi, A. Thomson, G. J. M. Velders, D.P and P. van Vuuren, 2011: The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300, *Climatic Change*, **109**, 213, doi:10.1007/s10584-011-0156-z.
- Mizuta, R., A. Murata, M. Ishii, H. Shiogama, K. Hibino, N. Mori, O. Arakawa, Y. Imada, K. Yoshida, T. Aoyagi, H. Kawase, M. Mori, Y. Okada, T. Shimura, T. Nagatomo, M. Ikeda, H. Endo, M. Nosaka, M. Arai, C. Takahashi, K. Tanaka, T. Takemi, Y. Tachikawa, K. Temur, Y. Kamae, M. Watanabe, H. Sasaki, A. Kitoh, I. Takayabu, E. Nakakita, and M. Kimoto, 2017: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 1383–1398.
- Mizuta, R., O. Arakawa, T. Ose, S. Kusunoki, H. Endo, and A. Kitoh, 2014: Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes, *SOLA*, **10**, 167–171, doi:10.2151/sola.2014-035.
- 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 20-km grid, *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 233 – 258.
- Murakami, H., Mizuta, R., and Shindo, E., 2012: Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60-km-mesh MRI-AGCM, *Climate Dynamics*, **39**(9–10), 2569–2584, doi:10.1007/s00382-011-1223-x.
- Murata A., H. Sasaki, H. Kawase, and M. Nosaka, 2016: Evaluation of precipitation over an oceanic region of Japan in convection-permitting regional climate model simulations, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-016-3172-x.
- Murata, A., H. Sasaki, H. Kawase, M. Nosaka, T. Aoyagi, M. Oh'izumi, N. Seino, F. Shido, K. Hibino, K. Ishihara, H. Murai, S. Yasui, S. Wakamatsu, and I. Takayabu, 2017: Projection of future climate change over Japan in ensemble simulations using a convection-permitting regional

- climate model with urban canopy, *SOLA*, **13**, 219–223, doi:10.2151/sola.2017-040.
- Ogata, T., R. Mizuta, Y. Adachi, H. Murakami and T. Ose, 2015: Effect of air-sea coupling on the frequency distribution of intense tropical cyclones over the northwestern Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 10, 415–10, 421, doi:10.1002/2015GL066774.
- Randall, D. Aa and D. M. Pan, 1993: Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure. In: The representation of cumulus convection in numerical models, *Meteorological Monographs*, Chap. 11, vol 24 (46), 137–147.
- Shaw, T. A., and A. Voigt, 2015: Tug of war on summertime circulation between radiative forcing and sea surface warming, *Nat. Geosci.*, **8**, 560–566, doi:10.1038/ngeo2449.
- Shiogama, H., Y. Imada, M. Mori, R. Mizuta, D. Stone, K. Yoshida, O. Arakawa, M. Ikeda, C. Takahashi, M. Arai, M. Ishii, M. Watanabe, and M. Kimoto, 2016: Attributing historical changes in probabilities of record-breaking daily temperature and precipitation extreme events, *SOLA*, **12**, 225 – 231.
- Sugi, M., Murakami, H., and Yoshida, K., 2016: Projection of future changes in the frequency of intense tropical cyclones, *Clim. Dyn.*, **49**, 619–632, doi:10.1007/s00382-016-3361-7.
- Vecchi, G. A., and B. J. Soden, 2007: Global warming and the weakening of the tropical circulation, *J. Climate*, **20**, 4316–4340, doi:10.1175/JCLI4258.1.
- Wang, B., Q. Ding, X. Fu, I.-S. Kang, K. Jin, J. Shukla, and F. Doblas-Reyes, 2005: Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L15711, doi:10.1029/2005GL022734.
- Xie, S.-P., C. Deser, G. A. Vecchi, J. Ma, H. Teng, and A. T. Wittenberg, 2010: Global warming pattern formation: Sea surface temperature and rainfall, *J. Clim.*, **23**, 966–986, doi:10.1175/2009jcli3329.1.
- Yoshida, K., Sugi, M., Mizuta, R., Murakami, H., and Ishii, M., 2017: Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 9910–9917, doi:10.1002/2017GL0075058.
- Yoshimura, H., R. Mizuta, and H. Murakami (2015), A spectral cumulus parameterization scheme interpolating between two convective updrafts with semi-Lagrangian calculation of transport by compensatory subsidence, *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 597–621.
- Yukimoto et al., 2012: A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 – Model description and basic performance –, *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 23 – 64.
- g. 成果の発表**
- (1) 原著論文 (発行・印刷済み)
- Ha, K.-J., J.-Y. Lee, B. Wang, S.-P. Xie, and A. Kitoh, 2017: Asian monsoon climate change - Understanding and prediction, *Asia-Pac. J., Atmos. Sci.*, **53**, 2, 179–180, doi:10.1007/s13143-017-0056-x.
- Kawase, H., A. Yamazaki, H. Iida, K. Aoki, W. Shimada, H. Sasaki, A. Murata, and M. Nosaka, 2018: Simulation of extremely small amounts of snow observed at high elevations over the Japanese Northern Alps in the 2015/16 winter, *SOLA*, **14**, 39–45, doi:10.2151/sola.2018-007.
- Kawase, H., T. Sasai, T. Yamazaki, R. Ito, K. Dairaku, S. Sugimoto, H. Sasaki, A. Murata, and M. Nosaka, 2018: Characteristics of synoptic conditions for heavy snowfall in western to northeastern Japan analyzed by the 5-km regional climate ensemble experiments, *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, doi:10.2151/jmsj.2018-022.
- 鬼頭昭雄, 2017: 温暖化気候下における熱中症, 給排水設備研究, **34**, 2, 8–11.
- Kusunoki, S., 2017: Future changes in global precipitation projected by the atmospheric model MRI-AGCM3.2H with a 60-km size, *Atmosphere*, **8**, 5, 93, doi:10.3390/atmos8050093.

- Kusunoki, S., 2018: How will the onset and retreat of rainy season over East Asia change in future? *Atmos. Sci. Lett.*, Accepted.
- Matsueda, M. and H. Endo, 2017: The robustness of future changes in Northern Hemisphere blocking: A large ensemble projection with multiple sea surface temperature patterns, *Geophysical Research Letters*, **44**, 5158–5166, doi:10.1002/2017GL073336.
- Murata, A., H. Sasaki, H. Kawase, M. Nosaka, T. Aoyagi, M. Oh'izumi, N. Seino, F. Shido, K. Hibino, K. Ishihara, H. Murai, S. Yasui, S. Wakamatsu, and I. Takayabu, 2017: Projection of future climate change over Japan in ensemble simulations using a convection-permitting regional climate model with urban canopy, *SOLA*, **13**, 219–223, doi:10.2151/sola.2017-040.
- Nakaegawa, T., K. Hibino, I. Takayabu, Identifying climate analogues for cities in Australia by a non-parametric approach using multi-ensemble, high-horizontal-resolution future climate projections by an atmospheric general circulation model, MRI-AGCM3.2H, *Hydrological Research Letters*, **11**, 72–78, doi:10.3178/hrl.11.72.
- Niwano, M., T. Aoki, A. Hashimoto, S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, K. Fujita, A. Tsushima, Y. Iizuka, R. Shimada, and M. Hori, 2018: NHM-SMAP: spatially and temporally high-resolution nonhydrostatic atmospheric model coupled with detailed snow process model for Greenland Ice Sheet, *The Cryosphere*, **12**, 635–655, doi:10.5194/tc-12-635-2018.
- Okada, Y., T. Takemi, H. Ishikawa, S. Kusunoki, and R. Mizuta, 2017: Future changes in atmospheric conditions for the seasonal evolution of the baiu as revealed from projected AGCM experiments, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **95**, 4, 239–260, doi:10.2151/jmsj.2017-013.
- Ose, T., 2017: Future precipitation change during summer in East Asia and model dependence in high-resolution MRI-AGCM experiments, *Hydrological Research Letters*, **11**, 3, 168–174, doi:10.3178/hrl.11.168.
- Pinzon, R., K. Hibino, I. Takayabu, and T. Nakaegawa, 2017: Virtually experiencing future climate changes in Central America with MRI-AGCM: climate analogues study, *Hydrological Research Letters*, **11**, 2, 106–113, doi:10.3178/hrl.11.106.
- Rahman, M. M., N. Ferdousi, S. M. A. Abdullah, and S. Kusunoki: Recent climate simulation over SAARC region including Bangladesh using high resolution AGCM, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Accepted.
- Sugi, M, Y. Imada, and T. Nakaegawa. Estimating probability of extreme rainfall over Japan using Extended Regional Frequency Analysis, *Hydrological Research Letters*, **11**, 19–23, doi:10.3178/hrl.11.19.
- Surendran, S., S. Gadgil, K. Rajendran, S. J. Varghese, and A. Kitoh, 2018: Monsoon rainfall over India in June and link with northwest tropical pacific, *Theor. Appl. Climatol.*, doi:10.1007/s00704-018-2440-6.
- Yoshida, K., M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami, and M. Ishii, 2017: Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations, *AGU, Geophysical Research Letters*, **44**, 19, 9910–9917, doi:10.1002/2017GL075058.

(投稿中)

- Endo, H., A. Kitoh, and H. Ueda: 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, *SOLA*.

(2) その他、報告書など

- 鬼頭昭雄、インタビュー 扉を開く「異常気象と地球温暖化の解明に挑む」、にちぎん、No. 53、2018年春号

鬼頭昭雄、2018：気象・気候災害 - 地球温暖化のもとでの災害リスク、特集 2「災害軽減と持続的社会的形成に向けた科学と社会の協働・協創」、学術の動向、23（3）、78-30.

（3）著書（発行・印刷済み）

鬼頭昭雄、2017：変わりゆく気候気象のしくみと温暖化、NHK カルチャーラジオ科学と人間、NHK 出版、160 pp.

鬼頭昭雄、2017：GCM 中の南極の雪と氷床、気象研究ノート第233号「南極氷床と大気物質循環・気候」、322、411-423.

鬼頭昭雄、2017：ヒプシサーマル期と近年温暖期の気候要因比較、「気候変動の事典」、朝倉書店、338-341.

（印刷中）

Surendran, S., K. Rajendran, A. Kitoh and R.S. Nanjundiah, Assessment of Climate Change Projection for the State of Kerala. In: Climate Change of Kerala. Kerala State Planning Board Publication.

Kitoh, A.: Climate Change Projection over Turkey with a High-Resolution Atmospheric General Circulation Model. In: T. Watanabe, R. Kanber and S. Kapur (eds.), Climate Change Impacts on Basin Agro-ecosystems, Springer Hexagon Series.

（投稿中）

鬼頭昭雄：地球温暖化はどこまで予測できるか？「地球の未来をいま、科学はどう捉えているか～地球人間圏科学からのメッセージ」、古今書院.

Kitoh, A.: Atmosphere. In: Y. Himiyama (ed.), Human Geoscience, Springer.

Kitoh, A.: Climate change. In: Y. Himiyama (ed.), Human Geoscience, Springer.

Kitoh, A. and H. Endo: Future Changes in Global Monsoon Precipitation and their Uncertainty: Results from 20-km and 60-km MRI-AGCM Ensemble Simulations. In: The Multi-Scale Global Monsoon System. World Scientific Publishing.

鬼頭昭雄、2018：地球温暖化予測技術の現状と将来、2018年版気象年鑑、（一財）気象業務支援センター.

（4）学会、研究集会等

遠藤洋和、鬼頭昭雄、植田宏昭、温暖化に伴うアジアモンスーン循環の変化、日本気象学会 2017年度秋季大会、北海道大学、札幌、2017/10/30-11/2

Endo, H., A. Kitoh, and H. Ueda, 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. The third International Workshop on "Climate change and Precipitation in the East Asia", Tokyo, Japan, 2018/2/22

Imada, Y., H. Shiogama, M. Mori, C. Takahashi, Y. Kamae, M. Watanabe, R Mizuta, M. Ishii, M. Kimoto, Large ensemble and long-term climate simulations with high-resolution MRI-AGCM and NHRCM - Application to Event Attribution study -, International Detection and Attribution Group Meeting 2018, Berkeley, USA, 2018/03/14

Imada, Y., H. Shiogama, C. Takahashi, Y. Kamae, M. Mori, M. Watanabe, R. Mizuta, M. Ishii, M. Kimoto, Event attribution with large-ensemble simulations generated by MRI-AGCM, International Workshop on Climate Downscaling Studies, Tsukuba, Japan, 2017/10/2-4

Imada, Y., H. shiogama, M. Mori, C. Takahashi, Y. Kamae, M. Watanabe, R Mizuta, M. Ishii, M. Kimoto, Large ensemble and long-term climate simulations with high-resolution MRI-AGCM and NHRCM - Application to Event Attribution study -, International Detection and Attribution Group Meeting 2018, Berkeley, USA, 2018/03/14

- Kawase, H., H. Sasaki, A. Murata, M. Nosaka, I. Takayabu, R. Ito, T. Sasai, T. Yamazaki, S. Sugimoto, Future changes in extremely heavy winter precipitation around Japan projected by regional climate models, Asia Oceania Geosciences Society 14th Annual Meeting (AOGS2017), Suntec City, Singapore, 2017/8/6-11
- Kawase, H., H. Sasaki, A. Murata, M. Nosaka, I. Takayabu, T. Sasai, T. Yamazaki, Past simulation and future projection of snowfall over mountainous areas in central Japan, International Workshop on Climate Downscaling Studies, Tsukuba, Japan, 2017/10/2-4
- 川瀬宏明、佐々井崇博、山崎剛、伊東瑠衣、大楽浩司、杉本志織、佐々木秀孝、村田昭彦、野坂真也、日本における極端に強い降雪発生時の総観場の特徴とその地域特性、日本気象学会2017年秋季大会、北海道大学、札幌、2017/10/30-11/2
- 川瀬宏明、佐々木秀孝、村田昭彦、野坂真也、地球温暖化によって日本の雪は減るのか？、第15回環境研究シンポジウム、一橋講堂、東京、2017/11/22
- Kawase H., H. Sasaki, A. Murata, M. Nosaka, I. Takayabu, R. Ito, K. Dairaku, T. Sasai, T. Yamazaki, S. Sugimoto, S. Watanabe, M. Fujita, S. Kawazoe, Y. Okada, M. Ishii, and R. Mizuta, Future projections of total snowfall and heavy daily snowfall in Japan simulated by large ensemble regional climate simulations, AGU 2017 Fall Meeting, New Orleans, USA, 2017/12/11-15
- Kitoh, A., H. Endo, R. Mizuta, H. Kawai and O. Arakawa, Future changes in global monsoon precipitation and their uncertainty: results from high-resolution MRI-AGCM ensemble simulation with multi-SSTs and multi-physics, IWM-VI, Singapore, 2017/11/12-17
- 楠昌司、格子点で解析した梅雨期の将来変化、日本気象学会2017年度春季大会、国立オリンピック記念青少年総合センター、東京、2017/5/25-28
- Kusunoki, S., Future changes in precipitation over East Asia projected by the global atmospheric model MRI-AGCM3.2, ACM2017, Busan, South Korea, 2017/10/23-24
- 楠昌司、d4PDF による梅雨の将来変化、日本気象学会2017年度秋季大会、北海道大学、札幌、2017/10/30-11/2
- Kusunoki, S., Future changes in precipitation over East Asia projected by massive ensemble simulations with a 60-km mesh global atmospheric model, IWM-VI, Singapore, 2017/11/12-17
- Kusunoki, S., Future changes in precipitation over the arctic projected by massive ensemble simulations with a 60-km mesh global atmospheric model, The Eighth Symposium on Polar Science, NIPR, Tokyo, 2017/12/4-8
- 楠昌司、格子全球大気モデルを用いた大量アンサンブル実験による北極域の降水の将来変化、第5回国際北極研究シンポジウム、一橋講堂、東京、2018/1/15-18
- Mizuta, R., H. Shiogama, A. Murata, K. Yoshida, O. Arakawa, H. Endo, M. Ishii, I. Takayabu, E. Nakakita, and M. Kimoto, Large ensemble climate simulations with high-resolution AGCM and RCM, International Symposium on Earth-Science Challenges 2017, Kyoto University, Kyoto, 2017/10/1-5
- 水田亮、地球温暖化時における極端降水変化と水蒸気量変化の関係、日本気象学会2017年度秋季大会、北海道大学、札幌、2017/10/30-11/2
- 水田亮、吉村裕正、尾形知道、吉田康平、尾瀬智昭、全球気候モデルにおける強い熱帯低気圧の表現を改善する試み、シームレス台風予測研究集会、JAMSTEC 東京事務所、東京、2017/11/10
- 村田昭彦、佐々木秀孝、川瀬宏明、野坂真也、青柳暁典、大泉三津夫、雲解像アンサンブル地域気候シミュレーションによる日本の極端な降水量の将来予測、日本気象学会2017年度春季大会、国立オリンピック記念青少年総合センター、東京、2017/5/25-28
- Murata, A., H. Sasaki, H. Kawase, M. Nosaka, T. Aoyagi, M. Oh'izumi, and K. Saito, Evaluation of errors in precipitation over Japan reproduced by the non-hydrostatic regional climate model (NHRCM), 5th WGNE workshop on systematic errors in weather and climate models, Montreal,

Canada, 2017/6/19-23

Murata, A, H. Sasaki, H. Kawase, M. Nosaka, T. Aoyagi, and M. Oh'izumi, Projection of heavy precipitation over Japan in ensemble simulations with a convection-permitting regional climate model, AOGS2017, Suntec City, Singapore, 2017/8/6-11

村田昭彦、渡邊俊一、佐々木秀孝、川瀬宏明、野坂真也、地域気候モデルを用いた台風及び非台風降水の将来変化予測（その１）－解像度依存性の小さい台風抽出手法の開発－、日本気象学会2017年度秋季大会、北海道大学、札幌、2017/10/30-11/2

仲江川敏之、高薮出、日比野研志、今世紀末の温暖化状況下におけるロシア主要7都市の気候アナログ、日本気象学会2017年度秋季大会、北海道大学、札幌、2017/10/30-11/2

大島長、気象研究所地球システムモデルによる北極ブラックカーボンのモデル研究、低温研共同研究集会「グリーンランド南東ドームアイスコアに関する研究集会」、低温科学研究所、札幌、2017/8/31

大島長、気象研究所地球システムモデルによる北極ブラックカーボンの放射影響、つくば雪氷研究懇談会、つくば、2017年12月

大島長、気象研究所地球システムモデルによる北極ブラックカーボンの放射影響、ArCS エアロゾル・雲研究会合、東京、2017年12月

Oshima, N. and M. Koike, Modeling studies of black carbon using a MRI Earth System Model, AMAP short-lived climate forcers (SLCF) expert group meeting, Helsinki, Finland, 2018/1/29-31

Takayabu, I. and K. Tsuboki, Introduction of Integrated Research Program for Advancing Climate Models (TOUGOU) theme C: Integrated Climate Projection, ACM2017, Busan, South Korea, 2017/10/23-24

高薮出、力学的ダウンスケーリングによるデータセットファミリーについて、日本気象学会2017年度秋季大会、北海道大学、札幌、2017/10/30-11/2

田中泰宙、数値モデルによるダストの予測と気候変動研究、鳥取大学乾燥地研究センター2017年度公開セミナー、鳥取大学乾燥地研究センター、鳥取、2017/7/27

渡邊俊一、村田昭彦、佐々木秀孝、川瀬宏明、野坂真也、地域気候モデルを用いた台風及び非台風降水の将来変化予測（その２）－現在気候再現実験における台風降水の検証－、日本気象学会2017年度秋季大会、北海道大学、札幌、2017/10/30-11/2

吉田康平、水田亮、杉正人、村上裕之、石井正好、大規模アンサンブルデータ d4PDF で見える熱帯低気圧の将来予測、日本気象学会2017年度秋季大会、北海道大学、札幌、2017/10/30-11/2

吉田康平、水田亮、杉正人、村上裕之、石井正好、大規模アンサンブルシミュレーション d4PDF による熱帯低気圧の将来変化、シームレス台風予測研究集会、JAMSTEC 東京事務所、東京、2017/11/10

吉田康平、水田亮、杉正人、村上裕之、石井正好、大規模アンサンブルシミュレーションによる熱帯低気圧の将来変化、異常気象研究集会「様々な結合過程がもたらす異常気象の実態とそのメカニズム」、京都大学宇治キャンパス、京都、2017/11/20

（５）アウトリーチ活動（講演、研修、報道、新聞、テレビ、ラジオ等）

川瀬宏明、日本の（山の）雪の現状把握と将来予測～観測と数値シミュレーションから～、大気科学特別セミナー、筑波大学、つくば、2017/12/21 [招待講演]

鬼頭昭雄、変わりゆく気候 気象のしくみと温暖化、NHK ラジオ第2、カルチャーラジオ「科学と人間」、2017/7/7、7/14、7/21、7/28、8/4、8/11、8/18、8/25、9/1、9/8、9/15、9/22、9/29

鬼頭昭雄、WCRP と世界気象機関（WMO）、日本学術会議公開シンポジウム「Future Earth 時代のWCRP」、東京大学生産技術研究所 S 棟講堂、2017/7/28

- 鬼頭昭雄、気象・気候災害 - 地球温暖化のもとでの災害リスク、日本学術会議公開シンポジウム「災害軽減と持続的社會の形成に向けた科学と社會の協働・協創」、東京、日本学術會議講堂、2017/9/17
- 鬼頭昭雄、将来の氣候はどうなるか - 異常気象と地球温暖化、一般社団法人南北米福地開發協會講演會、川崎、大山街道ふるさと館、2017/9/23
- 鬼頭昭雄、IPCC への関わり方、SI-CAT・統合プログラム研究交流会、京都大學宇治キャンパスおうばくプラザ、2018/1/25 [特別講演]
- 楠昌司、2017：中韓で梅雨期間長引く気象研今世紀末シミュレート、日刊工業新聞25面、2017/5/24
- 楠昌司、2017：街を守る 防災最前線（中）水害の研究土砂災害、IoT で予兆、日刊工業新聞 1 面、2017/5/25
- Kusunoki, S., International cooperation with Latin America through atmospheric global model of MRI, Estudios del cambio climático utilizando aplicaciones de reducción de escala dinámicas: caso de panamá, Wyndham Hotel, Panama City, Panama, 2017/9/18 [招待講演]
- Kusunoki, S., United Nations University downscale training course using atmospheric global model of MRI, Estudios del cambio climático utilizando aplicaciones de reducción de escala dinámicas: caso de panamá, Wyndham Hotel, Panama City, Panama, 2017/9/18 [招待講演]
- Kusunoki, S., Global Warming Projection, Panama City, Panama, 2017/9/19-29 [研修]
- Kusunoki, S., Practice training using output of global warming projections with 20-km mesh atmospheric global model, Panama City, Panama, 2017/9/19-29 [研修]
- Kusunoki, S., Future precipitation change over Panama projected by 20-km mesh atmospheric global model, Panama City, Panama, 2017/9/19-29 [研修]
- Kusunoki, S., Guide to make figures, Panama City, Panama, 2017/9/19-29 [研修]
- 村田昭彦、2017：温暖化で梅雨降水量、九州西部と北陸で増通年豪雨は北日本の日本海側で増気象研が予測、産経新聞電子版、2017/5/25
- 村田昭彦、2017：日本における極端降水の将来変化、平成29年度気象研究所研究成果発表會、一橋講堂、東京、2017/12/2
- Nakaegawa, T., History of collaborations on climate change studies between Panama and Japan, Estudios del cambio climático utilizando aplicaciones de reducción de escala dinámicas: caso de Panamá, Wyndham Hotel, Panama City, Panama, 2017/9/18 [招待講演]
- Nakaegawa, T., Future change in water balance in continental-scale river basins under a greenhouse gas emission scenario, CATHALAC, Panama City, Panama, 2017/09/19 [招待講演]
- Nakaegawa, T., Future climate projections and future impact assessments on water resources, CATHALAC, Panama City, Panama, 2017/09/19-29 [研修]
- Nakaegawa, T., New features of IPCC AR6, Technological University of Panama, Panama City, Panama, 2017/09/19-29 [研修]
- Nakaegawa, T., A proposal about impact Assessment of REDD + on regional climate and each sectors in Japan, MiAmbiente, Panama City, Panama, 2017/09/19-29 [研修]
- Nakaegawa, T., How to contribute to AR6-Final Remarks, Technological University of Panama, Panama City, Panama, 2017/09/29 [研修]
- 高薮出、氣候變動予測における、数値モデルの位置づけ、第17回富田チーム研究セミナー、理化学研究所計算科学研究機構、R104-2、2018/2/15
- 高薮出、氣候變動予測情報と社會への利活用、第5回イブニングセミナーここまで進化した天気予報の技術！～社會はこの進化をどう活かすか？～、日本大學駿河台キャンパス1号館121會議室、2018/2/19
- 吉田康平、2017：報道発表「地球温暖化で猛烈な熱帯低気圧（台風）の頻度が日本の南海上で高まる ～多数の高解像度温暖化シミュレーションによる予測～」、(一財)気象業務支援セ

ンター、気象庁気象研究所、2017/10/26

吉田康平、2017：猛烈な台風日本で増加か気象研、温暖化で予測、共同通信、2017/10/26

吉田康平、2017：日本南海上で台風増加、日刊工業新聞23面、2017/10/27

吉田康平、2017：21世紀末、日本南海上で「カテゴリー4」以上の台風増加気象庁など解析、日刊工業新聞電子版、2017/10/27

吉田康平、2017：2090年猛烈な台風増える予測、朝日新聞37面、2017/10/27

吉田康平、2017：温暖化進行時の猛烈な台風の研究紹介、NHK「おはよう日本」、2017/10/28

吉田康平、2017：温暖化による猛烈な台風の変化の研究紹介、テレビ朝日「スーパーJチャンネル」、2017/10/28

吉田康平、2017：日本の南海、巨大台風が増加へ…温暖化進むと、読売新聞、2017/11/6

吉田康平、2017：日本の南海上を通る猛烈な台風は地球温暖化で増えることが、初めて明らかに、科学技術振興機構サイエンスポータル、2017/11/8

吉田康平、2017：猛烈級到達増も温暖化で勢力強まる（狩野川台風から60年の特集記事）、静岡新聞、2018/1/1