

21世紀末における 日本の気候

不確実性評価を含む予測計算

- このパンフレットの概要
- 21世紀末における日本の気候予測結果
- 気候変動予測計算の仕様
- 本予測計算での不確実性の考慮
 - 現在気候の再現性
 - データの活用方法
- まとめ

このパンフレットの概要

「適応計画」の策定に向けた予測計算を行いました

2014年11月に、気候変動に関係する全世界の専門家の知見を総合する形で、気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）による第5次評価報告書（AR5）統合報告書（IPCC,2014）が公開されました。その要約（政策決定者向け要約、SPM）では、次の通り指摘されています。

- 気候システムの温暖化には疑う余地がなく、また1950年代以降、観測された変化の多くは数十年から数千年間にわたり前例のないものである。
- 温室効果ガスの継続的な排出は、更なる温暖化と気候システムの全ての要素に長期にわたる変化をもたらし、それにより、人々や生態系にとって深刻で広範囲にわたる不可逆的な影響を生じる可能性が高まる。
- 適応及び緩和は、気候変動のリスクを低減し管理するための相互補完的な戦略である。今後数十年間の大幅な排出削減により、持続可能な開発のための気候にレジリエントな（強靱な）経路に貢献することができる。

我が国においても、政府全体の総合的、計画的な適応に係る取り組みを取りまとめる「適応計画」を、平成27年夏頃を目途に策定するよう関係府省連携の下で作業を進めてきました。

環境省と気象庁は、この「適応計画」に向けた我が国における気候変動影響評価のための気候変動予測情報を整備することを目的として、日本周辺の将来の気候について不確実性を考慮した予測を行いました。このパンフレットはその予測結果の概要をまとめたものです。

複数ケースの予測計算を実施し、不確実性の幅を評価しました

本予測計算では、気候モデルを使って、日本周辺の将来（2080～2100年、以下「将来気候」）の気候予測計算を実施し、過去（1984～2004年、以下「現在気候」）の再現計算と比較しました。

将来気候の予測計算は温室効果ガスの濃度に応じ、RCP2.6シナリオ、RCP4.5シナリオ、RCP6.0シナリオ、RCP8.5シナリオで計算を実施しています（RCP（Representative Concentration Pathways）シナリオについては23ページ参照）。モデル計算をするうえでの条件設定を変え、RCP8.5シナリオは9ケース、残りの3つのシナリオでは3ケース、計18ケースの計算を行いました。（詳細は19ページ）

以下の項目の変化について、予測結果を取りまとめました。

- 気温の変化（年平均気温、日最高気温、日最低気温、真夏日¹日数、真冬日¹日数）
- 降水の変化（年降水量、大雨による降水量、無降水日数²）
- 積雪・降雪の変化（年最深積雪、年降雪量）

取りまとめにあたっては、日本全体だけでなく地域毎の違いを調べるため、日本列島を7つの地域に分割し、全国と地域ごとの結果を示しています。（詳細は5ページ）

さらに、平均気温、日最高気温、日最低気温、年降水量については、全18ケースの計算結果を用いて統計的処理を行い、不確実性の幅を評価しました。（詳細は24～27ページ）

1----- 真夏日：日最高気温が30℃以上の日、真冬日：日最高気温が0℃未満の日

2----- 無降水日数：日降水量が1.0mm未満の日数

21世紀末における気温、降水、積雪・降雪について予測しました

将来気候の予測結果の特徴を、現在気候と比較した場合の変化量として整理しました。その全国平均の変化の概要は以下の通りです。

気温の変化（詳細は4～11ページ）

年平均気温の変化については、今世紀末までに「厳しい温暖化対策を取った（RCP2.6）」シナリオの場合は0.5℃～1.7℃上昇すると予測されます³。一方、「現状以上の温暖化対策を取らなかった（RCP8.5）」シナリオの場合は3.4℃～5.4℃上昇すると予測されます。日最高気温、日最低気温についても上昇すると予測され、日最低気温の上昇幅のほうが大きい傾向があります。また、気温の変化の分布をみると、北日本のほうが、上昇幅が大きい傾向があります。

真夏日の日数は西日本を中心に増加すると予測され、真冬日の日数は北日本を中心に減少すると予測されます。「現状以上の温暖化対策を取らなかった」シナリオのほうが変化の傾向は顕著です。

降水の変化（詳細は12～15ページ）

年降水量の将来変化については、どのシナリオでも増加、減少のどちらとも言えず、不確実性が高いと予測されています。平均値は増加するとの予測が多いものの、不確実性幅を示すと増加側にも減少側にも伸びています。

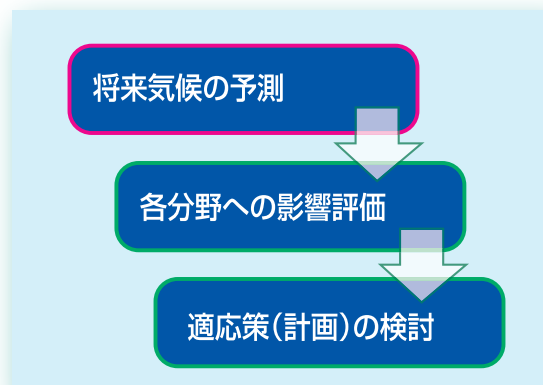
一方、大雨による降水量、無降水日数はそれぞれ多くのシナリオ及びケースで増加傾向となると予測されます。「現状以上の温暖化対策を取らなかった」シナリオのほうが変化の傾向は顕著です。

積雪・降雪の変化（詳細は16～17ページ）

年最深積雪、年降雪量ともにほとんどのシナリオで減少します。特に東日本日本海側で減少量が大きくなる予測となっています。「現状以上の温暖化対策を取らなかった」シナリオのほうが変化の傾向は顕著です。

予測結果は影響評価や適応策の検討に活用されます

本予測計算の結果は今後の気候変動への対応に向けた普及啓発の材料となります。同時に、気候変動によって起こりうる様々な影響（農業分野への影響、高温による健康被害、大雨による洪水など）について把握するための基礎データとなります。各分野への影響評価結果をもとに、「適応計画」が策定されることになります。気候変動適応策の取り組みの促進につながることが期待されます。



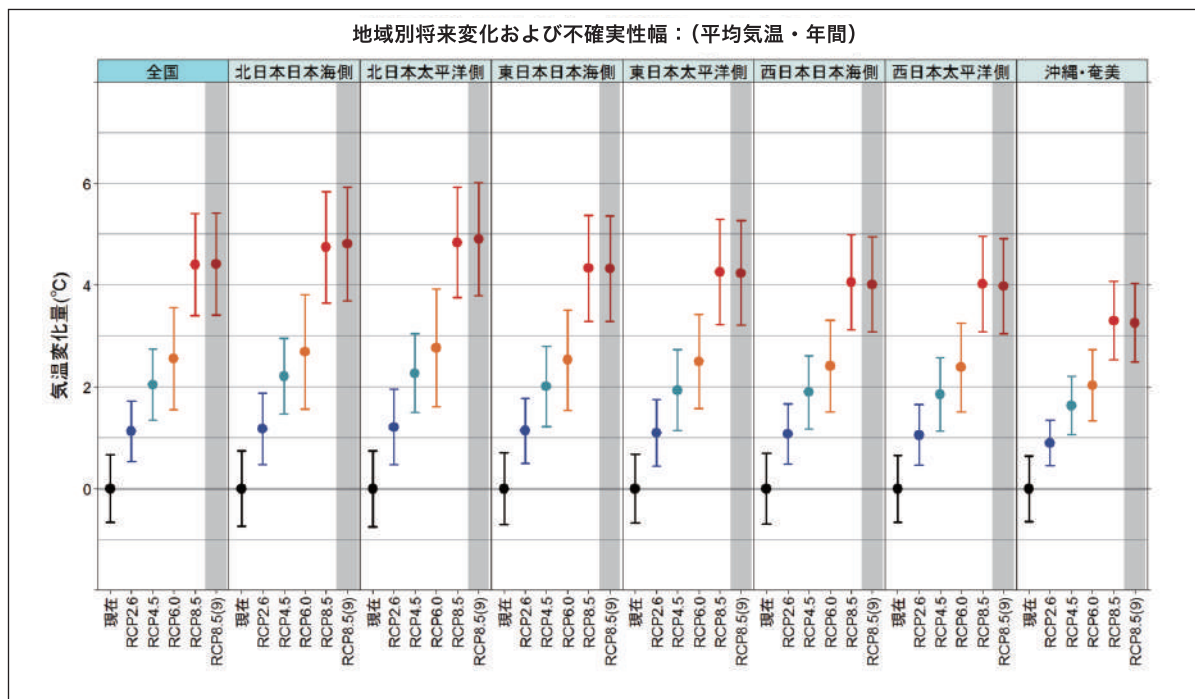
適応策検討までの流れ

3----- 将来の予測値（変化量）は将来気候（2080～2100年平均）と現在気候（1984～2004年平均）との差の各シナリオの平均値を表す。また、予測の幅を示しているが、AR5で考慮されているような不確実性幅の全体を表現してはいないことに注意が必要である。

21世紀末における日本の気候予測結果

平均気温の将来予測

- 年平均気温は、全国的に上昇します。
(RCP2.6は0.5～1.7℃、RCP8.5は3.4～5.4℃上昇) (全国平均)
- 低緯度より高緯度のほうが、気温上昇が大きい傾向がみられます。

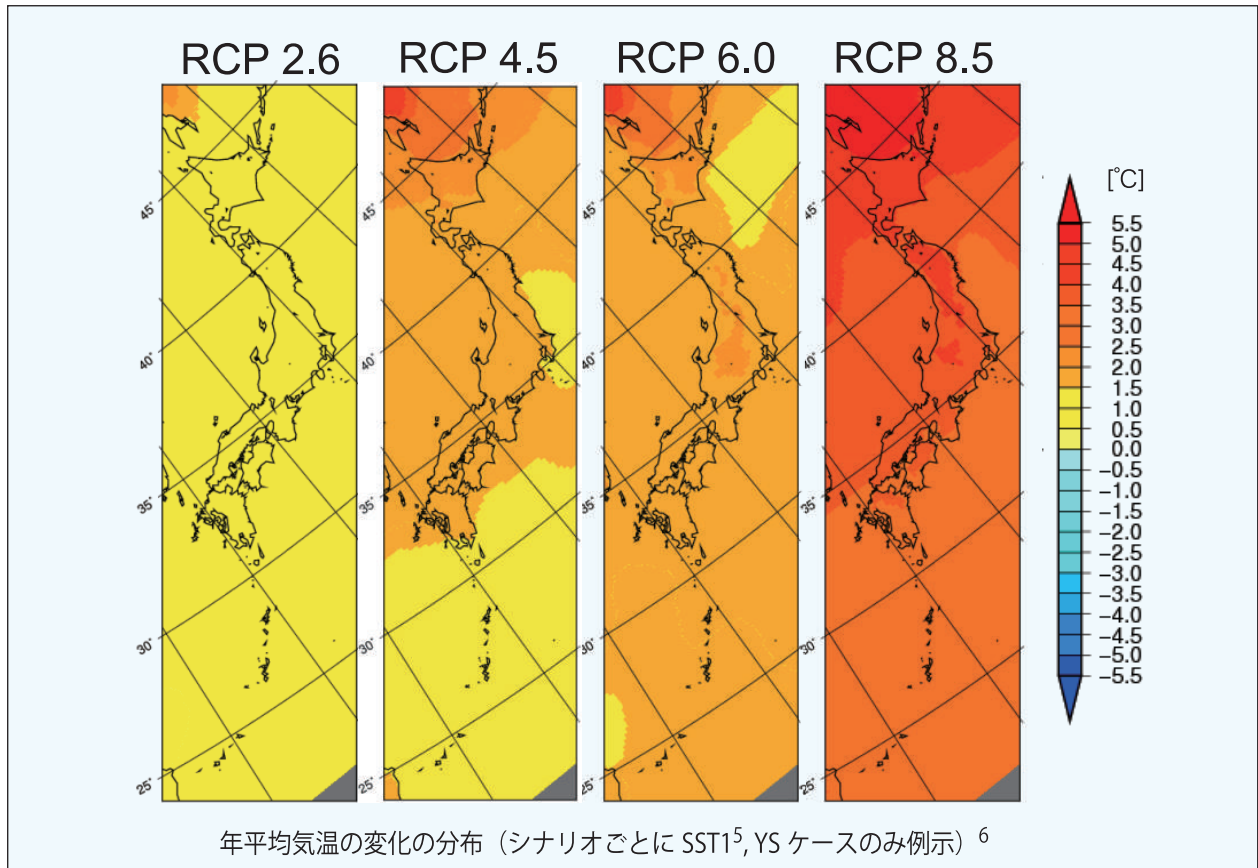


グラフでは、点で複数ケースの平均値を、実線で年々変動を含む全体の不確実性幅を表示しています（不確実性の幅に関する詳細は、24～27ページを参照）。横軸の現在は現在気候、RCP2.6～RCP8.5はRCPの各シナリオによる21世紀末の結果で、3ケースの結果を用いた不確実性幅を示しています。参考として、RCP8.5(9)に9ケースの結果を用いた不確実性幅を示しますが、同数値は他シナリオとの比較ができないことに注意が必要です。

(°C)	全国	北日本 日本海側	北日本 太平洋側	東日本 日本海側	東日本 太平洋側	西日本 日本海側	西日本 太平洋側	沖縄・ 奄美
RCP2.6	1.1 (0.5～1.7)	1.2 (0.5～1.9)	1.2 (0.5～2.0)	1.1 (0.5～1.8)	1.1 (0.4～1.8)	1.1 (0.5～1.7)	1.1 (0.5～1.7)	0.9 (0.4～1.3)
RCP4.5	2.0 (1.3～2.7)	2.2 (1.5～3.0)	2.3 (1.5～3.0)	2.0 (1.2～2.8)	1.9 (1.1～2.7)	1.9 (1.2～2.6)	1.9 (1.1～2.6)	1.6 (1.1～2.2)
RCP6.0	2.6 (1.6～3.6)	2.7 (1.6～3.8)	2.8 (1.6～3.9)	2.5 (1.5～3.5)	2.5 (1.6～3.4)	2.4 (1.5～3.3)	2.4 (1.5～3.3)	2.0 (1.3～2.7)
RCP8.5	4.4 (3.4～5.4)	4.7 (3.6～5.8)	4.8 (3.8～5.9)	4.3 (3.3～5.4)	4.3 (3.2～5.3)	4.1 (3.1～5.0)	4.0 (3.1～5.0)	3.3 (2.5～4.1)
(9ケースの 不確実性)	4.4 (3.4～5.4)	4.8 (3.7～5.9)	4.9 (3.8～6.0)	4.3 (3.3～5.4)	4.2 (3.2～5.3)	4.0 (3.1～4.9)	4.0 (3.0～4.9)	3.3 (2.5～4.0)
参考都市例	-	札幌	釧路	新潟	東京	福岡	大阪	那覇
上記都市の 平年値	-	8.9	6.2	13.9	15.4	17.0	16.9	23.1

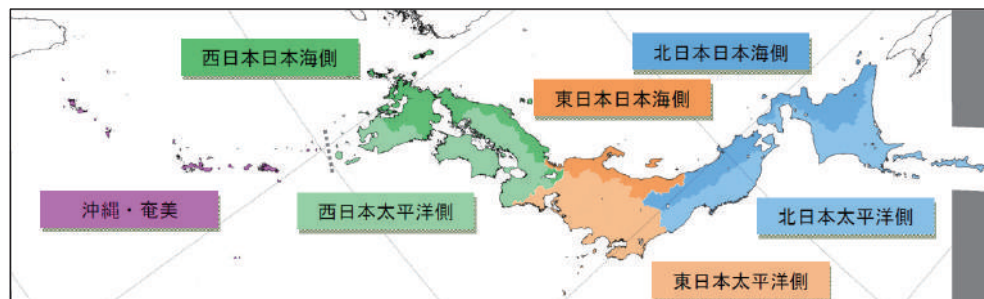
表中の数字は各シナリオの3ケース（YS⁴）の平均値を示し、括弧内に不確実性幅を示しています（RCP8.5のみ全9ケースの平均値と不確実性幅を併記）。参考までに各地域の都市における平年値（1981～2010年平均）も例示しています。

4----- YS: Yoshimura Schemeの略。本予測計算で用いた積雲対流パラメタリゼーションの一種。（詳細は21ページ）



■ 地域区分

本計算結果の一部は、下図のように、日本列島の気候特性と行政界を考慮して設定された7つの地域区分（北日本日本海側、北日本太平洋側、東日本日本海側、東日本太平洋側、西日本日本海側、西日本太平洋側、沖縄・奄美）ごとに統計した結果として示されています。予測として示している数値は、各地域区分内での平均または積算であって、特定の地点を代表するものではないことに留意が必要です。



予測データの解析に用いる地域区分

出所：気象庁「地球温暖化予測情報第8巻」（2013）

（注）AR5の中では「RCPシナリオ」として複数のモデル計算結果が示されていますが、本予測計算はあくまでその中の平均的な気温上昇量を想定し、その中で複数ケースの計算をした結果です。本パンフレットでは「RCP2.6は0.5～1.7℃上昇」等と表記しますが、AR5内で示されるRCP2.6シナリオの温度上昇幅をすべて評価しているわけではありませんので注意してください。

（注）表内に、参考として各地域の一都市における平年値（1981～2010年平均）を例示していますが、モデル計算結果の現在気候をベースにした変化量の地域平均と、一地点の観測値である平年値とは、単純に比較できるものではありません。また、都市例は代表的な都市をあげていますが、地域の気候の代表値ではありません。

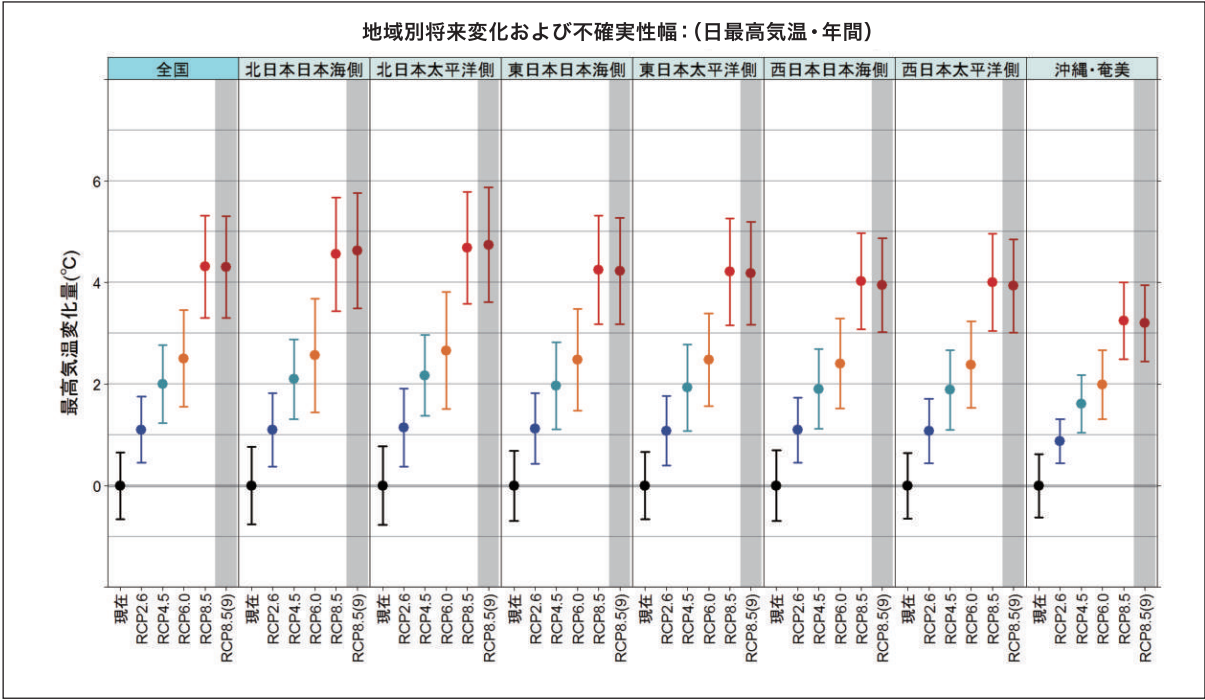
（他の指標の表内に示される参考都市例も同様です）

5----- SST1: 本予測計算で用いた将来の海面水温の変化パターンの一種。（詳細は20ページ）

6----- 本パンフレットに示す日本地図上の変化の分布は、あくまで計算結果の一部であることに留意すること。地域的な変化の傾向の違いを大まかに把握するためのものである。（他の指標の該当する図も同様）

日最高気温・日最低気温の将来予測

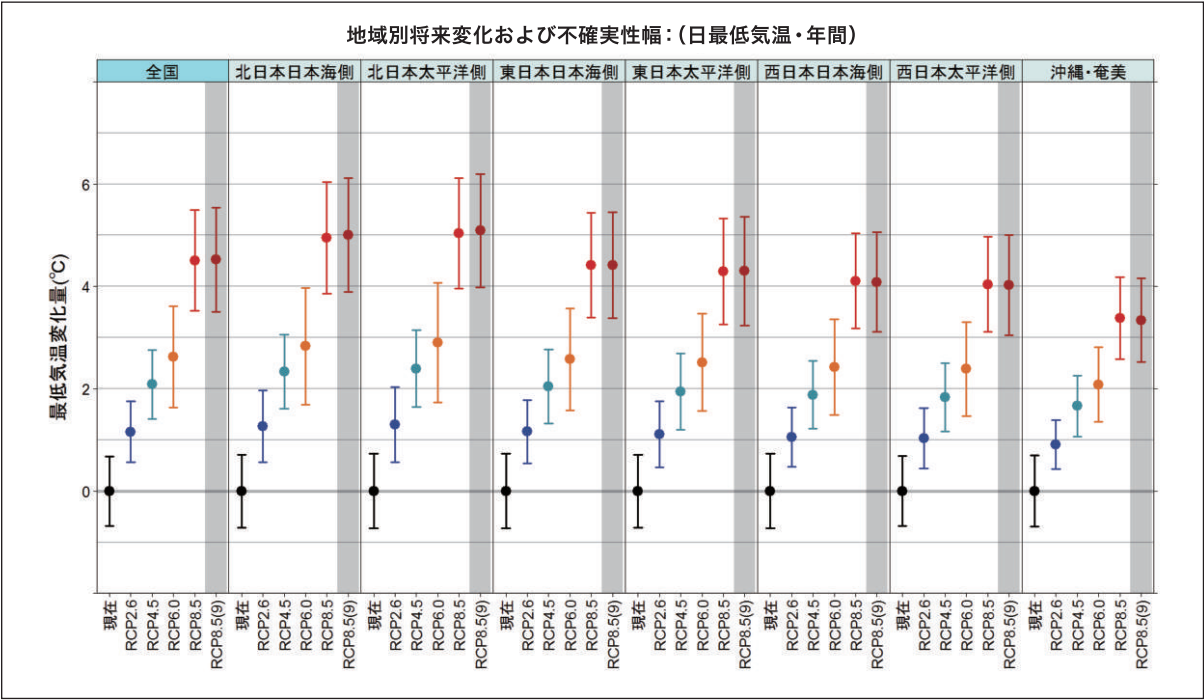
- 日最高気温・日最低気温とも、全国的に上昇します。
- 日最低気温のほうが、わずかに上昇幅が大きくなります。
(RCP8.5では日最高気温3.3～5.3℃上昇、日最低気温3.5～5.5℃上昇)
(全国平均・年平均)



グラフでは、点で複数ケースの平均値を、実線で年々変動を含む全体の不確実性幅を表示しています（不確実性の幅に関する詳細は、24～27ページを参照）。横軸の現在は現在気候、RCP2.6～RCP8.5はRCPの各シナリオによる21世紀末の結果で、3ケースの結果を用いた不確実性幅を示しています。参考として、RCP8.5(9)に9ケースの結果を用いた不確実性幅を示しますが、同数値は他シナリオとの比較ができないことに注意が必要です。（右ページの日最低気温の図も同様）

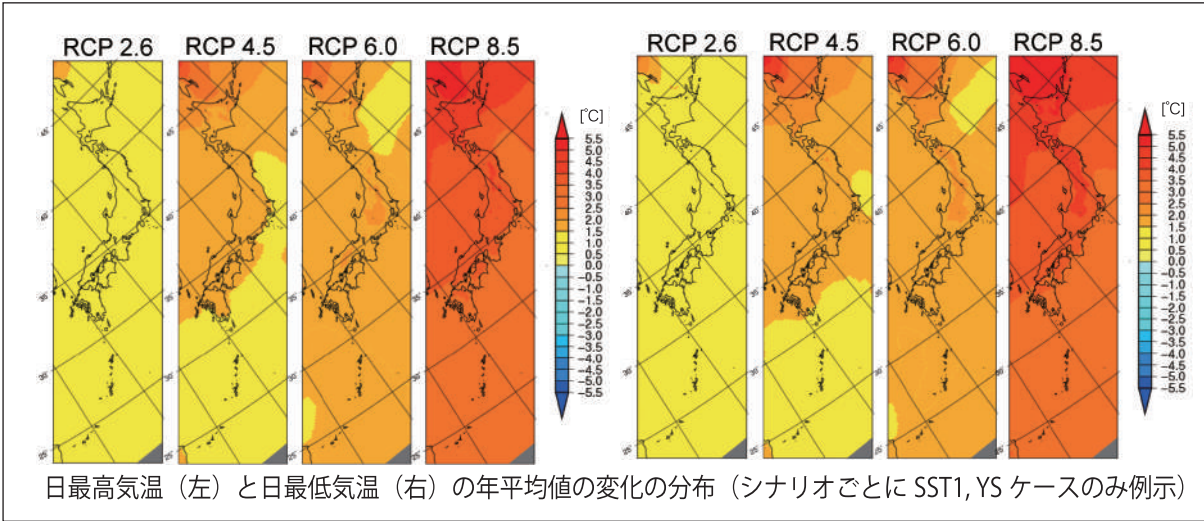
(℃)	全国	北日本 日本海側	北日本 太平洋側	東日本 日本海側	東日本 太平洋側	西日本 日本海側	西日本 太平洋側	沖縄・ 奄美
RCP2.6	1.1 (0.5～1.8)	1.1 (0.4～1.8)	1.1 (0.4～1.9)	1.1 (0.4～1.8)	1.1 (0.4～1.8)	1.1 (0.5～1.7)	1.1 (0.4～1.7)	0.9 (0.4～1.3)
RCP4.5	2.0 (1.2～2.8)	2.1 (1.3～2.9)	2.2 (1.4～3.0)	2.0 (1.1～2.8)	1.9 (1.1～2.8)	1.9 (1.1～2.7)	1.9 (1.1～2.7)	1.6 (1.0～2.2)
RCP6.0	2.5 (1.6～3.5)	2.6 (1.4～3.7)	2.7 (1.5～3.8)	2.5 (1.5～3.5)	2.5 (1.6～3.4)	2.4 (1.5～3.3)	2.4 (1.5～3.2)	2.0 (1.3～2.7)
RCP8.5	4.3 (3.3～5.3)	4.6 (3.4～5.7)	4.7 (3.6～5.8)	4.2 (3.2～5.3)	4.2 (3.2～5.3)	4.0 (3.1～5.0)	4.0 (3.0～5.0)	3.2 (2.5～4.0)
(9ケースの 不確実性)	4.3 (3.3～5.3)	4.6 (3.5～5.8)	4.7 (3.6～5.9)	4.2 (3.2～5.3)	4.2 (3.2～5.2)	4.0 (3.0～4.9)	3.9 (3.0～4.8)	3.2 (2.4～4.0)
参考都市例	-	札幌	釧路	新潟	東京	福岡	大阪	那覇
上記都市の 平年値	-	12.9	10.2	17.6	19.8	20.9	21.1	25.7

表中の数字は各シナリオの3ケース（YS）の平均値を示し、括弧内に不確実性幅を示しています（RCP8.5のみ全9ケースの平均値と不確実性幅を併記）。参考までに各地域の都市における平年値（1981～2010年平均）も例示しています。



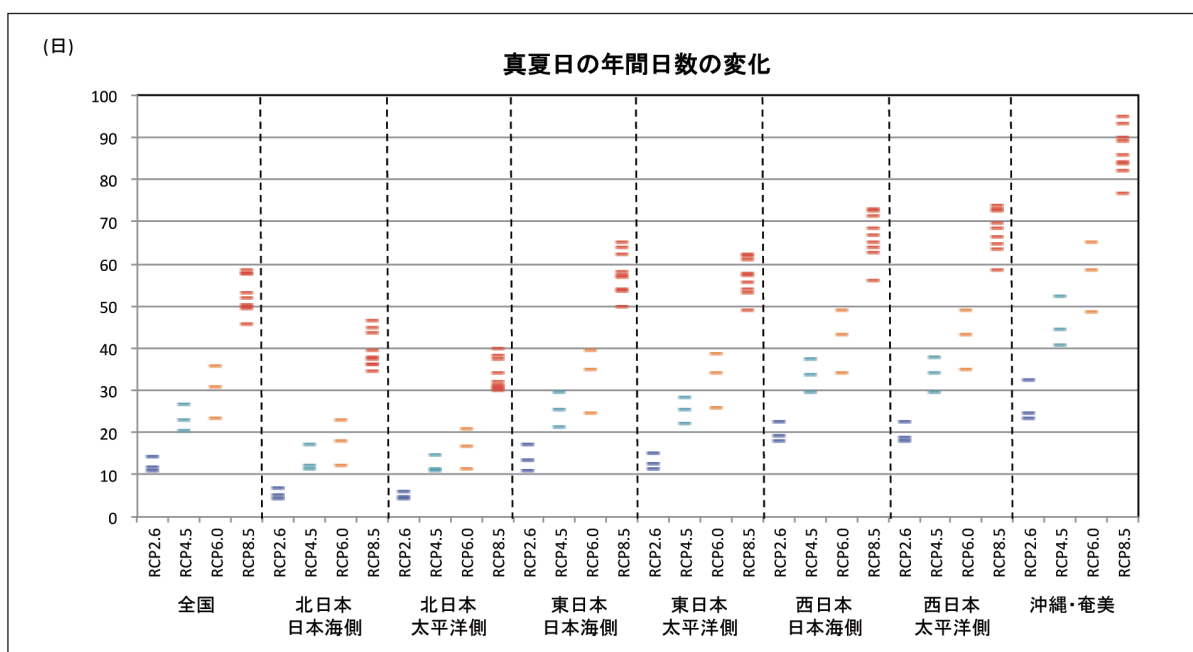
(°C)	全国	北日本 日本海側	北日本 太平洋側	東日本 日本海側	東日本 太平洋側	西日本 日本海側	西日本 太平洋側	沖縄・ 奄美
RCP2.6	1.2 (0.6 ~ 1.8)	1.3 (0.6 ~ 2.0)	1.3 (0.6 ~ 2.0)	1.2 (0.5 ~ 1.8)	1.1 (0.5 ~ 1.8)	1.1 (0.5 ~ 1.6)	1.0 (0.4 ~ 1.6)	0.9 (0.4 ~ 1.4)
RCP4.5	2.1 (1.4 ~ 2.8)	2.3 (1.6 ~ 3.1)	2.4 (1.6 ~ 3.1)	2.0 (1.3 ~ 2.8)	1.9 (1.2 ~ 2.7)	1.9 (1.2 ~ 2.5)	1.8 (1.2 ~ 2.5)	1.7 (1.1 ~ 2.3)
RCP6.0	2.6 (1.6 ~ 3.6)	2.8 (1.7 ~ 4.0)	2.9 (1.7 ~ 4.1)	2.6 (1.6 ~ 3.6)	2.5 (1.6 ~ 3.5)	2.4 (1.5 ~ 3.4)	2.4 (1.5 ~ 3.3)	2.1 (1.4 ~ 2.8)
RCP8.5	4.5 (3.5 ~ 5.5)	5.0 (3.9 ~ 6.0)	5.0 (4.0 ~ 6.1)	4.4 (3.4 ~ 5.4)	4.3 (3.3 ~ 5.3)	4.1 (3.2 ~ 5.0)	4.0 (3.1 ~ 5.0)	3.4 (2.6 ~ 4.2)
(9ケースの 不確実性)	4.5 (3.5 ~ 5.5)	5.0 (3.9 ~ 6.1)	5.1 (4.0 ~ 6.2)	4.4 (3.4 ~ 5.5)	4.3 (3.2 ~ 5.4)	4.1 (3.1 ~ 5.1)	4.0 (3.0 ~ 5.0)	3.3 (2.5 ~ 4.2)
参考都市例	-	札幌	釧路	新潟	東京	福岡	大阪	那覇
上記都市の 平年値	-	5.3	2.3	10.6	13.2	13.6	13.3	20.8

表中の数字は各シナリオの3ケース（YS）の平均値を示し、括弧内に不確実性幅を示しています（RCP8.5のみ全9ケースの平均値と不確実性幅を併記）。参考までに各地域の都市における平年値（1981～2010年平均）も例示しています。



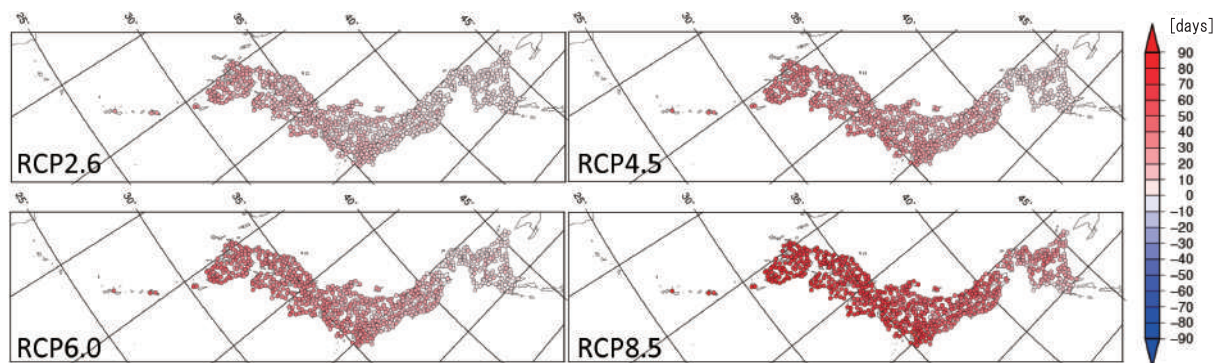
真夏日⁷の将来予測

- 真夏日の日数は、全国的に増加します。
(RCP2.6は約10日、RCP8.5は約50日増加) (全国平均・年積算)
- 特に西日本や沖縄・奄美で増加幅が大きくなります。
(沖縄・奄美ではRCP8.5で約90日増加) (年積算)



(日)	全国	北日本 日本海側	北日本 太平洋側	東日本 日本海側	東日本 太平洋側	西日本 日本海側	西日本 太平洋側	沖縄・ 奄美
RCP2.6	12.4	5.5	5.0	13.9	13.1	19.9	19.8	26.8
RCP4.5	23.5	13.7	12.4	25.6	25.3	33.6	33.8	45.8
RCP6.0	30.0	17.7	16.4	33.0	33.0	42.1	42.4	57.5
RCP8.5	52.8	39.7	33.9	57.9	56.9	66.7	67.8	86.7
参考都市例	-	札幌	釧路	新潟	東京	福岡	大阪	那覇
上記都市の 平年値	-	8.0	0.1	33.5	46.4	57.1	73.2	96.0

グラフは各ケースにおける将来気候の予測(2080~2100年平均)と現在気候(1984~2004年平均)の差を示しています。下表に、各シナリオにおける全ケースの平均値を示します。参考までに各地域の都市における平年値(1981~2010年平均)も例示します。

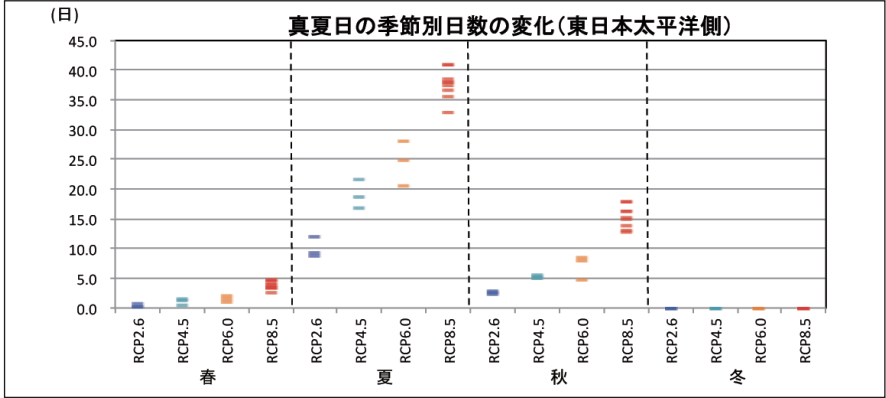


真夏日の年間日数の変化の分布(シナリオごとに SST1, YS ケースのみ例示)

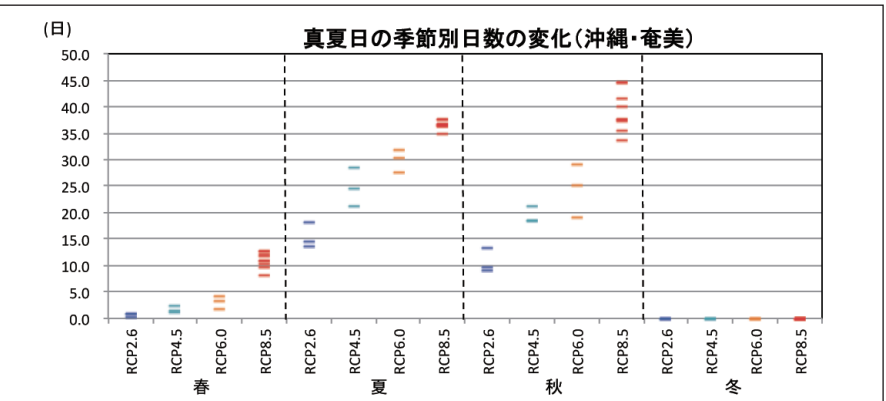
⁷----- 真夏日：日最高気温が30℃以上の日

真夏日日数の季節別変化

下図・下表は、東日本太平洋側および沖縄・奄美の真夏日日数の季節別変化を示したものです。東日本太平洋側では夏（6～8月）の日数増加が多い一方、沖縄・奄美では夏に加えて秋（9～11月）の増加も多いことが分かります。現在の夏のような暑い時期が秋まで長引くようになると言えます。



(日)	春(3～5月)	夏(6～8月)	秋(9～11月)	冬(12～2月)
RCP2.6	0.4	10.0	2.7	0.0
RCP4.5	1.0	19.0	5.3	0.0
RCP6.0	1.5	24.5	7.0	0.0
RCP8.5	3.8	37.7	15.3	0.0
東京(参考都市)の平年値	0.3	38.9	7.2	0.0



(日)	春(3～5月)	夏(6～8月)	秋(9～11月)	冬(12～2月)
RCP2.6	0.7	15.5	10.6	0.0
RCP4.5	1.7	24.7	19.4	0.0
RCP6.0	3.1	29.9	24.4	0.0
RCP8.5	11.0	36.6	39.2	0.0
那覇(参考都市)の平年値	1.6	70.3	24.0	0.0

(注) モデル計算結果の現在気候をベースにした変化量の地域平均と、一地点の観測値である平年値とは、単純に比較できるものではありません。また、都市例は代表的な都市をあげていますが、地域の気候の代表値ではありません。

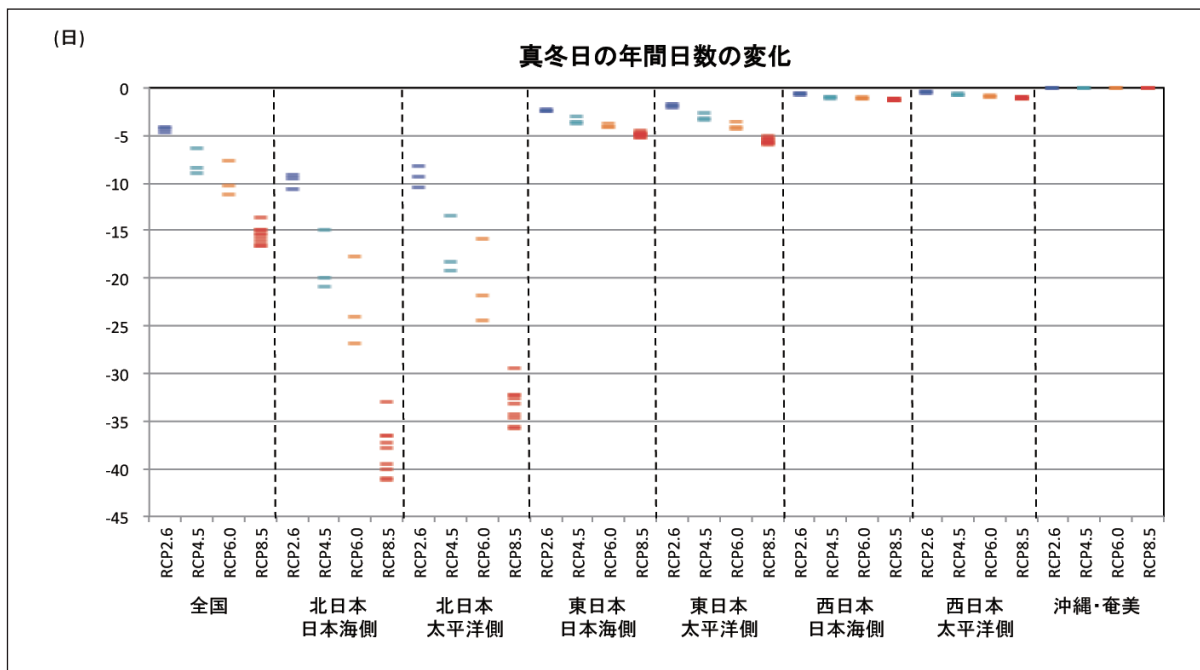
【参考】真夏日日数の現在気候再現値(3ケースの平均)

(日)	年	春	夏	秋	冬
全国	22.6	0.1	20.3	2.2	0.0
北日本日本海側	7.5	0.0	7.1	0.4	0.0
北日本太平洋側	6.5	0.1	6.1	0.3	0.0
東日本日本海側	25.2	0.1	23.1	2.1	0.0
東日本太平洋側	26.2	0.2	23.4	2.6	0.0
西日本日本海側	36.5	0.2	32.6	3.7	0.0
西日本太平洋側	38.2	0.2	33.7	4.3	0.0
沖縄・奄美	66.1	0.2	52.7	13.2	0.0

(注) 表中の値は、モデル計算結果の地域平均です。上記の参考都市の平年値(一地点の観測値)と単純に比較できるものではありません。

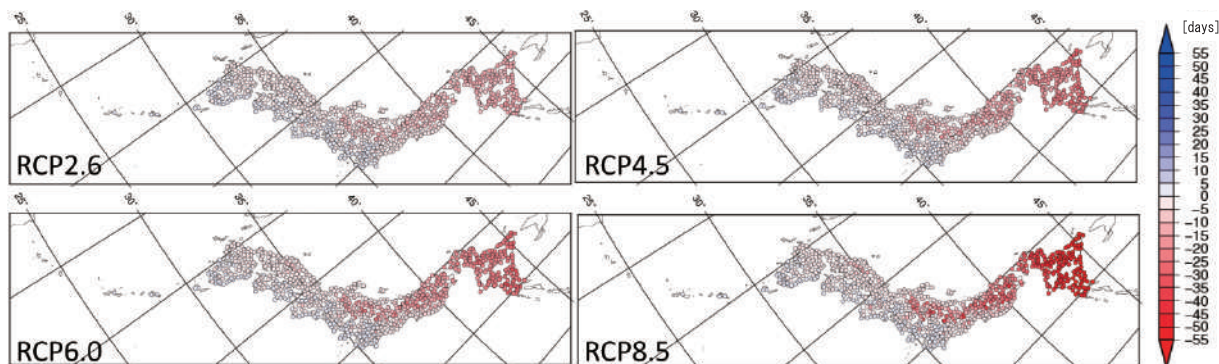
真冬日⁸の将来予測

- 真冬日の日数は、全国的に減少します。
(RCP2.6は約5日、RCP8.5は約15日減少) (全国平均・年積算)
- 特に北日本で減少幅が大きくなります。
(北日本日本海側ではRCP8.5で約40日減少) (年積算)



(日)	全国	北日本 日本海側	北日本 太平洋側	東日本 日本海側	東日本 太平洋側	西日本 日本海側	西日本 太平洋側	沖縄・ 奄美
RCP2.6	-4.4	-9.8	-9.4	-2.4	-1.8	-0.7	-0.5	0.0
RCP4.5	-7.9	-18.5	-16.9	-3.4	-3.1	-1.0	-0.8	0.0
RCP6.0	-9.7	-22.9	-20.7	-4.0	-4.0	-1.1	-0.9	0.0
RCP8.5	-15.5	-38.1	-33.3	-4.9	-5.6	-1.3	-1.0	0.0
参考都市例	-	札幌	釧路	新潟	東京	福岡	大阪	那覇
上記都市の 平年値	-	45.0	44.7	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0

グラフは各ケースにおける将来気候の予測（2080～2100年平均）と現在気候（1984～2004年平均）の差を示しています。下表に、各シナリオにおける全ケースの平均値を示します。参考までに各地域の都市における平年値（1981～2010年平均）も例示します。



真冬日の年間日数の変化の分布（シナリオごとに SST1, YS ケースのみ例示）

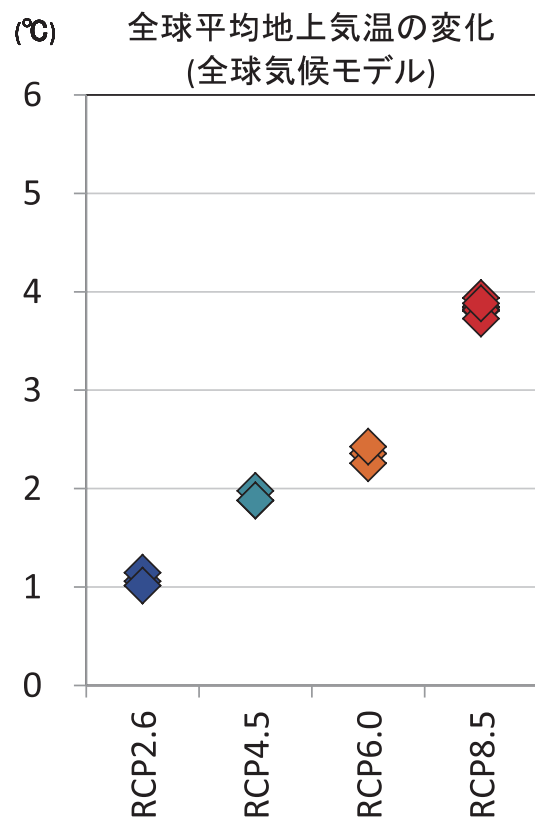
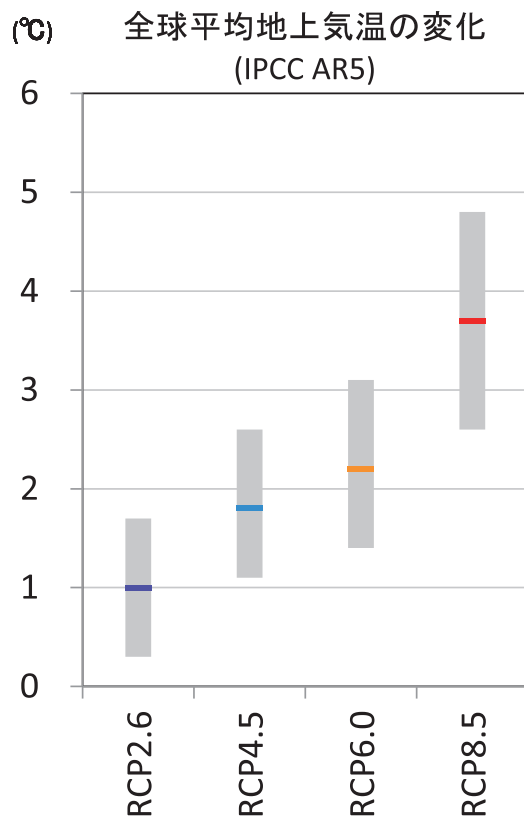
8----- 真冬日：日最高気温が0℃未満の日

■ IPCCの予測と本予測計算結果との関係は？

IPCCの第5次評価報告書（AR5）では、気候を研究する各国の機関がそれぞれの気候モデルを用いて実施した気候変動予測結果を集計しています。これにより、様々な専門的見解やモデルの違いを考慮した予測幅（不確実性幅）を計算しています。左図は代表的な結果の例で、世界全体の平均地上気温の上昇量について、複数モデルによる平均値とその幅が示されています。

今回の予測計算でも世界全体の予測計算（全球モデルによる予測計算）を行っており、同様に世界全体の平均地上気温の上昇量を評価することができます。右図はその結果で、RCP8.5については9ケース、それ以外は3ケースの気温上昇量を点で示しています。これを見ると、いずれのケースでも気温上昇量はIPCC AR5の平均値と同程度となっていることがわかります。

一方で、左図の幅のほうが右図の点の範囲より大きいことから明らかなように、今回の計算はIPCC AR5の気温上昇幅の全体をカバーしているわけではありません。そのため、今回の計算結果で示している不確実性幅は、様々な存在する不確実性のうちの一部であることに注意が必要です。



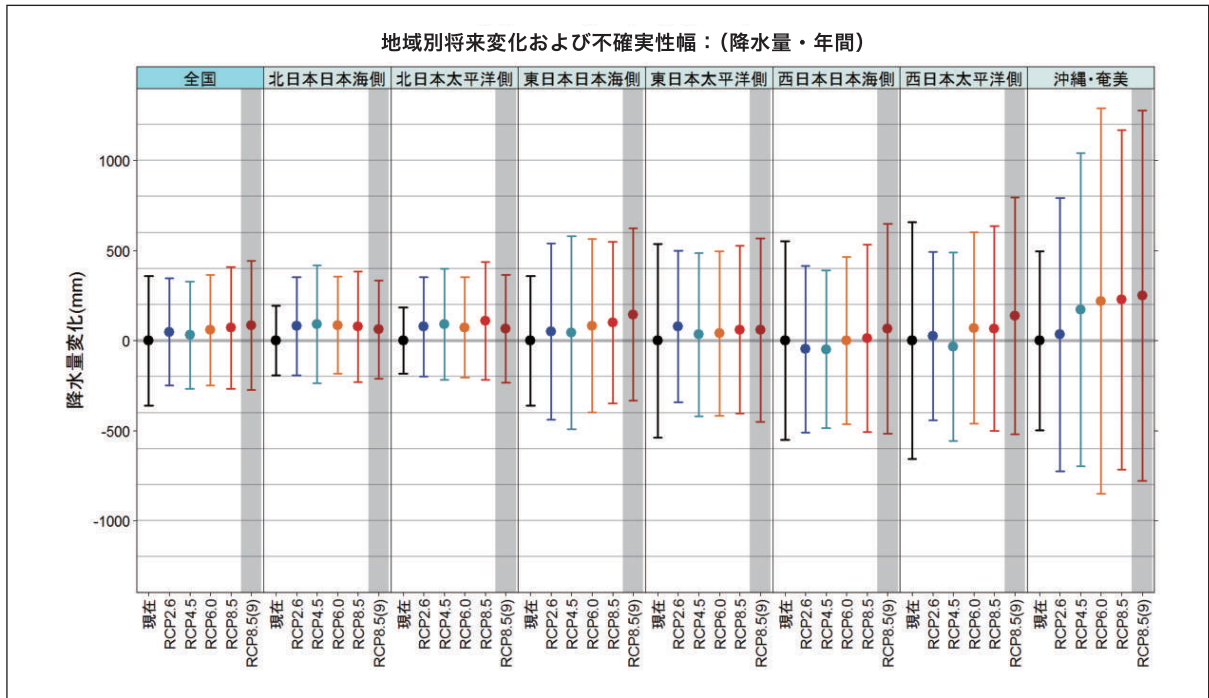
(左) IPCC AR5による1986～2005年平均に対する世界平均地上気温の変化（2080～2100年平均）

(右) 本予測計算結果から計算された、1984～2004年平均に対する全球平均地上気温の変化（2080～2100年平均）

左図数値の出所：IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約

年降水量の将来予測

- 年降水量は、増加するケースと減少するケースがあり、有意な傾向は見られません。



グラフでは、点で複数ケースの平均値を、実線で年々変動を含む全体の不確実性幅を表示しています（不確実性の幅に関する詳細は、24～27ページを参照）。横軸の現在は現在気候、RCP2.6～RCP8.5はRCPの各シナリオによる21世紀末の結果で、3ケースの結果を用いた不確実性幅を示しています。参考として、RCP8.5(9)に9ケースの結果を用いた不確実性幅を示しますが、同数値は他シナリオとの比較ができないことに注意が必要です。

(mm)	全国	北日本 日本海側	北日本 太平洋側	東日本 日本海側	東日本 太平洋側	西日本 日本海側	西日本 太平洋側	沖縄・ 奄美
RCP2.6	48.7 (-249.1～346.5)	80.2 (-192.9～353.2)	78.0 (-198.1～354.1)	50.1 (-440.2～540.5)	78.5 (-343.0～500.1)	-47.6 (-511.4～416.2)	26.2 (-440.5～493.0)	34.3 (-724.9～793.4)
RCP4.5	30.3 (-266.7～327.3)	90.8 (-237.2～418.7)	91.3 (-217.0～399.6)	45.2 (-491.2～581.6)	33.8 (-420.1～487.7)	-48.5 (-485.6～388.6)	-33.4 (-557.4～490.5)	172.8 (-696.0～1041.6)
RCP6.0	58.3 (-248.5～365.1)	86.3 (-182.7～355.3)	73.2 (-205.4～351.8)	81.9 (-399.4～563.1)	39.6 (-418.1～497.3)	-0.2 (-465.0～464.6)	69.3 (-462.0～600.6)	219.6 (-850.5～1289.7)
RCP8.5	71.3 (-266.4～409.0)	77.1 (-230.5～384.6)	109.6 (-219.0～438.2)	100.2 (-347.6～548.1)	61.3 (-403.8～526.4)	13.0 (-506.2～532.3)	67.0 (-502.0～636.1)	227.2 (-716.1～1170.6)
(9ケースの 不確実性)	85.2 (-274.1～444.5)	62.1 (-210.6～334.7)	65.7 (-234.0～365.4)	145.0 (-333.1～623.1)	58.9 (-449.7～567.4)	66.3 (-517.2～649.7)	138.2 (-519.4～795.7)	249.5 (-778.3～1277.3)
参考都市例	-	札幌	釧路	新潟	東京	福岡	大阪	那覇
上記都市の 平年値	-	1106.5	1042.9	1821.0	1528.8	1612.3	1279.0	2040.8

表中の数字は各シナリオの3ケース（YS）の平均値を示し、括弧内に不確実性幅を示しています（RCP8.5のみ全9ケースの平均値と不確実性幅を併記）。参考までに各地域の都市における平年値（1981～2010年平均）も例示しています。

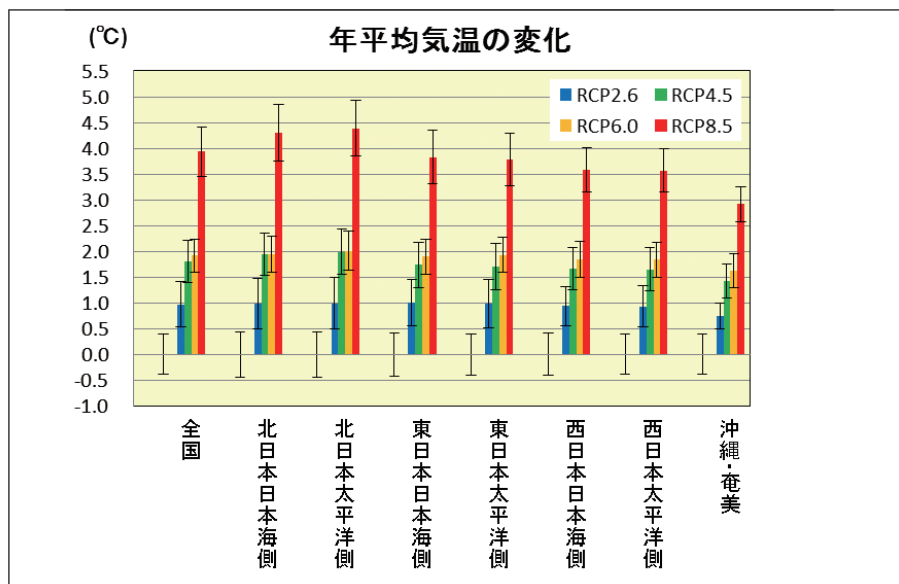
（注）参考として各地域の一都市における平年値（1981～2010年平均）を例示していますが、モデル計算結果の現在気候をベースにした変化量の地域平均と、一地点の観測値である平年値とは、単純に比較できるものではありません。また、都市例は代表的な都市をあげていますが、地域の気候の代表値ではありません。

■ 「将来変化」と「年々変動」の比較

現在でも、例年より暑い年や寒い年、降水が多い年や少ない年があるように、気象指標には年によるばらつきがあります(これを年々変動といいます)。そのため、去年より今年のほうが暑かったり、雨が多かったりしたからと言って、「気候変動が起こっている」とは言いきれません。そのような中で将来、「気温は上昇／下降する」「降水量は増える／減る」と明確に言うにはどうしたらよいのでしょうか。

本パンフレットでは、20年間の年々変動の標準偏差(データのばらつきの程度を示す量)と将来の変化量を比べることで、その変化量が有意なものかどうかを判定しています。この基準をもとに判定した場合、気温はどのケースでも年々変動よりも大きな変化量が見られ、「将来の気温は現在より高くなりそうだ」と言えます。

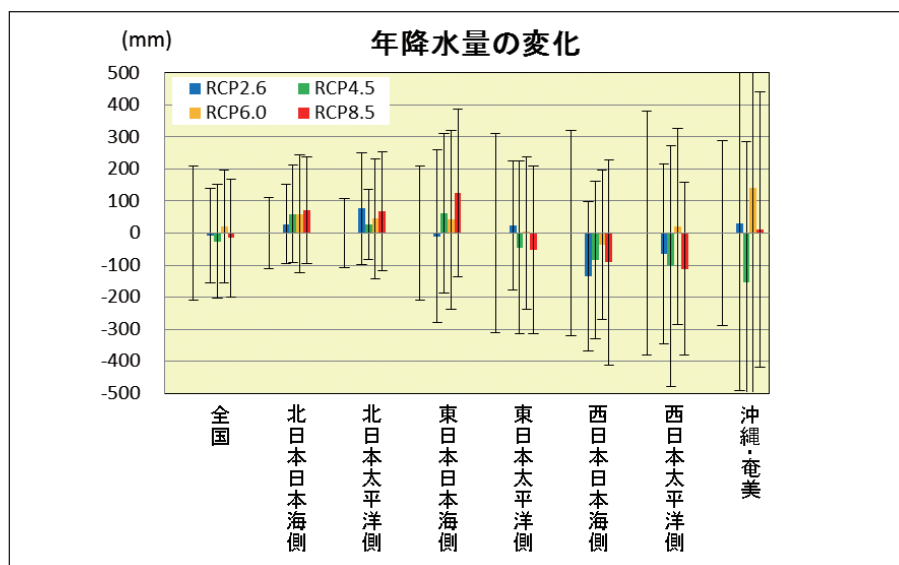
一方、年降水量はどのケースでも年々変動よりも変化量が小さく、「将来の降水量は現在より増える／減るだろう」とは言えません。



年平均気温の変化 (SST1, YSケースの例示)

棒グラフ：現在気候との差 (青：RCP2.6、緑：RCP4.5、橙：RCP6.0、赤：RCP8.5)

エラーバー：年々変動の標準偏差 (棒グラフがないものは現在気候の場合)



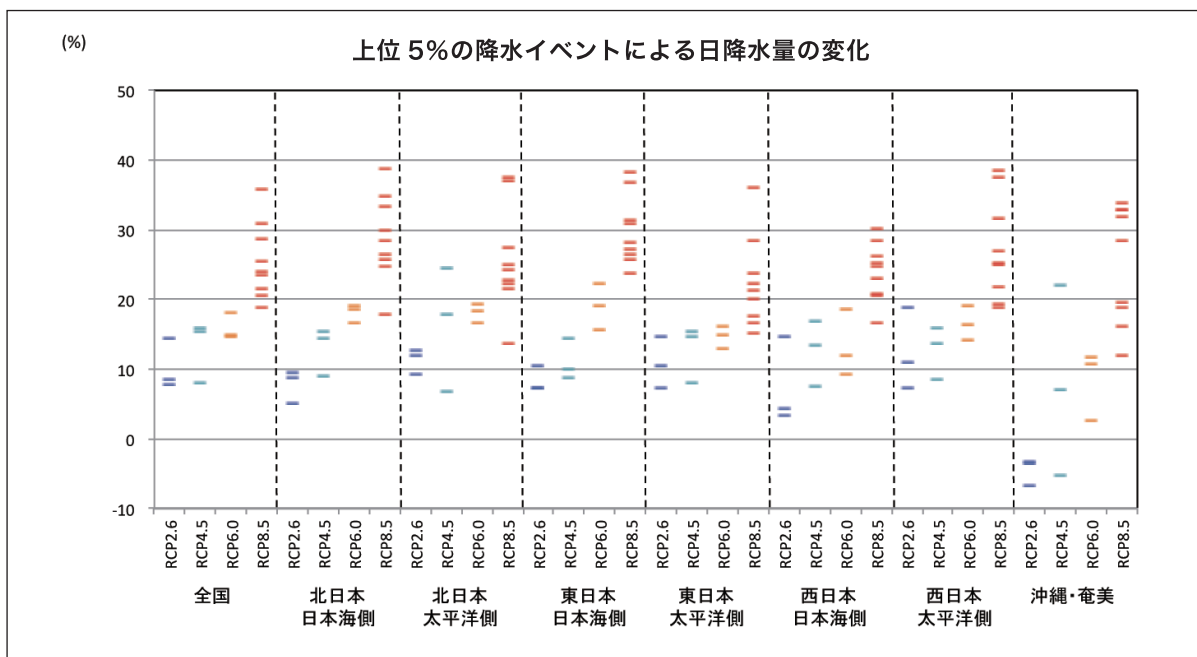
年降水量の変化 (SST1, YSケースの例示)

棒グラフ：現在気候との差 (青：RCP2.6、緑：RCP4.5、橙：RCP6.0、赤：RCP8.5)

エラーバー：年々変動の標準偏差 (棒グラフがないものは現在気候の場合)

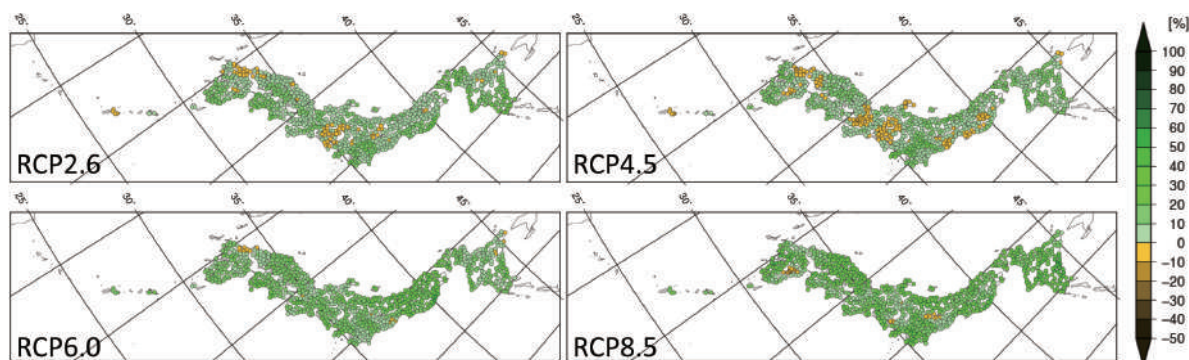
大雨による降水量⁹の将来予測

- 大雨による降水量は、全国的に増加します。
(RCP2.6は約10%、RCP8.5は約25%増加) (全国平均・年平均)
- RCP2.6、RCP4.5の中には、沖縄・奄美で減少するケースもあります。



(%)	全国	北日本 日本海側	北日本 太平洋側	東日本 日本海側	東日本 太平洋側	西日本 日本海側	西日本 太平洋側	沖縄・ 奄美
RCP2.6	10.3	7.8	11.3	8.5	10.9	7.5	12.4	-4.5
RCP4.5	13.2	13.0	16.4	11.1	12.7	12.6	12.7	8.0
RCP6.0	16.0	18.1	18.2	19.0	14.7	13.2	16.5	8.4
RCP8.5	25.5	28.9	25.7	29.9	22.4	24.0	27.2	25.2
地域平均	※地域ごとの日降水量の発生頻度分布をもとに算出							
上位5% 日降水量	40 ~ 60(mm)	20 ~ 40(mm)	20 ~ 40(mm)	40 ~ 60(mm)	40 ~ 60(mm)	40 ~ 60(mm)	60 ~ 80(mm)	80 ~ 100(mm)

グラフは各ケースにおける現在気候（1984～2004年平均）からの将来気候の予測（2080～2100年平均）の変化率を示しています。下表に、各シナリオにおける全ケースの平均値を示します。参考までに各地域のアメダス観測点を用いて算出した現在気候の再現値（1984～2004年平均）も例示します。

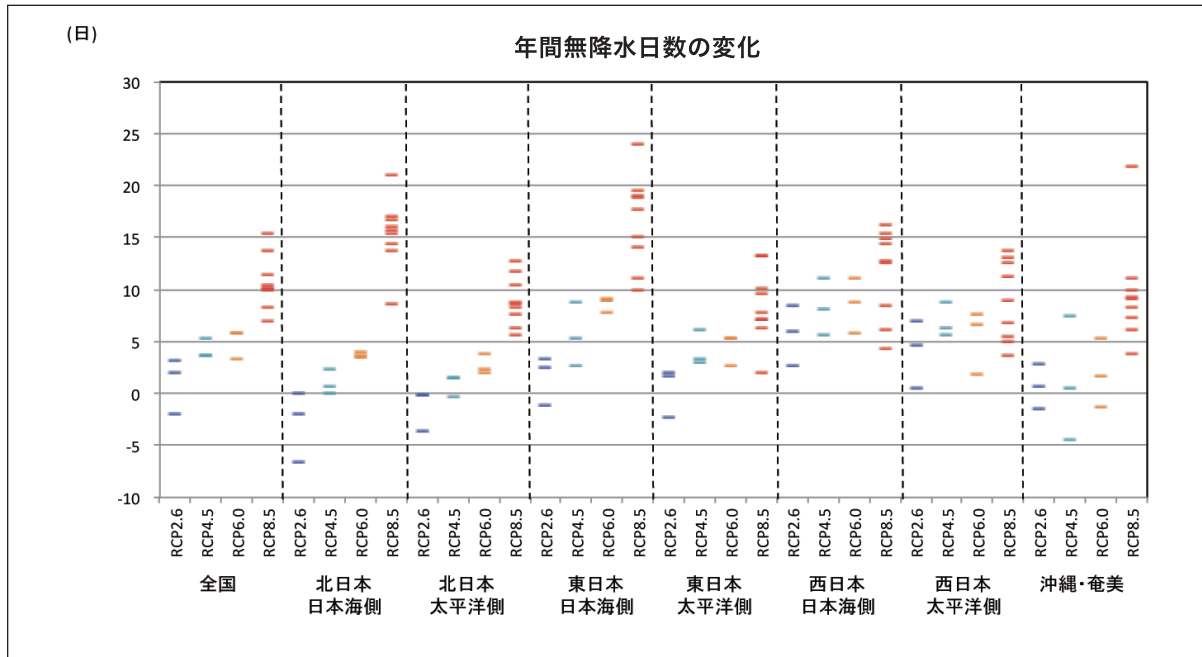


上位5%の降水イベントによる日降水量の変化の分布（シナリオごとに SST1, YS ケースのみ例示）

9----- ここでは、「上位5%の降水イベントによる日降水量」と定義する。各地点における日降水量の総発生数のうち、上位5%の日降水量の平均値を算出し、大雨の程度を表す指標としている。

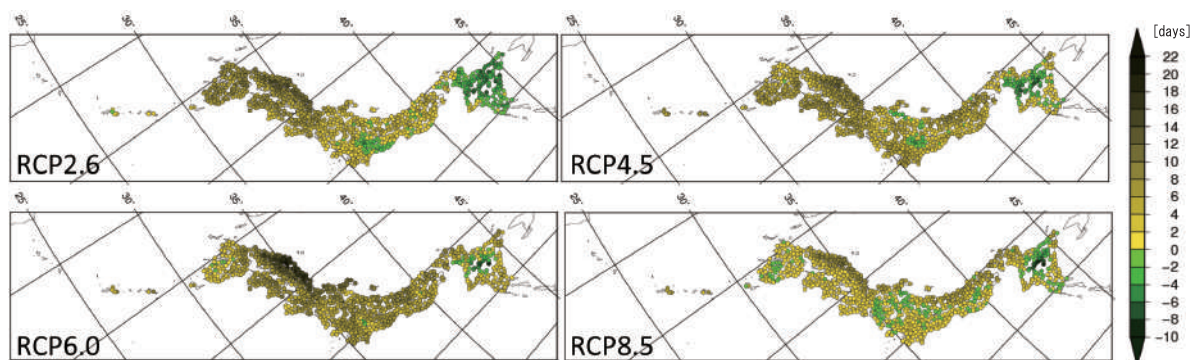
無降水日数¹⁰の変化の将来予測

- 無降水日数は、全国的に増加します。
(RCP8.5は約10日増加) (全国平均・年積算)
- RCP2.6、RCP4.5の中には、減少するケースもあります。



(日)	全国	北日本 日本海側	北日本 太平洋側	東日本 日本海側	東日本 太平洋側	西日本 日本海側	西日本 太平洋側	沖縄・ 奄美
RCP2.6	1.1	-2.9	-1.3	1.6	0.5	5.7	4.0	0.7
RCP4.5	4.2	1.0	0.9	5.6	4.2	8.3	6.9	1.2
RCP6.0	5.0	3.7	2.7	8.6	4.5	8.5	5.4	1.9
RCP8.5	10.7	15.4	8.9	16.6	8.5	11.7	8.9	9.7
参考都市例	-	札幌	釧路	新潟	東京	福岡	大阪	那覇
上記都市の 平年値	-	225.5	276.7	192.8	263.6	253.7	266.8	243.1

グラフは各ケースにおける将来気候の予測（2080～2100年平均）と現在気候（1984～2004年平均）の差を示しています。下表に、各シナリオにおける全ケースの平均値を示します。参考までに各地域の都市における平年値（1981～2010年平均）も例示します。

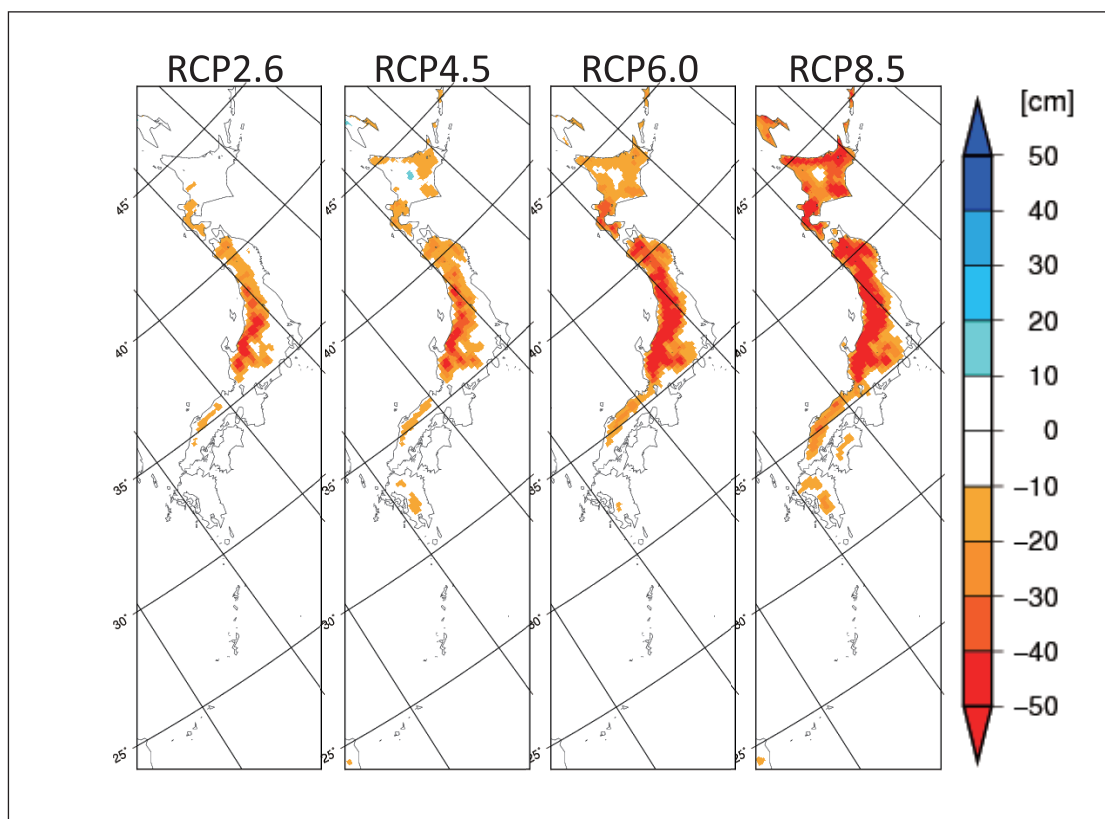


年間無降水日数の変化の分布（シナリオごとに SST1, YS ケースのみ例示）

10----- 無降水日数：日降水量が1.0mm未満の日数

最深積雪¹¹の将来予測

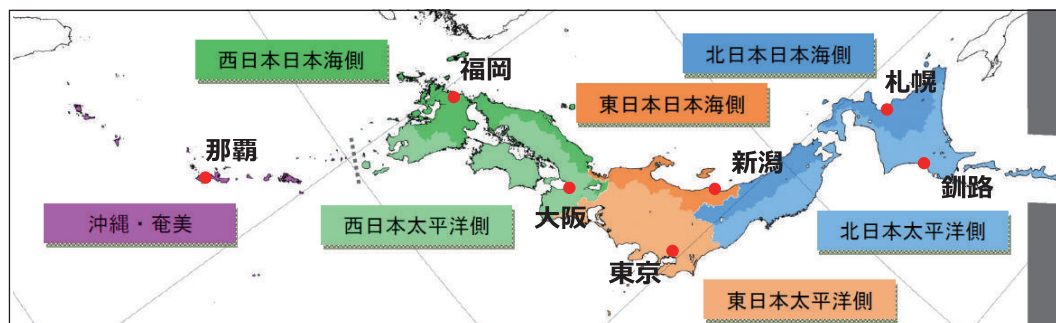
- 年最深積雪は、全国的に減少します。
- 特に東日本日本海側で減少量が大きくなります。



年最深積雪の変化の分布（シナリオごとに SST1, YS ケースのみ例示）

■ 代表都市の説明

本パンフレットでは、地域を7地域に分け、それぞれに代表都市を設定しています。ただし、「代表都市の値が地域の気候の代表値ではない」ことに注意が必要です。たとえば、単純に東日本太平洋側の真冬日の年間日数の変化量を現在の東京に当てはめると値がマイナスになりますが、そのような使い方は想定していません。

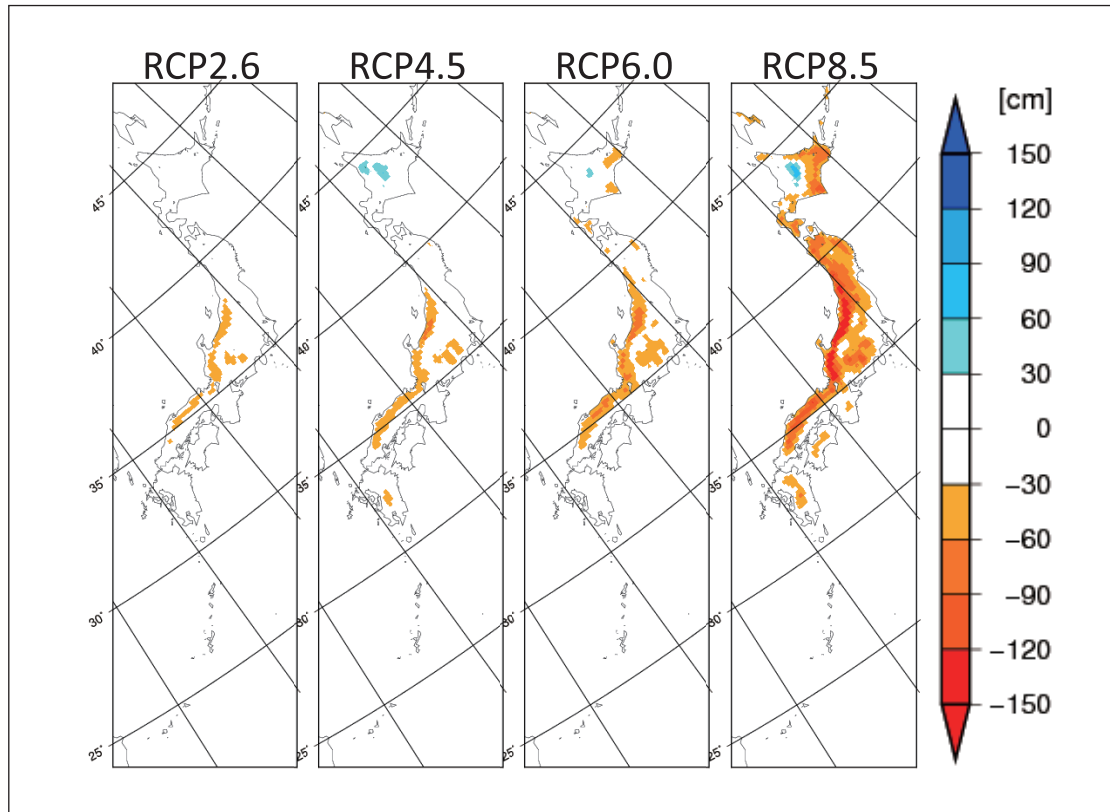


出所：気象庁「地球温暖化予測情報第8巻」（2013）を一部改編

11----- 現在気候とのバイアス誤差に伴う不確実性が大きいいため、利用には注意が必要である。

降雪量¹²の将来予測

- 年降雪量は、全国的に減少します。
- 特に東日本日本海側で減少量が大きくなります。
- 北海道内陸の一部地域では増加する傾向も見られます。



年降雪量の変化の分布（シナリオごとに SST1, YS ケースのみ例示）

■ 代表都市の説明（続き）

各地域の主な都市における各指標の平年値[※]

※平年値：1981～2010年（昭和56年～平成22年）の30年間の観測値から求めた平均値

地域	都市例	年平均気温 (°C)	日最高気温 の年平均値 (°C)	日最低気温 の年平均値 (°C)	真夏日の 年間日数 (日)	真冬日の 年間日数 (日)	年降水量 (mm)	日降水量1.0ミリ 未満の年間日数 (日)
北日本日本海側	札幌	8.9	12.9	5.3	8.0	45.0	1106.5	225.5
北日本太平洋側	釧路	6.2	10.2	2.3	0.1	44.7	1042.9	276.7
東日本日本海側	新潟	13.9	17.6	10.6	33.5	1.1	1821.0	192.8
東日本太平洋側	東京	15.4	19.8	13.2	46.4	0.0	1528.8	263.6
西日本日本海側	福岡	17.0	20.9	13.6	57.1	0.0	1612.3	253.7
西日本太平洋側	大阪	16.9	21.1	13.3	73.2	0.0	1279.0	266.8
沖縄・奄美	那覇	23.1	25.7	20.8	96.0	0.0	2040.8	243.1

出所：気象庁ホームページ (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>)

12----- 現在気候とのバイアス誤差に伴う不確実性が大きいいため、利用には注意が必要である。

気候変動予測計算の仕様 ~どのような条件を変えて計算しているの？

用いた気候モデルの概要

本予測計算では、気象庁気象研究所が開発した全球気候モデル（GCM：Global Climate Model）¹³と地域気候モデル（RCM：Regional Climate Model）¹⁴を使用しました。

GCMには温室効果ガス（GHG：Greenhouse Gas）、オゾン、エアロゾル濃度、海面水温、海氷密接度、海氷厚等を入力条件として与えました。今回使用するモデルは大気モデルであるため、海面の状態（海面水温、海氷）は、現在値については観測値、将来変化については第5期結合モデル相互比較計画（CMIP5：Coupled Model Intercomparison Project Phase 5）のモデル結果を利用しています。

より狭い範囲で高解像度の計算を行うRCMを駆動するためには、入力情報として、GHG濃度及び領域境界における気象条件等が必要です。領域境界における気象条件はGCMによる全球の計算結果から抽出しました。

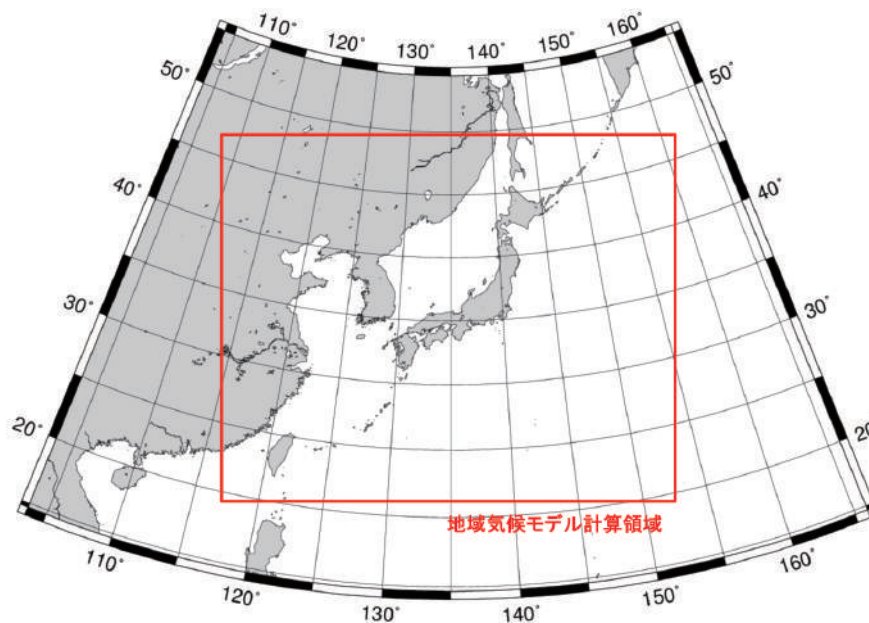
全球ではGCMの空間解像度である約60km間隔で、日本周辺ではRCMの空間解像度である20km間隔で、現在の気候の再現と将来の気候の予測を行いました。

気候変動予測モデルの主要な設定

	全球気候モデル (GCM)	地域気候モデル (RCM)
モデル名称	MRI-AGCM3.2H	MRI-NHRCM20
空間解像度	約60km	20km
計算領域	全球	日本周辺
格子数	640×320 (水平) 60層 (鉛直)	211×175 (水平) 40層 (鉛直)
積雲対流スキーム	Yoshimuraスキーム Kain-Fritschスキーム Arakawa-Schubertスキーム	Kain-Fritschスキーム
主な入力条件	温室効果ガス、オゾン、エアロゾル濃度 海面水温、海氷密接度、海氷厚	温室効果ガス、オゾン、エアロゾル濃度 GCM計算結果

13----- 詳細についてはMizuta et al.(2012); Endo et al.(2012)を参照のこと。

14----- 詳細についてはSasaki et al.(2011); Sasaki et al.(2012)を参照のこと。



複数ケースの予測計算

予測シナリオのケース設定

本予測計算では、以下に示す計21ケース（現在気候3ケース、将来気候18ケース）の計算を行いました。

予測シナリオのケース設定

番号	ケース名	期間 ¹⁵	排出シナリオ	海面水温	積雲対流スキーム
1	HPA_m02	【現在実験】 1984年9月～ 2004年8月	観測値	観測値	YS
2	HPA_kf_m02				KF
3	HPA_as_m02				AS
4	HFA_rcp85_c1	【将来実験】 2080年9月～ 2100年8月	RCP8.5	SST1	YS
5	HFA_kf_rcp85_c1				KF
6	HFA_as_rcp85_c1				AS
7	HFA_rcp85_c2			SST2	YS
8	HFA_kf_rcp85_c2				KF
9	HFA_as_rcp85_c2				AS
10	HFA_rcp85_c3		SST3	YS	YS
11	HFA_kf_rcp85_c3				KF
12	HFA_as_rcp85_c3				AS
13	HFA_rcp60_c1		RCP6.0	SST1	YS
14	HFA_rcp60_c2			SST2	
15	HFA_rcp60_c3			SST3	
16	HFA_rcp45_c1		RCP4.5	SST1	
17	HFA_rcp45_c2			SST2	
18	HFA_rcp45_c3			SST3	
19	HFA_rcp26_c1		RCP2.6	SST1	
20	HFA_rcp26_c2			SST2	
21	HFA_rcp26_c3			SST3	

（海面水温、積雲対流スキームの略号については、20, 21 ページの解説参照）

15---- 実際の計算では、初期条件の影響を緩和するため、上記の期間に先行して準備的な計算（＝スピンアップ計算）を実施した。スピンアップ計算の期間はGCMでは約1年間、RCMでは約40日間分である。なお、開始月を9月としたのは積雪に対する初期条件の影響を緩和するためである。

温暖化予測の不確実性を定量化するため、同じ対象期間の計算を異なる条件を設定して複数行うアンサンブル実験¹⁶を実施しました。

現在実験の海面水温（SST：Sea Surface Temperature）・海水密接度・海水厚については観測の値を用いました。将来条件の実験においては、現在気候実験で用いた観測値にモデルの将来変化を上乗せして作成した気候値に、観測と同じ年々変動を組み合わせた推定値を用いました¹⁷。

排出シナリオ

将来の温室効果ガス（GHG）排出シナリオによって気候は大きく変わります。この「排出シナリオ間の不確実性」を考慮するために、IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書（IPCC, 2013）で用いられた4つのRCPシナリオにもとづくCMIP5モデル実験から、将来の海面水温変化や温室効果ガス濃度などの入力条件を設定しました。（RCPシナリオの詳細は23ページ参照）

- RCP8.5（高位参照シナリオ）
- RCP6.0（高位安定化シナリオ）
- RCP4.5（中位安定化シナリオ）
- RCP2.6（低位安定化シナリオ）

なお、IPCC第5次評価報告書（AR5）統合報告書の中では「RCPシナリオ」として複数のモデル計算結果が示されていますが、本予測計算はあくまでその中の平均的な気温上昇量を想定し、その中で複数ケースの計算をした結果です。本パンフレットでは「RCP2.6は0.5～1.7℃上昇（4ページ参照）」等と表記しますが、AR5内で示されるRCP2.6シナリオの温度上昇幅をすべて評価しているわけではありませんので注意してください。

将来の海面水温の変化パターン

気候の変化を計算する上で、海面水温の設定は非常に重要な条件です。特に地上付近の気温などに対しては、海面水温によりほぼ傾向が決定されるほどの大きな影響があります。

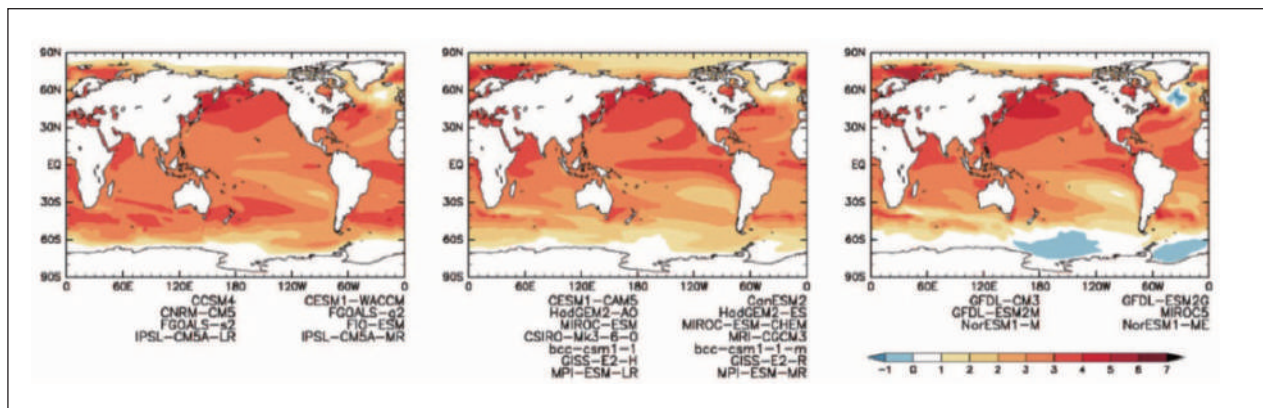
海面水温分布の変化は、熱帯やモンスーン地域の降水分布を通して東アジアの気候にも大きな影響を及ぼします。海面水温変化の分布の違いによる予測結果への影響を検討することで、予測の不確実性の一部を考慮するため、CMIP5で提供されている多数の大気海洋結合モデルを分析し、得られた海面水温変化パターンを大きく3つのパターン（SST1, SST2, SST3）に分類しました。ただし、海面水温変化量の全球平均は、規格化にともなって全てのパターンでほぼ同一となっています。水温変化の幅の不確実性を再現しているわけではないことに注意が必要です¹⁸。

SST1は東部熱帯太平洋での小さな昇温、南半球での大きな昇温、中緯度（40° 付近）での両半球における同程度の昇温により特徴付けられるパターン、SST2は中央から東部の熱帯太平洋で他のパターンよりも昇温が大きく、パターン分けをせずに平均した場合の特徴がより強く出ているパターン、SST3は北半球での大きな昇温、北インド洋・北大西洋での他のパターンより大きな昇温、南半球での小さな昇温と南北半球間のコントラストにより特徴付けられるパターンとなっています。

16----- 気候モデルを使ってコンピュータシミュレーションにより現在気候の再現や将来気候の予測を行うことを、気候研究分野では「実験」と呼ぶ。以降では、学術的な正確性を期すため、必要に応じて気候予測計算を指して実験と記載する。

17----- アンサンブル実験の設定に関する考え方は「文部科学省 気候変動リスク情報創生プログラム 領域テーマC：気候変動リスク情報の基盤技術開発」の成果を踏襲している。

18----- 海面水温条件の作成にあたっては、まず、現在実験と将来実験のSST変化の空間分布を作成する。次に、各モデルでの変化を熱帯（30S-30N）平均の変化量で規格化する。その空間パターンについて、全モデル平均からの偏差を計算する。その後、熱帯（30S-30N）におけるモデル間のパターン相関で定義されるノルムに基づいてクラスター分析をおこない、3グループのクラスターに分ける。このようにして計算した各クラスターでのSST将来変化分布を図に示している。詳細についてはMizuta et al. (2014)を参照のこと。



本予測計算で設定した3つの海面水温変化パターン（単位：K）
左：SST1、中：SST2、右：SST3

積雲対流パラメタリゼーション

日本周辺の気候変動予測では、降水の将来予測に関する不確実性を評価することが特に重要と考えられます。この不確実性を表現するため、全球気候モデル（GCM）の予測計算では3種類の積雲対流パラメタリゼーション（Yoshimura (YS) スキーム、Kain-Fritsch (KF) スキーム、Arakawa-Schubert (AS) スキーム¹⁹⁾）を用いて計算を行っています。

ただし、RCMにおいては、いずれの実験でも同一の対流スキーム（Kain-Fritschスキーム）を使用しています。KFは、日本周辺での各種気象現象に対する再現性の検証を通じて、一定の妥当性が担保されており、日本付近の積雲・対流活動を良く表現するスキームとして知られています。

■ 積雲対流パラメタリゼーションとは

積雲（晴れた日によく発生する綿のような形をした雲）は特に熱帯で顕著に発生・発達し、水蒸気を鉛直方向に輸送する過程で、水蒸気が凝結します。凝結した水蒸気は降水として落下するか、雲水として放出されます。結果として、積雲は大気中の熱源として大きな役割を果たし、ひいては大気大循環に大きな影響を与えています。

現在のモデルでは、非常に発達した積乱雲を局地モデルで表現可能であるケースを除けば、積雲を直接表現するだけの十分な分解能を持ちません。したがって、数値予報モデルの中における便宜上の取り扱いを行い、熱や水蒸気の鉛直方向の再分配を行う仕組みを導入しています。これが「積雲対流パラメタリゼーション」と呼ばれるものです。

出所：気象庁予報部 「平成24年度数値予報研修テキスト「数値予報の基礎知識と最新の数値予報システム」」を一部改編して引用

19----- それぞれのスキームについては、YS: Yoshimura et al.(2014), KS: Kain and Fritsch (1993), AS: Randall and Pan (1993)を参照のこと。



雄大積雲：入道雲ともいわれる。大気が不安定で、でき始めてから時間が経った積雲に見られることが多い。雲底から雲頂までの高さは、高度数千メートルから時には1万メートルにも達する。



塔状積雲：大気の状態が不安定なときに、上昇気流によって塔のように垂直に立ち上る。塔状積雲が現れると雨が降りだすことが多い。

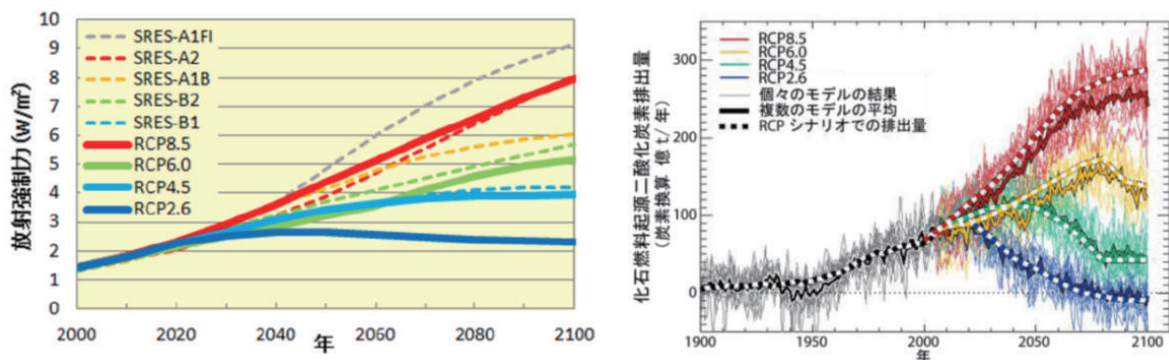
■ 予測のための将来シナリオの設定（RCPシナリオ）

RCPシナリオとは、政策的な温室効果ガスの緩和（削減）策を前提として、将来の温室効果ガスが安定化する濃度レベルと、そこに至るまでの経路のうち代表的なもの（代表的濃度経路）を選び作成したシナリオのことです。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）では、第5次評価報告書（AR5）から、このシナリオ区分に基づいた気候の予測や影響評価が行われるようになりました。

従来のSRESシナリオ²⁰に基づいた予測と違い、「目標主導型」の社会経済シナリオを複数作成して検討することが可能となります。

RCPに続く数値は、2100年における1750年に対するおおよその合計放射強制力（単位：W/m²）²¹を示し、その値が大きいくほど2100年における放射強制力（=温室効果ガス排出が多いシナリオである）ことを意味します。

出所：IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約を一部改編して引用

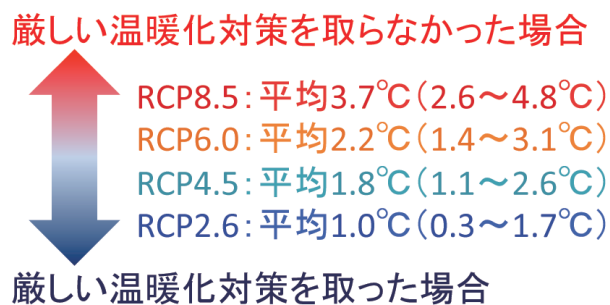


（左）RCPシナリオに基づく放射強制力（RCPシナリオで定める4つの放射強制力の経路を実線で示す。比較のためSRESシナリオに基づいて求めた放射強制力を破線で示す。）

（右）RCPシナリオに対応する化石燃料からの二酸化炭素排出量（地球システムモデルによる逆算の結果。細線：個々のモデルの結果、太線：複数のモデルの平均）

出所：文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省2013年9月27日報道発表資料をもとに作成

AR5によると、4つのRCPシナリオと、2081～2100年における世界平均気温の上昇量（1986～2005年比）の関係は以下のとおりです。その値が小さいほど、「厳しい温暖化対策を取った」シナリオである、ということもできます。



なお、括弧内の幅はAR5のモデル計算結果から予測された「5～95%モデル範囲」です。これらの範囲はモデルにおける不確実性及び確信度のレベルの違いを考慮して計算されたものです。

出所：IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約

20----- SRESシナリオ：IPCC第3次評価報告書及び第4次評価報告書において用いられたシナリオで、様々な将来の社会的・経済的・技術的変化を想定し、それぞれの想定に応じた将来の温室効果ガス排出量を推計して作成されている。

21----- 放射強制力：ある因子が持つ、地球に出入りするエネルギーのバランスを変化させる影響力の尺度である。正の放射強制力には地表面を昇温させる傾向が、負の放射強制力には地表面を降温させる傾向がある。

本予測計算での不確実性の考慮

～どうやって変化の「幅」を算出しているの？

なぜ複数シナリオ、複数ケースの予測計算が必要なのか

気候変動予測は、さまざまな要因により不確実性を持ちます。そのため、予測情報を用いて有効な意思決定に結びつけるためには、この不確実性を適切に把握し、解釈することが必要です。

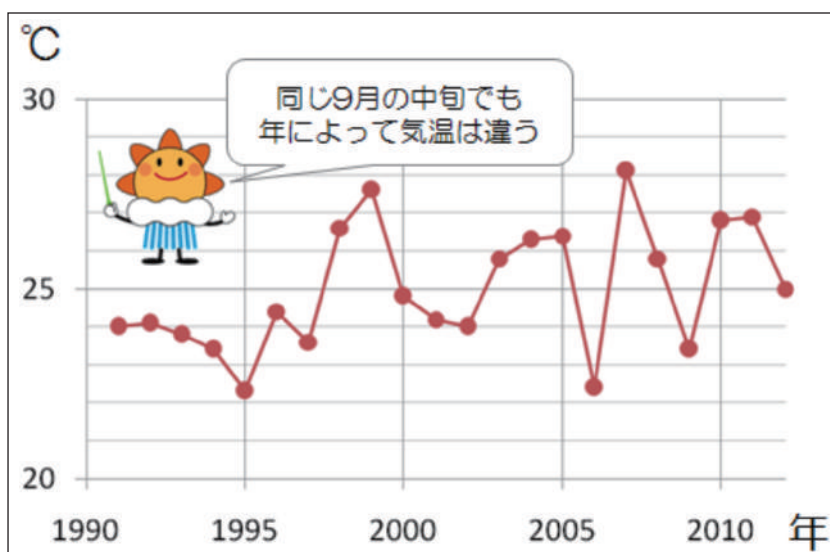
気候変動予測が持つ不確実性のうち、主要なものとして以下が挙げられます。

1 自然変動に伴う不確実性

人間活動の影響が無くとも、気候は自然要因により絶えず変動しています。自然変動の中には、日々の天気の変化を生み出すような短い時間スケールのものであれば、猛暑や冷夏といった年ごとの特徴を生み出すような変動もあります。さらに長期の変動としては、数年～10数年単位の変化も生じています。

このような自然変動が存在することにより、ある一年のみの気温や降水量の傾向を調べて、その結果により温暖化の存在を議論することは適切ではありません。それが自然変動により偶然生じたものであるか、温室効果ガスの排出量の変化によるものであるかを判別できないためです。

そのため、気候変動予測のシミュレーションにおいては、長期（20～30年程度）について平均値などの統計をとることにより、自然変動の影響を除いた上で気候変動による長期的な変化が生じているかを把握するのが一般的です²⁰。



1991～2012年の福岡における9月中旬(9月11～20日)の平均気温の年ごとの変動

出所：気象庁

2 将来の温室効果ガス排出量の不確実性

気候変動予測における将来の条件は、一定の想定のもとでの温室効果ガス排出量を設定することにより考慮されています。将来の温室効果ガス排出量は人口や経済発展、政策、技術の進展などに左右されますが、これらの条件について長期間にわたる単一の精度の良い予測を提示することは困難です。従って、社会科学的な観点から考えられる複数のシナリオを想定し、それぞれが実現した場合の気候への影響を気候変動予測モデルにより評価します。

²⁰----- 一方で、統計をとる期間が限られていることによる統計的な不確実性も存在する。

3 気候変動予測モデルの不確実性

気候変動予測モデルは、大気・海洋・陸面をはじめとする地球の気候システムに関する科学的な理解をもとに、それを計算可能な数式で表現し、コンピュータで計算できるプログラムとしたものです。ただ、気候システムは極めて複雑であり、全てが完全に理解されているわけではないため、現実を完全に再現できている気候モデルはありません。将来の科学的知見の進展により、現実と気候モデルの差が縮小できる可能性はあります。

また、数式をもとにシミュレーションプログラムを構築する際にも、現在のコンピュータで実行可能な計算量という意味での制約があり、空間解像度（格子サイズ）等の限界として現れます。こちらは今後のコンピュータの能力の向上により改善される可能性があります。

本予測計算においては、このような不確実性の存在を前提とし、それぞれの不確実性について可能な限り考慮するために、複数シナリオ、複数ケースの予測計算を行い、その分析を実施しています。



写真：北海道ニセコの積雪

積雪・降雪の多い地域では特に、その将来変化がレジャーや文化等に影響を及ぼすことも考えられる。ただし、本予測計算の積雪・降雪に関しては、観測と気候モデルの差が大きく、気候変動予測モデルの不確実性が大きいいため、利用には注意が必要である。

本予測計算での不確実性の取り扱い

本予測計算では複数のケース設定により予測計算の不確実性の一部を考慮していますが、現実的に計算可能なケース数の限界などにより、考慮されていない不確実性が存在します。特に、IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書（IPCC, 2013）等で示されている不確実性幅の全体を考慮するようなケース設定では無いことに注意が必要です。

本予測計算での不確実性の取り扱いについては以下のとおりです。

1 自然変動に伴う不確実性

自然変動に伴う不確実性に対しては、20年間の予測計算の平均的な傾向を対象として評価を行うとともに、不確実性幅の設定において年々変動の大きさを定量的に評価し、不確実性幅として考慮しています。ただし、将来気候の海面水温の設定において、自然変動成分は「現在気候での自然変動成分を使用して」設定されており、結果として将来発生し得る自然変動の一部が過小評価されている可能性があります。

2 将来の温室効果ガス排出量の不確実性

本予測では、IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書（IPCC, 2013）で用いられたRCP（代表的濃度経路）シナリオ（van Vuuren et al., 2011）のうち4つ（RCP2.6、4.5、6.0、8.5）の各条件のもとで予測計算を行いました。ただ、将来どのシナリオが実現するか現時点で判断できない（あるいは別のシナリオが実現し得る）という点で、不確実性は残存すると言えます。

ただし、今後の意思決定により特定のシナリオを選択できる余地が残されています。

3 気候変動予測モデルの不確実性

本予測においては、全球気候モデルにおいて複数の積雲対流スキーム（YS、AS、KF）及び海面水温（SST1、SST2、SST3）を設定して予測計算を実施することにより、気候変動予測モデルの不確実性を考慮しています。一般に、気候変動予測モデルには多数のパラメータ及び手法の選択肢があり、これらについて「真の設定」がまだ分かっていないために不確実性が生じます。

積雲対流スキームは空間スケールの小さい積雲の生成・消滅に関する評価手法の選択肢であり、海面水温の設定は海洋モデルが持つ不確実性に関する選択肢と言えますが、当然この2項目以外にも不確実性の要因は存在します。

あらゆる不確実性の組み合わせを考慮してシミュレーションを実施することは時間的に不可能であるため、本予測計算では、気候学的な知見及び経験から、日本付近の気候変動予測において重要と考えられる降水プロセスに注目し、それに特に重要な影響を与えと考えられる2つの項目（積雲対流スキーム及び海面水温）を選択しました²³。一方で、将来予測計算において海面水温上昇量を設定する際に、気温上昇量の空間的なパターンにのみ注目するために、3パターンとも平均的な気温上昇量が同じとなるよう規格化を行っています。その結果として、IPCC第5次評価報告書で表現されているような異なる気候モデルでの気温上昇のしやすさの違い（気候感度）が考慮されていません。

23----- 本設定は「文部科学省 気候変動リスク情報創生プログラム 領域テーマC：気候変動リスク情報の基盤技術開発」と同一としている。

本予測計算での不確実性の表現方法

今回の予測計算では、複数ケースの計算結果を用いて不確実性を統計的な幅で表現することを試みました。それぞれの不確実性を以下のように考慮します。

1 自然変動に対する不確実性

自然変動に対する不確実性について、年々変動の分散により考慮します。また、統計期間が有限であることによる不確実性をブートストラップ法²⁴により考慮します。

2 将来の温室効果ガス排出量の不確実性

4種類の排出シナリオに対する予測結果を使用しますが、異なる排出シナリオによる結果をまとめて幅を示すことはしません。これは前述の通り、今後の温室効果ガス対策に対する選択の余地を示すものであり、気候予測計算結果を扱う中で確からしさを考慮できるものではないためです。

3 気候変動予測モデルの不確実性

複数のケースの結果をまとめて不確実性幅を設定します。RCP8.5については9通り（3種の積雲対流スキーム×3種の海面水温）、複数シナリオ間の比較には3通り（3種の海面水温）の結果がありますが、各ケースの「確からしさ」は同一であるという想定を置いて分析します。ケースごとの特徴（気温が若干高い、特定の季節で降水量が多いなど）がばらつくほど、不確実性幅が大きくなります。

まとめると、本手法では、以下の3種類の異なる不確実性を足し合わせるにより、予測結果全体の不確実性を評価しています²⁵。

- 年々変動の不確実性 (上記区分では①に相当)
- 20年平均値を採用したことによる不確実性 (上記区分では①に相当)
- 複数ケース間の傾向の違いによる不確実性 (上記区分では③に相当)

なお、本手法においては以下の点を仮定していることに留意が必要です。

- 異なる年、異なるケースの計算結果について統計的に独立であると仮定
- 標本平均及び分散を、母集団の平均及び分散の近似値として使用
- 各ケースの確からしさを同程度と仮定²⁶

24----- ブートストラップ法：有限のデータ（例えば20年分の年別値）から、そのデータの個数と同じ回数などのあらかじめ定めた回数（例えば20回）で、無作為に重複を許した抽出を行うことを十分に繰り返して（例えば1万回）大量の標本を生成し、それらの標本を利用して母集団の性質を分析する方法。

25----- これらの和の平方根の1.64倍が、4ページ、6ページ、7ページ、12ページのグラフにある縦線（エラーバー）に相当する。

26----- 既存の研究事例では、現在気候において観測データをより精度よく再現できているモデルの重みを大きくするという手順もある。

現在気候の再現性 ～気候モデルは現実の気候をどれほど再現できているの？

以下では、気候モデルにより現在の気候を計算し、観測された現実の気候と比較して、どの程度の差異があるかを示します。現在の気候をある程度正確に再現できていることは、将来変化について議論できるための大前提となりますので、このような確認も重要です。

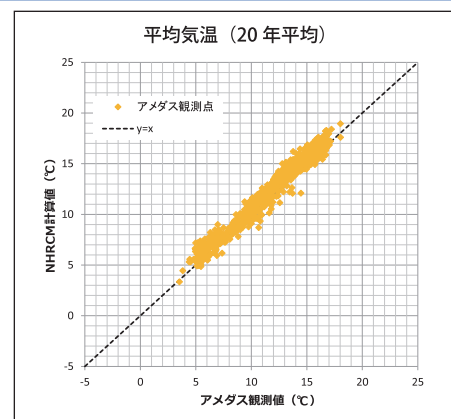
アメダス（AMeDAS²⁷）観測値と本予測計算（現在気候）とを比較し、今回用いた気候モデルの再現性を評価しました。その際、以下のような基準でバイアス（観測との差）の大きさを評価し、モデルがどれだけ現在の気候を再現できているかを確認しました²⁸。

基準	本書での表記
系統誤差の地域平均が 地点間の観測値標準偏差以上の場合	「正（負）のバイアスがある」
同未満の場合	「明確なバイアスはない」 「正（負）のバイアスも見られるが、偏差のばらつきも大きい」

気温の再現性

気温については、観測点が少なくバイアスを適切に評価しづらい沖縄・奄美を除き明確なバイアスはほとんど見られず、おおむね観測値を再現していると言えます。20年平均気温の相関図を見ても、その傾向が言えます。

	(単位：℃)				
	年	春	夏	秋	冬
全国	0.54 (3.64)	0.38 (3.78)	1.24 (2.94)	0.52 (3.43)	0.01 (4.58)
北日本日本海側	0.28 (2.19)	-0.02 (2.08)	1.45 (1.83)	0.33 (2.05)	-0.66 (3.05)
北日本太平洋側	0.68 (2.44)	0.44 (2.45)	2.21 (2.14)	0.54 (2.13)	-0.50 (3.40)
東日本日本海側	0.62 (1.01)	0.48 (1.05)	0.99 (0.69)	0.60 (1.07)	0.40 (1.38)
東日本太平洋側	0.32 (2.51)	0.16 (2.51)	0.95 (1.99)	0.31 (2.62)	-0.17 (3.11)
西日本日本海側	0.80 (1.42)	0.72 (1.41)	0.86 (1.12)	0.88 (1.57)	0.75 (1.76)
西日本太平洋側	0.68 (1.87)	0.66 (1.87)	0.71 (1.30)	0.63 (2.04)	0.70 (2.44)
沖縄・奄美	0.58 (0.36)	0.49 (0.46)	0.51 (0.28)	0.80 (0.31)	0.54 (0.50)



(左) 地域毎の日平均気温の再現性比較（地域気候モデルから観測を引いたもの）

バイアスの地域平均、括弧内は地点間の標準偏差を示す。単位は℃である。正（負）のバイアスがある（バイアスの絶対値が標準偏差以上）場合、オレンジ色（水色）に塗りつぶしている。

(右) アメダス観測値と NHRCM モデル値の相関図（20年平均気温）

■ バイアス補正について

現在気候の再現性を見ると、気温に関してはおおむね観測結果を再現していると言えます。そのため、年平均気温（日平均・日最高・日最低）に関しては補正せずに用いました。ただし、真夏日日数など閾値が関係する統計量の変化を扱う際には、出現頻度分布が観測値と気候モデルの出力値でずれていると、結果が大きくずれてしまいます。そのため、真夏日・真冬日日数を計算する際にはバイアス補正を行いました。

降水に関しては、現在気候の再現結果を見ると、気温より比較的大きなバイアスが存在することが分かりました。そのため、降水量のモデル計算結果はすべて、バイアス補正後の値を用いて比較することとしました。

バイアス補正は、モデルの現在気候計算結果とアメダスによる観測データとを比較して行うため、バイアス補正後の計算結果は、補正に用いたアメダス観測点上の値として算出されます。そのため、真夏日日数や降水の変化を示す地図をみると、連続的な色分けではなく、色を持つ点の集合であらわされています。

なお、本パンフレットでは、積雪・降雪に関してはバイアス補正を行っておりませんので、予測結果を利用する際はその旨留意してください。

27-----「地域気象観測システム」。Automated Meteorological Data Acquisition Systemの略。

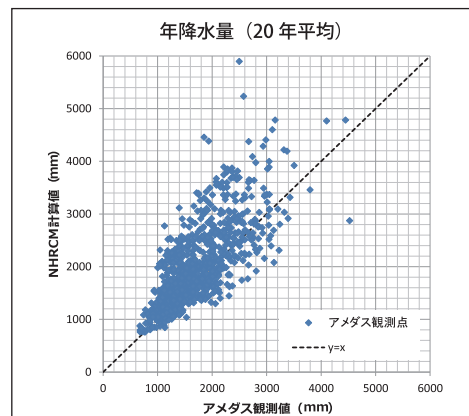
28----- 本パンフレットではYSスキームの現在気候計算結果を例示する。

降水の再現性

降水については、全体的に正のバイアスが目立ち、東日本日本海側では年降水量に有意なバイアスがあります。年降水量20年平均の相関図を見ても、気温よりは上方向（計算値の方が大きい方向）への点のばらつきが目立ちます。

（単位：mm）

	年	春	夏	秋	冬
全国	265.9 (577.1)	51.6 (161.4)	70.0 (259.2)	9.0 (135.8)	135.7 (191.9)
北日本日本海側	64.1 (432.5)	53.2 (90.5)	-72.5 (120.8)	-44.1 (107.8)	127.2 (160.2)
北日本太平洋側	99.2 (307.3)	32.5 (72.9)	-81.7 (110.0)	10.0 (91.7)	139.7 (77.6)
東日本日本海側	193.9 (407.5)	93.8 (72.8)	156.1 (80.6)	-65.7 (112.4)	8.7 (200.7)
東日本太平洋側	549.7 (494.0)	69.8 (143.1)	215.5 (182.9)	70.4 (135.8)	194.3 (104.4)
西日本日本海側	21.5 (285.5)	31.7 (86.1)	-57.9 (223.3)	-54.0 (77.6)	102.6 (140.8)
西日本太平洋側	432.3 (692.6)	50.3 (188.4)	200.7 (335.9)	43.6 (153.8)	138.3 (85.6)
沖縄・奄美	227.1 (431.2)	-61.5 (90.5)	305.1 (130.8)	4.6 (128.7)	-20.5 (92.2)



（左）地域毎の年・季節降水量の再現性比較（地域気候モデルから観測を引いたもの）

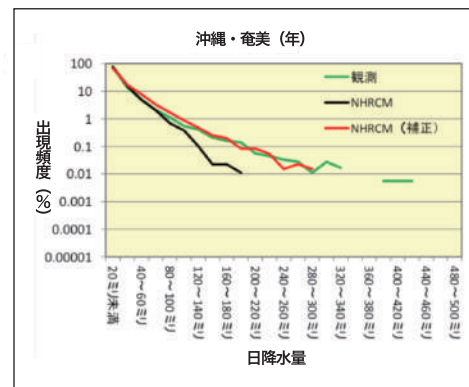
バイアスの地域平均、括弧内は地点間の標準偏差を示す。単位はmmである。正（負）のバイアスがある（バイアスの絶対値が標準偏差以上）場合、水色（オレンジ色）に塗りつぶしている。補正前を示す。

（右）アメダス観測値と NHRCM モデル値の相関図（20 年平均年降水量）

そこで、日降水量に対しバイアス補正を行いました。その結果、明確なバイアスは見られなくなり、降水量の頻度分布形状も観測と計算結果が近くなりました。

（単位：mm）

	年	春	夏	秋	冬
全国	-35.5 (577.1)	-0.3 (161.4)	-8.1 (259.2)	4.9 (135.8)	-31.7 (191.9)
北日本日本海側	-16.9 (432.5)	-2.6 (90.5)	14.1 (120.8)	2.7 (107.8)	-31.4 (160.2)
北日本太平洋側	4.5 (307.3)	0.9 (72.9)	20.2 (110.0)	2.8 (91.7)	-18.2 (77.6)
東日本日本海側	-97.5 (407.5)	-6.6 (72.8)	-11.4 (80.6)	1.1 (112.4)	-81.6 (200.7)
東日本太平洋側	-50.5 (494.0)	-2.0 (143.1)	-6.1 (182.9)	4.9 (135.8)	-46.9 (104.4)
西日本日本海側	-25.1 (285.5)	2.1 (86.1)	-12.8 (223.3)	9.7 (77.6)	-23.2 (140.8)
西日本太平洋側	-52.4 (692.6)	3.0 (188.4)	-43.9 (335.9)	6.9 (153.8)	-18.1 (85.6)
沖縄・奄美	-172.3 (431.2)	-5.2 (90.5)	167.0 (130.8)	0.2 (128.7)	0.3 (92.2)



（左）地域毎の年・季節降水量の再現性比較（地域気候モデルから観測を引いたもの）

バイアスの地域平均、括弧内は地点間の標準偏差を示す。単位はmmである。正（負）のバイアスがある（バイアスの絶対値が標準偏差以上）場合、水色（オレンジ色）に塗りつぶしている。補正後を示す。

（右）日降水量の発生頻度分布の再現性比較（例：沖縄・奄美）

積雪・降雪の再現性

最深積雪は、東日本太平洋側で正のバイアスが見られました。また、降雪量はほぼ全国的に大きな負のバイアスが見られました。両要素ともバイアス補正が必要ですが、再現性の検証方法やバイアス補正手法の確立は現時点では難しく、本予測ではバイアス補正を行っていません。このため、予測結果の利用には十分に注意してください。

データの活用方法 ～今回計算した結果はどこに保存・管理されているの？

今後、本予測計算をもとにした検討成果を温暖化の影響評価等に広く活用していくためには、ユーザーの利便性を考慮しつつ、データを一般に公開していくことが重要です。そのために、東京大学が文部科学省からの委託を受けて、運用管理を行っている「地球環境情報統融合プログラム」の「データ統合・解析システム(DIAS)」内に本予測計算結果のデータを保存し、そこから広く一般に公開しています²⁹。

ユーザー登録をすることによって、ユーザーは、DIASに登録・保管されている各種データを利用することができます。また、具体的なデータ利用を促進するため、「気候変動予測結果のデータ管理マニュアル」を作成しています。

■ DIASにて保存・公開するデータ

1 地域気候変動予測データ

本データセットは、気象庁気象研究所地域気候予測モデル（MRI-NHRCM20）の出力値と、同出力値に対して統計処理を施して作成したデータとで構成されます。本パンフレットで紹介した将来予測結果、現在気候再現性については、本データセットのデータを用いて算出したものです。

本データセットに含まれるファイル形式は次のとおりです。

- Processedデータ：影響評価等でニーズが見込まれるデータ項目について、NetCDF形式で提供しています。
- バイアス補正データ：バイアス補正を施したデータについて、テキスト形式で提供しています。
- Rawデータ：MRI-NHRCM20モデルから直接出力された未加工のデータについて、さらに詳細な解析を行う場合に備えて提供しています。

2 全球気候変動予測データ

本データセットは、気象庁気象研究所全球大気気候予測モデル（MRI-AGCM3.2H）の出力値で構成されます。本データセットに含まれるファイルは、MRI-AGCM3.2Hモデルから直接出力された未加工のデータ（Rawデータ）のみを提供しています³⁰。

なお、日本付近での気候変動影響評価等の詳細な検討を行う際には、本データセットを境界条件としてさらに解析を行った結果である地域気候変動予測データ（MRI-NHRCM20のデータセット）を使用することが推奨されます（空間解像度が小さいので、より細かな気象現象を再現したデータを得ることができます）。

29----- データの公開名称は、「環境省 全球気候変動予測データ（協力：気象庁）」及び「環境省 地域気候変動予測データ（協力：気象庁）」である。またDIASのURLを以下に示す。

<http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/projects/dias/>

30----- Rawデータは気象庁気象研究所の独自フォーマットで構成されている。一般の方の利用は想定していない。

まとめ

我が国における気候変動影響評価のための気候変動予測情報を整備することを目的として、空間解像度の高い気候予測モデルを利用した詳細な気候変動予測の解析を実施しました。今回の予測計算の成果が、今後検討が予定されている「適応計画」策定や、策定後の実運用等で活用され、気候変動適応策の取り組みの促進等につながることを願っています。

また、本パンフレットを通じて、読者の方々に、将来の日本の気候変動について興味を持っていただくと同時に、「将来の気候を予測するとはどういうことか、そのためには何が必要か」について理解を深めてもらえれば幸いです。

参考文献

- Corder, G. W. and Foreman, D. I., 2009: Index, in Nonparametric Statistics for Non- Statisticians: A Step-by-Step Approach, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Endo, H. et al., 2012: Future changes and uncertainties in Asian precipitation simulated by multi-physics and multi-sea surface temperature ensemble experiments with high-resolution Meteorological Research Institute atmospheric general circulation (MRI-AGCMs), J. Geophys. Res., 117, D16118.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kain, J. S. and Fritsch, J. M., 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, Meteorological Monographs, No.46, Amer. Meteor. Soc., 165-170.
- Mizuta, R. et al., 2008: Estimation of future distribution of sea surface temperature and sea ice using CMIP3 multi-model ensemble mean, Tech. Rep. Meteor. Res. Inst., 56, 28pp.
- Mizuta, R. et al., 2012: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid, J. Meteor. Soc. Japan, 90A, 233-258.
- Mizuta, R. et al., 2014: Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes, SOLA, Vol. 10, 167—171, doi:10.2151/sola.2014-035.
- Piani, C. et al., 2010: Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models, J. Hydrology, 395 (3), 199-215.
- Randall, D. A., and Pan, D. M., 1993: Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure, In “The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models of the Atmosphere”, Amer. Meteor. Soc. 137-144.
- Sasaki, H. et al., 2011: Reproducibility of present climate in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmosphere general circulation model. SOLA, 7, 173-176.
- Sasaki, H. et al., 2012: Projection of future climate change in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmospheric general circulation model., SOLA, 8, 53-56.
- van Vuuren, D. P., et al., 2011: The representative concentration pathways: An overview, Climatic Change, 109, 5-31.
- Yoshimura, H. et al., 2014: 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.
- 気象研究所技術報告, 2011: 気象研究所地球システムモデル第1版 (MRI-ESM1) —モデルの記述—, 気象研究所技術報告, 第64号
- 気象研究所技術報告, 2015: 気象研究所非静力学地域気候モデルによる日本付近の将来気候変化予測について, 気象研究所技術報告, 第73号 (査読中) .
- 気象庁, 2013: 地球温暖化予測情報第8巻.
- 気象庁, 2014: ヒートアイランド監視報告 (平成25年) .
- 気象庁予報部, 2012: 数値予報の基礎知識と最新の数値予報システム, 数値予報解説資料 (数値予報研修テキスト), 第45巻.
- 成田正巳, 森安聡嗣, 2010: メソモデルの対流スキームの変更, 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 53-62.

本パンフレットに関するお問い合わせ

環境省 地球環境局 総務課 研究調査室

〒100-0013 東京都千代田区霞が関1-4-2 大同生命霞ヶ関ビル17階 Tel: 03-3581-3351 (内線6756)

気象庁 地球環境・海洋部 地球環境業務課、気候情報課

〒100-8122 東京都千代田区大手町1-3-4 Tel: 03-3212-8341 (地球環境業務課: 内線4225、気候情報課: 内線2264)

21世紀末における日本の気候 不確実性評価を含む予測計算

