




地球温暖化予測情報 第8巻

IPCC 温室効果ガス排出シナリオ A1B を用いた
非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測



表紙の画像： (上) 気象衛星ひまわりによる可視画像 (2009年10月4日12時)

陸地画像提供：NASA

刊行にあたって

人間活動に伴う近年の大気中の温室効果ガス濃度の増加は、地球のエネルギー収支の不均衡をもたらし、その結果として、気候システムを構成する大気や海洋の変化が観測されている。今後、地球温暖化の一層の進行に伴って、自然の生態系や人間の社会経済活動に大きな影響を及ぼすことが懸念され、人類全体として協力して取り組むべき重要な課題の一つと位置づけられている。

国連の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、2007年に公表した第4次評価報告書において、20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどが人間活動に伴う温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性が非常に高いと結論づけた。将来予測については、温室効果ガス排出量の将来見通しに基づく複数の気候モデル予測実験の結果から、21世紀末における世界平均気温の上昇量を1.1～6.4℃と推定している。2012年に公表した「気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書」では、平均的な気候の変化だけでなく、極端な高温や大雨の頻度が増加する可能性が高いと評価している。

地球温暖化とそれに伴う気候変化に対処するため、温室効果ガス濃度の増加を抑制し気温上昇の進行を緩やかにする「緩和策」とともに、避けられない気候変化に対しては、人や社会、経済のシステムを調節することで負の影響を軽減する「適応策」を講じることによって、リスクを低減することが可能であるとされている。

気象庁では、地球温暖化の科学的理解に係る普及啓発や、緩和策・適応策の検討に資する気候変化予測を提供するため、数値モデルによる実験の結果を「地球温暖化予測情報」として取りまとめ、平成8年度より7回にわたって公表している。今般ここに取りまとめた第8巻では、近年の数値モデル技術の進歩や計算機能力の向上の成果を踏まえて、従来に比べ大幅に解像度を高めた気候モデルを用いて、21世紀前半及び末頃を対象に予測実験を行った。このモデルでは、日本列島の地形の影響等をより現実に近い形で予測計算に反映させることができることから、平均的な気候の変化に加え、極端な高温や大雨等についても評価することが可能となっている。

本書が地球温暖化に関する理解の促進や、緩和や適応に係る施策の検討の基礎資料として、広く活用されることを期待している。

最後に、本書の査読にあたってご協力をいただいた気候問題懇談会検討部会の近藤洋輝部会長をはじめ委員各位に厚く御礼を申し上げます。

平成25年3月

気象庁 地球環境・海洋部長 佐々木 秀行

地球温暖化予測情報第8巻 目次

本書の要約	I
第1章 はじめに	1
第1節 世界と日本の温暖化の現状	1
第2節 地球温暖化の要因	6
第3節 地球温暖化予測の方法	7
第4節 地球温暖化予測の不確実性	14
第5節 地域気候モデルの気候再現性	18
第2章 気温の将来予測	19
第1節 平均と年々変動の変化	19
第2節 極端現象の変化	29
第3節 階級別日数の変化	32
第3章 降水の将来予測	44
第1節 平均と年々変動の変化	44
第2節 大雨や強雨の発生頻度の変化	48
第3節 無降水日数の変化	54
第4章 積雪・降雪の将来予測	58
第1節 平均と年々変動の変化	58
第2節 季節進行の変化	62
第5章 その他の要素の将来予測	65
第1節 相対湿度	65
第2節 全天日射量	69
第3節 鉛直安定度	73
第6章 近未来予測	80
第1節 近未来予測の特性	80
第2節 各要素の予測	80
補遺	
1. 地域気候モデル NHRCM の気候再現性	A 1
2. 全球気候モデル MRI-AGCM3.2 における循環場の変化	A 24
3. アメダス等の気候値	A 30

参考文献
謝 辞

This page intentionally left blank.

(余白)

本書の要約

地球温暖化に対応するためには、緩和策とともに適応策が必要である。

大気中の温室効果ガス濃度の増加による地球温暖化に対応するためには、「適応策と緩和策を互いに補完」することが必要である (IPCC, 2007)。わが国における地球温暖化の影響評価や対策に係る検討、適応策に関する調査研究及び地球温暖化に関する普及啓発等への活用のため、日本付近を対象とする詳細な地球温暖化予測情報を作成した。

特に、地球温暖化は、高温、大雨等の「発生頻度、強度、空間的広がり、持続期間やタイミングの変化をもたらし、前例のない極端現象を発生させる可能性がある」と指摘されている (IPCC, 2012)。影響評価や適応策の検討には、平均的な気候の変化だけでなく、社会的影響が大きい極端現象の変化に関する科学的根拠に基づく予測も必要である。このため、今回の地球温暖化予測情報では、極端現象の変化についても解析の対象とした。

**地球温暖化に伴う日本付近の気候の変化や極端現象の変化を予測するため、以下のよ
うな気候モデル予測実験及び解析を行った。**

地球全体の予測は、解像度 20km の全球気候モデルにより行い、日本付近の予測は、この結果を側面境界条件として、地域気候モデルによる力学的ダウンスケーリングの手法を用いて、従来よりも大幅に解像度を高めた 5km 四方の格子で計算した。これにより、複雑な地形や対流がもたらす気象の変化をより現実に近い形で計算できるため、平均的な気候の変化に加えて大雨等の顕著現象の評価が可能となっている。(1.3.3)

全球気候モデル、地域気候モデルは、気象庁において日々の天気予報や防災気象情報の作成に用いられ高い予報精度が実証されている数値予報モデルをベースに開発されたものである。このため、モデルの信頼性や日本付近での再現性が高い。

気候変化の予測においては、海面水温の振る舞いが重要な因子の一つとなる。単一の気候モデルによる海面水温予測を用いると、モデルの系統誤差や計算上現れる自然変動の影響 (1.3.3、1.4) が予測結果に現れる。この影響を低減するため、本書の予測では、世界各国の複数の気候モデルによる海面水温予測結果の平均値を計算に用いている。

熱帯夜や真夏日等の階級値、極端な大雨の発生頻度等については、予測結果に対して統計的な補正を行ったうえで変化量を解析した。これにより、気候モデルの系統誤差の影響が低減されている。(1.5、補遺 1)

本書に示す予測結果は、以下の点について留意した上で利用する必要がある。

地球温暖化予測の前提となる温室効果ガスの将来変化は、単一のシナリオについてのみ予測対象としている。このため、他のシナリオを用いた場合には、異なる予測結果となる可能性がある。(1.3.2、1.4)

(要約)

海面水温予測は、複数の気候モデルによる平均値を用いているが、大気予測については単一の気候モデルの結果であるため、温暖化に伴う気候変化傾向に加えて、数値計算上の仮定や近似に由来するモデル固有の特性が反映されていると考えられる。このため、他の気候モデルを用いた場合には、異なる予測結果となる可能性がある。(1.4)

降水の変化予測は、気温に比べて一般に不確実性が大きい。これは、台風や梅雨前線に伴う大雨等の顕著現象の頻度や程度は年々の変動が大きいことに加え、空間的な代表性が小さい(狭い地域で集中的に降る等)うえに発生頻度が稀であって20年程度の計算対象期間を設けても統計解析の標本数が少ないため、系統的变化傾向が現れにくい場合があることによる。このような不確実性を低減するため、とりわけ降水の予測の場合には、特定の狭い地域に着目せず、広域的に平均・積算した傾向として理解することが重要である。(1.3.5、1.4)

地球温暖化予測は、自然変動に伴う気候の「ジグザグ」な揺らぎの影響を取り除いて、温室効果ガスの増加に伴って「じわじわ」と進行する長期的な変化の傾向を検出することが目的である。しかしながら、近未来を対象とする予測では、想定される温室効果ガスの増加幅が小さいため、「じわじわ」に対して「ジグザグ」な自然の揺らぎの大きさが卓越して、長期変化傾向の評価が難しくなる場合がある。(1.4)

本書の地球温暖化予測には様々な不確実性が伴うものの、以上のような予測手法の特性や限界を適切に理解した上で、影響評価や対策に係る調査研究や地球温暖化に関する普及啓発等に活用していただきたい。

21 世紀末（将来気候、2076～2095 年を想定）には 20 世紀末（現在気候、1980～1999 年を想定）と比較して、日本付近で以下のような気候変化が予測される。

気温の将来予測

年平均気温は各地域で 3℃程度の上昇がみられるが、北日本の上昇が 3℃を超えて最も大きい。季節別では、全ての地域で冬の上昇が最も大きく、夏の上昇が最も小さい。冬は、沖縄・奄美を除いて全国的に 3℃以上の上昇がみられ、北日本や、東日本の一部では 3.5℃を超える上昇がみられる。(図 S1、図 S2、2.1)

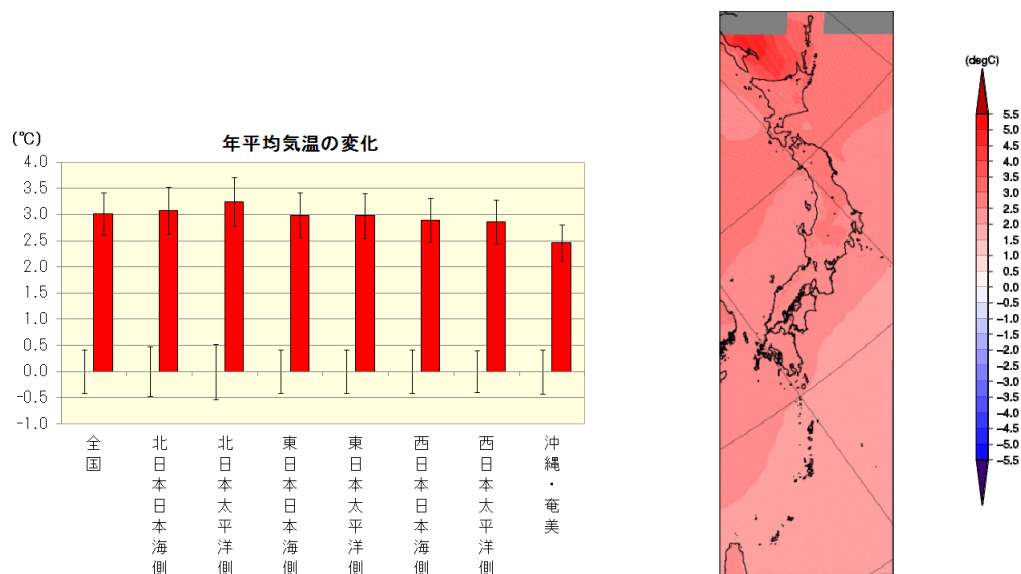


図 S1 地域別の年平均気温の変化と分布図

赤い棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。右の分布図の赤は増加、青は減少を示す。

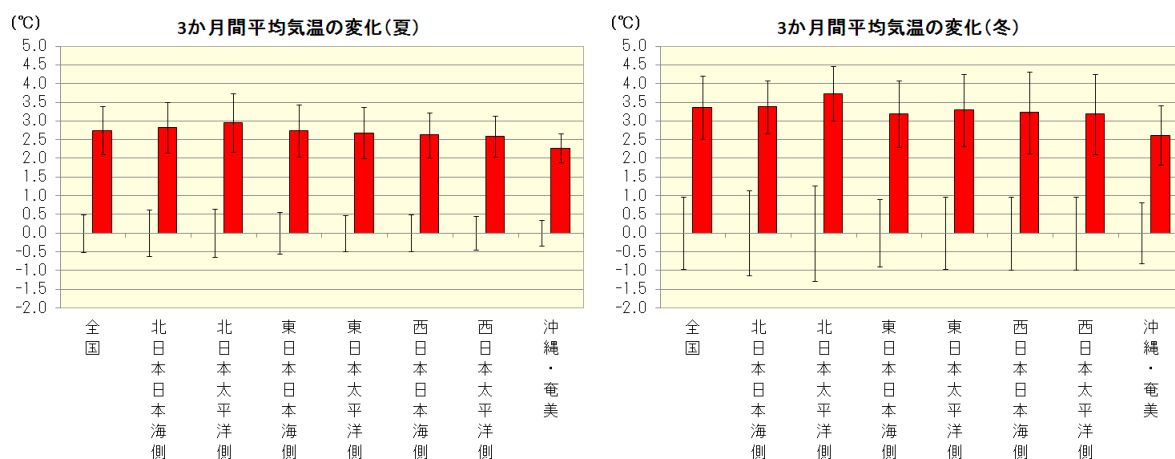


図 S2 地域別の 3 か月間平均気温の変化（左：夏（6～8 月）、右：冬（12～2 月））

赤い棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。

(要約)

年最高気温の20年再現値¹は2～3℃程度上昇し、北日本太平洋側の上昇が最も大きい。年最低気温の20年再現値は北日本を中心に2.5～4℃程度上昇し、北日本太平洋側の上昇が最も大きい。(図S3、2.2)

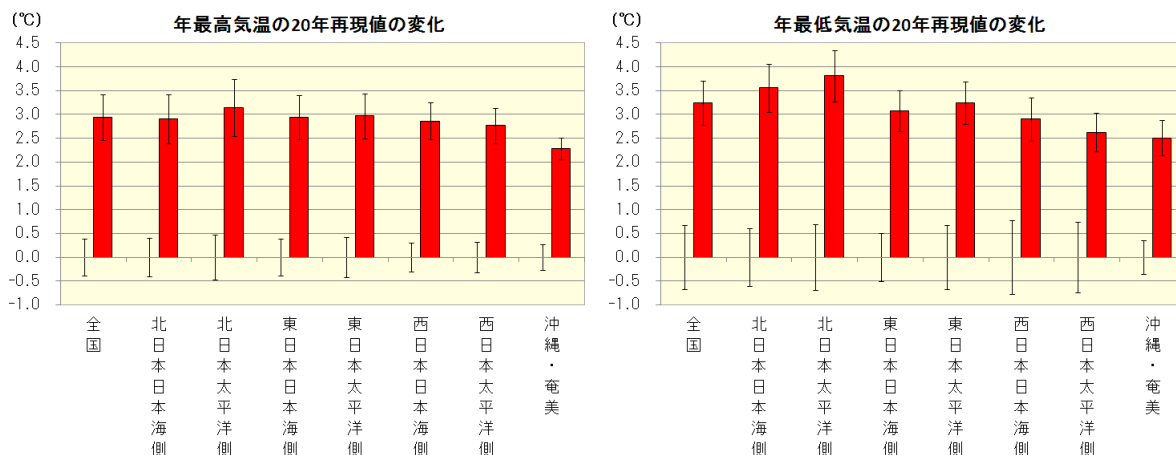


図 S3 地域別の高温（左）と低温（右）の20年再現値の変化

赤い棒グラフが現在気候との差、縦棒は推定誤差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。

冬日は各地域で減少し、北日本で減少幅が大きい。猛暑日は東日本～沖縄・奄美にかけての各地域で増加し、北日本で増加幅は小さい。(図S4、2.3)

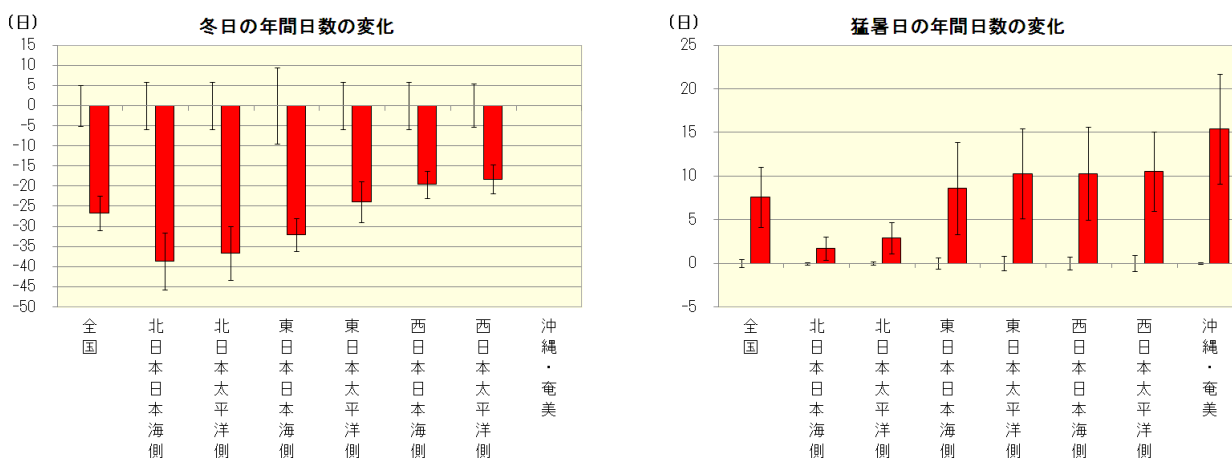


図 S4 地域別の冬日（左）と猛暑日(右)の年間日数の変化

赤い棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。

¹ 20年再現値とは、それを上回る（下回る）現象が、ある1年間に一回発生する確率が20分の1であるような極端な現象のことである。詳細は本文1.3.4を参照されたい。

降水の将来予測

年降水量は全国と北日本で増加する。冬から春にかけては、太平洋側で降水量が増加する。(表 S1、3.1)

表 S1 地域別の年・季節降水量の変化

増加(減少)の数値(単位はミリ)を示し、その変化量が現在気候の年々変動の標準偏差以上の場合は水色に、信頼度水準 90%で有意でない場合は灰色に塗りつぶしている。

	年	春	夏	秋	冬
全国	109.1	56.8	38.6	-27.9	41.6
北日本日本海側	139.5	57.8	60.5	-20.7	41.9
北日本太平洋側	89.4	46.4	34.1	-37.2	46.1
東日本日本海側	39.3	35.0	26.7	-46.6	24.2
東日本太平洋側	105.6	55.7	55.9	-56.9	51.1
西日本日本海側	111.7	61.3	27.1	0.3	23.1
西日本太平洋側	133.1	73.7	19.9	-10.7	50.3
沖縄・奄美	74.4	44.9	38.0	1.8	-10.4

大雨や短時間強雨の発生回数は多くの地域で増加する。無降水日数も多くの地域で増加する。(図 S5、3.2、3.3)

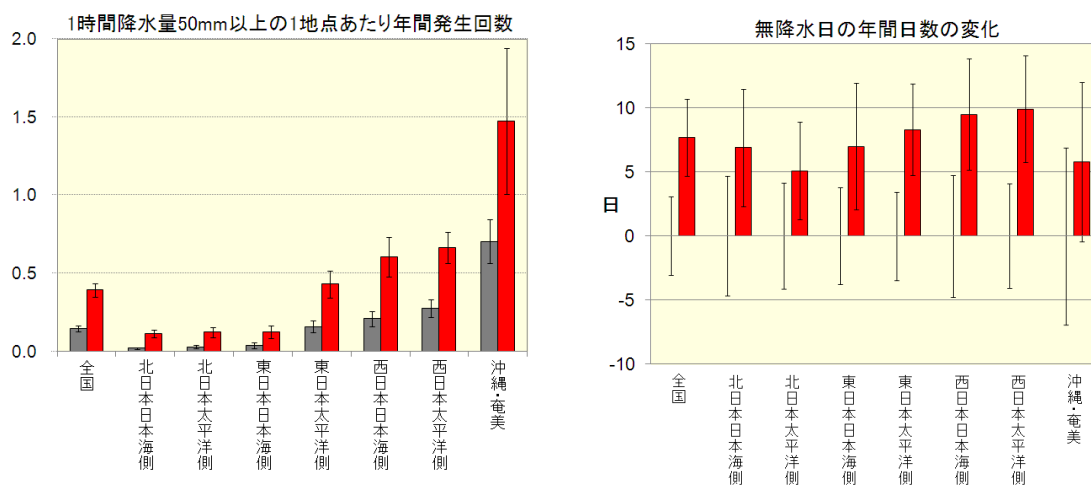


図 S5 地域別の1時間降水量50ミリ以上の短時間強雨の年間発生回数(左)と無降水日の年間日数(右)の変化

(左)棒グラフが現在気候(灰)、将来気候(赤)における発生回数で、縦棒は年々変動の標準偏差(左:現在気候、右:将来気候)を示す。(右)赤い棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差(左:現在気候、右:将来気候)を示す。

(要約)

積雪・降雪の将来予測

年最深積雪はほとんどの地域で減少するものの、北海道の内陸部等の寒冷地では現在と同程度か増加となる地域もある。(図 S6、4.1)

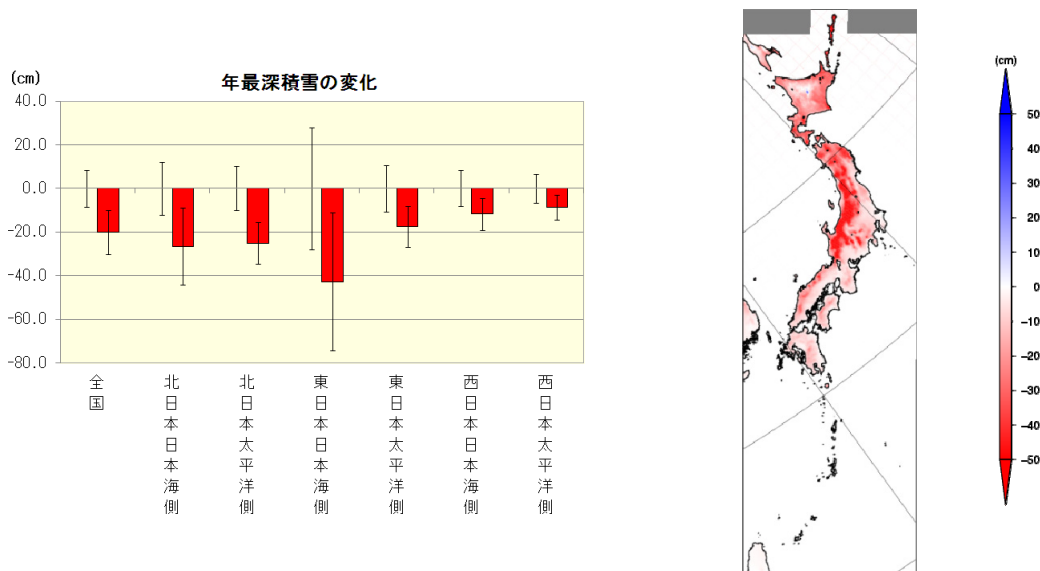


図 S6 地域別の年最深積雪の変化と分布図

赤い棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。右の分布図の青は増加、赤は減少を示す。

積雪、降雪共に、始期・終期における減少が明瞭で、観測される期間が短くなる。積雪はピークの時期が早まり大幅に減少する。(図 S7、4.2)

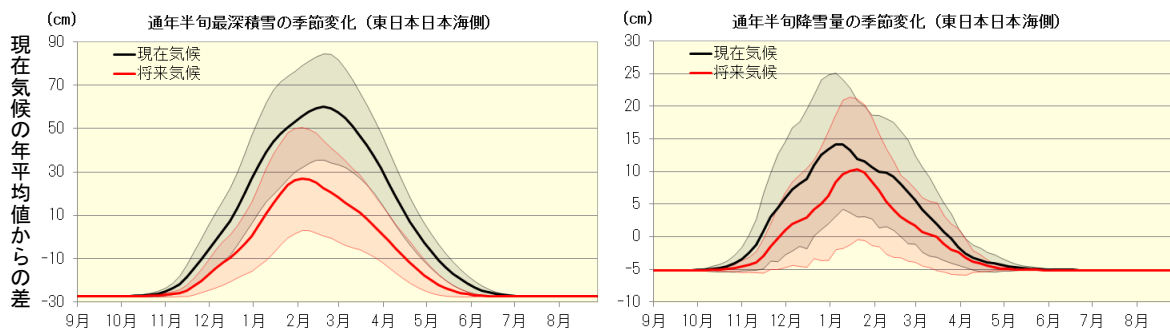


図 S7 積雪（左）と降雪（右）の季節進行の変化（東日本日本海側）

折線は通年半年値、陰影は年々変動の標準偏差を示す。5 半年で平滑化している。黒が現在気候、赤が将来気候を示す。縦軸は現在気候の年平均値からの偏差で表示している。

その他の要素の将来予測

夏は多くの地域で相対湿度が減少する。一方、冬は東日本日本海側を除く北日本から西日本で増加する。(図 S8、5. 1)

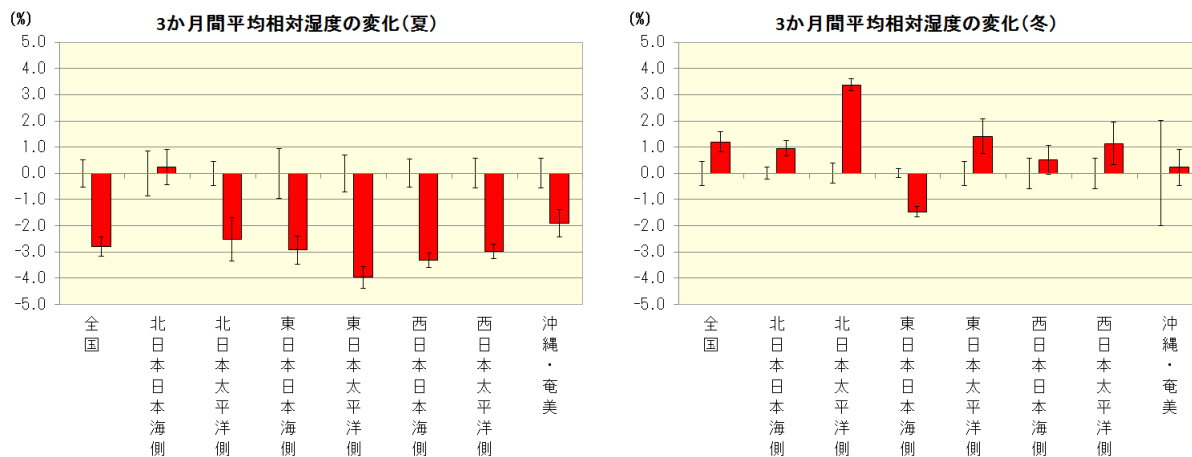


図 S8 地域別の 3 か月間相対湿度の変化 (左 : 夏 (6~8 月)、右 : 冬 (12~2 月))

赤い棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差 (左 : 現在気候、右 : 将来気候) を示す。

年平均の全天日射量は、北日本で減少する。冬は沖縄・奄美を除いて全国的に減少する。(表 S2、5. 2)

表 S2 地域別の年・季節全天日射量の変化

増加(減少)の数値(単位は MJ (メガジュール) /m²)を示し、その変化量が現在気候の年々変動の標準偏差以上の場合はオレンジ色(水色)に、信頼度水準 90%で統計的に有意で無い場合は灰色に塗りつぶしている。

	年	春	夏	秋	冬
全国	-0.11	0.08	-0.14	-0.03	-0.38
北日本日本海側	-0.37	-0.36	-0.69	-0.02	-0.39
北日本太平洋側	-0.38	-0.33	-0.62	-0.11	-0.47
東日本日本海側	-0.05	0.04	-0.09	0.15	-0.29
東日本太平洋側	0.04	0.38	0.18	0.09	-0.47
西日本日本海側	0.04	0.36	0.25	-0.16	-0.29
西日本太平洋側	0.13	0.49	0.31	-0.03	-0.27
沖縄・奄美	-0.20	-0.11	-0.39	-0.45	0.17

(要約)

突風や雷雨の発生しやすさを示す大気環境場の指数（エナジー・ヘリシティ・インデックス、EHI²）は、いずれの地域でも不安定の変化する。（図 S9、5.3）

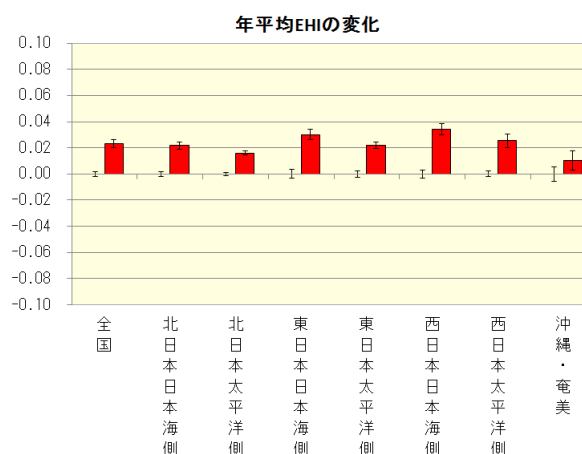


図 S9 地域別の年平均 EHI の変化

赤い棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。

² 上昇気流の起こりやすさを示す指数と、地表付近と上層の風速の差を示す指数から定義され、値が大きいつきに突風や雷雨の発生する可能性が高くなる。

第1章 はじめに

本資料は、主に 21 世紀末の我が国の気候を、気象庁が予測してまとめたものである。予測には気候モデル (1.3.1、1.3.3) の計算結果を用いているが、様々な不確実性 (1.4) を低減するため、以下の工夫を施している (1.3.4)。

- ・ 全国及び 7 つの地域区分ごとの平均値を用いている。
- ・ 各気候ごとに 20 年間の統計値を用いている。
- ・ 20 世紀末の現在気候と比較した変化を扱っている。

従って、対象とする地域の 21 世紀末の気候は 20 世紀末と比べて、「〇〇℃上昇する」や、「年々変動の幅が約 2 倍になる」や、「季節進行が 1 か月ほど早まる」といった変化量が得られる。また、地球温暖化による影響評価や適応策の検討のために特定のしきい値 (例えば平均気温 30℃) が重要である場合には、観測による気候値 (補遺 3) に変化量を加えることで推定できる。

第 1 章では、第 2 章以降の予測結果を上記のように適切に理解し活用する上での参考情報や留意点について述べる。関連するデータや図表等のさらに詳細な資料は、巻末の補遺にも示している。

1.1 世界と日本の温暖化の現状

本節では、第 2 章以降で示されている将来予測を解釈する上での参考資料として、気象庁で観測、収集している気温、降水、積雪の観測データを解析した結果 (気象庁、2012 等) から、近年の世界と日本の気候に見られる変化傾向について概説する。

1.1.1 気温の経年変化

(1) 世界と日本の年平均気温

世界の年平均気温 (陸域における地表付近の気温と海面水温の平均) は、数年～数十年の様々な周期の変動を繰り返しながら長期的に上昇しており、気象庁における統計開始年の 1891 年から 2012 年までの期間で、100 年あたり +0.68℃ の変化率となっている (図 1.1-1 左)。特に、1990 年代以降、高温となる年が頻繁に現れており、世界の年平均気温上位 10 位までの年はすべて 1998 年以降に出現し、2 位から 10 位まではすべて 21 世紀に入って以降に記録されている (表 1.1-1)。また、日本の年平均気温も長期的に上昇しており、統計開始年の 1898 年から 2012 年までの期間で、100 年あたり +1.15℃ の変化率となっている (図 1.1-1 右)。特に、1990 年代以降、高温となる年が頻繁に現れており、年平均気温上位 10 位までのすべての年は 1990 年以降に現れている (表 1.1-1)。

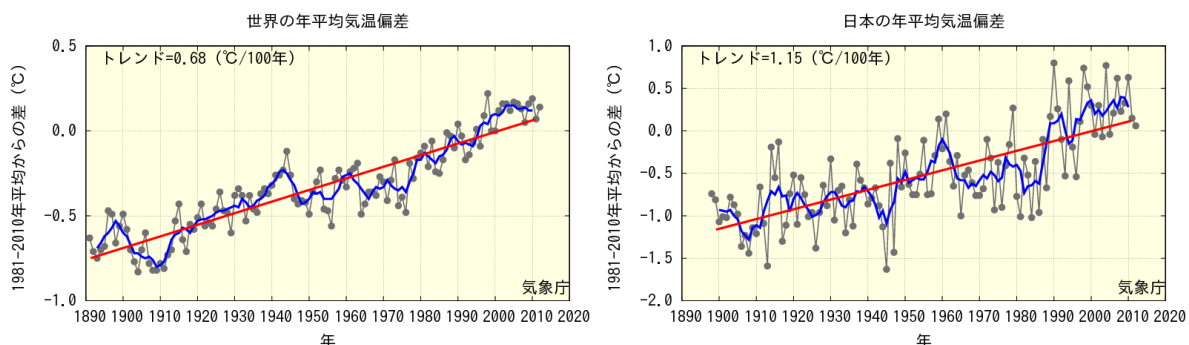


図 1.1-1 世界 (左) と日本 (右) の年平均気温の経年変化

灰色の細線は各年の値、青線は 5 年移動平均、赤い直線は期間にわたる変化傾向を表している。いずれも、1981～2010 年の 30 年平均を基準とする偏差として示す。

(第1章 はじめに)

表 1.1-1 世界と日本の年平均気温偏差の順位

世界の年平均気温（左、統計期間 1891～2012 年）、および日本の年平均気温（右、統計期間 1898～2012 年）の上位 10 位までの出現年と偏差を示す。偏差は 1981～2010 年の 30 年平均からの差である。

世界の年平均気温偏差			日本の年平均気温偏差		
順位	年	偏差	順位	年	偏差
1	1998	+ 0.22	1	1990	+ 0.80
2	2010	+ 0.19	2	2004	+ 0.77
3	2005	+ 0.17	3	1998	+ 0.74
4	2009	+ 0.16	4	2010	+ 0.63
	2006	+ 0.16	5	2007	+ 0.62
	2003	+ 0.16	6	1994	+ 0.59
	2002	+ 0.16	7	1999	+ 0.52
8	2012	+ 0.14	8	2009	+ 0.33
9	2007	+ 0.13	9	2002	+ 0.30
10	2004	+ 0.12		2000	+ 0.30
	2001	+ 0.12			

(2)日本における暑い日、寒い日の変化

日最高気温が 35℃以上（猛暑日）となる年間日数、及び日最低気温が 25℃以上（熱帯夜¹）となる年間日数の経年変化を図 1.1-2 に示す。統計期間は 1931 年から 2011 年である。猛暑日の日数は増加傾向が現れており、信頼度水準 90%で統計的に有意²な変化である。熱帯夜の日数は増加しており、信頼度水準 99%で統計的に有意な変化である。

また、日最高気温が 0℃未満（真冬日）となる年間日数、及び日最低気温が 0℃未満（冬日）となる年間日数は減少しており、共に信頼度水準 99%で統計的に有意な変化である（図略）。

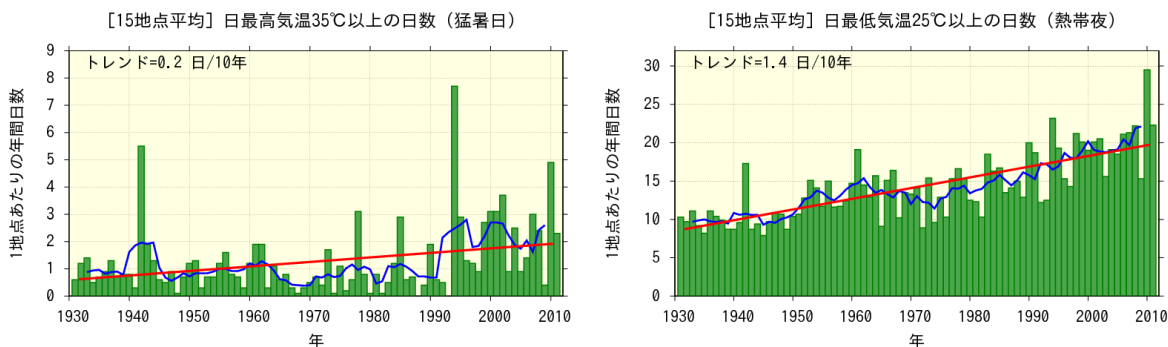


図 1.1-2 日最高気温 35℃以上(左)、日最低気温 25℃以上(右)の年間日数の経年変化

棒グラフは各年の値、青線は 5 年移動平均、赤い直線は期間にわたる変化傾向を表している。1 地点あたりの年間出現日数として表している。

¹ 熱帯夜は夜間の最低気温が 25℃以上の場合を指すが、ここでは日最低気温が 25℃以上の日を便宜的に熱帯夜として示している。

² 統計的有意性の評価については、気象庁(2012)の巻末を参照されたい。

1.1.2 降水量の経年変化

(1) 世界と日本の年降水量

世界各地の陸上の観測点で観測された年降水量の経年変化（統計期間 1901～2012 年）、及び日本の観測点で観測された年降水量の経年変化（統計期間 1898～2012 年）を図 1.1-3 に示す。世界の年降水量の変化傾向を精密に算出するには海上における降水量を含める必要があるが、図 1.1-3 は陸域のデータのみから算出しているため、変化傾向は評価していない。日本の年降水量には変化傾向は見られない。

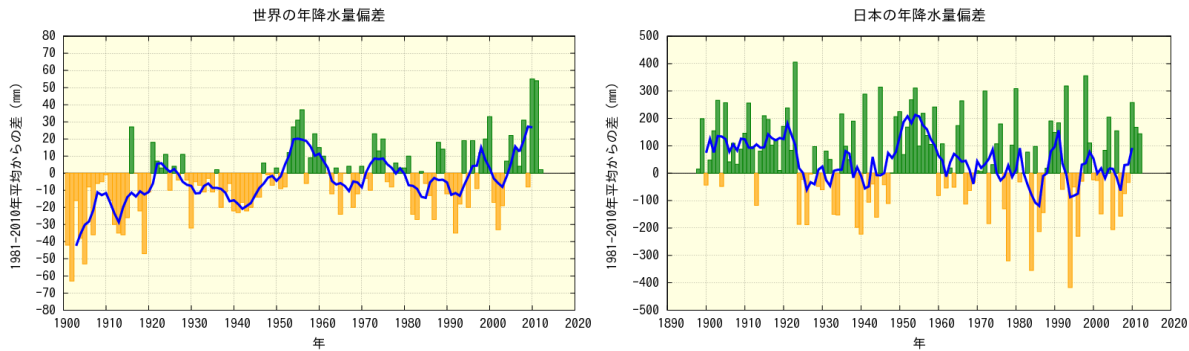


図 1.1-3 世界（左）と日本（右）の年降水量の経年変化

棒グラフは各年の値、青線は 5 年移動平均を表している。いずれも 1981～2010 年の 30 年平均を基準とする偏差として示す。

(2) 日本の積雪量

日本海側の観測点における年最深積雪の経年変化（統計期間 1961～2011 年）を図 1.1-4 に示す。北日本日本海側と西日本日本海側については、信頼度水準 95% で統計的に有意な減少傾向が現れており、東日本日本海側については信頼度水準 99% で統計的に有意に減少している。いずれの地域も、1980 年代初めの極大期から 1990 年代初めにかけて大きく減少し、それ以降は 1980 年以前と比べて少ない状態が続いている。なお年最深積雪は年ごとの変動が大きいのに対して統計期間が比較的短いことから、変化傾向を確実に捉えるには今後さらにデータの蓄積が必要である。

(第1章はじめに)

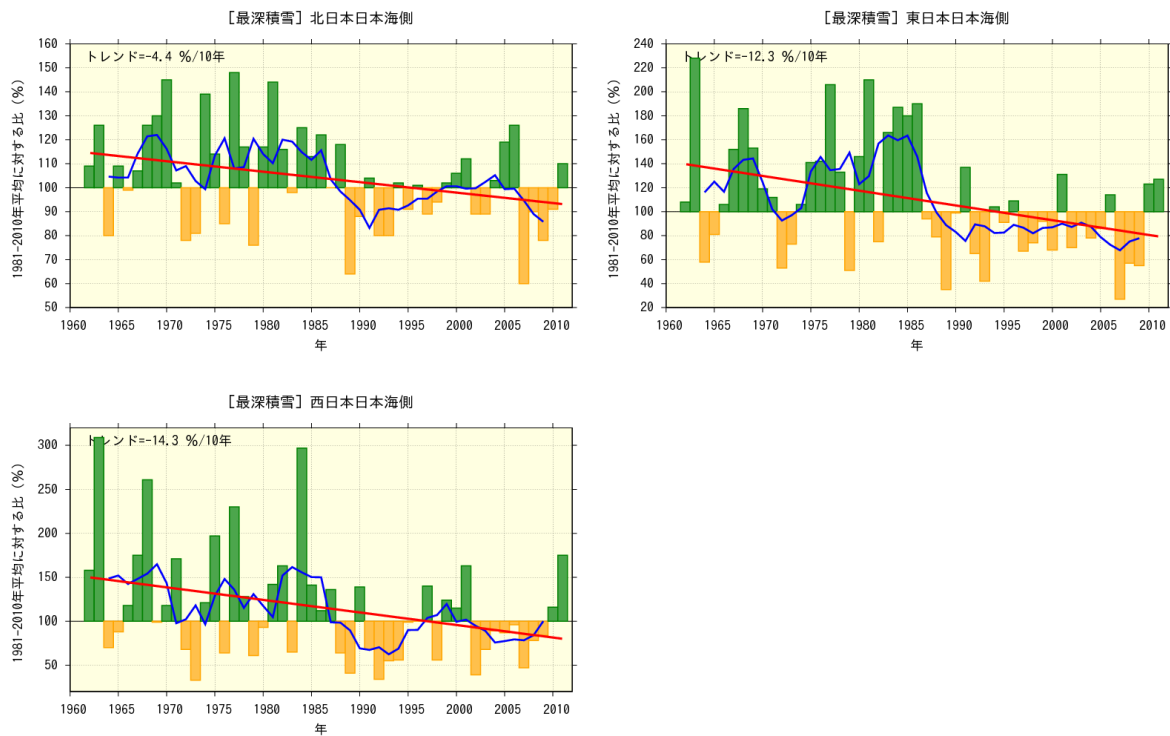


図 1.1-4 日本における年最深積雪の経年変化

北日本日本海側（上段左）、東日本日本海側（上段右）、西日本日本海側（下段）それぞれについて示す。棒グラフは各年の値、青線は5年移動平均、赤い直線は期間にわたる変化傾向を表している。いずれも1981～2010年の30年平均を基準とした場合の比で表す。

(3)日本における大雨・強雨の発生頻度

日本の観測点において、日降水量が100ミリ、200ミリ以上となる大雨の年間日数の経年変化を図1.1-5に示す（統計期間1901～2011年）。いずれも、増加傾向が明瞭に現れており、信頼度水準95%で統計的に有意な増加となっている。

アメダスで観測された1時間降水量（毎正時における前1時間降水量）50ミリ以上、80ミリ以上の短時間強雨の発生回数を図1.1-6に示す（統計期間1976～2011年）。50ミリ以上については、増加傾向が明瞭に現れており、信頼度水準95%で統計的に有意な増加である。80ミリ以上については、増加傾向が現れており、信頼度水準90%で統計的に有意な増加である。アメダスは観測地点数が多く面的に稠密な観測が得られることから、局地的な大雨などは比較的好く捉えることができるものの、統計期間が35年程度と比較的短いため、長期変化傾向を確実に捉えるためには、今後さらにデータを蓄積することが必要である。また、短時間強雨の増加傾向と温暖化の関係については、今のところ明らかでない。

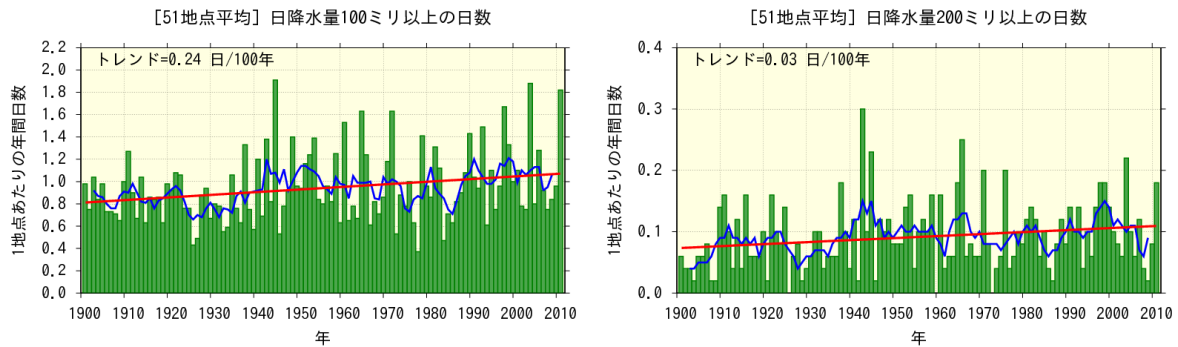


図 1.1-5 日降水量 100 ミリ以上 (左)、200 ミリ以上 (右) の年間日数の経年変化

棒グラフは各年の値、青線は 5 年移動平均、赤い直線は期間にわたる変化傾向を表している。1 地点あたりの年間日数として示している。

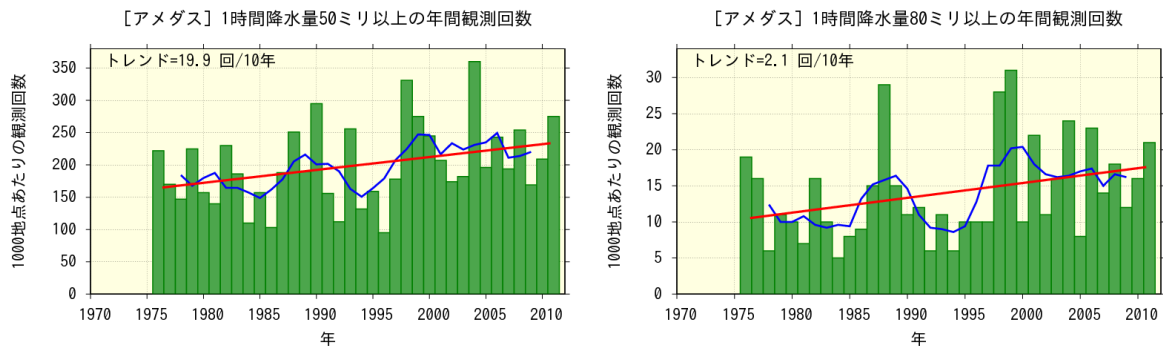


図 1.1-6 1 時間降水量 50 ミリ以上 (左)、80 ミリ以上 (右) の年間発生回数の経年変化

棒グラフは各年の値、青線は 5 年移動平均、赤い直線は期間にわたる変化傾向を表している。気象庁の全国のアメダス観測点で観測された年間回数で、年により観測地点数が変動することによる影響を避けるため、1000 地点あたりの回数に換算して表している。

(4) 日本における 1 ミリ以上降水日数

日降水量が 1 ミリ以上となる年間日数の経年変化を図 1.1-7 に示す (統計期間 1901~2011 年)。大雨や強雨の発生頻度は増加傾向を示す一方、弱い雨を含めた降水の日数は減少している (信頼度水準 99% で統計的に有意)。

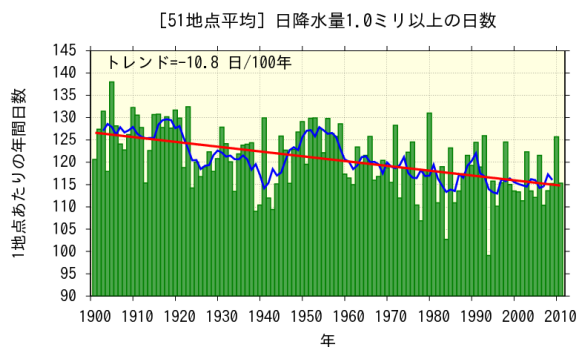


図 1.1-7 日降水量 1 ミリ以上の年間日数の経年変化

棒グラフは各年の値、青線は 5 年移動平均、赤い直線は期間にわたる変化傾向を表している。1 地点あたりの年間日数として示している。

1.2 地球温暖化の要因

近年の世界平均気温の上昇傾向、海洋内部の貯熱量の増加、海面水位の上昇、雪氷域や北極海氷域の縮小等、観測データに見られる広範囲の変化から、地球の気候システムの温暖化には疑う余地がない、と結論づけられている (IPCC, 2007)。

地球の気象や気候はさまざまな周期で変動しているが、その要因として、気候システムに内在する自然変動 (内部変動) と、外部強制力 (自然起源又は人為起源) に対するシステムの応答としての変動に分けることができる。内部変動とは、流体である大気や海洋の内部、あるいは陸面や雪氷圏との間の相互作用により、様々な形態のエネルギー、流体の運動量、水などの物質が交換・分配される過程で絶えず生じるランダムな変動が観測されるもので、よく知られている現象として、エルニーニョ/ラニーニャ現象や北極振動が挙げられる。地域規模で見た気候は、内部変動により大きく影響を受け、大気の循環や海洋の温度分布が通常から大きくかけ離れた状態が長く持続すると、その地域に住む人々にとっては、熱波・寒波・多雨・少雨などの異常気象として感知されることがある。

一方、地球全体の規模で数十年から数百年、あるいはさらに長期にわたって持続する気候システムの変化を、内部変動として説明することは困難であり、その要因は外部強制力に求めなければならない。地球全体で平均した気候の変化は、太陽から地球に入射するエネルギーと、地球から宇宙空間に放射されるエネルギーの収支によって決まる。近年の観測データに見られるように、気候システムの各構成要素で温暖化、すなわち熱の蓄積が進行しているとすれば、これは地球規模のエネルギー収支の均衡が何らかの外部強制力によって崩れ、「収入」が「支出」を上回る状態が続いているためと考えることが合理的である。近年の衛星観測や海洋貯熱量の増加傾向から推定すると、収支の均衡の崩れは、およそ 0.6W/m^2 の入超と推定されている (Stephens et al., 2012)。

外部強制力をもたらす要因の一つとして、太陽活動の変動が考えられる。しかし、現在の温暖化の傾向が明瞭に現れ始めた 20 世紀後半以降について見ると、太陽からの入射エネルギーの変化量は 0.1W/m^2 程度と小さく、観測された温暖化の進行を定量的に説明することは困難である。一方、外部強制力として、人間活動から放出された二酸化炭素等の温室効果ガスの大気中濃度が増加し、温室効果が強められたことが要因と考えると、20 世紀後半以降、気候システムに蓄積された熱量の増加を整合的に説明することができる (図 1.2-1)。また、気温変化のパターン、例えば対流圏の温度上昇に対し成層圏では温度が低下していることについても、二酸化炭素濃度の増加から予想される変化傾向と合致している。

以上のことをはじめとする観測事実や論理的考察を積み重ねて、20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの観測された増加によってもたらされた可能性が非常に高い (IPCC, 2007)、と結論することができる。人為起源の温室効果ガス排出が今後も続いた場合、将来どのような気候の変化が生じるか、科学的根拠に基づいて予測することは、急激な気候変化を防止する緩和策や避けられない変化に対する社会の適応策を合理的に議論する上で重要な判断材料を提供するものである。

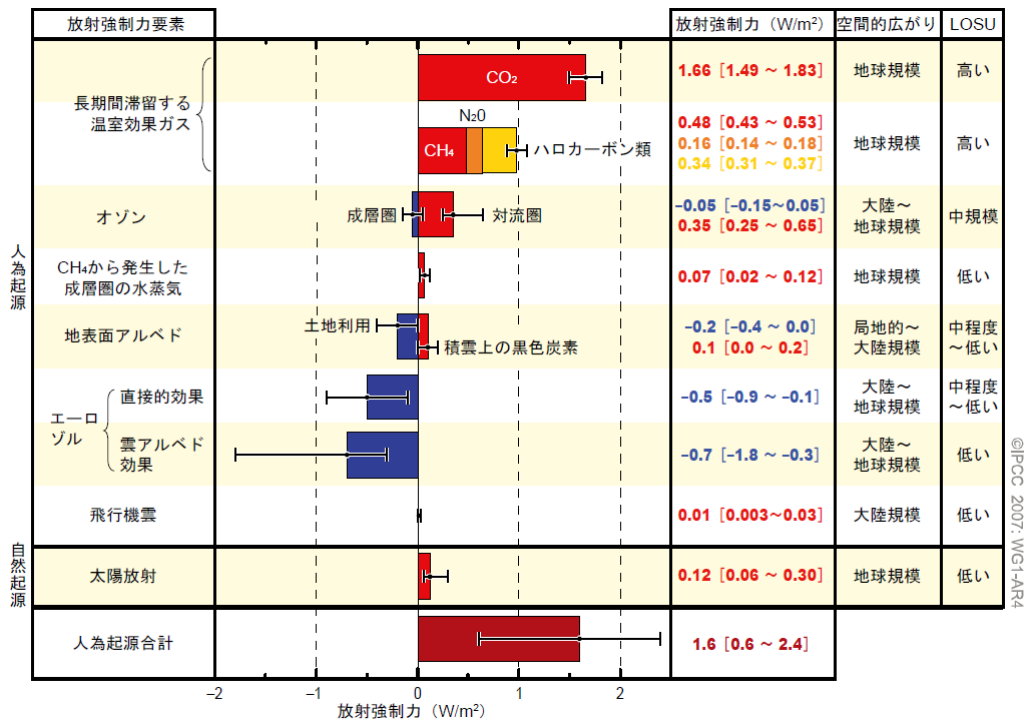


図 1.2-1 放射強制力（地球のエネルギー収支の不均衡）をもたらす要因別の大きさの比較

暖色系の色は、温暖化をもたらす放射強制力、寒色系の色は、寒冷化をもたらす放射強制力を表す。棒グラフと黒い線は、産業革命前（1750年）の大気組成や地表面の状態を2005年の状態に瞬間的に変化させたときの、対流圏界面における放射収支の不均衡の値の推定値と推定誤差の幅をそれぞれ表す。単位は W/m²。LOSU(Level of Scientific Understanding)は、当該要素についての現時点における科学的理解の水準がどの程度かを示している。

1.3 地球温暖化予測の方法

1.3.1 気候モデルによる予測

地球温暖化に伴う気候変化の予測には、現実の大気や海洋の運動、それに伴う気象の時間発展過程のモデルである気候モデルによるシミュレーションを用いる。気候モデルは、日々の天気予報の作成に使われている数値予報モデルと同じ原理に基づくコンピュータプログラムで、大気や海洋の流れ、気圧や気温の変化を現実に近い形で再現する性能を持っており、長期にわたる連続計算にも適用できるよう一部改良を加えたものである。この気候モデルに、気候変化をもたらす外部強制力（温室効果ガス濃度の変化など）を与えた上で気象の時間発展を計算し、その平均値や積算値を外部強制力がない場合と比較することで、気候がどのように変化するか予測することができる。実験室での実験ができない気候研究の世界では、シミュレーションは強力な研究手法となっている。

日々の天気予報は、気圧や気温、降水量などの気象要素が時間とともにどう変動するかを予測することを目的とするもので、概ね2週間程度先までの天気が予報の精度の限界と言われている。それを超える期間については、予測計算の手順に含まれる避けられない誤差のため、現実の気象の変動とのずれが大きくなり、特定の日時について「晴れ」や「雨」のような断定的な形の情報を取り出すことができなくなってしまう。従って、気候モデルによる地球温暖化予測は、こうした日々の天気の時間発展そのものを遠い将来にわたって予報することを目指すものではない。コンピュータの内部で大気や海洋の状態の時間発展を計算している点は天気予報と同じであるが、日々の天気のような短い周期の変動そのものは、実際にそのような天気の変動が起こることを意味しているわけではなく、予測の対象にはならない。

しかし、計算された気温や降水量の変動を十分長い時間にわたって平均あるいは積算した状態と

して得られる気候値は、温室効果ガス濃度の変化などの外部強制力が加えられたことに対する応答としての変化を反映している。このように、気象の変動の長期にわたる平均や積算としての気候値が、現在と比べて今後どの程度変化するかを調べるのが地球温暖化予測の目的である。

1.3.2 温室効果ガス排出シナリオ

人為起源の温室効果ガスの大気中濃度増加に伴う将来気候変化予測を行うためには、温室効果ガスの排出量の動向に関する前提条件が必要となる。温室効果ガス排出量は、今後の社会構造の変化や経済成長のスピード、人口増加、エネルギー源の選択、科学技術の発展・普及等の要因により大きく異なると考えられるが、これらの要因の将来像を予め正確に見通すことは不可能なので、将来社会について、いくつかの典型的なパターンを想定した上で、排出量の道筋の想定(排出シナリオ)が作成されている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、2000年に発表した特別報告書(SRES)において、今後の社会・経済動向に関する想定から算出した温室効果ガスの排出シナリオ(SRESシナリオ)を取りまとめた。

この報告書では、経済発展を重視した将来の世界をA、環境との調和を図る世界をB、地域格差が縮小しグローバル化が進展する世界を1、各地域の独自性が強まる多元的世界を2とし、これらの組み合わせによって、将来の排出シナリオをA1、A2、B1、B2という4つのパターンに大きく分類している(図1.3-1)。

今回の予測実験では、SRESシナリオA1ファミリーのうち、A1Bシナリオ(高度経済成長が続き、グローバル化の進行により地域間格差が縮小、新しい技術が急速に広まる未来社会で、全てのエネルギー源のバランスを重視すると想定)に基づく温室効果ガス濃度を外部強制力としてシミュレーションを行った。このシナリオでは、21世紀半ばまで排出量が増加し、ピークを迎えた後、緩やかに減少する経過をたどり、2100年頃の大気中二酸化炭素濃度は約700ppmに達することが想定されている(図1.3-2の緑線)。

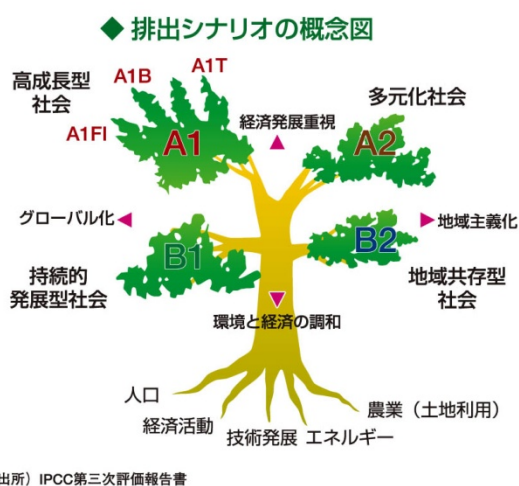


図 1.3-1 SRESシナリオの概念図

A1ファミリーは重点を置くエネルギー源によってさらにA1T(非化石燃料)、A1FI(化石燃料)、A1B(全てのエネルギー源のバランス)に分けられる。

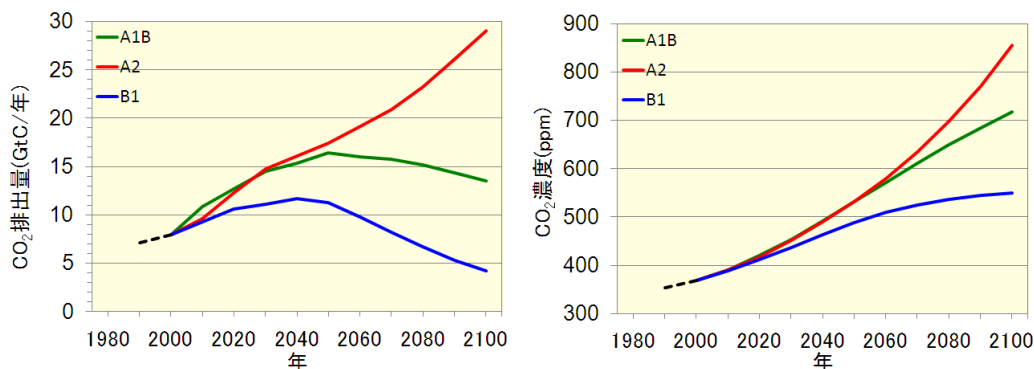


図 1.3-2 SRES A1Bシナリオに基づく二酸化炭素排出量(左)、大気中の二酸化炭素濃度(右)。

排出量は、炭素換算した質量で、単位は10億トン。濃度の単位はppm(1ppmは、100万分の1)。比較のため、A2、B1シナリオについてもあわせて示す。

1.3.3 全球気候モデルと地域気候モデル³

本書で解析する予測は、気象庁気象研究所が開発した非静力学地域気候モデル (NonHydrostatic Regional Climate Model; NHRCM) を 5km 解像度で実行した結果に基づくものである。側面境界値は SRES の A1B シナリオを外部強制力として予測計算を実行した 20km 解像度の全球気候モデル (MRI-AGCM3.2 : 文部科学省 21 世紀気候変動予測革新プログラムで気象研究所が開発した大気モデル) から、15km 解像度の地域気候モデルを経由して与えている。各モデルの領域を図 1.3-3 に、諸元を表 1.3-1 に示す。解像度を 5km に高めることで、日本列島の地形の影響をより現実に近い形で予測計算に反映させることができる (図 1.3-4)。地球温暖化予測情報第 6 巻 (気象庁, 2005) や同第 7 巻 (気象庁, 2008) で用いたモデルとの違いを表 1.3-2 に示す。

気候の予測計算においては、海洋、特に海面水温の振る舞いが非常に大きく影響する。全球気候モデル、地域気候モデルとも大気の変動のみを予測計算するモデルであるため、海面水温の予測値は別に与える必要があり、第 3 次大気海洋結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP3) から選択した 18 の気候モデルが予測した海面水温変化量の平均値を、現在気候の期間の実際に観測された海面水温に上乘せして与えている。複数の気候モデルの海面水温予測値を平均することにより、個別の気候モデルに見られる系統的な予測特性や計算上現れる自然変動の影響 (1.4 参照) が低減され、予測の信頼性が高まることが期待される。

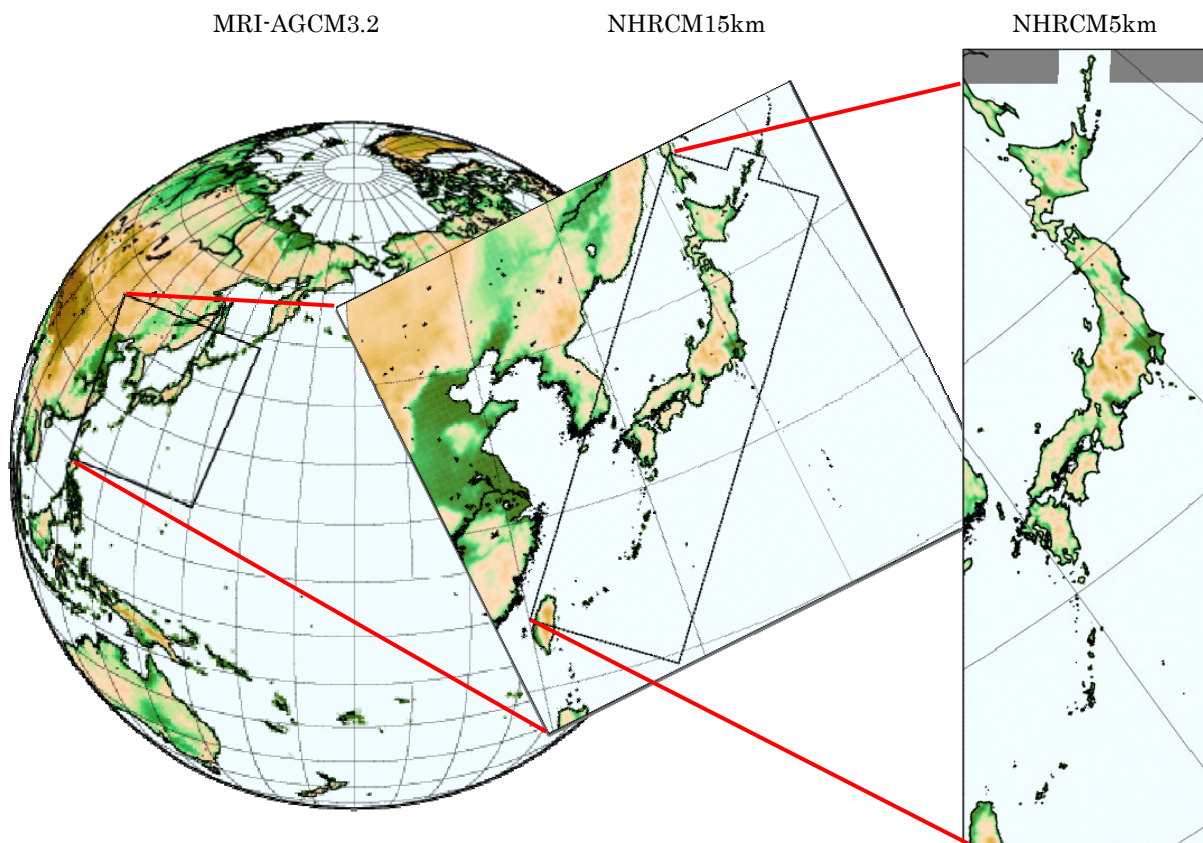


図 1.3-3 全球気候モデルからダウンスケーリングする地域気候モデルの領域

³ 全球気候モデルの計算方法の詳細については Mizuta et al. (2012)を参照されたい。また、地域気候モデルについては Sasaki et al. (2011)、Sasaki et al. (2012)、Sasaki et al. (2013)を参照されたい。

表 1.3-1 全球気候モデルと地域気候モデルの諸元

	MRI-AGCM3.2	NHRCM15km	NHRCM5km
水平解像度	20km	15km	5km
鉛直層数	64層	40層	
支配方程式	プリミティブ方程式 (静力学近似)	非静力学方程式	
降水過程	大規模凝結+Yoshimura スキーム(Yukimoto et al. 2012)	雲水・雲氷・雨・雪・あられの混合比を予報 +Kain-Fritsch法	
陸面過程	SiB0109	MJ-SiB(植生)、平板モデル(都市:時間変化なし)	

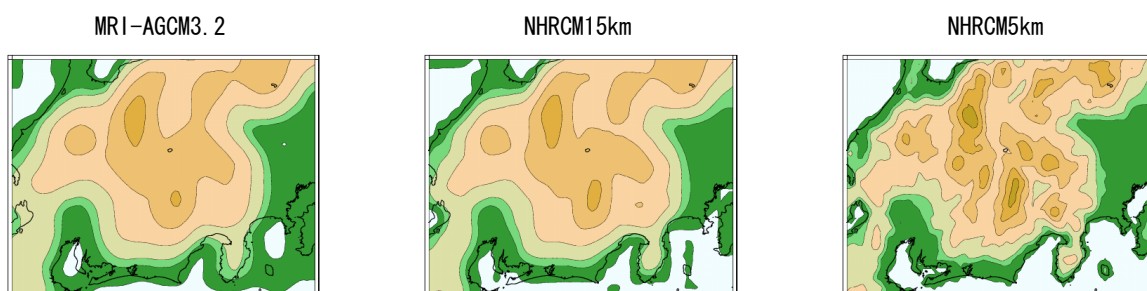


図 1.3-4 全球気候モデルから地域気候モデルへのダウンスケーリングによる地形の詳細化

表 1.3-2 地域気候モデルの主な違い

モデル名	RCM20 (第6巻、第7巻)	NHRCM5km (第8巻)
ベースモデル	気象庁領域スペクトルモデル RSM	気象庁非静力学モデル NHM
水平解像度 (格子点数)	20km (第6巻:129x129、第7巻:141x141)	5km (本土領域 661x211、国後・択捉領域 90x45、結合後 691x211)
鉛直層数	36層	40層
モデル上端	10hPa	約 40hPa
支配方程式	プリミティブ方程式 (静力学近似)	非静力学方程式
降水過程	大規模凝結+荒川シューベルト	雲水・雲氷・雨・雪・あられの混合比を予報+Kain-Fritsch法
陸面過程	地面温度予報、気候値による蒸発散効率 (水収支は考慮しない)	MJ-SiB(植生)、都市は平板モデル(時間変化なし)
境界モデル	MRI-CGCM2	MRI-AGCM3.2
水平解像度	2.8度(大気) 経度 2.5度×緯度 0.5~2度(海洋)	0.1875度(大気)
鉛直層数	30層(大気)、23層(海洋)	64層
温室効果ガス 排出シナリオ	SRES A2シナリオ(第6巻) SRES A1B, B1シナリオ(第7巻)	SRES A1Bシナリオ

1.3.4 統計の方法・地域区分

(ア) 統計の方法

本書では、前述の地域気候モデル(NHRCM)による温暖化予測の計算出力結果から、気温、降水、積雪・降雪、その他の要素のデータセットを作成し、それらを現在気候再現実験、近未来予測実験、将来予測実験のそれぞれ20年間の計算期間にわたって統計処理したものを気候値として、

その変化を解析している。各統計値の計算方法を表 1.3-3 に、計算対象の年代を図 1.3-5 に示した。21 世紀末頃を「将来」(A1B シナリオにおける 2076～2095 年の温室効果ガス濃度を想定)、21 世紀前半を「近未来」(A1B シナリオにおける 2016～2035 年の温室効果ガス濃度を想定)とし、これらの年代に予測される気候変化を、現在の人々の体感に近い 20 世紀末(1980～1999 年の観測された温室効果ガス濃度を想定)の気候を基準として解析できるように年代を設定している。

将来気候、近未来気候における変化量の予測は、現在気候の気候値からの差、または比として示している。地域平均として示している要素については、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、求められた変化量の統計的有意性を評価するために、有意性検定の結果を併せて記している。有意性検定は平均値の差の検定(t 検定)により行うが、標本分布の正規性を仮定できない要素については、分布に依らないノンパラメトリック検定(Mann-Whitney の検定)により行い、何れも信頼度水準 90%以上(両側)で有意と判定している。文中で特に指定のない場合は t 検定により行っている。有意性に関する本書での表記方法を表 1.3-4 に示した。また、気温の 20 年再現値の地域平均では、ジャックナイフ法⁴による推定誤差を示している。

なお、気温の階級別日数、降水の階級別日数・発生頻度とパーセンタイル値・20 年再現値、及び相対湿度については、気候モデルの出力値をバイアス補正した上で変化量を算出している。バイアス補正は、現在気候における再現値をアメダス(相対湿度の場合は地上気象観測)による観測データと比較して補正量を算出するので、観測地点に対応するモデル格子点についてのみ、補正が可能である。このため、バイアス補正した上で変化量を求める要素は、観測地点に対応する格子点のみを用いている。

表 1.3-3 統計値の計算方法(この他は、気象観測統計指針による)

統計値	計算方法
日別値	10 時～翌 9 時(世界標準時の 1 時～24 時)の特別値(モデル出力値)を用いる。ただし、鉛直安定度は 15 時、21 時、翌 3 時、翌 9 時の値を用いる。
通年半旬別値	1 月 1 日に始まる 5 日ごとの期間で 1 年を 73 半旬に分けた個々の期間について、日別値から求める。ただし、第 12 半旬は 2 月 25 日から 3 月 1 日までとし、平年では 5 日間、うるう年では 6 日間とする。
月別値	当該月の 1 日から末日までの 1 か月間について、日別値から求める。
3 か月別値	2 月、5 月、8 月、11 月の、前々月から当該月までの 3 か月間について、月別値から求める。それぞれ、冬、春、夏、秋として扱う。
年別値	9 月から翌 8 月までの 1 年間について、月別値から求める。
パーセンタイル値 ⁵	計算期間にわたる日別値(降水量の場合は特別値)を小さい順に並べた際の、x パーセント分位数である。例えば、日最高気温を現在気候の期間で並べた場合、高温側から 5%の値は「現在気候の日最高気温の 95 パーセンタイル値」となる。
20 年再現値 5	計算期間にわたる毎年の最大値(最小値)を一般化極値(GEV)分布に当てはめ、再現期間を 20 年とした時の値である。ある一年間を通じてこの値を上回る(下回る)現象が一回発生する確率は 20 分の 1 となる。

⁴ データのばらつき具合を評価する手法の一つ。期間中に 20 個ある年別値から、順番に 1 つ抜いたデータセット(19 個の年別値)を 20 種類用意し、それぞれで 20 年再現値を求める。これら 20 個の 20 年再現値のばらつきの大きさから推定誤差を求める。

⁵ パーセンタイル値と 20 年再現値は共に極端現象に関する統計値だが、95 パーセンタイル値は平均すると年間の全事例中の 5%がその値以上となるのに対して、20 年再現値はある年の一年間の極値がその値以上となる確率が 20 分の 1であることを示す。つまり、パーセンタイル値が毎年複数回発生しうる程度の極端現象を表す指標であるのに対して、20 年再現値は異常気象(気象庁の定義では 30 年に一度程度発生する現象)に準じた稀な現象を表す指標として用いる。この定義からわかるように、20 年再現値は現象が発生するまでの期間の期待値が 20 年であることを示し、「ある 20 年間に 1 度だけ必ず発生する」ことを意味するものではなく、20 年間に複数回発生する、或いは 1 度も発生しない可能性もある。

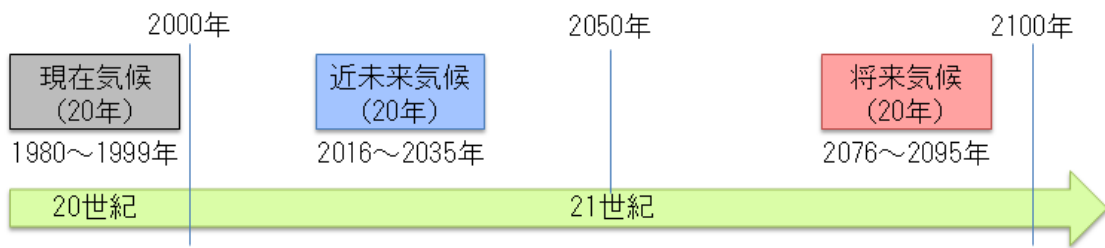


図 1.3-5 計算対象の年代

表 1.3-4 変化の有意性の表記

検定結果	本書での表記
信頼度水準 90%以上で有意	「増加(減少)している」と表現する。
信頼度水準 90%で有意ではない	「明確な変化はみられない」と表現するか、又は変化について特に言及しない。
その他	分布図等から特徴的な変化がみられる場合は、「〇〇地域では増加(減少)しているが、□□(地域内の一部)では負(正)の変化量である」などの記述を行う場合がある。

(イ) 地域区分

本書の第2章から第6章では、日本列島を対象とする地球温暖化予測の計算結果から、気温、降水、積雪・降雪、相対湿度、日射量、鉛直安定度のモデルによる気候変化を解析している。解析結果は、変化の分布図として示すほか、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；図 1.3-6）ごとに統計した結果として示している。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ある。なお、沖縄・奄美の積雪・降雪に関する予測については、現在の気候において観測される絶対量が少ないため、本書では解析を行っていない。

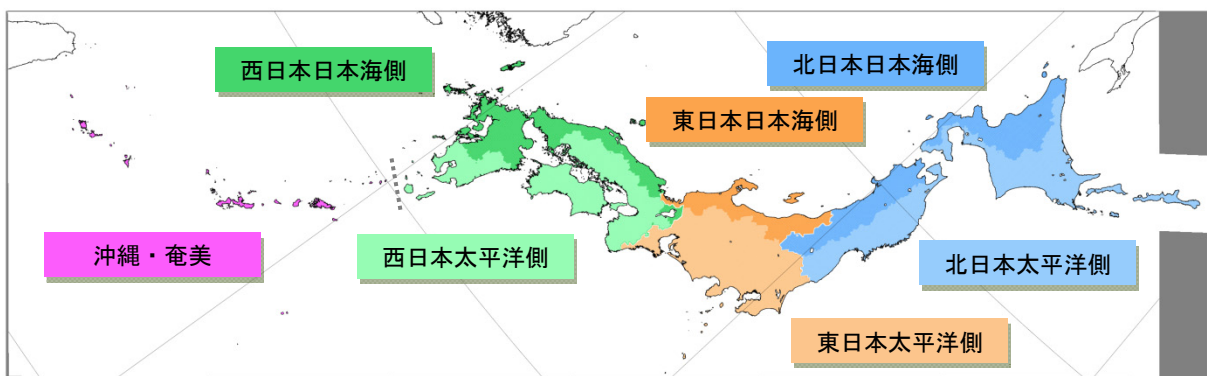


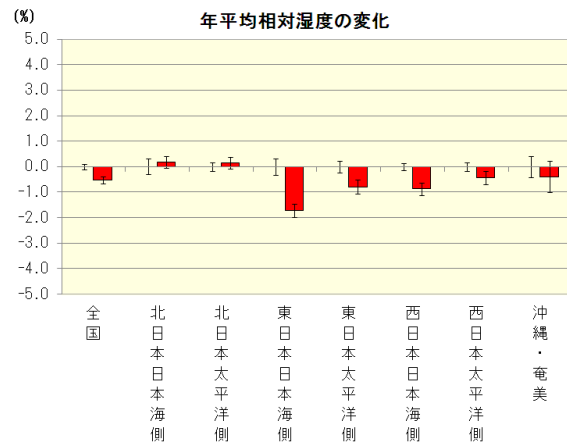
図 1.3-6 予測データの解析に用いる地域区分

1.3.5 解析結果の凡例

第2章から第6章までの各章では、平均的な気候値やその年々変動の大きさのほか、通年半旬値を用いた季節進行の変化を、更に気温と降水については、パーセンタイル値や20年再現値を用いた極端現象の変化予測についても記載した。なお、気候モデルの系統誤差(バイアス)の影響(1.4(オ))を低減するため、予測結果は原則として現在気候との差や比として表している。ここでは解析結果の凡例と図表の読み方について述べる。

(ア) 地域区分別の変化

全国及び地域ごとの現在気候からの変化量を図及び表で示した(図1.3-7)。この図では将来気候の現在気候との差を赤の棒グラフで示している。また黒い縦棒は年々変動の標準偏差(左:現在気候、右:将来気候)、すなわち毎年の天候のばらつきの程度を示す。変化量が年々変動の標準偏差に比べて大きければ、意味のある変化とみることができ、現在気候では稀にしか観測されないような天候が将来は例年のように現れることを示唆する。また、表は各地域の変化量を数値で示しており、信頼度水準90%で有意ではない場合は灰色で塗りつぶし、有意で且つ変化量が年々変動の標準偏差より大きい場合にはプラス偏差を水色で、マイナス偏差をオレンジ色で塗り分けている。ただし、冬日の日数、真冬日の日数、降水量、積雪・降雪、相対湿度以外の要素はプラス偏差をオレンジ色で、マイナス偏差を水色で塗り分けている。



	年	春	夏	秋	冬
全国	-0.52	-0.28	-2.80	-0.22	1.20
北日本日本海側	0.18	-0.09	0.24	-0.35	0.95
北日本太平洋側	0.15	-0.41	-2.52	0.16	3.37
東日本日本海側	-1.71	-1.57	-2.92	-0.90	-1.46
東日本太平洋側	-0.80	-0.32	-3.97	-0.33	1.41
西日本日本海側	-0.87	-0.41	-3.33	-0.27	0.51
西日本太平洋側	-0.44	0.08	-2.97	-0.04	1.14
沖縄・奄美	-0.39	0.46	-1.90	-0.35	0.22

図 1.3-7 地域ごとの変化図・表の例(相対湿度)

(イ) 変化の空間パターン(地図)

気候モデルの格子点ごとに、現在気候からの変化量を地図上に色の違いで示した(図1.3-8)。バイアス補正をおこなった要素については、補正の参照値となる観測地点に対応する格子点ごとにプロットしている。この図からは地域ごとの変化量を視覚的に把握することができるが、地域気候モデル(NHRCM)で再現できるのは数十kmの広がりをもった気象現象であることから、これより小さいスケールの空間パターンの情報をこの図から読み取ることは適切でない。また、1.4で述べるように、一般に狭い地域スケールで見ると、温暖化に伴う気候変化の検出の不確実性が大きくなることに注意が必要である。これらのことから、変化量の分布は、特定の「点」や狭い地域の情報としてではなく、(ア)の地域区分程度の広域の空間パターンとして読みとることが望ましい。なお、変化が統計的に有意かどうかについては、「地域区分別の変化」で評価している。

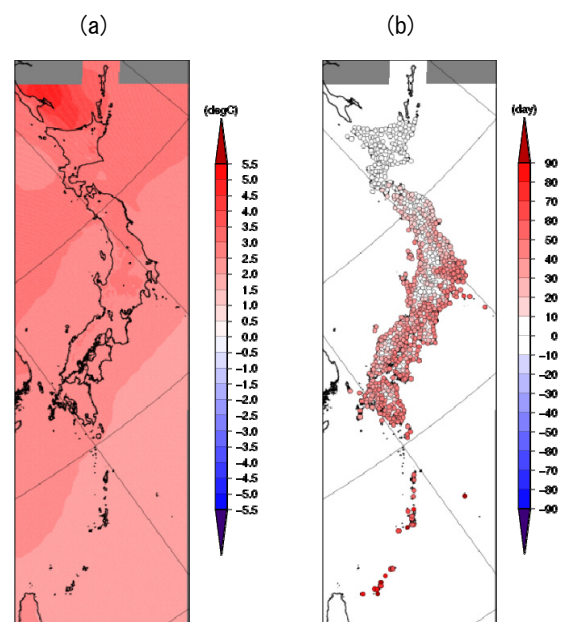


図 1.3-8 格子点・観測地点ごとの変化(地図)の例

(a): 格子点を用いた等値線(年平均気温)

(b): 観測地点ごとのプロット(年間の熱帯夜の日数)

(第1章 はじめに)

(ウ) 地域ごとの季節進行図

地域ごとに、通年半旬別値とその年々変動の幅(標準偏差)を各計算対象期間で示した(図 1.3-9)。陰影が標準偏差を示す。この図に現れるピークや立ち上がりの早まり・遅まりから季節進行の変化を把握することができる。なお、この図で用いる値は補遺の A1.7 で述べるような補正を行っていないため、バイアスを含んでいる可能性があり、数値をそのまま用いることは適切でない。このことから、縦軸は現在気候の年平均値を基準とした偏差で示していることに注意する必要がある。

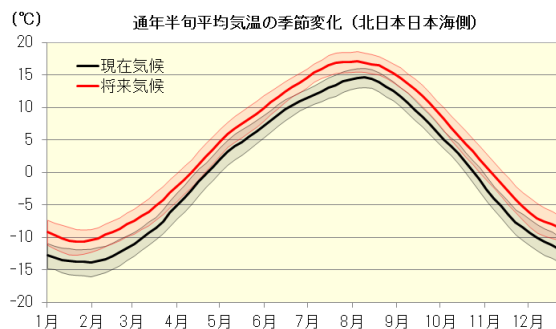


図 1.3-9 地域ごとの季節進行図の例

(エ) 地域ごとの出現頻度分布図

地域ごとに、各階級値の出現頻度を各計算対象期間で示した(図 1.3-10)。気温は日別値を、降水量は時別値を用いている。平均や積算量を示した地域ごとの変化図・表には現れない出現頻度分布の変化を把握することができる。

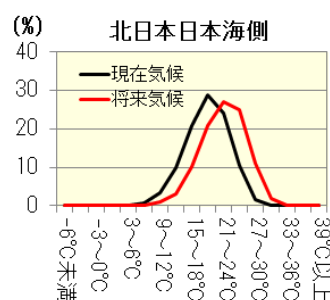


図 1.3-10 地域ごとの出現頻度図の例(夏(6~8月)の日平均気温の出現頻度)

1.4 地球温暖化予測の不確実性

地球温暖化に伴う将来の気候変化予測には、以下のような不確実性を免れ得ないことについて留意した上で、予測結果を解釈する必要がある。

(ア) 地球温暖化予測では大気・海洋の自然変動のタイミングは予測対象ではない

大気と海洋はさまざまな時空間規模で変動している。図 1.4-1(左)のグラフは、過去約 120 年の世界の年平均気温偏差の時系列である。この変動は、図 1.4-1(右)のように、赤の直線で表される「じわじわ」進行する長期変化と、青の折線で表される「ジグザグ」な短期変動成分に分けることができる。このうち、前者の長期変化傾向は、温室効果ガスの増加等の外部強制力に対する応答(気候変化)と考えられる。また、後者は大気や海洋に内在する自然要因の変動(内部変動)とみられ、年々~数年規模の変動に加えて、高温期や低温期が数十年の周期で現れる変動成分が含まれている。

自然の大気・海洋の変動を模した気候モデルによるシミュレーション結果にも、図 1.4-1(左)のようなさまざまな種類の変動成分が長期変化に重なって現れる。しかし、気候モデルで外部強制力に対する応答としての気候変化を予測することは可能であるものの、数年以上先のジグザグな自然変動の振幅や位相(高温期や低温期のタイミング)までを正確に予測することは現状では不可能である。そのため、気候モデルの予測結果に現れる年々~数十年周期の自然変動は、将来のある時期に実際にそのような高温や低温年が現れることを予測しているものではなく、地球温暖化予測の観点からは意味を持たない変動成分であることに注意する必要がある。このような自然変動の影響を完全に取り除くことは困難であるが、十分長い期間にわたる計算結果を解析することで、地球温暖化に伴う気候変化を抽出することができる。このため、本書の地球温暖化予測計算では、現在気候、近未来気候、将来気候それぞれについて、20年間分の計算結果を用いている。

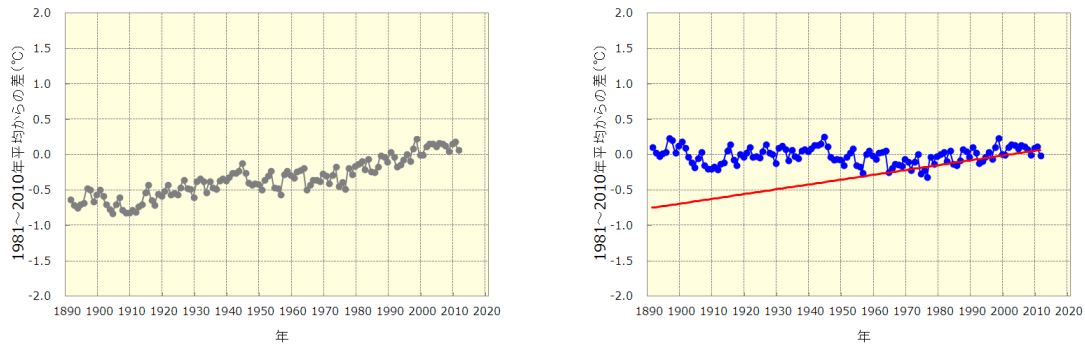


図 1.4-1 世界の年平均気温偏差の経年変化（左）、偏差の長期変化傾向と短期変動成分（右）

(イ) 地域レベルの気候変化予測では不確実性が大きくなる

地域的な気候の変化には、世界規模や大陸規模で平均的に見た変化に比べて大気・海洋の自然変動の影響が現れやすくなる。世界の年平均気温偏差（図 1.4-1（左））と日本の年平均気温偏差（図 1.4-2）を比較すると、日本の方が気温の変動が大きいことがわかる。このように、地域レベルでは長期変化傾向のシグナル（「じわじわ」進行する変化）に対する自然変動成分のノイズ（「ジグザグ」な短期変動）の大きさの比が大きくなるため、外部強制力による長期的な変化傾向が一時的に自然変動により強められる場合、あるいは打ち消される場合には、変化傾向の検出を難しくしてしまうことがある。気候モデルによる予測でも、同様の傾向がみられ、日本付近に限った地球温暖化に伴う気候変化を検出することは世界規模の予測に比べて不確実性が大きい。狭い地域に着目するほど、この傾向は強まるので、地域レベルで予測される変化傾向が、より広域で見た場合の傾向と一致するかどうか、外部強制力に対する応答として整合的な説明が可能か、等の観点から信頼性を検討する必要がある。

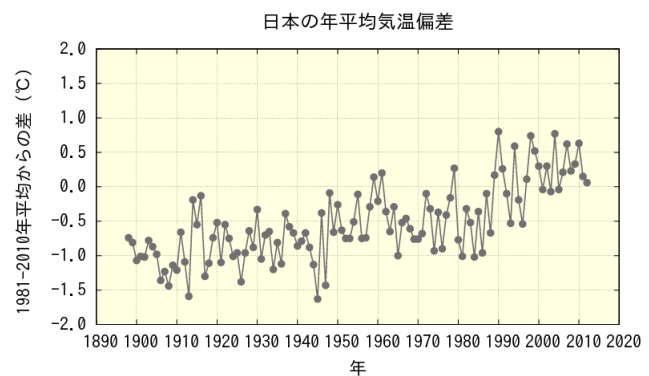


図 1.4-2 日本の年平均気温の経年変化

(ウ) 近未来の気候変化予測では不確実性が大きくなる

温室効果ガスの増加に伴って、これを外部強制力とする将来の気候変化の程度は年代とともに次第に強まると考えられる。本書においては、21世紀末頃の気候変化とともに、近未来(2016~2035年を想定)における気候変化についても予測結果を解析している。本書における予測の前提である SRES A1B シナリオで二酸化炭素濃度が約 700ppm に達する 21 世紀末頃と比べて、近未来では外部強制力に対する応答の程度が明瞭でないため、気候モデルの計算上現れる数年~数十年周期の自然要因の内部変動によって、温暖化のシグナルとしての気候変化が強調もしくは打ち消されている可能性がある（図 1.4-3）。(ア) で述べたように、このような内部変動は、実際にそれが実現する可能性が高いと予測されることを意味するものではなく、また長期変化傾向を捉えることを目的とする温暖化予測の観点からは意味を持たない成分（ノイズ）であり、解釈には注意が必要である。

なお、本書では、第 2 章~第 5 章で 21 世紀末の将来気候予測の結果を掲載し、近未来気候については、将来気候変化との整合性や気候学的観点からの妥当性を検討した上で、自然要因の内部変動の影響が小さいと判断される統計量の中から選別した要素について第 6 章に掲載している。

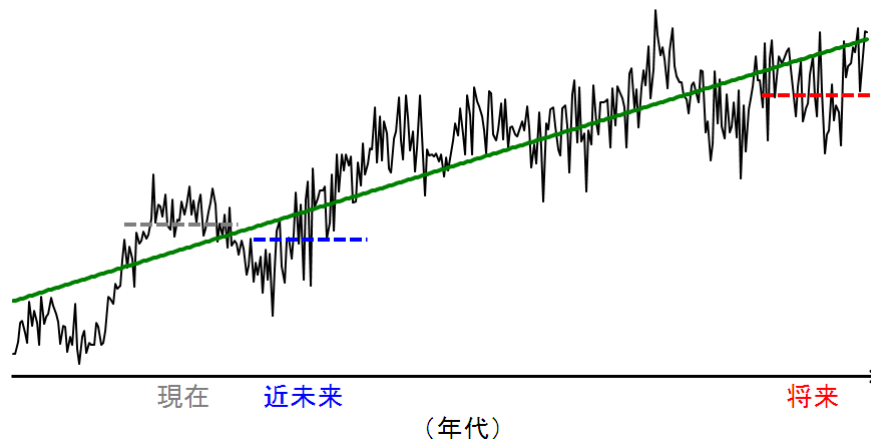


図 1.4-3 気候の長期変化傾向が短期的変動に打ち消される例

黒色の線は仮想的に作成した年々の変動、緑の直線はその長期的な変化傾向、破線は「現在」「近未来」「将来」の各年代における気候値を意味する。破線で示す気候値の差を予測するのが温暖化予測の目的であるが、この例では、「現在」と比較した場合、「近未来」では長期的な上昇傾向より短期的な変動による下降傾向が卓越しており、気候値の差は不明瞭になってしまっている。「将来」においても短期的な変動成分に影響される可能性はあるが、長期変化成分が十分に大きく、差が明瞭となる。

(エ) 長期変化傾向にも不確実性がある

IPCC 第4次評価報告書では、約20の全球大気・海洋結合モデルの結果を用いて、将来の気候の長期変化傾向を不確実性とともに示している。図1.4-4は、これらの全球大気・海洋結合モデルが予測した気温の変化と降水量の変化を示しており、モデルによってかなりのばらつきがあることがわかる。モデル実験や観測結果をもとに評価した平衡気候感度（二酸化炭素濃度が倍増したときの世界平均気温の上昇量）は、概ね2～4.5℃の範囲（最良の見積もりは約3℃）である可能性が高い（IPCC, 2007）とされているが、地球温暖化に伴って雲量に変化することによるフィードバック効果には大きな不確実性が残されており、この値がさらに高い可能性も否定できない。

また、炭素循環の変化に伴う気候へのフィードバック（温暖化により大気中の二酸化炭素の陸地と海洋への取り込みが減少し、人間活動に伴う二酸化炭素の大気中への残留分が増加する傾向）の効果十分に解明されていないことは、将来の大気中の二酸化炭素濃度予測に大きな不確実性の幅が残っていることを意味している。

複数の異なる気候モデルの結果、あるいは気候モデルのパラメータ等の条件を変えて計算させた同一モデルの複数の結果を比較することで、このような予測の不確実性を見積もることができる。しかし、本書のデータは大気に関しては単一モデルであり、また単一シナリオの下での予測結果であるため、長期変化傾向の不確実性について定量的な評価は行っていない。

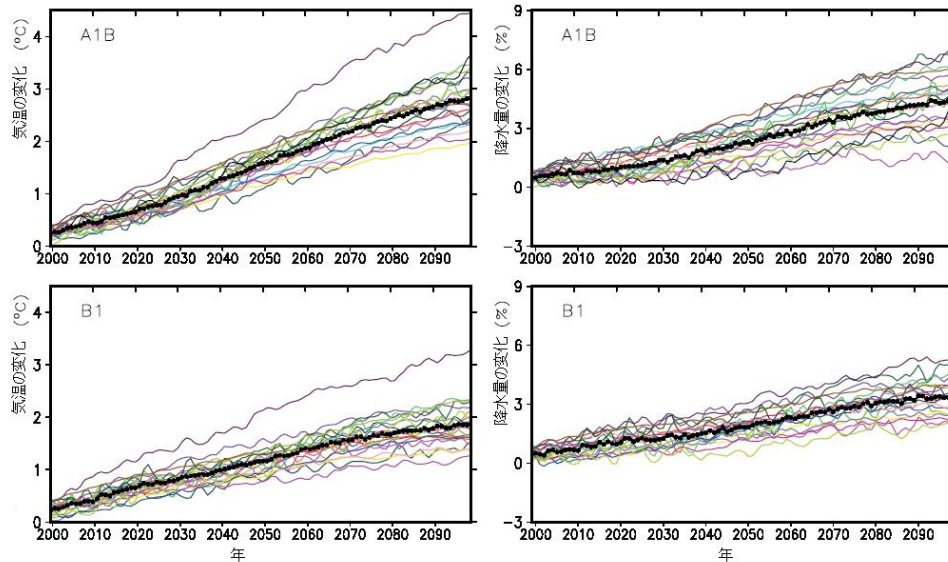


図 1.4-4 IPCC 第4次評価報告書における複数の大気・海洋結合モデルの世界平均気温と降水量の将来予測

(オ) 気候モデルの能力には限界がある

気候モデルは現実の大気や海洋の運動を完璧に忠実に再現できるものではなく、計算技術上の様々な仮定や近似を含むモデルであるので、計算結果には気候モデル特有の系統誤差（気候モデルが持つ特徴的な偏向（バイアス））が含まれている。このため、気候モデルによる予測計算の結果の絶対値をそのまま将来の具体的な予測値として解釈するのは適切ではない。本書に掲載した解析結果のうち、予測データを統計的に補正したものや、同一の気候モデルの結果同士を比較して得られる将来の変化量などは、ある程度この系統誤差の影響が除去されていると考えられるが、これは現在気候の再現性に見られるモデルの系統誤差が温暖化の進行した条件下での計算でも同じように現れるという前提に基づいている。

また、地域気候モデルの地形（山岳の起伏、海岸線、都市の存在など）も現実のものとは完全に一致するものではない。本書で解析している結果は、あくまでもモデルの地形に対応した情報である。

一般に気候モデルで再現できる現象スケールは、モデル格子の数倍程度以上のものである。これを踏まえ、特定の地点の結果に着目するのではなく、ある程度の広がりを持つ領域を対象として結果を解釈する必要がある。

(カ) 要素により予測の不確実性の大きさが異なる

降水量の変化予測は、台風や梅雨期の大雨等の顕著現象の発生頻度や程度に大きく影響される。一般に、降水の顕著現象は気温等に比べて空間代表性が小さく（狭い地域で集中的に雨が降る等）、また発生頻度が稀であるため、解析に利用できる標本の数に限られ、確からしい系統的な変化傾向の検出が難しくなる場合がある。このため、とりわけ降水量については、特定の狭い地域の変化傾向に着目せず、広域的に平均や積算した傾向として把握することで、このような問題をある程度低減することができる。

(キ) 温室効果ガス排出量により将来予測は変わる

本書は IPCC 第4次評価報告書で主な温室効果ガス排出シナリオとして採用された SRES A1B シナリオ（1.3-2）を前提とした全球気候モデルを用いた予測実験データから、日本付近についてさらに詳細な予測実験を行った結果をもとに作成しているが、異なるシナリオを採用すれば将来予測は大幅に変わる可能性がある。また、排出シナリオはあくまでも仮定に基づくシナリオであり、実

(第1章 はじめに)

際の排出量は今後の社会・経済の動向に大きく左右される。

これら(ア)～(キ)のように不確実性があるものの、気候系に含まれる複雑な諸過程をモデル化して合理的に気候の変化を予測できる気候モデルは、地球温暖化の定量的な評価には欠かせない。IPCC 第4次評価報告書に掲載されている他の全球気候モデルの結果や我が国で実施されている地球温暖化の予測研究のプロジェクトの成果などとともに、本書に掲載した結果を、地球温暖化の緩和・適応に向けた対策や調査・研究の基礎的な資料として活用していただきたい。

本節で解説した不確実性の低減は、温室効果ガスの排出抑制策をめぐる国際的議論を進める上で重要である。特に、地球温暖化による危険な気候変化を防ぐために温室効果ガス濃度をどの水準で安定化させる必要があるか、高い信頼度で算定するためには、気候感度の不確実性の低減が鍵となる。また、ある水準での温室効果ガス濃度安定化を実現するために許容される温室効果ガス排出量はどの程度か、高い信頼度で算定するため、温暖化に伴う炭素循環の変化の不確実性を低減させることが必要である。これらの不確実性低減に向けて、今後、モデル研究の一層の発展と、大気や海洋、生態系観測の充実・持続的実施が求められている。

1.5 地域気候モデルの気候再現性

1.4 で述べたように、地球温暖化予測にはモデルの特性に起因する系統誤差が伴うため、気候モデルの計算結果を観測データと比較して、再現性を把握した上で予測結果を用いる必要がある。本書では、地域気候モデルの再現性を評価するため、アメダス等の観測値とその観測地点に対応する地域気候モデルの現在気候再現実験の格子点データから、観測地点ごとの気候値を算出し、これらの地域平均を比較している。

地域気候モデルは、時空間的に細かく見ると各要素に系統誤差が見られるものの、全般的には、日本列島の各地域、各季節の気候の特徴を良く捉えており、現在と将来の気候の平均値の変化を解析するには十分な再現性があると考えられる。一方、気温の階級別日数、降水量の階級別日数・発生頻度とパーセンタイル値・20年再現値、及び相対湿度については、小さな系統誤差でも解析結果に大きく影響する場合がありますので、現在気候と同じ期間の観測値を真値とみて、気候モデルの現在気候の出力値が観測値に近づくよう統計的に補正係数を算出した上で変化量を解析している。

観測データと比較した地域気候モデルの気候再現性、及びバイアス補正方法については、補遺1に具体的な説明を掲載している。

第2章 気温の将来予測

【ポイント】

- 年平均気温は、全国的に 2.5～3.5℃の上昇が予測される。低緯度より高緯度、夏季より冬季の気温上昇が大きい (2.1.1)。
- 夏季の極端な高温の日の最高気温は、2～3℃の上昇が予測される。冬季の極端な低温の日の最低気温は、2.5～4℃の上昇が予測される (2.2.2)。
- 冬日、真冬日の日数は北日本を中心に減少し、熱帯夜、猛暑日の日数は東日本、西日本、沖縄・奄美で増加が予測される。(2.3)

2.1 平均と年々変動の変化

地域気候モデルによる、現在気候と将来気候における平均気温・最高気温・最低気温の差、および平均気温・最高気温・最低気温の季節進行については、以下の通りである。

平均気温・最高気温・最低気温すべてで各期間・各地域において上昇している。高緯度ほど上昇幅が大きい傾向がある。多くの地域で冬の上昇が最も大きいが、冬は年々変動の幅も大きい。各季節とも現在気候での年々変動の幅を大きく超えた変化が予測されており、現在はほとんど観測されることのないような暑夏や暖冬が将来の平均的な気候になることを示している。

将来はオホーツク海の海氷が減少することを反映して、春と冬にオホーツク海で大きな気温上昇がみられる。この影響により、北海道の一部では大きな上昇を示していると考えられる。なお、都市化が進行した地域ではヒートアイランド現象に伴い局地的に気温が高くなるが(気象庁、2012)、この予測結果には都市の将来変化の影響は考慮されていない。

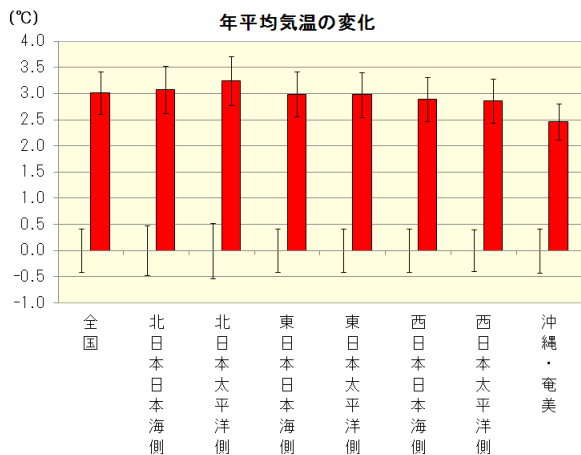
2.1.1 平均気温

図 2.1-1 及び付表は、全国及び地域ごとにみた年および季節ごとの、現在気候と将来気候の平均気温の差を示したものである。また図 2.1-2 は、地域気候モデルによる年及び季節ごとの現在気候と将来気候の平均気温の差の分布を示したものである。各期間・各地域で上昇している。

将来気候の年平均では、各地域で 3℃程度の上昇がみられるが、北日本の上昇が 3℃を超えて最も大きい。季節で比較すると、すべての地域で冬の上昇が最も大きく、夏の上昇が最も小さい。春は北日本や、東日本の一部で 3℃以上の上昇がみられる。冬は、沖縄・奄美を除いて全国的に 3℃以上の上昇がみられ、北日本や、東日本の一部では 3.5℃を超える上昇がみられる。

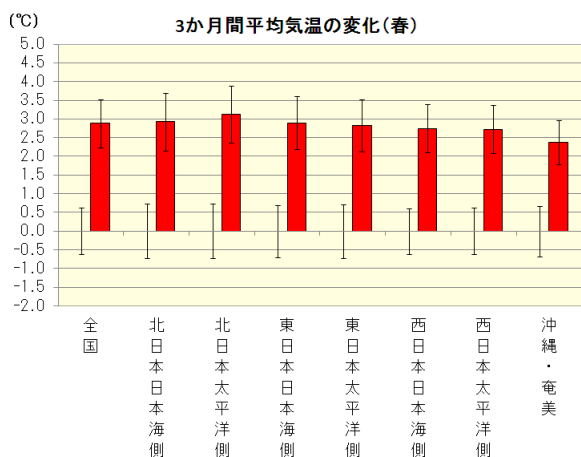
(第2章 気温の将来予測)

(a)

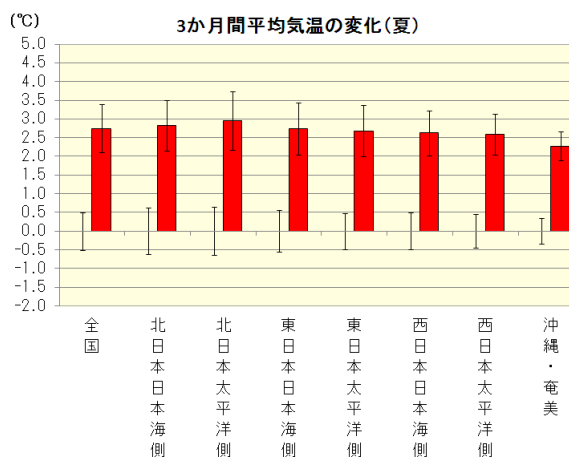


	年	春	夏	秋	冬
全国	3.02	2.88	2.74	3.08	3.36
北日本日本海側	3.08	2.92	2.82	3.19	3.38
北日本太平洋側	3.25	3.13	2.94	3.18	3.73
東日本日本海側	2.99	2.89	2.73	3.13	3.19
東日本太平洋側	2.98	2.83	2.69	3.10	3.30
西日本日本海側	2.89	2.74	2.63	2.97	3.23
西日本太平洋側	2.86	2.73	2.59	2.94	3.18
沖縄・奄美	2.46	2.37	2.27	2.57	2.62

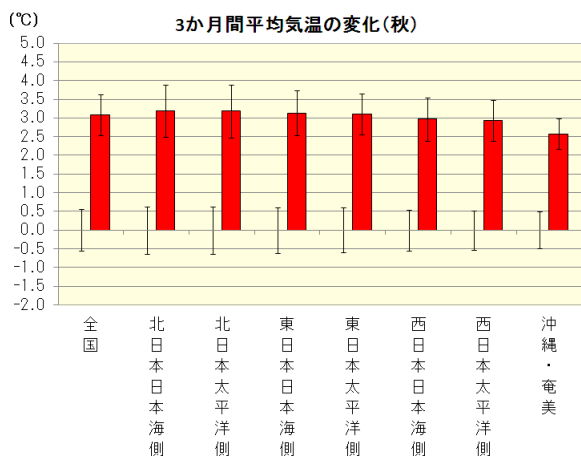
(b)



(c)



(d)



(e)

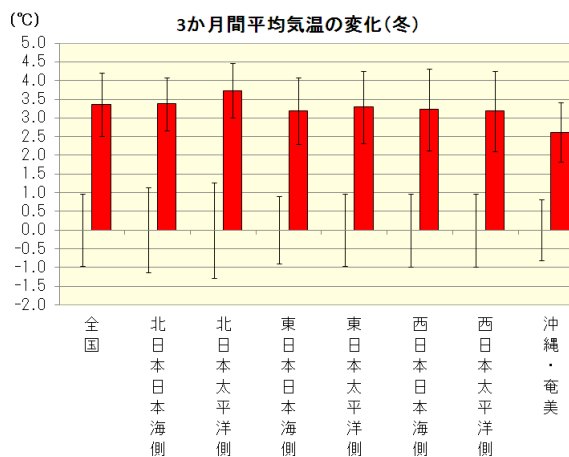


図 2.1-1 及び付表 地域別の平均気温の変化（将来気候の現在気候との差）

棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。(a)：年間、(b)：春（3～5月）、(c)：夏（6～8月）、(d)：秋（9～11月）、(e)：冬（12～2月）。右上の付表は増加（減少）の数値を示し、その変化量が現在気候の標準偏差以上の場合はオレンジ色（水色）に、信頼度水準90%で統計的に有意で無い場合は灰色に塗りつぶしている。

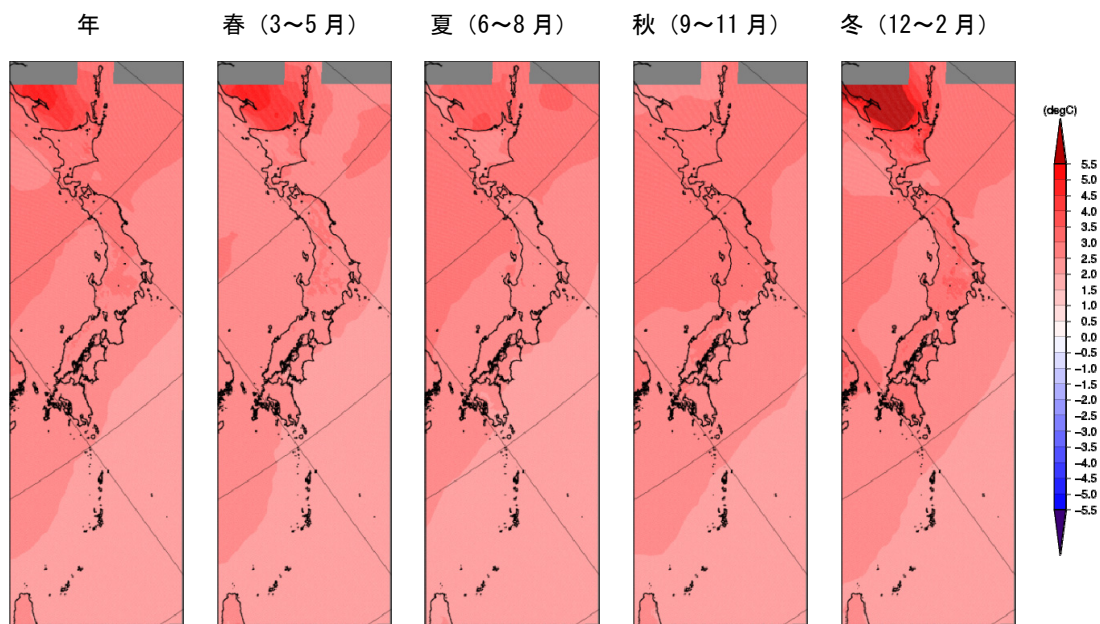


図 2.1-2 平均気温の変化 (将来気候の現在気候との差)

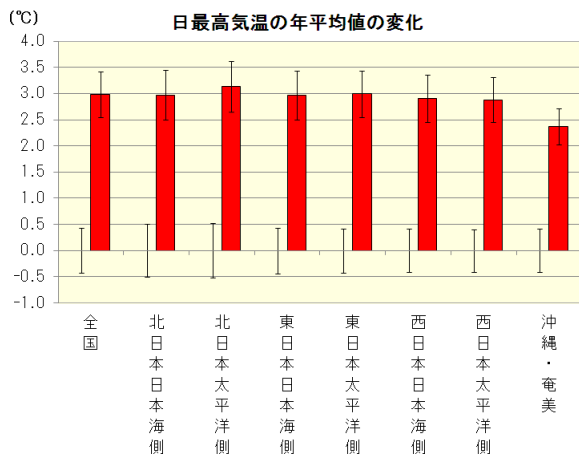
2.1.2 最高気温

図 2.1-3 及び付表は、全国及び地域ごとにみた年および季節ごとの、現在気候と将来気候の最高気温の差を示したものである。また図 2.1-4 は、地域気候モデルによる年及び季節ごとの現在気候と将来気候の最高気温の差の分布を示したものである。各期間・各地域で上昇している。

将来気候の年平均では、沖縄・奄美を除く各地域で約 3℃の上昇がみられ、北日本太平洋側では 3℃以上の上昇がみられる。季節で比較すると、すべての地域で冬の上昇が最も大きく、夏の上昇が最も小さい。季節ごとにみると、冬は、沖縄・奄美を除いて全国的に 3℃以上の上昇がみられ、北海道の太平洋側の一部では 4℃を超える上昇がみられる。

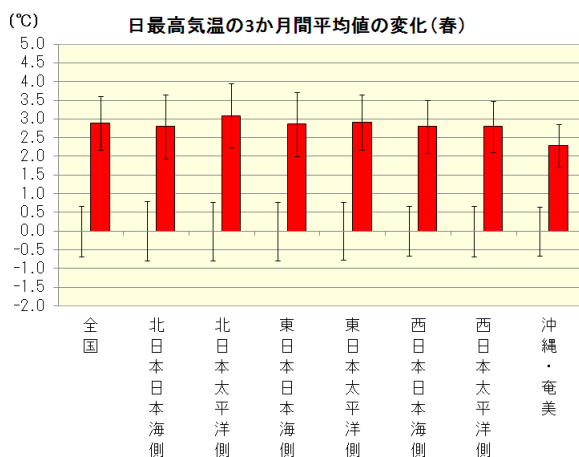
(第2章 気温の将来予測)

(a)

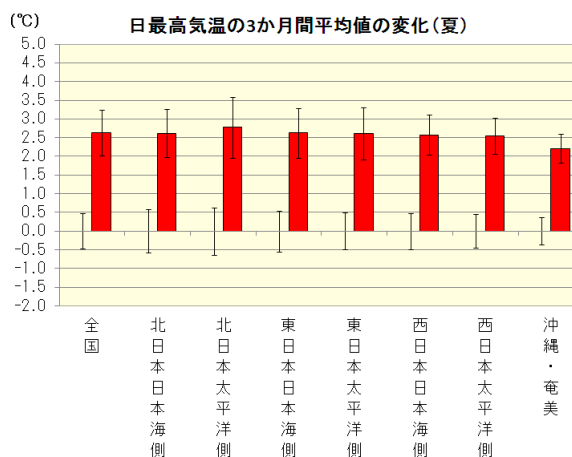


	年	春	夏	秋	冬
全国	2.98	2.88	2.63	3.06	3.36
北日本日本海側	2.97	2.80	2.62	3.17	3.31
北日本太平洋側	3.14	3.09	2.77	3.16	3.54
東日本日本海側	2.97	2.86	2.62	3.11	3.30
東日本太平洋側	2.99	2.91	2.61	3.08	3.36
西日本日本海側	2.90	2.79	2.58	2.94	3.30
西日本太平洋側	2.88	2.79	2.55	2.92	3.27
沖縄・奄美	2.38	2.28	2.21	2.47	2.55

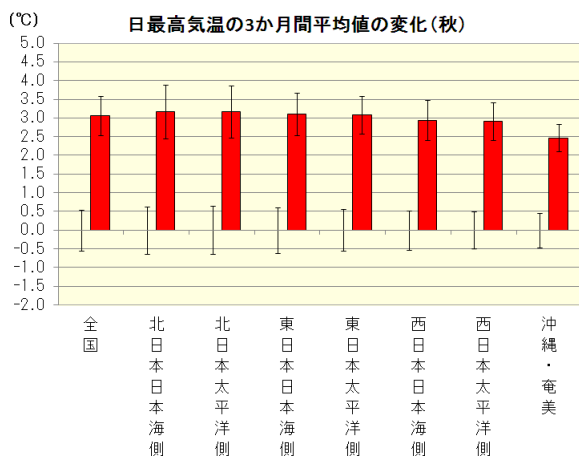
(b)



(c)



(d)



(e)

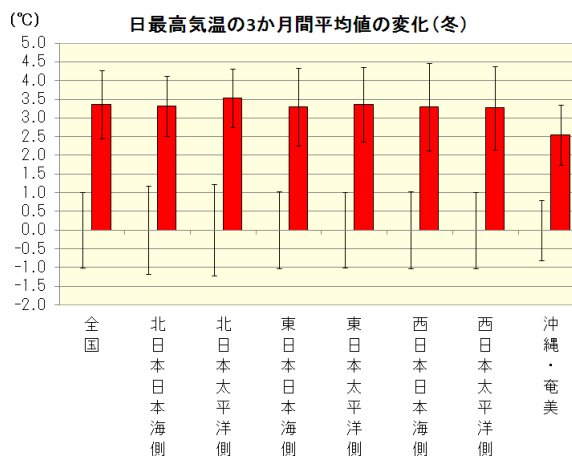


図 2.1-3 及び付表 地域別の最高気温の変化（将来気候の現在気候との差）

棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。(a)：年間、(b)：春（3～5月）、(c)：夏（6～8月）、(d)：秋（9～11月）、(e)：冬（12～2月）。右上の付表は増加（減少）の数値を示し、その変化量が現在気候の標準偏差以上の場合はオレンジ色（水色）に、信頼度水準90%で統計的に有意で無い場合は灰色に塗りつぶしている。

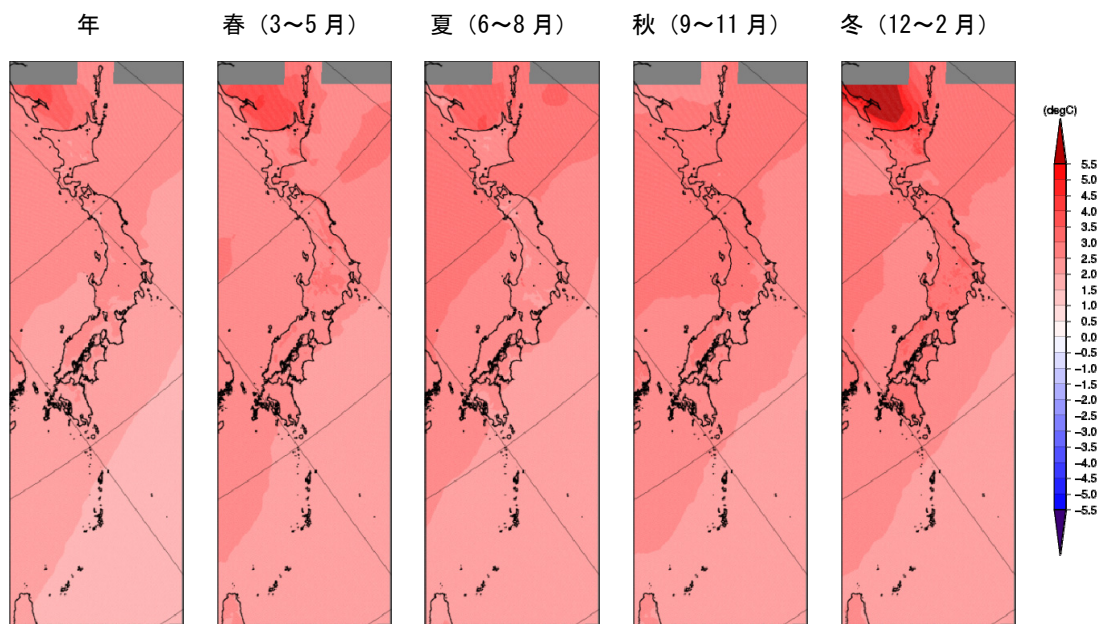


図 2.1-4 最高気温の変化 (将来気候の現在気候との差)

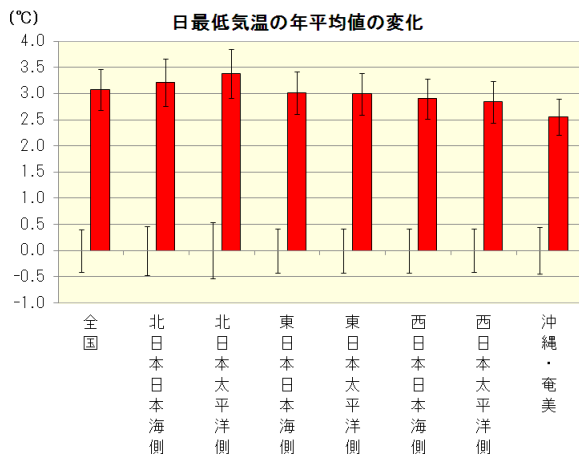
2.1.3 最低気温

図 2.1-5 及び付表は、全国及び地域ごとにみた年および季節ごとの、現在気候と将来気候の最低気温の差を示したものである。また図 2.1-6 は、地域気候モデルによる年及び季節ごとの現在気候と将来気候の最低気温の差の分布を示したものである。各期間・各地域で上昇している。

将来気候の年平均では、沖縄・奄美を除く各地域で約 3°C の上昇がみられる。年および全ての季節において、北日本の上昇が最も大きい。季節で比較すると、ほぼすべての地域で冬の上昇が最も大きく、夏の上昇が最も小さい。春は北日本及び東日本の一部の標高の高い地域で 3°C 以上の上昇がみられ、融雪の早まりに対応するものと考えられる。冬は、一部の標高の高い地域などで 4°C を上回る上昇がみられ、北日本太平洋側の一部では 4.5°C を上回る上昇がみられる。

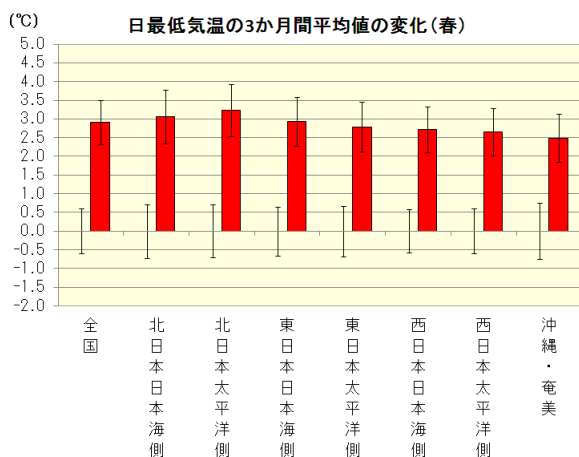
(第2章 気温の将来予測)

(a)

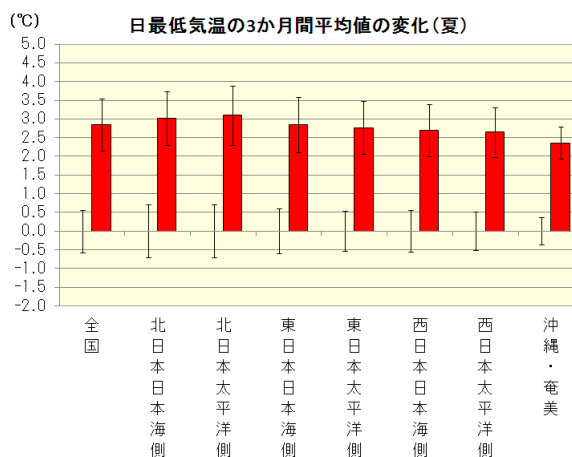


	年	春	夏	秋	冬
全国	3.08	2.91	2.86	3.13	3.41
北日本日本海側	3.21	3.07	3.02	3.24	3.53
北日本太平洋側	3.39	3.23	3.10	3.21	4.01
東日本日本海側	3.01	2.94	2.85	3.16	3.12
東日本太平洋側	2.99	2.79	2.77	3.15	3.27
西日本日本海側	2.90	2.72	2.69	3.02	3.16
西日本太平洋側	2.84	2.66	2.65	3.00	3.06
沖縄・奄美	2.55	2.49	2.36	2.66	2.71

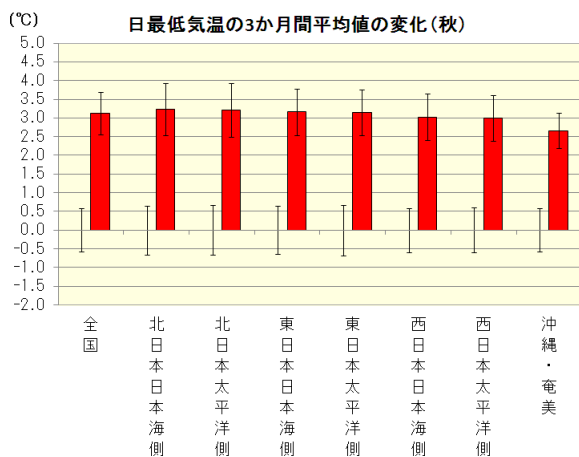
(b)



(c)



(d)



(e)

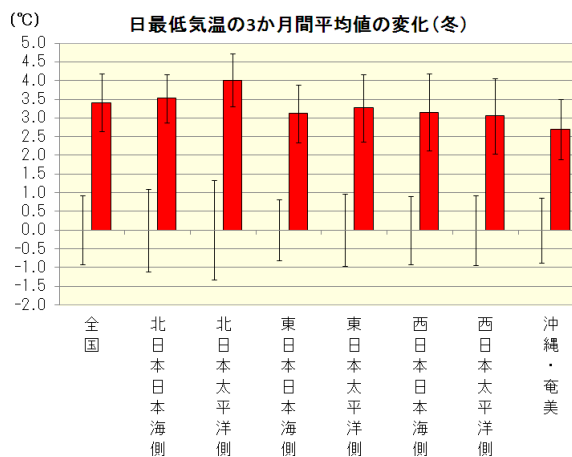


図 2.1-5 及び付表 地域別の最低気温の変化（将来気候の現在気候との差）

棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。(a)：年間、(b)：春（3～5月）、(c)：夏（6～8月）、(d)：秋（9～11月）、(e)：冬（12～2月）。右上の付表は増加（減少）の数値を示し、その変化量が現在気候の標準偏差以上の場合はオレンジ色（水色）に、信頼度水準90%で統計的に有意で無い場合は灰色に塗りつぶしている。

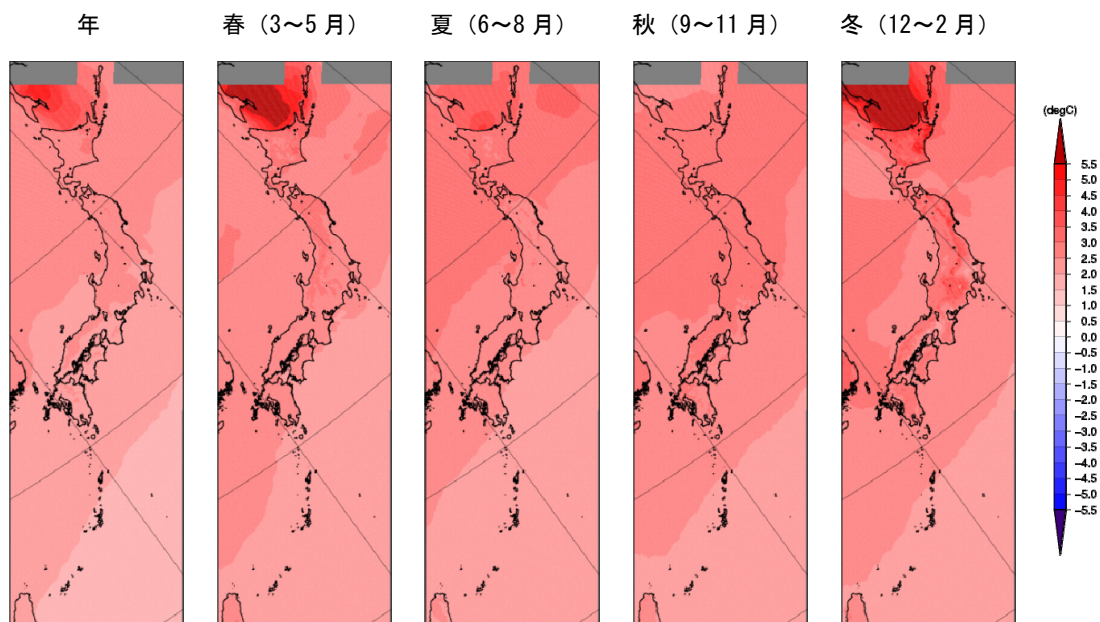


図 2.1-6 最低気温の変化（将来気候の現在気候との差）

2.1.4 季節進行の変化

図 2.1-7～9 は、平均気温・最高気温・最低気温の、地域気候モデルによる現在気候、将来気候の地域ごとの半旬平均の季節変動を示したものである。グラフの縦軸は、現在気候の年平均気温からの偏差を示している。

各要素・各地域で、2.1.1～2.1.3 の各平均と同様に気温が上昇しており、冬を中心とした時期の上昇が他の時期に比べて大きい。

将来気候では、主に北日本において一年で最も気温が高くなる時期が早まる傾向がみられる。温暖化が進んだ将来気候の日本の夏は、小笠原高気圧や偏西風の北上が弱くなるため梅雨明けが遅れる (Hirahara et al., 2012) ことや、日本の東海上の太平洋高気圧が弱まりオホーツク高気圧の影響を受けやすくなるため、北日本太平洋側に日照の減少などのぐずついた天気をもたらす「ヤマセ」の発生回数が8月を中心に増加する (Endo, 2012) ことが予測されている。北日本の全天日射量は7月から8月に顕著に減少する傾向を示しており (5.2.2)、主に北日本において一年で最も気温が高くなる時期が早まる傾向は、これらの予測と整合的だと考えられる。

冬から春にかけては、将来気候の年々変動の幅が現在気候と重なっている時期が見られる。半旬程度の時間規模で比べた場合、温暖化が進行した将来においても、年によっては、現在気候の平均気温と同程度に気温が低下する時期もあることを示している。

(第2章 気温の将来予測)

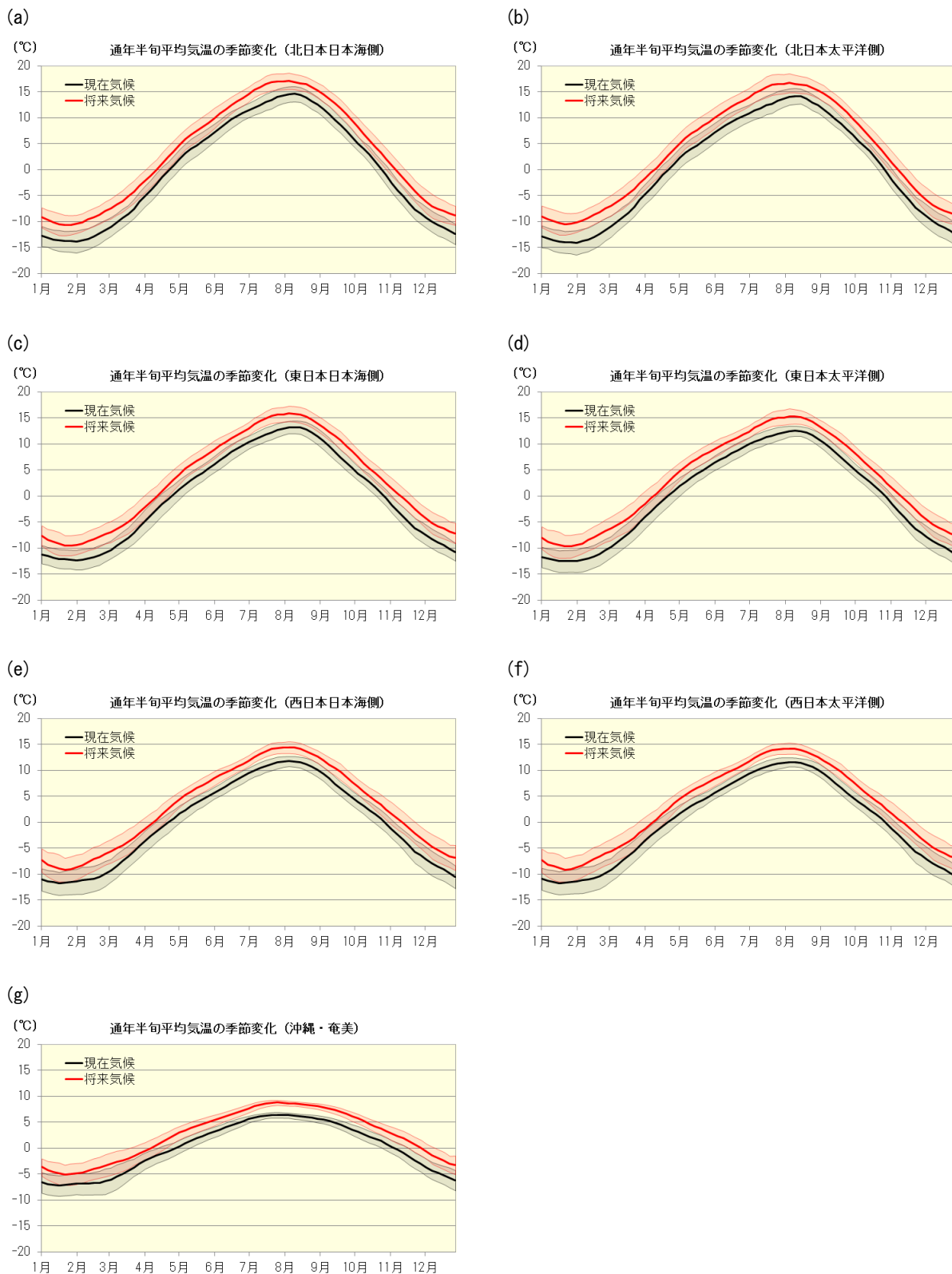


図 2.1-7 地域別の平均気温の季節進行の変化（現在気候の年平均との差）

折線は通年半年値、陰影は年々変動の標準偏差を示す。5 半年で平滑化している。黒が現在気候、赤が将来気候である。縦軸は現在気候の年平均値からの偏差として示している。

- (a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

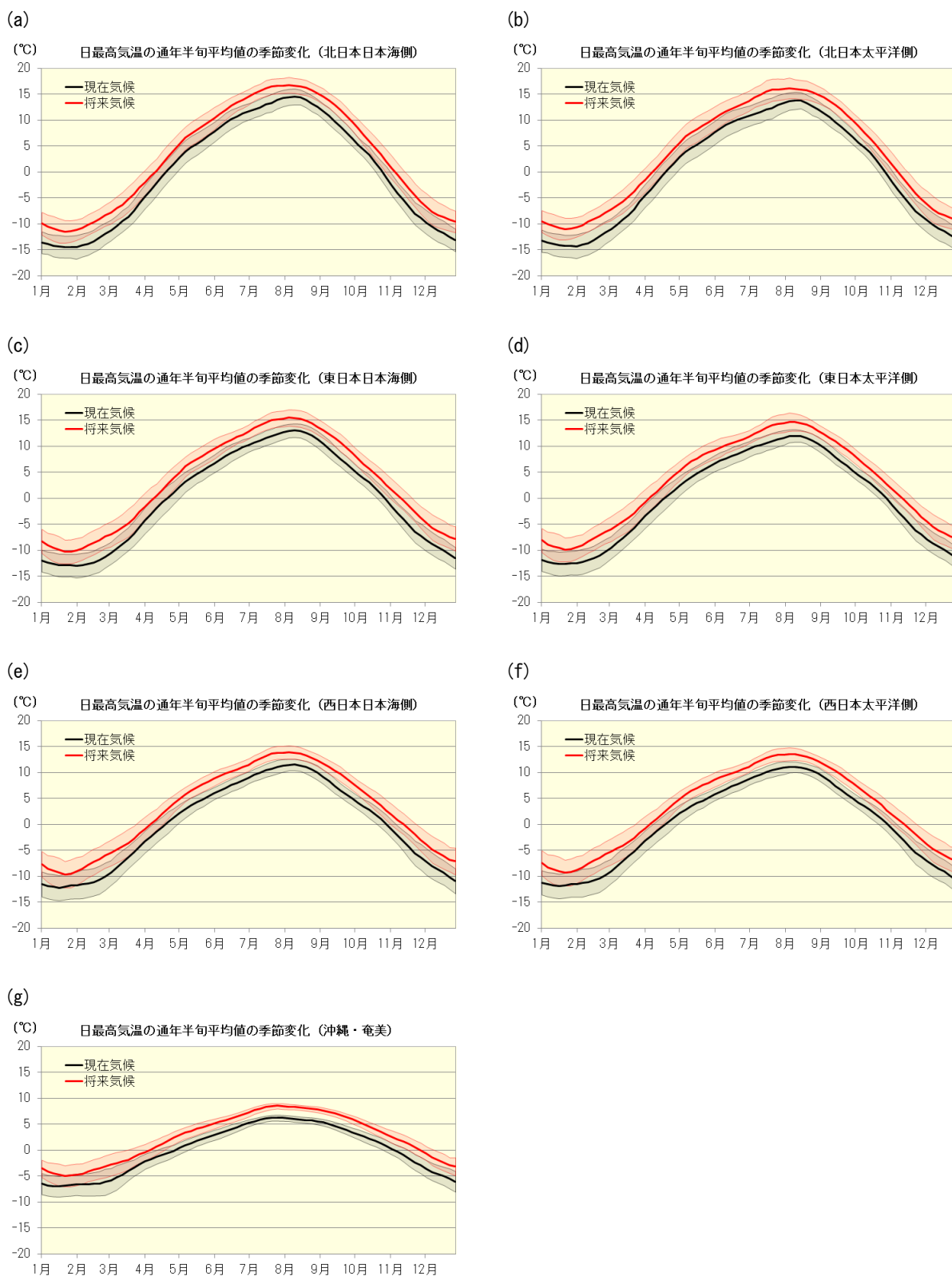


図 2.1-8 地域別の最高気温の季節進行の変化（現在気候の年平均との差）

折線は通年半年値、陰影は年々変動の標準偏差を示す。5 半年で平滑化している。黒が現在気候、赤が将来気候である。縦軸は現在気候の年平均値からの偏差として示している。

- (a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

(第2章 気温の将来予測)

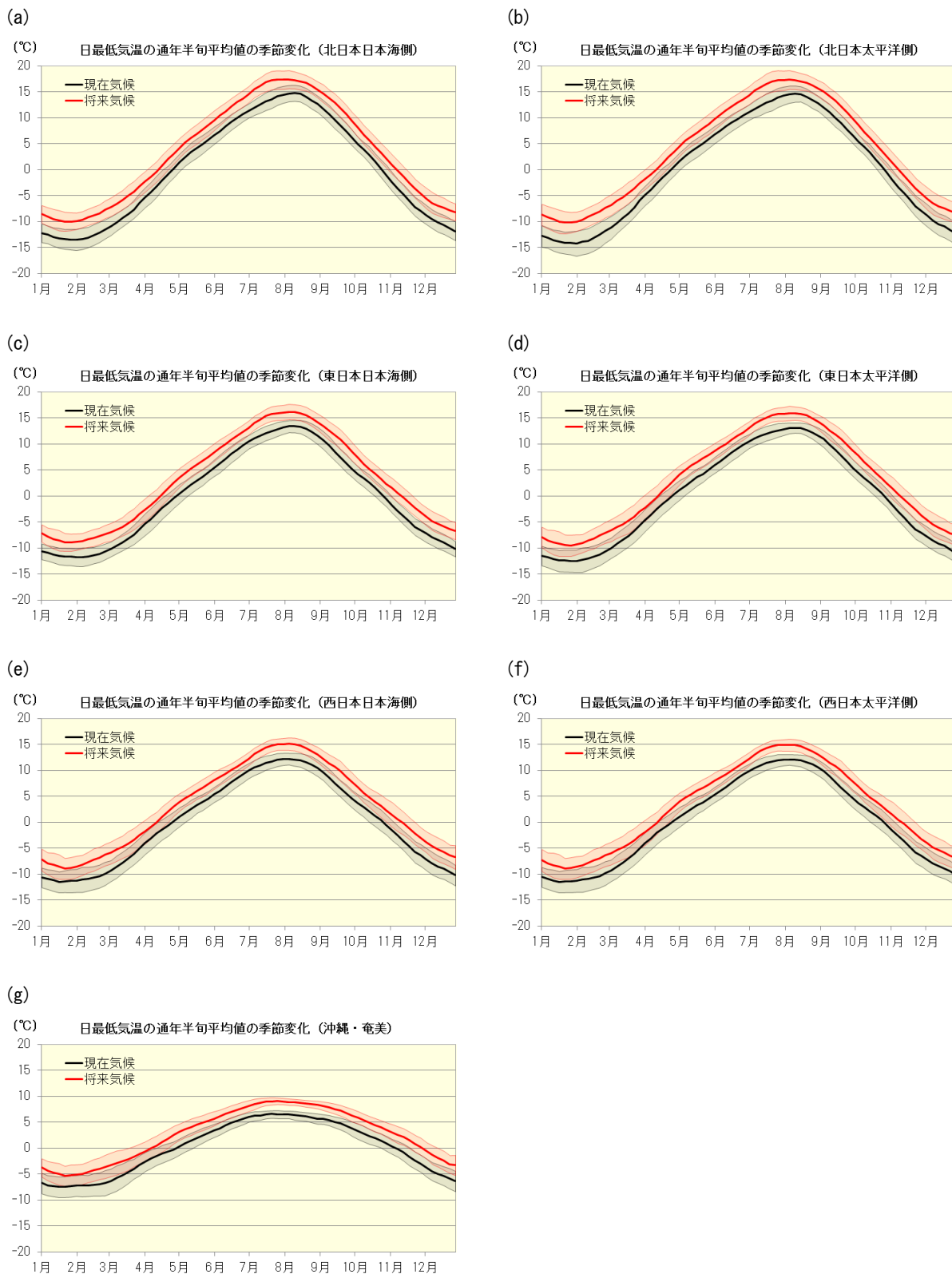


図 2.1-9 地域別の最低気温の季節進行の変化 (現在気候の年平均との差)

折線は通年半年値、陰影は年々変動の標準偏差を示す。5 半年で平滑化している。黒が現在気候、赤が将来気候である。縦軸は現在気候の年平均値からの偏差として示している。

- (a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

2.2 極端現象の変化

パーセンタイル値は例年発生しうる程度の極端現象を表す指標として、20年再現値は異常気象(気象庁の定義では30年に1度程度発生する現象)に準じた稀な現象を表す指標として用いる(計算方法は表1.3-3を参照)。夏季の極端な高温の日の最高気温について日最高気温の95パーセンタイル値および年最高気温の20年再現値、冬季の極端な低温の日の最低気温について日最低気温の5パーセンタイル値および年最低気温の20年再現値を示す。

なお、将来はオホーツク海が海氷に覆われることがほとんどなくなるため、最低気温ではオホーツク海で大きな気温上昇がみられる。北日本太平洋側の大きな上昇にはこの影響も含まれると考えられる。

2.2.1 パーセンタイル値

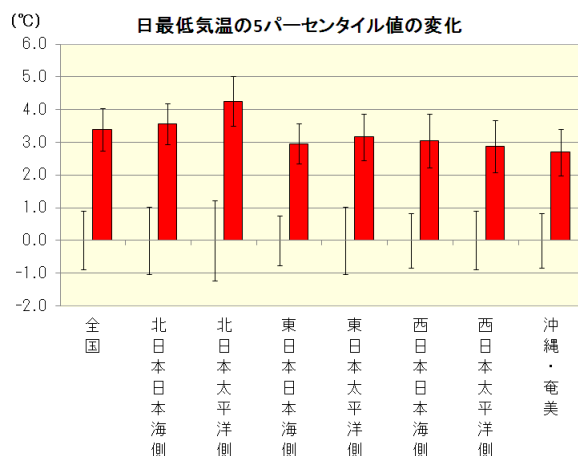
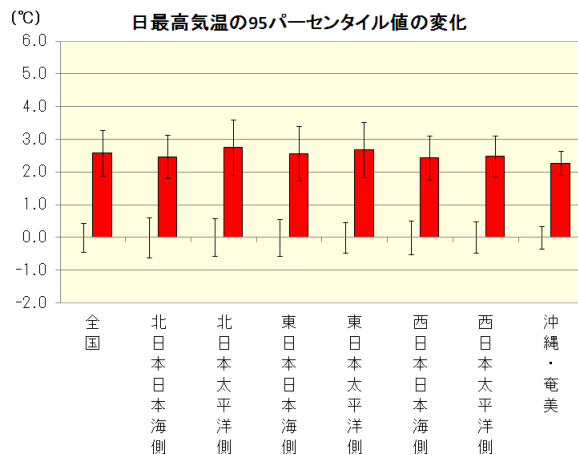
図2.2-1は、地域気候モデルによる日最高気温の95パーセンタイル値、日最低気温の5パーセンタイル値について、現在気候と将来気候の差を示したものである。各期間・各地域において上昇している。

日最高気温の95パーセンタイル値は、将来気候で2~3℃程度上昇しており、北日本太平洋側・東日本太平洋側の上昇が大きくなっている。

日最低気温の5パーセンタイル値は、将来気候では東日本以西で2.5~3℃程度上昇しているが、北日本では3.5℃以上上昇している。北日本太平洋側の上昇が最も大きい。

(第2章 気温の将来予測)

(a)



(b)

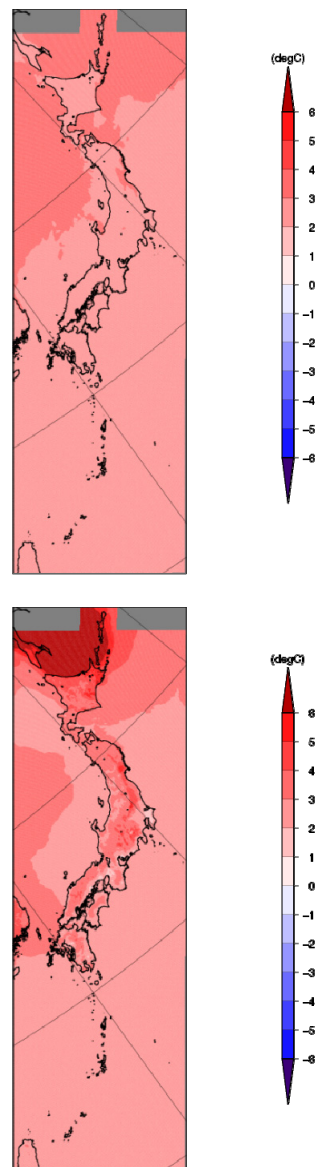


図 2.2-1 パーセンタイル値の変化 (将来気候の現在気候との差)

(a) : 棒グラフは地域別の現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差 (左 : 現在気候、右 : 将来気候) を示す。(b) : 分布図。上段が日最高気温の 95 パーセンタイル値の変化、下段が日最低気温の 5 パーセンタイル値の変化である。

2.2.2 20年再現値

図2.2-2は、地域気候モデルによる年最高気温・年最低気温の20年再現値について、現在気候と将来気候の差を示したものである。各期間・各地域において上昇している。

年最高気温の20年再現値は、将来気候では2~3℃程度上昇しており、北日本太平洋側の上昇が最も大きい。

年最低気温の20年再現値は、将来気候では北日本を中心に2.5~4℃程度上昇しており、北日本太平洋側の上昇が最も大きい。

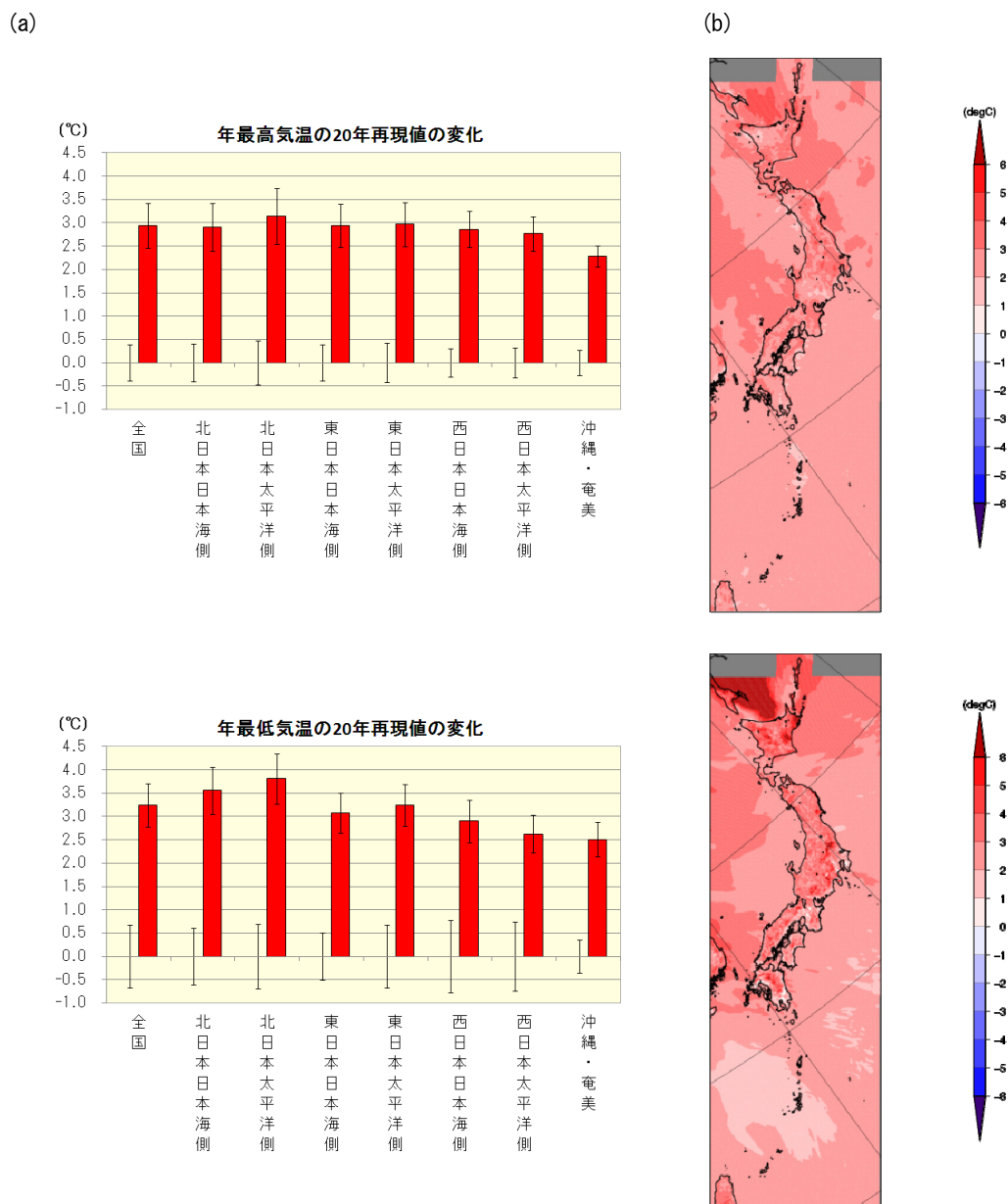


図2.2-2 20年再現値の変化（将来気候の現在気候との差）

(a)：棒グラフは地域別の現在気候との差、縦棒はジャックナイフ法で求めた推定誤差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。(b)：分布図。上段が年最高気温の20年再現値の変化、下段が年最低気温の20年再現値の変化である。

2.3 階級別日数の変化

地域気候モデルによる現在気候と将来気候での階級別日数の変化は、以下の通りである。地域気候モデルのデータは、気象官署及びアメダス地点¹に対応する格子点値を補正している（補正方法は補遺 A1.7.1 を参照されたい）。地域平均値は、地域内の補正した格子点値を平均して求めている。

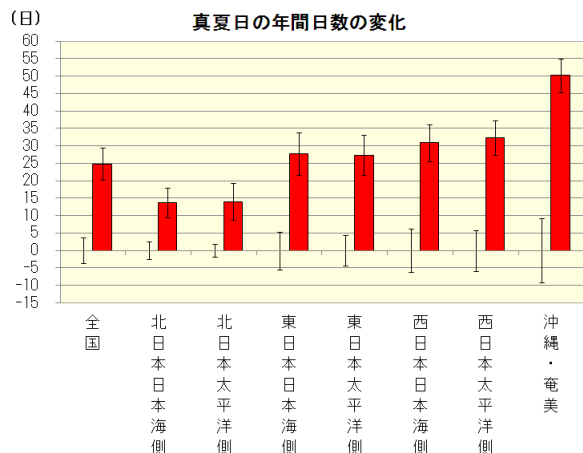
2.3.1 真夏日

図 2.3-1 及び付表は、全国及び地域ごとでみた年及び季節ごと（冬を除く）の、現在気候と将来気候の真夏日の日数の差を示したものである。図 2.3-2 は、地域気候モデルによる年及び季節ごとの、現在気候と将来気候の真夏日の日数の差の分布を示したものである。

将来気候では夏から秋にかけてを中心に増加がみられる。なお、都市の変化の影響は予測には反映していない。

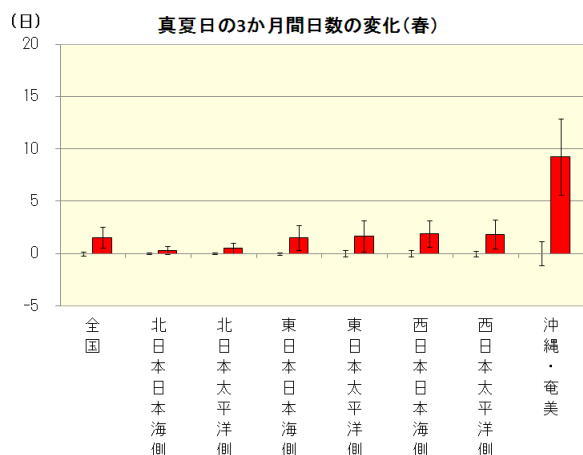
¹ アメダス地点は、日最高気温・日最低気温データが現在気候の期間において連続して8割以上存在する地点を対象とした。

(a)

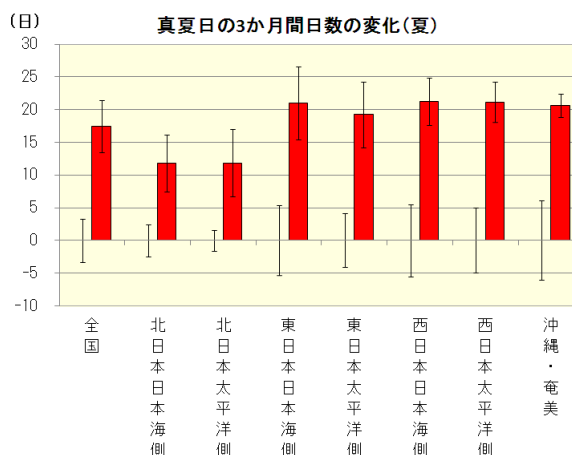


	年	春	夏	秋	冬
全国	24.95	1.53	17.43	5.88	0.00
北日本日本海側	13.71	0.32	11.78	1.61	
北日本太平洋側	14.00	0.53	11.83	1.63	
東日本日本海側	27.80	1.49	21.05	5.26	0.00
東日本太平洋側	27.36	1.66	19.25	6.45	
西日本日本海側	30.91	1.87	21.26	7.77	0.00
西日本太平洋側	32.42	1.84	21.15	9.42	
沖縄・奄美	50.17	9.25	20.67	20.19	0.06

(b)



(c)



(d)

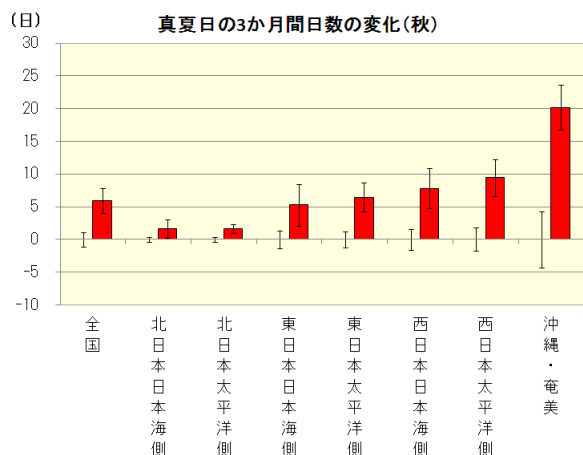


図 2.3-1 及び付表 地域別の真夏日の日数の変化 (将来気候の現在気候との差)

棒グラフは現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差 (左: 現在気候、右: 将来気候) を示す。(a) : 年間、(b) : 春 (3~5月)、(c) : 夏 (6~8月)、(d) : 秋 (9~11月)。右上の付表は増加 (減少) の数値を示し、その変化量が現在気候の標準偏差以上の場合はオレンジ色 (水色) に、信頼度水準90%で統計的に有意で無い場合は灰色に塗りつぶしている。現在気候と将来気候のいずれも出現日数がゼロの場合など、変化および標準偏差がともにゼロである場合は、空欄としている。

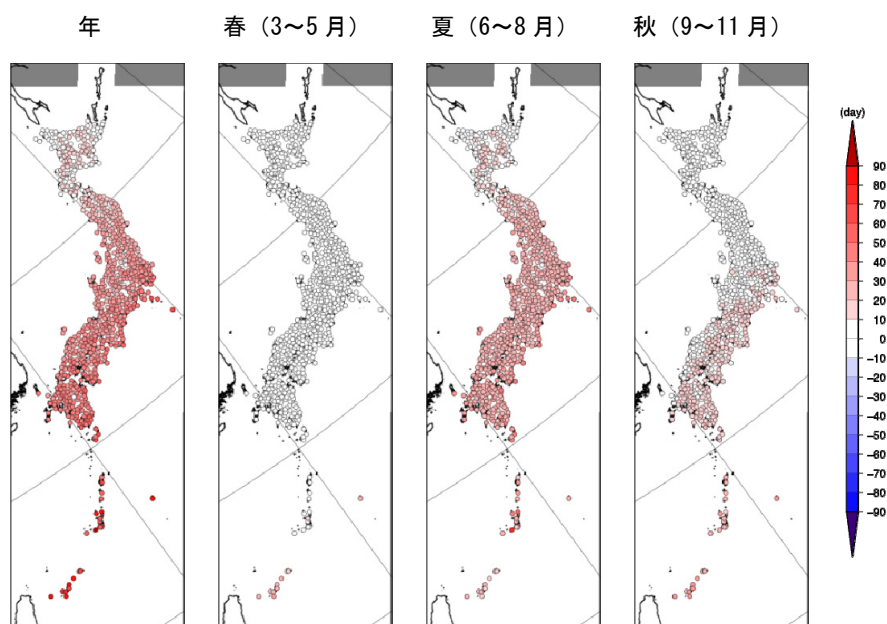


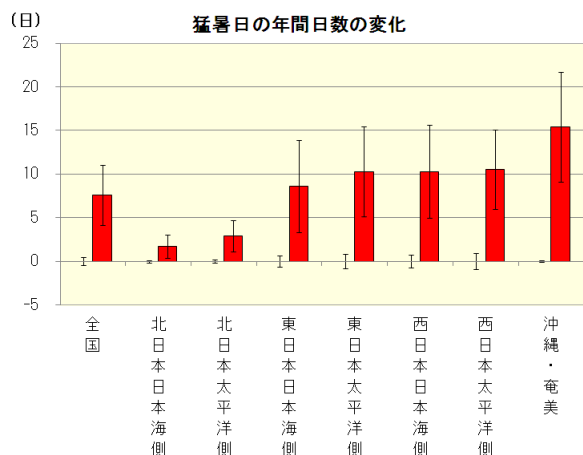
図 2.3-2 真夏日の日数の変化 (将来気候の現在気候との差)

2.3.2 猛暑日

図 2.3-3 及び付表は、全国及び地域ごとでみた年及び季節ごと (冬を除く) の、現在気候と将来気候の猛暑日の日数の差を示したものである。また図 2.3-4 は、地域気候モデルによる年及び季節ごとの、現在気候と将来気候の猛暑日の日数の差の分布を示したものである。

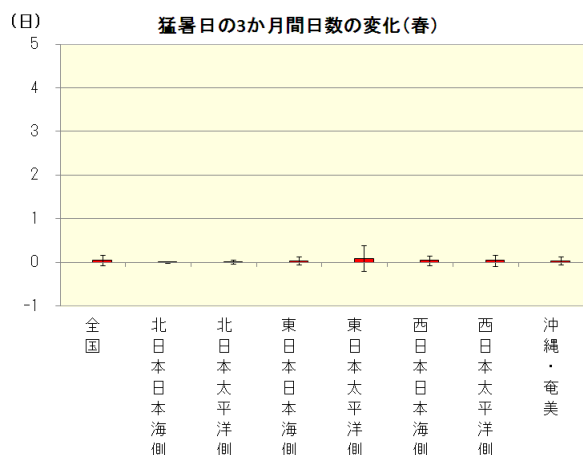
主に夏に増加がみられ、沖縄・奄美では秋にも増加がみられる。なお、都市の変化の影響は予測には反映していない。

(a)

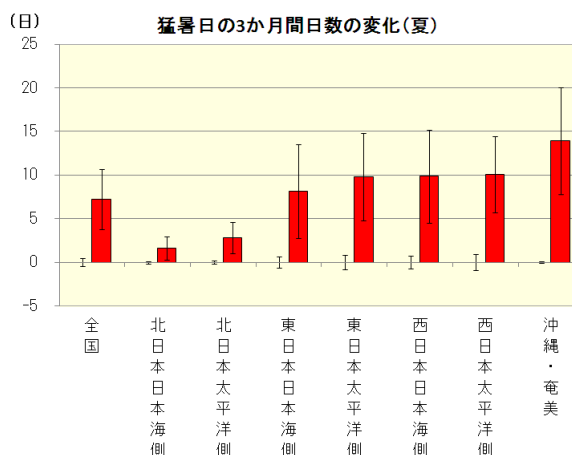


	年	春	夏	秋	冬
全国	7.60	0.04	7.24	0.32	
北日本日本海側	1.68	0.01	1.62	0.06	
北日本太平洋側	2.89	0.01	2.82	0.06	
東日本日本海側	8.58	0.04	8.11	0.43	
東日本太平洋側	10.29	0.09	9.79	0.41	
西日本日本海側	10.29	0.05	9.85	0.40	
西日本太平洋側	10.52	0.04	10.06	0.42	
沖縄・奄美	15.40	0.03	13.90	1.47	

(b)



(c)



(d)

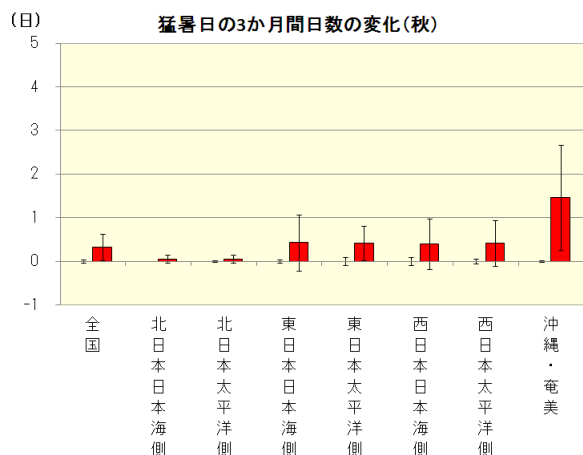


図 2.3-3 及び付表 地域別の猛暑日の日数の変化 (将来気候の現在気候との差)

棒グラフは現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差 (左: 現在気候、右: 将来気候) を示す。(a) : 年間、(b) : 春 (3~5月)、(c) : 夏 (6~8月)、(d) : 秋 (9~11月)。右上の付表は増加 (減少) の数値を示し、その変化量が現在気候の標準偏差以上の場合はオレンジ色 (水色) に、信頼度水準 90% で統計的に有意で無い場合は灰色に塗りつぶしている。現在気候と将来気候のいずれも出現日数がゼロの場合など、変化および標準偏差がともにゼロである場合は、空欄としている。

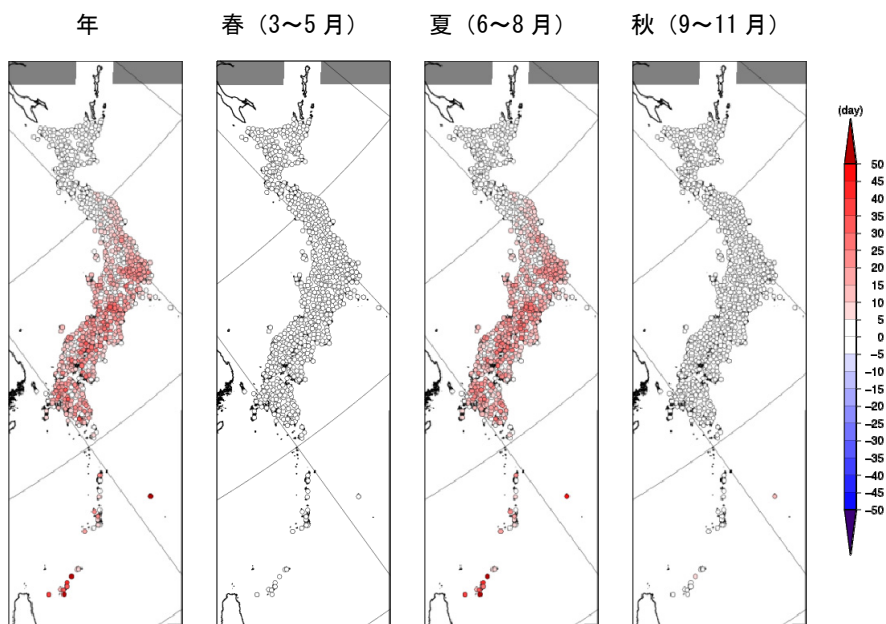


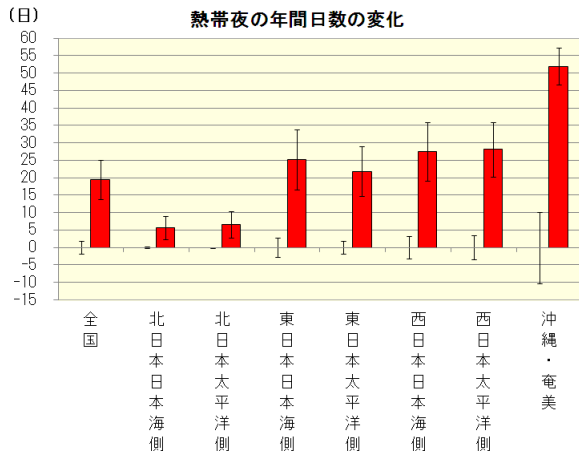
図 2.3-4 猛暑日の日数の変化 (将来気候の現在気候との差)

2.3.3 熱帯夜

図 2.3-5 及び付表は、全国及び地域ごとでみた年及び季節ごと (冬を除く) の、現在気候と将来気候の熱帯夜の日数の差を示したものである。また図 2.3-6 は、地域気候モデルによる年及び季節ごとの、現在気候と将来気候の熱帯夜の日数の差の分布を示したものである。

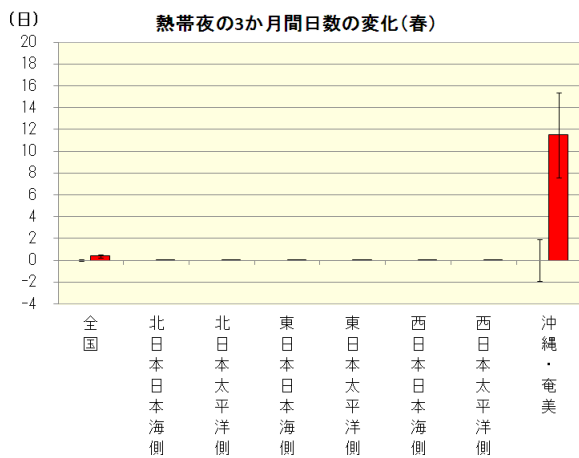
将来気候では夏から秋にかけて各地域で増加しており、沖縄・奄美では春も増加している。分布をみると、沿岸部など標高の低い地域でより多くの増加がみられる。なお、都市の変化の影響は予測には反映していない。

(a)

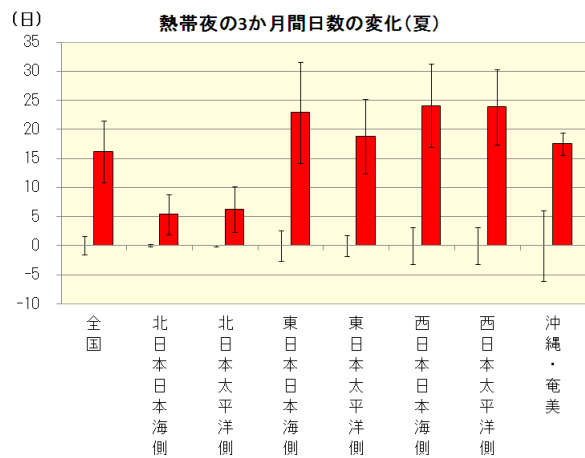


	年	春	夏	秋	冬
全国	19.52	0.38	16.22	2.91	0.01
北日本日本海側	5.62	0.00	5.40	0.23	
北日本太平洋側	6.62	0.00	6.31	0.32	
東日本日本海側	25.21	0.02	22.90	2.28	
東日本太平洋側	21.86	0.01	18.86	2.99	
西日本日本海側	27.43	0.01	24.10	3.32	
西日本太平洋側	28.10	0.04	23.84	4.21	
沖縄・奄美	51.92	11.48	17.55	22.59	0.30

(b)



(c)



(d)

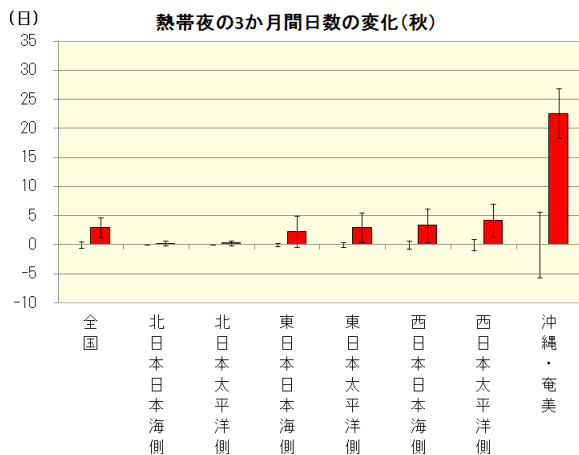


図 2.3-5 及び付表 地域別の熱帯夜の日数の変化 (将来気候の現在気候との差)

棒グラフは現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差 (左: 現在気候、右: 将来気候) を示す。(a) : 年間、(b) : 春 (3~5月)、(c) : 夏 (6~8月)、(d) : 秋 (9~11月)。右上の付表は増加 (減少) の数値を示し、その変化量が現在気候の標準偏差以上の場合はオレンジ色 (水色) に、信頼度水準90%で統計的に有意で無い場合は灰色に塗りつぶしている。現在気候と将来気候のいずれも出現日数がゼロの場合など、変化および標準偏差がともにゼロである場合は、空欄としている。

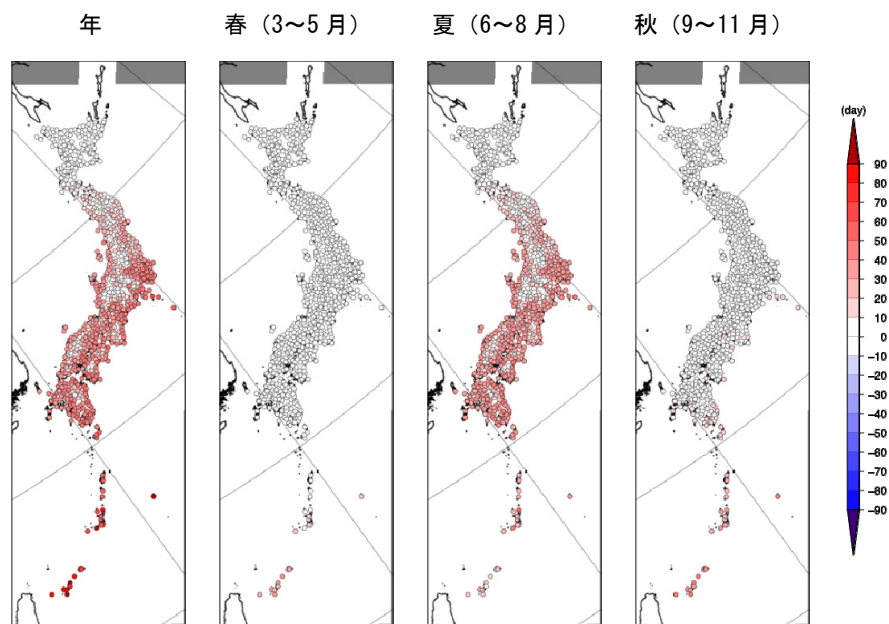


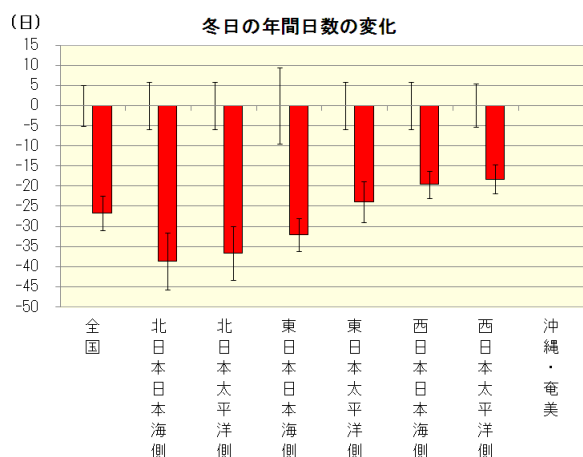
図 2.3-6 熱帯夜の日数の変化 (将来気候の現在気候との差)

2.3.4 冬日

図 2.3-7 及び付表は、全国及び地域ごとでみた年及び季節ごと（夏を除く）の、現在気候と将来気候の冬日の日数の差を示したものである。また図 2.3-8 は、地域気候モデルによる年及び季節ごとの、現在気候と将来気候の冬日の日数の差の分布を示したものである。

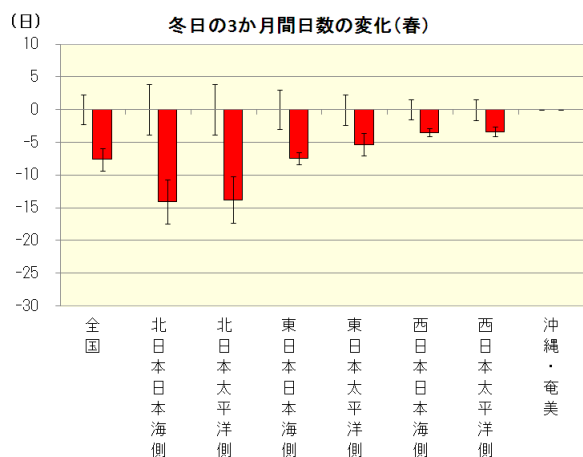
北日本を中心に各地域で減少しており、将来気候の北日本では年で約 40 日減少している。冬の北海道では、日最低気温は上昇するものの 0°Cを下回る日が多く、東北地方等に比べて減少は少ない。

(a)

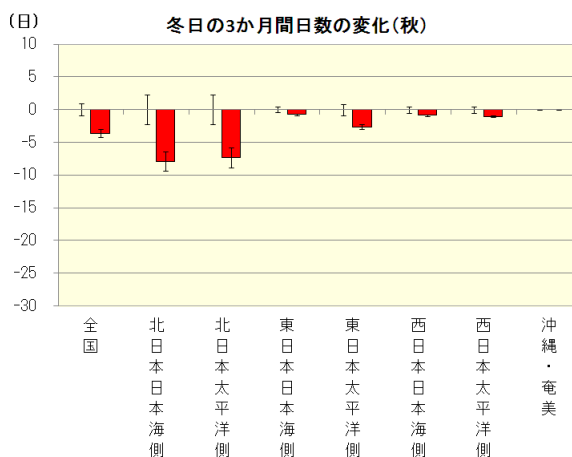


	年	春	夏	秋	冬
全国	-26.69	-7.63	-0.01	-3.59	-15.45
北日本日本海側	-38.66	-14.08	-0.05	-7.89	-16.64
北日本太平洋側	-36.66	-13.77	-0.03	-7.32	-15.53
東日本日本海側	-32.03	-7.44		-0.74	-23.84
東日本太平洋側	-23.94	-5.33	0.00	-2.65	-15.96
西日本日本海側	-19.61	-3.47	0.00	-0.86	-15.28
西日本太平洋側	-18.28	-3.38		-1.04	-13.87
沖縄・奄美					

(b)



(c)



(d)

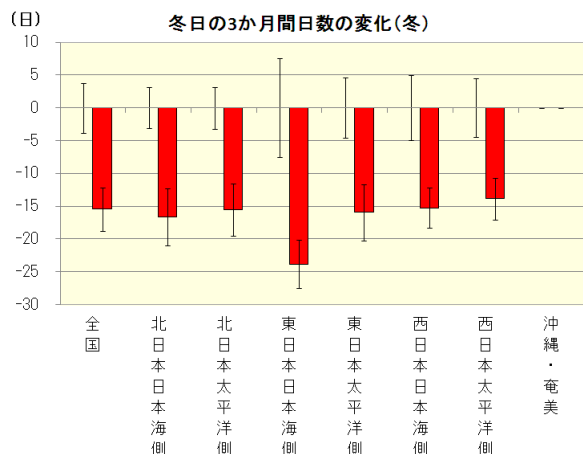


図 2.3-7 及び付表 地域別の冬日の日数の変化（将来気候の現在気候との差）

棒グラフは現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。(a)：年間、(b)：春（3～5月）、(c)：秋（9～11月）、(d)：冬（12～2月）。右上の付表は減少（増加）の数値を示し、その変化量が現在気候の標準偏差以上の場合はオレンジ色（水色）に、信頼度水準90%で統計的に有意でない場合は灰色に塗りつぶしている。現在気候と将来気候のいずれも出現日数がゼロの場合など、変化および標準偏差がともにゼロである場合は、空欄としている。

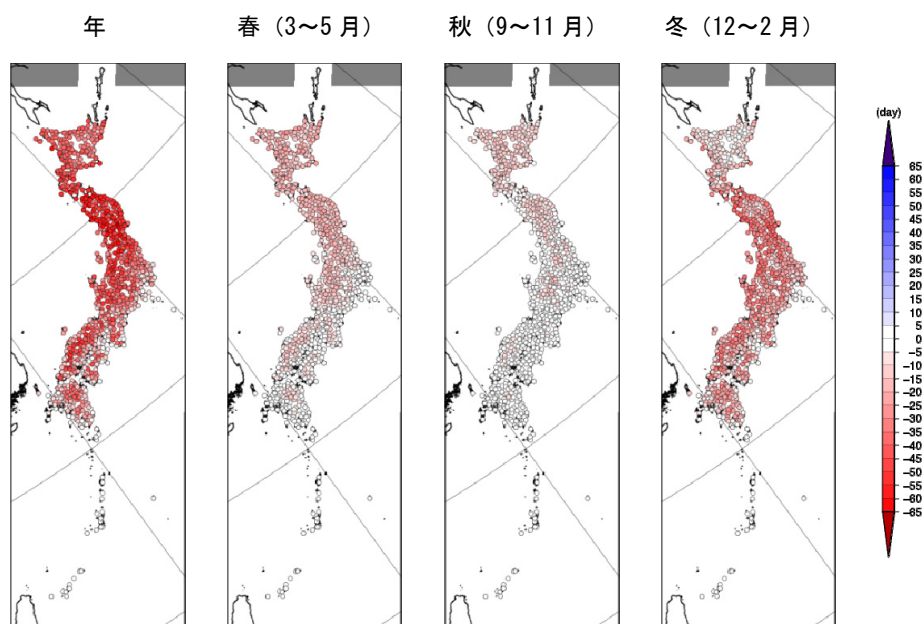


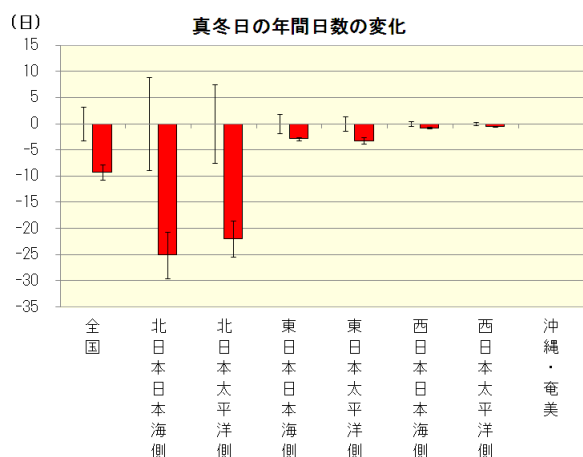
図 2.3-8 冬日の日数の変化 (将来気候の現在気候との差)

2.3.5 真冬日

図 2.3-9 及び付表は、全国及び地域ごとでみた年及び季節ごと (夏を除く) の、現在気候と将来気候の真冬日の日数の差を示したものである。また図 2.3-10 は、地域気候モデルによる年及び季節ごとの、現在気候と将来気候の真冬日の日数の差の分布を示したものである。

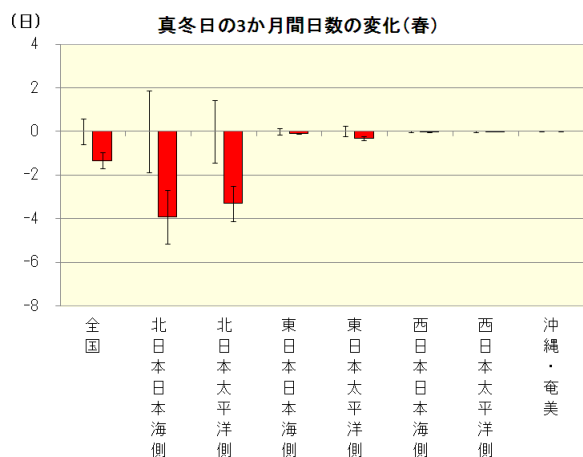
将来気候では、北日本を中心に各地域で減少しており、特に冬の北日本では北海道を中心に平均で年 20 日以上減少している。東日本及び西日本でも減少しているが、現在気候での出現日数が少ないため、変化量は小さくなっている。

(a)

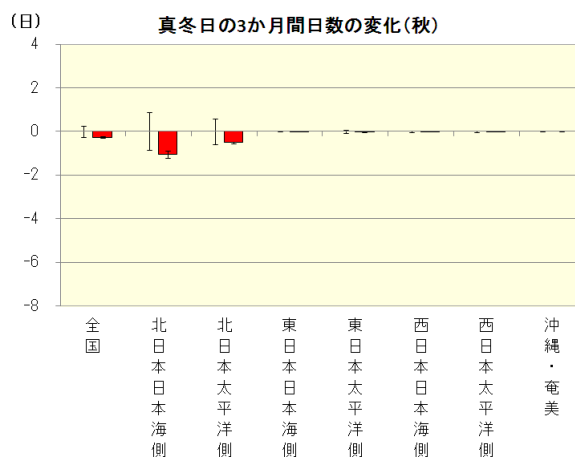


	年	春	夏	秋	冬
全国	-9.25	-1.34		-0.27	-7.64
北日本日本海側	-25.10	-3.93		-1.04	-20.13
北日本太平洋側	-21.94	-3.30		-0.51	-18.13
東日本日本海側	-2.86	-0.10		0.00	-2.75
東日本太平洋側	-3.22	-0.32		-0.04	-2.87
西日本日本海側	-0.81	-0.03		-0.01	-0.76
西日本太平洋側	-0.51	-0.02		-0.01	-0.49
沖縄・奄美					

(b)



(c)



(d)

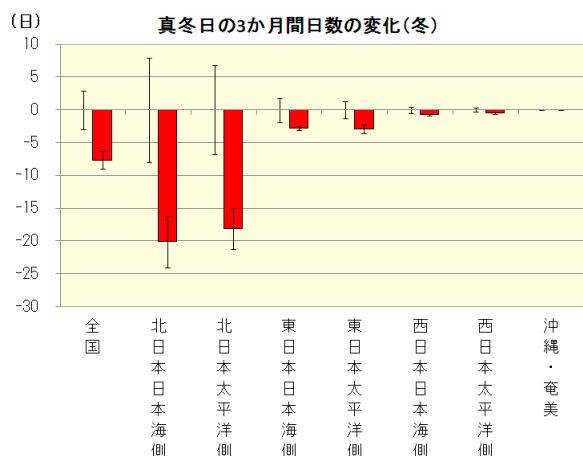


図 2.3-9 及び付表 地域別の真冬日の日数の変化 (将来気候の現在気候との差)

棒グラフは現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差 (左: 現在気候、右: 将来気候) を示す。(a): 年間、(b): 春 (3~5月)、(c): 秋 (9~11月)、(d): 冬 (12~2月)。右上の付表は減少 (増加) の数値を示し、その変化量が現在気候の標準偏差以上の場合はオレンジ色 (水色) に、信頼度水準 90% で統計的に有意で無い場合は灰色に塗りつぶしている。現在気候と将来気候のいずれも出現日数がゼロの場合など、変化および標準偏差がともにゼロである場合は、空欄としている。

(第2章 気温の将来予測)

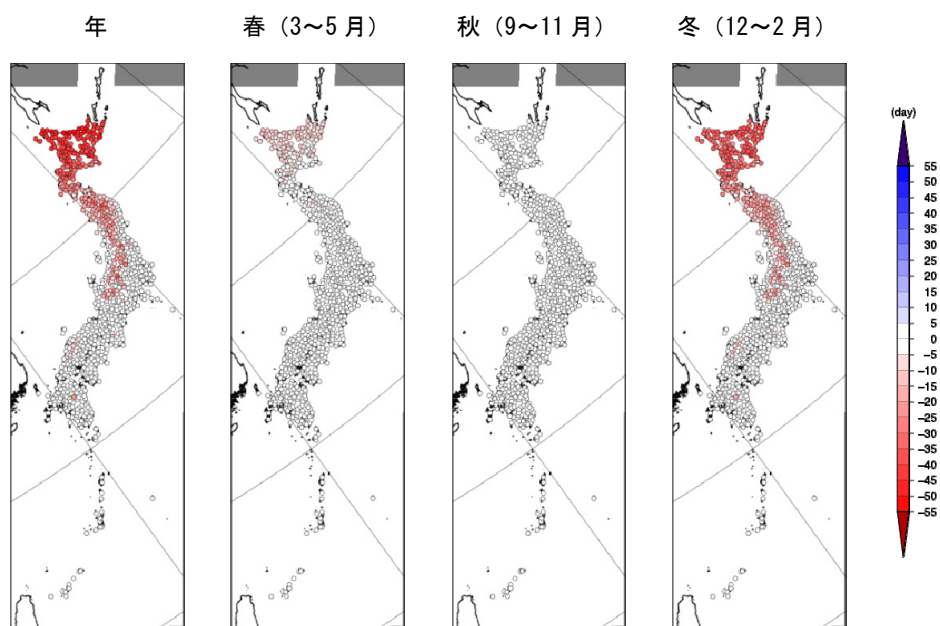


図 2.3-10 真冬日の日数の変化 (将来気候の現在気候との差)

2.3.6 各階級別日数

図 2.3-11 は、地域気候モデルにおける地域ごと及び季節ごとの、日平均気温の出現頻度の変化を示したものである。各季節・各地域で分布が高温側へ変化し、平均値の変化とともに、現在では稀な極端な高温日がより高い頻度で発生し、極端な低温日の頻度が低下することを示している。

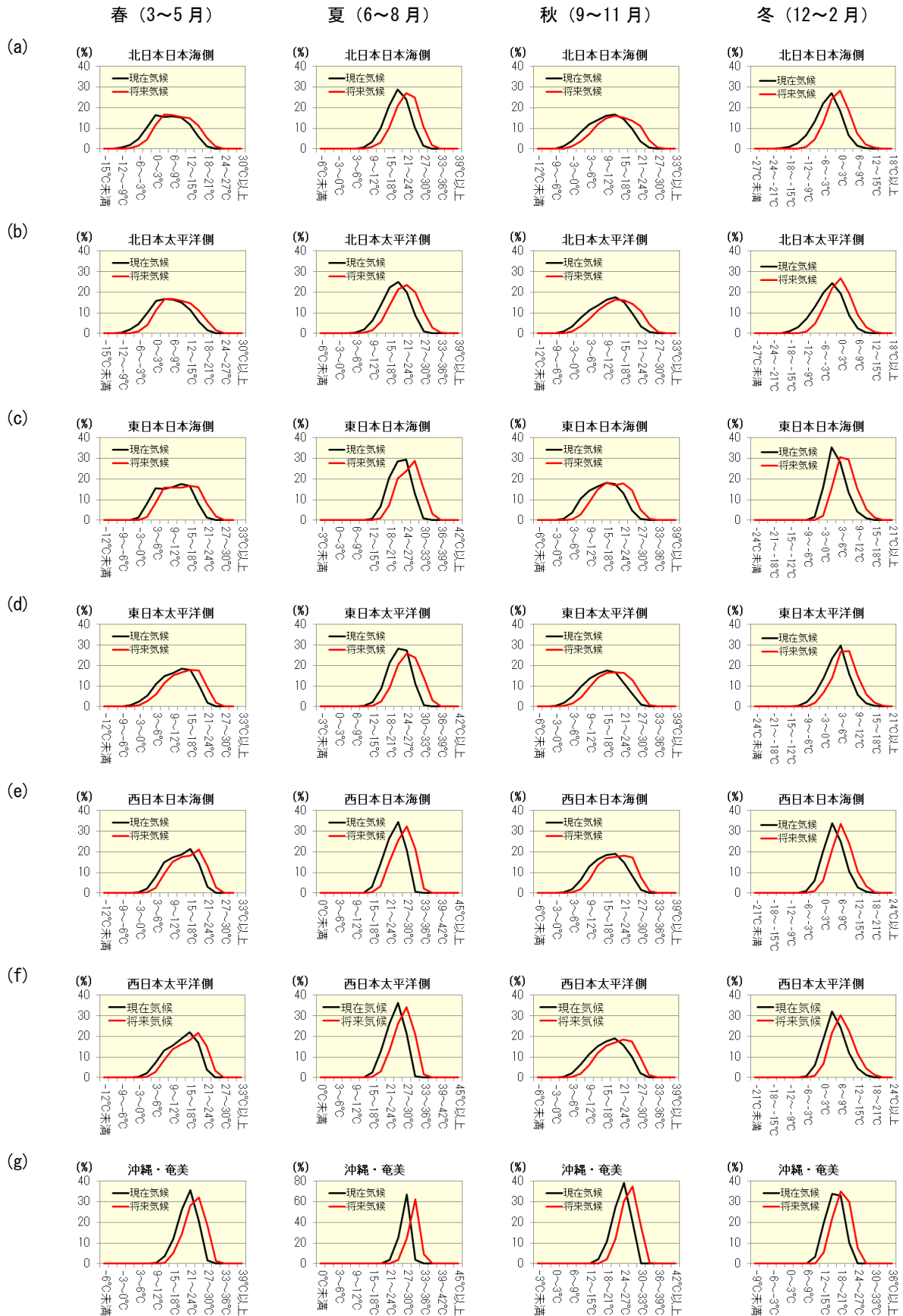


図 2.3-11 地域毎の日平均気温の出現頻度の変化

黒は現在気候、赤は将来気候を示す。(a)：北日本日本海側、(b)：北日本太平洋側、(c)：東日本日本海側、(d)：東日本太平洋側、(e)：西日本日本海側、(f)：西日本太平洋側、(g)：沖縄・奄美

第3章 降水の将来予測

【ポイント】

- 年降水量は北日本で増加する。春季、冬季の降水量は北日本及び太平洋側で増加する。
- 大雨や短時間強雨の発生頻度は全国的に増加する。
- 無降水日数が増加する。

3.1 平均と年々変動の変化

3.1.1 年・3か月間降水量

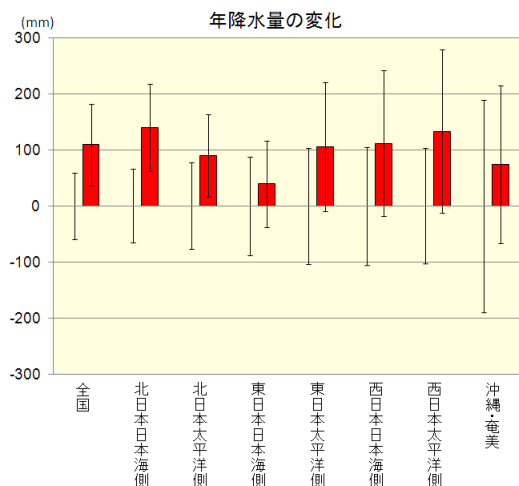
地域気候モデルによる現在気候における降水量と、将来気候における降水量との差を、全国及び地域別の平均として図 3.1-1 及び付表に示す。また、年及び季節ごとの降水量の予測される変化率の分布を図 3.1-2 に示す。

年降水量の全国平均は、有意に増加している。地域別に見ると、北日本日本海側・北日本太平洋側で有意に増加する予測となっている。これは、世界的な傾向として、高緯度地域で増加する可能性が非常に高い (IPCC, 2007) と予測されていることと整合的な結果となっている。他の地域平均では、年々変動が大きく、統計的に有意な変化とはなっていない。

冬から春にかけて、太平洋側で降水量が有意に増加している。3.3.1 で述べるように、冬の太平洋側では無降水日数が減少する地域が見られることから、偏西風の位置の北上や、冬型の気圧配置の弱まりに伴って、降水の頻度が増えるためと考えられる。これは、温暖化に伴って偏西風が極寄りにシフトすると予測されていること、太平洋側よりも大陸側で大きく気温が上昇し、冬季の東西の気圧勾配が小さくなると予測されていることと整合的である。さらに、3.2.1 で述べるように、強雨によってもたらされる降水量の割合が増えていることも影響していると考えられる。

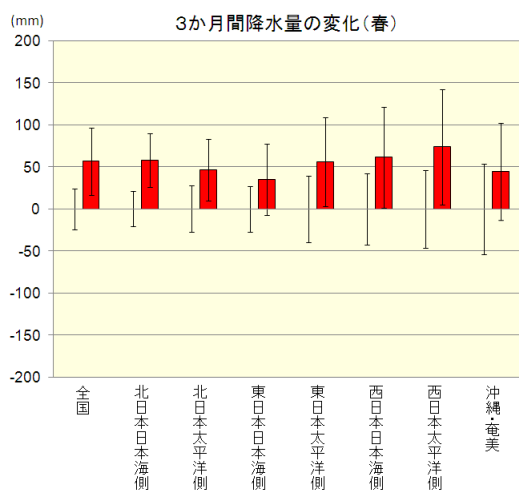
夏については、北日本で有意に増加する地域が見られるものの、全国的には変化傾向は明瞭でない。図 3.1-2 の分布を見ると、西日本の一部では減少となっている地域もあるが、地域平均として見ると (1.3-5 (イ)、1-4 (イ))、有意な変化ではない。夏は梅雨や台風による降水量の年々変動の幅が大きいため、統計的に有意な変化としては現れにくいと考えられる。秋は統計的には有意ではないものの、降水量が減る傾向は全国的に広がっている。これは無降水日数の増加(3.3 参照)と一致しており、降水の頻度の減少が総降水量の減少傾向に結びついているものとみられる。

(a)

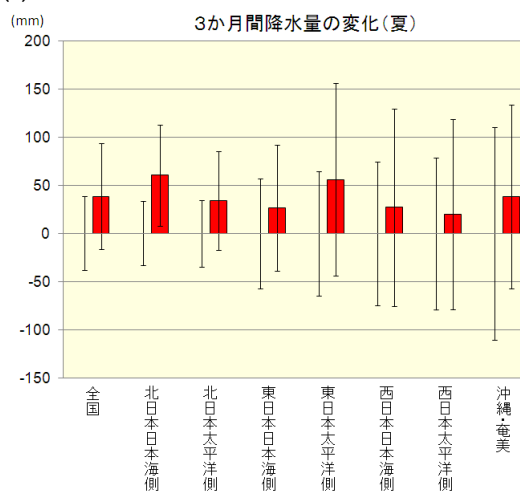


	年	春	夏	秋	冬
全国	109.1	56.8	38.6	-27.9	41.6
北日本日本海側	139.5	57.8	60.5	-20.7	41.9
北日本太平洋側	89.4	46.4	34.1	-37.2	46.1
東日本日本海側	39.3	35.0	26.7	-46.6	24.2
東日本太平洋側	105.6	55.7	55.9	-56.9	51.1
西日本日本海側	111.7	61.3	27.1	0.3	23.1
西日本太平洋側	133.1	73.7	19.9	-10.7	50.3
沖縄・奄美	74.4	44.9	38.0	1.8	-10.4

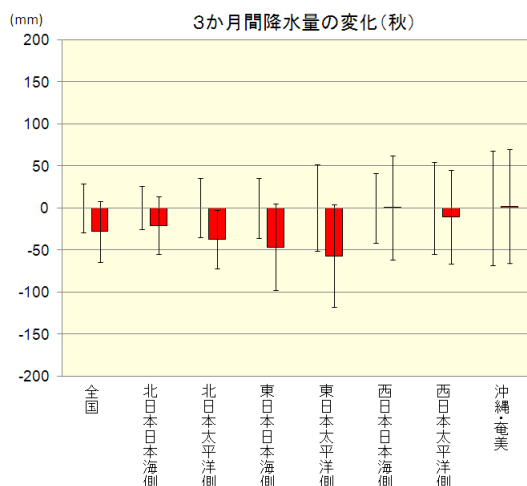
(b)



(c)



(d)



(e)

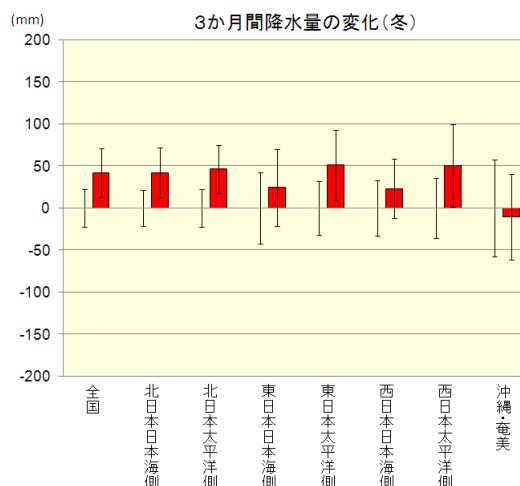


図 3.1-1 及び付表 地域別の降水量の変化（将来気候の現在気候との差）

棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。(a)：年間、(b)：春(3～5月)、(c)：夏(6～8月)、(d)：秋(9～11月)、(e)：冬(12～2月)。右上の付表は増加（減少）の数値を示し、その変化量が現在気候の年々変動の標準偏差以上の場合には水色（オレンジ色）に、信頼度水準90%で統計的に有意でない場合には灰色に塗りつぶしている。

(第3章 降水の将来予測)

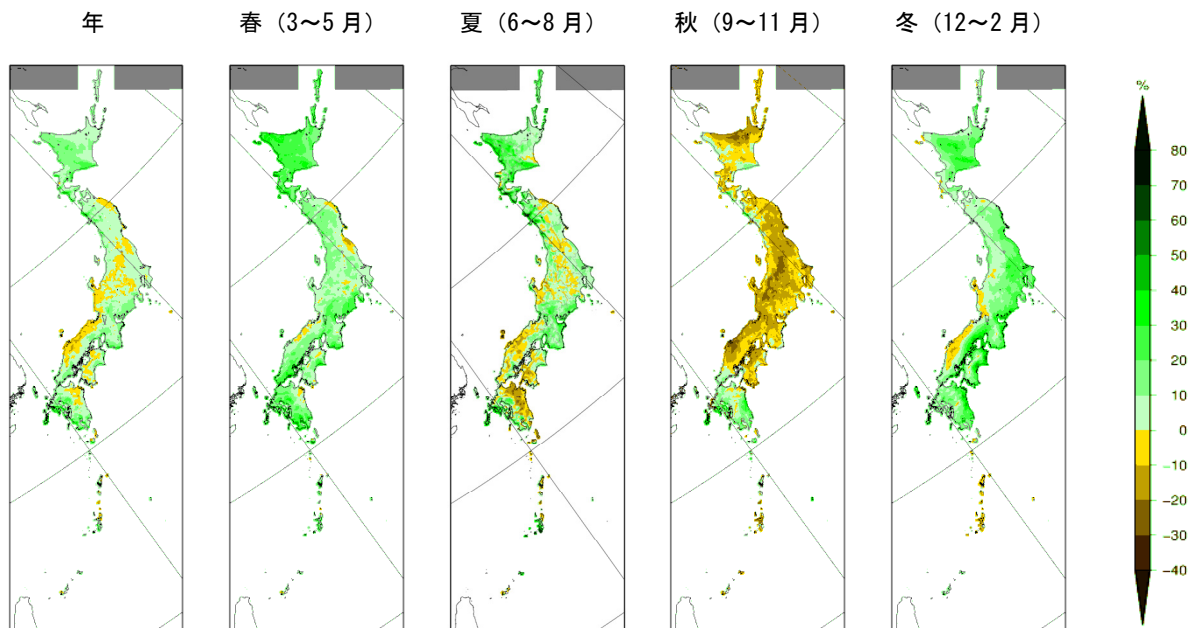


図 3.1-2 降水量の変化（将来気候の現在気候に対する比）

現在気候に対する変化率で示す。単位は%で、緑系の色は増加、茶系の色は減少することを示す。

3.1.2 季節進行の変化

地域気候モデルによる現在気候及び将来気候における地域ごとの半旬降水量の季節進行を図 3.1-3 に示す。いずれの地域、季節についても、将来気候の降水量の変化は、現在気候の年々変動の範囲に収まっているものの、次のような特徴が見られる。

北日本、東日本太平洋側、西日本太平洋側では、冬から春にかけて降水量が増加している。西日本では、梅雨明け後の降水量の減少がやや不明瞭になっており、Kitoh and Uchiyama (2006)や Hirahara et al. (2012)で指摘されている温暖化に伴う梅雨明けの遅れと整合的な予測結果となっている。沖縄・奄美は6月頃に増加しているが、この時期の現在気候の降水量に負のバイアスがあること（補遺 1）、年々変動の大きさが将来気候で大きくなっており特定の年の降水量の影響を受けている可能性があることから、この増加傾向については不確実性が大きいと考えられる。

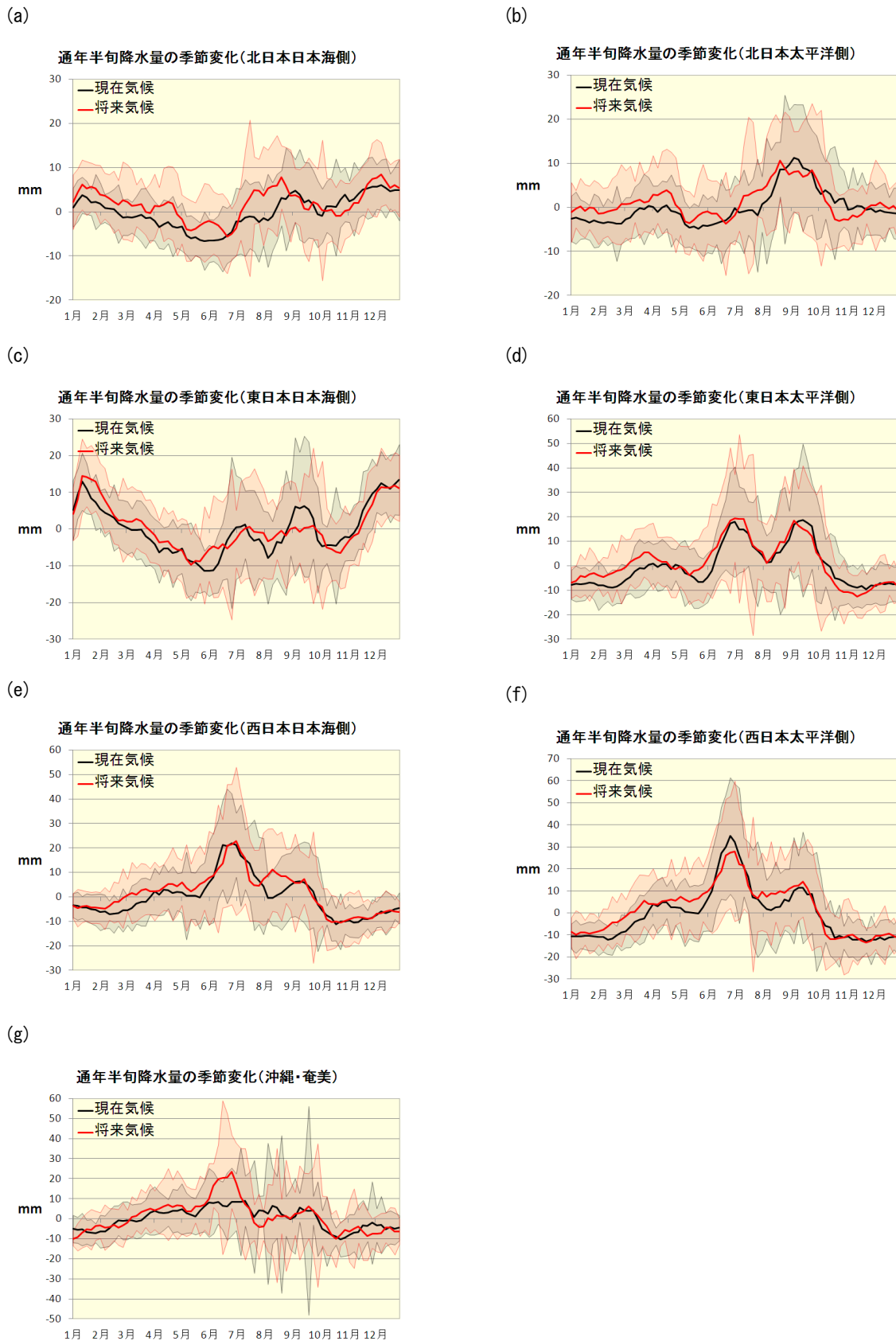


図 3.1-3 地域別の降水量の季節進行の変化 (現在気候の年平均との差)

折線は通年半年値、陰影は年々変動の標準偏差を表す。5 半年で平滑化している。黒が現在気候、赤が将来気候である。縦軸は現在気候の年平均値からの偏差として示している。(a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、(e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

3.2 大雨や強雨の発生頻度の変化¹

3.2.1 強雨によってもたらされる降水量

地域気候モデルによる強雨（ここでは、各地点における1時間降水量の総発生数に対して、降水量の多い方から上位5%の降水イベントを強雨と定義する。各地点において例年複数回観測されるレベルの強い雨に相当する。1.3-4を参照されたい。）によってもたらされる降水量について、現在気候と将来気候の比の分布を図3.2-1に示す。

ほとんどの季節、地域で、強雨によってもたらされる降水量は増加する傾向が現れており、春、夏の北日本、冬の東日本・西日本の太平洋側において一層明瞭である。総降水量では減少傾向が見られる地域でも（図3.1-2）、強雨による降水の寄与分としては増加している。これは、温暖化に伴って大気中の水蒸気量が増加する傾向と整合的である。

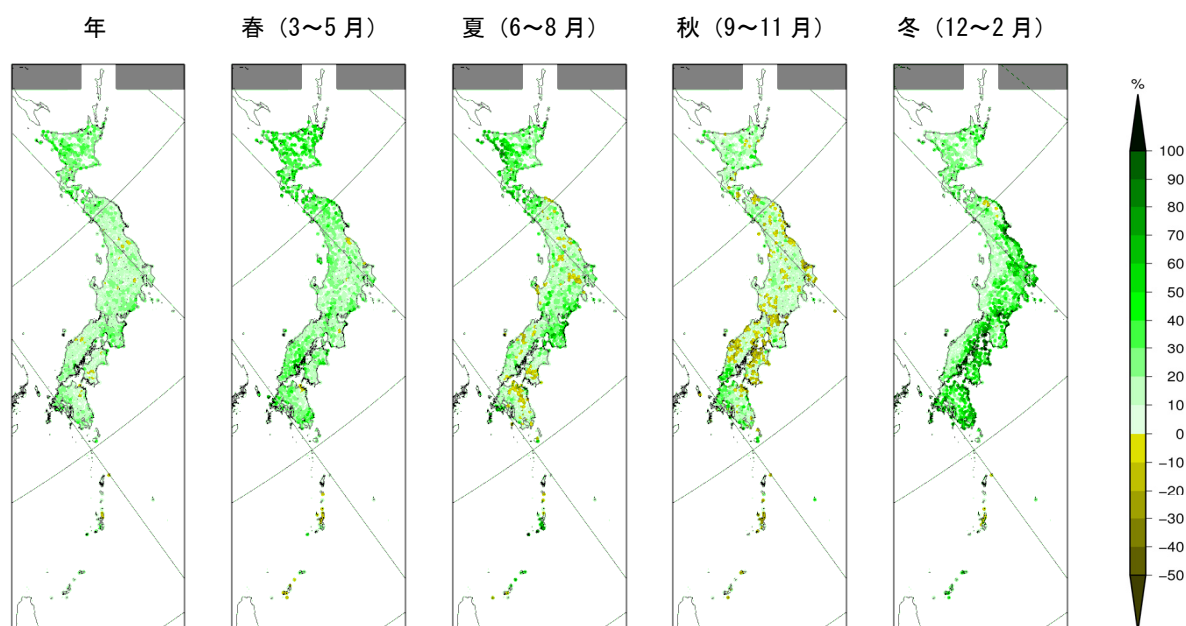


図 3.2-1 強雨によって降る降水量の変化（将来気候の現在気候に対する比）

現在気候に対する変化率(%)で示す。

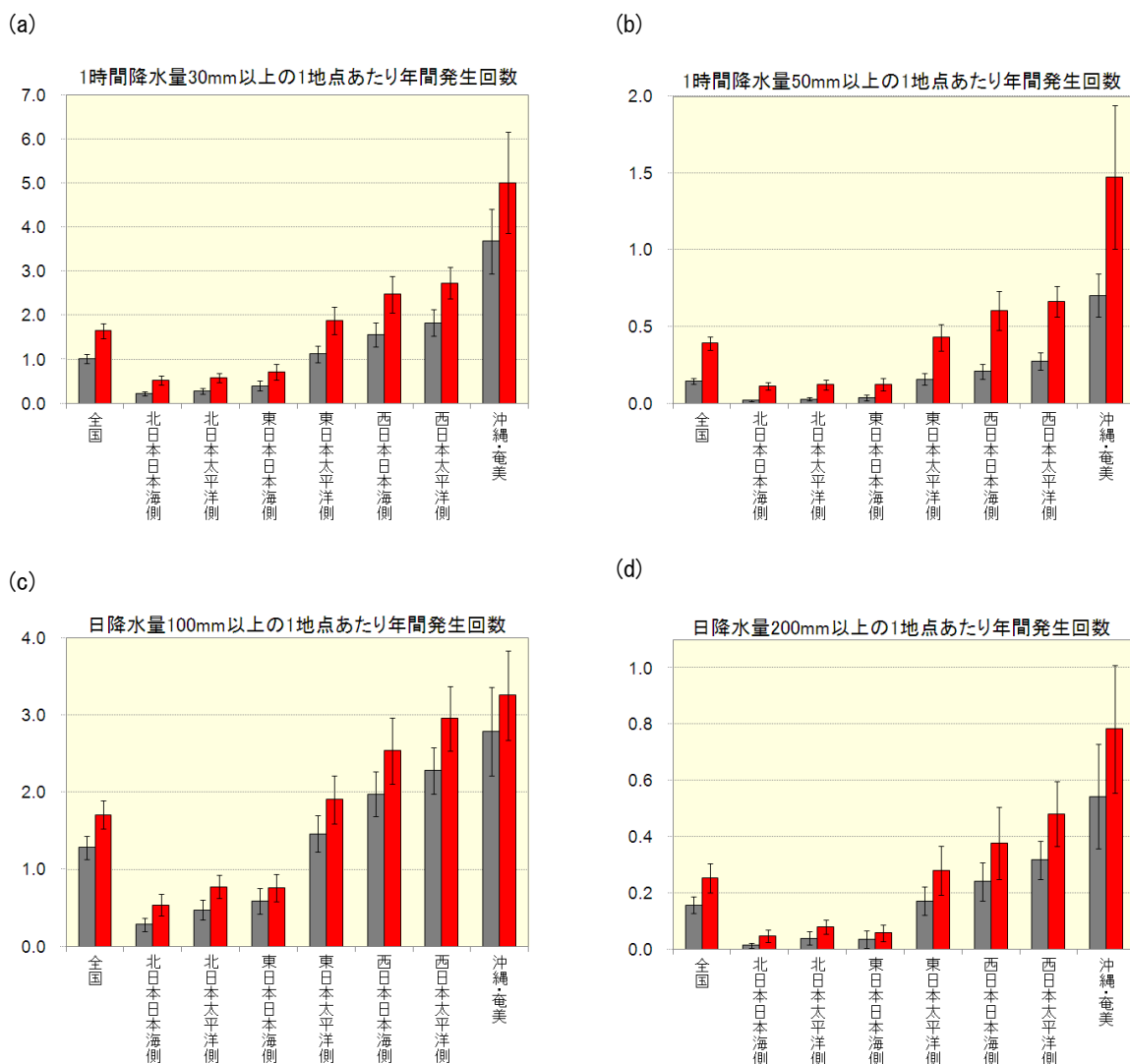
3.2.2 大雨・短時間強雨の発生回数

地域気候モデルによる現在気候における大雨（日降水量100ミリ及び200ミリ以上）と短時間強雨（1時間降水量30ミリ及び50ミリ以上）の年間発生回数と、将来における年間発生回数の変化を地域平均で見たものを図3.2-2及び付表に示す。

将来気候では、1時間降水量30ミリ以上、50ミリ以上の発生回数はすべての地域で有意に増加している。日降水量100ミリ以上、200ミリ以上については、全国的に増加傾向となっているが、東日本日本海側と沖縄・奄美では、有意と判定されていない。これは発生回数の変化量の大きさに対して年々変動の幅が大きいためとみられる。

現在気候、将来気候における地域毎の1時間降水量の年間発生頻度分布を図3.2-3に示す。降水量を5ミリ毎の階級に区分し、階級別の相対発生頻度として表している。いずれの地域についても、将来気候において強い雨の発生頻度が相対的に増加する傾向が見られる。

¹本節に示される予測結果は、気候モデルの予測値に含まれる系統誤差の影響を軽減するため、アメダスの観測値を用いて統計的補正を施したうえで解析したものである（補遺1）。



	1時間降水量 30ミリ以上	1時間降水量 50ミリ以上	日降水量 100ミリ以上	日降水量 200ミリ以上
全国	0.63	0.25	0.43	0.09
北日本日本海側	0.31	0.09	0.26	0.03
北日本太平洋側	0.30	0.10	0.30	0.04
東日本日本海側	0.32	0.09	0.18	0.02
東日本太平洋側	0.76	0.27	0.44	0.11
西日本日本海側	0.91	0.40	0.56	0.14
西日本太平洋側	0.91	0.39	0.67	0.16
沖縄・奄美	1.33	0.77	0.47	0.24

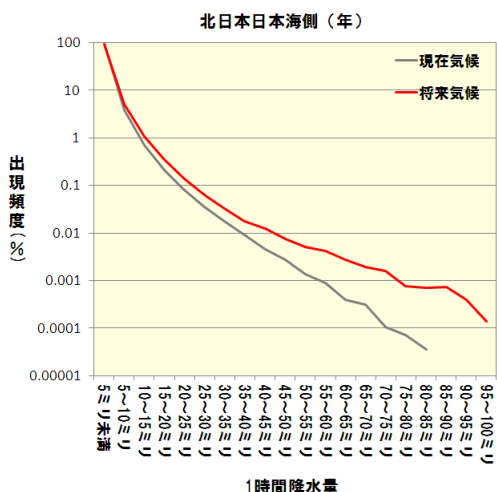
図 3.2-2 及び付表 地域別の大雨・短時間強雨の発生頻度の変化

棒グラフが現在気候(灰)、将来気候(赤)における1地点あたりの年間発生回数、縦棒は年々変動の標準偏差を示す。(a): 1時間降水量30ミリ以上、(b): 1時間降水量50ミリ以上、(c): 日降水量100ミリ以上、(d): 日降水量200ミリ以上。左下の付表は、増加(減少)の数値を示し、その変化量が現在気候の年々変動の標準偏差以上の場合は水色(オレンジ色)に、信頼度水準90%で統計的に有意でない場合には灰色に塗りつぶしている。なお有意性の判定は、Mann-Whitneyの検定²(Corder and Foreman (2009)など)により行っている。

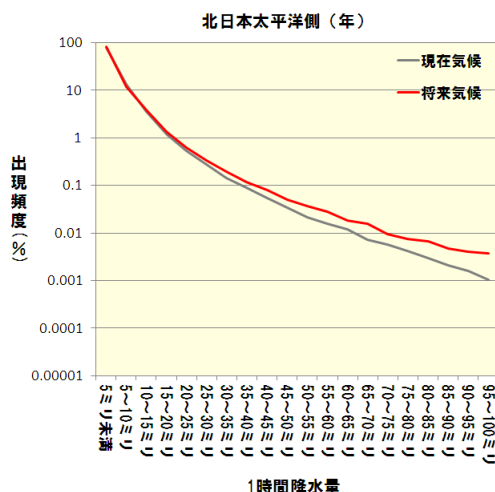
² 現在気候、将来気候のそれぞれ20年を年間発生回数の多い順に並べ順位付けし、順位の現れ方に偏りがあるかどうか検定することで有意性を判定する方法。

(第3章 降水の将来予測)

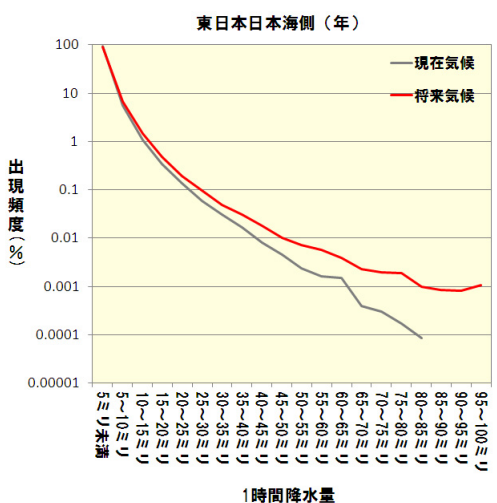
(a)



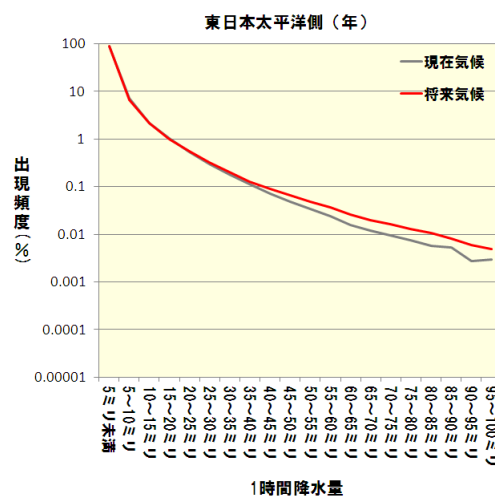
(b)



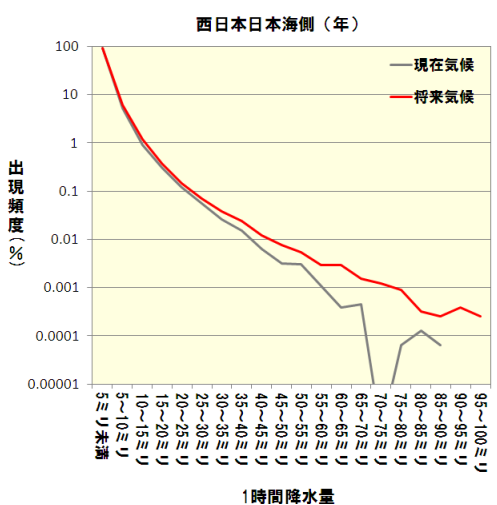
(c)



(d)



(e)



(f)

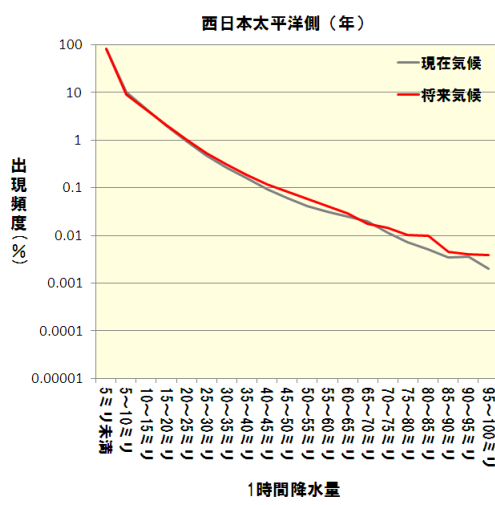


図 3.2-3 地域別の1時間降水量の発生頻度分布の変化

灰色が現在気候、赤が将来気候を示す。横軸が5ミリ毎の階級、縦軸が相対頻度(%)で、対数目盛で表示している。

(a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、(e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側

(g)

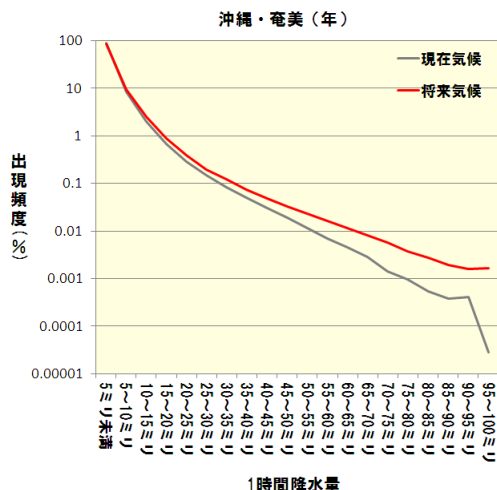


図 3.2-3 地域別の 1 時間降水量の発生頻度分布の変化 (続き)

(g) : 沖縄・奄美。

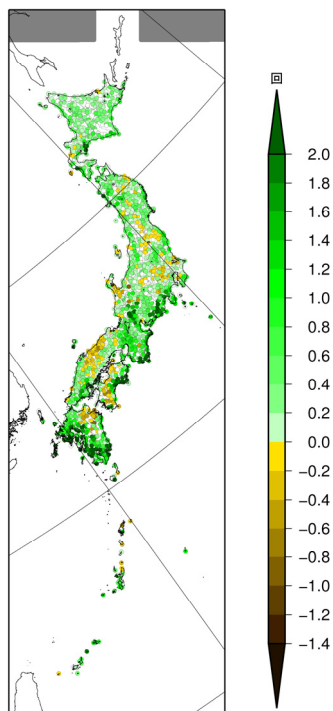
3.2.3 大雨の発生回数の変化の分布

地域気候モデルによる現在気候における大雨(日降水量 100 ミリ及び 200 ミリ以上)の年間発生回数と、将来気候における年間発生回数の差の分布を図 3.2-4 に示す。

将来気候では、日降水量 100 ミリ以上、200 ミリ以上の発生回数は、部分的に減少している地点も見られるものの、増加はほぼ全国的な広がりをもっている。現在気候において発生回数が少ない北日本では増加幅は小さいものの、増加する傾向としては他の地域と一致している。地形的に大雨の降りやすい東海から九州にかけての太平洋沿岸では増加幅が大きい。

(a)

日降水量 100 ミリ以上



(b)

日降水量 200 ミリ以上

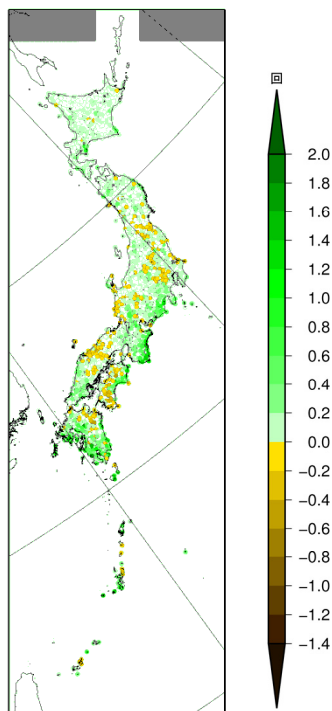


図 3.2-4 大雨の年間発生回数の変化(将来気候の現在気候との差)

日降水量 100 ミリ以上(左)、200 ミリ以上(右)について、年間発生回数の変化を示す。

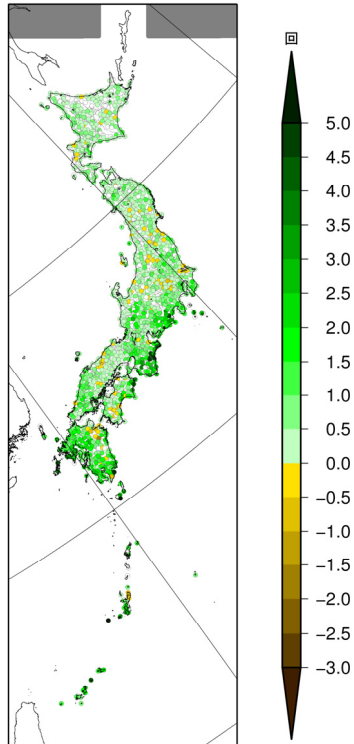
3.2.4 短時間強雨の発生回数の変化の分布

地域気候モデルによる現在気候における短時間強雨（1時間降水量30ミリ、50ミリ、80ミリ、及び100ミリ以上）の年間発生回数と、将来気候における年間発生回数の差の分布を図3.2-5に示す。

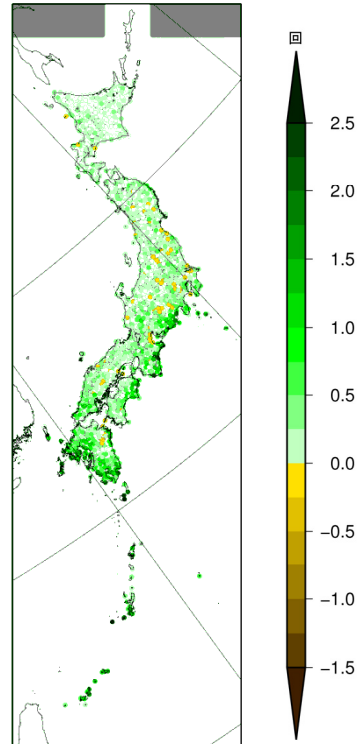
1時間降水量30ミリ以上の発生回数は、ほとんどの地域で増加しており、東日本から西日本の太平洋側で増加傾向が明瞭になっている。1時間降水量50ミリ以上についても、同様の傾向が見られるものの、30ミリ以上の場合に比べると、北日本では将来気候でも変化が不明瞭である。80ミリ以上の強雨については、将来気候の東日本、西日本、沖縄・奄美の一部で増加が見られるが、それ以外の地域では不明瞭である。100ミリ以上の強雨については、西日本や沖縄・奄美の一部で増加している地域があるが、全国的にはほとんど変化が見られない。

このような短時間強雨の増加傾向は、気温上昇に伴い大気中の水蒸気量が増加すると予測(A2.4)されることと整合的であるが、地球温暖化が進行した将来気候においても、北日本では1時間80ミリを超えるようなレベルの強雨の発生頻度は現在と同程度に稀であり、1時間100ミリを超えるようなレベルの強雨の発生頻度については、その他の地域でも現在と同程度に稀であることを示している。

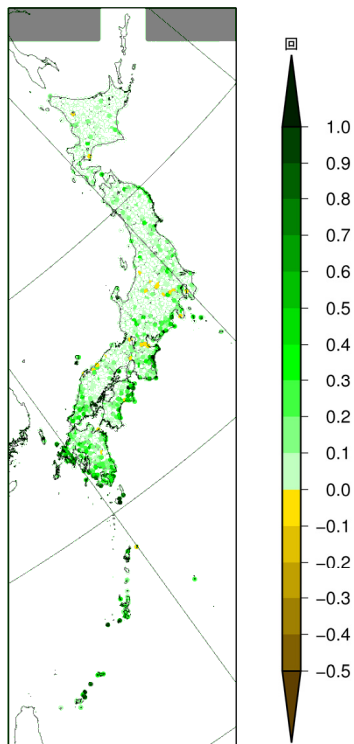
(a) 1時間降水量 30 ミリ以上



(b) 1時間降水量 50 ミリ以上



(c) 1時間降水量 80 ミリ以上



(d) 1時間降水量 100 ミリ以上

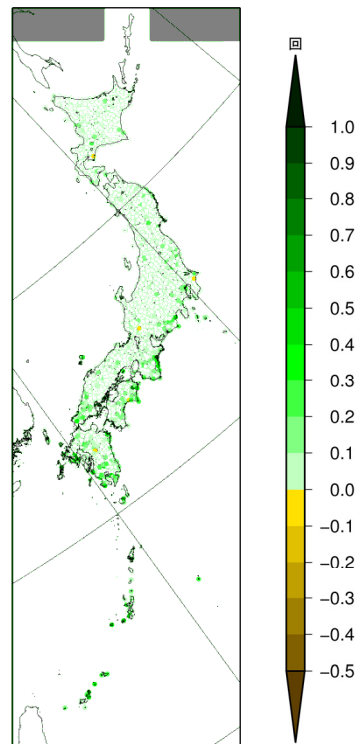


図 3.2-5 短時間強雨の年間発生回数の変化 (将来気候の現在気候との差)

(a): 1時間降水量 30 ミリ以上、(b): 50 ミリ以上、(c): 80 ミリ以上、(d): 100 ミリ以上について、年間発生回数の変化を示す。

3.2.5 日降水量の20年再現値

地域気候モデルによる現在気候における日降水量の20年再現値（ある一年間において発生する確率が20分の1であるような、稀にしか観測されない極端な大雨による日降水量、1.3-4を参照されたい。）と比較した将来気候における20年再現値の変化率の分布を図3.2-6(右)に示す。大幅に増加している地点、減少となっている地点があり、地点ごとのばらつきが大きくなっている。これは、1.4で述べているように、降水の顕著現象は空間代表性が小さく、標本数が限られているためと考えられることから、特定の狭い地域に着目せず、広域的な特徴として捉える必要がある。北日本、沖縄・奄美、東日本太平洋沿岸等で増加域が広がっている特徴が見られる。地域ごとに、各地点の変化率を大きい順に並べ、中位の予測値の幅（25～75パーセントイルの間）を見ると（図3.2-6(左)の赤いボックス）、数%～数10%程度の増加となっている。

日降水量の20年再現値の変化

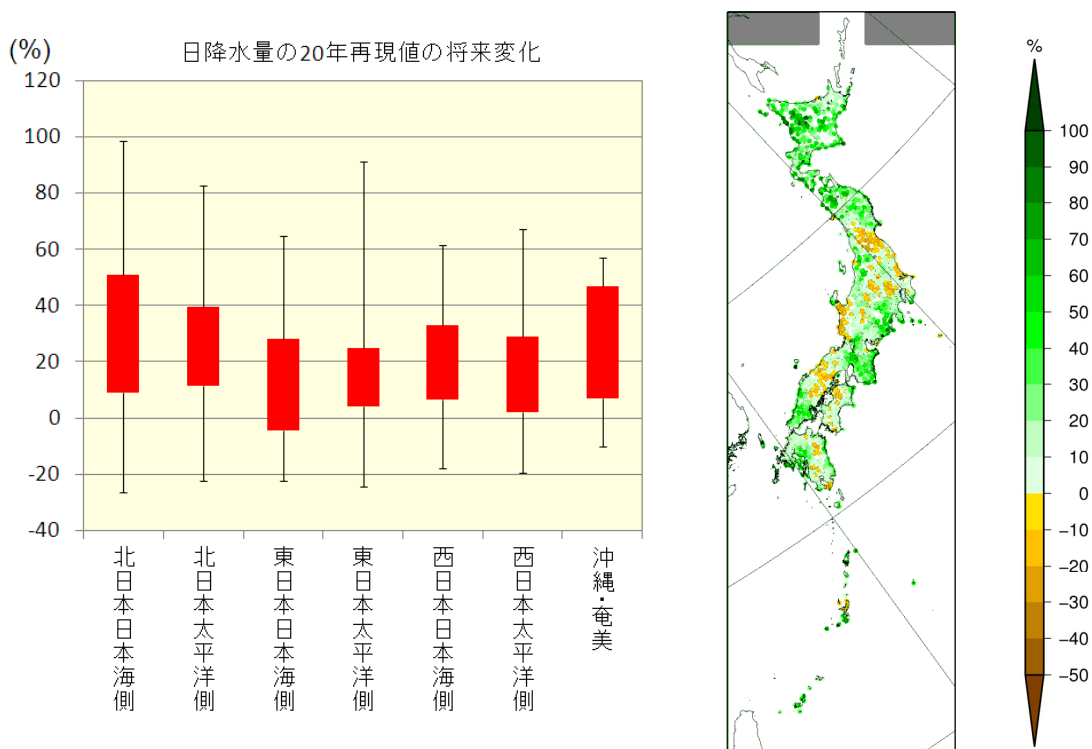


図 3.2-6 日降水量の20年再現値の変化

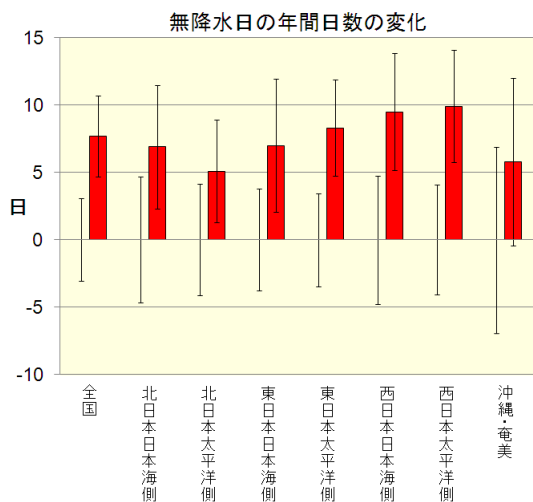
現在気候に対する変化率(%)で示す。(左)地域別に見た変化率のばらつきを示す。赤く塗り潰した箱は、各地域内における地点ごとの変化率を大きい順に並べて、その中位(25～75パーセントイルの間)に入る変化率となる幅を、縦棒は最大値・最小値の幅を示す。(右)変化率の分布を示し、緑系の色は20年再現値が増加、茶系の色は減少することを表している。

3.3 無降水日数の変化

3.3.1 年・季節別の無降水日数

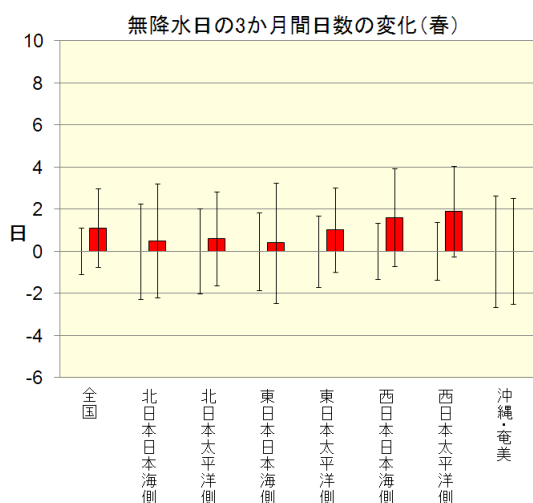
地域気候モデルによる現在気候における無降水日（ここでは、気候モデルにおける日降水量が1ミリ未満の日と定義する）の年・季節別日数と、将来気候における日数の差の地域平均を図3.3-1及び付表に、差の分布図を図3.3-2に示す。

(a)

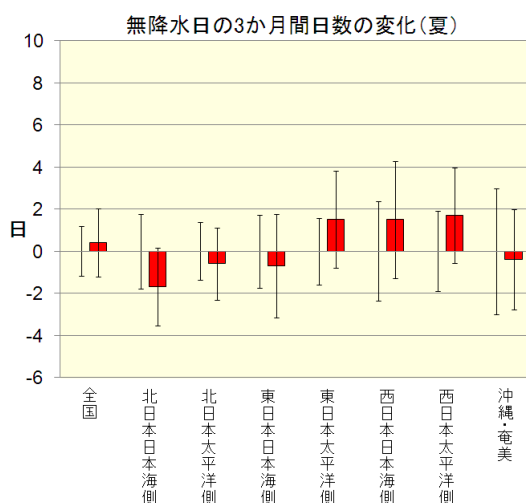


	年	春	夏	秋	冬
全国	7.7	1.1	0.4	3.6	2.6
北日本日本海側	6.9	0.5	-1.7	4.0	4.0
北日本太平洋側	5.1	0.6	-0.6	4.0	1.1
東日本日本海側	7.0	0.4	-0.7	3.3	4.0
東日本太平洋側	8.3	1.0	1.5	4.1	1.7
西日本日本海側	9.5	1.6	1.5	3.0	3.2
西日本太平洋側	9.9	1.9	1.7	3.3	3.2
沖縄・奄美	5.8	0.0	-0.4	1.4	4.8

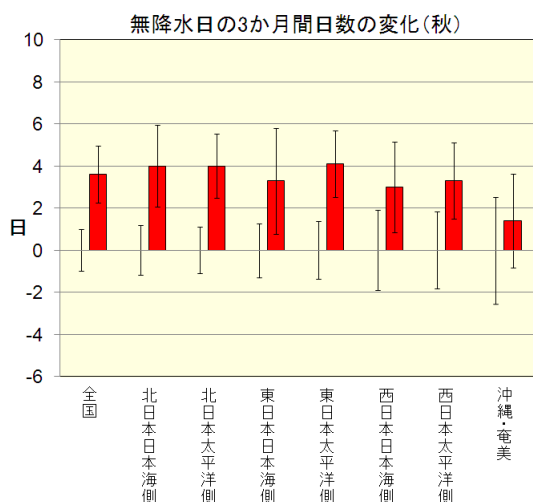
(b)



(c)



(d)



(e)

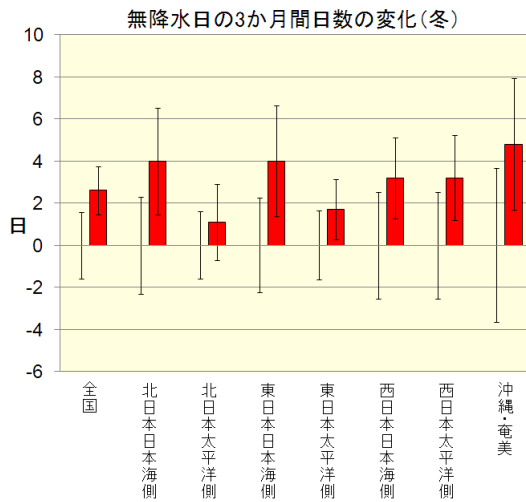


図 3.3-1 及び付表 地域別の無降水日数の変化（将来気候の現在気候との差）

棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。（a）：年間、（b）：春（3～5月）、（c）：夏（6～8月）、（d）：秋（9～11月）、（e）：冬（12～2月）。右上の付表は増加（減少）の数値を示し、変化量が現在気候の年々変動の標準偏差以上の場合にはオレンジ色（水色）に、信頼水準90%で統計的に有意でない場合には灰色に塗りつぶしている。

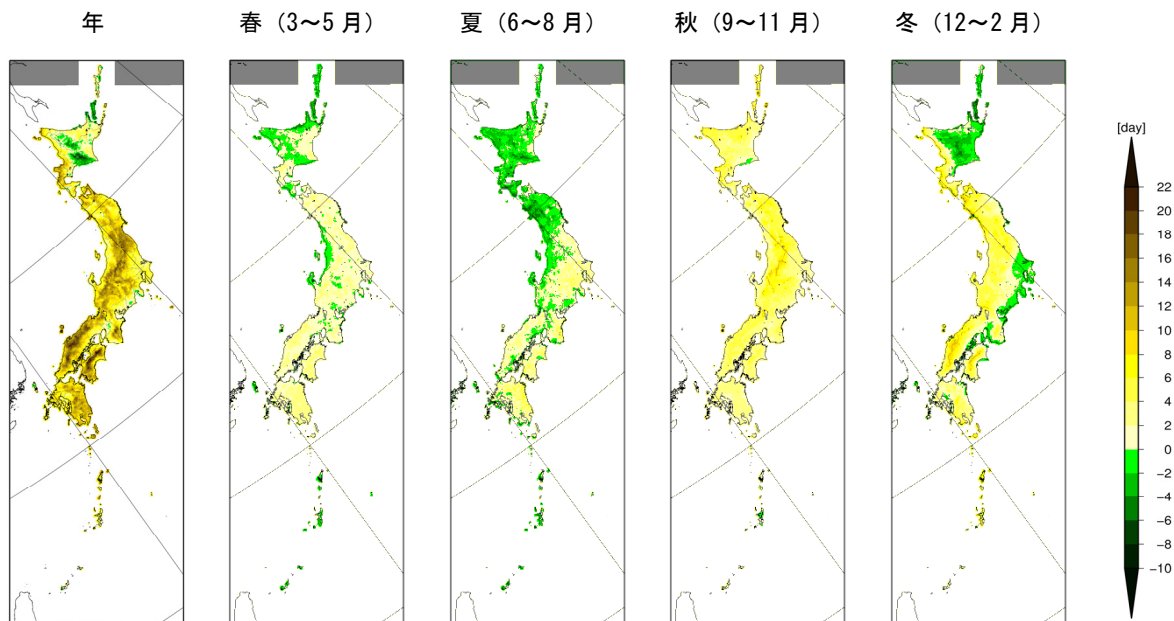


図 3.3-2 無降水日数の変化（将来気候の現在気候との差）

茶系の色は無降水日数が増加、緑系の色は減少することを示す。

年間無降水日数は、年々変動が大きい沖縄・奄美を除いて有意な増加となっている。季節別に見ると、冬は日本海側と太平洋側で変化の向きに明瞭なコントラストが見られる(図 3.3-2)。地域平均で見ても、日本海側では北日本から西日本にかけて有意に増加するのに対し、太平洋側では北日本で有意な変化が見られない。これは、冬型の気圧配置が弱まり日本海側では降水の発生頻度が減少するためと推測される。冬の日本海側で無降水日数が増加する地域でも、平均降水量が減少していない地域では(3.1.1)、一度に降る降水量が増加することを示唆している。春は地域的な特徴は見られず、夏はいずれの地域平均も有意ではないものの、北日本で減少域が広がっており、東日本から西日本では増加域が広がっている。秋は沖縄・奄美を除き全国的に有意に増加している。

一般的な議論として、気温の上昇に伴って、大気の水蒸気を保持する上限(飽和水蒸気量)は増加し一度の降水イベントでもたらされる降水量は増加するが、地表面からの蒸発散により水蒸気が補給される効率の変化は相対的に小さいため、次の降水イベントまでに水蒸気を補給するのにより長い時間が必要になり、このため無降水日数は増加する可能性が指摘されている(Giorgi et al. (2011), Trenberth (2011))。

3.3.2 連続無降水日数

長期にわたってまとまった降水がない天候（少雨）の継続期間が将来どのように変化するか評価するため、地域気候モデルによる現在気候 20 年間における連続無降水日数（気候モデルにおける日降水量が連続して 1 ミリ未満となる日数と定義する）の長い方から上位 20 位までの平均と、将来気候 20 年間における同じく上位 20 位までの平均の差を図 3.3-3 に示す。北日本を除くほとんどの地域で増加となっている。

連続無降水日数の変化

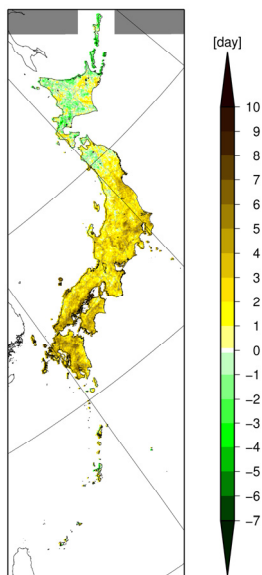


図 3.3-3 上位 20 位までの連続無降水日数の平均の差（将来気候の現在気候との差）
茶系の色は連続無降水日数の上位 20 位までの平均が長くなることを、緑系の色は短くなることを表している。

第4章 積雪・降雪の将来予測

【ポイント】

- 積雪・降雪は東日本日本海側を中心に減少する。北海道内陸の一部地域では積雪・降雪ともに増加する。
- 積雪・降雪期間は短くなる（期間の始まりは遅くなり、終わりは早くなる）。

4.1 平均と年々変動の変化

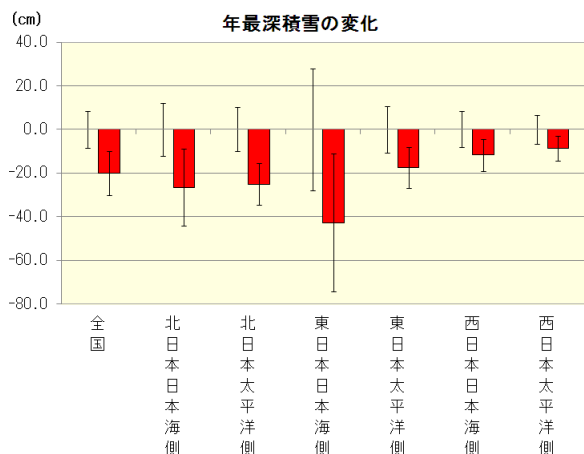
4.1.1 最深積雪

地域気候モデルによる地域別の年間・月別（12～3月）の最深積雪の変化を図4.1-1及び付表に示す。また、現在気候における年間・月別（12～3月）の最深積雪と、将来気候における最深積雪の差の分布を図4.1-2に示す。

将来気候では、北海道内陸の一部地域を除いて最深積雪が減少しており、特に2・3月の本州日本海側では変化が大きい。地域別の変化量については、全期間・全地域で最深積雪が減少しており、1月の西日本以外ではその変化量が現在気候の年々変動の標準偏差を上回っている。

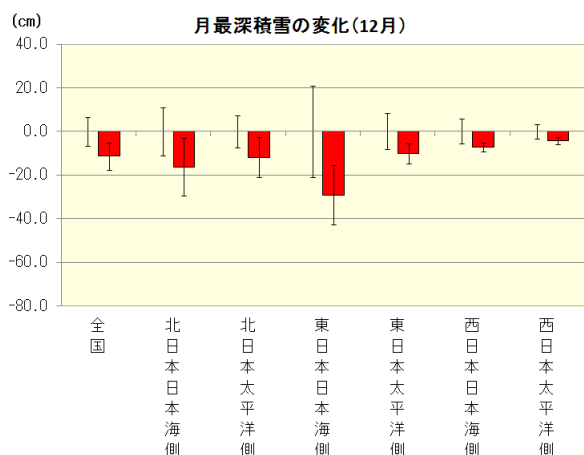
多くの期間・地域で最深積雪の減少が見られる一方、北海道の一部地域では最深積雪の増加が予測されているが、これは各地域における降雪量、気温等の変化が関係していると考えられる（Sasaki et al., 2012）。一般的に、地球温暖化による気温・海面水温の上昇を背景として大気中の水蒸気量は増加し、温暖化時でも十分に寒冷な地域においては降雪量が増加すると考えられる。実際、4.1.2で示すように、将来気候では北海道、本州の一部において降雪量が増加しているが、積雪量には降雪後の地表気温等がさらに影響する。つまり、北海道では降雪が積雪として持続するほど寒冷であるため最深積雪も増加するが、それ以外の地域ではそれほど気温が低くないため降雪や積雪の融解が早く、これが最深積雪としての減少に影響している可能性がある。

(a)

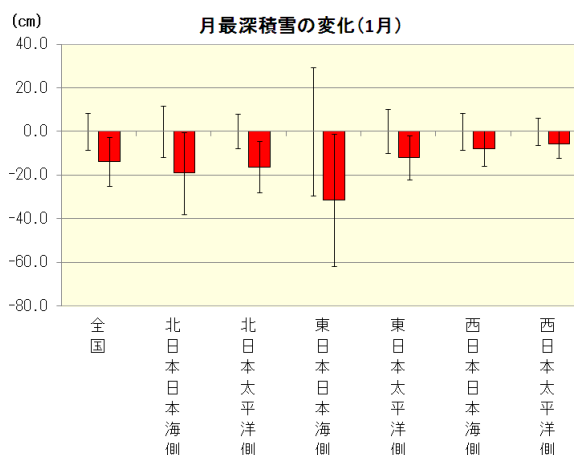


	年	12月	1月	2月	3月
全国	-20.08	-11.34	-13.81	-18.49	-23.46
北日本日本海側	-26.62	-16.24	-19.14	-25.73	-38.91
北日本太平洋側	-25.04	-11.84	-16.25	-22.45	-32.14
東日本日本海側	-42.69	-29.10	-31.54	-42.35	-51.45
東日本太平洋側	-17.53	-10.06	-12.06	-14.97	-17.95
西日本日本海側	-11.79	-7.16	-7.80	-10.83	-7.68
西日本太平洋側	-8.69	-4.27	-5.78	-7.90	-6.04

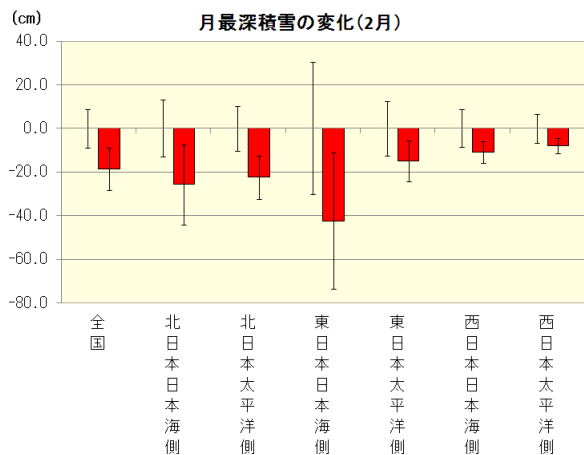
(b)



(c)



(d)



(e)

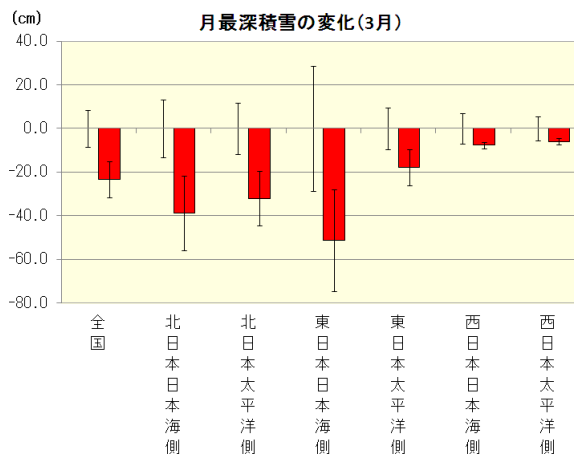


図 4.1-1 及び付表 地域別最深積雪の変化（将来気候の現在気候との差）

棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。(a)：年間、(b)：12月、(c)：1月、(d)：2月、(e)：3月。右上の付表は増加（減少）の数値を示し、その変化量が現在気候の年々変動の標準偏差以上の場合には水色（オレンジ色）に、信頼度水準 90%で有意ではない場合には灰色に塗りつぶしている。

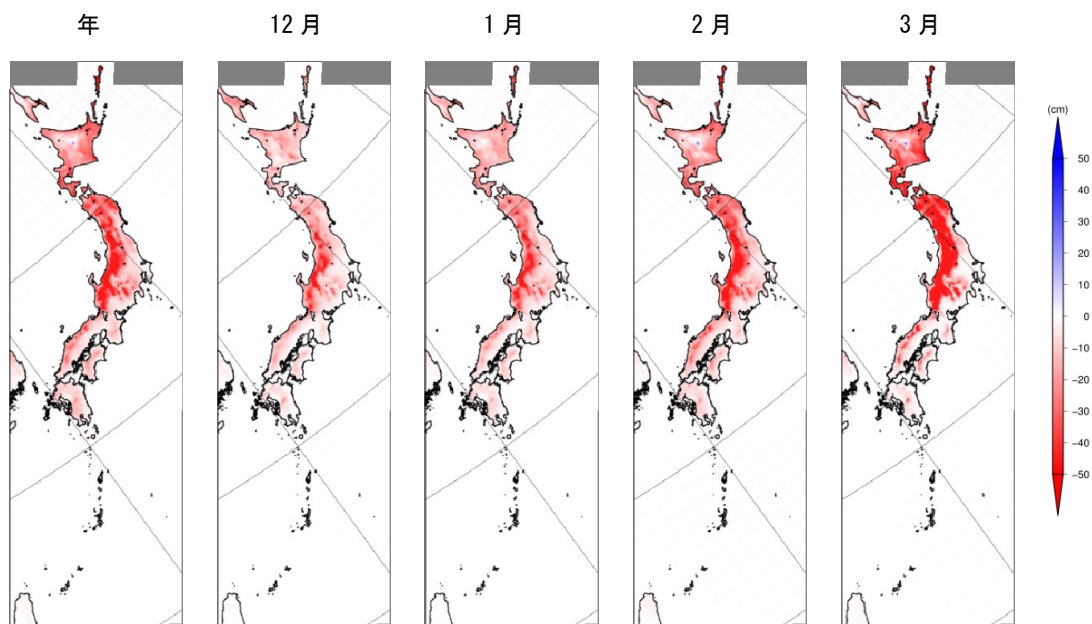


図 4.1-2 年及び月最深積雪の変化（将来気候の現在気候との差）

4.1.2 降雪量

地域気候モデルによる地域別の年間・月別（12～3月）の降雪量の変化を図 4.1-3 及び付表に示す。また、現在気候における年間・月別（12～3月）の降雪量¹と、将来気候における降雪量の差の分布を図 4.1-4 に示す。

将来気候では、北海道・本州内陸の一部で降雪量が増加する一方、他の地域では減少となっており、特に北海道太平洋側・本州日本海側では変化が大きい。地域別の変化量については、年間、12月の全地域、1月、2月の全国、東日本、西日本、3月の全地域で降雪量が減少しており、多くの地域・期間で現在気候の年々変動の標準偏差を超える変化となっている。一方、厳冬期の北日本では変化量が小さく、年々変動の幅を考慮すると現在気候の多雪年と同程度の年も現れている。

¹ ここでは、各日における1時間ごとの積雪深差（正の値のみ）の合計を日降雪量と定義し、年・月別に合計した。

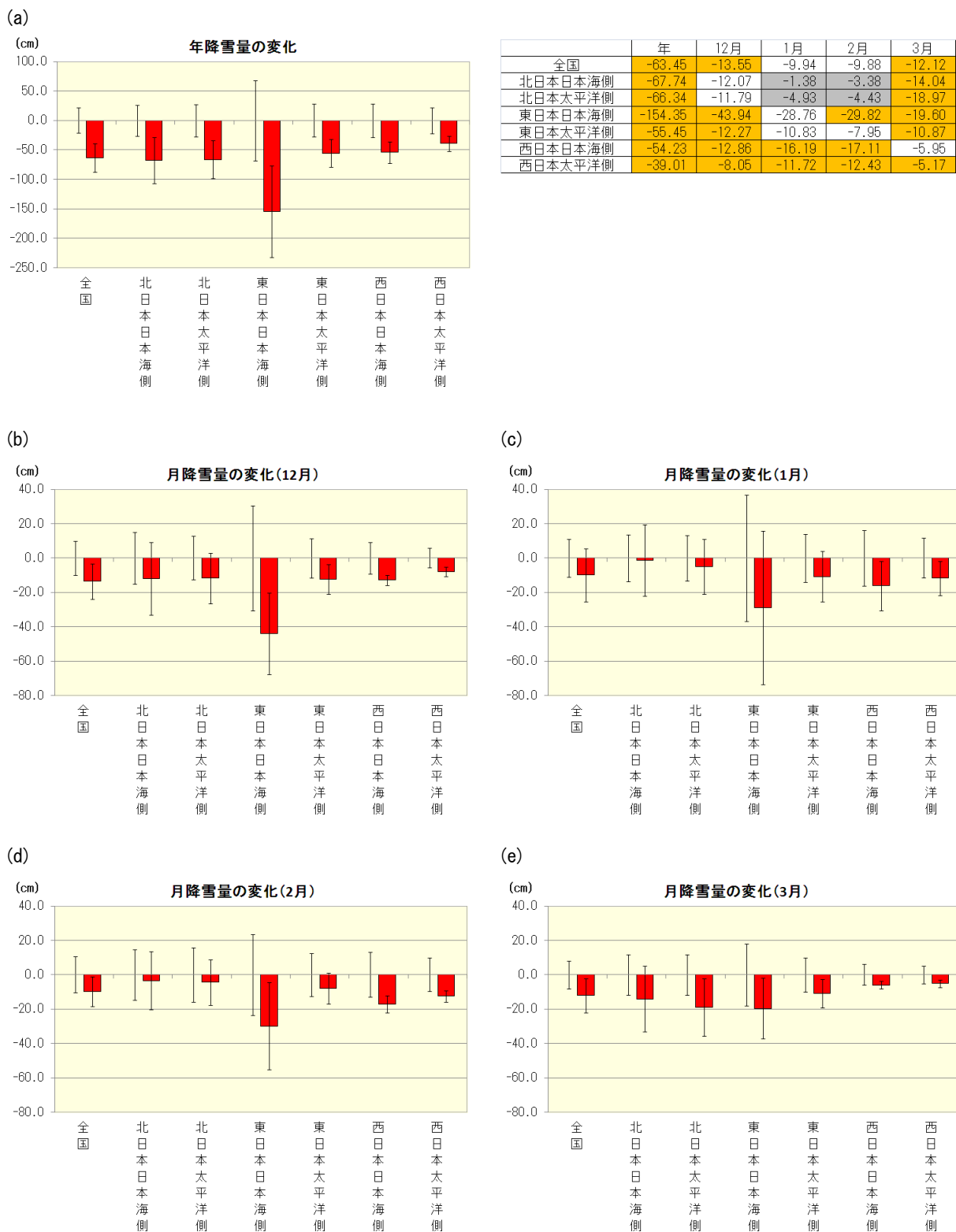


図 4.1-3 及び付表 地域別降雪量の変化(将来気候の現在気候との差)

棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差(左:現在気候、右:将来気候)を示す。(a):年間、(b):12月、(c):1月、(d):2月、(e):3月。右上の付表は増加(減少)の数値を示し、その変化量が現在気候の年々変動の標準偏差以上の場合は水色(オレンジ色)に、信頼度水準90%で有意ではない場合は灰色に塗りつぶしている。

(第4章 積雪・降雪の将来予測)

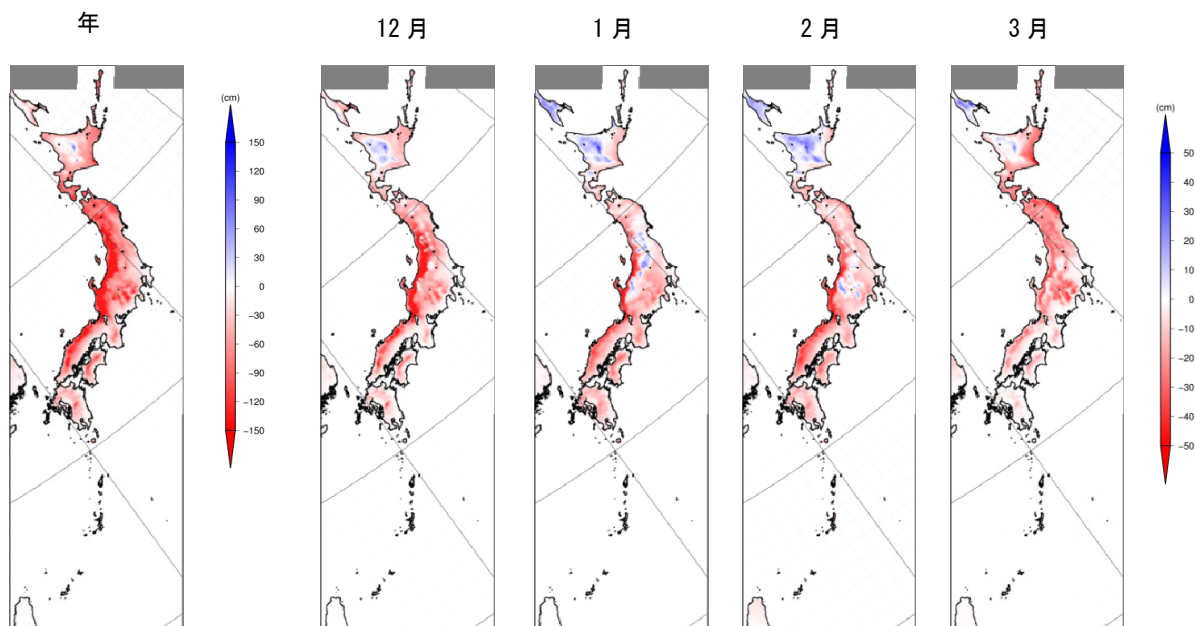


図 4.1-4 年及び月降雪量の変化（将来気候の現在気候との差）

年間と各月で異なる塗り分けとしている。

4.2 季節進行の変化

以下では最深積雪と降雪量について、その季節進行の将来変化を各期間における通年半旬値から示す。なおA1.3で示すように、各地域で平均した最深積雪と降雪量にはアメダス観測値からのバイアスがあることに注意されたい。

4.2.1 最深積雪

地域別の最深積雪の変化を図 4.2-1 に示す。

将来気候では多くの地域で最深積雪は減少しており、特に東日本日本海側と北日本日本海側では変化が大きい。最深積雪がピークとなる時期は、1か月程度早まっている。最深積雪はピーク時期のみならず積雪期間の始め・終わりにおいても減少しており、これは将来気候では積雪期間が短くなるということを示している。

4.2.2 降雪

地域別の降雪量の変化を図 4.2-2 に示す。

北日本では、降雪期間の前半（10～12月）と後半（2～4月）で降雪量の減少が明瞭であるものの、降雪のピーク（1月）においては減少が明瞭ではない、あるいは増加している時期もある。その他の地域では期間を通して降雪量が減少しており、特に東日本日本海側の10～12月の期間で減少が大きい。

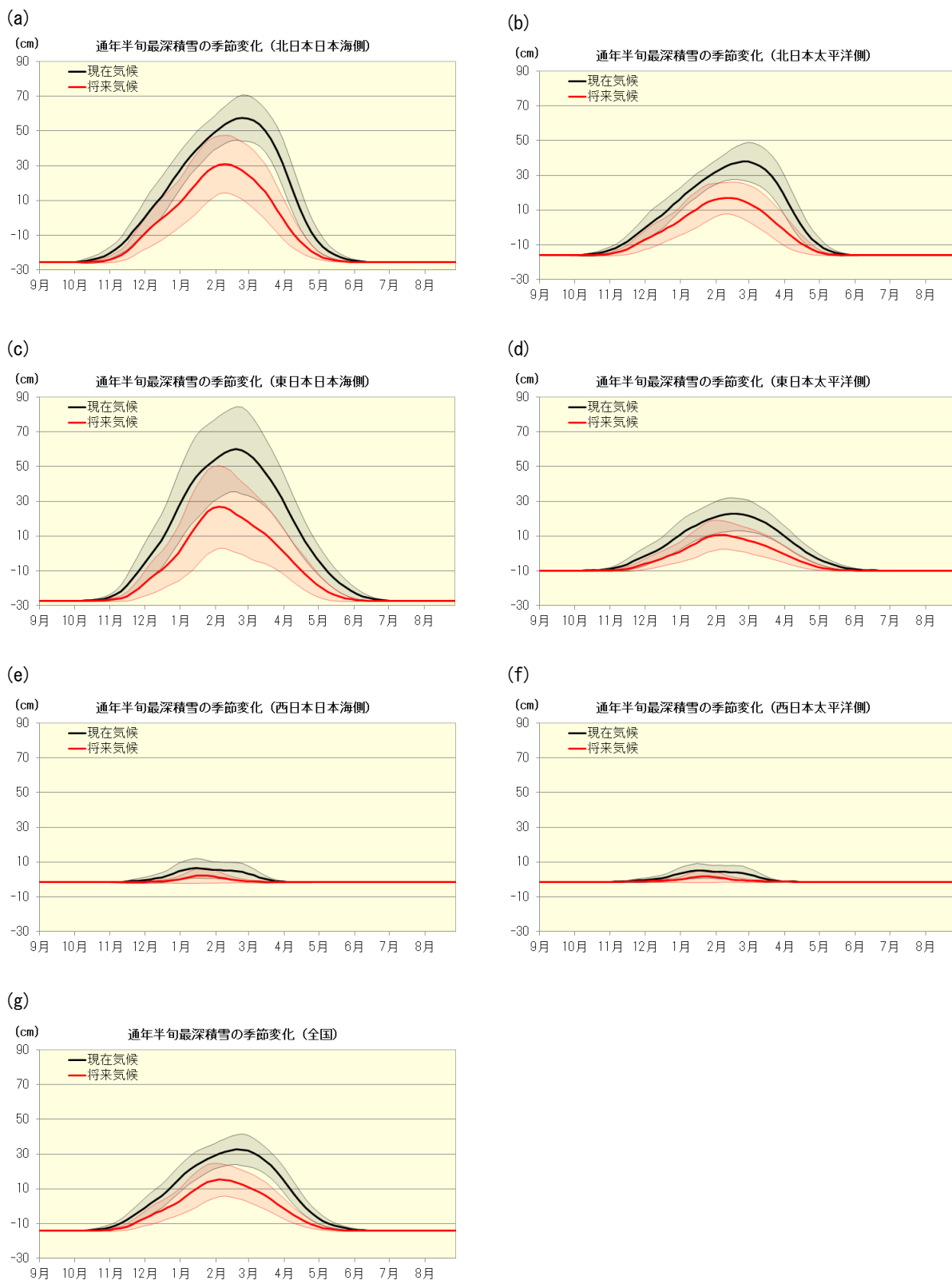


図 4.2-1 地域別最深積雪の季節進行の変化（現在気候の年平均との差）

折線は通年半年値、陰影は年々変動の標準偏差を示す。5 半年で平滑化している。黒が現在気候、赤が将来気候である。縦軸は現在気候の年平均値からの偏差として示している。

- (a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 全国

(第4章 積雪・降雪の将来予測)

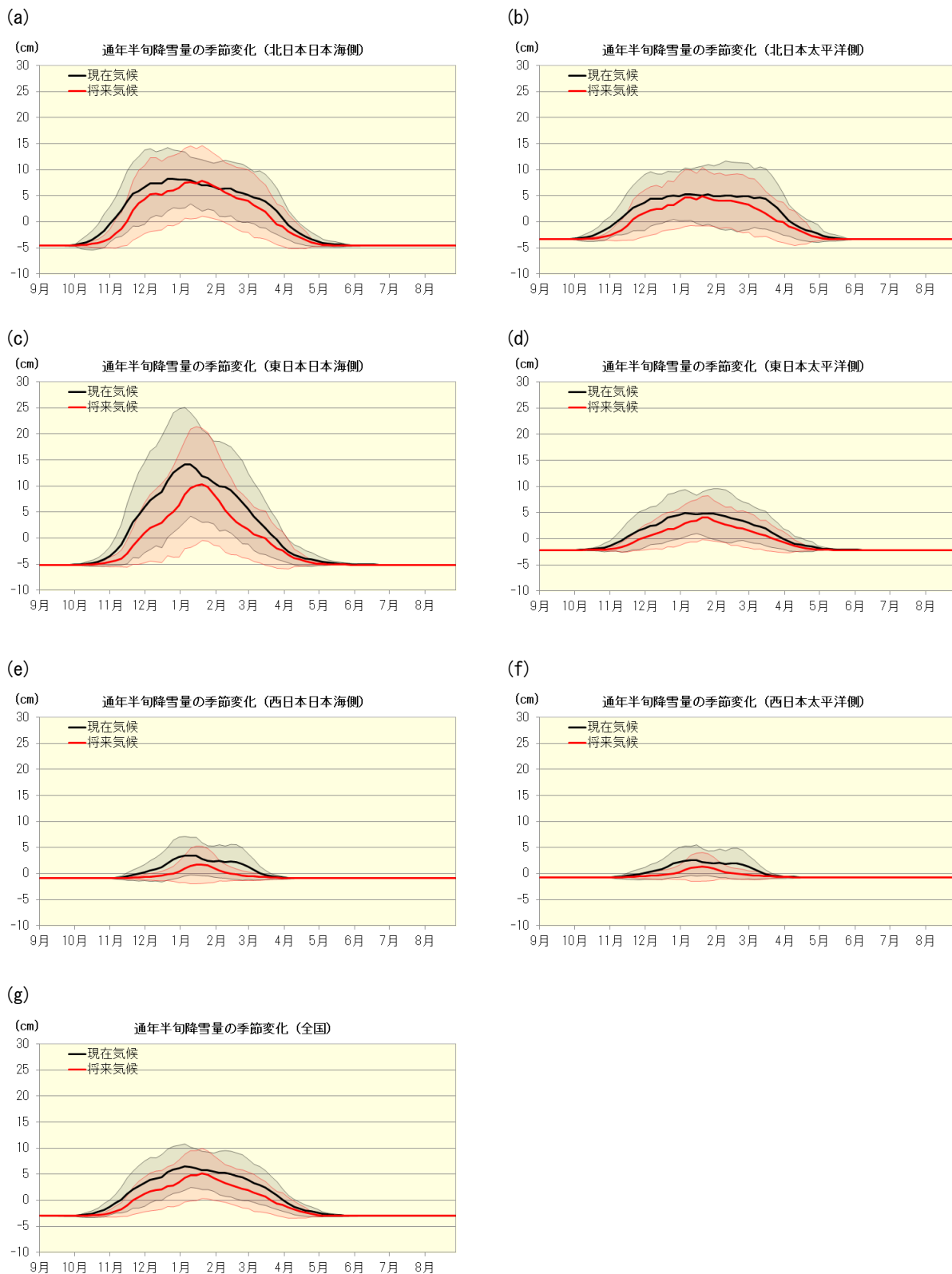


図 4.2-2 地域別降雪量の季節進行の変化（現在気候の年平均との差）

折線は通年半年値、陰影は年々変動の標準誤差を示す。5 半年で平滑化している。黒が現在気候、赤が将来気候である。縦軸は現在気候の年平均からの偏差として示している。

(a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 全国

第5章 その他の要素の将来予測

【ポイント】

- 相対湿度は、多くの地域で冬に増加し、夏に減少する。
- 年間の日射量は、北日本で減少する。
- 突風や激しい雷雨の発生しやすさを表す指数は不安定化を示す。

5.1 相対湿度

相対湿度は、飽和水蒸気圧に対する水蒸気圧の比を百分率で表したものである。飽和水蒸気圧は補正した気温を用いて算出している。相対湿度の大小は土壌・植物・人体等からの蒸発量に影響し、過度の多湿・乾燥は農作物管理や健康被害のリスクを増大させる。

相対湿度の日統計には、時別値を平均した日平均相対湿度と最小の時別値を抽出する日最小相対湿度があるが、本書では一時的な乾燥ではなく平均的な相対湿度の変化を評価するため、日平均相対湿度を年・3ヶ月・通年半旬で平均した統計値を用いた。

なお、本節では現在気候と将来気候との比較は全て「差」を用いており、「比」は用いていない。文中や図表の「%」は全て相対湿度の単位であることに注意されたい(例：現在気候の平均が65%、将来気候の平均が70%の場合、5%の増加となる)。

なお、気温と同様、都市化による相対湿度への影響があるが(気象庁、2012)、この予測結果には都市の将来変化の影響は考慮されていない。

5.1.1 平均と年々変動の変化

地域気候モデルによる相対湿度の現在気候と将来気候との差を、図5.1-1及び付表と図5.1-2に示す。

年平均湿度は減少しており、特に東日本以西でその傾向が強い。また、沖縄・奄美は減少しているものの、年々の変動も大きい。

夏は多くの地域で相対湿度が減少する。これは水蒸気圧は夏から秋を中心に全期間を通じて増加するが(図略)、それ以上に気温上昇により飽和水蒸気圧が増加するためと考えられる。

一方、冬は東日本日本海側を除く北日本から西日本で増加する。特に太平洋側で増加が顕著である。これは温暖化進行時の冬型の気圧配置の弱まりを反映していると考えられる。

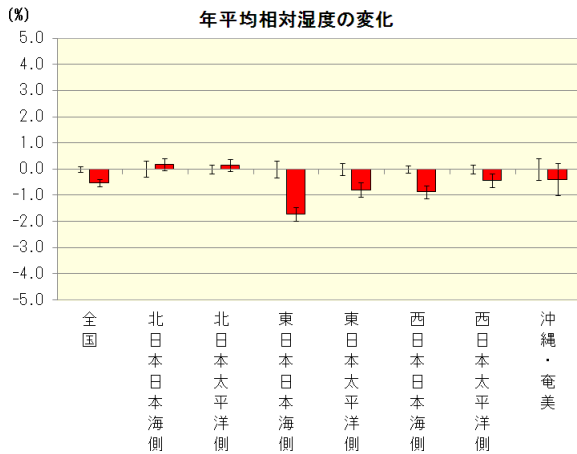
5.1.2 季節進行の変化

地域気候モデルによる相対湿度の通年半旬別値を、図5.1-3に示す。

概ね前節の変化を反映したものとなっているが、東日本と西日本の夏に着目すると、現在気候では6月に相対湿度のピークがあり8月にかけて緩やかに減少するのに対して、将来気候では6月のピークがなだらかになり7月に大きく減少した後8月には再び上昇する傾向がみられる。これは、夏の全天日射量増加が前半中心(5.2)であることと合わせ、3.1.2で述べた現在気候で梅雨開けに相当する時期の降水量の減少の不明瞭と整合しており、温暖化に伴う梅雨明けの遅れを反映していると考えられる。

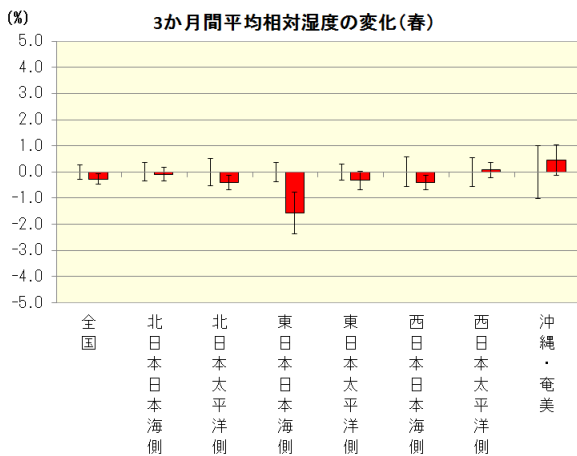
(第5章 その他の要素の将来予測)

(a)

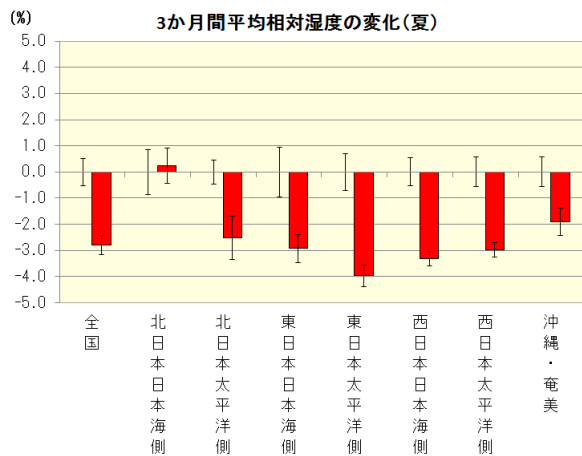


	年	春	夏	秋	冬
全国	-0.52	-0.28	-2.80	-0.22	1.20
北日本日本海側	0.18	-0.09	0.24	-0.35	0.95
北日本太平洋側	0.15	-0.41	-2.52	0.16	3.37
東日本日本海側	-1.71	-1.57	-2.92	-0.90	-1.46
東日本太平洋側	-0.80	-0.32	-3.97	-0.33	1.41
西日本日本海側	-0.87	-0.41	-3.33	-0.27	0.51
西日本太平洋側	-0.44	0.08	-2.97	-0.04	1.14
沖縄・奄美	-0.39	0.46	-1.90	-0.35	0.22

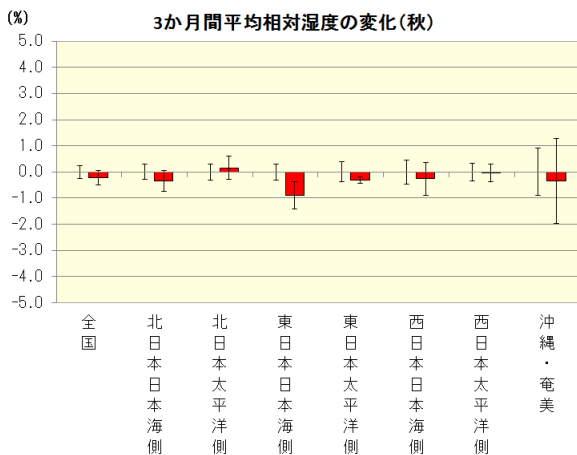
(b)



(c)



(d)



(e)

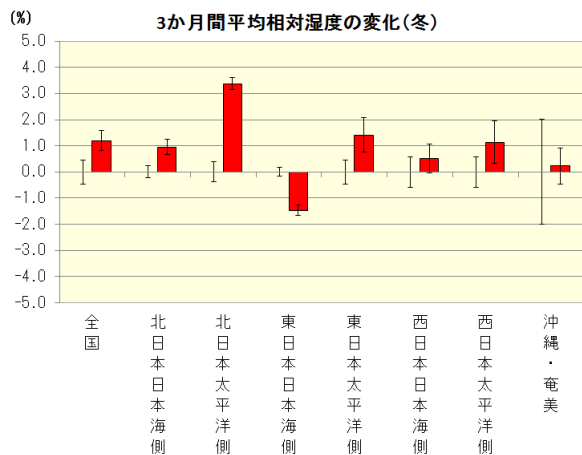


図 5.1-1 及び付表 地域別相対湿度の変化（将来気候の現在気候との差）

棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。(a)：年間、(b)：春（3～5月）、(c)：夏（6～8月）、(d)：秋（9～11月）、(e)：冬（12～2月）。右上の付表は増加（減少）の数値を示し、その変化量が現在気候の年々変動の標準偏差以上の場合は水色（オレンジ色）に、信頼度水準90%で有意ではない場合は灰色に塗りつぶしている。

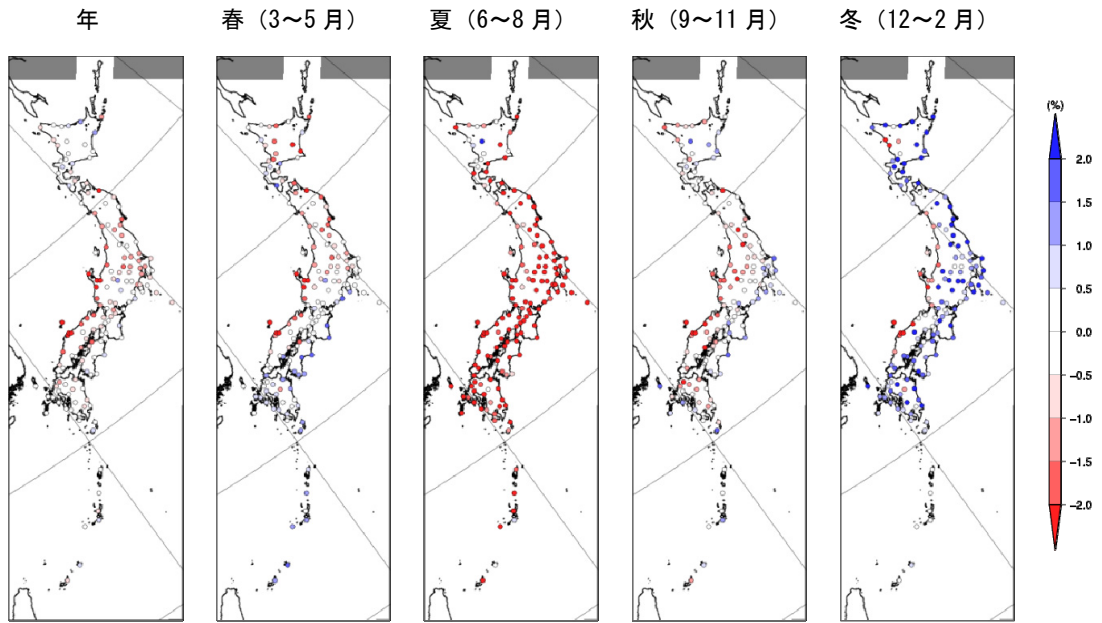


図 5.1-2 相対湿度の変化 (将来気候の現在気候との差)

(第5章 その他の要素の将来予測)

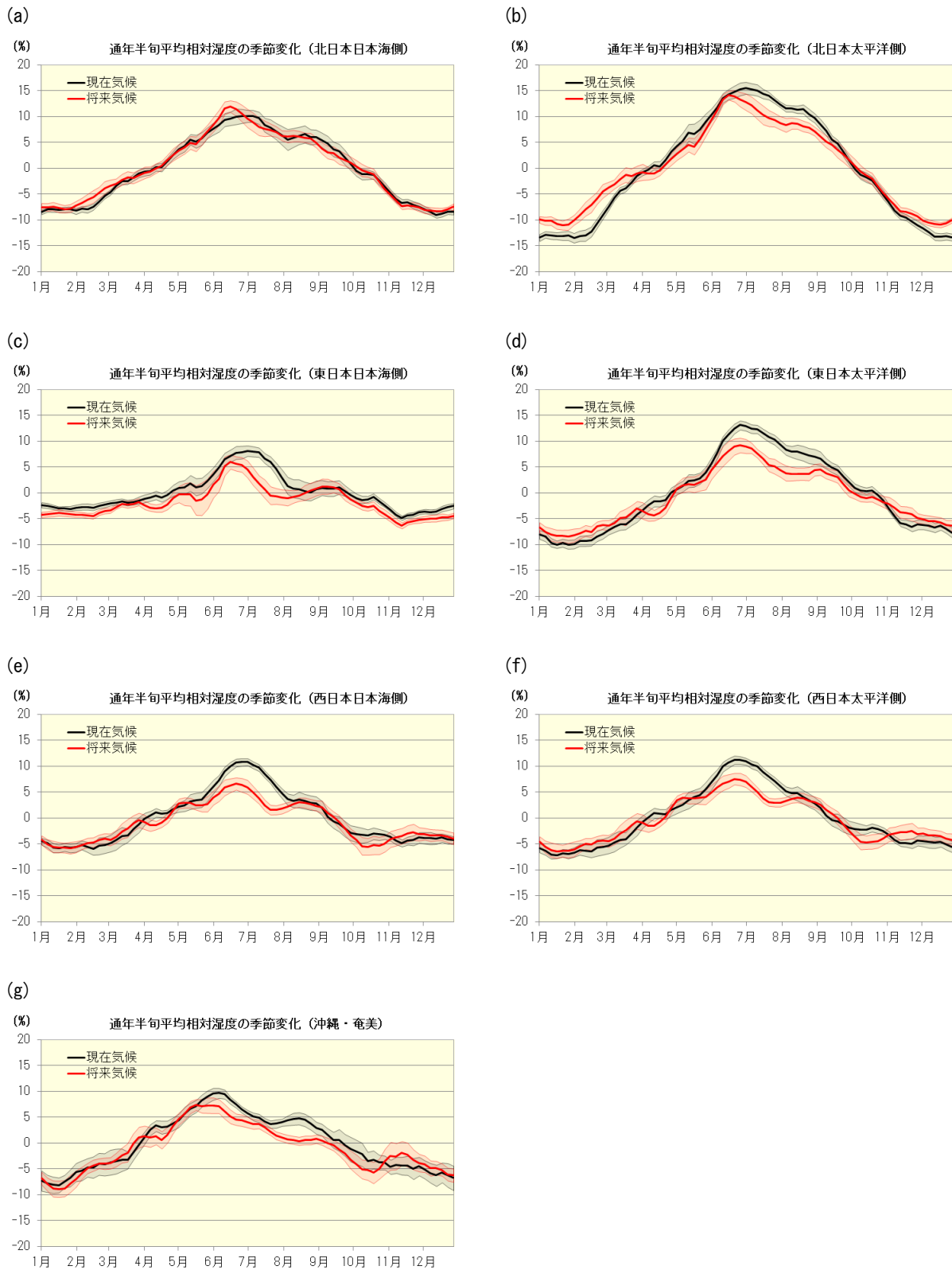


図 5.1-3 地域別平均相対湿度の季節進行の変化（現在気候の年平均との差）

折線は通年半年値、陰影は年々変動の標準偏差を示す。5 半年で平滑化している。黒が現在気候、赤が将来気候である。

- (a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

5.2 全天日射量

全天日射量は、地表面が受ける太陽放射のエネルギー量で、直接到達したもののほかに雲や空気などに散乱された上で到達した太陽放射も含む。全天日射量の増減による影響は、農作物の成長や太陽光発電の稼働効率などが考えられる。本書では1日の積算量を年・3か月・通年半旬で平均した統計値を用いた。単位はMJ/m²で表し、1MJ/m²は1平方メートルあたり1,000,000J(ジュール)のエネルギーを受けたことを示す。

5.2.1 平均と年々変動の変化

地域気候モデルによる全天日射量の現在気候と将来気候との差を、図5.2-1及び付表と図5.2-2に示す。

年平均値は、北日本では減少している。これは季節別に見ても秋を除いて同様の傾向であり、3.1.1の降水量の変化で述べたように温暖化による高緯度域での降水量増加と整合した結果となっている。しかし、東日本以西では有意な変化がみられない地域が多い。

春から夏は、北日本で全天日射量が減少し、東日本と西日本で増加する傾向がみられる。ただし、春の東日本と西日本の増加は、近未来と将来気候の対応がみられないことから、不確実性が大きい(図略)。

冬は沖縄・奄美を除いて減少する。無降水日数が増加する日本海側でも全天日射量が減少することは、冬型の気圧配置が弱まることで、降水頻度が減少するものの雲が多い状態を維持することと、太平洋沿岸でも曇天が増加することによると考えられる。

沖縄・奄美では、夏から秋の減少がみられるが、近未来気候と将来気候との対応がみられないことから、不確実性が大きい(図略)。

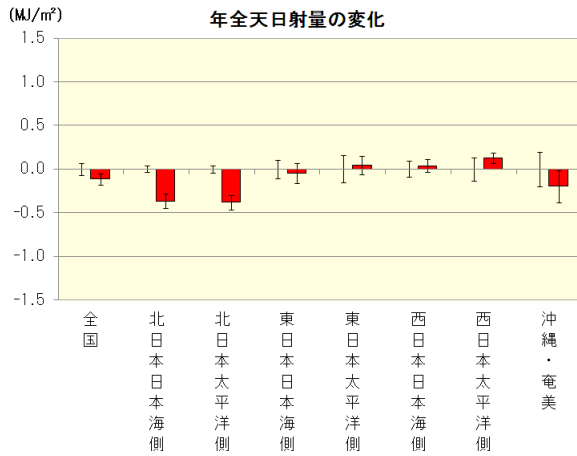
5.2.2 季節進行の変化

地域気候モデルによる全天日射量の通年半旬別値を、図5.2-3に示す。

東日本と西日本では、6月に全天日射量が増加しており、相対湿度の季節進行や夏の無降水日数の増加と整合している。また、北日本では7月から8月の減少が顕著で、降水量の増加(3.1.2)と対応している。北日本の将来気候の5月のピークから6月に急減し7月から9月の緩やかな減少という全天日射量の季節進行は、東日本や西日本のそれと類似しており、夏季においては北日本でも東日本や西日本の季節進行に近づいている。一方、沖縄・奄美では季節進行に大きな変化はみられない。

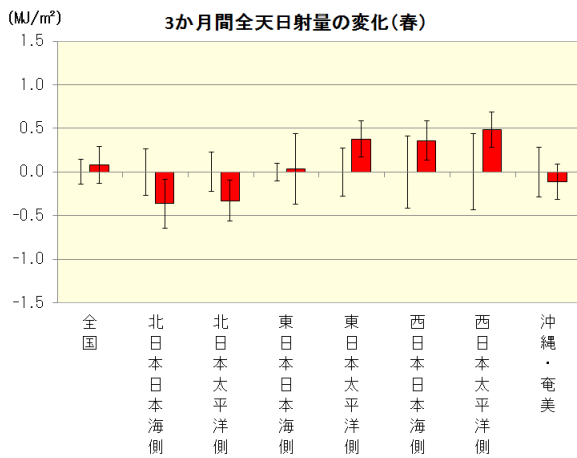
(第5章 その他の要素の将来予測)

(a)

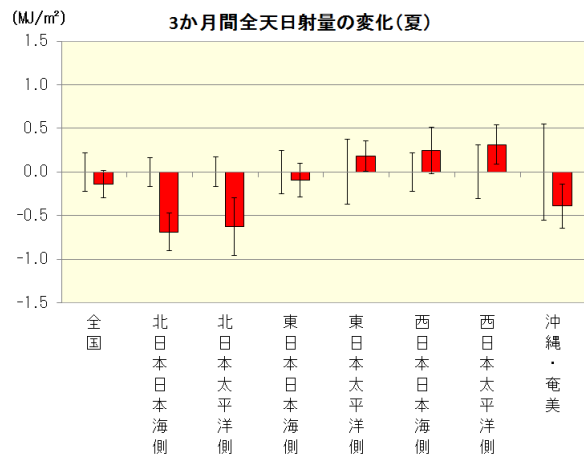


	年	春	夏	秋	冬
全国	-0.11	0.08	-0.14	-0.03	-0.38
北日本日本海側	-0.37	-0.36	-0.69	-0.02	-0.39
北日本太平洋側	-0.38	-0.33	-0.62	-0.11	-0.47
東日本日本海側	-0.05	0.04	-0.09	0.15	-0.29
東日本太平洋側	0.04	0.38	0.18	0.09	-0.47
西日本日本海側	0.04	0.36	0.25	-0.16	-0.29
西日本太平洋側	0.13	0.49	0.31	-0.03	-0.27
沖縄・奄美	-0.20	-0.11	-0.39	-0.45	0.17

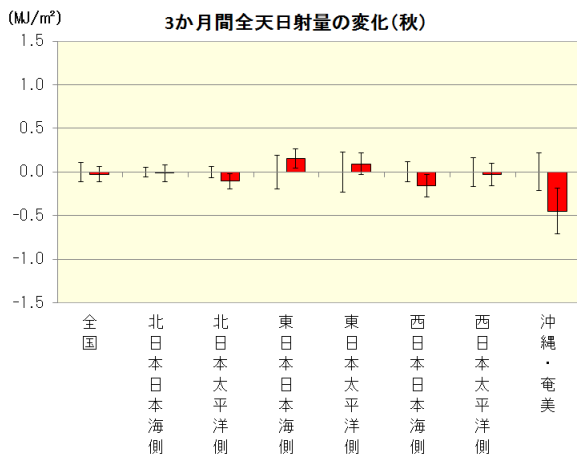
(b)



(c)



(d)



(e)

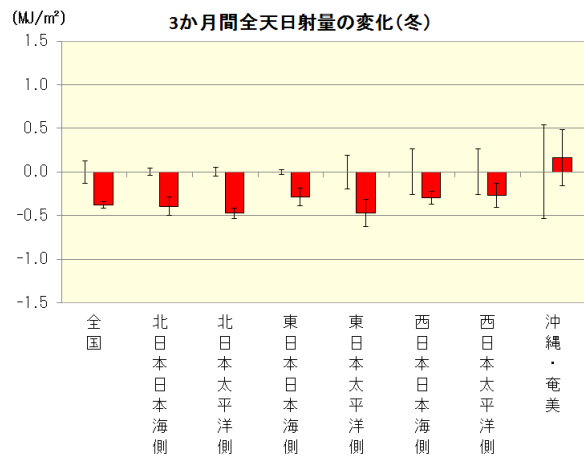


図 5.2-1 及び付表 地域別全天日射量の変化（将来気候の現在気候との差）

棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。(a)：年間、(b)：春（3～5月）、(c)：夏（6～8月）、(d)：秋（9～11月）、(e)：冬（12～2月）。右上の付表は増加（減少）の数値を示し、その変化量が現在気候の年々変動の標準偏差以上の場合はオレンジ色（水色）に、信頼度水準 90%で有意ではない場合は灰色に塗りつぶしている。

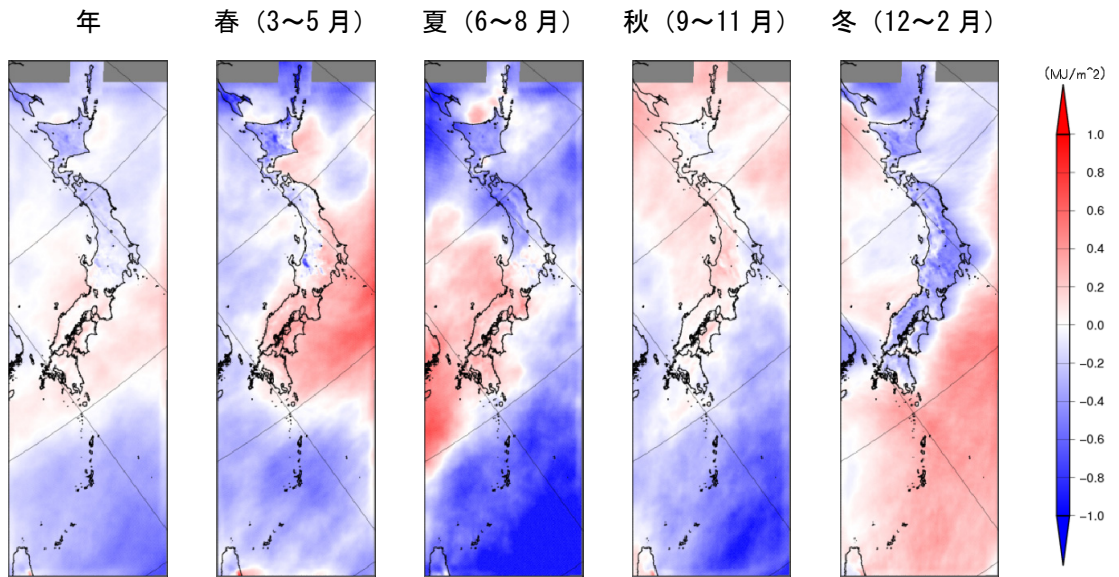


図 5.2-2 全天日射量の変化 (将来気候の現在気候との差)

(第5章 その他の要素の将来予測)

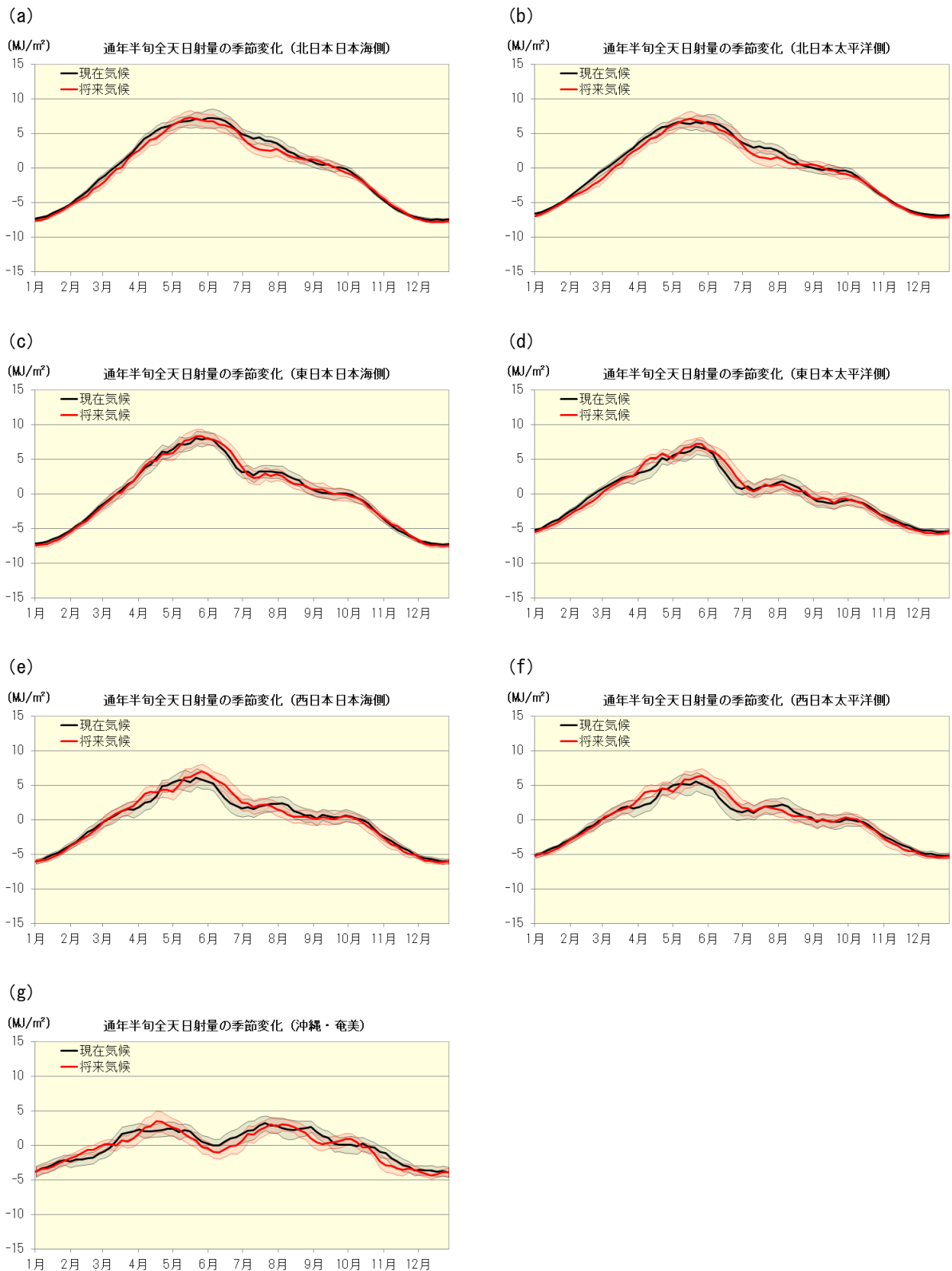


図 5.2-3 地域別全天日射量の季節進行の変化 (現在気候の年平均との差)

折線は通年半年値、陰影は年々変動の標準偏差を示す。5 半年で平滑化している。黒が現在気候、赤が将来気候である。

- (a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

5.3 鉛直安定度

鉛直安定度には様々な指数があるが、本書では EHI と SWEAT を用いて解析した。

EHI は Energy Helicity Index の略で、経験的にスーパーセル¹や竜巻の発生しやすさを CAPE と SReH を用いて指標化したものであり、数値が大きいほど発生・発達の可能性が高くなる。表 5.3-1 に計算式と値の目安 (Raumussen and Blanchard, 1998) を示す。なお、冬季は CAPE が小さくなることから、SReH が比較的大きな値となっても EHI は小さな場合がある。

SWEAT は Severe Weather Threat の略で、シビアウェザー指数と呼ばれる。激しい雷雨の発生しやすさを指標化したものであり、数値が大きいほど発生の可能性が高くなる。表 5.3-2 に計算式と値の目安を示す (Miller, 1972)。冬季に EHI が小さい場合でも、SWEAT は高い値を示す場合がある。

いずれの指数も、6 時間ごと (15 時、21 時、翌 3 時、翌 9 時) の値の最大値を日別値とし、これを年・3 ヶ月・通年半旬で平均した統計値を用いた。

表 5.3-1 EHI の計算式と値の目安

計算式	$EHI = \frac{CAPE \times SReH}{160,000}$ <p>CAPE : 対流有効位置エネルギー。大気の静的安定度を定量的に示す指標。大気の状態が不安定なほど値が大きくなる。</p> <p>SReH : ストームに相対的なヘリシティ (らせん状の渦)。積乱雲に流入して上昇する空気塊が、積乱雲に運び込む回転 (渦) の大きさの目安であり、値が大きいほど竜巻発生リスクが高くなる。</p>
値の目安	<p>EHI > 1.0 : スーパーセル発達の可能性有り。</p> <p>> 2.0 : スーパーセル発達の非常に高い可能性有り。</p> <p>> 4.0 : 顕著な竜巻が発達する可能性が高い。</p>

表 5.3-2 SWEAT の計算式と値の目安

計算式	$SWEAT = 12 \times TD850 + 20 \times TERM2 + 2 \times SKT850 + SKT500 + SHEAR$ <p>TD850 : 850hPa の露点温度 (負の場合は 0)</p> <p>TERM2 : TTI (Total Totals Index) から 49 を引いたもの (負の場合は 0)</p> $TTI = (T850 - T500) + (Td850 - T500)$ <p>T850 と T500 は、それぞれ 850hPa と 500hPa の温度</p> <p>SKT850 : 850hPa の風速 (ノット)</p> <p>SKT500 : 500hPa の風速 (ノット)</p> <p>SHEAR : $125 \times (\sin(DIR500 - DIR850) + 0.2)$</p> <p>SHEAR は以下を満たさない場合は 0</p> <p>① DIR850 が 130~350 度の範囲内、かつ DIR500 が 210~310 度の範囲内にある</p> <p>② $DIR500 - DIR850 > 0$、$SKT850 \geq 15$、$SKT500 \geq 15$</p> <p>DIR500 : 500hPa の風向</p> <p>DIR850 : 850hPa の風向</p>
値の目安	<p>SWEAT > 300 : 激しい雷雨の可能性有り。</p> <p>> 400 : 竜巻の可能性有り。</p>

¹ スーパーセルとは、内部の上昇流域に、数 km から 10km 程度の小さい低気圧をもち、比較的長寿命な発達した積乱雲である。スーパーセルは、強雨や雹、竜巻等の激しい気象現象をもたらすことがある。

5.3.1 平均と年々変動の変化

地域気候モデルによる鉛直安定度の現在気候と将来気候との差を、EHI は図 5.3-1 及び付表と図 5.3-3 に、SWEAT は図 5.3-2 及び付表と図 5.3-4 に示す。

沖縄・奄美を除くと、すべての季節で EHI、SWEAT 共に増加する。いずれも夏の増加が顕著である。沖縄・奄美では、EHI は春のみ顕著に増加するが、SWEAT は将来気候でどの季節も増加する。

夏の EHI に着目すると、北日本から西日本では日本海側よりも太平洋側の増加が少なく、沖縄・奄美では減少している。これについて、EHI 算出の元となる CAPE と SReH から求めた竜巻発生好適条件日が、21 世紀末の夏は日本海側では増加、沖縄・奄美を含めた太平洋側では減少しており（文部科学省研究開発局, 2012）、本予測と整合的である。同報告書では、太平洋側の減少の要因として将来の梅雨前線の北上の遅れを指摘している。

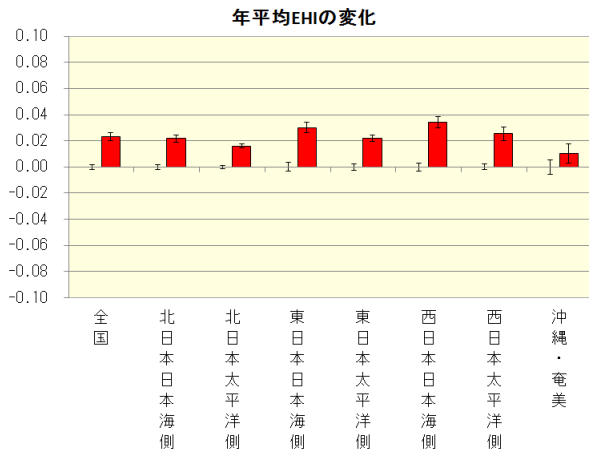
温暖化の進行により低緯度から中緯度帯の対流圏では上層の方が下層よりも温度上昇が大きくなるため、大気鉛直温度構造は安定化し、大規模な循環は弱まると考えられる。しかし、水蒸気量や風速鉛直シアの変化を計算に取り込み、大気の状態を積乱雲の発生・発達に係る時間スケールも空間スケールも比較的小さいエリアの環境場として表したこれらの指数では、温暖化の進行により環境場としては不安定化することがわかる。ただし、これは 5km 解像度のモデルにおける平均的な環境場として見たときの変化であり、モデルの格子よりも小さな空間スケールで発生する局地的な雷雨や竜巻の発生を直接評価したものではないことに留意する必要がある。

5.3.2 季節進行の変化

地域気候モデルによる鉛直安定度の通年半旬別値を、EHI は図 5.3-5 に、SWEAT は図 5.3-6 に示す。

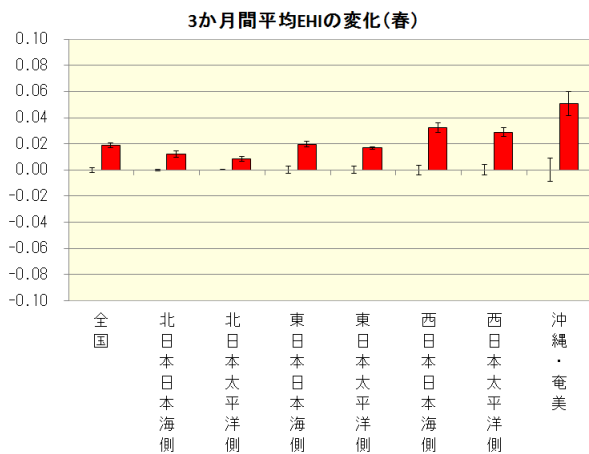
EHI、SWEAT 共に、概ね 5.3.1 で述べた変化を反映したものとなっている。沖縄・奄美を除くと 7 月から 8 月をピークとした季節進行は変わらないが、5 月から 6 月の不安定化が目立ち、早い時期から現在気候のピーク時に近い不安定となる可能性がある。沖縄・奄美では、SWEAT はどの季節でも増加し季節進行に大きな変化はみられないが、EHI は春の増加が顕著で、現在気候では 4 月から 9 月にかけて長期間のピークとなっていたが、将来気候では 4 月から 6 月がピークとなる。

(a)

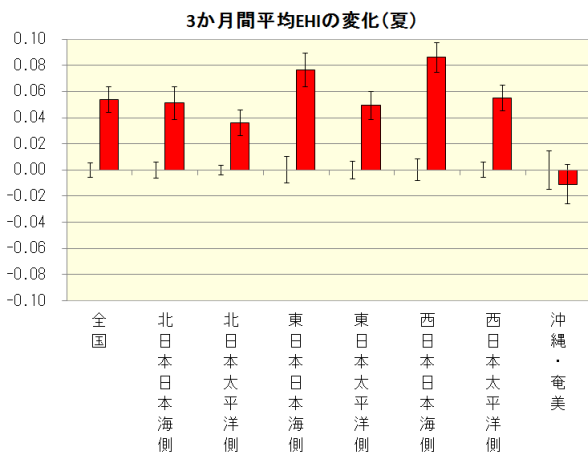


	年	春	夏	秋	冬
全国	0.0232	0.0189	0.0536	0.0165	0.0039
北日本日本海側	0.0217	0.0121	0.0511	0.0220	0.0014
北日本太平洋側	0.0161	0.0082	0.0362	0.0187	0.0012
東日本日本海側	0.0302	0.0197	0.0764	0.0202	0.0039
東日本太平洋側	0.0220	0.0169	0.0493	0.0168	0.0048
西日本日本海側	0.0342	0.0322	0.0860	0.0134	0.0051
西日本太平洋側	0.0265	0.0289	0.0549	0.0107	0.0074
沖縄・奄美	0.0104	0.0507	-0.0110	-0.0087	0.0105

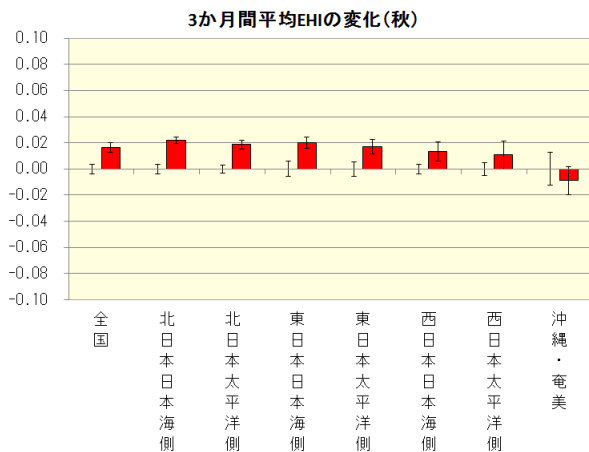
(b)



(c)



(d)



(e)

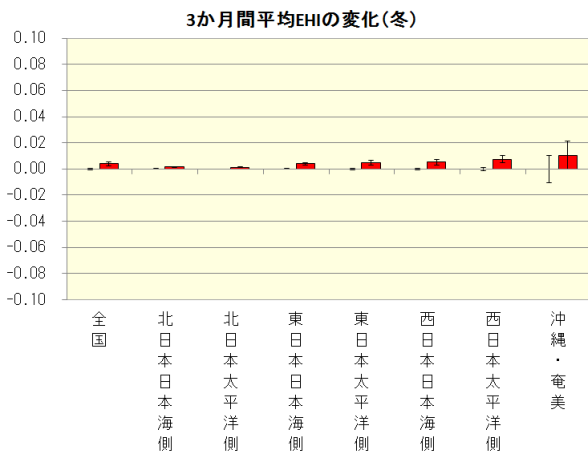
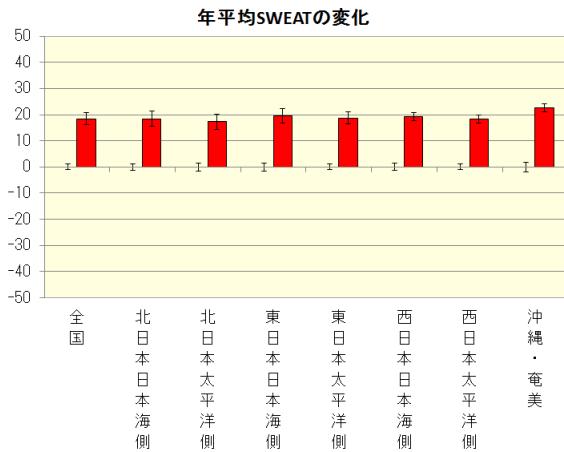


図 5.3-1 及び付表 地域別の EHI の変化 (将来気候の現在気候との差)

棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差 (左: 現在気候、右: 将来気候) を示す。(a) : 年間、(b) : 春 (3~5月)、(c) : 夏 (6~8月)、(d) : 秋 (9~11月)、(e) : 冬 (12~2月)。右上の付表は増加 (減少) の数値を示し、その変化量が現在気候の年々変動の標準偏差以上の場合はオレンジ色 (水色) に、信頼度水準 90% で有意ではない場合は灰色に塗りつぶしている。

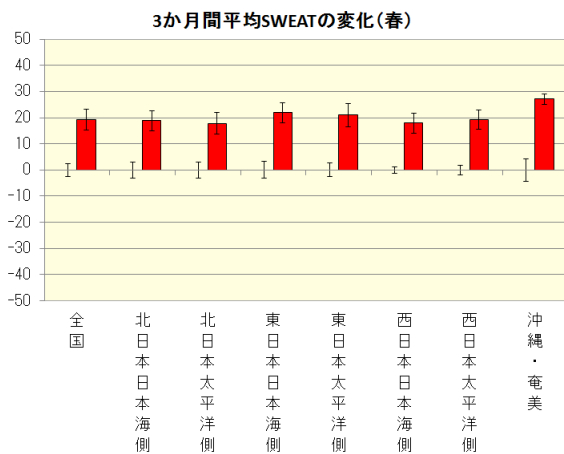
(第5章 その他の要素の将来予測)

(a)

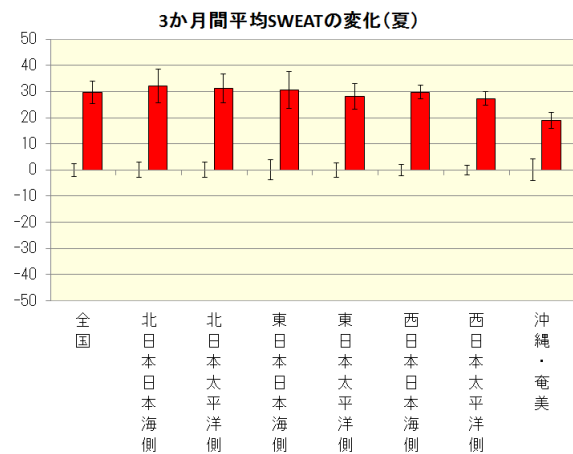


	年	春	夏	秋	冬
全国	18.40	19.24	29.61	19.21	5.54
北日本日本海側	18.34	18.79	32.07	17.32	5.09
北日本太平洋側	17.25	17.76	31.16	15.59	4.48
東日本日本海側	19.62	21.84	30.66	22.26	3.61
東日本太平洋側	18.72	20.93	28.09	20.58	5.36
西日本日本海側	19.14	17.88	29.67	21.99	7.03
西日本太平洋側	18.39	19.31	27.32	20.43	6.48
沖縄・奄美	22.56	27.08	18.86	26.98	17.31

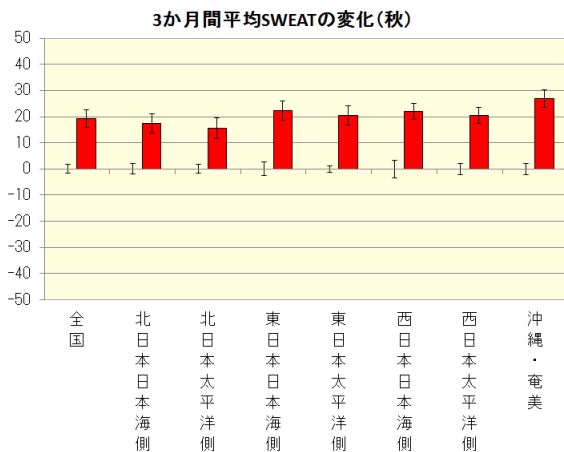
(b)



(c)



(d)



(e)

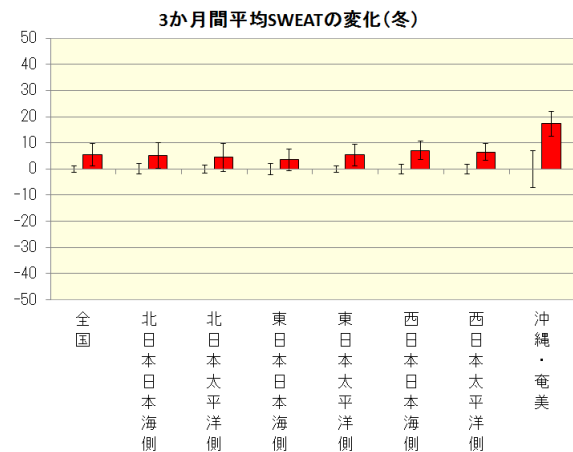


図 5.3-2 及び付表 地域別の SWEAT の変化 (将来気候の現在気候との差)

棒グラフが現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差 (左: 現在気候、右: 将来気候) を示す。(a) : 年間、(b) : 春 (3~5月)、(c) : 夏 (6~8月)、(d) : 秋 (9~11月)、(e) : 冬 (12~2月)。右上の付表は増加 (減少) の数値を示し、その変化量が現在気候の年々変動の標準偏差以上の場合はオレンジ色 (水色) に、信頼度水準 90%で有意ではない場合は灰色に塗りつぶしている。

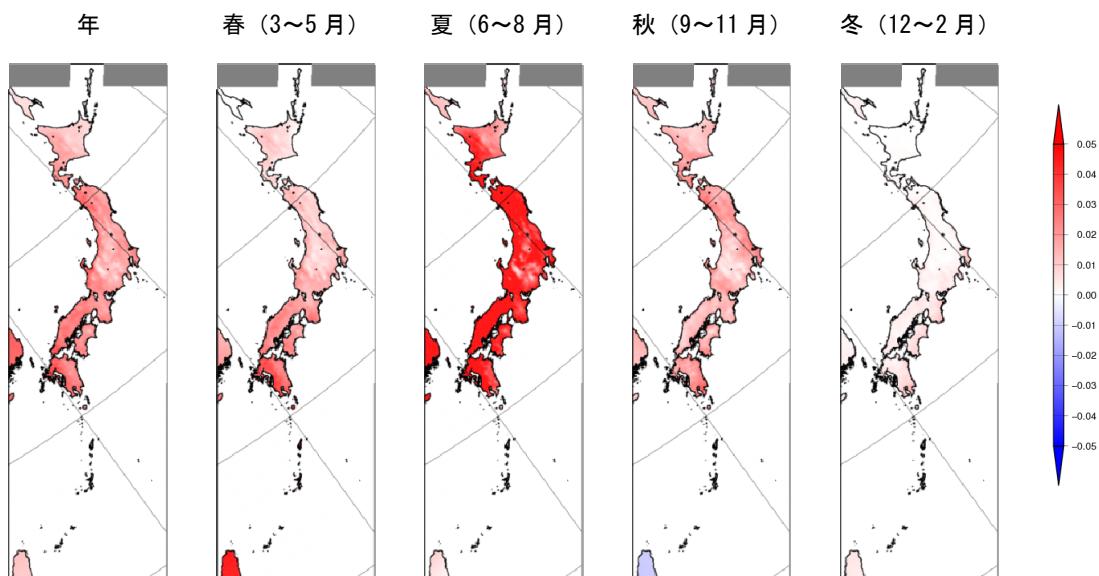


図 5.3-3 平均 EHI の変化 (将来気候の現在気候との差)

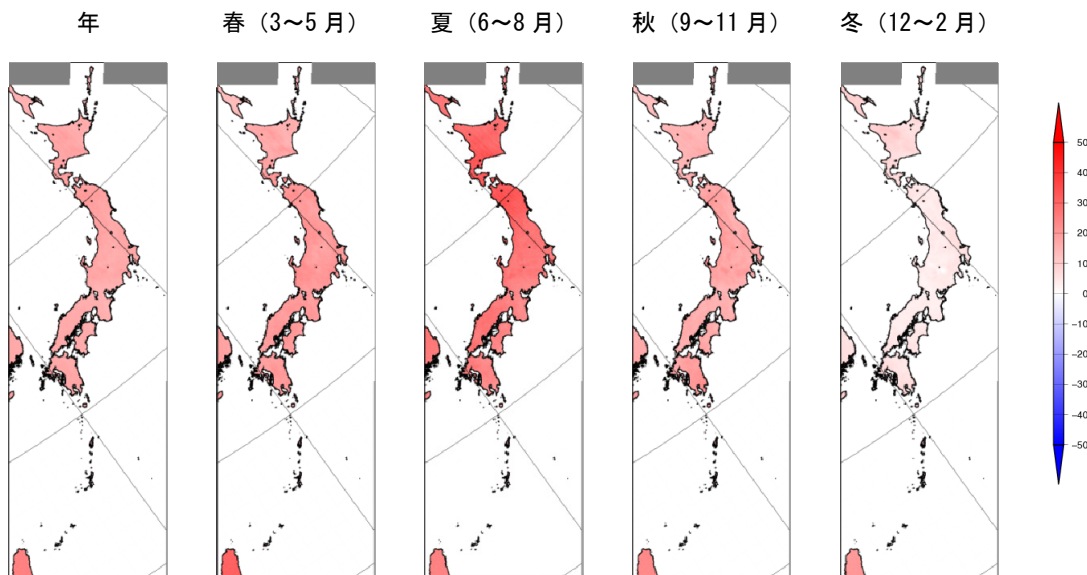


図 5.3-4 SWEAT の変化 (将来気候の現在気候との差)

(第5章 その他の要素の将来予測)

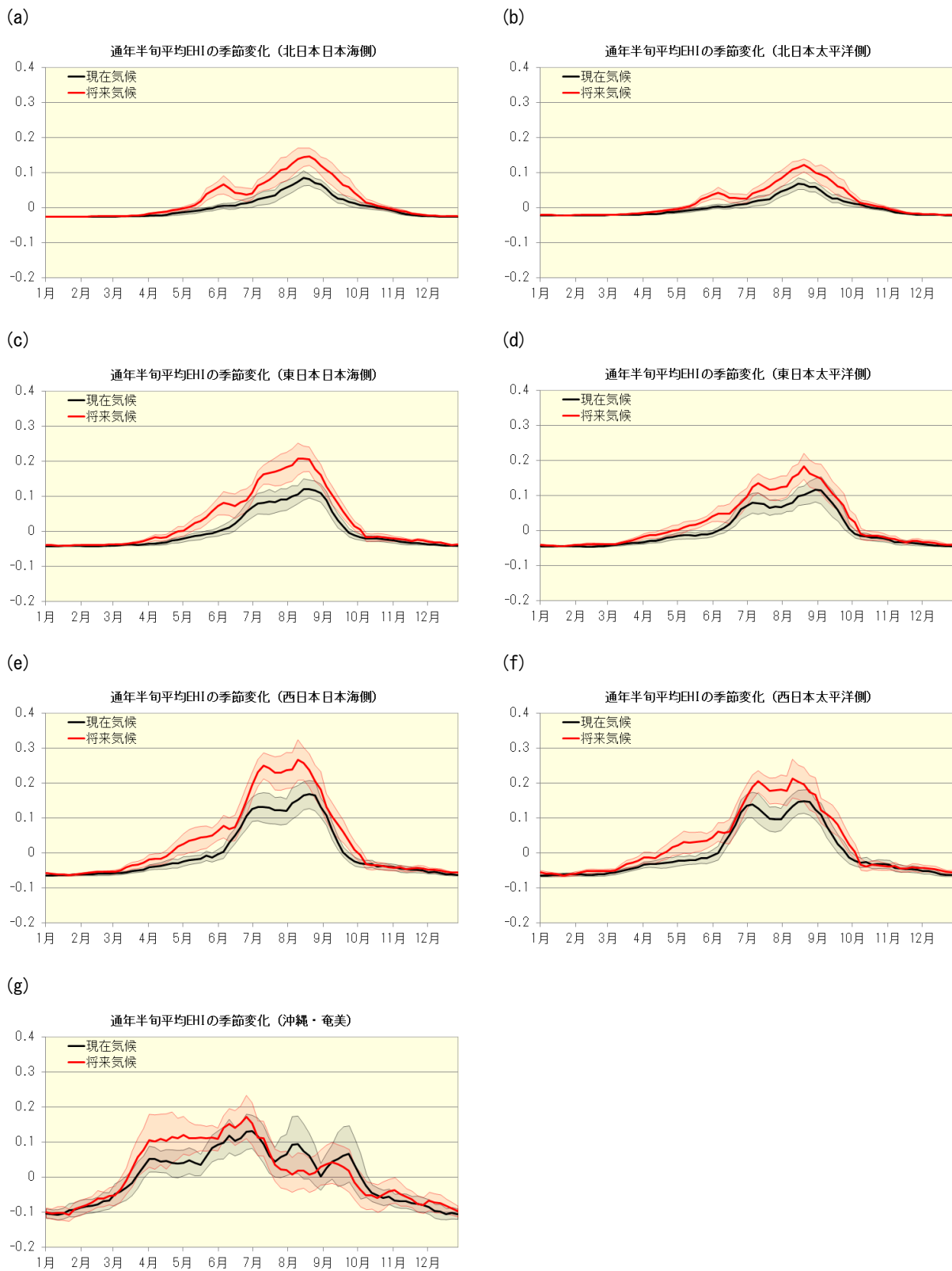


図 5.3-5 地域別の EHI の季節進行の変化（現在気候の年平均との差）

折線は通年半年値、陰影は年々変動の標準偏差を示す。5 半年で平滑化している。黒が現在気候、赤が将来気候である。

- (a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

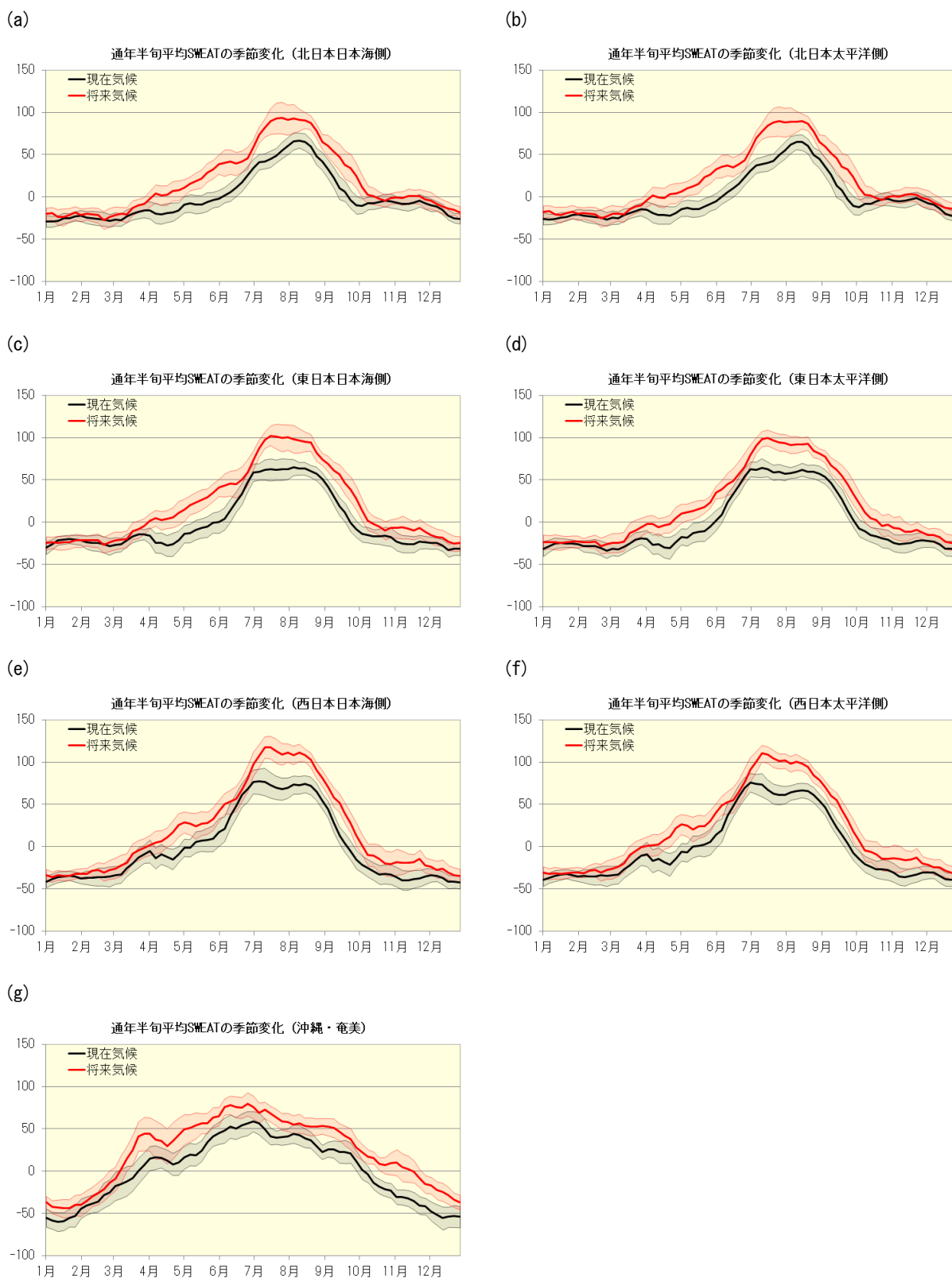


図 5.3-6 地域別の SWEAT の季節進行の変化 (現在気候の年平均との差)

折線は通年半年値、陰影は年々変動の標準偏差を示す。5 半年で平滑化している。黒が現在気候、赤が将来気候である。

- (a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

第6章 近未来予測

6.1 近未来予測の特性

この章では、現在気候（1980～1999年の観測された温室効果ガス濃度を想定）と比較した場合の近未来気候（SRES A1B シナリオにおける2016～2035年の温室効果ガス濃度を想定）における気候変化の解析結果を示す。近未来気候の期間では、シナリオで想定されている温室効果ガス濃度増加量、すなわち気候系に対する外部強制力の増加量は小さく、従って、地域気候モデルの計算においても、将来気候（A1B シナリオにおける2076～2095年の温室効果ガス濃度を想定）の予測と比べて、外部強制力に対する応答（シグナル）は相対的に小さい。

気候モデルによるシミュレーションでは、外部強制力に対する応答としての長期的な気候の変化傾向に加えて、数年～数十年周期のゆっくりとした大気や海洋の内部変動も計算上出現する。外部強制力の増加量が小さい近未来気候の期間では、このような内部変動の振幅（ノイズ）が長期変化傾向を上回って、見掛け上、シグナルを強調、もしくは打ち消してしまう場合がある（1.4(ウ)参照）。このため、近未来気候の予測結果を解釈する際には、解析されている変化をシグナルと見なしてよいか慎重に検討した上で判断する必要がある。本章では、将来気候との対応や気候学的に整合的な解釈が可能かどうか等の観点から検討し、内部変動の影響が小さいと判断される統計量の中から代表的な要素について結果を示す。

6.2 各要素の予測

6.2.1 気温

気温については、平均気温、階級別日数、極端現象のいずれの統計量についても将来気候と整合的である。昇温量の地域差が高緯度ほど高い傾向を示す点についても、将来気候と一致している。これらのことから、近未来気候についても、長期変化傾向を概ね捉えているとみられる。

ここでは、将来気候で示した統計量のうち、代表的なものとして、年平均気温、年最高気温の20年再現値、階級別日数(真夏日、熱帯夜、冬日)について、地域気候モデルによる現在気候と近未来、将来気候との差を図6.2-1から図6.2-3に示す。

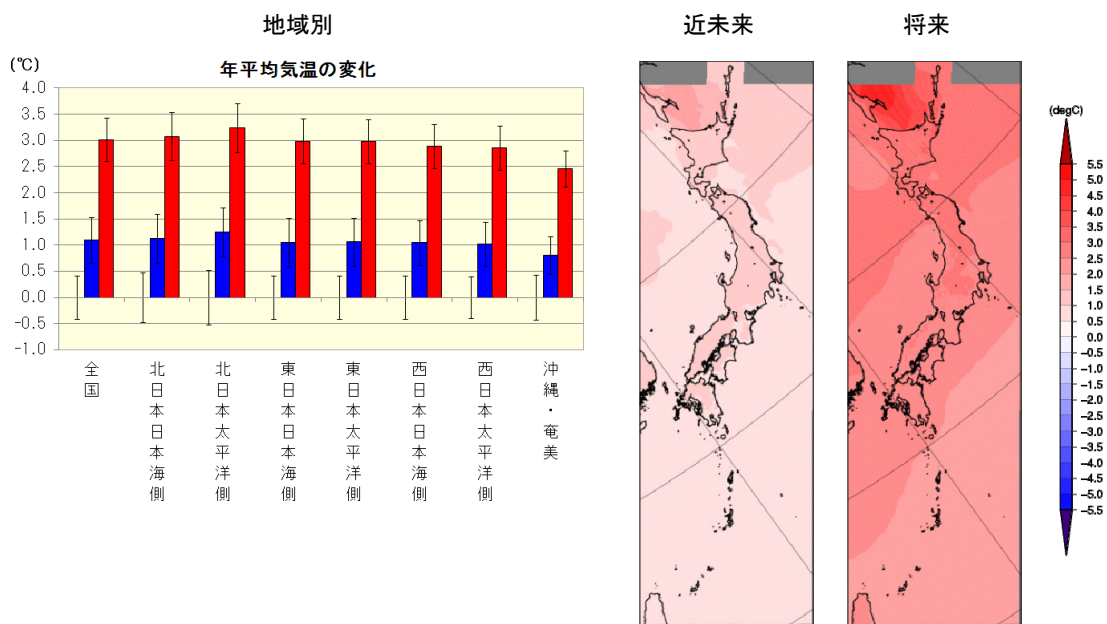


図 6.2-1 年平均気温の変化

左の棒グラフは地域別の現在気候との差（青：近未来気候、赤：将来気候）、縦棒は年々変動の標準偏差を示す。右の二枚の地図は近未来、将来気候における変化の分布を示す。

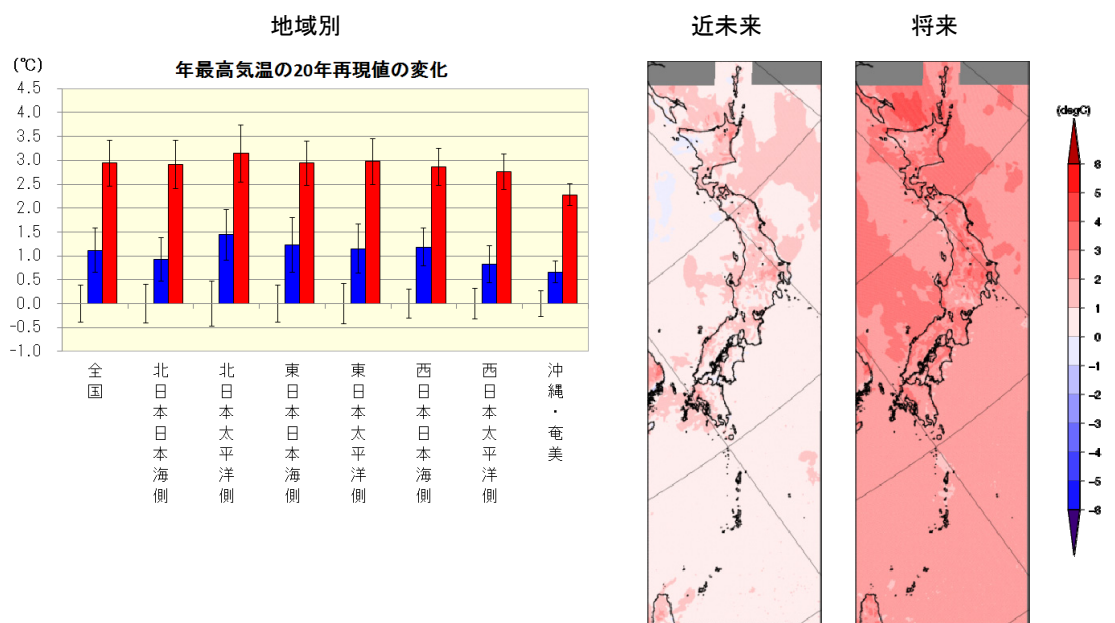


図 6.2-2 年最高気温の20年再現値の変化

左の棒グラフは地域別の現在気候との差（青：近未来気候、赤：将来気候）、縦棒はジャックナイフ法で求めた推定誤差を示す。右の二枚の地図は近未来、将来気候における変化の分布を示す。

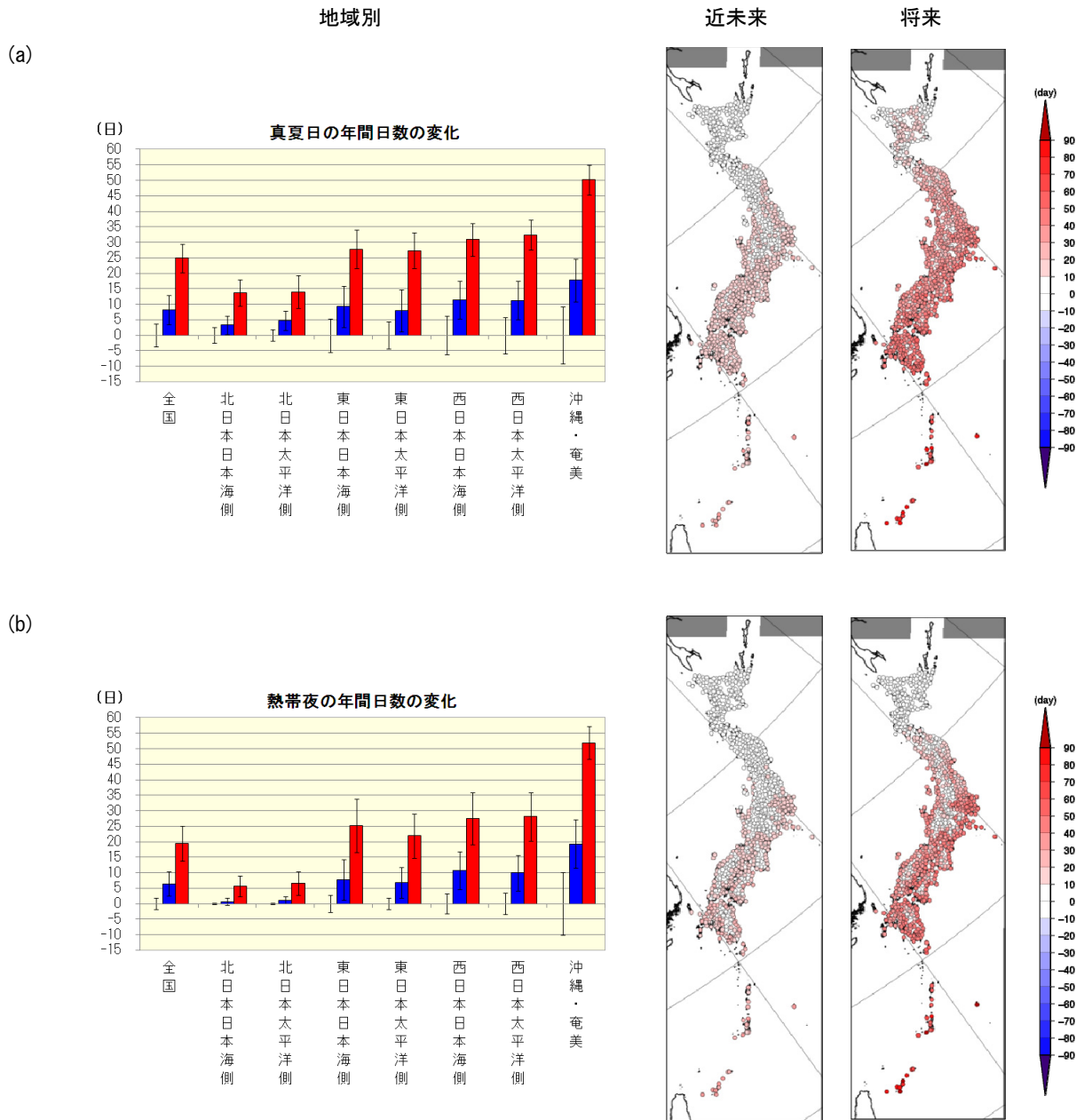
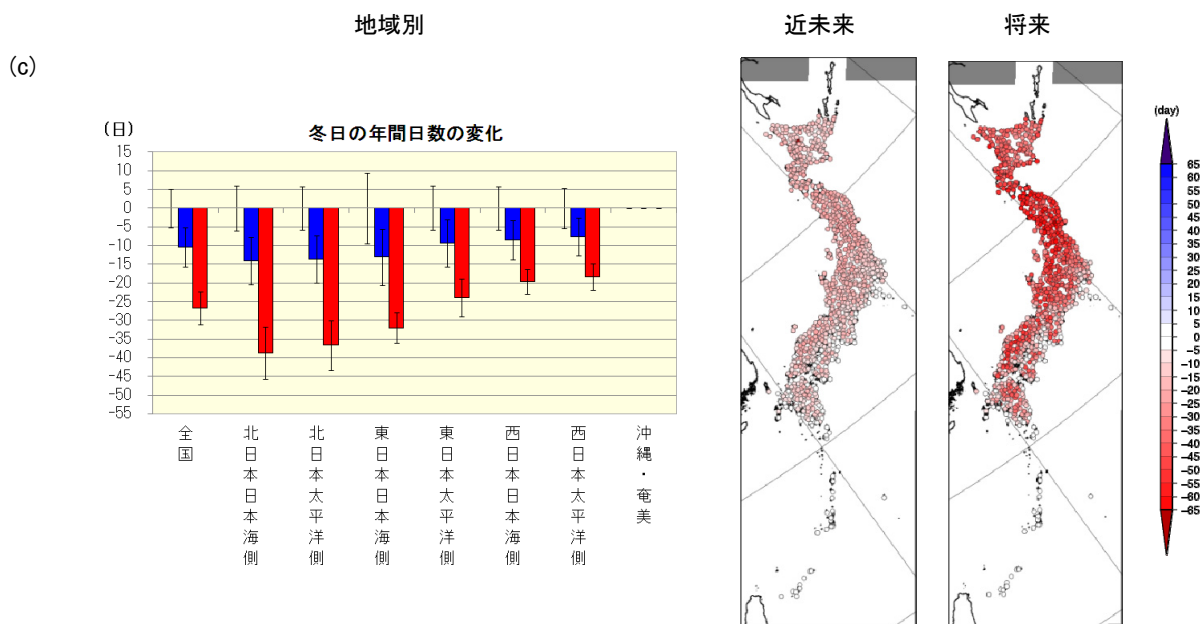


図 6.2-3 階級別日数の変化

(a)：真夏日の年間日数、(b)：熱帯夜の年間日数で、左の棒グラフが地域別の現在気候との差（青：近未来気候、赤：将来気候）、縦棒は年々変動の標準偏差を示す。右の二枚の地図は近未来、将来気候における変化の分布を示す。



6.2.2 降水

近未来気候における年・3か月間降水量は、夏から秋にかけての一部地域の降水量に将来気候と整合しない変化傾向が解析されており、気候モデルの中で計算される台風の接近・上陸数の変動の影響を受けているとみられる。一般に、台風の進路は、数年～数十年規模の自然変動の影響（1.4）や、個々の台風の内部構造、台風が存在している時点での偏西風の位置・強さなど、地球温暖化予測では予測対象としない偶発的な要因によって左右されやすい。また、地域レベルで見た場合には、接近・上陸事例のサンプル数が十分でなく、接近・上陸数の変化を地球温暖化に伴う系統的な変化とみなすことが妥当でない場合がある。これらのことから、この結果は予測の不確実性が高いと判断して、年・3か月間降水量については、ここでは結果を示していない。

図 6.2-4 に、1 時間降水量 50 ミリ以上の 1 地点あたりの年間発生回数の変化を示す。発生回数の増加は、将来気候と比べて明瞭ではないが、傾向としては一致しており、全国的な変化であることも同様である。西日本日本海側の変化量が小さくなっているが、これには前述の台風の接近・上陸数の変動の影響を受けている可能性があることに注意が必要である。図 6.2-5 に、無降水日の年間日数の変化を示す。広い地域で無降水日数が増加しているが、北海道では増加傾向が明瞭でない点は、将来気候と一致している。

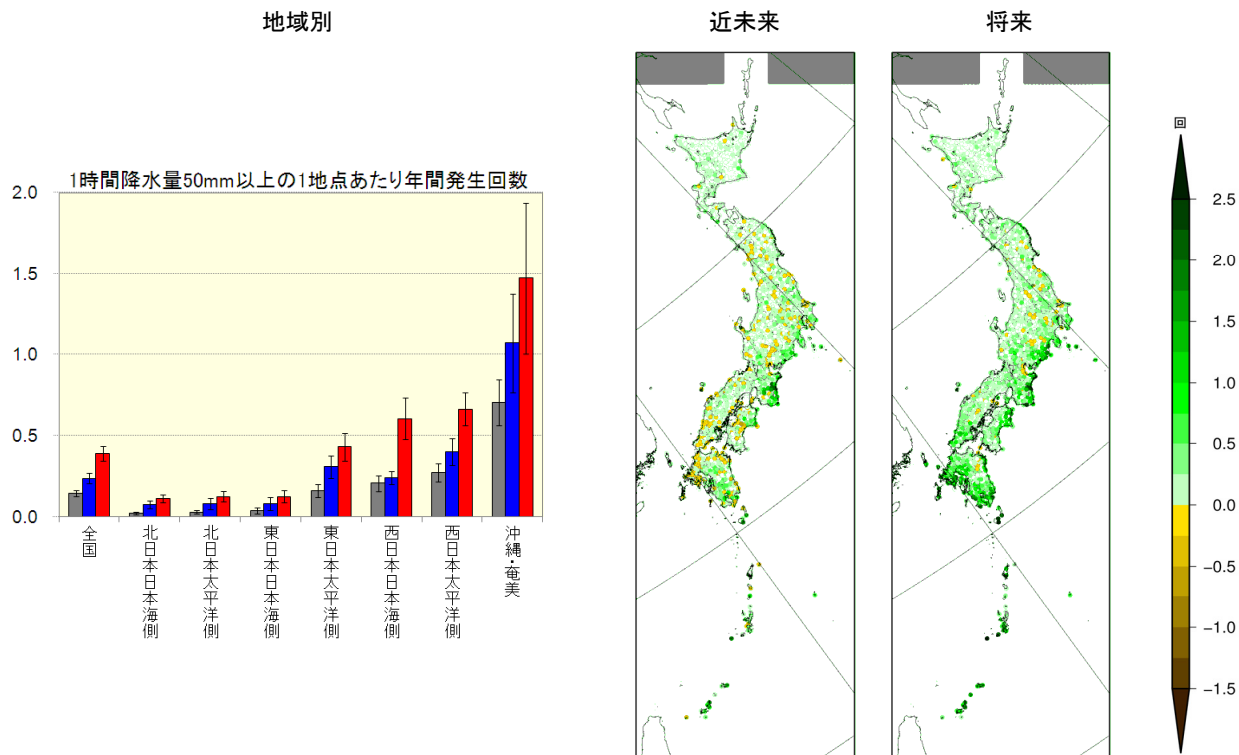


図 6.2-4 1時間降水量 50 ミリ以上の 1 地点あたりの年間発生回数の変化

左の棒グラフは地域別の現在気候 (灰)、近未来気候 (青)、将来気候 (赤) における発生回数、縦棒は年々変動の標準偏差を示す。右の二枚の地図は近未来、将来気候における変化の分布を示す。

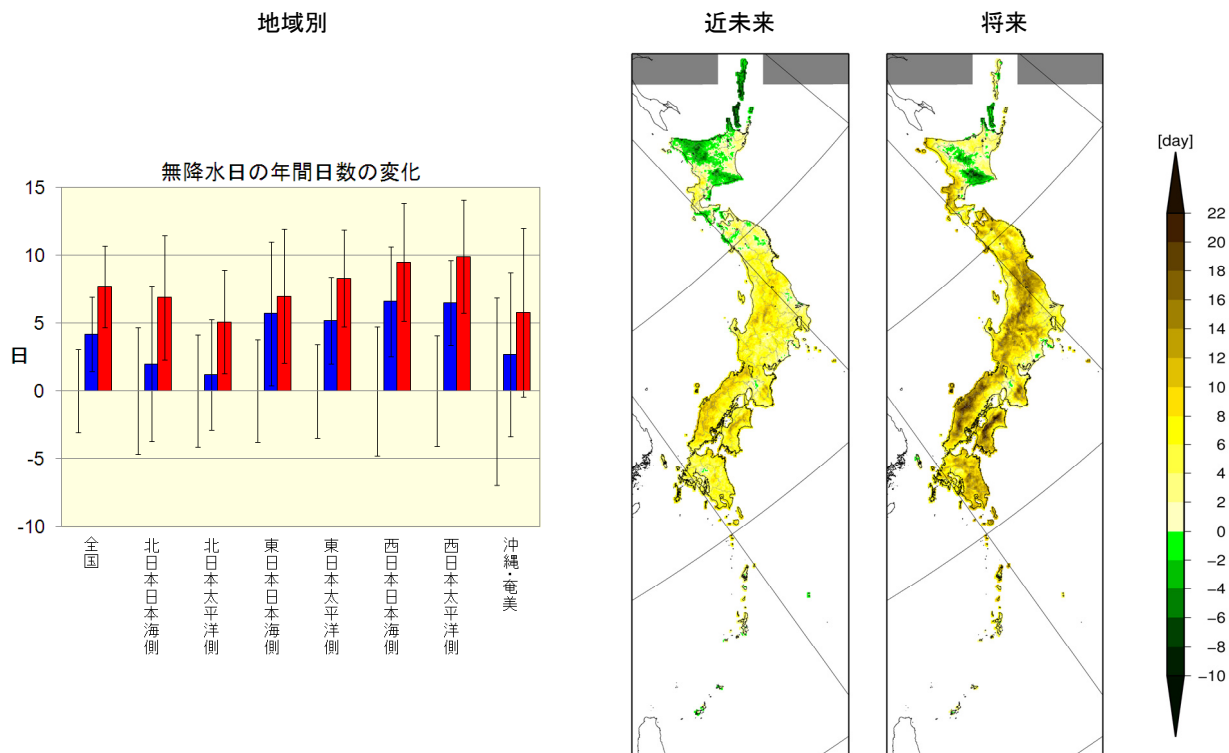


図 6.2-5 無降水日の年間日数の変化

左の棒グラフは地域別の現在気候との差 (青：近未来気候、赤：将来気候)、縦棒は年々変動の標準偏差を示す。右側の二枚の地図は近未来、将来気候における変化の分布を示す。

6.2.3 積雪・降雪

最深積雪と降雪量について、地域気候モデルによる現在気候と近未来、将来気候との差を図 6.2-6 に示す。

年最深積雪は、近未来気候において北海道の一部地域を除いて減少しており、地域別の変化量も全国、北日本、東日本で減少している。また、北日本太平洋側では現在気候の年々変動の標準偏差を超える変化となっている。一方、近未来気候の年々変動の幅を考慮すると、いずれの地域でも、現在気候と同程度の最深積雪となる年も現れている。降雪量は、近未来気候において北海道・本州内陸の一部では増加しているが、それ以外の地域では減少している。地域別の変化量は全ての地域で減少しており、全国と北日本では現在気候の年々変動の標準偏差を超える変化となっている。最深積雪と同様、近未来気候の年々変動の幅を考慮すると、いずれの地域でも、現在気候と同程度の降雪量となる年も現れている。変化量はいずれも近未来気候よりも将来気候で大きく、変化量の空間分布が将来気候と整合的であることから、近未来気候についても温暖化の影響を表していると考えられる。

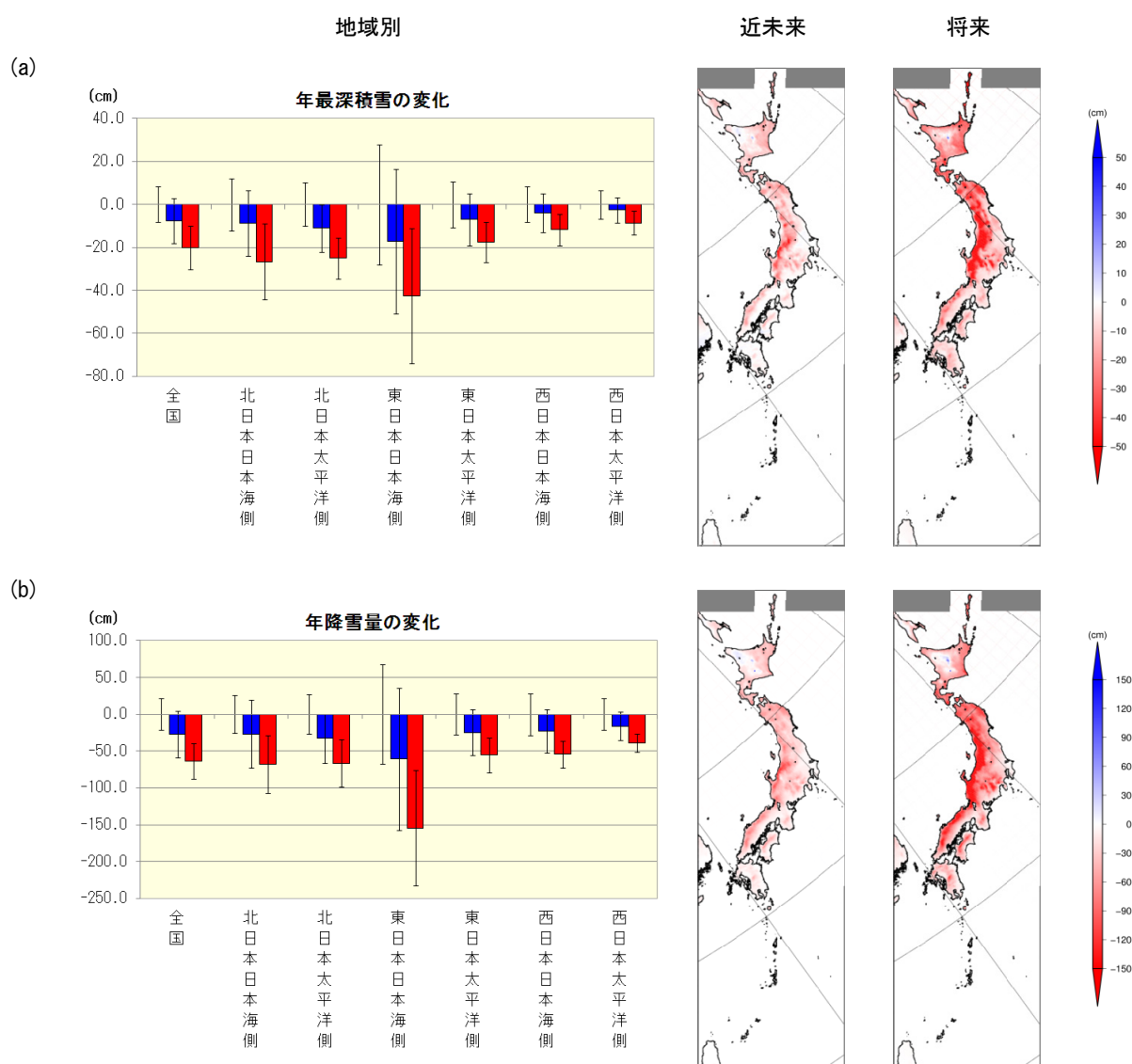


図 6.2-6 年最深積雪・年降雪量の変化

(a) : 年最深積雪、(b) : 年降雪量で、左の棒グラフは地域別の現在気候との差（青：近未来気候、赤：将来気候）、縦棒は年々変動の標準偏差を示す。右の二枚の地図は近未来、将来気候における変化の分布を示す。

6.2.4 その他の要素

相対湿度と全天日射量、鉛直安定度（EHI、SWEAT）について、地域気候モデルによる現在気候と近未来、将来気候との差を図6.2-7と図6.2-8に示す。

年平均相対湿度は、近未来気候において東日本以西で減少する（乾く）。将来気候の変化と概ね整合する変化が現れている。

年全天日射量は、近未来気候において北減南増の傾向がみられるものの明瞭な変化ではない。北日本は将来気候と整合する傾向がみられる。

鉛直安定度は、近未来気候において沖縄・奄美を除いて不安定化の傾向で、将来気候と整合する傾向が現れている。

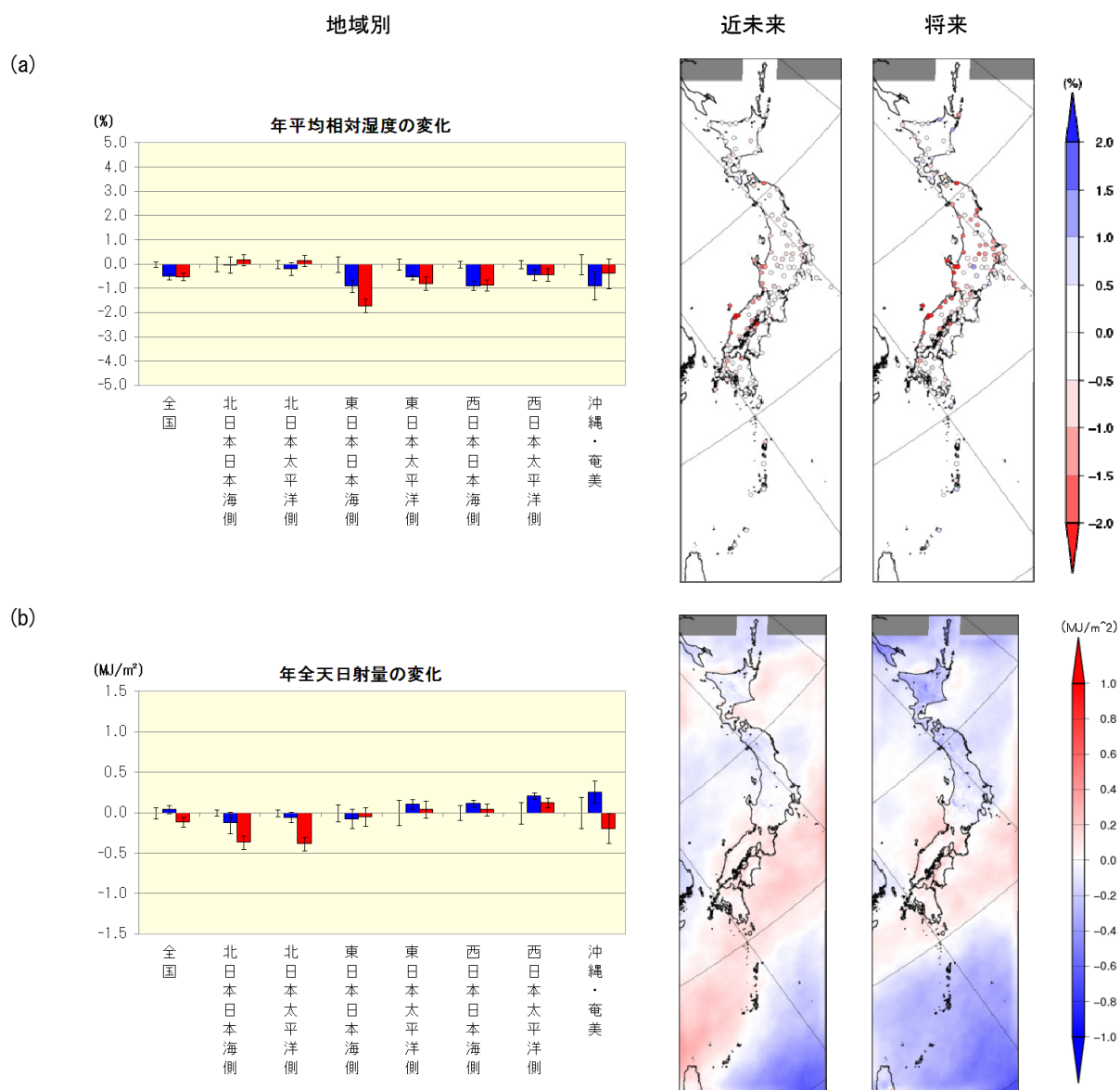


図 6.2-7 その他の要素の変化(1)

(a) : 年平均相対湿度、(b) : 年全天日射量で、左の棒グラフは地域別の現在気候との差（青：近未来気候、赤：将来気候）、縦棒は年々変動の標準偏差を示す。右の二枚の地図は近未来、将来気候における変化の分布を示す。

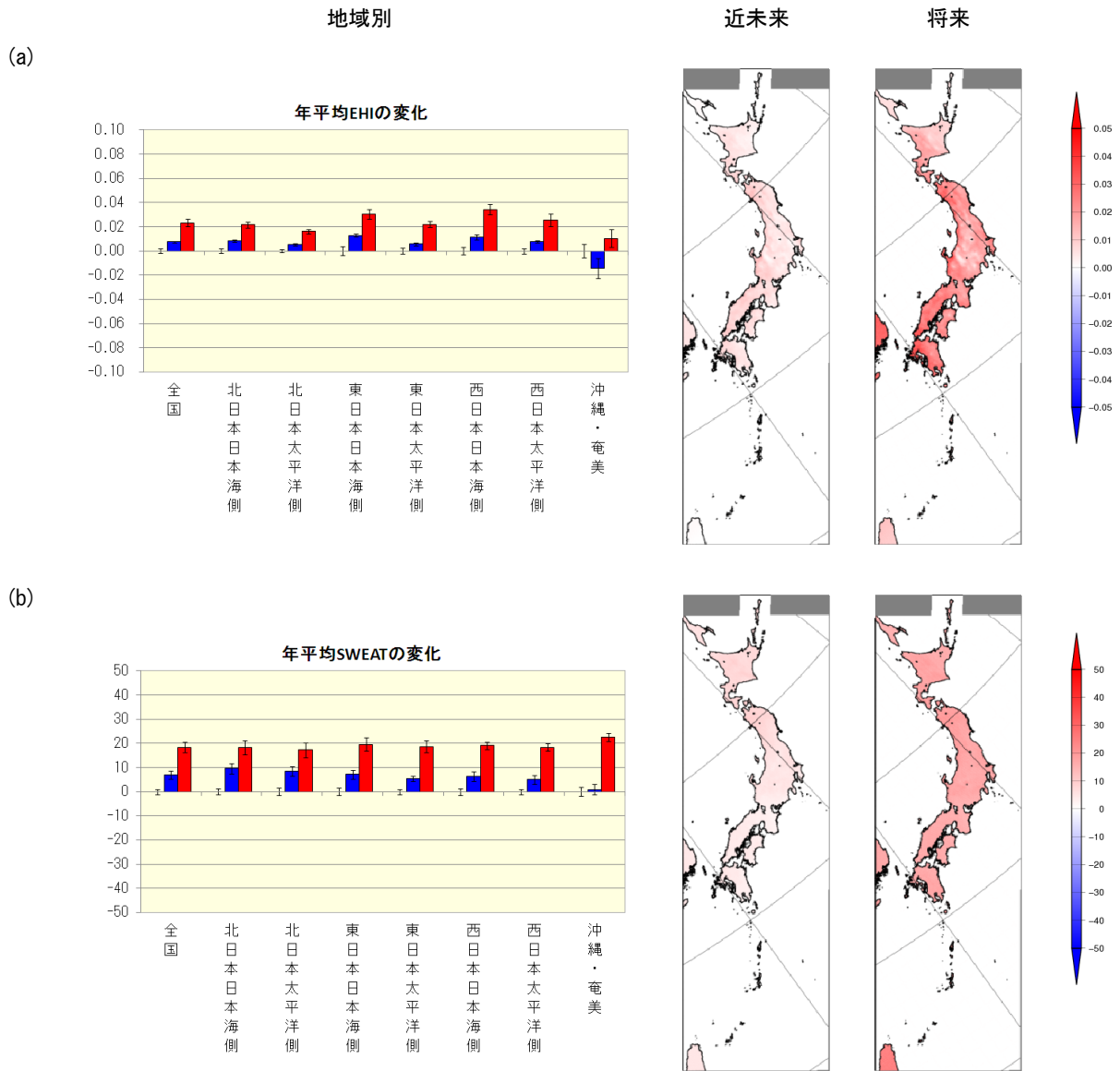


図 6.2-8 その他の要素の変化 (2)

(a) : 年平均 EHI、(b) : 年平均 SWEAT で、左の棒グラフは地域別の現在気候との差 (青 : 近未来気候、赤 : 将来気候)、縦棒は年々変動の標準偏差を示す。右の二枚の地図は近未来、将来気候における変化の分布を示す。

This page intentionally left blank.

(余白)

補 遺

1. 地域気候モデル NHRCM の気候再現性
2. 全球気候モデル MRI-AGCM3.2 における循環場の変化
3. アメダス等の気候値

A1 NHRCM の気候再現性

以下では、観測値（アメダス、地上気象観測、高層気象観測）とその観測地点に対応する地域気候モデル（NHRCM）の格子点データから、気候値をこれら観測地点ごとに算出し、地域平均を比較する。なお、気候値の算出期間は、特に指定のない場合は 1980～1999 年である。本書ではバイアスの有無について表 A1 で示す基準で表記している。

表 A1 バイアスの表記基準

基準	本書での表記
系統誤差の地域平均が 地点間の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）のバイアスが見られるが、偏差のばらつきも大きい」

A1.1 気温の再現性

(1) 平均気温

表 A1.1-1 は、平均気温の観測値（アメダス、地上気象観測）と地域気候モデルによる現在気候の再現値を、各地域の観測点で比較したものである。年平均では、沖縄・奄美を除き全国的に負のバイアスがある。沖縄・奄美は明確なバイアスはない。季節ごとでは、春は全国、東日本、西日本では負のバイアスがあるが、北日本では偏差のばらつきが大きく、沖縄・奄美では明確なバイアスはない。夏は北日本で正のバイアス、東日本以西で負のバイアスが見られるが、各地域で偏差のばらつきが大きい。西日本太平洋側は負のバイアスがある。秋は多くの地域で負のバイアスがあるが、北日本太平洋側では偏差のばらつきが大きく、沖縄・奄美では明確なバイアスはない。冬は多くの地域で負のバイアスがあるが、沖縄・奄美は明確なバイアスはない。

図 A1.1-1 は、各地域における平均気温について、出現頻度を観測と地域気候モデルで比較したものである。夏の北日本では、地域気候モデルの出現頻度分布が観測に比べて 18～24℃付近の頻度が高く、それより低温の頻度が低い。夏のその他の地域では、おおむね地域気候モデルが観測に比べてピークよりも高温側の頻度が低く、ピーク付近の頻度が高い。

表 A1.1-1 地域毎の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。

	年	春	夏	秋	冬
全国	-0.97(0.43)	-0.80(0.74)	-0.16(0.65)	-0.92(0.46)	-2.00(0.92)
北日本日本海側	-0.85(0.44)	-0.71(0.88)	0.21(0.85)	-0.87(0.61)	-2.02(0.97)
北日本太平洋側	-0.64(0.46)	-0.39(0.85)	0.86(0.89)	-0.61(0.65)	-2.41(1.03)
東日本日本海側	-0.99(0.46)	-0.87(0.86)	-0.37(0.76)	-1.08(0.51)	-1.63(0.95)
東日本太平洋側	-1.43(0.50)	-1.29(0.84)	-0.56(0.69)	-1.31(0.60)	-2.54(1.00)
西日本日本海側	-0.87(0.43)	-0.70(0.68)	-0.48(0.66)	-0.76(0.43)	-1.53(1.08)
西日本太平洋側	-1.11(0.46)	-0.91(0.71)	-0.74(0.57)	-1.05(0.47)	-1.73(1.06)
沖縄・奄美	0.05(0.23)	0.08(0.46)	0.11(0.33)	0.20(0.33)	-0.17(0.63)

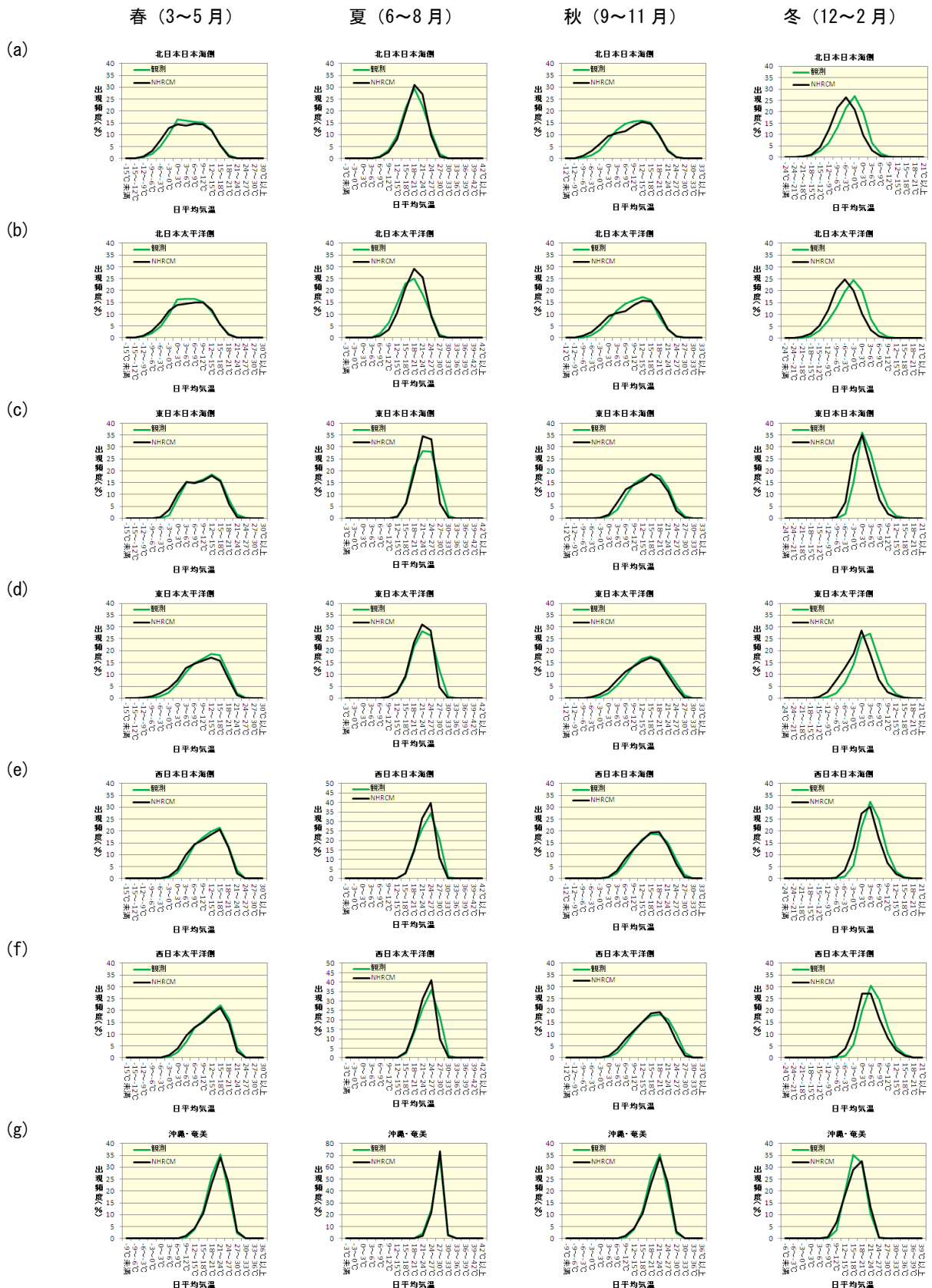


図 A1.1-1 地域毎の平均気温の出現頻度（地域気候モデルと観測の比較）

(a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

(補遺 1 地域気候モデル NHRCM の気候再現性)

(2) 最高気温

表 A1.1-2 は、最高気温の観測値（アメダス、地上気象観測）と地域気候モデルによる現在気候の再現値を、各地域の観測点で比較したものである。年平均及び季節ごとにみても、ほぼ全ての地域で負のバイアスがあり、冬の負のバイアスがやや大きい。

図 A1.1-2 は、各地域における最高気温について、出現頻度を観測と地域気候モデルで比較したものである。各地域で地域気候モデルは概ね負のバイアスを示している。

表 A1.1-2 地域毎の最高気温の再現性比較（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。

	年	春	夏	秋	冬
全国	-1.97(0.47)	-1.76(0.79)	-1.25(0.75)	-1.99(0.46)	-2.87(0.97)
北日本日本海側	-1.66(0.51)	-1.50(1.03)	-0.80(0.96)	-1.91(0.67)	-2.45(1.01)
北日本太平洋側	-1.50(0.53)	-1.28(0.97)	-0.01(1.08)	-1.67(0.60)	-3.03(0.97)
東日本日本海側	-1.79(0.54)	-1.67(1.00)	-1.22(0.89)	-1.98(0.53)	-2.29(1.14)
東日本太平洋側	-2.53(0.51)	-2.25(0.86)	-1.73(0.87)	-2.37(0.55)	-3.78(0.98)
西日本日本海側	-1.99(0.47)	-1.85(0.73)	-1.64(0.74)	-1.90(0.49)	-2.56(1.19)
西日本太平洋側	-2.24(0.46)	-2.01(0.66)	-2.02(0.63)	-2.15(0.52)	-2.79(1.10)
沖縄・奄美	-1.03(0.23)	-0.89(0.44)	-1.24(0.40)	-1.05(0.37)	-0.94(0.61)

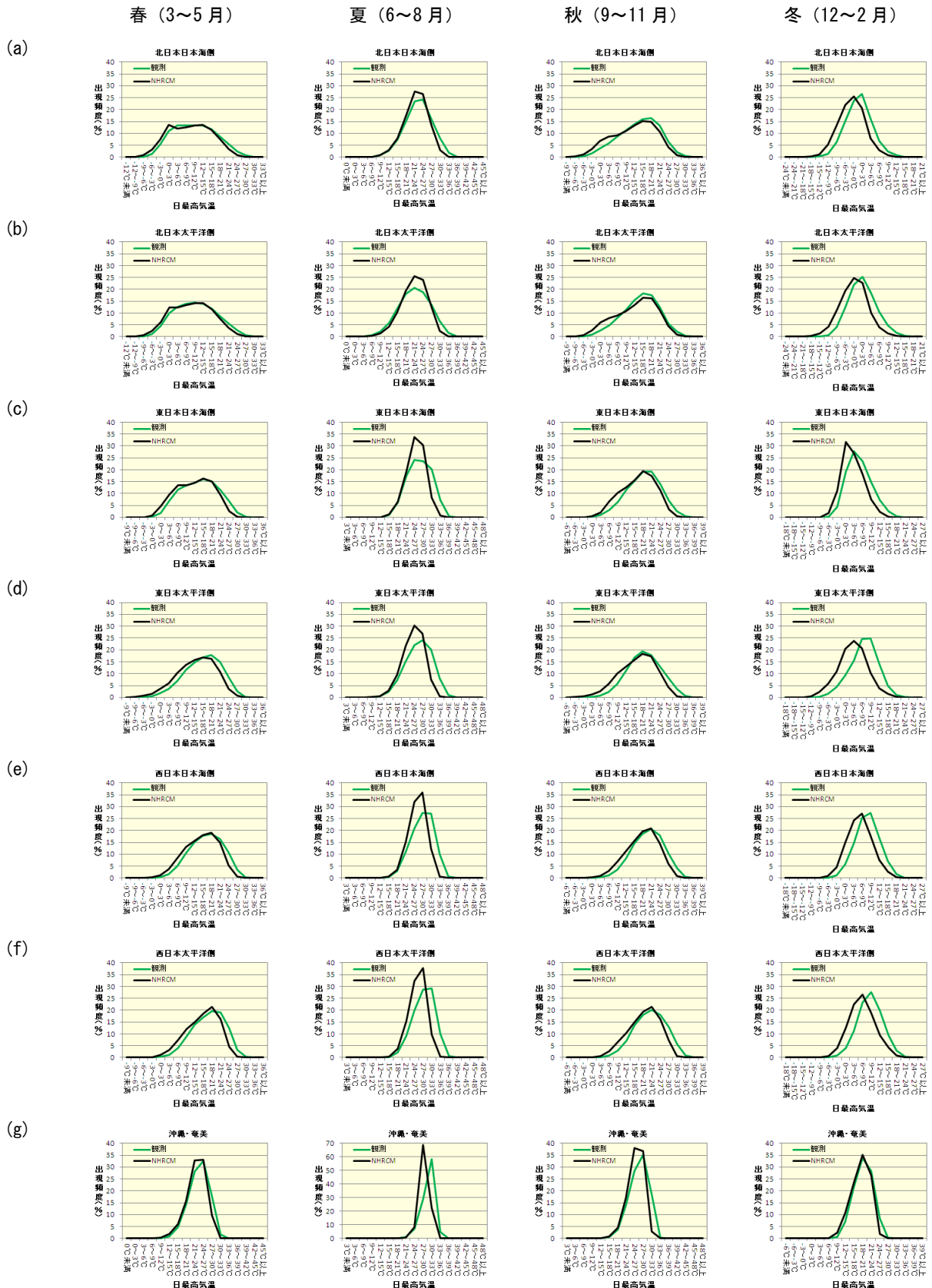


図 A1.1-2 地域毎の最高気温の出現頻度（地域気候モデルと観測の比較）

(a)：北日本日本海側、(b)：北日本太平洋側、(c)：東日本日本海側、(d)：東日本太平洋側、
 (e)：西日本日本海側、(f)：西日本太平洋側、(g)：沖縄・奄美

(3) 最低気温

表 A1.1-3 は、最低気温の観測値（アメダス、地上気象観測）と地域気候モデルによる現在気候の再現値を、各地域の観測点で比較したものである。年平均では、全国では明確なバイアスはないが、地域ごとでは東日本で負のバイアス、沖縄・奄美で正のバイアスがある。季節ごとでは、春は沖縄・奄美では正のバイアス、夏は北日本太平洋側と沖縄・奄美で正のバイアス、秋は東日本太平洋側・西日本太平洋側で負のバイアス、沖縄・奄美では正のバイアスがある。冬は北日本・東日本で負のバイアスがある。西日本では負のバイアスが見られるが、偏差のばらつきが大きい。沖縄・奄美は明確なバイアスはない。

図 A1.1-3 は、各地域における最低気温について、出現頻度をアメダスと地域気候モデルで比較したものである。頻度分布は表 A1.1-3 のバイアスを反映したものとなっている。

表 A1.1-3 地域毎の最低気温の再現性比較（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。

	年	春	夏	秋	冬
全国	-0.32(0.41)	-0.19(0.74)	0.36(0.64)	-0.28(0.57)	-1.17(0.89)
北日本日本海側	-0.20(0.39)	-0.10(0.79)	0.67(0.84)	-0.09(0.66)	-1.27(0.98)
北日本太平洋側	0.05(0.42)	0.31(0.78)	1.18(0.81)	0.26(0.78)	-1.55(1.12)
東日本日本海側	-0.54(0.42)	-0.46(0.72)	0.02(0.70)	-0.54(0.64)	-1.15(0.82)
東日本太平洋側	-0.81(0.53)	-0.79(0.91)	-0.03(0.64)	-0.84(0.77)	-1.57(1.07)
西日本日本海側	-0.16(0.45)	0.07(0.75)	0.13(0.74)	-0.15(0.52)	-0.67(0.99)
西日本太平洋側	-0.45(0.50)	-0.29(0.90)	-0.05(0.66)	-0.56(0.55)	-0.89(1.00)
沖縄・奄美	0.80(0.26)	0.68(0.55)	1.03(0.34)	1.09(0.33)	0.40(0.69)

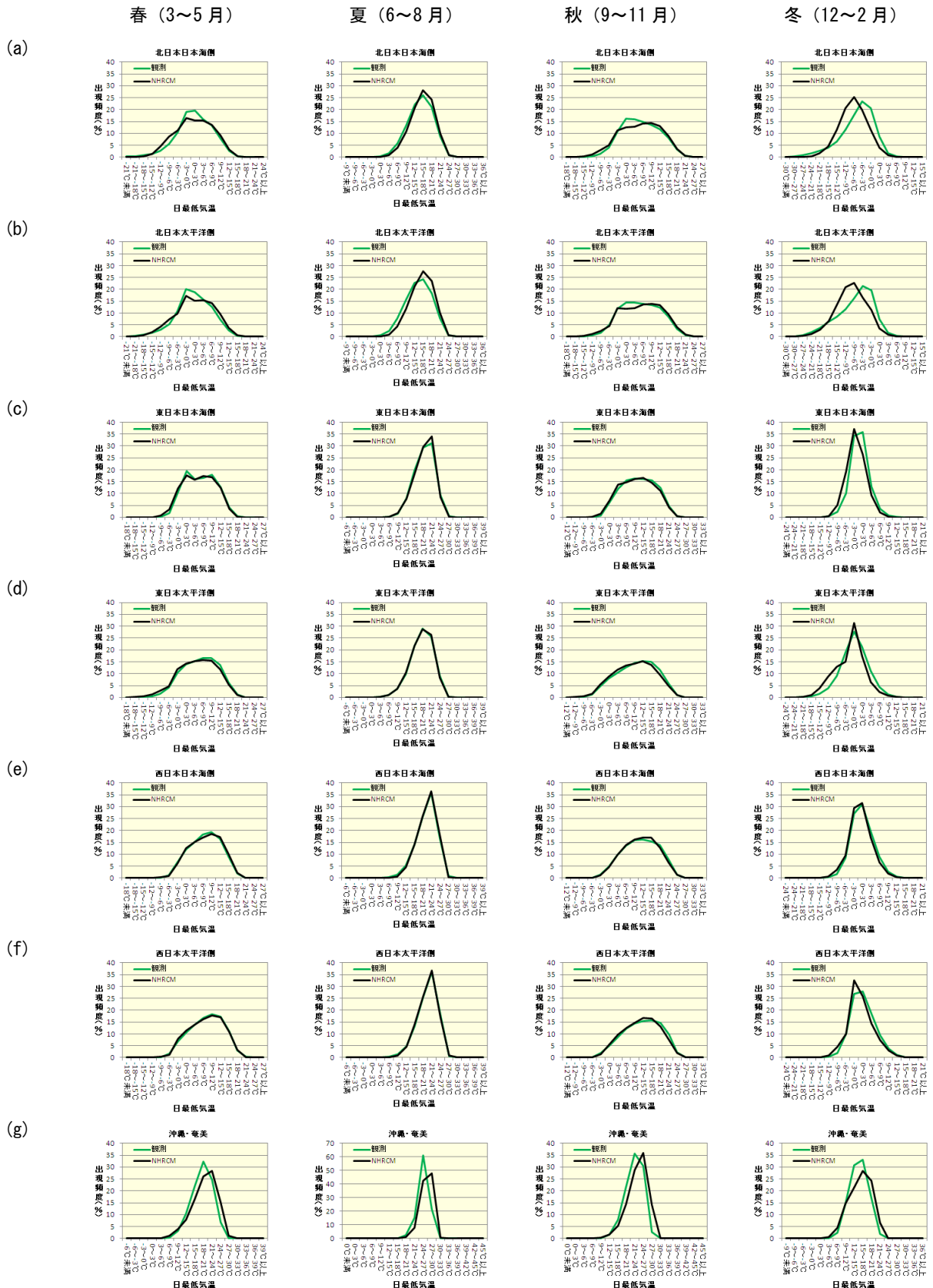


図 A1.1-3 地域毎の最低気温の出現頻度（地域気候モデルと観測の比較）

(a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

(補遺 1 地域気候モデル NHRCM の気候再現性)

(4) 階級別日数

表 A1.1-4 から表 A1.1-8 は、階級別日数の観測値（アメダス、地上気象観測）と地域気候モデルによる現在気候の再現値、及び地域気候モデルの再現値のバイアスを補正した値を、各地域の観測点で比較したものである（バイアスの補正方法は、補遺 A1.7 を参照されたい）。バイアスを補正した地域気候モデルの値は、各要素・各地域で明確なバイアスはない。

ア. 真夏日日数

表 A1.1-4 は、真夏日日数の観測値（アメダス、地上気象観測）と地域気候モデルによる現在気候の再現値、及び地域気候モデルの再現値のバイアスを補正した値を、各地域の観測点で比較したものである。夏は全国的に負のバイアスがある。沖縄・奄美のバイアスが最も大きい。秋は東日本以西で負のバイアスがある。

表 A1.1-4 地域毎の真夏日日数の再現性比較（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。単位は日である。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。アメダスと地域気候モデルのいずれも出現日数がゼロの場合など、バイアス及び標準偏差がともにゼロである場合は、空欄としている。(a) : 補正前、(b) : 補正後を示す。

(a)

	年	春	夏	秋	冬
全国	-15.90(4.66)	-0.18(0.16)	-13.36(4.43)	-2.36(1.13)	
北日本日本海側	-5.72(4.12)	-0.06(0.08)	-5.35(4.13)	-0.31(0.37)	
北日本太平洋側	-4.71(3.60)	-0.08(0.11)	-4.35(3.61)	-0.28(0.33)	
東日本日本海側	-16.03(6.80)	-0.18(0.21)	-14.00(6.51)	-1.84(1.42)	
東日本太平洋側	-18.05(6.14)	-0.19(0.23)	-15.08(5.72)	-2.78(1.46)	
西日本日本海側	-21.01(6.07)	-0.23(0.24)	-17.87(6.16)	-2.91(1.90)	
西日本太平洋側	-25.48(6.23)	-0.20(0.20)	-21.19(5.81)	-4.09(2.14)	
沖縄・奄美	-38.10(6.13)	-1.03(0.98)	-26.89(5.07)	-10.19(3.08)	

(b)

	年	春	夏	秋	冬
全国	-2.03(4.31)	-0.03(0.22)	-1.34(4.17)	-0.66(1.02)	0.00(0.00)
北日本日本海側	-1.24(4.14)	-0.02(0.09)	-1.15(4.06)	-0.08(0.46)	
北日本太平洋側	-1.26(3.78)	-0.02(0.13)	-1.16(3.71)	-0.07(0.46)	
東日本日本海側	-2.72(6.59)	-0.09(0.23)	-1.95(6.52)	-0.68(1.40)	
東日本太平洋側	-2.75(6.34)	0.02(0.40)	-1.81(5.26)	-0.96(1.28)	
西日本日本海側	-1.97(6.12)	0.01(0.37)	-1.19(6.23)	-0.78(1.85)	
西日本太平洋側	-2.28(5.98)	-0.01(0.31)	-1.09(5.87)	-1.17(1.77)	
沖縄・奄美	-3.20(7.87)	-0.49(0.76)	-1.23(5.68)	-1.49(3.69)	0.00(0.01)

イ. 猛暑日日数

表 A1.1-5 は、猛暑日日数の観測値（アメダス、地上気象観測）と地域気候モデルによる現在気候の再現値、及び地域気候モデルの再現値のバイアスを補正した値を、各地域の観測点で比較したものである。各季節・各地域において明確なバイアスはない。

表 A1.1-5 地域毎の猛暑日数再現性比較 (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。単位は日である。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。アメダスと地域気候モデルのいずれも出現日数がゼロの場合など、バイアス及び標準偏差がともにゼロである場合は、空欄としている。(a) : 補正前、(b) : 補正後を示す。

(a)

	年	春	夏	秋	冬
全国	-1.01(1.06)	0.00(0.00)	-0.97(1.06)	-0.04(0.04)	
北日本日本海側	-0.27(0.38)		-0.26(0.38)	0.00(0.01)	
北日本太平洋側	-0.18(0.25)	0.00(0.00)	-0.18(0.25)	0.00(0.01)	
東日本日本海側	-1.21(1.17)		-1.15(1.18)	-0.06(0.11)	
東日本太平洋側	-1.67(1.73)	0.00(0.01)	-1.58(1.74)	-0.08(0.13)	
西日本日本海側	-1.37(1.82)	0.00(0.01)	-1.33(1.83)	-0.04(0.05)	
西日本太平洋側	-1.54(1.84)		-1.49(1.83)	-0.05(0.07)	
沖縄・奄美	-0.02(0.03)		-0.02(0.03)		

(b)

	年	春	夏	秋	冬
全国	-0.15(0.76)	0.00(0.00)	-0.14(0.77)	-0.01(0.06)	
北日本日本海側	-0.06(0.36)		-0.06(0.36)	0.00(0.01)	
北日本太平洋側	0.03(0.23)	0.00(0.00)	0.02(0.23)	0.00(0.02)	
東日本日本海側	-0.08(0.94)		-0.05(0.95)	-0.04(0.11)	
東日本太平洋側	-0.09(1.55)	0.00(0.01)	-0.05(1.58)	-0.04(0.16)	
西日本日本海側	-0.22(1.25)	0.00(0.01)	-0.22(1.26)	-0.01(0.11)	
西日本太平洋側	-0.47(1.27)		-0.45(1.26)	-0.02(0.10)	
沖縄・奄美	0.01(0.07)		0.00(0.06)	0.00(0.01)	

ウ. 熱帯夜日数

表 A1.1-6 は、熱帯夜日数の観測値 (アメダス、地上気象観測) と地域気候モデルによる現在気候の再現値、及び地域気候モデルの再現値のバイアスを補正した値を、各地域の観測点で比較したものである。沖縄・奄美は、冬を除く各季節で正のバイアスがある。その他の地域は、いずれの季節も明確なバイアスはない。

表 A1.1-6 地域毎の熱帯夜日数の再現性比較 (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。単位は日である。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。アメダスと地域気候モデルのいずれも出現日数がゼロの場合など、バイアス及び標準偏差がともにゼロである場合は、空欄としている。(a) : 補正前、(b) : 補正後を示す。

(a)

	年	春	夏	秋	冬
全国	0.69(1.38)	0.13(0.05)	0.13(1.25)	0.43(0.29)	0.00(0.00)
北日本日本海側	0.05(0.19)		0.05(0.19)	0.00(0.01)	
北日本太平洋側	0.01(0.08)		0.01(0.08)	0.00(0.01)	
東日本日本海側	-0.95(2.07)		-0.89(2.06)	-0.06(0.19)	
東日本太平洋側	-0.47(1.34)		-0.53(1.30)	0.06(0.28)	
西日本日本海側	-0.02(3.05)		-0.02(2.91)	0.01(0.52)	
西日本太平洋側	-0.08(2.88)		-0.19(2.49)	0.11(0.59)	
沖縄・奄美	27.06(6.42)	4.03(1.69)	10.54(5.04)	12.49(3.32)	0.00(0.01)

(b)

	年	春	夏	秋	冬
全国	1.14(1.69)	-0.01(0.04)	0.90(1.40)	0.25(0.46)	
北日本日本海側	0.04(0.20)		0.04(0.20)	0.00(0.01)	
北日本太平洋側	0.09(0.13)		0.08(0.13)	0.00(0.02)	
東日本日本海側	1.21(2.37)		1.13(2.32)	0.08(0.32)	
東日本太平洋側	1.39(1.66)		1.06(1.52)	0.34(0.47)	
西日本日本海側	2.08(3.60)		1.82(3.32)	0.26(0.71)	
西日本太平洋側	2.19(3.53)		1.61(2.92)	0.58(0.93)	
沖縄・奄美	0.59(7.95)	-0.27(1.20)	0.12(4.75)	0.74(3.87)	

(補遺 1 地域気候モデル NHRCM の気候再現性)

エ. 冬日日数

表 A1.1-7 は、冬日日数の観測値（アメダス、地上気象観測）と地域気候モデルによる現在気候の再現値、及び地域気候モデルの再現値のバイアスを補正した値を、各地域の観測点で比較したものである。冬は、沖縄・奄美を除く各地域で概ね正のバイアスがある。その他の季節は、明確なバイアスはない。

表 A1.1-7 地域毎の冬日日数の再現性比較（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。単位は日である。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。アメダスと地域気候モデルのいずれも出現日数がゼロの場合など、バイアス及び標準偏差がともにゼロである場合は、空欄としている。(a)：補正前、(b)：補正後を示す。

(a)

	年	春	夏	秋	冬
全国	7.70(6.60)	1.11(2.70)	-0.02(0.03)	0.94(1.87)	5.67(4.18)
北日本日本海側	9.21(6.29)	1.83(3.55)	-0.05(0.09)	3.22(3.78)	4.21(2.13)
北日本太平洋側	4.13(6.45)	-0.74(3.54)	-0.07(0.11)	1.05(4.48)	3.89(2.05)
東日本日本海側	14.20(10.34)	2.65(3.40)		0.52(0.87)	11.03(7.69)
東日本太平洋側	12.54(8.84)	3.20(3.72)	0.00(0.01)	1.15(1.72)	8.19(5.68)
西日本日本海側	3.12(7.65)	-0.44(2.47)		-0.26(0.60)	3.81(6.10)
西日本太平洋側	6.84(7.58)	0.70(2.70)		-0.16(0.91)	6.30(5.77)
沖縄・奄美					

(b)

	年	春	夏	秋	冬
全国	-1.79(6.29)	-0.20(2.59)	-0.01(0.04)	-0.24(1.82)	-1.35(4.12)
北日本日本海側	0.66(6.57)	0.73(3.75)	-0.01(0.13)	0.10(3.89)	-0.16(2.52)
北日本太平洋側	-1.72(6.19)	-0.01(3.69)	-0.04(0.12)	-0.62(4.27)	-1.06(2.86)
東日本日本海側	0.74(10.21)	0.55(3.09)		0.17(0.76)	0.02(7.91)
東日本太平洋側	-3.37(8.62)	-0.54(3.39)	0.00(0.01)	-0.60(1.62)	-2.23(5.71)
西日本日本海側	-2.58(6.75)	-0.68(2.15)	0.00(0.00)	0.03(0.53)	-1.93(5.41)
西日本太平洋側	-2.71(6.67)	-0.71(2.34)		-0.11(0.71)	-1.89(5.08)
沖縄・奄美					

オ. 真冬日日数

表 A1.1-8 は、真冬日日数の観測値（アメダス、地上気象観測）と地域気候モデルによる現在気候の再現値、及び地域気候モデルの再現値のバイアスを補正した値を、各地域の観測点で比較したものである。冬は、沖縄・奄美を除く全地域で正のバイアスがある。北日本及び東日本太平洋側は、春と秋についても正のバイアスがある。

表 A1.1-8 地域毎の真冬日日数の再現性比較（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。単位は日である。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。アメダスと地域気候モデルのいずれも出現日数がゼロの場合など、バイアス及び標準偏差がともにゼロである場合は、空欄としている。(a)：補正前、(b)：補正後を示す。

(a)

	年	春	夏	秋	冬
全国	11.28(3.41)	1.45(0.73)		0.82(0.50)	9.02(2.95)
北日本日本海側	21.43(7.40)	3.50(2.07)		2.23(1.60)	15.70(5.97)
北日本太平洋側	21.50(6.89)	2.83(1.66)		1.93(1.22)	16.74(5.60)
東日本日本海側	6.40(3.84)	0.40(0.39)		0.03(0.06)	5.96(3.73)
東日本太平洋側	11.10(3.35)	1.30(0.60)		0.39(0.26)	9.41(3.03)
西日本日本海側	2.95(1.50)	0.14(0.20)		0.02(0.06)	2.80(1.42)
西日本太平洋側	2.81(1.33)	0.15(0.17)		0.03(0.06)	2.64(1.27)
沖縄・奄美					

(b)

	年	春	夏	秋	冬
全国	-0.70(3.27)	-0.10(0.59)		-0.09(0.32)	-0.51(2.83)
北日本日本海側	-1.75(8.46)	-0.19(1.90)		-0.37(1.18)	-1.19(7.30)
北日本太平洋側	-1.94(7.18)	-0.37(1.37)		-0.19(0.76)	-1.38(6.11)
東日本日本海側	-0.28(2.16)	0.00(0.11)		0.00(0.01)	-0.28(2.15)
東日本太平洋側	-0.04(1.89)	0.00(0.27)		0.01(0.07)	-0.05(1.70)
西日本日本海側	0.00(0.63)	0.01(0.04)		0.01(0.03)	-0.02(0.62)
西日本太平洋側	-0.13(0.53)	0.00(0.03)		0.01(0.02)	-0.13(0.52)
沖縄・奄美					

A1.2 降水の再現性

(1) 地域平均降水量

表 A1.2-1 は、地域毎の年・季節降水量について、観測値（アメダス、地上気象観測）と地域気候モデルによる現在気候の再現値を、各地域の観測点で比較したものである。年降水量では、全国平均で見るとバイアスは 0 に近いが、地域毎の特徴として、東日本・西日本日本海側と沖縄・奄美で負のバイアスが見られる。季節別に見ると、春は沖縄・奄美で負、北日本太平洋側で正のバイアスがある。夏と秋は北日本・東日本・西日本日本海側と沖縄・奄美で負のバイアスがある。冬は東日本日本海側と沖縄・奄美で負のバイアス、北日本・東日本・西日本太平洋側で正のバイアスがある。全体的に、日本海側と沖縄・奄美で観測より降水量が少ない傾向、太平洋側で多い傾向が見られる。

(2) 1 時間降水量の出現頻度

図 A1.2-1 は、地域毎の 1 時間降水量の相対出現頻度について、観測値（アメダス、地上気象観測）と地域気候モデルによる現在気候の再現値を、各地域の観測点で比較したものである。降水量を 5 ミリ毎の階級に区分し、階級別の相対出現頻度で表している。全体的な傾向として、地域気候モデルによる再現値では、観測に比べて、弱い雨に対する強い雨の出現頻度が相対的に小さくなる傾向が見られる。これは、解像度 5km の地域気候モデルでは、強い降水をもたらす積乱雲の発生・発達を完全に陽に表現していないことや、モデルの地形と現実の地形が完全には一致しないこと等が影響しているものと考えられる。

第 3 章では、大雨や強雨の発生頻度の将来変化について述べている。大雨や強雨の発生頻度の変化を解析する場合には、出現頻度分布が観測とモデルの再現値とでずれていると、適切な結果を得ることができない。このため、Piani et al. (2010a and 2010b) の手法に従って、モデルの降水頻度分布が観測に十分に接近するよう補正する（補正方法の詳細は補遺 A1.7 節を参照されたい）。図 A1.2-1 には補正後の出現頻度分布を合わせて示しているが、分布の末端に近い強い降水についても、観測とかなり良く一致していることがわかる。

表 A1.2-1 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。単位はミリである。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。(a)：補正前、(b)：補正後を示す。

	年	春	夏	秋	冬
(a) 全国	-14.5 (279.0)	4.7 (72.9)	-50.4 (146.7)	-21.9 (64.1)	61.9 (76.3)
北日本日本海側	-701 (193.9)	28.3 (43.0)	-63.0 (46.5)	-55.9 (41.5)	31.3 (89.6)
北日本太平洋側	137.6 (146.9)	47.6 (34.5)	-42.6 (53.5)	27.5 (41.6)	115.7 (42.4)
東日本日本海側	-443.7 (195.8)	-30.8 (38.8)	-128.7 (54.6)	-135.9 (38.8)	-139.2 (89.7)
東日本太平洋側	177.0 (275.0)	13.4 (67.7)	19.4 (123.7)	28.6 (69.1)	121.0 (82.8)
西日本日本海側	-252.6 (136.8)	-26.1 (39.3)	-163.3 (112.4)	-71.4 (35.1)	28.0 (41.4)
西日本太平洋側	76.0 (374.4)	5.9 (92.1)	-7.1 (202.6)	-2.0 (77.3)	85.4 (42.5)
沖縄・奄美	-684.0 (183.2)	-222.4 (55.9)	-147.7 (82.9)	-179.5 (45.4)	-134.4 (21.9)
(b) 全国	-7.1 (279.0)	-0.8 (81.2)	-3.6 (133.0)	-1.8 (65.7)	-0.6 (93.7)
北日本日本海側	-2.2 (210.7)	0.0 (45.0)	-1.3 (60.0)	-0.7 (52.3)	-0.1 (81.8)
北日本太平洋側	-3.1 (151.3)	-0.2 (36.6)	-2.3 (60.8)	-0.5 (44.6)	0.1 (38.5)
東日本日本海側	-8.0 (205.7)	-0.8 (37.8)	-2.8 (44.0)	-1.8 (54.0)	-2.5 (102.3)
東日本太平洋側	-5.5 (259.0)	-0.8 (75.6)	-2.3 (105.9)	-2.0 (72.2)	-0.1 (54.0)
西日本日本海側	-11.8 (146.6)	-1.0 (41.6)	-7.2 (127.6)	-1.8 (40.5)	-1.4 (71.2)
西日本太平洋側	-10.4 (333.3)	-1.2 (93.3)	-5.2 (163.3)	-2.9 (72.2)	-0.7 (42.2)
沖縄・奄美	-22.2 (154.0)	-4.1 (40.3)	-8.0 (50.1)	-6.7 (54.7)	-3.5 (39.1)

(補遺 1 地域気候モデル NHRCM の気候再現性)

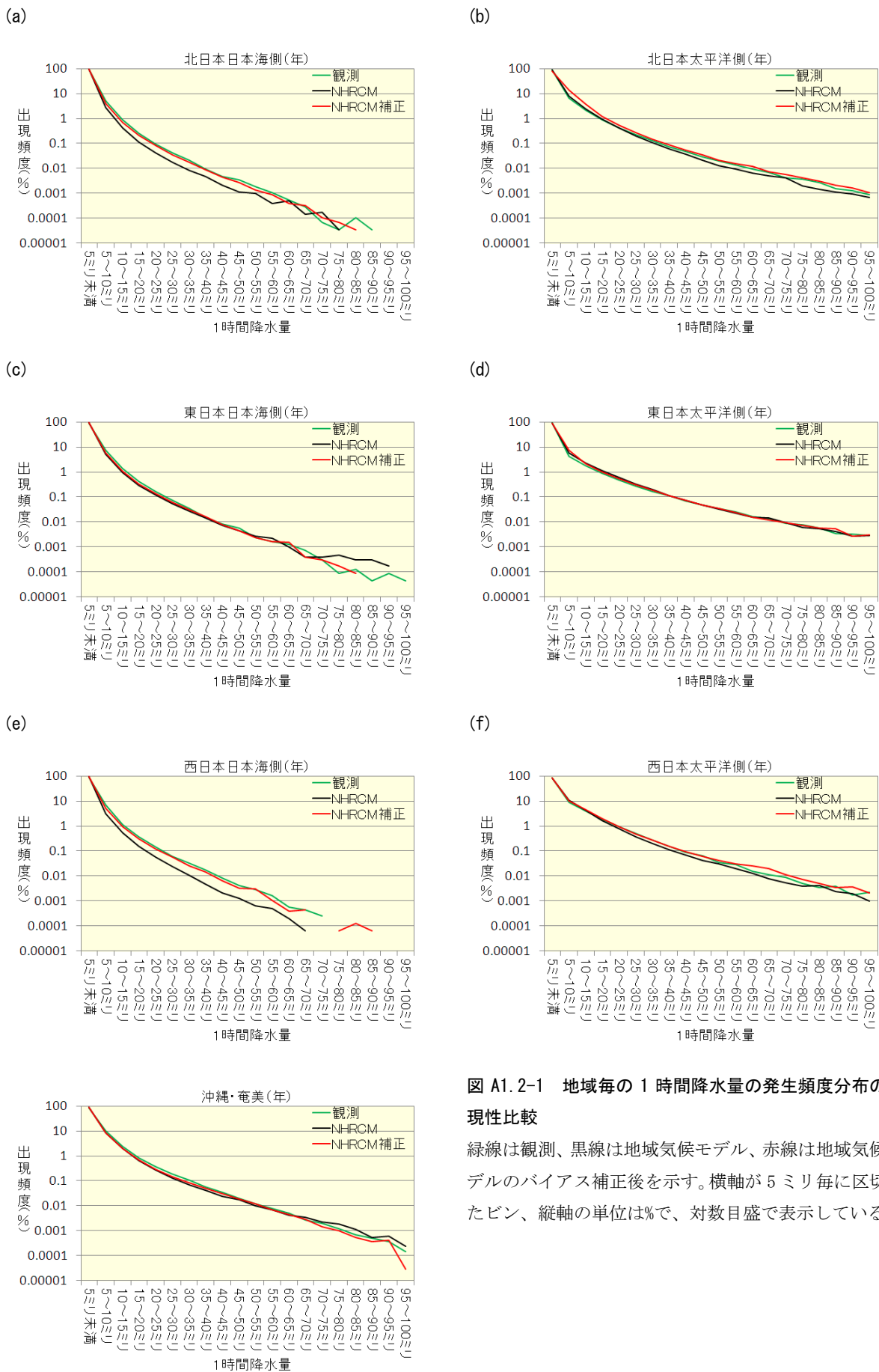


図 A1.2-1 地域毎の 1 時間降水量の発生頻度分布の再現性比較

緑線は観測、黒線は地域気候モデル、赤線は地域気候モデルのバイアス補正後を示す。横軸が 5 ミリ毎に区切ったビン、縦軸の単位は%で、対数目盛で表示している。

A1.3 積雪・降雪の再現性

(1) 最深積雪

表 A1.3-1 は、最深積雪のアメダス・地上気象観測による観測値と地域気候モデルによる現在気候再現値を各地域に含まれる観測点で比較したものである。年間では、東日本日本海側で負のバイアスがある。各月では、12月・3月の東日本太平洋側で正のバイアス、2月の東日本日本海側で負のバイアスがある。その他の地域・期間でも正・負のバイアスが見られるものの、偏差のばらつきは大きい。

図 A1.3-1 は、各地域における年最深積雪について、その出現頻度をアメダスと地域気候モデルで比較したものである。頻度分布は表 A1.3-1 のバイアスを概ね反映したものとなっており、北日本太平洋側では観測と地域気候モデルの分布が比較的良好に一致していることがわかる。

(2) 降雪量

表 A1.3-2 は、降雪量のアメダス・地上気象観測による観測値と地域気候モデルによる現在気候再現値を各地域に含まれる観測点で比較したものである。年間では全国、北日本、東日本日本海側に負のバイアスがある。月別では、12月の全国、北日本、東日本日本海側、1・2月の全地域、3月の全国、北日本、東日本で負のバイアスがある。その他の地域・期間でも正・負のバイアスが見られるものの、偏差のばらつきは大きい。

各地域における年降雪量の頻度分布(図 A1.3-2)では、北日本日本海側、北日本太平洋側での負のバイアスに対応したピークの違いが表れている。

表 A1.3-1 地域毎の最深積雪の再現性比較(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 cm 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。

	年	12月	1月	2月	3月
全国	-13.63(44.23)	0.46(20.88)	-9.70(33.02)	-14.32(39.37)	-3.17(41.97)
北日本日本海側	-25.99(40.22)	-4.80(24.95)	-18.95(34.96)	-26.32(38.60)	-14.82(41.95)
北日本太平洋側	5.18(30.27)	8.15(13.18)	2.85(21.93)	1.56(26.45)	9.01(25.79)
東日本日本海側	-35.88(31.91)	-2.16(11.13)	-20.64(24.72)	-32.30(28.86)	-19.32(33.22)
東日本太平洋側	48.28(60.22)	26.33(23.50)	32.17(44.79)	37.66(50.50)	57.84(57.67)
西日本日本海側	-17.20(28.85)	-0.54(11.85)	-7.73(19.41)	-18.59(30.60)	-7.91(26.73)

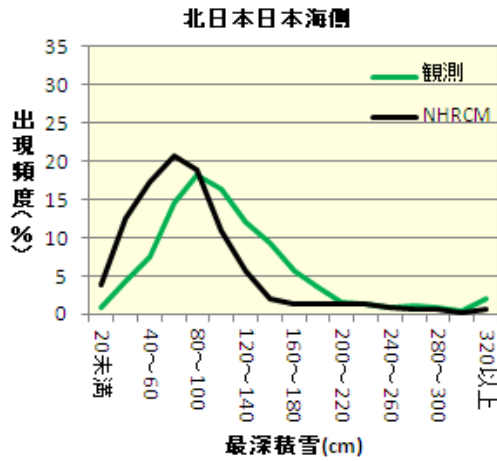
表 A1.3-2 地域毎の降雪量の再現性比較(地域気候モデルから観測を引いたもの)

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 cm 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。

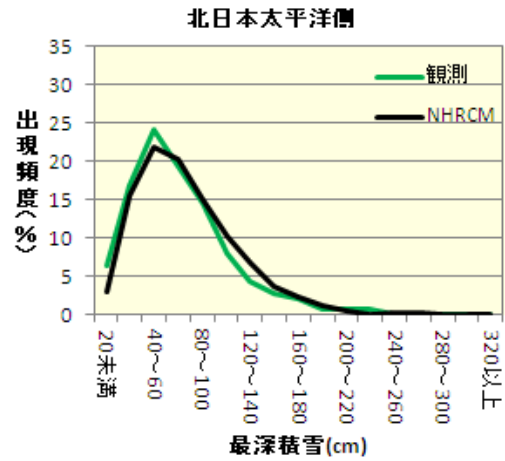
	年	12月	1月	2月	3月
全国	-386.97(244.15)	-65.97(65.12)	-130.40(68.99)	-116.92(52.04)	-62.83(41.58)
北日本日本海側	-535.09(202.63)	-106.77(65.15)	-173.58(51.45)	-144.06(38.17)	-85.91(33.11)
北日本太平洋側	-266.67(182.37)	-46.62(44.54)	-93.27(50.72)	-80.45(38.62)	-50.72(33.56)
東日本日本海側	-353.59(214.82)	-31.25(29.36)	-131.80(74.63)	-131.31(62.57)	-54.43(42.50)
東日本太平洋側	-156.10(179.22)	-4.53(34.94)	-89.18(58.97)	-98.45(44.99)	-31.42(30.29)
西日本日本海側	-194.85(199.13)	-16.99(36.41)	-64.26(54.43)	-87.87(51.36)	-26.37(48.33)

(補遺 1 地域気候モデル NHRCM の気候再現性)

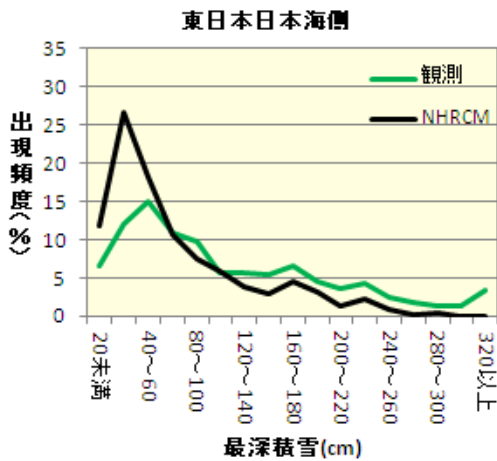
(a)



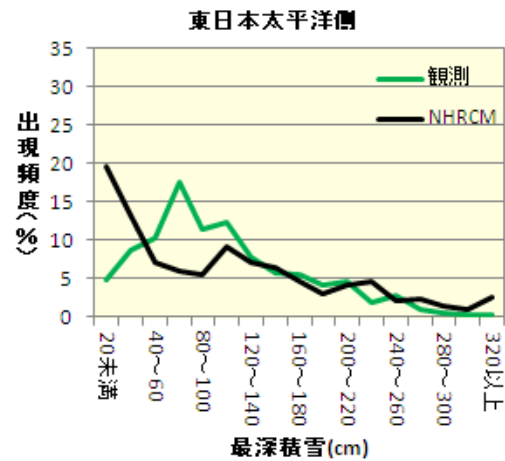
(b)



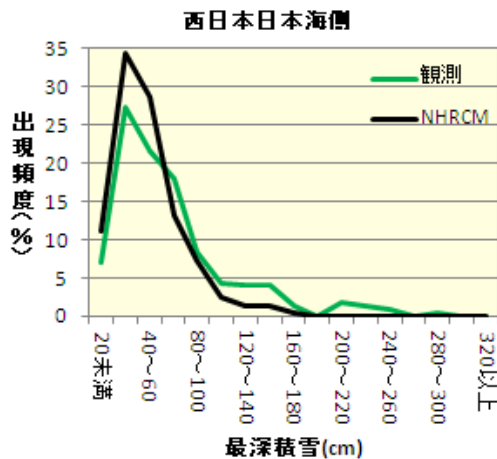
(c)



(d)



(e)



(f)

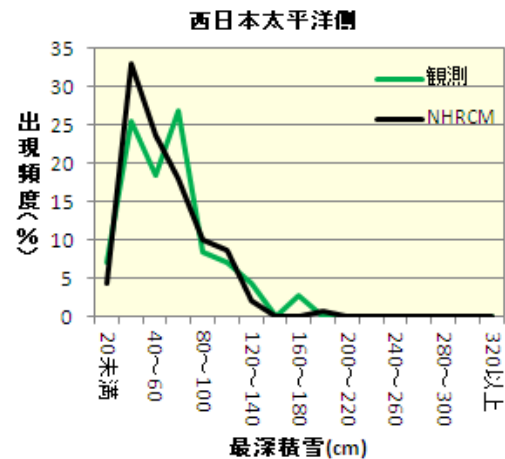
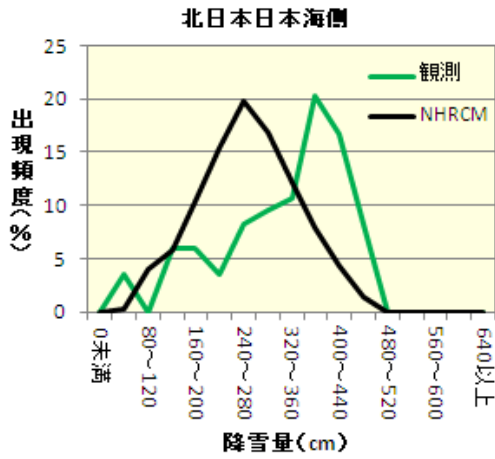


図 A1.3-1 地域毎の年最深積雪の出現頻度 (地域気候モデルと観測の比較)

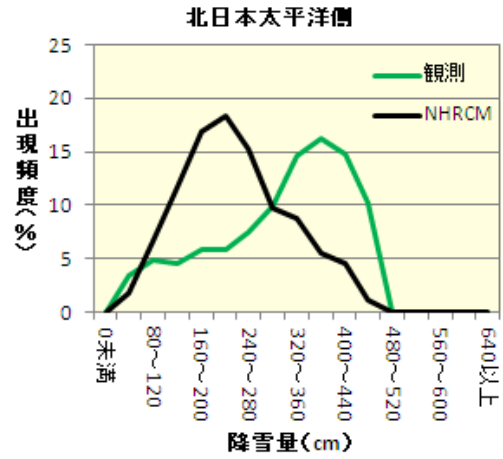
(a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、

(e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側

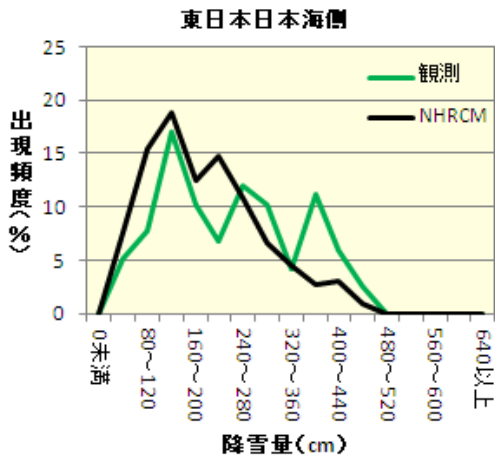
(a)



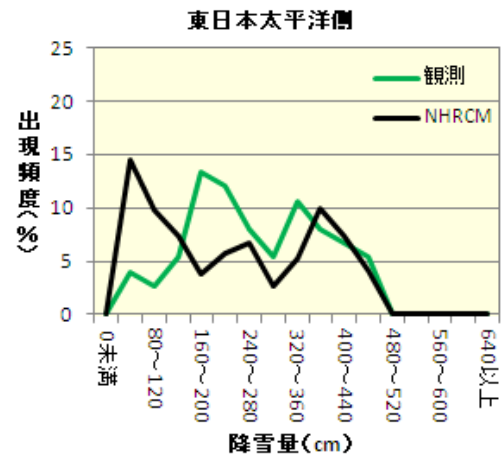
(b)



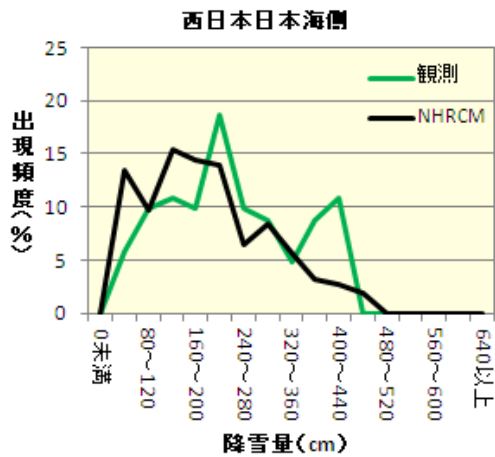
(c)



(d)



(e)



(f)

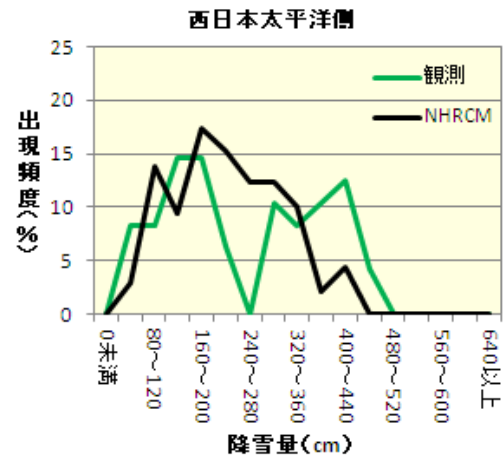


図 A1.3-2 地域毎の年降雪量の出現頻度 (地域気候モデルと観測の比較)

(a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、

(e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側

A1.4 相対湿度の再現性

表 A1.4-1 は、相対湿度について地上気象観測（149 地点）による観測値と地域気候モデルによる現在気候の再現値¹を地域別に比較したものである。年間では、北日本から西日本で正のバイアスが見られるが地点毎のばらつきも大きい。沖縄・奄美では負のバイアスがある。季節別では、春から夏は北日本を中心に正のバイアスがある。秋は沖縄・奄美で負のバイアスがある他は明瞭なバイアスはない。冬は北日本日本海側と沖縄・奄美で負のバイアスがある。秋と冬のバイアスは概ね 5%²以内である。

図 A1.4-1 は、各地域における日平均相対湿度の出現頻度を観測と地域気候モデルで比較したものである。これらは表 A1.4-1 のバイアスを概ね反映している。

表 A1.4-1 地域毎の平均相対湿度の再現性比較（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、水色（オレンジ色）に塗りつぶしている。

	年	春	夏	秋	冬
全国	2.15(4.52)	5.39(5.74)	4.25(3.66)	-0.63(4.59)	-0.18(6.24)
北日本日本海側	1.65(3.82)	7.17(4.96)	5.27(2.35)	0.68(3.76)	-6.69(5.82)
北日本太平洋側	3.02(3.93)	8.27(5.04)	6.35(3.20)	1.25(4.93)	-3.80(4.75)
東日本日本海側	2.65(4.45)	7.19(5.38)	4.76(3.73)	0.34(4.93)	-1.38(4.11)
東日本太平洋側	1.74(5.51)	3.56(6.28)	3.59(4.04)	-1.64(5.32)	1.74(6.98)
西日本日本海側	1.81(3.72)	5.00(4.45)	3.72(2.79)	-1.70(3.71)	0.90(4.65)
西日本太平洋側	3.39(4.70)	6.12(6.13)	4.49(4.17)	-0.25(4.59)	3.80(4.38)
沖縄・奄美	-1.78(1.67)	-0.72(1.99)	0.35(1.38)	-3.35(1.36)	-2.95(2.51)

¹ 現在気候の再現値の算出には補正後の気温を用いている。

² 本節では、観測値と地域気候モデルの再現値との比較は全て「差」を用いており、「比」は用いていない。文中や図表の「%」は全て相対湿度の単位であることに注意されたい（例：現在気候の平均が 65%、将来気候の平均が 70% の場合、5%の増加となる）。

(補遺 1 地域気候モデル NHRCM の気候再現性)

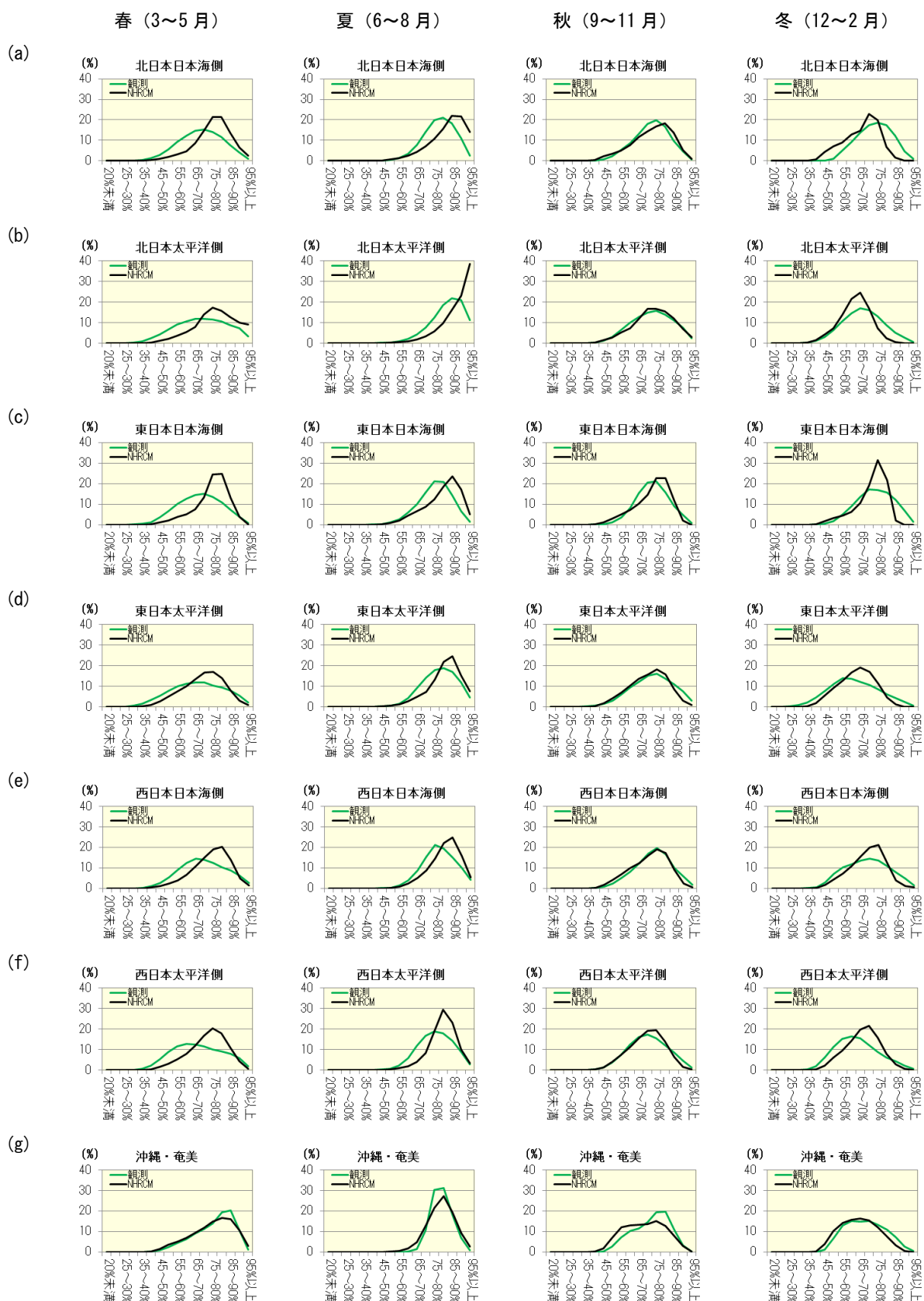


図 A1.4-1 地域毎の相対湿度の出現頻度 (地域気候モデルと観測の比較)

(a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

A1.5 全天日射量の再現性

表 A1.5-1 は、1 日あたりの全天日射量について地上気象観測（65 地点）による観測値と地域気候モデルによる現在気候の再現値を地域別に比較したものである。年間では北日本と東日本、西日本日本海側で正のバイアスがある。季節別でも概ね正のバイアスがあるが、秋や冬はバイアスが小さく、夏は明確なバイアスがみられない地域が多い。また、夏の沖縄・奄美では負のバイアスとなっている。一部を除きバイアスは概ね 2MJ/m²である³。

図 A1.5-1 は、各地域における日全天日射量の出現頻度を観測と地域気候モデルで比較したものである。小さい階級別値で観測に比べて地域気候モデルの頻度が低くなっており、これが正のバイアスの一因と考えられる。他の階級では各季節・地域ともに分布の違いをよく表現している。

表 A1.5-1 地域毎の 1 日あたりの全天日射量の再現性比較（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 MJ/m²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。

	年	春	夏	秋	冬
全国	1.04(0.68)	1.94(0.79)	-0.02(1.39)	1.06(0.69)	0.85(0.68)
北日本日本海側	1.04(0.30)	1.50(0.46)	0.71(0.55)	1.05(0.25)	0.75(0.38)
北日本太平洋側	0.80(0.51)	1.27(0.52)	0.62(1.01)	0.82(0.41)	0.22(0.35)
東日本日本海側	1.24(0.13)	2.04(0.13)	0.51(0.12)	1.26(0.17)	0.82(0.32)
東日本太平洋側	1.46(0.79)	2.67(0.84)	0.43(1.40)	1.32(0.69)	0.91(0.58)
西日本日本海側	1.40(0.34)	2.41(0.44)	0.12(0.70)	1.58(0.31)	1.07(0.39)
西日本太平洋側	0.74(0.78)	1.81(0.73)	-0.96(0.97)	0.92(0.70)	0.74(0.79)
沖縄・奄美	0.21(0.99)	1.77(1.03)	-3.02(1.30)	-0.10(1.21)	2.11(0.74)

³ 全天日射量の予測は雲量の予測に左右される。地域気候モデルの雲量予測は不確実性が大きいいため、全天日射量の再現性に影響を与えている可能性がある。

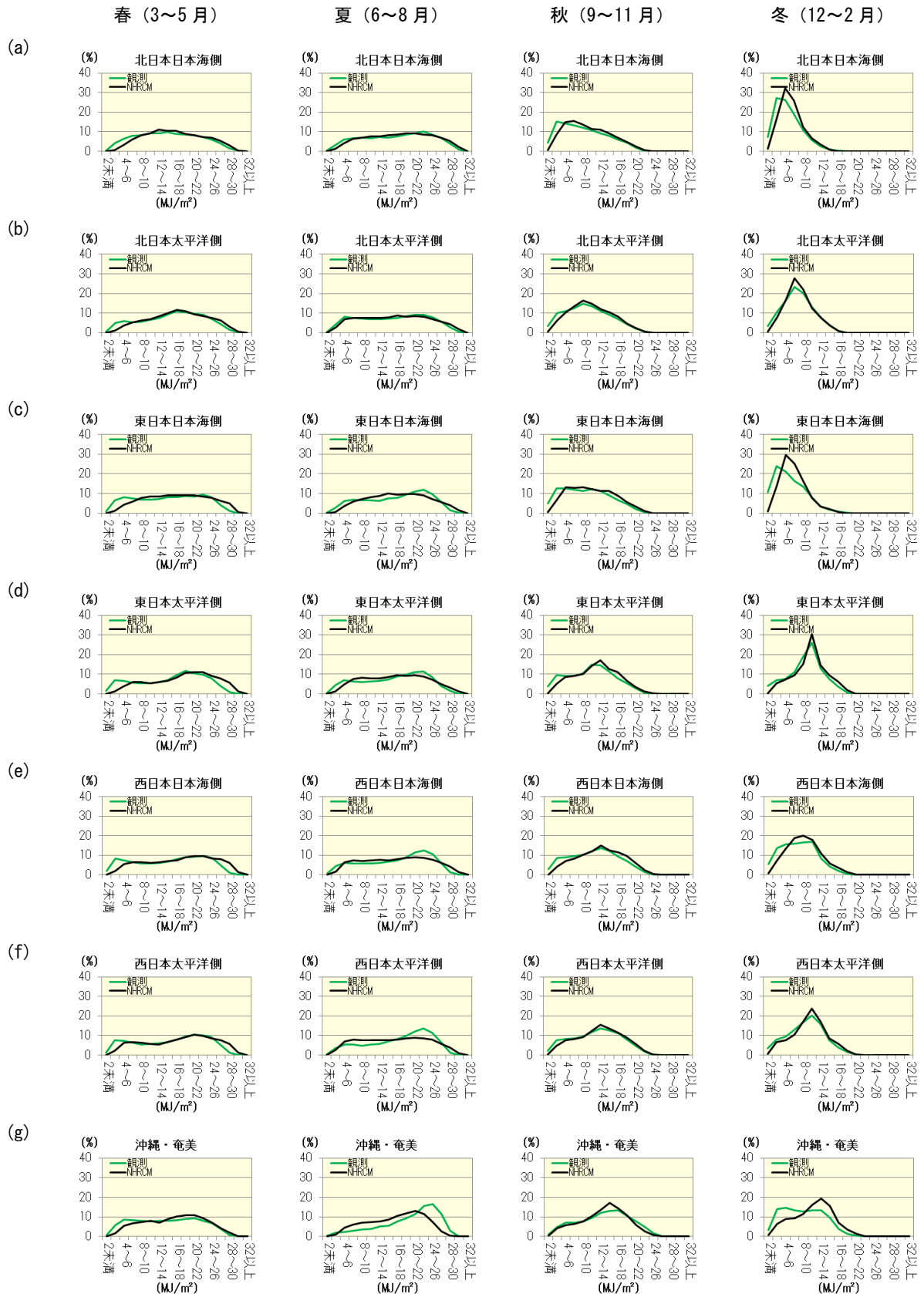


図 A1.5-1 地域毎の全天日射量の出現頻度（地域気候モデルと観測の比較）

(a)：北日本日本海側、(b)：北日本太平洋側、(c)：東日本日本海側、(d)：東日本太平洋側、
 (e)：西日本日本海側、(f)：西日本太平洋側、(g)：沖縄・奄美

A1.6 鉛直安定度の再現性

鉛直安定度には様々な指数があるが、本書では EHI と SWEAT を用いて解析している。気候値の算出期間は 1988～1999 年である。これらの指数の詳細は 5.3 を参照されたい。

EHI の再現性については、表 A1.6-1 に高層気象観測（16 地点）による観測値と地域気候モデルによる現在気候の再現値を地域別に比較したものを示した。夏に北日本日本海側と西日本太平洋側で正、沖縄・奄美で負のバイアスがあるほかは、明瞭なバイアスはない。また、図 A1.6-1 に出現頻度を観測と地域気候モデルで比較したものを示した。出現頻度では 0.2 から 1.0 の範囲で地域気候モデルが多い地域・季節が多いが、分布の形状は冬の西日本太平洋側を除いて大きな違いはない。なお、出現頻度についてはスーパーセルや竜巻の発達・発生の可能性が低い 0.2 未満が圧倒的に多いことから、0.2 以上について比較した。

SWEAT の再現性については、表 A1.6-2 に高層気象観測（16 地点）による観測値と地域気候モデルによる現在気候の再現値を地域別に比較したものを示した。夏の沖縄・奄美の負のバイアスと冬の西日本太平洋側の正のバイアスが絶対値で 10 以上であるほかは、大きなバイアスはない。また、図 A1.6-2 に出現頻度を観測と地域気候モデルで比較したものを示した。出現頻度は各季節・地域ともに表 A1.6-2 のバイアスをよく表現している。

表 A1.6-1 地域毎の EHI 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。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。また、観測値の欠測等により標準偏差を求められない場合は空欄としている。

	年	春	夏	秋	冬
全国	0.0054(0.0290)	-0.0042(0.0225)	-0.0025(0.0520)	0.0072(0.0353)	0.0180(0.0362)
北日本日本海側	0.0087(0.0070)	-0.0004(0.0042)	0.0235(0.0165)	-0.0127(0.0078)	-0.0011(0.0016)
北日本太平洋側	0.0111(0.0066)	-0.0025(0.0062)	0.0161(0.0328)	-0.0218(0.0000)	0.0058(0.0089)
東日本日本海側	0.0106()	0.0001()	0.0202()	0.0176()	0.0047()
東日本太平洋側	-0.0038(0.0048)	-0.0015(0.0168)	-0.0059(0.0472)	0.0024(0.0022)	0.0234()
西日本日本海側	0.0103(0.0179)	-0.0034(0.0281)	0.0254(0.0322)	-0.0192(0.0069)	0.0033(0.0006)
西日本太平洋側	0.0389(0.0604)	0.0252(0.0356)	0.0372(0.0269)	0.0388(0.0879)	0.0610(0.0886)
沖縄・奄美	-0.0160(0.0366)	0.0057(0.0366)	-0.0689(0.0559)	-0.0263(0.0333)	0.0260(0.0384)

表 A1.6-2 地域毎の SWEAT 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。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。また、観測値の欠測等により標準偏差を求められない場合は空欄としている。

	年	春	夏	秋	冬
全国	-6.07(11.35)	-3.16(11.82)	-11.52(19.81)	-7.64(13.36)	-1.30(13.87)
北日本日本海側	-4.36(1.85)	-10.62(18.54)	2.77(7.36)	-4.05(4.33)	-5.54(1.63)
北日本太平洋側	-11.85(19.77)	-7.40(14.10)	-0.67(2.37)	-22.02(30.43)	-17.32(32.20)
東日本日本海側	1.44()	8.26()	-1.81()	-4.83()	4.14()
東日本太平洋側	-6.17(14.85)	-6.57(11.04)	-12.69(25.87)	-11.13(14.84)	5.74(6.85)
西日本日本海側	-0.32(0.74)	3.79(3.06)	-8.40(1.62)	0.30(1.95)	7.37(2.49)
西日本太平洋側	1.79(2.60)	0.79(11.14)	-4.74(7.72)	0.24(5.03)	10.88(1.96)
沖縄・奄美	-13.10(16.24)	-2.03(12.42)	-34.45(25.05)	-10.02(15.34)	-5.39(13.84)

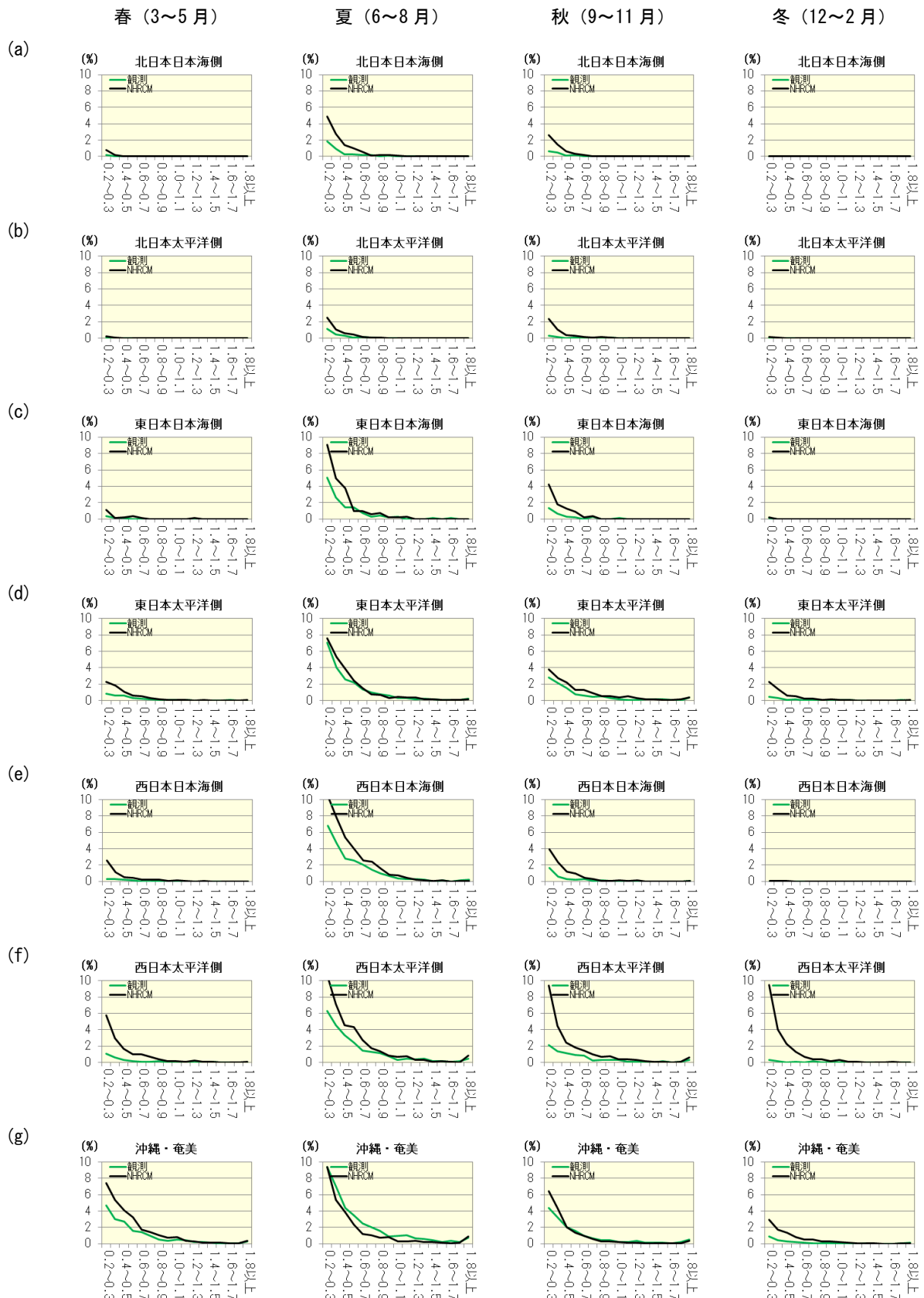


図 A1.6-1 地域毎の EHI の出現頻度 (地域気候モデルと観測の比較)

(a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

(補遺 1 地域気候モデル NHRCM の気候再現性)

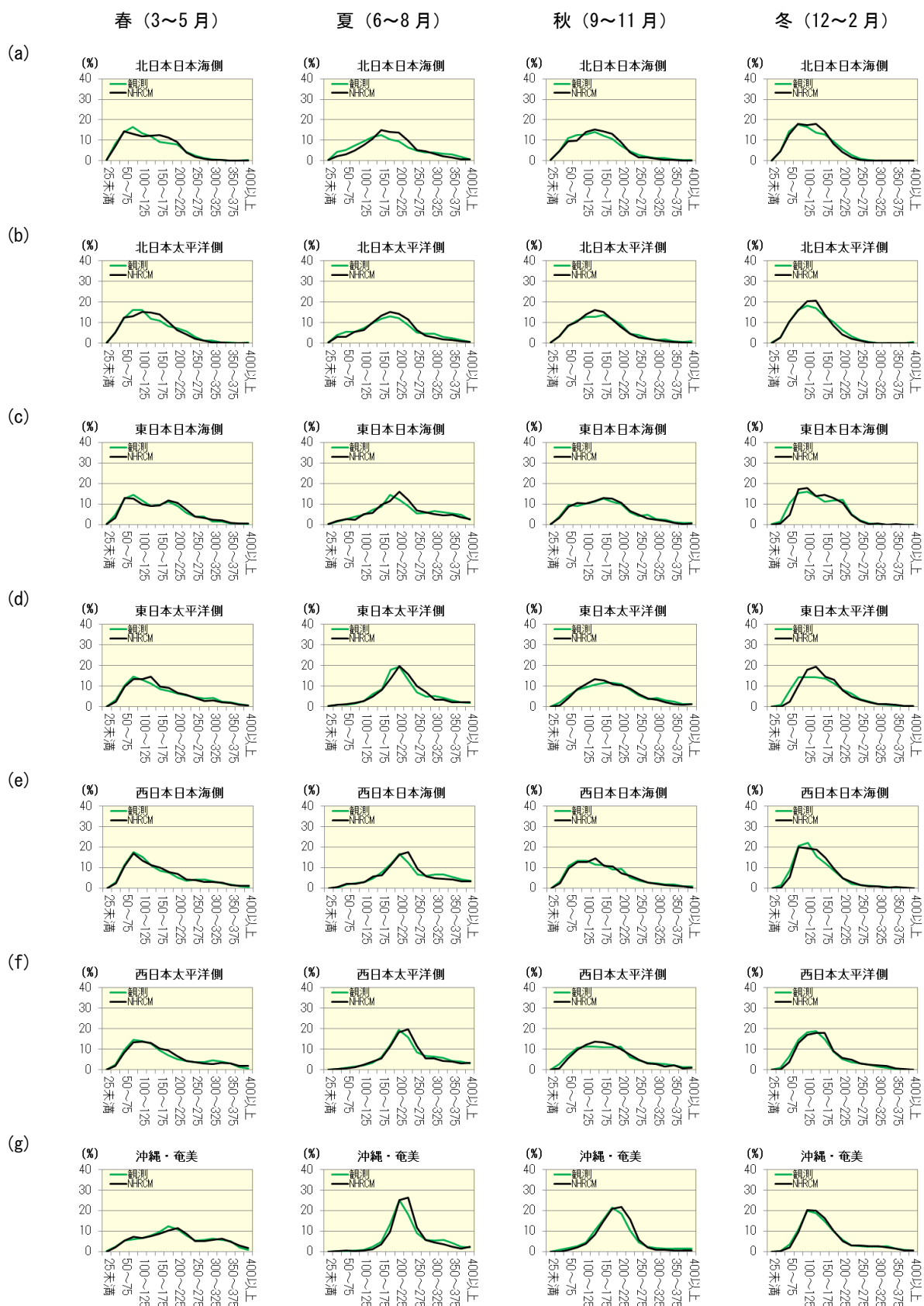


図 A1.6-2 地域毎の SWEAT の出現頻度 (地域気候モデルと観測の比較)

(a) : 北日本日本海側、(b) : 北日本太平洋側、(c) : 東日本日本海側、(d) : 東日本太平洋側、
 (e) : 西日本日本海側、(f) : 西日本太平洋側、(g) : 沖縄・奄美

A1.7 補正の方法

気温の階級別日数や大雨の出現頻度等、閾値が関係する統計量の変化は、気候モデルの出力値と現実の観測の出現頻度が十分に一致していないと、バイアスが増幅されて変化量の算出に影響し、適切な予測値を得られない場合がある。このため、2.3 で示す気温の階級別日数の変化や、3.2 で示す大雨や強雨の変化の予測は、モデル出力値のバイアスを補正 (Piani et al., 2010a; Piani et al., 2010b) した上で算出している。

A1.7.1 気温の補正

気候モデルでは、ある月における日平均気温・日最高気温・日最低気温は、十分に長い期間の統計をとると、観測と同様に正規分布に近い出現頻度分布となる傾向がある。この特性を踏まえ、観測値と、地域気候モデルの対応する格子点における現在気候を比較して、日平均気温・日最高気温・日最低気温を補正するが、これらの要素を独立に補正すると、日較差 (日最高気温と日最低気温の差) と歪度 (日平均気温と日最低気温の差を日較差で割ったもの) に大きな相対誤差が生じる可能性がある。このため、各要素を以下の手順で補正している。観測値と現在気候の比較から求めた補正係数を、近未来気候、将来気候についても同様に適用する。

- ① 現在気候に対応する期間における観測値の日平均気温を、地点別・月別に高い方から順に並べかえる。
- ② 各観測点に対応するモデル格子点の現在気候再現値の日平均気温を、地点別・月別に高い方から順に並べかえる。
- ③ 観測値とモデル格子点の現在気候再現値を線形関係と仮定し、最小自乗法により補正係数を求めて補正する。
- ④ 日較差、歪度についても日平均気温と同様に、①～③の手順で補正係数を求めて補正する。
- ⑤ 補正した日平均気温、日較差、歪度から、日最高気温、日最低気温の補正值を求める。

A1.7.2 降水量の補正

気候モデルでは、観測に比べて強い降水と無降水の頻度が少なく、弱い降水の頻度が相対的に多く現れやすい傾向がある。このような特性を踏まえ、観測値と、地域気候モデルの対応する格子点における現在気候を比較して、降水量を下記の手順で補正している。求めた補正係数は、近未来気候、将来気候についても同様に適用する。

- ① 現在気候に対応する期間における観測値の 0.5 ミリ以上の 1 時間降水量を、地点別・月別に多い方から順に並べかえる。
- ② 各観測点に対応するモデル格子点の現在気候再現値の 1 時間降水量を、地点別・月別に多い方から順に並べかえる。
- ③ ①と②の総サンプル数を少ない方に合わせる。(総サンプル数の多い方を、少ない方のサンプル数と同じ数まで打ち切る。)
- ④ サンプル数を揃えた観測値とモデル格子点の現在気候再現値を線形関係と仮定し、最小自乗法により補正係数を求めて補正する。
- ⑤ 強い降水 (95 パーセンタイル値以上) に対しては、ガンマ分布を適用する。観測値、モデル再現値とも、強い降水の出現頻度がガンマ分布の確率密度関数

(補遺1 地域気候モデル NHRCM の気候再現性)

$$f(x) = \frac{\exp\left(-\frac{x}{\theta}\right) x^{(k-1)}}{\Gamma(k)\theta^k}$$

に従うと仮定する。ここで、 x は降水量、 k, θ はガンマ分布の形状とスケールを示す母数である。観測データ、モデル再現値からそれぞれガンマ分布の母数を推定する。

- ⑥ モデル降水量から、⑤で推定したガンマ分布における累積頻度を求める。求めた累積頻度が観測値から推定したガンマ分布において相当する降水量を求め（図 A1.7-1）、これを補正值とする。
- ⑦ 近未来気候、将来気候の降水量に対しても、⑥の変換を適用して補正值を求める。

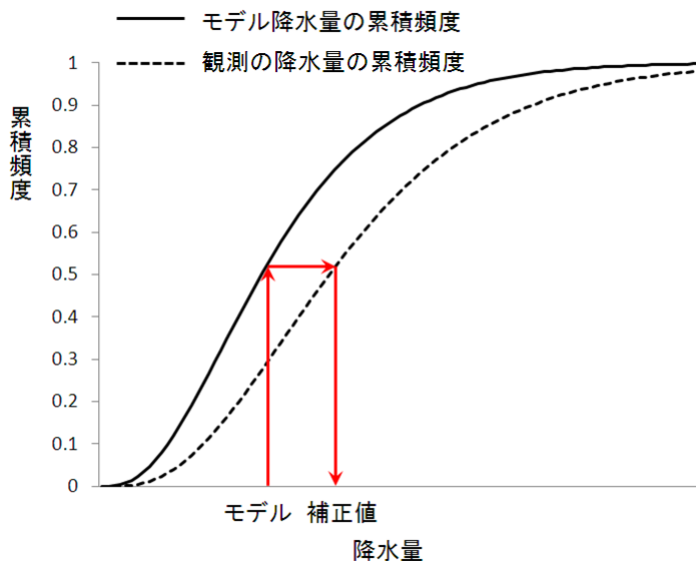


図 A1.7-1 ガンマ分布を適用した降水量の補正

A2 全球気候モデル MRI-AGCM3.2 における循環場の変化

ここでは、非静力学地域気候モデル (NHRCM) による将来予測実験において境界値を作成するために用いた全球気候モデル (MRI-AGCM3.2) の出力結果から、日本付近の循環場についてその将来変化の特徴を概説する。全球気候モデルの仕様・実験設定については 1.3.3 を参照されたい。対象とする気象要素は気温 (850hPa 面)、風速 (200hPa 面)、海面気圧、比湿、海面水温、海氷密度であり、各要素の近未来・将来における変化を季節ごと (3 か月平均) に示す¹。

なお、全球気候モデルによる現在気候の再現性については文部科学省研究開発局 (2012) や Mizuta et al. (2012) を参照のこと。

A2.1 気温 (850hPa 面)

全球気候モデルにおける気温 (850hPa 面) の将来変化を図 A2.1 に示す。

近未来・将来ともに気温は上昇しており、将来ほどその増加量は大きい。季節・地域により分布に差異が見られる。春については、ユーラシア大陸東部から日本付近にかけて昇温が相対的に大きい。夏については、北緯 40 度帯及びカムチャツカ半島付近で相対的に昇温が大きい。秋・冬については、ユーラシア大陸やオホーツク海付近で相対的に昇温が大きい。

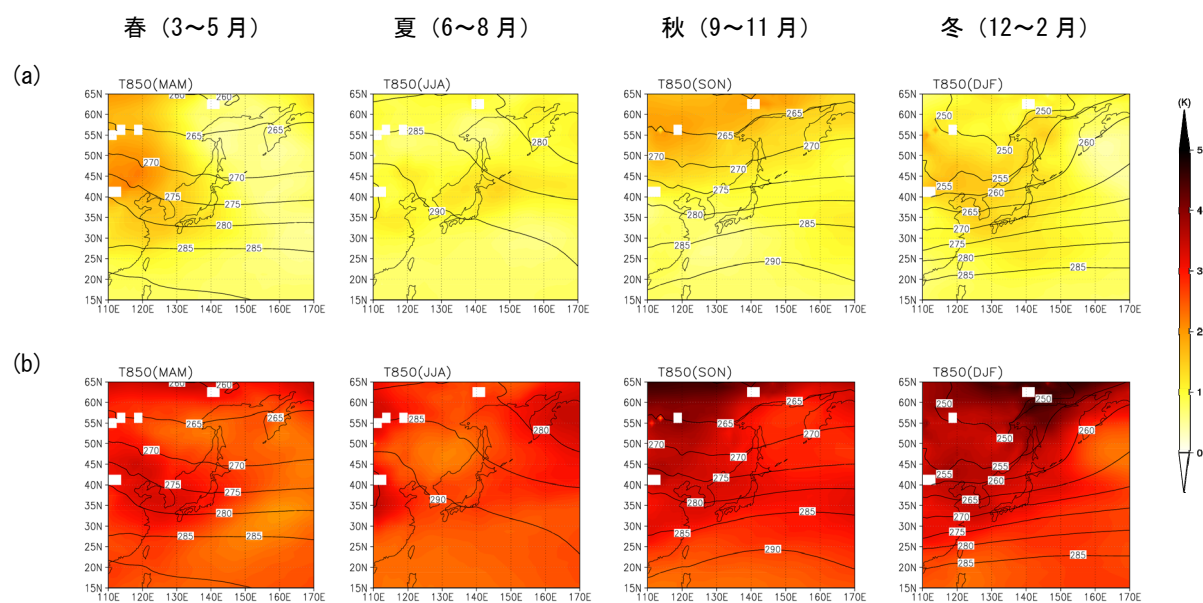


図 A2.1 気温 (850hPa 面) の将来変化

左から順に、春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月)、冬 (12~2 月)。単位は K、等値線間隔は 5K である。

(a) 基準気候 (1976~1995 年平均; 等値線) 及び近未来 (2016~2035 年平均) における変化 (陰影)。

(b) 基準気候 (1976~1995 年平均; 等値線) 及び将来 (2076~2095 年平均) における変化 (陰影)。

¹ 気温、風速、比湿については全球気候モデルの出力結果を水平 2.5 度格子に内挿したデータを用いた。海面気圧、海面水温、海氷密度についてはモデルの出力値、あるいは数値実験においてモデルに与えたデータを用いた。

A2.2 風速 (200hPa 面)

全球気候モデルにおける風速 (200hPa 面) の将来変化を図 A2.2 に示す。

秋から春にかけては、日本上空のジェットが極側で強まると予測されており、その変化量は近未来より将来の方が大きい。このようなジェットの極側シフト (Yin, 2005) はこれまで多くの研究で指摘されており、その要因として、温暖化に伴うハドレー循環の拡大 (Lu et al., 2008)、対流圏界面の上昇 (Lorenz and DeWeaver, 2007)、中緯度帯における擾乱活動の変化 (Hu et al., 2000; Rivière, 2011) 等が挙げられている。

夏の日本付近のジェットは、近未来においては日本の北側 (北緯 50 度付近) と南側 (北緯 20 度付近) で強まる一方、将来においては現在のジェット軸の付近から南側で強まると予測されている。日本の南側でジェットが強まることは Hirahara et al. (2012) で指摘されており、その要因として熱帯の循環場変化に伴うロスビー波応答 (Matsuno-Gill パターン) の変化が挙げられている。

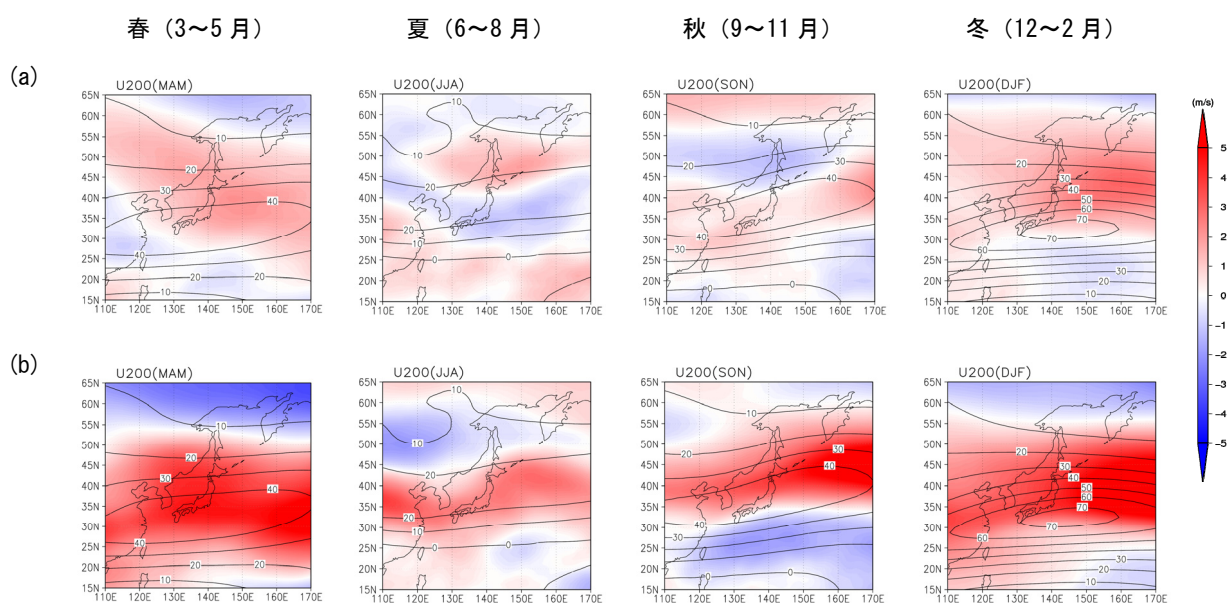


図 A2.2 風速 (200hPa 面) の将来変化

左から順に、春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月)、冬 (12~2 月)。単位は m/s、等値線間隔は 10m/s である。

(a) 基準気候 (1976~1995 年平均; 等値線) 及び近未来 (2016~2035 年平均) における変化 (陰影)。

(b) 基準気候 (1976~1995 年平均; 等値線) 及び将来 (2076~2095 年平均) における変化 (陰影)。

A2.3 海面気圧

全球気候モデルにおける海面気圧の将来変化を図 A2.3 に示す。

春については、日本の南海上で気圧が上昇するものの、オホーツク海からベーリング海の領域では気圧が低下すると予測されている。後者については、後述するアリューシャン低気圧の北偏が関係している可能性がある。

夏については、近未来では西日本から日本の東海上で気圧が上昇し、オホーツク海で低下する一方、将来では日本の南の太平洋上で上昇し、日本付近からオホーツク海で低下すると予測されている。日本の南で高気圧性循環が強まることは Kusunoki et al. (2006) 等の将来予測実験で指摘されている。また将来における日本付近での気圧の低下は、梅雨明けの遅れ (Kitoh and Uchiyama, 2006; Kusunoki et al., 2011 等) に伴い太平洋高気圧の張り出しが弱くなることに関係している可能性がある。

秋から冬にかけては、シベリア高気圧の弱まりと、アリューシャン低気圧の北偏 (Kimoto, 2005; Hori and Ueda, 2006) が予測されており、どちらも将来ほどその変化が大きい。日本付近の冬の循環場はいわゆる西高東低型 (西のシベリア高気圧と東のアリューシャン低気圧により北西の季節風が卓越する) で特徴づけられるが、将来この気圧勾配が弱まることで日本付近の北西季節風は弱まると考えられる。

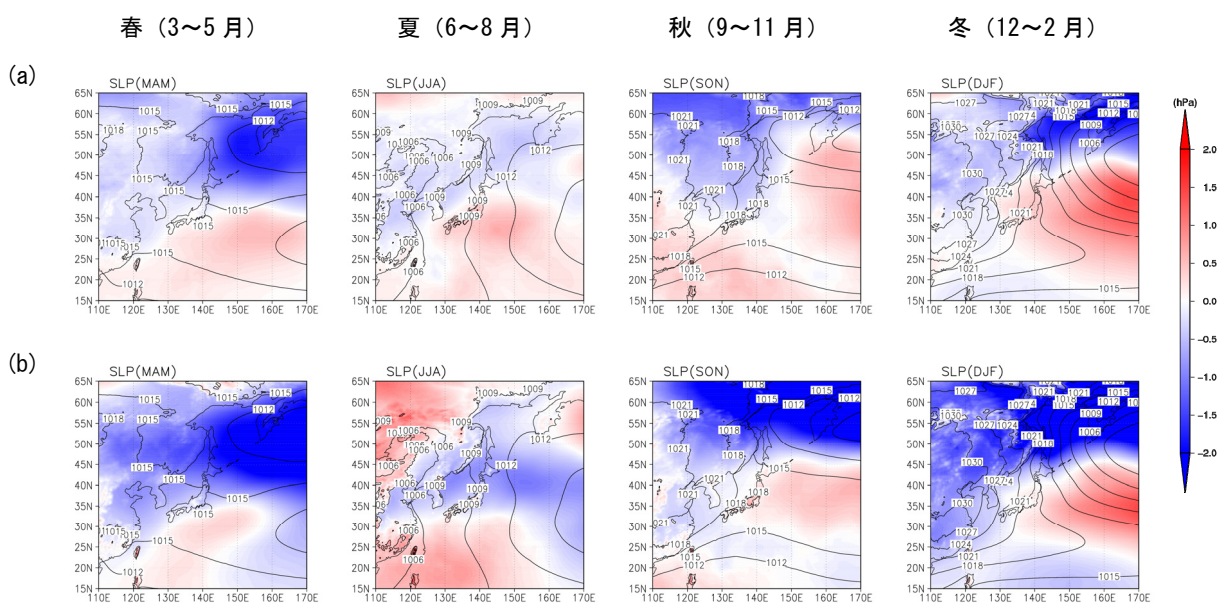


図 A2.3 海面気圧の将来変化

左から順に、春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月)、冬 (12~2 月)。単位は hPa、等値線間隔は 3hPa である。

(a) 基準気候 (1976~1995 年平均; 等値線) 及び近未来 (2016~2035 年平均) における変化 (陰影)。

(b) 基準気候 (1976~1995 年平均; 等値線) 及び将来 (2076~2095 年平均) における変化 (陰影)。

A2.4 比湿 (850hPa 面)

全球気候モデルにおける比湿 (850hPa 面)²の将来変化を図 A2.4 に示す。

どの季節においても、比湿は熱帯域を中心に増加しており、将来ほど変化量が多い。中緯度帯の日本付近でも比湿は増加しており、特に夏季の上昇が大きい。下層における水蒸気量の変化は、地表付近の気温や、海面水温の上昇によるものと考えられる。また、夏季の降水や冬季の降雪の増加は、下層における水蒸気量の増加に関係している可能性がある。

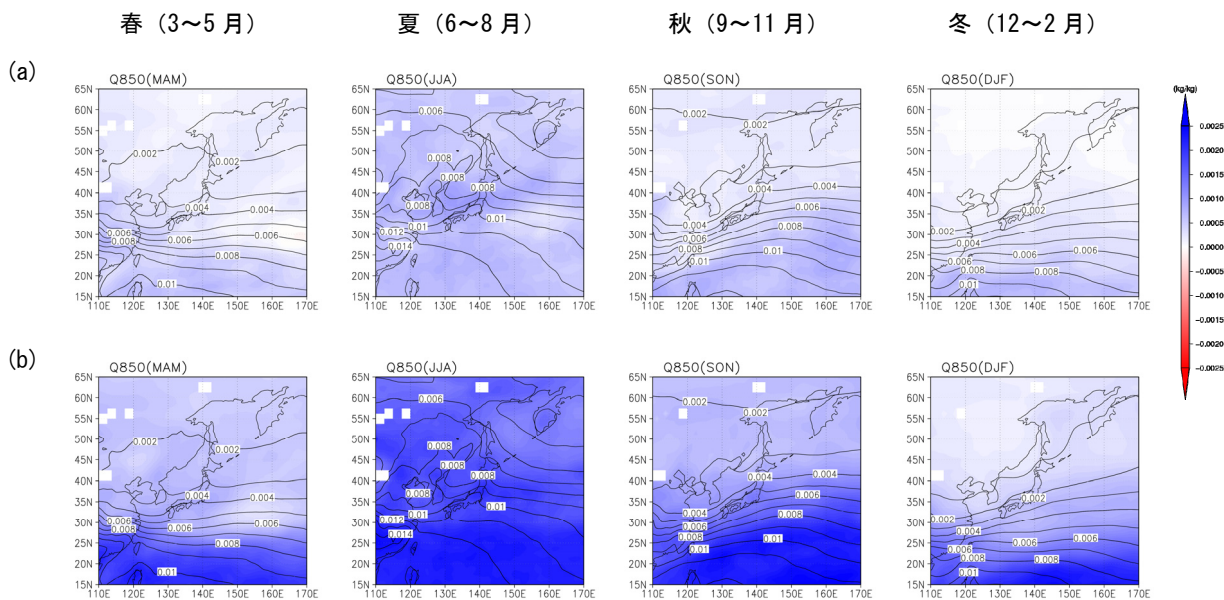


図 A2.4 比湿 (850hPa 面) の将来変化

左から順に、春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月)、冬 (12~2 月)。単位は kg/kg、等値線間隔は 0.001kg/kg である。

(a) 基準気候 (1976~1995 年平均；等値線) 及び近未来 (2016~2035 年平均) における変化 (陰影)。

(b) 基準気候 (1976~1995 年平均；等値線) 及び将来 (2076~2095 年平均) における変化 (陰影)。

² ここでは下層の水蒸気量を表すために用いた。

A2.5 海面水温

全球気候モデルに与えた海面水温の将来変化を図 A2.5 に示す。

近未来・将来ともにほとんどの海域で海面水温は上昇しており、将来ほどその変化が大きい。日本の東海上の黒潮続流域では相対的に昇温が大きいが、これには西太平洋の風応力の変化に伴う黒潮流速の増加 (Sakamoto et al., 2005) が関係している可能性がある。

オホーツク海の海面水温上昇は、夏・秋は全域でほぼ一様であるのに対し、春・冬はユーラシア大陸沿岸付近で相対的に小さい。海域による上昇量の違いには、オホーツク海を覆う海氷の量が関係している可能性がある。つまり、海氷の少ない夏・秋は気温の上昇等を背景として他の海域と同じように昇温するが、春・冬においては海氷の多い海域で昇温が抑えられると推察される³。

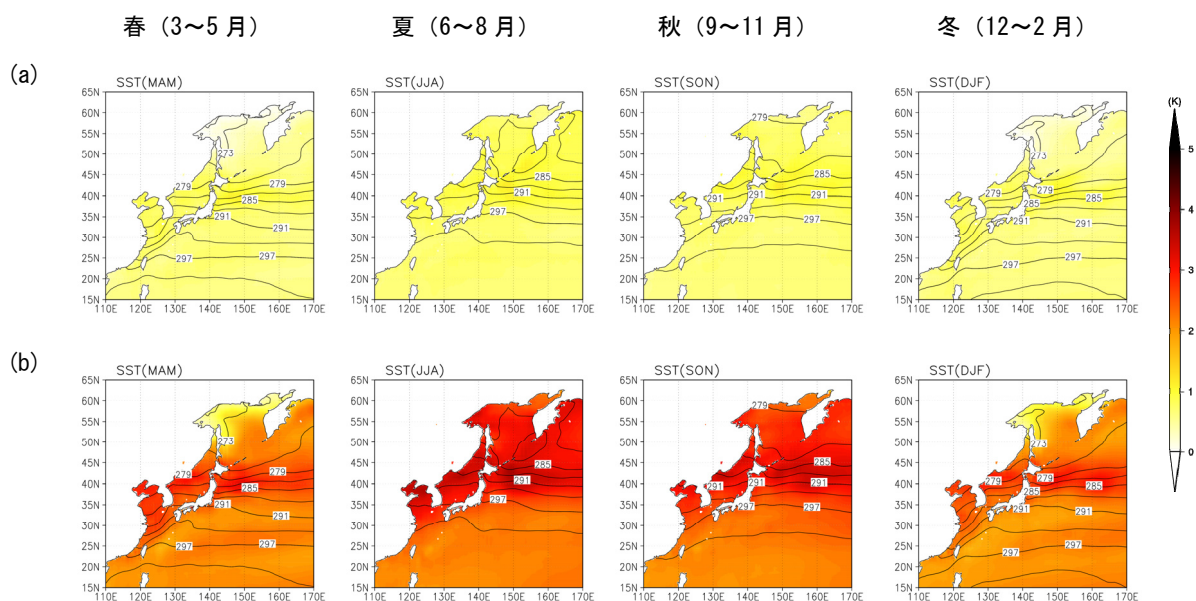


図 A2.5 海面水温の将来変化

左から順に、春 (3~5月)、夏 (6~8月)、秋 (9~11月)、冬 (12~2月)。単位は K、等値線間隔は 3K である。

(a) 基準気候 (1976~1995 年平均; 等値線) 及び近未来 (2016~2035 年平均) における変化 (陰影)。

(b) 基準気候 (1976~1995 年平均; 等値線) 及び将来 (2076~2095 年平均) における変化 (陰影)。

³後述するようにオホーツク海は将来減少するが、ユーラシア大陸沿岸では減少してもまだ海氷が残っているため昇温が相対的に小さいと考えられる。

A2.6 海水密接度

海水密接度⁴の将来変化を図 A2.6 に示す。

オホーツク海の海氷は将来減少すると予測されており、将来のユーラシア大陸沿岸で特に減少量が大きい。

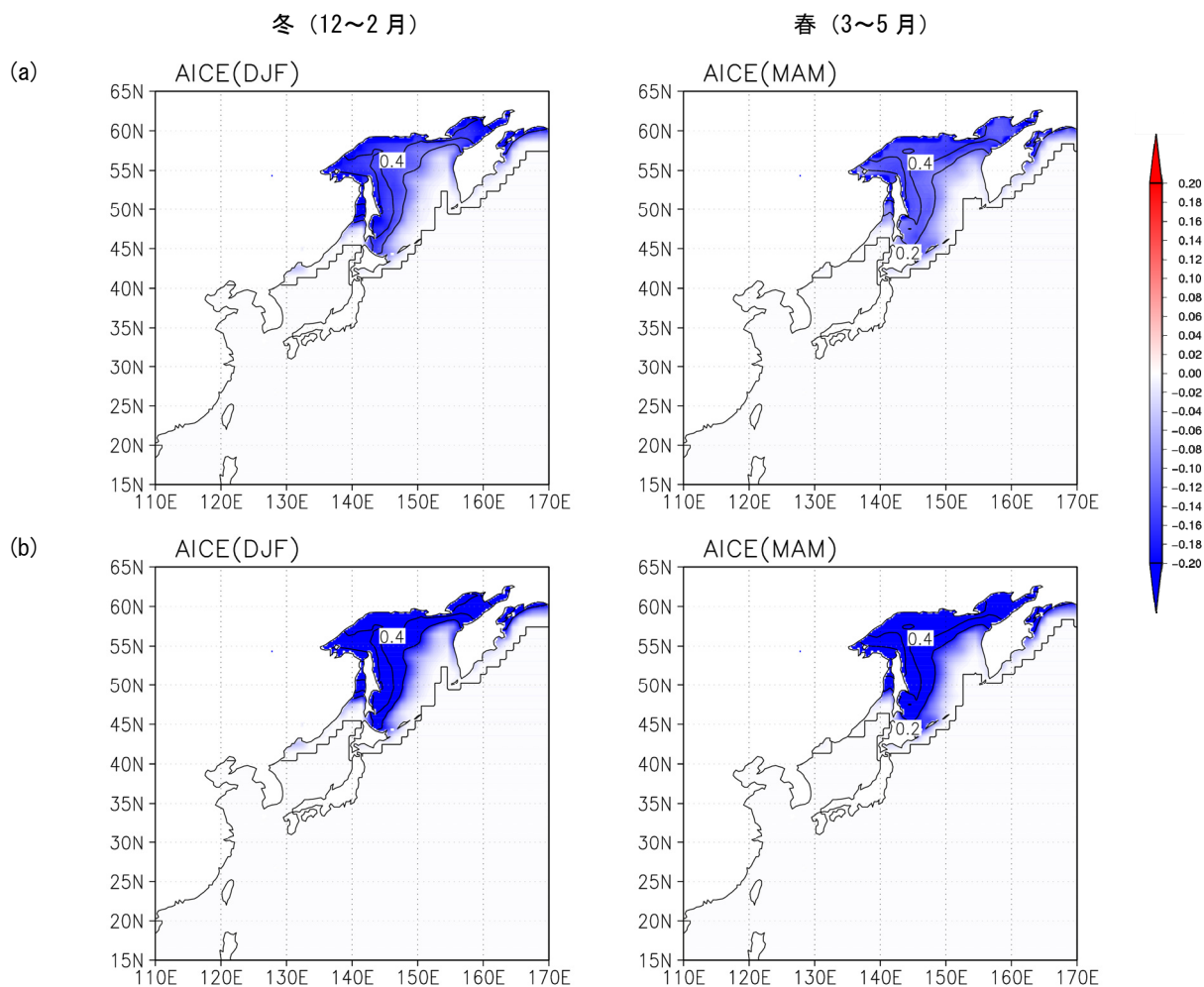


図 A2.6 海水密接度の将来変化。

左から順に、冬 (12~2月)、春 (3~5月)。等値線間隔は 0.2 である。

(a) 基準気候 (1976~1995 年平均；等値線) 及び近未来 (2016~2035 年平均) における変化 (陰影)。

(b) 基準気候 (1976~1995 年平均；等値線) 及び将来 (2076~2095 年平均) における変化 (陰影)。

⁴ 単位格子に占める海氷の割合を表す。0 が海氷の無い状態、1 が全面海氷に対応する。

A3 アメダス等の気候値

気温、降水、積雪・降雪、相対湿度、全天日射量について、本文中の現在気候と同じ期間(1980～1999年の20年)で平均した観測(アメダス、地上気象観測)の気候値を示す。

1章に示したように、気候モデルによる予測データには系統誤差を含むため、本文の2章から6章では予測値そのものを掲載するのではなく、現在気候からの変化量として示しているが、これらの変化量が実際の観測値との比較においてどの程度の大きさであるか把握することで予測結果の理解の助けになると考えられる。なお観測値は以下の図に示す以外に、気象庁HPの「過去の気象データ検索¹」から入手することもできるので、ご活用いただきたい。

¹ <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>

(補遺 3 アメダス等の気候値)

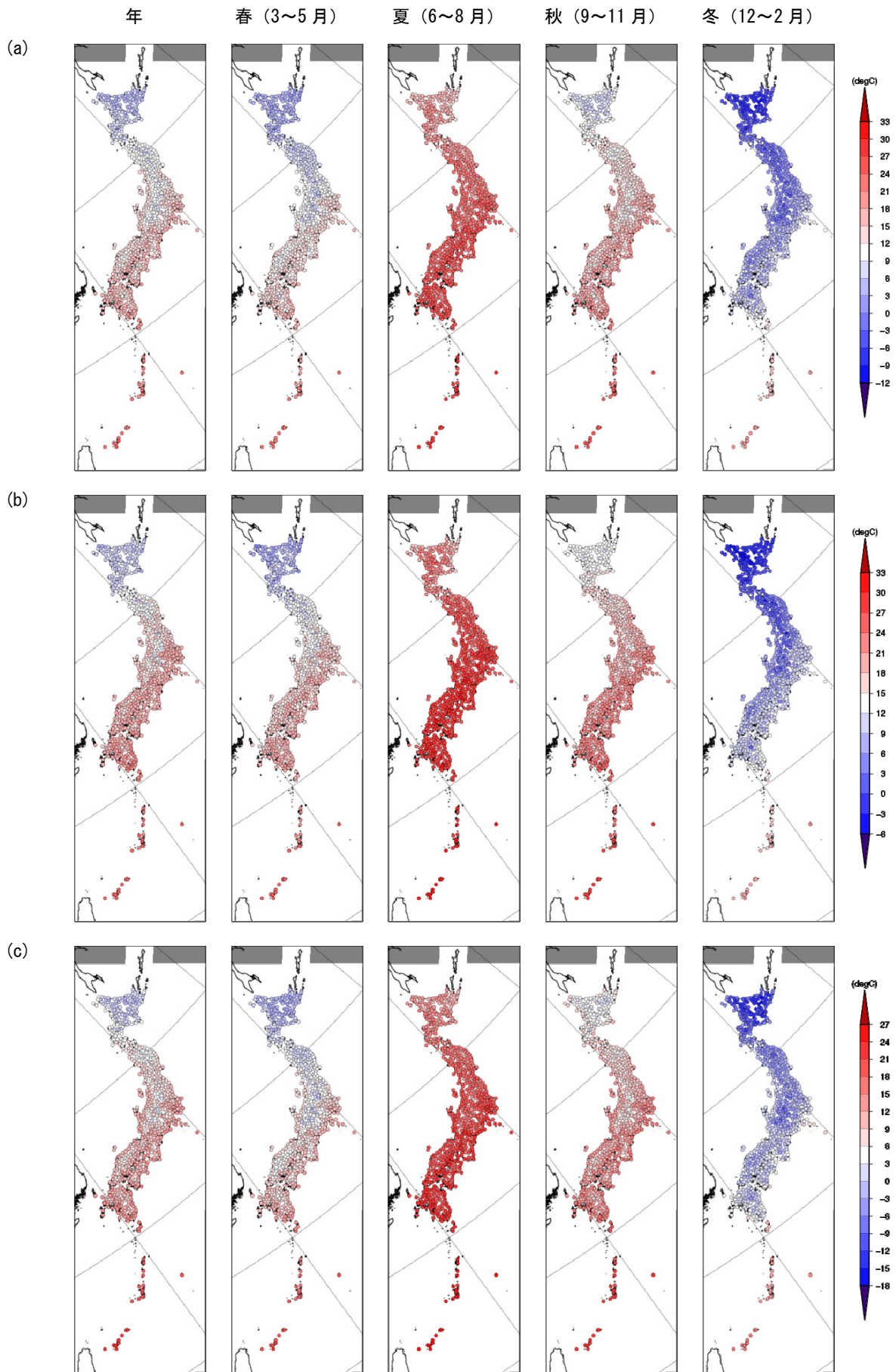


図 A3-1 気温の観測の気候値

(a) : 平均気温、(b) : 日最高気温の平均、(c) : 日最低気温の平均

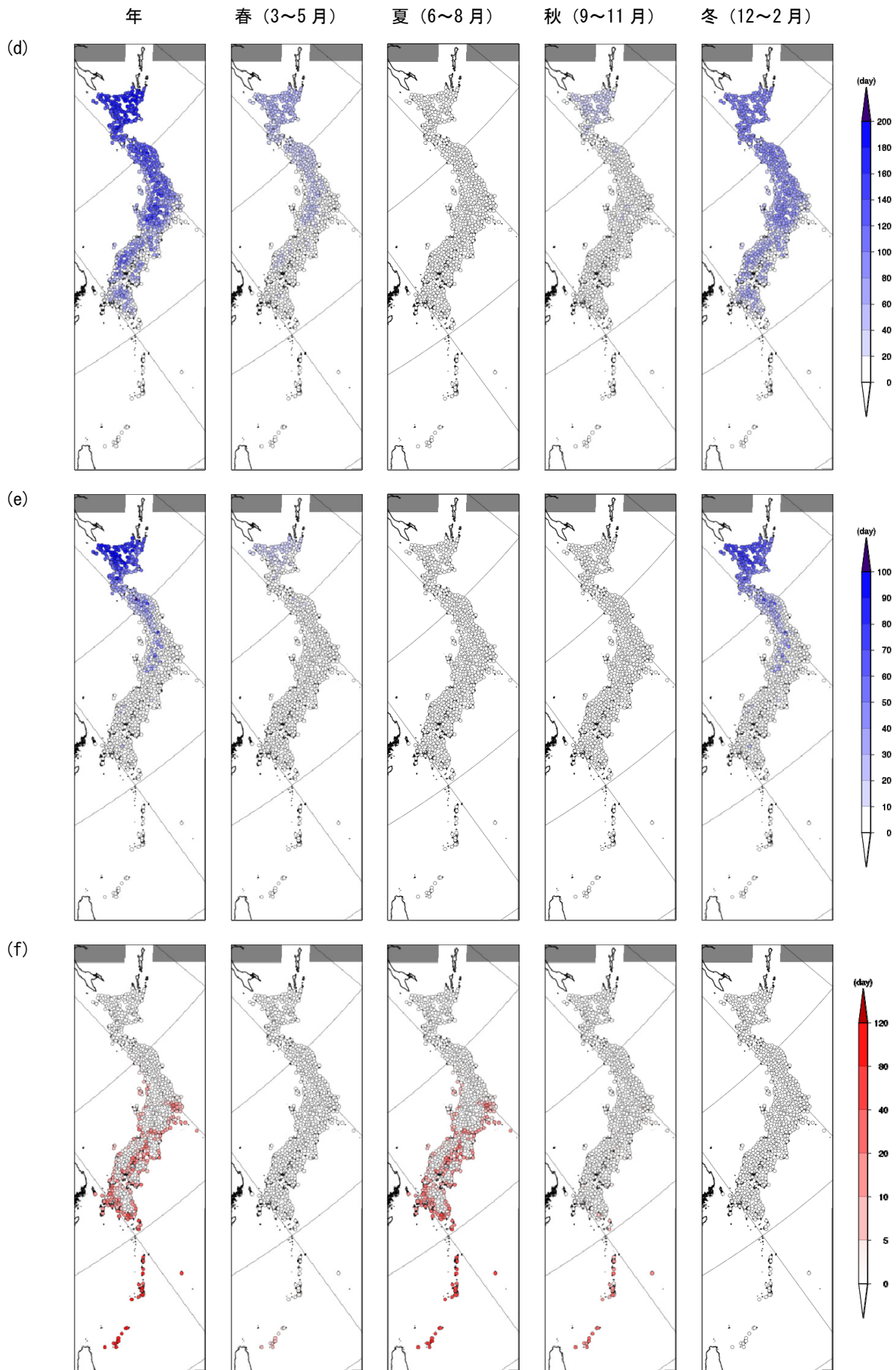


図 A3-1 気温の観測の気候値 (続き)

(d) : 冬日日数、(e) : 真冬日日数、(f) : 熱帯夜日数

(補遺3 アメダス等の気候値)

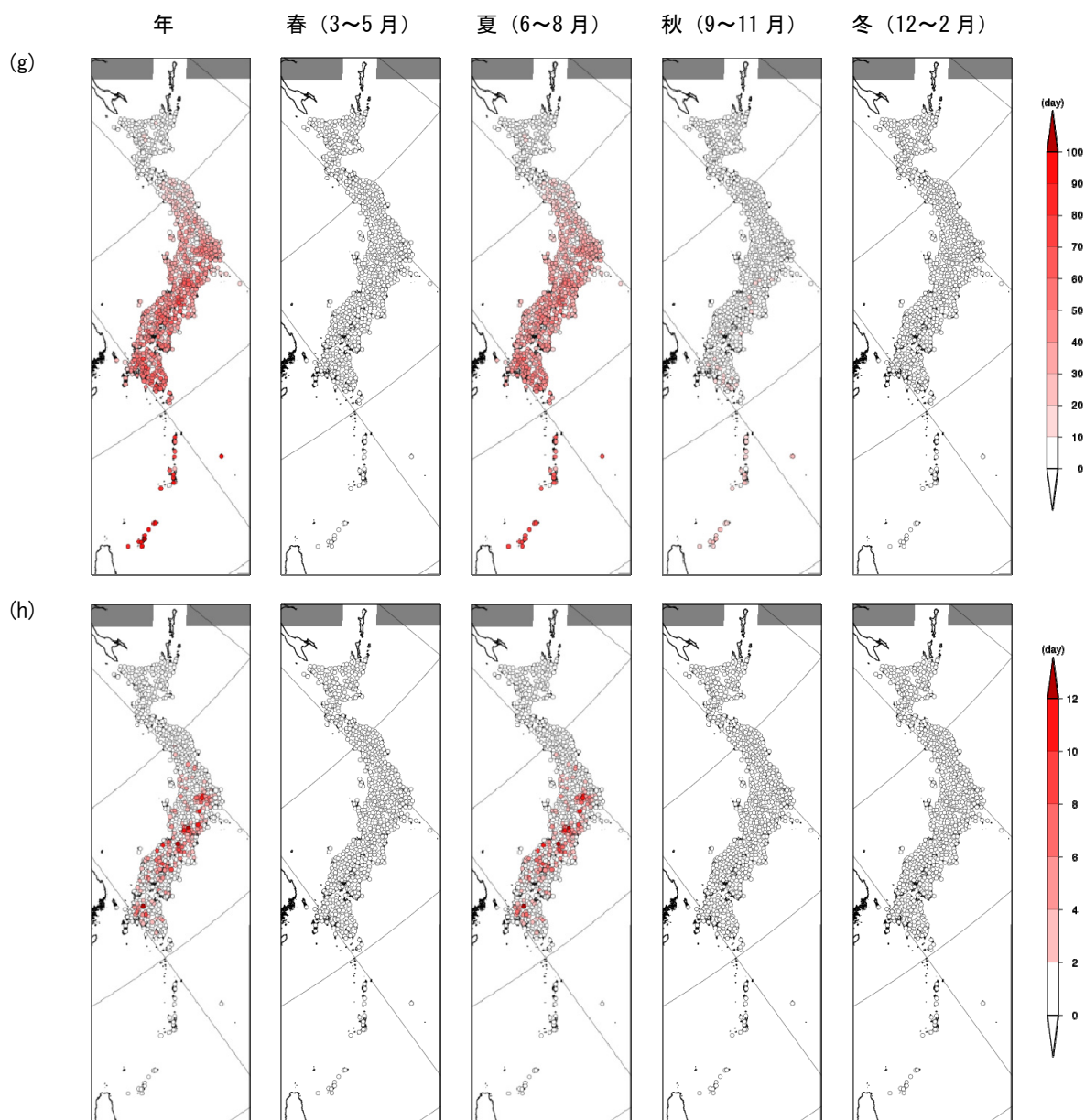


図 A3-1 気温の観測の気候値 (続き)

(g) : 真夏日日数、(h) : 猛暑日日数

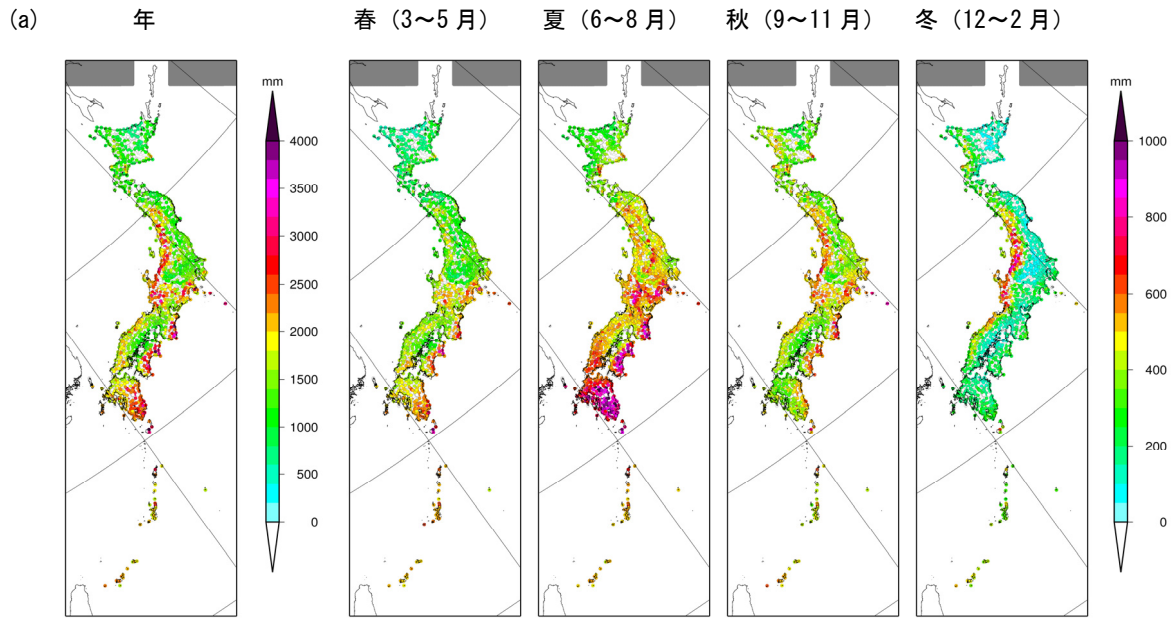


図 A3-2 降水の観測の気候値

年降水量(左)と季節別の降水量。

(b) 日降水量 100 ミリ以上 日降水量 200 ミリ以上

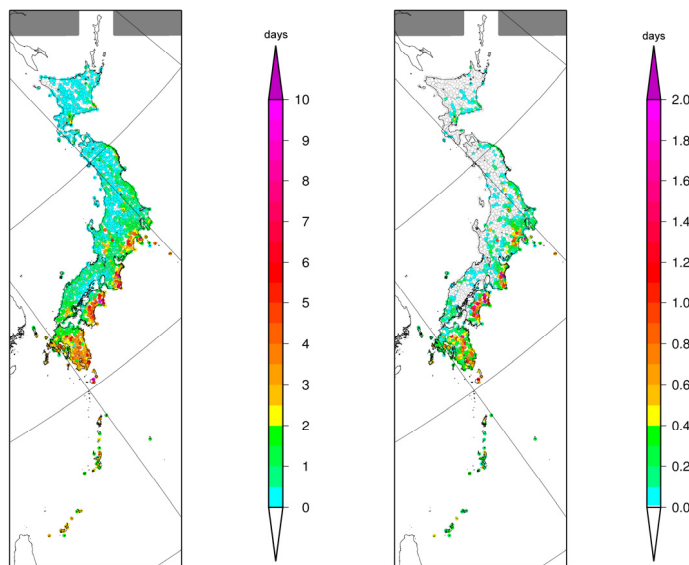


図 A3-2 降水の観測の気候値 (続き)

日降水量 100 ミリ以上(左)、200 ミリ以上(右)の年平均日数。

(補遺 3 アメダス等の気候値)

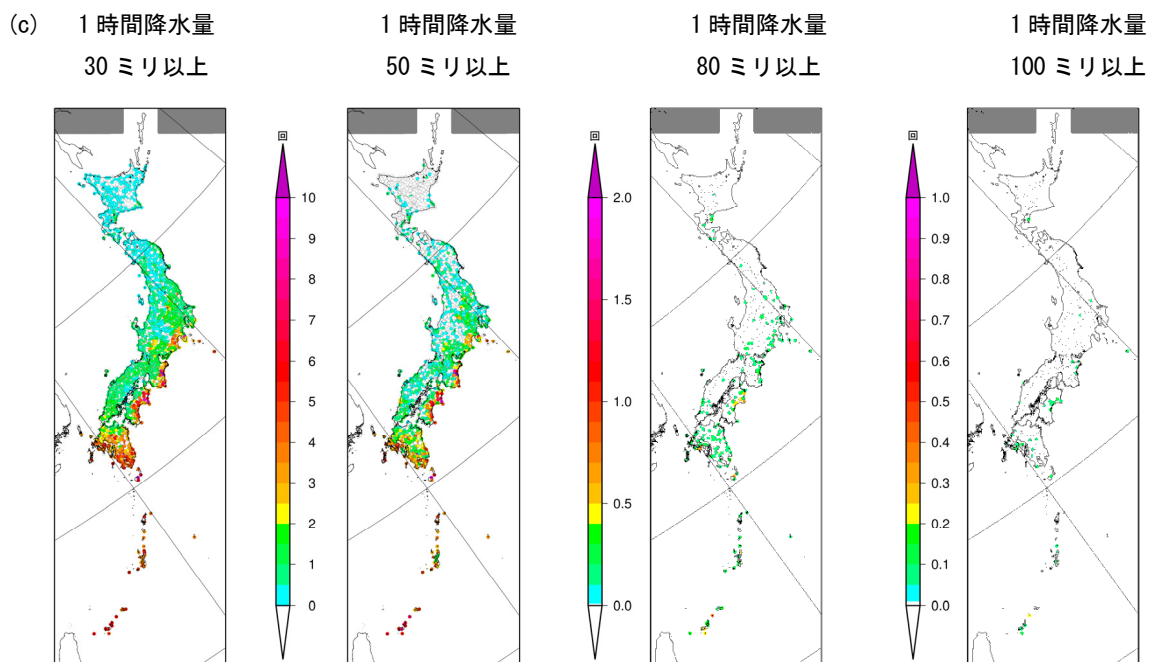


図 A3-2 降水の観測の気候値 (続き)

1時間降水量 30 ミリ以上、50 ミリ以上、80 ミリ以上、100 ミリ以上の年平均発生回数。

(d) 日降水量 1 ミリ未満

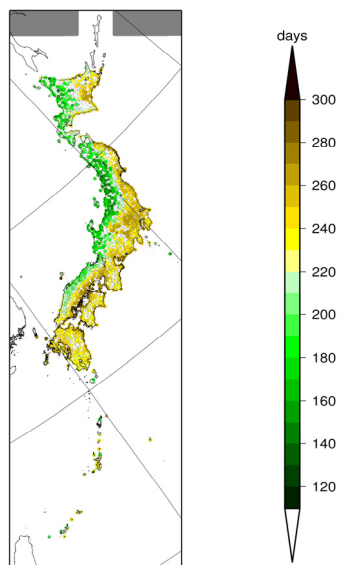


図 A3-2 降水の観測の気候値 (続き)

日降水量 1 ミリ未満の年平均日数。

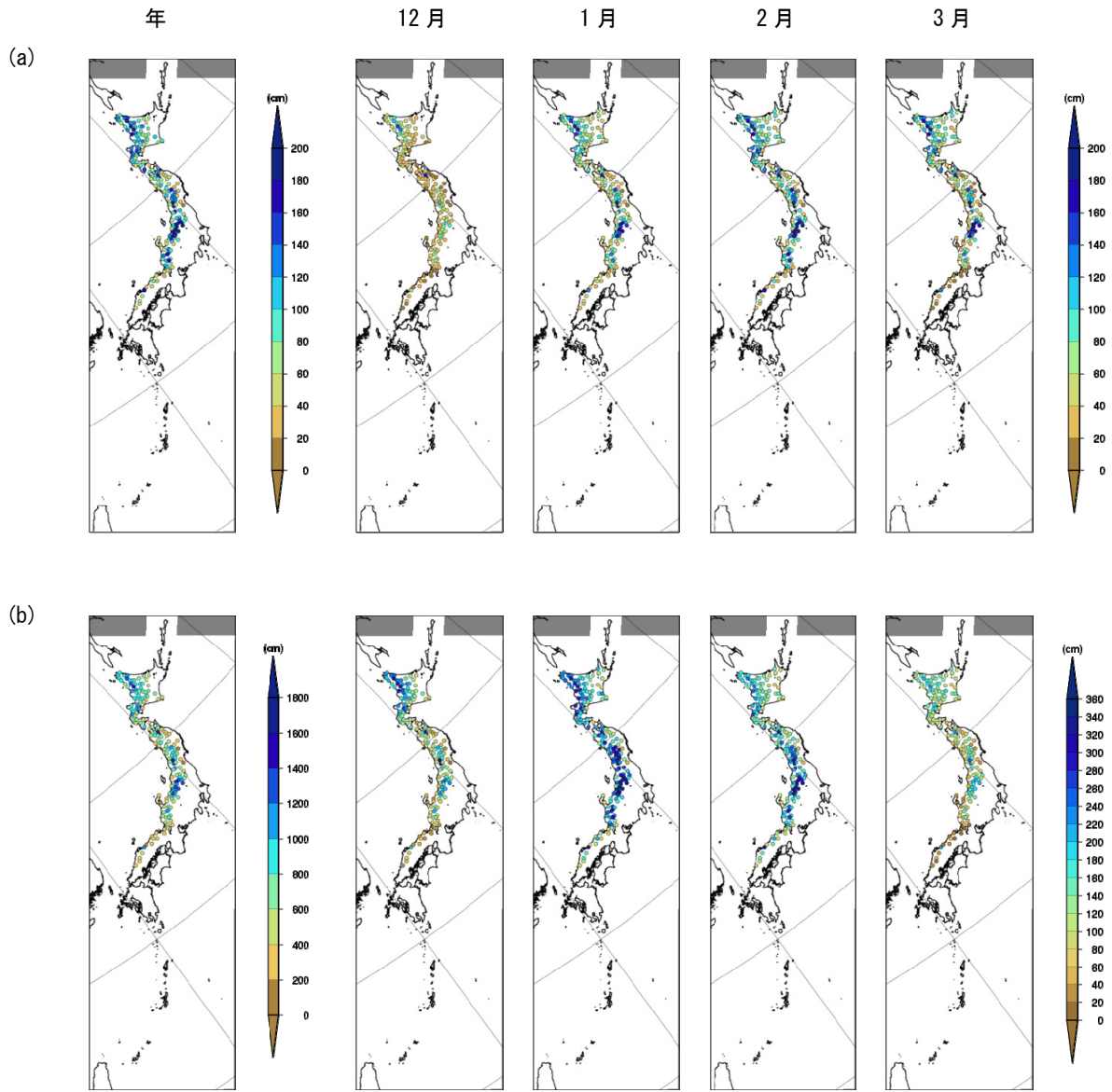


図 A3-3 積雪・降雪の観測の気候値

(a) : 最深積雪、(b) : 降雪量

降雪量では年間と月別で異なる塗り分けとしている。

(補遺 3 アメダス等の気候値)

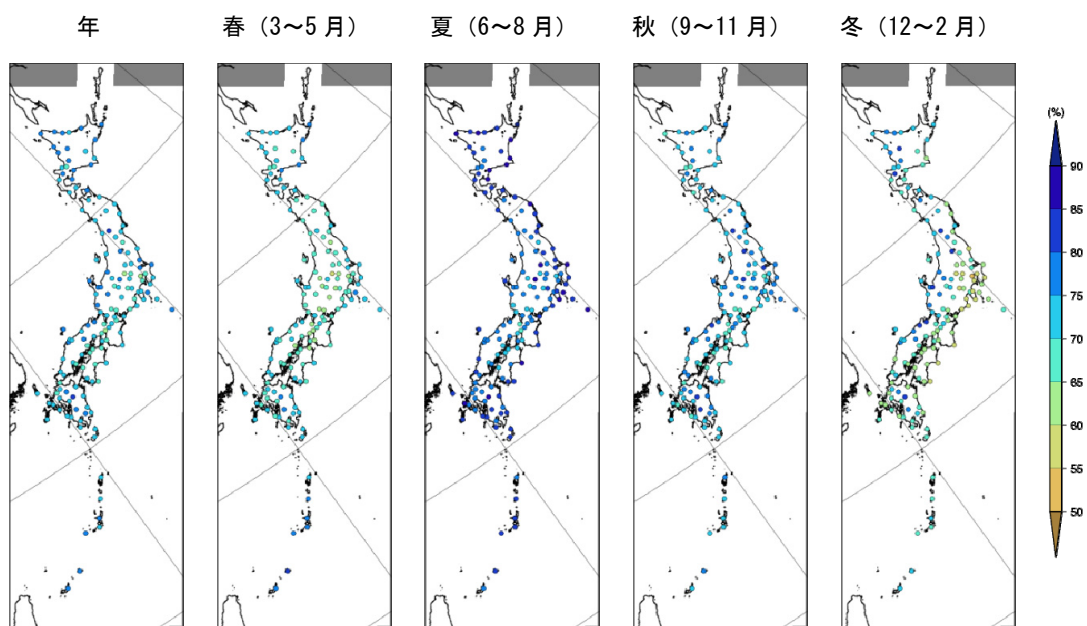


図 A3-4 相対湿度の観測の気候値

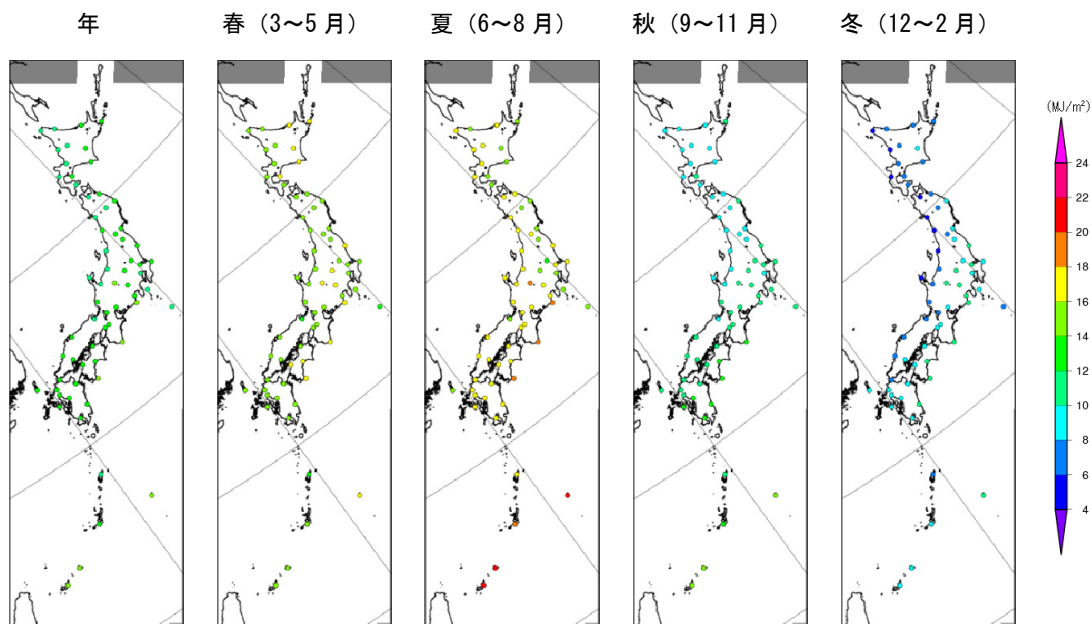


図 A3-5 全日射量の観測の気候値

参考文献

【要約】

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [Core Writing Team, Pachauri, R. K. and Reisinger, A. (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 104pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, and P. M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 582pp.

【第1章】

- 気象庁, 2005: 地球温暖化予測情報第6巻, IPCCのSRES A2シナリオを用いた地域気候モデルおよび都市気候モデルによる気候予測, 平成17年3月, 58pp.
- 気象庁, 2008: 地球温暖化予測情報第7巻, IPCCの温室効果ガス排出シナリオA1BおよびB1による日本の気候変化予測, 平成20年3月, 59pp.
- 気象庁, 2012: 気候変動監視レポート2011, 世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況について, 平成24年6月, 62pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- 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. doi:10.2151/jmsj.2012-A12.
- Sasaki, H., A. Murata, M. Hanafusa, M. Oh'izumi, and K. Kurihara, 2011: Reproducibility of present climate in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmosphere general circulation model. *SOLA*, **7**, 173-176, doi:10.2151/sola.2011-044.
- Sasaki, H., A. Murata, M. Hanafusa, M. Oh'izumi, and K. Kurihara, 2012: Projection of future climate change in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmospheric general circulation model. *SOLA*, **8**, 53-56, doi:10.2151/sola.2012-014.
- Sasaki, H., K. Kurihara, A. Murata, M. Hanafusa, and M. Oh'izumi, 2013: Future changes of snow depth in a non-hydrostatic regional climate model with bias correction. *SOLA*, **9**, 5-8, doi:10.2151/sola.2013-002.
- Stephens, G. L., J. Li, M. Wild, C. A. Clayson, N. Loeb, S. Kato, T. L'Ecuyer, P. W. Stackhouse Jr, M. Lebsock and T. Andrews, 2012: An update on earth's energy balance in light of the latest global observations. *Nature Geoscience*, **5**, 691-696, doi:10.1038/ngeo1580.
- Yukimoto, S., Y. Adachi, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, E. Shindo, H. Tsujino, M. Deushi, R. Mizuta, S. Yabu, A. Obata, H. Nakano, T. Koshiro, T. Ose, and A. Kitoh, 2012: A new global climate model of the Meteorological Research

(参考文献)

Institute: MRI-CGCM3 -Model description and basic performance, *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 23-64, doi:10.2151/jmsj.2012-A02.

【第2章】

気象庁, 2012: ヒートアイランド監視報告 (平成 23 年), 平成 24 年 7 月, 78pp.

Hirahara, S., H. Ohno, Y. Oikawa, and S. Maeda, 2012: Strengthening of the southern side of the jet stream and delayed withdrawal of Baiu season in future climate. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 663-671, doi:10.2151/jmsj.2012-506.

Endo, H., 2012: Future changes of Yamase bringing unusually cold summers over northeastern Japan in CMIP3 multi-models. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 123-136, doi:10.2151/jmsj.2012-A06.

【第3章】

Corder, G. W., and D. I. Foreman, 2009: Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 264pp.

Giorgi, F., E.-S. Im, E. Coppola, N. S. Diffenbaugh, X. J. Gao, L. Mariotti, and Y. Shi, 2011, Higher hydroclimatic intensity with global warming, *J. Climate*, **24**, 5309–5324. doi:10.1175/2011JCLI3979.1.

Hirahara, S., H. Ohno, Y. Oikawa, and S. Maeda, 2012: Strengthening of the southern side of the jet stream and delayed withdrawal of Baiu season in future climate. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 663-671. doi:10.2151/jmsj.2012-506.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.

Kitoh, A., and T. Uchiyama, 2006: Changes in onset and withdrawal of the East Asian summer rainy season by multi-model global warming experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 247-258.

Trenberth, K. E, 2011: Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.*, **47**, 123–138, doi:10.3354/cr00953.

【第4章】

Sasaki, H., A. Murata, M. Hanafusa, M. Oh'izumi, and K. Kurihara, 2012: Projection of future climate change in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmospheric general circulation model. *SOLA*, **8**, 53-56, doi:10.2151/sola.2012-014.

【第5章】

気象庁, 2012: ヒートアイランド監視報告 (平成 23 年), 平成 24 年 7 月, 78pp.

文部科学省研究開発局, 2012: 21 世紀気候変動予測革新プログラム 超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究 平成 23 年度研究成果報告書, 218pp.

Miller, R. C., 1972: Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. *Air Weather Service Tech. Rept. 200 (Rev.)*, Air Weather Service, Scott Air Force Base, IL, 106pp.

Rasmussen, E. N., and D. O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived

supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, **13**, 1148-1164.

【補遺 1】

- Piani, C., G. P. Weedon, M. Best, S. M. Gomes, P. Viterbo, S. Hagemann, J. O. Haerter, 2010a: Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *J. Hydrology*, **395**, 199-215, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.10.024
- Piani, C., J. O. Haerter, E. Coppola, 2010b: Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor. Appl. Climatol.*, **99**, 187-192, doi:10.1007/s00704-009-0134-9.

【補遺 2】

- 文部科学省研究開発局, 2012: 21 世紀気候変動予測革新プログラム 超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究 平成 23 年度研究成果報告書, 218pp.
- Hirahara, S., H. Ohno, Y. Oikawa, and S. Maeda, 2012: Strengthening of the southern side of the jet stream and delayed withdrawal of Baiu season in future climate. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 663-671. doi:10.2151/jmsj.2012-506.
- Hori, M. E., and H. Ueda, 2006: Impact of global warming on the East Asian winter monsoon as revealed by nine coupled atmosphere-ocean GCMs. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L03713, doi:10.1029/2005GL024961.
- Hu, Z.-Z., L. Bengtsson, and K. Arpe, 2000: Impact of global warming on the Asian winter monsoon in a coupled GCM. *J. Geophys. Res.*, **105**, 4607-4624.
- Kimoto, M., 2005: Simulated change of the east Asian circulation under global warming scenario. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L16701, doi:10.1029/2005GL023383.
- Kitoh, A., and T. Uchiyama, 2006: Changes in onset and withdrawal of the East Asian summer rainy season by multi-model global warming experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 247-258.
- Kusunoki, S., J. Yoshimura, H. Yoshimura, A. Noda, K. Oouchi, and R. Mizuta, 2006: Changes of Baiu rain band in global warming projection by an atmospheric general circulation model with a 20-km grid size. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 581-611. doi:10.2151/jmsj.84.581.
- Kusunoki, S., R. Mizuta, and M. Matsueda, 2011: Future changes in the East Asian rain band projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km grid size. *Clim. Dyn.*, **37**, 2481-2493. doi:10.1007/s00382-011-1000-x.
- Lorenz, D. J., and E. T. DeWeaver, 2007: Tropopause height and zonal wind response to global warming in the IPCC scenario integrations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D10119, doi:10.1029/2006JD008087.
- Lu, J., G. Chen, and D. M. W. Frierson, 2008: Response of the zonal mean atmospheric circulation to El Niño versus global warming. *J. Climate*, **21**, 5835-5851, doi:10.1175/2008JCLI2200.1.
- 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, doi:10.2151/jmsj.2012-A12.
- Rivière, G., 2011: A dynamical interpretation of the poleward shift of the jet streams in global warming scenarios. *J. Atmos. Sci.* **68**, 1253-1272.

(参考文献)

- Sakamoto, T. T., H. Hasumi, M. Ishii, S. Emori, T. Suzuki, T. Nishimura, and A. Sumi, 2005: Responses of the Kuroshio and the Kuroshio Extension to global warming in a high-resolution climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14617, doi:10.1029/2005GL023384.
- Yin, J. H., 2005: A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi:10.1029/2005/GL023684.

謝 辞

本書は、気象庁気象研究所が実施した気候予測計算データをもとに、気象庁地球環境・海洋部が作成し、内容に関する検討は、近藤洋輝リモート・センシング技術センター利用推進部特任首席研究員を部会長とする気候問題懇談会検討部会のご協力を頂きました。

気候問題懇談会 検討部会

部会長 近藤 洋輝 リモート・センシング技術センター
利用推進部特任首席研究員
今村 隆史 独立行政法人 国立環境研究所
環境計測研究センター センター長
日下 博幸 筑波大学 計算科学研究センター 准教授
須賀 利雄 東北大学 大学院理学研究科 教授
早坂 忠裕 東北大学 大学院理学研究科 教授
渡部 雅浩 東京大学 大気海洋研究所 准教授

本書に関するお問い合わせ先

本書の内容に関するご意見、ご感想、ご不明な点につきましては、下記の宛先までお問い合わせください。

気象庁 地球環境・海洋部 気候情報課
〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4
E-mail: clime@met.kishou.go.jp
TEL: 03-3211-8406