

1.2 気候変動予測

世界全体で生じる気候変動の予測に関しては、IPCC による第 4 次評価報告書 (IPCC AR4) が最も包括的かつ信頼性の高い文献とされている。2007 年の報告書の公開から 5 年以上が経過しており、その間の学術研究の進展はあるものの、気温や降水量など平均的な気候条件の変化に関しては(これ以上に詳細かつ信頼度の高い予測が得られていないという意味で)現時点でも有効な情報である。また、詳しくは後述するが、次期の第 5 次評価報告書 (AR5) に向けて行われる予測でも、AR4 での予測を大きく覆すような知見が得られているわけではなく、概ねこれまでの結果を強化・詳細化する方向性である。

熱波や豪雨、渇水などの極端現象の予測に関しては、「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(SREX, 2012)¹⁸において AR4 後の学術研究も含めた知見のとりまとめが行われている。

以下では、上記の 2 文献を基本として、これまで実施されている気候変動予測の結果について述べる。

1.2.1 平均的な気象要素の変化

AR4 での気候変動予測は、世界各国の研究機関が共通の将来シナリオに基づき気候変動予測を行った結果を取りまとめて作成されている。この取組はモデル相互比較実験 (CMIP3) と呼ばれ、20 以上の気候変動予測モデルが使用されている。気候変動予測の結果はモデルの構造によって異なるため、単一のモデルではなく複数のモデルを組み合わせて平均値や予測幅を調べることによって、現時点で最も確からしい予測を得ると同時に、モデルが持つ不確実性がどの程度あるかを知ることができる。

表 1-3 は AR4 で示されている気候変動の予測結果の概要である。世界全体の平均地上気温の上昇及びおよび海面上昇の予測で、20 世紀末と比較した場合の 21 世紀末の気温上昇量および海面上昇量である。将来シナリオは SRES シナリオと呼ばれ、社会経済系の研究者により作成されており、有りうる将来の GHG 排出の状況として幾つかのパターンが示されている。経済発展を重視する (A) か環境と経済の調和を目指す (B) か、グローバル化 (1) か地域主義か (2) という傾向に分かれている。シナリオ自体はあくまでも可能性として示されているもので、予測では無い。そのためこれらのシナリオのうちどれが実現しやすいかという点は議論しない。

気温上昇量では、シナリオ毎の将来推定値の幅は 1.8℃～4.0℃であり、海面上昇量の推定値の幅は 18cm～59cm である。これらの値は、AR4 後に実施された様々な分野や地域への影響評価に用いられている。ただし、海面上昇の予測値に関しては注意が必要で、気候変動により陸氷が移動するメカニズムについては科学的に未解明の点が多いため、推定値の中には含まれていない。これはグリーンランドや南極で今後生じうる氷床の融解のうち、大きな割合が含まれていないことを示している (この点についての近年の研究は後述する)。

降水量については、気温上昇に伴う飽和水蒸気量の増加によって、地球全体としては増加すると予測されている。しかし、気温変化や海面上昇と比べた場合の降水量予測の顕著な特徴は地域差の大きさにある。図 1-27 にシナリオの一つ (A1B シナリオ) による降水量変

化の分布を示す。地中海周辺や米国南部、アフリカ大陸の南部などでは降水量が減少するが、高緯度地域や熱帯では降水量が増加する。つまり地域によって変化の符号が異なっており、これは地域毎の気候変動影響の現れ方に大きな影響を与えている。

表 1-3 世界全体の平均地上気温の上昇及びおよび海面上昇の予測 (21 世紀末と 20 世紀末の比較) ²⁴

表 SPM.3. 21 世紀末における世界平均地上気温の昇温予測及び海面上昇予測。(10.5, 10.6, 表 10.7)

シナリオ	気温変化 (1980～1999年を基準とした2090～ 2099年の差 (C)) ^a		海面水位上昇 (1980～1999年を基準とした2090～ 2099年の差 (m))
	最良の推定値	可能性が高い 予測幅	モデルによる予測幅 (急速な水の流れの力学的な変化を除く)
2000年の温度で一定 ^b	0.6	0.3 - 0.9	資料なし
B1シナリオ	1.8	1.1 - 2.9	0.18 - 0.38
A1Tシナリオ	2.4	1.4 - 3.8	0.20 - 0.45
B2シナリオ	2.4	1.4 - 3.8	0.20 - 0.43
A1Bシナリオ	2.8	1.7 - 4.4	0.21 - 0.48
A2シナリオ	3.4	2.0 - 5.4	0.23 - 0.51
A1FIシナリオ	4.0	2.4 - 6.4	0.26 - 0.59

表の注釈:

- ^a これらの推定は、簡易気候モデル、いくつかのEMIC (中程度に複雑な気候モデル)、多数のAOGCM (大気海洋結合モデル) によって評価される。
- ^b 2000年の一定の構成は、AOGCMのみから得られたものである。

降水分布の変化予測

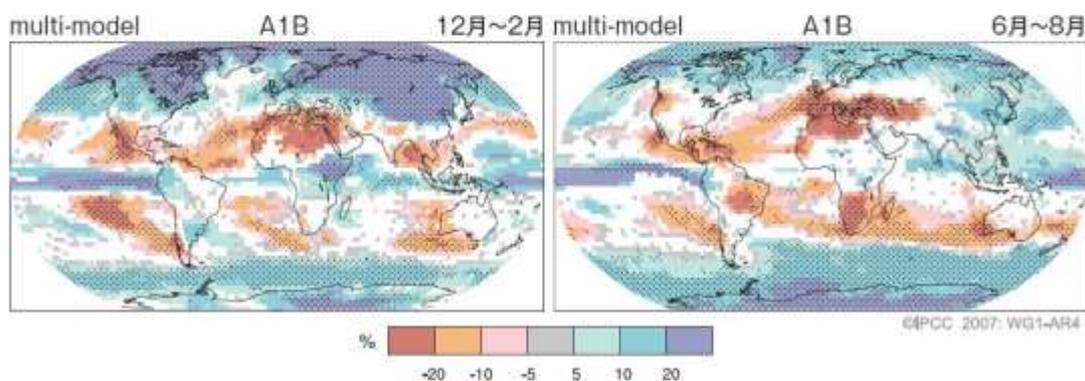


図 SPM.7. 2090～2099年を対象とする降水量の相対的な変化予測(単位%) (1980～1999年が基準)。値は、SRES A1Bシナリオによる複数モデルの平均で、左図は12～2月、右図は6～8月。白色の地域は、変化の符号が一致したモデルが66%に満たない地域、点描している地域は、90%以上のモデルで変化の符号が一致した地域。(図10.9)

図 1-27 IPCC AR4 による地球全体の降水量の変化予測 ²⁴

²⁴ 気象庁 (2007)、IPCC 第 4 次評価報告書第 1 作業部会報告書 政策決定者向け要約

1.2.2 極端現象の変化

極端現象の変化については IPCC SREX (2012) において詳細なレビューが行われている。同文献で実施されているのは AR4 以降 2011 年頃までの極端現象予測に関する主要な文献のレビューと、CMIP3 で作成されたマルチモデルの気候変動予測を用いた地域別の極端現象の予測である。予測に用いられたデータは AR4 と同一であり、予測モデル自体の改良や詳細化は行われていないことに留意する必要がある。AR4 で行われていなかった極端現象に関する統計分析 (XX 年に一度の熱波、豪雨など) を行なっており、その結果が主要な成果の一つといえる。

以下では、代表的な極端現象として熱波、豪雨・洪水、熱帯低気圧、渇水を取り上げ、予測結果について記述する。

(1) 熱波の変化

熱波に関しては、21 世紀末までに極端な気温が上昇することはほぼ確実であるとしている。A1B シナリオ、A2 シナリオに基づく予測結果の取りまとめでは、地球上の多くの地点 (北半球高緯度を除く) ではこれまで 20 年に 1 度の頻度でしか発生していなかった高温日が、21 世紀末には 2 年に 1 度の頻度になる可能性が高いと予測されている。20 世紀末の気候条件と比較して、日最高気温の極値 (20 年に 1 度) は 21 世紀中頃には 1~3°C 上昇し、21 世紀末には 2°C~5°C 上昇する可能性が高いとされている (シナリオによって異なる)。

図 1-29 に、20 年に 1 度の高温日における気温上昇の予測を示す。全球の予測 (左下) と地域ごとの予測 (上) が示されており、日本を含む東アジアは E.Asia である。この地域においては 21 世紀中頃には 1~4°C、21 世紀末には 2~6°C の上昇が予測されており、これは地球全体の傾向と概ね同一である。

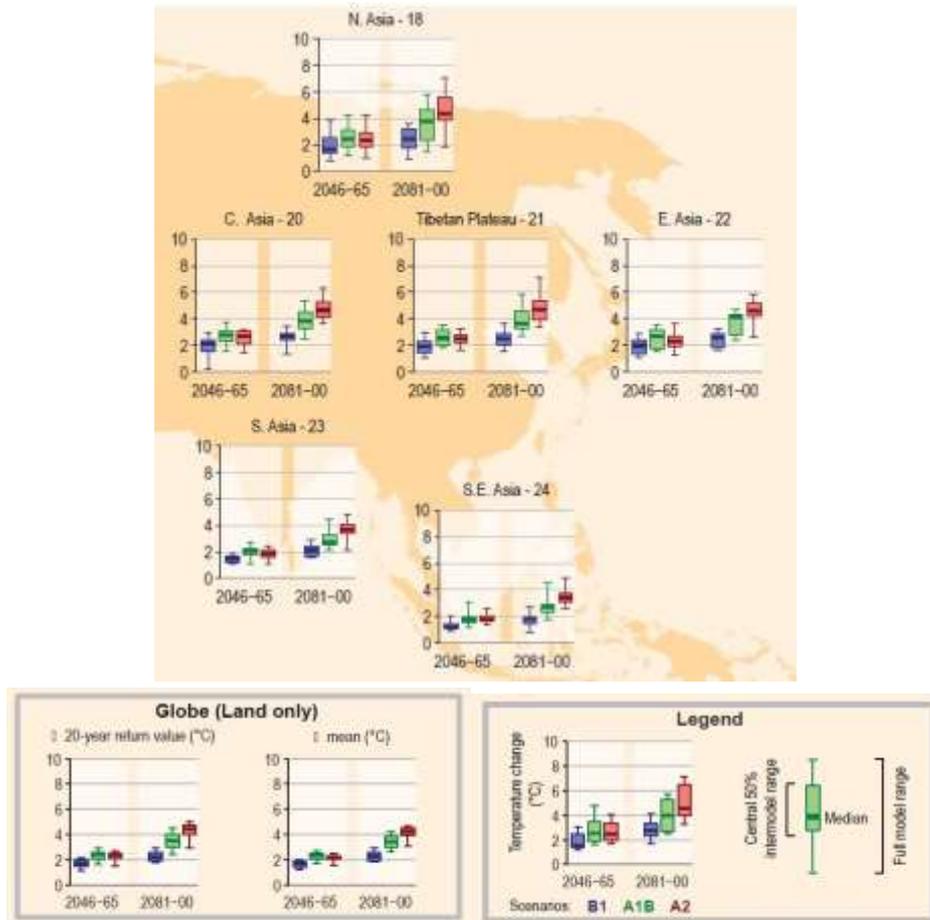


図 1-28 「20年に一度の高温」の将来変化の予測（21世紀中頃および21世紀末）¹⁸ 右下の凡例において、青・緑・赤がSRESのB1,A1B,B2に対応した結果、左右の情報が21世紀中頃と21世紀末の予測を示す。予測幅はマルチモデル予測による不確実性を示すもので、ボックスが50%のモデルの予測範囲、エラーバーが全モデルの予測範囲、中心線が中央値を示す。上図はアジアの各地域における「20年に一度の高温」の将来変化を示す。左下図は全球での「20年に一度の高温」の予測幅と、平均気温の予測幅の比較である。

(2) 豪雨・洪水の変化

豪雨の変化については、21世紀を通じて、地球上の多くの場所で豪雨の頻度あるいは降水量全体の中で豪雨による降水が占める割合が増加する可能性が高いとしている。特に高緯度地域や熱帯域、北半球中緯度地域の冬ではその傾向が顕著である。熱帯低気圧に伴う豪雨は温暖化により増加する可能性が高い。地域によっては、全体の降水量が減少するにもかかわらず、豪雨の強度が増加する場合もある。A1B、A2、B1のシナリオに基づく予測では、20年に1度の日降水量は21世紀末には5～15年に1度になる可能性が高い。高位シナリオ（GHG排出量が多いシナリオ）の方が豪雨の増加程度が大きい傾向にある。

図 1-29 に、20年に1度の日降水量に対する地域別の将来予測結果を示す。陸域全体の結果を左下に、アジアの各地域の結果を上を示す。平均降水量の変化率（左下図の右側）より豪雨の変化率（左下図の左側）の方が大きくなっているのが特徴的である。日本を含む東アジア（E.Asia）においては豪雨による降水量が21世紀末の時点で10～50%増加すると予測されている。

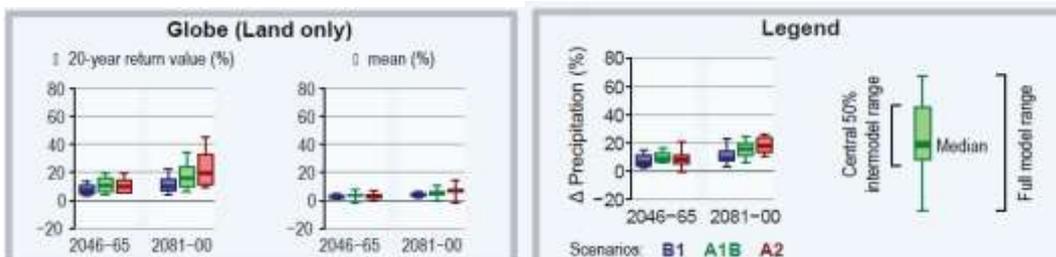
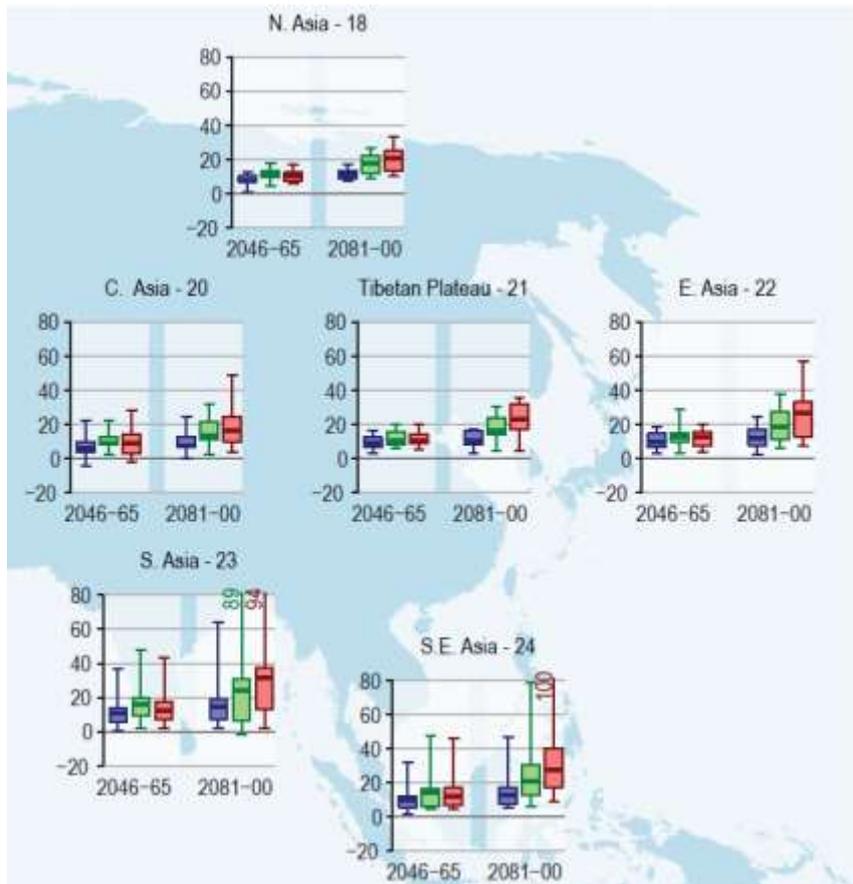


図 1-29 「20年に一度の降水量」の将来変化率の予測（21世紀中頃および21世紀末）¹⁸
 右下の凡例において、青・緑・赤がSRESのB1,A1B,B2に対応した結果、左右の情報が21世紀中頃と21世紀末の予測を示す。予測幅はマルチモデル予測による不確実性を示すもので、ボックスが50%のモデルの予測範囲、エラーバーが全モデルの予測範囲、中心線が中央値を示す。上図はアジアの各地域における「20年に一度の降水量」の将来変化率を示す。左下図は全球での「20年に一度の降水量」の予測幅と、年間降水量の予測幅の比較である。

(3) 熱帯低気圧の変化

熱帯低気圧については、最大風速は平均的には増加する可能性が高いが、全ての海域で増加傾向が生じるかどうかは不明である。世界全体での熱帯低気圧の頻度は減少するか変化しない可能性が高いとしている。熱帯低気圧に伴う降水量についても増加する可能性が高いとしている。これらの結果は様々な学術研究のレビューに基づくもので、熱波や豪雨の場合の

ように CMIP3 によるマルチモデル予測結果から得られたものではない。これは CMIP3 で行われているのは全球モデルによる予測であり、これらのモデルのうち多くは熱帯低気圧の減少を表現するのに十分な解像度を持っていないためである。

(4) 渇水の変化

渇水の変化に関しては、21 世紀を通じて特定の季節あるいは地域で渇水の深刻度が強まることに対して中程度の確信度がある。これは降水量の減少や蒸発散の増加によるものである。具体的な地域としては、欧州および地中海地域、北米中心部、中米およびメキシコ、ブラジル北東部、アフリカ大陸南部において渇水の深刻度が増加すると予測されている。そのほかの地域については予測の確信度が低い。

(5) 現象毎の予測のまとめ

IPCC SREX において、現象毎の予測情報をまとめた結果を図 1-2 に示す。これは同文献に示されていた内容の翻訳である。過去に観測された変化、過去の変化に対する人為的要素の寄与に関する知見、および 2100 年までの将来変化の予測について示されている。

表 1-4 既に顕在化している気候変動影響と将来予測 (IPCC SREX)

		観測された変化 (1950 年以降)	観測された変化の 原因特定	将来 (2100 年まで) 予測される変化 (20 世紀後半を基準とする)
気象および 気候に関する 観測要素	気温 (Section 3.3.1)	非常に寒い昼および寒い夜の数が地球規模で減少した可能性が非常に高い。非常に暑い昼および暑い夜が地球規模で増加した可能性が非常に高い。多くの地域(全ての地域ではない)で高温または熱波の持続期間もしくは発生数が増加したことについては確信度が中程度。いくつかの小地域内における気温の極端現象の傾向については、小地域内における観測が不足しているか、さまざまなシグナルが存することから、確信度が低いまたは中程度。	暑い昼/夜、寒い昼/夜の地球規模での傾向に人為的影響が及んでいる可能性が高い。わずかな例外を除き、地域規模の傾向については原因特定に至っていない。	非常に寒い昼および夜の発生頻度ならびに強度が地球規模で減少することはほぼ確実。非常に暑い昼および夜の発生頻度ならびに強度が地球規模で増加することはほぼ確実。ほとんどの陸域で、高温または熱波の持続期間、発生頻度および/または強度が増加する可能性が非常に高い。
	降水量 (Section 3.3.2)	大雨の回数が統計的に有意に減少した地域よりも統計的に有意に増加した地域の方が多(95 パーセントイル)可能性が高いが、傾向には地域および小地域によ	地球規模での極端降雨の強化に人為的影響が寄与したことについての確信度が中程度。	大雨の頻度または総降水量に占める大雨による降水量の割合が、地球上の多くの場所、特に高緯度および熱帯地域において増加し、また、冬場においては北半球の中緯度地域で増

		観測された変化 (1950年以降)	観測された変化の 原因特定	将来(2100年まで) 予測される変化 (20世紀後半を基準とする)
		り著しい差がある。		加する可能性が高い。
	風 (Section 3.3.3)	十分な証拠がないため、傾向についての確信度が低い。	十分な証拠がないため傾向の原因について確信度が低い。	極端な強風の予測については確信度が低い(熱帯低気圧に関連する風の極端現象を除く)。
極端な気象・気候現象と関連する現象	モンスーン (Section 3.4.1)	十分な証拠がないため、傾向について確信度が低い。	十分な証拠がないため、確信度が低い。	気候モデルについての意見の一致度が不十分であるため、モンスーンの変動予測について確信度が低い。
	エルニーニョ現象およびその他の変動モード (Section 3.4.2 および 3.4.3)	中央赤道太平洋におけるエルニーニョ南方振動(ENSO) ²⁵ の頻度の増加を示唆する過去の傾向について確信度が中程度。 ENSOの傾向に関するより具体的な記述については十分な証拠がない。 南半球環状モード(SAM) ²⁶ の傾向について可能性が高い。	特定されたSAMの傾向に人為的影響が寄与している可能性が高い。 ²⁷ 北大西洋振動(NAO) ²⁸ の傾向に人為的影響があるか否かについては可能性がおよそ五分である。ENSOの変化については原因特定に至っていない。	ENSOの動向の変化およびその他の変動モードの予測についてはモデル予測に関する意見の一致度が不十分であるため確信度が低い。
	熱帯低気圧 (Section 3.4.4)	過去の観測能力の変化があるため、熱帯低気圧の活動の長期的増加(すなわち40年以上)が堅調であることについての確信度が低い。	熱帯低気圧の活動に関して検出可能なあらゆる変化を人為的影響によるものと原因特定することにつき確信度が低い(過去の熱帯低気圧の観測記録に不確実性があること、物理的機構の理解が不完全であること、および熱帯低気圧の変動度合いが、確信度が低いことの原因。)	熱帯低気圧の頻度は減少するかまたは変化しない可能性が高い。 平均最大風速は増加する可能性が高いが、全ての大洋において増加するとは限らない。 熱帯低気圧と関連する大雨が増加する可能性が高い。
	温帯低気圧 (Section 3.4.5)	温帯低気圧の進路が極方向へ移動した可能性が高い。 強度の地域的变化について確信度が低い。	極方向への移動に人為的影響があることについて確信度が中程度。	地域的な低気圧の活動に影響がある可能性が高いが、現行のモデルでは物理過程の再現が十分でないため、地域予測の詳細

²⁵ エルニーニョ南方振動(ENSO)：南太平洋東部の気圧とインドネシア付近での気圧が逆の傾向(片方が高ければ、もう片方が低い)を示すことが知られており、その現象をENSOと呼ぶ。

²⁶ 南半球環状モード(SAM)：南半球における気圧の空間的なパターンのうち、主要なものを指す。

²⁷ 成層圏オゾン濃度の傾向に起因する。

²⁸ 北大西洋振動(NAO)：冬のアイスランド低気圧と北西大西洋中緯度の高気圧が共に強まる状態と共に弱まる状態を繰り返すことが知られており、その現象をNAOと呼ぶ。

		観測された変化 (1950年以降)	観測された変化の 原因特定	将来(2100年まで) 予測される変化 (20世紀後半を基準とする)
				細については確信度が低い。 中緯度低気圧の数が減少することについて確信度が中程度。 中緯度低気圧の進路が極方向に移動するという予測の確信度が中程度。
自然環境への影響	干ばつ (Section 3.5.1)	世界のいくつかの地域、特にヨーロッパ南部およびアフリカ西部がより強度かつ長期の干ばつに見舞われたことについて確信度が中程度であるが、それとは逆の傾向も存在している。	いくつかの観測された干ばつの分布の変化に人為的影響が寄与していたことについて確信度が中程度。証拠に矛盾がある、または十分な証拠がないことから、単一地域レベルでの干ばつの変化の原因特定について確信度が低い。	ヨーロッパ南部、地中海地域、ヨーロッパ中部、北アメリカ中部、中央アメリカおよびメキシコ、ブラジル北東部ならびにアフリカ南部を含むいくつかの地域において、干ばつの持続期間および強度が増大するという予測の確信度が中程度。予測についての意見の一致度が不十分であるため、他の地域については全体的に確信度が低い。
	洪水 (Section 3.5.2)	気候変動に伴う地域規模での洪水の規模・頻度の評価に利用できる証拠は、限られている～中程度。さらに、この証拠についての意見の一致度は低度であり、それゆえ変化の符号に関してさえ地球規模での全体的な確信度が低い。雪解け水および氷河に涵養される河川の春の流量ピーク時期が早まる傾向について確信度が高い。	人為起源の温暖化が地球規模で洪水の規模または頻度に影響を与えたことについての確信度が低い。洪水に影響を与えるいくつかの水循環の要素(降雨、融雪)に人為的影響があることについて確信度が中程度～高い。	十分な証拠がないため、洪水の規模および頻度の変化については確信度が低い。予測された大雨の増加が、いくつかの貯水池・地域における、降雨を原因とする局地洪水の発生に寄与することについて確信度が中程度(物理的理由に基づく)。雪解け水および氷河に涵養される河川の春の流量ピーク時期が早まる可能性が非常に高い。
	極度の海面 上昇および 沿岸影響 (Section 3.5.3, 3.5.4, 3.5.5)	20世紀後半における平均海面水位の上昇と関連して、沿岸域の極端な高潮が世界中で増加した可能性が高い。	平均海面水位上昇を介して人為的影響が寄与している可能性が高い。	平均海面水位の上昇が極端な沿岸域の高潮の上昇傾向に寄与する可能性が非常に高い。他の要因により変化が生じない限り、現在海岸浸食および浸水に見舞われている場所においては、海面水位上昇により、今後も同様の状況が継続することについて確信度が高い。
	その他の自然環境への影響 (Sections	いくつかの地域において大規模な地滑りがおこる地球規模の傾向があることについての確信度が低い。永久	永久凍土の融解に人為的影響がおよんでいる可能性が高い。寒冷地におけるその	熱波の変化、氷河後退および/または永久凍土縮小が、斜面不安定化、山体移動、氷河湖崩壊による洪水など高山における

	観測された変化 (1950年以降)	観測された変化の 原因特定	将来(2100年まで) 予測される変化 (20世紀後半を基準とする)
3.5.6, 3.5.7 および 3.5.8)	凍土の融解が増加する可能性が高く、結果として自然環境に影響が生じる可能性が高い。	他の自然環境への影響の傾向についての十分な証拠がないため、その他の人為的影響については確信度が低い。	現象に変化を及ぼすことについては確信度が高い。大雨の変化が、いくつかの地域における地滑りに影響を与えることについては確信度が高い。塵埃活動の将来における変化の予測については確信度が低い。

表 1-5 確信度の表記²⁹：現在の知見の評価に基づく「確信度」の度合い

用語	正しさについての確信度
確信度が非常に高い (Very high confidence)	10のうち少なくとも9が正しい
確信度が高い (High confidence)	10のうち約8が正しい
確信度が中程度 (Medium confidence)	10のうち約5が正しい
確信度が低い (Low confidence)	10のうち約2が正しい
確信度が非常に低い (Very low confidence)	10のうち1未満が正しい

表 1-6 可能性の表記²⁹：ある特定の結果が起きている、あるいは将来起きる可能性の評価定量的分析もしくは専門的見解からの論理的帰結

用語	用語
ほぼ確実 (Virtually certain)	99%を超える確率
可能性が非常に高い (Very likely)	90%を超える確率
可能性が高い (Likely)	66%を超える確率
どちらも同程度 (可能性がおおよそ五分である) (About as likely as not)	33-66%の確率
可能性が低い (Unlikely)	33%未満の確率
可能性が非常に低い (Very unlikely)	10%未満の確率
ほぼあり得ない (Exceptionally unlikely)	1%未満の確率

²⁹ 用語の和訳は、IPCC 第4次評価報告書第2作業部会 政策決定者向け要約 (環境省訳) のものを使用した。

1.2.3 日本における気候変動予測

IPCC 第4次評価報告書(AR4)以降の日本における科学的な気候変動予測の取り組みは、文部科学省による「21世紀気候変動予測革新プログラム（平成19年度～平成23年度）」が中心となり進められた。同プログラムでは、AR4の時点で不確実性が大きいとされていた極端現象、特に日本における影響の大きい台風や集中豪雨に関する詳細な予測や、20～30年後を予測する近未来予測、2100年以降を含む長期の予測を行う長期気候変動予測などについて研究が行われた。研究の最終成果報告書は2012年に公表され、日本を中心とした気候変動に関する最新の知見がまとめられている。以下ではその報告書および周辺資料をもとに、日本における気候変動予測の結果について説明する。

なお、2013年3月には、気象庁が地球温暖化予測情報第8巻⁴を公表した。

(1) 豪雨・洪水の変化

日本では近年豪雨の頻度の増加が観測されており、将来は豪雨の頻度がさらに増えるのではないかとの懸念も存在する。日本周辺の豪雨の将来変化について、高解像度(20km, 60km格子)の気候変動予測モデルを用いて気象研究所が予測を行った結果を図1-30に示す。豪雨の現象としては、100年に一度の日降水量を対象としており、現在と将来(21世紀末)で豪雨の雨量がどの程度変化するかを示している。日本全域での雨量の増加率は20%～30%で、高緯度ほど雨量の変化率が大きくなっている。このような降水量変化の図はこれまでも作られていたが、本結果は単に気候モデルが最新であるというだけでなく、複数のモデル及び実行条件の平均(アンサンブル平均)による評価であるという点で、これまでの結果と比較して精度の高い予測と考えられる。

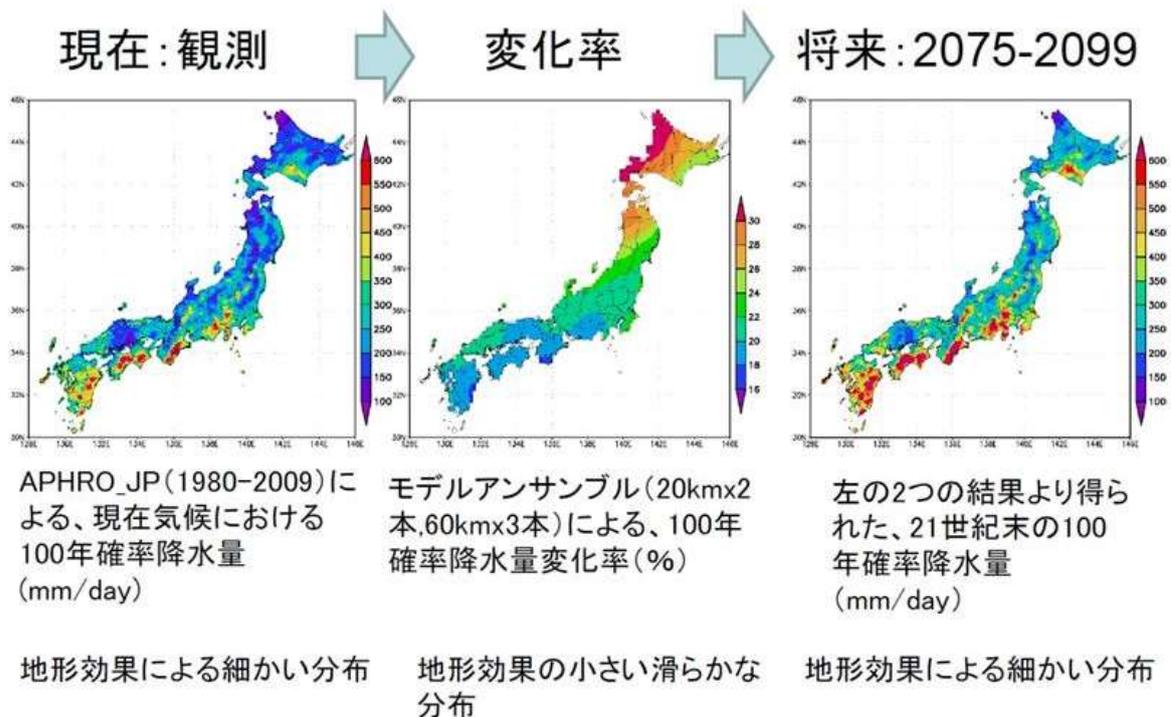


図 1-30 再来期間 100 年の豪雨の将来変化 (21 世紀末) ³⁰

洪水の頻度や被害額が将来どうなるかという点については、雨量の変化だけでなく人口や資産の変化、治水等対策の進行度合によって大きく変化するため、直接の予測は難しい。間接的な指標として、豪雨発生時の河川流量について予測が行われている。図 1-31 は京都大学防災研究所による予測の結果である。20 世紀末と将来気候の予測モデルによる 1 時間毎の降水量を時系列として入力し、流出モデルを用いて流量の評価を行なっている。

関東地方は若干増加するとの予測だが、地域による差が大きく、列島の中央部や日本海側では減少するとの予測である。豪雨の頻度が増加するにもかかわらず、流量が減少する地点があるのは、気温上昇による積雪量および融雪量の減少が原因とされている。太平洋沿岸では年間の最大流量が台風などの豪雨により決まることが多いが、東北地方南部や北信越地方では融雪により最大流量が決まることが多い。その違いが将来傾向の違いに反映されたものと考えられる。

21 世紀末気候実験において、北海道・東北地方北部・中国四国地方・九州地方北部で 100 年確率年最大流量の増加傾向をみることができる。ただし、東北地方南部や北信越地方など、出水が積雪・融雪に起因する地域では、積雪・融雪量の減少によって年最大流量が減少する傾向にある。この傾向は近未来気候実験で現れ、21 世紀末気候実験でより明瞭になる。³¹

³⁰ 楠(2012)、「超高解像度大気モデルによる気候変動予測の不確実性の定量化と低減に関する研究」21 世紀気候変動予測革新プログラム平成 23 年度研究成果報告会、2012 年 2 月

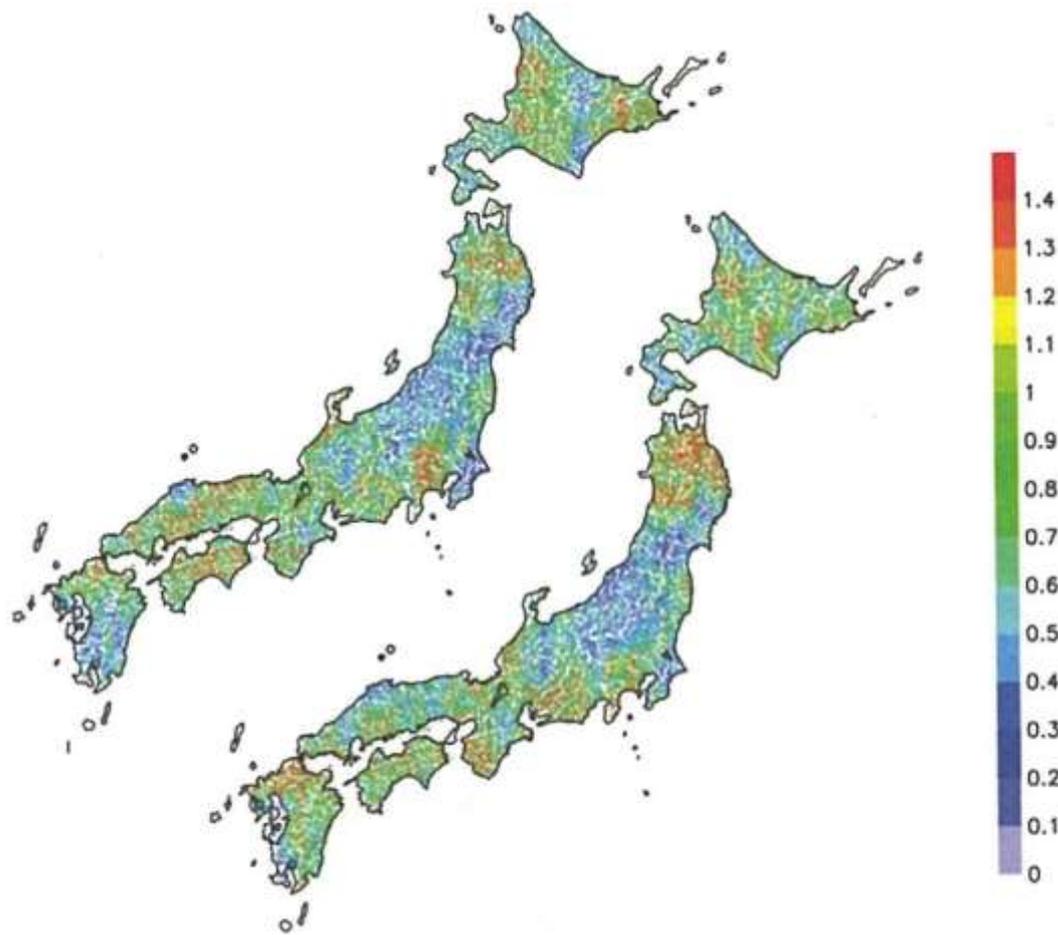


図 1-31 豪雨時の河川流量の変化（左：近未来と現在の比率、右：21 世紀末と現在の比率）³¹。凡例は「将来気候における 100 年確率最大流量÷現在気候における 100 年確率最大流量」の値。1 であれば確率流量の値は現在と将来で変わらず、1.5 であれば確率流量の値は将来において 1.5 倍になることを示している。

(2) 熱帯低気圧（台風）の変化

日本に大きな影響を与える可能性のある台風の将来変化についても詳細な評価が行われている。数の変化を図 1-32 に、強度の変化を図 1-33 に示す。両図より以下の傾向が確認される。

- 図 1-32 の台風発生域（フィリピン付近）を見ると青色の減少傾向となっており、さらに複数モデル間の合意がとれていることを示す網掛けが確認できる。これより、同文献では台風の発生数は将来減少する可能性が高いとしている。
- 図 1-33 の台風の強度については、上図では台風発生域から日本にかけて暖色となっており、将来は台風強度が強くなる傾向である。ただし、下図に示す改良版モデルの予測では台風発生機全体では強度が強くなる地域（暖色）と弱くなる地域（寒色）の両方が存在している。従って、同文献では台風強度の将来変化については依然として不確実性が大きいとしている。

³¹ 21 世紀気候変動予測革新プログラム 平成 23 年度研究成果報告書（2012）

前節で記述した通り、世界全体で集計した場合には熱帯低気圧の強度が強くなる可能性が高いと予測されているが、日本に來襲する台風の強度の変化については、現時点では不確実である。

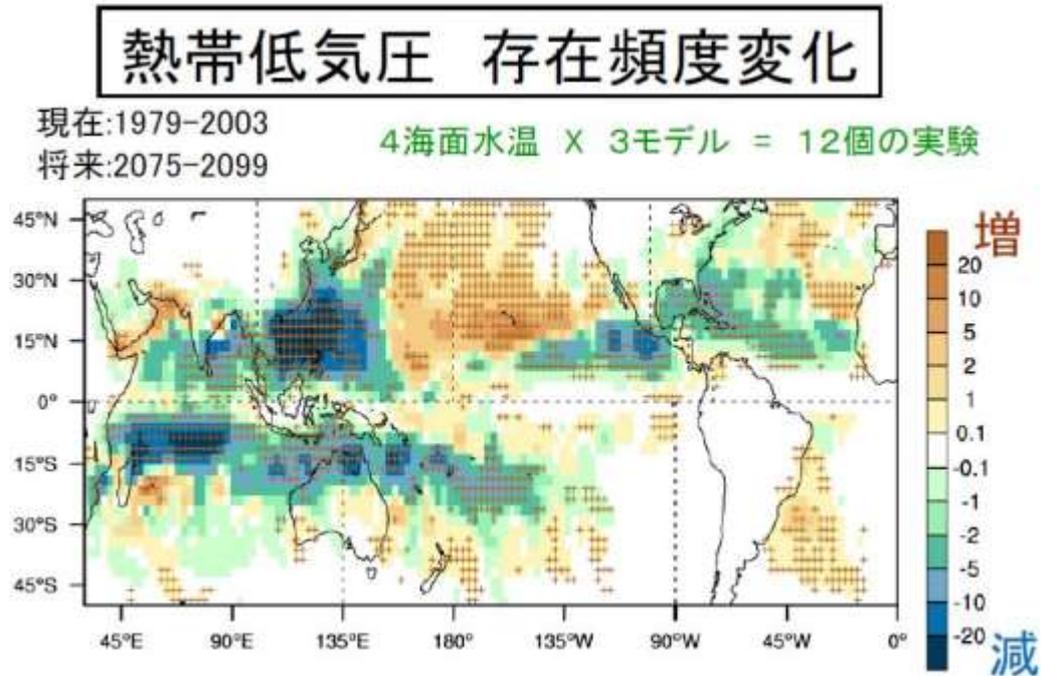


図 1-32 地球全体の熱帯低気圧の存在頻度変化³⁰: 暖色が増える地域、寒色が減る地域、+記号は増減の傾向が統計的に有意であることを示す。

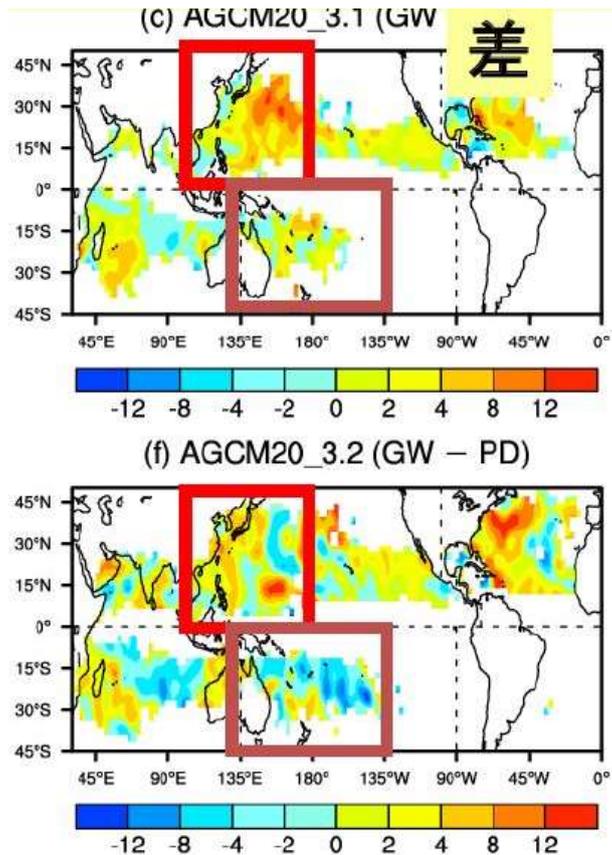


図 1-33 地球全体の熱帯低気圧の勢力変化（風速[m/s]の変化）³⁰：21 世紀末と現在の差、暖色が強くなる地域、寒色が弱くなる地域、上下は異なるモデルを用いた結果（下が改良版）

台風によって生じる高潮についても、高潮の数値シミュレーションモデルを用いて評価が行われている。図 1-34 に、国土技術政策総合研究所が評価した東京湾と対象とした高潮潮位の出現頻度の変化を示す。2m 以上の大きな規模の高潮については、東京湾の湾内および湾奥で頻度が増加している。

水平解像度 20km の全球大気モデルの結果を用いて、三大湾（東京、伊勢、大阪）の高潮偏差を推算した。その結果、将来気候では中程度以上の高潮偏差の頻度が上がる可能性が示された。一方、小～中程度の高潮の出現頻度が全体的に減る傾向が把握された。³¹

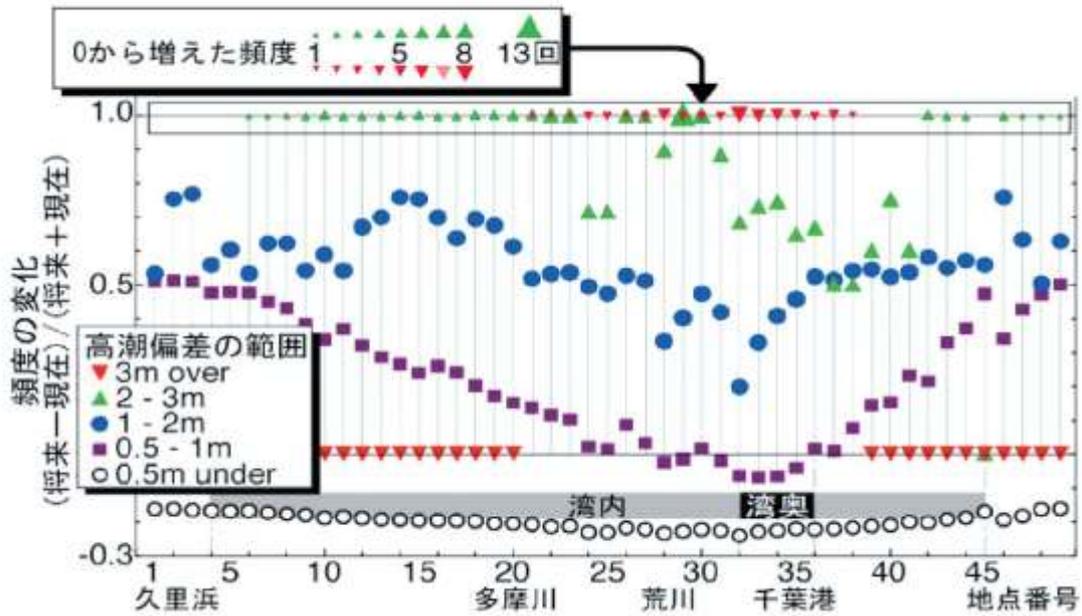


図 1-34 東京湾における高潮潮位の将来変化(革新プログラム³²)、現在と将来(21世紀末)において各水位が発生する頻度、0より大きい場合は頻度が増加することを示す。1.0の場合、現在気候では全く生じなかったものが将来気候では生じるようになる。

³² 21世紀気候変動予測革新プログラム 研究成果(総括)(2012)

<http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/reports/general%20report-j.pdf>

1.2.4 IPCC 第5次評価報告書に向けた新しい予測

世界全体での気候変動予測の取り組みとして、IPCCの第5次評価報告書（AR5）に向けた予測が行われており、その結果は2013年後半（第1作業部会の報告書）に公表される予定となっている。報告書の内容については現時点では不明であるが、予測に用いる新しい排出シナリオ（RCP）や新しいモデル比較実験（CMIP5）の結果、海面上昇量に関する新しい研究結果などが発表されており、以下ではこれらの文献をもとにAR5に向けた予測の取り組みをまとめる。

(1) 排出シナリオ

AR4の気候変動予測は前述のようにSRESシナリオに基づいて行われたが、IPCC第5次評価報告書に向けては新しい排出シナリオが決められており、RCP（代表的濃度パス）と呼ばれている。RCPシナリオの作成にあたっての基本的な手順はSRESシナリオと同様であるが、RCPシナリオの方が将来の排出量に対しより広い選択肢が示されていることが特徴である。特にRCP2.6は21世紀末までの気温上昇を2℃に抑えるシナリオとなっており、同様のシナリオはSRESでは提供されていなかった。また、シナリオの命名方法として、SRESでは社会経済の条件によりA1,B2などと決められていたが、RCPでは8.5, 6.0, 4.5のように放射強制力³³の大きさを指定されるという違いがある。

RCPにおける各年のCO₂排出量とSRESシナリオとの比較（1800年から2400年まで）を図1-35に示す。2000年～2100年までの排出量を比較すると、RCP4.5はSRES B1シナリオと近く、RCP8.5はSRES A2シナリオと近い。但し、RCP8.5のCO₂排出量は21世後半でSRES A2を上回り、2100年までの総排出量としてはRCP8.5の方が多くなる。結果として、気温上昇量や温暖化影響の面ではSRESシナリオより悲観的な結果となると予想される。ただし、これはIPCCの積極的な判断として将来の温室効果ガス排出に対して悲観的な予想をしているわけでは無いことに注意が必要である。IPCC自身は将来の社会経済状況についての予測を行わないというスタンスである。RCPの排出シナリオは、将来のエネルギー消費に関するAR4以降の学術的な文献を収集し、その範囲をカバーするように作成されており、その結果として排出シナリオの幅が広がっているに過ぎない。

³³ 放射強制力は、「対流圏界面における、成層圏の調節を経た放射フラックスの変化量として定義されている。正の放射強制力は地球全体で平均して地表の温暖化を、負の放射強制力は地球全体で平均して地表の寒冷化をもたらす（IPCC AR4 WGI 気象庁訳より引用）。」例えばRCP8.5の“8.5”の数値は、21世紀末時点での放射強制力が8.5W/m²上昇することを示している。

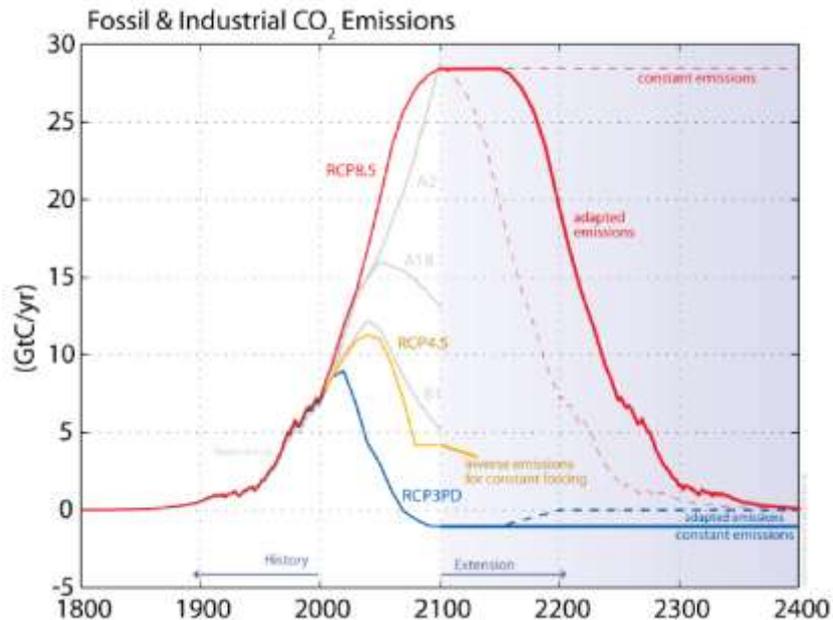


図 1-35 SRES シナリオと RCP シナリオの年間 CO2 排出量の比較³⁴

【参考】SRES シナリオにおける CO2 濃度

図 1-36 に示すように、IPCC 第 4 次報告書で頻繁に用いられる 3 シナリオのうち、A1B および A2 シナリオは CO2 排出量の大きな 2 シナリオであるため、温暖化による影響も大きいと考えられる。

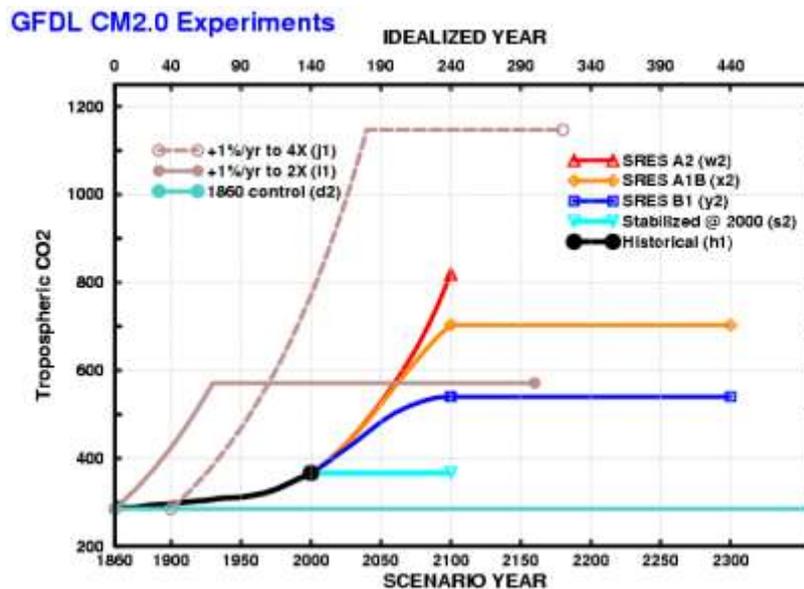


図 1-36 SRES 各シナリオにおける大気中 CO2 濃度の設定³⁵

³⁴ Van Vuuren et al, RCP Extension White Paper, 2009, http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/DraftRCPEExtension_WhitePaper_26Jul09.pdf

³⁵ NOAA ホームページ, CM2.0 experiments and metadata, http://nomads.gfdl.noaa.gov/CM2.X/CM2.0/data/cm2.0_data.html

(2) モデル相互比較実験(CMIP5)

上記の将来シナリオに基づき、新たなモデル相互比較実験(CMIP5)が実施されている。CMIP3と同様に世界の主要研究機関による20以上の気候モデルが登録されている。平均的には気候モデルの解像度は高くなり、物理過程についても改良が加えられている。この比較実験の結果に基づき、AR5の予測部分の主要な結論が導かれると考えられる。

CMIP5に基づく予測結果については、AR5の公開に先立って学術論文として公表されている³⁶。図1-37は気温上昇量の予測についてAR4の予測結果と比較した図であり、左がAR4の予測(CMIP3, SRES)、右がAR5の予測(CMIP5, RCP)である。前述のとおり両シナリオではGHG排出量が異なるため、AR4の予測に統計的な手法で修正を加えてRCPシナリオ相当のGHG排出量となるように調整した結果との比較が右のエラーバーとして示されている。この結果を見ると、各シナリオにおける予測の平均値および不確実性幅は概ね同じであることがわかる。AR4時点からは科学的な知見としては進歩しているはずであり、その意味で不確実性幅が狭まることを期待する声もあったが、科学的な理解の進展によって予測モデルで表現できる現象も増えており、両者のトレードオフとして不確実性としてはほぼ同じレベルにとどまったものと同論文では推測している。著者は、今後も不確実性をゼロにすることはできず、不確実性が減ることを期待せずに行動することが必要であると述べている。

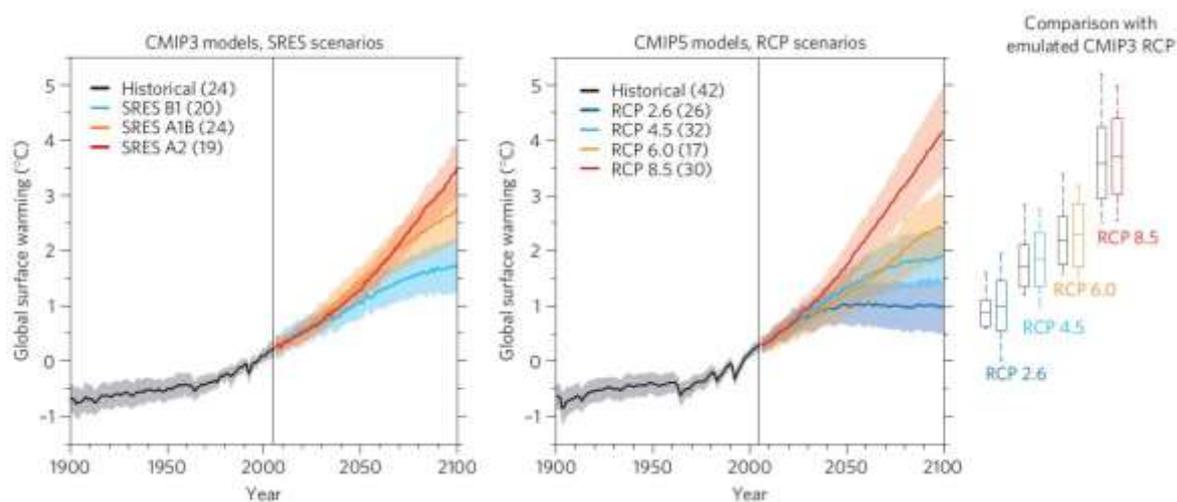


図 1-37 CMIP5 (RCP) と CMIP3(SRES)における気温上昇予測の比較 (Knutti and Sedlacek, 2012³⁶)。括弧内の数値は評価に用いられた予測シミュレーションの数、右のバーのうち、RCPと示されているものがRCPシナリオに基づく気温予測幅(四角が平均値±標準偏差の範囲、点線が全モデル範囲)、黒線がCMIP3に基づく結果で、シナリオ毎の排出量の違いを補正してRCP相当に修正したもの。

³⁶ Reto Knutti & Jan Sedláček, Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections, Nature Climate Change, 2012

(3) 海面上昇に関する新たな予測

海面上昇の予測については、AR4 時点で予測の限界が示されていた項目であり、AR5 に向けて新たな研究成果が採用される可能性がある。AR4 の時点でグリーンランドや南極をはじめとする氷床の大規模な融解は重要な影響を与える可能性があるとしながらも、科学的な理解が不十分であるために数値的な予測に加えられていなかった。その後の研究で、氷床の移動を物理的にモデル化する試みは行われているものの、現時点では予測に適用できる段階には達していない。一方で注目されているのが、過去の氷床の状況と海水面の高さの情報から統計的なモデル化を構築し、それをを用いて将来の海面水位変動を予測する研究³⁸である。過去のデータには氷床の融解も含まれているため、その影響を考慮した予測を行うことができる可能性がある。図 1-38 は AR4 以降の海面上昇量の予測についてレビューを行った結果である。20 世紀末と比較した場合の 2100 年時点での海面上昇量の予測結果を示しており、いずれの研究においても AR4 による海面上昇量の予測を大きく上回る可能性を指摘しており、1m を超える予測もある。

これらの知見が AR5 にどのように反映されるかは現時点では不明であるが、ニューヨーク市の気候変動対策において、同研究による結果が 1 つのシナリオとして採用されたり、米国政府向けに NOAA が作成した海面上昇シナリオ³⁷の 1 つとして採用されるなど、各所で大きな海面上昇量の可能性を考慮して適応策を策定する動きがある。

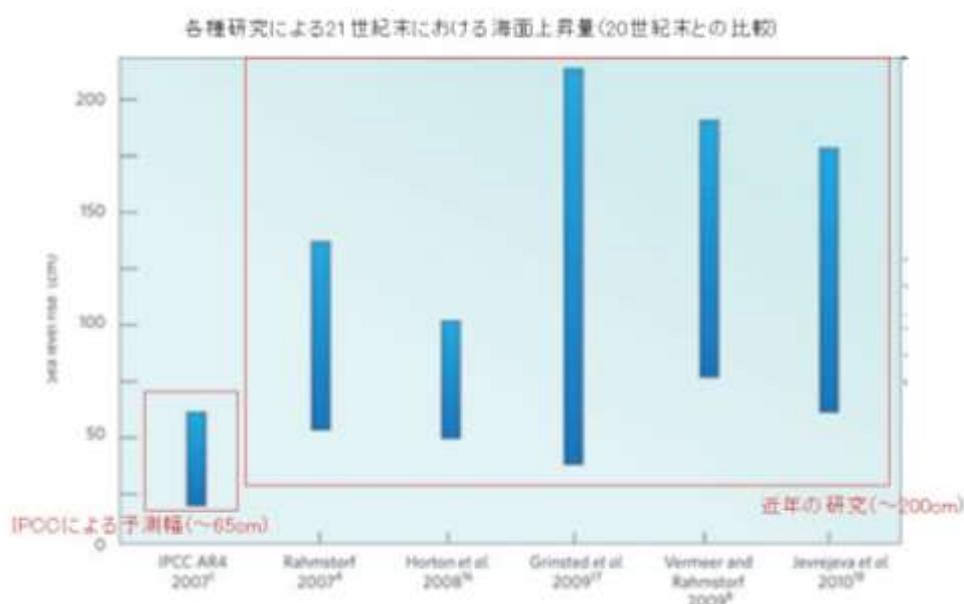


図 1-38 近年の研究による海面上昇量の予測と IPCC 予測の比較 (Rahmstorf, 2010³⁸)

³⁷ NOAA, Global Sea Level Rise Scenarios for the United States National Climate Assessment, NOAA Technical Report OAR CPO-1, 2012.

³⁸ Stefan Rahmstorf, A new view on sea level rise, Nature Reports Climate Change, 2010.

1.3 気候変動影響評価

気候変動は社会の様々な側面に影響を及ぼす可能性がある。特に影響が大きいと考えられる分野については、当該分野の専門家により気候変動影響評価が実施されている。世界全体の気候変動影響については IPCC 第 4 次評価報告書 第 2 作業部会において研究のレビューが行われている。その後 IPCC 以外の国際機関や大学、各国の研究機関でさらに詳細な影響評価が実施されている。日本においても国内の各分野の主要研究機関が参加し、日本の気候変動影響が評価されており、その結果は「日本の気候変動とその影響（2009）」として公開されている。

以下ではこれらの文献をもとに、現時点で実施されている気候変動影響評価についてまとめる。

1.3.1 世界の気候変動影響

世界全体で生じる可能性のある気候変動影響としては、IPCC AR4 による影響評価に加えて世界銀行や国連食料農業機関（FAO）、世界保健機関（WHO）等の主要な国際機関による影響評価の概要を示す。

(1) IPCC 第 4 次評価報告書

IPCC 第 4 次評価報告書の第 2 作業部会では、気候変動による社会への影響について分野毎に取りまとめている。図 1-39 に気温上昇量に対応した分野別の影響を、表 1-7 に代表的な気候変化とそれに伴って生じる社会影響をそれぞれ示す。分野としては水（水資源や干ばつ）、生態系（種の絶滅や植生変化）、食料（穀物生産への影響）、沿岸域（浸水や湿地）、健康（熱中症や感染症）に分けられている。全体的には 2°C を超えると多くの分野で深刻な影響が出ると判断されており、気温上昇を 2°C 以内に抑えることが 1 つの政策的な目標とされている。

世界全体の気候変動影響の統合的な評価としては、現時点で IPCC の報告書に匹敵する規模のものは実施されていない。図中に示されている個別の影響については各分野の研究者により活発な研究が進められており、新しい知見も出されている。

世界平均気温の変化の増大に対応した主要な影響
 (影響は、適応の程度、気温変化の速度、社会経済の道筋によって異なるであろう)

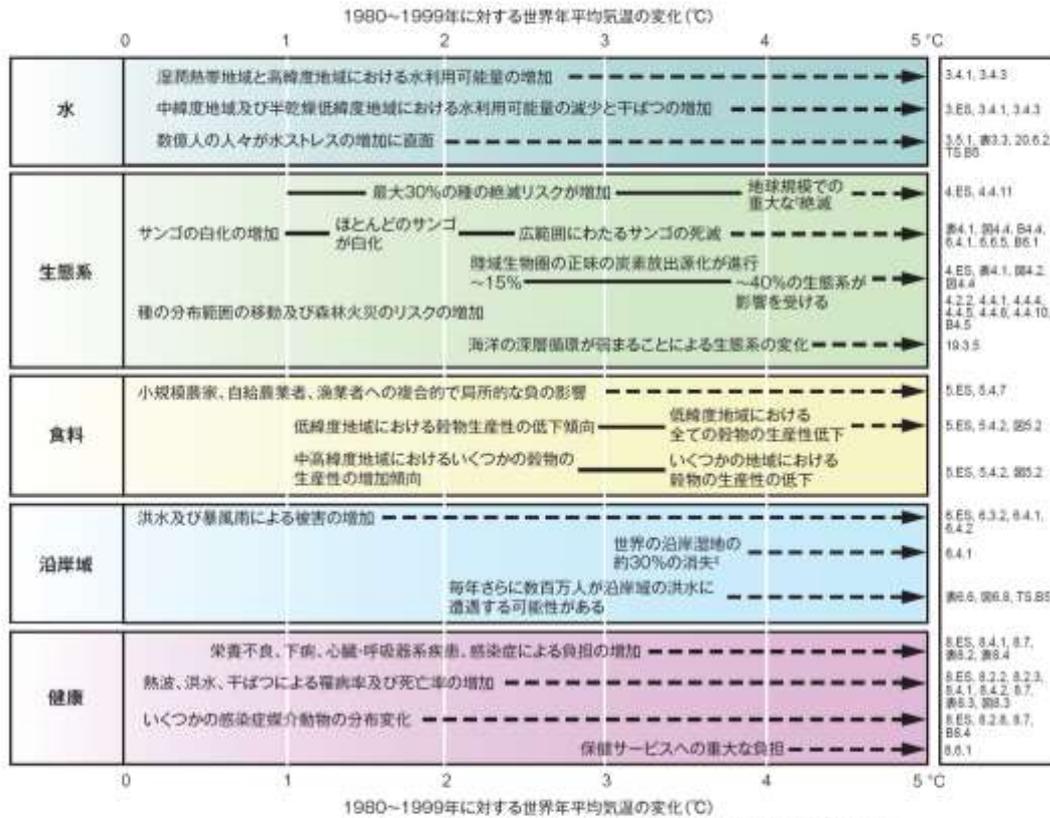


図 SPM.2. 21 世紀の世界平均地上気温の上昇量の違いに対応した気候変動 (及び関連のある場合は海面水位、大気中の二酸化炭素) から予測される世界的な影響の例示 [表 20.8]。黒い線は影響間のつながりを表し、破線の矢印は気温上昇に伴い継続する影響を表す。文章の左端がその影響が起始のおおよその位置を示すように、事項の記述が配置されている。水ストレスと洪水に関する定量的な事項は、排出シナリオに関する特別報告 (SRES) のシナリオ A1FI, A2, B1 及び B2 (Endbox3 参照) の範囲で予測される条件に対応した気候変動の追加的な影響を表す。気候変動に対する適応は本推定には含まれていない。全ての事項は、本評価報告書の各章に記載されている公表研究論文から引用している。出典は表の右側の欄に示してある。全ての記述において確信度は高い。

図 1-39 平均気温の上昇に対応した世界の気候変動影響(IPCC AR4³⁹)

³⁹ IPCC 第 4 次評価報告書第 2 作業部会報告書政策決定者向け要約 (環境省訳) (2007) http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/wg2_spm.pdf

表 1-7 21 世紀中頃または後半までの気候変動と各分野への影響(IPCC AR4³⁹)

現象*及び傾向の方向性	SRESシナリオを用いた21世紀の予測に基づく将来傾向の可能性	各分野に予測される主な影響例			
		農業/林業/生態系 [4.4.5.4]	水資源 [3.4]	人間健康 [8.2.8.4]	産業/居住/社会 [7.4]
ほとんどの陸域で、寒い日や夜の減少と昇温、暑い日や夜の頻度の増加と昇温	ほぼ確実である ³	寒冷環境での収量の増加 温暖環境での収量の減少 昆虫の大発生増加	雪融けに依存した水資源への影響 いくつかの水供給への影響	寒冷曝露の減少による死亡率の低下	暖房のエネルギー需要の減少 冷房のエネルギー需要の増加 都市の大気の質の悪化 雪氷による輸送中断の減少 冬季観光への影響
ほとんどの陸域で継続的な高温/熱波の頻度の増加	可能性が非常に高い	熱ストレスによる温暖地域での収量の減少 森林火災の危険性の増加	水需要の増加 水質の問題(例:藻の発生)	特にお年寄りや慢性の病気を有する人、こども、社会的に孤立した人の熱害関連の死亡リスクの増加	適切な住居を持たない温暖地域の人の生活の質の低下 お年寄りやこども、貧困者への影響
ほとんどの地域で大雨の頻度の増加	可能性が非常に高い	農作物への被害 土壌の侵食、土壌への浸水による耕地の耕作不能化	地表水及び地下水の水質への悪影響 給水の汚染 水不足は軽減されるかもしれない	死亡、怪我及び伝染病、呼吸器疾患及び皮膚病のリスクの増加	洪水による居住、商業、輸送及び社会の分断 都市部や農村部のインフラへの圧力 財産の損失
干ばつの影響を受ける地域の増加	可能性が高い	土地の荒廃 収量の低下/作物の被害及び不作 家畜の死亡の増加 森林火災のリスクの増加	より広範囲にわたる水ストレス	食料及び水不足のリスクの増加 栄養不良のリスクの増加 水・食品を原因とする病気のリスクの増加	居住、産業、社会における水不足 水力発電能力の低下 住民移住の可能性
強い熱帯低気圧の活動度の増加	可能性が高い	農作物への被害 木々の風倒(根がえり) サンゴ礁への被害	公共の給水の断絶を引き起こす停電	死亡、怪我、水・食品を原因とする病気のリスクの増加 心的外傷後ストレス障害	洪水及び強風による分断 民間保険会社の脆弱地域に対するリスク保障からの撤退 住民移住の可能性 財産の損失
極端な高潮位の発生増加(津波を含まない) ⁴	可能性が高い ⁴	灌漑用水、河口、淡水システムの塩性化	塩水の侵入による淡水利用可能量の減少	洪水による溺死及び怪我のリスクの増加 移住に関連した健康影響	沿岸防護コスト対土地利用の配置転換コスト 住民及びインフラの移動の可能性 また上記の熱帯低気圧の項も参照

* 定義に関する更に詳細な点については、第1作業部会第4次評価報告書の表3.7を参照

³ 各年の最も極端な日中と夜間の昇温

⁴ 極端な高潮位は平均的な海面水位及び地域の気象システムによって左右される。これは、ある標準期間における観測された海面水位の1割増しの位と定義される。

⁵ 全てのシナリオにおいて、2100年時点で予測される世界平均海面水位は標準期間よりも高い(第1作業部会第4次評価報告書10.6)。海面水位の極端な現象に対する地域的気象システムの変化の影響は評価されていない。

表 SPM.1. 21世紀半ば及び後期までの予測に基づいた、極端な気象及び気候現象の変化によって起こりうる気候変動の影響の例。これらは適応能力の変化や発達を考慮していない。全事項の例は、評価報告書本編の各章で見ることができる(欄の上端の出典を参照)。表の最初の2列(黄色の網掛け)は、第1作業部会第4次評価報告書から直接引用されている(表SPM.2)。2列目の可能性の推定は、1列目に記載された現象について述べている。

(2) 他機関での影響評価

IPCC 第 4 次評価報告書により全般的な気候変動の影響が示され、気候変動の問題に対する人々の関心も高まったことを受けて、国連の各専門機関では自機関の担当分野についての影響評価が行われた。主なものを下記に示す。

1) 健康分野

世界保健機関(WHO)では、気候変動により現時点で生じている健康面での影響(感染症、熱中症など)と、それに対する効果的な対策について報告書“Atlas of health and climate⁴⁰”としてまとめている。感染症としてはマラリア、下痢、髄膜炎、デング熱の 4 種類を取り上げ、現在深刻な影響が生じている地域を示すとともに、有効な対策について述べている。災害としては洪水・サイクロン、渇水、危険物質の大気拡散を取り上げ、途上国における代表的な被害の状況と対策について述べている。さらに、今後深刻化する可能性のある健康影響として、熱ストレス、紫外線、花粉、大気汚染を取り上げ、現在気候での被害の分布と将来変化の可能性、それに対する対策について記述している。

また、定期的に気候変動の影響に関するファクトシートを公開しており、各時点での気候変動影響に関する最新の知見を知ることができる。最近公開されたファクトシート⁴¹では、以下のような状況が報告されている。

- 1970 年代から 2004 年の間に進行した地球温暖化の影響により、年間 14 万人の超過死亡(気候が変化しなかった場合との比較)が生じている。
- 2030 年までに、直接的な健康被害(農業や水資源等からの間接影響を除く)のため年間 20-40 億ドルの経済コストがかかると推定される。
- 下痢、マラリア、デング熱、栄養不足など、死に繋がる代表的な病気は気候に対して敏感であり、気候変動によりこれらの病気の影響は悪化すると予想される。
- 健康インフラが脆弱な地域(主に発展途上国)の適応能力が最も低く、援助が必要である。

2) 農業・食料分野

農業・食料分野では国連食糧農業機関(FAO)により気候変動による影響が調査されている。特に、今後の食料の安定供給において気候変動の影響は大きな課題であると認識されている。影響に関する 2011 年の報告書⁴²では、気候変動が世界の農業生産及びその基盤となる水資源に与える影響と、それに対する適応策について記述している。図 1-40 は農業用水資源の

⁴⁰ WHO(2012), Atlas of health and climate,
<http://www.who.int/globalchange/publications/atlas/report/en/index.html>

⁴¹ WHO(2012), Climate change and health, Fact sheet No. 266,
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs266/en/index.html>

⁴² FAO(2011), Climate change, water and food security.

うち、気候変動による影響を受けると予想される地域を示したものである。図中の地域の分類は農業の形態（作物の種類および農法）によって決められており、分類毎に影響の度合いおよび適応の方法が異なっている。また、主に発展途上国における適応策の支援を目的として作成した適応フレームワークの報告書⁴³では、FAO としての気候変動適応の考え方、優先順位および具体的な取り組みについて記述している。

Figure i: Main agricultural water management systems that climate change is expected to impact

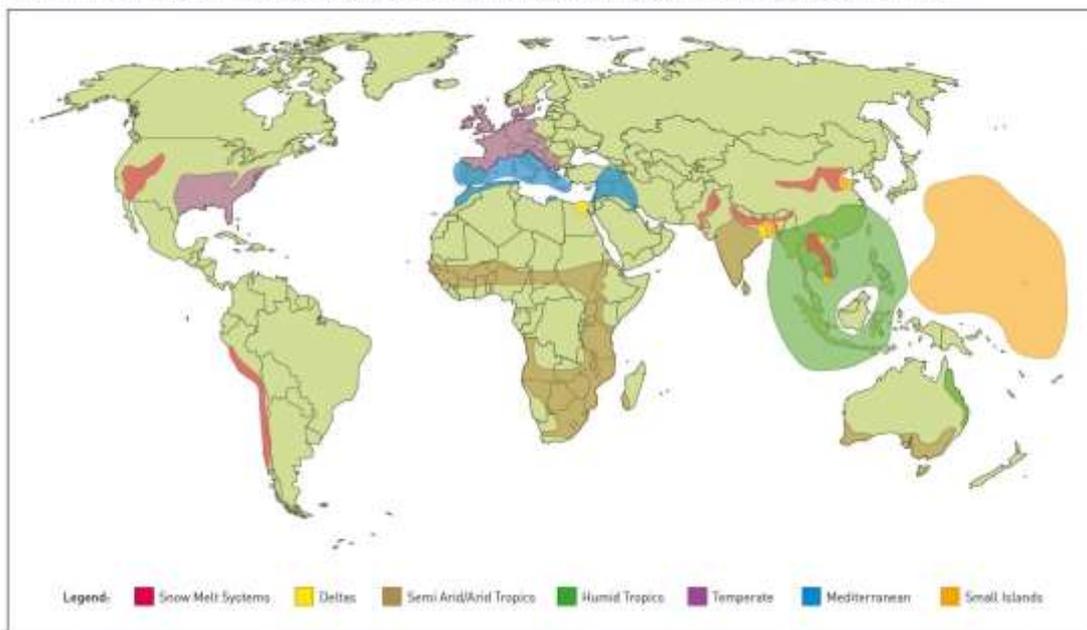


図 1-40 気候変動による影響を受けると予想される農業用水資源の位置と区分（FAO⁴²）、赤：融雪水地域、黄：デルタ地域、茶：半乾燥・乾燥地域、緑：湿潤熱帯地域、紫：温帯、青：地中海、橙：島嶼地域

そのほかの機関による影響評価の中で、経済モデルに基づく定量的な予測を示しているものとして頻繁に引用されているのが国際食料政策研究所（IFPRI）による影響評価⁴⁴である。穀物価格の将来変化について予測を行い、現在と比較して将来の穀物価格が明確に増加することを示している。図 1-41 及び図 1-42 に主要農作物および主要畜産物の価格の 2050 年時点での予測が示されており、特に主要農作物については 2 倍以上になる可能性もあるとしている。IFPRI 自体は一非営利組織であるが、本成果は上記の FAO 報告書を含め各所で引用されている。

他の機関の影響評価として、OECD による農業分野の気候変動影響に関する報告書⁴⁵も公表されているが、主な内容は農業分野の気候変動影響及び適応策について既往研究のレビューであり、OECD 独自の定量的評価は実施されていない。

⁴³ FAO(2011), FAO-Adapt Framework Programme on Climate Change Adaptation.

⁴⁴ IFPRI(2009) Climate Change: Impact on Agriculture and Costs of Adaptation.

⁴⁵ OECD(2010) Climate Change and Agriculture: Impacts, Adaptation and Mitigation

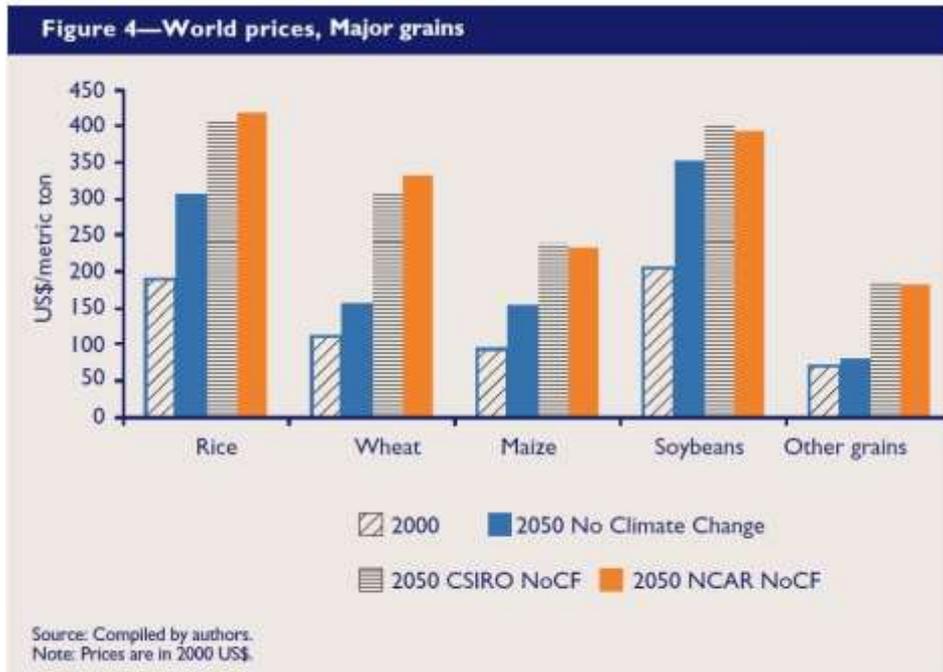


図 1-41 主要穀物の価格変化 (IFPRI⁴⁴) : 2000 年と 2050 年の比較。気候変動影響無し/有りの場合、および 2 つの気候モデルによる結果を比較。CO₂ 濃度上昇による施肥効果は考慮されていない。

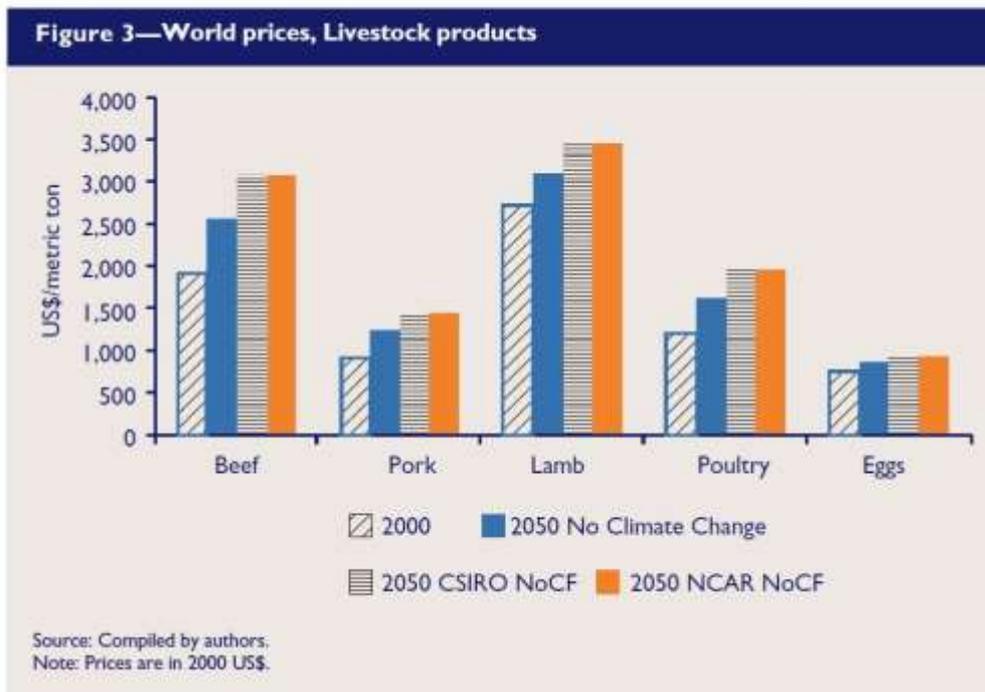


図 1-42 主要畜産物の価格変化(IFPRI⁴⁴) : 2000 年と 2050 年の比較。気候変動影響無し/有りの場合、および 2 つの気候モデルによる結果を比較。CO₂ 濃度上昇による施肥効果は考慮されていない。

3) 難民・人道支援

気候変動の影響により生じた難民は気候難民と呼ばれ、近年問題視されるようになってい
る。影響の種類は様々であり、ツバルのように海面上昇により居住地が失われるケース、バ
ングラデシュのサクロン・ナルギスの被害のように巨大な台風により住居が浸水し、難民と
なるケース、さらには水不足や食料不足に起因する内戦により難民が生じるケースなどがあ
る。ただし、純粋に気候変動の影響により生じた難民と通常の難民を完全に区別することは
実質的には難しく、気候難民の定義や認定基準は曖昧にならざるを得ない。国連難民高等弁
務官事務所（UNHCR）では毎年気候難民の数を報告するとともに、将来生じる可能性の
ある気候難民の数に関する予測を公表している⁴⁶。同報告書の予測によると、21 世紀中頃
までに、気候を原因とする難民の数は 5000 万人～2 億人に達する見通しである（国内、国
外を問わず）。これだけの数の難民が生じた場合、難民を受け入れる側の国にとっても大き
な負担となる可能性がある。

4) 高位シナリオに対する影響評価

気候変動による大幅な気温上昇が及ぼす負の影響を明確にし、特に気候変動に対して脆弱
な地域への対策の実施を呼びかける目的で、世界銀行は「気温上昇 4℃による世界への影響」
を評価している⁴⁷。同報告では、温室効果ガス削減に関する追加的な行動や約束が達成され
ない場合、今世紀末までに気温は 3℃以上（産業革命以前との比較で）上昇する可能性が高
く、20%程度の確率で 4℃を超える可能性があるとしている。従って、4℃の想定は極端な
ものではなく、普通に起こりうるシナリオの中の一つである。

4℃の気温上昇により起こりうる影響として以下が挙げられている。

- 熱波の増大：
海面より陸面の気温上昇幅のほうが大きく、多くの陸地で平均 6℃の気温上昇が予測
される。これにより熱波の頻度が高くなり、2010 年にロシアで生じた熱波のような
現象がより頻繁に観察されるようになるだろう。
- 海洋酸性化：
4℃の気温上昇シナリオでは、大気中の CO₂ 濃度は 800ppm を上回る。従って海洋
酸性化の規模も大きく、いくつかの地域では珊瑚礁全体が死滅する可能性がある。そ
の他の海洋生態系にも大きな影響が懸念される。
- 海面上昇：
4℃の気温上昇シナリオでの海面上昇量は 0.5m～1.0m と予想され、これ以上の海面
上昇が生じる可能性もある。これにより、特に熱帯域の低地に存在する大都市や島嶼
部が浸水のリスクにさらされることとなる。
- 食料・水・生態系・健康

⁴⁶ IOM/UNHCR/UNU(2009), “Climate change, migration, and displacement: impacts, vulnerability, and adaptation options”, Submission to AWG-LCA, UN Framework Convention on Climate Change.

⁴⁷ The World Bank (2012), Turn Down the Heat: Why a 4℃ Warmer World Must be Avoided.

人間の生存に欠かせないこれらの要素が失われるリスクも、2°C上昇シナリオと比較して4°Cシナリオの方がかなり大きくなると考えられている。特に乾燥化が予想される地中海沿岸、北米、オーストラリア南部等では大きな影響が予想される。一方でシベリアや北欧等、降水量の増加が予想される地域もあり、このような地域では条件が緩和される可能性がある。

- 気候難民

気候変動に加え、経済発展と人口増加は確実に発生する。これらの要因が組み合わさることにより、地域の生態系が持つ維持能力を超えてしまった場合、大規模な移民の発生が懸念される。

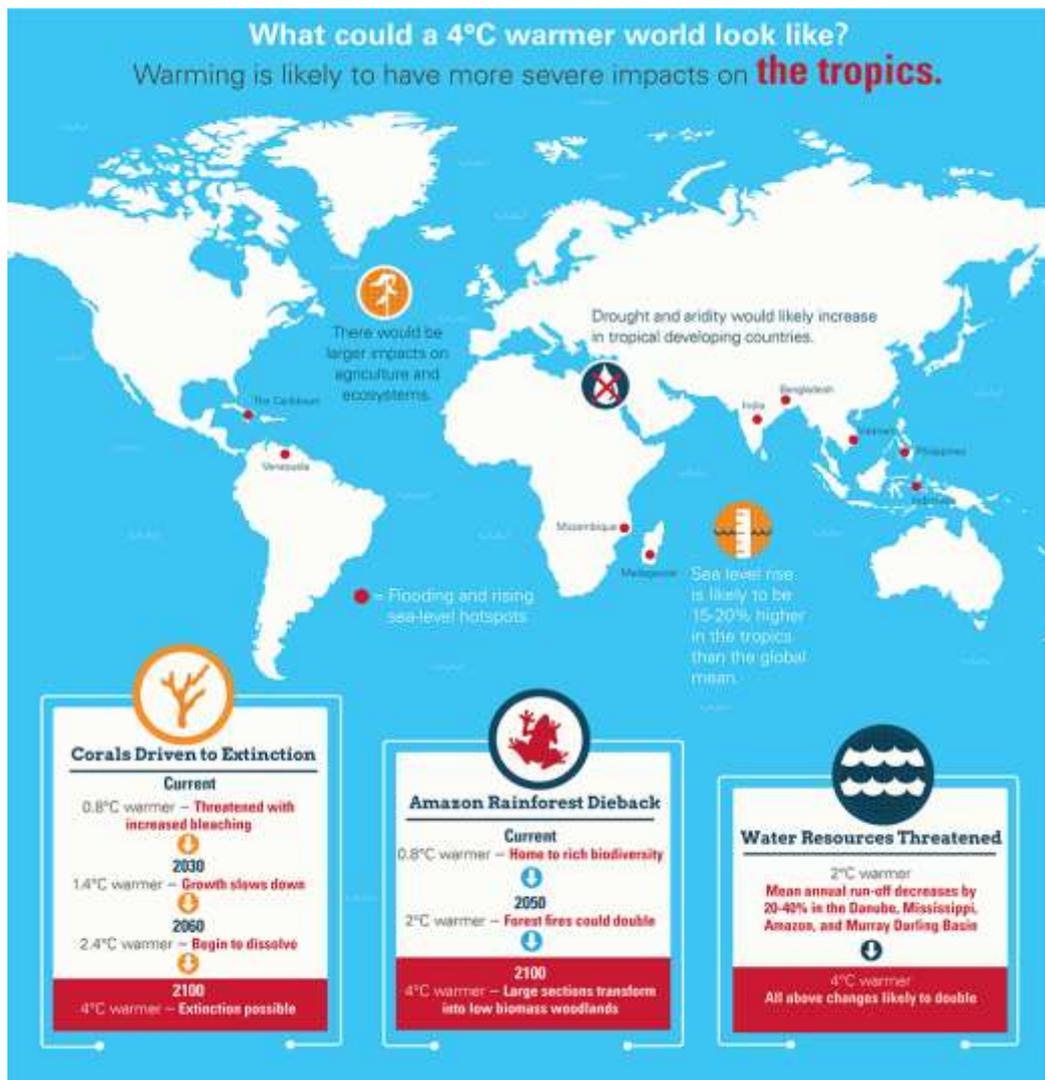


図 1-43 4°Cの気温上昇による世界全体の影響の外観⁴⁷。地図内に赤点で示されているのは、海面上昇および洪水リスクの増大が顕著な地域である。地図内の絵柄では、農業・生態系影響、熱帯域の発展途上国における渇水の深刻化、熱帯域での海面上昇が他の地域より大きいことが示されている。下図では、気温上昇に伴う影響の典型的な例として、サンゴ、アマゾンの熱帯林、水資源が挙げられており、それぞれ気温上昇2°Cの場合と比較した場合の4°Cの影響の深刻さを示している。

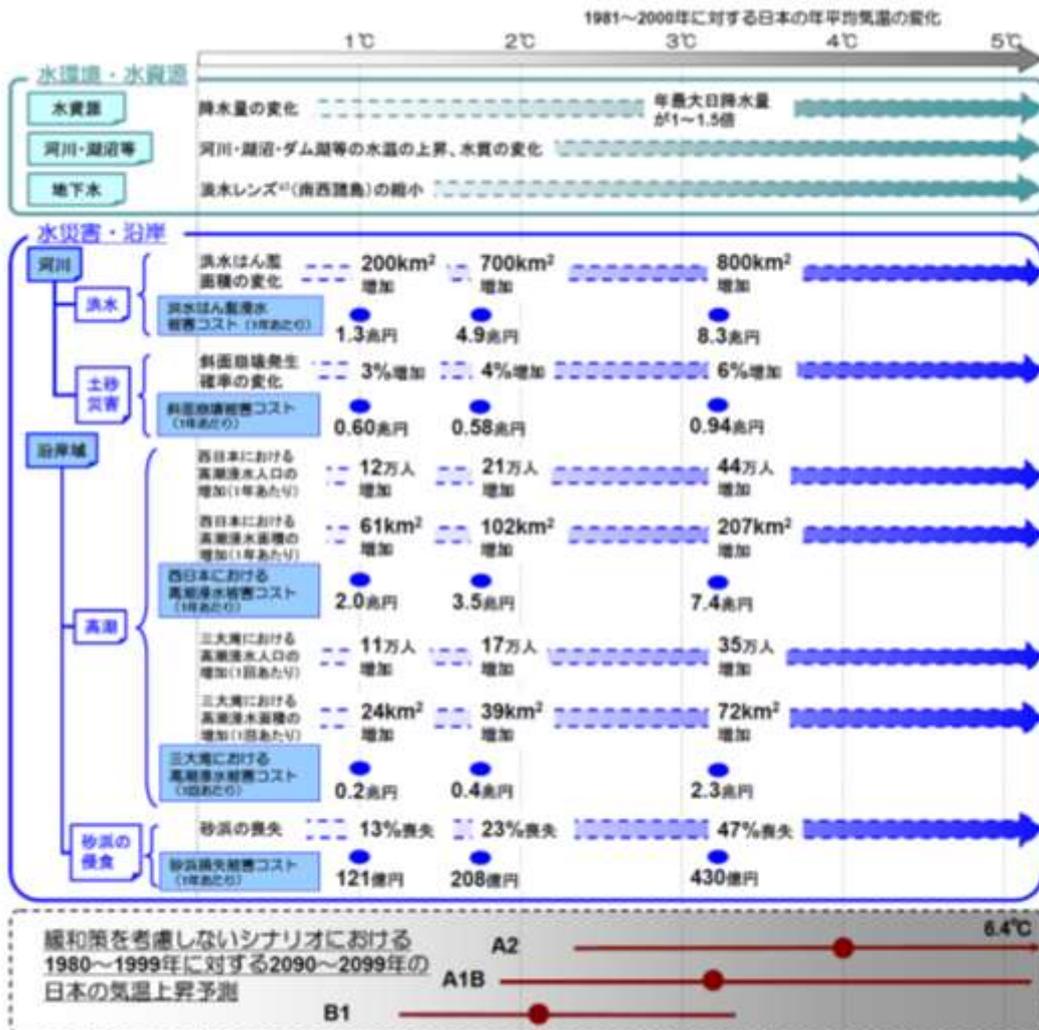
1.3.2 日本の気候変動影響

日本における気候変動の影響に関する網羅的な評価としては文部科学省・気象庁・環境省による「日本の気候変動とその影響⁴⁸」が挙げられる。国内の各分野の研究者により構成された温暖化影響総合予測プロジェクトによる研究成果をもとにしており、農業影響は農業環境技術研究所や農村工学研究所、水害は国土技術政策総合研究所、森林は森林総合研究所、漁業は農林水産業研究センターなどが参加し、各分野の専門的知見に基づいた影響の評価が行われている。

行われた評価を分野別に取りまとめた結果を図 1-44、図 1-45 に示す。日本は歴史的に台風や豪雨などによる水害を受けてきており、豪雨の将来変化に伴う経済影響は特に重要視されている。また、水資源では渇水の頻度の変化が主な論点である。自然生態系については、白神山地のブナ林やサンゴ礁、高山植物に代表される貴重な自然資源に対する影響が評価されている。食料に関しては主要穀物であるコメに対する影響と、気象条件に対する影響を受けやすい果樹に対する影響が考慮されている。健康面での影響は、現時点でも問題となっている熱中症の被害が将来増加する可能性が予測され、感染症については媒介となる種類の蚊の分布域が北上することが予測されている。

本報告書については、最新の研究成果を反映した更新版が 2013 年 4 月以降に公表される予定であり、より詳細かつ広範囲の予測結果が利用可能となると予想される。

⁴⁸ 文部科学省・気象庁・環境省：日本の気候変動とその影響、2009 年 10 月



- 1) 気温上昇予測については、図3.2.5における予測結果をもとに、図4.1.1と同様、可能性の高い予測幅を、平均予測値の-40~+60%で示している。図4.1.2(2)も同様。
- 2) 予測された定量的な影響は、1981~2000年を基準とした値。図4.1.2(2)も同様。
- 3) 洪水はん濫、斜面崩壊、高潮浸水、砂浜喪失の影響及び被害額の算定に当たっては、SRES B2シナリオによる解析結果を使用している。各影響の発現に大きく関与する降水量及び海面水位の上昇は以下の予測に基づく(1981~2000年を基準としたときの変化量。年平均降水量変化は%、海面水位上昇はcmで表す)。(温暖化影響予測総合プロジェクトチーム、2009)。
 - 平均気温が1.0℃上昇：年平均降水量は1%増加、海面水位は7cm上昇
 - 平均気温が1.7℃上昇：年平均降水量は7%増加、海面水位は12cm上昇
 - 平均気温が3.2℃上昇：年平均降水量は13%増加、海面水位は24cm上昇
 なお、高潮浸水予測においては、西日本については毎年発生する影響・被害を推定、三大湾については、最大級の台風が来襲した場合1回あたりの影響・被害を推定している(温暖化影響予測総合プロジェクトチーム、2009)。
- 4) 各項目別の影響評価に関する備考。
 - <降水量の変化> 2081~2100年の予測(RCM20使用)を同期間の気温上昇量に読み替えている。(国土交通省社会資本整備審議会、2008)
 - <河川・湖沼・ダム湖等の水温の上昇、水質の変化> 過去の変化からの推定。(尾崎ら、1999)。(堀島ら、1998)。(草場ら、2007)
 - <淡水レンズ(南西諸島)の縮小> 定性的な推定。(神野ら、2006)

図4.1.2(1) 日本における平均気温変化に伴う影響の事例(1)

矢印は気温上昇に伴い影響が継続することを示す。文章の左端がその影響が出始めるおおよその気温上昇のレベルを示すように、事項の記述が配置されている。また、被害コスト試算については、特定の気温上昇レベルにおける試算例を示している。(図4.1.2(2)も同様。)

出典：温暖化影響総合予測プロジェクトチーム、2009 をもとに作成

⁴³ 透水性の土質の地下で、海水と淡水の比重差から、島の地下水(淡水)が海水(塩水)の上にレンズ状の形で浮いているものをいう。

図 1-44 日本における気温上昇に対応した各分野の気候変動影響(水資源、水害⁴⁸)



- 1) ブナ林の適域変化、熱ストレス死亡リスク変化及びこれらの被害コストの算定に当たっては、SRES B2 シナリオによる解析結果を使用している(温暖化影響予測総合プロジェクトチーム、2009)。
- 2) 各項目別の影響評価に関する備考。
 - <ブナ林の適域> ブナ林の適域とは、ブナ林の分布確率が0.5以上である地域を示す。(温暖化影響予測総合プロジェクトチーム、2009)
 - <マツ枯れ> マツ枯れ危険域ではないマツ分布地域が危険域に変化する割合を推計。(温暖化影響予測総合プロジェクトチーム、2009)
 - <高山植物群落の減少> 定性的な推定。(環境省地球温暖化影響・適応研究委員会、2008)。(増沢、2005)。(Naganuma et al., 2006)
 - <サングの白化、北方種の減少・南方種の増加> 複数研究のレビュー。(Hughes et al., 2003)。(Harley et al., 2006)。(Nakano et al., 1996)
 - <サクラの開花> CO₂濃度上昇の影響を考慮していない。2082~2100年の予測(RCM20使用)を同期間の気温上昇量に読み替えている。サクラ開花が2週間早まる際の春季(2~4月)の気温上昇量平均値は約3.3°C。(清水ら、2007)
 - <コメ収量> CO₂濃度上昇の影響を考慮している。地域別に見ると、北海道、東北では気温上昇とともに増収する傾向は続くが、西日本ではおよそ3°Cを超えると減収に転じる。(温暖化影響予測総合プロジェクトチーム、2008)
 - <果樹栽培適地> CO₂濃度上昇の影響を考慮していない。気温上昇に伴い新たに栽培適地となる地域もある。(杉浦ら、2004)
 - <回遊魚の生息域の変化、養殖適地の北上> (伊藤、2007a)。(伊藤、2007b)。(桑原ら、2006)
 - <熱ストレス死亡リスク> 至適気温⁴⁴⁾を過去のデータを用いて個別に推定し、至適気温が将来にわたり変化しないと仮定して、高気温による超過死亡率(熱ストレス死亡リスク)を予測している。(温暖化影響予測総合プロジェクトチーム、2009)
 - <ヒトスジシマカ> 2035年、2100年の予測(MIROC使用)を同年の気温上昇量に読み替えている。(Kobayashi et al., 2008)
 - <熱中症や熱ストレス、感染症等>健康分野での知見に基づく推定。(環境省地球温暖化影響・適応研究委員会、2008)
 - <スキー場利用者> 北海道と標高の高い中部地方以外の、ほとんどのスキー場での利用者が30%以上減少すると予測。(Fukushima et al. 2002)
 - <真夏日日数> 図3.2.7より

図 4.1.2 (2) 日本における平均気温変化に伴う影響の事例 (2)

44 気温と死亡の関係において、気温と総死亡率の関係曲線上(V字型の曲線)で死亡率が最低となる気温。

図 1-45 日本における気温上昇に対応した各分野の気候変動影響(自然生態系、食料、健康、国民生活⁴⁸⁾)

1.4 気候変動適応

以下では、気候変動適応に関する国際的な取り組みと各国での適応策策定に関する検討状況について記述する。

1.4.1 世界での気候変動適応

これまでの記述の通り、IPCC の極端現象に関する特別報告書（SREX）の主目的の一つは、極端現象の将来予測に関する研究をレビューし現時点での知見を取りまとめることである。さらに、もう一つの重要な目的として IPCC SREX が掲げているのは、気候変動適応の災害リスクマネジメントへの組み込みである。既に各国で定常的な活動として実施されている災害対応に適応変動影響への対応を組み込むという意味で、気候変動適応のメインストリーミングとも呼ばれる。

図 1-46 に IPCC SREX 全体としての災害リスク対応のコンセプトを示す。中心に災害リスクがあり、それは気象・気候現象、脆弱性、暴露の 3 つの要素で構成されるとしている。気象・気候現象は外力やハザードとも呼ばれ、豪雨や渇水などの現象の大きさを示す。これまでに示したように、気候変動によりこれらの現象の規模が大きくなることが予測されており、変化するハザードに対応しなければならないという点がこれまでの災害リスクマネジメントと大きく異なる点である。脆弱性は予防策・緊急対応などの対応能力を示す。今後の対策実施においてどの程度の災害まで見込んで対応するか、というのは常に大きな問題となる。暴露は災害の影響を受ける地域の人口や資産などを示し、将来の人口増加や人口構成の変化、経済発展により暴露の状況も変化すると考えられる。IPCC SREX では、これら全ての要因を考慮した上で気候変動への適応を考えるべきであるとしている。

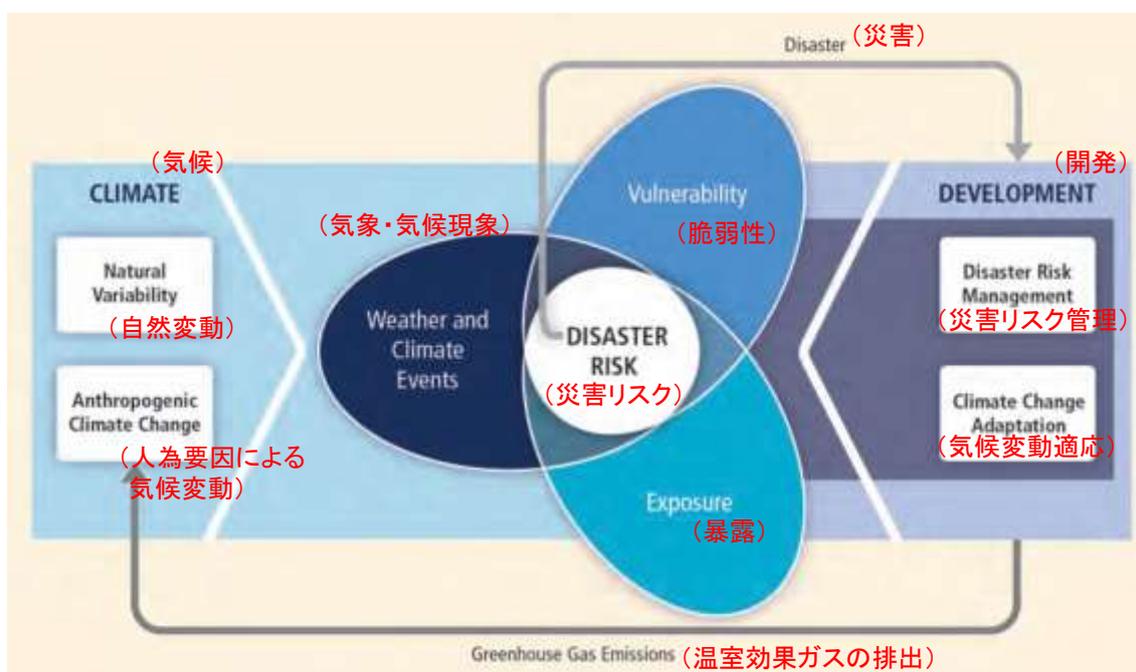


図 1-46 IPCC SREX のコアコンセプト：外力、脆弱性、暴露とそれらに影響を与える気候変動影響（左）および気候変動適応策（右）

気候変動適応においては、上記の 3 要素が時間とともに変化するという状況のために、状況によっては通常の災害リスクマネジメントとは異なる対応が必要となる。気候変動適応策の各地域への適用はまだ始まったばかりであるが、既に実施された適応策やその検討段階での知見より、適応策を実施する際に一般的に有効と考えられる方向性について以下のように取りまとめられている。

- ローリグレット対策 (low regret, 現時点の防災対策にもなり、将来の変化にも対応できるもの) を手始めに実施するのは妥当な選択である。(high agreement, medium evidence)
 - ✓ 例：早期警戒システム、リスクコミュニケーション、持続可能な土地管理（土地利用計画など）、生態系の保全・回復
- 有効なリスクマネジメントは、単一の対策でなく、複数の対策の組み合わせ (=ポートフォリオ) である。(high confidence)
 - ✓ 例：インフラ系のハード対策と、災害時の応急体制の構築、生態系の保全の組み合わせ
- 現象側からみても、単一事象でなく マルチハザードのリスク を考えることが重要である。(high agreement, robust evidence)
- 災害リスク低減のための 国際的な財源 はあるものの、ハザードの規模を考えると十分とはいえない。(high confidence)
- 国際レベルの災害リスク低減の取り組みが、必ずしも地域で見た場合のリスク低減につながっていない場合がある。地域レベルの知識と科学技術的な知見を組み合わせる ことが有効である。(high agreement, robust confidence)
- リスクコミュニケーション を適切なタイミングで、適切な量行うことが有効である。(high confidence)
 - ✓ 例えば、予測の不確実性や複雑さを明示することは有効である。
- 固定された対策でなく、将来の気候的、社会経済的变化に応じて柔軟に対策を変更 できることが必要である。モニタリング→リサーチ→評価→学習→イノベーションのサイクルが重要である。(high agreement, robust evidence)
- リスクの変化が小さい場合は、現在の対策の延長で対応できるが、変化が大きい場合には 社会システムの抜本的な再構築 が必要となる可能性もある。(high agreement, robust evidence)
- 極端現象に対するリスクマネジメントおよび適応を行うことは、社会・経済・環境の各面での 持続可能性を向上 させることにつながる。(medium agreement, robust evidence)
- 適応あるいは災害リスク低減の対策として最も有効なのは、比較的 短期間のうちに開発の面での効果が生じるとともに、長期的な脆弱性の低減 につながるものである。(high agreement, medium evidence)
 - ✓ 短期的な目標と長期的な目標は異なることが往々にしてあり、それらに折り合いをつけることは簡単ではない。
- 持続可能な開発を進めるためには、現在の仮定やパラダイムにとらわれず、新しい解決方法を探るためのイノベーションを創発 することが重要である。(medium agreement, robust evidence)

- 気候変動の緩和および適応と災害リスクマネジメントには相互作用が存在し、この相互作用は持続可能な開発に影響を与える。(high agreement, limited evidence)

1.4.2 先進国における気候変動適応

気候変動による負の影響を受けやすいのは適応能力の低い発展途上国であり、これは IPCC 第 4 次評価報告書においても、それ以前の各種研究でも指摘されている。一方でこれまでに排出された温室効果ガスの大半が先進国によるものである。このような経緯から、これまでの温暖化対策の国際交渉では「途上国の気候変動適応を先進国が支援する」という文脈で主に議論がなされてきた。そのため、先進国では自国向けの気候変動対策は緩和策とほぼ同義として扱われてきており、先進国における適応策の重要性が認識されたのは近年、特に IPCC 第 4 次評価報告書以降である。

先進国の気候変動適応策について、Ford et al. (2011)⁴⁹では国別および影響分野別に適応策に対する取組み状況がまとめられている。以下では同文献をもとに、各国で気候変動適応の問題が認知されることとなった経緯と、国内の各主体（政府、自治体、企業、民間団体）の取組み状況についてまとめる。

(1) 米国

米国では、近年（過去 5~7 年）急速に国内の気候変動影響に対する適応の重要性が認識されており、政府、州、地方の各レベルで適応のための様々な検討・活動が開始されている。

メディア等での温暖化対策の議論では、これまでは温暖化対策推進派の間でも適応の話題はタブー視されていた。温室効果ガスの削減こそが根本的な解決であり、適応のような対症療法に注意を向けることは許されない、という考え方である（アル・ゴアも当初はこのような考え方であったと指摘されている）。適応を考えることは、緩和の失敗を認めることに等しい、という見方もあった。このように、適応策と緩和策は相容れないものと見なされてきたが、2007 年の IPCC 第 4 次評価報告書において適応・緩和の両方が必要と明記されたことにより、適応策の必要性が徐々に認められるようになり、両対策の相互補完的な性質や相乗効果の可能性についても認識されつつある。

適応に関する米国政府の政策の進展にとってターニングポイントとなったのは 2006 年の中間選挙ある。当時野党であった民主党が下院で多数を占めたことで、気候変動対策に関する法案に関する審議が進展し、その結果として 2008 年に米国学術会議(NRC)による "America's Climate Choice" と呼ばれる研究プロジェクトが開始され、気候変動の適応・緩和に関する科学的検討が進められた。この結果は以後の政策的な判断の基礎となっている。それ以外にも各政府機関のレベルで、分野毎の気候変動の影響に関する検討が開始された。例えば、国立公園を管理する National Park Service では沿岸侵食による影響が、陸軍工兵隊(USACE)では海面上昇による護岸整備への影響が検討された。このような検討のうち一部は公式文書の中に明記されたが、法的強制力を持たず、政策の実際の実行段階において影響を与えられる段階には達していないのが現状である。

生物多様性保全の側面からは、米魚類野生生物局（Fish and Wildlife Service）を中心と

⁴⁹ Ford et al. (2011), *Climate Change Adaptation in Developed Nations*, Springer.

した部門横断的な取り組みとして、2013年に”The National Fish, Wildlife and Plants Climate Adaptation Strategy”⁵⁰が策定されており、気候変動による植生や動物への影響が評価されるとともに、生物多様性保全のための対策として、気候変動に対する耐性のあるエリアを同定し重点的に保護することや、モニタリング体制の強化、気候以外のストレス要因の緩和などの戦略が定められている。

州レベルでの適応策については、取り組みが開始されるきっかけとしては中央政府が実施した地域的な影響評価のプロジェクトを母体としている場合と、各地域で課題となっている気候の変化に対応する必要性から生じている場合がある。州によって課題の認識や対応の度合い、適応ニーズに大きな開きがある。州での総合的な適応の取り組みを進めている州としてはアラスカ州、カリフォルニア州、メリーランド州、オレゴン州、フロリダ州、ワシントン州、マサチューセッツ州などが挙げられている（この数は急速に増加している）。個別の現象に対応した適応の取り組みとして代表的なのは渇水への対応であり、ニューメキシコ州の”New Mexico’s 2006 Drought Plan”等では将来の気候変動の可能性を認識している。他にも沿岸整備、農業、林業、観光、自然保護などで事例が確認されるが、殆どが計画段階にとどまっており、実行段階への移行は予算状の理由、ステークホルダー間の合意の問題などにより進んでいないのが現状である。

都市レベルでの適応の取り組みは州と同様の状態である。適応の取り組みが始められるきっかけとしては、(1)政策の検討に関して政府による補助を受けている場合、(2)ICLEIによるプロジェクトとして始められる場合、(3)その他独自の検討に分けられる。ニューヨーク市は独自の検討であるが、政府による地域的な気候変動予測のプロジェクトが科学的予測の基礎となっている。

多くの都市における適応計画では、各都市にとって重要な影響を及ぼす対象に絞って検討を行なっている。ニューヨーク市では海面上昇がインフラに与える影響と、それに対する対策が主な検討内容である。カリフォルニアなど、気候変動の影響評価は実施しているものの、政策の変更には至っていないケースもある。現時点では、都市での適応が議論される範囲は自治体職員および議員に限定されており、住民の参加は十分に得られていないケースが多い。どのように自治体が市民を巻き込み、適応策を意味のあるものにしていくかは今後の課題である。

(2) 英国

この10年間、英国政府は世界および国内の気候変動に関する制度的・科学的検討をリードしており、気候変動予測情報のラインナップや気候変動適応実施のための体制においても国全体の対応としては最も充実しているといえる。特に、2008年に制定されたClimate Change Actは、気候変動に対応するための長期的かつ拘束力のある世界で初めての法律であり、他国が気候変動適応の法制度を検討する際のモデルとなっている。

気候変動の検討に関する歴史を見ると、1980年～1990年代中頃に初期の英国への気候変動影響評価(CCIRG)が実施されているが、当時は気候変動対策は政策的には緩和中心であ

⁵⁰ USFWS, NOAA & State of New York, The National Fish, Wildlife and Plants Climate Adaptation Strategy, 2013.

<http://www.wildlifeadaptationstrategy.gov/strategy.php>

った。1990年代中頃～2000年台中頃には、UKCIP(United Kingdom Climate Impacts Programme)が設立され(1997年)、以降はUKCIPが中心として影響評価、適応の取組みを行うこととなる。この時点で各主体が適応策を検討するためのAdaptation Wizardが公開された。地域での適応策の水深に関しては、地域の各機関とパートナーシップを組み、影響評価を進めた(Climate Change Impact Partnerships)。この精度の最大の特徴は地域が主担当である点であり、これがその後の適応の取組みにもつながった。2000年代後半～現在では、2008年に制定されたClimate Change Actが緩和・適応の取組みの基礎となっている。法案検討の段階で、当初は適応の扱いが小さかったが、政府の検討の結果、適応についても明確な行動が必要との結論に達し、主要なテーマとなった。具体的には国全体でのリスク評価(Climate Change Risk Assessment)を行い、5年毎の更新を義務付けた。また、適応策の実現のための国家プログラム(National Adaptation Programme)を設置した。

国レベルの適応の検討は、各省庁による適応プラン(Departmental Adaptation Plan)の作成の他に、気候変動法に基づく適応プログラム(National Adaptation Programme)の作成を進めており、2012時点で進行中である。

地方政府においては、地方の気候変動対策は近年までは緩和中心であったが、適応に関する取組みも徐々に進められている。現時点での適応の取組みは、地方による温度差が大きい。特に規模の小さな自治体では資金面、人材面の問題から十分に対応できていない場合もある。国では自治体をサポートするためのワークショップ等を行なっている。

民間セクターにおいては、公共セクターと比較して適応の活動は低調であると見なされている。民間企業への影響と対策について先行的な取組みを行なっている団体として、機械工学関連の団体(Institute of Mechanical Engineers)、保険業界団体(Association of British Insurers)、英国産業連盟(CBI、日本の経団連に相当)などが挙げられる。

(3) オーストラリア

豪州の適応策の歴史は、2004年に豪州への気候変動影響および適応策を検討するプログラム(National Climate Change Adaptation Program)が設立され、これに従って国全体の影響評価が行われている。また、2007年、州レベルでの適応策の検討を進めるための精度(National Adaptation Framework)が設置されている。

国レベルの適応策の検討では、National Climate Change Adaptation Programが国レベルの適応策に関するガイドライン作成、計画ツールの整備、情報提供において現在も中心的な役割を担っている。また、各省庁により分野毎の適応策を支援するためのプログラムが開始されている。

州および自治体は、気候変動影響に対応するための前線(forefront)と位置づけられている。地域における気候変動リスクの評価や適応計画策定を支援するためのLocal Adaptation Pathways Programが国により実施されている。地方政府の適応への関心は現在高まりつつあるところであるが、行政の各レベルでの役割・義務が明確化されていないことによる混乱も見られる。

(4) カナダ

カナダにおける国レベルの気候変動適応の検討の特徴として、中央政府によるリーダーシ

ップの弱さがある。気候変動政策に限らず、カナダの地方自治制度の一般的な特徴として、中央政府より自治体の権限が強いという点が挙げられる。国としての適応計画・戦略は現時点では作成されていない。ただし、2007年にカナダにおける総合的な気候変動影響評価(**From Impacts to Adaptation: Canada in a Changing Climate**)に関するレポートが発表されている。

州レベルの適応策の検討においては、中央政府のリーダーシップの不在により、各地域がそれぞれ多様な気候変動適応のための取組みを開始している。適応策の検討を行なっている代表的な地方機関の例として以下が挙げられる。取組みの品質はまちまちであるが、中には専門的水準の高い検討も見られる。

- ケベック州：Ouranos
- ブリティッシュコロンビア州：Pacific Climate Impacts Consortium
- オンタリオ州：Ontario Climate Change Impacts and Adaptation Research Group

都市レベルの適応策においては、地方自治体の団体（Federation of Canadian Municipalities）がICLEI（持続可能性をめざす自治体協議会）とパートナーシップを組み、適応策および緩和策の検討を開始している。

1.4.3 日本における気候変動適応

日本における国レベルの気候変動適応策としては、環境省が2010年に「気候変動適応の方向性」を公表している。これは国としての公式な気候変動適応計画では無いが、これまでの学術的研究や各省庁での検討を踏まえた上で、取りうる適応策のリストや適応策の策定プロセスを示している。現在は2015年の適応策策定を目標とし、最新の知見に基づく気候変動予測および影響評価、適応策の検討を実施している。

都道府県および都市レベルの気候変動適応策としては、環境省の環境研究総合推進費(S-8)による研究プロジェクトとして、気候変動適応に関心のある自治体を対象に気候変動適応社会をめざす地域フォーラム(地域適応フォーラム)が組織されており、適応策を実際に自治体で実施する際の方法や課題について検討され、情報共有が行われている。この枠組みでは長野県、埼玉県、三重県、北九州市等の自治体において、先行的に影響評価や適応策の検討が開始されている。法的には、温暖化対策法において、全国の都道府県および特例市以上の都市については、地球温暖化対策のための実行計画の策定が義務付けられているが、殆どの自治体において緩和の取り組みのみが記載されており、適応に関する記述は限られている。地方公共団体における適応策の具体的な取組事例を下表に示す。

表 1-8 地方公共団体における適応策の主な取組事例

都道府県名	分野	概要
東京都	気候変動影響評価	最新の気候変動予測である21世紀気候変動予測革新プログラムの成果を活用し、将来の気候変動が、水資源、防災、農林水産業、生態系、健康の各分野に及ぼす影響を定量的に評価。
埼玉県	農業、熱中症対策等	農作物の安定生産等を目的とした「気候温暖化対応農業プロジェクト」や熱中症対策を実施。
長野県	農業、生態系への影響等	リンゴの栽培適地、ブナ林の分布適地等に関する気候変動の影響予測を実施。
三重県	気候変動影響に関する基礎調査	県内における気候変動影響を把握するため、基礎調査(現状把握と基礎情報の整理、予想される影響の推定、情報共有の推進等)を実施。
熊本県	気候変動適応策の検討	地球温暖化影響適応部会を設置。さらに、地域WGを設置し、具体的に適応策を進めていくための課題及び手順等の検討を行った。