

IPCC 第4次報告書の要点・解説

加 藤 央 之*

Outline of the IPCC Fourth Assessment Report (AR4)

Hisashi KATO*

Abstract

This article outlines the latest scientific knowledge on global warming/climate change, especially in the meteorological and climatological fields, presented in the fourth assessment report (AR4) from Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in 2007, and provides a comparison with the third assessment report (TAR). In the review of WG1 report, we summarize "Observed recent climate change" and "Future climate projection," referring to major events and climate variables. In the review of WG2, we summarize the results on the main potential impacts of global warming projected on the natural environment and ecosystems in the future. Finally, a review of downscaling studies is presented, which are very important as they provide a bridge between regional scale climate change information presented in WG1 and WG2.

Since TAR, progress in understanding how climate is changing in space and in time has been gained through improvements and extensions of numerous datasets and data analyses, broader geographic coverage, better understanding of uncertainties, and a wider variety of measurements. Understanding of anthropogenic warming and cooling influences on climate has also improved. AR4 concludes with very high confidence (higher than TAR) that: i) climate warming is unequivocal and ii) the global average net effect of human activities since 1750 has been one of warming. In studies on the impacts of global warming, understanding of global warming risk is evaluated more quantitatively based on greatly increased studies of observed trends in the physical and biological environment and their relationships with regional climate change, as well as improved future climate projections on a regional scale.

Key words : global warming, climate change, impact study, IPCC, AR4

キーワード : 地球温暖化, 気候変化, 影響評価研究, IPCC, 第4次評価報告書

I. はじめに

地球温暖化、およびそれに伴う気候変化は自然環境、生態系、社会に重大な影響を及ぼすことが懸念されている。この問題に対応し、世界気象機関（WMO）および国連環境計画（UNEP）により国連の組織として1988年にIPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）が設立さ

れた。以降、IPCCは第1次（1990年：FAR）、第2次（1995年：SAR）、第3次（2001年：TAR）とこれまで3回の温暖化に関する評価報告書を構築し、この問題に取り組んできた。今回、130を超える国、450名を超える代表執筆者、800名を超える執筆協力者、2500名を超える専門家の査読を経て第4次評価報告書（AR4）が2007年に公開された。

* 財団法人電力中央研究所

* Central Research Institute of Electric Power Industry

AR4 は第 1 作業部会 (WG1: 自然科学的根拠), 第 2 作業部会 (WG2: 影響・適応・脆弱性), 第 3 作業部会 (WG3: 気候変動の緩和) でそれぞれの報告によって成り立っているが, 本稿では科学的な知見のうち, 気象・気候現象に関連した WG1 ならびに WG2 の内容に絞り, 報告書の主な内容をとりまとめ, 特に前報告書である TAR との違いを交えて概説する。以下, 第Ⅱ章で AR4 の特徴について触れたあと, 第Ⅲ章では, WG1 の報告内容のうち「これまでに観測された気候変化」と「将来予測される気候変化」について, 主な気候要素や現象を対象にとりまとめる。また, 第Ⅳ章では, WG2 の報告内容のうち, 特に「将来予測される影響」について主な分野毎にとりまとめる。最後に, 第Ⅴ章では今後必要とされる研究の一つとして重要と思われる, ダウンスケーリングの研究 (WG1 と WG2, 第 1 作業部会と第 2 作業部会をつなぐ地域気候変化予測情報の構築に関する研究) の現状について紹介する。

ここで概説する AR4 は現時点で印刷媒体としての出版物となっていないため, 本稿はインターネットで収集した原稿をもとにしている (IPCC, 2007a, b)。従って, 参考文献としてはネット上での電子媒体を記載することになるが, <http://www.ipcc.ch/index.html> [Cited 2007/08/29] から一般ユーザーによるダウンロードが可能である。なお, AR4 との比較に用いる TAR については, IPCC (2001a, b), 気候影響・利用研究会 (2002, 2004) などを参考にされたい。また, 本稿に関連した温暖化の我が国への影響については, 例えば西岡・原沢 (1997), 三村・原沢 (2000), 地球温暖化問題検討委員会 (2001), 気象庁 (2005) などを参考にされたい。

II. AR4 の特徴

TAR 以降, 「観測データの質的, 量的な増加」や「気候の空間的, 時間的な変化や不確実性に関する理解」が進み, また, 人為起源の温暖化や寒冷化が気候に及ぼす影響についての理解も向上した。この結果, i) 気候システムの温暖化は疑う余地がなく, また, ii) 1750 年以降の人間活動

が温暖化の効果をもたらした (「信頼性がかなり高い」) と結論される。これは, TAR において「可能性が高い」としていた結論よりも踏み込んだ表現となっており, AR4 の大きな特徴といえる。

AR4 では結果の可能性 / 起こりやすさ (likelihood) について以下のような評価基準を示している。すなわち, 「ほぼ確実」: 発生確率が 99% を超える, 「可能性が極めて高い」: 95% を超える, 「可能性がかなり高い」: 90% を超える, 「可能性が高い」: 66% を超える, 「どちらかといえば」: 50% を超える, 「可能性が低い」: 33% 未満, 「可能性がかなり低い」: 10% 未満, 「可能性が極めて低い」: 5% 未満等の 10 段階である。TAR では 7 段階の評価基準を用いていたが, AR4 では「可能性が極めて高い (低い)」という可能性の基準を加えたことが特徴である。可能性の評価について, より詳細な基準を設けたことは AR4 における評価が向上したことを示しているといえる。また, AR4 では専門家の判断による科学的な信頼性 (確信度: confidence) を示し, 信頼性が非常に高い (少なくとも 9 割正しい), 信頼性が高い (約 8 割正しい), 中程度の信頼性 (約 5 割正しい) などの表現を用いているのが特徴である。

AR4 では TAR と同様に気候変化予測は複数の温室効果気体の排出シナリオ (SRES シナリオ) に基づいている (表 1)。ここでは 6 つのシナリオを用いており, A1 シナリオ (高成長型社会シナリオ), A2 シナリオ (多元化社会シナリオ), B1 シナリオ (持続発展型社会シナリオ=環境の保全と経済の発展を地球規模で両立), B2 シナリオ (地域共有型社会シナリオ) の 4 分類のうち, A1 シナリオは A1F1 (化石エネルギー源を重視), A1T (非化石エネルギー源を重視), A1B (各エネルギー源のバランスを重視) の 3 つに分けている。

III. 第 1 作業部会 WG1 の報告 (自然科学的根拠)

1) 近年の気候変化に関する直接的な観測結果

直接的な観測結果に基づき, AR4 で明らかにされた近年の主な気象・気候変化は以下の通りである。

表 1 21世紀末の全球平均地上気温の予測 (IPCC (2007a) より引用).

Table 1 Projected global average surface warming at the end of the 21st century (from IPCC (2007a)).

予測シナリオ	最良予測値 (°C)	予測幅 (°C)
B1 (持続的発展型)	1.8	1.1 ~ 2.9
A1T (高成長型・非化石エネルギー源重視)	2.4	1.4 ~ 3.8
B2 (地域共存型)	2.4	1.4 ~ 3.8
A1B (高成長型・各エネルギー源バランス重視)	2.8	1.7 ~ 4.4
A2 (多元化社会型)	3.4	2.0 ~ 5.4
A1F1 (高成長型・化石エネルギー源重視)	4.0	2.4 ~ 6.4

1-1) 全球平均気温

過去 100 年間 (1906 ~ 2005 年) の全球平均気温は 0.74 (0.56 ~ 0.92) °C 上昇した。この値は TAR において 100 年あたり (1901 ~ 2000 年) に示された 0.6 (0.4 ~ 0.8) °C よりも大きい。さらに、気温の上昇傾向は近年特に大きく、最近 50 年間の上昇傾向 (10 年あたり 0.13°C) は過去 100 年間の傾向の約 2 倍に達する (図 1a)。

1-2) 全球平均海面水位

20 世紀を通じた全球平均海面水位の上昇は 0.17 (0.12 ~ 0.22) m と見積もられる。TAR の評価 (0.1 ~ 0.2 m 上昇) とほぼ一致するが、推定の精度は上がっており、「信頼性が高い」としている。1993 ~ 2003 年にかけての上昇率 (3.1 mm/ 年) は 1961 ~ 2003 年にかけての上昇率 (1.8 mm/ 年) を大きく上回っているが、これが長期的な変動なのか、あるいは 10 年規模の変動なのかはまだ不明である。1961 年以降の観測によれば、気候システムに加えられた熱の 80% 以上が海洋に吸収され、海水の膨張を通じて海面水位の上昇に寄与している (図 1b)。

1-3) 気温の日較差

1979 ~ 2004 年まで、日較差には変化がない。TAR では 1950 ~ 1993 年のデータをもとに気温の日較差に減少傾向があると示されたが、その後得られたデータでは、日中と夜間の気温上昇量がほぼ等しいことが示された。ただし、変化傾向には大きな地域差がある。

1-4) 降水量

陸域のほとんどにおいて 1900 ~ 2005 年にか

けて降水量に長期変化傾向が観測された。南北アメリカの東部、欧州北部、アジア北部と中部で降水量は増加し、サヘル地域、地中海地域、アフリカ南部や南アジアの一部は乾燥化した。1970 年代以降、特に熱帯や亜熱帯地域ではより広い地域で厳しく長い干ばつが観測された。TAR では、降水量が北半球の中・高緯度の大陸のほとんどで増加 (可能性がかなり高い)、熱帯の陸域で増加、北半球亜熱帯で減少としていたので、AR4 ではより具体的な記述になっている。

1-5) 雪氷面積

南北両半球において、山岳氷河と積雪面積は平均すると縮小している。3 ~ 4 月の北半球の積雪面積は 1980 年代後半に急激な減少があったが、1922 ~ 2005 年の長期トレンドでは $7.5 \pm 3.5\%$ 減少しているとの報告がある。TAR では 1960 年代以降、積雪域は 10% 減少した (可能性がかなり高い) としており、定性的な結論は変わりない。一方、北極の年平均海氷面積について AR4 では、10 年あたり 2.7 (2.1 ~ 3.3) % 縮小し、特に夏季の縮小は 10 年あたり 7.4 (5.0 ~ 9.8) % と大きいことを示している。これらの値は TAR の記述と整合している。TAR では、特に最近数 10 年に晩夏から初秋にかけて北極の海水の厚さが 40% 減少した (可能性が高い) ことが指摘されていたが、AR4 では 1987 ~ 1997 年の間に北極海中央部で海水の平均厚さが約 1 m 減少している (可能性がかなり高い) としている。

1-6) 大気循環

中緯度の西風は 1960 年代以降、両半球におい

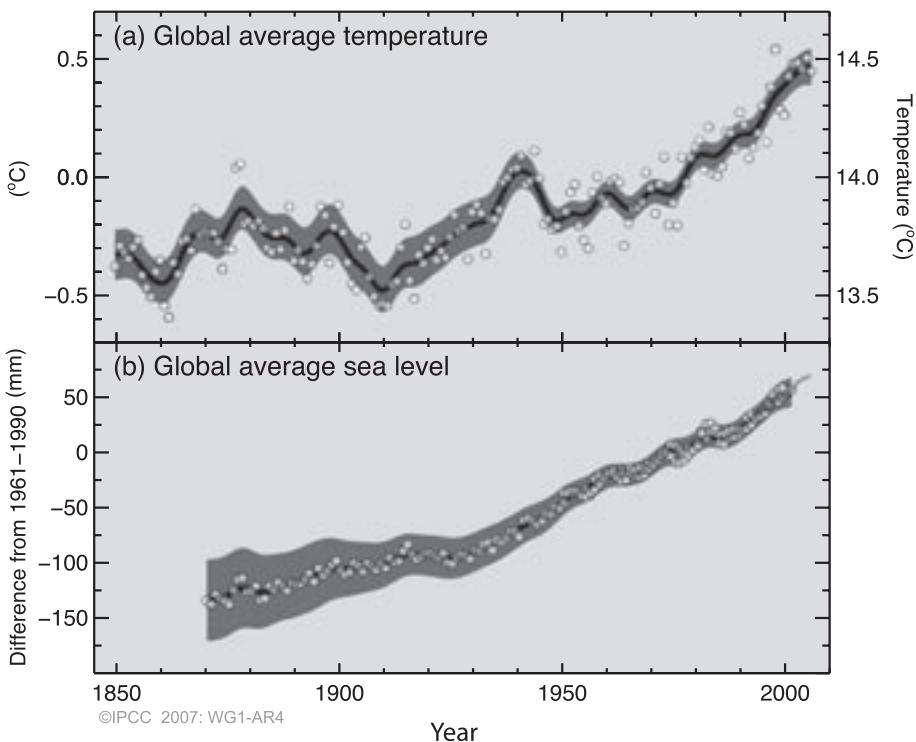


図 1 (a) 全球平均地上気温, (b) 全球平均海面水位の観測された変化. すべての変化は 1961 ~ 1990 年の平均からの偏差. 滑らかな曲線は 10 年平均値, 丸印は各年の値をそれぞれ示す. 陰影を施した部分は既知の不確実性の包括的な解析から推定された不確実性の幅 (Summary for Policymakers, IPCC (2007a) より引用). (日本語の説明文は IPCC の公式な翻訳ではない)

Fig. 1 Observed changes in (a) global average surface temperature, (b) global average sea level. All changes are relative to corresponding averages for the period 1961-1990. Smoothed curves represent decadal average values while circles show yearly values. The shaded areas are uncertainty intervals estimated from a comprehensive analysis of known uncertainties (from Summary for Policymakers, IPCC (2007a)).

て強まってきた。これに伴い大西洋や南半球の寒帶前線ジェット、強い低気圧の経路が極方向に移動した。また、1990 年代の後半まで、北半球では最近数 10 年の間、温帯低気圧の活動が強められた。この結果は AR4 で注目される結果の一つであり、例えば欧州における冬期の気温や降水量異常の主な原因と考えられる。

1-7) 極端な現象

1-7.1) 気温

過去 50 年間に極端な気温について、幅広い変化が観測された。寒い日、寒い夜および霜が降りる日の発生頻度は減少した (20 世紀後半に可能

性がかなり高い)。一方、暑い日、暑い夜 (20 世紀後半に可能性がかなり高い) および熱波 (20 世紀後半に可能性が高い) の発生頻度は増加した。TAR では陸上のほぼ全域で、最高気温や高温日の増加については可能性が高い、最低気温や低温日、霜日数の減少については可能性がかなり高いと指摘していたので、これらの結果をさらに強調する結果になっている。

1-7.2) 降水量

激しい降水現象の頻度はほとんどの陸域で増加している (20 世紀後半に可能性が高い)。TAR では、北半球の中・高緯度における陸上の多くの

地域で増加した（可能性が高い）としていたので、こうした可能性が全球的にさらに高くなつたことを示す。

1-7.3) 热帯低気圧

1970年ころから、熱帯の海面水温の上昇と関連して北大西洋の強い熱帯低気圧の強度が増加してきたことを示す観測事実がある。この他の地域でも強い熱帯低気圧の活動度が増加したことが示唆されている（いずれも可能性が高い）が、解析データ、特に定常的な衛星観測が行われる1970年ころより前のデータに精度の問題があり、結論を出すのは難しい。1970年以降、北太平洋、インド洋、南西太平洋などいくつかの地域で非常に強い熱帯低気圧の割合が増加しているように見えるが、この増加は現在のモデルによる同期間を対象としたシミュレーション結果よりかなり大きい。熱帯低気圧の年間発生数に明確な傾向はない。TARでは、『「熱帯低気圧における最大風速の増加」について、少ない解析結果では観測されていないとし、また、「熱帯低気圧における平均および最大降水強度の増加」について、評価には観測データが不十分』としていたこともあり、AR4はより進んだ評価となっている。

1-7.4) その他

竜巻、雹、雷、砂塵嵐といった小規模な現象については、何らかの傾向が存在するかを判断する十分な根拠はない。これはTARでも明らかにされなかつた情報である。

2) 将来の気候変化に関する予測

AR4において、気候モデル等により予測される将来の主な気象・気候変化は以下の通りである。

2-1) 全球平均気温

1980～1999年と比較した21世紀末（2090～2099年）の全球平均地上気温の変化について、最も小さい見積もり値となったB1シナリオについては1.8（1.1～2.9）℃の上昇、最も大きいA1F1シナリオについては4.0（2.4～6.4）℃の上昇を予測している（表1）。TARの予測範囲は1.4～5.8℃で、新たな予測はほぼこれに対応しているが、TARの値はシナリオの区別をしていない

ため、直接的な比較はできない。AR4の予測はさらに進んでおり、モデルの改良などに伴い、それぞれのシナリオに対して最良の見積もりと予測幅を示している。

また、AR4では、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量が減少することを新たに指摘し、人為起源の二酸化炭素排出量が大気中に残存してさらに気温を上昇させる可能性があることを示している。この「強い気候-炭素循環フィードバック」のため、気温予測の予測幅の上限はTARの値よりも大きい。

21世紀に予想される気温上昇の地理的分布は、シナリオには依存せず、過去数10年間に観測された分布と一致している。気温上昇は陸域とほとんどの北半球高緯度で最大となり、南極海や北大西洋の一部で最小になると予想される。

2-2) 全球平均海面水位

全球平均気温と同様、1980～1999年と比較した21世紀末（2090～2099年）の変化について、最も小さい見積もり値となったB1シナリオについては0.18～0.38mの上昇、最も大きいA1F1シナリオについては0.26～0.59mの上昇を予測している。これらの値はTARの予測範囲（1990～2100年）では0.09～0.88mであったので、予測幅は狭まった。これは主に予測に寄与するいくつかの不確実性についての理解が向上したためである。しかし、これらの予測にはまだ不確実性を含んでいる。例えば、予測に用いられているグリーンランドと南極からの氷の流出率は1993～2003年のものを用いているため、今後、この率が増加、あるいは減少する可能性もある。

A1Bシナリオを用いた場合は2100年までに0.21～0.48mの上昇予測であるが、2100年時点で放射強制力を安定させた場合でも、熱膨張のみで2300年までに（1980～1999年と比較して）0.3～0.8mの海面上昇がもたらされる。すなわち、深層への熱の輸送に時間を要するため、熱膨張はその後数世紀にわたって継続する。

2-3) 降水量

降水量は、高緯度では増加する（可能性がかなり高い）、一方、ほとんどの亜熱帯域においては

減少する（可能性が高い）。これは、観測された分布の最近の変化傾向を継続するものである。また、熱帯の多降水量地域や熱帯太平洋での増加が予測される。TARでは21世紀の後半までには、冬季に、北半球中・高緯度および南極で降水量が増加する（可能性が高い）ことが指摘されているが、AR4ではより理解が進み定量的に示されている。

2-4) 雪氷

積雪面積は縮小することが予想される。例えばB2シナリオに対するモデル平均で21世紀末までに北半球の積雪面積は13%減少することが報告されている。グリーンランド氷床は縮小が続き、2100年以降の海面水位上昇の要因となる。ちなみに、数千年の時間スケールではあるが世界の平均気温が1.9～4.6°C上昇（TARでは3°C以上の局地的な温度上昇）すれば氷床は縮小し、完全に消滅した場合には最大7mの海面上昇に寄与する。一方、南極氷床は十分に低温で、広範囲にわたる表面の融解は起こらず、むしろ降雪が増加するためにその質量は増加すると予想される。ほとんどの永久凍土地帯において、広い範囲で融解深度が深くなると予想され、例えば北半球では21世紀末までに、活動層（永久凍土の上の土壤層）の厚さが30～40%増加するとの報告もある。北極域および南極域の海水はすべてのSRESシナリオにおいて縮小すると予測される。A2シナリオを用いた場合、一部のモデルでは北極海の晩夏における海水が21世紀後半までにはほぼ完全に消滅するとの予測もある。

TARでは積雪域や海水域の減少のほか、南極氷床の増加、グリーンランド氷床の減少を指摘しており、AR4ではこれらの理解がより進んだといえる。特に、北極海の晩夏における海水の消滅の可能性は新しい見解として注目される。一方、氷床の脆弱性が増加し、将来の海面上昇をもたらす可能性を指摘しているものの、まだ一致した見解は得られていない。

2-5) 温帯低気圧の進路

温帯低気圧の進路は極方向に移動し、それに伴い、風、降水量、気温の分布も移動すると予測さ

れる。これは過去半世紀の間に観測された傾向の全般的なパターンを引き継ぐものである。

2-6) 極端な現象

2-6.1) 気温

極端な高温や熱波の頻度は引き続き増加する可能性がかなり高い。これはTARでも可能性がかなり高いと指摘されていた。

2-6.2) 降水量

激しい降水の頻度は引き続き増加する可能性がかなり高い。平均降水量が増加すると予想される熱帯や高緯度では、降水強度の増加が予測される。一方、中緯度の大陸では、夏季に干ばつのリスクが高まる。激しい降水の頻度増加はTARでも多くの地域に対して可能性がかなり高いと指摘されていた。

2-6.3) 热帯低気圧

モデルの予測範囲からみて、熱帯域の海面水温上昇に伴って、将来の熱帯低気圧（台風およびハリケーン）の強度は増大し、最大風速や降水強度は増加する（可能性が高い）。それと比べて世界的に熱帯低気圧の発生数が減少するとの予測については「信頼性が低い」。TARでは、熱帯低気圧の最大風速の増加、ならびにこれに伴う降水強度の増加については、いくつかの地域で「可能性が高い」としていたので、これよりも理解が進んだといえる。

2-6.4) 深層循環

現在のモデルシミュレーションによれば、大西洋における子午線方向の深層循環（MOC）は21世紀には速度が減少する。A1Bシナリオに対する複数モデルの予測の平均で、2100年までに25（0～50）%減少する。しかし、この循環に関連した熱輸送の影響を受けて温暖な大西洋地域の気温は、このような変化にもかかわらず、予測される温室効果気体の増加に伴う昇温の方がはるかに大きいため、上昇すると予想される。深層循環が21世紀中に、大規模かつ急激に変化する可能性はかなり低い。長期にわたる深層循環の変化についての信頼できる予測はできていない。深層循環の速度が減少することはTARでも指摘されていたが、TAR以降のモデルシミュレーションを通

じて、より定量的に評価されてきたといえる。

2-7) その他

大気中の二酸化炭素濃度の増加に伴い、海洋の酸性化が進行する。SRES シナリオに基づく予測では、全球平均した海面の pH は工業化以前の時代から現在 (pH = 8.1) までの 0.1 の減少に加え、21 世紀に 0.14 ~ 0.35 減少すると予測される。

IV. 第 2 作業部会 WG2 の報告 (影響・適用・脆弱性)

1) 観測された影響

TAR では、近年の地域的な気温変化がすでに多くの物理、生物システムに対して影響を及ぼしていることは確信度が高い (high confidence) と結論づけてきたが、最近の研究により、より広い範囲で確信度が高い結果が得られた。AR4 は、すべての大陸およびほとんどの海洋から観測された証拠から、多くの自然システムが地域的な気候変化、特に気温の上昇によって現在影響を受けていると結論づけている。

1970 年以降のデータに対する地球規模の評価によれば、人為起源の温暖化がすでに多くの物理システムおよび生物システムに対して識別可能な影響を及ぼしている可能性が高い（顕著に温暖化している地域と顕著な影響（変化）が観測されている地域は一致している）。AR4 で明らかにされた事象は以下の通りである。

雪氷、水文システム（信頼性は高い）

- ・氷河湖の拡大と数の増加
- ・永久凍土地域における地盤の不安定化、山岳地域での岩なだれの増加
- ・南極および北極の一部における生態系の変化
- ・氷河、雪氷起源の河川における流量増加と春季の流量ピークの早まり
- ・多くの地域における湖や河川水温の上昇、関連した温度構造や水質への影響

陸上生態系（信頼性はかなり高い）

- ・春季現象の早期化（開葉、鳥の移動、産卵）
- ・植物や動物の極方向あるいは高標高への移動
- ・海洋、淡水系生態系
- ・高緯度海洋における藻類、プランクトン、魚

類の数や生息範囲の変化

- ・高緯度や高標高の湖における藻類、動物プランクトン数の増加
- ・河川における魚類の生息範囲の変化や回遊時期の早期化

2) 予測される将来の影響

予測される主な事象は以下の通りである。これらについては、気温上昇の程度に対応させて表 2 のようにまとめて示されている。なお、AR4 では主な事象に関する記述のあとに、地域別に様々な影響をまとめているが、本稿では、主な事象の中にこれらの地域の典型的な例を含んでまとめている。

AR4 では、結果の記述について、D (TAR の結論をさらに発展させたもの), N (TAR にはなかった新たな結論) の記号を示し、TAR との違いを示している。また、同時に信頼性に関する記述を非常に高い (***), 高い (**), 中位 (*) で示しているので、本稿でもこの記号を表記している。

2-1) 淡水資源とそれらの管理

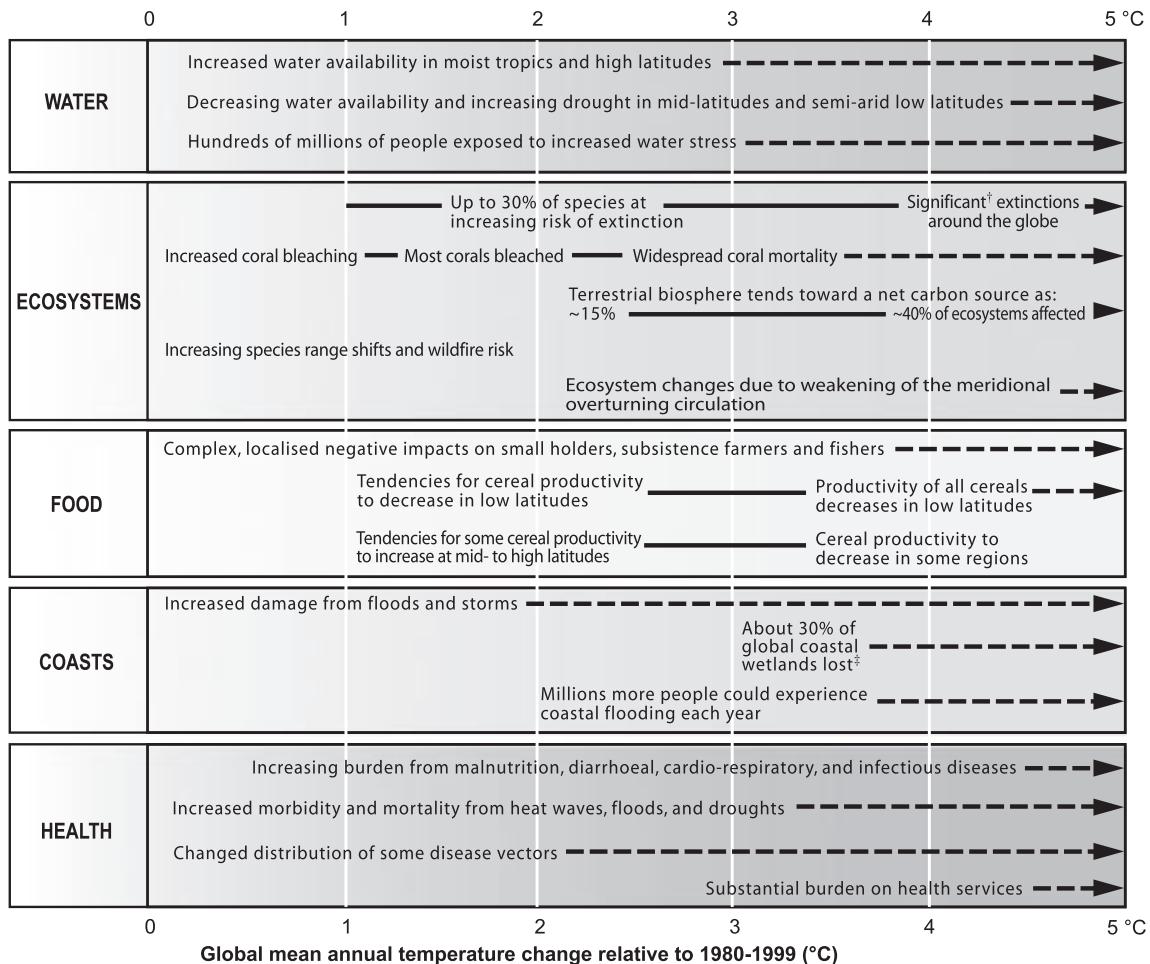
今世紀半ばまでに、年平均河川流量と水の利用可能性は、高緯度地域、およびいくつかの熱帯湿润地域において 10 ~ 40% 増加し、中緯度地域のいくつかの乾燥地域および熱帯の乾燥地域において 10 ~ 30% 減少すると予測される (**D)。中央アジア、南アジア、東アジア、東南アジア、特に大河の集水域において利用できる淡水が減少し、人口増や生活水準の上昇と相まって悪影響を与える (**N)。豪州南部や、東部、ニュージーランドでは、降水量の減少や蒸発量の増加により 2030 年までに水に関する安全保障問題が悪化すると予測される (**D)。北米の西部山岳地帯の水資源に関しては、夏季に利用競争が激化する (***D)。また、カリブ海や太平洋島嶼でも水資源の減少が予測される (***D)。

干ばつの影響を受ける地域の面積が増加する可能性が高い。また、激しい降水現象の頻度が増加する可能性は非常に高く、洪水リスクを増加させる (**N)。

今世紀の間に、氷河および積雪に蓄えられてい

表 2 気候変化（および海面水位や大気中二酸化炭素濃度）に対して予測される世界的な影響の例。21世紀における全球平均地上気温の上昇量に対応した記述。実線は影響の間の関連を示し、破線の矢印は気温上昇に伴って影響が継続することを示す。記述文の左端はその影響が始めるおよその位置を示す（Summary for Policymakers, IPCC (2007b) より引用）。（日本語の説明文は IPCC の公式な翻訳ではない）

Table 2 Illustrative examples of global impacts projected for climate changes (and sea-level and atmospheric carbon dioxide where relevant) associated with different amounts of increase in global average surface temperature in the 21st century. The black lines link impacts, dotted arrows indicate impacts continuing with increasing temperature. Entries are placed so that the left-hand side of the text indicates the approximate onset of a given impact (from Summary for Policymakers, IPCC (2007b)).



[†] Significant is defined here as more than 40%.

[‡] Based on average rate of sea level rise of 4.2 mm/year from 2000 to 2080.

る水の供給が減少し、主な山岳から融解水の供給を受けている地域（現在の人口の1/6が居住している）の水利用性を減少させる (**N)。ヒマラヤ山脈における氷河の融解に関しては、冬季・春

季の流出量の増加による洪水の危険性とともに、流出時期の早まりにより、今後20～30年間に水資源の利用可能性が低下するなどの悪影響が予想される (*N)。

TARにおいては主として地球レベルでの水不足人口の増加に関する定量的な記述や洪水リスクについての定性的な記述があったが、AR4ではより地域的な定量的評価が行われている。

2-2) 生態系

気候変化やそれに伴う擾乱（例えば、洪水、干ばつ、森林火災、昆虫、海洋の酸性化）、全球的な変化（例えば土地利用変化、汚染、資源の過剰搾取）がかつてない組み合わせで生じることにより、多くの生態系の復元力は、今世紀中に追いつかなくなる可能性がある（**N）。欧州の山岳地域の中では、CO₂の高排出シナリオ下で2080年までに最大60%の生物種の喪失も予想されている（***D）。今世紀半ばまでに、気温の上昇と土壤水分の減少により、アマゾン東部の熱帯雨林が徐々にサバンナに代わる（**D）。

陸上生態系による正味の炭素吸収は、今世紀の半ばにピークに達したあと、弱まるか逆に排出に転じ、気候変化を増幅する可能性が高い（**N）。

全球平均気温の上昇が1.5～2.5℃を超えた場合、これまで評価された植物および動物種の約20～30%は、絶滅のリスクが増加する可能性が高い（*N）。また、付随して大気中CO₂濃度が上昇した場合、生態系の構造や機能、生物種間の相互作用、生物種の生息範囲に大きな変化が生じ、生物多様性や生態系からの産物（水および食料の供給）に顕著な悪影響が生じる（**N）。グレートバリアリーフやケイーンズランドの湿潤熱帯地域などで、2030年までに生物多様性の顕著な損失が生じると予想される（**D）。また、熱帯ラテンアメリカの多くの地域でも生物多様性の顕著な損失が予想される（**D）。

大気中CO₂濃度の増加に伴う海洋の酸性化は、貝殻形成生物（例えばサンゴなど）とそれに依存する生物種に悪影響を与える（*N）。

TARでは、種の構成や優先状況の変化に伴う生態系の深刻な崩壊について定性的に指摘しているものの、AR4では温度との関連（表2）においてかなり定量的に評価を行っている。これらは、今回の新しい知見として重要である。

2-3) 食糧・農林水産業

世界平均でみれば、地域平均気温が1～3℃の幅で上昇すると、食料生産の潜在量が増加すると予測されるが、それを超えて上昇すれば減少すると予測される（*D）。ただし、低緯度地域、とりわけ季節的に乾燥する熱帯地帯では、農作物の生産性は1～2℃の上昇に対しても減少し、飢餓リスクを増加させる（*D）。21世紀半ばまでに穀物生産量は、東アジアや東南アジアにおいて、最大20%増加するが、中央アジアや南アジアにおいては最大30%減少すると予測される（*N）。ニュージーランドの一部では、温暖化の初期の段階で農業・林業生産は好影響を受けるが、豪州南部や東部、ニュージーランド東部では、干ばつと火事の増加により、生産が減少する（**N）。また、北米では中庸な気候変化は降雨依存型の農業生産を5～20%増加させるが、地域によってばらつきは大きい。特に気温や水資源の限界地では問題が大きい（**D）。TARでは中緯度や低緯度に関する食糧生産の記述は定性的にはAR4と同じであるが、定量的な表現ではなく、数度の気温上昇という表現にとどまっていた。

干ばつと洪水の頻度の増加は、地域の生産性、とりわけ低緯度域の自給農業部門に悪影響を与える（*D）。アフリカのいくつかの国では、降雨依存型の農業からの収穫量は、2020年までに50%減少する可能性がある（**N）。ラテンアメリカの乾燥地域では農地の塩化や砂漠化により、食料安全保障に悪影響を及ぼす（**N）。

継続する温暖化により、ある種の魚種の分布および生産量の地域的な変化が生じ、養殖および漁業へ悪影響を及ぼす（**N）。中米では、漁業資源の移動が予想され、またアフリカでは、水温上昇によって大きな湖の漁業資源が減少し、さらに過剰捕獲によって悪影響を及ぼす（**N）。

2-4) 沿岸システムおよび低地

沿岸では気候変化および海面上昇の影響により、海岸侵食などのリスクが増加する。その影響は沿岸域に対する人為起源の圧力により悪化する（***D）。アフリカでは適応のコストがGDPの少なくとも5～10%に達しうる（**D）。

サンゴは熱ストレスに対して脆弱であり、適応能力が低い。約1～3°Cの海面温度の上昇があった場合、熱に対する適応や順応が生じない限り、サンゴは、より頻繁な白化現象や広範な死滅に至る。小島嶼については、観光資源としての価値を減少させる。

塩水湿地やマンゴローブなどの沿岸の湿地は、特に陸上側に拡大できないなどの制約があったり、堆積が不足している場合、海面上昇によって悪影響を受けると予測される (**D)。

2080年までに海面上昇により、1000万人に近い人々が毎年洪水に見舞われる。気象災害などへの適応能力が低く、人口密度が高い低地では特にリスクが高い。影響を受ける人の数はアジアやアフリカのメガデルタで最大であり、また小島嶼は特に脆弱である (**D)。人口が集中している南アジア、東アジア、東南アジアのメガデルタ地帯では洪水の危険性が増加する (**D)。また、島嶼では熱帯に位置していると、高緯度に位置していると、気候変化、海面上昇、極端な気象現象に対して特に脆弱である (**D)。

これらの予測に対する信頼度は非常に高い。TARでも沿岸域・海洋生態系への影響のほか、居住・エネルギー・産業への影響の中で、海岸地域における侵食の加速化や熱帯低気圧等による被害の拡大を定量的な評価を交えて指摘していた。また、サンゴ礁、湿地やマンゴローブへの悪影響についても指摘されていたが、AR4ではより定量的な評価が示されている。

2-5) 産業、居住および社会

気候変化は産業、居住および社会にコストと好影響をもたらすが、それらは場所と規模に応じて大幅に異なる。しかし、合計された正味の影響は、気候変化が大きいほど、悪影響になる (**N)。例えば好影響としては、極域での暖房需要の減少や航行可能地域の拡大などがあるが (*D)、生態系へは悪影響が予想されている。

沿岸および氾濫原にあり、経済の気候感受性が強く、とりわけ急速な都市化が進んでいる地域の産業、居住および社会は気候変化の影響に対して最も脆弱である (**N)。また、貧困コミュニ

ティーは適応能力が制限されているため、気候変化の影響に対して特に脆弱である (**N)。

極端な気象現象がより強力/頻繁になった場合、その経済的・社会的コストはその被害地域で重大であるが、気候変化の影響は、直接影響を受けた地域から広範で複雑な関連をもって別の地域へと広がる (**N)。

TARにおいてはコストと好影響の例として、冷暖房需要の増減を示していたが、合計された正味の悪影響はAR4における新見解である。また、沿岸域の低地における急速な都市化地域の危険性についてはTARでも触れられており、これを発展させた結果になっている。気候変化の影響が複雑な経路で別の地域へと広がると指摘した見解もAR4における新見解である。

2-6) 健康

気候変化は以下のように、数百万のとりわけ適応力の弱い人々の健康に悪影響を及ぼす。i) 栄養失調の増加とそれに伴う疾患の増加、ii) 熱波・洪水・暴風雨・火災および干ばつによる死亡、疾病、傷害の増加、iii) 下痢性の疾患による負担の増加、iv) 気候変動に関連した地表面オゾン濃度の上昇による心臓、呼吸器疾患の発生率の増加、v) いくつかの感染症媒介生物の空間分布の変化 (**D)。東アジア、南アジア、東南アジアでは、下痢性疾患が増加すると予想される。また、沿岸の海水温度が上昇すると、コレラ菌の存在量、毒性が増加すると予想される。熱波の増大による健康影響は欧州や北米などでも予測され、特に高齢者への影響が懸念されている。

温帯における研究によれば、気候変化は寒冷による死亡者が減少するなどの好影響ももたらすことが示されたが、全体的にはこれらの好影響よりも気温上昇による悪影響の方が、特に途上国においては大きい (**D)。

TARでも熱帯や亜熱帯における低収入で弱い人への影響や、都市居住者、特に老人や病人の死亡率や罹病率の増加を指摘していたが、AR4ではこれらについて、より発展的な記述になっている。

V. 今後必要とされる研究： 地域気候変化予測について

これまでに記述したように、地球温暖化はもはや避けられない状況にあることは明らかである。今後必要なことは、個々の地域でどのような影響が生じるのかをできるだけ精度良く予測し、それに対する対策を早く検討することである。このため、WG1 と WG2 を結ぶ情報、すなわち気候変化予測情報を「提供者」と「利用者」の間のコンセンサスに基づいて効率よく受け渡すことが重要となる。すなわち、「利用者」としては、どのような時間・空間スケールで、どのような気象・気候要素の情報を必要としているかを「提供者」に伝える必要があり、「提供者」はそれに基づき、より有用な情報を提供することができる。また、「利用者」はそれぞれの影響評価に用いる情報の精度を詳しく知る必要があり、「提供者」に確認を求めるなければならない。ただし、現段階においては、このようなデータの受け渡しにおいて、必ずしも「利用者」が求めるような時間・空間スケール、精度で情報が提供できない場合がある。この橋渡しを行うのがダウンスケーリングの研究である。ここで、ダウンスケーリング手法とは、例えば低い空間解像度の気象情報から高い空間解像度の情報を得る方法のことである。特に我が国などのように複雑な地形を有した狭い地域の場合、影響評価にとって必要なものは空間解像度の高い地域レベルでの予測情報であり、これをいかに構築していくかが今後重要になる。

気候の再現や将来の気候変化予測を行うのには、現段階では大気海洋結合全球モデル (AOGCM) を用いることが最も妥当な方法である。こうした全球気候モデルの役割や精度については AR4-WG1 の第 8 章～10 章に記述されている。しかし、将来予測などの長期間シミュレーションを行うには、計算機が進歩したといってもせいぜい 125～400 km 程度の空間解像度のデータしか得られない (AR4-WG1 11 章)。従って、さらに細かい地域レベルの情報を得るには、ダウンスケーリングを行う必要がある。

ダウンスケーリングには力学的なモデルを用いる方法と、統計的な方法がある (気候影響・利用研究会, 2002)。力学的なダウンスケーリングは、AOGCM のデータを境界条件に用い、より高解像度の気候モデルによって地域気候を再現 / 予測するものである。これらは、境界条件を提供するモデルと同様な構造をしているため、首尾一貫した物理過程が再現されるという長所を持つ一方、計算コストがかかるという短所もある。また、現在用いているパラメタリゼーションスキーム (例えばモデルにおける計算地点の空間平均湿度や大気安定度をもとに降水量に換算する方式) が将来同じでよいかという疑問もある。一方、統計的ダウンスケーリングは、観測データをもとに大スケールの現象 (例えば上空の広い範囲の気候要素、あるいはパターン) と小スケールの現象 (例えば地上の地点あるいは特定範囲の気象要素) を結びつけ、この関係式を用いて AOGCM の大スケールデータから、小スケールのデータを推定する手法である。この手法は計算コストがかからないという長所や、気象モデルでは再現されない様々な量 (例えば農業生産量) も直接予測することができるという長所を持っている一方、関係式を作成するのに比較的長期的な質の揃ったデータを必要とするほか、この関係式は将来も利用することが可能かといった疑問もある。実際には、TAR 以降、こうした手法の複合的な利用によってダウンスケーリングが行われているのが現状だが、AR4-WG1 の第 11 章では現状について以下のようにまとめられている。

1) 高解像度の全球大気モデルを利用する方法

この手法は、SST (海面水温) や海水などの地表境界条件は低解像度の AOGCM で得られた値を用い、比較的短期間に限って高解像度の大気モデル (AGCM) を用いてシミュレーションを行うものである。2つのモデル間の双方向のフィードバックが行われないために、2つのモデル結果にねじれが生じるリスクはあるものの、水平解像度は 50～100 km、さらに高性能の計算機を用いた場合は 20 km の例もある。この高解像度により、低解像度のモデルではみられなかった地形

性の降水や熱帯低気圧が現実的に再現されている。一様な高解像度の AGCM を用いる代わりに解像度を特定部分で密にする可変解像度 AGCM モデルを用いた予測も行われており、高解像度部分、低解像度部分とも良いシミュレーション結果を得ている。

2) ネストした地域気候モデルを用いる方法

地球の特定地域だけを高解像度の地域気候モデルで再計算する方法で、AOGCM で計算された時間変化する大気場の情報（気象要素）を側方境界条件として、また SST や海氷などの情報を地表の境界条件として利用する。この方法により、例えば、大モデル（AOGCM）では再現されない複雑な地形の影響による降水などが小モデル（地域気候モデル）ではよく再現される。大モデルの中に小モデルを入れた形（ネスト）の計算となるため、この手法はネスティングと呼ばれる。通常は大モデルと小モデルの物理的なスキームは類似したものを用いる。大モデルから提供される情報と小モデルで計算される情報は、時々ねじれを起こす可能性があるが、境界条件の与え方の工夫により、そのリスクを小さくする努力が行われている。

TAR の段階では、空間解像度は 50 km 程度が主流であった。AR4 においても通常は 50 km 程度であるが、15 ~ 20 km の計算もあらわれ、中には短期間を対象とした計算だが、非静力学モデルの 5 km モデルも登場した。最近では、地域海洋、海水、水文、植生などとの 2 方向フィードバックモデルも開発されている。TAR の段階では数が少なかった 10 年連続シミュレーションが AR4 では標準になりつつあり、気温や降水量の年々変動も評価できるようになった。また、平均的な気候状態だけでなく、高次の統計値も求められるようになってきた。ただし、こうした手法を用いた場合でも、側方境界として与えられる AOGCM にバイアスがある場合には誤差が生じるという例（熱帯の例など）も報告されており、最終的な結果の精度は地域気候モデルの性能のみならず、境界条件を与える AOGCM の性能にも依存することは言うまでもない。

3) 経験的な統計ダウンスケーリングを用いる方法

大スケールの気象変数（予測変数：predictor）と地域スケールの気象変数（目的変数：predictand）を結びつける手法で、回帰モデルを用いるもののほか、天気分類パターンに基づくものなどがある。これらは複合的に用いられることもあり、また、地域気候モデルの結果を用いた解析もある。これらの手法は、気象変数（パターン）の間の関係に適用されるだけでなく、目的変数として例えば熱射病による死亡率やスキーシーズンといった要素を直接予測する例もある。様々な地域に適用されるだけでなく、手法相互の比較の研究やアンサンブルシミュレーション結果を用いた不確実性の検討も行われている。また、直接的な変数の予測ではなく、例えば気温や降水量、風などの確率分布（極端な現象の頻度）を求める研究も行われている。統計ダウンスケーリング手法自体の妥当性を検証する方法としては、利用可能な過去の気象データのうち、半分を用いて関係式を構築し、残りの半分を評価に用いることが行われている。

統計ダウンスケーリングでは、過去のデータによって得られた関係式が将来の気候状態でも利用できるかという問題があるが、将来の変動は過去の変動の範囲を上回る可能性がある（関係式を外挿して求める）ため、その検証は難しい。このため、直接的な数値の予測を行うだけではなく、確率的な変動の幅もあわせて求めることが効果的であるとみられる。

TAR 以降、多くの統計ダウンスケーリングが行われたが、どの手法が最も妥当かは検討の対象や対象地域により異なるというのが結論である。また、月平均値を求めるのには、月平均値を用いたダウンスケーリング手法より、日値を用いた場合の方が良い結果が得られることや、複雑な非線形モデルが、必ずしも単純な線形モデルに勝ってはいないことなどの報告も行われている。一方、激しい降水現象の年々変動の評価には最新のニューラルネットワークを用いて良い結果を得られたとの報告もある。

4) 手法の比較

TAR 以降, 地域気候モデルと統計ダウンスケーリングの結果についてはいくつかの相互比較研究が行われてきた。この結果, 両手法にはそれぞれ長所, 短所があるので, 相互補完して使用することが望ましいと考えられる。

今後, 影響評価にあたっては, これらの手法をさらに発展させると同時に, WG1 と WG2 を結ぶ橋渡しの役割を担う研究者(グループ)の数を増やすことが必要になると考えられる。

VI. おわりに

今回の AR4 で指摘されているポイントは, 地球温暖化はすでに避けられない事実であるということである。仮に温室効果気体の排出がある時点でゼロにしたとしても, すでに放出された分の効果がさらに長期にわたってあらわれてくることも指摘されている。すなわち, 温暖化に対する対応は早めに打たなければ将来にわたって禍根を残すことになるということである。このためには, 様々な分野の研究を精力的に進めるのは言うまでもなく, 影響評価の基本となる地域気候変化予測の研究が重要であると考えられる。

京都議定書やこれに続く温室効果気体削減の議論も盛んに行われているが, 「温暖化は先進国の責任」とする発展途上国の意見など, 南北対立が問題解決を遅らせている一因となっている。しかし, 対応に消極的だった国々がやっと乗り出してきた事実からも示されるように, 各国が事の重要性を認識しており, 世界が協力して対処しなければならない重要な問題であるとのコンセンサスが出来上がりつつある。子孫に対して負の遺産を残さないためにも地球温暖化問題に対しては早急の対策が望まれる。

謝 辞

本論説を執筆するにあたって, 編集担当である日本大学の山川修治先生および査読者には貴重なご指摘をいただいた。また, 本論説に用いた図表については IPCC から掲載許可をいただいた。記して感謝の意を表します。

文 献

- 地球温暖化問題検討委員会 (2001): 地球温暖化の日本への影響 2001. 地球温暖化問題検討委員会・影響評価ワーキンググループ, 446p.
- IPCC (2001a): *Climate Change 2001: The Scientific Basis* edited by Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A., Cambridge Univ. Press, 881p.
- IPCC (2001b): *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* edited by McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Avery, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S., Cambridge Univ. Press, 1032p.
- IPCC (2007a): *Climate Change 2007: The Physical Science*, Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html> [Cited 2007/08/29].
- IPCC (2007b): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc-wg2.org/> [Cited 2007/08/29].
- 気候影響・利用研究会編 (2002): 日本の気候 I : 最新データでメカニズムを考える. 二宮書店, 275p.
- 気候影響・利用研究会編 (2004): 日本の気候 II : 気候気象の災害・影響・利用を探る. 二宮書店, 338p.
- 気象庁 (2005): 異常気象レポート 2005. 気象庁, 気象業務支援センター, 383p.
- 三村信男・原沢英夫編 (2000): 海面上昇データブック 2000. 国立環境研究所地球環境研究センター, 128p.
- 西岡秀三・原沢英夫編 (1997): 地球温暖化と日本—自然・人への影響予測—. 古今書院, 256p.

(2007年8月30日受付, 2007年10月23日受理)