

気候モデルのシミュレーション結果を用いた温暖化影響評価シナリオ作成について

Developing climate change scenarios for impact assessment with the results of transient experiments of General Circulation Models

高橋 潔¹

岡村 知忠²

松岡 譲²

原沢 英夫¹

Kiyoshi Takahashi

Tomotada Okamura

Yuzuru Matsuoka

Hideo Harasawa

ABSTRACT: In order to develop climate change scenarios for impact assessments with the results of General Circulation Models (GCMs), it is important to examine which characteristics of the results can be taken into account with rational confidence. For the purpose, we listed up some important characteristics of GCMs to be used for creating climate change scenarios for impact assessment, and evaluated the ability of each GCMs to reproduce the characteristics with comparing the results of GCMs with the observed climatology data. Four characteristics are examined; regionally aggregated 30-years-mean annual-mean temperature/precipitation, spatial distribution of 30-years-mean annual-mean temperature, regionally aggregated 30-years-mean monthly temperature/precipitation (intra-annual variability of climatology), and inter-annual variability of annual-mean temperature. Some GCMs are found to have less ability to reproduce the observed climatology than others. Regionally aggregated 30-years-mean annual-mean temperature can be reproduced well, however, spatial distribution cannot be predicted well enough to be directly used for creating climate change scenarios for impact assessment. Monthly temperature is also reproduced well except for some models and regions. Generally precipitation is worse reproduced than temperature.

KEYWORD; General Circulation Model, Climate Change Impact, Climate Scenario

1 はじめに

全球規模を対象とした定量的な温暖化影響評価研究では、評価の対象について影響算定のためのモデルを構築し、その入力データとして将来の気候シナリオを設定し、影響評価を行う方法がもっとも頻繁に用いられる。温暖化研究の初期においては、現状の観測地表面気温データに一律の気温上昇を加えたり、世界全体一律の比率で降水量が増加することを仮定したりする、感度分析的な方法により将来気候シナリオを設定し、影響評価モデルの入力とした。1990年代に入ってから、全球規模の気候モデルの発達に伴い、大気中温室効果ガス濃度倍増時の平衡シミュレーション結果を将来気候として用いたり、現状の観測気候データに温室効果ガス濃度1倍時と倍増時の差を重ね合わせることで将来気候を設定する方法が主として用いられた。90年代後半には、大気、海洋、雪氷および陸面の三次元的表現を含む結合気候モデルの改良が急速に進み、現状の温室効果ガス濃度が将来にわたり継続すると仮定する基準実験と、将来の温室効果ガス濃度変化をシナリオとして与える漸増気候変化実験が多く行われるようになってきている。全球規模の温暖化影響評価の観点から見ると、漸増気候変化実験による知見を用いることで、影響を受けるシステムの適応速度を考慮した、

¹ 環境庁国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies, Environment Agency

² 京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University

より現実的な影響評価が可能になる。またその精度はいまだ十分とはいえないものの、年々変動や年内の季節スケールの変動といった変動性の将来変化についての情報も提供されることになり、極端な気候による影響の評価や、年々の変動幅を考慮に入れた上での対策の提案を行う際に有効である。

従来の温暖化影響研究では、各研究者が独自に気候シナリオを設定し影響評価モデルの入力としたために、その評価結果の比較に際して、それぞれの影響評価モデルに起因する違いと気候シナリオに起因する違いを区別出来ず、結果的に研究間の比較が困難であった。その経緯から、IPCCでは2001年での発表を目指す第三次評価報告書に向けて影響評価研究間の相互比較を容易にするために、気候変動影響評価のためのシナリオに関するタスクグループ（TGCIA）を作り、結合気候モデルを用いた気候シナリオ設定の標準的な手法を提案するとともに、その気候シナリオ設定に際して用いられるべき最新の結合気候モデルによる漸増気候変化実験の結果を収集し、インターネットを通じて公開・配布するためにIPCCデータ配布センター（IPCC-DDC, http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/ipcc_ddc.html）を創設しその運用が始まっている。

TGCIAにより提案されたシナリオ設定の手法を採用するにあたっては、（1）IPCC-DDCで提供される各大気海洋結合モデル自身の性質や精度に関する考察を行い、気候モデルの違いにより生成する誤差を知り、目的の影響評価に適した気候モデルを選択すること、（2）TGCIAで提案される気候シナリオ設定のための複数手法間に生成する誤差を、平均気温変化のシナリオ設定に注目して定量的に推計することで、シナリオ設定手法の選択により起こりうる影響評価の誤差の程度と傾向を認識しておくこと、が重要である。後者について、筆者らは全球規模を対象とした影響評価に際して年々変動を打ち消した平均的なシナリオを作成するためには15～30年位の平年値を用いる必要があることなどを調べてきたがその報告は別途行なうこととし、本論文では前者に関する検討の結果をまとめる。

気候変動による農業や河川流量、森林などへの影響を全球規模で評価する際に、その推計結果を支配する主たる気候変動要素は気温と降水量である。また、地球の温暖化傾向を表現するために「2100年時点での地球平均年平均気温上昇は2.0℃と予測される」といった言い回しが良く用いられるが、影響推計においては、気候変化の地域的な偏りや、各月間の変動、年々の変動や突発的な気象などが、平均的な気候変化の傾向に加えて重要である。本研究では、気温と降水量の2つの気候要素について、全球規模の影響評価で必要とされる気候の性質を各モデルがどの程度表現できるかについて、観測データを用いて作製された気候データセットとの比較によりいくつかの観点からまとめ、影響評価のための気候シナリオ設定の際の気候モデル選択の指針を与えることを目的とする。

本章では研究の背景と目的をまとめた。次章では、将来気候シナリオ設定に際して気候モデルからの提供が期待される情報を挙げ、それぞれについて3章での気候モデル評価に用いる基準を示した。3章では、各モデルの評価結果を示しその考察を行なう。終いに、本論文により得られた知見をまとめるとともに、シナリオ設定の際の気候モデル選択に関して今後更に検討が必要な点を示す。

2 気候シナリオ設定のための気候モデル評価基準

気候変動影響評価モデルの入力に結合気候モデルによる漸増実験結果を用いることは、時系列的な解析による現実的な適応の検討が可能になるなど多くの利点があり、今後の温暖化影響研究では標準的な方法となっていくと見込まれているが、現時点においてその精度は影響評価に直接利用するには不十分であり、より空間的に高解像で予測能力の高い地域気候モデルなど、今後の進歩を待つところは大きい。ただし、これは現在IPCC-DDCで配布されている結合気候モデルの計算結果を将来の気候シナリオ設定に用いることが出来ないということではなく、現状の結合気候モデルが比較的良くシミュレートできている点については、積極的に活用していく必要がある。表1はIPCC-DDC上で提供される7つの研究所による結合気候モデル実験をまとめている。それぞれのモデルに一長一短があり絶対的な評価は行ない難い。各モデルについて、平均気温、最高気温、最低気温、降水量、日射、露点、風速、気圧のシミュレーション結果が提供されている

表1 IPCC-DDC で提供される結合気候モデル実験

	CCSR	CCCma	CSIRO	GFDL	HADCM2	ECHAM4	NCAR
A-GCMの解像度	5.6° × 5.6° 20層	3.7° × 3.7° 10層	3.2° × 5.6° 9層	4.5° × 7.5° 9層	2.5° × 3.75° 19層	2.8° × 2.8° 19層	4.5° × 7.5° 9層
O-GCMの解像度	2.8° × 2.8° 17層	1.8° × 1.8° 29層	3.2° × 5.6° 21層	4.5° × 3.75° 12層	2.5° × 3.75° 20層	2.8° × 2.8° 11層	1° × 1° 20層
基準実験CO2濃度	345ppmv	295ppmv	330ppmv	300ppmv	323ppmv	354ppmv	330ppmv
遷移実験CO2増加率	1%/yr	1%/yr	0.9%/yr	1%/yr	1%/yr	1%/yr	1%/yr
基準実験のシミュレーション期間	1890-2099 210yr	1900-2100 200yr	1881-2100 219yr	1958-2057 100yr	1860-2099 240yr	1860-2099 240yr	1901-2036 136yr
気候感度	3.5°C	3.5°C	4.3°C	3.7°C	2.5°C	2.6°C	4.5°C
参照資料	Abe-Ouchi et al., 1998	Flato et al., 1998	Gordon and O'Farrell, 1997	Manabe et al., 1991	Johns et al., 1997	Roeckner et al., 1995	Meehl, 1997

が、本研究では多くの影響評価モデルにおいて重要な気候因子として取り扱われている平均気温と降水量に注目し、筆者らが開発を行なっている影響評価モデル (Takahashi et al., 1998) の気候シナリオを設定する際に必要とされる性質に基づいていくつかの評価基準を定め、各気候モデルのシミュレーション結果を分析した。本章では、評価基準の設定について説明する。

筆者らの開発する影響評価モデル研究の対象地域は地球全域であり、影響の種類としては農作物生産性への影響、河川流量への影響、森林植生への影響、マラリア伝播可能性への影響の4つを取り扱っている。その影響評価モデルは、空間解像度が 0.5° メッシュ、時間解像度が月平均の気候データを入力データとして必要とする。空間解像度が 1~5° である結合気候モデルの結果を空間解像度 0.5° の影響評価に用いるために張力付スプライン法を用いた補間を行なう場合が多いため、本論文でも同様の処理を行なった後に分析を行なった。

第一に、各モデルの現状気候再現性をおおまかに把握するために、各モデルの基準実験ならびに検証用観測データの年平均気温/年降水量の 30 年平年値 (1961~90 年) を世界 12 地域 (アフリカ、オーストラリア・ニュージーランド、中東・乾燥アジア、島嶼地域、温帯アジア、熱帯アジア、旧ソ連、欧州、アメリカ合衆国、カナダ、中米、南米) について集計し比較した (分析 1)。検証用観測データは LINK (New et al., 1998) を使用した。この地域区分は IPCC 第 2 作業部会の地域評価報告書の地域区分に基づき、1 地域の範囲が広いものについては更に細分化したものである。

次に、影響評価モデルで用いられる 0.5° × 0.5° グリッドレベルの気候を空間的にどの程度表現可能かを調べるために、各モデルの基準実験による年平均気温/年降水量の平年値と観測データによる平年値の乖離を各グリッドごとに計算し、その絶対値を各地域区分について集計した (分析 2)。

分析 1 に示した年平均気温の正確な表現とともに、年内変動の表現も重要である。例えば農業を例に取った場合、年平均が同じであっても栽培期の気候が異なれば、作物の生育は異なったものとなる。影響評価モデルの入力データは各月であるので、各モデルの基準実験ならびに観測データの月平均気温平年値/月降水量平年値を各月・各地域について集計し比較した (分析 3)。その際、年内の変動性を示す尺度の一つとして各気候モデルの各月平均気温/月降水量の年平均値からの偏差を計算し、観測値のそれと比較をした。

最後に、気候変動影響評価の結果から実際の施策を提案するためには、年々の変動性を考慮することが重要である。農業に関して言えば、豊作年・不作年双方に対応できるように準備しておく必要があるし、河川流量に関しては数年に 1 度起きる渇水などへの対策を検討する必要がある。年々の変動性の評価基準として、各気候モデルの平年年平均気温/年降水量に対する各年の年平均気温/降水量の偏差を計算し、観測値のそれと比較した (分析 4)。

3 気候モデルの評価

3.1 分析 1：年平均

図 1 は 7 つの結合気候モデルと LINK 観測データの 30 年平年年平均気温の地域集計を示す。NCAR モデルと GFDL モデルが全地域において観測値からそれぞれ高めと低めに 3~5℃ずれている。気候変動問題が 100 年で 2℃前後の気温上昇を取り扱うことを考慮すると、これら 2 つのモデルの精度は不十分であるといえる。大半の地域において複数気候モデルの中央値と観測値は近く、複数気候モデルを用いたシナリオ設定の有効性がわかる。図 2 は降水量について図 1 と同様の集計を行なったものである。降水量に関しては NCAR モデルの精度は低く、ECHAM4 モデルと HADCM2 モデルの精度は比較的高い。気温の場合と違い、観測値は複数気候モデルの幅の端に位置することが多く、複数気候モデルの中央値をとるという方法はあまり有効ではない。しかし、地域間の定性的な雨量の大小を表現できている点は、気候シナリオ設定の際に利用可能であるかもしれない。

3.2 分析 2：0.5°×0.5°の空間分布

図 3 は 30 年平年年平均気温についてモデル値と LINK 観測値の差を各グリッド毎に計算し、その絶対値を集計したものである。これは 0.5°×0.5°の解像度での空間的な分布を表現する能力を示すが、比較的良好な精度を持つ ECHAM4 や HADCM2 でも 1~3℃の誤差があり、高い空間解像度を要する影響評価モデルでは結合気候モデル出力を直接入力気候シナリオとして利用できないことを示している。観測データの平年値を用いたスケーリング (IPCC,1994) 等の手法を用いる必要がある。

3.3 分析 3：年内変動・各月平均値

図 4 は 30 年平年年平均気温に対する 30 年平年月平均気温の偏差を示している。気温の季節分布の表現力の尺度として用いた。NCAR モデルは LINK 観測値について同様に計算された偏差から外れた値を示すものの、他のモデルは全般的に各地域とも年内の気温のばらつきを良く表現することがわかる。これは、気候モデルの漸増実験により得られる将来の季節分布変化に関する知見に、気候シナリオ設定に使用されうる程度の信頼性があることを示している。各地域の 30 年平年月平均気温を観測データと比較したところ (図 5 は合衆国での例)、NCAR モデルの予測結果を除くと多くの地域で季節分布が正し

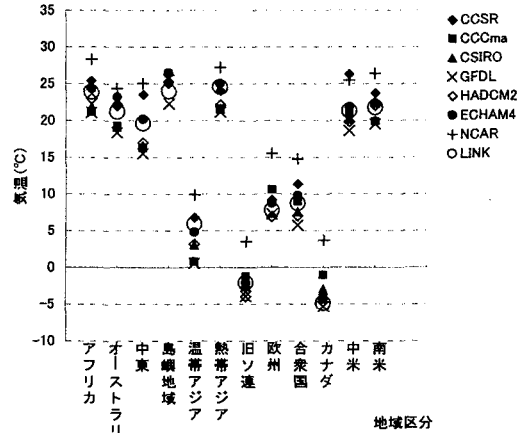


図1 各地域の30年平年年平均気温

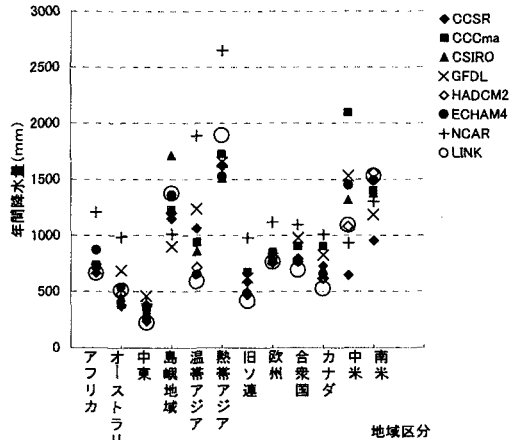


図2 各地域の30年平年年間降水量

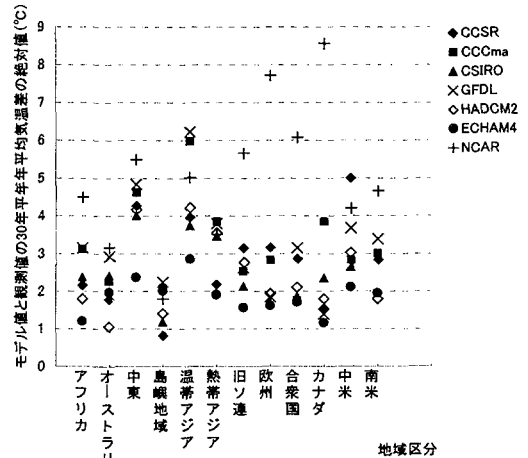


図3 30年平年年平均気温のモデル値と観測値の差 (グリッド毎の差分絶対値の地域集計)

く表現されていることがわかる。ただし CCSR モデルの中米についての計算結果は特異的に誤差が大きい。

図 6 は降水量について図 4 と同様の集計を行なったものである。複数気候モデルによる推計幅が大きい地域と小さい地域が存在する。偏差が大きい地域では推計幅も大きくなる傾向があるが、これは年内変動の大きい地域で降水量の季節分布を推定することが困難であることを示している。図 7 は降水量の月変動の地域集計について合衆国での例を示している。気温に比して、季節分布はうまく表現されていない。

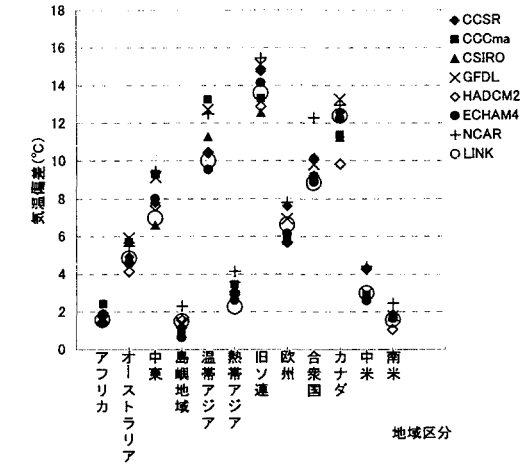


図4 30年平年月平均気温の年平均気温からの偏差

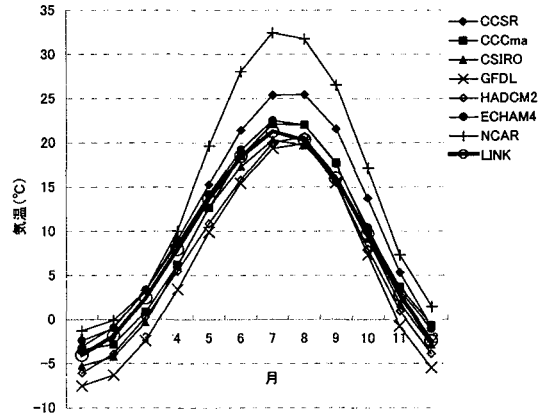


図5 30年平年月平均気温(合衆国)

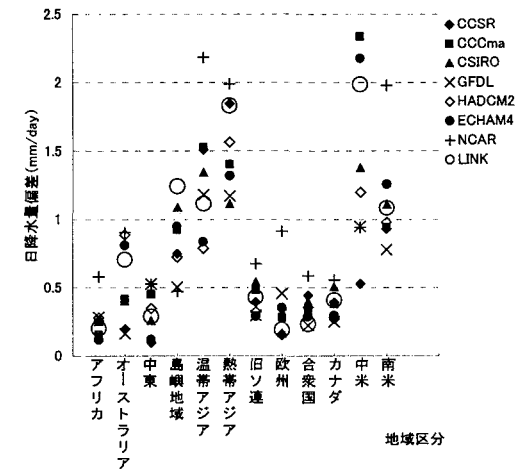


図6 平年月平均日降水量の年平均日降水量からの偏差

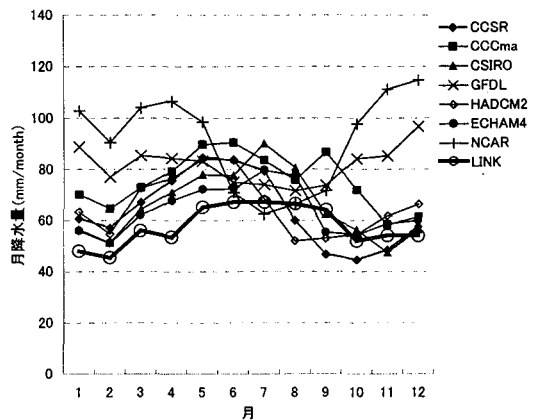


図7 30年平年月降水量(合衆国)

3.4 分析 4：年々変動

図 8 は 30 年平年年平均気温に対する各年（1961～90 年）年平均気温の偏差であり、年平均気温の年々変動の度合いを示している。モデル間の幅は大きい、多くの地域で複数気候モデルの中央値を用いることで観測値より得られた年々変動幅をかなりの精度で表現可能であることがわかる。これは、気候モデルの漸増実験により推計される将来の年々変動変化についての知見を、気候シナリオ設定時に利用できる可能性を示している。

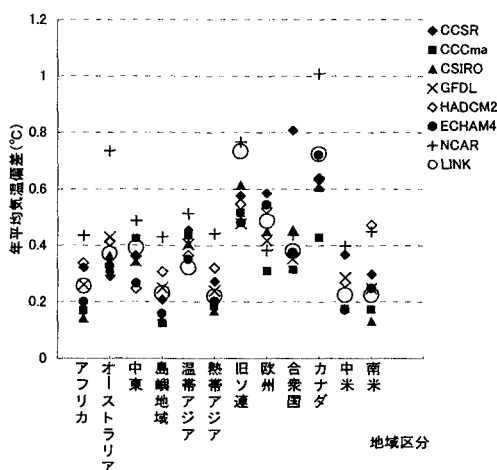


図8 年平均気温に対する各年平均気温の偏差

4 おわりに

本研究では、結合気候モデルによる観測値の再現性をいくつかの基準に基づいて評価した。その結果、NCAR モデルと GFDL モデルは将来の気候シナリオ設定に用いるには精度が不十分であることがわかった。また、シナリオ設定にあたって複数気候モデルの計算結果の中央値を用いるのが有効な場合が多いことが確認された。気温については年内の月々変動も良く推計されているが、降水については不十分な地域・モデルが多い。気候モデルの漸増実験結果は、将来の年々変動変化についてもある程度信頼できる知見を与えることもわかった。本研究では、気温と降水量を評価対象として取り上げ、いくつかの基準に絞ってモデル評価を行なったが、今後、各気候モデルに基づいて作成された気候シナリオを影響評価モデルに入力して、その

算定結果を観測気候データを入力とした算定結果と比較することでより包括的な気候モデル評価・気候シナリオ設定手法評価を行なうことが可能となると考えられる。

引用文献

- Abe-Ouchi, A. et al. (1998): Outline of CCSR-98 coupled atmosphere and ocean model and experiments, Internal Report of the Centre for Climate System Research, University of Tokyo, Japan.
- Flato, G.M., G.J. Boer, W.G. Lee, N.A. McFarlane, D. Ramsden, M.C. Reader and A.J. Weaver (1998): The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis Global Coupled Model and its Climate, submitted to Climate Dynamics.
- Gordon, H.B. and S.P. O'Farrell (1997): Transient climate change in the CSIRO coupled model with dynamic sea ice, Monthly Weather. Review, 125, 875- 907.
- IPCC (1994): IPCC Technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations.
- Johns, T.C., R.E. Carnell, J.F. Crossley, J.M. Gregory, J.F.B. Mitchell, C.A. Senior, S.F.B. Tett and R.A. Wood (1997): The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spin up and validation, Climate Dynamics, 13, 103-134.
- Manabe, S., R.J. Stouffer, M.J. Spelman and K. Bryan (1991): Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part I: Annual mean response, J. Climate, 4, 785-818.
- Meehl, G.A. (1997): Modification of surface fluxes from component models in global coupled models, J. Climate, 10, 2811-2825.
- New, M., M. Hulme and P. Jones (1998): Representing twentieth century space-time climate variability. I: Development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology, J. Climate.
- Roeckener, E. (1995): Parameterization of cloud radiative properties in the ECHAM4 model. In Proceedings of the WCRP Workshop on "Cloud Microphysics Parameterizations in Global atmospheric Circulation models", WCRP-90, 105-116, WMO/TD-No. 713.
- Takahashi, K., Y. Matsuoka and H. Harasawa (1998): Impacts of climate change on water resources, crop production and natural ecosystem in the Asia and Pacific region, J. of Global Environment Engineering, 4, 91-103.