

11. 米のグローバルな収量算定モデルの再現性評価 と気候変動影響予測

辰己 賢一^{1*}・山敷 庸亮¹・寶 馨¹

¹京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

* E-mail: tatsumi.kenichi.6m@kyoto-u.ac.jp

SRES A1B, A2, B1シナリオ下で、複数のGCMモデル気候値を用いた米の収量再現計算および将来の収量予測計算を、農作物収量算定モデル(iGAEZ)を適用して全球レベルで実施した。その結果、収量の再現性は $R^2 > 0.79$ となり、概ね良好な結果が得られた。将来の収量算定では、ロシアと西ヨーロッパでは対象とした全シナリオ下で将来の収量増が予想される結果となり、東南アジアおよび南アジアでは収量減となる可能性が高いことがわかった。また、B1シナリオ下では地域間の将来収量変化率の偏差が最も小さくなり、各地域で変化する自然環境に適応し、先進国と発展途上国の不均衡を抑えながら生産性を維持し、持続可能な発展を目指していくためには、本シナリオの世界が望ましい環境であることがわかった。

Key Words : Rice yield, iGAEZ, Climate Change, GCM, SRES A1B A2 B1

1. はじめに

作物は土地・水を主要な生産手段とし、降水・気温・日射等にその生長・収量が大きく左右されるため、気候変動の影響は、他の産業に比べて大きいことが予想される。IPCC第4次評価報告書は、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象現象の変化による寒冷環境での農作物収量の増加、温暖環境での収量減少、土壌の浸食・浸水による耕作不能化を指摘している。

環境条件が変化した場合の作物の収量を予測する手段には、過去の気象状況と収量の関係などから統計的に導く統計モデルと作物の生育や成長過程のメカニズムから導くプロセスモデルがある。Matthews *et al.*¹⁾は、1990年比でCO₂濃度が2倍、地球の平均気温が0℃、1℃、2℃、4℃上昇するとしたシナリオ下で、アジアでの米の生産量が平均で4.4%減少することを示した。Masutomi *et al.*²⁾は、SRES A1B(18GCM)、A2(14GCM)、B1(17GCM)の合計49のGCM出力を用いて、GCM出力の不確実性を評価するとともに将来気候がアジア域における米の収量に与える影響を評価した。その結果、CO₂濃度の増加による施肥効果が米の収量を増加させる方向に働くが、2081-2090

年平均の収量は、1991-2000年平均に比べ減少することを示した。Stehfest *et al.*³⁾は、主要穀物の植え付け期を考慮した作物収量を全球レベルでモデル計算し、計算結果と統計値が高い相関を持つことを示した。一方、土地利用・植え付け期・灌漑情報のデータ精度、作物管理や作物生長過程に関する作物パラメータ、入力データの時間・空間解像度に代表される不確実性が計算結果に大きな影響を与える可能性があることを指摘した。Tan *et al.*⁴⁾は、作物ごとの植え付け期と収穫期を考慮した作物収量モデルEPICを用いて主要穀物の収量計算を全球レベルで行い、モデルの有用性を示すとともに、温暖化が多くの国で農作物生産に悪影響を与える可能性があることを示した。Semenov *et al.*⁵⁾は、AFRCWHEAT 3Sを用い、気温と降水量の平均値および分散値を変化させることによって、小麦の収量に与える影響を感度分析した。その結果、気候の変動特性が平均気候の変化より収量に大きな影響を与えることを示した。Darwin *et al.*⁶⁾は、GISと一般均衡経済モデルからなるフレームワークを使い、将来の気候変動は農業だけでなく、家畜、林業、採鉱および加工業を含む世界の土地および水資源に関連したあらゆる生産可能性に影響を与えることを指摘した。また、地

表-1 本研究で用いた GCM と排出シナリオ

Groups	GCM	SRES Scenario			
		Model name	20C3M	A1B	A2 B1
Bjerknes Centre for Climate Research		BCCR-BCM2.0	○	○	○ ○
NASA/Goddard Institute for Space Studies		GISS-AOM	○	○	- ○
Institute for Numerical Mathematics		INM-CM3.0	○	○	○ ○
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)		MIROC3.2-hires	○	○	- ○
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)		MIROC3.2-medres	○	○	○ ○

球の平均気温が4℃以上上昇すると、作物生産に悪影響を与えることを示した。Hitz *et al.*⁷⁾ は、将来において高緯度では作物の栽培に適した条件が得られやすく、低緯度では作物栽培に適した期間が短くなる結果、先進国と発展途上国の間の作物生産における不均衡が増大することを示した。また、気温上昇が農作物に与える影響は不確実性が高いが、平均気温が3-4℃以上上昇すると作物生産にとって悪影響があることで複数の研究者の見解が一致していることを示した。Bondeau *et al.*⁸⁾ は、LPJmLを用いて炭素と水循環が農業に与える影響の調査および主要穀物の収量算定を全球レベルで行い、熱帯性の国々では収量が過大評価され、冷涼な国々では過小評価される傾向を示した。また、灌漑に関する情報が計算結果に与える不確実性の要因となることを指摘した。Liu *et al.*⁹⁾ は、GEPICモデルを用いて小麦の収量再現計算を全球で行い、水生産性と収量に高い相関があることを示した。Lobell *et al.*¹⁰⁾ は、日内気温格差と平均気温の将来変化が作物収量に与える影響を11のGCMモデルを用いて調べ、日内気温格差の将来変化が与える作物収量への影響は平均気温の将来変化に比べて小さいことを示した。Parry *et al.*¹¹⁾ は、A1FI, A2, B1, B2シナリオ下での主要穀物の収量変化を全球レベルで予測した。その結果、CO₂施肥効果のあるなしに関わらず、全球平均で穀物の生産量は減少することを示し、B1とB2シナリオ下では、先進国と発展途上国の将来の収量差がA1FI, A2シナリオと比較し小さいことを示した。Tatsumi *et al.*¹²⁾ は、世界の主要作物8種の収量再現計算とA1Bシナリオでの将来の収量予測をモデル計算により全球レベルで行った。その結果、気温の上昇により、現在栽培適地とされている箇所において生産性が減少し、カナダや北ヨーロッパ、中国東北部などの現在冷涼な気候の土地が作物栽培に適したものとなる可能性が高いことを示した。

以上の既往研究では、気候変動が農作物生産性に与える影響の定性的・定量的評価を行っているが、特定の作物の収量再現計算と複数の排出シナリオ間における収量

変化の地域間偏差に着目した全球規模での研究は十分に行われていない。国家やある地域における将来の食料政策を策定するにあたっては、ある特定の作物の収量について地域毎により詳細なシナリオによる分析が行なわれる必要があると考えられる。また、世界の米はアジアで90%以上が生産されているが、アメリカは世界第4位、エジプトは同7位の輸出国(2004)¹³⁾であり、米の生産国として挙げられている国の数は、2004年でアジア29カ国、アフリカ39カ国、ヨーロッパ12カ国、アメリカ27カ国、オセアニア3か国の合計110カ国に上る¹³⁾。また、南ヨーロッパ、北アメリカ、北アフリカおよびオーストラリアで生産される米の収量はアジアにおける平均収量の1.5倍以上に上り、EU (27か国) の米輸入量は世界第4位(2006)となっている¹⁴⁾。一方、サブサハラアフリカにおける米の消費量は年4.5%の水準で成長しており¹⁵⁾、ナイジェリアの米輸入量は世界第1位(2004)である¹³⁾。このことから、アフリカでは米の安定的な生産とそのための土地生産性の向上が急務となっている。また、ブラジルは世界第9位の米生産国(2004)¹³⁾であり、日系社会が発達しているウルグアイを含め、南米では、米は小麦やキャッサバと並ぶ主食の一つである。世界の米の耕作面積・生産量は年々増加傾向にあり、かつ、米は、世界の多くの地域で生産され、人類の主食であることから、将来の気候変動が米の生産性・輸出入・地域偏在性に与える影響を全球レベルで調べることは意義があるものと考えられる。

本研究では、Tatsumi *et al.*¹²⁾の農作物収量算定モデルiGAEZ (Improved Global Agro-Ecological Zones model)を用い、世界にとって重要な主要穀物である米に注目した1990-1999年におけるモデルによる地球規模の収量再現を試みるとともに、表-1に示す温室効果ガス排出シナリオ(SRES A1B, A2, B1)での複数のGCM気候値の不確実性を考慮した2040-2049年、2090-2099年における収量の気候変動影響予測を行った。なお、本研究ではCO₂による肥沃化の影響は不確実性が高いため考慮しないものとし、気候変動に対する適応策の効果も考えていない。

2 方法

本研究では、モデルの入力値に用いる気候値として表-1に示す現在気候値 (20C3M)、将来気候値 (A1B, A2, B1) を採用する¹⁶⁾。現在気候のGCM計算値と観測気候値の間には差異があることから、1961-1990年の各年について、月平均値がCRU TS 2.1¹⁷⁾による値と一致するように気候モデルの出力値に補正を施した。すなわち、月平均気温値についてはベースライン期間 (1961-1990年) のCRU TS 2.1と気候モデル出力の平均値の差分を気候モデル出力値に加算して作成した。また、気温以外の物理量については、気候モデル出力値がベースライン期間の気候モデル出力の平均値以上の場合、ベースライン期間のCRU TS 2.1と気候モデル出力の平均値の差分、未満の場合は、その比を気候モデル出力値にそれぞれ加算・乗算することにより作成した²⁾。また、将来気候値の補正については、観測気候値とGCM予測値のバイアスが将来も変化しないものと仮定し、同様の方法でバイアス補正を行った。以上の処理に加え、現在気候に対する観測気候値と補正後のGCM予測値との差が大きく変わらないことを確認した上で、現在と将来のモデル入力値として同種のGCM出力データを用いることにより、現在気候と将来気候の違いによる収量変化を捉えることとした。入力に用いた月別の気候データ^{16), 17)}は、線形補間により日別データに変換した。また、気候データ、標高・土壌タイプ¹⁸⁾、灌漑データ¹⁹⁾は、最短距離法を適用することにより、モデル入力に用いる全データを水平解像度0.5度に統一した。

前研究からの本モデルの改良点の一つは、より現実的な農作物収量を算定するために、Sacks *et al.*²⁰⁾で公開されている生育期間中の栽培期間と気温・降水要件、植え付け期、収穫期、栽培期間に関する国別・グリッドごとの情報を用いた点である。本データは実際に農事暦情報が観測されたエリアのみを収録したものと空間的に農事暦データを全球に外挿したものの2種類からなる。本研究では、全球計算を行うため、後者の外挿によって得られた全球データを利用し、各グリッド上での米の植え付け期・収穫期を定義し、モデルの物理過程に組み込んだ。これにより、各グリッドにおける作物の栽培パターン (単作・多期作など) を把握し、より現実的な条件下での米収量の算定を行った。なお、将来の気温・降水量の変化により現在のこれらの作物情報は変わる可能性があるが、本研究では将来における作物の植え付け期・収穫期は現在と同じものに設定し、作物パラメータ (光合成経路、標準成長期間、最低生長期間、収量形成期間、葉面積指数、標準収穫係数、成長許容最低・最高気温、水

ストレスや病害虫などに対する耐性) は、Fischer *et al.*²¹⁾による農業生態学地域プロジェクトで示されている経験的データを使用した。

以上により、入力データと各種パラメータを整理した上で、最初に、iGAEZを用いて気温と放射のみを入力とする収量を算定する。なお、作物固有の生長することができるための日平均気温が日最低気温以上かつ日最高気温以下である期間を生長期間とし、生長期間が最低生長期間と収量形成期間の和より大きい場合は、収量があるとみなした。次に、天水栽培による収量を算定するため、気温と放射、土中水分量を入力とする収量を算定する。作物の生長には利用可能な土中水分量が存在している必要がある。土中水分量の算定には、降水量、野外容水量^{18), 19)}、実蒸発散量を入力とする次式の簡易水バランス式を使用した。本研究では河川水・地下水からの灌漑水取得や大規模灌漑をモデル内で陽に考慮していないため、グリッド間の水の移動や流出量の評価は行っていない。

$$W_{j+1} = \min(W_j + P_j - ET_{a,j}, S_{max}) \quad (1)$$

j : 時間, W : 土壌水分量 [mm], P : 降水量 [mm], ET_a : 作物別実発散量 [mm], S_{max} : 野外容水量 [mm] である。

さらに、有害動物・病気・霜枯れの発生など作物への直接・間接的原因による収穫高減を表すパラメータである農業気候制約²⁰⁾を用いることにより、農業気候制約下での農作物収量を算定した。なお、将来の収量計算にも同様に本パラメータを使用した。さらに、天水栽培時には、土壌環境や地形の傾斜の影響があるため、同様にFischer *et al.*²¹⁾によって提案されている制約条件をベースに修正されたパラメータを適用した。

以上により、天水栽培時における米収量の推計を行った。また、世界で生産される食料の40%は灌漑農地で占められていることから、実際の農作物収量算定は灌漑を考慮したものでなければならない。しかし、全球規模での灌漑を考慮した収量の算定は灌漑設備や河川・地下水流量の情報、貯水池の操作などを勘案する必要があり、詳細なデータの入手は困難であることから、これらの影響を考慮したモデル化は本研究では行っていない。そのため、気温・放射制約下で収量が示されたグリッドから天水栽培の収量が示されたグリッドを差し引いたグリッドエリア (気温と放射制約下で作物が生長できる環境、つまり、天水栽培が行われていないエリア) を灌漑農業が行われているエリアであると仮定し、そのエリアの収量に灌漑率¹⁹⁾を掛けることにより得た次式を使い、灌漑を考慮した米収量の計算を行った。

$$Yield_{total} = Yield_{ra} + (Yield_{fr_{grid_cell}} - ra_{grid_cell}) \times Irrigationrate \quad (2)$$

表-2 1990年代に対する2090年代の気候変化に関する統計量

	気温℃	降水量 %	気温標準偏差 (最小/平均/最大)	降水量標準偏差 (最小/平均/最大)
A1B	+3.3	+7.6	0.72/0.84/0.94	12.77/14.66/19.67
A2	+3.6	+12.2	0.74/0.92/1.03	16.03/21.54/29.64
B1	+2.3	+9.1	0.61/0.69/0.82	11.09/15.65/20.35

ここで、 $Yield_{total}$: 灌漑を考慮した農作物収量 [kg/ha],
 $Yield_{ra}$: 天水栽培による農作物収量 [kg/ha],
 $Yield_{fr_{grid_{cell}} - ra_{grid_{cell}}}$: 気温・放射制約下で収量が示されたグリッドと天水栽培の収量が示されたグリッドの差で得られたグリッド上の農作物収量 [kg/ha],
 $Irrigationrate$: 耕地面積に占める灌漑耕地面積の比である。

以上により、現在 1990-1999 年と将来 2040-2049, 2090-2099 年について米の収量を算定し、気候変動が米の収量に与える影響を評価した。なお、将来の灌漑率には、現在の灌漑率空間分布に農地面積の国別統計値の 1990 年代の変化傾向の外挿を掛けることにより算出した。

3. 結果と考察

(1) 現状と将来におけるシナリオごとの気候変動量

排出シナリオ間および各GCM出力モデルが持つ気候変動量の偏差が作物収量に及ぼす影響を調べるために、各地域におけるGCMモデル出力値のばらつきを評価しておく必要がある。表-2に各シナリオ下での1990年代に対する2090年代の地上気温変化量、年降水量変化率の全球平均値および地上気温変化量・年降水量変化率の地域間標準偏差の最小値・平均値・最大値を示す。図-1にGCMの現在気候条件の再現として使われるSRES 20C3Mシナリオの1990年代に対するSRES A1B, A2, B1シナリオでの2090年代の地域別地上気温変化量および年降水量の変化率を示す。SRES A1B(地域間格差を解消する立場を取り、エネルギー源のバランスを重視)、A2(地域主義を仮定し、環境への関心が相対的に低い)、B1(環境を重視した持続可能な経済成長と地域格差の縮小を仮定)それぞれにおいて、GCMモデル出力値にばらつきがあり、気候変動予測の不確実性が見てとれる。また、地域間の標準偏差はA2シナリオが最も大きく、地域主義を仮定した本シナリオ下では、地域間の将来における気候変動量の偏差がA1B, B1に比べて大きいことがわかった。このことは、将来の収量計算の結果に対しても、収量変化に変動幅を与える可能性が高いことを示す。

地域ごとに見るとロシアでは、A1Bシナリオ下で1990

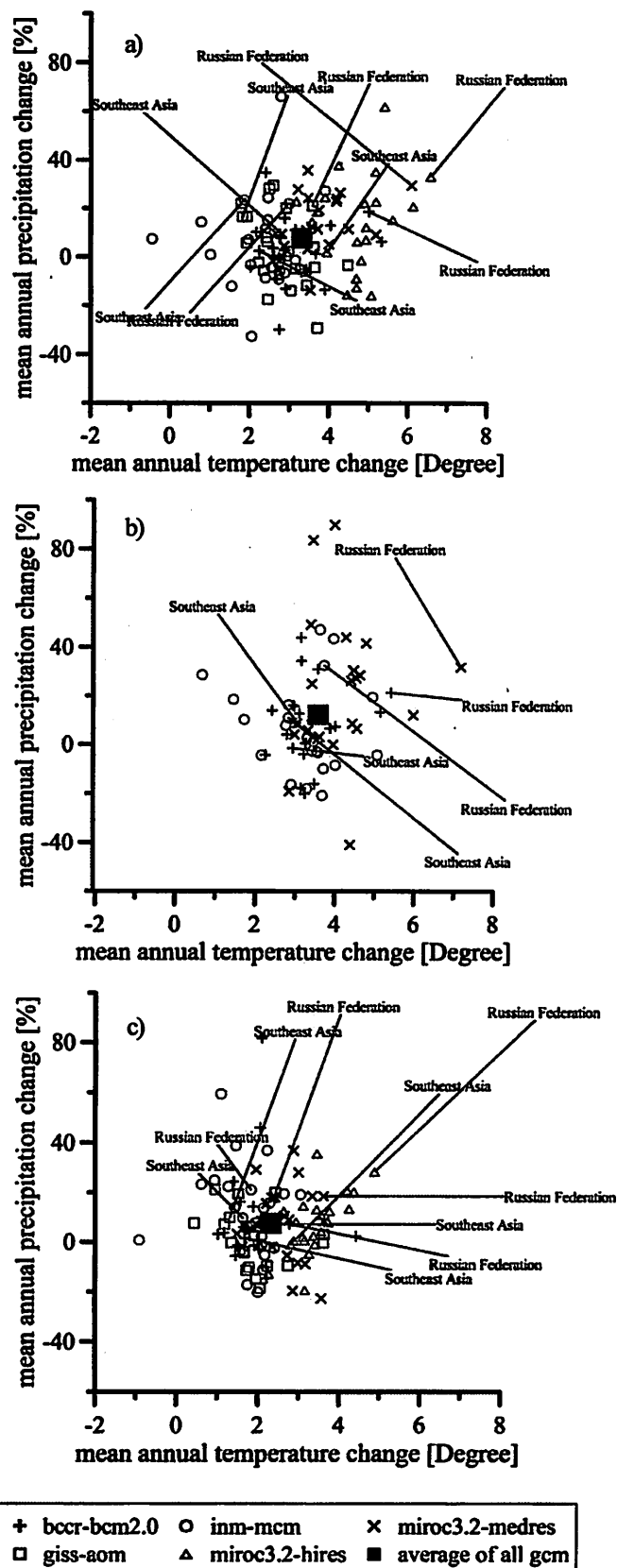


図-1 1990年代に対する2090年代の年平均気温変化量と年降水量変化率の関係 (a) A1B, (b) A2, (c) B1)

年比で気温は3.0 - 6.6℃ 上昇し、降水量は18.4 - 33.1%増加, A2では気温3.7 - 7.2℃ 上昇, 降水量21.3 - 32.5%増加,

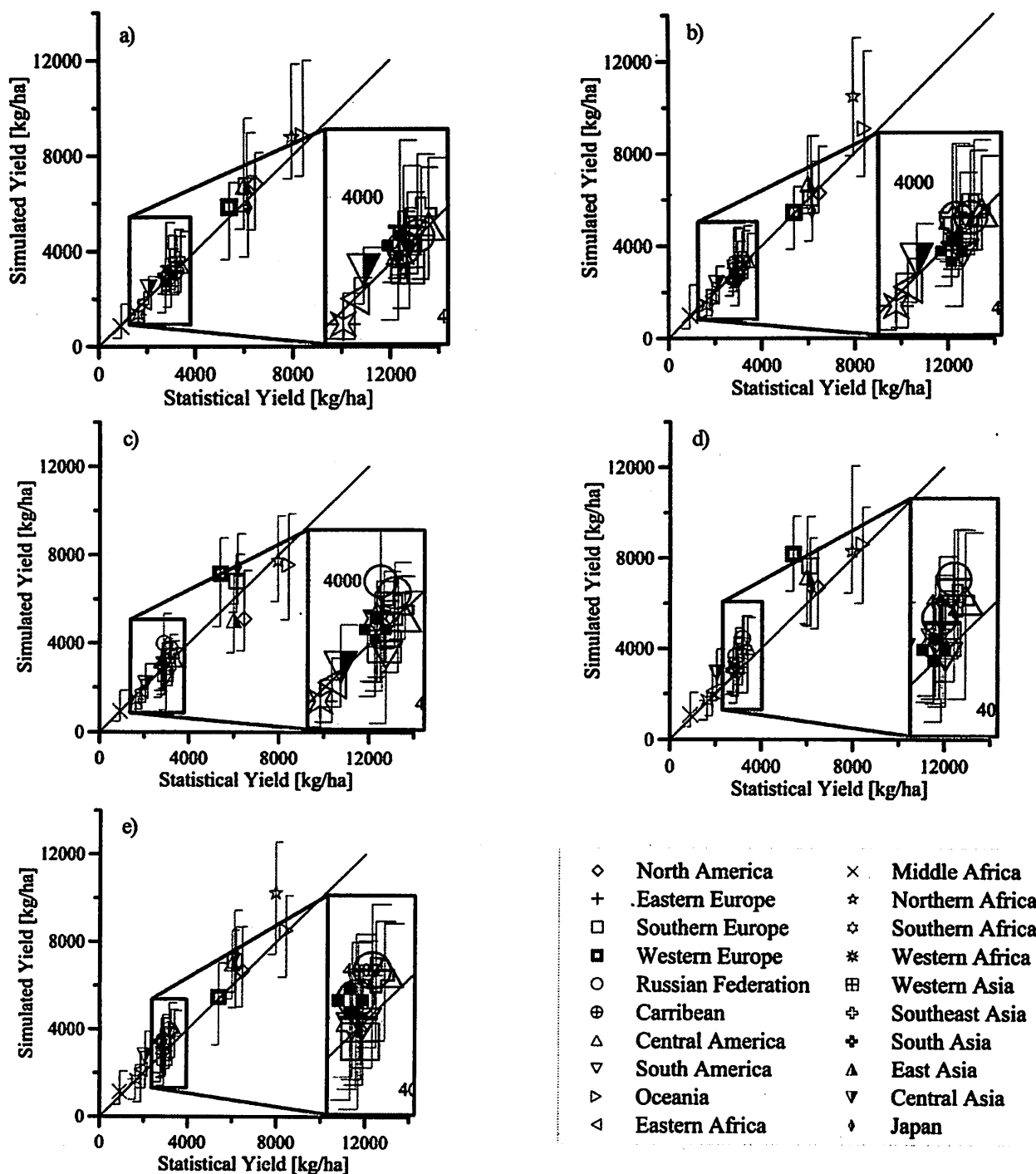


図-2 1990年代の統計値と収量計算結果の比較 (a) BCCR-BCM2.0, b) GISS-AOM, c) INM-CM3.0, d) MIROC3.2-hires, e) MIROC3.2-medres)

B1シナリオでは気温1.8-4.9℃上昇、降水量73-28.5%増加する結果となった。同様に東南アジアでは、A1Bで気温1.8-4.0℃上昇、降水量1.7-16.3%増加、A2で2.8-3.1℃上昇、降水量-1.5-10.9%増加、B1で1.3-2.8℃上昇、降水量-1.0-9.9%増加する結果となった。また、A1B、B1シナリオ下では、中緯度から高緯度の地域で、気温と降水量には概ね正の相関が見られる結果となったが、低緯度に位置するアフリカを始めとする発展途上国では、気

温と降水量変化に有意な相関は見られなかった。以上のように、気候変動の量や時間的・空間的な分布には不確実性が内在する。これはGCMが正確な将来気候値の予測というよりは、パラメタリゼーションと呼ばれる確からしいと思われる物理過程によって得られるものであるからである。したがって、収量計算を行う際は、1つのGCMに依存するのではなく、複数のモデル気候条件下で収量予測を試みることが重要となる。

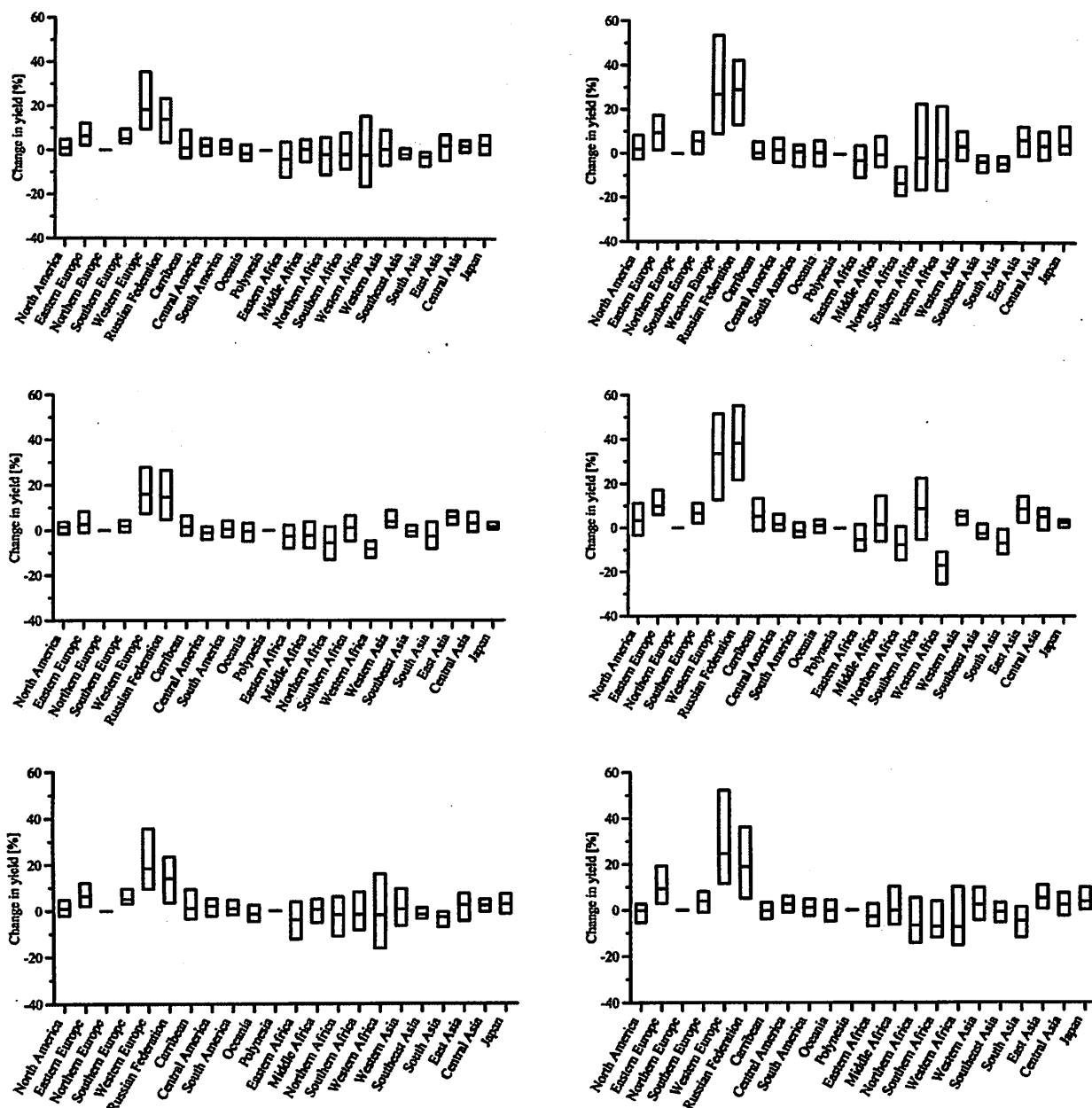


図3 1990年代に対する2040年代、2090年代における地域ごとの収量変化率
(左：2040年代、右：2090年代；上段：A1B、中段：A2、下段：B1)

(2) モデルによる収量再現性の評価

iGAEZモデルによる1990年代の米収量再現性の定量的な評価を行うために、各グリッドごとに得られた収量の値を地域別に合計し、収穫面積で除すことで単純平均した。次に、FAOSTAT¹³⁾から得た地域別の統計値と計算された収量を比較することによって、iGAEZによって得られた収量の再現性を評価する。図-2に統計値と20C3Mシナリオの各GCM気候値を用いることによって得られた計算結果の1990-1999年の10年平均値を地域ごとに散布図にして示す。なお、図に示すエラーバーは、各地域内におけるグリッド別収量の推計値の最大値、最小値を表している。図より、統計値と計算値は良い一致を示し、全ての点は1:1のラインに近づく結果となった。また、

地域内収量の最大値・最小値を見ると、用いたGCM気候値によって差があるものの、概してモデルが出力する地域内収量の変動幅は小さいと言える。さらに、線形単回帰モデルを用いた検証を行った結果、F検定において、全てのGCM気候値を用いた収量再現結果の重回帰式が有意水準0.01で有意であるとの結果を得た。また、統計値と計算値間における1990-1999年の10年間の自由度調整済み決定係数 R^2 は、BCCR-BCM2.0で0.92、GISS-AOMで0.87、INM-CM3.0で0.79、MIROC3.2-hiresで0.87、MIROC3.2-medresで0.89と高い値を示した。本計算結果をTatsumi *et al.*¹²⁾と比較すると、自由度調整済み決定係数は平均で0.76から0.86と改善した。また、Tatsumi *et al.*¹²⁾では、北アメリカにおける収量は統計値と比較して2000 kg/ha

程度過小評価されていたが、本研究では統計値との良好な一致が見られた。これは、本研究において、Sacks *et al.*²⁰ で公開されている農事暦データを取り入れ、米の二期作に関する情報を組み入れたことによるものと考えられる。また、1990-1999年の各年における自由度調整済み決定係数の標準偏差はいずれのモデル出力においても0.05を超えず、収量の年々変動を精度よく再現できていることがわかった。Nash-Sutcliffe係数²¹は、最低で0.78、最高で0.90を示し、正規化二乗誤差は最高でも0.09と低い値を示した。地域別の傾向を見ると、北アフリカにおいて、BCCR-BCM2.0、GISS-AOM、MIROC3.2-medresモデルによる出力値を使って得られた収量は、統計値に比べやや過大評価する傾向となった。各地域における10年平均値の収量再現性を高めるために、本栽培エリアでの雨や気温などの気候条件以外の一期作・二期作の情報や灌漑技術の発達、機械化効率などモデルパラメータに改善を要する必要があることがわかった。しかしながら、iGAEZを用いた米の収量再現計算は、統計値に対して概ね良い値を示した。

(3) 各シナリオ間における将来の収量変化

図-3に各シナリオ下における1990年代の計算収量に対する2040年代と2090年代の地域ごとの収量変化率の最小値・平均値・最大値を棒グラフで示す。ロシアでは、全シナリオ下において2040年代、2090年代の米収量が1990年代比で増加することを示すとともに、用いたGCM気候値間の収量変化率の偏差は他の地域に比べて相対的に大きく、大きな不確実性を有していることがわかる。本結果は、図-1に示すようにロシアでのGCM気候値が各モデル間で大きなばらつきを持っていることに起因している。また、ロシアの2090年代における収量変化率はA1Bシナリオ下においてGCM平均で+29%、A2シナリオで+38%、B1シナリオで+19%で他地域より大きく、また、A1BおよびB1シナリオと比べ、A2シナリオにおけるロシアでの収量の平均増加率は2040年代、2090年代とも高い結果となった。このことは、将来の気温上昇・降水量の増加がロシアでの収量増加を引き起こす大きな要因になっていることを示唆している。また、現在では気候上の特性からロシアで最も南に位置する地方でのみ米の耕作が可能となっているが、2040年代および2090年代にはモスクワ南部からカザフスタンとの国境にかけて、栽培地が見られ（図-4）、ロシアにおける耕作面積は将来において拡大する結果を得た。ただし、ロシアでの米の生産量はアジアなどと比べると大変小さいものであることから、気候学的な栽培適地と気候変動がグローバルな米の生産に与える影響についてはさらなる議論を必要とする。また、Tani *et al.*⁹ や Parry *et al.*¹⁰ は、ロシアでの穀

物の大幅な減収を予想しており、本結果はこれらの結果と異なるものとなった。さらに、ロシアでのGCM気候値間における収量変化率の標準偏差は、1990年比で2040年代がA1B、A2、B1シナリオでそれぞれ11.1、10.59、10.00となり、2090年代がそれぞれ23.0、19.57、16.63となった。このことから、2040年代に比べて2090年代の収量計算値がより大きな不確実性を持っていることを示す結果となった。また、西ヨーロッパの将来の収量はA1B、A2、B1シナリオの全てで増収を予想しているが、A1Bシナリオ下のMIROC3.2-hiresを用いた結果では1990年代比で2090年代ではGCM平均より17.9%低い収量増加率を予想している。この要因として、年平均気温および年平均降水量変化率を他のモデルと比べると、大幅な減収の要因となるような差異は認められないが、10月の平均降水量を見ると、64mmとなっており、例えばMIROC3.2-medresの114mmと比べると40%以上少なく、その結果、本地域において収穫期に必要な水分の確保が困難となるため収量が大幅に減少する結果となったことが考えられる。西ヨーロッパでの増収を示す本研究結果は、CO₂の施肥効果を考えた際にA1、A2、B1、B2シナリオ下で増収を予想したParry *et al.*¹⁰ の結果と整合的である。また、西ヨーロッパでの収量変化率の偏差は、他の地域に比べて相対的に大きく、この地域での気候値間の標準偏差の大きさが不確実性を高めていると考えられる。南ヨーロッパでは、A1Bで100%、A2で66%、B1で80%の確率で1990年代比で2040年代は正の収量を示す結果となり、本結果はCO₂施肥効果を考慮した際のA1、A2、B1、B2で2050年代の増収を予想したParry *et al.*¹⁰ の結果と同傾向を示すものとなった。アフリカ地域はロシアや西ヨーロッパを除く他の地域と比較すると相対的に、将来の収量変化率の幅が大きくなっており、GCM気候値の偏差が大きく影響しているものと思われる。また、アフリカの各地域全体では、A1Bで80%、A2で60%、B1で72%の確率で負の収量変化率を示す結果となり、特にA1Bの全GCMで北アフリカの収量は減少し、A2の全GCMで西アフリカの収量が減少する結果となった。この西アフリカおよび北アフリカにおける全シナリオ下で将来の収量減を示す確率が高くなった本結果は、Parry *et al.*¹⁰ の結果と整合的である。なお、アフリカ全土における各シナリオ間の収量変化率の標準偏差は、A1B、A2、B1でそれぞれ10.46、11.81、7.29となり、B1シナリオつまり地域格差の縮小を仮定した環境が最も収量変化率の偏差量が小さくなることがわかった。南米では、A1Bで40%、A2で33%、B1で40%の確率で2040年代の収量減を予想したが、GCM平均ではそれぞれ0.42%、0.54%、0.98%の収量増を示す結果となった。Lobell *et al.*²² は2030年にブラジルでの収量減を示し、Parry *et al.*¹⁰ はCO₂効果を考慮した場合、2050年代の収量

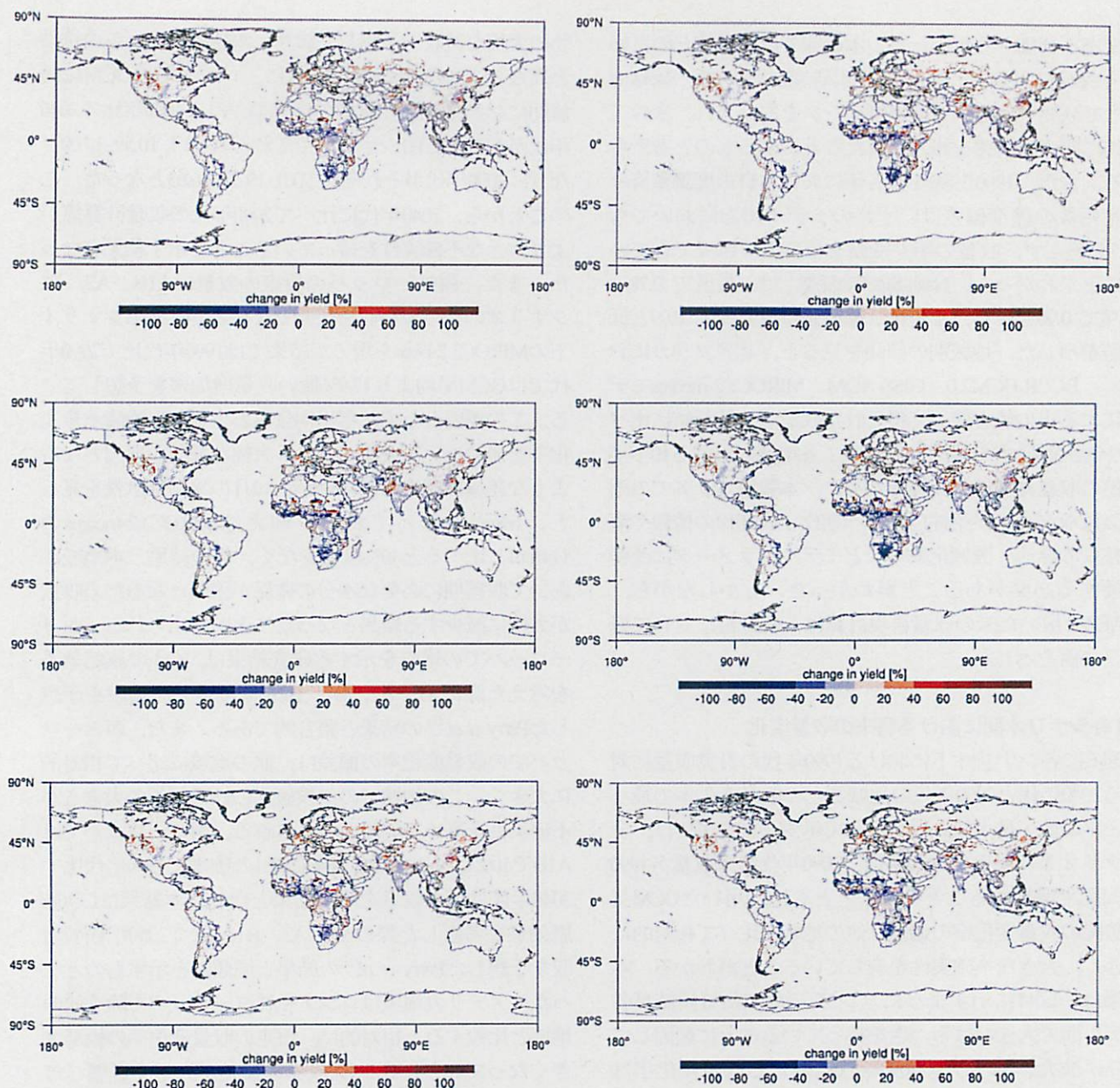


図4 2040年代、2090年代の各シナリオ下における米のモデル間平均収量の変化割合
(左：2040年代、右：2090年代；上段：A1B、中段：A2、下段：B1)

はA1, A2, B1, B2シナリオで、ブラジルを含む南米北部で0 - 5.0%の減収、アルゼンチンを含む南米の南部ではB2aを除く全シナリオで0.0 - 10.0%の増収を示す結果を示しており、本計算結果はこれらの結果と概ね整合的であると言える。また、南米においてもB1シナリオでの収量変化率の標準偏差が最も小さい結果となった。また、全球ではA1B, A2, B1で標準偏差はそれぞれ11.35, 13.54, 9.41となり、A2では収量変化率の不確実性が最も大きく、B1が最も小さい結果となった。一方、全球での米の生産量は、A1B, A2, B1シナリオ下でそれぞれ-23%, -1.9%, +1.6%となった。以上のことから、生産量の絶対的な地域差を考えない場合、各地域で変化する

自然環境に適応していくためには、より長期的な見通しを備えることができ、先進国と発展途上国における収量差の不均衡を抑制し、長期的に生産性を維持する一助となりうるB1シナリオの世界が作物生産にとって望ましい環境であると言える。本結果は、B1およびB2シナリオでの先進国と発展途上国間の将来における収量の差異は、他のシナリオと比較して小さくなるとしたParry *et al.*¹¹⁾の結果を支持するものであると考える。

現在、世界における主要な米の生産地域である東南アジアや南アジアでは、それぞれA1Bで80%, 100%, A2で66%, 83%, B1で70%, 80%の確率で将来において収量減が予想される結果となった。この収量減の傾向は、

Masutomi *et al.*²⁾, Lobell *et al.*²⁰⁾の結果と整合的である。また、図-3、図-4より、これらの地域では幅広いエリアで、将来において収量の減少が生じる可能性の高いことが本研究で明らかとなった。このことは、将来の気温上昇や蒸発散量の増加によって、米の生育に必要な環境の悪化が収量に悪影響を与えることを示唆している。一方、東アジアでは、モンゴル以東や中国とロシアの国境付近において、収量増が予想される結果となり、現在は冷涼な気候のために米の栽培に適していない土地が将来において農業に適した気候条件を備える可能性が高いことがわかった。また、アメリカ西部やアメリカとカナダの国境付近においても将来、米の収量増が予想される一方、アメリカの主要な米生産地帯である南部の幅広い領域では、収量が減少する結果となった。この結果は、全シナリオで予想されるものであることから、農業技術のさらなる発展や作物の品種改良などを行っていく必要があることを示唆するものと考えられる。

4. 結論と課題

本研究では、全球スケールでの米の収量に着目し、1990年代の収量の再現計算およびSRES A1B, A2, B1シナリオ下における複数のGCMモデル気候値を用いて、2040年代と2090年代の将来収量についてモデル計算を行った。その結果、将来の収量予測は各GCM気候値の不確実性の影響を大きく受けることが明らかとなった。また、収量の変化率が持つ不確実性は、2040年代に比べて2090年代でより顕著となることがわかった。

本研究での1990年代の米の収量再現性は、統計値と計算値間の自由度調整済み決定係数 R^2 で見た際、0.79以上と高いものとなり、概ね良好な結果が得られた。しかしながら、一部地域では、再現性は十分とは言えず、さらなるモデルの改良・開発を行っていく必要がある。

将来の収量予測では、GCM気候値の偏差が大きいほど、収量変化率の偏差も大きいものとなったが、ロシアおよび西ヨーロッパでは全シナリオ下で将来の収量増が予想される結果となった。一方、東南アジアや南アジアでは将来、広い領域で収量減となる可能性が高いことを示す結果となり、人口増加や食料の需給の観点からも灌漑効率の向上や農業技術の発展が望まれる。東アジアでは、米生産にとって良好な気候環境が北へ遷移することが将来において強く示唆される結果となった。これは、現在冷涼な気候である中国の東北部が、将来における気温上昇や降水量の増加によって、収量が向上する可能性が高いことを示している。アフリカ地域では、全シナリオ下で収量の減少が生じる可能性が高いことを示す結果

となった。また、環境を重視した持続可能な経済成長と地域格差の縮小を仮定したB1シナリオ下では、将来における地域間の収量変化率の偏差が最も小さくなった。

本研究では、河川流量を考慮した灌漑取水スケジュールや二酸化炭素の施肥効果、土壌侵食・劣化、機械化効率、技術の発展などについて考慮していないため、今後これらの効果を適切にモデル過程に組み入れ、一層収量の再現性を高めるとともに、将来の気候変動が収量に与える影響の予測を行っていく必要があると考える。また、全球植生モデルや窒素循環モデルなどと本研究で使用したモデルを組み合わせた統合的な農作物収量算定モデルへの拡張なども検討していかなければならない。

参考文献

- 1) Matthews R.B., Kropff M.J., Horie T. and Bachelet D.: Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation, *Agricultural Systems*, 54(3), pp.399-425, 1997.
- 2) Masutomi Y., Takahashi K., Harasawa H. and Matsuoka Y.: Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation modes, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol.131, pp.281-291, 2009.
- 3) Stehfest E., Heistermann M., Priess J.A., Ojima, D.S. and Alcamo J.: Simulation of global crop production with the ecosystem model DayCent, *Ecological Modelling*, Vol.209, pp.203-219, 2007.
- 4) Tan G. and Shibasaki R.: Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration, *Ecological Modelling*, Vol.168, pp.357-370, 2003.
- 5) Semenov M.A. and Porter J.R.: Climatic variability and the modelling of crop yields, *Agricultural and Forest Meteorology*, 73, pp.265-283, 1995.
- 6) Darwin R., Tsigas M., Lewandrowski J. and Ranases A.: World agriculture and climatic change: economic adaptations, *Agricultural Economic Report*, No.703. US Department of Agriculture, Washington, DC.
- 7) Hitz S. and Smith J.: Estimating global impacts from climate change, *Global Environmental Change*, 14, pp.201-218, 2004.
- 8) Boudeau A., Smith P.C., Zaehle S., Schaphoff S., Lucht W., Cramer W. and Gerten D.: Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance, *Global Change Biology*, Vol.13, pp.679-706, 2007.
- 9) Liu J., Williams J.R., Zehnder A.J.B. and Yang H.: GEPIC-modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale, *Agricultural Systems*, 94, pp.478-493, 2007.
- 10) Lobell D.B.: Changes in diurnal temperature range and national cereal yields, *Agricultural and Forest Meteorology*, 145 (3-4), pp.229-238, 2007.
- 11) Parry M.L., Rosenzweig C., Iglesias A., Livermore M. and Fischer G.:

- Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios, *Global Environmental Change*, 14, pp.53-67, 2004.
- 12) Tatsumi K., Yamashiki Y., Silva R.V., Takara K., Matsuoka Y., Takahashi K., Maruyama K., Kawahara N.: Estimation of potential changes in cereals production under climate change scenarios, *Hydrological Processes*, Vol. 25, Issue 8, 2011.
 - 13) FAOSTAT, Food and agriculture organization, 2005.
<http://faostat.fao.org>
 - 14) USDA: 世界の農業生産, 世界の貿易.
 - 15) FASID: 第164回Brown Bag Lunch Seminar 報告書.
http://www.fasid.or.jp/chosa/forum/bbl/pdf/164_r.pdf
 - 16) Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E.: The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: a new era in climate change research, *Bulletin American Meteorological Society*, Vol.88, pp.1383-1394, 2005b.
 - 17) Mitchell T.D. and Jones P.D.: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids, *International Journal of Climatology*, Vol.25, pp.693-712, 2005.
 - 18) FAO: The Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties, Version 3.5, United Nations Food And Agriculture Organization. CD-ROM, 1995c.
 - 19) Döll P. and Siebert S.: Global modeling of irrigation water requirements, *Water Resources Research*, 38(4), 2002.
 - 20) Sacks W.J., Deryng D., Foley J.A. and Ramankutty N.: Crop planting dates: an analysis of global patterns, *Global Ecology and Biogeography*, Vol.19, pp.607-620, 2010.
 - 21) Fischer G., Velthuisen H. and Nachtergaele F.: Global Agro-Ecological Zones Assessment: Methodology and Results. Interim report. Luxemburg, Austria: International Institute for Systems Analysis (IIASA), and Rome: FAO, 2000.
 - 22) Nash J.E., Sutcliffe J.V.: River flow forecasting through conceptual models: Part I—A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp.282-290, 1970.
 - 23) Lobell D.B., Burke M.B., Tebaldi C., Mastrandrea M.D., Falcon W.P. and Naylor R.L.: Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030, *Science*, Vol. 319, pp.607-610, 2008.

(2011. 4. 11 受付)

(2011. 6. 28 受理)

Validation of A Global Rice Yields Model and Climate Change Impact Projection

Kenichi TATSUMI¹, Yosuke YAMASHIKI¹, Kaoru TAKARA¹

¹Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

This paper uses the iGAEZ (Improved Global Agro-Ecological Zones) model for simulating rice yields on a global scale. This model determines the optimum criteria of crop parameter of growth cycles to ensure most realistic crop yields combinations under the climate, water resources and crop conditions. Global-scale rice yields are calculated using iGAEZ for the periods of 1990-1999, 2040-2049 and 2090-2099 by projecting each of total 18 GCM outputs for SRES A1B, A2 and B1. Comparing calculated rice yields with the statistics from FAOSTAT, iGAEZ has demonstrated a very good ability ($R^2 > 0.79$) to reproduce realistic rice yields on a global scale. In Russia and Western Europe, increases in temperature and precipitation contributed to the increase in yield under the all scenarios. On the other hand, decreases in yield were observed in SouthEastern Asia and South Asia under many scenarios. Global-scale rice production for 2090s will increase by 1.6% under B1, decrease by 2.3%, 1.9% under A1B, A2. Under the B1 scenario, developed and developing regions exhibit less contrast in crop yield changes, with the B1 future crop yield changes being slightly more favourable (lower standard deviation) than those of the A1B, A2 scenarios for sustainable development.