

農作物のグローバルな収量推定モデルの再現性評価と

気候変動影響予測

企画情報技術グループ 辰己賢一

1. はじめに

農業は土地・水を主要な生産手段とし、気象条件等の環境に生長が大きく左右されることから、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。また、世界の穀物消費量は、人口の増加、経済成長、生活スタイルの変化等に伴い、今後急速に増大すると考えられている。一方、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・浸水による耕地の耕作不能化を指摘している。

Matthews et al.¹⁾ は、1990 年比で CO₂ 濃度が 2 倍、地球の平均気温が 0°C、1°C、2°C、4°C 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。Takahashi et al.²⁾ は、地球の平均気温が 2.5°C 上昇すれば、アジア地域における穀物生産に大きな影響を与え、中国では 1990 年比で小麦の生産量が 60% 減少し、とうもろこしの生産量が 40% 減少することを示した。Masutomi et al.³⁾ は、SRES(Special Report on Emissions Scenarios) A1B(18GCM)、A2(14GCM)、B1(17GCM)の合計 49 の GCM 出力を用いて、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、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.⁴⁾ は、主要穀物の植え付け期を考慮した全球規模での作物収量をモデル計算し、計算結果が統計値との高い相関を持つことを示した。Tan et al.⁵⁾ は、作物ごとにおける植え付け期と収穫期を考慮した農業収量モデルを用いて主要穀物の収量計算を行い、モデルの有用性を確認するとともに、温暖化が多くの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。

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、全球規模かつ多数の作物種に関する収量の評価は必ずしも十分ではなく、モデルが現状の農作物収量を全球規模で精度よく再現できているかについての研究は、数多く行われていないのが現状である。

本研究では、Fischer et al.⁶⁾の農業生産性推定モデルをベースに改良された農作物収量算定モデル iGAEZ (Improved Global Agro-Ecological Zones model)⁷⁾を用い、複数の GCM 出力を用いた全球規模の農作物収量計算を 8 種の作物に対して行った。

2. 方法

本研究では、妥当な精度で全球規模での農作物収量を推定するため、Fischer et al.⁶⁾の農業生産性推定モデル（以下、GAEZ）を基礎として開発された農作物収量算定モデル（以下、iGAEZ）⁷⁾を用いる。iGAEZ は、気温、降水量、可能蒸発散量、平均雲量、

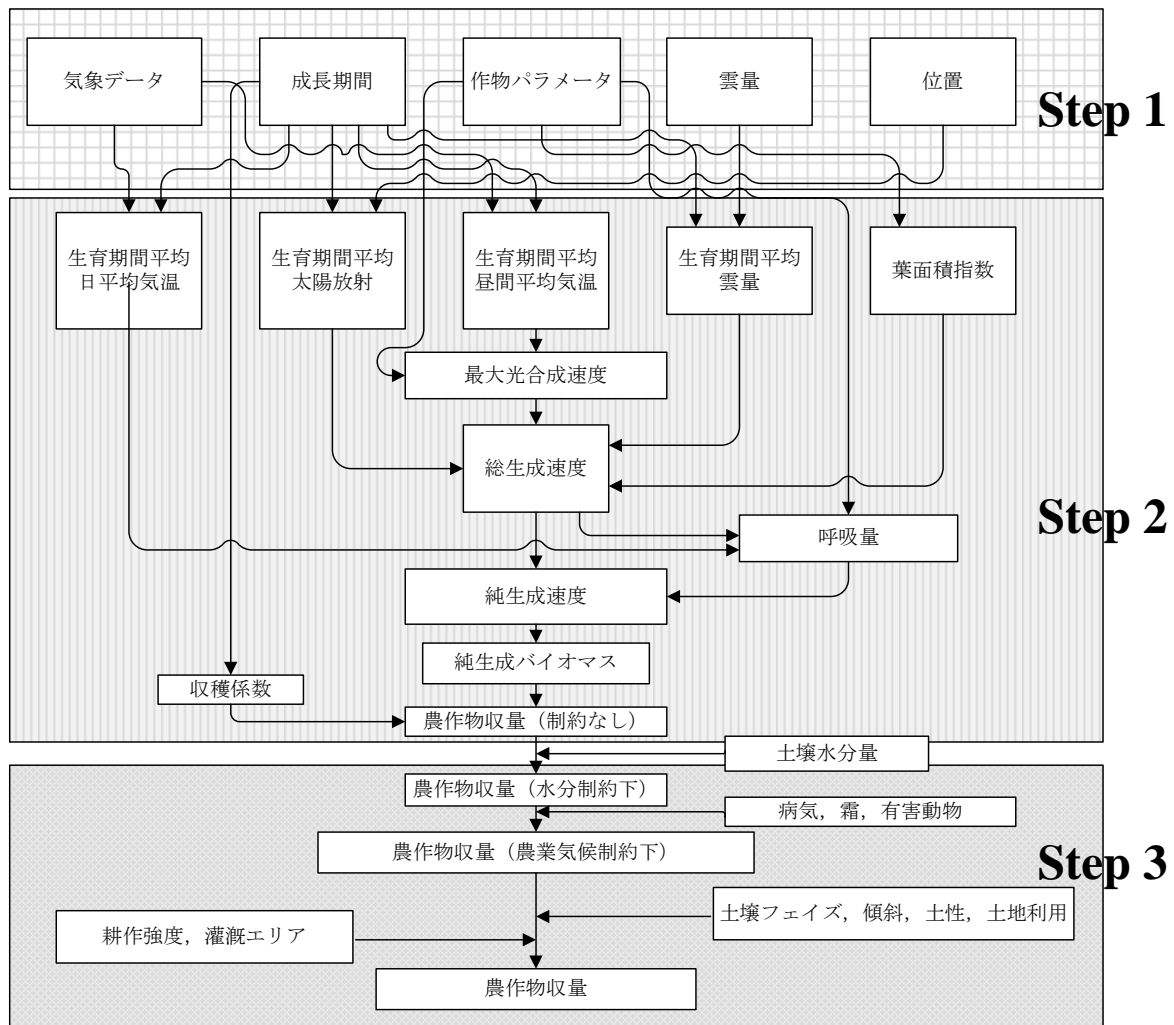


図1 iGAEZによる収量計算の流れ

放射などの気候データと土壌条件・地形・灌漑情報を入力条件とし、作物の生長・動向のモデル化により農作物収量を算定するものである。本研究では、小麦、じゃがいも、キャッサバ、大豆、米、サツマイモ、とうもろこし、さやいんげんの計8作物の収量計算を行った。iGAEZによる収量計算の流れを図1に示す。月別の気候データ^{8),9)}は、線形補間により日別データに変換し、標高、土壌タイプ¹⁰⁾、灌漑エリア¹¹⁾データは、各セルに対して距離の自乗の逆数で重みづけ平均することにより水平解像度0.5度に統一した。将来の気候シナリオは、1961-1990年の30年平均値⁷⁾に、IPCC-SRES-A1B、A2排出シナリオの出力結果(それぞれGFDLのCM2.1モデル、NIESによるMIROC3.2medresモデル、UKMOによるHadGEM1モデル、MRIによるCGCM2.3.2モデル、NCARによるCCSM3モデル)による気候変化を足し合わせて作成した。

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、GeoWeb¹²⁾、USDA¹³⁾、William et al.¹⁴⁾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から、年間においてグリッド上で栽培されている作物種を調べることにより、各作物の植え付け期・収穫期を定義した点である。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、より現実的な農作物収量の算定を行った。なお、将来に

おける気温・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もあるが、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た。また、各作物の気候条件、土壌条件に対する作物パラメータ（光合成経路、標準成長期間、最低生長期間、収穫形成期間、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、FAO¹⁵⁾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。(Step 1)

次に、気温と放射のみを入力とする収量を算定する。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。なお計算手順は Fischer et al.⁶⁾、FAO¹⁵⁾によるものとする。(Step2)

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^{6),10)}、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。

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

ここで、 j : 時間、 W : 土壌水分量 [mm]、 P : 降水量 [mm]、 ET_a : 作物別実蒸散量 [mm]、 S_{max} : 野外容水量[mm]

実際の作物栽培では、生長期間中および収量生成段階での有害動物・病気・雑草・霜枯れの発生、仕事効率が収穫高増減の直接・間接的原因となる。本研究では、FAO¹⁵⁾の農業気候制約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 FAO¹⁵⁾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単位面積当たりの農作物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、全球規模での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エリアと天水栽培の収量エリアの差を灌漑農業が行われているエリアであると仮定し、その差に灌漑率¹⁰⁾を掛けることによって得た次式を使い、灌漑を考慮した農作物収量の計算を行った。(Step3)

$$Yield_{total} = Yield_{rainfed} + (Yield_{free} - Yield_{rainfed}) \times Irrigationrate \quad (2)$$

ここで、 $Yield_{total}$: 灌漑を考慮した農作物収量 [kg/ha]、 $Yield_{rainfed}$: 天水栽培による農作物収量 [kg/ha]、 $Yield_{free}$: 温度・放射制約下における農作物収量 [kg/ha]、 $Irrigationrate$: 耕地面積に占める灌漑耕地面積の比

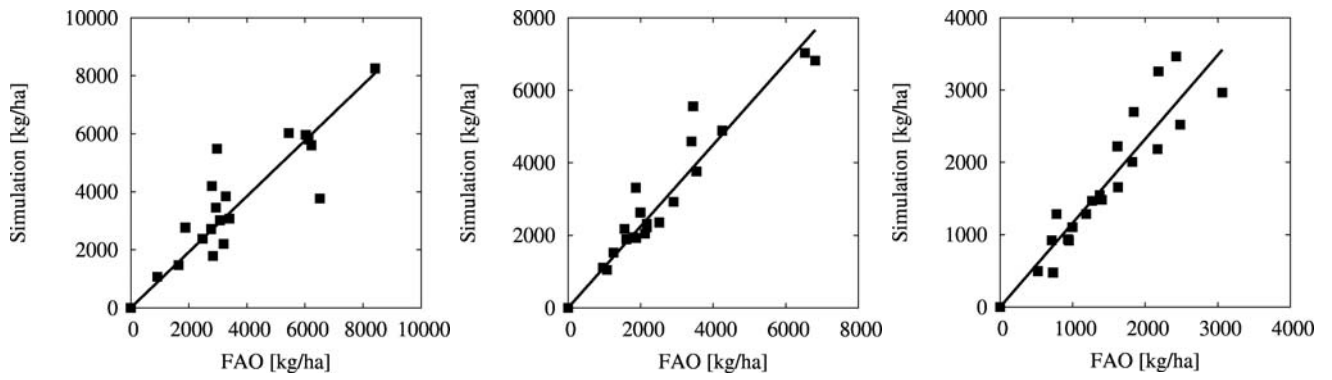


図 2 計算結果と統計値の比較 (左)米, (中)小麦, (右)大豆

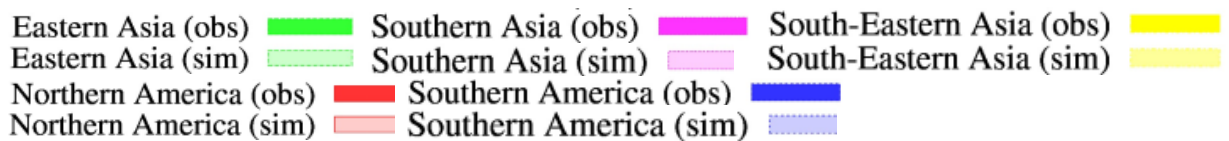
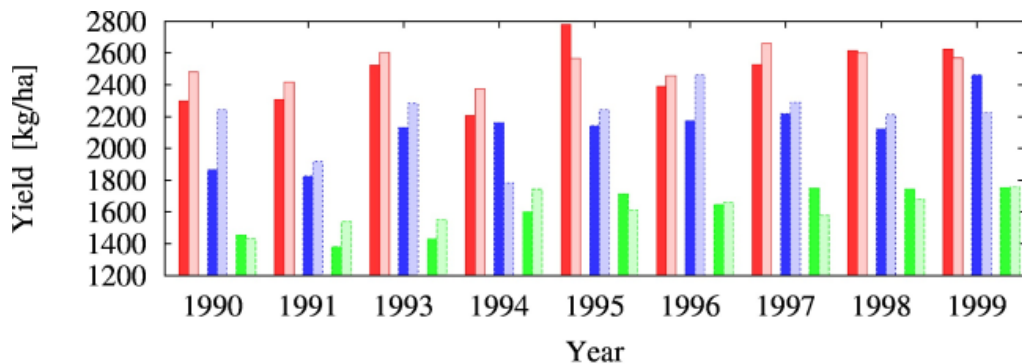
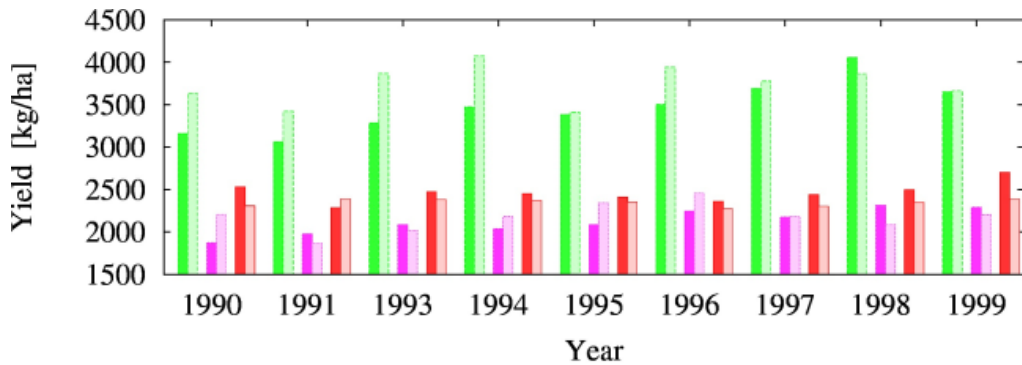
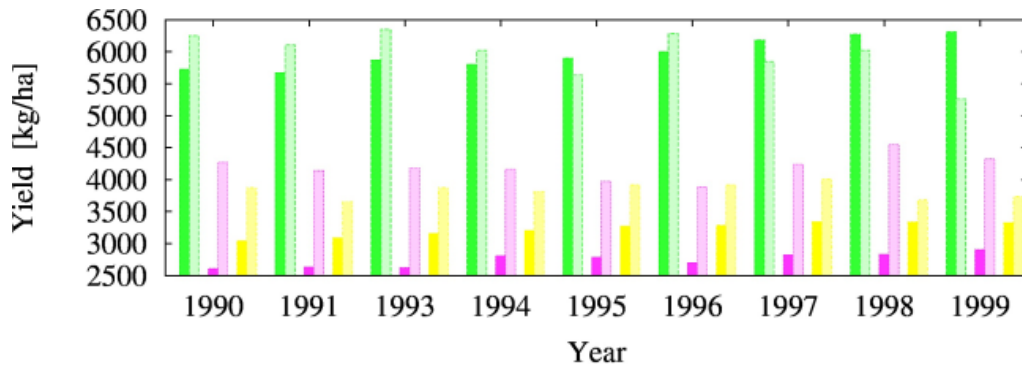


図 3 計算結果と統計値の年々比較 : (上段)米, (中段)小麦, (下段)大豆

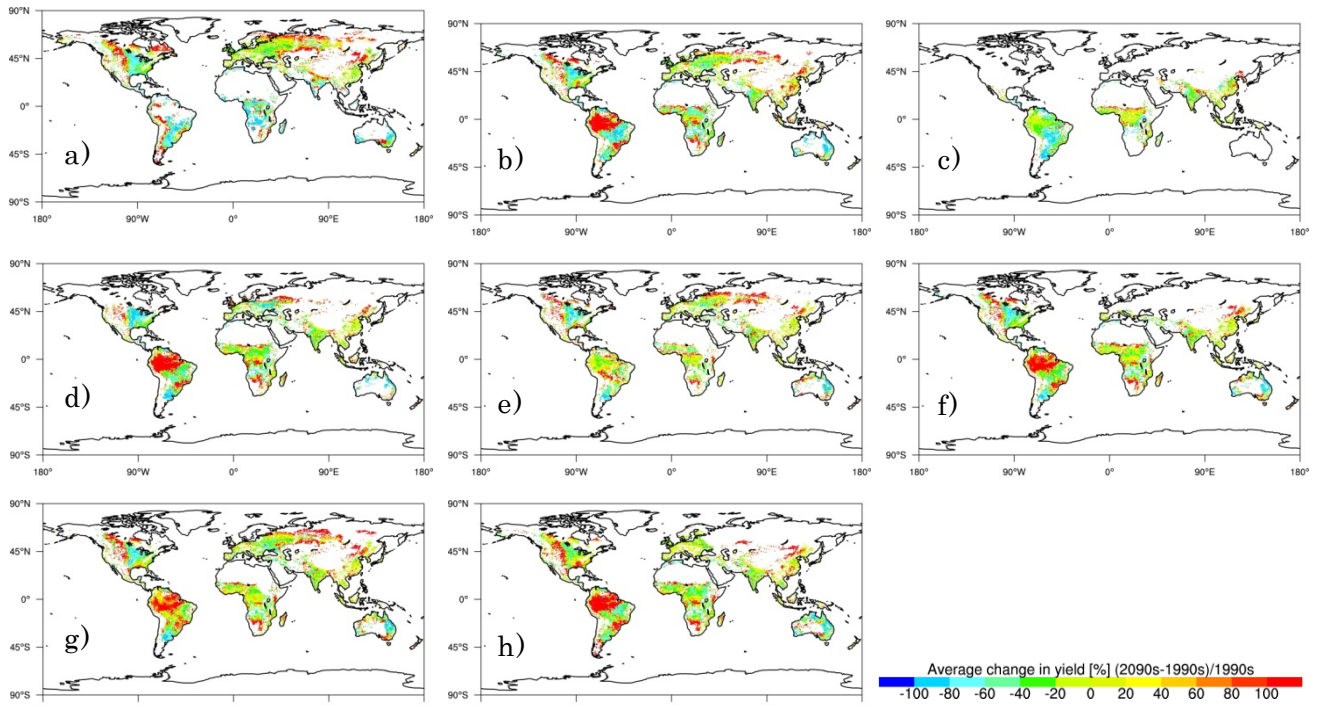


図 4 2090 年代の農作物収量の変化割合（1990 年代との比較，全シナリオによる結果の平均）：(a)小麦，(b)じゃがいも，(c) キャッサバ，(d)大豆，(e)米，(f)サツマイモ，(g)とうもろこし，(h)さやいんげん

以上により、現在 1990-1999 年と将来 2090-2099 年について農作物収量を算定し、気候変動が農作物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

3. 1 現状と将来における農作物収量変化

図 2 に FAO の統計値¹⁶⁾と計算結果の収量散布図（1990-1999 の平均）を示す。なお、図中の■は世界の各地域に対応している。世界の全 22 地域における 1990-1999 年平均の作物収量の統計値と計算結果の相関係数は計算対象とした 8 作物種（一部の図省略）全てにおいて 0.86 以上と高く、多くの地域で実際の収量を良好に再現する結果となった。図 3 に世界の主要穀物である米、小麦、大豆に関する計算結果と FAO による統計値を年毎に比較した図（1990-1999）を示す。なお、図中に示す地域は、各作物の世界の生産量上位三か国が属する地域である。作物別に見ると、小麦の計算結果と統計値の相関係数は図に示す地域の平均で 0.51 となった。一方、米では、0.40 を上回る地域はなく、計算結果と統計値の間に高い相関は見られなかった。大豆における計算結果と統計値の相関係数は、地域平均で 0.53 となった。各作物における年々の収量統計値と計算結果の相関係数は、総じて高い結果とは言えない。

地域別に見ると、南アジア、東南アジアにおける米の計算結果は、計算対象としてすべての年において、統計値に比べて高く算定され、モデルにおける作物パラメータに改

善を要する結果となった（図 3(上段)）。また、東アジアにおける米の相関係数は-0.52 となり、中国における一期作・二期作の情報や灌漑技術の発達など、栽培エリアにおける雨などの気候条件以外の要素が実際の収量に大きく関わっていることから、精度よく収量の年々変動を再現できていない結果となった。また、図 3(下段)より、大豆の南米における収量は統計値で示された収量の年々変動を十分に追従できていない結果となり、その年々変動幅は、統計値に比べて大きくなった。特に、1993 年の南米における平均気温は、1990-1999 年の平均気温に比べて約 1.6 度低く、気温の低下が本モデルによる収量計算結果に大きく影響を与えたことが要因として挙げられる。収量は経済状況や極端気象、技術発展などにも左右される。これらの要素についてもモデルに組み込むことにより、年々変動する作物収量に対するモデルでの再現性が上がると考えられるため、今後の課題としたい。

図 4 に 1990-1999 年の平均収量と 2090-2099 年の平均収量の変化率 (%) を示す。図 4(a)より、小麦の収量は、将来、アメリカ東部、ブラジル南部、オーストラリアの南部において減少することを示す結果を得た。これは、気候変動による作物の生長期間における将来の気温上昇が収量を減らす要因になる可能性を示唆している。一方、カナダ南部・東部、中国東北部においては、収量が増加に転じる結果となった。現在と比べ、農作物の生長に適したエリアが将来北へ遷移することによって、作物栽培に適した地域になる可能性が高いことを示唆するものである。じゃがいも（図 4(b)）およびサツマイモ（図 4(f)）は、将来においてブラジル北部では大幅に収量が増加し、ブラジル南部で収量が大幅に減少する結果となった。平林ら¹⁷⁾は、陸面モデルを用いて AGCM の降水量が陸面水収支に与える影響を調べた。その結果、流出量の変化が大きい地域と LAI の相関が高いことを示し、特にブラジル北部の LAI の年平均は世界で最も高い値を出していることを示した。また、GCM 気候出力による気温変化では、ブラジル北部は他の地域に比べて大きな気温上昇度を示していることから、将来の作物生長期間における LAI と気温の値がモデル内で過大評価されたため、この地域における将来収量が増加する結果となったことが考えられる。キャッサバ（図 4(c)）は、ブラジル南部では、将来収量の大幅な減少が見られるが、南米地域全体では 6.6%、世界全体では 17.4%の収量増が見込まれる結果となった。大豆（図 4(d)）は、南米全体で、0.42%の収量減少が予想される結果となったが、アマゾン域では大幅な収量増加が予想される結果となった。これらの結果は、穀物メジャーの経済力あるいは地域規模の人口増加、経済成長による技術発展の効果をより詳細にモデル内に取り込むとまた異なる結果がでる可能性もある。米の生産（図 4(e)）では、将来において中国東北部および南アジアの一部の地域で収量の増加が見られる。アジア域でのこれらの結果は、Masutomi et al.³⁾と同様の傾向を示した。さらに、カナダ西部でも収量増加が予想され、ロシアでは 11.4%の収量増加が示された。この結果は、現在は冷涼な気候のため稲作に適していないが、将来の温暖化により、これらの地域で稲作栽培による収量の増加が見込まれることを示す。とうもろこしの生産エリア（図 4(g)）は、将来においてアメリカのコーンベルト地帯において収量が減少し、カナダが栽培適地になる可能性があることを示唆する結果となった。また、中国では、北緯 40 度以北において、幅広いエリアで収量の増加が予想される結果となった。

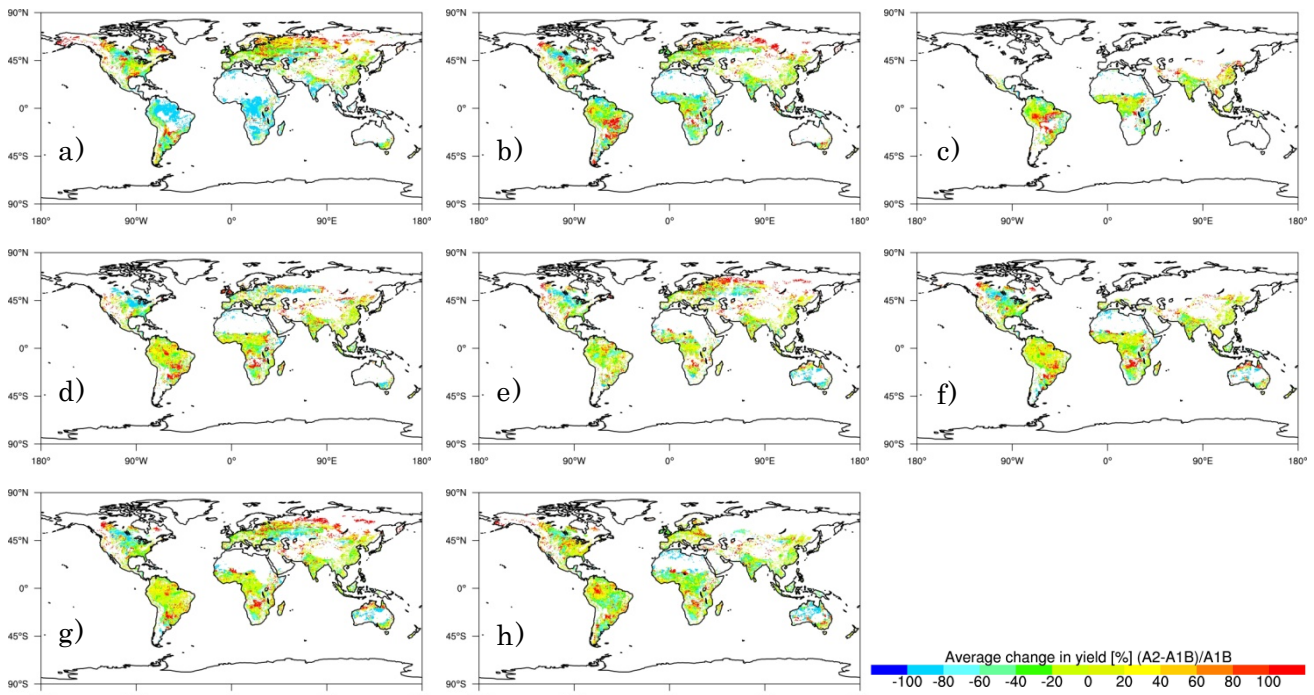


図 5 2090 年代の A1B シナリオに対する A2 シナリオの平均収量の変化割合：(a)小麦，(b)じゃがいも，(c) キャッサバ，(d)大豆，(e)米，(f)サツマイモ，(g)とうもろこし，(h)さやいんげん

以上の 8 作物種の収量計算結果から、将来における地球規模での気温の上昇によりアメリカ東部やインド、中国東部では幅広いエリアにおいて収量が減少する傾向を示す一方、現在冷涼な気候であるカナダやヨーロッパ北部、中国東北部が将来、農作物の栽培に適した土地になる可能性が高い結果が明示的に示された。

3. 2 将来の気候シナリオ間における収量差

図 5 に、SRES の A1B シナリオに対する A2 シナリオ下の農作物収量の変化率を示す。図 5(a)より、カナダ南部、ケベック地方以東において A2B シナリオ下で小麦の収量増が見込まれるが、北アメリカ全体では 13%の収量減が予想される結果となった。また、アフリカ、インド、一部を除くヨーロッパ全体で減収が見込まれ、ロシア北部（北緯 60 度以北）では、東西に渡り幅広く増収が見込まれることがわかる。以上から、低緯度地域では専ら収量が減少し、高緯度地域は温暖化により農作物栽培に適した土地となるため、収量が増加するのではないかと考えられる。キャッサバ(図 5(c))は、南アメリカ全体で 9%の収量増が予想されたが、世界の上位生産地域であるアフリカ全域・東南アジアでは収量が減少する結果となった。これは、気候変化に強いと考えられているキャッサバにとっても、将来における気温上昇や蒸発散量の増加によって生長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。大豆(図 5(d))は、アメリカ中央部およびロシア南部の東西に渡る幅広い地域で大幅な減収が見込まれる結果となった。本モデルにはアメリカ中央部における将来における灌漑率の増加が考慮されているものの、労働力や機械化効率、品種改良などのシナリオを組み込んでいないため、これらを組み入れることにより、収量の増減に差がでる可能性があることを考え

ておこななければならない。米（図 5(e)）の収量では、アメリカ五大湖以西からカナダ南部にかけて収量の減少が見込まれ、北米全体では 3.6%減少する結果となった。また、東ヨーロッパやロシア北部では気温上昇が米の生産に好影響を与えることがわかった。南アジアでは収量が 13%増加するが、東南アジアおよび東アジアではシナリオ間の収量に大きな差は見られなかった。とうもろこし（図 5(g)）は、カナダのグレート・スレーヴ湖とマッケンジー山脈に挟まれる地域およびロシアの 55 度以北において収量の大幅な増加が予想され、温暖化による気温上昇により増収に転じる地域であることが示された。また、1990 年代や A1B シナリオでは生産が見られなかったカムチャッカ半島において、A2 シナリオでは収量が見込まれる結果となり、気候の将来変化因子が現在冷涼な地域に生産性をもたらすことがわかった。さやいんげん(図 5(h))は、世界生産の 1/4 以上を占める中国で、5.2%収量が増加する結果となった。また、アジアにおける主要生産国であるインドでは、ほぼ全域で平均収量が減少する結果となった。

4. 結論と課題

本研究では、全球スケールでの農業生産に着目して、世界の主要作物 8 種類について、現在における収量および SRES A1B、A2 シナリオ下における将来の収量について計算を行った。

1990 年代の収量と 2090 年代の収量を比較した結果、各 GCM 間によって結果に差異があるものの、気候変動による温暖化および降水量の変化によって、主に北半球では、農作物の栽培適地が現在よりも北へシフトし、特にカナダやロシア北部において収量の増加する可能性が高いことがわかった。また、アフリカの低緯度地域ではすべての作物種で収量が減少しており、温暖化の影響による農作物の被害が大きいものとなる。アジア地域では、中国東部の広いエリアで収量の減少が避けられないものとなる一方で、現在冷涼な気候である東北部では、将来の気温上昇と降水量の増大により、収量が向上する傾向が認められた。南米では、GCM 気候値にもコントラストが見られるように、特にブラジル北部・南部において将来における収量に大きな差異が生じた。

SRES A1B シナリオに対する A2 シナリオにおける 2090 年代の平均収量の変化率を見ると、キャッサバ、さやいんげんを除く作物種で、アメリカ中部において収量の減少が見られ、ロシア北部やカナダ南部などの現在冷涼な気候では収量の増加が見られた。2090 年代における A1B と A2 の地球平均気温の差は 0.4 度と小さいが、その地球規模での収量の増減に与える影響は必ずしも少なくない。

本研究での農作物収量算定は、定量的な再現性において、一部の地域を除き、概ね良好な結果が得られた。しかし、収量の年々変動の再現性は高い結果とは言えなかった。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、土地利用変化や品種改良、二期作・二毛作、農作物生産技術の発展などについて考慮していないため、今後はこれらの効果を適切に物理過程に組み入れ、収量の年々変動の再現性を向上させるためのモデルの改良・開発を行っていく必要がある。また、全球植生モデルや窒素循環モデルなどと組み合わせた統合的な農業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と考える。

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) Takahashi, K., Harasawa, H. and Matsuoka, Y.: Climate change impact on global crop production, *Journal of Global Environmental Engineering*, Vol.3, pp.145-161, 1997.
- 3) 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.
- 4) Stehfest, E., Heistermann, M., Priess, J., Ojima, D. and Alcamo, J.: Simulation of global crop production with the ecosystem model DayCent, *Ecological Modelling*, Vol.209, pp.203-219, 2007.
- 5) 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.
- 6) Fischer, G., Velthuisen, H., Shah, M. and Nachtergaele, F.: Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century. Methodology and Results. IIASA RR-02-02, International Institute for Applied Systems Analysis, 2002.
- 7) 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*, 2011, in press
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) FAO: The Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties, Version 3.5, United Nations Food And Agriculture Organization. CD-ROM, 1995c.
- 11) Döll, P. and Siebert, S.: Global modeling of irrigation water requirements, *Water Resources Research*, **38**(4), 2002.
- 12) FAO-Geoweb: General Information and Early Warning System – Geoweb, 2004. <http://geoweb.fao.org>
- 13) USDA: Major World Crop Areas and Climatic Profiles Online Version, 2004. www.usda.gov/oce/waob/jawf/prfiles/update.htm
- 14) William, J.S., Delphine, D., Jonathan A.F. and Navin R.: Crop planting dates: an analysis of global patterns, *Global Ecology and Biogeography*, Vol.19, pp.607-620, 2010.
- 15) FAO: Report on the agro-ecological zones project. Vol.1. Methodology and results in

Africa, *World Soil Resources Report*, Vol.48, pp.150-164, 1978.

- 16) FAOSTAT, Food and agriculture organization, 2005. <http://faostat.fao.org>
- 17) 平林由希子, 鼎 信次郎, 沖 大幹, 虫明功臣: AGCMにおける降水量の変動特性が陸域水収支に与える影響, 水文・水資源学会研究発表要旨集, pp.120-121, 2002.