GCMの不確実性を考慮した気候変動がコムギとトウモロコシの生産量に与える影響評価

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

CMIP3マルチ気候モデルによるSRES A1B, A2, B1シナリオに基づく出力値を農作物収量算定モデルの入力値に用い、コムギ・トウモロコシの2040-2059年, 2080-2099年における生産量の現在 (1980-1999年) からの変化を見積り、気候変動が農業生産に与える影響を不確実性を考慮して評価した。コムギの地球全体における生産量は近未来, 未来とも全シナリオ下で減少することが示され、東アジアでは生産量が増加する一方、南アジアやヨーロッパでは大きく減少する結果を得た。トウモロコシは現在の主要生産域での生産量減少は微小な幅にとどまることがわかった。B1シナリオでは将来における生産量変化のモデル間のばらつき、つまり不確実性の幅が最も小さい結果となった。

Key Words : CMIP3, SRES scenario, crop production, wheat, maize, iGAEZ, uncertainty

1. はじめに

地球温暖化の影響で気温や降水特性の変化が顕著になってきていると言われている。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・浸水などによる耕作不能化を指摘している。

Takahashi *et al.*¹⁾は、気温が2°Cから5°C上昇すると、中国におけるコムギの生産量は6割、トウモロコシは4割減少するなど、アジアの穀物生産が大打撃を受けることになると推定した。Masutomi *et al.*²⁾は、SRES A1B, A2, B1の合計49のGCM (General Circulation Model) 出力値を用いて、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コメの収量に与える影響を評価した。その結果、2081-2090年の平均収量は、1991-2000年平均に比べて減少することを示した。Tan *et al.*³⁾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、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。Pany *et al.*⁴⁾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, 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シナリオと比較して小さくなることを示した。Tatsumi *et al.*⁵⁾は、世界の主要穀物8種の収量再現計算とA1Bシナリオ下での将来の収量予測をモデル計算により全球規模で行った。

以上の既往研究が示すように、将来の温暖化が農業生産に与える影響に関する研究は数多く行われている。一方、さまざまなモデルの入力値として用いられる将来気候値は、各研究機関などによって作成されており、GCMに採用されている物理過程などはそれぞれ異なることが多く、将来の社会シナリオごとに予想されるCO₂濃度や気候値の特徴もモデルによって異なる。加えて、既往研究では、モデル入力値として利用されているGCM出力の数や社会シナリオの数は現状では十分とは言えず、将来の気候変動が農業生産に与える影響予測結果の不確実性については十分な議論がなされているとは言い難いのが現状である。本研究では、物理法則に従って将来の気象現象や気候要素が再現された世界気候研究計画の第3次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP3⁶⁾)が提供する最大24の気候モデルによるSRES A1B, A2, B1シナリオに基づいて計算された出力値を農作物収量算定モデルの入力値に用い、近未来 (2040-2059年) , 将来 (2080-2099年) におけるコムギ・トウモロコシの生産量の現在 (1980-1999年) からの変化を推計した。以上により、気候変動が農業収量に与える影響を推定し、その不

確実性を考慮した定量的な分析を行うことを目的とする。

2. 利用データと不確実性の評価方法

(1) 入力気候データ

本研究では、Tatsumi *et al.*^{5), 13)}が開発した農業収量算定モデルiGAEZ (improved Global Agro-Ecological Zones)をベースに用いる。iGAEZは気温、降水量、放射、土壌の性質、地形環境、技術発展のデータを取り入れて、それに対する作物の生長・動向のモデル化により、作物の収量を算出するものである。また、約175の作物種（亜種を含む）に対応でき、地球環境と土地生産の関係に関する空間的な考察と検討が可能である。入力値として用いる現在気候値（1980-1999年）にはCRU TS2.1⁷⁾を、近未来（2040-2059年）および将来（2080-2099年）にはCMIP3マルチ気候モデルのSRES A1B（高成長社会シナリオ）、A2（多元化社会シナリオ）、B1（持続発展型社会シナリオ）シナリオ下の気候値を用いた。CMIP3は、Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) によりWEBで公開されており、地球温暖化による影響評価に土地利用、陸域生態系、気象、海洋、水資源など様々な分野で用いられている。これらの気候モデルの水平解像度は100km-450km程度で、公開されているモデルは24種類であり、モデルによっては複数のアンサンブルランを実施している。本研究で使用したマルチ気候モデルを表-1に示す。

(2) 気候シナリオの作成と収量推計手法

GCMマルチ気候モデルの出力値と過去に得られた観測気候値の間には系統的なバイアスを有していることから、1961-1990年の各月について、月平均値がCRU TS2.1による値と一致するようにマルチ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 TS2.1とマルチ気候モデル出力の月平均値の差分（気候変化値）を気候モデル出力値に加算することにより作成した。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 TS2.1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、入力に用いた月別の気候データは、スプライン補間によって日別データに変換した。また、標高⁸⁾・土壌タイプ⁹⁾・灌漑率データ¹⁰⁾・農事暦データ¹¹⁾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の水平解像度を0.5度に統一した。また、CMIP3マルチ気候モデル出力値はモデルごとに解像度が異なるため、本研究では気温に関しては

表-1 本研究で使用したCMIP3マルチ気候モデル

Model Name	SRES シナリオ		
	A1B	A2	B1
BCCR-BCM2.0	○	○	○
CCSM3	○	○	○
CGCM3.1(T47)	○	○	○
CGCM3.1(T63)	○		○
CNRM-CM3	○	○	○
CSIRO-Mk3.0	○	○	○
CSIRO-Mk3.5	○	○	○
ECHAM5/MPI-OM	○	○	○
ECHO-G	○	○	○
FGOALS-g1.0	○		○
GFDL-CM2.0	○	○	○
GFDL-CM2.1	○	○	○
GISS-AOM	○		○
GISS-EH	○		
GISS-ER	○	○	○
INGV-SXG	○	○	
INM-CM3.0	○	○	○
IPSL-CM4	○	○	○
MIROC3.2(hires)	○		○
MIROC3.2(medres)	○	○	○
MRI-CGCM2.3.2	○	○	○
PCM	○	○	○
UKMO-HadCM3	○	○	○
UKMO-HadGEM1	○	○	○

スプライン補間、降水量に関しては逆距離加重法を用いて、0.5度の水平解像度にリグリッドした。なお、本研究ではA1Bシナリオとして24のモデル、A2シナリオでは19のモデル、B1シナリオでは22のモデルを使用した（表-1）。将来の機械化効率は、村井ら¹²⁾による耕地面積あたりトラクター台数と1人あたりGDPの回帰式から、将来の耕地面積あたりトラクター台数を算出する。FAOSTATのトラクター台数データと耕地面積データから、トラクター台数を耕地面積で除した値の1960-1969年の平均を1とした各年における耕地面積あたりのトラクター台数の比を国ごとに時系列で求め、iGAEZで得られた作物収量値に乗じた。CO₂の施肥効果は、Masutomi *et al.*²⁾で示されている各シナリオごとおよび年代ごとの係数を乗ずる。なお、将来における土地利用変化および灌漑エリアの変化は不確実な要素が大いいため、本研究では現在から変化しないものと仮定した。

以上によりデータを整備した上でiGAEZを使用し、現在(1980-1999年)、近未来(2040-2059年)、将来(2080-2099年)におけるコムギ・トウモロコシの収量を推計し、現在気候下における収量再現性の精度¹³⁾を確認した上で、気候変動が作物収量に与える影響を評価した。

(3) 不確実性の評価手法

気候変動が農作物生産量に与える影響の不確実性を定量的に評価するため、以下に示す指標を定義する²⁾。

$$A_{CPp} = \frac{1}{n} \sum_{model} CP_{p,m} \quad (1)$$

$$SD_{CPp} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left\{ \left(\sum_m CP_{p,m}^2 \right) - \frac{1}{n} \left(\sum_m CP_{p,m} \right)^2 \right\}} \quad (2)$$

$$P_{CP<0} = \frac{NUM_m(CP_{p,m} < 0)}{n} \times 100 \quad (3)$$

$$PR_{p,m} = \int_{ca} Yield_{p,m} dA \quad (4)$$

ここに、 $CP_{p,m}$: 現在(1980-1999年)からの近未来(2040-2059年)、将来(2080-2099年)における生産量変化率(%), A_{CPp} : 各シナリオ下におけるモデルごとの生産量変化率の平均(%), SD_{CPp} : 各シナリオ下におけるモデルごとの生産量変化率の標準偏差, $P_{CP<0}$: 各シナリオ下においてモデルごとの生産量変化率が負になる割合(%), $PR_{p,m}$: 各シナリオ下におけるモデルごとの生産量(kg)を示し、 $Yield_{p,m}$: 各グリッド上の収量(kg/ha)にPortmann *et al.*¹⁴⁾による各グリッドごとの収穫面積値を乗じた値を地域ごとに合算して得る。n: 計算時に使われた各シナリオ下におけるGCMモデルの数。さらに、サフィックス **p**: 現在, 近未来, 将来の各期間, **m**: 計算に使用した各モデル, **ca**: 現在の栽培エリアである。

3. 結果と考察

表-1に示したCMIP3マルチ気候モデル出力値を用いてA1B, A2, B1シナリオ下の近未来, 将来におけるコムギ・トウモロコシの生産量を推定し、現在気候下の生産量からの変化を求めた。表-2, 表-3に地域別の生産量変化率の平均 A_{CP} , 全モデル数に占める生産量変化率が負となる割合 $P_{CP<0}$, 各モデルによる生産量変化率の標準偏差 SD_{CP} を各作物ごとに示す。図-1にA1B, A2, B1における将来の生産量変化率を箱髭図で各作物ごとに示す。

コムギの地球全体のGCM平均に見る生産量は近未来のA1Bで7.2%, A2で7.0%, B1で6.7%減少し、将来のA1Bで9.8%, A2で10.3%, B1で7.8%減少すると算定された。地域別に見ると、ロシアではA1Bシナリオ下の近未来で A_{CP} は15.1%となり、95%の信頼区間は $15.1 \pm 6.8\%$ となった。同様に将来における A_{CP} は23.9%, 95%の信頼区間は $23.9 \pm 10.2\%$ である。また、 $P_{CP<0}$ は近未来, 将来でそれぞれ12.5%, 8.3%となった(表-2)。以上のことから、ロ

シアでは全シナリオ下において気温の上昇などが要因となり生産量の大幅な増加が予想される結果となった。

SD_{CP} は、A1B, A2, B1シナリオ下の近未来でそれぞれ16.0%, 12.5%, 14.1%となり、将来ではそれぞれ24.2%, 30.1%, 14.2%となり、他の地域に比べて相対的に大きく、また近未来と比べて将来の生産量変化率はより大きな不確実性を持つことを示す結果となった。これはロシアにおけるGCM気候値が各モデル間で大きなばらつきをもつことに要因があると考えられる。一方、現在の主要生産域である東アジアでは、A1B, A2, B1それぞれの近未来における生産量変化率は2.4%, 2.7%, 1.3%と微増であり、将来ではそれぞれ1.6%, 0.6%, 0.8%となり、近未来と比較して増加率が小さくなる。また、 $P_{CP<0}$ の値は、近未来の全シナリオ平均で32.7%, 将来で44.0%となり、減少する確率が将来では40%を超える結果となっていることから、この地域における将来の生産量の増減についてはどちらの傾向が有意であるかを判断することが難しいことがわかる。しかしながら、東アジアの近未来, 将来における本結果は、Lobell *et al.*¹⁵⁾の中国での2030年における生産量の微増傾向を示す結果と同じ傾向を示している。南アジアでは、気温の上昇に伴ってA2シナリオ下の将来では18.1%の生産量減少を示す結果となり、他のシナリオ下でも生産量は大きく減少する可能性が高いことがわかった。また、近未来, 将来ともに生産量が減少する確率は80%を超え、この地域における生産量の減少傾向を示す本結果は、Parry *et al.*⁴⁾, Lobell *et al.*¹⁵⁾と同様の傾向を示している。世界最大の生産量を誇るヨーロッパにおける $P_{CP<0}$ の値を見ると、B1シナリオ下の近未来および将来の北ヨーロッパを除いて、50%以上の確率で将来の生産量減少を示す結果となり、温暖化などによる生産量の減少が将来の食糧需給に大きな影響を与える可能性が示唆される結果となった。ヨーロッパ最大のコムギ生産国であるフランスが属する西ヨーロッパでは、将来の A_{CP} は全シナリオ平均で-11.5%を示しており、同様に $P_{CP<0}$ は90%を超えている。また、 SD_{CP} は9.8%となり、他の地域に比べて相対的に小さい値を取っており、各モデルによる計算結果のばらつきは小さく、将来における生産量の減少が多くモデルで示されていることがわかる(図-1)。ヨーロッパでの生産量減少の傾向は、Parry *et al.*⁴⁾によるA1FI, A2a, A2b, A2c, B1a, B2aにおいてCO₂の施肥効果がない場合における収量減少を示す結果と整合的であるが、施肥効果を考慮した場合は、収量が増加すると予想していることから、本結果との一致を見ない。

A_{CP} の地域間標準偏差は、A1B, A2, B1シナリオ下の近未来でそれぞれ10.1%, 9.4%, 7.6%, 将来が14.8%, 16.1%, 11.4%となり、近未来と比較して将来では、各地域間の生産量変化率のばらつきが大きくなることが示された。

表-2 各シナリオ下における近未来, 将来のコムギの A_{CP} , $P_{CP<0}$, SD_{CP}

	近未来									将来								
	A1B			A2			B1			A1B			A2			B1		
	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}
北アメリカ	-3.9	62.5	6.6	-3.7	68.4	7.5	-2.3	66.7	7.6	-5.8	70.8	9.2	-9.0	73.7	12.3	-4.1	61.9	7.3
東ヨーロッパ	-2.0	62.5	12.8	-2.2	68.4	11.5	-1.2	61.9	13.8	-2.8	58.3	17.4	-9.9	84.2	18.0	-0.4	52.4	13.1
北ヨーロッパ	0.9	58.3	8.5	-0.9	78.9	4.3	3.0	33.3	11.7	-1.6	66.7	10.5	-3.4	68.4	7.8	1.5	47.6	9.7
南ヨーロッパ	-4.9	79.2	6.5	-4.5	78.9	5.6	-3.8	76.2	5.1	-7.8	91.7	7.0	-10.9	94.7	6.1	-7.0	90.5	6.4
西ヨーロッパ	-7.7	75.0	8.6	-6.0	84.2	6.1	-3.8	81.0	7.7	-11.5	91.7	9.8	-13.3	100.0	9.5	-7.5	90.5	9.8
ロシア	15.1	12.5	16.0	11.0	15.8	12.5	8.3	33.3	14.1	23.9	8.3	24.2	22.1	15.8	30.1	13.7	19.0	14.2
中央アメリカ	-6.4	83.3	8.1	-7.6	78.9	7.4	-6.4	76.2	8.1	-14.3	87.5	10.1	-20.0	100.0	11.4	-9.2	90.5	9.6
南アメリカ	1.1	41.7	7.6	1.8	31.6	7.3	-1.8	57.1	6.3	4.4	29.2	10.1	4.9	31.6	11.0	0.2	52.4	7.6
オセアニア	-0.7	58.3	5.9	-3.0	57.9	7.9	-1.6	66.7	7.1	-5.6	75.0	7.7	-10.7	89.5	9.4	-4.4	76.2	9.8
東アフリカ	-9.7	83.3	12.1	-10.1	84.2	12.0	-8.1	76.2	9.9	-16.8	83.3	25.2	-21.8	89.5	22.1	-13.0	90.5	12.3
中央アフリカ	4.8	29.2	28.3	0.1	42.1	28.8	6.2	28.6	26.0	-4.7	50.0	38.4	-16.6	52.6	39.2	3.0	33.3	31.5
北アフリカ	-4.7	66.7	17.3	-4.4	63.2	20.6	-2.7	61.9	17.0	-6.3	79.2	20.2	-1.6	68.4	25.8	-5.2	66.7	21.5
南アフリカ	-1.2	66.7	10.8	-2.2	68.4	11.3	-1.3	61.9	8.0	-1.1	70.8	13.8	-3.4	63.2	14.0	-0.8	66.7	11.7
西アフリカ	-33.8	83.3	35.4	-33.6	89.5	34.2	-26.9	85.7	33.8	-48.8	75.0	53.7	-50.0	84.2	59.4	-39.5	85.7	35.8
西アジア	-0.7	62.5	6.9	-0.1	57.9	5.4	-0.7	57.1	6.1	-1.1	50.0	9.0	-1.1	47.4	9.7	-1.9	57.1	7.1
東南アジア	-23.2	91.7	17.2	-22.1	89.5	15.8	-16.0	85.7	15.5	-35.4	87.5	20.0	-44.9	100.0	18.5	-28.1	95.2	18.1
南アジア	-10.8	83.3	8.7	-11.5	94.7	7.4	-9.2	90.5	7.4	-14.4	91.7	12.8	-18.1	94.7	12.5	-13.3	95.2	9.2
東アジア	2.4	33.3	7.8	2.7	26.3	6.6	1.3	38.1	5.7	1.6	41.7	11.5	0.6	47.4	13.2	0.8	42.9	8.1
中央アジア	-6.7	75.0	10.2	-8.5	73.7	10.6	-6.0	81.0	7.2	-15.7	91.7	12.3	-18.9	89.5	14.2	-9.1	71.4	9.7
日本	-0.5	58.3	6.0	-1.1	63.2	5.0	-1.4	42.9	6.8	-0.4	45.8	8.1	-1.0	52.6	8.6	-1.2	47.6	7.6

表-3 各シナリオ下における近未来, 将来のトウモロコシの A_{CP} , $P_{CP<0}$, SD_{CP}

	近未来									将来								
	A1B			A2			B1			A1B			A2			B1		
	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}	A_{CP}	$P_{CP<0}$	SD_{CP}
北アメリカ	-1.0	58.3	5.7	-1.5	63.2	6.8	-0.8	61.9	6.2	-1.7	58.3	8.4	-2.5	52.6	10.3	-1.2	61.9	7.1
東ヨーロッパ	6.8	45.8	14.9	7.2	42.1	15.6	8.0	28.6	16.4	9.5	41.7	21.2	3.4	52.6	22.2	11.9	28.6	16.2
南ヨーロッパ	7.3	37.5	10.3	8.2	31.6	11.8	7.9	23.8	9.8	9.3	29.2	12.5	8.3	31.6	13.7	10.2	19.0	12.0
西ヨーロッパ	12.0	25.0	15.2	14.1	21.1	18.5	12.6	23.8	14.7	16.6	29.2	22.3	15.0	36.8	31.3	18.8	14.3	19.4
ロシア	21.4	12.5	29.0	17.2	10.5	26.5	12.2	28.6	17.1	32.5	12.5	44.1	31.5	15.8	62.2	17.8	14.3	22.3
カリブ	-1.8	58.3	7.3	-1.4	57.9	7.4	-0.6	71.4	5.7	-3.1	75.0	9.4	-1.7	73.7	12.6	-1.2	57.1	7.6
中央アメリカ	-1.4	66.7	3.9	-1.1	47.4	4.4	-1.8	71.4	3.9	-3.7	70.8	6.0	-3.9	84.2	7.0	-2.0	61.9	5.6
南アメリカ	-0.8	45.8	3.4	-0.6	57.9	3.3	-0.6	52.4	3.0	-1.5	62.5	4.3	-2.5	63.2	4.9	-1.0	57.1	3.9
オセアニア	1.0	37.5	6.6	1.6	36.8	6.9	0.9	47.6	8.1	1.1	45.8	8.6	0.0	68.4	9.7	1.4	57.1	9.5
東アフリカ	-2.0	66.7	3.2	-1.0	52.6	4.2	0.1	47.6	6.4	-3.1	75.0	4.9	-4.0	78.9	6.0	-0.5	57.1	7.5
中央アフリカ	2.6	33.3	5.1	2.0	36.8	4.9	0.9	33.3	4.3	2.6	37.5	5.8	2.4	31.6	6.1	1.3	28.6	5.3
北アフリカ	0.0	58.3	4.9	0.8	47.4	6.8	-0.4	71.4	7.1	-0.8	70.8	7.4	-0.2	68.4	11.1	-0.7	61.9	7.1
南アフリカ	-10.7	91.7	7.7	-7.2	78.9	7.9	-5.3	81.0	8.1	-12.7	87.5	8.9	-16.5	100.0	7.3	-8.9	76.2	9.7
西アフリカ	0.4	45.8	5.5	-0.4	63.2	5.0	0.7	61.9	5.7	2.5	45.8	7.0	1.7	47.4	7.1	0.8	47.6	4.8
西アジア	0.0	58.3	5.6	0.5	57.9	4.8	1.3	38.1	5.2	-0.3	50.0	5.8	-0.4	42.1	6.4	0.5	47.6	7.0
東南アジア	0.2	54.2	3.9	1.6	36.8	3.9	0.6	47.6	4.1	1.8	37.5	4.9	3.5	42.1	6.3	0.6	42.9	4.8
南アジア	-2.0	79.2	3.0	-0.9	63.2	3.5	-1.3	76.2	2.6	-4.0	87.5	3.7	-5.1	78.9	4.1	-3.1	90.5	2.5
東アジア	9.3	20.8	10.0	8.4	5.3	8.5	6.3	9.5	6.8	12.0	16.7	12.4	14.8	10.5	14.1	8.8	14.3	9.2
中央アジア	3.5	45.8	12.0	4.1	42.1	12.9	1.3	42.9	9.0	-1.7	58.3	14.3	-3.8	63.2	15.8	2.7	42.9	11.0
日本	-3.6	62.5	7.9	-2.9	63.2	7.9	-3.1	66.7	6.7	-5.9	62.5	12.2	-6.9	63.2	14.0	-2.9	61.9	9.8

トウモロコシの世界生産量は、近未来の全シナリオ平均で7.6%、将来で同10.2%増加する結果となった。特に、東アジアにおける生産量増加による寄与が大きい。東アジアの A_{CP} は、近未来のA1Bシナリオ下で9.3%、A2で8.4%、B1で6.3%の増加となり、将来ではそれぞれ12.0、14.8、8.8%の増加を示した。本結果は、中国において2030年の生産量がモデル間平均で7%減少するとしたLobell *et al.*¹⁵⁾の結

果とは逆の傾向を示すものである。南アジアの A_{CP} は近未来、将来ともに全シナリオ下で負を示しており、Lobell *et al.*¹⁵⁾と同様の傾向を示した。北アメリカにおける A_{CP} はA1B、A2、B1シナリオ下の近未来でそれぞれ-1.0、-1.5、-0.8%となり、将来ではそれぞれ-1.7、-2.5、-1.2%と生産量は微減する結果となり、減少を示す確率は50%を超える結果となった。南アメリカでも北アメリカと同様に生産

図-1 世界の地域別に見る将来の生産量変化率 (左：コムギ、右：トウモロコシ、上段:A1B、中段:A2、下段:B1、略語は表-2、表-3の地域名にそれぞれ対応)

量は近未来、将来とも微減を示す結果となり、両域とも SD_{CP} の値は他の地域と比較して相対的に小さい部類に入り、比較的不確実性は小さいと言える。一方、ロシアでは将来で15%以上の増加を示すが、モデル間のばらつきが大きく不確実性が高い(表-2、図-1)。ヨーロッパでは全域において、将来の生産量は増加する結果となった。以上のことから、トウモロコシは現在の主要生産域での生産量減少は微減な幅にとどまり、温暖化による地球規模での大幅な生産量の減少が生じにくい作物種の一つであると考えられる。また、 A_{CP} の地域間標準偏差は、将来においてA1Bが9.5%、A2が9.7%、B1が7.0%となった。このことから、生産量の絶対的な地域差を考えない場合、B1シナリオでは将来における生産量変化率のば

らつき、つまり不確実性の幅が最も小さいと言える。

4. まとめ

本研究では、SRES A1B, A2, B1シナリオ下の複数のGCMマルチ気候モデル出力値を用いて、現在(1980-1999年)、近未来(2040-2059年)、将来(2080-2099年)の生産量を農業収量算定モデルを用いて見積もり、気候変動が農業生産に与える影響を不確実性を考慮して評価した。その結果、コムギは現在の主要生産地域である東アジアでは生産量に大きな変化はないものの、南アジアやヨーロッパでは生産量が減少することが予想される結

果となった。また、トウモロコシでは、東アジアにおいて生産量が増加する結果となり、北アメリカや南アメリカでは将来における生産量は減少するものの、その減少幅は小さいことからトウモロコシの世界生産量は、全シナリオ平均で将来10.2%増加する結果を得た。各シナリオ下における地域ごとの生産量変化率のばらつきを見ると、B1シナリオでは、近未来および将来における地域間の生産量変化率の標準偏差、つまり不確実性の幅（ばらつき）が最も小さくなった。

今後として、極端気象を考慮した上での温暖化が農業生産に与える影響やその適応策について考えていきたい。

参考文献

- 1) 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.
- 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 models, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol.131, pp.281-291, 2009.
- 3) 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.
- 4) 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*, Vol.14, pp.53-67, 2004.
- 5) Tatsumi K., Yamashiki Y., Rovert V.S., Takara K., Matsuoka Y., Takahashi K., Maruyama K. and Kawahara N.: Estimation of potential changes in cereals production under climate change scenarios, *Hydrological Processes*, Vol.25, pp.2715-2725, 2011.
- 6) 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, 2007.
- 7) 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.
- 8) USGS.: GTOPO30. United States Geological Survey, Available at <http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/gtopo30.html>
- 9) FAO.: The Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties, Version 3.5, Food and Agriculture Organization, CD-ROM, 1995.
- 10) Döll, P. and Siebert S.: A digital map of irrigated areas, *International Commission on Irrigation and Drainage*, Vol.49, No.2, pp.55-66, 2000.
- 11) 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.
- 12) 村井啓朗, 高橋潔, 増井利彦, 原沢英夫, 松岡謙: 適応策を考慮した上での温暖化が農業潜在生産性に及ぼす影響の評価, 環境システム研究論文集, Vol.33, pp.97-104, 2005.
- 13) 辰己賢一: 作物収量算定モデルの高精度化と気候変動が農業生産に与える影響の定量的分析に関する研究, 京都大学大学院工学研究科学学位論文, 2012.
- 14) Portman F.T., Siebert S. and Döll P.: MIRCA2000-Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling, *Global Biogeochemical cycles*, Vol.24, GB1011, 2010.
- 15) Lobell D.B.: Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030, *Science*, Vol.319, pp.607-610, 2008.

(2012. 4. 20 受付)

(2012. 6. 18 受理)

Impact assessment of climate change on wheat and maize production on consideration of GCM uncertainty

Kenichi TATSUMI¹, Yosuke YAMASHIKI¹ and Kaoru TAKARA¹

¹Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

This paper uses the iGAEZ (improved Global Agro-Ecological Zones) model for simulating wheat and maize yields on a global scale. We estimated the future agricultural production under climate change, based on iGAEZ model and climate projection for 2040-2059, 2080-2099 from general circulation models (A1B: 24, A2:19, B1:22 models) using the CMIP3 multi-model dataset. Results indicate wheat production in whole world have decreased in the near future and the future under the all scenarios. In addition, East Asia will likely get positive impacts on wheat production in the future. Moreover, it is found that reduction in maize productions on North and South America remains within small range. Under the SRES B1 scenario, developed and developing regions exhibit less contrast in crop yield changes, with the B1 future crop yield changes being slightly more favorable than those of the A1B, A2. B1 scenario is being relatively easy to plan agricultural adaptation for long-term food supply and demand.