

7. 気象条件によるとうもろこし収量関数の推定と 気候変動による影響予測

杉本 賢二^{1*}・松村 寛一郎²

¹名古屋大学大学院環境学研究科（〒464-8601愛知県名古屋市千種区不老町）

²関西学院大学総合政策学部（〒669-1337兵庫県三田市学園2丁目1番地）

* E-mail: k.sugimoto@urban.env.nagoya-u.ac.jp

近年穀物市場において高い価格水準が続いているが、これには発展途上国などでの人口増加や経済成長による需要の増加だけではなく、干ばつや洪水などの異常気象による供給の不安定化も一因とされている。加えて、今後の気候変動によりこうした極端事象が増加・増大化するとされており、気象条件の変化にとりもなう穀物収量への影響を予測することは、食料確保の観点において重要である。

本研究では、穀物のなかでも飼料作物として利用されており、バイオ燃料の原料として注目が集まっている、今後需要の増加が見込まれるとうもろこしを対象として、1961-2009年までの統計による単位収量と、0.5度グリッド単位での気象条件や作付情報などの空間データを組み合わせることによる、収量を気象条件による関数として推計した。気象条件として、とうもろこし耕地のあるグリッドについてCRU TS3.10による月別降水量と月平均気温を用い、作付日から収穫日までの栽培期間の合計である積算降水量・平均気温として集計した変数を用いた。また、推計された各国ごとの収量関数に7つの気候モデルによる将来の気象条件を適用することにより、気候変動によるとうもろこし収量への影響を予測した。その結果、世界のとうもろこし収量は直近30年間の平均(1980-2009年)と比較して、2010-2039年平均で95.7%、2040-2069年平均で88.4%、2070-2099年平均で83.5%となることが推計された。この推計では耕作地や栽培期間の変更について考慮していないため、こうした適応策を含めることは今後の課題である。

Key Words : maize, yield function, weather condition, climate change

1. 研究の背景

近年、穀物価格が過去の趨勢と比較して高い水準で推移しているが、これは発展途上国を中心とした経済成長や人口増加、先進国でのバイオ燃料の原料としての穀物利用などによる需要の増加に加え、高温や干ばつ、洪水などの異常気象による生産の不安定化も一因である。そもそも、穀物は自給される傾向が強いために、石油や自動車といった他の貿易財と比較して生産量に占める貿易量の割合が非常に小さくなっていることから、穀物市場は生産量の変動により価格が上下しやすい構造となっている¹⁾。加えて、今後の気候変動により極端事象の発生回数が増加し、その強度が増すといわれているために²⁾、温暖化により変化する気象条件のもとで生産量がどのようになるかが、今後の食料安全保障を考えていく上で非常に重要である。

こうした背景から、Tan and Shibasaki (2003)³⁾やTatsumi et

al. (2011)⁴⁾のように、気候変動による穀物収量への影響を推定する研究が行われてきた。これらの研究では、既存の穀物モデルに気候モデルによる出力結果を入力として計算することにより収量変化の推計を行なっているが、一般的に穀物モデルは圃場や試験場などの観測データが十分に得られる小さいスケールを想定して開発されてきたために、世界全体で適用するためには多様なデータ収集やパラメータ調整などを行う必要がある。また、穀物モデルでは複雑な計算過程を経ているために、気象条件の変化が収量に与える影響が直感的に分からない構造となっている。

一方で、Lobell et al. (2011)⁵⁾やMatsumura and Sugimoto (2011)⁶⁾のように、統計値と過去の気象条件などの空間データを組み合わせることにより、収量との関係性を計量的に捉える研究がなされている。この手法では、穀物モデルほど正確にバイオマスの成長過程など生物学的プロセスを表現できるわけではないが、気候条件の変化に対

する各国の収量変動やトレンドとして得られるという利点がある。特に、農作物の品種ごとの単位収量や耕地面積割合⁷⁾、気温や降水量、風速などの気象データ⁸⁾、栽培暦⁹⁾の空間データの整備が進められており、これまで国単位でしか行えなかった回帰分析などが空間分布を考慮したものとして行うことができるようになっている。

本研究では、統計値と気象に関する空間データとを用いることにより、とうもろこしを対象として、世界各国の収量を気象条件によって関数化を行う。とうもろこしは北中南米アメリカなどで主食とされているが、先進国などでは家畜の餌やバイオエタノールの原料として利用されており、今後も需要の増加する品目である。また、推定した収量関数に、気候モデルによる将来の気象条件を入力とすることにより、気候変動にともなうとうもろこし生産量の変動について推計を行う。

2. 収量関数の推定方法

本研究では、各国のとうもろこし収量について、統計値による単位収量を、降水量と平均気温による気象条件と、タイムトレンドによる関数として推定を行った。図

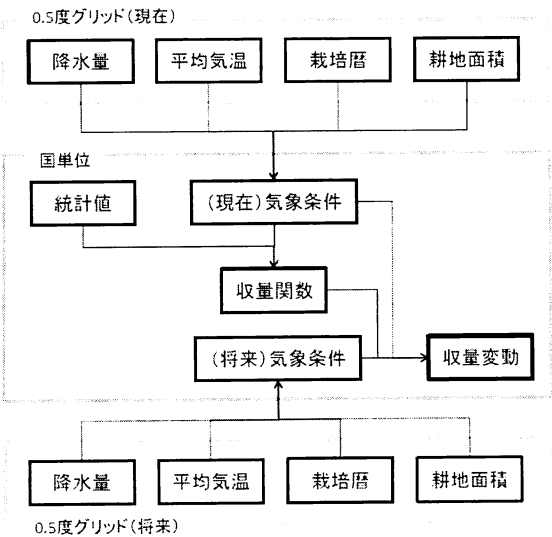


図-1 気候変動がとうもろこし収量に与える影響の推計フローチャート

表-1 収量関数の推定に使用したデータ

data	resolution	source
単位収量	country	FAOSTAT (http://faostat.org)
耕地面積割合	5 min.	Monfreda <i>et al.</i> (2008) ⁷⁾
月降水量	0.5 degree	CRU TS.3.10 ⁸⁾
月平均気温		
栽培暦	0.5 degree	Sacks <i>et al.</i> (2010) ⁹⁾



図-2 収量の降水量弾力性 (b1) の推計値

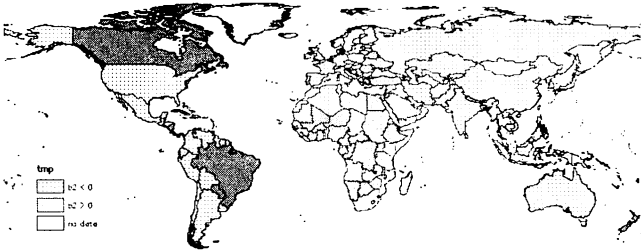


図-3 収量の平均気温弾力性 (b2) の推計値

1にとうもろこし収量の変動についての推計手順について示す。まず、現在の気象条件を用いて各国ごとのとうもろこし収量関数の推定を行う。i国におけるとうもろこしの単位収量(kg/ha)、 Y_i は、

$$\ln Y_i = a + b_1 \ln P_i + b_2 \ln T_i + b_3 Trend \tag{1}$$

として推定される。ここでここで、P：作付日から収穫日までの積算降水量(mm)、T：同期間の積算平均気温(℃)、Trend：1961年=1とし、次年で1ずつ増加するタイムトレンド、であり、a、b1、b2、b3はそれぞれパラメータを表している。積算降水量と平均気温については0.5度グリッド(約50km)の月単位のデータ⁸⁾を用い、降水量は月の合計であるため日数で除したものとし、平均気温は月における平均であるため、同一月では同じ値とすることにより日別に変換して用いた。

また、推計期間については、FAO(国際連合食糧農業機関)による農業統計が整備されている、1961-2009年までとしているが、東欧や旧ソ連構成国など、一部統計値が無い国については、統計が存在する期間のみを推定の対象とした。

図2に収量の降水量弾力性について、図3に収量の平均気温弾力性について示す。降水量弾力性は、南米や北アフリカ、東欧の一部の国ではマイナス、それ以外の国ではプラスとなっている。また、平均気温弾力性については、カナダ、ブラジル、アフリカなどではプラス、それ以外の国ではマイナスの値となっている。今後温暖化が進むことにより、降水量については少なくなる地域もあれば多くなる地域もあるように、その傾向には地域差が生じると考えられているが、平均気温については世界的

表-2 主要生産量における推計されたパラメータ

係数	a	b1 pre	b2 tmp	b3 trend
United States	13.223 (3.359)	0.195 (1.732)	-0.755 (-1.647)	0.018 (18.514)
China	29.973 (3.594)	0.066 (0.326)	-2.834 (-2.750)	0.033 (21.857)
Brazil	-4.623 (-0.491)	0.463 (2.727)	1.057 (0.909)	0.023 (16.678)
Mexico	7.155 (0.854)	0.022 (0.200)	-0.054 (-0.056)	0.025 (21.814)
Indonesia	13.649 (1.684)	-0.055 (-0.627)	-0.839 (-0.821)	0.033 (33.488)
India	16.260 (1.162)	0.18 (1.143)	-1.323 (-0.801)	0.019 (16.506)
France	9.035 (1.846)	0.524 (3.392)	-0.506 (-0.896)	0.024 (12.076)
Argentina	22.869 (3.569)	0.397 (3.882)	-2.176 (-2.929)	0.029 (27.563)
South Africa	32.961 (2.137)	0.493 (1.934)	-3.520 (-2.036)	0.024 (8.258)
Ukraine	14.621 (2.415)	0.087 (0.524)	-1.108 (-1.557)	0.042 (7.727)

*下段カッコ内の数値はt値

に気温が上昇するといわれている。したがって、ブラジルやアフリカでは現在もとうもろこし生産が盛んであるが、温暖化による気温の上昇は増産の影響を与えると考えられる。

表2に2009年のとうもろこし生産量上位10カ国について、推定されたパラメータを示す。なお、スペースの都合から決定係数等を掲載していないが、決定係数は0.675以上であり、p-value < 0.000である。切片a以外のパラメータでは、多くの国においてタイムトレンドにかかる係数のt値が高くなっており、品種改良などの技術革新や肥料投入量の増加による影響が含まれている。こうした長期的な傾向を除去する方法として、ニュートラルネットワークを用いた推計方法¹⁰⁾も提案されているが、これは今後の課題としたい。

式(1)の推定により、得られるパラメータb1, b2はそれぞれ収量の降水量弾力性、平均気温弾力性である。例えば、b1=0.5であれば降水量が1%増加したときには収量が0.5%増加するといった関係を表している。そのため、降水量と平均気温の変化が収量に与える影響について、図1の下部に示すように、同様に作成した将来世代の気象条件を入力とすることにより将来のとうもろこし収量の変動について推計することが可能となる。

3. 将来の気候データの適用

前節で推定した各国のとうもろこし収量関数に、将来の気象データを入力することで、気候変動によるとうもろこし生産への影響について推計を行う。IPCCの第4次報告書では過去の地球温暖化が人為的な要因によるものと、将来の気候変動の度合いについて、24の気候モデル(GCM)による計算結果がその根拠として引用されており、それらの計算結果についてはCMIP3 (the 3rd phase of Coupled Model Intercomparison Project) として公開されている。

しかし、気候モデルはその複雑な計算過程から解像度が、最も高解像度のGCMにおいても約100kmと広く設定されているため、統計学的なダウンスケーリングが必要である。加えて、各GCMではモデル固有のパラメータ設定に起因するバイアスを有している。

そこで、本研究では、CIAT (International Center for Tropical Agriculture) によるGCMデータベースを用いた¹¹⁾。CIATでは解像度の異なるGCMについて統計的ダウンスケールにより、モデル固有のバイアスを取り除いた共通の解像度に空間内挿を行ったGCMデータベースを公開している。本研究では、収量関数の推定と同じ解像度0.5度のGCMの出力結果を利用した。表3に将来のとうもろこし収量を推計するために利用したGCMについて示す。なお、IPCCの第4次報告書ではいくつかの社会経済シナリオ(SRES)が想定されているが、データベースで利用できるものはA1Bシナリオのみであるため、これを使用した。

将来のとうもろこし収量について、現在から将来にかけての変化割合 ΔY を、

$$\Delta Y = (P_F / P_C)^{b1} + (T_F / T_C)^{b2} \quad (2)$$

として推計した。ここで、 P_F ：将来の積算降水量、 P_C ：現在の積算降水量、 T_F ：将来の積算平均気温、 T_C ：現在の積算平均気温、である。また、b1, b2はそれぞれ式(1)において推定されたパラメータである。今回の推計では、現在を1980-2009年の平均値とし、将来については、

表-3 将来推計に用いた気候モデル

model	institute
CGCM3.1	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis (Canada)
MK3	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Australia)
CM4	Institut Pierre Simon Laplace (France)
ECHAM5	Max-Planck-Institut for Meteorology (Germany)
CCSM3	National Centre for Atmospheric Research (United States)
HadCM3	United Kingdom Meteorology Office (United Kingdom)
HadGEM1	

表-4 主要国における将来収量の変化割合

(%)

	average			max			min			s.d.		
	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
United States	95	89	84	97	93	90	93	84	77	1.5	3.2	4.4
China	91	75	64	97	79	69	88	70	57	2.0	3.7	4.6
Brazil	102	109	116	103	112	120	101	107	113	0.7	1.8	2.9
Mexico	100	99	99	103	99	99	99	98	98	0.1	0.3	0.5
Indonesia	98	95	92	100	96	94	98	94	91	0.3	0.6	0.8
India	98	93	89	99	97	94	95	87	80	1.9	4.1	5.6
France	94	85	78	100	89	83	91	78	68	1.8	3.7	5.0
Argentina	92	83	75	96	89	84	84	68	57	3.6	7.1	9.3
South Africa	89	68	54	95	75	62	86	62	47	2.8	4.9	5.7
Ukraine	95	85	78	93	92	87	91	78	69	2.1	4.1	5.3
World	96	88	84	98	93	89	93	83	76	1.8	3.5	4.7

2020s (2010-2039年平均), 2050s (2040-2069年平均), 2080s (2070-2099年平均), の30年間の平均値として設定した。なお、推計にあたっては関数推定において利用した降水量と平均気温以外の栽培暦などの変数については変更がないものと仮定している。これは、気象条件の変化によって作付日や品種の変更などの適用策がなされと考えられるが、本研究では気象条件の影響について推計するためである。

また、収量推定において気象との相関が弱かった国、具体的にはp値が0.10以上となったアフガニスタンやチャド、北朝鮮など、14カ国については将来推計には利用しなかった。なお、これらの除外した国におけるとうもろこし生産量の合計は、世界全体の0.5%ほどであり、除外したことによる影響は小さいものになると考えられる。

表4に7つすべての気候モデルを入力としたときに推計される収量の、平均、最大・最小、標準偏差について示す。ブラジルとメキシコ、インドネシアではより温暖化が進む2080sにおいても現在とそれほど変わらないか、あるいはブラジルでは16%の増産となっているが、他の国では現15から45%ほどの減産となり、世界全体では2050sには現在の88%, 2080sには84%まで生産量が少なくなると推計された。今後も人口増加や経済成長による畜産物需要の増加が続くと可能性が非常に高いと考えられるため、生産量の減少は需給の逼迫に拍車をかける。

また、標準偏差についてみると、全体として2020s, 2050s, 2080sと年代を経るにつれてばらつきが大きくなる。国別で見ると、メキシコやインドネシアでは他の国に比べ少なくなっており、2080sにおいても1%未満である。しかし、アルゼンチンや南アフリカ、ウクライナなどでは5%以上となっているために、将来世代になるにつれて推計に幅が出てしまう、不確実性が生じる。今回の推計においては第4次報告書で引用されている24の気候モデルのうち7つの気候モデルについて、また、

社会経済をA1Bシナリオのみを適用したが、実際には4つのシナリオが想定されており、入力する気候モデルの数が増えることによる不確実性を軽減することは今後の課題である。

4. まとめと今後の課題

本研究では世界各国のとうもろこし収量について、降水量、平均気温、トレンドの関数として推定を行った。また、その関数に気候モデルによる出力結果を入力することで将来のとうもろこし収量の変動について推計を行った。本研究により明らかとなったことは以下の通りである。

現在の主要生産国では、ブラジルやメキシコでは気候変動による影響は少ないかプラスであるが、世界全体としては収量が減少することとなり、2040-2069年の平均では現在の88%, 2070-2099年の平均では84%になると推計された。なお、とうもろこしは、人口増加や経済発展に伴う畜産物需要が増えることによる飼料需要、あるいはバイオ燃料政策により今後需要が減少に向かう可能性は低いと考えられるため、将来とうもろこし需給が逼迫することが危惧される。

また、今後の課題としては、関数には導入しているがニュートラルネットワークの手法などを用いたタイムトレンドとして含まれる技術革新の除去や、気候変動に対応するための技術作付日や品種変更による適用策、あるいは、入力する気候モデルが増えた時の不確実性について考慮することが挙げられる。

参考文献

- 1) 本間茂：世界の食料需給の動向と見通し, *ESTRELA*, No. 178, pp. 2-9, 2009.

- 2) Sugiyama, M., H. Shiogama, and S. Emori : Precipitation extreme changes exceeding moisture content increases in MIROC and IPCC climate models, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 107, pp. 571-575, 2010.
- 3) Tan, G. and R. Shibasaki : 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) Tatsumi, K., Y. Yamashiki, R. V. da Silva, K. Takara, Y. Matsuoka, K. Takahashi, K. Maruyama and N. Kawahara : Estimation of potential changes in cereals production under climate change scenarios, *Hydrological Processes*, Vol. 25, pp. 2715-2725, 2011.
- 5) Lobell, B. D., W. Schlenker, J. Costa-Roberts : Climate Trends and Global Crop Production Since 1980, *Science*, pp.616-620, 2011.
- 6) Matsumura, K., K. Sugimoto : Future Global Soybean Yield Projections, *Energy and Environment Research*, Vol. 1, pp.111-123, 2011.
- 7) Monfreda, C., N. Ramankutty and J. A. Foley : Farming the planet : 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 22, GB1022, 2008.
- 8) CRU, Climatic Research Unit, University of East Angilla : CRU TS 3.10, <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg.htm>, (accessed 2011 12/15).
- 9) Sacks, W. J., D. Derying, J. A. Foley and N. Ramankutty : Crop planting dates : an analysis of global patterns, *Global Ecology and Biogeography*, Vol. 19, pp. 607-620, 2010.
- 10) Hsieh, W. W. : Machine Learning Methods in the Environmental Sciences : Neural Networks and Kemels, Cambridge University Press, 2009.
- 11) International Center for Tropical Agcilture (CIAT) : GCM Data Portal, <http://www.ccafs-climate.org/>, (accessed 2012. 3/10).