

気象条件によるともろこし収量関数の推定と将来予測

誌名	環境科学会誌 = Environmental science
ISSN	09150048
著者名	杉本, 賢二
発行元	環境科学会
巻/号	25巻6号
巻号補足	
掲載ページ	p. 493-497
発行年月	2012年11月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



特集 気象条件によるとうもろこし収量関数の推定と将来予測

杉本 賢二[†]

1. 研究の背景

近年、穀物の国際価格が過去の趨勢と比較して高い水準で推移しており、2012年8月には、とうもろこし価格が過去最高となる297.7ドル/トンを記録した¹⁾。こうした価格高騰の背景には、短期的には6月から8月の、アメリカ穀倉地帯における高温障害により生育が阻害されたことが大きく影響しているが、長期的に見れば発展途上国を中心とした人口増加や経済成長、あるいは先進国におけるバイオ燃料政策の推進により、穀物需要の継続的な増加が見込まれることから、投機としての期待感が高まっていることも一因である。また、穀物は自国において自給される性格が強く、他の貿易財と比較して生産量に占める貿易量（輸出量）の割合が小さいために、輸出国での生産量の変動が価格を大きく上下させやすい市場構造となっている。加えて、今後の気候変動の進行により気象条件が変化していく中で、穀物生産量がその程度影響を受けるかを把握することは、輸入依存度の高い日本や購買力の低い発展途上国における食料安全保障を考える上で非常に重要である。

こうした背景から、Tan and Shibasaki (2003)²⁾, Masutomi *et al.* (2009)³⁾, Tatsumi *et al.* (2011)⁴⁾ などにより、気候変動による穀物生産への影響を推計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収量変化を推計しているが、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構築されており、世界全体で適用するためには多くの入力データや地域パラメータ調整を行う必要がある。また、生長に関わる要因や複雑な生物・物理プロセスを表現しているが、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、Schlenker and Roberts (2006)⁵⁾, Lobell *et al.* (2011)⁶⁾, Matsumura and Sugimoto (2011)⁷⁾

のように、統計値と気象条件を組みわせることにより、収量と気象との関係性を計量的に捉える研究が行われている。この手法では、穀物モデルのように正確に成長プロセスを表現できるわけではないが、各国の収量と気象条件との関係やトレンドを推定することが可能である。特に、これまで統計値などを利用した国単位でしか行えなかった回帰分析が、降水量や気温といった気象条件や農作物の栽培暦、耕地分布などの空間データが整備されることにより、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く。

本研究では、とうもろこしを対象として、統計値と気象条件により収量の関数化を行う。とうもろこしは南北アメリカやアフリカにおいて主食とされている農作物であるが、家畜の飼料やバイオエタノールの原料としての利用が増加しており、他の穀物と比較して、将来も需要が大きく伸びると期待される農産物である。また、推定された収量関数に気候モデルによる将来の気象条件を入力することにより、気候変動がとうもろこし収量に与える影響について推計を行う。

2. とうもろこし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、統計値による単位面積あたり収量（以下、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1に示すように、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 Y_i (kg/ha) は、

$$\ln Y_i = a + b_1 \ln P_i + b_2 \ln T_i + b_3 \text{Trend} \quad (1)$$

として推定される。ここで、 P : 作付日から収穫日までの栽培期間における積算降水量 (mm), T : 同期間における積算平均気温 (°C), Trend : 1961年 = 1で、次年以降1ずつ増加するトレンド関数であ

り、 a : 定数項、 b_1 , b_2 , b_3 はそれぞれパラメータを表している。栽培期間における積算降水量と平均気温は以下の方法により算出した。まず、CRU TS 3.10.01⁸⁾ による 0.5 度グリッド (約 50km) ごとの月別気象データを、Sacks *et al.* (2010)⁹⁾ の栽培期間に該当する月を抽出・合計する。次に、Monfreda *et al.* (2008)¹⁰⁾ によるグリッドごとのとうもろこし耕地割合と、それを国別に集計した総耕地割合との比によって重み付けをした後、国ごとに集計した。この手順により、実際に栽培されているグリッドの、栽培期間における気象条件のみを合計している。

また、推定期間については、FAO (国連食糧農業機関) による統計値¹¹⁾ が整備されている 1961 ~ 2009 年までを対象としているが、旧ソ連や東欧諸国など一部統計値が利用できない場合には、統計値が存在する期間のみを推定の対象とした。

表 1 に収量関数の推定結果について、2009 年における生産量上位 10 カ国を対象として示す。なお、2009 年の統計値では、これら 10 カ国の生産量の合計は 6 億 5277 万トンであり、世界全体の 80% を占めている¹¹⁾。主要国では決定係数が 0.65 以上であり、0.9 を超えている国もあることから、当てはまりは非常に良い。また、各係数についてみると、タイムトレンドに係る b_3 の値がどの国においても統計的に有意であり、収量には気象条件のみならず、品種改良や肥料投入を含めた技術革新などの気象要因以外の要因も大きな影響を及ぼしていることが示された。

加えて、収量を (1) 式の関数式として推定することにより、求められたパラメータ b_1 , b_2 はそれぞれ、収量の降水量弾力性、収量の平均気温弾力性と同義である。例えば、アメリカにおいて降水量に係る係数 $b_1 = 0.187$ であるが、これは降水量が 1% 増加 (減少) したとき、収量が 0.187% 増加 (減少) するという、収量と気象要因との関係性を表してい

る。そのため、将来温暖化により気象条件が変化した際、関数式によって収量の変動を推計することが可能となる。

図 2 に各国における推定された収量の降水量弾力性について、図 3 に同じく平均気温弾力性について示す。降水量弾力性はロシアや中東、東南アジアでは負の値となり、それ以外の多くの国では正値となっている。また、平均気温弾力性については、カナダ、ブラジル、中央アフリカ諸国などで正値となっており、これらの国では地球温暖化による気温上昇が収量にプラスの効果をもたらす。一方で、ほとんどの生産主要国を含めて負値であるために、世界的に見れば気温上昇により収量が減少することが示唆される。

3. 気候変動による収量への影響

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、本研究で用いる 0.5 度グリッドに合わせるための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 では研究機関ごとに設定されたモデル固有のパラメータに起因するバイアスを取り除く必要がある。

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¹²⁾。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 2 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。

気候変動による収量への影響について、現在から将来の収量変動を変化割合として推計する。現在から将来にかけての変化割合 ΔY は、(1) 式より、

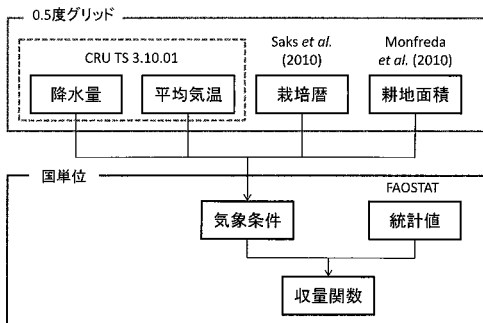


図 1 収量関数の推計フロー

表 1 主要生産国における収量関数の推定結果

	a	b_1	b_2	b_3	R^2
United States	10.235 (2.367)	0.187 (0.114)	-0.646 (0.446)	0.018 (0.001)	0.884
China	21.401 (4.871)	0.060 (0.195)	-3.143 (1.018)	0.034 (0.002)	0.927
Brazil	-0.749 (5.508)	0.346 (0.177)	1.105 (1.116)	0.023 (0.001)	0.922
Mexico	8.245 (4.954)	0.020 (0.115)	-0.308 (0.941)	0.025 (0.001)	0.959
Indonesia	10.708 (5.505)	-0.066 (0.096)	-0.742 (1.138)	0.033 (0.001)	0.978
India	11.043 (8.962)	0.204 (0.161)	-1.168 (1.706)	0.019 (0.001)	0.865
France	8.115 (3.024)	0.443 (0.147)	-0.579 (0.576)	0.024 (0.002)	0.851
Argentina	13.545 (4.172)	0.399 (0.107)	-1.759 (0.783)	0.029 (0.001)	0.945
South Africa	16.929 (9.781)	0.593 (0.242)	-2.742 (1.748)	0.024 (0.003)	0.652
Ukraine	13.177 (4.72)	0.018 (0.200)	-1.516 (0.885)	0.044 (0.006)	0.825

*下段カッコ内の数値は標準誤差を表す

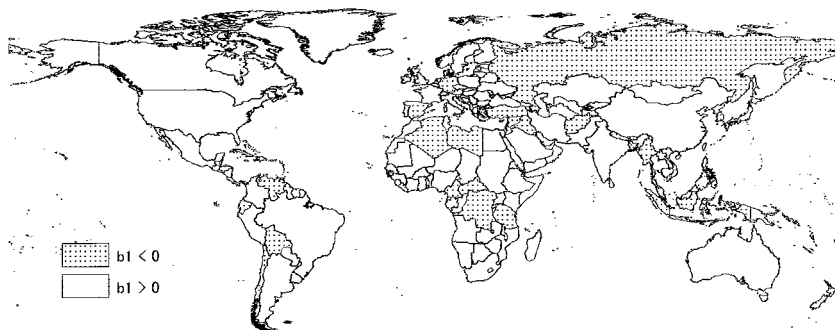


図 2 収量の降水量弾力性 (b_1)

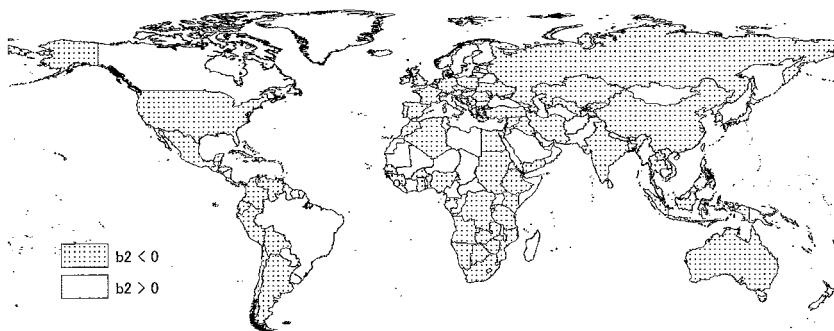


図 3 収量の平均気温弾力性 (b_2)

$$\Delta Y = Y_F/Y_C = (P_F/P_C)^{b_1} + (T_F/T_C)^{b_2} \tag{2}$$

として推計できる。ここで、 Y_F ：将来の収量、 Y_C ：現在の収量、 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、 b_1 、 b_2 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、将来世代については、2020s（2010－2039年平均）、2050s（2040－2069年平均）、2080s（2070－2099年平均）、のそれぞれ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。現実的には、気象条件の変化によって作付け日や品種の変更などの適用策がなされることが考えられるが、本研究では気象条件の影響についてのみを推計するため

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以上となったチャドや北朝鮮など、12ヵ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%ほどしかなく、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3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、平均ケース、最大・最小ケース、標準偏差について示す。平均ケースについてみると、ブラジルやメキシコインドネシア、インドではより温暖化が進む2080sにおいても、ブラジルは16%の増産、それ以外も10%程度の減産と推計された。ブラジルが増収となっているのは、収量の平均気温弾力性が正值であり、気温上昇がプラスの効果となっているためである。一方で、中国や南アフリカ、ウクライナでは将来世代ほど減産の割合が大きくなり、現在の60～70%まで低下する。特

表 2 将来推計に用いた気候モデル一覧

model	institute (country)
CGCM1	Canadian Center for Climate Modeling and Analysis (Canada)
MK3	Australia’s Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Australia)
CM4	Institut Pierre Simon Laplace (France)
ECHAM5	Max Planck Institute for Meteorology (Germany)
CCSM3	National Center for Atmospheric Research (United States)
HadCM3	United Kingdom Meteorology Office (United Kingdom)
HadGEM1	

表 3 主要国と世界における将来の収量変化割合

	average			max			min			S.D.		
	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
United States	95	90	86	97	93	91	93	86	80	1.3	2.7	3.8
China	90	72	60	92	76	65	87	66	53	2.3	4.0	4.8
Brazil	102	109	116	103	111	119	101	108	114	0.5	1.3	2.1
Mexico	99	97	95	99	97	96	98	96	94	0.2	0.5	0.7
Indonesia	99	96	93	99	97	95	99	95	92	0.3	0.6	0.8
India	98	94	90	100	98	96	95	87	81	2.0	4.1	5.7
France	93	84	78	95	88	82	90	79	70	1.5	3.1	4.1
Argentina	93	86	80	96	92	88	86	72	61	3.3	6.7	9.0
South Africa	92	73	61	96	81	69	88	67	53	2.8	5.2	6.3
Ukraine	93	81	72	96	88	81	90	75	64	2.1	4.1	5.1
World	95	88	83	97	92	88	93	83	76	1.2	2.9	4.8

(%)

に中国では今後も人口増加や経済成長によってさらに需要は増加していくと考えられ、需給が逼迫する可能性もある。そのため、世界全体では現在と比較して2020sには95%, 2050sには88%, 2080sには83%まで収量が減少すると推計された。

また、標準偏差についてみると、すべての国において将来世代になるほどばらつきが大きくなる。国別ではメキシコやインドネシアでは2080sにおいても1%未満と小さいが、インド、南アフリカ、ウクライナにおいて5%以上となり、気候モデルの出力結果に起因して、推計値に幅が出る不確実性が生じていると考えられる。また、本研究では第4次報告書引用されている24の気候モデルのうち、CIATが作成した7つの気候モデルの、A1Bシナリオを用いて推計を行った。そのため、気候モデルやシナリオの数が多くなるにつれて標準偏差はさらに大きくなると考えられ、アンサンブル平均など、不確実性を軽減させる手法を適用する必要がある。

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と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。

現在のとうもろこし主要生産国では、ブラジルでは、収量関数の推定により得られた収量の平均気温弾力性が正の値であったため、将来の収量は気候変動に伴う気温上昇により増加するが、それ以外の国では減産すると推計された。世界全体では現在の収量と比較して2020s(2010 - 2039年平均)には95%, 2050s(2040 - 2069年平均)には88%, 2080s(2070 - 2099年平均)には83%まで減少する。一方で、とうもろこしは人口増加や経済成長による食用需要に加えて、飼料用のみならずバイオ燃料の原料としての利用によって今後も需要が増加していく可能性が高いために、将来とうもろこしの需給状況は逼迫に向かうことが危惧される。

また今後の課題として、本研究では栽培暦や耕地については現在の条件で固定としているが、実際には気候条件の変化に対する適応策として、作付け日や耕作地の移動が行われると考えられており、そうした栽培条件の変更による増収効果を含むこと、収量関数の推定において技術革新などのトレンドが収量に影響していることが示されたが、こうした要因を取り除くニューラルネットワーク手法¹³⁾の適用

すること、などが挙げられる。

文 献

- 1) 農林水産省, 穀物等の国際価格の動向, http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_zyukyu_kakaku/index.html (accessed 2012-9-25).
- 2) Tan, G. and R. Shibasaki (2003) Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecological Modelling*, 168, 357-380.
- 3) Masutomi, Y., K. Takahashi, H. Harasawa and Y. Matsuoka (2009) 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*, 131, 281-291.
- 4) Tatsumi, K., Y. Yamashiki, R.V. de Silva, K. Takara, Y. Matsuoka, K. Takahashi, K. Maruyama and N. Kawahara (2011) Estimation of potential changes in cereals production under climate change scenarios. *Hydrological Processes*, 25, 2715-2725.
- 5) Schlenker, W. and M. Roberts (2006) Nonlinear effects of weather on corn yields. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 28, 391-398.
- 6) Lobell, D.B., W. Schlenker and J. Costa-Roberts (2011) Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333, 616-620.
- 7) Matsumura, K. and K. Sugimoto (2011) Future global soybean yield projections. *Energy and Environment Research*, 1, 111-123.
- 8) CRU, CRU TS 3.10.01, <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>, (accessed 2012-8-28).
- 9) Sacks, W.J., D. Derying, J.A. Foley and N. Ramankutty (2010) Crop planning dates: an analysis of global patterns. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 607-620.
- 10) Monfreda, C., N. Ramankutty and J.A. Foley (2008) Farming the planet: 2 Geographical distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB1022.
- 11) FAO, FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/>, (accessed 2012-03-20).
- 12) International Center for Tropical Agriculture (CIAT), GCM Data Portal, <http://www.ccafs-climate.org/>, (accessed 2012-3-23).
- 13) Hsieh, W.W. (2009) *Machine Learning Methods in the Environmental Sciences: Neural Networks and Kernels*. Cambridge University Press, 364 pp.