

32. アジア・太平洋地域の穀物生産性モデルの開発

DEVELOPMENT OF THE CROP PRODUCTIVITY MODEL IN ASIAN-PACIFIC REGION

高橋 潔¹ 原沢英夫² 松岡 譲³

Kiyoshi Takahashi, Hideo Harasawa, Yuzuru Matsuoka

ABSTRACT; Climate change impact on crops production is one of the most serious problems in the next century. In order to evaluate this problem, we developed a crop productivity model based on local climatic, hydrological and soil characteristics. In this paper we compared potential crop productivity estimated by the model with actual statistical yield data in China. Through this comparison, some factors that should be considered in the model were found. Those factors are the differences of model parameters among different species, the effect of irrigation, soil constraints decreased with high level input of fertilizer and the double- or triple-cropping.

KEYWORDS; Climatic Change, Global Environment, Crop Suitability, Food Production

1 本論文の要旨

今後予測される気候変動により、世界の潜在穀物生産性が長期的にどの程度変化するかを定量的かつ空間的に解析することを目的として、地理情報システム（GIS）を用いた農業－気候モデルを作成した（松岡・高橋, 1995）。潜在穀物生産性の算定手法は、国連食糧農業機構（FAO）が行っている農生態地域プロジェクト（AEZ）に基づき独自に開発を行った。この方法では、毎月降水量、毎月平均気温、毎月昼間平均気温、毎月平均雲量及び土壌情報を用いて、一定の農業努力投入下での収量（潜在生産性）を算定する。モデルの概要については2章で説明する。

同様の手法により作成されたモデルを用いて、現在及び将来の気候条件下での穀物の生産能を評価した研究結果は多数報告されている（Leemans ら, 1993 等）。しかしながら、モデルの推定能力の評価についてはあまり多くは研究が行われなかった。これは、潜在的な生産能を示すと考えられる代表的な地点での最大収量測定実験には多大なコストと労力がかかること、またその測定結果が入手されにくいことなどによると考えられる。本論文では、対象作物としてイネを取り上げ、対象地域として中国に焦点を絞って推定能力の評価を行い、モデルの改良すべき点を抽出した。評価の方法としては、地理的情報システムを用いてまず農業分布の地図との視覚的な比較を行いおおまかな対応を確認し、次に中国におけるかなり小さな行政域レベル（県レベル）での実際の収量の統計データとモデル出力との比較を行った。この比較において適切に推定できていないと判断される地域に関してその原因を追求し、改善を試みた。これらの分析によって、現在まで多く用いられてきた AEZ に基づく標準的な方法・パラメーターでは中国の稲作を適切に推定できず、以下の点を考慮することが必要であった。

(1) 成長特性に関するパラメーターが変種の違いを区別しておらず、その値には中国の農業とはかなり異なる

¹ 京都大学工学部

² 国立環境研究所社会環境システム部

³ 名古屋大学工学部

ものが用いられていた。特に成長期間と収穫係数に大きな差がみられた。

(2)乾燥地域である中国北部においては灌漑農業が盛んであり、その効果を考慮することが重要となる。

(3)近年、肥料の多量投入などの努力によって土壌条件による制約がかなり緩和されており、それらの考慮が重要となる。

(4)中国南部（華南）での多期作の効果が重要である。

2 潜在穀物生産性算定モデルによる収量推定

2.1 潜在生産性算定モデルの概要

使用した潜在穀物生産性算定モデルについて説明する。本研究で作成・使用したモデルは、FAOによる農生態地域プロジェクト(FAO,1978)にて開発している算定手法に基づくものである。この方法では、気温、降水量、潜在可能蒸発散、日射量、土壌の性質及び地勢を入力とし、穀物の成長をモデル化し、潜在穀物生産性を算定する（図-1；高橋，1995）。作物成長のモデル中での水分供給を計算するために水収支サブモジュールを作成したが、そのサブモジュール中では潜在可能蒸発散(Potential Evapotranspiration, PET)の算定には熱収支と空気力学を組み合わせることによって求める Penman 法を用いた。野外容水量は100mmとし、灌漑効果は取り扱っていない。成長に関するモジュールでは、水収支サブモジュールにより成長に十分なだけの水供給が得られ、かつ成長に十分なだけの気温が得られる期間（成長期間）内の平均気温、平均日中気温、平均放射量から作物の成長量を計算し、その成長量のうち食用に資する部分の割合（収穫係数）をかけて土壌制約を考慮しない時の潜在生産性を計算した。作物の成長に関し、二酸化炭素濃度の生理学的直接影響を考慮していない。さらに土壌パラメータとして土壌単位（106種）、フェイズ（12種）、傾斜（3段階）、土性（3段階）の4種をあげ、穀物種及び投入労力に応じた収量割引値を準備した。この方法を用い、イネ、春コムギ、冬コムギ、温帯性トウモロコシ、熱帯性トウモロコシ、温帯性モロコシ、熱帯性モロコシ、トウジンビエ、キャッサバ、サツマイモ、ジャガイモ、ダイズの12作物を取り扱った。各作物の成長に関する性質として、表-1に示すような項目を用いた。

2.2 入力データ

気候入力はすべて1度メッシュのラスターデータを用いた。対象年には、1987年を選んだ。月平均気温及び月平均日中平均気温は、European Centre for Medium-range Weather Forecasts(ECMWF)による6時間おきの月平均データから Goudriaan の方法(Goudriaan ら, 1994)を用いて近似したものを用いた。降水量は World Climate Research Program/Global Precipitation Climatology Project (WCRP/GPCP)、風速・湿度は ECMWF の月平均データを用いた。日射量は International Satellite Cloud Climatology Project Stage C2 (ISCCP-C2)の月平均雲量データから算定した。これらのデータは NASA/GSFC の International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP)にて1度メッシュに補間されたものである。

土壌データは FAO/UNESCO 世界土壌図第2版(FAO/UNESCO, 1994)を用いた。これは世界全域の土壌を、生成、形態、分布に関する現在の知識と、食糧生産の見地から、26の土壌単位とそれを細分化した106の細分単位に分類し、1:5,000,000の縮尺で作成したデジタル地図である。さらに、土壌単位の分類に加え、傾斜、土性、土壌のフェイズの分類が付記されている。本モデルでは、これらの情報を用いて、気候条件から計算された潜在生産性を割引した。

3 モデルによる潜在生産性の推定結果と実際の収量との比較

3.1 比較作業の対象

前節で示した入力データを用いて、土壌制限をかけた場合及びかけない場合の各作物の潜在生産性を計算した。これらの計算結果は地理情報システムにより視覚的に評価できる。この章ではそれらの計算結果のう

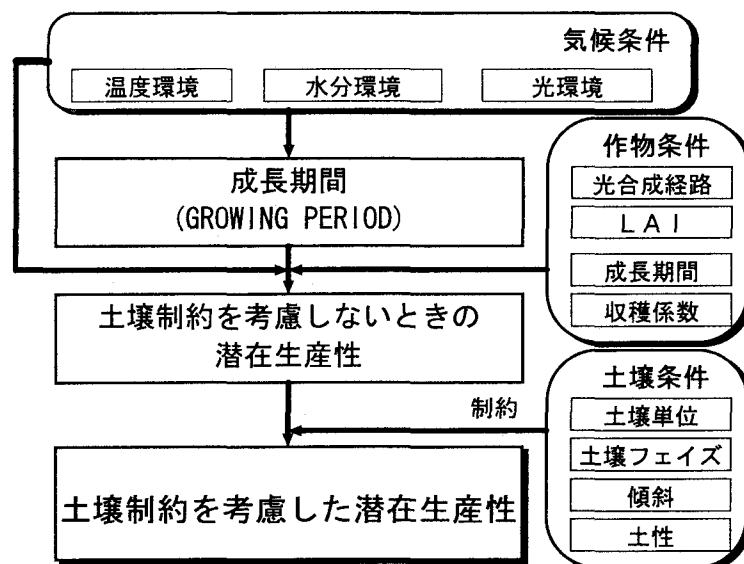


図-1 本論文で使用した穀物潜在生産性算定モデル

表-1 本論文で使用したモデルにて取り上げた作物パラメータ

作物略称	日本名	作物グループ	光合成経路	標準成長期間 N(日)	最低成長期 間(日)	LAI _{max}	収穫係数 Hi(ave.)	最低温度 T _{min} (°C)	最高温度 T _{max} (°C)
Wheat SC	春コムギ	I	C 3	100 *	100	5	0.4	5	25
Wheat WC	冬コムギ	I	C 3	150	120	5	0.4	5	25
White potato	ジャガイモ	I	C 3	150	90	5	0.6	7	30
Phaseolusbean TEC	温帯性インゲン	I	C 3	90 *	90	4	0.3	7	32
Phaseolusbean TRC	熱帯性インゲン	II	C 3	120	90	4	0.3	7	32
Soybean	ダイズ	II	C 3	120	90	4	0.35	13	38
Rice	イネ	II	C 3	130	100	5	0.3	13	36
Sweet potato	サツマイモ	II	C 3	150	120	4.5	0.55	10	40
Cassava	キャッサバ	II	C 3	330	180	3	0.55	10	35
Pearl millet	トウジンビエ	III	C 4	90	70	4	0.25	15	45
Sorghum TRC	熱帯性モロコシ	III	C 4	120	90	4	0.25	15	38
Maize TRC	熱帯性トウモロコシ	III	C 4	120	90	4	0.35	12	40
Sorghum TEC	温帯性モロコシ	IV	C 4	110 *	110	3	0.25	15	38
Maize TEC	温帯性トウモロコシ	IV	C 4	110 *	110	4	0.35	12	40

*印の作物の標準成長期間Nは、成長期間中の平均気温によって変化する。この表に示された値は20℃の時のNである。春コムギ、温帯性インゲンは、平均気温が20℃から0.5℃低下することにNを6日間長くする。例えば、平均気温15℃の時、春コムギでは、表に示されたN(20℃でのN)が100日であるから、 $N=100+12 \times (20-15)=160$ (日)となる。ただし、Nは、春コムギで最大190日まで、温帯性インゲンでは最大180日までとする。

温帯性モロコシと温帯性トウモロコシも春コムギ、温帯性インゲンと同様の方法を採用するが、この2つの作物では、20℃から1℃低下することにNを40日間延長する。また、これら2つの作物のNの最大は310日とする。

ち特に土壌制約をかけた場合のイネの潜在生産性について、実際の収量の統計データとの比較を試みた。比較の対象地域は以下の理由から中国とした。

- (1)中国は国土が広大であり、地域により多様な稲作の形態がとられており、それを表現できるモデルを目指すことによって世界全域の推定能力も向上すると考えられる。
- (2)近年の研究報告や報道では中国における環境変化の農業への影響がしばしば取り扱われており、中国における今後の食糧供給に関する研究は重要な社会的関心事となっている。
- (3)生産面積、生産量、肥料投入量、灌漑面積等の統計データが、小さな行政域レベル(県レベル)で利用可能であった。

3.2 比較に用いた稲作分布と収量データ

まず最初に、モデル計算により推定された潜在生産性のラスター出力(図-2)と、近年の中国の稲作分布図(中国国家地図集編纂委員会, 1989; 米国農務省, 1994)を視覚的に比較し、その対応を見た。気候・土壌データから計算された潜在生産性が高い地域では、実際の稲作も多く行われている可能性が高いと考えられ、この視覚的比較によりモデルの有効性をおおまかに検討することが出来、またモデルでは推定されにくい状況を知ることが出来る。

次に、1987年の県別のイネの平均収量のデータを図化して（図-3）、それをモデル計算による推定結果のラスター図と比較することにより、稲作の行われている範囲、面積だけではなく、計算された潜在生産性と実際の収量の間の数量的な関係も調べた。この比較に用いた県別のデータは共同研究を行っている中国科学院自然資源総合考察委員会(CISNAR)によって収集され、データベース化されたものであり、約2400県について収録されている。我々のモデル出力結果をCISNARに送ることにより、またCISNARが実際の収量のデータを我々に送ることにより、この比較作業は中国と日本で平行して行われ、その比較した結果についてコメントの交換が行われた(China's Project Team of AIM/IMPACT MODEL, 1996)。農業の形態はそれぞれの国・地域ごとに異なるので、このような意見交換は的外れな研究を防ぐことにつながり重要である。また、モデルの表現できない状況の原因判定も容易になる。

3.3 比較結果

これらの比較作業を通じて次のことが指摘された。

- (a)寧夏回族自治区銀川平原では稲作が行われており高収量地域であるが、モデル計算では耕作不適地として推定される。
- (b)遼寧省遼河流域の高収量稲作地帯が耕作不適地として推定される。
- (c)北京・天津地域の稲作地帯が耕作不適地と推定される。
- (d)河西省鄯陽湖、湖南省洞庭湖周辺の高収量稲作地帯は適作地として推定されるが、その値は5000～6000kg/haと実際の収量より若干低い。さらにそのまわりの中収量稲作地帯では、低い収量が推定されたり耕作不適地として推定されたりする。
- (e)江蘇省から上海市にかけての長江下流での高収量稲作地帯は可耕地として推定されるが、実際の収量より低めに推定される。
- (f)広東省西江下流の集中した稲作地帯は可耕地として推定されるが、収量が低めに推定される。
- (g)四川省の広範囲にわたる稲作地帯は可耕地として推定されるが、収量は低めに推定される。
- (h)広西壮族自治区から雲南省にかけて存在する稲作地帯は一部可耕地として推定されるが、全体的にはうまく推定されない。
- (i)新疆ウイグル自治区西部に点在する低収量稲作地は耕作不適地として推定される。

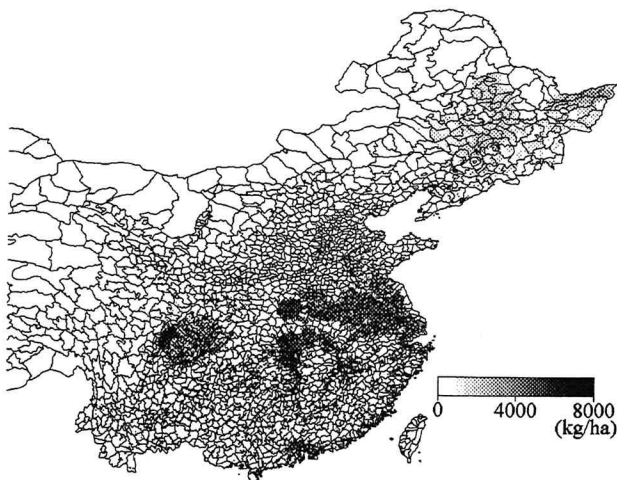


図-2 AEZ/FAOに基づく計算方法によるイネの潜在生産性のモデル計算結果（1987年、中国、kg/ha）

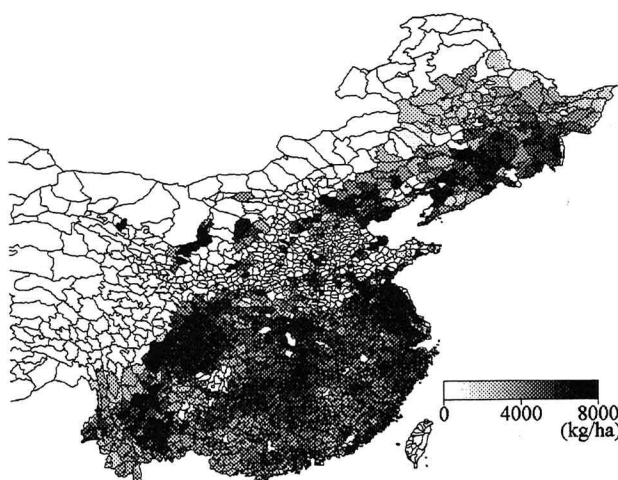


図-3 統計資料による県別のイネの収量（1987年）

4 モデルの改良について

前章において、モデル出力と実際の収量データとの比較の結果、いくつかの問題点があげられたが、それぞれに原因が検討され、計算方法・パラメータなどについて改良すべき点が指摘された。

まず全体的に、実際の収量に比べてモデルによる推定値が低い。この原因として次の3つが考えられる。

(1) AEZ/FAO の方法で用いている標準的な成長期間が中国の農業での実際の成長期間よりも短く設定されている。

(2) 近年の品種改良による収穫係数の向上を考慮していない。

(3) 多期作を考慮していない。

これらのうち(1)については収集資料(中国農業科学院, 1987 等)をもとに標準的な成長期間を 130 日から 160 日へ変更した。それにともない稲作の北限において、標準的な成長期間を達成できるように、最低成長気温設定地 13℃を 8℃に引き下げた。(2)については明確に記した資料が入手できなかったが、0.3 から 0.35 へ変更した。(3)については、現在多期作が実際に行われている地域(中国国家地図集編纂委員会, 1989)の成長期間を参考にして多期作に必要な成長期間を決め、それよりも長い成長期間を持つ地域では多期作を考慮した係数をかける、といった改良が可能である。

次に前章の比較による指摘(d)、(h)の原因の多くは、土壌の傾斜の影響を過度に見積もっているためであると推定した。中国では棚田の技術が普及している(中国農業資源与区画要覧編委会, 1987)ことを考慮すると、AEZ/FAO でイネの耕作に適さないとされていた中斜面(傾斜 8~30 度)に対する制約を緩和する必要があると考えた。それ以上の傾斜に関しても、技術の投入により限界的な生産が行われている地域もあり、その効果を考慮する必要がある。また、傾斜に関しては現在より解像度の高いデータの利用が望まれる。

比較による指摘(a)、(b)、(c)、(i)の地域は、土壌制約を考慮しない潜在生産性においても耕作不適地として推定されていることから、気候条件の制約により耕作不適地と判定されていることがわかる。入力データを調べたところ、これらの地域では降水量が少ないことが制限因子となっていた。指摘(a)、(b)の地域はそれぞれ黄河、遼河流域である。また灌漑の県別データをみると指摘(a)、(c)、(i)の地域はかなり高い灌漑率を示していることから、ある一定以上の灌漑率の地域では水分不足による制約を受けないと仮定することでこれらの地域の収量を推定することが出来ると考えた。灌漑率が 50%以上の県では水分不足の制約を受けないと仮定して計算したところ、指摘(c)、(i)の地域では推定値の改善が見られた。指摘(b)の地域は灌漑率が 50%に若干満たなかったため改善されなかった。指摘(a)の地域では土壌制約を考慮しない場合の潜在生産性は高収量が推定されるようになったが、厳しい土壌制約のために耕作不適地のままである。

さらに、中国における近年の肥料投入量の急激な増加を考慮すると、肥料投入・機械化などの努力による土壌制約の緩和を取り入れる必要がある。土壌単位、土壌フェイズによる制約には肥料投入などの努力によって緩和することが出来る種類のものがあり、それらを適宜考慮にいれていく。たとえば、土壌フェイズに関していえば saline フェイズと sodic フェイズによる制約は肥料投入などの努力によって緩和されることが示されており(FAO, 1978)、実際その制約を外すことによって指摘(a)の地域の収量推定が改善された。同様に土壌単位に関しても肥料投入などの努力によって緩和する制約について考慮する必要がある。

ここで述べた改善点のうち、表-2 のように成長期間の変更、収穫係数の変更、傾斜制約の緩和、灌漑率を用いた水分制約の緩和、肥料投入などの努力による土壌フェイズと土壌単位による制約の緩和を行い再計算した結果が図-4 である。いまだ北東部の収量などはうまく推定できないものの、かなりの改善が見られた。

5 今後の課題

本報告で行った各県レベルでの比較作業においては、気候入力データの解像度 1 度は粗いと考えられる。そのため ECMWF による 0.5 度メッシュの気候データを入手し、それを入力データとして用いた分析を開始したところである。また本報告では、比較の対象作物としてイネを取り上げたが、同様の方法を用いて、コ

表-2 穀物潜在生産性算定モデルの変更点

	従来の方法 (AEZ/FAOに基づく)	今回の変更
標準成長期間	130日	160日
最低温度	13℃	8℃
収穫係数	0.3	0.35
土壌単位	S2=50% S1/S2=75% S2/N2=25% S2/N1=25% N1/N2=0%	S2=70% S1/S2=100% S2/N2=70% S2/N1=70% N1/N2=50%
土壌フェイズ 傾斜	saline、sodicでは耕作不可能 中傾斜・高傾斜では耕作不可能	saline、sodicによる制約なし 中傾斜では制約無し、 高傾斜では50%の収量減少
灌漑効果	取り扱われていない	灌漑率が50%以上の県では 水分不足による制約なし

(但し、土壌単位の S2, S1/S2 などは AEZ/FAO 中で用いられている制約段階)

ムギ、トウモロコシについても比較を行っている。これらも随時報告していく予定である。さらに、同様の比較作業をインドに対しても行っている。インドでは中国に比べると肥料投入量が少なく、イネの収量は低い。異なる農業管理の形態を持っており、中国で行われたモデル改良の一般性を判断するのに役立つと思われる。

なお本研究の遂行にあたっては、国立環境研究所地球環境研究グループ森田恒幸総合研究官、甲斐啓子主任研究員、中国科学院自然資源総合考察委員会孫九林副委員長、李擇輝教授の協力を得た。ここに記して感謝の意をあらわす。

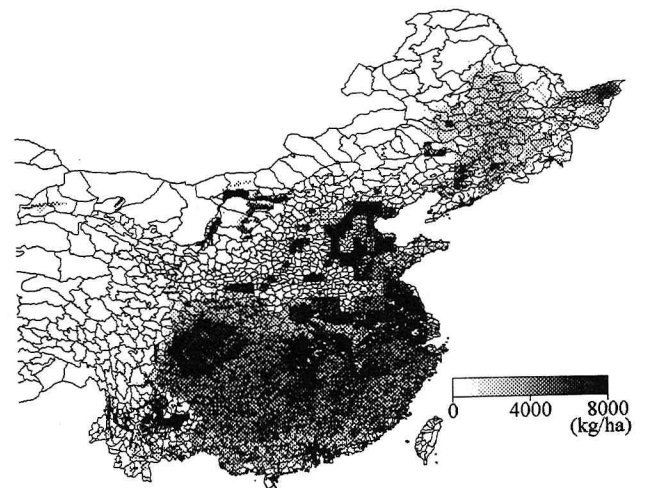


図-4 修正後のイネの潜在生産性のモデル計算結果
(1987年、中国、kg/ha)

引用文献

- China's Project Team of AIM/impact Model: Checking of model outputs and opinions on model improvement, AIM interim paper, 1996
- FAO: Report on the Agro-Ecological-Zones project, Vol.1-4, FAO, 1978-1981
- FAO/UNESCO: Soil map of the world, FAO, 1974
- Goudriaan, J. and H.H. van Laar: Modelling potential crop processes, Kluwer academic publishers, 1994
- Leemans, R. and A.M. Solomon: Modeling the potential change in yield and distribution of the earth's crops under warmed climate, Climate Research, 3, pp.79-96, 1993
- U.S.Department of Agriculture: Major world crop areas and climatic profiles, World agricultural outlook board, U.S.Department of Agriculture, 1994
- 中国国家地図集編纂委員会: 中華人民共和国国家農業地図集, pp.94-95, 中国地図出版社, 1989
- 中国農業科学院: 中国農作物種植区画論文集, pp.21, 科学出版社, 1987
- 中国農業資源与区画要覧編委会: 中国農業資源与区画要覧, pp.59-98, 測絵出版社, 1987
- 松岡 譲・高橋 潔: 地球温暖化が穀物生産能に及ぼす影響について, 第23回環境システム研究, 1995
- 高橋 潔: 食糧生産から見た地球環境変化に関する基礎的研究, 平成6年度京都大学卒業論文, 1995