筑後モデルを用いた農業生産力の気候学的評価 — 中国内蒙古を事例として —

周 建中・大槻恭一・神近牧男

(鳥取大学乾燥地研究センター)

Climatological Evaluation of Agricultural Productivity using Chikugo Model: Case Study of Inner Mongolia in China

Jian-zhong ZHOU, Kyoichi OTSUKI and Makio KAMICHIKI

(Arid Land Research Center, Tottori University,
1390, Hamasaka, Tottori, 680 Japan)

Abstract

Chikugo model, which was originally the climatological model to estimate Net Primary Productivity (NPP) of natural vegetation including underground organs, was applied to estimate agricultural productivity in Inner Mongolia in China. The results show that the natural grass productivity and the agricultural crop (cereals, pulse crops and potato) productivity under poor irrigation activities are linearly correlated with NPP. Agricultural crop productivity under various irrigation ratios (irrigated area divided by cropping area) are not directly related with NPP. However, the rates of agricultural crop productivity to NPP are linearly correlated with irrigation ratios. Therefore, Chikugo model can be applicable to evaluate the potential productivity of both natural grassland and farmland, and offer an index of the proper agricultural development.

Key words: Agricultural productivity, Arid land, Chikugo model, Inner Mongolia, Net Primary Productivity.

キーワード: 内蒙古, 乾燥地, 純一次生産力, 筑後モデル, 農業生産力

1. はじめに

近年, 人口の爆発的な増加に対して, 世界の乾燥地は食糧不足を補う可能性のある地域として注目されている。中国においても, 国土の約半分を占める西北乾燥地域が農業の有力な開発適地として注目されつつある。しかし, 開発に必要な農業生産力の適切な評価方法はまだ確立されておらず, その早期確立は中国だけでなく, 世界的な課題となっている。乾燥地は将来の食糧基地として期待される一方で, 不適切な農業開発・灌漑によって砂漠化が進行あるいはその危機にさらされているところが多い。このような意味からも, 土地の潜在的な農業生産力を適切に評価し, 乾燥地の農業開発において持続可能な開発規模の指標を提供することが世界的な急務となっている。

ところで内嶋・清野 (1985) は, 気候学的に自然植生

の純一次生産力 (Net Primary Productivity of Natural Vegetation, 以下 NPP と略す) を評価するモデル (筑後モデル) を提案した。筑後モデルは日本のみならず, 世界の湿潤気候から乾燥気候にいたる広い範囲においてバイオマス量を高い精度で推定し得ることが明かにされている (内嶋・清野, 1985; 1987; Seino and Uchijima, 1992)。この筑後モデルはさらに広い適用性を有し, 農業生産力の評価にも有効に利用できると考えられるが, 適用例は少なく, 類似の方法では桜谷ら (1988) の例があるだけである。

以上の様な観点から, 本研究では中国内蒙古自治区を事例として, 筑後モデルを用いた農業生産力の評価方法について検討を行った。まず内蒙古の面積の大半を占める牧畜業草原地域における天然草地の生産力と NPP の関係について検討した。次に内蒙古中部の三つの地区を対象にして, 食糧生産力と NPP の関係について検討し, 更に食糧生産力と NPP の関係について灌漑率の観点か

1993年4月3日 全国大会にて発表

1994年10月11日 受付, 1995年1月4日 受理

らも分析を行った。

2. 解析資料および計算方法

2.1 解析資料

気候データは、内蒙古自治区の147地点における1951～1980年平均値(内蒙古自治区気象台など, 1983)を用いた。データの種類は、気温、相対湿度、降水量、日照時間の月別平均値である。

天然草地生産量は「内蒙古気候」(王文輝ら, 1990)に掲載されている内蒙古自治区10地点のデータを用いた。

農業関連データは、「烏蘭察布盟国土資源」(烏蘭察布盟計画委員会, 1989), 「伊克昭盟国土資源」(伊克昭盟計画委員会, 1988), 「内蒙古各盟市国土資源概要」(劉珍ら, 1989), 「内蒙古鄂爾多斯高原自然資源と環境研究」(李博ら, 1990)から引用した。

2.2 計算方法

NPPを推定する「筑後モデル」(Uchijima and Seino, 1985)は次式で表される。

$$NPP = 0.29 \{ \exp \{ -0.216 (RDI)^2 \} \} (Rn/41.8605) \quad (1)$$

ここに、NPPは年純一次生産力(t乾物重/(ha・y)), RDIは放射乾燥度, Rnは年間純放射量(MJ/m²)である。

筑後モデルでは、放射乾燥度RDIの推定にはBudykoの式(Budyko, 1956), 純放射量Rnの推定にはChangの式(Chang, 1970)を使用しており、それぞれ(2)式、(3)式のように表される。

$$RDI = 10^3 \frac{\sum Rn}{l \sum r} \quad (2)$$

$$Rn = (1 - \alpha) S_t - 0.00006 \sigma T_a^4 \{ 286.18 + 202.60 (S_t / S_o) - \{ 45.24 + 10.92 (S_t / S_o) \} \sqrt{e_a} \} \quad (3)$$

ここに、rは月降水量(mm), lは水の蒸発潜熱(J/g), α はアルベド, S_t は月平均全日射量(MJ/m²), σ はステファン・ボルツマン定数(5.67042×10^{-8} W/(m²・K⁴)), T_a は月平均気温(K), S_o は月平均大気外日射量(MJ/m²), e_a は月平均水蒸気圧(hPa)である。

本研究で収集した気候データには日射量が含まれていないため、日射量は日照時間より推定した。日射量の推定式には、Ångstrom型の日照時間による回帰式を用いた。回帰式の算定には、内蒙古の毛烏素沙地開発整治研究センターで観測された1986年9月から1987年9月の日射量および日照時間の日データを用いた(内蒙古沙漠開発研究会, 1989)。得られた回帰式は次式に示す通りである。

$$S_t / S_o = 0.23 + 0.47 (n/N) \quad (4)$$

ここに、nは日照時間(hr), Nは可照時間(hr)である。

3. 研究対象地域の概要

3.1 内蒙古自治区

内蒙古自治区は中国北部の内陸国境線に位置する(Fig. 1)。面積は 1183×10^4 haで国土の約12.3%を占めているが、約1/3は沙漠で覆われている。人口はおよそ2,200万人で中国全人口の2%に相当し、平均的な人口密度はかなり希薄である。

内蒙古自治区の平均標高は1000 m以上で、中央には、東部から大興安嶺山脈、西部から陰山山脈が連なって縦断している。両山脈の北側には、自治区面積の約2/3を占める内蒙古高原が広がっている。全耕地 5300×10^3 haの90%以上は山脈の南側に分布している。

内蒙古の大半は半乾燥気候と乾燥気候に属している。夏季モンスーンの影響は弱く、西部奥部には殆ど届かない。Fig. 2 (a), (b)はそれぞれ内蒙古自治区における降水量と気温、降水量と純放射量の関係を示したものである。図に示される様に、降水量の多い地方では気温が低く純放射量が少ない傾向があるが、これは北東部の特徴である。逆に降水量が少ない地方では、気温が高く純放射量が多い傾向があるが、これは南西部の特徴である。すなわち、内蒙古自治区では北東部は寒冷湿潤で、南西部は温暖乾燥の傾向を有している。

年平均気温は-5～9℃, 1月平均気温は-30～-10℃, 7月平均気温は17～26℃であり、冬季は非常に寒冷であるが、夏季は比較的温暖である。年降水量は50～500 mmであり、夏季に雨期があり、年降水量の65～70%は6～8月に集中している。年日照時間は2600～3400 hrであり、5～6月がピークである。寒冷乾燥地ではあるが、温暖期・雨期・多照期が同一季節にあることから、気候的に夏季を中心に農業利用の価値は高い。

内蒙古の主要な営農方式はドライファーマーリングであり、粗放的な農業地区が多く、収量は低く不安定である。灌

Fig. 1. Map of Inner Mongolia of China.

Fig. 2. Relationships between annual precipitation and (a) annual mean air temperature, (b) annual net radiation in Inner Mongolia in China. $\triangle$: Wumeng, Hushi and Yimeng.

●: Locations where natural grass productivity is compared in subsection 4.1.

○: Other locations.

溉面積(1985年)は約 1140×10^3 haで、全耕地面積の約 21.5%を占めている。耕作は主に一毛作で、一部は間作や後作も可能である。農作物の 75% (1985年)は食糧作物であり、主としてハルコムギ・トウモロコシ・アワ・ハダカエンバク・パレイショとダイズが生産されている。

3.2 食糧生産力の検証対象地区

内蒙古における食糧生産力と NPP の関係を検証するために、烏蘭察布盟(Wumeng)・呼和浩特市(Hushi)・伊克昭盟(Yimeng)を対象地にした。これらの地区は、内蒙古自治区の中部に位置し、北の国境から黄河を経て内蒙古最南端まで広がり、自治区を南北に横断している (Fig.1)。この地域では、牧畜業・ドライファーマー・

灌漑農業など多様な農業が展開されている。

烏蘭察布盟 (北緯 $39^{\circ}37' \sim 43^{\circ}28'$, 東経 $109^{\circ}16' \sim 114^{\circ}49'$) は、面積 8469.2×10^3 haで、内蒙古自治区の 7.1%を占める。黄河の北側に位置し、内蒙古高原、烏蘭察布丘陵、大青山山地、丘陵台地からなる。全面積に占める割合は、丘陵 61.6%, 平原低地 22.5%, 山地 15.9%であり、全般に傾斜地が多い。北部の内蒙古高原は全面積の 40.5%を占め、標高 965~1100 mで、地勢は平坦で、牧畜区となっている。高原と陰山山脈に挟まれた烏蘭察布丘陵は、標高 1100~1500 mで、農業と牧畜業が混在している。大青山山地は標高 1500~2100 mで、林地と果樹林が分布している。丘陵台地は、標高 1100~1400 mで、地形は複雑で、東西方向に溶岩台地・断層盆地・侵食山地・丘陵・低山・沖積平原が入り交じっており、農業地区となっている。

呼和浩特市 (北緯 $40^{\circ}06' \sim 41^{\circ}08'$, 東経 $100^{\circ}46' \sim 120^{\circ}10'$) の全面積は 6245×10^3 haであり、内蒙古の約 0.53%を占め、平原が全面積の 73.5%を占めている。黄河の北側の土默特平原に位置し、古くから内蒙古の重要な農業地区の一つとなっている。また、呼和浩特市が内蒙古の省都でもあるた

め、近年野菜の栽培が増加しつつある。南、東、北の三面を烏蘭察布盟に包まれるように接しており、南西の一部は黄河を隔てて伊克昭盟と隣接している。標高 1000~2280 mであり、平均標高は 1060 mである。

伊克昭盟 (北緯 $37^{\circ}35' \sim 40^{\circ}52'$, 東経 $106^{\circ}43' \sim 111^{\circ}27'$) は面積 87428×10^3 haで、内蒙古自治区の 7.1%を占める。西、北、東の三面を黄河で囲まれている。標高 850~2150 mで、平均的な標高は 1000~1500 mであり、中・西部が高く、南・東部と北部黄河沿いが低い。中部にある鄂爾多斯台地は、標高 1400~1700 mであり、水食と風食が激しく、谷溝の多い地域が分布している。

全面積のうち、北部の黄河沿いにある沖積平原は全面

積の4.3%を占め、主な灌漑農業区である。これの南側にある庫布其砂漠は全面積の19.2%を占め、牧畜業地区である。南東部にある黄土開析丘陵地区は全面積の18.9%を占め、ドライファーマーミングを主とする地区である。西部にある波状高原風食地区は全面積の28.8%を占め、牧畜業地区となっている。南西部にある毛烏素砂漠は全面積の28.8%を占め、主に牧畜業地区であるが、農業地区も散在している。

Table1は烏蘭察布盟(Wumeng)・呼和浩特市(Hushi)・伊克昭盟(Yimeng)三地区の農業基盤(1985)の概要を示したものである。表より、耕地面積は烏蘭察布盟が最も広く、 1400×10^3 haであり、呼和浩特市の9.15倍、伊克昭盟の6.45倍ある。しかし、灌漑面積でみると、各地区は大差がなく、 $75 \sim 93 \times 10^3$ haの範囲にある。したがって、灌漑率でみると、呼和浩特市は49%、伊克昭盟は43%と高いのに対して、烏蘭察布盟は6%と非常に小さい。

Table 1 Agricultural infrastructure in Wumeng, Hushi and Yimeng (1985).

Item	Wumeng	Hushi	Yimeng
Total Area ($\times 10^3$ ha)	8469.2	624.5	8742.8
Arable Area ($\times 10^3$ ha)	1956	246	365
Cropping Area ($\times 10^3$ ha)	1400	153	217
Irrigated Area ($\times 10^3$ ha)	78	75	93
Irrigated Ratio: (%)	6	49	43

※ Irrigated Ratio = (Irrigated Area/Cropping Area) $\times 100$

この地域における降水量と気温、降水量と純放射量の関係を示したのがFig. 2の中の三角マーク(Δ)である。図より三地区の降水量は内蒙古の中では比較的多い方に属し、年降水量は300~400 mmの範囲にある。また三地区は内蒙古の中では比較的温暖であり、年平均気温は2.5~7℃の範囲にある。ただし、三地区の中では烏蘭察布盟が若干冷涼である。三地区の純放射量は内蒙古の中ではかなり高い方に属し、年純放射量は2700~2900 MJ/m²である。ただし、烏蘭察布盟が三地区の中では若干低い傾向がある。放射乾燥度は2~4の範囲にあり、内嶋・清野(1987)の分類によれば、半砂漠~沙漠に属する。

4. 結果と考察

4.1 天然草地生産力とNPPの関係

内蒙古自治区は広大な牧畜業草原地域である。草原面積は 788×10^6 haで自治区面積の67%、中国の全草原面積の22%を占める(内蒙古草地資源編委会, 1990)。近年、内蒙古自治区では人工草地の建設が進められているが、人工草地の全草地面積に占める割合はまだ0.8%に

過ぎず、99.2%は天然草地で占められている。すなわち、天然草地は内蒙古自治区における代表的な自然植生であるといえる。そこで、まずここでは、内蒙古自治区の天然草地生産力(単位面積における牧草年収量)とNPPの関係について検討する。

検討に用いた天然草地生産力の資料は内蒙古自治区の10地点のものである。Fig. 2の黒丸($\bullet$)はこの10地点の値を示している。図より、この10地点は内蒙古を代表する気候区からバランス良く選ばれていると言える。放射乾燥度でみると $RDI=1 \sim 2$ が3点、 $RDI=2 \sim 4$ が5点、 $RDI=8 \sim 12$ が2点であり、これは王文輝ら(1990)の気候分類によれば、それぞれ半湿潤・湿潤地、半乾燥地、乾燥地に相当する。

これらの10地点における天然草地の単位面積当たり牧草生産力(生重)と筑後モデルによるNPPの関係を示したのが(5)式およびFig. 3である。

$$NGP = 0.566 \cdot NPP + 0.437 \quad (r = 0.978) \quad (5)$$

ここにNGPは天然草地生産力(t/(ha・y))である。

図より、NPPと天然草地の生産力は線形関係にあり相関も高いことがわかる。筑後モデルは本来「地下部を含む自然植生(主として森林)のNPPを気候データから評価する」ものであるが、天然草地の生産力評価にも十分な精度で適用できるといえる。

Fig. 3. Comparison between net primary productivity (NPP) and actual productivity of natural grass in Inner Mongolia in China.

4.2 食糧生産力とNPPの関係

ここでは、内蒙古における食糧生産力とNPPの関係を検証する。ここに食糧とはハルコムギ・トウモロコシ・アワ・ハダカエンバクおよびバレイショと豆類などである(バレイショは1/5の比率で食糧に換算される)。食糧生産力は単位面積当たり食糧の年収量で示すことにする。検討に用いた収量データは前述内蒙古自治区の中部に位置する烏蘭察布盟、呼和浩特市、伊克昭盟の1985年の各地の平均値、および伊克昭盟1984年の灌漑耕地

と非灌漑耕地のデータである。

なお、内蒙古自治区では、降水量の年変動が大きい、1985年の降水量は呼和浩特市で455mm(年平均降水量407mm)、烏蘭察布盟北部の達茂旗(Damaoqi)で240mm(同255mm)で、伊克昭盟南部の烏審召(Wushenzhao)で430mm(同362mm)、1984年は455mmであった。この様に1984年と1985年の降水量は年平均降水量とほぼ一致していることから、1984年と1985年の食糧生産力データは年平均作のデータとして使用できると考えられる。

烏蘭察布盟、呼和浩特市、伊克昭盟における各地点の食糧生産力とNPPの関係を示したのがFig.4である。図より、全般的にみると食糧生産力とNPPの間には明確な関係は見いだせない。灌漑耕地(灌漑率100%)はNPPに関係なく、2.4~2.5 t/(ha・y)でほぼ一定の食糧生産力を示している。一方、非灌漑耕地(灌漑率0%)の食糧生産力は低く、0.7~1.0 t/(ha・y)で、NPPとの線形関係を有している。また灌漑率の低い地点についても、食糧生産力とNPPの間には非灌漑耕地とほぼ同様の線形関係が見いだせる。非灌漑耕地と灌漑率15%未満の耕地における食糧生産力とNPPの比較をしたのが(6)式である。灌漑率の低い農地では、灌漑による影響は少なく、食糧生産力は自然生産力に近いので、NPPとよく対応していることがわかる。

$$ACP = 0.121 \cdot NPP + 0.598 \quad (r = 0.701) \quad (6)$$

ここにACPは食糧生産力(t/(ha・y))である。

Fig.4の中で、右下方の回帰線から離れた生産力の低い2地点は烏蘭察布盟の清水河(Qingshuihe)、伊克昭盟の東勝(Dongsheng)である。Fig.5は烏蘭察布盟の13地点における水食危害度の分布と土壌有機質含有量の分布を示したものである(烏蘭察布盟計画委員会, 1989)。なお、水食危害度(t/(ha・y))は次式で求められている。

$$A = \sum_{i=1}^6 S_i \times P_i \quad (7)$$

ここに、 S_i は侵食率階級、 P_i は階級別面積100分率である。

図より、清水河における水土流失の程度を表す水食危害度は他の地点より極端に大きいこと、土壌の肥沃度を示す有機質の含有率は他の地点と比べるとかなり低いことがわかる。烏蘭察布盟の耕地の95%が斜面にあるが、その中で清水河は特に侵食の激しい黄土丘陵・台地である。植生が希薄で過度に開墾された斜面畑では降雨の60~90%が流出し、これに伴って大量の表土が流出してしまう。この土壌流失により、土壌の有機物質が減少していると言える。伊克昭盟の東勝については詳細なデータがないが、伊克昭盟の最も水土流出の激しい地区に

Fig. 4. Comparison between net primary productivity (NPP) and actual productivity of agricultural crops in Wumeng, Hushi and Yimeng in Inner Mongolia of China.

Regression line is calculated with the data where irrigated ratio are less than 15%.

Fig. 5. (a) Degree of water erosion injury (DWEI) and (b) soil organic matter content (SOMC) in Wumeng, Inner Mongolia in China.

位置しており、水食危害度は50~80(t/(ha・y))(伊克昭盟計画委員会, 1988)であることから、清水河と同様に土地基盤に問題があるため生産力が低迷していると考えられる。以上より、表土流失の激しい地点を除けば、NPPと食糧生産力は良く合うと言える。

次に、Fig.4の各地点における食糧生産力ACPのNPPに対する比率を求め、この比率と灌漑率の関係を示したのがFig.6である。図より、灌漑率が高いほど食糧の生産力が高くなること、両者の相関は高いことが確認された。なお、回帰式は次の通りである。

$$ACP/NPP = 1.87 \cdot (IA/CA) + 0.855 \quad (r = 0.947) \quad (8)$$

ここに、IAは灌漑面積(ha)、CAは作付け面積(ha)である。

Fig.5において直観的には食糧生産力とNPPの間に見いだせなかった関係が灌漑率を考慮することによって

Fig. 6. Relationship between areal rate of irrigation and ratio of agricultural crop productivity (ACP) to net primary productivity (NPP) in Wumeng, Hushi and Yimeng in Inner Mongolia in China.

一定の関係を有していることが明らかになった。ちなみに非灌漑耕地に対する灌漑耕地の食糧生産力比率は3倍あることが認められた。

5. 結 論

筑後モデルは本来「地下部を含む自然植生（主として森林）のNPPを気候データから評価する」ものであるが、筑後モデルによるNPPは、天然草地の生産力および灌漑率の低い耕地における食糧生産力と線形関係にあり、相関も高いことが明らかとなった。また、灌漑率が高くなると、耕地の食糧生産力とNPPの間には直接的な関係は見いだせないが、耕地の食糧生産力をNPPに対する比で表し、灌漑率との関係を調べると、両者の間には線形関係が成立することを明らかにした。すなわち、NPPは天然草地の生産力評価の基本量となると共に、灌漑率で整理すると耕地の食糧生産力評価の基本量ともなり得ると言える。

世界の乾燥地における耕地の食糧生産力に対する評価方法の早期確立は急務であるが、これまでに適切な評価方法は確立されていなかった。本研究により、筑後モデルを用いれば、天然草地および耕地における潜在的食糧生産力の評価が可能であり、世界の乾燥地農業開発への指標を提供できることが明らかにされた。

今後はさらに灌漑水量を明確にとらえ、RDIごとに詳

細に耕地の食糧生産力を評価し、世界の乾燥地農業開発への指標を確立するための分析が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究にあたって、鳥取大学大学院連合農学研究科の長井武雄教授より終始ご指導、ご助言を賜った。ここに心より感謝の意を表する。

引用文献

- 李 博主編, 1990: 内蒙古鄂爾多斯高原自然資源と環境研究, 科学出版社, pp. 227.
- 劉 珍主編, 1989: 内蒙古各盟市国土資源概要, 内蒙古人民出版社, pp. 790.
- 内蒙古自治区気象台等, 1983: 内蒙古自治区各盟, 市等地面気候資料.
- 内蒙古沙漠開發研究会, 1989: 中国の乾燥地における沙漠化の機構解明と動態解析, トヨタ財団助成研究報告, pp. 329.
- 内蒙古草地資源編委會編著, 1990: 内蒙古草地資源, 内蒙古人民出版社, pp. 547.
- 桜谷哲夫, 1988: 九州における畑地のバイオマスメッシュ分布, 自然植生, 水田, 畑地における生物資源メッシュ分布図(BCP-89-I-2-1), 農業環境技術研究所・北陸農業試験場・九州農業試験場, 31-47.
- 清野 豁, 内嶋善兵衛, 1985: 自然植生の純一次生産力の農業気候学的評価(2)日本における純生産量の評価, 農業気象, **41**(2), 139-144.
- Seino, H. and Z. Uchijima, 1992: Global distribution of Net Primary Productivity of terrestrial vegetation. *J. Agric. Meteorol.*, **48**(1), 39-48.
- Uchijima, Z. and H. Seino, 1985: Agroclimatic evaluation of net primary production of natural vegetation. (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity. *J. Agric. Meteorol.*, **40**, 343-352.
- 内嶋善兵衛・清野豁, 1987: 世界における自然植生の純一次生産力の分布(BCP-87-I-2-1), 農業環境技術研究所・九州農業試験場, pp. 102.
- 王文輝主編, 1990: 内蒙古気候, 気象出版社, pp. 273.
- 烏蘭察布盟計画委員会編, 1989: 烏蘭察布盟国土資源, 内蒙古人民出版社, pp. 766.
- 伊克昭盟計画委員会編, 1988: 伊克昭盟国土資源, 内蒙古人民出版社, pp. 438.