



Title	中国西南部におけるトウモロコシの気象潜在生産力評価のための簡易モデルの構築
Author(s)	須藤, 博嗣; SUDO, Hirotsugu; 長谷川, 利拓 他
Citation	北海道大学農学部農場研究報告, 32, 35-45
Issue Date	2001-03-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13451
Type	departmental bulletin paper
File Information	32_p35-45.pdf



中国西南部におけるトウモロコシの気象潜在生産力評価のための 簡易モデルの構築

須藤 弘嗣・長谷川 利拡・岩間 和人

(北海道大学大学院農学研究科 作物生産生物学講座)

林 憲二

(北海道大学農学部 生物資源科学科)

茂木 紀昭・市川 伸次

(北海道大学農学部附属農場 植物資源開発部門)

程 偉東

(広西農業科学院経済作物研究所)

鄭 虚

(北海道大学大学院農学研究科 作物生産生物学講座)

(2001年1月12日受理)

緒 言

中国西南部に位置する広西壮族自治区には石灰岩山系が広く分布しており、その山間地域にトウモロコシを主食とする人々の生活圏が存在する。気候的には亜熱帯地帯に属するが、急峻な斜面に囲まれた盆地地形の影響で昼夜の温度較差が大きい。年降水量は1500-1600 mmであるが、斜面地の土壌層が薄く、水分保持力は乏しい。また、冬季には降水量が少なく、作物栽培期間は2月～11月に限られている。トウモロコシは晩生種が2月に植え付けられ7月下旬に収穫される。その生産性は低く、多くの人々が貧困に直面しているのが現状である。

この地域におけるトウモロコシの生産性を制限している要因は、耕土層の薄さ、低地力、土壌水分の変動など様々である。これら要因がどの程度生産性を制限しているのかを解明し、品種の選択、作期の策定、肥培管理技術の開発を行っていくためには、気象からみた潜在生産性の把握が重要である。

日々変動する気象条件から作物の潜在生産性を定量的に評価する方法としては、1970年頃より開発され始めた作物生育モデルが有効である。トウ

モロコシについてもこれまでに CERES-Maize¹⁾ や MUCHOW ら²⁾ のモデルなど、いくつかのモデルが構築されてきた。これらは、その複雑さの程度によって、包括的モデルと簡易モデルに大別される。いずれのモデルも収量の予測や地域・年次間差を解析することを目的とする点では共通しているが、CERES-Maize などの包括的モデルは、土壌条件や栽培管理技術の影響を考慮し、技術開発・普及・政策決定を支援する点に特徴がある。しかしながら、多くの環境要因を包括的に取り入れた作物生育モデルは、多数の環境変数、関数パラメータを必要とするため、観測データの限られた地域に適用することは難しい。また、その構造の複雑性から、品種固有のパラメータの推定、得られた結果の解釈も容易ではない。一方、複雑な生理過程を簡略化した簡易モデル^{2,3)} は、その用途こそ限られているが、パラメータの推定、結果の解釈が容易であることから、本研究のように情報量が限られた地域における生産性の解析には適している。そこで本研究は、今後新たな作付体系の導入も念頭において、発育特性が大きく異なる3品種を対象に簡易モデル作成のための基礎情報を収集することを目的とする。

本来、モデルパラメータ推定のための基礎デー

タ収集は、対象地域に類似した環境において好適圃場条件下で行うことが望まれるが、現地において頻繁な作物生育情報の収集が難しいこと、好適条件を持つ圃場が得にくいことから、まずは北海道大学農学部附属農場において作期移動試験を行うことにより、異なる気象条件下におけるトウモロコシ品種の生育情報を収集することとした。

材料および方法

I. 発育特性評価試験

実験は1999年に北海道大学農学部附属農場の精密圃場にて行った。発育特性の異なるハイブリッド品種LG 2290(北海道準奨励品種, 早生), 桂単22号(中国広西農業科学院育成品種, 中生), 30 F 45(九州晩播用早生品種)の3品種を供試した。畝間70 cm, 株間30 cmの栽植密度(4.76株/m²)で, 5月18日, 6月1日, 6月15日, 6月29日, 7月13日の計5回, 1株につき2粒ずつ播種し, 3葉期に間引きを行い1本立てとした。区制は作期を主区, 品種を副区とする2反復分割区法である。一区面積は2.8 m×1.8 mとした。肥料は全量基肥, N, P₂O₅, K₂O, MgOをそれぞれ13, 18, 10, 4 g/m²の割合で施用した。また, 播種から出芽までの保温, 保湿を目的に, 地表面をポリエステル製不織布(ユニチカ(株)製パスライト)で被覆した。その他の栽培管理は附属農場の慣行に従った。出芽日は, 各区において80%の個体が出芽した日を, 絹糸抽出日は, 50%の個体が絹糸抽出した日とした。第3~4葉期以降, 6~8日おきに1区8個体について主稈葉数を測定した。

日射, 気温, 降水量は, 本学農学部附属農場における観測値を用いた。地温は銅-コンスタンタン熱電対(φ6 mm)を地中5 cmの深さに埋設して, 10分ごとに記録した。日長は地平視差を考慮しない天文日長(可照時間)とし, 緯度(北緯43°04′)から算出した。

II. 乾物生産特性評価試験

同年に実験Iと同じ品種を5月18日, 6月15日, 7月13日に計3回播種した。区制は3反復分割区法(主区, 作期; 副区, 品種)で, 1区面積

は7.2 m×3.5 mとした。栽植様式および施肥は実験Iと同様である。出芽から約3週間ごとに1区3~4個体を抜き取り, 葉面積および地上部の乾物重を調査した。また, 魚眼レンズを持つプラントキャノピーイメージャー(CI 110, CID Inc. Vancouver, WA, USA.)を用いて, 群落下部から上方に向けて撮影した画像を解析し, 散乱光に対する群落受光率を推定した。測定は, 各区株間, 畝間のそれぞれ2箇所において約3週間ごとに行った。最終乾物重に関しては, 各区において全体の50%の個体において雌穂中央部の子実と離層が形成されたときを成熟とし, この時期の値を用いた。また, 成熟に達しなかった区に関しては, 10月中旬の測定値を用いた。

結 果

1. 気象条件

図1には, 実験を行った札幌とモデルによる予測を試みる中国広西大化県七百弄郷における慣例的なトウモロコシ栽培期間(札幌, 5月中旬~10月上旬; 七百弄, 2月下旬~7月中旬)の気温および日長の推移を示した。ほぼ北回帰線上に位置する七百弄郷の日長は11.5~13.5時間, 札幌では11.2~15.3時間で, 6月下旬には1.8時間の差があった。一方, 気温は七百弄で7.2~27.6℃, 札幌では7.1~28.0℃とほぼ同様の範囲にあった。七百弄は低緯度に位置するものの, 標高が600 m前後と高いため, トウモロコシの生育期間に関しては札幌と類似した気温範囲を示したものと考えられる。七百弄では, 生育期間を通して気温が増加し続ける傾向にあるため, 生育後半の気温は札幌と異なるものの, 札幌における作期移動試験によって, 七百弄とある程度似通った温度条件が得られたものと考えられる。しかしながら日長に関しては, その影響が大きい生育前半において著しい違いがあったことから, ここで得られるモデルを中国西南部に適用する際には, 低緯度地域における検証が必要である。

札幌における1999年の気温は, 平年よりも全般に2~3℃程度高く推移した。また, 降水量は6月に平年対比49%と少なかったが, 5月~10月

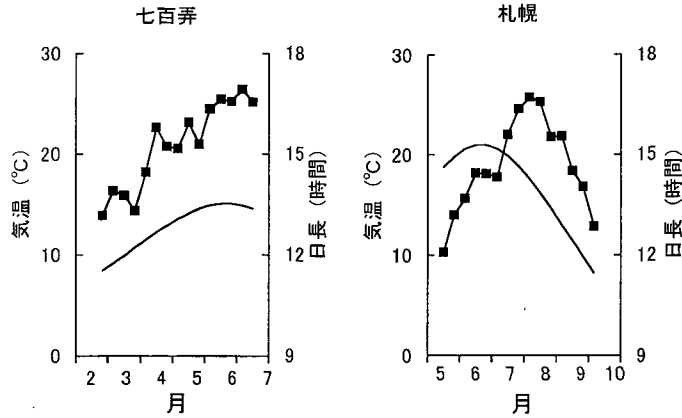


図1. 中国広西大化県七百弄（北緯 24° 04′）および札幌（北緯 43° 04′）におけるトウモロコシ栽培期間の気温（旬別）および日長の推移（1999年）
 ■ 気温（℃） — 日長（時間）
 七百弄における気温データは、高橋ら⁴⁾による。

の総降水量は 571 mm で平年並み（平年対比 98 %）であった。このため低温や水の過不足による障害はなかったものと考えられる。

播種から出芽までの日数は、晩播に伴い減少し、4～14 日の作期間差が認められたが、各作期における品種間差は認められなかった（表 1）。一方、出芽から絹糸抽出までの日数は、作期間、品種間ともに著しい変動が認められ、LG 2290、柱単 22 号、30 F 45 の順に増加し、播種日が遅くなるにつ

2. 発育特性

表 1. 発育に関する諸形質

品 種	播種日	播種～出芽 日	出芽～ 絹糸抽出 日	主稈最終葉数 枚	単位出葉あたり 積算気温 ¹⁾ ℃・日
LG 2290	5月18日	12	53	16.3±0.3 ²⁾	55.1±2.1
	6月1日	9.5	50	15.2±0.2	
	6月15日	9.0	43	15.8±0.2	
	6月29日	6.5	41	16.0±0.3	
	7月13日	4.0	41	16.0±0.2	
柱単22号	5月18日	12	81	24.4±0.4	59.5±1.7
	6月1日	9.5	72	23.6±0.2	
	6月15日	10	69	23.5±0.8	
	6月29日	7.0	64	22.4±0.7	
	7月13日	4.0	59	21.6±0.1	
30 F 45	5月18日	14	94	25.3±0.0	59.0±1.4
	6月1日	9.5	88	25.5±0.3	
	6月15日	10	75	25.0±0.2	
	6月29日	7.0	69	24.5±0.2	
	7月13日	4.0	63	22.6±0.3	

註. 1) 3葉期～雄穂抽出期。基底温度 = 0℃
 2) ±標準誤差

れて短くなった(表 1)。絹糸抽出期が 8 月下旬以降となった LG 2290 の 7 月 13 日植え, 桂単 22 号および 30 F 45 の全作期については成熟に至らなかった。

発育日数の違いを反映して主稈最終葉数にも著しい品種間差が認められ, 桂単 22 号および 30 F 45 では北海道品種の LG 2290 に対して 6~8 枚多かった。最終葉数の作期反応には品種間差が認められ, 桂単 22 号, 30 F 45 は播種日が遅れるにつれて減少する傾向がみられたのに対し, LG 2290 ではいずれの作期も類似した枚数を示した。

主稈葉数がほぼ直線的に増加する雄穂抽出期までの各品種の出葉速度と気温との関係を, 全作期のデータを用いて回帰分析したところ, 回帰式の Y 切片はいずれの品種も原点付近を通過した(図省略, Y 切片の有意性なし)。そこで, 基底温度を 0℃とする単純積算気温を用いて, 各品種の単位出葉当りの積算温度を算出した。雄穂抽出期までの単位出葉あたりの積算気温は, 最も生育日数の短かった LG 2290 が他の 2 品種に比べてやや小さい傾向にあった。

播種から出芽までの日数と平均地温との関係は, これまでの多くの報告²⁾と同様に, 品種に関わらず次の(1)式でよく近似された(図 2)。

$$D_E = 80.7 / (T - 12.5) \quad (1)$$

ただし D_E は播種から出芽までの日数, T は平均

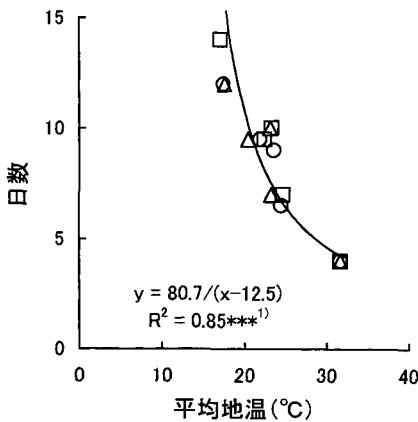


図 2. 播種から出芽までの平均気温と日数との関係
○ LG 2290 △ 桂単 22 号 □ 30 F 45

地温(℃)である。また, 得られたパラメータから, 出芽のための基底温度は 12.5℃, 有効積算温度は 80.7℃と推定された。

一方, 絹糸抽出期までの積算気温は, LG 2290 がいずれの作期においても 1000℃・日前後で同様の値を示したのに対し, 桂単 22 号では 1400~1700℃・日, 30 F 45 では 1480~2000℃・日と作期によって大きな変動を示した。ただし, ここでの積算気温の算出には, 出葉に関する基底温度を参考に, 0℃を基底とする単純積算気温を使用した。桂単 22 号と 30 F 45 における絹糸抽出までの積算気温の作期間変動は, 図 3 に示すとおり日長と密接な関係にあることがわかった。すなわち, 北海道品種である LG 2290 は日長反応が極めて弱いのにに対し, 低緯度地域に適応した桂単 22 号および 30 F 45 の絹糸抽出期には, 温度に加えて日長の影響が大きいことが示された。以上から, 絹糸抽出までの積算気温 (TT_s , ℃・日) は, 日長 (L , 時間) の一次関数として近似することができる。

$$TT_s = a \times L + b \quad (2)$$

ただし, a , b は品種固有のパラメータで, 日長感応性の強さは a の大小によって評価することができる。

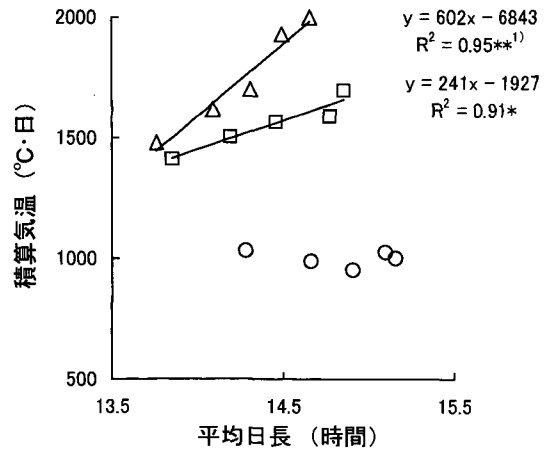


図 3. 出芽から絹糸抽出までの平均日長と積算気温(基底温度=0℃)との関係
シンボルは図 2 と同様。
*, ** はそれぞれ 5%, 1% 水準で有意な相関関係があることを示す。

3. 乾物生産特性

表2に示されるとおり、最終乾物重は作期、品種によって大きく変動したが、7月13日植えを除くと1500~2550 gm⁻²で全般に高い値が得られた。また、最大葉面積指数も、生育期間の違いを反映して著しい品種間差が認められたが、作期間変動は最終乾物重に比べ小さかった。

乾物生産特性を群落受光量(受光率×日射量)と受光量から乾物への変換効率(日射利用効率, RUE)から解析した。群落受光率は、いずれの品種も、積算気温が920°C・日に至るまで直線的な増加が認められ、920°C・日以上ではほぼ一定の値を示すことが示唆された(図4)。この関係は、絹糸

表2. 最大 LAI および最終地上部乾物量

品種	播種日	最大 LAI	最終地上部乾物量 gm ⁻²
LG2290	5月18日	3.49±0.16 ¹⁾	1735±17
	6月15日	2.89±0.05	1498±26
	7月13日	2.26±0.02	934±11
柱単22号	5月18日	6.87±0.36	2548±101
	6月15日	6.61±0.65	2159±167
	7月13日	5.43±0.19	1199±160
30 F 45	5月18日	7.95±0.36	2138±198
	6月15日	8.17±0.16	2015±31
	7月13日	6.18±0.28	1206±36

註. 1) ±標準誤差

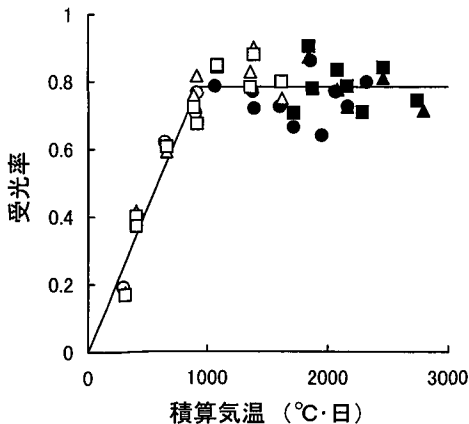


図4. 積算気温と受光率との関係
○● LG 2290 △▲ 柱単 22 号 □■ 30 F 45
白抜きは絹糸抽出前, 黒塗りは絹糸抽出後。

抽出期までの積算気温や最大葉面積指数が大きく異なる品種でも同様であったことから、受光率の簡便な推定に用いることができる。すなわち、

$$F = c \times TT \quad (0 \leq TT < 920) \quad (3)$$

$$F = c \times 920 \quad (TT \geq 920)$$

ただし、 F は受光率、 TT は積算気温(°C・日)、 c は受光率の積算気温に対する傾き(°C⁻¹・日⁻¹)であり、品種に関わらず、 8.50×10^{-4} と推定された。

受光率と日射量との積として求められる群落受光量と地上部乾物重との関係を図5に示した。これまでの報告と同様に、両者は極めて密接な正の相関関係にあった。特に絹糸抽出期までには、品種、作期による違いは認められず、乾物重の変化は次の受光量の3次曲線でよく表されることがわかった($R^2=0.962, p<0.001$)。

$$DW = 4.69 + 0.456IR + 0.00533IR^2 - 0.00000377IR^3 \quad (4)$$

ただし、 DW は地上部乾物重(gm⁻²)、 IR は群落積算受光量(MJm⁻²)である。

一方、絹糸抽出期の受光量に対する乾物増加割合(日射利用効率, RUE)は、いずれの品種も低下する傾向にあった。そこで、絹糸抽出後における日射利用効率の推移を積算気温との関係で示した(図6)。いずれの品種も積算気温の増加に伴って日射利用効率は減少する傾向にあったが、

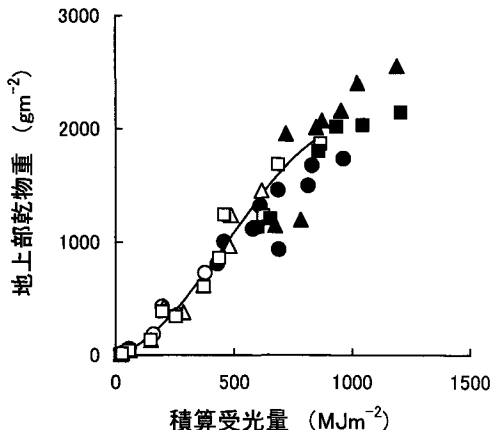


図5. 積算受光量と地上部乾物重との関係
シンボルは図4と同様。

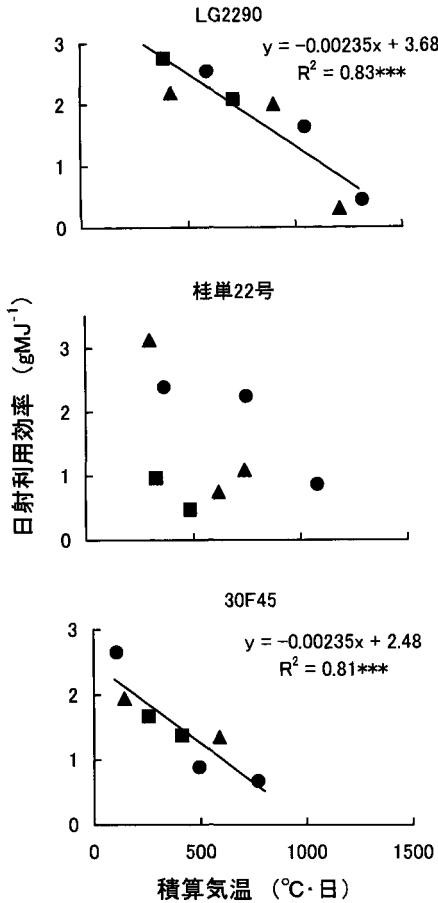


図6. 絹糸抽出後の積算気温と日射利用効率との関係
 ● 5月18日播種 ▲ 6月15日播種
 ■ 7月13日播種
 ***は0.1%水準で有意な相関関係があることを示す
 日射利用効率が0 gMJ⁻¹以下を示した一点を除く

LG 2290 および 30 F 45 の 2 品種は、いずれの作期も同様に低下したのに対し、桂単 22 号では作期間で低下速度に差が認められた。積算気温は作物のステージを反映したものと考えられるため、LG 2290 および 30 F 45 における日射利用効率は、老化に伴う光合成速度の低下を反映したものと考えられる。一方、桂単 22 号の場合は、作期により低下の傾向が異なったため、葉の齢とは異なる要因が関連している。作期によって大きく変動する環境要因としては登熟気温があげられる。そこで、桂単 22 号の絹糸抽出後における日射利用効

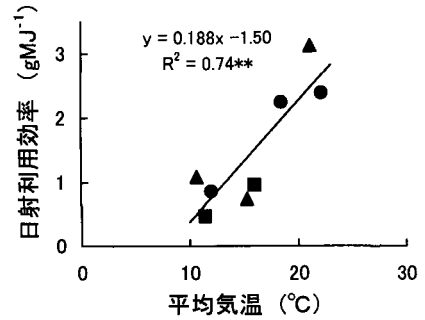


図7. 絹糸抽出後の平均気温と日射利用効率との関係
 シンボルは図6と同様。
 **は1%水準で有意な相関関係があることを示す。

率と気温との関係をみたところ(図7)、同品種の日射利用効率は気温と高い正の相関関係にあったことから、桂単 22 号における登熟期の日射利用効率の作期間差には気温が関与していることがわかった。したがって、絹糸抽出期以降の日射利用効率は品種固有の関数およびパラメータが必要である。

これらの関係より、各品種における発育ステージおよび乾物生産を気象要因(地温、日長、気温、日射量)から極めて簡易に推定するモデルを構築することが可能であると示唆された。

考 察

養水分の不足や病虫害がなく、日射・気温のみによって決定されるトウモロコシの生産性を定式化するためには、好適条件圃場における栽培試験のデータが基礎になる。本試験で得られた最終乾物重は最大で 2550 gm⁻² となり、数年にわたる IBP 試験、GEP 試験で報告された最大値⁹⁾と同様の値であったことから、本試験の結果をほぼ潜在生産性に近いものとみなして差し支えないものと考えられた。

簡易モデルは、出芽期、絹糸抽出期を推定する発育時期を予測する部分と群落の受光量から乾物生産を予測する部分から構成される。それぞれの要素において品種固有のパラメータと共通に取り扱うことができるパラメータを整理することが重

要である。

発育ステージは品種の違いに最も大きく影響される要素であるが、播種から出芽までの日数と地温との関係には品種間差はみられず、基底温度 12.5℃と有効積算気温 80.7℃・日にという 2 つのパラメータにより表すことができた。ここで得られた出芽までの積算温度は、CERES-Maize で用いられている 45℃・日（気温、基底温度=10℃、播種深度 5 cm）⁹⁾よりも大きい、MUCHOW と CARBERRY⁷⁾の報告にある 87℃・日（基底温度=8℃）とは同様である。また、戸澤⁸⁾は出芽に要する単純積算温度（基底温度=0℃）が一般的に 150~200℃・日の範囲にあるとしており、本実験の値は妥当なものと考えられる。出芽までの日数には、土壌水分や播種深度などの他の要素が関係しているが、好適条件を仮定した本モデルではこれらの要因を考慮しないものとする。

出芽から絹糸抽出までの積算気温および日長反応は品種によって大きく異なった。最も日長反応が強かったのが、九州の遅播に用いられる 30 F 45 である。九州遅播用品種群では早生とされる同品種が、札幌において晩生となった原因は日長感応性の強さによる。一方、北海道の準奨励品種である LG 2290 は日長に対する反応が弱く、絹糸抽出期までの積算気温は作期に関わらず同様であった。また、中国品種の桂単 22 号はその中間的な日長反応性を示した。したがって 30 F 45 や桂単 22 号については、日長反応性を取り入れていない MUCHOW ら⁹⁾の簡易モデルでは、発育日数に大きな推定誤差が生じることになる。一方、CERES-Maize では、出芽から絹糸抽出までの期間を幼若相、感光相（雄穂分化まで）、雄穂分化から絹糸抽出までの 3 相に分類し、幼若相は積算気温、感光相は日長関数、雄穂分化から絹糸抽出までは温度の関数で表される葉原基分化速度などについて品種固有のパラメータを用いて各相の発育日数を推定するが、これらのパラメータの推定は容易ではない。ここでは、絹糸抽出までの積算気温と日長の関係から品種の温度・日長反応特性を定量化した。しかしながら、図 1 に示したとおり、本実験における日長は中国西南部のそれよりも明らかに

長い。また、KINIRY ら⁹⁾が報告したとおり、日長に対する発育反応は非線形であるため、ここで得られた関数をそのまま現地に適用することはできない。したがって、本モデルを中国西南部に適用するには、低緯度地域におけるキャリブレーションが必要である。

乾物生産の予測では群落受光率が最も重要な要素である。群落受光率は葉面積の展開、受光態勢によって決定されることから、これまでのモデルは葉数から推定される葉面積および吸光係数から受光率を求めるものが多い^{2,10)}。一方、OTEGUI ら³⁾は受光率をさらに簡便に、積算気温から推定する方法を提案した。本実験においても受光率の推移は出芽からの積算気温と密接に関連しており、単純な線形関数で定量化できることが確認された。また、本試験に用いた品種は発育日数、主稈葉数、最大葉面積などが大きく異なるが、受光率の関数に関しては大きな品種間差は認められなかった。受光率と積算気温とに密な関係が認められたのは、受光率を支配する葉数の増加速度が、気温とほぼ直線的な関係にあることによる。したがって、出葉間隔が品種によって異なる場合には、受光率の立ち上がり角度（(3)式における c ）にも品種間差が生じることになる。出葉間隔に品種間差が存在することは、TORIGOE ら¹¹⁾、TOLLENAAR ら¹²⁾などにより報告されている。また、CARBERRY¹⁰⁾は出葉間隔の品種間差が CERES-Maize における葉面積ひいては受光率の推定に甚大な影響を及ぼすことを指摘した。ここで用いた 3 品種においても、単位出葉当りの積算気温が生育期間の長かった桂単 22 号および 30 F 45 においてやや大きい傾向にあった（表 1）が、品種間差は最大で 8% 程度（最大値/最小値）であり、TOLLENAAR ら¹²⁾の 17%、CARBERRY¹⁰⁾の 24%などに比べると小さかった。そのため(3)式における c の品種間差も小さくなったものと考えられる。

OTEGUI ら³⁾の報告と同様に、受光率が最大に達した積算温度も品種、作期に関わらず 920℃・日程度でほぼ一定であった。ここで用いた品種は絹糸抽出期までの積算気温、総葉数、最大葉面積が大きく異なったが、葉面積指数が 3 前後で受光率が

ほぼ飽和に達したために、品種、作期間差が認められなかったものと推察される。また、OTEGUIら³⁾が早生品種において報告した生育後半における受光率の低下も大きくなかった。以上のことから、ここで用いた3品種については受光率と積算気温の関係に関するパラメータを共通に取り扱っても差し支えないものと考えられた。

MONTEITH¹³⁾の報告以降、受光量に対する乾物重と受光(あるいは吸収日射)量の傾きで示される日射利用効率に関する研究が数多くなされてきた(SINCLAIRとMUCHOWの総説¹⁴⁾を参照)。本研究においても乾物重と受光量の間には、極めて密接な正の相関関係が認められ、全作期、全品種を含めた全生育期間の日射利用効率は 2.05 gMJ^{-1} であった。この値は一般的に報告されている $1.6 \sim 1.7 \text{ gMJ}^{-1}$ ¹⁴⁾よりも高いが、日射利用効率の算出に関しては受光率の測定方法や対象とする日射の波長範囲によって異なることが指摘されている^{14,15)}。実際、ここで用いた受光率は魚眼レンズによる群落画像を解析し、散乱光に対する値として推定されたもので、最大となった受光率も0.8前後と、光合成有効放射量(PAR)を対象に実測した他の報告¹⁶⁾(本試験と同様の栽植密度で $0.9 \sim 0.93$)に比べて小さかった。その結果、受光量も小さく推定され、日射利用効率の値が他の報告に比べ高くなったものと考えられる。したがって、ここで得られた日射利用効率を他の報告と単純に比較することは難しいが、乾物重の推定については、受光率を本実験で得た関数で推定する限り支障ないものと考えられる。

絹糸抽出期までの乾物重と受光量の関係は、品種、作期に関わらず同様の関数で表すことができた。これは、日射利用効率が異なる品種でも類似した値を示すとする他の報告^{17,18,19)}と一致する。本研究では、生育初期において受光量に対する乾物重の立ち上がりが小さく(すなわち日射利用効率が低い)、絹糸抽出期までの両者の関係は3次曲線で示された。このような生育初期の日射利用効率の低さはANDRADEら¹⁸⁾によっても報告され、その要因として低温の影響が示唆されている。しかしながら、本実験では初期の温度が高かった7

月播種区においても同様の傾向が認められたことから、初期の日射利用効率の低さは温度の影響によるものとは考えにくい。SINCLAIRとHORIE²⁰⁾のモデル解析によると、日射利用効率は葉面積にかかわらずほぼ一定であるとしているが、そこに示された結果では、葉面積が小さく相互遮蔽が起こらない場合に多くの葉で光合成の光飽和が起こり、その結果日射利用効率が低くなる傾向が認められる。本研究における生育初期の日射利用効率の低さはこの現象を反映したものと推察される。

絹糸抽出以降における日射利用効率の低下も他の報告^{21,22)}で認められる現象であるが、本研究ではその低下傾向が品種によって異なった。すなわち、LG 2290 および 30 F 45 は、作期に関わらず同様の低下傾向を示したのに対して、桂単 22 号は遅播区の低下は早播区に比べ著しく大きかった。日射利用効率を低下させる原因としては、ステージの進行に伴う葉内窒素の子実への転流²¹⁾、低温^{17,23)}など複数の要因が報告されているが、本実験からそれぞれの影響の程度を特定することはできない。しかしながら、作期間で日射利用効率の低下速度に大きな差が認められた桂単 22 号では、日射利用効率と気温との間に高い正の相関が認められたことから、低緯度地域に適応した同品種の日射利用効率が、低温に対して高い感受性を示した可能性は高い。HAMMERとVANDERLIP²⁴⁾はソルガムの日射利用効率について品種×温度の相互作用が存在することを報告した。本報告ではトウモロコシについてもその傾向が認められたことから、日射利用効率の低下については、品種固有特性として取り扱う必要があることが示唆された。

本実験において、生育可能期間内(気温が 8°C 以上)に成熟に達したのは5月18日播種および6月15日播種におけるLG 2290のみであった。そのため、子実収量推定のための基礎データは得られなかった。しかしながら、好適条件における収穫指数は幅広い環境条件でほぼ一定ということが報告されている^{19,25)}ので、地上部乾物重を収量性の指標とみて問題はないものと考えられる。

以上の結果から、トウモロコシの潜在生産性を極めて簡易なモデルにより定式化することができ

た。また、中国西南部の条件に本モデルを適用するためには、異なる年次や低緯度地域においてパラメータの検証を行い、モデルの妥当性を評価することが重要である。

摘 要

中国広西省壮族自治区内の七百弄郷における気象からみたトウモロコシの潜在生産力を評価することを目的に、発育特性の異なる3品種を用いて本学農学部附属農場において作期移動試験を行い、簡易生育モデルの構築に必要な基礎情報を収集した。

播種～出芽および出芽～絹糸抽出までの日数は、播種日が遅くなるにつれて減少した。播種～出芽まで日数は、品種に関わらず基底温度12.5℃、有効積算温度80.7℃・日とする地温の関数により表された。一方、出芽～絹糸抽出期までの日数と播種日に対する反応には著しい品種間差が認められ、絹糸抽出期までの積算気温(基底温度=0℃)は、北海道品種のLG 2290の場合、播種日に関わらず一定の値を示したのに対し、中国育成の桂単22号および九州遅播用の30 F 45では、日長とともに直線的に増加した。群落受光率は、積算気温(基底温度=0℃)とともに直線的に増加し、920℃・日で最大に達した後は一定の値を示した。また、受光率と積算気温との関係に品種間差は認められなかった。地上部乾物重と積算受光量との間には密接な正の相関があり、絹糸抽出期まではすべての品種で同じ3次回帰曲線で表された。一方、絹糸抽出期以降の受光量に対する乾物重の増加割合(日射利用効率)は、いずれの品種も生育ステージに伴い低下したが、その傾向は品種により異なり、LG 2290および30 F 45では作期にかかわらず積算気温とともに同様に低下したのに対して、桂単22号では遅播になるにしたがい、より早く低下した。桂単22号の登熟期における日射利用効率の低下には、低温の影響が大きいことが示唆された。

以上の結果から、トウモロコシの生産性を、地温、日長、気温、日射量の4つの気象要因から定量的に説明することが可能であること、品種固有

の特性としては、出芽～絹糸抽出にいたる積算気温と日長反応、登熟期における日射利用効率の低下パターンであることが示された。

謝 辞

本実験の遂行にあたり、北海道農業試験場、雪印種苗(株)および九州農業試験場より種子の提供をいただいた。また、北海道農業試験場生産環境部の鮫島良次博士には有益なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。なお、本研究の一部は、日本學術振興会未来開拓学研究推進事業(複合領域)「アジア地域の環境保全」の「中国西南部における生態系の再構築と持続的生物生産性の総合開発」で行った。

引用文献

1. JONES, C. A. and KINIRY, J. R.: CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station, U. S.A. 1-194. 1986
2. MUCHOW, R. C., Sinclair, T. R. and Bennett, J. M.: Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across location. *Agron. J.* 82 : 338-343. 1990
3. OTEGUI, M. E., RUIZ, R. A. and PETRUZZI, D.: Modeling hybrid and sowing date effects on maize in a humid temperate region. *Field Crops Res.* 47 : 167-174. 1996
4. 高橋英紀・山田雅仁・呂維莉：弄石屯気象表。日中共同研究「中国西南部における生態系の再構築と持続的生物生産性の総合的開発」報告書 第3報：147-163. 1999
5. 秋田重誠：IV. 炭水化物の動態、「作物の生態生理」：173-220, 文永堂出版, 東京. 1984
6. KINIRY, J. R.: Maize phasic development.: Modeling plant and soil system, ASA-CSSA-SSSA. 1991
7. MUCHOW, R. C. and CARBERRY, P. S.: Environmental control of phenology and leaf growth in a tropically adapted maize. *Field Crops Res.* 20 : 221-236. 1989
8. 戸澤英男：トウモロコシの栽培技術。農山漁村文化協会, 東京. 1-276. 1981
9. KINIRY, J. R., RITCHIE, J. T. and MUSSER, R. L.: Dynamic nature of the photoperiod response in maize. *Agron. J.* 75 : 700-703. 1983
10. CARBERRY, P. S.: Test of leaf-area development in

- CERES-Maize: a correction. *Field Crops Res.* 27 : 159-167. 1991
11. TORIGOE, Y., WATANABE, H. and KURIHARA, H.: Varietal difference in morphological and physiological characters of the developmental phases of maize. *Japan. Jour. Crop. Sci.* 55 : 474-482. 1986
 12. TOLLENAAR, M., MULDOON, J.F. and DAYNARD, T. B. : Differences in rates of leaf appearance among maize hybrids and phases of development. *Can. J. Plant Sci.* 64 : 759-763 1984
 13. MONTEITH, J. L.: Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 281 : 277-294. 1977
 14. SINCLAIR, T. R. and MUCHOW, R. C.: Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy* 65 : 215-265. 1999
 15. BONHOMME, R.: Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs solar radiation or absorbed vs intercepted radiation. *Field Crops Res.* 68 : 247-252. 2000
 16. TOLLENAAR, M. and BRULSEMA, T. M.: Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf area expansion. *Agron. J.* 80 : 580-585. 1988
 17. ANDRADE, F. H., UHART, S. A. ARGUISSAIN, G. G. and RUIZ, R. A.: Radiation use efficiency of maize grown in a cool area. *Field Crops Res.* 28 : 345-354. 1992
 18. ANDRADE, F. H., UHART, S. A. and CIRILO, A.: Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Res.* 32 : 17-25. 1993
 19. OTEGUI, M. E., NICOLINI, M. G. RUIZ, R. A. and DODDS, P. A.: Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87 : 29-33. 1995
 20. SINCLAIR, T. R. and HORIE, T.: Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Sci.* 29 : 90-98. 1989
 21. MUCHOW, R. C.: Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. III. Grain yield and nitrogen accumulation. *Field Crops Res.* 18 : 31-44. 1988
 22. TOLLENAAR, M. and AGUILERA, A.: Radiation use efficiency of an old and a new maize hybrid. *Agron. J.* 84 : 536-541. 1992
 23. WILSON, D. R., MUCHOW, R. C. and MURGATROYD, C. J.: Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in a cool climate. *Field crops Res.* 43 : 1-18. 1995
 24. HAMMER, G. L. and VANDERLIP, R. L.: Genotype-by-environment interaction in grain sorghum I. Effects of temperature of radiation use efficiency. *Crop Sci.* 29 : 370-376. 1989
 25. SINCLAIR, T. R., BENNETT, J. M. and MUCHOW, R. C.: Relative sensitivity of grain yield and biomass accumulation to drought in field-grown maize. *Crop Sci.* 30 : 690-693. 1990

A Simplified Model for Evaluating Climatic Productivity of Maize in Southwest China

Hirotsugu SUDO, Toshihiro HASEGAWA, Kazuto IWAMA

(Research Group of Botany and Agronomy, Graduate School of Agriculture,
Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan)

Kenji HAYASHI

(Department of Agrobiological and Bioresources, Faculty of Agriculture,
Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan)

Noriaki MOKI and Shinji ICHIKAWA

(Division of Exploration and Utilization of Plant Resources, Experimental Farms, Faculty of Agriculture,
Hokkaido University, Sapporo 060-0811, Japan)

Weidong Cheng

(Institute of Maize, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530000, China)

Xu Zheng

(Research Group of Botany and Agronomy, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University,
Sapporo 060-8589, Japan)

(Received January 12, 2001)

Summary

To develop a simplified model for evaluating climatic potential productivity of maize (*Zea mays* L.) in Qibainong, Guanxi Province, Southwest China, field trials with different sowing dates were conducted for three hybrids of different maturity groups at Sapporo (43°04'N), Japan. Days from sowing to emergence and from emergence to silking decreased as the sowing date was delayed. The interval from sowing to emergence was well expressed by a function of soil temperature with 80.7 degree days (base temperature=12.5°C) for all the varieties tested. The duration from emergence to silking and its response to sowing dates were largely different among varieties. Thermal time (base temperature=0°C) from emergence to silking was similar for all the sowing dates in LG2290 grown in Hokkaido, but decreased linearly with day length for Guidan 22 bred in Southwest China and 30F45 grown in Kyushu. The fraction of canopy intercepted radiation increased linearly until thermal time=920 degree days, and became constant thereafter with no major difference between varieties. Shoot dry matter was positively correlated with intercepted radiation, and the third-order polynomial best described the relationship before silking for all the varieties. The dry matter increase per unit intercepted radiation (radiation use efficiency, RUE) decreased after silking, and its pattern was different between varieties. While post-silking RUE decreased with thermal time similarly for all sowing dates in LG2290 and 30F45, Guidan 22 showed a more rapid decrease in later sowing dates and RUE was positively correlated with air temperature. This suggests that susceptibility of post-silking RUE to low temperature is cultivar-dependent.

We conclude that climatic productivity of maize can be quantified with four climatic factors; soil temperature, day length, air temperature and radiation. Cultivar-dependent parameters are required for thermal time from emergence to silking, its response to day length and the decrease in post-silking RUE. The model needs to be tested in different years and locations including low-latitude regions.