



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	気象情報に基づいた水稻生育のモデル化に関する研究
Author(s)	川方, 俊和
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	乙第5263号
Issue Date	1997-12-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3132247
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51461
Type	doctoral thesis
File Information	000000317437.pdf



気象情報に基づいた水稻生育の
モデル化に関する研究

川 方 俊 和

気象情報に基づいた水稻生育の モデル化に関する研究

川方俊和

目 次

第1章 緒論	3
1. 1 はじめに	3
1. 2 既往の研究	5
(1)出穂期と開花期モデル	5
(2)生産量モデル	7
1. 3 目的と研究の概要	10
第2章 発育速度による水稻の幼穂形成期と出穂期の推定モデル	12
2. 1 はじめに	12
2. 2 方法	12
(1)作期移動試験方法	12
(2)発育速度のパラメータの計算方法	14
(3)他地域のデータへの適用方法	16
2. 3 結果及び考察	18
(1)幼穂形成期と出穂期の特徴	18
(2)発育速度による幼穂形成期と出穂期の推定	22
(3)他地域のデータへの適用	28
2. 4 まとめ	31
第3章 穂の伸長による水稻の出穂期の推定モデル	34
3. 1 はじめに	34
3. 2 試験方法	35
3. 3 結果及び考察	36
(1)試験結果	36
(2)モデル式の構築	38
3. 4 まとめ	42
第4章 日長及び水温を考慮した水稻の出穂期の推定モデル	44
4. 1 はじめに	44
4. 2 試験方法	45
(1)実験方法	45
(2)モデルの構築	46

4. 3	結果及び考察	4 8
	(1)定温・自然日長下における出穂特性	4 8
	(2)出穂予測モデルの構築	5 3
	(3)出穂予測の簡易式	6 2
	(4)考察	6 5
4. 4	まとめ	6 7
第5章	水稻地上部重の簡易推定モデル	6 9
5. 1	はじめに	6 9
5. 2	試験方法	7 1
5. 3	結果及び考察	7 4
	(1)葉重の推定モデル	7 4
	(2)地上部重の推定モデル	7 9
	(3)地上部重の実測値と推定値の比較	8 2
	(4)考察	8 7
5. 4	まとめ	8 9
第6章	メッシュ気候値による水稻生育モデルの利用	9 1
6. 1	はじめに	9 1
6. 2	方法	9 3
	(1)国土数値情報とメッシュ気候値の利用法	9 3
	(2)安全移植期間及び地上部重の推定方法	9 5
6. 3	結果及び考察	9 8
	(1)関東地方の気温・日射のメッシュ化とその特徴	9 8
	(2)安全移植期間及び地上部重の分布	1 0 2
6. 4	まとめ	1 1 2
第7章	総合考察	1 1 5
7. 1	出穂期の推定モデル	1 1 5
7. 2	地上部重の推定モデル	1 2 1
7. 3	メッシュ気候値への利用	1 2 3
謝辞		1 2 6
参考文献		1 2 7

第 1 章 緒 論

1. 1 はじめに

気象を構成する気温、日射量、降水量などの気象要素は、農作物を取り巻く環境に働きかけ、その結果、農業生産に影響を与える。また、気象は、年次、作期、地域の違いにより異なり、このような違いは農業生産を変動させる。気象と農業生産の関係を体系的に理解するためには、気象要素を用いて作物の発育及び生産量をモデルとして表現することが必要である。また、作物の栽培管理計画、灌漑、排水などの水管理計画等を適切に行うためにも、気象要素を用いて作物の出穂期、開花期の発育を予測することが必要である。さらに、開発された作物の発育及び生産量のモデルと広域的な気候値の推定を結び付けることにより、発育及び生産量の地理的な分布を得ることができ、面的な適地適作の判定が可能になる。このようにモデル化は、農業を計画的に行うために有効であり、農業生産現場及び農業指導機関において要望が高い。

現在、大気中のCO₂濃度の増加が認識されており将来の地球温暖化が懸念されている。このような環境変化が将来の食糧生産にどのような影響を及ぼすのかを評価、予測することが求められている。このためには、CO₂濃度、気温を上昇させたチャンバー実験に加えて、気象要素と作物生産を結び付けたモデル化が必要である。将来、信頼性の高い作物モデルが開発されれば、大気大循環モデ

ルと作物モデルを結合して、地球全体の食糧生産の変動を評価、予測することができるようになるかもしれない。

気象データから作物の発育及び生産量を評価、予測するためのモデルの開発を進めるためには、気象要素と作物の発育及び生産量との関係が定量的に表現されなければならない。物理的な気象現象をモデルで表現する場合には、質量保存則、エネルギー保存則、運動方程式などの基本法則がモデルの核になるが、モデルで作物の生育を表現する場合には、客観的な基本法則が存在していないのが現状である。そのため、作物モデルの開発は、気象要素と作物の生育、収量との関係を統計的に表す方法（統計的モデル）と作物の生理、生態的な現象のプロセスを積み上げて生育、収量を表わす方法（機構的モデル）が用いられてきた。

統計的モデルは、ある特定の場所における長年のデータから、生育、収量と気象要素との間に統計的關係を導き、それを用いて任意の年の生育、収量を予測、推定しようとするものである。これは簡便であるが外挿的予測であり、発展的手段にならないという限界を有している。一方、機構的モデルは、作物の生育と収量形成に関する物理的、生物的プロセスの因果関係を明らかにし、それに基づいて予測を行おうとするものである（高見，1994）。これまで植物の生理、生態現象を積み上げたいくつかの機構的モデルが開発されてきた。生理、生態現象を積み上げたモデルは、植物の生長過程を理解するためには有効であるが、モデルの構造が複雑になり、パラメータの

数が多くなる傾向がある。モデルが汎用的かつ精緻になるほど、プロセスの数や個々のプロセスのパラメータの数、シミュレーションに必要なデータの種類の数が増え、現実に入手できないデータが生じる。さらに個々のプロセスの構造についての知識は限られているので、記述を細かくすればするほど不確実性が増してくる。その結果、「個々の要素に還元すれば、一般性が高まる」という図式が成り立たなくなる（小林，1994）。

そのため、生理、生態現象を表現するプロセス及びパラメータの数をなるべく少なくした簡易な機構的モデルが要望される。しかし、植物の生理、生態現象は複雑であるため、安易な簡易化は避けなければならない。安易な簡易化を避けるために、実際に観測、測定した結果に基づいて、発育及び生産量を定量的に表現し、評価、予測法を確立する必要がある。このような手続きにより、複雑な現象を簡易に表すことが可能である。したがって、簡易な機構的モデルは、上記の統計的モデルと機構的モデルの中間に位置付けられる。また、簡易な機構的モデルは、実験等により信頼性と限界を確認することが容易であり、将来はより信頼性の高いモデルに発展する可能性がある。本研究の目的は、気象要素から作物の発育、生産量を評価、予測する簡易モデルの確立を目的とした。

1. 2 既往の研究

（1）出穂期と開花期モデル

同一地点、同一時期の栽培条件下では、水稻の播種か

ら出穂期までの日平均気温を積算した積算気温、または日平均気温から基準温度を引いた値を積算した有効積算気温がほぼ一定であることが知られている。そのため、気象要素から出穂期を予測するために、播種から出穂期までの積算気温が多く使われている。また、気温の高低により変化する有効気温係数を気温に乘じ、その積算した値から出穂期を推定する研究もある（羽生・内島、1962）。このように種々の積算気温は、気象と水稻の出穂との関係を定量的に表現しているので、出穂予測モデルの基本であるといえる。

しかし、積算気温で出穂期を予測することは二つの点で問題がある。一つは、水稻は短日性植物で日長に反応するため、日長に強く反応する品種は積算気温のみで出穂期を推定することができない。もう一つは、高温障害、低温障害が生じる温度条件を含めた場合、気温と水稻の発育との関係は非線形になり、積算気温のみで出穂期を推定すると推定誤差を生じやすい。

これに対して、発育ステージの概念を取り入れたのが、de Wit et al.(1970)である。de Witらは、トウモロコシの出芽日を0、開花期を1とするスケールを定め、これを発育ステージ(DVS:Development stage)と定めた。さらに、発育ステージの日々の変化率を発育速度(DVR:Development rate)とし、気温と日長時間に依存するとした。日長時間を一定とした条件下で、発育速度と気温の関係を求め、トウモロコシの開花期を予測した。また、堀江(1981)はヒマワリの生長シミュレーションにこの概

念を応用した研究を行っている。

さらに、この概念を応用した研究として、鮫島・岩切(1987)は、ダイズの播種から開花期までの期間における平均発育速度と気温、日長時間との関係を実験的に調べ、開花期の推定方法について検討した。Summerfield et al. (1992)は、水稻の日長処理、温度処理の実験を行い、気温と日長時間の線形式により平均発育速度を表した。堀江・中川(1990)は、水稻の作期移動試験、人工気象室実験から気温と日長時間の非線形関数で表した発育速度を提案し、有効積算気温よりも出穂期の推定精度が高いことを示している。このように、気温と日長時間の線形、非線形の関数で表現した種々の発育速度が提案されている。なお、堀江(1987)は、発育ステージに変えて発育指数(DVI: Developmental Index)の呼び名を提案している。

気温と日長時間の関数で発育速度を表すことは、日長に反応する品種や幅広い温度条件に対しても出穂期の予測が可能となり、積算気温による方法よりも上記の問題点を解決できる点で有効であると思われる。しかし、出芽日の発育ステージを0、出穂期の発育ステージを1と定義したが、0と1の間の発育ステージが具体的に何に対応するのかは明確ではない。すなわち、発育ステージ(発育指数)、発育速度は概念であり、これらは作物の具体的事物に対応していないという問題点がある。

(2) 生産量モデル

体系的なモデルで作物の生産量を表した例として van Keulen(1986)のモデルがある。このモデルは、作物群落

が密な場合は、気候データから作物群落の CO_2 同化速度を評価し、疎な場合は葉面積指数の指数関数で表した減衰関数を掛けて同化速度を評価する。乾物重増加速度はこの同化速度から呼吸速度を引いた値に乾物重への変換率を掛けて求め、この乾物重増加速度を積算して作物の乾物重を評価している。葉面積指数は、de Wit et al.(1970)の発育ステージの関数で乾物重から葉への分配率を表して求めている。

作物のある時点における乾物重は、その時点までに作物の群落により吸収または遮蔽された日射量に比例することが知られている(Monteith, 1977, 堀江・桜谷, 1985)。この関係を基本にして、いくつかの作物の生育モデルが開発されている。水稻の生育モデルには、Horie et al.(1995)のSIMRIW (Simulation Model for Rice-Weather relation), 岡田, 小林(1987)のPRISM (Paddy Rice Simulation Model)のモデルがある。大豆の生育モデルには、Kobayashi(1990), Sameshima(1992)のモデルがある。水稻の2つの生育モデルでは、吸収日射量は全天日射量から反射日射量を引いた値と葉面積指数の関数との積で表され、この吸収日射量に光利用効率を掛けて乾物重増加速度が求められ、乾物重増加速度を積算して乾物重が求められている。また、簡易な作物モデルとして、Maas(1993)のモデルがある。このモデルは、乾物重が葉面積によって遮蔽された日射量に比例することを基本にしている。モデルは6つの式と9つのパラメータのみで葉面積指数、地上部乾物重の推移を推定している。

上記の生育モデルでは、日射エネルギーが、作物の葉群で吸収され、乾物重に変換されることを基本にし、この点に関しては共通である。しかし、生育モデルの間では、モデルの中のサブモデルの表現法やサブモデル間の関係が異なっており、主な違いは、葉面積の表現方法と収穫期の乾物重の表現の方法である。

葉面積の表現方法については、SIMRIWは気温と葉面積指数の関数で葉面積指数増加速度を表し、葉面積指数を求めている。一方、PRISMは現存乾物重に葉への分配率を掛けて葉面積指数増加速度を表し、葉面積指数を求めている。Maasのモデルも乾物重に葉への分配率を掛けて、葉面積指数を求めている。収穫期の乾物重の表現の方法については、SIMRIWとPRISMのモデルは、光利用効率が低下することにより、収穫期に向けての乾物重増加速度の低下を表し、Maasのモデルは葉の老化により葉面積が減少することにより、乾物重が最終的に一定になることを表している。

このように、生育モデルの研究は、モデル間で構造自体が異なるほか、どのモデルがより普遍性が高いかを判断することは難しいが、現段階では本研究を含め、①既存のモデルを学ぶ、②モデルのための試験を行う、③モデルを提案し試験結果と比較する、④生理、生態学の知見と比較し矛盾しないことを確かめる等、試行錯誤的に進めている状況にある。したがって、生育モデルの研究の意義は、この試行錯誤を繰り返して、より安定的に試験結果を再現できる、信頼性の高いモデルに近づくこと

にあると思われる。このことにより、気象環境と農業生産の関係の理解が深まり、気象環境が農業生産に与える影響を評価、予測する精度の向上が期待される。

1. 3 目的と研究の概要

本研究の目的は、気象要素に基づいて水稻の出穂期等の発育を予測するモデルを構築すること、及び乾物重に代表される生産量を評価・予測するモデルを構築することである。このようなモデル化を通して気象が農業生産に与える影響の仕方の理解を進めることができ、栽培管理計画及び水管理計画の指針になると思われる。さらに、メッシュ気候値などの広域的な気象情報と結び付けて、発育や生産量の地理的分布を得ることができる。

第2章では、茨城県つくば市の農業環境技術研究所の水田圃場で水稻の作期移動試験を行い、幼穂形成始期、出穂期を予測する5種の発育速度の関数式のパラメータを求めた。これら関数式の相互比較を行い、発育速度の関数形についての検討を行った。また、他地域のデータに適用し、問題点を整理した。

第3章では、作期移動試験の結果から、穂が分化した後の穂、止葉、穂首節間の伸長過程をモデルで表現し、幼穂形成始期からこれらの伸長過程を表しながら出穂期を推定した。

水稻は日長に反応し、日長に強く反応する品種の出穂期を予測するためには、日長の影響を含めたモデルが必要である。従来、日長時間を一定にした条件下で、日長

反応に関する実験が行われてきた（例えば、栗山、1965）。しかし、現実の日長時間は1年周期で増加と減少を繰り返す連続的な変化をしている。このため、日長の影響を含めた出穂予測モデルを開発するためには、1年周期で変化する自然日長下で実験を行い、解析する必要がある。

第4章では、一定の気温に制御したガラス温室内の自然日長下において年間を通して水稻を播種し、定温、自然日長下における出穂予測のモデル化を行った。この結果をさらに簡略化し、積算水温に基づいて出穂期を予測する簡易式を開発した。

第5章では、水稻の作期移動試験を行い、葉の乾物重、地上部乾物重、光透過率等を測定した。この結果を用いて、積算気温に基づいて水稻の地上部乾物重を推定する簡易モデルを構築した。

第6章では、これまで構築したモデルとメッシュ気候値を組み合わせ、関東地方の安全な移植期間の分布図及び地上部乾物重の分布図を作成した。これらの分布図と実際の移植期及び平均収量と比較し、生育モデルとメッシュ気候値を組み合わせることの有効性について検討した。

第2章 発育速度による水稻の幼穂形成期と出穂期の推定モデル

2. 1 はじめに

気象要素を用いて水稻の幼穂形成期及び出穂期を推定するモデルを開発することは、地域に適した作期の計画や灌漑・排水の水管理計画及び施肥などの栽培管理計画において有用である。

水稻の幼穂形成期及び出穂期を推定するモデルに関する既往の研究では、発育速度と気温、日長時間との関係について、いくつかの関数式が提案されている。しかし、関数式相互の比較やその適用範囲などについては十分に検討されていない。

本章では、①作期移動試験を行い、幼穂形成始期、出穂期までの日数及び積算気温の特徴について調べ、その結果を用いて、②5つの発育速度のパラメータを求め、関数式の相互比較を行い、幼穂形成始期、出穂期の推定精度を検討した。さらに、③他地域のデータに適用し、その問題点について検討した。

2. 2 方法

(1) 作期移動試験方法

茨城県つくば市の農業環境技術研究所の水田圃場において、1985年と1986年に水稻の作期移動試験を合計7組(1985年4組、1986年3組)実施した。

1985年の試験では4月15日、5月14日、6月15日、7月14

日に播種し、それぞれ4月19日、5月17日、6月18日、7月17日に萌芽させ、5月9日、6月7日、7月8日、7月31日に移植した。1986年には4月9日、5月6日、6月15日に播種し、それぞれ4月12日、5月9日、6月18日に萌芽させ、5月12日、6月9日、7月8日に移植した。

まず、種子を比重 $1.13(\text{g}/\text{cm}^3)$ の食塩水で塩水選を行い、ベンレートT水和剤1000倍液に1日間浸し消毒を行った。その後、約5日間、約 20°C の水に種子を浸し催芽させた。育苗箱に催芽した種子を播種し、立枯病防止のためタチガレン、ダコニール剤で消毒し、灌水した。その後、約 30°C に保った出芽器に育苗箱を入れた。約3日後に種子は萌芽し、その日を萌芽日とした。その後、出芽器から育苗箱を屋外へ出し、1985年は屋外で、1986年はグロースチャンバー内で育苗を行った。

移植日の約3日から5日前に代かきを行った。移植日には、イネミズゾウムシの防除のため苗にアドバンテージ粒剤をまき、深さ約2cm、1株3本植えの手植えを行った。苗の大きさは、本葉数平均3.5の中苗であり、栽植密度は $20.66\text{株}/\text{m}^2$ である。肥料については、基肥としてNが5kg/10a、穂肥として3kg/10aとなるように8-8-8化成肥料を施用した。供試品種は、アキヒカリ、ササニシキ、コシヒカリ、ミズホを用いた。

幼穂形成期と出穂期の判定は次のようにして行った。圃場から3～4日おきに1処理区につき1株をサンプリングし、主稈を3本抜取り、幼穂の長さを測定した。幼穂の長さが1.0mmになる日を各サンプルごとの平均値を補間して

求め、この日を幼穂形成始期とした。出穂期は、1処理区につき4株の有効莖数を数え、そのうち40～50%の穂が止葉の葉鞘から抽出した日とした。

気温は、水田圃場内の地上約1mの高さの位置に通風式白金抵抗温度計を設置して測定し、毎正時の値を平均して日平均気温とした。

(2) 発育速度のパラメータの計算方法

幼穂形成始期、出穂期の推定に、de Wit et al.(1970)が提案した発育ステージの概念を取り入れた発育速度のモデルを検討した。すなわち、出芽日から発育速度を日々積算し、1に達した日を幼穂形成始期または出穂期とする(1)式のモデルで表される。

$$DVI(t) = \sum_{i=1}^t DVR(i) \quad (1)$$

ここで、 $DVR(i)$ は、出芽日から*i*日目の発育速度(day^{-1})、 $DVI(t)$ は出芽日から*t*日目の発育指数である。

作期移動試験の結果を用いて、次に示す5種の発育速度のパラメータを非線形最小2乗法で求め、発育速度の関数式の相互比較、及び推定精度の検討を行った。

$$DVR = a \cdot (T - b) \quad (2)$$

$$DVR = \frac{1 - \exp\{-a \cdot (T - b)\}}{c} \quad (3)$$

$$DVR = a \cdot T + b \cdot L + c \quad (4)$$

$$DVR = a \cdot (b - L) \cdot (T - c) \quad (5)$$

$$DVR = \frac{1 - \exp\{a \cdot (L - b)\}}{e \cdot [1 + \exp\{-c \cdot (T - d)\}]} \quad (6)$$

ここで、 T は気温、 L は日長時間を示す。(2)式の発育速度は、有効積算気温を発育速度の形に変形したものである。(2)式と(3)式は、気温のみの関数で、それぞれ堀江(1981)、堀江(1984)で報告されている。(4)式と(5)式及び(6)式の発育速度は、気温と日長時間の関数であり、(4)式は発育速度が気温と日長時間の線形で表される式、(5)式は(2)式の発育速度のパラメータ a が日長時間の一次式で表される式、(6)式は堀江ら(1986)が提唱している発育速度の式である。いずれの式も発育指数が負になる条件では発育速度は0とした。なお、堀江ら(1986)は(6)式に日長感応発育ステージを加えているが、このステージを求めることがデータ数からみて困難であると判断し、ここでは考慮しなかった。

日長時間は、太陽の中心が東の地平線上に現われてから西の地平線上に没するまでの時間である可照時間や可照時間とあるしきい値以上の照度の薄明時間の和で表せるが、ここでは日長時間は可照時間として次式で求めた。

$$\delta = \frac{23.45}{180} \cdot \pi \cdot \sin \left\{ \frac{(X - 80) \cdot 2 \cdot \pi}{370} \right\} \quad (7)$$

$$L = \frac{24.0}{\pi} \cdot \cos^{-1} \{ -\tan(\phi) \cdot \tan(\delta) \} \quad (8)$$

ここで、 X は1月1日からの日数、 δ は赤緯(単位はラジアン)、 L は日長時間、 ϕ はラジアン単位の当地の緯度(

$36.0\pi/180$)である。(7)式は赤緯の近似式であり、(8)式は太陽の方位角及び高度の式から求められる(蔵田・岡田, 1984)。

発育速度のパラメータは、非線形最小2乗法の一つである準ニュートン法(田辺, 1981)を用いて計算した。計算方法は、準ニュートン法のサブルーチン部分に発育速度のモデル及びモデルから推定された日数と実測日数との残差2乗和を使用した。初期値として発育速度の式のパラメータを与えると、準ニュートン法は残差2乗和が最小になるパラメータを繰り返し計算し、収束条件が満たされると計算結果を出力する。初期値のパラメータは、試行錯誤を繰り返して与え、安定な値に収束するパラメータを求めた。

(3) 他地域のデータへの適用方法

都道府県の試験場では、水稻の幼穂形成期や出穂期が調査されている。また、多くの場合、気温が測定されている。このため、つくばの作期移動試験で計算した発育速度の式とパラメータ及び他地域の気温データを用いて、他地域の幼穂形成始期及び出穂期を予測することができる。

他地域の生育調査データとして、1976年から1985年までの青森県農業試験場(黒石市)のアキヒカリと、宮崎県総合農業試験場(佐土原町)のコシヒカリとミズホのそれぞれ10組の幼穂形成始期と出穂期のデータを使用した。気温のデータとしては、各試験場で測定した日最高気温と日最低気温を平均した日平均気温を用いた。

初めに、つくばの作期移動試験で計算した発育速度の式とパラメータ(2.3.(2))を用いて青森のアキヒカリと宮崎のコシヒカリ、ミズホの幼穂形成始期と出穂期を予測した。発育速度の式は(5)式を用いた。しかし、青森、宮崎のデータには育苗床の気温がないため、育苗期間中の発育速度を計算することができない。そこで、なんらかの方法で移植日の発育指数を推定しなければならない。発育速度が(5)式のアキヒカリ、コシヒカリ、ミズホのパラメータとつくばの育苗期間中の気温から、つくばのアキヒカリ、コシヒカリ、ミズホの移植日の発育指数を求め、それらをそのまま青森のアキヒカリ、宮崎のコシヒカリ、ミズホの移植日の発育指数とした。移植日から各地域の気温のデータを用いて発育速度を計算し、幼穂形成始期及び出穂期を予測した。

次に、発育速度が(5)式のパラメータと各地域の生育調査データ及び移植日からの気温データを用いて、非線形最小2乗法で幼穂形成始期、出穂期の実測日数と推定日数の残差2乗和が最小になる移植日の発育指数を計算し、この場合の日数の推定精度(標準誤差)を検討した。

最後に、各地域の生育調査データと移植日からの気温データを用いて、移植日の発育指数を0として、非線形最小2乗法で幼穂形成始期、出穂期の実測日数と推定日数の残差2乗和が最小になる発育速度のパラメータを再計算し、この場合の日数の推定精度を検討した。発育速度の式は(2)式を用いた。

2. 3 結果及び考察

(1) 幼穂形成期と出穂期の特徴

作期移動試験による，出芽日から幼穂形成始期までの日数と積算気温を表-1に，出芽日から出穂期までの日数と積算気温を表-2に示した。

表-1 幼穂形成始期までの日数と積算気温

出芽日	アキヒカリ		ササニシキ		コシヒカリ		ミズホ	
	日数	積算気温	日数	積算気温	日数	積算気温	日数	積算気温
1985年4月19日	73	1312	80	1532	84	1631	104	2164
1985年5月18日	65	1346	69	1454	71	1509	92	2091
1985年6月18日	49	1199	54	1333	52	1282	72	1820
1985年7月17日	40	1088	45	1224	41	1115	51	1387
1986年4月12日	75	1392	87	1630	89	1676	112	2231
1986年5月 9日	67	1425	73	1559	76	1629	98	2206
1986年6月18日	54	1246	55	1273	57	1328	73	1745
減少率(%)	45	17	44	20	51	32	51	36

(減少率は，1995年4月19日の値と1995年7月17日の値の差を1995年4月19日の値で割った値とした)

表-2 出穂期までの日数と積算気温

出芽日	アキヒカリ		ササニシキ		コシヒカリ		ミズホ	
	日数	積算気温	日数	積算気温	日数	積算気温	日数	積算気温
1985年4月19日	98	1914	102	2109	107	2248	133	2951
1985年5月18日	88	1978	87	1950	93	2121	116	2728
1985年6月18日	71	1792	74	1874	74	1874	95	2375
1985年7月17日	62	1638	72	1838	66	1725	81	2001
1986年4月12日	105	2041	113	2256	118	2382	139	2932
1986年5月 9日	91	2017	97	2179	100	2260	122	2828
1986年6月18日	75	1798	78	1878	78	1878	102	2417
減少率(%)	37	14	29	13	38	23	39	32

(減少率は，1995年4月19日の値と1995年7月17日の値の差を1995年4月19日の値で割った値とした)

図-1に、播種期（出芽日）に対する出芽日から幼穂形成始期までの日数及び出芽日から出穂期までの日数を示した。試験期間中の水田圃場の日平均気温と日長時間の推移を図-2に示した。

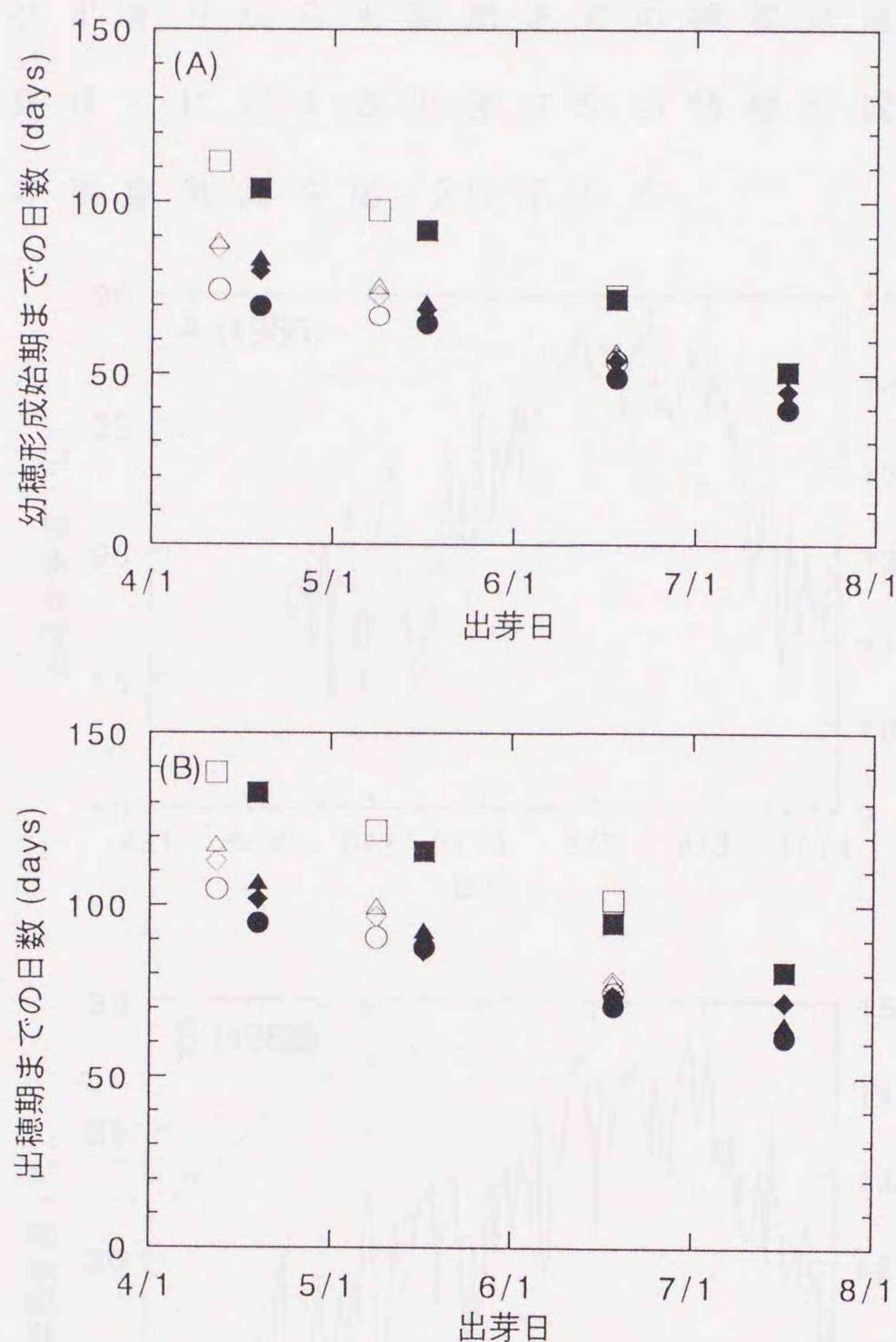


図-1 播種期を移動したときの出芽日から幼穂形成始期までの日数（A）及び出穂期までの日数（B）。

●は1985年のアキヒカリ、◆は1985年のササニシキ、▲は1985年のコシヒカリ、■は1985年のミズホ、○は1986年のアキヒカリ、◇は1986年のササニシキ、△は1986年のコシヒカリ、□は1986年のミズホを示す。

各品種とも播種期が遅れるほど、出芽日から幼穂形成始期までの日数及び出芽日から出穂期までの日数が短く

なった。この主な原因は、図-2に示すように、播種期が遅れるほど生育期間中の日平均気温が高くなり、そのため、発育が進み、幼穂形成始期及び出穂期までの日数が短くなったと考えられる。そこで、出芽日から幼穂形成始期及び出穂期までの積算気温を求め、播種期（出芽日）に対する出芽日から幼穂形成始期及び出穂期までの積算気温を図-3に示した。

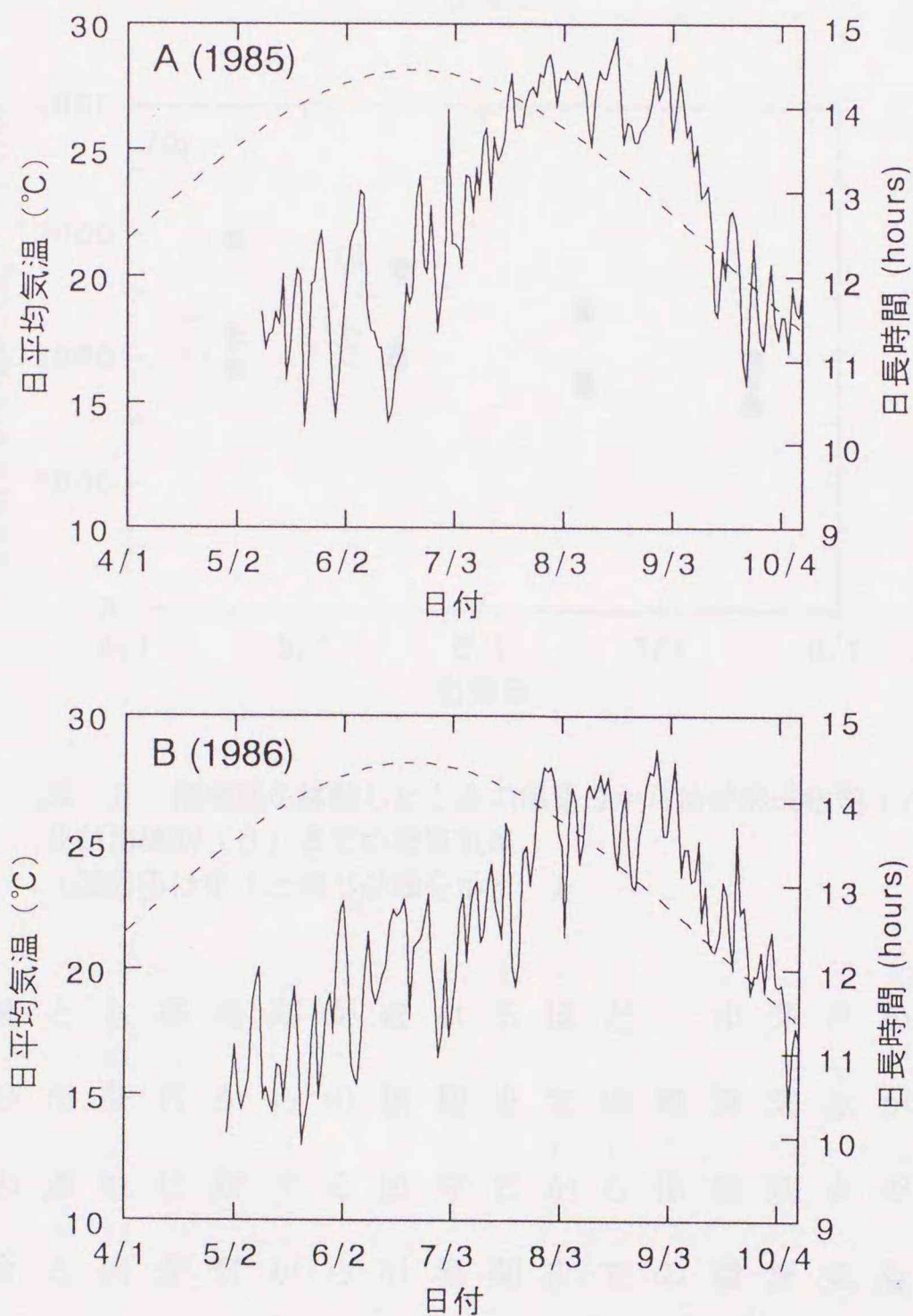


図-2 水田圃場における日平均気温(——)と日長時間(-----)の経日変化。
(Aは1985年, Bは1986年.)

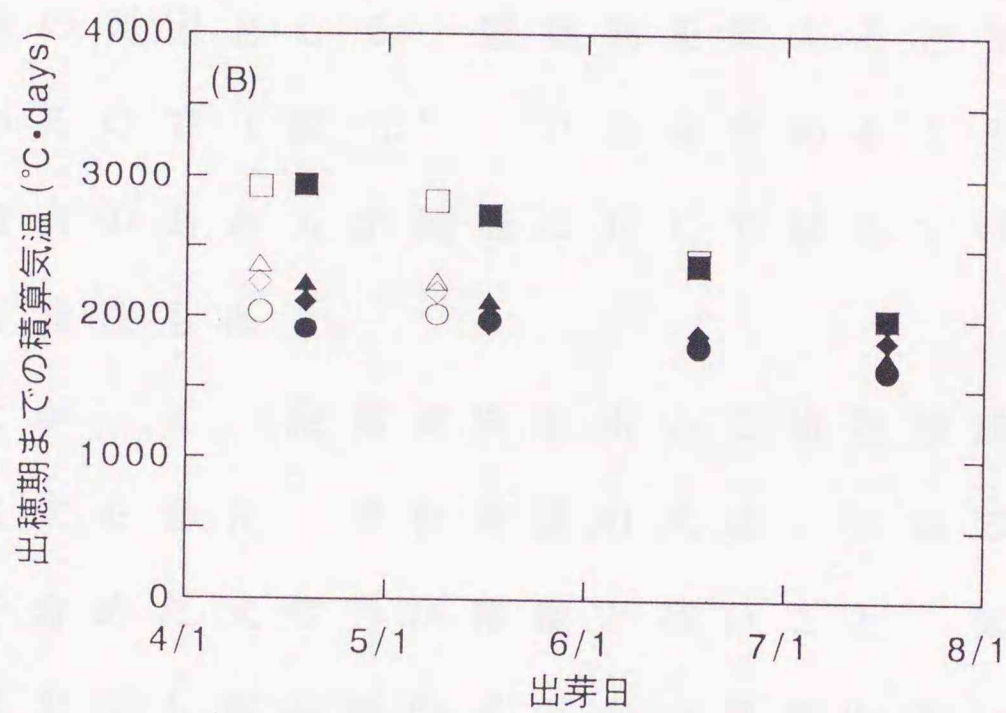
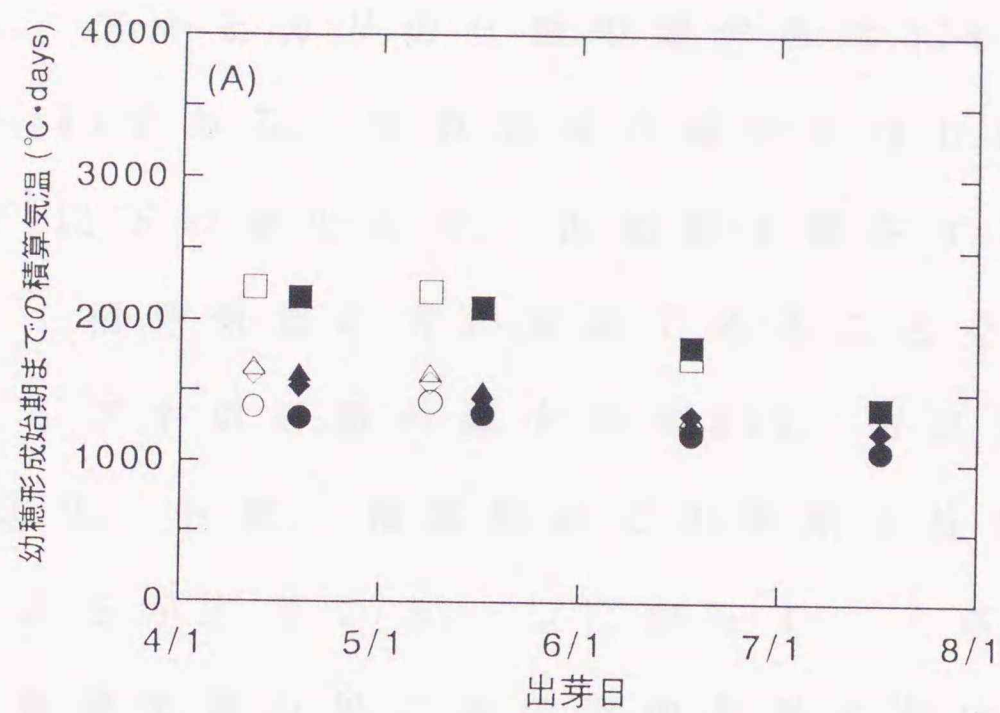


図-3 播種期を移動したときの出芽日から幼穂形成始期 (A) 及び出穂期 (B) までの積算気温.
(図の印は図1と同じ品種を示す.)

各品種とも播種期が遅れるほど、出芽日から幼穂形成始期及び出芽日から出穂期までの積算気温が低くなった。播種期の遅れに対する出芽日から出穂期までの日数の減少の割合と出芽日から出穂期までの積算気温の減少の割合を比較した。すなわち、1985年4月19日の値と7月17日の値との差を4月19日の値で割った値を、ここでは減少率と呼び、日数の減少率と積算気温の減少率(表-2)を比

較した。アキヒカリの日数の減少率は37%, 積算気温の減少率は14%である。積算気温の減少率は日数の減少率に比べて1/2以下の値であり, 出穂期を推定するためには日数よりも, 積算気温の方が有効であることを示している。一方, ミズホの日数の減少率が39%, 積算気温の減少率は32%になり, 日数, 積算気温で出穂期を推定することが難しいことを示している。したがって, ミズホの出穂期の推定は積算気温以外に他の要因を考えなければならない。その他の要因として, 播種期を変えると日長時間の推移が変わるので(図-2), 日長を含めることが必要である。また発育の進み方が気温に対して線形ではなく非線形である可能性もある。

したがって, 発育速度を用いて幼穂形成始期, 出穂期を推定する場合, 発育速度の式は, 気温のみの式よりも日長を含めた式の方が精度が高いこと, 気温に対して線形の式よりも非線形の式の方が精度が高いことが予想される。そこで, 気温と日長を含めた5つの発育速度の式を比較した。

(2) 発育速度による幼穂形成期と出穂期の推定

作期移動試験の結果を用いて14ページに示した5種の発育速度の式のパラメータを計算した。表-3は幼穂形成始期に発育指数が1になる発育速度のパラメータ, 表-4は出穂期に発育指数が1になる発育速度のパラメータである。

表-3 幼穂形成始期に発育指数が1になる発育速度(DVR)のパラメータ

DVRの式		アキヒカリ	ササニシキ	コシヒカリ	ミズホ
$a \cdot (T-b)$	a	1.16×10^{-3}	1.21×10^{-3}	1.43×10^{-3}	1.30×10^{-3}
	b	7.14	9.23	11.3	13.6
$\frac{1 - \exp\{-a \cdot (T-b)\}}{c}$	a	-4.85×10^{-2}	-5.84×10^{-2}	-8.20×10^{-2}	-5.92×10^{-2}
	b	-2.49	-8.19×10^{-1}	-1.67	10.6
	c	-13.5	-186	-413	-92.7
$a \cdot T + b \cdot L + c$	a	1.20×10^{-3}	1.21×10^{-3}	1.44×10^{-3}	8.86×10^{-4}
	b	-3.41×10^{-3}	-1.65×10^{-3}	-4.95×10^{-3}	-7.21×10^{-3}
	c	3.90×10^{-2}	1.21×10^{-2}	5.35×10^{-2}	9.24×10^{-2}
$a \cdot (b-L) \cdot (T-c)$	a	2.59×10^{-4}	1.03×10^{-4}	4.15×10^{-4}	4.66×10^{-4}
	b	18.5	25.6	17.4	15.6
	c	7.03	8.87	10.5	7.53
$\frac{1 - \exp\{a \cdot (L-b)\}}{e \cdot [1 + \exp\{-c \cdot (T-d)\}]}$	a	2.18×10^{-1}	2.93×10^{-1}	5.86×10^{-1}	8.66×10^{-1}
	b	17.6	19.8	16.1	14.9
	c	9.77×10^{-2}	1.21×10^{-1}	1.36×10^{-1}	1.20×10^{-1}
	d	30.3	27.4	27.1	24.6
	e	9.70	18.4	15.3	20.2

表-4 出穂期に発育指数が1になる発育速度(DVR)のパラメータ

DVRの式		アキヒカリ	ササニシキ	コシヒカリ	ミズホ
$a \cdot (T-b)$	a	8.90×10^{-4}	9.02×10^{-4}	1.15×10^{-3}	9.22×10^{-4}
	b	9.05	10.2	13.1	13.5
$\frac{1 - \exp\{-a \cdot (T-b)\}}{c}$	a	-3.33×10^{-2}	-6.10×10^{-2}	-6.83×10^{-2}	1.24×10^{-2}
	b	5.17	-4.79×10^{-1}	7.81	13.9
	c	-66.2	-264	-169	12.2
$a \cdot T + b \cdot L + c$	a	7.02×10^{-4}	8.67×10^{-4}	9.13×10^{-4}	5.95×10^{-4}
	b	-2.21×10^{-3}	-2.31×10^{-4}	-1.85×10^{-3}	-3.19×10^{-3}
	c	2.71×10^{-2}	-5.15×10^{-3}	1.60×10^{-2}	3.89×10^{-2}
$a \cdot (b-L) \cdot (T-c)$	a	1.22×10^{-4}	3.45×10^{-5}	1.62×10^{-4}	2.38×10^{-4}
	b	19.5	38.0	19.4	16.0
	c	4.85	9.14	10.3	7.02
$\frac{1 - \exp\{a \cdot (L-b)\}}{e \cdot [1 + \exp\{-c \cdot (T-d)\}]}$	a	1.23×10^{-1}	1.85×10^{-2}	3.52×10^{-1}	1.28
	b	18.2	43.2	17.2	14.7
	c	8.67×10^{-3}	1.19×10^{-1}	1.13×10^{-1}	1.01×10^{-1}
	d	31.2	28.9	33.8	33.8
	e	11.1	12.3	14.3	19.3

実測日数と推定日数の残差2乗和をデータの組数で割っ

た平方根を標準誤差として、各式の推定精度を比較した(図-4)。図-4のAは幼穂形成始期に發育指數が1になるモデル、Bは出穂期に發育指數が1になるモデルである。

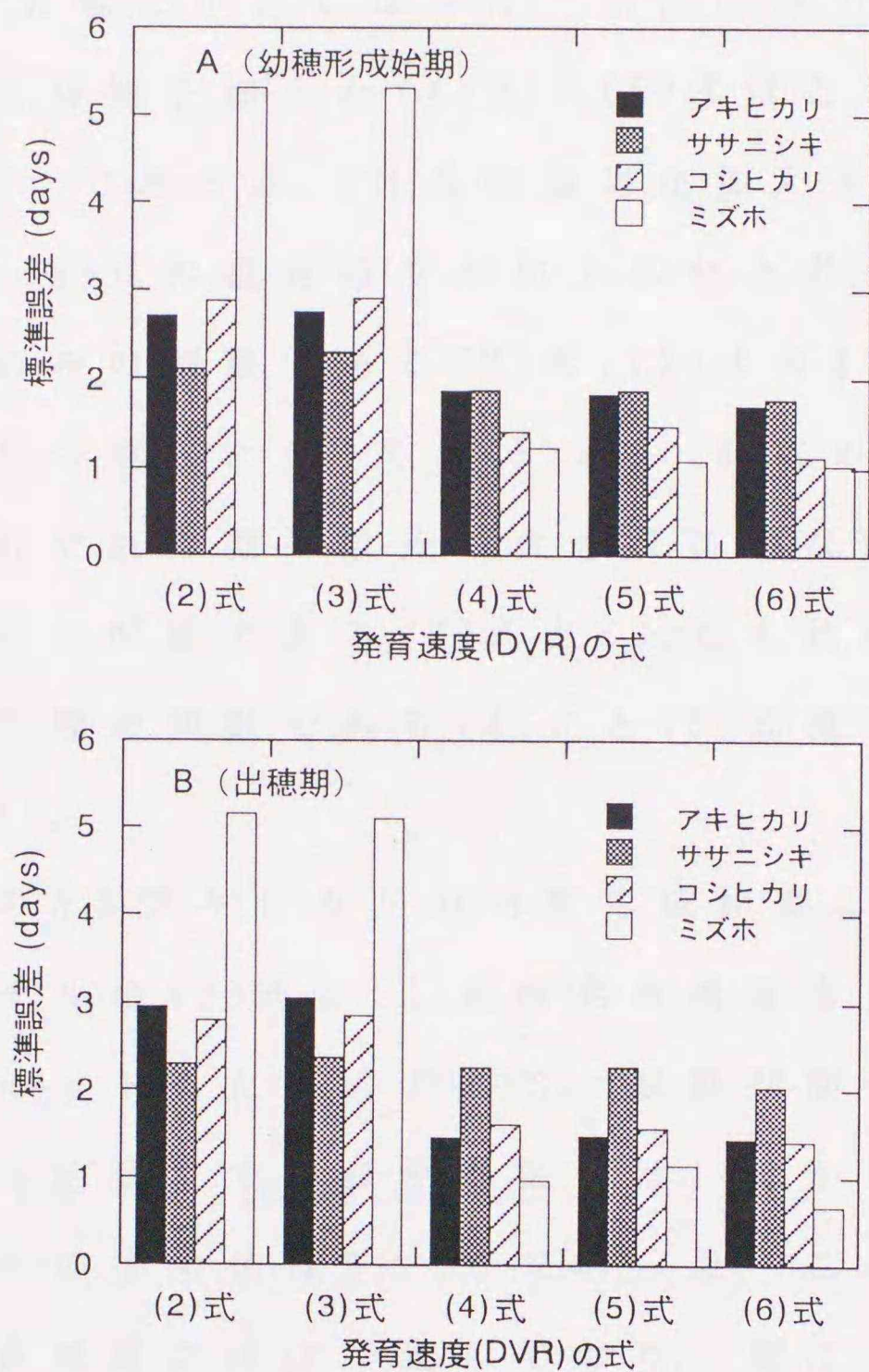


図-4 5種類の發育速度式による推定日数と実測日数の標準誤差の比較。

(Aは幼穂形成始期に發育指數が1になる發育速度の標準誤差,
Bは出穂期に發育指數が1になる發育速度の標準誤差を示す.)

A, B 両者とも, 發育速度を気温のみの関数とした(2)式及び(3)式よりも, 気温と日長時間の関数とした(4)式, (5)式, (6)式の方が標準誤差が小さくなる傾向があった。この傾向は感光性が強いと言われるミズホでとくに顕著

であった。すなわち、ミズホの幼穂形成始期に発育指数が1になるモデルの標準誤差は(2)式、(3)式で5.3日、4.8日であったが、(4)式、(5)式、(6)式で1.2日、1.1日、1.0日と大幅に小さくなった。気温のみの関数である(3)式と日長時間を加えた(4)式、(5)式はともにパラメータの数が3つであるが、日長の効果を加えることによって(4)式、(5)式の推定精度が向上したと考えられる。

気温のみの関数である(2)式、(3)式の2つの式の間、及び日長を考慮した(4)式、(5)式、(6)式の3つの式の間では、それぞれの標準誤差に大きな差がなかった。そこで気温のみの関数である(2)式と(3)式を比較し、また気温と日長時間の関数である(4)式と(5)式及び(6)式を比較した(図-5)。

図-5のAはアキヒカリの幼穂形成始期に発育指数が1になるモデルの(2)式と(3)式の発育速度を日平均気温に対してプロットしたものである。試験期間中の出芽日から幼穂形成始期までの日平均気温は14℃から29℃の範囲にあり、その平均値は21.5℃であった。この範囲では、両式の発育速度がほぼ一致しており、堀江(1984)の報告の高温域での頭打ちは現れなかった。図-5のBにはミズホの幼穂形成始期に発育指数が1になるモデルの(4)式と(5)式及び(6)式を比較した。この場合も日平均気温は14℃から29℃の範囲にあり、その平均値は22.7℃であった。気温が15℃付近の低温域と日長時間が短い場合の(4)式を除いて、各式の発育速度はほぼ同等の値を示した。またこの場合でも高温域の頭打ちは現れなかった。

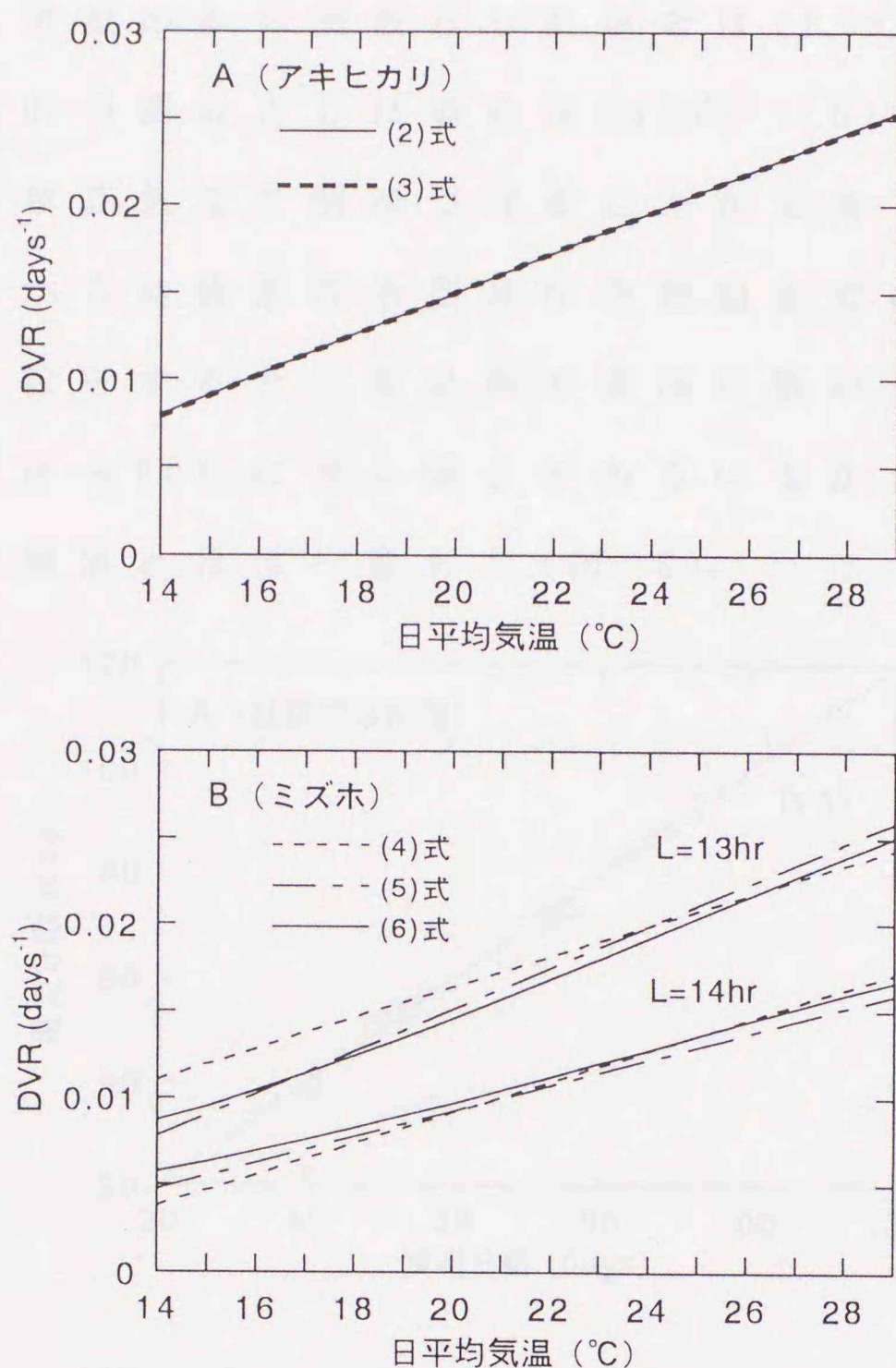


図-5 発育速度の各式の比較.

Aはアキヒカリの(2)式, (3)式. Bはミズホの(4)式, (5)式, (6)式. Lは日長時間. いずれも幼穂形成始期に発育指数が1になる発育速度を示す.

以上の結果から, 今回の作期移動試験における, 同一地点で4カ月程度の播種期の幅を持ったデータでは, 気温のみの関数で発育速度を表した(2)式と(3)式の間, 気温と日長時間の関数で発育速度を表した(4)式と(5)式及び(6)式の間では推定精度に大きな差がないといえる。パラメータの数は(2)式が2個, (3)式と(4)式及び(5)式が3個, (6)式が5個であり, パラメータの数が少ない発育速度の

式は、気温のみの関数とした場合は(2)式であり、気温と日長時間の関数とした場合は(4)式、(5)式である。従来の有効積算気温と関連づけることができる(5)式で求めた出芽日から幼穂形成始期及び出穂期までの日数と実測日数の比較をすると、各品種で実測日数の最大と最小の差が40日から60日に及ぶ開きがあるにもかかわらず、推定値は実測値とほぼ一致した(図-6)。

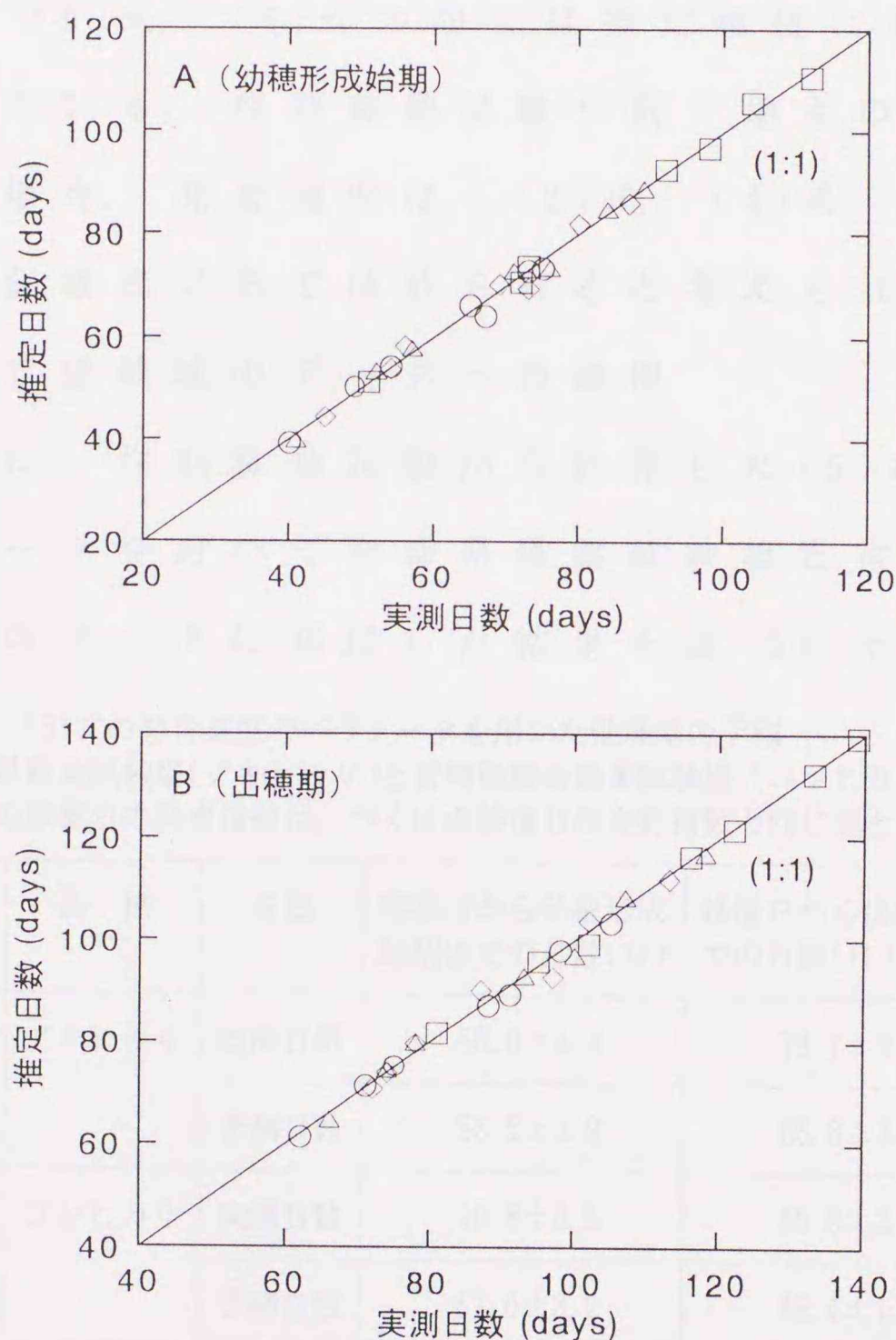


図-6 (5)式の発育速度による推定日数と実測日数の比較。
 Aは幼穂形成始期に発育指数が1になる発育速度、Bは出穂期に発育指数が1になる発育速度。○はアキヒカリ、◇はササニシキ、△はコシヒカリ、□はミズホを示す。

堀江ら(1986)は、作期移動試験にファイトトロンの試験を組み合わせて、日長感応発育ステージを含めた(6)式を提案している。このような気象要素を大きく変動させたデータを説明する場合は発育速度の関数形が複雑になると思われる。土居ら(1990)は、本試験結果を踏まえて、同一地点で4年間、1ヶ月の播種期の幅を持ったデータで発育速度を比較したところ、日長の効果は認められたが、(4)式、(5)式、(6)式の間では推定精度に差がないことを報告している。作期移動試験や同一地点の作況試験を説明する場合、発育速度は、(2)式、(4)式、(5)式のような簡単な関数式であてはめられると考えられる。

(3) 他地域のデータへの適用

初めに、作期移動試験から計算した(5)式の発育速度とパラメータを用いて青森県農業試験場と宮崎県総合農業試験場のデータに適用した結果を表-5に示す。

表-5 (5)式の発育速度のパラメータを用いた他地域の予測。

〔青森県農業試験場(アキヒカリ)と宮崎県総合農業試験場(コシヒカリ、ミズホ)のデータ。〕
各地の移植日の発育指数は、つくばの移植日の発育指数と同じ値とした。

県	品 種	日数	移植日から幼穂形成 始期までの日数(日)	移植日から出穂期ま での日数(日)
青森	アキヒカリ	実測日数	56.0±4.3	79.7±4.3
		予測日数	58.5±3.9	83.8±3.5
宮崎	コシヒカリ	実測日数	59.8±3.5	85.2±2.5
		予測日数	52.0±3.2	85.4±1.8
	ミズホ	実測日数	56.4±2.4	79.5±2.1
		予測日数	50.6±2.9	75.5±2.9

移植日から幼穂形成始期までの実測日数の平均は、青森のアキヒカリと宮崎のコシヒカリとミズホについて、それぞれ56.0日、59.8日、56.4日であり、日数のばらつきを示す標準偏差はそれぞれ4.3日、3.5日、2.4日であった。移植日から幼穂形成始期までの予測日数の平均は、青森のアキヒカリと宮崎のコシヒカリとミズホについて、それぞれ58.5日、52.0日、50.6日であり、実測日数の平均と比べると青森でやや過大、宮崎で過小に評価することが分かった。すなわち、各地の移植日の発育指数の評価が適切でなかったことが、予測値と実測値にずれが生じた原因として考えられる。移植日の苗は、つくばでは中苗であり、青森では中苗、宮崎では稚苗であった。宮崎の稚苗につくばの中苗の発育指数をあてはめた結果、予測された幼穂形成始期までの日数が実際の日数よりも短くなったと考えられる。移植日の苗が同じでない場合、同一の移植日の発育指数を使うことは適切ではないと思われる。また、日最高気温と日最低気温の平均値は毎正時の気温から求めた日平均値よりもやや高くなることが知られている（羽生，1962）。日平均気温の算出方法がつくばと各地で同一でなかったこともずれの原因の一つと考えられる。出穂期の予測についても、宮崎のコシヒカリを除き、同様な傾向がみられた。

次に、(5)式の発育速度のパラメータと各地のデータを用いて、非線形最小2乗法で移植日から幼穂形成始期、出穂期までの実測日数と推定日数の残差2乗和が最小になる移植日の発育指数を計算し、この場合の実測日数と推定

日数の標準誤差を求めた（以下、①のモデル）。また、各地のデータを用いて、移植日の発育指数を0として、非線形最小2乗法で実測日数と推定日数の残差2乗和が最小になる（2）式の発育速度のパラメータを再計算し、この場合の標準誤差を求めた（以下、②のモデル）。実測日数の標準偏差は、日数と平均日数の残差の2乗和をデータ数で割った平方根であるので、平均日数で推定した場合の誤差と考えられる。表-6に、①と②のモデルの標準誤差と実測日数の標準偏差を比較した。

表-6 ①と②のモデルによる他地域の移植日から幼穂形成始期及び出穂期までの日数の標準誤差。

青森県農業試験場（アキヒカリ）と宮崎県総合農業試験場（コシヒカリ、ミズホ）のデータ。①は（5）式のパラメータと非線形最小2乗法で移植日の発育指数を計算し、②は移植日の発育指数を0とし、非線形最小2乗法で（2）式のパラメータを再計算した。

県	品 種	標準偏差と標準誤差 （日）	幼穂形成始期 までの日数	出穂期までの 日数
青森	アキヒカリ	実測日数の標準偏差	4.3	4.3
		①のモデルの標準誤差	1.6	2.2
		②のモデルの標準誤差	1.6	2.0
宮崎	コシヒカリ	実測日数の標準偏差	3.5	2.5
		①のモデルの標準誤差	2.2	2.2
		②のモデルの標準誤差	1.7	2.2
	ミズホ	実測日数の標準偏差	2.4	2.1
		①のモデルの標準誤差	1.8	2.3
		②のモデルの標準誤差	1.6	2.1

①と②のモデルによる標準誤差は、宮崎のミズホの①のモデルの出穂期までの日数の標準誤差を除いて、いず

れも実測日数の標準偏差よりも小さな値になった。平均日数で推定するよりも、①と②のモデルで推定する方が精度が高いことが認められた。この中で、品種によりモデルの効果に違いが見られた。

移植日から出穂期までの実測日数の標準偏差に対する、①と②のモデルの標準誤差を比較すると、青森のアキヒカリについては、標準偏差は4.3日に対して、2.0日と2.2日であり、値が大幅に小さくなった。一方、宮崎のコシヒカリについては、2.5日に対して、2.2日と2.2日、ミズホについては、2.1日に対して、2.3日と2.1日であり、値がほとんど変わらなかった。アキヒカリについては、移植日から出穂期までの日数を平均日数で推定するよりも①、②の気象要素を用いたモデルで推定した方が推定精度が高くなるが、コシヒカリ、ミズホについては平均日数で推定してもモデルで推定しても推定精度があまり変わらないことが示された。

いずれの品種についてもモデルの標準誤差は2日前後の値になった。従って、もとの日数のばらつきである標準偏差が2日程度の場合、モデルによる精度の向上は期待できないと考えられる。もし、この2日前後のばらつきの原因が気象要素以外によるものであるならば、この数値が気象的発育予測の限界と考えられる。

2. 4 まとめ

茨城県つくば市の農業環境技術研究所の水田圃場で、水稻の作期移動試験を行い、その結果を用いて、幼穂形

成始期及び出穂期を予測する5種類の発育速度式のパラメータを求めた。これら関数式の相互比較を行い、幼穂形成始期、出穂期の推定精度を検討した。さらに、他地域のデータに適用し、問題点を整理した。その結果は次のように要約できる。

(1) 作期移動試験の結果、播種期が遅れるほど、幼穂形成始期までの日数及び出穂期までの日数は短くなった。積算気温も播種期が遅れるほど低くなったが、その減少率は日数の減少率に比べて小さかった。幼穂形成始期及び出穂期の推定のためには、積算気温の方が日数よりも有効であることが示された。積算気温の減少率は品種により差があり、日長に反応したことも原因の一つと考えられる。

(2) 作期移動試験の結果から、5種類の発育速度式のパラメータを求めた。発育速度は気温のみの関数とするよりも気温と日長時間の関数とする方が標準誤差が小さくなった。気温のみの関数とした(2)式と(3)式の間、気温と日長時間の関数とした(4)式と(5)式及び(6)式の間では、標準誤差に大きな差がなかった。作期移動試験や作況試験の結果を説明する発育速度は、気温のみの式は(2)式、気温と日長時間の式は(4)式、(5)式のパラメータの数の少ない簡単な式でもよくあてはまると考えられた。

(3) 作期移動試験から求めた(5)式の発育速度とパラメータで青森のアキヒカリと宮崎のコシヒカリとミズホの幼穂形成始期と出穂期を予測した。ただし、育苗期間の気温が測定されていないので、つくばの移植日の発育

指数をそのまま青森、宮崎の移植日の発育指数として計算した。予測日数と実測日数を比較すると、宮崎で過小に評価された。つくばの移植日の苗は中苗、宮崎では稚苗であったことが原因と考えられる。移植日の苗が同一でない場合、移植日の発育指数を同じとして計算することは適切ではないことが明らかとなった。気象要素を用いた①と②のモデルによる出穂期の推定は、青森のアキヒカリでは精度の向上がみられたが、宮崎のコシヒカリ、ミズホでは精度の向上があまりみられなかった。モデルの標準誤差は、いずれの品種も2日前後であり、この値が気象的予測の限界と考えられた。

第3章 穂の伸長による水稻の出穂期の推定モデル

3. 1 はじめに

第2章では、気象要素を変数とした発育速度の積算値である発育指数を用いて、水稻の幼穂形成始期及び出穂期を推定した。この場合、幼穂形成始期は穂の長さが測定可能な約1mmを基準としたが、穂の伸長を表すモデルで穂の長さが1mmになる幼穂形成始期を推定することは難しい。しかし、1mmに達した以後の穂の長さの測定は容易であり、モデルで穂の伸長の過程を直接表現し、出穂期を推定することは可能であると思われる。

幼穂形成始期と出穂期の期間における穂の長さを推定することは、冷害などの被害軽減のための計画的な水管理や栽培管理を行うためにも有効である。穂の発育段階は、一般に出穂前日数で表わされ、通常的气象条件下ではある程度信頼できるが、高温年、低温年で変動することが知られている（松島，1957）。したがって、気象の経過から穂の伸長を表すモデルは、穂の発育段階の推定のためにも有効であると考えられる。発育指数と穂の発育段階を対応させて、気象の経過から穂の発育段階を推定する試みもある（中川・堀江，1987）。

ここでは、作期移動試験を行い、止葉の葉鞘の長さ、穂の長さ、穂首節間の長さを測定した。この結果に基づき、幼穂形成始期からこれらの伸長過程をモデルで表現し、出穂期の推定結果を検討した。

3. 2 試験方法

茨城県つくば市の農業環境技術研究所の水田圃場において、水稻の作期移動試験を1986年に3組、1987年に4組行った。なお、1986年の試験は第2章に記述した試験と同時に行った。供試品種は、1986年はハツコガネ、1987年はコシヒカリ、日本晴を用いた。育苗はグロースチャンバー内で行った。なお、栽培方法は第2章に記述した方法（12-14ページ参照）と同様である。水田の地上約1mの高さで通風式白金抵抗温度計を設置して気温を測定し、毎正時の値を平均して日平均気温とした。

幼穂形成期前後から、3～4日おきにハツコガネについては1株、コシヒカリ、日本晴については3株をサンプリングし、主稈を3本抜取り、止葉の葉鞘の長さ、穂の長さ、穂首節間の長さを測定し、その平均値を求めた。幼穂形成始期は、穂の長さを直線補間して1mmになる日とした。出穂期は、4株の茎数を数え、そのうち40～50%の穂が止葉の葉鞘の先端から抽出した日とした。

幼穂形成始期から出穂期までの止葉の葉鞘、穂、穂首節間の伸長過程の模式図を図-7に示す。

出穂は、止葉の葉鞘の先端から穂が抽出することなので、出穂期は止葉の葉鞘の長さよりも穂と穂首節間との長さの和が大きくなった日である。しかし、単純なモデルで出穂を表すために、ここでのモデルの出穂期は、止葉の葉鞘の長さよりも穂首節間の長さの方が大きくなった日とした。

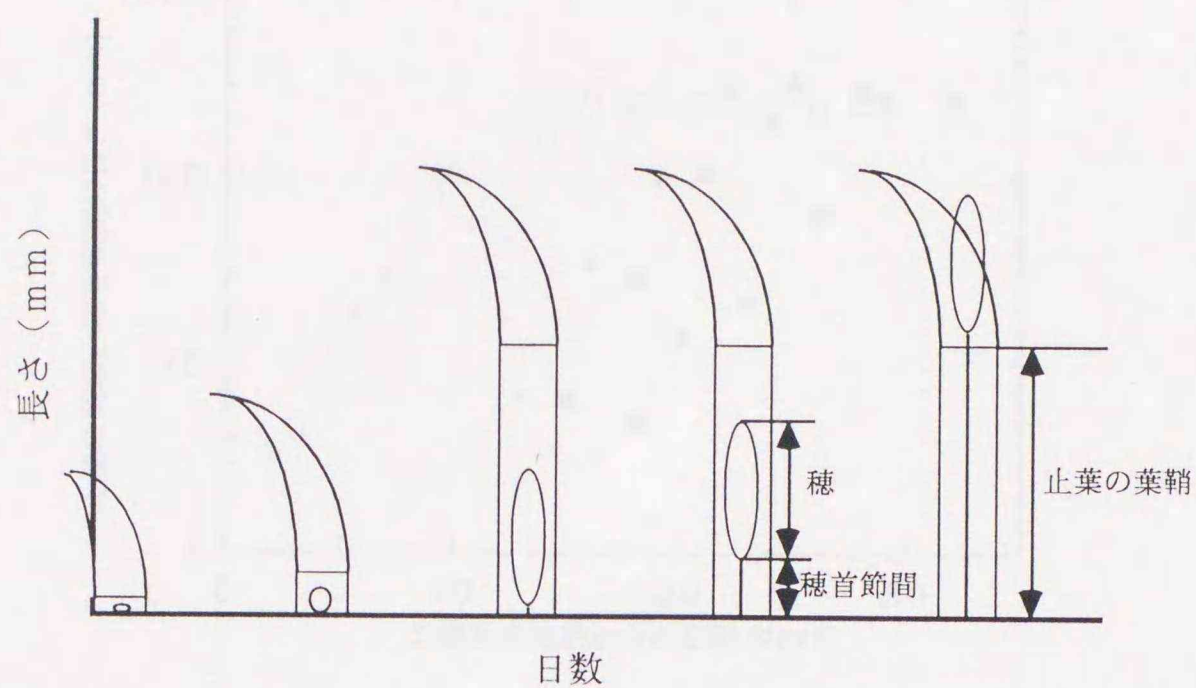


図-7 幼穂形成始期から出穂までの止葉の葉鞘、穂、穂首節間の伸長の模式図。

3. 3 結果及び考察

(1) 試験結果

播種日と移植日及び幼穂形成始期と出穂期の試験結果を表-7に示す。また、ハツコガネの幼穂形成始期からの止葉の葉鞘と穂首節間の長さの対数値を図-8に示す。

表-7 作期移動試験の播種日、移植日、幼穂形成始期、出穂期。

年	1986			1987							
品 種	ハツコガネ			コシヒカリ				日本晴			
播 種 日	4/ 9	5/ 6	6/15	3/10	4/ 6	5/ 8	6/ 9	3/10	4/ 6	5/ 8	6/ 9
移 植 日	5/12	6/ 9	7/ 8	4/13	5/11	6/15	7/13	4/13	5/11	6/15	7/13
幼穂形成始期	6/19	7/ 6	7/29	6/22	7/ 7	7/27	8/13	7/ 6	7/13	8/ 4	8/15
出 穂 期	7/17	7/29	8/20	7/21	8/ 3	8/21	9/ 3	8/ 3	8/ 9	8/27	9/ 7

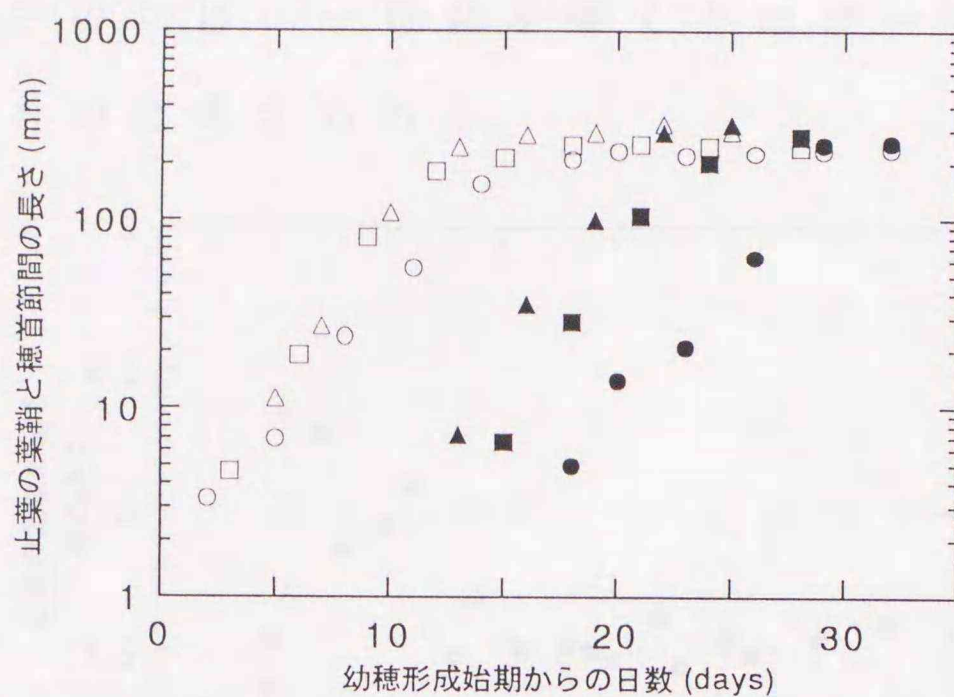


図-8 止葉の葉鞘と穂首節間の長さの対数値の経日変化

〔品種はハツコガネ。○, □, △は、それぞれ5月, 6月, 7月に移植した止葉の
葉鞘長, ●, ■, ▲は、それぞれ5月, 6月, 7月に移植した穂首節間の長さ。〕

図-8によると止葉の葉鞘長は播種期に関係なく幼穂形成始期から約15日頃までは日数の経過とともに長くなり、その後一定になる。一方、穂首節間長も日数の経過とともに長くなりその後一定になるが、移植日が遅い区ほど穂首節間長が一定になる時期が早く、直線的に増加する部分の傾きが大きい傾向がみられた。幼穂形成始期から出穂期までの平均気温は、移植日が5月12日、6月9日、7月8日の順にそれぞれ21.0℃、23.3℃、26.0℃で、移植時期が遅れるとともにその期間の平均気温が高くなった。このことから、穂首節間の長さの対数値が増加する部分では、それらの伸長速度は気温が高い程大きいと考えられる。

穂の長さに対する止葉の葉鞘の長さの比を図-9に示す。幼穂形成始期から5～10日後では若干大きくなるものの、ほぼ1.5の一定の値を示した。このことは、穂と止葉の葉

鞘の長さの比は、一時期を除くとほぼ一定の値で経過しているものと考えられる。

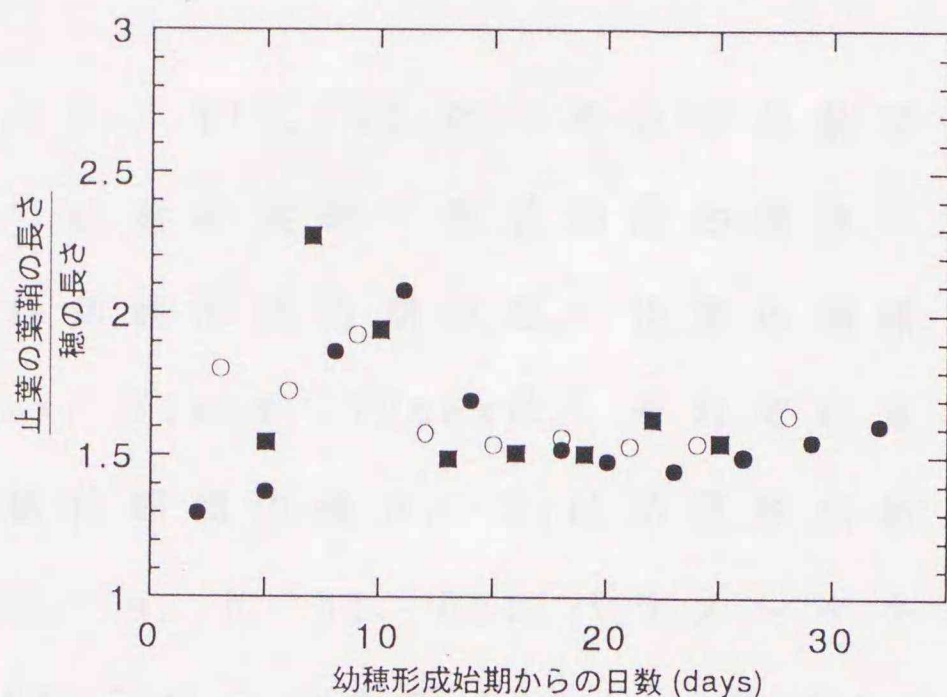


図-9 穂の長さに対する止葉の葉鞘の長さの比
(品種はハツコガネ, ●, ○, ■は, それぞれ5月, 6月, 7月に移植した比を示す.)

(2) モデル式の構築

止葉の葉鞘, 穂, 穂首節間の長さの測定から, これらの伸長過程を次のように表した。

① 最大長になるまえの止葉の葉鞘, 穂, 穂首節間の長さの対数値の伸長速度は, 気温の一次式で表し, 同一の式とした ② 最大長になるまえの穂に対する止葉の葉鞘の長さの比, 穂に対する穂首節間の長さの比は一定とした。

上の2つのことは次式で表せる。

$$\log Y_t = \sum_{i=1}^t a \cdot (T_i - b) + \log Y_0 \quad (1 \leq Y_t \leq Y_{\max}) \quad (9)$$

$$\log Y1_t = \sum_{i=1}^t a \cdot (T_i - b) + \log Y1_0 \quad (1 \leq Y1_t \leq Y1_{\max}) \quad (10)$$

$$\log Y2_t = \sum_{i=1}^t a \cdot (T_i - b) + \log Y2_0 \quad (1 \leq Y2_t \leq Y2_{\max}) \quad (11)$$

$$h1 = \log(Y1_t / Y_t) = \log Y1_t - \log Y_t \quad (12)$$

$$h2 = \log(Y_t / Y2_t) = \log Y_t - \log Y2_t \quad (13)$$

ここで、 Y_t 、 $Y1_t$ 、 $Y2_t$ は、それぞれ幼穂形成始期から t 日目の穂、止葉の葉鞘、穂首節間の長さ、 Y_0 、 $Y1_0$ 、 $Y2_0$ は、それぞれ幼穂形成始期の穂、止葉の葉鞘、穂首節間の長さ、 Y_{max} 、 $Y1_{max}$ 、 $Y2_{max}$ は、それぞれ最大の穂、止葉の葉鞘、穂首節間の長さ、 T_i は幼穂形成始期から i 日目の日平均気温、 a 、 b 、 $h1$ 、 $h2$ はパラメータを表す。

図-10にこれらの仮定を表したモデルを模式的に示した。

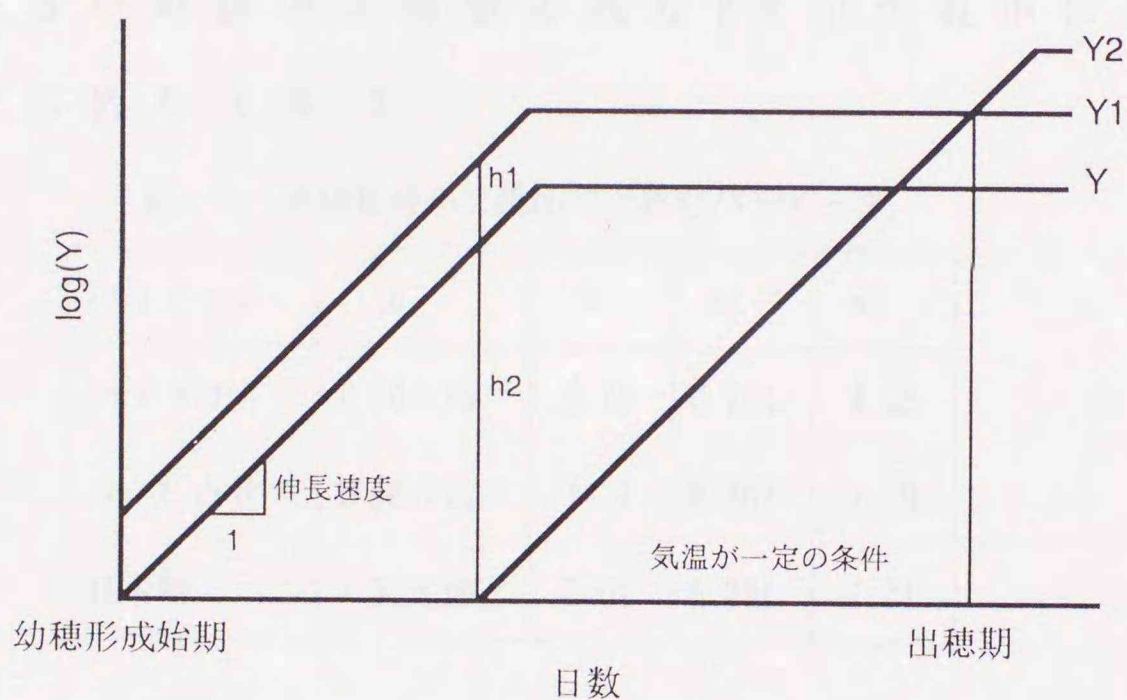


図-10 (9), (10), (11), (12), (13)式で表した伸長モデルの模式図。

前述の①について、移植時期の遅れとともに、穂首節間の長さの対数値の伸長速度の増加が認められたが、止葉の葉鞘については、このような傾向は明確ではなかった。しかし、単純なモデルでこれらの伸長を表すために、気温については同じ一次式で、止葉の葉鞘、穂、穂首節間の伸長速度を表した。また、伸長に長さの対数値を用

いたが、このような例として、葉長の対数値を用いた連続な数値で葉齢を表すことがある(Ralph, 1957)。②の中で、実際には5mm以下の穂首節間の長さを測定できず、直接、穂に対する穂首節間の長さの比を求めることができなかった。しかし、モデルで穂と穂首節間の長さの関係を表すために、この比が一定であると仮定した。

非線形最小2乗法である準ニュートン法でパラメータ a , b , h_1 , h_2 の値を求めた。準ニュートン法のサブルーチンの部分に、(9)式～(13)式を入れ、増加する部分の止葉の葉鞘、穂、穂首節間の長さの対数の推定値と、それらの長さの対数の実測値の残差2乗和が最小になるパラメータを求めた(表-8)。

表-8 非線形最小2乗法で求めたパラメータ.

パラメータ	a	b	h_1	h_2
ハツコガネ	1.16×10^{-2}	9.16	0.244	1.58
コシヒカリ	1.46×10^{-2}	14.7	0.267	1.70
日本晴	7.50×10^{-3}	5.07	0.291	1.71

止葉の葉鞘、穂首節間の長さの対数値の推定値と実測値との比較を図-11に示す。モデルは、移植時期の遅れとともに気温が高くなるので、止葉の葉鞘の伸長速度が大きくなること、穂首節間の長さが5～10mmの時期が早くなること、穂首節間の伸長速度が大きくなること、この結果、出穂期が早くなることを表している。このモデルは、作期の遅れに対する長さの経時変化をよく表し、かつ出穂期が早まる現象を表すことができたといえる。

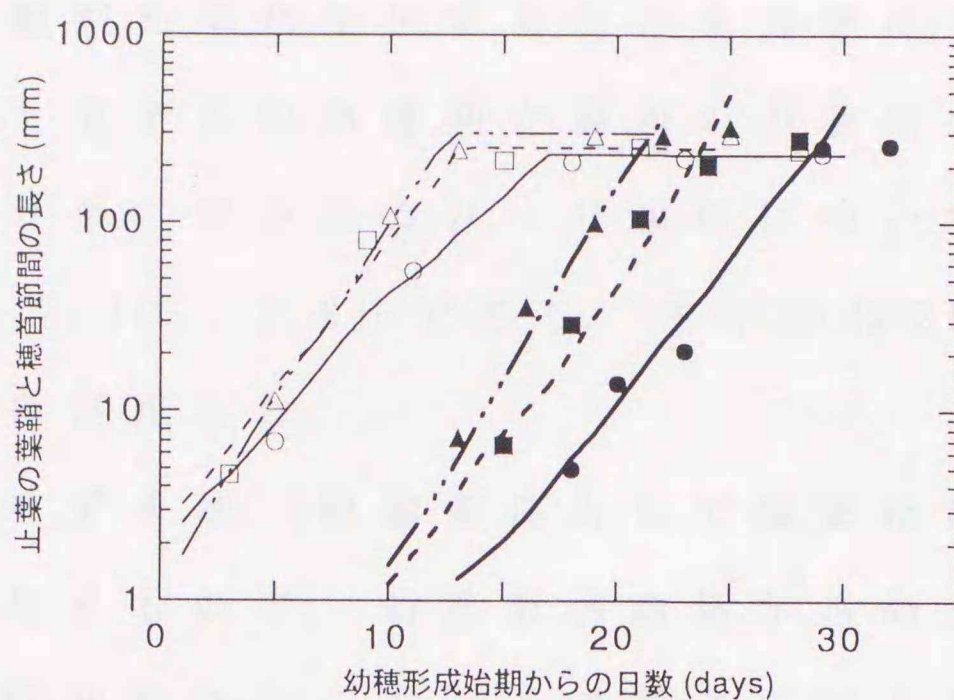


図-11 モデルの止葉の葉鞘と穂首節間の長さの対数値の経日変化
 品種はハツコガネで、(——), (-----), (— · — · —)は、それぞれ5月、
 6月、7月に移植したモデルの止葉の葉鞘長の対数値、(——), (-----),
 (— · — · —)は、それぞれ5月、6月、7月に移植したモデルの穂首節間長の対数
 値を示す。印は図-8と同じ。

次に、幼穂形成始期の穂の長さ(1mm)を初期条件とし、求めたパラメータからモデルの出穂期を推定し、圃場で調査した出穂期と比較した(表-9)。

表-9 モデルの出穂期と圃場の出穂期の比較。
 (出穂期は幼穂形成始期から出穂期までの日数を示す。)

品 種	ハツコガネ			コシヒカリ				日本晴			
移 植 日	5/12	6/9	7/8	4/13	5/11	6/15	7/13	4/13	5/11	6/15	7/13
圃場の出穂期	28	23	22	29	27	25	21	28	27	23	23
モデルの出穂期	28.5	23.7	21.5	30.9	24.1	25.2	23.1	27.5	25.6	25.3	24.7

モデルの出穂期から圃場の出穂期を引いた差の平均値は、ハツコガネ、コシヒカリ、日本晴について、それぞれ0.2日、0.3日、0.5日であり、モデルの出穂期は圃場の出穂期より遅れる傾向にあった。これは、出穂期は穂の先端が抽出することを基準にするのに対し、モデルの出

穂期は穂が完全に抽出することを基準にしたためと考えられる。モデルの出穂期と圃場の出穂期の標準誤差は、ハツコガネ、コシヒカリ、日本晴についてそれぞれ、0.6日、2.0日、1.6日であり、モデルは2日以内で圃場の出穂期を推定した。

このモデルは、初期条件として穂または止葉の葉鞘の長さを与えるので、幼穂形成始期からの計算だけでなく、幼穂形成期前後からも、その長さを与えれば計算できるという長所がある。問題点としては、最大の止葉の葉鞘の長さを与えなければならない点がある。ハツコガネの最大の止葉の葉鞘の長さは、5月、6月、7月の移植日に、それぞれ240mm、250mm、300mmであり、その長さの対数値は、それぞれ2.38、2.40、2.48である。5月と7月の長さの増加率は25%であるが、長さの対数値の増加率は4%だけであり、長さの変動よりも長さの対数値の変動の方が小さい。このモデルは長さの対数値を用いるので、最大の止葉の葉鞘の長さに一定の値を与えることも考えられる。

3. 4 ま と め

作期移動試験から、水稻の止葉の葉鞘、穂、穂首節間の長さを測定し、幼穂形成始期からモデルでこれらの伸長過程を表しながら出穂期を推定した。

(1) このモデルは、止葉の葉鞘、穂、穂首節間の長さの対数値の伸長速度を気温の一次式で同じ式として表し、穂と葉鞘の長さの比、穂と穂首節間の長さの比を一定としたモデルである。非線形最小2乗法でモデルのパ

ラメータを求めた。モデルは、実測の長さの対数値の経時変化をよく再現した。

(2) このモデルで出穂期を推定し、圃場で調査した出穂期と比較した。モデルの出穂期は圃場の出穂期より遅れる傾向があった。これは、圃場の出穂期は穂の先端が抽出すること、モデルの出穂期は穂が完全に抽出することを基準とするためと考えられた。モデルは圃場の出穂期を標準誤差2日以内で推定した。

第4章 日長及び水温を考慮した水稻の出穂期の推定モデル

4. 1 はじめに

気象要素を用いた作物の出穂及び開花の予測は、通常の栽培条件下では気温のみが使用される場合が多い（例えば、羽生・内島，1964）。しかし、いくつかの作物は日長にも反応するため気温だけで予測することは難しく、日長の影響を考慮する必要がある。また、多くの日長反応性に関する実験は、日長時間を一定にした条件下で行われてきた（例えば、栗山，1965，Kiniry et al.，1983，Board and Hall，1984，Major et al.，1990）。しかし、自然の日長時間は1年周期で増加と減少を繰り返す連続的な変化をしている。このため、日長の影響を考慮した作物の出穂及び開花予測モデルを組み立てるためには、1年周期で変化する自然日長下で実験を行い解析することが必要である。

自然日長下で行われた実験には、異なる緯度で作期を変えて水稻を栽培した試験（鳥山ら，1985）や、カンボジアで半月ごとに1年間、感光性の高い水稻を播種した試験（佐藤，1960）などがある。これらの実験はいずれも屋外で行われているため、日長の影響以外に気温の影響が含まれている。気温の影響を除くためには、気温を一定に制御した人工気象室内で実験することが必要である。

ここでは、気温を一定に制御したガラス温室内の自然日長下で2週間毎に1年間、6品種の水稻を播種し、出穂を

調査した。この結果に基づき、定温・自然日長下における出穂予測モデルを構築した。さらに、このモデルを簡略化した簡易式で出穂期を推定した。

4. 2 試験方法

(1) 実験方法

一定の気温に制御したガラス温室内で、1988年1月22日から12月9日まで2週間毎に24回、6品種の水稻を播種し、出穂日を調査した。

供試品種はアキヒカリ、ササニシキ、コシヒカリ、日本晴、ミズホとインド稲のCo26である。種子の塩水選と消毒を行い、その後、種子を浸水し催芽させた。育苗箱に催芽した種子を播種し、約30℃に保った出芽器に入れたところ、約3日後に出芽したため、この日を出芽日とした。その後、出芽器からガラス温室内に育苗箱を移動し、約1週間後に直径18cm、高さ17cmのプラスチック製のポットに苗を移植した。このポットには土を詰め、基肥として13-13-13化成肥料を3g/1ポット加え、その後、苗の生育にともない適宜追肥した。1回の試験で、1品種当たり2ポット、1ポット当たり3本植えとし、6品種全部で12ポットに苗を移植した。ガラス温室に設置した2組の水槽内にポットを置いて、ポットに水を供給した。この水槽は縦約2.5m、横約1.5m、高さ約25cmのベニヤ板で作製した箱で、この中にビニールシートを敷いたものである。

試験期間を通して大型の冷暖房器で、ガラス温室内の気温を約25℃の一定値に制御した。気温は温室内の中央

部の地上約1mに通風式白金抵抗温度計を設置し、水温は水槽内に白金抵抗温度計を入れて測定した。一日の平均気温、平均水温は毎正時の値を平均して求めた。理科年表の太陽の赤緯と農業環境技術研究所の緯度(36.0°N)から日長時間を(8)式で計算した。写真1にガラス温室の実験施設及び実験状況を示す。なお、出穂日は、有効茎数の40～50%が出穂した日とした。

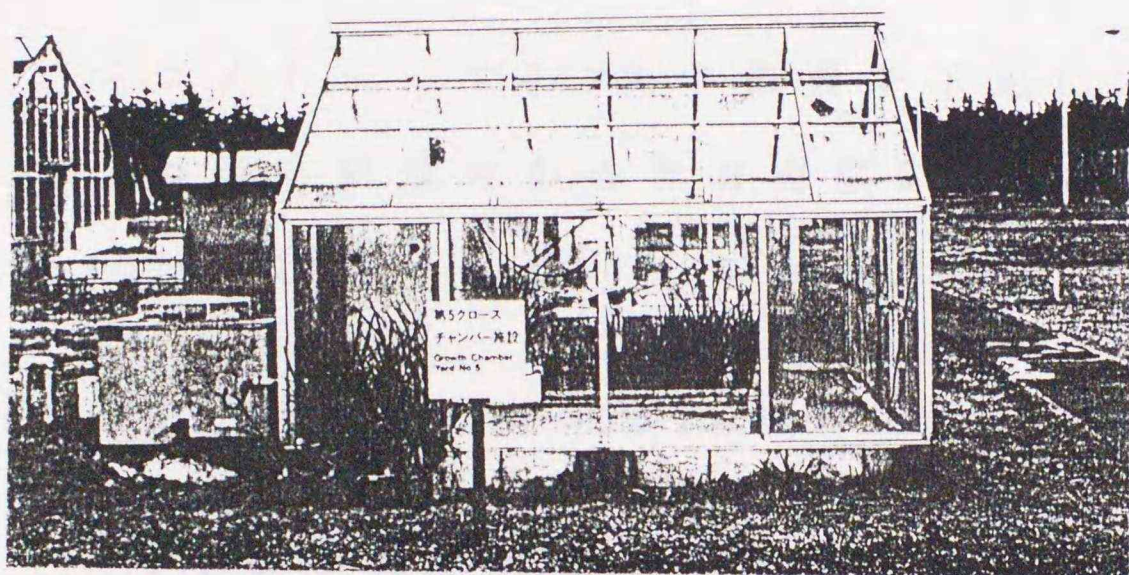


写真1 冷暖房器で一定の気温に制御したガラス温室とその実験状況

(2) モデルの構築

定温・自然日長下で1年間播種した試験結果に基づいて、出穂予測モデルを4.3(2)で構築した。ノンパラメトリックDVR法(竹澤ら, 1989, Takezawa and Tamura, 1991, 田村ら, 1989)を用いて、モデルの中で仮定した日長時間の関数を求めた。次にモデルの出穂までの日数と実測日数を比較した。さらに、このモデルを簡略化した出穂予測の式を検討した。

第2章では発育速度(DVR)に多項式や非線形式などの関数式を仮定した。しかし、どのような関数式を選択すべきかについての基準がない。ノンパラメトリックDVR法は、多項式などのパラメトリックな関数式を仮定しないで、データを平滑化する手法により発育速度(DVR)の関数を得る方法である(竹澤ら, 1989)。この方法で発育速度(DVR)の関数の形を得ることができる。ノンパラメトリックDVR法の発育速度(DVR)の関数を、4.3.(2)のモデルの中の日長時間の関数に置き換えて、日長時間の関数の形を求めた。

ノンパラメトリックDVR法の概要を下記に示す。この方法では、温度の関数である発育速度DVR(T)は各温度に対する表(DVR_i, i=1...m)で与えられる。

$$DVR(T_j) = DVR_i \quad (T_0 + (i-1)\Delta T \leq T_j < T_0 + i\Delta T) \quad (14)$$

ここで、mは温度の刻み数、T_jはj日目の温度、T₀は温度の最小値よりも小さな値、ΔTは温度の刻み幅である。

DVR_i (i=1...m)は、次式を最小化して求める。

$$F = \sum_{k=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^h DVR(T_j) - 1 \right\}^2 + \lambda \sum_{i=1}^{m-2} (DVR_i - 2DVR_{i+1} + DVR_{i+2})^2 \quad (15)$$

ここで、nはデータ数、hは出穂日を示す。右辺の第1項は出穂日までの発育速度の積算値が1になること、すなわちモデルのあてはまりの良さを要求し、第2項は、DVR(T)が滑らかな関数であることを要求する。λはスムージングパラメータと呼ばれ、この2つの項の重み付けを決める。

(15)式のFを最小にするためには、各DVR_i (i=1...m)でFを

微分した式が0でなければならない。これらの式は各 DVR_i についての線形の式なので、 m 次元の連立一次方程式になり、これを解けば $DVR_i (i=1 \dots m)$ が求められる。

重み付けのスミージングパラメータ λ の決め方は、次の予測誤差 (E) が最も小さくなる λ を採用する。 n 組全部のデータから、ひと組のデータを除いて、残りの $(n-1)$ 組のデータを用いて(15)式を最小にする $DVR_i (i=1 \dots m)$ を求める。この結果を用いて、除いたひと組の出穂日を予測し、実測日との差をとる。この操作を n 組全体で行い、次式の予測誤差を求める。

$$E = \left[\frac{\sum_{k=1}^n (D_k^* - D_k)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

ここで、 D_k は k 組目の実測の出穂日、 D_k^* は k 組目を除いて求めた $DVR_i (i=1 \dots m)$ によって予測した k 組目の出穂日である。予測誤差が最小になる λ を選択し、この時の $DVR_i (i=1 \dots m)$ を計算した。

4. 3 結果及び考察

(1) 定温・自然日長下における出穂特性

試験期間中のガラス温室内の日平均気温と水槽内の日平均水温の推移を図-12の(A)に、1年間の日長時間の推移を図-12の(B)に示した。気温の平均値は 24.4°C であり、ほぼ一定に制御できた。一方、水温の平均値は 20.3°C であり、気温よりも低く推移し、特に11月から4月にかけて低下する傾向が見られ 20°C を下回ることもあった。この

水温の低下を調べるために、図-13の(A)に気温と日長時間の関係、図-13の(B)に水温と日長時間の関係を示した。気温は日長時間に対しほぼ一定の値を示したが、水温は日長時間が短くなると低下する傾向が見られた。この傾向から冬期の水温は夏期の値よりも低下することが示された。

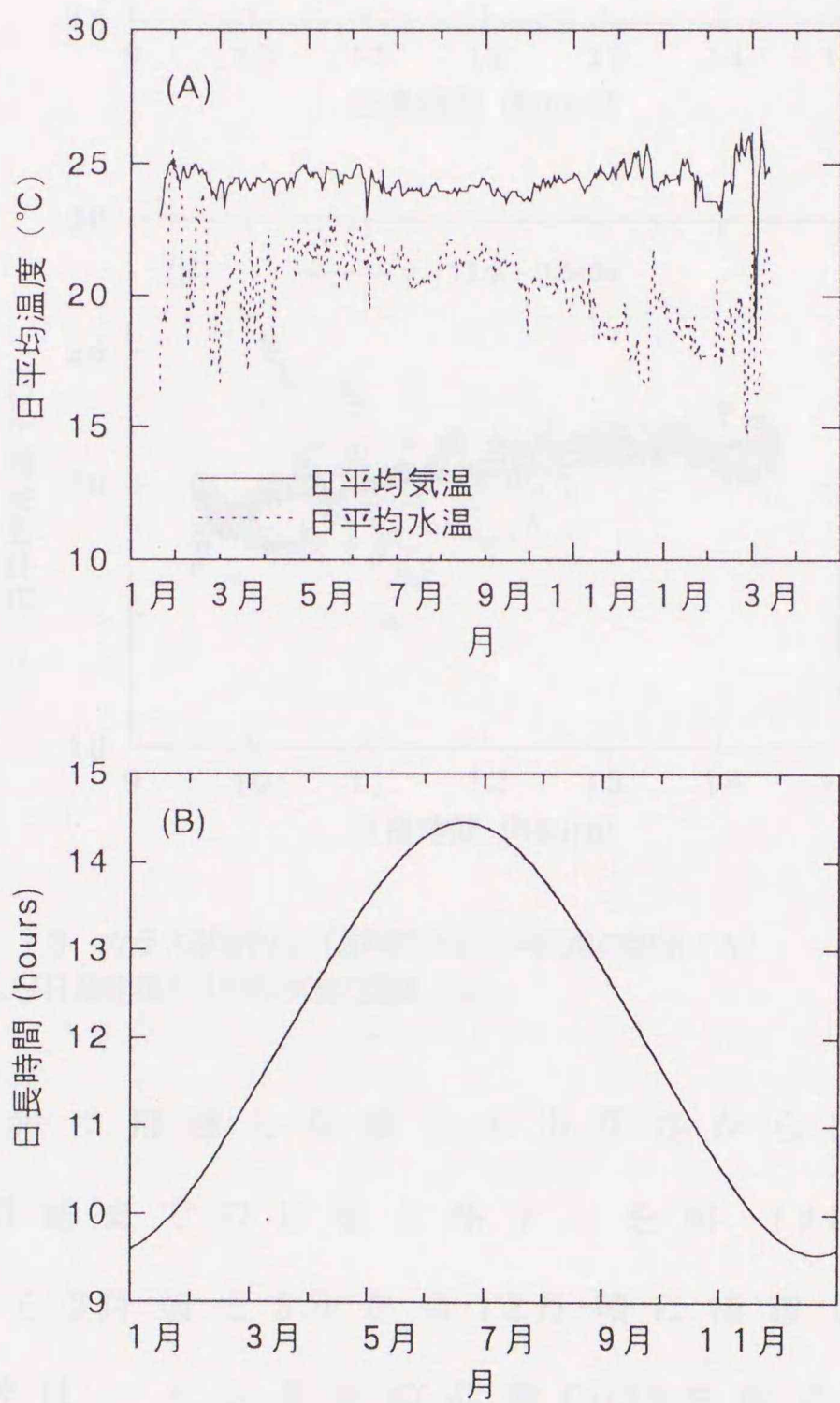


図-12 ガラス温室内の日平均気温と日平均水温の変化(A), および日長時間の1年間の変化(B). (36.0° N).

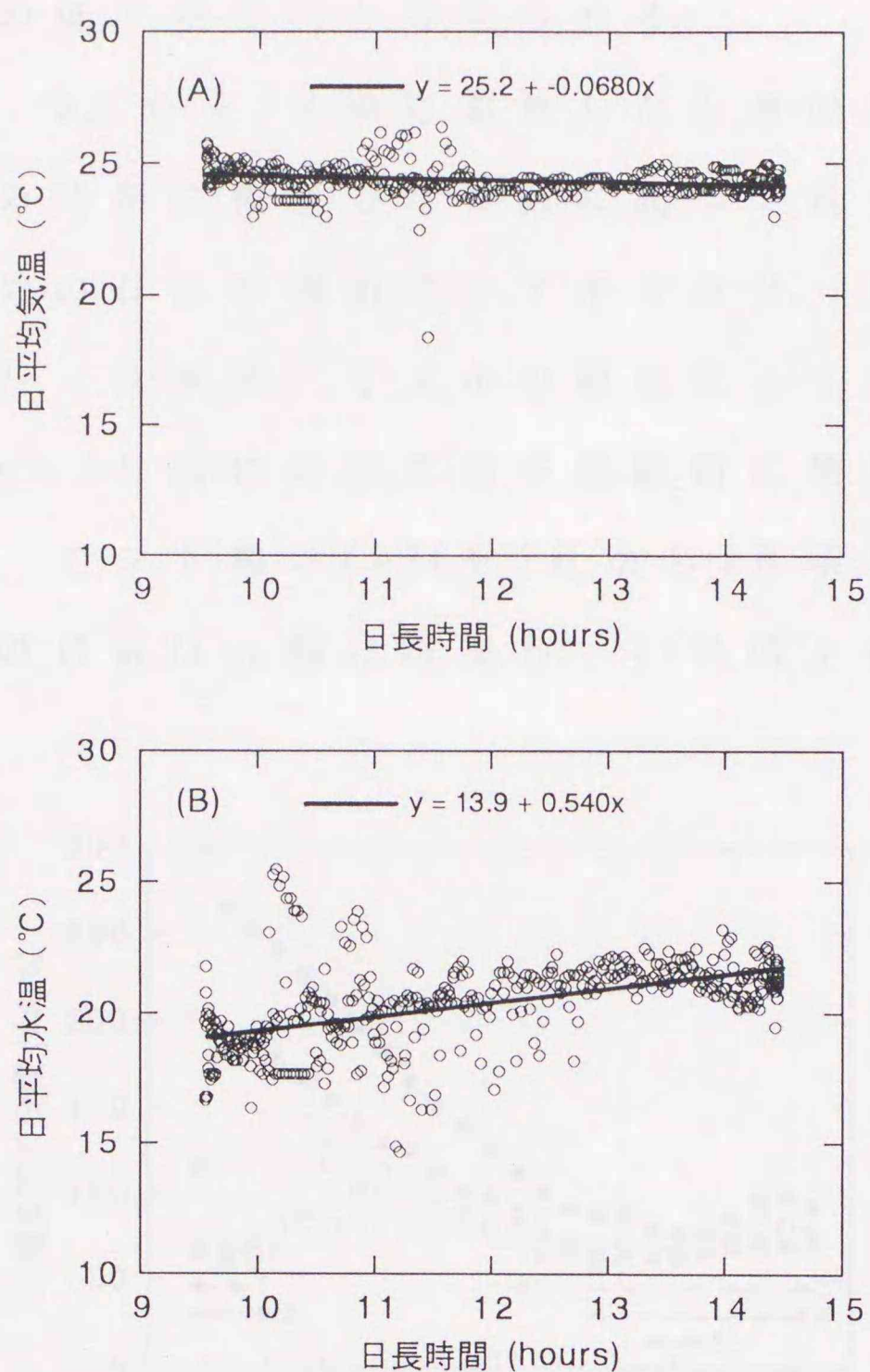


図-13 ガラス温室内の日長時間と日平均気温の関係(A), および日長時間と日平均水温の関係(B).

2週間毎に播種した場合の出芽日から出穂日までの日数(以下出穂までの日数と略す)を図-14に示した。

1月から2月頃と8月から12月頃に播種したときの出穂までの日数は、インド稲の品種Co26を除く5品種すべてについて、ほぼ一定であった。また、日数の品種間差異もきわめて小さかった。しかし、この期間の中で、11月から12月頃に播種した場合の出穂までの日数は、他の月に播種した日数に比べてやや長くなった。おそらく、冬期間

の水溫の低下が原因と考えられる。

一方、3月から7月頃に播種したときの出穂までの日数は、他の時期に播種した日数に比べて長くなった。この出穂までの日数の増加は、アキヒカリ、ササニシキ、コシヒカリ、日本晴、ミズホの順に従って大きくなり、また2月から3月頃にかけては不連続的に増加する特徴がみられた。インド稲のCo26を2月から8月頃に播種すると出穂までの日数は大幅に増加し、11月上旬に一齐に出穂した。

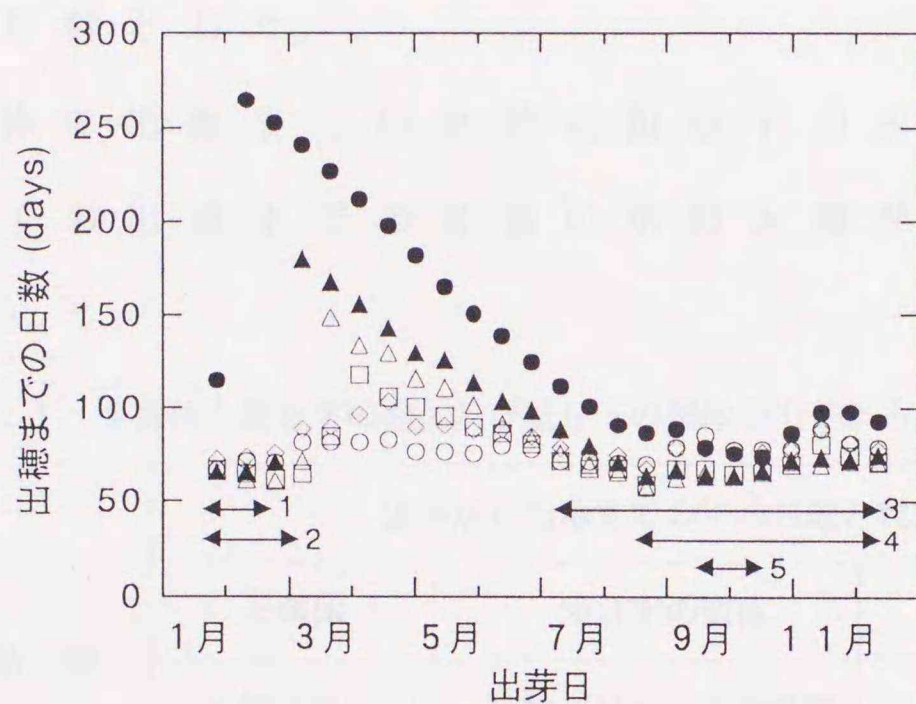


図-14 2週間毎に播種した場合の出芽日から出穂日までの日数

○はアキヒカリ、◇はササニシキ、□はコシヒカリ、△は日本晴、▲はミズホ、●はCo26を示す。アキヒカリは1と3、ササニシキとミズホは1と4、コシヒカリと日本晴は2と4、Co26は5の矢印の区間を短日下の出穂までの日数とした。

インド稲を除く5品種は、1月から2月頃と8月から12月頃に播種した出穂までの日数はほぼ一定であり、また、この時期に播種したときの生育期間の日長時間は、他の時期に播種したときの日長時間よりも相対的に短日であることから、本報ではこの時期に播種した水稻の出穂までの日数を短日下の出穂までの日数と呼ぶことにした。

1月から12月まで24回播種した試験区を1月から順にそれぞれ1組, 2組...24組とここでは名付けた。24組の全個体の中でアキヒカリでは1~3組と13~24組(図-14の矢印区間1と3), ササニシキ, ミズホでは1~3組と16~24組(矢印区間1と4), コシヒカリ, 日本晴では1~4組, 16~24組(矢印区間2と4), Co26では18~20組(矢印区間5)の出穂までの日数を短日下における出穂までの日数とした。一方, 24組の全個体の中で短日下の個体を除いた, 残りの個体の出穂までの日数を長日下における出穂までの日数とした。

全個体の出穂までの日数と短日下の出穂までの日数及び長日下の出穂までの日数の平均と標準偏差を比較した(表-11)。

表-11 全個体と短日下の個体及び長日下の個体の出芽から出穂までの平均日数の比較

品 種	出芽から出穂までの平均日数と標準偏差				
	全個体	短日下の個体		長日下の個体	
	日数(日)	日数(日)	個体数	日数(日)	個体数
アキヒカリ	78 ± 5	76 ± 6	15	80 ± 2	9
ササニシキ	83 ± 8	77 ± 5	12	88 ± 8	12
コシヒカリ	77 ± 15	68 ± 6	13	88 ± 15	11
日本晴	83 ± 26	66 ± 5	13	103 ± 27	11
ミズホ	95 ± 36	69 ± 4	12	122 ± 34	12
Co26	140 ± 61	76 ± 2	3	162 ± 59	21

短日下の出穂までの平均日数は, アキヒカリ, ササニシキでほぼ同じ, コシヒカリと日本晴とミズホがほぼ同じ

であった。短日下の出穂までの日数の標準偏差はいずれも6日以内であった。これを24組の全個体の標準偏差と比較すると、アキヒカリ、ササニシキ以外の品種は、短日下の日数の標準偏差が著しく小さく、短日下では出穂までの日数は各品種ともほぼ一定であることが示された。アキヒカリとササニシキで全個体と短日下の標準偏差にほとんど差がみられなかったのは、これらの品種では日長感応性が低いためと考えられる。

一方、長日下の出穂までの平均日数は、短日下の出穂までの平均日数に比べて長く、アキヒカリ、ササニシキ、コシヒカリ、日本晴、ミズホ、Co26の順になるに従って長くなっている。これは、日長感性の品種間差異を反映しているものと考えられる。

(2) 出穂予測モデルの構築

前節で短日下の出穂までの日数はほぼ一定であった。しかし、長日下の出穂までの日数は短日下の出穂までの日数に比較して長く、この日数の増加が品種の特性を示すと考えられる。そこで次のようなモデル化を行った。

(a) モデル (I)

モデルには次の仮定を設けた。

- ① 短日下の出穂までの平均日数をNとし基本的な量とする。
- ② 長日のために出穂までの日数が増加したとすると、この増加した日数は日長時間の関数を積算した値で表すことができるとする。
- ③ 積算する範囲は日長に反応し始める日から出穂日までとする。

①, ②, ③を仮定した理由をまとめると, ①は短日下
の出穂までの日数がほぼ一定であることに基づいている。
②は, もしこのことを仮定すると, 発育速度を積算した
形に変換することができる。そのため, 従来の発育速度
と比較することができる。③は水稻が日長に感応しない
期間があることに基づいている(三本ら, 1989)。

まず, ①の仮定では, 短日下の出穂までの日数は次式
で表すことができる。

$$\sum_{i=e+1}^h 1 = N \quad (17)$$

ここで, e は出芽日, h は出穂日を示し, (17)式の左辺は,
(出芽日+1)日目から1日単位を出穂日まで積算した値,
すなわち出芽日から出穂日までの日数を示し, N は表-11
の短日下の出穂までの平均日数である。

②, ③の仮定では, 出穂までの日数は次式で表すことが
できる。

$$\sum_{i=e+1}^h 1 = \sum_{i=a+1}^h f(L_i) + N \quad (18)$$

ここで, L_i は*i*日目の日長時間(hours), $f(L_i)$ は*i*日目の
日長時間の関数, a は日長に反応し始める日とした。

(18)式の右辺の第1項を左辺へ移項し両辺を N で割り整
理すると, 右辺が1になる。

$$\sum_{i=e+1}^a \frac{1}{N} + \sum_{i=a+1}^h \frac{\{1-f(L_i)\}}{N} = 1 \quad (19)$$

すなわち, de Wit et al.(1970)が提案した発育速度
(DVR)の積算形に変形することができる。

$$DVR_i = \frac{\{1 - f(L_i)\}}{N} \quad (20)$$

但し, $i \leq a$ のときは, $DVR_i = \frac{1}{N}$

$$DVI_h = \sum_{i=e+1}^h DVR_i = 1 \quad (21)$$

ここで, DVR_i は i 日目の発育速度, DVI_h は出穂日の発育指数で1である。

(18)式には変数として温度を含んでいない。しかし, ガラス温室内の水温は冬期間に低下し, その結果, この水温の低下を含んだ組では出穂までの日数が増加した。このため, (18)式には水温の影響を含んだ結果が表れること, 推定誤差が大きくなることが予想される。そこで, 日数を積算水温に置き換えたモデル化も行った。

(b) モデル (II)

日数を積算水温に置き換えたモデルには, 次の仮定を設けた。

④ 短日下の出穂までの積算水温の平均を S とし, 基本的な量とする。

⑤ 長日のために, 増加した出穂までの積算水温は日長時間の関数を積算した値で表せるとする。

⑥ 積算する範囲は日長に反応し始める日から出穂日までとする。

④の仮定では, 短日下の出穂日までの積算水温は次式で表すことができる。

$$\sum_{i=e+1}^h T_i = S \quad (22)$$

ここで、 T_i は*i*日目の水温である。 S は短日下の出穂日までの積算水温の平均値であり、アキヒカリ、ササニシキ、コシヒカリ、日本晴、ミズホ、Co26の値は、それぞれ1520, 1520, 1340, 1310, 1350, 1490(°C days)であった。

⑤、⑥の仮定では、出穂日までの積算水温は次式で表すことができる。

$$\sum_{i=e+1}^n T_i = \sum_{i=a+1}^n f(L_i) + S \quad (23)$$

ここで、 L_i は*i*日目の日長時間(hours), $f(L_i)$ は*i*日目の日長時間の関数、 a は日長に反応し始める日とした。(23)式も同様に(24)式の発育速度の積算形に変形することができる。

$$DVR_i = \frac{\{T_i - f(L_i)\}}{S} \quad (24)$$

但し、 $i \leq a$ のときは、 $DVR_i = \frac{T_i}{S}$

モデル(1)の日長時間の関数 $f(L)$ は、次のように求めた。すなわち、ノンパラメトリックDVR法の(15)式の右辺の第1項に(18)式を代入し、(15)式の右辺の第2項の DVR_i を f_i に置き換えた(25)式を作成し、これを最小にすることにより求めた。

$$F = \sum_{k=1}^n \left[\sum_{j=e+1}^n 1 - \left\{ \sum_{j=a+1}^n f(L_{kj}) + N \right\} \right]^2 + \lambda \sum_{i=1}^{m-2} (f_i - 2f_{i+1} + f_{i+2})^2 \quad (25)$$

ここで、 f_i は区間 $(L_0 + (i-1)\Delta L \leq L < L_0 + i\Delta L)$ の $f(L)$ の値、 L_0 は日長時間の最小値(9.5 hours), ΔL は日長時間の刻み幅(0.5 hours), m は日長時間の刻み数(10), n はデータの数(24), L_{kj} は*k*組目の出芽日から*j*日目の日長時間、 λ は

スムージングパラメータである。

同様に、モデル(Ⅱ)の日長時間の関数 $f(L)$ も、(15)式の右辺の第1項に(23)式を代入し、(15)式の右辺の第2項の DVR_i を f_i に置き換え、次の(26)式を作成し、これを最小にすることにより求めた。

$$F = \sum_{k=1}^n \left[\sum_{j=c+1}^n T_{kj} - \left\{ \sum_{j=a+1}^n f(L_{kj}) + S \right\} \right]^2 + \lambda \sum_{i=1}^{m-2} (f_i - 2f_{i+1} + f_{i+2})^2 \quad (26)$$

(25)、(26)式の F を $f_i (i=1 \dots m)$ で微分した式を0とした m 次の連立方程式を解き、これらの式を最小にする $f_i (i=1 \dots m)$ を計算した。

スムージングパラメータ λ は $10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7$ の6通りの中から次の予測誤差(E)が最小になる値を採用した。次に、この λ で DVI_{a+i} が0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1を越える日の11通りの中から、予測誤差(E)が最小になる日長に反応し始めるステージである発育指数 DVI_a を求めた。この λ と DVI_a の場合の $f_i (i=1 \dots m)$ を求めた。

$$E = \left[\frac{\sum_{k=1}^n (D_k^* - D_k)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

ここで、 D_k は k 組目の実測の出穂日、 D_k^* は k 組目を除いて計算した $f_i (i=1 \dots m)$ によって予測した k 組目の出穂日である。

予測誤差を最小にする最適なスムージングパラメータ λ は、モデル(Ⅰ)、モデル(Ⅱ)のいずれもアキヒカリ、ササニシキ、コシヒカリ、日本晴、ミズホ、Co26で

それぞれ 10^3 , 10^3 , 10^3 , 10^4 , 10^4 , 10^3 であり, λ が大き過ぎても小さ過ぎても予測誤差が大きかった。従って, 以後 λ を 10^3 として計算した。

予測誤差を最小にする最適な日長に反応し始めるステージである発育指数 DVI_a は, アキヒカリ, ササニシキ, コシヒカリ, 日本晴, ミズホ, Co26 のそれぞれについてモデル (I) では 0.4, 0.2, 0.1, 0.2, 0.2, 0.5 であり, モデル (II) では 0.4, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.5 であった。この結果はアキヒカリ, Co26 を除けば, 堀江・中川 (1990) の発育指数が 0.2 で日長に感応し始める結果とほぼ一致している。出芽日から日長に反応し始めるとしたとき, 日長に反応し始める発育指数を考慮したときの予測誤差の差は, アキヒカリ, ササニシキ, コシヒカリ, 日本晴, ミズホ, Co26 のそれぞれについてモデル (II) では 0.6 日, 0.6 日, 0.8 日, 1.8 日, 2.0 日, 10.5 日であった。日長に反応し始める発育指数を考慮するならば, 予測誤差は Co26 では大幅に小さくなったが, それ以外の品種ではあまり小さくならなかった。そのため, Co26 を除く 5 品種では日長に反応し始める発育指数を考慮する必要があまりないと考えられるが, ここでは, 以後日長に反応し始める発育指数は, Co26 で 0.5 とし, Co26 を除きアキヒカリを含めた 5 品種で 0.2 として計算した。

これらのスミージングパラメータ λ と日長に反応し始める発育指数 DVI_a を用いてモデル (I) とモデル (II) の日長時間の関数 $f(L)$ の形を求めた。モデル (I) の $f(L)$ と日長時間の関係及び発育速度 (DVR) と日長時間の関

係を図-15の(A),(B)に示した。

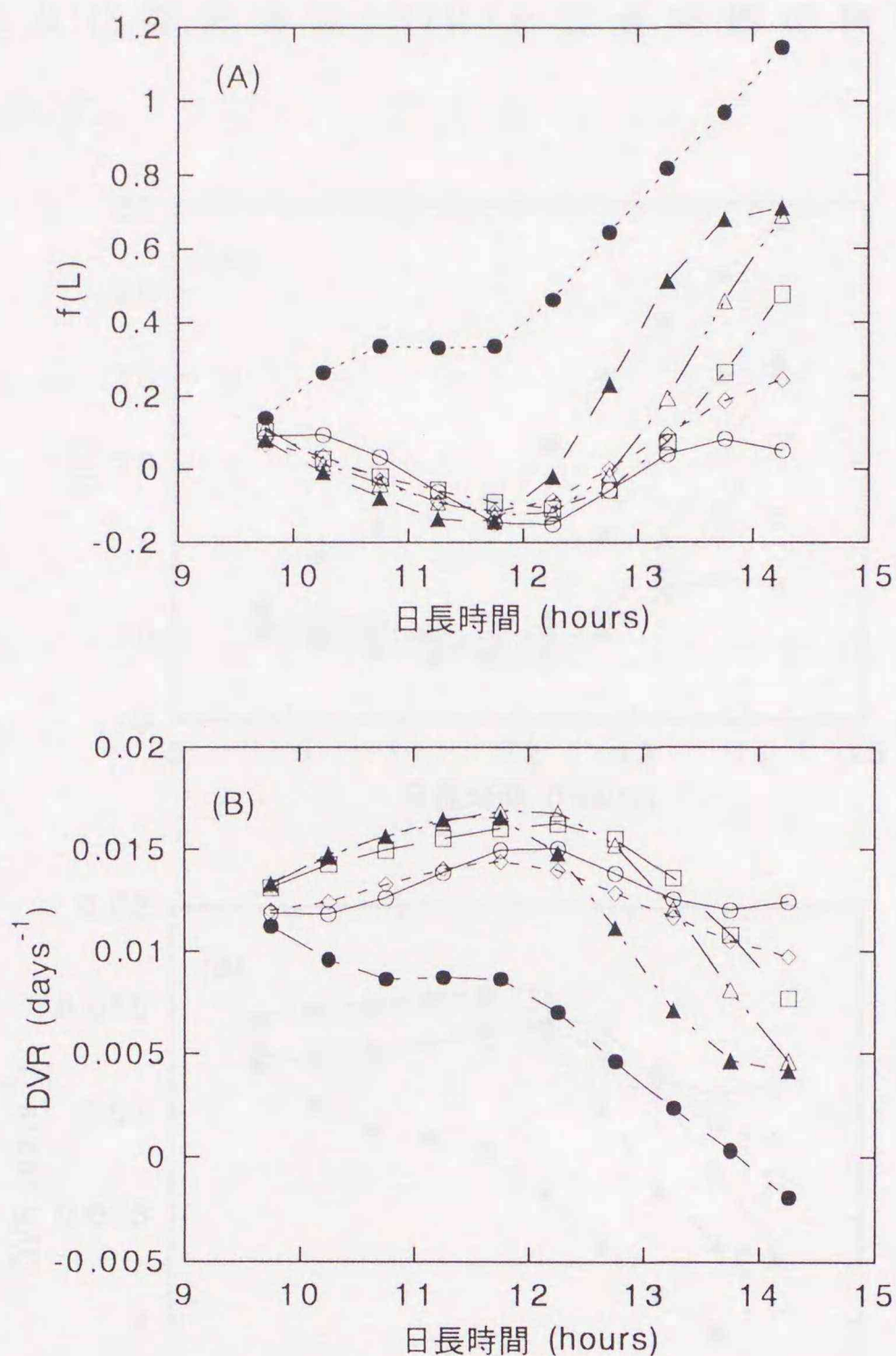


図-15 モデル(I)の日長時間の関数 $f(L)$ (A)と(20)式の発育速度(DVR)(B).
 (○はアキヒカリ, ◇はササニシキ, □はコシヒカリ, △は日本晴, ▲はミズホ, ●はCo26を示す.)

モデル(I)の日長時間の関数 $f(L)$ は, Co26以外の品種で, 日長時間が約12時間以下では日長時間が短くなるとともに増加する傾向を示した。発育速度も日長時間が約12時間以下では日長時間が短くなるとともに減少する傾向を示した。これは日長時間が短い冬期間では水温が低くなり, 出穂までの日数が長くなるためと考えられる。

次に、モデル（Ⅱ）の日長時間の関数 $f(L)$ と日長時間の関係及び発育速度（DVR）と日長時間の関係を図-16の（A）、（B）に示す。

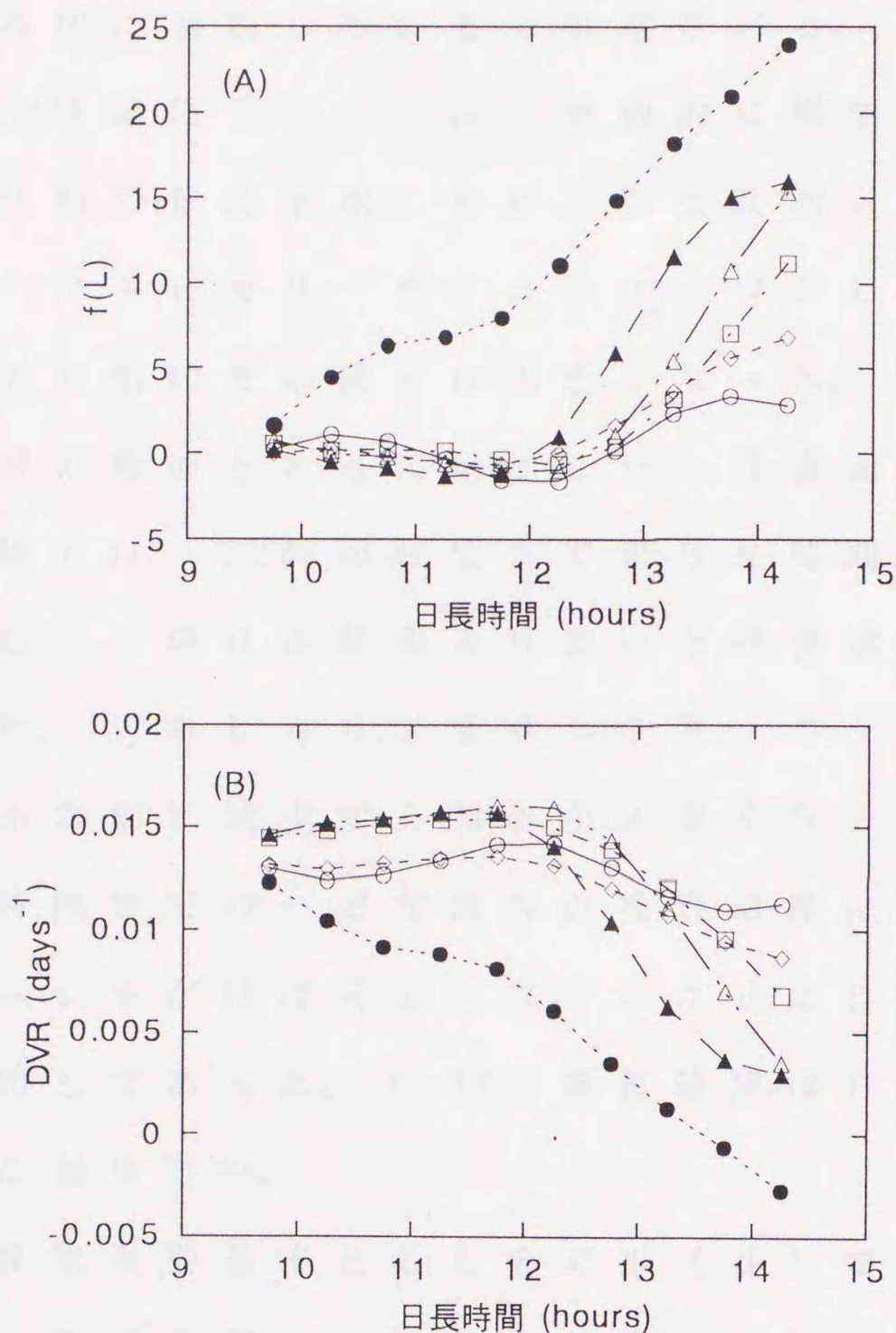


図-16 モデル（Ⅱ）の日長時間の関数 $f(L)$ （A），と(24)式の発育速度(DVR)（B）．
 { 水温は20℃，○はアキヒカリ，◇はササニシキ，□はコシヒカリ，△は日本晴，
 ▲はミズホ，●はCo26を示す． }

モデル（Ⅱ）の日長時間の関数 $f(L)$ の値は、Co26以外の品種では、日長時間が約12時間以下ではほぼ0であった。水温20℃の発育速度も、日長時間が約12時間まではほぼ一定の値を示した。このモデルは、冬期間の水温の低下

による出穂までの日数の増加の影響を除いていると考えられる。このことから、日長時間の関数 $f(L)$ 及び発育速度の傾向は、積算水温を基本としたモデル (Ⅱ) の方がより適切に表現していると推察される。また、日長時間が約12時間以上の $f(L)$ は、直線的に増加する傾向を示した。品種の差は増加し始める日長時間と増加する傾きに表れ、アキヒカリ、ササニシキ、コシヒカリ、日本晴、ミズホの順にその傾きは大きくなった。Co26の $f(L)$ は日長時間の増加とともに増加した。発育速度は、Co26以外の品種では、12時間程度までの日長時間でほぼ一定の値を示し、この日長時間より長いと発育速度は直線的に減少した。アキヒカリ、ササニシキ、コシヒカリ、日本晴、ミズホの順に減少する傾きが大きくなった。日長時間が約12時間までの一定な部分の発育速度は、アキヒカリとササニシキがほぼ同じ、コシヒカリと日本晴とミズホがほぼ同じであった。Co26の発育速度は日長時間の増加とともに減少した。

積算水温を基本としたモデル (Ⅱ) で推定した出穂までの日数と実測の日数を比較した (図-17)。モデルの日数は、実測日数とほぼ一致し、さらに、3月から7月に播種した場合、日数が長くなることを説明している。

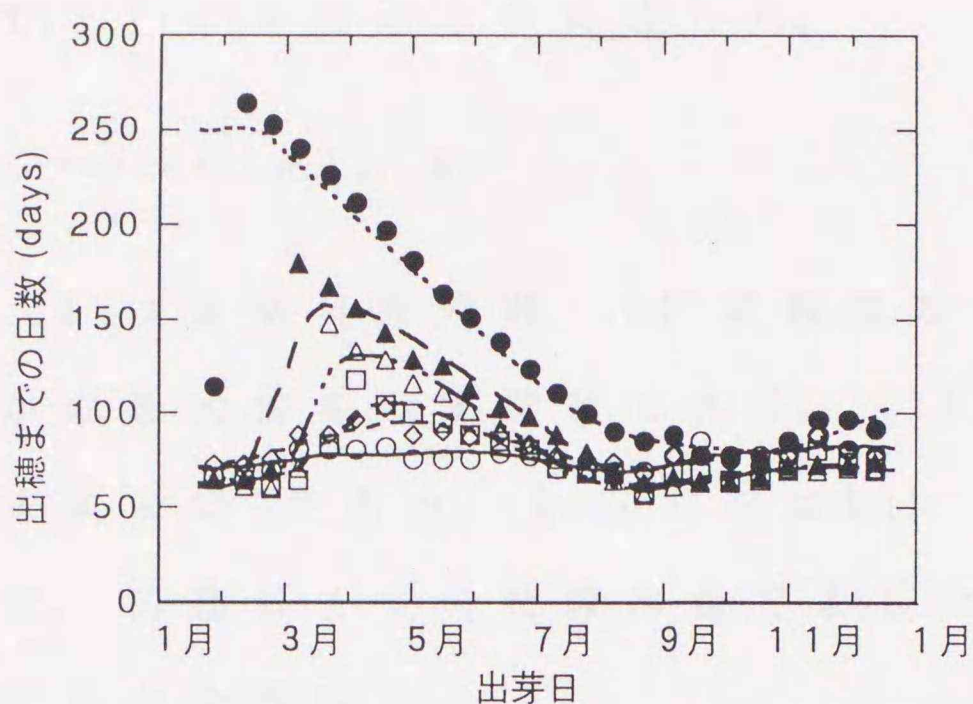


図-17 モデル(II)による出穂までの日数と実測日数の比較

〔実線及び破線はモデルの日数を示し、(——)はアキヒカリ、(-----)はササニシキ、(- - - -)はコシヒカリ、(— · — ·)は日本晴、(— — —)はミズホ、(······)はCo26を示す。印は図-14と同じ品種の実測日数を示す。〕

(3) 出穂予測の簡易式

積算水温を考慮した日長時間の関数 $f(L)$ は、Co26を除いて、日長時間が約12時間以下で、ほとんど0であるが、約12時間以上では日長時間に対してほぼ直線的に増加する形を示した(図16-A)。ある値以下では0で、ある値を超えると直線的に増加する形は、有効積算温度に用いられる有効温度と同じ形である。有効温度は基準温度よりも低い温度で0になるが、基準温度よりも高い温度では温度から基準温度を引いた差で表される。そこで、有効温度を有効日長時間に置き換え、この有効日長時間で $f(L)$ を表現した。有効日長時間は、基準日長時間よりも短い日長時間では0であるが、基準日長時間よりも長い日長時間では日長時間から基準日長時間を引いた値とした。また、基準日長時間よりも長い日長時間では、 $f(L)$ の増加する傾きは品種により異なるので、有効日長時間に定数

を掛けて、 $f(L)$ を次のように表した。

$$f(L_i) = b \cdot \max(L_i - L_0, 0) \quad (28)$$

ここで、 L_0 は基準日長時間、 b は定数である。 $\max()$ は括弧のなかの最大値を示す関数である。(28)式は、日長時間が L_0 未満では0であり、 L_0 以上では $b(L_i - L_0)$ になることを示す。出穂日までの積算水溫で表した(23)式に(28)を代入すると次式になる。

$$\sum_{i=c+1}^n T_i = b \sum_{i=a+1}^n \max(L_i - L_0, 0) + S \quad (29)$$

(29)式の左辺の出穂日までの積算水溫は、右辺の第1項に含まれる有効日長時間の積算値に対する一次式で表されている。従って、 L_0 と a を与えると、直線回帰によってパラメータの b と S を求めることができる。 $8.0(\text{hours})$ から $14.5(\text{hours})$ まで $0.1(\text{hours})$ 毎の値の中からパラメータ L_0 を選択した。 $0(^{\circ}\text{C} \cdot \text{days})$ から $1200(^{\circ}\text{C} \cdot \text{days})$ まで $100(^{\circ}\text{C} \cdot \text{days})$ 毎の値の中から日長に反応し始める日(a)までの積算水溫を選択し、この積算水溫に達した日を a とした。パラメータ L_0 と日長に反応し始める日までの積算水溫を与え、(29)式で直線回帰を行い b 、 S を求めた。(27)式の予測誤差を計算し、予測誤差が最小になるパラメータ L_0 、日長に反応し始める日までの積算水溫、 b 、 S を求めた。これらのパラメータによる出穂日と実測の出穂日を比較した。

表-12に求めたパラメータ L_0 、 b 、 S と日長に反応し始めるまでの積算水溫を示した。

表-12 (29)式のパラメータ.

品種	パラメータ			
	L_0	b	S	ΣT
アキヒカリ	12.8	3.68	1520	900
ササニシキ	12.3	3.91	1520	500
コシヒカリ	13.3	12.78	1380	500
日本晴	13.2	16.66	1350	500
ミズホ	12.9	15.42	1410	500
Co26	12.0	11.61	1630	300

注: ΣT は出芽日から日長に反応し始める日(a)までの積算水温を表す.

(28)式の $f(L)$ を図-18に示した。(29)式と表-12のパラメータで推定した出穂までの日数と実測の出穂までの日数を図-19に比較した。この簡易式で推定した出穂までの日数と実測の出穂までの日数とは、ほぼ一致した。また2月から3月頃に播種した出穂までの日数は不連続的な変化を示したが、推定した日数もこの不連続的な変化を表すことができた。Roberts et al. (1986)は、ヒラマメの実験から、感光相の期間は、基準日長時間以上の日長時間の積算値から計算することを提案している。(29)式の簡易式は、この提案と同じ概念であり、本実験結果を説明することができた。

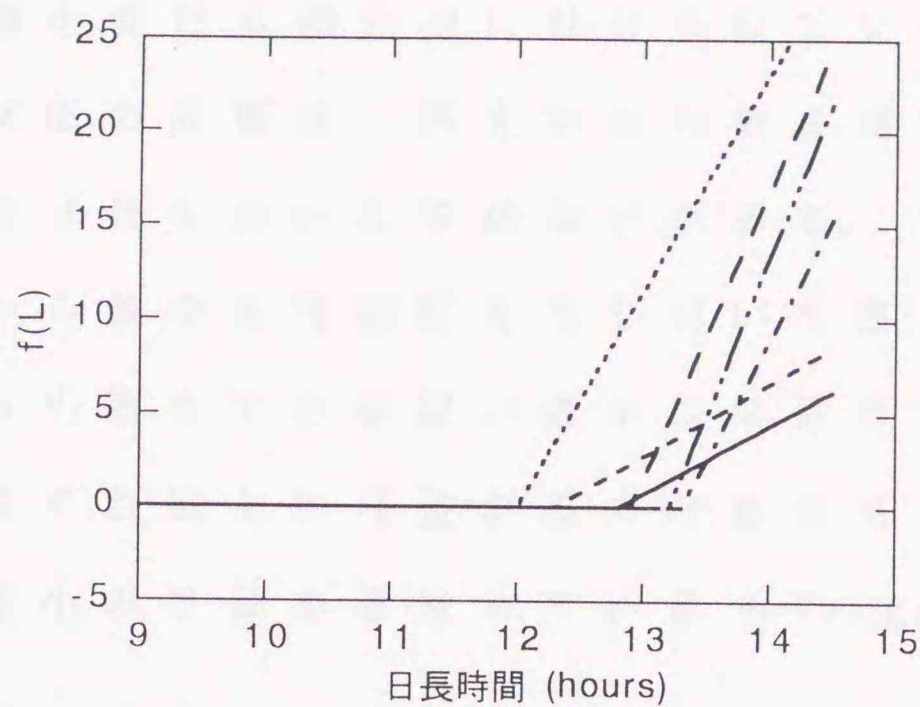


図-18 表-12のパラメータを代入した(28)式の $f(L)$.
 (—)はアキヒカリ, (-----)はササニシキ, (.....)はコシヒカリ,
 (— · — · —)は日本晴, (— — —)はミズホ, (·····)はC o 26を示す.

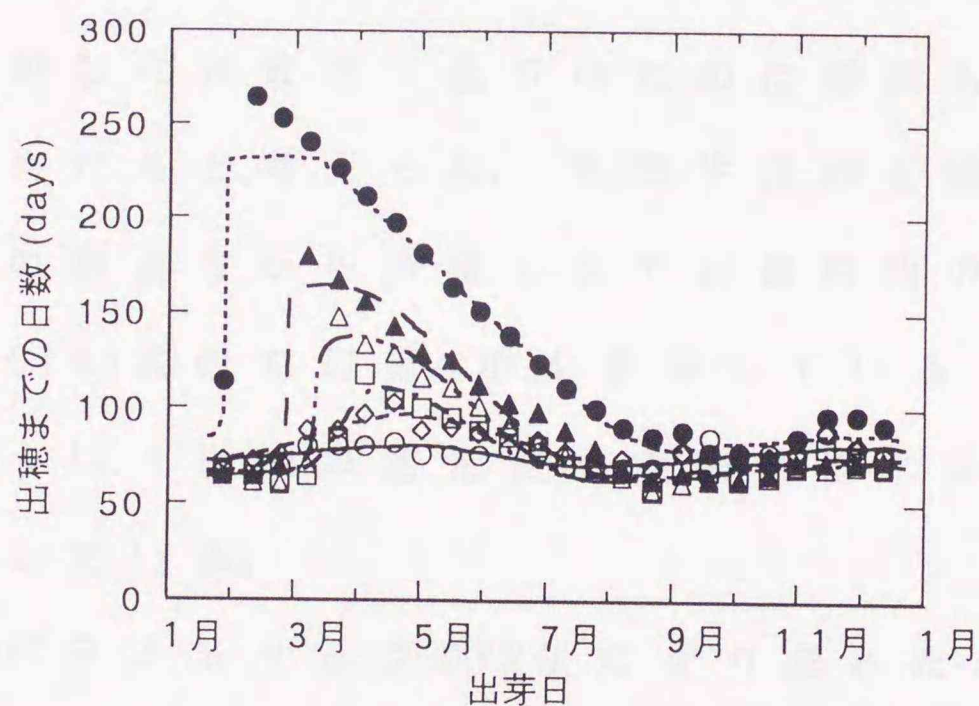


図-19 (29)式と表-12のパラメータで推定した出穂までの日数と実測日数の比較.
 (実線及び破線は図-17の同じ品種の推定日数, 印は図-14の同じ品種の実測日数.)

(4) 考察

水稻の生長は, 発芽から幼穂分化までの栄養生長相, 幼穂分化から出穂までの生殖生長相および出穂から登熟までの登熟相の3段階に分けて考えられている。さらに栄養生長相は日長の影響を受けない基本栄養生長相と日

長の影響を受ける感光相に分けられている。また、品種の日長反応の評価は、感光相の日数を用いた方法や適日長と限界日長を用いた方法などがある。感光相は最大生育期間から最小生育期間を差し引いて表され、適日長は播種から出穂までの期間が最小になる日長を意味し、限界日長はそれ以上に日長が長くなるともはや出穂しないような最小の日長を意味している (Vergara and Chang, 1976)。

これらの知見で本実験結果とモデルを表すならば、適日長の出穂までの日数は生育期間が短いことから、短日下の出穂までの日数に対応していると考えられる。感光相の増加した日数は、長日のために増加した出穂までの日数に当たると考えられ、生殖生長相を感光相に含めて、感光相の始まりから出穂日まで日長時間の関数 $f(L)$ を積算した (18) 式の右辺第 1 項を意味していると考えられる。このように、従来の知見と本実験結果によるモデルはよく対応している。

ノンパラメトリック DVR 法により求めた各品種の日長時間の関数 $f(L)$ の形について考察すると、アキヒカリのような日長にあまり感応しない品種では $f(L)$ がいつも 0 であり、出穂までの日数と積算水温は増加しない。一方、日長感応性のある品種ではある日長時間より長いと $f(L)$ が直線的に増加し、その結果、生育期間が増加して出穂までの日数と積算水温が増加すると考えることができる。

(23) 式、(29) 式は、发育速度を積算した形に変換できるが、これらの式は发育速度及び发育指数を仮定してい

ない。すなわち、(23)式、(29)式は、発育速度及び発育指数を概念として用いる必要がないという長所がある。

本実験は気温と水温の両方を一定にして進める予定であったが、実際には冬期間に水温が低下した。このため、水温を含めたモデル(Ⅱ)を考えなければならなかった。もし、気温と水温の両方を一定に制御した実験施設で本実験を行えば、実験結果とモデル化はさらに精度が高くなると思われる。

4. 4 まとめ

気象要素から日長反応性の異なる水稻の出穂期を予測するために、気温を一定に制御したガラス温室内の自然日長下で2週間毎に1年間、6品種を播種し、出穂を調査した。この結果に基づき、定温・自然日長下における出穂予測モデルを構築した。このモデルをさらに簡略化した簡易式で出穂日を推定した。その結果、次のことが明らかになった。

(1) 8月から12月頃にアキヒカリ、ササニシキ、コシヒカリ、日本晴、ミズホを播種すると、出穂までの日数はほぼ一定であり、品種の差も小さかったが、3月から7月頃に播種すると、これらの品種の順に従い日数は増加した。インド稲のCo26を2月から8月頃に播種すると11月上旬に一斉に出穂した。

(2) 構築したモデルは、短日下の出穂までの日数、短日下の出穂までの積算水温が基本的な量であり、(18)式の日長時間の関数 $f(L)$ の積算値で長日下の増加する日

数, (23)式の日長時間の関数 $f(L)$ の積算値で長日下の増加する積算水温を表すモデルである。ノンパラメトリック DVR法で求めた(23)式の日長時間の関数 $f(L)$ の形は, 約12時間より短いと0であり, この日長時間より長いと増加する形を示した。

(3) (23)式の日長時間の関数の形をさらに簡略化し, 有効積算日長時間の一次式で出穂までの積算水温を表す(29)式を提案した。この簡易式で推定した出穂までの日数は, 実測の日数とほぼ一致した。2月から3月頃に播種した出穂までの日数は不連続的な変化をしたが, 推定した日数もこの不連続的な変化を表すことができた。

第5章 水稻地上部重の簡易推定モデル

5. 1 はじめに

気象要素に基づいたモデルで作物の生育を表わすことは、気象と農業生産の関係を体系的に理解するために有効である。また、生育モデルと広域的な気象データを結び付けることにより、生産量の地理的分布を得ることができ、面的な適地適作が可能になる。

この章では、気象要素から水稻の地上部乾物重を推定する簡易なモデルの開発を試みた。植物の生理、生態現象は複雑であるため、安易な簡易化は避けなければならないが、気象データから生産量のみを予測することが目的であるならば、より簡単で実用的なモデルが必要である。

作物の乾物重は、群落により遮蔽された日射量に比例すること(Monteith, 1977)、または、吸収された日射量に比例することが知られている(堀江・桜谷, 1985)。吸収日射量と乾物重の関係を基本にして、Horie et al.(1995)はSIMRIW(Simulation Model for Rice-Weather relation)、岡田・小林(1987)はPRISM(Paddy Rice Simulation Model)と呼ばれる水稻の生育モデルを開発している。群落により遮蔽された日射量と乾物重の関係を基本にしてMaas(1993)は比較的簡易な生育モデルを開発している。群落により遮蔽された日射量は、全天日射量から群落下の日射量を引いた値で表される。群落下の日射量は、全天日射量と葉面積指数の指数関数の積で表さ

れる。乾物重は、遮蔽された日射量に光利用効率を掛けて乾物重増加速度を求め、この値を積算して求める。

これらの生育モデルは、日射量が群落に吸収され、乾物重に変換されることを基本にしている。従って、どのようなモデルで日射量を吸収する葉面積を表すのかという問題は重要である。

SIMRIWは、気温と葉面積指数の関数で毎日の葉面積指数増加速度を求め、この値を積算して葉面積指数を求めているが、PRISMは、毎日の現存乾物重の増加速度に葉への分配率を掛けて葉面積指数増加速度を求め、この値を積算して葉面積指数を求めている。また、Maasのモデルでは、毎日の乾物重増加速度に積算気温の関数である葉への分配率を掛けて葉面積指数増加速度を求め、この値を積算して葉面積指数が求められている。このように、葉面積を表すモデルの構造は複雑で、生育モデルの間で、葉面積のモデルの構造が異なるほか、乾物重増加速度、葉面積指数増加速度、葉への分配率を高い精度で求めることは難しく、どのモデルが最も適しているかを検証することは困難である。

一方、葉の発育の指標となる葉齢は、積算気温で表されることがあり（例えば、Baker et al., 1986）、葉齢と関連がある葉面積も積算気温の関数で表されることがある（例えば、Dwyer and Stewart, 1986, Muchow et al., 1989）。Hammer et al. (1987), Chapman et al. (1993)は、積算気温の関数で展開した葉面積と老化した葉の面積を表し、その差から生育期間全体の葉面積を表して

いる。Maasのモデルにおいても、展開した葉面積から老化・脱落した葉の面積を引いて生育期間全体の葉面積が表されている。

積算気温の関数で葉面積を表す方法は、その構造が単純であり、実測値との比較も容易である。また、展開した葉と老化した葉との2種類に葉を分ける方法は、生育期間全体の葉面積の推移を簡便に表すことができ、その結果、より簡易なモデルで乾物重の推移及び収穫時の乾物重を推定することができる可能性がある。

この章では、気象要素から水稻の地上部乾物重を推定する簡易モデルを開発するために、4月から8月まで約1カ月毎に5回作期移動試験を行い、葉重、枯葉重、地上部重及び光透過率を測定した。また、老化した葉の面積を直接測定できなかったため、モデルには、葉面積の代わりに葉重を用いた。測定結果を用いて、積算気温に基づいて展開した全葉重と枯葉重をあてはめ、全葉重から枯葉重を引いて生育期間全体の葉重を表した。次に、群落により遮蔽された日射量と地上部重との関係から光利用効率を求め、葉重の指数関数で光透過率を表し、これらの関係を用いて、気象要素から地上部重の推定を検討した。

5. 2 試験方法

農業環境技術研究所の水田圃場で、1992年4月から8月までに合計5回、水稻の作期移動試験を行った。品種は日本晴を用いた。4月10日、5月8日、6月15日、7月6日、8月3日に育苗箱に催芽した種子を播種し、出芽器に育苗箱を

入れ、2日後の出芽した日を出芽日とした。4月と5月に播種した苗はビニール温室内で、その他の月に播種した苗は野外の水田で育苗した。出芽日から3週間後に水田圃場に移植した。1株3本植えとし、栽植密度は $22.2 \text{株}/\text{m}^2$ である。基肥としてNが $5 \text{kg}/10 \text{a}$ 、穂肥としてNが $3 \text{kg}/10 \text{a}$ となるように8-8-8化成肥料を施用した。

移植日から成熟期（出穂から6～7週間後）まで2週間毎に5株ずつ抜き取り、根部を除いた地上部を枯れていない葉身部、完全に褐変した枯れた葉身部、葉鞘部、穂部に分解し、乾燥器に入れて約 80°C で4日間乾燥させた後、各器官別にそれぞれの乾物重を測定した。枯れていない葉身部は、乾燥前に葉面積を葉面積計（林電工株式会社製、AAM-8）で測定し、単位土地面積あたりの葉面積である葉面積指数を求めた。収穫時に30株を抜き取り地上部風乾重を測定した。棒状光センサ（小糸工業株式会社製、IKS-225R-10、川方・矢島・守谷、1992）を用いて群落上と群落下の水田水面上の平均光量子束密度を測定し、前者で後者を割った値を光透過率として求めた。この棒状光センサは測定波長域が $400\sim 700 \text{nm}$ の光量子センサを内蔵したものである。気温と日射量については農業環境技術研究所で定常的に観測している値を用いた。ビニール温室内の気温は、日射が直接当たらないようにアルミ箔で覆ったサーミスタ温度計（コーナシステム株式会社製、KADEC-U）で無通風の状態で測定した。

ここでは、枯れていない葉身部の乾物重を葉重、完全に褐変した枯れた葉身部の乾物重を枯葉重、葉重に枯葉

重を加えた葉身部の乾物重を全葉重、地上部の乾物重を地上部重と名付け、下記の解析方法を行った。

Hammer et al. (1987), Chapman et al. (1993)は、展開した全葉面積と老化した葉の面積を積算気温の関数で表し、全葉面積から老化した葉の面積を引いて葉面積を表した。しかし、この試験では老化した葉の面積は直接測定できなかった。そこで、全葉面積の代わりに全葉重を、老化した葉の面積の代わりに枯葉重を用いた。全葉重と枯葉重を積算気温の関数で表し、全葉重から枯葉重を引いて葉重のモデルを表した。

葉重のモデルを用いて遮蔽された日射量を求めるために、葉重の指数関数で光透過率をあてはめた。全天日射量と光透過率を掛けた値を群落下の日射量とし、全天日射量から群落下の日射量を引いた値で遮蔽された日射量を表した。群落下の日射量を求めるための光透過率は、本来群落上と群落下の日射量の比でなければならないが、ここで測定した光量子束密度の比で代用した。地上部重とここで求めた遮蔽された日射量の積算値との関係を直線式であてはめ、比例定数を光利用効率とした。葉重のモデルと光透過率の関係式、群落に遮蔽された日射量の積算値と地上部重の関係式を用いて地上部重を推定した。

5.3(2)の結果で示すように、このモデルでは生育後半の地上部重を推定することができなかった。そこで、葉重を補正して、生育後半の地上部重を推定することを試みた。Maasのモデルでは、葉は展開してからある積算気温を経過した後で老化するとして、全葉面積から老化し

た葉の面積を引いて葉面積を表している。この考え方を
用いて、葉がある一定の積算気温の後で老化した葉にな
るとして、全葉重から老化した葉の葉重を引いて葉重を
補正した。補正した葉重のモデル、群落に遮蔽された日
射量の積算値と地上部重の関係式を用いて地上部重を推
定した。

5. 3 結果及び考察

(1) 葉重の推定モデル

播種期を移動したときの葉重の推移を図-20に示した。
葉重は、生育とともに増加し始め、その後は直線的な増
加を示し、葉重が最大に達した後、減少する傾向を示し
た。最大の葉重は播種期が遅いほど小さな値になったが、
葉重の増加が停止するのは、いずれも止葉の展開が終わ
り、代わりに穂が伸長する時期で、その後は、老化にと
もない枯葉が増加して葉重が減少した。

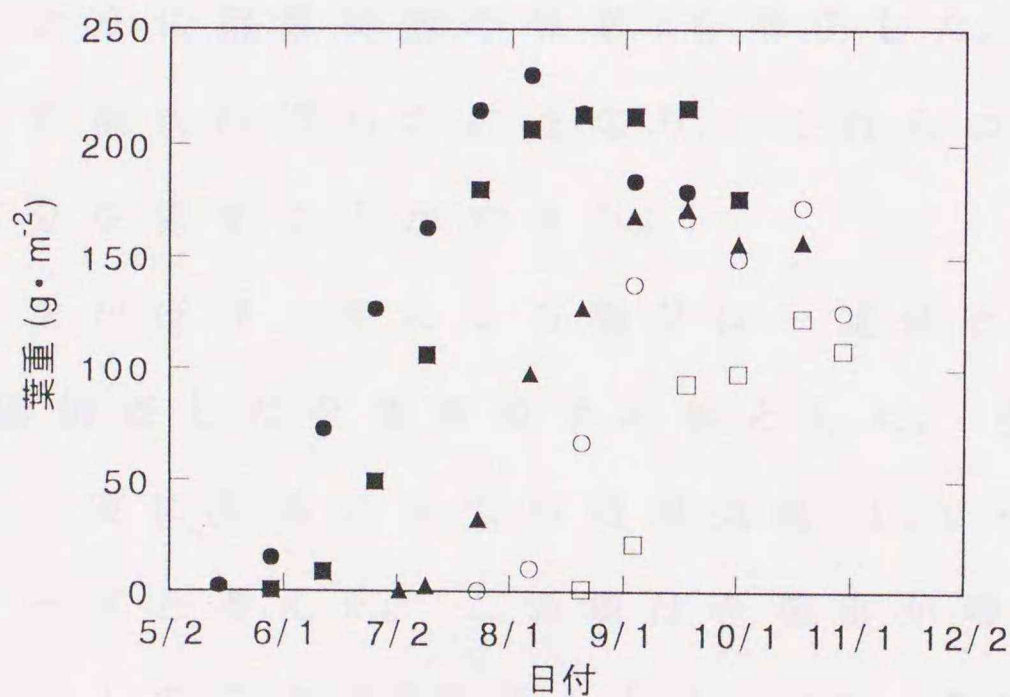


図-20 播種期を移動したときの葉重の経日変化

(印の●は4月, ■は5月, ▲は6月, ○は7月, □は8月に播種した実測値を示す。)

出芽日からの積算気温と全葉重との関係を図-21に示した。全葉重は、出芽日からの積算気温に対して、初めは指数的にその後は直線的に増加し、最終的にはほぼ一定の値を示した。指数的及び直線的な増加期においては、出芽日からの積算気温と全葉重の関係は、播種期によらずほぼ同様であった。全葉重がほぼ一定になる値は播種期が遅いほど小さくなった。

全葉重が増加する期間について、積算気温(X)の関数で全葉重(Y)をあてはめた。まず、図-21より積算気温 $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ を境にして、 $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ 以下では指数関数 $Y=b\cdot\exp(c\cdot X)$ をあてはめ、ついで $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ 以上では直線式 $Y=d\cdot(X-e)$ をあてはめた。この場合、指数関数と直線式はある点で滑らかに交わらなければならない。そのため、直線式の傾きと指数関数の傾きが一致する Y 座標($1.136\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)を求め、この Y 座標を通る直線式上の X 座標($770.4^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$)を求め、この座標($770.4^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$, $1.136\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)を通るように指数関数の係数 b を補正した。補正した指数関数と直線式は滑らかに連なり、これらの式で全葉重の増加部分を表すことができた。

全葉重がほぼ一定になる部分は一定値と仮定し、出穂以後2回調査した全葉重の平均値とした。全葉重の増加が止まり一定になる日までの積算気温($X_a^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$)も重要なパラメータと考えた。この値は全葉重が増加する直線式と一定値との交点の X 座標とした。(30)式はこうして得られた結果をまとめたものである。

$$TLW(X_i) = 0.08000 \exp(0.007468 X_i) \quad (X_i < 770.4)$$

$$= 0.1884(X_i - 636.5) \quad (770.4 \leq X_i < X_a)$$

$$= 0.1884(X_a - 636.5) \quad (X_a \leq X_i) \quad (30)$$

ここで、 $TLW(X_i)$ は*i*日目の単位土地面積当たりの全葉重 ($g \cdot m^{-2}$)、 X_i は出芽日から*i*日目の積算気温 ($^{\circ}C \cdot days$)、 X_a は全葉重の増加が止まり一定になる日までの積算気温 ($^{\circ}C \cdot days$)を示す。

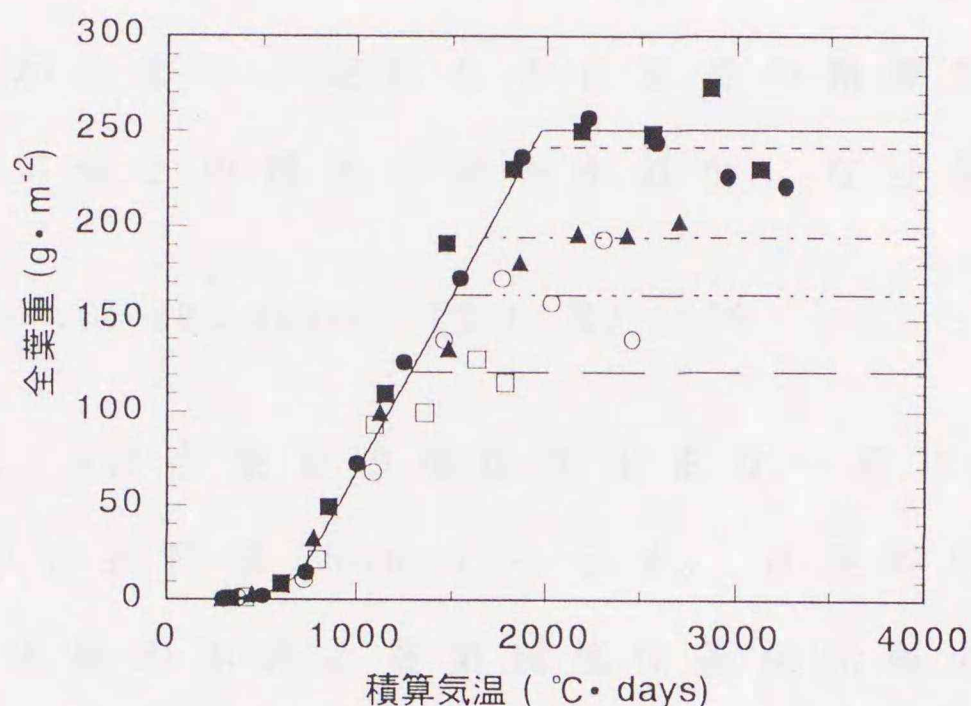


図-21 出芽日からの積算気温と全葉重との関係、及びモデルの全葉重との比較
印は図-20と同じ播種期の実測値を示す。実線及び破線の(——)は4月、
(-----)は5月、(.....)は6月、(- - - -)は7月、(——)は8月に播種した
モデルの値を示す。モデルの全葉重は(30)式、(31)式であてはめて求めた。

全葉重の増加が止まり一定になる日までの積算気温 (X_a)は、播種期が遅れるにつれて小さな値になった(図-21)が、これは第2章で示した出穂期までの積算気温が播種期の遅れとともに小さな値になる結果とも一致する。すなわち、止葉の展開時期と出穂期は比較的近い時期なので、全葉重の増加が止まり一定になる日も出穂期と同様に考えることができる。川方・矢島(1994)は定温・

自然日長下の出穂期までの積算水温を(23)式で表し、さらに簡略化した(29)式を提案した(Kawakata and Yajima, 1995)。(29)式の積算水温を積算気温に置き換えた式も成立する可能性が高いと考えられる。そこで、全葉重の増加が止まり一定になる日までの積算気温は、(29)式の積算水温を積算気温に置き換えた次の(31)式で表せると仮定した。(31)式の係数は、基準日長時間を9.0(hours)から15.0(hours)まで0.1(hours)刻みで変化させて、全葉重の増加が止まり一定になる日までの積算気温の値と(31)式の推定値との残差二乗和が最小になる値を選んだ。

$$X_a = 4.20 \sum_{i=1}^a \max(L_i - 12.1, 0) + 1130 \quad (31)$$

ここで、 a は全葉重の増加が止まり一定になる日、 L_i は*i*日目の日長時間(hours)を示す。日長時間は理科年表(1992)の太陽の赤緯と農業環境技術研究所の緯度(36.0° N)から、蔵田・岡田(1984)の方法に従い計算した。 $\max(L_i - 12.1, 0)$ は括弧内の最大値を示す関数を表し、 L_i が12.1未満では0、それ以上では($L_i - 12.1$)になることを表す。図21に(30)式と(31)式で表した全葉重を実線及び破線で示した。

一方、枯葉重は、出芽日からの積算気温に対し播種期に関係なくほぼ直線的に増加する傾向を示した(図-22)。そこで、播種期の如何にかかわらず、次の1つの直線式にあてはめた。

$$DLW(X_i) = 0.0231(X_i - 1100) \quad (32)$$

ここで、 $DLW(X_i)$ は*i*日目の枯葉重 ($g \cdot m^{-2}$)を示す。

図-22に(32)式で表した枯葉重を実線で示した。

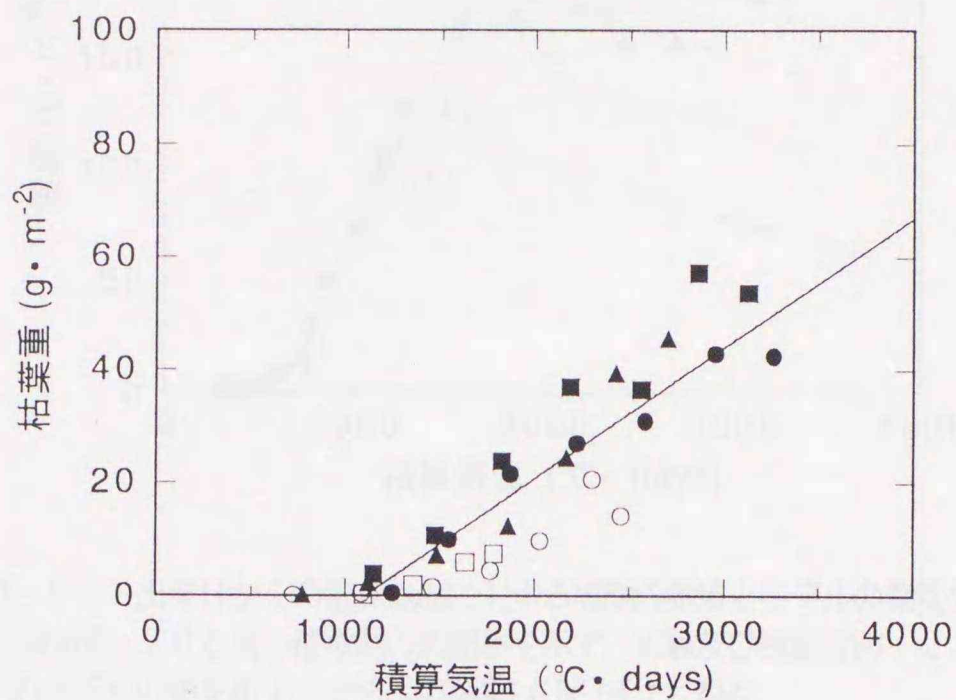


図-22 出芽日からの積算気温と枯葉重の関係、及びモデルの枯葉重との比較

{印は図-20と同じ播種期の実測値を示す。実線はモデルの枯葉重を示し、(32)式
であてはめて求めた。}

葉重は全葉重から枯葉重を引いて表した。

$$LW(X_i) = TLW(X_i) - DLW(X_i) \quad (33)$$

ここで、 $LW(X_i)$ は*i*日目の葉重 ($g \cdot m^{-2}$)を示す。

図-23に(33)式で求めた葉重を実線で示し、実測値と比較した。積算気温に基づいた4つの式、(30)式、(31)式、(32)式、(33)式により、4月から8月までいずれの時期に播種した場合についても、積算気温と葉重の関係を適切に表すことができた。

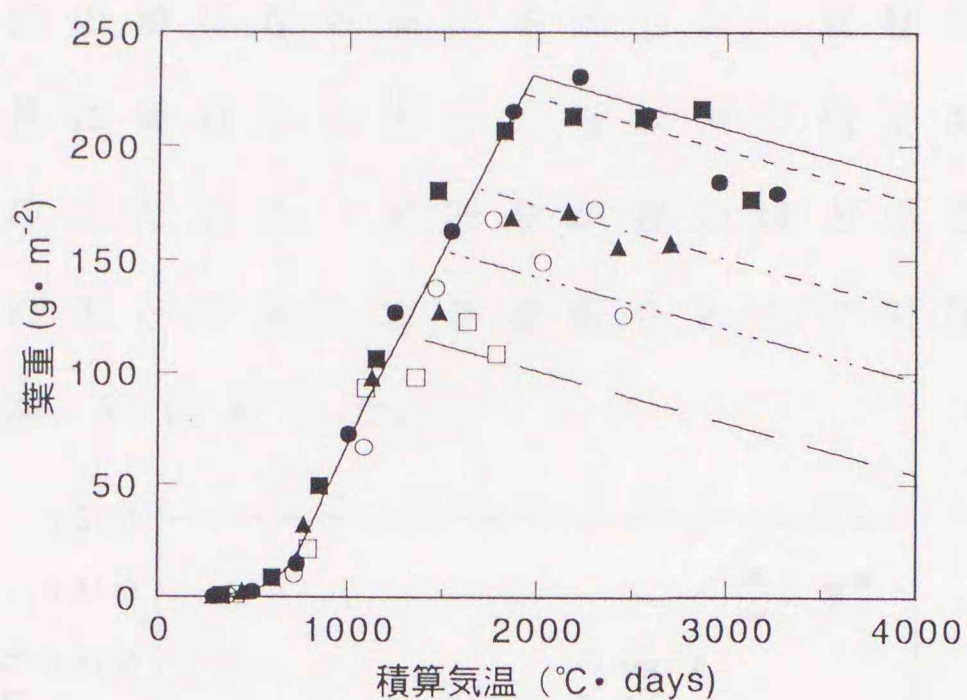


図-23 出芽日からの積算気温に対する実測の葉重とモデルの葉重の比較
 (印は図-20と同じ播種期の実測値を示す。実線及び破線は図-21と同じ播種期のモデルの値を示す。モデルの葉重は(33)式より得た。)

(2) 地上部重の推定モデル

播種期を移動したときの地上部重の推移を図-24に示した。

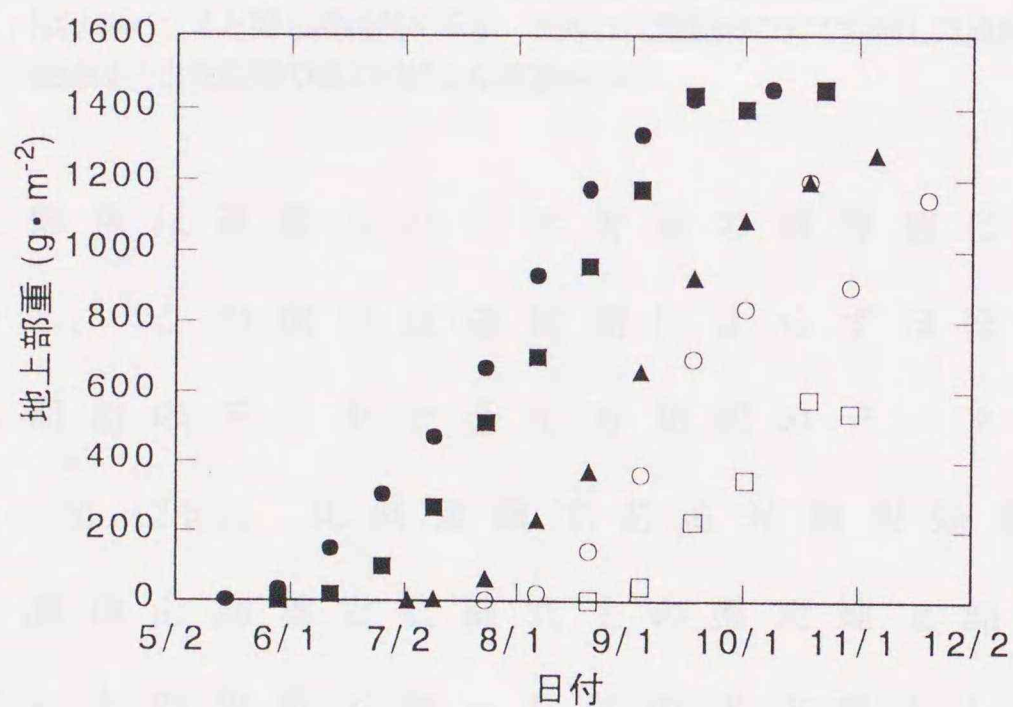


図-24 播種期を移動したときの地上部重の経日変化
 (印の●は4月, ■は5月, ▲は6月, ○は7月, □は8月に播種した実測値を示す。)

地上部重は、移植後次第に増加し始め、その後直線的な増加を示した後、増加速度が緩慢となり、最終的には、

ほぼ一定の値になる傾向を示した。収穫時の地上部重は、4月と5月に播種した場合、ほぼ同じ値であったが、その後、に播種した場合、播種期が遅いほど小さな値になった。

地上部重と群落により遮蔽された日射量の積算値との関係を図-25に示した。

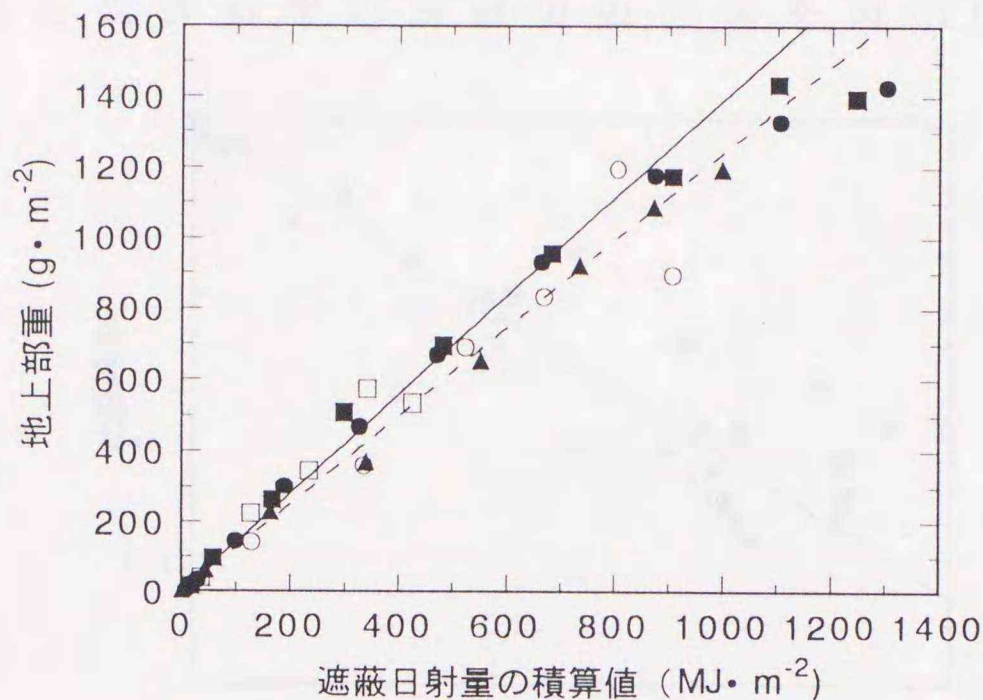


図-25 群落による遮蔽日射量の積算値と地上部重の関係
(印は図-24と同じ播種期を示す。実線は出穂期前の値で回帰した直線、破線は全生育期間の値で回帰した直線を示す。)

地上部重は遮蔽された日射量の積算値に対して直線的に増加し、この関係は播種期によらずほぼ同じであった。

出穂期前のデータと全生育期間のデータで、直線をあてはめ(図-25)、比例定数である光利用効率を求めた。また、実測地上部重と直線式上の推定地上部重の差の二乗和をデータの組数で割った値の平方根として標準誤差を求めた。出穂期前のデータの光利用効率と標準誤差はそれぞれ $1.39(\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1})$ と $36(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$ であり、全生育期間のデータの光利用効率と標準誤差はそれぞれ $1.24(\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1})$ と $80(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$ であった。出穂期前のデータの標準誤差は全生

育期間のデータの標準誤差の半分以下の値であり、出穂期前の光利用効率の方が精度が高いと考えられる。以後、この値を光利用効率とした。得られた光利用効率は、Monteith(1977)の $1.4(\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1})$ や矢島ら(1988)の $1.38(\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1})$ にほぼ等しく、妥当な値である。

葉重と光透過率の対数値の関係を図-26に示した。

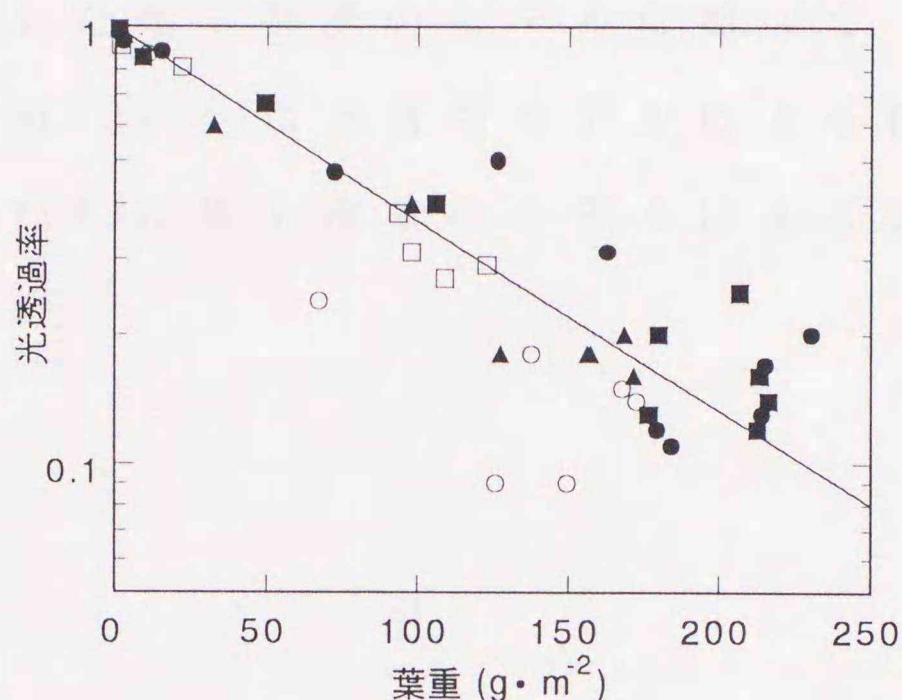


図-26 葉重と光透過率の対数値との関係
(印は図-24と同じ播種期を示す。実線は(0,1)座標を通る回帰直線。)

葉重の増加に対して光透過率の対数値は減少する傾向を示した。この葉重と光透過率の対数値との関係に、葉重が0の時光透過率が1の点を通る直線をあてはめ、葉重の指数関数で光透過率を表した(図-26)。その直線の傾きとして -1.01×10^{-2} を得た。

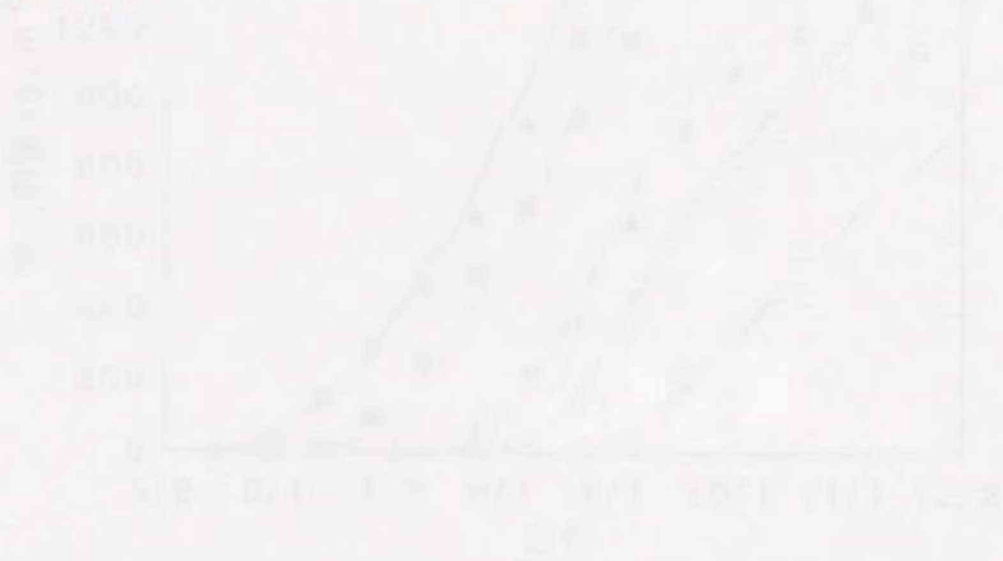
地上部重は光利用効率と群落により遮蔽された日射量の積算値との積で表されること、群落により遮蔽された日射量は、全天日射量から全天日射量と光透過率との積を引いた値で表されること、光透過率を葉重の指数関数で表すことを用いて、(34)式で地上部重を表した。

$$W_i = 1.39 \sum_{j=1}^i R_j \cdot \{1 - \exp(-0.0101LW(X_j))\} \quad (34)$$

ここで、 W_i は*i*日目の地上部乾物重($g \cdot m^{-2}$)を示し、 R_j は*j*日目の全天日射量($MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$)を示す。

(3) 地上部重の実測値と推定値の比較

(30), (31), (32), (33)式で表した葉重のモデルと(34)式で表した地上部重のモデルに従って、地上部重を推定した。図-27(A)に葉重のモデルによる推定値と実測値を、図-27(B)に地上部重のモデルによる推定値と実測値を比較した。



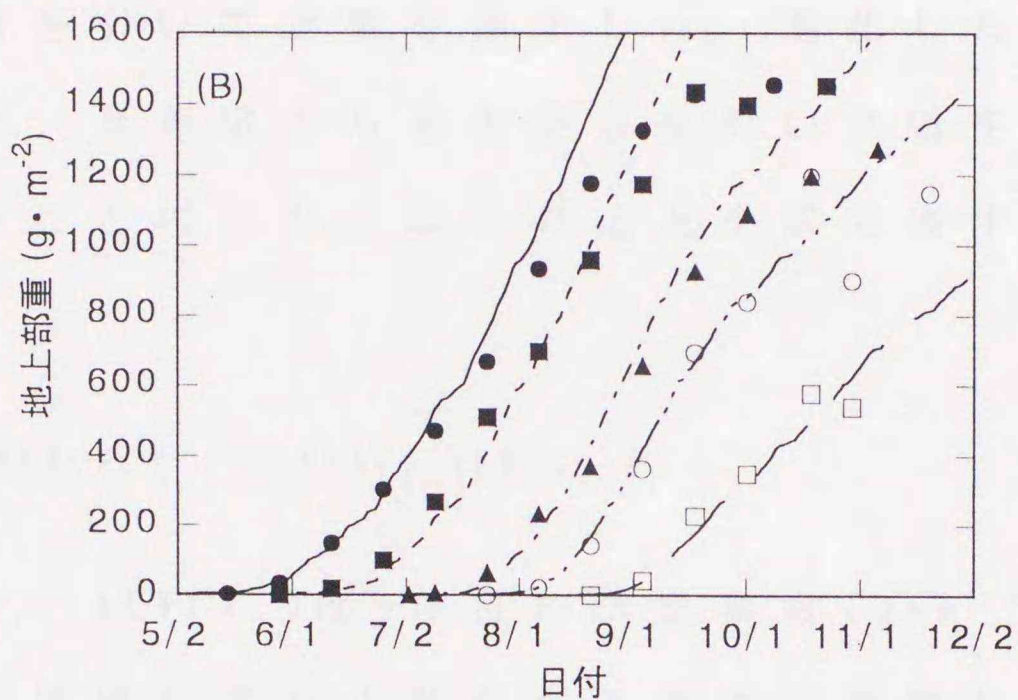
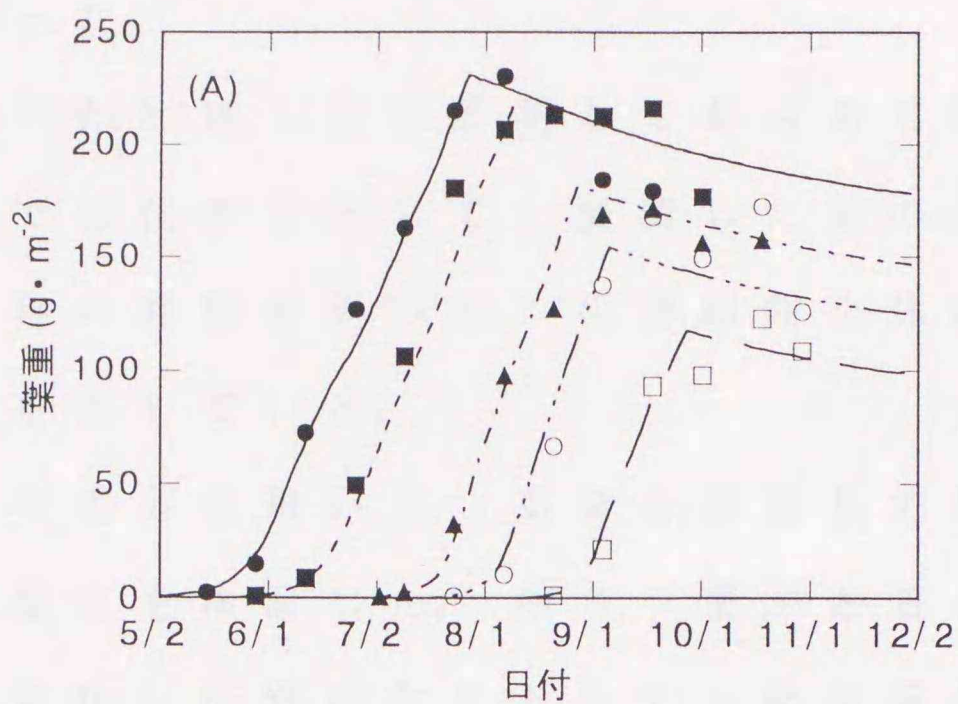


図-27 モデルと実測による葉重(A)と地上部重(B)の経日変化
 (印は図-24と同じ播種期の実測値, 実線及び破線の(——)は4月, (-----)は5月, (.....)は6月, (-·-·-)は7月, (— -)は8月に播種したモデルの値を示す.)

葉重については、モデルによる推定値と実測値はほぼ一致した。地上部重については、指数的な増加と直線的な増加をする部分では、モデルによる推定値と実測値とはよく一致した。しかし、地上部重の増加が緩やかになる生育後半では、モデルによる推定値は、その後も増加を続け、実測値よりも大きな値になった。このため、このモデルによって収穫時の地上部重を推定することがで

きなかった。

Mäas(1993)は、葉は展開してからある積算気温を経過した後で老化するとして、展開した葉の全葉面積から老化した葉の面積を引いて、生育期間全体にわたる葉面積の変化を表している。

この考え方を用いて、葉重を補正して生育後半の地上部重の推定を検討した。即ち、葉がある一定の積算気温の後で老化した葉になるとして、全葉重から老化した葉の葉重を引いて葉重を補正した。老化した葉の葉重を老化葉重、全葉重から老化葉重を引いた値を活動葉重と名付けることにした。以上のことを式で表すと(35)式になる。

$$ALW(X_i) = TLW(X_i) - TLW(X_i - J) \quad (35)$$

ここで、 $ALW(X_i)$ は*i*日目の活動葉重($g \cdot m^{-2}$)、 $J(^{\circ}C \cdot days)$ は葉が展開してから老化するまでの積算気温を表すパラメータである。 $TLW(X_i - J)$ は*i*日目の老化葉重を示す。*i*日目の老化葉重は*i*日目の積算気温 $X_i(^{\circ}C \cdot days)$ から $J(^{\circ}C \cdot days)$ を引いた $(X_i - J)(^{\circ}C \cdot days)$ における全葉重であることを表している。

(33)式の代わりに(35)式を用いると地上部重は(36)式で表される。

$$W_i = 1.39 \sum_{j=1}^i R_j \cdot \{1 - \exp(-0.0101 ALW(X_j))\} \quad (36)$$

(30)、(31)式の全葉重を表す式に(35)式、(36)式を加えて地上部重を推定した。(35)式のパラメータ $J(^{\circ}C \cdot$

days)を $10(^{\circ}\text{C}\cdot\text{days})$ 刻みで変化させて、収穫時の実測地上部重とモデルによる推定地上部重の差の二乗和を最小にする $J(^{\circ}\text{C}\cdot\text{days})$ の値($1180^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$)を求め、このときの推定値と実測値を比較した。

図-28に出芽日からの積算気温に対する(35)式のモデルの活動葉重を実線と破線で示し、実測の葉重と比較した。図-29(A)にモデルの活動葉重の推移を示し、実測の葉重と比較した。図-29(B)にモデルの地上部重の推移を示し、実測の地上部重と比較した。

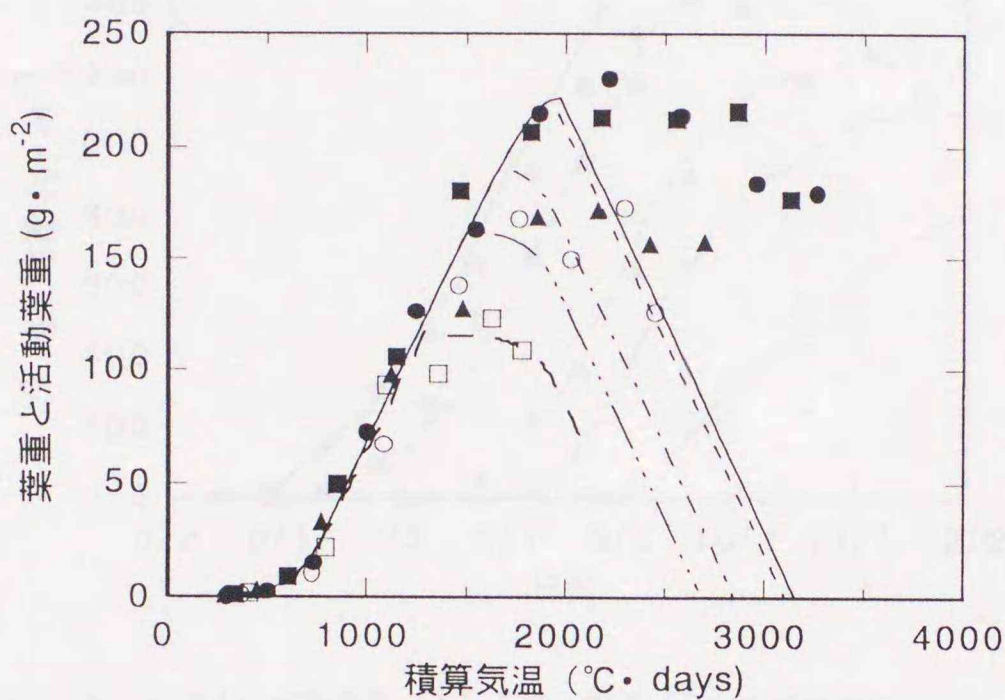


図-28 積算気温に対するモデルの活動葉重と実測の葉重の比較
 {印は図-20と同じ播種期の実測値、実線及び破線は図-21と同じ播種期の
 モデルの活動葉重を示す。モデルの活動葉重は(35)式より求めた。}

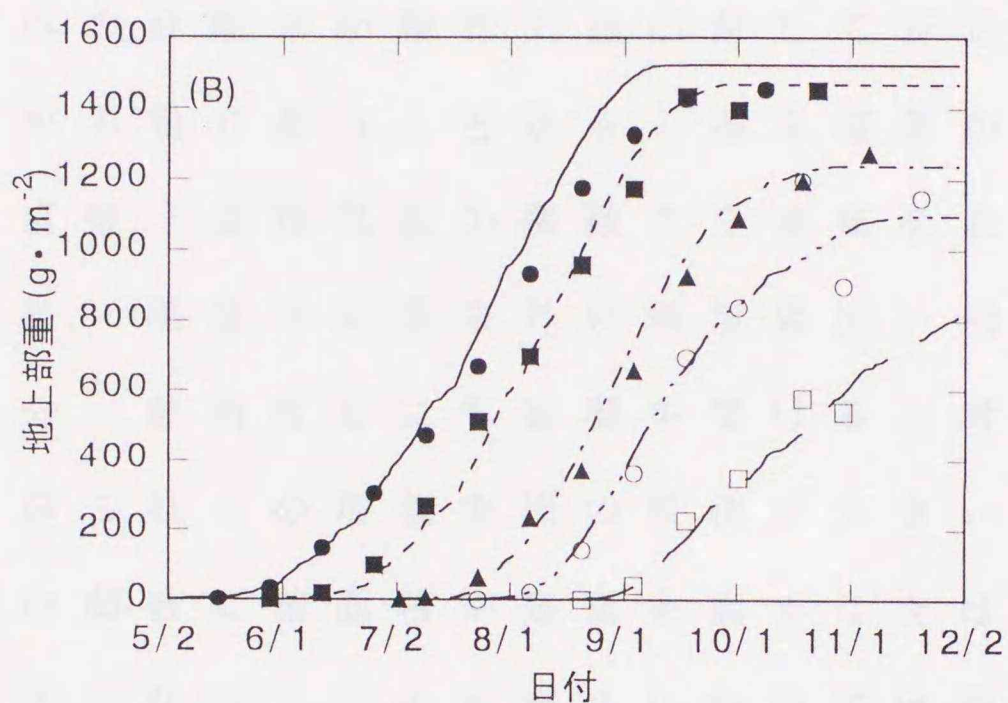
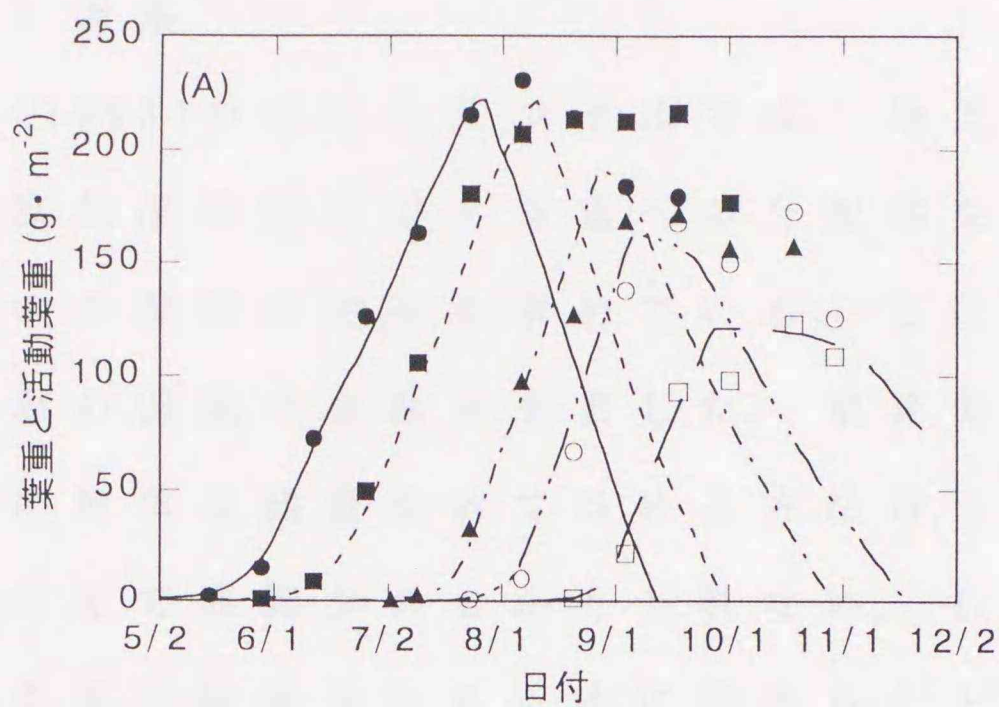


図-29 モデルの活動葉重(A)と地上部重(B)の経日変化

(印は図-24と同じ播種期の実測値を示す。実線及び破線は図-27と同じ播種期のモデルの値を示す。)

老化葉重は常に枯葉重を上まわるので、活動葉重は実測の葉重よりも急激に減少し、最終的に0の値になった。このため、遮蔽日射量、地上部重の増加量が0になり、最終的に一定になる地上部重を表すことができた。このように、4つの簡単な式である(30)式、(31)式、(35)式、(36)式からなるモデルで生育期間全体の地上部重の経過を表すことができた。

(4) 考察

Maas(1993)の提案したモデルでは、地上部乾物重の増加に積算気温の関数である葉への分配率を掛けて、展開した葉の全葉重の増加を求めている。ここでは、単純に、積算気温の関数で全葉重を表した。積算気温と全葉重との関係に簡単な関数をあてはめる方法は、植物の生産過程から考えて問題があるかもしれない。しかし、葉への分配率を本実験結果から正確に求めることは難しいことと、葉への分配率が積算気温に対して安定した値であるかどうか不明であることから、地上部重からの分配ではなく、直接、積算気温の関数で全葉重を表した。

葉面積、葉重は気温以外の環境要因、例えば、日射量、土壌水分、肥料などにも影響を受けると考えられる。気温以外のこれらの環境要因の変化が大きい場合、積算気温のみの関数で葉面積や葉重を表すことは問題があると思われる。なお、このモデルにおいては葉面積の代わりに葉重を用いたが、一般に光透過率は葉面積の指数関数で表されること、(33)、(34)式は枯葉を考慮する必要がないことから、出芽日からの積算気温の関数で葉面積を表して地上部重を推定することも考えられる。

この葉重モデルを用いて、地上部重の推定を試みたが、出穂期後の光利用効率の値も出穂期前の値と等しいとしたため、モデルの地上部重は生育後半でも増加を続け収穫時の地上部重を推定することができなかった。出穂期後の光利用効率が低下する方法により全生育期間の地上部重の推定も可能であると考えられる。しかし、この方

法では、光利用効率を何の関数にするのか、どのように表されるのかを決めなければならず、モデルはさらに複雑になる。

ここでは単純なモデルの構造を維持したままで、適合性を高める方法を採用した。すなわち、光利用効率は生育期間を通じて一定とし、その代わり葉重を補正することにより生育後半の地上部重の推定精度を高めることを試みた。補正された葉重は活動葉重と名付けた。ここで「活動葉」とは、Maas(1993)のモデルで用いられている、葉は展開してからある積算気温の後で老化するとし、この老化した葉を葉全体から除いたものとした。この方法の長所は、生育期間全体を通して光利用効率は一定であるためモデルの構造が単純になること、葉が老化するまでの積算気温であるパラメータを一つつけ加えるだけで、最終的に一定になる地上部重を表せることである。

活動葉重は、葉重が増加する生育の前半では実測の葉重と一致したが、葉重が減少する生育の後半では実測の葉重と合致しなかった。従って、生育前半には、ここで定義した完全に褐変した枯葉は老化葉とみなしてもよいと考えられる。出穂期後には、完全に褐変した枯葉以外にも、黄緑色、黄色の葉が多く含まれていたが、これらの葉は枯葉に含めなかった。生育の後半では、ここで定義した枯葉に黄緑色、黄色の葉を含めた葉を老化葉とすることも考えられる。活動葉と老化葉の判断、また葉が老化するまでの積算気温を一定とすることが生育期間全体の葉に適用できるかどうか、今後の問題点として残

されている。

得られた地上部重のモデルは、収穫時の実測地上部重とモデルによる推定地上部重の差の二乗和が最も小さくなるようにパラメータの値を選んだ結果である。即ち、このモデルは測定値に簡単な関数をあてはめた結果であり、実際に収穫時の地上部重をどれだけの正確さと精度で予測できるかは検討していない。正確さと精度を検討する方法として、播種した複数の組の1組を除いてモデルのパラメータを決め、残りの1組の結果をモデルで推定することや、他の試験結果にモデルをあてはめ比較する方法などが考えられる。このように現段階では、精度の検討が不十分なので、モデルを使用する場合には、地上部重の絶対値を予測することよりも、むしろ地上部重の推移を簡単な仮定に基づいて表現すること、地上部重を相対値で表して比較することに止めた方が良いと思われる。

5. 4 まとめ

気象要素から水稻の地上部乾物重を推定する簡易モデルを開発するために、4月から8月まで約1ヶ月毎に5回作期移動試験を行い、葉重、枯葉重、光透過率、地上部重を測定した。気候値の指標の一つである積算気温に基づいて葉重と地上部重のモデル化を試みた。モデル化はモデルの構造を簡単にする、パラメータの数を少なくする方向で進めた。

(1) 積算気温の関数で展開した全葉重と枯葉重をあてはめ、全葉重から枯葉重を引いて生育期間全体の葉重を表

した。積算気温の指数関数と直線関数を結合して全葉重を記述し、積算気温の直線関数で枯葉重を表した。次に、葉重と光透過率の関係から葉重の指数関数で光透過率を表し、群落により遮蔽された日射量の総量と地上部重の関係から光利用効率を求めた。さらに、群落により遮蔽された日射量と光利用効率から地上部重を推定した。

(2)モデルによる推定値は、葉重の実測値にはよく適合したが、生育期間を通じて光利用効率を一定とした場合、地上部重を過大に評価した。この過大評価を修正するために、葉がある一定の積算気温に達した後は老化すると仮定し、全葉重から老化した葉重を引いた活動葉重で地上部重の推定を試みた。補正したモデルは地上部重の経過を良く表すことができた。

(3)得られたモデルは測定値に簡単な関数をあてはめた結果であり、実際にどれだけの正確さと精度で収穫時の地上部重を予測できるかは検討していない。精度の検討として、他の試験結果との比較などが考えられる。

第 6 章 メッシュ気候値による水稻生育モデルの利用

6. 1 はじめに

水稻は種子の発芽に始まり、生長と発育を伴って、開花・受精して穂をつける。この一連の過程には植物の分化のメカニズムと環境適応性が深く関わっている。それらを農業気象学的観点から捉え、定式化したのが前章までに述べた発育速度による出穂期の推定モデルであり、日長や水温を考慮した出穂期の推定モデルである。さらに、乾物生産量が葉群に遮蔽および吸収された日射量に近似的に比例することを前提にして、前章で地上部重の簡易モデルを構築した。これらのモデルに含まれる経験定数は、作期移動試験などの幅広い気象条件下で決定した。

このような過程で構築したモデルの応用として、ある地点の気象データと組み合わせ、その地点の出穂期や生産量を予測することがある。さらに、メッシュ気候値などの気象情報と組み合わせて、出穂期や生産量の地理的分布を評価すること、適地適作を判定することがある。

メッシュ気候値は、国土庁の国土数値情報の地形に関するメッシュデータから多変量解析法によって未観測地点の気候値を算出したものである。既に、気温、降水量等のメッシュ気候値が公表されている。このメッシュ気候値は地域の気候の特徴を細かに把握することができるので、農業への利用価値や応用範囲が高い。

メッシュ気候値は、従来、月別平年値を基本としてい

たが、近年、日別平年値を評価する手法やアメダスデータと組み合わせて特定年を評価する手法の開発も進められている（清野，1990a, 1990b, 1995）。これらの手法の進展により農業分野への利用が大幅に広がっている。農業分野への利用としては、農業気候資源の評価、作物の生育や生産量の評価と予測、適地適作の判定等がある。

さらに、農業気候資源の評価としては、複雑な地形条件下における日射量の評価（清野・内嶋，1985，上原ら，1989，黒瀬，1991），積雪日数および最深積雪のメッシュ気候値の推定（山田・岩切，1986a, 1986b），メッシュデータによる簡易被覆下の温度推定（吉本・原藺，1993）等の研究がある。

作物の生育や生産量の評価と予測として、植物の年間の物質生産力である純一次生産力のメッシュ分布図（清野・内嶋，1988），発育速度（DVR）を用いた北海道十勝地域のトウモロコシの生育ステージのメッシュ分布図（田村ら，1989b，田村・清野，1989c），水稻の発育速度と低温感受性モデルを組み合わせた不稔歩合推定による冷害被害の分布図（矢島ら，1989，矢島，1990），水稻生育の気象的予測モデルを用いた水田バイオマス生産量分布図（高見・菅谷，1989，1990），トウモロコシの生産力分布図（桜谷，1989，1990）等の研究がある。

適地適作の判定では、気候と土壌のメッシュデータによる適地判定（中本，1993），発育速度による出穂期推定モデルと水稻の安全作季策定法（内島，1983）とを組み合わせた適地区分（宮川，1991，梅津，1991）の報告

がある。

この章では、最初に、国土数値情報とメッシュ気候値から関東地方の地形図と水田分布図を作成し、水稻生育期間の気温と日射量のメッシュ化、及びその特徴について検討した。次に、本研究で構築した出穂期推定モデルと水稻の計画栽培策定法及びメッシュ気候値を組み合わせて、安全移植期間の分布図を作成した。さらに、この分布図と実際の移植期を比較し、適地判定について検討した。また、第5章の地上部重の簡易推定モデルとメッシュ気候値を用いて、最終の地上部重の分布図を作成した。さらに、この分布図と実際の収量と比較し、生産量の地理的評価への応用について検討した。

6. 2 方法

(1) 国土数値情報とメッシュ気候値の利用法

まず、水稻生育モデルを利用するため、関東地方を対象に国土数値情報とメッシュ気候値の整備を行った。

国土数値情報は、国土庁の国土数値情報整備事業の一環として建設省国土地理院が作成したデータを利用した。この情報には、国土の地形、土地利用などに関する各種の情報が含まれており、経度方向45秒、緯度方向30秒の格子で囲まれた3次メッシュ（基準地域メッシュ、第三次地域区画、1kmメッシュとも呼ばれる）に基づいて整備されている。この格子は日本の中央付近で約1km×1kmの面積がある。

メッシュ気候値は、いくつかの気象要素が地形の影響

を強く受けることに着目し、観測地点の気象要素を目的変数とし、国土数値情報の地形に関するメッシュデータから作成された様々な地形因子を説明変数とする重回帰式により、任意未観測地点のメッシュ（1kmメッシュ）の気候値を算出したものである（気象庁、1988）。解析に使用したメッシュ気候値は、気温と日射量である。気温のメッシュ気候値は、気象庁が国土情報整備事業の一環として作成した資料、日射量のメッシュ気候値は、農業環境技術研究所がグリーンエネルギー計画の一環として作成した資料を使用した。

最初に、関東地方の1都6県（東京都、千葉県、神奈川県、埼玉県、群馬県、栃木県、茨城県）の地形及び水田の分布を把握するために、国土数値情報の地形総合データの3次メッシュ（1kmメッシュ）の平均標高データを使用し、標高の分布図を作成した。また、土地利用データの3次メッシュの面積、及び水田の面積を使用し、3次メッシュの面積に対する水田の面積割合の分布図を作成した。

次に、関東地方の水稲の生育期間の気候を把握するために、月別の気温と日射量の平年値を使用して6月から9月までの分布図を作成した。これらの分布図は、横方向2メッシュ（2km）、縦方向2メッシュ（2km）の4メッシュの平均値を2ドット×2ドット単位で図化した。

メッシュ気候値は月別の平年値であるため、生育モデルと組み合わせるためには日別の平年値に変換する必要がある。この変換は気象庁が開発した調和解析法を用い

た（清野，1990a）。すなわち，調和解析法のプログラムを用いて，平年値より計算した月別の平均気温，最低気温，日射量のメッシュ気候値を，それぞれ日別のメッシュ気候値に変換し，以後のモデル計算に使用した。

（2）安全移植期間及び地上部重の推定方法

最初に，水稻の計画栽培策定法に出穂期推定モデルを適用して，関東地方の移植期早限，移植期晩限のメッシュ分布図を作成し，実際の移植期と比較した。さらに，移植期早限から移植期晩限までを安全移植期間とし，この期間の長さで適地判定を行った。使用した出穂期推定モデルは，発育速度（DVR）を用いたモデルである（川方，岡田，1989）。

- 移植期早限，成熟期晩限，安全出穂期晩限は，坪井（1986）の安全作季の策定法に従い，次の基準で求めた。
- ① 移植期早限は，平均気温が 14°C （活着温度）以上になる日とする。
 - ② 成熟期晩限は，秋の最低気温が 10°C 以下になる日とする。最低気温が 10°C になる日は，おおむね初霜日になっている。
 - ③ 安全出穂期晩限は，成熟期晩限から45日さかのぼった日とする。

移植期晩限は，安全出穂期晩限から出穂期推定モデルを逆算して求めた。すなわち，出穂期推定モデルは移植期晩限を決定するために用いた。移植期早限から移植期晩限までの日数を安全移植期間とした。安全作季の策定の概略図と安全移植期間を図-30に示した。

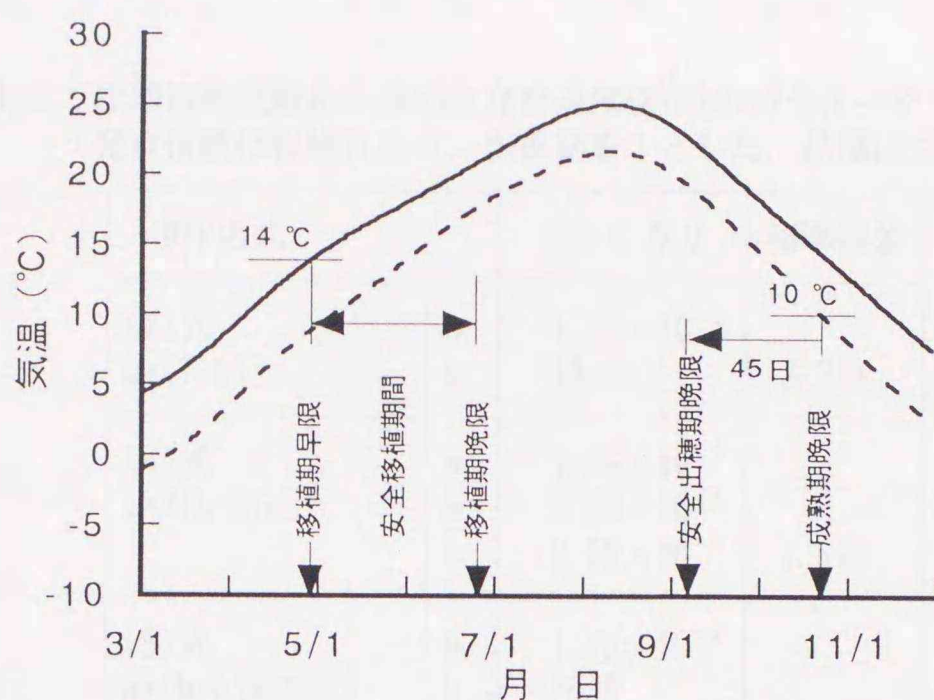


図-30 安全作季の策定の概略図と安全移植期間

出穂期推定モデルの中の発育速度(DVR)のパラメータは、第2章の試験結果から求めた。第2章では、出芽日の発育指数を0、出穂期の発育指数を1としたが(表-4)、ここでは、移植日を推定するために、移植日の発育指数を0、出穂期の発育指数を1に変形する必要がある。そこで、非線形最小2乗法で品種コシヒカリの発育速度のパラメータを再計算し(表-13)、標準誤差が小さい(4)式とそのパラメータを用いた。

表-13 作期移動試験から求めた発育速度(DVR)のパラメータ
(発育指数は移植日を0, 出穂期を1とした, 品種はコシヒカリ)

DVRの式		コシヒカリ	標準誤差
(2)式 $a \cdot (T-b)$	a	1.50×10^{-3}	2.7日
	b	13.4	
(4)式 $a \cdot T + b \cdot L + c$	a	1.05×10^{-3}	1.5日
	b	-2.53×10^{-3}	
	c	2.55×10^{-2}	
(5)式 $a \cdot (b-L) \cdot (T-c)$	a	1.75×10^{-4}	1.5日
	b	20.0	
	c	9.57	

メッシュ毎の移植期早限は日別平均気温から求めた。
メッシュ毎の成熟期晩限と安全出穂期晩限は日別最低気温から求めた。(4)式に使用する日長時間はメッシュの位置を緯度に変換して(7)式と(8)式から計算した。メッシュ毎の移植期晩限は, この日長時間と日別平均気温を(4)式に代入して求めた。

移植期早限, 移植期晩限と実際の移植期を検証するため, 農林水産省統計情報部による都県別の5カ年(平成2年~平成6年)の移植期の平均を図化した。また, 適地判定のために安全移植期間のメッシュ分布図を作成した。

次に, 水稻の地上部重の簡易推定モデル(川方・矢島, 1994)とメッシュ気候値を組み合わせ, 関東地方の地上部重の分布図を作成した。モデルの品種は日本晴である。

各メッシュ毎の日別平均気温と日別日射量及び日長時間を地上部重の推定モデルに代入し, 最終の地上部重を算定した。茨城県の耕種基準に従い, 出芽日から移植日

までの育苗期間を15日間、平均気温を20℃として、出芽日から地上部重を計算した。安全移植期間内であり、かつ4月5日から7月5日までの約10日間毎の日付（各月の上旬、中旬、下旬を代表する）を移植日として最終の地上部重を計算した。そして、最終の地上部重が最大となる場合の移植日の分布図とこの場合の最終の地上重の分布図を作成した。最終の地上部重は、成熟期晩限以前に、地上部重の増加速度が0になり一定値になった値を採用した。成熟期晩限において、地上部重が増加している場合は未成熟と判断し最終の地上部重は0とした。また、安全移植期間が0日の場合も最終の地上部重は0とした。

モデルから求めた最終の地上部重を検証するため、各都県の農林水産統計年報から農業地域別の過去10年間（昭和59年～平成5年）の収量を整理した。その内、全国の作況指数が100を下回る、昭和63年、平成3年、平成5年を冷害年とし、これらの年を除いて平均収量を図化した。これらによって、実際の収量とモデルの最終の地上部重を比較し、モデルの有効性を検討した。

6. 3 結果及び考察

（1）関東地方の気温・日射のメッシュ化とその特徴
国土数値情報によって、関東地方の地理的特徴と水田の分布を調べた。

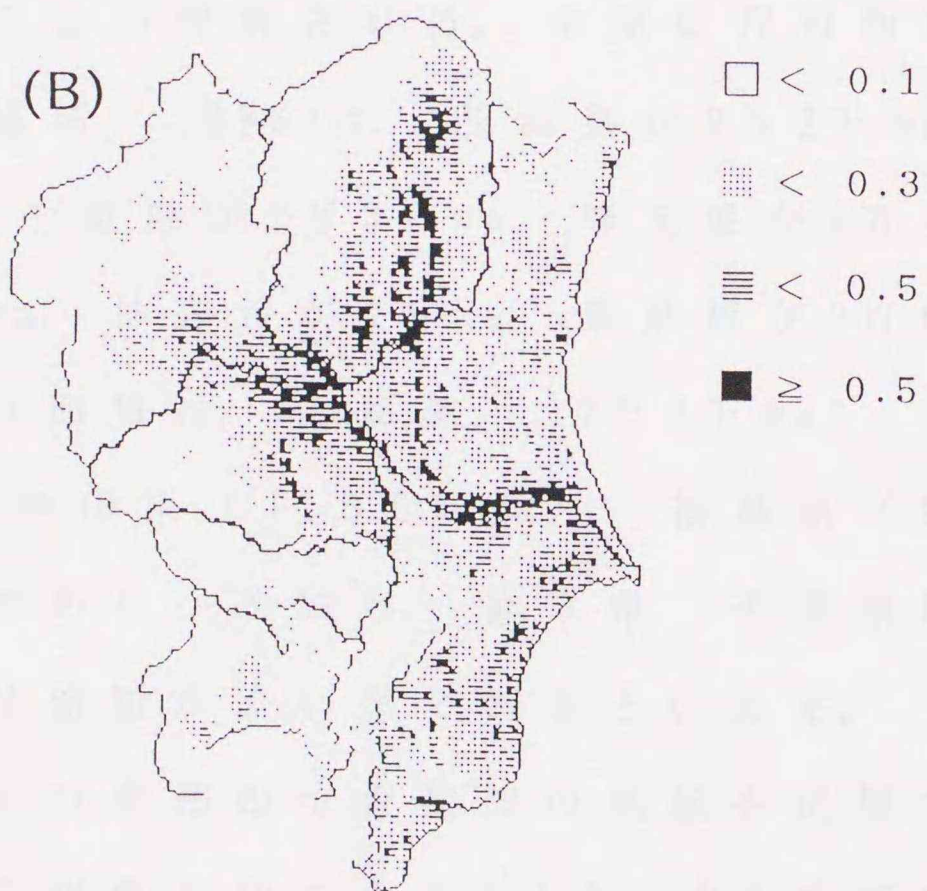
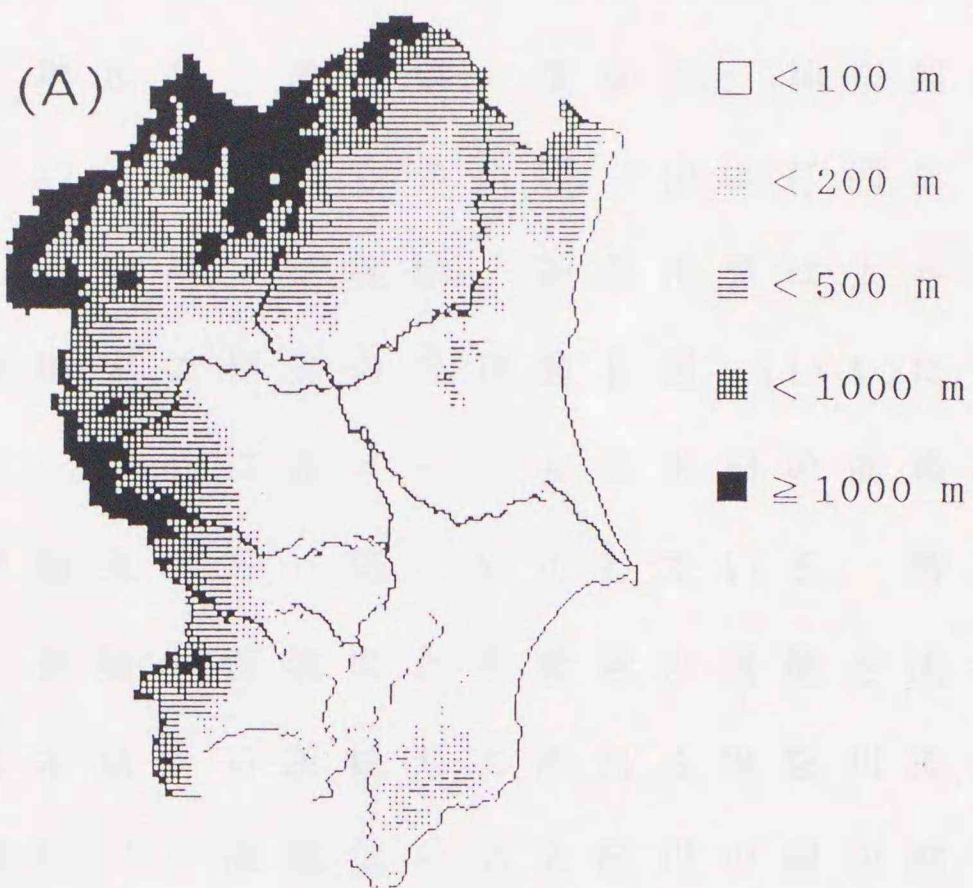


図-31 関東地方の標高(A)と各メッシュの水田の面積割合(B)の分布

関東地方は、周囲に阿武隈山地（茨城県北部）、奥羽山脈の南端（栃木県北部）、三国山脈（群馬県北部）、関東山地（群馬県、埼玉県、東京都、神奈川県各西部）が存在している。これらの山脈、山地に囲まれた関東平野の中で、茨城県、千葉県、神奈川県は太平洋に面している。関東地方の標高の分布図を図-31(A)に示した。

また、図-31(B)に各メッシュの水田の面積割合を示した。水田は関東平野一帯に分布している。特に、群馬県と埼玉県の県境、茨城県と千葉県の県境を流れる利根川周辺部、栃木県から茨城県に流れる鬼怒川周辺部、栃木県北部の那珂川上流部などの大河川の周辺部で水田の面積割合が高い。山脈、山地から平野部に流れる河川及び河川からの用水路が水田地帯の形成に重要な役割を果たしていることが理解される。水稻の作付面積（農林水産省統計情報部、1996）は、茨城県が9万2千ha、栃木県が8万5千ha、千葉県が7万3千ha、埼玉県が4万4千ha、群馬県が2万4千ha、神奈川が4千ha、東京都が3百haである。茨城県の作付面積は、北海道（17万6千ha）、新潟県（14万3千ha）、秋田県（11万6千ha）、福島県（9万4千ha）に次ぐ面積であり、茨城県、栃木県、千葉県は全国的にも水稻の作付面積が広い県であるといえる。

関東地方の水稻の生育期間の気候を把握するために、移植期から刈取り期である6月から9月までの平均気温と平均日射量の分布図をそれぞれ図-32(A)と図-32(B)に示した。

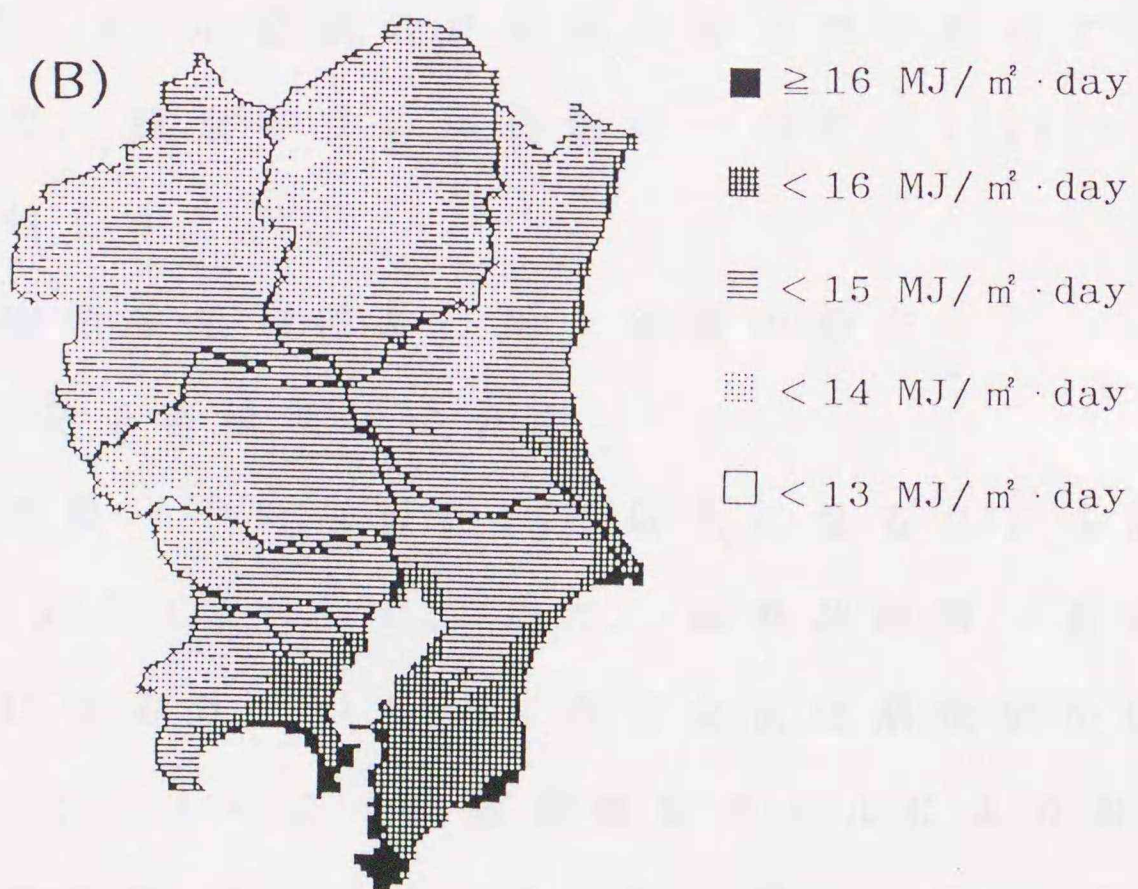
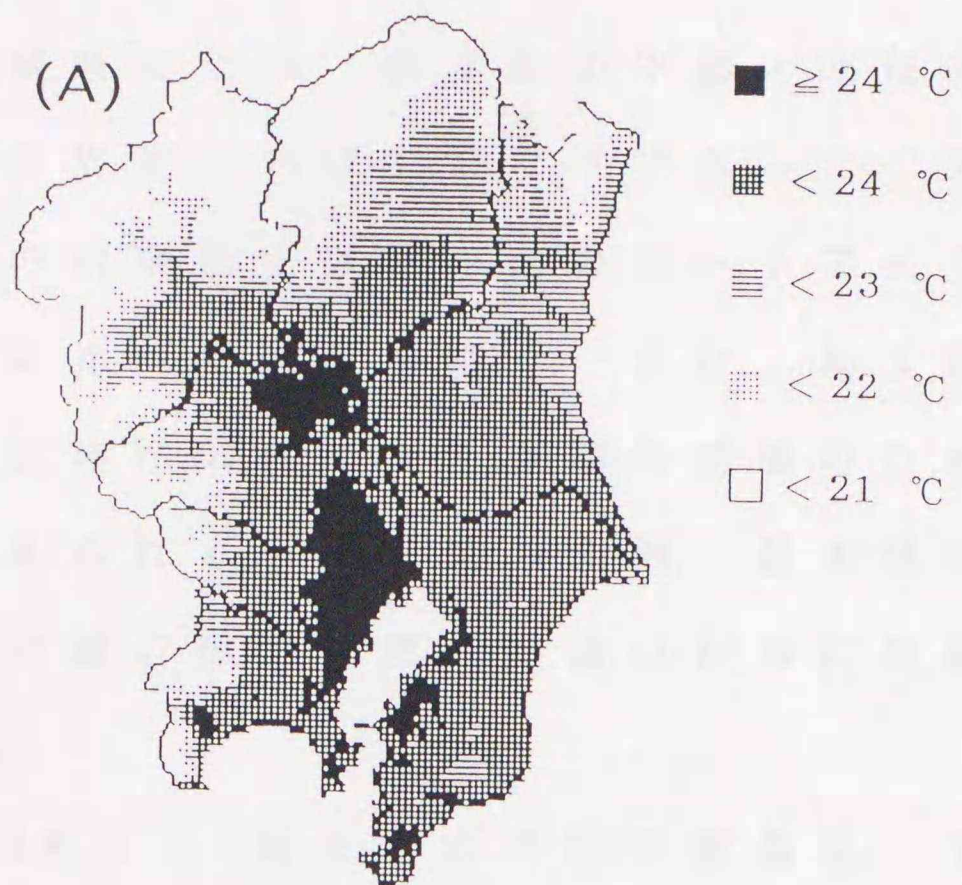


図-32 関東地方の6月から9月までの平均気温 (A) と、
6月から9月までの平均日射量 (B)

6月から9月までの平均気温は、東京都の東部と埼玉県
の南東部、埼玉県の北東部で 24°C 以上の高い値であった。
一方、茨城県の北部、栃木県の中部・北部では $22\sim 23^{\circ}\text{C}$ 、
関東平野の周辺部では 22°C 以下であった。東京都の東部
と埼玉県の南東部では都市部のヒートアイランドの影響
で周辺部に比べて気温が高く、また、埼玉県の北東部で
は内陸の大陸性気候による夏期の高温のため平均気温が
高いと考えられる。茨城県の北部、栃木県の中部・北部、
関東平野の周辺部では標高が高いために気温が低いと考
えられる。

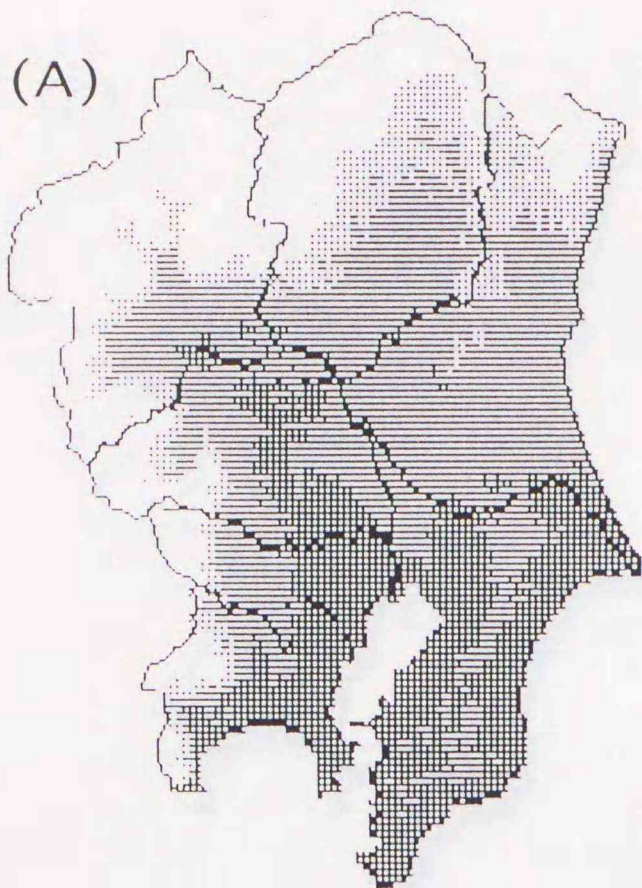
一方、6月から9月までの平均日射量は、千葉県の南部
と沿岸部、茨城県の沿岸部、神奈川県南東部で $15\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{day}$
以上と周辺よりも高い値を示した。これらの地帯
では、7月、8月の夏期の日射量が周辺部に比べて高い傾
向にあった。関東平野の周辺部の一部では $14\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 以
下の低い値を示した。

(2) 安全移植期間及び地上部重の分布

(2)-1. 安全移植期間の分布

移植期早限（平均気温が 14°C 以上になる日）を計算し、
結果を図-33(A)に示した。また、成熟期晩限（最低気温
 10°C 以下になる日）の前45日の安全出穂期晩限を図-33
(B)に示した。さらに、出穂期推定モデルにより計算した
移植期晩限を図-33(C)に、安全移植期間を図-33(D)に示
した。安全な移植期と実際の移植期を比較するために、
各都県別の移植期を図-34に示した。

(A)



■ < 4月 11日

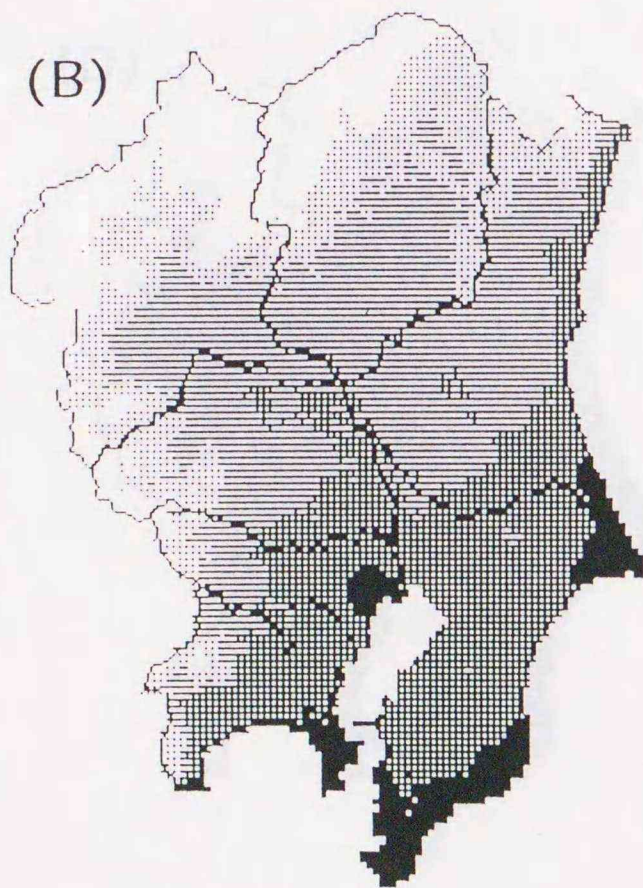
▤ < 4月 21日

▥ < 5月 1日

▦ < 5月 11日

□ ≥ 5月 11日

(B)



□ < 8月 21日

▦ < 9月 1日

▥ < 9月 11日

▤ < 9月 21日

■ ≥ 9月 21日

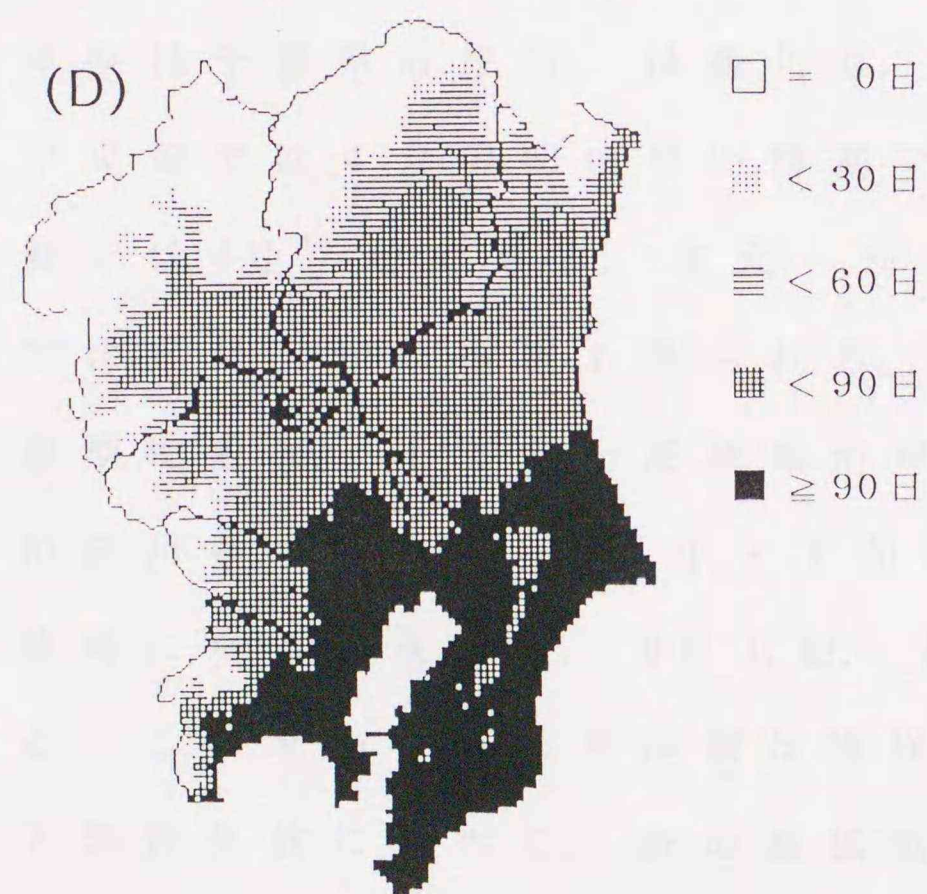
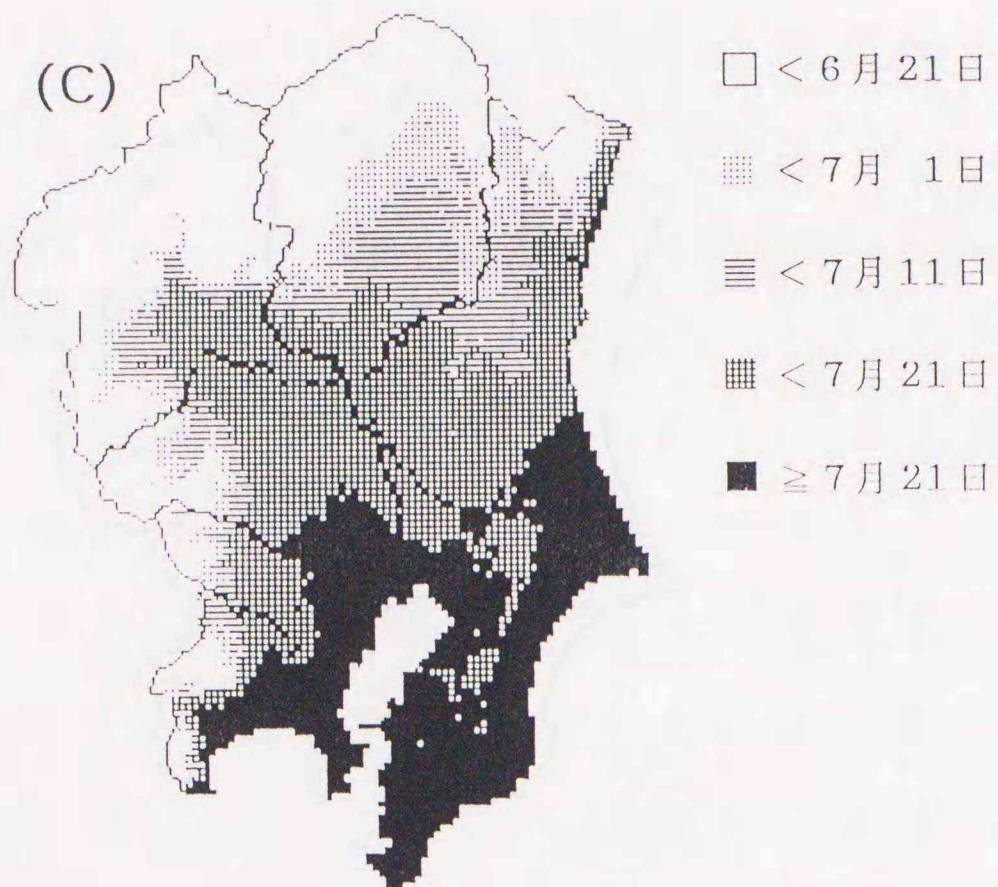


図-33 関東地方の安全作季（コシヒカリ）
 { 移植期早限（A），安全出穂期晩限（B），
 移植期晩限（C），安全移植期間（D） }



図-34 各都県別の実際の移植期

移植期早限は千葉県沿岸部，神奈川県，東京都の東部，埼玉県の中央部では4月中旬の早い時期で，その他の主な関東平野では4月下旬である。また，茨城県，栃木県の北部などでは5月上旬の地帯も見られる。

安全出穂期晩限は，千葉県と茨城県沿岸部及び埼玉県，東京都，神奈川県の各東部で9月中・下旬の遅い時期であるが，内陸部になるに従って，9月上旬，8月下旬の早い時期である。この理由は，太平洋側は海洋性気候であり，内陸部の大陸性気候に比べて，秋の最低気温が高くなるため，太平洋沿岸部の安全出穂期晩限は遅くなると考えられる。沿岸部の千葉県銚子と内陸部の埼玉県熊谷の日最低気温の平年値を比較すると，銚子の10月と11月の日最低気温はそれぞれ15.5℃，10.1℃であるが，熊谷の値

はそれぞれ 11.9°C , 5.9°C である (国立天文台編, 1992)。

移植期晩限も、安全移植期晩限と同様の分布傾向を示し、太平洋側の地帯では、7月下旬の遅い時期であるが、内陸部に向かうに従って、7月上・中旬と早まり、栃木県、茨城県の北部では6月下旬であった。

安全移植期間は、千葉県、茨城県の南東部、神奈川県、東京都の東部では90日以上の間であり、移植時期の選択の幅が大きいことを示している。その他の主な関東平野では60～90日間であった。茨城県の北部、栃木県の北部では60日以下であり、移植時期が限定されることを示している。関東の北西部周辺地帯は、安全移植期間が0であり、水稻栽培の適地とはいいがたいと判断された。この図に図-31(A)の標高を重ね合わせると、関東の北西部周辺地帯は約500m以上の高標高地帯であることがわかる。東北地方の水稻の場合、一般に冷害が発生しやすい地帯は標高300m以上といわれているが、平均気温が高い関東ではこれより高くても栽培可能地域と考えることができる。しかし、現実には減反や担い手不足から水田放棄地になっている。

各都県の実際の移植期は、図-34に示すように、いずれも、移植期早限と移植期晩限の間にあり、安全作季の策定法の有効性が示された。このうち、千葉県の移植期が最も早く5月1日であり、茨城県、栃木県と北上するに従って、5月7日、5月12日と遅くなる。これらの地帯の移植期早限は、千葉県で4月中旬、茨城県、栃木県の中部、南部で4月下旬、北部で5月上旬である。したがって、これ

らの地帯では、移植期早限に近い早植えが行われていること、また北部に向かうに従って、移植期早限が遅れ、そのため実際の移植期も遅れると考えられる。一方、群馬県、埼玉県、東京都、神奈川県の移植期は6月であり、早植えが行われていない。これは、早植えすると、登熟期が高温の時期と重なって登熟不良を起こし、逆に収量を下げる要因となるためである（坪井、1986）。

以上のことから、水稻の計画栽培策定法と出穂期推定モデル及びメッシュ気候値とを組み合わせることにより、関東地方の安全移植期間の分布図を得ることができ、適地判定に利用できることが明らかになった。また、実際の移植期と比較することにより、地域の移植時期の特徴を把握することができた。

（2）-2. 地上部重の分布

最終の地上部重が最大になる移植日の分布図を図-35（A）に、その移植日の最終の地上部重の分布を図-35（B）に示した。モデルの最終の地上部重と実際の平均収量を比較するために、各都県の農業地域別の平均収量を図-36に示した。

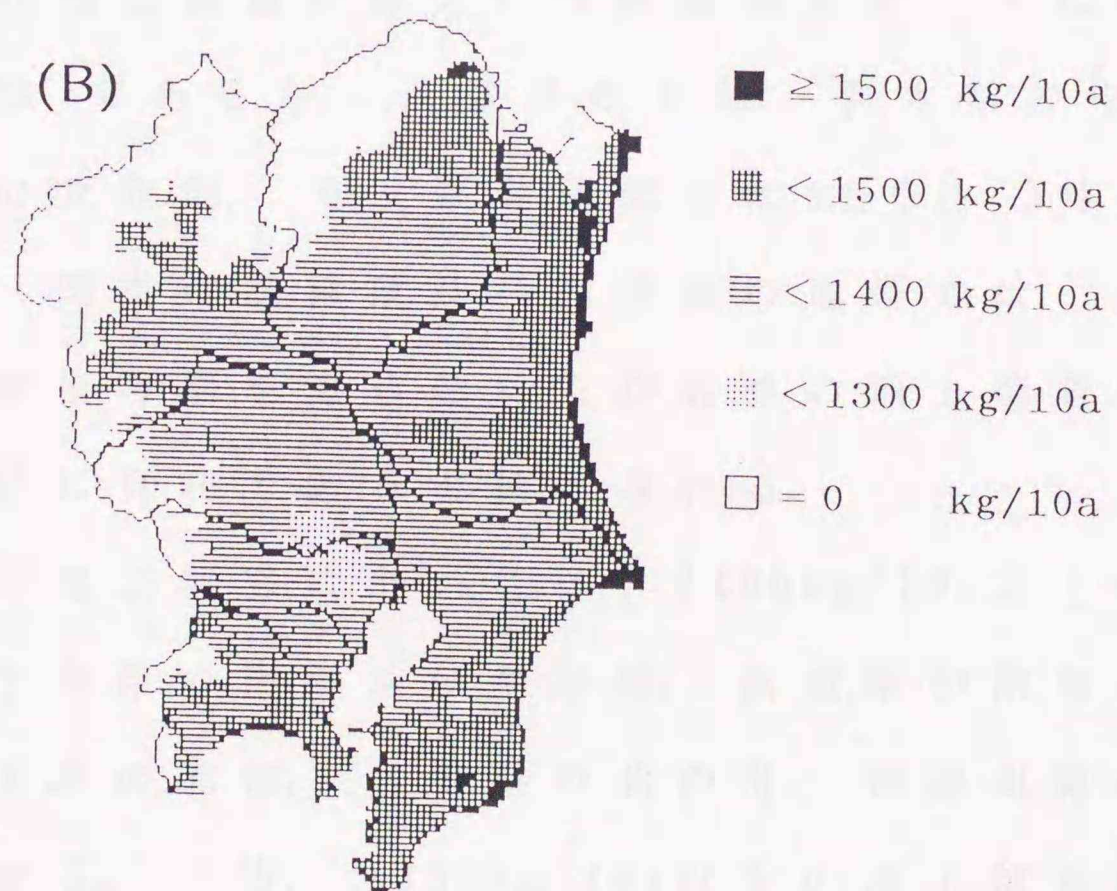
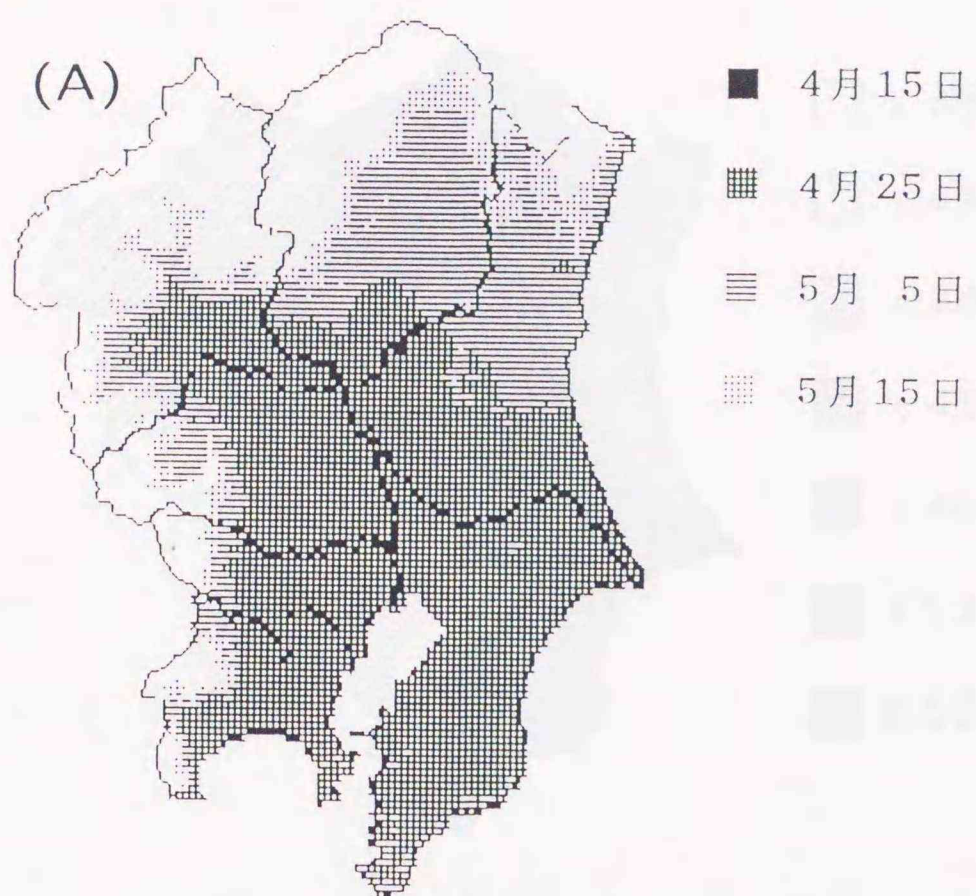


図-35 最終の地上部重が最大になる移植日(A)と
最終の地上部重(B), (品種日本晴)

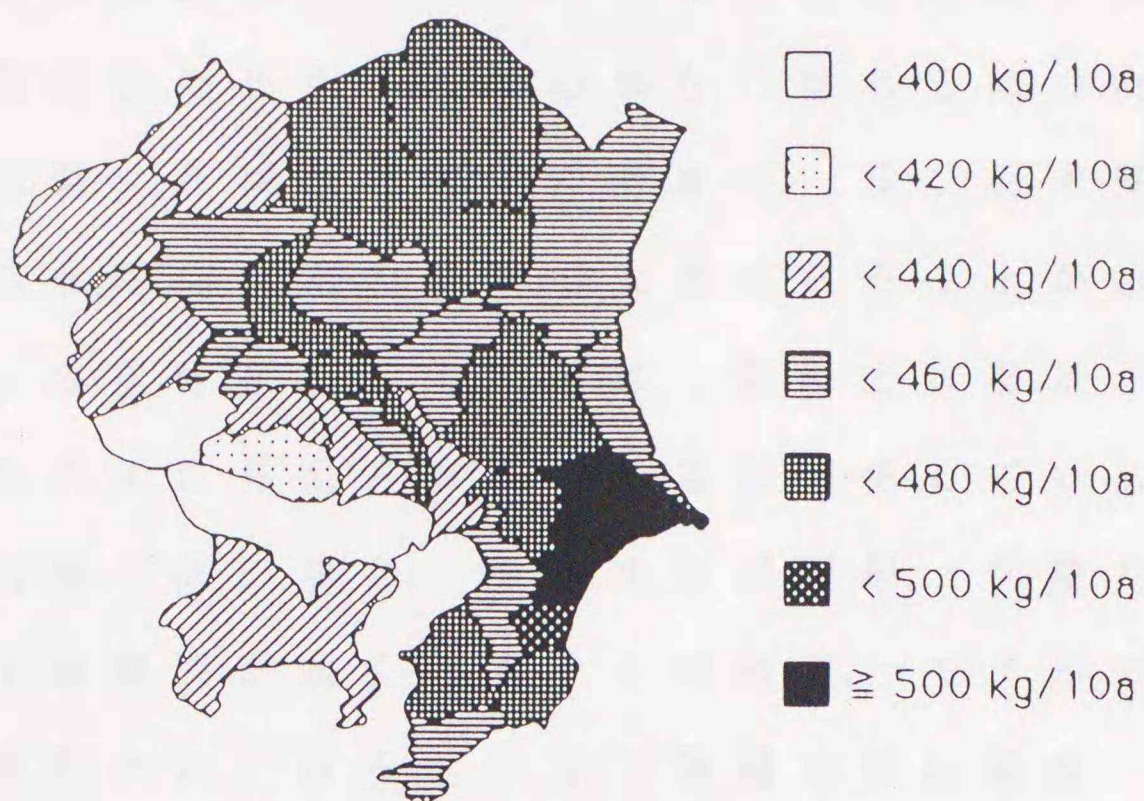


図-36 各都県の農業地域別の平均収量

最終の地上部重が最大になる移植日は、主に4月25日（4月下旬）であるが、茨城県の北部、栃木県の中部・北部、群馬県の北西部、埼玉県の西部では5月5日（5月上旬）であった。関東の高緯度及び高標高の地帯では、平野部に比べて移植時期を遅らせた方が最終の地上部重を増加させるために有利であると推察される。

最終の地上部重については、1400kg/10a以上を示す地帯は、千葉県の南部及び沿岸部、茨城県の南部及び沿岸部、栃木県の北部、群馬県の北西部、神奈川県南東部などである。一方、1300kg/10a以下の地上部重の小さい地帯は東京都の北東部、埼玉県の南部の一部である。その他の主な関東平野は1300～1400kg/10aの地帯である。関東周辺部の0kg/10aの地帯は安全移植期間が0、または

成熟期晩限以前に地上部重が一定値に到らない地帯である。この分布図をみると、モデルの最終の地上部重は東京都心部周辺で小さく、都心部から離れるにつれて増加し、千葉県、茨城県の太平洋沿岸部、及び栃木県の北部、群馬県の北西部などの地帯で大きくなることが示された。

このような分布を示す原因は、気温と日射量が地上部重推定モデルに与える影響の仕方に関係している。すなわち、気温が高い場合、モデルの出穂期、刈取り期が早まり、生育期間が短くなる。その結果、モデルの最終の地上部重が小さくなる。一方、気温が低い場合、生育期間が長くなり、モデルの最終の地上部重が大きくなる。したがって、東京都心部付近の気温の高い地帯では地上部重が小さく、また茨城県の北部、栃木県の北部、群馬県の北西部の気温の低い地帯では最終の地上部重が大きくなったと考えられる。さらに、日射量の増加は、モデルの群落による吸収日射量を増加させ、その結果、地上部重を増加させる。したがって、千葉県の南部と沿岸部、茨城県の沿岸部では最終の地上部重が大きくなったと考えられる。

農業地域別の実際の平均収量(図-36)は、千葉県の東部沿岸部にある香取、海匝、山武地区では $500\text{ kg}/10\text{ a}$ 以上の多収地帯であり、次いで、千葉県の南部にある夷隅、君津、長生地区、北部の印旛地区、茨城県の南部地域、栃木県の北部地域では $480\sim 500\text{ kg}/10\text{ a}$ である。一方、東京都、埼玉県の秩父地域では $300\text{ kg}/10\text{ a}$ 台の低収地帯であり、次いで、埼玉県の南部にある入間、北足立地区、神奈川

県では440kg/10a以下である。

ここで試算した地上部重は玄米収量と密接な関係があり、以下の関係で表されている (Horie et al. 1995)。

$$Y = h \cdot W_t \quad (37)$$

ここで、 Y は玄米収量(kg/10a)、 h は収穫係数、 W_t は全乾物重(kg/10a)である。比例定数である収穫係数は品種や栽培地域あるいは年次によって異なることがわかっている。しかし、その係数は経験則の域をでていないが、平均値として水稻で0.31が得られている。いま、図-35(B)の地上部重に0.31の収穫係数を掛けると、地上部重が1500kg/10a以上の地帯では収量が465kg/10a以上と、地上部重が1300kg/10a以下の地帯では収量が403kg/10a以下になる。この数値を図-36に示した実収量の分布と比較してみると、実収量の高い利根川下流地帯では500~530kg/10a、低い東京周辺部では400kg/10a前後であることから、地上部重から推定した玄米収量は高収量地帯では1割程度過小評価していると思われる。その理由の一つとして、全乾物重ではなく根の乾物重を除いた地上部乾物重から評価したことが考えられる。

この実収量の分布とモデルの地上部重の分布を比較すると、東京都心部周辺では小さな値であること、千葉県の太平洋沿岸部と南部、茨城県南部、栃木県の北部で大きな値である傾向は一致している。

一方、群馬県の東部、埼玉県の北東部では収量が高い傾向にあること、逆に茨城県沿岸部では千葉県沿岸部ほど収量が上がらないことなどの点で違いが見られる。気

象要素から推定した地上部重の分布と実際の平均収量の分布の違いの原因は、いろいろな要因が考えられる。その一つとして、土地の利用形態があると思われる。群馬県と埼玉県の間境は水田の面積割合が高く、逆に茨城県沿岸部は水田の面積割合が低い畑作地帯である。したがって、大規模水田地帯は実収量が高くなる要因になり、水田地帯以外は実収量が低くなる要因になると考えられる。

しかし、総体的に地上部乾物重と実収量は比例関係にあり、地上部重のモデルとメッシュ気候値を組み合わせることで平均収量の地理的分布を推定することが可能である。今後はさらに、生育モデルの信頼性を高めることにより、適地適作、農業立地計画、計画栽培により有効な判断材料が提供できる。

6. 4 まとめ

ここでは、国土数値情報とメッシュ気候値から関東地方の地形と水田分布図を作成し、気温と日射量のメッシュ化、及びその特徴について検討した。次に、本研究で構築した水稻生育の簡易モデルとメッシュ気候値を組み合わせ、その有効利用を検討した。

すなわち、①水稻の計画栽培策定法と発育速度による出穂期推定モデルを組み合わせ、移植期早限から移植期晩限までの安全移植期間の分布図を作成した。次に②地上部重の簡易推定モデルを用いて、最終地上部重の分布図を作成し、実際の平均収量と比較した。結果は以下の

ように要約される。

(1) 6月から9月までのメッシュ化された平均気温分布図によると、東京都の東部と埼玉県の南東部、埼玉県の北東部で 24°C 以上の高い値を示し、茨城県の北部、栃木県の中部・北部では $22\sim 23^{\circ}\text{C}$ 、関東平野の周辺部では 22°C 以下であった。これは東京の東部、埼玉県の南東部は都市から発生する熱の影響のためであり、また、埼玉県の北東部では夏期が高温のために、6月から9月の平均気温が高くなっていると考えられる。茨城県の北部、栃木県の中部・北部、関東の周辺部では標高が高いために、6月から9月の平均気温が低くなっていると考えられる。6月から9月までの平均日射量は、千葉県の南部と沿岸部、茨城県の沿岸部、神奈川県南東部で $15\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 以上の高い値を示した。

(2) 安全移植期間は、千葉県、茨城県の南東部、神奈川県、東京都の東部などの太平洋側の地帯では90日以上、その他の関東平野では60～90日間、茨城県の北部、栃木県の北部では60日以下であった。標高500m以上の山地、山脈では安全移植期間が0になり、気候学的には、水稻栽培の適作地帯とはいいがたいと判断された。

(3) モデルから推定される最終の地上部重は、東京都心部周辺で小さな値を示し、都心部から離れるに従って増加した。特に、千葉県の南部及び沿岸部、茨城県の南部及び沿岸部、栃木県の北部、群馬県の北西部などでは大きな値になることが明らかになった。モデルから推定される地上部重と実際の平均収量の分布を比較すると、

東京都周辺では小さな値になること、千葉県の南部及び沿岸部、茨城県南部、栃木県の北部で大きな値になる傾向はよく一致した。

一方、群馬県と埼玉県の間境では実収量の方が高い傾向にあること、逆に茨城県沿岸部では実収量の方が低い傾向にあることなどで両者に違いがみられた。この原因として、大規模な水田地帯であるか否かがあると考えられた。総体的に地上部乾物重と実際の平均収量は比例関係にあり、構築した地上部重推定モデルとメッシュ気候値を組み合わせて、平均収量の分布推定の可能性が示された。

第 7 章 総合考察

気象要素に基づいて作物の発育及び生産量を推定するモデルを構築することは、気象と農業生産の関係の体系的な理解を進めるために有効である。本章では、各章の研究の結果及び残されている問題について考察する。

7. 1 出穂期の推定モデル

水稻の出穂期予測は、従来から積算気温に基づいて行われることが多かった。出穂期までの積算気温が近似的に一定であるとすることは、定量的な表現であり、モデルとして優れた方法であると思われる。しかし、発育が停止する低温や生理的障害が起こる高温を含めた場合、積算気温で予測することが難しくなる。また、日長に反応する品種では、日長の効果について考慮する必要がある。このため、気温あるいは日長時間などの気象要素の関数である発育速度を積算し、その積算値である発育指数で出穂期を予測する手法が試みられつつある。

第 2 章では、発育速度をパラメータ化した発育指数により、幼穂形成始期、出穂期を推定することについて検討した。茨城県つくば市の農業環境技術研究所の水田圃場で作期移動試験を行い、その結果を用いて、非線形最小 2 乗法で発育速度式のパラメータを求め、5 種の発育速度式を比較した。さらに、青森県農業試験場、宮崎県総合農業試験場の試験データに、発育速度式とパラメータを適用し、問題点を整理した。

試験結果から導かれる発育速度は、気温のみの関数よ

りも気温と日長時間の関数の方が、実測値と推定値の残差2乗和をデータ数で割った平方根である標準誤差を小さくした。気温のみの関数とした(2)式と(3)式の間、気温と日長時間の関数とした(4)式と(5)式及び(6)式の間では、標準誤差に大きな差がなかった。本試験のような同一地点で幅広い播種期の条件下で得られた幼穂形成始期、出穂期を推定する発育速度式は、気温のみの関数では(2)式、気温と日長時間の関数では(4)式、(5)式のパラメータの少ない簡単な式でも十分である。これらの簡単な式でも実際の生産現場で利用することが可能であると考えられる。

一連の試験結果から求めた発育速度式とパラメータを用いて青森県と宮崎県の幼穂形成始期と出穂期を予測した。これらのデータには育苗期間中の気温が測定されていなかったもので、移植日の発育指数を推定しなければならなかった。最初に、つくばの移植日の発育指数を、そのまま青森県、宮崎県の発育指数に当てはめて計算した。その結果、宮崎では過小に評価されたが、その理由として移植日の苗がつくばでは中苗、宮崎では稚苗であることが原因と考えられた。

このように育苗期間中の気温が測定されていない場合、移植日から出穂期を推定しなければならない。このためには、移植日の発育指数を推定する方法を構築することが考えられる。しかし、発育指数は、出芽日に0、出穂期に1と定めた概念的な指標であり、その間の数値と水稻の具体的な生長に対応関係があることを保証していな

い。したがって、移植日の発育指数を推定する方法を構築することは非常に困難なことが予想される。

次に、移植日の発育指数を0、出穂期の発育指数を1と再定義して、発育速度のパラメータを再計算して出穂期を推定する方法が考えられる。この場合には、出穂期の予測としては有効であるが、発育速度式のパラメータは、出芽日を0とする場合と移植日を0とする場合では異なり、パラメータの普遍性が失われる。したがって、移植日から出穂期を推定する場合は、移植日の発育指数を推定することが困難である。また、移植日の発育指数を0として発育速度のパラメータを再計算する場合は、そのパラメータの値が出芽日の発育指数を0とした場合の値と異なることに留意する必要がある。

非線形最小2乗法で、移植日の発育指数を0とし青森県、宮崎県の出穂期の発育指数を1とした発育速度のパラメータを再計算した。発育速度が(2)式の場合の標準誤差は、他の式の場合の標準誤差に比べて大差がなかった。したがって、青森県、宮崎県の試験データのような、同一地点で毎年ほぼ同じ播種期の条件で、移植日の発育指数を0として出穂期を推定する発育速度は(2)式でよいと考えられた。(2)式は有効積算気温を変形した式である。したがって、同一地点で同じ播種期の条件下で出穂期を推定する場合は、有効積算気温でも十分に有効であると思われる。

第3章では、水稻の穂の伸長過程から出穂期を推定するモデルを構築した。作期移動試験を行い、止葉の葉鞘、

穂、穂首節間の長さを測定し、幼穂形成始期からこれらの伸長過程をモデルで表現した。この伸長モデルは、約2日以内の誤差で圃場の出穂期を推定することができた。第2章の発育指数は概念的な指標であり、具体的な生長に対応していない。この欠点を補うために、モデルを構築した。したがって、この伸長モデルは、穂の伸長過程という具体的な生長に対応しているという点が優れていると思われる。しかし、幼穂形成始期以前からは出穂期を推定することができないという短所を合わせ持っている。

第4章では、気温が一定であり、自然日長下の水稻の出穂期を調査し、この結果に基づき、気象要素から日長反応性のある水稻の出穂期を予測するモデルを構築した。従来、水稻の多くの日長反応性の実験は、一定の日長時間で処理して行われている。しかし、本実験のような連続的に変化をする自然日長下での実験例は少なく、その結果に基づいたモデル化は行われていない。実験は気温を一定に制御したガラス温室内の自然日長下で、2週間毎に1年間、6品種を播種し出穂を調査した。

実験結果は、8月から12月頃に播種した場合には、出穂までの日数がほぼ一定であった。ここでは、この時期に播種した出穂までの日数を短日下の出穂までの日数と呼ぶことにした。このうち、11月から12月頃に播種した場合には、冬期間の水槽の水温の低下のために、日数が少し長くなった。3月から7月頃に播種した場合には、他の月に比べて日数が増加した。

構築したモデルは、日長に反応する日から出穂日まで日長時間の関数を積算した値に、短日下の出芽日から出穂日までの積算水温を加えた値が、出芽日から出穂日までの積算水温に等しいとした(23)式である。ノンパラメトリックDVR法で日長時間の関数の形を求めたところ、日長時間が約12時間より短いと0であり、この日長時間より長いと増加する形を示した。基準日長時間以下では0で、この日長時間以上では直線で増加する形に日長時間の関数を簡略化し、出芽日から出穂日までの積算水温を表した(29)式を提案した。この式で計算した出穂までの日数は実測の日数とほぼ一致し、(29)式が第2章の発育速度を積算した発育指数のモデルに比べて優れていると思われる点は次の通りである。

① 出芽日に0、出穂期に1と定義した発育指数を仮定しなくてすむことである。

② 従来の一一定の日長時間で処理した場合の日長時間と出穂までの日数の関係を示すこともできる。出芽日から出穂日までの水温が一定であり、日長時間も一定である条件では、(29)式は(38)式に変形することができる。

$$H = B \cdot (H - A) \cdot \max(L - L_0, 0) + N \quad (38)$$

(38)式は、(29)式の $T_i = T$, $L_i = L (i = e+1, \dots, h)$, $H = h - e$, $A = a - e$, $N = \frac{S}{T}$, $B = \frac{b}{T}$ と置き換えて得られる。Hは出芽日から出穂日までの日数、Aは出芽日から日長に反応する日までの日数である。(38)式は、Lが L_0 より小さい場合と大きい場合に分けて解くことができる。

$$H = N \quad (L \leq L_0) \quad (39)$$

$$H = \frac{(N-A)}{B} \cdot \frac{-1}{\left\{L - \left(L_0 + \frac{1}{B}\right)\right\}} + A \quad (L_0 < L) \quad (40)$$

(40)式は、 $H=A$ 、 $L=L_0 + \frac{1}{B}$ の漸近線を持ち、座標 (L_0, N) を通る双曲線で、図-37で示される。

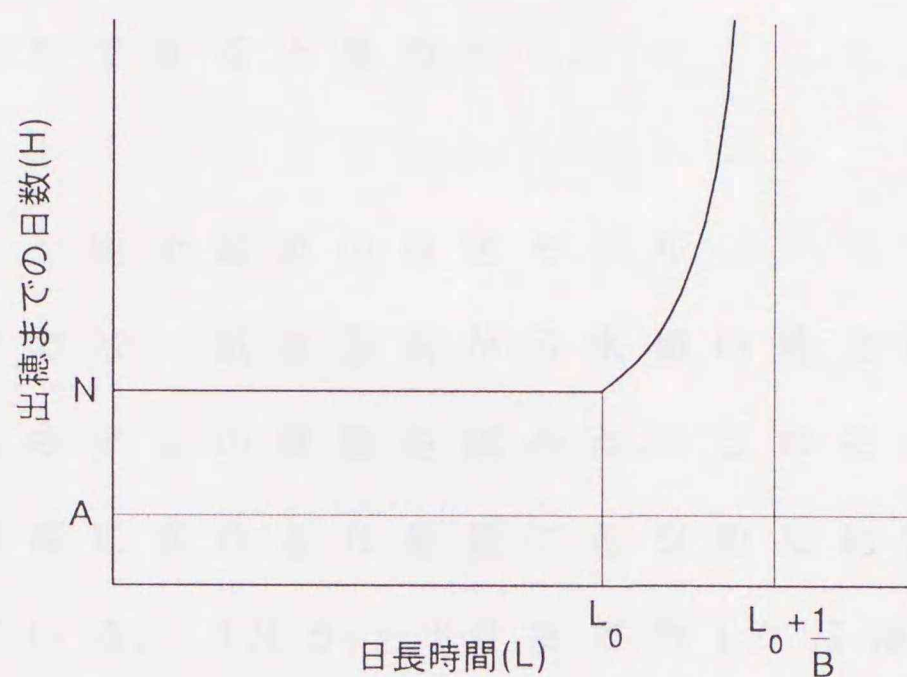


図-37 (29)式から予想される日長時間と出穂までの日数の関係

この曲線は、従来の一定の日長時間で処理した実験の日長時間と出穂までの日数の関係を示した曲線とよく似ている。したがって、(29)式は、一定の日長時間で処理した実験結果についてもある程度説明することができると思われる。

③(29)式の積算水温を積算気温に置き換えることができると仮定するならば、この式は積算気温に日長の効果を含めた式として表される。第5章では、積算気温は葉の生長と関連性が高かった。そのため、(29)式は、積算気温という葉の生長に対応した部分を含む式であり、発育指数に比べて、より具体的な生長に対応した式である

と思われる。

本実験では、1年間を通して水温を一定に制御することができなかったが、気温と水温の両方を一定に制御した実験を行うなら、実験結果とモデルはさらに精度が高くなるとと思われる。また、自然日長下で、数℃高い区と数℃低い区を加えて実験を行うなら、さらに新しい知見を得ることができると思われる。

7. 2 地上部重の推定モデル

第5章では、気象要素から水稻の地上部乾物重を推定する簡易モデルの構築を試みた。このモデルは、乾物生産量が群落にされる日射量に近似的に比例することを前提にしている。4月から8月まで約1カ月毎に5回の播種期を変えた作期移動試験を行い、この結果を用いて、地上部重（地上部乾物重）のモデルを構築した。ここでは、構造が簡易であり、パラメータの数が少ないモデルを指向した。

最初に、日射量をする葉の生長をモデルで表現する必要がある。積算気温に基づいた葉重（葉の乾物重）のモデルを構築した。積算気温の関数で、植物が生産した全葉重（葉の全乾物重）と枯葉重（枯葉の乾物重）をあてはめ、全葉重から枯葉重を引いて葉重を表した。全葉重は、積算気温の指数関数と直線関数を結合して、その増加する部分を表し、その後増加が止まり以後一定値になるとした。増加が止まる時期は、出穂期と同様に、(29)式で表した。枯葉重は、積算気温の直線関数で表した。

次に、葉重の指数関数で群落の光透過率を表した。さらに、群落にされた日射量の総量と地上部重の関係から、その比例定数である光利用効率を求めた。葉重のモデル、葉重と群落の光透過率の関係式、群落にされた日射量の積算値と地上部重の関係式を用いて、気象要素から地上部重を推定した。

葉重の推定値は、実測値の推移とよく適合した。しかし、地上部重の推定値は、生育の後半の時期において、実測値よりも過大に評価した。この過大評価を修正するために、葉は展開してから、ある一定の積算気温に達した後で老化すると仮定した。全葉重から老化した葉重を引いて葉重を補正し、この補正した葉重を用いて地上部重を推定した。この地上重の推定値は、生育期間全体の地上部重の実測値の推移を再現することができた。

ここで構築したモデルの構造は簡易であることを指向したが、これまで、いろいろなモデルの構造が提案されている。日射エネルギーから群落に吸収されるエネルギーを見積るためには、葉の生長を推定しなければならない。この葉の生長のモデルは、全乾物重から分配して推定する方法や、積算気温等の気温に基づいて推定する方法などがある。群落に吸収されるエネルギーから乾物重への変換率である光利用効率は、作物の生長とともに変化させる方法や、生育期間全体で一定として、その代わり葉の老化を考慮する方法がある。このように、生育モデルの構造は未解明の部分が多いので、モデルの構築は依然として試行錯誤の段階にあり、これからの発展の余

地は十分に残されていると思われる。

今後、数学的な解析手法やコンピュータによる計算手法を取り入れること、実験計画法に基づく生育データの測定と測定精度の向上によって、作物の生育モデルは、さらに精緻でより信頼性の高いものへと発展させることができる。

7. 3 メッシュ気候値への利用

気象要素による水稻の生育モデルは、メッシュ気候値と組み合わせることにより、その応用がさらに広がる可能性がある。第6章では、水稻の計画栽培策定法に本研究で構築した出穂期推定モデルを適用して、関東地方について安全移植期間のメッシュ分布図を作成し実際の移植期と比較した。さらに、第5章で構築した地上部重の簡易推定モデルから地上部重の分布図を作成し、実際の平均収量と比較した。

安全移植期間は、関東平野の太平洋側では90日以上、その他の主な地帯では60～90日、北部では60日以下であり、山地、山脈地帯では0日であった。安全移植期間は、関東地方の水稻栽培の適地判定を可能にし、また、実際の移植期と比較することにより、早植え地帯であるか否かを判定することができた。

モデルから推定した地上部重は、東京都心部周辺で小さな値を示し、千葉県と茨城県の南部及び沿岸部、栃木県の北部などで大きな値を示した。モデルの地上部重と実際の平均収量の分布図を比較すると、東京都周辺は低収地帯、千葉県の南部及び沿岸部、茨城県の南部、栃木

県の北部は多収地帯である傾向はよく一致した。しかし、両者の間に違いも見られ、その原因として大規模な水田地帯であるか否かが関係していると思われた。さらに、地上部重のモデル自体の精度が不十分であることも考えられる。

今後は、メッシュ気候値と組み合わせて関東地方以外の地域に生育モデルを適用すること、さらに、平均年以外の冷害年や特定年にモデルを適用することが考えられる。これらの適用にモデルがどこまで有効であるかを検証する必要がある。関東地方以外への適用を図るには、品種の特性を考慮する必要がある。平均年以外の冷害年や特定年への適用を図るには、低温障害や高温障害のメカニズム、さらに、収量形成について考察し、これらがどのようにモデルで表現されなければならないかという困難な問題が残されている。データを蓄積し、モデルの再構築及び検証を通して、モデルの信頼性を高めていくことが今後とも必要である。

今後、気象学の進歩に伴い、メッシュ気候値よりも、さらに精密な気象情報が提供されることが考えられる。また、人工衛星データから地表面温度及び気温等の広域的な気象要素を推定する研究（谷ら、1984、堀口ら、1985、堀口ら1986）に代表されるように、気象衛星データの活用により、アメダス観測点以外の広域的な気象データが提供されることも考えられる。これらの気象情報と作物の生育モデルを結合することによって、地球温暖化による作物生産の影響評価や日本及びその周辺のアジアの

地域も含めた食糧生産の評価、さらに生態系農業といった今日の課題の解決にも貢献できると思われる。

謝 辞

本論文の作成にあたり、終始懇切な御指導と御助言を賜りました北海道大学農学部教授堀口郁夫博士に衷心より謝意を表します。更に、北海道大学農学部教授中世古公男博士、並びに同教授松田豊博士には本論文の御校閲、御指導を賜り謹んで感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、多くの御指導と御鞭撻を賜りました農林水産省農業環境技術研究所環境資源部気象管理科気象生態研究室岡田益己博士（現東北農業試験場）、同前気象生態研究室長故氷高信雄博士、同気象生態研究室長矢島正晴博士（現国際農林水産業研究センター）、同研究室竹澤邦夫博士（現北陸農業試験場）、同科大気保全研究室小林和彦博士（現情報解析・システム研究室長）には厚く感謝の意を表します。農業環境技術研究所元気象管理科長内嶋善兵衛博士（現宮崎公立大学）、同元気象管理科長内島立郎博士、同前気象管理科長磯部誠之技官には多くの御激励を賜り謹んで感謝の意を表します。農業研究センター耕地利用部前気象災害研究室長真木太一博士（現農業環境技術研究所気象管理科長）、同気象立地研究室長井上君夫博士には本論文の御校閲と御助言を賜り謹んで感謝の意を表します。農業環境技術研究所気象管理科及び業務科の皆様方、農業研究センター耕地利用部及び業務科の皆様方から多くの御助言と御助力を頂きました。これらの方々に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Baker, J. T., Pinter, P. J. Jr., Reginato, R. J.,
and Kanemasu, E. T., 1986: Effects of
temperature on leaf appearance in spring and
winter wheat cultivars. *Agron. J.*, 78, 605-613.
- 2) Board, J. E. and Hall, W., 1984: Premature
flowering in soybean yield reduction at
nonoptimal planting dates as influenced by
temperature and photoperiod. *Agron. J.*, 76,
700-704.
- 3) Chapman, S. C., Hammer, G. L., and Meinke, H.,
1993: A sunflower simulation model: I. model
development. *Agron. J.*, 85, 725-735.
- 4) 土居 健一・川方 俊和・矢島 正晴, 1990: 西南暖地にお
ける水稻の出穂期の予測 - パラメトリック法の適用
例 -. *日作紀九州支部会報*, 57, 25-27.
- 5) Dwyer, L. M. and Stewart, D. W., 1986: Leaf
area development in field grown maize. *Agron. J.*,
78, 334-343.
- 6) Hammer, G. L., Hill, K., and Schrodter, G. L.,
1987: Leaf area production and senescence of
diverse grain sorghum hybrids. *Field Crops Res.*,
17, 305-317.
- 7) Hammer, G. L., Vanderlip, R. L., Gibson, G.,
Wade, L. J., Henzell, R. G., Younger, D. R.,

- Warren, J., and Dale, A. B., 1989:
Genotype-by-environment interaction in grain
sorghum. 2. Effects of temperature and
photoperiod on ontogeny. Crop Sci., 29, 376-384.
- 8) 羽生 寿郎, 1962: 本邦における夏季の気温日変化の型.
農業気象, 18, 17-20.
- 9) 羽生 寿郎・内島 立郎, 1962: 作物の生育と気象に関する研究 第一報 水稻の出穂期と気温の関係(1). 農業
気象, 18, 109-117.
- 10) 堀江 武, 1981: 気象と作物の光合成、蒸散そして生
長に関するシステム生態学的研究. 農技研報告, A28,
1-181.
- 11) 堀江 武, 1984: イネの生産の気象的評価・予測法に
関する研究 (3) 発育予測モデル並に主要品種の発育パ
ラメータ. 昭和59年度日本農業気象学会全国大会講
演要旨, 5-6.
- 12) 堀江 武・桜谷 哲夫, 1985: イネの生産の気象的評
価・予測法に関する研究 (1) 個体群の吸収日射量と乾
物生産の関係. 農業気象, 40, 331-342.
- 13) 堀江 武・中川 博視・吉良知彦, 1986: イネの発育過
程のモデル化と予測に関する研究 (1) 発育動態の気象
的予測モデルについて. 日作紀, 55(別1), 214-215.
- 14) 堀江 武・中川 博視, 1990: イネの発育過程のモデル化
と予測に関する研究 第1報 モデルの基本構造とパラ
メータの推定法および出穂予測への適用. 日作紀,
59, 687-695.

- 15) Horie, T., Nakagawa, H., Centeno, H. G. S., and Kropef, M. J., 1995: Modeling the impact of climate change on rice production in asia 4 The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. CAB INTERNATIONAL in association with the IRRI, 51-66.
- 16) 堀口郁夫・谷 宏・森川俊次, 1985: 農業気象における人工衛星データの利用に関する研究 (2) 気温と赤外放射温度計による地表面温度との関係. 農業気象, 40, 379-385.
- 17) 堀口郁夫・谷 宏・元木敏博, 1986: 農業気象における人工衛星データの利用に関する研究 (3) GMS (ひまわり) 赤外データによる地域分類と小地域の気温推定. 農業気象, 42, 129-135.
- 18) 川方俊和・岡田益己, 1989: 発育指数を用いた水稻の幼穂形成始期と出穂期の推定. 農業気象, 45, 137-142.
- 19) 川方俊和・矢島正晴・守谷孝志, 1992: 2種の棒状光センサの特性比較. 農業気象, 47, 241-244.
- 20) 川方俊和・矢島正晴, 1993: 日長および水温を考慮した水稻の出穂予測モデル. 農業気象, 49, 3-9.
- 21) 川方俊和・矢島正晴, 1994: 積算気温に基づく水稻の葉重と地上部重の簡易モデル. 農業気象, 50, 115-120.
- 22) Kawakata, T. and Yajima, M., 1995: Modeling flowering time of rice plants under natural

- photoperiod and constant air temperature. *Agron. J.*, 87, 393-396.
- 23) van Keulen, H. and Wolf, J. (eds), 1986:
Modelling of agricultural production: Weather,
soils and crops. PUDOC, Wageningen, 1986.
- 24) Kiniry, J. R., Ritchie, J. T., and Musser, R. L.,
1983: Dynamic nature of the photoperiod
response in maize. *Agron. J.*, 75, 700-703.
- 25) 気象庁, 1988: 気候値メッシュファイル作成調査報告
書 (気温).
- 26) Kobayashi, K., Miller, J. E., Flagler, R. B.,
and Heck, W. W., 1990: Modeling the effects of
ozone on soybean growth and yield. *Environ.*
Pollut., 65, 33-64.
- 27) 小林和彦, 1994: 新しい農業気象・環境の科学 第6
章植物生育シミュレーション 2. 影響評価モデル. 養
堅堂, 190-203.
- 28) 国立天文台編, 1992: 理科年表平成4年, 丸善.
- 29) 蔵田憲次・岡田益己, 1984: 環境工学入門, サイエ
ンスハウス.
- 30) 栗山英雄, 1965: 稲の出穂性に関する研究. 農技研報
告, D13, 275-323.
- 31) 黒瀬義孝, 1991: 複雑地形における250mメッシュ日射
量分布推定モデルについて. 農業気象, 47, 95-99.
- 32) Maas, S. J., 1993: Parameterized model of
gramineous crop growth: I. leaf area and dry

- mass simulation. *Agron. J.*, 85, 348-353.
- 33) Major, D. J., Rood, S. B., and Miller, F. R.,
1990: Temperature and photoperiod effects
mediated by the sorghum maturity genes. *Crop
Sci.*, 30, 305-310.
- 34) 松島省三, 1957: 水稻の収量の成立と予察に関する作物学
的研究 第3章全茎を対象とした幼穂發育経過の
解剖学的追跡. 農技研報告, A5, 29-87.
- 35) 宮川英雄, 1991: 水稻の發育ステージ予測とメッシュ
氣候値を利用した秋田県における水稻作期の策定. 農
業環境技術研究所依頼研究員研修成果発表会資料.
- 36) 三本弘乗・梁瀬雅則・中條博良, 1989: 水稻における
幼若期と日長感応性の品種比較. 日作紀, 58,
628-634.
- 37) Monteith, J. L., 1977: Climate and the
efficiency of crop production in Britain. *Phil.
Trans. R. Soc. Lond. B.*, 281, 277-294.
- 38) Muchow, R. C. and Carberry, P. S., 1989:
Environmental control of phenology and leaf
growth in a tropically adapted maize. *Field
Crops Res.*, 20, 221-236.
- 39) 中川博視・堀江 武, 1987: イネの發育過程のモデル
化と予測に関する研究 (2) 幼穂の分化・發育過程の
氣象的予測モデル, 日作紀, 56(別1), 208-209.
- 40) 中本洋, 1991: メッシュ氣候値の利用及び氣象データ
加工 - 氣候・土壤メッシュデータによる作物栽培適地

の判定 - 農業環境技術研究所依頼研究員研修報告.

41) 農林水産省統計情報部, 1996: 平成6年産作物統計.

42) 岡田益己・小林和彦, 1987: 水稻の生長予測モデル (PRISM). 日本農業気象学会1987年度全国大会講演要旨, 94-95.

43) Ralph, O. Erickson and Francis, J. Michellini, 1957: The plastochron index. Amer. Jour. Bot., 44, 297-305.

44) Roberts, E. H., Summerfield, R. J., Muehlbauer, F. J., and Short, R. W., 1986: Flowering in lentil (*lens culinaris medic.*): The duration of the photoperiodic inductive phase as a function of accumulated daylength above the critical photoperiod. Ann. Bot., 58, 235-248.

45) 桜谷哲夫, 1989: 九州における畑地のバイオマスメッシュ分布図. 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.

46) 桜谷哲夫・脇山恭行, 1990: 畑地におけるバイオマス資源のメッシュ分布図. 生物資源メッシュ分布図 (東日本) (BCP-90-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・森林総合研究所, 21-29.

47) 鮫島良次・岩切敏, 1987: 気象と大豆の生育動態に関する研究(1)開花まで期間における発育速度と日長・気温の関係. 農業気象, 42, 375-380.

- 48) Sameshima, R., 1991: A new method for predicting flowering stage in soybean. JARQ, 25, 149-153.
- 49) 鮫島良次, 1992: 作物モデルにおける水ストレスの扱い. 農業技術, 47, 539-544.
- 50) 鮫島良次, 1992: ダイズの生育シミュレーション. 日本農業気象学会1992年度全国大会合同大会講演要旨, 436-437.
- 51) Sameshima, R., 1995: Estimating the absorptivity of solar radiation in soybean canopies - for use in crop models -. J. Agric. Meteorol., 51, 37-45.
- 52) 佐藤孝平, 1960: 東南アジアの稲作 (山田登著). 農政研究センター, 11-12.
- 53) 清野 豁・内島善兵衛, 1985: 複雑地形地 (阿蘇カルデラ) における太陽放射資源量の評価. 農業気象, 41, 247-255.
- 54) 清野 豁・内島善兵衛, 1988: 日本における自然植生の純一次生産力のメッシュ分布図 (BCP-88-I-2-2). 農業環境技術研究所, 1-131.
- 55) 清野 豁, 1990a: 農業環境研究におけるメッシュデータと気象情報の利用(2) 2.メッシュデータによる農業気候資源評価と作物生産への利用. 農業及び園芸, 65, 925-931.
- 56) 清野 豁, 1990b: メッシュデータの農業環境研究への利用. 地学雑誌, 99, 618-622.

- 57) 清野 豁, 1993: アメダスデータのメッシュ化について.
農業気象, 48, 379-383.
- 58) 柴田和雄・内嶋善兵衛編, 1987: 太陽エネルギーの分布と測定, 学会出版センター.
- 59) Sinclair, T. R., Kinani, S., Hinson, K.,
Bruniard, J., and Horie, T., 1991: Soybean
flowering date: Linear and logistic models
based on temperature and photoperiod. Crop Sci.,
31, 786-790.
- 60) 新編農業気象ハンドブック編集委員会, 1974: 新編農業
気象ハンドブック, 養堅堂.
- 61) Summerfield, R. J., Collinson, S. T., Ellis, R.
H., Roberts, E. H., and Penning de Vries, F. W.
T., 1992: Photothermal Responses of flowering
in rice (*Oryza sativa*). Ann. Bot., 69, 101-112.
- 62) 高見晋一・菅谷博, 1989: 北陸における水田の生物資源
メッシュ分布図. 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, 21-30.
- 63) 高見晋一・菅谷博, 1990: 水田における生物資源メッ
シュ分布図. 生物資源メッシュ分布図 (東日本) (B
CP-90-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・森林総合研究所, 11-19.
- 64) 高見晋一, 1994: 新しい農業気象・環境の科学 第6
章植物生育シミュレーション 1. 生育モデル. 養堅堂,
174-189.

- 65) 竹澤邦夫・田村良文・小野祐幸, 1989: 作物の発育ステージのノンパラメトリック推定の有効性. 農業気象, 45, 151-154.
- 66) Takezawa, K. and Tamura, Y., 1991: Use of smoothing splines to estimate rates of development. Agric. For. Meteorol., 57, 129-145.
- 67) 田村良文・竹澤邦夫・金野隆光・小野祐幸・清野豁・門馬栄秀, 1989a: ノンパラメトリック法を用いた温度影響評価によるトウモロコシの絹糸抽出期予測. 日作紀, 58, 48-54.
- 68) 田村良文・清野豁・門馬栄秀・小野祐幸・金野隆光, 1989b: サイレージ用トウモロコシの発育ステージ予測と栽培適地判定図の作成. 農業研究センター研究報告, 17, 55-81.
- 69) 田村良文・清野豁, 1989c: 発育ステージの予測モデルとその実用化 - とくにノンパラメトリック法を中心に -. 農業技術, 44, 22-25.
- 70) 田辺國士, 1981: 非線型最小二乗法のアルゴリズム. 応用統計学, 9, 119-140.
- 71) 谷 宏・堀口郁夫・元木敏博, 1984: 農業気象における人工衛星データの利用に関する研究 - GMS (ひまわり) 赤外データによる地表面温度と AMeDAS 気温との関係 -. 農業気象, 40, 111-117.
- 72) 鳥山國士・坂本敏・岩下友記・徐進生, 1985: 異なる緯度で栽培した日本稲の出穂性について. 中国農試報告, A17, 1-16.

- 73) 坪井 八十二, 1986: 気象と農業生産. 養賢堂,
1-259.
- 74) 上原由子・清野 豁・原田昭彦, 1989: 広島県における
日照時間及び日射量のメッシュ化について. 農業気象,
45, 159-163.
- 75) 梅津敏彦, 1991: 発育ステージ予測モデルとメッシュ
気候値を活用した水稻品種の適地区分. 農業環境技術
研究所依頼研究員研修成果発表会資料.
- 76) 内島立郎, 1983: 北海道, 東北地方における水稻の安
全作季に関する農業気象学的研究, 農業技術研究所報
告, A31, 23-113.
- 77) Vergara, B. S. and Chang, T. T., 1976: The
flowering response of the rice plant to
photoperiod. A review of the literature, IRRI,
1-48.
- 78) de Wit, C. T., Brouwer, R., and Penning de
Vries, F. W. T., 1970: The simulation of
photosynthetic systems. Proc. of the IBP/PP
Technical Meeting, PUDOC, Wageningen, 47-60.
- 79) 矢島正晴・網藤芳男, 1988: 吸収日射量型モデルにお
ける光・乾物変換係数と群落吸光係数. 日作紀, 57
(別2), 149-150.
- 80) 矢島正晴・日塔明弘・清野 豁, 1989: 発育モデルを用
いた水稻不稔歩合推定法, 日本農業気象学会全国大会
講演要旨, 58-59.
- 81) 矢島正晴, 1990: 作物の生育・栄養診断, 農業及び園

芸, 65, 217-222.

82) 山田一茂・岩切敏, 1986a: 北陸地域における農業気候特性の評価と利用に関する研究 (1)積雪日数データのメッシュ化とオオムギの栽培地帯区分へのその利用. 農業気象, 42, 7-17.

83) 山田一茂・岩切敏, 1986b: 北陸地域における農業気候特性の評価と利用に関する研究 (2)メッシュ情報を用いた最深積雪の推定と棚栽培果樹地帯区分へのその応用. 農業気象, 42, 103-112.

84) 吉本真由美・原蘭芳信, 1993: メッシュデータによるダイコンの簡易被覆栽培適地の判定, 農業気象, 49, 99-104.





Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19