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

堀江 武*・桜谷 哲夫**

(* 北陸農業試験場環境部)
(** 九州農業試験場畑作部)

Studies on Crop-Weather Relationship Model in Rice

(1) Relation between Absorbed Solar Radiation by the Crop
and the Dry Matter Production

Takeshi HORIE* and Tetsuo SAKURATANI**

(* Laboratory of Agrometeorology, Hokuriku Nat. Agric. Exp. Stat.,
Inada, Joetsu, Niigata 943-01
** Laboratory of Meteorological Disaster, Kyushu Nat. Agric. Exp. Stat.,
Yokoichimachi, Miyakonojo, Miyazaki 885)

1. は し が き

イネの生産の地域間差や年次変動の大部分が気候の違いや気象の変動によってひき起されていることはこれまでの研究(村田, 1964; Hanyu ら, 1966)から明らかになっている。気象とイネの生育・収量との関係を定量的に説明かつ予測できるモデルを開発することは、収量予測はもとより生産の気象的リスク分析、およびそれに基づく栽培の気候立地計画や安定多収作期などを策定する上できわめて重要である。

気象とイネの生育・収量との関係はこれまで主として重回帰などの統計学的なモデルによって解析されていたが、これにはモデルを導くために用いられたデータの範囲(地域・年次)を超えて適用できないという限界がある。このため気象とイネの生育・収量との関係はより作物の生理・生態および気象の物理法則に則ったモデルによって解析されるようになってきているが(村田, 1964; Hanyu ら, 1966; Kudo, 1975; Iwaki, 1975; Munakata, 1976; 杉原・羽生, 1980), Iwaki (1975)を除いてはいずれもある期間の気象値と生育・収量との関係を静的なモデルによって説明しようとするものである。

最近のイネの生産現場では、気象の経過から生育各時点での生育状態を適確に評価するとともにその後の生育を予測しながら、適時適切な栽培管理を行うような農業技術の確立に対する要望が高まっている。このようなニ

ーズに対しては、これまでの静的な生育・収量の予測モデルでは自ずと限界があり、気象の経過から毎日の生育や収量を評価・予測できる動的なモデルである必要がある。

上に述べたような現状を踏まえて、本研究は気象からイネの生育・収量を動的にしかも精度高く評価・予測できるモデルを開発することを目的としている。本報告はその第一歩として水稻個体群に吸収された日射量とバイオマス(乾物)生産との関係を実験、モデルの両面から明らかにしようとするものである。すなわち、これまでに吸収日射量とバイオマス生産とは比例することが他の作物で報告されている(Shibles and Weber, 1966; Monteith, 1977; Gallagher and Biscoe, 1978)が、果してこのような比例関係がイネにおいても成立つか、そしてその関係は気象や栽培条件によってどのように影響されるかを明らかにしようとした。このため生態型が顕著に異なる水稻品種日本晴(日本型)、IR-36(インド型)および密陽23号(日印交配品種)を年度や作期を異にして栽培したり、あるいは遮光処理を行ったりして両者の関係を調べた。さらに得られた結果の検討をモデルによって行い、両者の間にはイネの生育・収量の動態の気象的予測モデルに組込めるような安定した比例関係が存在することがわかったので報告する。

2. 材料および方法

2.1 試験区の構成と栽培条件

水稻個体群の吸収日射量とバイオマス生産との関係に

昭和58年4月6日 日本農業気象学会全国大会にて発表

昭和59年8月9日 受理

及ぼす気象や品種の影響を調べるために、茨城県筑波郡谷田部町の農技研圃場において、Table 1に示すように1980, '82, '83年の3ケ年に、17とおりに異なる条件下で水稻を栽培した。いずれの年度とも主として用いた品種は日本型の日本晴であったが、1982および'83年にはインド型のIR-36および日印交配の密陽23号も合せて用いた。いずれの水稻とも育苗は人工気象室を用いて、温・湿度条件を同一にして、30～35日間の畑苗の箱育苗によった。

1980年の実験は日本晴を田植直後からカンレイシァで遮光して、日射レベルが3段階に異なる条件下で栽培して行った。1982年には日本晴を3月31日から7月5日まで約2週間隔で計8回移植して、作期を変えて栽培した。これによって3月下旬から4月上旬にかけての日平均気温10℃前後から、8月中旬の27～28℃にかけての広い環境範囲において、種々に異なった条件下で水稻を生育させることができた。1982年の5番目の作期(N5)には、IR-36(R5)と密陽23号(K5)も合せて栽培した。1983年にもこれらの品種の比較試験を反復して行った。

各試験区の大きさは年によって異なるが、最小40m²、最大500m²の範囲であり、個体群としての取り扱いが可能と判断された。土壌条件は；1982年のN5、K5およびR5区は火山灰土壌であったが、他の試験区はいずれも同一の沖積土であった。施肥量は日本晴に対しては1982年のN3-H区を除いては、いずれも同一のN、

P₂O₅、K₂O各13kg/10aであった。N3-H区はN3区と同一の作期であるが、施肥量はその15%増とした。外国稲のIR-36および密陽23号には各要素それぞれ20kg/10aを施肥した。すべての試験区とも肥料は3回に分けて分施した。除草、病害虫防除および水管理等の栽培管理は各試験区とも同様に行った。

2.2 測定方法

各年度とも圃場において入射する全短波放射、気温、湿度および水温の測定をイネの全生育期間にわたって行った。1983年には以上の測定に加えて、各試験区の植被を透過および反射する短波放射の測定を全生育期間について行った。透過短波放射の測定は管形日射計を地上約6cmの高さの株間に配置して行った。反射短波放射は日射計を下向きにして植被上約1mの高さに設置して測定した。これらの日射計からの出力は積算計によって1時間毎の積算値をもとめ、アナログ記録した。

Table 1に示すすべての試験区とも、田植直後から成熟期まで、約2週間隔でイネを根まで含めて抜きとり、器官別の乾物重、葉面積、草丈、葉数および茎数を測定した。この場合、枯死した葉身や葉鞘も注意深く回収して、それぞれの器官のバイオマスに含めた。各試験区とも成熟期には3ヶ所から10株ずつ計30株のイネを抜きとり、上の生態調査に加えて、収量構成要素の調査を行った。

Table 1. Growth conditions of rice crops on which the relationships between absorbed solar radiation and the drymatter production were investigated.

Notation	Cultivar	Sown date	Transplant date	Ripened date	Explanations
1980: shading experiment					
80-NH	Nipponbare	6/V	4/VI	10/X	100% solar radiation
80-NI	"	"	"	"	54% "
80-NL	"	"	"	"	28% "
1982: growing season and cultivar experiments					
82-N1	Nipponbare	22/III	31/III	12/IX	high nutrition level
82-N2	"	8/III	12/IV	14/IX	
82-N3	"	23/III	26/IV	19/IX	
82-N3H	"	"	"	"	
82-N4	"	5/IV	10/V	30/IX	} cultivar experiment
82-N5	"	19/IV	24/V	11/X	
82-K5	Milyang 23	"	"	13/X	
82-R5	IR-36	"	"	11/X	
82-N6	Nipponbare	4/V	8/VI	18/X	
82-N7	"	17/V	21/VI	25/X	
82-N8	"	31/V	5/VII	5/XI	
1983: cultivar experiment					
83-N	Nipponbare	4/IV	6/V	26/IX	
83-K	Milyang 23	"	"	15/IX	
83-R	IR-36	"	"	22/IX	

3. 実験結果

3.1 乾物生産の動態および収量

1982年に作期を異にして栽培した日本晴の各個体群の全乾物重と葉面積指数(LAI)の生長の時間変化が、Fig.1とFig.2にそれぞれ示されている。各作期の水稻とも乾物重はロジスティック型の生長経過をたどり、成熟期ごろに最大値に達したが、LAIは出穂期ごろに最大値に達した後、登熟期には漸減した。

Fig.1およびFig.2において、最初の三つの作期の各水稻(N1, N2, N3)の乾物重と葉面積の生長曲線はほとんど重なっていることがみられる。これはN3の作期(4月26日移植)までは、日平均気温が15℃以下と低く、イネは本田で事実上生長を停止していることを示している。この第3番目の作期以降は、後で移植したイネが前に移植したものの生長を追い越すことはなかった。これ

Fig. 1. Time changes in whole crop dry weight (including roots) of rice cultivar "Nipponbare" grown by shifting the sowing date at Tsukuba in 1982.

Fig. 2. Time changes in LAI of "Nipponbare" rice grown by shifting the sowing date in 1982.

らのことから茨城県南部における実用的な移植の早限は4月下旬ごろと判断される。

1982年に作期、品種そして肥料レベルを変えて栽培した各水稻の最終乾物重および粗玄米収量(水分0%)と移植時期との関係をFig.3に示す。日本晴の最終乾物重は第4番目の作期(N4, 5月10日移植)までは、作期にかかわらずほぼ一定の約18 t/haであるが、この時期を過ぎると移植期が遅くなるほど漸減し、最後の作期(N8, 7月5日移植)でそれは約13 t/haとなった。一方収量の方も全乾物重と同様な作期反応を示し、第4番目の作期まではほぼ一定の約5.3 t/ha(通常の14%水分の収量で約6.2 t/ha)であったが、この時期を過ぎると移植期が遅くなるほど収量が低下し、8番目の作期では約3.7 t/haとなった。

Fig. 3. Relation between transplanting date and dry weight of whole crop and brown rice of cultivars of "Nipponbare", "IR-36" and "Milyang 23" grown in 1982.

Standard N. denotes a standard nutrition level and high N., the level of 15% more of the standard.

第3番目の作期の日本晴(N3)と作期は同一であるが、それよりも肥料を15%増とした試験区(N3-H, 3図に黒丸で示す)の最終乾物重と収量とはともにN3区のそれとほぼ同様であった。このことから本実験の日本晴の施肥量は品種の特性からみて適量であって、Fig.1, 2, 3にみられた。作期移動にともなう生育・収量の差異は肥料ではなく気象条件の違いを反映して現われたものとみなされる。

Fig.3において、5番目の作期の日本晴(N5)と、それと同一時期に栽培されたインド型のIR-36および日印交配の密陽23号とでは、最終乾物重は三者ほぼ同一ないしは外国稲の方が幾分低い傾向にある。ところが粗玄米収量は外国稲の方が高く、密陽23号で約6 t/ha(14%水分表示で約7 t/ha)そしてIR-36で約5.3 t/ha(同

6.2 t/ha)であった。このように外国稲の方が日本稲よりも全乾物重中に占める収量の比率、すなわち収穫指数 (harvest index)が高いことがわかった。

収穫指数が生育時の気象条件や品種によってどのように変化するかを明らかにするため、Table 1 に示した3ヶ年にわたる全試験区について、全乾物生産量と粗玄米収量との関係を調べ、つぎのような結果を得た。すなわち、日本晴では遮光処理区や作期試験区をすべてこみにして、粗玄米乾物重は全乾物重に比例し、その比例係数すなわち収穫指数は環境条件にかかわらず一定の0.31であった。一方、密陽23号とIR-36の2品種の2年間平均の収穫指数は0.37で、日本晴よりもかなり大きい。

以上のことから多収品種といわれている密陽23号やIR-36の多収性の原因の一つが高い収穫指数にあることが明らかになった。なおTable 1に示した全試験区中最高の粗玄米収量(水分14%)は1983年の密陽23号(83-K区)で約7.8 t/haであった。

3.2 吸収太陽放射量

Fig. 4 に、日本晴について得られた、田植直後から成熟期までの全生育期間における、1日あたりの植被の全短波放射反射率 r および透過率 τ の生育にともなう変化が、葉面積指数LAIのそれとともに示されている。水稻個体群の日射透過率 τ は田植直後には1.0であるが、LAIの増加とともに指数関数的に減少した。図において、田植後約90日のLAIが最大になった時期が出穂期である。この出穂期を過ぎるとLAIが減少するにもかかわらず、 τ が継続して減少しているが、これは出穂期を過ぎると緑葉による日射の吸収に加えて、穂、稈および枯死葉が日射を吸収するためである。

Fig. 4. Time changes in LAI, canopy transmittance (τ) and reflectance (r) of daily short-wave radiation of Japonica type rice cultivar "Nipponbare".

水稻個体群からの反射率 r は地面あるいは水面からの反射が卓越する生育初期には約0.1であるが、LAIの増加とともに大きくなり、出穂期頃に最大値の約0.22となった後、登熟末期になって黄化した穂や葉の比率が高まるにつれて低下する傾向がみとめられる。外国稲のIR-36や密陽23号についても、Fig. 4の日本晴の場合と同様な τ と r の経時変化がみられた。

Fig. 4にみられた、水稻個体群の1日あたりの全短波放射の反射率 r と葉面積指数 F_t との関係はつぎの式(蒸発散研究グループ, 1967)によってよく表わせることがわかった。

$$r = r_f - (r_f - r_o) \exp(-k_r F_t) \quad (1)$$

ただし r_f と r_o は地面が完全に植被で覆われたときと裸地の反射率、 k_r は F_t と r との関係の特徴づける係数である。(1)式の各パラメータの品種による違いは小さく、3品種平均で $r_o = 0.1$ 、 $r_f = 0.22$ 、 $k_r = 0.5$ と推定された。本実験で得られたこれらの直は、蒸発散研究グループ(1967)、岸田(1973)および広田ら(1978)の測定値とほぼ一致している。

一方、水稻個体群の1日あたりの日射の透過率 τ と F_t との関係は、Monsi und Saeki (1953)の式から導かれるつぎの式によってよく表わせることがわかった。

$$\tau = \exp\{-(1-m)k_* F_t\} \quad (2)$$

ここで、 m : 植被による日射の散乱係数(= (葉の透過率 + 反射率)/2)、 k_* : 葉を完全黒体とみなしたときの日積算日射量についての消散係数、である。みかけ上の消散係数 $(1-m)k_*$ の値は、植被の日射吸収のほとんどが葉によって行われている出穂期までは、生育時期にかかわらずほぼ一定で、日本晴で0.45、密陽23号で0.41、IR-36で0.43であった。出穂期を過ぎると、穂、稈および枯死葉の非同化部分による日射の吸収が加わるため、葉群のみについての消散係数をもとめることはできなかったが、稲の姿勢より判断して、出穂後も葉群のみによるみかけ上の消散係数の値は、上に示した値から大きくは変化していないと考えられた。

イネおよびその他の植物の葉の短波放射の吸収率は約0.5であることが知られており(岸田, 1973; Gates, 1980)、したがって(2)式の散乱係数 m の値は0.25と推定される。この m の値と上に示した $(1-m)k_*$ の値とから、葉を完全黒体としたときの日積算日射量についての消散係数 k_* の値は、日本晴、密陽23号およびIR-36でそれぞれ0.60、0.55および0.57と推定される。この値はイネ個体群の幾何学的構造のデータを用いて計算によってもとめた、散乱放射の消散係数の値(堀江, 1981)よりも幾分小さいが、ほぼそれに匹敵する。

植被の日射吸収率 α は、すでに岸田(1973)によって

示されたように、つぎの式から求めることができる。

$$\alpha = 1 - r - (1 - r_0)\tau \quad (3)$$

Fig. 4 に示した、毎日の r と τ の実測値を地面の反射率 r_0 とともに (3) 式に代入することによって、吸収率 α の生育にともなう変化を得ることができる。 α はまた、LAI の生長曲線のデータ (Fig. 2) を用いて、(1), (2) 式より r と τ をもとめ、それを (3) 式に代入することによって、その生育にともなう変化が推定できる。この二つの方法によって、日本晴、密陽 23 号および IR-36 の日射吸収率 α の生育にともなう変化をもとめ、両者を比較したのが Fig. 5 である。この場合、 k_r や $(1-m)k_*$ などのパラメータの値は生育時期にかかわらず一定として、それぞれ上に示した値が使用された。

Fig. 5. Comparisons between measurements and estimations of solar radiation absorbance by the rice canopies of three different cultivars, during their growth.

植被の日射吸収率 α は、いずれの水稲品種とも生育初期のゼロ付近から末期の約 0.75 まで、生育とともに増加した。生育中期ごろに日本晴の α の推定値は実測値を幾分下まわり、また生育末期には 3 品種とも α の推定値は実測値を下まわったが、これを除いては実測値と推定値とはよく一致しているといえる。生育末期に α の推定値が実測値を下まわったのは、葉群のみによって日射が吸収されるとして α が推定されているのに対し、実際には生育末期になると葉の他に穂、稈および枯死葉などによる日射の吸収が加わるためである。後で述べるように、植被の日射吸収を物質生産と関係づけるには、非同化器官による吸収を除外して葉のみによる吸収量をもとめる必要がある。これを考慮すれば、ここに示した葉面積指数から日射の吸収率をもとめる方法は、満足できる精度で物質生産の研究に適用できると考えられる。

植被の日射吸収率をもとめる (1), (2), (3) 式は、全

短波放射についての散乱係数 m および植被と地面の反射率 (r_f と r_0) の代りに、光合成有効放射 (PAR) についてのこれらパラメータの値を用いることによって、PAR の吸収率の推定にも適用できる。これに必要な PAR についてのこれらのパラメータ値として、岸田 (1973) および Gates (1980) から $m_p = 0.07$, $r_{fp} = r_{op} = 0.07$ を用いて、次節以降に示される、水稲個体群による PAR の吸収量を推定した。

3.3 吸収日射量と乾物生産の動態との関係

1983 年の日本晴の田植直後から成熟期にいたるまでの生育の各時点における、根や枯死葉も含めた現存量すなわち純生産量と、その時点までに植被に吸収された短波放射の積算値 S_s あるいは PAR の積算値 S_p との関係が Fig. 6 に示されている。同図には吸収短波放射の積算値を、前節に示した τ と r の測定値を用いてもとめた場合 (実測) と、LAI の測定データから (1), (2) 式によって推定した τ と r を用いてもとめた場合のそれぞれについて、乾物生産との関係が示されている。また PAR の吸収量は、植被に入射する PAR は全短波放射の 50% としをもとめた。

Fig. 6 より、吸収短波放射量 S_s あるいは吸収 PAR 量 S_p と乾物生産 W_t との間には、生育末期を除いてつぎの直線関係が成立つことがわかった。

$$W_t = C_s S_s \quad \text{又は} \quad W_t = C_p S_p \quad (4)$$

Fig. 6. Relation between the total crop dry weight (W_t) at different time of the growth and the absorbed shortwave radiation (S_s) or PAR (S_p) cumulated over the time for "Nipponbare" rice crop in 1983.

S_s was obtained by the two different ways: one is by using the radiation transmittance (τ) and the reflectance (r) measured each day (Fig. 4), and another by using the estimated τ and r from the LAI growth curve by eqs. (1) and (2).

ここで C_s と C_p は吸収短波放射あるいは PAR から乾物への変換係数もしくは変換効率 (conversion efficiency) である。 W_t と S_s との関係において、 S_s の実測値を使用した場合と推定値を使用した場合とでは、推定値を使用したときの方が生育後期まで直線関係が成立することがみられる。これはすでに述べたように、 S_s の測定値には非同化器官による放射エネルギーの吸収が含まれるためである。

S_s あるいは S_p に推定値を用いても、イネが成熟期に近づくにつれて W_t と S_s あるいは S_p との関係は直線からはずれて次第に頭打ちになることがみとめられる。Table 1 に示した日本晴の全試験区について検討したところ、田植直後から出穂後約 20 日ごろの登熟期前半までは W_t と S_s もしくは S_p との関係は直線とみなされ、これを過ぎると直線関係からはずれることがわかった。これは登熟後期になると光合成産物の受け入れ器官である穂の受け入れ能力が低下し、その結果物質生産力が低下するためと考えられる。

Table 1 に示した日本晴についての全試験区のうち、遮光処理区を除く 10 の試験区をこみにして、田植直後から出穂後 40 日および 20 日までの間の生育各時点における乾物現存量 W_t とその時点までの吸収短波放射量 S_s もしくは吸収 PAR 量 S_p との関係をプロットして、Fig. 7 に示すような結果を得た。Fig. 7 の結果から、栽培年度や作期を変えることにより、生育時の気象条件が 10 とおりに異なる環境下に栽培されたイネの生長過程において、(4) 式の比例関係が成立し、かつその比例係数 C_s あるいは C_p の値は環境条件にかかわらずほぼ一定とみ

なすことができる。

すでに述べた理由から、水稻のはば全生育期間にあたる移植直後から出穂後 40 日までの期間について W_t と S_s あるいは S_p との関係を直線で近似した場合よりも、出穂後 20 日目までに限って直線式をあてはめた方が決定係数 (R^2) が高くなり、かつ関係直線の比例係数すなわち光エネルギーの変換効率 (C_s と C_p) も高くなる。 W_t と S_s あるいは S_p との関係が直線とみなせる出穂後 20 日目までの期間では、植被に吸収された短波放射 S_s および PAR (S_p) から乾物への変換効率は環境条件にかかわらずそれぞれ $C_s = 1.90$ および $C_p = 2.88 \text{ g/MJ}$ と推定された。 W_t と S_s もしくは S_p の関係が直線からはずれる、登熟後後半を含む出穂後 40 日目までの期間について、上の変換効率の値を推定したところ、それぞれ $C_s = 1.79$ 、 $C_p = 2.75 \text{ g/MJ}$ であった。

上に示した各パラメータの推定値の妥当性を調べる目的で、1982 年に作期を変えて栽培した日本晴の各個体群について、吸収日射量から推定した生長の動態と実測値との比較を行った。この場合、吸収日射から乾物への変換効率 C_s およびみかけの消費係数 $(1-m)k_*$ は移植直後から成熟期まで一定 ($C_s = 1.79 \text{ g/MJ}$ および $(1-m)k_* = 0.45$) として、Fig. 2 に示した LAI の生長データと毎日の日射量から乾物生産の推定を行い、実測値と対比して Fig. 8 に示されている。

Fig. 8 の結果から、本田への植付時期が 3 月 31 日 (N1) から 7 月 5 日 (N8) までの間で種々に作期を変えて、気象条件が大きく異なる条件下に栽培されたイネ個体群の生長の動態が、毎日の吸収日射量からきわめてよ

Fig. 7. Relation between the total crop dry weight (W_t) and absorbed shortwave radiation (S_s) or PAR (S_p) at different time of the growth of "Nipponbare" rice crop in 10 different cropping seasons. Left hand side shows the relation until the maturation (40th day from the heading) and the right hand side until 20th day from the heading.

Fig. 8. Comparisons of measured growth curves with those estimated from absorbed solar radiation by the canopy for "Nipponbare" rice grown at different seasons in 1982. Circles denote the measurements and lines the model predictions.

く説明できることがわかる。成熟期直前においてモデルからもとめた乾物重が実測値を上まわるのは、すでに述べた理由による。以上より、 C_s や $(1-m)k_*$ が通常の環境条件下では気象や、ごく生育末期を除いては、生育時期にかかわらず一定とみらすことができる。

日本稲とは生態型が顕著に異なる密陽23号およびIR-36について、1982, '83両年の試験結果をこみにして、吸収日射量と乾物生産との関係をもとめ、Fig. 9のような結果を得た。これら2品種の間では明確な品種間差は認め難いが、両品種ともさきに示した日本型水稻の日本晴よりも、吸収放射量から乾物への変換効率(C_s あるいは C_p)が約20%高い。これら外国稲のエネルギー変換効率が高い原因として、これらの品種は日本稲よりも肥料要求度が高くなり、多肥条件で栽培されていること、および日射の消散係数が小さいことの二つが考えられる。

1980年に、日本晴の全生育期間にわたって46%および72%の遮光処理を連続して行った場合について、吸収日射量と乾物生産との関係が、無遮光区についてのそれとともにFig. 10に示されている。吸収日射から乾物への変換効率 C_s の値は、無遮光区についてはFig. 7の結果とはほぼ同一であるが、46%遮光区ではそれよりも約30%高く、72%遮光区では実に57%も高かった。このようかなり強度の遮光処理を連続して行くと、放射エネルギーの変換効率が顕著に高まることがみられるが、この原因については後で検討する。

以上の結果から、強度の遮光処理を連続して行った場合を除いて、通常に起り得る幅広い気象範囲において、水稻個体群に吸収された日射エネルギーから乾物への変

Fig. 9. Relation between the total crop dry weight (W_t) and the absorbed shortwave radiation (S_s) or PAR (S_p) at different time of the growth of "Milyang 23" and "IR-36" rice.

Fig. 10. Relation between the absorbed shortwave radiation and the dry matter production during the growth of "Nipponbare" rice crop at continuous shading treatments.

換効率は、登熟末期を除いては生育時期や気象条件にかかわらず一定とみなすことができる。ただしこの変換効率は品種によって幾分異なり、多収性の外国稲品種の密陽23号およびIR-36は日本型の日本晴よりも高い。

4. モデルによる検証

前節の実験結果において、水稻個体群による太陽放射の吸収量とバイオマス生産とが、幅広い環境範囲において生育時期にかかわらず比例することがみられたが、こ

れがどの程度一般性のあることかについて、モデルを用いて検討する。

植被に吸収された短波放射あるいはPARの積算値(S_s あるいは S_p)と乾物生産(W_t)とが比例するためには、個体群の生長速度(CGR)と S_s あるいは S_p とが、環境条件や生育ステージの違いにかかわらず比例することが必要である。この CGR はつぎに述べるモデルによってもとめた。まず個体群の光合成速度 Φ_g はつぎの Monsi und Saeki (1953) の式によった。

$$\Phi_g = \frac{b}{(1-m_p)ka} \ln \left[\frac{1 + (1-m_p)kaI_{p0}}{1 + (1-m_p)kaI_{p0} \exp\{-(1-m_p)kF_t\}} \right] \quad (5)$$

ここで、 a , b ; 個葉の光-光合成曲線の特徴づけるパラメータ, I_{p0} ; 植被上の PAR 強度, k ; 消散係数, m_p ; PAR に対する植被の散乱係数(=0.07), F_t ; 葉面積指数である。一日当りの粗光合成速度 $\Phi_{g, day}$ は, PAR の日変化をつぎの式で与え, それを(5)式に代入し, さらに時間について積分してもとめた。

$$I_{p0} = I_{PM} \sin \left(\frac{\pi(t-t_R)}{t_S-t_R} \right) \quad (6)$$

ただし, I_{PM} ; 南中時の PAR 強度, t_R と t_S ; 日の出と日没時刻, である。 I_{PM} は一日あたりの PAR 量が与えられると, (6)式を積分した式よりもとめられる。

一日あたりの呼吸速度 R_{day} は光合成速度に比例する生長呼吸と, バイオマス量に比例する維持呼吸との和として, つぎのように与えた。

$$R_{day} = G_r \Phi_{g, day} + M \frac{F_t}{L} Q_{10}^{(T_a - 25)/10} \quad (7)$$

ここで, G_r ; 生長呼吸係数, M ; 気温 25℃ のときの維持呼吸率, L ; 葉面積比(LAR), Q_{10} ; 呼吸の温度係数, T_a ; 気温, である。すると一日あたりの個体群生長速度 CGR は, つぎの式よりもとめられる。

$$CGR = \Phi_{g, day} - R_{day} \quad (8)$$

上のようにして CGR をもとめるのに必要な各パラメータの値は, 水稻についての実験データ(堀江, 1981)よりつぎの値を用いた。 $a = 8.3 \times 10^{-3} \text{ J}^{-1} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$; $b = 7.84 \times 10^{-6} \text{ g CH}_2\text{O J}^{-1}$; $G_r = 0.30$; $M = 0.01 \text{ g CH}_2\text{O g}^{-1} \text{ day}^{-1}$; $Q_{10} = 1.8$ 。また葉面積比 L については単純化のために葉面積指数 F_t にかかわらず一定の $0.008 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ を用いた。他方, 植被に吸収される短波放射あるいは PAR は, 入射する短波放射強度 I_0 あるいは PAR 強度 I_{p0} に, (3)式によって与えられる吸収率 α を乗じ, それを一日間積算してもとめた。この場合 $I_{p0} = 0.5 I_0$ とし, 短波放射および PAR に対する植被の散乱係数の値にはすでに説明した数値を用いた。

以上に説明したモデルによって, 種々の PAR と葉面積指数 LAI の組合せについて CGR と短波放射あるいは PAR の吸収量との関係をもとめた。PAR と LAI の組合せは, 通常の範囲を想定して, PAR については $4 \sim 12 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ そして LAI については $0.2 \sim 6$ とした。モデルによってもとめられた, 作物個体群の吸収日射量と生長速度 CGR との関係が, 消散係数 $k = 0.5$ と $k = 0.6$ の場合について Fig. 11 に示されている。

Fig. 11. Simulated relationship between crop growth rate (CGR) and absorbed shortwave radiation for crop canopies with the radiation extinction coefficient k of 0.5 and that of 0.6. Each curve is derived by changing LAI at a fixed radiation level.

Fig. 11 の各曲線は一日の日射量一定の条件下で LAI を変化させたときに対応するものである。この日射量一定のもとで LAI が増加すると, CGR は最初は吸収日射に比例して増加するが, あるところで最大値に達した後には低下するという最適型の変化になる。CGR が最大になる吸収日射量は個体群に入射する日射強度が増すにつれて高くなる。また, 吸収日射量と CGR の比例部分のこう配は, 入射日射量が低いほど急になることもわかる。

前節の実験結果にみられた, 水稻個体群の生育各時点における乾物生産量と吸収日射量とが環境条件や生育時期にかかわらず比例することは, LAI と日射量の種々の組合せについて CGR と吸収日射量が比例することを

意味する。Fig. 11 に示したモデルシミュレーションの結果でも、CGR と吸収日射量とは近似的に比例関係にあることから、前節に得られた実験結果は物質生産のモデルに照らしてもきわめて一般性の高いものといえる。Fig. 11 のモデルによる各予測点の中央を通るような回帰直線のこう配からもとめた、吸収短波放射あるいは吸収 PAR から乾物への変換効率(C_s あるいは C_p)はつぎのようであった。すなわち、消散係数 $k=0.6$ のとき、 $C_s=1.97$ 、 $C_p=2.90$ g/MJ、および $k=0.5$ のとき $C_s=2.07$ 、 $C_p=3.06$ g/MJ であった。これらの値は実験による推定値にほぼ等しい。

5. 考 察

作物個体群のバイオマス生産が吸収された短波放射あるいは光合成有効放射 PAR に比例することは、Shibles and Weber (1966) が大豆について、そして Gallagher and Biscoe (1978) がムギ類について示している。本実験の結果から、イネにおいてもこのような比例関係が成立し、かつその比例係数は品種や施肥量などの栽培条件を同一とした場合気象条件にかかわらず一定であり、しかも登熟中期ごろまでは生育ステージによってほとんど変化しないことが明らかになった。

吸収放射と乾物生産との間の比例関係を、Monteith (1977) は呼吸はすべて光合成速度に比例するというモデルを用いて説明している。しかし作物あるいは植物の呼吸は光合成に比例する生長呼吸と現存量に比例する維持呼吸の両者から成立していることが明らかになっている (Penning de Vries, 1973)。そこでこの両呼吸を考慮したモデルによって作物個体群の生長速度 CGR と吸収日射量との関係を検討したところ、日射レベルや LAI にかかわらず両者は近似的に比例関係にあり、かつその比例係数すなわち吸収放射エネルギーから乾物への変換効率の値は実験による推定値にきわめて近いことがわかった。すなわち、この変換効率の値は日本稲の日本晴では、全短波放射に対して 1.90 そして PAR に対して 2.88 g/MJ であった。水稻の乾物の燃焼熱を 1.55×10^{-2} MJ/g (村田ら, 1968; 広田ら, 1978) とすると、上の数値は放射エネルギーの変換効率にしてそれぞれ $C_s=2.9\%$ (対全短波放射) および $C_p=4.4\%$ (対 PAR) となる。

水稻についてこの放射エネルギーの変換効率(C_s もしくは C_p)の測定値としてつぎのような値が報告されている。すなわち $C_s=4\sim 6.9\%$ (村田ら, 1968); $C_s=2.81\sim 3.53\%$ (Hayashi, 1969); $C_p=3.2\sim 5.7\%$ (鈴木・村田, 1975); $C_p=4.24\%$ (Yamagishi ら, 1980); $C_s=4\sim 5\%$ 、 $C_p=5\sim 6\%$ (広田ら, 1978)。またイネ以外の作については、オオムギ、ジャガイモおよびサトウダイ

コンの平均値として $C_s=2.4\%$ (Monteith, 1977); オオムギとコムギの $C_p=4.6\%$ (Gallagher・Biscoe, 1978) などが報告されている。本研究において実験およびモデルから得られた水稻の C_s および C_p の値は、村田ら (1968) および 広田ら (1978) の測定値よりも幾分小さいことを除いては、上に挙げた多くの測定値と比較してきわめて妥当と判断できる。

この太陽放射エネルギーの変換効率は品種によって若干変化する。すなわち日本稲に比較して多収といわれている密陽 23 号や IR-36 の C_s は日本晴よりも約 20% 高くなることが示された。これは第 1 にこれらの多収品種は日本晴よりも直立葉型であるため、消散係数 k が小さく、したがって Fig. 11 にみられるように C_s が大きくなるためである。第 2 にこれらの品種はその能力を発揮させるために、日本稲よりも約 50% も多肥条件で栽培されており、それが葉の光合成能力を高める方向に作用したものと考えられる。前節のモデルでは葉の光合成能力は (5) 式のパラメータ a , b によって表わされるが、この a , b は葉の N 含量に強く支配されることが知られている。このパラメータ a , b の値の変更は直に C_p や C_s に反映することがモデルから予測できる。

強度の遮光処理を連続して行くと放射エネルギーの変換効率 C_s が高まることが Fig. 10 に示された。この原因としてモデルから予測できることは、葉の光合成パラメータ a , b が同一であっても Fig. 11 にみられるように、弱光下ほど吸収放射量と CGR の関係の直線部分のこう配が急になることである。しかしながらこのことのみによって、Fig. 10 にみられた遮光処理による著しい C_s の増加を説明することは困難である。したがって上のことに加えて、強度の遮光処理を連続して行ったことにより、葉が薄くなるなどの弱光に対する適応が起り、弱光域での光合成能すなわち (5) 式のパラメータ b が高まったり、あるいは組織の呼吸特性に変化の生じたことなどが相乗的に作用して C_s が増加したと考えられる。このことは無遮光区と 72% 遮光区とでは、比葉面積が約 30% も後者の方が高いことから十分に考えられることである。

以上のように強度の遮光処理を連続して行ったような場合、あるいは日本稲と生態型が著しく異なる品種を用いた場合には、放射エネルギーの変換効率は上に示した値とは異なったものになる。しかし生態型の同様な品種を通常の肥料水準のもとに栽培した場合、変換効率は気象条件にかかわらず一定とみなせるということが、北関東においておそらく早植の新記録と思われる 3 月 31 日の田植から始まり、7 月 5 日田植まで種々に作期を変えた栽培試験を 3 ケ年にわたって行い、計 17 とおりに異なる環境条件下で変換効率を測定して得た結論である。

さらに、この変換効率率は登熟期中期ごろまではイネの生育ステージにはほとんど影響されないということも本研究より得られた結論である。これらのことから、水稻個体群に吸収された放射エネルギー量と乾物生産との間の安定した比例関係は、気象からイネの生育や収量を予測するモデルの重要な骨格となり得ると考えられる。

6. 摘 要

水稻の生育や収量を気象から動的に評価・予測するモデルを開発する目的で、水稻個体群に吸収された短波放射あるいは光合成有効放射 PAR と乾物生産との関係を、栽培年度、作期、品種を異にし、さらに遮光処理によって 17 とおりに異なる条件下に栽培した水稻について調べた。用いた品種は日本晴(日本型)、IR-36(インド型)および密陽 23 号(日印交配品種)であり、植被に吸収された短波放射量は入射、反射および透過放射の連続測定から全生育期間にわたってとめた。得られた結果はつぎのように要約される。

1. 日積算日射量についての日本晴、密陽 23 号および IR-36 の生育全期間の平均的な消散係数の値はそれぞれ 0.45, 0.41 および 0.43 であった。全短波放射の反射率の品種間差は小さく、いずれの水稻とも田植直後の約 0.1 から出穂期ごろの約 0.22 の範囲で、葉面積指数 LAI とともに変化した。

2. 水稻個体群の全短波放射および PAR の吸収率を LAI から推定する方法が、必要なパラメータとともに導かれ、吸収率の推定値は生育末期を除き実測値とよく一致した。いずれの水稻とも短波放射の吸収率は生育初期のほとんどゼロから末期の約 0.75 まで、生育とともに増加した。

3. いずれの水稻とも生育各時点における現存乾物重と、その時点までに植被に吸収された日射あるいは PAR の積算値とは出穂後約 20 日ごろまで比例することがわかった。この比例係数すなわち吸収短波放射から乾物への変換効率(C_s)あるいは吸収 PAR から乾物への変換効率(C_p)は、栽培年度や作期の違いにかかわらずほぼ一定で、日本晴で $C_s = 1.90$ 、 $C_p = 2.88 \text{ g/MJ}$ であり、これはエネルギー変換効率にしてそれぞれ 2.9 および 4.5% に相当する。日本晴よりも 50% 多肥条件下で栽培した IR-36 および密陽 23 号の変換効率は日本晴より約 20% 高く、また強度の遮光処理を連続するとこの効率が高まることがわかった。

4. 作物個体群の光合成に生長・維持両呼吸を考慮したモデルによって、水稻個体群の生長速度 CGR と吸収日射量との関係を検討した。この結果、生育時期や環境の違いにかかわらず、CGR と吸収日射量とは近似的に

比例関係にあり、かつその比例係数すなわち C_s あるいは C_p の値は上に示した実測値にきわめて近いことがわかった。

5. 以上より品種や栽培法を同一とした場合、強度の遮光処理を連続したような極端な場合を除く通常の気象範囲では、吸収日射量から乾物への変換効率は、ごく生育末期を除いては生育時期や環境条件にかかわらず一定とみなせる。

6. 全乾物重に占める粗玄米乾物重の比率すなわち収穫指数は、本実験の範囲内ではほぼ一定で、日本晴で 0.31、密陽 23 号と IR-36 で 0.37 であった。

謝 辞

本研究は著者が農業技術研究所気象科(現農業環境技術研究所気象管理科)在任中に行ったものである。当時の物理第一研究室長の岩崎尚博士(現気候資源研究室長)より本研究に対して種々の援助を頂いた。また業務科の松本公吉、飛田正義両技官には水稻の栽培から生態調査の全般に渡って協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。なお、本研究は農水省の大型別枠研究「バイオマス変換計画」の一環として行われたものである。

引用文献

- 1) Gallagher, J. N. and Biscoe, P. V., 1978: Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Soc., Camb.*, **91**, 47–60.
- 2) Gates, D. M., 1980: *Biophysical Ecology*. p. 661, Springer-Verlag.
- 3) Hanyu, J., Uchijima, T. and Sugawara, S., 1966: Studies on the agro-climatological method for expressing the paddy rice production I. *Bull. Tohoku Nat. Agric. Exp. Stat.*, **34**, 27–36.
- 4) Hayashi, K., 1969: Efficiency of solar energy conversion and relating characteristics in rice variety. *Jap. J. Crop Sci.*, **38**, 495–500.
- 5) 広田 修, 武田友四郎, 村田裕治, 木場明倫, 1978: 数種作物の太陽光利用に関する研究(第2報), 日作紀, **47**, 133–140.
- 6) 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.
- 7) Iwaki, H., 1975: Computer simulation of vegetative growth of rice plant. *JIBP Synthesis*, **11**, 105–121.
- 8) 蒸発散研究グループ, 1967: 水田の放射状態について, 農業気象, **22**, 97–102.
- 9) 岸田恭久, 1973: 耕地の光エネルギー利用に関する農業気象学的研究(1), 九州農試報告, **17**, 1–79.
- 10) Kudo, K., 1975: Economic yield and climate. *JIBP Synthesis*, **11**, 199–220.

- 11) Monsi, M. and Saeki, T., 1953: Über den Lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jap. J. Bot.*, **15**, 22–52.
- 12) Monteith, J. L., 1977: Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **281**, 277–294.
- 13) Munakata, K., 1976: Effects of temperature and light on the reproductive growth and ripening of rice. In: *Climate and Rice*, p. 187–207. IRRI, Philippines.
- 14) 村田吉男, 1964: わが国の水稲収量の地域性及ばす日射と温度の影響について, 日作紀, **33**, 59–63.
- 15) 村田吉男, 宮坂 昭, 棟方 研, 秋田重成, 1968: 水稲個体群のエネルギー収支の生育にともなう変化について, 日作紀, **37**, 685–691.
- 16) Penning de Vries, F. W. T., 1973: *Substrate utilization and respiration in relation to growth and maintenance in higher plants*. Ph.D. Thesis of Agric. Univ., Wageningen, The Netherlands.
- 17) Shibles, R. M. and Weber, C. R., 1966: Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. *Crop Sci.*, **6**, 55–59.
- 18) 杉原保幸, 羽生寿郎, 1980: 水稲の気候生産力の評価に関する研究 I, 農業気象, **36**, 71–79.
- 19) 鈴木 守, 村田吉男, 1975: 圃場における水稲の光合成のエネルギー転換効率の測定, 日作紀, **44**, 109–113.
- 20) Yamagishi, T., Okada, K., Hayashi, T., Kumura, A. and Murata, Y., 1980: Cycling of carbon in a paddy field. *Jap. J. Crop Sci.*, **49**, 232–242.

Summary

As the first step to develop a model to explain and predict the dynamic relationship between weather and rice crop growth and yield, we investigated the relation between absorbed solar radiation by the canopy and the drymatter production for three different rice cultivars grown in different seasons, years and radiation regimes (c.f. Table 1). The cultivars used were “Nipponbare” (Japonica rice), “IR-36” (Indica rice) and “Milyang 23” (Japonica-Indica cross variety). The canopy absorbed radiation was obtained by the continuous measurements of the incoming, the transmitting and the reflected radiations into/from the canopy, and the dry weight by the periodic harvesting.

The radiation transmittance and the reflectance of the canopy changed drastically with LAI (see Fig. 4), but the extinction coefficient of daily shortwave radiation, calculated from the transmittance, was fairly constant throughout the main growth period. The values of the coefficient are 0.45, 0.43 and 0.41 for “Nipponbare”, “IR-36” and “Milyang 23”, respectively. An equation was proposed to estimate the radiation absorptance from the LAI, the extinction coefficient and the crop optical parameters. The changes with time in the estimated radiation absorptance agreed well with the observation for almost the entire growth period except the very later stage (Fig. 5).

The crop dry weight increased linearly with the increase in the absorbed shortwave radiation or photosynthetically active radiation (PAR) as the crop grew until about 20 days after the heading and thereafter it increased curvilinearly, indicating that the conversion efficiency from the absorbed radiation to the dry weight is constant over the most growth period. In Fig. 7 are plotted the relationships between the absorbed radiation and the dry weight during the growth of “Nipponbare” rice grown under 10 different seasons and years, of which the growth curves in the dry weight and LAI in 1982 experiment are given in Figs. 1 and 2. From the results in Fig. 7 it may be concluded that the conversion efficiency from the absorbed radiation to the dry weight is independent of crop growth stage except for the later half of the ripening stage and also of the cropping seasons. The conversion efficiencies on the bases of the shortwave radiation (c_s) and PAR (c_p) are 1.90 and 2.88 g/MJ in “Nipponbare”, which are equivalent to 2.9 and 4.5% in the energy conversion efficiency, respectively.

The constancy of the conversion efficiency of c_s or c_p over the growth stage and the cropping seasons is largely justified in Fig. 8, where comparisons are made between the observed growth curves and those re-constructed by multiplying the conversion efficiency to the absorbed radiation which in turn was obtained from LAI and radiation on each day. The constancy of the energy conversion efficiency was also validated by a model simulation in which the crop growth rate (CGR) is given

as a function of the radiation intensity, LAI, canopy architecture and growth and maintenance respiration rates. It was made clear from the model simulation that CGR increases approximately linearly with the increase in the absorbed radiation and that the proportional constant, which is the conversion efficiency, is to a larger extent independent of the radiation regimes and LAI, but is affected by the radiation extinction coefficient (Fig. 11). The simulated conversion efficiency from the shortwave radiation to the dry weight c_s were 1.97 and 2.07 g/MJ for the canopies with the extinction coefficient of 0.6 and 0.5, respectively, which are comparable with the experimental results.

The value of c_s of the high yielding rice cultivars of "IR-36" and "Milyang 23" was about 20% higher than that of "Nipponbare" (c.f. Fig. 9). This is due to the fact that these high yielding cultivars were grown under 50% more nutrition level than "Nipponbare" and also to their smaller extinction coefficient of the radiation. Under the continuous shading of about 50% or more, c_s increased to a marked extent, which is presumably due to the result of the crop adaptation to the weak radiation. Except these extreme environmental conditions, it is well concluded that the radiation energy conversion efficiency of rice crop is constant over most growth period and independent of the weather conditions.