圃場における水稻の光合成のエネルギー転換効率の測定*

鈴木 守**・村田 吉男***

(**九州農業試験場・***東京大学農学部)

作物にかぎらず地球上のすべての生物の生活に必要なエネルギーの源は直接、間接に太陽放射エネルギーである。これまで、水稻の太陽エネルギー利用率（有機物の化学エネルギーとして固定されたエネルギー量／おなじ期間に群落上におちた太陽エネルギー量）を取扱った報告^{3,5)}はあるが、光合成メカニズム自体の効率に最も近いもの、すなわち、群落や個体群に吸収された光合成有効放射（PAR）に対する固定化学エネルギーの比、光合成の光エネルギー転換効率（ E_p ）を自然条件下で測定したデータは極めて少ない。わずかにトウモロコシ⁶⁾ マツ科植物⁷⁾ 等で若干の値が報告されているにすぎない。

われわれは IBP 戸畑、村田班の一員として 1971 年および 1972 年農林省九州農業試験場において、純生産量と呼吸量および PAR 吸収量を実測する法で、水稻個体群の E_p を長期間（3 週間毎）にわたって測定したのでそのうち 1972 年の結果を報告する。

日射量の測定結果を利用して頂いた九州農業試験場農業気象研究室の佐藤室長および岸田技官に感謝する。

材料および方法

1. 光合成有効放射の測定

光合成有効放射（PAR）量は、PAR と 日射（短波）量との比が九州の稲作期間では平均 0.535 であるという岸田⁵⁾の結果を用い、全日射量にこの値を乗じて算出した。全日射量は、岸田技官が当時本庁舎屋上において、気象庁検定付エプリー型差温式日射計を電子管式自動平衡記録計に接続し、その自記紙からプランニメータを使用して算出したものである。

2. イネ個体群による光合成有効放射吸収量の測定

この場合も岸田⁵⁾の得た次の関係式を用いて算出した。

$$\alpha_{ef} = 1 - \exp(-K_{\alpha,ef} \cdot L) \quad (1)$$

* 昭和 49 年 8 月 5 日受理

本研究は文部省科学研究費によるものであり、特定研究「生物圏の動態」の一部をなすものである。

ここで α_{ef} は個体群による PAR 吸収率、 $K_{\alpha,ef}$ は PAR の反射・透過に関する常数（イネの場合 0.40）、 L は葉面積指数を示す。

3. 乾物重、葉面積測定法

水稻品種 ホウヨクを早植（5 月 31 日植）、普通期（6 月 30 日植）に m^2 当り 22.2 株（25cm×18cm）、1 株 3 本植え、施肥量は N.P.K とも成分で 10 アール当り早植で 16 kg、普通期で 14 kg を施用して、それぞれ 4 連で栽培し、穂揃期を中心に 3 週間おきに 1 区 20 株あて採取し、生体重を測定して中庸株 5 株を選び、計 20 株について通風乾燥機により約 70°C で 2 昼夜乾燥したものを乾物重として測定とした。葉面積は、乾物重測定個体中の 1~1/2 株について自動面積計（林電工 K・K、AAM-5 型）により測定。

4. 呼吸量および粗生産量の推定

生育中庸な株を 1/5000 アールポットにはめこむように土ごと堀りとり、ポットには湛水し、チャンバーをかぶせ、その上を暗幕でおおい赤外線ガス分析計（日立堀場製作所製）を用いて呼出 CO_2 量を測定した。測定は、サンプル採取 1 時間以上経過してから全個体について室温において行ない、その測定値と m^2 当りに存在する乾物重の値とから個体群の呼吸量を求め、さらに呼吸の Q_{10} を 2 と仮定して各期間中の平均気温に温度補正して、圃場における 24 時間の全呼吸量を計算した。

日中、光の当たっている部分では光呼吸が行なわれていると考えられるが、ここでは上記のようにして求めた暗呼吸が 24 時間各部分で行なわれていると仮定し、その値を純生産量に加えたものを粗生産量とした。

結 果

1. 個体群に吸収された光合成有効放射量

第 1 表に早植および普通期について各時期の LAI（葉面積指数）と（1）式を用いて算出した α_{ef} （個体群による光合成有効放射（PAR）の吸収率）を示した。早植、普通期ともに穂揃期である 8 月 23 日、9 月 6 日に LAI が最大で、穂揃期前後ともに穂揃期か

らはなれるにしたがつて値が小さくなっている。 α_{ef} も LAI と同様に穂揃期で最も大きく、穂揃期からはなれるにしたがつて値が小さくなっている。

第2表に個体群に吸収された PAR を早植、普通期とも各生育期間別に計算手順を含めて示した。PAR は前述のように日射量に 0.535 を乗じて算出し、 α_{ef} は第1表の値を用い各期間の始めと終りの算術平均をもつてその期間の平均値とした。個体群により吸収された PAR は早植では穂揃い3週間前から穂揃期にかけての期間の値が最も大きく、普通期では穂揃い3週間までの期間の値が最も大きかった。

2. 呼吸量

第3表に CO_2 呼出量として示した暗呼吸量を前述した算出手順を含めて示した。単位乾物重当りの CO_2 呼出量は早植、普通期ともに生育が進むにしたがつて低下する傾向がみられた。早植9月16日の測定値は若干高すぎると思われるがその原因は明らかでない。

3. エネルギー転換効率

第4表に光合成有効放射 エネルギー転換効率 (E_p) をその算出手順を含めて示した。この表で、1日当り CO_2 呼出量から1日当り呼吸消費エネルギー (R) を算出するにあたっては次式を用いた。

また、乾物の形の固定エネルギー (P_n) を算出する際には乾物 1g を平均 3.75Kcal³⁾ として計算した。

得られた E_p の値は老化の進んだ登熟後半を除いては比較的一定した値を示し、早植区で 4.6~7.7%、普通期区で 5.3~7.0% の範囲にあり、最高値はそれぞれ 7.7% および 7.0% であった。

考 察

光合成有効放射量の全日射量に対する比は岸田³⁾によれば曇天や雨天の場合に高く (約 0.60)、晴天の場合に低い (約 0.50)。また、朝夕は低く (0.5 以下) なるが、平均的な値としては、0.535 位が適当であるという。ここではその見解をそのまま採用し、全日射量の測定値より光合成有効放射量を推定した。なお、岸田の測定は飯尾電機の波長別放射記録計およびエプリーの差温式日射計を用いて行なつたものであ

Table 1 The absorption rate (α_{ef}) of photosynthetically active radiation (PAR, 400~700nm) by rice stands at various growth stages

Date	LAI	α_{ef}
Early culture		
Jun 1	0.08	0.0315
Jun 23	1.08	0.3507
Jul 13	4.38	0.8265
Aug 3	5.26	0.8780
Aug 23	6.03	0.9103
Sep 14	4.13	0.8083
Oct 5	2.48	0.6291
Normal culture		
Jul 1	0.07	0.0276
Jul 27	2.91	0.6877
Aug 17	5.60	0.8935
Sep 6	6.23	0.9172
Sep 27	3.97	0.7956
Oct 18	2.35	0.6093

Table 2 Amount of PAR absorbed by rice stands

Period	Days	S cal/cm ² , day	PAR cal/cm ² , day	Mean α_{ef}	Absorbed PAR cal/cm ² , day
Early culture					
Jun 23~Jul 13	20	309.3	165.5	0.5886	97.4
Jul 13~Aug 3	21	395.1	211.4	0.8523	180.2
Aug 3~Aug 23	20	418.5	223.9	0.8942	200.2
Aug 23~Sep 14	22	336.4	180.0	0.8593	154.7
Sep 14~Oct 5	21	324.8	173.8	0.7187	124.9
Normal culture					
Jul 1~Jul 27	26	307.6	164.6	0.3577	58.9
Jul 27~Aug 17	21	453.7	242.7	0.7906	191.9
Aug 17~Sep 6	20	360.0	192.6	0.9054	174.4
Sep 6~Sep 27	21	314.3	168.2	0.8564	144.0
Sep 27~Oct 18	21	314.6	168.3	0.7025	118.2

Note : S, incident short wave radiation ; Mean α_{ef} , calculated from Table 1 as an arithmetic mean of the beginning and end of each period

Table 3 Amount of dark respiration of rice stands

Date	T_1 °C	CO ₂ evolved mg/g d. w., hr	Dry weight g/m ²	CO ₂ evolved mg/m ² , day	T_2 °C	Respired CO ₂ g/m ² , day
Early culture						
Jul 12	26.0	1.17	295.3	8292.0	25.3	7.897
Aug 5	33.5	0.87	700.4	14623.2	27.9	9.921
Aug 22	32.5	0.60	1057.3	15225.6	27.3	10.954
Sep 16	24.7	0.53	1379.8	17551.2	25.4	18.428
Oct 4	26.6	0.14	1444.9	4855.2	20.6	3.202
Normal culture						
Aug 5	33.5	1.28	184.6	5671.2	27.0	3.614
Aug 19	32.6	1.64	597.6	23522.4	27.9	16.982
Sep 6	30.1	0.75	1005.1	18091.2	26.2	13.810
Sep 28	21.5	0.30	1297.1	9338.4	22.8	10.219
Oct 17	22.3	0.18	1408.5	6084.0	18.4	4.644

Note: T_1 , temperature at the measurement of respiration; T_2 , mean temperature in each period

Table 4 The efficiency for light energy conversion(E_ϕ) in photosynthesis of rice stands

Period	Respired CO ₂		P_n		P_g	P_n/P_g %	Absorbed PAR kcal/m ²	E_ϕ %
	g/m ² , day	kcal/m ² , day	g/m ² , day	kcal/m ² , day	kcal/m ² , day			
Early culture								
Jun 23~Jul 13	7.897	20.64	14.39	53.96	74.60	72.4	19480	7.7
Jul 13~Aug 3	9.921	25.93	19.07	71.51	97.44	73.5	37842	5.4
Aug 3~Aug 23	10.954	28.63	17.17	64.39	93.02	69.3	40040	4.6
Aug 23~Sep 14	18.428	48.17	15.95	59.81	107.98	55.4	34034	7.0
Sep 14~Oct 5	3.202	8.37	3.82	14.33	22.70	63.0	26229	1.8
Normal culture								
Jul 1~Jul 27	3.614	9.45	8.44	31.65	41.10	77.0	15314	7.0
Jul 27~Aug 17	16.982	44.39	21.43	80.36	124.75	64.3	40299	6.5
Aug 17~Sep 6	13.810	36.10	21.66	81.23	117.33	69.3	34880	6.7
Sep 6~Sep 27	10.219	26.71	13.33	50.00	76.71	65.1	30240	5.3
Sep 27~Oct 18	4.644	12.14	4.87	18.26	30.40	60.0	24822	2.6

Note: P_n , net production (=CGR); P_g , gross production

る。

また、個体群による PAR 吸収量の算出には、個体群によるアルベド透過を除いた PAR 吸収量と葉面積との関係に関する岸田⁵⁾の経験式(1)を用いた。この式はホウヨク、シラヌイ、レイホウなどの九州における短稈品種を用いてえられた関係式なのでホウヨクを用いた本研究にはそのまま適用出来るものと思われる。

粗光合成量は粗生産されたものの含む燃焼熱に等しいものとし、粗生産量はすでに述べたように、乾物の測定から得た純生産量に暗呼吸量を加えて求めた、しかし、現実には C₃ 植物は日中、光の当っている緑色

部分では光呼吸を行なっていることが知られており、しかもその速度は暗呼吸のそれより大きく、粗光合成量の 20~50% 程度と云われる²⁾。従つて、もし光呼吸を考慮に入れると本研究で得た値よりも、少なくとも 2~3 割高い E_ϕ 値がえられるはずであるが、しかし、光呼吸に関しては未知の問題が多く、測定法にも完全なものがない現状にあるので、本研究ではあえて以上の方法をとつた次第である。なお、以上の測定で根の呼吸量は無視したが、それによる影響はそれほど大きくないはずである。

このようにして得られた E_ϕ の値は第 4 表に示したように著しく老化の進んだ時期を除いて、7.7~4.6%

の間の値を示し、その平均値は早植区 6.2%, 普通期区 6.4%, また、最高値はそれぞれ 7.7% および 7.0% であつた。

自然条件下の植物群落あるいは作物個体群について E_p を測定した例ははなはだ乏しく、イネについては全く報告がない。Lemon⁸⁾ はトウモロコシで空気力学的方法によつてある 1 日の測定で 15% という値をえており、Bray¹⁾ は *Picea omorica* の人工林で年間平均の値として 7.9% を報告している。King and Evans⁴⁾ は人工気象室で育てたコムギ、アルファルファ、サブクローバの人工群落で E_p の最高値としてそれぞれ、12.8%, 13.5%, および 9.8% という高い値をえている。本実験でえられたイネの値が、高い光合成能力をもつトウモロコシの値より低いのは当然としても、コムギ、アルファルファ、サブクローバの値より低いのは、人工気象室に比べて自然条件下では光が著しく強いことが関係していると思われる。

実験室で最上の条件を与えたときの E_p の短時間の最高値としては、例えばブドウの葉で 27.2%⁹⁾ というように 20~30% という高い値がえられている¹¹⁾。野外条件で得られた値がこれらの値の 1/2~1/4 程度に過ぎない最大の原因は、CO₂ 濃度が低すぎる一方、光が強すぎることにより、さらに水や養分の不足、不適当な温度などの条件も限定要因として働く可能性がある。

Loomis ら⁷⁾ の綜説によれば圃場で個体群に吸収された PAR に対する net production の比として、日射量 294 cal (1 cm², 1 日当り) の下でテンサイ 9.5%, 331 cal の日射量の下でオーチャードグラス 6.4% という値が英国で、また 450 cal の日射量の下でライグラス 4.2%, 400 cal の日射量下でバレイショ 5.4% という値がオランダで報告され、C₄ 植物のトウモロコシでは 500 cal の日射量下で 9.8% という値がアメリカで報告されている。本実験のデータから個体群に吸収された PAR に対する net production の比を算出してみると、その最高値は早植で日射量 309 cal の下で 5.7%, 普通期で日射量 308 cal の下で 5.4% となり、Loomis らの綜説に引用されている値と比較しても C₃ 植物としては妥当な値であるといえよう。

第 4 表には P_n と P_g の比として早植 72~55%, 普通期 77~60%, 後期ほど低下する傾向があり、平均いずれも 67% という値が示されているが、長い期間について個体群や群落のこの比をしらべた例は極めて乏しい。Thomas and Hill¹¹⁾ はアルファルファ個

体について 2 年間の値として 51~65%, 平均 62% を得ている。

Monteith⁸⁾ はテンサイ 個体群の全生育期間平均で 44% を得ている。これらの値からみると本実験で得られた P_n/P_g 比はほぼ妥当な値と考えられ、そのことはまた逆に本実験における呼吸量の測定が全体的にほぼ正確に行なわれたことを意味するものであろう。

摘 要

圃場に十分な施肥、水管理の下に早植および普通期栽培した水稻ホウヨクについて、光合成の光エネルギー転換効率すなわち個体群の吸収した光合成有効放射に対する粗固定エネルギーの割合を、3 週間毎に全生育期間にわたつて測定した。吸収有効放射量は日射量の観測値と岸田⁵⁾の実験式とから求め、粗固定エネルギーは純生産量に呼吸量の測定値を加えて求めた。

こうして求めた光エネルギー転換効率は登熟後半期を除いて 7.7~4.6% という比較的一定した値を示し、早植区で平均 6.2%, 普通期区で 6.4%, また、その最高値は 7.7% および 7.0% であつた。

また、純生産と粗生産の比は早植区 72~55%, 普通期区 77~60%, 全生育期間の平均はいずれも 67% で、呼吸によつて 3 分の 1 が失われることが示された。

引 用 文 献

1. Bray, J. R. 1961. An estimate of a minimum quantum yield of photosynthesis based on ecologic data. *Plant Physiol.* **36**: 371—373.
2. Hatch, M. D. 1970. Chemical energy costs for CO₂ fixation by plants with differing photosynthetic pathways. In: *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*, Proc. IBP/PP Technical Meeting, Trebon, Sep., 1969, Centre for Agr. Publ and Docum., Wageningen, pp 215—220.
3. 林 健一 1972. 水稻品種の日射エネルギー利用効率に関する研究. 農技研報告 D 23: 1—67.
4. King, R. W., and L. T. Evans 1967. Photosynthesis in artificial communities of wheat, lucerne, and subterranean clover plants. *Aust. J. Biol. Sci.* **20**: 623—635.
5. 岩田恭允 1973. 耕地の放射エネルギー利用に関する農業気象学的研究 [I] 緒論および植物群落の波長帯別放射収支. 九州農試報告 1—79.

6. Lemon, E. R. 1966. Energy conversion and water use efficiency in plants. In: Plant environment and efficient water use, ed. W. H. Pierre, Don Kirkham, J. Pesek and R. Shaw, ASA and SSSA, Madison, Wis. 53711, pp. 28—48.
7. Loomis, R. S., W. A. Williams, and A. E. Hall 1971. Agricultural Productivity. Ann. Rev. Plant Physiol. 22 : 431—468.
8. Monteith, J. L. 1966. The photosynthesis and transpiration of crops. Exp. Agr. 2 : 1—14.
9. 村田吉男・宮坂 昭・棟方 研・秋田重誠 1968. 水稻個体群のエネルギー収支の生育に伴う変化について, 日作紀 37 : 685—691.
10. Salegeanu, H. 1965. On light absorbed, reflected and passing through leaves and on photosynthesis efficiency in some species. Rev. Roumaine Biol. Ser. Bot. 10 : 393—402.
11. Thomas, M. D., & G. R. Hill 1949. Photosynthesis under field condition. In: Photosynthesis in plant, ed. J. Franck and W. E. Loomis, Iowa State Coll. Press, Ames, Iowa, pp. 19—52.
12. Wassink, E. C. 1960. Efficiency of light energy conversion in plant growth. Plant Physiol. 35 : 356—361.

Measurement of the Efficiency for Photosynthetic Light Energy conversion of Rice Population under Field Conditions

M. SUZUKI* and Y. MURATA**

(*Kyushu Agricultural Experiment Station, Chikugo; **Faculty of Agriculture,
Tokyo University, Bunkyo, Tokyo, Japan)

Summary

Using the variety 'Hoyoku' cultured on a fertile soil in the field with nearly an optimum supply of water and fertilizer in an early planting or a normal season, the efficiency for photosynthetic light energy conversion of a rice population was measured under natural conditions for each 3-week period of the whole growth duration.

The absorbed PAR was obtained from the observed data of short wave solar radiation by the experimental formula of Kishida (1973), and gross chemical energy fixed by the population was obtained from adding the net production to the dark respiration.

The efficiency for light energy conversion thus determined was found to be fairly uniform during most of the growth period except for the last phase of the grain filling period, ranging from 7.7% to 4.6%. The average and the highest values for the early planting culture were 6.2% and 7.7%, respectively, and those for the normal season culture were 6.4% and 7.0%, respectively.

The ratio of net production to gross production was found to be 72% to 55% in the early planting culture 77% to 60% in the normal season culture, both with an average value of 67%, indicating that one third of the gross production was lost by respiration.