暖地二条オオムギの太陽エネルギー利用効率および転換効率の季節的变化*

山本 晴彦・本 條 均**・早 川 誠 而

鈴木 義 則***・河 田 尚 之****

(山口大学農学部, **果樹試験場, ***九州大学農学部, ****栃木県農業試験場)

1995年3月27日受理

要 旨: 暖地において水田裏作の基幹作物である二条オオムギ (品種: ニシノチカラ) を対象に, 個体群の太陽エネルギー利用効率 (Eu, %), 太陽エネルギー転換効率 (Ec, %) ならびに日射吸収量から乾物への変換効率 (Cs, g MJ⁻¹) を算出し, 二条オオムギの乾物生産を太陽エネルギーの利用の面から評価した. 節間伸長期から出穂期までの個体群日射吸収量は全天日射量の約 56%, 登熟期間中の個体群日射吸収量は約 70% であった. 全生育期間の個体群日射吸収量は 865.02 MJ m⁻² で, これは生育期間中の個体群に投下された日射量の積算値の約 40% に相当した. 節間伸長期から出穂期までの生育中期の Ec は 3.94% で, 高い値を示した. また, 登熟期間中の Eu は 1.47%, Ec は 2.13% で, 全生育期間における Eu は 1.09%, Ec は 2.71% であった. これは, 表作における暖地水稻の Eu, Ec に匹敵する値であり, 寒冷地のリクゼンムギに比べてかなり高率であることがわかった. 播種期直後から出穂期までの栄養生長期における乾物生産と積算日射吸収量の関係は直線関係が成り立ち, Cs は 2.32 g MJ⁻¹ であった. さらに, 登熟初期および中期は, 1.79 g MJ⁻¹, 1.17 g MJ⁻¹ になることが示された.

キーワード: 乾物生産, 乾物変換係数, 子実生産, 太陽エネルギー転換効率, 太陽エネルギー利用効率, 二条オオムギ.

Seasonal Changes in Efficiency of Solar Energy Utilization and Solar Energy Conversion in Two-rowed Barley of Warm Regions in Japan: Haruhiko YAMAMOTO, Hitoshi HONJO**, Seiji HAYAKAWA, Yoshinori SUZUKI*** and Naoyuki KAWADA**** (*Faculty of Agriculture, Yamaguchi University, Yamaguchi 753, Japan, **Fruit Tree Research Station, Ibaraki 312, Japan, ***Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-81, Japan, ****Tochigi Agricultural Experiment Station, Tochigi 328, Japan*)

Abstract: Efficiency of solar energy utilization (Eu, %), efficiency of solar energy conversion (Ec, %) and conversion efficiency were determined for two-rowed barley (cv. Nishinochikara) plant grown in warm regions in Japan. Absorbed solar radiation during the stage from internode elongation to heading was about 56% of the total supplied solar radiation, and that in the ripening stage was about 70%. Absorbed solar radiation (SR_α) in the growing period was 865.02 MJ m⁻², equivalent to about 40% of the total solar radiation. Ec at the internode elongation to heading stage was 3.94%. Eu and Ec were 1.47% and 2.13% in the ripening period, both of which accounted for 1.09% and 2.71% in the whole growing period, respectively. These values were equal to those of rice grown in the same regions in Japan. Top dry weight was variable in proportion to SR_α, and Cs (Conversion efficiency) was 2.32g MJ⁻¹. The value of Cs determined in the early and middle ripening stages were 1.79g MJ⁻¹ and 1.17g MJ⁻¹, respectively.

Key words: Conversion efficiency, Dry matter production, Efficiency of solar energy conversion, Efficiency of solar energy utilization, Grain production, Two-rowed barley.

九州地方は, 二条オオムギの主要な栽培地帯であるが, 収量性が低く, かつ安定生産力が低い. このため, 二条オオムギの生産性を向上させるためには, 多収品種の育成や湿害対策などの新しい栽培技術の開発等が必要とされている.

太陽エネルギーの利用からみた作物の多収性についての育種目標は, 太陽エネルギーをいかに有効に乾物生産と子実生産に結びつけるかという点にある⁹⁾. 二条オオムギにおいても物質生産過程における

太陽エネルギー利用の実態について解明することが, 多収性品種の育種を進める上からもきわめて重要であるといえる.

このような視点から, 水稻^{2,3,6,9,11,12)}, 豆類^{3,10)}, 牧草^{7,8)}などの作物については太陽エネルギーの利用効率や転換効率が推定されてきた. 二条オオムギにおいては, 本田・神田⁴⁾が寒冷地において太陽エネルギー利用効率の推定を試みている. しかし, 暖地において二条オオムギの太陽エネルギーの利用について季節的变化や品種間差異を比較した報告は認められない.

山本ら¹³⁾は, 暖地における二条オオムギの太陽エ

* 大要の一部は, 第 186 回講演会 (1988 年 10 月) において発表.

** 現在, 宇都宮大学農学部.

エネルギー利用効率を解明するため、日本の二条オオムギ新・旧品種および外国品種を供試品種に用いて、栄養生長期および登熟期における太陽エネルギー利用効率の品種間差異について検討した。1987年から1989年にわたって日本および外国で育成された二条オオムギ品種を供試して、太陽エネルギー利用効率を比較した結果、供試品種間で大きな差異が認められることを明らかにした。

本研究では、二条オオムギ個体群への短波放射の入射量、透過量および個体群からの反射量を測定し、個体群日射吸収量を求め、この測定値から太陽エネルギー利用効率ならびに転換効率を算定し、二条オオムギ個体群の乾物生産を太陽エネルギー効率の面から評価することを試みた。さらに、二条オオムギ個体群に吸収された日射量と乾物生産の間の関係について検討した。

材料と方法

1. 供試品種および栽培管理

実験材料には、農林水産省九州農業試験場が1987年に品種登録を行ったニシノチカラを使用した。実験は、1987年から1988年にかけて九州農業試験場(福岡県筑後市)の精密圃場で行った。栽培法は、畦幅140 cmの畦立栽培とし、70 cmの間隔に、株間10 cm、条間10 cmの4条ドリル播で、1987年11月16日に播種した。播種量は10 a当たり5 kgである。施肥量は、多肥条件として、化成肥料(N:P:K=16:16:16)を10 a当たり窒素成分量で5.6 kgを基肥として施肥した。追肥は基肥と同様の化成肥料を1月18日に4.3 kg、3月2日に2.1 kgの2回行った。踏圧は1月7日から2月25日にかけて4回行った。土入れは1月18日から3月5日にかけて3回行った。出穂期は4月4日であった。

2. 生育調査方法

生育調査は、最初は播種日から59日目(1月14日)に行い、それ以降は1~2週間の間隔で5月24日まで14回行った。試験圃場を3ブロックに分割し、1ブロック当たり1 m²を採取した後、草丈、茎数、葉面積を調査した。測定後、通風乾燥機により80°Cで48時間乾燥して、地上部乾物重量を器官別に求めた。ただし、本実験では根部の調査は行わなかった。

3. 作物個体群における入射光、反射光および透過光の測定方法

作物個体群における入射光、反射光および透過光の測定は、以下のように行った。試験圃場の中央部

に設置した高さ3 mの観測用ポールに、地上2 mの高さにアルベドメーター(MR21, 英弘精機)を取り付け、入射する全短波放射と作物個体群から反射される短波放射を測定し、管形日射計(英弘精機)を地面上5 cmの高さに水平上向きに個体群内に株間に配置し、個体群を透過して畑面に到達する短波放射を測定した。裸地面から放射される短波放射は、アルベドメーターを使用して高さ180 cmの位置に取り付けて測定した。これらの測定計器からの出力は、データロガー(TR2731, タケダ理研工業)により1分間隔で測定し、30分間ごとに積算した。測定期間は、1987年11月16日から1988年5月23日までの191日間である。

4. 作物個体群の日射吸収率の計算方法

3の測定結果をもとに、個体群の吸収率は式(1)によって求めた。

$$\alpha = 100 - r - \tau + 0.01r_s \cdot \tau \quad (1)$$

ここで、 α は吸収率(%), r は反射率(%), τ は透過率(%), r_s は土壌面反射率(%)である。

5. 個体群の太陽エネルギー利用効率および転換効率の計算方法

個体群の太陽エネルギー利用効率および転換効率は、式(2)および式(3)によって求めた。

$$Eu (\%) = \frac{\Delta W \times Q}{\Delta SR \times 10^3} \times 100 \quad (2)$$

$$Ec (\%) = \frac{\Delta W \times Q}{\Delta SR \times \alpha \times 10^3} \times 100 \quad (3)$$

ここで、Euは太陽エネルギー利用効率(%), Ecは太陽エネルギー転換効率(%), ΔW は地上部乾物増加量(g m⁻²), Q は乾物に含まれる燃焼熱量(KJ g⁻¹), ΔSR は積算日射量(MJ m⁻²), α は吸収率である。

乾物1 g当たりの燃焼熱(Q)の測定には、燃研式自動ボンブ熱量計(CA-3 P, 島津製作所)を使用し、生育時期別に採取した材料を、部位別に乾燥し粉碎した試料について Q を求めた。

結果と考察

1. 気温および日射量の推移

播種日から収穫日までに当たる1987年11月から1988年5月までの平均気温と日射量の半旬別の日データを第1図に示した。播種日から出芽期にかけて平均気温はやや高く推移したが、12月に入って平年値よりもかなり低く経過した。12月下旬から1月上旬にかけて平均気温は平年値より高く推移した。

2月第2, 第4半旬, 3月上旬は平年より低温で推移したため, 生育がやや遅れ気味の傾向が認められた。4月第2半旬に低温傾向が認められたが, 生育中期・後期を通じてほぼ平年並に推移した。生育期間の積算温度は, 1957.5°C で, 平年値 (1961.8°C) とほぼ等しかった。このため, 二条オオムギの収穫日は, ほぼ平年並であった。

日射量は, 11月下旬から12月上旬にかけて平年を下回ったものの, 2月に入って平年値より日射量がかなり高い傾向を示した。3月中下旬は, 日射量が低かったが, 4月の前半は平年値よりもかなり高い傾向がみられた。生育期間中の積算日射量は, $2152.81 \text{ MJ m}^{-2}$ で, 平年値 ($2154.52 \text{ MJ m}^{-2}$) とほぼ等しかった。

2. 地上部乾物重量と葉面積指数の推移

二条オオムギ個体群の生育期間内における地上部乾物重量 (以下, 乾物重量と略称) および葉面積指数 (以下, LAI と略称) の推移を, 第2図に示した。乾物重量は, 播種後徐々に増加し, 節間伸長期の播種後105日頃から急激に増加した。出穂期 (4月4日) 以降, 生殖生長期に移行して乾物重量は栄養生

長期と比較して緩やかに増加して, 登熟後期に至って乾物重量の増加はさらに緩やかになり, 収穫期の乾物重量は 1398.2 g m^{-2} であった。LAI は, 播種後はゆるやかに増加し始めて, 播種後59日目から次第に増加した。出穂期直後に LAI は最大 (4.70) に達したが, 出穂以降は葉身の枯れ上がりにより葉面積は急激に減少し, 収穫期には皆無の状態であった。

山本ら¹³⁾ は, やや少肥条件 (窒素成分量: $7 \text{ kg}/10 \text{ a}$) で栽培試験を行った結果では, ニシノチカラは成熟期の乾物重量が 1212 g m^{-2} , 穂揃い期の LAI が 4.97 であった。これに比べて本実験の肥料水準は 10 a 当たり 13 kg であり, この多肥が登熟期の地上部の生育に良好に作用して, 乾物重量が高まる結果になったと推察される。

3. 反射率, 透過率および吸収率の推移

LAI が急激に増加し始めた播種後59日目から成熟期に至るまでの二条オオムギ個体群の反射率, 透

Fig. 1. Changes in mean air temperature and mean solar radiation, at 5-day intervals.

Fig. 2. Changes in whole plant dry weight and leaf area index (LAI) of two-rowed barley.

Fig. 3. Changes in rate of transmittance, reflection and absorption of solar radiation.

過率および吸収率の推移を第3図に示した。

透過率は、播種後59日目には93%であったが生育が進むに伴って減少し始め、2月上旬以降はLAIの増加に伴って指数関数的に減少し、出穂期には12%まで低下した。出穂後、透過率はさらに低下し極小値で約8%を示した。出穂中期以降は個体群の下葉の枯れ上がりが進行してLAIが減少したにもかかわらず、透過率はほぼ一定で推移し、登熟後期にはわずかながら増加する傾向が認められた。反射率は、出穂期まではわずかな増加傾向を示し、出穂期に反射率は最大の21%であった。出穂後は漸減傾向を示した。吸収率は、透過率の低下と相半して2月上旬から急激に増加する傾向が認められた。出穂後には、その増加率は鈍化した。5月上旬には約76%と最大値を示した。それ以降の登熟後期には吸収率が若干減少する傾向を示した。

4. 燃焼熱の推移

二条オオムギの燃焼熱を部位別に分けて測定した結果を第4図に示した。葉の燃焼熱は、1月中旬には 18.31 KJ g^{-1} の値を示したが、出穂期を過ぎると急激に低下し、茎と葉鞘は葉の約90%の燃焼熱であったが、登熟後期は葉と同様な値を示した。穂は、出穂直後は約 17 KJ g^{-1} であったが、登熟中後期には、葉の燃焼熱を上回る傾向を示した。枯死部の燃焼熱は、生育期間を通じてほぼ一定な値を示した。作物体の平均燃焼熱は、生育初期には 17.71 KJ g^{-1} であったが、生育が進むにつれて漸減する傾向が認められ、出穂後は 17 KJ g^{-1} で推移した。

5. 太陽エネルギー利用効率および太陽エネルギー転換効率の推移

二条オオムギの生育時期を5段階に分けて、生育時期別の日射量、日射量の累年平年値、個体群日射吸収量、太陽エネルギー利用効率 (Eu) および太陽エネルギー転換効率 (Ec) を、第1表に示した。太陽エネルギー利用効率および太陽エネルギー転換効率の推移を、第5図に示した。

播種期から収穫期までのオオムギ生育期間中の積算日射量は、 $2152.81 \text{ MJ m}^{-2}$ であった。この期間の1981年から1987年までの7年間の積算日射量の累計平均値は $2154.52 \text{ MJ m}^{-2}$ であったことから、本試験の生育期間中の日射環境はほぼ平年並に推移していたと考えられる。播種期から出穂期までの栄養

Fig. 4. Changes in heat of combustion of leaf, stem and leaf sheath, dead leaf, panicle and a whole plant.

Table 1. Efficiency for solar energy utilization (Eu) and efficiency for solar energy conversion (Ec) of two-rowed barley in various growth stages.

Growth stage	ΔSR (MJ m^{-2})	$\Delta \text{SR}_{\text{ave}}$ (MJ m^{-2})	$\Delta \text{SR}_{\alpha}$ (MJ m^{-2})	Eu (%)	Ec (%)
Vegetative growth stage					
16 Nov. ~ 27 Feb.	915.19	882.60	64.53	0.286	4.063
27 Feb. ~ 2 Apr.	388.60	438.24	215.97	2.188	3.936
16 Nov. ~ 2 Apr.	1303.79	1320.84	280.50	0.849	3.947
Ripening stage					
3 Apr. ~ 16 Apr.	274.12	195.08	189.54	2.075	3.001
17 Apr. ~ 7 May	304.32	338.26	215.68	1.497	2.112
8 May ~ 23 May	270.58	300.34	179.30	0.822	1.240
3 Apr. ~ 23 May	849.02	833.68	589.52	1.466	2.129
Total growth stage	2152.81	2154.52	865.02	1.090	2.714

ΔSR : Accumulated solar radiation (MJ m^{-2}).

$\Delta \text{SR}_{\text{ave}}$: Normal solar radiation (MJ m^{-2}).

$\Delta \text{SR}_{\alpha}$: Absorbed solar radiation (MJ m^{-2}).

生長期の積算日射量は、 $1303.79 \text{ MJ m}^{-2}$ であり、全生育期間の約61%に相当した。

日射吸収量を生育ステージ別にみると、播種期から節間伸長期までは 64.53 MJ m^{-2} で、個体群に投下された日射量の約7%しか吸収されていないことがわかる。これは、この生育ステージが低温・低日射の環境条件下にあったために光合成能力が低く推移し、葉面積の拡大が妨げられたことによるものと推察される。節間伸長期以降は、平均気温と日射量の両者が上昇傾向に転じており、LAIの増加につれて日射吸収率が増加し、節間伸長期から出穂期までに投下された日射量の約56%が個体群に吸収されている。さらに、出穂期以降は個体群日射吸収率はさらに高く維持され、登熟期間中の個体群日射吸収率は、日射量の約70%であった。これは、出穂期に葉群の日射吸収に穂の吸収が加わったことが大きく影響しているものと考えられる。全生育期間の個体群日射吸収量は 865.02 MJ m^{-2} で、生育期間中の個

体群に投下された積算日射量の約40%に相当した。

Euは、播種後はわずかな上昇しか認められなかったが、節間伸長期から急激に上昇し、出穂前の1週間では2.68%と高い効率を示した。この変化は、LAIの増加とよく一致していることがわかる。播種期から節間伸長期までの生育初期は、積算日射吸収量が 64.53 MJ m^{-2} で非常に少なかったが乾物増加量が高かったために、Ecは高い傾向を示した。LAIの増加により個体群日射吸収率は急激に高まり、節間伸長期から出穂期までの生育中期のEcは3.94%で、高い値を示した。EuとEcは、出穂直後に低下する傾向が認められているが、登熟中期の低下は緩やかであった。このため、出穂期から収穫期までの登熟期間内のEuは1.47%、Ecは2.13%であった。登熟期間内のEuおよびEcが節間伸長期から出穂期までの値より低かったのは、穂のEuおよびEcが低かったことが原因の一つと考えられる。全生育期間におけるEuは1.09%、Ecは2.71%であった。

第2表には、過去に日本国内で求められた生育期間を通じてのEuおよびEcの値を作物別に示した。本田⁴⁾は、寒冷地(宮城県)で二条オオムギ(品種: リクゼンムギ)を用いてEuを測定した結果、10月から翌年4月上旬までのEuは0.2%、4月初旬から収穫期までは1.1~1.4%であり、生育期間を通じては0.6%であったと報告している。水稻についてみると、岸田⁶⁾は短波放射域におけるEuとEcを求めた結果、Euは1.15%、Ecは2.22%であったと報告している。さらに、村田⁹⁾、広田³⁾、本田・神田⁴⁾はEuをそれぞれ1.32~1.49%、1.34%、1.48~1.94%であったと報告している。また、堀江・桜谷⁵⁾は水稻のEcを2.95%であったと述べている。本実験で算出された水田裏作の基幹作物である二条オオムギ個体群のEuとEcは、表作である暖地水稻のEuとEcに匹敵する値であり、寒冷地のリクゼンムギに比

Fig. 5. Changes in efficiency for solar energy utilization (Eu) and efficiency for solar energy conversion (Ec).

Table 2. Efficiency for solar energy utilization (Eu, %) and efficiency for solar energy conversion (Ec, %) of barley, rice and soybean.

Experimental Crop	Author	Experimental place (Prefecture)	Eu (%)	Ec (%)
Barley	Yamamoto <i>et al.</i>	Fukuoka	1.09	2.71
Barley	Honda and Kanda ⁴⁾	Miyagi	0.6	—
Rice	Kishida ⁶⁾	Fukuoka	1.15	2.22
Rice	Murata ⁹⁾	Saitama	1.32~1.49	—
Rice	Horie and Sakuratani ⁵⁾	Ibaraki	—	2.95
Rice	Hirota <i>et al.</i> ³⁾	Fukuoka	1.34	—
Rice	Honda and Kanda ⁴⁾	Miyagi	1.48~1.94	—
Soybean	Hirota <i>et al.</i> ³⁾	Fukuoka	0.92	—

Fig. 6. Relationships between accumulated of absorbed solar radiation and top dry weight. Cs1: Vegetative stage, Cs2: Early ripening stage, Cs3: Middle ripening stage.

Table 3. Conversion efficiency (Cs) of two-rowed barley in various growth stages.

Growth stage	Conversion efficiency (Cs, g MJ ⁻¹)
Vegetative growth stage (16 Nov.~4 Apr.)	2.32
Early ripening stage (5 Apr.~23 Apr.)	1.79
Middle ripening stage (24 Apr.~14 May)	1.17

とてもかなり高い値であることがわかった。

6. 乾物重量と日射吸収量の関係

播種期直後から成熟期にまでにおいて、その時点までに個体群に吸収された全天日射量（短波放射）と生育の各時点における地上部乾物重量の関係を第6図および第3表に示した。これから、播種直後から出穂期まで、すなわち栄養生長期における日射吸収量と乾物生産量との間には、式(4)にみられるように直線関係が成り立つことが明らかになった。

$$\Delta Tdw = Cs \times \Delta SR\alpha \quad (4)$$

ここで、 ΔTdw は地上部乾物重量 (g m⁻²)、Cs は日射吸収量から乾物への変換効率 (Cs: Conversion efficiency, g MJ⁻¹)、 $\Delta SR\alpha$ はその時点までに個体群に吸収された全天日射量 (MJ m⁻²) である。ただし、Cs は Cs1 (栄養生長期)、Cs2 (登熟前期)、Cs3 (登熟中期) である。

播種期直後から出穂期までは $\Delta SR\alpha$ と ΔTdw の関係は直線とみなされ、Cs1 は 2.32 g MJ⁻¹ であることが示された。しかし、出穂期を過ぎる頃からこ

の直線関係からはずれ、登熟前期 (Cs2) は 1.79 g MJ⁻¹、さらに登熟中期 (Cs3) には 1.17 g MJ⁻¹ となり、2つの直線関係が成り立つものと考えられた。

これまでに、作物個体群のバイオマス生産が吸収された短波放射もしくは光合成有効放射量と比例することは、Gallagher and Biscoe¹⁾ がムギ類について、堀江・桜谷³⁾ がイネについて示しており、オオムギとコムギの光合成有効放射に対する変換効率 (Cp) が 2.17、イネの Cs は 1.79、Cp は 2.75 などが報告されている。本実験の結果から、暖地における二条オオムギについて、播種直後から出穂期までの栄養生長期については、このような比例関係が成り立ち、Cs1 が 2.32 となることが明らかになった。しかし、出穂期直後から Cs は低下しており、登熟期間は栄養生長期で得られた直線回帰式を下回り、乾物への変換効率が低下する結果となった。本実験で得られた生育末期における Cs の低下は、イネについて堀江・桜谷⁵⁾ が得た生育末期の Cs の低下時期よりもかなり早い段階で二条オオムギでは低下することが明らかになった。登熟期の初期から中期にかけて Cs が低下した原因として、第1に登熟期には高温環境に移行した結果、維持呼吸の増大を招き、それが乾物生産量の低下をきたしたためと考えられる。第2には、登熟期の葉面積の減少による個体群光合成能力の低下が考えられる。第3には、登熟期における穂の日射吸収により葉群内への透過光が減衰するため葉の光合成能力が低下したこと等が考えられるが、今後さらに実験を通じて検討する必要がある。

この二条オオムギ個体群に吸収された日射量と乾物生産との関係から導かれた乾物への変換効率は、気象因子から二条オオムギの生育や収量を予測するモデルの重要な柱になる可能性を示唆するものである。今後は、栽培年度、作期、品種を異にし、また遮光処理により異なる日射条件下で栽培実験を行って、日射吸収量から乾物への変換効率を求め、変換効率が環境条件等にかかわらず一定であるかどうかを検証する必要がある。

謝辞: 本研究の解析には、地域環境計測と防災予知・予測システムを使用した。本研究の実施するに当たっては、九州農業試験場水田利用部機械化研究室および耐性育種研究室から精密圃場および計測機器をお借りした。また、乾物の燃焼熱の測定に当たっては、九州農業試験場畜産部環境生理研究室のご協力を頂いた。ここに深く感謝いたします。

引用文献

1. Gallagher, J.M. and P.V. Biscoe 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Soc., Camb.* 91: 47-60.
2. 林 健一 1972. 水稻の日射エネルギー利用効果に関する研究. *農技研報* D23: 1-67.
3. 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率に関する研究. 第2報 水稻並びに大豆個体群における短波放射と光合成有効放射の利用効率および転換率. *日作紀* 47: 133-140.
4. 本田 強・神田巳季男 1984. 耕地(水田)における短波長域放射の利用効率. *グリーンエナジー計画成果シリーズIII系(生産環境) No.1 生産環境の成立機構の解明*. 農林水産技術会議事務局. 45-62.
5. 堀江 武・桜谷哲夫 1984. 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.
6. 岸田恭允 1973. 耕地の放射エネルギーに関する研究. 緒論および植物群落の波長別放射収支. *九農試報* 17: 1-79.
7. 楠谷彰一・杉山修一・後藤寛治 1979. オチャードグラスの生産性に関する研究. VI 日射エネルギー利用効率の品種間差異と乾物生産. *日草誌* 25: 7-15.
8. 萬田富治・村井 勝・畠中哲也・秋山 侃・塩見正衛・高橋繁男 1984. 飼料作物の生産・利用におけるエネルギーの流れの解明. *グリーンエイジ計画成果シリーズIII系(生活環境) No.1 生産環境の成立機構の解明*. 農林水産技術会議事務局. 153-164.
9. 村田吉男 1980. 光合成. *農学大事典*. 養賢堂, 東京. 814-815.
10. 中世古公男・後藤寛治 1983. 大豆, 小豆, 菜豆の生産生態に関する比較作物学的研究. 第7報. エネルギー吸収量ならびにその乾物生産効率からみた生産力の作物間差異. *日作紀* 52: 49-58.
11. 鈴木 守・村田吉男 1975. 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. *日作紀* 44: 109-113.
12. 鈴木 守・中村公則 1977. 暖地における水稻の乾物生産と気象要因ならびに太陽エネルギー利用効率について. *日作紀* 46: 530-536.
13. 山本晴彦・本條 均・河田尚之・鈴木義則・早川誠而 1996. 暖地二条オオムギの太陽エネルギー利用効率の品種間差異. *日作紀* 65: 198-206.