

作物の群落構造と物質生産-受光およびCO2拡散 (5)

グレインソルガムの草高が群落光合成に及ぼす影響

誌名	九州大学農学部学芸雑誌 = Science bulletin of the Faculty of Agriculture, Kyushu University
ISSN	03686264
著者名	広田,修 武田,友四郎
発行元	九州大学農学部
巻/号	42巻3/4号
巻号補足	
掲載ページ	p. 137-151
発行年月	1988年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



作物の群落構造と物質生産—受光および CO₂ 拡散—

V. グレインソルガムの草高が群落光合成に及ぼす影響

広 田 修・武 田 友四郎

九州大学農学部栽培学教室
(1987 年 11 月 27 日 受理)

Relationship between Canopy Architecture and Crop Production with Reference to Light and CO₂ Environments

V. Effect of the Canopy Height on Foliage Photosynthesis of Grain Sorghum Stands

OSAMU HIROTA and TOMOSHIRO TAKEDA

Laboratory of Crop Husbandry, Faculty of Agriculture,
Kyushu University 46-01, Fukuoka 812

緒 言

草高の高い個体群の乾物生産速度が草高の低い個体群のそれよりも大きいことはいくつかの作物で報告されている(星野ら, 1978; 飯田・館野, 1981; 武田・広田, 1983; 武田ら, 1984)。群落光合成および乾物生産に關与する要因の一つとして植被内の CO₂ 拡散が挙げられるが、前報(広田・武田, 1987)で示したように、草高の高い個体群では CO₂ 拡散に關与するすべての要因で群落光合成に有利であつた。すなわち、草高の高い個体群では植被面風速は大きく、風速の減衰係数および抵抗係数は小さく、そして葉面積密度も小さい。これらのことはすべて植被内の CO₂ 拡散に有利に働いている。CO₂ 拡散に關するこれらの要因は群落光合成にどの程度の影響を与えるものであろうか。このことを検討するためには、CO₂ 拡散に關する情報を組込んだ群落光合成モデルを作成し、シミュレーションによつてこれらの要因が群落光合成に及ぼす影響を推定する方法が有効である。この目的のために本研究では、グレインソルガムの同質遺伝子系統である短稈系統と長稈系統の個体群を作成して、群落光合成のシミュレーションに必要なデータを収集した。このデータを用いて群落光合成をシミュレートし、長稈系統の個体群の CO₂ 拡散に關する有利な要素がどの程度群落光合成に影響を与えているのかを検討した。

材料および方法

1984 年 6 月 21 日、佐賀県川副干拓地にてグレインソルガム(品種 Plainsman)の短稈系統と長稈系統をそれぞれ 25 a、畝幅 50 cm で条播した。施肥は石灰を 100 kg/10 a、N、P、K をそれぞれ 16 kg/10 a を全量元肥として化成肥料で与えた。

1. 個葉光合成の測定法

立毛状態での個葉光合成の測定法の概略を Fig. 1 に示した。測定は以下のようにしておこなつた。まず、容量が 200 l の空気袋に 20°C に保つた水中でバブリングさせた空気を貯え、これを光合成の測定中に流した。用いた同化箱の大きさは内容積が 10×10×5 cm³ で、内部にファンを設けた。同化箱の温度制御はおこなわなかつた。葉面の光強度の測定のため光量子センサー(LICOR 製)をつけた。葉温は直径が 0.1 mm の銅・コンスタンタン熱電対で測定した。光合成の測定は上位 4 葉の完全展開葉の葉身中央部でおこなつた。CO₂ 濃度の測定は絶対値型赤外線分析計(IR21 型、横川製)でおこない、水分の測定は相対湿度計(HMT+HMH SMAL, パイサラ製)を用いた。これらの計器からの出力は測定時刻、葉位などの情報とともにアナログカセットレコーダー(R61, TEAC)に収録し、測定終了後チャートに再生・記録した。葉温、チャンパー内温度、光強度などはデジタルレコーダー(TR2731,

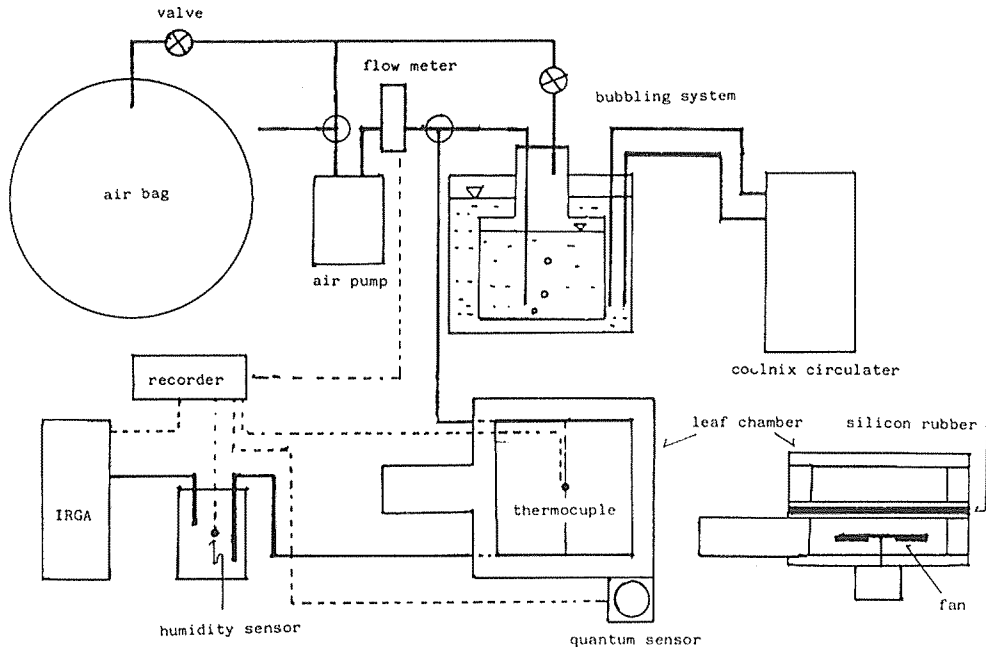


Fig. 1. Leaf photosynthesis measuring system used at the field condition.

タケダ理研)に収録した。なお、赤外線分析計および湿度計と同化箱のあいだは10 mのビニールパイプでつないだ。同化箱に送った空気の流量は4~5 l/minで、同化箱の葉面積は0.4~0.7 dm²であった。同化箱に葉をセットして計器の指示が安定した値を示すまでに要した時間は約2分で、測定終了までに要した時間は約3分であった。

2. CO₂ プロファイル、地面からのCO₂放出および風速の測定

群落内のCO₂濃度の測定は短稈系統の個体群では高さ100, 80, 60, 40, 20, 0 cmから、長稈系統では210, 150, 120, 30, 0 cmの高さから空気を採集してビーチボールに詰めた。風速は熱線風速計(KANOMAX)を短稈系統の個体群では100 cmに、長稈系統では200 cmの高さにセットして、30秒間隔で10分間の測定をおこない、これらの平均値とした。地面からのCO₂の放出は前報(武田・広田, 1983)と同じ方法を用いて測定した。

3. 群落光合成のシミュレーション

前報(広田・武田, 1988)に基づいて「ねらい打ち法」を使ってシミュレーションをおこなった。

結果および考察

1. 生育経過

全乾物重はFig. 2に示すように、長稈系統では播種後30日以後に急速に増加し、CGRの最高値は45 g/m² dayとなった。これに対して短稈系統では30 g/m² dayにすぎなかった。8月20日に来た台風によって被害を受け、特に長稈系統は完全に倒伏した。長稈系統の一部分は個葉光合成の測定を継続するため、支柱を立てて保持した。台風のアとの生育は低下し、特に長稈型で著しかつた。生育盛期の生産構造をFig. 3に示した。葉面積密度は長稈系統では短稈系統の約1/2であった。葉面積指数は長稈系統の方が少し大きかつた。葉の大きさ(葉幅)はFig. 4に示すように、短稈系統で少し大きい傾向があつた。

2. 個葉光合成

個葉光合成の測定は8月10, 17, 28日におこなった。本研究では光合成測定中の同化箱の温度制御をおこなっていないので、最初に葉温の検討をする。Fig. 5に日陰部の温度と葉温の関係を示した。8/10日の最も葉-気温差が大きくなると思われる11~14時の測定例を掲げた。なお、Fig. 5には短稈系統と長稈系統の両者を込みにして示している。以後においても、個葉光

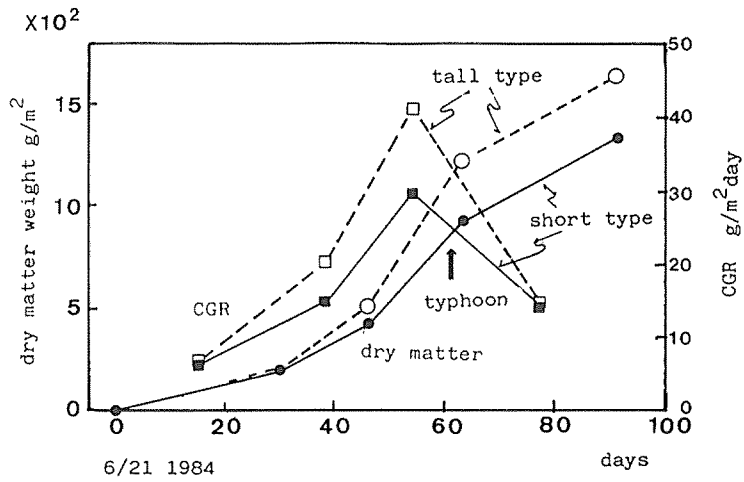


Fig. 2. Changes in dry matter weight and crop growth rate of grain sorghum (var. Plainsman).

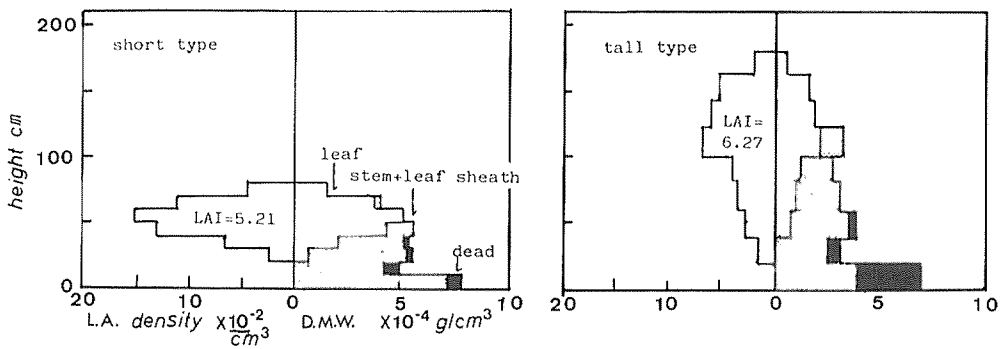


Fig. 3. Productive structure of grain sorghum (var. Plainsman) plant population (1984 8 6).

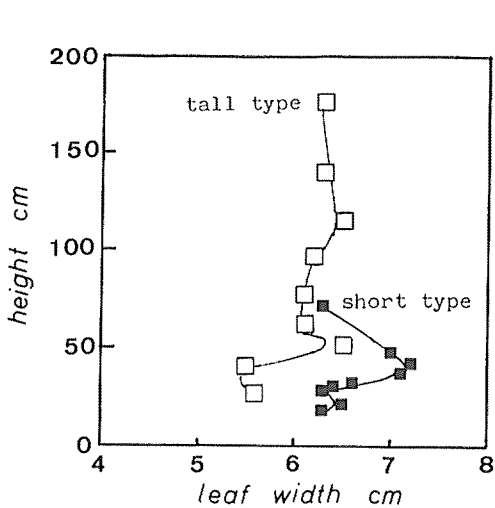


Fig. 4. Leaf width of grain sorghum (var. Plainsman).

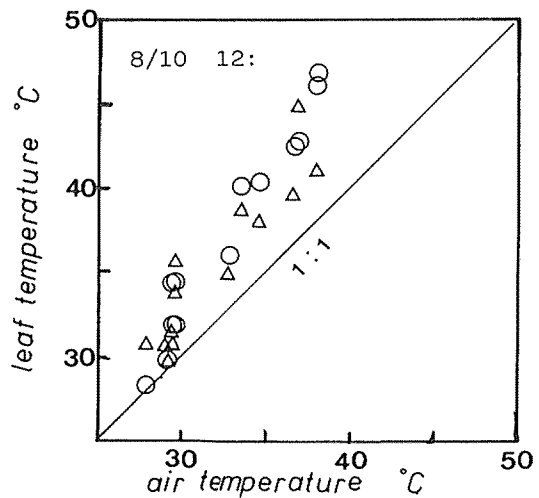


Fig. 5. Temperature of the leaf and air in leaf chamber during measurement of leaf photosynthesis. ○, leaf; △, air

合成速度に関しては、短稈型と長稈型の間には明瞭な差が見られなかったため、今回は両者を区別せずに議論を進める。

さて、 C_4 植物の葉温は周囲温度よりも2~5°Cほど高くなる例(坪木・藤井, 1978)が知られているが、本研究において葉-気温差は最大7°Cに達した。しかしながら、光合成測定に要する時間は約3分であつたので、当初はこの間、葉温が光合成に与える影響は大きくないと判断した。この点に関しては、あらためて後で議論する。

まず、8月17日の測定例について、Fig. 6に光強度と個葉光合成速度および蒸散速度の関係を示し、Fig. 7には葉温と個葉光合成速度および蒸散速度の関係を

示した。13時台には個葉光合成速度は100 mg/dm²h以上のものが見られた。葉温と光合成速度の関係は13時台に葉温も高く光合成速度も大きくなっている(Fig. 8)。

さて、Fig. 6および7で示すように本研究で得られた個葉光合成速度は100 mg CO₂/dm²h以上の値がかなりみられる。個葉光合成が高い例として、Nobel (1976)は *Hibiscus rigida* (C_4 植物)が115 mgCO₂/dm²hに達していることを報告している。本研究において個葉光合成速度が高い値が得られたのは次のような理由によるものであろう。まず圃場条件下で測定されたことが挙げられる。根圏の大きさ、葉の表裏面での受光などの他に、さらに葉温がかなり高くなつたこ

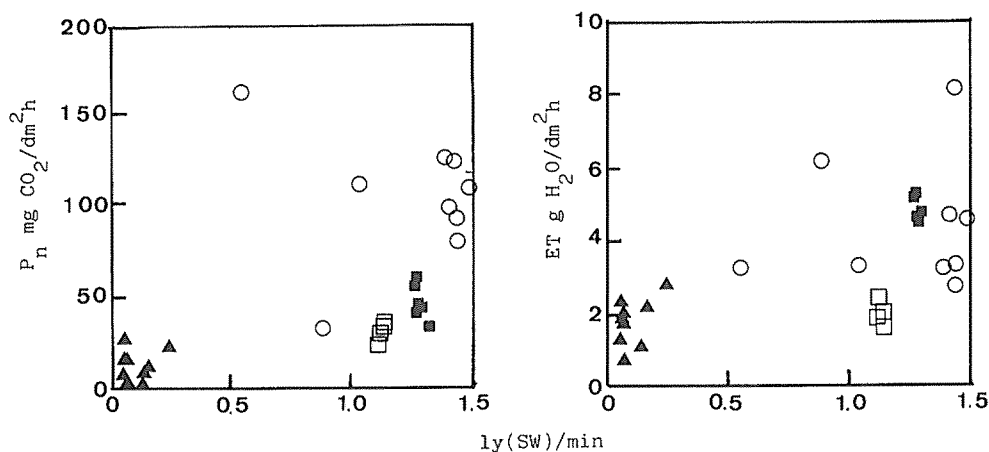


Fig. 6. Relation of light intensity with a leaf photosynthesis and transpiration of grain sorghum. □, 10:00; ■, 11:00; ○, 13:00; ▲, 18:00 8/17

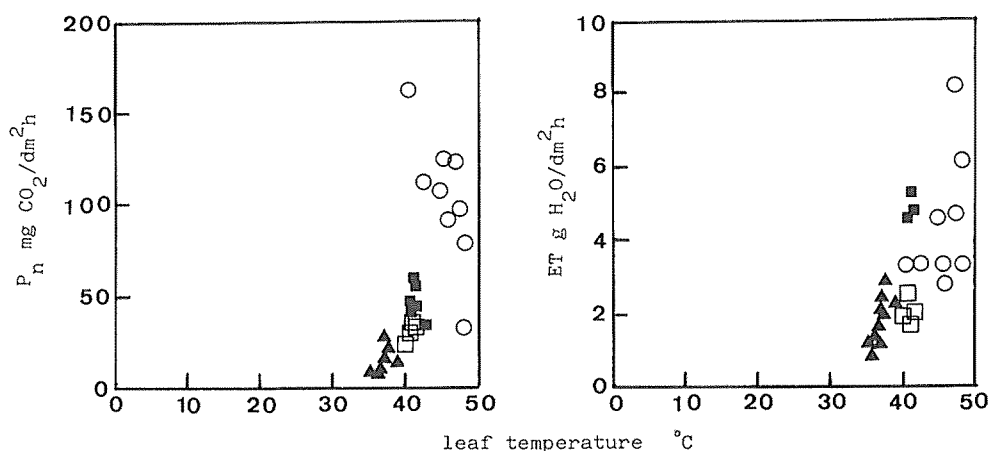


Fig. 7. Relation of leaf temperature with a leaf photosynthesis and transpiration of grain sorghum. □, 10:00; ■, 11:00; ○, 13:00; ▲, 18:00 8/17

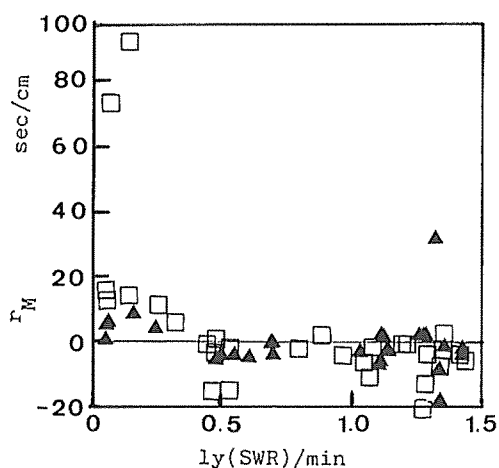


Fig. 8. Mesophyll resistances of grain sorghum (var. Plainsman), obtained at field condition.

□, short type; ▲, tall type 8/10, 17, 28

とが挙げられる。Björkman and Berry (1973) によると、*Tidestromia ablongifolia* (C_4 植物) の CO_2 固定速度は $40^\circ C$ 以上の葉温で最大になっている。本研究においても、葉温が高くなったために、 C_4 光合成に関与する酵素 (Pyruvate Pi dikinase, PEP carboxylase) の活性が高まったことが考えられる。この点に関連して、つぎに Gaastra (1959) の方法を用いて個葉光合成に関与する全抵抗を気孔抵抗と葉肉抵抗に分けて個葉光合成に果たしているそれぞれの役割を以下で評価する。Gaastra (1959) の式では光合成速度 P_{nt} と蒸散速度 E は、

$$P_{nt} = \frac{[CO_2]_{co}}{(r'_a + r'_s)/2 + r_M} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$E = \frac{[H_2O]_t - [H_2O]_{co}}{(r_a + r_s)/2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $[CO_2]_{co}$ 、同化箱の出口の CO_2 濃度で表わされている。 $r'_a + r'_s = 1.68(r_a + r_s)$ とすると、(1) 式と (2) 式より、葉肉抵抗 r_M は、

$$r_M = \frac{[CO_2]_{co}}{P_{nt}} - (r'_a + r'_s)/2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。今回測定した 8 月 10, 17, 28 日のデータより r_M を求めると、Fig. 8 に示したように負の値が多く得られた。これは如何なる理由によるものであろうか。 C_4 光合成においては PEP カルボキシラーゼの働きにより Bundle sheath 内の CO_2 濃度を高く保つことが知られている (Hatch and Osmond, 1976)。 C_4 植物におけるこの作用を含めて、葉での CO_2 拡散を電気アナログモデルで表わすと Fig. 10 で示すことができる。すなわち、 C_4 植物では mesophyll cell において光照射によつて PEP カルボキシラーゼの活性が高まり CO_2 が固定され、 C_4 化合物として bundle sheath 内に運ばれ、そこで脱炭酸される。Fig. 9 に示したように、mesophyll cell における PEP カルボキシラーゼの働きを負の抵抗 $r'_M (< 0)$ とすると、(3) 式によつて求められた r_M は $r'_M (< 0)$ と bundle sheath 内でおこなわれる Calvin 回路での抵抗 r_c との和で表わされ、

$$r_M = r'_M (< 0) + r_c \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。したがつて、Fig. 10 に示したように r_M が負となるのは $|r'_M| > r_c$ のときに生じる。このことを考慮して (1) 式を書きなおすと、

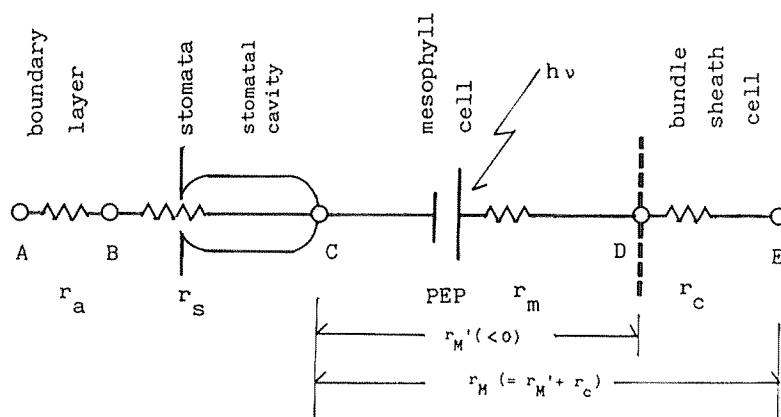


Fig. 9. Electric circuit as possible model for concentrating of CO_2 in bundle sheath cell of C_4 -plant.

$$P_{nl} = \frac{[\text{CO}_2]_{cu} - r'_M P_{nl}}{(r'_a + r'_s)/2 + r_c} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 $r'_M < 0$; r_c , Calvin 回路における抵抗となる。(5)式は PEP カルボキシラーゼの働きにより bundle sheath 内で $-r'_M P_{nl}$ だけ CO_2 濃度の高まりを示す。したがって、(5)式は外気の CO_2 濃度と bundle sheath 内の CO_2 濃度の和が全 CO_2 濃度差となつて、境界層抵抗 r'_a 、気孔抵抗 r'_s と Calvin 回路における抵抗 r_c の和としての全抵抗に對することになる。通常は、実験室などでは $|r'_M| < r_c$ の場合が多く、(4)式より $r_M > 0$ となつていたので PEP カルボキシラーゼ

による負の抵抗 r'_M はマスクされているものと考えられる。なお、葉肉抵抗 r_M が負の値をとるという報告例は Louwerse and Zweerde (1977) と Catsky and Ticha (1982) にみられる。

さて、個葉光合成を全抵抗と CO_2 ポテンシャルの二つの項にわけて、 C_4 光合成の活性を評価するには(5)式を用いる必要があるが、Calvin 回路における抵抗を独立に評価することは今のところ出来ないので、(4)式と(5)式より得られる(6)式、

$$P_{nl} = \frac{1}{(r'_a + r'_s)/2} ([\text{CO}_2]_{cu} - r'_M P_{nl}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

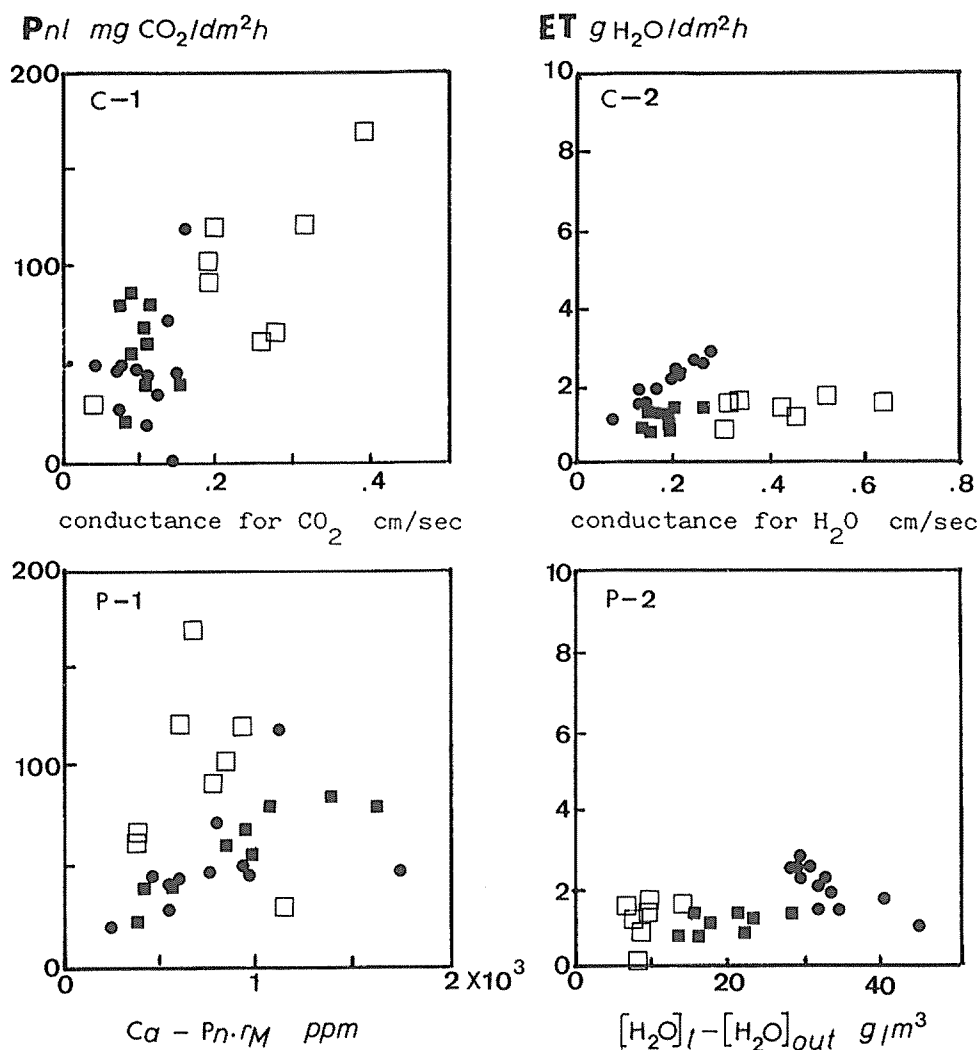


Fig. 10. Relation of leaf photosynthesis and transpiration with their component factors [conductance (C-1), (C-2) and potential (P-1), (P-2)] of grains sorghum, obtained at field condition. (var. Plainsman). $P_f = 2.6$, $\square$, 8:00; $\blacksquare$, 10:00; $\blacktriangle$, 12:00 8/10

を用いて、 P_{nl} を気相におけるコンダクタンス [$1/((r'_a + r'_s)/2)$] と CO_2 濃度のポテンシャル ($[\text{CO}_2]_{cu} - r_M P_{nl}$) に分けて、光合成特性の解析をおこなう。同時に、蒸散速度についても、(2) 式によつてコンダクタンスと葉面飽差に分けて解析をおこなう。

さて、8/10、8/17、8/28 日の測定結果をそれぞれ Fig. 10, 11 および 12 に示した。まず、8/1 日の例であるが、この日は数日前からの乾燥が続き P_f 値はテンションメーターの測定限界以下に低下し $P_f = 2.6$ であつた。したがつて、17、28 日の両日にくらべて葉面からの蒸散速度は低い。また、8 時台を除いて気孔コン

ダクタンスは低下していた。しかしながら、 CO_2 ポテンシャルは 10 時台と 12 時台には大きくなった。これは高温・強日射下での PEP カルボキシラーゼの働きが強まった結果と考えられる。また、8 時台には P_{nl} は気孔コンダクタンスと関係をもち、10、12 時台には PEP カルボキシラーゼの活性と関係があると思われる CO_2 ポテンシャルと関係をもつた。 CO_2 ポテンシャルは最大で 1,700 ppm に達している。同化箱内の CO_2 濃度を 300 ppm とすると、両者の差は 1,400 ppm になるが、この値はさきに述べたように bundle sheath 内の CO_2 濃度と見なすことができ、Hatch and Os-

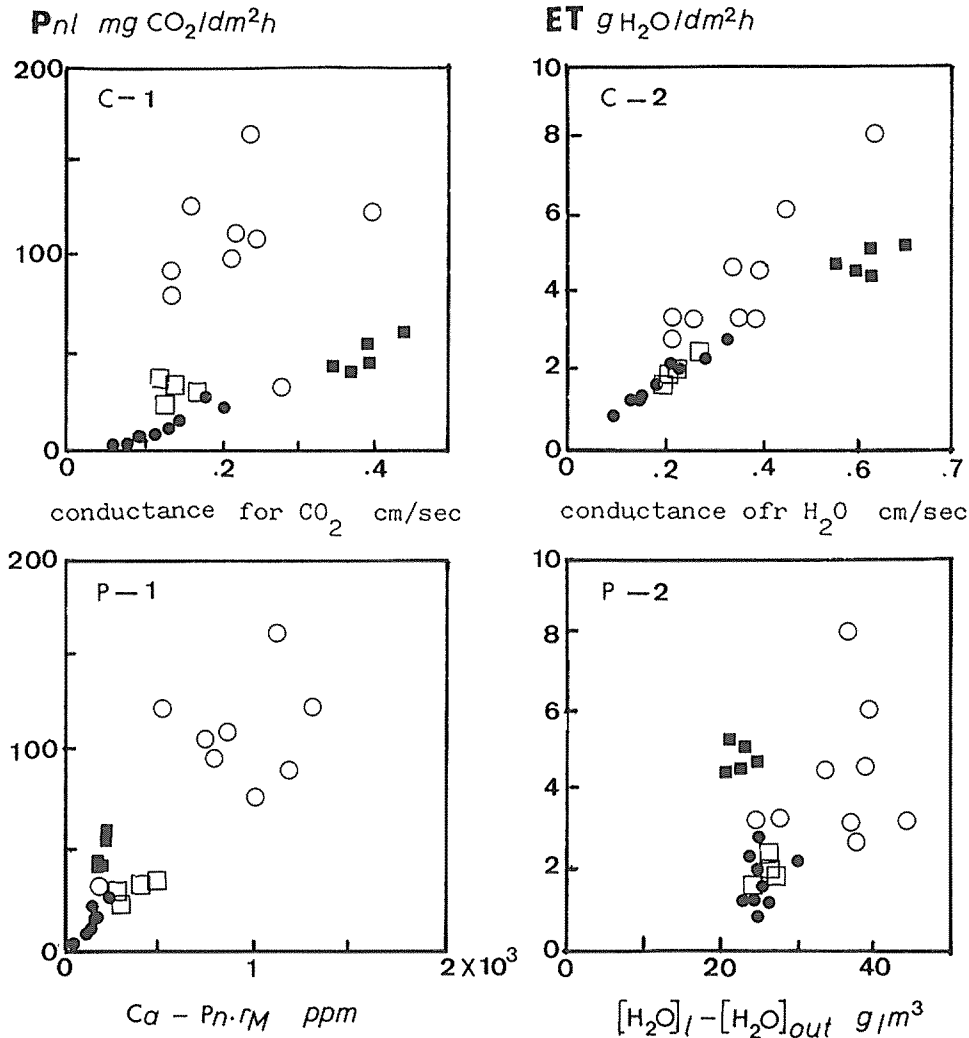


Fig. 11. Relation of leaf photosynthesis and transpiration with their component factors [conductance (C-1), (C-2) and potential (P-1), (P-2)] of grain sorghum, obtained at field condition. (var. Plainsman).

$P_f = 2.4$, $\square$, 10:00; $\blacksquare$, 11:00; $\circ$, 13:00; $\bullet$, 18:00 8/17

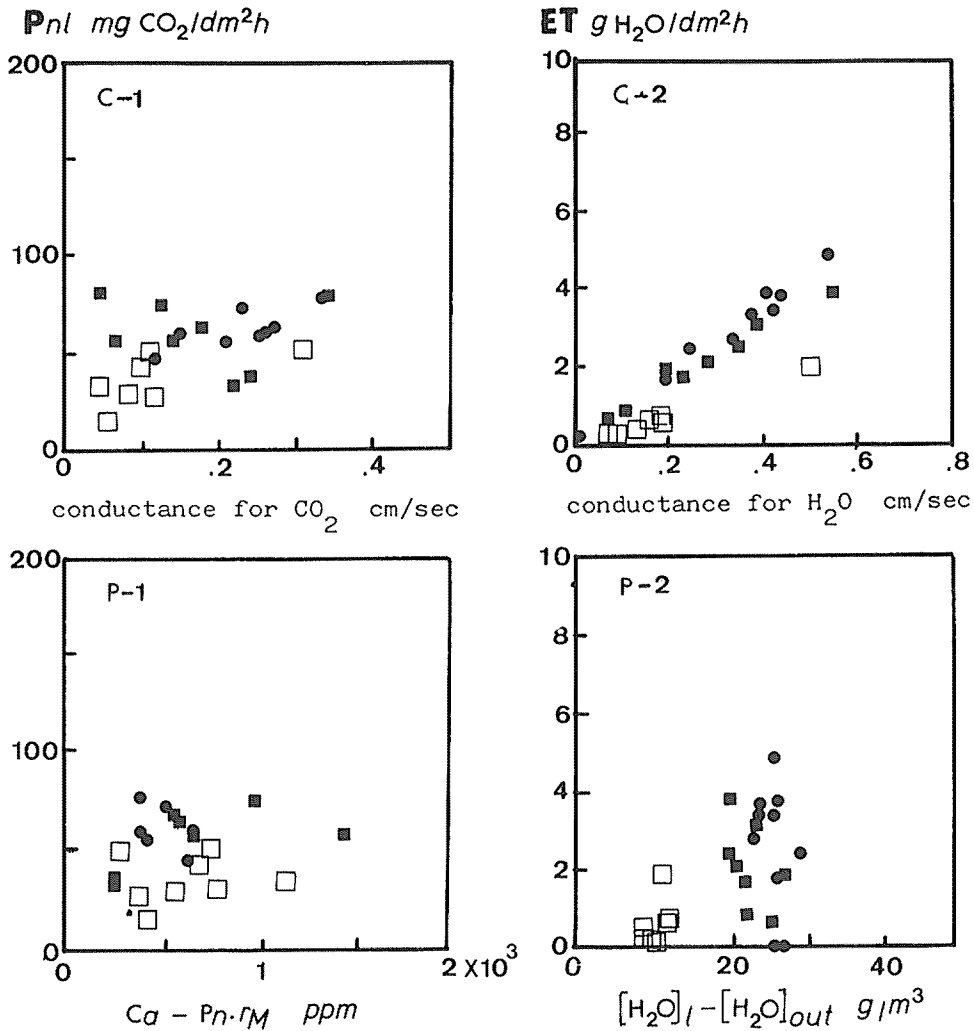


Fig. 12. Relation of leaf photosynthesis and transpiration with their component factors [conductance(C-1), (C-2) and potential (P-1), (P-2) of grain sorghum, obtained at field condition. (var. Plainsman).

$P_f=1.25$, $\square$, 9:00; $\blacksquare$, 11:00; $\bullet$, 14:00 8/28

mond (1976) が指摘している値に近い値である。

つぎに 17 日の例 (Fig. 11) であるが, $P_f=2.4$ であり蒸散速度も大きく $5 \text{ gH}_2\text{O/dm}^2\text{h}$ 以上のものがかなりみられる。気孔コンダクタンスは日射の強い 11 時と 13 時台で大きくなった。CO₂ ポテンシャルは 13 時台の強日射と高温下で大きくなった。28 日は (Fig. 12) は $P_f=1.25$ であるにもかかわらず、全体に蒸散速度および光合成速度は低下した。これは 10, 17 日にくらべて、気孔コンダクタンスと CO₂ ポテンシャルがともに低下したことによると考えられる。

さて、ここで Fig. 10~12 を用いて、光—光合成曲

線を求める。Fig. 13(A) は光強度に対して、光合成速度をプロットしたものであるが、強光条件下で光合成速度が小さい集団がある。これらは 8/28 日に測定したものであり、上に述べたように生育の進行と台風の影響が考えられるので、この部分を除いた。また Fig. 13(B) に示した光合成速度は純光合成速度であるので、これを呼吸（構成呼吸と維持呼吸）を考慮して導いた前報（広田・武田, 1988）の (13) 式を用いて、粗光合成速度に変換した。得られた光—光合成曲線は (7) 式で示される。

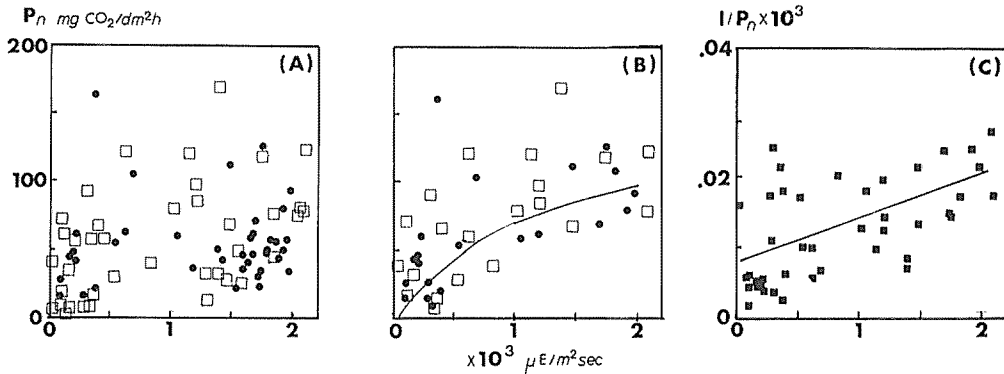


Fig. 13. Relation between light intensity on leaf surface and single leaf photosynthetic rate at the grain sorghum plant population. (var. Plainsman).
 □, short type; ●, tall type

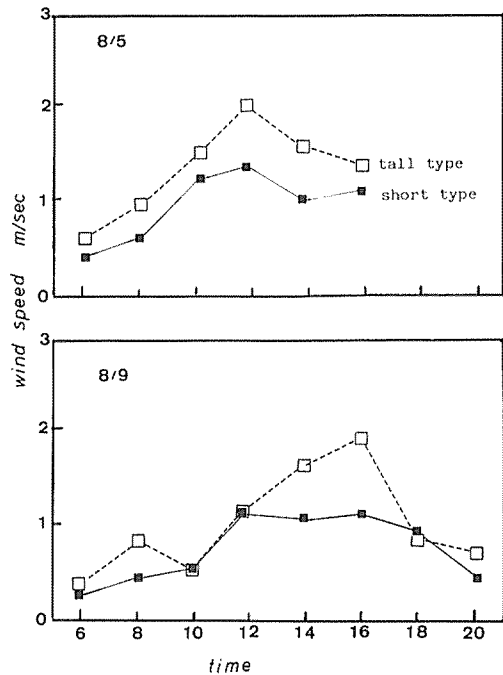
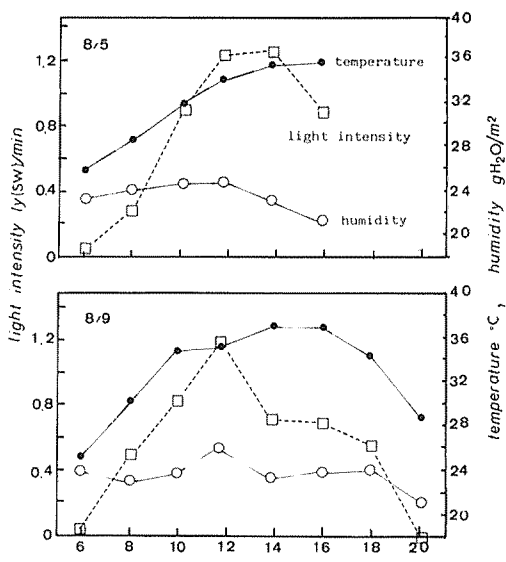


Fig. 14. Diurnal changes of incident radiation, temperature and humidity.

Fig. 15. Diurnal changes of wind speed above grain sorghum plant populations. (var. Painsman)

$$P_{st} = \frac{3.949 \times 10^{-6} I}{1 + 7.89 I} \dots\dots\dots (7)$$

ただし, P_{st} , 個葉の粗光合成速度 $gCO_2/cm^2 sec$;
 I , 光合成有効放射, $\mu E/cm^2 sec$

3. 群落光合成のシミュレーション

まず, 8月5日の日射, 気温および湿度の日変化を Fig. 14 に示す。5日の日射量は最大1.25 ly(SW)/min, 気温は36°Cに達した。9日は日射が弱く経過した。風速の日変化を Fig. 15 に示す。測定した高さは, 短稈型個体群で1 m, 長稈型個体群では2 mである。

これらの高さは, いずれも植被面より20 cm上の高さである。風速は早朝は弱く, しだいに強くなり日中に最大に達し, 午後再び低下した。長稈型個体群では短稈型よりも風速は大きい傾向があつた。つぎに, 植被面のCO₂濃度の日変化を Fig. 16 でみると, 午前6時にもつとも高く, 日中に極小に達し夕刻再び上昇した。

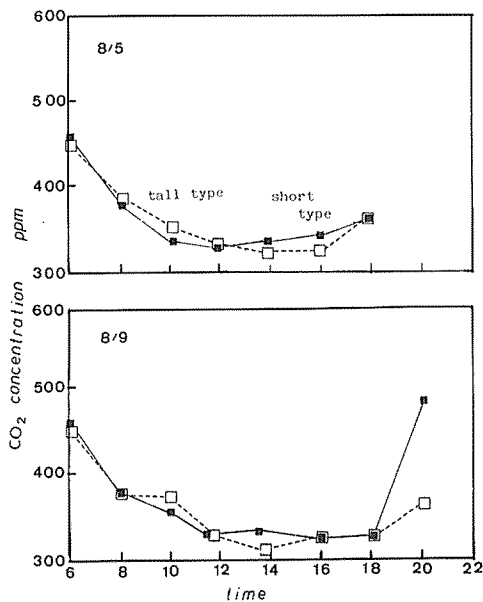


Fig. 16. Diurnal changes of CO_2 concentration of the air above grain sorghum plant populations. (var. Plainsman)

植被面の CO_2 濃度は短稈型と長稈型で差がないようであった。 CO_2 プロファイルは Fig. 17 で示したように、両者の間で差がみられた。短稈型個体群では日射が強い 13 時には、植被内での CO_2 濃度の急激な減少を示した。長稈型では植被内での CO_2 濃度の減少はゆるやかであった。日射の強い 5 日でこの傾向は特に著しかった。

次に、地面からの CO_2 の放出について、Fig. 18 で説明する。地面からの CO_2 放出速度と温度の関係は、

$$P_s = P_{s30} Q_{10s}^{(T_s - 30)/10} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 P_{s30} , 30°C における地面からの CO_2 放出速度, $\text{gCO}_2/\text{m}^2\text{h}$; Q_{10s} , 温度係数, 3.0; T_s , 土壌面温度, $^\circ\text{C}$

となった。温度係数 $Q_{10s}=3.0$ は Monteith (1964) の報告と一致する。

群落光合成のシミュレーションの方法は、前報 (広田・武田, 1988) で述べた方法とほぼ同じであるが以下の点については変更した。

まず、 CO_2 濃度の基準高度 CH をそれぞれの群落において CO_2 濃度を測定した最高たかさ (短稈型個体群では 100 cm, 長稈型では 210 cm) とした。風速も同様に風速を測定した高さ (短稈型で 100 cm, 長稈型で 200 cm) を基準高度 UH とし、ここでの風速の実測値

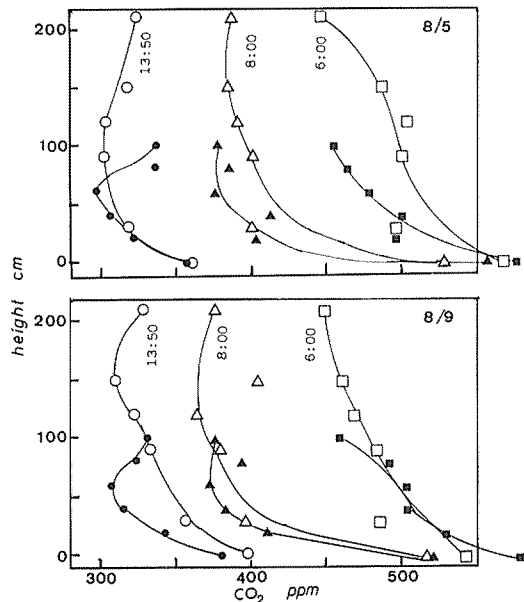


Fig. 17. Observed CO_2 profiles of grain sorghum plant populations. (var. Plainsman)

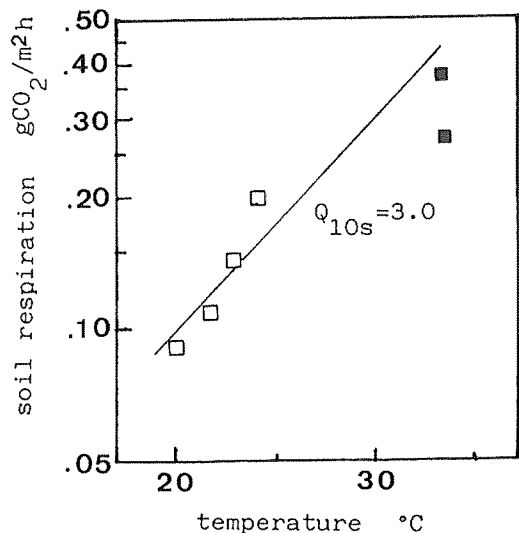


Fig. 18. Relation between temperature and CO_2 flux from soil below the grain sorghum plant populations. (var. Plainsman)

□, 1982 Kyushu Univ.; ■, 1984 Saga Pref.

をもとに摩擦速度 U_* を (9) 式より算出した。これを用いて、植被面風速 U_h と植被内の風速 $U(z)$ をそれぞれ (9) 式と前報 (広田・武田, 1987) (1) 式から求

めた、

$$U_h = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left(\frac{h-d}{Z_0} \right) \dots\dots\dots(9)$$

呼吸速度は McCree (1974) がグレインソルガムで得た (10) 式、

$$N_p = 0.14 D_{pn} + 0.0054 W_{cp} \dots\dots\dots(10)$$

ただし、 N_p 、30°C における、夜間 12 時間当りの呼吸量 $\text{gCO}_2/\text{plant } 12\text{h}$ ； D_{pn} 、日中 12 時間あたりの CO_2 吸収量、 $\text{gCO}_2/\text{plant } 12\text{h}$ ； N_{cp} 、乾物重の CO_2 当量、 $\text{gCO}_2/\text{plant } 12\text{h}$

を参考にした。すなわち、昼夜間の呼吸が等しいとすれば、一日当りの呼吸 R_p は、

$$R_p = 2N_p = 0.28 D_{pn} + 0.0108 W_{cp} \dots\dots\dots(10)'$$

となる。

つぎに、植被の最下層の拡散係数〔前報（広田・武田, 1988）(26) 式の $D(1)$ 〕は、Monteith (1973, p. 81) による地表面の摩擦を考慮した境界層抵抗 r_{as} を導く (11) 式、

$$r_{as} = 1.5 \left(\frac{d_s}{U(1)\nu} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(11)$$

ただし、 r_{as} 、地表面での境界層抵抗、 sec/cm ； d_s 、地面の土塊の代表長 5 cm； $U(1)$ 、植被の最下層の風速、 cm/sec ； ν 、空気の動粘性係数 0.160 (30°C) を用いて、(12) 式から求めた、

$$D(1) = \frac{dz/2}{r_{as}} \dots\dots\dots(12)$$

ただし、 dz 、シミュレーションを行うために分割した植被の層の最小単位。短稈型個体群で 10 cm、長稈型で 20 cm

なお、群落光合成のシミュレーションには Fig. 3 に示した葉面積および乾物重の垂直分布を用いた。葉の大きさ（幅）は Fig. 4 より、短稈型は 6.63 cm、長稈型は 6.13 cm とした。

光の消散係数 ($EXEF$) と風速の減衰係数 (β) は、

	$EXEF$	β
短稈型	0.478	2.7
長稈型	0.450	2.2

とした（武田・広田, 1983）。

シミュレーション結果は以下のとおりである。まず最初に、実験室で得た個葉光合成の値〔前報（広田・武田, 1988）の Fig. 4, グレインソルガム〕を用いてシミュレーションを行った結果について説明する。Fig. 19 に CO_2 プロファイルを示した。強光条件下(13 時台)での CO_2 濃度の低下が Fig. 17 (8/5) の実測値

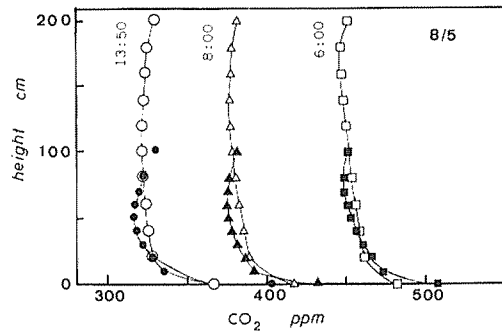


Fig. 19. Simulated CO_2 profile of grain sorghum plant populations, using leaf photosynthesis obtained at the laboratory. LAI is 5.21 in short type and 6.27 in tall type.

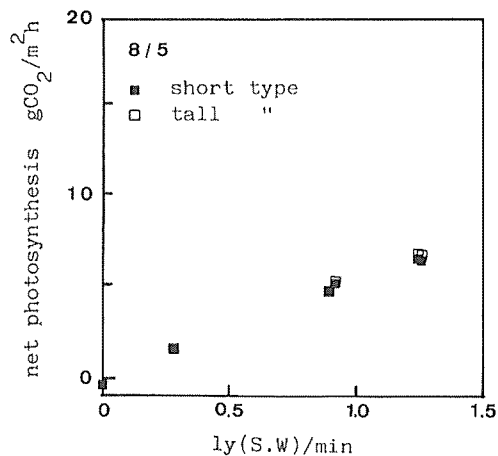


Fig. 20. Simulated canopy photosynthesis of grain sorghum plant populations, using leaf photosynthesis obtained at the laboratory. LAI is 5.21 in short type and 6.27 in tall type.

よりも短稈型および長稈型とともに小さい、また、群落光合成速度も小さく (Fig. 20)、両個体群の間で差はほとんど見られなかった。

つぎに、圃場条件下で測定した個葉光合成をもちいて、シミュレーションを行って得られた CO_2 プロファイルを示す。Fig. 21 に示す。 CO_2 プロファイルは強光下ではかなり実測に近い値になっている。また、群落光合成速度も高い (Fig. 22)。群落光合成速度の最大値は短稈型で $15.4 \text{ gCO}_2/\text{m}^2\text{h}$ で、長稈型で $17.2 \text{ gCO}_2/\text{m}^2\text{h}$ であった。長稈型の群落光合成速度は短稈型に比べ約 12% ほど大きい。なお、群落光合成でこれに近い値と

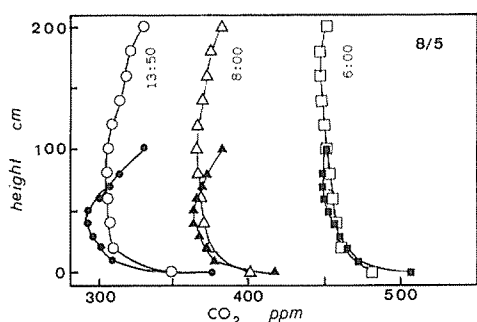


Fig. 21. Simulated CO_2 profile of grain sorghum plant populations, using leaf photosynthesis obtained at the field condition. LAI is 5.21 in short type and 6.27 in tall type.

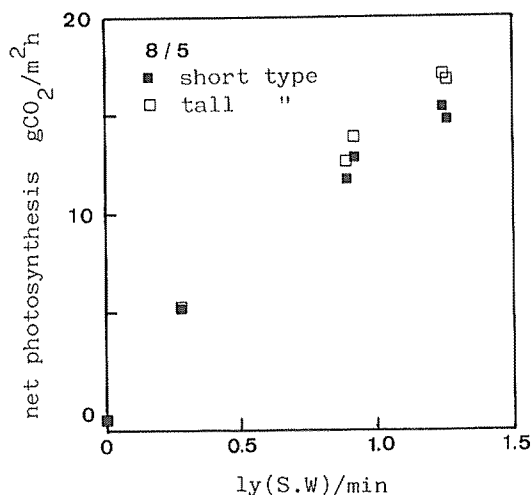


Fig. 22. Simulated canopy photosynthesis of grain sorghum plant populations, using leaf photosynthesis obtained at the field condition. LAI is 5.21 in short type and 6.27 in tall type.

しては Lemon (1960) がトウモロコシ群落で空力法を用いて測定した例として、 $14 \text{ gCO}_2/\text{m}^2\text{h}$ というのがある。以上のことから、 CO_2 プロファイルおよび群落光合成の両面から判断して、群落光合成のシミュレーションに用いる個葉光合成速度は圃場で測定した高い値が必要であることがわかった。

以上の結論は、LAI を Fig. 3 に示したように短稈型で 5.21、長稈型で 6.27 の群落としてシミュレートしたものである。したがって、Fig. 22 で示した短稈型と

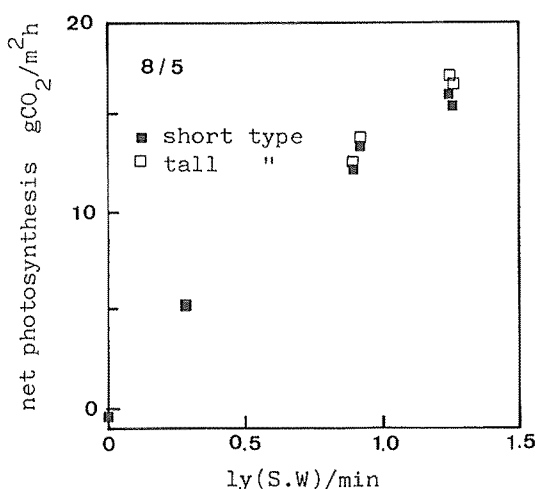


Fig. 23. Simulated canopy photosynthesis of grain sorghum plant populations, using leaf photosynthesis obtained at the field condition. LAI is 6.0 for both short and tall types.

長稈型の群落光合成速度の違いは純粹に両者の群落構造の違いによるものではない。この点を考慮して、両個体群とともに LAI を 6 とした場合の群落光合成をシミュレートした。シミュレートにあたっては、Fig. 3 の葉面積および乾物重の垂直分布を LAI=6 としてそれぞれ換算した。光の消散係数および風の減衰係数などは変えなかった。

結果は Fig. 23 に示すように、群落光合成速度は長稈型のほうが短稈型よりも最大で約 8% の増大を示した。

以上の議論は群落光合成について行ったものであるが、乾物重の実測値との対応を見るために、つぎに乾物重の面から検討する。個葉光合成を測定した時期に対応する 8 月 6 日から 8 月 23 日までの日射、風速、 CO_2 等の時間単位のデータが必要であるが、これらの長期測定データがないために以下のように単純化して検討する。Fig. 20, 22 において純光合成速度の日射に対する直線近似を行い、この回帰係数とその期間中の日平均日射量から日中の純光合成速度を求め、さらに (10) 式より夜間呼吸量を求める。

Table 1 に上記の計算を行うために必要なデータをまとめた。8 月 6 日から 8 月 23 日までの日平均日射量 S は平均日照時数 T_h をもちいて、(13) 式(岸田, 1978) によつて求めた。

$$S = (33.20 T_h + 200.65) \times 10^4 \dots\dots\dots (13)$$

Table 1. Estimated canopy photosynthesis and crop growth rate of grain sorghum plant population.

Strain	LAI	Dry matter w.	Incident radiation ¹⁾	Single leaf photosyn.	P _{ri} ⁴⁾	P _{ncd} ⁵⁾	E _{CGR} ⁶⁾
		$\frac{\text{g (D. W)}}{\text{m}^2}$	$\frac{\text{cal (S. W)}}{\text{m}^2 \text{ day}}$		$\frac{\text{gCO}_2}{\text{cal (S. W)}}$	$\frac{\text{gCO}_2}{\text{m}^2 \text{ day}}$	$\frac{\text{g (D. W)}}{\text{m}^2 \text{ day}}$
Short type	5.21	450	434.7×10^4	L ²⁾	$5.39 \times (60 \times 10^4)^{-1}$	39.05	18.5
				F ³⁾	11.88 //	86.07	43.6
Tall type	6.27	522	434.7×10^4	L	5.71 //	41.36	19.2
				F	13.44 //	97.37	49.1

Note, 1) Calculated from Eq. 14

2) Fig. 4, (—1 leaf) in Hirota and Takeda (1988)

3) Fig. 13 (B)

4) Net photosynthesis of a canopy (gCO₂m²h)/incident radiation (ly(S. W)/min), in Fig. 20. and Fig. 22

5) Net photosynthesis of a canopy in daytime.

6) Estimated value of CGR (Eq. 15).

ただし, S, 日平均日射量 cal/m² day; T_n, 日照時数 hour

また, 日射量 S と純光合成速度 P_{nc} の間の回帰係数 P_{ri} を Fig. 20 と 22 より求め (Table 1), S と P_{ri} より 1 日当りの日中の純光合成速度 P_{ncd} を (14) 式を用いて計算した.

$$P_{ncd} = P_{ri}S \dots\dots\dots(14)$$

ただし, P_{ncd}, 日中の純光合成速度, gCO₂/m²daytime; P_{ri}, S に対する P_{nc} の回帰係数, gCO₂/cal(SW)

1 日当りの乾物増加量の推定は McCree (1974) がグレインソルガムを用いて得た夜間の呼吸量を求める (10) 式を使い, 乾物換算率を 0.62 (=C₆H₁₂O₅/6CO₂) とすると, (15) 式によつて行うことができる.

$$E_{CGR} = (0.86P_{ncd} - 0.0054 W_c)0.62 \dots\dots\dots(15)$$

ただし, E_{CGR}, 乾物増加量の推定値, g(DW)/m² day

(15) 式を使つて得られた結果を Table 1 で検討する. 実験室で測定した個葉光合成をシミュレーションにもちいたばあいの日平均乾物増加量 E_{CGR} は短稈型で 18.5 gDW/m² day, 長稈型で 19.2 g であり, これらは実測値のそれぞれ 30 g と 43 g におよばない. 一方, 圃場での個葉光合成の測定データを用いて得られた, 日平均乾物増加量は短稈型で 43.6 g, 長稈型で 49.1 g であった. このばあいは, 短稈型での過大評価がめだつ. 以上の日平均乾物増加量の計算には長期間にわたる風速, CO₂ 濃度などの変移を考慮に入れていないので, 問題がないとは言えない. しかしながら, 実験室で得た個葉光合成を使つて得られた最大乾物生産速度 (E_{CGR}) は星野ら (1978) の CGR の実測値と比較し

ても小さすぎると考えられる. なお, 個葉光合成をもちいて群落の乾物生産を推定するばあいに, かなり高い個葉光合成をもちいる必要があることを Iwaki (1975) および堀江 (1981) は指摘している.

本報では C₄ 植物であるグレインソルガムの個葉光合成をもちいて群落光合成を推定した. 個葉光合成は圃場で測定したが, かなり高い値を得た. この理由として, すでに述べたように葉の表・裏面が照射されること, 一部の葉のみが照射されるのではなく全体が照射されるなどがあげられる. さらに, 今回の測定では葉温が非常に高かつた (Fig. 8). C₄ 植物の光合成と温度の関係については Björkman and Berry (1973) の報告にみられるように高温で光合成速度は高まる. また, 今井・村田 (1974) はトウモロコシの乾物生産速度と CO₂ 濃度の関係について, 夏期の高温時には高 CO₂ 濃度における乾物生産速度が高まつたことを報告している. このことは本研究の主題である CO₂ 拡散と群落構造と言う観点からみれば興味あることである.

本研究では圃場で測定した高い個葉光合成をもちいて, 群落光合成をシミュレートした際に得られた CO₂ プロファイルは実測値とよく対応した (Fig. 17, 21). しかしながら, Fig. 22 に示すように短稈型と長稈型の群落光合成の差は Fig. 2 で示した 8 月上旬の CGR にみられる両者の差 (長稈型は短稈型より CGR は 40% 大きい) ほど大きくなつていない. ちなみに, 星野ら (1978) によると本研究でもちいたものと同じ品種では同様に長稈型は短稈型よりも CGR は 30% 高い. 本研究のシミュレーション結果では Fig. 22 および Table 1 に示すように両者の差は 13% に過ぎない. 両

個体群の CGR の差とシミュレーションによって推定された群落光合成の差は何によってもたらされたものであろうか。この理由の一つに、長稈型個体群では葉がはためきやすく、境界層抵抗を小さくすることが考えられる。しかしながら、Oikawa (1978) の報告によっても明らかなように、葉のはためきによつて上記の差を説明するには不十分である。また、光の消散係数が関与しているのではないかという疑問に対しても前報 (広田・武田, 1988) で述べたように、 C_4 型の光合成曲線をもつた群落では LAI が 6 では消散係数の違いは個体群光合成にはほとんど影響を与えない。

以上のことから、短稈型と長稈型の乾物生産速度の差を説明するには上記の要因に加えて他の要因を考えなくてはならない。本報告では個葉光合成速度は短稈型と長稈型の間に差はみられなかつたのであるが、実験室で光および温度条件を制御して測定した結果では長稈型の光合成速度は高かつた (武田・広田, 1983)。圃場においても、もし長稈型の光合成速度が短稈型よりも高ければ両系統の乾物生産速度の差はある程度説明がつく。この点を確かめるには圃場において、光条件・温度条件および葉位などをそろえて両系統の光合成速度を比較する必要があるであろう。

本研究では LAI を 6 とした場合に、長稈型は短稈型よりも約 8% の群落光合成の増加をみたわけである。この値は長稈型の乾物重が大きく、その分の維持呼吸によるロスが差し引かれていることを考慮するならば、この場合の CO_2 の拡散にともなう群落光合成への影響は無視できないといえる。

摘 要

群落の草高が CO_2 拡散および群落光合成に及ぼす影響について、グレインソルガムの草高の異なる同質遺伝子系統を用いて調べた。短稈型と長稈型個体群を各 25 a ずつ育成し、微気象 (日射, 風速, 気温, CO_2 等) および群落構造等の測定データを用いて CO_2 プロファイルおよび群落光合成をシミュレートした。結果は以下のとおりである。

1) グレインソルガムの長稈型個体群は CO_2 拡散に関与する植被面風速, 風の抵抗係数, 減衰係数, 混合距離および葉の幅など, すべての要素で短稈型個体群よりも優れていた。

2) グレインソルガムの個葉光合成速度は圃場で測定すると高い値 ($100 \text{ mgCO}_2/\text{dm}^2$ 以上) が得られた。グレインソルガムの長稈型の最大 CGR ($43 \text{ g/m}^2\text{day}$) をシミュレートするには、個葉光合成速度はこのよう

な高い値が必要であることがわかつた。

3) 短稈型で LAI が 5.21, 長稈型で 6.27 の個体群の光合成は、シミュレーションの結果、長稈型は短稈型よりも 13% の増加を示した。しかしながら、この値は両個体群の CGR の差 (30~40%) にほど遠い値であつた。この理由は明確ではないが、長稈型における個葉光合成速度が短稈型のそれよりも大きいことが原因となつているかもしれない。

4) 短稈型と長稈型個体群の LAI を 6 に揃えて群落光合成をシミュレートした結果、長稈型は短稈型よりも 8% 増であつた。

文 献

- Björkman, O., and J. Berry 1973 High-efficiency photosynthesis. *Sci. American* 229: 80-93
- Catsky, J., and I. Ticha 1982 Photosynthetic characteristics during ontogenesis of leaves. 6. Intracellular conductance and its components. *Photosynthetica* 16: 253-284
- Gaastera, P. 1959 Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. *Mededel Landbouwhogeschool. Wageningen*. 59: 1-68
- Hatch, M. D. and C. B. Osmond 1976 Compartmentation and transport in C_4 photosynthesis. *Encyclopedia of plant physiology In: New Ser., 3 Transnsport in plants III* (ed., by Stocking, C. R. and U. Heben) pp. 144-148
- 広田 修・武田友四郎 1987 作物の群落構造と物質生産—受光および CO_2 拡散Ⅲ. 数種作物の群落構造と CO_2 拡散の構成要因. 九大農芸誌 41: 171-184
- 広田 修・武田友四郎 1988 作物の群落構造と物質生産—受光および CO_2 拡散Ⅳ. 葉の傾き, サイズおよび葉面積密度の垂直分布が群落光合成に及ぼす影響. 九大農芸誌 42: 125-136
- 堀江 武 1981 気象と作物の光合成, 蒸散そして成長に関するシステム生態学的研究. 農技研報告 A28: 1-181
- 星野次汪・氏原和人・四方俊一 1978 グレインソルガムの稈長の差異が乾物生産および収量に及ぼす影響. 日作紀 47: 541-546
- 飯田克美・館野宏司 1981 牧草類の物質生産に及ぼす光利用機能と環境要因. 農水省 GEP 計画. pp. 182-183
- 今井 勝・村田吉男 1974 作物の成長および生理作用間のバランスにおよぼす CO_2 濃度の影響 (2) 乾物生産における種間差および品種間差. 日作紀 43(別 1): 53-54
- Iwaki, H. 1975 Computer simulation of vegetative growth of rice plant. *In: JIBP synthesis. Vol. II* (ed., by Murata, Y.), pp. 105-121

- 岸田恭允 1978 昭和 53 年九州ブロック会議成績書, pp. 4
- Lemon, E. R. 1960 Photosynthesis under field conditions. II An aerodynamic method for determining the turbulent carbon dioxide exchange between the atmosphere and a corn field. *Agron. Jour.*, 52: 697-703
- Louwerse, W. and W. v. d. Zweerde 1977 Photosynthesis, transpiration and leaf morphology of *Phaseolus vulgaris* and *Zea mays* grown at different irradiances in artificial and sunlight. *Photosynthetica* 11: 11-21
- McCree, K. J. 1974 Equation for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as function of dry weight, photosynthetic rate, and temperature. *Crop Sci.*, 14: 409-414
- Monteith, J. L. 1973 *Principles of environmental physics*. Edward Arnold, London
- Monteith, J. L., G. Szeiz and K. Yabuki 1964 Crop photosynthesis and the flux of carbon dioxide below the canopy. *J. Appl. Ecology*, 1: 321-337
- Oikawa, T. 1978 Canopy photosynthesis of the plant population simulated on the basis of light and CO₂ conditions. In: JIBP Synthesis (ed., Monsi, M., and T. Saeki) 19: 167-183
- 武田友四郎・広田 修 1983 作物個体群による太陽光利用の特性比較. 農水省 GEP 計画 II-4-(2)-2, pp. 1-27
- 武田友四郎・岡 三徳・内村研一・梶 和一 1984 暖地における水稻品種の物質生産に関する研究 第 3 報 本邦暖地品種と韓国新品種の乾物生産特性の比較. 日作紀 53: 22-27
- 坪木良雄・藤井秀昭 1978 作物の葉温について—C₃植物および C₄植物の葉温—. 日作紀 47(別 2): 53-54

Summary

The field experiment was carried out to study the effect of canopy height on CO₂ diffusion and canopy photosynthesis using the isogenic line of grain sorghum with different canopy height. Using the data obtained from the field experiment, CO₂ profile and canopy photosynthesis of grain sorghum were simulated. The results of the study are summarized as following;

Canopy architecture of tall type grain sorghum was superior to the short type in all the factors concerning the CO₂ diffusion (wind speed at canopy surface, drag coefficient, attenuation coefficient of wind speed, mixing length and leaf width).

High leaf photosynthetic rates (more than 100 mg CO₂/dm²h) were observed under a field condition. The CO₂ profiles simulated by using these values of leaf photosynthesis coincided with CO₂ profiles measured in the canopy.

Crop photosynthesis of tall type grain sorghum which has a LAI of 6.27 was 12% higher than that of short type which has a LAI of 5.21.

Under the condition of a LAI of 6.0, the crop photosynthesis of tall type was 8% higher than short type canopy.