

SPACにおける水流規定因子としての 土壌水分・温度因子について

How Water and Temperature Conditions of Soil Affect the Water Flux in SPAC (Soil Plant and Atmosphere Continuum)

○原 道宏, 大山善人
○Michihiro Hara, Yoshito Ohyama

岩手大学
Iwate University

キーワード: SPAC (SPAC), 蒸散速度 (Transpiration Rate), 光合成速度 (Photosynthetic Rate),

蒸散水流 (Transpiration Water Flux), 土壌水分 (Soil Water), 土壌温度 (Soil Temperature).

連絡先: 〒020-8850 盛岡市上田3-18-8 岩手大学 農学部 農林環境科学科 リサイクル生物生産工学講座
農業環境制御工学研究室 原 道宏, Tel.: (019)621-6125, Fax.: (019)621-6125, E-mail: mrhara@iwate-
u.ac.jp

1. はじめに

植物の生育に際し、水は土壌から植物体を経て大気に至る経路により移動する。これは、SPAC (Soil=土壌、Plant=植物、Atmosphere=大気、Continuum=連続体)、すなわち、土壌植物大気連続体の概念である。植物体の生育は光合成作用を基本とするものである。光合成は、大気中の二酸化炭素ガスと植物体中の水、それに太陽からの光 (特にそのうち、波長が 400~700nm の範囲の、いわゆる、光合成有効放射) を資源に、葉緑体が炭水化物を合成し酸素を放出するものである。

この際に水がいかほど必要であるかは、大気中の湿度や二酸化炭素濃度によっても異なるので定まった値ではないが、平均的な値として、

モル蒸散比 (蒸散された水のモル数/固定された二酸化炭素ガスのモル数。これを単に蒸散比といふことが多い。) は、CAM 植物 (サボテンなどの多肉植物) で 50、 C_4 植物 (トウモロコシ、サトウキビなど) で 250、 C_3 植物 (ムギ、イネ、バレイショ、タバコなど大多数の植物) で 500 である。水 ($H_2O=18$) と二酸化炭素 ($CO_2=44$) の分子量を考慮すると、重量蒸散比 (蒸散された水のグラム数/固定された二酸化炭素ガスのグラム数) の値はモル蒸散比の値の 18/44 倍、すなわち約 0.4 倍になり、CAM、 C_3 、 C_4 植物で、それぞれ、20、100、200 になる。さらに、1モルの二酸化炭素 (CO_2) から 1/6 モルの炭水化物 ($C_6H_{12}O_6=30*6$) が合成されることを考慮すると、炭水化物蒸散比 (蒸散された水のグラム数/固

定された炭水化物のグラム数)の値はモル蒸散比の値の18/30倍、すなわち0.6倍になり、CAM、C₃、C₄植物で、それぞれ、30、150、300になる。

このように、1 kgの炭水化物を得るために、作物の生育過程において30~300kgの水を蒸散により消費する。蒸散比の値がこれほど大きな値になる理由は、植物は気孔を介して二酸化炭素ガスを取り入れること、その際に同じ気孔を通して水蒸気拡散により水を失うこと、そして、大気湿度(20℃の飽和水蒸気で約23,000 μmol/mol)と現在の地球大気中の二酸化炭素ガス濃度(約350 μmol/mol)との間に桁違いな差があること、等が原因している。

本研究では、土壌水分量の多寡、言い換えれば土壌水分張力の強弱、および土壌温度が植物の蒸散量、光合成量、生育にどのように影響するかを実験を通じて検討することを目的とした。このことを通じて、土壌への灌漑を抑制すればどのように植物の生育速度に影響するか等が分かるから、収量を低下させないで節水する方法を考案する指針が得られると考えたからである。

2. 材料と方法

土壌水分条件の異なる材料を得、蒸散と二酸化炭素ガス交換速度測定装置(SPACの装置)により測定した。準備段階は東北農業試験場で行ない、本測定を岩手大学で行なった。

2.1 準備段階1 供試植物には、加工用トマト「なつのこま」を、また、土壌は園芸用育苗床土「ソイルフレンド」を用いた。播種は1999年8月17日セルポットに「JAくみあい園芸用育苗培土クレハ園芸培土」(呉羽化学製)を用いて行なった。鉢あげは、9月11日にビニールポットの粉殻培地にした。

本測定には、内径250mm 外径266mm 高さ500mmの塩ビパイプの一方に小穴が開いた板を接着したものを用いた。土壌水分調節用の素焼き管をポットの底に設置し、ソイルフレンドを高

さ450mmまで入れた。これを大型バケツに入れ腰水により、全土壌を水分飽和させ、ポットをバケツから取り出し網の上に乗せた。ポットにはアルミ箔を被せ、蒸発しないようにし、72時間おいて、ポット容水量とし、すべてのポットの初期水分状態が同じとなるようにした。

2.2 準備段階2 10月30日、ポット容水量となっているポット5個にトマトを定植した。

(1) 水管理 定植後の水管理は、毎日正午に重量測定し、土壌水分管理した。SPAC装置での測定の数日前までは全ポットを同一の土壌水分管理をし、トマト葉に萎れを観測した日の午後8時頃(トマトの活動が落ち着く日没2時間後)に灌水した。灌水量は少なすぎるとポットの下まで十分行き渡らず、多すぎると土壌が過湿となりトマトの生育に悪影響を及ぼし、また管理のやりやすさも考えた結果、体積含水率0.33まで土壌水分を戻すことにした。トマト葉に萎れを観測した時の土壌の体積含水率は約0.26であった。結果的に、約7日間隔で灌水した。測定前の土壌水分の調節は最終灌水日で行った。ポット1と2では測定日3日前にその3日間で減少する水重分を考慮して灌水した。この水管理の様子を図1に示した。

(2) 温度管理 ガラス室内の温度は約15℃で管理した。

(3) ポットの位置 ポットは葉が干渉しない程度に離し、風当て日以外はポットの位置は変えずに定植から測定まで同じ位置、同じ向きに置いた。

(4) 風当て SPACの装置の植物ケース内はクロスファンによって常に空気が攪拌されている。よって予めガラス室内の生育段階で風に当てておく必要がある。風当ての方法は扇風機を用いた。ポットの中心から扇風機の羽の中心部分の距離を150cmあけ、風の中心が植物体の中心にあたるようにした。首振り機能により首が振り切ったところで風が当たるようにした。

この状態で正午から翌正午までの 24 時間風に当てた。風速は植物ケース内の風速とほぼ一致するよう、風速を「弱」とし、植物体付近で 1.0 ~ 1.5 m/s であった。

表 1 測定開始日における土壌水分量

	測定開始日	体積含水率
ポット 1	12 月 11 日	0.364
ポット 2	12 月 14 日	0.284
ポット 3	12 月 17 日	0.243
ポット 4	12 月 20 日	0.230

2. 3 準備段階 3

(1) 運搬 各ポットを測定開始日前日の午後 11 時頃に東北農業試験場のガラス室から自動車運搬した。車内温度は測定条件と同じ 15°C 前後に、振動を極力与えないように、また屋外の冷たい空気にできるだけあてないように注意した。

(2) センサーの取り付け ポットは SPAC の装置がある部屋まで運び重量を測定した後、TDR と熱電対を取り付けた。TDR は土壌表面から 5、15、25、35cm の深さに 2 本のセンサーを平行かつ水平に、また熱電対は同じ深さに感温部がポットの中心およびポット側面に 1 設置した。

2. 4 SPAC 装置へのトマトポットの据付

トマトポット 1 個ずつ測定するため、次の手順で SPAC の装置に設置した。

(1) 土壌温度を調節するための電気温風器「トレボカ」を置き、その上にポットの高さを上げるための台を覆いかぶせた。

(2) ポットを載せ、ポットの上部と土壌層との間を断熱材で 10cm 程度塞いだ。また、土壌表面を断熱材で覆った。

(3) 植物ケースの 1 段目を乗せ植物ケースと土壌層の間に、空気の流れをなくし断熱するための発泡スチロール板を茎の部分は穴をあけて取り付けた。

(4) トマトの葉が、クロスファンの吹き出し口の上に覆い被さらないように荒めの網をクロスファンの周りを取り付けた。

(5) 入口の空気を 4 カ所に分岐させるチューブを取り付けた。

(6) 光量子束密度センサーをトマトの最も高い葉と同じ高さとなるように支柱に取り付けた。

(7) 植物ケースを据え付けた。

2. 5 地上部環境要因の設定値

(1) 光量子束密度 照射開始 6:00 照射終了 18:00 照射時間 12 時間で光強度の変化は sin カーブとなるようにした。

(2) 気温 植物ケース内と出口の気温を同じと考え、出口の気温が日中 20°C 夜間 15°C となるようにした。昼と夜の境はできるだけ短い時間で温度を変えるようにした。調節方法は SPAC の装置のある部屋の温度ごと変化させ、バッファータンクとその前後のホースの中の空気を変化させることで、結果的に植物ケースに入る空気の温度を変化させた。

(3) 湿度 植物ケース内と出口の湿度を同じと考え、出口の湿度が終日 80% となるようにした。湿度の調節方法は通気流量にて調節した。但し、通気流量を 5 L/min 以下にした場合、本来空気が抜ける出口温度と出口湿度のセンサーのある場所以外から空気が抜け、これらのセンサーに当たる空気がまったく流動しない恐れがあるので出口湿度を上げるため通気流量が 5 L/min 以下になってしまう場合は、通気流量を 5 L/m 以下にせず出口湿度が下がるのはやむをえないものとした。基本的に植物ケース内に導入する空気は加湿しないが、ポット 4 のみ無加湿の場合では通気流量が約 5 L/m でも出口湿度が低すぎるため、バッファータンク内に水の入った容器を入れて加湿した。

(4) CO₂ 濃度 本実験では CO₂ 濃度を制御できないので、成り行きとした。

(5) 通気流量 湿度の調節により増減させた。但し、5 L/min 以下にしないようにした。

(6) 地温 測定1日目と2日目は15°C、3日目は25°Cとした。地温25°C前後がトマトの最適生育地温といわれるが、ガラス室で育成してきた地温が15°C前後のためにまず15°C、次いで25°Cとした。調節方法は、電気温風器「トレボカ」を使い土壌層の温度を上げて地温を上昇させた。調節はポット1と2は手動、ポット3と4は自動で行った。

(7) 土壌水分量 各ポットはそれぞれ測定期間が3日間あるが、その期間中は灌水はせず、また土壌の底に埋めた素焼き管を使つての吸水も行わなかった。当然、土壌水分は減少していくが、灌水を行なうと大きな水分むらができるので、そのままにした。

2. 6 各ポットの環境差

本実験では4ポット(トマト4個体)を用いた。残りの1ポットは試運転に用いた。本実験ではそれぞれ3日間の測定期間がある。測定順にポット1, 2, 3, 4とした。3日間の測定期間の1日目はSPACの装置への慣らしの日とし、2日目からのデータを使うことにした。2日目は地温15°C、3日目は地温25°Cに設定した。ポット間の環境差は、土壌水分 θ の違いだけであり、 $\theta(1) > \theta(2) > \theta(3) > \theta(4)$ の順で土壌水分が多い。それぞれのトマトはできる限り同じ条件で育成し、本実験の特徴である、同一程度の植物が異なった環境に置かれることを達成した。

2. 7 測定データの取得について

(1) 一般事項 SPACの装置では大気圧・植物ケースの入口と出口それぞれの空気の温度・同相対湿度・同CO₂濃度・植物ケース内の光量子束密度と通気流量を測定した。またTDR4カ所、熱電対5カ所をデータロガー(CR10)で測定した。SPACの装置ではCO₂を除くデータは10秒おきに測定され、平均されずに測定間隔ごとにデータが格納される。本実験では3分おき

にデータをとることにした。CO₂はCO₂分析機が1つで流路を入口と出口を指定のインターバルで切り替えて測定する。このとき測定されている方のCO₂は他のデータと同様10秒おきに測定されているが、測定されていない方のCO₂は測定された最も新しいデータが持ち越される(ラッチ)。また、測定されるCO₂が切り替わった後の数十秒は前のCO₂の影響を受けるためにインターバルと切り替えのポイントをよく考えなければならない。本実験ではインターバル90秒で入口から出口に切り替わるポイントを3分おきのデータが取られる5秒後となるようにした。そうすると、出口CO₂は測定ポイントのときのデータが採れて、入口CO₂は測定ポイントと測定ポイントの中間のデータが採れる。CR10は測定を1分間隔、データ格納を10分間隔で10個のデータを平均したものを採ることにした。

(2) 測定中 測定中は常に出口湿度と出口温度を重点的に監視し最適となるように、通気流量や室内温度を管理した。

(3) 測定後 ポットをSPACの装置から装置への据え付けで述べた順番と逆の順番で取り出し、センサーを取り外し、重量を測った後地上部を地表間際から切り取って大まかに切断して、一時的に冷蔵庫に保管した。次に土壌を5cmごとに分解し重量測定し含水率を求めるため秤量缶に採土する。その後、保管しておいた地上部の重量測定してから葉と茎に分け、重量測定してから葉は再び冷蔵庫に保管しておき、すべてのポットが測定終了してから葉面積計を使って葉面積を測定した。茎は70°Cで24時間焔にかけ、乾物重を求めた。

3. 結果と考察

3. 1 環境条件の管理結果

SPACの装置における蒸散速度および二酸化炭素ガス交換速度測定時における環境条件の管理結果を図2~6に示した。手動で制御した

結果、オーバーシュートとアンダーシュートの見られる日もあるが、温度 (15/25°C)、湿度 (80%) は目標値に近い値に制御されている。

3. 2 蒸散速度および二酸化炭素ガス交換速度

蒸散速度は図 7 に、二酸化炭素ガス交換速度は図 10 にそれぞれ示した。それらを日平均値と示したのが、それぞれ、図 8 と図 11 である。いずれも土壤水分張力の増加とともに減少している。二酸化炭素ガス交換速度については、地温の増加につれて増加しているが、蒸散速度は温度にあまり影響されていない。

蒸散比 (蒸散速度/二酸化炭素ガス交換速度の比) は、図 12 に示した。また、また、午前午後について平均したものを図 13 に示した。土壤水分張力の増加につれて蒸散比はやや低下している。土壤温度および時間帯に対する蒸散比の相違は顕著でない。

3. 3 蒸散抵抗

蒸散速度は (葉における水蒸気濃度 - 大気中の水蒸気濃度) / 抵抗 と定義される。葉における水蒸気濃度は葉温における飽和濃度と仮定して大差ない。サーモビジョン (赤外線温度計) による葉温の測定結果を図 9 に、また、計算された水蒸気拡散抵抗を時間ごとに図 14 に示した。拡散抵抗は、日照開始とともに減少し、一定値をへて、増加に向かう。ただし、夜間には回復し、明朝は前日の同時刻値と同じかやや高い値になる。

水蒸気拡散抵抗の日最低値と最高値を土壤水分張力に対してプロットしたのが図 15 である。日最低値は 350 cm 水柱付近で急増している。日最高値は最低値より数倍大きい、「土壤水分張力が 500 cm 水柱以上になると、最低値が高くなり、最高値との比率は小さくなる。

4. 結論

トマトについて蒸散速度と二酸化炭素ガス交換速度を、主として土壤水分条件を変化させ

て測定した。その結果、次の結論を得た。

土壤水分張力の影響

- ① トマト植物の葉から大気への水蒸気拡散抵抗は土壤水分張力がある程度大きくなると、土壤水分張力の増加につれて増大する。
- ② 土壤水分張力が 250cmH₂O 程度以下の範囲では、水蒸気拡散抵抗はほぼ一定である。
- ③ 土壤水分張力が 350cmH₂O 程度以上になると、水蒸気拡散抵抗の増大が顕著になる。
- ④ いずれの土壤水分張力においても、光照射開始とともに、水蒸気拡散抵抗は、はじめ急激に低下し、のち徐々に増大する。

はじめの低下は光照射に反応して気孔が開き始めたことによるもの、ひきつづく増大は根の直近の土壤水分量が減少したことによる土壤水分量吸収速度の減少、それに伴う、葉の水ポテンシャルの低下によるもの、と考えられる。

- ⑤ 暗期 (12h) の間に根の直近の土壤水分低下はほぼ回復したものとみられる。

土壤温度の影響

- ⑥ 15°C と 25°C の土壤温度について試験した結果から、15°C に比べ 25°C の方が水蒸気拡散抵抗が、特に、土壤水分張力の大きい範囲で、低かった。
- ⑦ 蒸散速度で比べると 15°C と 25°C の差は無かった。
- ⑧ CO₂ 交換速度で比べると 15°C に比べて 25°C の方がやや大きかった。これは根の吸収速度が高温の方が速いことに起因するものと推定された。

5. 参考文献

- 1) 古在豊樹ら著：施設園芸作物の生育と環境「新施設園芸学」, 11/39, 朝倉書店 (1992)
- 2) 日本農業気象学会関東支部：湿度の測定, 日本農業気象学会関東支部編「農業気象の測器と測定法」, 51/81, 農業技術協会 (1988)

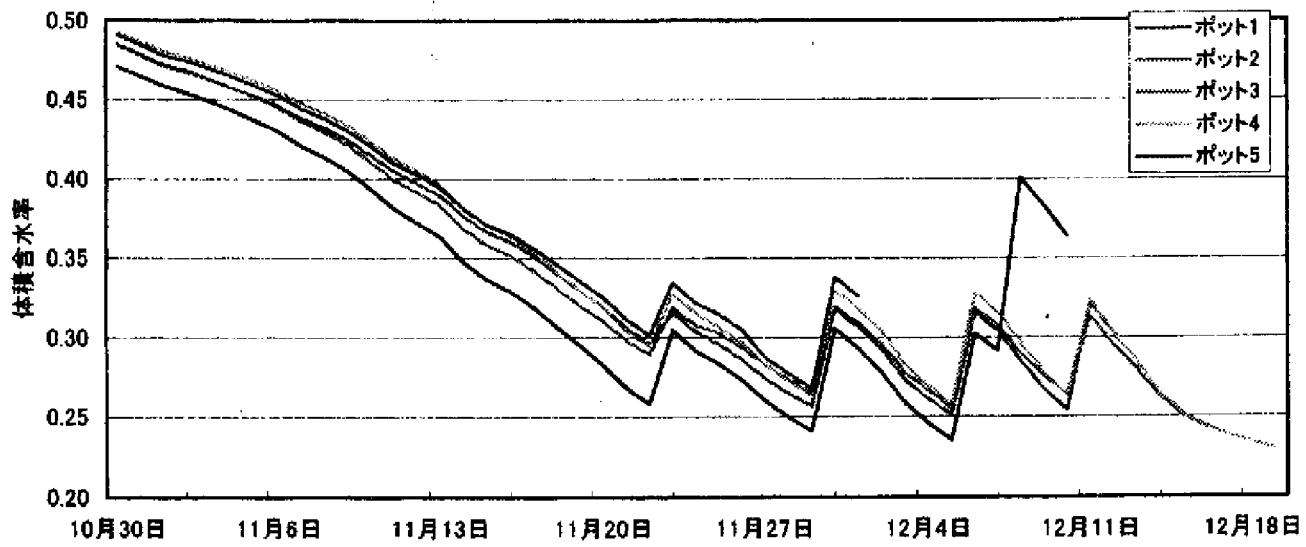


図1 生育中の体積含水率の日推移

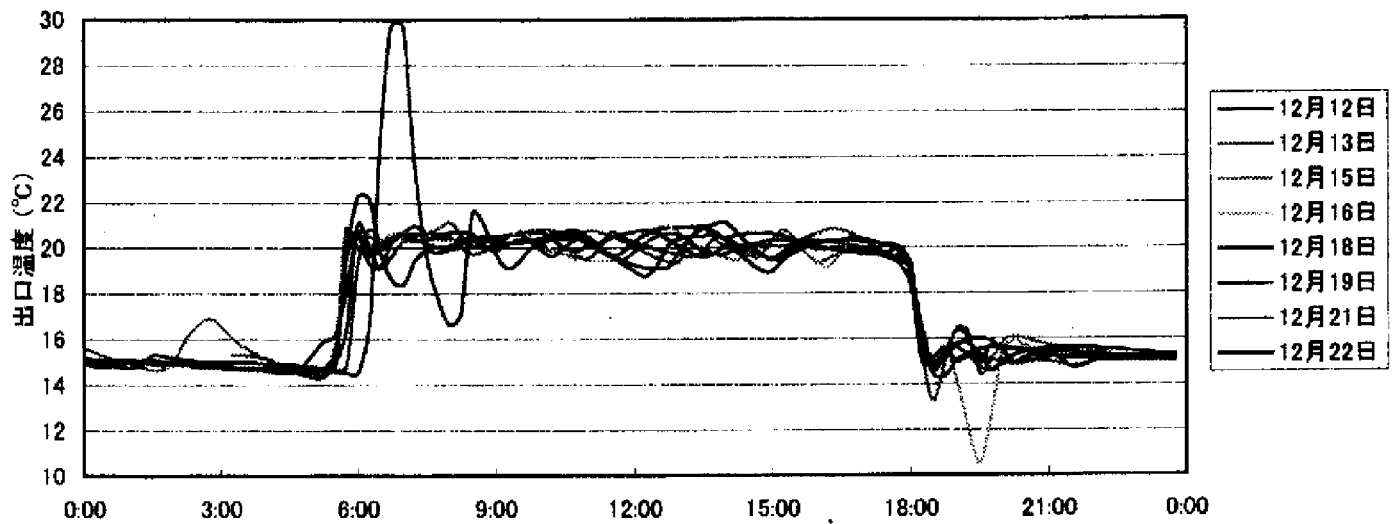


図2 出口温度の時間推移

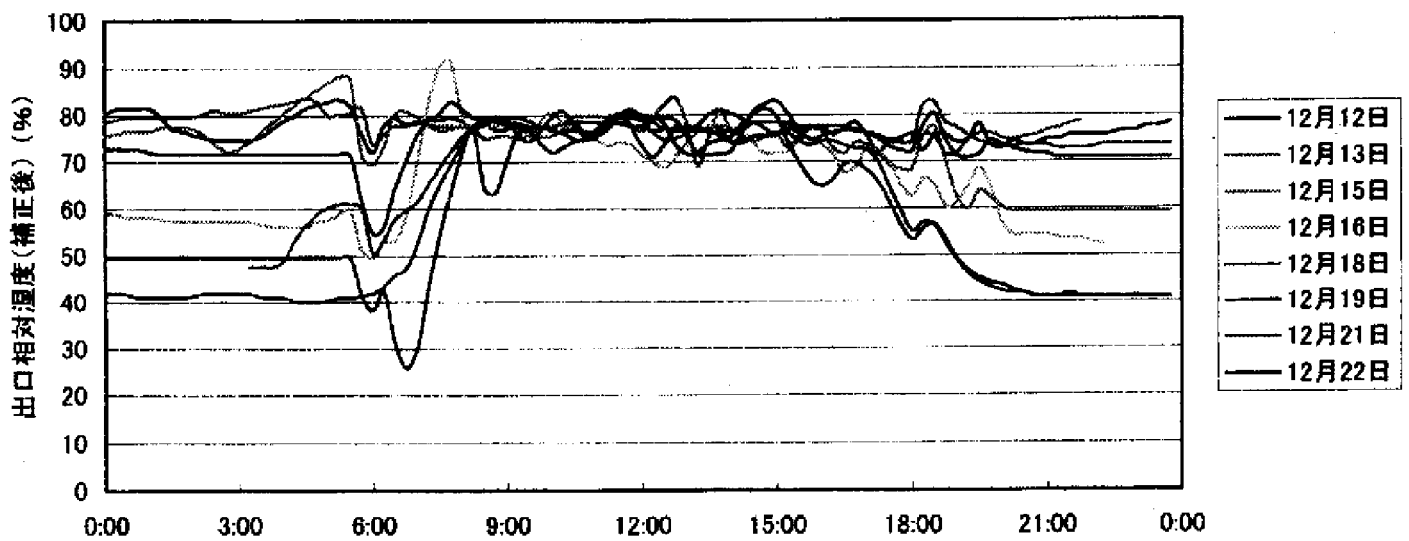


図3 出口相対湿度(補正後)の時間推移

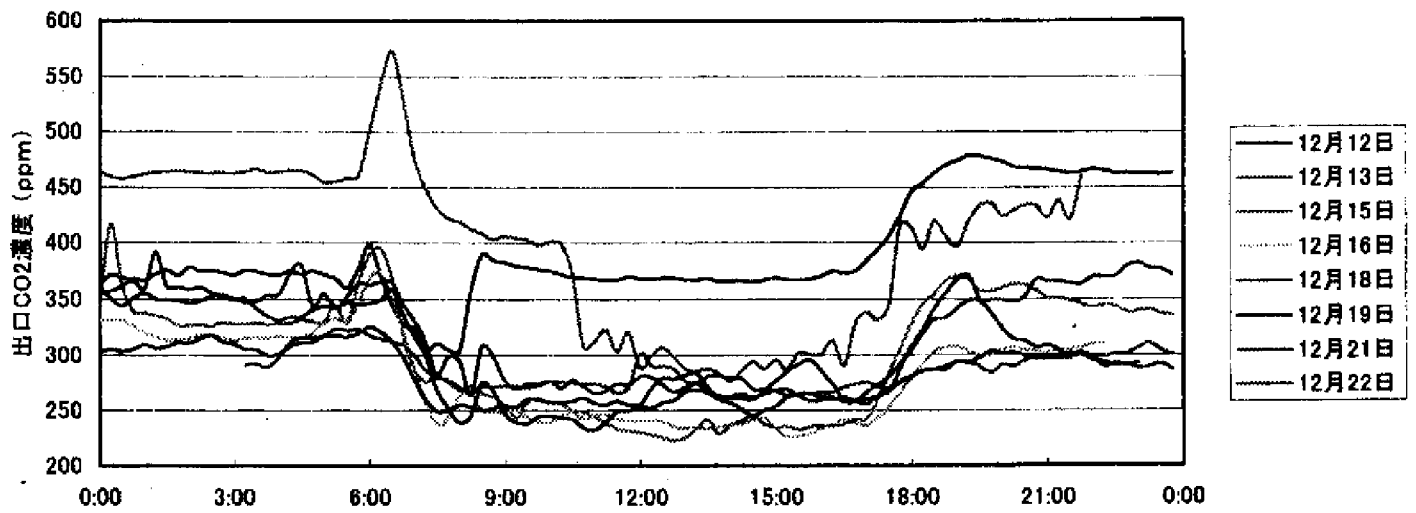


図4 出口CO₂濃度の時間推移

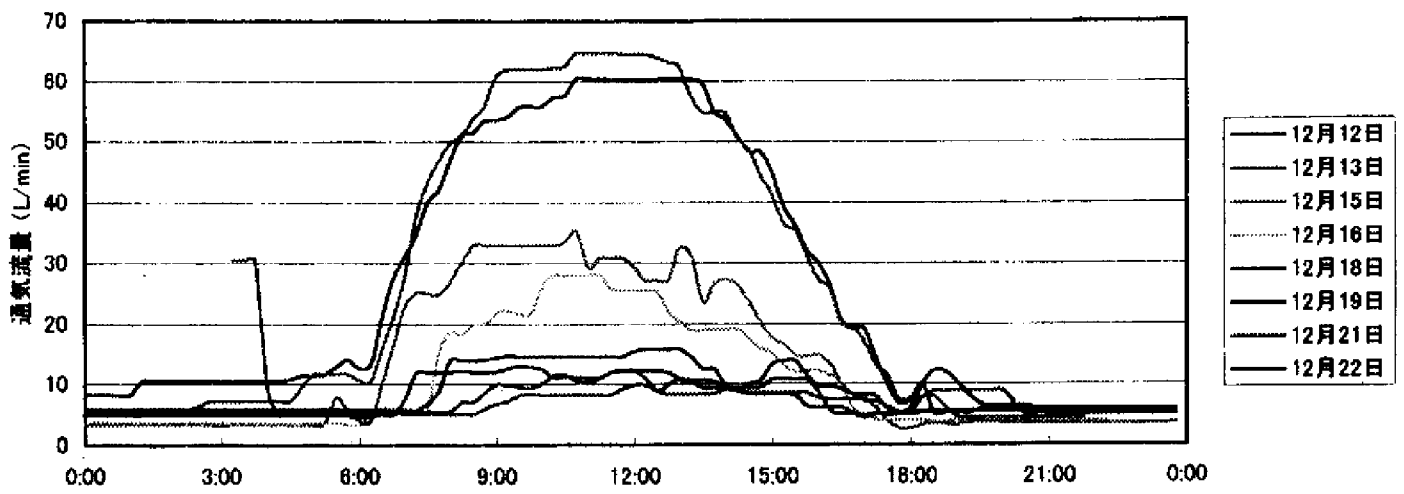


図5 通気流量の時間推移

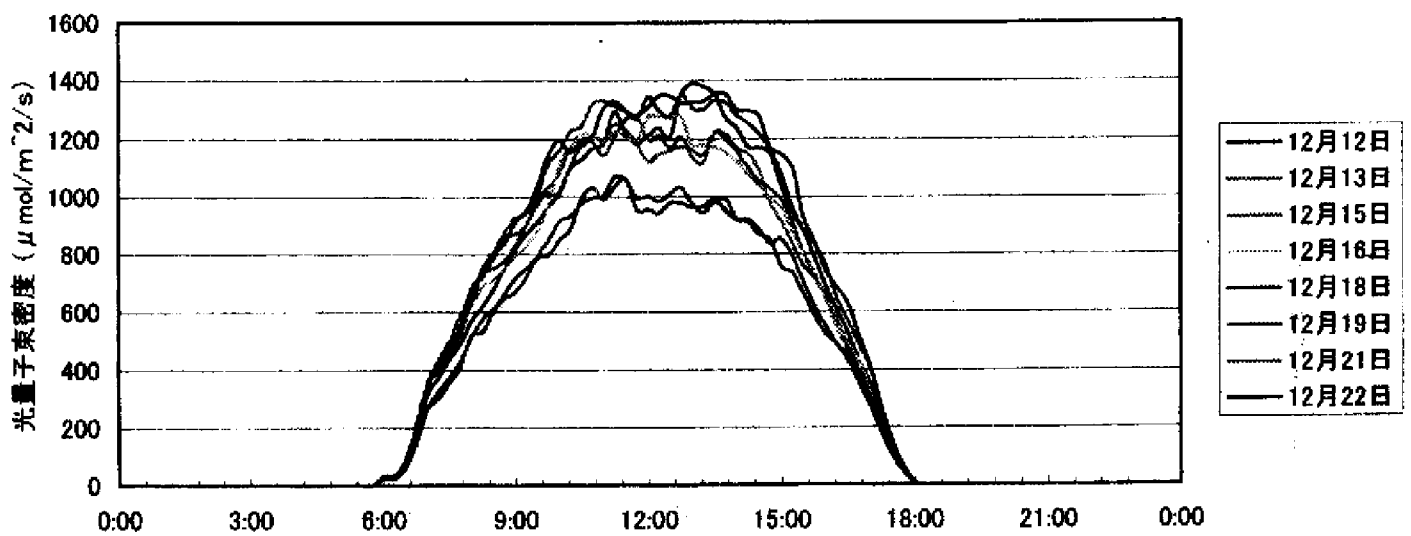


図6 光量子束密度の時間推移

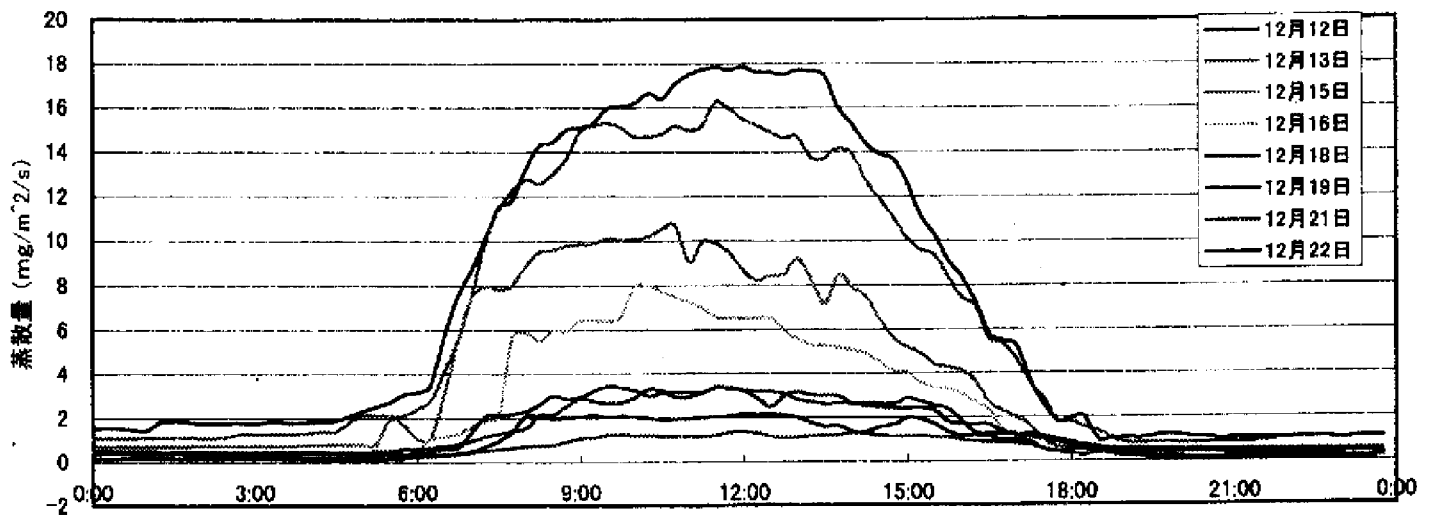


図7 蒸散量の時間推移

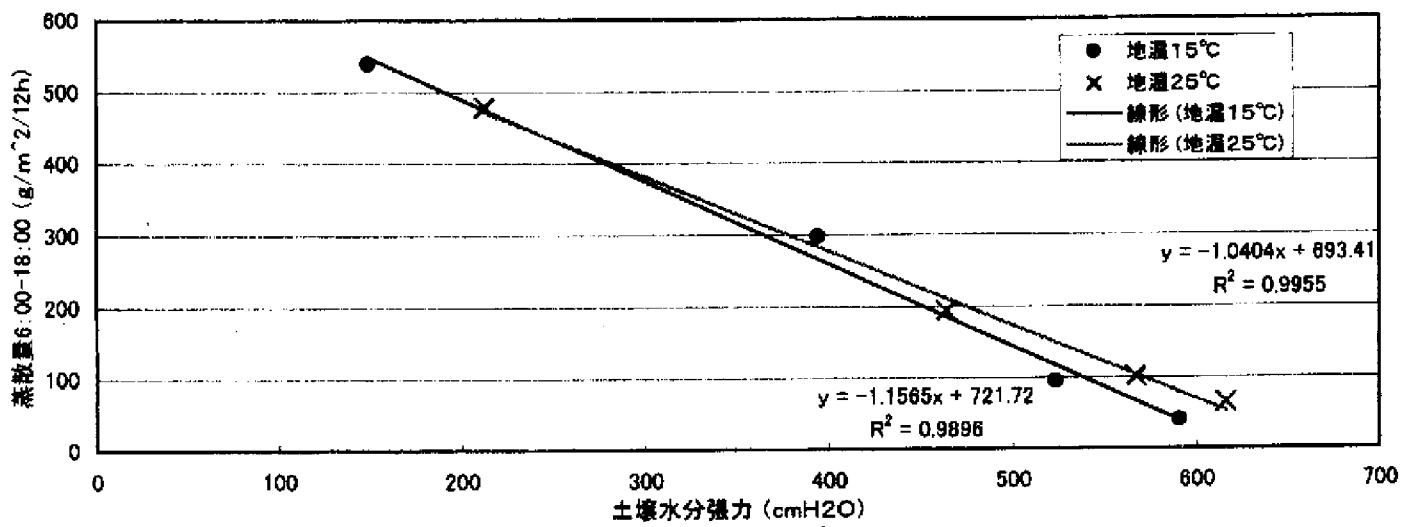


図8 土壤水分張力と蒸散量の関係
土壤温度15°Cと25°Cの場合

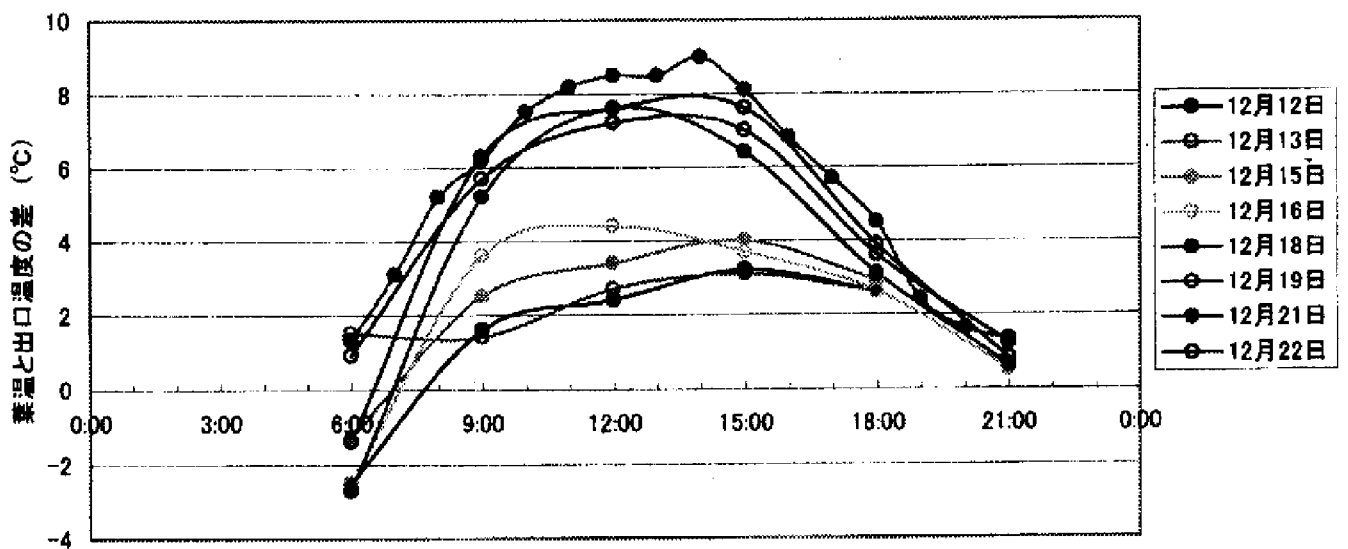


図9 葉温と出口温度の差の時間推移

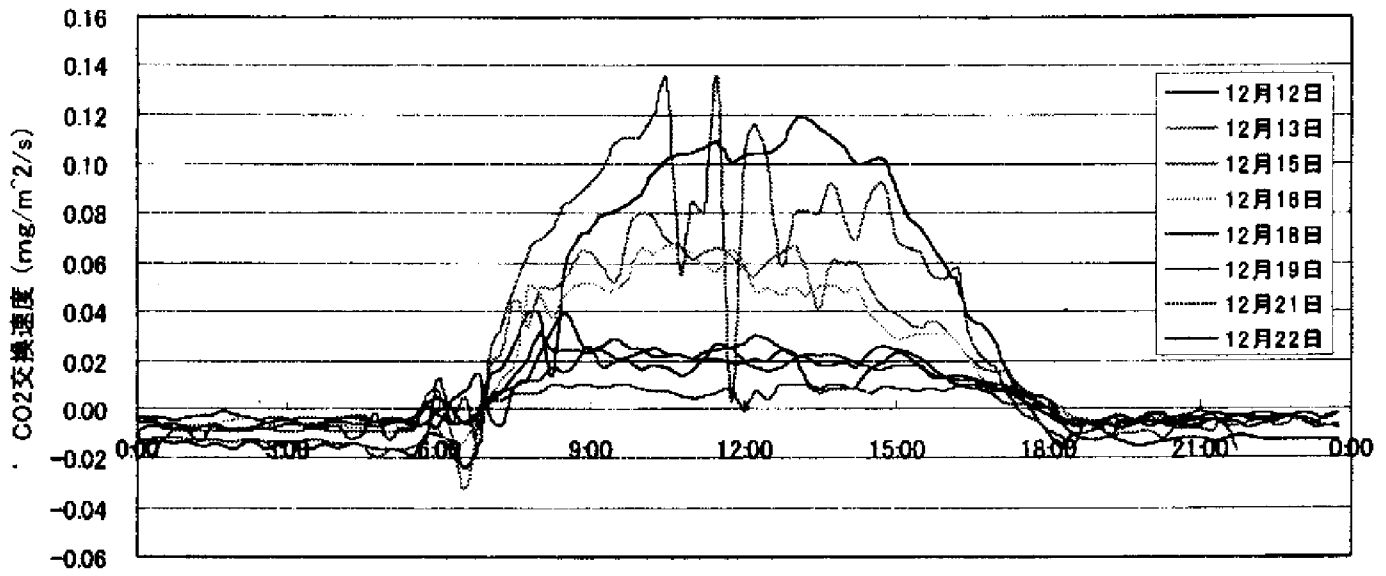


図10 CO2交換速度の時間推移

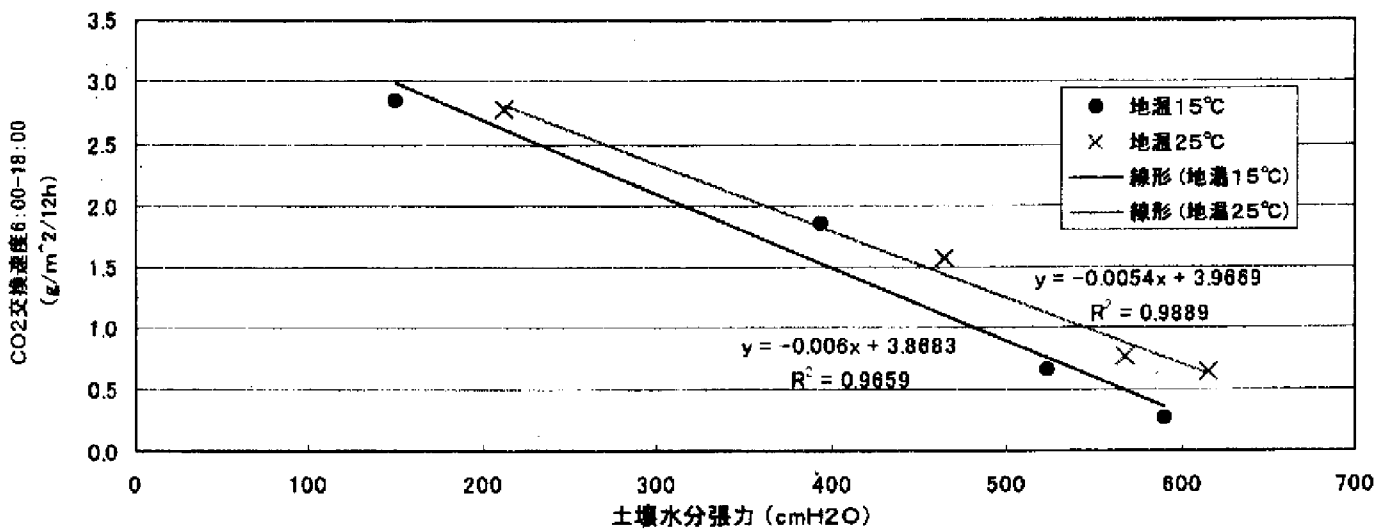


図11 CO2交換速度と土壌水分張力の関係
土壌温度15℃と25℃の場合

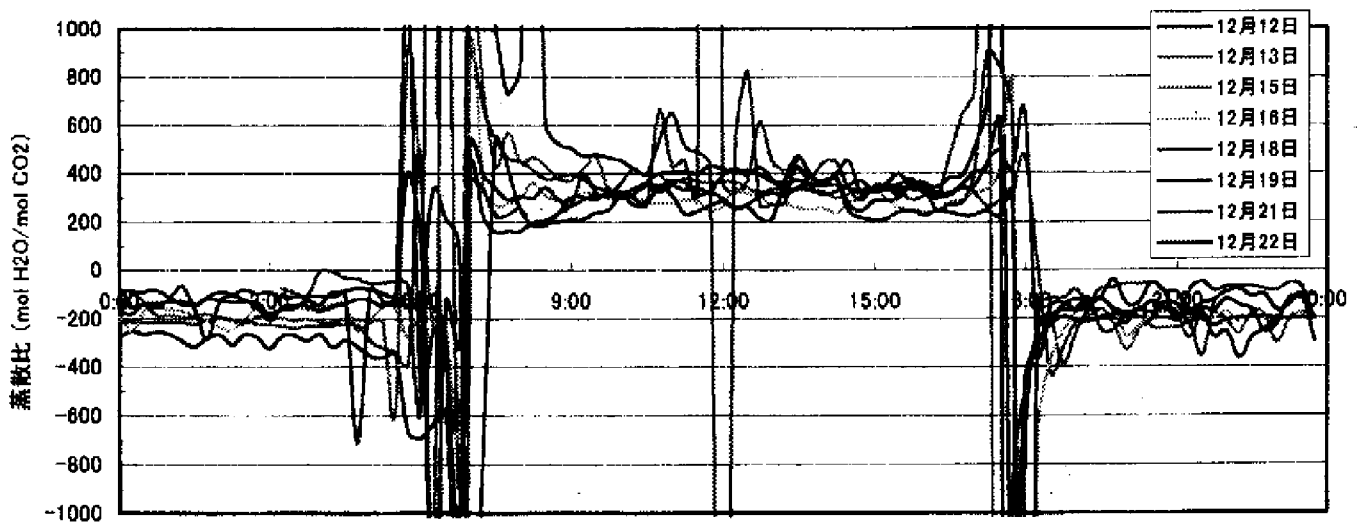


図12 蒸散比の時間推移

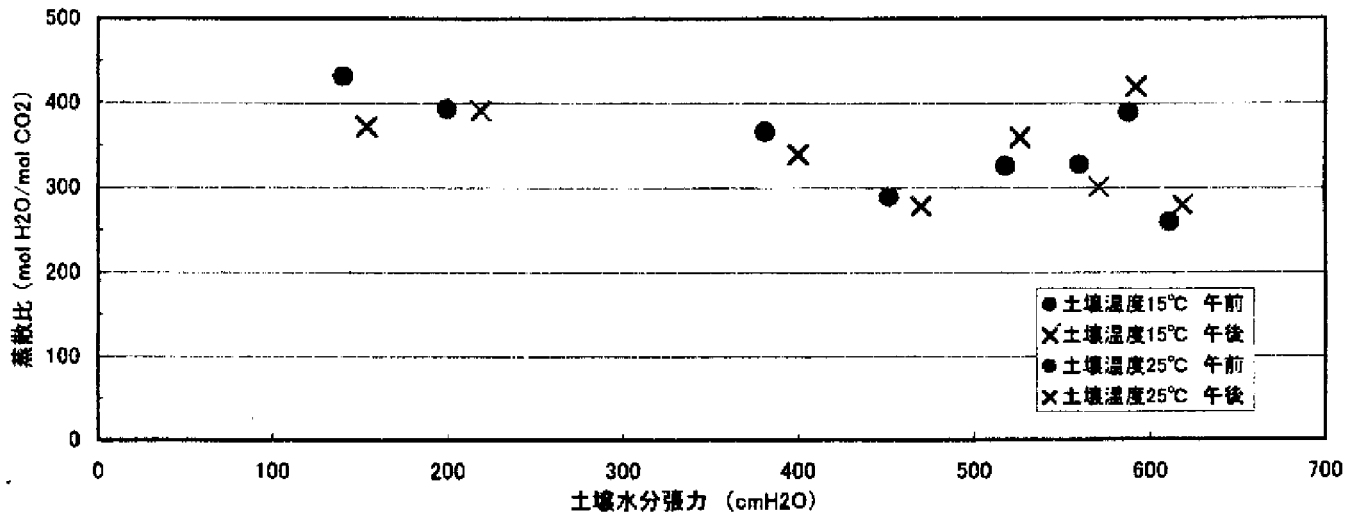


図13 蒸散比と土壌水分張力の関係
土壌温度15°Cと25°Cの場合

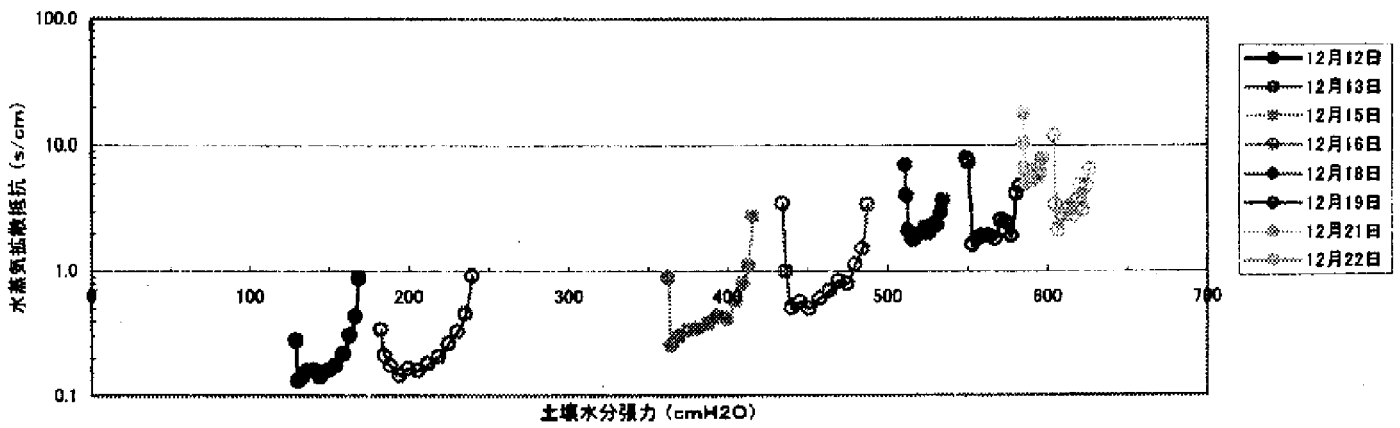


図14 水蒸気拡散抵抗の推移

各点はそれぞれの測定日の6:00-18:00までの1時間ごとのデータをつないだ値

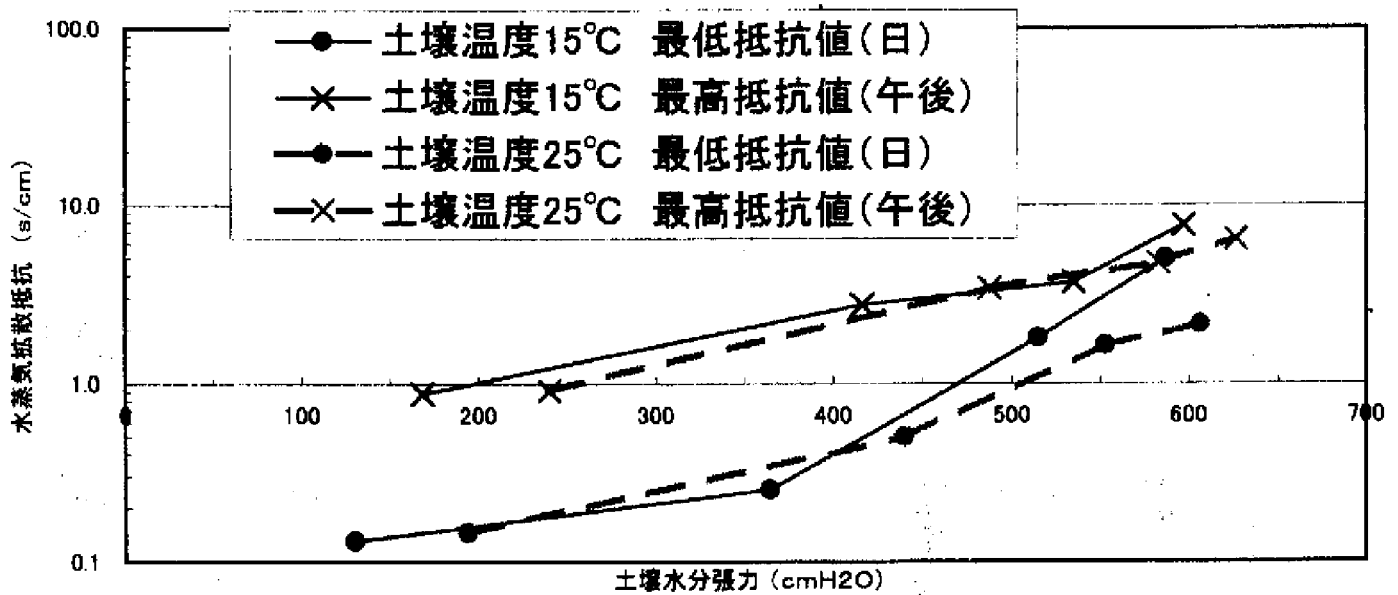


図15 水蒸気拡散抵抗の日中の最低値及び最高値

附録資料 土壤植物大気連続体水流実験装置の概要

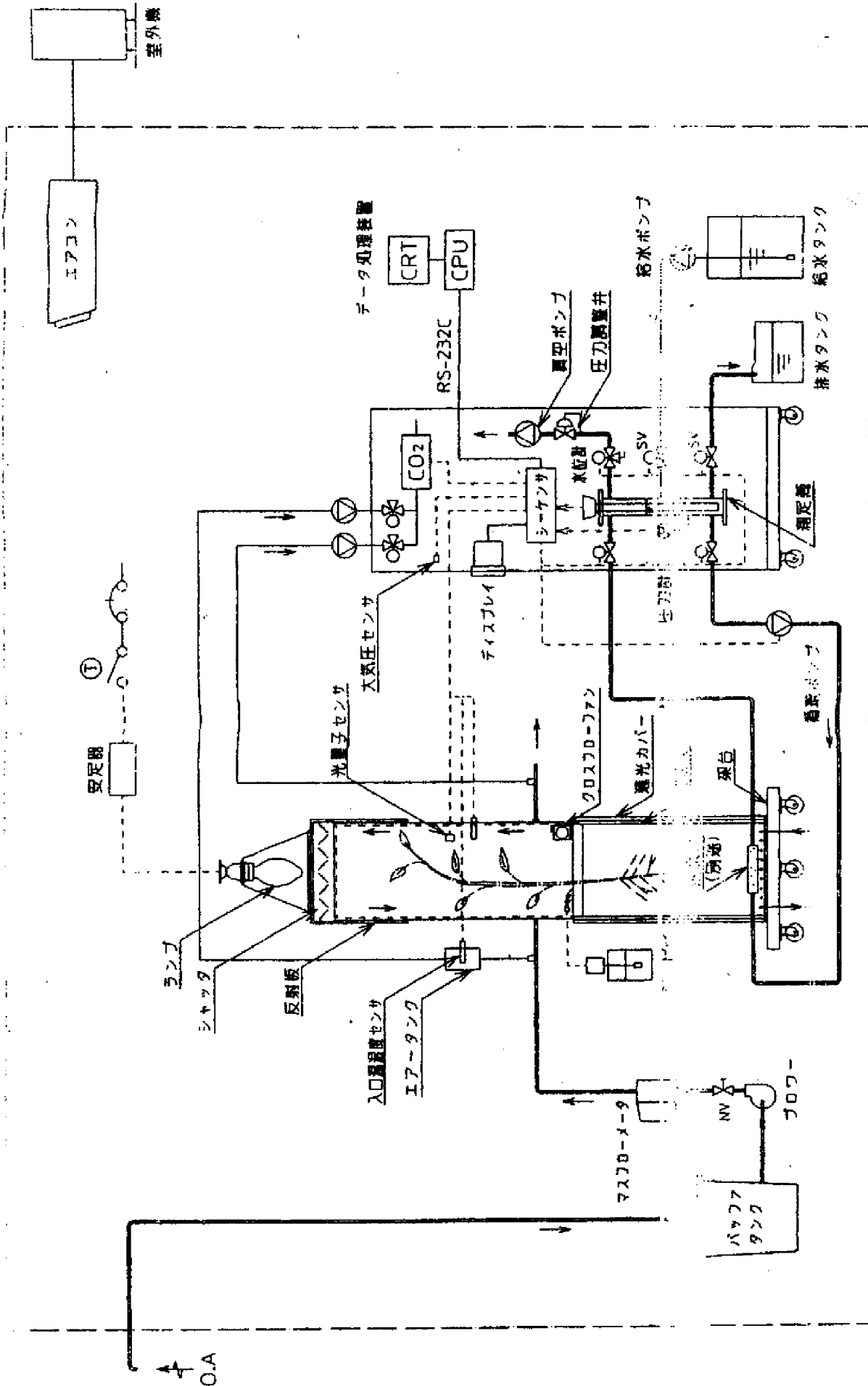
本装置は、植物環境生態学の分野における土壌-植物-大気連続体の水流の計測制御を行なうシステムで、光合成蒸散測定装置、土壌水分コントロール装置、データ処理装置、設置室空調から構成されます。

光合成蒸散測定装置は、土壌槽に植栽した植物の地上部を植物収容ケースで覆ってチャンバとし、バッファタンクでCO₂濃度をある程度安定化させた外気を一定量チャンバに送気し、通気流量と入口、出口空気のCO₂/H₂O濃度差から光合成・蒸散速度を計測します。

土壌水分コントロール装置は、土壌槽底面に設置した透水管（別途）に供給する脱気水の負圧を調整することにより、土壌中のpF値を制御しながら土壌槽への給排水量を測定筒の水位変化から計測します。

データ処理装置は、光合成蒸散測定装置および土壌水分コントロール装置からの計測データを受け取り、表示および記憶装置へ格納します。

計測項目	検出器(メーカー、形式)	レンジ/出力
給水負圧力	拡散半導体式 (コパル電子, PA-500-102V-06)	0~-98.1kPa/1-5V
測定筒水位	静電容量式 (桜エレクトロニクス, EMC470Z+11301GT)	0~500mm/4-20mA(1-5V)
通気流量	マスフロー式 (日本特殊計器製作所, MF1-16)	0~100LM/0-5V, 4-20mA
CO ₂ 濃度	赤外線式(光音響式) (MSA JAPAN, MODEL 3600)	0~2000ppm/4-20mA(1-5V)
温度(入口, 出口)	白金測温抵抗体	-40~60°C/4-20mA(1-5V)
相対湿度(%)	静電容量式 (ロトニック, MP408A-T4-W4W)	0~100%RH/4-20mA(1-5V)
光量子束密度	フォトダイオード式 (小糸工業, IKS-27-10)	0~3000 μmol/m ² s/0-10mV 変換器0-10mV/(1-5V)
大気圧	静電容量式 (ガイファラ, PTB100A)	800~1060hPa/0-5V



(資料1) 図1 土壌植物大気連続体水流実験装置の概要図
 光合成蒸散測定装置および土壌水分コントロール装置