

氏 名 (本籍) さくら だに てつ お
桜 谷 哲 夫

学位の種類 農 学 博 士

学位記番号 農 第 211 号

学位授与年月日 昭和56年 7月16日

学位授与の要件 学位規則第5条第2項該当

学位論文題目 作物体内の蒸散流量測定法の開発とその
応用

論文審査委員 (主 査)

教授 佐藤 庚 教授 堀 裕

教授 庄子貞雄

論文内容要旨

葉からの蒸散量によって作物の水消費量を評価する従来の方法は、自然環境下に生育している作物へ適用する際には多くの限界がある。このため、自然条件にさらされている作物の生育と水要因に関する研究は不十分であった。そこで、作物の茎部における蒸散流量を測定することが可能であれば、自然環境下での作物の水消費量を簡易に測定できる。そして、各葉群への水の分配特性および蒸散流に影響されている茎部の熱的性質も解明できる。それゆえ、茎部蒸散流の決定法の確立は作物の生態生理の研究に寄与するところが大きいと考えられる。

本研究は、伝熱工学における熱輸送理論を作物茎部に適用することによって、作物個体に何らの障害を与えることなく自然環境下で蒸散流を測定する方法を確立することを第1目標とし、次にこれを用いて、主として圃場条件下における作物個体群の水の輸送特性および消費特性に関する知見を得ることを目的として行われた。

第1章 茎部蒸散流の測定法の開発

測定法の原理は、加温された茎の温度分布に基づく方法と、加温部位の熱収支に基づく方法とである。本論文では、前者を温度波法、後者を熱収支法と呼ぶことにする。

第1節 従来の測定法

植物の茎部蒸散流を求めるための従来の測定法では、茎部蒸散流の絶対量を作物に害を与えずに測定することが困難であることを指摘した。

第2節 温度波法による測定法

横断面積 A [cm²], 熱伝導率 λ_0 [cal · cm⁻¹ sec⁻¹ °C⁻¹] をもつ細長い円柱状の茎を仮定し、その一点に加温し、その熱が茎を伝導する過程に水流を考慮した一次元熱伝導方程式を適用すると、茎内蒸散流量 W [g · sec⁻¹] は、次式で与えられることがわかった。

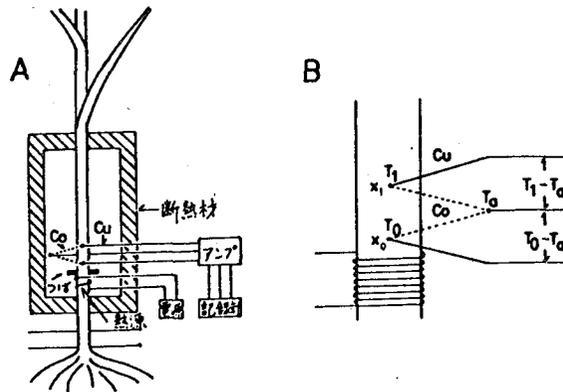
$$W = \left[\frac{\ln \left\{ (T_1 - T_a) / (T_0 - T_a) \right\}}{x_1 - x_0} - \frac{hP}{\lambda_0 A} \frac{x_1 - x_0}{\ln \left\{ (T_1 - T_a) / (T_0 - T_a) \right\}} \right] \frac{\lambda_0 A}{c_w} \quad (1)$$

ここで、 T_0 と T_1 はそれぞれ熱源の下流側の2点 x_0 と x_1 ($x_0 < x_1$) における茎温 (°C), T_a は茎の周囲の気温 (°C), h は茎部での対流熱伝達係数 [cal · cm⁻² sec⁻¹ °C⁻¹], P は茎の周囲 [cm], c_w は水の比熱 [g · cal⁻¹ °C⁻¹] である。

上式を利用するために必要な λ_0 は、茎の構成成分である、セルロース、水および空気の体積率

にそれぞれの熱伝導率を乗じ、その得られた各項を加算する方法で求めた。また、 h は茎と同程度の太さをもつガラス棒による実験式から評価した。

測定装置は、絹巻マンガン線巻いた熱源、銅コンスタンタン熱電対、および h を一定に保つための断熱材で囲われた空間より構成した(第1図)。



第1図 温度波法の測定装置(A)と測定部位の結線図(B)

ポット植えのイネを用いて温度波法の適用性を秤量法との比較から検討したところ、温度波法はおおむね $\pm 20\%$ の精度で蒸散流量を評価できることがわかった(第3図A)。

第3節 熱収支法による測定法

茎部の長さ L cmの部分に一定の熱量 Q [$\text{cal} \cdot \text{sec}^{-1}$] が与えられているとき、その部分には次の熱収支式が成立する。

$$Q = Q_f + q_u + q_d + q_s \quad (2)$$

ここで、 Q_f は蒸散流によって輸送される熱量、 q_u と q_d は熱伝導によって加温部のそれぞれ上流と下流へ失われる熱量、 q_s は熱源表面から周囲気層へ失われる熱量である。 Q_f は、熱源の上流側と下流側の茎温 T_u および T_d ($^{\circ}\text{C}$)の差に流量 W [$\text{g} \cdot \text{sec}^{-1}$]および水の比熱 c_w [$\text{cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$]を乗じたものとして与えられるので、 W を求めるための次式を導いた。

$$W = \frac{Q - q_u - q_d - q_s}{c_w (T_d - T_u)} \quad (3)$$

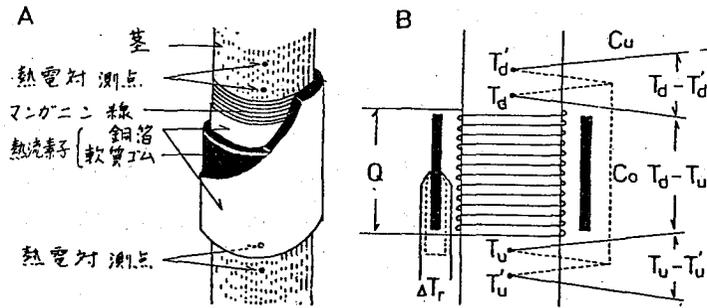
q_u と q_d は、次の一次元熱伝導式の近似式により評価した。

$$q_u = \lambda_0 A_u \frac{T_u - T'_u}{\Delta x} \quad (4)$$

$$q_d = \lambda_0 A_d \frac{T_d - T'_d}{\Delta x}$$

ここで、 A_u と A_d は加温部の直下と直上の茎の横断面積(cm²)、 T'_u と T'_d は、 T_u と T_d の測定点からそれぞれ上流および下流へ Δx (cm)の距離での茎温である。

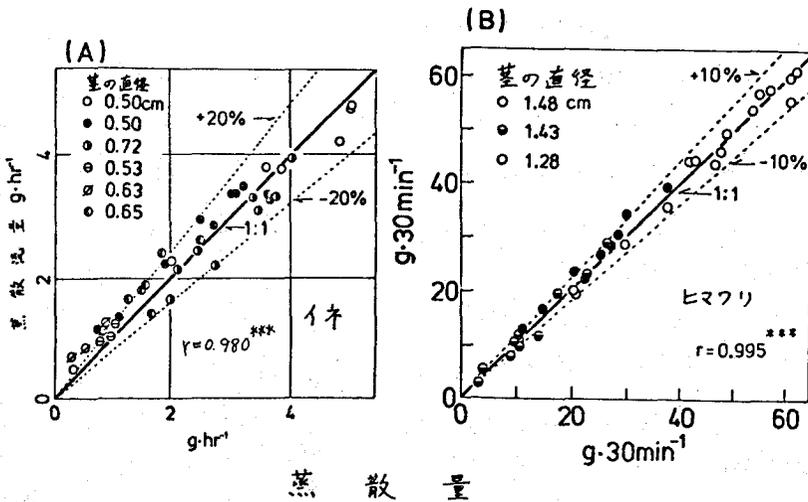
測定センサーは、熱量 Q を発生させるためのマンガン線の熱源、茎温測定用熱電対、および q_s を評価するための熱流素子より構成されている(第2図)。 Q は熱源に与えられた電圧と電流



第2図 熱収支法の測定センサーの構造(A)と結線図(B)

の積により、また q_s は熱流素子の内側と外側の温度差(ΔT_r)から評価した。

ポット植えのダイズとヒマワリの蒸散量を秤量法およびチャンバー法で測定し、これらの測定値と熱収支法による測定値とを比較した。この結果、秤量法による蒸散量と熱収支法による蒸散流量とは±10%以内で一致し(第3図B)、熱収支法は作物茎内の蒸散流量評価のためのきわめて有効な方法となりうることがわかった。蒸散流量とチャンバー法による蒸散量の日変化の比較から30分平均では、両者の間には明瞭な位相の相違は認められず、一般には茎部蒸散流量は蒸散量に等しいと想定できることがわかった。



第3図 秤量法から求めた蒸散量と温度波法(A), および熱収支法(B)から算出した蒸散流量の比較

第4節 温度波法と熱収支法の特徴の比較

温度波法は、蒸散流量の小さい場合には適するが、その適用には限界があること、これに対し、熱収支法は測定法が比較的単純であり、蒸散流量のかなり広い範囲に適用でき、しかも比較的精度も高いことがわかった。

第Ⅱ章 蒸散流の葉層別消費特性

第1節 イネの部位別蒸散流特性

乳熟期のイネ「ニホンマサリ」の主稈の各葉位間の蒸散流量を温度波法により測定した。稈の横断面における水の占有面積 A_w [cm²] の単位面積あたりの流量で定義される水フラックス密度 F_w [$g \cdot cm^{-2} sec^{-1}$], および稈の単位横断面あたり流量で表わされる水フラックス密度 F [$g \cdot cm^{-2} sec^{-1}$] は、ともに上方に向うに従いやや減少する傾向がみられた(第4図)。

任意の部位の A_w とその部位の上方に着生する葉面積との比は部位によらずおおむね一定値を示すこと、および導管面積と葉面積の比はほぼ一定という既応の研究とから、 F_w は蒸散流速の指標として使用できることがわかった。また、稈内蒸散流の測定から蒸散の湧源強度の算出を試みた。

第2節 ダイズの粗植区および密植区における葉群別水消費特性

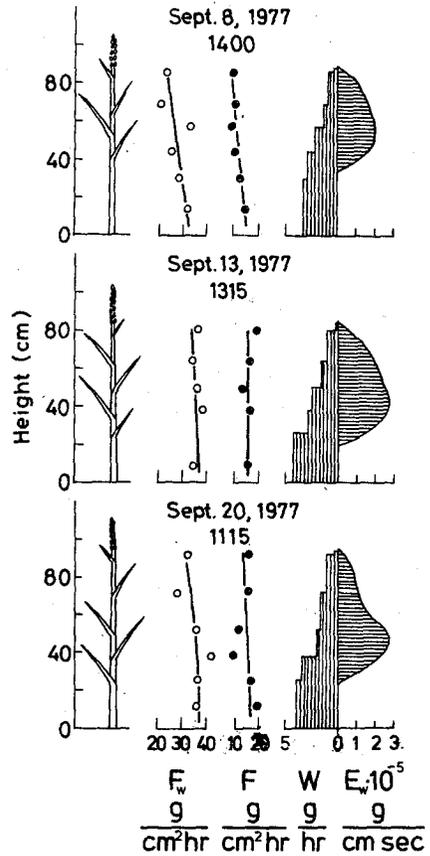
品種「ミヤギシロメ」の粗植区(30×30cm)と密植区(20×20cm)の個体の茎部3カ所(下方より z_1, z_2, z_3 ,とする)の蒸散流量を熱収支法で測定し、栽植密度による水消費特性を調べた(第5図)。その結果、粗植区では、植被の上層に分布する z_3 より上方に着生する上位葉群、および $z_1 \sim z_2$ 間に着生し葉群分布が上層までおよんでいる下位葉群の水消費量が大きく、植被の中層に分布する $z_2 \sim z_3$ 間に着生する中位葉群の水消費量は小さいこと、密植区では最上層に分布する上位葉群の水消費量が大きく、中・下位となるほど小さくなることがわかった。粗・密植区によるこのような差異は葉層の密度と幾何学的構造による日射環境の差異に起因するものと考えられた。

上層に分布する上位葉群では、粗・密植区ともに日中に水消費率(基部蒸散流量に対するその葉群の水消費量の比)が低下する現象がみられ、その原因として、日中における上位葉群の水分ストレスの増加を考えた。

蒸散の湧源強度は、粗植区は最上層よりやや下方にピークをもち、密植区では最上層に大きなピークをもつ分布型となることが認められた。

第3節 温室キュウリの葉群別水消費特性

品種「王金半促成」を用いて、ダイズと同様の手法によって水消費特性を調べた。水消費量は上位・中位葉群で大きく、下位葉群ではそれらの2/3程度であった。上位葉群では、日中に水消費率の低下がみられた。湧源強度は、最上層よりやや下方にピークをもつ分布となることがわかった。

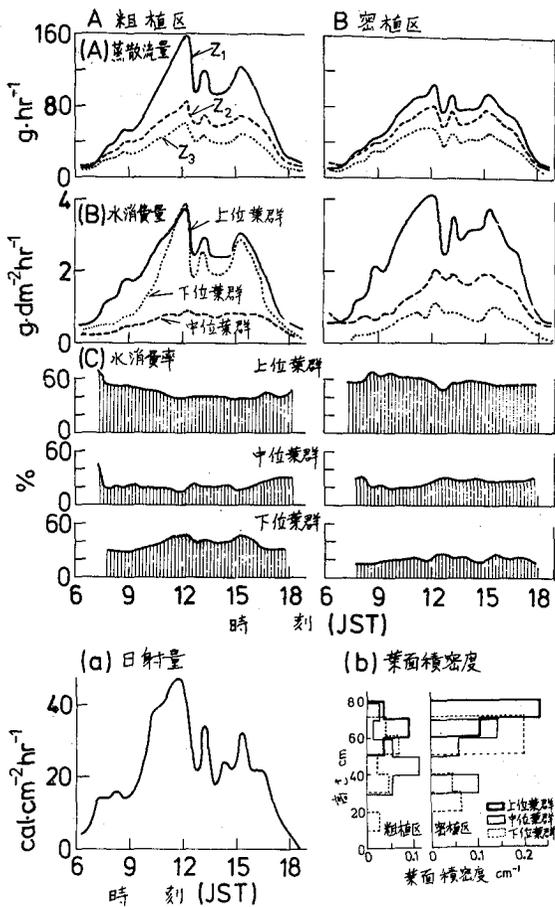


第4図 イネの稈における水フラックス密度 F_w , F , 蒸散流量 W , および蒸散の湧源強度 E_s のプロファイル

第Ⅲ章 自然環境下における2～3の作物の蒸散特性

第1節 イネの蒸散特性

梓水田条件下でイネ（品種、ササニシキ）の蒸散量を温度波法により測定した。蒸散の日変化は日射に最もよく追従し、飽差と気温に対する追従性は明瞭でなかった。気孔抵抗と気層抵抗の和である全拡散抵抗を蒸散流量と葉面飽差に基づいて求めた。その結果、全拡散抵抗は日中に最小を示し、朝・夕に大きい値を示した。これは気孔開度の既応の測定結果と似ており、本測定法は気孔抵抗の研究にも利用できることがわかった。日中の飽差が20 mmHgと、かなり乾燥していた夕方に蒸散流の振動現象を認めた。これは、蒸散と吸水のアンバランスによって生じたものと考えた。



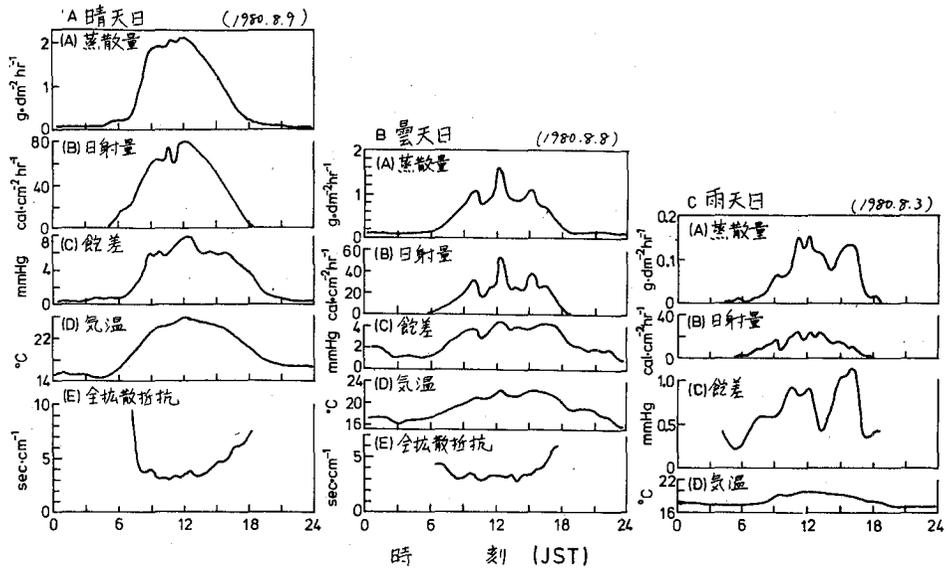
第5図 ダイズの粗植区および密植区個体の葉群別水消費特性(1979年8月1日)

第2節 ダイズの蒸散特性

品種「エンレイ」を用い、粗植区(40×40 cm)と密植区(20×20 cm)で蒸散特性を調べた。単位土地面積あたりの蒸散量は、密植区では粗植区の約2倍であった。このことから、密植区ではかなりの水が消費されていることが示唆された。

次に、粗植区について、晴天日、曇天日および雨天日の蒸散特性を調べた(第6図)。晴天日には、蒸散の急激な増加は日の出より約2時間後にみられることもあった。この立ち上りの遅れは、葉面上の露によって蒸散が抑制されるためと判断された。

晴天日の全拡散抵抗は10時頃に最小を示し、以降増加の傾向を示した。曇天日のそれは、日



第6図 晴天日、曇天日および雨天日におけるダイズの蒸散特性

中においておおむね一定であった。両者の相違は、水分ストレスの発達の差異によるものと考えられた。

雨天日（日雨量 2.2 mm）にも、蒸散の日変化が明瞭に認められた。その変化は、日射と飽差の変化に追隨していることがわかった。

上の測定期間の地下 20 cm の pF は 1.6 ~ 2.9 の範囲にあったが、この土壤水分の差は蒸散量にほとんど影響を与えなかった。

これらの測定で得られたデータを用い、日射量および飽差と蒸散量との関係を調べた。日射量と蒸散量との関係は、飽差が比較的小さい場合には、ほぼ直線関係を示し、飽差が比較的大きい場合には、日射の増加に伴って蒸散の増加が鈍くなることがわかった。この結果は、現在までの計算および実験結果と一致した。一方、飽差の増加に伴って蒸散の増加は鈍化した。

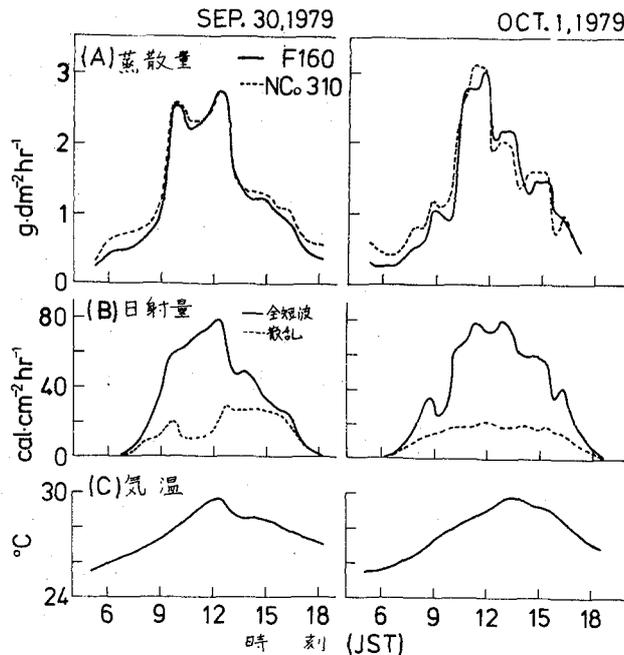
全拡散抵抗は、日射の増加に伴って減少し、 $60 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 以上では一定 ($3 \sim 4 \text{ sec cm}^{-1}$) となった。また、飽差が 9 mmHg 以上では、飽差の増加に伴って全拡散抵抗は増大することが認められた。

第3節 サトウキビの蒸散特性

品種「F 161」と「NC0310」を用い、熱収支法により蒸散量を測定した（第7図）。その結果、蒸散特性に品種の差は認められなかった。蒸散は、午後になるとやや急激に減少した。また

植被面に入射する散乱光の減少につれて蒸散は減少した。これらの結果および既応の研究結果を参照すると、サトウキビは水分ストレスや日射に敏感な作物であることが推察された。

30 mmの灌水によりpFは2.7から1.4に低下し、蒸散量は17%増加した。しかし、非灌水区との間で日変化パターンの差異は認められなかった。このことから、蒸散の日変化パターンはダイズと同様、気象条件によって強く支配されているといえる。



第7図 サトウキビの蒸散の日変化特性

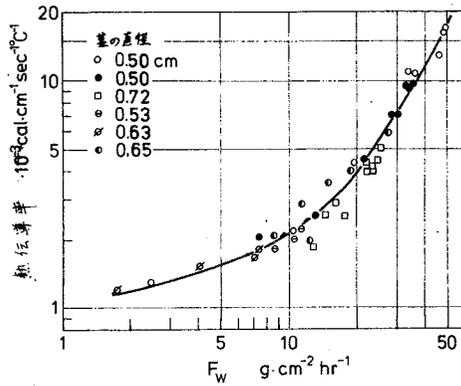
第4節 蒸散量の作物間比較

イネ、ダイズ、サトウキビ、キュウリの葉面積あたり蒸散量を同一日射量下($60 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$)で比較したところ、イネ>サトウキビ>ダイズ>キュウリの順となった。

第IV章 イネの見掛けの熱伝導率と蒸散流との関係

イネの稈に温度波法を適用して、体温の成立に関係している見掛けの熱伝導率と蒸散流との関係を調べるとともに、茎温に対して水温の影響がおよぶ高さについても検討した。

見掛けの熱伝導率 λ は(1式)において $W=0$ とおき、 λ_0 について整理し、 λ_0 を λ と置換えて得られた。 F_w が約 $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 以上では、 λ は急激に増加し、 $F_w = 50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ では $\lambda = 0.016 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ となり、水の約11倍となることがわかった。



第8図 イネの稈内の水フラックス密度(F_w)と λ との関係

水田条件におけるイネの λ は蒸散流によって変化し、夜間には 0.001 、日中には $0.02 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ となった。このことは、日中においては水温がより稈の高い部位まで影響することを示唆している。そこで、水温のおよぶ高さ H (cm)を水温-気温の差に対する茎温-気温の差の比が $1/20$ となる高さとして定義し、 F_w と H との関係をみた。その結果、稈からの蒸散がないと仮定した場合には、稈部における h が小さいほど、また F_w が大きいほど水温の影響は稈の高い部位にまでおよぶことがわかった。水田条件下での H は、夜間では 2 cm 、正午ごろでは 10 cm に達することがわかった。

以上の結果から、蒸散のさかんな日中には水温の影響がより上部まで波及し、逆に蒸散の少ない夜間には水田水温の影響は水際部位に局限されると推論できる。

審査結果の要旨

耕地の自然環境下に生育する作物個体群の蒸散量を正確に測定することは、農業技術の開発のみならず耕地の生態生理学研究上不可欠のことである。ライシメーター法、チャンバー法、微気象学的方法などによって作物の水消費特性を評価する従来の方法には、経費を多く要したり、立毛中の作物に何等かの影響を与えずには測定できないなど適用上多くの限界があった。したがって、自然条件下における作物と水要因との関係の解明はおくれており、新しい測定方法の開発が切望されていた。

著者は、伝熱工学における熱輸送理論を作物の茎部に適用することによって、作物個体にほとんど障害を与えることなく、耕地群落内作物個体の蒸散特性を立毛のまま測定することに成功した。温度波法および熱収支法の2法を考案して比較検討の結果、後者の方が適応性が広い上に測定法がより簡便でかつ精度が高い（前者の誤差±20%以内、後者の誤差±10%以内）ことを立証した。

次いで、これらの新しい方法を用いて、自然環境下のイネ、ダイズ、サトウキビおよび温室内のキュウリについて、葉群別、部位別の蒸散流特性をしらべるとともに、同時に測定した葉群構造、日射、気温、飽差、葉面拡散抵抗などとの関係を考察し、従来の知見を再確認するとともに、いくつかの新知見を加えることができた。

従来、方法論的に困難視されてきた耕地の自然環境下の作物の水消費特性が本法によって精度高く評価できることになり、本法は今後の耕地生態生理学の発展、水の有効利用技術の開発の上に強力な手段となるであろう。ここに審査員一同は、本論文が農学博士の学位を授与するに十分な価値をもつ業績であると認定した。