

植物の生長計測と制御

Measurement and Control of Plant Growth

最近、施設園芸での環境制御の問題や植物工場の実現がクローズアップされ、植物の生長の定量的な計測と環境制御による生長促進が基本的に重要な技術課題となってきた。そこで日立製作所では、葉菜類の代表としてサラダ菜を試料として、光合成速度と重量の二つの生長指標に対する非破壊・連続測定装置を開発した。多成分ガスの質量分析計により、光合成など生理反応の環境効果が同時連続的に調べられる。また、半導体ひずみゲージを利用した重量連続測定装置により、植物の一昼夜の生長に及ぼす環境効果が判明する。これらの装置を利用し温度、日長及び炭酸ガス濃度を最適に制御することにより、サラダ菜が6倍程度に生長促進することが見られた。その他、植物は夜間に生長するなどの生理学的知見も定量的に把握された。

高辻正基* *Takatsuji Masamoto*

金子忠男** *Kaneko Tadao*

鶴岡 久** *Tsuruoka Hisashi*

1 緒 言

近代農業では、ビニールハウスやガラスハウスで代表される施設園芸が、生鮮野菜の周年供給に寄与していることは周知のとおりである。しかし最近、石油や機械の値上りによって、施設園芸の今後の方向が問い直され始めた。一つの方向は省エネルギーに基礎を置くもので、施設面と栽培面から、主に暖房燃料をどの程度まで節約できるかを検討する。これは最も常識的なアプローチであるが、食糧供給という面からみると、やや消極的な考えと言えるであろう。しかし、将来期待される太陽熱、地熱及び排熱の有効利用は、積極的な省エネルギー対策である。

もう一つの方向は、植物の生理学的特性や機構に立ち入り、最適生長のための環境条件を定量的に把握することによって、最も採算に合った環境管理の方法を見いだそうとするものである。すなわち、施設費の値上りがあっても、それ以上の生産性を目指すという考え方である。従来の施設園芸では、植物の生理学的特性まで十分に立ち入った管理は行なわれておらず、主に経験的データに基づいた温度管理しかなされていなかった。施設園芸が今後大きく発展するためには、植物の生長機構を把握し、それに基づいて最も効率の良いエネルギーと生産コストの投入を行なうというアプローチが必要であろう。最近注目されている植物工場も、このようにして初めて実現されると考えられる。

植物の環境に対する生長特性を定量的に把握するためには、しかるべき生長指標を測定するための計測器の開発がまず必要である。この論文では、主要な環境条件を制御できる植物生育槽(グロースチェンバ)の中で、葉菜類の代表として取り上げたサラダ菜を試料として生長計測と生長促進の実験を行なった結果について述べ、今後の展望に言及する。

2 植物の生理反応と質量分析計

植物の生長指標としては、従来、形状や色つやなどのパターン量が使われ、栽培家の目による判断によって、暖房、施肥、収穫などの操作が行なわれてきた。これらのパターン量と判断基準が定量化されれば最も望ましいが、パターン認識の技術は極めて難しく、更に判断の段階になると、現状では

どうしても人間の主観性に影響されることが避けられない。植物生長の様子 of の画像処理は、現在ようやく研究が開始された段階である¹⁾。今後、農業でのパターン認識の技術は重要になると思われるが、これだけでは植物の生理学的特性に立ち入ることはできない。日立製作所が採用した生長指標は、光合成で代表される生理反応と、植物全体の指標としての重量である。

植物の生長過程には、種子発芽期、光合成による物質生産の段階である栄養生長期及び開花や結実の生殖生長期の三つがある。この論文では栄養生長期を対象に取り上げた。光合成では、葉の葉緑体が光エネルギーを利用して、炭酸ガスと水とから炭水化物を作る(同化作用)。一方、呼吸では逆に炭水化物を酸化し、生長に必要なエネルギーを作り出す。このエネルギーによって、炭水化物の他の器官への移動が起こり(転流)、生長が実現される。更に、植物の大部分を占める水分は、根から養分とともに吸収されると同時に、葉の気孔を通して空気中に蒸散される。このように、植物の基本的な生理反応である光合成、呼吸及び蒸散に伴って、炭酸ガス、酸素及び水蒸気の出入りがある。したがって、これらのガスを定量的に測定することができれば、生長の手掛りを得ることができる。

従来これらのガスは、別々の計測器で測定されてきた。例えば、光合成の測定は炭酸ガスの赤外線分析計によって行なわれることが多い。三つのガスを、同時に一つの分析計で測定できれば便利であるばかりでなく、植物の生理反応に対する新しい知見を得ることができる。日立製作所はこの目的で、小形で高感度の質量分析計を試作した。その主要部分と構造図を、それぞれ図1、2に示す。検出すべきガスは、葉の場合、大気中から差動排気によりキャピラリーを経てイオン化室に導入される。各ガス成分に対応するイオンは電圧により加速され、永久磁石によってその質量数に応じて一定の角度だけ曲げられ、あらかじめそれぞれの収束点に配置されたコレクタにより同時に検知される。水耕栽培の場合、検出端にテフロン膜を付着させることによって、根の呼吸も測定できる。

試作したマルチコレクタ方式の質量分析計は、磁場によっ

* 日立製作所中央研究所 理学博士 ** 日立製作所中央研究所

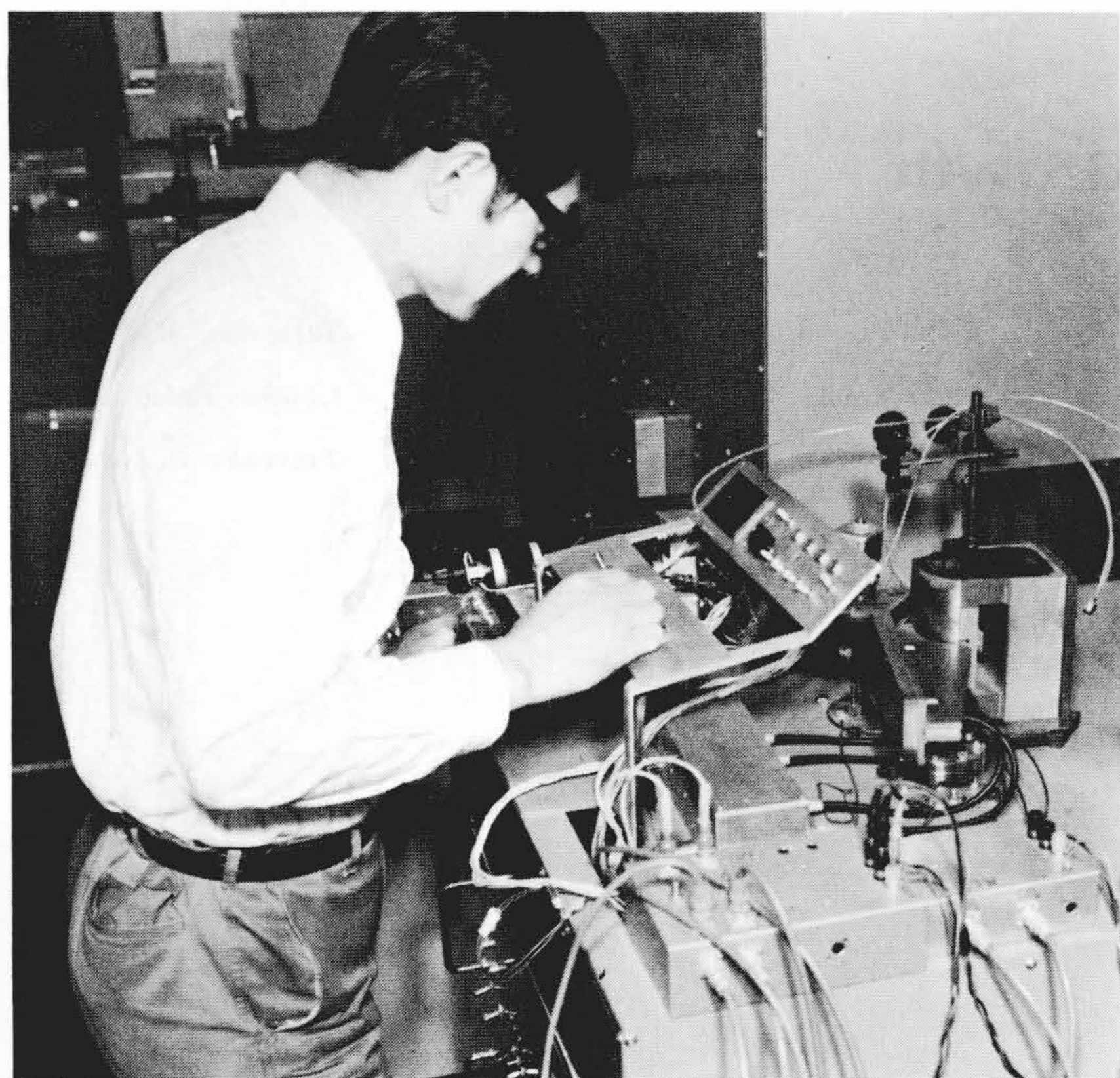


図1 マルチコレクタ方式質量分析計 植物の生理反応に伴って出入りするガスを、同時分析することができる。

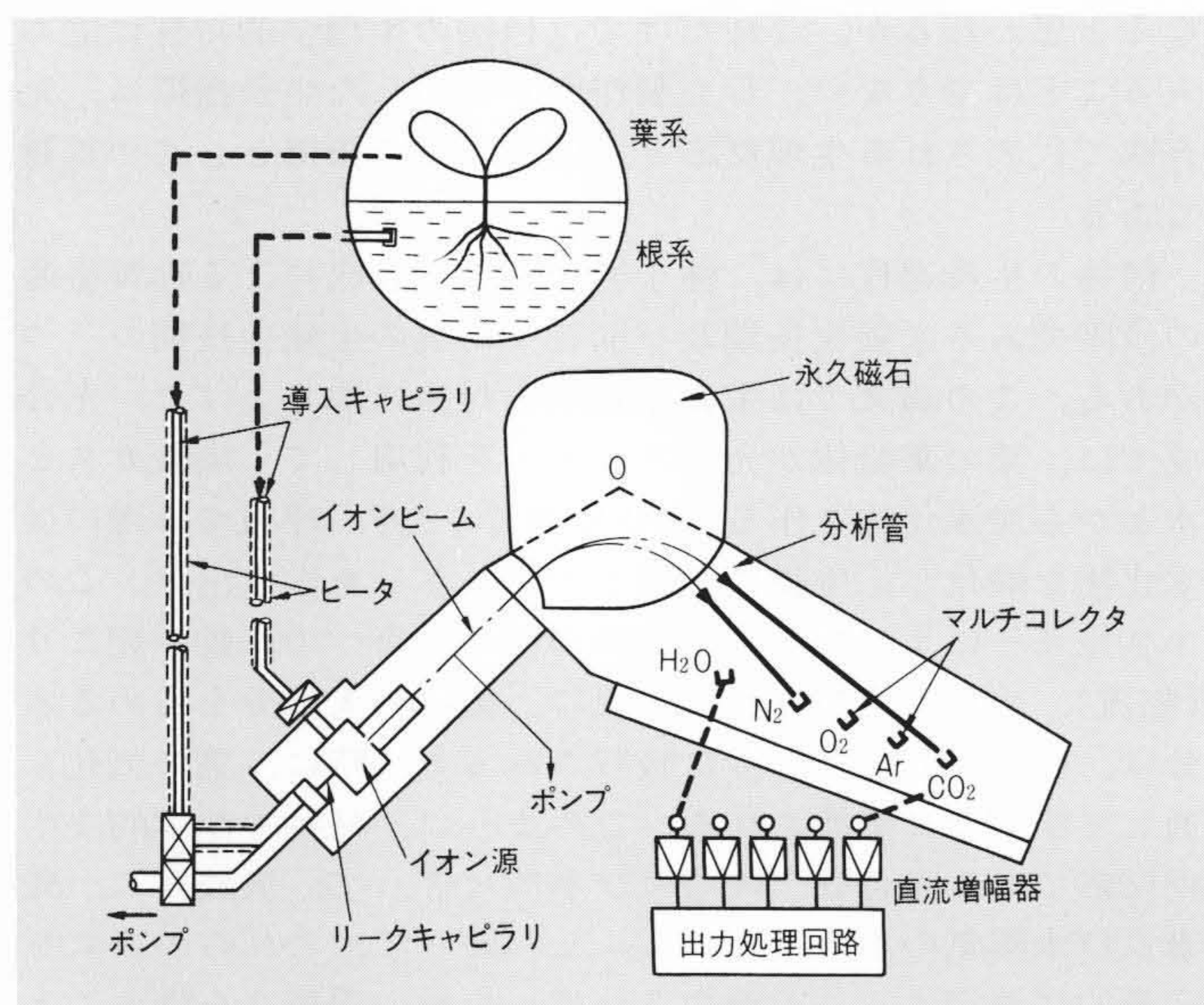


図2 マルチコレクタ方式質量分析計の構造 光合成などの生理反応に伴って、葉や根から出入するガスが同時に分析される。

て曲げられる平均イオン半径が5 cmという小形の装置であるが、測定できる質量数(m)の範囲は4~60で、分解能($m/\Delta m$)は40に達する。これはイオン光学系に収差を少なくする立体収束系を導入することによって実現された。他の仕様としては、検出端内径=0.24mm、応答速度=0.1s、CO₂に対する感度=数ppmである。検出端内径が細い結果、端子を葉面近傍に配置することによって、葉面からの蒸散量を直接測定できるという特長をもっている。試料ツルナシインゲンの若葉と老葉に対する測定例を図3に示す。

3 グロースチェンバと光合成の測定

光合成の測定は炭酸ガスの吸収量として測る。ただし、この場合、測定されるのは見掛けの光合成、すなわち真の光合成から呼吸を差し引いた量である。植物の生長は環境条件に強く依存する。光合成も他の生長指標と同様に、温湿度、光

条件、炭酸ガス濃度などに影響される。施設園芸での環境管理の基礎付けとして、環境量を任意に設定できるグロースチェンバ内で、光合成などの生理反応を測定することは広く行なわれている²⁾。試作したグロースチェンバとその構造図を、それぞれ図4、5に示す。植物に対する環境条件の変動を少なくし、均一の条件を作り出すために二重のチェンバ(ダブルチェンバ)方式を採用した。空調された外部チェンバの空気は、流量と炭酸ガス濃度が制御されて、内部チェンバ(同化箱)に送られる。

同化箱の中の植物全体の光合成速度($\text{mg CO}_2/\text{時間}\cdot\text{株}$)は、入口と出口での炭酸ガス濃度差($\text{mg}/\text{m}^3\cdot\text{株}$)と通気量(m^3/h)

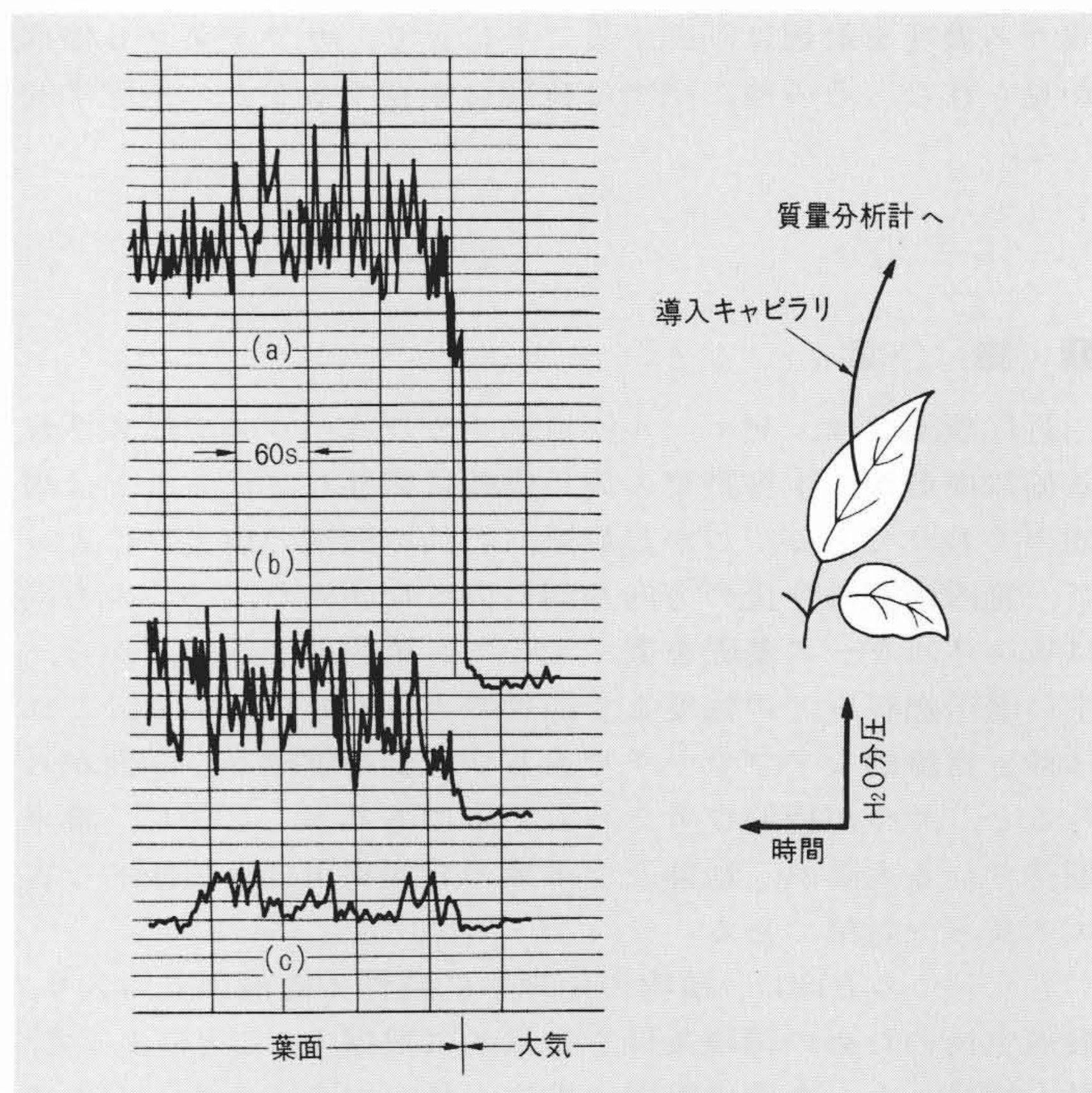


図3 質量分析計による蒸散量の直接測定 試料としてツルナシインゲンを用いた。図中(a)は若葉の裏面、(b)は(a)と同じ葉の表面、(c)は老葉の表面の測定波形を示す。キャピラリ端と葉面との間隔は約0.5mmである。



図4 グロースチェンバ 試料としてピーマンを用いている。左下は質量分析計を、右端は炭酸ガス濃度コントローラを示す。

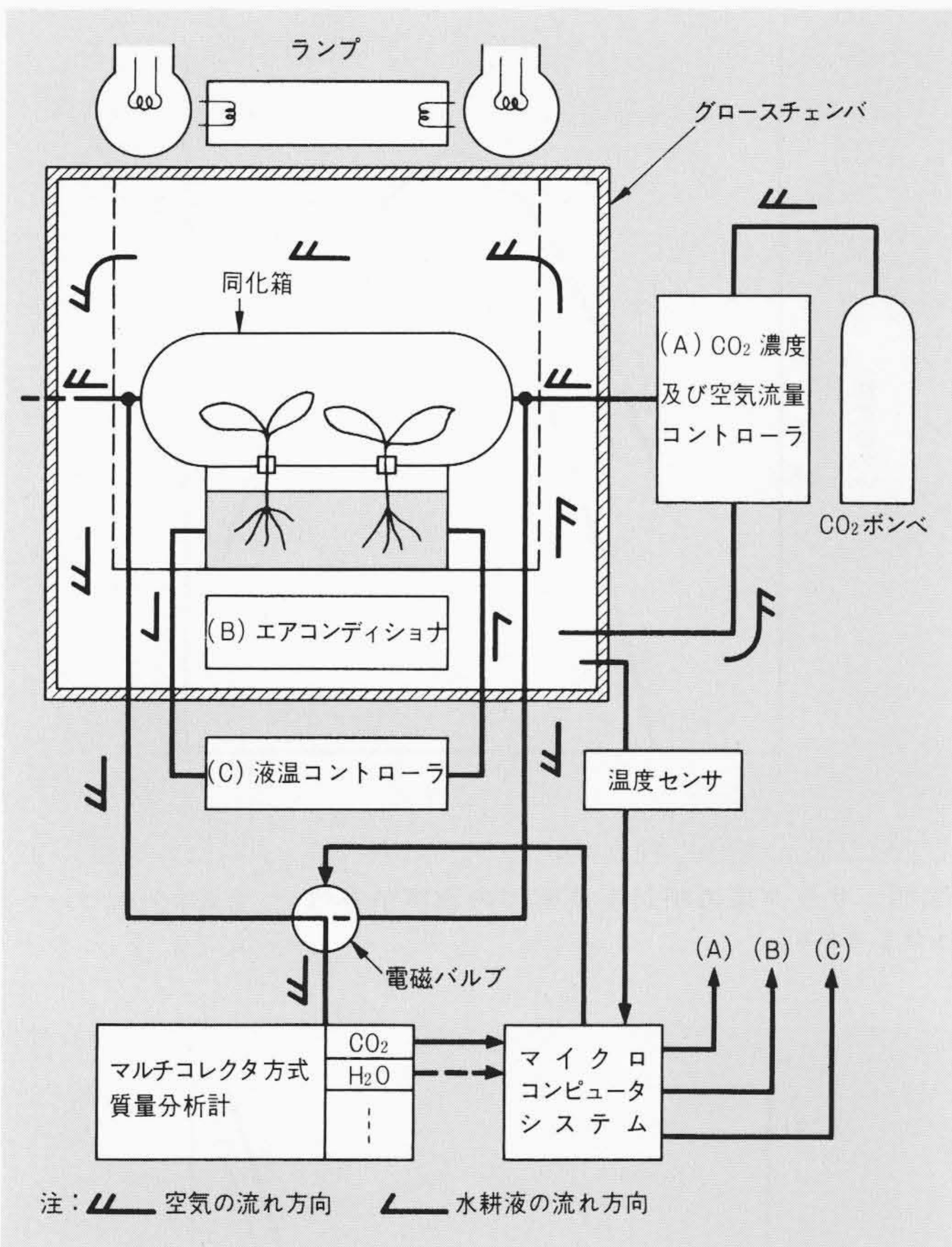


図5 グロースチェンバの構造 同化箱の入口と出口の炭酸ガス濃度の差を、質量分析計で検知して光合成を測定する。マイクロコンピュータと結合して、光合成最大の環境条件を探索することもできる。

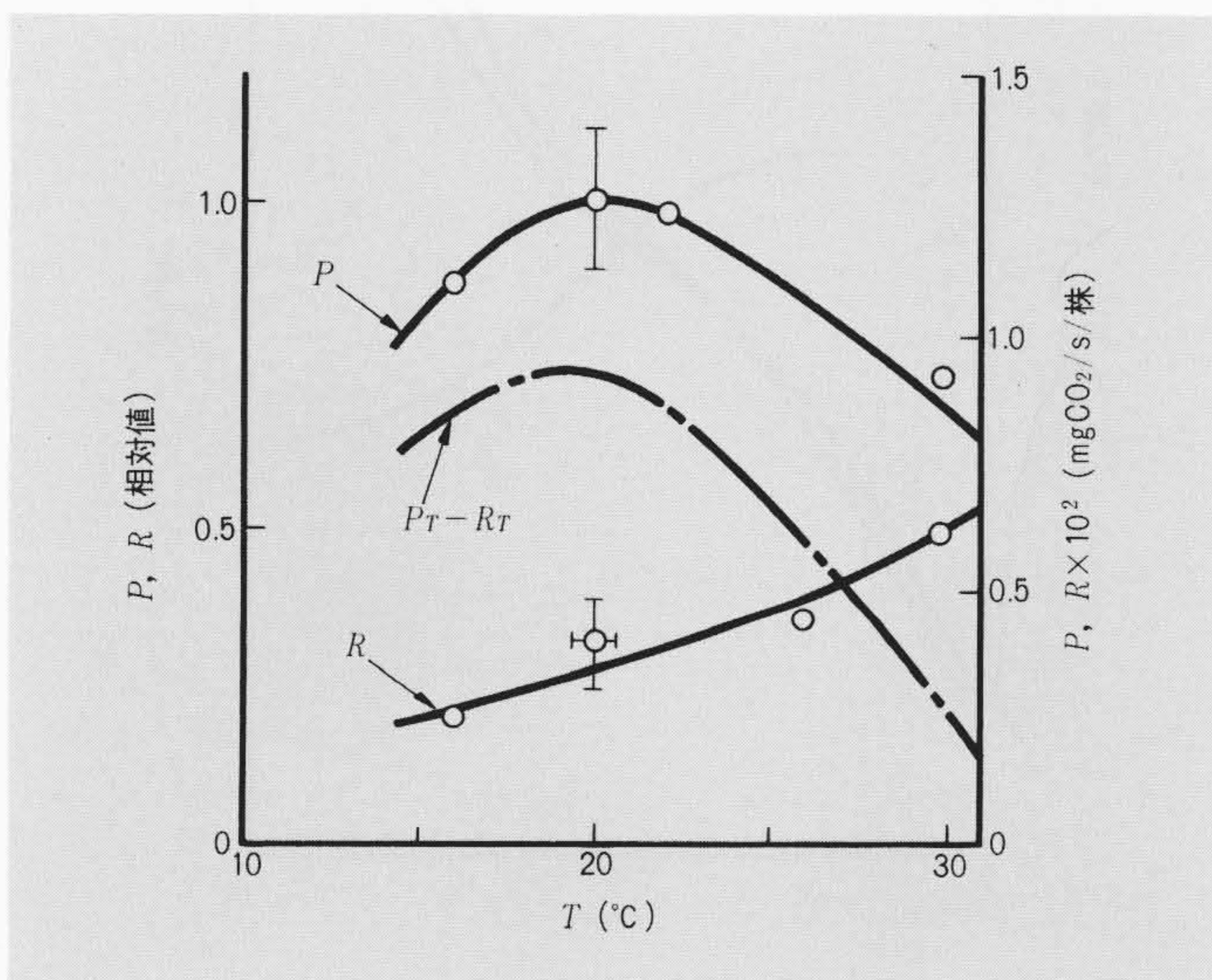


図6 サラダ菜の光合成速度(P)、呼吸速度(R)の温度依存性
1日の実効的な積算光合成量($P_T - R_T$)も示してある。

の積によって求められる。炭酸ガスの質量分析計への導入は電磁弁により操作し、基準ガス濃度との比で検知される。同様な原理によって、夜間、光合成が行なわれないときの呼吸量や葉からの蒸散量が測定される。このグロースチェンバでは、気温、液温、湿度、光の強さ、1日の光の照射時間(日長)及び炭酸ガス濃度が制御される。そこで、実際にサラダ菜に対して、種々の環境条件の組み合わせのもとで、光合成、呼吸及び蒸散を測定した。光合成速度(P)と呼吸速度(R)の温

度、炭酸ガス濃度及び日長依存性測定データを図6～8に示す。図6には、1日の実効的な積算光合成量($P_T - R_T$)の温度依存性も示されている。図7は光合成の炭酸ガス依存性を示すものであるが、日長(L)が12時間と24時間の二つの場合を示し、更に24時間の場合は光合成速度(単位時間当たりの光合成量)の絶対値もプロットした。日長が長くなると炭酸ガス施肥の最適濃度が低下する。日長に対する光合成速度、呼吸速度及びそれらの積算値を示したデータが図8である。日長とともに P 、 R は減少するが、光合成の積算値 P_T は増大している。以上のデータに基づいて、光合成すなわち植物の乾物生産の環境依存性が定量的にとらえられ、後述する重量の環境依存性ととも、実際の環境制御を行なう場合の基礎となる。

サラダ菜に対して系統的なデータをとったのは初めてであ

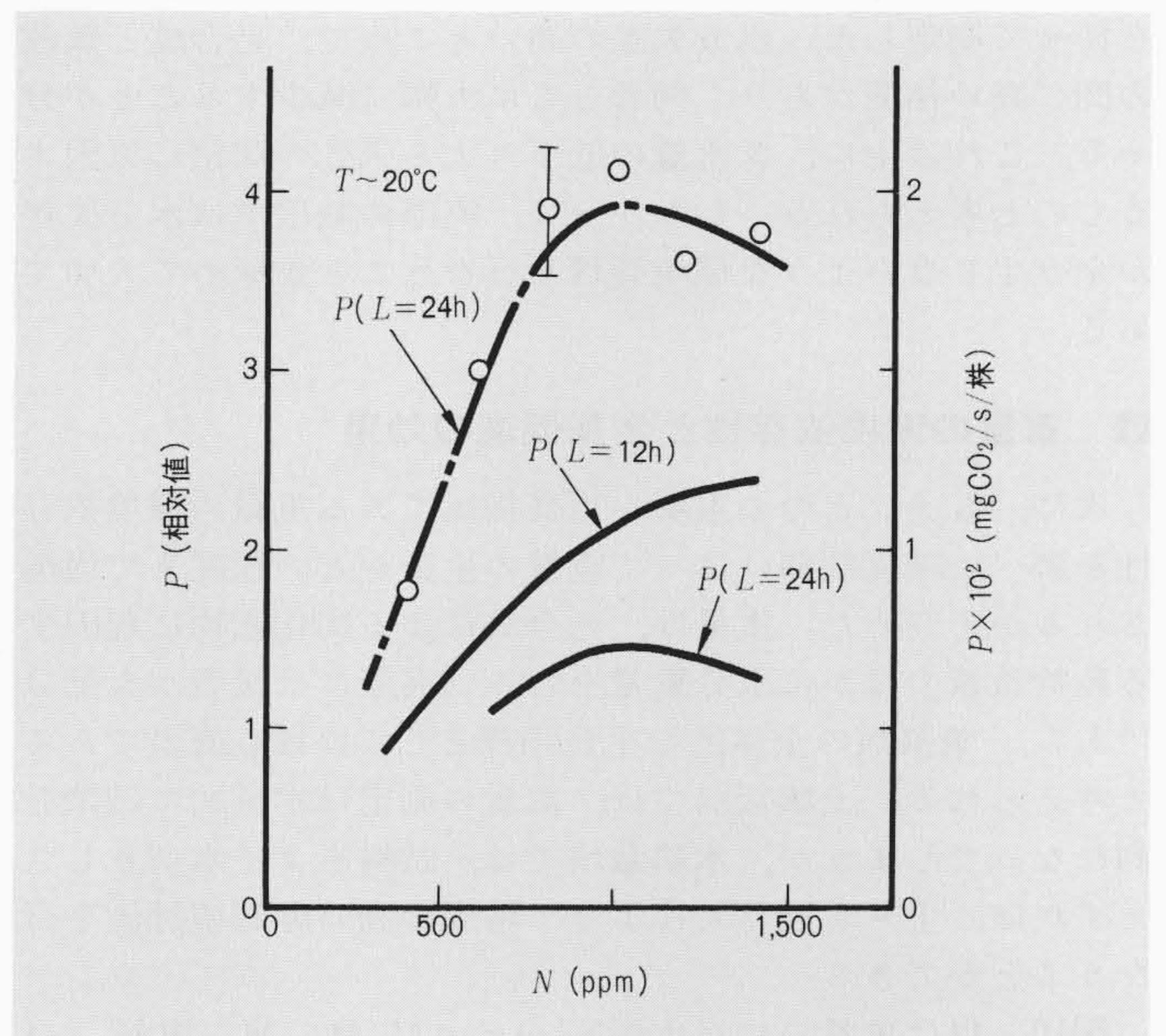


図7 サラダ菜の光合成速度(P)の炭酸ガス濃度(N)依存性 図中の L は日長を示す。破線は絶対値を示す。

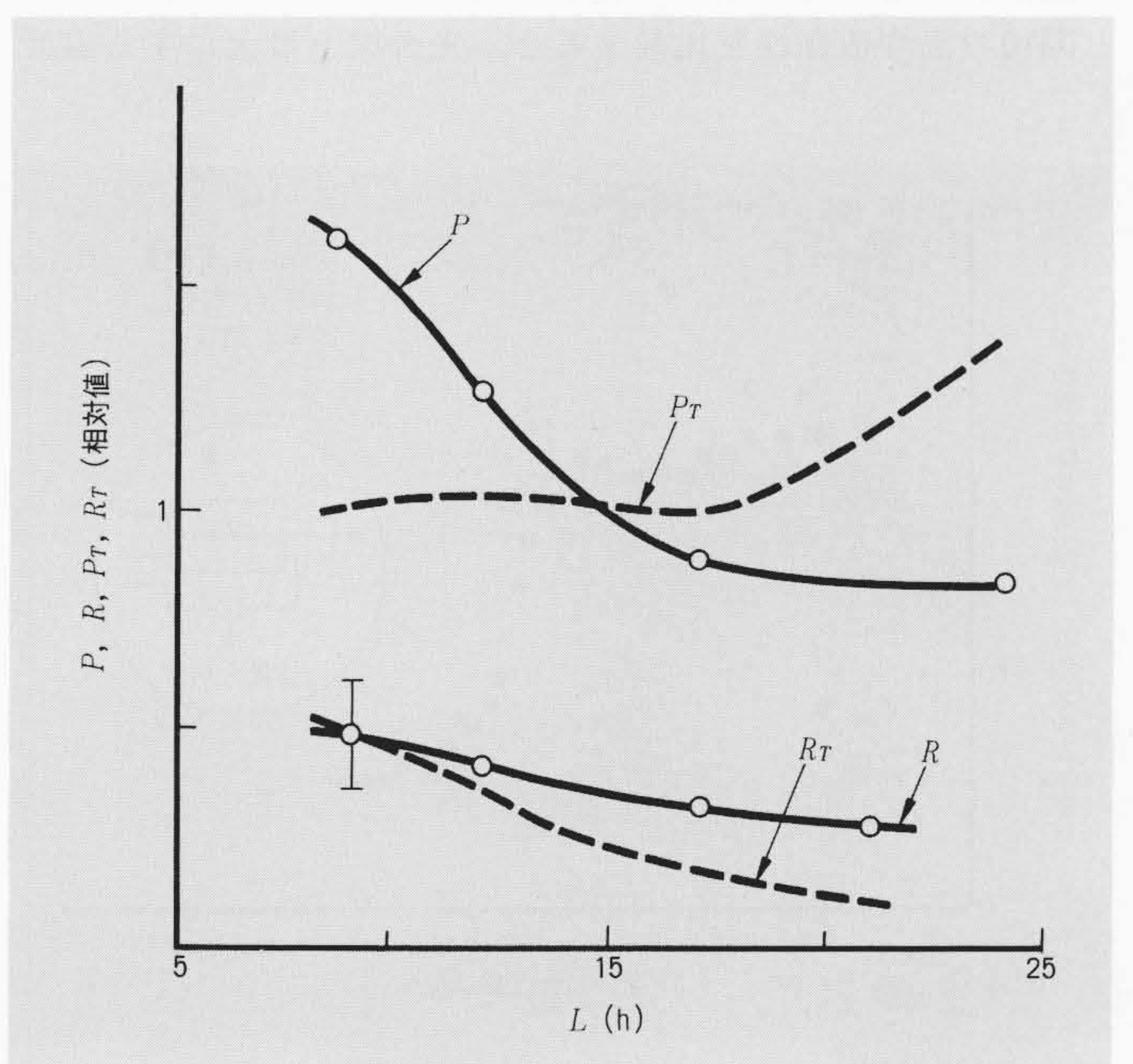


図8 サラダ菜の光合成速度(P)と呼吸速度(R)の日長(L)依存性
1日の光合成速度の積算値(P_T)と呼吸速度の積算値(R_T)も示してある。

るが、原理的には、蒸散の微小部測定を除き、従来の個々のガス分析計によっても同様のデータを得ることは可能である。そこで、質量分析計の特長を出した一つの測定例として、光合成と蒸散の同時測定の結果を示す。図9は、サラダ菜の光合成速度と蒸散速度 E を、葉の水分欠差の関数として求めたものである。ただし水分欠差は、

$$\text{水分欠差}(\%) = \frac{W_0 - W_t}{W_0 - W} \times 100 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに W_0 : 水分が飽和している状態の葉の重量

W_t : ある時刻での葉の重量

W : 葉の乾物重量(水分がゼロ)

によって定義される。この量は環境状態の履歴によって大幅に変わり、水分欠乏による植物の代謝機能の低下を示す重要な指標である。図9は1枚の葉の裏面に対する結果を示すもので、同図の円内に示すようなリーフチェンバ(葉の同化箱)を使って測定した。水分欠差の高いところで、光合成と蒸散の間に高い相関があり、両者ともに大幅に減少することが分かる。これは主に、含水量の低下による気孔の閉鎖に原因するものと考えられる。したがって、実際の栽培では水分欠差が余り生じないような環境管理を行なうことが極めて大切である。

4 重量の環境依存性と生長促進の効果

次に、もうひとつの重要な生長指標である重量の環境依存性を調べ、環境制御によって重量の生長がどの程度まで促進されるかを究めた。重量は、光合成による同化産物に起因する乾物重量のほかに水分重量を含み(実際には後者が大部分である)、葉菜類の全体的な生長指標としては最も適当であると考えられる。土壌栽培では、重量の測定は本質的に破壊計測になってしまうが、水耕栽培では、試料をよく水切りしさえすれば、上ざら天びんによって精度の高い非破壊計測を行なうことができる。

図10、11は重量の相対生長率 $r(=\Delta M/M, M$: 重量, ΔM : 1日の重量の増分)と含水率 $w(=M/W-1)$ の温度と日長に対する依存性を示したものである。光合成に関する図6と図8に対応しているが、定量的にやや異なっている。図6と図10の温度依存性を比較すると、光合成を最大にする温度

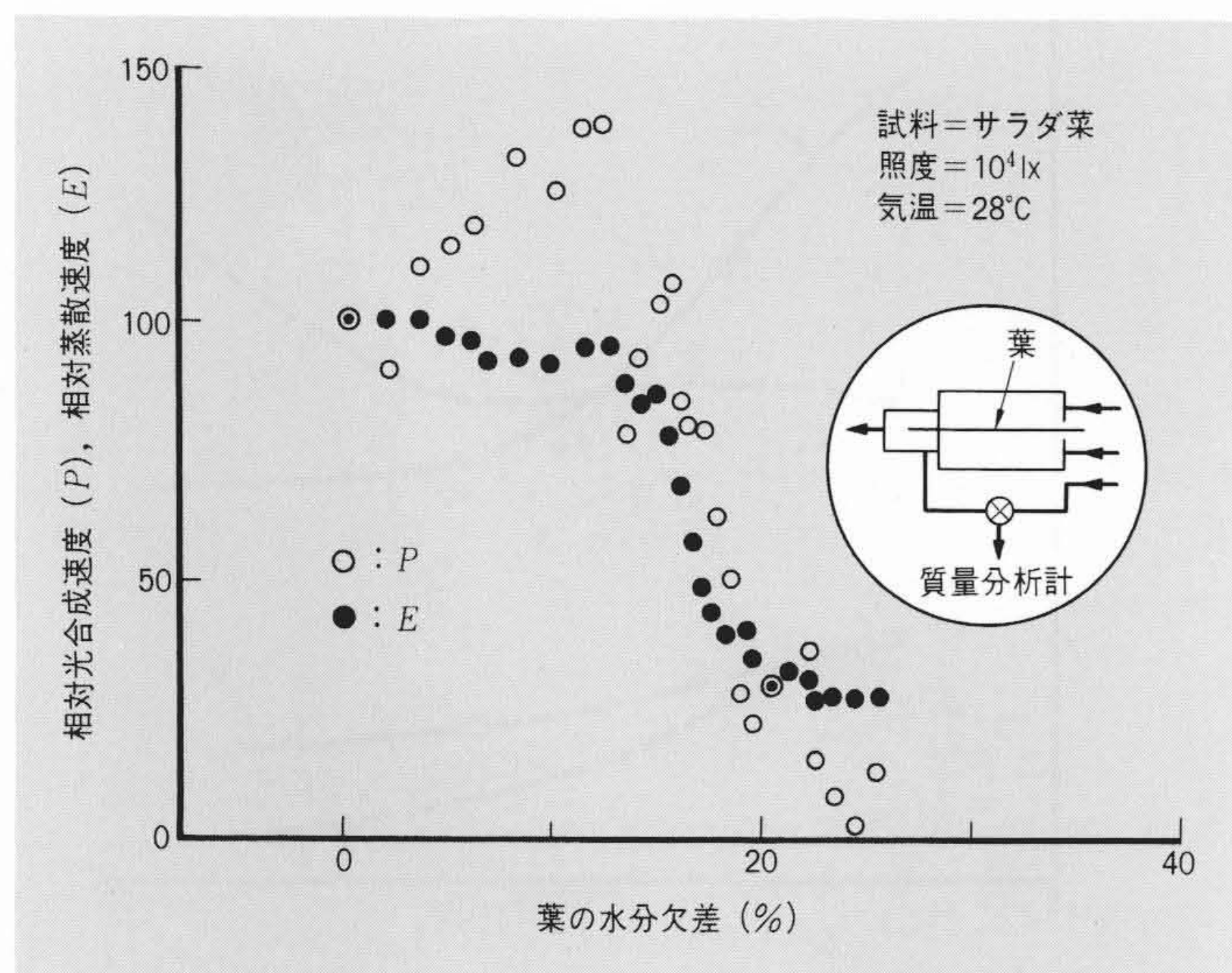


図9 質量分析計による光合成速度と蒸散速度の同時測定例(サラダ菜) 円内はリーフチェンバ(葉の同化箱)による測定方法である。矢印は空気の流れ方向を示す。

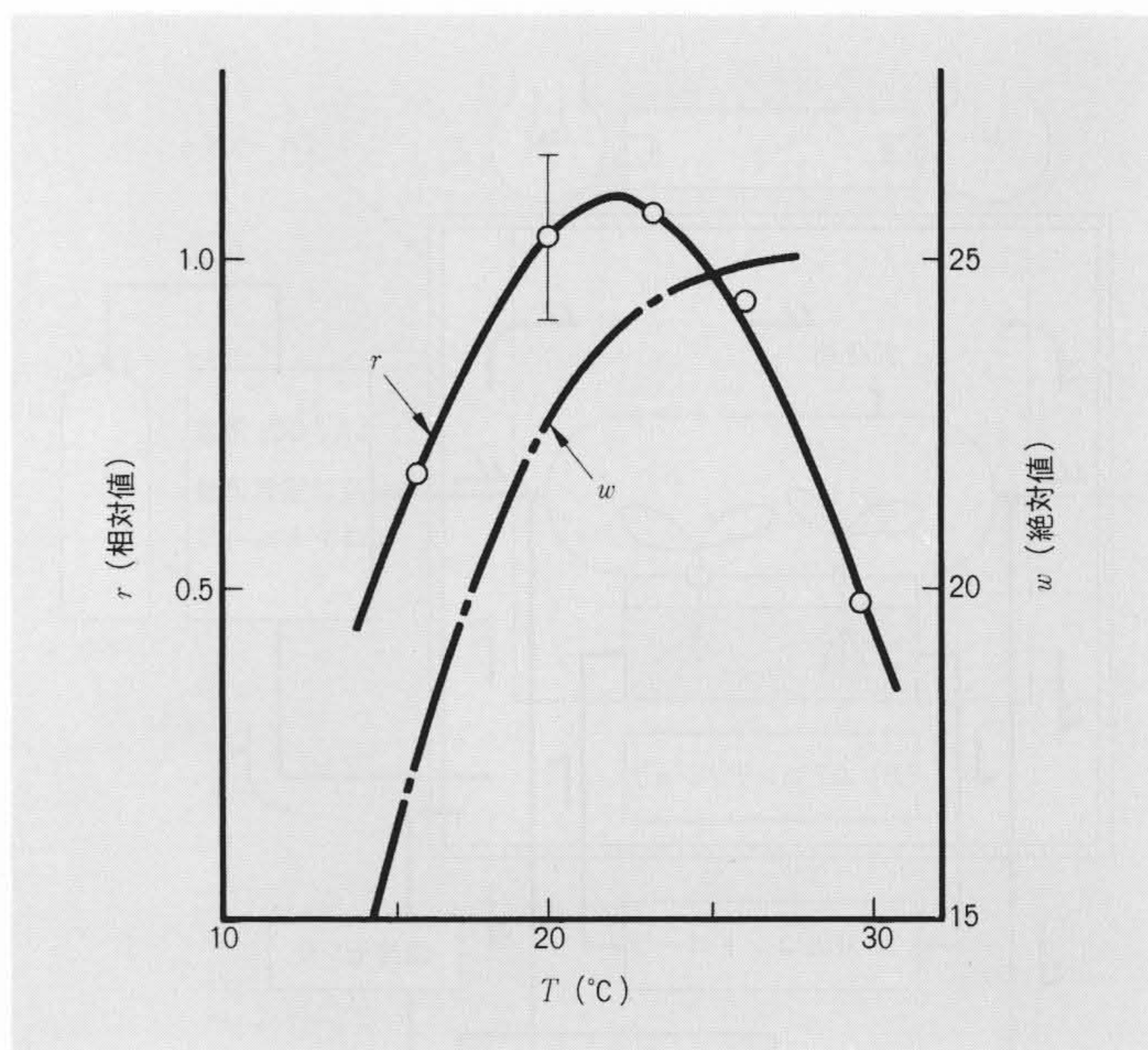


図10 サラダ菜の相対生長率(r)の温度依存性 含水率(w)についても示してある。

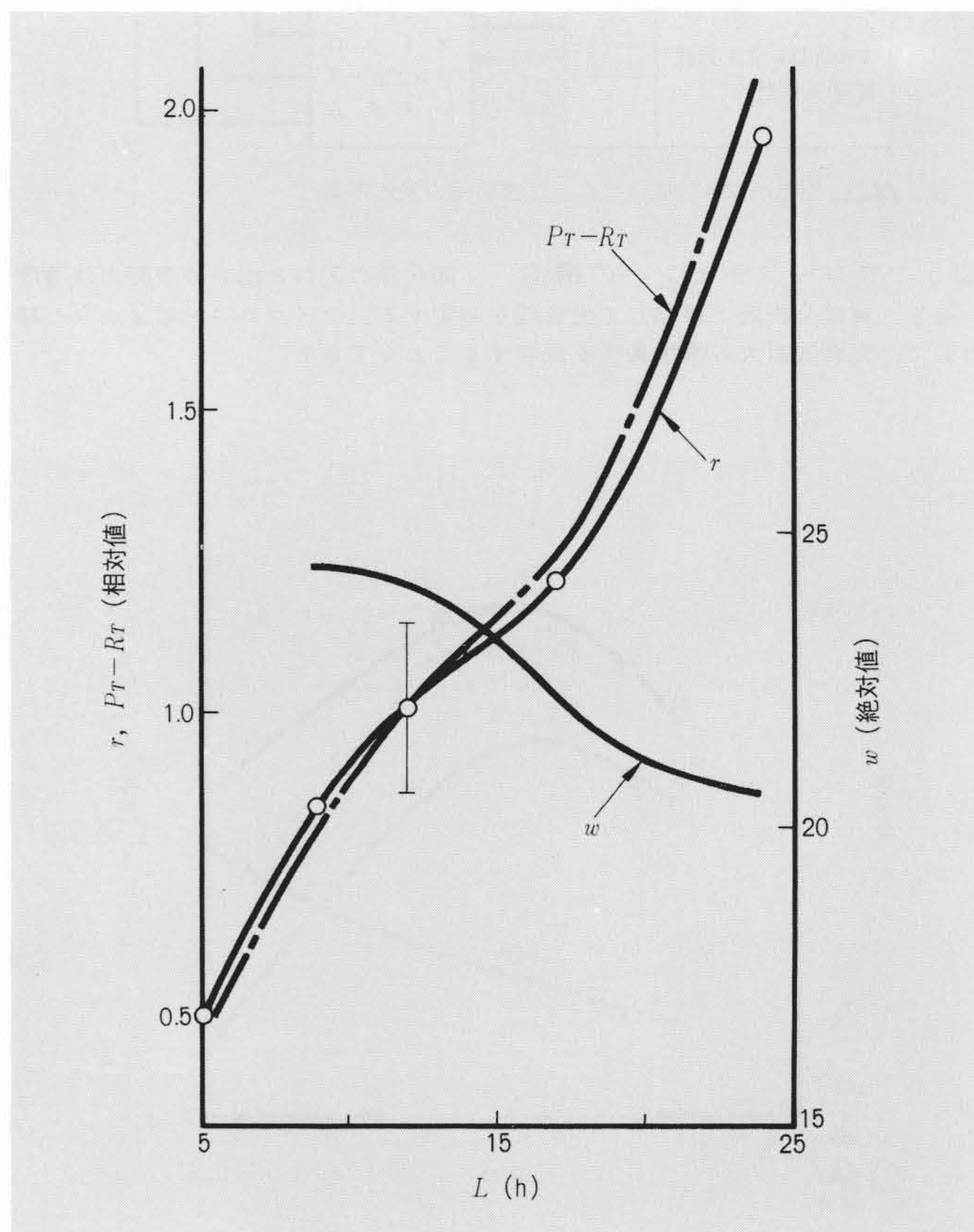


図11 サラダ菜の相対生長率(r)の日長依存性 1日の実効的な積算光合成量($P_T - R_T$)と含水率(w)についても示してある。

は20°Cであるのに対し、重量の生長を最大にする温度は22°Cである。どちらの温度を最適気温とするかの判断は一般に難しいが、サラダ菜の場合では、気温が22°C以上になるとやや徒長的になる。これは図10に示したように、温度が上がると含水率が増大することと関係している。図11には r のほかに、図8からとった1日の実効的な光合成量($P_T - R_T$)の日長依存性も合わせて示してある。日長が増大すると両者も大きくなるが、 r の増え方がより低い。これは含水率が低下するた

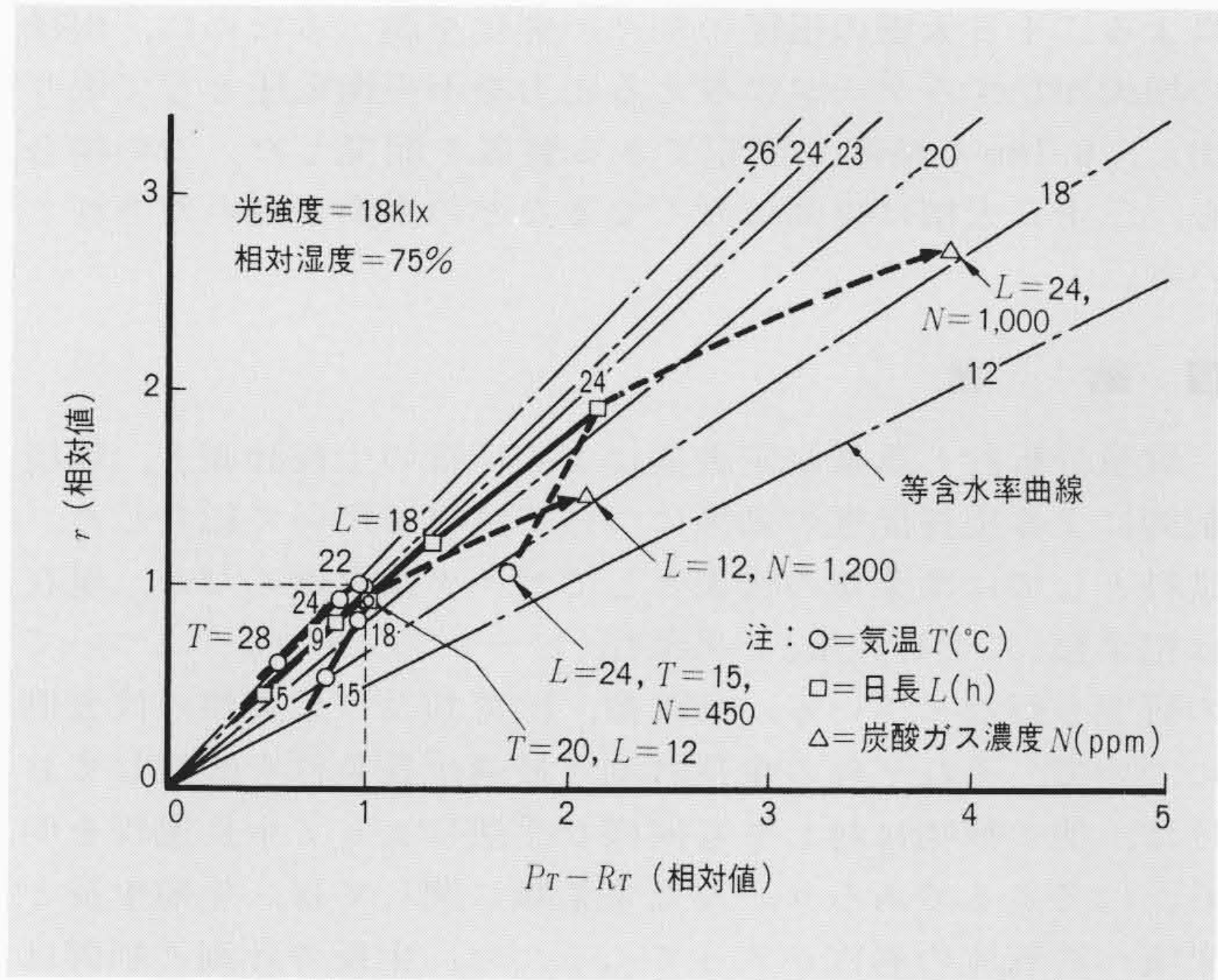


図12 サラダ菜の総合的な生長評価 相対生長率と1日の実効的な積算光合成速度の関係が、気温、日長及び炭酸ガス濃度をパラメータとして描かれている。

めである。以上の結果に基づき、光合成と相対生長率の環境依存性を一つのグラフにまとめて示したものが図12である。これは約50gの重量のサラダ菜に対して得られた結果を示すものであるが、ひとつの総合的な生長評価を与えている。いろいろな野菜に対してこの種のグラフが得られれば、現実の施設園芸や将来の植物工場での環境制御に対して、有力な指針が与えられるものと考ええる。

ここで実際に、サラダ菜の生長促進の実験結果について述べる。上記3種類の環境量を2～3段階に変え、表1に与えた環境条件の組合せA、B、……、Fに対応して、サラダ菜が25gから200gまでに生長する経時変化を図13に示した。まず気温の効果であるが、D、E、Fの比較によって、光合成の最適温度20℃に設定すれば、6℃の温度偏差の範囲で、生長日数を5日～15日も短縮できることが分かる（液温は気温に等しくとった）。次に炭酸ガス施肥の効果は、CとDの比較により、2.5倍の濃度の施肥に対して7日程度生長が早まる。ここでは示していないが、炭酸ガス施肥単独の効果は濃度1,500ppm近くまで見られた。空気中の炭酸ガス濃度が300ppmであるから、約5倍の施肥まで有効である。はなはだしいのは日長の効果で、24時間照射を続けて夜間をなくすと、生長は約10日も早まる（BとDの比較）。サラダ菜の場合、24時間照射を続けても形態には目立った変化は見られない。栄養生長だけを考えれば、夜間は不要のように思われる。最後にAは、日長24時間、炭酸ガス施肥1,000ppmという極限的な場合であるが、サラダ菜はわずか8日で25gから200gにまで生長する。普通の露地栽培では、天候などの条件によっても異なるが、平均的に1箇月半ほどかかるとして、約6倍の生長促進を見たことになる。このように、温度、炭酸ガス及び日長という比較的制御しやすい条件の適当な管理によって、かなり大幅な促成栽培が可能になることが理解されるであろう。

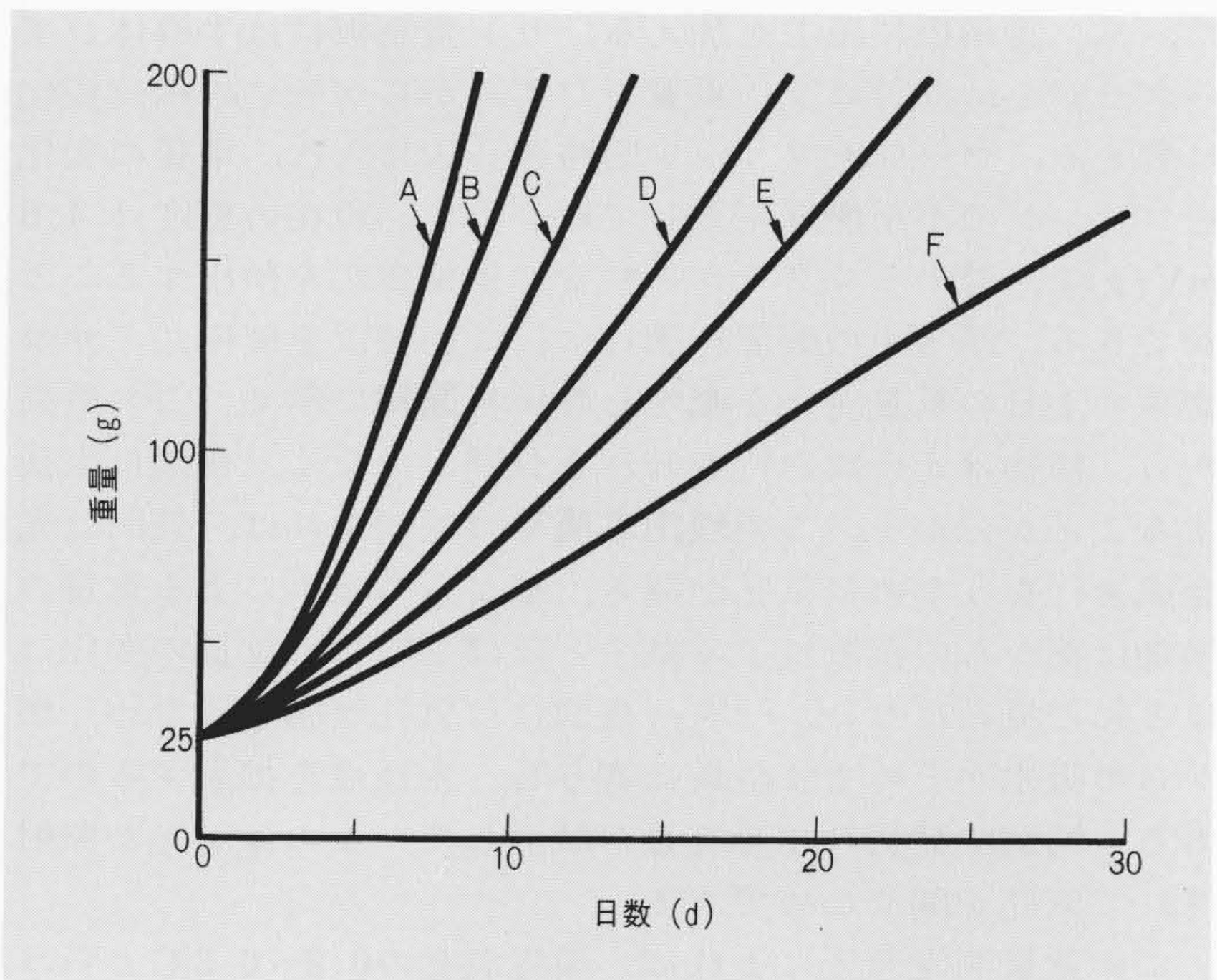


図13 各種環境条件の組合せ(表1参照)に対するサラダ菜の生長曲線 露地栽培では平均的にほぼFの生長曲線が妥当する。Aの条件下では25gから200gにわずか8日で到達し、6倍程度の生長促進が見られる。

表1 サラダ菜の生長実験における環境条件の各種の組合せ 表中のA、B、……、Fに対応する生長曲線は図13に示される。

環境	組合せ	A	B	C	D	E	F
日 長 (h)		24		12			
CO ₂ 濃度 (ppm)		1,000	450	1,200	450		
気温=液温 (°C)		20				26	14
相 対 湿 度 (%)		80～85					
照 度 (klx)		18					
養液の電気伝導度(mS/cm)		1.1～1.3					
養液のpH		5.8～6.8					

5 重量の連続測定装置

水耕栽培の場合、上ざら天びんによって重量を非破壊的に測定できることを前述したが、これでは測定の際、植物をいちいち引き出すために不連続測定になる。したがって、微妙な環境条件の変化が生長にどのような影響を及ぼすかを知ることが難しい。更に操作が面倒であるばかりでなく、自動的なデータの集積ができない。そこで半導体ひずみゲージを利用した重量の連続測定装置を開発した。

測定の原理は、重量をひずみに変換し、ひずみゲージによって電気量に変えて測定するもので、図14に示すとおりである。植物の重量は、てこの右端に取り付けた金属円板を介し

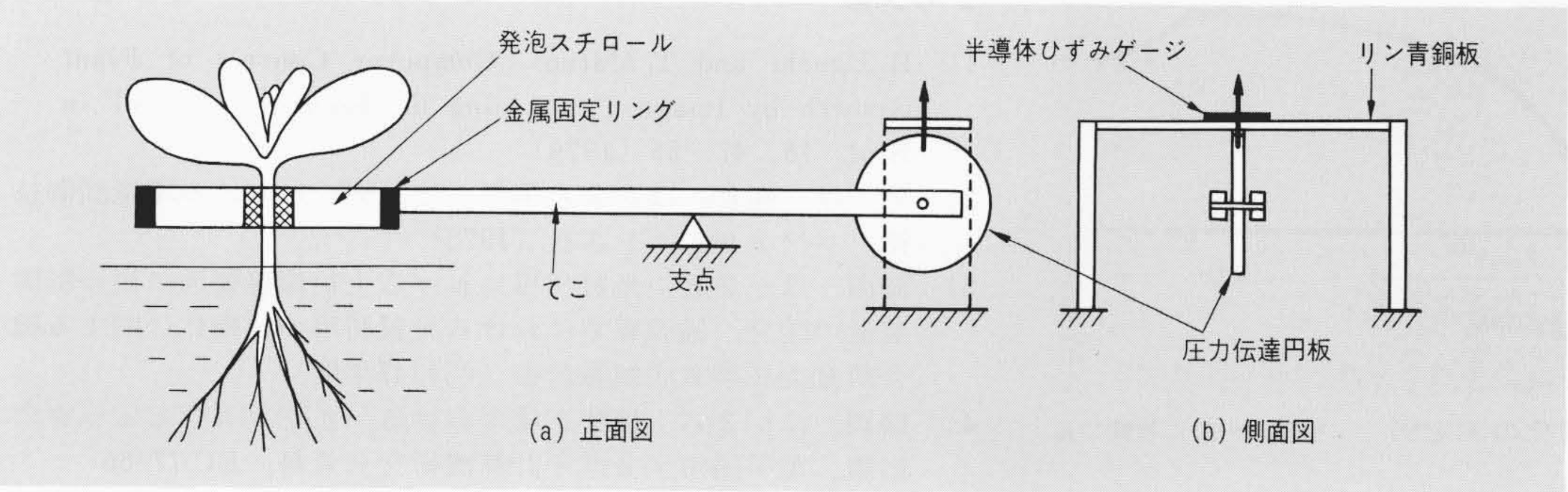


図14 植物重量の非破壊・連続測定の原理 重量の変化は半導体ひずみゲージの抵抗変化に変えられ、ゲージを一辺とするブリッジ回路の不均衡電圧として取り出す。

て、リン青銅板に圧力を加える。リン青銅板には半導体ひずみゲージをはり付けて、重量をひずみからゲージの抵抗変化に変える。ゲージをブリッジ回路の一边に入れ、重量の変化をブリッジの不平衡電圧として取り出す。現在の感度は 4.6 mV/g で、数十ミリグラムの精度で重量変化を検出することができる。測定中の装置を図15に、この装置を使用してサラダ菜の1日の重量変化を測定した例を図16に示す。この結果から、植物は光合成の行なわれる昼間ではなく、夜間に生長することが分かる。この理由を簡単に説明すれば、昼間は光合成を行なうために気孔が開き、根からの吸水による重量の増加は葉からの蒸散による減少とほぼ平均し、重量の変化はほとんど見られない。一方、夜間には気孔が閉じるため、根からの吸水がそのまま生長に寄与し、生長点を拡大するのである。同図で翌朝にやや重量が減少しているのは、光が照射されて気孔が開くためである。

この重量測定装置によれば、環境温度の $0.2 \sim 0.3^\circ\text{C}$ という小さな変化により、重量の変化に及ぼす微妙な効果が観測される。簡単な操作によって実験が行なえるので、温度だけでなく、他の環境量が生長に及ぼす効果も明らかにすることができるであろう。また重量だけでなく、他の連続・非破壊測定のための難しい生長指標、例えば根菜類の根の直径などは、同様の原理によって測定が可能である。日立製作所は、水耕栽培

による二十日大根の根径の刻々の変化を調べるために、根径の増大がひずみゲージに与える圧力を不平衡電圧として取り出し、 0.1mm の精度で測定できる装置を開発した。この場合も、二十日大根は夜間に太くなるなどの事実が見いだされている。

6 結 言

質量分析計と重量測定装置による植物の生長計測と、環境制御による生長促進の効果について試料を用いて紹介した。試料としては葉菜類の代表としてサラダ菜を選んだが、現在は根菜類(二十日大根)と果菜類(ピーマン、メロン)についての研究も行なっている。葉菜類、根菜類及び果菜類の代表例について、それぞれの生長計測と最適生長条件を確立しておけば、他の植物に対しても同様な手法によって生長過程を明らかにできるであろう。ただ果菜類に関しては、生殖生長と果実への転流の過程が入ってくるため、生長の計測と制御ははるかに難しい問題となり、長期的な研究が必要となるものとする。このようにして代表的な野菜の最適環境条件が明らかになれば、あとは栽培ハウス内の諸環境を考慮しながら、最も生産コストに合った環境制御の範囲が設定され、マイクロコンピュータによってプログラム制御を行えばよいことになる。

この研究の成果を施設園芸や植物工場など、フィールドへの適用の実際研究は今後の課題であるが、いま述べたように、環境制御方式の決定とマイクロコンピュータの活用がキーポイントになる。最近、前者に関しては、与えられた日射量を基準として他の環境量を制御する、いわゆる複合環境制御が話題になっている³⁾。しかし植物の生長は過去の環境ばかりでなく、未来の環境によっても影響されることは言うまでもない。そこで生長の最適化のためには、翌日の天候の予測による一種の予測制御が必要になるものと思われる。日立製作所ではこの方向で、新しい制御方式の提案を考えている。また後者に関しては、マイクロコンピュータの一つの利用法として、光合成を最大にする環境条件を計算させる「山登り法」を試み、サラダ菜の最適温度が 20°C 近辺にあることの確認を2時間以内に行なった(図5)⁴⁾。

完全な周年栽培、収量増大、自動化・省力化栽培及び新しい流通経路による販売を目指す植物工場の実現のためには、以上のほかに解決しなければならない技術課題が数多くある。食糧問題という大きな課題に対処するには、基礎的な課題から一歩一歩着実に解決していくことが大切である。

最後に、この研究に対して絶えず御指導をいただいている、東京大学農学部農学博士立花一雄教授及び農林省野菜試験場農学博士高橋和彦室長に対し深く感謝する。なお、この研究は通商産業省重要技術研究開発費補助金の交付を受けて実施したものであることを付記する。

参考文献

- 1) H. Eguchi and T. Matsui: Computer Control of Plant Growth by Image Processing III, Environ. Control in Biol. 16, 47~55 (1978)
- 2) 例えば、高倉、ほか3名編集:施設園芸における環境制御技術、ソフトサイエンス社(1975)
- 3) 関山、ほか3名:光質利用における生物環境要因の複合制御装置の開発、施設農業における光質利用の技術化に関する総合研究委託事業成績報告書(昭和47年度)
- 4) 鶴岡、ほか2名:植物工場におけるマイクロコンピュータの応用、電子通信学会電子計算機研究会資料、EC 77-56



図15 植物の重量連続測定装置 試料に二十日大根を用いている状況を示す。

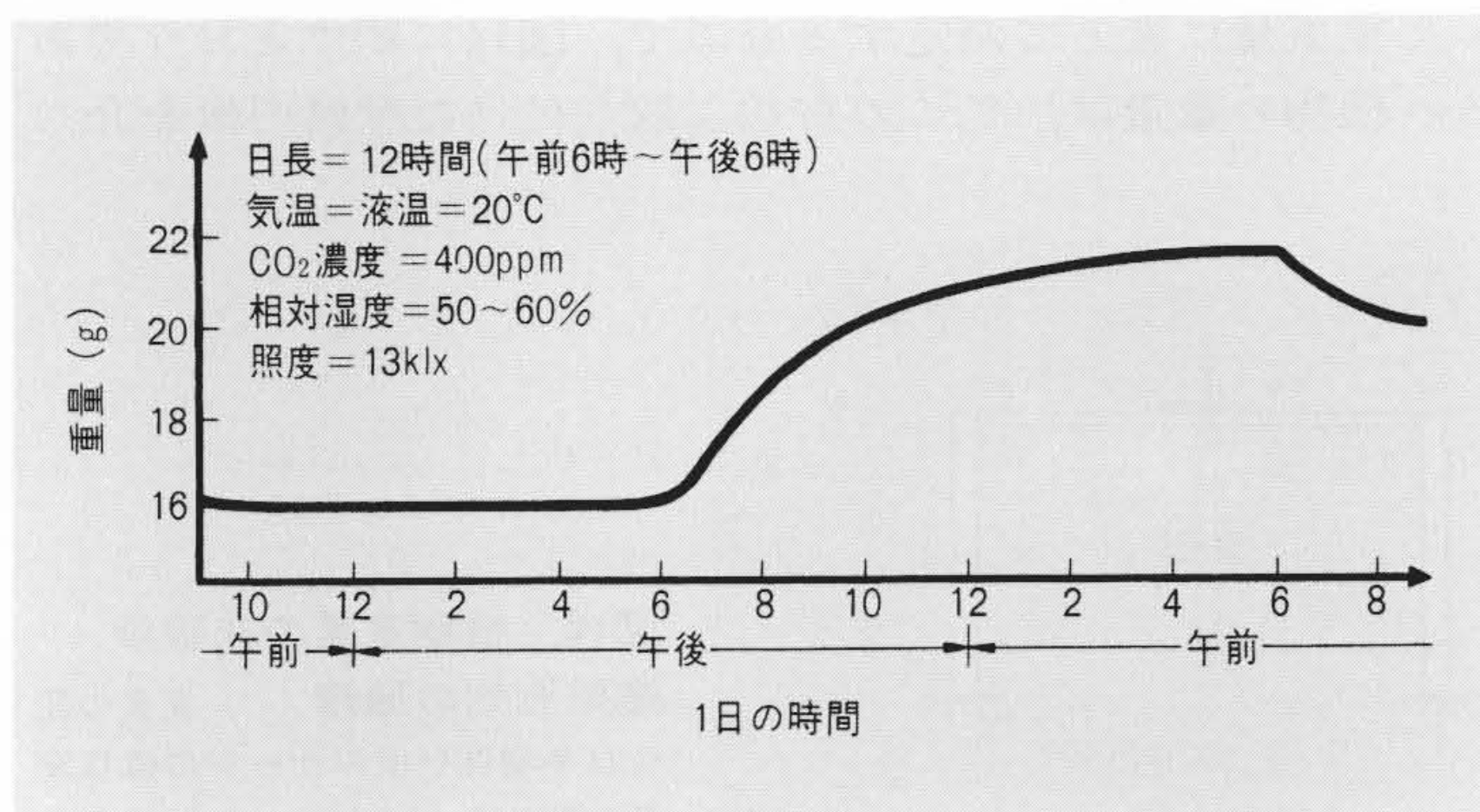


図16 サラダ菜の1日の重量変化の測定例 植物は一般に夜間に生長することが分かる。