U.D.C. 581.11/.14.087:〔635.52+635.649〕

植物生長の計測と定量評価

Measurement and Quantitative Estimation of Plant Growth

金子忠男* *Tadao Kaneko*
高辻正基** *Masamoto Takatsuji*

最近，施設園芸の生産方式の見直しや野菜工場という新しい生産方式の実現がクローズアップされ，環境制御による植物の生長の定量的な評価が基本的に重要な技術課題となっている。そこで日立製作所では，葉菜類の代表としてサラダ菜を，果菜類の代表としてピーマンを試料として，光合成，生重量，生体電位，転流などの生長指標に対する非破壊的な計測手法及び計測器を開発し，総合的な生長評価を行なった。質量分析計と安定同位体$^{13}CO_2$により光合成や転流が，また特殊な銀電極により生体電位が調べられる。サラダ菜については，温度，日照時間，炭酸ガスなどの主要環境条件に対する生長の定量化をほぼ達成し，ピーマンについては，播種から着果までで約2倍，果実の肥大時で2～3倍の生長促進を得た。また，品質も改善されることが分かった。

1 緒　言

我が国の施設園芸は，現在世界一の施設面積をもち，主要な野菜はいつでもどこかで生産されており，野菜の自給率もほぼ100%に近い。このような状況下でも，野菜工場に関心が高まり，研究開発が進められている。これは，本当の意味の農業の工業化を達成することにより，新鮮，高品質で無農薬の野菜を天候に左右されずに周年供給できる可能性があるからである。ハウス栽培では大量の農薬を使用するし，高温の夏場の栽培は難しい。生産地が遠隔化していることもあり，品質が問題になる。労働環境が悪く，栽培者にハウス病が発生している。これらの問題点は野菜工場では解決される。野菜工場の場合のように，生産プロセスを規格化，連続化して真の工業化を達成するためには，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り，作物の成長プロセスを定量化し，最も採算に合った環境管理の方法を見いだすことが重要となる。すなわち，施設費の値上りが若干あっても，それ以上の生産性の向上を実現しようという考え方である。

このような観点から，日立製作所では，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，植物のしかるべき生長指標を測定するための計測器及び計測手法を開発し，生長特性と環境との関係の定量的なデータ[1)]を集積して，野菜工場の実用化のための基礎検討を行なってきた。この論文では，葉菜類及び果菜類の代表としてそれぞれ取り上げたサラダ菜とピーマン(いずれも水耕栽培)を試料として行なった総合的な生長評価に関する実験結果について報告する。

2 葉菜類の生長評価

2.1 工場生産における葉菜類の特徴

野菜工場で工場生産をするという立場から見た葉菜類の一般的な特徴としては，次のことが挙げられる。(1) 小形で生長速度が大きく，収穫までに要する日数が短く，取扱いやすい。(2) 光合成による物質生産の段階である栄養生長期だけを対象とすればよく，生長がよくそろい収穫が容易である。(3) 植物体全体に対する可食部分の割合が大きい。(4) 光合成速度が飽和する光強度(光飽和点)が低く，20klx以下の比較的弱い光強度で正常な生長が期待でき，人工照明栽培に適している。**図1**に代表的な葉菜類(レタスとホウレン草)及び果菜類(トマトとキュウリ)の光合成速度と光強度の関係を示す[2)]。

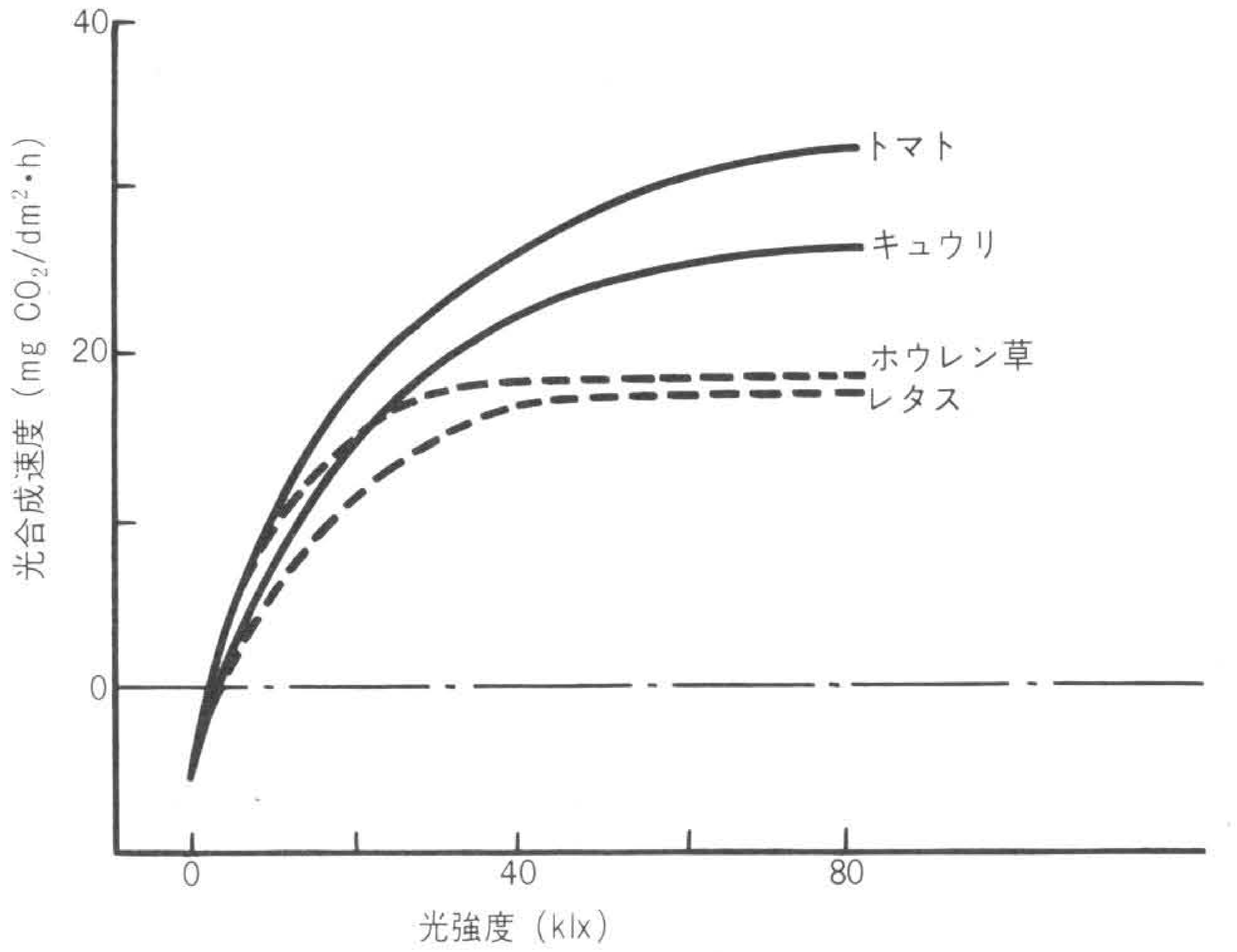

図1　代表的な野菜の光合成速度と光強度の関係(同化曲線)
果菜類(トマト，キュウリ)では光強度が60～70klxで光合成速度が飽和するが，葉菜類(レタス，ホウレン草)では30～40klxと果菜の約半分であり，それだけ弱い光で栽培することができる。

トマトの70klxに対しホウレン草は30klxに光飽和点が見られ，トマトのように強い光を必要としないことが分かる。葉菜類の代表として実験試料に選んだサラダ菜は，生食用として鮮度，荷傷みが問題であり，栽培地として都市近郊地ほど有利とされている。工場生産により，清浄野菜としての価値が発揮されるものの一つである。**図2**に人工環境条件下で約60gに生長中のサラダ菜を示す。

2.2 生長指標と計測方法

植物は光合成により，炭酸ガスと水から炭水化物を作る(同化作用)。一方，呼吸により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り炭水化物

* 日立製作所中央研究所　** 日立製作所中央研究所 理学博士

図2 人工環境条件下で栽培中のサラダ菜 光源にランプを使用した完全な人工環境下で，株当たり約60gに生育中のサラダ菜を示す。

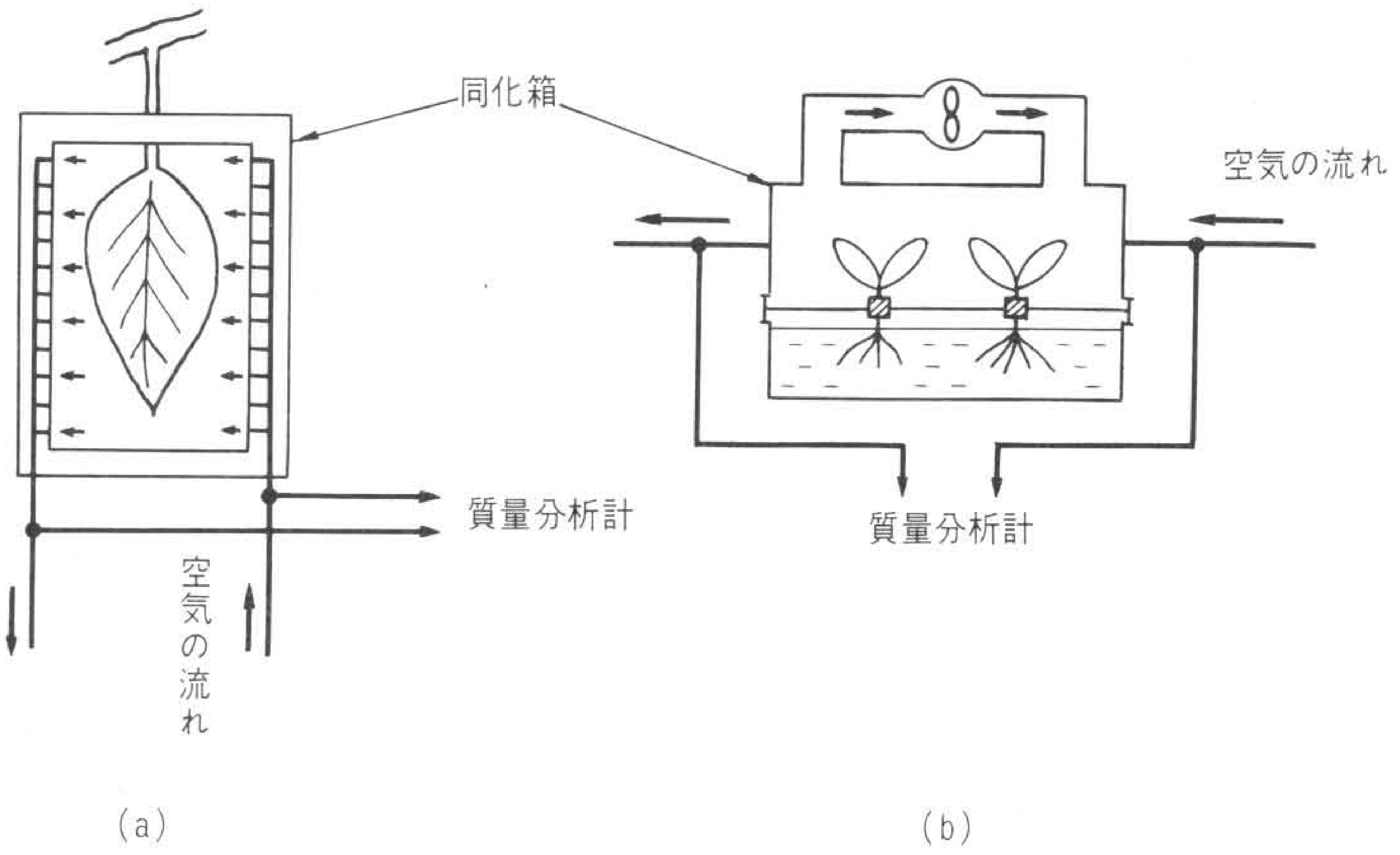

図3 光合成及び呼吸の測定原理 (a)は葉1枚を対象とした方法であり，(b)は株全体を対象としたものである。同様の考え方で，葉の一部分に対する測定も可能である。いずれの場合も，同化箱内の空気組成の均一化が大切である。

の他の器官への移動(転流)が起こり，生長が実現される。

更に，植物体の重量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，葉の気孔を通じ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，吸水及び蒸散に伴って，炭酸ガス，酸素及び水分の出入りがある。植物体は，このような炭酸ガスと水分の出入りを基にして得られる乾物と水分から構成されている。この乾物と水分の両者を関連づけて，生長を総合的に評価するため，**表1**に示す生長指標を採用した。光合成量と呼吸量との差から体内に蓄積された炭水化物の量が分かり，生重量と含水率(水分重と乾物重の比)から水分量が分かる。

図3に，葉1枚[3]及び株全体の光合成速度と呼吸速度の測定原理を示す。光合成速度と呼吸速度は同図の同化箱の出入口の炭酸ガスの濃度差を質量分析計[1]により測定して求めることができる。**図4**に，葉の同化箱〔**図3(a)**〕を用いて測定したサラダ菜の葉1枚の光合成速度と水分含量及び気孔の開度との関係を示す。ⓑ点では含水率の低下のため気孔はほとんど閉じており，この状態で光合成速度がほぼゼロであるという測定結果が裏付けられている。気孔開度の測定は，光合成測定用の試料と同条件の試料を4枚用意し，光合成の測定と同時に行なったものである。

表1 生長指標の選定と指標の計測器及び計測方法 葉菜類に対しては，植物体全体の乾物と水分を関連づける指標を選定した。果菜類に対しては，着果から果実の肥大，成熟までの1周期を評価することを目的とした。

		光合成反応 →	生合成反応 →	植物体		
生長指標	葉菜類（サラダ菜）	光合成量 呼吸量		生重量（全重）	含水率	形態
	果菜類（ピーマン）	光合成量 呼吸量	生体電位 転流（葉→果実）	体積（果実）		
計測器・計測方法	葉菜類（サラダ菜）	質量分析計		半導体ひずみゲージてんびん	乾燥	観察
	果菜類（ピーマン）	質量分析計	電極装着 質量分析計（$^{13}CO_2$）	水浸法		

2.3 サラダ菜の生長評価

主要な環境条件である気温Ta，水耕液温Tw，日照時間L及び炭酸ガス濃度Nに対するサラダ菜の総合的な生長評価を行なうために，これらの環境条件と光合成速度，呼吸速度，生重量及び含水率の生長指標との関係に関する実験結果を3次元的に一つのグラフにまとめたのが**図5**である。三つの座標軸にそれぞれ1日当たりの生重量増加量ΔW，1日当たりの乾物重増加量ΔM及び含水率(その日の全水分重と全乾物重の比)Wcをとり，ΔW及びΔMは$Ta=Tw=20$℃，$L=12$ h，$N=400$ppmのときの値を基準として規格化した。同図中のⒹ点がこの基準値($\Delta W=\Delta M=1$，$Wc=23$)を示している。まずΔW，ΔM及びWcとTaとの関係では，$Ta=20$℃でΔMが，$Ta=22$℃でΔWが最大となるが，気温に関しては，生長促進効果よりむしろWcに対する影響が顕著である。Taの変化により，同じサラダ菜でも含水率の著しく異なる作物となることが分かる。次にLとの関係では，ΔWとΔM両指標はほぼ比例関係を保ちながらバランスよく生長し，$L=24$hで共に最大となり($\Delta W=1.8$，$\Delta M=2.1$)，Taの場合に比べて生長促進効果が大きい。

Twに関しては，ΔMはほとんど変化しないが，WcはTwの上昇とともに増大し，$Tw=26$℃で飽和値($Wc=26$)に達する。このようにTwにより含水率の調整が可能である。一方，Nとの関係では，生長促進効果及び含水率の変化共に顕著であり，$N=1{,}200$ppmで$\Delta W=1.4$，$\Delta M=2.6$，$Wc=16$となる。この効果は$N=1{,}500$ppmで飽和状態に近づく。ΔWとΔMの変化量がLの場合のような比例関係になく，ΔMのほうが大きいため作物は含水率の低い引き締まった状態となる。これらの主要環境条件の生長に対する効果を整理して**表2**に示す。同表には作物の生育形態への影響の観察結果も示してある。生育気温は，個葉ばかりでなく株全体の形状に大きな影響を与える。一方，日照時間の延長や炭酸ガスの施肥は形状への影響は小さく，葉色や葉の厚さへの影響が大きい。生長に対するこのような効果をもつ気温，液温，日照時間及び炭酸ガス濃度を適当に組み合わせることにより，生長速度ばかりでなく作物の含水状態，形態などをも制御することが

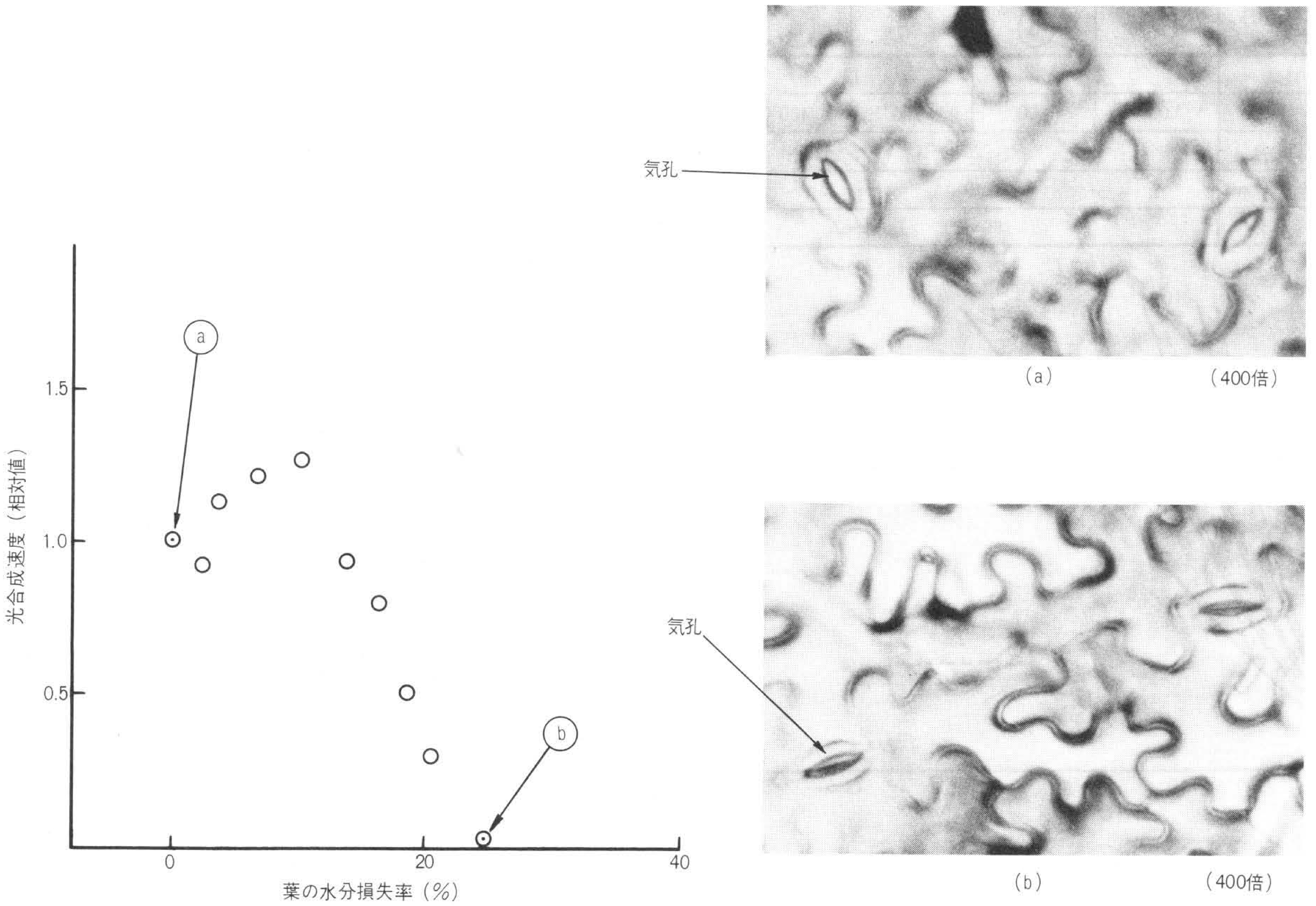

図 4　サラダ菜の個葉の光合成速度と気孔開度の関係　葉の水分損失率は，失われた水分量のⓐ点で含まれていた水分量に対する割合を意味する。ⓑ点では含水率の低下のため気孔が閉じ，光合成速度がゼロとなることが写真により裏付けられている。

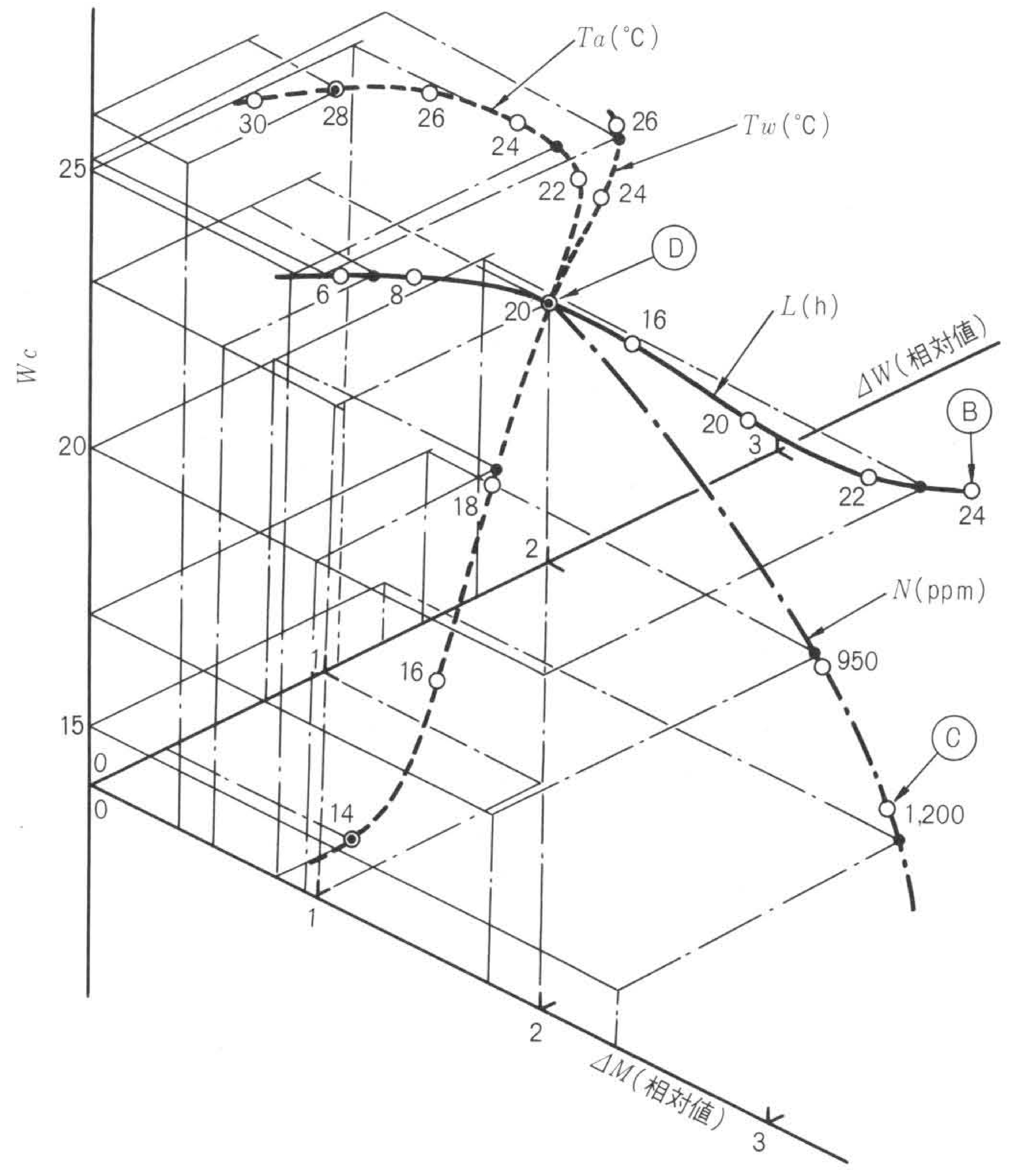

図 5　サラダ菜の総合的な生長評価　1日当たりの相対的な生重量増加量（ΔW），1日当たりの相対的な乾物重増加量（ΔM）及びその時点の含水率（Wc）の関係が，気温（Ta），液温（Tw），日照時間（L）及び炭酸ガス濃度（N）をパラメータとして描かれている。基準条件Ⓓは $Ta=Tw=20$℃，$L=12$h，$N=400$ppmである。

可能になる。

代表的な4種類の環境条件の組合せⒶ，Ⓑ，Ⓒ，Ⓓ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 6**（実線）に示す。炭酸ガスを1,200ppm施肥した場合の単独の生長促進効果はⒸとⒹの比較により6日間であり，24時間連続照射による日照時間単独の効果はⒷとⒹの比較により約8日間である。一方，炭酸ガスと日照時間を組み合わせた場合には，ⒶとⒹの比較から，約12日間の生長促進効果があり，25gから100gまでわずか8日間で生長することが分かる。**図 5**に示したサラダ菜の生長パターンは，50gの生重量のサラダ菜に対して得られた結果である。この関係を生重量が25gから200gまでの生長期間にそのまま適用して，Ⓐ，Ⓑ，Ⓒ各環境条件下での生長曲線を算出した結果が**図 6**に破線で示した

表 2　サラダ菜の総合的な生長評価のまとめ　生育気温は乾物よりも水分への影響が大きく，日照時間は乾物，水分両方に大きく影響するが，両者のバランスがとれている。炭酸ガス濃度は乾物への影響が顕著である。

項目 / 環境条件	生長促進効果			含水率変化域	形態変化		
	株全体	乾物	水分		株全体の形状	個　葉の形状	葉の色厚　さ
生育気温（℃）	小	小	大	14～26	変化大	大	小
日照時間（h）	大	大	大	21～24	小	小	大
CO_2濃度（ppm）	大	大	小	15～24	小	小	大

環境条件＼設定条件	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ
日照時間 (h)	24		12	
CO_2濃度 (ppm)	1,000	400	1,200	400
気温，液温 (℃)	20			
光強度 (klx)	18			
相対湿度 (%)	80～85			

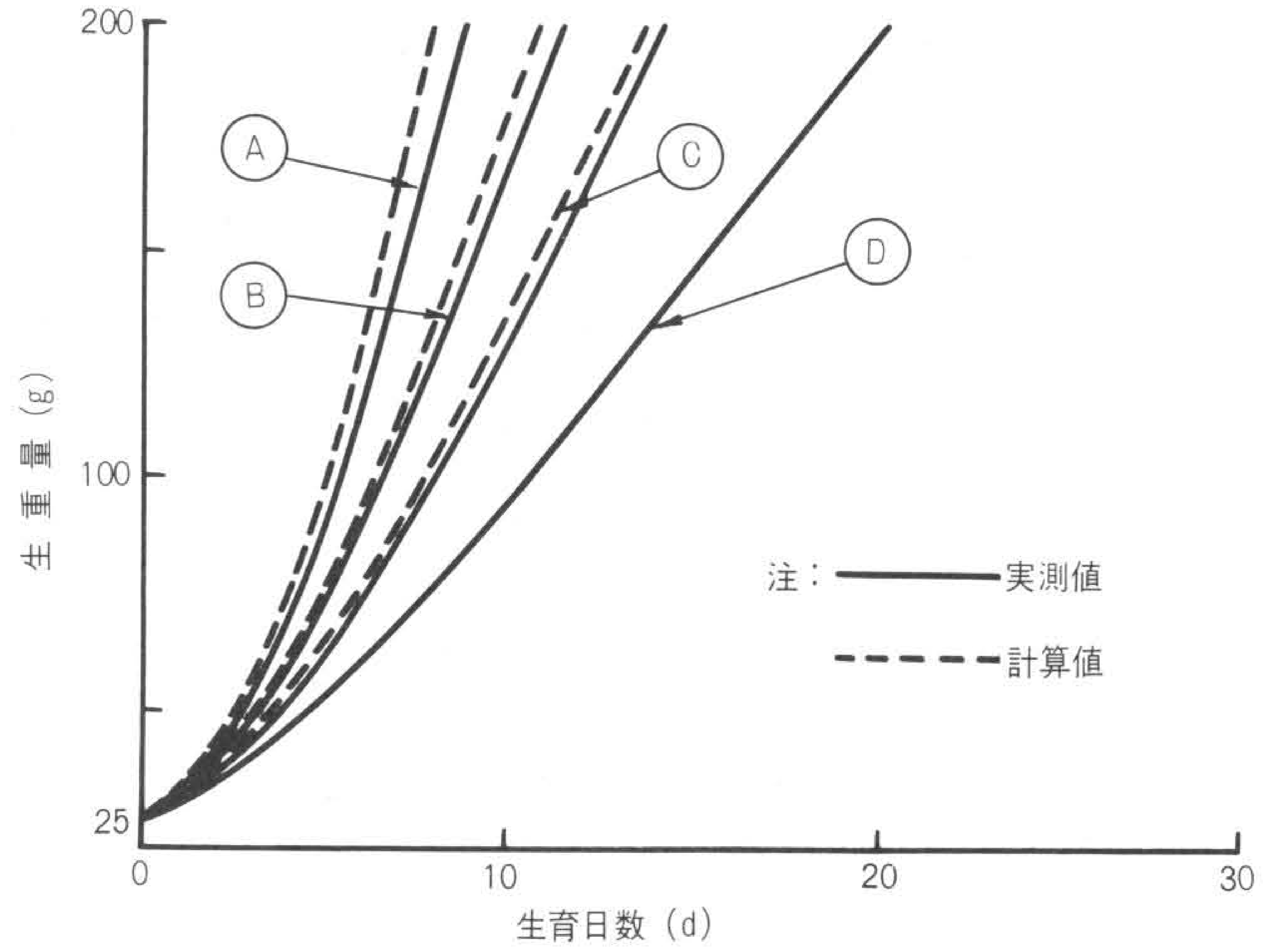

図6　種々の環境条件の組合せに対するサラダ菜の生長曲線　Ⓐの条件下では25gから200gまでわずか8日で到達する。破線で示した曲線は図5の結果(生重量＝50gでの評価)を25gから200gの期間にそのまま適用して，Ⓐ，Ⓑ，Ⓒ各条件での生長曲線を算出した結果である。図5の結果が広い生育範囲に適用できることが分かる。

曲線である。同じ条件の実測値に近い結果が得られたことから，**図5**の生長パターンが50gのサラダ菜だけでなく，かなり広い生育範囲の生長評価に適用できることが明らかとなった。

3　果菜類の生長評価

3.1　工場生産における果菜類の特徴

工場生産の立場から見た果菜類の一般的な特徴は，**2.1**で述べた葉菜類の特徴の裏返しと考えて差し支えない。**図1**に示したように，光飽和点はトマトで70klx，キュウリで60klxというように葉菜類の約2倍である。また，果菜類では栄養生長期と開花や結実の生殖生長期が共存しており，生長の解析がより複雑となる。生長評価方法としては，従来，株全体の一生の果実の総収穫量を指標とする方法や，播種時から一定期間の収穫量を対象とする方法などが用いられている。ここでは，開花後，ある果実が着果してから，その果実が肥大，成熟するまでの一定期間の果実の肥大速度を対象とした。上述のように，一般に強光を必要とする果菜類の中で，ピーマンは**図1**に示したレタスとほぼ同様な光飽和曲線をもち[2]，サラダ菜と同じ程度の光強度で正常な栽培が可能である。このため，果菜類の代表としてピーマンを実験試料に選んだ。

3.2　生長指標と計測方法

非破壊的な果実の生長指標は種々のものが考えられるが，生長の結果を表わすものとして果実の体積を，代謝に関連するものとして生体電位及び転流を取り上げた。これらの指標を整理して先の**表1**に示した。以下，これらの生長指標の計測方法及び代表的な測定結果について紹介する。

(1)　果実の体積

実験に使用したピーマン(品種は「秀翠」)の体積と重量の間には高い正の相関があり，体積を指標として生長評価ができる。果実の体積は**図7**に測定原理を示す水浸法により行なった。光合成測定用の同化箱と同様なチェンバを果実に取り付け，通常の生育時には空気ポンプにより適当な通気量で通気を行ない，体積測定時だけチェンバ内を水で満たし，水の重量変化から体積を算出する。

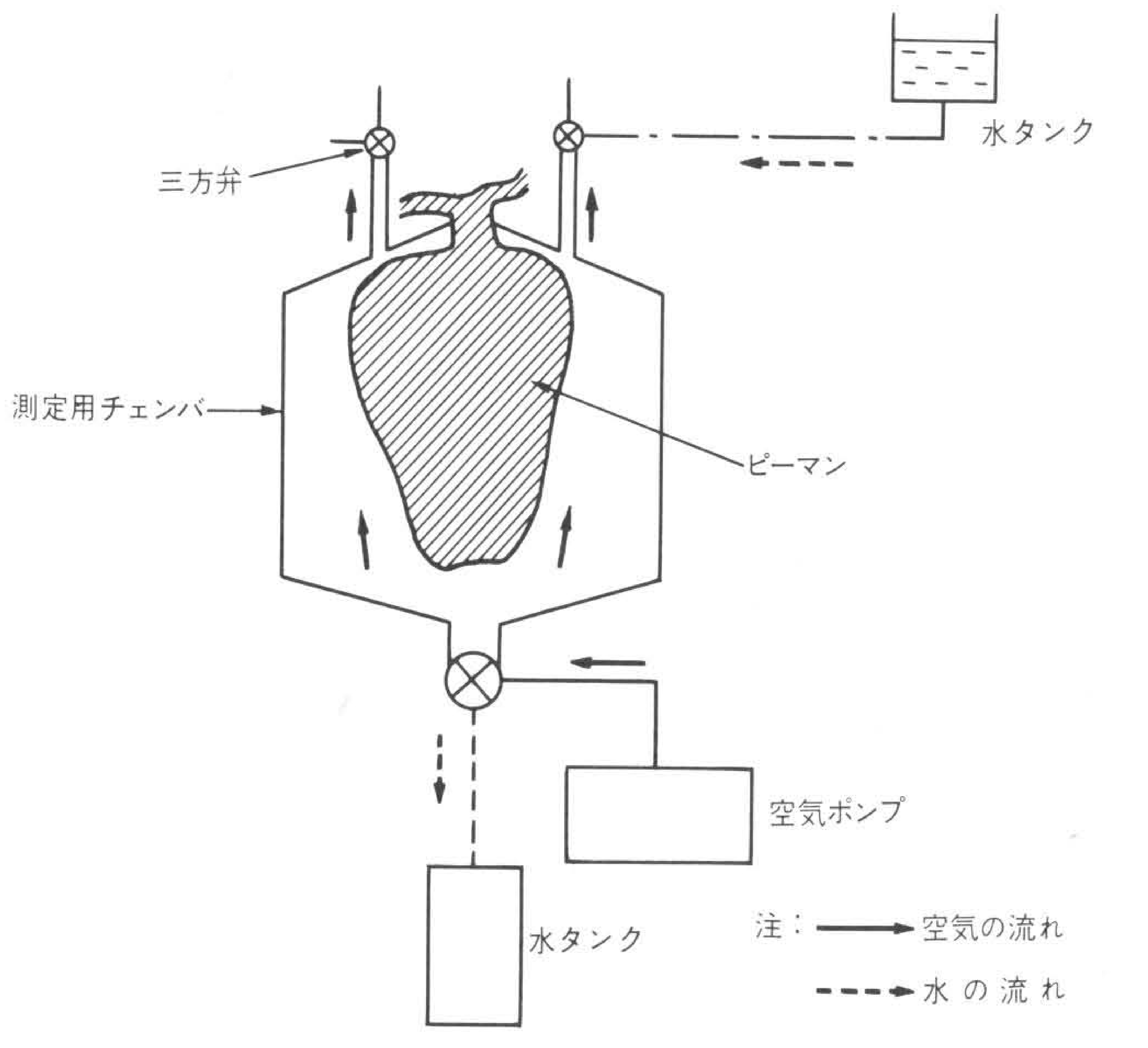

図7　ピーマンの果実の体積の測定原理　通常の生育時には，適量の空気を通気して栽培し，体積測定時だけ水を満たす。

(2)　生体電位

生体内では電解質が細胞膜に隔てられており，膜を通じての拡散により膜電位が生じる。この電位差は膜の選択透過性や細胞内外のイオン濃度を変化させる要因，例えば光，温度，電気的刺激あるいは物質代謝の変化などによって変化すると言われている。したがって，果実の生長状態を着果させたままで診断する指標として，生体電位[4]を利用できる可能性がある。ここでは，ピーマンの茎と果梗(果実と茎のつなぎの部分)の間の生体電位差を対象として取り上げた。

使用した電極の構造及び生体電位の測定方法を**図8**に示す。

この電極〔**図8**(a)〕は，対照用として用いた不分極電極である飽和カロメル電極とほぼ同様の特性をもち，スパイラル状に巻いた銀線と生理食塩水(0.5%)を含んだロ紙から構成される。茎と果梗間の電位差の測定を**図8**(b)に示す。この場合，補助電極により電位差のほとんど生じない茎の近傍の2点間の電位差を同時に測定し，この電位の状態により，電極の経時的な安定性の検査を行なった。茎と果梗間の電位差の代表的な測定例を**図9**に示す。茎と若い果実(体積が約30cc)の果梗間には20～30mVの電位差があり，果梗部がその周辺の茎に対して低電位にある。この電位差は日中のほうが夜間より大きく，日中後半に最大となり，光合成産物の量と何らかの関連があることが推定される。この電位差は果実の肥大，成熟につれ徐々に減少する傾向をもち，果実の生長につれ，茎と果梗の一体化が進行する様子を表わしているのではないかと考えられる。いずれにせよ，同図の曲線の微係数により，果実の生長状態の過程を知る手掛りを得ることができる。

(3)　転　流

炭素の安定同位元素^{13}Cで標識した炭酸ガス$^{13}CO_2$と質量分析計を利用して，非破壊的に転流を測定することができる。

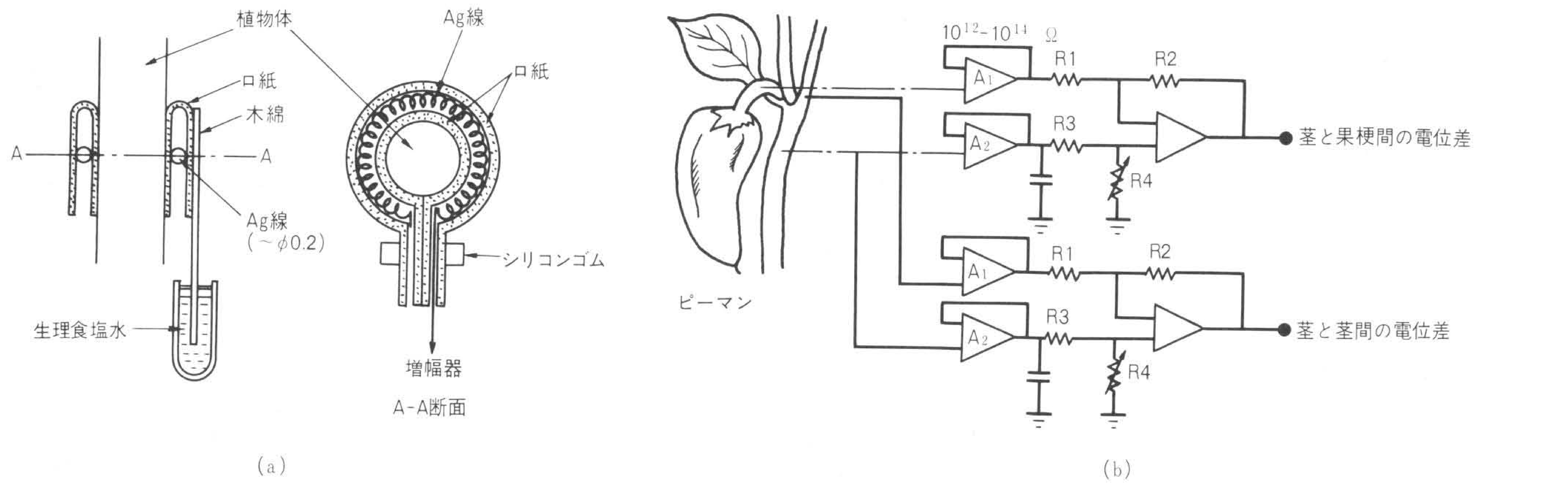

図8　ピーマンの生体電位の測定原理　(a) はスパイラル状に巻いた銀線と生理食塩水を含んだロ紙から構成される銀電極を，(b) は茎と果梗間の生体電位の測定方法を示す。茎近傍の2点間の電位を，対照用として同時に測定する。

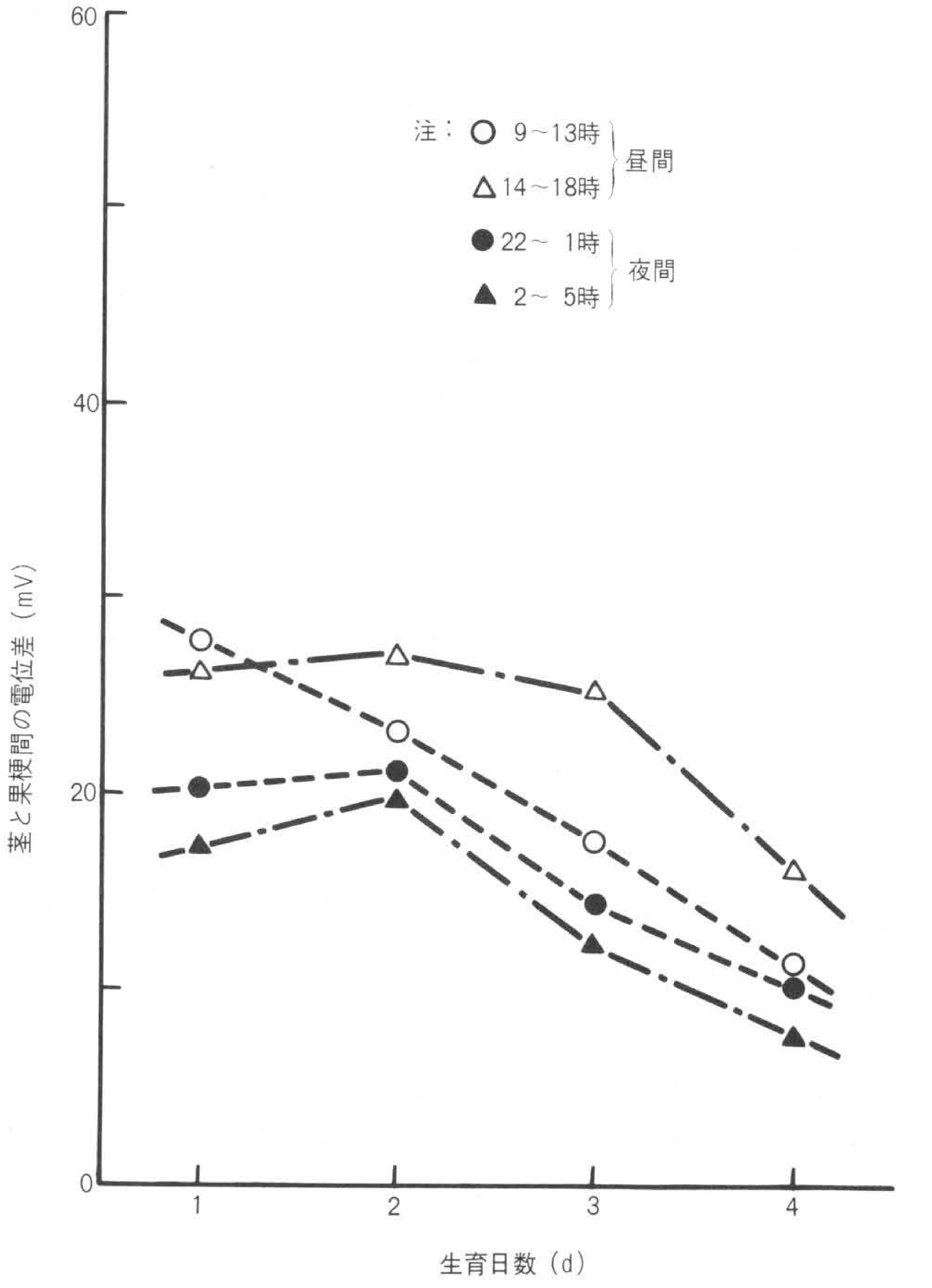

図9　茎と果梗間の電位差の経時変化　白丸印の9－13時は日中9時から13時までの4時間の平均値を意味する。茎に対して低電位にある果梗の電位が，果実の生長につれて茎の電位に近づいてゆくのが分かる。

測定原理を**図10**(a) に示す。ピーマンを一定時間$^{13}CO_2$を混合した空気中に露出する。光合成により吸収された$^{13}CO_2$は転流により果実へ移動し，果実の呼吸により消費され，再放出される。この呼吸により再放出された$^{13}CO_2$濃度の経時変化を測定する。代表的な$^{13}CO_2$の経時変化の測定例を同図(b) に示す。$^{13}CO_2$処理後1時間で$^{13}CO_2$は$^{12}CO_2$の4％に上昇し，4～5時間後に最大値8％に達した。処理後11時間経過後3～4％に減少した。この実験結果から，(a) 光合成により葉に吸収された炭酸ガスは2時間以内に，その葉の近傍の果実へ移動し，少なくともその一部は呼吸により消費されて放出される，(b) $^{13}CO_2$処理終了後14～15時間で呼気中の$^{13}CO_2$濃度が大気レベルに低下することから，果実へ転流した光合成産物は，流入後少なくとも14～15時間以内に呼吸により消費されない状態となり，以後蓄積された，ことが分かる。このように果実への初期転流量にほぼ比例すると考えられる同図(b) の曲線の初期こう配や果実の呼吸による$^{13}CO_2$放出開始までの時間と環境条件の関係を調べることによって，転流による果実の肥大に関する有益な情報を得ることができる。また放射性同位元素^{14}Cを利用したトレーサー法[5]と併用すれば，更に多くの新しい知見が得られるであろう。

3.3　ピーマンの生長評価

3.2で述べた生長計測手法により，主要な環境条件に対して，ピーマンの果実の生長計測と生長評価を行なった結果を**図11，12**及び**13**に示す。まず，ピーマンの一生にわたる生長評価例を示したのが**図11**である。現在施設園芸で主に行なわれている栽培方式では，播種から収穫開始時までに約5箇月，収穫期間がせいぜい5箇月である[6]のに比べ，グロースチェンバの場合には，図示した気温，日照時間及び炭酸ガス濃度の制御により，収穫開始までが2.8箇月，収穫期間は1年以上(上限はグロースチェンバの寸法に制約があり，確認されてい

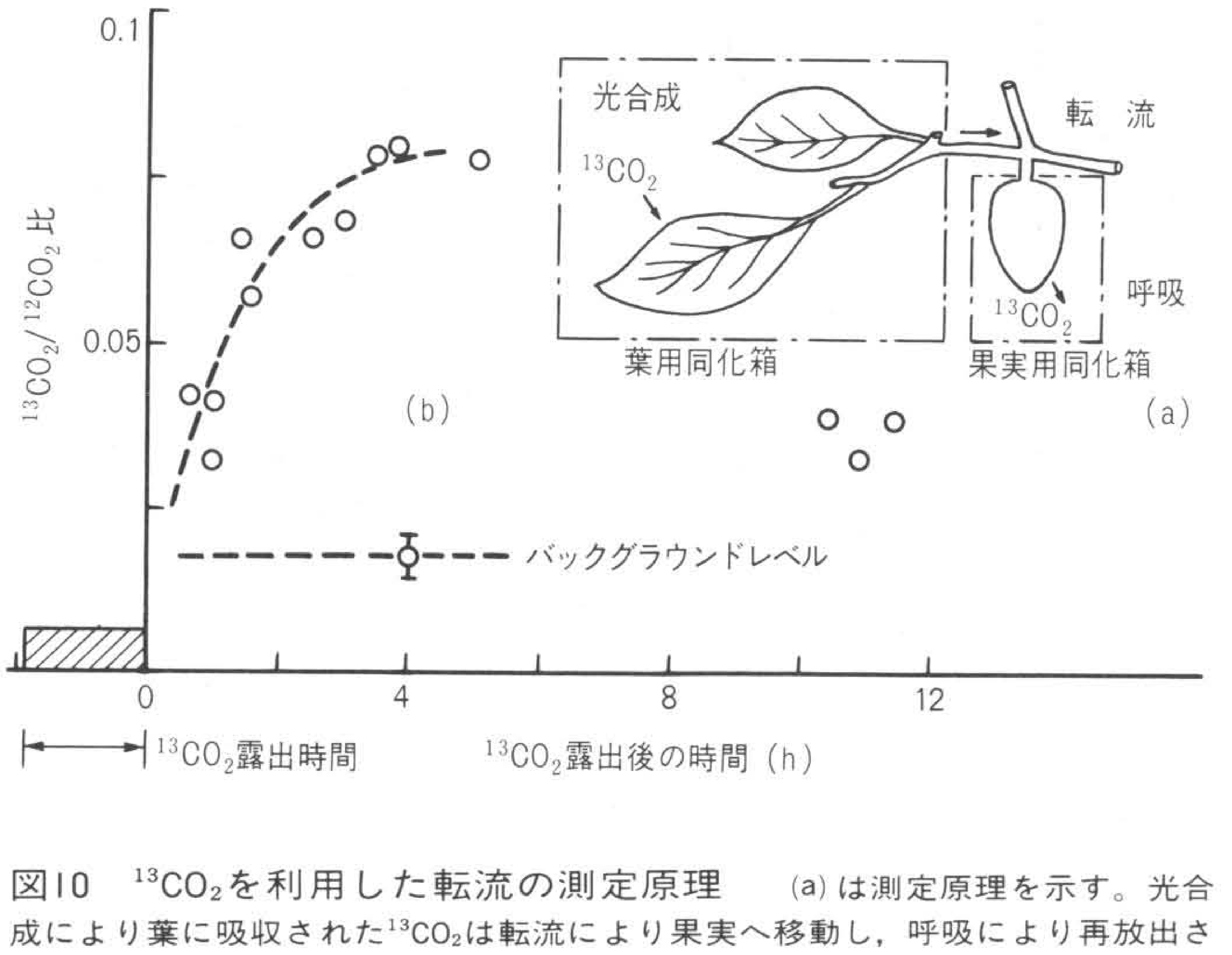

図10　$^{13}CO_2$を利用した転流の測定原理　(a) は測定原理を示す。光合成により葉に吸収された$^{13}CO_2$は転流により果実へ移動し，呼吸により再放出される。(b) は果実の呼吸により再放出された$^{13}CO_2$の測定例である。光合成により吸収されてから，2時間以内に再放出されているのが分かる。

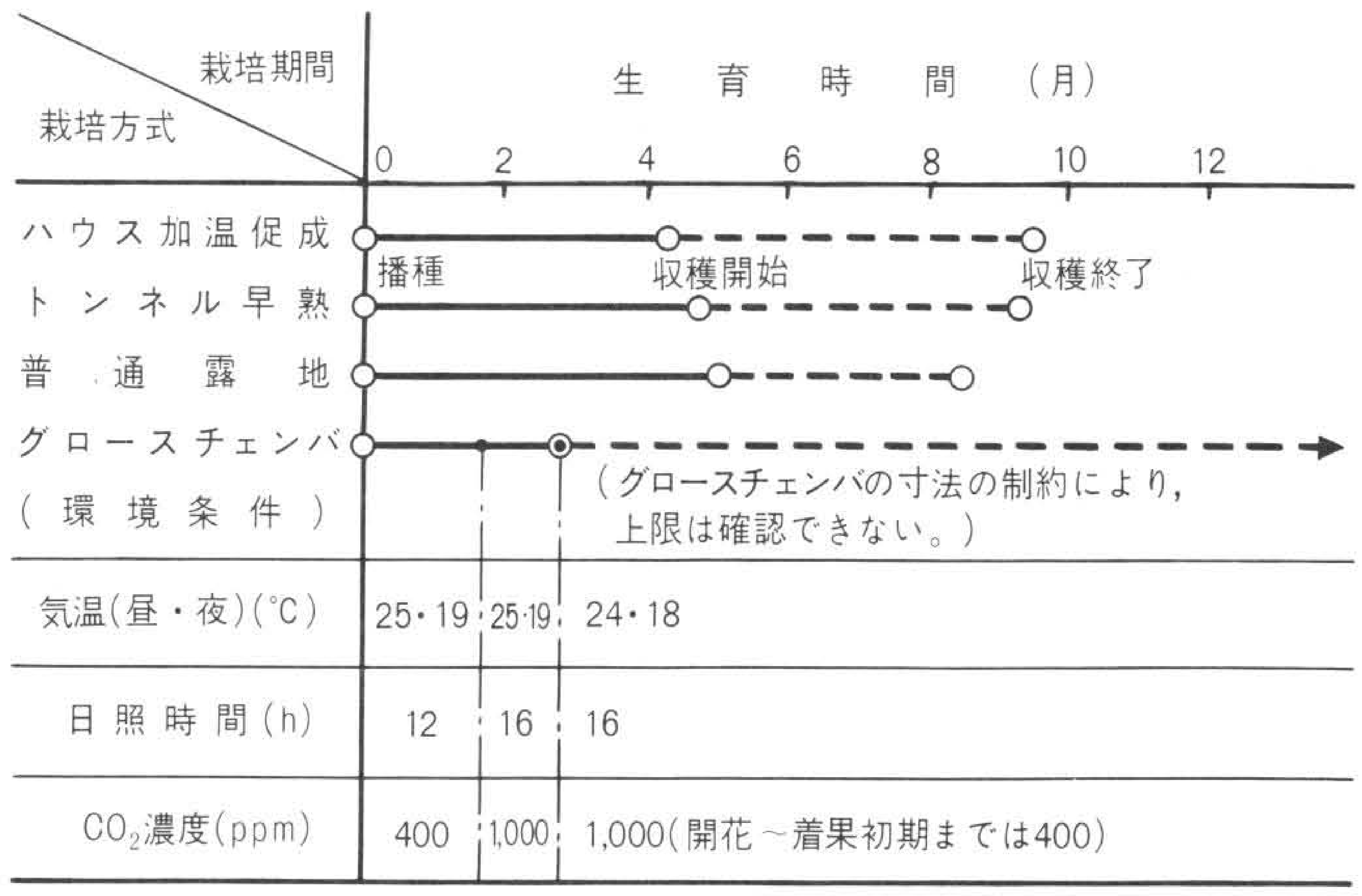

図11 ピーマンの一生の生長評価 栽培方式が収穫開始時期や収穫期間に大きな影響を与えるのが分かる。グロースチェンバの場合の収穫期でのCO_2制御では，開花から着果初期までの間は400ppm，それ以後収穫までを1,000ppmとしている。

ない)となる。次に，収穫期での果実の肥大過程に関する生長計測結果を**図12**に示す。これは果実の体積変化と環境条件の関係である。Ⓐの16時間の日照時間と1,000ppmの炭酸ガス施肥に対し，1日当たりの体積増加量はⒷに比べて約1.8倍となり，体積が30から80ccまで肥大するのに要する日数は約6日間も短縮される。最後に，環境制御により栽培したピーマンの品質評価例を**図13**に示す。グロースチェンバ品は**図12**のⒶの環境条件で栽培したものである。これは市場品に比べ，水分含量が約4％減少し，その分有機分が1.7倍，無機分が1.5倍増加しており，品質が改善されていることが分かる。以上述べたように，環境条件の適切な制御により，栄養生長期ばかりでなく，生殖生長期での果実の生長速度の促進や品質の向上を図ることができる。

設定条件 / 環境条件	Ⓐ	Ⓑ
気温(昼・夜)(℃)	24・18	24・18
日照時間(h)	16	12
CO_2濃度(ppm)	1,000	400

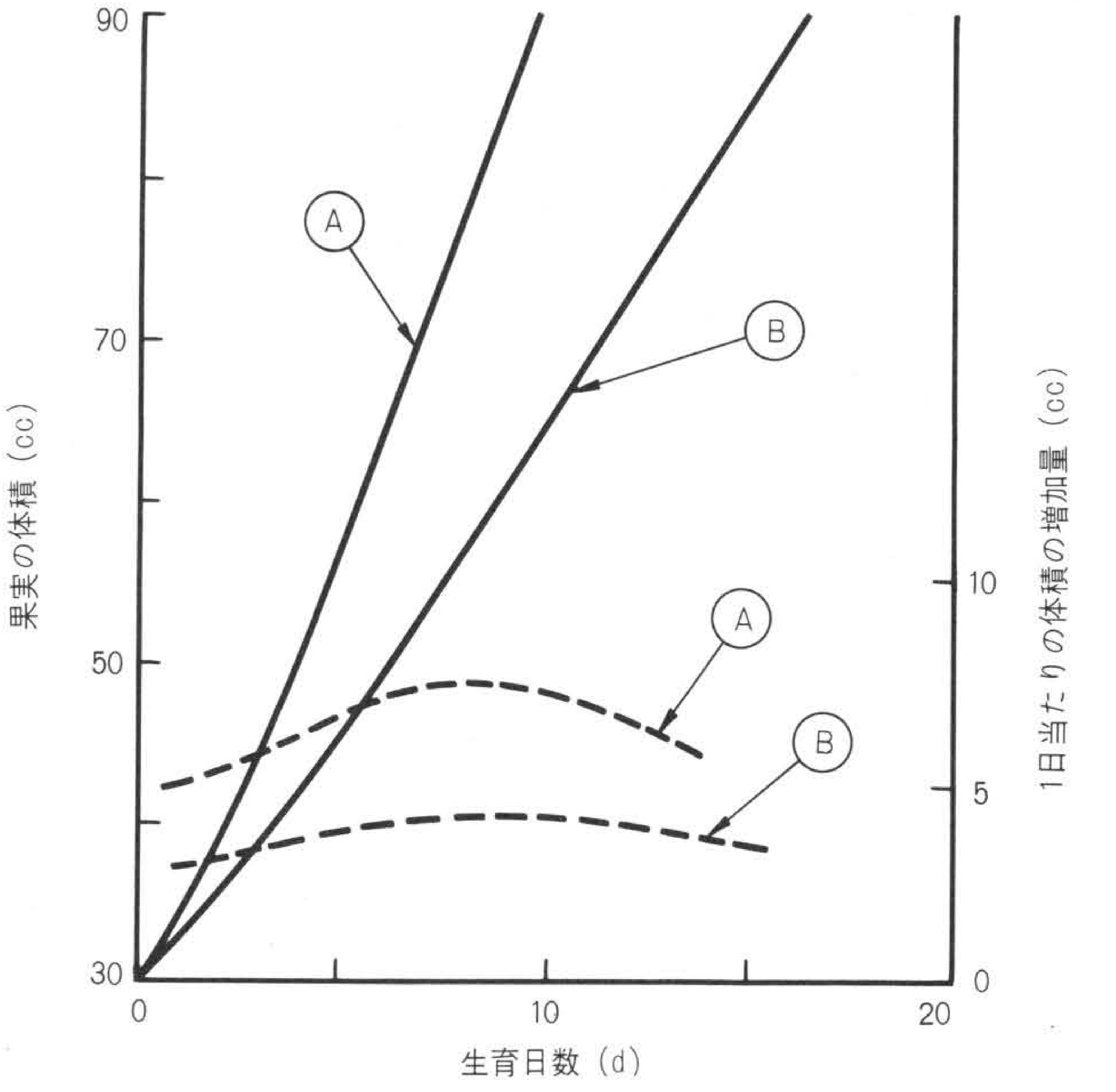

図12 ピーマンの果実の体積の生長曲線 Ⓐ条件下では標準的な環境条件Ⓑに比べ，1日当たりの体積の増加量が約1.8倍となる。

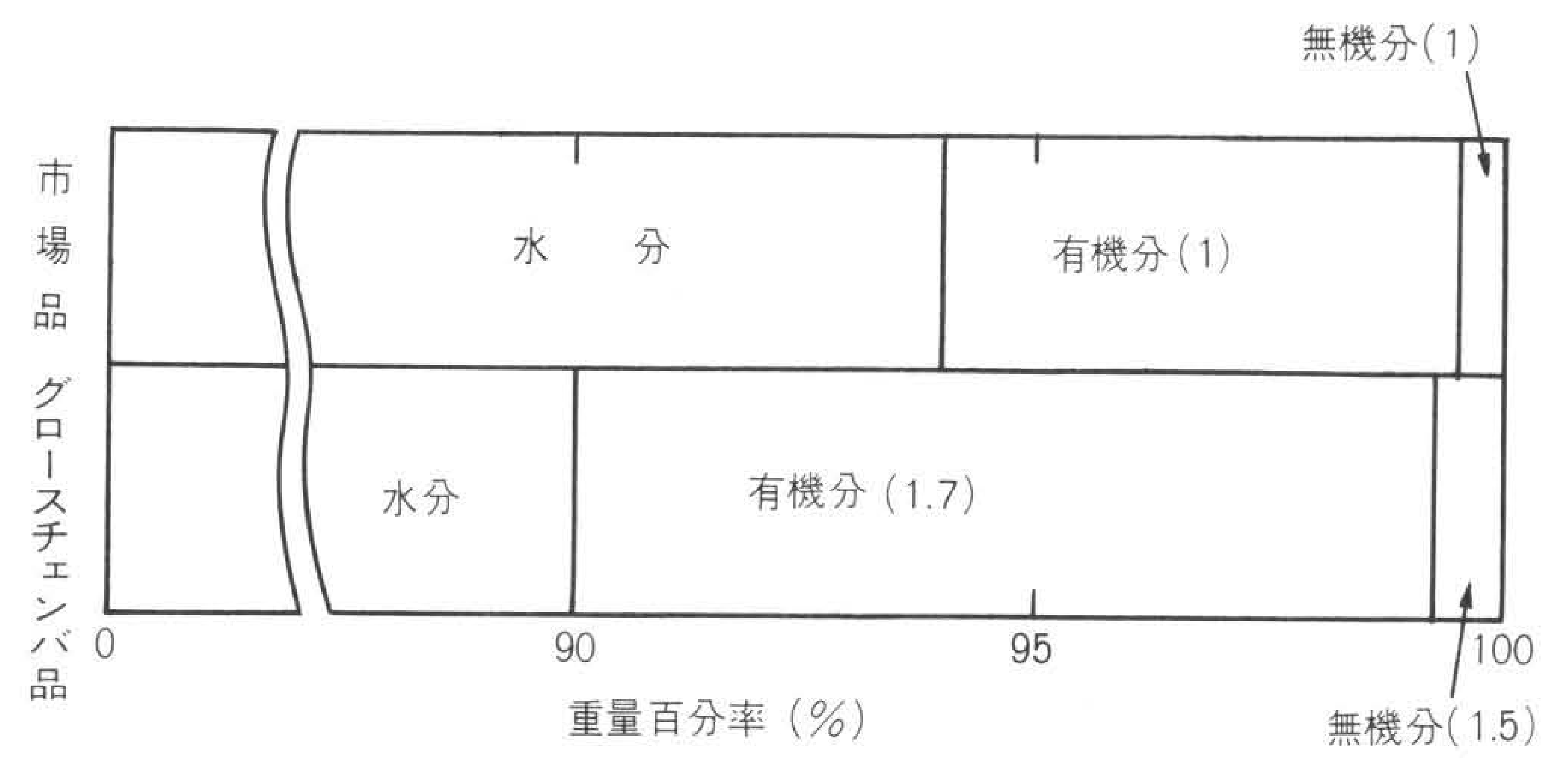

図13 ピーマンの品質評価例 市場品とグロースチェンバ品の成分分析結果を示す。グロースチェンバ品は図12のⒶ条件で栽培したものである。グロースチェンバ品は水分含量が4％減少し，その分有機分(1.7倍)，無機分(1.5倍)が増加しているのが分かる。

4 結　言

葉菜類に対しては光合成，呼吸及び生重量を，果菜類に対しては光合成のほか，生体電位，転流及び果実の体積を生長指標とした生長の計測と評価について，それぞれ実験結果を報告した。試料としては葉菜類の代表としてサラダ菜を，果菜類の代表としてピーマンを選び，生長計測方法と最適生長条件を確立した。同様な手法によって，他の植物に対しても生長過程を明らかにできるはずである。実際，非結球性のレタス類(サニーレタス，マミーレタスなど)に，サラダ菜と同様な手法が十分適用できることが，その後の実験により明らかとなっている。現在，日立製作所ではこれらの研究成果を基にして，フィールドへの適用のための実際的研究により，野菜工場の実用化の基礎検討を行ないつつある。完全な周年栽培，収量増大，自動化，省力化栽培を実現し，採算性をもった野菜工場の実現のためには，生長計測や環境制御以外にも解決しなければならない技術課題がまだ数多くあり，これらの早期解決が必要である。

最後に，工学的立場からの本研究の遂行に当たり，野菜工場を対象とした実験に適した野菜の選定に対する考え方や，光合成産物の転流，蓄積などの植物生理など農学の専門家の立場から，絶えず御指導いただいた農林水産省野菜試験場栽培部長の高橋和彦農学博士に対し深く感謝申し上げる。

参考文献

1) 高辻，外：植物の生長計測と制御，日立評論，**61**，2，39～44(昭54-2)
2) 池田：蔬菜の種類と光，光合成特性，農学集報，**23**，3.4号，p. 195～205(昭53)
3) 中川，外編集：農業気象観測，測定に関する手引書，第3部日本農業気象学会関東支部(1978)
4) 関山，外：農林水産業特別試験研究報告書，電力中央研究所生物環境技術研究所(1981)
5) J. Moorby, et al.：The Use of Compartmental Analysis in the Study of the Movement of Carbon through Leaves, Planta, **122**, p. 155～168(1975)
6) 株式会社大和農園，栽培技術資料(1980)