ビデオカメラを用いたホウレンソウ葉 の運動の連続計測

星 岳彦*・瀧口 武**

(* 東海大学開発工学部
** 神奈川県園芸試験場果菜科)

Continuous Measurement of Movement in Spinach Leaves Using Video Cameras

Takehiko HOSHI* and Takeshi TAKIGUCHI**

(*Department of Biological Science and Technology, Tokai University,
317, Nishino, Numazu, Shizuoka, 410-03 Japan
**The Fruit Vegetable Division, Kanagawa Horticultural Experiment Station,
1217, Ninomiya, Naka-Gun, Kanagawa, 259-01 Japan)

Abstract

Leaf movement together with growth of vegetables was continuously measured by two video cameras and a three-dimensional image processing system. In the experiment, the leaf movement of spinach (*Spinacia oleracea* L. cv. "Lead") from 10 to 24 days after seeding in two different photosynthetic photon flux densities (PPFD) was observed.

A diurnal movement in spinach leaves was observed of both high and low PPFD. Spinach folded all the leaves in the dark period and spread the leaves in the light period. The amplitude of the diurnal movement showed a tendency to increase with high PPFD and increasing growth of the leaf blade. An irregular falling-rising movement due to infirm growth and a periodical swing movement with 3 hours on several leaves was also observed at low PPFD.

It is considered that the physiological condition of spinach affects the kind and amplitude of the movement. The experimental results indicate that the measurement of the movement is a possible method to monitor vegetable growth in environmental control systems.

Key words: Computer measurement, Image processing, Leaf movement, Spinach.

キーワード: 画像処理, コンピュータ計測, 葉の運動, ホウレンソウ

1. はじめに

環境制御システムの性能を高めるためには、植物の生理状態を制御にフィードバックする必要がある。これまで、植物の生理状態を得る目的で各種生体情報の計測が試みられて、環境制御へ応用されてきた。一例をあげると、炭酸ガスの吸収量による純光合成速度の計測と制御 (Lake, 1966; Takakura *et al.*, 1974), 生体電位の計

測 (関山ら, 1982; 三輪ら, 1987; 内田ら, 1990), クロロフィル蛍光の計測 (Methy and Salager, 1989) 等が行われた。

植物体の形、色彩、テクスチャの状態やそれらの変化などは、植物の生理状態を栽培者が知るための指標として古くから活用されている。そこで、形態や色彩の変化をセンサで自動計測する研究も行われてきた。茎径、果径、花蕾の大きさの連続的計測法として、ストレインゲージを使う方法 (二ノ方・宮里, 1959), 差動トランスを使う方法 (Kadoya, 1973; 鴨田・内藤, 1975), ポテン

シヨメータを使う方法(Haung, 1974), 静電容量を計測する方法(岩尾・高野, 1989)等が用いられた。また, 色変化の計測については, 中西ら(1989), 鳥居ら(1990)の研究が行われた。

さらに, コンピュータ技術の進歩に伴い, 撮影された植物画像を解析して, 植物の成長に関する情報を得ようとする研究が行われた。Matsui and Eguchi (1976)は, キュウリの画像処理によって画像面積から植物成長量の定量化を試み, 柴田ら(1993)は, レタスの投影面積から植物成長量を得ようと試みた。また, 江口ら(1991)は, レタスの個葉に印を付け, その位置の変化を画像解析することによって, 気温によって葉が非等方的に成長することを明らかにした。

植物の各器官が成長・発達に伴って運動することはよく知られている。Darwin(1882)は, 300 種以上の植物の葉, 茎, まきひげなどの運動について観察した。顕著な就眠運動, 捕食運動などを行う, マメ科, カタバミ科, モウセンゴケ科の植物については, その運動の特性やメカニズムが詳細に研究されている(柴岡, 1981)。近年になって, 蔬菜類の運動についても, 微速度撮影からサラダナ葉の運動が成長と関連しているようであるという指摘(中島, 1993)がある。著者らも, 植物工場においてサラダナ, ホウレンソウ, トマト等の葉が運動することを観察している。蔬菜類葉の運動速度は $50 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ を越えるものは少ないので, 肉眼の詳細な観察は困難を極める。この運動の詳細かつ連続的な計測は, これまでほとんど報告されていない。この計測は, 画像計測とコンピュータを利用した画像解析によって容易に実現できる。

本研究では, ビデオカメラを用いて, 播種後約 10 日目の苗からほぼ収穫可能になる 24 日目までの期間, 異なる光環境条件下で栽培されているホウレンソウを連続的に撮影した。そして, 撮影された画像からホウレンソウ葉の運動を 3 次元的に解析した。

2. 材料および方法

2.1 立体画像計測

物体形状の立体計測装置として磁気式 3 次元デジタイザがある。植物の立体形状の計測にも利用されている(本條ほか, 1993)。しかし, 温室骨材などの金属物体により計測誤差を生じ, 柔軟な植物の特定の部位を正確にトレースすることが難しく, 人手による実時間計測が必要なので長期間連続計測に不適で, 今回の目的には適当でない。

一方, 画像計測による方法として, 視差を用いて計測点の位置を計算する立体写真法がある(Minagawa, 1994)。自動撮影して, 後でまとめて位置情報を計算で

きるので長時間連続計測が可能であるが, 撮影した画像の前後方向の計測精度を高めることが難しい。また, 一方向から対象物を撮影するので, 重なり合って立体的に展開するホウレンソウ葉序の場合には, 計測点が隠れて全く計測できない部分が多くなってしまう。そこで, 植物体の上方および側方に, それぞれ 1 台のビデオカメラを設置して画像を収録し, 直交 2 方向からの透視画法による立体画像計測を行った。

撮影するホウレンソウの周囲に鉄製 L アングルで架台を設置し, 8 mm カラービデオカメラ (Sony 製 CCD-TR 75.41 万画素撮像素子内蔵) を 2 台設置した。カメラには, ズームレンズ(焦点距離 7.8 から 62.4 mm)が装着された。錘付きの道糸, 水準器を用いて, 光軸が直交するようにカメラをねじで架台に固定し, 光軸交点を定めた。さらに, 計測した pixel 数を実際の長さに換算するために, 表面に方眼紙を貼付した基準立方体を用意した。水準器とカメラの画像を使って, 基準立方体のカメラに向かう面が, それぞれのカメラの光軸と直交するように設置した。

カメラは, 録画待機状態にしておき, カメラの遠隔操作端子から録画開始・中断の接点信号線を取り出し, 半導体タイマーに接続して自動微速度撮影を行った。暗期の収録光源として, 40 W の白熱電球をホウレンソウの斜め上方に設置した。撮影のプロセスは, まず白熱電球を点灯し, カメラの露出と焦点調節機構を安定させるために 1.5 秒間待つ。次に, 0.5 秒間録画開始信号を出力し, 録画を開始し, 1.5 秒間待つ。続いて, 0.5 秒間録画中断信号を出力し, 録画を停止する。その直後, 白熱電球を消灯し, 1 回の撮影サイクルが完了する。この撮影方法によって, 3 分毎に約 2 秒間の画像を 8 mm ビデオカセットテープに連続収録した。

収録した画像は, ビデオデジタイザ(Raster Ops 製 24 STV)を使い, 画像取り込みソフトウェア(Raster Ops 製 Media Grabber)によって, 608×456 pixels で色情報 8 bits のカラー画像にデジタイズし, 3.5 インチ光磁気ディスクに収録した。そして, 上方および側方の二方向から同時刻にホウレンソウを撮影したふたつの画像を使って, 計測点の 2 次元座標を pixel 単位でそれぞれ計測した。この 2 組の 2 次元座標データを突き合わせ, ホウレンソウの茎頂を原点とする cm 単位の 3 次元座標に変換するソフトウェア(Pict Meas)を開発した。Pict Meas を用いて, 子葉を含む全ての葉の先端および葉柄との接続点を 3 次元座標データに変換した。

2.2 Pict Meas のアルゴリズム

Pict Meas は, 2 台のカメラを直交する方向に設置して撮影した画像データの計測点の 2 次元座標データ, お

Fig. 1. Symbolic system for measurement of the three-dimensional coordinates on spinach.

よび、基準立方体の画像上での大きさから、計測点の3次元座標を計算する。アルゴリズム説明のために、Fig. 1の通り記号を定める。

添字のdは上方のカメラを、sは側方のカメラを表す。ZdおよびZsはカメラの光学上の焦点、SdおよびSsは、撮影された映像が写るスクリーンを示す。また、点Oは2台のカメラ光軸の交点、点Rは植物体の基準点、点Pは計測点を表す。点Cd, Pd, Cs, Psは、点Oおよび点Pをスクリーン上で見た点で、pixelを単位にした2次元座標値である。

ここで $\overline{ab}$ を点ab間の距離と定義し、 dd , ds , fd , fs を定める。

$$\left. \begin{aligned} dd &= \overline{Od \cdot O} \\ ds &= \overline{Os \cdot O} \\ fd &= \overline{Od \cdot Cd} \\ fs &= \overline{Os \cdot Cs} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

まず、 dd と ds を実測する。さらに、 n cm角の基準立方体の占める縦横のpixel数を計測し、上方スクリーンの分を dx , dz とし、側方スクリーンの分を sx , sy とする。すると、1 pixelの縦横比である kd , ks が求められる。

$$\left. \begin{aligned} kd &= \frac{dx}{dz} \\ ks &= \frac{sx}{sy} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

また、それぞれのカメラに向く基準立方体の面が、カメラ光軸方向に点Oからずれている長さを Qd , Qs とし、それを実測する。この場合の符号は、点Oからカメラに

向かう方向をマイナスとする。

すると、未知の値である fd , fs が次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} fd &= \frac{1}{n} (dd + Qd) dx \\ fs &= \frac{1}{n} (ds + Qs) sx \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

次に、点Cd, Pd, Cs, Psをpixel単位で計測し、以下の値を計算する。

$$\left. \begin{aligned} Xdl &= Xcd - Xpd \\ Zdl &= Zpd - Zcd \\ Xsl &= Xps - Xcs \\ Ysl &= Ycs - Yps \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

すると、点Oを原点とした点Pの座標($X'p$, $Y'p$, $Z'p$)は、(5)式で求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} X'p &= \frac{Xdl (dd \cdot fs - Ysl \cdot ds \cdot ks)}{fd \cdot fs + Ysl \cdot Zdl \cdot kd \cdot ks} \\ &= \frac{Xsl (ds \cdot fd + Zdl \cdot dd \cdot kd)}{fd \cdot fs + Ysl \cdot Zdl \cdot kd \cdot ks} \\ Y'p &= \frac{Ysl (ds \cdot fd + Zdl \cdot dd \cdot kd) ks}{fd \cdot fs + Ysl \cdot Zdl \cdot kd \cdot ks} \\ Z'p &= \frac{Zdl (dd \cdot fs - Ysl \cdot ds \cdot ks) kd}{fd \cdot fs + Ysl \cdot Zdl \cdot kd \cdot ks} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

また、 $X'p$ については2通りの算出式が使用できるので、計測の検証に使用できる。

同様にして、点Oを原点とした点Rの座標を求める。点Pと点Rの座標から、点Rを原点にした点Pの座標を最終的に求められる。

2.3 ホウレンソウ栽培

ホウレンソウ (*Spinacia oleracea* L. cv. "Lead") は密閉ガラス室内で湛液式養液栽培を行った。大塚A処方に大塚5号肥料を30 g・m⁻²添加した培養液を用い、電気伝導度を0.24±0.02 S・m⁻¹に、水素イオン濃度を6.0±0.5に制御した。培養液循環は0.5時間周期で0.25時間行った。気温は明期25℃、暗期20℃に比例制御し、相対湿度は60%以上に加湿制御し、CO₂濃度は明期のみ750 ppm以上に制御した。明期は6時から18時までの12時間、暗期は18時から翌6時までの12時間とし、暗期には光線透過率30%の遮光カーテンを展張した。

ホウレンソウ葉の展開状態は、明期と暗期で異なることを観察している。そこで、葉の運動に光が関連していると考え、強光区と弱光区の光条件を用意し、対照実験を行った。強光区は、明期屋外の水平面光合成有効光量子束密度 (Photosynthetic Photon Flux Density, 以下PPFDと略す) が300 μmol・m⁻²・s⁻¹を下回ったときに、165 W・m⁻²の投入電力でメタルハライドランプによる補

光を行った。これは、ランプ直下の栽培ベッド面のPPFDで約 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の補光になった。弱光区は、屋外PPFDが $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を上回ったときに、光線透過率30%の遮光カーテンを展張した。

3. 結 果

3.1 立体画像計測の精度

ホウレンソウ計測時の dd は 113.0 cm 、 ds は 71.2 cm になった。そして、 $n=3.0 \text{ cm}$ の基準立方体を、 $Qd=-1.5 \text{ cm}$ 、 $Qs=3.2 \text{ cm}$ の位置に設置した。この計測条件での光軸の交点 O を中心とする直径 20.0 cm の球体空間内の計測分解能は、側方から計測した X 座標が 0.40 から $0.53 \text{ mm} \cdot \text{pixel}^{-1}$ 、 Y 座標が 0.38 から $0.50 \text{ mm} \cdot \text{pixel}^{-1}$ になり、上方から計測した X 座標が 0.77 から $0.92 \text{ mm} \cdot \text{pixel}^{-1}$ 、 Z 座標が 0.77 から $0.92 \text{ mm} \cdot \text{pixel}^{-1}$ になった。

光学系およびビデオ信号処理系の計測精度を調べるために、ホウレンソウを計測する場合とほぼ同様の画角で、一辺が 20.0 cm の正方形を 100.0 cm の距離から撮影して録画した。この時の全画面面積に対する正方形の面積は 28.5% になった。その再生信号を計測方法と同様の方法でデジタル化した。こうして得られた画像上の正方形には、極めて弱い歪曲(糸巻収差)が観察されたが、歪みの大きさは最も顕著なところで 1 pixel であった。したがって、前段落の計測条件であれば、光学系およびビデオ信号処理系だけでは最大 0.92 mm の誤差で計測が可能であると推定できた。

また、計算アルゴリズムの代数的処理の正しさは、数式処理ソフトウェア(Mathematica)によって検証した。

続いて、ホウレンソウを用いて予備計測を行った。ホウレンソウの各部位を10箇所今回の方法で計測し、定規を使って手計測した値との比較を行った。上記のホウレンソウの計測条件では、 $\pm 5.0 \text{ mm}$ 以内の誤差で各座標を計測できることが確かめられた。

3.2 光環境に関わる運動

強光区の播種後22日目のホウレンソウを午前0時から12時までの12時間、4時間毎に側方から収録した画像を合成したものをFig.2に示した。暗期に直立して閉じていた葉が、明期になるとともに、葉を展開する概日性の就眠運動が示された。就眠運動は、強光区と弱光区の両方のホウレンソウで認められた。

ホウレンソウの本葉第1葉と第2葉の葉身先端の1時間毎の位置変化を、強光区は播種後11日目から23日目までの軌跡として、弱光区は播種後10日目から24日目までの軌跡として、それぞれ、立体グラフにしたものをFig.3に示した。ホウレンソウの葉が就眠運動を行いながら成長に伴って伸長していくことが、グラフのぎざぎざした軌跡によって示された。また、強光区よりも弱光区の軌跡の方が、茎頂から上方向により大きな弧を描いており、葉が立ち気味に伸長していることが示された。また、弱光区では、Fig.3で“irregular movement”と示した振幅の大きな非定常な軌跡が現れた。

さらに、光環境条件との関連を観察するために、本葉第1葉と垂線との成す角度を1時間毎に計算し、それをPPFDの経時変化と共に示したものをFig.4に示した。

Fig. 2. Leaf movement of spinach at high PPFD (average $350 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 22 days after seeding.

Fig. 3. Locus of the leaf tops with growth and movement at different PPFD.

Fig. 4. Time-courses of PPFD and the first leaf angle at different PPFD.

どちらの区においても、葉はほぼ垂直の状態から、伸長するにつれて水平に展開した。全計測期間の本葉第1葉と垂線との成す平均角度は、強光区が63.7度、弱光区が56.9度で、この値からも弱光区の葉が立ち気味であることが示された。

Fig. 4の角度変化からも、Fig. 2でも指摘したホウレンソウの成長に伴う就眠運動が示された。そして、PPFDとの対応から、明期に葉を水平方向に展開し、暗期に葉を垂直方向に閉塞する運動であることがより明確に示された。また、強光区の成長中期に就眠運動が強く起きていることが、角度変化の振幅の大きさから読み取れた。一方、弱光区では、強光区に比較して就眠運動の振幅は全計測期間を通じて小さいが、播種後18日目にFig. 3でも指摘した非定常な運動が記録された。

3.3 自律的な振動運動

観察する時間スケールを20分毎に拡大すると、弱光区の特定の葉で別の運動が認められた。播種後23日目のホウレンソウを真上から見下ろした場合、本葉第5葉の先端の軌跡を表したものをFig. 5に示した。Fig. 5では、軌跡を見やすくするためにZ軸を3倍に拡大して、葉身先端が運動した軌跡を示した。X軸方向の変動は、葉を左右に振る運動である。また、葉が水平に展開している程、真上から見たホウレンソウの見かけの葉の長さが長くなるのでZ軸の値は大きくなった。軌跡は、Darwin (1882) が巡回運動と呼ぶ運動パターンに酷似していた。

Fig. 5の軌跡全てをX軸とZ軸成分に分解して、PPFDの経時変化と共にFig. 6に示した。Fig. 6のZ軸方向の運動は、Fig. 2で示した覚醒期の就眠運動である。X軸方向には、約3時間の周期をもって葉を左右に振動させる自律的な振動運動が認められた。その最大速度は22

Fig. 5. Locus of the fifth leaf top from downward view in low PPFD at 23 days after seeding.

$\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ に達した。

4. 考 察

4.1 立体画像計測の性能および問題点

予備計測から、今回実施したホウレンソウの計測条件では、最低 $0.92\text{mm} \cdot \text{pixel}^{-1}$ の分解能でX, Y, Z座標を計測可能であった。このことは、1.4mm以上の長さのどのような傾きの物体でも識別可能なことを意味する。また、手計測値との比較でも、 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内の誤差での計測が可能であった。計測精度の実測結果から、光学系およびビデオ信号処理系の誤差の割合は小さく、むしろ、少々接触で位置を変えてしまうホウレンソウ葉を定規で手計測したときの誤差、画像着目点のマウスを使った

Fig. 6. Time-courses of PPFD, Z-axis vector movement, and X-axis vector movement in Fig. 5 locus.

位置指定のずれによる誤差等の割合が大きかったと考える。

今回試作した計測システムでは、いくつか不都合が生じている。まず、カメラを長期間録画待機状態にしている。このため、録画ヘッドの汚染と磨耗が激しく、撮影期間中は1日に最低1回の録画ヘッドの清掃が必要であった。コマ撮り機能のあるビデオカメラを用意するか、直接デジタイズしてコンピュータの画像データファイルとして蓄積する方が望ましい。

また、暗期の撮影が必要であるので、撮影時だけ4秒間程度白熱灯を点灯した。長日性植物であるハウレンソウでは、このために暗期中断が起り、成長後期に花芽分化、抽苔してしまった。ハウレンソウに対する暗期の非侵襲計測を行うためには、暗視カメラ等の使用が必要である。

さらに、Pict Measによる座標計算のため、コンピュータディスプレイに表示された画像の葉身先端等の計測点を、マウスを使って人手で位置指定した。ヒトの運動解析等で一般的に実施されているこの方法は、計測の労力が極めて大きく、自動化を妨げる最大の問題である。従って、本立体計測法を環境制御システム等へ応用する場合には、画像から計測点抽出の自動化を図る必要がある。さらに、別な葉の影に隠れたために葉の計測が不能になった場合もあったので、さらに撮影点を増やしたり、撮影位置を工夫したりすることも必要だと考える。

4.2 葉の運動に関わる要因

ハウレンソウ葉は概日的な就眠運動を行いながら成長する。しかしながら、Fig. 2 および Fig. 4 にも示されて

いる通り、明期の開始(午前6時)によるPPFDの増加と共に葉が開き始めるのではなく、暗期の終了数時間前には、すでに葉の展開を開始している。光と関連する植物の運動は、屈光性現象と傾光性現象に分類できる。就眠運動は傾光性現象であり、単純な光反応ではないが、基本的には光による反応として説明されている(佐々木, 1984)。今回得られた結果も、ハウレンソウの就眠運動が単純な光反応によるものだけではなく、概日性リズム等の複数の生理的メカニズムの複合によって制御されていることを示唆していると考ええる。いくつかの植物では概日性リズムは青色光で制御可能であるという報告(Satter *et al.*, 1981)もあり、赤色光と遠赤色光で制御されるフィトクロムによる光反応との区別を行うために、光質を制御した実験系を組むことがハウレンソウの就眠運動メカニズムを解明するうえで必要であると考ええる。また、概日性リズムがリミットサイクルであるという観点(中島, 1991)からは、光照射のタイミングを微妙に調節することによって、特異点の存在を調べる実験も必要である。

Fig. 3 および Fig. 4 で認められた非定常な運動の原因を調べるために録画したビデオテープを再生して詳細に観察した。すると、弱光区のハウレンソウは、播種後11日目と18日目に地上部が倒伏し、その後起き上がりを行っていた。この倒伏・復元が大きな角度の変動を示す原因であることが判明した。これは、光環境条件によって上胚軸の強度が不足し、地上部が倒伏・復元を繰り返す不安定な状態が生じたためであると推察できた。その中で、本葉第1葉が特に大きく傾いた播種後18日目の倒伏がFig. 4 で特に大きく示された。このことから、ハウレンソウの不規則な運動を検出することによって、光環境条件による徒長という生理状態を検出する指標として使用できると考える。

就眠運動は、葉の成長ステージによってその大きさが異なるようである。そこで、計測した座標データから、ハウレンソウの本葉第1葉の葉身長と葉柄長を1時間毎に計算し、さらに、葉と垂線が成す角度の毎日の変動値との関係をFig. 7 に示した。弱光区の倒伏による大きな角度の変動を除くと、葉身の伸長に伴って葉の運動が盛んになり、葉身の伸長が停止すると共に葉の運動も小さくなって行った。これは、葉の成長等の生理現象と葉の運動とに関連があることを示すひとつの根拠であると考ええる。

弱光区で観察された自律的な振動運動は、弱光区の播種後約20日以降の数枚の葉で認められた、特に顕著に運動していたのが本葉第5葉であった。強光区では、自律的な振動運動と明確に認められるものは観察できな

Fig. 7. Time-courses of the diurnal changes of the first leaf angle and the length of the first leaf blade and stem at different PPFD.

かった。自律的振動運動が発生する条件は、今回の計測結果からは明確にならなかった。また、その発生原因についても葉温振動と同じような何らかのフィードバックによるハンチング現象が生じているのか、成長に非等方性が生じるためなのか、植物のまきひげ等が巻き付く対象を探すために行う運動のようなものなのか、今後の検討が必要である。

4.3 画像計測による生育状況の把握

葉の運動以外にも、画像情報を解析することによって、ホウレンソウ各器官の成長特性が計測可能であった。

たとえば、Fig. 7の葉身長、葉柄長を示すグラフの傾きの変化から、強光区では播種後19日目で本葉第1葉の伸長がほぼ終了し、弱光区では21日目で終了し、両区に約2日の開きがあることが読み取れる。また、葉柄の伸長はその後も続くこと、弱光区では葉身長よりも葉柄長の方が長くなること等、器官・光環境の違いによる成長特性の違いが実測できている。

5. 結 論

ビデオカメラによる直交2方向からの透視画法によるホウレンソウ葉運動の画像計測を行い、以下の結果を得た。

- (1) ± 5.0 mm以内の誤差で、播種後10日目から24日目のホウレンソウ各器官の連続非破壊立体計測が実現できた。
- (2) ホウレンソウ葉は成長に伴って就眠運動を行っている。この運動は、光刺激によって引き起こされるだけでなく、概日性リズム、葉の育成ステージ等の影響が考えられた。
- (3) 播種後約20日目以降の弱光区ホウレンソウの葉

で、3時間周期の自律的な振動運動が観察された。

- (4) 葉の運動計測以外にも、ホウレンソウの徒長や各器官の成長特性が計測可能であった。

謝 辞

本研究は、平成4年度文部省科学研究費補助金奨励研究(A) 04760178「植物の形態変化に基づいた植物生体情報の非破壊測定法の基礎的検討」による援助を受けた。また、東海大学の林真紀夫氏には、本稿の執筆にあたり数多くの有益なご指摘をいただいた。記して謝意を表す。

引用文献

- Darwin, C., 1882: *The power of movement in plants*. John Murray, London (渡辺 仁訳, 植物の運動力, 森北出版, 東京, pp.499).
- 江口壽彦・筑紫二郎・江口弘美, 1991: レタス個葉における非等方的生長の画像解析—葉の形状に対する温度効果について—. 生物環境調節, **29** (3), 141–145.
- Haung, B. K., 1974: Electric circumference meter for continuous monitoring of plant and fruit growth. *Trans. of the ASAE*, 493–495.
- 本條 均・庄野浩資・高辻正基, 1993: 植物形状の測定と可視化. 植物工場学会誌, **4** (2), 151–156.
- 岩尾憲三・高野泰吉, 1989: 植物生体情報の計測手法の開発とその応用に関する研究(第3報)植物の成長・肥大の非破壊連続測定法の開発. 生物環境調節, **27** (2), 57–60.
- Kadoya, K., 1973: Studies on the translocation of photosynthesis in fruit growth and some environmental conditions. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.*, **42**, 215–220.
- 嶋田福也・内藤文男, 1975: 野菜の光合成及び蒸散に関

- する研究 2. 差動トランス利用による生長記録装置及びこれを用いてのトマト、キュウリなどの伸長肥大の測定. 野菜試報告, **A2**, 33-47.
- Lake, J. V., 1966: Measurement and control of the rate of carbon dioxide assimilation by glass-house crops. *Nature*, **209**, 97-98.
- Matsui, T. and Eguchi, H., 1976: Computer control of plant growth by image processing. *Environ. Control in Biol.*, **14**, 1-7.
- Methy, M. and Salager, J. L., 1989: A microcomputer-based fast data acquisition system for in-vitro measurements of stress effects in crop plants by chlorophyll fluorescence induction. *Computers and Electronics in Agr.*, **4**, 121-128.
- Minagawa, H., 1994: Surface area, volume, and projected area of japanese-shorthorn cattle measured by stereo photogrammetry using non-metric camera. *J. Agric. Meteorol.*, **50** (1), 17-22.
- 三輪敬之・櫛橋康博・町田浩章, 1987: カボックの葉表面における生体電位変化について. 生物環境調節, **25**, 123-128.
- 中西美一・内田 徹, 1989: 実用型栽培支援システムの開発. 生物環境調節, **27** (4), 145-147.
- 中島秀明, 1991: 環境応答(新免輝男編集), 5. 内生リズム. 朝倉書店, 177-190.
- 中島武彦, 1993: レタスの初期成育に及ぼす間欠補光の影響. 園芸学会雑誌, **61** (4), 813-820.
- 二ノ方兼武・宮里 満, 1959: 歪計による樹幹直径の測定. 鹿児島大学農学部報告, 76-88.
- 佐々木恵彦, 1984: 光と植物生育(稲田勝美編著), 光と成長運動. 養賢堂, 東京, 51-56.
- Satter, R. L., Guggino, S. E., Lonergan, T. A. and Galston, W., 1981: The effect of blue and far red light on rhythmic leaflet movements in *Samanea saman* and *Albizia julibrissin*. *Plant Physiol.*, **67** (5), 965-968.
- 関山哲雄・羽生広道・岡部勝美, 1982: 環境ストレスに対する植物生体反応の連続測定法の開発. 電力中央研究所報告, **481016**, 33 pp.
- 柴岡孝雄, 1981: 動く植物. 東京大学出版会, 東京, pp. 154.
- 柴田孝信・岩尾憲三・高野泰吉, 1993: 画像処理による自動成長計測装置の開発. 生物環境調節, **31** (1), 29-35.
- Takakura, T., Kozai, T., Tachibana, K. and Jordan, J. A., 1974: Direct digital control of plant growth I. Design and operation of the system. *Trans. of the ASAE*, **17**, 1150-1154.
- 鳥居 徹・長野敏英・石田朋靖・船田 周, 1990: 葉色によるメロンの成熟度判定(2), 葉の表面色と果肉糖濃度変化について. 生物環境調節, **28** (3), 129-131.
- 内田 徹・中西美一・浦田真紀, 1990: 栽培環境制御のための植物生体電位計測に関する研究(第1報)ホウレンソウの葉面電位計測. 生物環境調節, **28** (3), 113-118.