研究論文

植物工場の基礎研究*

—多因子自動生長計測システムの開発—

中 沢 弘** 佐々木 正和*** 小 平 祐 介†

Basic Study of Plant Factory

—Development of Automatic Growth Measurement System of Multi-Items—

Hiromu NAKAZAWA, Masakazu SASAKI and Yusuke KODAIRA

This paper deals with the development of automatic measurement system of growth of plant for multi-items, which are photosynthetic rate, weight changing rate and area of leaves of plant. To measure these items of the test plant, Pakutyoi, it is proved that the system can run satisfactorily. It is also proved that area of leaves can be monitored by image processing technique with the use of two kinds of interference filters. It is found that the fact that some effects of past history of the plant affect the data of photosynthetic rate suggests that it is not recommendable to change the circumferential conditions in a short time.

Key words: growth measurement, photosynthetic rate, weight, area of leaves, plant factory

1. は じ め に

近年、自然環境に左右される従来の露地栽培農業に代わり工業生産に近い効率的で安定した計画生産が行える植物工場が注目されている。

最近の野菜工場は人工光、水耕栽培、空調、CO₂施肥などの技術を取り入れて生育環境を最適に制御する方向に進んできている。この場合まだ適応制御の技術は十分開発されておらず、あらかじめ育成植物の育成データを収集する必要がある。このデータ収集はまだ技術が確立しているとはいいがたい。すなわち生長をどのように評価すれば良いかがはっきりしていない。現在の技術レベルで言えることはそれぞれの植物の最適環境条件を決定するには、植物をまず総合的に評価・計測しなければならないということである。

従来から使用されている主な生長計測法には、通気式、半閉鎖循環式、閉鎖循環式などがある¹⁾。

本論文では植物の総合的な生長計測のために、同化速度、重量、画像情報を同時に計測するシステム

を開発し、植物の最適環境条件を見いだすための基礎研究を行った結果を報告する。

2. 実 験 装 置

実験装置システムを図1に、装置全景の写真を図2に示す。

本研究で開発したシステムは、植物の生長状態を多因子で連続・自動的に計測することを目的とする。植物の生長状態を計測するためには種々の方法があるが、それぞれ一長一短があり、また目的も計測法に

Fig. 1 System design

* 原稿受付 昭和63年9月17日。昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和63年3月17日）にて発表

** 正 会 員 早稲田大学理工学部（東京都新宿区大久保3-4-1）

*** 正 会 員 日本アイ・ビー・エム（東京都港区六本木3-2-12）

† 学生会員 早稲田大学大学院

Fig. 2 Experimental equipment

よって異なってくる。本研究においては、(1)短時間での生長の速度、(2)それが積分されたと考えられる植物重量、(3)収穫期の決定や病気の発見などに利用する植物の形と色情報、の3種類を計測するシステムを開発する。本年度は開発の第一段階として、上記に対応して、同化箱法、重量測定法、画像計測法を採用する。

システム全体は、外部環境制御部、内部環境制御・計測部、画像計測部の3つのシステムに分割される。それぞれの制御部は、シングルチップマイコン(Zilog: Z 8613, NEC: V 20)によって制御されている。また各制御部はパーソナルコンピュータ(NEC: PC 9801 VM)とRS 232 Cレベルで通信することによって統括され、データが収集される。

装置全体の構成は外部環境の役目をするグロースチェンバ内に内部環境装置を設置し、その中に被験植物が納められ栽培されている(図2)。

外部環境制御部の機能としては、パーソナルコンピュータの指令により同化箱内に一定の温度、CO₂濃度の空気を送り込めるように環境を制御することである。

温度は、温度センサによって計測したデータをもとに、グロースチェンバのヒータ、クーラをオン・オフ制御することによって調節する。また、CO₂濃度は、それを赤外線分析器によって計測し、電磁弁をオン・オフ制御することによりCO₂の不足分を供給する。

内部環境装置の外形図を図3に、写真を図4に示す。内部環境制御・計測部の機能としては、内部の温度を精密に保ち、植物を水耕栽培しつつ、植物の生長を同化箱法・重量計測法で連続測定することである。

Fig. 3 Design of inside environmental control and measuring system

Fig. 4 Inside environmental control and measuring system

内部環境装置は、植物の栽培場所、水耕液の格納場所、重量計の収納場所の3層から構成されている。植物の栽培場所の上部と側面は、無色透明の亚克力板でできている。無色透明の亚克力板を使用した理由は、可視光の全波長にわたり透過率が高く、加工しやすいからである。下部は、画像処理の関係から黒色の亚克力板でできている。水耕液の格納場所、重量計の収納場所は、それぞれ無色透明の亚克力板、アルミニウム板でできている。内部環境装置は気密性が保たれ、パイプを通してのみ外部環境装置とつながっている。

空気は、グロースチェンバ内の空気をシロッコファンによりシステム内部に送り込み、内部に取り付けられているファンによって均一化されている。

内部温度は、パーソナルコンピュータにより指令された設定温度と内部温度の差より電子冷却素子を用いて制御する。

電子冷却素子を用いた理由としては、(1)小型でグロースチェンバ内に入る、(2)電流制御で容易に出力を制御できる、(3)構造が単純なので故障しにくいなどである。

同化量の測定法としては、閉鎖循環式の同化箱の概念を用いる。本装置での同化量の測定法は、グロースチェンバと内部環境装置を結ぶパイプの間に設置してある電磁弁を閉じてこの装置と外部環境装置とのつながりを遮断し、密閉している間の CO_2 濃度変化を計測する方法である。

重量は、市販の電子天びんを用いて計測する。最小測定単位は 0.1 g である。植物を水耕栽培したまま、同化量と重量を同時に計測するために、図 3 に示すように植物と重量計をリブで結び、重量計の収納場所の気密性を保つことにより、植物の重量を計測している。このような構造にすることにより、従来実現されていなかった同化箱法による生長計測と重量計測が同時に連続的に行えるようになった。なお根の浮力による誤差は 3.5% 以下であった。

画像計測部の機能としては、CCD カメラを用いた対象植物の画像入力、パーソナルコンピュータの指令による CCD カメラのレンズ前部に設けた光学干渉フィルタ群の自動交換および CCD カメラの撮影位置の移動である。

得られた画像の解析は、すべてパーソナルコンピュータで行う。CCD カメラからの映像信号はアナログ信号のまま同軸ケーブルで送り、パーソナルコンピュータ側でデジタル化する。

フィルタ交換用ステッピングモータと CCD カメラ移動用ステッピングモータは、すべてシングルチップマイクロコンピュータ (Zilog: Z 8613) によって制御される。

3. 画像処理による葉面積の測定

画像情報によりその画像中の植物が占めるピクセル数を求める。本方法は当研究室においてすでにアイディアが出されたものを実用化して用いた²⁾。その方法として図 5 に示すように、2 種類の光学干渉フィルタによって得られた画像を用いて植物の切り出しを行い、ピクセル数を求める。以下に詳細を述べる。

a) 2 次元座標表示

n チャンネルでサンプリングされた画素は、 n 次元のベクトル量として表せる。今回は、緑フィルタでサンプルした輝度値 S_g と、赤色フィルタでサンプルした輝度値 S_r を座標軸に取った 2 次元平面 (S_g - S_r 平面) を考え、各画素がどのように分布しているかを表す。輝度値はデジタル量に量子化されているので、 $0 \sim 64$ の離散的な値を取る。従って、 S_g - S_r 平面上にプロットとして示すことにする。また、各プロットの度数が分かるように、度数に比例した大きさのプロット

Fig. 5 Image processing

Fig. 6 Display of image data on two dimensional coordinate

トを用いる (図 6)。使用したフィルタ特性を図 7, 8 に示す。

Fig. 7 Characteristics of 550 nm filter

Fig. 8 Characteristics of 650 nm filter

Fig. 9 2-dimensional coordinate after slash hold

b) 植物部分の切り出し

本研究では撮影時の照明条件は常に一定で、背景は黒に統一してあるため、取り込まれた反射光はほとんどが葉からきているものと仮定できる。従って、植物の部分と背景の部分は常に座標上で異なった範囲に存在する。本実験では横軸のしきい値を $S_g=25$ とすれば背景はほぼ除去できた (図 9, 10 参照)。本研究のように、入射光に対する反射光の相対量 (反射率) ではなく絶対量を測定する場合、同一の物質は原点を通る

Fig. 10 Display of image data after slash hold

Fig. 11 Display of 2-dimensional coordinate after dividing

同一直線上に集まる。つまり同一の物質は原点からの方向、傾きとして表現できる。さらに葉の葉緑素のような同種の物質は座標上の一定の範囲に分布する。このことから、

$$(S_g > 25) \cap (S_r < 0.97 S_g) \cap (S_r > 0.55 S_g) \quad (1)$$

に当てはまる画像データを切り出す (図 11)。これらの値は、実験前に調べておいた経験的な値である。さらに残った全画素についてラベリングし、そのうち周りに近接した画素のない点を背景の微小点と判断して除去する。次に、逆に植物の部分で照明の状態で抜けてしまう部分もあるので、これを中空点補てんで穴埋めする。以上により植物の部分の画像を切り出すことができる。

4. 実験

植物の環境を気温 $26 \sim 12^\circ\text{C}$ の間で変化させ、温度変化後の維持時間は $60 \sim 90 \text{ min}$ で、それに対する植物の過渡応答を計測する。次に、気温 22°C 、水温 22°C 、照度 14 klx 、サンプリング間隔 $30 \sim 50 \text{ min}$ で、植物の定常応答を計測する。

植物の同化量は、 2000 ppm の濃度の CO_2 ガスが 1800 ppm に減少する時間を計測し、単位時間当たりの CO_2 の減少率を求める。従ってサンプリング間隔は上述のように $30 \sim 50 \text{ min}$ と不定な値となっている。

本研究で用いる植物として、(1) システム内に入る

Fig. 12 Photosynthetic rate, weight, pixel number

植物, (2) 短期間で成長する植物, (3) 栽培が容易な植物, という条件に合うものを選ぶ。

このような条件を満たすものとして中国野菜の青軸パクチョイを選定した。青軸パクチョイとはアブラナ科の植物である。本研究では、サカタのタネ(株)が販売しているものを使用した。なお今回は測定が正しく行われるかどうかを調べることを目的としていたため養液の成分調整は行っていない。

実験により得られた植物の光合成速度, 重量, ピクセル数を図 12 に示す。

5. 同化速度の変化について

本実験で得られた光合成速度を見ると(図 12), かなり大きな範囲にばらつきがみられる。そのうち, 大きく外れたものは測定誤差と考えるとして, これらはランダムに振動している。これは植物生体内に気孔の開閉を中心としたかなり複雑な生体反応の影響と考えられる。

次に, 光合成速度の分散をみてみる。表 1 に各温度における光合成速度の分散と平均値を, 表 2 に 22°C における光合成速度の分散と平均値をそれぞれ示す。ただし表 1 はできるだけ同じ生長時期のデータを得るために違う個体で得た結果である。

表 1 によると, 平均値は 20°C で最大となっている。つまり, この環境に限っての最適栽培温度はだいたいこのあたりにあるということができよう。また, 分散はかなり大きなものとなっており, 光合成速度が大きく変動していることがわかる。この変動は, 植物生体に起因する影響のほか, 温度を変化させた後一定温度に保つ時間が短すぎたために前温度における前歴効果が現れたのかも知れない。

Table 1 Variance and mean value of photosynthetic rate on the various temperature

Temperature °C	Variance	Mean value
26	0.221	1.28
24	0.043	1.36
22	0.030	1.48
20	0.212	1.81
18	0.919	1.53
16	0.485	1.74
14	0.054	1.35
12	0.613	1.68

Mean variance; 0.322

Table 2 Variance and mean value of photosynthetic rate on the same temperature

Temperature °C	Variance	Mean value
22	0.502	1.33
22	0.249	1.62
22	0.087	1.98
22	0.143	1.89
22	0.241	1.85
22	0.130	2.25
22	0.114	2.13
22	0.086	2.25

Mean variance; 0.194

表 2 の同一温度における分散を, 表 1 の温度を変化させた場合に比べると, 平均分散値は約 60% に下がっており, かなり変動が小さくなっているのはその意味で前歴効果の現れ方が少なかったからかも知れない。しかし, 十分無視できるものではない。これは, 植物という生体を通して得られたデータゆえに, その個体特有の性質やバイオリズムの現れることがあるからである。例えば, 連続測定のために常時光を照射していたことによる植物の「昼寝現象」で, 部分的に光合成が抑えられていたことも考慮せねばならない。また, 成長に伴う葉数・葉面積の増加のような成長段階の変化によっても, 影響が生じることも考えられる。このように, 植物から測定されたデータには前歴効果や植物生体自身に起因する影響が含まれている。従って, これらの影響は十分考慮すべきである。

6. 葉面積増加と光合成速度

図 12 で同一温度 (22°C) で測定したデータを見てみると, 時間が経過するにつれて光合成速度が増加している。もし外部環境が変化していないのに光合成速度が増加しているとする, 光合成速度を指標とした最適環境探求に大きな障害を与えることになる。

そこで, 同一植物における単一葉面積当たりの光合

Fig. 13 Photosynthetic rate per unit pixel

成速度が一定だと仮定すると、葉面積が増加すれば当然その分だけ光合成速度も増加すると考えられる。

システム内を 22°C 一定に保ったときの二酸化炭素減少量つまり光合成速度 y を時間 t に対して最小二乗法を用いて直線近似すると、

$$y = 0.000\,064t + 1.35 \quad (2)$$

が得られる。これを図にしたのが図 13 の破線である。また、同一測定時の葉面積のピクセル数 z を時間 t に対して最小二乗法を用いて直線近似すると、

$$z = 0.116t + 840 \quad (3)$$

が得られる（同図実線）。両式より単位ピクセル数当たりの光合成速度を算出し、それを図に一点鎖線で示す。

この図から分かる通り、単位ピクセル数当たりの光合成速度の傾きは、全体の光合成速度の傾きよりも小さくなっている。つまり、ただ単に全体の光合成の変化を指標とするよりも、画像から得られる植物の葉面積のピクセル数当たりの光合成の変化を指標とする方が、その時の環境を評価するのに適していると考えられる。しかし、同一環境における単位ピクセル数当たりの光合成速度は一定とはなっていないことに注意しなければならない。これは全体の光合成速度の増加がピクセル数の増加に比べて小さかったためにわずかながら減少を示しているのであるが、この原因として

は、画像処理によって得た葉には局所的な光合成速度差が存在するためと考えられる。すなわち幼葉は面積はあるが光合成は不十分であるためと考えられる。

また図 12 においてピクセル数は全体的にみて増加の傾向を示している。ところどころ減少しているのは、画像を真上から撮影しているためで、葉が重なったりして撮影の時々により見え隠れしたり、葉の成長とともに新芽が出てきても始めは下の葉の上でありピクセル数に現れなかったりしてしまうため多少の減少があると思われる。画像に現れない重なった部分では光合成

が行われないわけであるから、その部分の影響は少ないと考えられる。しかし葉面積の測定精度は今後もっと向上させなければならない課題である。

7. 結 論

本研究により次の結論を得た。

- (1) 植物の生長をモニタするために光合成速度、重量、葉面積の 3 因子を同時に連続的に計測できるシステムを開発した。
- (2) 重量変化は被験植物体を取り出さなくても連続的に計測できるようにした。
- (3) 同化速度には、前歴効果などの影響が含まれており、植物の最適条件を見いだすためには、これを考慮すべきであることがわかった。すなわち、余り短時間の環境変化は好ましくないことがわかった。

研究をまとめるに当たり、本学大学院生鈴木浩明君の協力を得たので感謝します。

参 考 文 献

- 1) 牛島忠広, 古川昭雄, 米山忠克: 植物の生産過程測定法, 共立出版 (1981)。
- 2) 中沢 弘, 川瀬 桂, 佐々木正和: 植物工場における自動生長計測システムの開発, 昭和 62 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1987) 837。