植物の工場的生産と成長計測

柴田孝信・岩尾憲三*・高野泰吉**

(株)メイテック 451 愛知県名古屋市西区

* 中部電力㈱電気利用技術研究所 459 愛知県名古屋市緑区

** 名城大学農学部 468 愛知県名古屋市天白区

Analysis of Factory Production of Plants and Growth Measurement

Takanobu SHIBATA, Kenzo IWAO* and Taikichi TAKANO**

Meitec Co., Inc., Nishi-ku, Nagoya 459, Japan

* *Electrotechnology Applications R & D center, Chubu Electric Power Co., Inc., Midori-ku, Nagoya 459, Japan*

** *Faculty of Agriculture, Meijo University, Tempaku-ku, Nagoya 468, Japan*

Summary

We have studied the intentional production and quality control of lettuce plants (*Lactuca sativa* L. non-heading type) grown in a plant factory. Using the growth indices obtained by image processing especially leaf area, it is possible to measure the growth of a lot of individual plants continuously. The distribution of the growth was represented by frequency function, therefore, it is possible to evaluate the production by the quality control technique in the industrial fields. Furthermore, there was a significant relationship between the growth rate by the regression curve of horizontal projected leaf area and the yield. With the advancement of micro-computer technology, we can use a low cost image processing system with a personal computer.

In conclusion, the horizontal projected leaf area of lettuce transplants for several days after sowing made it possible to estimate the yield and control the production.

緒 言

植物工場の開発研究においては、ハードウェア開発に偏る傾向が見られる。筆者らのこれまでの経験から、製品である作物の工場的生産にあたって、次の三つのソフトウェア的要件が、定常的に満たされる必要があると考える。

- ・生産の目標が明確にされていること（目標管理）。
- ・計画生産が可能であること（生産管理）。
- ・作物の品質を一定に維持できること（品質管理）。

上述の要件を満たすためには、以下の条件を明確にする必要がある。

- ・対象作物の生育プロセスが、発芽から収穫まで明確になっていること。
- ・各生育プロセスにおいて、栽培環境の調節・制御の目的が明確になっていること。つまり、

生育の最短時間制御，費用の最小化，省力化，利益の最大化，あるいはそれらを組み合わせて，線形計画法などにより最適化を図る必要がある。

- ・諸元を関数化するとともに，目標値，すなわち IP (Index Performance) を明らかにして，これを最適化するなどの科学的な決定法を確立する必要がある。そして，その IP は各生育プロセスごとに明確にされるべきである。

以上に述べたように，栽培の最適化および管理化のためには，作物の成長をモニターする成長計測技術が前提となる¹⁻⁴⁾。すでに画像処理を用いた非接触での成長計測についても，今までに多くの基礎的研究⁵⁻¹⁰⁾や装置開発¹¹⁻¹²⁾が行なわれている。しかし既存の工業技術の応用が最も困難な部分は生体計測であり，栽培現場での実用的な成長計測を可能にする装置や手法が開発されているとはいいがたい。そこで，筆者らは画像処理を用いた実用的な野菜の成長計測技術および装置の開発を行なっている¹³⁻¹⁴⁾。本研究では人工光型植物工場で栽培される非栽培レタスを対象に，生産ロットのバラツキや成長計測について分析を加えることにより，作物の工場的生産について検討した。

材料および方法

1. 供試材料

供試材料として，非栽培レタス二品種 (*Lactuca sativa* L., cv. ‘晩抽レッドファイヤー’，‘レッドファイヤー W’) を用いた。供試材料は，光源に蛍光灯を用いた人工光型植物工場で 30 日間養液栽培した。供試材料の種子を，水温 27°C の水中で 48 時間滞留させ，発芽した幼苗を，植物工場に定植した。各植物体を明期 25°C，暗期 20°C，水温 23°C，湿度 70%，光強度 12 klux，日長 16 時間，EC 2.0 mS/cm，pH 5.5 で栽培した。

2. 成長計測

播種後 12 日目の，‘晩抽レッドファイヤー’600 株の地上部新鮮重を計測した。‘レッドファイヤー W’24 株について，各個体の播種後 5 日目から 15 日目までの水平投影面積と，収量として播種後 30 日目の地上部新鮮重を計測した。水平投影面積は，筆者らが開発した画像処理システム¹⁴⁾により，一日一回の連続計測を行なった。水平投影面積による成長曲線を式 (1) で示す指数曲線で近似した。成長解析において，成長の効率を表すのに乾物生産における成長率 GR が用いられるが，葉面積による成長率 GR_A を，同様に式 (2) で定義した。

$$AH_t = AH_0 \cdot \exp(GR_A \cdot t) \quad (1)$$

$$GR_A = (\ln AH_t - \ln AH_0) / t \quad (2)$$

結果および考察

人工光型植物工場で栽培される非結球レタスの品質管理の可能性について検討した。苗の生体重は，正規分布することがわかった (Fig. 1)。高い収量を得るためには，正規分布曲線を図中の右方向に移動させる必要がある。さらに，工場から出荷される製品の規格化，つまり一定の大きさの製品を出荷するためには，管理限界線 (平均値 ± 標準偏差の n 倍) による品質管理が，各生育プロセスの移行時，または出荷時に必要となる。環境条件の最適化によって，生体重の平均値が大きく，標準偏差が小さい急峻な分布とすることが可能であると考えられる。

成長量を計測することで，初めて栽培作物の生育状況が把握でき，栽培を管理することが可能

Fig. 1. Frequency curve of the top fresh weight of lettuce transplants ('Banchu-red-fire').

Table 1 Relationship between item and accomplishment for growth measurement by image processing, ○ : Accomplished, △ : Not Satisfied

Item	Accomplishment
Non-destructive measurement	○
Automatic measurement	○
Individual measurement	○
Three-dimensional measurement	△
Real-time measurement	○
Coloring	○
Price	△
Accuracy	○

となる。乾物重および生体重は、多くの個体の破壊検査による平均値の解析となる。多数の個体を連続的に計測（生育モニタリング）するためには非破壊計測が必要条件である。すでに非結球レタスの生体重と画像特徴量との間に、高い相関関係があることが報告されている^{9,10}。ここで、画像処理を用いた作物の成長計測における、課題と達成度について考える (Table 1)。各種作物の成長量と画像特徴量との間には有意な関係が認められるため、画像特徴量による成長の代用指標化が実用的に可能である^{5,9,10}。三次元計測については、栽培現場における撮像の制限により、計測株数が限られてしまうため実用性に欠ける。最近になって価格対性能比の優れたパソコンを利用して安価な画像処理システムを構築することが可能になったことから、近い将来には栽培現場にも導入が可能になると予想される。しかしハードウェアの低価格化が進んでも、計測値を栽培者に有益な情報にまで加工するノウハウがソフトウェア化されなければ意味がない。ソフトウェアの充実とともに、画像処理は目視情報を定量化するものとして極めて有用な技術になるといえる。

植物工場での 30 日間の栽培期間における、レタスの生体重、乾物重、および葉面積の成長曲線は指数回帰式で近似することができる¹⁰。'レッドファイヤー W'24 株の水平投影面積の指数回帰式のなかから特徴的な特性を示す 14 株を Fig. 2 に示す。約 170 g の収量を示した成長率が最も高い株、植物工場の一般的な収量と思われる 120 g 前後の二株、収量が約 40 g の生育不良の一株である。成長が健全に行なわれる個体ほど、指数回帰式の傾きが大きく、回帰式の初期値と終値の逆転がみられた。回帰分析における回帰式の当てはめの結果、同じ初期値（実測値）の個

Fig. 2. Comparison among growth curves as the logarithmic form of lettuce transplants (Red-fire-W). Each curve was shown by a straight regression line.

- : Normal development (very large)
 ■—■ : Normal development (medium)
 ●—● : Abnormal development

体同士において、生育の劣る個体ほど回帰式の係数である初期値が実測値より高くなるため、初期値を用いた成長予測は困難である。以上の結果から、特に初期の生育プロセスにおける環境の影響や個体差が、同一個体の連続的な成長量から得られるところの成長曲線の傾き、つまり成長の効率を表す成長率であらわされることが示唆された。

Fig. 3 に、'レッドファイヤー W'24 株の水平投影面積による指数成長回帰式から得られる成長率と播種後 30 日目の地上部新鮮重の関係を示す。成長率と収量の間には、有意な相関関係が認められた ($P < 0.01$)。また、播種後 30 日目の地上部新鮮重に約 40 g から 170 g の大きな差がみられた。これは栽培密度や位置的な光量分布の不均一が原因であると考えられる。特に栽培ユニットの規模が小さい植物工場では、光量不足になりがちな辺縁部の株の占める割合が無視できないため、実用的な栽培を行なうためには技術的に解決しておく必要がある。成長率と収量との間に有

Fig. 3. Relationship between the top fresh weight at 30 days after sowing and the growth rate corresponding to exponential regression curve by horizontal projected leaf area of lettuce transplants (Red-fire-W), during 4-to 15 days after sowing.

** Significant at 1% level

意な関係が認められたことで、収量予測や予測に基づく選別、ならびに栽培制御の可能性が示唆された。しかし、実用的な収量予測を行なうためには、指標項目の検討やさらに精度を高める工夫が必要であろう。

ま と め

人工光型植物工場で栽培される非栽培レタスについて、作物の計画的生産および品質管理のための成長計測について検討した。成長の分布は正規分布曲線であらわされ、 $\bar{x}-R$ 管理図などによる品質管理の可能性が示された。画像処理による画像特徴量、特に水平投影面積を用いることでリアルタイムな成長計測が可能である。さらに同一個体の非破壊連続計測により、苗の水平投影面積の指数成長曲線から収量を予測できる可能性が示唆された。以上の結果から、各個体の成長量をフィードバックした栽培管理が可能であることがわかった。今後は、生体計測に基づいた各生育プロセスの最適化を検討する予定である。なお、本研究の要旨は当学会平成4年度大会にて発表した。

参 考 文 献

- 1) 星 岳彦・岡野利明・寺添 斉：植物の生育と制御，電気設備，平成元年2月号：127～133(1989)
- 2) 小林 肇：植物工場の夢と現実，省力と自動化，'89/10：74～78(1989)
- 3) 橋本 康：苗生産におけるシステム科学への期待—生体計測と制御に基づく知能的苗工場—，遺伝，46(4)：28～31(1992)
- 4) 橋本 康：施設栽培における植物生理の同定と生体情報，計測技術，'87/11：67～79(1983)
- 5) Matsui, T., and H. Eguchi: Computer control of plant growth by image processing I., Mathematical representation of relation between growth and pattern area taken in photographs of plants, Environ. Control in Biol, 14(1)：1～7(1976)
- 6) Eguchi, H., and T. Matsui: Computer control of plant growth by image processing II., Pattern recognition of growth in on-line system, Environ. Control in Biol, 15(2)：37～45(1977)
- 7) Eguchi, H., and T. Matsui: Computer control of plant growth by image processing III., Image processing for evaluation of plant growth in practical cultivation, Environ. Control in Biol, 16(2)：47～55(1978)
- 8) Eguchi, H., Hamakoga, M., and T. Matsui: Computer control of plant growth by image processing IV., Digital image processing of reflectance in different wave length regions of light for evaluating vigor of plants, Environ. Control in Biol., 17(2)：67～77(1979)
- 9) 小田雅行・野中正義・星野和生：レタスの投影面積と生長の関係，農気東海誌，45：6～12(1987)
- 10) 岩尾憲三・蔭山裕之・谷村泰宏・池田 彰・江崎謙治・河相好孝・中山繁樹：蛍光ランプを用いた人工光型植物工場の研究（その2）画像計測による野菜の成育監視技術の開発，生物環境調節，29(2)：89～93(1991)
- 11) George E., Meyer, and Dale A. Davison: An electronic image plant growth measurement system, TRANSACTIONS of the ASAE, 30(1)：242～248(1987)
- 12) 中沢 弘・佐々木正和・小平祐介：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—，精密工学，56(6)：75～80(1989)
- 13) 柴田孝信・岩尾憲三・高野泰吉：植物工場における野菜の画像処理手法の開発，植物工場，4(2)：123～130(1993)
- 14) 柴田孝信・岩尾憲三・高野泰吉：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(1993)