植物工場におけるレタスの成長予測手法の開発

柴田 孝 信・岩 尾 憲 三*・高 野 泰 吉**

(株)メイトック・*中部電力 (株)電気利用技術研究所・**名城大学農学部

Development of Growth Prediction Method in
Lettuce Plants Grown in a Plant Factory

Takanobu SHIBATA, Kenzo IWAO* and Taikichi TAKANO**

Meitec Co., Inc., Nishi-ku, Nagoya 451, 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

Fresh weight at the harvest of lettuce plants (*Lactuca sativa* L. cv. Red-fire-W) grown in a plant factory with fluorescent lamps was estimated by the automatic plant growth measurement system with a personal computer. Growth curves of leaf area, fresh- and dry-weight of above ground parts from sowing to about 30 days in age showed an exponential pattern ($r^2=0.90$ or higher). It is most suitable to use an exponential regression function during young stage of the growth, considering a declining pattern in specific growth rate. Standard deviations at 6.1-5.4 were observed between the top fresh weight in 30 days after sowing and specific growth rate revealed by the regression curve of leaf area. On the other hand, standard deviations obtained by the leaf area estimated from the regression curve were 6.4-3.9. Further, standard deviations were 3.6-3.1, where the initial leaf area and specific growth rate were regarded as describing parameter. The growth of lettuce plant was quantitatively represented as the function of leaf area by image processing. Specific growth rate of leaf area of individual plants in young stage of the growth showed periodic fluctuation. As the plant grew from sowing, its cyclic period became longer. The leafing velocity is defined as a cyclic period of changes in specific growth rate.

(Received March 12, 1993)

1993年3月12日受付

緒 言

露地栽培される作物の栽培管理を適切に行なうために、収穫時期や収量を早期に予測する成長予測法の研究が数多く行われている。植物工場においても、計画的な栽培を行うためには成長を予測する技術が重要である。露地栽培の成長予測は、変動する気象要因がパラメータになる。環境条件が一定に制御される植物工場の成長予測は、オンラインモニターされる同一個体の連続的な成長量の数値解析により可能であると考えられる。従来、成長の計測や解析は、生体重や乾物重の平均値により行われ

てきた。成長をオンラインモニターするためには作物を破壊して計測することはできない。作物の成長を非破壊計測する試みとして、画像処理の適用事例が報告されている¹⁻⁵⁾。画像処理から得られる成長指標は葉面積、莖径、葉長などがあるが、葉面積が最も広く用いられている^{3,6-11)}。筆者ら¹²⁾は、植物工場で栽培する育苗期の非結球レタスについて、鉛直方向から水平面に投影した葉面積（水平投影面積）が生体重の高精度な代用指標となることを報告した。さらに、非結球レタス苗の葉面積の成長曲線から得られる成長速度を用いた成長予測の可能性と実用化のための精度の向上の必要性を報告した¹³⁾。本研究では、人工光型植物工場で栽培する非結球レタス

について、育苗期の水平投影面積を用いた個体の収量予測を試み、予測手法の開発と予測精度の向上を検討した。また、育苗初期の個体の成長予測が可能になれば苗品質を早期に評価することができるため、幼苗の本葉の展葉過程の定量化手法についても検討を加えた。

材料および方法

1. 供試材料

非結球レタスの‘レッドファイヤー W’ (タキイ種苗) を使用した。種子を水温 27°C の水中でエアバブリングしながら 48 時間滞留させた。水中で発芽した幼苗を植物工場に 168 苗定植した。168 苗のうち成長解析試験に 140 苗、収量予測試験と展葉周期の定量化試験に 28 苗を供試した。供試材料は、光源に蛍光灯¹⁴⁾ (三菱電機 FLR110H・EX III/A) を用いた人工光型植物工場で養液栽培した。各種物体を気温 20°C、水温 20°C、相対湿度 60%、光強度 180 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ 、日長 16 時間、養液の EC 2.0 mS/cm、pH 5.5 で栽培した。

2. 画像処理

供試材料の水平投影像を、モノクロ CCD カメラ (竹中システム, TM-745H, 有効 25 万画素) を用いて画像メモリー装置にオンライン入力した。入力画像を画質改善のための濃淡画像処理後に大津のヒストグラム判別法¹⁵⁾を用いて 2 値化した。画像処理システムは CCD カメラ、画像メモリー (ピラス LA-525 512×512 画素, 256 階調)、画像処理装置 (NEC PC-9801RX)、画像モニター、プリンターからおもに構成されるパソコン画像処理システムである¹²⁾ (Fig. 1)。CCD カメラと対象物の距離は 30 cm (播種後 20 日目までの株) および 50 cm (播種後 20 日目以降の株) とした。画像計測の分解能はカメラ距離 30 cm で 0.6 mm/画素, 50 cm で 1 mm/画素である。

3. 回帰分析

線形関数、2 次関数、3 次関数および指数関数を回帰

関数として、最小 2 乗法により関数のパラメータを決定した。計算は倍精度浮動小数点 (有効桁数 15 桁) のデータ型で、表計算ソフト (Microsoft Excel) を用いて行った。

線形関数、2 次関数および 3 次関数の回帰式を式 (1) の高次関数の一般式で表わし、誤差を最小にする各パラメータ値を最小 2 乗法¹⁶⁾により決定した。

$$y = ax^0 + bx^1 + cx^2 + \dots + mx^m \quad (1)$$

残差平方和 S_E を最小にすべき関数は式 (2) で、各パラメータの偏微分係数が同時に 0 となるように各パラメータの最適値を求めた。

$$S_E = \sum_{k=1}^N [y_k - (ax_k^0 + bx_k^1 + cx_k^2 + \dots + mx_k^m)]^2 \quad (2)$$

指数関数式 (3) は高次関数式と異なりパラメータ a , b を非線形に含んでいるため、最小 2 乗法による線形テイラー微分補正法¹⁶⁾を用いてパラメータを決定した。計算方法は次のとおりである。

$$y = a \exp(bx) \quad (3)$$

最終的に求めるパラメータ a , b を式 (4) のように初期値 a_0 , b_0 と反復補正值 Δa , Δb に分解する。

$$\begin{cases} a = a_0 + \Delta a \\ b = b_0 + \Delta b \end{cases} \quad (4)$$

最小にすべき関数は式 (5) で、線形パラメータとして扱えるようになった Δa , Δb を最小 2 乗法で求める。

1 回目の計算で得られた a , b を 2 回目の計算の a_0 , b_0 とし、 Δa , Δb が十分小さく ($\pm 1.0\text{E-}06$ 以下とした) なるまで反復計算する。

$$S_E = \sum_{k=1}^N [y_k - a_0 \exp(b_0 x_k) - \Delta a \exp(b_0 x_k) - \Delta b a_0 x_k \exp(b_0 x_k)]^2 \quad (5)$$

(3) 式の両辺の対数をとった線形式 (6) の線形回帰分析から求めた a , b を式 (4), (5) の初期値 a_0 , b_0 とした。

$$\ln y = \ln a + bx \quad (6)$$

回帰における説明変数と目的変数との有意性を寄与率 r^2 および分散比 F により検定した。回帰による予測精度の指標として、分散分析から得られる残差平方和 S_E または標準偏差 S.D. (式 (7)) を用いた。d.f. は残差の自由度である。

$$\text{S.D.} = \sqrt{\frac{S_E}{\text{d.f.}}} \quad (7)$$

4. 成長解析試験

播種後 7, 9, 12, 17, 22, 27, 32 日目の各 20 株, 計 140 株の水平投影面積, 地上部生体重および地上部乾物重 (85°C 通風乾燥 2 日間) を成長指標として、適合す

Fig. 1 Block diagram of image processing system with a personal computer.

る回帰関数の型と回帰における予測精度の検討を行った。水平投影面積の成長曲線を式(8)の指数曲線、式(9)の2次曲線、式(10)の3次曲線で近似した。地上部生体重と地上部乾物重についても式(8)、(9)、(10)と同様に回帰曲線を求めた。

$$AH_t = AH_0 \exp(SGR_{At} \cdot t) \quad (8)$$

$$AH_t = AH_0 + at + bt^2 \quad (9)$$

$$AH_t = AH_0 + at + bt^2 + ct^3 \quad (10)$$

ここで、 AH_t 、播種後 t 日後の水平投影面積 (cm^2)； AH_0 、播種後 0 日目の水平投影面積の初期値 (cm^2)； SGR_{At} 、 t 日までの水平投影面積の比成長率 (day^{-1})； a, b, c 、回帰曲線の係数； t 、播種後経過日数 (day)。

約 30 日の栽培期間を区分して成長特性を把握するため、栽培期間を五つ ($t_2 - t_1 = 5$ 日) に分割して各 20 株の地上部生体重と水平投影面積の平均値の比成長率を求めた (式 (11)、式 (12))。

$$SGR_W = (\ln FW_{t_2} - \ln FW_{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad (11)$$

$$SGR_A = (\ln AH_{t_2} - \ln AH_{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad (12)$$

ここで、 SGR_W 、 $t_2 - t_1$ 日の地上部生体重の比成長率 (day^{-1})； SGR_A 、 $t_2 - t_1$ 日の水平投影面積の比成長率 (day^{-1})； FW_{t_2} 、播種後 t_2 日後の地上部生体重 (g)； FW_{t_1} 、播種後 t_1 日目の地上部生体重 (g)； AH_{t_2} 、播種後 t_2 日後の水平投影面積 (cm^2)； AH_{t_1} 、播種後 t_1 日目の水平投影面積 (cm^2)。

成長モデル式の精度向上を目的として、約 30 日の栽培期間を二分割して指数関数回帰分析を行った。五分割から二分割にしたのは、細分化した比成長率 SGR_A の経時変化に一つの変曲点がみられたためである。播種後 7, 9, 12, 17 日目および播種後 17, 22, 27, 32 日目の水平投影面積に指数関数回帰式を当てはめた場合と、播種後 7 日目から 32 日目までのデータに指数関数回帰式を当てはめた場合の、残差平方和 S_E を比較した。

5. 収量予測試験

収量の予測精度を実用的に満足する水平投影面積のモニタリング期間の把握と、収量の予測精度の向上を検討した。供試材料 28 株について、各個体の水平投影面積を播種後 4 日目から 20 日目までの育苗期に、一日に 1 回計測した。播種後 4 日目から 20 日目までを以下の期間 ① から期間 ③ に分けて、それぞれ 28 株の水平投影面積の指数関数回帰式を求めた。収量は播種後 30 日目の地上部生体重とした。

期間 ①：播種後 4 日目から 10 日目

期間 ②：播種後 4 日目から 15 日目

期間 ③：播種後 4 日目から 20 日目

育苗期の水平投影面積を用いた収量予測モデルを三と

Fig. 2 Definition of measurement items (length, width) of young lettuce plant.

Aspect ratio=length/width.

おり用意して、回帰の有意性と予測精度の評価を行った。まず、比成長率 SGR_{At} と収量、および初期値 AH_0 と収量との回帰分析を行った。次に、水平投影面積の収穫時の推定値と収量との回帰分析を行った。水平投影面積の推定値は式(8)において $t=30$ を代入して得られる推定葉面積 AH_{30} である。さらに、初期値 AH_0 と比成長率 SGR_{At} を説明変数、収量を目的変数にした重回帰分析を行った。

6. 展葉周期の定量化試験

播種後 2 日目から本葉が 2 枚ほど展葉する播種後 10 日目までの幼苗の成長過程と形態特徴量の関係を分析した。定植直後の幼苗の水平投影像の最大長と幅を形態特徴量とした。Fig. 2 に最大長と幅の定義を示した。最大長は野菜画像の輪郭線の周上の二点間の最大距離である。幅は最大長に直角な方向の輪郭線の周上の二点間の最大距離である。最大長と幅から縦横比 (Aspect ratio) を求めた。

本葉の展葉過程を、水平投影面積による比成長率を用いて定量化することを試みた。本葉が展葉を開始する播種後 6 日目から 6 枚程度展葉する播種後 20 日目までの同一株 28 株の 1 日ごとの水平投影面積を、画像処理によりオンラインで連続計測した。式 (12) から水平投影面積の比成長率 SGR_A ($t_2 - t_1 = 1$ 日) を求めた。比成長率の経時変化にスプライン曲線をあてはめ、スプライン曲線の変曲点の時間間隔 (周期) と本葉の展葉速度との関係を分析した。

結果および考察

1. 成長解析試験

各成長指標に 2 次、3 次の高次関数と指数関数を当てはめた場合の回帰分析結果を Table 1 に示した。各回帰モデルの F 値は 500 以上と高く、成長曲線を有意に近似できた。2 次よりも 3 次の高次関数回帰式のほうが

Table 1 Comparison among regression functions obtained from the horizontal projected leaf area, fresh- and dry-weight of the above ground part.

(a) Horizontal projected leaf area (AH)			
Regression function AH_t : (cm^2), t : (day)	Standard deviation (cm^2)	Ratio of contribution r^2	Variance ratio F
$AH_t = 243.9 - 43.1t + 1.71t^2$	49.7	0.94	1157**
$AH_t = -4.6 + 7.1t - 1.17t^2 + 0.492t^3$	46.1	0.96	905**
$AH_t = 2.71 \exp(0.171t)$	51.0	0.94	1595**
(b) Top fresh weight (FW)			
Regression function FW_t : (g), t : (day)	Standard deviation (g)	Ratio of contribution r^2	Variance ratio F
$FW_t = 32.5 - 5.4t + 0.195t^2$	7.0	0.90	545**
$FW_t = -24.1 + 6.0t - 0.46t^2 + 0.011t^3$	5.5	0.94	618**
$FW_t = 0.035 \exp(0.235t)$	5.4	0.96	1277**
(c) Top dry weight (DW)			
Regression function DW_t : (mg), t : (day)	Standard deviation (mg)	Ratio of contribution r^2	Variance ratio F
$DW_t = 1447.3 - 242.4t + 8.82t^2$	320	0.90	554**
$DW_t = -1017.9 + 255.3t - 19.75t^2 + 0.488t^3$	258	0.94	588**
$DW_t = 2.51 \exp(0.221t)$	257	0.94	1209**

** Significant at 1% level.

高い精度で成長を近似できた。指数関数回帰式は3次関数回帰式と同等以上の予測精度を有していた。これから、成長の曲線性を指数関数回帰式で説明できることがわかった。指数関数回帰式は、多項式にくらべ、成長の増加効率を表わすパラメータが一つである。したがって、取り扱いが簡易になる利点がある。

水平投影面積の指数成長曲線と細分化した比成長率 SGR_A , SGR_W を Fig. 3 に示した。比成長率の低下傾向において播種後18日目あたりに変曲点が認められた。比成長率は時間の経過とともに低下し、播種後30日目の比成長率は播種後20日目までの比成長率にくらべ約2分の1になった。播種後20日目までにおいて、 SGR_A の低下率が SGR_W の低下率にくらべて大きかった。これは、葉の重なりによる水平投影面積の全葉面積に対する割合の減少が影響しているためであると考えられる¹²⁾。

成長を指数関数で近似できるということは、比成長率が一定であることを意味する。従来、多くの研究者が植物の成長過程を単一の式で表わすことを試みてきている。たとえば、Williams¹⁷⁾は、コムギの乾物重をロジスティック曲線、連続的な指数関数、および多項式にそれぞれ当てはめて比較した結果、それらのどの式も正確に

Fig. 3 A growth curve (—) of lettuce by the horizontal projected leaf area and changes of specific growth rate.

■, horizontal projected leaf area; ●, SGR of top fresh weight (mean value of 20 plants); △, SGR of horizontal projected leaf area (mean value of 20 plants); —, trend curve of SGR of top fresh weight; ---, trend curve of SGR of horizontal projected leaf area.

は成長曲線を表現できないことを明らかにした。本試験においても、細分化された比成長率の低下から、30日間

Table 2 Comparison between residuals of exponential regression function obtained from horizontal projected leaf area (AH) of divisible and indivisible duration.

Duration of regression (day)	Regression function AH_t : (cm ²), t : (day)	Duration of residual (day)	Residual sum of squares S_E (cm ²)
7-32	$AH_t=2.71 \exp(0.171t)$	7-17	24952
		22-32	292636
		ΣS_E	317588
7-17	$AH_t=0.08 \exp(0.325t)$	7-17	779
17-32	$AH_t=2.99 \exp(0.168t)$	22-32	289496
		ΣS_E	290275

の栽培期間のすべての成長を単一の指数関数で近似することの危険性が示唆され、比成長率の変曲点で数式モデルを分割することが考えられた。

Fig. 3 の約 30 日間の栽培期間を、比成長率の変曲点である播種後 18 日目前後で 2 分割した場合の回帰分析結果を Table 2 に示した。播種後 22 日目以降の残差は期間を分割してもほとんど減少しなかった。しかし、播種後 17 日目までの残差は分割することにより 32 分の 1 に減少した。この結果、より正確な成長モデル式を得るためには、栽培期間を分割して指数関数回帰を行うことが最も有用であると判断した。

2. 収量予測試験

収量を目的変数に、期間 ①、②、③ の初期値 AH_0 または比成長率 SGR_{At} を説明変数にした回帰分析結果を Table 3 に示した。比成長率と収量との間の F 値は 19.3 から 26.3 ($F_{20}^1(0.01)=7.73$) を示し、すべての期間において有意な相関関係が認められた。いっぽう、初期値は期間 ③ においてのみ、 F 値が 23.2 ($F_{20}^1(0.01)=7.73$) の有意な相関関係が認められた。比成長率を用

いた各期間の回帰の標準偏差は 6.1 g から 5.4 g を示し、初期値よりも予測精度の変動が少なかった。成育初期において、初期値にくらべて比成長率の収量への寄与率が非常に大きいのは、指数関数への適合度合が高いことを意味している。期間 ① から期間 ③ に従い比成長率の係数が大きくなるのは、生育ステージの進行に伴う細分化された比成長率 SGR_A の低下により、指数関数回帰式の比成長率 SGR_{At} が相対的に小さくなるためである。以上の結果から、比成長率 SGR_{At} の個体差が栽培期間を通して維持されるものと考えられた。

収量を目的変数、期間 ①、②、③ の推定葉面積 AH_{30} を説明変数にした回帰分析結果を Table 4 に示した。比成長率 SGR_{At} を説明変数にした場合と同様に、すべての期間において有意な相関関係が認められた。各期間の回帰の標準偏差は 6.4 g から 3.9 g を示し、予測精度は回帰分析にとりこむ時系列が多いほど高くなり、期間 ③ では比成長率を用いた場合にくらべて精度の向上が認められた。これは、期間 ③ において初期値が回帰に有意に寄与しているためである (Table 3)。推定葉面

Table 3 Changes in estimated errors of regression between the top fresh weight (FW_{30}) at 30th day after sowing, and initial leaf area (AH_0) or specific growth rate (SGR_{At}) corresponding to exponential regression functions obtained from the horizontal projected leaf area in different duration.

Duration (day)	Regression function FW_{30} : (g), AH_{30} : (cm ²)	Standard deviation (g)	Ratio of contribution r^2	Variance ratio F
4-10	$FW_{30}=42.4+85.6AH_0$	7.7	0.09	2.5
	$FW_{30}=-0.8+100.2SGR_{At}$	5.7	0.50	26.3**
4-15	$FW_{30}=28.6+65.7AH_0$	7.8	0.05	1.4
	$FW_{30}=-27.7+202.5SGR_{At}$	5.4	0.54	30.6**
4-20	$FW_{30}=14.4+112.4AH_0$	5.8	0.47	23.2**
	$FW_{30}=-79.2+403.5SGR_{At}$	6.1	0.43	19.3**

** Significant at 1% level.

Table 4 Changes in estimated errors of regression between the top fresh weight (FW_{30}) at 30th day after sowing and that estimated value (AH_{30}) corresponding to exponential regression functions obtained from the horizontal projected leaf area in different duration.

Duration (day)	Regression function FW_{30} : (g), AH_{30} : (cm ²)	Standard deviation (g)	Ratio of contribution r^2	Variance ratio F
4-10	$FW_{30}=31.7+0.00056AH_{30}$	6.4	0.36	14.5**
4-15	$FW_{30}=28.1+0.0042AH_{30}$	5.4	0.54	30.8**
4-20	$FW_{30}=19.1+0.016AH_{30}$	3.9	0.76	81.5**

** Significant at 1% level.

Table 5 Changes in estimated errors of multiple regression between the top fresh weight (FW_{30}) at 30th day after sowing, and the initial leaf area (AH_0) and specific growth rate (SGR_{At}) corresponding to exponential regression functions obtained from the horizontal projected leaf area in different duration.

Duration (day)	Multiple regression function FW_{30} : (g), AH_0 : (cm ²)	Standard deviation (g)	Ratio of contribution r^2	Variance ratio F
4-10	$FW_{30}=-69.7+308.5AH_0+226.5SGR_{At}$	3.4	0.83	59.2**
4-15	$FW_{30}=-63.0+160.2AH_0+254.5SGR_{At}$	3.6	0.80	50.4**
4-20	$FW_{30}=-94.4+107.5AH_0+383.8SGR_{At}$	3.1	0.86	73.9**

** Significant at 1% level.

積の回帰係数が、データ数が多くなるにつれて大きくなるのは、細分化された比成長率 SGR_A の低下により若い生育ステージほど推定葉面積が実測葉面積より高い値を示すためである。推定葉面積を用いた収量予測モデルは、期間 ③ において精度の向上が認められたが、早い時点での予測精度は比成長率を用いた場合と大差ないものであった。

収量を目的変数、比成長率 SGR_{At} と初期値 AH_0 を説明変数にした重回帰分析結果を Table 5 に示した。標準偏差の最大値は 3.6 g、幅は 0.5 g であった。前述した二つの予測モデルの場合と異なり、成育ステージの早い時点でも高い予測精度が得られた。期間 ①、② において精度が向上したのは、初期値と比成長率を切り離して重み付けしたことによるものと考えられた。

3. 展葉周期の定量化試験

同一個体の形態変化を画像として Fig. 4 に、形態特徴量である縦横比の変化を Fig. 5 に示した。播種後 2 日目から 3 日目にかけて子葉が開き、播種後 7 日目まで子葉の縦方向と横方向が交互に成長を繰り返すことで、縦横比に周期的変化がみられた。播種後 7 日目から 8 日目にかけて子葉の成長が停止し、その後の本葉の成長とともに縦横比は 1 に近づいた。本葉と子葉の長さが等しい

播種後 10 日目に縦横比が 1 になった。縦横比により、同一個体の本葉展開までの連続した成長過程を定量化することができた。縦横比が 1 になる時間が早いほど本葉の展開が早く行われたものと判断できる。いっぽう、周期的変化を示さない個体は子葉の発育が不健全であることが予想される。以上の結果から、幼苗の日単位の成長

Fig. 4 The growth process shown by morphological feature of young lettuce plants during the period from 2 to 10 days after sowing.

Values in figure indicate days after sowing.

生物環境調節 (Environ. Control in Biol.)

Fig. 5 Change in aspect ratio during the young stage of lettuce growth.

Aspect ratio=length/width. A, development of cotyledon; B, width>length in cotyledon development; C, length>width in cotyledon development; D, width>length in cotyledon development; E, width>length in cotyledon arrested in growth and true leaf development; F, length (true leaf length)=width (cotyledon length).

解析が、画像処理により十分な精度で簡易に行えることがわかった。本試験では1日単位の計測を行ったが、筆者ら¹⁸⁾は、2時間単位での成長変化が十分な分解能で得られることを実証している。

本葉が展葉を開始する播種後6日目から20日目までの水平投影面積の比成長率に周期的変化がみられた (Fig. 6)。播種後8日目、11日目および15日目に、比成長率が最小になる極値が多くの個体にみられた。比成長率の極小化と同時に本葉の展葉がみられた。成育の進行に伴い周期 (変曲点の時間間隔) は大きくなり ($T_1 < T_2 < T_3$)、振幅 A は小さくなる傾向がみられた。比成長率の周期的変化は、葉と葉における物質の需給との関

係から、若葉の需給性が漸次供給器官に転換していくことによるものと考えられた。つまり、本葉が一枚ずつ展葉するさいに比成長率が小さくなるが、新葉が独立栄養を始めると負担が少なくなり、その後効率が高くなるからと考える。成育ステージの進行に伴う振幅の減少は、ステージの進行に伴う比成長率の低下により、変化の絶対値が減少するためと考えられる。さらに、葉の重なりにより全葉面積が水平投影面積に投影されにくくなることも影響していると考えられる。以上の結果から、比成長率の経時変化は本葉の展葉に対応した周期的減衰変動であることがわかった。この周期的変動において、周期が短く周期的変化がはっきりしているものほど、つぎつぎと成長効率の高まる葉の展葉を示していることが予想される。これから、比成長率を経時的にモニターした場合の変曲点、あるいは周期関数の各極値間の時間間隔を測定することにより葉間期を示し、その逆数から展葉速度を求めることが可能である。

28株のスプライン曲線から三つの周期 (T_1, T_2, T_3) を求めた (Table 6)。各周期の平均値は $T_1=62$ hr, $T_2=85$ hr, $T_3=101$ hr で、すべての個体について時間の経過とともに周期が長くなることが確かめられた。周期比 ($T_2/T_1, T_3/T_2$) の変動率 (標準偏差/平均値の百分率) は10%以下で、周期比は各個体でほぼ一定となる傾向が認められた。このような周期現象は、光周性における光の効果についても認められている。また、明期と暗期において比成長率 (乾物重) に周期的変化があることがわかっている¹⁹⁾。本試験の結果から、非結球レタス苗の水平投影面積の比成長率が展葉速度に対応した周期的変化を示すことがわかった。本手法を苗生産における

Fig. 6 A periodic change in specific growth rate ($\Delta, \blacktriangle, \blacksquare, \circ, \bullet, \diamond, \times, *$) of the horizontal projected leaf area during the young stage of lettuce growth.

The numerical values (1-3) indicate leafing of true leaf. A, amplitude; T_1-T_3 , leafing intervals; —, trend curve.

Table 6 The leafing intervals plastochrone as period estimated by specific growth rate of horizontal projected leaf area.

Leafing interval (hr)			Ratio of period	
T_1	T_2	T_3	T_2/T_1	T_3/T_2
61.66±12.58 (96, 48)	85.24±10.32 (108, 72)	101.38±13.06 (132, 84)	1.41±0.15 (1.75, 1.00)	1.19±0.08 (1.33, 1.00)
Mean value of 28 plants ±S.D. (Maximum, Minimum).				

不良苗の選抜等の品質管理に応用できると考えられる。

ま と め

植物工場で栽培される非結球レタスについて、画像処理から得られる特徴量を成長指標とした成長予測手法について検討し、以下のような結果を得た。

1) 葉面積の成長を、期間を分割した指数回帰式で近似できることがわかった。栽培期間（約30日）の3分の1である播種後10日目までの葉面積の推移から、播種後30日目の生体重を予測（回帰の標準偏差 3.4 g）でできることがわかった。

2) 本葉が2枚展葉するまでの幼苗の縦横比に、展葉過程に対応した周期的変化がみられた。この形態的な変化を定量化することで、成育初期の個体の成長度合を判断することができた。本葉の展葉過程においても、葉面積の比成長率に周期的変化がみられた。成育ステージの進行に伴い、周期は長くなり、振幅は減衰する傾向が認められ、本葉の展葉に対応した周期的変動であることがわかった。これから、この周期関数の各極値間の時間間隔を測定することにより、本葉の展葉速度を評価できる可能性が示唆された。

本研究で行った収量予測手法は、成長モニターに画像特徴量を採用することで、多数の個体の自動的な成長予測を可能にした。

文 献

- HASHIMOTO, Y., I. TAKETOSHI, P. J. KRAMER, A. W. NAYLOR, and B. R. STRAIN. 1976. Dynamic analysis of water stress of sunflower leaves by means of a thermal image processing. *Plant Physiol.* **76**: 266-269.
- 大政謙次・安保文彰・橋本 康・相賀一郎. 1979. 画像処理による植物の大気汚染害の評価. 国立公害研究所研究報告 **10**: 269-274.
- MATSUI, T. and H. EGUCHI. 1976. 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**: 1-7.
- EGUCHI, H. and T. MATSUI. 1977. Computer control of plant growth by image processing. II. Pattern recognition of growth in on-line system. *Environ. Control in Biol.* **15**: 37-45.
- EGUCHI, H. and T. MATSUI. 1978. Computer control of plant growth by image processing. III. Image processing for evaluation of plant growth in practical cultivation. *Environ. Control in Biol.* **16**: 47-55.
- VOISEY, P. W. and M. KLOEK. 1964. A portable leaf area measuring instrument. *Can. J. Plant Sci.* **44**: 389-391.
- NEWTON, J. E. and G. E. BLACKMAN. 1970. The penetration of solar radiation through leaf canopies of different structures. *Ann. Bot.* **34**: 329-348.
- BUCKLEY, D. J. and W. E. MCADAM. 1972. A television scanned, digital planimeter and dimension gage for measuring size of agricultural produce. *Trans. ASAE* **15**: 324-326.
- WIERSMA, J. V. and T. B. BAILEY. 1975. Estimation of leaflet, triboliate, and total leaf areas of soybeans. *Agron. J.* **67**: 26-30.
- 小田雅行・野中正義・星野和生. 1987. レタスの投影面積と生長の関係. 農気東海誌 **45**: 6-12.
- 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. 1991. 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**: 89-93.
- 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**: 29-35.
- 柴田孝信・岩尾憲三・高野泰吉. 1993. 植物の工場的生産と成長計測. 植物工場学会誌 **5**: 39-43.
- 谷村泰宏・池田 彰・江崎謙治・河相好孝・中山繁樹・岩尾憲三・蔭山裕之. 1991. 蛍光ランプを用いた人工光型植物工場の研究（その1）栽培システムの諸元ならびに性能試験結果. 生物環境調節 **29**: 81-88.
- 大津展之. 1980. 判別および最小2乗規則に基づく自動しきい値選定法. 電子通信学会論文誌 **J63-D**: 349-356.
- T. R. マッカーラ著, 三浦 功・田尾陽一共訳. 1972. 「計算機のための数値計算法概論」211-231, サイエンス社, 東京.
- WILLIAMS, R. F. 1964. The growth of grasses. In "Grasses and Grasslands" (Ed. by Barnard, C.) 89-101, MacMillan, London.
- 柴田孝信・岩尾憲三・高野泰吉. 1993. 植物工場における野菜の画像処理手法の開発. 植物工場学会誌 **4**: 123-130.
- HUNT, R. 1982. Plant growth curves. In "The Functional Approach to Plant Growth Analysis" 158-164, Edward Arnold, London.