

スペックル相関法による植物生長測定

小林 幸一*, **・門野 博史*, ***・山口 一郎**, *・豊岡 了*

*埼玉大学工学部理工学研究科環境センシング研究室 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

** (株)東洋精機製作所技術部 〒174-0041 東京都板橋区舟渡 1-2-6

***埼玉県環境科学国際センター 〒347-0115 加須市上種足 914

Plant Growth Measurement Using Speckle Correlation Method

Koichi KOBAYASHI^{***}, Hirofumi KADONO^{****}, Ichirou YAMAGUCHI^{**} and Satoru TOYOOKA^{*}

*Department of Environmental Science and Technology, Saitama University, 255 Shimookubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama 388-8570

**Technical department, Toyo Seiki Seisaku-sho Ltd., 1-2-6 Funado, Itabashi-ku, Tokyo 174-0041

***Center for Environmental Science in Saitama, 914 Kamitanadare, Kazo-shi, Saitama 347-0115

In this study, a laser speckle strain gauge was applied to monitor the growth behavior of plant under several cultivating conditions such as light irradiation, humidity, and temperature. This method permits highly sensitive noncontact measurement of the growth of the plant. In the experiments, the growths of Chinese chives and Bok Choy were measured. A growth rate of the plant of 0.01%/min. was successfully measured, and growth behaviors under the alternation of light illumination were also monitored in real time. It was found that growth rate became larger as the light was turned off, while it became smaller as the light was turned on. Furthermore, it was experimentally confirmed that this growth behavior of the leaf for the illumination is not caused by the variation of the humidity and temperature but by irradiation of light. It was demonstrated that present method can be a novel tool that permits real time monitoring of the growth behavior of plants and satisfies a large demand from agriculture, for instance, plant factories.

Key words: speckle strain gauge, noncontact monitoring, short term plant growth

1. はじめに

近年、バイオテクノロジーや情報通信技術等の急速な普及は、農業生産・流通に大きな変革をもたらしている。また、室内にて温度・湿度環境を制御した植物の生産が行われている^{1,2)}。しかし所要経費は、露地栽培に比べると設備の運転と保守や、人工光源の光熱費が発生するため上昇する。対象となる植物ごとに最適な栽培条件を見いだすことにより、より効率的な栽培を実現し生産性を上げ、安定した供給をはかることが可能となる。

植物の環境変化に対する生長計測ではこれまで、収穫後の乾燥重量、比葉面積などが測定されている。生長途中での計測については抜き取りが行われている。これらの方法は試料の採取を必要とし検出感度が低く、そのため計測には数日から数か月を要し、また対象となる植物を数多く栽

培する必要がある。これに対して、非接触・無侵襲に植物の生長計測を行う方法も存在する。例えばカメラを使い何日も対象を連続撮影し、画像処理によって各部の寸法を求めて生長を測定する方法がある^{3,4)}。しかし、植物全体を撮影するためミクロンオーダーの計測は困難であり、リアルタイムでの生長測定はできない。

本報告では、従来と全く異なる手法として、レーザー光を対象物に照射し、その拡散反射光に生じるレーザースペックルの移動現象を利用し、0.01%という微小な生長をリアルタイムで演算する方法を提案する。本手法はこれまで金属やプラスチックなどの材料試験に用いられてきたが⁵⁾、ここでは植物栽培環境を変えたときの植物の伸長を計測した結果を報告する。

2. 測定原理

2.1 レーザースペckルひずみ測定原理

金属、プラスチック、ゴムなどの粗面にレーザー光を照射すると、粗面の微視的な凹凸により散乱したレーザー光がランダムな位相関係で干渉することにより、斑点模様が現れる。これをスペckルパターンとよんでいる。その統計的な性質は、粗面の凹凸がレーザーの波長より大きく、凹凸の平均的な間隔、すなわち表面高さ変動の相関長がレーザースポット径より十分小さいとき、粗面の微視的な構造には影響を受けない。そのため粗面は、一般的な材料の加工面および塗装面だけでなく、植物などの生物表面に適用が可能である。スペckルは、物体の変化に応じて移動と変形を示し、物体が変化する前後のスペckル画像のデジタル相関演算により非接触で、定量的に解析される⁶⁾。本ひずみ計では、対象植物が放射状に生長するような変形を、レーザースポット内での局所的なひずみとして検出することが可能である。

直径数 mm 以下の領域のひずみを直接検出するためには、Fig. 1 のように、平行なレーザービームを対象植物に垂直照射する。ひずみを測定したい方位と平行な面内で、レーザーの入射光に対して互いに対称な方向 (角度 $\pm \theta$)、距離 L_0 に 2 つの撮像素子を配置し、スペckルパターンを検出する。対象植物が変化すると、それぞれの撮像素子上でのスペckルは移動し、移動量は移動前後の画像強度の相互相関ピーク位置から計算される。照射領域上の座標を (x, y) として、 x 軸を入射面の方向にとる。対象植物が一樣な微小変化を生じるとして、その成分を並進 (a_x, a_y, a_z) 、回転 $(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ 、ひずみ $(\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yy})$ で表すと、2 つの撮像素子が作る面の方向に対するスペckル移動 A_X は

$$A_X = a_x \cos \theta - a_z \sin \theta - L_0 [\epsilon_{xx} \tan \theta - \Omega_y (1/\cos \theta + 1)] \quad (1)$$

で表される。各撮像素子上でのスペckル移動の差 ΔA_x は、面外並進 a_z が小さく $|a_z| \ll L_0 \epsilon_{xx} \cos \theta$ が満足されるとき、

$$\Delta A_X = A_X(\theta) - A_X(-\theta) = -2L_0 \epsilon_{xx} \tan \theta \quad (2)$$

となる⁷⁾。ここで ϵ_{xx} はひずみを表す無次元量であり、単位は 10^{-6} を μstrain で表す。同様に、 Y 方向に配置した 2 つの撮像素子出力の相互相関から検出されるそれらを結ぶ方向へのスペckル移動の差は

$$\Delta A_Y = A_Y(\theta) - A_Y(-\theta) = -2L_0 \epsilon_{yy} \tan \theta \quad (3)$$

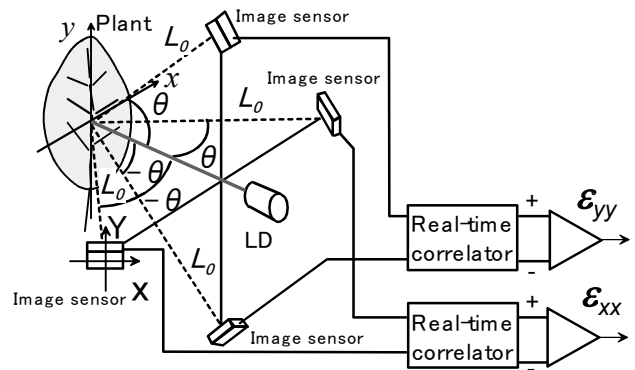


Fig. 1 Setup of biaxial speckle strain gauge.

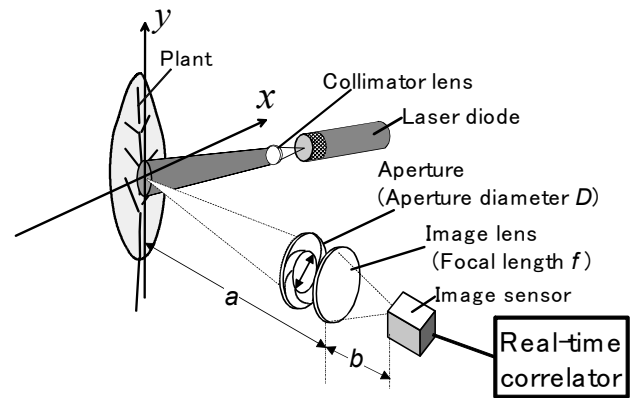


Fig. 2 Setup for in-plane displacement measurement.

となる。したがって、これらのスペckル移動の差 ΔA_x 、 ΔA_y を求めることで対象植物のひずみ ϵ_{xx} 、 ϵ_{yy} が得られる。

2.2 面内並進計測

時間とともに測定箇所が生長点を外れてしまう場合は、平行移動の効果が大きくなるため、ひずみではなく面内並進を測定するほうが適切であると考えられる。面内の並進だけを検出するためには、対象植物と撮像素子間に結像レンズを挿入する配置により得られる結像面のスペckル移動を検出する (Fig. 2)。結像面では面内並進だけに比例したスペckル移動が生じ、面内並進と同時に起きやすい面の傾きには影響を受けないことが特徴である⁷⁾。この場合のスペckル移動は物体の面内並進に結像倍率 $m = -b/a$ を乗じて

$$(A_x, A_y) = m(a_x, a_y) \quad (4)$$

で与えられる。面内並進計測では、対象植物が時間とともに平行移動する変化を検出することが可能である。

2.3 スペckル移動量の検出

本研究におけるスペckル移動の検出には、二次元 C-

MOSカメラと、実時間二次元相関計を使用している。スペckル強度の移動前後の強度分布を I_1 , I_2 とすると、それらの相互相関関数

$$C_{12}(X, Y) = \iint I_1(X', Y') I_2(X'+X, Y'+Y) dX' dY' \quad (5)$$

の計算には通常、高速フーリエ変換 (FFT) (\mathcal{F}) が用いられる。相互相関関数は、 I_1 , I_2 のフーリエ変換の共役積をとって、それを逆フーリエ変換 (\mathcal{F}^{-1}) することにより得られる。

$$C_{12}(X, Y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[I_1(X, Y)] \times \mathcal{F}^*[I_2(X, Y)]\} \quad (6)$$

この相関関数を Normal Correlation (NC) とよぶことにする。

これに対して本装置では、位相限定相関法 (phase-only-correlation, POC)⁸⁾ を使用した。POC は、各強度分布のフーリエ変換の振幅を一定にして位相成分だけを残した共役積を逆フーリエ変換する。

$$C_{12}(X, Y) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{\mathcal{F}[I_1(X, Y)]}{|\mathcal{F}[I_1(X, Y)]|} \times \frac{\mathcal{F}^*[I_2(X, Y)]}{|\mathcal{F}^*[I_2(X, Y)]|}\right\} \quad (7)$$

両者を比較すると、POC は NC に比べて平均強度の変動に強く、相関ピーク高さが鋭く、高い測定感度を得る特長がある。

本実験では、位相限定相関を計算する専用のハードウェア (型式 SVS010S32044, (株)山武) と、C-MOS 型カメラ (型式 SVS-DC03-02-03, (株)山武), 640×480 画素, 画素ピッチ 6.7μm×6.7μm を使用した。この相関計は、計測開始時の画像を基準画像として記録し、変化後の画像との位相限定相関を計算する。相関計からは、相関のピーク位置としての二次元スペckル移動ベクトルと相関のピーク高さが出力され、コンピューターへ送られる。また、相関ピーク高さが設定された閾値以下になった時点で、基準画像を現在の画像に切り替え、二次元スペckル移動ベクトルは積算される。画像を取得してから結果を出力するまでの時間は、256×256 画素の画像データを使う場合で、毎秒 60 回である。また、相関ピーク位置の検出には内挿計算を行って、画素ピッチ p の 10 分の 1 の分解能を達成している。これによりスペckルひずみ計のひずみ分解能は式 (2) より次のようになる。

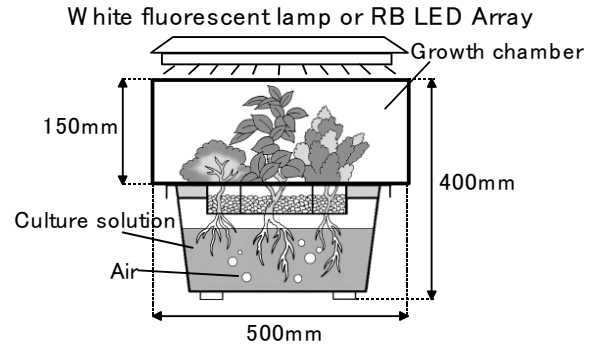


Fig. 3 Arrangement for plant growth chamber.

$$\Delta \varepsilon = \frac{p}{20L_0 \tan \theta} \quad (8)$$

また、面内変位の測定分解能は

$$\Delta a = \frac{p}{10|m|} \quad (9)$$

となる。C-MOSカメラの画素ピッチは $p=6.7\mu\text{m}$ である。実験において $L_0=200\text{ mm}$, $\theta=30^\circ$ に設定しているため、分解能は $2.9\ \mu\text{strain}$ となる。また、面内変位測定では、結像倍率 $m=-1$ の場合、 $0.67\mu\text{m}$ となる。

3. 試料とその栽培方法・測定法

3.1 使用した植物

生長を測定する植物として、ミニチンゲンサイ (学名 *Brassica campestris* L) とニラ (学名 *Allium tuberosum*) を使用した。ミニチンゲンサイは成熟までの期間が約 40 日と短く、草丈が 15 cm 程度であるため、室内で栽培が容易である。ニラは一方方向に生長し、短期間で大きく伸びる特徴がある。

ミニチンゲンサイに対しては、室内で栽培が容易である水気耕栽培を採用した。水気耕栽培とは、根に対する強制的な酸素供給を伴う水耕栽培のことをいい、連作障害回避、除草不要、無農薬で高品質な作物が供給可能であり、再現性のある生長が期待できるという利点がある。ニラは直径 10 cm のポット苗を購入し、植え替え、土による栽培を行った。ニラは生長後、根本から切り落とし、何回も測定できる利点がある。

3.2 植物栽培条件

ミニチンゲンサイの栽培は、水気耕栽培装置にポット (直径 5 cm, 深さ 9 cm) を入れ、その中にグラスウールを入れ、グラスウールが湿る程度まで水を入れ、その上に種をまいた。種は暗い状態を保つと、3~4 日程度で発芽し

た。発芽後は、土の代わりにロックウールを葉が隠れない程度に入れた。光源は、太陽光の代わりに白色蛍光灯 (20 W×2本, 長さ 580 mm (ピオルックス HG, NEC)) を使用した。Fig. 3 に示す温度・湿度を外部制御できる恒温・恒湿槽を製作し、植物全体を入れて栽培を行った。

栽培条件は、温度は昼 25°C, 夜 20°C, 湿度は 65% に制御し、白色蛍光灯を昼 12 時間, 夜 12 時間になるようにタイマーで自動点滅させた。水気耕栽培の水は不足分を定期的に補い、約 2 週間に 1 度ずつ粉末の肥料を水の中に入れた。ニラはミニチンゲンサイ同様に恒温・恒湿槽に入れ、白色蛍光灯で栽培した。

3.3 測定条件

照明用光源は、白色蛍光灯と、赤・青LED (総数360個, 個数比 1:1, CCS (株)) を用いた。光強度は、光量子束密度 (PFD: photon flux density) を光強度センサー (MES-136 IKS-27-10/136, 受光面積 $\phi 17$ mm, 測定範囲 0~2500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 小糸工業 (株)) により計測した。PFD は、1 秒当たり、1 平方メートル当たりの光子数を表し、単位は、 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ である。本実験において、白色蛍光灯と赤・青LEDの光強度は、高さ 10 cm で 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ である。

レーザー光を植物などに照射した場合、植物内部からの動的散乱によるスペックルが発生する。これをバイオスペックルとよんでいる⁹⁾。バイオスペックルはこれまでの測定で、スペックルパターンの相関ピークをより早く減少させてしまうことが判明している。そのためバイオスペックルの影響を抑制する必要がある。この問題を解決するため、レーザー照射部分の植物表面に小麦粉を塗布し、実験を行った。使用したレーザーは、ビームサイズ 6 mm×3 mm の平行光 (670 nm, 最大出力 6 mW) である。実験に使用した赤色 LED の波長は 650 nm であり、使用しているレーザーの波長に近い。しかし LED はインコヒーレントな光であるため、スペックル全体の明るさが変化するだけである。POC は高周波成分を強調して処理するため、平均強度の変動に強く、影響はない。また、レーザーの波長 670 nm は、植物の光合成に使われる波長であり、葉の生長に影響を与える可能性が考えられる¹⁰⁾。しかし、本実験では、レーザーのスポットサイズは 6 mm×3 mm のため、葉全体からするとわずかである。さらに、前述のような表面処理をしているため、葉内部へのレーザー侵入はなく、照射レーザー光の影響は少ない。葉を自然のままの状態においていたのでは、風や振動の影響で、葉全体が動いてしまう可能性がある。そのため、Fig. 4 に示すように、葉の後ろに金属板をおいて、レーザービームの照射位置の周りを、プラ

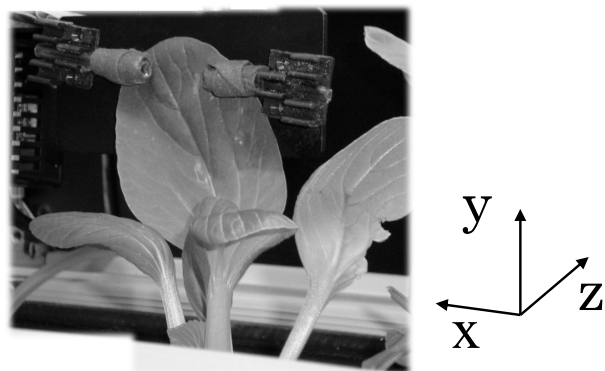


Fig. 4 Method of supporting plant.

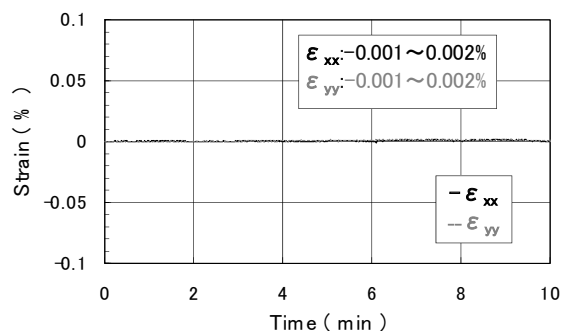


Fig. 5 Strain signal from a fixed metal plate.

スティックチューブを用いて葉の生長を妨げない程度に支持した。またプラスチックチューブは、植物になるべく触れないように、点で支持するように工夫した。POC からの演算結果は、毎秒 20 回コンピューターへ送られる。長時間測定を行う場合は、データ数が多くなるため、5 秒ごとにデータを取得する。その際、スペックル移動量は 5 秒間の積算値として保存される。

4. 測定結果

4.1 安定性測定

最初に、無ひずみ状態でのひずみ出力の変動をみるために、植物育成装置の中にアルミ金属板を入れ、その表面にレーザーを照射し、計測を行った。測定結果を Fig. 5 に示す。金属板では振幅 0.003%, 標準偏差 0.0006% であり、ごくわずかのひずみ変動しか示さないことが確認され、これにより装置の安定性が示された。

4.2 レーザースペックルひずみ計による生長測定

白色蛍光灯照明下でのミニチンゲンサイの伸長変化を測定した。レーザービームは、葉の中心付近に垂直に入射させ、C-MOS カメラは角度 30°, 葉面から距離 200 mm の位置に、上下・左右対称に設置された。これにより、葉の葉

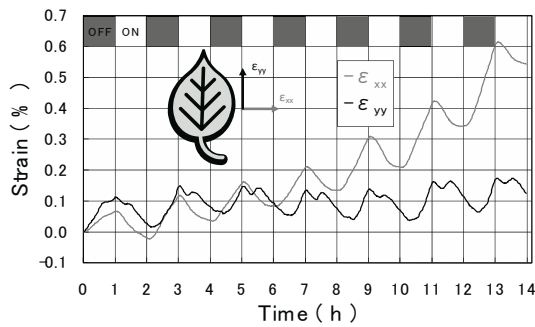


Fig. 6 Leaf growth of Bok Choy under periodic exposure to white fluorescent light.

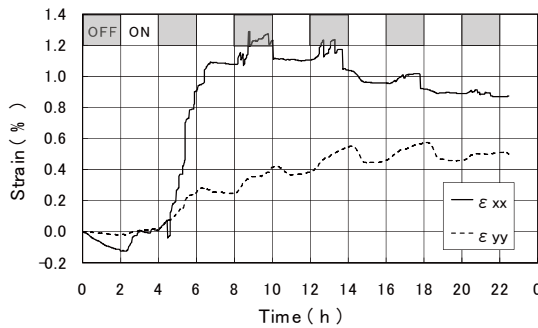


Fig. 7 Strain measurement of Chinese chives leaf under periodic illumination by white fluorescent lamp.

柄から葉先に向かう方向（葉の軸方向）の伸びと、それに直角方向の伸びを同時に測定することができる。1時間ごとに光源の点灯消灯を切り換えた際の、葉の伸長測定結果を Fig. 6 に示す。葉の軸方向、垂直方向ともに、光照射時は葉は収縮し、光を遮断したときに伸長していることがわかる。葉軸に垂直方向では消灯時の伸び量が時間とともに増加するのに対し、点灯したときの収縮量はほとんど変わらないため、正味の伸びが増加し、生長が認められるようになる。消灯時の曲線を微分して得られる生長速度は、 $0.01\%/min$ である。一方、葉軸方向でも消灯時に伸長し、点灯時に収縮する。ただし、点灯時の収縮は一度伸長に転じている。また、正味の伸長は小さく、軸方向の10分の1以下である。

4.3 レーザースペckル面内並進による生長測定

白色蛍光灯照明下でのニラの生長測定を、レーザースペckルひずみ計を用いて行った。レーザーはニラの先端から3 mm の位置に照射した。測定結果は Fig. 7 に示すように、軸方向のひずみ量は0.5%であった。しかし、物差しによるマクロな測定では約2~3 mm 伸びており、土から上の葉の長さは、その先端までで約60 mm であった。もし、葉全体が一様に伸びているとすれば、ひずみの値は約5%

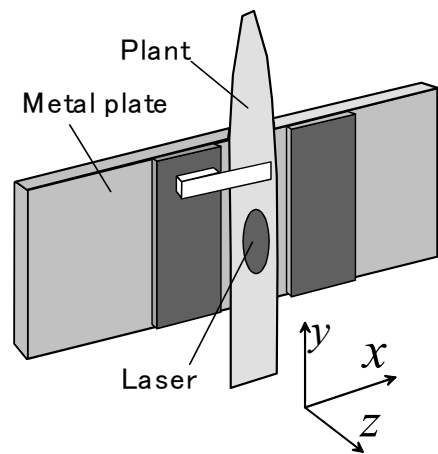


Fig. 8 Arrangement for fixing Chinese chive leaf.

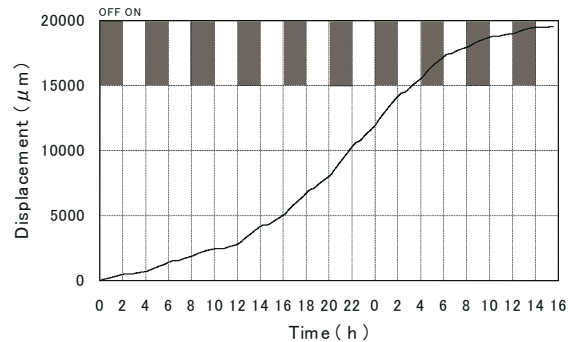


Fig. 9 In-plane translation of Chinese chives leaf under periodic illumination by white fluorescent lamp.

となる。一方、本ひずみ計では、レーザースポット入射位置の局所的なひずみをみているので、これらの差が出たものと考えられる。また、ニラの葉は軸方向の生長が大きく、ひずみ測定では測定場所が変わってしまい、ひずみ成分より並進成分の影響が大きいと考えられる。そのため、Fig. 2 のような光学系を用いて軸方向の面内変位の計測を行った。測定対象の葉は、同じ株の違う葉を用いた。支持方法は Fig. 8 に示すように、ミニチンゲンサイの場合と同様、葉の後ろに金属板をおいて、レーザービーム照射位置の上部を軸方向への伸びを妨げない程度に押さえた。

レーザーは、ビームサイズ $6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ の平行光で測定位置に入射させる。C-MOS カメラは Fig. 2 において $f=50\text{ mm}$ のレンズを用いて結像倍率 $m=-1$ になる位置に配置する。ミニチンゲンサイと同様にバイオスペckルの影響を抑制するために、レーザー照射部分の植物表面に小麦粉を塗布して実験を行った。白色蛍光灯の照射に関して消灯と点灯を2時間ごとに繰り返したときの、ニラの軸方向への面内並進測定を行った結果を Fig. 9 に示す。ミニチンゲ

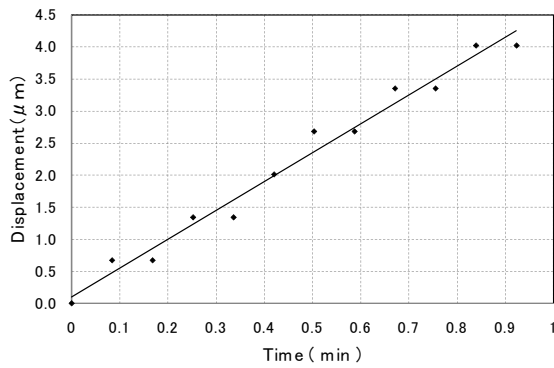


Fig. 10 Growth of Chinese chives leaf of one minute.

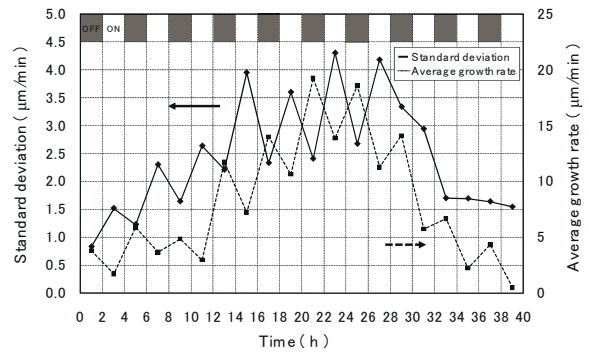


Fig. 12 Average growth rate and standard deviation.

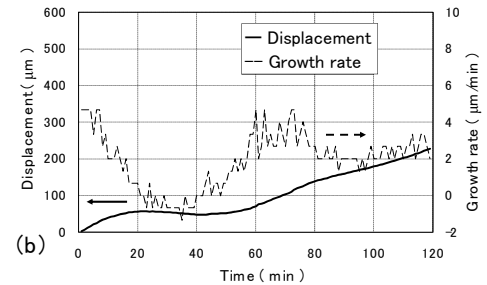
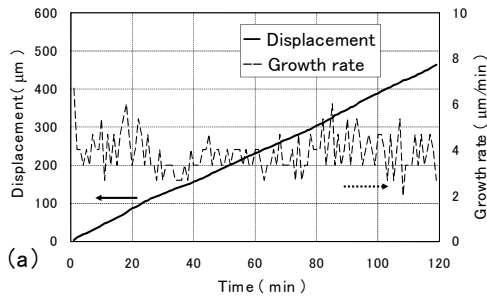


Fig. 11 Displacement and growth rate of Chinese chive (a) growth behavior of the plant during dark period, (b) growth behavior of the plant during illumination period.

ンサイと同様に、点灯時のほうが消灯時より変位が小さい結果となった。レーザー照射位置に近い場所に印をつけ、測定終了後に印の変化を物差しで測定すると、40時間で約20 mm移動しており、本測定結果とほぼ一致していることがわかる。

Fig. 9から、消灯時のほうが点灯時より伸長していることがわかる。より詳しくみるために、Fig. 9の測定データから1分間の測定データの傾きを計算した例がFig. 10である。わずかな時間では直線的に変化していることがわかる。直線の傾きは1分当たりの生長率 (growth rate, 単位 $\mu\text{m}/\text{min}$) として計算される。この生長率を時間ごとに計算し、点灯/消灯期間の2時間の変位データに重ねると、Fig. 11のグラフとなる。Fig. 11(a)は消灯時、Fig. 11(b)

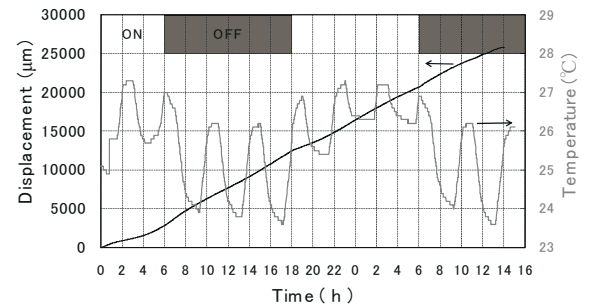


Fig. 13 Growth behavior of under alteration of illumination and temperature.

は点灯時である。

Fig. 11(a)の生長率からわかるように、植物の生長は一樣ではない。消灯下では、生長率は約 $5 \mu\text{m}/\text{min}$ の振幅で変動している (Fig. 11(a)). そのゆらぎ量を評価するために、標準偏差を計算した。このような評価は、これまで松の根の生長測定で行われていた手法でも報告されており¹¹⁾、装置の振動などの影響ではなく、生長自体にゆらぎのあることが認められている。これらの測定結果により、生長ゆらぎ量が植物の活性の指標になりうる可能性が示唆されることになる。Fig. 11の変位曲線の傾き、すなわち平均生長率は、消灯下では $3.81 \mu\text{m}/\text{min}$ 、標準偏差 $0.83 \mu\text{m}/\text{min}$ 、点灯下では $1.73 \mu\text{m}/\text{min}$ 、標準偏差 $1.52 \mu\text{m}/\text{min}$ となる。Fig. 11(b)では光が点灯すると生長率は減少し、その約30分後に増加している。この傾向は、Fig. 6でミニチンゲンサイの葉の軸方向にみられるものと同じである。

2時間ごとの生長率と、その標準偏差をまとめた結果をFig. 12に示す。消灯時のほうが点灯時より平均生長率が大きい、しかし標準偏差は消灯時のほうが小さい結果となった。その理由は、点灯時のほうが植物は光合成などで活性化しているためと考えられる。

葉の測定においては、点灯すると温度上昇による湿度の低下により葉が乾燥収縮し、逆に消灯すると温度が下降し

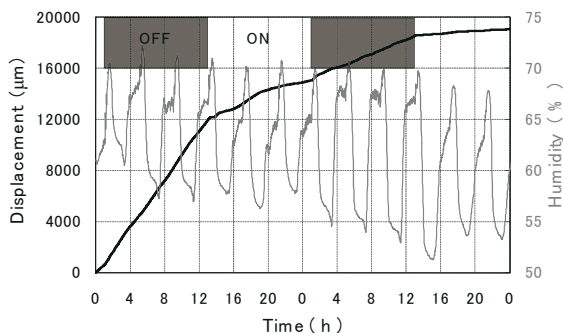


Fig. 14 Growth behavior during changes of illumination and alteration of humidity.

湿度が上昇するため葉が伸長することが考えられる。この状態を繰り返しながら生長している可能性もある。そのため、照明の点灯時および消灯時に、栽培槽の温度または湿度を強制的に変化させ、植物の生長を測定した。白色蛍光灯の場合は、光源の発熱から槽内温度が約 2°C 上昇することがわかった。そのため、光源にはLED照明を使用した。光源を12時間ごとに点滅させ、その間槽内の温度を 24°C から 28°C へ2時間間隔で変化させ、測定を行った結果がFig. 13である。照明光の消灯時に生長率が大きいことがわかる。これにより、温度変化の影響はほとんどみられず、光の作用による生長変化のほうがより大きく関与していることがわかる。

次に、湿度の影響をみるために、光源を12時間ごとに点滅させ、その間槽内の湿度を55%から75%へ2時間ごとに変化させて測定を行った。この結果をFig. 14に示す。これまでと同様に、消灯時に生長率が大きくなる結果となった。湿度の変化と成長率の間の相関は低いことがわかり、やはり光の作用による生長変化のほうが、より大きく関与していることがわかる。

5. 考 察

本研究では、植物の葉の伸長を、レーザースペックルの移動を検出することにより、実時間で完全に非接触で測定した。人工栽培装置の中で白色蛍光灯やLEDを断続点灯させた状態で、植物の生長の変化を計測することができた。ミニチンゲンサイのように葉が全体に大きくなるような場合は、差動型配置でひずみ成分を検出することにより、またニラのように一方向に大きく伸びる場合は、結像配置で面内並進を検出することにより、光照射に対する応答を測定することができた。こうして、光の点滅の伸長への影響をはっきりと観測できた。葉の伸長が光の点滅によ

る温度と湿度の変化に伴ってある程度変化することがわかったが、温度・湿度の変化より光の点滅が植物の伸長に大きく影響していることがわかった。また、光を点灯した直後に生長率は減少し、その約30分後に増加している。この現象は、これまではみることができなかった新しい発見である。

これまででは、収穫後の乾燥重量測定や、数日間にわたって画像を連続記録し解析処理を行うなど、計測に時間がかかっていた。それに対して、本法は非接触かつ秒単位でサブミクロンオーダーの分解能があり、短時間のわずかな生長挙動を実時間で知ることができる。このことは植物工場や農業分野への新しいツールとして期待できる。

次のステップとしては、温度・湿度・光照射条件（種類・強度・波長）などを変化させたときの生長速度の違いを短時間で計測し、植物の最適生長条件の探索に役立てていきたい。

文 献

- 1) 高辻正基 (編)：植物工場ハンドブック (東海大学出版会, 1997) pp. 3-9.
- 2) A. R. De Pinheiro Henriques and L. F. M. Marcelis: "Regulation of growth at steady-state nitrogen nutrition in Lettuce (*Lactuca sativa* L.): Interactive effects of nitrogen and irradiance," *Ann. Bot.*, **86** (2000) 1073-1080.
- 3) 馬 稚晃, 清水 浩, 森泉昭治, 宮田真知子, 道園美弦, 田澤信二: "明期, 暗期および光中断期におけるキクの節間伸長量の画像解析", *植物環境工学*, **18** (2006) 65-71.
- 4) Mar Zhiyu, H. Shimizu, S. Moriizumi, M. Miyata, M. Douzono and S. Tazawa: "Effect of light intensity, quality and photoperiod on stem elongation of Chrysanthemum cv. Reagan," *Environ. Control Biol.*, **45** (2007) 19-25.
- 5) I. Yamaguchi and K. Kobayashi: "Material testing by laser speckle strain gauge," *Proc. SPIE*, **1554A** (1991) 240-249.
- 6) 山口一郎: "スペックル", *光学技術ハンドブック* (朝倉書店, 2002) pp. 505-521.
- 7) 山口一郎: "電子式スペックル相関法による変位・ひずみ測定", *応用物理*, **61** (1992) 584-587.
- 8) K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi and K. Kobayashi: "High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation," *IEICE Trans. Fundam.*, **E86-A** (2003) 1925-1934.
- 9) A. Oulamara, G. Tribillion and J. Duvernoy: "Biological activity measurement on botanical specimen surfaces using a temporal decorrelation effect of laser speckle," *J. Mod. Opt.*, **36** (1989) 165-179.
- 10) 山中正宣, 西田嘉夫: "レーザ植物工場の現状と今後の展望", *応用物理*, **73** (2004) 1068-1075.
- 11) A. Pushpakumara Rathnayake, H. Kadono, S. Toyooka and M. Miwa: "A novel optical interference method to measure minute elongations in Japanese red pine (*Pinus densiflora*) seedling roots grown under ectomycorrhizal infection," *J. Environ. Exp. Bot.*, **64** (2008) 314-321.