相互相関関数を利用した移植による根の植傷み回復の診断法

鳥居 徹

東京大学大学院農学生命科学研究科 113 文京区弥生 1-1-1

Diagnosis of Recovery of Roots from Transplanting Damage Using
Cross-correlation Function

Toru TORII

*Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan*

Abstract

In recent years, the need for hydro-culture has been increasing because of the aesthetic and sanitary aspects. When a plant is transplanted from soil culture to hydro-culture, the roots are damaged. If the plant is sent as a product before recovering from the damage, the plant may not survive. The plants should be cured under a protected environment until they have recovered from the transplanting damage. From the viewpoint of cost, the curing time should be as short as possible. The main goal of this study was to develop a method to diagnose when the roots had sufficiently recovered from the transplanting damage.

The plant material used was pumpkin (*Cucurbita Maxima* Duch. cv. Ebisu). The test was done in a growth cabinet with temperature 25°C, humidity 60%, and light intensity 120 $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{sec}$. The light intensity was varied and resulting plant responses, such as changes in stem diameter and leaf temperature, were measured. Cross-correlation functions were calculated, and the time lag and correlation coefficients were compared during the recovery.

Before transplanting, the time lag for stem diameter measurement was 11.6 minutes, and the correlation coefficient was -0.38 . During the first 3 days after transplanting, clear peaks of time lag were not found. During the recovery, clear peaks of time lag appeared, and these time lags approached 15 minutes and correlation coefficients approached -0.65 . In the step response, the diameter variation changed from first order lag to quadratic lag. Based on these results, the recovery of roots from transplanting damage was diagnosed from the time lag in diameter variation.

緒 言

近年、快適で潤いのある生活空間や職場環境を求める需要が増大し、観葉植物などの鉢ものは美観や衛生的な面から発泡煉石を用いたハイドロカルチャーのニーズが高まっている。土耕の苗をハイドロカルチャーに移植すると根が生え代わるため、移植直後に商品として出荷すると短期間で枯死することがある。移植後の植物は、根が回復するまで安定環境下で管理する必要があるが、コスト削減のためその期間の短縮化を図り、かつ出荷する植物の品質保証のため、回復状

1997年 2月27日受付

1997年 6月 4日受理

態の診断技術が必要である。根の回復状態の研究としては、稲を田植機で移植した際の植傷みの発現と回復過程についての研究例はあるが、その計測法としては葉身の成長速度や成分含量などの破壊計測によって行われている¹⁾。そこで、ハイドロカルチャーに移植した植物の回復状態を診断するには非破壊による新しい診断技術を確立する必要がある。

本研究は、植物を移植した後の根の回復状態を診断するため、水ストレスを与えたときの葉温や茎径変動などの応答を非破壊計測し、移植後の応答変化によって回復時期を予測することを目的としている。ストレスとして光強度を変化させて葉温変動、蒸散速度変動、茎径変動の応答を計測し、光を入力信号とした相互相関関数からタイムラグと相関値により診断する方法²⁻⁴⁾について検討を行った。さらに、根の伸張とタイムラグや相関値との関連を調べるため、苗を水耕で栽培して実際に根の伸張を計測する実験を行った。

実験材料および実験方法

1. 実験材料

実験材料はカボチャ (*Cucurbita Maxima* Duch. cv. Ebisu) を用いた。材料の生育は、東京大学農学部付属バイオトロン(昼間 25°C 夜間 20°C 自然光)内で約 3 週間生育管理した。本葉 3~4 枚のころ根を切断してバブリングした水耕に移植し、湿度 100 % に近い状態で最低 3 日間管理した後、根の発根状況に応じて室内の環境に戻した。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験方法

根の伸張が十分な状態では、植物に対して光強度を強めると蒸散速度が増加した量に相当する水分が根より供給されるため、茎径、葉温などが光の強度変化に連動して変化すると予想される。一方、根の伸張が不十分で根からの水分吸収能力が低い場合は、光の強度変化に対して応答が連動しないことが予測される。そこで、以下の実験を行った。

- ① 光のステップ入力(暗条件から明条件に急激に変化させる)に対する各種応答の比較により根の発根状態を推定する。
- ② 光強度を M 系列によって不規則に変化させたときの各応答を計測し、光の強度変化との相互相関関数を求める。相関値が最初にピークとなるまでのタイムラグならびに相関値を比較することにより発根状態の推定を行う。相互相関関数は下記の式で計算した。

$$R_{xy}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)y(n+k)$$

ここに

n : タイムラグ

k : 時間

$R_{xy}(n)$: タイムラグ n のときの相関係数

x : 入力信号(光強度)

y : 出力信号(茎径、葉温)

N : データ数

光強度を規則的に変化させると一定の周波数だけが強調されるため、それを避けるために不規則に変化させた。光強度を変化させる最小単位は 15 分で、M 系列の周期は 15 である。周期は

図 1 実験装置

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

多いと良い周波数応答が得られるが、余り多くすると実験時間が長くなり、活着不十分の植物では枯死することがあるため、この周期とした。

(2) 実験装置

実験は、温、湿度制御した人工光チャンバー(気温 25℃、湿度 60%)を用いた。計測項目は、葉温、蒸散速度、茎径変化である。葉温は赤外線放射温度計で、蒸散速度は電子天秤、茎径変化はレーザー式外径測定器で計測し(図 1)、根の長さは、茎より直接出ている不定根の一次根だけをコンベックスで計測した。

結果および考察

1. 相互相関関数による診断法

光強度を M 系列にしたがって変化させたときの応答結果の例として、移植前、回復後の葉温変動、茎径変動を図 2 に示す。本図で 2 値間で変化しているのが光の強度を表す光合成有効光量子束密度(PPFD)である。これらの応答データに対して光強度を入力としたときの相互相関関数を図 3 に示す。葉温のタイムラグは移植前、回復後ともに 2 分で相関値は約 0.8 と高い値を示した。茎径は、タイムラグが 15~17 分で相関値は -0.4 から -0.8 とばらつきが大きかった。回復後は、タイムラグが 14~17 分で移植前とあまり変化はなく、相関値は -0.5 から -0.65 とばらつきはやや少なかった。また、根の切断後 4 日目から 9 日目にかけての茎径応答の変化を図 4 に、相互相関関数が変化する様子を図 5 に示す。移植後 5 日目までは根の伸張が不十分で、光に対して茎径が十分に応答しないため、相関値は低く一定である。その後、切断後 6 日目あたりからタイ

図 2 移植前ならびに回復後の葉温, 茎径変化

Fig. 2 Changes in leaf temperature and diameter before transplanting and after recovery

ムラグ約 15 分で負のピークを示すようになり, 時間経過とともにほぼ移植前の値に収束する。このころから, 急速に根の伸張が見られるため, 光に対して茎径の応答が連動するようになると考えられる。また, 40 分付近では正の相関値が高くなるが, これは図 4 (5)(6)に示されるように, 光強度が強くなったとき茎径は一旦減少するが, 40 分過ぎに増加するためである。これは, 水ストレスによって減少した茎径が根からの水の供給のため増大した現象と考えられるので, この部分の応答も根の吸水能力を表す指標となると思われる。これらの応答は個体差があるため, 50 サンプルによる根の長さとの相関値が最初に負の極小値となるタイムラグとの関係を図 6 に示す。根の伸張が少ないときは, タイムラグにばらつきがあるが根が 200 mm を越えるとタイムラグが移植前の値に近い約 15 分に収束してくることが判明した。このことから, 根の回復にともなって茎径応答のタイムラグが移植前の値に収束することを指標として, 回復時期の診断を行うことができる。

一方, 葉温応答の結果は, 根の伸張に係わらずタイムラグのピーク値が約 2 分のところにあるため, 回復状態の診断指標にはならないことが判明した(図 7)。また, 蒸散速度の計測は蒸散の絶対量が少ないため, はっきりとした結果が出なかった。

2. ステップ応答による診断法

図 8 (1)に移植前, 図 8 (4)に移植後十分に根が伸びて, 回復したと考えられる状態にあるサンプルの茎径のステップ応答を示す。いずれのサンプルもステップ入力後約 10 分程度経過してから茎径の減少を示す応答が見られ, 40 分～50 分後に最小値を示した後に再び増加を示しており, 二次遅れ系のような応答となった。移植後における茎径応答の推移を図 8 (2)(3)(4)に示す。光強度が増加してから茎径の減少を示すまでの時間はいずれも 10 分程度であるが, 回復するにつれて応答が変化する。すなわち, 根の長さが 15 mm の状態では茎径の減少は一次遅れに類似してお

図 3 移植前およびに回復状態の葉温と茎径の相互相関関数

Fig. 3 Cross-correlation functions for leaf temperature and stem diameter variation before transplanting and after recovery from damage

り、80分を経過しても減少し続けて定常値には至らなかった。これは、蒸散速度の増加に根からの吸収速度が追いつかないために一方的に茎径が減少するものと思われる。根の長さが48 mmの状態になると約55分経過した時点で定常状態になっているようにみえるが、この時点で吸収速度と蒸散速度とが平衡状態となっていると考えられる。根の長さが202 mmになると、茎径の減少は二次遅れ系のようにオーバーシュートをみせ、35分後に最小値を示した後、今度は増加に転じている。一般に蒸散速度のステップ応答はオーバーシュートを示したあと定常値に収束し、根からの吸収は蒸散の応答にやや遅れてオーバーシュートのあと定常値に収束する傾向がある。このため、一時的に根からの吸収速度が蒸散速度を追い越す事態が生じるため茎径が多少回復したのち一定値に収束するようになると思われる。したがって、これらの応答変化からも回復の状態を診断できる可能性があるが、相互相関関数のタイムラグのようなはっきりとした数値で示すことができないので、定性的な診断法にとどまると考える。

また、葉温のステップ応答を図9に示す。左側が切断後1日目で根は全く生えていないサンプルにおける計測結果である。葉温は一次遅れで応答しており、単なる熱伝導の応答である。右側は切断後11日経過して根が十分伸張したサンプルで、ステップ入力に足して葉温は振動しながら一定値に収束していく。これは、気孔開閉が振動しているために生じる現象で^{5,6)}、葉温振動

図 4 回復過程における茎径の応答変化

Fig. 4 Changes in stem diameter variation during recovery

図 5 回復過程にある植物の茎径変動の相互相関関数の推移

Fig. 5 Changes in cross-correlation functions for stem diameter variation during recovery from transplanting damage

図 6 回復過程にある植物の根の長さや茎径変化のタイムラグとの関係

Fig. 6 Relationship between root length and time lag in stem diameter variation during recovery from transplanting damage

図 7 回復過程にある植物の葉温変動の相互相関関数の推移

Fig. 7 Changes in cross-correlation function for leaf temperature during recovery from transplanting damage

の周波数解析は根の吸水能力を表す指標となると思われる。ただし、これも定性的な診断法にとどまると考えられる。

摘 要

本研究では、植物の移植後における回復状態の判定法として、植物の体内水分状態に着目し、水ストレスを与えたときの葉温変動、茎径変動の応答を計測し、回復時と移植後の変化を評価した。その結果、以下の結論を得た。

(1) Step response of diameter before transplanting

(2) Step response of diameter after transplanting (root length 15mm)

(3) Step response of diameter after transplanting (root length 48mm)

(4) Step response of diameter after transplanting (root length 202mm)

図 8 回復過程における茎径のステップ応答の変化

Fig. 8 Step response of stem diameter during recovery

(a) one day after transplanting

(b) nine days after transplanting

図 9 葉温のステップ応答

Fig. 9 Step response of leaf temperature

1. 光と各種応答との相互相関関数を求め、タイムラグを比較した結果、茎径変化のタイムラグが移植前の値に収束することで回復状態を判定できることが判明した。
2. 茎径のステップ応答は、根が回復するにつれて一次遅れ系からオーバーシュートを示す二次遅れ系に近い状態に変化することが確認された。
3. 葉温のステップ応答は、根が回復するにつれて一次遅れ系から気孔開閉による振動現象が見られるようになることが確認された。

4. 回復状態の診断を定量的に示すには、相互相関関数のタイムラグで評価することが最も良い方法であると考えられる。

謝 辞

本研究の推進に当たり、東京ガス(株)生産技術センター(現在：業務用機器開発センター)向井隆司氏にはテーマを示していただき、また機材等の使用の便宜を図っていただいた。本学卒業生檜物友和氏(現在：(株)クボタ)には卒業論文のテーマとして実験を担当していただいた。ここに記して感謝する。

引用文献

- 1) 山本由徳・久野訓弘：水稻の植え傷みに関する研究(第4報)植え傷みの発現と回復の様相，日本作物学会紀事，59(1)：40～47(1990)
- 2) 鳥居 徹 他：相互相関関数を利用した植物の移植後における活着性の診断，日本植物工場学会平成7年度講演要旨：91～92(1995)
- 3) 鳥居 徹 他：植物の体内水分状態の計測・制御に関する研究(第1報)，農機誌，54(6)：73～79(1992)
- 4) 鳥居 徹 他：植物の体内水分状態の計測・制御に関する研究(第2報)，農機誌，55(6)：105～112(1993)
- 5) 長野敏英・島地英夫：植物の水分状態とその制御に関する研究(2)，生物環境調節，16(3)：93～100(1978)
- 6) 橋本 康 他：植物生育のプロセス同定とその最適制御(VII)，生物環境調節，17(1)：47～53(1979)