

(第5号様式)

学位論文審査の結果の要旨

氏名	Diyah Yumeina
審査委員	主査 森本 哲夫 副査 羽藤 堅治 副査 石川 勝美 副査 河野 俊夫 副査 奥田 延幸

論文名

Modelings and optimal controls of plant responses of tomato plants to environmental factors in hydroponics
(水耕トマトの環境要因に対する植物応答のモデル化と最適制御)

審査結果の要旨

養液栽培では、地下部環境を積極的かつ適切に制御できる利点があり、これにより植物の成長促進や高品質化が望める。さて、このような制御をどのように実現するか。やはり、その時の植物の生理生態的応答（植物応答）を計測し、それが向上する（たとえば成長量が最大となる）方向に、環境を最適に制御する方法が有効と考えられる。これをスピーキングプラントアプローチと称する。しかし、環境-植物応答システムは非常に複雑かつ曖昧なので、数式を基本とする解析的方法論ではこのような最適制御を実現するのは困難といえる。これに対して、生命機能を模倣した知能的方法論は融通性があり非線形システムの取り扱いができるので、このような制御に有効と思われる。そこで本研究では、ニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムを組み合わせた新しい知能的最適化法を活用し、トマトのDF T（Deep Flow Technique）水耕栽培における2種の最適化問題に適用し、その有効性を示すとともに、最適な環境制御法を検討した。

1つは、培養液濃度(EC)を操作量、トマトの成長速度を制御量とし、育苗期におけるトマト苗の成長速度を最大にする培養液濃度の制御である。まず、温室内に栽培区を多数設け、2入力（光強度と培養液濃度）-1出力（成長速度）システムを想定し、培養液濃度に対する成長速度のいろいろな日変化パターンを計測した。次に、3層のニューラルネットワークを用いて、これらの日変化データを学習し、動的モデルを構築した。この場合、ニューラルネットワークの次数と中間層ニューロン数を決める必要があるが、モデル誤差を最小にする最適な次数 ($m=90$)と中間層ニューロン数($n_h=20$)を選ぶことにより、高精度のモデルができた。続いて、そのモデルのシミュレーションから、遺伝的アルゴリズムを用いて、トマトの成長速度を最大にする6段階の培養液濃度操作パターン（最適値）を求めた。得られた最適値は、 $EC = 1.0 \rightarrow 0.5 \rightarrow 0.8 \rightarrow 0.9 \rightarrow 1.1 \rightarrow 1.2 \text{ dS m}^{-1}$ であった。制約条件は $0.3 \leq EC \leq 2.0 \text{ dS m}^{-1}$ である。この操作パターンをみると、通常は成長に応じて培養液濃度を徐々に上げていくが、2段階目でかなり下げる操作であった。最後に、この最適値を実際に適用すると、トマトの成長量は、通常の育成に応じて徐々に上げる操作 ($EC=0.8 \rightarrow 1.0 \rightarrow 1.0 \rightarrow 1.2 \rightarrow 1.5 \rightarrow 1.5 \text{ dS m}^{-1}$)と比べて、1.15倍大きくなった。この結果より、植物の制御は、環境条件を常時最適値一定に保つというよりも、植物の状態に応じてフレキシブルかつ最適に変化させる制御法が有効であるとわかった。

2つ目は、培養液の液温を操作量、葉の水分含量を制御量とし、トマト苗の葉の水分含量を最大にする液温の制御である。なお、この実験は6~10時間の短時間とした。葉の水分含量は、有効な計測法がないので、非破壊かつ連続計測できる葉の厚さ（葉厚）から推定し、葉厚は渦電流変位計で計測した。葉厚と葉の水分含量の関係は、葉の水分含量が75~95%のときほぼ直線関係を示したので、葉厚から葉の水分含量を推定できた。それで、まずいろいろな液温変化に対する葉の水分含量の応答を計測し、3層のニューラルネットワークを用いて、これらの時系列データを学習し、動的モデルを構築した。この場合も、ニューラルネットワークの最適な次数と中間層ニューロン数を選ぶことにより、精度の高い動的モデルを構築できた。実データおよびモデルシミュレーションから、葉の水分含量は液温が35~40℃までは液温の上昇に伴って増大したが、その温度以上では逆に低下した。これは高温により根の機能が低下し吸水が抑制されたためと考えられる。最後に、モデルのシミュレーションから、遺伝的アルゴリズムを用いて、トマトの葉の水分含量を最大にする5段階の培養液濃度の操作パターン（最適値）を求め、実際に適用した（5段階が最良であった）。得られた最適値は液温=40→15→40→22→30℃であった。制約条件は $10 \leq \text{液温} \leq 40^\circ\text{C}$ である。この操作パターンを見ると高温（40℃）と低温（15℃）のストレスの組合せであることが分かる。この最適値を実際に適用すると、最適制御における葉の水分含量は、適切な温度（30℃液温）の場合と比べ、最終段階（5段階目）で約1.3倍増加した。この結果より、短時間において、葉の水分含量を増やす（もしくは根の吸水を促進させる）方法として、液温を順次マイルドな高温と低温に変化させる、すなわち植物に適度なストレスがかかるように制御した方がよいのではないかと推測された。

以上2つの研究成果より、植物の生理的反応や成長を促進させるには、スピーキングプラントアプローチに基づく制御法が有効であること、そして最適化手法等のシステム科学的方法論を活用して、植物に適度（最適）なストレスがかかるように、環境要因を適切に制御する方法が有効と考えられる。

学位論文の公開審査会が平成28年8月6日に香川大学農学部で開催され、申請者の口頭発表とそれに対する質疑応答が行われた。引き続き開催された学位論文審査委員会で本論文の内容を慎重に審議した結果、審査委員全員一致して、本論文が博士（学術）の学位を授与するに値するものと判定した。