

(様式5) (Style5)

学位論文全文に代わる要約
Extended Summary in Lieu of Dissertation

氏名： 戸田 清太郎

Name

学位論文題目： 太陽光植物工場に実装可能な植物生体情報画像計測システム

Title of Dissertation

学位論文要約：

Dissertation Summary

第1章 序論

わが国における次世代の農業生産形態として、栽培面積が1 haを越える大規模施設による企業的施設生産が注目されている (JGHA, 2018; MAFF, 2019b). 太陽光 (型) 植物工場 (Fig. 1) は、太陽光エネルギーを活用して大規模な農作物生産を行う施設であり、二酸化炭素・気温・湿度等の多くの環境要因を一元的に制御する環境制御技術と自動化・機械化等の省力化技術の融合により、地域において高い農作物生産効率を達成する農業生産システムとして確立されつつある。既に、環境制御技術については、セミクローズド・グリーンハウスの登場により一定の到達点にあると考えられている (Takayama, 2017).

他方、高度化した環境制御技術の性能を十分に発揮させるためには、植物の生育状態に合わせて環境制御の設定値を適切に更新し続ける必要がある (Takayama, 2018). つまり、植物の生育状態の見極め能力の高低が生産性の高低に直結することになるが、この「植物の生育状態の見極め」は、いまだに栽培管理者の目視による観察と経験に基づいた主観的判断に委ねられており、毎日の植物の生育状態を評価するための信頼できる数値データがほとんど存在しなかった。このような状況を打破し、太陽光植物工場の生産性を向上させるための切り札として世界的に注目されているのがスピーキング・プラント・アプローチ (SPA: Speaking Plant Approach; Udink et al., 1978; Hashimoto, 1989; Hashimoto, 2013) である。SPAは、様々なセンサーを用いて植物生体情報を計測して生育状態を診断し、その診断結果に基づいて栽培環境を適切に制御するという環境制御戦略であり、太陽光植物工場の生産性を向上させるための切り札として世界的にも注目されている (van Straten et al., 2010). なお、非破壊かつ非接触タイプの植物生体情報計測技術は、SPAにおける重要な最初のステップとして位置づけられている (Takayama, 2013).

特に、近年の画像計測デバイスの低廉化とIoT技術とロボット技術の普及により、従来のフェノタイピング技術 (Omasa, 2014) が進展した植物生体画像情報計測技術が提案されつつあり、人間の目による観察に基づいた生育の把握に代わる「植物の生育状態の数値化」が現実味を帯びてきている (Takayama, 2019). 愛媛大学においても太陽光植物工場への実装を念頭においたクロロフィル (以降、Chl) 蛍光画像計測ロボットが開発されている。Fig. 2に、Chl蛍光画像計測ロボットの模式図と写真を示す。本装置は、夜間に作業レーン上を自動走行し、トマト個体群のChl蛍光インダクション現象 (Omasa et al., 1987) を画像計測し、人間の目視では判断できない光合成能力の高低や種々の

ストレスの影響を数値評価することができる(Takayama et al., 2012). この技術を応用して2015年に井関農機(株)より植物生育診断装置(PD6-C[®], 井関農機(株))が市販された.

しかしながら, Chl蛍光画像計測ロボットを用いた光合成活性計測において, 装置の商品化に伴い計測は半自動化されているのに対し, 解析においては, 数値評価指標の算出において人間の判断が介在している. 具体的には, インダクションカーブ中の最大をP点, 以降の極小および極小点以降の極大をそれぞれS点およびM点と定義し, 特定しているが, 特にS点とM点については専門技術者の目視によって特定されているのが現状である(Fig. 3). つまり, 光合成活性の数値評価指標であるP/SやM/Sの再現性が低くなってしまふ. そのため, P/SやM/Sのデータの信頼性を高めるためにもS点およびM点の特定プロセスの自動化は喫緊の課題である.

Fig. 4に, 太陽光植物工場における長期多段トマト生産を単純化したモデルの模式図を示す(Takayama, 2013). 太陽光植物工場における環境制御の目的は, 純光合成の最大化と同化産物の代表的な器官(茎・葉・果実)への適正分配であり, 光合成については, 光合成・蒸散リアルタイムモニタリングシステムを用いることで, トマト個体群の光合成速度を個体レベルで計測可能であり, Chl蛍光画像計測ロボットを用いることでトマト個体群の光合成活性の日単位の変化を把握可能であり, 農業生産現場において実用化されつつある. 一方で, 同化産物の分配先である茎・葉・果実の日単位の変化を統合して高精度に計測する技術は確立されていない. つまり, これら, 茎・葉・果実の生体情報を把握することで, 生育の完全把握が可能となり, SPA技術に基づいた太陽光植物工場の実現が加速される.

そこで, 本研究では, スピーキング・プラント・アプローチ (SPA) 型太陽光植物工場への実装を念頭においた多元的植物生体情報画像計測技術の開発を目的として, クロロフィル (Chl) 蛍光画像計測による光合成活性診断の高度化を目指したChl蛍光インダクションカーブの解析技術の開発, さらに, 同化産物の分配先 (主要なシンク) である茎・葉・果実の日単位の変化を計測する各種画像計測技術の開発を行った.



Fig. 1 太陽光植物工場の外観(上)と内部の様子(下).

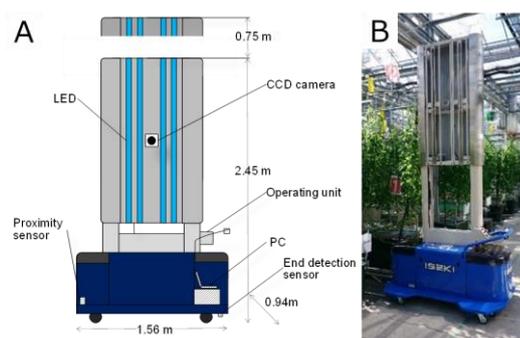


Fig. 2 Chl 蛍光画像計測ロボットの模式図(A)と写真(B).

(様式 5) (Style5)

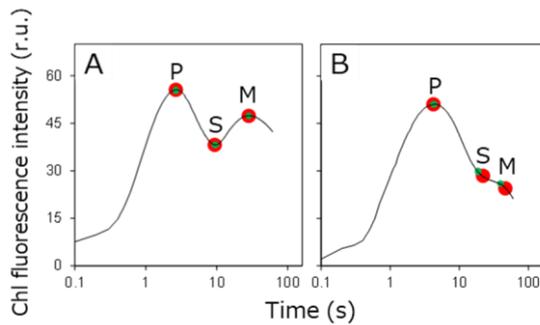


Fig. 3 特徴点 P,S,M 点が明確なインダクションカーブ(A)と不明確なインダクションカーブ(B). 赤と緑色の○はそれぞれ異なる特定者が特定した特徴点.

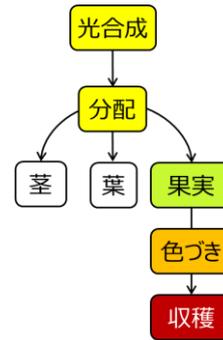


Fig. 4 太陽光植物工場における長期多段トマト生産の単純化モデル (Takayama, 2013 を改変)

第2章 Chl蛍光インダクションカーブを用いた光合成活性解析の高度化

Chl蛍光画像計測ロボットを用いた光合成活性計測において、装置の商品化に伴い計測は半自動化されているため、規格化されたデータ取得が可能となっている。しかしながら、それらのデータ解析においては、インダクションカーブの特徴点であるS点およびM点の特定が人間の判断に基づいている。そのため、光合成活性の数値評価指標であるP/SやM/Sの再現性が損なわれており、P/SやM/Sのデータの信頼性を高めるためにもS点およびM点の特定プロセスの自動化は喫緊の課題である。なお、S点およびM点はインダクションカーブのSlow phaseに含まれ、Slow phase中の生理学的プロセスは、P→Sはプラストシアニン等（第三電子受容体群）への電子伝達による Q_A の再酸化、S→Mは電子受容体群全体が還元傾向、M→Tは第三電子受容体群以降への電子伝達(カルビン回路によるNADPH消費の活性化)と熱放散の活性化を表していると解説されているが、多くのプロセスが同時に変化するため生理学的プロセスのモデルの構築は困難である。そこで、本章では、インダクションカーブのSlow phaseを数理モデルを用いて表現することを試みた。その結果、6次関数式がインダクションカーブのSlow phaseをよく近似することが確認された。Fig. 5に、トマト個体群およびイチゴ個体群を対象として計測を行った結果得られたインダクションカーブのSlow phaseとS点およびM点を多項式近似によって求めた結果を示す。S点とM点の時点を特定するという目的に関して、十分に近似できていることが確認でき、S、M点が不明確なインダクションカーブであっても、多項式近似を行うことで自動特定が可能であることが示めされた。

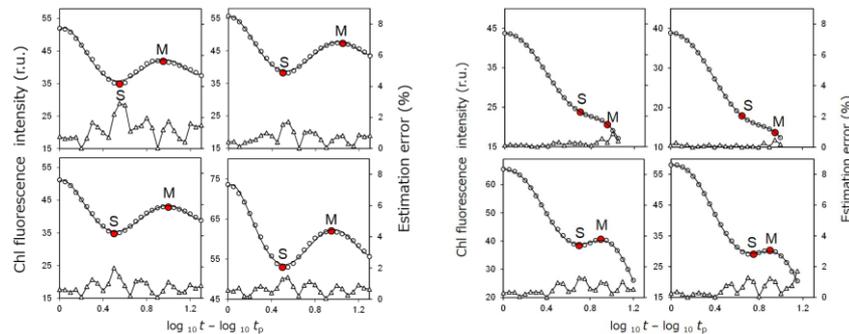


Fig. 5 インダクションカーブの Slow phase と 6 次式近似により特定した S 点および M 点を示す。

第3章 トマト個体群を対象とした茎伸長計測システムの開発

市販の Chl 蛍光画像計測ロボット(植物生育診断装置 PD6-C[®], 井関農機(株))を用いてトマト個体群の茎伸長計測を行った。本ロボットは、指定した時刻に1レーン(栽培管理用の通路)を自動的に往復走行し、作物個体群を対象とした Chl 蛍光画像計測を行う。画像計測部を個体群の茎頂の高さに固定した状態で水平方向に移動しながら連続的に Chl 蛍光画像を取得して(Fig. 6)茎頂高を計測(茎頂の y 座標[≒茎頂高])を目視で確認し、前日の茎頂高との差分を日単位の茎伸長量と定義した。まず、レンズに起因する画像の歪み補正を行った。OpenCV 3.6(OpenCV)に標準実装されているパラメータ推定機能を用いて歪み補正パラメータを推定し、カメラ内部パラメータとして $f_x = 2245.95$, $f_y = 2402.34$, $\alpha_x = 261.53$, $\alpha_y = 326.65$, 半径方向歪みのパラメータとして $k_1 = -15.53$, $k_2 = 363.98$, $k_3 = -4761.52$, 円周方向歪みのパラメータとして $p_1 = 0.037$, $p_2 = -0.031$ を得た。これらのパラメータを用いて歪み補正を行うことで $1.6 \text{ mm pixel}^{-1}$ の空間分解能を達成した。次に、ロボットを用いた高さ計測の精密さを検証した。30 mm × 40 mm の方形蛍光シートを計測対象レーン上のほぼ同一の高さに 0.4 m 間隔で 40 箇所を設置し、5 回の反復計測を行った。その結果、高さ計測の再現性は 0.01 % 以内であることを確認した。トマトの日単位の茎伸長量は 20 mm 程度であることから、本システムがトマトの茎伸長計測を行うのに十分な精度を有していると結論づけた。この結果に基づいて、連続した 70 日間の茎伸長量計測を行った。その結果、茎伸長量の日単位のダイナミックな変化を把握することに成功した(Fig. 7)。また、ロボット計測による週積算茎伸長量と、週次のマニュアル計測による週積算茎伸長量を比較し、ロボット計測が週単位のマニュアル計測の代替として機能することを確認した(Fig. 8)。

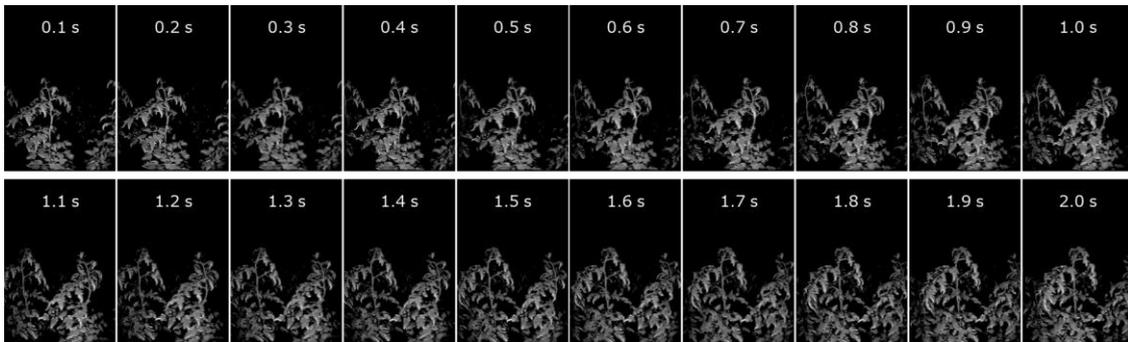


Fig. 6 水平方向に移動しながら連続的に取得された Chl 蛍光画像。

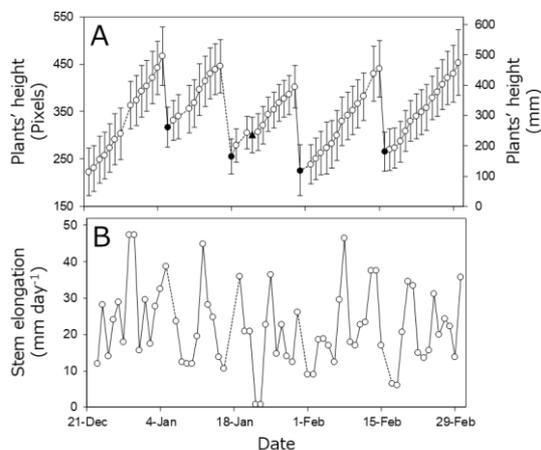


Fig. 7 70 日間の連続計測で得られた平均茎頂高(A)と日茎伸長量(B)の経時変化。

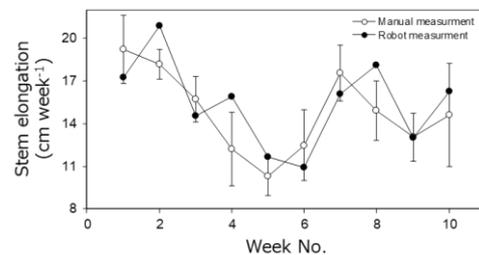


Fig. 8 ロボット計測による週積算茎伸長量と、週次のマニュアル計測による週積算茎伸長量の経時変化。

第4章 トマト個体群を対象とした果実計測システムの開発

市販型 Chl 蛍光画像計測ロボット(植物生育診断装置, PD6C 井関農機(株))に新機能を追加し、収穫予測を行うことを念頭におき、トマト果実を対象とした画像計測技術の確立を目的とした。具体的に果実の画像計測を行うにあたり、カラー画像、NDVI 画像、Chl 蛍光画像の同時取得が可能な多元的画像計測装置を開発し、この装置を用いて得られる画像から成熟果実および未成熟果実を抽出するアルゴリズムの開発を行った。なお、ここでの成熟果実とは赤色に着色した果実のことで、これを計測することで直近の1~3日後の収穫予測が可能になると期待される。他方、未成熟果実とは赤色に着色していない緑色果実のことで、これを把握することで、直近の1~2週間後の収穫予測が可能になると期待される。

Fig. 9 に、開発した小型多元的植物生体画像計測装置の模式図(A)と写真(B)を示す。装置の大きさは、0.6 m [H] × 0.6 m [W] × 0.06 m [D], 総重量は 4 kg であり、市販の Chl 蛍光画像計測ロボット(PD6C, 井関農機(株); 2.5 m [H] × 1.5 m [W] × 0.9 m [D], 総重量 200 kg)と比べ、大幅な小型化と軽量化を達成した(Fig. 4-2-1-C)。軽量なアルミパイプ構造材(SUS(株))をベースとして用い、カラー画像計測用の CMOS カメラ(以降、Color カメラ)1 台と、NDVI および Chl 蛍光画像計測用の近赤外域にも感度を有する CMOS カメラ 1 台を中央に配置し、光源には、カラー画像計測用の白色 LED((株)OBU)2 本、Chl 蛍光画像計測用の青色 LED((株)OBU)6 本、NDVI 画像計測用の赤色 LED((株)OBU)2 本と近赤外 LED((株)OBU)2 本を配置した。

果実を対象とした日単位の変化の把握技術として、果実着色速度計測システムを開発した。白色光を照射しながらColorカメラを用いて撮像した白色光反射画像(以降、カラー画像)を用いて、色相319~360°および0~40°, 彩度140~255[0-255が変域], 明度30~255[0-255が変域]のピクセルを赤色果実領域とした。なお、鏡面反射による白飛びの影響(Fig. 10)を低減するために、白飛び低減機構を開発し、愛媛大学農学部の太陽光植物工場で栽培されているトマト個体群を対象として4週間連続の果実計測を行った結果、成熟による日単位の赤色果実領域の増大、および、収穫による赤色果実領域の減少を捉えていた。なお、白飛び低減機能によって、色情報の欠落を約19.2%低減でき、本システムを用いることで、果実着色速度の正確な計測が可能になると期待される。

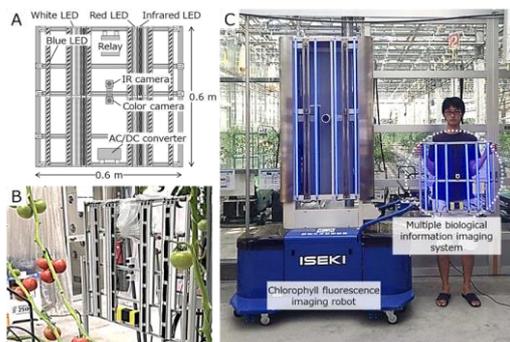


Fig. 9 開発した小型多元的植物生体画像計測装置の模式図(A)と写真(B)および、市販の Chl 蛍光画像計測ロボットと小型多元的画像計測装置の比較(C)

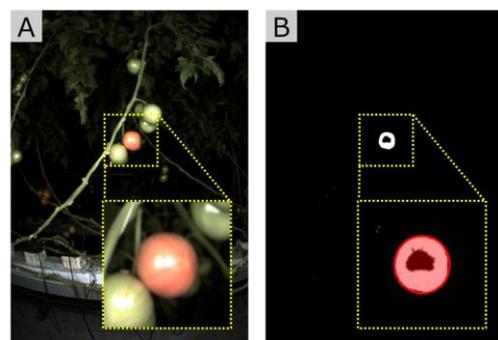


Fig. 10 トマト果実を対象に白色光を照射し、Color カメラで取得した画像(A)と、これに対し HSV の色空間をパラメータとして、トマトの成熟果実領域を抽出した画像(B)

第5章 総括

本研究では、スピーキング・プラント・アプローチ (SPA) 型太陽光植物工場への実装を念頭においた多元的植物画像計測技術の開発を目的として、クロロフィル (Chl) 蛍光画像計測による光合成活性診断の高度化を目指した Chl 蛍光インダクションカーブの解析技術の開発、さらには、同化産物の分配先 (主要なシンク) である茎・葉・果実の日単位の変化を計測する各種画像計測技術の開発を行った。

第2章では、インダクションカーブの Slow phase を数理モデルで表現することにより S 点および M 点の自動特定を試みた。その結果、6次関数式がインダクションカーブの Slow phase をよく近似することが確認され、得られた近似式を用いて S 点および M 点を特定するアルゴリズムを確定した。

第3章では、市販の Chl 蛍光画像計測ロボット (植物生育診断装置 PD6-C[®], 井関農機 (株)) を用いてトマト個体群の茎伸長計測を行った。本ロボットの画像計測部を個体群の茎頂の高さに固定した状態で水平方向に移動しながら連続的に Chl 蛍光画像を取得して茎頂高を計測 (茎頂の y 座標 [= 茎頂高] を目視で確認) し、前日の茎頂高との差分を日単位の茎伸長量と定義した。まず、レンズに起因する画像の歪み補正を行い、得たパラメータを用いて歪み補正を行うことで 1.6 mm pixel⁻¹ の空間分解能を達成した。次に、ロボットを用いた高さ計測の精密さを検証した。その結果、高さ計測の再現性は 0.01 % 以内であることを確認した。トマトの日単位の茎伸長量は 20 mm 程度であることから、本システムがトマトの茎伸長計測を行うのに十分な精度を有していると結論づけた。この結果に基づいて、70日間連続の茎伸長計測を行った。その結果、茎伸長量の日単位のダイナミックな変化を正確に把握することに成功した。

第4章では、果実を対象とした日単位の変化の把握技術として、果実着色速度計測システムを開発した。白色 LED を照射しながらカラーカメラを用いて撮像した白色光反射画像 (以降、カラー画像) を用いて、HSV 色空間をパラメータに色相 319~360° および 0~40°, 彩度 140~255 [0-255 が変域], 明度 30~255 [0-255 が変域] のピクセルを赤色果実領域とした。愛媛大学農学部の太陽光植物工場で栽培されているトマト個体群を対象として 4週間連続の果実計測を行った結果、成熟による日単位の赤色果実領域の増大、および、収穫による赤色果実領域の減少を捉えていた。なお、白飛び低減機能によって、色情報の欠落を約 19.2 % 低減でき、本システムを用いることで、果実着色速度の正確な計測が可能になると期待される。

引用文献

- Hashimoto, Y., 1989: Recent strategies of optimal growth regulation by the speaking plant concept. *Acta Horticulturae*, **260**. 115-121.
- Hashimoto, Y., 2013: Comprehensive innovation of a solar plant factory -from speaking plant approach to intelligent control for cultivation in a greenhouse-. *J.SHITA*, **25**, 57-64.
- Japan Greenhouse Horticulture Association (JGHA), 2018: Report of nationwide development of next-generation greenhouse horticulture in Japan. At http://plantfactory-japan.com/03document_download/20180801.pdf. Accessed 3 January 2020. (日本施設園芸協会, 2018: 次世代施設園芸の全国展開 攻めの農業の旗艦. At http://plantfactory-japan.com/03document_download/20180801.pdf. Accessed 3 January 2020.)
- Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF), 2019: Affairs of greenhouse horticulture. At <http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/saitai2/meguji.pdf>. Accessed 10 October 2019. (農林水産省, 2019: 施設園芸をめぐる情勢. At

<http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/saitai2/meguji.pdf>. Accessed 10 October 2019)

- Omasa, K., 2014: Remote sensing of plant functioning -Applications in plant diagnosis and phenomics researches-. *Eco-Engineering*, **26**, 51-61.
- Omasa, K., Shimazaki, K., Aiga, I., Larcher, W. and Onoe, M., 1987: Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves. *Plant Physiol.*, **84**, 748-752.
- van Straten, G., van Willigenburg, G., van Henten, E. and van Ooteghem, R., 2010: *Optimal control of greenhouse cultivation*. CRC Press, Boca Raton, 1-326 pp.
- Takayama, K., 2013: Second generation speaking plant approach: Practical application. *J. SHITA*, **25**, 165-174.
- Takayama, K., 2017: What can be seen through the Japan-the Netherlands international collaborative research [2] Environmental control technique contributing to increase in yield, Different approaches in the Netherlands and Japan. *Agriculture and Horticulture*, **92**, 458-464.(高山弘太郎, 2017: 2016-2017 日蘭国際共同研究を通じて見えるもの[2] 収穫量増大に貢献する環境制御技術: オランダと日本で異なるアプローチ, 農業および園芸, **92**, 458-464.)
- Takayama, K., 2018: Chlorophyll fluorescence imaging technique as a management tool in commercial greenhouse. *RSSJ*, **38**, 414-417.
- Takayama, K., 2019: New paradigm in international collaborative research of Japan and the Netherlands -Implementable SPA technologies inspired interdisciplinary research of agriculture and engineering sciences-. *Agriculture and Horticulture*, **94**, 973-982.(高山弘太郎, 2019: 連載記事 国際学術振興を目指す学会のパラダイム 日蘭共同研究に見る新「パラダイム」-実装型 SPA 技術が推進する農学と工学の先端融合-. 農業および園芸. **94**, 973-982.)
- Takayama, K. and Nishina H., 2008: Chlorophyll fluorescence imaging as a plant diagnosis tool in protected horticulture. *J.SHITA*, **20**, 143-151.
- Takayama, K., Miguchi, Y., Manabe, Y., Takahashi, N. and Nishina, H., 2012: Analysis of Φ_{PSII} and NPQ during the slow phase of the chlorophyll fluorescence induction phenomenon in tomato leaves. *Environ. Control Biol.*, **50**, 181-187.
- Udink, A. J., Bot, G. P. A. and van Dixhoorn, J. J., 1978: Computer control of greenhouse climates. *Acta Horticulturae*, **87**, 265-272.