トマトの養液栽培における水分ストレスに応じた 給液制御システムの開発(1)

——茎径変化による水分ストレスの非破壊評価——

大 石 直 記¹

静岡県農業試験場

¹ 現在：静岡県農林水産部

Development of Irrigation Control System in Response to Plant Water Stress in Tomato Hydroponics (1)

—Non-Destructive Evaluation of Plant Water Stress by the Change of Stem Diameter—

Naoki OISHI¹

Shizuoka Agricultural Experiment Station, Iwata-gun, Shizuoka 438-0803, Japan

¹ Present address : *Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, Shizuoka Prefectural Office,
Shizuoka 420-8601, Japan*

(Received July 18, 2001)

In order to develop an irrigation control system for applying optimum water stress to produce high-Brix tomato fruits with restricted root-zone hydroponics, a non-destructive evaluation method of water stress by measuring stem diameter (SD) was investigated. SD was continuously measured by using a laser sensor at internode between the 2nd and the 3rd leaves of tomato plant during the growing period. Relative stem diameter (RSD) was used as an index of a water stress, which is calculated from a percentage of SD toward maximum stem diameter (MSD). When RSD is 100%, there is no water stress. And if the RSD is smaller than 100%, an intensity of water stress is bigger. RSD indicated a diurnal change which decreased to less than 100% after the sunrise and recovered to 100 % from the evening to midnight. With a substrate drying, the relationship between RSD and leaf photosynthetic rate (Pr) was expressed as linear regression lines with high coefficient of correlation. The positive correlation between RSD in one plant grown in cultivation bed and relative water content (RWC) of leaves in other plants was investigated, except for the harvesting time of the double-truss cultivation. These results indicate that RSD is useful for an evaluation of water stress as an index for irrigation control in tomato cultivation, while a time constraint should be concerned in evaluating water stress by RSD measured at same stem position.

Keywords : irrigation control system, laser sensor, photosynthesis, stem diameter

2001 年 7 月 18 日受付

緒 言

近年、トマトは糖度の高い果実が好まれ、その需要

が拡大している。トマトの果実糖度は、水分ストレスを付与することによって上昇することが知られており (Tochigi and Kawasato, 1989; Mitchell et al., 1991), 灌水制限による高糖度トマト生産が土耕栽培を中心に

Corresponding author : Naoki Oishi, fax : +81-54-221-2839, e-mail : naoki1_oishi@hq.pref.shizuoka.jp

行われている (Muramatsu, 1992)。しかし、栽培期間を通じて適度な水分ストレスを付与するためには、高度な灌水量管理技術が不可欠である。すなわち、灌水量が過多となり水分ストレスの付与が充分でないと糖度の上昇程度は小さく、逆に灌水量が過少となり一時的ではあっても強い水分ストレスが付与されると、葉身の萎凋・枯死、着果不良、一果重の減少等が発生し、著しい減収を招く可能性がある。

著者らは、少量のロックウール細粒綿を培地として用いる根域制限式養液栽培システムによって、高糖度トマト生産が可能であることを明らかにした (Oishi et al., 1996)。この栽培システムの培地量は1株当たり約200 mlと少なく、短時間で培地内の水分量を減少させることができるので、確実な水分ストレスの付与が可能である。しかし、適度な水分ストレスを付与するためには生育や気象環境に応じて自動的に給液を制御できるシステムの開発があわせて必要である。

作物の水分ストレスは、蒸散量が一時的に吸水量を上まわることによって生じるが、このバランスを決定する蒸散および吸水速度は気象環境や培地内水分等の影響を受けて時々刻々変動する。そこで、養液栽培では水分ストレスを適切に制御するため、作物の蒸散および吸水に関わる積算日射量や培地内水分量を指標とする自動給液制御システムが用いられている (Tanaka, 1987)。しかし、前者は蒸散量を精度良く推定するための指標としては充分でなく (Kamota et al., 1972; Nakamura et al., 1988; Sato 1989)、後者は水分センサの適用条件 (培地種類、培地量等) に制約がある (Tanaka and Yasui, 1992)。したがって、これらの制御方式のどちらも、著者らの開発した根域制限式養液栽培システムにそのまま適用することは困難である。

近年、作物の生体計測によって体内水分状態を非破壊的に評価する方法が検討されている (Iwao and Takano, 1988a; Nakahara and Inoue, 1997)。この中でも茎径変化は、作物体の水分ポテンシャルを表す指標として有効であることが報告されている (Nagano and Shimaji, 1976; Iwao and Takano, 1988b; Imai et al., 1990, 1994)。さらに、Yamada and Kajioka (1991) と Sato and Hasegawa (1995) は、レーザ式変位センサを用いた非接触式の茎径測定法を検討し、本方法によって長期間にわたる茎径の簡易測定が可能であることを明らかにしている。したがって、レーザ式変位センサによる茎径測定を通じた水分ストレスの連続評価

方法が確立できれば、水分ストレスに応じた自動給液制御に応用することが可能と考えられる (Sato and Hasegawa, 1995)。しかし、現在のところ茎径変化から水分ストレスを長期間にわたって連続的に評価できる方法は確立していないため、茎径変化を指標とした給液制御は実用化されていない。

本研究では、養液栽培による高糖度トマト生産を目的として、適度な水分ストレスが付与できる給液制御技術を開発するため、レーザ式変位センサによってトマトの茎径変化を非破壊連続測定し、水分ストレスの評価法の検討を行った。

材料および方法

1. レーザ式変位センサによる茎径測定法

茎径の測定は、レーザ式変位センサ (LX2-02, (株) キーエンス製) を用いて、Sato and Hasegawa (1995) の方法を用いて行った (Fig. 1)。このセンサは赤外線レーザの投光器と受光器から構成され、両器の間に物体があるとレーザ光が遮られ、その遮光量から物体の外径を測定できる (検出幅: 10 mm, 分解能: 10 μ m)。センサの投光器及び受光器を 30 mm 間隔で取り付けたアルミ製固定器具にトマト茎を密着させた後、茎の測定部位の上下を固定器具にクリップで固定し、直径 (SD: mm) を連続測定した。なお、本センサによって得られたすべてのデータは、各センサごとに求めた出力値と気温との関係式によって温度補正して用いた。

2. 水分ストレス指標の算出法

水分ストレスを与えながら生育させた茎径肥大期の

Fig. 1 Measurement method of stem diameter using laser sensor.

Fig. 2 Typical diurnal time courses of stem diameter (SD), photosynthetically photon flux density (PPFD), and calculation methods of maximum and relative stem diameter (MSD, RSD).

トマト株における、晴天日の典型的なSDの日変化パターンをFig. 2に示した。その特徴は以下のとおりである。SDは、深夜から早朝にかけて増加した後、日の出以降はPPFDの増加にともなって減少した。また、SDはPPFDが最も大きくなる正午前後にその日の最少値を示した後、増加に転じ、深夜にその日の最大値を示した。ここで、深夜から早朝の時間帯におけるSDの増加は、蒸散の減少にともなう体内水分の増加と茎の肥大生長によって生じ、日の出以降の時間帯におけるSDの減少は、蒸散の増加にともなう体内水分の減少および肥大生長の停止によって生じると推察される(Iwao and Takano, 1988b; Imai et al., 1990)。そこで、この考え方に基づきSD変化から水分ストレスを連続的に評価する指標として、以下に示した相対茎径(RSD: %)を求めた(Fig. 2)。

SD(t) ≥ MSD(t-τ) の場合

$$\text{MSD}(t) = \text{SD}(t)$$

$$\text{RSD}(\%) = 100$$

SD(t) < MSD(t-τ) の場合

$$\text{MSD}(t) = \text{MSD}(t-\tau)$$

$$\text{RSD}(\%) = \text{SD}(t) / \text{MSD}(t) \times 100$$

SD(t): 時刻tにおける茎径 (mm)。MSD(t-τ), MSD(t): 時刻t-τ, tまでに記録された最大茎径 (mm)。

すなわち、ある時刻tに測定されたSD(t)が、それ以前の測定時刻t-τまでに記録された最大茎径(MSD(t-τ))より大きい場合等しい場合には、MSD(t)にSD(t)を代入し、この時のRSDは100%とする。いっぽう、SD(t)がMSD(t-τ)より小さい場合には、MSD(t)にMSD(t-τ)を代入し、この時のRSDはSD(t)のMSD(t)に対する百分率で表すものとする。すなわち、茎の肥大生長によってSDおよびMSDが増加傾向を示す場合のRSDは100%として、水分ストレスはないとみなし、SDがMSDより小さい場合のRSDは100%以下の値をとり、その値が小さいほど水分ストレスは大きいことを表す。

3. 培地内水分の減少にともなう相対茎径の推移と葉身の光合成速度との関係

トマト品種‘ハウス桃太郎’を用い、1995年10月15日にロックウール細粒綿を充填した72穴セルトレイに播種した。10月25日に縦、横100 mm、高さ50 mmのロックウールキューブへ移植し、静岡県農業試験場内プラスチックハウス内で、大塚ハウスA処方0.8単位の培養液(EC 2.0 dS·m⁻¹)を与えながら育苗した。11月30日に6葉期の健全な2株を用い、上記培養液処方の濃度を変えたEC 2.0区(EC 2.0 dS·m⁻¹)及びEC 6.0区(EC 6.0 dS·m⁻¹)を設け、それぞれの培養液でロックウールキューブを飽水状態にした後、2節と3節の節間にレーザ式変位センサを設置した。翌日の12月1日からの4日間にわたり、特に断らない限り給液を停止し、SDを30分間隔で測定してRSDを算出した。

茎径測定個体の第3葉小葉におけるみかけの光合成速度(Pr)は、携帯型光合成蒸散測定装置(SPB-H3, (株)島津製作所製)を用いて、毎日7~16時に測定した。

4. 栽培条件における相対茎径と葉身の相対含水量との関係

1994年8月16日に、トマト品種‘桃太郎’の4葉期の苗を、静岡県農業試験場内プラスチックハウス内に設置した根域制限式養液栽培システム(方式: 循環式, 栽培ベッド: 長さ8 m, 培地: ロックウール細粒綿, 培地量: 200 ml·plant⁻¹)へ定植した。栽植条件は条間1.5 m, 株間100 mmの1条振り分け誘引とし、2段花房上の3葉を残して摘心した。培養液は大塚ハウスA

処方 EC 濃度 $2.0 \sim 3.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ で、給液はしおれ程度や天候に応じて、1 回 $40 \text{ ml} \cdot \text{plant}^{-1}$ として、日中 1~17 回行った。8 月 28 日の 8 葉期に、栽培ベッド中央部の 1 株の第 2 節と第 3 節の節間にレーザ式変位センサを取り付け、10 分間隔で茎径データをコンピュータ (G200V, (株) 東芝製) に取り込み、RSD を算出した。

葉身の相対含水量 (RWC) の測定は、9 月 8 日及び 10 日の 1 段花房開花期 (11 葉期, 以下, 9 月測定), 10 月 4 日および 6 日の 2 段花房開花終期 (15 葉期, 以下, 10 月測定), 11 月 7 日及び 8 日の 1 段花房収穫期 (以下, 11 月測定) に各時期の最大展開葉位の小葉 (9 月測定: 第 7 葉, 10 月測定: 第 10 葉, 11 月測定: 第 13 葉) について行った。具体的な RWC の測定手順は以下のとおりであった。各測定日の 6 時から 18 時までの 1 時間おきに、栽培ベッド (南北畦) の南側, 中央, 北側の 3 カ所から上記葉位の小葉を 1 枚ずつ採取した。採取後の小葉は速やかに電子天秤で秤量し生体重 (F_w) を求め、水を充填した水槽に 2 時間浮かべて吸水させた後、葉の表面に付着した水分をティッシュペーパーでふき取ってから再び秤量し、飽水時生体重 ($F_{w_{\max}}$) を求めた。その後、小葉は乾燥機に入れ 70°C で 3 日間乾燥後、秤量して乾物重 (D_w) を求めた。RWC は、以下の式によって算出した。

$$\text{RWC} (\%) = (F_w - D_w) / (F_{w_{\max}} - D_w) \times 100$$

F_w : 生体重 (mg), D_w : 乾物重 (mg), $F_{w_{\max}}$: 飽水

時生体重 (mg)。

結 果

1. 培地内水分の減少にともなう相対茎径の推移と葉身の光合成速度との関係

1.1 SD, MSD および RSD の推移

給液停止後の培地内水分の減少にともなう SD, MSD 及び RSD の変化を Fig. 3 に示した。EC 2.0 区では、給液停止 1 日目の SD は直線的な増加を示し、MSD と SD はほとんど同じ値で推移した。RSD が 100% 以下となる時間帯はわずかであった。2 日目以降では、SD の増加は鈍化する傾向がみられ、RSD が 100% 以下に低下する時間帯がしだいに増加した。特に、3 日目および 4 日目では、12 時から 13 時に SD および RSD は急激に減少するとともに、株全体の葉身にしおれが観察された。そこで、この両日に 40 ml の給液を行った結果、給液後 SD および RSD は増加し、葉身のしおれも回復した。なお、いずれの日も夜間の SD は概ね増加傾向を示したが、一時的に減少する日もあった。EC 6.0 区では、給液停止 1 日目の SD は EC 2.0 区と同様に増加を示したが、EC 2.0 区に比べその増加程度は小さかった。2 日目以降の RSD は、昼夜を問わずしだいに 100% 以下となる時間帯が増加し、日中における RSD の最低値は減少する傾向を示した。特に、4 日目における SD および RSD は 9 時から 12 時

Fig. 3 Time courses of stem diameter (SD), maximum stem diameter (MSD) and relative stem diameter (RSD) during suspension of the nutrient solution supply at EC 2.0 and 6.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$.

Arrows (↓) in the figure indicate the timing of irrigation.

Fig. 4 Time courses of relative stem diameter (RSD: $\triangle$), photosynthetic rate (Pr: $\bullet$) and photosynthetically photon flux density (PPFD: $\circ$) during suspension of the nutrient solution supply at EC 2.0 and 6.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Arrows ($\downarrow$) in the figure indicate the timing of irrigation.

Fig. 5 Relationship between relative stem diameter (RSD) and photosynthetic rate (Pr) during suspension of the nutrient solution supply at EC 2.0 and 6.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

These were measured at higher than $700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD. **, Significant difference at $p=0.01$.

に著しく減少し、株全体の葉身にしおれがみられたので 40 ml の給液を行った。その結果、SD および RSD は急激に増加し、しおれは回復した。なお、夜間の SD は増加傾向を示したが、一時的に減少する日もあった。

1.2 RSD と葉身の Pr との関係

給液停止後の日中における RSD、葉身の Pr および Pr 測定時の PPFD の推移を Fig. 4 に示した。EC 2.0 区における給液停止 1 日目および 2 日目の RSD はほぼ 100% で推移し、Pr は PPFD の増加とともに上昇し、PPFD が減少すると低下した。3 日目では、PPFD の増

加にともなって 12 時以降 RSD は急激に減少し、同時に Pr も低下を示した。しかし、給液後は RSD の増加とともに Pr も上昇した。また、4 日目も RSD が減少した 11 時以降には、PPFD に関わらず Pr の上昇はみられなかった。EC 6.0 区では、給液停止 1 日目及び 2 日目の RSD は、PPFD の増加にともなわずに減少した。また、Pr は PPFD が増加すると上昇し、減少すると低下する傾向がみられた。3 日目の RSD は、PPFD の増加にともなわずに減少する傾向がみられ、Pr の上昇はみられなかった。また、4 日目の RSD は 9 時

から13時30分にかけて急激に低下し、PrもPPFDの変化に関わらず低下傾向を示した。

培地内水分が充分ある給液停止1日目においては、Prは $700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上のPPFDで飽和していた。そこで、光飽和点の $700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上におけるPrとRSDとの関係を求めた結果、RSDとPrとの間にEC 2.0区では $r=0.94$ 、EC 6.0区では $r=0.88$ の有意な相関関係がみられた (Fig. 5)。

2. 栽培条件における相対茎径と葉身の相対含水量との関係

2.1 RSDおよびRWCの生育時期別日変化

根域制限式養液栽培システムに生育したトマト株の

RSD、RWCおよびPPFDの日変化をFig. 6に示した。9月10日の測定では、PPFDの増加にともなって葉身のRWCは6時以降減少し、8時から15時まではほぼ一定値を示した後、16時以降増加を示した。RSDは、RWCと同様に6時から9時に減少傾向を示し、その後日中はほとんど変化せず、PPFDが減少する14時から18時にかけて微増傾向がみられた。10月6日の測定では、9月10日の測定と同様にPPFDの増加にともなってRWCおよびRSDは減少し、PPFDの減少にともなって増加する日変化を示した。11月7日の測定におけるPPFDは9月10日および10月6日の測定に比べて小さかったが、RWCは6時以降9時まで減

Fig. 6 Time courses of relative stem diameter (RSD: Δ) and relative water content (RWC: $\bullet$) in leaves of tomato plants cultivated with the hydroponics and photosynthetically photon flux density (PPFD: $\circ$) on Sep. 10, Oct. 6 and Nov. 7.

Maximum stem diameter (MSD) of these days were 11.7 mm, 12.4 mm and 13.0 mm, respectively. Vertical bars indicate standard deviations in RWC.

Fig. 7 Relationship between relative stem diameter (RSD) and relative water content (RWC) in leaves of tomato plants cultivated with the hydroponics on Sep. at flowering the first truss, Oct. at the end of flowering the second truss and Nov. at the start of harvesting the first truss.

**, Significant difference at $p=0.01$. ns, nonsignificant difference at $p=0.05$.

少し、その後18時にかけて増加傾向を示した。これに対し、RSDは6時から18時にわずかに減少しただけだった。

2.2 RSDとRWCとの関係

9月、10月、11月測定におけるRSDとRWCとの関係をFig.7に示した。1段花房開花期の9月測定及び2段花房開花終期の10月測定では、RSDとRWCとの間にそれぞれ $r=0.81$ 、 $r=0.85$ の有意な相関関係がみられた。これに対し、1段花房収穫開始期の11月測定では、RSDとRWCとの間に相関関係はみられなかった($r=0.01$)。

考 察

本報告では、レーザ式変位センサを用いてトマト莖径の連続測定を行った。従来の莖径測定法は、莖に変位センサを接触させるため、測定器具が莖径変化に影響を及ぼす可能性があり、長期間の測定には煩雑な調整が必要であった(Nagano and Shimaji, 1976; Iwao and Takano, 1988a; Imai et al., 1990)。これに対し、本測定法では莖径測定部位の上下位置を器具に固定するだけで莖径の連続測定が可能であり、測定中における調整はほとんど必要ない。すでに本法は、トマト(Yamada and Kajioka, 1991; Nishina et al., 1998)、温室メロン(Sato and Hasegawa, 1995)の莖径測定に用いられている。

レーザ式変位センサによる莖径測定の結果、トマトのSDは生育過程を通じた水分変化と肥大生長とによってダイナミックな日変化を示した。SDの変化から植物体の水分状態を評価するためIshida(1985)は、毎日の夜間のSDを結ぶ包絡線は水分ストレスがない状態のSDとほぼ等しいとし、当日とその前日の午前5時のSDを結ぶ基準直線に対するSDの相対値(相対莖直径)を指標として用いた(Ishida et al., 1989)。いっぽう、Sato and Hasegawa(1995)は、メロンのSDが深夜から早朝にかけて直線的な増加を示すことから、水分ストレスがない場合には日中でもその増加が継続すると仮定し、0時から5時のSDの経時的変化から求めた仮想直線に対するSDの相対値(莖径膨縮率)を指標として用いている。しかし、今回の莖径測定の結果から、培地内水分が少ない条件では、蒸散量の少ない夜間であってもSDに一時的な減少がみられ(Fig. 3)、必ずしも直線的な増加を示さなかった。また、その結果、1日の中でSDが最大となる時刻、言い換えると水分ストレスが最も小さくなる時刻をあらかじめ特

定することは困難と思われた。これに関連してIwao and Takano(1988b)、Imai et al.(1990)は、培地の乾燥が進むと日中のSDの減少量に対する夜間の増加量が小さくなることを指摘している。このことを考慮すると、本研究においてみられた夜間におけるSDの一時的な減少は、培地内水分が著しく減少し、吸水や肥大生長が抑制されることを通じて生じていると考えられた(Ishida, 1985)。したがって、培地内水分が少ない条件では、特定の時間帯におけるSDの経時的変化を基準として用いるIshida et al.(1989)、Sato and Hasegawa(1995)の指標は、水分ストレスの評価に大きな誤差を生じる可能性があり、水分ストレスのない状態のSDの基準値の算出方法を改善する必要がある。

本研究では、SDの変化から莖の肥大生長にともなう最大莖径(MSD)を随時求め、日の出後のSDの減少が体内水分の減少によって生じると仮定し、SDのMSDに対する相対的变化によって水分ストレスを評価しようとした。すなわち、RSDは特定の時間帯におけるSDの経時的変化を基準としていないため、SDがパターン化できない複雑な経時的変化を示す場合でも、安定的な水分ストレスの評価が可能である。RSDの特性を明らかにするため、培地内水分の減少にともなう葉身のしおれ状況との対応関係を観察するとともに、葉身の生理的機能を表す指標の一つであるPrとの関係をみた。その結果、葉身にしおれが生じると同時にRSDは著しい減少を示し、両者に密接な対応関係がみられた。また、Prは培地内水分が充分ある条件ではPPFDと密接に関係して変化するが、培地内水分が減少し葉身にしおれが生じるようになると、PrはRSDと密接に関係して変化する事が明らかとなった。このことは、灌水制限によって水分ストレスが生じたトマト葉身の光合成速度が気孔の閉鎖によって低下したことを示している。また、Fusao and Iwao(1994)は、土壤の乾燥と晴天とが重なった場合に限り、トマト体内の水分ポテンシャルが低下し強い水分ストレスが発生することを明らかにした。今回の結果でも、培地内水分の減少とPPFDの増加にともなう蒸散量の増加とが重なることによって強い水分ストレスが生じ、葉身の光合成、気孔の閉鎖などの生理的機能が著しく低下したことを示唆した。これらのことから、葉身にしおれが生じる程度の水分ストレスが付与される栽培条件では、RSDによって水分ストレスにともなう葉身の生理的变化を評価することが可能であり、RSDは水分ストレスを評価するための指標として有効であ

と考えられた。なお、培養液 EC 濃度によって培地内水分の減少にともなう RSD の推移は大きく異なったが (Fig. 3), RSD と Pr との関係に著しい相違はみられなかった。したがって、RSD によって吸水抑制にともなう水分ストレスの影響を総合的に評価できる可能性が示唆された。

RSD を指標にした給液制御を想定して、根域制限式養液栽培システムに生育した 1 株の RSD と同じ栽培ベッドに生育した他株における葉身の RWC との関係を見た結果、両者の間には 9 月および 10 月測定のいずれも密接な相関関係が認められた。これまで、同一株内における茎径変化と葉身の水分状態との関係は報告されているが (Nagano and Simaji, 1976; Iwao and Takano, 1988b; Imai et al., 1990; Fusao and Iwao, 1994; Sato and Hasegawa, 1995), その他の株との関係を見た報告は少ない。Nishina et al. (1998) は、本報告と同様に等しい条件で生育した異なる株の茎径変化と葉身の水ポテンシャルとの間に密接な関係があることを報告している。このことは、畦の 1 株における RSD を追跡することによって、等しい給液条件で管理された個体群の水分ストレスを総合的に評価することが可能であることを示している。しかし、1 段花房収穫期の 11 月測定における RSD と RWC との関係は、9 月、10 月測定のように密接な関係はみられなかった (Fig. 7)。これに関連して Nishina et al. (1998) は、トマトの茎径を部位別に同時測定した結果、茎の下部は上部に比べ茎径変化が小さいことを報告している。すなわち、本報告では、いずれの生育ステージでも 2 節と 3 節の間の茎径を測定したため、加齢にともなって茎の弾力性が失われ、葉身の水分変化に対する RSD の変化程度が小さくなった結果、RSD と RWC の間に密接な関係が認められなくなったと推察された (Ishida, 1985)。このことから、トマトの長期栽培では 1 カ所の茎径測定によって水分ストレスを評価することには限界があり、さらなる検討が必要と考えられた。

以上のように、RSD を指標とすることによって、水分ストレスを非破壊で連続的に評価することが可能と考えられた。今後、RSD を指標にした給液制御システムの構築を図るとともに、給液及びトマトの収量、品質に及ぼす影響について検討を行う。

本研究の遂行にあたり中部電力 (株) の石田伸治氏、(株) 東芝の林 巧氏、元同社の小山保徳氏には多大なご協力をいただいた。また、本論文のとりまとめにあた

り、東京農業大学の石原 邦教授、静岡大学の糠谷 明教授には貴重なご助言をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。

文 献

- Fusao, K., Iwao, K. 1994. Effect of soil moisture on diurnal variation of water content in tomato plant. (Japanese text with English title) Rep. Tokai Branch Soc. Agric. Meteorol. Jpn. (農気東海誌) **52**: 13-16.
- Imai, S., Iwao, K., Fujiwara, T. 1990. Measurements of plant physiological information of vine tree and indexation of soil moisture control. (1) Analysis of stem diameter variation affected by environmental factors. (Japanese text with English abstract) Environ. Control in Biol. **28**: 103-108.
- Imai, S., Honda, T., Fujiwara, T. 1994. Influence of soil moisture on daily variations of fruit and stem diameters of Japanese pear 'Kosui.' (Japanese text with English abstract) Environ. Control in Biol. **32**: 155-162.
- Ishida, T. 1985. Water transport through soil-plant system. (Japanese text with English abstract) Bull. Yamagata Univ. Agric. Sci. (山形大学紀要(農学)) **9** (Extra Issue): 616-621.
- Ishida, T., Nagano, T., Higashiyama, I., Hunada, S. 1989. Automatic environment monitoring and regulating system for crop cultivation. —Development of automatic monitoring system—. (Japanese text with English abstract) Bull. Yamagata Univ. Agric. Sci. (山形大学紀要(農学)) **10**: 839-847.
- Iwao, K., Takano, T. 1988a. Studies on measurements of plant physiological informations and their agricultural applications. (1) Development of non-invasive measurements of water content in plant. (Japanese text with English abstract) Environ. Control in Biol. **26**: 139-145.
- Iwao, K., Takano, T. 1988b. Studies on measurements of plant physiological informations and their agricultural applications. (2) Dynamics of water content in plants such as several crops and trees under natural conditions. (Japanese text with English abstract) Environ. Control in Biol. **26**: 163-170.
- Kamota, F., Taniguchi, R., Kato, I., Sakata, K. 1972. Studies on the characteristic features of water consumption of various crops. VI. On the evapotranspiration of the indoor cultivation of vegetables. (Japanese text with English abstract) Bull. Tokai-Kinki Agric. Exp. Stn. (東近研報) **24**: 76-93.
- Mitchell, J. P., Shennan, C., Grattan, S. R., May, D. M. 1991. Tomato fruit yields and quality under water deficit and salinity. J. Am. Soc. Hortic. Sci. **116**: 215-221.
- Muramatsu, Y. (村松安男) 1992. Cultivation of Tomato with High Quality and High Brix (高品質・高糖度のトマトづくり). (Japanese text) Nonsan Gyoson Bunka Kyokai (農山漁村文化協会), Tokyo, pp 10-19.
- Nagano, T., Shimaji, H. 1976. Internal plant-water-status and its control. (1) Measurement of internal plant water status. (Japanese text with English abstract) J. Agric. Meteorol. **32**: 67-71.
- Nakahara, M., Inoue, Y. 1997. Detecting water stress in differentially-irrigated tomato plants with infrared thermometry for cultivation of high-brix fruits. (Japanese text with English abstract) J. Agric. Meteorol. **53**: 191-199.
- Nakamura, S., Horiuchi, M., Sano, H. 1988. Control of nutrient solution for "rockwool culture" of tomato. (Japanese text with English abstract) Bull. Shizuoka Agric. Exp. Stn. (静岡農試

- 研報) **33**: 19-25.
- Nishina, H., Yoshida, T., Nagatomo, K., Miyoshi, M., Hashimoto, Y. 1998. Production of tomato fruits with high brix in nutrient solution cultivation system with granular rockwool. (Part1) Measurement and analysis of physiological information of tomato plants under water stress. (Japanese text with English abstract) J. SHITA(植物工場学会誌) **10**: 113-118.
- Oishi, N., Okatani, M., Koyama, Y. 1996. Development of hydroponics system for production of high soluble solids tomato by low node-order pinching and high density planting. (Japanese text with English abstract) Bull. Shizuoka Agric. Exp. Stn. (静岡農試研報) **41**: 1-11.
- Sato, N. 1989. Automatic watering for the muskmelon accomplished by personal computer. (Japanese text with English abstract) Bull. Shizuoka Agric. Exp. Stn.(静岡農試研報) **34**: 1-21.
- Sato, N., Hasegawa, K. 1995. Prediction of relative water content in muskmelon leaf from change in stem diameter by laser sensor. (Japanese text with English abstract) Bull. Shizuoka Agric. Exp. Stn. (静岡農試研報) **40**: 1-5.
- Tanaka, K. 1987. New substrate and development of sensor in hydroponics. (固形培地新素材及びセンサの開発) (Japanese text) Agric. Hortic. (農業及び園芸) **62**: 111-118.
- Tanaka, K., Yasui, H. 1992. Studies on practical application of rockwool culture for fruit vegetables. Bull. Natl. Res. Inst. Veg. Ornam. Plants Tea (野菜茶試研報) **A5**: 1-36.
- Tochigi, H., Kawasato, H. 1989. Effect of the soil moisture on the quality of tomato fruit in forcing culture (Japanese text with English abstract) Bull. Tochigi Agric. Exp. Stn. (栃木農試研報) **36**: 15-24.
- Yamada, H., Kajioka, R. 1991. Valuation of planting method by plant physiological measurements for petty-tomato cultivating in NFT. (Japanese text with English abstract) Environ. Control in Biol. **29**: 153-157.