トマトの体内水分と器官間水分競合との関係

誌名	園藝學會雑誌
ISSN	00137626
著者名	荒木,陽一
発行元	園藝學會
巻/号	62巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 121-128
発行年月	1993年6月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

園学雑. (J. Japan. Soc. Hort. Sci.) 62(1) : 121-128. 1993.

トマトの体内水分と器官間水分競合との関係

荒木陽一*

野菜・茶業試験場施設生産部　470-23　愛知県武豊町南中根45

Relationship between Plant Water Status and Water Movement in Tomato

Yoichi Araki

Department of Protected Cultivation, National Research Institute of Vegetables, Ornamental Plants and Tea, Taketoyo, Aichi 470-23

Summary

Water economy between leaf and fruit in tomato plant was studied to establish a water management practice based on plant water status.

1. Relationships among stem, leaf, and fruit water potentials in tomato plants are influenced by soil moisture status. When soil moisture potential, ψs, was -0.002 MPa, the water potential was highest in the stem and lowest in the fruit. But when ψs was -0.062 MPa, the water potential was highest in the fruit and lowest in the leaf.

2. Sap flow rates in the stem, petiole, and peduncle fluctuated daily. They were minimal when ψs was -0.062 MPa.

3. When ψs approached -0.062 MPa, the fruit shrank, which suggests that water flows from the fruit to the stem as soil moisture is depleted. This back flow could not be measured by the heat pulse method employed in this experiment.

緒　言

近年，トマトの生産現場では，市場や消費者の要望にこたえ，また，生産物の差別化を狙って，糖度の高い果実を生産しようとする試みがみられる．そのために，隔離床や金網床を用いて根域を制限したり，極端な節水管理を行っている．その結果，果実の糖度は上昇したが，果実の肥大が抑制されて収量が上がらず，また，果皮が硬くなるといったあらたな生産上の問題を引き起こしている．

このトマトの各器官を水分生理的な役割の面からみると，生育に必要な水を吸収する根，その水を葉や果実へ送る茎，茎から送られてきた水を蒸散する葉，ならびに水を貯蔵する果実にわけられる．一方，植物体の水分状態を表す水ポテンシャルは，膨圧や根圧などによる圧ポテンシャルと，無機養分や同化産物に起因する浸透ポテンシャルとにわけられる．それゆえ，1個体の中でも，水ポテンシャルは器官により異なることが予想される．

熱力学の第2法則では，水は水ポテンシャルの高い所から低い所へ流れる．したがって，土壌水分や培養液などが十分に存在する場合には，日中の蒸散により葉の水ポテンシャルが低下すると，根から吸収された水は茎を通って葉に供給される．しかし，土壌水分等が極端に不足して，根による吸水が停止した場合には，葉よりも水ポテンシャルの高い他の器官が葉への水の供給器官になると考えられる．果菜類ではこれが果実であると推測される．このことは，果実をつけた茎葉とつけない茎葉を切り取って放任しておくと，果実をつけない茎葉はすぐに萎れるが，果実をつけた茎葉は相当の期間健全であったとする実験結果（Bartholomew, 1926 ; Chaney・Kozlowski, 1971）からも裏づけられる．これが葉と果実との間における水分競合現象（小林, 1976）であり，その結果として果

1992年4月17日　受理．体内水分を指標とした施設トマト栽培における水管理に関する研究．第4報．本報告の一部は園芸学会昭和63年度秋季，平成元年度春季大会において発表した．

*現在：農業研究センター耕地利用部．

実から葉への水の奪取が始まると，果実は収縮を始める（Hodgson, 1917）．それゆえ，果実生産が最終目標である果菜類において，葉と果実の水ポテンシャルの違いに基づく水の競合現象，ならびにそれと関連した植物体各部の生長反応を明らかにすることは，良品質・多収生産のための生育制御技術，とりわけ，水管理技術開発のための基礎データになると考えられる．

そこで，本実験ではトマト各器官における水ポテンシャル勾配と水の移動速度ならびに各器官の生長反応等の水分特性を土壌水分減少過程で検討し，これら水分特性と土壌水分との関係を明らかにしようとした．

材料および方法

1．トマト各器官の水ポテンシャル勾配

トマトの葉，果実ならびに茎の水ポテンシャルを，土壌水分の減少過程で経時的に測定した．水ポテンシャルの測定にはプレッシャーチャンバーを用い，各器官の木部圧ポテンシャルをもって水ポテンシャルとした．

品種'トピック'を供試した．1984年9月10日に播種し，11月22日に黄色土の入った1/2,000 aワグナーポットに定植した．測定は12月7日と13日にハウス内で行った．測定は第2花房とその上下の葉（上が葉の水ポテンシャル用，下が茎の水ポテンシャル用）について行い，果実の水ポテンシャルは直径2 cm前後の果実について葉に準じて測定した（Klepper, 1968）．一方，茎の水ポテンシャルの測定はBegg・Turner（1970）の方法によった．すなわち，測定日の前日の夕方に測定葉をポリエチレンビニル袋で覆い，中の空気が逃げない程度にビニル袋の口をしばり，さらにその上をアルミホイルの袋で覆った．測定直前にビニル袋の中の葉から，最も基部にある小葉を切り出して水ポテンシャルの測定を行い，この値を茎の水ポテンシャルとした．各時刻の測定には3株ずつ供試した．第1回目測定日の前日（12月6日）の夕方に全ポット十分にかん水した後，測定終了まで無かん水とした．

2．トマト各器官への水移動速度

茎，葉柄ならびに果柄における水移動速度を土壌水分の減少過程で測定した．水移動速度の測定にはヒートパルス法（Cross, 1957）を用いた．これは，水移動方向が明らかになっている器官にヒーター（O）を中心に温度センサー2本（A：上流側，B：下流側）をOA<OBとなるように配置し，ヒーターを加熱後2点の温度が等しくなるまでの時間（t_o）から，次式に基づいてヒートパルス移動速度，さらに水移動速度を求める方法である．すなわち，

$$V_{hp}=(OB-OA)/2\,t_o \cdots\cdots(1)$$

ここで，V_{hp}：ヒートパルス移動速度（cm・hr^{-1}）

また，

$$V_w=\rho(m+0.33)V_{hp}A \cdots\cdots(2)$$

ここで，V_w：水の移動速度（ml・hr^{-1}）

ρ：測定部の乾物重／測定部の生体容積（g・cm^{-3}）

m：測定部の水分重／測定部の乾物重

0.33：セルロースの比熱

A：測定部の断面積（cm^2）

品種'トピック'を1985年8月26日に播種し，10月1日に黄色土を詰めた1/5,000 aワグナーポットに定植した．測定はファイロンハウス内で12月23日から25日まで経時的に行った．センサーの設置箇所は茎では第1花房直下，葉柄では第1花房直上葉，果柄では第1花房とした．第1花房上6葉を残して摘心し，第1花房より下の葉は切除した．また，果実も第1花房以外はすべて除去した．

ヒーターを中心に温度センサー2本の挿入間隔は，茎についてはOA：OB＝0.5 cm：1.0 cm，葉柄については0.7 cm：1.0 cmとした．一方，果柄については0.9 cm：1.0 cmとし，茎から果実ならびに果実から茎への水移動速度が測定できるように，近接した2点にヒーターとセンサーのセット2組を対称的に設置した．また，ヒート時間は茎については1.0 sec，葉柄ならびに果柄については0.5 secとした．水移動速度の測定と同時に葉の水ポテンシャルならびに土壌水分吸引圧も測定した．また，ヒートパルス法の信頼性を確認するために，重量法で蒸散速度を測定した．

3．トマト各器官の生長反応

土壌水分の減少に伴う茎，葉柄ならびに果実の肥大・収縮の変化を同時計測した．トマト各器官の水ポテンシャルならびに各器官への水移動速度も適宜測定した．トマトの葉柄ならびに茎の肥大・収縮は動ヒズミ計（関山ら，1978, 1980, 1982）で，また，果実については作動トランス（鴨田・内藤，1975）で測定した．

品種'トピック'を1987年9月16日に播種した．1/2,000 aワグナーポットに黄色土を風乾土で13 kg詰め，10月18日に定植した．1988年2月1日の夕方に十分かん水し，計測器を所定の部位に装着した後，翌日の早朝から測定を開始した．測定はハウス内で行った．

計測器の装着位置は茎では地際部，葉柄では第2花房直上葉ならびに果実では第2花房第1果とした．葉，果実，茎の水ポテンシャルの測定部位は，それぞれ第2花房直上葉，第2花房ならびに第2花房直下葉とした．葉柄，果柄，茎の水移動速度は，それぞれ第2花房直上葉，第2花房ならびに地際部で測定した．

4．トマト果実からの水の流出

根の切除が茎，葉柄ならびに果柄における水移動速度に及ぼす影響について検討した．

品種'トピック'を1988年4月4日に播種し，5月6日に黄色土を詰めた1/5,000 aワグナーポットに定植した．第1花房上3葉を残して摘心した後，6月27日に人工気象室に搬入した．

温度センサー2本の挿入間隔は，茎についてはOA：OB＝0.5 cm：1.0 cm，葉柄については0.7 cm：1.0 cmとした．一方，果柄については果実から茎に向かってOA：OB＝0.9 cm：1.0 cmとした．また，ヒート時間は茎については1.0 sec，葉柄ならびに果柄については0.5 secとした．

測定は6月28日13時に開始し，6月30日15時まで続けた．途中，6月29日9時の測定直後に茎を地際部と子葉の中間で切断した．切断部の茎の直径は7.1 mmであった．

結　果

1．トマト各器官の水ポテンシャル勾配

土壌水分状態が異なる時のトマト各器官の水ポテンシャルを第1図と第2図に示す．土壌水分の多少にかかわらず，葉，果実，茎の水ポテンシャルは日変化を示したが，土壌水分が少ないほど低い値で推移した．また，日変化の様相は土壌水分状態で異なり，特に朝の低下過程と夕方の上昇過程に違いがみられた．すなわち，土壌水分吸引圧がpF 1.3（−0.002 MPa）前後の場合，各器官の水ポテンシャルは5時頃最高に達し，7時の日の出とともに徐々に低下を始め，15時頃最低値を示した後急速に上昇に転じ，日没後の17時以降も徐々に上昇を続けた．これに対して，土壌水分吸引圧がpF 2.8（−0.062 MPa）以上では，日の出直前の7時に最高に達した各器官の水ポテンシャルは日の出とともに急速に低下し，13時頃最低値を示した後上昇を始めたが，その上昇の程度はわずかで，日没後の17時以降ももとに復帰することなく，低い値のまま推移した．

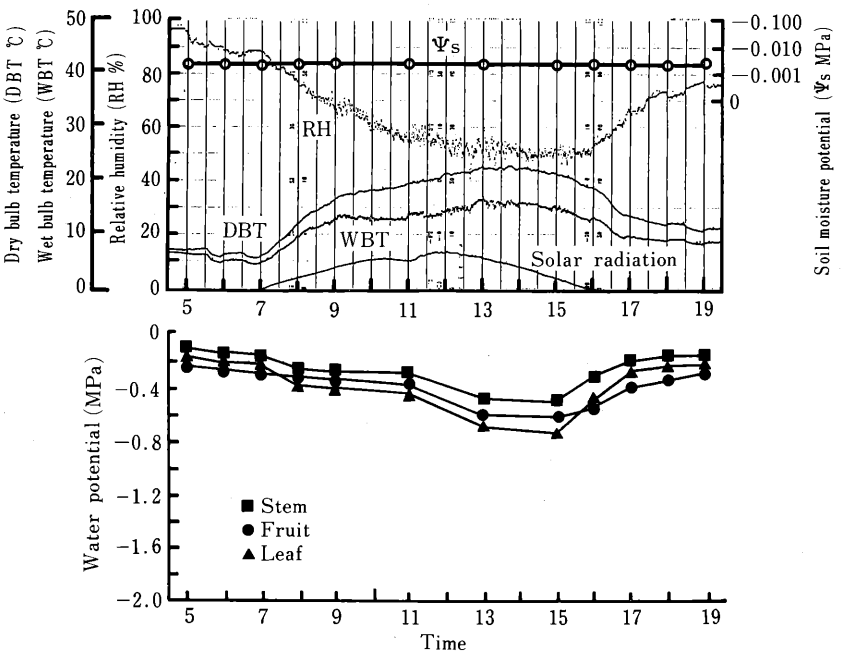


Fig. 1. Diurnal fluctuations of water potential in various plant parts of tomato under high soil moisture potential in a glasshouse (7/Dec/84, Integrated solar radiation：93 kcal・cm^{-2}・day^{-1}).

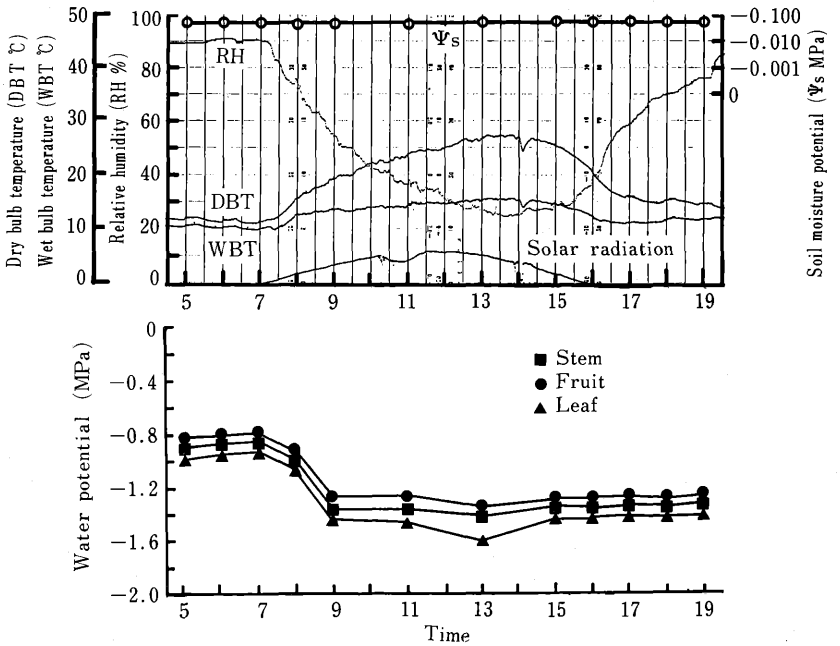


Fig. 2. Diurnal fluctuations of water potential in various plant parts of tomato under low soil moisture potential in a glasshouse (13/Dec/84, Integrated solar radiation : 85 kcal・cm^{-2}・day^{-1}).

葉，果実，茎の3者の水ポテンシャルの関係は時刻および土壌水分状態で異なった．すなわち，土壌水分吸引圧がpF 1.3前後の場合，早朝の水ポテンシャルは茎＞葉＞果実であったが，日中には茎＞果実＞葉となり，夕方には再び茎＞葉＞果実となった．これに対し，pF 2.8以上では三者の関係は終日，果実＞茎＞葉であった．

2．トマト各器官への水移動速度

ヒートパルス法の信頼性を確認するために，重量法から求めた蒸散量と，ヒートパルス法で求めた茎の水移動速度の関係を第3図に示す．両者の間には，相関係数r＝0.994＊＊で有意な正の相関関係があった．また，ヒートパルス法で求めた茎と葉柄の水移動速度（それぞれX，Y）の関係を第4図に示す．両者の関係は，Y＝−0.0703＋0.104 X（r＝0.995＊＊）で表すことができた．この回帰係数（0.104）は測定に用いた株の全葉面積に対する測定葉（1枚）の葉面積の割合（0.085）に近い値であった．すなわち，茎における水の移動量の約10％を測定葉が占め，それは葉面積の割合とほぼ一致した．

黄色土の水分減少に伴う葉の水ポテンシャルと葉柄，

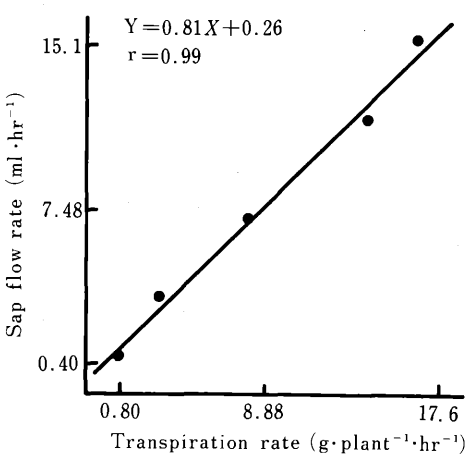


Fig. 3. Relationships between transpiration rate and sap flow rate in the stem of tomato plants.

果柄，茎における水移動速度の変化を第5図に示す．測定期間中は晴天が続き，葉の水ポテンシャルは実験1と同様な日変化を示した．しかし，その変化の様相は土壌水分状態によって異なり，土壌水分が十分に存

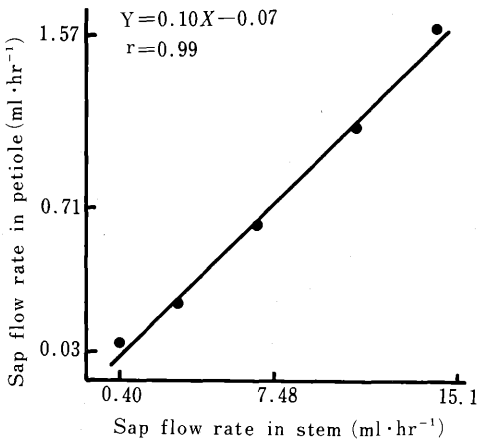


Fig. 4. Relationships between sap flow rate in the stem and petiole of tomato plants.

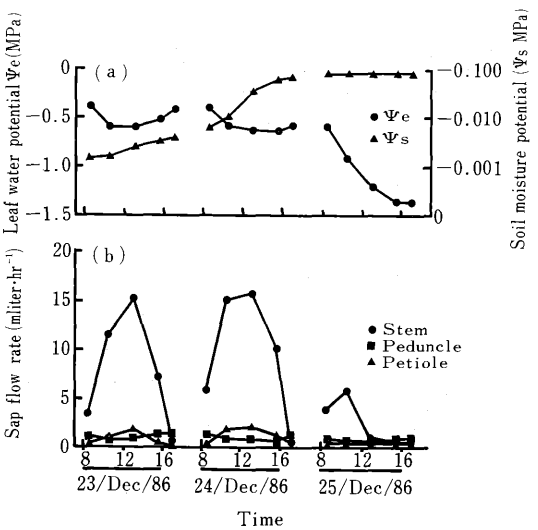


Fig. 5. Diurnal fluctuations of leaf water potential and sap flow rate in various plant parts of tomato grown on yellow soil under a decreasing soil moisture condition.

在する間は葉の水ポテンシャルは夜の間に回復したが，土壌水分が減少するにつれて夜間の回復が不十分になり，pF 2.8 以上になった 3 日目には夜間の回復はみられなくなった（第 5 図 a）.

各部位における水移動速度は茎が最も大きく，葉柄と果柄は同程度の値であった．果柄における水移動速度は終日ほぼ一定で，土壌水分の減少につれてわずかずつ低下した．葉柄の水移動速度は土壌水分が十分に存在するときは，日中果柄のそれよりも大きかったが，土壌水分が pF 2.8 以上の時は，日中でも果柄の水移動速度より小さくなった（第 5 図 b）.

なお，いずれの土壌水分状態の時でも，果実から茎への水移動速度は計測できなかった.

3．トマト各器官の生長反応

土壌水分の減少に伴う茎，葉柄ならびに果実の肥大・収縮を第 6 図に示す．また，これらの測定期間中適宜計測した各器官の水ポテンシャルと茎，葉柄および果柄における水移動速度の変化をそれぞれ第 8 図と第 9 図に示す．測定器官中適宜計測した各器官の水ポテンシャルと各部位の水移動速度は，それぞれ実験 1 および実験 2 と同様の傾向で変化した.

土壌水分の減少によりまず茎の収縮が始まり，次に葉柄の収縮がみられた．果実の収縮は土壌水分がかなり減少した時点で始まったが，それは果実の水ポテンシャルよりも葉や茎の水ポテンシャルの方が低くなった時点とほぼ一致した．2 月 8 日 17 時のかん水により葉柄，茎ともただちに肥大を始めた．しかし，葉柄径がかん水翌日には測定開始時の大きさに回復したのに対し，茎径の回復には 1 昼夜以上を要した.

4．トマト果実からの水の流出

根の切除がトマト各部位における水移動速度に及ぼす影響を第 7 図に示す．土壌水分がかなり減少してから根を切除したため，根切除直前の茎と葉柄の水移動速度はそれぞれ 0.2，0.1 ml・hr^{-1} とかなり小さな値であった．しかし，根切除前には果実からの水の流出はみられなかった．根切除直後，茎と葉柄の水移動速度は大きく低下して両者ともほぼ同じ値になり，茎ではその後 5 時間，葉柄では 7 時間ほぼ一定の値で推移した．これに対して，根切除後 2 時間目から果実からの水の流出移動が始まり，その後 6 時間一定の速度で流れが続いた．根切除後 7 時間目に茎の水移動が停止しても，葉柄の水移動は同じ速度で続き，根切除後 26 時間目に果実からの水の流出移動が止って 2 時間後に葉柄の水移動が停止した.

考　察

作物の水ポテンシャルが日変化することは多数報告（有原・渡辺，1977；平沢・石原，1978；Rudich ら，1981）されている．しかし，作物の水ポテンシャルを器官別に測定した報告は少なく，セイヨウナシを用いて葉，果実，茎の水ポテンシャルを測定した報告（山本・渡部，1980）がみられる程度である．それによると，セイヨウナシの各器官における水ポテンシャルの

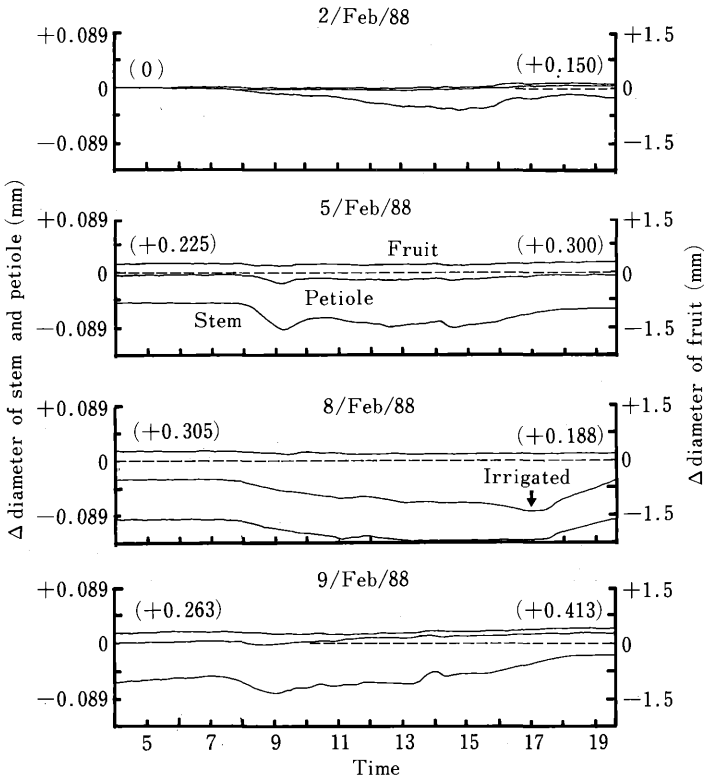


Fig. 6. Diurnal fluctuations in the diameter of various plant parts of tomato under a decreasing soil moisture condition.
values in parentheses are △ diameters of fruit at 5：00 and 19：00 o'clock of each day.

大きさは，朝夕では茎＞葉＞果実であり，日中は茎＞果実＞葉の順となっており，本実験のトマトでも同じ関係がみられた．

しかし，トマトでは土壌水分が極度に減少すると，各期間の水ポテンシャルの関係が果実＞茎＞葉と変化したが，このような報告は他にはみられない．土壌水分が十分な場合は茎（根から吸収された水）が葉への水分供給器官と考えられるが，土壌水分が極度に減少した場合は根からの吸水が抑制されるため，樹体の水容量の小さいトマトでは果実が水分供給器官になる可能性があると推察される．

アボカドなどの果実は土壌水分が十分にあるときには，夜間に膨潤し，日中に収縮するという日変化を繰り返しながら肥大することが確認されている（Schroeder・Wieland，1956）．果実の収縮が日中に起こる原因として，がくを含む果実からの蒸散と果実からの水の逆流による果実の含水量の減少が考えられるが，蒸散による果実の収縮は全体の収縮量の 20～30％とする報告（Tromp，1984）を考慮すると，日中の果実の収縮の主な原因は，果実から他の器官への水の逆流であるということになる．

果実からの水の逆流の存在については，以前から，果実の有無と茎葉の萎ちょう程度（Bartholomew，1926）や，葉と果実の浸透圧の違い（高野ら，1980）などから，間接的に示唆されていたが，最近では，果柄における水移動方向と移動速度の測定（山本・渡部，1980）によって直接的に証明されている．山本らによると，セイヨウナシの果実からの水の逆流が，葉の水ポテンシャルが果実の水ポテンシャルよりも低下した時にみられている．

本実験でも，土壌水分が十分存在する場合は，各部の水ポテンシャルの日変化の中で，葉の水ポテンシャルが果実の水ポテンシャルよりも低下し，水ポテンシャル勾配に基づき，果実からの水の逆流が予測されたが，測定の結果，水の逆流は確認できなかった．また，果実が日中に収縮し，夜間に肥大するという生長パタ

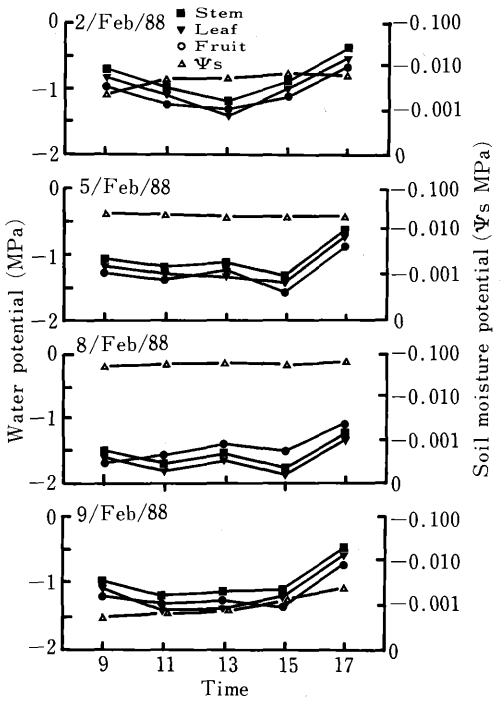


Fig. 7. Diurnal fluctuations in water potential of various plant parts of tomato under a decreasing soil moisture condition.

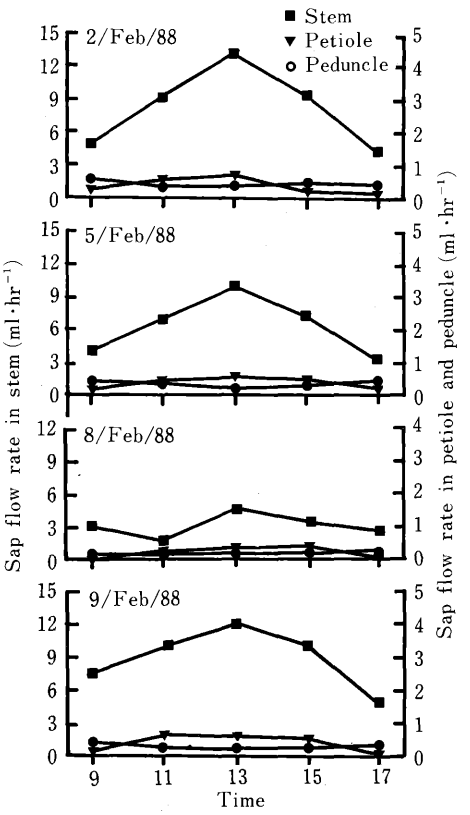


Fig. 8. Diurnal fluctuations of sap flow rate in various plant parts of tomato under a decreasing soil moisture condition.

ーンも確認できなかった．しかし，数日間という長い期間でみた場合，果実の収縮が確認され，それは土壌水分が極度に減少し，果実の水ポテンシャルが茎の水ポテンシャルよりも高くなってからであった．また，果実からの水の流出も確認され，それは根を切除するといった極端な水分ストレスを与えて初めてみられた．したがって，トマト各器官の水ポテンシャル勾配に基づく水の移動，ならびに水の移動に伴う各器官の肥大・収縮現象が確認できなかったのは，本実験で用いた測定装置に問題があるとは考えられず，トマト体内の複雑な維管束配列等，もっと本質的な部分に原因があると思われる．

本実験では，トマト各器官の水ポテンシャル，各器官への水移動速度，ならびに各器官の膨潤，収縮を同時に計測したわけであるが，各器官への水移動や各器官の収縮・肥大現象と各器官の水ポテンシャル勾配の間には明確な関係がみられなかった．しかし，土壌水分がある値以下に減少すると，各器官の水ポテンシャルの関係が茎＞果実＞葉から，果実＞茎＞葉に変化すること，ならびに，この値を境に果実が収縮を始めることが明らかとなった．この時の土壌水分状態を土壌水分吸引圧で表すと，pF 2.8 であった．このことは，裏を返せば土壌水分吸引圧が pF 2.8 までなら，果実の肥大速度が遅くはなるが，果実が収縮することはなく，近年の高糖度を志向したトマト栽培における節水管理の参考になると考えられる．

摘　要

結実期のトマト各器官の水分状態ならびに各器官への水移動速度と各器官の肥大・収縮との関係を，黄色土を用いて土壌水分減少過程で同時計測した．

1．各器官間の水ポテンシャルの関係は土壌の水分状態により異なり，土壌水分が十分に存在する条件下では，朝夕は茎＞葉＞果実であったのに対し，日中には茎＞果実＞葉となった．しかし，土壌水分が極度に減少した pF 2.8（−0.062 MPa）以上では，終日，果実＞茎＞葉であった．

2．土壌水分吸引圧が pF 2.8 以上では各部位にお

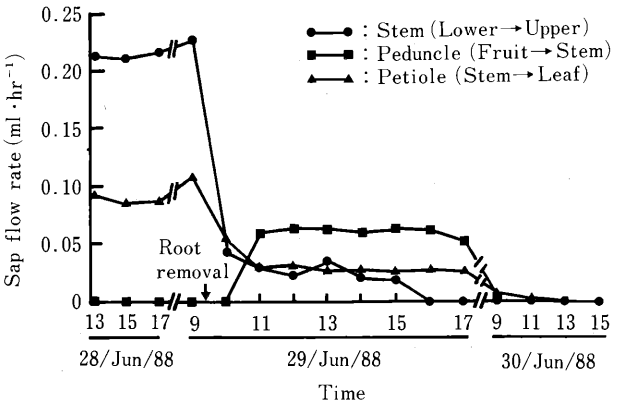


Fig. 9. Effect of root removal on sap flow rate in various plant parts of tomato.

ける水移動速度は極端に小さかった.

3. 土壌水分吸引圧が pF 2.8 以上では葉と茎の水ポテンシャルが極端に低く, 両者が果実の水ポテンシャルよりも低下した時点から果実の収縮が始まった. この時点で果実から茎への水の流出が始まったものと考えるが, 本実験で用いたヒートパルス法ではそれをとらえることができなかった.

引用文献

有原丈二・渡辺和之. 1977. 水ポテンシャル測定法と二・三の測定例. 日作紀. 46：137-141.

Bartholomew, E. T. 1926. Internal decline of lemons. Ⅲ. Water deficit in lemon fruits caused by excessive leaf evaporation. Amer. J. Bot. 13：102-117.

Begg, J. E. and N. C. Turner. 1970. Water potential gradients in field tabacco. Plant Physiol. 46：343-346.

Chaney, W. A. and T. T. Kozlowski. 1971. Water transport in relation to expansion and contraction of leaves and fruits of Calamondin orange. J. Hort. Sci. 46：71-81.

Cross, R. L. 1957. The heat pulse method for measuring rate of sap flow in a plant stem. New Zealand J. Sci. 1：281-288.

平沢 正・石原 邦. 1978. 水稲の体内水分と環境条件との関係. 第1報. 葉身の水ポテンシャル・葉面積当り含水量・水欠差について. 日作紀. 47：655-663.

Hodgson, R. W. 1917. Some abnormal water relations in citrus trees of the arid southwest and their possible significance. Univ. Calif. Publs. Agric. Sci. 3：37-55.

鴨田福也・内藤文男. 1975. 野菜の光合成及び蒸散に関する研究. Ⅱ. 差動トランス利用による生長記録装置及びこれを用いてのトマト, キュウリなどの測定. 野菜試報. A 2：33-48.

Klepper, B. 1968. Diurnal pattern of water potential in woody plants. Plant Physiol. 43：1931-1934.

小林 章. 1976. 果樹園芸大要—汎論—. 第9版. p. 190-204. 養賢堂. 東京.

Rudich, J., E. R. Poblete, M. A. Stevens and A. I. Ambri. 1981. Use of leaf water potential to determine water stress in field tomato plants. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 106：732-736.

Schroeder, G. A. and P. A. Wieland. 1956. Diurnal fluctuation in size in various parts of the avocado tree and fruit. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 68：253-258.

関山哲雄・羽生広道・岡部勝美. 1982. 環境ストレスに対する植物生体反応の連続的測定法の開発. 電中研報. 481016.

関山哲雄・岡部勝美・羽生広道・岩尾憲三・藤野安朗・野口和揮. 1980. 植物生体情報の工学的計測と処理に関する研究. 第2報. 茎の膨縮特性ならびに葉身の電気特性と葉温振動. 電中研報. 479011.

関山哲雄・岡部勝美・岩尾憲三・藤野安朗. 1978. 植物生体情報の工学的計測と処理に関する研究. 第1報. 茎の膨縮, 伸長および葉身の電気特性などの連続測定法と測定事例. 電中研報. 478005.

高野泰吉・鈴木茂敏・中島三夫. 1980. 日本ナシの果実肥大成熟期における葉と果実の水分経済. 名城大農学報. 16：31-37.

Tromp, J. 1984. Diurnal fruit shrinkage in apple as affected by leaf-water potential and vapour pres sure defficit of the air. Scientia Hortic. 22：81-87.

山本隆儀・渡部俊三. 1980. Heat pulse 法によるセイヨウナシの枝, 果柄ならびに葉柄内の水移動速度の測定. 園学雑. 49：311-325.