



フーティゲーション 灌水同時施肥

Where needs take us



ICL Specialty
Fertilizers

フアーティゲーション 灌水同時施肥

ジョセフ・ハギン

イスラエル工科大学名誉教授

The Stephen and Nancy Grand Water Research Institute

M. スネ, A. ロウエンガート・アイシセジ

イスラエル農務省 オシュラート地区普及センター

A.E. ジョンストン 編集

ローサムステッド研究所 土壌学科

田畑 正秀 訳

ICL スペシャルティ・フアーティライザーズ

**INTERNATIONAL
POTASH INSTITUTE**



Original Title

Fertigation Fertilization through Irrigation

by J. Hagin, M. Sneh and Lowengart-Aycicegi

© All rights held by: International Potash Institute

Baumgärtlistrasse 17

P.O. Box 260

CH-8810 Horgen / Switzerland

Phone: (41) 43 810 49 22

Telefax: (41) 43 810 49 25

e-mail: ipi@ipipotash.org

web: www.ipipotash.org

2015

Japanese translation rights arranged with International Potash Institute, Horgen through ICL JAPAN Ltd., Tokyo.

もくじ

1.	はじめに	5
2.	ファーマティゲーションの歴史	9
3.	文献でみるファーマティゲーション	14
3.1.	野菜と小果実	14
3.2.	普通畑作物	16
3.3.	果樹	16
4.	肥料	20
4.1.	ファーマティゲーションに適した肥料	20
4.2.	灌漑用水中の肥料の反応	24
4.3.	土壌と培地中における養分の反応	27
4.4.	土壌と培地中における養分の分布	33
5.	技術	36
5.1.	灌漑技術	36
5.2.	肥料混入技術	48
6.	養分要求、施肥量およびタイミング	57
6.1.	トマト	57
6.2.	ピーマン	60
6.3.	バナナ	61
6.4.	トウモロコシ、スイートコーン	62
6.5.	カンキツ類	64
7.	モニタリングと制御	66
7.1.	水分要求量のモニタリング	66
7.2.	植物体分析による養分要求量のモニタリング	69
7.3.	土壌分析	70
7.4.	水質のモニタリング	72
8.	参考文献	75
	訳注	84
付録 1.	養水分供給量の計算例	87
付録 2.	カラー写真	93

1. はじめに

農業生産システムとは、その持続可能性を維持しながらも、収量・品質の向上とコスト削減を追求するものである。そのためには、最も望ましく均衡の取れた養水分供給が前提条件となる。また、作物の養分吸収と供給を調和させなければいけないのは、環境、土壌、水源の保全という観点からも重要である (Hagin and Lowengart, 1996)。

フアーティゲーションは、灌漑によって水と肥料を同時に与える最新の農業技術で、環境汚染を抑えながら収穫量を増加させる優れた方法である (Magen, 1995; Shani et al., 1988; Sneh, 1987)。

適切な水分供給のため、半乾燥および乾燥地域だけではなく、雨の多い地域でも灌漑が行われている。しかし、その多くは水路、越流、畝間を通じた地表灌漑で、水の利用効率が低いという欠点がある。これらの方法では、灌漑水のおよそ 1/3~1/2 が、多くの養分を含んだまま環境に排出される。加圧灌漑システムを使えば、水の利用効率は 70~95% へと格段に向上する。このシステムは養水分供給のコントロールが可能で、肥料成分の環境への排出も最小限に抑えられる。加圧灌漑の主な問題は、設備投資や維持費、システムについての知識が必要なことであるが、それでも特に点滴灌漑水はおそらく最も有効な灌漑方法である。点滴灌漑では局所的に水分が供給されることで、頻繁に養分を要求する根圏の制御された根系^{訳注1}が発達する。しかし、灌水の中に養分を添加することでその要求は満たされる。フアーティゲーション栽培で、施肥量と吸収量のバランスが取れている例を表 1.1. に示す (Hagin and Lowengart, 1996)。これは養液栽培トマトの例で、生育の最盛期に吸収する養分と推奨施肥量とが一致している。

表 1.1. トマトの養分吸収量と推奨施肥

養分	N	P	K	Ca	Mg
吸収量 (kg/ha)	85	19	190	43	11
推奨施肥量 (kg/ha)	87	35	122	61	14

表 1.1. のデータは、推奨量に基づく施肥を行っていただければ環境負荷が少ないことを示している。窒素の施用量と吸収量が一致し、余った窒素分が水とともに環境に排出されることもほとんどない。リンの施肥量は吸収量の

1. はじめに

約2倍であるが、培地がリン化合物を吸着するため、リンが環境に排出されることはない。

重力を利用した開放型灌漑システムから、加圧灌漑やマイクロ灌漑システムへと移行する傾向が各地で見られる。例えば、カリフォルニア州の農業レポートは、1986年から1996年にかけて地表灌漑が11%減少し、マイクロ灌漑が12%増加したことを明らかにしている。マイクロ灌漑では、低流量の給水を可能にする小さな開口部を備えた吐出孔を用いる。さらに、灌漑システムを変更した農場の中には、ファーティゲーションのような新しい施肥管理技術を採用したところもある (Dillon et al, 1999)。

発展途上にある農業システムでは、マイクロ灌漑への移行に際しファーティゲーションを導入することによって大きな効果を期待できる。例えばヨルダン川西岸にあるエリコ県ジフトリク村では、ファーティゲーションによって野菜の収穫量が10倍以上に増加した。同時に品質も向上し、生産者の収入も大幅に増加した。このプロジェクトの成功のカギは、農業生産を行う地域社会に直接、点滴灌水とファーティゲーションを導入したことにある。この成功によって、農業基盤整備が未発達な地域でも、点滴灌水とファーティゲーションのような高度な技術が、段階的ではなく一挙に導入できることが証明された。このようなアプローチは、発展途上国において、価値の高い作物を栽培する農業が発展できるという、経済的・社会的に受け入れられる方法を示している (Rayrnon and Or, 1990)。

ファーティゲーションシステムでは、施肥の時期・量・濃度・配合割合などが簡単にコントロールできる。そのため、元肥・追肥だけの単純な施肥と地表灌漑の場合よりも作物の収穫量が増加する。ただし、農業技術の変化は、他の栽培管理上の改善も伴うため、収穫量の増加がすべてファーティゲーションによるものであるとすべきではない。

どのような灌漑システムでもファーティゲーションを行うことができるが、開放型灌漑では圃場における肥料の分布が不均一になる。スペインの研究者 (Playan and Faci, 1997) によると、開放型灌漑を行っている圃場の、標高が低い1/2の区画の肥料分布の均一性は3~52%であり、水分分布の均一性は63~97%であった。

加圧灌漑システムの中でも、特にマイクロ灌漑ではファーターゲーションが作物の施肥管理の一体として考えられている。これらのシステムでは、根は湿潤域内に集中して発達するため、ファーターゲーションは適切な施肥を行う上で欠かせない。

巻末写真 1.1. は、アボカドの加圧灌漑によるファーターゲーションの例で、ドリッパー^{訳注2} 付近に細根が密生している様子がわかる。これは、点滴灌水の特徴を良く示している。湿潤域内では、肥料成分の動きと利用し易さは水の動きに影響される。根がドリッパーの近くにあることは、養分が限られた場所から吸収されていることを示しており、ファーターゲーションの利点を際立てさせている。ドリップチューブ^{訳注3} 上に、白い析出物が見える。これは化学反応で、水が吐出するところで起こる場合がある。養分と水分を同時に供給するファーターゲーションでは、根が活発に養分を吸収するため、土壌からの養分の過剰な溶脱が少なく、地下水汚染を最小限に抑えることができる (Alva and Mozaffari, 1995; Hagin and Lowengart, 1996)。さらに、ファーターゲーションを導入すれば、作物は痩せた浅土や化学的に不活性な培地でも、その潜在生長力を最大限まで発揮することができる (Bar-Yosef, 1988; Bar-Yosef and Imas, 1995; Imas et al, 1998; Kafkafi and Bar-Yosef, 1980; Sonneveld, 1995)。

地中点滴灌水システム^{訳注4} でファーターゲーションを行うと、蒸発による水分損失の減少、湿潤域の拡大、深い根域など、更なる利点がある (Phene and Lamm, 1995)。また地中点滴灌水システムでは、農業による硝酸塩汚染を最小限に抑えることができる。

アメリカ合衆国では、カンキツ類への長期間の窒素および水の管理に関する検証モデルが作られ (Harrison, 1999)、窒素の施肥方法や施肥量によっては環境汚染が起こる可能性が示唆されている。このモデルでは、成熟したカンキツ類の果樹園下の地下水に含まれる硝酸態窒素の濃度をシミュレーションしている。地下水の硝酸態窒素濃度を環境保護庁が定める汚染レベル 10 mg/L 以下に抑えるためには、窒素施肥レベルは次の基準を超えてはならないとされている。

- 固形肥料の場合、窒素 172 kg/ha/ 年を、3 回に分けて施肥

1. はじめに

- 緩効性肥料の場合、窒素 208 kg/ha/ 年を、3 回に分けて施肥
- ファーティゲーションの場合、窒素 231 kg/ha/ 年を、18 回に分けて施肥

湿潤多雨地域においても、ファーティゲーションの採用は拡大している。例えばオランダでは、固定式灌漑システムを備える果樹園がファーティゲーションを採用するケースが増えており、1 件あたりの規模も大きくなっている (Koeman, 1998)。

中国南部では、ライチの開花期のごく短い重要な期間にだけファーティゲーションが行なわれ、この時期に十分な水分と養分を確保することで、毎年安定した収穫量を確保している (私信から)。

イスラエルでは、1960 年代初期からファーティゲーションが普及している。43 万 ha の耕地のうち、およそ 20 万 ha で加圧灌漑システムが採用されている。果樹・花き・温室作物ではすべてファーティゲーション栽培が行われ、露地栽培の野菜や作物では土壌の肥沃度によって全面的あるいは部分的にファーティゲーションが採用されている (Aamer et al., 1997; Bravdo et al. 1988; Bravdo et al., 1992; Heffner et al., 1982; Lahav et al., 1995; Lahav and Kalmar, 1995; Lowengart and Manor, 1998; Sheinesh et al., 1995; Zaidan and Avidan, 1997)。

要約すると、ファーティゲーションは灌漑農業、特に活性のある根が水分供給範囲に制限されるマイクロ灌漑農業システムでは不可欠な技術である。根域が広がる傾向のある湿潤な気候条件下においても、ファーティゲーションには、施肥による環境汚染のリスクが最小限に抑えられるという利点がある。

2. ファーティゲーションの歴史

ファーティゲーションは現代の集約的灌漑農業における鍵となる要因であり、それはしばしば水耕栽培とも呼ばれる養液栽培とともに発展してきた。この技術は古くバビロンの空中庭園や、中央アメリカのアステカ族の浮遊庭園で用いられた。実際、バビロンの空中庭園はポンプを使った手の込んだ水耕栽培システムで、酸素と養分に富む新鮮な水が使われていた。アステカ人は、根が貫通して水中に伸びていくことのできる浮き板で、野菜や花卉さらには樹木さえも育てていた。古代の中国人も、水耕栽培で稲を栽培していた。現代の空中庭園の例は、イスラエルのハイファにあるバハイ庭園にある（巻末写真 1.2.）。

18世紀の終わりにイギリスのジョン・ウッドワードは、最初の人工の水耕培養液である、土から抽出した水を用いて植物を栽培した。19世紀中頃にはジャン・バチスト・ブサンゴーが、養分を含まない培地を用い、成分の知られている化合物を組み合わせて水溶液として与え、植物の育成に必要な9種類の成分を同定した。ブサンゴーは無機養分を同定しただけではなく、最適な生長のための成分比率まで明らかにした。その後フォン・ザックスが、植物の良く生長する最初の標準水耕養液を作った。1925年までは、水耕培養液の使用は植物栄養の研究に限られ、様々な組成の養液が開発された (Hoagland, 1919; Aron, 1938; Robbins, 1946)。

1925年には、温室業界が慣行の土耕栽培の代わりに、水耕栽培を用いることに興味を示した。ハイドロポニックス（水耕栽培）という言葉は当初、地下部に水以外のどんな培地も用いない水栽培だけを意味していた。その後ハイドロポニックスは礫・砂・ピート・バーミキュライト・オガクズなどの不活性な培地と、植物が必要とする成分を含む養液を使って土なしで植物を栽培する技術として定義された。現在、培地を使う養液栽培は、ソイルレス栽培と呼ばれ、一方、培地を使わない養液栽培だけをハイドロポニックス（水耕栽培）と呼ぶようになっている。

第二次世界大戦では、米軍に生鮮野菜を供給するため、水耕栽培の拡大が加速した。最初の大規模水耕農場は、南大西洋のアセンション島の瘦せた

土地に作られた。アセンション島で開発された、砕いた火山岩を培地として用いる技術は、後に太平洋の硫黄島や沖縄でも使われた。戦後、米軍は特殊な水耕栽培システムを開発し、日本の調布に 22 ha の水耕農場を建設した。

水耕栽培の商業的利用は、1950 年代にオランダ・イタリア・スペイン・フランス・イギリス・ドイツ・スウェーデン・ソビエト連邦およびイスラエルに広がり、さらにその後アラビア半島、クウェート、サハラ砂漠などの中東の砂漠地帯に、また中央および南アメリカ・メキシコ、そしてベネズエラ沿岸のアルバ島やキュラソー島にも広がった。アメリカ合衆国での商業的水耕栽培装置は、主にイリノイ州・オハイオ州・カリフォルニア州・インディアナ州・ミズーリ州・フロリダ州で開発された。アメリカだけで 100 万件以上の生産者向け養液栽培装置が稼動している。このような生産者向けの養液栽培装置は、ロシア・フランス・カナダ・南アフリカ・オランダ・日本・オーストラリア・ドイツにもある。

栽培容器やパイプ用のプラスチックとバランスの良い培養液の開発がきっかけとなって、低コストで管理が容易なシステムがさらに増加した。

1950 年代の半ばアメリカ合衆国で、越流灌漑や畝間灌漑などの地表灌漑の一部で、水に肥料を混合することが行われた。最もよく使われた肥料はアンモニアガス、アンモニア水、硝酸アンモニウムだったが、水の利用効率が低いため窒素の利用効率も低かった。やがて地表灌漑で、より正確な水の供給を行うためのサージ灌漑が普及するに従い、サージバルブを通して肥料を注入する技術が導入された。この技術の開発により、サージ灌漑における肥料の利用効率は非常に高まった。また、オランダでは 1950 年代初め、ガラス温室の著しい増加があり、灌水を通じた施肥も広く行われるようになった。その際、正確な養分供給のための電動ポンプと希釈タンクが開発された。

イスラエルでのファーティゲーションは、1960 年代にマイクロ灌漑の導入と並行して発展した。マイクロ灌漑の中でも点滴灌水では、少量の湿潤域に制限される根域に、適量の養分が水と同時に供給される必要があった。ファーティゲーションは、スプレイノズルやマイクロスプリンクラーなど

他のマイクロ灌漑方法でも作物にメリットをもたらした。移動式から固定式への移行にともない、ファーティゲーションはスプリンクラー灌漑装置にも適用された。1980年代初期以降は、ファーティゲーションは自走回転式スプリンクラーシステムと統合された。現在、イスラエルでは補助的な灌漑を除いた灌漑エリアの75%以上でファーティゲーションが行われている。

点滴灌漑のアイデアは1930年代初期、(現在の)イスラエルで技術者シムハ・プラスが、海岸通りの小さな農園で遅い午後のティーパーティーに招かれたときに生まれた。その農園には、多くのグレープフルーツの木があった。灌漑はされていなかったが、その中に1本だけ他よりも目立つ大きな木があった。近づいてみると、家に飲用水を引く小口径の鉄パイプが木の近くを通っており、それに小さな穴が開いていた。樹冠の直径は10 mあるのに、濡れている土の表面の直径は25 cmしかなかった。このような大きな木が、小さな容積の土壌からの水分供給で育っているのを見て、プラスは点滴灌漑のアイデアを思いついた。不幸なことに、当時の技術ではそのアイデアはすぐには実現できなかったが、17年後の1959年にプラスチックチューブが使えるようになったことで、実用化が可能となった。3年間の試行錯誤の結果、成功がもたらされた。スプリンクラーや畝間灌漑の場合に比べ、トマトの収穫量は2倍に、キュウリでは3倍になった。

この新しい灌漑技術の大きな問題点の1つは、養分供給であった。特に砂質土壌では、湿潤域が栽培土層のごく一部に限られるので、散布された固形肥料の多くは土の表面にそのまま残るため植物が利用できず、肥料不足が起こった。そこで、灌漑用水を通して養分を与える2つの方法が試された。その1つは、肥料溶液を動力噴霧器用のポンプを使って灌水パイプに注入する方法、もう1つは灌水パイプに送られる水を、固形肥料の入ったタンクに導き、再び灌水パイプに戻す方法である。この2つの方法は単純で精度は高くないが、1963年に目覚ましい収穫量の増加をもたらした。これらの方法に比べ、冬に固形肥料を散布しておいて点滴灌漑するという方法は、粒子の粗い土壌では特に効率が悪く、海岸沿いの砂質土

壤の圃場では、スプリンクラー灌溉されたカンキツ類よりも収量が低くなり欠乏症まで現れた。1960年代後期から1970年代初頭にかけて行われた実験で、多年生植物もファーティゲーションによる持続的な養分供給の恩恵を受けることが証明された。

1960年代後期、主に輸出向け花卉栽培のためにガラス温室の面積が拡大した（巻末写真 2.2.）。点滴灌水とファーティゲーションの組み合わせは、このような集約的で高価な栽培システムに対して大きな効果があった。また、野菜や露地作物の生産者もファーティゲーション技術を採用した。

1960年代中頃、点滴灌水の普及に伴い養分供給の主要な方法として肥料タンクが採用された。ガラス温室では、動力噴霧機用のポンプが防除とファーティゲーションの2つの目的に使われることもあった。果樹園では、移動式の動力噴霧機が灌水システムに直接液肥を注入するために使われた。1970年代初期には、新しい水圧駆動式のポンプが液肥利用のために導入された。最初のモデルは、水圧で動くダイアフラムが液肥を吸引し、灌水に注入するタイプだった。このポンプの注入圧は灌水システムの水圧の2倍であった。水圧駆動式ポンプの2つめのタイプは、液肥の吸引と混入の両方をピストンで行うものだった。これらのポンプの導入によって、水量に対し一定の割合で肥料を混入することが可能になった。また1970年代初期には、低流量のベンチュリー装置も導入され、主に育苗棟や温室での鉢物栽培で使われた。これは初期のポンプの主な欠点の一つであった低流量での精度の悪さを克服していた。主に温室などの、電源が得られる場所では、液肥の正確な混入のために電動ポンプが導入された。1990年代初期には、水を吐出することなく^{訳注5}、低流量および中流量でも正確に液肥混入ができる新しいタイプの水圧駆動型のポンプが開発された。

飲用水と灌漑用水が共用の給水ネットワークから供給される場合には、液肥が給水システムに逆流しないようにすることが、ファーティゲーションを行なうための前提条件である。液肥の逆流を防ぐためには、バキュームブレーカー・逆止弁およびエアセパレーターなどが用いられる。

施肥量の調節も、時と共に改良されてきた。最初は肥料タンクへの水の入りを手動バルブで調節しなければならなかったが、その後、肥料投入量

を自動調節するメカニズムが開発された。最近では、コンピューターに pH および EC センサーを接続し、液肥混合タンクと灌水コントローラーを組み合わせる、より進んだ制御方式も開発されている。

3. 文献で見るファーターティゲーション

文献によると、以下の例が示すように、多くの場合ファーターティゲーションの導入によって作物の収穫量が増加し、肥料と水の吸収効率が高まり、養分の環境への流出が改善されている。

3.1. 野菜と小果実

重要な栽培作物のひとつであるトマトでは、露地や施設でファーターティゲーションが行われている。ファーターティゲーションで栽培されたトマトは、慣行の栽培・灌水法に比べて収穫量および乾燥重量が増加し、サイズ・実のしまり・可溶性糖分などの品質指標も改善される (Alcanter et al., 1999)。他の比較データによれば、ドリップ・ファーターティゲーション (点滴灌水 + ファーターティゲーション) されたトマトは 72 t/ha の完熟果実を産出したのに対し、点滴灌水 + 慣行施肥では 44 t/ha しか収穫できなかった。ファーターティゲーションにより、果実数が倍増した。収穫量増加の主な理由の 1 つは、養分の利用効率が高まったからだと考えられる (Pan et al., 1999)。もう 1 つの例では、慣行施肥とスプリンクラー灌漑で栽培されていたトマトが、ファーターティゲーションを行うことによって、収穫量が 39 から 50 t/ha に増加し、果実の品質も著しく向上した (Siviero and Sandei, 1999)。地中点滴灌水施肥で栽培された 6 種類の加工用トマトの収穫量が、80~98 t/ha というめざましい収穫量をあげ、その可溶性固形分は 4.9% 以上だった。また、根の 90% 以上が深さ 25 cm より浅いところに集中していた。さらに、収穫量が多いだけでなく、加工特性にも優れ、病気も少なく腐敗果も非常に少なかった (Silva et al. 1999)。このように、ファーターティゲーションには増収以外にもメリットがあることが実証されている。温室で適切なファーターティゲーションを行って栽培された養液栽培トマトは病気にかかりにくく、長期間高収量を維持した (Reist et al. 1999)。同様な結果が、他の作物でも報告されている。ドイツのバイエルン州のシルト質壤土におけるキュウリの露地栽培試験では、スプリンクラーと尿素の葉面散布区での収穫量は、65 t/ha だったが、マルチと点滴灌水の区画

では 74t であった (Mosler, 1998)。また、沖積土壌 (pH7.9) で行われたキュウリの栽培試験では、硫酸を元肥で与えた場合と硝酸カリウムをファーターティゲーションで与えた場合について 3 段階の窒素量で比較した。その結果、窒素量の最も多いファーターティゲーション区の収穫量が最も多くなった。硝酸塩の窒素利用効率は、硫酸の利用効率 (10%) よりも著しく高く (75~97%)、窒素の溶脱は硝酸塩のファーターティゲーション区で最も少なかった。

アイスバーグレタスの商業的栽培では、ファーターティゲーションで 100 kg/ha の窒素を施用した場合に、33 t/ha の収穫量が得られている (Rincon et al., 1998)。また、450 kg/ha の窒素を施用したレタスの他の試験では、ドリップ・ファーターティゲーションの窒素利用効率がスプリンクラー灌漑 + 慣行施肥にくらべて 25% 高くなった。この窒素利用効率の向上は、土壌中の硝酸塩の濃度がより安定していたため、アンモニウム態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) に対する硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) の割合が高く、土壌のアンモニウム態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) の濃度が有害レベル以下であったことによるものである。これらすべての要因が窒素の溶脱を少なくしている (McParlin et al., 1995)。

地表灌漑と固形肥料で栽培したヒヨコマメの収穫量を、ファーターティゲーションと比べたデータがある。推奨量の固形肥料を施用した地表灌漑区の収穫量は 1.9 t/ha だったが、その 75~150% の肥料 (NPK) をドリップ・ファーターティゲーションで与えた場合の収穫量は 2.2~2.3 t/ha になった。点滴灌水は、水の必要量を地表灌漑に比べて 60% 削減した (Deolanker and Pandit, 1998)。また、砂壤土で栽培したエンドウマメ (*Pisum sativum*) では、蒸発計で計測された蒸発量の 75% の水と、25 kg/ha の窒素をファーターティゲーションで与えたときに最大の収穫量が得られ、水の利用効率が最も良くなった (Malik and Kumar, 1996)。

埴壤土や埴土で栽培されたブロッコリでは、ドリップ・ファーターティゲーションで NPK 肥料を与えた場合、窒素量が 400 kg/ha のとき、固形肥料を散布したときよりも多い収穫量 (24.5 t/ha) が得られた (Castellanos et al., 1999)。イチゴでも、ドリップ・ファーターティゲーションで NPK 肥料を与えた場合、粒状肥料を与えたときよりも約 25%、収穫量が増加した

(Bernardoni et al., 1990)。ブルーベリー (*Vaccinium corymbosum*) でも、ファーマティゲーションと粒状肥料の散布を比較するため、ともに最初の2年間に 65 kg/ha、3年目に 75 kg/ha の窒素が与えられた。3年後、収穫量はファーマティゲーションの方が粒状肥料区よりも勝っていた。これは、ファーマティゲーションでは窒素が根域に直接与えられ、吸収され易かったためである (Finn et al., 1977)。

3.2. 普通畑作物

小麦での栽培試験で、ファーマティゲーションによってリン酸肥料がかなり節約できることが示されている。石灰分を多く含む砂壤土で、リン酸肥料としてリン酸一アンモニウムをファーマティゲーションで与えた場合、過リン酸石灰を散布した場合に比べ、その 50% の施用量で同量のリンが吸収され、同等の収穫量が得られた (Alam et al., 1999)。同様な結論がサトウキビの実験でも得られている。ドリップ・ファーマティゲーションで、窒素肥料を 30% 減らすことができる。ドリップ・ファーマティゲーションで、年間 80 kg/ha の窒素を施用した場合のサトウキビの収穫量は、慣行施肥で畝に沿って年間 120 kg/ha の窒素を施用した場合の収穫量と比べて遜色がなかった (Kwong et al., 1999)。トウモロコシの試験でも、肥料を土壌に散布した場合に比べ、ファーマティゲーションでは収穫量が多く、穀粒への窒素の移動も多くなった (Basso and Reichardt 1995)。

綿花でも、地中点滴灌水でファーマティゲーションを行った場合に、収量と養分吸収が増加した例がいくつかある。主要な効果はリン酸のファーマティゲーションで見られる (Eizenkot et al., 1998)。埴土 (Vertisol) で栽培された綿花の収量は、75 kg/ha の窒素でファーマティゲーションを行った場合に、100 kg/ha の固形肥料で栽培した場合と同等の収穫量が得られている (Bharambe et al., 1997)。

3.3. 果樹

イスラエルのガリヤラ湖西岸で長期間にわたって行なわれたバナナの栽培試験では、ファーマティゲーションによって何年間も肥料の利用効率が改善

された。1960年代、バナナは主にスプリンクラーで灌水され、固形肥料が1作に3~4回散布されていた。1990年代になると、ドリップ・ファーターティゲーションが栽培期間を通して行われるようになった。これにより、年間窒素施用量が250から500 kg/haに倍増した。これと平行して、樹高が150から270 cmになり、平均房重量が18から28 kgに増加、房数も1haあたり1700~2100に増加し、平均収量が30から60 t/haに増加した。第七葉柄の窒素、リン、カリの乾燥重量%を1972年と1995年で比較すると、窒素が0.6%から1.1%に、リンは0.08%から0.12%に、カリは3.7~6.5%にそれぞれ増加している。このバナナ農園では、ファーターティゲーションの導入によって施肥量を増やすことができ、空間的にも時間的にも養分の分布が改善された結果、吸収が促進され収穫量の増大がもたらされたと考えられている (Lahav and Lowengart, 1998)。

ペカン^{訳注6}の木でも、ファーターティゲーションで56 kg/haの窒素施用した時、112 kg/haの窒素をすべて散布した場合、および散布とファーターティゲーションを半々で行った場合と同等の収量と品質が得られている。すべてのファーターティゲーション区で、樹冠下土壌の非湿潤域のpHの低下や、カリウムやカルシウム、マグネシウムの溶脱が、肥料を散布した場合にくらべて減少した。土壌pH、カリウム、マグネシウムは、窒素をファーターティゲーションで与えたすべての場合で、15~30 cmの土層でわずかに低下しただけだった。葉のカルシウムやマグネシウム濃度は、ファーターティゲーションを行ったすべての場合で、他の方法よりも高くなった (Worley and Mullinix 1996)。

リンゴのファーターティゲーションは、他の農業技術の変化と組み合わせられたときに効果があった。カナダのブリティッシュコロンビア州では、伝統的な疎植栽培から800~1400株/haを植える密植栽培に変わりつつあるが、ドリップ・ファーターティゲーションは、特に粒子の荒い土壌における養分管理の改善に貢献している (Nielsen and Roberts, 1996)。粒子の粗い土壌において、矮性台木を用い密植されたリンゴへの毎日高頻度の点滴灌水は、マイクロジェット散水より、横に広がりにくい浅い根域をもたらした (Nielsen et al., 2000)。リンゴのドリップ・ファーターティゲーションは、慣

行の灌水法と固形肥料散布を組み合わせた場合と比較されている。ファーターティゲーションで 26 kg/ha の窒素を与えた場合に、芽出し、展葉、花芽形成、着果と累積収量のバランスが最も良くなった。施肥量を抑えつつリンゴの生育改善と増収が達成できれば、ファーターティゲーションは農薬使用量をも抑える総合栽培技術の構成要素となり得る (Hipps, 1992)。

しかしリンゴとモモでは、ファーターティゲーションは有利ではなかったという結果もある。ファーターティゲーション栽培でのリンゴの収穫量は、4年以上にわたって他のどんな方法（葉面散布・緩効性肥料・液肥散布）よりも勝っていたが、増収分だけ肥料コストも上昇したため経営的には有利とは言えなかった (Paoli, 1997)。リンゴの 2 品種を使って 6 年以上をかけた試験でも、ファーターティゲーションは、液肥や固形肥料の散布による慣行の施肥方法以上のメリットがなかった (Widmer and Krebs 1999)。Dolega ら (1998) は、ファーターティゲーションとそれ以外の方法で、リンゴの硬度、酸度、糖含量に違いがないことを示している。また、果実のミネラル含量や保存性、開花や収穫量にも特にプラスの効果はなかった。この試験では、点滴灌水と肥料散布を組み合わせるときに最も収穫量が大きくなった。

密植栽培されたモモ (606 株 /ha) で、ファーターティゲーションによって窒素やカリを施用した試験でも、帯状施肥と比べて投入コストに見合う増収は認められなかった (Layne et al 1996)。しかしイスラエルのモモでは、ファーターティゲーションによって木の成熟が早まり、従来の管理方法に比べて半年から 1 年早く実をつけると報告されている。リンゴやモモのファーターティゲーションで、あまり良くない結果があるのは、それらの試験が主に湿潤な気候条件下で行われたためだと思われる。そのような条件ではファーターティゲーションの重要な要素の一つである土壤水分コントロールがうまく働かないからである。

オレンジのファーターティゲーションでは、ホーグランド培溶液^{訳注7}の 2 倍希釈液を少量ドリッパーで与えた場合に最も収穫量が増加した。これにより、狭い領域に多量の細根が密集して生じた (Bravdo et.al., 1992)。微細砂質土壌で栽培されたオレンジの収穫量は、固形肥料を散布した場合よりも 3-8 t/ha 増加した。さらに、年間 18 回のファーターティゲーションでは、

同じ窒素量を固形肥料で年3回に分けて散布した場合に比べ、硝酸態窒素の地下水への溶脱が減少した (Alva et.al., 1998)。地下水への硝酸塩汚染に対するファーターティゲーションの効果については、Alva と Mozaffari (1995) も報告している。

グレープフルーツの試験では、ファーターティゲーションによるメリットが、従来の肥料散布法と同等かそれ以上であることが示されている (Boman, 1995)。成熟したグレープフルーツの樹で、粒状肥料を散布する従来法と、肥料散布とファーターティゲーションを組み合わせた方法との比較が行なわれた。従来の施肥法では1年に3回肥料を散布する。組み合わせた方法では、春に年間の窒素とカリウムの施肥量の33%を散布し、その後、残りの量を2週間間隔のファーターティゲーションで施用する。従来の方法と比較して、この肥料散布 + ファーターティゲーションの組み合わせた方法では、収穫量が8~9%増加し、肥料の利用効率も改善された (Boman, 1996)。

4. 肥料

4.1. ファーティゲーションに適した肥料

様々な固形や液体の肥料が、生産者に提供されている。それらがファーティゲーションに適しているかどうかは、水に対する溶解度などの性質によって決まる。常温で完全に水溶性の固体肥料か、すでに溶液になっている液体肥料がファーティゲーションには適している。また肥料を混合する場合には、それらの適合性が重要である。水の中で混ざったときに沈殿が生じたり、溶解度が変わるものは適さない。例えば、硫酸アンモニウムと塩化カリウムを混ぜるとき、混合液の中で最も溶解度の低い硫酸カリウムの濃度によって混合濃度の上限が決まってくる。溶液の腐食性も重要である。肥料は灌水システムの金属部分との間に化学反応を起こすことがあり、酸性のものや塩素を含む肥料は、一般に他のものよりも腐食性がある。キレート形で微量元素を含む肥料原液は、他の肥料原液と混合すべきではない。キレートは、酸によって分解される傾向があるので、キレートを含む原液と酸性の原液は、別々に調製しなければならない。

原水と肥料の適合性も、考慮する必要がある。カルシウムやマグネシウムなどの、2価の陽イオンを比較的多く含む水がある。そのような水ではある種のリン酸化合物は沈殿し易いが、他方、ポリリン酸のようなものは溶解性を保つ。肥料の溶解度は、水の温度によっても変わってくる(表 4.1.)。これらのデータは、理化学ハンドブックのデータに基づいており、一部は

表 4.1. 単肥の各温度における溶解度 (g/L)

単肥	化学式	0 °C	10°C	20°C	30°C
尿素	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	680	850	1060	1330
硝酸アンモニウム	NH_4NO_3	1183	1580	1950	2420
硫酸アンモニウム	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	706	730	750	780
硝酸石灰	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	1020	1240	1294	1620
硝酸カリウム	KNO_3	130	210	320	460
硫酸カリウム	K_2SO_4	70	90	110	130
塩化カリウム	KCl	280	310	340	370
リン酸二カリウム	K_2HPO_4	1328	1488	1600	1790
リン酸一カリウム	KH_2PO_4	142	178	225	274
リン酸二アンモニウム	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	429	628	692	748
リン酸一アンモニウム	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	227	295	374	464
塩化マグネシウム	MgCl	528	540	546	568
硫酸マグネシウム	MgSO_4	260	308	356	405

表 4.2. 各種肥料水溶液の EC・pH・成分濃度 (10 mMol/L)

単肥	化学式	成分	濃度 (mg/L)	EC (dS/m)	pH
硝酸	HNO ₃	N	140	0.7	2.0
硝酸アンモニウム	NH ₄ NO ₃	N	280	0.7	5.5
硝酸石灰	Ca(NO ₃) ₂	N	280	2.0	6.9
アンモニア水	NH ₄ OH	N	140	0.7	5.5
硫酸アンモニウム	(NH ₄) ₂ SO ₄	N	280	1.4	4.5
尿素	CO(NH ₂) ₂	N	280	2.7	7.0
リン酸一アンモニウム	NH ₄ H ₂ PO ₄	N	140	0.4	4.7
		P	310		
リン酸二アンモニウム	(NH ₄) ₂ HPO ₄	N	280	0.6	7.8
		P	310		
リン酸	H ₃ PO ₄	P	310	0.4	2.3
リン酸二カリウム	K ₂ HPO ₄	P	310	1.9	9.2
		K	780		
リン酸一カリウム	KH ₂ PO ₄	P	310	0.7	4.6
		K	390		
塩化カリウム	KCl	K	390	0.7	7.0
硝酸カリウム	KNO ₃	N	140	0.7	7.0
		K	390		
硫酸カリウム	K ₂ SO ₄	K	780	0.2	7.0
塩化マグネシウム	MgCl	Mg	240	2.0	6.8
硫酸マグネシウム	MgSO ₄	Mg	240	2.2	6.9

Avidan ら (1996) や Wolf ら (1985) から引用した。

特に肥料原液を調製する場合、温度による溶解度の違いを考慮する必要がある (表 4.1.)。夏期の気温では完全に溶ける肥料も、冬期には沈殿 (塩の析出) することがある。

灌漑に用いられるほとんどの水は固有の塩類を含むので、それ自体の浸透圧を持っており、肥料塩類を加えることで浸透圧はさらに上昇する。培地の浸透圧が高いと、高い収量を得にくくなる。浸透圧が高いと、植物は水と肥料を吸収するためにより多くのエネルギーを必要とするからである。したがって、ファーターゲーション養液には、なるべく浸透圧を高めない肥料を使うべきである。一般に肥料やファーターゲーション養液の浸透圧は表記されたり測定されたりしないが、多くの肥料溶液で浸透圧と電気伝導度の関係が調べられており、以下の式によって電気伝導度 (EC) から浸透圧 (OP) を計算することができる。

$$OP=0.036 \times EC \text{ (Richards, 1954)}$$

ファーティゲーション養液の酸・アルカリ度は pH で表され、酸性の場合は腐食性を示し、アルカリ性の場合は沈殿形成のリスクを示す。例えば、弱アルカリ性の水では、リン酸カルシウムの沈殿が形成される可能性がある。

肥料溶液の電気伝導度、dS/m (EC) と pH は計算し比較することができる。EC は溶液のイオン強度 (IS) から計算でき、 $IS = 0.013 \times EC$ の関係がある (Griffin and Jurinak, 1973)。IS と pH は、Geochem program^{訳注⁸} というコンピューターシミュレーションで計算することができる (Sposito and Mattigod, 1980)。尿素溶液に関しては、他の溶液の性質との比較を可能にするため、異なる計算式が必要である。溶液中の尿素は EC を生じないが、浸透圧 (OP、単位: atm) は発生し、それは次の式で計算できる: $OP \times V = N \times R \times T$ 、ここで N は溶質のモル数、V は溶液の体積、 $R=0.082$ 、T は絶対温度である。尿素溶液の“EC 相当”値は、この OP 値から、先に述べた式で計算することができる。

何種類かの肥料の 10 mmol/L 溶液の計算結果を、表 4.2. に示す。mg/L で表した成分濃度も、この表に示した。

表 4.2. から、例えば (i) 硝酸カルシウム溶液は、与えられる全養分あたりの浸透圧が硝酸カリウムよりも高いこと、(ii) リン酸ニカリウム溶液は、リン酸一カリウム溶液よりも pH が高いこと、(iii) リン酸は比較的 low 濃度でも溶液の pH を下げることがわかる。

10℃の水に尿素、リン酸、塩化カリウムを加えて軽くかき混ぜるだけで、窒素 (N)、リン (P_2O_5)、カリ (K_2O) の濃度がそれぞれ 9-10% 以上ある透明な NK、PK、および NPK 肥料溶液を作ることができるかどうかを試された。硫酸アンモニウムと塩化カリウムが共存すると硫酸カリウムの沈殿が生じるため、高濃度の肥料原液を作ることができない。リン酸を使う場合は水にリン酸を加えて行き、そのときに発生する熱を利用する。窒素-リン酸 (P_2O_5) -カリ (K_2O) の組成が 0-0-8、4.9-0-4.9、3.1-0-6.3、2.7-0-8.1、6.1-0-3.1、7.8-0-2.6 の透明な原液は、水に尿素と塩化カリを加えて軽く攪拌するだけで作ることができ、希釈後の pH は 5~7 となる。0-6.3-6.3、0-3.7-7.4、0-3.2-9.6、0-7.4-3.7、3.6-3.6-3.6、2.7-2.7-8.1、2.7-5.4-2.7、

2.5-5.1-10.1、7.4-2.5-2.5、5.1-1.7-5.1 の組成の透明な原液は、水に尿素、オルソリン酸、塩化カリウムを軽く混ぜるだけで調製でき、その希釈液の pH は 3~4 の範囲にある。液肥原液の調製に使う水の pH は、最終的な pH にはほとんど影響しない (Lupin et al., 1996)。

ファァーティゲーション用の液肥は、多種類の水溶性固形肥料を組み合わせ、保存用原液として圃場で作ることができる。この原液を、作物の要求に合った組成と量になるように灌水に混入する。この方法でファァーティゲーション用の液肥を調整することは、コスト面でメリットがある

表 4.3. ファァーティゲーションに使われる代表的な配合液肥の性質

液肥	N-P-K	EC	pH	温度	比重
尿素・硝酸アンモニウム・リン酸	8-16-0	1.1	0.4	11	1.23
尿素・硝酸アンモニウム・リン酸・塩化カリウム	8-8-8	1.0	0.6	14	1.25
尿素・硝酸アンモニウム・塩化カリウム	15-0-5	0.7	7.5	6	1.20
尿素・硝酸アンモニウム・リン酸・塩化カリウム	12-6-6	1.0	1.0	11	1.24
硝酸アンモニウム・リン酸	14-14-0	1.7	0.1	2	1.34
硝酸アンモニウム・リン酸・塩化カリウム	8-4-8	1.1	0.4	15	1.23
硫酸アンモニウム・硝酸アンモニウム・リン酸・塩化カリウム	8-2-4	1.0	1.8	0	1.22
硝酸アンモニウム・リン酸・硝酸カリウム・リン酸一カリウム	8-6-6	0.9	0.7	9	1.27
硝酸アンモニウム・リン酸・硝酸カリウム・リン酸一カリウム	6-3-6	0.6	0.7	6	1.19

N-P-K= 重量 %, N-P₂O₅-K₂O として算出

EC=1L の蒸留水に 1cc の液肥を加え、EC(dS/m) として算出

温度 = 析出開始点 (摂氏)

比重 =kg/L (25℃)

代表的な配合微量栄養素の水溶液

微量栄養素	配合 A g/L	配合 B g/L	配合 C g/L
EDTA 鉄	12.2	5.50	40.5
EDTA マンガン	5.2	2.70	20.2
EDTA 亜鉛	1.75	1.35	10.1
EDTA 銅	0.54	0.20	1.5
モリブデン	0.24	0.15	1.1
ホウ素	2.0		
pH	9.2	8.5	7.5
温度		2	2
比重	1.1	1.1	1.35

が、植物の要求に合致した組成をもち、沈殿を形成することなく、適切な pH と EC の養液を作るためには、それなりの知識と技術が必要である。表 4.1. や表 4.2. のデータは、フアーティゲーション用の液肥を調製するのに役立つ。

肥料メーカーは、フアーティゲーション用に非常に多種類の液肥を提供している。これらの液肥は、植物の要求や培地の特性の違いに適合するように、様々な養分組成や pH、EC 値のものが作られている。表 4.3. のリストに、多量要素と微量元素をともに含む市販の液肥の特性を示した。この中の情報はイスラエルの肥料メーカー、“Fertilizer and chemicals Ltd.”、“Haifa Chemicals Ltd.”、“Deshen Gat Ltd.” のカタログから引用した。世界の他の肥料メーカーも、同様な製品を提供している。表 4.3. のデータは、性質の異なる化合物を様々な組み合わせることで、多様な組成の肥料ができることを示している。マグネシウムやカルシウム欠乏症の改善のために、5 g/L の窒素、3 g/L のカルシウム、1 g/L のマグネシウムを含む、硝酸 HNO_3 、硝酸カルシウム $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、硝酸マグネシウム $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 、の溶液を作ることができ、また、7 g/L のホウ素 (B) を含む溶液を作ることでもある。

4.2. 灌漑用水中の肥料の反応

灌漑に用いる原水は、その EC や pH の値と同様、含まれる塩類の組成と濃度も様々である。従って、フアーティゲーションにどの肥料を使うかを決める際には、原水の水質を考慮する必要がある。

アンモニア水 ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) は、フアーティゲーションに用いることのできる一般的な窒素溶液の一つである。アンモニア水を灌水システムへ注入すると、原水の pH が上がって目詰まりが起こる可能性がある。 Ca^{2+} や Mg^{2+} および重碳酸イオン (HCO_3^-) を多く含む水では pH が高くなり、水の吐出口やフィルターを詰まらせる炭酸カルシウム (CaCO_3) や炭酸マグネシウム (MgCO_3) の沈殿が生じることがある。沈殿の量は注入された NH_3 の量や、原水に含まれる塩類の濃度と組成によって異なる。EC が 0.2 dS/m で Ca と Mg の濃度の合計が 10 mg/L の水では、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 濃度は 30 g/L まで許容できるが、EC が 0.8 dS/m で Ca と Mg の

濃度の合計が 30 mg/L のような比較的高い塩分濃度の水では、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 濃度は 1 g/L までしか許容できない。

このようなデータは、ファーターゲーションのための推奨施肥法を開発する際に使われる。例えば、それにより乾燥地帯に多くみられる塩分濃度の高い原水でも、沈殿を生じないような組成が開発できる。EC2.5 dS/m、二価陽イオン ($\text{Ca}+\text{Mg}$) 濃度が 200 mg/L のような原水では、アンモニア態窒素の濃度は 0.25 g/L 以下でなければならない (Whiting, 1975)。

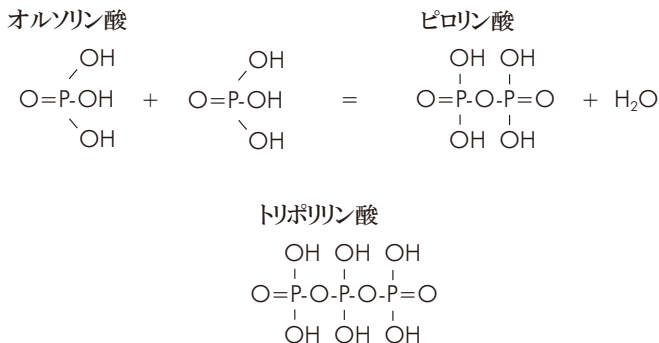
高濃度の硫酸アンモニウム (NH_4)₂SO₄ は、わずかに水を酸性にする。硫酸イオン (SO_4^{2-}) は高濃度では、水の中に溶解している Ca^{2+} イオンと結合して硫酸カルシウム (CaSO_4) の沈殿を生じる。尿素や硝酸アンモニウム (NH_4NO_3) のような他の窒素源は、灌漑用水に含まれている塩類とは反応しにくいので、これらには沈殿形成のリスクがない。

ファーターゲーションで使われるリン酸肥料は、灌漑用水中の塩類と異なる形で反応する。一般的なリン酸源の 1 つはリン酸、より正確にはオルソリン酸 (H_3PO_4) である。これは比較強い酸で、用水の pH を下げて沈殿した塩類を溶解するので、灌水システムのクリーニングや目詰まり防止剤にもなる。リン酸一アンモニウム ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) は、オルソリン酸の塩で、多くのファーターゲーション用の液肥に使われる。リン酸イオンと Ca^{2+} のような二価の陽イオンは、リン酸二カルシウム (CaHPO_4) やリン酸三カルシウム [$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$] のような沈殿を形成し、目詰まりを引き起こす。灌漑用水に加えるリン酸濃度の上限は、Ca や Mg の濃度のほかに、他のイオンの存在や溶液の pH によって影響されるため、変化の予測が難しい。例えば、200 mg/L の Ca を含む灌漑用水では、リンの濃度が 7.5% 以上になるようにリン酸アンモニウムを加えると沈殿が生じる (Duis and Burman, 1969)。

沈殿形成のリスクがある場合のリンの供給源として、ポリリン酸が処方の中で使われている。ポリリン酸はオルソリン酸のポリマーで、その構造と化学式を、図 4.1. に示した。ここではオルソリン酸 2 分子から水 1 分子がとれて、1 分子のピロリン酸が作られることが示されている。同様なプロセスで、もう一つのオルソリン酸分子がピロリン酸に付加され、トリポ

リン酸が作られる。このようにして、長鎖のポリリン酸が作られる。ほとんどのポリリン酸肥料は、様々な鎖の長さのポリリン酸の混合物である。これらの酸と陽イオンが反応してポリリン酸アンモニウムのような塩が形成され、それが肥料の処方に使われる。ポリリン酸の特徴は、カルシウム

図 4.1. 各種リン酸の構造



のような陽イオンを封鎖する能力にある。カルシウムを多く含む水に十分なポリリン酸を加えると、水溶性のリン酸カルシウムが生じ、沈殿の形成が阻止される。カルシウムを多く含む水に、少量のポリリン酸溶液を加えると、溶解度の低いピロリン酸カルシウムが沈殿するが、ポリリン酸の量を増やしていくと沈殿は溶解し、それ以後新たな沈殿は生じない。11-37-0 のポリリン酸アンモニウムを使った定量試験の例を、Duis and burman (1969) と Noy and Yoles (1979) の結果から以下に紹介する。

- 100 mg/L のカルシウムを含む灌漑用水に、どれだけの量のポリリン酸アンモニウムを加えても沈殿は生じない。
- 200 mg/L のカルシウムを含む水に、300 倍に希釈したポリリン酸溶液を加えると沈殿を生じるが、200 倍溶液では沈殿を生じない。
- 500 mg/L のカルシウムを含む水に、100 倍に希釈したポリリン酸養液を加えると沈殿を生じるが、50 倍希釈では沈殿を生じない。

沈殿を生じない最低濃度については、これらの結果と異なる報告がある。その違いは使用したポリリン酸の鎖の長さの違いによるものと思われる。

る。実際には、溶かせるポリリン酸の量の限界値を調べるためのバッチテストを行って決めるべきである。

常温でのカリウム塩の溶解度は大きいので、ほとんどの場合、高濃度で原水に混入することができる。表 4.1. のデータは、20℃では KCl が 34%、KNO₃ が 32%、リン酸一カリウム (KH₂PO₄) が 30%、リン酸二カリウム (K₂HPO₄) はそれよりも高い溶解度を持つことを示している。他方、K₂SO₄ は水に対する溶解度が低く、20℃で 11% である。さらに、カルシウムイオン (Ca²⁺) を多く含む水では、水に対する溶解度が比較的低い硫酸カルシウム (CaSO₄) が沈殿する可能性がある。

Elan ら (1995) は、溶けやすく、高いカリウム濃度が必要とされるファーターティゲーションでの使用について、KCl、K₂SO₄ および KNO₃ を比較している。KCl は 25℃までは最も解けやすく、より低い温度でも最も高い溶解度を保っていた。KNO₃ は温度が高いほど溶解度が高く、最も解けにくかったのは K₂SO₄ だった。塩素に対し低感度の作物や溶脱の起こりやすい条件では、KCl がファーターティゲーションに最も適した肥料である。その理由は、これら 3 つ中で KCl は最も良く溶け、カリウムの含有量が高く、温度変化に対する影響が小さく、かつ最も安価だからである。

微量元素は通常、キレートされた状態で利用され、多量要素 (表 4.3.) と共に原水に混入される。キレートされた状態では、ほとんどの微量元素は沈殿を形成しない。

4.3. 土壌と培地中における養分の反応

ファーターティゲーションによって水溶液の形で与えられた肥料成分は、土壌や培地と反応する。

塩ではない単純な有機分子である尿素 (NH₂CONH₂) が、多くの配合肥料処方において使われている (表 4.3.)。尿素で注意しなければならないのは、植物に有害な不純物であるピウレット (NH₂CONH₂CONH₂) の濃度を 0.25% 以下にすることである^{脚注 9}。

尿素は水に非常によく溶けるので (1 リットルの水に 1 kg)、実際上ファーターティゲーション養液中の尿素的濃度には上限がない。尿素は水とともに土

壤や培地中を移動し、至る所にある酵素、ウレアーゼによって分解されて炭酸アンモニウムとなる。



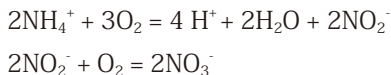
この化合物は不安定で、アンモニアと二酸化炭素に分かれる。



アンモニア (NH_3) は、土壤や培地の表面に吸着するか、水に溶けてアンモニウムイオン (NH_4^+) となり、土壤の陽イオン交換部位 (CE) に吸着される。アルカリ条件下では、アンモニアは揮発して失われる。

与えられた尿素の半分が加水分解されるのに要する時間は、数時間から数日である (Balwinder-Singh et al., 1996)。培地の温度や pH が、尿素の加水分解速度に影響を与える。5~45℃の範囲では、その速度は 10℃上がるごとに 2 倍になり (Moyo et al., 1989)、pH6.5 で最大になる (Cabera et.al., 1991)。炭酸カルシウムや塩分濃度およびアルカリ度の増加につれて分解速度は遅くなるが、培地中の粘土や有機物の含有量が多くなると分解速度が速くなる傾向がある。

ファーターションで使われるその他の窒素肥料には、アンモニア (NH_4) と硝酸 (NO_3) の塩がある。アンモニウム塩は、人工培地や粒子が大きい土壤では溶存する。粘土を含む土壤では、 NH_4 の一部は陽イオン交換部位 (CE) に吸着し、その一部は粘土の結晶格子内に固定される。アンモニウムは、溶液でも吸着された状態でも植物や微生物が容易に利用できる。通常的环境条件下では、 NH_4 は微生物によって酸化されて NO_3 になる (硝化作用という)。硝化作用の速度は環境条件に依存し、最初の NH_4 の半分が硝化されるまで、数日から数週間かかる。独立栄養細菌がまず亜硝酸 (NO_2) を作り、続いて硝酸 (NO_3) を作ることによって硝化のプロセスが進行する。このプロセスはエネルギーを放出し、その反応は次の式で表される。



この式は、反応には酸素が必要なこと、 H^+ イオンが放出されるため硝化が起こった場所では酸性化が起こることを示している。したがって、アンモニウム塩や尿素の施用は培地を酸性化する効果がある。土壌や培地中に炭酸カルシウム ($CaCO_3$) があると、この酸性は容易に中和される。

土質は、通気状態と緩衝能力によって硝化速度に影響を与える。礫の多い砂壤土で、アンモニウム肥料をフアーティゲーションによって与えて栽培したリンゴの試験では、土壌の酸性化は1年以内に始まり、その範囲は深さ 60 cm で点滴口から水平に広がった。酸性化は、ドリッパー直下の 20~30 cm で最も著しく、最初 5.8 だった pH は 1 年後には 4.5 となり、フアーティゲーション開始 3 年後には 3.7 となった。さらに、カリウムの急速な溶脱も観察された (Parchomchuk et al., 1993)。

土壌粒子の大きさの違い（砂質か粘土質か）による硝化速度の違いは、土壌や培地の含水量とも関係している。土壌水分を張力で表すと、最適な水分と通気の状態は 0.1~1.0 bar の範囲にある。約 0.01 bar では培地は水で飽和した状態となり、空気がないためバクテリアが活動できず硝化が止まる。逆に水分張力が 15 bar 以上でも、微生物に必要な水分がないため硝化が止まる。

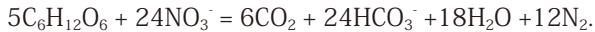
NH_4 の硝化速度に及ぼす pH の影響が、Kuldip-singh(1996) によって定量的に調べられている。孔隙の 60% を水で満たした土壌を使った培養試験で、硝化速度は pH7.4 のときに最も早く (7 mg N/kg 土壌 / 日)、pH9.4 で中程度 (3 mg/kg)、pH4.8 では最も遅く (1 mg/kg) になった。一般に、硝化に適した pH は 6.6~8.4 の範囲にあり、pH4 以下や pH9 以上で硝化は停止する。

アンモニウム源の種類が、施肥による pH の変化に影響を与える。硝化の研究では、弱酸性で pH 緩衝力の弱い土壌に、硫酸アンモニウム、リン酸二アンモニウムおよび尿素を与え比較した。その結果、硝化速度は窒素源のアルカリ度によって異なることが明らかになった。最も速度が速いのは尿素で、リン酸二アンモニウムはそれよりも少し遅く、硫酸アンモニウムは最も遅かった (McInnes and Fillery, 1989)。

点滴口下の土壤の湿潤域における、硫酸アンモニウム、尿素、および硝酸カルシウムの移動と変化について、圃場での研究が行われた (Haynes, 1990)。湿潤域における、土壤 pH の影響も調べられた。1 回のファーターティゲーション (ドリッパー吐出量 2 L/h) で施用されたアンモニウムは、点滴口直下の深さ 10 cm の部分に集中し、横方向にはほとんど移動しなかった。これに対し、尿素や硝酸塩は土壤中を移動しやすいため、吐出口の下により均一に分布し、吐出口を中心として水平方向に半径 15 cm の範囲まで移動した。施用された窒素の硝酸態窒素への変換は、硫酸アンモニウムよりも尿素の方が早く、このことは硝化の遅い硫酸アンモニウムを施用した場合には、点滴口の下に多量のアンモニウムが蓄積することを示唆している。土壤の酸性化は、硫酸アンモニウムでは地表から 20 cm の部分に限られていたのに対し、尿素では深さ 40 cm の部分まで起こっていた。硝酸塩は、尿素、アンモニウム塩、硝酸塩のどの肥料が使われるかには関係なく、培地の中で広く存在する窒素形態である。硝酸塩は土壤成分とは反応しないので、水と共に土壤や培地の中を移動する。ファーターティゲーションシステムでは、吸収根の場所よりも下に水と共に NO_3 が溶脱しないように、水の移動を十分良くコントロールすることができる。しかし、培地の保水量よりも少し多めに水を与える必要があるため、根域より下へある程度の溶脱、すなわち NO_3 の損失は避けられない。これは培地の中に蓄積する塩類を除去するため、多めに水を流す必要があるからである。それでも、他の灌水方法とファーターティゲーションを比較した場合、ファーターティゲーションは根域より下への NO_3 の移動を最小限に抑えることができるので、水質汚染をかなり低減させることができる。

培地からの NO_3 の損失は、脱窒によっても起こる。これは、微生物によるプロセスで、 NO_3 はまず亜酸化窒素 (N_2O) に還元され、最終的に窒素ガス (N_2) になる。脱窒が起こる条件は、遊離酸素の不足と脱窒に関与する微生物のエネルギー源としての有機物の存在である。このような条件下では、様々な微生物が NO_3 の酸素を使い、有機物分子を酸化することによってエネルギーを獲得する。脱窒のプロセスは、多くの段階を経て進行する。エネルギー源の有機物としてグルコースを使い、最終的に気体状の窒素を

発生する場合のトータルな反応は以下のように表すことができる。



脱窒速度は比較的早く、最適条件下では1~4日で完了する。どの微生物による反応もそうであるように、脱窒反応は温度に依存する。0℃や70℃といった極端な温度では反応は起こらないが、通常の土壤温度範囲では温度が10℃上がると反応速度は2倍になる。

ファーティゲーションに用いられるリン酸肥料は、完全に水溶性の物質でなければならない。リン酸一カルシウム $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ である過リン酸塩のような従来型のリン酸肥料は水溶性であるが、インコングルエント（不一致）溶解という性質のため、ファーティゲーションには向いていない。すなわちリン酸一カルシウムは、溶解の過程でリン酸二カルシウム (CaHPO_4) を形成し、その溶解度が非常に低いため、吐出口に目詰まりを引き起こすためである。インコングルエント（不一致）溶解の反応は次の式で表される。



リン酸アンモニウム、リン酸カリウムおよびリン酸（表 4.1. 参照）は、通常的环境条件下では完全に水溶性で、良い N・P・K 源である。しかし、これらの塩は土壤中で二価あるいは三価のカチオンと反応して、溶解度の低い化合物を形成することがある。リン酸アンモニウム、リン酸カリウムの溶液は、リン酸よりも pH が高く、カチオンと反応しにくいいため、より多くのリン酸を含む土壤を作ることができる。

人工培地の入ったコンテナを使ったキュウリとマスクメロンの養液栽培の実験で、リン酸一カリウム (MKP) が非常に効率の良いリンとカリウムの供給源であることが示されている (Nerson et al., 1997)。リン酸一カリウム (MKP) の施肥効率、リン酸 (H_3PO_4) と塩化カリウムを組み合わせた場合と同じだった。彼らは、リン酸 (H_3PO_4) よりも安全に扱えることから、リン酸一カリウム (MKP) の使用を推奨している。

ポリリン酸肥料は土壤や培地と接触した後、酵素反応によって加水分解さ

れる。ポリリン酸アンモニウム溶液は、オルソリン酸、ピロリン酸、トリポリリン酸および、より高分子のポリリン酸などの多種類の分子を含むため、その分解反応はかなり複雑である。ポリリン酸の加水分解の産物はオルソリン酸で、トリポリリン酸の加水分解は次の式のように進む。



培地温度、含水量、pHなどの要因が加水分解速度に影響する。反応は比較的早く、数時間から数日間で終了する。

カリウムの反応は、人工培地や粒子の粗い土壌と、粘土質土壌の場合で異なる。ファーターションで使用されるカリウム肥料は容易に溶け、反応性の低い培地や砂質土壌中では、カリウムはプラスに荷電したイオンとして存在する。粘土を含む土壌の場合には、水溶性肥料として与えられたカリウムのほとんどは、交換性カリウムまたは非交換性の固定カリウムとして土壌に保持される。交換性カリウムは、通常、植物が容易に利用できる。交換性カリウムも固定カリウムも、プラスに荷電したイオンとして、粘土粒子の表面や内部のマイナスの電荷に引き付けられ、土壌に保持される。その名の通り、交換性カリウムとは、土壌に他のカチオンが過剰により溶脱するとき、それらのカチオンと入れ替わるカリウムである。植物の根が土壌溶液からカリウムを吸収すると、吸収されたカリウムはまず交換性カリウムによって補充され、続いて固定カリウムによって補充される。カルシウムは Ca^{2+} として、ファーターションを行っている場所の用水や土壌中に、適量また時には過剰に存在する。このためほとんどの場合、カルシウムの施用は必要ない^{訳注 10}。

二価のマグネシウムイオン (Mg^{2+}) は、カルシウムのように用水や土壌中に広くは存在しない。土壌中で植物が利用できる Mg は、交換性陽イオンとして、土壌溶液の中に存在する。陽イオン交換容量 (CEC) の低い砂質土壌や人口培地では、マグネシウム欠乏症が起こる可能性がある。このような条件で多収穫を続けていると、植物が吸収できる Mg がすぐになくなってしまふ。粘土質土壌では、植物が吸収できる Mg、Ca および K の間のバランスが崩れると Mg の欠乏症が起こる。例えば、交換性 Mg が少

ない場合、高濃度のKによってMg欠乏が起こる。このような場合には、マグネシウム塩をファーターションで与えることができる（表4.1、4.2.参照）。

イオウ(S)は、ファーターションにおける特殊肥料として、植物が必用とする場合に与えられる。また、硫酸マグネシウムや硫酸アンモニウムなどの副成分としてイオウを含む肥料もある。人工培地や砂質土壌でイオウ欠乏症状が疑われる場合、硫酸塩を含む肥料をファーターション養液に添加することがある。ほとんどの乾燥地帯や半乾燥地帯ではイオウ欠乏症は起こらない。イオウは土壌中の有機物が無機化し、植物が利用できる硫酸イオン(SO_4^{2-})となって遊離されるため、植物にとっては得やすい成分である。他方、植物の根に吸収されず、また溶脱しなかった硫酸塩は、微生物によって有機物に取り込まれる。

鉄(Fe)、亜鉛(Zn)、銅(Cu)、マンガン(Mn)などの陽イオンの微量元素は、ファーターションではキレートされた形で与えられる。キレートは、その構造の中に陽イオンを結合することのできる合成有機化合物で、陽イオンを用水や土壌中の成分との反応から保護する。このため好ましくない反応が避けられ、植物の根は水溶性のキレートを吸収することができる。ホウ素(B)とモリブデン(Mo)が不足する場合、水溶性の塩として微量与えると、植物はそれを利用できる。

4.4. 土壌と培地中における養分の分布

ファーターションを行っている土壌や培地における肥料成分の垂直分布は、与えられた水の動きと土壌や培地の性質によって決まる。水溶性の肥料塩類は、土壌や培地の成分と反応しなければ、与えられた水とともに動く。例えばリン酸塩は、土壌中にCa、Fe、Alがあれば沈殿し、K、Mg、 NH_4 イオンは、土壌の陽イオン交換部位に捕捉される。こうして土壌中では、これらの反応が水による更なる養分の移動を防ぐ。他方、硝酸塩やポリリン酸のようなある種のリン酸塩では、沈殿や吸着が起こらない。水や、それに含まれる NO_3 等の、非常に溶解度の高い塩類の動きは、粗い粒子の土壌や不活性培地の場合と、細かい粒子の土壌の場合とでは、異

なる。粗く均一な粒子からなる培地や砂礫質の土壤では、水や NO_3 が通る孔隙は大きく均一で連続していて、水とその中に溶解している肥料成分は一樣に移動し、途中で妨げられることがない。これはピストンフローと呼ばれ、 NO_3 の流れは次の簡単な式で表すことができる。

$$q_N = q_w \cdot C_N$$

すなわち、 NO_3 の流れ (q_N) は、水の流れ (q_w) と水の中の NO_3 濃度 (C_N) の関数として表すことができる。

粒子が細かく、一定の砂、シルト、粘土粒子を一定の割合で含む土壤の場合は、孔隙の幅、長さ、連続性が多様なため、 NO_3 の流れが異なってくる。水の流れは、大きな孔隙では小さなものよりも速く、連続していないところでは妨げられる。このため養液中の NO_3 の一部は 土壤内の水力学的分散によって流れの前後に変位が生じ、その結果 NO_3 濃度の波が生じ、その形は時間とともに変化し、やがて長く均一な形になる (図 4.2.)。

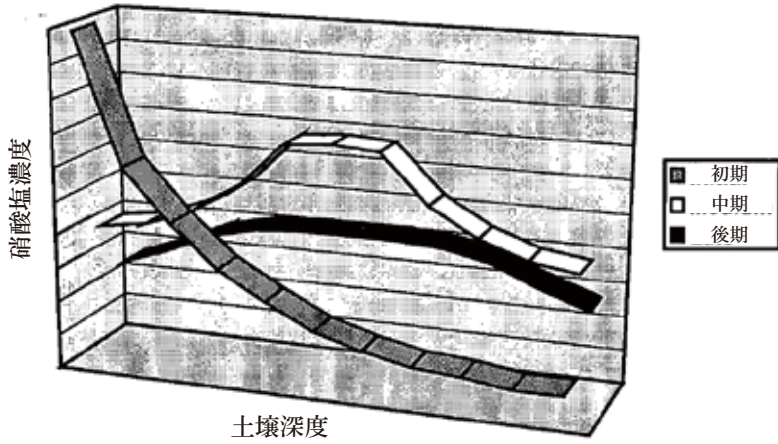
水力学的分散による硝酸塩の流れは、次のような非常に簡単な式で表される。

$$q_N = q_w \cdot C_N - D \cdot (dC_N/dx)$$

ここで NO_3 の流れ (q_N) は、水の流れ (q_w) と NO_3 の濃度 (C_N) に比例し、そこから土の深さ (x) の変化に対する NO_3 の濃度 (C_N) の変化の割合に定数 D を掛けたものを引いたものになる。定数 D は、孔隙の大きさと分布を決定する土性や土壤の物理性によって決まる。

畝間灌水や越流灌漑の場合、肥料タンクを使ってファーターティゲーションを行うと、水と肥料の水平方向の分布が不均一になりがちである。コントロールされた液肥混入装置と点滴灌水の組み合わせによる加圧灌漑では、水と肥料を均一にタイミング良く与えることができる。点滴灌水とファーターティゲーションの組み合わせでは、水分と肥料を含んだ土壤の体積は、灌水量と土壤の圃場容水量によって異なる。例えばリンゴ園では、ドリッパーを中心として半径 40 cm 以内に水と肥料が分布していた (Komosa et al., 1999a 1999b)。

図 4.2. 硝酸塩の分布と時間経過



5. 技術

5.1. 灌漑技術

ファーンティゲーションはどのような灌漑方法でも行うことができるが、重力を利用した開放型の地表灌漑か、パイプを使った加圧灌漑かによって施肥の均一性と効率が異なってくる。

5.1.1. 地表灌漑

地表灌漑は最も広く行われている灌漑方法で、世界全体の灌漑面積 2 億 5 千万 ha の 90% がこの方法である。一般に、この方法は無駄が多く、与えられた水の 30~70% のみが有効根域に留まると考えられている。巻末の写真 5.1. は中国の越流灌漑の様子である。ただし、平坦な圃場でサージ灌漑（後述）のような進んだ技術を使うと水の利用効率は高まり、90% にも達する。

地表灌漑を選択する理由としては、気候や土壌のタイプ、地形、収穫方法、水源・水質、導水施設、生産者の経営技術およびその土地の伝統などがある。考慮しなければならない土壌の性質には、土壌構造、粒径分布、表層状態、透水性、圃場容水量と萎凋点の間の保水量である有効水量、硬盤の有無や通気性の良し悪しなどがある。関連する気象条件としては、栽培期間における降水量と蒸発速度である。これらの条件が注意深く考慮され最良の運用がなされると、水の利用効率はこの方式の平均を上回り、高い収穫量が得られ品質も向上する。

越流灌漑

(i) 带状畦区灌漑（ボーダー法）

周囲を畦で囲まれた、幅 4~18 m の水平な浅いベッドで（広いベッドまたは田んぼの間口方向の傾斜はゼロ、奥行き方向の傾斜が 1% 以内）、その端にある樋を開けるか、あるいはサイフォンの作用によって、水路または畝間から圃場を水で満たす。水路あるいは水溝を作る。この方法は圃場をある程度水平にする必要があり、また大量の流水を必要とする。それは短

時間で圃場を濡らすことによって、水が根域よりも下に浸透して無駄になるのを防ぐためである。このシステムが良く働いているかどうかは、時間関数で水の満ち引きを見ることによって知ることができる。稲、バナナ、綿、アルファルファ等の畑作物で、带状畦区灌漑が行われている。

(ii) 多段畦区灌漑

この方法は、土地が完全に平坦ではない所で行われる。多段畦区灌漑は畦区内の高さの違いを最小にし、水の分布の均一性を高める。

(iii) 等高線畦畔水平面灌漑（コンターディッチ法）

この方法は多段畦区灌漑と似ているが、等高線が灌水境界となる。この方法は地形が不均一な場合に行うことのできる唯一の方法である。

(iv) 完全水平面灌漑

この灌漑方法は、レーザーレベラーで高精度な水平面を作って行われる。この方法による灌漑効率は、上に述べた3種類の方法よりも高い。灌漑面の幅は、100~150 mまでが限界である。

畝間灌漑

水は、畝間を流れ、それぞれの畝間は1条または2条に水を供給する。水の利用率を高めるため、水の供給は2段階で行われる。最初は、畝間全体の土壌表面を早く濡らすために大流量の水を送り込み、次にそれよりも少ない量の水をゆっくりと流し、根の深さまで土を湿らせる。

サージ灌漑

サージ灌漑を完全に水平な圃場で行うと、地表灌漑の効率は加圧灌漑と同じ程度まで高まる。サージ灌漑は、越流灌漑でも畝間灌漑でも行うことができる。サージ灌漑の原理は、水を何回かのパルスに分けて圃場に送ることである。最初のパルスで大量の水を送り、土壌浸食を起こさない程度になるべく早くベッドや畝間全体を濡らす。この最初の水が、圃場全体の上層をある程度濡らすため均一に浸透が始まる。次に、やや少ない水量のパルスがその上に広がって浸透を持続させ、畑全体に均一に水が深く浸透する。最新のサージ灌漑技術では、自動サージバルブを使い、あらかじめ計

画された時間割にしたがって圃場の異なる区画に交互に水を送り出す。

5.1.2. 加圧灌漑

スプリンクラー灌漑

スプリンクラー灌漑（巻末写真 5.2.）は地表灌漑ができない高低差のある土地や急斜面など、多様な地形に適用できる。水の土壌への浸透速度に合わせてられるように、様々な散水速度をもつノズルが作られている。

圃場における水の均一な散布と散水量の正確な把握、および高精度の制御装置が、水の利用効率を高めることを可能にする。スプリンクラー灌漑は、風の影響を受けやすい方法である。風は土壌表面への散布均一性を低下させ、水の利用効率を下げる。また、頭上からの灌水は葉や果実に病害を誘発しやすく、水が高い塩分濃度を含んでいる場合には葉焼けを引き起こす。設置型で自走式の散水装置があると労力を低減できるが、投資資金に余裕がなく労働力が安価な場合には、手動のシステムが比較的少ない投資で広い範囲の灌水を可能にする。作業手順はシンプルで信頼性が高く、短時間のトレーニングで覚えられる。

どんなスプリンクラーシステムでも、ファーターティゲーションが可能である。ただ、肥料成分による金属パーツの腐食と、頭上灌水時の植物の葉焼けを避けるように注意する必要がある。

スプリンクラーは、金属やプラスチックで作られている。強化プラスチックで作られた可動部分やノズルは、金属製のものに比べ耐久性に優れている。スプリンクラーは、散水技術や作物の性質に合わせて、様々な高さの支柱に取り付けて使われる。

露地栽培の穀物や野菜のように栽植密度が高い場合は、畑全体に水が均一に散布される必要がある。これは散水範囲が適度にオーバーラップするように、ノズルを配置することによって実現できる。一方果樹では、樹冠によって散水が妨げられるため土壌表面に均一に散布することができないが、実際にはその必要はなく、大きくオーバーラップすることのない樹冠下スプリンクラー灌漑が行われている。この場合、各樹木には同じ水量が与えられ、土壌中の水の分布はその樹木の根系分布と一致していなければ

ならない。

スプリンクラーを使う場合、そのノズルには 1~10 bar の間の適切な水圧がかかっている必要がある。スプリンクラーは水圧で回転するため、各スプリンクラーにはそれぞれの適正作動水圧がある。ノズルから噴射される水流が、スプリンクラーの可動部分を動かす。巻末写真 5.3. に、いくつかのスプリンクラーを示した。

(i) インパクトスプリンクラー

ノズルから噴射される水流がハンマーアームをたたき、スプリングがアームを戻すまで反時計回りにアームを動かす。ハンマーアームが戻るときスプリンクラー本体にぶつかり、スプリンクラー本体は反対方向へ回転する。インパクトスプリンクラーにはノズルが 1~3 個ついており、その形も様々である。露地作物や果樹用の頭上灌水では仰角 15~30°で、果樹の樹冠下灌水では 4~7°が推奨されている。インパクトスプリンクラーは非常に信頼性が高いが、長期間の作動を維持するためには、しっかりとした日常点検が必要である。

(ii) ターボハンマースプリンクラー

水流が溝の付いたローターを動かし、そのローターがハンマーをたたき力でスプリンクラーが回転する。材質はプラスチックで、果樹、野菜および庭などの低流量の灌水に使われる。

(iii) ジャイアントスプリンクラー (ガン)

これは 2~3 個のノズルが付いた、真鍮製の大型ハンマースプリンクラーである。使用水圧は 4~8 bar、散水量は 6~60 m³/h。ジャイアントスプリンクラーは、据え置き型灌水装置の中に組込まれたり、あるいは移動式スプリンクラーとして単体で飼料作物や露地作物の灌水に用いられる。ほとんどのハンマースプリンクラーには、ある角度範囲だけ扇形に散水するタイプがあり、散水円の一部だけに灌水することができる。

(iv) ポップアップスプリンクラー

ポップアップスプリンクラーは、庭やグラウンドの芝生の灌水に良く用いられる。このスプリンクラーは、灌水開始時に地上に飛び出し、灌水終了

後は地下のケースに収納され、次の灌水時までそこで待機している。ポップアップスプリンクラーにも円弧状に散水するタイプがあり、飛び出す高さも各種ある。

(v) 固定スプリンクラー

これらのタイプは、真鍮や丈夫なプラスチックで出来ていて、動く部分がない。これらのスプリンクラーは、主に庭で、全円や扇形の灌水に使われる。散水範囲は、回転するタイプのスプリンクラーよりも狭い。

スプリンクラー灌漑の技術

(i) ハンドムーブ方式

口径 50~75 mm、長さ 6~12 m の複数のパイプ（側管）にスプリンクラーを一定間隔で取り付け、場所を移動しながら散水して行く。これらのパイプは、灌水サイクルの間に何回か場所を変える。次の灌水サイクルの初めに、これらのパイプを最初の位置に戻す。この方法は、「時計方法」として知られ広く行われている。手動方式は小規模の畑作物や野菜および果樹で行われ、また次の牽引パイプ式には向いていない圃場でも行われる。この方法には労力がかかり、しかもそれは重労働である。

(ii) 牽引パイプ式（トラライン）

一カ所での灌水が終わった後、側管をトラクターで（パイプの延長方向へ）牽引し、最初の場所から次の場所へ移動させる。（畝の長さの半分のパイプを使って）各灌水列数を半々に灌水を行い移動するため、列数の 2 倍がポジション数となる。一般に、側管を 6 カ所（= 3 列）に移動させて灌水するが、圃場によっては 4 または 8 カ所あるいはそれより多い場合もある。

(iii) 果樹における人手による移動灌水

口径 16, 20, 25 mm で長さが 50 m までの軟質ポリエチレンパイプ（グレード 6）の先端に、1~2 個のスプリンクラーノズルを付けたものを樹列に沿って引いていく方法。灌水開始時にはパイプは完全に伸びていて、灌水毎にパイプは巻き取られ、次の樹列の位置に移動する。灌水が終わるまで、このサイクルが続く。灌水装置は、「ラージムーブ」と呼ばれる移動用具を使っ

て次の灌水サイクルを始める場所へ移動させる。

(iv) 果樹における据え置き型灌水装置

(a) 樹冠下灌水: 軟質ポリエチレン (グレード 4) のパイプ口径 16, 20, 25 mm のものを、樹木の列の沿って配置する。低流量スプリンクラー、マイクロスプリンクラー、マイクロジェット (250 L/h まで) を、パイプや細いプラスチックチューブで接続する。散水量は少なく、3-5 mm/h である。ノズル間隔は果樹の間隔に合わせるが、1~2 本の木にノズルが 1 個である。サブメインパイプは通常グレード 4~6 の硬質ポリエチレンパイプを使用し、樹列を横切って地中に埋設する。この方法は初期投資が大きいが、果樹栽培ではハンドムーブ灌水にとって変わりつつある。ミニスプリンクラー、マイクロスプリンクラー、マイクロジェット、スプレイヤーが、ドリッパーと共に果樹では普及している。

固定式システムは、省力的で簡単に使い、そしてすべての自動制御システムが利用できる。低い噴射角度のノズルは、樹冠を濡らさないで地上部病害を予防し、また葉から殺菌剤が洗い流されることがない。風による湿潤域の均質性への影響も、無視できるレベルである。このシステムは、霜や過度な高温による障害を低減するためにも使われる。果樹では、固定式システムでファーターゲーションが普通に行なわれている。灌水サイクルを短くし、湿潤域の深さを良くコントロールすることによって、肥料成分の利用効率が高くなる。

(b) 頭上(樹冠上)灌水: 口径 40-75 mm の硬質ポリエチレンパイプ(グレード 4) を、樹列に沿って敷設する。このパイプに 10~15 m 間隔で、樹冠より高い垂直パイプを取り付け、その頂部にスプリンクラーを取り付ける。スプリンクラーの間隔は、樹木の間隔と樹園の形状によって異なる。設置と運転は簡単で、スプリンクラーの配置と水圧が適切なら、最小限の労力によって樹園全体を完全にカバーできる。このシステムには、多くの欠点もある。高い水圧を必要とし、塩濃度の低い原水しか使えない。また灌水は夜間に限られ、特に樹園が小さい場合、樹園の周辺で水が無駄になる。葉や果実が濡れることにより、病気が発生しやすくなる。

近年、頭上灌水は霜よけに著しく効果のある場合を除いて、樹冠下の固定

式スプリンクラーに置き換わってきている。

野菜や畑作物における低流量固定式灌水装置

この10年間、露地野菜や畑作物で固定配管での低流量ミニスプリンクラーの使用が広まってきた。果樹園の樹冠下用から改変され、ノズルの散布径が8 x 8 m や 10 x 10 m に拡大している。初期投資額は、固定式の点滴灌水システムや通常のスプリンクラーシステムよりも少なく済む。使用水压は比較的低く、このシステムの経済性は満足のいくものである。ミニスプリンクラーのノズルは、口径 40-50 mm の送水管に細いフレキシブルチューブで接続し、地面に差した 100-150 cm の金属棒の先に取り付ける。スプリンクラーの吐出量は 400-600 L/h で、散布速度は毎時 4-6 mm である。この方法のメリットは、ソフトな灌水のため土壌表面を固めることがなく、水が土壌に吸収されずに流れ去ることがないことである。主なデメリットは、風に対して影響を受け易いことである。

マイクロ灌漑

マイクロ灌漑という用語は、小さな穴から水を吐出する吐出口を使い、200 L/h 以下の低流量で行う灌漑技術を意味している。点滴灌水以外のマイクロ灌漑は、主に果樹で行われている（巻末写真 5.4.）。最近 10 年で、野菜や畑作物へのマイクロスプリンクラーの使用が、可動式センターピボットや直進移動式の大型スプリンクラーに代わって広まった。

マイクロエミッターは普通、硬質プラスチックで作られ、慣行のスプリンクラーよりも小型で安価である。舵輪タイプの固定式のディフレクター（散乱ノズル）は多くの水の流れを作り、それらがエミッターから放射される。これらのディフレクターは風に強く、動くパーツがないので耐久性に優れている。振動タイプのディフレクターでは、水は円形の隙間から放出されてディフレクターに当たり、散乱されて周りに飛び散る。このタイプのエミッターはシンプルで信頼性がある。

細霧やミストタイプのディフレクター（散乱ノズル）は、細かい霧を作り

砂質土壌を均一に散水し、また霜よけにも有用である。しかし、風や蒸発によるロスに対しては弱くなる。これらのディフレクターは多種類の形状のものがあり、散布範囲も 45-360°をカバーしている。

ロータータイプのディフレクター（散乱ノズル）は、異なる形に作られている。このタイプの特徴は、ディフレクターが中心軸の周りを回転することで、オリフスタイプのスプリンクラーよりも広い範囲の灌水ができることである。回転台の中で、ノズルの付いたボディが回転する。ただし、動く部分があることで断裂や磨耗と共に、外的要因に対する脆弱性が高まる。

ほとんどのマイクロスプリンクラーは汎用性があり、多目的に使用できる。部品の多くは交換可能で、必用に応じて低コストで流量や、散布範囲、散布パターン、水滴直径を変更することができる。

マイクロスプリンクラーはドリッパーよりも目詰まりしづらく、また目詰まりしてもすぐ分かり復旧も容易である。小型のバルブが付いているものもあり、ノズルの洗浄のために水を止めることができる。圧力補正および流量制御のついたマイクロスプリンクラーは急斜面の土地での灌水に使われ、パルスチャンバー機能は少量灌水が可能である。

通常、マイクロスプリンクラーはプラスチックチューブで送水管につながれ、杭に固定されて垂直に設置される。ネジ式のマイクロスプリンクラーが 12-18 mm の硬質の垂直パイプに取り付けられたり、送水管に直接取り付けられる場合もある。温室では頭上灌水を行うため、マイクロスプリンクラーが逆さまに吊り下げられる。

細霧ノズルを使ったマイクロ灌漑も、温室の相対湿度を高めたり気温を下げるためによく行われる。その場合、コントローラーで短時間の噴霧が間歇的に行われる。ブリッジのあるマイクロスプリンクラーではローターがしっかりと支持されるが、ブリッジの陰に水のかからない部分ができる。

点滴灌水

点滴灌水は、作物の水分要求と根系の発達に見合った最も正確な水分供給

のために行われている。点滴灌漑はスプリンクラー灌漑よりも低い水圧で行われ、様々な条件に合わせて灌漑を自動制御することができる。このため点滴灌漑は、ファーンティゲーションに最も適した方法である。点滴灌漑は風の影響を受けず、1日のどの時間でも行うことができる。また、土壌表面の限られた部分が濡れるだけなので、雑草の生育も抑制される。葉が濡れないので地上部病害の発生や伝染が少なく、葉焼けも起こらない。巻末写真 5.5. で、点滴灌漑による土壌の湿潤パターンが見られる。

ドリッパーの種類

低流速を作ることが、ドリッパーの基本機能である。通常のオリフィス(開口部)によって低流速を作ろうとすると、そのサイズは非常に小さくなり目詰まりのリスクが高くなる。このリスクは、流路を広くしたり、また減圧のための螺旋形の流路やラビリンス型の流路内に乱流を発生させることによって低減される。巻末写真 5.6. に、いくつかのドリッパーの写真を載せた。

ドリッパーの流量と水圧の関係は、次の式で表される： $q = kP^e$ 。

ここで、

q = ドリッパーの流量 (L/h)

k = ドリッパーの定数 流量と水圧の単位に関係する

P = ドリッパーの入口での水圧

e = 指数 ドリッパーの形によって決まる

非圧力補正タイプのドリッパーの場合、 e は 0.4~1.0 である。層流による水との摩擦のみを利用するマイクロチューブの場合、 e は 1.0、長い螺旋状の流路では 0.7、乱流を発生させるドリッパーでは 0.5 となる。

水圧変化に対する吐出量の変化は、 e が小さいほど小さくなる。 e が小さくなると、吐出量が水圧変化の影響を受けにくくなるので、チューブの入口側と末端側でのドリッパーの吐出量の差を小さくできる。

歴史的には、当初、長い流路のドリッパーが使われた。その後、ラビリン

ス型と渦巻き型が開発され、小型で安価なドリッパーの製造が可能となった。これら二つのタイプでは、乱流によって比較的短い流路で水圧が低下する。ラビリンス型では、水の流れに沿って流路の方向と広さが変化することによって、乱流が発生し水圧が低下する。渦巻き型では、水が接線方向にドリッパーに入ることによって乱流が発生し、水圧が大きく低下する。ドリッパーの使用水圧は0.5~4.0 barで、吐出量は1.0~8.0 L/hである。テープ形のドリップチューブの中には、ドリッパーからの吐出量が0.1~0.5 L/hというものもある。

点滴灌水における低流量のドリッパーは、0.2~2 m という短い間隔で取り付ける必要がある。ドリップチューブの間隔は、畝の間隔によって決まる。果樹の場合、普通1列の樹木に対して1~2本のチューブを使い、綿花やトマトのような、より密植する一年生作物の場合には1~2畝に1本のチューブを使う。薄手のテープタイプのチューブを使うと、あまりコストをかけずに吐出口間隔0.1 mのものを使うこともできる。

点滴灌水は多くの場合“地表”で行われるが、この20年間に地中点滴灌水が広まってきた。ドリッパーへの根の進入による目詰まりは、ドリッパーのごく近くでの根の生育を抑えて根の侵入を防ぐ化学薬品を、チューブに定期的に注入することによって阻止することができる。灌水停止後に、ドリッパー内に水と一緒に土の粒子が吸引されることによって起こる目詰まりは、灌水停止後に速やかにシステムに空気を取り込むバキュームブローカーを設置することによって防ぐことができる。

軟質ポリエチレンや塩化ビニールで作られたドリップチューブの厚さは、使用水圧によって違ってくる。グレードは、0.5~4.0 bar (5~40 m) の範囲での使用水圧に従って定義される。比較的低い水圧のため、点滴灌水システムではコントロールヘッド^{註11}に減圧弁が必要である。

機械化灌漑

熟練労働力の不足によって地表灌漑から加圧灌漑への移行が促進され、さらに広い面積を灌漑する必要から機械化灌漑の発達が始まった。初期の技術は、手でスプリンクラーの付いたパイプを移動させるハンドムーブ方

式を改良した牽引方式と、手動サイドロールの改良型としての自動サイドロールだった。続いてトラベリングガン、リニアムーブ、センターピボットのような、より進んだシステムが開発された。機械化灌漑は、面積が10~20 ha以上で水平か傾斜の緩い長方形の圃場には向いているが、不規則な形の土地では効率が落ちる。機械化灌漑は省力化にはなるが、熟練した質の高いオペレーターが必要で、灌漑システムの形も様々である。

(i) 牽引パイプ式（トウライン）

トウラインは通常6~12 mのアルミニウムパイプからできていて、牽引中に外れないように補強されたカップラーがパイプに接続されている。6~12 m間隔で取り付けられた、すべり板または車輪がパイプを支えている。パイプユニットが長い場合には、牽引中の安定を保つため、パイプの中央に立上げパイプが取り付けられている。牽引は畝に沿って行われる。

(ii) サイドロール

サイドロールは直径75~150 mmのアルミニウムパイプやメッキされたスチールパイプでできていて、このパイプが半径0.5~1.0 mの金属製の車輪の軸になっている。パイプの長さは最長300~400 mあり、パイプに沿ってスプリンクラーを取り付けるための可動式回転コネクタが取り付けられている。コネクタには、ノズルが常に垂直を保つための重りが付いている。各スプリンクラーの散水範囲は20~30 mで、システムに付いているエンジンが一つの灌水位置から次の灌水位置に車輪を回転させてシステムを移動させ、通常3~12時間かけて所定の水量を散布する。オペレーターはエンジンを始動して、12~24 m先の次の位置にシステムを進ませなければならない。サイドロールシステムは斜度5%までの斜面でも使うことができるが、丈の低い作物にしか使えない。

(iii) トラベリングガン

トラベリングガンは、6~8 barという高い水圧を必要とする。一つのガン（散水ノズル）の最大散水量は60 m³/hで、最大散水半径は50 mである。水は、トレーラーに乗せたリールに巻かれた大口径のフレキシブルホースから供給される。ガンは、ホースをリールに巻き取ることでトレーラーの

方に引きよせられるか、内蔵エンジンや水圧によって前方へ進む。別の方式では、ガンは車輪のついたカートに取り付けられ、ケーブルで圃場の端へ引き寄せられる。

(iv) リニアムーブ

リニアムーブの側管（巻末写真 5.7.）は、長さ 200~400 m 口径 100~200 mm の大口徑アルミパイプで、車輪の付いた可動式の取水塔に繋がっている。側管に添って取り付けられる散水装置には、スプリンクラーや固定式または可動式のスプレー、ローテーター、スピナーなどがある。ディーゼルエンジンや電動モーターが、このシステムを動かす。水の取り入れ口は、パイプの末端か中心部である。水は圃場の給水栓から供給されたり、圃場の境界に沿って作られた水路から大口徑のフレキシブルホースで直接ポンプアップされる。側管の進行速度は、必要な散水量と土壤の透水性（インテークレート）および散水装置の吐出量によって決まる。移動する距離は、1000~2000 m である。圃場の末端まで来ると、側管は 180 度回転し隣接する圃場に沿って引き返す。

(v) センターピボット

側管（多数の散水装置が付いたパイプ）が 1 点（ピボット）を中心として、時計の針の様に回転する。給水配管は、この側管の末端に接続される。側管は円を描いて動くので、均一な灌水のためには中心に近い散水装置では少なく、周辺の散水装置では多くの水を散布するよう調整にしなければならない。四角い圃場では、その面積の 80% だけが灌水される。四角全体を灌水するには、コーナーアタッチメントが必要である。この装置は、システムのコストを約 25% 高める。長さ 400 m のセンターピボットは、面積 50 ha の円、またはコーナーアタッチメントを取り付けると 60 ha の四角形の圃場を灌水することができる。給水配管や給水栓、自動制御装置および電機配線等の基盤整備のための妥当なコストは、システムの総コストの 20~25% になる。

散水装置

初期の機械化灌漑システムには、高圧スプリンクラーが使われていた。そのため風の影響を受けやすく、ノズル間の距離が長過ぎたり、散水量が多過ぎるために地表を流れ去って無駄になったり、また土壌表面への水滴落下の衝撃などのため、散布が不均一になることが多かった。このスプリンクラーのもう1つの弱点は、多くのエネルギーを消費することであった。可動式灌水システムでは、散水量ファクターに加え可動パイプに沿った「長軸散布特性 (SLD)」、すなわち、可動パイプの単位長さあたりの毎時の散布量が非常に重要である。これは、最大灌水面積を求めるために必要なパラメーターである。SLD は、毎時の散布量を可動パイプの長さで割ったものである。

例えば：システムの散水量が、 $600 \text{ m}^3/\text{h}$ で、可動パイプの長さが 400 m の場合

$$\text{SLD} = 600/400 = 1.5 \text{ m}^3/\text{m}/\text{h}$$

灌水システムの SLD が大きくなると、同じ時間に表面流出なく灌水できる面積が大きくなる。普通 SLD は $0.5\sim 2 \text{ m}^3/\text{m}/\text{h}$ であり、移動速度は $50\sim 100 \text{ m}/\text{h}$ である。

最近 10 年の傾向としては、吐出量の小さい散水装置を短い間隔で取り付けることが多い。固定式や回転式の散布ノズルや、ローテーターおよびスピナーが開発され、現在はパイプに $2\sim 4 \text{ m}$ の間隔で取り付けられる。一般的な吐出量は、 $1\sim 2 \text{ m}^3/\text{h}$ である。

現代の機械灌漑ユニットには、移動速度や散水量、散水の開始・停止を完全にコントロールできる最新のコントローラーが装備されている。

圃場にある水路から水を直接揚水する場合のために、組み込み式の自動フィルターを備えたシステムもある。

5.2. 肥料混入技術

5.2.1. 地表灌漑におけるファーフティゲーション

ファーフティゲーションは、地表灌漑では一般的な方法ではない。肥料を施用するときは、固体肥料や肥料溶液を予め決められた量だけ水路に注ぎ込

む。使用する機器は、簡単なものでは底に固体肥料用の調節可能な穴あるいは肥料溶液を調節するためのバルブのついたタンクから、高度なものではサージ灌漑用の自動バルブがついた最新の肥料混入器までいろいろなタイプがあり、その中から選ぶことができる。

無水アンモニアは、それ自体の水圧で灌水システムに注入される。

地表灌漑に肥料を投入するのは、無駄が多い。かなりの量の肥料、特に窒素が水と共に深く浸透して失われる。にもかかわらず、収穫量の増大と品質の向上が肥料の無駄によるコストの増加を補うと主張して、地表灌漑でファーターゲーションを行なう生産者がいる。ファーターゲーションは水平な圃場でサージ灌漑と共に行なわれることがある。この場合の、効率の良さは証明されている。

5.2.2. 加圧灌漑におけるファーターゲーション技術

加圧灌漑では定義上、配管系に水圧がかかっているため、肥料溶液をこのシステムに注入するには、内部水圧に打ち勝つだけの差圧が必須である。

(i) 密閉型肥料タンク（巻末写真 5.8.）

コントロールヘッドからの水流をバルブで絞って減圧し、そのバルブの手前で配管を分岐させる。分岐した水流を、肥料溶液の入ったタンクに通してから元のラインに戻す。9~12 mm のチューブを通して十分な量の水をタンクに通すためには、0.1~0.2 bar の差圧が必要である。タンクには、腐食防止のためにエナメルコーティングや亜鉛メッキをした鉄製のものや、ステンレス製およびグラスファイバー製のものが使われるが、システムの稼働水圧に耐える強度が要求される。タンク内で固体の水溶性肥料が徐々に溶けていくか、あるいは液体肥料が水と混ざっていく。養分濃度は、固体肥料がタンク内にある間は概ね一定である。固体肥料がなくなると、肥料溶液が連続的に希釈されるため濃度は低下していく。このシステムは、比較的シンプルで安価である。外部からのエネルギーは不要で、高い希釈率が得られる。しかし、欠点もいくつかある。肥料の注入比率と灌水中の養分濃度を正確にコントロールできないこと、施肥を行うたびにタンクに肥料を詰めなければならないこと、バルブを絞ることによって圧力損失が

発生することなどである。また、このシステムは自動化には向いていない。

(ii) ベンチュリ（巻末写真 5.9.）

ベンチュリ装置では、パイプの狭窄部を通して吸引がおこわれる。狭窄部では流速が増加して負圧が発生するので、狭窄部に接続されたパイプを通してタンクから肥料溶液が吸引される。

ベンチュリ装置は、銅、プラスチック、ステンレスなどの腐食に強い材料で作られる。ベンチュリ装置の混入率は、初圧の 10~75% となる圧力損失によって変わり、また注入形式や作動条件によって変わる。ベンチュリ装置を使うときには、必要な圧力損失を得るための水圧の余裕が必要である。装置への入力水圧が一定であると、長時間均一な肥料濃度が保障される。圧力損失は、入力水圧のパーセントで表示される。吸引は通常、圧力損失が入力水圧の 33% 以上になると始まるが、二重ベンチュリ^{註12}の場合 10% の圧力損失だけで使用できるようになる。吸引割合は、一次水圧、圧力損失、パイプの口径によって決まるので、バルブや減圧弁によって調節することができる。吸引率は、毎時 100 mL~2000 L まで様々である。ベンチュリ装置は、直列またはバイパスで取り付けられる。また、温室ではバイパス経路にブースターポンプを取り付けることがある。

ベンチュリシステムのメリットは、外部動力源がいらないこと、開放タンクからの低コストで吸引ができること、取り付けや移動が簡単なこと、自動化が可能なこと、均一な肥料濃度、腐食に強いことなどである。デメリットは、圧力損失が大きいこと、水圧の変動によって混入率が影響されることである。

(iii) 混入ポンプ

肥料ポンプは、電気、エンジン、トラクターの動力、あるいは灌水システムの水圧による水力で駆動する。水圧ポンプは、多目的で信頼性が高く、運転やメンテナンスコストがかからない（巻末写真 5.10., 5.11., 5.12. 参照）。灌水システムの水圧によって動くダイアフラムやピストンを使った水力ポンプには、エネルギーを失った駆動水が排出されるものもある。遠心力を使ったポンプは、大量混入の場合や、液肥が濁っている場合に使わ

れる。ローラーポンプは、少量の肥料溶液を正確に注入する場合に使われる。最も普及しているポンプは水圧駆動のダイアフラムポンプやピストンポンプで、正確で信頼性が高くメンテナンスコストも小さい。

ファージーションに使われるポンプは、ほとんどが自動制御型である。パルス発信機がポンプに取り付けられ、ピストンやダイアフラムの動きを電気信号に変え、流量がモニターされる。この情報はコントローラーに送られ、設定されたプログラムに従って肥料溶液の注入量を決定する。注入される肥料溶液の量は、比例制御または量的制御で決定される。比例制御の場合には、灌水量に対して一定の比率で肥料が混入される。量的制御の場合には、あらかじめ設定された量の肥料溶液が短いパルスで注入される。温室では、複数の液肥の同時混入が普通に行われている。分解や沈殿が起こるため原液を一つのタンクに混ぜることができないとき、コントロールヘッドに取り付けられた2~3系統の注入装置で個別に注入される。異なる注入装置の混入率は、灌水コントローラーによってモニターされ調整される。

数種類のポンプが使われる；

(a) 水圧ポンプ

水圧駆動ポンプは、水流がタービンやダイアフラムまたはピストンを動かすことによって作動する。混入率は灌水の流量に比例する。混入量は水圧に影響し、駆動を停止することで肥料注入が停止する。

(b) ダイアフラムポンプ（巻末写真 5.10. 右側）

このポンプは、垂直軸で繋がれた上下2つのダイアフラムで構成されている。上のダイアフラムが液肥チャンバーで、下のダイアフラム部が駆動水チャンバーである。まず灌漑水が両方のダイアフラムの下側に同時に入り、ダイアフラムを押し上げる。このとき、液肥チャンバーの注入口が開いて液肥が灌水に混入される。続いて、両ダイアフラムの下側のチャンバーの水が排出され、ダイアフラムが元に戻ると排水口が閉じ、駆動水の入口が開いて水が入り再びダイアフラムを持ち上げる。液肥チャンバーのダイ

アフラムが下がるときに液肥が吸引され、ダイアフラムが上がる時に灌水に液肥が注入される。ダイアフラムポンプは、ピストン型のものに比べて高価であるが、稼動部品が少なく腐食性のある肥料液に触れる部分が少ないという利点がある。

ダイアフラムポンプの能力は 3~1200 L/h で、適用水圧は 1.4~8 bar である。注入される液肥と排出される水の比は、1:2 である。ダイアフラムポンプの制御はメカニカルバルブによって行なわれ、メタリングバルブやパルス発信機からの信号によって、一定の混合割合になるようにストローク数がコントロールされる。

流量に比例した液肥の混入は、肥料流量計を使って行なわれる。ポンプに取り付けたパルス発信機からの信号が、流量情報として灌水コントローラーに送られ自動制御される。

(c) ピストンポンプ（巻末写真 5.11.）

ピストンポンプは、灌漑用水の水圧を利用して液肥を混入する。送り出される水の量は、注入される液肥の量の 3 倍である。シリンダーの中を往復する、複合ピストンとパイロットバルブがポンプを動かす。ポンプがタンクから液肥を吸い上げ、灌水システム内に注入する。パイロットバルブはポンプが動き始めるときにはポンプ内の空気を逃がし、ポンプ停止後は液肥がサイフォン効果で灌水システム内に吸い込まれるのを防ぐ。ピストンポンプの流量は 1~250 L/h で、使用水圧は 1.5~8 bar(15~80 m) である。ポンプの流量を調整するために、流量調整器や流量計が使われることもある。流量計は、ポンプの入り口に取り付けられる。流量計に取り付けたパルス信号発生器からの信号は流量情報に変換され、混入する液肥の量を調節するために使われる。この信号によって、コントローラーが灌水量に対する液肥の混入比を調整する。

(d) 非排水型水圧ポンプ

水圧ポンプは、ピストンとその方向を変えるための水圧誘導弁から構成されている。原水に混入される肥料溶液の割合は、外部ダイヤルによって手で調整するか、あるいはコントローラーによって制御される。肥料溶液は、ポンプを通過する水の量に比例して混入される。すべての水がポンプ

を通過するので、水の排出はない。混合チャンバーの中で、肥料と水が連続的に混合される。複数のポンプを、直列または並列に配置することができる。肥料溶液の混入量は毎時 2~250 L で、使用水圧は 1.5~8 bar である。

(e) 電動ポンプ（巻末写真 5.12.）

電動ポンプは、安価で信頼性がある。ランニングコストも小さく、自動灌水装置に組み込むことも容易である。ダイアフラム型のポンプは、小容量のものから大容量のものまで各種入手可能である。往復型ダイアフラムを使ったものや、単相交流モーターを使った容積式ポンプユニットを使う場合もある。使用水圧は、1~10 bar である。ダイアフラムポンプの継手部分には普通、分離チャンバーがあり、劣化によってダイアフラムが破れた場合でも、肥料原液がポンプやシステムの他の部分にかからないようになっている。

電動ピストンポンプは、水圧ポンプと同様な動作をする。それらは、非常に正確で、ダイアフラムポンプよりも精度が高く、圧力の変化から受ける影響も小さくなっている。従って、このポンプは異なる複数の溶液を一定の割合で正確に混合する場合に向いている。速度可変式モーターによって、広いレンジで混入量を変えることができる。混入量は、毎時 0.5~300 L、使用水圧は 2~10 bar である。

ファーターゲーションの運用

ファーターゲーションシステムでは、施肥のタイミングが灌水スケジュールと合致していなければならない。必要な施肥量は、経験と分析の結果に基づいて決められる。その際、原水中に養分が含まれる場合はその量も計算に入れなければならない。

肥料注入部位

肥料溶液は、コントロールヘッドで灌水システムに注入される。このような装置を圃場ごとに設置すると、集中装置を一箇所に設置する場合よりもトータルコストが大きくなる。他の方法としては、サブメインパイプの入口に混入器を取り付けるやり方があり、畑作物で一般的である。最も便利

で、多くの場合に最も安価な方法は、中央制御である。この方法は省力的であり、自動化に適している（巻末写真 5.13.）。

コントロールと自動化

灌水システムへの肥料の混入は、定量的あるいは定率的に行われる。定量的混入では、灌水時に混入器、ポンプ、肥料タンク等で、一定量の肥料を灌水システムに混入する。混入は自動、または手動で開始され制御される。定率的混入では、あらかじめ決められた原水と肥料溶液の比率に基づいて混入が行われる。定率混入は、養液栽培で一般的な方法である。肥料は普通、注入ポンプがパルスパターンで作動して注入される。流量計からの信号が、パルスコンバーターでパルス信号に変換されポンプを制御する。肥料流量計は、小型の流量計と磁石一体断続器を組合せたものである。肥料の定率混入は、砂質土壌や養液栽培では必須の技術である。

混入のタイミング

ファーターゲーションは、灌水サイクルの一部の期間のみ行うことがある。この場合、肥料の混入は最初と最後の灌水時には行わない。この方法ではファーターゲーション開始時に適切な水圧が確保でき、また、最後に灌水システムから肥料成分を洗い流すことができる。定量・定率どちらの混入方式にも適用できる。

自動コントロール

自動コントロールは、人手の介入なしに、同じシステムで様々な設定のファーターゲーションを可能にする。自動コントロール・ハードウェアの主な構成要素は、以下のとおりである。

(i) ソレノイド

自動三方弁が、灌水コントローラーやフィールドユニットから送られてくる電気パルス信号を機械的な動きに変える。この動きが水圧弁を動かし、あるいは水圧信号を伝達する。

(ii) コントローラー

コントローラーユニットが、ファーターティゲーションプロセスを調整し制御する。比例混入システムでは、流量計から出されるパルス信号に対してあらかじめ決められた割合で少量ずつ肥料溶液が混入される。コントローラーは単体で使うこともできるが、中央コンピューターに接続することもできる。

(iii) 常時閉水圧弁

耐腐食性のバルブが、肥料溶液の灌水システムへの流入をコントロールする。このバルブは通常閉じているタイプで、水圧制御弁の水圧信号が損傷を受けたときには、肥料溶液の混入が直ちに停止するようになっている。

腐食による損傷の回避

ほとんどの肥料溶液には腐食性があり、金属部分に深刻な損傷を与える可能性がある。肥料溶液に接触するパーツ類は、耐腐食性の材質で作られていなければならない。さらに、肥料注入装置および灌水システムは、肥料を混入した後は完全に洗浄されるべきである。

逆流防止機構

上水道ネットワークが灌水システムに接続される場合、肥料を含む灌水が上水道に逆流しないよう、厳格な逆流予防措置を取る必要がある。逆流は、水の供給が失敗したときに起こる。逆流を防止するためには、逆流の2つの基本的なタイプ: 逆サイフォンと背圧について知る必要がある。

逆サイフォンは、給水パイプの口径が小さいために大きな水圧勾配ができて、給水ライン側が低い水圧になった場合や、給水パイプの破損やポンプや電源の故障で給水が中断した場合に起こる。

背圧は、灌水システムの水圧が上水道の水圧よりも高くなったときに起こる。これは灌水にブースターポンプが使われる場合や、灌水区が上水道の供給タンクよりも高い位置にある場合に起こる。

ファーターティゲーション養液が、物理的に分離されている飲用水供給システムでは、逆流は避けられる。逆流防止弁には、逆サイフォンだけを防ぐものと、逆サイフォンと背圧の両方を阻止できるものがある。上水道の安全

のためには、多くの場合に二重逆止弁が必要である。その他の場合には、減圧型逆流防止弁で十分である。

大気圧バキュームブレーカーは、下流側に最も近いバルブの先に取り付けられ、減圧時に外の空気を下流側に取り込む。加圧バキュームブレーカーには、内部でスプリングによって押さえられた空気取り込みバルブがある。このバルブは、外部電源を用いるファティーゲーションシステムには向いていない。バキュームブレーカーは、逆サイフォンに対してだけ効果があり、背圧を抑えるために使うことはできない。

二重逆止弁は、スプリングまたはウエイトで負荷がかけられた2つの逆止弁が直列にならんだもので、完全に閉じられる2つのバルブの間に1つのユニットとして取り付けられる。この装置は背圧や逆サイフォンによって引き起こされる逆流に対して抑止効果があり、液肥混入システムの手前に取り付けられる。

減圧逆流防止装置は、減圧部によって分離された2つの逆止弁から成る。減圧部の水圧は上流側より低く、下流側より高くなっている。下流側と上流側の水圧が近づくと両方のバルブが閉じ、逆流が阻止される。

6. 養分要求、施肥量およびタイミング

ファーティゲーションシステムは、作物の要求量の変化に合わせて養分供給量を変えることができる。しかしそのためには、作物の生育ステージごとの養分吸収について知っていなければならない。各生育ステージの養分吸収量は、作物の特性 / 目標収量 / 収穫物 / その他の植物体の養分含有量 / 温度 / 湿度 / 日射量などの環境条件によって変わってくる。土耕栽培作物では、施肥量を計算するとき、土壌に残っている養分も考慮に入れなければならない。また作物の推奨施肥量は、実際にその作物が生育する条件に、できるだけ近い条件で調べられたものでなければならない。上記の観点からみると、作物の養分吸収量はその品種によっても異なってくるはずであるが、通常は一般的な推奨施肥量しか知られていない。それでも生産者は、できるだけ精度の高い知識に基づいて最適な施肥量を決定し、植物体分析、灌水・排水・土壌分析によってそれを補正し、ファーティゲーションを実践的な栽培技術にしている。

各種の作物について、その養分吸収と葉中の栄養レベルが調べられ、推奨施肥量が公表されている。以下に示す推奨施肥量は、主にイスラエル農務省の普及サービスによるものである。

6.1. トマト

Bar Yosef (1995) は、砂質土壌の温室で栽培されたトマトの収穫量が 195 t/ha のときの養分吸収量を調べた。その結果、各養分の吸収量は N 450, P 65, K 710 kg/ha であった。吸収量は定植後に増加し、40 日から 80 日にかけて最初のピークを形成し、その後 150 日から 180 日にかけて次のピークがあった (図 6.1)。

イスラエル農務省の普及サービスでは、トマトを砂壤土で栽培した場合に 100 t/ha の収穫量を得るための推奨施肥量を公表している。その値は N 280, P 40, K415 kg/ha で、図 6.2. に時期別に示されている。ただし、これらの数値は目安であり必用に応じて修正が必要である。

養分吸収量は、生育条件などの様々な要因の関数である。これを説明す

図 6.1. 温室栽培トマトの養分吸収

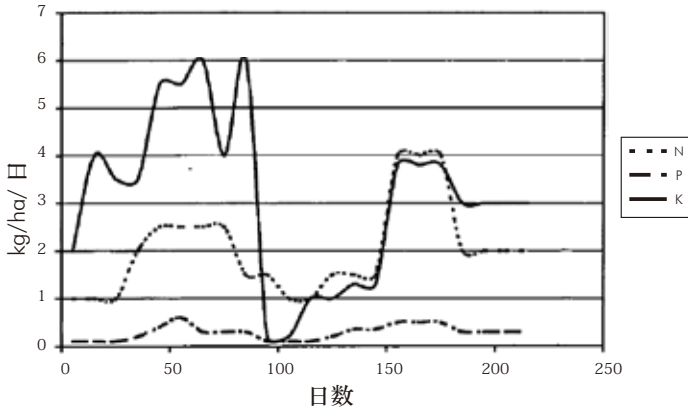
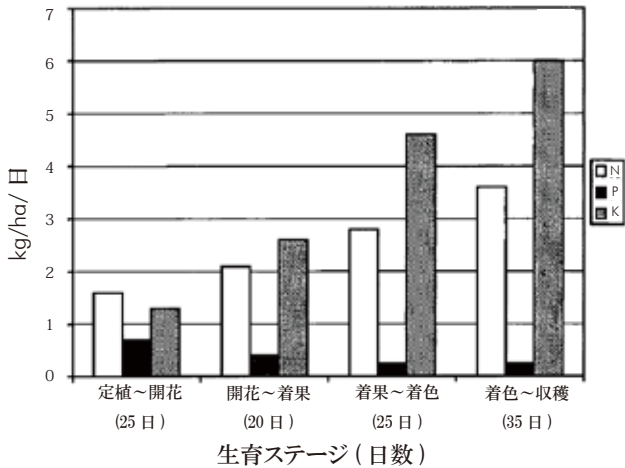
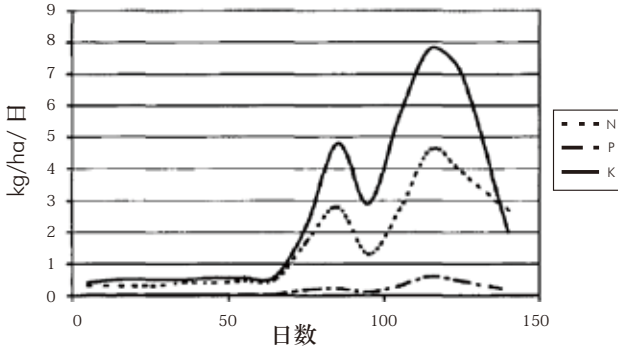


図 6.2. トマトの生育ステージ別推奨施肥量



るために、砂質土壌で露地栽培されトマトの例を図 6.3. に示した。この例では、127 t/ha の収穫量を得るための養分吸収量は、N 250, P 24, K 370 kg/ha であった (Bar Yosef, 1995)。図 6.3. は N, P, K の毎日の吸収量を示しているが、これは 図 6.1. の温室栽培のグラフと全く異なっている。生育条件による違いに関して Wolf ら (1985) は、収穫量が 67 t/ha の場

図 6.3. 露地栽培トマトの養分吸収



合のトマトの養分吸収量を N 201, P 23.5, K 312, Mg 31, S 46 kg/ha としており、一方 Achilea は収穫量が 90 t/ha の場合の吸収量を N 350, P 35, K 415, Ca 100, Mg 18 kg/ha としている。収穫量 1 t あたりで見ると、マグネシウム以外はその養分吸収量は実質上それほどの違いはない。

葉の養分分析は、適切な施肥量を決定するための良い指標である。収穫量と関係する葉の標準養分濃度は、実験的に求める必要がある。例えば Westerman(1990) は、トマトの葉の標準養分濃度を調べている (表 6.1)。値がこの表の値より低いときには、特定の養分が欠乏しているので施肥量を増やす必要があり、高いときには養分が過剰なので施肥量を減らす必要がある。

6.2. ピーマン

表 6.1. 多段栽培トマトの最も若い完全に成長した葉における標準養分濃度 (第一段花房成熟期)

乾燥重量 %					
N	P	K	Ca	Mg	
2.5-4.0	0.3-0.6	3.0-4.0	0.5-2.0	0.6-1.0	
乾燥重量 ppm					
Cu	Zn	Mn	Fe	B	Mo
5-10	30-40	50-100	100-300	30-100	0.4

ファーターゲーションで栽培されている野菜の、もう1つの例はピーマンである。砂質土壌での栽培では、収穫量が75 t/haのときの養分吸収量はN 205, P 31, K 370 kg/haであった (Bar Yosef, 1995)。養分吸収量は生育にともなって変化し、播種後70~110日にピークがある (図 6.4.)。ピーマンの生育ステージ別推奨施肥量を、図 6.5. に示した。ハイファケミカル社が複数のデータから引用している資料によると、中度砂質土壌で栽培されたピーマンの場合、収穫量が50~70 t/haのときの養分吸収量は N 300~400, P 87~114, K 290~415 kg/ha である。ピーマンの葉の標準養分濃度を、表 6.2. に示した。

図 6.4. ピーマンの養分吸収

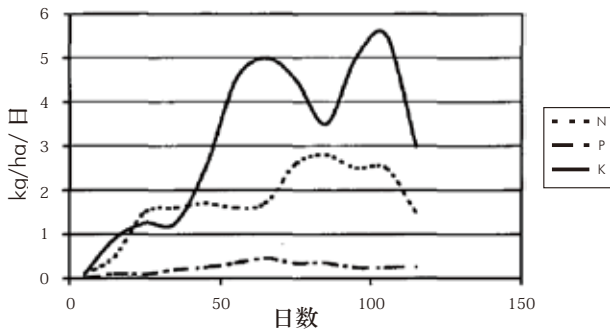
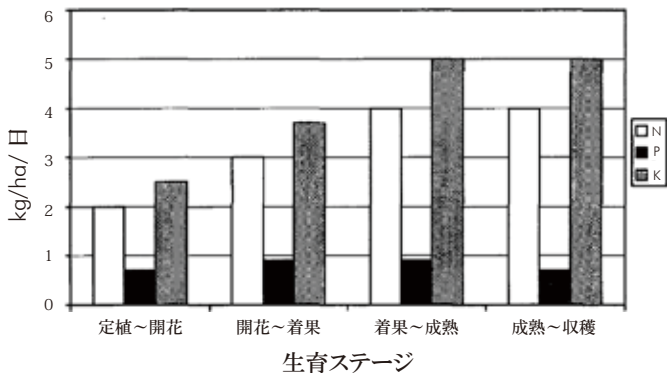


図 6.5. ピーマンの生育ステージ別推奨施肥量



6.3. バナナ

表 6.2. ピーマン（生育中期）の最も若い完全に成長した葉における標準養分濃度

N	P	乾燥重量 %		Mg	
		K	Ca		
3.0-4.5	0.3-0.7	4.0-5.4	0.4-0.6	1.0-1.7	
乾燥重量 ppm					
Cu	Zn	Mn	Fe	B	Mo
10-20	40-50	80-120	200-300	40-100	0.4

Lahav と Turner(1989) は、収穫量が 50 t/ha のときのバナナの各養分の平均吸収量と、各組織における含有量を計算している（図 6.6., 図 6.7.）。砂壤土で栽培されたバナナの収穫量が、40~50 t/ha のときの推奨年間施肥量を表 6.3. に示した。

この推奨値は、養分吸収量データと一致している。値の幅は、目標収穫量の違いと土壌からの養分供給や土壌への養分固定によるものである。

図 6.6. 果実収量 50t/ha のときにバナナが吸収する養分

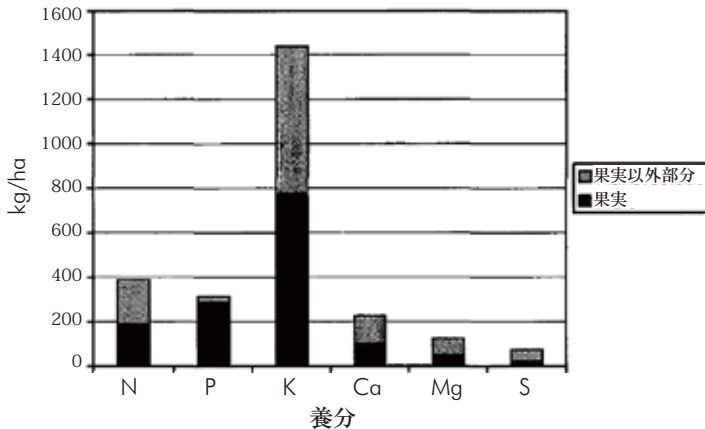


図 6.7. 果実収量 50t/ha のときにバナナが吸収する微量元素

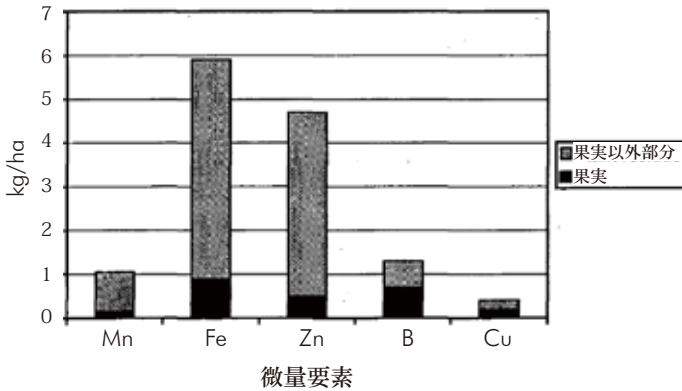


表 6.3. バナナの推奨施肥量 (kg/ha)

N	P	K	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
240-400	30-45	660-830	48-72	2-4	4-7	0.3-0.6	0.1-0.2	0.3-0.9

6.4. トウモロコシ、スイートコーン

収穫量が 9.1 t/ha のときのトウモロコシの地上部の平均養分含量が、Corrazina ら (1991) によって調べられている (図 6.8., 図 6.9.)。

表 6.4. は、スイートコーンの標準養分含量 (Westman 1990) である。

Wolf ら (1985) によると、収穫量 10.1 t/ha のときのスイートコーンの平均養分吸収量は、N 157, P 23, K 126, Mg 13 kg/ha であった。Bar Yosef (1995) は、壤土で栽培されたスイートコーンの収穫量が 28 t/ha のときの吸収量はそれよりも大きく、N 240, P 40, K 320 kg/ha であると報告している。図 6.10. は時間経過に伴う養分吸収量の変化で、図 6.11. は推奨施肥量である。

図 6.8. トウモロコシの平均養分含量（穀粒収穫量 9.1 t/ha のとき）

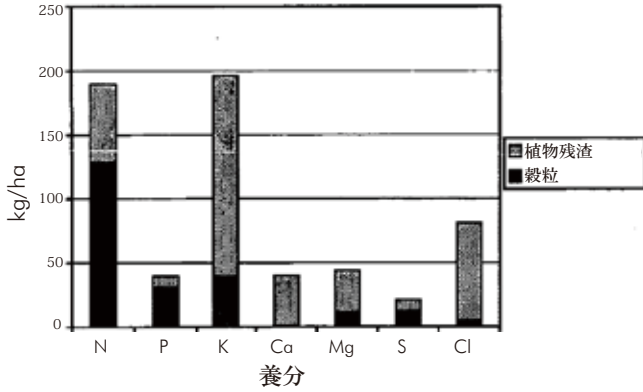


図 6.9. トウモロコシの平均微量元素含量（穀粒収穫量 9.1t/ha のとき）

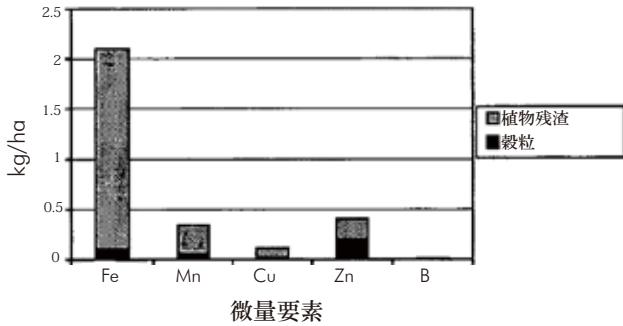


表 6.4. スイートコーンの包葉の養分含量（絹糸抽出後）

N	P	乾燥重量 %		Mg	
2.8-3.5	0.18-0.30	K	Ca	0.4-0.8	
		1.8-2.8	1.6-2.5		
		乾燥重量 ppm			
Cu	Zn	Mn	Fe	B	Mo
8-12	20-40	100-140	60-160	40-70	0.2

図 6.10. スイートコーンの日別養分吸収量

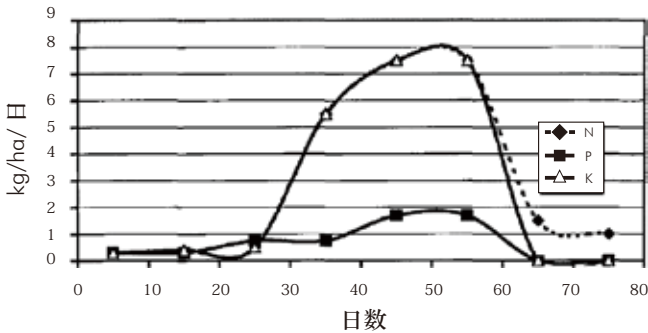
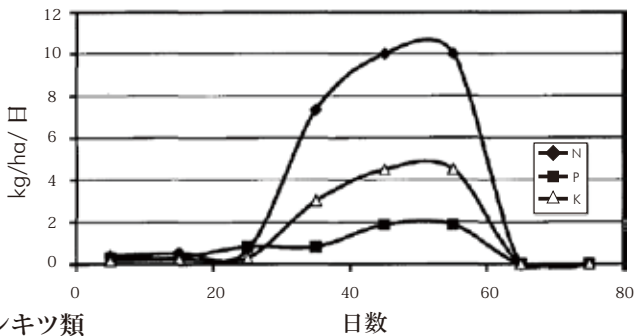


図 6.11. スイートコーンの日別推奨施肥量



6.5. カンキツ類

カンキツ類の畑から吸収される養分のほとんどは、果実に回る。この事実に基づいて、植物が吸収できる土壌中の養分と、施用した肥料と土壌の反応も考慮した上で施肥設計が行われる。収穫量が 50 t/ha のときのカンキツ類の養分吸収量が Erner ら (1999) によって、また、収穫量が 60 t/ha のときのオレンジの養分吸収量が Wolf ら (1985) によって算出されている (表 6.5.)。

この表の数値には幅があるので、より正確な値が必要である。ハイファケミカルズ社では、数種のカンキツ類の果実による養分吸収量の平均値を表にしている (表 6.6.)。表 6.6. のデータは現在の一般的な基準ではあるが、まだその値に幅があり、異なる土壌や気象条件でのより正確な値が必要とされている。

カンキツ類の葉の標準養分含量 (4-7 月齢、春作の葉、非着果期) を、

表 6.5. カンキツ類とオレンジの養分吸収量 (kg/ha)

	カンキツ類	オレンジ
	収穫量 50t/ha の場合	収穫量 60t/ha の場合
N	59-95	300
P	9-14	27
K	74-130	307
Ca	17-52	85
Mg	8-10	43
S		31

表 6.6. 果実収量が 50t/ha の時のカンキツ類の養分吸収量 (kg/ha)

品種	N	P	K	Ca	Mg
オレンジ	89	11	132	36	11
レモン	82	8	86	24	6
グレープフルーツ	52	6	100	20	5

Erner ら (1999) のデータから引用した (表 6.7)。葉の各成分について、表 6.7 の値よりも低いときには養分が不足しているその成分の施肥量を増やす必要があり、逆に高い場合にはその成分の施用量を減らす必要がある。

ハイファケミカルズ社やバーゼルの IPI(International Potash Institute) か

表 6.7. カンキツ類の葉における標準養分濃度

乾燥重量 %					
N	P	K	Ca	Mg	
2.2-3.0	0.1-0.3	0.7-2.4	1.5-7.0	0.2-0.8	
乾燥重量 ppm					
Cu	Zn	Mn	Fe	B	Mo
4-20	18-200	18-1000	35-200	20-260	0.05-50

ら出版されている資料で、他の様々な作物におけるファーターティゲーションの標準的な施肥基準を知ることができる。

7. モニタリングと制御

ファーティゲーションは、精密な栽培技術である。植物が必要とする水と養分を、環境を汚染することなく無駄なく与えてその力を十分に発揮させるためには、植物の養分吸収についての知識と徹底したモニタリングが必要である。

7.1. 水分要求量のモニタリング

ファーティゲーションシステムのような精密な栽培管理システムでは、収穫量を低下させるストレスを避けるため、植物に十分な水を与える必要がある。また同時に、水を与えずに根域よりも下方に塩類を溶脱させるようなことも避けなければならない。作物の水分要求量についての基本的なデータは、標準的な方法で測定された気象データや土壌や培地の水分ポテンシャルから得られるが、これらのデータは、できるだけ実際の栽培環境に近い条件で得られたものでなければならない。葉の色や膨圧のような植物の外観から灌水時期を判断する方法は、最も簡単ではあるが問題が多い。そのような兆候が現れたときには明らかに手遅れで、すでに植物にストレスがかかっている。

作物の水分要求量を推定し、灌水量を計算するための方法がいくつかある。広く使われている方法は、土壌表面からの蒸発と、植物からの蒸散による水分の損失を合わせた蒸発散量 (ET) に基づくものである (Burman, 1980)。ある期間の最大蒸発散量 (ETp) は、水を張ったフタのない浅い容器の水位の低下によって測定され、mm/日のような単位で表される。標準容器は、US クラス A パンで、その大きさは直径 121 cm、深さ 25.5 cm (巻末写真 7.1.) である。この容器からの蒸発速度は、温度や湿度、日射、風のような周囲の気象条件によって決まる。どの生育時期においても実際の作物からの蒸発散量 (ET) は、作物によって土壌表面が覆われている割合・栽植密度および葉の大きさが異なるため、最大蒸発散量 (ETp) とは異なっている。また、灌水方法も蒸発散量に影響する。点滴灌水では土壌や培地の表面の一部のみが濡れるが、スプリンクラー灌漑では圃場の全面

が濡れる。このような、水の分布範囲が蒸発率に影響を与える。蒸発散量 (ET) は、それぞれの作物、品種、生育時期、栽培方法によって異なる水分吸収量をあらかじめ実験で求め、そこから算出しておく必要がある。

ある作物の特定の生育ステージにおける ET と ET_p との比は作物係数 (K_c) と呼ばれ、 $K_c=ET/ET_p$ として定義される。一例として、イスラエル農業普及サービス (Reshef, 2000) が推奨する、露地栽培トマトの作物係数は次のとおりである。

生育開始期は、 $K_c=0.4$ 。そして植物の生育とともに増加し、着果までの栄養成長期には $K_c=0.5\sim 0.6$ となる。最初の果実の肥大開始から着色開始までは $K_c=0.7\sim 0.8$ で、その後、収穫期には K_c は 0.9 に達する。灌水時に与える水の量は、測定された ET_p に K_c を掛けて求める。

作物の水分要求量は、土壤水分を直接測定することによっても知ることができる (Cambell and Mulla, 1990)。重量測定による方法は簡単で直接的であるが、時間と労力がかかる。根域から採土ドリルで土壤サンプルを採り、重量を計った後 105℃で乾燥させて再び重量を計る。その差が、土壤水分量を表す。これは重量パーセント (水の重さ / 土の重さ) で表されるが、土壤が乱されておらず容量のわかっているサンプルが得られれば、容積パーセント (水の体積 / 土の体積) で表すこともできる。必要な灌水量は、前回の灌水の直後に測定した土壤水分値と現在の値の差から計算される。水分要求量を得るための良い方法は、「圃場容水量」を調べその値と現在の水分量の差を計算することである。圃場容水量は、重量測定によってもとめられる水分量で、あらかじめ決められた深さ以下に水が排水された後に、土壤が保持している水分量である。

土壤水分状態を測定するための、より進んだ方法もある。

(i) テンシオメーター

土壤水分張力を測定する、テンシオメーターが広く使われている (巻末写真 7.2.)。テンシオメーターで必要灌水量を決定する前に、水分張力と水分量の関係を調べておく必要がある。この関係は土壤によって異なり、土壤粒子のサイズとその構成比によって変わってくる。その値は多孔質セラ

ミックプレートを通して、様々な圧力で吸引した後に残った土壤水分を測定することによって知ることができる。

テンシオメーターは水を満たして密封した管で、土に差し込む方の先端に多孔質セラミックのカップが付いていて、反対側に圧力計が付いている。水は、土の水分張力とテンシオメーターの圧力が平衡に達するまで、多孔質カップを通して移動する。圧力計の値が土壤水分張力を表し、この値から必要な灌水量が計算できる。ただし、テンシオメーターは、土壤水分張力が一定の範囲にある場合にしか使えない。0.8 bar 付近では、空気が多孔質カップに入って圧力測定を妨害する。テンシオメーターは、畑の一地点の土壤水分張力だけを測定するので、灌水範囲の数カ所で土の深さも何点かをとって測定する必要がある。

(ii) 中性子プローブ

これは放射線を使う方法の一つで、土の中に置いた高エネルギーの中性子源から出る中性子の散乱を利用する。中性子源から出る高速中性子が、土の中の水素原子と衝突してできる低速中性子を測定する。土壤中のほとんどの水素原子は水分子に含まれているので、低速中性子を測定することによって土壤水分量がわかる。計測器を校正する際、中性子が拡散する土壤の体積によってその中に存在する水の量が変わるので、測定する土壤の体積も考慮に入れる必要がある。比較的乾燥した土では、湿った土よりも中性子の散乱が広がる。測定されるのは球形の範囲で、その直径は 2~3 センチから 20~30 センチの間である。

(iii) タイムドメインリフレクトメトリー (TDR)

最近 10 年間に、TDR が土壤水分の測定に用いられるようになった。この方法は、水分子の電気的性質に基づいている。水は比較的高い誘電性を持つ 2 極分子なので、電気エネルギーを吸収する能力を持っている。センサーは数十センチほどの 2 本の平行な金属電極で、土壤に差し込んで使う。高周波エネルギーパルス発信機をセンサーにつなぎ、オシロスコープが土壤の各深さにおける電圧の振幅と電極間の伝搬速度を記録する。誘電反応のデータから、土壤の体積水分率を知ることができる。

また、土壤水分は、幹の太さや果実の肥大や萎縮といった植物指標によっ

ても、間接的に、おおまかに知ることができる。

7.2. 植物体分析による養分要求量のモニタリング

植物の養分要求量とは、ある作物の特定の品種について、実際の栽培環境に近い条件で実験的に求めた養分吸収量である。これは、肥料成分が土壤と反応しないか、また培地中の水分張力が弱いため与えた肥料を植物がすべて吸収する理想的な環境の下では、意味のある値かもしれない。しかし実際には、水は土壤の吸引力によって培地に保持され、その吸引力は肥料による浸透圧によってさらに高められる。植物は根の細胞膜の内外に浸透圧勾配を作ることによって、水と共に養分を吸収している。土壤や培地に含まれる水の養分濃度は、養分の沈殿や土壤への吸着および遊離によって変化する。

作物による養分要求量と吸収速度は施肥計画を決定する際の重要なパラメーターであるが、最適な施肥量を定めるには他のデータも必要で、このために様々な方法が用いられている。

植物の外見から、要素欠乏の状態を診断することができる。しかし、ある要素の欠乏が引き起こす葉の色の変化や、葉焼けおよび植物器官の変形と似た症状は、他の要因によっても起こることがある。従って、正しい診断のためには経験と熟練が必要である。この方法の欠点は、症状が出たときにはもはや手遅れで、その時点で不足している養分を補給しても、最大収穫量を得ることができない場合が多いことである。

植物体の養分濃度は、植物の栄養状態の良い指標だと考えられている。何種類かの植物や養分の、葉中の過不足については前の章で説明した。しかし、葉の分析データから導かれた推奨施肥量が常に正しいとは限らない。植物組織の養分濃度は、その組織の生理的ステージによって変わり、また温度や湿度および土壤水分も、植物の生長速度と同様、蒸散や養分の移動に影響を与えることによって組織の養分濃度に影響を与える。従って、植物組織のサンプリングに当たっては、厳密な標準化が必要である。普通サンプリングは、活発に生育していて水分ストレスの兆候の見られない植物で行う。例えば、イスラエル農業普及サービスではカンキツ類の場合、生

長中の成木の北側にある果実の近くの葉を採取するよう推奨している。また、バナナでは葉身と葉柄を別々に採取し、上から3枚目の葉と7枚目の葉の葉柄を分析に使用する。

その濃度以下では収穫量が減少するという意味で、植物組織の限界養分濃度という概念がよく使われる。しかし、ある成分の限界濃度は他の成分の濃度に影響を受ける。複数の成分が不足しているとき、一つの成分の濃度を上げると他の限界濃度が変化する。この問題を解決するため、Sumner(1979)によってDRIS(Diagnosis and Recommendation Integrated System 診断処方統合システム)が開発された。この方法では、主要成分(NPK)の推奨施肥量はデータと計算から導かれる養分充足度指数に基づいて計算される。例えば、植物組織の養分濃度を測定し、成分間の比率を計算する。次に、この比率を同じ条件で栽培された同じ品種の植物の、高収量が得られた場合の比率と比較して養分充足度指数を計算する。この方法は、必要な施肥量を決定する上で、限界濃度よりも良い診断ツールである。しかし、いくつかの制約もある。測定は生育中の植物で行われるので、栽培中の植物における要素欠乏を修正し、その後の欠乏を回避するためにのみ有効である。また指数の計算には高収量時の作物の養分比率のデータが必要であるが、それが常に入手できるとは限らない。

7.3. 土壌分析

養液栽培では普通、培地からの成分の遊離や吸着がないので、培地の養分分析によって植物の栄養要求を知ることはない。養分は、培地内の水と共に植物に取りこまれる。長期間、培地を使っていると植物病原菌が好ましくないレベルにまで増加する可能性がある。そのような場合、病気の発生を防ぐために微生物検査と殺菌が薦められる。

土耕栽培では、施肥量を決定するためには土壌分析が必須である。土壌分析は、その作物が生育するために必要な土壌中の養分の過不足を知るために行なわれる。養分は土壌中に土の成分として、あるいは前作で施用した肥料や堆肥の残りとして存在する。しかし、植物が利用できるのは、土壌中の養分のほんの一部だけである。窒素の多くは有機物に結合しており、

その一部が微生物による分解によってアンモニウム (NH_4) や硝酸 (NO_3) となり、植物が利用できるようになる。土壌中のリンで植物が吸収できるのは、土壌中に溶けているそのごく一部だけであるが、土壌中のリンが遊離して土壌溶液のリン濃度が維持されることがよく起こる。カリウムについても同様で、その一部のみが交換性カリウムであったり、あるいは土壌溶液中に存在し、植物によって吸収されると土に吸着されていたカリウムが土壌溶液中に遊離して補給される。土壌中に存在するすべての養分の量を測定しても、植物が利用できる養分についてはわからない。そこで、植物が吸収できる養分を抽出する技術が開発され、植物が利用できる養分の信頼できる値を提供するため、土壌分析室で広く使われている。

抽出法は、養分や土壌の性質によって異なる。弱い酸やアルカリ性の抽出液を使う方法や、根による養分吸着をシミュレートするためにイオン交換樹脂を使う方法がある。陽イオンの例として、利用可能なカリウムの量はイオン交換樹脂への吸着分画からの抽出法がよく使われる。分析データを診断ツールとして使うには、養分濃度と生育状態の関係を栽培試験で良く調べておかなければならない。

必要な施肥量は、作物の要求量の合計と土壌中の養分の利用し易さから推測される。一方、ファーティゲーションで与えられた水溶性養分、特にリン酸は土壌と反応して利用しにくくなることがある。土耕栽培作物の推奨施肥量を定める際には、このことも考慮しなければならない。そのため例えばリンの施肥量は、吸収量よりも多くなることが多い。土壌や培地の分析には、さらに2つのパラメーターの測定が必要である。土壌や培地の水抽出液の電気伝導度 (EC) は、可溶性塩分濃度の指標である。灌漑用水や肥料成分の中の塩類が、植物に吸収されずに残り土壌に蓄積することがある。そのような過剰な塩類は根の周りの浸透圧を高め、水と養分の吸収を阻害し、最終的に収量を低下させる。また、過剰なイオンが植物に対して毒性を持ったり、土壌構造に良くない影響を与えることもある。

土や培地の pH は、その酸性度やアルカリ度を示す。多くの植物は、pH が中性付近で良く生育する。肥料の中には、土壌や培地を酸性化するものがある。例えばアンモニウム化合物は、酸化されて NO_3 になるときに酸

を生成する。酸性化は粒子の細かい土壌よりも、粒子の粗い砂質土壌のような緩衝力の弱い培地でより強く進む。また灌漑用水が過剰の Na を含むときには、土壌がアルカリ化する。

イスラエルの農業普及サービスでは、標準土壌サンプリング法を公表している。

土壌サンプルは、土壌採取器で採取する。一般に、その畑を代表する土壌サンプルは、地表 0~20 cm と 20~40 cm の層から採取する。深根性の作物の場合には、0~30 cm と 30~60 cm の層から採取する。塩分に冒されている土壌では、60 cm 以下の層から採取することが推奨されている。また、圃場の均一性も調べなければならない。表面の土の色の違い、傾斜、栽培暦等によって、圃場を小区画に分けてサンプリングする。均一な圃場やその小区画および土層から、30~40 のサンプルを採取する。これらのサンプルを良く混ぜ、約 1 kg ずつに分けて、土壌分析室へ送る。栽培中にサンプリングする場合には、灌水の前に採取を行う。表層 5 cm の土を取り除き、深さ 15~20 cm のサンプルを採取するか、あるいは上に述べた方法で土壌を採取する。

7.4. 水質のモニタリング

その水がファーティゲーションに適しているかどうかを調べるため、まず初めに水の化学分析をする必要がある。水の pH はほぼ中性でなければならない。その EC は許容範囲以下でなければならない。許容範囲には十分な定義がないが、ほぼ 1 dS/m 以下で、その目的はファーティゲーション養液を弱酸性で低 EC にすることである。これらのパラメーターは、水質に適した肥料の組み合わせを選ぶときにも考慮しなければならない。EC が比較的高い水では、Na と Ca+Mg の比が土壌のアルカリ化を防ぐために重要である。重炭酸イオン濃度は、リン酸肥料を選ぶときに重要である。重炭酸イオン濃度の高い水では、ほとんどのカルシウムがオルソリン酸と結合して沈殿が起こりやすくなる。このような場合にはポリリン酸肥料が適している。

ファーティゲーション養液の水質モニタリングは、養液栽培では植物栄養

調節のための主要な手段である。イスラエル農業普及サービスでは、灌漑用水と排水の水量と水質のモニタリングに関する詳細な推奨方法を公表している。1日の灌水回数は、作物や季節によって異なる。灌水頻度は、排水量が灌水量の20~30%になるように調節される。

ドリッパーから出るフアーティゲーション養液と、培地から出る排液のpHを頻繁にチェックしなければならない。フアーティゲーション養液の最適pHは、5.5~6.0である。pHが5.5以下になる場合は、養液の組成を変更する必要がある。

養液の予想ECは、肥料溶液を加える前の灌漑用水のECを測定し、肥料溶液の計算上のECを加えることによって計算される。ドリッパーから採取して測定された養液のECは、その計算値の10%以内に収まっていないといけない。誤差がこれよりも大きい場合は、肥料注入装置や肥料希釈プロセス、あるいは肥料溶液の組成をチェックする必要がある。フアーティゲーション養液のECと排液のECを比較することで、培地の塩類集積の程度を知ることができる。これらのECが近いときは正常であり、排液のECが与えられる養液より20%以上高いときには塩類集積の可能性がある。排液中に塩化物が多いときは、この高いECが原水の塩分によるものであることを示している。この場合、培地から塩分を洗い流すために灌水量を多くしなければならない。

フアーティゲーション養液と排液の養分濃度を比較すると、養分吸収の程度を知ることができる。排液中に過剰な養分が含まれる場合には養分添加量を減らした方が良く、フアーティゲーション養液よりも排液のECが低い場合には養分吸収が活発であり養分添加量を増やすべきであることがわかる。

排液中の亜硝酸塩濃度は培地の通気性の程度を示し、亜硝酸塩の存在は培地が嫌氣的になっていることを示している。良く通気された正常な培地では、窒素化合物は完全に酸化されてNO₃となり亜硝酸塩は見つからない。灌水の間隔を長くすると、ほとんどの場合、嫌氣的な条件が解消される。フアーティゲーションシステムをコントロールするためには、養液および排液のpH/EC/ 亜硝酸塩 / アンモニウム / 塩化物 / カルシウム / マグネシ

7. モニタリングと制御

ウム / カリウム / ナトリウム / 重炭酸塩 / 微量元素を頻繁に分析することが必要である。

8. 参考文献

- Aamer, K., Lowengart, A. and Omar, S. (1997): Response of seedless watermelon to different nitrogen application through fertigation. A summary of 1996/7 season in vegetables. The Extension Service and the Agricultural Research Organization, Ministry of Agriculture. pp. 101-112(Hebrew).
- Achilea, O.: Multi-K for fertigation in field-grown crops, top yields in vegetables and row crops. Haifa Chemicals Ltd, p.24.
- Alam, S.M., Zafar-Iqbal and Latif, A. (1999): Fertigation technology for improved phosphorus use efficiency in wheat. Pakistan J. Sci. Indust. Res. 42:380-383.
- Alcantar, G.G., Villarreal, R.M., Aguilar, S.A. and Papadopoulos, A.P.(1999): Tomato growth (*Lycopersicon esculentum* Mill), and nutrient utilization in response to varying fertigation programs. Intern Symp. On growing media and hydroponics, Windsor, Ontario, Canada. Vol. 1 Acta Horticulturae No.481:385-391.
- Alva, A.K. and Mozaffari, M.(1995): Nitrate leaching in a deep sandy soil as influenced by dry broadcast or fertigation of nitrogen for citrus production. Dahlia Greidinger Intern. Symp. on Fertigation. Proc. pp. 67-78.
- Alva, A.K., Paramasivam, S. and Graham, W.D.(1998): Impact of nitrogen management practices on nutritional status and yield of Valencia orange trees and groundwater nitrate. J. Environ. Qual. 27: 904-910.
- Avidan, A., Yoles, D. and Sneh, M. (1996): Fertilizer characteristics. Ministry of Agriculture, Extension Service, Field Service Department, p.107 (Hebrew).
- Balwinder-Singh, Lakhwinder-Singh, Singh-B and Singh-L (1996): Studies on urea hydrolysis in Typic Ustochrepts of Punjab. J. Indian Soc. Soil Sci.44:638-643.

- Bar-Yosef, B. (1988): Control of tomato fruit yield and quality through fertigation. *Optimal Yield Management* (Ed. D. Rymon). Avebury. pp. 175-184.
- Bar-Yoser, B. and Imas, P.(Eds. P. Adams, A.P. Hidding, J.A. Kipp, C. Sonneveld and C. Kreij) (1995): Phosphorus fertigation and growth substrate effects on dry matter production and nutrient content in greenhouse tomatoes. *Intern. Symp. On growing media and plant nutrition in horticulture*, Naaldwijk, Netherlands. *Acta-Horticulturae* No.401. pp. 337-346.
- Bar-Yosef, B. (1995): Fertigated vegetables in arid and semi-arid zones. In: Scaife, A. and Bar-Yosef, B.: *Nutrient and fertilizer management in field grown vegetables*. IPI-Bull. NO.13, pp. 54-104.
- Basso, L.H. and Reichardt, K. (1995): Dry matter and nitrogen accumulation in maize grown during winter given nitrogen fertilizer by soil application and fertigation. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 30: 1316-1373.
- Bernardoni, C., Cerioni, G. Fabbri, A. and Paoletti, M. (1990): Fertigation experiments in horticulture. *Culture-Protette*. 19: 109-112.
- Bharambe, P.R., Narwade, S.K., Oza, S.R., Vaishnav, V.G., Shelke, D.K. and Jadhav, G.S. (1997): Nitrogen management in cotton through drip irrigation. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 45: 705-709.
- Boman, B.J. (1995): Effects of fertigation and potash source on grapefruit size and yield. *Dahlia Greidinger Intern. Symp. on Fertigation*, Technion, Israel. pp. 55-66.
- Boman, B.J. (1996): Fertigation versus conventional fertilization on Flatwoods grapefruit. *Fert.Res.* 44: 123-128.
- Bravdo, B., Heffner, Y., Naor, A., Cohen, S. and Zur, D. (1988): The influence of NPK fertigation in drip irrigated vineyard on yield and quality of 'Sauvignon Blanc' wine grapes. *Annual Reports for 1987*.

- Hebrew University of Jarusalem, The Faculty of Agriculture, pp. 19-33 (Hebrew).
- Bravdo, B., Salomon, E., Erner, Y., Saada, D., Shufman, E. and Oren, Y. (1992): Effect of drip and microsprinkler fertigation on citrus yield and quality. *Proc.Intern. Soc.Citriculture*, Vol.2: 646-650.
- Brito, J.M.C., Ferreira, D., Guerrero, C.A.C., Machado, A.V., Beltrao, J., Anac, D. (ed) and Martin Prevel, P. (1999): Soil pollution by nitrates using sewage sludge and mineral fertilizers. In: *Improved crop quality by nutrient management*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands, pp. 223-227.
- Burman, R.D., Nixon, P.R., Wright, J.L. and Pruitt, W.O.(1980): Water requirements. In: *Design and operation of farm irrigation systems*. ASAE Monograph 3 (Ed. M.E. Jensen), pp. 189-232.
- Cabrera, M.L., Kissel, D.E. and Bock, B.R. (1991): Urea hydrolysis in soil: effects of urea concentration and soil pH. *Soil Biol.Biochem.*23: 1121-1124.
- Campbell, G.S. and Mulla, D.J. (1990): Measurement of soil water content and potential. In: *Irrigation of agricultural crops*. ASA publ.30(Eds. B.A.Stewart and D.R.Nielsen), pp.127-142.
- Castellanos, J.Z., Lazcano, I., Sosa-Baldibia, A., Badillo, V and Villalobos, S.(1999): Nitrogen fertilization an plant nutrient status monitoring - the basis for high yields and quality of broccoli in potassium-rich Vertisols of central Mexico. *Better Crop Intern.* 13: 25-27.
- Cavazza, D. (1988): *Irrigazione a Goccia*. Edagricole, Bologna, 150p.
- Champion, D. and Bartholomay, R. (1992): Fertigation through surge valves. *Coop Ext. U.S. Drpt. Of Agr.* Colorado State University. Online.
- Corrazina, E., Gething, P.A. and Mazzali, E.(1991): Fertilizing for high yield Maize. *IPI Bull.* No.5, 87p.
- Deolankar, K.P. and Pandit, P.S. (1998): Use of drip and fertigation of liquid fertilizers in chickpea. *J.Maharashtra Agric. Univ.* 23: 307-308.

- Deutschmann, G.V. (1988): History of Hydroponics. Online.
- Dillon, J., Edinger-Marshall, S. and Letey, J. (1999): Farmers adopt new irrigation and fertilizer techniques. *California Agric.* 53: 24-28.
- Deloga, E.K., Link, H. and Blanke, M. (1998): Fruit quality in relation to fertigation of apple trees. Proc. 2nd Workshop pome fruit quality, Bonn-Rottgen, Germany, *Acta Hortic.* No. 466: 109-114.
- Duis, J.H. and Burman, K.A. (1969): Ployphosphates in irrigation systems. *Fert. Sol.* 13(2): 46-48.
- Eizenkot, A., Steinbert, Y., Levy, U., Levy, D., Golan, T. and Yutal, Y.(1998): P and K fertigation in subsurface drip irrigated cotton. Field experiments and research in cotton in 1998. Ministry of Agriculture - Extension Service, Cotton production and marketing board. pp. 120-125(Hebrew).
- Elam, M., Ben Ari, S. and Magen, H.(1995): The dissolution of different types of potassium fertilizers suitable for fertigation. *Dahlia Greidinger Intern. Sym. on fertigation, Technion, Haifa, Israel*, pp. 165-174.
- Erner, Y., Cohen, A. and Magen, H. (1999): Fertilizing for high yield Citrus. *IPI-Bull.* No.4, 59p.
- Finn, C.E., Warmund, M.R., Yarborough, D.E. and Smagula, J.M.(1997): Fertigation vs. surface application of nitrogen during blueberry plant establishment. Proc. 6th Intern. Sym. *Vaccinium culture*, Orono, Maine, USA, *Acta-Hortic.* 446: 397-401.
- Gratten, S.(1999): The history & future of hydroponics. *Irrig. Jour.* July-Aug. Online.
- Griffin, R.A. and Jurinak, J.J.(1973): Estimation of activity coefficients from the electrical conductivity of natural aquatic systems and soil extracts. *Soil Sci.* 116: 26-30.
- Hagin, J. and Lowengart, A. (1996): Fertigation for minimizing environmental pollution by fertilizers. *Fert. Res.* 43:5-7.
- Hagin, J. and Tucker, B.(1982): Fertilization of dryland and irrigated soils.

- Springer Verlag, 188p.
- Harrison, C.B., Graham, W.D., Lamb, S.T. and Alva, A.K. (1999): Impact of alternative citrus management practices of groundwater nitrate in the Central Florida ridge: II. Numerical modeling. *Transact ASAE*. 42:1669-1678.
- Haynes, R.J. (1990): Movement and transformations of fertigated nitrogen below trickle emitters and their effects on pH in the wetted soil volume. *Fert. Res.* 23:105-112.
- Heffner, Y., Bravdo, B., Louanja, S., Cohen, S. and Tabekman, H.(1982): NPK fertigation in vineyard. *HASSADEH*, Vol.62: 828-831(Hebrew).
- Hipps, N.A. (1992): Fertigation of newly planted Queen Cox / M9 apple trees: establishment, early growth and precocity of cropping. *J.Hortic. Soc.* 67:25-32.
- Imas, P., Bar-Yosef, B. and Munuz-Carpena, R. (1998): Response of lettuce plants grown on different substrates to phosphorus fertigation. *Acta Hortic.* 1988, pp.171-178.
- Kafkafi, U. and Bar-Yosef, B. (1980): Trickle irrigation and fertilization of tomatoes in highly calcareous soils. *Agron.J.* 72: 893-897.
- Koeman, R. (1998): Chiefly the large enterprises irrigate, fertigate and cool. *Fruiteelt-Den Haag* 88: 13, pp. 19-21.
- Kuldip-Singh, Aulakh, M.S., Bijay-Singh, Doran, J.W., Singh-K and Singh-B (1996): Effect of soil pH on kinetics of nitrification in semi-arid subtropical soils under upland and flooded conditions. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 44: 378-381.
- Komosa, A., Pacholak, E., Stafecka, A. and Treder, W.(1999a): Changes in nutrient distribution in apple orchard soil as the effect of fertigation and irrigation. I. Ammonium and nitrates. *J. Fruit and Ornamental Plant Res.* 7: 27-40.
- Komosa, A., Pacholak, E., Stafecka, A. and Treder, W.(1999b): Changes in nutrient distribution in apple orchard soil as the effect of fertigation

- and irrigation. II. Phosphorus, potassium and magnesium. *J. Fruit and Ornamental Plant Res.* 7: 71-80.
- Kwong, K.F.N.K., Paul, J.P. and Deville, J. (1999): Drip fertigation - a means for reducing fertilizer nitrogen to sugarcane. *Exp. Agric.* 35:31-37.
- Lahav, E., Lowengart, A. and Kalmar, D. (1995): Response of avocados to different nitrogen applications through fertigation. *Western Galilee Res. And Develop. ? Annual Reports 1994-95.* pp.100-106(Hebrew).
- Lahav, E. and Kalmar, D.(1995): Fertigation and water regimes on a Banana plantation. *Dahlia Greidinger Intern. Symp. On Fertigation, Technion, Israel* pp. 25-33.
- Lahav, E. and Lowengart, A. (1998): Water and nutrient efficiency in growing bananas in subtropics. *Acta Hort.* 490: 117-125.
- Lahav, E. and Turner, D.W. (1989): Fertilizing for high yield Banana. *IPI Bull. No. 7,* 62p.
- Layne, R.E.C., Tan, C.S., Hunter, D.M. and Cline, R.A.(1996): Irrigation and fertilizer application methods affect performance of high-density peach orchards. *Hort. Sci.*31: 370-375.
- Lowernart, A. and Manor, H. (1998): Irrigation and fertigation recommendations for drip-irrigated processing tomatoes. *The Extension Service, Ministry of Agriculture and Rural Development(Hebrew).*
- Lupin, M., Magen, H. and Gambash, Z. (1996): Preparation of solid fertilizer based solution fertilizers under grass roots field conditions. *Fert. News* 41: 69-72.
- Magan, H.(1995): Fertigation: An overview of some practical aspects. *Fert. News.* The Fert. Assoc. of India, New Delhi, India.
- Malik, R.S. and Kumar, K.(1996): Effect of drip irrigation levels on yield and water use efficiency of pea. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 44:508-509.
- Marr, C.(1993): Fertigation of vegetable crops. *Agr. Exp. St. & Coop. Ext.* Kansas State University. Online.

- McInnes, K.J. and Fillery, I.R.P. (1989): Modeling and field measurements of the effect of nitrogen source on nitrification. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1264-1269.
- McPharlin, I.R., Aylmore, P.M. and Jeffery, R.C.(1995): Nitrogen requirements under sprinkler irrigation and trickle fertigation on a Spearwood sand. *J.Plant Nutr.* 18: 219-241.
- Microsoft Encarta Encyclopedia (1999): Online.
- Mosler, C.T., Schnitzer, W.H. and Ben Yehoshua, S.(1998): Influence of drip laterals placement on root development of field cucumber plants. *Inter. Cong. on Plastics in Agariculture, Tel Aviv, Israel*, pp. 435-444.
- Moyo, C.C., Kissel, D.E. and Cabrera, M.L.(1989): Temperature effects on soil urease activity. *Soil Biol.Biochem.* 21: 935-938.
- Nielsen, D. And Roberts, T.L.(1996): Potassium fertigation on high density apple orchards. *Better Crops with Plant Food* 80:12-13.
- Nielsen, G.H., Parchomchuk, P., Nielsen, D. And Zebarth, B.J. (2000): Drip fertigation of apple trees affects root distribution and development of K deficiency. *Can. J. Soil. Sci.* 80: 353-361.
- Nelson, H., Edelstein, M., Berdugo, R. And Ankorion, Y. (1997): Monopotassium phosphate as a phosphorus and potassium source for greenhouse-winter-grown cucumber and muskmelon. *J. Plant Nutr.* 20: 335-334.
- Noy, J. And Yoles, D. (1979): Precipitates formed by APP 11-37-0 in irrigation water. *Hassadeh* 59: 2129-2130 (Hebrew).
- Pan, H.Y., Fishre, K.J. and Nichols, M.A. (1999): Fruit yield and maturity characteristics of processing tomatoes in response to drip irrigation. *J. Veget. Crop Prod.* 5: 13-29.
- Paoli, N. (1997): What does fertigation have to offer? *Obstbau-Weinbau* 34: 10-13.
- Parchomchuk, P., Nielsen, G.H. and Houge, E.J. (1993): Effects of drip fertigation of $\text{NH}_4\text{-N}$ and P on soil pH and cation leaching. *Can. J. Soil*

- Sci. 73: 157-164.
- Phene, C.J. and Lamm, F.R. (1995): The sustainability and potential of subsurface drip irrigation. Microirrigation for a changing world: conserving resources-preserving the environment. Proc. 5th Intern. Microirrigation Cong., Orlando, Florida, pp. 359-367.
- Playan, E. and Faci, J.M. (1997): Border fertigation: Field experiments and a simple model. Irrigation Sci. 17: 163-171.
- Postel, S. (1999): Pillar of Sand. W.W.Norton & Company, New York. 313p.
- Raymon, D. and Or, U. (1990): Advanced technologies in traditional agriculture: A new approach. A case study: Drip fertigation in the Jiftlik Valley. ICID Bull. 39: 49-61.
- Reist, A., Pivot, D. and Gillioz, J.M. (1999): Closed cultivation systems: Living with pathogens. Rev. Suisse Viticul. Arboricul. Horticul. 31: 259-263.
- Reshef, G. (2000): Fertilization and irrigation of soil grown vegetables in the coastal plains. Extension Service, Ministry of Agriculture, Israel.
- Richards, L.A. (ed.) (1954): Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Handbook 60, p. 13.
- Rincon, L., Pellicer, C. and Saez, J. (1998): Effect of different nitrogen application rates on the yield and nitrates concentration of lettuces. Agrochimica 42: 304-312.
- Shani, M., Sneh, M. and Sapir, E. (1988): Fertigation. 2nd. edit. Ministry of Agriculture, Extension Service, 32p.(Hebrew).
- Shemesh, D., Noy, Y., Gere, G., Lowengart, A. and Spencer, Y. (1995): NPK fertilization in cotton. Field Experiments and Research in Cotton. pp. 141-146 (Hebrew).
- Silva, W.L.C., Giordano, L. De B., Marouelli, W.A., Fontes, R.R., Gornat, B. and Biech, B.J. (1999): Response of six processing tomato cultivars to subsurface drip irrigation. Workshop on Irrigation and fertigation of processing tomato, Pamplona, Spain. Acta Hortic. 487: 569-573.

- Siviero, P. and Sandei, L. (1999): Fertigation of tomatoes with the mobile bench irrigation system. *Informatore Agrario* 55: 79-82.
- Sneh, M. (1987): Fertigation. Ministry of Agriculture, CINADCO, 53p.
- Sneh, M. (1995): The history of fertigation in Israel. *Dahlia Greidinger Intern. Symp. On Fertigation, Technion, Israel*, pp. 1-10.
- Sonneveld, C. (1995): Fertigation in the greenhouse industry. *Dahlia Greidinger Intern. Symp. on Fertigation, Technion, Israel*, pp. 122-140.
- Sposito, G. and Mattigod, S.V. (1980): *Geochem: A computer program for the calculation of chemical equilibria in soil solution and other natural water system*. Dept. Soil and Env. Sci. Univ. of California, Riverside, CA, USA.
- Sumner, M.E. (1979): Interpretation of foliar analyses for diagnostic purpose. *Agron. J.* 71: 343-348.
- Westerman, R.L. (ed.) (1990): *Soil testing and plant analysis*. 3rd ed. SSSA Book Service 3.
- Whiting, R.E. (1975): Fertilizer and drip irrigation. 3rd Drip Irrig. Convent. Trade Show, Fresno, Calif., pp. 73-75.
- Widmer, A. and Krebs, C. (1999): What does fertigation achieve compared with tree row fertilization? *Obst und Weinbau* 135: 518-522.
- Wolf, B., Fleming, J. and Batchelor, J. (1985): *Fluid Fertilizer Manual Vol. 1*. National Fert. Sol. Assoc., Peoria, Ill.
- Worley, R.E. and Mullinix. B.G. (1996): Fertigation and leaf analysis reduce nitrogen requirements of pecans. *Hort. Techn.* 6: 401-405.
- Zaidan, O. and Avidan, A. (1997): *Greenhouses tomatoes in soilless culture*. Ministry of Agriculture, Extension Service, Vegetables and Field Service Depts.(Hebrew).

謝辞

完璧な編集で原稿をより良いものにしていただいた、A.E. ジョンストン博士に深く 感謝いたします。

ファーティゲーションによって栽培された作物の養分吸収データを提供していただいた、パトリシア・イマス博士に感謝します。ハイファケミカルズ社の印刷物やスライドにある、普及および研究用資料の使用を許可していただいた、オデッド・アキレア博士に感謝します。

ラファエル・クリーガー氏の写真提供に感謝します。

訳注

1. 根圏の制御された根系 (p.5)

点滴灌水では、浅い場所に活性の高い細根が多く発生する形で根系が発達する。

2. ドリッパー (p.7)

水滴を吐出する部分。ポリエチレンパイプに穴を開け後から差し込むボタン・ドリッパーと射出成型によってポリエチレンチューブにドリッパーが内臓されているドリップチューブがある。p.44 の「ドリッパーの種類」を参照。

3. ドリップチューブ (p.7)

p.44 の「ドリッパーの種類」を参照。

4. 地中点滴灌水システム (p.7)

ドリップチューブを地中に埋めて点滴灌水する方法。地表からの水分蒸発によるロスがなく、根域の水分環境も優れる。

5. 水を吐出することなく (p.12)

ダイアフラムポンプでは、ポンプを駆動させた後、エネルギーを失った水が排出される。

6. ペカン (p.17)

クルミ科の落葉高木およびその種実。ナッツ類。

7. ホーグランド培溶液 (p.18)

1933年にホーグランドらにより、開発された水耕栽培用の無機培養液。その後、修正が重ねられ現在でも一般的に利用される組成となった。

8. Geochem program (p.22)

研究者が植物の培養液を作成する際に使われる、多機能化学種組成プログラム。現在、GEOCHEM-EZ という PC ソフトウェアが、下記ウェブサイトよりダウンロードできる。

<http://www.plantmineralnutrition.net/Geochem/geochem%20home.htm>

9. ビウレットの濃度を 0.25% 以下にすることである (p.27)

日本の肥料取締法において、ビウレット性窒素は窒素全量の含有率 1.0% につき 0.02% 以下と公定規格に定められている。窒素 46% の品の場合、ビウレット性窒素は最大で 0.92% となる。低ビウレット尿素と表示してあるものが、ファーターションには適している。

10. カルシウムの施用は必要ない (p.32)

日本は雨が多く、カルシウム等の塩基が溶脱し酸性化しやすいので、通常、土壌 pH の中和とカルシウム補給のために石灰肥料を施用する。また、用水中のカルシウム含有量が低い場合、ファーターションによりカルシウムを補給することは有効である。

11. コントロールヘッド (p.45)

灌水の開始・停止、肥料の混入、流量の計測などを行う装置の集合体。p.102

の「イスラエルにおける典型的な露地ドリップ・フアーティゲーションのコントロールヘッド構成」を参照。

12. 二重ベンチュリ (p.50)

通常のベンチュリより広い狭窄部の内側にさらに小さな狭窄部を設け、そこから吸引させる装置と考えられる。狭窄部の断面積が大きくなることで、少ない圧力損失で使用できると推測される。

13. 二種類の肥料の組み合わせ (p.88)

肥料 a が成分 1、2 を含み、肥料 b が成分 1 のみを含む場合の計算。
Nu1(K_2O) は肥料 a からのみ与えられるので、a の量は (1) で計算できる。
Nu2(N) は肥料 a と肥料 b の両方から与えられるので、必要量から肥料 a で与えられる分を引いたものを肥料 b で与えることになる。(2) のように、その値を肥料 b の Nu2(N) の含有率で割ったものが肥料 b の量となる。

付録 1. 養水分供給量の計算例

ファーティゲーションは、環境への流出を最小限に抑えながら作物の必要とする養分量を供給する精密なツールである。その目標を達成するために重要なステップは、施肥量の計算である。施肥量は、作物の養分要求量、培地に既に含まれる養分量、ファーティゲーションを行なう面積、および灌水速度に関係してくる。

最も良く使われる計算は、次のようなものである

施用する養分量を市販肥料の量への変換

Q_c = 市販肥料の重量 (kg)

N_u = 成分量 (kg)

$P\%$ = 市販肥料の養分含有量 (重量%)

$Q_c = N_u \div P\%$

例:

窒素 50 kg(N_u) を、硫酸アンモニウムで与える場合

硫酸アンモニウムは、窒素を 21% 含むので

必要な硫酸アンモニウムの量 (Q_c) は

$Q_c = 50 \text{ kg} \div 21\% = 50 \div 21 \times 100 = 238.1 \text{ kg } (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

液体肥料の重量を体積へ変換する

液体肥料をその体積で計ることは、重量で計るよりも便利ながある。

V_c = 施用する液体肥料の体積 (L)

Q_c = 市販肥料の重量 (kg)

S_d = 液体肥料の比重 (kg/L)

$V_c = Q_c \div S_d$

例:

与えたい硝酸アンモニウム溶液の重量 $Q_c = 250 \text{ kg}$ の場合

硝酸アンモニウム溶液の比重 (S_d) = 1.27 kg/L

$V_c = 250 \text{ kg} \div 1.27 = 196.8 \text{ L } \text{NH}_4\text{NO}_3$

二種類の肥料の組み合わせ^{訳注13}

二種類以上の市販肥料を混合して、同時に二種類以上の成分を与える場合の計算

Qa = 肥料 a の量 (kg)

Qb = 肥料 b の量 (kg)

Nu1 = 与えられる成分 1 の量 (kg)

Nu2 = 与えられる成分 2 の量 (kg)

Nu1a% = 肥料 a 中の成分 1 の含有率 (重量%)

Nu2a% = 肥料 a 中の成分 2 の含有率 (重量%)

Nu1b% = 肥料 b 中の成分 1 の含有率 (重量%)

$$Nu1 = Qa \times Nu1a\% + Qb \times Nu1b\% \dots\dots\dots(1)$$

$$Nu2 = Qa \times Nu2a\% \dots\dots\dots(2)$$

(2) から $Qa = Nu2 \div Nu2a\%$

(1) から $Qb = (Nu1 - Qa \times Nu1a\%) \div Nu1b\%$

例:

Nu1 = 50 kg N

Nu2 = 50 kg K₂O

肥料 a が KNO₃ (13-0-46)

肥料 b が NH₄NO₃(21-0-0) の場合

Nu1a% = 13(13%N)

Nu2a% = 46(46%K₂O)

Nu1b% = 21(21%N)

$$Qa = 50 \text{ kg} \div 46 \times 100 = 108.7 \text{ kg (KNO}_3) \dots\dots\dots(1)$$

$$Qb = (50 - 108.7 \times 13\%) \div 21 \times 100 = 170.8 \text{ kg (NH}_4\text{NO}_3) \dots\dots\dots(2)$$

施肥量と面積から施肥総量の計算

Qfo = 灌水に必要な肥料の総量 (kg)

Qfa = 単位面積あたりに必要な肥料の量 (kg)

Au = 灌水する面積 (ha)

$$Qfo = Au \times Qfa$$

例：

$$Q_{fa} = 200 \text{ kg/ha}$$

$$A_u = 15 \text{ ha}$$

$$Q_{fo} = 15 \text{ ha} \times 200 \text{ kg/ha} = 3000 \text{ kg}$$

灌水量と面積および肥料濃度からの肥料の量の計算

$$Q_{fo} = \text{施肥量 (kg)}$$

$$Q_{wa} = \text{灌水量 (m}^3\text{/ha)}$$

$$F_{cw} = \text{灌水中の肥料濃度 (mg/L)}$$

$$A_u = \text{灌水面積 (ha)}$$

$$Q_{fo} = A_u \times Q_{wa} \times F_{cw}$$

例：

$$Q_{wa} = 300 \text{ m}^3\text{/ha}$$

$$F_{cw} = 200 \text{ mg/L} = 200 \text{ g/m}^3 = 0.2 \text{ kg/m}^3$$

$$A_u = 15 \text{ ha}$$

$$Q_{fo} = 15 \text{ ha} \times 300 \text{ m}^3\text{/ha} \times 0.2 \text{ kg/m}^3 = 900 \text{ kg}$$

肥料原液の体積を求める計算（溶解可能な最高濃度）

$$N_{sv} = \text{肥料原液の体積 (L)}$$

$$F_{s\%} = \text{使用温度での肥料の溶解度 (\% w/v)}$$

$$Q_f = \text{施肥量 (kg)}$$

$$W_v = \text{ある量の肥料を溶かすために必要な最少量の水量 (L)}$$

$$W_w = W_v \text{ の重量 (kg)}$$

$$S_d = \text{溶液の比重 (kg/L)}$$

$$N_{sv} = (Q_f \div F_{s\%} + Q_f) \div S_d$$

例：

$$Q_f = 200 \text{ kg (NH}_4\text{)}_2\text{SO}_4$$

$$F_{s\%} \text{ 20}^\circ\text{Cでの (NH}_4\text{)}_2\text{SO}_4 \text{ の溶解度} = 750 \text{ g/L}$$

$$W_v = 200 \text{ kg} \div 75\% = 200 \div 75 \times 100 = 266.7 \text{ L}$$

$$W_w = 266.7 \text{ kg}$$

8. 参考文献

溶解過程で、溶液の体積は水と肥料の体積の合計よりも小さくなるので、溶液の実際の体積は、溶液の比重を実測して求める。

Sd = 1.2 (測定が必要)

$$Nsv = (266.7 \text{ kg} + 200 \text{ kg}) \div 1.2 = 466.7 \div 1.2 = 388.9 \text{ L}$$

肥料溶液の養分濃度 (重量 %)

Nus% = 肥料溶液の養分濃度 (%)

Qf = 肥料の量 (%)

Nu% = 肥料中の養分の重量パーセント (w/w)

Nsv = 肥料溶液の体積 (L)

Sd = 肥料溶液の比重 (kg/L)

$$Nus\% = Qf \times Nu\% \div (Nsv \times Sd)$$

例:

$$Qf = 200 \text{ kg}$$

$$Nu\% = 61\%$$

$$Nsv = 500 \text{ L}$$

$$Sd = 1.12$$

$$Nus\% = 200 \times 61 \div (500 \times 1.12) = 21.8 \%$$

肥料溶液の養分濃度 (容積 %)

Nus% = 肥料溶液の養分濃度 (%)

Qf = 肥料の量 (%)

Nu% = 肥料中の養分の重量パーセント (w/w)

Nsv = 肥料溶液の体積 (L)

$$Nus\% = Qf \times Nu\% \div Nsv$$

例:

$$Qf = 200 \text{ kg}$$

$$Nu\% = 61\%$$

$$Nsv = 500 \text{ L}$$

$$Nus\% = 200 \times 61\% \div 500 = 200 \times 61 \div 100 \div 500 = 24.4 \%$$

希釈率

希釈率は、肥料原液を灌水量に注入する割合である。

$$Dr = \text{希釈率}$$

$$Fnc = \text{灌水中の肥料濃度 } w/v \text{ (mg/L)}$$

$$Nuc = \text{肥料原液の養分濃度 } w/v \text{ (\%)}$$

$$Dr = Fnc \div Nuc$$

例：

$$Fnc = 50\text{mg/L N (窒素)}$$

$$Nuc = 26.7\% = 267 \text{ g/L} = 267,000 \text{ mg/L}$$

$$Dr = 50 \div 267,000 = 1:5340 = 187 \text{ mL/m}^3$$

肥料ポンプの流量

肥料ポンプの流量計算は、適切なポンプを選ぶため、および圃場で手動または灌水コントローラーによって流量を調節するために必要である。

$$Pfr = \text{ポンプの流量 (L/h)}$$

$$Fnc = \text{灌水中の肥料濃度 } w/v \text{ (mg/L)}$$

$$Nuc = \text{肥料原液の養分濃度 } w/v \text{ (mg/L)}$$

$$Wfr = \text{灌水の流速 (m}^3\text{/h)}$$

$$Pfr = Wfr \times Fnc \div Nuc$$

例：

$$Wfr = 80 \text{ m}^3\text{/h}$$

$$Fnc = 50 \text{ mg/L}$$

$$Nuc = 26.7\%$$

$$Pfr = 80 \text{ m}^3\text{/h} \times 50 \text{ mg/L} \div 26.7\%$$

$$= 80,000\text{L} \times 50\text{mg/L} \div 267,000\text{mg/L} = 14.5 \text{ L/h}$$

フアーティゲーション

灌水同時施肥

発行日：2015年12月
発行：ICL JAPAN 株式会社
〒112-0004
東京都文京区後楽 2-3-21
TEL 03-6801-8430 (代)
企画・編集：ICL JAPAN 株式会社 肥料部
翻訳：田畑 正秀

無断転載・複製を禁じます 非売品

お問い合わせ

本書に関するご意見・ご感想は、ICL JAPAN 株式会社 肥料部
(TEL 03-6801-6426) までお寄せください。

付録 2. カラー写真



写真 1.1. ドリッパーと密集するアボカドの細根



写真 1.2. イスラエルのハイファにあるバハイ庭園



写真 2.2. 観葉植物の養液栽培 (Shefer nurseries, イスラエル)

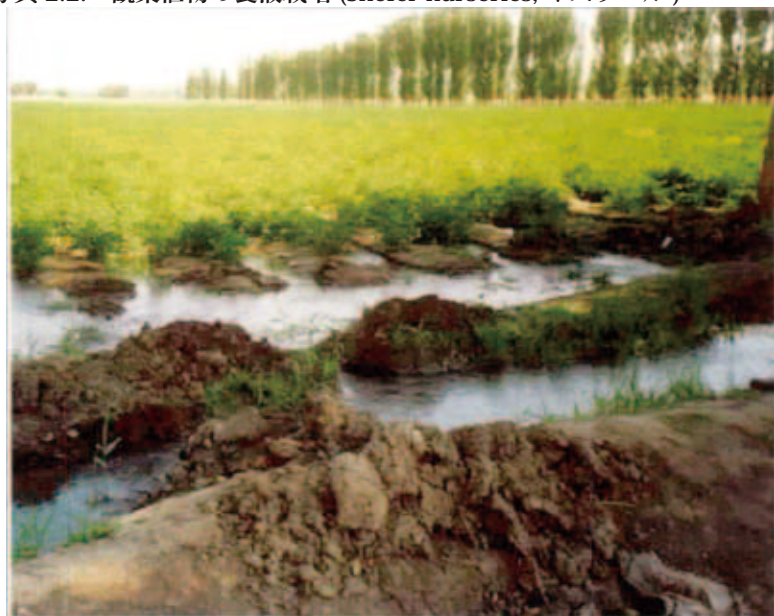


写真 5.1. 中国における越流灌漑



写真 5.2. スプリンクラー灌漑 (ナンダンジェイン社)



写真 5.3. スプリンクラーの種類 (ナンダンジェイン社)



写真5.4. 果樹園におけるマイクロ灌漑(ナンドンジェイン社)



写真 5.5. 点滴灌水による土壌の湿潤パターン(ネタフィルム社)



写真 5.6. ドリッパーの種類 (ネタフィム社)



写真 5.7. リニアムーブによる機械化灌漑



写真 5.8. 肥料タンク

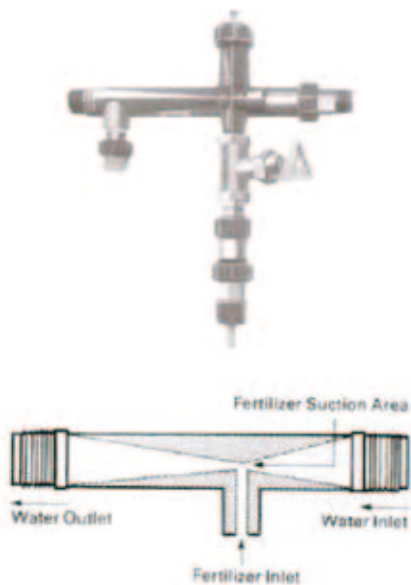


写真 5.9. ベンチュリー装置と断面図

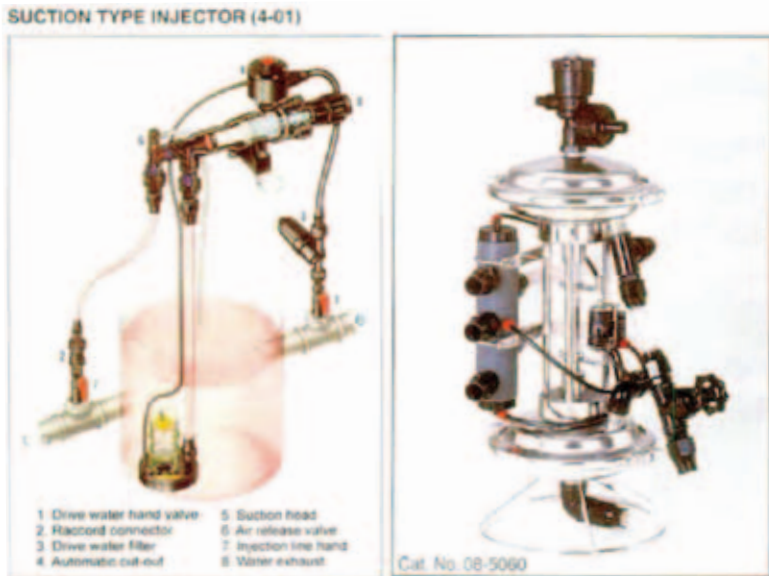


写真 5.10. ダイアフラム式注入ポンプ (アミアド社)



写真 5.11. ピストン式注入ポンプ (ドサトロン社)



写真 5.12. 電動ポンプ (プロミネント社)



写真 5.13. 単肥混合システム (ローテム社)

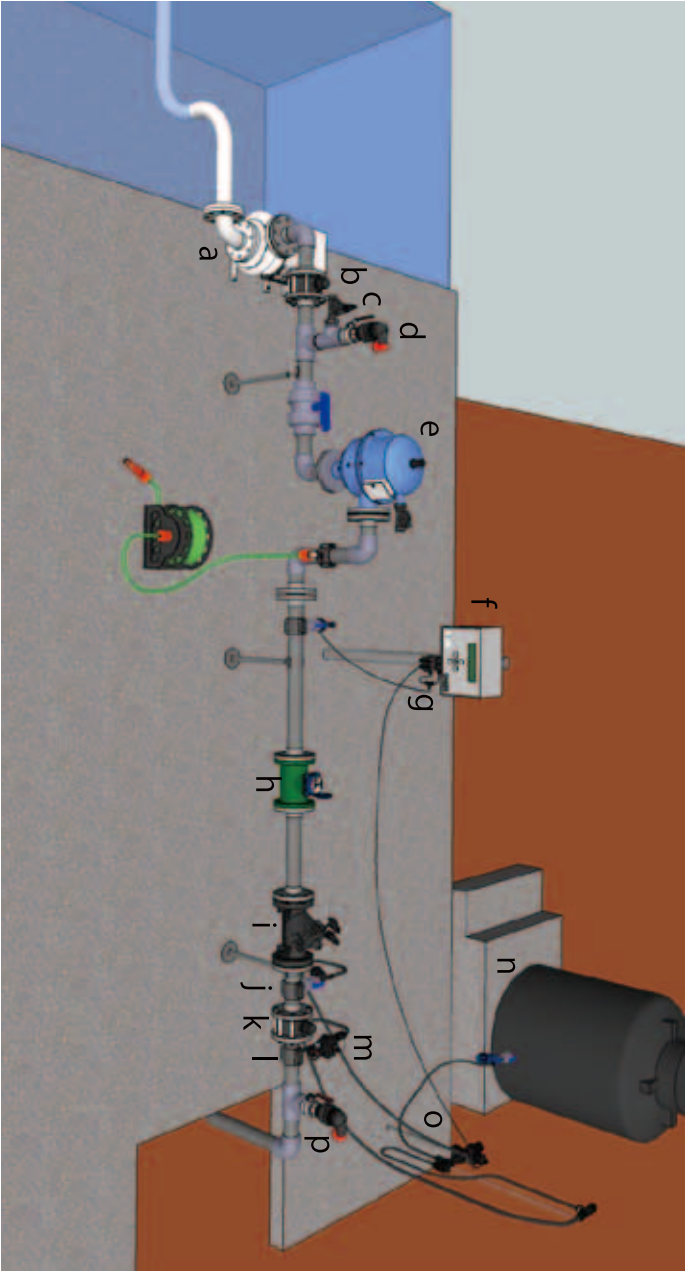


写真 7.1. クラス A パン蒸発計



写真 7.2. テンシオメーター

【訳者挿入図】 イスラエルにおける典型的な露地ドリッジ・フューデーイゼーションのコントローラヘッド構成



- a. 揚水ポンプ
- b. 逆止弁
- c. 安全弁
- d. 吸排気型空気弁
- e. スクリーンプールター
- f. コントローラー
- g. ソレノイド
- h. 流量計
- i. 減圧・圧力保持弁
- j. 液肥混入器の駆動水取水位置
- k. 逆止弁
- l. 液肥混入器の液肥注入位置
- m. 肥料流量計
- n. 液肥タンク
- o. デルタ型液肥混入器
- p. 吸排気型空気弁



P.O. Box 40
4190 CA Geldermalsen
The Netherlands
Tel.: +31 (0) 418 655 700
Fax: +31 (0) 418 655 795
Email: info@icl-sf.com
www.icl-sf.com

ICL JAPAN Ltd.
Sumitomo Fudosan Iidabashi Buildings, 5th fl.,
2-3-21, Koraku, Bunkyo-ku
Tokyo, 112-0004, JAPAN
Tel.: +81-3-6801-6426
Fax: +81-3-6801-6509
Email: masahide.tabata@icl-group.com