

マルドリ方式を基軸とした高品質カンキツ安定生産のための技術体系

根角博久

農研機構九州沖縄農業研究センター

1.はじめに

カンキツにおいては、適度な乾燥ストレスにより果実糖度を増加させることができることが知られている。降雨の影響を可能な限り除外してかん水量を精密に管理することのできるマルドリ方式栽培は、大規模にそれを実現することが可能な技術であり、IoT による技術革新も進められている。ここでは、ここでは、農研機構生研支援センター「攻めの農林水産業の実 現に向けた革新的技術緊急展開事業（うち産学の英知を結集した革新 的な技術体系の確立）（2015～2016）」の支援を受けて実施した「マルドリ方式・ICT などを活用した省力的な高品質カンキツ安定生産技術体系とその実現のための園地整備技術の実証」の成果（根角ら 2016）を中心に、マルドリ方式を効果的に活用するための周辺技術を含めて、どのような技術体系を構築しようとしているのかについて概説する。

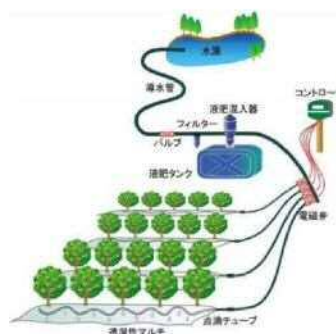
2.マルドリ方式とは

ウンシュウミカンの高品質果実生産のための周年マルチ栽培（吉川ら 2000）として開発されてきたもので、マルチと点滴灌水同時施肥を特徴とするため愛称として「マルドリ方式」と呼ぶ。当初は、ウンシュウミカン栽培の技術であったが、その生育環境を制御する設備の活用により中晩生カンキツへの応用も進められ展開が図られている。ここで、マルドリ方式と呼んでいるのは、マルドリ方式設備（施設）、それを用いたマルドリ方式栽培を含むものであり、ここではそれらを分けて考える。

3.マルドリ方式設備（施設）

シートマルチで、降雨の影響軽減、根域の土壤水分の適正化、抑草、光環境の改善などの園地環境の制御を行い、精密な自動点滴かん水と液肥の施用ができる設備である。

（1）精密な自動かん水施肥のための設備



傾斜地における設備の概念



平地における設置例（50a の園地）



点滴かん水チューブの吐出状況

図1 マルドリ方式設備の設置例

かん水施肥のための基本的な設備は、十分な水量と圧力のある水源、液肥（原液）タンク、液肥混入機、電磁弁とそのコントローラ、点滴かん水チューブである。基本的には、標高差で水压を確保できる場所にヘッドタンクを置いた水源システムが合理的と考えるが、小規模なら平地でも井戸用ポ

ンプにより対応できる。

精密な自動かん水施肥を実現は、一定範囲の水圧条件で全ての吐出孔から同量の水が吐出される点滴チューブによるところが大きい。当初は、2.3L/h/吐出孔（38mL/min/吐出孔）の点滴チューブを勧めていたが、1.0mL/h/吐出孔（38mL/min/吐出孔）のチューブも入手できるようになり選択できる。なお、時間吐出量の違いは、設備の大きさや運用も含めた設計に違いが出てくることに留意する必要がある。なお、点滴孔の間隔は、土壌の物理的特性に基づく水の浸潤を考慮して、根域に合理的かん水ができる間隔とするが、我が国の果樹園土壌では、通常は 30 cmを標準として問題ないと考えている（根角ら 2014）。

なお現在、電磁弁を IoT により遠隔操作できるものも市販されるようになっており、大規模な設備において有効活用できるように検証が必要である。

（2）シートマルチ

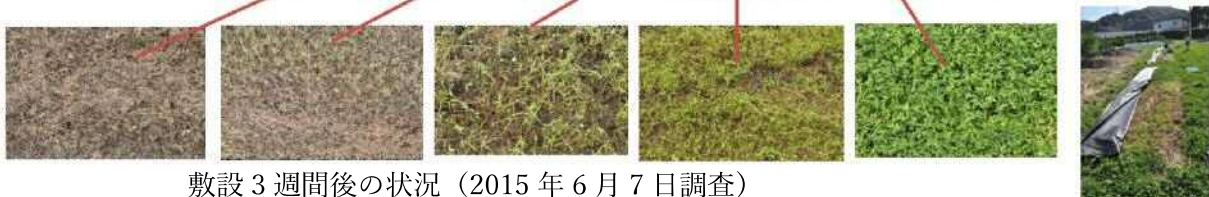
シートマルチの基本的な効果は、土壌水分の保持と抑草である。カンキツのマルドリ方式では、意図しない雨水を根域に入れないことで、シートマルチ下の点滴かん水のみで、樹体に必要な水分を適切にコントロールしようとする。

マルチをしたままで土壌を乾燥させやすいのは、透湿性の高い不織布シートである。また、反射率の高い不織布シートは、樹冠内部の光環境の改善やチャノキイロアザミウマ等の害虫の被害抑制も期待される。

資材の透過光率、表面色、透湿性の違いにより、マルチ下の温湿度環境は異なり、除草効果も異なる（表 1）ので、園地の環境や目的に合わせて資材の選択を行うことになる（根角ら 2015）。

表 1 シートマルチ資材の表面色および透過光率、透湿性の違いによるマルチ下の環境と除草効果

設置表面の色	黒		白		マルチ上 (約3.5cm)	
透過光率	<1%				≒35%	100
透湿性（穴加工）	無	有	無	有	無	
（マルチ下の環境）						
相対湿度日変化	55－100%	50－100%	90－100%	80－100%	80－100% （結露多）	20－100%
最高温度	50℃以上	50℃以上	50℃以上	40℃以下 （マルチ上より低い）	40～50℃	40℃以下



敷設 3 週間後の状況（2015 年 6 月 7 日調査）

4.マルドリ方式栽培技術の基礎

上記のマルドリ方式設備を活用して、高品質果実の安定生産を行うのがマルドリ方式栽培の技術である。マルドリ方式栽培技術の特徴は樹体の水分状態の管理と液肥による栄養状態のコントロールで、養水分の吸収、光合成および転流を考える。そのため、光合成器官が緑化し、果実が結実するまでの「かん水施肥実施期間」と果実糖度を向上させるための「乾燥ストレスをコントロール期間」に分けて管理を行う。

(1) 土壌－植物－大気連続系（SPAC）モデルでカンキツの高品質生産に関わる水の流れを考える

カンキツ樹の水分生理を理解するため、Daniel Hillel（1990）の環境土壌物理学を参考にして、カンキツ樹を想定した SPAC モデルを図に表してみた（図 2）。土壌中の水が重力に逆らって根から収集され、葉から蒸散によって大気中に流れてく状況を、水ポテンシャル勾配で説明するものである。この図では、日中は葉の水ポテンシャルが低くなり、水は根から葉、葉から大気中に移動しやすく、夜間は気孔が閉じて転流が進むことをイメージしてもらえると良い。

水が土壌に吸着されている強さの程度は、通常同等の力となる水柱の高さ（cm）の対数（pF）で表す。pF 2.7～pF 3.0 は、毛管連絡が切断される水分張力であり、圃場容水量からこの毛管連絡切断点までが植物にとって利用しやすい易利用有効水で、毛管連絡切断点から永久萎凋点とされる pF 4.2 までの水量が難利用有効水である。この時の土壌が水を保持する力（水ポテンシャル： Ψ_w ）の違いは、主に土壌の粒子の大きさ（マトリックポテンシャル： Ψ_m ）に起因する。

葉の水ポテンシャルは、日照に合わせて昼夜で周期的に変動する。日射の強い日中には－3MPa 程度と低くなるが、土壌水分が十分にある条件では夜明け前に－0.4MPa 程度と最大となる。この葉内最大水ポテンシャル（ Ψ_{max} ）は、葉によるバラツキはほとんど無く、樹全体で平衡に達している状態である。この日変動は、光合成による同化と同化産物（糖）の転流により浸透圧（浸透ポテンシャル： Ψ_o ）が変化することによるものである。

果実の水ポテンシャルは、さじょう中の糖、酸濃度等により生育過程で変動する。この時、浸透ポテンシャルの他に、細胞壁によりプラスの値となる圧ポテンシャル（ Ψ_p ）も考慮すべきとされる。

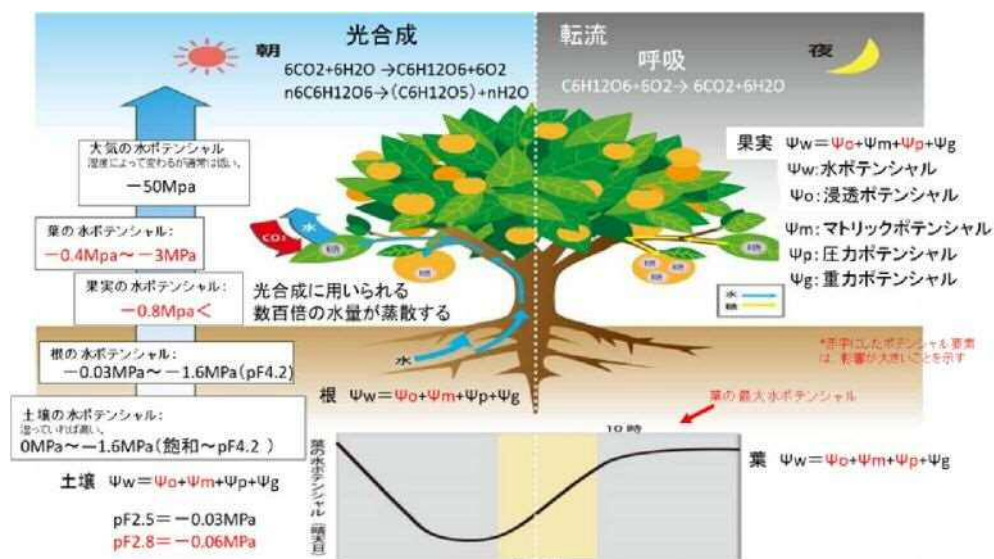


図 2 カンキツの高品質生産を検討するための SPAC モデル
圧力単位の換算 ; 1MPa=10bar=101.97m(水頭:15°C)÷10⁴cm(水頭)÷pF4

* SPACの概念について、「環境土壌物理学 Daniel Hillel 著、1990」を参考にした。

(2) 高品質生産のためのかん水管理の目安となる葉内最大水ポテンシャル

果実糖度に着目した高品質果実生産を行うためには、果汁への糖の蓄積期に適度な乾燥ストレス状態で管理することが有効であり、プレッシャーチャンバー法により測定される葉の水ポテンシャルがその目安となる。この葉内水ポテンシャルの変動は、光合成と同化産物の転流に関係し、樹内で平衡状態となる夜明け前の葉内最大水ポテンシャルは、根からの給水が十分でない場合に低い方にシフト

する。乾燥ストレス状態の基準としては、この葉内最大水ポテンシャルが最もこれまでの蓄積のある生体情報である。光合成を阻害せず果実糖度を向上させることのできる目安として、乾燥ストレスをかける時期の葉内最大水ポテンシャル（ $\Psi_{\max}$ ）について -0.8MPa 程度を適切と仮定し制御目標とする。この目安により管理することで糖度を向上させることができる。また、生育途中で乾燥ストレス状態を変えて、目標糖度に向けた管理をすることができる。

5. マルドリ方式を基軸とした高品質カンキツ安定生産のための技術体系の概要

生産現場において適度な水分ストレス状態となっているかどうか、栄養状態は適正かについて、客観的に判断する簡易な指標やそれを用いる技術を開発した（表2）。

表2 マルドリ方式を高度に活用するための要素技術

要素技術	解 説
簡易土壌水分計 (土壌水分目視計)	簡易土壌水分計は、ポーラスカップをセンサ部とし、 $\text{pF}2.8$ 以上の乾燥状態になると透明塩ビ管部の水が減水し、センサ部の乾燥状態が植物の生育阻害水分点となっていることを目視できる（黒瀬、2010）。適切に管理を行っているマルドリ方式栽培では、その減水量を樹体の乾燥ストレスの積算値として、果実糖度を向上させるための管理の目安とすることができる（黒瀬ら、2016）。
水分ストレス表示シート	水分ストレス表示シートは、葉裏からの蒸散量の多寡を評価する指標である。葉裏に張り付けて、蒸散する水蒸気を補足し、ブルーの指示部がピンクに変色するかどうかを確認する。ウンシュウミカンでは、夏季の日中に5分間添付してピンクに変色しないようであれば、土壌乾燥による蒸散抑制が起こっており、かん水が必要な状態であると考えられる。蒸散量が極端に減じるタイミングでは、葉内最大水ポテンシャルが -0.8MPa 以下となっている（星ら、2007）。この時、根域の土壌が、樹が吸水しにくくなるほど乾燥している。
水分チェックボール	ウンシュウミカンの果汁蓄積期の果実硬度指標である。夏の果汁蓄積期の晴天日には、日中果実が柔らかくなり、日没になると果実が吸水して硬くなる。この時、日没直後には土壌水分が十分にある場合と乾燥が進んでいる場合で、果実硬度の差が大きくなる。日没直後に果実の吸水が不十分となる状態において、葉内最大水ポテンシャルは -0.8MPa 程度となっている（須崎ら、2015）。この時、根域の土壌が、樹が吸水しにくくなるほど乾燥している。
RQフレックスを用いた 簡易栄養診断技術	小型反射式光度計「RQフレックス」を用いて、カンキツの葉柄中の硝酸イオン濃度を測定することができる。施肥の適切化のため、RQフレックスによる葉柄中の硝酸イオン濃度の基準が作成された（中村ら、2015）。この葉柄中硝酸イオン濃度は、栄養診断で用いられる葉中の窒素含量とは異なり、調査時点に植物が吸収している硝酸イオン濃度を反映しており、施肥の適正化の指標として優れている。また、マルドリ方式栽培では、液肥の適切な施用により、連年安定生産に効果がある（三堂ら、2013）。
農地環境推定システム	近隣にあるアメダスなどの気温観測地点と任意地点との気温地点間差の推定モデルを作成することで、アメダスなどの気温観測値に準じた気温を推定する手法が開発されている（植山、2016）。小型太陽電池でデータを送信することのできる「気温データ自動収集装置」、PC用及びスマホ・タブレット用のwebページが開発され、農地環境情報を共有できる農地環境推定システムの試験的運用が開始された。このシステムでは、登録地点の気温、湿度、日射量、降水量の推定その他、蒸発散量の推定値も表示され、栽培管理の高度化のための情報を共有できるようになっている。このシステムは、さらに改良が進められており、チャノキイロアザミウマの成虫の発生ピークなどの病害虫発生予察をはじめとして、多様な農業情報の提供ツールとして活用できるものと考えている。

それらを用いて、園地の環境を推定し確認しながらマルドリ方式設備を高度に活用し、高品質果実を安定生産することを考えた（図3）（根角ら 2016、2017）。その手順は以下のとおりである。

- ①降水量、気温、蒸発散量などの園地の状況を推測し、生育予測に基づいて液肥の施用時期や量、かん水を停止する時期、果実生育の中間目標などの年間計画を立てる。
- ②実際に管理を進めながら、樹の生育や栄養診断の状況、土壌乾燥の状況、葉からの蒸散量、果実肥大や品質の推移を確認し、液肥の量やかん水量を変更する。
- ③収穫までの確認と管理の変更により収穫時の目標品質に近づける。

このようにして、年間の栽培管理の中で客観的な指標により、適宜管理を変更し、気象変動対応型の栽培管理で、高品質果実の安定生産を目指すことができるのが、マルドリ方式を基軸とした技術体系の特徴である。



図3 マルドリ方式を基軸とした高品質カンキツ安定生産のための技術体系

6.おわりに

ここで示したのは、マルドリ方式設備をどのように活用して高品質安定生産に向けたマルドリ方式栽培を行うかという骨格となる提案である。電磁弁の遠隔操作も可能になってきており、大規模に高品質生産を可能にする技術としてのさらなる発展を期待する。

7.参考文献

- 植山秀紀. 2016. 栽培管理・営農の高度化に資する精密メッシュ気温データの作成. 近中四農研資 12. 39-65
- 黒瀬義孝. 2010. ポーラスカップの空気浸入特性を利用した簡易な土壌水分計の開発. 農業気象. 66 (4) : 245-253
- 黒瀬義孝・大濱秀一・村上要三・根角博久. 2016. ウンシュウミカンと中晩生カンキツ‘はれひめ’における簡易土壌水分計を用いた水分ストレスの把握. 園学研. 15 (2) : 139-144.
- 須崎徳高・一ノ木山浩道・上西啓資・黒瀬義孝・根角博久. 2015. マルドリ方式による極早生ウンシュウミカン高品質生産の現地実証. 園学研. 14 (別2) : 109
- ダニエル・ヒレル. 2001. 環境土壌物理学 II 耕地の土壌物理学 第15章 植物による土壌水分の吸収. 財団法人 農林統計協会. pp175-223.

中村明弘, 吉川公規. 2015. 葉柄汁液中硝酸態濃度を用いた‘青島温州’での年一回施肥の影響評価. 園芸学研究 14 (別 2), 118

根角博久、植山秀紀、黒瀬義孝、星典宏、國賀武、大濱秀一、村上要三、井上久義. 2014. マルドリ方式高度利用によるカンキツ栽培のための自動点滴かん水施肥設計概念の検証. 園芸学研究. 13 (別 2)、129

根角博久・竹内新二・國賀 武. 2015.春草の除草効果に及ぼすマルチシート資材の特性. 園学研. 14 (別 2) : 120.

根角博久・棚田光雄・島崎昌彦.2016.高品質安定生産を支えるマルドリ方式を基軸とした技術カタログ集.農研機構近畿中国四国農業研究センター

根角博久.2017.経営規模拡大と高品質カンキツ生産の両立を目指すマルドリ方式を基軸とした技術体系の構築.園学研.16 (別 2) : 34-35 (公開シンポジウム 果樹の省力化技術開発の現状と課題)

星 典宏、森永邦久、横井秀輔、浜出絵里子、草場新之助、島崎昌彦. 2007. ウンシュウミカン樹における水分状態の簡易把握のための‘水分ストレス表示シート’の開発. 園芸学研究 6、541-546

三堂博昭、根角博久、藤原文孝、安部伸一郎. 2013.シートマルチ栽培下のカンキツ‘はれひめ’における樹勢回復と果実品質に及ぼす点滴かん水同時施肥の効果. 近畿中国四国農業研究. 23、41-46

吉川弘恭、中尾誠司、長谷川美典. 2000. 露地栽培温州ミカンの周年マルチによる高品質果実生産、園芸学会雑誌、69 (別 2)、279.