周年マルチ点滴灌水同時施肥法の導入が カンキツ園での窒素溶脱に及ぼす影響

渡邊 修一^{1*}・笠原 賢明¹・松森 堅治¹・
清水 裕太¹・向井 章恵²・小野寺 真一³

Influence of drip irrigation and liquid fertigation system with year-round plastic mulching on nitrogen leaching in a citrus orchard

Shuichi WATANABE^{1*}, Yoshiaki KASAHARA¹, Kenji MATSUMORI¹,
Yuta SHIMIZU¹, Akie MUKAI² and Shin-ichi ONODERA³

Abstract

The “drip irrigation and liquid fertigation system with year-round plastic mulching (MD system)” is a cultivation method whereby plants are irrigated using a drip tube underneath a plastic mulch sheet. This study investigated how an MD system affected nitrogen (N) leaching by measuring the changes in soil inorganic N levels in a satsuma mandarin orchard.

In the control plot, N, in the form of solid fertilizer, was applied to the surface of the soil according to local fertilization practice. In the MD plot, N, in the form of liquid fertilizer, was applied using the MD system. The amount of N in the MD plot was 60% of the control plot. The total amount of inorganic N in the soil, which was collected at 30–60 cm apart from the tree trunk, was measured in consideration of the distance from the drip tube. As a result, the total amount of inorganic N after cultivation in the MD plot was lower than that in the control plot. The amount of leached N was estimated from the levels of soil inorganic N before and after cultivation, amount of fertilizer N added, and plant absorbed N in the fruit. The estimated amount of leached N from the MD plot was less than that from the control plot. The N applied through irrigation water, which contained nitrate, was similar to the estimated amount of N that leached from the MD plot. Therefore, the results suggest no net N leaching from the MD plot.

In conclusion, the MD system effectively reduced N leaching in the citrus orchard.

Key words: nitrogen leaching, drip irrigation, orchard, groundwater, drip irrigation and liquid fertigation system with year-round plastic mulching

1 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 西日本農業研究センター Western Region Agricultural Research Center, NARO

2 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門 Institute for Rural Engineering, NARO

3 広島大学大学院総合科学研究科 Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

* 責任著者, nabeshu@affrc.go.jp

I. はじめに

点滴灌水 (drip irrigation) は、灌漑水を吐出する点滴孔を一定距離ごとに配した点滴灌水チューブという管を利用し、作物の株元に灌漑水を供給する方法 (Dasberg and Or, 1999) である。灌漑水に肥料成分を溶かして灌水と施肥を同時に行うことも可能であり、特に区別して、灌水同時施肥 (fertigation) と記述することがある。

この特性を活かし、小野寺ほか (2014) は農地で涵養された肥料成分に富む地下水を流域スケールで農業に再利用する“水・養分ハイブリッド再利用”方式を提案している。このシステムは、農地由来の栄養分に富む浅層地下水を点滴灌水の灌漑用水とすることで、水も肥料も節約する省資源型のシステムであり、同時に地下水中の栄養分を農地に還元する環境負荷浄化型のシステムと言える。

実際に、マーガレット (吉川ほか, 2012a), 茶 (吉川ほか, 2012b) において富栄養化地下水中の硝酸態窒素を灌漑に利用した事例がある。いずれも、農研機構近畿中国四国農業研究センターが開発した日射制御型拍動灌水システム (吉川・中尾, 2010) を用いて、富栄養化地下水を点滴灌水により作物に供給する方法をとっている。

広島県尾道市の島しょ部のカンキツ園が多く分布する流域において施肥由来の高濃度の硝酸態窒素を含む浅層地下水が存在することが報告されている (齋藤・小野寺, 2009)。この地域のカンキツ園の慣行では、除草剤等を用いた清耕栽培が行われ、施肥は堆肥等の有機物や粒状肥料を地表面に散布するため、肥料成分の多くが降雨などにより表面流去や溶脱を起こしやすい状況であることが要因と考えられる。このことは、カンキツ園が“水・養分ハイブリッド再利用”方式の考え方を導入するのに適した状況であることを示唆している。

カンキツ栽培での点滴灌水システムとして、周年マルチ点滴灌水同時施肥法 (drip irrigation and liquid fertigation system with year-round

plastic mulching) を農研機構近畿中国四国農業研究センターが開発している。この技術は、マルチ (mulch) とドリップ (drip) を用いるので「マルドリ方式」と略称されている。本論文でも、「マルドリ方式」(英語略記は「MD」) と記載する。マルドリ方式の特徴は、樹冠下に点滴灌水チューブを設置し、その上を透湿性マルチシートで周年被覆して、必要に応じて灌水あるいは灌水施肥を行うカンキツの栽培管理技術である (森永ほか, 2003)。灌水と施肥の自動化による省力化と、降雨の影響を受けずに土壤水分をコントロールすることによる果実糖度向上など高品質化を図ることができる。

さらに、マルドリ方式では、液肥を用いて点滴灌水チューブで肥料を株元に施用するため、樹体の肥料利用効率が向上するばかりではなく、マルチシートで被覆していることにより降雨による溶脱を減らせるなど環境負荷低減の効果が期待される (森永ほか, 2005) との記述が認められる。しかし、実際にその効果を比較調査した報告は無い。

そこで、本研究では“水・養分ハイブリッド再利用”方式の実証試験地として、カンキツ園に由来する富栄養化地下水を利用したマルドリ方式を導入した生産者圃場において、栽培期間の前後における土壤中の無機態窒素含量や土壤に埋設したイオン交換樹脂に吸着した硝酸態窒素量を調査することにより、マルドリ方式が窒素溶脱に及ぼす影響を明らかにする。

II. 研究対象圃場および栽培の概要

1. 圃場の立地および気象条件

研究対象圃場は、広島県尾道市生口島の標高 57 m に位置する斜度およそ 1/15 のカンキツ園であり、約 800 m² にマルドリ方式を導入した。中生ウンシュウ ‘石地’ (*Satsuma unshiu* cv. ‘isiji’) の 12 年生樹を対象とした。調査地の土壤は礫質褐色森林土 (pH 6.2, CEC 10.7 cmol(+)kg⁻¹, 全炭素 5.1 mg kg⁻¹, 全窒素 0.57 mg kg⁻¹) で、

基盤は主に花崗岩からなる。土壌の仮比重 (Mg m^{-3}) は、0–5 cm ; 0.76, 5–10 cm ; 1.18, 10–40 cm ; 1.31, 40–50 cm ; 1.43であった。調査は2014年3月26日から2015年3月4日まで行った。調査期間中の生口島のアメダス観測点の年平均気温は16.2°C (平年値15.5°C), 年間降水量は1,537 mm (平年値1,055 mm) であった。

2. 試験区の設定

現地圃場の栽植密度は1,000 m^2 あたり200本であった。この中から、隣接した3列の樹列を選定した。各樹列には8株が栽培されており、株間2 mで樹冠面積4 m^2 であった。東側の3株を慣行の管理による対照 (Control) 区、西側5株をマルドリ方式での管理を行うマルドリ (MD) 区とした。試験区の概要をFig. 1に示す。マルドリ方式では点滴灌水チューブ (drip irrigation tube) は、内径17 mm, 点滴孔 (dripper) の間隔は30 cm (30 cm pitch), 点滴孔ひとつあたりの吐出量は2.3 L h^{-1} であり、透湿性シートマルチ (タイベック・ソフトタイプ, デュポン社製) で圃場全体を被覆した。

3. 肥培管理

尾道市農業協同組合監修の営農ハンドブックに記載の現地施肥基準では、‘石地’の窒素施肥量は、春夏肥 (4–7月) で21 g m^{-2} と秋肥 (10–12月) で9 g m^{-2} となっている。本研究では、現地施肥基準をもとに、樹冠面積4 m^2 とした際の1樹あたりの施肥量を設定した。対照区の1樹あたりの施肥量は春夏肥が84 g, 秋肥が36 gとした。対照区の施肥時期は、春夏肥として16.8 g m^{-2} (栽植密度に基づいた圃場面積あたりでの施肥量, 以下同様) を4月25日, 5月15日, 6月5日の3回に分けて有機ペレット肥料セとだアミノ8-6-6 (エムシーファーターコム株式会社, 東京) を樹冠下表層に均一散布した。同様に秋肥として, 7.2 g m^{-2} を10月15日, 11月7日の2回に分けて施肥した。マルドリ区では対照区の60%になるように1樹あたりの春夏肥が50.4 g, 秋肥が21.6 gとした。マルドリ区では、樹園地から250 m離れた、標高差60 m下流に位置する井戸水を電動ポンプで2 m^3 の貯水タンクに汲み上げた後に、タイマー制御で駆動する電動ポンプを用いて自動灌水した。事前調査で確認した井戸水は約20 mg L^{-1} の硝酸態窒素を含んでおり、アンモニア態窒素はほとんど検出されなかった。このた

Fig. 1 Layout of the test site.

め、9.33 kgの水溶性化学肥料OKスペシャル15-8-12、(OATアグリオ、東京)を200 Lの水に溶解し、窒素濃度約7 g L⁻¹の液肥原液を調整し、無動力型液肥混入器により1%の比率で灌漑水に混入し、肥料由来の窒素成分を70 mg L⁻¹とすることで、灌漑水にもともと含まれる窒素濃度を20 mg L⁻¹と合計した窒素濃度を90 mg L⁻¹とした。灌水時間および灌水量は、朝夕各7分間、1樹あたり5.7 L d⁻¹ (圃場面積あたりでの水柱換算で1.14 mm、以下同様)として、4月17日~7月22日の97日間に灌水同時施肥した。この期間の液肥の総灌水量は1樹あたり552.9 L (110.6 mm)であった。秋肥は、春肥と同様に灌漑水中の窒素濃度を20 mg L⁻¹として、液肥の窒素濃度を160 mg L⁻¹に調整した。灌水時間および灌水量は、液肥を朝7分間、1樹あたり2.9 L d⁻¹ (0.58 mm)として10月30日~12月27日の期間で灌水同時施肥した。ただし、設備の一部不具合から2週間程度灌水が滞った期間があるため、実際の灌漑日数は47日であり、総灌水量は1樹あたり136.3 L (27.3 mm)とした。灌漑水源の窒素濃度を2014年4月~12月の月1回観測した結果、窒素濃度の平均値は21.2 mg L⁻¹であった。このため、実際の灌漑水由来の窒素量を含めたマルドリ区の窒素施肥量は春夏肥10.0 g m⁻²、秋

肥4.4 g m⁻²で、このうち灌漑水由来は2.92 g m⁻²であった。

Ⅲ. 研究方法

1. 土壌水分変動の調査

栽培期間中の土壌水分の変化を把握するために、圃場に土壌水分センサー EC-5、(Decagon Devices, USA)を設置した (Fig. 1)。対照区では幹から30 cm離れた位置、マルドリ区では点滴孔直下のそれぞれ深さ10 cm、30 cm、50 cmに設置した。

2. 土壌層別の根量および無機態窒素含量の調査

マルドリ方式導入前後の土壌中の無機態窒素量の変化を把握するため、深さ50 cmまでの不かく乱土壌試料 (直径50 mm、長さ250 mm×2)を藤原製作所 HS-50Sを用いて採取した。対照区とマルドリ区から各3樹を選定し (Fig. 1)、1樹あたり3箇所ずつ、導入前の2014年3月19日と1年後の2015年3月4日に採取した。採取位置はFig. 2に示したとおりである。ここで採取した地点名を各区の英語表記の頭文字CまたはMと、2014年については初期値; initialの頭文字 'i' を添え字として用い、対照区はC_i1~C_i3およびC1~

Fig. 2 Soil sampling position for inorganic N measurement. The sampling was conducted on March 19, 2014 at C_i1~C_i3 and M_i1~M_i3, and on March 4, 2015 at C1~C3 and M1~M2. C, Control plot; M, liquid fertigation system with year-round plastic mulching (MD plot); the subscript "i" indicates samples collected in 2014; no subscript is used for samples collected in 2015.

C3, マルドリ区をM_i1~M_i3およびM1~M3と記載する。なお, マルドリ区のM_i1, M_i2, M1, M2は点滴孔の近傍であった。採取した円筒試料を深さ5 cmごとに裁断して, 風乾後に重量を測定した。各裁断試料から根を回収し, 太さ1 mm以下の根と1 mmより太い根を分別し, 105°Cで一晩乾燥後の重量を測定した。4 gの風乾土あたり2 mol L⁻¹塩化カリウム40 mLを添加し, 30分振とう抽出し, 無機態窒素を抽出した。硝酸態窒素はフローインジェクション分析装置FIA-2500 (FIA-lab, USA) によるカドミウム還元-ナフチルエチレンジアミン発色法, アンモニア態窒素はインドフェノール法により測定した。ただし, 25-30 cmの層は, 採土管の抜き差しの際に表層の土壌が落下し混入した試料があったため, 無機態窒素分析結果からは除外した。

3. イオン交換樹脂埋設法による硝酸イオン吸着量の調査

農地における土壌表層から下層への浸透水の移動に伴う硝酸イオンなどの溶存物質の動態を調べる方法としては, 埋設型のライシメータを用いる方法やポーラスカップにより土壌溶液を吸引する方法などがあるが, 前者は土壌を攪乱してしまう点, 後者は継続的な調査が必要な点など, 現地調査には適さない。

そこで既往の研究(朝田ほか, 2006; Binkley, 1984; 生原ほか, 1990)を参考にイオン交換樹脂埋設法により, 下層で移動する無機態窒素の捕捉を試みた。なお, 本手法でのイオン交換樹脂への吸着は大部分がイオンの拡散に制御されており(Yang et al., 1991), 土壌水分状態や土質の影響を受ける(Pampolino and Hatano, 2000)とされている。

本研究では, イオン交換樹脂(Dowex Marathon MR-3 hydrogen and hydroxide form, Sigma-aldrich, USA)を, Binkley (1984)の方法に倣い不織布バッグ(市販のポリエチレン・ポリプロピレン製お茶パック)に包み, 直径2 cm程度の球状の樹脂バッグを作成し圃場の異なる深さ

に埋設することとした。ここで用いた樹脂は陰イオン・陽イオンの吸着が可能なミックスベッド樹脂のため, 硝酸イオン・アンモニウムイオンを吸着できる。しかし, アンモニウムイオンは大部分の試料で検出されず, 総吸着量の5%以下と少なかったため, 硝酸イオンの結果のみを報告する。樹脂バッグを10%塩酸に1時間浸漬し前処理を加えた後に純水で塩化物イオンが放出されなくなるまで洗浄し, 使用まで冷蔵庫に保存した。対照区とマルドリ区それぞれに3樹を選定し(Fig. 1), 埋設位置は各樹の南側の点滴孔直下とし, 深さは10 cm, 30 cm, 50 cmとした。点滴灌水チューブとイオン交換樹脂バッグの埋設位置の模式図をFig. 2に示す。深さ10 cmについては点滴孔の直下と, 左右に15 cm離れた点の計3点に埋設した(Fig. 3)。深さ10 cmについては, 上部の土壌をなるべく攪乱しないように移植ゴテで土壌を持ち上げて樹脂バックを挿入した。30 cmと50 cmについては, 複数期間について繰り返し測定を行うため, 上部の土壌を攪乱しないように, 点滴孔から埋設深度と同じ距離だけ離れた地点から45度の角度で直径5 cmの孔をあけ, 点滴孔直下の10 cm手前まで塩ビパイプを挿入し, ステンレス棒の先端に固定した樹脂バッグが点滴孔直下になるように設置し, 樹脂バックが土壌に密着するように塩ビパイプの先端まで土壌を充填した。

埋設期間は, 春夏肥前後の2014年3月19日~

Fig. 3 Position of ion-exchange resin bags in the plots with drip irrigation and liquid fertilization system with year-round plastic mulching (MD plot).

7月29日、秋肥前までの2014年7月29日～10月17日、秋肥前後の2014年10月17日～2015年3月4日の3回とした。回収した樹脂バッグはクーラーボックス内で氷冷して実験室に持ち帰り、バッグ表面に付着した土壌や有機物を純水で洗浄し、250G程度の遠心分離で脱水した。5gのイオン交換樹脂あたり2M塩化カリウム100 mLを添加し、60分振とう抽出して吸着された硝酸イオンを回収し、フローインジェクション分析装置FIA-2500 (FIA-lab, USA) によるカドミウム還元-ナフチルエチレンジアミン発色法で測定した。結果は、樹脂バッグひとつあたりの硝酸イオン吸着量 (mg bag^{-1}) として記述し、埋設深度ごとのバッグの吸着量の平均値を求め、3期間の合計値を求めた。

IV. 結果と考察

1. 土壌水分変動

各層別の土壌の体積含水率の変動と日別の降水量およびマルドリ区の灌水量のデータをFig. 4に示す。対照区では、降水に応じて体積含水率が大幅に変動していた (Fig. 4A, C)。一方、マルドリ区では圃場表面を被覆しているため、土壌水分に対する降雨の影響はなく、灌漑スケジュールに従って調整できていることが確認できた (Fig. 4B, C)。Fig. 4Bの拡大図に示した部分では、毎日灌水のタイミングでピークが検出された。また、マルドリ区では、灌水に由来する水分変動のピークが深さ10 cmのセンサーで灌水の都度検出されているのに対し、深さ30 cm, 50 cmでは春夏肥期間中の6月上旬ごろまでは水分変動のピークが検出されたものの、6月中旬以降は検出されず、体積含水率は低下した (Fig. 4B)。ウンシュウミカンの根群分布については、既往の報告によれば深さ30 cm程度のところに多くの根が発達するといわれている (駒村・関谷, 1985; 木村, 1941)。6月上旬ごろまで深さ30 cm, 50 cmのセンサーにピークが見られた原因は、慣行では通路など降雨による水の供給がある部位に根が発達

していたのに対して、マルドリ方式導入直後は、樹冠下に設置した点滴灌水チューブ付近の土壌中の根が発達しておらず灌漑水が十分に吸収されず、また蒸散量も少なかったために灌漑水が根域外まで浸透したためと推察される。6月中旬以降は、根が十分発達し灌水量と蒸散量のバランスがとれたため、根域外へ浸透するような過剰の灌水量ではなかったと考えることができる。慣行区とマルドリ区の根の発達の違いに関してはFig. 5に示した。

マルドリ方式のマニュアル (森永ほか, 2003) では、春夏肥期間は液肥供給し、7月中旬からは極力乾燥させるが、樹体状況に応じ樹勢維持灌水を行う。8月下旬～9月上旬は減酸のための灌水を行い、灌水量は年次の天候により調節するという指導がなされている。本試験における栽培状況に合わせた管理の調整は生産者の判断に委ねており、試験を実施した2014年は8月と9月の降水量が合計331 mmと平年値191 mmと比べると雨が多かったため、この期間の点滴灌水による水供給を行わず地表面を被覆していただけであった。このため、7月22日以降、土壌水分が徐々に低下していた。

参考として、試験に供試した区画の2014年の出荷量のデータを示す。ただし、それぞれ試験区全体の単年度の収量であり、統計的に評価できるデータではない。総収量は対照区が 7.09 kg m^{-2} 、マルドリ区 7.04 kg m^{-2} と同等であった。しかし、対照区の果汁用や自家用などの規格外品を除いた成品出荷量は対照区の 2.51 kg m^{-2} に対して、マルドリ区では 3.67 kg m^{-2} であった。さらに、成品出荷量に対して特秀、秀の等級が占める割合は、対照区64.4%に対して、マルドリ区76.2%とマルドリ区で高かった。マルドリ方式は、降雨の影響を受けずに土壌水分をコントロールすることにより、高品質化が期待できる技術であると同時に、灌水・施肥の自動化による省力化を行う技術である。森永ほか (2004) は、マルチ敷設にかかる時間が増加するが、施肥作業の軽労化および除草剤散布作業の省略、果実の成熟

Fig. 4 Volumetric water content of soil (A: Control; B: liquid fertigation system with year-round plastic mulching [MD]), Irrigation schedule and precipitation (C). The values for several periods in A and B were not obtained due to mechanical error. Precipitation data was obtained from Automated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS) at Ikuchi-jima.

揃いに伴う収穫作業回数の減少によって、労働時間を 175 時間 ha^{-1} (慣行総作業時間の9.5%) 削減できるとしている。

2. 土壌層別の無機態窒素含量

ここでは、硝酸態窒素とアンモニア態窒素の合計量としての無機態窒素含量として結果を示す。

マルドリ方式導入前 (2014年3月) の層別の無機態窒素含量は、対照区の C_1 , C_2 , C_3 とマルドリ区の M_1 , M_2 , M_3 では有意な差がなく全体の平均値は0-5 cm で 42.9 mg kg^{-1} , 5-10 cm で 13.5 mg kg^{-1} , それ以下の層では徐々に低下し45-50 cm では 4.6 mg kg^{-1} であった (Fig. 6A)。マルドリ方式導入1年後 (2015年3月) に

Fig. 5 Depth profiling of the root weight.

Columns show the average weight of roots of different diameters. $n=6$ at C1, C2 and M1, M2. $n=3$ at C3 and M3. Horizontal lines on top of the bars show the standard deviations.

C, Control plot; M, liquid fertigation system with year-round plastic mulching (MD plot)

Fig. 6 Depth profiling of inorganic N concentration.

Columns show the average of NH₄-N or NO₃-N. C1, C2 and M1, M2: $n=6$. C3 and M3: $n=3$. Horizontal lines on top of the bars show the standard deviations of total inorganic N concentration. Asterisks indicate significant difference by *t*-test at the same depth: *, $p<0.05$; **, $p<0.01$. The data of 25–30 cm soil depth were excluded due to contamination.

C, Control plot; M, liquid fertigation system with year-round plastic mulching (MD plot)

採取した試料については、両区とも幹から近い採取位置の試料 (C1, C2 または M1, M2 の組合せ) と幹から遠い採取位置の試料 (C3 または M3) とに分けて平均値を求めて比較した (Fig.

6B, C)。対照区では、C1, C2 と C3 の間に有意な差は認められなかった (Fig. 6B)。一方、マルチ区では、M1, M2 のほうがいずれの層においても M3 よりも無機態窒素含量が低く、0–5 cm

と20–25 cmの層では $p < 0.05$ の有意な差が認められた (Fig. 6C)。対照区のC1, C2とマルドリ区のM1, M2について比較すると, 0–40 cmの各層においてマルドリ区の無機態窒素含量は対照区よりも有意に低かった (データ省略) が, C3とM3の間には有意な差は認められなかった (データ省略)。

本研究では, マルドリ区の幹に近い部分 (M1, M2) と遠い部分 (M3) の無機態窒素含量に差が認められたことは, 土壌水分の状態が影響していると考えられる。マルドリ方式において灌漑水により形成される湿潤域の範囲は, 点滴孔を中心とした直径およそ20–30 cm (森永ほか, 2003; 吉田・岩崎, 2014) とされている。すなわち, M1, M2は湿潤域に含まれ, M3は, 灌漑水の影響が少ない湿潤域外であったと考えられる。マルドリ方式では, 灌水同時施肥を行うので, 肥料成分も湿潤域に対応する範囲に局部的に供給されることになる。しかし, いずれの層においてもM1, M2では, M3よりも無機態窒素含量が低い傾向が認められ, 特に0–5 cm層や20–25 cmでは有意に低かった (Fig. 6C)。このことは, 供給された肥料成分が十分に吸収されたことや, 土壌水分状態が良好になったことにより元々土壌に保持されていた無機態窒素成分も吸収されたことなどが要因と考えることができる。露地ナス栽培に点滴灌水を導入し灌水同時施肥を行った圃場で根の発達を調査した事例では, 点滴灌水チューブを

敷設した部位の周辺では細根が発達し, 灌水チューブから離れた場所では細根が少ないことが報告されている (渡邊ほか, 2014)。本研究においても, 同様にM1, M2では細根が発達しているのがわかる (Fig. 5)。一方, 対照区では, 地表面はマルチで被覆されていないため降雨の影響により地表面に施用された肥料成分は溶け出し, 土壌に浸透する。このとき, 細根が十分に発達していないため, 肥料成分の利用効率が悪く, 吸い残した成分が下方に溶脱したため, マルドリ区よりも土壌中に残存していた無機態窒素が多かったと考えられる。

3. 層別に埋設したイオン交換樹脂への硝酸イオン吸着量の特徴

表層に近い深さ10 cmに埋設したイオン交換樹脂に吸着された硝酸イオンの量は, マルドリ区で高かった (Fig. 7)。これは, マルドリ区では, 液肥灌水によって局部的に供給された硝酸イオンがイオン交換樹脂に吸着されたためである。対照区では, 春夏肥前後の期間の硝酸イオン吸着量が最も高く, 次いで秋肥前後の期間が高かった (Fig. 7A)。施肥を行っていない秋肥前の時期にも硝酸イオンの吸着は認められた。マルドリ区でも, 春夏肥前後の期間の硝酸イオン吸着量が最も高く, 次いで秋肥前後の期間が高かった (Fig. 7B)。しかし, 秋肥前の時期には硝酸イオンの吸着は認められなかった。マルドリ区の硝酸イオン

Fig. 7 Amounts of NO₃-N adsorbed on ion exchange resin (IER) bag. n=6 at 10 cm; n=3 at 30 and 50 cm. Horizontal lines on top of the bars show the standard deviations.

吸着量は深くなるほど減少したのに対し、対照区では、深さ30 cmのほうが50 cmよりも低くなっていた (Fig. 7)。

森林 (生原ほか, 1990) やサトウキビ畑 (朝田ほか, 2006) で下層への窒素溶脱量を推定するためにイオン交換樹脂埋設法を用いた研究では、高さ2 cm直径10 cm程度の円筒に充填したイオン交換樹脂に吸着された硝酸イオン等を測定し、埋設期間中に各層を通過した浸透水に含まれるイオンの移動量として評価している。これらの研究でも上層に比べて、下層ではイオン交換樹脂により捕捉された硝酸イオン比率は低くなっており、本研究での傾向と一致していた。なお本研究では、地表に近い深さ10 cmと、根域より下に位置する深さ50 cmでのイオン交換樹脂に吸着された硝酸イオンの比率は対照区20.0%、マルドリ区2.7%となり、マルドリ区で小さかった。肥料の供給方法や土壌の水分状態の違いが影響したものと考えられる。

4. マルドリ方式導入が無機態窒素の収支に及ぼす影響

マルドリ方式導入前 (2014年) と2015年の対照区、マルドリ区の樹冠下土壌の深さ50 cmまでに含まれる窒素量を次のように算出した。各土壌試料の無機態窒素含量から仮比重を用いて層ごとの100 mL円筒に換算した後に、1 m²あたりの5 cmの層での無機態窒素量に換算した。2014年の初期値は、C_i1, C_i2, C_i3, M_i1, M_i2, M_i3の平均値から算出した。2015年の対照区の値は、C1, C2, C3の平均値から求めた。2015年のマルドリ区については、灌水部分 (M1, M2) と非灌水部分 (M3) で層別の窒素含量に差が見られた (Fig. 6C) ことから、1樹あたりの圃場占有面積に占めるそれぞれの面積の重み付けを以下のように行って計算することとした。まず、1樹あたりの圃場占有面積を栽植密度から5 m²とした。次に、点滴孔間隔30 cmの灌水チューブを株間2 mの樹列両側に敷設したため、1樹あたりの点滴孔数は13.3個とした。さらに1個の点滴孔が形

Table 1 Depth profiling of the inorganic N amount.

Depth (cm)	2014	2015	2015
	Initial	Control	MD
Inorganic N (g m ⁻²)			
0–5	1.14	1.45	1.21
5–10	0.72	1.15	0.71
10–15	0.52	0.84	0.45
15–20	0.48	0.91	0.5
20–25	0.49	1.01	0.47
25–30 ^{*1}	—	—	—
30–35	0.44	0.59	0.47
35–40	0.47	0.51	0.29
40–45	0.45	0.53	0.44
45–50	0.38	0.54	0.23
Sum of all depth ^{*2}	5.56	8.34	5.24

^{*1} The data of 25–30 cm soil depth were excluded due to contamination.

^{*2} The missing value of 25–30 cm soil depth was complemented by a mean value of 20–25 cm and 30–35 cm soil depths.

成する湿润域の円の直径を0.3 m (森永ほか, 2003; 吉田・岩崎, 2014) と仮定し、灌水部分の面積を0.07 m²とした。最後に、これらの積から1樹あたりの灌水部分の面積を0.93 m²とし、1樹あたりの占有面積と灌水部分との差4.07 m²を非灌水部分の面積とした。1樹あたりの占有面積に対するそれぞれの部分の面積割合の比率を層ごとの無機態窒素含量に乘じ合算することで1 m²あたり5 cmの層での無機態窒素量に換算した。25–30 cm層は欠測のため、20–25 cm層と30–35 cm層の数値の平均値を用いて算出した。その結果、層別の無機態窒素量はTable 1のような分布となった。

これに基づき対照区とマルドリ区の無機態窒素収支を考察する。ここでは、窒素の無機化・有機化、脱窒については考慮せず、植物吸収窒素量については文献値 (中間, 2000) を用いて推定した。ただし、対照区で施用した有機ペレット肥料の無機化は考慮した。試験開始前の圃場の窒素含量は2014年3月の調査結果から5.6 g m⁻²とした (Table 2 (a), 以下Table 2の項目を示す記号を括弧書きで付す)。これを初期値として、各区の

Table 2 Comparison of N flow between plots with conventional irrigation (Control) and plots with drip irrigation and liquid fertilization system with year-round plastic mulching (MD).

	Control	MD
	N (g m^{-2})	
(a) Initial amount of inorganic N (Estimated from total N values in 2014)	5.56	
(b) Amount of Fertilized N (Spring and Autumn)	24	14.4
(c) Available inorganic N ((a) + (b) + Precipitation ^{*1})	30.56	19.96
(d) Remaining amount of inorganic N (Estimated from 2015 control and MD plots)	8.34	5.24
(e) Plant absorbed N ^{*2}	12.05	11.97
(f) Leached nitrogen (c) – (d) – (e)	10.17	2.75
(g) Difference of leached N between Control and MD plots	7.42	—

^{*1} The amount of N in precipitation was estimated as 1.0 g m^{-2} in the Control plot and 0 g m^{-2} in the MD plot.

^{*2} Plant absorbed N was estimated based on methodology from Nakama (2000). In this study, N was estimated based on the premise that the content of N in the fruit was the same between the Control and MD plots.

窒素施肥量 (b) と降水由来の窒素量 (ここでは、 1.0 g m^{-2} と仮定) を加算した。ただし、マルドリ区はマルチ被覆しているため、降水の影響を受けないものとした。これによって算出される利用可能な無機態窒素量 (c) はそれぞれ、対照区 30.56 g m^{-2} 、マルドリ区 19.96 g m^{-2} となった。1年後の残存窒素量 (d) は、2015年3月の調査結果から対照区 8.34 g m^{-2} 、マルドリ区 5.24 g m^{-2} とした。植物体による窒素吸収量 (e) は、ウンシュウミカン果実の窒素含量0.17% (中間, 2000) を参照し、対照区とマルドリ区の総収量をもとに果実による持ち出し量を推定すると対照区 12.05 g m^{-2} 、マルドリ区 11.97 g m^{-2} となった。中間 (2000) による年間吸収養分の推定では、枝幹の肥大や落葉も考慮している。しかし、本研究では果実収量以外の生育に関する測定値がないため推定に含めなかった。以上で求めた推定値について、利用可能な無機態窒素 (c) から1年後の栽培終了後の残存窒素量 (d) と植物体による吸収量 (e) の差し引きした値 (f) を算出した。この値 (f) は、果実以外の樹体吸収量

などの不明部分を含む値であるが、仮にこれを溶脱量とみなせば、対照区で 10.17 g m^{-2} 、マルドリ区では 2.75 g m^{-2} となり、両者の差し引きからマルドリ区のほうが対照区より 7.42 g m^{-2} 溶脱量が少ないことが推定された。

さらに、ここで推定されたマルドリ区の溶脱量 2.75 g m^{-2} は過大評価の可能性があるが、水源井戸の富栄養化地下水から圃場に還元された窒素量 2.92 g m^{-2} との差し引き分に着目すると 0.17 g m^{-2} であり、ほぼ一致した。すなわち正味の溶脱はほとんど生じなかったと考えることができる。以上のように無機態窒素の収支に関する考察から、マルドリ方式の導入による窒素溶脱量に及ぼす影響が明らかとなった。

ただし、より厳密な窒素溶脱量の評価を行うためには、今回の収支計算には組み込まなかった土壌中での窒素の有機化・無機化、脱窒といった過程や枝幹の肥大や落葉についてのより詳細なデータを収集することが不可欠であり、今後研究を進める必要がある。

V. おわりに

本研究では、カンキツ園に由来する富栄養化地下水を利用したマルドリ方式を導入した生産者圃場において、栽培期間の前後における土壤中の無機態窒素含量や土壤に埋設したイオン交換樹脂に吸着した硝酸態窒素量を調査した結果、マルドリ方式の導入により、窒素溶脱量を大幅に低減できる可能性を示した。関野（2006）はマルドリ方式の経営試算において、高品質果実割合の増加などで、所得の向上が可能であるとしているが、マルドリ方式の導入時の費用負担の変化として、1,000 m²あたり 76,853 円の増加としている。このうち、マルドリ方式の灌水同時施肥では施肥効率が上がるため、大幅な減肥が可能であるが、用いる液肥の単価が高いため、若干増加するとしている。本研究では、富栄養化した地下水に含まれる硝酸態窒素濃度を圃場に還元することで、肥料の一部を置き換えた。このことは、環境浄化型の栽培体系となるだけでなく、経営費のさらなる削減に貢献するものと考えられる。

謝 辞

本研究は、科学研究費助成事業（科学研究費補助金）基盤研究（A）（課題番号：25241028、代表者：小野寺真一）による研究成果の一部である。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 朝田 景・千川 明・加藤 誠・西村 拓（2006）耕起，不耕起が亜熱帯サトウキビ畑土壌の養分溶脱に与える影響。土壌の物理性，**104**, 41–49.
- 小野寺真一・齋藤光代・清水裕太・松森堅治・高橋英博・金 広哲・谷口智雅（2014）流域スケールでの地下水および窒素の再利用に関する研究。日本水文科学会学術大会発表要旨集，**29**, 91–92.
- 木村光雄（1941）傾斜地に於ける柑橘「温州」の根群に就て。園芸学会雑誌，**12**(3), 179–193.
- 駒村研三・関谷宏三（1985）土壌母材，有効土層の差異とウンシュウミカン樹の生育及び根群分布。果樹試験場報告A，**12**, 79–92.
- 齋藤光代・小野寺真一（2009）沿岸農業流域における地下水による硝酸性窒素流出の季節変動特性。陸水学雑誌，**70**, 141–151.
- 関野幸二（2006）傾斜地力ンキツ作における省力・軽労化及び高品質果実生産技術の経営的評価。農業機械学会誌，**68**(1), 14–19.
- 中間和光（2000）夏肥の効果と施肥法。農文協編，果樹園芸大百科1，カンキツ。農山漁村文化協会，279–289.
- 生原喜久雄・相場芳憲・川島 裕（1990）イオン交換樹脂による森林土壌浸透水の移動イオン量の測定。日本生態学会誌，**40**, 19–25.
- 森永邦久・島崎昌彦・草場新之助・星 典宏（2005）カンキツ生産の新しい技術 マルドリ方式—その技術と利用—。近畿中国四国農業研究叢書，1。農研機構近畿中国四国農業研究センター，131 p.
- 森永邦久・中尾誠司・吉川弘恭・村松 昇・島崎昌彦・草場新之助（2003）周年マルチ点滴灌水同時施肥法（マルドリ方式）マニュアル。農研機構近畿中国四国農業研究センター，29 p.
- 森永邦久・吉川弘恭・中尾誠司・関野幸二・村松昇・長谷川美典（2004）露地栽培ウンシュウミカンにおける周年マルチ点滴かん水同時施肥法の効果。園芸学研究，**3**(1), 33–37.
- 吉川省子・岩井正直・渡邊修一・吉川弘恭（2012b）茶園における富栄養化地下水を用いた日射制御型低流量液肥灌水減肥栽培がチャの生育や土壌化学性に及ぼす短期的影響。日本土壌肥料学雑誌，**83**, 647–657.
- 吉川省子・村口 浩・大西孝志・渡邊修一・吉川弘恭（2012a）日射制御型低流量点滴灌水システムを用いた地下水灌水による環境保全型マーガレット栽培農家実証試験。日本土壌肥料学雑誌

- 誌, **83**, 574–580.
- 吉川弘恭・中尾誠司 (2010) ソーラーポンプを利用した拍動自動灌水装置の組み立て方法. 近畿中国四国農業研究センター研究資料, **7**, 21–31.
- 吉田純也・岩崎光徳 (2014) 根域に対する灌水域の割合がカンキツ樹の乾燥ストレスに及ぼす影響. 園芸学研究, **13** (4), 335–341.
- 渡邊修一・笠原賢明・吉川弘恭・松森堅治 (2014) 根の簡易調査法の提案と露地ナス圃場における調査事例. 日本土壤肥料学雑誌, **85**, 519–524.
- Binkley, D. (1984) Ion exchange resin bags: factors affecting estimates of nitrogen availability. *Soil Science Society of America Journal*, **48**, 1181–1184.
- Dasberg, S. and Or, D. (1999) Drip Irrigation. Springer Science & Business Media, 162 p.
- Pampolino, M. F. and Hatano, R. (2000) Comparison between conventional soil tests and the use of resin capsules for measuring P, K, and N in two soils under two moisture conditions. *Soil Science and Plant Nutrition*, **46** (2), 461–471.
- Yang, J. E., Skogley, E. O., Georgitis, S. J., Schaff, B. E. and Ferguson, A. H. (1991) Phytoavailability soil test: development and verification of theory. *Soil Science Society of America Journal*, **55**, 1358–1365.

原稿受付：2016年1月13日

原稿受理：2016年8月19日

この論文に対する「討論」を2017年6月30日まで受け付けます。

周年マルチ点滴灌水同時施肥法の導入が カンキツ園での窒素溶脱に及ぼす影響

渡邊 修一^{1*}・笠原 賢明¹・松森 堅治¹・
清水 裕太¹・向井 章恵²・小野寺 真一³

要 旨

「周年マルチ点滴灌水同時施肥法」(マルドリ方式)とは、透湿性マルチシート下に設置した点滴チューブによって灌水と施肥を行う栽培方式である。本研究では、マルドリ方式が窒素溶脱に及ぼす影響を明らかにするために、温州ミカンの圃場において現地施肥基準をもとに固形肥料を表面散布した対照区と、対照区の60%の窒素を灌水同時施肥したマルドリ区を設け、土壌無機態窒素の変化を調査した。点滴チューブとの位置関係を考慮して、樹幹から30–60 cm離れた位置で採取した土壌を分析した結果、栽培後の土壌無機態窒素量は対照区よりもマルドリ区の方が低い傾向を示した。さらに、試験前後の土壌無機態窒素量、施肥量、果実収穫量から推定した窒素溶脱量はマルドリ区の方が対照区よりも少なかった。マルドリ区の推定窒素溶脱量と灌漑水から圃場に還元された窒素との差し引きはほぼ一致しており、正味の溶脱はほとんど生じなかったと考えられる。以上より、マルドリ方式の導入がカンキツ園での窒素溶脱を低減する効果があることが明らかとなった。

キーワード：窒素収支，点滴灌水，カンキツ園，地下水，マルドリ方式