

## <論文>

# 畑地灌漑を想定した下水再生水の水質評価

重松賢行<sup>1)</sup>、吉田綾子<sup>2)</sup>、山下尚之<sup>3)</sup>、田中宏明<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 環境省(〒100-8975 東京都千代田区霞ヶ関1-2-2 E-mail:takayuki\_shigematsu@env.go.jp)

<sup>2)</sup> 東京農工大学生物生産技術学科(〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1 E-mail:a3yosida@nodai.ac.jp)

<sup>3)</sup> 京都大学大学院工学研究科附属流域圏総合環境質研究センター(〒520-0811 滋賀県大津市由美浜1-2)  
(E-mail:yamashita@biwa.eqc.kyoto-u.ac.jp,htanaka@biwa.eqc.kyoto-u.ac.jp)

### 概要

本研究は、沖縄県島尻地区での下水再生水の灌漑利用計画に基づき、島尻地区下水再生水実証プラントから得られる下水再生水について、栽培試験を実施して植物への影響調査を実施するとともに、灌漑による土壌・地下水環境への影響について考察し、以下の知見を得た。

- 1) 下水再生水の灌漑によるコマツナの生育障害は見られず、灌漑用水として利用可能である。
- 2) 下水再生水及び高度処理水の灌漑によりコマツナの葉面積が増加する傾向がみられ、下水中の成分がコマツナの生育促進に寄与することが示唆された。
- 3) 塩分濃度が高い下水再生水の灌漑により、コマツナ地上部中の Na 含有量が高まり、窒素成分の吸収が抑制される傾向がみられた。
- 4) 下水再生水からの窒素供給により施肥量の削減が期待されるが、付加される窒素量は地下水への硝酸の溶脱を助長する恐れがあるため、灌漑量を考慮した肥培管理が必要である。

キーワード: 下水再生水、アンモニア性窒素、コマツナ栽培試験、環境負荷

## 1. はじめに

地域内の資源循環や自然環境の保全が重要視される現在、下水道においても処理水や汚泥の有効利用、水域環境のさらなる保全が求められている。通常、下水処理水を再処理した水(以下、下水再生水)についても、地域内で安定供給可能な水資源として、様々な用途への活用が期待できる。国内では、下水再生水をトイレ用水や樹木への散水、修景用水に利用している事例は多く、目的に応じた下水再生水の水質基準が既に設けられている<sup>1)</sup>。しかし、わが国では農地への灌漑事例は少なく、農業利用を目的とした水質基準は定められていないのが現状である。

沖縄本島南部に位置する島尻地区では下水再生水を用いた畑地灌漑が計画されている<sup>2)</sup>。島尻地区には大規模河川が存在せず、水資源が慢性的に不足している。沖縄県内では灌漑水の確保のため、通常のダム建設の他に、琉球石灰岩を母材とした土壌(島尻マージ)の特性を活かした地下ダムの建設も進んでいるが、島尻地区は透水性の低いジャーガルが分布していることから、地下ダムの建設も困難である。この島尻地区の下水再生利用プロジェクトでは、那覇浄化センターの二次処理水を高度処理し、約1,550haの農地に日量最大51,000m<sup>3</sup>/日を供給する、国内最大規模の農業用再利用事業となる予定である。当該地区では、従来からサトウキビ栽培が盛んであるが、灌漑水が安定供給されれば、より収益性の高い野菜栽培に転換が可能となる。また、人口

が集中している那覇市近郊という立地条件を活かし、野菜等の地産地消の実践も期待できる。

また、現行の那覇浄化センターでの下水処理過程には窒素除去が導入されていない。現状では、放流水質に窒素濃度規制はないが、将来的には周辺海域、特にサンゴ礁保全のために、窒素負荷が問題となることも予見される。下水再生水の灌漑水として利用は、再生水中の窒素成分も農作物に供給することとなるため、周辺海域への環境負荷低減効果も期待できる。

下水処理水の農業利用は、海外では実用例も多くカリフォルニア州の「Title22」やWHOのガイドライン<sup>3)</sup>などで、濁度や大腸菌群数などの衛生学的安全性に関する項目を中心に水質基準値が定められている。しかし、前述のとおり国内では下水再生水の農業利用の基準は定められていない。農業利用の場合、人々が摂取する食物の生産現場での利用となるため、ウイルスを含めた病原性微生物等、人体に悪影響を及ぼす物質等のより厳しい評価基準が必要である。また、下水中には、重金属類のほか、塩分、微量有機成分等も含まれている可能性があり、これら作物の生育を阻害する物質の土壌蓄積が懸念される<sup>4)</sup>。灌漑用水は土壌を浸透し、雨水などとともに最終的に地下水層に移行することも考慮すると、長期的な環境影響評価も重要となる。

本研究では、下水再生水による畑地灌漑が予定されている沖縄本島島尻地区をモデル地区として、現地下水再生水(島尻地区下水再生水実証プラント)を対象に、畑地灌漑を

目的とした水質評価を実施した。水質評価として、本研究では、下水再生水の灌漑水としての利用を目的としているため、野菜栽培を想定しコマツナを用いた栽培試験を実施した。さらに、下水再生水中の窒素成分に着目し、植物体への窒素移行量を算定した。

## 2. 材料及び方法

### 2.1 下水再生処理実証プラントの概要

島尻地区の下水再生水実証プラントは、那覇浄化センター内に隣接して設置されている。再生水の灌漑用水としての利用を目的としていることから、ウイルスなどの病原性微生物除去のために「Title22」に準拠した処理プロセスを採用している<sup>2)</sup>。

#### (1) 下水再生処理実証プラントの処理フロー

下水再生水実証プラントの運転条件を表1に示す。本実証プラントは、2002年から運転条件を検討するために試験運転が開始され、「Title22」の基準値を参考に独自の再生水水質基準の設定を目指し、「ヒトへの衛生学的安全性」を中心とした様々な水質のモニタリング調査が実施されてきた<sup>14)</sup>。その結果、再生水からは原虫類およびウイルスは検出されなかった。本実証プラントの処理フローは、放流水に対して「前塩素処理 5mg/L→凝集沈殿→砂ろ過→UV消毒→後塩素処理 4mg/L」であり、このフローで得られるウイルス除去率は、USEPA が水道で想定している  $10^{-4}$  の年間許容感染リスクレベルを満足できる Title22 の再生水システムと同等であると確認された<sup>6)</sup>。温暖な本地域では年間を通じて下水の水温が高く、処理プラント内にユスリカ幼虫やスライム等が発生したため前塩素処理が行われている。また、放流水中の  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度が約 20mgN/L であり塩素消毒の際にクロロミンが生成し、ウイルスの不活化に効果は低く、UV 消毒の有効性が実証されたため、UV 消毒を基本工程としている。トリハロメタンなどの塩素消毒の副生成物は、日本の水道水質基準を下回ることが確認されている。

表1 下水再生水処理実証プラントの運転条件

処理原水	放流水
処理量	40m <sup>3</sup> /day
凝集剤	PAC
ろ過速度	300m/day (150m/day × 2基)
ろ材	アンスラサイト・砂・支持砂利
塩素消毒	次亜塩素酸ナトリウム
UV消毒	0.1kW低圧ランプ2基

#### (2) 下水再生水の特性

那覇浄化センターでは、活性汚泥法が硝化抑制型で運転されているため、放流水中の全窒素濃度は年平均 23.3mgN/L (2003年)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は平均 18.9mgN/L

(2003年)と高い<sup>7)</sup>。また、Cl<sup>-</sup>が約500mg/Lと非常に高い。桑江ら<sup>8)</sup>は、那覇市下水処理場の流入水および海水の水質調査を長期間実施し、流入下水中のCl<sup>-</sup>とMg<sup>2+</sup>との間に非常に良い相関があり、その傾きは海水に近似していたと報告しており、更なる調査の結果、再生水中のCl<sup>-</sup>は特に潮が満ちた時間に破損した下水管に流入する海水由来であることが確認されている。

### 2.2 コマツナの栽培試験

通常、下水処理水のバイオアッセイでは、藻類などを用いることが多いが、本試験では下水再生水の畑地灌漑、とくに、野菜栽培を想定している。そのため、農業分野で堆肥や液肥等の資材における生育阻害検定に一般的に用いられるコマツナを用いた栽培試験<sup>9)</sup>で評価することとした。

#### (1) 下水再生水の水質

本実験では、実際の再生水成分によるコマツナの生育阻害を評価するために、島尻地区の下水再生水処理実証プラントの下水再生水を用いた。なお、下水再生水の対照水として、水道水(東京都)、O市のA処理場から採水した高度処理水(以下、高度処理水)を用いた。高度処理水は、凝集剤添加担体利用循環式硝化脱窒法により、窒素ならびにリン除去が行われているため、本実験で用いた窒素除去のない島尻地区の下水再生水とは性状が異なる。表2に栽培試験に用いた下水再生水等の水質を示す。

表2 下水再生水等の水質

分析項目	pH	EC mS/m	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mgN/L	NO <sub>x</sub> <sup>-</sup> mgN/L	TN	
下水再生水	6.3	2.1	17.1	2.69	22.6	
対照水	水道水	7.2	0.38	N.D	1.53	2.02
	高度処理水	7.4	0.3	N.D	2.0	7.01
分析項目	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup> mg/L	DOC			
下水再生水	499	279	7.16			
対照水	水道水	20.2	17.3			
	高度処理水	42.0	30.0			
			2.8			

#### (2) 栽培試験の概要

コマツナは、品種みずき(サカタ配合を用いた。供試土壌は、東京都世田谷区内の畑地より採取した多腐植質黒ボク土、すなわち栽培歴のある土壌(既耕地)とした。なお、現地沖縄土壌のジャーガルは粘性が強く、保水性などの土壌物理性によって作物の生育に影響が出てしまう恐れがある。栽培試験では特定項目の影響を調査するために、土壌中水分量などの栽培環境を全試験区で一定に保つ必要がある。本研究の栽培試験は、水質の違いによるコマツナの生育への影響調査を主目的としている。そのため、通気性や保水性が良好であり、小規模で閉鎖系のポット栽培試験で一般的に用いられる黒ボク土を用いることとした。

肥料成分は、窒素、リン酸、カリウムとしてそれぞれ硫酸、過リン酸石灰、塩化カリウムを各 250mg(25kg/10a)相当量混合した土壌をノイバウエルポット(面積 1/10,000a、内径 11.3cm、高さ 6.5cm、排水弁なしの閉鎖型)に充填した。コマツナは 25 粒/ポット播種し、屋外の網室内(気温平均 24.1℃、最低 19.4~31.5℃、日照 1~20,000Lux 程度、降雨は遮断されている。)で 27 日間栽培した。栽培概要を表3に示す。

表3 コマツナ栽培試験の概要

供試品種	コマツナ(サカタ交配:みずき)
供試土壌	既耕地黒ボク土
施肥量	窒素(硫酸):1.19g/pot リン酸(過リン酸石灰):1.47g/pot カリウム(塩化カリウム):0.42g/pot
試験区	無施肥区(水道水) 対照区(水道水) 高度処理水(O市A処理場) 下水再生水

いずれの試験区も各 3 ポット栽培した。また、試験区により生育状況が異なるため、栽植密度が一定となるよう播種後 6 日目に間引きを行い、ポットあたり 10 株とした。

(3) 灌水条件

下水再生水によるコマツナの発芽及び発根に及ぼす影響は、別途、シャーレ内での発芽試験を実施し、生育障害がないことを確認している<sup>5)</sup>。そのため、本試験では、本葉展開後の下水再生水による生育障害を把握するため、全てのポットで本葉が展開した播種 12 日目までは、全試験区とも水道水を灌水し、その後、各試験水の灌水を開始した。灌水量は 1 ポットあたり 1 回 50ml、1 日の灌水回数は土壌の乾燥状態により調整し、通常、晴天時は 1 日 2 回、曇天及び雨天時は 1 日 1 回とした。栽培期間中の総灌水量は、2,150ml(水道水 19 回 950ml、試験水 24 回 1,200ml)であった。灌水は頭上灌水(植物体に水滴がかかる状態)で行った。

(4) 調査項目

播種 27 日目に各試験区の葉色を比較するために、葉緑素値(SPAD 値)を測定するとともに、地上部のみを収穫し、葉面積、生体重、乾物重(75℃で 24 時間乾燥後の重量)を測定した。また、養分吸収量を把握するため、全窒素、全炭素、リン酸、カリウムの肥料成分の他、塩基類(Ca、Mg、Na)、微量元素(Mo、Cu、Zn、Mn、Fe、B)を分析した。各試料は、風乾、微粉碎後、分析に供した。全窒素、全炭素は CN コーダーによる乾式燃焼法<sup>9)</sup>、その他の元素はテフロン加圧分解容器-ICP 発光分光分析法<sup>10)</sup>により定量した。

2.3 下水再生水からの窒素供給

下水再生水中には肥料成分となり得る養分が含有している。とくに、本試験で用いた下水再生水は窒素除去がなされていないため、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N が多く残存している。この窒素成分

は、そのまま水域に放流された場合、窒素負荷となるが、畑地等に灌水された場合、養分供給に寄与すると考えられる。

(1) 植物体への窒素移行量

下水再生水の灌漑利用により、農作物に吸収される下水再生水中の成分、とくに、窒素量と土壌及び地下水系への流出負荷を推定する目的で、コマツナの栽培試験における養分の移行量を推定した。各試験水中全窒素濃度と試験期間中の灌水量から試験水由来の窒素供給量を算出した。また、試験前に混合した肥料中の窒素含有量を「肥料由来」とした。作物中の窒素吸収量は、収量調査のコマツナ中の全窒素含有量に乾物中を乗じて算出している。

(2) 下水再生水からの窒素供給量の試算事例

島尻地区において栽培を予定している作物を対象に下水再生水を灌漑利用した場合の窒素供給量の試算事例を解析し、下水再生水の灌漑利用に伴う環境負荷について考察した。

3.結果及び考察

3.1 コマツナの栽培試験

(1) コマツナの生育状況及び収量調査

灌水は全て頭上灌水としたため試験水が植物体に直接かかる状態であった。本試験で用いた下水再生水は、塩分濃度が高く、葉に塩類障害が生じる恐れがあったが、収穫時までコマツナの葉や茎に障害はみられず、生育は良好であった。著者らは、これまでに本試験で用いた下水再生水によるコマツナの発芽試験を行い、種子及び根が直接下水再生水に接する状態でも種子や根の色や形態に異常はみられないことを確認している<sup>5)</sup>。一般に、植物体に塩類が付着すると、変色や褐変などの障害が起きる。このような塩類障害は、作物の種類や生育ステージによって異なるが、土壌水中の塩化ナトリウム濃度が0.3%程度で障害が現れるといわれている<sup>11)</sup>。本研究の対象となる下水再生水は、Na<sup>+</sup>やCl<sup>-</sup>濃度が通常の下水处理水より高いという特徴があるが、500mg/L程度のCl<sup>-</sup>濃度では、コマツナ外観を損なうことはないといえる。

収穫時(播種 27 日目)のポットあたりの乾物重及び葉面積の平均値を図1に示す。乾物重については、下水再生水区は対照区(水道水)とほぼ同等であり、高度処理水区でやや高い値を示したが、いずれの処理区においても有意差(p<0.05)はみられなかった。しかし、葉面積についてみると、高度処理水区、下水再生水区ともに対照区より大きく、高度処理水と対照区間には有意差(p<0.05)がみられた。これらの結果から、高度処理水や下水再生水を灌水することにより、コマツナの葉面積を増大させ、可食部となる葉面の生育の促進がみこまれ、農産物としての収量増加に寄与する可能性が示唆された。

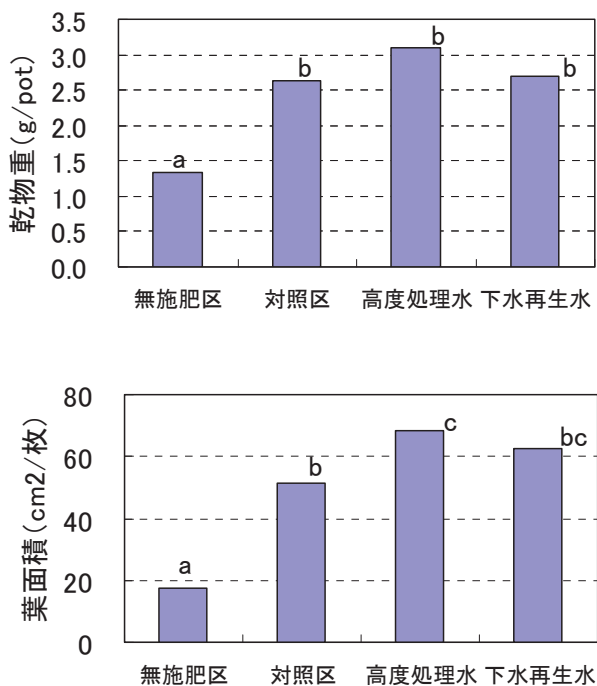


図1 コマツナの乾物重及び葉面積の比較

注) 同一記号(a,b,c)間でそれぞれ有意差なし ( $p < 0.05$ ) (F検定)

## (2) コマツナの養分吸収に及ぼす影響

収穫時(播種 27 日目)にコマツナの葉緑素値 (SPAD 値) を測定した結果、対照区が高度処理水区、下水再生水に比べ高い値を示した。SPAD 値は葉に含有するクロロフィルの分光特性を用いて葉緑素を光学濃度差測定法にて定量化した値である。植物体は、一般に窒素含有量が増加するとクロロフィル含有量も増加し、葉の緑色が濃くなるといわれている。そこで、各試験区のコマツナ地上部中窒素含有率を比較した結果、対照区は高度処理水区、下水再生水区に比べて高い値を示し、SPAD 値と同様の傾向がみられた。また、窒素含有率から窒素吸収率を求めると、表 4 に示すように生育量(乾物重)に応じて高度処理水区が最も窒素を吸収していることがわかった。

これらの結果から、高度処理水区では、吸収された窒素成分が速やかに生育に用いられていることを示唆された。すなわち、高度処理水区のコマツナは、対照区や下水再生水区と比較して生育ステージが進んでいると考えられた。

下水再生水は、高度処理水に比べて  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度が高いことが特徴である(表 2)。しかし、表 4 に示すように、下水再生水区のコマツナは、高度処理水に比べて窒素吸収量が低く、乾物重も高度処理水区に劣っている。これは、下水再生水中の窒素が効率的に吸収されていない、つまり、窒素吸収を阻害する要因があると考えられる。

図 2 に示すように、下水再生水区では、コマツナ地上部中のナトリウム含有率は著しく高いことがわかった。F 検定にて下水再生水区と高度処理水区、対照区それぞれの試験区との間に有意差 ( $p < 0.01$ ) が見られた。

表 4 コマツナの葉緑素及び窒素含有率の比較

調査項目	葉緑素値 (SPAD 値)	全窒素 (%)	乾物重 (g/pot)	全窒素 (mg/pot)
無施肥区	29.5	1.5	1.3	21
対照区	44.1	7.1	2.6	186
高度処理水	39.1	6.6	3.1	206
下水再生水	38.2	6.9	2.6	183

全炭素や主要な栄養素であるリン、カリウムその他、塩基類 (Ca, Mg)、そして微量元素である Mo, Cu, Zn, Mn, Fe, B の作物の吸収率を F 検定にて解析した結果、ほとんどの項目で下水再生水区とその他の試験区との間で有意差 ( $p < 0.05$ ) は見られなかった。しかし、リンについては下水再生水区と対照区で有意差 ( $p < 0.05$ ) が見られた。

下水再生水は、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度の他に、海水由来と考えられる塩分が多く含まれていることがわかっている。そこで、コマツナ地上部中のナトリウム含有率について各試験区で比較した(図 2)。

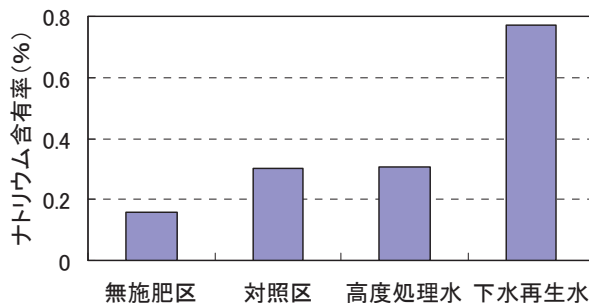


図 2 コマツナのナトリウム含有率の比較

下水再生水中には水道水の 16.1 倍、高度処理水の 9.3 倍の Na が含有されている(表 2)。著者らは、下水再生水の土壌中での挙動を把握するために、別途沖縄土壌であるジャーガルを用いたカラム浸透実験を実施している<sup>5)</sup>。このカラム試験の結果では、下水再生水由来の Na は、土壌の表層 10cm までの深さに残存することが明らかになっている。3.1(1)コマツナの生育状況及び収量調査で示したように、下水再生水の灌水により、コマツナの葉や茎には塩類障害とみられる症状は確認されなかったが、下水再生水中の塩分は、コマツナの養分吸収に影響することが明らかとなった。

一方で、コマツナ中の各元素の含有成分比を見ると、全炭素含有比は 33.2% (再生水区) ~ 33.6% (対照区) と差がなかった。さらに、CHO 以外の元素で成分比を比較すると、窒素、カリウムがこれらに次いで多く、続いて Ca, Na, P, Mg であった。なお、ナトリウムは最も含有率が多かった再生水区でも全体の 0.77% と非常に小さく、またナトリウムは植物にとっては不要な元素とされているので、ナトリウム単独でコマツナの品質に大きな影響を及ぼすとは考えにくい。

また、再生水区では、試験水由来のナトリウム供給量 351mg に対し、吸収量は 23.6mg と微小である。施設栽培の場合、栽培期間中の降雨は遮断されるが、期間外は開放され、降雨によって土壌中のナトリウム分は洗い流される。また、ソルゴーなどの塩類吸収植物を栽培する等の対策をとることで、ただちに塩類集積が問題化することはない。

本実験では、陰イオンである Cl<sup>-</sup>含有率の分析には至らなかったが、Na の吸収と同様、高濃度に存在する Cl<sup>-</sup>についても、生育過程で吸収されていると推測される。なお、長坂ら<sup>12)</sup>は、塩素系窒素肥料(塩安)の施用により、塩素の吸収により窒素(硝酸)の吸収量が抑制されることを報告しており、本実験においても同様の現象がみられたと考えられる。本実験の結果では、高度処理水に比べ下水再生水の乾物重は低い値を示したが、葉面積には有意差はなく、農産物としての収量の評価にも差はないといえる。

農業分野では、最近、塩素イオンを含む資材の土壌施用は、葉菜類の地上部中の硝酸含有量を低減させる効果があると報告されて話題となっている<sup>12)</sup>。硝酸は、人体への影響が懸念され、野菜の硝酸濃度が問題となっている。EU では野菜の硝酸含有量の基準値が設けられており、国内でも低硝酸野菜の生産技術の確立が求められている。また、一般に、葉菜類では硝酸含有量が低いほど、ビタミンCや糖含有量が高くなる傾向がある。ビタミンCや糖含有量が高い野菜は、食味や日持ちが良く、いわゆる高品質野菜とされ、市場価値が高い。本試験では、コマツナの硝酸やビタミンC、糖含有量などの栄養分析は実施できなかったが、下水再生水のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N濃度に対して、コマツナ窒素吸収量が低かったことから勘案しても、下水再生水によるコマツナの硝酸低減効果は十分期待できるといえる。なお、Cl<sup>-</sup>イオンの吸収により硝酸イオンの吸収が抑えられるメカニズムは不明であるが、植物体中のイオンバランスを保つため、硝酸イオンの吸収が阻害されていると推測される。

### 3.2 下水再生水からの窒素供給

#### (1) 植物体への窒素移行量

前述の作物体中の窒素吸収量や試験水中の濃度などから、試験水の違いが水・土壌肥料・作物系での窒素移行量に及ぼす影響の把握を試みた。なお、本実験で用いたポット形状および灌水条件は、栽培試験において、一般的に畑地(好気)条件を満たすものと考えられるため、脱窒の影響は考慮しないものとした。

図3に27日間の栽培期間における窒素の移行量を示す。肥料由来の窒素吸収量は、無施肥区の吸収量の差分から対照区では165 mgNとなり、全窒素吸収量に占める割合は88.7%と高くなった。

施肥由来窒素と再生水由来窒素のどちらを優先的に摂取するかは、窒素の安定同位体比を用いてその摂取経路を推定することが可能である。

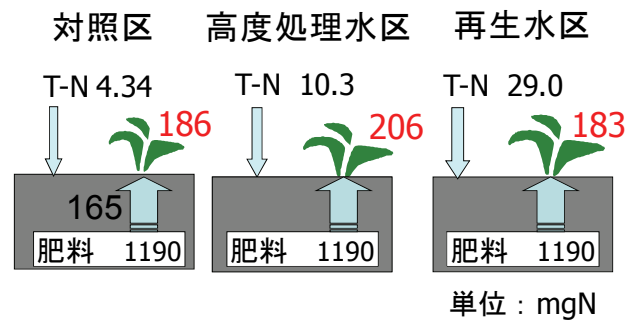


図3 栽培期間(27日間)での植物体への窒素移行量

本試験では、高度処理水区や再生水区において、肥料由来の窒素吸収量を定量することは困難である。しかし、筆者らが以前に実施した土壌カラム試験の結果、下水再生水中のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nは土壌に灌水されると、一時的に土壌への吸着が見られるものの、比較的速やかに畑作物の窒素供給源であるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N<sup>13)</sup>へ変化し、土壌表層(10cm)中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N濃度が高まることがわかっている<sup>5)</sup>。従って、下水再生水中の窒素成分は植物に供給可能な形態で存在し、植物の窒素吸収量に含まれると考えられる。本試験では、再生水区では試験水からの窒素供給量は29mgNと最も多いが、植物体の窒素吸収量は高度処理水区や対照区よりも少ない。これは、再生水中に共存する塩分の影響によるものと考察される。再生水区の場合には、灌水によって塩化物イオンが供給されたために、塩化物イオンが優先的に吸収された結果、高度処理水区に比較してコマツナの窒素吸収量が減少したと推察される。

#### (2) 現地での下水再生水からの窒素供給量の試算事例

本研究の栽培試験では、施肥量は通常施肥量、灌水は土壌の乾燥状態を見ながら必要最小限で行った。そのため、土壌浸透水とともに、塩類や硝酸などの成分が流出する量の評価が出来ていない。しかしながら、実際の畑地栽培においては、農家によって計画水量以上に再生水の灌水が行われる場合も少なくない。必然的に再生水由来の含有成分供給量の影響も無視できなくなる。

含有成分による環境影響や資源の有効活用の面から再生水利用を評価するためには、現地での計画水量等の情報をもとに考察する必要がある。そこで、沖縄島尻地区で実際に栽培されている作物の標準窒素施肥量と再生水灌水量から試算された窒素負荷を表5に参照する<sup>14)</sup>。再生水の全窒素濃度は30 mgN/L、栽培作物は露地栽培を想定しているため現地での降雨量と計画灌水量との関係も考慮し、全体の必要灌水量の50%が降雨によって供給されると仮定している。また、再生水由来の窒素量は作物ごとに定められた標準灌水量をもとに、灌水日数と窒素濃度(30mgN/L)、降雨率(50%)を乗じて算出している。

表 5 沖縄島尻地区栽培予定作物への窒素供給量

栽培品目	肥料由来	再生水由来 (kg/10a)	合計	灌水期間 (月)
サトウキビ		22	28.0	10.0
チンゲンサイ		17	17.8	1.3
ホウレンソウ		19	20.2	2.0
コギク		36	39.6	6.0
マンゴー		20	34.4	12.0

全体窒素要求量に占める下水再生水由来窒素供給量は、灌水期間に比例して多くなり、永年作物のマンゴーの灌水に利用した場合、年間施肥量の 41.1%が下水再生水から供給可能と試算される。栽培期間が短い葉菜類(チンゲンサイ、ホウレンソウ)においても施肥量の 5%程度を再生水から供給可能と考えられる。下水再生水中の  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  は、土壌とのイオン交換と硝化により速やかに  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  に変化することから、畑作物の窒素源として利用可能であり、施肥削減が期待できる。しかし、灌水量が多い場合は  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  は溶脱し、地下水層へと流入することが想定される。

施肥により供給された窒素は、土壌の種類により、地下への溶脱速度が異なるとされ、山田らは 3 種の土壌を充填したライシメーターでの  $\delta^{15}\text{N}$  値(窒素安定同位体比)を用いた実験を行い、灰色低地土では施肥の窒素がそのまま浸透、多腐植質の黒ボク土では、施肥窒素と土壌の窒素の両方が浸透することを明らかにしている<sup>15)</sup>。一般的に黒ボク土で年間 30 kgN/a の施肥量で地下水中の  $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$  が 10 mgN/L を超えるとされている<sup>16)</sup>。土壌中で陰イオンの吸着がない沖縄の土壌では、さらに窒素負荷が増加する可能性がある。なお、別途、沖縄の土壌で実施したカラム実験の結果では、計画値の 2 倍量の間欠的な灌水で再生水由来の全窒素の約 75%が流出することがわかっている<sup>5)</sup>。また、島尻地区の下水再生水は塩分濃度が高いため、陽イオンの溶脱に伴い陰イオンである  $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$  の溶脱が助長されることも予見される。

#### 4.まとめ

本研究では、将来に事業化が予定されている沖縄本島島尻地区の下水再生水について、その有効性を検証するために畑地灌漑を想定した野菜の栽培試験を実施した。また、下水再生水中の窒素分や塩分に着目し、灌漑による環境への影響を把握するために、下水再生水からの窒素供給について考察した。

1) 島尻地区の下水再生水は、塩分濃度が高く、植物体に直接水滴がかかる頭上灌水を行った場合、塩類障害が生じることが懸念されたが、コマツナの生育、外観に障害はみられなかった。従って、下水再生水は植物の生

育面において灌漑用水として利用可能であるといえる。

- 2) 下水再生水や高度処理水の灌水により、対照区に比較してコマツナの葉面積が増加する傾向がみられ、下水中に含まれる成分が作物の生育促進に寄与すると考えられる。これらの結果から、葉菜類を中心とした野菜への生産現場での利用が期待できる。
- 3) 下水再生水を灌水した場合、水中のナトリウム濃度が高かったことより、コマツナ地上のナトリウム含有率は有意に高くなった。下水再生水は、高度処理水よりも  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度が高く窒素供給量が多いと考えられるが、コマツナの生育、葉色、窒素濃度ともに、高度処理水より低い値を示した。これは、下水再生水中の塩分により植物体の窒素( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )の吸収が阻害されたためと推測される。
- 4) 島尻地区で実際に栽培を予定している作物対象とした下水再生水からの窒素供給量の試算事例では、下水再生水からの窒素供給は、永年作物であるマンゴーでは年間施肥量の 41.1%、栽培期間が短い葉菜類でも 5%前後に相当すると試算され、灌漑により施肥量を削減できる可能性がある。

以上の結果から、下水再生水中成分は、野菜の生育促進に一部寄与すると考えられるが、灌水量が多い場合、窒素や塩分等は作物に吸収されることなく、土壌中に残留、地下水へ溶脱されると考えられる。下水再生水中の窒素等の成分を有効に活用し、環境負荷の低い農業を実現するためには、肥料の施用量、灌漑用地の土壌特性を把握した上で、灌水計画を立てることが重要といえる。

#### 謝辞

情報提供並びにデータの収集にご協力いただきました内閣府沖縄総合事務局土地改良総合事務所の関係者の方々に謝意を表します。また本研究は、(財)河川管理環境財団の助成を受けて行われたものです。

#### 【参考文献】

- 1)国土交通省・国土技術政策総合研究所:下水処理水の再利用水質基準等のマニュアル,2005
- 2) 仲間雄一・加藤浩一・藤田智康・荒川浩成:再生水を利用したかんがい計画について—国営土地改良事業地区調査「島尻地区」の概要—,第 86 回農業土木学会九州支部講演会,pp.36-39,2005
- 3)WHO:Guidelines For The Safe Use Of Wastewater, Excreta and Grey water Volume 2 Wastewater use in agriculture,2006
- 4)田中宏明・浅野孝:農業灌漑への下水処理水再利用—沖縄でのわが国初の本格的な計画—,再生と利用, 29, 144, 6-14, 2006
- 5)重松賢行・吉田綾子・山下尚之・田中宏明,下水再生水の畑地灌漑利用における土壌及び水環境に及ぼす影響,環

- 境工学研究論文集, 44, 39-47, 2007
- 6) T. Shigematsu, W.K.C.N. Dayanthi, N. Yamashita and H. Tanaka, The First Introduction of Reclaimed Wastewater to Dry-Farming field in Okinawa Island, Japan, The Proceedings of 6<sup>th</sup> IWA Specialist Conference on Water Reclamation and Reuse for Sustainability, Antwerp, Belgium, 2007
- 7) 沖縄県下水道管理事務所: 維持管理年報 平成15年度版
- 8) 日本土壌協会, 堆肥等有機物分析方法, 216-217, 2000
- 9) 土壌標準分析・測定法委員会編, 土壌標準分析・測定法, 博友社, 1990
- 10) 後藤逸男・村本穰司・蜷木翠, テフロン加圧分解容器-ICP 発光分光分析法による植物の無機成分分析, 土肥誌, 63: 345-348, 1992
- 11) 藤原俊六郎・安西徹郎・小川吉雄・加藤哲郎編, 土壌肥料用語辞典, 農文協, 140, 1998
- 12) 長坂克彦・加藤知美・小林真理, 塩安系窒素肥料が葉菜類の硝酸塩濃度に及ぼす影響, 日本土壌肥料学会関東支部会講演要旨集, 19, 2006
- 13) 米山忠克: 植物栄養・肥料の事典, 3 元素の生理機能, 3.3.2 窒素, 植物栄養・肥料の事典 編集委員会, 朝倉書店, 72-74, 2002
- 14) 沖縄総合事務局土地改良総合事務所: 再生水に係る調査概要及び事業着工後の検討事項, 2007
- 15) 山田裕・森田明雄・米山忠克: 3種の土壌を充填したライシメーターでの施肥窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  値と栽培作物、浸透水、土壌の  $\delta^{15}\text{N}$  値の関係, 土肥誌, 70, 533-541, 1999
- 16) 長谷川周一・波多野隆介・岡崎正規: 環境負荷を予測する-モニタリングからモデリングへ-日本土壌肥料学会監修, 博友社, 2002

## Evaluation of the Reclaimed Wastewater Quality Simulating Agricultural Irrigation

Takayuki Shigematsu<sup>1)</sup>, Ayako Yoshida<sup>2)</sup>, Naoyuki Yamashita<sup>3)</sup>, Hiroaki Tanaka<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Environment Management Bureau, Ministry of the Environment (E-mail: takayuki\_shigematsu@env.go.jp)

<sup>2)</sup> Department of Bioproduction Technology, Tokyo University of Agriculture (E-mail: a3yosida@nodai.ac.jp)

<sup>3)</sup> Research Center for Environmental Quality Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University  
(E-mail: yamashita@biwa.eqc.kyoto-u.ac.jp, htanaka@biwa.eqc.kyoto-u.ac.jp)

### Abstract

This research investigated the effect of environmental aspect of using the reclaimed wastewater in agricultural irrigation, in corporation with Okinawa wastewater reclamation and reuse project.

In the plant growth experiment using *Brassica campestris*, no significant growth inhibition was observed in the reclaimed wastewater application. The results suggested that the reclaimed wastewater is applicable for crop irrigation and, in addition, the constituents can promote plant growth compared to the tap water irrigation. On the other hand, to reduce the environmental burden of the reclaimed wastewater, the amounts of irrigation water and fertilizer should be managed appropriately.

### Key words:

reclaimed wastewater, ammonium nitrogen, cultivation experiment, environmental load