

(6) 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

重松 賢行^{1*}・吉田 綾子²・山下 尚之¹・田中 宏明¹

¹京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)

²東京農業大学短期大学部 生物生産技術学科 (〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1)

* E-mail: shigematsu@biwa.eqc.kyoto-u.ac.jp

下水再生水の畑地灌漑を想定した実証プラントから供給される再生水について、コマツナを用いた発芽試験を行った結果、試験水質による植物の発芽及び根の伸長への有意な差は見られなかった。また、再生水中の NH_4^+ 及び海水由来の塩分が、灌漑によって土壌の化学性ならびに土壌浸透水に及ぼす影響を調べるための土壌カラム実験を実施した。土壌分析の結果、 NO_3^- は土壌中にも一時的に保持され、土壌の塩基バランスも変化した。さらに、カラム実験の結果をもとに、再生水の畑地灌漑における物質収支を試算した結果、再生水中成分が土壌に移行またはイオン交換を引き起こして他成分の流出を促進させることも確認された。これらの移行量や流出負荷は、実際の作物栽培での環境負荷を予見する際の参考値となり得る。

Key Words : reclaimed wastewater, dry-field irrigation, column experiment, soil accumulation

1. はじめに

近年、環境保全を目指した循環型社会の構築が叫ばれている。下水道においても下水処理水を都市部やその周辺で再生される貴重な水資源と捉え、利活用することが推進されている¹⁾。国内では下水再生水は、トイレ用水や樹木への散水用水あるいは修景用水などに活用されている事例は多く、目的に応じた再生水の水質基準²⁾が設けられているが、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。再生水の農業利用は、栽培作物への水供給のみならず、再生水中の成分が作物に吸収されることで有効成分の活用、さらに、土壌中の微生物等による有害物質の分解などの浄化作用が期待でき、水域への負荷低減に寄与するものと考えられる。

沖縄本島那覇市の南部に位置する島尻地区において、下水再生水の畑地農業利用プロジェクトが計画されている³⁾。本プロジェクトは、近傍に位置する那覇浄化センターの処理水を高度処理し、約1,600haの農地に日量最大60,000m³/dを供給する国内初、且つ最大規模な下水の再利用事業である。島尻地区は、降雨パターンの特性ならびに大規模河川が存在しない丘陵地帯であることが原因で、水資源が慢性的に不足している。人口の集中している那覇市近郊という地産地消の実践が可能な立地条件を活かし、農業のさらなる振興を図るために、作物生産に不可欠な水資源の確保が急務な課題となっている。

島尻地区は透水性の低いジャーガル（石灰岩質台地土）が分布し、また丘陵地帯に位置するために地下ダムの建設も困難である。このような背景から、本地域は、農業利用水となりうる新たな水資源の確保が必要な地域といえる。また、現行の那覇浄化センターでの下水処理システムでは、窒素除去が行われていない。現状では、放流水質に窒素濃度規制はないものの、将来的にはサンゴ礁豊かな周辺海域への過剰な窒素負荷が問題となることも予見される。下水再生水の農業利用は、単に作物栽培への水供給だけでなく、農地を介して再生水中の成分を自然循環させる、すなわち海洋への環境負荷低減効果も期待でき、サンゴ礁の保全という本地域特有の環境対策の一環として有効な手段と考えられる。

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⁴⁾など水質基準も定められているが、国内では下水再生水の畑地灌漑に関する基準は定められていない。農業では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となってくる。また、下水中には、重金属類のほか、塩分、微量有害化学物質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⁵⁾。灌漑用水は土壌を浸透し、雨水など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。

著者らは、これまでに本地域の下水再生水の畑地灌漑を想定し、再生水中成分のうち特に約17mgN/Lの NH_4^+ がその大部分を占める窒素分の土壌中での挙動に着目し、室内にて土壌カラムを作成し、動態把握の実験を行ってきた⁹⁾。その結果、土壌浸透過程にて表層付近の好気条件下では硝化作用により NO_3^- が生成され、連続的な灌水の実験系でのカラムの下層部においては嫌気的な条件が発生することで、脱窒作用により N_2O あるいは N_2 として気化することを土壌中ガス分析により確認した。また、このカラム実験では、窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$ 値: ‰) を測定し、濃度変化以外の指標からも土壌浸透過程における硝化や脱窒などの窒素形態の変化を証明している⁹⁾。だが、これらの実験では農地灌漑で最も重要視される再生水の安全性及び作物に対する生育阻害の有無、作物の生育環境である土壌の物理化学性についての調査・検討には至っていない。また、本地域では現状としてはNaClによる再生水中塩分濃度が高い特徴があり、その影響の評価はこれまでのカラム実験では明らかにされていない。

そこで、本研究では、下水再生水の灌漑利用を目指し、作物の生育への影響、土壌および地下水等の周辺環境への流出負荷量の把握を目的とした。第一に、現地の再生水を対象に、農地への灌漑水としての利用可能性について、作物栽培や周辺環境に影響を及ぼす窒素や塩分の項目を中心に水質を解析した。さらに、作物への生育阻害の有無を判断するために、野菜栽培を想定しコマツナを用いたパイオアッセイを行った。また、土壌浸透過程における再生水中物質の動態ならびに地下水へ影響ならびに灌漑による土壌環境の変化を把握するために、前報⁹⁾と同様、カラム実験の手法を用いて実験を実施した。さらには、実験前後の土壌分析の結果より、窒素や塩基類の土壌中含有量の変化および地下水系への移行量、さらに土壌成分の溶出量を実測し、再生水の農地灌漑における物質収支を算出し、環境負荷の試算も行った。

2. 沖縄県島尻地区における下水再生水の水質

本研究では、沖縄の再生水実証プラントで再生処理された下水再生水の農地灌漑を目的に、作物栽培や周辺環境への影響に関連する項目を中心にモニタリング調査の結果を解析した。

(1) 下水再生処理実証プラントの概要

那覇浄化センターに併設された島尻地区再生水実証プラントでは、病原性微生物除去のために「Title22」に準拠した再生処理プロセスを有している³⁾。

処理フローは図1に示すように、放流水に対して「凝集沈殿→砂ろ過→塩素またはUVによる消毒」である。また、プラントの運転条件を表1に示す。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、これまで多項目に渡るモニタリングが行われてきた。

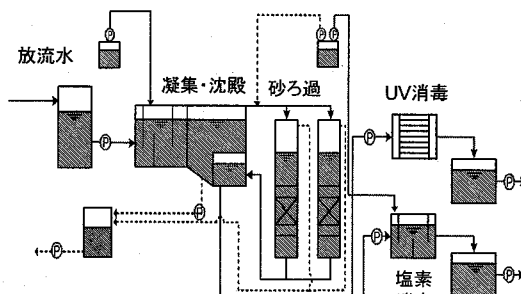


図1 下水処理水の再生処理フロー

表1 下水再生処理実証プラントの運転条件

処理原水	放流水または二次処理水
処理量	40m ³ /day
凝集剤	PAC
ろ過速度	300m/day (150m/day×2基)
ろ材	アンササイト・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) 島尻地区下水再生水の特性

a) 窒素項目

那覇浄化センターの処理工程では、活性汚泥法が硝化抑制型で運転されているため、二次処理水中の窒素濃度は年平均TN23.3mgN/L (2003年)、特に NH_4^+ -N濃度は平均18.9mgN/L (2003年) と高くなっている⁷⁾。

b) 塩分項目

これまでの水質モニタリング調査の結果、再生水中のCl⁻が平均600mg/L以上と高いことがわかっている。桑江ら⁸⁾は、那覇浄化センター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⁻とMg²⁺と良い相関から、海水の流入を示唆している。また、土地改良総合事務所による下水処理場の放流水のECの長期的なモニタリングの結果、潮位とEC値の変化が連動していることが分かり、再生水中のCl⁻は海水由来であると考えられる。

Cl⁻濃度が高い処理水を農地に灌水した場合、土壌への塩類の蓄積が懸念される。特に、施設栽培などでは、降雨が遮断された状態で長期的にCl⁻が供給されるため、土壌中の塩基類のアンバランス化や作物の塩類障害などを招くと考えられる⁹⁾。Ayers and Westcott (1985)¹⁰⁾ およびPettygrove and Asano(1985)¹¹⁾ は、塩分は土壌の浸透ポテンシャル、比イオン毒性に影響し、土壌の物理条件の劣化の原因となると報告している。そこで本地域の再生水をAyers and Westcott¹⁰⁾ による灌漑用水水質評価のためのガイドラインの項目に従って評価を実施した。作物の水

利用に影響するEC値は、利用制限の程度が「少し～中程度」であったが、Na⁺濃度が高いことによる土壤中の浸透速度への影響を評価するナトリウム吸着比 (SAR) については、EC値と組み合わせでの評価で「利用制限なし」となった。感受性の強い作物に対して特定のイオンが過剰になることで発生する「イオン毒性」に関しては、表面灌漑において、Na⁺が「少し～中程度」の、Cl⁻は「高い」利用制限となった。評価として土壌の浸透性には影響がないと考えられるが、特定の作物栽培には影響を及ぼす可能性があることが示唆された。

島尻地区では将来的にCl⁻濃度を200mg/L以下にすべく海水侵入のない下水を優先的に再生利用する方針だが、本研究では塩分濃度の高い現状の水質での評価とする。

3. コマツナを用いたバイオアッセイ

(1) 発芽試験の目的

再生水の農地灌漑において、まず、再生水成分そのものの作物への生育阻害が懸念される。そこで、発芽レベルでの生育阻害の有無を判断するために、コマツナの発芽試験を実施した。下水処理水のバイオアッセイでは通常、藻類などを用いる場合が多いが、本試験では再生水の畑地灌漑を想定しているため、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の発芽試験¹²⁾で評価することとした。日本では、下水を用いた発芽試験の実施例は非常に限られている。

(2) 発芽試験の方法

発芽試験の概要を表2に示す。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、島尻地区の実証プラントの再生水を用いた。なお、再生水の対照水として、イオン交換水、水道水（東京都）、0市のA処理場から採水した二次処理水（以下、二次処理水）を用いた。二次処理水は、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再生水とは性状が異なる。表3に試験水の分析結果を示す。

表2 コマツナ発芽試験の概要

供試品種	コマツナ（サカタ交配：みずき）
	再生水（島尻地区実証プラント）
試験区	イオン交換水・水道水（東京都） 二次処理水
実験条件	25℃暗黒条件
試験区	50粒×4枚

発芽試験では、まず、検液4mlをろ紙（東洋No.3）1枚を敷いたシャーレ（直径9cm）に分注し、コマツナ種子

を50粒置床した。蒸散を防ぐため、純水で湿らせたろ紙1枚をはり付けたシャーレの上蓋をかぶせ、25℃暗黒条件下で培養した。種子置床24時間後に発芽状態を観察するとともに、48時間後に各シャーレから代表的な5個体を採取し根長を測定した。さらに、試験区ごとの根長に5%水準にて平均値の差の検定を実施した。

表3 発芽試験に用いた試験水の水質一覧

項目	pH	EC	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	TN
		dS/m	mgN/L		
再生水	7.5	1.58	17.8	0.49	23.3
イオン交換水	6.6	0.022	N.D	N.D	0.14
対照水 水道水	7.2	0.38	N.D	1.53	2.02
2次処理水	7.4	0.3	N.D	1.55	2.41
項目	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
	mg/L				
再生水	427	20.2	19.3	17.8	224
イオン交換水	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
対照水 水道水	20.2	15.3	3.57	1.90	17.3
2次処理水	42.0	21.8	2.54	7.54	30.0

(3) 発芽試験の結果

表4のようにいずれの区も播種後24時間以内に99.5～100%の種子が発芽し、発芽率および発芽速度に相違はみられなかったと言える。すなわち、再生水によるコマツナの発芽阻害はみられなかった。また、図2に示すように発芽後の根の伸長程度について調査した結果、いずれの区も根長は2～3cmと生育に違いはみられなかった。5%水準で各試験区の根長の平均に差があるか2つの試験区ずつ検定を行った結果、どの2つの試験区においても有意な差は見られなかった。発芽試験では、種子及び根が直接再生水に接する状態で培養されるが、種子や根の色や形態に異常はみられなかった。

以上の結果から、再生水によるコマツナ発芽、発根に対する影響は発生しなかったと言える。一般に、塩分の高い灌漑水では、土壤中の塩類濃度が上昇し植物は水分吸収が阻害されたり、葉などに塩類が付着することで葉

表4 コマツナ平均発芽数と発芽率(48時間後)

調査項目	再生水	対照区		
		純水区	水道水区	二次処理水
平均発芽数	49.8	49.8	50	49.8
発芽率(%)	99.5	99.5	100	99.5

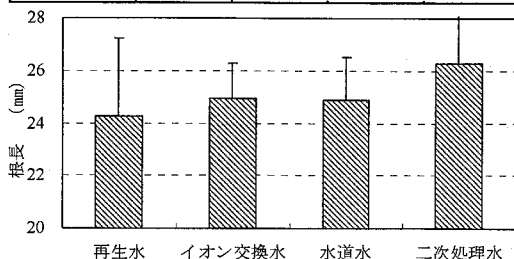


図2 播種48時間後のコマツナ根長

が変色する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¹³⁾。本研究の対象となる再生水は、 Na^+ や Cl^- 濃度が通常の処理水より高いという特徴があるが、発芽レベルでは、植物体に直接影響を及ぼす濃度ではなかったといえる。なお、最近、塩素イオンは葉菜類の硝酸含有量低減効果があるという報告がなされている¹⁴⁾。近年、硝酸の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。今後、塩分濃度が高い場合の再生水中 Cl^- が灌漑利用において野菜の品質、特に硝酸含有量に及ぼす影響について検討することで、再生水の新たな利用価値が提案できる可能性もある。

4. 土壌カラムを用いた 土壌及び地下水への影響評価

再生水を農地に灌水した場合、再生水の土壌浸透の過程で再生水中成分の土壌吸着や土壌成分の溶脱が予見される。著者らがこれまでに行った窒素動態把握の実験⁹⁾の結果により、再生水中に含まれる NH_4^+ は、土壌表層付近で硝化され、土壌中を溶脱しながら嫌気的な条件のもとで脱窒によって窒素除去がされることが分かっている。さらには、前述のように再生処理の原水である放流水には、海水由来の塩分が含まれている。陰イオンである NO_3^- や Cl^- の土壌下層方向への移行は、 Ca^{2+} や Mg^{2+} 、 K^+ などの陽イオンの溶脱を助長させる作用がある。土壌中の陽イオンは、窒素やリン酸同様、作物の生育に必要な成分であるが、作物の生育にはその含有量のみならず含有比率、すなわちイオンバランスも重要な要素である。そこで、本実験では、再生水の灌漑による土壌化学性への影響に着目し、灌水後の土壌および浸透水の分析を行うとともに、これまでの窒素項目に加えて土壌中の陽イオンにも着目したカラム実験を行うことでその挙動を把握することを目的とした。さらに、本実験では、前述の窒素動態把握実験と比較してカラムの規模を縮小し、深度ごとの土壌の分析を行うことで、窒素項目および塩基項目の土壌カラム実験系における物質収支を試算した。

(i) カラム実験の概要

本実験では、灌漑の対象となる島尻地区の畑地から採取したジャーガル（石灰岩質台地土）を風乾させ、カラム内の土壌物理性均一にするために、粉碎後2mmの篩を通過させた土壌を実験に供した。なお、土壌を採取した畑は今期、実際に作物が栽培されており、窒素、リン酸、カリウムの施肥がなされている。内径95mm、高さ255mm

アクリル製のカラムに土壌を充填し、上部から土壌表層に対して純水（Milli-Qまたは精製水）ならびに再生水（人工調整2次処理水）を灌水した。充填時の容積重が純水区1.04g/cm³ 再生水区1.10g/cm³、空隙率はそれぞれ60.7%、58.2%であった。灌水量及び灌水方法は、実際の畑地への灌漑を想定し、また再生水中 NH_4^+ からの好気的な条件での硝化細菌による硝酸生成および成分の土壌内の移行を把握しやすい灌漑量を予め検討し、カラム内が極端な嫌気状態にならない条件として間欠的に週3-4回、1回あたり20mm（現地の計画灌漑量の2倍量）とした。カラムへの灌水は、試験水の調達上の理由により開始42日目から63日目までの灌水休止期間を挟んで述べ93日間行った。なお、休止期間中は表面を覆い蒸発を防ぐ処置を行ったため、カラムの重量に変化はみられなかった。カラム実験の概要を表5に示す。

表5 カラム実験の実験条件

試験区	純水区	再生水区
使用水	Milli-Q/精製水	人工調整2次処理水
土壌	ジャーガル【石灰岩質台地土】 （既耕地より採取・2mm以下に破碎）	
土壌充填量	内径95mm×高さ255mm	
灌水頻度	20mm×3-4回/week（計画値の約2倍量）	
灌水方法	間欠的	
温度	室温（15-20℃）	
採水	流出水 土壌水（深度10cm・20cm）	
採水時間	灌水1日経過後	

表6 カラム実験で用いた再生水の水質

項目		pH	EC (dS/m)	NO_2^-	NO_3^-	NH_4^+	D-TN
				(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
カラム再生水 (n=6)	平均値	7.64	2.07	N.D.	2.61	17.4	24.3
	標準偏差	0.068	0.052	0	0.64	0.55	3.00
島尻再生水 (n=1)		7.74	2.08	2.9	1.29	17.1	23.3
項目		Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}
		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
カラム再生水 (n=6)	平均値	25.8	4.64	39.6	354	660	28.5
	標準偏差	3.4	14.8	11.4	14.8	11.4	1.54
島尻再生水 (n=1)		20.7	16.3	25.3	210	514	76.9

注) カラム再生水：カラム実験に用いた人工調整2次処理水
島尻再生水：実証プラントの再生水（2006年12月採取）

また、本実験では対照区として水質による動態の違いを明確にするために純水区（Milli-Q/精製水）を設けた。本実験では窒素と塩分の動態と土壌への影響の調査が目的であり、これらの物質の濃度を一定に保つために、再生水区では島尻地区の再生水ではなく、発芽試験で用いた2次処理水を採取した同一の0市A処理場の2次処理水

をGF/Clにてろ過後、 NH_4Cl 及び NaCl を添加し、島尻地区の再生水と同等の NH_4^+ 及び Cl^- 濃度となるよう人工的に調整した擬似再生水を用いた。表6にカラム再生水 (n=6)、島尻再生水 (n=1) の水質分析値を示している。

土壌浸透水については、土壌表層から10cm、20cm付近の土壌水を土壌溶液採取器 (DAIKI社製) にて吸引採取したほか、底面からの流出水を採取して水質分析に供した。

(2) 灌水前後のカラム土壌の化学性の変化

土壌は実験開始前(カラム充填前)の土壌と実験終了後、カラム上部から5cm刻みに採取した土壌をいずれも土壌採取後、35℃で風乾させて分析した。土壌の化学性に関する項目は、農地の土壌化学性の評価項目に従って、 pH ・ EC ・無機態窒素 (NH_4^+ ・ NO_3^-)・陽イオン交換容量 (CEC)・陽イオン (Ca^{2+} ・ Na^+ ・ Mg^{2+} ・ K^+)・リン酸 (Trug法抽出：微酸溶出性、水溶性)、可給態微量元素 (DTPA抽出) を分析した。なお、本実験では、再生水中に高濃度の Cl^- が含有していることを考慮し土壌中の水溶性陰イオンの測定も行った。

分析方法は、無機態窒素は竹迫¹⁵⁾の方法に基づき IN KCl に振とう抽出した溶液をFIA法、陽イオンは村本¹⁶⁾の方法に従って $\text{pH} 7.1$ M酢酸アンモニウムにて抽出した溶液をICP発光分光分析法で測定した。その他の成分について土壌標準分析・測定法¹⁷⁾に従って分析した。

表7 灌水前後の土壌化学性の変化 (乾土あたり)

分析土壌	pH		EC (dS/m)	無機態窒素		リン酸	
	(H_2O)	(KCl)		NH_4^+ ($\text{mgN}/100\text{g}$)	NO_3^- ($\text{mgN}/100\text{g}$)	加給態 ($\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$)	水溶性 ($\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{g}$)
灌水前	8.3	7.2	0.20	1.21	0.93	18.4	12.2
灌水後	8.6	7.3	0.52	0.78	2.62	—	—

分析土壌	交換性塩基				CEC ($\text{meq}/100\text{g}$)	塩基飽和度 (%)	Cl^- 水溶性 ($\text{mg}/100\text{g}$)
	CaO ($\text{mg}/100\text{g}$)	MgO ($\text{mg}/100\text{g}$)	K_2O ($\text{mg}/100\text{g}$)	Na_2O ($\text{mg}/100\text{g}$)			
灌水前	2044	73.6	139	10.2	17.4	459	2.78
灌水後	2084	62.8	115	113	—	480	54.8

表7に灌水前後の主な土壌化学性の変化を示す。灌水前は土壌充填前(実験前)の土壌平均値、灌水後の値は、最も変化の大きかった実験終了後の再生水区の表層5cm土壌値を示している。土壌化学性は、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 8以上、交換性 $\text{CaO} 2000\text{mg}/100\text{g}$ 以上とアルカリ性である。土壌の保肥力を示す陽イオン交換容量 (CEC) は実験前土壌にて $17.4\text{mg}/100\text{g}$ と小さいが、交換性 CaO 濃度が高いため、塩基飽和度は400%以上と非常に高くなっている。これは、珊瑚石灰由来のジャーガルの特性といえる。また、土壌中のリン酸のうち、作物が吸収可能な可給態リン酸は実験前土壌で $18.4\text{mg}/100\text{g}$ 程度と栽培の適正值であった¹³⁾。土壌中ではリン酸は吸着されたために土壌中のリン酸濃度は農地の施肥量を反映すると考えられる。最近では、施肥過剰によるリン酸濃度が $100\text{mg}/100\text{g}$ 以上と蓄積してい

る畑が多く存在する。リン酸濃度から判断して、本実験で用いた土壌は適切な肥培管理がなされていると考えられる。さらに、一般に家畜ふんや汚泥コンポストなどを施用している畑では Cu や Zn 濃度が高い傾向があるが、本実験で用いた土壌では等の微量元素濃度が低く適正の範囲内だったため有機物等の過剰施用がないと考えられる。

a) 窒素

土壌の窒素成分は無機態窒素項目の分析を行った。

図3は、実験前土壌の平均値・純水区の実験後土壌の平均値および再生水区の深度5cmごとの NH_4^+ ならびに NO_3^- 含有量を窒素量で示している。 NO_3^- に関しては、表層5cmにて実験前日で2.8倍という明らかな含有量の増加がみられた。一方、下層ほど NO_3^- 含有量は減少し、最下層部の20-25cmでは、無機態窒素含有量は純水区の実験後土壌とほぼ同等であった。 NH_4^+ については、実験前土壌に比較して全ての地点で減少がみられた。土壌中では表層付近にて流入水由来の NH_4^+ の硝化が進み、 NO_3^- へと変化して溶脱するが¹⁸⁾、土壌の粒径組成や間隙率などの違いによって土壌中で非定常な不飽和流が生じているために、生成した NO_3^- が全ては溶脱することなく、表層部分の間隙中に土壌水と共に保持されていると考えられる。

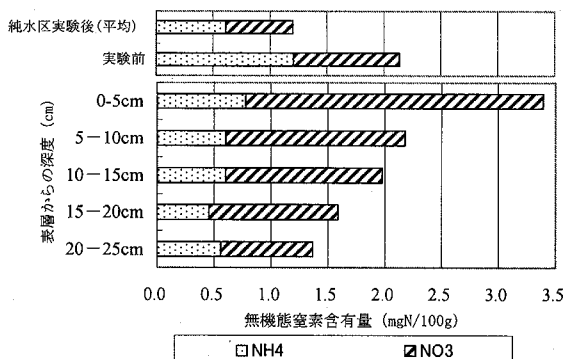


図3 再生水区土壌中の無機態窒素含有量の変化

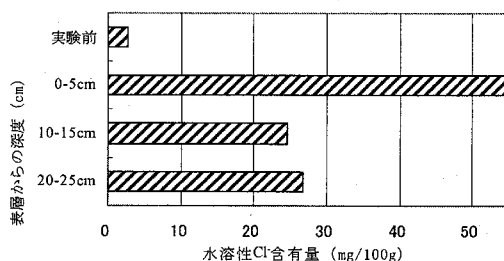


図4 再生水区土壌中の水溶性 Cl^- 含有量の変化

b) 塩化物イオン

再生水中に平均 $660\text{mg}/\text{L}$ 含まれていた Cl^- については、図4に示すように土壌分析結果においても再生水区の全

てにおいて水溶性 Cl^- 濃度の増加が見られた。特に表層5cmにおいては実験前の19.8倍の含有量増加が見られた。この結果から、 NO_3^- と同様に Cl^- が表層部分で増加したことが分かる。本実験では水溶性 Cl^- の評価にとどまるが、再生水由来で流入した Cl^- が NO_3^- と同様、土壌間隙中の不均一な水の流れによって全ては溶脱せず一時的に土壌水中に保持されたためと考えられる。

c) 交換性塩基類

土壌中の交換性塩基類の分析において、実験に用いたジャーガルのカルシウム含有量が非常に多く、塩基飽和度が実験前土壌で460%と大きかった。図5に再生水区の実験後深度ごと、純水区実験後平均値ならびに両実験区実験前土壌の交換性塩基含有量を示す。 CaO の含有量が全体の大きな部分を占め、含有量自体も大きくは変化しなかった。しかし、 Na_2O においては実験前土壌および純水区実験後土壌に比較して、再生水区の全ての深度での増加がみられた。再生水由来の Na^+ が土壌浸透過程の早い段階で土壌中の Ca^{2+} や K^+ などとイオン交換反応をされ、土壌に吸着したものと考えられる。

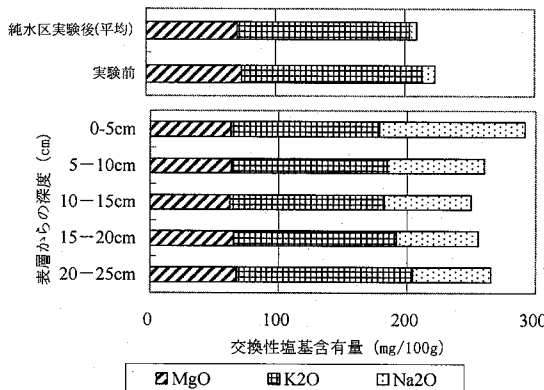


図5 再生水区土壌中の交換性陽イオン含有量の変化

(3) カラム中の水収支および土壌浸透水の水質変化

灌水した水の移行状態を把握するため、灌水量及びカラム底からの流出水量および実験終了後の土壌含水比を測定した。土壌含水比は、カラム上部から5cm刻みに土壌を採取し、105°C24時間乾熱乾燥させ、土壌重量から算出した。カラムの各層の土壌含水率は、純水と再生水区では、中間部分含水率がやや異なるものの、両区ともに下層でやや高くなる傾向がみられた。

実験後のカラムの深度別土壌含水比を図5に示している。

実験期間中の総灌水量は純水区4826ml, 再生水区4572mlであり、純水区では灌水量の66.9%が流出し、13.9%が土壌水として間隙中に保持された。一方の再生水区では、流入水の65.9%が流出し、15.3%が土壌水と

して増加した。蒸発などが原因と考えられる損失水量は、純水系にて19.1%、再生水区にて18.7%となった。また、カラムが定常状態での毎回の灌水後の流出率は、純水区で平均77.6%、再生水区で平均76.9%となった。

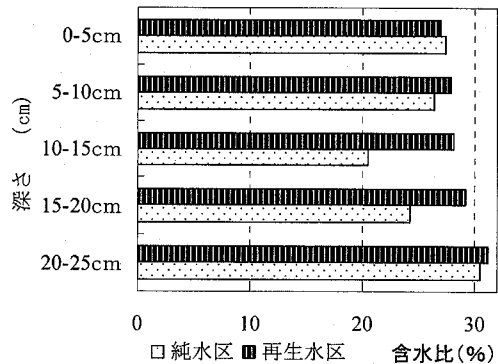


図6 カラム土壌の深度別土壌含水比

a) 窒素

カラム実験での流出水の NH_4^+ ・ NO_3^- 及びD-TNの濃度変化を図6に示す。純水区では、 NH_4^+ ・ NO_3^- 共に実験開始後10日までに10cm・20cm・流出水共に濃度が急激に上昇し、その後時間と共に減少する傾向がみられた。一方、再生水区では、D-TN及び NO_3^- 濃度が実験開始後から徐々に上昇し、実験後期には10cm・20cm・流出水共に減少がみられた。なお、流出水の NO_3^- については実験終了直前の90日経過後に10mg/Lを下回った。 NH_4^+ 濃度は、添加した再生水中にて17.4mg/Lであったのに対し、10cmで5日経過後に4.89mg/Lまで上昇したが20cm及び流出水では濃度が低下した。10cm土壌水の NO_3^- は、純水区と比べても高かったことから、 NH_4^+ は表層付近で土壌に吸着、硝化され、 NO_3^- として溶脱したと考えられる。

また、D-TNの分析結果から、土壌浸透水の溶存態窒素の多くが硝酸性窒素であること確認され、土壌浸透過程で NH_4^+ 濃度が高い流入水から組成が大きく変化していることがわかった。一方の10cm・20cm土壌水は、D-TNが NO_3^- と同程度の濃度で検出されたサンプルも多く、土壌の窒素成分の大半を占める有機態窒素の無機化あるいは有機態成分の溶出の可能性も示唆された。

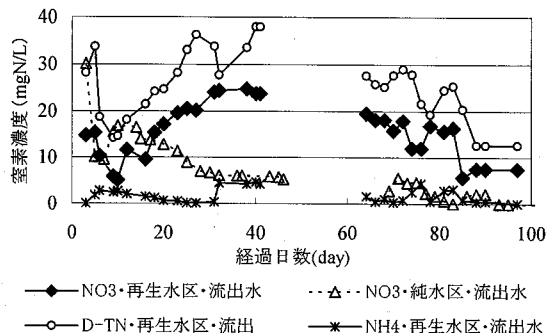


図7 土壌浸透水中の各形態別窒素濃度変化

b) 陰イオン

土壤浸透水の陰イオンとして Cl^- および SO_4^{2-} イオンに着目し、窒素項目と同様、カラム上部の10cm及び20cm、カラム底面からの流出水を分析した。 Cl^- について、純水区では、窒素項目同様に実験開始後から徐々に濃度低下した。一方、再生水区では流入水由来の平均660mg/Lの Cl^- が土壤中では吸着やイオン交換がなく、そのまま流出したことと影響により、実験開始後から高い濃度で検出し、最終的に3地点全てで800mg/Lから850mg/Lの濃度となった。前述のように再生水区での毎回の灌水後の流出率が76.9%であったことから、蒸発等によるイオン濃縮が考えられ、濃度補正を行うことで流入と流出の検出値濃度の整合性が示された。浸透水中 Cl^- 濃度変化は、 Na^+ や Ca^{2+} の濃度変化と共に図8に示す。

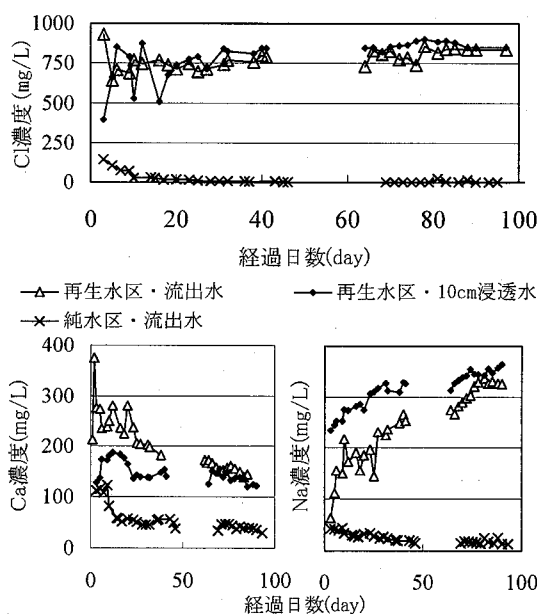


図8 土壤浸透水中の Cl^- ・ Na^+ ・ Mg^{2+} 濃度の変化

c) 塩基類

純水区では、 Ca^{2+} ・ Na^+ ・ Mg^{2+} ・ K^+ いずれについても実験開始後から濃度が次第に減少した一方、再生水区では、純水区に比較して3地点とも高い濃度で推移した。(図8) Ca^{2+} ・ K^+ ・ Mg^{2+} については純水区同様、次第に減少したが、 Na^+ のみ次第に濃度が上昇し、流入水平均 Na^+ 濃度(367mg/L)に近づいた。これは、流入水由来の Na^+ が土壤中を通過して流出した結果と考えられる。

Ca^{2+} ・ K^+ ・ Mg^{2+} について、再生水区が純水区と比較して3地点全てにおいて濃度が高かったことの原因として、再生水中 Na^+ の一部が土壤浸透過程でイオン交換を生じ、他のイオンに置換されて流出したと考えられる。土壤中での陽イオン交換反応は、極めて速く、瞬時的に行われ

るものと考えられている¹⁹⁾。作物栽培では土壤中の塩基類のバランスを適正に保つことが重要であり、イオン交換によりイオンバランスが変化している可能性がある。

(4) 再生水の農地灌漑における物質収支

再生水の農地灌漑による作物への養分供給となる土壤養分の変化量と地下水への流出負荷を推定する目的で、カラム実験で得られた土壤及び浸透水中の各成分の実測値を用いて本実験における物質収支を試算した。

物質収支の試算は、作物の生育や地下水などの周辺水環境に特に影響を及ぼすと考えられる窒素($\text{D-TN} \cdot \text{NO}_3^- \cdot \text{NH}_4^+$)および塩基類($\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{K}^+ \cdot \text{Na}^+$)に着目し、流入・流出量を算出し、休止期間を除く全74日の実験期間における地下水系への移行負荷量を1日1m²あたりの値で試算した。土壤中の増加分は、灌水前の土壤と実験終了時の灌水後土壤の含有量差から算出し、1日1m²あたりの変化量で表示した。流入と流出の物質収支の算出に際して、存在する主要な陽イオン(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+)と陰イオン(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-)にてイオンバランス²⁰⁾を算出した結果、流入水で20-21meq/L、流出水で27-28meq/Lであり、イオンバランスが取れていることが確認された。

a) 窒素

表8に再生水区における無機態窒素を中心とした物質収支を示す。流入水と土壤浸透水(流出水・10cm、20cm土壤水)では、 $\text{D-TN} \cdot \text{NO}_3^- \cdot \text{NH}_4^+$ 値について示した。 NO_3^- の流出量は、流入量比で311%であったが、 NH_4^+ は流入水の4.88%のみが流出した。 D-TN は74.7%であった。また、土壤への窒素の蓄積量は、 NH_4^+ が54.2%減少した一方で、 NO_3^- が46.2%増加した。以上の結果から、土壤中での硝化作用で生成した NO_3^- が溶脱することが物質収支上からも確認できた。土壤中での硝化作用は、土壤中の微生物活性により異なる。本実験では、カラムという閉鎖系での実験結果であるため、土壤の物理環境が変化している可能性はあるが、現地の畑土壤を用いたことから硝化能は実際の畑地と近い条件で試算できたと考えられる。

また、実験前土壤の全窒素は、乾式燃焼法にて測定の結果、1392mgN(重量比0.08%)であり、無機態窒素の占める割合は2.6%と非常に小さかった。窒素の物質収支を取る上では、土壤中の大部分を占める有機態窒素の無機化量が物質収支に占める割合も無視できないと考えられるが本研究では評価出来なかった。また、本実験では、脱窒量についても把握出来なかった。

窒素成分は、作物の生育に不可欠な主要養分であり、栽培時の施肥管理の面で非常に重要な項目である。本実験で得られた作物・降雨・施肥などの影響を排除した条件下での窒素収支は、肥料の施肥量の設定や環境負荷の算定の基礎データとして用いることが出来る。

表8 カラム実験系における無機態窒素の収支

	D-TN	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
流入量(gN/m ² d)	0.206	0.157	0.025
流出量(gN/m ² d)	0.154	0.008	0.097
流出率(%)	74.7	4.99	382
土壌中増加量(gN/m ² d)		-0.085	0.057
増加割合(%)		-54.2	46.9

b) 塩類

図9に再生水区における塩基類項目の収支を示す。土壌浸透水においては、灌水日数の経過と共に次第にCa²⁺・Mg²⁺・K⁺の濃度が低下した。物質収支にて流入量に対する流出量の割合は、Ca²⁺で366%、Mg²⁺で416%、K⁺で283%となった。一方のNa⁺は、35.9%の流出率であった。さらに、これらの塩基類は灌水前後の土壌中の含有量でも全体として減少していることが確認された。すなわち、再生水の流入により土壌中でイオンの交換現象がおり、土壌に含まれる塩基類が浸透水と共に流出し、土壌のイオンバランスが変化することが物質収支の試算からも確認出来たといえる。粘土粒子の陽イオンに対する吸着の強さは、H⁺>Ca²⁺>Mg²⁺>K⁺≧NH₄⁺>Na⁺とされており²⁾流入Na⁺の影響でイオン交換が進んだものと推察される。

また、実験前後の土壌中の交換性塩基類の増減を電荷量で評価したところ、減少したCa²⁺・Mg²⁺・K⁺の電荷量が35.8meqであった一方で、増加したNa⁺の電荷量は33.3meqと収支がほぼ一致した。土壌中の塩基類は交換性のみの分析となったため、流入量と流出量の差と、土壌含有量での増減は一致しないが、土壌中でのイオン交換に関しては土壌中での収支から示されたと言える。

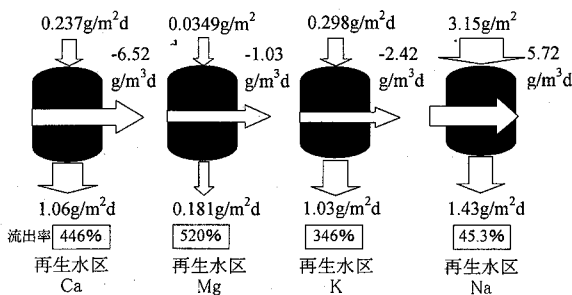


図9 再生水区における塩基類項目の収支

実際の農地灌漑においては、土壌への蓄積量ならびに地下水などの周辺環境への各成分の移行量を算定することが、作物の生育、農地及び周辺環境への影響を評価するうえで重要となる。本研究で行ったカラム実験は、降雨や気温などの自然条件、施肥や有機物の施用の有無などによる土壌の養分状態や物理性などの諸条件が異なるものの、カラムという実験系のなかでの再生水添加による物質収支を取ることは、実際の農地での養分の供給および流出負荷量の予測のモデルとなることが期待される。

6. 結論

本研究においては、下水再生水を農業利用（特に畑地灌漑）にて有効利用に向けて農作物への影響および土壌地下水への環境影響について、現地実証試験のデータの解析を行うとともに、現地の実験プラントで製造された再生水を用いた発芽試験を行った。さらには窒素および塩分の濃度を現地に合わせた擬似再生水を用いた土壌カラム実験にて土壌の化学性ならびに土壌浸透水の分析を行い、さらに無機態窒素及び塩基類の物質収支を求めた。得られた結論を以下に示す。

- (1) 実証プラントを用いた島尻地区再生水のモニタリング結果から、現状の再生水では窒素分ならびに塩分の含有量が多く、土壌浸透性へは影響はないと考えられるものの、感受性の高い作物栽培への影響が懸念される。
- (2) コマツナの発芽試験により、再生水中に含まれるNa⁺やCl⁻などの塩分濃度では、対照水と比較して発芽に阻害を及すとはいえない濃度であることが分かった。
- (3) カラム実験の土壌化学性の分析結果、再生水中NH₄⁺によるNO₃⁻が生成と表層付近での含有量が増加し、イオン交換によって交換性のNa⁺も特に表層付近において増加していることが分かった。
- (4) カラム実験の土壌浸透水（10cmと20cm土壌水・流出水）の分析にてNO₃⁻や再生水由来のNa⁺、あるいはイオン交換による他の塩基類流出過程が把握された。
- (5) カラム実験での土壌浸透水・土壌分析結果から試算される物質収支の結果から、再生水中Na⁺の影響で土壌中のCa²⁺・Mg²⁺・K⁺がイオン交換によって土壌中から土壌浸透水とともに流出する負荷量が算定された。期間中の再生水の灌水によって土壌全体でのイオンバランスが変化していることが示された。

本研究は、カラム実験系において再生水や土壌の条件が限定された条件下での検討ではあるが、今後予定されている実際の作物栽培での施肥や周辺環境への影響の予測の参考値となると考えられる。今後、作物の存在下での再生水成分の植物体への取り込み、それら成分が生育に及ぼす影響などを詳細な実験系で調査する予定である。

謝辞：サンプル並びに資料の提供でございました内閣府沖縄総合事務局土地改良総合事務所およびアジアプランニング株式会社の関係者の皆様に感謝致します。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部、下水道ビジョン 2001
- 2) 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

- 3) 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
- 4) WHO: Guidelines For The Safe Use Of Wastewater, Excreta And Greywater Volume 2 Wastewater use in agriculture
- 5) 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,vol.29,No.144,pp.6-14,2006
- 6) 重松賢行・W.K.C.N.Dayanathi・山下尚之・田中宏明・対馬孝治・天野邦彦・山下正：下水再生水の灌漑利用における窒素動態把握に向けた安定同位体比の測定,環境工学研究論文集,Vol.43,pp.506-512,2006
- 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) 桑江良光・上原盛隆・糸数清正：下水道の海水への侵入について,第 23 回下水道研究発表会講演集,1986
- 9) 小野信一, 藤井義晴：ハウス栽培における土壌の塩類集積とその回避対策, 日本土壤肥料学会誌, 65, pp.62-65, 1994
- 10) Ayers, R.S. and D.W. Westcott : Water Quality for Agriculture FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1 Food and Agriculture, Organization of the United Nations
- 11) Pettygrove, G.S. and T. Asano, eds. 1985 : Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater-A Guidance Manual, Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI
- 12) 日本土壤協会、堆肥等有機物分析方法, pp.216-217, 2000
- 13) 藤原俊六郎・安西徹郎・小川吉雄・加藤哲郎編、土壤肥料用語辞典, 農文協, pp.140, 1998
- 14) 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, 日本土壤肥料学会関東支部会講演要旨集, pp.19, 2006
- 15) 竹迫紘、フローインジェクション分析法による土壌抽出液のアンモニア態窒素の定量法, 日本土壤肥料学会誌, vol.62, pp.128-140, 1991
- 16) 村本穰司・後藤逸男・蜷木翠：振とう浸出法による土壌の交換性陽イオンおよび陽イオン交換容量の迅速分析, 日本土壤肥料学会誌, vol.63, pp.210-215, 1992
- 17) 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
- 18) 新井重光・杉原進：土壌における窒素とリンの挙動, 水質汚濁研究, 10(7), 402-406, 1987
- 19) 松本聡：土壌の浄化能に係る諸特性, 水質汚濁研究, 10, 7, pp.388-393, 1987
- 20) 土壌環境分析法編集委員会編：土壌環境分析法, 博友社, pp.205, 1997
- 21) 国松孝男：土壌による排水処理の実際と展望, 公害と対策, 12月号, pp.13-33, 1985

(2007.5.25 受付)

The Effect of Reclaimed Wastewater on the Soil and Water Environment Under the Dry-field Irrigation

Takayuki SHIGEMATSU¹, Ayako YOSHIDA², Naoyuki YAMASHITA¹
and Hiroaki TANAKA¹

¹Research Center for Environmental Quality Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University

²Department of Bioproduction Technology, Tokyo University of Agriculture

Germination test was conducted with Komatsuna (*Brassica rapa* var. *peruviridis*) in order to evaluate the effect on plant growth of reclaimed water provided from demonstration plant which tried to apply the reclaimed wastewater for dry-field irrigation in Okinawa Island, Japan. From this result, no significant effect on the germination and root extension was observed. We also conducted soil-column experiment to elucidate whether NH_4^+ and other salts in reclaimed wastewater have an impact on the chemical state and leachate of soil. The soil analysis revealed that as a result of nitrification of NH_4^+ , NO_3^- is temporarily held in the soil matrix. For cations, by the effect of ion exchange, Na^+ increased at the top layer and other cations such as Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ flowed out with the effluents. It suggested the change of base balance in the soil column. Furthermore, we estimated the mass balance of nitrogen and cations using the result of soil-column experiment. Especially NH_4^+ and Na^+ in reclaimed wastewater moved into the soil matrix, and/or induced ion exchange and nitrification, which then advanced other components to outflow. It was concluded that mass balance estimation can be as a reference index to predict the environmental load of reclaimed wastewater in practical crop cultivation.