

平成22年5月25日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19580280
 研究課題名(和文) 安定同位体トレーサーを活用した
 高度処理水の水稻生育に対する効果の解明
 研究課題名(英文) Elucidation of Advantageous Effect of Applying Advanced Treated
 Wastewater to Rice Plant Growth Using Stable Isotopes
 研究代表者
 治多 伸介 (HARUTA SHINSUKE)
 愛媛大学・農学部・准教授
 研究者番号：60218659

研究成果の概要(和文)：

安定同位体(^{15}N , P^{18}O_4)を添加した高度処理水を、無希釈で灌漑水として利用した水稻ポット試験を行った。それにより、施肥条件、土壌の種類、灌漑水の浸透速度等が異なった場合の、処理水中の窒素・リンの肥料効果を定量的に解明するとともに、処理水が水稻生育に及ぼす影響を明らかにした。さらに、処理水中のカチオン類(K, Na, Ca, Mg)と SO_4 が水稻生育に影響を与える可能性と、具体的効果の一部を解明した。これらの成果は、高度処理水の水田灌漑水としての有効性の大きさと、その有効性が発揮される条件を示したもので、今後の高度処理水活用技術の確立に大いに役立つ。

研究成果の概要(英文)：

Non-diluted actual advanced treated wastewater with the stable isotopes (^{15}N , P^{18}O_4) as the tracer was applied to the rice plant in pot-scale experiments. The experiments were conducted under the variety of condition of fertilizer application rate, kind of soils, and soil permeability. In the research, the nitrogen and phosphorus dynamics in the pots and the effect of the treated wastewater to rice plant growth were elucidated. The effect of cations (K, Na, Ca, Mg) and SO_4 in the treated wastewater was also defined. These results show the significant advantageous effect of applying the advanced treated wastewater to rice plant and the suitable condition of the application to obtain the effect.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学，農業土木・農村計画学

キーワード：農業集落排水，処理水利用，窒素，リン，カチオン類，水田

1. 研究開始当初の背景

(1) 下水処理水の再利用の重要性

下水処理水は、灌漑水として水田に適切に利用すれば、新たな水資源や肥料源としての

大きな効果を得られる可能性がある。そのため、そのような技術が確立できれば、持続可能な循環型社会の確立に大いに役立つ。それゆえ、日本をはじめ、中国、韓国等の世界各

国で、その技術確立のための検討が進められている。しかし、それらの効果を安全・確実に発揮させる技術は、未だ確立できておらず、その確立が急務となっている。

(2) 従来の下水処理水の再利用における問題

従来の下水処理水は、河川水等の自然水に比較して N(窒素)濃度が極めて高かった。そのため、処理水の水田灌漑水としての利用では、減肥を行っても、自然水による希釈が不十分な条件下では、N の供給過剰が起り、倒伏・登熟不良・病虫害の多発・米質低下に繋がるのが危惧されていた。それが一因となって、日本での処理水利用は、水不足が特に深刻な地域に限られてきたのが現状で、農村の代表的な下水道施設である農業集落排水施設においては、処理水を利用している施設は全体の 1%に満たない状況にある。

(3) 高度処理水の特徴と利用への期待

しかし、近年の下水処理では「高度処理」と呼ばれる N・P(リン)を高率に除去する技術が発達し、その処理水(高度処理水)では、N 濃度が自然水に比較して 2 倍以下程度と低濃度になっている地域が少なくない。その一方で、高度処理水においても、P は自然水よりも 3 倍程度以上の濃度となっており、さらに、K(カリウム)・Na(ナトリウム)、Ca(カルシウム)・Mg(マグネシウム)といった N・P 以外の肥料元素についても、それらの濃度が自然水よりも 2 倍程度以上に高い。

以上のことは、「高度処理水」は、無希釈で利用しても、N による水稻生育への悪影響のリスクは小さく、N, P, K, Na, Ca, Mg の肥料効果が期待できる「新たな水資源および肥料源としての潜在的価値の高い未利用資源」であることを示している。高度処理を利用した下水処理施設は、世界中で益々増加していく見通しとなっているため、下水処理水の再利用の研究、技術開発は、高度処理水利用について進めていくことが重要である。しかし、これまでの下水処理水の再利用研究は、高度処理水ではなく、通常の処理による処理水を対象としたものが殆どである。

(4) 安定同位体トレーサー技術の処理水利用研究への適用の重要性

処理水中の各種物質の肥料効果は、これまで N が中心に調べられてきた。しかし、それは通常の下水処理水についてであり、高度処理水の肥料効果については十分に調べられていない。また、N 以外の成分の効果についての検討は殆ど行われていない。さらに、N も含め、それ以外の肥料効果についても、具体的に処理水中の何%が水稻に移行し、何%が土壌に移行するといった定量的な解明はされていない。

その一方で、近年は「安定同位体トレーサー法」によって、物質の動態を安全かつ正確に測定する技術が発展してきている。安定同

位体トレーサー法とは、生体(人体・植物等)に悪影響がなく、自然界に安定して存在する安定同位体(例えば、重窒素 ^{15}N)を用い、それを検討対象(今回の研究では高度処理水)に微量添加して、その動きを追跡することで各物質の移動先と移動量を解明する方法である。この技術では、農地のように、同じ元素でも肥料由来・土壌由来・灌漑水由来といった複数の起源が存在する場での起源別の元素移動状況を知ることができる。そのため、安定同位体トレーサー法を処理水利用の場に適用すれば、処理水中の物質の水稻吸収量や土壌への蓄積量等を正確に把握でき、肥料効果や水稻生育への影響を効果的に解明することができると考えられる。しかし、安定同位体トレーサー法が高度処理水利用の場に適用されたことは、これまでなかった。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では、農村の下水処理施設の代表である「集落排水施設」を研究対象とし、「集落排水高度処理水を無希釈で水田灌漑水として利用した場合の効果・影響と、効果的利用方法の解明」を目的とした。そして、その解明に安定同位体トレーサー法を利用することにより、効果・影響の定量的な把握を実施することとした。具体的には、以下の内容を明らかにするための実験を実施した。

(1) 安定同位体トレーサー(^{15}N , P^{18}O_4)を利用した、高度処理水中の N・P の水稻生育への寄与率(肥料効果)の定量的解明。

(2) 上記、N・P 寄与率(肥料効果)が高まる営農条件の解明。

(3) 登熟歩合・食味といった籾の性質や、耐倒伏性といった茎・葉の性質に対する高度処理水の影響と、その原因の解明。

(4) 上記、籾・茎・葉の性質を高める営農条件の解明。

本研究の特色と独創性は、第 1 には「①従来、困難とされてきた処理水の肥料効果の直接定量的のために、「安定同位体トレーサー」を用いた先端的分析方法を活用している点」にある。また、それ以外の特色としては、「②これまで研究対象とされてこなかった「高度処理水の水稻への肥料効果」に意義を見出して、研究対象としている点」「③処理水の肥料効果として、収量・稲への栄養吸収量だけでなく籾・葉・茎の性質(食味・耐倒伏性等)への影響についても検討する点」「④単一元素でなく、N・P・K・Ca・Mg の水稻生育への影響を総合的に検討しようとしている点」等があげられる。

3. 研究の方法

本研究における検討は、全て 1/2000a ワグネルポットを用いたポット栽培(各実験条件

毎に3ポットを設置)によって行った。具体的には、以下の条件を設定することで、多様な栽培条件下での水稻生育状況と、灌漑水中のN・P動態を調べた。

(1)灌漑水 愛媛県I市0地区農業集落排水施設(凝集剤添加型間欠曝気方式OD法)の高度処理水を2週間に1度程度の頻度で採取して、遮光タンク内で保存したものを用いた。また、比較対象等として、0地区で通常の灌漑水として使われている河川水を採取し、同様に遮光タンク内で貯留して利用した。

灌漑水には、安定同位体トレーサーとして $^{15}\text{NO}_3$ および P^{18}O_4 を処理水中に元々含まれる NO_3^- および PO_4^{3-} の5%分を添加した。灌漑水中の NO_3^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 濃度を人為的に上昇させる場合には、 $\text{Ca}_2(\text{NO}_3)_2$ 、 NaCl 、 CaSO_4 を利用した。

(2)土壌 土壌は、原則として、日本の代表的な水田土壌である灰色低地土を、0地区の水田から採取して利用した。ただし、土壌の違いによる影響を検討する際には、黒ボク土(茨城県つくば市採取)、干拓地土(秋田県八郎潟採取)も利用した。

(3)水稻 水稻品種は愛媛県で広く利用されている「愛のゆめ」とした。「愛のゆめ」は、「西海181号」と「ヒノヒカリ」を交配した倒伏に比較的強い中生品種である。移植は、1ポットにつき1株(3本)とした。

(4)施肥 施肥は愛媛県JAの施肥基準どおり(元肥N:P:K=14:10:13, $30\text{kg}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 、追肥N:P:K=14:2:17, $20\text{kg}\cdot 10^{-1}$)を基本とした。減肥をする場合は、元肥のみの条件と、元肥と追肥を行い、追肥を通常の1/4減肥した条件とした。

(5)透水条件 透水条件は、日本の水田における平均的な浸透速度である $1\text{cm}\cdot \text{d}^{-1}$ を原則とし、その条件が保たれるよう、ポット下部からの排出水量をピンチコックで調整した。「浸透無し($0\text{cm}\cdot \text{d}^{-1}$)」の条件を設定する場合は、ピンチコックを閉じた。なお、中干しは、1週間程度、全てのポットに対して実施した。

(6)湛水深と灌漑方法 灌漑は1日に1回行うこととした。毎日の灌漑実施後に、湛水深が中干し前は5cm、中干し後は2cmになるように、ポット上部から灌漑水を注いだ。

4. 研究成果

(1)高度処理水の水稻生育への増進効果とその発現条件 灌漑水として、高度処理水(灌漑期平均T-N濃度 $1.5\sim 2.9\text{mg}\cdot \text{L}^{-1}$ 、窒素主要形態 NO_3^- -N)を利用したポットと、河川水(灌漑期平均T-N濃度 $1.5\sim 2.0\text{mg}\cdot \text{L}^{-1}$ 、窒素主要形態 NO_3^- -N)を利用したポットでの結果の比較検討から、高度処理水の利用は、水稻生育を増進させる効果を有していることが明らかとなった。その際に、耐倒伏性の低下(第5節間長の伸長)や食味悪化につながる初中の

N含有率(タンパク含有率)の上昇は生じなかった。

具体的な生育増進効果としては、籾および茎・葉の乾燥重量が増大するとともに、登熟歩合が増加して収穫量が多くなった。

以上の効果は、減肥を行わない灰色低地土と黒ボク土(浸透速度 $1\text{cm}\cdot \text{d}^{-1}$)での栽培で得られた。従って、日本の多くの水田においては、減肥をしない今までどおりの施肥条件の下で、高度処理水を利用することが、水稻生育をより活発化させる有効な手段であることが明らかとなった。

(2)土壌や浸透条件が水稻生育に及ぼす影響

減肥を行わない干拓地土(浸透速度 $0\text{cm}\cdot \text{d}^{-1}$)では、高度処理水を利用しても、河川水利用時と生育は同等で、上記(1)のような効果は得られなかった。また、浸透速度 $0\text{cm}\cdot \text{d}^{-1}$ とした灰色低地土では、上記(1)の効果は見られたものの、浸透速度 $1\text{cm}\cdot \text{d}^{-1}$ の場合に比べて効果は小さかった。

以上より、高度処理水の水稻生育増進効果の発現程度には、灌漑水の浸透条件や土壌の種類が、大きな影響因子となっており、浸透速度が大きい場合に効果が発現しやすいことが明らかとなった。

(3)高度処理水中の硝酸態窒素濃度の水稻生育への影響 処理水中Nの主要形態である NO_3^- -N(処理水中平均濃度約 $1.5\text{mg}\cdot \text{L}^{-1}$)を、薬品添加によって $5\text{mg}\cdot \text{L}^{-1}$ と $10\text{mg}\cdot \text{L}^{-1}$ に上昇させた処理水を利用した実験(灰色低地土、浸透速度 $1\text{cm}\cdot \text{d}^{-1}$ 、通常施肥条件)の結果、処理水中の NO_3^- -N濃度は水稻生育に対する大きな影響因子となっていることが分かった。具体的には、上記(1)のような水稻生育効果は、 NO_3^- -N濃度が高い場合には低くなった。すなわち、 NO_3^- -N $5\text{mg}\cdot \text{L}^{-1}$ 程度が増収の限界で、それ以上の NO_3^- -N濃度となると減収が生じることが分かった。

以上より、高度処理水利用による水稻の生育増進効果を得るためには、処理水中の NO_3^- -N濃度が上昇しないような処理施設の運転管理が重要であること等が解明された。

(4)高度処理水中のN動態の特徴と肥料効果

高度処理水中の NO_3^- -Nの水稻地上部への吸収量は、土壌条件、浸透条件、施肥条件、高度処理水中の違いによって異なることが分かった。ただし、高度処理水中のNの水稻地上部への吸収率は、概ね15-30%の範囲にあり、この値が高度処理水中の NO_3^- -Nの肥料効果の1つの目安の値になると考えられた。

一方、初中のNに占める「高度処理水中の NO_3^- -N由来のN」の割合は、どのような条件でも5%以下と低かった。このような NO_3^- -Nの籾への低い吸収状況は、高度処理水を利用しても、食味悪化に繋がる初中のN含有率(タンパク含有率)の上昇が起こらない原因と考えられた。高度処理水中の NO_3^- -N由来のNのう

ち、土壌に蓄積する割合は 35%程度と、水稻に吸収される割合よりも多い。ただし、その量は土壌中の全N量から見ると 1%以下程度であるため、一旦土壌に蓄積した $\text{NO}_3\text{-N}$ が、次年度以降に、水稻生育に及ぼす影響は小さいと考えられた。

(5) 高度処理水中の PO_4 の肥料効果

高度処理水中の PO_4 の吸収率も、N と同様に栽培条件によって変化するが、5%程度か、それ以上というのが、1 つの目安になると考えられた。すなわち、高度処理水中の PO_4 の多くは土壌に蓄積するものの、5%程度以上は、高度処理水利用時に肥料として水稻にすぐに有効利用されることが分かった。

(6) 高度処理水中のカチオン類の吸収特性

高度処理水で生育した水稻中への K, Na, Mg, Ca 吸収量は、河川水で生育した水稻よりも多くなることが分かった。また、それらの水稻中における含有濃度は、高度処理水で生育した水稻で高めとなり、特に高くなったのは Na であった。

以上の結果は、上記(1)で指摘した、高度処理水による水稻生育への好影響の原因が、高度処理水中に河川水よりも高濃度で含まれる K, Na, Ca, Mg の影響である可能性を示唆した。また、その中でも、特に Na の影響の検討は重要であると考えられた。

(7) 高度処理水中の Na の影響

河川水の Na 濃度を処理水並の $50\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ および $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ に高めた灌漑水を利用したポット試験により、Na 濃度が高まるにつれて、水稻の最大草丈は短く、耐倒伏性が高い形態となった。また、Na 濃度が高いほど、無効分げつ率は低下して最終分げつ数は多くなり、登熟歩合は高くなった。以上より、高度処理水中の Na は、水稻の NO_3 吸収や生育への影響要因となっており、草丈短縮、有効分げつ数の増加、登熟歩合の増大といった効果を生じさせる一因となっていると考えられた。ただし、Na は、高度処理水利用による水稻乾燥重量の増大要因ではなく、その効果は、処理水中の別の高濃度成分、例えば K の影響であると推定された。

(8) 高度処理水中の SO_4 への留意の重要性

河川水の SO_4 濃度を、処理水並の $60\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ に高めた灌漑水を利用したポット試験では、籾と茎・葉の乾燥重量は低下した。また、その低下程度は、浸透水量が $1\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ の時よりも、浸透無しの場合で大きかった。

以上のことから、高度処理水中の SO_4 は、水稻生育に対しては負の影響を与えており、処理水中の SO_4 濃度を低下させる等の対策ができれば、上記(1)で指摘した高度処理水の効果は更に高まる可能性が考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

①治多伸介, 櫻井雄二, 灌漑利用の観点からみた集落排水高度処理水の水質特性, 農業および園芸, 査読無(招待論文), 82(11), 2007, 1182-1189.

〔学会発表〕(計 7 件)

①治多伸介, 櫻井雄二, 高度処理水中のナトリウムが水稻に及ぼす影響—農業集落排水処理水の農地への再利用(XXIII)—, 平成 22 年度農業農村工学会大会講演会, 神戸市, 2010 年 9 月 2 日.

②治多伸介, 櫻井雄二, 安定同位体トレーサーによる下水処理水に含まれる硝酸態窒素の水稻への移行量解析—農業集落排水処理水の農地への再利用(XXII)—, 第 44 回日本水環境学会年会, 福岡市, 2010 年 3 月 15 日.

③治多伸介, 櫻井雄二, 高度処理水に含まれる硝酸態窒素の水稻吸収に対する土壌の影響—農業集落排水処理水の農地への再利用(XXI)—, 第 64 回農業農村工学会中国四国支部講演会, 徳島市, 2009 年 10 月 28 日.

④治多伸介, 櫻井雄二, 高度処理水利用水田での浸透条件が水稻生育と栄養吸収に及ぼす影響—農業集落排水処理水の農地への再利用(XX)—, 平成 21 年度農業農村工学会大会講演会, つくば市, 2009 年 8 月 4 日.

⑤治多伸介, 櫻井雄二, 安定同位体トレーサーによる高度処理水に含まれる硝酸態窒素の水田での動態解析—農業集落排水処理水の農地への再利用(XIX)—, 第 43 回日本水環境学会年会, 山口市, 2009 年 3 月 16 日.

⑥治多伸介, 櫻井雄二, 処理水を無希釈利用した水田土壌におけるカチオン含有状況の経時変化—農業集落排水処理水の農地への再利用(XVIII)—, 第 63 回農業農村工学会中国四国支部講演会, 広島市, 2008 年 10 月 21 日.

⑦治多伸介, 櫻井雄二, 高度処理水利用が水稻の塩基類吸収に及ぼす影響—農業集落排水処理水の農地への再利用(XVII)—, 平成 20 年度農業農村工学会大会講演会, 秋田市, 2008 年 8 月 27 日.

〔図書〕(計 1 件)

①治多伸介(分担), 第 8 章 2. 農業集落排水と資源循環. 農地環境工学, 山路永司・塩沢昌編, 249-258, 2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

治多 伸介 (HARUTA SHINSUKE)

愛媛大学・農学部・准教授

研究者番号: 60218659

(2) 研究分担者

櫻井 雄二 (SAKURAI YUJI)

愛媛大学・農学部・教授

研究者番号: 00036427