

集排污泥に由来する再生有機質肥料の施用が 水田排水の水質および物質収支に与える影響

Effect of Recycled Manure on Drainage Water Quality and Material balance in Paddy Field

猪迫耕二* 吉田勲* 吉村香織**

(* 鳥取大学農学部 **鳥取県土地改良事業団体連合会)

I はじめに

現在、農村住民の生活環境の改善と水環境の保全のために、集落排水事業が盛んに行われている。鳥取県はその先進地域の一つであり、昭和58年度に開始されて以来、県民の生活環境改善に対する関心の深まりとともに急速に伸び、平成8年度末では、65処理区が供用を開始するに至った。それに伴い、これらの処理施設から発生する汚泥量も急増してきた。これらの汚泥の大半は、し尿処理場に運ばれ焼却処分されており、この処理費が町村財政にかける負担は大きい。

一方、農地を見ると、化学肥料のみに頼った栽培による地力の低下が指摘されている。その対策として、堆肥などの有機質肥料が見直されるようになった。集落排水処理場から出る余剰汚泥は、汚水を養分として増殖した微生物の集合体であり、その成分は有機質がほとんどである。この余剰汚泥を肥料（再生有機質肥料、以後、再生肥料と称する）として農業利用することは、町村の財政負担を軽減するだけでなく、農地の地力増進をも実現する極めて有益な方法といえる。

このような社会背景を受けて、再生肥料の農地利用に関する研究は、これまでも盛んに行われてきた¹⁾。これらを概観すると、研究テーマは、次の3つに大別される。すなわち、①肥効、②重金属による土壤汚染、③分解した成分による地下水

汚染である。①、②については、研究機関の実験圃場で行われたもの^{2,3)}が多く、③では実験室レベルのもの⁴⁾が多い。また、対象農地は畑地がほとんどである。

再生肥料の生産量が今後増大することはほぼ確実と思われる。その際、わが国の農地面積比を考慮すると、水田が施用対象となる可能性は大きい。畑地と異なり、水田は河川や湖沼の近傍に存在することが多く、その表面排水や地下浸透水などが周辺の水環境に直接影響する可能性は否定できない⁵⁾。とりわけ、代かき時などの表面排水は、水環境の保全上、問題とされており、再生肥料を施用した場合においても十分な検討が必要と思われる。これまでのところ、水田地下浸透水に関する研究には、矢木ら⁶⁾のライシメータによる研究があるが、表面排水を取り扱った事例および再生肥料を施用した水田全体の物質収支を検討した研究は見当たらない。そこで、筆者らは、再生肥料の施用が水田排水（主として表面排水）の水質に与える影響を明らかにするとともに、水田全体の物質収支の把握を目的として、実際の水田圃場で再生肥料の連用実験を行った。

II 実験方法

1 実験圃場の概要

本実験は、鳥取県倉吉市三江地区にある20.1a

の水田で行った。ここでは、集落排水処理施設から出る余剰汚泥を原材料とするコンポスト、乾燥汚泥、脱水汚泥を再生肥料として使用した。本実験では、これらの肥効を比較するために、水田内をさらに小区画に分割して、各肥料をランダムな配列で施用した。しかし、畦等の区切りを設置しなかったため、耕耘、代かき作業により区画間の各成分の濃度差は消失することとなった。このことは、本圃場をグリッド分割(250地点)して採土した試料の分析で明らかとなった。この件に関しては、別報で報告する予定である。このように、区画間の差異が保持できていなかったため、各肥料の排水水質への寄与を明らかにすることはできない。そこで、ここでは、これらの肥料をまとめて再生肥料として捉え、それを施用した一筆の水田全体から出る排水と水田全体の物質収支を検討対象とした。

調査水田の概要は図1に示した通りである。用水は、支線用水路から小用水路を通じて対象水田に供給される。用水路末端は排水路に接続されているが、用水のほぼ全量が水田に供給されるため、用水路末端において水の流れはない。田面水の一部は3つの水尻から排水される。この排水は、小排水路を通じて支線排水路に排出される。したが

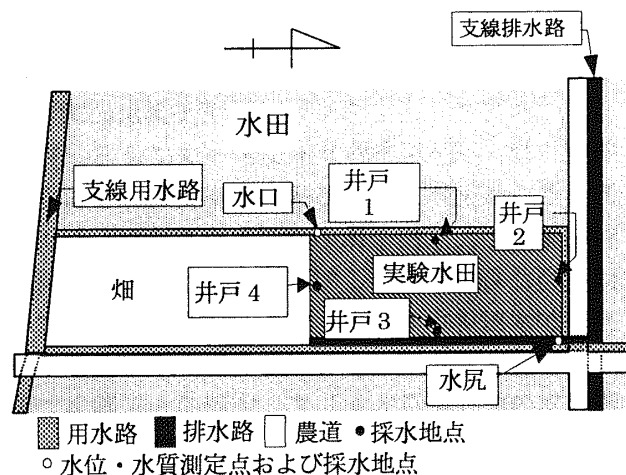


図1 実験水田の概要

って、図1では、小排水路末端を水尻としている。また、実験水田の境界付近に4本の小井戸を設置し、浸透水の水質測定を試みた。これらは、井戸1のみが隣接水田に面しており、他の3本は畑や道路に面している。

2 実験の概要

(1) 再生肥料の成分と施肥量

本実験で用いた再生肥料の成分の平均値と変動係数を表1に示す。これによると、各成分とも変動係数が大きく、成分のばらつきが大きいことがわかる。これは汚泥そのものの成分変動に起因しており、汚泥由来の再生肥料ではやむを得ない現象である。本実験の肥料設計は窒素について行った。また、毎年施肥は、代かきの20日前頃に行った。追肥は8月上旬に行い、化学肥料(N, Kのみ)を施用した。追肥も加味した各成分の施肥量は表2にまとめている。

(2) 水収支測定

小用・排水路に直角三角ゼキをそれぞれ設置し、自記水位計で水位を連続観測した。数回の実測より、水位-流量曲線を作成し、自記された水位より流量を求めた。降水量は、実験圃場近傍に転倒マス式自記雨量計を設置し自動計測を行った。蒸発散量は、気象庁倉吉測候所のデータからMakkink式⁷⁾を用いて推定した。

(3) 水質分析

水質測定地点は図中の小用水路中の水口手前、小排水路末端、小井戸である。各地点において週1回採水し、実験室で定量した。降雨は、実験圃場近傍に設置した採水容器で全量を採取し、各降雨イベント毎に回収・分析を行った。なお、降雨採水器は常時設置していたので、湿性降水物だけでなく、晴天日に降下してくる乾性降水物も含まれている。小井戸は、直径10cmの塩ビパイプの下

表1 再生有機物肥料の成分

肥料の成分	水分(%)	N(%)	P ₂ O ₅ (%)	Zn(ppm)	Cu(ppm)	Cd(ppm)
コンポスト	25.9(55.4)	2.38(26.5)	2.60(39.4)	381(33.4)	220(44.4)	0.85(21.1)
乾燥汚泥	34.1(26.1)	3.82(31.7)	5.85(10.0)	1401(33.7)	346(48.0)	1.99(38.2)
脱水汚泥	79.4(7.12)	1.51(15.0)	0.945(33.7)	547(24.8)	183(22.6)	1.71(41.9)

注) 表中の数値は、平均(変動係数)。重金属成分は乾物当たり、他は現物当たり。Nは硫酸-ケルダール法、P₂O₅は過塩素酸分解-バナドモリブデン酸アンモニウム法、重金属は過塩素酸分解-原子吸光法で定量

部10cmに多数の小穴を明け、地中40cmまで埋め込んだ。測定項目は、COD、T-N、T-P、Zn、Cu、Cdである。各項目の定量は、CODを100℃過マンガン酸カリウム酸性法で、T-Nを硫酸ヒドラジニウム還元法（1995～1997）とペルオキシ二硫酸カリウム-紫外線吸光光度法（1998）で、T-Pをペルオキシ二硫酸カリウム分解法で行った。重金属成分は、酢酸ブチル溶媒抽出法によって得られた濃縮サンプルをICP発光分析法によって定量した。

(4)作物・土壌調査

作物収量調査では、全重、わら重、籾重を測定した。土壌分析は、1995年の実験開始前と各年の収穫後に作土層（厚さ14cm）を対象とした。作物体および土壌の窒素は硫酸分解-ケルダール法で定量した。同じく、重金属では過塩素酸分解-原子吸光法を使用した。土壌の可給態リン酸はトルオグ法で、作物体の全リン酸は過塩素酸分解-バナドモリブデン酸アンモニウム法で定量した。

(5)測定期間

測定は各年度とも代かき日から灌漑終了時まで行った。すなわち、1995年が6月9日～9月9日、1996年が6月2日～9月16日、1997年が6月1日～9月8日、1998年が6月2日～9月23日である。

Ⅲ 結果と考察

1 用・排水の水質変動特性

(1) COD

図2は、COD濃度の変動を示している。用水のCOD濃度は、いずれの年もほぼ安定して推移しており、流量加重平均は $2.57 \pm 0.37 \text{ mg/l}$ であった。一方、排水には、代かき時に大きな値を示し以後安定するという変化パターンが認められる。代かき時の排水濃度は、年によって大きく異なり、 $52.6 \sim$

表2 各成分の施用量

年度	N(kg)	P(kg)	Zn(g)	Cu(g)	Cd(g)
1995	24.2(55.0)	7.88	43.5	23.8	0.150
1996	48.5(18.8)	16.0	485.1	89.8	1.1
1997	37.5(24.3)	12.7	325.1	102.6	0.9
1998	33.3(24.3)	10.7	372.8	77.4	1.1
合計	143.6(28.0)	47.3	1226.6	293.7	3.3

() 内は、施用量中の追肥分の占める割合、%

238 mg/l であった。これは、全期間平均値（ $7.56 \sim 9.70 \text{ mg/l}$ ）と比較してかなり大きい。図2(d)には、実験水田の排水の溶存態CODもプロットしている。図より、溶存態CODは用水のCOD(全量)とほぼ同程度の濃度であることがわかる。すなわち、代かき時の極めて高い排水濃度は、実験水田から再生肥料を伴った懸濁物が流失したことによると考えられる。また、年によって代かき時の濃度が大きく異なるのは、代かき作業の精粗によるものと推測される。

(2)栄養塩類

図3に用水と排水のT-N濃度変化を示した。用水の濃度変動幅は小さく、各年の平均値は $0.84 \pm 0.06 \text{ mg/l}$ であった。排水濃度についてみると、

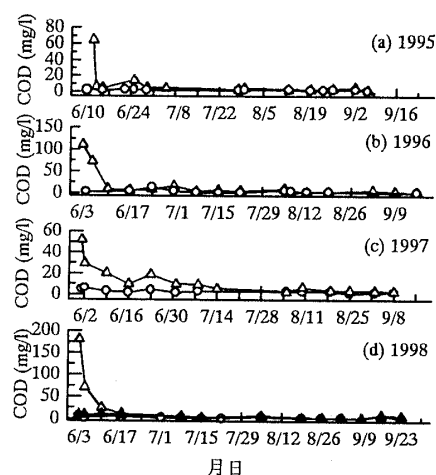


図2 用・排水におけるCODの変動
○用水(全量COD) △排水(全量COD)
▲排水(溶存態COD)

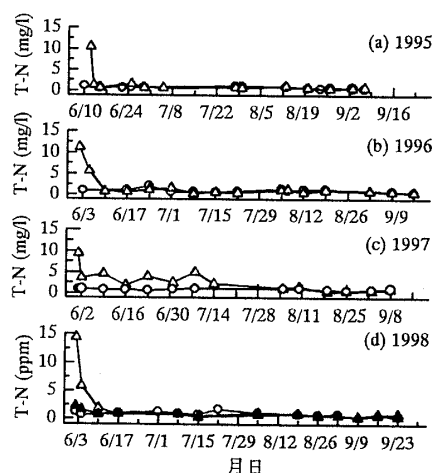


図3 用・排水におけるT-Nの変動
○用水(全量T-N) △排水(全量T-N)
▲排水(溶存態T-N)

COD 同様、代かき時に大きな値を示すが、それ以後は用水濃度との顕著な差は認められない。代かき時の排水濃度は9.38~14.4mg/lであり、CODの場合と異なって、年度間にそれほど大きな差はなかった。図3(d)に示した溶存態T-Nの挙動は、CODのそれと同様であり、水田からの懸濁物の流出が代かき時の高い排水濃度の原因であることが理解できる。

図4は、用水と排水のT-P濃度変化を示したものである。用水濃度は極めて安定しており、年度間の変動も平均値 0.14 ± 0.07 mg/lであった。排水濃度の変動傾向は、COD、T-N同様であった。代かき時の排水濃度は6.08~17.0mg/lであった。図4(d)に示した溶存態T-Pは、COD、T-Nと同様の傾向

を示した。

一般に天然水中のT-N:T-Pは10:1程度といわれている。用水のそれは、4年平均で6:1であった。それに対し、排水では2:1となっており、T-Pの比率が高くなっている。表2に示したとおり、圃場に投入されたT-NとT-Pの比は2.6:1となっている。このことから、排水におけるT-P濃度の比率の大きさは投入肥料の影響と考えられる。再生肥料では、肥料成分の調整が困難であるため、総じてリン含有量が大きくなる傾向がある。このことは、閉鎖性水域の流域で問題となるであろう。

(4)重金属

図5~7は用水ならびに排水中のZn, Cu, Cd濃度の変化を表している。図5および図6をみると

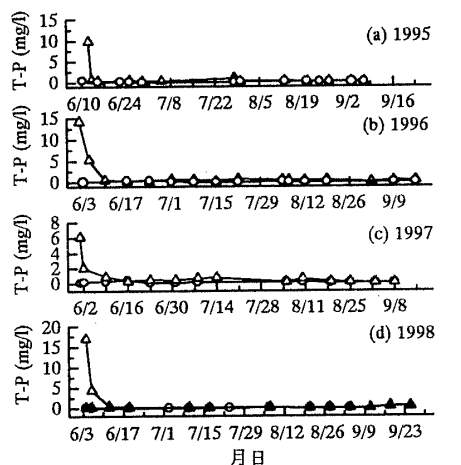


図4 用・排水におけるT-Pの変動

○用水(全量T-P) △排水(全量T-P)
▲排水(溶存態T-P)

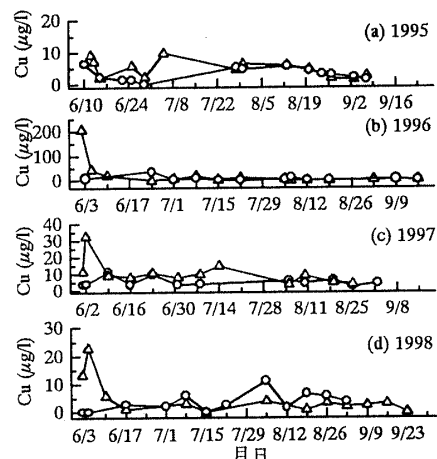


図6 用・排水におけるCuの変動

○用水 △排水

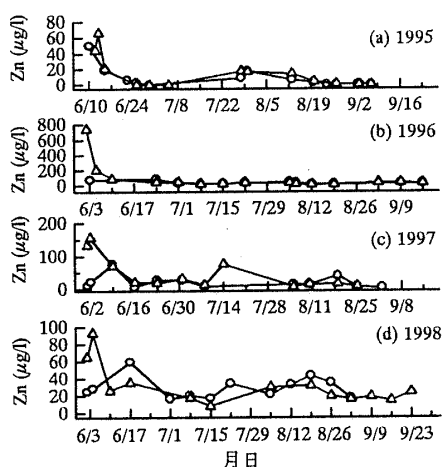


図5 用・排水におけるZnの変動

○用水 △排水

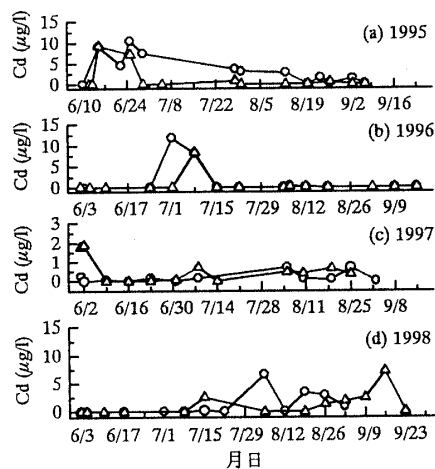


図7 用・排水におけるCdの変動

○用水 △排水

Zn, Cuは用水, 排水ともにほとんど同じ傾向にあることが分かる。すなわち, 用水は加重平均値付近で安定しており, 排水は代かき時に非常に高い値を示した後, 漸減する。

図7より, Cdは上記2元素と異なる挙動を示しており, 一定の変動傾向は認められない。その理由は明らかでない。なお, Cdの加重平均値は用水が0.156~1.09 $\mu\text{g/l}$, 排水が0.363~1.23 $\mu\text{g/l}$ であり, 用水と排水の間で, 顕著な差は認められなかった。

全期間平均でいえば, 排水のZn, Cu, Cdは, それぞれ30 $\mu\text{g/l}$, 6.71 $\mu\text{g/l}$, 0.841 $\mu\text{g/l}$ であり, 農業用水水質基準 (Zn500 $\mu\text{g/l}$, Cu20 $\mu\text{g/l}$), 水質障害対策事業に係る農業用水基準 (Cd10 $\mu\text{g/l}$) よりも低濃度であった。しかし, 最大値に限れば, Znで1.4倍, Cuで10倍, Cdで2倍もの濃度に達している年があった。代かき時以外では水田用水と排水の間で明確な差が認められないことから, 代かき時に適正な水管理を行えば, 再生肥料の施用に起因する周辺水環境の重金属汚染が生じる可能性は極めて小さいと結論できる。

2 地下浸透水の変動特性

地下浸透水は, 表面排水と異なり, 各成分において明確な変動特性は認められなかった。小井戸は, 実験水田の端に設置しているため, 周辺の影響が全くないとは言いきれない。しかし, 本実験では, 地点間で大きな濃度差は認められなかった。そこで, ここでは4地点の測定結果の単純平均を代表値と見なした。その結果は表3に示している。

表3 用・排水および雨水の平均水質

	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)	Zn ($\mu\text{g/l}$)	Cu ($\mu\text{g/l}$)	Cd ($\mu\text{g/l}$)
用水	0.839	0.134	23.3	4.10	1.30
排水	1.31	0.606	30.2	6.71	0.841
雨水	0.887	0.133	61.2	13.5	0.308
地下水	1.79	0.379	40.0	6.00	1.70

表4 水収支量 (m^3)

用水量	降水量	排水量	蒸発散量	地下浸透量
3926	1408	2754	905	1675

3 物質収支

水田における水収支は, 灌漑(I), 降雨(R), 排水(D), 地下浸透(P), 蒸発散(E)を用いて次式のように表される。

$$I+R=D+P+E \quad (1)$$

本研究における測定期間内の各量の平均値は, 表4にまとめている。ただし, 地下浸透量のみは(1)式の残差として算定した。

(1)式中のEを除く各項に, 水質成分の加重平均値(地下水は単純平均値)を乗じることによって流入, 流出負荷量を算出できる。これらの負荷量と, 降水負荷, 施肥量, 作物体による吸収量, 実験前後の土壌の残存量とから水田の物質収支が求められる。その結果は表5に示した。これによると, インプットではCd以外では, 施肥による供給量が大部分を占めており, 用水や降水による供給はほとんど無視できるといえる。アウトプットを見るとN, Pで作物による吸収量が多いが, Zn, Cu, Cdに関しては表面排水として流出する方が大きくなっている。すなわち, 重金属成分による作物体汚染の危険性は, 本実験程度の施肥量では極めて小さいといえる。また, 表3, 表5から水田排水中の重金属成分は, 濃度・負荷量ともに用水などと同程度であり, 周辺の水環境への影響は小

表5 水田における各物質の収支 (kg)

	N	P	Zn	Cu	Cd
作付前土壌	422	38.5	19.5	4.93	0.0760
Input					
肥料	144	47.3	1.16	0.288	0.0029
用水	13.2	2.10	0.37	0.064	0.0204
降水	5.0	0.75	0.35	0.076	0.0017
計	162.2	50.15	1.88	0.428	0.0250
Output					
作物吸収	99.3	18.60	0.388	0.029	0.0022
排水	14.4	6.68	0.333	0.074	0.0093
地下浸透	13.3	4.23	0.245	0.032	0.0151
計	127.1	29.50	0.965	0.135	0.0266
収穫後土壌	530.3	41.53	20.3	4.028	0.0609
誤差	-73.1	17.59	0.173	1.189	0.0136

さいといえる。

次に、土壌中の重金属残留量をみると、4年間の実験では顕著な蓄積は認められなかった。したがって、施用前の各肥料の成分分析を正確に行い、そのデータに基づいて的確な施肥を行えば、再生肥料による土壌汚染を最小限度に防ぐことは十分可能であるといえる。

なお、表5の誤差は、藻類による窒素固定、非灌漑期の降雨による物質供給および溶脱による物質の消失などを考慮していないためと思われる。

V おわりに

本研究では、農業集落排水施設から出る余剰汚泥を起源とする再生有機質肥料を水田に連用し、水田排水の水質変動特性と水田における物質収支について検討を加えた。

その結果、水田の表面排水濃度は代かき時が非常に高く、それ以後は用水と同程度となることが明らかとなった。このことから、再生肥料を施用した水田においても、代かき時の適正な水管理の必要性が示唆された。また、成分的にはNに比較してPの比率が高く、湖沼等の閉鎖性水域を有する流域では問題になりうることが示された。一方で、最も懸念された重金属の流出は、代かき時以外では問題ないと結論できた。さらに、4年間の物質収支計算によると、重金属の顕著な蓄積は認められず、施用量に十分注意すれば、水田への施用も十分可能であることが明らかとなった。

今後は、再生肥料の種類による排水水質への寄与の差異、浸透水質への影響、化学肥料水田との相違を明らかにする必要がある。

最後に、鳥取県農業試験場の稲坂恵美子研究員には、作物体および土壌分析データを提供していただいた。ここに記して謝意を表す。

[引用文献]

- 1) 後藤茂子, 茅野充男 (1993): 下水汚泥の緑農地利用, 用水と廃水, 第35巻, 第10号, pp. 30-37
- 2) 例えば, 市来征勝, 野々山芳夫, 伊藤秀文(1989): 下水汚泥コンポストの畑作物に対する施用効果と土壌への影響, 鹿児島県農業試験場研究報告, 第17号, pp71-92
- 3) 例えば, 後藤茂子, 茅野充男, 山岸順子, 熊澤喜久雄 (1997): 下水汚泥コンポストの長期連用に伴う重金属の土壌への蓄積, 日本土壌肥科学雑誌, 第68巻, 第2号, pp156-162
- 4) 例えば, 山本一彦, 隅田裕明, 松坂泰明, 小口弘(1984): コンポスト施用土壌からの成分の溶出, 日本大学農獣医学部学術研究報告書, 第41巻, pp. 34-45
- 5) 久保井徹 (1992): 汚泥の性状と環境影響(8)農林地への汚泥施用と水環境への潜在的影響, 再生と利用, 第15巻, 第57号, pp. 84-88
- 6) 矢木修身, 稲森悠平, 広木幹也, 大久保紀男, 須藤隆一 (1986): 汚泥の水田土壌還元による陸水環境に及ぼす影響, 国立公害研究所研究報告, 第94号 (R-94-'86), pp. 161-175
- 7) 永井明博(1993): Makkink式による計器蒸発量の推定と考察, 水文・水資源学会誌, 第6巻, 第3号, pp238-243

Activated sludge is rich in organic matters and some nutrients. Therefore it is significant to reuse composts of sludge for agriculture. In this study, field tests were conducted to investigate effects of compost upon the water environment and accumulation of heavy metals in soil. As for results, it was concluded that fertilizer application of organic manure containing mainly compost of sludge doesn't effect the water environment except a puddling term and it can be protected from the accumulation of heavy metals in the field by the correct control of the organic manure amount.