

中海干拓地農業への都市下水利用に関する基礎的研究 II

干拓地土壌への都市下水処理水および汚泥の還元について

松井佳久^{*}・帯刀奈津子^{*}・鍋島 浩^{**}・寺田俊郎^{**}
吉野蕃人^{**}・福田 晟^{**}・津本 潔^{**}

Yoshihisa MATSUI, Natsuko TATEWAKI, Hiroshi NABESHIMA,
Toshiro TERADA, Shigeto YOSHINO, Akira FUKUDA and
Kiyoshi TSUMOTO
Basic Research on the Application of Municipal Sewage to
the Agriculture at the Reclaimed Lands of Nakanoumi Area.
II. Recycling of Municipal Sewage Effluents and Sludges
on the Reclaimed Land

資源の有効利用と水系環境の保全という観点から、栄養塩類濃度の高い都市下水処理水を農地へ還元しようという気運が、近年高まってきている。人間が生活する中で必然的に廃出される物質を、十分な処理も施さず、無用なものとして廃棄し、環境汚染を促進させた高度成長期の生産体系に対する反省が、その底流に存在することは否定できない。しかし、このような発想は決して新しいものではない。工業的に生産された肥料の無かった時代には、人畜の糞尿が貴重な肥料として農地に還元され、しかも、意識するかしないかは別として、それが自然生態系の中で十分に消化・吸収され、環境浄化にもつながっていた。人間生活の廃物を農業という一つの生産機構の中で消化・吸収させる方式を、¹⁾宮地は物質循環系の完結した生態系農業と呼び、中海干拓地にこの方式を取り入れるよう提唱している。²⁾前報において詳述したように、本研究もこれと同じ発想の上に立つものであるが、都市下水処理水を現実に農地還元しようとするれば、なお未解決の技術的問題が数多く残されているため、基礎的試験を積み重ねる必要がどうしても生ずる。特に重要と思われる問題点を箇条書きすると：

1. 中海干拓地土壌の物理的・化学的特性の把握が、なお不十分である。したがって、干拓地において、どの程度の量の下水処理水をどの程度の純度まで浄化するものか、栄養塩類が土壌の中でどのような形態で吸着さ

れるのか、またそれが植物にどの程度まで吸収・利用されるものか、予測がつかない。中海干拓地土壌の特性については、³⁾村上による優れた研究があるが、これは下水処理水の農地還元を念頭に置いてなされたものでない。

2. 下水処理水の中に有害物質、特に重金属類がどの程度含まれているのか、それが土壌ないし農作物の汚染につながるのか否か、不明である。下水処理水や汚泥の農業利用において、⁴⁾重金属汚染の危険性はしばしば指摘されてきたこと⁵⁾であり、諸試験機関でも重視・検討されている点である。

3. 農作物の栽培や営農といった観点からみて、下水処理水の農地還元²⁾に意義はあるのか、少なくとも大きな欠陥はないのか、もし欠陥があるとすれば、それは作付体系や栽培技術の検討の中で解消できるのか否か、現在のところ判断する資料に乏しい。⁵⁾

筆者らは、中海干拓地土壌の物理的・化学的特性を把握するところから研究を始め、附属農場においてライシメーターおよびポット試験を行ない、その結果の一部を前報で報告した。本報告では、その後に行なった追跡調査の結果を述べるとともに、栄養塩類を相当量含んだし尿処理水および汚泥を干拓土壌へ投与しながら、上記1～3の問題点について検討した結果をも合わせて述べたい。

実験方法

装置

^{*} 農芸化学工学研究室
^{**} 附属農場
^{**} 松江地区環境衛生組合

本研究において使用したライシメーター、イオンメーター、および分光光度計は前報と同じものである。原子吸光分析には日立製508型原子吸光度計を用いた。

分析法

H⁺、Cl⁻、リン酸態リン (PO₄-P)、Fe²⁺、Fe³⁺、および可酸化性イオウ (FeS₂-S) の定量は、前報と同じ方法で行なった。硝酸態窒素 (NO₃-N) およびアンモニア態窒素 (NH₃-N) の定量は、それぞれオリオン社製硝酸用液体膜電極93-07型およびアンモニア用ガス電極95-10型を指示電極とするイオン電極法により行なった。水溶液、汚泥、土壌および作物体中のカドミウム (Cd) の定量は、農林水産技術会議事務局発行の資料に準拠して行なった。試薬はいずれも市販品をそのまま用いた。ただ、ジチゾンのみは文献記載の方法により精製した。

実験結果および考察

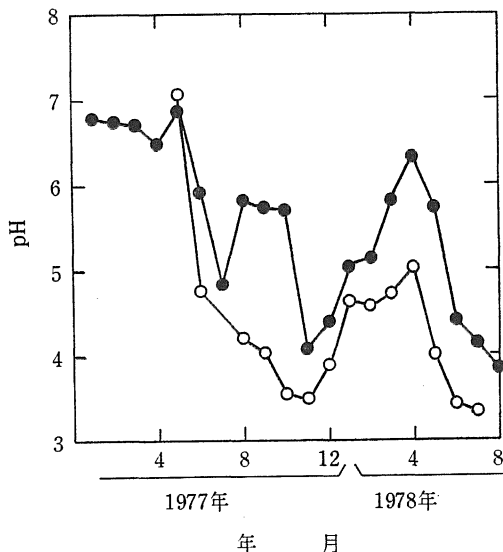
1. 土壌中の化学成分の変化

昨年 (1977年) 1月にライシメーターへ充てんした掛屋干拓地土壌が、当初中性を保っていたものの、夏期に至って急激に酸性へと変化したことは、前報において述べた。5区画あるライシメーターのうち第4区は、その

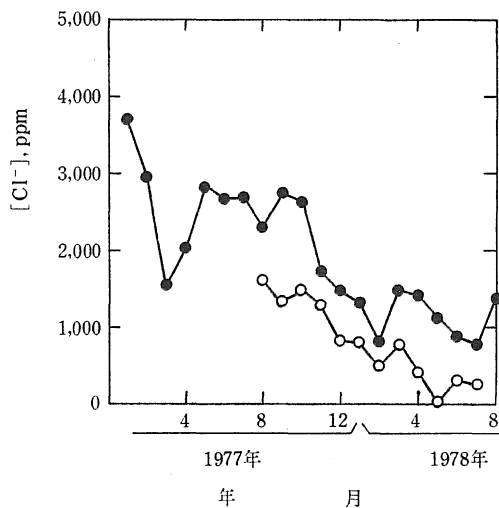
後も継続して自然放置し、毎月ほぼ定期的に浸出水を採取し、その pH および Cl⁻ 濃度を追跡調査した。両分析項目の各月平均値の変化状況を図示したのが、第1および第2図である。浸出水は、土壌表面より 40cm および 60cm の深さに埋めた集水管から採取した。

pH は上層 40cm から採取した浸出水の方が、下層 60cm からのものより常に低く、しかも一部の期間 (1977年8—10月) を除き、両者はほぼ平行して変動した。土壌上層部にある可酸化性イオウ (パイライト、FeS₂) から順次空気酸化を受け、硫酸を生じ、土壌が酸性化されるという村上³⁾および筆者²⁾の推定から当然予測される現象である。浸出水の pH は1977年夏期に、40cm 層で 3.5、60cm 層で 4.0 まで低下した。しかし気温の低い冬期に至り、pH は次第に増加しはじめ、1978年4月には 40cm 層で pH 5.0、60cm 層で pH 6.3 まで回復した。土壌温度の低下とともに、FeS₂ の化学的ないし微生物的酸化反応が不活発となり、硫酸の流亡とともに、pH 増大が起ったのであろう。FeS₂ の酸化は、第2年次の夏期に至り再び活発化した。1978年8月の段階で、すでに昨年をしのぐ pH 低下が観察されている。

Cl⁻ 濃度は、月によって多少の変動があるものの、ほぼ継続的に低下した。1978年7月の段階において、40cm 層浸出水の Cl⁻ 濃度は約 300ppm、60cm 層浸出水では約 800ppm となり、塩分が作物栽培に悪影響を



第1図 掛屋干拓地土壌を充てんしたライシメーターの第4区 (自然放置区) における浸出水の pH の経月変化。
○：表層より40cm下の排水管からの浸出水。
●：表層より60cm下の排水管からの浸出水。



第2図 掛屋干拓地土壌を充てんしたライシメーターの第4区 (自然放置区) における浸出水の Cl⁻ 濃度の経月変化。
○：表層より40cm下の排水管からの浸出水。
●：表層より60cm下の排水管からの浸出水。

及ぼす恐れはほとんどなくなった。

土壌酸性化の主要因である FeS_2 の土壌中濃度を適時測定した結果を第1表に示す。1977年春季まで土壌の深さによってほとんど差異のなかった FeS_2 -S 濃度も、同年夏季に至り表土から減少しはじめ、1978年夏季には明確な断層が見られた。なおライシメーター第3区においては、昨年秋から今年春にかけて、毎週1回、土壌耕うんを行ない、 FeS_2 -S の減少を期待した。1978年8月に調査した結果によれば、表層から 20cm までの土壌には FeS_2 -S は全く観測されず、20—30cm 層においてはじめて観測された。 FeS_2 -S の分解・除去のために、耕うん作業は極めて有効であるといえる。前報で述べたように、揖屋干拓地土壌は粒度が非常に小さく、そのため透水性・通気性も非常に悪いであろう。自然放置下では、表層部の土壌しか空気と接触しえず、下層部土壌が空気に触れる機会といえば、偶々生じた土壌の亀裂によるか、浸透水中の微量溶存酸素によるしかない。耕うんは、下層土壌と空気との接触面積を格段に増加させる効果を有する。村上は干拓地土壌の改良法として、 FeS_2 を徹底的に酸化分解させたのち、石灰で中和する方法を提唱しているが、耕うん作業は FeS_2 の分解に要する期間の短縮に大きく寄与するものと判断できる。

第2表には松江市内およびその近郊から採取した土壌中に含まれる FeS_2 -S を分析した結果を示す。村上の調査によれば、 FeS_2 は宍道湖・中海水系に広く分布しているとされているが、筆者らが採取した大橋川中州土

壌もかなり FeS_2 を含んでおり、このことを裏付けている。しかし、中海本庄沖底土は、かなり黒色化し硫化水素臭の強いヘドロであったが、 FeS_2 含量は低かった。中海干拓地の中で68%の面積を占める本庄地区の土壌が、酸性障害を引き起こす可能性の少ないものであることは、干拓地の農業利用にとって明るい材料である。主題から若干外れるが、村上らは宍道湖・中海水系のみならず、松江市近郊の丘陵地を削り造成した土地（例えば生馬、古志原）においても、土壌中に相当量の FeS_2 が存在し、芝生が定着しなかったり、隣接する水田に酸性障害を及ぼしている、と報告している。筆者らも、上乃木町の総合運動公園造成地土壌中から、平均 4.4、最大 14.4 mg/g-dry soil の FeS_2 を検出した。 FeS_2 の分布の広さが印象的であった。

2. 干拓地土壌への都市下水処理水の施用効果

本研究は都市下水処理水の農地還元を目的としているが、斐伊川水系の都市下水処理施設は目下建設中であるため、実験に適合した処理水が入手できない。当分の間は、松江市のし尿処理場から出る水を代替物として利用することにし、川向および麦島処理場の水を採用・分析してみた。第3表にその結果を示す。一般都市下水処理水に比べて川向処理場放流水は、ケルダール態-N含量が低く、 PO_4 -P 含量が高い。ケルダール態-Nと PO_4 -P の濃度比 (N/P 比) が一般都市下水と相当異なることは、実験用水として好ましくない。これに対して、麦島処理場の放流水および放流前段の貯留水は、ケルダール態-N、 PO_4 -P とも一般都市下水処理水と比べ相当濃いが、その N/P 比は両者相似通っている。麦島処理場放流水中の塩分濃度がかなり高いことから、放流前段の貯留水を希釈して使用すれば良いと見当をつけ、以後2回にわたってこの水を採取し、その化学成分の変化を調べた。当然のことながら、化学成分は採取日

第1表 ライシメーター土壌中の FeS_2 -S

採取年月	採取地点	[FeS_2 -S] mg/g-dry soil
1977-1	全区	11.3-13.3
1977-4	第1区 10cm	14.0
	30cm	12.6
	50cm	12.5
1977-7	第2区表土	5.0-8.8
1977-9	第3区 0-10cm	11.1-16.8
	10-20cm	11.0-16.5
	20-30cm	16.5-25.0
1978-8	第3区 0-10cm	0.0
	10-20cm	0.0
	20-30cm	8.4
1978-8	第4区 0-10cm	7.3
	10-20cm	18.3
	20-30cm	18.8

第2表 松江市内およびその近郊の土壌中の FeS_2 -S

採取年月	採取地点	試料数	[FeS_2 -S] mg/g-dry soil	
			実測値	平均値
1977-2	附属農場電算機利用温室	1	1.2	1.2
1977-5	中海本庄沖底土	2	1.2, 1.7	1.5
1977-7	大橋川中州	1	11.6	11.6
1977-7	揖屋干拓地 10-30cm	3	9.2-12.2	10.3
1977-9	松江市上乃木町 総合運動公園造成地	16	0.3-14.4	4.4

によってある程度変動したが、N/P 比は割合安定しており、この水を附属農場地下水で約5倍に希釈して用いることにした。希釈液は10t 入りタンクに貯留し、必要に応じてライシメーター、ポットに散布した。念のため、タンク貯留中の希釈液の化学成分変化を調べた(第3表)が、冬期であったことにもよるのか、成分はほとんど変化しなかった。

Wagner ポット 1/2000a の底に 3kg の砂を敷き、この上に風乾後石灰中和した干拓地土壌 10kg (先ず大粒の土壌 4kg, ついで小粒の土壌 6kg)を加えたものを20個作った。これらを、a) 無栽培タンク水無添加区、b) 無栽培タンク水添加区、c) タマネギ・キャベツ・アイリス・大麦をタンク水のみで栽培する区、および d) 土壌に適量の元肥を加えた上でタンク水を追加して、上記作物を栽培する区、に分け、栄養塩類の物質収支と作物の生育を調べた。タンク水は3-4日毎に1度、300-700cm³ 添加し、ほぼ1週間おきに底部孔より浸出水を抜き取った。なお実験開始日(1977年11月15日)以後35日間は、全ポットとも自然降雨下においたが、栽培上の問題が生じ、それ以後はガラス室に移して実験を継続した。ここではそのうち無栽培タンク水添加区について、塩類の物質収支を調べた結果を述べる。第3-6図に、それぞれ Cl⁻, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P の収支をとったものを示す。縦軸はすべて、流入ないし流出した塩類の積算量を示す。

Cl⁻ は測定期間後期において、流入積算量が流出積算量をやや上回る傾向を示したが、全般的に見て両者はほぼ平行的に増加した。土壌中において強い吸着ないし大きな化学変化をうけない化学種の特徴を示している。

NH₃-N では、流入積算量が流出積算量を大きく上回

り、測定終了日における後者の値は前者のわずか3.5%にすぎなかった。これだけのデータでは、NH₃-N が強く土壌吸着されたためか、化学変化をうけたためか、明らかでない。しかし、NH₃ の酸化生成物である NO₃⁻ の収支を見れば、この点は明らかとなる。

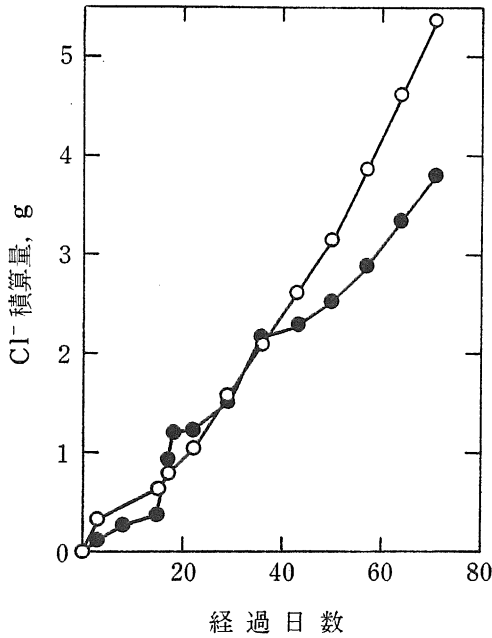
NO₃-N では、流入積算量はわずかであるのに、流出積算量は極めて大きかった。測定終了日において後者は前者の10.9倍にもなった。土壌中の硝化菌による NH₃ の NO₃⁻ への酸化が極めて活発なことがわかる。測定終了日における窒素収支を NH₃-N と NO₃-N のみについて取ると、流出積算量は流入積算量を上回った(157%)。これは流入水中の有機態N、土壌中に最初から含まれていたN、土壌中で固定されたN、雨水に含まれて流入したN等が計算されていないためであろう。特に雨水中のN成分は、無視しえない濃度であるといわれており、⁵⁾ポットをガラス室に入れて雨水の流入を防いだ35日目以後、NO₃-N の流出速度が減少したことも、このことを裏付けている。

PO₄-P では、流入積算量が流出積算量を大きく上回り、測定終了日において後者は前者のわずか2.9%にすぎなかった。PO₄-P は化学的に安定な種であるので、一部少量は土壌微生物の生育に利用されたとしても、大部分は土壌吸着されたものと推定できる。

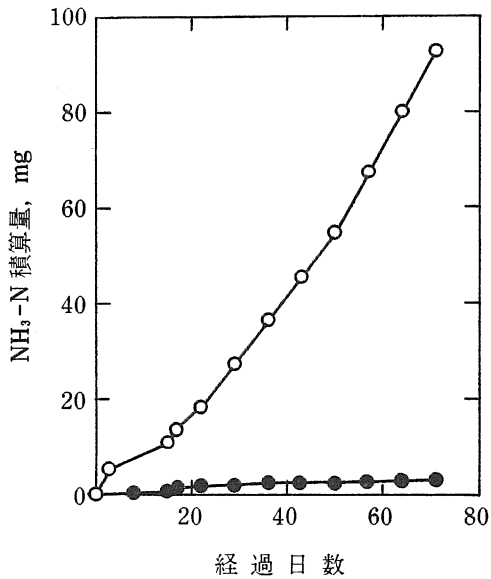
なお、元肥を添加せず、タンク水のみでタマネギ・キャベツ・アイリス・大麦を栽培した区においても、上述とほぼ同様な栄養塩収支が得られており、作物への吸収量はこの場合十分に評価することができなかった。また元肥として、硫酸、溶リン、硫酸カリウムを適量加えた区では、実験開始後約半月目から、流出水中の NO₃-N が非常に濃くなった(最大 120ppm)。しかし NH₃-N

第3表 し尿処理水中の化学成分

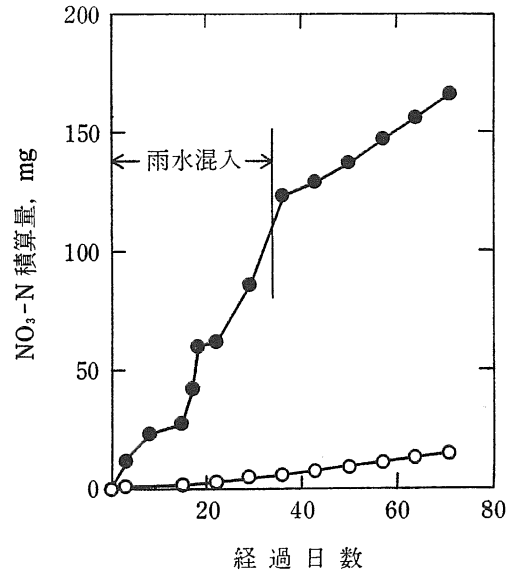
採取年月日	試料	pH	[Cl ⁻] ppm	[NO ₃ -N] ppm	[NH ₃ -N] ppm	[ケルダール態-N] ppm	[PO ₄ -P] ppm	N/P 比
1977-10-13	川向処理場放流水	7.49	1,230	2.7	—	7.9	5.4	1.5
1977-10-13	麦島処理場放流水	7.17	6,000	10.1	32	33	6.3	5.2
1977-10-13	麦島処理場放流前貯留水	7.40	7,100	12.5	82	141	10.9	13
1977-10-25	同上	7.91	2,510	5.3	38	91	7.0	13
1977-11-1	同上	7.58	3,230	7.2	40	63	7.1	8.9
1977-11-1	同上. 5倍希釈液	7.35	490	1.5	8.8	11	1.5	7.3
1977-11-8	同上	7.09	530	1.5	9.1	11	1.2	9.2
1978-1-20	同上	6.75	520	1.7	9.9	—	1.5	—



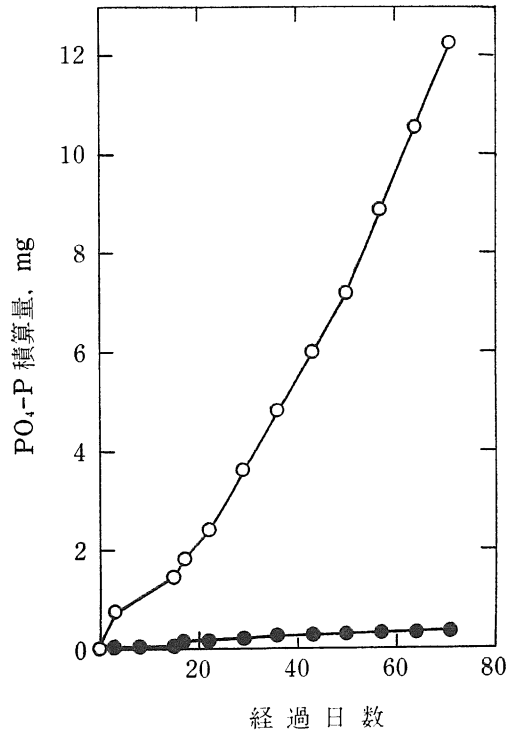
第3図 揖屋干拓地土壤を充てんしたポットへのし尿処理水添加にともなう Cl⁻ の物質収支。
○：流入 Cl⁻ 積算量。
●：流出 Cl⁻ 積算量。



第4図 揖屋干拓地土壤を充てんしたポットへのし尿処理水添加にともなう NH₃-N の物質収支。
○：流入 NH₃-N 積算量。
●：流出 NH₃-N 積算量。



第5図 揖屋干拓地土壤を充てんしたポットへのし尿処理水添加にともなう NO₃-N の物質収支。
○：流入 NO₃-N 積算量。
●：流出 NO₃-N 積算量。



第6図 揖屋干拓地土壤を充てんしたポットへのし尿処理水添加にともなう PO₄-P の物質収支。
○：流入 PO₄-P 積算量。
●：流出 PO₄-P 積算量。

はあまり増加しなかった (最大 10ppm)。この場合でも PO₄-P の流出は非常にわずかで、溶リン 無添加区と差異はなかった。

中海干拓地土壌のリン吸着能が大きいは、村上³⁾も指摘しているが、筆者らは室内実験によってこの点をさらに詳しく調べた。1977年1月に揖屋工区から採取した土壌を風乾後、0.5mm 以下の細土を篩いで分け取った。この土壌の酸化の進行度を示す指標として FeS₂-S 含量を求め、リン酸と安定な化学結合を形成する土壌の金属主成分として Fe²⁺、Fe³⁺、および Ca²⁺ の含量を求めた (第4表)。乾土にして約 1g の細土を 200 cm³ の三角フラスコに精秤し取り、これに約 1-125 ppm の PO₄-P を含む水溶液 (KH₂PO₄ 溶液) を 50cm³ 添加した。25°C 恒温水槽中で3時間振盪して吸着平衡に達せしめた。No. 5B の濾紙2枚で濾過後、濾液中の PO₄-P を従前の方法で定量した。乾土 1g 当り吸着された PO₄-P の mg 数 (x) を縦軸に、それと平衡にある溶液中の PO₄-P 濃度 (c) を横軸にとり、プロットしたものの一例を第7図に示す。立上り部の非常に急な飽和型曲線がえられた。Langmuir 型の吸着を仮定すると、式1あるいは式2が得られる。

$$x = \frac{abc}{1+ac} \quad (1)$$

$$\frac{c}{x} = \frac{1}{ab} + \frac{c}{b} \quad (2)$$

ここで a は吸着における平衡定数、b は最大吸着量を表わす。第7図中には c/x と c との関係を示すプロットもあわせて記した。c が約 10ppm を越えると良好な直線関係を示すが、5ppm 以下になると、プロットはこ

第4表 PO₄-P の吸着試験に用いた干拓地土壌^{a)}の化学成分

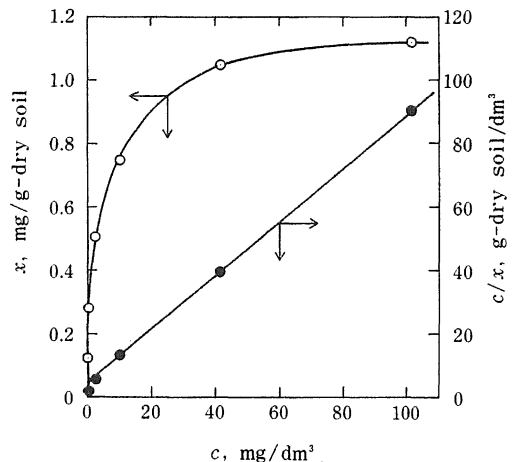
化学種	濃 度	
	mg/g-dry soil	me/g-dry soil
PO ₄ -P ^{b)}	0.0002	6×10 ⁻⁶
Fe ²⁺ ^{b)}	20.4	0.365
Fe ³⁺ ^{b)}	7.35	0.132
Ca ²⁺ ^{b)}	1.00	0.025
FeS ₂ -S	13.3	0.416

a) 1977年1月揖屋干拓地に採取。
風乾後、篩いにより 0.5mm 以下の粒子をとる。
b) 熱塩酸 (d=1.10) 抽出。

の直線より低くなった。溶液中の PO₄-P 濃度の低いときは、Langmuir 吸着等温式から予測される量より多い PO₄-P が土壌に吸着されることを、この結果は示している。恐らく吸着の初期には化学吸着が支配しており、吸着量の増加とともに物理吸着が支配的になるのであろう。

吸着に及ぼす無機イオンおよび pH の影響を見るため、同様の測定を、0.1M NaCl 溶液およびクエン酸緩衝液 (イオン強度 0.1M, pH 5.93) 中でも行なった。結果を第5表にまとめた。いずれの溶液中でも、最大吸着量 (b) は 1.2-1.4mg/g-dry soil で、大きな差異はなかった。しかし平衡定数 (a) には大きな違いが見られた。0.1M NaCl で a 値はほぼ半減し、クエン酸緩衝液中では約1/3に減少した。クエン酸緩衝液の場合、pH の効果か、クエン酸自身の固有な性質による効果か、今の時点では明らかでないが、いずれにしろ、水溶液中にイオン種が含まれていると、PO₄-P の土壌吸着はかなり阻害されることは確かである。b 値がほぼ一定であるので、この阻害作用は拮抗的な性格を有すると判断できる。

PO₄-P の乾土 1g 当り最大吸着量、約 1.4mg は、化学当量に直すと 0.045 me となる。この量は、土壌中に含まれ、PO₄³⁻ と不溶性の塩を形成する Ca²⁺ (0.02-0.03 me/g-dry soil)、Fe²⁺ (0.37 me/g-dry soil) および Fe³⁺ (0.13 me/g-dry soil) の総和と比べるとかなり少ない。土壌-水溶液という不均一平衡系において、水溶液中の PO₄³⁻ が土壌中の全ての Ca、Fe



第7図 揖屋干拓地土壌における PO₄-P の吸着等温線。(25°C)

○: x-c プロット。
●: c/x-c プロット。

オンと接触することは不可能であるから、当然の結果といえる。ただ、 $PO_4\text{-P}$ がどのような形態で土壤粒子と結合するかは、リンの肥料としての利用効率を推定する上で重要な事柄であり、さらに詳しく研究する必要がある。

以上の結果から、揖屋干拓地土壤はアンモニアを硝化する能力が強く、かつ強いリン酸吸着能を有することが明らかとなった。硝化力の強いことは、作物栽培上には好都合であるが、下水処理水の浄化の面では、必ずしも好ましくない。 $NO_3\text{-N}$ の方が $NH_3\text{-N}$ より除去困難であるから、リン酸吸着力が強いことは、下水処理水の浄化および土壤の肥沃化のいずれの面から見ても、好都合である。ただ吸着された $PO_4\text{-P}$ がどの程度まで農作物に吸収・利用されるかは別問題である。今後は、干拓地以外の畑地土壤の特性も調べ、干拓地土壤の特性を浮き彫りにさせるとともに、都市下水処理水の土壤還元効果を、水質浄化と作物栽培の両面から定量的に評価する必要がある。

3. し尿処理汚泥の農地利用と重金属

し尿処理は通常、微生物を用いた分解・凝集等によって行なわれているが、それにとり多量の汚泥が生ずる。例えば松江地区川向処理場では、1日約4tもの汚泥（これを当処理場では、凝集汚泥脱水乾燥ケーキと呼んでいる）が出来る。し尿処理段階に $PO_4\text{-P}$ 除去のため石灰を添加する操作が含まれているため、この汚泥のリンおよびカルシウム含量は高く、しかもアルカリ性を示す。当処理場より提供された資料によれば、 P_2O_5 が11.3%、 CaO が15.3%、 pH 9.3である。他方、この川向処理場に隣接する揖屋干拓地の土壤は、すでに述べたように、強い酸性を示し、ここで農作物を栽培するに

は多量の石灰とリン肥料の投与を必要とするといわれている³⁾。もし川向処理場の汚泥を揖屋干拓地土壤の改良に利用できれば、これ程能率的・経済的なことはない。この可能性を検討するため、まずこの汚泥の投与によって、干拓地土壤の pH がどの程度改良されるか、調べた。結果を第6表に示す。汚泥無添加区の土壤は、 pH 3.0以下の強い酸性を示した。風乾土の5%に相当する量の汚泥を添加して、5日目に pH 測定を行なったところ、すでに5.5を越えており、作物栽培にほとんど支障のない程度まで改良されていた。10日目の測定値はさらに中性へ近づいていた。汚泥の投与量を増加すれば、 pH はさらに中性に近づいた。汚泥が干拓地土壤の中和に、大きな効果を有することは明らかである。この汚泥を約10%投与した干拓地土壤を用いて、タマネギの栽培試験を行なった結果、石灰で中和し十分な元肥を追加した土壤で生育したタマネギと比べて何らそんな色のないものが得られた（栽培試験結果は後述）。汚泥が優れた肥料効果を有することも明らかである。

しかしながら、汚泥の農業利用に際して、なお慎重に検討しなければならない点がある。このような汚泥は、しばしば重金属、特にカドミウム (Cd) を多く含むことが指摘されている⁴⁾。そのため本研究においても、この汚泥の Cd 濃度を測定するとともに、関連する諸試料についても同時に Cd の分析を行なった。結果を第7表に示す。乾燥汚泥の Cd 濃度は1.1-3.5ppm（平均2.2ppm）であった。肥料取締法における特殊肥料の公定規格は、 Cd 5ppm以下であることが必要とされている。上述の値は一応基準値以下である。また三好がまとめた活性汚泥の Cd 濃度に関する数多くのデータと比較しても、上記の値は平均値以下である。したがって、この汚泥を同一土壤に繰り返し施用することを避ける限り、

第5表 揖屋干拓地土壤への $PO_4\text{-P}$ の吸着における Langmuir 吸着等温式^{a)} のパラメータ

溶液組成	Langmuir 吸着等温式 ^{a)} のパラメータ	
	a dm ³ /mg	b mg/g-dry soil
H_2O ($I_c^b=0.0M$, $pH=3.4-3.6$)	0.16	1.4
0.1M $NaCl$ ($I_c=0.1M$, $pH=3.5-3.8$)	0.080	1.4
クエン酸緩衝液 ($I_c=0.1M$, $pH=5.9$)	0.017	1.2

a) $x = \frac{abc}{1+ac}$

b) イオン強度。

第6表 川向し尿処理場汚泥の土壤中和効果^{a)}

汚泥添加量 ^{b)} , g	土壤 $pH^c)$	
	5日後	10日後
0	2.58	2.81
150	5.57	6.47
300	6.79	6.81
600	6.90	6.92

a) 揖屋干拓地土壤を風乾後、適量の汚泥を添加、攪拌後 Wagner ポット 1/2000a 中に室温放置。

b) 風乾土 3.0kg 当り。

c) 換土の2.5倍量の 1M KCl 水溶液で抽出した液の pH 。攪拌1時間。

Cd 蓄積の心配もなく、汚染につながる恐れもなからう。念のため、農業用あるいはし尿処理用として広く使用されている消石灰中の Cd 量も測定した。岡山県新見産の消石灰中に平均 1.46ppm、山口県美祢産で平均 0.55ppm の Cd が検出された。これが直接 Cd 汚染につながる恐れはないであろうが、消石灰は無害のものという一般通念からみると意外であり、注目に値する。なお川向処理場の汚泥中の Cd は主としてし尿に由来するものであり、処理に用いた石灰からの Cd は10%程度のものでと推定している。

揖屋干拓地土壌中の Cd は 0.14-0.18 ppm であった。この値は、Cd のクラーク数 0.15ppm、非汚染地域土壌の Cd 濃度の平均値 0.3ppm⁹⁾ から見て、むしろ少ない方である。麦島および川向処理場より放流される処理水中の Cd も、0.0002ppm かそれ以下の低濃度であり、公共用水域の環境基準濃度 0.01ppm をはるかに下まわった。

汚泥を施用した干拓地土壌で農作物の栽培を行なう場合、最終的には作物の可食部における Cd 濃度が問題となる。汚泥10%添加土壌で栽培、収穫したタマネギ・トマト・キャベツについて、その Cd 濃度を測定した(第8表)。トマトの Cd 濃度が最も低く(0.011ppm)、キャベツ芯部において最も高い値(0.040ppm)が検出された。野菜類に関しては Cd の公定基準が全くない。しかし、米のように日常多量に摂取される作物において、1ppm が汚染米とされ、0.4-1ppm が準汚染米とされていることを考えれば、上記野菜の Cd 濃度は問

題にならぬほど低い。ただ汚泥を加えず、石灰で中和した干拓地土壌で栽培したキャベツに比べ、汚泥添加区キャベツの Cd 濃度が幾分か高かったことは、注意を要する。今後は、汚泥施用区と対象区との比較を十分取りながら、各種野菜類について Cd 濃度のデーターを蓄積する予定である。Cd 以外の重金属についても、調査する必要がある。

4. 野菜栽培試験結果

Wagner ポット 1/2000a に揖屋干拓地土壌を充てんし、石灰中和区、石灰中和・元肥添加区、汚泥添加区にわけ、適時し尿処理水 5 倍希釈液を与えながら、野菜・花卉・牧草等の生育と収穫を調べた。ここではタマネギに関して得た結果の概略を述べる。

タマネギは1977年11月15日にポットへ定植し、1978年6月13日に収穫した。いずれの区においても、冬期にはわずかの株元肥大しか観察されなかった。4月に至り肥大が顕著となり、5月に急速な肥大が進行した。収穫時における株元直径および球重の平均値を第9表に示す。石灰中和区では、一応生育が見られたものの、収穫物は貧弱であった。これに対し、適量の元肥を施用した区においては、満足できる収穫物を得た。し尿処理水 5 倍希釈液からくる窒素・リンのみでは、タマネギの生育には不十分な肥料しか得られないことがわかる。また土壌に石灰・元肥等は加えず、汚泥のみを施用した区においては、元肥施用区に匹敵する収穫物を得た。汚泥の利用価値の高さを示している。

ここで述べた試験のほか、ポットやライシメーターを

第7表 し尿処理汚泥、揖屋干拓地土壌および関連試料中のカドミウム濃度

試料採取年月	試料	試料数	[Cd], ppm	
			実測値	平均値
1977-10~ 1978-8	し尿処理汚泥	5	1.10-3.50	2.02
1977-12~ 1978-2	消石灰(新見産)	10	1.00-3.00	1.46
1978-2~ 1978-8	消石灰(美祢産)	4	0.40-0.85	0.55
1978-1	ライシメーター第1区土壌			
	0 cm	1	0.14	} 0.16
	10 cm	1	0.17	
	30 cm	1	0.15	
	50 cm	1	0.18	
1977-11~ 1978-8	川向処理場放流水	2	<0.0002	
1977-11~ 1978-8	麦島処理場放流水	2	≤0.0002	

第8表 し尿処理汚泥が共存する干拓地土壌で生育・収穫した生野菜中のカドミウム濃度^{a)}

試料番号	野菜の種類・部位	[Cd], ppm
1	タマネギ、可食部	0.034
2	同上	0.026
3	トマト、可食部	0.011
4	キャベツ、内葉	0.024
	同上、芯	0.040
5	キャベツ、内葉	0.020
	同上、芯	0.027
6	キャベツ、内葉	0.006
	同上、芯	0.018

a) 試料番号1~5は干拓地土壌 10kg に汚泥 1.0kg を添加して栽培。試料番号6は干拓地土壌を石灰中和して栽培。

用いて、各種野菜・花卉・牧草類の栽培を試み、現在も試みつつあるが、その結果は今後の報告に回したい。ただ栽培試験を通じて気付いた重要な点の一つ最後に指摘しておきたい。前報において述べたように、掛屋干拓地土壌の粒子は極めて微細であり、透水性が悪い。大量あるいは長期継続的な降雨や、過剰な都市下水処理水の散布があると、土壌は長期間含水率の高い状態を保持する。そのため農作物は根腐れを起こしやすい状態におかれる。本研究期間中でも、このような状態におかれたトマトが、土壌中に十分な汚泥を添加し、豊富な Ca が存在していたにもかかわらず、Ca 不足の典型的症状であるしり腐れ病状を呈した。この病気は、塩化カルシウム水溶液を土壌散布しても押えられなかったが、葉面散布によって完全に押えることができた。根の吸収機能が弱体化していたことは明らかである。ライシメーターにおいて牧草を栽培した場合にも、水のたまりやすい窪み部での生育が悪く、水はけの良い盛り土において良好な生育が観察された。適度の畝立てを施すことによって、透水性の悪さに起因する栽培上の問題点は、ある程度改善できるものと思われる。

ま と め

1977年1月にライシメーターへ充てんした掛屋干拓地土壌は、その年の夏期に急激な酸性化を示したが、引き続き冬期から春期にかけて pH は上昇を続けた。しかしながら再び夏期が訪れると、pH もまた大きく低下した。土壌塩分濃度は継続的に低下し、作物栽培上の問題とはならなくなった。可酸化性イオウの酸化を促進するには、耕うん作業が有効であった。干拓地土壌に都市下水処理水を散布した結果、この土壌は強いアンモニア硝化能と強いリン酸吸着能とを有することが明らかとなった。リン酸の土壌吸着に関しては、Langmuir 型の吸着等温式がほぼ成立し、イオン性化学種の共存によって

吸着平衡定数は減少した。し尿処理により生成する汚泥が干拓地土壌の改良に極めて有効であった。汚泥中に若干のカドミウムが検出されたが、野菜への吸収量はわずかであった。野菜の栽培には、畑地からの排水方法を十分考慮する必要があると考えられた。

謝辞 本研究における費用の一部は、文部省特定研究経費によった。また本研究の実施に際して、農林省中海干拓事務所、島根県農林水産部、松江市環境部、および松江地区環境衛生組合の深い理解と協力を得た。カドミウムの分析と結果の考察に関しては、本学部耕地環境保全学研究室の達山和紀教授をはじめ、同研究室教員の皆様の指導と助言をたまわるとともに、装置の使用を許していただいた。本学部農山村地域開発学研究室の安達生恒教授からは、貴重な参考資料と有意義な情報を提供していただいた。土壌や浸出水の採取・運搬・分析やライシメーターの管理に関して、附属農場の教職員・研究生および本学部農芸化学工学研究室の教職員・学生の皆様の協力を得た。ここに心からの謝意を表する。

引用文献

1. 宮地伝三郎：生態系農業の構想。中海干拓地の利用について 島根県農政審議会 松江 1972, p.1-5.
2. 松井佳久・帯刀奈津子・寺田俊郎・吉野蕃人・福田晟：島根大農報 11：81-86, 1977.
3. 村上英行：酸性硫酸塩土壌の特性と改良法に関する研究 京都大学学位論文 京都 1965, p.1-148.
4. 登川親：公害研究 7(1)：31-33, 1977.
5. 三好洋：農業技術 33(9)：390-395, 1978.
6. 農林水産技術会議事務局：土肥誌 43(7)：264-270, 1972.
7. 村上英行・古山光夫・沢田真之輔：中国農業研究(42)：13-14, 1971.
8. 村上英行・古山光夫：低位生産地調査事業特殊調査成績集 農林省農蚕園芸局農産課編 東京 1974, p.32-1-4.
9. 坂井弘(監修)：農業公害ハンドブック 地人書館 東京 1974, p.118.

第9表 タマネギの収量と土壌培地との関係^{a)}

培 地	株数	平均株元直 径, mm	平均球重, g
石灰中和区 ^{b)}	4	42.5	40
石灰中和・元肥添加区 ^{c)}	4	68.8	116
汚泥添加区 ^{d)}	2	68.7	123

a) Wagner ポット 1/2000a を使用。

1977年11月15日定植。1978年6月13日収穫。

b) 掛屋干拓地土壌を風乾後、石灰中和。

c) b.の土壌 10kg の表土 15cm までに硫酸6.0g, 溶リン 6.1g, および硫酸カルシウム 2.5g を混合。

d) b.の土壌 10kg にし尿処理汚泥 1.0kg を混合。

Summary

Soil, which was collected from the reclaimed land of Iya and packed in lysimeters in January of 1977, showed an abrupt acidification in the summer and then it recovered in pH above 5.0 in the following spring. However, the pH of soil again rapidly decreased in the successive summer. The concentration of the chloride ion in soil steadily decreased to the extent that there may be no problem for the growth of the crops. The cultivation of land was effective for the acceleration of the oxidation of oxidizable sulfur. The application of municipal sewage effluents to the reclaimed land soil revealed that the soil has a strong nitrification action on ammonia together with a strong adsorption action on phosphate. The Langmuir adsorption isotherm virtually held for the adsorption of phosphate on the soil. The adsorption equilibrium constant was decreased by the coexistence of ionic species in solution. Municipal sludge is very effective for the improvement of soil in the reclaimed land. Although a significant amount of cadmium was detected in the sludge, the amount of cadmium absorbed in vegetables, grown in the presence of the sludge, was slight. It is important to consider the method for draining from a farm-land in order to cultivate a vegetable.