

中海干拓地農業への都市下水利用に関する基礎的研究 I

無灌漑下における土壌成分の変化について

松井佳久[※]・帯刀奈津子[※]・寺田俊郎^{※※}・吉野蕃人^{※※}・福田晟^{※※}

Yoshihisa MATSUI, Natsuko TATEWAKI, Toshiro TERADA,
Shigeto YOSHINO, and Akira FUKUDA
Basic Research on the Application of Urban Sewage to the
Agriculture at the Reclaimed Lands of Nakanoumi Area.
I. Change in Soil Components under No Artificial Irrigation

農林省中海干拓事務所発行のパンフレットによれば、¹⁾現在進捗中の干拓事業は、水面積 9,748ha の中海の28%にあたる 2,769ha を干拓し、あわせて残水域を淡水化することによって、農業用地・用水を確保するとともに、近代的な農業技術を導入して、先進的な農業地域を創設することを目的としている。しかしその目的達成までには、なお克服すべき幾多の問題が残されている。たとえば――

1. 水質汚濁：中海淡水化のため、中浦水道に防潮水門を建設し、海水の逆流を防ぐことになっているが、これによって海水流入にもとづく湖水浄化は完全に抑えられる。いわゆる塩分躍層によって現在比較的安定な状態²⁾に保たれている湖底のヘドロ状土壌が、淡水化によって攪乱され、一時的にせよ湖水の汚濁が急速に進行する可能性もある。特に中海周辺地域の都市化の進行とともに、都市下水の流入量が増加している現在、水質汚濁をいかに食い止めるかは重大な問題である。

2. 土壌改良：湖底土壌は多量の塩分を含み、かつ長期にわたる湖水の富栄養化現象の結果として、強い還元状態にあることが多い。このような土壌が干拓後、空気に触れると急速な酸化を受け、土壌は強い酸性となり、そのままでは農地として利用できない³⁾。経済性を考慮した土地改良法の開発が不可欠である。

3. 営農体系：水稻は一般に還元性土壌に強く、しかもその生育期に湛水することから土壌塩分の影響を受け

にくいため、干拓地の作付作物として無難である。多くの干拓地でも、水稻が主として栽培されている。しかし米の生産過剰あるいは消費の減少傾向の結果として、減反ないし転作が奨励されるという最近の農政動向からみて、この地域で稲作を行うことは困難と思われる。都市近郊という中海干拓地のすぐれた立地条件を生かしながら、畑地として有効な作付・営農体系を編み出すことも、重要な課題であろう。

さらにこれらの諸課題と密接に関連する問題として、斐伊川水系における都市下水処理水の放流がある。島根県の最終的な計画はまだ明らかでないが、もし都市下水に2次処理を施した後、中海へ放流するということになれば、中海の水質汚濁を促進することになりかねない。島根県の試算によれば、下水処理施設完成時において放流される2次処理水量は $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ にのぼり、斐伊川の平均水量 $260 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ の8%に相当する。1,000haの水田で稲作期に必要な水量が $12 \sim 15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ と見積られているのであるから、上記の放水量だけで、中海干拓地の半分を水田としたとしても、必要量を満足することになる。さらに都市下水2次処理水の栄養塩濃度は $\text{PO}_4\text{-P}$ で $0.1 \sim 3.0 \text{ g/m}^3$ 、ケルダール態 N で $10 \sim 20 \text{ g/m}^3$ といわれており⁴⁾、いずれも中海湖水中の濃度の10倍以上である。このように栄養塩濃度の高い処理水を大量、直接中海へ放流することは、水質汚濁の面で問題があるだけでなく、資源利用の面でも損失である。もしこれを干拓地灌漑用水として利用すれば、栄養塩類は土壌に吸着され、土壌の肥沃化

※ 農芸化学工学研究室

※※ 附属農場

に寄与するであろうし、浸出水は貧栄養化されるであろう。土壌の除塩にも寄与するであろう。中海干拓地は松江・安来・米子・境港等の都市に近接し、営農上の立地条件としては非常に恵まれている。これらの都市から流出する下水が農業に寄与することになれば、両者の結合はさらに強まり、理想的な地域農業システムが生まれることも夢ではない。本研究では、このような視点から中海干拓地に潜在する諸問題を総合的に把握するなかで、解決の道を探ることを目的としている。

われわれは研究の第一歩として、附属農場にライシメーターを設置し、中海干拓掛屋工区の土壌をここに充てんし、無灌漑・自然降水下における土壌および浸出水中の化学成分の時間変化を追跡した。同時に数種の作物について試験栽培を行った。本報告においては、1977年1月末、ライシメーター完成後、同年8月初旬までに得られた知見についてのべる。なお掛屋干拓地土壌の特性とその改良法については、島根県農業試験場の村上博士によって、極めて示唆に富む研究結果が1965年に報告されているが³⁾、それ以来10年以上を経た時点における結果と比較するのも有意義であろう。

実験方法

装置

1. ライシメーター：附属農場に1区面積 5×4m のライシメーターを5区、コンクリートおよびブロックを用いて設置した。浸透水の流失を防ぐため、底部および壁部にビニルフィルムを敷いた。1977年1月15日に中海干拓掛屋工区中央部よりヘドロ状土壌約 60t を採取し、1月17～18日に底部から60cm の高さまで充てんした。各区とも土壌表面より 20, 40, 60cm の位置に、直径 50mm 長さ約 5m の多孔性ビニル管を水平にさし入れ、浸透水の採取口とした。

2. 分析機器：pH および Cl⁻ の定量には Orion 社製デジタルイオンメーター801A型を用いた。指示電極には同社製精密分析用シングル pH 電極 91-01型、および塩素用固体膜電極94-17型を用い、比較電極には同社製ダブルジャンクション電極90-02型に、外部液として 10% KNO₃ または 0.2M Na₂SO₄ を注入したものをを用いた。吸光分析には日立社製124型分光光度計を、また総有機態・無機態炭素の測定には Oceanography International 社製504型分析計を用いた。

分析法

水溶液中の SO₄²⁻ の定量は J I S 規格クロラニル酸バリウム法^{5a)} と重量法^{5b)} とを併用して行った。溶存性 Fe²⁺ および Fe³⁺ の定量も J I S 規格チオシアン酸塩

-チオグリコール酸法^{5c)} によって行った。硝酸態窒素 (NO₃-N) は、Cd-アマルガムを用いて NO₂-N へ還元後定量し^{6a)}、リン酸態リン (PO₄-P) はモリブデン酸アンモニウムとアスכולビン酸 とを用いる精密法^{6b)} によって定量した。

土壌中の H⁺, Cl⁻, PO₄-P, NO₃-N の定量は、試料土壌にその5倍量の 0.5M Na₂SO₄ を加え、1h 攪拌後ろ過し、ろ液について前記の方法を適用して行った。土壌中の硫化物イオン (S²⁻) の定量は、6N HCl 添加により発生した H₂S を水蒸気蒸留し、酢酸亜鉛液に吸収後、沃素滴定する方法により行った。土壌の鉄含量は熱塩酸による浸出を行った後、前記の方法で定量した。土壌中の可酸化性イオウ (FeS₂-S) の定量は、過酸化水素法⁹⁾ によった。

実験結果および考察

1. 供試土壌の初期特性

ライシメーターへ充てん時における土壌の物理的、化学的特質を調べた結果をのべる。国際土壤学会ピベット法による土壌粒子の分別の結果を第1表に示す。比較のため、村上・入沢により1956年に調査された同じ地点における湖底土壌特性値も示す。両試料の土性は分類学的には若干の相違があるものの、ともに粒径 0.02mm 以下の微砂・粘土分の和が75%をこえ、粒度が非常に小さいという特徴のあることは明白である。

供試土壌の水吸着保持力 (pF) と含水比との関係を第2表に示す。通例の畑地土壌に比べ、いずれの含水比も非常に高い値となった。この結果から土壌水の種類別にその含水比を見積りうる。すなわち、pF 0 と 1.8 における含水比の差4.4%が、重力によって下降運動をする水 (重力水) に相当し、pF 1.8~4.2 の含水比の差、34.6%が植物に利用される水 (毛管水) に当り、残り 34.8%が土壌粒子に吸着し植物が吸収しえない水 (吸湿

第1表 土壌粒子の機械分析 (国際土壤学会法)

試料	細 土 %				土性
	粗砂 2~ 0.2 mm	細砂 0.2 ~ 0.02 mm	微砂 0.02 ~ 0.002 mm	粘土 0.002 mm 以下	
掛屋干拓地中央 (1977年1月) ^{a)}	4.5	19.2	46.9	29.4	Silty Clay
干拓前掛屋湾 底土 (1956年) ^{b)}	0.3	20.7	36.9	42.1	Light Clay

a) 土粒子比重2.72, 仮比重0.905, 間隙率66.7%

b) 村上英行, 文献3

水)に相当する¹⁰⁾。吸湿水が非常に多いのに対し、重力水が非常に少ないことが注目される。土壌粒子が細かく、重力水の割合が小さいことから、土壌の透水性は非常に悪いと判断できる。都市下水を干拓地農業に利用する立場からみると、このような土性は好ましくない。ただ塩湖の干拓初期では、粘土粒子がナトリウムコロイドとなつて膨潤し、孔隙のくびれが非常に狭められるため透水性が悪くなるといわれている。¹¹⁾除塩処理によってコロイドの破壊がおり、透水性が向上する可能性は十分ある。粘土・微砂の団粒化を促進することも必要であろう。

供試土壌の化学分析の結果を第3表に示す。比較のため、附属農場の電算機利用温室土壌の分析結果を併記した。干拓地土壌の含水率、Cl⁻含量が非常に高く、pHが弱アルカリ性であることは当然として、S²⁻およびFeS₂-Sの含量の高いことに注目せねばならない。³⁾村上によって指摘されたように、これらのイオン分は酸化されると硫酸と化し、悪質な酸性土壌をもたらす物質である。この点については後で詳述する。また干拓地土壌では、NO₃-NやPO₄-Pの栄養塩が比較的乏しい反面、炭素含量が高かった。土壌中には貝殻の破片が数多く見受けられ、無機炭酸塩が存在するものと思われる。鉄含量は平均的な値といえよう。

第2表 揖屋干拓地土壌(1977年1月)のpFと含水比との関係

pF	含水比 ^{a)} , %
0	73.8
1.8	69.4
3.0	58.9
4.2	34.8

a) 含水比 = $\frac{\text{水分重量}}{\text{乾土重量}} \times 100$

第3表 土 壌 の 化 学 分 析

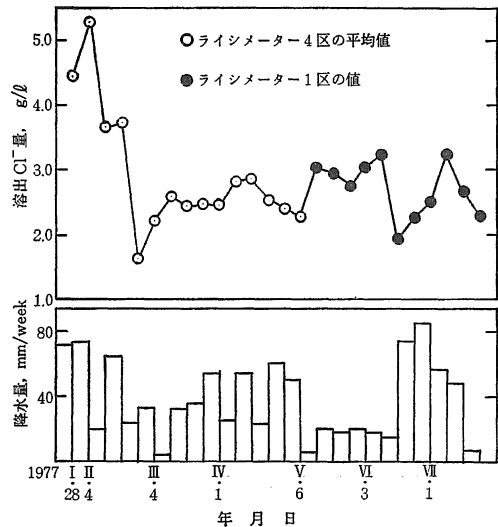
試 料	含水率 %	pH	乾土 1g 当りの含量, mg							
			Cl ⁻	NO ₃ -N	PO ₄ -P	TDC ^{a)}	Fe ²⁺ ^{b)}	Fe ³⁺ ^{b)}	S ²⁻	FeS ₂ -S
揖屋干拓地土壌 (1977-1)	40.4	8.26	8.19	0.0002	0.001	0.48	11.3	16.3	0.30	11.3
農場電算機利用温室土壌 (1977-2)	10.8	6.87	0.13	0.021	—	0.14 ^{c)}	8.3	28.7	0.06	1.2

a) 総炭素含有量, b) 熱塩酸抽出量, c) 1976-12 採取土壌

2. Cl⁻ の浸出速度

干拓地農業においてまず問題となるのが除塩である。これに関する知見をうるため、無灌漑、自然降水下における土壌および浸出水中の Cl⁻ 濃度の時間変化を追跡した。1月18日にライシメーターへ土壌を充てんし、1月28日に下層排水管より浸出水を初めて採取した。以後1週間毎に採水を続けた。なお排水管は平常栓を閉じておき、採水時のみ開放し、浸出水の留出が止まると再び栓を閉じた。

第1図は Cl⁻ 濃度を採水日に対しプロットしたものである。Cl⁻ 濃度は、漏水のため浸出水がほとんど採取できなかった1つの区を除く4つの区の平均値で示した。ただしそのうち3つの区は、5月初旬に人工灌水を行うなど、別の目的に利用したので、5月13日以降の値は唯1区のものである。第1図には参考のため、採水日前1週間の降水量も併記した。Cl⁻ 濃度は最初の約1ヶ



第1図 降水量およびライシメーター下層浸出水中の Cl⁻ 含量の時間変化

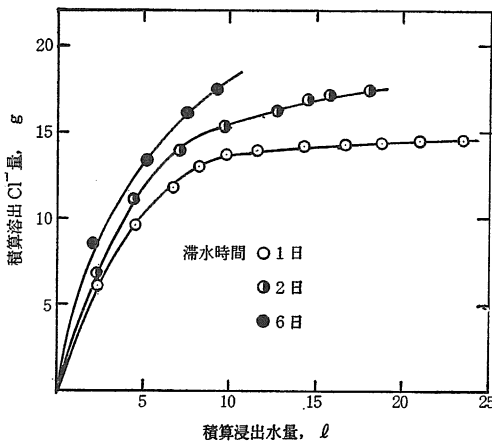
月ではほぼ半減したが、それ以降若干の変動はあるものの、2.0~3.0g/l 間ではほぼ一定となった。

4月22日に、ライシメーター各区中央部から深さ別に土壌を採取し、化学成分の垂直分布を調べた。5つの区の平均値を第4表に示す。上層土壌において Cl⁻ 濃度の顕著な低下が観測された。しかし下層部では初期値と大差なかった。下層より浸出する水の塩分濃度が半年を経た後でも低下しないのは当然といえよう。

土壌から塩分が溶脱する機構をさらに詳しく知るため、ポット試験を行った。アール2,000分の1のポットに、風乾した干拓地土壌 10kg を均一に充てんし、最大含水量に近い 8l の農場水道水 (pH 7.15, [Cl⁻] = 0.0097g/l) を添加・吸収させた。一定の日数放置した後、底部より浸出水を採取し (平均 2l), その直後約 2.5l の水を補充した。浸出水より補充水が若干多いのは、放置中の蒸散を考慮したためである。この操作を繰り返し、浸出水中の Cl⁻ 量を定量した。放置日数としては、1, 2, 6日と3種類設定した。浸出水の積算量と浸出 Cl⁻ の積算量との関係を第2図に示す。Cl⁻ は、

第4表 ライシメーター土壌化学成分の垂直分布 (採土: 1977年4月22日)

土壌深さ cm	含水率 %	pH	乾土 1g 当りの含量, mg	
			Cl ⁻	NO ₃ -N
10	35.7	7.44	3.17	0.022
30	41.2	7.48	5.45	0.022
50	51.1	7.71	7.42	0.029



第2図 ポット試験における積算浸出水量と積算溶出 Cl⁻ 量との関係

積算浸出水量が 7~8l までは急速に溶出したが、それ以後急に溶出しなくなった。土壌中の Cl⁻ には、浸透水によって容易に溶出する部分と、溶出し難い部分とが存在するものと推定できる。滞水時間を長くすると、一定量の浸出水によって溶出する Cl⁻ 量は増大するので、易および難溶出性 Cl⁻ の境界は明確でないが、図から 15~20g の Cl⁻ が易溶出性で見積られる。供試土壌 10kg 中の Cl⁻ の総量は約 60g であるので、易溶出性 Cl⁻ は全体の約30%にすぎないことになる。このように浸透水によって除去の困難な Cl⁻ の割合が大きいのは、土壌粒子が極めて微細なため、土壌表面積が大きく、表面吸着性 Cl⁻ 量が大きくなるからであろう。吸湿水の割合が大きいのも同じ理由である。水の透過性が悪く、Cl⁻ の拡散速度が小さいことも原因の一つとして考えられる。

ライシメーターの2つの区では、5月末から作物栽培試験を行うため、それに先立つ約2週間、湛水による除塩を試みた。両区とも、その上層約 20cm をよく耕耘したのち、水道水で湛水状態にした。2日間放置後、全排水管の栓を開放、抜水し、その後再び湛水する。この作業を5回繰返した。これにより表層土壌の Cl⁻ 含量は、乾土 1g 当り 0.15~0.45mg まで低下した。したがって、干拓地土壌の短期除塩は必ずしも容易でないが、都市下水処理水のような淡水資源が豊富であれば、不可能ではないといえる。

3. pH の低下現象

多くの干拓地農業において、塩分以上に大きな障害となっているのが土壌の酸性化である。すでに述べた様に、初期供試土壌は弱アルカリ性を示した。この時浸出水の pH は 6.7~7.0 ではほぼ中性であった。以後、Cl⁻ の場合と同様に毎週1回、浸出水の pH をチェックした。最初の3ヶ月間はほとんど変化がみられず、3ヶ月を過ぎた4月29日にいたり、若干の pH 低下 (pH 6.1~6.4) が観察された。4月22日に行った土壌化学分析の結果 (前述、第4表) でも、上層土壌に若干の pH 低下がみられたが、ほぼ中性に近く、作物栽培に支障を与えるものとは考えられなかった。それゆえ、5月中旬から前述の様に、ライシメーターの2つの区において耕耘・湛水を行い、作物栽培の準備に取りかかった。ところが、思いがけない pH の急激な低下が起った。第5表にその前後における浸出水の pH を示す。耕耘後5日目に採取した浸出水の pH はこれまでになく低い値を示し、特に上層部からの浸出水で著しかった。湛水を繰り返す間に pH は 6.0 付近まで回復したが、作物の植付け前に再耕耘したところ、再び pH は低下し、もはや

中性へとは回復しなかった。なお対照区としてこの期間も耕耘せず自然降雨下で放置した区においては、浸出水の pH が 6.2 より低下することはなかった。

5月22日に至り、耕耘・湛水区へトマト苗（加工用55日苗）および飼料作物（とうもろこし、ソルゴー、ローズグラス、青刈大豆）を作付けした。しかしトマトでは新根の発生が極めて少なく、飼料作物はいずれも発芽後の生育が悪く、6月17日に至りすべて枯死した。その時点における土壌上層部の pH は 3.69 と非常に低かった。Cl⁻ は 0.15mg/g-乾土で、問題になる量ではなかった。

村上³⁾の研究によれば、揖屋干拓地土壌は多量の硫化鉄および pyrite (FeS₂) を含み、これが酸化をうけると硫酸と化し、土壌 pH は低下する。前述のような pH の急激な低下も、耕耘によって土壌中へ空気が供給されたため、酸化が進行したためと思われる。この点を裏付けるため、浸出水中の SO₄²⁻ および Fe³⁺ の定量を行った。両者とも水に不溶性の FeS、FeS₂ が酸化されると溶出してくると考えられる化学種である。Fe³⁺ は褐色を呈するため視覚によっても生成が確認でき、事実5月中旬頃から土壌表面や浸出水が目立って褐色付くのが観察された。第6表に分析結果の一部を示す。pH に大きな変化の現われていない4月頃からすでに SO₄²⁻、Fe³⁺とも増加傾向が現われている。土壌中の塩基による中和作用が起こる間は、イオウ分の酸化が起こっても pH 低下として現われないので、このような時期的な差異が生じたのであろう。5月下旬から6月にかけて

第5表 土壌耕耘前後における浸出水の pH 変化
(ライシメーター第1区)

	浸出水採取口の深さ, cm		
	20	40	60
4月22日 抜水	—	—	6.13
5月6日 抜水	—	—	6.06
5月7日 上層 20cm を耕耘	—	—	—
5月9日 湛水	—	—	—
5月12日 抜水後再湛水	3.37	3.65	5.32
5月14日 抜水後再湛水	5.90	6.38	6.34
5月17日 抜水後再湛水	5.82	6.04	6.10
5月20日 抜水後再湛水	—	—	6.84
5月24日 耕耘, 整地	—	—	—
5月26日 トマト苗植付け	—	—	—
5月28日 抜水	—	3.33	6.90
6月2日 抜水	3.02	3.08	3.77
6月11日 抜水	—	3.19	4.27
6月17日 トマト枯死	—	3.49	4.75

SO₄²⁻ と Fe³⁺ との溶出が盛んとなり、pH の低下も顕著となった。6月17日採取の上層部土壌の pH は、一部で実に 2.73 という低い値を示し、Kappen 法による全酸度は 212、この酸を中和するのに必要な炭カルは、1ha 当り作土を 20cm として約 32,000kg と巨大な量に達することがわかった。耕耘を行わず自然降雨下で放置した区でも、6月下旬に至り pH 4.0 付近へと低下した。夏期に pH の低下が顕著となるのは、温度上昇に伴う化学反応および微生物活動の活性化の結果であろうが、この点についてはさらに基礎的な検討を要する。

浸出水の化学成分として、この他に NO₃-N、PO₄-P、総有機態炭素 (TOC)、および総無機態炭素 (TIC) を調べた (第7表)。このうち前3者は、下層浸出水で見る限り、変動幅が狭いか、変動しても規則性がなかった。したがって土壌酸性化現象への硝酸、リン酸、および有機酸の寄与は無視できよう。これに対し TIC は、2-3月の間 40mg/l 前後の値をほぼ保ったが、4月には 10mg/l 程度に低下し、5月中旬には 1mg/l のオーダーになった。このような変化は、pH の低下時期より先行しており、むしろ SO₄²⁻、Fe³⁺ の増加期と一致している。イオウ分の酸化によって生じた硫酸が、土

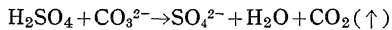
第6表 浸出水中の SO₄²⁻、Fe³⁺ の定量
(ライシメーター第1区 60cm 採取口)

採水月日	SO ₄ ²⁻ , g/l	Fe ³⁺ , g/l
1月28日	2.5	0.0002
2月11日	2.7	0.0001
4月1日	3.1	0.0066
5月18日	3.3	0.011
5月28日	4.8	0.016
6月11日	6.4	0.051
6月23日	5.9	0.062

第7表 浸出水中の化学成分の定量
(ライシメーター第1区 60cm 採取口)

月日	NO ₃ -N mg/l	PO ₄ -P mg/l	TOC mg/l	TIC mg/l
2月11日	0.055	0.006	25	42
2月18日	0.009	0.011	24	47
3月4日	0.010	0.006	42	36
3月18日	0.018	0.003	17	41
4月1日	0.022	0.005	11	14
4月15日	0.022	0.005	34	13
4月22日	0.021	0.003	36	13
4月29日	0.018	0.002	14	5
5月14日	0.011	0.003	17	0
5月18日	0.007	0.005	25	5

壤中に存在する炭酸塩と反応し、脱炭酸が進行していることを示している：



炭酸塩の減少とともに中和反応が起こらなくなり、土壌の酸性化は急速に進行しはじめるのであろう。

ま と め

揖屋干拓地土壌を充てんしたライシメーターを用いて、無灌漑下における土壌化学成分の消長を調べた。供試土壌は微細粒子成分に富み (Silty Clay)、透水性が悪い。このため脱塩はかなり困難であった。また、可酸化性のイオウ分に富み、それが気温の上昇につれて酸化を受け、硫酸と化するため、土壌は酸性化し、作物の栽培も容易でなかった。

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。揖屋干拓地土壌の採取・運搬に際しては、農林省 中海干拓事務所の理解と協力を得た。土壌の粒子組成・土性等の物理性試験では、本学部農地工学研究室の福桜盛一助教授の協力を得た。島根県農業試験場の村上英行博士からは、数多くの研究文献の提供を受けた。土壌試料の採取・分析に際しては、本学部農芸化学工学研究室の伊達善夫教授をはじめ、職員・学生の皆様の協力を得た。特に佐藤朝美嬢には、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の分析に関して、多大の労をたまわった。また分析試料の採取・運搬およびライシメーターの管理に関して、附属農場教職員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. 農林省中海干拓事務所：中海干拓事業計画概要 松江 1971.
2. 伊達善夫・川上誠一・松本宗人：山陰文化研究紀要 (15) : 35-60, 1975.
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.
4. 日本下水道協会：住宅団地における処理水の稲作に及ぼす影響等調査報告書 東京 1973.
5. 守田栄・洞沢勇・白沢忠雄 (編)：公害関係 J I S 公覧 新日本法規出版 東京 1972.
a) P.1205, b) P.1210, c) P.1258.
6. 陸水生物生産測定方法論 研究会 (編)：陸水生物生産研究法 講談社 東京 1969,
a) P.476, b) P.483.
7. 松江吉行 (編)：公共用水域保全のための水質汚濁調査指針 恒星社厚生閣 東京 1965, P.182.
8. 日本分析化学会 (編)：分析化学便覧 丸善 東京

1971, P.1468.

9. 村上英行：土肥誌 32 (6) : 276-279, 1961.
10. 船引真吾：土壌学講義 養賢堂 東京 1972, P.174.
11. 菅野一郎 (編)：日本の土壌型—その生成・性質・研究法— 農山漁村文化協会 東京 1964, P.282.
12. 松野孝雄：土壌学通論 明文堂 東京 1952, P.106.

Summary

The change in chemical components of soil with time was examined under no artificial irrigation by means of lysimeters packed with soil taken from the reclaimed land of Iya. The soil was rich in fine particles (silty clay) and poor in the permeability of water, so that the desalting of the soil was significantly difficult. The soil had an abundance of oxidizable sulfurs, which were oxidized by air with the elevation of atmospheric temperature to give sulfuric acid. The resulting acidification of the soil made the growth of crops very difficult.