下水汚泥の緑農地における利用

——国際シンポジウムとわが国における課題

藤井國博*

都市の発達と人口の集中は下水処理の拡充を招いたが、最終的に増加する汚泥が頭を悩ませる問題となっている。生物圏では元素の循環が円滑に行なわれなければならない、汚泥を自然界に還元することは理にかなうことではあるが、肥効、衛生、金属汚染などの問題を解決せねばならない。緑農地を“ごみ箱”としてはならず、健全な姿をいかに生み、保ってゆくかが問われる。

下水汚泥は、下水道の終末処理場における下水の処理に伴って発生する。下水処理にはいくつかの方式があるが、現在ほとんどは活性汚泥法が採用されており、単に下水汚泥と言え、この方式によって発生する汚泥を指している。図1に同法による下水処理のフローシートを示した⁽¹⁾。汚泥は最初沈殿池と最終沈殿池で発生する。前者の汚泥を初沈汚泥と呼び、下水に含まれる沈殿しやすい固形物から成る。後者を余剰汚泥と呼び、下水中のコロイド状や溶解性の有機物などの酸化分解に働いた生物体(細菌と原生動物)から成る。水処理系で発生した汚泥は、汚泥処理系に送られ濃縮後直ちに脱水される場合(脱水ケーキと呼ばれる)と、消化槽に送られ嫌気性消化などの消化工程を経たのち脱水される場合(消化汚泥と呼ばれる)とがある。わが国では、直接脱水される場合が多く、昭和56年度における全処分量に占める消化汚泥の割合は8%にすぎない(建設省調査)⁽²⁾。

汚泥の脱水の際には、効率を上げるために脱水助剤が用いられる。これには、消石灰(水酸化カルシウム)や塩化第二鉄などの無機凝集剤やアクリルアミドポリマーなどの合成高分子凝集剤が使用されている。石灰を用いた汚泥を石灰汚泥、高分子

凝集剤を用いた汚泥を高分子汚泥と呼ぶこともある。こうして発生した汚泥が最終処分される。

わが国における下水汚泥処分の現状

わが国では、昭和56年現在、約500個所の終末処理場が稼動中であり、年間約65億 m^3 の下水処理されている。昭和56年に発生した汚泥の最終処分量は約240万 m^3 であり、その性状は、脱水ケーキが80%、焼却灰(脱水後焼却した灰)が11%、その他(乾燥汚泥、消化汚泥)が9%である。これを処分の形態で見ると、陸上埋立が42%、海面埋立が36%、有効利用が15%となっている。有効利用のうち93%が、緑地や農地による利用で占められている⁽²⁾。このように、約80%が埋立によって処分されているが、次第に埋立地の確保が困難になっている。表1は、54年に発表された全国157都市の下水汚泥の処分可能年数に関する調査(建設省)⁽³⁾の結果であるが、ここに示されているように70%近くの都市が5

図1 標準的下水処理場のフローシート⁽¹⁾

* Kunihiro FUJII
国立公害研究所水質土壌環境部

表 1 下水汚泥の処分可能年数⁽²⁾

処分可能年数	0～5	5～10	10～15	15～20	20～	計
都 市 数 (%)	104 (66)	22 (14)	15 (10)	2 (1)	14 (9)	157

年以内に汚泥の処分ができなくなることが明らかにされ、埋立に代わる処分方法の確立が緊急の課題となっている。

現在、下水道関係者が安定した処分方法として熱い視線を注いでいるのが、緑地や農地における利用（処分）である。

下水汚泥の農耕地利用

日本において本格的な下水処理場（東京、三河島）が建設されたのは、1922 年（大正 11 年）のことである。その方式は散水汙床法であった。1930 年には、活性汚泥法による処理場が名古屋市（堀留、熱田）に建設され、以後、わが国の汚水処理の主流を占めている⁽⁴⁾。散水汙床法で発生する汚泥が各種の農作物に有効であることは麻生（1924）によって報告され、活性汚泥の肥料としての有効性は、平井（1930）、矢木（1934）、塩入と小林（1935）によって報告されていた⁽⁴⁾。これらの報告が出された当時、名古屋市は肥料成分を明記した汚泥肥料を農業団体を通じて販売しており、これは 1950 年代まで続いたとされている（稲場）⁽⁴⁾。しかし、その後の高度経済成長政策によって農村人口が都市へ流出するとともに化学肥料が普及し、汚泥の農地における利用はほとんど行われなくなった。

過去においてこのような経過をたどったにもかかわらず、最近再び下水汚泥の農地や緑地における利用が注目を集めるようになった。それにはいくつかの理由がある。

一つは、下水道の整備、拡充と下水処理の高度化に伴って汚泥の発生量が増加したことと、海洋投棄や埋立処分などの法的規制が強化されたこと、そして前述のように埋立地の確保が困難になり、安定した処分法として緑農地利用が有望視されていることである。

一方、わが国の農耕地は、長年にわたる化学肥料の連用によって土壌の有機物含量の低下——地

力の減退——が問題となっており、有機物の補給による土づくり運動が提唱されはじめていた。その有機物として下水汚泥の有機物を使用しようとする考え方がおこってきたことが第二の理由として挙げられる。

第三の理由として、世界的な資源問題がある。現在の食糧生産は、化学肥料によって支えられていると言っても過言ではないが、この化学肥料は、資源の枯渇が憂慮されるような状況にある。とくにリン酸肥料の原料であるリン鉱石については、全世界の可採埋蔵量（現在の技術で経済的に採掘できる量）が 250～350 億トンとされており、1977 年の世界のリン鉱石生産量が 1.3 億トンであり、生産量は毎年約 5% の伸びを示している。この比率で生産量の伸びが続くとすれば、40～50 年で消費してしまう計算となる⁽⁶⁾。このような事態に対応するために FAO（国連食糧農業機関）は、化学肥料に代わる肥料資源として各種の有機物を可能なかぎり植物生産・食糧生産に利用しようと提言している⁽⁶⁾。この有機物の一つとして下水汚泥が考えられている。

このような状況を背景にして、再び下水汚泥の緑農地利用に関する調査研究が各地の農業試験場（東京、神奈川、愛知）や建設省などで開始された。再開当初は、以前と同様に肥料としての有効性に関するものであった。しかし、建設省が土木学会に委託して 1968 年に開始された全国的規模での組織的研究「下水汚泥の処理、処分及び利用に関する調査研究」の実施過程で、汚泥に含まれる重金属類の危険性が問題となり、1972 年からは重金属を中心とした研究が実施された⁽⁴⁾。ここに至ってはじめて、汚泥の安全性の確認に重点をおいた研究が実施されるようになった⁽⁴⁾。研究の再開とともに下水汚泥を有機物資材として受け入れる農家も出はじめ、各地で農耕地利用が再開された。しかし、受け入れ農家や流通を扱う肥料業界、さらには処理場側からも、重金属類に対する不安感が出されはじめ、施用を中止する処理場も現われた。

1976 年には肥料取締法が改正され、汚泥（汚泥肥料）中のヒ素、カドミウムおよび水銀について

それぞれ乾物当り 50, 5, 2 ppm を限度とする規制値が出されるとともに、総理府令による溶出法に基づいた規制値が定められた⁽⁷⁾。このようにして、有効性と安全性の両方を考慮した本格的な研究が開始されるようになり、1978 年には日本土壤肥料学会の主催で下水汚泥に関するシンポジウムが開催され、その成果が公表された⁽⁸⁾。それ以後も、下水道側、農林水産省、環境庁、建設省やそれぞれの省庁の研究機関、各地の農業試験場などで調査研究が行なわれ、下水汚泥の安全性、有効性、環境影響、流通などに関する幅広い検討が行なわれるようになった。さらに、1981 年末、環境庁水質保全局は、「汚泥の農用地等還元問題研究会」を設置し、それまでに得られた研究成果をもとに、下水汚泥の農耕地利用に係る指針（ガイドライン）の検討を開始した。

このように、下水汚泥の生産者側、受け入れ側の農業関係者および環境保全担当者側それぞれの関心が盛り上がっているなかで、1982 年 10 月、東京において下水汚泥資源利用協議会（日本下水道協会の下部組織）の主催による「下水汚泥の緑農地利用に関する国際シンポジウム」が開催された。筆者は、このシンポジウムに発表者の一人として参加した。また、現在も下水汚泥の農耕地利用に伴う環境影響に関する研究に従事している。このような立場から、国際シンポジウムで討論された事項を中心に、以下下水汚泥の農耕地利用に関する問題点について紹介しよう。

下水汚泥の緑農地利用に関する国際シンポジウム

このシンポジウムにおける各講演者の演題は、表 2 のとおりであり、その内容は、各国（日本、米国、英国、西独）における緑農地利用の現状、施用効果とその発現様式、土壌の性質（物理、化学および微生物性）に与える影響、病原性微生物からみた汚泥施用の安全性、土壌-植物系における重金属類の挙動、重金属類や有機化合物などからみた汚泥施用の安全性、緑農地利用に対する住民の合意（public acceptance）、利用の指針（ガイドライン）と規制、モニタリングなど広範な事項にわたっている。そのうち出席者の関心を

表 2 下水汚泥の緑農地利用に関する国際シンポジウムプログラム

-
- I. 現状と社会的影響
1. 日本における下水汚泥の緑農地利用の現状と課題
建設省都市局下水道部 石川 忠男
日本下水道事業団計画部 堂々 功
 2. 下水汚泥の緑農地利用の推進をめぐる社会的影響
米国環境保護庁都市環境研究所
G. K. Dotson
- II. 施用効果
3. わが国における下水汚泥の農地還元
神奈川県農業総合研究所技術研究部
松崎 敏英, 和地 清
 4. 西独における下水汚泥の緑農地利用の実際
ルール大学工学部 U. Möller
 5. 下水汚泥の土壌中での分解と挙動
福井県立短期大学 河野 通佳
農水省農業技術研究所化学部 山添 文雄
- III. 微生物
6. 下水汚泥施用土壌の微生物相
国立公害研究所水質土壌環境部
藤井 國博, 広木 幹也
 7. 下水汚泥の処理処分と病原性生物の挙動
カリフォルニア大学名誉教授 C. G. Golueke
- IV. 重金属
8. 下水汚泥施用に伴う重金属の挙動
農水省農業技術研究所化学部 尾和 尚人
 9. 農地に施用した汚泥中の有害物質の挙動
米国農務省ベルツビル農業研究センター
R. L. Chaney
- V. ガイドライン
10. 下水汚泥の処理及び利用のためのガイドライン並びにモニタリング方法
英国環境省水技術部 R. C. Ramsay
- VI. 総合討論
- 東京大学農学部教授 熊沢喜久雄
-

ひき、活発な討論の対象となった主要事項について以下に述べる。

1. なぜ緑農地利用を行なうか

前々節および前節において、わが国で緑農地利用が注目されている理由を述べたが、このシンポジウムにおいても、下水汚泥が窒素、リンおよびカリウムの肥料主要成分、植物の生育に必須な各種の微量元素（Ca, Mg, Cu, Zn, Fe など）および土壌改良剤（物理性、保水性の改善）として有効な有機物を含み、緑農地で利用することは資源の再利用という観点から非常に有益なことであり、かつ汚泥の発生源側からみて最も安定した処分方法であることが認められた。また、欧米各国とも

表 3 消化汚泥の肥料としての効果*(Dotson)⁽⁹⁾

処 理 方 法	生産量 (kg/ha)
無 施 用	7,100
肥 料 施 用	10,497
6.72t 汚泥/ha	9,129
13.44t 汚泥/ha	10,727

* オハイオ州コロンバスでの消化汚泥施用区でのトウモロコシ生産量 (1980)

海洋投棄や埋立による処分が全汚泥処分量に占める割合が高く (たとえば, 米国では両者の合計が 69%, 英国では 48%), 緑農地における処分割合を増やしたい意向をもっていることも明らかにされた。下水汚泥の有効性については, 下水汚泥単独施用でも施用量によっては化学肥料と同等の収量を上げることが報告された (Dotson, 表 3)。

2. 緑農地利用される汚泥の形状

このシンポジウムにおいてわが国と欧米各国との違いが最も明確に現われたのは, 緑農地利用される汚泥の形状の違いであった。すなわち, 英国や西独, 他の欧州共同体 (EC) 諸国では, 消化工程を経た汚泥を固液分離することなく液状で農地に散布しているのに対して, 日本では消化工程を経ないで脱水された汚泥 (脱水ケーキ) が 90% を占めることである。一方, 米国では一般的に利用されているのは熱乾燥汚泥であり, 急速に増大しているのがコンポスト汚泥 (汚泥を推積し発酵させたもの) である。小規模処理場の場合は液状汚泥として利用されているということであった。

3. 土壌の性質の変化

日本側の発表者 (松崎, 石川) および発言者 (東京都農試, 伊達) から, カルシウムを多量 (T-CaO として 20% 以上) に含む汚泥は, 連用すると土壌 pH を上昇させ, 作物生育を阻害すること (アルカリ障害), 高分子汚泥の連用によって土壌

pH が低下し, 作物の生育が阻害されること (酸性障害) が指摘された。

これに対して, 外国出席者から土壌 pH の上昇について疑問が出された。それは「外国では連用しても土壌 pH が上昇したという経験はない。もう一度慎重な実験を行なうことを奨める」というものであった。日本側 (松崎) からスライドを使った詳細な説明がなされ, 外国側もユニークな土壌影響の例として納得した。この違いは, 日本では汚泥を脱水し, 脱水に際して脱水助剤として多量の消石灰を使用しているのに対して, 外国では脱水する場合が少ないことに由来している。すなわち, 利用形状の違いがここでも現われている。

4. 病原性生物からみた下水汚泥施用の安全性

これについては, 西独の Möller 教授と英国の Ramsay 氏から疫学的・衛生学的な観点に立脚した強制力をもつ規制 (西独, 表 4) と指導指針 (英国, 表 5) が紹介された。西独の規制は, 1983 年 4 月 1 日から実施されること, 強制力をもつ施行令であること, 野菜畑と果樹園への施用が全面的に禁止されることなどの内容をもつことから大きな反響を呼び, 質問が集中した。とくに, 緑農地利用されている下水汚泥の 90% が未

表 4 下水汚泥の疫学的・衛生学的に無害な緑農地利用* (西独, Möller)⁽⁹⁾

	I 休耕地	II 耕 地	III 牧草地	IV ぶどう畑	V 果樹園	VI 林地	VII 家庭園芸 および 野菜畑
	VR	V	VR	V	VR		
5.1.1 生汚泥	hz (制限あり)	+	+	+	+	+	+
5.1.2 小規模処理場および どろだめの汚泥	hz	+	+	+	+	+	+
5.2.1 液状汚泥	hz	+	+	+	+	+	+
5.2.2 脱水汚泥	hz	+	+	+	+	+	+
5.2.3 自然乾燥 汚泥	hz	+	+	+	+	+	+
5.3.1 化学処理	hz	+	+	+	+	+	+
5.3.2 熱処理	hz	+	+	+	+	+	+
5.4 熱乾燥汚泥	hz	+	+	+	+	+	+
5.5 熱殺菌液状汚泥	hz	+	+	+	+	+	+
5.6 コンポスト汚泥	hz	+	+	+	+	+	+
5.7 化学的安定化汚泥	hz	+	+	+	+	+	+

* 下水汚泥の緑農地利用に関する施行令による疫学的・衛生学的無害処分
hz=衛生的に有害, VR=休耕地, V=耕地. +=施用可, -=施用不可。

^{a)} 1986 年 12 月 31 日以降, ^{b)} 1986 年 12 月 31 日まで, ^{c)} 特別な許可がおりる場合

消化の脱水汚泥であり、畑を主要な利用（処分）地と考えている日本の関係者にとっては、注目すべき事項であった。

Möller 教授は、このように 厳しい規制が作られた経緯についての質問に、「1972 年に作成された強制力を伴わない勧告（少数の例外を除いて果樹園には施用できた。野菜畑には熱乾燥、熱殺菌液状およびコンポスト汚泥は施用できた）は、下水汚泥処分の実務家を主体とした委員会がその作成にあたったが、1983 年 4 月 1 日からの施行令については、衛生関係の専門家の発言力が強く、彼らの主張（木から落下した実をだれかが拾ってそのまま食べてしまうということがあったときどうするか）が通り、果樹園への施用が全面的に禁止となった。野菜の場合には生食することが多いので、原則として野菜畑への施用も禁止されている」と答えた。しかし、教授の回答の中には「施用に先立って殺菌され、衛生的にきちんと管理されていればよい。野菜畑では播種後には施用してはならないということで、播種前は施用してよいと解釈できる」という発言もあり、施行にあたって解釈を統一する必要が感じられた。

これに関して、英国を除く各国の衛生学的な観点からの規制（強制力をもたない）が紹介された。スイス（Möller 教授）では特定の家畜の病気があり、牧草地に利用される汚泥は殺菌されて

いなければならないという規制がある。また、スイスでは腸内細菌数が 100 個/g 汚泥（基準値）以下であれば疫学的に無害であると考えられており、この基準に下げるときの殺菌工程が確立されている。米国では、回虫卵などの病原菌が野菜に付着し汚染される可能性があるので、葉菜類やタバコ畑には施用してはならないとする農務省（USDA）の規制がある（表 8 脚注参照）。EC（ヨーロッパ共同体）でも、衛生面からの安全性についての検討が行なわれている。さらに米国の Chaney 氏から、米国では安全性の指標に耐性の強いウイルスの減少をとりあげるべきであるとする考えがあることも紹介された。

このように欧米各国では下水汚泥の緑農地利用に対して疫学的・衛生学的に慎重な配慮がなされていることが示された。日本からは、最近、未消化の脱水汚泥を発酵堆積処理（コンポスト化）した後、利用しようとする考え方が台頭し、各地の処理場でコンポスト化のための装置が設置されつつあることが紹介された上で、「このような工程を踏んだ場合は、病原性生物からみて安全であると考えてよいか」という質問が出された。これに対して、病原性生物に関する講演を行なった Golueke 教授から「消化汚泥をさらにコンポスト化する場合はより安全であるといえる。コンポスト化を適正に行ない、とくに熟成を行なえばか

表 5 有害物質の面から見た下水汚泥の推奨利用法（英国, Ramsay）⁽⁹⁾

汚泥の種類	施用後の農地の実態						
	食用（料理して）作物	飼料作物	果樹園 芝	公園 花壇	食用（生食）作物	種子ばれいしょ輸出用苗取	庭 園 農業園
中温嫌気性消化熱処理	Yes	Yes ^{a), b)}	Yes	Yes	Yes ^{c)}	Yes	当面 Yes
2年間ラグーンに入れ低温嫌気性消化ケーキで1年経過	Yes	Yes ^{a), b)}	Yes	Yes	Yes ^{c)}	No	No
好気性消化石灰安定化処理	Yes	Yes ^{c)}	Yes ^{d)}	Yes	Yes ^{c)}	No	No
液状で2週間石灰処理していないケーキ	Yes	Yes ^{c)}	Yes ^{d)}	No	No	No	No
生	Yes	Yes ^{c)}	No	No	No	No	No

a) 施用後3週間は採食させず、搾乳牛で殺菌しないのであれば5週間はおくこと。
b) 嫌気性消化で40%以下の有機物が分解されていないとき、ラグーン処理や脱水後の期間が推奨値に達しないときは、施用後採食までの期間を3週間から6週間とする。
c) 肉用の牛・豚には施用後6週間採食させないこと、他の動物は注a)による。
d) 施用後3週間以内に果樹・芝生を収穫しないこと。
e) 生食用の作物は施用後12カ月間は播種しないこと、他の作物をその間栽培可。

なり安全性が高くなるといえる。病原性生物は、このような処理をしても残るが、感染問題をひき起こすほどの数は残らないと思う。残っているとすれば異常な状況であろう」という回答がなされた。このように、日本で普及しようとしているコンポスト化が病原性生物からみて安全であるとお墨つきはもらえなかった。

衛生面での安全性をめぐる討論の中で明らかにされたことは、この面における研究が遅れていることであった。

5. 下水汚泥に含有される重金属類からみた汚泥施用の安全性

下水汚泥に含有される重金属類が、緑農地への施用に伴って土壤に蓄積し、作物の生育を阻害したり、作物に吸収された重金属類が人間や動物の健康に影響を与える可能性があることについては、何ら疑問も出されず、作物生育や人間および動物の健康を守るために何らかの規制が必要であるとの暗黙の了解のもとに議論が進められた。

講演の中で、西独（表 6）、英国（表 7）およ

表 6 西独における重金属の規制 (Möller)⁽⁹⁾

元 素	汚 泥 ^{a)} (mg/kg 乾燥汚泥)	土 壌 ^{b)} (mg/kg 風乾土壌)
鉛	1,200	100
カドミウム	20	3
ク ロ ム	1,200	100
銅	1,200	100
ニ ッ ケ ル	200	50
水 銀	25	2
亜 鉛	3,000	300

a) 1 項目でも濃度が上回った場合、当局の許可が必要。

b) 1 項目でも上回った場合、施用は許可されない。ただし、Pb, Cr, Cu, Ni, Zn に対しては、公共財産および人畜の健康に危害を与えないという条件の下で特別の例外規定を設けることができる。

表 7 英国における重金属の投入許容量の推奨値 (Ramsay)⁽⁹⁾

元 素	未汚染土壌の濃度 (mg/l)	各元素許容付加限度 (kg/ha)
	可溶性量 ¹⁾	全 量 ²⁾
亜 鉛	2.5	560
銅	5	280
ニ ッ ケ ル	1	70
亜鉛当量	20.5	560
ホ ウ 素	1	4.5(初年目) 3.5(それ以降)
全量 ²⁾		
ク ロ ム	100	1,000
カドミウム	1	5
鉛	50	1,000
水 銀	<0.1	2
モリブデン	2	4
ヒ 素	5	10
フ ッ 素	200	600
セ レ ン	0.5	5

亜鉛、銅、ニッケルの含量は亜鉛当量の基準に従っている。

1) 可溶性量——EDTA 可溶金属量。ホウ素の場合は熱水可溶性量。2) 金属——強酸可溶性金属量。ただし、フッ素は溶融法で溶解し、イオン選択電極で定量。また、ホウ素は熱水可溶性量。

び日本（4 参照）では、国全体に共通の規制が設けられていること、米国では各州が独自の規制をもつほか農務省の規制（表 8）があること、EC においても目下検討中であること（表 9）が報告されたが、外国における規制が強制力をもつかどうかは日本側出席者の主たる関心事項であり、質問が出された。各国の回答によって、西独では法律に基づく強制力をもつ規制（1983 年 4 月 1 日発効）であること、英米両国のそれは強制力をもたない推奨値であることが明らかにされた。

これらの規制の内容に関しては、①重金属類のうちどの元素を対象とするか、②土壌中の重金属濃度で規制する場合、全量とするのか、作物に吸

表 8 私有農地に対する汚泥重金属の最大蓄積施用量の推奨値 (米国農務省, Chaney)⁽⁹⁾

元 素	土壌の陽イオン交換容量		
	0 ~ 5	5 ~ 15	15me/100g
	最大施用量 (kg/ha)		
亜 鉛	250	500	1,000
銅	125	250	500
ニ ッ ケ ル	50	100	200
カドミウム	5	10	20
鉛	500	1,000	2,000

- 1) 年間の Cd 施用量は、脱水またはコンポスト化汚泥では、2 kg/ha を、液状汚泥では 1 kg/ha を越えないこと。作物が必要とする以上の窒素を汚泥により施用しないこと。
- 2) Cd が 25 ppm の汚泥は Cd/Zn が 0.015 でなければ施用しないこと。Cd/Zn が 0.015 を越える場合は、汚泥の Cd を減少させるためのプログラムを始めるべきである。
- 3) これらの推奨値は汚泥を施用する時の土壌 pH が 6.5 である場合にのみ適用され、施用後は pH 6.2 に管理しなければならない。
- 4) 葉野菜あるいはタバコ畑には下水汚泥を施用してはならない。
- 5) 陽イオン交換容量は施用前の土壌のものである。

表 9 EC (欧州共同体) で提案されている金属濃度限界 (単位: mg/乾物 kg) (Ramsay)⁽⁹⁾

	カドミウム	銅	ニッケル	亜鉛	鉛	クロム	水銀	ヒ素
汚泥(規制値)	40	1,500	400	3,000	1,000	—	—	—
(推奨値)	20	1,000	300	2,500	750	750	16	—
土壌(規制値)	3	100	50	300	100	—	—	—
(推奨値)	1	50	30	150	50	50	2	20
施用の年間投入量 (kg/ha)								
(規制値)	0.15	12	3	30	15	—	—	—
(推奨値)	0.10	10	2	25	10	10	0.40	0.35

収されると予想される可給態濃度とすべきか、③濃度はどの程度とすべきか、④土壌の種類や性質を要因として規制に組込む必要があるか、⑤作物の生育を阻害する元素の濃度を設定する場合、どのような作物を対象にすべきかなどの質問が日本側から出された。

①については、西独の規制の中にヒ素が入っていないこと（表6参照）に対する質問であり、Möller 教授から「西独では一般にヒ素の問題はない」との回答がなされた（英国ではヒ素が対象とされているが、EC では汚泥中のヒ素濃度については触れていない。同じヨーロッパでも国によって状況が異なると考えられる）。

②については、Chaney 氏より「たとえば、可給態亜鉛量は、土壌 pH に影響される。したがって、全量をもとに許容量を定めるべきである」との意見が出され、これに関連して「土壌中の重金属総量を決定因子とすべきか、土壌中の安定なものについては別に評価するのか（英国、Ramsay 氏）」との質問に対して同氏は、「重金属の存在状態は、pH によって変化するので、単に汚泥として添加されたものだけではなく土壌中に存在していた重金属も含めて総量として注意すべきである」と回答したが、これに対する異論は出されなかった。なお、英国では、植物に吸収される形態の重金属を抽出する溶媒の研究が行なわれていることが Ramsay 氏によって講演の中で報告された。

③については、日本側から欧米諸国の下水汚泥中のカドミウム（Cd）含有量も、Cd の規制値についても高いのではないかという疑問（米国の規制値は、日本の Cd 高濃度汚染地域の値とほぼ同等となる）と設定の根拠について質問が出されたが、「欧米では Cd の由来が不明である」、「人間に対して最も多量の Cd を供給するのは穀物であるが、下水汚泥を多く利用する野菜生産者は、食用穀物をあまり栽培せず、葉菜、根菜、豆類、果樹、ポテトの栽培に関心がある。したがって、米国の規制値で十分であると考え（Chaney 氏）」と回答された。さらに、③に関連して、日本では汚泥施用土壌の重金属濃度を日本の農地の自然賦

存量のバラツキの範囲内、あるいはその2倍量程度とする考えがあるが、これをどう思うか、Cd の土壌中の許容濃度を決定する際にどのような作物を使うのがよいか、また、Cd の消化吸収率（bioavailability）をどう考えるか、という質問に対して Chaney 氏は、「自然の存在量（バックグラウンド）のレベルを最大値とする考え方は、カナダの一部の科学者も採用している。日本もそれに近い考え方だということであるが、日本のような重金属濃度が低レベルの汚泥の場合、米国のレベルに達するには膨大な量の施用が必要となるであろう。したがって、大変な間違いを犯す可能性は非常に少ないと思う。また、日本の作物が米国のそれと同じであるとすれば、弱い作物も十分に守れるものであると考える。方法論を選ぶ場合、その国における食品の消費形態や食品が供給されるルートを見る必要がある。消化吸収率は、Cd が米、レタス、トウモロコシなど、どの作物に含まれるかによって異なる。したがって、それぞれの国で、その状況に合わせた研究を行なってはじめて規制値が作られるものとする。④については、土壌 pH を一番重視しているが、CEC（陽イオン交換容量）についても検討すべきだと考える。⑤については、最も敏感な作物を選ぶべきである」と回答した。

重金属の規制が、西独、英国、EC では下水汚泥と土壌の両方で、日本では下水汚泥で、米国（USDA）では土壌中濃度で行なわれているという違いが出たが、これについては格別議論の対象とはならなかった。

重金属に関する論議の結論としては、Chaney 氏が回答の中で述べたように「各国の置かれている状況（土壌、気候、作物、食品の消費形態など）によってそれぞれの国において最も適切な規制を設けることが必要である」ということであろう。

6. モニタリング（監視）体制

下水汚泥を農家に受け入れてもらうには、短期および長期的にみて良質のものを供給する必要がある。しかし、農家は専門家ではないので、下水

汚泥を施用している農地の状態把握ができない。したがって、施用農地の監視体制を整備することが安心感をもって受け入れてもらう上で必要となる。こういう認識に立って、病原性生物および重金属の面からどのような監視体制を作るかについて討議された。

病原性生物については、農地へ汚泥を施用した後のモニタリングは困難であることから、汚泥発生現場（下水処理場）で定期的に病原性生物数の把握を行なうことが現実的と考えられる（日常的に行なえば理想的であるが、経費が膨大となる）こと、重金属については、汚泥の分析はもちろん必須であるが、施用量が少ない場合は10年ごとの、多い場合は5年ごとの頻度で土壌中の濃度を測定することが必要であること、分析は十分訓練を受けた人々（処理場あるいは農業関係の専門家）が行ない、農家と接触している農業関係者と農家に情報を提供し、その上でその後の指導（継続するか、施用量を減らすか、中止するか）を行なうことが望ましいこと、また処理場は、どこに、どの汚泥が、どれだけ施用されたかなどについての記録を保存しておく必要があることなどが指摘された。そして、下水汚泥の農地利用を安全に行なうには、監視体制の整備が不可欠であるとの結論に達した。

7. Public acceptance

米国のオハイオ州では、下水汚泥の農地利用にあたって事前に汚泥のもつ有効性と危険性を十分に知らせる教育プログラムが作られ、都市と農村双方の住民に宣伝と教育活動が行なわれ、これによって知識を得た都市と農村の住民を計画に参加させた結果、汚泥の施用に住民の合意が得られ、計画が成功したことが報告された(Dotson)。この例は、今後、下水汚泥の農地利用を進める上で参考とすべき例として注目を集めた。

以上が、シンポジウムでの討論の概要である。同シンポジウムは、内容が多岐にわたったことと短時間であったために十分に討論されたとは言いがたい。しかし、緑農地利用の実施にあたってどの

ような事項に配慮すべきかということについては、多大な成果が得られたと思う。

わが国における課題

先に述べたように、FAOは食糧や植物の生産に可能なかぎり有機物を使うことを提言しているが、有機物を含む廃棄物（下水汚泥も含まれる）の利用については、重金属や有害菌類を含み人間や動物の健康に害を与えたり、作物（植物）生産や環境などに悪影響を与えるものには注意が必要であるとしている⁽⁹⁾。下水汚泥を緑農地において植物生産に利用しようとするならば、FAOの提示した注意点に留意する必要がある。この面から、ここではわが国における緑農地利用を考えてみたい。

植物生産に対する下水汚泥の有効性を肥料としての効果（肥効）に限定してみると、米国の液状消化汚泥の例（表3）や筆者らの未消化脱水汚泥を施用した場合⁽¹⁰⁾は、汚泥単独でもかなりの高い生産性を示し、優れた肥料資源となりうる。しかし、コンポスト化したものの肥効は低く、化学肥料の同時施用が必要であると言われている。将来において、下水汚泥を化学肥料に代わる肥料資材として利用するとすれば、肥効の高いものが望ましい。この方向での検討が必要であろう。

下水汚泥の緑農地利用を安全性の面からみると、病原性生物については、わが国で今後普及しようとしている未消化汚泥のコンポスト化が衛生的に安全であるという保証は得られていない。したがって、衛生面での研究を要するが、これには衛生関係の専門家の参加が望まれる。一方、重金属の面では、現在、肥料取締法によって汚泥中のヒ素、カドミウムおよび水銀について制限が設けられている。また、環境庁では、亜鉛および銅について土壌中濃度（全量＝酸分解法）をもとに指針を提示しようとしている。当面は、これらに従って実施することとし、同時に監視（モニタリング）体制を確立することが必要である。なお、現在すでに緑農地施用が行なわれていて監視体制のない所では早急に体制を作り、現状を把握するとともに今後の対応を立てる必要がある。

前述の肥料取締法と環境庁の指針だけで十分であるとは言えないが、この点に関しては多くの調査研究が行なわれており、その成果に基づいてより安全な配慮がなされることを期待したい。病原性生物による汚染は一過性であるのに対して、重金属は土壌に蓄積する。重金属汚染土壌の復元には膨大な経費がかかる。下水汚泥の利用によって汚染地とならないようにすべきであろう。

重金属以外の植物生産に悪影響を与える要因としては、連用に伴う土壌 pH の変化が挙げられよう。すなわち、石灰汚泥の場合の pH 上昇（土壌のアルカリ化）と高分子汚泥の場合の低下（酸性化）である。わが国では、土壌の酸性化に対処する農業技術は確立されているが、逆の技術はない。したがって、汚泥の脱水工程における石灰の使用量を低くする必要がある。あるいは、石灰汚泥と高分子汚泥の併用によって土壌 pH を変化させないような施用技術の開発も望まれる。

下水汚泥の緑農地利用に伴う環境影響に関しては、研究が開始されたばかりである。これまでの報告^(11,12)によると、土壌に施用された下水汚泥成分のうち Ca, Mg, Na, Cl および N（硝酸の形態）が地下に浸透し、地下水に達すること、汚泥施用土壌から亜酸化窒素（ N_2O ）が発生することなどが明らかにされている。このような現象が地下水や水域ならびに大気を与える影響の評価に関する研究も行なわれている。この環境影響をも考慮した利用が行なわれてはじめて、FAO が提示した条件を満たすことになる。

下水汚泥を資源として緑農地で安全に、かつ有効に使用するには、重金属含有量や病原性生物数が少なく、有効な肥料成分含有量の高い汚泥であることが望ましい。これらの条件は、相反する場合もあり、理想に近づけるためには相当の努力を要するであろう。しかし、これらの条件を満たしてはじめて、緑農地利用が安定した汚泥の処分方法となると考える。

本稿で紹介したシンポジウムについては、講演の予稿集（英文）と講演および討論を和訳した会議録が、下水汚泥資源利用協議会から出版されている。本稿の討論内容と図表の多くは、同会議録から引用した。引用を許可された同協議会に謝意を表す。

文 献

- 1) 斎藤利之, 田崎義朗, 印南洋造: 下水道協会誌, 16, 59 (1979).
- 2) 汚泥の農用地等還元問題研究会: “汚泥の農用地等への還元問題について”, 1983, p. 43.
- 3) 遠山 啓: 日本下水道新聞, 昭和 54 年 10 月 29 日.
- 4) 松崎敏英, 和地 清: “下水汚泥の緑農地利用——国際シンポジウム会議録”, 下水汚泥資源利用協議会, 1983, p. 26.
- 5) 安藤純平: 土肥誌, 54, 164 (1983).
- 6) 熊沢喜久雄: “汚泥の緑農地還元肥料化対策資料集”, フジ・テクノシステム, 1976, p. 3.
- 7) 農林省肥料機械課 (監修): “ポケット肥料要覧”, 農林統計協会, 1977, p. 241.
- 8) 日本土壌肥料学会 (編): “下水汚泥——リサイクルのために”, 博友社, 1979, p. 1.
- 9) 下水汚泥資源利用協議会: “下水汚泥の緑農地利用——国際シンポジウム会議録”, 1983, p. 1.
- 10) 山口武則, 久保井徹, 服部浩之, 広木幹也, 藤井國博, 小林峰雄, 矢崎仁也: 国立公害研究所研究報告, 第 46 号, p. 147 (1983).
- 11) 広木幹也, 久保井徹, 鷺沢清司, 豊田敏治, 服部浩之, 藤井國博, 松坂泰明: 昭和 58 年度日本土壌肥料学会関東支部大会講演要旨集, p. 39 (1983).
- 12) 久保井徹, 陽 捷行, 広木幹也, 服部浩之, 藤井國博, 福士定雄: 日本土壌肥料学会講演要旨集, 第 29 集, p. 176 (1983).

お知らせ

「植物細胞生物学の進歩と研究法に関するコロキウム」 ——日本農芸化学会研究奨励会奨助——

日 時: 昭和 59 年 4 月 14 日 (土) 9.00 a.m. ~ 5.00 p.m.

場 所: 名古屋大学農学部第 11 講義室

目的と内容: 高等植物細胞生物学における新しい研究方法の導入や材料の選択などの問題を討論するために、日仏科学協力事業計画で来日中の下記 2 研究者の講演を中心として informal な小集会を計画しました。

Dr. Richard Bligny (CNRS, CENG, Grenoble)

“Mitochondria and regulatory mechanism of respiration in higher plants.”

Professor Pierre Gadal (Univ. of Paris, Sud, Orsay)

“Properties and regulation of glutamine synthase and GOGAT.”

斬新な内容をもつ両氏の研究から学ぶところは大きいと思いますのでご自由にご出席下さい。また関連領域（たとえば培養細胞、オルガネラ、アインザイム、分泌性糖蛋白質、代謝プール、蛍光抗体法など）において、ご自分の研究を中心とし話題を提供して下さる方を広く募集いたします（メ切 3 月 15 日）。新しい試みをもった informal な集会でですから気軽に御参加下さることを期待しております。

問い合わせ先: 〒 464 名古屋市千種区 名古屋大学農学部
赤沢 堯 (Tel. 052-781-5111 ext. 6269)