下水汚泥の処理・処分および利用に関する調査研究

衛生工学委員会 下水汚泥の処分方法に関する研究小委員会

1. 研究調査活動

建設省都市局下水道部から「下水汚泥の農業利用に関する調査研究」の委託を受けて，土木学会衛生工学委員会は昭和 43 年9月 19 日に「下水汚泥の処分方法に関する研究小委員会」を発足させた。

昭和 43 年度は主として下水汚泥の処理・処分とその利用について，わが国の現況と外国における状況を調査して報告書としてとりまとめた。

昭和 44 年度は，建設省からの委託研究のほかに，東京都から下水汚泥の海洋処分に関する調査研究の委託を受けて，「下水汚泥の処分方法に関する研究小委員会」に農業利用と海洋処分の 2 分科会を設けて調査研究の促進をはかった。調査研究の重点は，わが国における下水汚泥の処分方法とその経費についての実状調査，土壌改良材として利用する場合の施用量と農作物の成育，および収量についての圃場試験，大島沖における下水汚泥の実際の処分についての現地調査，生汚泥の海水中における沈降と拡散，および水質と底質に及ぼす変化，ならびに水棲生物に対する影響と餌料としての効用についての実験であった。これらの結果も昭和 44 年度の報告書としてとりまとめた。

昭和 45 年度は，下水汚泥の農業利用と海洋処分に関しての調査研究を引続いて実施したほか，大阪府，藤沢市および札幌市から，下水汚泥の脱水に必要な前処理としての熱処理に関する調査研究の委託を受けたので，前記の 2 分科会のほかに下水汚泥の脱水等に関する分科会を設けて調査研究を行なった。したがって，下水汚泥の農業利用に関しては，昭和 43 年度と 44 年度に引続き土壌改良材としての施用量などについての圃場試験を行なった。下水汚泥の海洋処分に関しては，消化汚泥と活性汚泥について昭和 44 年度と同様な項目についての試験を行なった。下水汚泥の脱水等に関しては，熱処理施設についての文献調査と，吹田市正雀下水処理場の実態調査を行なった。これらの調査研究についても報告書をとりまとめた。

昭和 46 年度は，農業利用に関しては継続して土壌改良材としての圃場試験を行なったほかに，重金属などによる土壌の汚染についても調査をはじめた。海洋処分に関しては，引続いて水棲生物に対する影響と下水汚泥の実際の処分についての実地調査を行なった。下水汚泥の脱水等に関しては，札幌市の実情調査のほか，熱処理に伴う悪臭と腐食に対する調査，脱離液と加圧濾過による濾液の処理などの実験を行なった。これらの結果は報告書としてまとめられた。

昭和 47 年度は，農業利用に関しては主として重金属の土壌に対する影響を調査し，海洋処分に関しては，水棲生物に対する補足的な実験と汚濁の拡散現象の解析を行なって，いずれも最終的なとりまとめの方向にある。脱水等については，熱処理に関する一応の結論を得るための調査研究を引続いて実施する予定である。

2. 下水汚泥の処理・処分および利用の現状

下水処理場では，単純沈殿作用による沈殿物，微生物作用による凝集性の生物性フロックとして二次沈殿池における沈殿物が下水汚泥となる。したがって，汚水は下水処理水として浄化されて河川等に放流されるが，あとには含水率のきわめて大きく，腐敗性に富んだ有機物を含む下水汚泥が残る。しかも，病原菌や寄生虫を含有する危険が多い。わが国では，下水道の整備が遅れて，普及率が排水面積と市街地面積との比率で 20% 弱，排水人口と市街地人口との比率で 32% と低いから，下水汚泥の発生量が 77 400 m^3/day（含水率 99% として）と少ないが，大都市ではすでにこの処理・処分に困っている。

下水道が整備されて，総人口の 70% が処理人口になれば，下水汚泥の発生量は 5.4 倍の 416 000 m^3/day となる。この下水汚泥を処分するには，まず，① 含水率を低下させて汚泥容積を減少させること，② 有機物を分解させて比較的安定した物質に変えること，③ 病原菌などを消滅させること，などが必要である。これが下水汚泥の処理である。これはまた，下水汚泥の処分方法に応じて適切な処理方法を採用しなければならない。

わが国における昭和 43 年度現在の下水汚泥の処分と利用の方法は 表─1 に示すとおりである。大別すれば，陸地処分，海洋処分および農業利用である。焼却灰まで処理してもいずれは上記のいずれかで処分するか，農業

表—1 下水汚泥の処理・処分および利用の現状

処理方法＼項目	処理量 (千 m^3/年)	処分量 (千 m^3/年)	下水処理場箇所数	陸地処分		海洋処分		農業利用		焼却灰	
				箇所	処分量 (千 m^3/年)	箇所	処分量 (千 m^3/年)	箇所	処分量 (千 m^3/年)	箇所	処分量 (千 m^3/年)
無処理	106	55.8	6	5	26.1	1	29.7				
乾燥床	257	3.8	10	10	3.8			2	0		
生汚泥脱水	6 663	142.3	23	15	64.1			3	1.5	9	76.7
好気性消化	11	2.8	3	1	1.1	2	1.7				
好気性消化—脱水	271	4.6	5	5	4.6						
嫌気性消化	732	19.2	4	3	8.6	1	10.6				
嫌気性消化—乾燥床	2 140	24.3	26	20	18.8			10	5.7	8	
嫌気性消化—脱水	23 087	462.1	73	54	370.8			24	37.4	17	53.9
計	33 267	714.9	140	107	497.9	4	42.0	38	44.4	17	130.6

注：1) 汚泥量のうち，処理量は含水率 99% に換算した値であり，処分量は含水率を統一していない．
2) 箇所数の計は重複分を除いたものである．

や路盤材などに利用するかしかない。

陸地処分は下水処理場内や海岸の埋立などであるが，下水処理場 140 か所のうちの 107 か所（76%），処分量は汚泥発生総量の 70% を占めている。これに比して海洋処分はわずかに 1% である。

下水汚泥を土壌改良材として利用できれば，化学肥料のみの施用による田畑などの有機資材や微量要素の欠乏を補なうことができるし，下水汚泥の有機成分を無機物とすることになり，この無機物から農作物という有機物に循環させる自然のサイクルに組み入れることも可能となるのである。したがって，処分から利用に転換できる最も良い方法となるわけである。この可能性を高めるために，この調査研究が発足したともいえる。

下水汚泥を土壌改良材として農業に利用している下水処理場は 38 か所で，処分量は汚泥総量の 11% である。

陸地処分される下水汚泥は嫌気性消化後，乾燥床で乾燥されるものと，機械脱水されるものも合わせて処分量の 70% を示している。陸地処分の場合でも，悪臭を減少させ，病原菌を消滅させる消化過程をはぶかない処理方法が望ましいことはもちろんである。このことは，海洋処分や農業利用にも，あてはまることである。

大都市では，海岸その他の埋立地の取得が困難になってきて，やむを得ず，下水汚泥を焼却処理をして，できるだけ処分量を減少させる傾向にある。焼却灰にしている下水処理場は 15 か所，その汚泥処理量は発生汚泥総量の 20% になっている。

わが国においては，処分方法のいかんにかかわらず，嫌気性消化を行なったのち，乾燥床で乾燥させるか機械脱水を行なう下水処理場が 99 か所（71%）あり，その処理量は発生汚泥総量の 76% を占めている。生汚泥の機械脱水を行なっているのは 23 か所で，その処理量は発生汚泥総量の 20% である。しかも，生汚泥の機械脱水は設備費の点から，経費が安くなると考えられているが，1 000 m^3/day という大規模な汚泥処理設備においては，減価償却費を含めた単位量あたりの経費は，嫌気性消化を行なう方法が，いくぶん安価になっている。いかなる処分と利用の方法を採用するにしても，下水汚泥中の病原菌や寄生虫卵を消滅させるなどの疫学的見地からは嫌気性消化過程は見直してもよい処理方法である。

3. 下水汚泥の農業利用に関する調査研究

建設省の委託を受けて，昭和 44 年から 46 年の 3 か年にわたり本調査研究は行なわれた。調査研究の目的は，下水汚泥を，おもに土壌改良のための有機物資材として耕地に施用した場合の効果を確認し，作物別の最適施用量を中心とした，施用上の条件を明らかにすることである。

初年度は，川越・川崎・長野・富山・福井・豊橋・岐阜・鹿児島の 8 市において，次年度以降はさらに札幌・仙台の 2 市を加えた 10 市で，通算合計 82 件の試験が行なわれた。供試された作物は水稲を筆頭に，普通畑作物・葉菜類・根菜類・果菜類・花卉および果樹で，合計 25 種類に及んだ。調査研究結果の概要を以下に述べる。

（1） 供試汚泥の性状

調査各都市の汚泥は，大部分のものが嫌気性消化の工程をとっているという点での共通性をもつにもかかわらず，流入下水の水質およびその他の処理工程の違いで，品質形状が著しく異なった。つまり，下水汚泥として一括される物質は，決して均質なものではなく，むしろ雑多な物質群とでもいったほうが適切であるように思えるが，土壌に対する有機物資材としてみた場合，下水汚泥が窒素および燐酸成分に比較的富んだ有機物資材であって，分解特性は堆厩肥に近いがややすみやかであり，窒素成分の無機化放出は初期から円滑に行なわれるものである，というような共通点はあげられよう。

（2） 下水汚泥の施用効果

a) 作物の生育に対する効果として，下水汚泥の施用

は，おおむねすべての作物の生育を良好にしたが，例外として初期の生育をやや悪くした場合があった。この原因は，汚泥の物理的性状の不良性に基づく部分的な過湿過干，一時的な土壌還元障害，部分的な濃度障害などで一律ではない。しかし，こうした初期生育不振はまもなく回復し，中期以降は逆に生育旺盛となる場合が多かった。施用量が多すぎる場合は，もちろん生育が抑制され極端な場合は枯死することもありうる。この原因は，塩類濃度障害と，土壌 pH の極端な不適正化がおもなものである。下水汚泥が生育阻害を引きおこす限界施用量は，成分組成がまちまちなので一概にはいえないが，各作物に対する施用適量よりは，ずっと高い所にあることはまちがいない。生育を良好にする要因は，数多くあげられるが，汚泥中の窒素成分による効果が最もあらわれやすいので，窒素に敏感で要求も多い作物に効果が出やすいといえる。

b） 作物の収量に対する効果について，作物は種類によってそれぞれ収穫しようとする目的の部位が異なり，栄養生理的特性も異なるので，地上部栄養器官の生育を良好にすることが必ずしも収量を高めることにはならないものがかなり多く，したがって，収量に対する効果の点では，生育に対する場合の施用限界量が，いっそうせばめられることになり，同時に作物の特性が，より大きく関係してくるといえよう。効果要因としては，生育の場合と同じく窒素成分の影響が最も端的にあらわれやすいと思われる。

一般的にいって，下水汚泥の施用により収量に対する効果が最もあがりやすい作物は，生育に対する効果が出やすく，しかもそれが，ただちに収量増大に結びつきやすい作物ということで，まず葉菜類があげられよう。果菜類も効果が出やすいが，これは汚泥からの窒素養分が長期にわたって発現することに栄養生理的要求が合致しやすいためでナス，キュウリに大きな効果がみられた。子実生産を目的とする稲・麦においては窒素過剰になりやすく，収量に対する効果はあがりにくい。これは施用適量が低いということで，イネ科の作物は生育に対しては敏感なので，適量の範囲内では効果があがりやすいともいえよう。子実を目的としない青刈飼料作では効果が出やすい。根菜類は窒素要求量があまり大きくなく，敏感でないものが多いので，収量に対する効果は現われにくい。また，イモ類の中でカンショはとくにそうであり，汚泥施用により地上部が過繁茂になると，イモ収量は低下しやすい。サトイモにも若干そうした傾向がみられた。

c） 生産物の品質に対する効果として，汚泥の施用量が多すぎる場合は，もちろん各作物とも品質が低下するが，とくに水稲や麦に対しては，わずかの過剰でも稔実が不良となって品質低下がおきやすい。

適量施用の場合は，水稲でもモミの熟色が良好となった事例がある。葉菜類については，生育が良好で収量が高いということは各個体が充実してしかも揃っていることなので，当然品質はすぐれるはずである。果菜類については，全般に収量とともに品質向上の効果も大きいと考えられる。根菜類については，有機物資材の施用は一般に主根の伸長を阻害して，岐根や曲根をふやすといわれるので，下水汚泥についても形状が悪いと品質を低下させるが，粉状で土とよく混和されていれば好影響を与える可能性が大きいと思われる。

d） 土壌条件に対する影響として，下水汚泥の施用は土壌の耐水性団粒を増大し，それに伴って固相率の低下，孔隙量の増大が認められ，また粘質土壌の易耕性を増大させた事例などもあり，土壌の物理性に対して好影響を与えることは，まちがいない。

土壌の化学性について，pH に及ぼす影響はまちまちで一定でなかった。これはおもに汚泥の脱水工程で，濾過助剤として添加している消石灰の量的な関係が異なることによるが，一般に水田においては pH の変動が小さい。畑においては，下水汚泥中の窒素の無機化に伴う硝酸の生成や，硫化物の酸化による硫酸の生成により，本質的には土壌の pH を低下させる方向に働くものと考えられる。その他の項目で，汚泥の施用により土壌の全炭素含量・全窒素含量・無機態窒素含量・電気伝導度・可給態燐酸含量・塩基置換容量などが明らかに増大し，置換性苦土含量もおおむね増大した。これらは，下水汚泥の施用によって，土壌がとくに養分的な面で著しく富化されることを示すもので，これが生育および収量に対する効果の主要因と考えられる。

e） 施用効果の持続性について，下水汚泥施用の効果は2作目以降にも残効としてあらわれ，したがって，連用する場合は効果が累積される。残効の大きさは施用当初の効果より小さいが，これを具体的な低下率として一律に表わすことはできない。残効の持続性についても各種条件により一定でないので，事例的にしか示し得ないが，たとえば 800 kg/a の施用だと4年8作目でもなお効果が認められたが，100 kg/a 程度の施用だと3年6作目でほとんど効果が消失した。

（3） 下水汚泥の施用量

水稲に対しては，化学肥料を標準量施用する場合，下水汚泥の施用量は乾物で 40 kg/a が安全な線と考えられた。ただし，2年連用の場合は 20～30kg/a が限界である。窒素肥料を減らせば施用量をふやすことができ，無肥料とすれば 120～150 kg/a まで施用しうるが，還元障害などがおきやすいので，化学肥料と併用して施用量を少なくするほうがよい。

畑作物に対する施用適量は，水稲に比べて全般に高いレベルであるが，作物が多種多様で，各作物の窒素成分に対する感応と要求量により，大きく次の3段階に分れる。

① 窒素要求量少の作物：窒素施肥量 1 kg/a 以下のもの；カンショ・豆類
② 窒素要求量中の作物：窒素施肥量 1～2 kg/a のもの；麦類・多くの根菜類．バレイショなど
③ 窒素要求量大の作物：窒素施肥量 2～3 kg/a あるいはそれ以上のもの；多くの葉菜類・果菜類・飼料作物

こうした区分の中でも各作物によって違いはあろうが①のグループに対しては単作施用で 100 kg/a，連用の場合は 50 kg/a 程度，②のグループに対しては単作施用で 150 kg/a，連用の場合は 80 kg/a 程度，また，③のグループに対しては単作施用で 250 kg/a，連用の場合は 100 kg/a 程度が全般を通じての適量と考えられた。しかし，普通畑作では作付作物が一定でないので，作付体系を考慮したうえで，この基準を適用しなければならないが，①および②グループのみの作付体系の場合は別として，そ菜類の作付けを中心とした畑作では 100 kg/a 連用を一応の基準とすることができよう（樹園地も含めて）。そしてこれは，化学肥料は標準施肥量を想定しているので，作物により窒素過剰となる場合は窒素の施肥量を加減しなければならない。

(4) 汚泥の種類による効果のちがい

各種汚泥の施用効果を比較検討した結果，作物に対する施用効果は，化学処理汚泥よりも微生物による処理汚泥のほうがすぐれた。また，消化汚泥のほうが生汚泥よりもすぐれ，し尿消化汚泥が下水消化汚泥よりもすぐれている。

(5) 下水汚泥の施用法および，その他留意すべき点

土壌改良のための有機物資材としては，土壌とできるだけよく混和することが，改良効果を高め，局所的障害性をなくす意味で基本的な施用法である。しかし，汚泥を肥料として施用することももちろんできるし，その場合は条施したほうが良いこともありうる。

その他，窒素肥料の調節，土壌 pH の矯正と塩基の補給，養分のバランスなどに留意しなければならない。

(6) 残された問題点

試験を実施してきた経過の中から見いだされた農業利用上の問題点は，次の5項目に要約される。

① 汚泥の形状および品質の改善
② 作物生育に対する障害性の見きわめ
③ 雑草種子あるいは食用果実の種子の混入
④ 植物病原菌の混入
⑤ 重金属類の問題

このうち，①については技術的な問題よりもむしろ自治体の処分方針のいかんにかかわる問題で，農業利用を前提とする以上は改善されなければならない。②については，施用量が極端に多すぎず，施用法をあやまらず，また，よくその特性を把握して土壌への塩基の補給，不足する養分のバランスなどに留意すれば障害は出ないと思われるが，⑤の問題に関連して若干の懸念が残る。③についての対策は考えられてないが，問題としてあまり大きなものではないようである。④についてはほとんど手がつけられてなく問題としてはかなりむつかしいが，観念的な問題意識のほうが大きいようにも考えられ，実際問題として3か年間の試験成績の中で，はっきりと汚泥施用による罹病が問題とされた事例の報告は皆無であった。⑤が当面する最大の問題として残されたものであり，47年度以降この問題に焦点をしぼって，千葉・長野・福井・豊橋・鹿児島の5都市で，汚泥―土壌―作物間の重金属の移行を中心に，調査研究が続けられることとなった。

4. 下水汚泥の海洋還元に関する調査研究

下水処理の普及が拡大されるのに伴い，増大する下水汚泥の処分方法について，海洋還元の可否を検討することはきわめて必要な課題である。その大きな理由の一つは，海洋で汚泥が分解して，水域の栄養化に役立ち，生産性の向上に寄与しうる可能性が考えられるからで，反面，もし海洋処分に伴う有害性が認められるならば，海洋処分の決定は慎重に行なわなければならない。

これらの問題に関して，昭和 43 年には海洋処分に関する文献調査が行なわれ，昭和 44 年から調査研究が行なわれて，一応昭和 47 年度で取りまとめを行なうことで検討が進められている。研究は，実地の投棄実験と，室内実験による検討とに分かれる。前者としては，昭和 44 年および 46 年の2回，大島沖合においてし尿投棄船を使用して，汚泥の投棄実験を行なった。また，室内実験としては，① 汚泥の水中での挙動，② 底質に及ぼす影響，③ 水棲生物に対する有害性，④ 魚類への汚泥中の重金属の蓄積，⑤ 汚泥の餌料等としての価値，などを検討した。以上のような調査研究の概要を次に述べよう。

(1) 昭和 44 年度海洋処分実地調査

昭和 44 年 11 月 8 日に，北緯 34°45′，東経 139°40′ の地点で，濃縮生汚泥，含水率 96% のものを 500 m³，30 分間で投棄した。投棄地点の調査は，飛行機による着色

水面の写真撮影による拡散域の検討，音響測深器を使用しての影響水域の検討，濁度測定，採水して水温，BOD，SS の測定が行なわれた。当日の風速約 2～3 m，風向北北西であって，拡散面積は1時間後 27.6 ha（長軸 610 m，短軸 210 m）2時間 22 分後 52.5 ha であり，4時間後にも明らかに汚濁面が認められた。音響測深器の記録は明瞭に水面近い汚泥の拡散を示し，1時間後，10 m ぐらいの深さに及ぶ表層での拡散が認められた。しかしながら，濁度，BOD，SS にはほとんど汚泥は表示されず，表層における汚濁物の濃度は，微量であることがうかがわれ，多くのものは比較的早く沈降して，軽いものだけが浮遊しているのであろうと考えられる。

（2） 昭和 46 年度海洋処分実地調査

昭和46年10月16日に，北緯 34°40′，東経 139°40′ の地点で，濃縮生汚泥，含水率 96% のものを 1 000 m^3，1 時間かけて投棄した。飛行機による着色水面の写真撮影，魚群探知機による汚濁の検討，水中テレビカメラによる濁度測定，水中照度計による濁度測定，採水により，水温・塩素量・pH・DO・BOD・COD・アンモニア・亜硝酸・硝酸・燐酸・珪酸・濁度・SS・紫外部吸収・細菌試験を行ない，また，プランクトンの検討も行なった。当日の天候は，風速 8.5～14.5 m 西南西の強風が吹き，1時間後に幅 170 m・長さ 1 700 m の帯状にあることは明瞭であったが，2時間後では，もはや識別できないほどにかき散らされ，3時間後には，航空写真でも確認できないほどになっていた。鉛直的には，1時間ぐらいまでには 10～30 m（場所により 50 m）に懸濁物が一様に分布し，その後沈むものは沈んで 10 m 以浅に微細なものが滞留しているように思われた。以上のように，昭和44年のと比較し，強風により拡散が相当の影響をうけたことが明らかである。

（3） 汚泥の水中での挙動

生汚泥を水槽の海水中に入れてかくはんし，放置すると，大部分のものは沈降するが 10% あまりのものが懸濁したまま残っている。実験値で 2.4 時間後 13.4%，24 時間後 11.0% 残っていた。

次に，生汚泥の海水中での落下速度を調べたが，実測値で 4.6～22 m/h のものがあった。しかし，この実験は，水槽にごく微量のものを入れて，10 cm 落ちていくのを測ったもので，海洋投棄の際は，はるかに早い速度で固まったまま落ちていくものがあることは十分考えられる。

（4） 底質に及ぼす影響

海底に落下した汚泥により，底質が悪化することは当然であるが，生汚泥を用いた実験において，砂の上に約 0.6 mm 以下の汚泥がたい積していると考えられる条件下では，7週間後にも悪化が見られなかった。同様に消化汚泥を 1 m^2 あたり 300～3 000 g 添加して影響をみた実験において，600 g/m^2 以下では底質に変化がなく 1 000 g/m^2 ではいくらか悪くなるというような影響がみられ，3 000 g/m^2 では，硫化物が 0.2 mg/g（乾泥）以上に増加するなど悪化が認められている。

実験池に砂を敷き，アサリなどを入れたほか，自然海水を半年近く通水させて，種々の生物が発生（実験終了時に対照池中の生物は，多毛類・軟体類・甲殻類等 15 種類の動物が見られたほか，数種の藻類が周囲の壁に繁殖）した中に，毎日池の水量に対し 0.1，0.5，1.0% の生汚泥を添加1時間水を静止させて沈降させたのち通水することを 20 日間続けた結果，0.1% 添加区の生物相に変化の現われないことを認めた。0.1% 区は，毎日の泥の添加は 540 g/m^2 にあたり，砂の上の泥のたい積は 2～3 mm となっていた。実験は 11 月末行なわれており，水温は低いけれども，深い海底の問題として考えるならば無関係の条件ではない。生汚泥のたい積が 30～50 mm となっている他の実験区では，生物の 50～80% が斃死しているという状態を示している。

（5） 水生生物に対する有害性

魚に対する生汚泥の影響を検討したが，メジナを使って生死の条件を観察した結果，2% なら 76 時間後も異常がなかった。水温は 18～21°C で通気しながら行なったもので，毒性の評価には十分だと考えられる。

魚に対し，嫌忌量をヒメダカを用いて測定したが，生汚泥で 0.03% 以上，消化汚泥で 0.1% 以上で嫌忌行動を示した。

貝について，アサリの成貝では 1% 以下の生汚泥で影響がなかった。アカガイの成貝について，1% 区が最も長く生育していた。次に稚貝について，アサリの稚貝は 0.1% であれば生存に支障はない。チョウセンハマグリも同様である。マガキ稚貝は，それらの貝と比べ抵抗性が強いと考えられる。

貝などの幼生に対する生汚泥の影響の検討を行なったが，0.025% 以下であれば，天然において摂餌し，成長すると考えられる。0.05% になると，カキ，チョウセンハマグリの幼生は，摂餌できなくなる。

貝の初期発生に及ぼす消化汚泥の影響を検討した。この実験では，消化汚泥，上澄液，あるいは保存のため凍結し，その解凍濾液を使用した。また，その受精卵，あるいはふ化した幼生について，その影響を検討して，その濃度を求めた。その結果，カキに対しては 0.025% 以下では無害，アワビについては 0.01% 以下が無害，チ

ョウセンハマグリについては 0.05% 以下，アカガイについては 0.01% 以下では害がないと考えられた。

(6) 魚類への汚泥中の重金属の蓄積

消化汚泥を沈降させた水槽中でハマチを3か月間飼育して，体内への重金属の蓄積を検討しようとした。汚泥中の金属は Hg 0.12 ppm, Cd 0.31 ppm, Cu 7.66 ppm, Pb 7.12 ppm であり，3か月（冬期）後のハマチの金属蓄積について，Pb を除きほとんど変化がなく，Pb については，対照区に対していくらか増加したのではないかと思われる程度の変化が見られた。

(7) 汚泥の餌料等としての価値

まず，汚泥を加えて水域の富栄養化としての価値の検討を行なった。2%の生汚泥を加え 24 時間放置した液にはアンモニア態窒素が 4.1 ppm，燐酸態燐が 0.8 ppm 含まれており，その濾過液を種々の濃度にして添加した海水について藻類の繁殖を検討したが，生汚泥の 2000 倍希釈まで藻類がよく繁殖した。そのときの窒素と燐は，0.1 ppm および 0.025 ppm くらいになる。

次に，生汚泥を加えた水中での動物性プランクトンを見ると，生汚泥を食べていることがみられたし，ブラインシュリンプに 0.1〜5% を添加した水で，その生長をみたが，5%区では死亡がめだつとともに生き残ったものの生長が早く，12 日目には交尾を認め，20 日目には新しくふ化したものが水中に見られた。このような急激な成長は，対照区はもちろんのこと，1% 以下の汚泥添加区にも見られず，汚泥のすぐれた餌料効果を示したものと考えられる。

貝に対して，アサリ稚貝は生汚泥が餌料として成長効果があり，トリガイに対しては否定的，チョウセンハマグリには成長効果があるなど，貝類について，温度条件によって，重量の増加がみられている。ただ，幼生に対しては，それ自体が餌とはならず，また 0.025% 以上だと，餌を食べるのに妨害となる。

底泥に汚泥をまぜた中で，クルマエビ，ナマコなどは体重が増加して，餌として役にたつことがわかる。魚についてはどうかと，ボラを生汚泥を加えた水中で飼育したが，それが餌として役立ってはいないことがわかった。

次に，生汚泥を餌にまぜて投与してみたが，メジナについては，生汚泥がいくらかの餌料効果のあることが見られている。これに反し，ハマチについての実験では，生汚泥が餌料効果を示さないだけでなく，ねり餌の効果を低下させたようである。生汚泥でなく，活性汚泥をねり餌にまぜたハマチの飼育実験を行なったが，ねり餌に 25%以内に添加すれば，餌料効果があると考えられる。

以上の結果からみると，下水汚泥について 10^{-2} 以下の濃度なら成魚などが死ぬことはないが，嫌忌量あるいは，初期発生への影響を考えると，10^{-4} 以下であることが要求されそうである。海洋投棄実験の結果からは1時間後には 10^{-4} 以下になっているのではないかと考えられ，しかし，そのような希釈が進むと，溶出する栄養塩の効果は，それほど大きくないように思われる。本年度の研究で種々の魚類に対する致死濃度の検討を行ない，また，活性汚泥中への重金属などの毒物質の蓄積およびそれらの活性汚泥の海洋水中における分解，毒物質などの溶出などについて実験を行ない，さらにこれまでの海洋投棄実地調査結果の解析を行なうことになっているが，それらの結果を含めて，最終的に，海洋還元に関する結論を取りまとめたいと考えている。

5. 下水汚泥の脱水等に関する調査研究

(1) 熱処理法の沿革および原理

a) 沿　革

熱処理法は 1911〜1914 年にイギリスの Huddersfield で Testrup によって初めて試みられたが，必ずしも満足すべき結果が得られなかった。その後イギリスで 1935 年に Porteous が改良法を発表し，1938〜1939 年には Halifax に実際プラントが建設された。1965 年にスイスで本法が使用されるに及び，ヨーロッパ各地で熱処理プラントが多く建設されるに至った。わが国では昭和 45 年以来，吹田市正雀下水処理場・札幌市豊平川下水処理場・大阪府泉北下水処理場・藤沢市南部下水処理場などに実際プラントが建設され，稼動中である。

b) 原　理

下水汚泥は親水性のコロイド組織で，加熱すると粒子の熱運動を増して粒子の衝突と会合の頻度を高め，ついに凝集するに至る。さらに，下水汚泥のようなたん白質を含むヒドロゲルは，熱効果によってゲル構造が破壊されて多量の水分が分離する。また，有機物は熱による加水分解のため液化が進行する。これらの現象は連続的・全体的に進行すると考えられている。熱処理の効果は汚泥の性質，反応温度および反応時間に大きく左右される。

ふつう使用される反応温度は 160〜200°C，反応時間は 30〜60 分ぐらいと考えることができるようであり，熱処理によって汚泥の沈降性・脱水性が著しく改善される。

(3) 基礎的調査研究

a) 昭和 45 年度の研究[1]

本法に関する内外の文献調査を行ない，また，わが国における最初の実施例である吹田市正雀下水処理場の熱処理プラントの設計諸元を得るための，テストプラントによる調査研究を行なった。テストプラントは φ288×

1 000 mm の反応器，濃縮槽およびフィルタープレスよりなっており，反応温度 200°C，反応時間 30 分で汚泥の沈降性・脱水性が著しく改善されることがわかった。また，熱処理分離液を希釈して BOD 200 ppm とし，エアレーション時間 3.69 hrs，BOD-SS 負荷 0.12 kg/kg MLSS/day で活性汚泥法で処理すれば，87.5% の BOD 除去率が得られることがわかった。

b) 昭和 46 年度の研究

熱処理法の重要問題と考えられる熱処理分離液の処理，脱臭および装置の腐食などについて検討を行なった。

熱処理分離液の返送量が流入下水量の 1 % 以下であれば，活性汚泥のバルキングの恐れがない。BOD の除去はかなり期待できるが，生物学的に分解困難な COD 成分は残存して褐色に着色し，また，分離液に溶出した窒素の除去は十分行なわれず，溶出した金属は再び活性汚泥に吸着・吸収されるため，処理水中の濃度にはあまり変化は認められないが，汚泥中に蓄積するので，その影響について検討する必要がある。分離液を水処理系統に返送することには種々問題が残るので，分離液の単独処理について研究した。嫌気性消化法を用いる場合には BOD 除去，余剰汚泥発生量からみると 20 日間消化が適当であり，また，消化日数の増加や pH の調整等によって窒素除去が可能であることがわかった。

表—2 熱処理プラントの設計基準（第 1 期計画）

設計基準	札幌市 豊平川 下水処理場	大阪府 泉北 下水処理場	藤沢市 南部 下水処理場
(1) 設計基本条件			
生汚泥濃縮槽出口汚泥水分 (%)	95	96	96
同上 汚泥量 (m³/day)	403	196	144
熱処理汚泥濃縮槽出口汚泥水分 (%)	90	90	92
同上 汚泥量	161.2	54.9	57.7
脱水ケーキ水分 (%)	47 以下	50	40
脱水ケーキ量(DS-t/day)	30.4	9.97	7.2
(2) 汚泥の加熱条件			
生汚泥温度 (°C)	10	15	20
熱交換器出口温度 (°C)	165	160	160
反応器内熱処理温度(°C)	200	200	200
熱交換器出口温度 (°C)	55.3	60	62
汚泥クーラ出口温度	クーラなし	処理水＋15	25
反応器内加温時間 (min)	45	30～60	60～120
(3) 熱処理設備			
熱交換器	対向流二重管型 16.8 m³/h×18 kg/cm²×220 m²	同左 10 m³/h×18 kg/cm²×165 m²	同左 3～10 m³/h×18 kg/cm²×150 m²
反応器	垂直円筒型 φ1 798×7 000× 16.8 m³	同左 φ1 600×7 000× 12.5 m³	同左 φ1 750×7 000× 14 m³

熱処理汚泥からはコーヒーが焦げたような悪臭が発生する。泉北下水処理場に φ400×2 400 mm の実験脱臭塔を設置した。塔内温度はヒーターにより最高 150°C まで上げることができ，A，B 種類の触媒について脱臭効果を調べたところ，炭化水素値からみると両種とも 28.0～48.2% であり，硫化水素値からみるとA種で 31.8～71.4%，B種で 25.6～60.7% であり，顕著な効果はみられなかった。

札幌市豊平川下水処理場の反応器内で腐食試験に供した金属試片について調査したところ，少なくとも 6 か月間の使用期間内では，反応器の内壁は安定な Fe_3O_4 皮膜で保護されており，腐食による侵食の程度はきわめて少なく，また局部的な異常腐食を生じていないことがわかった。ただし，応力腐食割れについては，まったく知見が得られていないので検討が必要である。

(4) 実際プラントに関する調査研究

a) 設計基準

熱処理プラントの工程は次のとおりである。下水処理場で発生した汚泥は生汚泥濃縮槽で汚泥濃度を高め，破砕機で処理してから高圧送泥ポンプで昇圧し，二重管式熱交換器を通して熱回収したのちに反応器に入れ，高温高圧で処理してから熱交換器で冷却し，熱処理汚泥濃縮槽で汚泥濃度を高め，脱水機で脱水する。

わが国の主要プラントの設計基準は **表—2** に示すとおりである。

b) 運転結果

上記プラントの運転結果を要約すると **表—3** に示すとおりである。

臭気対策としては，熱処理汚泥を冷却して発生量を減らすこと，悪臭ガスをボイラーなどで焼却すること，脱水機室などの室内空気を集めて脱臭装置で処理することなどが行なわれている。

熱交換器は二重管式であるが，汚泥温度が 160°C を越える部分で，内管外面および外管内面に，有機物が層状に焼き付く現象がみられ，また，汚泥の流れの急変部分（外管屈曲部の一部）で摩耗現象がみられた。

表—3 熱処理プラントの運転結果

運転結果	札幌市 豊平川 下水処理場	大阪府 泉北 下水処理場	藤沢市 南部 下水処理場
反応温度 (°C)	195～200	180	200
反応時間 (min)	30	40	—
熱処理汚泥水分 (%)	94	94.64	85～92
脱水ケーキ水分 (%)	36.1	44.07	35.6
分離液 BOD (ppm)	6 000	5 747	4 000～6 000
処理水 BOD	13.0	—	6.6

c) 運転維持費

償却費を除いた運転維持費は札幌市豊平川下水処理場で 4 503 円/DS-t (20.16 DS-t/day), 大阪府泉北下水処理場で 6 621 円/DS-t (3.94 DS-t/day), 藤沢市南部下水処理場で 7 287 円/DS-t (6.72 DS-t/day) である。薬注方式の場合は札幌市で 7 157 円/DS-t (20.16 t/day), 藤沢市で 11 335 円/DS-t (4.75 DS-t/day) で, 熱処理法のほうが安いことがわかった。

(5) ま と め

熱処理法の利点は, ① 処理施設の敷地面積が小さくてすむこと, ② 省力化ができること, ③ 汚泥の脱水性がよくなることなどである。また問題点として今後検討を要することは, ① 機器の安全性と耐久性, とくに熱交換器の焼付きと摩耗現象, ② 臭気対策, ③ 分離液の処理などである。

本年度は基礎的調査研究と実際プラントの調査をさらに進め, 3 か年の研究成果をふまえて, 本プロセスの総合的評価を試みる予定である。

6. 問題点と今後の展望

水質汚濁防止と生活環境の改善との面から公共下水道と流域下水道の整備が急速に行なわれることは必至である。したがって, 下水汚泥量も飛躍的に増大するであろう。しかも, 環境基準もしだいにきびしくなることも明らかであるから, 放流水をきれいにすればするほど, 下水処理場では汚泥の発生量もますます増加するし, 生下水の水質が悪化するにつれて, 汚泥の性状も処理が困難になることが予想される。すなわち, 量の増加と質の悪化の両面から, 下水汚泥の処理・処分および利用について研究調査を押し進める必要があるのである。

わが国で, これまで実施されてきた陸地処分も, 量が少ない間はどうにか間に合っていたけれども, 今では, 大都市はもちろん, 中都市においても困難になっている。そこで, 下水汚泥を単に棄てるのでなく, 肥料とはいかないが, 有機資材であるので, 土壌改良材として農業に利用することを積極的に実施することが肝要である。それでも, 有機資材としての下水汚泥があまるであろうから, 今後, 緑地面積を増加してゆく状況下では, 芝生・造林・山林などにも大いに活用してほしいものである。

このためには, 重金属や有害物質の含まない下水汚泥であることはもちろんであるし, 病原菌や寄生虫の消滅をはかるなどの疫学的配慮を行ない不快な臭いを出さず運搬や施用に便利な性状に汚泥を処理することが大切であり, これまでの調査研究で, ほぼその解決も可能になりつつある。

わが国においては, 四周を海で囲まれているから, 当然, 臨海都市の数も多く 50 余であり, その下水処理場の数も 80 余である。ところが, 下水汚泥の海洋処分を行なっているのはきわめて少ない。これまでは内海とか沿岸に近いところで, し尿の投棄が行なわれ問題となった例もあるし, 産業廃棄物を無処理で投棄するなどは当然禁止されるべき行為である。

臨海都市である立地条件を生かして, これらの都市の下水汚泥を, 海洋処分することについての研究調査が進められた結果, 量および質の面からの制限条件を設ければ実施可能である。ただ, 前述のごとき悪例があるため海洋汚染防止法による規制がきびしくなることが考えられるから, 農業利用の場合と同様に, 重金属その他の有毒物質および病原菌などを含まないこと, 拡散が速いことなどの性状を有するものに処理する必要がある。さらに進んで, 水棲生物に餌料効果があり, 微量要素の補給になる傾向があることからも, 下水汚泥の海洋処分という観点からでなく, 水棲生物に役立せるという積極的な面から押し進めることが大切である。これが, ひいては自然のサイクルに不都合なく組み入れて, 環境の保持を可能ならしめる方法となるのである。

したがって, 今までは, 公共下水道はいかなる汚水をも引受けてこれを処理することを建て前としていたのであるが, 下水汚泥の有効利用という観点からは, なるべく, 重金属や有害物質を含む汚水が混入しないような配慮が必要となってくる。根本的には, これらの汚水を排出する工場は団地化して, 工場汚水を別途処理して, これらの物質を濃縮し, これらの物質の回収をはかることが必要になってくる。

それにしても, 各界の協力のもとに, 下水汚泥の処理・処分およびその利用について, さらに調査研究を進めることの必要を痛感する次第である。

(委員長・寺島重雄／執筆・1, 2, 6 寺島重雄
3 高橋和司, 4 新田忠雄, 5 松本順一郎)

下水汚泥の処理・処分および利用に関する研究

● 昭和 43 年度報告書　B 5・232 ページ　1200 円 (〒 140 円)　3 冊 合計
● 昭和 44 年度報告書　B 5・160 ページ　1300 円 (〒 140 円)　4000 円
● 昭和 45 年度報告書　B 5・200 ページ　1500 円 (〒 140 円)　(〒 200 円)