

13. 性状の異なる汚泥の共同処理に関する調査

材料地盤研究グループ（リサイクル） 首席研究員 鈴木 穰
主任研究員 落 修一

1. はじめに

概して汚泥処理は設備部分が多く、スケールメリットが大きく働きやすいと言われている¹⁾。そのため、近年、公共事業の効率化の観点から複数の下水処理場から発生した汚泥の広域的な処理が図られつつある。また、排水処理事業には国土交通省所管の下水道事業、農林水産省所管の集落排水事業、環境省所管の合併処理浄化槽、し尿処理事業などがあるが、公共事業の効率化の観点から言えば、これらから発生する汚泥も省庁横断的に集約されて処理することが求められている。このため、旧建設省において汚水処理施設共同整備事業（MICS）の制度が平成7年度より創設された。²⁾しかし、進展の度合いは緩慢なものとなっている。本調査は、下水汚泥と他事業から発生する汚泥との共同処理の円滑な推進に寄与するために、共同処理に際して下水汚泥処理プロセスが受ける影響の度合いを評価するとともに、適正な汚泥処理方法の在り方について検討したものである。

2. 調査方法

調査は、既存施設の処理能力や処理の余力が「下水道施設計画・設計指針と解説」³⁾に基づいているものとして、共同処理により受け入れる汚泥の性状及び量が下水汚泥の処理プロセスへ及ぼす影響を解析、評価するとともに、そこで何らかの対策・対応が必要となる場合にはその具体的方法について検討した。また、コンポスト化プロセスにおける共同処理では汚泥の増量分が直ちに施設の増設に繋がる可能性が高く、必要な知見やデータを得るための共同コンポスト化の実験を行った。

2. 1 共同処理による下水汚泥処理プロセスへの影響評価

下水汚泥の処理プロセスに他事業の汚泥を受け入れて処理することを想定した場合、既存施設の設計処理能力や余力の範囲内で受け入れ可能なケ

ース、設計能力を超えた場合でも何らかの軽微な対策を施すことにより受け入れが可能となるケース、或いは完全に受け入れ相当分を増設により対応しなければならないケースなどが考えられる。ここでは、これらのケースに対する各汚泥処理プロセスの関連付けを行うために、既存施設の潜在処理能力について解析し、共同処理による影響を評価した。また、下水道への受け入れに際しての技術的な対応方法について調査、検討した。

2. 2 共同コンポスト化に関する実験

各種事業から発生する汚泥の発酵性を調べるために、実際の共同コンポスト化を想定した実規模実験を行った。実験に用いた汚泥は全て高分子凝集剤を使用した脱水汚泥である。

実験は、北海道十勝地方にある採光可能な屋根付きのコンクリート床盤上で、無通気・ウィンドロー式により自走式切り返し機を用いて実施した。実験に用いた汚泥の種類を表-1に、それらの性状を表-2に、また仕込み条件を表-3に示した。実験では、発酵温度を連続測定しながら切り返しを当初の4回/週程度から適時漸減させて行った。また、含水率が概ね40%を下回らないよう適時加水した。

3. 調査結果

3. 1 共同処理による下水汚泥処理プロセスへの影響評価

3. 1. 1 既存施設の計画・設計値による評価

下水道における汚泥処理施設の計画・設計では、施設の処理量や容量を定めるための値として計画発生汚泥量を用いる。計画発生汚泥量は、下水処理場に流入する汚水の計画1日最大汚水量を基準として水処理施設で除去された浮遊物（SS：Suspended Solids）量から水処理法を考慮して求められる。ここで、計画1日最大汚水量は年間最大汚水量発生日の発生汚水量である。また、1年

間の汚水量の平均値を表す計画1日平均汚水量がある。

汚泥処理施設においては、水処理施設から発生する汚泥を扱うものであるが、扱う汚泥は水処理の過程で汚水中の浮遊物が数十倍から百倍相当に濃縮、平準化されたものであることから、汚泥の処理量は年間を通して大きく変動しないのが一般的である。すなわち、実際の汚泥処理においては計画1日平均汚水量に相当する発生汚泥量を扱っているとすることができ、既存の汚泥処理施設の処理能力には計画1日最大汚水量と計画1日平均汚水量の差に相当する分の余力があると言える。[計画1日平均汚水量] / [計画1日最大汚水量] は、通常、大規模処理場の場合が0.8、中小規模の場合が0.7としている。

個々の自治体における共同処理を考えた場合、各事業の排水処理施設から発生する汚泥は大部分が生活系排水を生物処理したことに由来していることから、性状的には下水汚泥と大きく異なることはないと考えられる。そして、そこで対象とする全体の汚泥処理量はその自治体の行政人口相当分とすることができる。

ここで、前掲の[計画1日平均汚水量] / [計画1日最大汚水量]と同様に、[下水道・普及処理人口] / [行政人口]（これは[下水道・人口普及率]を表す）を定義すると、双方を比較することにより現状における下水道の汚泥処理施設が持つ余力

での受け入れ可否が判定できる。更に同様に、[下水道・計画処理人口] / [行政人口]を定義すると、同様の比較により将来における判定ができることになる。この判定の過程からは次の3つのケースが現れ、それぞれのケースは異なる判定結果と対処・対応方法を取る。

1) ケース(1)

本ケースは、[下水道・人口普及率]が[計画1日平均汚水量] / [計画1日最大汚水量]を上回っている場合である。この場合は、現時点において施設的に支障なく他事業の汚泥を受け入れて共同処理することができる。

2) ケース(2)

本ケースは、[下水道・人口普及率]は[計画1日平均汚水量] / [計画1日最大汚水量]より小

表-1 コンポスト化実験に用いた汚泥の種類

種類	発生源(水処理法)	実験記号
下水汚泥	オキシデーショディッチ法 標準活性汚泥法	下-0D 下-標
農業集落排水汚泥	接触曝気法 JARUS-I型 オキシデーショディッチ法	農-J1 農-0D
し尿汚泥	嫌気性消化活性汚泥法の余剰活性汚泥	し-消・活
共同処理汚泥	下水汚泥:オキシデーショディッチ法:1カ所 農業集落排水汚泥:回分式活性汚泥法:3カ所 の液状汚泥を下水処理場で共同脱水処理 <計画処理人口 下水:魚排 = 9,000:1,166>	共-0D・回

表-2 コンポスト化実験に用いた汚泥の性状

	RUN-1			RUN-2		RUN-3		
	下-0D	農-0D	農-J1	下-0D	し-消・活	下-標	農-0D	共-0D・回
含水率 (%)	86.1	86.3	83.9	85.4	81.2	84.6	86.1	85.6
強熱減量 (%)	83.5	80.2	74.3	85.4	71.7	83.4	82.9	79.6
窒素(N) (%・DS)	5.9	7.8	8.3	10.3	7.7	4.3	5.0	5.3
リン(P ₂ O ₅) (%・DS)	12.7	11.0	11.7	11.3	12.1	10.2	12.7	12.4
カリ(K ₂ O) (%・DS)	0.4	1.3	1.5	1.0	0.1	1.0	1.9	2.2
pH	7.04	6.86	7.05	7.15	6.32	7.24	7.01	7.25
EC (ms/cm)	1.8	2.5	1.7	2.4	0.3	2.4	3.1	2.7
砒素 (mg/kg・DS)	6.8	3.7	2.0	1.1	5.8	2.6	1.8	6.7
カドミウム (mg/kg・DS)	0.0	3.0	3.0	2.4	10.5	2.0	3.2	6.4
水銀 (mg/kg・DS)	0.40	0.15	0.23	0.28	0.64	0.15	0.23	0.18
ニッケル (mg/kg・DS)	37	49	61	57	70	44	57	80
クロム (mg/kg・DS)	45	29	33	30	22	30	44	35
鉛 (mg/kg・DS)	72	75	57	39	48	23	31	41
銅 (mg/kg・DS)	695	1318	648	573	900	298	685	634
亜鉛 (mg/kg・DS)	2,227	1,146	1,115	881	4,079	1,021	1,107	1,103

表-3 コンポスト化実験の仕込み条件

実験ケース	記号	仕込み時			混合比 (DS比)							
		含水率 (%)	総量		汚泥					返送 コンポスト	牧草	
			(t)	(m ³)	下-0D	下-標	農-0D	農-J1	し-消・活 共-0D・回			
RUN-1 (平成12年9月4日 ~ 10月18日、44日間)	下-0D	61.6	3.39	7.33	1						3.37	0.28
	農-0D	61.7	3.39	6.84			1				3.41	0.29
	下-0D+農-0D	61.7	3.39	7.08	0.5		0.5				3.39	0.28
	下-0D+農-J1	61.0	2.71	5.73	0.46			0.54			3.12	0.25
RUN-2 (平成12年11月27日 ~ 平成13年1月12日、46日間)	下-0D	63.7	4.82	9.97	1						3.31	0.28
	し-消・活	61.0	4.82	10.05					1		2.48	0.21
	下-0D+し-消・活	62.4	4.82	10.01	0.43				0.57		2.83	0.24
RUN-3 (平成12年11月27日 ~ 平成13年1月12日、46日間)	下-標	64.3	6.43	15.34		1					2.12	0.30
	下-標+農-0D	66.4	6.11	14.73		0.56	0.44				2.11	0.30
	共-0D・回	68.0	5.91	14.37						1	2.11	0.30

さいが、[下水道・計画処理人口] / [行政人口] では上回っている場合である。これは、自治体の大半の人口を下水道整備により賄う計画としているが、現在は下水道整備の途中にあることを意味している。この場合は、将来的にはケース(1)の結果と同じく、施設の支障なく共同処理が行えるようになることを踏まえると、現時点から共同処理に着手すべきである。そこでは、まず、現有の汚泥処理施設における余力分を最大限に活用して、相当量を受け入れることである。更に、残余分の受け入れを早々に可能となるようにすべく、汚泥処理施設の増強（通常は、将来の段階的な増設に相当する分である）に先行着手する必要がある。

3) ケース(3)

本ケースは、[下水道・人口普及率] も [下水道・計画処理人口] / [行政人口] も [計画1日平均汚水量] / [計画1日最大汚水量] より小さい場合である。この場合は、下水道計画区域外の人口の大部分が自家処理を行っているケースの自治体を除き、基本的に現有施設の計画・設計を見直し、処理能力の増強を図らないと完全に対応することはできない。ただし、この場合も、過渡的には前述した現有施設の余力の範囲内で共同処理を行うことは可能であるが、いずれ、完結した共同処理とするためには程度に差はあれ現有施設の計画の見直しと増強が避けられなくなる。

表-4は、これらの3つのケースに該当する潜在的な自治体数を「平成11年度版 下水道統計」⁴¹⁾に基づき解析した結果である。解析において、データ記載団体数は計画編：2,301、普及編：1,681であり、この中からデータの整合が取れないことや共同処理に馴染まないこと等を考慮して、流域下水道、流域関連公共下水道のみを実施している自治体、及び組合方式により実施している団体は解析から除いた。ここで、前掲の汚水処理施設共同整備事業（MICS）の主体は下水道事業を実施する地方公共団体であり、

その対象地域は当該事業が対象とする処理人口及び処理水量の1/2以上を下水道事業が対象としている地域としている。解析結果は、この事業により大部分の自治体が共同処理に取り組めることを示しており、早々の事業着手が望まれる。

3. 1. 2 技術的対応方法

前項による検討・解析において、共同処理に際して現有施設の計画・設計の見直しと施設増強が必要となったケースの場合は、既存の計画・設計指針に従い対応すれば良いことになっていることから、特別の配慮は必要としない。ここでは、これ以外の方法による対応・対処方法について扱う。

1) 運転管理体制による方法

汚泥処理プロセスにおける処理能力の余力を評価する場合、施設能力の余力は個々の処理場で取られている運転方法、中でも1日当たり、或いは1週間当たりの運転時間に大きく依存している。これが大規模な施設では24時間の連続運転となっている場合が多く、この場合には施設の公称の余力（誰もが認める余力）は殆ど無いと言える。しかし、中小規模の処理場では一般の勤務時間内運転としているケースが多く、その場合は、連続運転に改変できる可能性を有していることから、相当に大きな余力、場合によっては現有能力の数倍以上となるものを持っていると言える。これの対象となる処理プロセスは、機械濃縮プロセスや機械脱水プロセスである。その余力の活用方法は関係する設備機器の運転時間を延長することであり、その場合、運転要員の確保が困難なケースでは自動化を進めると良い。

2) 濃縮プロセスの機能改善による方法

汚泥処理施設は、一般的に[濃縮] → [嫌気性

表-4 共同処理検討のためのパターン分析結果

(自治体数：(組合方式、流域下水道、流域関連が主体を除く)、平成11年度末時点)

計画処理人口	ケース(1)	ケース(2)	ケース(3)	計		
				内、MICS ^{注)} 制度にて実施可	内、MICS ^{注)} 制度にて実施可	
85,000 ≤ (大規模)	57	53	34	32	144	142
10,000 ~ 85,000 (中規模)	65	169	161	99	395	333
10,000 > (小規模)	36	119	273	96	428	251
計	158	341	468	227	967	726

ケース(1)：[下水道・人口普及率] ≥ ([計画1日平均汚水量] / [計画1日最大汚水量])

ケース(2)：[下水道・人口普及率] < ([計画1日平均汚水量] / [計画1日最大汚水量])

AND ([下水道・計画処理人口] / [行政人口]) ≥ ([計画1日平均汚水量] / [計画1日最大汚水量])

ケース(3)：[下水道・人口普及率] < ([計画1日平均汚水量] / [計画1日最大汚水量])

AND ([下水道・計画処理人口] / [行政人口]) < ([計画1日平均汚水量] / [計画1日最大汚水量])

注) MICS：国土交通省 汚水処理施設共同整備事業

消化] → [脱水] → [乾燥, コンポスト, 焼却, 溶融] の流れに沿ったプロセスから構成されている。ここで、明らかなように、[濃縮] は汚泥処理プロセス全体の最前段に配置され、その性能の善し悪しが後段プロセスの処理成績に大きく影響するものであることが分かる。特に、液状汚泥を扱う [濃縮] → [嫌気性消化] → [脱水] までのプロセスへは汚泥処理量の変化として直結した影響を及ぼす。このために、共同処理において、液状汚泥を受け入れる場合には [濃縮] プロセスの機能を改善することが重要である。[濃縮] プロセスには、自然の重力を活用した濃縮法と機械的に行う浮上濃縮法、遠心濃縮法、造粒濃縮法等があるが、ここで重要視されるのは古来より多用されてきている重力濃縮法である。

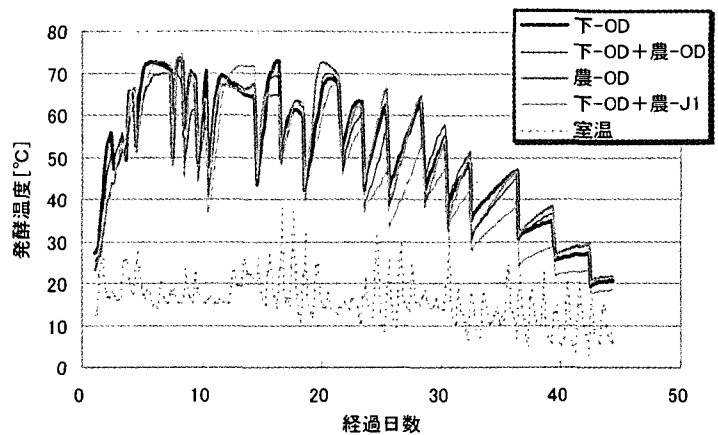
前掲の「下水道施設計画・設計指針と解説」では、重力濃縮法は $60 \sim 90\text{kg-DS/m}^2$ の固形物負荷のもとで含水率が $96 \sim 98\%$ の濃縮汚泥が得られるとしている。また、「小規模下水道計画・設計・維持管理指針と解説」⁵⁾ では、固形物負荷を余剰活性汚泥の場合を 30kg-DS/m^2 、余剰活性汚泥と最初沈殿池汚泥との混合汚泥の場合を 50kg-DS/m^2 とし、そこから得られる濃縮汚泥の含水率を最初沈殿池汚泥の場合が 3% 、余剰活性汚泥の場合が 1.5% 、混合汚泥の場合 2.5% としている。一方、双方の「指針と解説」共に、機械的に行う浮上濃縮法、遠心濃縮法から得られる濃縮汚泥の含水率は $96 \sim 97\%$ としている。

このように、重力濃縮法から得られる濃縮汚泥の固形物濃度は概して薄いものとなっている。更に実際は、前掲の「下水道統計」を紐解くと、もっと薄い濃縮汚泥しか得られていないケースが非常に多いことが分かる。このようなことから、建設省土木研究所は過去に「下水汚泥の濃縮脱水機構の解明に関する研究」を行い、重力濃縮法でも機械的に行う濃縮法と同等の成績が得られる方法を見出している。⁶⁾ この研究成果については、本研究期間中に実施に適用する技術指導を行い、機械濃縮法に匹敵する十分な効果を確認している。従って、これによれば、後続の [嫌気性消化] や [脱水] プロセスへの処理液量としての負荷が大幅に低減され、また、これらのプロセスの機能上

の効率も向上することから大きな余力を生むことができるようになる。

3) 乾燥, 焼却及び溶融プロセス

[乾燥]、[焼却]、[溶融] の各プロセスの設備



・機器に共通しているのは、熱量収支解析に基づいた容量設計が取られ、設備、機器の熱効率が追求されていることにある。このために、24 時間の連続運転が取られるのが一般的である。更に、これらのプロセスは負荷の変動が直ちに処理成績に反映される特性を有している。特に、[焼却] と [溶融] プロセスに関しては、排ガス対策や炉の寿命の関係から設計値に基づいた一定負荷運転が望ましく、施設設計に用いる計画汚泥発生量を単に冒頭で述べた方法によるのではなく、各処理場の実績値に基づき設計されているのが一般的である。このようなことから、これらのプロセスは施設的には余力が殆ど無いと言える。

4) コンポストプロセス

コンポストプロセスは、発酵日数で決定付けられる容積設計法が取られ、その発酵日数は 2 週間程度から 3 ヶ月程度までと発酵方法により異なる。そして、いずれの発酵方法においても、その余力は前述の [計画 1 日平均汚水量] と [計画 1 日最大汚水量] の比に相当する仕込み時の容積分であると言える。

コンポストプロセスでは、共通して仕込み時の原料調整が重要視され、原料の脱水汚泥に対して発酵過程での良好な通気性が確保されるよう各種の副資材や返送コンポストを用いた調整が行われる。既存施設の余力を越えた受け入れを図る場合には、用いる副資材による容積増加が非常に大きなものとなることから施設の増設か、或いは原料

汚泥の低含水率化プロセスの導入、又は用いる副資材の変更等、大幅な施設改変が避けられない。

5) し尿との共同処理方法

液状のし尿を下水汚泥の処理プロセスに受け入れる共同処理を図る場合は、し尿が有機物を高濃度に含み、併せて臭気が激しいことや汚泥処理プロセス内での疫学的な安全性を確保する必要があることなどから嫌気性消化プロセスへの受け入れに限られる。このとき、液状し尿側に求める条件は、含まれる夾雑物の除去である。一方、受け入れ側の嫌気性消化プロセスには、条件が2つある。1つは、消化プロセスにおける必要な消化日数の確保を図ること、他の1つはし尿に含まれる高濃度の窒素や難分解性有機物が水処理系からの放流水質に影響を及ぼさない範囲の受け入れ量とすることである。

し尿受け入れに伴う消化日数の確保に関しては、消化槽への下水汚泥の投入汚泥濃度を高めることで対応できる。その方法は前項の2)濃縮プロセスの機能改善による方法に従うとよい。

水処理系に及ぼすし尿受け入れの影響については建設省土木研究所による調査⁷⁾、また、若山、堺、山本による報告⁸⁾があり詳細に検討されている。これらの報告からエアレーションタンクにおける酸素供給能力、窒素除去に係わる高度処理、放流水質の COD_{Mn} (化学的酸素要求量) 等への影響の面から総合的に考慮すると、流入下水量に対して1%以下が安全な水準であると言える(勿論、それ以上でも可能である。例えば放流水の COD_{Mn} だけを指標としてみれば2.5%まで可能である)。ここで、一般家庭における下水(汚水)と、し尿の発生量原単位をそれぞれ250L/人・日、2L/人・日とすると、流入下水量に対して1%のし尿受け入れは、し尿収集人口に換算すると、現有の下水処理人口の1.25倍となり、この人数分のし尿収集人口を受け入れることが可能と言える。ただし、実際の受け入れに際しては、消化日数に係わる条件と、放流水質に係わる条件の双方を満足する受け入れ量としなければならない。

3. 2 共同コンポスト化に関する実験

RUN-1、RUN-2、RUN-3の発酵温度の経日変化をそれぞれ図-1、図-2、図-3に示した。図-1より、「下-OD+農-OD」のケースは、それぞれ単独の場合の「下-OD」と「農-OD」の中間温度で推移したことから、単独の発酵結果から混合して発酵させた場合の結果を予測できるものと思われる。ここで、「農-J1」のケースの温度低下が他より大きく現れたことには、本ケースの仕込み時のパイルが他より幾分小さく、放熱効果を受けやすかったことに加え、当該汚泥の強熱減量の値が小さかったことも関係しているものと思われる。

図-2のRUN-2の結果は冬季に行ったものである。各ケースともほぼ同時に昇温し良好な発酵の進行を示したが、仕込み後2週間ほどで発酵温度が急激に低下した。これは、これまでの間に分

図-1 RUN-1における発酵温度の経日変化

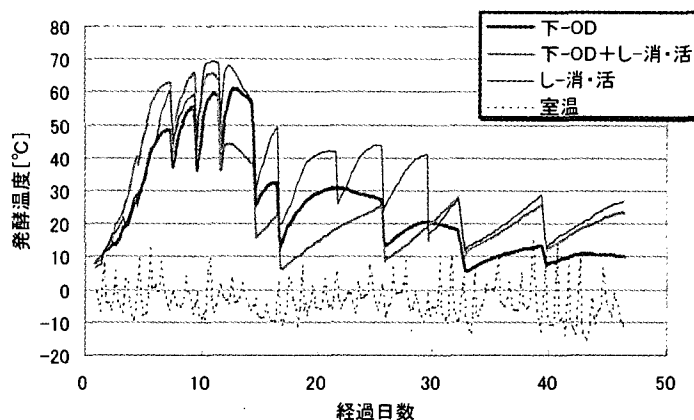


図-2 RUN-2における発酵温度の経日変化

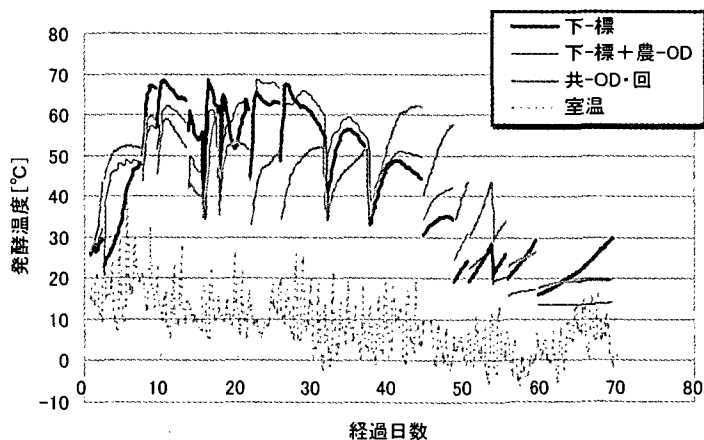


図-3 RUN-3における発酵温度の経日変化

解性の高い有機物を利用する旺盛な発酵期が終り、緩慢な発酵期へと移行する段階で、切り返し時に

冬季の外気温の影響を強く受けやすくなったことにある。その後の発酵温度の推移には仕込み時の位置やパイルの大きさなどの違いにより外気温の影響の受けやすさの度合いが異なることが大きく関係していたものと推察される。また、その後の発酵温度に上昇の機運が現れていることから、この温度低下に対しては、実際の仕込み時のパイルを大きくして保有熱量を高めることにより冬季の外気温の影響を容易に軽減できると思われる。

図-3の RUN-3 の結果から各ケースとも発酵が円滑に進んでおり、また、3者には大きな差は認められない。これらに関しては、汚泥発生源の水処理法としては標準活性汚泥法とオキシデーションディッチ法と大きな違いがあるものの、そこから発生する汚泥のコンポスト化に際しては大差なく、また支障なく進められる性状のものであると言える。ここで、RUN-3 の実験が前掲の RUN-1 や RUN-2 の実験と仕込み時の条件が異なっていることとして、RUN-1 や RUN-2 の場合よりも仕込み時の含水率が高かったことと、パイルが大きかったことがある。このために、RUN-3 の高含水率仕込みは RUN-1 と比べて発酵初期の温度の立ち上がりを遅くし、また、大きなパイル仕込みは冬季に入っても RUN-2 のような極端な温度低下を招いていない。

以上の結果より、各種の排水処理、し尿処理施設から発生する汚泥の共同コンポスト化においては、汚泥間に多少の性状の違いがあっても、発酵は支障なく円滑に進行すると言える。実際の発酵の状況は、各原料汚泥の強熱減量の値とそれらの混合比から、単独での発酵実績が多い下水汚泥の発酵状況を参考にして、推測すると良い。また、仕込みに際しては、通気性を改善するために何らかの副資材を混合するとともに、可能な限り含水率を低く 60 %程度に設定すると、発酵の立ち上がりも早く、また旺盛なものとなる。さらに季節や地域によって、気温低下が著しい所は、仕込み時のパイルを大きくすると熱損失が防げて良好な発酵が維持できる。

4. まとめ

本調査では、下水汚泥処理プロセスを活用した共同処理の方法について技術的な検討を加えると

ともに実用規模の共同コンポスト化の実験を行い以下の知見を得た。

- 1) 下水処理場にて汚泥の共同処理を計画する場合の、現有施設の処理能力の余力を〔下水道・人口普及率〕、或いは〔下水道・計画処理人口〕／〔行政人口〕と〔計画1日平均汚水量〕／〔計画1日最大汚水量〕との比較から3つのケースに分けて評価する方法を示した。
- 2) 共同処理を行う観点から各汚泥処理プロセスについて技術的な評価を加え、必要な対策、対応方法を検討した。
- 3) 下水汚泥、農業集落排水汚泥、し尿処理汚泥、漁業集落排水混入下水汚泥等を用いた実用規模の共同コンポスト化実験を行った結果、共同コンポスト化は容易に行えるものであった。さらに、実験より得られた知見に基づき共同コンポスト化の要点について検討した。

参考文献

- 1) 堀江信之「下水汚泥をリサイクルする」月刊下水道、Vol.24, No.5, p31, 2001
- 2) 建設省都市局下水道部監修「日本下水道」平成 12 年
- 3) (社)日本下水道協会「下水道施設計画・設計指針と解説」1984, 1994, 2001
- 4) (社)日本下水道協会「平成 11 年度版 下水道統計・行政編」
- 5) (社)日本下水道協会「小規模下水道計画・設計・維持管理指針と解説」1996
- 6) 建設省土木研究所「平成 8 年度下水道関係調査研究年次報告書集」pp91_98, 土木研究所資料第 3528 号, 1997
- 7) 建設省土木研究所「平成 5 年度下水道関係調査研究年次報告書集」pp141_152, 土木研究所資料第 3294 号, 1994
- 8) 若山正憲, 堺好雄, 山本賢一「下水処理施設へのし尿受入れに伴う技術的検討<第1回~第4回>」, 月刊下水道, Vol.21-No.16-pp65_71, Vol.22-No.1-pp113_118, Vol.22-No.2-pp76_80, Vol.22-No.3-pp62_65