

下水処理場のエネルギー収支について

下水道部計画課

1. はじめに

下水汚泥はバイオガスや再生りんに有効利用されているが、より効率的に利用するため、下水処理場のエネルギー収支について調査を行った。汚泥の発熱量と有機物指標（CODクロム・TOCなど）との相関から流入下水が有する化学エネルギーを算出し、処理工程での化学エネルギーの挙動を明らかにした。

2. 調査方法

垂水処理場にて、各処理工程での水試料及び汚泥試料を表1のとおり採取した。水試料については、水処理工程での挙動を把握するため、本・分場系と東系の流入下水、初沈流出水、放流水をそれぞれ採取した。また、汚泥の濃縮や脱水前後での収支を把握するため、濃縮分離水と脱水ろ液を採取した。汚泥試料については、濃縮前後の生汚泥と余剰汚泥、消化前後の汚泥、脱水ケーキを採取した。試料採取については、複数回または運転号機ごとに行い、平均的な試料となるよう混合した。分析は水試料のCODクロム、TOC、汚泥試料のCODクロム、炭素、TS（蒸発残留物）、湿重量あたりの発熱量を測定した。調査は9/6, 1/24, 2/7の3回実施し、汚泥試料の発熱量とCODクロム及び炭素量の相関から単位重量当たりのエネルギー換算値を算出し、水試料のエネルギーを試算した。

表1 試料採取表

採水

採水箇所		方法
本場 分場	流入下水	採水日のコンポジット試料
	初沈流出水	1系,2系,分場を2回採取し、等量混合
	放流水	2回採取
東系	流入下水	採水日のコンポジット試料
	初沈流出水	2回採取
	放流水	2回採取
濃縮生分離水		4回採取
濃縮余剰分離水		運転号機で採取、混合
脱水ろ液		運転号機で採取、混合

採泥

採泥箇所		方法
濃縮前生汚泥		4回採取
濃縮生汚泥		4回採取
濃縮前余剰汚泥		4回採取
濃縮余剰汚泥		運転号機で採取、混合
濃縮汚泥貯留槽	生側	4回採取
	余剰側	4回採取
消化汚泥 貯留槽	1系	スポット
	2系	スポット
	ホリ鉄添加後	スポット
ケーキ		運転号機で採取、混合
高分子凝集剤（粉体）		スポット

3. 調査結果

①発熱量とCODクロム及び炭素との相関

水試料の分析結果は表2とおりであった。1回目の分析結果のTOCは流入下水と初沈流出水ではほぼ同値であったため、炭素によるエネルギー試算の際には1回目の結果を除外した。また、1回目の調査結果から濃縮や脱水におけるエネルギーの消失があると考えられたため、2回目以降の調査で汚泥の分離水及び脱水ろ液を追加した。

汚泥試料の分析結果は表3のとおりであり、発熱量とCODクロム及び炭素との相関を図1に示す。近似式よりCODクロム1kgあたりの発熱量は16.8MJ/kg-CODクロム、炭素1kgあたりの発熱量は45.7MJ/kg-炭素であった。

表2 水試料分析結果

採水箇所		1回目		2回目		3回目	
		COD-Cr (mg/L)	TOC (mg/L)	COD-Cr (mg/L)	TOC (mg/L)	COD-Cr (mg/L)	TOC (mg/L)
本分場	流入下水	350	29	280	210	260	90
	初沈流出水	180	28	130	27	130	54
	放流水	18	3.4	24	21	24	7.0
東系	流入下水	430	38	380	143	320	98
	初沈流出水	220	37	160	68	180	67
	放流水	18	3.0	16	6.5	14	5.0
濃縮生分離水		-	-	6200	2700	6300	1800
濃縮余剰分離水		-	-	39	9.8	40	12
脱水ろ液		-	-	380	275	330	110

表 3 汚泥試料分析結果

採泥箇所		1回目				2回目				3回目			
		COD-Cr (mg/kg/)	炭素 (mg/kg)	発熱量 (kJ/kg乾)	TS (%)	COD-Cr (mg/kg/)	炭素 (mg/kg)	発熱量 (kJ/kg乾)	TS (%)	COD-Cr (mg/kg/)	炭素 (mg/kg)	発熱量 (kJ/kg乾)	TS (%)
濃縮前生汚泥		35000	11000	19100	2.39	32000	12000	19100	2.71	33000	12000	21100	2.75
濃縮生汚泥		64000	22000	19300	5.21	49000	19000	19400	4.04	46000	18000	20000	4.43
濃縮前余剰汚泥		7800	2500	14900	0.67	7800	2700	20000	0.64	9400	2700	20600	0.67
濃縮余剰汚泥		43000	16000	17600	4.18	42000	25000	19400	4.13	45000	17000	21200	4.24
濃縮汚泥貯留槽 (混合)	生側	50000	18000	18600	3.89	45000	12000	19000	3.99	48000	17000	22400	4.02
	余剰側	65000	17000	18300	4.00	48000	17000	20100	4.04	49000	17000	22100	4.07
	1系	37000	7600	15600	1.98	23000	7100	17700	1.87	18000	6500	20900	1.67
	2系	37000	7900	15700	2.10	27000	7400	18900	1.94	18000	6700	20100	1.74
消化汚泥 ホリ鉄添加後		-	-	-	-	21000	7000	17500	2.02	17000	6700	18900	1.94
脱水ケーキ		180000	67000	16100	18.1	180000	73000	17700	18.8	190000	66000	18200	17.6

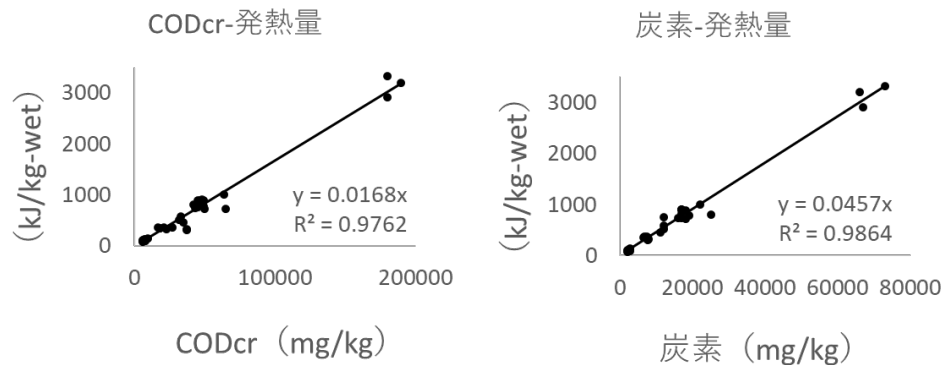


図 1 汚泥試料の発熱量と COD クロム及び炭素の相関

②化学エネルギーの算出

水試料についてはCODクロム及びTOCの分析結果と図1で得られた近似式から発熱量 (kJ/kg湿) を換算し、1日の処理水量から化学エネルギー (GJ/日) を算出した。CODクロムの換算には1～3回目の調査結果、炭素換算には1回目の分析結果を除く2,3回目の調査結果を用いた。汚泥試料については発熱量 (kJ/kg乾) とTS (%) と汚泥発生量から化学エネルギー (1～3回目及び2,3回目の平均) を算出した結果を表4に示す。

表 4 水及び汚泥試料の化学エネルギー (GJ/日)

(GJ/日)				(GJ/日)				(GJ/日)			
水試料 (CODクロム換算)				水試料 (炭素換算)				汚泥試料		1~3回目	2,3回目
流入下水	本分場	416	745	流入下水	本分場	576	854	濃縮前生汚泥		361	405
	東系	328			東系	278		濃縮生汚泥		307	316
初沈流出水	本分場	197	359	初沈流出水	本分場	145	300	濃縮前余剰汚泥		223	249
	東系	162			東系	155		濃縮余剰汚泥		264	294
放流水	本分場	29	42	放流水	本分場	50	63	濃縮汚泥貯留槽	生側	279	314
	東系	14			東系	13			余剰側	265	296
濃縮分離水	生汚泥		38	濃縮分離水	生汚泥		37	消化汚泥	1系	137	152
	余剰汚泥		1.0		余剰汚泥		0.8		2系	90	99
脱水ろ液			3.8	脱水ろ液			5.6		ホリ鉄添加後	258	258
								脱水ケーキ	186	193	

(1) CODクロム換算によるエネルギー収支

流入下水のCODクロムから算出した1日の化学エネルギーは745GJであり、このうち69.8%が汚泥へ移行して有効利用され、5.6%が放流、27.0%が生物反応槽などで消失することが明らかとなった。

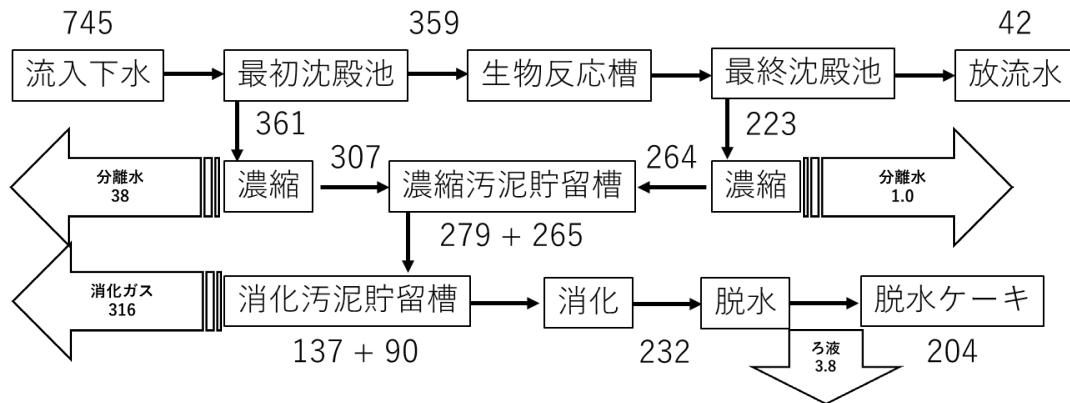


図2 CODクロム換算による処理工程でのエネルギー収支 (GJ/日)

(2) 炭素換算によるエネルギー収支

流入下水の炭素量から算出した1日の化学エネルギーは854GJであり、このうち66.8%が汚泥へ移行して有効利用され、7.4%が放流、28.0%が生物反応槽などで消失することが明らかとなった。

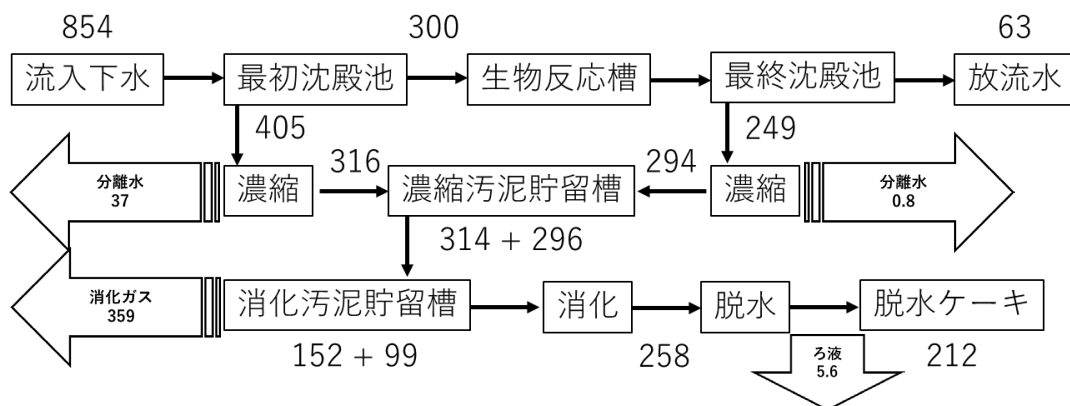


図3 炭素換算による処理工程でのエネルギー収支 (GJ/日)

流入下水の化学エネルギーはCODクロム換算では745GJ/日、炭素換算では854GJ/日と算出結果に若干の差異はあったが、どちらも消化ガスの発生及び脱水ケーキの燃焼に利用されたエネルギーの有効利用率は69.8%、66.8%と同程度であるという結果が得られた。また、消化ガスの定期分析結果と消化ガス発生量から求めると298GJ/日が消化ガスとしてエネルギー回収されており、消化前後のエネルギー収支から求めた消化ガスエネルギー量はCODクロム換算で316GJ/日、炭素換算で359GJ/日であり、CODクロム換算の方が妥当な試算結果が得られていると考えられる。

③消化タンクでの収支

汚泥の分析結果より得られた消化前後でのエネルギー、固形物及び炭素量の収支を図4に示す。消化前後でのエネルギーは6.7%、固形物は3.1%減少したが、概ね良好な試料採取ができたと考えられる。一方、炭素量の減少が10.4%とやや大きかったが、メタン発酵の過程で無機性の炭素になったと推察される。

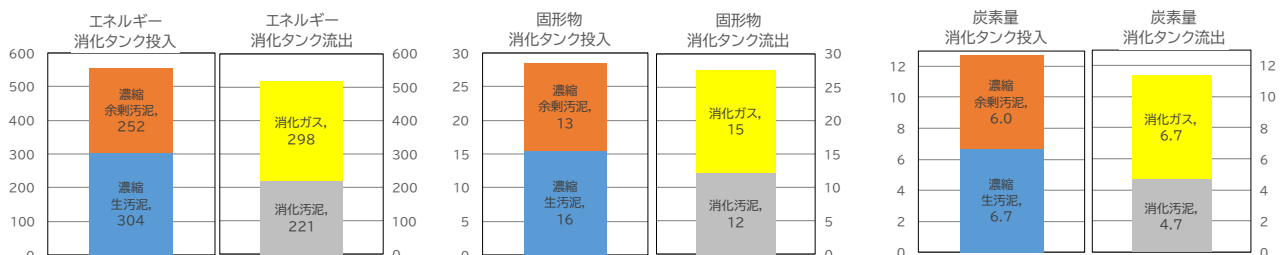


図4 消化タンクでの収支

④全市の流入エネルギーの試算

本調査で分析を行った水試料のCODクロムとCODマンガンの相関を図5に示す。この相関から得られた近似式とCODクロム1kgあたりの発熱量の換算値（16.8MJ/kg-CODクロム）より、CODマンガンの1kgあたりの発熱量は55.0MJ/kg-CODマンガンの値となる。この換算値を用いて、R3年度の月別の流入下水量（日平均）と月2回のCODマンガンの定期分析結果から、神戸市の7処理場の流入エネルギーは表5のとおりであり、全市で1日に流入するエネルギーは2800GJであるという試算結果が得られた。

R3年度の垂水処理場の流入エネルギーは804GJ/日（垂水東309GJ/日、垂水本分場495GJ/日）であり、今回の調査で算出した流入エネルギー745GJと大きな差異はなく、本市で定期分析を行っているCODマンガンのエネルギー収支の試算も可能ではないかと考えられる。

また、R3年度の消化ガス発熱量、脱水ケーキ発熱量を表6に示す。全市における発熱量はそれぞれ853GJ/日、668GJ/日となり、今回試算した流入下水のエネルギーの54%を占める結果となった。

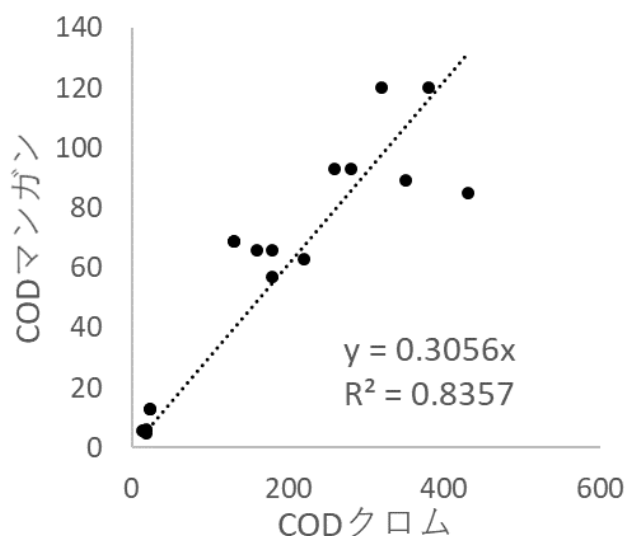


図5 水試料のCODクロムとCODマンガンの相関

	年間
東灘	処理水量 (m³/日)
	159321
	CODマンガンの (mg/L)
PI	89
	エネルギー (GJ/日)
	770
鈴蘭台	処理水量 (m³/日)
	9621
	CODマンガンの (mg/L)
西部	104
	エネルギー (GJ/日)
	54
垂水東	処理水量 (m³/日)
	16173
	CODマンガンの (mg/L)
垂水本分場	99
	エネルギー (GJ/日)
	88
玉津	処理水量 (m³/日)
	92378
	CODマンガンの (mg/L)
合計	112
	エネルギー (GJ/日)
	561
東灘	処理水量 (m³/日)
	52332
	CODマンガンの (mg/L)
西部	108
	エネルギー (GJ/日)
	309
垂水東	処理水量 (m³/日)
	84635
	CODマンガンの (mg/L)
垂水本分場	107
	エネルギー (GJ/日)
	491
玉津	処理水量 (m³/日)
	73643
	CODマンガンの (mg/L)
合計	135
	エネルギー (GJ/日)
	547
合計	2820
	エネルギー (GJ/日)
	2820

表5 7処理場の流入エネルギーの試算

	消化ガス		
	発熱量	ガス量	エネルギー
	kJ/m³N	m³N/年	GJ/日
東灘	23000	3833395	242
西部	22250	3276110	200
垂水	22750	4314206	269
玉津	22750	2291168	143
合計			853

	脱水ケーキ			
	発熱量	含水率	ケーキ量	エネルギー
	kJ/kg乾	%	t/年	GJ/日
東灘	17200	80.5	24897	229
西部	16700	77.7	13420	137
垂水	17500	81.7	23088	203
玉津	18100	81.9	11048	99
合計				668

表6 4処理場の消化ガス及び脱水ケーキのエネルギー

4. まとめ

本調査では、これまで分析データがなかったCODクロムや炭素量を測定したことで、処理場における化学エネルギーの挙動を明らかにすることができた。炭素量よりもCODクロムの方が良好なエネルギーの試算ができるのではないかと考えられる。今回、垂水処理場での調査結果より得られたエネルギーの換算値を用いて全市での試算を行ったが、消化を行っている処理場については消化ガスとCODマンガンの定期分析結果から、おおよそのエネルギーの試算ができ、エネルギー収支や有効利用率を算出できるのではないかと考えられる。