

(9) 遠心濃縮・遠心脱水の組合せシステムに関する実証的研究

PRACTICAL STUDY ON COMBINATION SYSTEM OF CENTRIFUGAL THICKENING
AND CENTRIFUGAL DEWATERING

村上 忠弘* , 石田 貴*

Tadahiro MURAKAMI, Takashi ISHIDA

ABSTRACT ; The combination system of a centrifugal thickening and a centrifugal dewatering is planned to be adopted in a large scale sludge treatment plant which collects a large amount of sludge in a wide area. Because this system needs the smallest land requirement for installation and it produces a minimum amount of sidestream. Centrifuge has two functions which are liquid-solids separation and condensed solids conveyance. The ability of solids conveying increases according to the scale-up of centrifugal dewatering. Therefore it is very rational to be set a centrifugal thickening before a centrifugal dewatering in a large scale plant. A small amount of polymer addition in a centrifugal thickening process improves centrate quality quite well. It is essential to keep sidestream quality well enough to be accepted by a neighbor wastewater treatment plant. This study presents an improved combination system which can get low water content in cake and high SS capture rate totally.

KEY WORDS ; Combination system, Centrifugal thickening, Centrifugal dewatering

1. はじめに

広域汚泥処理事業は、大都市圏における下水汚泥の処理処分を効率的に行う方策として、幾つかの下水処理場の汚泥を汚泥圧送管によって集め、汚泥を集中処理する。汚泥濃度が高いと粘性が増すので、汚泥圧送管での圧力損失や管の閉塞防止を考慮して、1%程度の汚泥濃度での送泥が計画されている。

広域汚泥処理場では、汚泥濃度1%程度の比較的濃度の薄い汚泥を処理することになるので、汚泥の濃縮工程は不可欠である。大都市圏では、地価が高いうえに広い用地の取得が困難であることから、汚泥の濃縮工程としては設置面積が小さく処理能力の大きな遠心濃縮機の採用が予定されている。また、汚泥の脱水工程としては、同様な理由から遠心脱水機の採用が予定されている。遠心脱水機は、他の脱水機種のように洗淨水を必要としないので、返流水が少なくなるという長所もある。

しかしながら、このように濃縮工程と脱水工程とが遠心方式で直列につながるシステムは、下水道事業においては初めての経験である。特に、遠心脱水機への供給汚泥濃度が高濃度となった場合における、遠心脱水機処理性能へ与える影響については不明であった。

また、広域汚泥処理場では、汚泥処理の各工程から出る返流水を近隣の下水処理場に受け入れてもらう必要があることから、受け入れ下水処理場の処理に悪影響を与えない配慮が必要となる。このような返流水の水質目標値としては、例えば下水道法に定める公共下水道への受け入れ基準である $BOD = 600 \text{ mg/l}$ 、

SS = 600 mg/ℓ以下（ただし、流入水量の4分の1を越える場合はBOD = 300 mg/ℓ、SS = 300 mg/ℓ以下）をあげることができる。ところが、通常の無薬注遠心濃縮ではSS回収率80～90%程度であり、遠心脱水ではSS回収率90～95%程度である。したがって、図-1に示すような単なる遠心直列方式では、総合除去率が72～85%程度と低く、返流水の汚濁負荷は非常に高いものとなる。

本研究は、まず遠心濃縮機および遠心脱水機の処理原理に対する考察から、特に処理規模が大きくなると遠心濃縮・遠心脱水の組合せシステムが合理的となることを明らかにした。また、遠心濃縮工程で少量の凝集剤を添加することにより、遠心濃縮機分離液の水質を著しく改善すると共に、供給汚泥濃度および供給汚泥量の変動に対する処

理性能の安定性が增大することを明らかにした。さらに、薬注遠心濃縮に加えて、遠心脱水機分離液を遠心濃縮機前の貯留槽に返送し、返流水としては遠心濃縮機分離液のみとすることにより（図-2参照）、返流水の水質を改善するとともに脱水ケーキ含水率を安定的に低減できる可能性があることを明らかにした。

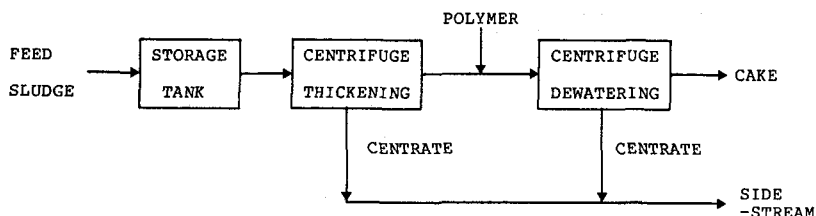


FIG.1. Flow diagram of normal combination system

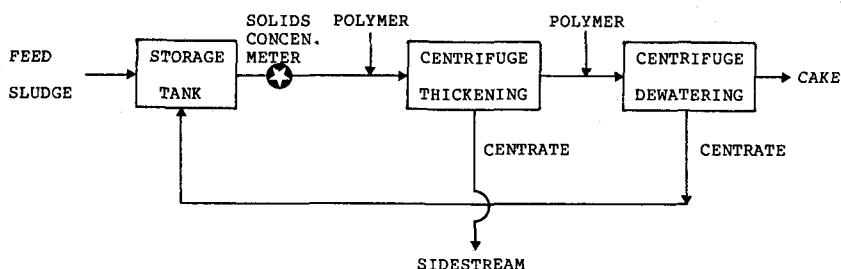


FIG.2. Flow diagram of improved combination system

2. 横型遠心分離機の処理原理

横型遠心分離機は、濃縮機または脱水機として使われるが、機能としては固液分離能力と固形物搬出能力を持つ。遠心分離機は、図-3に示すように、スクリーンと回転筒との回転差（差速）を利用して固形物を搬出する型式が一般的であるが、濃縮機としては供給汚泥ポンプの圧力を利用して固形物を搬出する型式のものもある。

固液分離能力は、一般に水面積によって規程されるが、遠心分離機では遠心力が回転筒内面に垂直に働くので、回転筒の内表面積が水面積に相当する。すなわち、

$$\text{固液分離能力（水面積）} = \pi \ell D \quad \text{①}$$

と表わされる。ここで、 ℓ = 有効分離長、 D = 回転筒内径である（図-3参照）。

一方、固形物搬送能力は、スクリーンと回転筒本体との差速を利用する型式のものでは、②式で表わされる。

$$\text{固形物搬送能力} \propto \Delta N P D^2 \quad \text{②}$$

ここで、 ΔN = 差速（rpm）、 P = スクリーンのピッチ

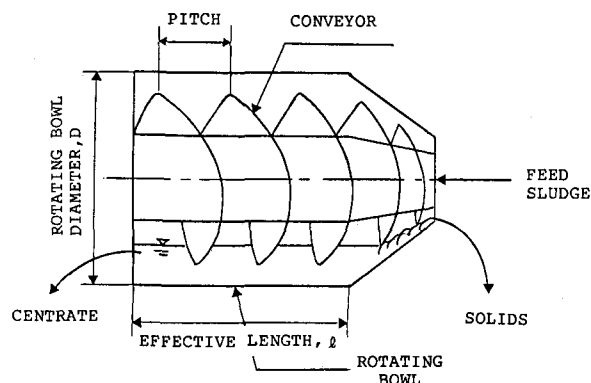


Fig.3. Schematic of typical centrifuge

①式および②式において、回転筒の形状とスクリーンの形状が相似形と仮定すると、 ℓ および P は D に比例することになる。よって、①式に示す固液分離能力は D の2乗に比例し、②式に示す固形物搬送能力は差速が変わらないとすれば D の3乗に比例することになる。すなわち、遠心分離機の回転筒の径が異なる場合、両機能の相似則を保つことはできない。

遠心分離機が濃縮機として使用された場合には、固液分離機能の方が重要視されるので、回転筒の径を大きくし水面積を大きくした方が有利となる。

一方、脱水機として使用された場合には、供給固形物量が多く脱水ケーキ含水率が重要な運転操作要因となるので、固液分離能力と固形物搬送能力との調和を図ることが重要となる。設計実績をもとに、遠心脱水機の回転筒内径(D : cm)と処理能力(Q : m^3/h)との関係を示すと、図-4のとおりとなる。¹⁾ すなわち、

$$\text{遠心脱水機の処理能力: } Q (\text{m}^3/\text{h}) \propto D^{2.4} \dots\dots\dots ③$$

となる。

遠心脱水機の水面積負荷は、③式より Q が D の2.4乗に比例し、水面積が D の2乗に比例することから、 D の0.4乗に比例する。すなわち、

$$A (\text{m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{h}) = Q / \pi D \ell \propto D^{2.4} / D^2 = D^{0.4} \dots\dots\dots ④$$

の関係が成り立つ。

同様に、⑤式において、③式より分母が D の2.4乗に比例し、分子が D の3乗に比例することから、遠心脱水機の水理学的滞留時間(T : h)は、 D の0.6乗に比例する。

$$T = \pi D^2 \ell / 4 Q \propto D^3 / D^{2.4} = D^{0.6} \dots\dots\dots ⑤$$

④式より、処理能力の増大は水面積負荷の増大となるので、固液分離能力としては不利となる。しかし、⑤式より処理能力の増大によって滞留時間が増大する。同じ水面積負荷であれば、滞留時間の長い方が固液分離が進行するので、水面積負荷の不利をある程度補償するものと考えられる。

一方、固形物搬送能力は、供給固形物量に等しくなくてはならないので、⑥式の関係が成り立つ。

$$c Q \propto \Delta N P D^2 \dots\dots\dots ⑥$$

ただし、 c = 供給汚泥濃度($TS\%$)とする。よって、供給汚泥濃度は⑤式と同様に D の0.6乗に比例する。すなわち、

$$c \propto \Delta N P D^2 / Q \propto D^3 / D^{2.4} = D^{0.6} \dots\dots\dots ⑦$$

の関係があるので、処理能力の増大につれて供給汚泥濃度を高めることができる。

広域汚泥処理事業のように、処理能力の大きな遠心脱水機の採用が考えられる場合には、前段の遠心濃縮機で十分に汚泥濃度を高めた方が有利となることがわかる。

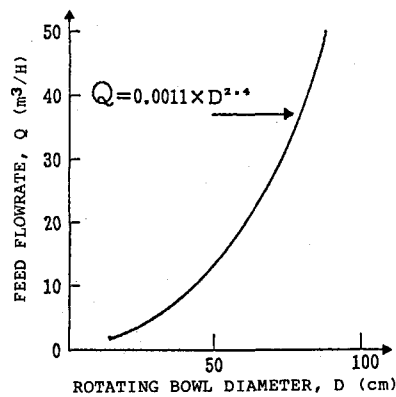


Fig.4. Design dimension of centrifuge dewatering

3. 遠心濃縮・遠心脱水システム実験

3.1 薬注遠心濃縮の処理性能

(A) 供試汚泥

供試汚泥は、家庭下水を主とする分流式(一部合流式)下水処理場の混合生汚泥である。実験は冬季に行われたため、有機物含有率が約80%と高かった。一方、 pH は6前後とやや腐敗気味の汚泥であった。

(B) 室内試験

実規模遠心濃縮機による実験に先立ち、遠心濃縮に適した高分子凝集剤の種類及び薬注率と濃縮汚泥濃度や分離液 SS 濃度を設定するため、事前の室内試験を行った。実験に供したカチオン系高分子凝集剤のカチ

オン強度および分子量は、表-1に示すとおりである。ただし、カチオン強度はコロイド当量値によって表わされ、3.5 meq/g 以上を強カチオン性、1.5 meq/g 以下を弱カチオン性、その中間を中カチオン性と定義されている。²⁾

供試汚泥と高分子凝集剤との凝集混和は、ジャーテスターを用い、175 rpmで60秒間行った。凝集混和された汚泥50 mlを遠沈管にとり、卓上遠心分離器にかけた。遠沈時間は、実機での運転を想定して遠心効果1000 Gにて40秒間を標準とした。

図-5は、高分子凝集剤の種類による薬注率と分離液SS濃度との関係を示す。カチオン強度の大きなほど、また薬注率の高いほど分離液SS濃度は低下する。強カチオンであれば、薬注率0.1%で分離液SS濃度100 mg/l程度となる。濃縮操作における高分子凝集剤の添加は、微細ブロックやコロイド粒子を凝集してSS回収率を向上するのに非常に有効と考えられる。

コロイド滴定法により分離液のイオン強度を分析すると、濃縮に際し添加する薬注率程度(対TS: 0.1~0.2%)では、分離液はアニオン度0.5~0.9 meq/lを示し、荷電中和にまで至っていない。この時、無薬注の分離液のアニオン度は、1.3 meq/lであり、添加カチオン強度以上にアニオン度の低下に効果があったことがわかる。

図-6は、遠心効果1000 Gを同一として、濃縮時間と分離液SS濃度との関係を示したものである。実機の標準処理量に相当する濃縮時間が40秒と想定されるので、濃縮時間20秒は供給汚泥量が標準処理量の2倍となることを意味する。無薬注では、濃縮時間の短縮によって分離液SS濃度が著しく増大するが、薬注率0.1~0.15%では濃縮時間を短縮しても分離液SS濃度が若干高くなる程度である。このことより、薬注遠心濃縮では、分離液SS濃度に悪影響を与えることなく供給汚泥量の増大を図ることができると考えられる。

(C) 実規模遠心濃縮機による実験結果

実験に使用した遠心濃縮機の諸元は、標準処理量20 m³/H、回転筒寸法(D=60 cm、ℓ=180 cm)、遠心効果700~1200 G、出力20 KWである。遠心濃縮機内の汚泥の滞留時間が1分間程度であることから、運転条件の変更ごとに15~20分間連続的に同一条件で運転し、濃縮汚泥および分離液SS濃度を採取した。凝集剤は、室内試験の結果から強カチオ

Table 1 Characteristics of using polymers

polymer sort	cation strength (meq/g)	molecular weight
A	4.8 high	11 × 10 ⁶
B	4.8 high	9
C	4.0 high	10
D	3.8 high	10
E	3.0 middle	12
F	3.0 middle	12
G	2.0 middle	15
H	2.0 middle	11
I	1.1 low	7

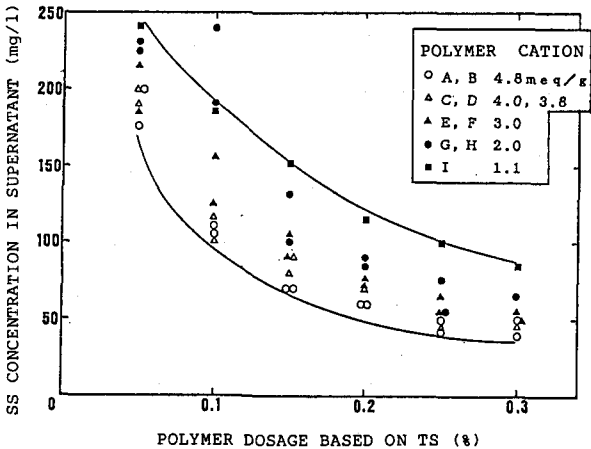


Fig.5. Performance data by a labo-scale centrifuge with polymer addition

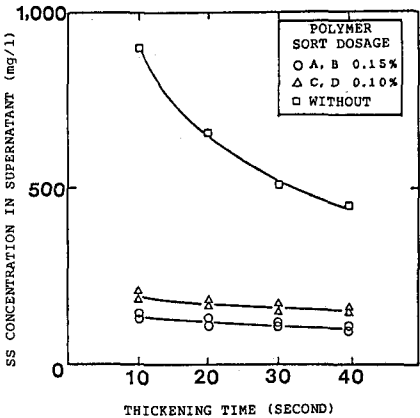


Fig.6. Relationship between SS concentration in supernatant and thickening time by a labo-scale centrifuge

ンのものを使用した。

(1) 無薬注遠心濃縮の処理特性

遠心効果を1000Gとし、供給汚泥濃度2種類(約1.6%と約0.8%)、供給汚泥量2種類(20m³/Hと30m³/H)について組合せた実験を行い、それぞれ濃縮汚泥濃度および分離液SS濃度を測定した。図-7にその結果を示す。

供給汚泥濃度約1.6%の場合、濃縮汚泥濃度が高くなるにつれて、SS回収率が著しく低下する。標準処理量20m³/Hのとき、濃縮汚泥濃度4%であればSS回収率が90%以上となるが、濃縮汚泥濃度5%であればSS回収率は80%程度となる。一方、供給汚泥濃度約0.8%の場合には濃縮汚泥濃度の影響が見られず、標準処理量であれば、濃縮汚泥濃度5%以上であってもSS回収率は90%以上となる。

無薬注遠心濃縮では、供給汚泥濃度が高いと濃縮汚泥濃度の増大や供給汚泥量の増大に対して、SS回収率への悪影響が大きい。

(2) 薬注遠心濃縮の処理特性

図-8は、遠心効果(1000G)および供給汚泥量(20m³/H)を一定とし、薬注率を3種類(0.1%, 0.15%, 0.2%)に変えたときの、分離液SS濃度と供給汚泥濃度との関係を示す。供給汚泥濃度の増大につれて分離液SS濃度が増大するという右上がりの曲線が得られる。供給汚泥濃度が1.5%程度までは、薬注率0.1%で分離液SS濃度を200mg/l以下とすることができる。しかし、供給汚泥濃度が2%程度となったときは、薬注率を2倍の0.2%にする必要がある。汚泥圧送管で送泥されてくる汚泥の濃度は、通常0.5~2%程度の範囲で変動すると考えられるので、遠心濃縮分離液

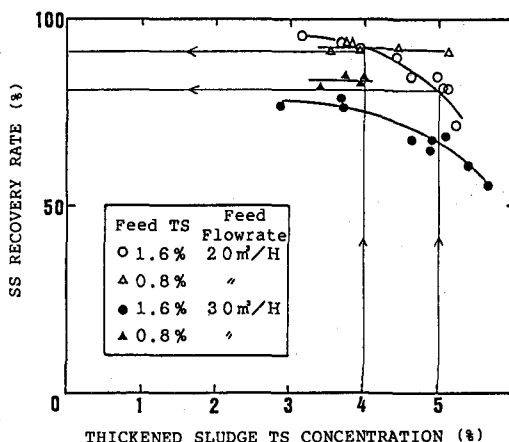


Fig.7. Performance characteristics of a full-scale centrifuge thickening without polymer (centrifugal force = 1000G)

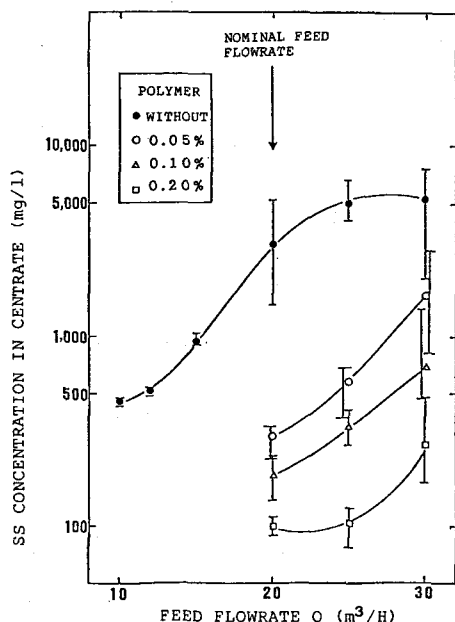


Fig.9. Influence of feed flowrate on SS concentration in centrate (centrifugal force 1000G, feed sludge TS 1.5%, thickened sludge TS 3.3~5.6%)

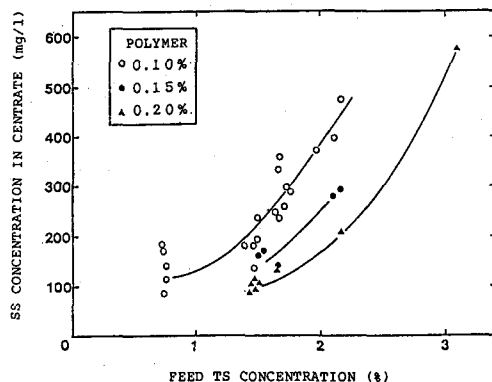


Fig.8. Influence of feed TS concentration on SS concentration in centrate (centrifugal force 1000G, feed flowrate 20 m³/H, thickened sludge TS 3.4~5.6%)

のSS濃度を一定に保持し経済的な維持管理を行うためには、汚泥濃度によって薬注率を変える必要があると考えられる。

図-9は、遠心効果を一定の1000Gとし、供給汚泥濃度を約1.5%（変動範囲1.4~1.6%）に保持したときの、分離液SS濃度と供給汚泥量との関係を示す。ただし、分離液SS濃度は対数表示されており、それぞれの条件ごとにデータ範囲およびその平均値を示す。無薬注および薬注3種類のいずれにおいても、平均値をつなぐ曲線は右上がりとなっており、供給汚泥量の増大につれて分離液SS濃度が上昇することがわかる。分離液SS濃度への影響は、図-6に示す室内試験の結果よりも若干大きくでているが、標準処理量20m³/Hでは薬注率0.05%でも分離液SS濃度は300mg/ℓ程度以下となる。薬注率0.2%とすれば、供給汚泥量を25m³/Hと増大させても分離液SS濃度は100mg/ℓ（SS回収率99.3%相当）程度と非常に低い水準に維持することができる。一方、無薬注では、供給汚泥量を標準処理量の半分の10m³/Hとしても、分離液SS濃度は400~500mg/ℓである。

図-10は、遠心効果3種類について、SS回収率と薬注率との関係を示す。ただし、実験は、供給汚泥濃度約2%、濃縮汚泥濃度約5%、供給汚泥量20m³/Hで行われた。薬注率が小さくなるにつれて遠心効果の差が大きくなり、800Gでは、薬注率0.12%以下となると他との差がしだいに大きくなる。消費電力は、遠心効果が大きくなるにつれて増大するので、想定される薬注率からみて本汚泥では1000G程度が適当と考えられる。

このように、薬注遠心濃縮は、分離液SS濃度の低下に非常に有効であり、供給汚泥濃度が変動しても薬注率の制御によって分離液SS濃度を目標とする水準に保持することが可能である。また、供給汚泥量の増大や遠心効果の低減を図ることも可能であることがわかった。

3. 2 後続の遠心脱水機の処理性能

遠心濃縮した濃縮汚泥は、標準処理量4m³/Hの遠心脱水機により脱水処理された。実験は、遠心効果2000G、最適薬注率で行われた。最適薬注率は、供給汚泥濃度1.5%については約1.5%、供給汚泥濃度3.5%および5%については約1%であった。

図-11は、ケーキ含水率と処理固形物量との関係を示したものである。図中の記号は、回転筒本体とスクリーとの差速および供給汚泥濃度によって区別した。SS回収率によってケーキ含水率は変化するので、データは全てSS回収率98%以上のものを採用した。差速が小さくなるにつれてケーキ含水率も低下するが、ケーキ含水率が同じ条件で比較すると、供給汚泥濃度5%のときの処理固形物量は他の2ケースより30%程度増大している。

このように、遠心脱水機は供給汚泥濃度を5%程度と高めた方が処理

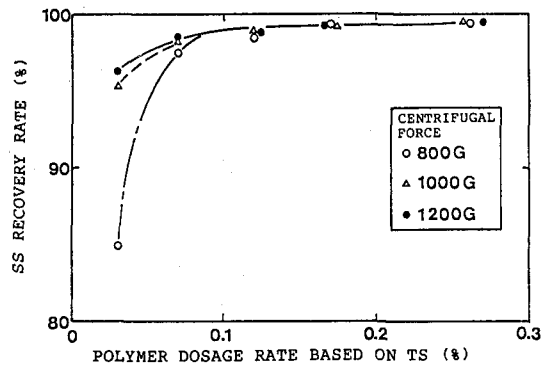


Fig.10. Influence of centrifugal force on SS recovery rate (feed flowrate 20 m³/H, feed sludge TS 2%, thickened sludge TS 5%)

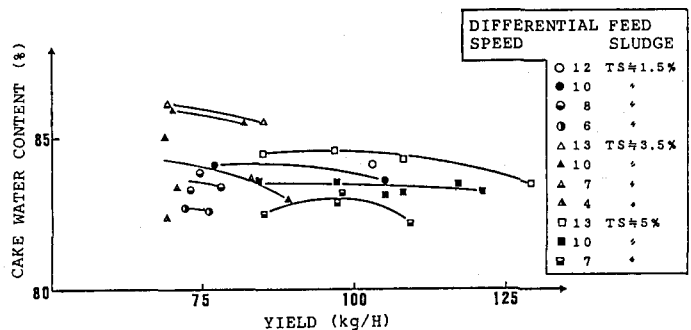


Fig.11. Performance data of a full-scale centrifuge dewatering (centrifugal force 2000G, feed flowrate 2~6.8 m³/H, polymer dosage 1.5% or 1%, SS recovery rate >98%)

能力が増大する。また、広域汚泥処理事業で使われるような大型遠心脱水機では、2章で述べたように固形物搬送能力の向上が期待できるので、SS回収率を低下させずに濃縮汚泥濃度を高めることができる薬注遠心濃縮は有効と考えられる。

3. 3 返流水の処理性状

(A) 分離液の性状

表－2は、濃縮分離液および脱水分離液の性状調査の例を示す。また、図－12は、このときの分離液SSの粒径分布を示す。SSの粒径分布は、SS粒子を液中に分散させこれを電気的に読み取るコールター・カウンター法によって測定した。

濃縮分離液の方が脱水分離液よりも細かいSS粒子分の割合が多い。濃縮分離液では、20μm以下の細かいSS粒子分が85～94%と大部分を占めている。BODとSSとの比は1.93～2.36で、おおむねBODはSSの2倍の値を示した。

脱水分離液は、30μm以下のSS粒子分が78～90%を占めており、BODとSSとの比が1.95～3.28と範囲が広くやや大きな値を示した。また、有機物比は3～4%低い値を示した。

(B) 沈殿池のSS除去性能

遠心濃縮・遠心脱水の組合せ実験を実規模で実施した下水処理場において、最初沈殿池での返流水SSの沈殿除去の状況を明らかにするための調査を行った。

約1ヵ月間に生下水、最初沈殿池流入水、最初沈殿池流出水の24時間混合試料をそれぞれ14回採取し、SS濃度、全リン濃度(T-P)およびオルトリン酸濃度(PO₄-P)を測定した。また、最初沈殿池引き抜き汚泥および返送汚泥をスポットで採取し、汚泥中のリン含有率を測定した。

SS中のリン含有率は、⑧式により算出し、経時変化を図－13に示す。

$$\text{SS中リン含有率 (\%)} = \frac{(\text{T-P}) - (\text{PO}_4\text{-P})}{\text{SS}} \times 100 \quad \text{⑧}$$

実験期間中のSS中のリン含有率は、それぞれ生下水＝1.58%、最初沈殿池流入水＝1.67%、最初沈殿池流出水＝2.21%であった。一方、最初沈殿池汚泥の平均リン含有率は1.57%であり、活性汚泥

Table 2 Performance data on centrate characteristics

	ITEM	A	B	C
Thickening Centrate	SS (mg/l)	550	454	176
	Volatile Content (VSS%)	89.5	89.8	89.1
	BOD (mg/l)	1300	1030	340
	BOD/SS Ratio	2.36	2.27	1.93
Dewatering Centrate	SS (mg/l)	320	314	847
	Volatile Content (VSS%)	86.5	85.5	84.8
	BOD (mg/l)	800	1030	1650
	BOD/SS Ratio	2.50	3.28	1.95

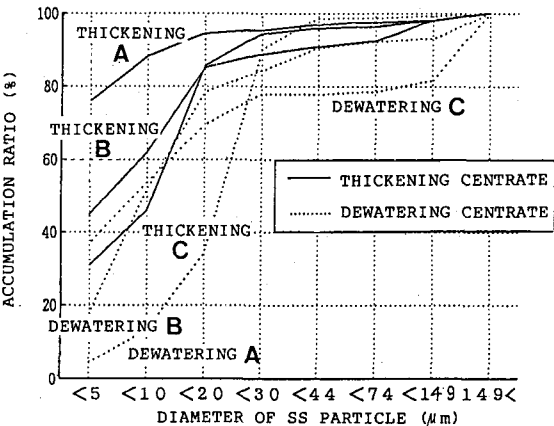


Fig.12. Distribution curve of SS particle diameter in thickening centrate and dewatering centrate

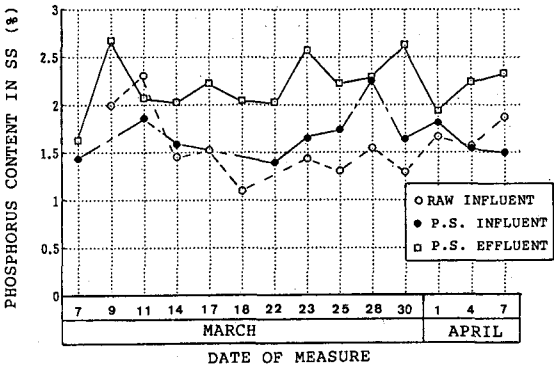


Fig.13. Variations of phosphorus content in SS

の平均リン含有率は2.27%であった。

すなわち、最初沈殿池汚泥として引き抜かれるものは、リン含有率からみて生下水中のSSが主となっていると考えられる。また、活性汚泥と最初沈殿池流出水のSS中リン含有率がほぼ等しいことを考えると、返流水に含まれる活性汚泥は最初沈殿池で沈殿せずに、ほとんどそのままエアレーションタンクに流入しているものと考えられる。

最初沈殿池で沈殿除去が困難な活性汚泥は、 $30\mu\text{m}$ 以下のSS粒子が90%程度を占めている。濃縮分離液および脱水分離液のSS粒子の大部分は活性汚泥と同様に $30\mu\text{m}$ 以下であることから、分離液SS濃度を低下して沈殿処理の困難な微細粒子の量を低減することは重要と考えられる。

3. 4 システムの改良について

濃縮分離液については、既に述べたように0.1%程度の凝集剤の添加により、SS濃度を安定的に著しく低減できる。

しかし、遠心脱水機の処理性能は、図-14に示すように、SS回収率を高めようとするとケーキ含水率が高くなるという背反する傾向を持っている。

先に示した図-2のように、脱水分離液を濃縮機前の貯留槽へと返流することにより、返流水は薬注率で水質を制御できる濃縮分離液のみとなる。したがって、遠心脱水機のSS回収率を低下させても直接的に返流水の水質悪化とならないので、供給汚泥量を減少すること無くケーキ含水率を低下できると考えられる。広域汚泥処理事業のように、後続の処理工程のため安定的にケーキ含水率を低減したいときには、有効な方法と考えられる。

4. おわりに

遠心濃縮・遠心脱水の組合せシステムに関する実証的な研究を行った結果をまとめると、以下のとおりとなる。

- ①薬注遠心濃縮は、供給汚泥濃度や供給汚泥量の変動に対して、安定的に分離液SS濃度を低減するのに有効である。
- ②遠心脱水機は、濃縮工程で十分汚泥濃度を高めた方が、処理能力が向上する。特に、大型遠心脱水機では固形物搬送能力に余裕が生ずるので、広域汚泥処理事業ではより有効である。
- ③濃縮分離液および脱水分離液は、 $30\mu\text{m}$ 以下の微細粒子が大部分を占めるので、簡易な沈殿処理程度では除去が困難である。このため、分離液のSS濃度をできるだけ低減するのが望ましい。
- ④脱水分離液を返送することにより、総合的な返流水のSS濃度の低下とケーキ含水率を低減できる可能性がある。

参考文献

- 1) 村上忠弘、石田貴、鈴木和美：遠心脱水機のスケールアップ効果について、第25回下水道研究発表会講演集、pp524～526（1988）
- 2) 日本下水道協会：下水道試験方法-1984年版-、p365

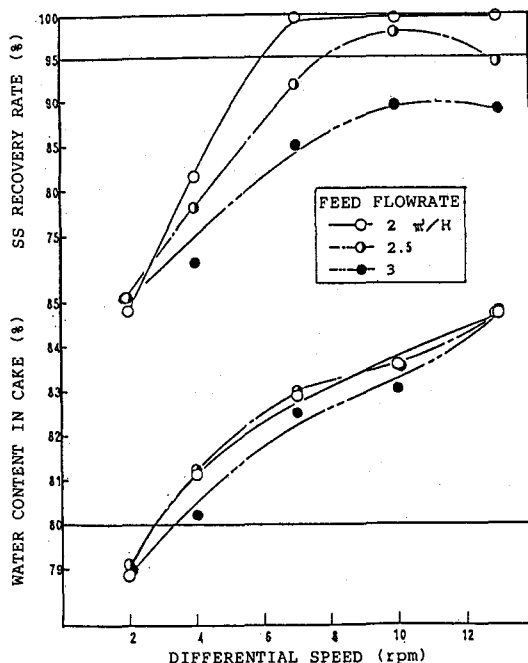


Fig.14. An example of performance data of a full-scale centrifuge dewatering (centrifugal force 2000G, feed sludge TS 5%, polymer dosage 1%)