

ディープシャフトプロセスによる 紙・パルプ廃水の処理

Paper Mill Wastewater Treatment by Deep Shaft Process

紙・パルプ廃水は有機物質が多く、従来から生物学的処理法である活性汚泥法が主に用いられてきたが、装置の所要面積が大きいという問題があり、排水水質の総量規制の実施に伴い所要面積が小さくCOD_{Mn}の除去効果の更に高い処理装置の開発が急務となってきた。

日立プラント建設株式会社では以上のような背景から、イギリスのICI社が基礎技術を開発した超深層曝気形のディープシャフトの技術導入を行ない、板紙抄紙工程廃水を対象に1年間のパイロットプラントによる実験を経て、世界最大級の20,000 m³/dの実機を昭和55年9月建設し、良好な結果を得て現在稼動中である。

本論文では実機の運転結果を基に、活性汚泥法との比較検討結果を報告した。主な結論は下記のとおりである。

- (1) 滞留時間1時間でCOD_{Mn}除去率80%以上が得られ、COD_{Mn}除去速度恒数(k_2)は標準活性汚泥法の約7.5倍である。
- (2) 負荷変動に対する対応は、十分満足できるものである。
- (3) 処理に必要な空気量は約 $\frac{1}{3}$ にでき、所要動力を約 $\frac{1}{2}$ にすることができる。

1 緒 言

紙・パルプ廃水は、有機物質に富みしかも大容量の廃水である。従来、その処理方式は、運転コストが安価であることから標準活性汚泥法が主に用いられてきたが、設備の所要面積が広大となることが問題であった。この問題の解決とCOD_{Mn}(化学的酸素要求量)総量規制の実施に伴い、標準活性汚泥法よりもCOD_{Mn}除去効果の高い処理方式の開発が切望されていた。

本論文は、1974年にイギリスのICI(Imperial Chemical Industries)社が基礎技術を開発し^{1),2)}、1978年日立プラント建設株式会社が技術導入した超深層曝気(ディープシャフト)法を、製紙メーカーの20,000m³/d板紙抄紙工程廃水処理に適用した実機運転結果について述べたものである。

2 構造及び原理

2.1 構 造

ディープシャフトは直径1~6m、深さ50~150mの立て穴を地中深く掘り下げる。その構造は図1に示すように、液の上昇する上昇部と液の下降する下降部とを円筒状の壁で仕切り、内筒が下降部で外筒が上昇部になっている。また、シャフトの上部(ヘッドタンク)は余剰の気泡を除くため、一定の表面積をもつように拡張された構造になっている。

2.2 原 理

シャフト内の液循環は、次の機構により行なわれる。まず、上昇部に循環開始用空気を吹き込み、エアリフト効果により液循環を開始する。循環が安定したのちに、吹き込み空気を上昇部から下降部へ徐々に切り換えていくと、液循環流速が下降部に吹き込まれる処理用空気の気泡上昇速度(0.3m/s)よりもかなり速い流速(1~2m/s)になっているため、空気は下

諸岡 純* Jun Morooka
佐藤 等** Hitoshi Satô
塚原伸一郎* Shin'ichirô Tsukahara

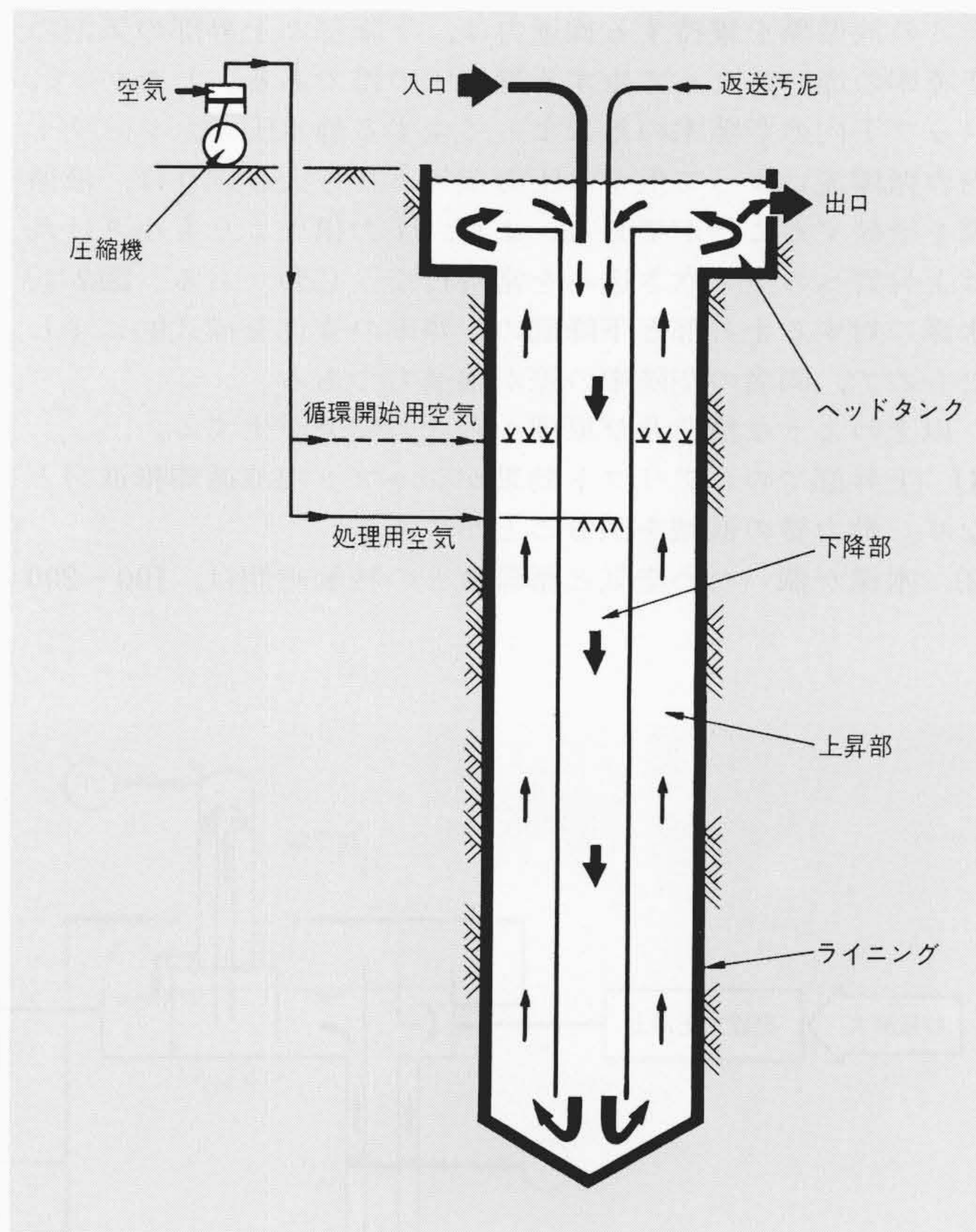


図1 ディープシャフトの構造 ディープシャフトは、直径1~6m、深さ50~150mの立て穴を地中に掘り下げ、上昇部と下降部との2槽に分割した構造になっている。

* 日立プラント建設株式会社 ** 日立プラント建設株式会社研究所

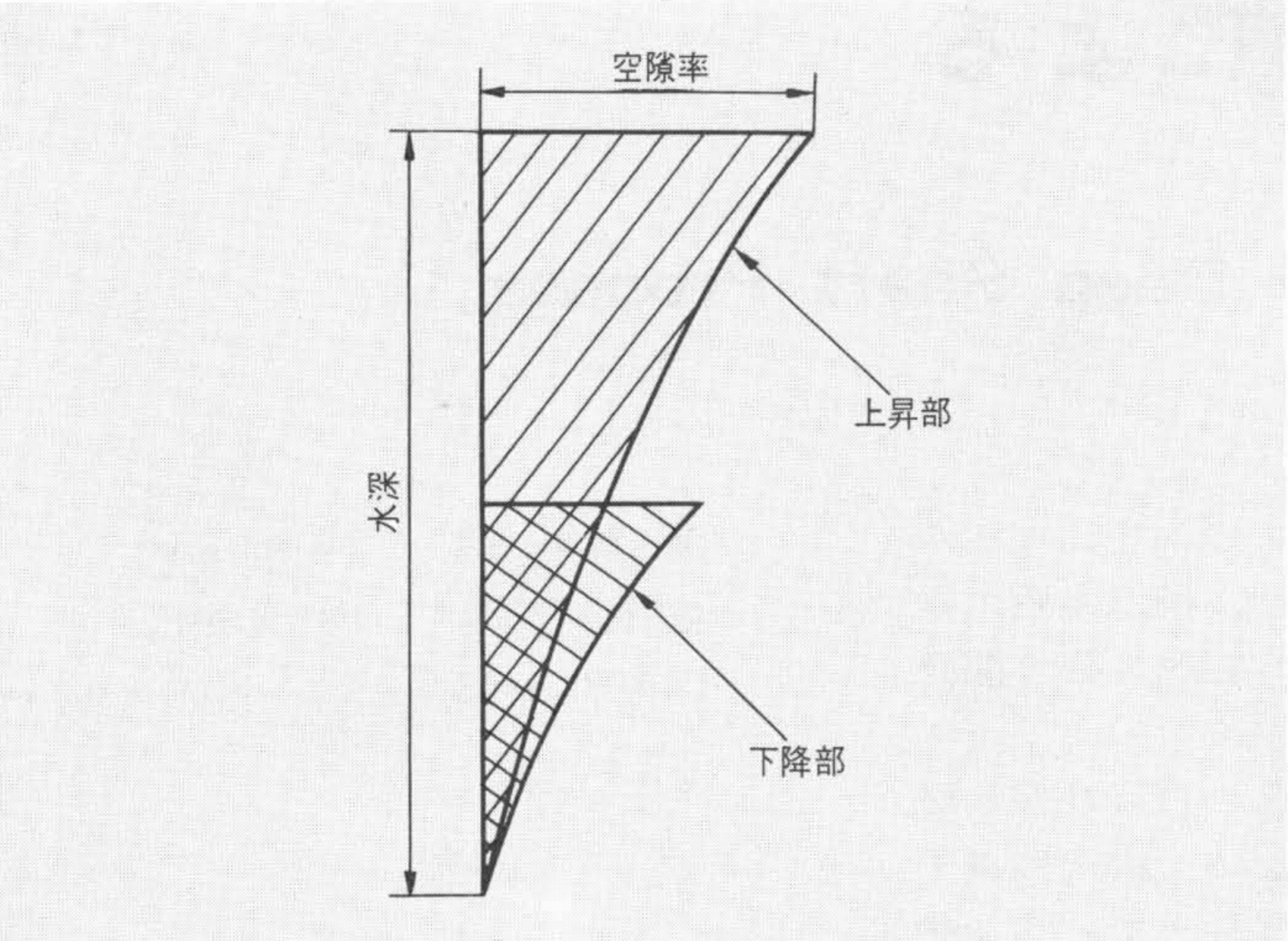


図2 水深に対する空隙率εの変化 上昇部と下降部の空隙率の変化を模式的に示したもので、両者の空隙率の差が推進力となる。

降流に伴われシャフトの下方に運ばれる。

このとき、処理用空気は、下方に向かうに従って増大する静水圧により気泡容積が縮小し、一部は循環液中に溶解する。シャフト底部に達した気泡は底部で反転し、上昇部を上昇する。上昇部では下降部とは逆に静水圧が減少するため、気泡容積及び数は増加し、上昇部の上部でエアリフト効果が大きくなり液循環が維持される。

この液循環を維持する推進力は、下降部と上昇部の気泡の空隙率の違いによって生ずる静水圧の差である。したがって、シャフト内の空隙率の差によって生ずる静水圧が、シャフト内の循環流によって生ずる圧力損失よりも大きければ、液循環を継続することができる。また、圧力損失よりも小さければ上昇管への空気吹き込みを常時行なう必要がある。図2は、水深に対する上昇部と下降部の空隙率の変化を模式的に示したもので、両者の空隙率の差が推進力である。

以上のような構造及び原理から次の効果が生ずる。

(1) 上昇部でのエアリフト効果がシャフト内液循環推進力となり、動力費の低減を図ることができる。

(2) 水深が深いため空気と循環液との接触時間は、100～200

秒(水深100mの場合)と標準活性汚泥法に比べ約10倍以上になり、微生物に対する酸素利用率が高くなる。

(3) シャフト内静水圧が大きいため溶存酸素濃度を高めることができ、接触時間の増大とあいまって酸素利用率が更に高くなる。

3 実機と処理結果

今回の板紙抄紙工場の場合は、従来加圧浮上方式の処理を行ってきたが、処理水の放流先が閉鎖水域の湖であるため、COD_{Mn}の規制が厳しくなり、しかも、住宅及び文教地域に位置するため工場敷地も狭く、面積及び処理効率の高い処理方式の採用を望んでいた。このため、有機物質処理として加圧浮上法の後に従来の活性汚泥法よりも効率の高いディープシャフトプロセスの導入を計画した。

3.1 適用廃水及び処理目標水質

適用廃水(原水)は、板紙抄紙工程の廃水を既設加圧浮上処理装置でSS(浮遊物質)を除去したもので、処理水量は20,000 m³/dである。

原水及び排水規制水質を表1に示す。

3.2 実機

実機のフローシートを図3に示す。原水はディープシャフトの上端から供給され、下降部に吹き込まれる処理用空気と十分に混合されながらシャフト底部に下降する。この際、吹き込まれた空気の大部分は、水圧によりシャフト底部に達するまでに循環液中に溶け込み溶存酸素濃度の高い状態となり、シャフト内は生物酸化処理の行なわれやすい環境となる。循

表1 原水水質及び規制水質 原水水質は板紙抄紙廃水を加圧浮上処理し、浮遊物質を除いたものである。

項 目	種 別	水 質	
		原 水	規制水質
pH	(—)	6～7	6～8
BOD	(mg/l)	160	10以下
COD _{Mn}	(mg/l)	200	37以下
SS	(mg/l)	60	20以下

注：略語説明
pH(水素イオン濃度) COD_{Mn}(化学的酸素要求量)
BOD(生物化学的酸素要求量) SS(浮遊物質)

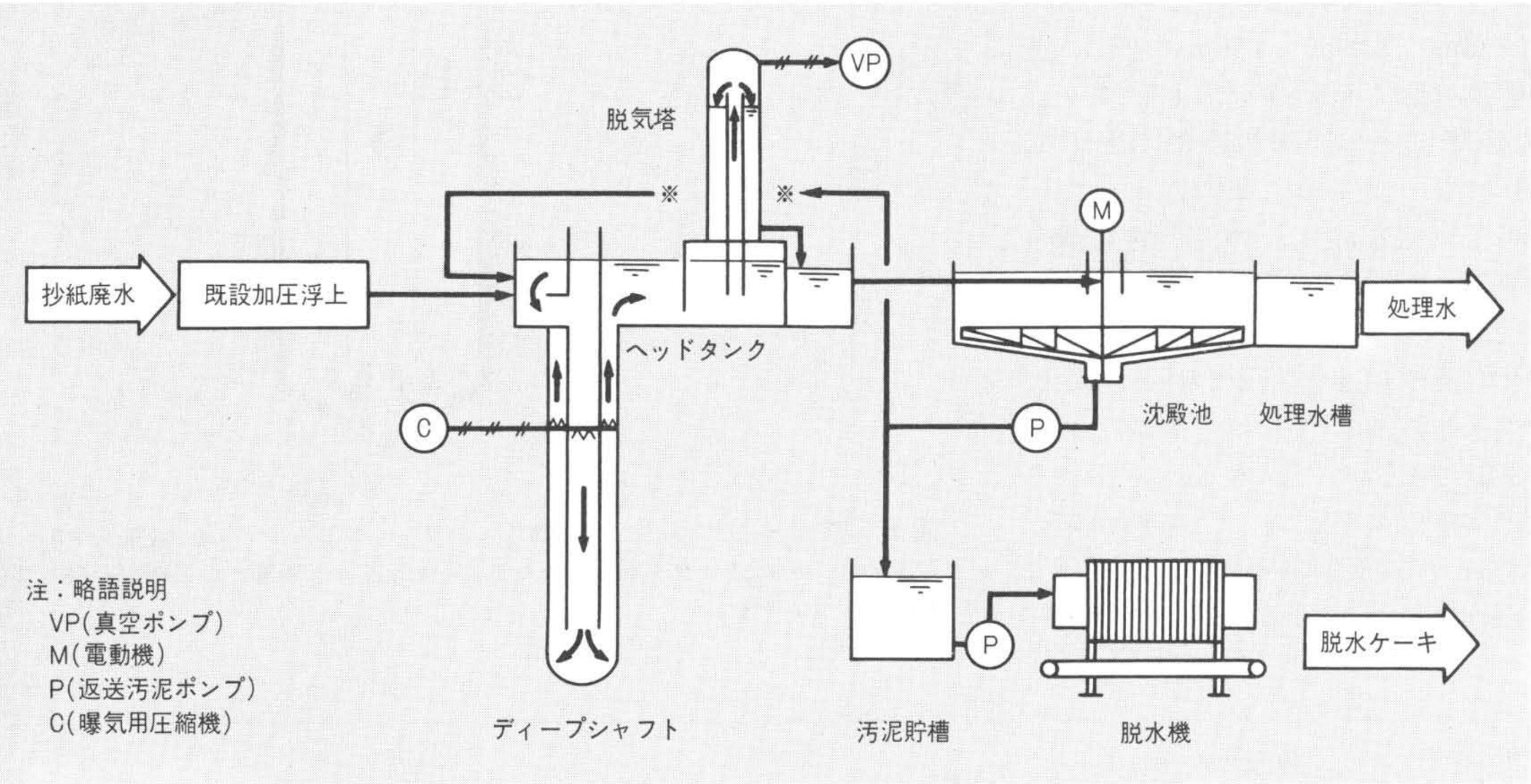


図3 ディープシャフト装置のフローシート 抄紙廃水は、既設加圧浮上処理されたのち、ディープシャフトで生物酸化処理される。次いで、微細気泡を脱気塔で除いたのち、沈殿池で固液分離され処理水として放流される。

環液はシャフト底部で反転し、上昇部を上昇しヘッドタンクにもどり余剰気泡を発散させたのち再度下降部に導かれる。原水は、この循環を数十回繰り返し十分な生物酸化処理が行なわれたのち、脱気塔に入り吹き込まれた空気中の窒素ガスなどから成る微細気泡が除去され、次いで沈殿池で固液分離される。なお、沈殿した汚泥は返送汚泥としてディープシャフトにもどされるほか、一部は余剰汚泥として脱水処理される。

稼動中のディープシャフトの全景は図4に示すとおりで、シャフトの直径は2.8m、深さは100mで世界最大級の規模である。なお、実機は昭和55年9月から稼動しており、主な仕様を表2に示す。

3.3 COD_{Mn}除去性能

板紙抄紙廃水は、一般的に凝集沈殿処理などの物理化学処理法及び標準活性汚泥法などで処理されているが、COD_{Mn}除去率は前者で約60%、後者でも約70%程度にとどまる。

これに対しディープシャフトでは、図5に示すCOD_{Mn}-汚泥負荷(kg-COD/MLSS-kg・d)とCOD_{Mn}除去率の関係のように、高負荷短時間(滞留時間1時間)でも80%以上の高い除去率が得られる。このディープシャフトが短時間に処理できる点についてディープシャフトと標準活性汚泥法とのCOD_{Mn}除去速度恒数(k_2)³⁾を求め両者の比較を行なった。図6にその結果を示す。

標準活性汚泥法は $k_2=3.3\times10^{-4}1/h\cdot mg/l$ であるのに対し、ディープシャフトは $k_2=2.5\times10^{-3}1/h\cdot mg/l$ と約7.5倍になる。この相違は、前述した酸素利用率の差などにより、廃水基質の生物分解が促進されるためと考えられる。

また、ディープシャフト及び標準活性汚泥法の処理水をゲル汙過法⁴⁾で分子量分画を行ない、基質の除去状態を比較した。ゲル汙過分画には、セファデックスG-15ゲル(分子量排除限界1,500)を用い、カラムは直径26mm×高さ500mmを使用し、展開液には蒸留水を用いた。また、分画された液分はTOC(全有機体炭素)を測定し図7に示す結果を得た。同図は同一のCOD除去率(82%)が得られた処理条件下のもので、同図(a)に原水の、(b)にディープシャフト処理水の、(c)に標準活性汚泥処理水の結果をそれぞれ示す。

原水は高分子物質に富み、全体TOCの約60%を分子量1,000以上の物質が占めている。これに対しディープシャフト及び標準活性汚泥の処理水は、ほぼ同様の除去パターンを示し原

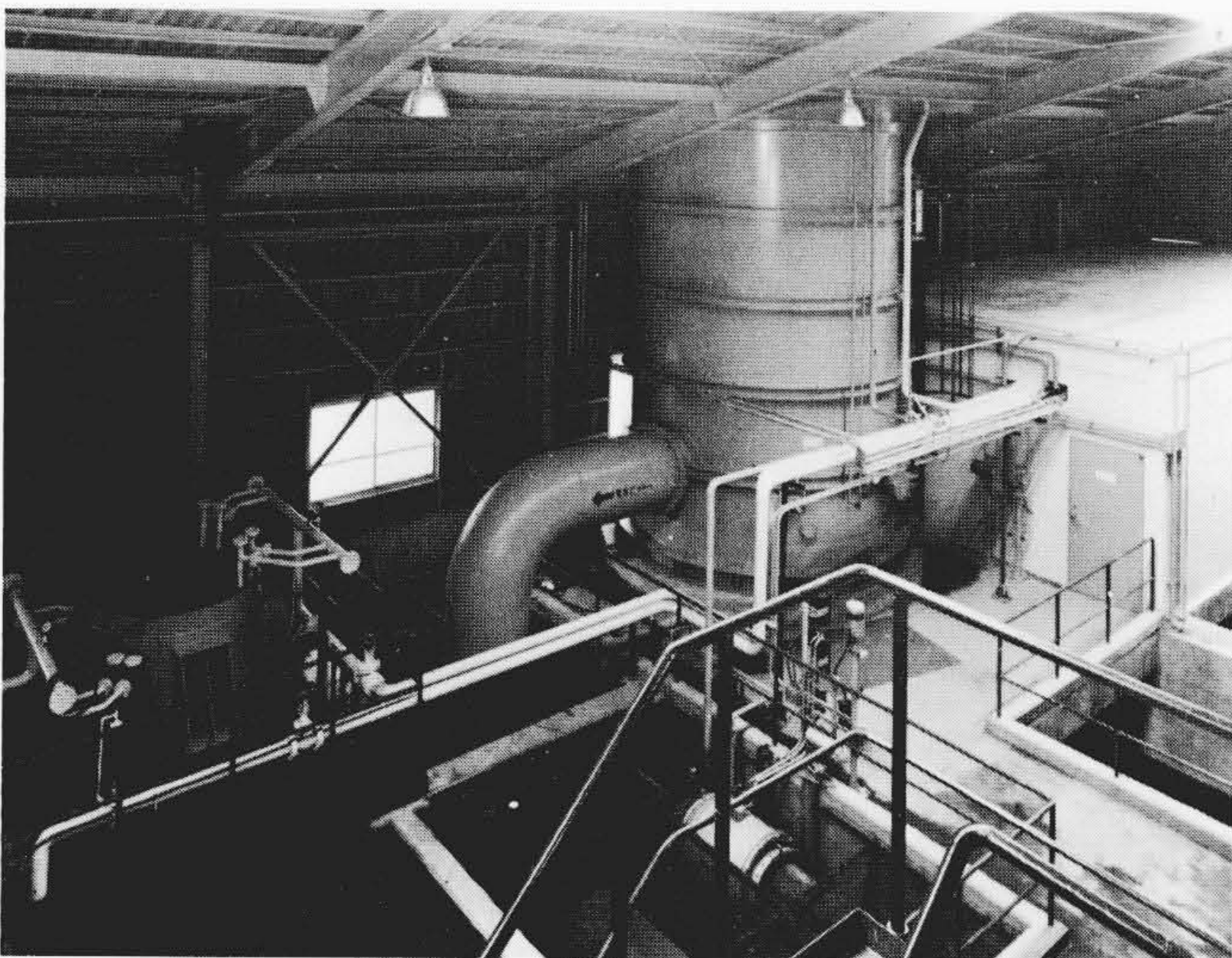


図4 稼動中のディープシャフト全景 写真の左側がディープシャフト(直径2.8m×深さ100m)で、右側は脱気塔(直径3.8m×高さ10m)及び圧縮機室である。

表2 実機の主な仕様 実機は昭和55年9月から稼動しており、規模は世界最大級である。

装置名称	台数	仕様
ディープシャフト	1基	直径2.8m, 深さ100m
ヘッドタンク	1槽	幅6m×長さ12m×高さ3m
脱気塔	1基	直径3.8m, 高さ10m
沈殿池	2槽	直径25m, 深さ2.5m
圧縮機	2台	75kW, 7kg/cm ²

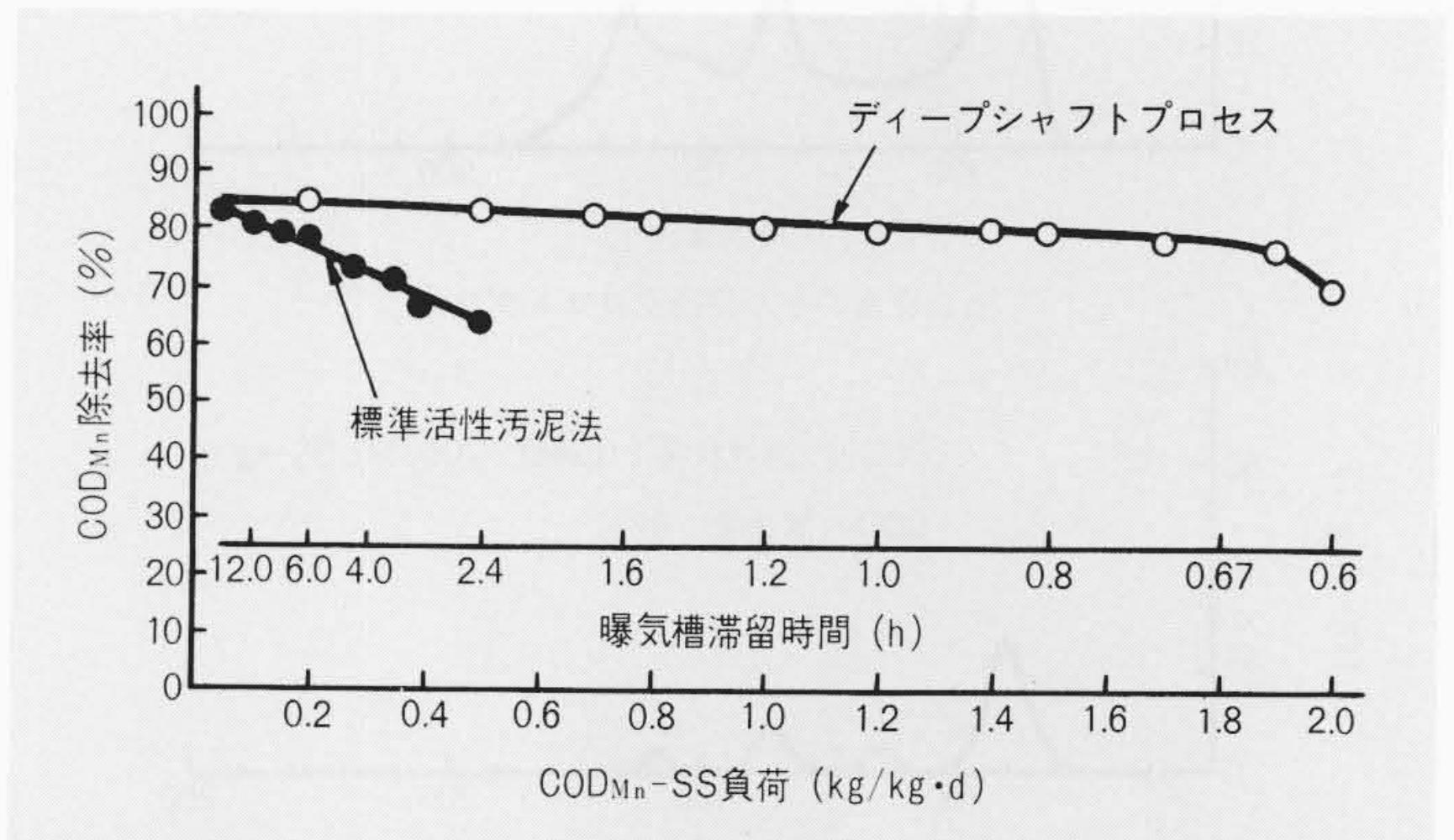


図5 COD_{Mn}-SS負荷とCOD_{Mn}除去率の関係 曝気槽滞留時間とは、ディープシャフト+ヘッドタンク容積に対する滞留時間である。また、COD_{Mn}-SS負荷とは、COD_{Mn}-汚泥負荷を示す。

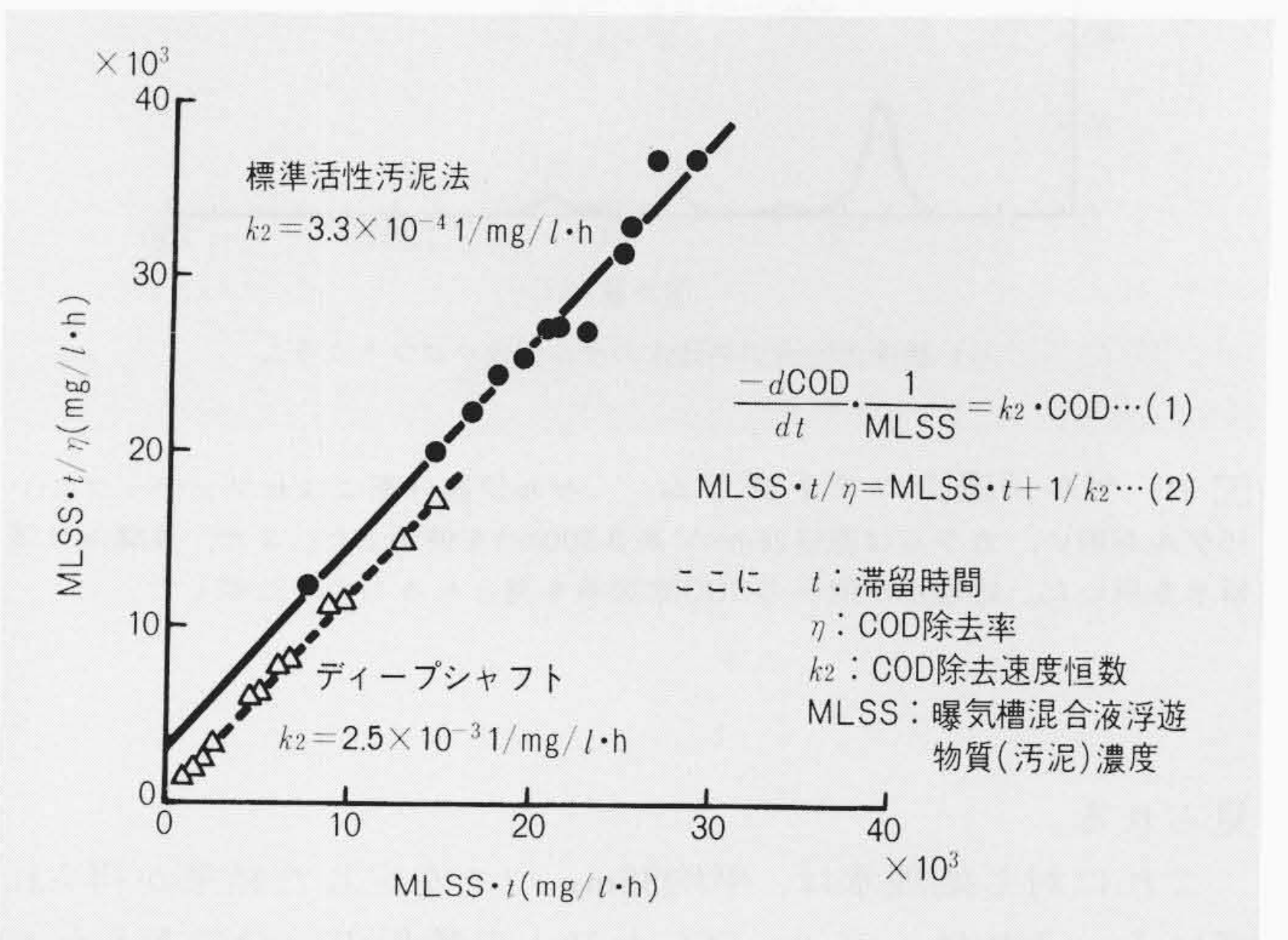


図6 MLSS・ t/η とMLSS・ t の関係 連続処理での基質除去反応は一次反応に従うため、図中に示す式で表わされ、COD_{Mn}除去速度恒数(k_2)(図中Y切片の逆数)が大きいかほど単位汚泥量当たりのCOD_{Mn}除去速度が速いことを表わす。

水のパターンと比べると全般にピークが低くなり、高分子物質から低分子物質まで良好に除去されている。このとき用いた試料のCOD-汚泥負荷は、ディープシャフトが0.96kg-COD/MLSS-kg・d、標準活性汚泥法は0.18kg-COD/MLSS-kg・dのものをを用いた。以上のようにディープシャフトは約5倍の高負荷、高速処理が可能な装置であることを実証している。

3.4 負荷変動に対する影響

図8は、原水水量及びCOD_{Mn}の変動に対する処理水COD_{Mn}の影響を示したものである。原水量は設定水量に対し±25%の変動があり、また、原水COD_{Mn}は160~260mg/lの変動が

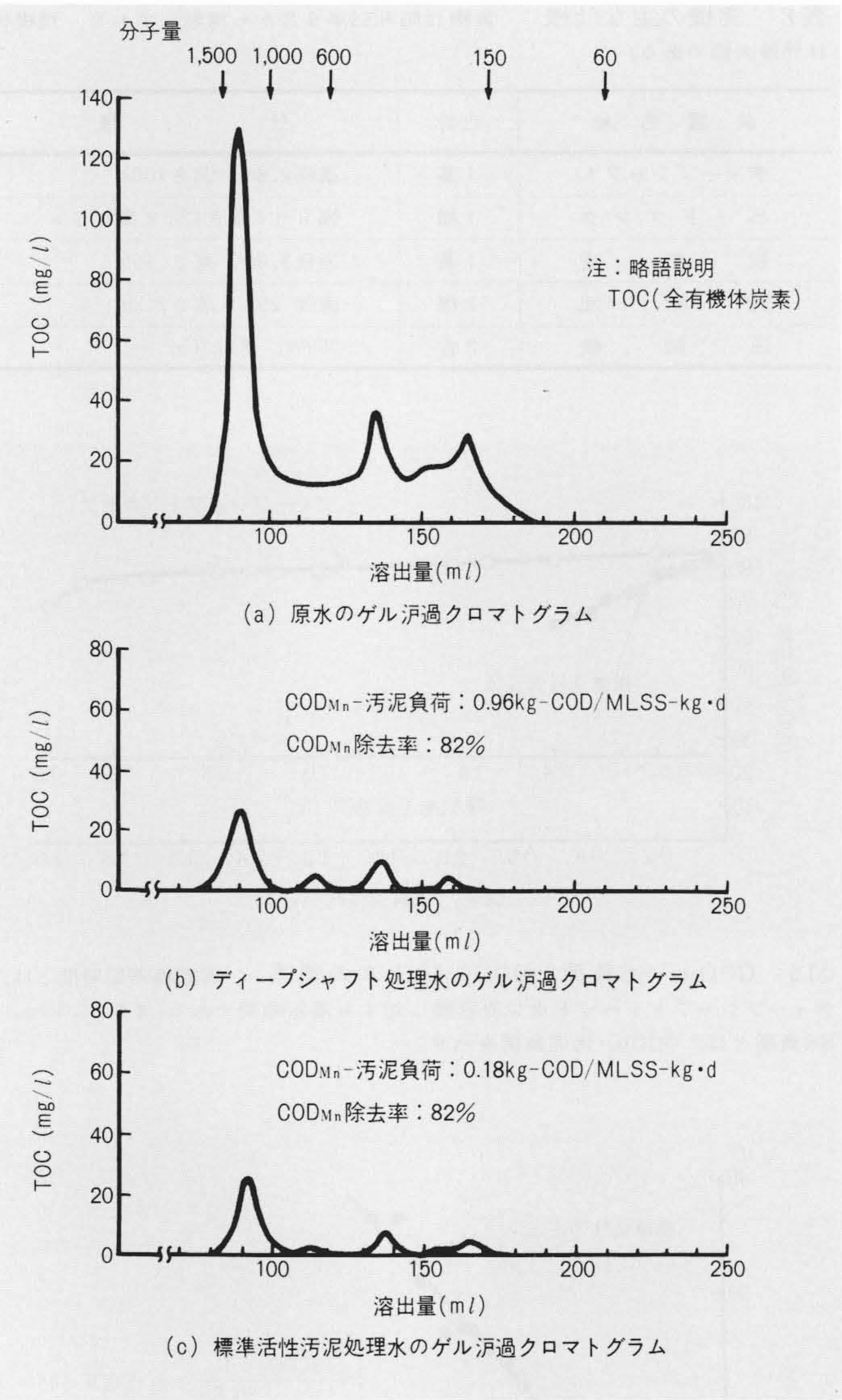


図7 ゲル濾過クロマトグラム ゲル濾過分画にはセファデックスG-15ゲルを用い、カラムは直径26mm×高さ500mmを使用した。また、展開液は蒸留水を用いた。処理水が同一のCOD除去率を得られるものを比較した。

見られる。

これに対し処理水は、平均35mg/lで安定した結果が得られている。これは、ディープシャフトの特長の一つであるシャフト内循環水による希釈効果で原水変動を吸収したためである。

実機を用い原水量20,000m³/d、原水COD_{Mn}200mg/lの廃水をCOD_{Mn}35mg/lまで処理する場合、表3に示す条件でディープシャフトの負荷変動に対する影響を検討した。シャフト内循環水量は常に一定値とし、循環水量=1.5m/s×3,077m²×60s/min×60min/h×24h/d≒399,000m³/dとなる。

原水COD_{Mn}は、シャフト内に入ると同時に循環水で希釈されるから、下降部流入口ではかなり低い濃度になる。これらの関係を図9に示す。

図9中の*印の位置は、下降部への流入口を示しており、ここでの定常時COD_{Mn}濃度をC₀とするとその値は循環水量から処理水量を差し引いた約397,000m³/d (COD_{Mn} 35mg/l)で原水を希釈するから、C₀≒43mg/lとなる。

同様に、負荷変動時のCOD_{Mn}濃度をC₁とすると、その値はC'≒52mg/lになる。

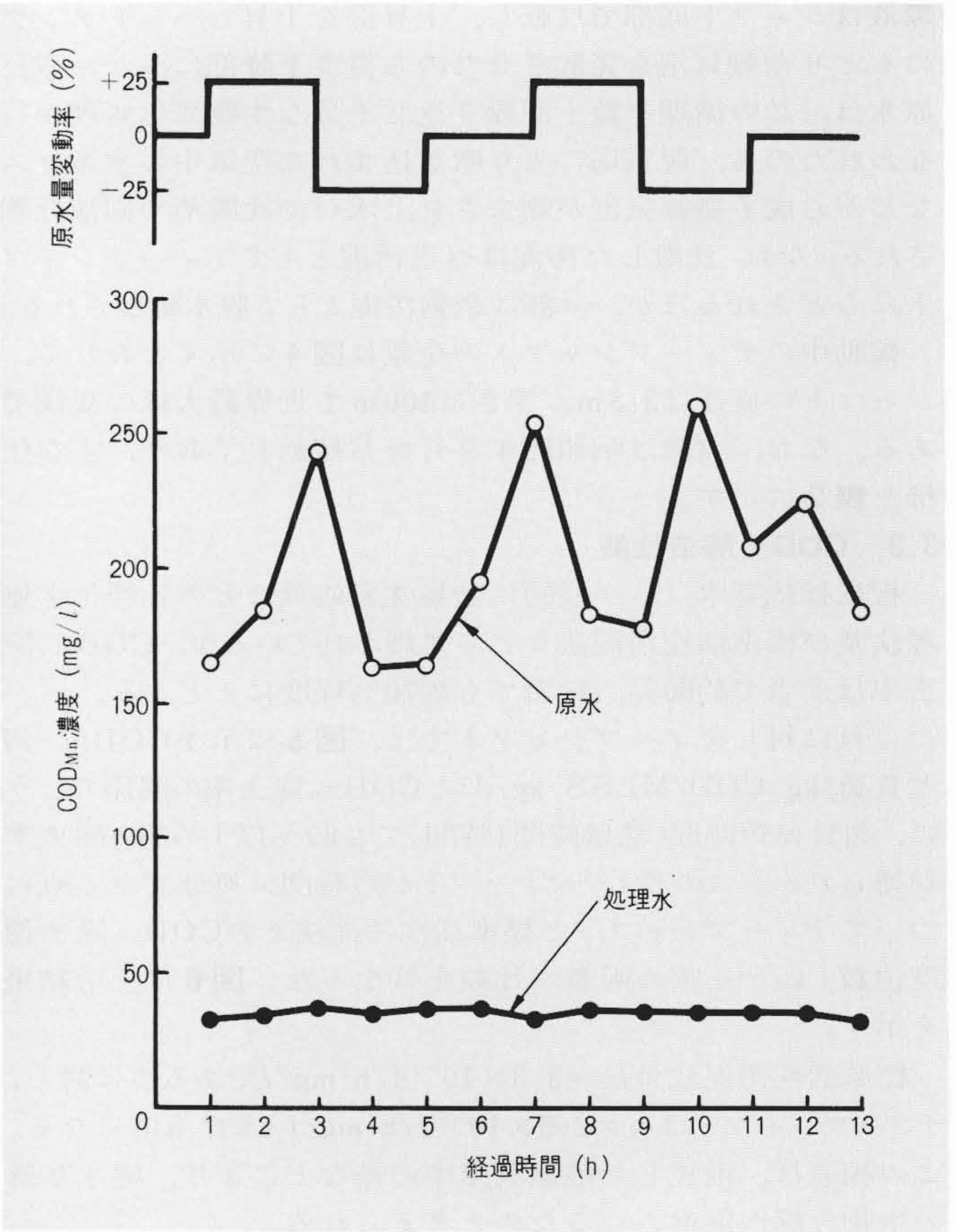


図8 負荷変動の影響 処理水は、原水の負荷変動の影響を受けず安定した結果が得られる。

表3 負荷変動条件 負荷変動に対する影響を調べるため、原水変動率+25%、COD_{Mn}変動率+50%の条件を設定した。

項 目	定 常 時	変 動 時
原 水 量 (m ³ /d)	20,000	25,000
原 水 COD _{Mn} (mg/l)	200	300
循 環 流 速 (m/s)	1.5	1.5
下 降 部 面 積 (m ²)	3,077	3,077
原水COD _{Mn} 負荷 (kg/d)	4,000	7,500

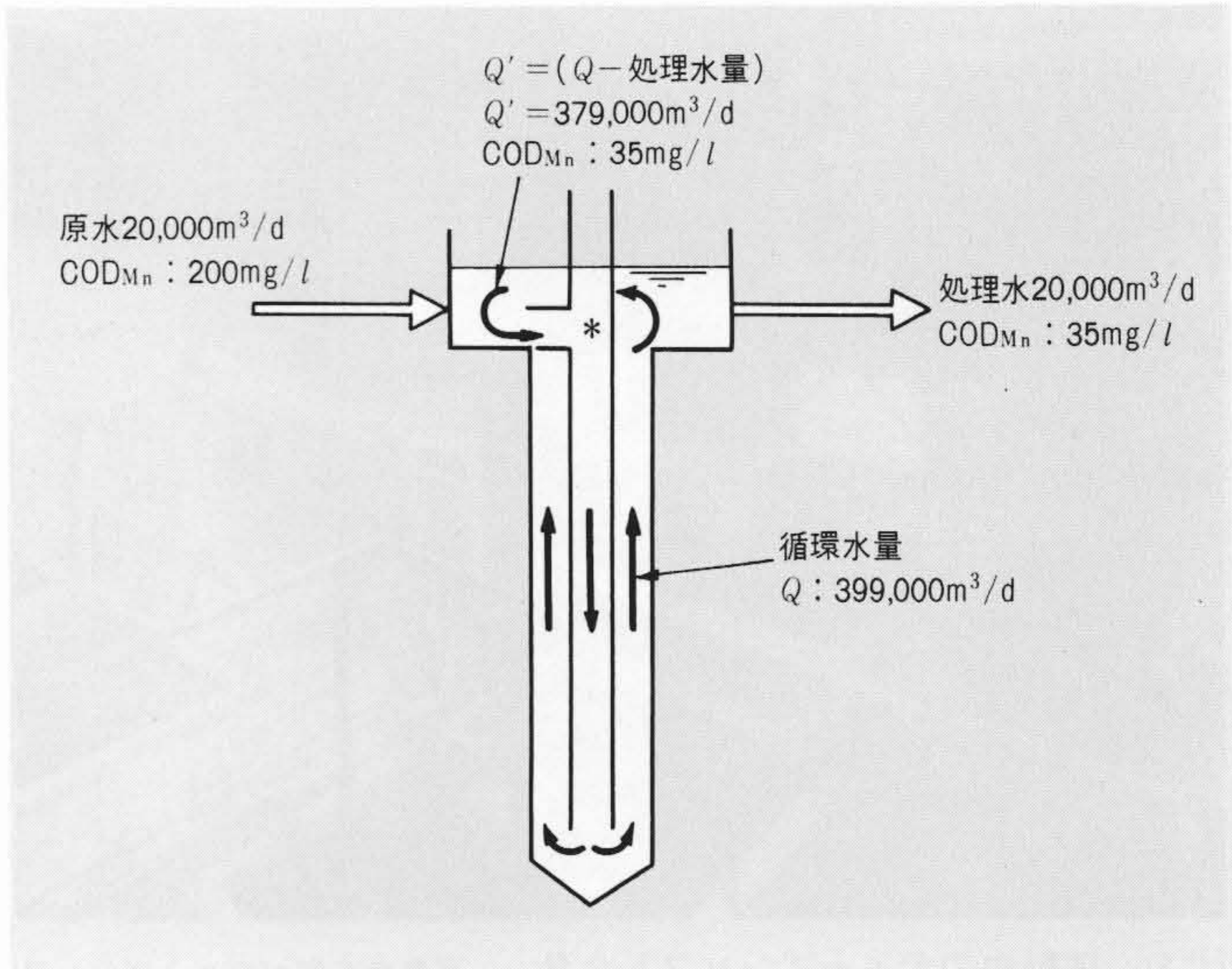


図9 シャフト内水量バランス 原水は、図中の*印の点で循環水により希釈効果を受け、下降部に流入する。

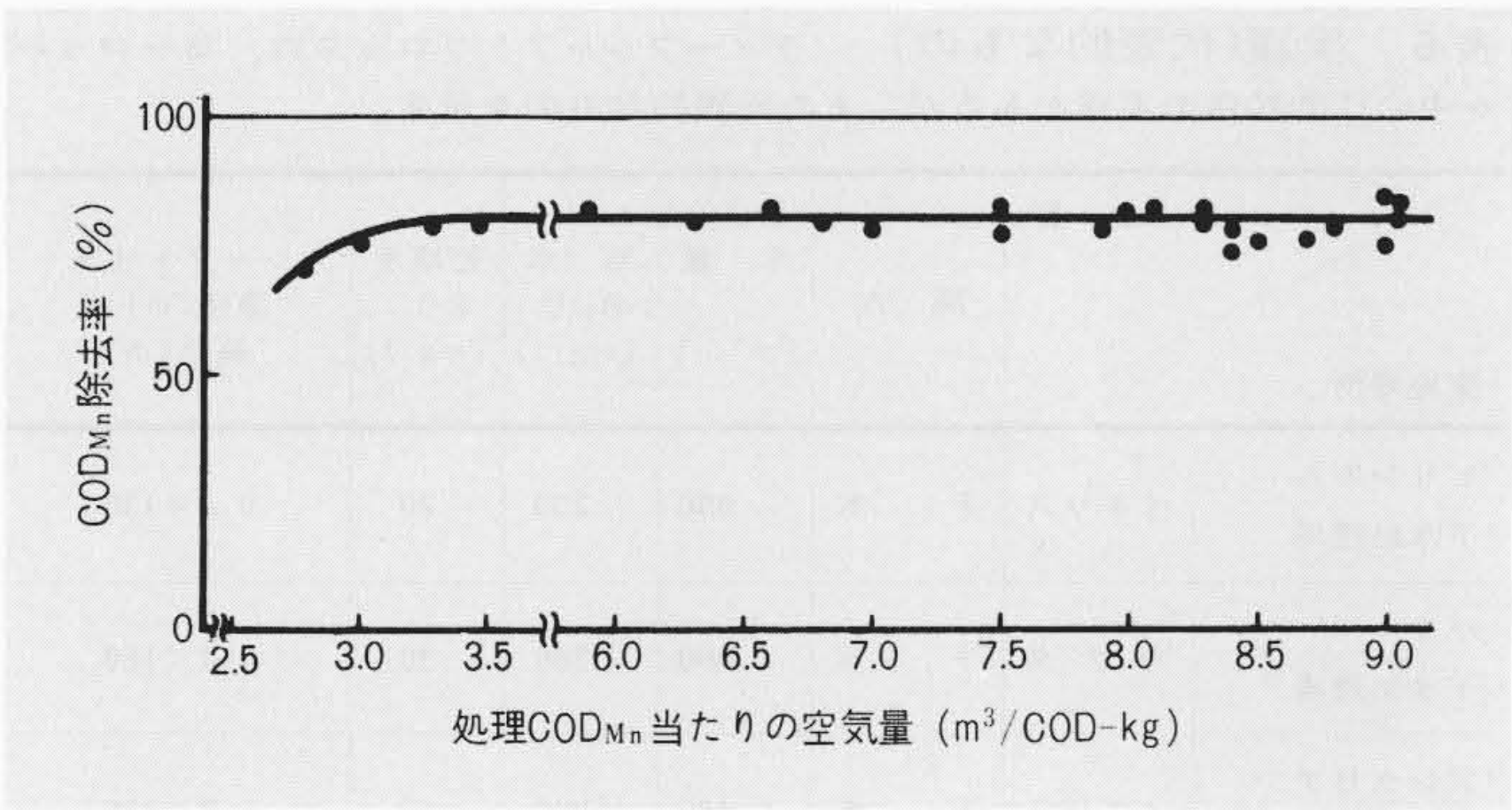


図10 空気量とCOD_{Mn}除去率の関係 COD_{Mn}除去率80%以上を得るための空気量は6 N・m³/COD_{Mn}-kgとなり、標準活性汚泥法に比べると約1/3量となる。

定常時と変動時では、水量及び水質が変動するため、原水の負荷変動率は約88%となる。これに対しシャフト流入口での変動率は、C₀からC'に変化しても約21%と少なく、原水変動率のわずか1/4以下になっていることが分かる。

以上のことから、ディープシャフトは負荷変動に対する影響の少ない装置であることが分かる。

3.5 必要空気量

単位除去COD_{Mn}当たりの必要空気量とCOD_{Mn}除去率の関係を図10に示す。COD_{Mn}除去率80%以上を得るには、6 N・m³/COD-kgの空気量が必要である。同様の廃水を標準活性汚泥法で処理する場合、35 N・m³/COD-kg程度の空気量が必要であるのに対し約1/6に低減することができる。これは、ディープシャフトが酸素移動速度が速いためである。

酸素移動速度の一般式⁵⁾は次のとおりである。

$$\frac{dO_2}{dt} = KLa (Cs - C)$$

- ここで KLa：総括酸素移動容量係数(1/h)
- Cs：飽和溶存酸素濃度(mg/l)
- C：溶存酸素濃度(mg/l)
- t：時間(h)

これに対しディープシャフトは次に示す影響を与えるので、酸素移動速度が速く空気量が標準活性汚泥法より少なくなる。

表4 連続運転結果 板紙抄紙工程の廃水を加圧浮上処理し、浮遊物質を除いた廃水を使用した。COD-汚泥負荷 0.86 kg-COD/MLSS-kg・dで、平均BOD除去率90%以上、平均COD_{Mn}除去率80%以上が得られる。

種別 測定項目	原 水		処 理 水		ディープシャフト (ヘッドタンク)
	最小～最大	平均	最小～最大	平均	
水 量(m ³ /d)	18,000～23,000	20,000	—	—	—
水 温(℃)	18～29	22	19～28	22	—
pH	5.8～6.8	—	6～7	—	—
BOD(mg/l)	80～215	145	—	10以下	—
COD _{Mn} (mg/l)	90～260	180	21～37	34	—
SS(mg/l)	10～100	30	10～20	10	—
透視度(cm)	—	10以下	—	50以上	—
MLSS(mg/l)	—	—	—	—	3,900～8,000
SV ₃₀ (%)	—	—	—	—	22～85
SVI	—	—	—	—	56～106
DO(mg/l)	—	—	—	—	6～10

注：略語説明
MLSS〔曝気槽混合液浮遊物質(汚泥)濃度〕
SV₃₀ (30分沈降汚泥容積)
SVI (汚泥沈降指標)
DO (溶存酸素濃度)

- (1) シャフト内が完全な乱流領域となり、レイノズル数が10⁵～10⁶と大きく、空隙率を0.2以下にしているため境膜の更新が活発に行なわれ、しかも気泡の会合が起こりにくいのでKLa値が大きくなる。
- (2) ディープシャフトは超深層曝気方式であるため、気泡と液との接触時間が標準活性汚泥法に比べ10～20倍も長く、(Cs－C)値が大きくなる。
- (3) 飽和溶存酸素濃度Csは酸素分圧に比例するため、(Cs－C)値が大きくなる。

3.6 連続運転における処理水質結果

COD_{Mn}-汚泥負荷：平均0.86 kg-COD/MLSS-kg・d (平均滞留時間1時間)での連続運転処理水質を表4に、また、連続運転でのCOD_{Mn}の日間変動結果を図11に示す。処理結果は3.1で述べた規制水質を満足し、安定した好結果を得ている。な

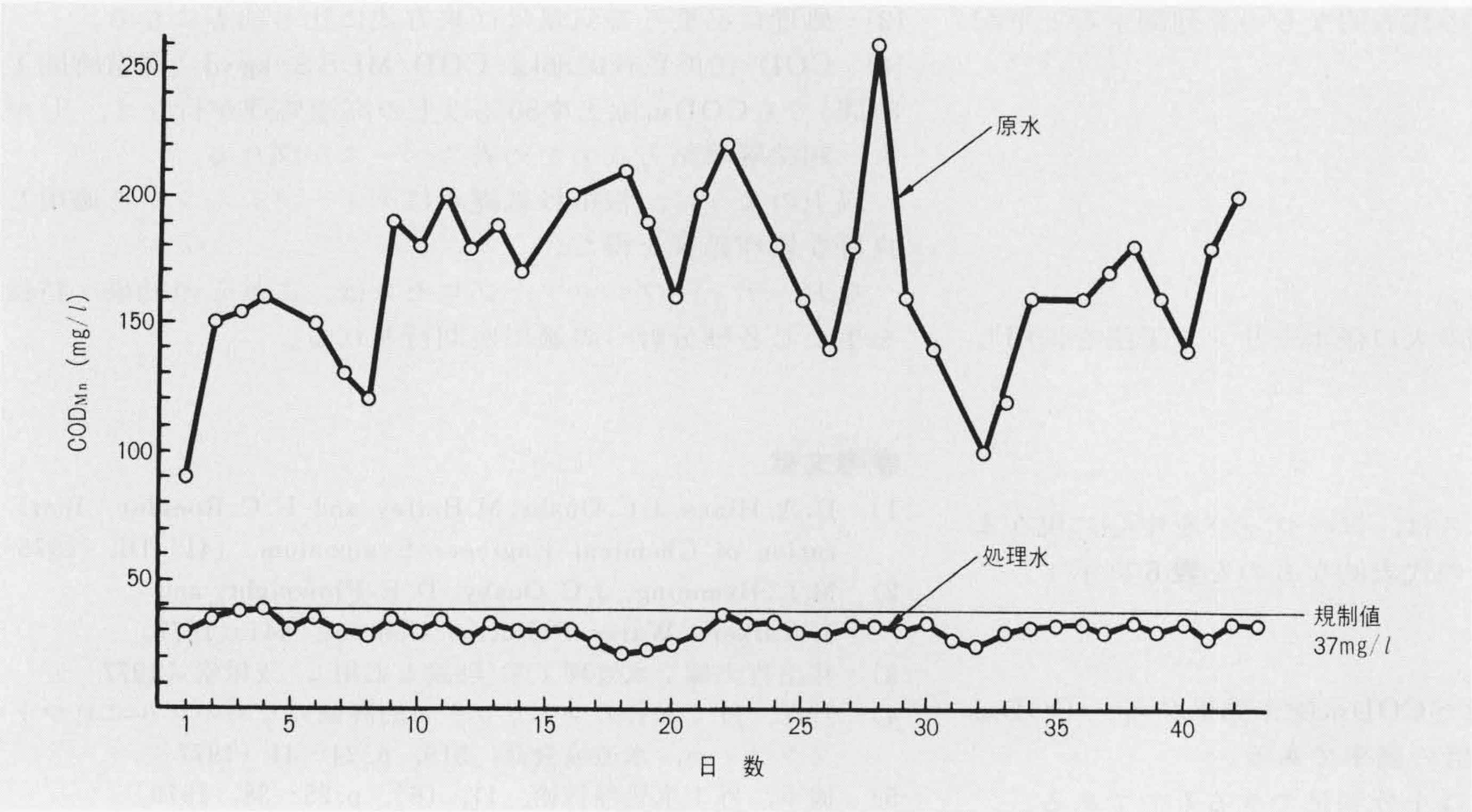


図11 COD_{Mn}の日間変動結果 CCD-汚泥負荷：平均0.86 kg-COD/MLSS-kg・dでの連続運転の結果を示す。

表 5 従来形生物処理方式との比較 ディープシャフトは、標準活性汚泥法に比べCOD容積負荷が7倍の高負荷になり、曝気槽容積を $\frac{1}{7}$ にすることができる。しかも、超深層方式のため敷地面積も大幅に低減することができる。表5に示した面積比較は、沈殿池なども含めた全体敷地面積比較である。

No.	比 較 項 目	ディープシャフト プ ロ セ ス	活性汚泥法	接触酸化法
1	滞 留 時 間(h)	1.0	7.0	6.5
2	COD-SS 負 荷(kg/kg・d)	0.98	0.2	—
3	COD容 積 負 荷(kg/m ³ ・d)	4.8	0.7	0.75
4	MLSS 濃 度(mg/l)	4,500～6,000	2,500～4,000	—
5	汚 泥 返 送 率(%)	100～150	50～150	—
6	余剰汚泥生成量(kg/kg-COD)	0.2～0.5	0.5～0.6	0.2～0.6
7	酸 素 利 用 率(%)	50～90	5～15	5～15
8	敷 地 面 積 (ディープシャフトプロセスを1とした場合)	1.0	1.6	1.4
9	ランニングコスト (ディープシャフトプロセスを1とした場合)	1.0	1.4	1.3

注：1. 日立プラント建設株式会社の実験結果を基に作成した。
2. 比較条件(20,000m³/d抄紙廃水を処理対象にBOD除去率90%以上、COD除去率80%以上とした。)

お余剰汚泥生成量(kg/kg-COD)は、標準活性汚泥法に比べ20～50%少なくなる。これはディープシャフト内の速い循環流によりフロックが微細になり見掛けのCOD_{Mn}-汚泥負荷が小さくなるためと考えられる。

4 従来生物処理方式との総合比較

20,000m³/dの板紙抄紙廃水を対象に、BOD除去率90%以上、COD_{Mn}除去率80%以上の条件で従来方式との総合比較を表5に示す。これらの結果は同一原水で同時に比較実験を行ったものである。

ディープシャフトは、従来方式に比べ高負荷処理が行なえ、しかも、超深層曝気方式のため省スペース、省エネルギーが実現できる。また、地上の開口部が小さく吹き込み空気量も少ないため、臭気の発生もほとんどなくなり二次公害の防止が容易である。

5 ディープシャフトの掘削

ディープシャフトを建設するための立て穴掘削工法は、シャフト径、深さ土質条件などにより異なるが、基本的には従来土木工法を使用する。その代表的なものを列記すると下記のとおりである。

- (1) 小口径ボーリング
- (2) 大口径ボーリング
- (3) 井筒沈下工法
- (4) 逆巻き工法
- (5) 連続地中壁工法

なお、本稿の施工は、(2)の大口径ボーリング工法を採用した。

6 実 績

ディープシャフトプロセスは、ヨーロッパを中心に現在まで約20件の実績がある。その代表的なものを表6に示す。

7 結 言

- (1) 従来形生物処理方式に比べCOD_{Mn}除去効果が高く、COD_{Mn}除去速度恒数(k₂)は約7.5倍の高率である。
- (2) 負荷変動に対する対応は十分満足できるものである。

表 6 実績(代表的なもの) ディープシャフトプロセスは、ヨーロッパを中心に約20件の実績があるが、その代表的なものを示す。

項 目		廃 水	水 量 (m ³ /d)	原 水 BOD (mg/l)	処理水 BOD (mg/l)	シャフト寸法 直径(m)× 高さ(m)
実施場所						
ビルンガム 下水処理場	イギリス	下 水	800	300	20	0.4×130
バリー 下水処理場	カナダ	下 水	1,090	300	30	0.4×150
アングリアン 下水処理場	イギリス	下 水	6,480	1,000	60	1.9×130
バーデン 下水処理場	イギリス	下 水	2,400	200	30	0.8×152
イサカ市 下水処理場	アメリカ	下 水	754	200	30	0.4×150
レエア 下水処理場	西ドイツ	下 水	15,000	400	30	2.6×81
ポタージ 下水処理場	カナダ	下 水	14,200	500	30	1.4×150
原田終末処理場	日 本	下 水	2,400	300	20	1.0×100
松島町 (河川浄化)	日 本	下 水	1,200	60	20	0.7×100
ジャがいも デンプン工場	西ドイツ	産業廃水	1,400	2,000	200	1.1×100
ビール工場 (Molson)	カナダ	産業廃水	2,900	3,600	50	0.46×150
製紙工場 (Kimberly Clark)	イギリス	産業廃水	21,600	1,000	100	6.0×50
農業製造工場	日 本	産業廃水	1,500	2,000	100	2.0×80
製紙工場*	日 本	産業廃水	20,000	160	10	2.8×100
コーンスターチ 工場	日 本	産業廃水	4,000	1,500	20	2.4×100

注：*は本稿に記載したもの

- (3) 処理に必要な空気量は従来方式に比べ約 $\frac{1}{5}$ になる。
 - (4) COD-汚泥負荷0.86kg-COD/MLSS-kg・d(滞留時間1時間)でもCOD_{Mn}除去率80%以上の高速処理が行なえ、しかも、超深層曝気方式のため省スペースが図れる。
- 以上のように、板紙抄紙廃水にディープシャフトを適用し良好な処理結果を得た。
- なお、ディープシャフトプロセスは、これらの効果・特長を生かし各種分野への適用が期待される。

参考文献

1) D. A. Hines. J. C. Ousby, M. Bailey and F. C. Roesler : Institution of Chemical Engineer Symposium. [41] DI, (1975)
2) M. L. Hemming, J. C. Ousby, D. R. Plowright, and J. Walker : Water Pollution Control, 441 (1977)
3) 井出哲夫編：水処理工学(理論と応用), 技報堂・(1977)
4) 丹保, 外：水質のマトリックス的評価のためのゲルクロマトグラフィー, 水道協会誌, 519, p. 24～41 (1977)
5) 橋本, 外：水処理技術, 11, [6], p. 25～38 (1970)