

(18) 多段反転流式バイオリアクターの特性

THE CHARACTERISTICS OF MULTI-STAGE
REVERSING FLOW BIOREACTOR (MRB)

高 橋 正 宏*
Masahiro TAKAHASHI*

ABSTRACT ; Multi-Stage Reversing flow Bioreactor (MRB) is multi-stage sludge blankets type bioreactor for municipal wastewater treatment utilizing the symbiotic relationship between microaerophilic and anaerobic bacteria. The most interesting characteristic of MRB is the formation of the self granulated sludge consist of anaerobic bacteria including Sulfate Reducing Bacteria and *Beggiatoa*. The hypothetical mechanism of the granule formation and the results of one year operation is summarized.

- (1) Once Sulfate Reducing Bacteria (SRB) are accumulated in the reactor, *Beggiatoa* utilize sulfide which is produced by SRB, then wrap up the anaerobic bacteria floc, make the self granulated sludge.
- (2) The effluent quality rose 30mg-BOD/ℓ in winter because of the slugging of the self granulated sludge though less than 20mg/ℓ in summer without the slugging.
- (3) Sludge producing ratio was 0.22 (produced SS/removed BOD) and 0.43 produced SS/removed SS).

KEY WORDS; Multi-Stage Reversing flow Bioreactor(MRB), *Beggiatoa*, Sulfate Reducing Bacteria, Wastewater treatment, Symbiotic relationship

1. まえがき

生物学的排水処理システムは、好気性処理と嫌気性処理の2つに大きく分けることができる。2つの処理方式を比較すると、それぞれ長所、短所を有している。例えば好気性処理は嫌気性処理に比べ、短い処理時間で良好な処理水質を得ることができるが、消費エネルギーや、余剰汚泥生成量が多いという短所を有する。嫌気性処理は好気性処理に比べ、消費エネルギーや余剰汚泥生成量が少ないかわりに処理時間が長く、処理水質にも問題がある。各処理方式の短所は、処理に応用されている生物学的原理そのものに起因することが多いため従来の処理方式を踏襲するのみでは、これらの短所を克服することは一般的に困難である。しかし、従来の好気性処理、嫌気性処理とは異なった微生物学的環境を導入することによって、全く新しい生物学的原理を利用した処理方式を開発する可能性は十分あろう。

多段反転流式バイオリアクター (Multi-stage Reversing flow Bioreactor : MRB)^{1,2)} は、限定的酸素供給を汚泥床型のバイオリアクターに適用し、硫黄の代謝に関与する微生物の相互関係を利用した、新しい処理方式であり、微好気、又は微嫌気性という微生物学的環境下で、排水処理を行うものである。

2. MRB の原理

MRB の概念図を図-1に示す。流入水は一段目の下向流式曝気槽の上部より流入する。ここには浮遊性固型物は滞留しない。次の槽は上向流式生物反応槽である。水の上向流速より速い沈降速度をもつ固型物は、こ

* 建設省土木研究所 (Public Works Research Inst., Ministry of Construction)

ここに滞留する。以下の槽は同様の組み合わせを直列につないだものとなっている。曝気槽は単に溶存酸素を供給するための槽である。生物反応槽において、浮遊性固型物はゆっくりと上向流れにより攪拌され、やがて径2～3mmの自己造粒汚泥を形成する。

図-2に示すMRBのプロトタイプは1986年11月より運転されている¹⁾²⁾。流入水は、都市下水処理場の最初沈殿池越流水であり、種汚泥の添加などは行わなかった。運転開始後3週間で、まず嫌気性の汚泥が第一生物反応槽に蓄積し、それが、次第に、第二、第三生物反応槽へ越流していき、図-3に示す自己造粒汚泥²⁾がやがて生成した。自己造粒汚泥の

SVIは汚泥採取時に自己造粒汚泥が崩壊するため正確な値は分らないが、反応槽底部よりの引抜汚泥濃度は平均2.8%であり、沈降性、濃縮性とも良好である。自己造粒汚泥による汚泥床が第一～第四生物反応槽に形成されると、そこでの有機物の除去が進行し、第五生物反応槽に流入する水のBODは20mg/ℓ以下となるため嫌気性微生物が生育するに十分な濃度の有機物が供給されず、ここには好気性の汚泥床が形成された。この好気性汚泥床は自己造粒汚泥を形成しないが、上向流速144m/日の生物反応槽内で、安定的に、汚泥床を形成し得た。

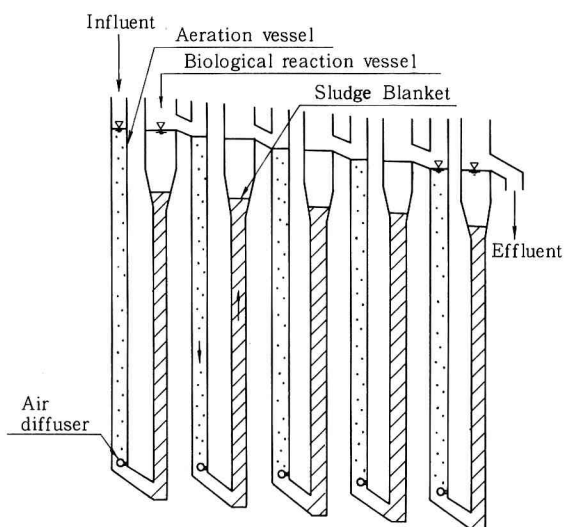


Fig. 1 Schematic layout of MRB

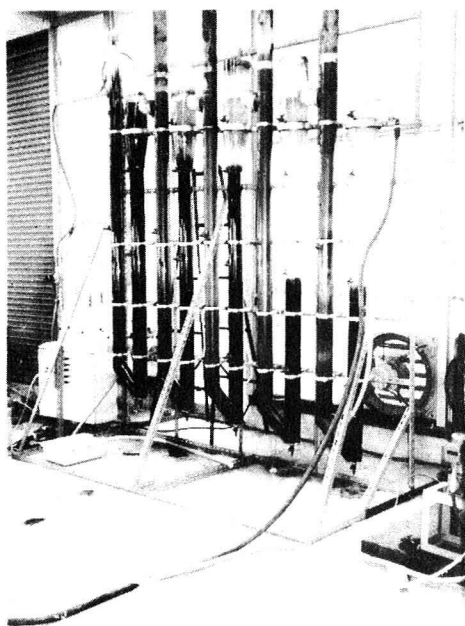


Fig. 2 Prototype MRB

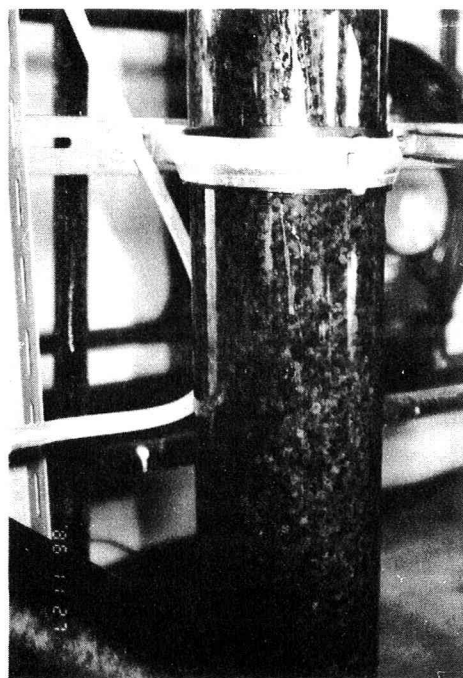


Fig. 3 Self Granulated Sludge (SGS)

3. 自己造粒の機構

MRBの最も興味深い現象は、自己造粒汚泥形成の機構である。自己造粒汚泥は図-4に示すようにピンセットでつまめる程度の強度を有しているが、ポンプを通す等の強いせん断力を加えると破壊されてしまう。図-3に示すように、ほとんどの自己造粒汚泥は白く薄い膜に被れている。図-5は、自己造粒汚泥表面の電子顕微鏡写真である。この膜が糸状細菌により構成されていることが明らかである。図-6は、図-3に示した自己造粒汚泥の表面近くをピンセットで採取したサンプルの工学顕微鏡による生菌状態の糸状細菌の写真であるが、菌体内に硫黄の小粒を有すること、特徴的なすべり運動をすること等より³⁾*Beggiatoa*と同定された。自己造粒汚泥の内部は、黒く、嫌気性であった。図-7は内部の電子顕微鏡写真であるが、球菌、短桿菌、及び長桿菌が混在しており、一部の長桿菌は、大きさ(5 μ 程度)、形状が硫酸還元菌の一種*Desulfovibrio* sp.に相当した。表-2に示す平板培地で、30℃の嫌気性チャンバー内培養を2週間行い、自己造粒汚泥中の硫酸還元菌の計数を行ったところ、 10^8 N/g-ssの値を得た。これは下水処理用の嫌気性上向流汚泥床(UASB)中の汚泥よりは、1オーダー低い値であるが、下水の嫌気性消化汚泥(10^6 N/g-VSS)に比べるとはるかに多い⁴⁾。

MRBでは、殆ど微生物が存在しない曝気槽で酸素の供給が行われる。曝気槽の溶在酸素濃度は排水の水温、水質によって決る飽和濃度以上になることはない。一方、生物反応槽には高濃度の汚泥が蓄積しているため、流入水中に、十分な有機物が存在する場合には、曝気槽で供給された酸素は急速に消費される。その結果生物反応槽液中のORPが-200mv以下に低下し、硫酸還元菌が生育できる嫌気的環境となる。

上記の観察結果より、自己造粒の機構を推定すると、以下のようである。

図-8は、硫酸還元菌、硫酸酸化菌としての*Beggiatoa*及び他の嫌気性細菌の相互関係をまとめたものである。排水中の有機物の一部は自己造粒汚泥内部に透過し、嫌気性加水分解菌により、酢酸、プロピオン酸等の有機酸に分解される。硫酸還元菌はこの有機酸を利用し、排水中の硫酸根を還元する。この反応により生成した硫化水素は、自己造粒汚泥の表面を通して外部の排水中へ透過していく。反応槽内での酸素供給は行われていないが、自己造粒汚泥の表面に生育する微生物は、前段の曝気槽で供給された酸素に接触する機会を有しており、ここでは好気性代謝を行う微生物も生育可能である。Nelsonら⁵⁾によると*Beggiatoa*の一種はそのすべり運動によって微量の酸素(10 μ M未満、0.32mg/ ℓ 未満)と硫化水素(10 μ M未満、0.34mg/ ℓ 未満)が共存する環境へ移動する能力を有しており、MRBにおいても、*Beggiatoa*は硫酸還元菌を含む嫌気性フロックの表面に選択的に集まることが考えられる。また微小なフロックが自己造粒汚泥へと成長する過程でも、常にその表面へ移動していくものと思われる。更にNelsonら⁵⁾のデータによる酸素フラックスと、*Beggiatoa*現存量より計算した*Beggiatoa*の酸素消費速度はバルクの酸素濃度が0.32mg/ ℓ 以下の場合でも、30~140mg-O₂/g-菌体 $\cdot$ hであり、MRBにおいてもほぼ同様な環境にあることから、供給された酸素のかかなりの部分が、*Beggiatoa*により消費されていると考えられる。

今回用いた実験装置は上向流速の変更(10cm/sec、又は15cm/sec.反応槽下部)程度しか行っておらず自己造粒汚泥の形成に関する水理学的条件についての十分な検討ができない。ただし、後述するように1日12回の流入水の停止、再流入といった瞬間的な水理条件の変化に対しても自己造粒汚泥が崩壊したり凝集しないことから、松井ら⁶⁾が報告した、上向流中での粒子の成長と破壊の平衡状態から起こる物理的造粒作用よりも、*Beggiatoa*を主体とする生物学的造粒過程がMRBにおける自己造粒の主流であると考えられる。

なお硫黄化合物の濃度と組成は、汚泥の自己造粒機構にとって非常に重要であるが我国の都市下水中においては、これらは問題とはならないと考えられた²⁾。

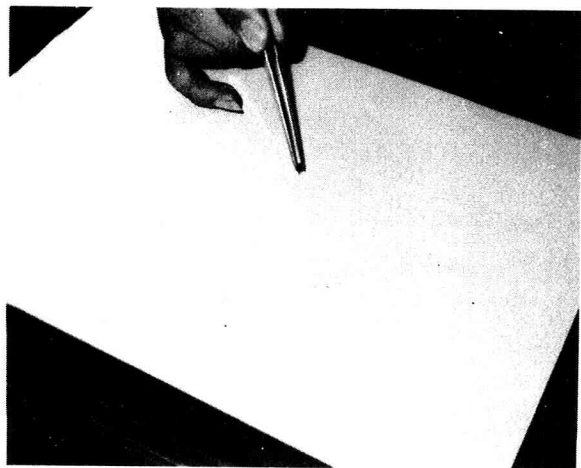


Fig. 4 SGS Picked up by Tweezers



Fig. 5 Surface of SGS by SEM

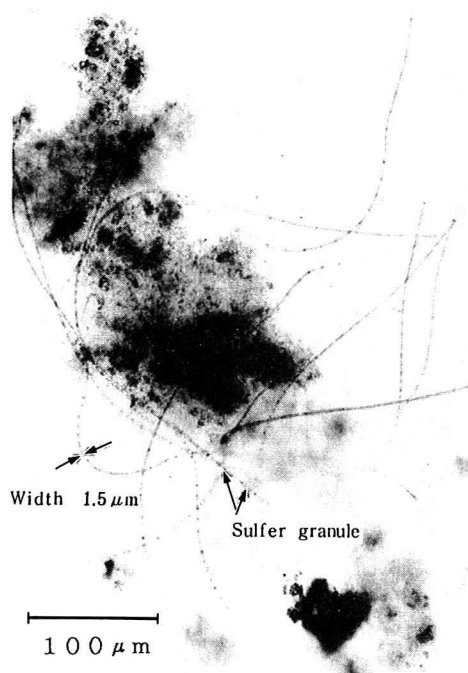


Fig. 6 Microscopic View of Film (*Beggiatoa*)

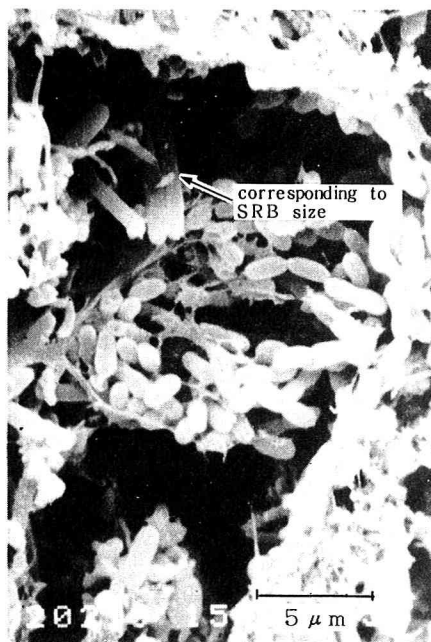


Fig. 7 Inside of SGS by SEM

Table 1 Medium for Sulfate Reducer
Counting

Sodium lactate	3.5 g
Yeast extract	1.0 g
K ₂ HPO ₄	0.5 g
NH ₄ Cl	1.0 g
Na ₂ SO ₄	1.0 g
CaCl ₂ ·6H ₂ O	0.1 g
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.2 g
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.1 g
Agar	15 g
Distilled water	1 l
Sodium Thioglycollate* (1 w/v%)	10 ml
Sodium-L-Ascorbate* (1 w/v%)	10 ml

* Sterilized by filtration

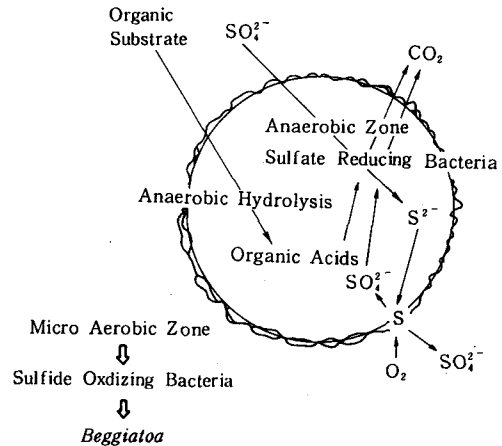


Fig. 8 Mechanism of Self-Granulation

4. プロトタイプMRBの設計条件と処理成績

プロトタイプMRBの設計、運転条件を表-2に示す。本条件は前報¹⁾の運転条件を1987年4月から変更したものである。

ここに示した条件の他、タイマーによって2時間に1度、1分間曝気の停止を行った。これにより曝気槽のエアリフトが切れるため、曝気槽のエアリフト分に見合った水が反応槽に瞬時に移行し、水理的ショックロードにより沈殿した汚泥が再浮上する。(ただし、後述するようにすべての沈殿汚泥が再浮上するわけではない。)1分後曝気が再開されると、反対に曝気槽水位が上昇し、反応槽の水位が下がるため二段目以降の反応槽は一時的に流入が停止するが、上流側より順次越流が再開し、十分間程度で全体の流れが回復する。

処理成績のデータについては、毎週水曜日と金曜日の午前10時に採水し、原則として下水試験法により測定した。余剰汚泥は、流入水と処理水を採取した後、生物反応槽最下部より引き抜いた。MLSS等のサンプルは、余剰汚泥の引き抜き後、各反応槽内の垂直方向に3箇所取り付けられている採取口よりのコンポジットサンプルとして採取した。ただし、汚泥界面が達していない採取口よりは、サンプリングは行わなかった。汚泥が流動化していない場合には汚泥を攪拌して流動化させ、汚泥界面が安定した後、サンプリングを行った。図-9は約1年間にわたるMRBのBOD処理成績、および、水温の変化である。前報¹⁾では、水文学的滞留時間4.5時間の場合、冬季の低水温期においても、処理水BODは平均14mg/ℓであったが、今回、3時間に短縮したところ、冬季において、処理水BODの悪化が見られた。しかし、これは、MRBの限界負荷量を示すとは考えてはいない。なぜなら図-10に示すように、生物反応槽(主に第2、3段目)で、しばしば自己造粒汚泥の

Table 2 Design and Operational Conditions of Prototype MRB

Design Conditions		
Aeration Vessel	φ 10cm,	Depth 2.2m × 5 Vessels
Biological Reaction upper part Vessel	φ 18cm,	Depth 2.2m × 5 Vessels
lower part	φ 10cm,	
Total Volume	213 ℓ	

Operational Conditions (from Apl. 1987)		
Hydraulic Retention Time	3 hour	
Up flow velocity in Bio. Re. Vessel	upper part	4.5cm/min
	lower part	15 cm/min
BOD-Volumetric Load in Bio. Re. Vessel	1.23kg-BOD/m ³ .day	

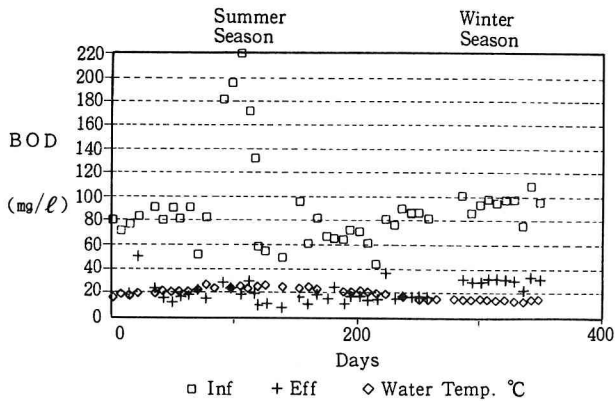


Fig. 9 Influent and Effluent BOD and Temperature in MRB

肥大化が見られ、汚泥の流動が停止してしまう現象が見られた。このため第5段目流入水のBOD濃度が高くなり、好気性の汚泥床が形成されなかったため、好気性生物処理に匹敵する処理水質が確保されなかったものと考えられる。図-11は、1年間の生物反応槽の平均MLSS濃度の推移であるが、非常に不安定なことが分かる。これは、自己造粒汚泥の粒径が経時的に安定していないため、汚泥界面高が変動し、結果的に汚泥濃度も変動するためである。実験でもちいているプロトタイプMRBは、その構造上、攪拌装置などを設置して自己造粒汚泥の過大な成長を制御することが困難であり、より大型の実験装置を用いて、成長の制御方法を開発すれば、生物反応槽の効率はより改善されるものと思われる。

表-3に1987年4月より1年間の運転結果について最大、最小、平均値をまとめた。処理水質は、上述の理由により低水温期の水質悪化があったため満足すべきものではない。

汚泥の存在量に注目すると、第一槽が極端に少なく、第二槽で最大、以下、第五槽に向かい、漸減している。第一槽は、流入水中の固形物の影響を受けるせいか、自己造粒汚泥の肥大化がしばしば見られ、安定した流動化が殆ど起きなかった。

表-3の結果より、全運転期間の平均BOD、D-BOD、SS除去量、および日平均汚泥引き抜き量（いずれもkg/Day）を求めて引き抜き汚泥としての転換率を計算したものが、図-12である。除去SS当たりで、0.43、除去BOD当たりで0.22と、非常に低い汚泥転換率となった。

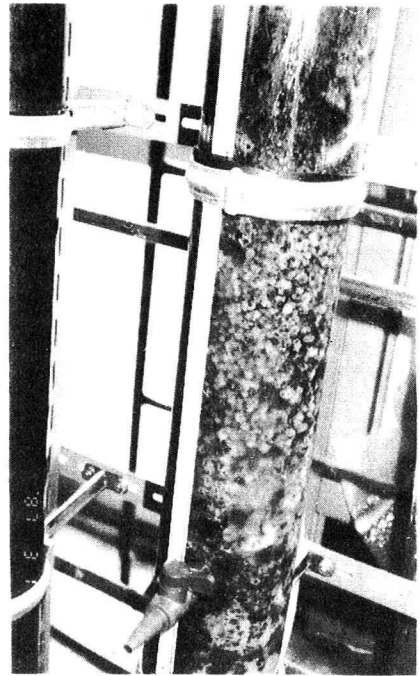


Fig. 10 Excess Growth of SGS (2nd Vessel)

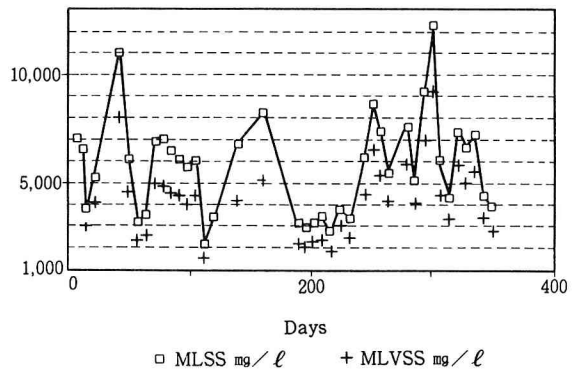


Fig. 11 Ave. MLSS and MLVSS in Bio. Re. Vessels.
(MLSS and MLVSS was Average Concentration in Fluidized Sludge Blanket.)

Table 3 Summary of Operation Result on MRB

		Max.	Min.	Ave.
Inflow rate	ml/day	1.76	1.43	1.71
Temp. °C	In.	26.0	14.1	19.8
	Ef.	29.6	12.2	19.4
pH	In.	7.6	6.8	7.1
	Ef.	7.8	7.0	7.4
BOD mg/ℓ	In.	220.0	45.3	91.1
	Ef.	50.7	7.0	21.8
D-BOD mg/ℓ	In.	91.4	20.8	57.1
	Ef.	27.3	5.4	14.5
SS mg/ℓ	In.	207.0	10.8	44.7
	Ef.	47.6	2.8	10.4
Toshido cm	In.	14.5	4.2	6.9
	Ef.	56.0	5.2	23.7
MLSS mg/ℓ ¹⁾	No. 1 Bio. Re. Ve.	24,720	0	3,710
	No. 2 Bio. Re. Ve.	39,560	2,410	7,664
	No. 3 Bio. Re. Ve.	43,750	2,480	7,583
	No. 4 Bio. Re. Ve.	31,240	1,910	6,924
	No. 5 Bio. Re. Ve.	24,680	1,340	6,023
Sludge Blanket Hight	No. 1 Bio. Re. Ve.	225	13	78
	No. 2 Bio. Re. Ve.	222	6	181
	No. 3 Bio. Re. Ve.	225	15	175
	No. 4 Bio. Re. Ve.	225	45	181
	No. 5 Bio. Re. Ve.	218	0	152
Total Solid in g	No. 1 Bio. Re. Ve.	170.3	0.0	25.0
	No. 2 Bio. Re. Ve.	636.6	6.6	109.1
	No. 3 Bio. Re. Ve.	721.2	6.4	106.7
	No. 4 Bio. Re. Ve.	515.0	33.7	99.3
	No. 5 Bio. Re. Ve.	397.2	0.0	73.9
Total Solid in MRB g		2,297	170	414
MLVSS mg/ℓ	No. 1 Bio. Re. Ve.	14,740	0	1,920
	No. 2 Bio. Re. Ve.	18,260	1,540	4,956
	No. 3 Bio. Re. Ve.	9,110	1,700	4,849
	No. 4 Bio. Re. Ve.	15,820	1,320	4,808
	No. 5 Bio. Re. Ve.	11,720	1,050	4,191
Ave. VS%		81.5	60.7	72.6
Excess Sludge Concentration mg/ℓ		53,710	4,130	28,011
Dry weight of Excess Sludge g		469	57	207

¹⁾ Ave. MLSS in Sludge Blanket (Excluding Settled Sludge)

る。

また、実際の設計、運転管理手法については、実規模に近いパイロットプラントを建設中であり、そのデータの蓄積を図る予定である。

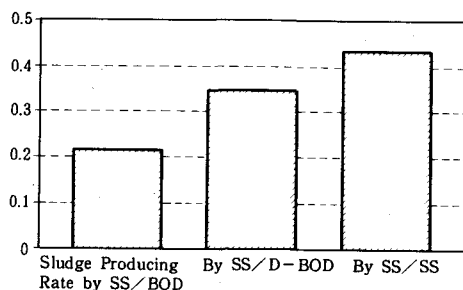


Fig. 12 Sludge Producing Rate of MRB

5. まとめと今後の課題

前報¹²⁾以降のMRBの運転状況をまとめると以下ようになる。

- (1) 前報¹²⁾より、1.5倍の水理学的負荷を掛けたところ、低水温期においてBOD、SS等の処理性能が、かなり低下した。しかし、これは設計負荷上の限界ではなく、実験装置の構造的制約による汚泥の非流動化（それに伴う、汚泥と下水の接触効率の低下）により生じたものと考えられる。
- (2) 汚泥転換率は、除去BOD、D-BOD、SS当たりそれぞれ、0.22、0.35、0.43となり、好気性処理法のそれより、かなり低い値となった。

MRBは、小規模なベンチスケール実験での基本的原理の追求を行うことが、かなり難しい処理装置であり、自己造粒の原理に関してさえ、未だ不明の点が多い。今後は、MRB内の主要な細菌と考えられる、硫酸還元菌、*Beggiatoa*について、純粹系、両者の共存系においてその有機物除去能、収率などを明らかにし、MRB内での役割を推定する必要がある。

6. 参考文献

- 1) 高橋, 京才, 多段反転流式バイオリアクターの開発, 土木学会第42回年次講演会講演概要集, 土木学会, 1987, 9, pp 836-837
- 2) M. Takahashi, Development of Multi-Stage Reversing flow Bioreactor for Wastewater treatment, Proceedings International Conference on Water and Wastewater Microbiology, 1988 2, IAWPRC, pp. 60.1-7
- 3) Leadbetter. E. R., Family II. Beggiatoaceae Migula 1894. 238. In: Bergey's Manual of determinative Bacteriology. 8 ty edition, 1974 Williams and Wilkins Co., Baltimore, pp. 112-115
- 4) 原田, 桃井, 上向流式スラッジブランケット反応器による下水, 生活排水処理, 下水の嫌気性処理に関する調査 (昭和62年度), 建設省都市局下水道部, 土木学界, 1988 3, pp 50-60
- 5) Nelson D. C, B. B. Jørgensen, N. P. Revsbech, Growth Pattern and Yield of Chemoautotrophic *Beggiatoa* sp. in Oxygen - Sulfide Microgradients, Appl. Environ. Microbiol., Vol. 52, No. 2, 1986, pp. 225-233
- 6) 松井, 丹保, 遠田, 高濁水のペレット法による高速処理, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, 第2部, 土木学会, 1987 9, pp. 764-765