

BODセンサーを用いた活性汚泥プロセスの制御

Activated Sludge Process Control using BOD sensor

長塩 尚之*、岡崎 和也**
Naoyuki Nagashio Kazuya Okazaki

*日新電機(株)
電力・システム研究開発部
Nissin Electric Co., LTD
Power & System Reseach Div.

**日新電機(株)
公共システム事業部 開発部
Nissin Electric Co., LTD
R & D Dept.
System Engineering & Control Equipment Div. for Public Sector

Abstract

To control the aeration rate in a sewage treatment plant using the activated sludge process, the influent flow rate or the dissolved oxygen concentration has been used as an indicator, because the influent BOD value could not measure on time. As a result, we have to supply too much air to the water to be sure that the aeration is good enough. Although the BOD value is known to be very important as an index of the organic substance quantity in water, it has been considered difficult to measure it in a short time. So we have developed a BOD measuring apparatus which can obtain the BOD value quickly. Good correlations were obtained between the BOD values obtained by the conventional method and ours using the apparatus. The new control method utilizing our apparatus and the conventional DO time-schedule control method were compared at a sewage treatment plant and we found that the air-volume per removed BOD value was 13% less for our method than the other one.

Key words : BOD, sewage treatment process, control

1. はじめに

活性汚泥法を用いた下水処理の制御、特に送風機の制御については、流入下水中のBOD値をリアルタイムで計測できなかったために、流入水量比率制御のような量的制御、ないしは汚濁負荷の直接的な指標ではないDO値を用いたDO一定制御のような制御しか実現できなかった。このため、安全サイドを考慮して風量を過剰に供給しているのが、現状である。

また、BODは微生物代謝を基準としており、有機物

濃度の指標として非常に重要なものであるが、短時間で簡便に計測する事が困難であった。我々は、1987年に微生物電極を用いた簡便なBOD計測装置を実用化し、その後様々な改良・開発を行ってきた。さらに、本センサーを用いた風量制御システムの研究・開発を行っている。この度、本制御システムに関して、従来制御に比べて効果のあることが確認できたので、報告する。

2. 赤水拡散の基礎方程式

BOD (Biochemical Oxygen Demand) は有機性水質汚濁の代表的指標であり、その測定法はJIS K 0102に定められている。しかしこの方法は、培養に5日間を要し、さらに測定操作は、煩雑で熟練を要するため、水処理設備などのプロセス管理にそのまま適応する事は困難である。

一方、1990年にJIS K 3602で規定された微生物電極を用いたBODセンサーによる測定は、従来のBOD測定とは異なり、試料液の希釈操作や植種操作を必要とせず、さらに迅速な測定が可能のため、トレンド管理や自動計測、さらには自動制御にも応用の可能性を有するものである。^{1)~4)}

2.1 測定原理

バイオセンサーとは、固定化酵素や微生物等の分子認識素子と酸素電極などのトランスデューサーから構成されているものを言い、BODセンサーは、有機化合物の分子認識素子として微生物を用いているバイオセンサーの一種である⁵⁾。

BOD測定用の微生物電極は、微生物膜と溶存酸素電極とで構成されており、微生物電極を有機化合物を含有する溶液に浸漬すると、有機物は微生物膜中の微生物によって資化される (Fig. 1)。

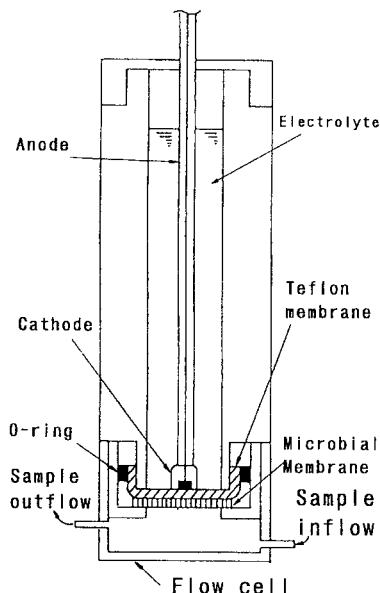


Fig. 1 Microbial Electrode

微生物が有機化合物を資化すると呼吸活性が活発になり、この呼吸活性によって消費される酸素濃度の変化を酸素電極で測定する事により、試料溶液中の有機化合物の量すなわちBOD値を推定する事ができる。

この値をBOD₀と規定している。

2.2 微生物膜

微生物膜は、溶存酸素電極に密着しており、微生物 (酵母菌) を封入、固定化したものである (Fig. 2)。

酵母菌 (*Trichosporon cutancum*) は、膜の長期保存性がよく、資化スペクトルも広いので総合性能で優れていると判断し、本膜にはこの酵母菌を使用している。なお、JIS K 3602にもこの酵母菌は採用されている⁶⁾。

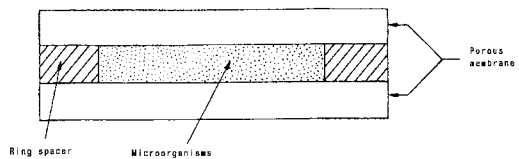


Fig. 2 Microbial membrane

2.3 装置構成^{7)~10)}

BODセンサーは、3つのユニットから構成されている (Fig. 3)。

それぞれのユニットは以下のような機能を有している。

1) 検水切り替えユニット (valve unit)

ここでは、BOD標準液、検水、洗浄水をあらかじめ定められたタイムスケジュールに従ってつぎのセンサーユニットに供給する。

2) センサーユニット (sensing unit)

検水切り替えユニットで選ばれた検水、緩衝液、空気をフローセルに送り込み、酸素消費量に応じた信号を出力するユニットである。

3) データ処理ユニット (computing unit)

データ処理ユニットは、マイクロコンピュータを内蔵しており、検量線の作成とBOD₀値の演算などを行っている。

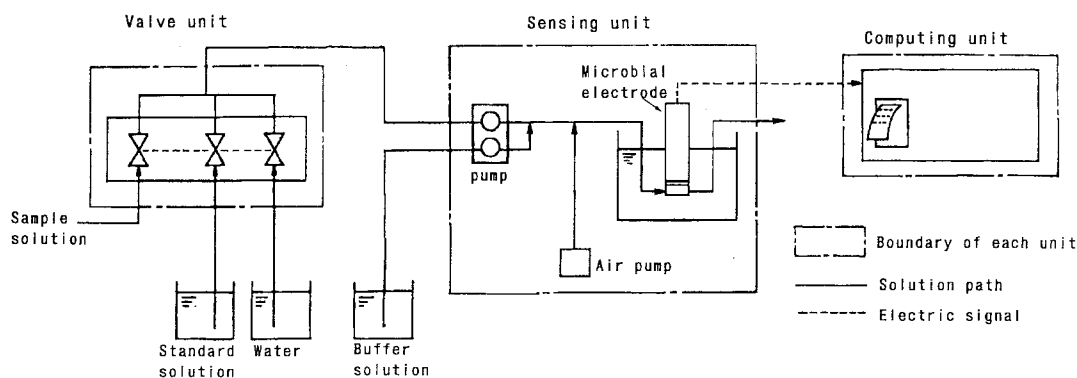


Fig. 3 Schematic diagram of the BOD measuring system

2. 4 応答特性

1) 標準液に対する応答とBOD_s値の測定

JISに規定されたBOD標準液（グルタミン酸グルコース混合液）を注入したときの微生物電極の応答をFig. 4に示す。

この出力電流減少値とBOD標準液の濃度の間には、Fig. 5に示すように、フローセル中のBOD濃度が60mg/Lまで直線関係が得られる（検量線）。標準液の代わりに試料液を注入し、その出力電流減少値を求め、検量線から試料液のBOD_s値を測定することが出来る。

BOD標準液を一定の流速で微生物電極のフローセルに注入すると、約20分で電極出力電流は定常状態になる。その後、洗浄水をフローセルに注入して微生物の呼吸活性を元の基礎呼吸状態に戻す必要がある。この洗浄に要する時間は先のBOD標準液の注入時間に依存し、BOD標準液を5分注入した場合は25分以上の洗浄を、BOD標準液10分以上注入した場合は50分以上の洗浄をそれぞれ必要とする。

2) 周囲温度の影響

微生物電極は周囲温度の影響を受け、35℃以上で使用すると微生物膜の寿命が短くなり、25℃以下では出力が小さくなる。この装置では、恒温槽を設け、外部の気温の影響を受けにくくしている。

3) 純物質に対する応答¹⁾

代表的な生分解性の有機化合物に対する、5日間法手分析BOD値と微生物電極法BOD_s値の比較をTable 1に示す。

短時間では分解しにくいと思われる可溶性澱粉やラクトースは、微生物電極法の方が5日間法よりも低い値を示し、またエタノールや酢酸に対しては高い値を示して

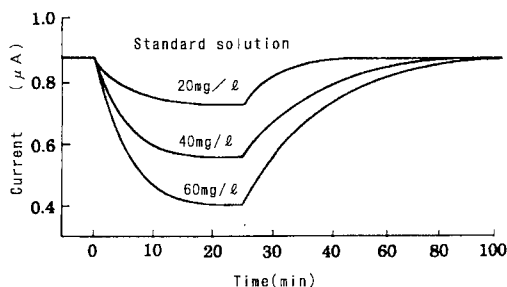


Fig. 4 Response curve of the microbial electrode sensor

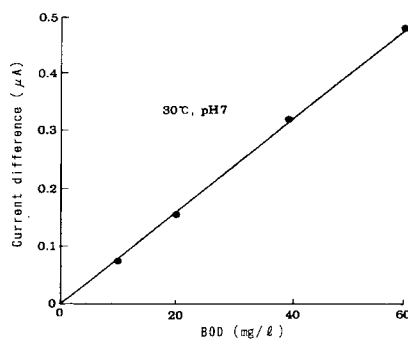


Fig. 5 Calibration curve of the microbial electrode

いる。これは、低分子で細胞膜の透過性が良く、かつ菌体内に分解酵素を有する有機物の場合は高い値を示し、その逆は低い値を示すものと考えられる。

4) 有害物質の影響

代表的な重金属や毒性物質が微生物電極に影響を及ぼす濃度をTable 2に示す。シアンとフェノールを除くと、

Table.1 Comparison between BOD estimated by the microbial electrode and that determined by 5-day conventional method for various pure compounds

Substrate	BOD(g/g)	
	Microbial electrode	5-day method
Lactose	0.06	0.45-0.72
Soluble starch	0.07	0.22-0.71
Citric acid	0.17	0.4
Sucrose	0.36	0.49-0.76
Histidine	0.35	0.55
Glycerol	0.51	0.62-0.83
Fructose	0.54	0.71
Glycine	0.45	0.52-0.55
Lactic acid	0.72	0.63-0.88
Glutamic acid	0.70	0.64
Glucose	0.72	0.50-0.78
Ethyl alcohol	2.90	0.93-1.67
Acetic acid	1.77	0.34-0.88

工場排水規制基準濃度の2倍でも微生物電極に影響を及ぼさない事がわかる。

5) 長期安定性

微生物電極の、繰り返し長期安定性を Fig. 6 に示す。フローセル中のBOD濃度が30mg/LのBOD標準液に対して、約40日間(繰り返し測定回数960回)に亘って安定した出力を示した。

Table.2 Influence of Toxicant

substance	Conc. of Toxic effect (mg/ℓ)	Wastewater regulation standard (mg/ℓ)
CN ⁻ (NaCN)	<1	1
Cd ²⁺ (CdCl ₂)	>1	0.1
Cr ⁶⁺ (K ₂ Cr ₂ O ₇)	>5	0.5
Hg ²⁺ (HgCl ₂)	>0.05	0.005
As ³⁺ (As ₂ O ₃)	>5	0.5
Cu ²⁺ (CuCl ₂)	>30	3
Zn ²⁺ (Zn(NO ₃) ₂)	25	5
Fe ³⁺ (FeCl ₃)	50	1.0
Mn ²⁺ (MnCl ₂)	>100	1.0
Pb ²⁺ (Pb(NO ₃) ₂)	5	1
◎ ⁿ	<5	5

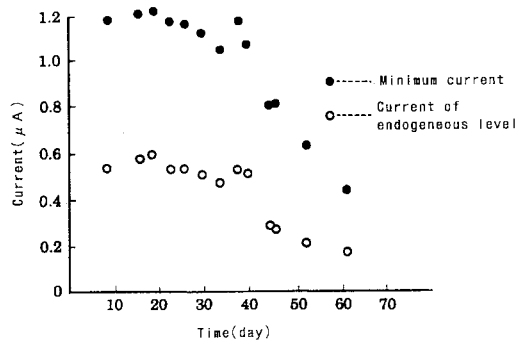


Fig. 6 Reusability of the microbial electrode

2. 5 測定結果例

本装置を用いて各種排水に接続して測定を行い5日間法BODとの比較を行った。一例として製薬工場排水、製鉄工場排水について、微生物電極法BOD (BOD_s)と、手分析5日間法 (BOD₅)の相関を Fig. 7 に示す。

いずれも良好な相関を示している。また、下水処理場曝気槽流入水を対象に行ったBODの24時間の変動を調べたところ、Fig. 8 に示す様にBOD_sとBOD₅は非常に近い値を示した。このように刻々変化する排水に対してトレンド管理も可能である。

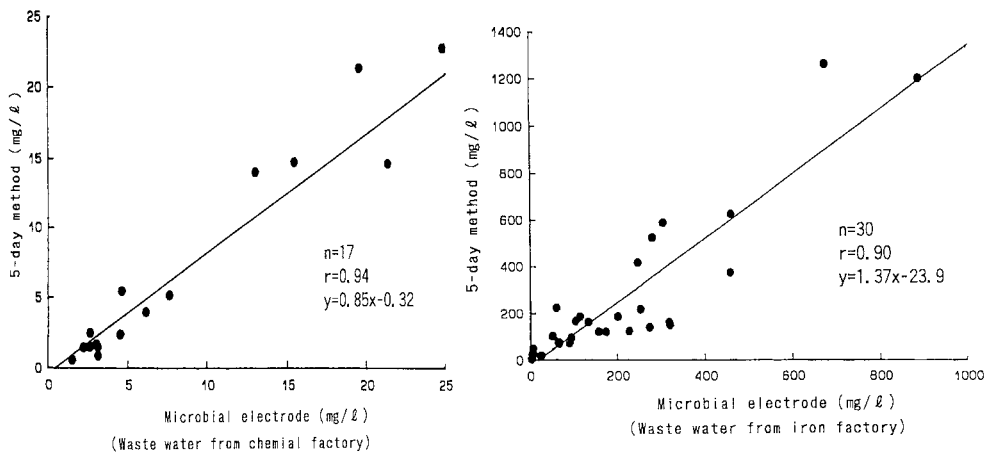


Fig. 7 Comparison between 5-day BOD obtained by conventional method and BODs obtained by microbial electrode

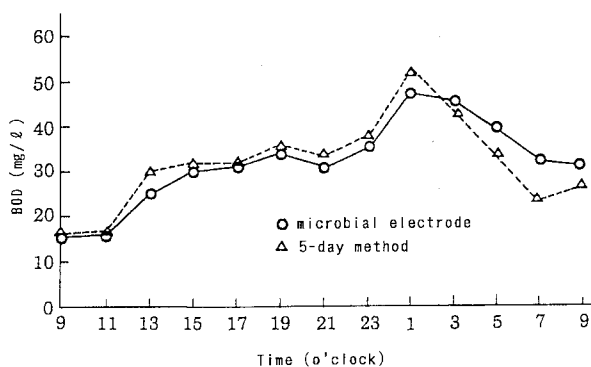


Fig. 8 Comparison between 5-day BOD obtained by conventional method and BODs obtained by microbial electrode (Primary tank effluent from a sewage treatment plant)

3. BODセンサーによる活性汚泥プロセスの風量制御システム

BODセンサーを用いた送風機風量制御のシステム構成及び従来の送風機風量制御のシステム構成を、Fig. 9に示す。

3.1 従来の制御システム

流入水量比率制御については、負荷の高い時間帯の流入水質が処理されて放流される時に、水質基準を守るよ

うに比率を設定しなければならないので、負荷の低い時間帯は過剰曝気となり、省エネルギーという観点からは好ましくない制御方式である。

DO一定制御は、エアレーションタンクの後段でDO値を計測するフィードバック制御である。活性汚泥プロセスの場合、無駄時間が長く、一旦DO値が低下すると回復には時間を要し、DO値が回復した頃にはDO低下を検出した時点の水は十分に処理されずに河川等へ排出されてしまう。したがって、極端なDO低下が生じないように、高い目のDO値を設定しなければならず、結果

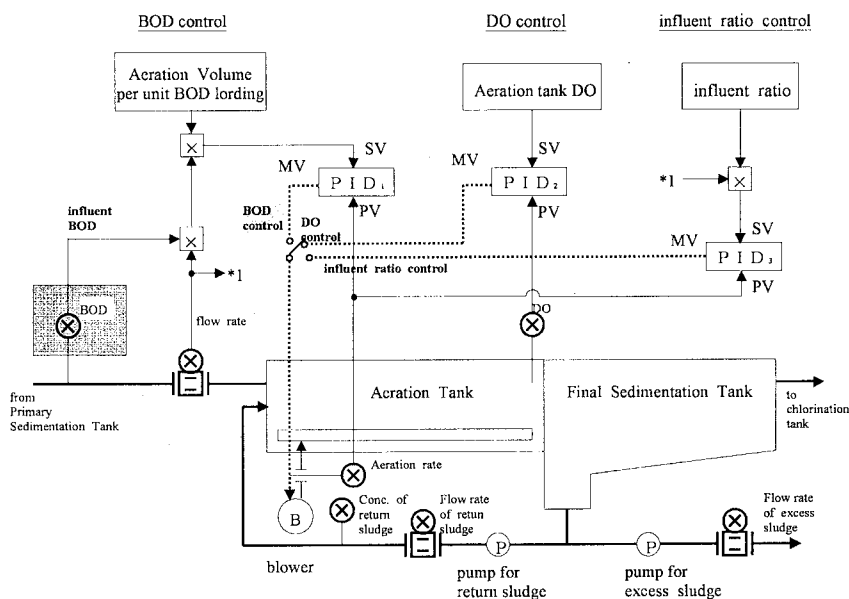


Fig. 9 Aeration Control System

的に過剰曝気となる。

3.2 BODセンサーによる制御システム

本制御システムの特徴は、流入BOD値をリアルタイムで測定している点である。これにより、送風機風量制御に関しては、BOD負荷量に単位BOD負荷量当たりの設定風量乗じ、この風量となるように送風機の風量を調節する制御（BOD負荷量比率制御）のようなフィードフォワード制御が可能である。また、返送汚泥制御に関しても、BOD-SS負荷一定制御が可能である。

今回、送風機の風量制御に関して、流入BOD計測値を用いた制御としてBOD負荷量比率制御を実施した。

4. BOD負荷量比率制御の効果

本制御の効果を予め確認するために、シミュレータを用いて、従来制御（流入水量比率制御）との比較を行った。シミュレータを用いたのは、全く同じ条件（流入流量、流入水質）を設定でき、純粋に制御方式の違いによる処理効果の比較が行えるためである。

その後、実際に本制御をA処理場へ適用した。

4.1 シミュレータの構成

Fig.10にシミュレータの概略構成を示す。シミュレータは、主に下水処理プロセスモデル¹²⁾と制御モデルからなる。プロセスモデルには、外乱として、流入水質・水量を与える。プロセスモデルでは、外乱と制御モデルからの操作量に応じて、演算の刻み時間毎に各地点の水質を演算する。制御モデルでは、プロセスモデルで計算された各種水質値に応じて、制御対象である送風機等の設定値出力を演算し、この値はプロセスモデルの入力となる。プロセスモデル中の動力学定数等は、A処理場の実測値をもとにチューニングしたものをを用いた。

4.2 シミュレーション結果

シミュレーションは、24時間実施した。また、送風機の風量制御の効果のみを比較するため、返送汚泥流量制御・余剰汚泥引抜制御については、全く同一の制御とした。返送汚泥制御は流入水量比率(50%返送)制御、余剰汚泥引抜制御は1時間毎に一定量引き抜く制御とした。また、両制御で処理水質が同程度となるように、流入水量比率と単位BOD負荷量当たりの風量を調整し、流入水量比率を3倍、単位BOD負荷量当たりの風量を25m³/kgBODとした。なお、今回は硝化による酸素の消費の

影響を受けないよう、初期の硝化菌数をゼロとした。

Fig.11に、流入水質・水量を示す。これは、演算の刻み時間の変更に対応できるように、A処理場の2時間毎の実測値をフーリエ級数で近似したものである。Fig.12に、流入水量比率制御とBOD負荷量比率制御を行った場合の、処理水BODと風量のトレンドを示す。また、Table 3に1日当たりの風量、1日当たりの除去BOD重量、除去BOD単位重量当たりの風量を示す。図と表より、処理水BOD値は両制御でほとんど変わらないのに対して、風量に関しては両制御で明らかな差異が見られた。除去BOD単位重量当たりの風量について、流入水量比率制御では30m³/kgBODであるのに対して、BOD負荷量比率制御では23m³/kgBODと、優位な差を確認できた。

4.3 実プラントへの適用結果

本制御システムの優位性を確認するため、実際に本制御システムをA処理場に適用した。本制御システムの優位性は、隣接する別系列で目標DO値をタイムスケジュールで設定し、そのDO値になるように送風機の風量を調節する制御（DOタイムスケジュール制御）を実施し、風量・処理水等を比較することによって、確認した。また、本風量制御を実施した系列では、余剰汚泥引抜制御として、流入BOD計測値と汚泥転換率を用いて発生汚泥量を予測し、それに見合った量を引き抜く制御を実施した。隣接する別系列の余剰汚泥引抜制御は、1時間毎に一定量引き抜く制御であった。Table 4に実プラントへの適用結果を示す。

Table 4の値は、4か月分の日量データを日処理流量で加重平均したものである。データに示されるように、除去BOD単位重量当たりの送風量及び、除去BOD単位重量当たりの電力量で13%本制御の方が有利となった。

また、流入BOD計測値と汚泥転換率を用いた余剰汚泥引抜制御を行った結果、処理水SSを抑えることができた、従来制御より清澄な処理水を得ることができた。

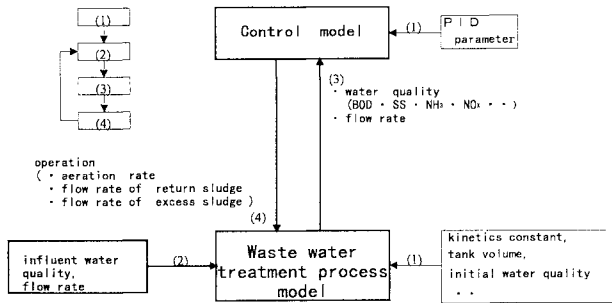


Fig.10 Schematic of Simulator

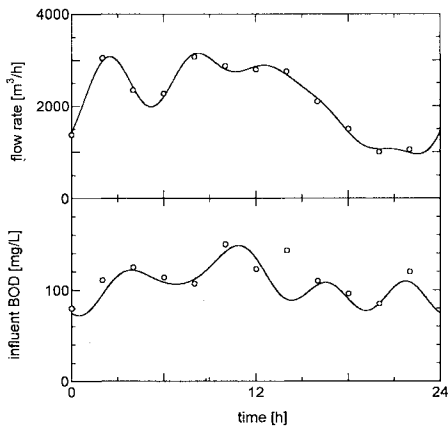


Fig.11 Inflow Water Quality & Water Flow Rate

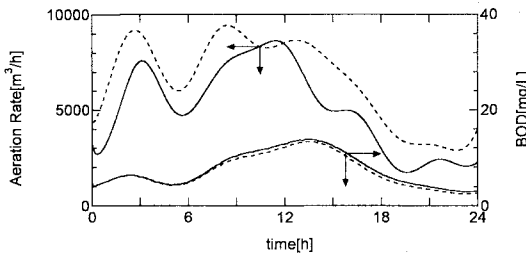


Fig.12 BOD in the treated Water & Aeration Rate
 — BOD control
 ···· influent ratio control

Table. 3 Simulation Results

	Control in proportion to Flow Rate	Control in proportion to BOD load
Aerated Volume [m ³ /d]	157269	122371
Removed weight of BOD [kgBOD/d]	5300	5277
Aerated Volume per removed weight of BOD [m ³ /kgBOD]	29.67	23.19

Table. 4 Control Results

		Control in proportion to BOD loading	DO time-schedule Control
Influent	Flow rate[m ³ /d]	116690	106990
	BOD loading [kgBOD/d]	9888	8568
	SS [kgSS/d]	5376	4296
MLSS		1337	1155
DO		2.1	1.7
effluent	avarege BOD [mg/L]	6.4	6.4
	BOD [kgBOD/d]	672	1104
	avarege SS [mg/L]	1.6	3.8
	SS [kgSS/d]	192	432
Removed weight of BOD[kgBOD/d]		9216	7464
Removed weight of SS[kgSS/d]		5184	3864
Aeration Volume [m ³ /d]		666140	621111
Energy Consumption[kWh/d]		11520	10750
Aeration Volume per removed weight of BOD[m ³ /kgBOD]		72.3	83.2
Energy Consumption per removed weight of BOD[kWh/kgBOD]		1.250	1.440

5. まとめ

BODセンサーを各種排水に接続して測定を行い、5日間法BODとの比較を行ったところ、BOD₀とBOD₅は、非常に良い相関を示した。

また、BOD負荷量比率制御とDOタイムスケジュール制御との結果を比較し、除去BOD単位重量当たりの電力量で、本制御の方が13%省エネルギーになることを確認した。

今後は、本センサの循環変法への適用や、各種設定値を自動的に算出するコントローラの開発を行っていく予定である。

(参考文献)

- 1) 日本工業規格、JIS k 3602(1990)
- 2) 板倉英治：水処理監視用BOD計測器、高岳レビュー、39(4)、239-244、(1992)
- 3) 上野健朗、田中良春、磯部健介：BODバイオセンサ、富士時報、68(3)、171-174、(1995)
- 4) A. Ohki, K. Shinohara, O. Ito, K. Naka, S. Maeda, T. Sato, H. Akano, N. Kato, Y. Kawamura: A BOD sensor using klebsiella oxytoca ASI, J. Environ. Anal. Chem. 56, 264-269, (1993)
- 5) 鈴木周一編：バイオセンサー 講談社サイエンティフィック(1984)
- 6) T. Nishio, T. Yoshikura, N. nagashio, H. Itoh: A BOD Biosensor using Trichosporon cutaneum Isolated from effluent of a sewage tratment plant, J. Water treatment Biology, 33(1), 23-34, (1997)
- 7) 長塩尚之、張田健一郎：BOD迅速測定装置、日新電機技報、35(4)、78-84、(1990)
- 8) 長塩尚之：BOD迅速測定装置、環境技術、19(9)、573-577、(1990)
- 9) 長塩尚之：バイオセンサーを活用したBOD測定装置、P P M、123(12)、(1992)
- 10) 長塩尚之：微生物固定化膜を用いたBODバイオセンサ、計装、39(3)、(1996)
- 11) Bond RG, Straub CP(eds) Handbook of environmental control, 3, 671-686, (1973)
- 12) 藤井滋穂、宗宮功：大規模処理場のシミュレーションモデルによる処理機能解析と管理柔軟性の検討。第27回下水道研究発表会講演集(169)、(1990)

(受付 1997. 6. 30)

(受理 1997. 9. 4)