

回転円板接触法におけるBOD除去機構について

北海道開発コンサルタント 正員 藤嶋 正紀
 “ “ 正員 高畑 征三郎

[1] はじめに

都市下水、有機性排水の高度処理技術としては、活性汚泥法が最も有力な生物酸化処理法とされているが、近年、固定生物膜を利用した処理法が注目をあつめている。中でも回転円板接触法については、多くの研究、開発が行なわれており、①、曝気、汚泥の返送を必要としないので動力費が安く、運転管理が容易である。②、高濃度排水の処理も可能である。③、流入負荷変動に強い。④、余剰汚泥発生量が少ない。⑤、窒素、リンを含めて高度処理が可能である。等の処理効率に関するメリットを持つ処理法として将来が期待されており、種々の設計方法が提案されてきた。しかしながら、各設計法とも十分に整理されているとは言えず、どれを採用すべきかを判断する根拠が明確ではないと言えよう。回転円板法の処理効率に与える影響因子としての実質滞留時間に着目した設計法の開発が叫ばれているが、それはとりもなさず、同法の浄化機構に立脚した設計法の確立を要求したものであると考える。筆者らは、実用規模での回転円板を用いて実験する機会を得たが、これらの実験データを整理した結果、BOD除去が平衡水質を加味した2段階の一次反応式に従うことがわかったので報告する。回転円板法の設計法確立の一助となれば幸である。

[2] 一般的考察

回転円板法の設計手順の第一は、必要円板面積を求めることであり、その設計指標として次のような負荷量表現法が用いられている。

- (1)、BOD面積負荷 …… 円板単位面積当りのBOD負荷量 $BL = (g \text{ BOD}) / (m^2 \cdot d)$
- (2)、水量負荷 …… 円板単位面積当りの1日の処理量 $HL = l / (m^2 \cdot d)$
- (3)、表面積負荷 …… 単位時間の流入汚水量当りの円板面積 $SL = m^2 / (m^2 \cdot min)$

また、回転円板法の慣用の設計法としては、次の三方法がある。(1)

(1)、ペーペルの方法

ペーペルは、多くの実験結果から帰納的に次のような実験式を作りあげた。

$$F_b = Q \times \frac{0.022 \cdot (O_{bk} - O_{be})^{0.44}}{(O_{bk})^{0.44}} \text{-----}(2-1)$$

F_b : 生物付着円板面積 (m^2) Q : 処理水量 (m^3/d)

O_{bk} : 流入BOD濃度 (mg/l) O_{be} : 処理水BOD (mg/l)

後に、石黒はこの式を簡略化し、次のような設計式を示している。(2)

$$F_b = f(F_w) \cdot f(\eta) \cdot f(t) \cdot f(T) \cdot Q \cdot O_{be} \text{-----}(2-2)$$

F : 必要円板面積 (m^2) t : 接触時間 (h)

F_w : 円板浸漬面積 (m^2) T : 処理水温 ($^{\circ}C$)

η : 除去率 (%) Q : 処理水量 (m^3/d)

これらの式は、基本的にはBOD面積負荷決定方式である。

(2) ドイツ、シュテンゲリン社の方法

表面積負荷-BOD除去率曲線より円板面積を求め、BOD面積負荷と流入BOD、処理水BODとのダイヤグラムを用いて円板面積の値をチェックする方法である。

(3) 米国、アントニーの方法

最適流量面積比、最適ステージ数という条件下で、BOD除去は一次反応式に従うとし、水量負荷のみを設計因子として面板面積を決定する方法である。

以上のように、各設計法によって用いる設計負荷量は異なっている。前述の指標のうち、(a)と(b)は互いに逆数の関係にあり、同質のものと思われ、主として(c)、(d)の負荷量が用いられている。(1)の方法はあくまで経験式を基にしたものであり、(2)の方法の根拠については余りよく知らされていない。この中では、(3)の方法が、一応、理論的ではある。(3)の方法によれば、図2-1より必要なBOD除去率に対応する水量負荷を定め、処理水量から円板面積を決定することになる。しかしながら、一次反応であればBOD除去率は流入BOD濃度に無関係のはずであるが、流入BOD濃度が高い程、BOD除去率は高くなっている。アントニーは、この理由として、沈殿池における固液分離の難易や、BOD濃度が低くなると硝化が優先しBOD除去速度が低下すること、算を挙げている⁽³⁾、理解しにくい。ハルトマンは、回転円板法で除去不可能な水質が存在するとして、次式のような変形一次反応式を用いている⁽⁴⁾。

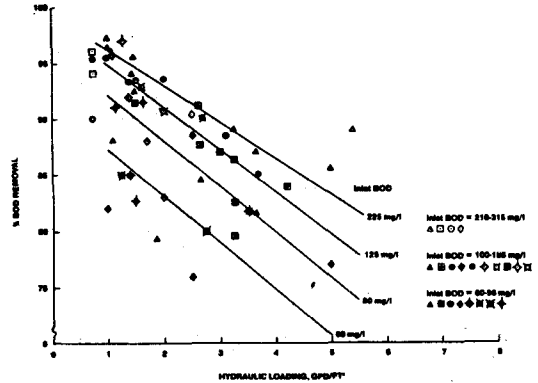


図2-1. アントニーによる設計図表

$$\frac{dC'}{dt} = K \cdot C' \quad \text{-----} \quad (2-3)$$

$$C' = C - C_e \quad K = K' \cdot R_v^{0.4} \cdot C_0^{-0.2} \cdot \left(\frac{L}{W}\right)^{0.25} \cdot G^{-1}$$

K' : 総括反応定数 C_e : 平衡水質 (%) C_0 : 流入BOD (mg/l)

R_v : 円周速度 (m/min) W : 浸漬率 G : $V/(A \cdot W)$ (s/m)

V : 槽実容積 (m³) A : 全円板面積 (m²)

上式によれば、流入BOD濃度によって除去率が変化することが理解できるが、反応定数に与える影響因子が多すぎるからいがある。アントニーが行なったように、各変数の最適値を別の実験から決定し、固定してしまうという方法をとる必要があると考える。

[3] 実験の方法

M市R下水処理場において、初沈後流出水を用いて運転し、実験を行なった。期間は、昭和52年2月～7月の6ヶ月間であった。実験装置のフローシートは図3-1の通りであり、装置の諸元は表3-1の通り。

表3-1. 装置の諸元。設計流量70%のとき。

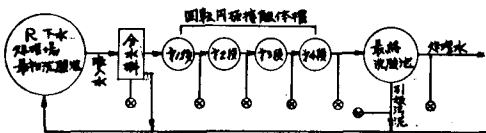


図3-1. 装置のフローシート

項目	諸元	項目	諸元
円板槽実容積	14槽×4槽=5.6 m³	BOD面積/槽	44.6 800/m²・日
円板槽	φ2000mm 厚10mm	負荷/全体	11.1 "
枚数	円板実間隔18mm 50枚×4 = 200枚	水量負荷	58.3 g/m²・日
円板面積	314 m²/槽×4 = 1256 m²	槽滞留時間	28.8分×4 = 115.2分
流量面積比	300 × 4 = 1200	沈殿	沈殿時間 2.91 hr
槽容積負荷	2.5 M/BOD/m³・日	沈	水面積負荷 10 m³/m²・日

サンプリングは、図3-1に示す④印の位置で行ない、各々のユニットの平均滞留時間を考慮して時間をずらせて行なった。また、各槽のBODは、サンプリング後1ℓのメスシリンダーで30分沈降後、上澄水を分析したものである。接触槽での平均滞留時間を1.28, 1.60, 1.92, 2.24, 2.40 分の五段階にからして実験を行ない。

各々の条件で馴化後のデータをを用いて解析を行なった。

〔4〕 実験結果の解析とその考察

(4-1) BOD除去パターンとモデル化

回転円板法における除去効率に与える影響因子は多数存在する。流入条件に関するものとしては、(a) 水温、(b) 汚水の種類と性状 (c) 水量、水質の負荷変動 が挙げられるが、実用規模の装置を用いた実験では水量のみをコントロールするものとせざるを得ない。しかも同法の場合、サンアリングは各ステージ毎に行なうしかない。従って、その浄化機構について検討するためには、多少の強引さも是非としなければならぬ。

図4-1は、今回の実験結果の中から流入BOD濃度がほぼ同じものを抽出し、滞流時間を横軸とし、残存BOD濃度を縦軸にプロットして一般的なBOD除去パターンを示したものである。この図から、1槽以内にBODの大部分が高い除去速度で除去されており、それ以降はゆるやかな速度で除去されていることがわかる。このことから、今回の実験では円板槽の平均滞流時間が約2.5槽であることを考えると、1、2槽は主としてBOD物質の除去に寄与し、3、4槽は低濃度におけるBOD物質の除去およびNH₄-Nの除去に寄与していると考えた。回転円板法では、各槽毎にその浄化度に対応した微生物環境ができあがっているとされており⁽⁵⁾、そう考えても矛盾はないと思われる。

実験結果より、滞流時間が増大してもこれ以上処理しきれないというBOD濃度、即ち、平衡水質C_eが存在すると考えられたので、これを加味した一次式を想定した。即ち、

$$\frac{dC}{dt} = -K_1 \cdot (C - C_e) \quad (4-1)$$

実験結果を水温別に三段階に分け、対数プロットした。図4-2は、水温が18°Cの例であるが、1槽前後を境として二つの反応定数が得られた。表4-1に各水温時における各反応定数を整理しておく。但し、C_e = 10 (mg/l) とする。

初期の反応速度定数をK₁'とすると、(4-1)式は次のようになる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_1' \cdot (C - C_e) \quad (4-2)$$

あるところまで除去されてくると、反応速度定数が変わり、次式で示されるような除去パターンとなる。

$$\frac{dC}{dt} = -K_2' \cdot (C - C_e) \quad (4-3)$$

境界条件、即ち、反応速度定数が変わる点は、前述のように、ある微生物環境を持った1、2槽から、他の微生物環境を持った3、4槽へ変化する時点と考えればよい。従って、(4-2)式に t = t* (境界点における滞流時間) を代入すると境界点では次式が成立する。

$$\frac{(C - C_e)^*}{C_0 - C_e} = e^{-K_1' \cdot t^*} \quad (4-4)$$

(4-3) 式を解き、境界条件を代入すると次式となる。

$$\frac{C - C_e}{(C_0 - C_e)^*} = e^{-K_2' \cdot (t - t^*)} \quad (4-5)$$

(4-4) 式を(4-5)式に代入すると、次式が得られる。

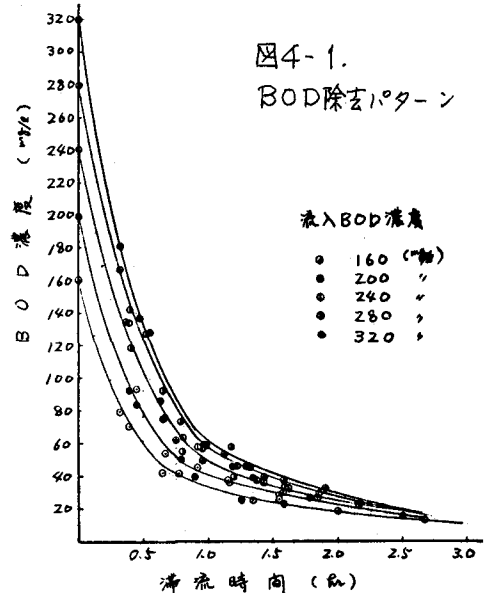


図4-1. BOD除去パターン

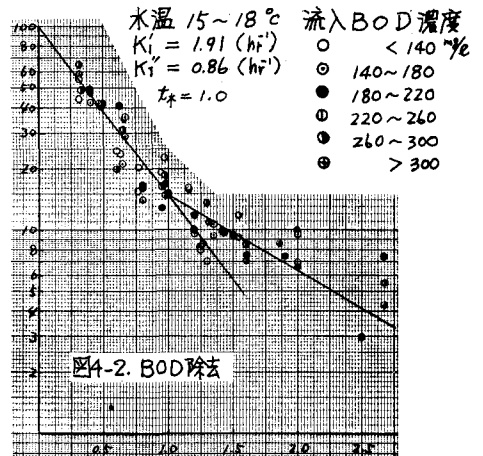


図4-2. BOD除去

表4-1. 反応定数

水温	K ₁ ' (hr ⁻¹)	K ₂ ' (hr ⁻¹)	t*
7~12°C	1.90	0.95	1.0
12~15°C	1.91	0.76	0.8
15~18°C	1.91	0.86	1.0

$$\frac{C - C_e}{(C_0 - C_e) \cdot e^{-K_1' \cdot t_{R1}}} = e^{-K_1' \cdot (t - t_{R1})} \quad (4-6)$$

残存率 r を求めると

$$r = \frac{C}{C_0} = \frac{C_e}{C_0} + (1 - \frac{C_e}{C_0}) \cdot e^{-K_1' \cdot t_{R1}} \cdot e^{-K_1' \cdot (t - t_{R1})} \quad (4-7)$$

但し、 $r = 1 - R$ R : 除去率

となり、BOD除去率は初期濃度 C_0 の影響を受けることになる。

今回の実験結果では、表4-1のように、水温が反応定数に与える影響は定かではなかった。これは、影響因子が水温の他にも存在し、水温よりも支配的であったためと思われる。

(4-2) 定数の決定とモデルの適合性

平衡水質を加味した二段階の一次反応式というモデルの適合性を検討するため、多少乱暴ではあるが、次のような考え方で各反応定数を決定した。

K_1' : 今回の実験期間中、一定であったとして、 $K_1' = 1.9 / (日^{-1})$ とする。

K_2' : 実験結果の平均値として、 $K_2' = 0.86 (日^{-1})$ とする。

t_{R1} : 平均滞留時間の約 $1/2$ と考え、 $t_{R1} = 1.0 (日)$ とする。

これらの反応定数を用い、(4-7) 式に初期濃度 C_0 、接触槽での滞留時間 t_{R1} を与えると、第4槽後処理水のBOD濃度もしくは除去率を求めることができる。結果を図4-3、4-5の実線で示す。プロットは実験結果である。このように、上述の反応モデル式を用いた計算曲線群は、実験値をほぼ包絡的にカバーしている。上述の反応モデル式を用いると、一見不規則に見える実験値を整理した形で整理できる。

処理水の水質は、最終沈殿池の効率により大きな影響を受ける。処理水のBOD濃度および除去率を推定するには、最終沈殿池における固液分離をモデル化する必要がある。今回は単純に、沈殿池での除去率、即ち、第4槽後処理水に対し最終沈殿池ではBODが何%除去されるかということによって沈殿池の効果を評価するにとどめる。実験結果を図4-6に示すが、沈殿時間による影響は定かではなく、今回の実験では、最終沈殿池でのBOD除去率は平均して15%であると仮定した。

前述の反応モデル式を用いた第4槽後処理水の推定結果に沈殿池のBOD除去効果を加えて最終沈殿池のBOD濃度及びBOD除去率を推定した結果を図4-7、8.9の実線で示し、実験結果をプロットで示す。実験結果と推定結果とは、非常によく合致しており、処理水のBOD濃度およびB

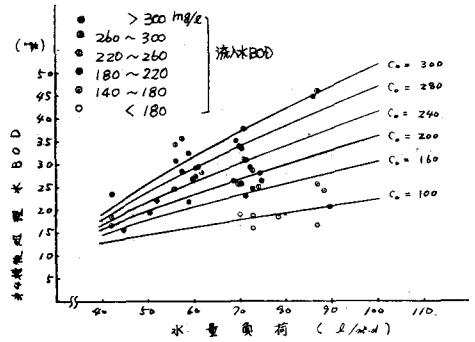


図4-3. 水量負荷と第4槽流出水BODの関係

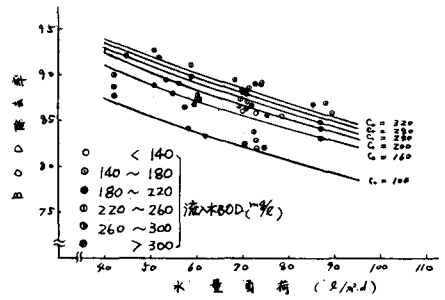


図4-4. 水量負荷と第4槽BOD除去率の関係

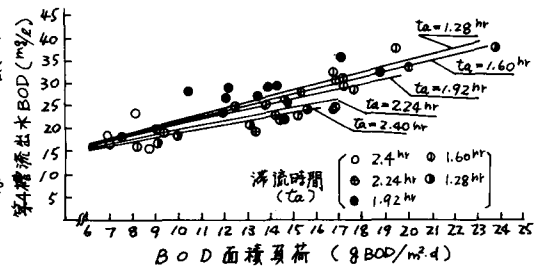


図4-5. BOD面積負荷と第4槽流出水BODの関係

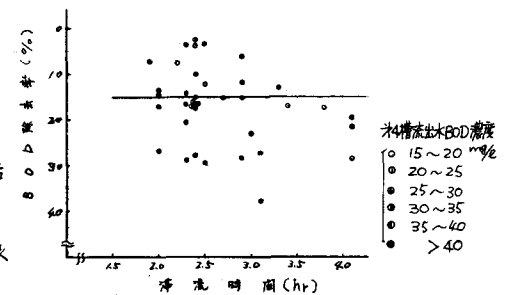


図4-6. 最終沈殿池のBOD除去率

OD除去率を推定するには、ここで提案したように平衡水質を加味した二段階の一次反応式で十分と思われる。このモデルによれば、一次反応であるのにBOD除去率が初期濃度の影響を受けるといふ問題は平衡水質を考慮することで説明することができ、その理由とされている硝化によるBOD除去速度の低下は二段階の一次反応式を考えることで説明することができる。

(4-3) 設計方法に関する一考察

回転円板法のBOD除去機構が、前述の反応モデルで説明できるとすれば、(4-7)式における各反応定数は実験的に求める必要がある。実際には水温、下水の性状、液量面積比(G値)、装置特性、等の影響を受けると考えられる。従って、これらについて系統的な実験を行ない、任意の設定水温時における各反応速度定数、G値と各反応速度定数との関係および最適G値、等を求めておかねばならないだろう。

最適G値、設定水温時での各反応速度定数が求まると、与えられた設計条件を次式に代入することにより、必要な滞留時間を求めることができる。(4-6)式より、

$$\frac{C_0 - C_e}{C_0 - C_e} = e^{-K_1 \cdot t_a} \cdot e^{-K_2 \cdot (t_a - t_*)} \quad (4-8)$$

今、境界点における滞留時間を $t_* = \frac{1}{2} \cdot t_a$ とすると

$$\begin{aligned} \frac{C_0 - C_e}{C_0 - C_e} &= e^{-\frac{1}{2} K_1 \cdot t_a} \cdot e^{-\frac{1}{2} K_2 \cdot t_a} \\ &= e^{-\frac{1}{2} (K_1 + K_2) \cdot t_a} \end{aligned}$$

$$\therefore t_a = -\frac{2}{(K_1 + K_2)} \cdot \ln \frac{C_0 - C_e}{C_0 - C_e} \quad (4-9)$$

一方、滞留時間 t_a は、次式で表わされる。

$$t_a = \frac{V}{Q} \times 24 \quad (4-10)$$

V: 円板槽実容積 (m³)

Q: 処理水量 (m³/d)

Qは設計条件であるので、 t_a が与えられれば、(4-10)式より円板槽実容積を求めることができる。

前述のように、最適G値で設計するので、円板槽実容積が求まれば、次式より必要円板面積が求まる。

$$G = \frac{V}{A} \times 10^3 \quad (4-11)$$

G: 液量面積比 (l/m²) V: 円板槽実容積 (m³) A: 円板面積 (m²)

また、従来、用いられてきたBOD面積負荷、水量負荷、表面積負荷、等の設計負荷量は、以下のように滞留時間および液量面積比(G値)で表わすことができるので、BOD除去機構と設計負荷量との関係を説明することができるようになる。

$$B \cdot L = \frac{C_0 \times Q}{A} = C_0 \cdot \frac{G}{t_a} \times \frac{10^3}{24} \quad (4-12)$$

$$H \cdot L = \frac{Q}{A} \times 1000 = \frac{G}{t_a} \times 24 \quad (4-13)$$

$$S \cdot L = \frac{A}{Q} \times 60 \times 24 = \frac{t_a}{G} \times 60 \times 10^3 \quad (4-14)$$

B·L: BOD面積負荷 H·L: 水量負荷 S·L: 表面積負荷

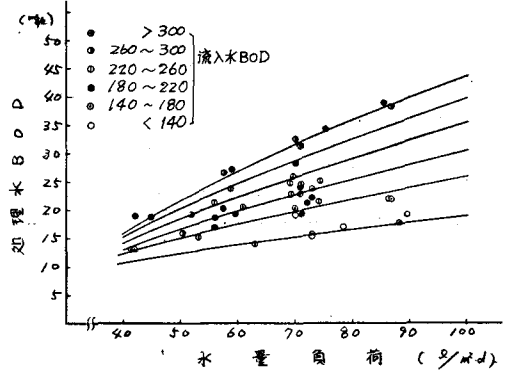


図4-7. 水量負荷と処理水BODの関係

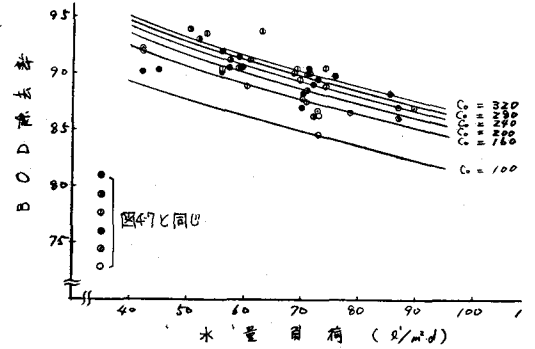


図4-8. 水量負荷と処理水BOD除去率の関係

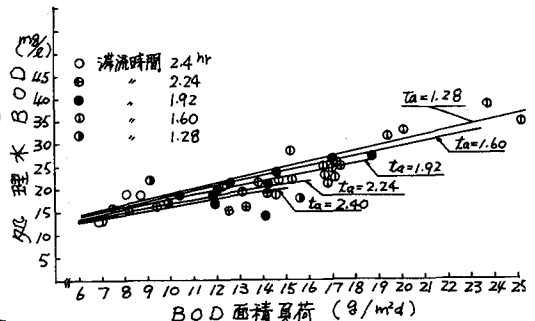


図4-9. BOD面積負荷と処理水BODの関係

これらの設計負荷量の中では、水量負荷が最も簡単で理解しやすいと言えよう。従って、前述のように、(4-9.10.11)式を用いて円板面積、円板槽実容積を求めることができるのであるが、回転円板法設計の際には、あらかじめ、反応速度定数(K_1 , K_2)を用いて水量負荷—処理水BODのダイアグラムを作成しておけば、容易に合理的設計が可能となる。図4-10に設計フローチャートを示しておく。

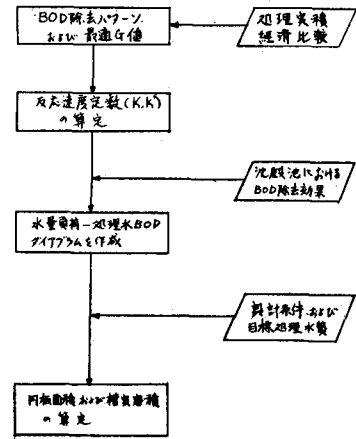


図4-10. 設計フローチャート

[5] 結論

- (1) BOD除去パターンは、2段階の一次反応式で表現できる。
- (2) 平衡水質を加味した一次反応式により、BOD除去率が流入水のBOD濃度に影響されるといふ除去機構をうまく説明することができる。これにより、合理的な設計が可能となる。
- (3) 反応速度定数は、初期 $K_1 = 1.91 (\text{日}^{-1})$ 、才二期 $K_2 = 0.86 (\text{日}^{-1})$ という値が得られた。これらの値は、都市下水に対する活性汚泥法の反応速度定数よりも1オーダー高い⁽⁶⁾。回転円板法が滞留時間を短くすることができるのはこのためである。反面、高濃度領域では水量変動の影響が大きく、滞留時間が十分でないとは水質変動の影響を大きく受けるようになる。(図4-7参照)

[6] 今後の課題

回転円板法の浄化機構に基づいた設計法の確立のためには、次のような点について、更にデータを蓄積する必要があると考える。① 水温と反応速度定数との関係について ② 流量面積比(G値)と反応速度定数との関係 ③ SSの除去機構について ④ 沈殿池におけるSSの除去効率について ⑤ 平衡水質 C_e の吟味 ⑥ 装置特性の把握 等である。これらは、とりもなおさず、今回の実験上の問題点でもあることを胆に命じて、今後の課題とさせて頂きたい。

[7] おわりに

回転円板法が開発されて以来、多くの研究が積み重ねられてきた。同法は、確かに、多くのメリットを持った処理法ではあるが、それが故に、また、多くの問題を有していると考えられる。今回の実験でも、高BOD濃度程、流量変動の影響を受けやすいことがわかった。同法は、活性汚泥法に比べ滞留時間の短い処理法であるので、流量変動に対する緩衝能力は少ないと言わねばならない。設計の際には、十分な検討が必要であろう。

最後に、今回の実験を行なうにあたり、御協力を頂いた関係各位に謝意を表わすとともに、御指導を頂いた北海道大学、丹保教授、神山助教に深謝します。

<参考文献>

- (1) 奥野長晴：回転生物接触法の現状と問題点，用水と廃水，Vol.19, NO.7, 1977, P.799
- (2) 石黒政義：回転円板法による下水産業廃水の二次処理および三次処理，環境技術研究会，研究資料，No.6 P.1
- (3) R.L.Antonie: Fixed Biological Surface-Wastewater Treatment, CRC PRESS (1976)
- (4) 加藤善盛ほか：回転円板法の処理効率特性—合理的設計法に関する考察，第14回下水道研究発表会講演集，1977, P.368
- (5) 須藤隆一ほか：回転円板法における微生物管理，用水と廃水，Vol.19, NO.7, 1977, P.855
- (6) 神山桂一：寒地下水処理に関する研究，北海道大学工学研究科学学位論文