

II-6 回転円板接触体法の合理的設計法に関する一提案

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

生物学的廃水処理方法としては、現在、生物群を流動させる活性汚泥法がその主流をなしているが、近年、固定生物膜を利用した生物処理法が注目を集めるようになった。中でも、回転円板接触体法（以下、回転円板法という）は、負荷変動に強く、維持管理が比較的容易であり、余剰汚泥の発生量が少ない、等多くの利点を持つ処理法として将来が期待されてあり、種々の設計法が提案されてきた。しかしながら、従来の各設計法は、あくまで経験に基づいたもの、あるいは、理論的に不明確な点が多いというのが現状であり、十分整理されているとは言い難い。回転円板法の浄化機構の解明と、それに立脚した合理的な設計法の確立が叫ばれている所々であると思われる。筆者らは、1昨年よりほぼ2年間にわたり、実用規模の回転円板装置を用い実験を行なう機会を得た。この一連の実験のうち、昭和52年度の実験結果より、回転円板法におけるBOD除去が平衡水質を加味した2段階の1次反応に従うことが解ったので既に報告している⁽¹⁾。昭和53年度においては、前年と異なる円板構造、形状を持つ装置を用いて実験を行なった。本報では、これらの実験結果を整理した結果、円板構造の相違に拘らず、BOD除去は平衡水質を加味した2段階の1次反応に従うこと、円板構造の異なる装置間の比較を行なうためには、 $H:L$ 比を用いるとその除去効果をうまくまとめることができ、設計指標として適したものであること、等わかったので、報告する。

[2] 一般的考察

従来、回転円板法の設計の主要目は、必要円板面積を求めることであるとされてあり、そのため、次のような負荷量表現法が用いられている。

- | | | |
|-------------|-------------------|--------------------------------|
| (イ) BOD面積負荷 | 円板単位面積あたりのBOD負荷量 | $B:L = (gBOD) / (m^2 \cdot 日)$ |
| (ロ) 水量負荷 | 円板単位面積あたりの処理水量 | $H:L = l / (m^2 \cdot 日)$ |
| (ハ) 表面積負荷 | 単位時間の流入汚水量当りの円板面積 | $S:L = m^2 / (m^3 \cdot 分)$ |

また、回転円板法の慣用の設計法としては、次の3方法があることは良く知られている。

(1) ペーペルの方法

ペーペルは、多くの実験結果を解析し、次のような実験式を提案した。

$$F_n = Q \times \frac{0.022 (O_{bx} - O_{bl})^{0.4}}{(O_{bx})^{0.4}} \quad \text{----- (2-1)}$$

F_n : 生物付着円板面積(m^2)、 Q : 処理水量($m^3/日$)、 O_{bx} : 流入BOD濃度(mg/l)、 O_{bl} : 処理水BOD濃度(mg/l)

後に、石黒はこの式を簡略化した設計式を提案している。これは、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) 曲線より必要円板面積を求め、(BOD面積負荷 - BOD除去量)、(BOD面積負荷 - 処理水BOD)とのダイアグラムを用いて、所用円板面積をテックする方法である。

(3) アントニーの方法

最適液量面積比、最適ステージ数という条件下で、BOD除去は1次反応に従うとし、水量負荷のみを設計因子として、円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が異なっているが、経験によるところも多く、合理的

な設計法と言ひ難い。こういった設計負荷量を採用するには、装置のスケールアップと円板構造の相違に拘らず、円板単位面積当りの負荷量を基準として行なえるということも明らかにされねばならないが、今のところこの事に言及した報告例は見あたらない。円板構造に関する項目の中で、最も重要なものとして、流量面積比(G値)が知られているが、アントニーはG値が処理効率に与える影響として図2-1に示す結果を報じている。それによると、除去率90%を得るために必要な水量負荷は円板構造によって、67~130%と変化し、例えば設計水量負荷を85%とすると、円板によって除去率は83~94%と変化することになる。また、この図からアントニーはG≧5の円板については処理効率は変化しないが、G<5では処理効率が小さいとして、彼はG≧5の領域の円板について種々のダイアグラムを作成した。従って、G<5の円板について彼の設計図表を用いることは困難であり、各装置毎にダイアグラムを作成しておかねばならない。そこで、設計負荷量の汎用性問題となり、水量負荷を設計指標とすることに疑問が生じることになる。

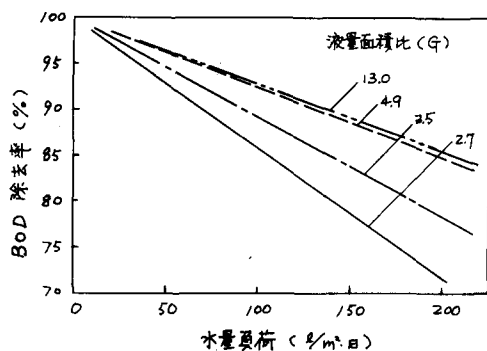


図2-1. BOD除去率とG値の関係
(by. Antonie)

設計負荷量の概念を用いる従来の設計法に対し、加藤、奥野は、回転円板法のBOD除去は2次反応に従うとして、滞留時間を設計の基本概念とした設計法を提案している。

(4) 加藤、奥野の方法

反応速度定数 K_2 値を求めておけば、設計条件および次式から必要滞留時間が求められる。

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C - C_e)$$

但し、 $C' = C - C_e$ 、 C_e :平衡水質(mg/l)、 C :濃度(mg/l)、 K_2 :反応速度定数($hr^{-1}(mg/l)^{-1}$)

筆者らも、回転円板法の浄化機構に立脚した設計法の確立を目標としており、滞留時間と設計の基本概念とすることに同意するものであり、前報⁽¹⁾ではBOD除去は2段階1次反応に従うことを報告した。しかしながら、1次反応にしろ、2次反応にしろ、円板構造と反応速度定数(K)との関係が不明確であり、速度論的な合理的設計法が確立されるには、さらなるデータの積み重ねが必要であるというのが現状である。

表3-1. 装置の概要

[3] 実験の方法

M市R下水処理場において、最初沈殿池流出水を装置の流入水として実験を行なった。実験装置のフローシートは図3-1のとおりであり、装置の諸元は表3-1に示すとおりである。サンプリングは、図3-1に示

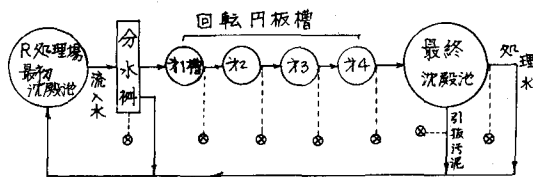


図3-1. 装置のフローシート

		前回の装置(5.52.2 ~8)	今回の装置(5.52.10 ~33.8)	備考
接 触 槽	円板槽容積	1.4 槽 × 4 槽 = 5.6 m ³	1.8 槽 × 4 槽 = 7.2 m ³	
	円板寸法	φ2000 mm 板厚 10 mm 円板間隙 18 mm	φ2000 mm 板厚 15 mm 円板間隙 205 mm	
	円板枚数	50 枚/槽 × 4 槽 = 200 枚	62 枚 × 4 = 248 枚	
	円板有効面積	300 槽 × 4 槽 = 1200 m ²	420 槽 × 4 = 1680 m ²	
	流量面積比	4.67 l/m ²	4.36 l/m ²	流量 70%
	BOD 面積負荷	11.67 gBOD/m ² ・日	8.33 gBOD/m ² ・日	流量BOD 20%
	水量負荷	58.33 l/m ² ・日	41.67 l/m ² ・日	92%
最終沈 殿池	停留時間	29 分/槽 × 4 槽 = 115.2 分	38 分 × 4 = 150.6 分	
	寸法	3 mφ × 1.2 mH		流量 70%
	水面積負荷	10 m ³ /m ² ・日		92%

す印の位置で行ない、各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。各槽流出水のBODはサンプリング後、12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。

[4] 実験結果の解析とその考察

(4-1) BOD除去パターン

前報では、回転円板法におけるBOD除去は、平衡水質を加味した2段階の1次反応式で表現できることを報告した。即ち、

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

C: BOD濃度, C_e : 平衡水質, K_1' : 反応速度定数, t : 時間

BODの除去が進行し、ある濃度になると、反応速度定数は K_1' から K_1'' へ変り、次式で示されるような除去パターンとなる。

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

反応速度定数が変化する時点を t_* とし、(4-1)式に代入すると、境界点では次式が成立する。

$$r_* = \frac{(C - C_e)_*}{C_0 - C_e} = e^{-K_1' t_*} \quad (4-3)$$

r_* : 見かけの残存率

(4-2)式を解き、(4-3)式に代入すると、次式を得る。

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

従って、残存率は次式で表わされることになる。

$$r = \frac{C}{C_0} = \frac{C_e}{C_0} + (1 - \frac{C_e}{C_0}) e^{-K_1' t_*} e^{-K_1''(t - t_*)} \quad (4-5)$$

$$\text{但し、} r = \frac{C}{C_0} = 1 - R \quad (4-6)$$

r : 残存率, R : 除去率

表3-1のように、前回の円板と形状の異なる円板を用いた今回の実験結果に対して、平衡水質を加味した2段階1次反応式というモデルが適用できるかどうかを次に検討した。

図4-1は、今回得られた実験結果の中から、流入BOD濃度がほぼ同じデータを抽出し、横軸に滞留時間、縦軸に残存BOD濃度をプロットして、一般的なBOD除去パターンを示したものである。1R以内にBODの大部分が高い除去速度で除去されており、それ以降の除去速度は比較的低い。

実験結果を水温別に3段階に分け、平衡水質(10%)を加味して対数プロットを行なったが、その1例を図4-2に示す。いづれも平衡水質を加味した1次反応に従っており、円板構造の相違に拘らず、同じ反応モデル式で説明できることがわかった。前回の実験結果とともに、各定数を示すと、表4-1のとおりである。今回の実験結果のうち、低水温時における反応速度定数の低下の原因は、円板構造の欠点によるものと思われ、以下の記述は高水温時(15~20℃)におけるものについて限定する。

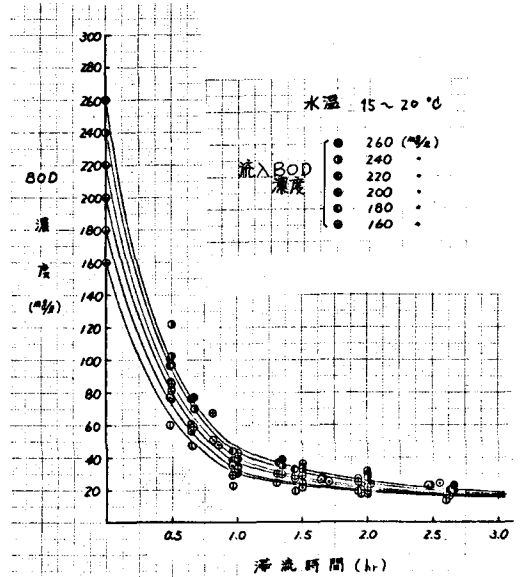


図4-1. BOD除去パターン(高水温時)。

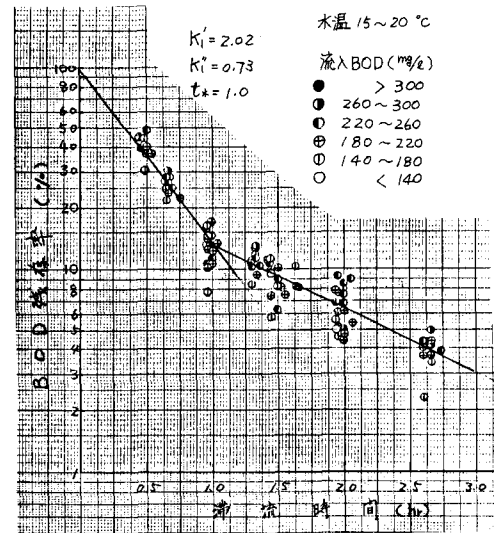


図4-2. BOD除去パターンの対数表現(高水温時)

表4-1. 反応定数の比較

		K_1' (hr ⁻¹)	K_1'' (hr ⁻¹)	t_*
今回の (853年)	(1) 低水温(8~10℃)	1.18	0.75	2.0
	(2) " (8℃)	1.16	0.53	2.0
	(3) 高水温(15~20℃)	2.02	0.73	1.0
前回の (852年)	(4) 水温 7~12℃	1.90	0.95	1.0
	(5) " 12~15℃	1.91	0.76	0.8
	(6) " 15~18℃	1.91	0.86	1.0

(4-2) 反応モデルの適合性

各反応速度定数を用い、(4-5)式に初期濃度 C_0 、接触槽での滞留時間 t_a を与え、第4槽流出水のBOD濃度もしくは除去率を求めることができる。また、従来用いられている各設計負荷量は、以下のように滞留時間および G 値で表わすことができる。容易に水量負荷・処理水BOD、水量負荷・BOD除去率等のダイアグラムを作成することができる。

$$B \cdot L = C_0 \times Q/A = C_0 \cdot \frac{G}{t_a} \cdot \frac{24}{10^3}$$

$$H \cdot L = \frac{Q}{A} \times 1000 = \frac{G}{t_a} \times 24$$

$$S \cdot L = \frac{1}{Q} \times 60 \times 24 = \frac{t_a}{G} \times 60 \times 10^3$$

ここで、 t_a : 滞留時間(hr), G : 液量面積比 = V/A (hr^3)

Q : 処理水量(m^3/d), V : 接触槽実容積(m^3)

このようにして作成したダイアグラムと実験結果とを高水温時について比較したのが図4-3、4、5である。モデル式を用いて計算した曲線群は実験値をほぼ包絡的にカバーしており、整然とした形で整理することができることと見られる。回転円板法におけるBOD除去については、前述の反応モデル式で十分説明することができると思われる。

(4-3) 設計方法に関する一提案

回転円板法の設計方法としては、大別して、各設計負荷量または滞留時間を基本とする2つの方法がある。設計負荷量を用いる設計法については、各設計負荷量の中で最もすぐれていると思われる水量負荷を用いても、円板構造の違いによる除去効率の評価が十分でなく汎用性に欠けることは既に述べた通りである。最近では、各設計負荷量の他に滞留時間もチェックして設計するという傾向になってきているが、浄化機構に立脚した合理的設計法が確立されるに至っていない。ここでは、各メーカーが所有している円板装置ごとに円板構造(G 値等)が異ならざるを得ないという特徴を持つこの処理法に対し、従来から使用されている設計負荷量と比較もしくは設計することの意味について考えることとした。

例として、反応速度定数が同じで、液量面積比 G が異なる2つの円板装置の場合について検討してみる。反応モデル式は平衡水質を加味した2段階1次反応式で表現できるものとし、各定数は次のとおりとする。

$$K_1' = 2.02 \text{ (hr}^{-1}\text{)}, K_2' = 0.73 \text{ (hr}^{-1}\text{)}, t_{*} = 1.0 \text{ (hr)}$$

$$G_1 = 4.36 \text{ (今回の実験装置)}, G_2 = 4.67 \text{ (前回の実験装置)}$$

滞留時間を2.0~3.3 hrの範囲とし、各定数を(4-5)式に代入して計算し、横軸に水量負荷、縦軸に処理水BODをプロットしたのが図4-6である。この図から、各反応速度定数、滞留時間が同じで、全く同じ浄

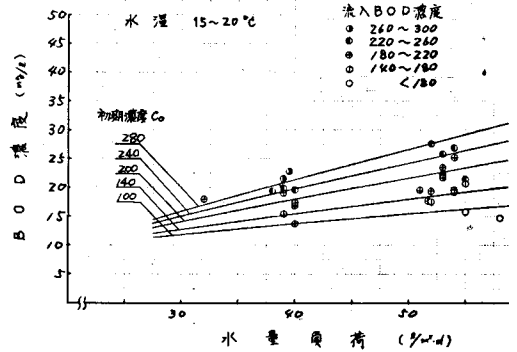


図4-3. 水量負荷と第4槽流出水BOD

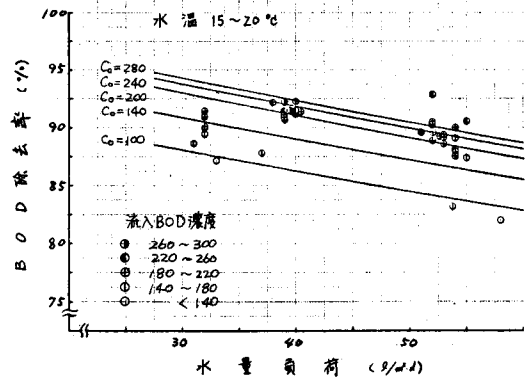


図4-4. 水量負荷と第4槽までのBOD除去率

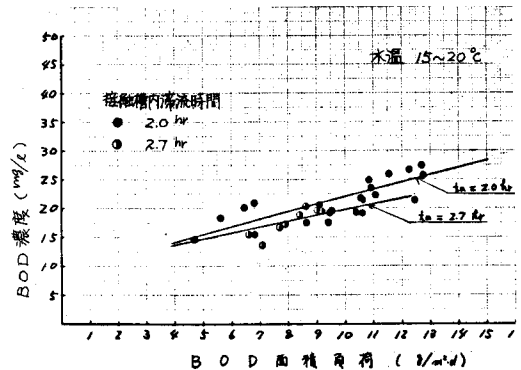


図4-5. BOD面積負荷と第4槽流出水BOD

化効率を持っているに拘らず、水量負荷で表現すると、 G 値が異なるため一見、 G 値が小さい今回の装置の効率が悪くなったように見える。しかし、これらの曲線群をよく見ると、 G_1 だけ互に平行移動した関係となっていることが解る。このことは横軸に他の設計負荷を採った場合についても言える。現在、我國において普及している各メーカーの円板装置の G 値は4~8 %/m²の範囲内であると言われているが、従来の設計負荷と比較すると、約2倍の差があることになり、浄化効率の比較を正しく行なうことはできない。従って、装置の処理特性を表す指標として従来の負荷量を用いる事はさしつかえないが、設計指標として用いるには問題がある。

そこで、円板構造の影響を加味し、浄化機構に立脚した設計指標として、次の指標を提案したい。

$$\frac{HL}{G} = \frac{24}{La} \quad (4-11)$$

HL/G を横軸に、処理水BODの実験値を縦軸にプロットしたのが、図4-7である。図中には、(4-10)式に示した値を用いて計算した結果も示している。この指標を用いると、各反応速度定数が同じであれば、 G 値が異なっても初期BOD濃度毎に1本の曲線で表わされることになり、また、各反応速度定数が異なる場合は、その浄化効率を同列に比較することができるようになる。例えば、水量負荷を基準にすると、流入BOD濃度140mg/l、処理水20mg/lを得るためには、前回の円板装置では63.5 %/m²、今回の装置では59.7 %/m²(比計算値)必要だということになる。しかし、 HL/G を基準にとると、13.7(今回)~13.6(前回)即ち、必要滞留時間は1.75(今回)~1.76(前回)(hr)ということになり、浄化効率にあまり変化がなかったことが解る。

図2-1で示したように、アークはBOD除去率と

液量面積比の関係を水量負荷を指標にして整理したため、 $G \geq 5$ では浄化効率は変化しないと示した。しかし、これを HL/G を指標にして整理しなおすと、図4-8のようになる。 $G = 2.7, 3.5, 4.9$ の場合はほとんど一本の曲線となり、浄化効率が同程度であったこと、 $G = 13.0$ の場合は、極端に効率が低下したことがわかる。このように従来の設計負荷量を指標とすると、装置の除去効率を正確に評価することができず、これは(4-7)~(4-9)式中の各設計負荷量自体の中に G 値を含んでおり、その影響を受けざるを得ないためである。これに対し、 HL/G の指標は滞留時間の逆数という意味を持っており、 G 値の影響を受けるとはならない。従って HL/G は設計指標としても利用性があり、滞留時間を基本として設計することと同じ意味を持つと考えてよい。この指標を用いると、従来の各設計負荷量および滞留時間といった2つの概念を併用してきた従来の設計法に対して、滞留時間を基

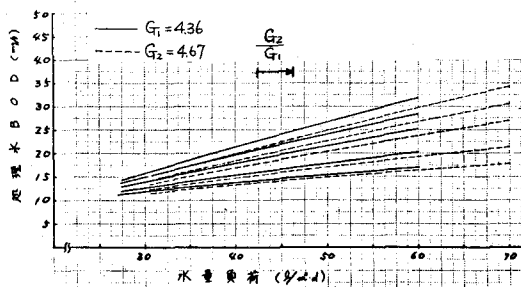


図4-6. G 値が水量負荷 vs. 処理効率に与える影響。

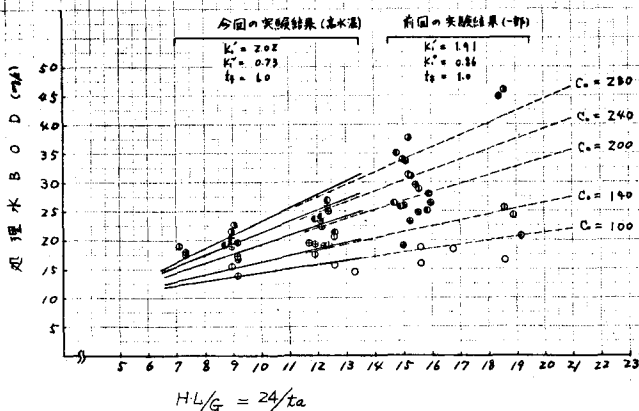


図4-7. HL/G とオ4槽後処理水BOD

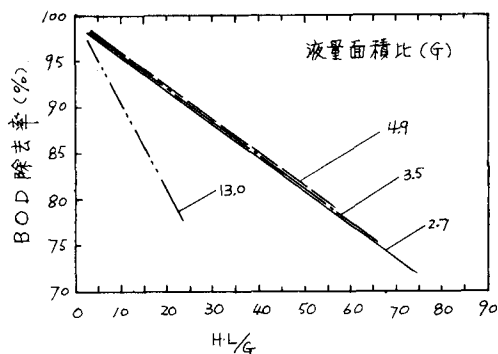


図4-8 BOD 除去率と HL/G の関係

本とした設計法として1つに整理できる。

次に、これまでの考慮はオ4槽後流出水に対し行なったものど、終沈での除去効果は考慮していない。オ4槽後流出水に対し、終沈後処理水はBODで何%除去されるかという事で沈殿池の効果を評価すると、図4-9のとおりとなる。これによると、滞流時間が長い程BOD除去率は増すが、オ4槽流出水濃度にも関係がある。回転円板法における終沈の設計基準は定められていないが、必要滞流時間に応じた除去率を加味した H/L vs. 処理水BODのダイヤグラムを作成しておけば、合理的設計が可能となろう。図4-10に設計フローチャートを示す。更に、 G 値と各反応速度定数との関係が実験的に解明されれば、他の円板装置との比較、スケールアップも可能となろう。

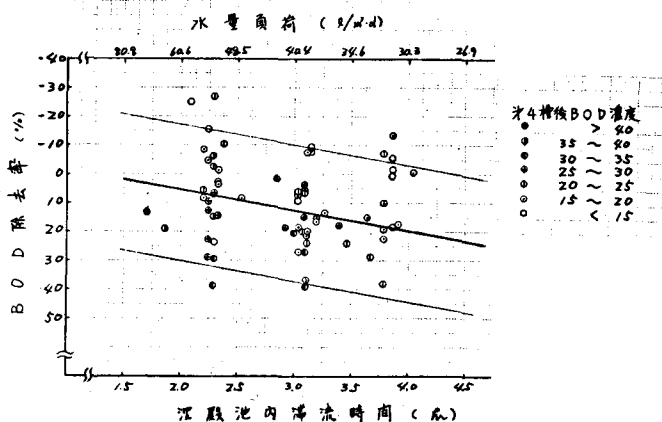


図4-9. 最終沈殿池のBOD除去率

[5] 結論

- (1) BOD除去パターンは平衡水質を加味した2段階の1次反応で表現できる。
- (2) 従来用いられてきた設計負荷量表現法では、円板構造の異なる円板装置間の比較ができなかったが、 H/L を用いると、BOD除去能の正しい評価が可能になる。
- (3) H/L を用いることにより、滞流時間を基本とした設計法として整理が可能であり、浄化機構に立脚した設計が容易となる。

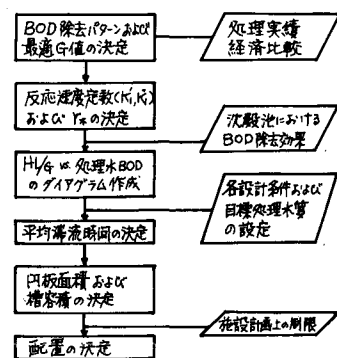


図4-10 設計フローチャート

[6] おわりに。

回転円板法については、これまでに多くの研究開発が積み重ねられてきているが、まだ、未知の部分が多い。中でもその浄化機構に関する研究は最近その端を察したというのが実情であり、設計法についても経験によるところが大きい。従来の実験結果はその実験条件がバラバラであり、比較、整理が困難な場合が多く、合理的設計法の確立を妨げている面もある。今回の2年間に蓄積した実験データから、BODの浄化機構に立脚した浄化モデルを提案し、設計指標を提案し、さらには合理的設計法を提案した。しかし、これらは短期間の実験で得られた限られた資料をもとにしたものであり、不足な点もあると思われる。さらにデータを集積し、発展させたいと願うものである。特に、① 反応速度定数と水温の関係、② 液量面積比と反応速度定数との関係、については今後の重要な課題である。

最後に、実験を行なうにあたって御協力を頂いた関係各位に謝意を表わすとともに、終始御指導を頂いた北海道大学工学部衛生工学教室、丹保教授、神山教授に深謝致します。

＜参考文献＞

- (1) 「回転円板接触法におけるBOD除去機構について」 藤島、高畑、土木学会北海道支部 論文報告集 34号 昭和52年度
- (2) 「Fixed Biological Surface-Waste-water Treatment」 R.L.Antonie, CRC PRESS (1976)
- (3) 「回転円板法による汚水処理技術」 回転円板技術研究会編、山海堂 P.106