特 集

回転円板処理法の効率化に関する研究

回転円板法の二次処理

——米国土木学会，回転円板法委員会報告——

ASCE WATER POLLUTION MANAGEMENT TASK COMMITTEE
REPORT ON "ROTATION BIOLOGICAL CONTACTOR
SECONDARY TREATMENT"

Shanka K. Banerji : Chairman of Task Committee on RBC, Professor of Civil Engineering, University of Missouri-Columbia, -MO, First National Symposium on Rotating Biological Contactor Technology, Session 1, No. 2, February 4 ~ 6, 1980, Seven Springs Mountain Resort Champion, Pennsylvania.

石 黒 政 儀*

足 立 哲 伸**

1. 序論

アメリカ土木学会環境工学部門，水質汚濁管理委員会は，1977年10月に，回転円板法の下水二次処理に関する技術の現状の報告をする実行委員会を設置した。その報告書は，委員会の最終審議を経て本年末に発刊予定であるが，ここに二次草案の主要部を報告する。現在，最も一般的な生物学的二次処理方法としては，散水ろ床法とその改良法，空気や純酸素による活性汚泥法とその改良法，そして，回転円板法があげられる。この報告書は都市下水処理に関する回転円板法の設計，適用や選択における現状を要約したものである。

2. プロセスの概要

本法は，都市下水や各種産業廃水を処理するため，好気性，連続流として設計される。原水中の生物処理可能な溶解性有機成分を微生物や発散ガスに変換し，発生汚泥は終沈で分離される。（図-1，回転円板装置は省略）実装置の円板体浸漬率は約40%で生物膜を下水と空気に交互接触させるため円板体は機械または空

気駆動方式で回転させる。また活性汚泥法の曝気槽上で，円板体を回転させる回転円板活性汚泥併用法もある。短絡流を避けるために，円板体群は各段ごとで隔壁区分され，また，大規模装置では軸直角流で一軸または多段で設計される。各段の微生物量は下水負荷条件で変化し，微生物の大量発生と基質除去は初段で起こり，後段では徐々に減少して炭素除去が行なわれる。硝化作用が期待できる後段では生物膜厚が薄くなり，円板間のブリッジングが起こらないので円板間隔を狭くでき，円板表面積を増すことができる。円板体の回転により，下水は膜上で空中に運ばれ，酸素が液状膜を通して移送される。酸素と有機性基質が生物膜中に液状膜を通して拡散し，微生物の成長や呼吸の目的で消費される。付着液膜中の過飽和溶存酸素は接触槽中の有機物を混合し，下水を曝気する。生物膜に働く剪断力は，過剰の微生物を円板体から定期的にハク離させ，円板間の目詰りを防ぐ。また，このハク離微生物が接触槽から流出し，終沈で沈殿するまで浮遊状態に保つ。要するに，回転円板体は微生物支持体となり，微生物と基質や酸素の接触を確実に行なわせる。（図-2，回転円板法のフローは省略）回転円板各段は，完全混合，固定生物膜，生物学的反応として操作し，汚

* 宮崎大学工学部土木工学科 教授 工博

** 宮崎大学大学院 工学研究科

泥返送を必要としないワンスルー方式である。本法は、長い接触滞留時間（散水ろ床法の8～10倍）を持ち、固定床法よりも動的であり、散水ろ床法とは異なる。また、懸濁性微生物よりも接触機会が多く、返送汚泥の分離と曝気を必要としないので活性汚泥法とも異なる。前者の場合、回転円板法の方がより高い処理レベルを達成でき、後者において、本法は反応槽や沈殿池における水量や有機物負荷の変動には強い。

3. 回転円板法の適用性

本法は、生物分解可能な廃水からほとんどのBODや $\text{NH}_3\text{-N}$ の除去が可能であり、小規模施設から大規模都市下水処理場まで広範囲な家庭汚水に適用されている。また、バター製造所、パン工場、食肉加工工場、パルプや製紙工場、飼料工場、蒸留酒製造所、かん詰工場、精練所や他の有機性産業排水を処理することができる。

4. 回転円板法の機械設備

本法の構造は軸に取りつけた密接する円形プラスチック円板体からなり、軸はベアリングによって支えられギヤボックスを通して電動機に連結されている。プラスチック円板体は波形状のポリエチレンからなり、また、 $\phi 38\text{mm}$ のプラスチックボールに充たされたドラムからなる回転ろ床法もある。その軸はコンクリート、または金属の槽内で2から4rpmで回転し、軸長は、5から20ftであり小型のものは処理水量によって4から12ftである。寒冷時の機能保持のため、出入口と換気口を備えたファイバーグラスで円板体をカバーするか、機械部のみをカバーし建屋内に設置することができる。最近、円板体を空気で回転させる方法も開発された。（図-3、空気駆動式回転円板は省略）本法は、プラスチックカップが円板体全長にわたって円板体外周部に取り付けられている。円板体の真下で軸方向に設置された散気管から空気が放出され、カップでとらえられて回転軸に浮力を与える。円板体外周部にある放射状の経路は波状円板体断面を通して上方へ空気を放出する。定常状態の処理に達するまで、補助曝気と乱流の増加によって円板体速度を減少させることができる。同じ処理効率を得るのに、空気駆動は機械駆動と比べて、必要とする装置が約25%少なくて済む。

5. 歴史的背景（省略）

6. 操作上の特性

下水二次処理の研究に用いる装置は、一般に小規模実験では2～10段、実規模パイロットプラントでは、2～6段である。各段で処理される下水の物理学的、また、化学的時性が変化するため微生物群の生物化学的性質は新陳代謝生成物と同様に大きく変化する。多段の回転円板処理装置におけるBOD、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、溶存酸素、浮遊性固形物質、微生物乾燥重量、pHを図-4に示す。本法で高濃度産業廃水や一般の家庭廃水中に於ける有機炭素は効果的に除去できるが、BOD、COD除去率は採用した水量負荷率や円板段数に大きく左右される。生物分解可能な有機物除去の大半は6段以内で達成されることが図-4よりわかるが、炭素含有物の急速な除去が最初の3段で起こる事も判明する。多段式では除去率が増加するが、これは段数増加によって滞留時間が長くなり、各段の汚水濃度に応じた微生物がそれぞれ生育するからである。BOD濃度が約 $20\text{mg}/\ell$ になった5段までは、アンモニア性窒素が硝酸塩と亜硝酸に変換されていないことが図-4のように現われ、このことは窒素変換の研究で判明した。5段目の前では、微生物による有機性窒素の加水分解で、アンモニア性窒素濃度は流入水よりもわずかに増加する。また、第1段、第2段では、溶存酸素は低く、後段では下水中の溶存酸素量は増加することがわかる。この結果は、微生物の活動が酸素利用によって示され各段でそれらが変化している。急速な酸素の消費のため、1段、2段の溶存酸素濃度は低くなる。廃水が円板表面上で育成した微生物と最初に接触するこれらの段内で、細胞の生育が最も活発に行なわれる事をこれは示唆している。Pretorius,⁸⁾ Pescodら⁹⁾、Sackら¹⁰⁾は各段での定常状態にある生物膜厚の研究で前述の事を確認している。円板体上生育の微生物の種類は主に各段に流入する廃水中の栄養物に依存している。Torpeyら⁷⁾、¹⁰⁾ Pescodら⁹⁾、Sackら¹⁰⁾、Antonieら¹²⁾は、家庭廃水や産業排水処理における各種の操作条件下での円板体上微生物体を決定する実験を行なった。Sackら¹⁰⁾は、4段装置において微生物の外観は1、2段では白いゼラチン状の細片を伴った黒いセンイ質のものから、3、4段では緑がかったブラウンの粘膜の範囲であることを見出した。然し、以上の研究者達によって報告されたこれらの研究に基づく一般の発見は次のような事である。糸状菌やズーグレア菌を含む優先種の微生物が全部の

Figure 4. Effects of Stage Number on RBC System Performance

円板体に発生する。これら2つの重要種を除いて自泳の原生植物 (Paramecium, Cyclidium, Ocomonas, Oxytrichia, Euglena) が前段において各種豊富に発生する。担輪虫 (Epiphanes, Ptoales) また、茎のある繊毛虫類 (Vorticella) 線虫類 (Ethmolaimus) そして環構造をしている真菌類 (Athrobotrys), 藻類 (Coelastrum, Chlorella, Fragilaria, Pinnularia) が一諸に、有機物負荷が低いが微生物の生育を助けるときだけ最後の数段で発生する。回転円板前段で、急速に生長した生物膜は、後段の円板体上に生育した生物膜より厚い。円板体上付着成育のメカニズムは他の微細な有機物が付着できるような一種の骨格組織であり繊維質有機物が実際にそれを形造っている。生物膜厚は各段において繊維状生物群が漸減するため後段程本質的に減少するが、これは各段通過後の下水中の炭素エネルギー、すなわち、有機物量に起因する。Pseudomonas denitrificans と Beggiatoa alba の両者は、円板装置内で窒素やイオウを本質的に摂取、変換する。

7. 操作パラメーター

円板装置の操作とその性能をコントロールする主なファクターは次のようなものである。すなわち、1. 流入廃水基質濃度、2. 下水滞留時間 (または、表面水量

負荷)、3. 下水温度、4. 円板体回転速度、以上のコントロールパラメーターに加えて、本装置の処理効率に影響するものとして、円板体浸漬率、円板表面の形状や円板間隔もまた重要である。然し、プロセスの設計と操作を最適にするために、これら2つのパラメーターは規格化されており、現在の実装置では反応槽内の下水中の浸漬率を全表面積の40%としている。全円板体有効表面積は一般に10~12 ft. の円板直径を用いているが、処理能力の研究では円板直径が比較的小さなパイロットプラントのものが多用されている。

8. 流入下水濃度の影響

各種の水量負荷に対する BOD と $\text{NH}_3\text{-N}$ 除去に関する原污水濃度の影響を図-5, 6 に示す (図-5省略)。これより産業廃水と家庭廃水の処理に対する BOD 除去率と水量負荷の間に線分関係が判明する。然し、BOD 除去率は主に下水の流入 BOD 濃度に左右され、

Figure 6. Effects of Initial Ammonia Nitrogen Concentration on Ammonia Nitrogen Removal At Various Hydraulic Loadings (Initial $\text{NH}_3\text{-N}$ Concentration in Parenthesis)

一定の水量負荷の場合、下水の流入濃度が増せば BOD 除去率は大きくなり、また、生物処理のむずかしい産業排水を処理する場合には、流入 BOD 濃度の増加に伴い、BOD 除去率は低下する。水量負荷率が異なった場合の $\text{NH}_3\text{-N}$ 除去率もまた流入下水特性によって影響される。図-6より $\text{NH}_3\text{-N}$ 9.5~36.0 mg/l の範囲で $\text{NH}_3\text{-N}$ 酸化の割合は、流入 $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度が増加するにつれて減少することがわかり、また、流入 $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度が高い場合、 $\text{NH}_3\text{-N}$ の残存量は、水量負荷の増加に伴い大きく増加する。

9. 下水滞留接触時間の影響 (または、円板表面積負荷)

Figure 7. Effect of Flow Rate & Residence Time on BOD and Ammonia-N Removal

下水滞留時間を変化させた場合の BOD, $\text{NH}_3\text{-N}$ 除去率の関係を図-7 に示す. 処理効率は滞留時間に密接に関係し, 100 分以下の滞留時間では BOD や $\text{NH}_3\text{-N}$ 除去は流量の増加, すなわち滞留時間が短くなるにつれて常に減少する, 滞留時間が 100 分を大幅に越えても基質除去率はあまり増加しない.

前述のように, 本下水処理装置の効率と同様に, 安定性は表面水量負荷率に大きく依存している. パラメーターは普通, 微生物付着単位表面積あたり単位時間水量 (gallon/day/ft²) で表わされ, 滞留時間と逆の関係にある. 円板表面積の増加, すなわち, 水量負荷の減少は基質除去率の増大となることを多くの研究者が報告してきた.^{24) 25) 27)} 基質除去の増加の原因は, より長い滞留時間や基質負荷に比例して円板体表面上

Figure 8. Effect of Hydraulic Loading on BOD Removal

の活性微生物量が増加する為である (低 F/M).

BOD やアンモニア性窒素除去に対しての水量負荷の関係を図-8, 9 に示す. (図-9 省略) Antonie ら,¹⁵⁾ Tucker ら²¹⁾ の研究から, 回転円板プロセスは BOD やアンモニア性窒素に関して, 一次反応で近似でき, それは生物酸化反応率であり, 酸化可能有機物や無機性窒素残存量に比例する. 然し, 基質の除去効率は表面水量負荷率が増加するにつれて減少することが図-8, 9 のように示される. 加えて, 基質除去に関する水量負荷の影響もまた, 温度, 円板回転速度, 段数のような他のパラメーターに左右される.

10. 廃水温度の影響

図-10, 11 に水温と基質除去の関係を示す. (図-10 省略) 炭素, 窒素除去への温度の影響は水量負荷率によって左右される. 図-10 から 55°F 以上では BOD 除去率の増加はあまりない. 然し, 55°F 以上では水量負荷の相異が BOD 除去率に影響する. 水量負荷率が增大すると低温時のようにその影響はさらに大きくなる. 図-11 に温度と硝化の関係を示す. 硝化作用は水量負荷と温度に非常に影響される. 一般に水量負荷 1.0 gallon/day/ft² の場合, 水温 55°F 以下ではアンモニア性窒素除去率は, 水温に大きな影響をうけない. しかし, 1.0 gallon/day/ft² 以上の水量負荷にすると温度低下の影響が大きく, アンモニア性窒素除去率は非常に低下する.

20°C すなわち 68°F の標準温度に対する温度補正係数は, パイロットと実装置で Antonie と Weng が研究した. その結果より, 温度補正係数は, 回転円板各段で異なり温度変動の程度に関係する. 一般に補正係数 θ は ($K_T = K_{68} \theta^{(T-68)}$, T は °F), 55°F よりも高温

Figure 11. Effect of Temperature on Ammonia Nitrogen Removal

の最初の段では約 1.017 に等しい。補正係数は、55°F から 40°F に温度が低下すると 1.017 から 0.645 に減少する。Weng によれば、補正係数 (< 1.017) は 55°F よりも高い水温時でも、最後の数段でみられるという。

11. 円板回転速度の影響

円板の回転速度はあらゆる面で廃水処理効率に影響を及ぼす。それは、微生物と下水との接触、過剰微生物のハク離、廃水の曝気、各段における必要な混合速度などを与える。回転速度を大きくすると、これらの効果が增加する。しかし、最適回転速度があり、それ以上では処理効率はもはや増加しない。この最適速度は廃水の種類によって異なる。すなわち、高濃度産業廃水では速く、低濃度家庭下水では遅くする。

処理性能と円板体回転速度の関係を図-12 に示す。これより、プロセス操作が円板の大きさで分類されねば、BOD、COD 除去に関する回転速度の影響は十分に決定できない。円板直径が 6.5 ft 以上で 2～4 段処理施設では、最適回転速度は約 4.6 rpm、直径 3.0 ft 以下で 4～10 段のパイロットプラントでは、最も効果的な回転速度は 6～10 rpm である。最適速度以上で回転させても性能は増えず、大量なエネルギーを消費する。このように、回転速度は設計時に重要となる。基質除去で酸素律速とならない限り、一定の周辺

速度で任意直径に対する必要 RPM を決定することが、各種の直径を持つ円板体の試験によって判明した。酸素供給律速が存在する有機物負荷条件下では、その毎分当りの角速度は各種円板直径に対して適切な設計要因である。酸素供給を決定する基本要因は、単位廃水量あたりの表面更新率であり、それを決定するのは角速度である。最も主要な要因は、生物膜ハク離力と混合力の 2 つであって、これは周辺速度で直接算出できる。消費動力は、回転速度に対し指数的に増加する。例えば、回転速度を 2 倍にすると、一般に動力消費は 5 倍になる。普通 1.6 rpm の回転、すなわち 60 ft/min の周辺速度のとき実規模装置では、円板表面積 10,000 ft² あたり 2 kw から 3 kw を消費する。この回転速度を大きく増加させることは不経済であり、詳細に言えば、20 年間のエネルギーコストの計算を行えば、1 馬力あたり \$ 2,500 から \$ 5,000 のエネルギーの消費となる。それゆえ、1.6 rpm の回転速度は高濃度廃水処理をするときでさえ、実用上から検討した上限回転速度である。

12. 要約

本報告書は、下水処理に関する円板法の性能に影響を与える要因を論述したものである。本法の性能をコントロールする主な要因としては、流入基質濃度、下

Figure 12. Effect of Rotating Disc Speed on BOD Removal

水滞留接触時間 (すなわち、表面積水量負荷)、下水温度そして円板回転速度である。

謝辞

本報告は、回転円板法に関するWPMCの小委員会によって提出された報告草案から抜粋したものである。本報告草案を作製した委員会メンバーは以下の各氏すなわち、Donald F. Kincanon, Alfred A. Friedman, Ronald L. Antonie, R. Srinivasaraghavan, Ed. Smith, Yeun C. Wu, A. F. Gaudy, Jr., S. K. Banerji. である。この報告の提示を許可された米国土木学会環境工学部門実施委員会に深謝する。

参考文献

- Hartmann, H., "Investigation of the Biological Clarification of Wastewater Using Immersion Drip Filters," 9, Stuttgart Berichte zur Seidlungswasserwirtschaft, R. Oldenbourg, Munich (1960)
- Maltby, A. T., "Process & Apparatus for Treating Sewage & Other Organic Matters", Patented June 23, 1931 U. S. Pat. No. 1,811,181.
- Hardenbergh, W. A. and Rodie, E. A., "Water Supply & Waste Disposal", International Textbook Co., Scranton, PA (1961).
- Imhoff, K. and Fair, G. M., "Sewage Treatment" John Wiley & Sons, New York (1956).
- Antonie, R., "Fixed Biological Surfaces Wastewater Treatment", CRC Press, Cleveland, OH (1976)
- Labella, S. A., et al., "Treatment of Winery Wastes by Aerated Lagoon, Activated Sludge, and Rotating Biological Contactor", Proceedings 27th Purdue Industrial Waste Conference, 803, (1972)
- Torpey, W. N., et al., "Rotating Discs with Biological Growths Prepare Wastewater for Disposal and Reuse", Water Pollution Control Federation Journal, 43, 2181, (1971).
- Pretorius, W. A., "Some Operational Characteristics of A Bacterial Disc Unit", Water Research, 5, 1141, (1971).
- Pescod M. B., et al., "Biological Disc Filtration for Tropical Waste Treatment", Water Research, 6, 1509, (1972).
- Sack, W. A., et al., "Evaluation of the Bio-Disc Treatment Process for Summer Camp Application", EPA Project No. S-800707, National Environmental Research Center, Cincinnati, OH, (1973).
- Torpey, et al., "Rotating Biological Disc Wastewater Treatment Process Pilot Plant Evaluation", EPA Project No. 17010 EBM, Environmental Protection Agency, Washington DC, (1974).
- Antonie, et al., "Preliminary Results of a Novel Biological Process for Treating Dairy Wastes", Proceedings of 24th Annual Purdue Industrial Waste Conference, Purdue University, (May 1969).
- Gillespie, W. J., et al., "A Pilot Scale Evaluation of Rotating Biological Surface Treatment of Pulp and Paper Mill Wastes", Proceedings 29th Purdue Industrial Waste Conference, 1026, (1974).
- Clark, et al., "Performance of a Rotating Biological Contactor Under Varying Wastewater Flow", Journal Water Pollution Control Federation, 50, 896, (1978).
- Antonie, R. L., et al., "Application of Rotating Disc Process to Municipal Wastewater Treatment" EPA Project No. 17050 DAM, Autotrol Corporation, Milwaukee, WI, (November, 1971).
- Chittenden, J. A., et al., "Rotating Biological Contactors Following Anaerobic Lagoons", Journal Water Pollution Control Federation, 43, 746, (1971).
- Borchardt, J. A., "Biological Waste Treatment Using Rotating Discs", Biotechnol & Bioeng, Symp. No. 2, 131, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1971).
- Malhotra, S. K., et al., "Performance of a Bio-Disc Plant in a Northern Michigan Community", Presented at the 1975 WPCF Conference at Miami Beach, Florida
- Hao, O., et al., "Rotating Biological Reactors Removal Nutrients-Part I & II, "Water and Sewage Works", 122, 10, 70, and 11, 48, (1975).
- Allis-Chalmers, "Municipal Sewage Treatment with a Rotating Biological Contactor", EPA Contract No. 12-12-24, Federal Water Pollution Control Administration, Department of the Interior, (May 1969).
- Tucker, A. L., "A Case Study of Ammonia Nitrogen Oxidation Rates in a Biological Rotating Disc System" Master Thesis, Department of Civil Engineering, University of Pittsburgh, (September, 1976).
- Antonie, R. L., "Rotating Biological Contactor for Secondary Wastewater Treatment" Presented at Culp/Western/Culp WWT Seminar South Lake Tahoe, Stateline, Nevada, (1976).
- Antonie, R. L., Kluge, D. L., and Mielke, J. H., "Evaluation of a Rotating Disc Wastewater Treatment Plant", Journal Water Pollution Control Federation, 46, 498, (1974).
- Weng, C., "Biological Fixed-Film Rotating Discs for Wastewater Treatment", PhD Thesis, School of Engineering and Science, New York University, (1972).
- Hartmann, H., "Investigations of the Biological Clarification of Wastewater Using Immersion Drip Filters", Stuttgart Report of City Water Economy, Published by Oldenbourg, Munich, Vol. 9, (1960).
- Poon, C. P., et al., "Rotating Biological Contactors Treat Island's Saline Sewage", Water and Sewage Works, 125, 62, (February 1978).
- Popel, F., "Estimating Construction and Output of Immersion Drip Filter Plants", Eidg. Technische Hochschule, Stuttgart, Germany, (1963).
- Antonie, R. L., Personal Communication (1979).