解説

回転円板法に関する現状と展望

——日本および中国——

石 黒 政 儀*

1. は し が き

環境技術研究協会は1979年11月に回転円板法水処理部会を発足させて、同年第1回の回転円板法研究シンポジウムと同法処理場見学会をも併催し、85年11月に第7回研究シンポジウムを終了した。第7回まで7年間に提出された報文は112編、特別講演は24編に達し国内回転円板処理場見学が7回に及び、さらに海外回転円板法水処理技術調査団を編成し欧米へ4回に亘って実施しており、我が国における本法の研究開発と普及発展に大きく寄与して来た。86年12月末日現在、日本では2,507処理場以上で稼動し、約720,000 m³/dの下廃水を処理するようになった。

回転円板法に関連する内外の現状や動向については筆者が毎年、同シンポジウムや環境技術誌に報告しているの、その歴史的発展過程を知ることができる。本文では第7回回転円板法研究シンポジウムで述べた時点の、85年11月以降より86年12月まで1年間の動向をまとめて報告する。また、86年6月に中国上海市の同济大学・全中国給水排水工程標準技術委員会より招聘を受けて、回転円板法の特別講義で訪中し、円板製作所や同処理場をも調査して来たので、中国の現況についても併せて報告する。

2. 日本における回転円板法実用普及面の現状と動向

1968年に日本最初の回転円板処理場が宮崎県で稼動開始したが、現在では欧米との技術提携や、日本独自の円板体開発によるものなど、円板メーカーは20社以上に達し、処理原水の水量水質と、要求処理水質に応じた円板体を選定できるようになった。また世界最大の円板直径5.0mを開発し稼動させている。

1972年より86年12月31日まで、15年間の日本における回転円板法実稼動処理場数と処理水量を各年、各社

ごとに集計したものが表1である。また同表には、12月末現在での受注をも併記してある。本法は76年から急増し始め、86年12月31日現在で2,507処理場、約720,000 m³/d 以上の下廃水を処理するようになり、世界中で円板処理場数の最も多い国となった。なお、この表1は筆者が日本の各メーカーにアンケート方式で毎年調査して来たものであるが、未回収のメーカーもあるので、実績はこれ以上の処理場と処理水量とになるはずである。同表は円板稼動処理場数の多い順に並べてあるが、これより各社、各年の実績、動向も知ることができる。

表2は1986年12月末日現在の稼動実績値表1を基礎資料として、各処理場の処理水量ごとに分類集計したものである。2,507処理場のうちで、処理水量100 m³/d以下が1,472処理場、全体の59%を占めており、500 m³/d以上が191処理場で約7.0%である。その最大は約70,000 m³/dを処理する大阪府三ヶ牧農業用原水の硝化国際第1号で、円板直径5.0m、軸長8.85m、円板表面積：13,764 m²/軸を持つ世界最大の円板体12軸を用い、85年より稼動開始している。現時点で本法による処理水量の最大は、米国フィラデルフィヤ市ノースイースト下水終末処理場の720,000 m³/d、直径3.6mの円板体280軸を用いたもので、一処理場の規模では比較にならないが、日本の下水道普及率の向上につれて、全体の処理水量も増加するであろう。

表1の実績表を用いて、処理原水の種類別に分類して処理水量と処理場数、および%で示したものが表3である。No.1は福岡県中間市の上水道原水の悪化による、既設浄水場対策で前処理として、特にアンモニア性窒素の除去を主目的とした回転円板上水道原水硝化の国際第1号である。1981年に同市西部浄水場の14,200 m³/dを円板2軸2段、3系列6軸で稼動開始し、84年に唐戸浄水場の19,700 m³/dを4軸4段、2系列8軸で稼動を開始している。さらに新潟県佐渡郡真野町浄水場2,000 m³/dがある。No.2は前述のアンモニア性窒素

* 宮崎大学工学部教授 工博
Masayoshi ISHIGURO

表 1 回転円板法の各社各年実績表

No	会 社 名	処 理 場 数 (各 年 12 月 31 日 現 在)																受 注				
		1972	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	計	処理水量 (m^3/d)	数	合計	総処理水量 (m^3/d)	
1	日本オートロー	1	10	11	8	26	33	37	52	53	36	23	40	33	25	15	403	331,687	11	414	337,817	
2	タ ク マ				4	17	32	34	49	57	53	46	27	16	11	12	358	54,510	1	359	54,542	
3	パシフィック エンジニアリング					7	13	13	22	40	45	44	53	30	29	25	321	35,842	11	332	36,496	
4	栗 田 工 業				2	36	32	36	29	14	16	2	5	1	2		175	23,104	1	176	23,134	
5	積 水 化 学 工 業						10	15	5	8	16	30	37	19	14	13	166	21,571	7	173	26,008	
6	電 業 社					2	2	11	14	24	20	14	16	19	9	19	151	109,679	6	157	110,269	
7	新 明 和 工 業					2	6	18	21	19	23	16	10	9	4		128	11,829	2	130	11,874	
8	テ ク ノ ユ ニ バ ス	3	8	8		16	21	5	7								68	16,668		68	16,668	
9	東レ・エンジニアリング		2	15	7	4	15	1	3	4		5	3	3	1	1	65	8,975		65	9,215	
10	ユ ニ チ カ					1	3	8	9	8	7	6	9	5	5	1	63	13,400	1	64	13,550	
11	神 鋼 フ ァ ウ ド ラ ー									5	6	12	8	12	3	3	57	8,304	1	58	12,304	
12	極 水 プ ラ ン ニ ン グ											2	4	10	13	20	49	8,765	6	55	8,265	
13	昭和エンジニアリング		1	1		2	1	2	4	5	5	2	8	10			44	7,890		44	7,890	
14	関 根 産 業																50	5,545		50	2,507	
15	旭エンジニアリング				3	12	15	6	1	3							40	9,741		40	9,741	
16	松 下 精 工				1	1	7	9	7	2	5	1	1		2		36	4,014		36	4,014	
17	新 潟 鉄 工				1	5	7	8	5	2	2		1	2	1	1	34	19,151		34	19,151	
18	三 機 工 業							1	3	2	5	4	3	1			19	2,219		19	2,219	
19	中 道 機 械										1	2	2	3	4	2	3	17	2,960		17	2,960
20	イ ナ ッ ク ス													1	5	5	5	16	757		16	757
21	明 電 舎						2	1	1		1	2	2	2			11	495		11	495	
22	中 山 環 境 エ ン ジ															5	3	8	2,700		8	2,700
23	日 本 鋼 管							2	1	2			1	1			7	960		7	960	
24	九 州 電 気 工 事										1	3		2			6	1,506		6	1,506	
25	オ ル ガ ノ											2	2	1			5	465	1	6	465	
26	そ の 他				10	25	19	25	12	18	13	19	17	27	22	18	205	18,120	11	216	19,120	
各 年 合 計		4	21	35	36	156	219	232	248	268	264	244	259	218	160	147	2,507	720,857	59	2,566	738,270	
累 計		4	25	60	96	252	471	703	951	1,219	1,483	1,723	1,962	2,200	2,360	2,507	2,507	720,857	59	2,566	738,270	

表 2 処理水量別処理場数(1986 年 12 月 31 日 現 在)

処理水量 (m^3/d)	1～ 99	100～ 299	300～ 499	500～ 999	1,000～ 2,999	3,000～ 4,999	5,000～ 9,999	10,000～ 19,999	20,000～ 29,999	30,000～ 49,999	50,000～ 69,999
処理場数	1,472	700	164	85	60	9	5	7	2	1	2
累 計	1,472	2,172	2,336	2,421	2,481	2,490	2,495	2,502	2,504	2,505	2,507
%	58.7	86.6	93.2	96.6	99.0	99.3	99.5	99.7	99.8	99.9	100.0

表 3 処理水種別分類表(1986年12月31日現在)

No	種別	項目	処理水量 (m^3/d)	%	処理場数	%
1	上水道原水硝化		36,100	5.0	3	0.1
2	農業用原水硝化		83,844	11.6	2	0.1
3	生活廃水系		353,213	49.0	1,352	54.0
4	食品廃水系		55,367	7.7	417	16.6
5	工場廃水系		144,330	20.0	375	15.0
6	清掃事業系		43,727	6.1	314	12.5
7	畜産廃水系		4,286	0.6	43	1.7
計			720,857	100.0	2,507	100.0

による稲作障害対策を目的とする硝化処理場である。さらに同じ大阪府玉島揚水機場で14,076 m^3/d の農業用水を、直径5.0mの円板体4軸を用い、農林省の認可を得て建設完了し、供用開始した。

No.3の生活廃水系は約350,000 m^3/d 、全処理水量の $\frac{1}{2}$ を1,352処理場で処理している。この中で公共下水道特定公共下水道、地域し尿処理施設などが現在まで24処理場稼動し、目下計画建設中の13処理場がある。ま

た農林省所管の農村総合整備モデル事業(モデル事業)農林基盤総合整備事業(ミニ総バ)、農業集落排水事業(集排事業)などで12処理場稼動し、建設計画が7処理場ある。さらに水産庁漁業集落排水処理施設として4処理場が供用開始している。この生活廃水には、住宅団地の合併処理施設、し尿浄化槽、中水道、生活雑排水処理施設など、すべての物が含まれている。なお生活排水系の中で最大は徳島市中央下水浄化センターの63,300 m^3/d であり、直径3.6mの円板体、4軸4段16系列、計64軸を用いるもので、第1期工事として、その $\frac{1}{2}$ を80年9月完成し、第2期工事を85年3月完成したものである。

No.4の食品廃水系は約55,000 m^3/d を417処理場で処理しているが、これは給食、製パン、洗米、水産加工食肉加工、味噌醤油製造、酒造、罐詰、漬物、その他からなっている。

No.5の工場廃水系は約144,400 m³/d(全処理水量の20%),375処理場で処理していて、処理水量は生活系に次いで2位であるが、処理が最も難かしいと云われる、あらゆる種類の工場廃水を処理している。その最大はパルプ工場廃水の20,000 m³/dとなっている。

No.6の清掃事業廃水系は塵芥廃棄物埋立場浸出水と塵芥焼却場廃水の処理が主である。特に社会的問題となっていたのが前者であり、この浸出水は高濃度のアンモニア性窒素を含むため、無処理放流により全国各地で地元民とトラブルを起していた。しかし1976年に回転円板法による硝化、脱窒の国際第1号を宮崎市萩の台塵芥埋立場で稼働させた結果、厚生省認可の下に280処理場で稼働している。これは回転円板法の長所に最も適合した処理水部門とも云える。すなわち、塵芥廃棄物埋立処分場は殆んど山間・海岸部などに設置されており、これには維持管理容易で無人運転可能、そして容易に硝化が進行し、運転動力費も低廉という、本法の長所が生かされるからであり、今後も、この種の処理場は本法によるものが増加するであろう。No.7は畜産廃水系であるが養豚廃水が主体である。表3の処理水種別分類表の処理場数を1979年6月末現在の実績値と比較すれば、生活廃水系の345処理場が3.9倍増、清掃事業系の73ヶ所が4.3倍増、全処理場数844が2.9倍増の2,507処理場となっている。この増加率からも判るように、この7年間に生活系と清掃系が最も増加し今後も、この傾向は続くものと思われる。近年、発展途上国などから円板体の引合いが増えつつあるが、(株)電業社が生活系廃水用として85年10月、ユニチカ(株)が工場廃水用として86年1月に、円板体1軸づつを中国へ輸出し、神鋼ファウダー(株)が4,000 m³/dの工場廃水用として、12軸を87年3月にナイゼリアに輸出した。

3. 日本における回転円板法研究開発の現状と動向

1985年11月より86年10月までに発表された回転円板法に関する論文、報告等は末尾に一覧として、年月順に掲載した通りである。ただし、これは筆者の手許にある報文情報のみで、他に多くの見落としがあると思われるので御了承願いたい。

既設合併浄化槽の処理水(100 m³/d)を回転円板法を用いて脱窒、脱リン、BOD除去を行なった事例報告が文献1)であるが、原水BOD:34が7, TN:40.2が3.5, TP:2.9が0.6(mg/l)の平均値が1年間を通じて得られている。第7回回転円板法研究シンポジウム:

85年11月28日、東京都で開催し、特別講演4編と10編の研究報告が行なわれ、第2日は茨城県土浦市霞ヶ浦浄化センター内にある通商産業省の「定住圏用排水処理機械システム開発」実証プラントの見学を行った。2)~15)、特別講演として筆者の「回転円板法の現状と展望」は84年10月より85年10月までの、日本における実用普及面の現状と動向、円板法をめぐる諸動向、回転円板法研究指導のための筆者の招聘訪韓と韓国の現状、国際水質汚濁研究協会第1回アジア会議、さらに米国における回転円板法に関する調査・研究としてSecond International Conference on Fixed—Film Biological Processesと、84年にEPAから発表されたDesign Information on Rotating Biological Contactors中の計画設計に関する重要14項目の紹介、そして日本の研究開発現状と動向について述べた2)23)。通産省機械情報局井上邦大氏の「小規模分散型排水処理システムの開発—定住圏用排水処理機械システムの開発から—」は、通産省が1980年度から6ヶ年計画で行っている小規模下水道として建設コストの低減、操作の簡便化、保守管理の単純化等を考慮しつつ、地域社会の実情に即応した小規模分散型の排水処理機械システムを緊急に開発するための霞ヶ浦浄化センターにおける実証プラントを中心とした報告である。本プロジェクトのトータルシステムは、大別して搬送、処理、再利用の3システムからなり、それらは更に次のように細分化されている。すなわち搬送システムとして小口径管搬送システム、小中口径管理設機械システム、処理システムとして集落を3種に分類し、①浸漬ばっ気法(50戸、50 m³/d)、②回転円板法(200戸、200 m³/d)、③流動床法(500戸、500 m³/d)の生物膜法3種類のプラントが稼働。さらに高度処理システムとして晶析脱リン法(200 m³/d)、汚泥脱水システム(4tトラックに汚泥脱水機積載集荷)および分散集落処理場の集中的な中央管理システムからなる。再利用システムとしてはコンポスト化システムとメタン発酵システムがとられている。またランニングコストについては動力費、管理費、維持費等が最終的に評価される3)22)。徳島市土木部副部長山城敏男氏の「徳島市中央下水浄化センターにおける回転円板法建設完成の経過と稼働実績」回転円板法による公共下水道処理場として最大63,300 m³/dを直径3.6mの円板4軸4段16系列、計64軸で処理し、85年3月建設完成までの経過と稼働実績を詳細に述べられた。なお、円板体4軸4段1系列におけるBOD面積負荷は13.8g

/m³d, 接触滞留時間は1.2時間で設計され、半年間の実績ではBOD:9.1mg/l が平均して得られている 4) 24). パシフィックエンジニアリング(株), 技術課長歌崎秀夫氏「西独における回転円板法について」: 同社は回転円板法の元祖, 西独シュテンゲリン社と技術提携しており, 日本で回転円板法納入第3位の実績を持ち, 同氏は良く訪独される関係もあって西独の現状を詳しく述べられた。現在, 本法は西独で1,000ヶ所以上稼動し, 20年以上も無事故運転の下水処理場が多くあり, 回転円板法は既に確立された下水処理技術となっている。環境問題を取り上げた緑の党が政界進出して下水道建設ブームとなり, シュテンゲリン社の省エネ円板法は85年中に85下水処理に採用され建設中である。西独では日本のように工場廃水のみでの処理場はなく, すべて下水処理場で合併処理される。1人当り下水量は200l/人・日, 原水BODは300mg/l, 初沈流出の円板体流入BODは200mg/lであり, 処理水BODが20mg/l以下ではBOD円板面積負荷は14~16g/m²・d, BOD15mg/l以下では10~15g/m²・dで設計される。ファンゴマット80の出現で終沈不要が多くなった。円板体使用西独最大のドナウエッシーゲン下水処理場の改善で, 円板体を硝化専用とした。円板厚は6~8mm, 円板間隔は一般用が14~15mm, 硝化用は8mmである。また同社の最大円板体は直径3.0mで円板表面積は5,600m²/軸, 回転数1rpm, 消費電力は約0.8kw, 生物膜厚2.0mmで水面上の汚泥重量は約6.7tonであるがポリスチレンの浮力とキャンセルして運転荷重はゼロとなる。円板体群は上屋の中に納められるが, 最近では周囲の環境との調和を考えて, 上屋材質は木材が使われるようになった 5) 25)。福本は回転円板法の脱窒は全水没であったが, 好気性とと同じく半水没型で密閉カバー型を開発し, 既に10処理場で運転され好結果を得ている6)。酒井啓は移動床砂ろ過装置を用い円板処理水の高度処理として, 終沈流出水ではBOD, SSとも5mg/l以下, 円板出口水ではBOD, SSが7~12mg/lの処理水が得られ, 終沈に相等する性能があると報告7)。小久保は愛知県新城市の生活廃水処理施設(300m³/d)として, 回転円板循環脱窒法(脱窒円板1軸, 硝化酸化円板2軸)の後に, カキ殻をろ材とした接触曝気法を組み合わせ処理場を造り, BOD2, SS4mg/l以下を得ている8)。中山らは羽毛洗浄処理工場での処理水の再利用のため, 回転円板法で処理した後, 砂ろ過を行ないBOD10mg/l前後が得られた, 実験と500m³/dの実例を述べた9)。

岩崎は焼酎蒸留廃液処理に回転円板法を用いたメタン発酵装置での実験結果を報告し, 円板直径50cm各段18枚の5段で密閉嫌気の円板装置で原水COD濃度16,000mg/lを中温消化, 滞留時間10日で約80%の除去率を得, ガス発生量は1.2~1.3m³/kg・TOCであり, 更に実験継続中と報告した10)。鈴木はBOD原水1,500~2,500mg/lの漬物工場廃水処理の8工場で, 処理水質BOD15, 20, 60mg/l以下が得られている事例を報告11)。小林らは中間市唐戸浄水場の前処理として, 硝化回転円板法を用いた設計, 建設, 運転実績を詳細に報告した, 処理水量は19,700m³/d, 直径3.6m, 軸長7.5m, 円板間隔30mm, 円板面積9,660m²/軸, 円板4軸4段, 2系列で計8軸使用, 回転数1.6rpm, 滞留時間40分, 水量負荷216l/m²dで設計され, 84年4月に稼動開始した。1年間のNH₃-Nの原水濃度は2.2~0.3mg/lであるが, 70~74%が除去されて, 処理水の濃度変動巾が均一化され, 塩素注入量も53%削減されている12)。押川は宮崎市木花終末処理場での回転円板法の概要と現状を報告した, この処理場は宮崎大学移転先の新キャンパスを含む宮崎学園都市の公共下水道終末処理場で, 計画下水流量11,600m³/d, 処理水BOD, SSは共に10mg/l以下, 円板体は4軸4段6系列, 24軸, 直径3.6m, 軸長6.0m, 円板面積6,500m²/軸, BOD面積負荷12g/m²dで設計された。1984年9月より宮崎大学農学部のみが移転して来たが, 全体計画の1/2である円板体4軸1系列のみを建設し, 1年間の処理放流水質はBOD, SSとも平均2.0mg/lが得られている13) 27)。江頭は水産庁漁業集落排水処理施設として84年3月に完成した, 福岡県玄海町鐘崎処理場の概要と維持管理について報告し, 計画下水流量800m³/d, BOD面積負荷4.7g/m²d, 水量負荷33.7l/m²d, 円板4軸4段, 2系列, 計8軸を使用している。84年12月時点で処理水量は200m³/dにしかならず, 円板1系列の第1, 2段, 2軸のみを使用しており, 84年9月から85年4月までの平均処理水質はBOD13.4, SS15.8mg/lが得られている14)。小林は横浜市鶴見中継事務所での一般家庭ごみ中継基地廃水の処理事例を報告, 処理水量80m³/d, BOD400, SS370mg/l, 円板直径2.4m1軸4段, 2系列2軸, 円板面積2,820m²/軸, BOD面積負荷5.7g/m²d設計された円板体の次に, 急緩速撹拌槽でPAC投入後, 沈殿放流, 再利用となっているが, 84年4月から85年8月までの平均流入BODは855, SSは717mg/l, 放流水質はBOD7.0, SS10.0mg/l以下が得られている15)。菅原は

農業集落排水処理における今後の問題点を述べ 16), 神戸は農村集落排水処理施設事例として福井県美山町の円板処理施設(120 m³/d)の概要と現状を述べ, 処理水BOD₁₁, SS₁₆が得られている 17). 農村集落排水のための汚水処理技術入門と題する専門書が農業土木学会より京大農学部西口 猛教授監著で出版されたが, 同書には回転円板法も記載されている 18). オランダ, アムステルダム出版社よりMathematical Models in Waste Water Treatment のシリーズ, No. 7としてDevelopments in Environmental Modelling が出版された. 同書の中に回転円板法に関するものとして東京大学松尾, 山本氏の回転円板法における酸素移動過程の数式モデル 19), および宮崎大学渡辺氏の回転円板法における硝化, 脱窒の数式モデル 20), さらに東京工大, 久保田, 藤江, 両氏の生物処理におけるエネルギー消費の数式モデル 21)が掲載されているが, いずれも, 今まで土木学会やIAWPRCで発表された論文の集約である. 石黒は環境技術研究協会回転円板水処理部会が, 1985年11月28日に開かれた第7回回転円板法研究シンポジウムを最後に, 同部会を発展的に解消して, 新しく生物膜研究部会を発足させた意義と目的などを述べている 22). 松重, 田井らは風力エネルギーを利用して発電し, その電力で回転円板法を回転させると言う実験を行っている. その結果は風速が年間平均 4 m/sでいどの所であれば風力発電のみでも, 浄化槽などに必要なエネルギーを十分まかなえるとしている 29). 西口は前年度に引き続いて, 円板体に薄鉄板を用い汚水中に溶出した鉄イオンがリン酸イオンと結合して難溶性のアルモファスを形成し, これが生物膜はく離汚泥と共に沈殿除去される. この場合リン酸鉄などのアモルファスを含む汚泥は比重が大きくなり, 高率の脱リンと共にSS除去率も向上すると, 報告している 30). 渡辺らは宮崎大学工学部紀要に硝化, 脱窒の動力学をまとめているが, 文献 20)と同内容. 長野県野沢温泉村と熊本県宮原町は, いずれも回転円板法で公共下水を処理しており, 両者での下水道完通後の水洗化向上の事例を報告している 32)33). 第20回水質汚濁学会, シンポジウム〔2〕生物膜法の処理特性およびその技術・プロセス開発, において13編の報告がなされているが, 円板法に関連する物は次の4編であろう. すなわち, 黒田らは基質の生物膜表面でのフラックスがモノー式と同型の式で表わせるとして, 式中の飽和定数と付着生物量との関係を示した 34), 西留らは半水没型好気性円

板装置の円板生物膜表面付近にDO電極を装着して, 生物膜内部におけるDOの変化や濃度を実測し, 全円板付着生物膜表面での平均酸素フラックスを求める式を提示し, 定常状態における半水没型回転円板での基質酸化速度の定量化が可能とした 35). 国安らは生物膜によく出現する貧毛類と輪虫類を選んで, 浄化特性に及ぼす役割として, 輪虫類Philodinaspは分散状細菌を摂食して細菌の凝集化をもたらし, 貧毛類のAeolosoma hemprichiは凝集菌体の摂取によるバイオマスの減少と再分散化を進めると報告している 36). 黒田らはメタン発酵に関係する種々の菌体について, 菌体の形態的特長, 膜形成過程を電子顕微鏡で視察し, さらに種々の基材に対する膜形成および固着量なども検討している 37). 増田らは円板生物膜内の平均的な硝化, 有機物酸化活性度を飽和関数とロジスティック関数で表示し, 硝化, 脱窒同時反応のシミュレーションを行い, この反応の定量化ができるようになった 38).

土木学会西部支部研究発表会で筆者の研究室から7編の論文が発表された. それは, (1)円板付着生物膜の生物活性に関する研究で, 細菌活性の測定と膜の電子顕微鏡観察により, 膜の密度, 深さ方向の硝化, 有機物酸化, 脱窒の定量化が可能となった 39). (2)円板表面上に微細突起を取り付け, 拡散層厚を薄くして物質移動を促進させ, 円板回転速度を上げなくても, 除去率が高くなる事を実験的に確証した 40). (3)円板処理装置として, 円板体の底部にイムホフ槽を設けて運転すれば, 反応槽直下のイムホフ沈殿槽にSSは沈降分離され, 固液分離が効果的である 41). (4)原水BOD: 48,000mg/lの焼酎廃液の処理に, 回転円板メタン発酵を実験的に行ない, 原水10倍希釈のBOD4,800mg/lに対し中温の24時間滞留で90%の除去が可能となった 42). (5)回転円板法によるメタン発酵での, 生物膜内メタン生成速度を水温37° 28° 20° 15°C について実験し, 温度の依存性を明らかにした 43). (6)(7)回転円板法による都市下水のメタン発酵処理に関する第4, 第5報であるが, 水温35°Cと20°Cに対する総括物質移動係数を実験的に求め, 液本体のTOC濃度とフラックスの関係をも数式化された 44)45). 山田らは円板処理装置の基質消費速度に及ぼす酸素移動係数の影響, と題し, 円板枚数と接触槽形状の異なる2装置を用いた実験と理論解とを第1報として報告している 47). 竺は地域的な小規模の下水処理について概括的に述べ 48), 須藤は生活雑排水に関する技術的諸問題として,

各種の処理方式を論述している 49)。柳らは中小規模下水処理施設として処理方式の選定に当って、6種の処理方式の敷地面積、建設、維持管理費の数値比較を行なっている 50)。洞沢は浄化槽の単独処理と合併処理について、活性汚泥法、散水ろ床法、接触曝気、回転円板法の4法をとりあげ、特性上の差異を論じている 51)。亀岡らは豚舎排水のメタン発酵消化処理法として、活性汚泥法、回転円板法、浸漬ろ床法を用い比較実験を行ない、円筒状内に網目ろ材を入れて槽内で回転させる、可動式浸漬ろ床装置を用いたものが良い、との結果を得ている 52)。砥上らは回転円板付活性汚泥における下水の窒素、リンの同時除去について、の第4報を報告しているが、これは81年より福岡市で実験が行なわれており、嫌気脱窒槽で脱窒とリン放出、回転円板付活性汚泥槽でBOD除去と硝化を行なう循環方式の組合せで、バイオブリッド法と呼ばれその結果は高く評価されている 54)。須藤は新しい小規模処理技術開発の動向を述べ、対策と選択のあり方について論じている 55)、さらに須藤らは湖沼水質保全のための生活雑排水対策として、対策のあり方、発生源対策と処理技術を述べ、効率的生活雑排水の処理技術開発と普及を急ぐべきとしている 56)。石黒は86年6月に回転円板法特別講義で訪中した報告をしている 57)。大嶋は米国の水処理技術事情として、下水処理法別の処理場数を表示し、84年現在で回転円板処理が347、2,000年までに新規採用予定が276処理場あり、米国での高度処理場の過半数は、硝化を目的とするものであると解説している 58)。

4. 中国における回転円板法の現状と展望

外国の環境問題や下水道問題などを論評することは非常に難しいが、特に情報不足の近隣諸国において甚しい。筆者は幸運にも1985年6月、韓国科学技術庁の招きで、回転円板法の特別講演で訪韓して、同国における現状を見聞し、それは既に環境技術誌上で報告した。中国に関しては散文的なものしかなかったが、筆者は1986年6月2日より16日まで「回転円板法による廃水処理の原理と応用」を講義の主題目として、上海市の同济大学、上海市政工程設計院、全中国給水排水工程標準技術委員会の招聘により訪中する機会を得たので、中国における下水道や、回転円板法の研究普及の現状をも知ることができた。

今回、訪中の機会を造って載いたのは同济大学環境工学科の邓培德助教授である。邓助教授が1980年に初

めて筆者に論文送付の依頼を受けてからであり、82年から回転円板法に関する本格的な論文送付が始まった。そこで拙著「生物膜法」を送付したが、同氏は、その第4章回転円板法135頁を全訳され、それ以来、中国初めての回転円板体の製作、実処理施設の建設など、多くの研究、指導の成果を上げておられる。今回の招聘は前述の三者であったので、これらについて略述すると、次の通りである。すなわち、同济大学(Tongji Daxue)は1907年創立で工学主体の大学で、西独科学技术導入センターでもある。教職員数4,000名で全在学生は14,000名、キャンパス面積は70haである。学科(工程系)は環境工学、道路交通工学など18学科からなり、さらに、これらは40講座からなり上下水工学、環境工学、環境計測工学に分かれ、土木建築系が20講座を占め、大学院修士課程が29専攻あり、博士課程は環境工学、都市計画設計、都市工学、土質工学、地震耐震工学、構造工学、無機非金属材料工学、建築設計、海洋地質学の9専攻からなり、土木系が6専攻で、この大学は土木工学系が最も充実している事を示している。また環境保全科学技术研究所などの6研究所と、国内の水処理施設製作所や上下水処理場などと連携技術研究を行なう水処理技術開発センターが併設されている。環境工程系は学部学生が500名、院生約40名が現在在学中である。上海市政工程設計院(Shanghai Municipal Engineering Design Institute)は、上海市市内の組織で1954年設立され、職員数は800名であり、給水工程、排水工程、橋架工程、道路工程、防洪工程からなっている。全国給水排水工程標準技術委員会(China Water & Sewerage Engineering Standard Technology Committee)は、全中国の上水道、下水道施設標準化を行なうため1985年8月に発足し、委員長、副委員長と委員36名よりなり、各大学と北京、上海市の市政設計院、各省の環境部門専門家などで組織されている。85年から87年までの事業要項として、学術活動の積極的展開、給水排水標準指針決定、外国給水排水学術団体との関係強化、学術的国際交流活動化、国内実施建設面指導、常用技術語定義標準化、室外給水排水設計基準確立、諸外国標準指針翻訳導入などからなっており、本委員会は積極的に学術技術面を国外にも眼を向け、中国の上下水道の水準を高める事も重要な任務の一つとしている。

今回の訪中半月間の計画案配表は詳細に作られており、月～金曜までは午前中、同济大学環境工学科で講義、午後は聴講生、市政設計院、同济大学環境工

学科との質疑応答，座談会および上海市と周辺の下水工場廃水処理場の視察助言となっていた。講義は「生物膜法概論と回転円板法による汚水処理の原理と応用」であったが，聴講生は大学，研究機関の教官，研究者，院生，設計者，各省市の代表技術者など約60名（20％は女性）で，極めて熱心に聴講された。講義の最終日は質疑応答および日本の回転円板法研究会から別送して載いた円板各社のパンフレットは詳しく説明して喜ばれた。さらに筆者自身が撮影したフィルムを含め，6本の8ミリは日本・米国・西独の回転円板法に関する貴重なもので，約3時間上映し，非常に好評を得た。ただし中国の大学等では16ミリ映写機はあるが8ミリは皆無である。

全国給水排水工程標準技術委員会は日本の下水道施設設計指導と解説に類似した室外排水設計規範を86年6月に作製したが，その第5節が生物膜法でⅠ一般規定，Ⅱ生物池（散水ろ床法），Ⅲ生物転盤（回転円板），Ⅳ生物接触酸化池（接触酸化法）に分類され，22条に亘って説明している。回転円板法は12～18条の7条あって，円板段数2～4段円板間隔は前段が25～35mm，後段10～20mmを用いること，円板回転周辺速度は15～18m/分，設計負荷として一般的には， $10\sim20\text{g}\cdot\text{BOD}_5/\text{m}^2\cdot\text{日}$ 円板表面水力負荷は $90\sim180\text{l}/\text{m}^2\text{日}$ を採用すること，と規定してある。上海市より150km離れた無錫市（人口100万人）にある無錫第4機械工場を6月7日に訪問したが，当工場は同済大学水処理技術開発センター鄧助教授の指導の下に，回転円板体を作製している。製作規格として円板直径3～5m，軸長2.5～7.5mの5種類，ハニカム孔径2～3cm，円板表面積 $1,250\sim9,600\text{m}^2/\text{軸}$ がある。現在，ハニカムを用いた空気駆動式で，直径3.0m， $2,000\text{m}^2$ の2種類を作製している。その外観とハニカム材は写真1・2のようである。中国における回転円板処理場を，86年6月末現在で調査したのが表4である。この表以外にも処理場があって約30処理場と云われている。同表から判るようにNo15のみ生活廃水で，他はすべて工場廃水である。処理水量は $2,400\text{m}^3/\text{d}$ が最大で，原水BOD： $2,000\sim60\text{mg}/\text{l}$ が処理水で $375\sim7.0\text{mg}/\text{l}$ ，円板回転数は $1\sim4\text{rpm}$ ，周辺速度： $32\sim10\text{m}/\text{min}$ ，円板直径は $1.0\sim3.0\text{m}$ で3.0が最も多く，4段4軸を用いて5段5軸もある。設計BOD面積負荷は $4\sim97\text{g}/\text{m}^2\text{d}$ 水量負荷 $14\sim335\text{l}/\text{m}^2\text{d}$ が採られている。円板材質は塩ビ，ポリエチレン，ポリプロピレン，FRPなどであり処理原水は染色廃水が10ヶ所，澱粉，製絲，含油その

他からなっている。同表中のNo13，上海立新造纸廠の処理場は筆者が調査したので略述する。古紙再生工場廃水 $2,400\text{m}^3/\text{d}$ を直径3.0m，軸長7.5m， $2,600\text{m}^2/\text{軸}$ の円板体4軸4段，3系列，計12軸を用いて処理していた。この処理場は84年稼動開始で，その外観は写真3・4のようであり，機械駆動式であるが，チェーンを用いず，直径3.0mの大歯車を水槽外部に取り付けて回転させており，円板体はすべて建屋内に収められていた。円板材質は塩ビであるが，BOD過負荷で運転しており，円板1段目は半嫌気状態であり，維持管理上の問題として負荷軽減，回転数増大，分注方式の採用，補助曝気などの対応策を講じるよう助言した。

上海市の上下水道の現況を知ることは，中国全体にも通ずると思われる，上海市政工程設計院の説明を要約すると次の通りである。人口は世界最大1,200万人で生活廃水系 $104\text{万m}^3/\text{d}$ を下処理場で $12\text{万m}^3/\text{d}$ をし尿 $1\text{万m}^3/\text{d}$ は農地還元，工場廃水 $386\text{万m}^3/\text{d}$ を工場内廃水処理場で $85\text{万m}^3/\text{d}$ を処理し，都市下水 $91\text{万m}^3/\text{d}$ と工場排水 $214\text{万m}^3/\text{d}$ の合計 $305\text{万m}^3/\text{d}$ が無処理放流である。このような現状から，大上海市の下水処理基本計画は旧外国租界を含めた旧市街部は下水管渠新增設の施工困難性を考慮して，全廃水を集水し沈殿処理の

写真1

写真2

表 4 中国における回転円板汚水処理場

No	項目 廠名	廃水 水性 質	処理 水量 (m ³ /d)	BOD (mg/l)			COD (mg/l)			BOD 負荷 g/m ² d	水 量 負荷 l/m ² d	直 径 (m)	級 数 × 軸 × 組 数	転 速 (r/min)	周 辺 速 度 (m/min)
				入 水	出 水	%	入 水	出 水	%						
1	益陽茅麻 纺织厂	煮煉废水	1,560	375	60	84	1,100	550	50	12.6	31	3	4 × 4 × 5	2	18.8
2	林州茅麻 纺织厂	煮煉废水	1,248	400	60	85	1,200	500	58	16.4	40	3	4 × 4 × 5	2	18.8
3	上海苧麻 实验厂	煮煉废水	1,344	205	36	82				一級 : 23 二級 : 14.7	一級 : 163 二級 : 175	3	3 × 3 × 2	2.1	19.8
4	杭州织布厂	印染废水	144	300	70	76	325	85	74	2.5	84	1.8	4 × 4 × 2	3~6	
5	沙市毛纺厂	染色废水	700	150	7.0	95	300	90	70	23.2	46.5	3	4 × 4 × 1	2.5	23.6
6	上海松江 棉纺织厂	同上	60	596	50	91	923	135	80	22	37	1.8	3 × 4 × 1	4.5	25.4
7	北京鐵路 分局 石橋 車輛段	含油废水	48	29	2.2	92	156	56	64	4.4	120	1	4 × 1 × 2	3.5	11
8	金州永興 化工厂	含酚废水	216	200	3	98.5	460	40	91	フェノール: 9.9	49	3	5 × 1 × 1	2	18.8
9	南京织布厂	染色废水	650	120 160	15 30	81 88	300 400	80 120	70 73	20.6	255	2.4	4 × 1 × 4	2.7	20
10	成都色织 染整厂	同上	150	/	/	/	600	400	33	COD: 57~113	141	2.6	2 × 1 × 5	2	16
11	上海三 印刷厂	同上	288	160	34	78	500	200	60	20.4	128	2.2	2 × 2 × 3	4.3	30
12	瀋陽木材 防腐厂	含油 含酚废水	96	511.4 4.6	342.4 2.4	60	513 32	395 14.8	52	24.5	48	2.6	4 × 1 × 1	2	16.3
13	上海立新 造纸厂	中段废水	2,400	311	48	85	1,088	406	63	23.8	80	3	4 × 4 × 3	2	18.8
14	天津二 印染厂	印染废水	2,400	110	26	76	350	200	43	11	130	3	4 × 2 × 4	2.5	23.6
15	国营長空 机械厂	生活废水	35	592	10.4	82	/	/	/	4	69	1.8	4 × 1 × 3	2	11.3
16	杭州皮革 厂	制革废水	960	1,762	375	78.7	3,860	924	76	97	70	2.6	4 × 4 × 4	1.2 2.4	10 20
17	上海三 毛纺厂	含酚废水	1,800	100 150	20	90	300 350	100	70	12	130	3	4 × 1 × 4	2.5 3.4	23.6 32
18	国营紅原 染料厂	含酚废水	107	391	142	64	1,560	580	63	5.23 フェノール: 3.4	14	3	4 × 8 × 1	2.2	20.7
19	武进米 米厂	酿酒废水	59	/	/	/	3,120	902	71	COD: 81.8	36	3	1 × 1 × 1	1.39	13.1
20	北京羊絨 衫厂	染色废水	1,500	60 150	20 40	71	1,507 250	60 80	65	30	150	2.5	2 × 3 × 4	4	31.4
21	天津木材 五厂	纤维液 老水	450	800 2,000	72 180	91	2,000 5,000	300	91	50	27	2	1 × 1 × 2	/	15 42
22	北京毛絨 厂	染色废水	450	150	50 60	63	200	100	50	50	335	2.18	2 × 3 × 1	4.5	30.8
23	北京木材 防腐厂	含油废水	150	油: 269	71	74	120	45	63	/	100	2.18	3 × 1 × 2	/	< 20
24	北京結核 病院	医院废水	347	43	16	63	116	77	34	7	164	1.5	3 × 1 × 4	4	18.8

写真 3

写真 4

みで黄浦江を潜管し、東海への海洋放流とする。旧市街地の周辺に対して10万 m^3/d 以下、平均して7万5千 m^3/d の小規模下水処理場を14ヶ所設置し、蘇州河や黄浦江に放流する計画を樹て、目下、建設が進められつつある。なお中国での計画1人1日下水量は200lとなっている。上海市の上水道は現在、13浄水道から390

万 m^3/d を給水しているが、原水取水場は、すべて上海市下流の黄浦江から取水しているが、下廃水無処理放流により汚濁は甚だしく、逐に上海市より20km 上流の黄浦江に取水地点を変更し、目下その建設が進行中である。中国の下水処理や工場廃水処理施設に対しては、この国の歴史的過程と背景があり、一概には云え

写真5

ないが、最大の工業都市である上海市の実状から見ても非常に厳しいものであり、下廃水処理場の建設は漸く緒に着いたともいえよう。公害先進国、公害対策先進国である我が国の上下水道、環境技術が、この国の繁栄と発展に役立てば、これに過ぎるものはない。

写真5は86年9月に完成した韓国ソウル郊外にある同昌製紙の回転円板処理装置である。これは85年筆者が韓国政府の招聘で訪韓した際に、相談を受けたパルプ工場廃液処理である。円板直径5.0mで円板面積9,600㎡を持つ波板円板であり、処理廃水量5,200㎡/dを円板2軸2段、2系列、計4軸で処理し、設計施工は日本の東洋パテントエンジニアリングと韓国との合弁会社、謹域実業である。同国での回転円板法の普及発展を期待したい。

5. あとがき

本文では最近1年間における日本の回転円板法の現状と展望、および中国の現状について述べたが、日本における回転円板処理場は1986年12月31日現在で2,507ヶ所以上で稼動するようになった。中国については昨年6月訪中の機会を与えられ、その時の知見と情報を基にして回転円板法の現状を報告した。既に30処理場で稼動しているが、主に処理原水は工場廃水であり、日本の回転円板法普及発展の過程から、1973年頃の状態に似ていると云えよう。今後は生活系廃水の処理が増えて行くであろうが、中国での本法の研究、開発と普及発展を願って止まない。

回転円板法に関する論文、報告等一覧

＜1985年11月～1986年10月＞

- 1) 和田洋六：生活排水の窒素・リン除去，PPM，Vol.16, No. 11, 1985/11, PP50～58.

- 2) 石黒政儀：回転円板法の現状と展望，第7回回転円板法研究シンポジウム論文集，環境技術研究協会，1985年11月28日，PP1～14.
- 3) 井上邦夫：小規模分散型排水処理システムの開発とその実験結果，同上，PP39～47.
- 4) 山城敏男：徳島市中央下水浄化センターにおける回転円板法建設完成の経過と稼動実績，同上，PP64～80.
- 5) 歌崎秀史：西独における回転円板の現状，同上，PP81～84.
- 6) 福本哲也：半水没密閉カバー回転円板による脱窒，同上，PP15～17.
- 7) 西井 啓：移動床砂濾過装置による円板処理水の高度処理，同上，PP18～21.
- 8) 小久保修身：回転円板と接触ばっ気による下水処理，同上，PP22～25.
- 9) 中山勝夫：用水化を目的とした回転円板の応用 — 洗浄工程が多い羽毛生産をより少ない用水で行なう回転円板装置の概要 — 同上，PP26～29.
- 10) 岩崎義彦：回転円板法による焼酒蒸留廃液処理，同上，PP30～33.
- 11) 鈴木 豊：KL—RBC装置による漬物廃水処理について，同上，PP34～38.
- 12) 小林証明：唐戸浄水場前処理としての回転円板生物処理，同上，PP48～51.
- 13) 押川俊男：宮崎市木花終末処理場（回転円板法）の概要，同上，PP52～55.
- 14) 江頭敬二：玄海町鐘崎下水処理場の維持管理，同上，PP56～59.
- 15) 小林 俊：回転円板方式によるごみ中継基地廃水の処理事例，同上，PP60～63.
- 16) 菅原正孝：農業集落排水処理における今後の問題点，環境技術Vol.14, No.11, 85/11, PP6～8.
- 17) 神戸忠孝：農村集落排水処理の現状・展望とその事例：〔福井県美山町〕，同上，PP29～31.
- 18) 西口 猛編著：農村集落排水のための汚水処理技術入門，農業土木学会選書9，農業土木学会刊，85/12.
- 19) T.Matsuo and K.Yamamoto: Mathematical models for the oxygen transfer processes in a rotating biological contactor, Developments in Environmental Modelling, 7. Edited by S. E. JORGENSEN and M. J. GROMIEC, Mathematical Models in Biological Waste Water Treatment, Elsevier Science Publishers, BV, Amsterdam, The NETHERLANDS. Dec. 1985, PP357～418.
- 20) Y. Watanabe: Mathematical modelling of Nitrification and Denitrification in rotating biological Contactors. do, PP419～472.
- 21) H. Kubota and K. Fujimoto: Mathematical modelling of energy Consumption in biological wastewater treatment, do, PP691～736.
- 22) 石黒政儀：生物膜法研究部会の設置にあたって，環境技術Vol.14, No.12, 85/12 PP1.

- 23) 井上邦夫：小規模分散型排水処理システムの展望 — 定住圏用排水処理機械システム開発から — 同上，PP4～9.
- 24) 石黒政儀：国内，国外における回転円板法の現状と展望，同上，PP43～53.
- 25) 山城敏男：徳島市中央下水浄化センター回転円板法建設完成の経過と稼働実績，同上，PP54～59.
- 26) 歌崎秀史：西独における回転円板法について，同上，PP60～66.
- 27) 小林証明，豊田福美，松本哲也，永野博之：唐戸浄水場前処理としての回転円板生物処理，同上，PP67～71.
- 28) 押川俊男：宮崎市木花終末処理場(回転円板法)の概要と現状，同上，PP72～78.
- 29) 松重一夫，田井慎吾，土井賢二郎：風力エネルギーを利用した廃水処理システム，土木学会衛生工学研究論文第22巻，1986/1，PP187～194.
- 30) 西口 猛：回転円板法による高率脱リン，環境技術，Vol. 15, No. 1, 1986/1，PP83～90.
- 31) Y. Watanabe and S. Masuda: Mathematical Modelling of Nitrification and Denitrification in Rotating Biological Contactors, Memoirs of the Faculty of Engineering, Miyazaki University. No. 16, Feb 1986, PP1～41.
- 32) 池田 功：下水道による水洗化向上の事例報告，野沢温泉村の場合，月刊下水道，Vol. 9, No. 3，86/3，PP40～44.
- 33) 江崎 悟：下水道による水洗化向上の事例報告，熊本県宮原町の場合，同上，PP60～65.
- 34) 黒田正和，湯沢 恩，富沢正彦，榊原 豊：生物付着量の増加に伴う速度パラメータの変化，第20回水質汚濁学会，シンポジウム〔2〕生物膜法の処理特性およびその技術プロセス開発，86/3，PP233～234.
- 35) 西留 清，楠田哲也，栗谷陽一：生物膜表面の基質の移動速度および生物膜内の酸素消費速度と基質酸化速度について，同上，PP235～236.
- 36) 国安祐子，稲森悠平，須藤隆一，岡野貴子：生物膜の浄化特性に及ぼす貧毛類，輪虫類の単独および共存の効果，同上，PP239～240.
- 37) 黒田正和，湯沢恩，榊原豊，長井光弘：嫌気性微生物の固定化，同上，PP251～252.
- 38) 増田純雄，渡辺義公，石黒政儀：回転円板法における硝化，脱窒，有機物酸化同時反応のシミュレーション，下水道協会誌，Vol. 23, No. 262，86/3，PP49～57.
- 39) 増田，石黒，後藤雅子，川崎慎一郎：回転円板付着生物膜の生物活性に関する研究，土木学会西部支部研究発表会講演集，86/3，PP128～129.
- 40) 渡辺，石黒，田代雄児，岡部 聡：微細突起による回転円板への物質移動の促進，同上，PP130～131.
- 41) 渡辺，石黒，西田員敏，杉本秀一：固液分離機構をもつ回転円板の処理特性，同上，PP132～133.
- 42) 渡辺，石黒，松岡一則，増井順一：回転円板法による焼酒廃液のメタン発酵処理，同上，PP134～135.
- 43) 渡辺，石黒，竹口信一，平島充治：回転円板法によるメタン発酵過程の温度依存性，同上，PP136～137.
- 44) 石黒，増田，牛原正詞，高松一久：回転円板法による都市下水のメタン発酵に関する研究(4)，同上，PP138～139.
- 45) 石黒，増田，峯下英俊，高松一久：回転円板法による都市下水のメタン発酵に関する(5)，同上，PP140～141.
- 46) 小林証明：回転円板処理施設の稼働状況，第37回全国水道研究発表会講演概要集，86/5，
- 47) 山田伴雄，高橋 幸：回転円板式廃水処理装置の基質消費速度に及ぼす酸素移動係数の影響(1)，水処理技術，Vol. 27, No. 5，86/5, PP29～33.
- 48) 竺 文彦：地域的な小規模の下水処理について，Vol. 15, No. 5，86/5，PP19～23.
- 49) 須藤隆一：生活雑排水に関する技術的諸問題，同上，PP24～29，
- 50) 柳 東先，川下好則，姜 龍太：中小規模下水処理施設に関する研究，環境技術，Vol. 15, No. 6，86/6，PP62～67.
- 51) 洞沢 勇：技術的にみた単独と合併浄化槽の特質について用水と排水，Vol. 28, No. 7，86/7，PP30～34.
- 52) 亀岡俊則，崎元道男，因野要一：豚舎排水のメタン発酵消化廃液の浄化処理，水処理技術，Vol. 27, No. 7，86/7，PP45～52.
- 53) 山口正三：回分法と回転円板法の組合せによる窒素リンの除去，第23回下水研究発表会講演集，86/7.
- 54) 砥上晴孝：回転円板付活性汚泥法における下水の窒素リンの同時除去について(第4報)，同上.
- 55) 須藤隆一：新しい小規模処理技術の動向と選択，PPM，Vol. 17, No. 8，86/8，PP62～72.
- 56) 須藤隆一，稲森悠平：湖沼水質保全のための生活雑排水対策，用水と廃水，Vol. 28, No. 8，86/8，PP56～65.
- 57) 石黒政儀：同済大学の招聘訪中によせて，水，Vol. 28, No. 11，86/9，PP18～21.
- 58) 大嶋 篤：米国の水処理技術事情，月刊下水道，Vol. 9, No. 10，86/10，PP30～35.
- 59) 須藤隆一：生物処理の管理(No. 67～76)，水，Vol. 28, No. 1～12，86/1～10.
- 60) 石黒政儀：回転円板法のすべて(No. 9～17)，水，Vol. 28 No. 1～11，86/1～9.