

(23) 下水余剰汚泥・嫌気性消化の前処理の研究

三菱重工業㈱高砂研究所 正会員 山内 徹

1. まえがき

下水処理場の汚泥処理は嫌気性消化法が最も普及しているが、消化槽の改善や消化法の検討そのものは比較的少ないようである。本研究は、消化ガスの発生量の増加や消化槽の省エネルギー化を目的としたもので、約2ヶ年の実験結果の一部分を整理し報告するものである。

2. 従来技術の現状と問題点

既存消化槽の実態を独自に調査した結果を表1に示す。(例外も多く多少無理して整理した部分も含む) 一方、実際の汚泥を入手し、生汚泥と余剰汚泥を別々に室内で消化実験を行い、二者の消化状況の比較を行つた。この結果を表2に示す。なお参考の為、№4と№5は一般文献値を参考として示した。

表2. 余剰汚泥と生汚泥の嫌気性消化ガス発生率の比較(中温消化)

№	余 剰 汚 泥		生 汚 泥		消化日数 日	※ T.V.S	
	ガス発生率	メタン含量	ガス発生率	メタン含量		実 験 用	備 考
	ℓ/g ※	%	ℓ/g ※	%		下水汚泥源	
(1)	0.42	65	0.63	66	12	A下水処理場	回分消化実験結果
(2)	0.34	66	0.46	67	40	B下水処理場	連続消化実験結果
(3)	0.31	64	0.39	57	30	————	文献(2)による
(4)	0.18	65	0.24	68	30	————	同 上
(5)	0.28	69	0.63	69	15	————	文献(3)による

表2より、最初沈殿池で回収される「生汚泥」はガス発生率が高いのに対し、最終沈殿池で回収される「余剰汚泥」はガス発生率が低く、表1に示した「余剰汚泥」の問題が明確となつた。そこで、余剰汚泥が消化槽に投入されて以降の生菌数の変化状況をB下水処理場の余剰汚泥を用い、回分操作実験で調査した。調査結果を表3に示す。この表3より、投入された余剰汚泥中の生菌は約1週間で死滅し、投入前の消化槽の生菌数に戻ることが判つた。これらの調査及び実験の結果より明らかに余剰汚泥のガス発生が悪く何らかの改善が必要であるという事と、余剰汚泥が消化槽に投入されてから死滅するまでに、かなり長い時間を要する事が判明した。汚泥の嫌気性消化の改善は、表3に示す実験で得た結果より、消化槽に投入される余剰汚泥を前処理として死滅させるなら、余剰汚泥がメタン菌等に利用可能となるまでの時間の短縮が出来るのではないだろうかとの結論を得た。

3. 余剰汚泥の前処理法の検討

余剰汚泥は、複雑な微生物集団であり、その内容や特徴は活性汚泥法の設計条件や運転条件によつて異なると考えられる。各種条件の内、運転BOD負荷の異つた余剰汚泥を用いて嫌気性消化の比較実験を行つた。

表1. 下水汚泥の嫌気性消化ガス生成量の一般的傾向 (1)

№	嫌気性消化ガス生成量の一般的傾向
(1)	余剰汚泥は生汚泥に比べガス生成量(率)が低い。
(2)	南日本の処理場は北日本に比べガス生成量(率)が低い。
(3)	日本の処理場は欧州に比べガス生成量(率)が低い。
(4)	a. コミプラ型下水処理場, b. 大都市型下水処理場, c. 産業廃水, 余剰汚泥のガス生成は $a < b < c$ である。
(5)	ばつ気槽へ流入するBODの容積負荷が大きい場合の余剰汚泥ほど、嫌気性消化のガス生成量(率)が大きい。
(6)	同一処理場では冬の方が夏よりガス量の多い例が多い。

表3. 消化槽内の生菌数の変化状況

槽内生菌数 計測時期	平均個数 (個/ml)	Total SS (mg/ℓ)
投入直前	2.6×10^6	13400
投入直後	7.6×10^7	18800
1日後	1.4×10^7	18800
3日後	1.0×10^7	18800
6日後	3.8×10^6	18800

この実験では、余剰汚泥の死滅前処理として熱処理を行つた。実験結果を表4に示す。

この結果によれば、BOD負荷が低い状態で生成された余剰汚泥は、前処理としての熱処理が有効であり、逆に同負荷の高い場合は効果が少ないという点と、同じ余剰汚泥に対しては熱処理温度の高いものほど、メタン生成に効果のある点とが明らかとなつた。

表4に示した熱処理の効果が余剰汚泥の死滅にどの程度反映されているかについて、特に60℃の場合の試験を実施した。参考として、*B. subtilis*の孢子と栄養細胞の死滅曲線を求めた。得た結果の一部を図1に示す。

図1の結果より、下水処理場の余剰汚泥は、熱処理死滅曲線だけから判断する限り、孢子の同曲線と極めて近似していた。

孢子等の死滅速度は、孢子等の栄養細胞化速度に近似できる場合が多いとの考え方で検討を進める。活性汚泥(余剰汚泥)は栄養細胞と孢子(又は休眠細胞)の混合物であり、そのバランスはBOD負荷条件や他の栄養条件等によつて異なると推定される。BOD負荷の高い状態で生成された余剰汚泥は栄養細胞が多く、BOD負荷の低い状態では孢子等が多いと考えれば、下水の余剰汚泥は、比較的BOD負荷が低く、図1の如く孢子等が多いということになる。また、表4に示した余剰汚泥の熱処理の消化への効果は、BOD負荷の高い栄養細胞の多い汚泥には効果が少なく、BOD負荷の低い孢子等の多い汚泥には効果が大きいという説明が可能となる。

さて、余剰汚泥は孢子等の占める割合が多く、熱処理を前処理として行つてから消化処理すると、孢子等の占める割合が多いと思われる余剰汚泥ほど消化処理に効果があるだろうとの結果を得たので、熱処理だけでなく他の死滅処理の方法も検討する必要がある、アルカリ処理、熱処理、超音波処理、酸発酵処理及び、単純2倍濃縮についての消化処理への効果の比較実験を行つた。実験結果を表5に示す。なおこの表5に示したもの以外に、塩素処理、酸処理等も行つたがクロラミンの生成や蛋白変性、使用薬品上の問題もあり、実用上表5に示すものが候補となつたものである。表5の結果より、熱処理、酸発酵処理、及び単純2倍濃

表4. 余剰汚泥別の嫌気性消化実験結果の比較 (中間消化) (4)

供試余剰汚泥内容 (活性汚泥の運転状態)	汚泥性状 (平均値)	熱処理条件 温度×時間 (℃)(分)	投入T.V.S当 りガス発生量 (ℓ/g)	消化 日数 (日)
グリコース馴致汚泥 (0.05kg BOD/kg MLSS・日)の低負荷条 件で室内で馴致した汚泥	T.S 2.5% T.V.S 1.2%	無処理	0.20	(回 分 実 験)
		120×30	0.28	
		80×10	0.27	
		60×120	0.29	
C 食品工場・余剰汚泥 (極めて高負荷運転)	T.S 1.1% T.V.S 0.81%	無処理	0.30	14
		60×60	0.34	
D 下水処理場の余剰汚泥 (大都市域・分流式・特 徴の少ない平均的下水処 理場)	T.S 2.2% T.V.S 1.8%	無処理	0.31	(連 続 実 験)
		175×30	0.51	
		120×30	0.41	
		60×120	0.38	

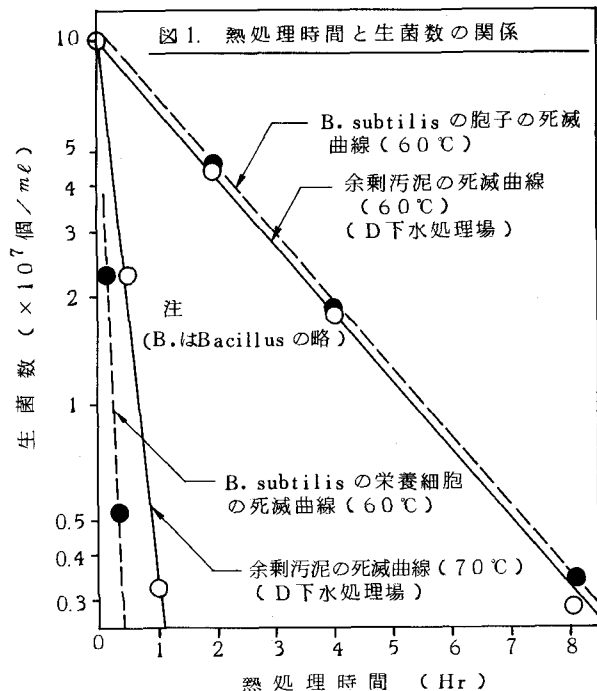


表5. 余剰汚泥嫌気性消化の前処理法に関する予備実験方法と実験結果(中温消化, ※以外回分実験)

区分	No.	前処理方法	条件や方法等について	ガス発生量(ガス発生率)
A	1	無処理	グリコース合成下水馴致汚泥(0.05kg BOD/kg MLSS・日で馴致) T.S 2.3% T.V.S 1.9%	0.21ℓガス/g T.V.S (100とする)
	2	アルカリ処理	NaOH添加しpH12で1Hr 攪拌。HClで中和しpH7.5とする。使用汚泥はNo.1。以下同様。	0.21ℓガス/g T.V.S (100)
	3	熱処理Ⅰ	オートクレイブで、120℃30分間加熱する。	0.30ℓガス/g T.V.S (143)
	4	熱処理Ⅱ	60℃で1時間攪拌する。	0.30ℓガス/g T.V.S (143)
	5	超音波処理	150Wの発生機を使用、(供試汚泥500mlに対して)20kHz、20分間処理する。	0.23ℓガス/g T.V.S (110)
B	6	無処理	A下水処理場の返送汚泥ラインから採取した余剰+初沈汚泥(1:1) T.S 2.1% T.V.S 1.7%	0.51ℓガス/g T.V.S (100とする)
	7	酸発酵処理	35℃、滞留時間2日間の条件で上記6の余剰+初沈汚泥を酸発酵処理する。	0.59ℓガス/g T.V.S (118)
C	8	※無処理	D下水処理場余剰汚泥 T.S 2.2% T.V.S 1.7% 消化日数(滞留時間)20日、連続実験	0.31ℓガス/g T.V.S (100とする)
	9	※2倍濃縮	上記余剰汚泥 T.S 4.3% T.V.S 3.4% 消化日数(滞留時間)20日、連続実験	0.35ℓガス/g T.V.S (113)
	10	※2倍濃縮	同上余剰汚泥 T.S 4.3% T.V.S 3.4% 消化日数(滞留時間)40日間、連続実験	0.41ℓガス/g T.V.S (132)

縮が、嫌気性消化の前処理法として有効であるとの結果を得た。

4. 前処理済余剰汚泥の嫌気性消化実験と酸発酵法の検討 (1) 嫌気性消化実験

前処理として単純濃縮を行う場合については、既に表5で連続実験結果を示したので、本項では、熱処理と酸発酵処理を前処理として実施する場合についての、長期間の連続消化実験の結果を述べたい。

実験に使用した装置は、機械攪拌装置付の内容積20ℓの消化槽である。この装置を用いて、約3ヶ月の連続実験

表6. B下水処理場の余剰汚泥の嫌気性消化実験結果(中温消化)

区分	No.	操作条件		項目	水 質		発生ガス	
		前処理	滞留日数		T.S (%)	T.V.S (%)	ガス量 (ℓ/*)	CH ₄ (%)
A	1	無処理	20	投入汚泥	2.20	1.72	0.31	67
				消化汚泥		1.24	(100)	
	2	60℃ (120分)	20	投入汚泥	2.12	1.67	0.35	67
				消化汚泥		1.13	112	
	3	120℃ (30分)	20	投入汚泥	2.08	1.63	0.41	66
				消化汚泥		1.12	130	
	4	175℃ (30分)	20	投入汚泥	2.08	1.63	0.51	66
				消化汚泥		1.07	164	
B ※	5	無処理	40	投入汚泥	2.38	2.20	0.52	65
				消化汚泥		0.98	(100)	
	6	酸発酵 汚 泥	7	投入汚泥	1.95	1.65	0.51	65
				消化汚泥		0.98	(100)	

備考: ※印に使用した汚泥に、初沈の生汚泥と余剰汚泥を1:1に混合

* g T.V.S

を実施した。消化実験の結果を表6に示す。表6は区分Aが、余剰汚泥単独に対し熱処理汚泥の消化実験であり、区分Bが初沈の生汚泥と余剰汚泥を1:1に混合し酸発酵処理した汚泥の消化実験である。

次に、表6で示した実験で発生した消化汚泥の固液分離に関する実験を行つた。実験項目は沈降試験、ブフナー試験、リーフ試験である。この他加圧浮上試験なども実施したが、他の結果と傾向が似ており、本報告では割愛した。各固液分離の試験法を表7に、試験結果の例を表8に示す。なお区分及びNaは表6のものと同一であるが、ブフナー試験、リーフ試験における区分Aのものについては、滞留日数に多少差がある。即ち、滞留日数20日間で3ヶ月連続運転した後、滞留日数40日間に運転操作を変更し3～4週間経過した消化汚泥を供試試料としているため、正確には、滞留日数が20日間の汚泥では無い。従つて結果の絶対値は傾向として考え、Na1～Na4の相対評価としてとらえていきたい。

表6、表8の試験結果を一括して考察すると次の様になる。(a)前処理として熱処理を行う場合、熱処理温度が高くなるほど、投入T.V.S当りのガス発生量が多くなる傾向を示した。特に60℃では顕著な効果は現われなかつたが、120℃、175℃では極めて明瞭な効果が得られた。(b)上記同様に、熱処理温度の増加につれて、T.V.Sの除去率も増加する傾向があつた。(c)また、熱処理温度の増加と共に、おおむね固液分離性能の向上がみられた。この傾向は沈降試験では比例的傾向ではなかつたが、リーフ試験の汙過速度については、顕著な差が生じていると思われる。(d)酸発酵を前処理として実施する場合には、投入T.V.S当りのガス発生量は、無処理汚泥の40日間滞留の場合と酸発酵汚泥の7日間滞留の場合がほぼ同一である。表3の結果によれば、消化槽内に投入された余剰汚泥の生菌数は全量死滅するのに約7日間を要するとされているが、酸発酵処理を行うことで、嫌気性消化は極めて短縮されることとなるようであり、酸発酵処理の効果は、酸発酵そのものの効果よりも、酸発酵処理の操作によつて孢子等が栄養細胞化する効果に負うのではないかと

表7. 消化汚泥の固液分離試験方法

考えられる。(e)酸発酵処理をした汚泥と無処理汚泥の消化汚泥の固液分離性能には、まったく差が生じず、酸発酵処理を行うことが固液分離の性能向上に貢献できるとは考えられないようである。(f)加圧浮上試験の結果は沈降試験結果と似た傾向を示していた。

	沈 降 試 験	ブフナー試験	リーフ試験
装置 又は 手順	試料1ℓを下記条件の前処理をし、1ℓメスシリンダーに投入後、静置観察する。	○ブフナーろうと ○ろ布 パイレンPF303	○ラボ・リーフテスター ○ろ布 パイレンPF303 ○汙過面積 50.3 cm ²
条件	前処理条件 下水処理水で3倍量で稀釈洗浄を実施	1.真空度-400mmHg 2.薬品注入： FeCl ₃ (7%)と Ca(OH) ₂ (40%)	1.真空度-400mmHg 2.洗浄：下水処理水5倍量で稀釈洗浄 3.薬品注入： FeCl ₃ (7%)と Ca(OH) ₂ (40%)

表8. 消化汚泥の固液分離試験結果 (区分及びNaは表6と同じ。試験方法は表7による。)

区 分	Na	沈 降 試 験			ブフナー試験			リーフ試験			
		沈降速度	上澄SS	圧密度	汙液SS	ケーキ 含水率	ケーキ 比抵抗	汙液SS	ケーキ 厚 み	汙過速度	
		cm/Hr	mg/ℓ	-	mg/ℓ	%	sec ² /g	mg/ℓ	mm	GROSS	NET
A	1	0.46	1270	2.2	230	90	1.7×10 ⁹	110	4	8.4	5.8
	2	0.48	430	2.1	230	86	9.7×10 ⁸	270	4	10.1	7.0
	3	0.45	1180	4.4	310	83	2.4×10 ⁸	210	6	15.9	11.0
	4	15.0	500	5.6	490	76	1.4×10 ⁸	540	8	28.6	19.8
B	5	0.40	250	2.2	120	82	8.2×10 ⁷	120	5	15.3	10.6
	6	0.21	160	1.8	170	83	1.0×10 ⁸	250	5	14.2	9.8

(2) 酸発酵処理実験

酸発酵処理の方法に関し、多数の報文をみかける。ある報文では、特定の菌種を接種し、特定の生化学反応が卓越するようにコントロールされている。しかし、本報文で用いた方法は、表9に示すような、極めて平凡で管理しやすい方法を用いたものであり、既存設備に微小な附

加設備を設置するだけで容易に達成できるよう考慮した。この方法の場合には、余剰汚泥単独よりも、生汚泥が混合している方が運転や維持管理が容易なように思われる。

表10に、酸発酵処理前後の汚泥の性状の変化の例を示す。この表10の供試汚泥も、表6に示した場合と同様に、初沈の生汚泥と余剰汚泥を1:1に混合したものである。表現としては「酸発酵」と称したが、揮発性有機酸の生成量は決して多いとは言えず、他の諸数値においても、酸発酵処理前後で顕著に変化したものはない。外観上は、多少酸臭があり、多少「さらさら」した粘性の低下を感じさせるものに変化する程度の変化である。従つて、先の(1)でも述べたように、余剰汚泥中の孢子等の栄養細胞化の促進としての効果が期待出来、この効果によつて消化槽での滞留日数の短縮に貢献できると考えられる。

5. まとめ

(1) 一般的結論

本報文で示した研究結果の一般的結論を次に示す。

- (a) 下水汚泥の嫌気性消化において、生汚泥と比較すると、余剰汚泥に問題があり改善の余地がある。
- (b) 余剰汚泥の消化の問題の原因として、余剰汚泥に占める栄養細胞と孢子等のバランスが考えられ、孢子等の多い余剰汚泥においては、消化槽中での孢子等の生存期間が何らかの影響を及ぼすようである。
- (c) 余剰汚泥は簡単な前処理によつて、消化の改善(ガス回収率、消化汚泥の固液分離、消化槽滞留日数等)が可能である。
- (d) 有望な前処理法としては、単純2倍濃縮、熱処理、及び酸発酵処理であり、各々に特徴がある。特徴とその考え方については、(3)項に示す。

(2) 研究結果からみた検討課題

各種実験の結果を整理してまとめると表11のような結論となつた。報文中に小考察を行つて来たが、表11の結論の中で、十分な考察を行なかつた部分、即ち今後の検討課題を明確としておきたい。

(a) 同じ余剰汚泥であつても、余剰汚泥の生成される状況(BOD負荷の大小)に応じて、消化の状況に差異の生じる理由として、余剰汚泥中に占める栄養細胞と孢子等のバランスの考え方を示した。そして、消化槽における余剰汚泥の生存状況と、前処理として死滅処理の意義づけを述べた。

表9. 酸発酵処理用馴致汚泥の生成方法

No	段 階	馴 致 方 法
1	第1段階 (初回のみ)	1容の消化槽沈降汚泥と4容の供試汚泥を35℃で6日間半好気で混合攪拌する
2	第2段階 (繰り返し)	上記の後、汚泥を攪拌して適宜4容を排除、残液1容に供試汚泥4容を加えて、35℃4~2日間半好気で混合攪拌する

表10. 酸発酵処理前後の汚泥の性状例

項 目	供試汚泥	酸発酵後
pH	6	5
T.V.S %	1.88	1.56
揮・有機酸 mg/ℓ	500	1600
粘 度 Cp	400	250
ブフナー試験ケー キ比抵抗 sec ² /g	1.6×10 ⁸ 塩鉄7%石灰40%①	6.4×10 ⁸
リーフ試験戸過速 度Grosskg/m ² ・Hr	13.2 塩鉄7%石灰40%②	13.9

①無洗浄・無濃縮 ②下水処理場の処理水で5倍稀釈して洗浄

表11. 実験結果の整理(余剰汚泥の消化)

前処理 の内容	ガス収率 の 向 上	反応速度 の 向 上	固液分離 の 向 上
熱処理	○・A	○・B	○・C
酸発酵	×・D	○・E	×・F
濃 縮	△・G	○・H	×・I
○ かなりの効果があると認められる。			
△ 効果は認められそうだが、多少不安			
× 効果は認められない。			

栄養細胞と孢子等のバランスの点と、前処理としての死滅処理についての考え方で、表11のB E及び場合によつてはHの説明づけは可能であつた。しかし、A及びCについては論議をしなかつた。余剰汚泥が方法は別としても死滅すれば、メタン菌等の基質となりガス生成されるなら、最終的なガス収率は余剰汚泥の死滅前処理の方法や、前処理の有無に無関係にはば一定になるはずである。しかしながら、A及びCの結果を得たことからみて、熱処理の場合は、細胞壁構成のたん白の分解、高分子物質の分子量の低下、その他化学的組成の変化などが重要な要素であろうと考えられる。目下実験や検討を行つてゐるが、この点の説明が次の課題と考えられる。

(b) 孢子等と栄養細胞のバランスの検討を進めてみたが、孢子等 → 栄養細胞、栄養細胞 → 孢子等についての変換メカニズム、即ち変換に至るインパクトの整理や検討が不十分で多くの類推で論を進めざるを得なかつた。特に酸発酵における詳細な状況が不明のままに終つた。複雑な過程の中で微生物の状況を分別して正確に計測できる技術の検討が、次の課題と考える。

(3) 実験成果の展開

嫌気性消化プロセスの改善の考え方は、(a) 系への投入熱量の低減(消化槽へ投入する汚泥の昇温エネルギーの低減と、消化槽からの放散熱量の低減)(b) 系から回収されるメタンガス量の増加(系で回収される熱量の増加)が最も大切であり、(b)と(a)の差が利益もしくは損失と考えられるものである。しかし、忘れてはならない重要な点としては、(c) 処理場全体での汚泥回収率の向上が必要であり、固液分離性能が(a)(b)と平行して向上されねばならない。また(d) 省スペースや建設コストの低減も大切である。これらの(a)~(d)と、今までの実験成果とを結びつけると図2の右に示す矢印が考えられる。

図2. 嫌気性消化プロセスの改善の考え方

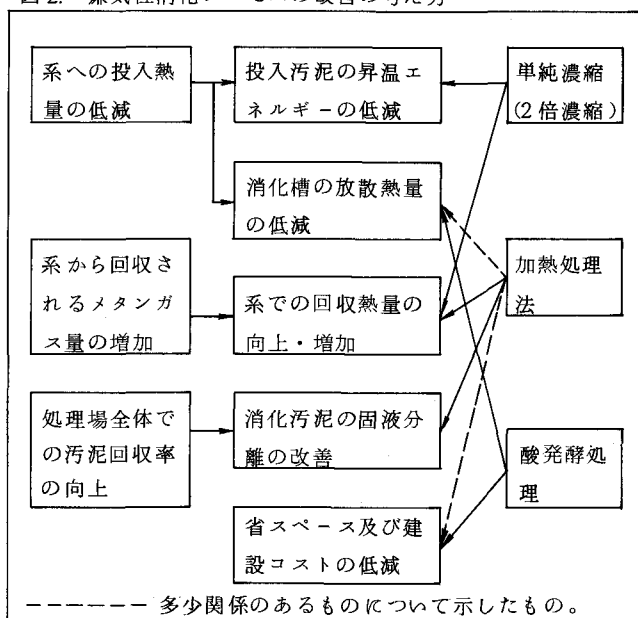


図2からみて明らかな如く、単純濃縮(2倍濃縮)は投入汚泥の昇温エネルギーの低減に貢献でき、他の2種の前処理法のいずれを採用するとしても、平行的に実施すべき項目である。また加熱処理法と酸発酵処理のいずれを採用するかは、その特徴に差があり処理場のおかれている状況に応じて考えられるべきものと思われる。なお、熱処理法を採用する場合には、余剰汚泥のみを対象として考え、60℃の熱処理の場合は、常温の生汚泥と熱処理済の余剰汚泥を合流させることで40℃前後の汚泥液となり、そのまま消化槽へ投入すれば熱的に大きい問題は生じないが、120℃あるいは175℃を採用する場合には必ず何らかの熱回収を行う必要がある。汚泥と汚泥の熱交換になるので装置製作上の工夫が必要となるであろう。

引用文献

- (1) 山内 植田 京都大学環境衛生工学研究会(第3回)予稿集 P47 (1981・8)
- (2) 安藤, 佐藤, 館山, 建設省下水道事業調査費報告 (昭52年度)
- (3) Haug R. T., Stuckey D. C, et al, J. WPCF fan., (1978)
- (4) 山内 日本機械学会関西支部, 第91回講習会 教材 P99 (1981・6)