

第9章 泡沫分離法の実用性

水処理技術のみならず、全ての工業・産業技術において共通していることであるが、新しい方法・技術が認知され、実用化されるためには、その方法・技術が既存のものと比較して優れた処理能力を有し、しかも経済的に採算がとれ、発展性のある分野への適用が可能でなければならない。泡沫分離法においても、単に懸濁物除去能が優れてるだけでは既存の方法・技術に対抗することは困難であると考えられる。

そこで本章では、泡沫分離法の処理能力と経済性について検討し、さらに発展性について若干の考察を加え、実用化の可能性を明らかにすることを目的とした。

9.1 凝集・泡沫分離法の処理能力およびコストの試算

本研究で得られた凝集・泡沫分離法における各種懸濁排水の処理条件を表-9.1にまとめた。凝集プロセスは、鉄塩とアルミニウム塩の凝集剤で凝集のpH領域が異なるが、マイクロフロックが形成される3~5分間の急速攪拌で十分である。泡沫分離プロセスは、カゼインの混合時間と送気時間と合わせても4~7分間である。凝集・泡沫分離処理の所要時間は合計で約10分間であり、濁度として95~99%の極めて高い除去率が期待できる。比較対照を目的として、今日広く排水処理システムに採用されている凝集・加圧浮上法の各種懸濁排水の処理条件について、いくつかの文献^{1)~5)}から抽出し、表-9.2に整理した。凝集・加圧浮上法は、微細気泡をフロックに内包あるいは付着させるため、良好なフロック形成が重要であり、十分な緩速攪拌が必要とされる。高分子凝集剤を併用する場合も多くみられる。また、浮上プロセスの時間は、泡沫分離の場合と比較して、約2倍程度長い。凝集・加圧浮上処理の所要時間は合計で約30分間であり、濁度除去率90~95%が期待できる。したがって、凝集・泡沫分離法と凝集・加圧浮上法を比較すると、前者の方が処理時間は約1/3倍短かく、期待される除去率も高いことがわかる。

注薬条件(表-9.1)と薬剤の単価(表-9.3)から、凝集・泡沫分離処理で消費される薬剤のコストを試算した(表-9.4)。なお、薬剤の単価は、10~25kg単位の商品として購入した場合の価格であり、大量購入により価格は1/3~1/5倍に大幅に削減できる。都市下水の処理は、凝集剤が70~90%を占め、凝集・泡沫分離法は不可欠なカゼインの負担分は、10~30%に過ぎない。アオコ懸濁液や赤潮海水では、泡沫を生成させるためにカゼインの添加濃度が高く設定されるので、10~50%程度になるが、沈降性の悪い植物プランクトンを凝集沈殿処理する場合には、凝集剤が多く必要となること、ならびに処理時間の短縮化などを考慮すると、カゼインのコストは高くないと考えられる。

上記は大まかな試算結果ではあるが、凝集・泡沫分離法は、広く採用されている凝集・加圧浮上法に匹敵し得る性能と実用性を持ち合わせていることが示唆された。そこで、都市下水、その他の各種排水の処理プロセスへの凝集・泡沫分離法の実用化の可能性について、もう少し詳細に処理能力および経済的観点から評価検討することにした。

表-9.1 凝集・泡沫分離法による各種排水処理条件

試料水	凝集プロセス				泡沫分離プロセス				合計処理時間 (min)	除去率 (%)		
	薬剤 (mg-Fe/L, mg-Al/L)	pH領域	急速攪拌 (rpm)	攪拌時間 (min)	薬剤	添加濃度 (mg/L)	急速攪拌 (rpm)	混合時間 (min)			送気時間 (min)	流量 (L-Air/min)
カオリン懸濁液 200mg/L	FeCl ₃ PAC	6.8~7.8 8.5~10.0	150 150	3 3	カゼイン	20 15	150 150	1 0.5	3 5	0.3 0.2	7 8.5	95 95
都市下水	FeCl ₃ ポリ鉄 PAC	5.0~6.0 4.0~5.6 未調整(pH7)	150 150 150	5 3 3	カゼイン	3 3 3	150 150 150	1 1 1	6 6 6	0.5 0.5 0.5	12 10 10	98 98 98
原水平均濁度: 65TU 梅水性汚濁排水	ポリ鉄	未調整(pH7.8)	150	5	カゼイン	3	150	1	6	0.5	12	95
原水平均濁度: 32TU Microcystis懸濁液	PAC	6.5~8.5	150	3	カゼイン	15	150	0.5	5	0.2	8.5	97
原水濁度: 50TU 赤潮海水	ポリ鉄	未調整(pH8)	150	3	カゼイン	15	150	1	3	0.2	7	99
油濁水 油分濃度: 90mg/L	PAC	7	150	3	カゼイン LAS	1 10	150 150	1 1	5	0.5	10	96

表-9.2 凝集・加圧浮上法による各種排水処理条件

試料水	凝集プロセス				加圧浮上プロセス				合計処理時間 (min)	除去率 (%)	文献	
	薬剤	添加濃度 (mg-Fe/L, mg-Al/L)	pH領域	急速攪拌 (rpm)	攪拌時間 (min)	急速攪拌 (rpm)	圧力 kgf/cm ²	循環率 (%)				浮上時間 (min)
カオリン懸濁液 85TU	FeCl ₃	8	-	200	1	20	7	-	10	26	87	1)
カオリン懸濁液 50mg/L	PAC	5	7~8	120	5	40	3	10	10	30	95	2)
下水生物処理水 原水濁度: 43TU	PAC	5	5.7	120	5	40	4	10~20	10	30	95	3)
し尿生物処理水 原水濁度: 25TU	FeCl ₃	20	5.5	120	5	40	4	10~20	10	30	95	3)
Microcystis懸濁液 2~700×10 ⁴ cells/mL	PAC	20	6.7~8.8	120	5	25	4	10	5	25	95	4)
赤潮海水 SS: 70~100mg/L	PAC 高分子凝集剤	27 1.5	未調整(pH8)	-	5	-	-	50	10	25	-	5)

表-9.3 薬剤の単価

用途	名称	化学式、略号	商品価格 (円)	単位	単価 (円/kg)	有効成分単価
凝集剤 pH調整剤	塩化第二鉄 (FeCl ₃ , 38%)	FeCl ₃	3,500	25kg-ポリ缶	140	1.05 (円/g-Fe)
	ポリ塩化アルミニウム (Al ₂ O ₃ 10~11%)	PAC	2,500	20kg-ポリ缶	125	2.50 (円/g-Al)
	塩酸 (工業用, 35%)	HCl	3,200	20kg-ポリ缶	160	0.46 (円/g-HCl)
	苛性ソーダ (工業用, 20%)	NaOH	4,500	25kg-ポリ缶	180	0.90 (円/g-NaOH)
	重曹 (工業用)	NaHCO ₃	4,500	25kg-粉末	180	0.18 (円/g-NaHCO ₃)
捕集剤・起泡剤	カゼイン (化学用)	LAS	18,000	10kg-粉末	1,800	1.80 (円/g-カゼイン)
	トデシルベンゼンサルホン酸ナトリウム (工業用)		10,000	20kg-ベースト	500	0.77 (円/g-LAS)

表-9.4 凝集・泡沫分離法の薬剤消費量およびそのコスト

薬剤	消費量	コスト (円/m ³)
都市下水	FeCl ₃ 18 (g-Fe/m ³)	19
	pH調整剤 4 (g-HCl/m ³)	2
	カゼイン 3 (g/m ³)	5
	合計	26
都市下水	PAC 18 (g-Al/m ³)	45
	pH調整剤 0	0
	カゼイン 3 (g/m ³)	5
	合計	50
アオコ懸濁液	PAC 10 (g-Al/m ³)	25
	pH調整剤 2 (g-HCl/m ³)	1
	カゼイン 15 (g/m ³)	27
	合計	53
赤潮海水	FeCl ₃ 40 (g-Fe/m ³)	42
	pH調整剤 0	0
	カゼイン 15 (g/m ³)	27
	合計	69
油濁水	PAC 3 (g-Al)	8
	pH調整剤 1 (g/m ³)	2
	カゼイン 10 (g/m ³)	8
	LAS	17
	合計	35

(処理水1m³当たり)

表-9.5 連続式凝集・泡沫分離処理のランニングコスト

薬剤費	用途	薬剤名	設定条件 (mg/L)	消費量 (g)	金額 (円/m ³)
電気料	凝集剤	PAC	20	20	50
	捕集剤・起泡剤	カゼイン	10	10	18
				小計	68
電気料	凝集プロセス	攪拌機		消費電力量 (KWh/m ³)	金額 (円/m ³)
		電磁定量ポンプ (PAC用)	95	0.16	1.7
	泡沫分離プロセス	電磁定量ポンプ (カゼイン用)	16	0.03	0.3
		空気自給式エアレーター	16	0.03	0.3
			120	0.20	2.2
合計				小計	4.5
					72.5

凝集・泡沫分離システムの総容量: 90L
 原水流量: 10L/min
 原水1m³の処理に要する時間: 100min

9.1.1 都市下水

排水の懸濁物除去プロセス（固液分離プロセス）において、凝集・加圧浮上法は、処理時間が最も速い処理法に位置づけられてきた。しかしながら、本研究の凝集・泡沫分離法は、その凝集・加圧浮上法と比較して、さらに処理時間が1/3倍に短縮でき、また、極めて高い懸濁物の除去率（濁度，SS）が得られる。しがたって、凝集・泡沫分離法の都市下水処理システムへの導入が期待される。現在、連続式の凝集・泡沫分離処理システムのパイロットプラントを某下水処理場内に構築し、都市下水の処理について検討を進めている⁶⁾。ここでは、その成果の一部を紹介し、凝集・泡沫分離法を下水処理システムに導入した場合における有用性について考察する。

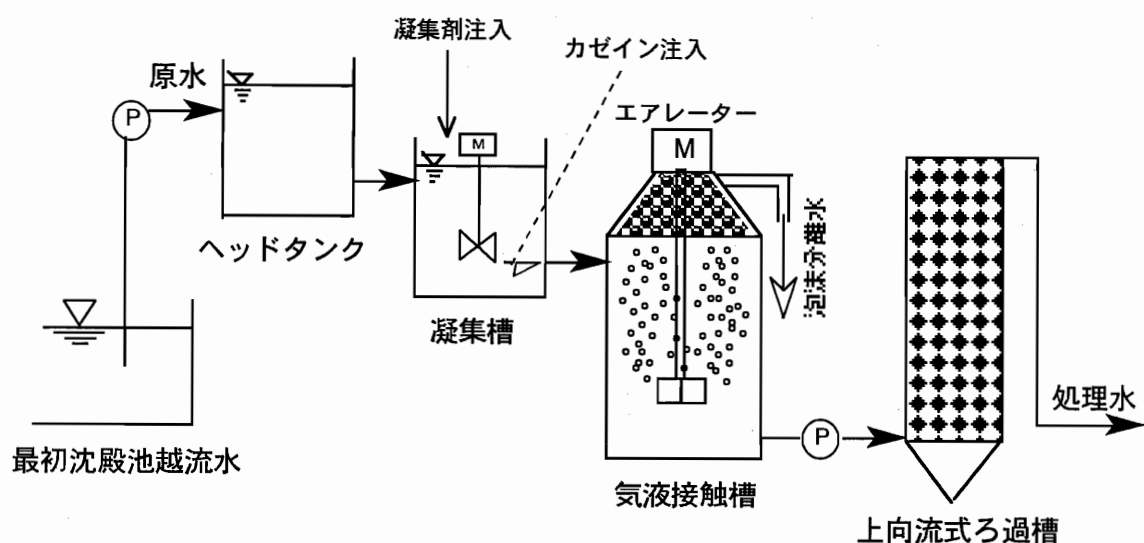


図-9.1 連続式凝集・泡沫分離-ろ過システム（都市下水処理）。

凝集・泡沫分離プロセスを導入した連続式の凝集・泡沫分離-ろ過システムのパイロットプラントを図-9.1に示す。最初沈殿池越流水を原水とし、凝集槽、泡沫分離槽、およびろ過槽からなる。カゼインとフロックとの混合は接続管内で行うことができるとして、カゼイン混合槽は設けず、カゼインを泡沫分離槽へ流出する管内に滴下した。本システムの凝集と泡沫分離のプロセスの運転条件は、次の通りである。原水流量，5L/min；凝集槽の水理的滞留時間（HRT），3分；泡沫分離槽のHRT，6分；PAC添加濃度，20mg-Al/L；カゼイン添加濃度，10mg/L。凝集・泡沫分離プロセスにおいて、懸濁物除去に要する時間はわずか10分以内で、処理水水質を濁度で約10TUに維持できた。凝集および泡沫分離の処理時間を回分式実験に準じて設定した場合、カゼイン添加濃度は、回分式実験で得られた条件よりも3倍多く必要とし、濁度除去率は85%前後となり、回分式の場合と比較して10%程度低下した。後続のろ過プロセスは、HRTを2時間に設定した場合において、泡沫分離槽で越流した懸濁物および溶解性有機物質が除去され、ろ過槽を通過した処理水濁度は6TU、TOCは11mg-C/Lとなった。凝集・泡沫分離-ろ過システムの処理水は、通常の下処理場の処理水に求められる水質と同等であった。生物処理の前段で懸濁成分を除去し、生物処理にかかる負担を軽減したことが処理時間の短縮化に至った要因であると考えられる。連続式凝集・泡沫分離処理におけるラン

ニングコストを試算すると、凝集槽30L、泡沫分離槽60Lの計90L規模のシステムにおいて、薬剤68円/m³、電気料4.5円/m³、合計72.5円/m³となる(表-9.5)。

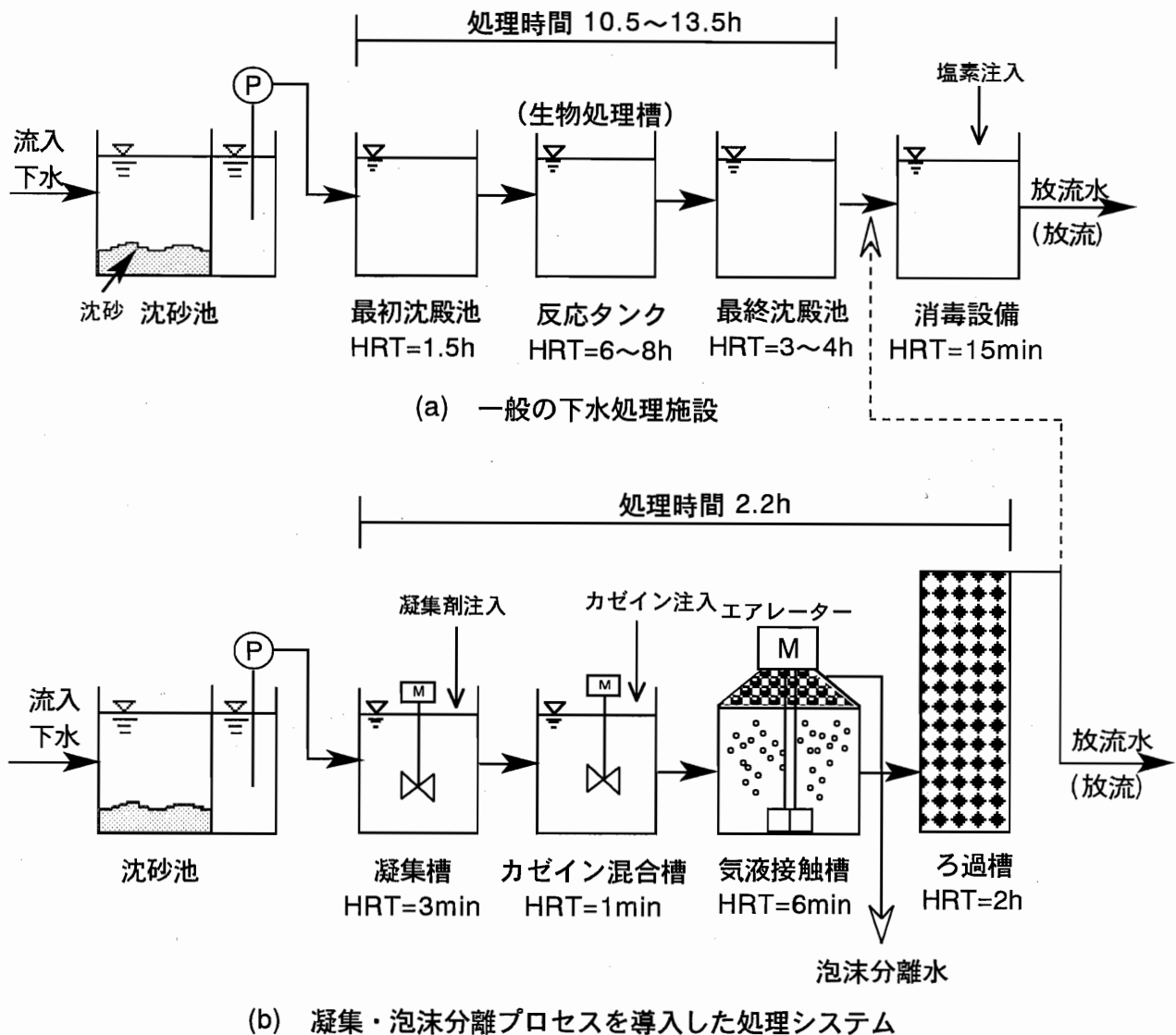


図-9.2 (a)一般の下水処理施設と(b)凝集・泡沫分離プロセスを導入した処理システム。

一般的な下水処理場の処理フローを図-9.2-aに示した。処理に要する標準的な時間は、最初沈殿池で1.5時間、反応タンク(標準活性汚泥法)で6~8時間、最終沈殿池で3~4時間の合計して10.5~13.5時間である⁷⁾。最初沈殿池越流水に対して、凝集・泡沫分離-ろ過システムの処理に要した時間は2時間10分である。現行の下水処理システムの処理時間を7~11時間も短縮できることになる。実際のシステムへの導入に当たっては、沈砂池流出水から凝集・泡沫分離プロセスを導入することが可能と考えられる(図-9.2-b)。下水処理場(標準活性汚泥法)の建設費は、最初沈殿池、反応タンク(曝気槽)、および最終沈殿池で全体の62%を占めると算出されている⁸⁾。凝集槽、泡沫分離槽、およびろ過槽からなるシステムは、最初沈殿池と最終沈殿池を必要とせず、反応タンクの規模も小さ

くできるので、建設費の大幅な削減に寄与できるものと考えられる。また、標準的な下水処理システムにおいて、好氣的生物反応に必要な曝気の電気料は、下水処理場の全ランニングコストの39%を占めると試算されている⁸⁾。泡沫分離プロセスでは、気泡が激しく混合・攪拌されるので、懸濁物除去による生物処理への負荷削減と同時に、酸素を効率的に溶解することができる。生物処理時間の短縮化および酸素の効率的供給は、ランニングコストの削減に寄与できると考えられる。

9.1.2 産業廃水

産業廃水の中でも、油滴が微細にエマルジョン化した油濁廃水は、処理が困難な廃水の一つである。油分や有機懸濁物などの沈降性の悪い物質は、気泡を利用した起泡分離法が効果的である。従来、油滴が微細にエマルジョン化した油濁廃水からの油分除去には、凝集・加圧浮上法が最も有効であるとされ、多数の研究が報告されている⁹⁾。凝集・加圧浮上法による油濁廃水処理の技術は確立され、今日の石油精製所や製鉄所など多くの廃水処理システムに広く採用されている。硫酸アルミニウムやPACなどのアルミニウム塩凝集剤と、さらに微細気泡が付着・内包できるように、高分子凝集剤で大型フロックに成長させてから、あるいは成長させる過程で大量の微細気泡を供給して浮上させる仕組みになっている。凝集剤の添加濃度は廃水によって大幅に異なるが、凝集プロセスは、急速攪拌3～5分（アルミニウム塩）、緩速攪拌（高分子凝集剤）5～10分の合計8～15分、浮上プロセスは、加圧水循環率50%で浮上分離時間20～40分が最も一般的な操作条件である。全処理行程の所要時間は、28～55分となる。今日における油濁廃水処理において、処理能力、システムの安定性からみて凝集・加圧浮上法に匹敵する処理技術は開発されていない。しかし、凝集・加圧浮上法による処理システムは、浮上したスカム回収の調整ならびに大型の高加圧装置の維持管理に多大な労力を要しているのが現状である。

ところが、本研究で開発した凝集・泡沫分離法は、PAC、カゼイン、およびLASを用いることによって、油濁水から極めて効率よく油分を除去できることが明らかとなった（第8章、8.5）。凝集・泡沫分離法は、凝集および泡沫分離の全処理行程の所要時間が10分と極めて短い点、凝集・加圧浮上法のように加圧水を循環率させる必要がなく、高加圧装置は不要であり、泡沫分離装置が単純な点において、既存の凝集・加圧浮上法よりも優れていることが強く示唆された。また、凝集・泡沫分離法は、某精油所実廃水および某製鉄所実廃水について、PACおよびカゼインの添加濃度を適切に設定すれば、油分濃度を5mg/L以下（公共用下水道排除基準ならびに公共用水域の一律排除基準）に除去できることがわかっている。油濁廃水処理に消費される薬剤のコストは、廃水の水質とその変動によって大きく異なることが予想されるが、凝集・泡沫分離法の油濁廃水処理の薬剤消費量は、凝集・加圧浮上法の場合とほぼ同量のPACが必要となり、さらに捕集剤のカゼインを必要とするため、凝集・加圧浮上法よりも若干高くなると推測される。しかしながら、凝集・泡沫分離法は、凝集・加圧浮上法に用いられる高分子凝集剤を必要とせず、いずれの方法の場合もPACのコストの方が圧倒的に大きいので、カゼインの使用が極端に薬剤消費コストを引き上げることは考えられない。また、実廃水中には、LASなどの界面活性剤が混入している場合が多く、薬剤としてのLASの消費量は少なくて済むと推察される。

現在、凝集・泡沫分離法の産業廃水処理技術としての実用性を検討するため、某工場廃水処理施設内において、連続式パイロットシステム（600L規模、図-9.2-b参照）を構築し、実廃水の処理実験を実施している。工場廃水の水質は、時間単位で濁度で数倍から十倍以上に変動するが、本システムは、その水質変動に対して優れた適応能力を示し、濁質および油分については、95%以上の高い除去率が得られている。流量・送気量の運転条件、気液接触槽の設計の最適化、ならびにスケールアップに関する検討が今後の課題である。

凝集・泡沫分離法の処理システムは、凝集と泡沫分離（浮上）のいずれのプロセスの処理時間においても、既存の凝集・加圧浮上法と比較して、1/5～1/3倍に短縮でき、処理装置を縮小できる。我が国の各種工場廃水処理施設の用地は制限されている場合が多く、新たな代替法として泡沫分離システムを採用することによる建設費と用地面積の削減への寄与は大きい。

9.1.3 淡水植物プランクトン

湖沼やダムに異常発生した*Microcystis* sp.などの淡水植物プランクトンを回収除去する方法としても、凝集・加圧浮上法が効果的であることが報告されている^{4), 10)}。建設省は、PACを用いた凝集・加圧浮上法を採用（揚水）したアオコ回収船を実規模で構築し、茨城県霞ヶ浦の浄化を行っている。アオコ回収船のシステムは、採水、凝集、加圧浮上、および回収汚泥の脱水の各プロセスからなり、処理能力は、30m³/h以上となっている¹¹⁾。そこで、加圧浮上プロセスを泡沫分離プロセスに置き換えることによって、浮上分離時間の短縮化が期待できる。基本的なシステムの構成は、都市下水のシステムの凝集槽の後段に、フロック疎水化を十分に行うためにカゼイン混合槽を組み込み、泡沫分離処理をすれば良い。しかしながら、カゼインを多く必要とするため、凝集・加圧浮上法と比較して、薬剤のコストは2倍程度高くなる。

実際の湖沼・ダムの淡水植物プランクトンによる濁水の凝集条件は、生育条件や環境条件によって大幅に変動し、処理を困難にしている要因である。凝集・泡沫分離法においても凝集プロセスは極めて重要である。植物プランクトンの有機性代謝物質による凝集剤のAl³⁺あるいはFe³⁺のキレート化は凝集阻害を引き起こすと考えられ¹²⁾⁻¹⁴⁾、凝集剤の添加濃度を高めなければならない。淡水植物プランクトンに適用する際には、実際の現場の原水の適切な凝集剤添加濃度の把握が不可欠である。ただし、凝集剤添加濃度の増加は、薬剤費の増大となる。

湖沼やダムなどの水量は膨大なため、その全水量を処理することは、処理能力およびコストの両面からも極めて困難である。植物プランクトンはある水域に集積して発生する場合が多い¹⁵⁾ことから、集積機構とその水域を把握して、局所的に対処することが重要となろう。

9.1.4 赤潮

赤潮海水の連続処理に関する検討は行っていないが、基本的には、淡水植物プランクトンと同様に、採水、凝集、泡沫分離の各プロセスからなる連続処理が可能であると考えられる。ただし、赤潮海水を処理対象とする場合には、大量の原水を処理しなければ目的を達成できない。そこで、スケールアップ

プの可能性および経済的観点から、赤潮海水からの赤潮プランクトンを回収除去の可能性について考察する。

1970年代において、水産庁を中心として、凝集・加圧浮上法を採用した赤潮回収船が建造され、実際の海域で試験操業されている⁵⁾。建造費用は5億1,700万円、運用費用（12時間連続操業で1日分）は136万円（内訳：燃料費、34万円；薬剤費、35万円；人件費、12万円；支援船55万円）となっており、移動可能な船上において、海面の赤潮海水を船内に引き込み、連続的に処理できる最大規模のシステムと考えられる。赤潮回収船の処理フローは、海水吸い込み、凝集、加圧浮上、回収汚泥の脱水、および汚泥焼却の各プロセスからなる。しかしながら、回収したスカムの水分量が多く、効率的な処理が困難であった。また、加圧浮上法はフロックを微細気泡で静かに浮上させなければならず、振動や揺れによって浮上プロセスが極端に悪化することから、船上の処理システムとしては不向きであり、実用化に至っていない。一方、空気分散方式で浮上分離できる泡沫分離法は、激しく分散される気泡にフロックを吸着させ、泡沫として分離回収することから、振動や揺れに対応できる。また、加圧装置が不要で、凝集・加圧浮上法と比較してシステムの構成は単純である。したがって、凝集・泡沫分離法を採用した赤潮回収船の建造も技術的に容易であると考えられる。

当時の赤潮回収船の処理能力は、表層1mの赤潮海水を引き込み、凝集・加圧浮上装置部は1,800m³/hの処理能力で設計されている。凝集処理時間15分、浮上時間10分で、システム内のHRTは合計25分となっている。ここで、凝集・泡沫分離法のシステムの導入を想定すると、凝集処理時間3分、泡沫分離時間4分の合計7分（表-9.1）であり、赤潮回収船と同規模のシステムにおいて、約3倍の5,400m³/hの処理能力が期待できる。12時間で処理可能な水量は64,800m³、水表面積（水深1m）は64,800m²（254m×254m）と見積もられる。処理水量が増加すれば、薬剤消費量も増加し、薬剤費は447万円（64,800 m³×69 円/m³）となる。回収された赤潮汚泥の焼却灰は、プランクトンの残渣のリン成分および鉄塩凝集剤の鉄分を含有し、貧栄養の海洋への還元や海藻増殖等への施肥に利用できると考えられる。

赤潮は、主に海面網生け簀によるハマチ養殖に被害をもたらす。生け簀一基当たりの水面積は64m²（8m×8m）でハマチ1.5トンが生産できるとされ¹⁶⁾、ハマチ（ブリ）単価を800円/kgとすると、生け簀一基当たり120万円の生産額となる。赤潮回収船で約1,000基分（64,800÷64≒1,000）の網生け簀の表層が処理可能であるから、赤潮発生海域に出動して、12時間連続操業すれば、最大で1億2,000万円相当の被害を防ぐことが可能と算出される。先の運用費用の136万円に凝集・泡沫分離法による薬剤費の増加分を加算すると薬剤費が突出することとなり、合計548万円となってしまう。しかし、赤潮被害による生産額の損失を考えれば、決して過度に高い金額ではないであろう。

わが国では古くから赤潮に関する関心が極めて高く、赤潮プランクトンの生理生態ならびに発生機構に関しては、古くから今日に至るまで数多くの研究がなされ、貴重な知見が集積されてきている¹⁷⁾。最近では赤潮の発生予知に関する手法が検討されはじめ、実施段階に進んできている¹⁸⁾。しかしながら、赤潮による被害額は、平成8年度と9年度では、それぞれ2億2,452万円（発件数、29件）と6億4,548万円（19件）であり、ここ十年、被害額は減少する傾向がみられない。赤潮の発生予知の情報を最大限に活用して赤潮回収船を操業し、適切な海域で効果的に赤潮を回収することができれば、被害額を大幅に減額できると考えられる。赤潮回収船の建造費は、初期投資としては非常に大き

いものになってしまうが、被害額と船舶の操業可能年数を考慮すると、決して過大投資になることはないと思われる。

9.2 泡沫分離プロセスを組み込んだ魚類飼育システムの実用性

9.2.1 経済性

閉鎖循環式泡沫分離・硝化脱窒システム（以降、閉鎖式システムと称する）のランニングコストは、流水式システムと比較すると、約50%増になった。これは、閉鎖式システムに設置した気液接触槽のエアレーター、循環ポンプ、およびpH水温制御装置の稼働によって、電気料が約2倍高くなったためである。閉鎖循環式システムによって、流水式システムよりも高い利益を得るためには、魚を高密度で飼育しなければならない。そこで、魚類の酸素消費量と閉鎖循環式システムの酸素供給能力から十分な安全を考慮して閉鎖循環式システムにおける魚類の飼育限界密度を求めてみると、10~14%となった。現行の流水式あるいは循環式システムでは1%前後の飼育密度で飼育されているのが一般的であり¹⁹⁾、閉鎖循環式システムが超過密条件で飼育できることが明らかである。第8章8.6において検討したヒラメやウナギなどの単価の高い魚種については、最終的に10%程度の生育密度で生産できれば、流水式システムに匹敵するかそれ以上の利益が得られると見積もられた。

海産魚類のヒラメをはじめとする数種類の高級魚種については、既に、流水式、循環式システムなどの陸上施設で養殖されている場合が多い²²⁾。また、内水面漁業の給餌養殖の大部分は、魚を人工池で飼育する池中養殖と呼ばれる方式で、流水式、半流水式、止水式、循環ろ過式のいずれかである¹⁷⁾。既存の設備として、飼育槽（池）、ろ過槽、およびポンプ類などを現有している場合がほとんどである。既存のシステムに、気液接触槽（泡沫分離プロセス）、硝化槽、および脱窒槽を付設すれば、閉鎖循環式システムが構築できる。閉鎖循環式システムの設備費および建設費は算定できなかったが、既存の流水式システムや循環式システムから閉鎖循環式システムに改良する場合には、初期投資額は、大幅に削減できると考えられる。また、閉鎖循環式システムでは、飼育期間中に注水することないので、注水中に含まれる可能性のある病原性微生物や寄生虫がシステム内に入る可能性がないので、発症するリスクは著しく低いと考えられる。養魚の発症は、生産量すなわち収入に直接影響を及ぼすので、発症リスクの低下は、経済的にも効果的である。

泡沫分離プロセスを導入したシステムではないが、電力中央研究所の研究グループも閉鎖循環式システムによるヒラメ養殖の経済性について初期投資額および生産費から評価し、経済的に成り立つ可能性が高いと推察しており²⁰⁾、本論文と同様の結論を示している。

9.2.2 閉鎖循環式システムのメリット

閉鎖循環式システムは、魚を飼育する際に発生する汚濁水・汚濁物を環境に排出させないことに主眼を置いて研究している。そこで、閉鎖循環式システムの開発は、環境への負荷削減による効果を経

済的に評価することが重要である。しかしながら、環境の価値、負荷削減量による環境へのメリットを価格で評価することは極めて困難である。そこで、水環境へのメリットをいくつか挙げて、その期待され得る効果を推察した。

海産魚養殖（海面養殖，陸上養殖）

・赤潮の発生件数の減少によって、海面養殖の赤潮被害を軽減できる。赤潮による被害額は、環境庁の調べでは平成9年度で6億4,548万円（19件）であるから、仮に1件でも防止できれば、単純に考えて約3,400万円の経済的効果があることになる。

・海域への負荷削減は、沿岸域の自然環境（岩礁，干潟，藻場）の回復によって、生物生産の向上，漁業資源の回復が期待できる。漁業補償とは，漁業者に対して，埋め立て等によって消滅する漁業資源を保有する沿岸域の価値を金額で補償するものである。そこで，漁業補償額（関西空港工事，中部空港工事，その他原子力発電所）を沿岸域の価値を表す目安として推定すると，一つの漁業組合が受け持つ沿岸域当たり30～250億円程度である（インターネット調べ）。負荷によって自然環境が消滅した海域が，負荷削減によって，その沿岸の一部が回復されただけでも，その環境修復の価値は極めて大きい。

内水面養殖

・内水面養殖場は，河川・湖沼に隣接している場合が多い。また，上流域に位置する場合も少なくない。栄養塩類や有機物の河川・湖沼への流入負荷の削減は，富栄養化の解消を促し，アオコなどの発生を防ぐことが期待できる。水道水は，我々の健康に直接的に影響を及ぼす可能性があるため，水道水源の水質浄化とその維持は極めて重要である。

閉鎖循環式システムを用いて，産業として養殖が立ちゆくか否かの判断は，今後の展開を待たなければならない。しかしながら，技術的，経済的，ならびに負荷削減による水環境へのメリットを鑑みると，閉鎖循環式システムは，新しい養殖形態の担い手として十分に期待できる。

9.3 小括

泡沫分離法の実用性について，処理能力と経済性から評価した。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 下水処理に対して，凝集・泡沫分離プロセスとろ過プロセスを組み合わせた連続式システムによって二次処理水の目標とされる水質以下まで処理できた。総容量90L規模のシステムの処理能力は，処理時間2時間10分，処理水濁度6TU，および処理水量0.6m³/hである。薬剤費は凝集剤の他にカゼインを消費するため，凝集沈殿と比較すると約40%増となるが，処理時間および処理施設の大幅な短縮・縮小化が可能である。凝集・泡沫分離プロセスの下水処理システムへの実用性は極めて高い。
- (2) モデル油濁廃水に対して，凝集・泡沫分離法の処理システムは，凝集と泡沫分離（浮上）のいずれのプロセスの処理時間においても，既存の凝集・加圧浮上法と比較して，1/5～1/3倍に短縮できる。また，システムの単純化と処理装置のコンパクト化が可能である。処理施設用地に制限のある場合に有利であり，建設費の削減にも寄与できる。

- (3) 凝集・泡沫分離法によるアオコならびに赤潮の回収・除去は、カゼインを多く必要とするため、凝集・加圧浮上法と比較して、薬剤のコストは2倍程度高くなると推察された。アオコや植物プランクトン、ならびに赤潮の発生する湖沼・ダム、あるいは海域の水量は膨大なため、その全水量を処理することは、処理能力およびコストの両面からも極めて困難であると考えられる。植物プランクトンを直接的に回収・除去するためには、水域の植物プランクトンの集積機構および発生機構を把握し、局所的に対処することが重要である。赤潮の被害額は毎年数億円にも上っており、初期投資額は大きくなるが、凝集・泡沫分離法を採用した赤潮回収船の建造による抜本的対策を再検討すべきと考えられる。
- (4) 閉鎖循環式の泡沫分離・硝化脱窒システムによる魚類養殖（ヒラメ、ウナギ）は、電気料金の負担が大きくなるものの、高密度で飼育することによって、採算がとれる可能性が示唆された。また、負荷削減の観点から評価すると、環境へのインパクトの軽減は経済的にも非常に大きいと推察された。

第9章 引用文献

- 1) Hyde, R. A., D. G. Miller, R. F. Packham and W. N. Richards (1977) Water clarification by flotation, Journal of Americal Water Works Assiciation, July, 369-374.
- 2) 丹保憲仁, 福士憲一, 太田等 (1984) フローテーションテストによる溶解空気浮上法と沈降分離法の比較, 水道協会誌, 53, 17-27.
- 3) 福士憲一, 丹保憲仁 (1982) 生物学的処理水の清澄処理のための加圧浮上法の研究, 下水道協会誌, 19, 50-58.
- 4) 福士憲一, 佐藤敦久, 長谷川孝雄 (1995) *Microcystis sp.*の凝集-浮上分離特性, 水道協会雑誌, 64, 2-12.
- 5) 日本水産資源保護協会 (1976) 赤潮防除技術事業化試験 報告書(日本水産資源保護協会), 47 pp., 日本水産資源保護協会, 東京.
- 6) 手金浩嗣, 丸山俊朗, 鈴木祥広 (2000) 連続式泡沫分離処理システムにおける下水処理, 第34回日本水環境学会年会講演集, 544.
- 7) 建設省都市局下水道部監修 (1994) 下水道施設計画・設計指針と解説 (後編), 762 pp., 日本下水道協会, 東京.
- 8) 宗宮功, 金東夏, 立木裕子 (1994) 高度下水処理法の処理効率と経済性の評価, 下水道協会誌, 31, 32-40.
- 9) Bennett, G. F. (1988) The removal of oil from wastewater by air flotation: A review, CRC Critical Reviews in Environmental Cotrol, 18, 189-253.
- 10) Edzwald, J. K. and B. J. Wingler (1990) Chemical and physical aspects of dissolved-air flotation for the removal of algae, Aqua, 39, 24-35.
- 11) 建設省霞ヶ浦工事事務所: アオコ採取船みずすまし (配布資料) .
- 12) 真柄泰基, 国包章一, 相沢貴子 (1986) 藻類の生産する有機物の凝集阻害に関する基礎的研究, 水道協会雑誌, 55, 33-39.
- 13) 菅原繁, 黒川眞弓, 真柄泰基 (1995) *Microcystis spp.*群体から得られた有機物質が凝集沈殿処理に与える影響, 水道協会雑誌, 64, 2-11.
- 14) 菅原繁, 黒川眞弓, 真柄泰基, 胡建英 (1996) *Microcystis spp.*コロニーの細胞由来有機物質 (AOM) が凝集沈殿処理に与える影響, 水道協会雑誌, 65, 39-50.

- 15) 山田正人, 宗宮功, 小野芳朗, 小林尚礼 (1995) ダム湖における*Peridinium*淡水赤潮の集積機構の評価, 水環境学会誌, 18, 775-783.
- 16) 隆島史夫 (1997) 水族育成論, 236 pp., 成山堂書店, 東京.
- 17) 岡市友利 (1997) 赤潮の科学 (第二版), 337 pp., 恒星社厚生閣.
- 18) 南西海区水産研究所 (1990) 赤潮の発生予知技術の開発に関する研究, 179 pp., 南西海区水産研究所.
- 19) 安永義暢, 浮永久 (1993) 養殖生産技術に関するデータ「養殖93養殖データブック」, pp. 56-99, 緑書房, 東京.
- 20) 本田晴朗, 菊池弘太郎, 岩田仲弘, 古田岳志 (1999) 実用循環濾過式ヒラメ養魚システムの開発, 電力中央研究所報告, U98065, 1-17.