

第2章 気泡を利用した分離法

界面活性物質の気泡の気液界面への吸着あるいは集積は、古くから知られている現象である。したがって、気泡を利用した分離法すなわち起泡分離法は、決して新しい方法ではなく、過去において盛んに研究・開発された経緯があり、現在の工業技術に利用されている事例もいくつか存在する。本論文は、起泡分離法の範疇に属する泡沫分離法による新たな固液分離法の確立を目指しており、既往の研究成果は貴重な示唆を与えてくれる。

そこで本章では、過去において研究・開発された起泡分離法の種類および原理を調べ、現在に至った経緯と問題点を整理し、本研究の位置づけと新規性を明確にすることにした。

2.1 起泡分離

起泡分離法には、溶液に気泡を送気するか、あるいは析出させて、溶液中に存在する溶解性物質（イオン、溶解性有機物）、あるいは懸濁性物質（コロイド、鉱物粒子、粘土粒子、その他、水中に分散する種々懸濁物）を気泡に吸着させ、浮上させて分離する方法がある。分離・除去を目的とする物質、気泡の供給方法、分離・回収方法などによって、操作手法は多岐にわたるが、これら気泡を利用した分離法を総称して、起泡分離¹⁾（発泡分離ともいう、Adsorptive bubble method）という。分離・除去を目的とする対象物質が溶解性であるか、それとも懸濁性であるかによって、液液分離と固液分離に分類される。

気泡の供給方法は、析出方式と分散方式に大別される。析出方式には、加圧条件で気体（空気や窒素ガス）を溶解させた水を常圧で解放することによって微細気泡を析出させる方式と、減圧して溶解していた空気を析出させる方式があるが、現在では、加圧式が一般的である。析出方式の気泡の大きさは、加圧条件によって、ある程度の制御が可能で、数 μm ～数 $10\mu\text{m}$ 程度であるとされ、析出した微細気泡は水中を静かに浮上する。気泡の供給量は、加圧強度と加圧水の注入率で制限される。一方、分散方式には、吹き込み式と攪拌による引き込み式がある。分散方式の気泡の大きさは、溶液の表面張力によって大きく左右されるが、数 $100\mu\text{m}$ ～数 mm であり、析出方式のそれと比較してワンオーダー以上大きく、気泡は激しく揺れながら浮上する。気泡の供給量は、送気流量と送気時間で任意に増減できる。

分離・回収方法には、対象物質（固体あるいは溶解性物質）を気泡に吸着させ浮上させて、泡沫を生成させずに水面表層でスカムとして回収する方法と、界面活性物質を利用して水面上に泡沫を生成させて、対象物質と界面活性物質の両者を泡沫として同時に液側から分離・回収する方法がある。

2.2 浮遊選鉱法とイオン浮選

浮遊選鉱法（英語では単にFlotationという）は、鉱物工学の分野において、有用な鉱物粒子を選択的に精製・分離する方法として、広く工業的に利用されてきた起泡分離法であり、学術的・技術的に多数の知見が集積されている²⁾。浮遊選鉱法には、大きく分けて多油浮遊選鉱法、水面浮遊選鉱法、ならびに泡沫浮遊選鉱法があるが、今日我々が一般に浮遊選鉱法と称している方法は、泡沫浮遊選鉱法のことである^{2), 3)}。原理は、界面活性剤などの有機試薬を用いて、特定の鉱物粒子界面を疎水化させて気泡に吸着させて水面に集積させ、さらに界面活性剤で水面上に泡沫を生成させて、泡沫とともに鉱物粒子と界面活性剤を同時に回収するようになっている。目的とする物質を気泡に吸着させるために用いる薬剤を捕集剤（Collector）、泡沫を生成させるために用いる薬剤を起泡剤（Frother）と称している。鉱物粒子界面の疎水化は、最も重要なプロセスであり、泡沫浮遊選鉱法の普及の背景には、キサントゲン酸塩に代表される優れた捕集剤が見いだされたためであるとされる³⁾。浮遊選鉱法は、水中に分散している微細鉱物粒子を分離することから、固液分離を目的とした起泡分離の典型的な方法であるといえる。現在においても、鉱物粒子回収の更なる効率化を目指して、粒子と捕集剤の固液界面における反応機構やそれに及ぼす共存物質の影響に関する詳細な研究が進められている⁴⁾。

浮遊選鉱法から発展して、廃水中の重金属イオンの除去を目的とした諸種のイオン浮選法（Ion flotation）が研究・開発された^{5), 6)}。イオン浮選法は、水処理における主要な液液分離プロセスである。イオン浮選法は、おおまかにみると、単純イオン浮選（Ion flotation）、吸着粒子浮選（Adsorbing particle flotation）、ならびに沈殿浮選（Precipitate flotation）に分類される⁷⁻⁹⁾。

イオン浮選法は、対象物質が溶解性のイオンであるので、イオンを吸着粒子、沈殿物あるいはコロイド粒子などの固体として分離回収する場合においても液液分離として位置づけられる。

単純イオン浮選は、界面活性剤が気泡界面に吸着することを利用して、正荷電の重金属イオンと負荷電の親水基を有する界面活性剤を加えて、気泡の界面に重金属イオンをイオン結合（錯体形成）あるいは静電的に吸着させて浮上分離する方法である。目的とする重金属イオンと捕集剤としての界面活性剤の選定が処理のポイントとなる。

吸着粒子浮選は、金属イオンを吸着剤（活性炭、イオン交換樹脂や粘土粒子）に吸着させてから、その吸着粒子の界面を捕集剤で疎水化して、気泡に吸着させて浮上分離する方法である。

沈殿浮選は、金属イオンをpH調整で水酸化物として沈殿物を生成させ、その沈殿物の界面を捕集剤で疎水化して、気泡に吸着させて浮上分離する方法である。単純イオン浮選と比較すると、捕集剤の使用量は大幅に減量化できる。また、鉄塩を加えて、金属イオンを水酸化鉄で共沈させるか、あるいは水酸化鉄コロイドに吸着させてから、そのコロイドを疎水化して、気泡に吸着させて浮上分離する方法（コロイド吸着浮選法、Adsorbing Colloid Flotation）⁷⁻¹²⁾も、沈殿浮選の範疇に属するとみなせる。

イオン浮選法の用途範囲は広く、重金属イオンのみならず、毒性の高いヒ素^{13), 14)}や染料^{15), 16)}の除去に関する実験的研究が報告されている。

ところで、水処理プロセスにおいて、除去を目的とする物質をスカムで回収する場合と、泡沫で分離する場合では、泡沫生成プロセスを要するか否かが極めて重要なポイントである。しかしながら、

イオン浮選法に関する多数の研究において、浮上した目的物質の回収方法について明確に言及した報告は少ない。これは、イオン浮選の原理が導入した気泡の上昇作用を利用して、目的物質を浮上させることに主眼がおかれているためであると考えられる。佐々木¹⁾は、イオン浮選の説明において、‘イオン浮選は、通常泡沫層はつくらないが、泡沫が結果的にはできてもさしつかえない’と記述している。また、スカム（不溶性皮膜）の明確な定義も困難であり、スカムと表現されるものの中には、明らかに泡沫と見受けられる場合もある¹⁷⁾。イオン浮選に関する研究の焦点は、目的物質の種類、捕集法、捕集剤の種類と添加濃度、およびpH条件である。

スカムの回収は、水面付近での溶液の乱れや返流が生じないように静かに行うことが望ましく、浮遊選鉱法で利用される攪拌空気引き込み式の浮選機では、気泡供給が激しく、液に乱れが生じるので不向きであるとされ、気泡析出方式または送気式が採用されている。気泡析出方式には、加圧装置の敷設が必要である。また、スカム回収法では、捕集剤として機能する界面活性剤を添加するだけで良い。一方、泡沫分離の場合には、目的物質の界面が疎水化されていれれば、気泡が激しく供給されても水面上の泡沫に濃縮されるので、気泡の供給方法の制約は受けないと考えられる。対象物質を泡沫によって容易に分離・回収できる反面、適切な捕集剤と起泡剤を選定しなければならない。各種イオン浮選法における実際の処理プロセスにおいて、泡沫生成を目的として起泡剤を利用した事例は少ない。

浮遊選鉱法は、鉱物粒子の分離・精製、すなわち固液分離を目的として、粒子疎水化および泡沫生成のプロセスに必要な捕集剤および起泡剤を用いる。これに対して、イオン浮選法は、液液分離を目的として、目的イオンを気泡に吸着あるいは捕集するための捕集剤のみを利用する。我が国では、“浮遊選鉱”の流れを継いで“イオン浮選”と称しているが、目的物質の存在状態、原理、および処理プロセスは、大きく異なる可以考虑することができる。

2.3 固液分離を目的とした凝集・加圧浮上法の開発

石英、長石、カオリン、モンモリロナイトなどの非金属鉱物（粘土粒子も多く含まれる）に関する浮遊選鉱法の技術は、かなり古くから確立されている²⁾。しかしながら、水処理の固液分離プロセスとして、起泡分離が用いられるようになったのは、それほど古くない。浮遊選鉱法の原理をそのまま利用して、単に懸濁物界面を疎水化させて、空気分散型で浮上分離する方法は1950年～1960年代にかけて盛んに研究されたようである¹⁸⁾が、処理条件の制限が厳しく、分離時間が長いことなどから、検討段階で留まっている。下飯坂ら¹⁹⁾は、上水処理における原水の懸濁物除去を目的とし、ヘマタイトと石英粉末を懸濁物試料として、界面活性剤と高分子凝集剤を用い、気泡接触型（気泡分散型）と気泡析出型の浮上法による懸濁物除去に関する研究を1970年に報告している。高分子凝集剤を併用することによって、気泡析出型の浮上法における処理性が著しく向上することを明らかとしている。上水処理においては、界面活性剤や高分子凝集剤の利用は不向きであったが、懸濁物を凝集処理してから、浮上分離する処理プロセスを提案した先駆的研究であると考えられる。

英国・北欧の研究グループ（Water Res.Ctr., WRCと略）が1971～1973年にかけて、凝集処理プロセスと無注薬の加圧式浮上分離プロセスを組み合わせた水処理システムを構築し、実プラントの完

成まで成し遂げている²⁰⁾。凝集・加圧浮上法（単に加圧浮上法と称される場合が多い、Dissolved air flotation, DAFと略される）の誕生である。これ以降から現在に至るまで、凝集・加圧浮上法は、水処理の固液分離プロセスとして広く採用されることになる。福士・丹保らによる凝集・加圧浮上法における詳細な動力的解析に関する一連の研究^{21)~23)}は、我が国における凝集・加圧浮上法の発展に寄与するところが大きい。今日において、浮上法といえば、凝集・加圧浮上法を指すといっても過言でない。

WRCによる凝集・加圧浮上法において、画期的であった点は、凝集したフロックを捕集剤無しで気泡と吸着して浮上分離できること利用した点である。一般に、親水性物質は、気泡の気液界面には吸着されないと考えられ、従来の起泡分離における捕集作用と大きく異なる。WRCは、親水性の鉄やアルミニウム水酸化物フロックが気泡に吸着できる理由として、天然水には、フロックを気泡に吸着させて連行できるに十分量の有機物質が存在する可能性のあること、ならびにフロックへの微細気泡の物理的巻き込みが考えられるとしている²⁰⁾。また、松岡ら²⁹⁾は、沈殿浮選法において、加圧式を用いる場合において、金属水酸化物のゲル状構造物の中に微細気泡が析出して、捕集剤を添加しなくても、金属水酸化物を良好に浮上できることを見出ししている。丹保ら²³⁾は、水酸化物フロックの正荷電と気泡の負荷電による静電的吸着（付着）機構から解析している。しかし、フロックと気泡の吸着機構（あるいは付着機構）に関する詳細は不明な点が多い。ただし、吸着・付着力が極めて弱いことは明らかである。したがって、凝集・浮上処理のポイントは、良好なフロックを形成させること、微細気泡をフロック内や界面に析出させること、水の乱れの生じないように静かに浮上させること、および水面のスカムを効率よく回収することであり、これらの諸条件を常に適切に維持管理することが重要となる。

2.4 泡沫分離法の研究背景

界面活性物質を含む液体に気泡を供給すると、水面上に泡沫を生じ、その泡沫に界面活性物質が濃縮される。この現象は古くから知られ、すでに1937年にSchutz³⁰⁾は、タンパク質水溶液に気泡を送気する実験を行い、泡沫にタンパク質が濃縮され、分離されることを報告している。生化学実験における天然の界面活性物質の分離法として、また、食品産業におけるタンパク質の回収法あるいは精製法として、今日も利用されている^{31)~34)}。また、Lemich and Lavi³⁵⁾は、市販の界面活性剤水溶液に窒素ガスを送気して、生成される泡沫を回収し、泡沫に界面活性剤が濃縮され、水溶液中の界面活性剤濃度が減少することを報告している。これらのように、溶液中に完全に溶解している界面活性物質の分離・回収を目的として、気泡を利用して泡沫に界面活性物質を濃縮させ、その泡沫を分離回収する方法を、元来、泡沫分離法（Foam Separation, Foam Fractionation）と称してきた経緯がある。したがって、泡沫分離法は、浮遊選鉱法やイオン浮選とは範疇の異なる処理法と認識され、水処理においては、下水・廃水中の合成洗剤^{36)~39)}や製紙工場の毒性物質^{40)~41)}の除去法として検討されている。吉田と竹内⁴²⁾は、‘浮遊選鉱法と泡沫分離法では、同じ泡沫を利用する分離方法においても、本質的に全く異なる’と述べている。従来の水処理法としての泡沫分離法において、泡沫を利用して、界面活性剤以外の物質、すなわちコロイドや懸濁物を除去する認識はなかったと考えられる。

除去を目的とする物質が、界面活性物質以外のイオンやコロイド、あるいは懸濁物であったとしても、泡沫生成プロセスを利用して、泡沫中にその目的物質を濃縮し、分離回収する方法は、“泡沫分離”と表現することが最も適当であると考えられる。

2.5 固液分離を目的とした泡沫分離法の意義

今日までに検討・開発されてきた諸種の起泡沫分離による処理法の原理ならびに処理のポイントを概説してきた。現在、水処理において、起泡沫分離に属する固液分離プロセスとして、実用化されているものは、凝集・加圧浮上法以外には、見あたらない。

そこで、本研究では、凝集・加圧浮上法と対比して、気泡の供給方式において全く異なる泡沫分離法に着目した。泡沫分離法においては、必然的に空気分散方式となることから、つぎの様な特長が挙げられる。

- ・空気分散方式であるから、加圧装置などは不要で、装置が簡単である。
- ・気泡の浮上速度は極めて速く、分離時間の短縮化が期待できる。
- ・気液界面の表面積を支配する気泡供給量は、送気流量と送気時間によって、任意に設定できる。
- ・水面上に生成される泡沫を分離回収すればよいので、回収操作が容易である。

したがって、固液分離を目的とした泡沫分離法が開発されれば、分離速度、装置の単純化、および維持管理の容易性において、有用性は極めて高い。それにも関わらず、今日まで開発に至らなかったことは、多くの問題が存在していることを示唆している。

空気分散方式は、懸濁粒子を凝集処理することによって、著しく処理性が低下することが報告されている¹⁹⁾。分散方式では、凝集フロックが破壊されること、ならびに激しく混合・浮上する気泡にフロックが吸着できないことが考えられる。従来の認識は、凝集処理プロセスを施すのであれば、加圧式を適用することが最も一般的であるとされる⁴³⁾。現在のところ、凝集プロセスと空気分散方式による浮上分離プロセスを組み合わせる方法を検討した事例は見あたらない。

空気分散方式においては、懸濁物あるいはフロックの気泡への吸着力（結合力）は、処理性を支配する極めて重要な因子であり、優れた捕集機能を有する捕集剤（界面活性物質）を選定することが必要である。浮遊選鉱法に利用してきた捕集剤を、そのまま水処理に適用した検討がなされた。しかし、処理時間が長いことから疎水化機能は低いと考えられ、浮上分離可能なpH条件も、極端なpH領域の場合が多い¹⁸⁾。粘土粒子（鉱物）の種類、界面状態によって利用できる捕集剤は異なること、および浮上分離可能なpH条件の制限も厳しく（例えばpH2付近、あるいはpH10以上）^{2), 18)}、浮遊選鉱法の捕集剤は、不特定の懸濁物を対象とした水処理においては、適当でないと考えられる。また、原水には、除去の対象物質の他に、多数の無機イオンや溶解性物質が共存するため、界面活性剤の固体界面への吸着に際して阻害する可能性が高い。陰イオン界面活性剤を用いたコロイド吸着浮選法に関する研究において、塩の存在は、著しく処理性を低下させることが明らかとされている^{11), 12), 14)}。

懸濁物あるいはフロックを、泡沫分離する場合には、捕集剤の他に、泡沫生成能の高い起泡沫剤として機能する界面活性物質が必要である。処理フローから考えると、捕集剤と起泡沫剤の機能をどちらも

持ち合わせている界面活性物質が最も好ましい。しかし、浮遊選鉱法やイオン浮選法で用いられてきた界面活性剤の中から、懸濁物・フロクの捕集剤として機能する界面活性剤の選定が困難であったことから、その上、さらに起泡剤の機能を兼ね備える物質を検索するまで研究を進めることは極めて困難であったと考えられる。

ここで、固液分離を目的とした泡沫分離法を開発するための諸条件を整理する。

水に分散している懸濁物を凝集処理し、フロクとして分離回収する場合、すなわち“凝集・泡沫分離法 (Coagulation and foam separation)”においては、以下の条件を満足することが必要となる。

- ・ 空気分散による液の乱れや攪拌に対応できるように、懸濁物の凝集力が強いフロクを形成させなければならない。ただし、フロクを大型化する必要はない。
- ・ 凝集最適条件において、フロクの界面を効果的に疎水化できる捕集剤を選定しなければならない。
- ・ 凝集最適条件において、泡沫生成能の高い界面活性物質を捕集剤として選定するか、あるいは捕集剤とは別途に、泡沫生成能の高い界面活性物質を用いなければならない。

原水中の懸濁物を単一粒子として分離回収する場合には、以下の条件を満足することが必要となる。

- ・ 粘土粒子や有機懸濁物などの不特定の多様な単一粒子界面に対して、効果的に疎水化できる捕集剤を選定しなければならない。
- ・ 捕集剤として、泡沫生成能の高い界面活性物質を選定するか、あるいは捕集剤とは別途に、泡沫生成能の高い界面活性物質を用いなければならない。
- ・ 粒子は分散しているので、疎水化した粒子を気泡に接触させるための頻度を増加させなければならない。

以上の諸点に加えて、塩類などのイオンや他の溶解性物質が共存する原水において、これらの条件をすべて満足できる場合において、新しい固液分離プロセスとしての可能性を見いだすことができる。

緒言で述べたように、生物起源の界面活性物質であるタンパク質は、その分子構造や界面化学的性質が多様であるが故に、捕集剤および起泡剤の両方の機能を効果的に発揮すると考えられる。本研究の主眼は、除去機構を明らかにすることにある。空気分散方式による固液分離プロセスの開発は、気泡を利用した分離法の新たな展開の契機と成り得るものである。

第2章 引用文献

- 1) 佐々木恒孝(1967) 起泡分離 [実験化学講座 (続) 2 分離と精製 (日本化学会), pp. 565-603, 丸善, 東京.
- 2) 富田堅二(1974) 非金属の選鉱法, 259pp., 技報堂, 東京.
- 3) 山崎太郎, 佐々木弘(1970) 浮遊選鉱剤とその作用機構について, 表面, 8, 238-255.
- 4) Jiang, C. L., X. H. Wang, B. K. Parekh and J. W. Leonard (1998) The surface and solution chemistry

- of pyrite flotation with xanthate in the presence of iron ions, *Colloids and Surfaces A*, 136, 51-62.
- 5) Sebba, F. (1959) Concentration by ion flotation, *Nature*, 184, 1062-1063.
 - 6) Sebba, F. (1960) Organic ion flotation, *Nature*, 188, 736-737.
 - 7) 下飯坂潤三, 松岡功 (1972) イオン浮選, 沈殿浮選, 吸着粒子浮選を利用した産業廃水の処理法について, *水処理技術*, 13, 21-33.
 - 8) 向井滋 (1973) 浮選による廃水処理, *表面*, 11, 129-144.
 - 9) 下飯坂潤三 (1977) 各種浮選法による排水中の重金属イオンの除去, *表面*, 15, 542-552.
 - 10) Slapik, M. A., E. L. Thackston and D. J. Wilson (1976) Improvements in foam flotation for lead removal, *Journal of Water Pollution Control Federation*, 54, 238-243.
 - 11) Huang, S. D., H. Ho, Y. Li and C. Lin (1995) Adsorbing colloid flotation of heavy metal ions from aqueous solutions at large ionic strength, *Environmental Science and Technology*, 29, 1802-1807.
 - 12) Beheir, S. G. and M. Aziz (1996) Removal of Zn(II) from dilute aqueous solution and radioactive process wastewater by foam separation, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 209, 75-89.
 - 13) Cario, E. H. D. and D. M. Thomas (1985) Removal of arsenic from geothermal fluids by adsorptive bubble flotation with colloidal ferric hydroxide, *Environmental Science and Technology*, 19, 538-544.
 - 14) Peng, F. F. and P. Di (1994) Removal of arsenic from aqueous solution by adsorbing colloid flotation, *Industrial Engineering Chemical Research*, 33, 922-928.
 - 15) Horng, J. and S. Huang (1993) Removal of organic dye (Direct Blue) from synthetic wastewater by adsorptive bubble separation techniques, *Environmental Science and Technology*, 27, 1169-1175.
 - 16) Choi, S. U. and Y. H. Choi (1996) Removal of direct red from aqueous solution by foam separation techniques of ion and adsorbing colloid flotation, *Separation Science and Technology*, 31, 2105-2116.
 - 17) 松原寛 (1971) 海水とイオン浮選, *水処理技術*, 12, 15-21.
 - 18) Crandall, C. J. and R. B. Grieves (1968) Foam separation behavior of aqueous suspensions of clays and/or iron, *Water Research*, 2, 817-832.
 - 19) 下飯坂潤三, 向井信, 堀岡正和, 山本和正 (1970) SS除去に対する浮上法の基礎的研究, *水道協会誌*, 433号, 10-15.
 - 20) Hyde, R. A., D. G. Miller, R. F. Packham and W. N. Richards (1977) Water clarification by flotation, *Journal of American Water Works Association*, July, 369-374.
 - 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) 丹保憲仁, 五十嵐敏文 and 清塚雅彦 (1985) 気泡付着フロック生成の電気泳動的な研究, *水道協会誌*, 54, 2-6.
 - 24) 丹保憲仁, 福士憲一 (1985) 加圧浮上法の動力学的過程, *水道協会誌*, 54, 22-30.
 - 25) 福士憲一, 丹保憲仁, 清塚雅彦 (1985) 加圧浮上法の動力学過程の実験的評価, *水道協会誌*, 54, 32-41.
 - 26) 丹保憲仁, 福士憲一, 松井佳彦 (1985) 加圧浮上法の微細気付着過程の解析, *水道協会誌*, 54, 2-11.
 - 27) 福士憲一, 丹保憲仁 (1987) 微細気泡付着過程の解析による気-固比の評価, *水道協会誌*, 56, 48-51.
 - 28) Fukushi, K., N. Tambo and Y. Matsui (1995) A kinetic model for dissolved air flotation in water and wastewater treatment, *Water Science and Technology*, 31, 37-47.
 - 29) 松岡功, 青木薫, 下飯坂潤三 (1980) 金属水酸化物の加圧浮上に関する基礎的研究, *水質汚濁研究*, 3, 43-48.
 - 30) Schutz, F. (1937) Adsorption on Foam, *Nature*, 139, 629-630.
 - 31) Bhattacharjee, S., R. Kumar and K. S. Gandhi (1997) Prediction of separation factor in foam

- separation of proteins, *Chemical Engineering Science*, **52**, 4625-4636.
- 32) Patino, J. M., M. D. N. Delgado and J. A. L. Fernandez (1997) Stability and mechanical strength of aqueous foams containing food proteins, *Colloids and Surfaces A*, **99**, 65-78.
 - 33) Noble, M., A. Brown, P. Jauregi, A. Kaul and J. Varley (1998) Protein recovery using gas-liquid dispersions, *Journal of Chromatography B*, **711**, 31-43.
 - 34) 中釜達朗, 保母敏行 (1999) 起泡分離, *ぶんせき*, 59-64.
 - 35) Lemlich, R. and E. Lavi (1961) Foam fractionation with reflux, *Science*, **134**, 191.
 - 36) Rubin, E., R. Everett, Jr., J. J. Wenistock, and H. M. Schoen (1963) Contaminant removal from sewage plant effluents by foaming, U. S. Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service Publication No. 999-WP-5, 1-44pp., Cincinnati, Ohio.
 - 37) 前田満雄, 谷口靖子, 小沢建樹 (1976) 泡沫分離法 (その1) 陰イオン界面活性剤の除去, *化学工場*, **20**, 98-102.
 - 38) 丸石功 (1976) 泡沫分離法 (その2) 非イオン界面活性剤の除去, *化学工場*, **20**, 103-106.
 - 39) 安藤進, 岡部晃夫, 樹下基孝 (1976) 排水中のアニオン系界面活性剤除去プロセス (DEFOX PROCESS), *化学工場*, **20**, 110-112.
 - 40) Ng, K. S., J. C. mueller and C. C. Walden (1974) Process parameters of foam detoxification of kraft effluent, *Pulp and paper magazine of Canada*, **75**, 101-106.
 - 41) Ng, K. S., J. C. mueller and C. C. Walden (1976) Foam separation for detoxification of bleached kraft mill effluents, *Journal of Water Pollution Control Federation*, **48**, 458-472.
 - 42) 吉田高年, 竹内忠雄 (1970) 泡沫分離 (泡分離), *表面*, **8**, 65-73.
 - 43) 野中八郎 (1967) 下水処理プロセスとプラントの設計, 285 pp., 山海堂, 東京.