

## 第7章 除去機構

懸濁物除去を目的とした泡沫分離法においては、懸濁物あるいはフロックを疎水化する過程（疎水化プロセス）と、浮上した懸濁物・フロックを泡沫生成によって液側から分離する過程（泡沫生成プロセス）の両方が適切に機能しなければならない。カゼインは、水酸化鉄フロックへの吸着性が著しく高く、この性質がフロックの疎水化を効率的に達成できることがわかった（第5章）。凝集プロセスはカゼインの吸着部位を設置する上においても極めて重要であった（第6章）。また、カゼインの優れた泡沫生成能は、泡沫生成プロセスにおいて効果的に機能するとがわかった（第3章、第5章）。泡沫生成プロセスは、カゼインの泡沫でなくても、泡沫生成が良好であれば界面活性剤でも効率的に機能した（第6章）。

そこで、本章においては、カゼインの界面化学的性質に関する知見（第3章、第4章）ならびに懸濁水の処理特性の知見（第5章、第6章）をもとに、カゼインを用いた泡沫分離法における懸濁物除去機構について総括することとした。

### 7.1 凝集・泡沫分離法

懸濁粒子の鉄塩およびアルミニウム塩による荷電中和と架橋作用からなる凝集メカニズムの詳細は、広く知られているところであり<sup>1)-3)</sup>、省略することとする。鉄塩を用いて、凝集最適pH領域（pH7）で急速攪拌条件のもと、分散している懸濁粒子（カオリン）を集塊させて、フロックを形成させる。このとき、フロックの大きさは処理性に関係なく、マイクロフロックがしっかりと形成されていれば良い。凝集した粒子間および界面に水酸化鉄（ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ）が吸着し、粒子塊は、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ で覆われている状態となる。実際のフロックを顕鏡すると、不定形のアモルファス状の $\text{Fe}(\text{OH})_3$ が粒子を覆っている様子が観察される。また、カゼインは、アミノ酸残基の配列によって、親水性部位と疎水性部位が生じ、強い界面活性を示し、また、会合しやすい性質を有する。

フロックが形成されたところで、カゼインを添加すると、カゼインの親水性部位がフロックの $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の部位に吸着される。カゼインの懸濁粒子への吸着機構は、吸着特性の検討からもわかるように、実際には複雑である。しかし、中性付近における $\text{Fe}(\text{OH})_3$ コロイドは正荷電を示すこと、カゼインは分子全体で見ると、等電点よりも高いpHでは負荷の残基が多く存在すると考えられること、および陰イオン性界面活性剤もフロックに吸着したことから、カゼインのフロックへの重要な吸着形態は、静電的引力であると考えられる。フロック面の $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の正荷電の部位にカゼインの負荷電の親水基部位が吸着することによって、液側（溶媒）にはカゼインの疎水性部位が露出される状態となり、カゼインの吸着したフロック界面は疎水化される。カゼインのフロックへの吸着による疎水化の模式図を図-7.1に示す。カゼイン分子は、ポリペプチド鎖の折りたたまった球状タンパク質ではあるが、吸着部位と露出部位について、親水性残基と疎水性残基の側鎖を持つ鎖状で表すことにした。カゼインの乳化界面における吸着形態は、ループ・トレイン・テイル型であることが示唆され

ている<sup>4)</sup>ので、フロックの $\text{Fe}(\text{OH})_3$ への吸着形態もループ・トレイン・テイル型で表すことにした。

つぎに、気泡を供給すると、疎水化されたフロックは、水を避けようとして、気泡に吸着する。この際の気泡界面への吸着メカニズムは、通常の吸着のように相互間の吸引力が働いているのではない。疎水基（疎水性部位を構成する残基）が水との接触を避けようとする原因は、水分子間には、強い水素結合による凝集力が働いているために、水分子同士が集まって疎水基を排斥し、排斥された疎水基は気体（気泡）に吸着するのである（図-7.2）<sup>5)</sup>。したがって、水が疎水化されたフロックを排斥する力は、吸引力よりも強い。疎水化されたフロックは、イオン性の異なる界面活性剤のいずれを起泡剤として用いた場合においても、気泡に吸着し、極めて高い処理性を示したことから理解される。

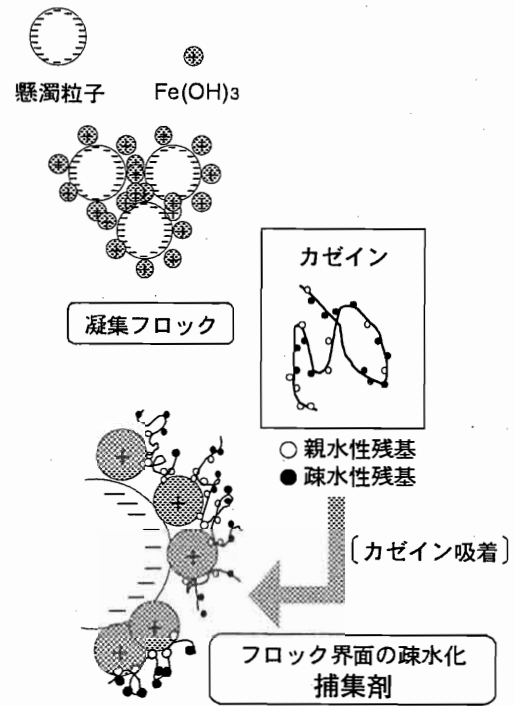


図-7.1 カゼインの凝集フロックへの吸着による疎水化。

図-7.2 疎水化フロックの気泡界面への吸着。

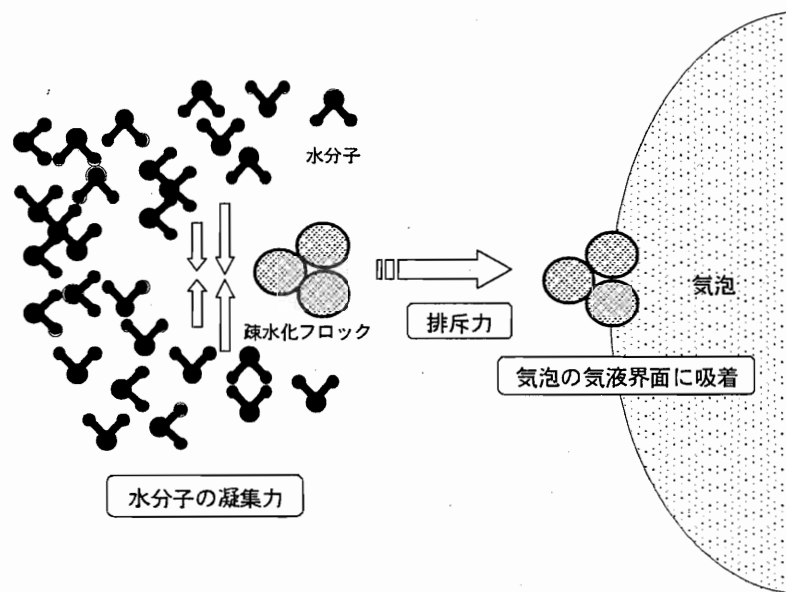


図-7.2 疎水化フロックの気泡界面への吸着。

気泡に吸着したフロックは、浮上し、水面に集積する。ここで、泡沫が生成されると、その泡沫の泡膜にフロックが吸着して、液側から分離される。この場合も、疎水基は水を避けるので、疎水化フロックは、なるべく水との接触のすくない方に排斥されるため、泡膜に移動する（図-7.3）。このと

きの泡膜は、溶解性のカゼインによって安定化され（図-7.4），次々に生成される泡沫によって，フロックは泡沫層に連行される。泡膜を安定させる能力が，すなわち泡沫生成能である。泡沫を生成させることができれば，フロックはその泡膜に吸着してくるので，泡沫の泡膜を安定すれば良く，起泡剤として，カゼインの代わりに，界面活性剤を利用することができるはずである。実際に，界面活性剤は種類・性質に関係なく起泡剤として機能した（第6章6.1.2）。

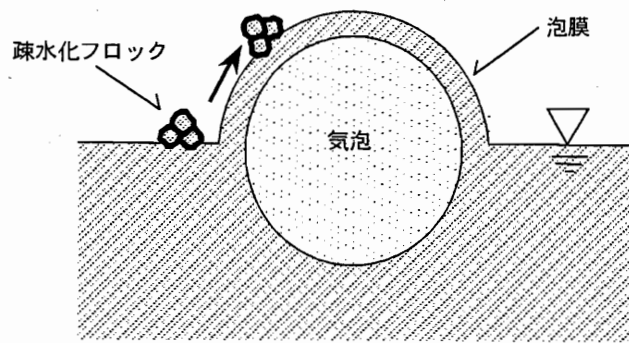


図-7.3 水面上に浮上した疎水化フロックの泡膜への移動。

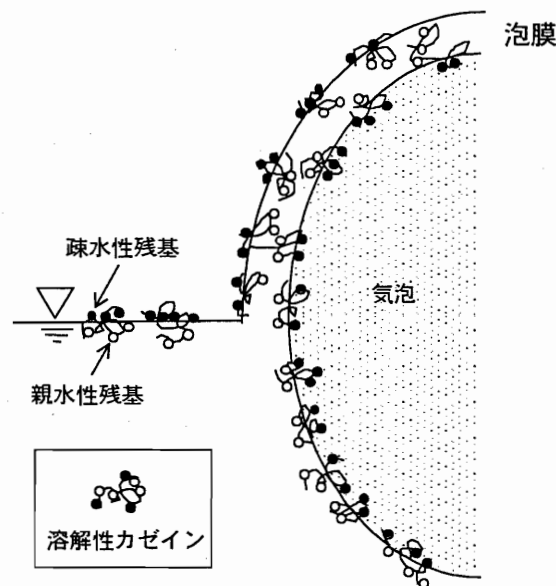


図-7.4 溶解性カゼインの泡膜安定化。

フロックが疎水化されなければ，カゼインやその他の界面活性剤で，いかに大量の泡沫を生成させても，泡沫にフロックは回収されて来ない（図-6.2, 6.3, 6.4）。凝集・泡沫分離法において，フロックを疎水化することが最も重要なプロセスであり（図-5.9），カゼインは，フロックを疎水化させる機能が極めて高い物質なのである。凝集・泡沫分離法の一連の除去原理のフローを模式図として図-7.5にまとめた。

なお，ここでは，凝集剤として鉄塩をモデルに表したが，アルミニウム塩を用いた場合においても，同様の機構で説明できると考えられる。

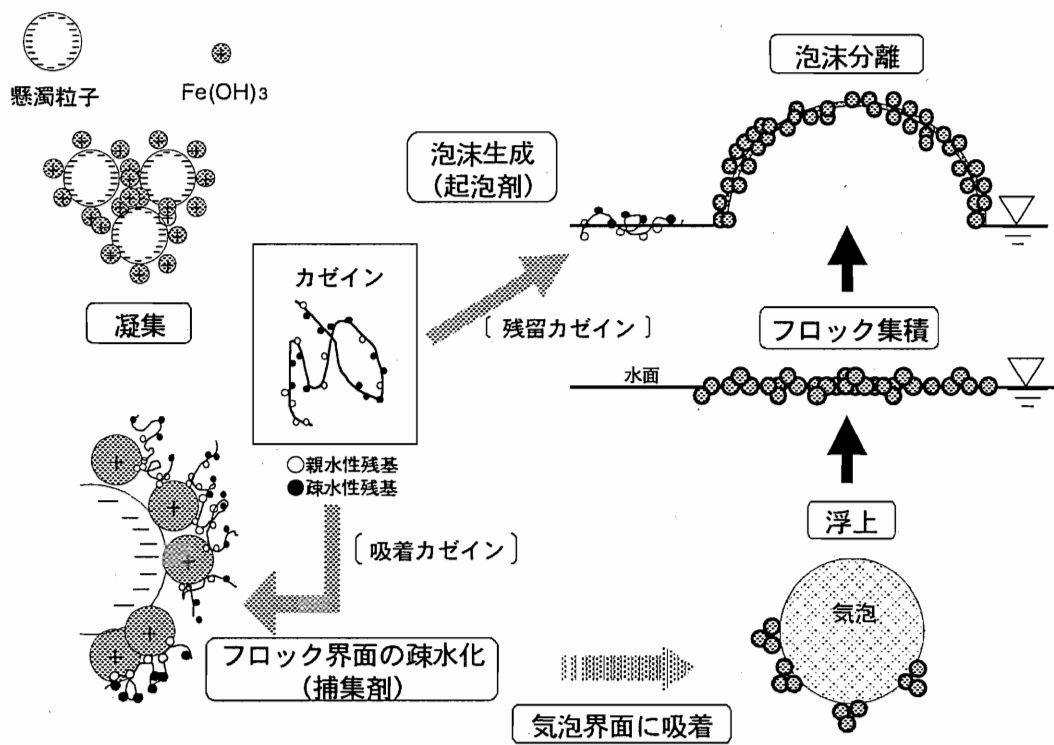


図-7.5 凝集・泡沫分離法による懸濁物除去機構.

## 7.2 泡沫分離法（凝集処理無し）

カゼインは、蒸留水中（pH7）では、カオリン粒子界面にはあまり吸着しない（図-5.5）。しかし、pHや塩によって、カゼイン分子の立体構造（コンホメーション）の変化、あるいは会合していた分子の解離が生じる（第3章参照）。立体構造の変化によって、溶媒に露出されるアミノ残基数が増加すること考えられる。また、解離することによってカゼインとして機能できる分子群の数は増加すると考えられる。このような変化によってカオリン粒子界面に吸着可能なカゼインの親水性残基数が著しく増加することによって、カゼインのカオリン粒子界面への吸着量が増加し、粒子界面が疎水化され、気泡の気液界面に吸着できるようになる（図-7.6）と考えられる。疎水化された粒子の除去機構は、フロックの場合と同様であると考えられる。高濃度のNaClによってカオリンの処理性が上昇した理由は、カゼインのカオリンへの吸着性が增大したことのほかに、気泡径が小さくなり、フロックと気泡界面との接触頻度が増加したことが挙げられる。魚類の体表面粘質物による懸濁物除去についても、カゼインと同様の除去機構で説明される。

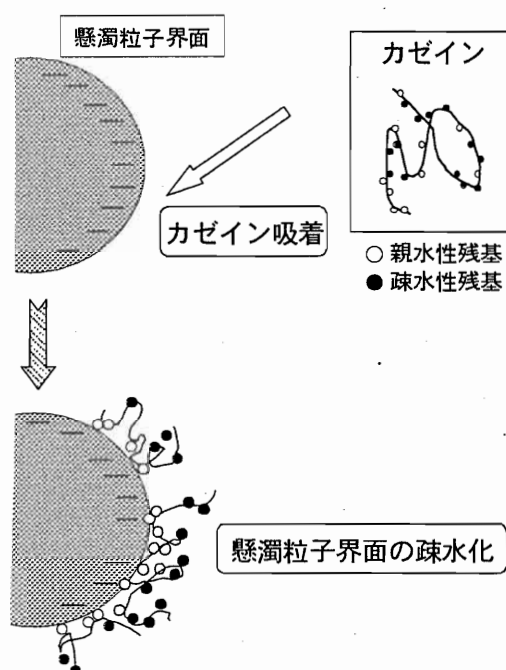


図-7.6 カゼインの懸濁粒子界面への吸着による疎水化.

## 第7章 引用文献

- 1) 丹保憲仁(1980) 上水道(土木学会編), 370 pp., 技報堂, 東京.
- 2) 丹保憲仁, 小笠原紘一(1985) 浄水の技術, 390 pp., 技報堂, 東京.
- 3) 井出哲夫, 角田省吾, 遊佐美津雄(1993) 凝集分離「水処理工学」(井出哲夫編著), pp. 42-78, 技報堂, 東京.
- 4) 松崎成秀(1999) 乳化食品の安定性, 食品・食品添加物研究誌, No.180, 45-54.
- 5) 妹尾学, 辻井薫(1995) 界面活性の化学と応用(日本化学会編), 201 pp., 大日本図書, 東京.