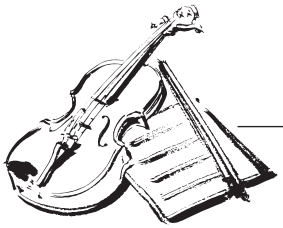
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	浄水処理の新概念 : WHOの飲料水ガイドラインの遵守を目指して
Author(s)	落合, 壽昭; 宇山, 浩; 木内, 正人
Citation	目で見るWHO. 2009, 41, p. 9-13
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/86816
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka



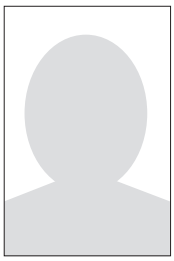
浄水処理の新概念

−WHOの飲料水ガイドラインの遵守を目指して−

株式会社 水処理技術研究所 代表取締役 落合壽昭
大阪大学大学院 工学研究科 応用化学専攻 教授 工学博士 宇山浩
独立行政法人 産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門ナノ機能合成グループ 主任研究員
大阪大学特任教授 工学博士 木内正人

Hisaaki OCHIAI
1945年12月生
東京理科大学工学部工業化学科
（1969年）
現在、株式会社 水処理技術研究所
代表取締役社長
TEL：03-5938-9982
FAX：03-5938-9982
E-mail：0117911201@jcom.home.ne.jp

Hiroshi UYAMA
1962年5月生
京都大学大学院工学研究科合成化学専攻
・博士前期課程修了（1987年）
現在、大阪大学・大学院工学研究科・応用化学専攻、教授、博士（工学）、高分子材料化学、バイオポリマー
TEL：06-6879-7364
FAX：06-6879-7367
E-mail：uyama@chem.eng.osaka-u.ac.jp



Masato KIUCHI
1959年10月生
大阪大学・工学部・応用物理学科卒業
（1982年）
現在、独立行政法人 産業技術総合研究所
ナノテクノロジー研究部門 ナノ機能合成グループ 主任研究員 工学博士 生活環境学
TEL：072-751-9535
FAX：072-751-9637
E-mail：m-dd160@m.aist.go.jp

1．はじめに

安心・安全な水の供給は我々の日常生活に欠かせないものである。普段、何気なく蛇口から出てくる水の安全性を疑うことは無い。しかし、クリプトスポリジウムの漏洩による集団感染は1993年に米国ミルウォーキー市、1996年に埼玉県越生町で報告されており、先進国の上水道すら必ずしも安心できないのが現状である。また、飲料水中の残留アルミニウムはアルツハイマー症との関連があるとも言われ、社会的関心が高い。1984年にはWHOは飲料水中の残留アルミニウム濃度の低減化に関する勧告を出し、米国は残留アルミニウム濃度0.05mg/Lの厳しい目標値を設定した。しかしWHOは、飲料水に対するガイドラインを示しながら、実際には残留アルミニウムとアルツハイマー症との因果関係が不明確として水道界に対して高い濃度を許容し[1)]、クリプトスポリジウムのオーシストの漏洩防止のための代案として膜分離法を提案した。

筆者らは長年にわたって正しいと信じられてきた急速ろ過システムの問題点をクローズアップし、それを解決する新概念に基づく浄水処理技術を提案する。砂ろ過（粒状ろ過）は、オーシストよりも小さなウイルス、バクテリアを除去し、人の健康に貢献してきた歴史をもつ。従って古い概念にとらわれることなく、浄水処理本来の目的であるろ過水質の向上の観点から急速ろ過システムの各プロセスの担う役割を再検証することで、急速ろ過システムの大幅な効率改善ができる技術を開発した。この技術はクリプトスポリジウムの漏洩防止と残留アルミニウム濃度の削減に関する課題も解決できる。本稿では、この新概念とそれに基づく浄水処理技術について述べる。

2．現凝集理論の問題点

現在の浄水処理に広く採用されている急速ろ過システムは、凝集処理、沈澱処理、ろ過処理の三工程からなる（図1）。凝集操作は最小径粒子から微フロック、微フロックからフロックの二段階で行われ、いずれも集塊化によって成長する（図2）。集塊化は渦流が与える衝突と衝突の際の付着により起こり、付着はアルミニウムなどの凝集剤粒子が与える。

凝集処理により集塊化されたフロックは自由沈降に基づく沈澱処理により除去され、沈澱水中の微フロックは砂ろ過により除去される（図3(A)）。

図１ 急速ろ過システムの概略図

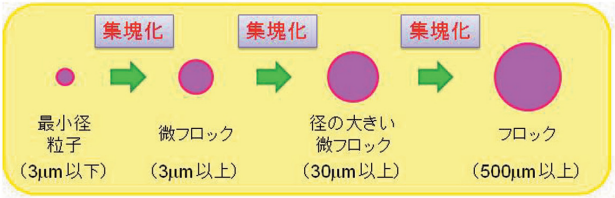


図２ 凝集処理の概念図

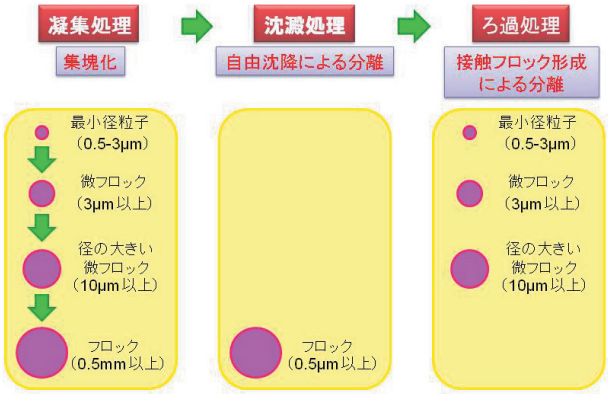


図３ (A) 現在の急速ろ過システムの概念図

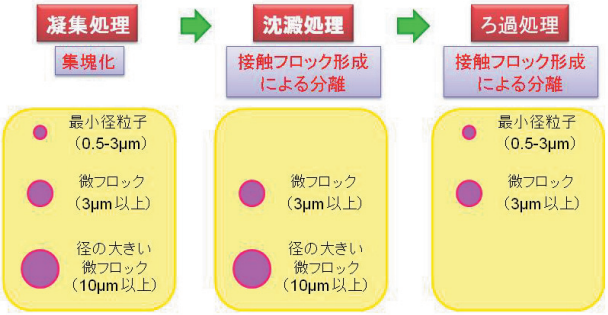


図３ (B) 新概念に基づく急速ろ過システムの概念図

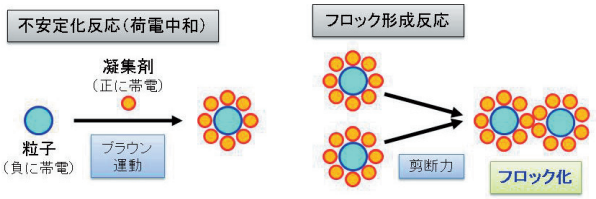


図４ 現凝集理論における不安定化反応とフロック形成反応

現在の凝集理論は、凝集過程における最小径粒子（懸濁粒子）は負電荷を持つので、そこに正に帯電した凝集剤を加えると荷電を中和し、懸濁粒子表面を凝集剤粒子が被覆して架橋作用を与えると説明した（図４）。この不安定化と呼ばれる反応はブラウン運動によるとされ、そこでの攪拌は凝集剤の均一分散のためとされている。また、フロック破壊の要因を高い強度の攪拌によるフロック表面の劣化とみなし、集塊化に低い攪拌強度を採用した。低い攪拌強度の条件では最小径粒子の集塊化における衝突頻度を制限するため、必要量を上回る凝集剤を注入して集塊化に必要な粒子間の衝突の効率を向上させて水質向上を図ってきた。以上の凝集条件が選択された背景は、径の大きなフロックほど沈澱に際して分離効率が高くなるとの考え方に基づいている。

クリプトスポリジウムなどの病原性原虫（大きさ：３～１０μm）の流出の要因は、ろ過水中への微フロックの漏洩による。水道施設設計指針は、低い攪拌強度と高い凝集剤注入率による粗粒・低密な微フロックは剪断力により漏洩しやすく、高い攪拌強度と低い凝集剤注入率による細粒・高密な微フロックは漏洩しにくいと説明した[2)]。この内容は、従来の急速ろ過システムの運転法、つまり現凝集理論を否定したことになる。

砂ろ過に用いられる砂層の空隙容量は小さく、特に微フロックの除去に係わる表層部の空隙容量は有限であるため、ろ過処理が進行すると必ず径３μm以上の粒子の剥離と漏洩が起こり、流入微フロックの容積が大きく数が多いほど漏洩量は多くなる。また、径３μm以上の粒子の漏洩量が増加すると、必然的に残留アルミニウム濃度は高くなる。以上のように、病原性原虫の漏洩事故及び残留アルミニウム濃度の問題は、急速ろ過システムの沈澱とろ過の最適処理のためのフロックの形状が正反対であることと密接に関連する。

クリプトスポリジウムの漏洩防止と残留アルミニウム濃度の削減は一見、異なる課題に思えるが、砂層からの径３μm以上の粒子の漏洩という共通の要因を持つ。径の大きなフロックを形成して分離効率を高める凝集沈澱処理は、あくまでも砂ろ過に流入する微フロック量を減少させて、ろ過水中に漏洩する微フロックの量を低減化するための１つの手段に過ぎない。こうした運転方法は、ろ過水濁度が２度以下であれば良かった時代には問題となることはなかったが、ろ過水中への径３μm以上の粒子の漏洩が課題として取り上げられ

た今日、凝集剤の過剰注入による運転法は水道施設設計指針が指摘したように、むしろ逆効果となることに気付くべきであろう。この課題が未だ解決されず、我々に提供される浄水の安全性に対する危惧が払拭されないことは、WHO と水道界がろ過水質の向上を図る際に沈澱処理を重視した現在の急速ろ過システムの問題点を把握せず、抜本的な解決を怠ってきたことに起因する。

急速ろ過システムが開発されて以来、フロックを重力によって分離する方式が採用されてきたが、こうした自由沈降による分離と比べて、砂ろ過の粒子分離効率がはるかに高いことに気付いていない。これは、砂ろ過の粒子分離機構が正しく理解されていないためである。

凝集処理の概念が理論としてまとめられて半世紀を経たが、フロックの径と密度の決定要因をはじめ、フロックの粗大化及び破壊の要因、砂ろ過の清澄化機構等、今もって明確な説明がされておらず、数々の問題点が明らかになってきた。これらの要因は、微細懸濁粒子と凝集剤粒子の集塊化への攪拌処理の重要性が認識されなかったことによるが、凝集処理を粒子相互の衝突反応として検証してこなかったことも一因として挙げられる。急速ろ過システムは既に完成された技術と認識され、ほとんど改善・改良がなされてこなかったため、砂層の集塊化と固液分離の機能を粒子の挙動として解析し、ろ過水質向上の観点から各プロセスのあるべき姿を追求することで、急速ろ過システムの効率を大きく改善できる可能性が高い。筆者らはこれらの問題に取り組み、安全・安心な飲料水を省コスト・省エネで提供でき、同時にクリプトスポリジウム及び残留アルミニウム濃度に関する二つの課題を解決できる技術の開発に目途を立てつつある。後述のように接触フロック形成による固液分離機能に注目すると共に、低い凝集剤注入率と高い衝突頻度とによって、これらの問題を解決できる。

3．砂ろ過の粒子分離機構と凝集処理における凝集剤粒子の役割

急速ろ過システムの処理性改善にはろ過の粒子分離機構の正確な理解が必要であり、不安定化反応の説明のために径３μm 以下粒子の抑留挙動に触れていない現ろ過理論[3]は、実態を反映していない。筆者らは実験により、砂ろ過ではほとんどの粒子が砂層表層部で抑留されることを明らかにした[4]。また、凝集剤注入量が低いほど、攪拌の際の衝突頻度が高いほど、ろ過水中のクリプトスポリジウムの漏洩につながる径３μm 以上の粒子数が減少することを示した。更に径３μm 以上の粒子数を完全に無くすことは、いかなる条件でも達成されなかった。これらの結果から砂層の清澄化機構を次のように推定した。全ての砂粒裏面には微細渦流が形成されることが知られている。この渦流は表層部に集中抑留された微フロックと流入粒子の間に高い衝突頻度を与えて抑留に寄与する。ところが表層部の空隙容量には限りがあるため、抑留が進行すると微細渦流の洗掘作用によって剥離が起こる。剥離粒子は下部砂層に再抑留され、内部ろ過へと推移するが、再抑留機能は大きくないために一部はろ過水中に漏洩する。

orthokinetic なフロック形成式[5]を用いたこの結果の解析では、砂層が低い凝集剤注入率で最小径粒子を高効率で阻止できるのは、表層部の抑留粒子数と微細渦流が与える高い衝突頻度の二つのファクターが与える大きなフロック形成速度に基づき、集塊化と固液分離が同時に起こるためにほかならない。したがって、沈澱装置に接触フロック形成機能を導入するならば、フロック形成速度が大きいほど粒子分離効率は高くなると考えることができる。このことが、筆者らが主張する砂ろ過の接触フロック形成機能の重要性である。

近年、微粒子カウンターが手軽に利用できるようになったことから微細懸濁粒子と凝集剤粒子の衝突反応の直接検証が可能となった。筆者らは、モデルの微細懸濁粒子（カオリン）と凝集剤粒子（PAC）を用いて急速攪拌過程における凝集処理の動的解析を行った。その結果、両粒子の衝突に剪断力の与える衝突が欠かせず、急速攪拌時間が短い場合には水中に残留する両粒子の数が多くなった。また、径 30 μm 以上大型微フロックは凝集剤粒子量が多い場合に集塊化が進行し、少なくなると破壊が起こることを確認した。更に低い攪拌強度では、水中に残留する凝集剤粒子の粗粒化の程度に比例してフロックの破壊が解消されること、同時にフロックの密度は低下することなどが明ら

かとなった[4)]。

以上のように、水中に残留する凝集剤粒子の与える付着力と剪断力の大小が、凝集反応における集塊化と破壊を決める主要因になる。このようにろ過処理にとって弊害となる凝集剤粒子の粗粒化を防ぐには低い凝集剤注入率の選択が不可欠であるが、その結果として低下するフロック形成速度とフロック破壊はシステム全体で対応することが求められる。

4．細粒・高密な微フロックの高効率沈澱分離

スラッジ・ブランケットのフロック形成速度は機械式フロッキュレータに比べて概ね二桁大きく、優れた流況を有している[6)]。しかも細粒・高密な母フロックは10 m/hを越える群沈降速度を持つ[4)]。筆者らはスラッジ・ブランケットと上向流傾斜板の二つの接触フロック形成機能を利用した凝集沈澱処理を提案し、その高効率な粒子除去特性を実証実験により明らかにした。また、上向流傾斜板の粒子分離機能によって、沈澱水濁度は大幅に低下した。上向流傾斜板の粒子分離効果は、傾斜板下端の剪断作用により同抑留面に向かう渦流の輸送と衝突に基づく接触フロック形成によるもので、段数の増加により粒子分離効率は向上する。衝突により径を増した高密な微フロックは、傾斜板上を滑落する際に下方の微フロックを取り込んで更に径を増して沈澱分離が可能となる。尚、付着力の低い高密な微フロックは傾斜板との間の付着力も低いため、日光を遮断するならば閉塞の懸念は無い。この結果、微フロックを径7 μm以上に集塊化することで高効率分離を実現できるため、従来法のように自由沈降で分離できる粗大フロックの形成を必要としないことが明らかになった。

5．中空接触材層の前置による砂ろ過の効率化

ろ過水中へのクリプトスポリジウムの漏洩を防ぐには、砂層への径3 μm以上粒子の流入を阻止すればよい。その結果、残留アルミニウム濃度も同時に低下する。丹保らによって200～300度の高濁度原水の直接ろ過を目的に考案された高容量ろ過池[7)]は、そのための有力な手段となる。筆者らはカオリンをPACで集塊化した急速攪拌槽の出口水を対象に、中空接触材層を用いた粗粒ろ過実験を行った。この中空接触材層は径3 μm以上粒子を高効率で阻止する能力と、径0.5～1 μm粒子を高効率で集塊化する水流フロッキュレータとしての能力を併せ持つことを検証した[4)]。粒子濃度の低い沈澱水を対象に同粒子分離特性を粗粒ろ過が発揮するには、砂層の清澄化機構と同様に流入部への微フロックの集中抑留が重要となる。中空接触材層の前置は砂層に流入する全ての径の粒子を削減し、ろ過水質の向上、ろ過池洗浄頻度の大幅な低減（エネルギー消費の低減）、沈澱プロセスの固液分離性能の補完などにより、合理的な急速ろ過システムの実現に寄与できる可能性が強く示唆された。

6．浄水処理の新概念に基づく急速ろ過システム

上述のように、筆者らはろ過水中に漏洩する粒子の数を削減するために前処理はいかにあるべきか、との観点から浄水処理に関する現凝集理論とろ過理論の問題点を洗い出し、新概念としての「凝集沈澱処理への砂ろ過の粒子分離機構の導入」を含む浄水処理技術を提案する（図3(B)）。

砂ろ過は分離に際し、粒子の径と密度の影響は少なく、その大きなフロック形成速度によって集塊化と固液分離の同時達成を長所としている。一方、弱点は粒子分離の中核を占める表層の集中抑留部の閉塞に伴う微フロックの漏洩にあり、ろ過水質と通水速度（装置規模）を決めている。従って中空接触材層を前置する高容量ろ過池の採用は、砂ろ過プロセスをろ過理論にとっての究極の姿に近づける。

現在でも浄水処理に広く採用されているスラッジ・ブランケットは、径が小さく、高密度で大きな沈降速度を持つ母フロックを高濃度に集積することで、高いフロック形成速度と粒子分離特性とによって、後続の砂ろ過の最適化に寄与できる。上向流傾斜板は母フロック破片などの流出を接触フロック形成機能によって補完することで、低い凝集剤注入率であるにも係わらず従来法と同等の粒子分離を可能にする。以上により、急速ろ過システムが現状抱える課題の多くを解決できる。

この新しい凝集沈澱処理と現凝集理論の相違点は以下の通りである。

- 濁度成分の内の最小径粒子は、渦流により集

塊化される。

- 凝集剤注入率を高める代わりに、衝突のための小さな渦流と既存フロックを活用する。
- フロックの破壊によって形成される微フロックは砂ろ過に最適な径が小さく、高密度の微フロックと一致する。
- 従来の径の大きなフロックを分離する凝集沈澱処理のほかに、径が小さく、高密度の微フロックを処理対象とする凝集沈澱処理がある。

これらの新概念を具体的に以下の三つのプロセスに組み込んだ急速ろ過システムの一例を図５に示す。

①低い凝集剤注入率、高い衝突頻度、多槽に分割された急速攪拌による凝集処理

②上向流傾斜板を備えたスラッジ・ブランケット型高速凝集沈澱池

③空接触材層を備えた高容量ろ過池

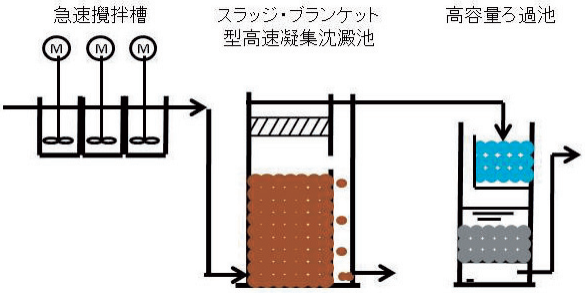


図５ 新概念に基づく急速ろ過システム例

７．まとめ

本稿では筆者らによる凝集処理における新概念を述べた。紙面の都合上、示せなかった具体的な実験データは今後発表する専門誌を参照されたい[4]。急速ろ過システムは微細懸濁粒子を除去して安全な飲料水を提供することを目的としている。その微細懸濁粒子を高効率分離する砂層の微細渦流と既存微フロックによる接触フロック形成機能をシステム全体に活用した新概念に基づく急速ろ過システムは、ろ過水質の向上のみならず、米国が目標とした厳しい残留アルミニウム濃度をクリアできる可能性が高い。更にクリプトスポリジウムの漏洩リスクの低下により、人々が安心して飲める水を提供できる。

また、この新概念に基づき低い凝集剤注入率を採用することで、凝集剤コストの低減は勿論、砂ろ過の洗浄頻度の減少と発生汚泥の濃縮、脱水性の向上[8]とによって急速ろ過システム全体の消費電力の削減ならびに処理に伴う炭酸ガス発生量の削減に大きく寄与でき、更に各プロセスのコンパクト化による建設費も低減できる。以上から、この新概念は安全・安心な水を提供できるだけでなく、地球温暖化防止に貢献できる浄水処理技術であり、更に経済的にも多大な効果が期待される。今後、実用化に向けた実証研究を進め、一日も早くこの技術に基づく浄水を世界の人々に届けられるよう技術開発を進める所存である。

参考文献

1) Guidelines for Drinking-water Quality, THIRD EDITION, World Health Organization, 2008.
2) 水道施設設計指針、日本水道協会、1990.
3) O' Melia, C, R. and Stumm, W, "Theory of Water Filtration", Jr. AWWA, 59, 1393 (1967.11).
4) 落合壽昭、宇山浩：投稿準備中
5) Von Smoluchowski, M. Versuch einer Mathemtischen Theorie der Koagulations kinetic Kolloid Losungen. Z, Phys. Chem, 92:129 (1917).
6) 丹保憲仁：接触高速凝集沈澱装置の一般特性、水道協会雑誌、第386号、pp.38～46、(S41.1).
7) 丹保憲仁ら：高容量ろ過池に関する研究(Ⅰ)～(Ⅲ)、水道協会雑誌、第571号、第598号、 第634号、(昭57.4、昭59.7、昭62.7).
8) 丹保憲仁ら：汚泥処理上からみた合理的浄水方法、土木学会、昭和55.3.
9) 海老江邦雄・東義洋・山木暁：凝集沈澱の処理性改善に関する基礎的研究－GR値の上昇による濁度とSTRの低減化－、水道協会雑誌、第71巻、第９号（第816号)、pp.11～21、(2002.9.).