

キャビテーションを抑制した高速回転分散・乳化機「チータCPM」

アシザワ・ファインテック(株)
開発課 担当マネージャー
微粒子技術研究所 副所長
小貫 次郎

1. はじめに

微粒子は表面エネルギーが大きく凝集しやすいため、微粒子としての機能を発揮させるには凝集を解し安定化させる必要がある。水や溶剤などの液体中で凝集した微粒子を解し微細化することを分散、また、水と油のように液体中で混ざりにくい他の液体を微細化させることを乳化という。本来混ざりにくい物質を液体中で微細化するということが、分散と乳化は近い技術である。

分散・乳化技術は、小型化や発色性、透明性、平滑性、吸収性の向上など様々な目的で利用され、電池性能の向上や小型化、スマートフォンの高機能化、鮮やかな色彩、薬剤の効能改善など多くの最先端技術に役立っており、これらを効率良く行うために分散・乳化機がある。

分散・乳化機には、高速回転方式、高圧方式、超音波方式などがある。高速回転方式は、最大50 m/s程度で回転するロータにより発生するせん断力を主に利用し分散・乳化を行う。高圧方式は、処理液を最大250 MPa程度に加圧し、隙間を高速で通過させることで発生する伸張やせん断などを利用する。超音波方式は、20000 Hzの超音波振動で発生するキャビテーションの破裂する衝撃力を利用する。このように大きく異なる方式が存在するのは、各方式に一長一短があり要求により使い分けられているからである。

ここでは、当社で開発された高速回転分散・乳化機「チータCPM」について説明する。

2. 理想の分散・乳化機とは

メーカーとして「理想の分散乳化機は？」と問われれば、それは非常に明確で、最低限のエネルギーで最高の品質を得る機械と迷わず答える。これは、ランニングコストを低減するというユーザーが受ける実利のみならず、省エネによりCO₂排出量を削減し世界的な自然環境保全に貢献するという意味も大きい。

もちろん、処理温度、コンタミネーション、生産コスト、機械価格、機械サイズ、機械寿命、再現性、メンテナンス性、洗浄性など、分散・乳化機に要求される他の要素も多く、これらも充足しなければユーザーに受け入れられることはない。しかしながら、「最低限のエネルギーで」という要求を満たす機械は、自ずと前述した各要素のハードルを容易にさせる。

例を挙げると、分散・乳化機に投入される電力の99%以上は熱に変換されるといわれ、ほとんどが対象物の温度上昇につながる。また、大電力を要する機械は負荷が高いため、一般に大型で複雑かつ高価となる。このため、電気代が余分に必要とされるだけでなく、冷却コスト、機械価格、使い勝手などの点でも三重四重に不利になることになる。逆に、小電力の機械は、省エネ、低温処理、低コンタミネーション、小型、低価格、長寿命、高メンテナンス性など要求される様々な条件を満たしやすい機械といえるわけである。

3. 開発にあたって

開発の目的は、良い分散・乳化機を世

の中に出し産業界に貢献することであり、安定的に大量生産を可能にする機械ということが大前提であった。また、前述の理想の分散・乳化機の通り、動力原単位(一定量の生産物をつくるために必要とされる電力量)[kWh/t]を最小限に抑えることを重要な指標として開発を進めた。

分散・乳化機の方式にある250 MPaの圧力や20000 Hzという振動数は、ある意味で非日常的な状態であり、もちろんそれが分散・乳化性能につながるわけではあるが、半面、エネルギー効率や機械寿命、スケールアップ、再現性などにはマイナスに働く。これらにより、本分散・乳化機には高速回転方式を採用した。

高速回転型の分散・乳化機においては、処理場全体に均一なせん断力をかけることが、理想の分散・乳化場と考え、この理想を提供できる機械を目指した。キャビテーション、乱流、渦などは、局部的に強烈な力を生じ均一とは逆の要素となるため、これらをいかに排除するかを焦点に構造検討を進めた。特に、30 m/s付近以上になるとキャビテーションが発生しやすくなるため、これをいかに抑えるかが当開発の最大のキーとなった。

4. いかにキャビテーションを抑えるか

キャビテーションは、空洞現象とも言われ、液体の流れの中で圧力差により極短時間に泡の発生と消滅が起きる現象である。キャビテーションの起こりやすさを表す指標に下記に示すキャビテーシ

ン数Caがあり、このCaの値が大きいほどキャビテーションが起こりにくくなる。

$$Ca = (P - P_v) / (1/2 \rho u^2) \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

Ca: キャビテーション数[-]

P: 絶対圧力[Pa]

P_v: 流体の蒸気圧[Pa]

ρ: 流体の密度[kg/m³]

u: 流体の代表速度[m/s]

式(1)より、一定の対象物を処理する場合、①速度を下げる、②温度を下げる(蒸気圧を下げる)、③圧力を上げる、ことがキャビテーションを抑制する要素であることが分かる。各要素について検討する。

①-1) 速度を下げるについて

現実には、高周速が高せん断を生み、それが高分散・乳化効率につながるため、高周速は必須の要素となる。しかしながら、高周速は、キャビテーションを誘発させるだけでなく多くの動力を要し製品を昇温させるため回転型の分散・乳化機の最大の障害となる。このジレンマを解決することが高速回転型の分散・乳化機に与えられた課題であると理解できる。繰り返しになるが、低動力=低昇温であることから、キャビテーション抑制の観点からも動力原単位[kWh/t]での評価は重要となる。これらより、速度を下げるのではなく、低動力高周速特性の検討が必要となる。

①-2) 低動力高周速の特性について

攪拌動力を考えると、下記の計算式がある

$$P = N_p \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

P: 動力[W]

N_p: 動力数[-]

ρ: 流体の密度[kg/m³]

n: ロータの回転数[rps]

d: ロータの直径[m]

式(2)より、動力数N_pはロータ形状に依存するので、動力数N_pの小さい方が低動力高周速特性となり、このようなロータ形状を採用した。また、周速が高いほど分散・乳化効率が上がることを考

え、一定の周速で運転するには、大径ロータを低速回転させるより小径ロータを高速回転させることが有利となり、これも考慮するポイントであった。

②温度を下げる(蒸気圧を下げる)について

いかに低動力高周速ロータを採用しようとも、高周速で運転させるかぎり温度上昇を回避することはできない。しかしながら、解決策はある。処理時間を極めて短くすることで動力の投下を最小限に抑え、温度上昇を極小に抑え機械から排出する。そして、わずかに上昇した対象物温度を機械外部で冷却する。これを繰り返すことによって、処理温度を上昇させることなく大きな動力を投下することができる。この短時間処理の繰り返しにより分散・乳化する進行させる方法をシンプルに実現させる方法として、大流量ポンプと組み合わせるアイデアを採用した。高速回転による強力な遠心力が大きな送液力を生み出すので、この点は最高のコンビネーションとなる。複雑な形状を必要とせず遠心力がポンプ能力を生み出すわけであるから、シンプルな構造という重要なコンセプトからも外れない。

③圧力を上げるについて

潜水艦のプロペラが発生させるキャビテーションは海面付近に限られ、潜航中は水圧の影響で発生しない。これを高速回転分散・乳化機に利用する。強力な遠心力が生み出す送液力は当然圧力を発生させるため、キャビテーション抑制の観点からも大流量ポンプとの組み合わせは理にかなっている。また、高周速の分散場を狭く限定することにより微小隙間を形成し、ここに大流量ポンプで送り出した処理物を送り込む構造とした。これにより、分散場である微小隙間はより高圧力の状態となりキャビテーションを抑制できる。さらに、微小隙間は、せん断力の向上にもつながるため一石二鳥のメリットとなる。

上記以外にもキャビテーションを抑制

させる要素は様々あり、④流れの中の急激な圧力差を抑える、⑤泡の混入を抑える、ことが大きな要素として挙げられ、解決すべき項目である。

④流れの中の急激な圧力差を抑えるについて

流れの中の急激な圧力差を抑えるために、層流主体の分散場を提供することを考えた。逆の言い方をすれば、乱流や渦の発生をいかに抑えるかである。高速回転型における分散・乳化原理はせん断が主であるが、せん断面に対し直交する流れは容易に乱流を発生させることになる。例えば、櫛歯型のロータ/ステータに代表される多くの高速回転分散・乳化機は、せん断面と液流方向が直交するため、積極的に乱流を発生させることになる。この乱流が急激な圧力差を発生させ、キャビテーションを誘発する。また、直交は分散場を通過する液が急停止・急加速を繰り返すこととなり、動力の浪費に直結する。この動力の浪費は、昇温による蒸気圧の上昇となり、さらなるキャビテーションの誘発につながる。本開発では、せん断面と液流を干渉しない方向にすることで層流を主体とした分散場を実現した。

⑤泡の混入を抑えるについて

遠心力により、液体と気体を分離することができる。分離の効率を考えるのに下記の沈降速度ストークスの式がある。

$$V = d^2 (ps - p) g / 18 \mu \dots\dots\dots \text{(3)}$$

V: 終末速度[m/s]

d: 粒子径[m]

ps: 粒子の密度[kg/m³]

p: 流体の密度[kg/m³]

g: 遠心加速度[m/s²]

μ: 流体の粘度[Pa·s]

脱泡を考える場合、気泡が粒子となる。式(3)より、気泡が小さいほど、流体の粘度が高いほど、流体の密度が小さいほど沈降速度が遅くなり気液分離は難しくなることが分かる。しかしながら、高速回転で発生する数千Gの強力な遠心力は、

処理液に混入した微細な気泡をも容易に分離させることができる。これを上手く利用することで、分離された小さな気泡は中心に集まり大きな塊となり、液流により機外へ排出される。大きな空気の塊は容易に静置脱泡されるため機外のタンク内で脱泡が完結する。

脱泡は、分散・乳化効率にも好影響を与える。脱泡機能がない機械で、界面活性剤が含まれるような対象物を処理すると、気泡が微細化し分散・乳化効率が低下する。さらに、泡立ちが激しいと処理液の嵩が極端に増加し運転不能となる。このような場合、脱泡機能は絶大な効果を発揮する。

本項「いかにキャビテーションを抑えるか」で述べた各機能を網羅したものが、このたび当社で開発した高速回転分散・乳化機チータCPMである。特徴をまとめると下記ようになる。

- ・低動力高周速特性のロータ形状
- ・微小隙間による高せん断
- ・遠心力を利用した大流量ポンプ機能
- ・大流量・短時間処理による極小の温度上昇
- ・大流量と微小隙間による加圧分散場
- ・液流がせん断面と干渉しない層流分散場
- ・遠心分離を利用した脱泡機能

5. チータCPMの構造・原理

チータCPMは、最高68 m/sで高速回転するロータとロータ/ケーシング間の

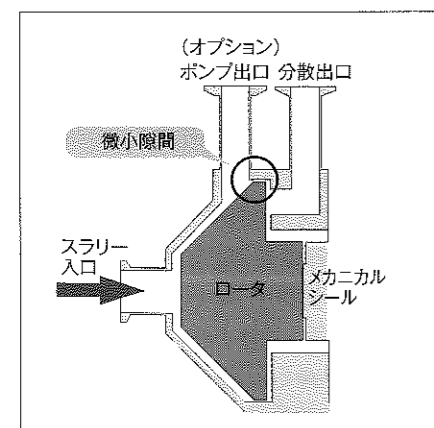


図1 チータCPM構造図

微小隙間で構成された、高速回転型の分散・乳化機である。

構造は図1の通りで、特殊コニカル型ロータと、ロータ外径に沿ったコニカル型のケーシングで構成され、大径端のロータ/ケーシング間で微小隙間が形成されている。この微小隙間は、凸凹のないスムーズな形状で、軸と平行方向に形成されている。ケーシングの小径端側にスラリー入口、大径端側に分散出口が設けられ、軸封にはダブルメカニカルシールが採用されている。

液体は、液入口から吸い込まれ、コニカルロータ内を小径端から大径端方向に強力な遠心力により大流量で流れる。続いて、微小隙間に流れ込み、せん断力を受け、分散出口から排出される。対象物は極短時間で分散場を通過するため、温度上昇は最小限に抑えられる。また、液体は、せん断面に対し干渉しない方向で流れるため分散場は層流に保たれ、キャビテーションが抑えられる。層流の分散

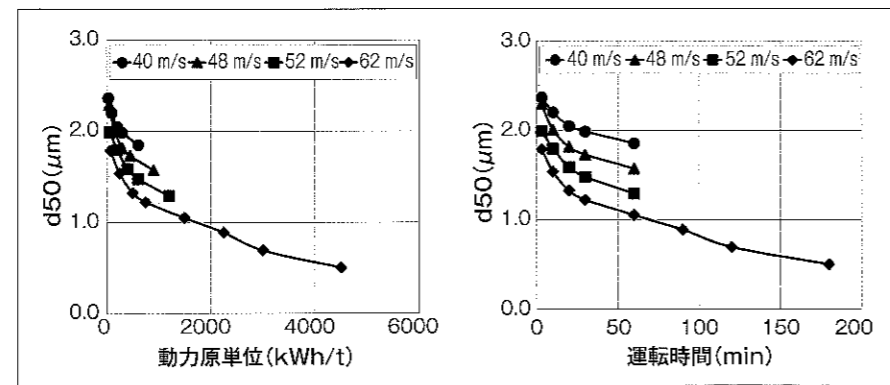


図2 分散例 (ナノ酸化チタンの凝集体の分散)

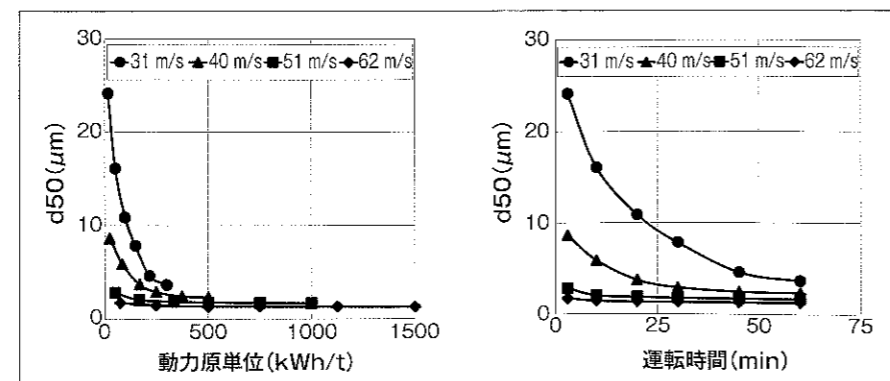


図3 乳化例 (流動パラフィンO/Wエマルジョン)

場は、キャビテーションを抑えるだけでなく乱流や渦の発生も抑えるため無駄な動力がかからずにエネルギー効率の良い分散・乳化ができる。さらに、大流量と微小隙間の組み合わせは、分散場を加圧状態に保ち、キャビテーション抑制に大きな効果を発揮する。

付帯機能として、液流れから見て微小隙間手前にポンプ出口をオプションとして設けることができる。ポンプ出口を利用すると、液は微小隙間を通過せずに排出されるので、静圧は動圧に変換され効率がよいポンプとして利用できる。

6. チータCPMを利用した処理例

分散、乳化、粉碎の各処理例を紹介する。

図2、3より、分散・乳化においては、シングルミクロンからサブミクロンへ到達し、周速が高いほど効率がよいことが分かる。また、図4より、対象物が微粒子の凝

集体でなく結晶粒子の場合、微細化は進行せず新界面を創出するような粉碎効果はないことが分かる。このような特性は、例えば10μm程度の活物質、微粒子の導電助剤、バインダー、溶剤を同時に混合するような電池の電極スラリーなどに活用でき、活物質の粒子径を保持したまま全体を混合分散させることができる。

また、ポンプやスクリー、攪拌機などは一般に20~30 m/sを境にキャビテーション問題が顕著になるといわれるが、チータは最大周速の68 m/sで運転しても各処理例共にキャビテーションはほとんど発生しなかった。

さらに、最高周速の68 m/sで運転しても、各処理例共に1パスの温度上昇は2.5℃程度に収まった。本処理例は比熱が約1.0弱であったが、これが溶剤系や高固形分濃度のような例えば比熱0.5の対象物であっても5.0℃に収まることになる。

以上のように、チータは、高速回転型の分散・乳化機のボトルネックであるキャビテーションと昇温を克服し、高効率の分散・乳化を実現した。

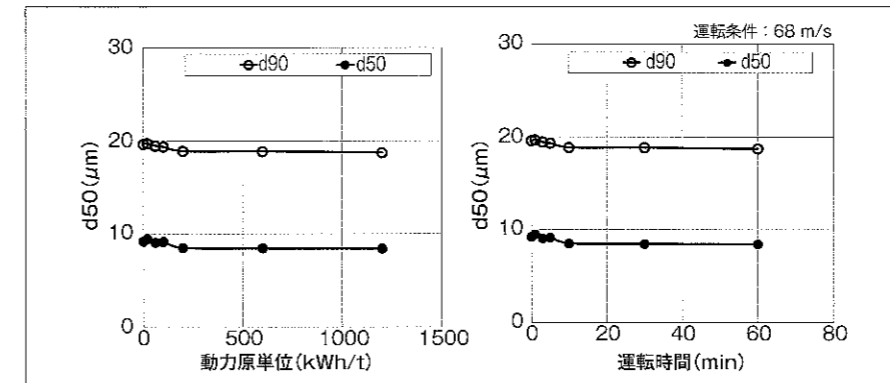


図4 粉碎例 (一次粒子径9μmの炭酸カルシウムの粉碎)

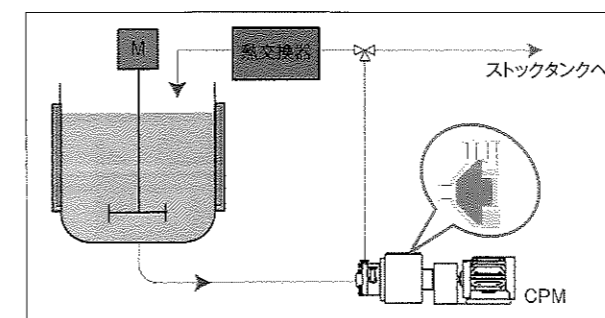


図5 循環運転による分散・乳化システム

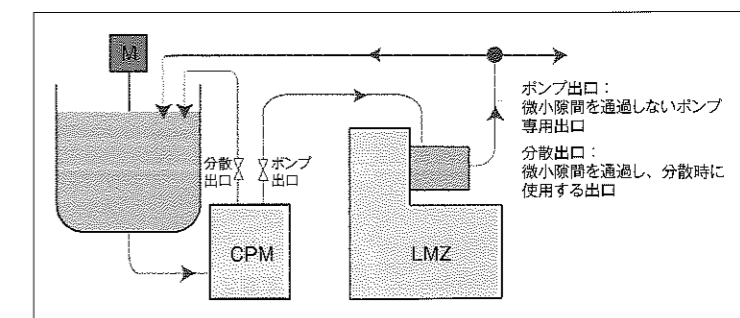


図6 ビーズミルと組み合わせたシステム

7. チータCPMの利用方法

図5の循環運転による分散・乳化システムは、チータCPMのコンセプトである短時間滞留の多重パスを最小の付帯設備で成立させる方法である。前述の通り、機内を通過する際の1パスの温度上昇はわずかなため、ホールディングタンクをジャケット構造にする、または、循環系内に熱交換器を設置するなどで製品の温度上昇を最小限に抑えることができる。容易な分散・乳化の場合は、循環工程を要せず1パスのみで目的の分散・乳化が完了する。

図6のビーズミルと組み合わせたシステムは、ビーズミルのプレ分散機としてスクリーンの目詰まり防止や小径ビーズによる分散効率向上に活用する方法である。このような場合、前処理分散が終了した後、ポンプ用出口を使用しビーズミルへの送液ポンプとして利用できる。

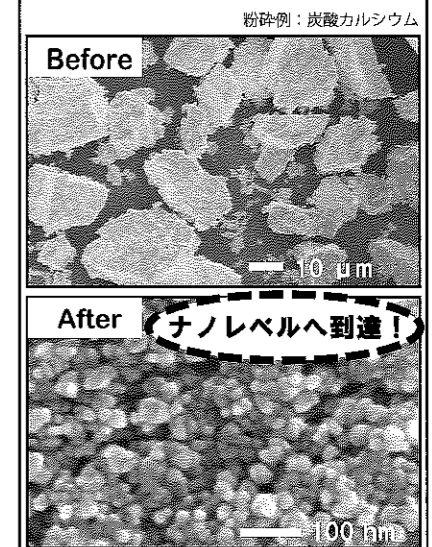
8. おわりに

一般に、高速回転型の分散・乳化機は、高速になるほど効率が上がるが、キャ

ビテーションの発生と製品温度の上昇が障害となり高速回転の限界となる。高速回転分散・乳化機チータCPMはこれらを抑制することにより、さらなる高速回転での安定運転を実現し、分散・乳化の効率を向上させた。さらに、脱泡効果と送液機能の付加により、1台で個液混合から分散、乳化、脱泡、送液を可能とした。

※チータはアシザワ・ファインテック㈱の登録商標

湿式も、乾式も。
微粉碎・分散なら、
アシザワ・ファインテック



微粒子技術で「新しい可能性の共創」
アシザワ・ファインテック株式会社
本社・実験室
〒274-8572 千葉県習志野市茜浜1-4-2
TEL 047-453-8111
http://www.ashizawa.com