

氏名	小野 實信
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成8年12月4日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和40年3月 東北大学工学部化学工学科卒業
学位論文題目	乱流攪拌槽による高粘性分散滴の微粒化に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 新井 邦夫      東北大学教授 松本 繁 東北大学教授 今野 幹男

## 論文内容要旨

### 第1章 緒論

食品工業においては、植物油脂などの比較的粘性の高い液状食品を、砂糖や粉乳等を添加した水あるいは純水に加えて攪拌することで分散・乳化させる工程にしばしば遭遇する。従来この種の工程では液温を意図的に高く設定することによって分散相の粘度を低くし、分散・乳化を速やかに行う操作方法が採られてきた。しかし、品質の面からは、加熱処理工程を極力少なくして食品構成成分の変性を抑制することが望ましく、乳化プロセスの迅速性を多少犠牲にしても高品位な食味と風味を得ようとするのもまた今日的な課題の一つである。さらに、エネルギー消費の観点からも、加熱工程あるいはその後の冷却工程等のプロセスの簡略化が望まれることは言うまでもない。

しかし、液温の低下は分散相である油脂の高粘度化を招くので、必然的に所要攪拌時間が長くなり、条件によっては乳化が困難となる場合もあり得る。したがって、分散相の粘度や所望分散滴径に応じた最適な操作条件を明らかにする必要があるが、現時点では参照し得る研究成果が極めて少ない。

そこで本研究では、攪拌槽内における高粘性分散滴の微粒化過程を実験および理論の両面から明らかにし、高品質な液液分散系食品を製造するための新規攪拌乳化工程の実現の可能性を探索すると共に、そのための操作の指針を得ることを目的とした。

### 第2章 既往の研究

本章では、攪拌槽内における分散滴の分裂と合一の現象に関する既往の研究を調査した。その結果、高粘性滴に関する報告は数少ないものの、低粘性滴については数多くの研究が成されており、特に標準型の攪拌翼であるラシュトナービン翼による液液分散操作に関しては平均滴径や滴径分布の推算手段も与えられていることがわかった。そこで本研究では、初めにこの標準翼を備えた攪拌槽内における高粘性滴の微粒化過程に検討を加え、低粘性滴に関する知見を高粘性滴に拡張することで微粒化過程に対する取り扱い手法の一般化を図ることにした。次いで、この成果を踏まえて実用の大型攪拌乳化装置に実験的考察を加えることにした。

### 第3章 標準型攪拌槽の仕様と実験方法

本章では、標準翼を備えた小型攪拌槽による液液分散実験について、使用した装置の構造と寸法、試料液の物性、実験条件および実験方法を述べた。この実験の結果は第4章から6章にて考察と共に提出した。

## 第4章 液滴の分散機構に関する考察および平均滴径の相関

本章では、分散相体積率が極めて小さく液滴同士の合一が無視し得る微粒化過程（純分裂過程）を対象として、液滴の分裂機構を実験・理論の両面から考察した。初めに、乱流場に存在する単一液滴に関して新たなエネルギー収支式を提案し、これに基づいて、与えられた乱流場で安定に存在し得る最大の滴の大きさ、すなわち最大安定滴径  $d_{max}$  の相関式を導出した。式中の二つの装置定数を適切に与えることで、図1に示したように、定常分散下における本実験値ならびに文献値を良好に表示できることがわかった。

次いで、最大安定滴径  $d_{max}$  と Sauter 平均径  $d_{32}$  の間に比例関係が成立することを確認し、前者が後者の約1.6倍の値となることがわかった。

さらに、定常分散に至るまでの Sauter 平均径の時間的変化を追跡し、定常分散下の平均滴径を一つの相関パラメーターとして利用する、平均滴径経時変化の新たな相関手法を提案した。図2は翼径  $L$  で無次元化した過渡滴径  $(d_{32})_t / L$  を翼回転速度  $N$  と攪拌時間  $t$  の積（すなわち翼回転回数）に対してプロットしたものであるが、実線で示した本相関式の計算値は測定結果の傾向を良好に表示している。

## 第5章 純分裂過程における滴径分布

本章では、純分裂過程における滴径分布の経時変化を論じた。初めに滴径分布の形と操作条件の関係を調べ、高粘性滴の分裂では大小二つの滴径に極大値を有する、いわゆる二峰性分布が条件によっては出現することを指摘し、その理由について定性的に論じた。

次いで、低粘性滴に対して適用されていた既往の Population balance モデルを高粘性滴に拡張することにより、定常分散状態に至るまでの滴径分布の時間的変化の推算を試みた。すなわち、モデルに含まれている分裂頻度、単一液滴の分裂個数および生成子滴の数密度分布関数という三種の関数に滴粘性の寄与を評価する補正を理論的あるいは実験的に施すことにより、低粘性滴から高粘性滴までの滴径分布の推算を可能とした。図3は粘度 3.02 Pa·s、連続相との界面張力 0.016 N/m の高粘性滴の滴径分布の推算値と実測値を比較した結果の数例であるが、両者の一致は良好である。

## 第6章 合一を伴う分散微粒化過程における平均滴径と滴径分布

本章では、分散相体積率が大きく液滴同士の合一も生ずる条件下における分散微粒化過程に検討を加えた。

初めに定常分散下の平均滴径を調べ、これが合一の影響によって純分裂過程の値より大きくなる割合を分散相体積率を含む簡単な実験式で表した。次いで、この定常分散に至るまでの平均滴径の経時変化を追跡し、これが第4章で提案した手法によって相関できることを確認した。さらに、滴合一の項をも含む Population balance 式の数値解析も試み、既往の合一頻度式に対して滴粘度に関する簡単な補正を施すことにより、合一を伴う時の高粘性滴の微粒化過程をシミュレートできることがわかった。

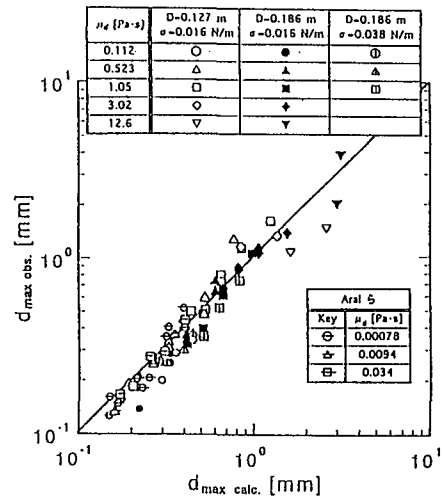


図1 最大安定滴径の計算値と実測値の比較

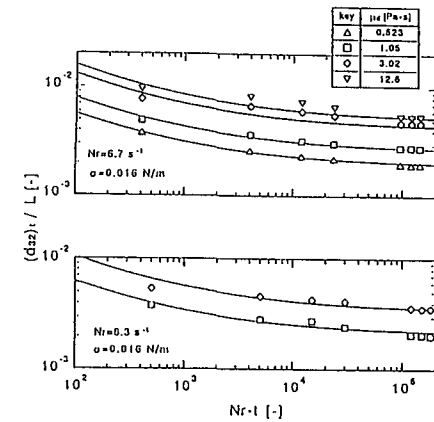


図2 平均滴径の経時変化

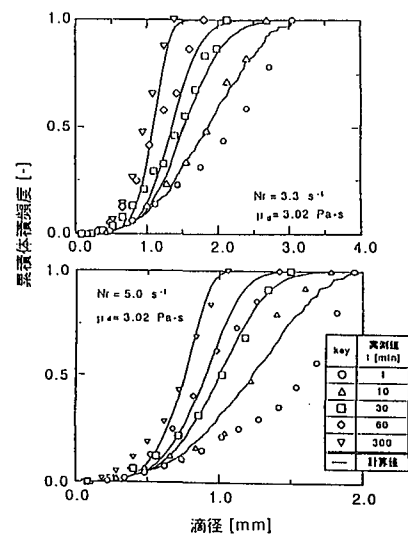


図3 滴径分布の経時変化  
(槽径0.127 m)

## 第7章 実用型攪拌槽における分散滴の微粒化過程

本章では、第6章までの知見を踏まえて、実用装置の検討を行った。標準翼以上に液滴の分散微粒化性能に優れた攪拌翼を選定し、これを備えた内容量50リットルの大型攪拌装置を製作して高粘性滴と低粘性滴双方の微粒化実験を行い、実用工程で特に重要な平均滴径を調べた結果を論じた。図4は第4章において最大安定滴径の理論から導出した定常分散下の平均滴径の相関式を式中の装置定数を変えて本実用機に適用した結果であるが、計算値と実測値は良好に一致し、先の関数形が攪拌翼の形式によらず適用できることを確認した。また、平均滴径の時間的変化の相関手法も本実用装置に対してそのまま適用可能なことがわかった。さらに、以上の結果から、高粘性の液液分散系食品を熱的に温和な条件で分散微粒化する新規工程の実現性について言及した。

## 第8章 総括

本章では、各章の内容を総括した。

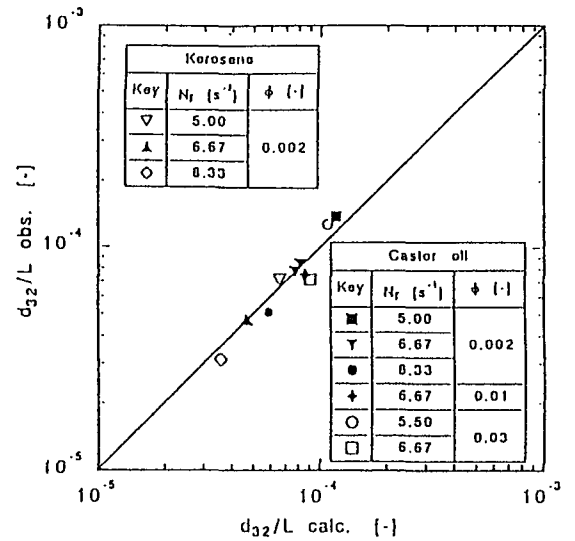


図4 定常分散下の平均滴径の相関

## 審査結果の要旨

食品工業においては、植物油脂などの比較的粘性の高い液体を攪拌操作により水中に分散・乳化させる工程にしばしば遭遇する。従来、このような液液分散操作に関する研究は主として低粘性分散滴に関するものが多く、高粘性滴の攪拌微粒化に関しては、未だ操作条件と滴径分布の定量的な関係は明確ではない。

本論文は、攪拌槽内における高粘性分散滴の微粒化過程を実験および理論の両面から明らかにし、一次乳化としての液液分散操作の設計指針を高粘性分散相域まで拡張することを目的としたもので、全編8章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、本研究に関連した既往の研究を整理し、その問題点を明確にしている。すなわち、従来の液液分散操作の研究は低粘性滴に関するものが多く、特に標準型のラシュトナービン翼による操作では平均滴径や滴径分布の推算手法が確立されている。高粘性滴に関しては、実験データも少なく、提案されている相関式も不十分である。

第3章では、低粘性滴に関する実験データが蓄積されている標準翼を備えた小型攪拌槽による高粘性液滴の分散実験を計画し、その実験装置、条件、方法を述べている。

第4章では、液滴同士の合一が無視しうる純分裂過程を対象とし、液滴の分裂機構を理論および実験の両面から考察し、高粘性滴にも適用できる平均滴径の新たな相関式を提案している。すなわち、乱流場に存在する滴の変化に対する抗力として、界面張力に加えて、滴の粘性応力を考慮した新たなエネルギー収支式を提案し、最大安定滴径の相関式を導出している。本研究での実験値および文献値を使用して、この相関式により低粘性から高粘性滴の定常分散下における最大安定滴径、平均滴径の相関に成功している。さらに、この結果を基にして、平均滴径の経時変化の相関式も与えている。

第5章では、Population balance モデルを用いた純分裂過程における滴径分布の推算方法を提案している。すなわち、理論あるいは実験的に滴粘性の寄与を評価することにより既往のモデルを補正し、滴径分布の経時変化の予測手段を確立している。

第6章では、分散相体積分率の影響を実験的に補正し、液滴同士の合一が生じる条件下での平均滴径とその経時変化の相関式を提案している。さらに、既往の合一頻度の式に滴粘性に関する補正を加え、滴径分布の経時変化の予測も可能にしている。

第7章では、高粘性滴の分散微粒化性能に優れた攪拌翼を備えた大型の実用装置を用いて平均滴径の相関を試みている。その結果、本研究で得られた定常分散時の平均滴径の相関式は適切な装置定数を用いることによりそのまま適用が可能であること、さらに、平均滴径の経時変化の予測手法も適用しうることを示している。

第8章は総括である。

以上要するに本論文は乱流攪拌槽における高粘性分散滴の微粒化を実験および理論的に検討し、平均滴径および滴径分布の定量化を行い、高粘性滴にも適用しうる液液分散操作の指針を確立したもので、化学工学及び食品工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。