

氏 名	栗 山 雅 文
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 58 年 7 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 51 年 3 月 山形大学大学院工学研究科化学工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	攪拌槽内における高粘度液の流動と伝熱特性
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 斎藤正三郎 東北大学教授 大谷 茂盛 東北大学教授 只木 楨力 東北大学教授 鈴木 睦

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

攪拌槽は高分子化学工業の中核をなす重合反応器として広く用いられており、その伝熱特性を把握することが高分子製造プロセスの収率を高め、また製品の品質を向上させる上で極めて重要な課題とされている。

一般に、高分子製造プロセスにおける処理流体は高粘度を有し、そのために攪拌槽の伝熱操作は層流域で行われることが多い。ところが層流域での熱の輸送速度は大きなものではなく、流動状態によっては槽内に少なからぬ温度分布が発生し、これが製品の品質に悪影響を及ぼしてしまうことも少なくない。しかるに従来の研究ではこの温度分布を考慮した取り扱いはなされておらず、装置設計ならびに操作条件の決定に際して、明確な指針を与えるまでには至っていない。

そこで本研究では、高粘度液用攪拌翼のうち最も基本的型式であるアンカー翼とヘリカルリボン翼の 2 種類を対象とし、槽内流動状態に立脚して、槽壁での熱移動ならびに槽内の熱的混合過程を解明することを試みた。

なお攪拌液としては、各種流体の基礎となるニュートン流体、および工業上最もしばしば遭遇する擬塑性流体を対象とした。

第2章 既往の研究

本章では、本研究で対象としたアンカー翼およびヘリカルリボン翼を備えた攪拌槽について、槽内の流動状態、槽壁での熱移動、槽内温度分布、および攪拌所要動力に関する既往の研究を調査し、本研究の立場を明確にした。

第3章 層流域における攪拌槽内の流動

本章では、槽内の移動現象の場を規定する流動状態について、槽水平断面を模擬した2次元モデルの数値解析ならびに速度分布の実測の両面から検討し、伝熱特性を解明するための基礎的資料を提出した。

数値解析では、大宮司ら¹⁾が提案した物体をよぎる流れの解析手法を適用して計算のアルゴリズムを確立し、得られた数値解が、図1に示すように、アンカー翼攪拌槽水平断面内の流れを良好に表現することを認めた。さらに、攪拌条件を種々変化させて計算を行い、フローパターンならびに循環流量に及ぼす翼寸法とレイノルズ数の影響を明らかにし、混合性能との関係を論じた。

またトレーサ粒子法によってヘリカルリボン翼攪拌槽内の全域の速度分布を実測し、槽内流動に及ぼす翼直径と攪拌液の流動特性の影響を明らかにした。両者の影響は軸方向流れにおいて特に顕著であり、図2に示すように、翼直径が小さくなるほどまた攪拌液の擬塑性が強くなるほど軸方向流れが弱まることわかった。この結果は、槽壁から伝熱を行った場合にはそこで熱交換した流体の更新速度が遅くなり、ひいては熱移動速度が低下することを示唆しており、第5章の伝熱実験結果を裏付けるものである。

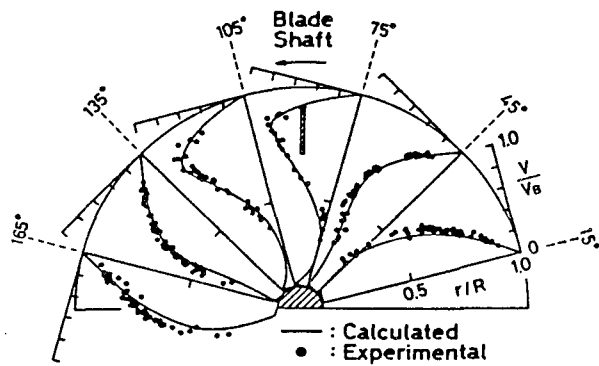


図1 アンカー翼攪拌槽内の円周方向速度分布
($Re = 1$)

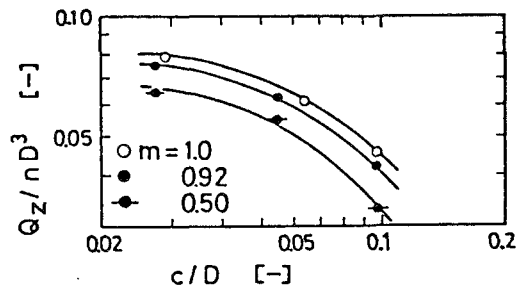


図2 ヘリカルリボン翼攪拌槽内の軸方向循環流量

第4章 攪拌槽内の熱的混合過程

本章では、攪拌槽内の熱的混合の問題を取り上げ、非定常伝熱時におけるヘリカルリボン翼攪拌槽内の温度分布をコレステリック液晶を用いて可視化し、これを検討した。本実験によって槽内温度分布の発生過程の全容が明らかとなり、温度分布が主として軸方向循環流によって規定されるこ

とを認めた。この結果に基づき、槽内の伝熱が、1) 槽壁近傍の温度境界層内の伝熱（これは槽壁での熱移動を規定する）、2) 循環流による対流伝熱（これは沖合いでの温度分布および境界層内流体の更新速度を規定する）、の2つの機構から構成されることを指摘した。加えて、槽壁で熱移動の推進力を規定する槽内代表温度が、攪拌羽根通過位置での温度であることを認めた。さらに、槽内の熱的混合過程を定量化するためには軸方向循環流をモデル化することが有効であるとの考えに基づき、この流れをいくつかの流路に分割して槽内に幾何学的に配置した1つのフローモデルを提案し、第6章における伝熱特性の解析の方法論を提示した。

第5章 層流域における攪拌槽の伝熱特性

本章では、流通式攪拌槽を用いて熱伝達測定を行い、従来ほとんど報告例の見当たらない詳細な槽内温度分布および槽壁での熱流束分布を測定して伝熱機構を論じた。

はじめに、非ニュートン流体の伝熱データを整理するための代表粘度、すなわち見掛け粘度の決定法を述べた。この見掛け粘度は、槽内平均せん断速度と呼ばれるせん断速度の代表量と液の流動特性から求められる。そこでニュートン流体と擬塑性流体の攪拌動力の測定結果から槽内平均せん断速度を求め、翼-壁間クリアランスとの間の実験式を、アンカー翼およびヘリカルリボン翼の各々について与えた。

ヘリカルリボン翼攪拌槽に関しては、従来用いられてきた槽内完全混合の仮定が不適当なことを指摘し、翼回転数が高い場合でも層流域では槽内温度分布が無視し得ないことを示した。この温度分布のパターンは、翼寸法や液の流動特性に依らず、槽壁近くと攪拌軸近傍で半径方向の温度勾配が大きくなる。また熱流束分布は、一般に槽頂と槽底付近で極大値を、槽高さ中央付近で極小値を取る形となったが、この分布形は軸方向フローパターンから説明し得た。

アンカー翼攪拌槽に関しては、温度分布の測定結果から、既往の伝熱相関に見られる著しいデータのばらつきが槽内代表温度の採り方に起因することを明らかにした。また熱流束分布の測定結果から、槽壁での熱移動が軸方向流れによって槽壁近傍に流れ込む流体と槽壁との間の温度差を推進力としていることが判明した。

第6章 フローモデルによる伝熱特性の解析

本章では、これまでに得られた知見に基づき、槽内の軸方向流れの特徴を生かしたフローモデルを導出し、前章で得られた流通式攪拌槽の伝熱実験結果を解析した。

ヘリカルリボン翼攪拌槽に関しては、第4章で提案したフローモデルを流通系に適用し、その定量化手法を示した。このフローモデルを図3に示す。図中の $Q_1 \sim Q_5$ 、 $t_1 \sim t_4$ および t_{∞} は各流路の流量と温度を、また t_w は壁温を表わす。攪拌液は流量 Q 、温度 t_i で流入し、温度 t_o で流出する。槽壁での伝熱相関式と各流路の流量が与えられれば、図中①～⑥の個所での熱収支式を連立して解いて各流路の温度が求められる。そこで境界層理論を用いて伝熱相関式を導出し、また $Q_1 \sim Q_5$ に適当な関数形を仮定してこのモデルを適用したところ、ニュートン流体ならびに擬塑性流体の双方について温度の推算値と実測値が良好に一致することを認め、操作条件から直接温度分布と

熱移動速度を推算する手法が確立された。なお、得られた伝熱相関式と実測値との対応は図4に示す通りである。相関式中のFは、攪拌液の流動特性の相違に対する補正項であり、槽壁での軸方向速度勾配を評価する1つのモデルに基づいて導出したものである。

また、アンカー翼攪拌槽に関しては、軸方向フローパターンを考慮に入れて攪拌軸近傍温度を槽内代表温度と定義し、この代表温度に基づいてニュートン流体および擬塑性流体双方の伝熱係数を無次元相関した。結果を図5に示す。アンカー翼攪拌槽では、従来レイノルズ数が50以下では温度分布が著しく大きくなるために伝熱係数の相関が困難とされていたが、ここで提示した代表温度を用いることにより、その相関が可能となった。またヘリカルリボン翼の場合と同様な手法を用い、代表温度と熱移動速度の推算法を提出した。

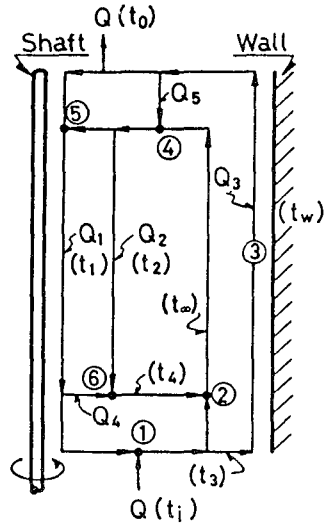


図3 ヘリカルリボン翼攪拌槽のフローモデル

第7章 攪拌槽内のせん断特性と攪拌所要動力

本章では、非ニュートン流体の攪拌所要動力ならびに伝熱操作時の動力に関する設計指針を得ることを目的とし、それらの推算法を検討した。これらの動力も等温条件下で決定されたニュートン流体の動力相関を用いて予測し得れば簡便かつ有益である。その際には、非ニュートン流体の代表粘度を求めるための槽内平均せん断速度の見積り方、および物性値を評価するための代表温度の採り方、の2点が問題となる。そこで、せん断速度分布と動力の数値解析、および等温条件下と伝熱操作時の動力測定から、上記の2点を検討した。その結果、槽内平均せん断速度は攪拌羽根先端の半径方向位置における円周方向せん断速度の積分平均値と対応していることが判明し、簡単なモデルによってその推算を可能とした。また、伝

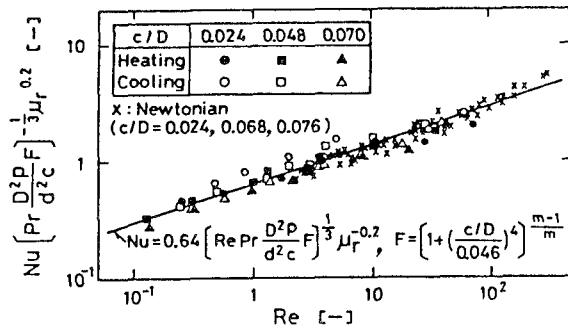


図4 ヘリカルリボン翼攪拌槽の槽壁における平均伝熱係数の相関

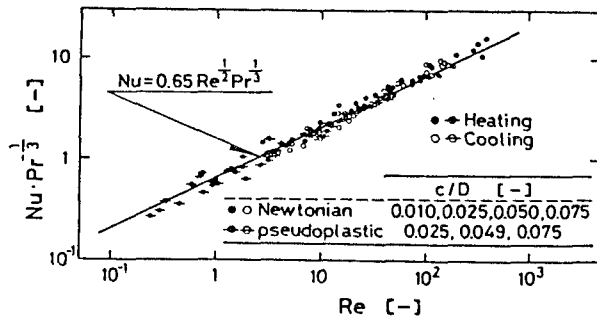


図5 アンカー翼攪拌槽の槽壁における平均伝熱係数の相関

熱時において著しい温度分布が発生している場合でも、攪拌羽根通過位置での温度を代表温度とすれば、等温条件下で得られた相関式がそのまま伝熱時の動力相関式として適用できることがわかった。

ニュートン流体の等温攪拌動力についてはこれまでに数多くの相関式が報告されているが、本章で得られた知見はこれらを非ニュートン流体および伝熱操作時の動力推算に拡張するものである。

第 8 章 総 括

本章では、各章の内容を総括した。

(記号の説明)

C : 翼一壁間クリアランス D : 槽内径 d : 翼直径 F : 非ニュートン補正項

m : 流動指数 Pr : プラントル数 p : ヘリカルリボン翼のピッチ Q : 流通流量

Q_2 : 軸方向循環流量 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 : フローモデルの各流路の流量

Re : レイノルズ数 t_i, t_o : 流入, 流出温度 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_{\infty}$: フローモデルの各流路の温度

t_w : 槽内壁温度 v : 円周方向速度 v_B : 攪拌羽根先端の円周方向速度

μ_r : 粘度補正項

審 査 結 果 の 要 旨

高分子化学工業において攪拌槽は重合反応器として広く用いられているが、反応生成物の高品質化に伴い、その設計に際して伝熱特性に関する詳細な情報が必要とされている。しかしながら、高分子溶液のような高粘土液の層流攪拌伝熱については未だ不明な点が多く、特に反応生成物の品質に重大な影響を及ぼす槽内温度分布についてはほとんど知見が得られていないのが現状である。

本研究は、槽内の移動現象が流動状態によって規定されることに着目し、リボン翼およびアンカー翼を備えた攪拌槽内の流動状態、温度分布、ならびに槽壁での熱移動速度等について実験および理論の両面から検討を加え、これら諸量間の関係を定量的に把握することにより、伝熱機構を解明せんとしたものである。本論文はその成果をまとめたもので、全編8章から構成されている。

第1章は緒論であり、本研究の意義と目的を述べている。

第2章では、本研究に関する既往の研究を調査し、本研究の立場を明確にしている。

第3章では、流れ場の2次元モデルの数値解析ならびに詳細な速度分布測定の両面から槽内流動状態を解明し、これに及ぼす翼寸法、レイノルズ数、および攪拌液の流動特性の影響を明らかにしている。

第4章では、攪拌槽内の熱的混合機構を実験的に解明している。非定常伝熱過程における槽内温度分布の可視化を行い、温度分布と槽内循環流との関係を明らかにしている。またこの結果に基づいて、熱的混合過程を定量化するための方法論を述べている。

第5章では、流通式攪拌槽を用いた定常伝熱実験について述べている。槽内温度分布ならびに槽壁での熱流束分布を種々の操作条件の下で測定し、これらの分布形が第3章で明らかにした軸方向フローパターンから説明できることを示すとともに、翼寸法や攪拌液の流動特性による相違を明らかにしている。

第6章では、第3章から第5章までに得られた知見に基づき、伝熱過程の定量化を行っている。すなわち、槽壁での熱移動を規定する槽内代表温度に明確な定義を与え、この代表温度を用いて精度のよい伝熱相関式を導出している。また槽内流動の特徴を表現するフローモデルを導出し、熱的混合過程の定量化手法を提案している。これらの知見は、熱移動速度と槽内温度分布の推算を可能にするものであり、装置設計上極めて有益である。

第7章では、槽内のせん断速度分布と攪拌動力の数値解析、ならびに等温操作と伝熱操作における攪拌動力の測定を行い、これらの結果を基に、ニュートン流体の等温動力相関式を非ニュートン流体の動力および伝熱操作時の動力の推算に拡張している。

第8章は総括である。

以上要するに、本論文は攪拌槽の層流伝熱特性を流動状態に立脚して体系的に解明し、その設計ならびに操作に関する有益な知見を与えたものであり、化学工業および化学工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。