

氏 名	わ だ あき 穂
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年 2 月 8 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 2 8 年 3 月 北海道大学工学部機械工学科卒業
学 位 論 文 題 目	高粘性液の流路内冷却伝熱に関する基礎的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大谷 茂盛 東北大学教授 鈴木 陸 東北大学教授 新井 邦夫 東北大学教授 太田 照和

論 文 内 容 要 旨

食品の製造加工において、高粘度液状食品原料の急速加熱や冷却を必要とする操作が、昨今の人々の嗜好の多様化に応じて多くなってきている。この際、伝熱装置は、衛生的で、分解・点検・清掃が可能な構造であることを必要とし、この目的に適応したプレート型熱交換器を高粘度の食品原料の熱処理に使用することが試みられている。しかし、高粘度液体をプレート型熱交換器により冷却する場合、所定の性能が発揮できず、現場では熱交換器を単に直列に連結するなどの応急的な処置で対応しているのが現状である。また、この根本的な対策のために、定量的な伝熱機構の解明も、未だ十分にはなされていない。

そこで、本研究では、円管、狭い間隔を有する平行平板流路および方形波型流路での高粘度液体の冷却操作における流動・伝熱特性を理論的および実験的に明確にし、その結果に基づきプレート型熱交換器により高粘度液体を冷却する際の基礎資料と新しいプレート型熱交換器の開発を目的とした。

第 1 章 緒 論

本章では食品工業における急速な加熱冷却の必要性和プレート型熱交換器の適用性を論じた。その結果、高粘度液体の伝熱特性と熱交換器の構造・性能とから、高粘度液状食品原料に対してプレート型熱交換器が最適であることを明確にすると共に、適用時の問題点を指摘した。その問題解決には、高粘度液体の冷却操作における伝熱特性を把握する必要がある事を示した。さらに、高粘度液体の伝熱およびプレート型熱交換器に関する既往の研究を概説した。

第2章 高粘性液の冷却伝熱に関する数値解析

本章では温度によって粘度が大きく変化する流体即ち高粘性液の冷却伝熱に関して理論解析を行った。

最も基本的な流路である円管と、プレート型熱交換器内の流路を最も簡単に模擬した狭い間隔で縦横比の大きな矩形断面の流路（流れは2次元と近似する。以後この流路を矩形流路と云う。）の2通りの流路に高粘性液を層流で流して周囲から冷却する場合を想定し、いくつかの仮定の下で運動方程式、エネルギー方程式、連続の式を立てこれを差分方程式に直して数値解析を行った。

その結果、本研究の範囲内では流路内の温度分布は $X^* (= \frac{Z}{De \cdot Re \cdot Pr})$ 、 Z ：流路の長さ、 De ：流路の代表寸法、 Re ：レイノルズ数、 Pr ：プラントル数）および粘度比 μ_i / μ_w （ μ_i ：流体の入口温度における粘度、 μ_w ：壁温での粘度）によってほぼ決定されることが分かった。また、流路内の温度分布は粘度の温度依存性に大きく影響されないが、速度分布の方は著しい影響がみられた。一方、熱伝達係数は粘度比 μ_i / μ_w が小さい程、Nusseltの解より小さい値となり、 X^* の増加と共にNusseltの解に漸近して行く事を示した。管摩擦係数は物性値一定の場合の値と比べ μ_i / μ_w が小さくなるに従い大きくなり、同時に X^* の大きくなる程両者の差が大きくなること等の点を明らかにした。

第3章 高粘性液の冷却伝熱に関する実験

本章では円管および矩形流路に高粘性液を流して冷却伝熱実験を行った結果について述べた。ニュートン流体である水飴水溶液を種々の濃度に調整して壁温を一定に保った流路に流し、出口温度分布ならびに熱伝達係数を測定して、前章で求めた理論解および既往の実験結果と比較検討した。

その結果、実験においても μ_i / μ_w が等しい場合、同一の X^* の点での温度分布はほぼ等しい事を確認した。

熱伝達係数に対する粘度の補正項としては従来 $(\mu_b / \mu_w)^{-0.14}$ （ μ_b ：流体の入口および出口における混合平均温度の算術平均温度での流体粘度）が用いられているが、粘度が温度と共に著しく変わる液ではこの補正では不十分で、むしろ $(\mu_i / \mu_w)^{-m}$ を補正項とし、べき数 m を X^* の関数とみなす方が妥当である事を明らかにし、従来の式より精度の高い熱伝達係数の実験式を提示した。

第4章 プレート型熱交換器を模擬した方形波型伝熱面を有する流路の層流冷却伝熱

実際のプレート型熱交換器の流路は流路の拡大・縮小と方向転換のくりかえしである。これを最も端的に表わす流路として矩形波状の凹凸をつけた伝熱板を2枚平行に組合せて、多数回直角に折れ曲る流路（以後これを方形波型流路と云う）を用いた。この流路に生ずる滞留域などの流動特性を液の物性値を一定のもとで数値解析すると共に、水飴水溶液の冷却伝熱実験を行い、伝熱特性について検討した。

物性値一定の時の計算によれば Re が10より大きくなると折れ曲りの隅に液の滞留域が生じて来る事、2度の折れ曲りを通過した後のフローパターンには周期性がみられる事、方形波型流路の熱

伝達係数は矩形流路のそれと大きな差はない事、 X^* が 5×10^{-3} より大きくなると矩形流路より若干小さくなる事、などが分った。

また、実験によれば $\mu_i / \mu_w > 0.4$ の時には $Re < 100$ で熱伝達係数は従来の Sieder-Tate の式に一致する事、乱流への遷移は Re 数が100付近から始まる事、粘度比が0.4以下では μ_i / μ_w が小さい程、物性値一定の場合の熱伝達係数よりも小さい値となる事、 X^* が大きくなるとその差は小さくなる事、などが分かった。

この実験結果にもとづき矩形流路、方形波型流路の双方に適用出来る熱伝達係数の実験式を得た。さらに矩形、方形波に対する型の2つの流路摩擦係数は、ほぼ等しいが、 μ_i / μ_w が極めて小さいと方形波型流路の方が小さくなる事も明らかにした。

第5章 プレート型熱交換器を模擬した流路の層流速度分布と冷却伝熱特性

プレート型熱交換器内においては、構造上流体の出入口は流路巾方向の一部にそれぞれ設けられている。従って、前章までの流路間隔方向に関する検討と共に、プレート巾方向の流れの考察が必要となる。

本章では、プレート型熱交換器内流路の流出入口位置の流動および伝熱特性への影響に関する検討を行った。矩形流路に流路巾 $1/3$ もしくは $1/4$ の流入口、流出口を取付けた模擬流路を透明アクリル板で作製した。流速分布をレーザー・ドップラー流速計で測定すると共に流れの可視化により観察し、同時に流れを2次元とみなして計算も行ない、流路が急拡大する際の流れの拡がりを検討した。また銅板で模擬流路を作り冷却実験により伝熱特性を検討した。

その結果、流路巾が急拡大する場合、入口での流速が小さくとも流れは容易に拡がらず、入口からの流れはほとんどそのままの速度分布を保って出口に達し、それ以外の所では大きな停滞域となっていることが分った。さらに、流路巾の $1/4$ の入口と出口を矩形流路の対角位置にとりつけた模擬流路での実験によれば、液の物性値一定の場合には、熱伝達係数は第2章で求めた矩形流路（二次元流路）の計算結果と大差が無いが、粘度の温度による変化が大きく（ μ_i / μ_w の小さい）なるにつれ小さな値となることが判明した。

そこで、狭い出入口を有する流路についての熱伝達係数を、2章で得た矩形流路のそれに流路入口断面積と流路断面積の比の関数で補正して求める事を提案し、満足すべき相関式を得た。さらに、流路間隔中心面での流体の温度分布も測定し、巾方向の停滞域の存在を裏づけた。

また、流路を垂直に立てた実験から、操作条件によっては自然対流の影響により熱伝達係数が極めて小さくなる事を確認した。

第6章 総括

本研究で得られた成果を総括的に述べた。

審査結果の要旨

食品製造においては、種々の液状物質の急速な加熱・冷却操作が要求されることと、食品の安全性の面から、伝熱係数が大きく、かつ分解・洗浄のしやすいプレート型熱交換器が多用されている。一方、取りあつかわれる流体は高粘性であることが比較的多く、冷却伝熱の場合は特に伝熱面近傍での流体の粘度の増加に依る伝熱能力の減少がしばしば問題となる。

本論文はプレート型熱交換器による高粘性液の冷却操作を確立するために、幾つかの間隙の狭いモデル流路について高粘性液の流動・伝熱実験及び数値解析を行ない、その機構を明確にしたもので、全編6章より成る。

第1章は緒論であり、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第2章では、流体粘度の温度依存性を考慮してプレート型熱交換器の流路を最も単純化した円管及び矩形流路の層流冷却伝熱の数値解を求め、その伝熱特性と流動特性を明確にしている。さらに、矩形流路の冷却伝熱時における摩擦係数の相関式を提案した。

第3章では、前章の数値解析に対応させて、高粘性液の詳細な冷却伝熱実験を行っている。その結果、温度・速度分布及び伝熱係数は数値解と良好に一致し、伝熱部の無次元長さ及び流体の入口と伝熱壁温における粘度比で一義的に整理されることを明らかにし、従来より精度の高い円管及び矩形流路の伝熱係数の相関式を提案した。

第4章では、プレート型熱交換器を模擬した方形波型の伝熱面を有する矩形流路について、高粘性液の冷却伝熱及び流動特性を数値解析及び実験の両面から検討している。その結果、流路の展開長さを代表長さとする矩形流路の式で近似できることを示し、更に粘度比が1よりかなり小さい範囲での推算精度を向上させるために伝熱係数の相関式を導出した。

第5章では、プレート型熱交換器の流体の出入口形状の流動及び伝熱特性に及ぼす影響を検討し、出入口流路巾が伝熱流路巾よりも小さくなる時は滞留域を生じ、それが冷却操作により拡大されて伝熱係数が減少するが、その値は矩形流路の式を入口及び伝熱部流路の断面積比で補正することにより与えられることを示している。また、伝熱特性は自然対流の影響を受けやすいことを指摘している。

第6章は本論文の結論である。

以上要するに本論文は、食品工業で多用されるプレート型熱交換器による高粘性液体の冷却機構を解明し、その操作・設計に重要な指針を与えたもので、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。