

氏名	西川正史 にし かわ まさ ふみ
学位の種類	工学博士
学位記番号	工博第286号
学位授与の日付	昭和47年1月24日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科化学専攻
学位論文題目	攪拌槽における運動量、熱移動に関する研究
論文調査委員	(主査) 教授 永田進治 教授 水科篤郎 教授 吉岡直哉

### 論文内容の要旨

第1章は本論文の内容を概観したもので、研究の目的は攪拌操作のうちこれまでに未解決のまま残されている部分を解明して装置設計に必要な知見を補充する点にあることを述べている。また液の混合および伝熱の相互関係を攪拌所要動力を通して把握し総括的に研究するのがよいと論じている。

第2章では攪拌所要動力についての研究をまとめている。まず既往の研究結果を概説した後、まだあまり究明されていない高粘度液の攪拌所要動力について研究を行った結果をまとめている。まず高粘度液の攪拌に用いられるリボン翼および案内円筒つきスクルー翼についてピッチや槽壁との間隙幅の影響を含めた動力式を提出した。

次に異相分散系の攪拌所要動力について検討し、まず通気攪拌槽の所要動力を  $Re$  数の他に翼長対槽径の比、通気係数およびフルード数をも含む実験式としてまとめている。ついで固—液、液—液分散系の動力についても論じているが乱流域ではいずれも翼周辺部の液の平均密度が動力に対して大きく影響することを明らかにし、さらに分散固体粒子が微小で分散量が多くなると液は粘性流を示す所謂スラリー状態になるがこの範囲の動力式に対して降伏値動力数を定義し、粘性動力数および慣性動力数との和として広範囲にわたる固—液の組合せに対しその相関式を提出したがすべての実験結果と良好な一致を示している。またビンガム塑性液をタービン翼で攪拌する場合、遷移  $Re$  域において吸込渦の周期的発生と消滅の反覆現象をみいだしたがこの現象に対し攪拌機にかかるトルクを測定して興味ある説明を与えた。この現象はビンガム塑性液の攪拌機構を理解する上において重要であることを述べている。

擬塑性液に対しては従来より2, 3の相関方法が提案されているが、著者は A. B. Metzner の方法を推奨している。すなわち攪拌翼の周りの平均剪断速度が攪拌速度に比例するとの近似法であるが、Power law model に従う液はもちろん、これより偏倚する擬塑性液に対してもこの近似法が適用できるとして従来報告されていないリボン翼やスクルー翼に対する結果を提示した。さらに上述のビンガム塑性流体の動力相関において得られた諸係数を使用すれば擬塑性流体の動力の推算に必要な係数が、また逆に擬塑性

流体の動力の推算過程に用いられる比例係数からビンガム塑性流体の動力推算係数が計算できることを示した。

第3章では高粘性流体の混合についての研究結果を述べている。まず高粘性流体の混合に適する翼についての基本形を示した後、ミクロスケールおよびマクロスケールの混合の別を明かにした。高粘性液の混合においては多くはマクロ混合で判定されているが、基礎方程式を無次元化して循環混合形式に対する無次元混合時間を定義しこれにより混合効果の判定を行った。その結果、代表的なタービン、リボンおよび錨形翼による混合速度をニュートン液、擬塑性液およびビンガム塑性液について広い攪拌速度の範囲について比較し、液の流動特性により特徴的な変化曲線を示すことを動力の測定結果と対比して示している。またタービン翼によるビンガム塑性液の攪拌においては攪拌動力、混合速度および後述の伝熱係数の間には相互に密接な関連があることを明かにした。

第4章では乱流域における攪拌槽の熱伝達を取扱っている。これまで多数の研究者によって数多くの相関式が提出されているが作用因子が多いためまだ全研究者の実験結果を満足する計算式が得られていない。著者はまず槽壁面に対する伝達係数について各種因子の影響を丹念に検討して特殊な形の攪拌翼を除けば従来研究者によって得られている数値をもべて満足する相関式を導いた。また槽内の流速分布を測定した山本の実験値に基づき槽壁面の流速を推算する式を導き、この値を入れたレイノルズ数を用いて形状係数の項を含まない簡単な相関式をも導いている。また冷却コイル面に対する伝熱については従来種々の相関式が提出されているが、レイノルズ数の指数についてさえもまとまった見解が示されていないので、著者は広範な実験結果に基づいてその原因を明かにした。すなわち、攪拌翼が冷却コイル配列範囲内にあるが配列範囲より外（またはこれと同等な流動状態を示すコイル配列構造）にあるかによってレイノルズ数の指数が異なることを明かにして全研究者の実験結果を満足する相関式を示した。さらに異相分散系の攪拌槽伝熱についても論じている。

第5章は高粘性流体の攪拌槽伝熱をまとめたもので第3章の混合に関する研究に基づき混合効果の良好なる翼を用いなければ槽内に顕著な温度斑が現われ、工業的に使用し難く、また液温に斑の現われる攪拌翼に対しては厳密な温度差推進力が定義できず伝熱係数も不正確になるとし混合効果のすぐれたリボン攪拌機についての結果をまとめている。

元来加熱または冷却壁面の温度は液本体の温度と異なるが高粘度液においてはその差が特に顕著に現われる。従って伝熱相関式において粘度補正項の指数の精度が乱流伝熱の場合に較べて遙かに重要となることを指摘し、数千倍の粘度変化を含めて良好な相関結果を示す粘度補正項の指数として0.2を推奨した。そして従来推奨されている値0.14は乱流域に限定して用いる方がよいとしている。また擬塑性液に対しては第2章の動力測定の結果より求めたみかけ粘度を使用し、ニュートン液とともに簡単な相関式でまとめられることを示した。

ついで高粘性液の攪拌槽伝熱方式として新しい考案を提示している。すなわち槽壁に近接したヘリカルコイルを攪拌機としこのコイル内へ冷却または加熱媒体を通しつつ攪拌する方式である。この形式の攪拌翼を用いるとコイル壁面における剪断力勾配が大となり例えば二重螺旋のピッチ1のコイル攪拌機ではコイル面における伝熱係数が槽壁面における伝熱係数の約3倍の値を示す。さらにこの効果は擬塑性液、ビ

ンガム塑性液に対して特に顕著であることを発見し、これに対する定性的な説明を与えている。また例題により伝熱係数の大きいことが反応による発生熱を伴う高粘度液の攪拌冷却に対していかに有利となるかを数値的に明かにしている。またコイルのピッチやコイル径を含んだ熱伝達係数の推算式を提出している。さらに高粘度液の攪拌においては攪拌動力が熱となって液に伝えられ、これが無視できない値となる。したがって攪拌速度を上昇すると冷却効果よりも機械的エネルギーより熱となって液に与えられたエネルギーの方が大となる場合がある。この作用は攪拌槽が大となる程顕著に現われることより、スケールアップした時の冷却可能な限界を外套壁面のみより冷却した場合と外套壁面および攪拌冷却コイルを用いた場合とについて比較し後者の優れていることを示している。

### 論文審査の結果の要旨

この論文は攪拌槽の設計に際して必要な攪拌所要動力、混合効果および伝熱係数に関する研究をまとめたものであって攪拌動力に基づいて諸現象間の関連性を明かにしている。得られた成果の主なものを列挙すれば次の通りである。

(1) 異相分散系の攪拌所要動力式をガス-液、液-液および固-液系について求めた。さらに固-液系の結果を拡張してビンガム塑性を示すスラリーに対する動力数を降伏値動力数、粘性動力数および慣性動力数の和として表わす一般相関式を導き広範囲にわたる実験結果と比較して良好な一致を示すことを明かにした。

(2) ビンガム塑性液の攪拌において遷移領域で現われる流動状態の反覆変動現象を翼の周りのみかけ粘度の変化によって説明した。

(3) 擬塑性液に対する攪拌所要動力の推算法をリボン翼およびスクリュウ翼について提出し、推算過程で使用される相関係数がビンガム塑性液について求められた係数より計算できることおよびその逆の過程も可能なことを示した。

(4) 乱流域における攪拌槽伝熱の相関式を槽壁面および冷却コイル面に対して求めた。これらは従来の研究者による測定値のほとんど全部に対して良好な一致を示した。また冷却コイル面に対する従来の伝熱相関式において  $Re$  数の指数が一定していなかった理由を究明しコイル構造および翼取付位置の相互関係により2種に大別すべきことを明かにした。

(5) リボン攪拌機による高粘性ニュートン液および非ニュートン液の攪拌伝熱相関式を提出し加熱、冷却面に対する粘度補正項の指数として層流域の場合0.2を推奨した。

また冷却コイル自身を攪拌翼として使用する高粘性流体の攪拌方法を提案し混合効果ならびに伝熱効果の優れていることを明かにした。すなわち本攪拌翼によればコイル面における熱伝達係数が槽壁面に対する値の約3倍を示すがこれは伝熱面に働く局所剪断速度勾配に基因すると説明している。そしてこの冷却方式は擬塑性液およびビンガム塑性液の攪拌冷却に対して特に有効となる理由を明かにし、熱伝達相関式を提出している。

(6) 高粘性流体を攪拌して冷却する場合、攪拌動力は熱に変換されるが速度の上昇による熱伝達係数の上昇に伴う伝熱量の増加が発生熱を下廻り、また粘度補正項の影響も加わるためスケールアップおよび

攪拌速度の上昇にはある限界のあることを線図を用いて明かにした。

これを要するにこの論文は攪拌所要動力に基づいて混合効果および伝熱係数の粘度による変化を論じ、また攪拌槽の設計に必要な動力式、伝熱相関式を提出したものであって、学術上および工業上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価値あるものと認める。