

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560920

研究課題名(和文)非対称攪拌を含む流体混合理論の一般化に関する研究

研究課題名(英文) Study on the generalization of the fluid mixing theory, including an asymmetric mixing

研究代表者

仁志 和彦 (Nishi, Kazuhiko)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20262412

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では層流から乱流に至る広範囲の流動状態における混合を説明する一般化した理論の構築を目指した。

層流混合に関しては、攪拌槽の流脈面を実験的あるいは数値的に検討し、その構造を定量化する指標を提案し、層流混合における混合過程、速度と相関できることを明らかにした。

遷移、乱流状態における混合については、パドル翼および大型特殊翼の非対称攪拌について攪拌所要動力、翼に作用する水平荷重の経時変化を検討した。同データを解析することで、混合作用を流脈面構造と関連する対流混合作用と乱流変動に基づく乱流拡散混合作用に分離し、それぞれの混合作用の定量的な議論を可能とした。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aim to build a general theory to explain the mixing ranging from the laminar state to the turbulent state.

For the laminar mixing, the streak lobe in the stirred vessel was investigated in experiments and numerical simulation. Index for quantifying the structure of the streak lobe was proposed and it was correlated with mixing process and mixing rate.

In the transition and turbulent mixing, the dynamic change of power consumption and horizontal load for the vertical paddle impeller and large type impeller were investigated. They were measured in the concentric and eccentric conditions. Based on the frequency analysis of these data, the mixing effect was separated into convection mixing associated with streak lobe and turbulent diffusion mixing effect based on the turbulent eddy. Quantitative discussion of each of the mixing effect was advanced to general of the mixing theory.

研究分野：化学工学

キーワード：ミキシング 流脈面 偏心攪拌 数値混合実験 完全邪魔板条件 攪拌所要動力 水平荷重

1. 研究開始当初の背景

液体を対象とした混合操作では、層流では流れ場の剪断速度が、乱流ではエネルギー散逸率が混合速度を決定づけているものと考えられ、外部から供給される機械的エネルギー、すなわち攪拌槽においては攪拌所要動力と混合速度の相関が議論されてきた。しかし、この相関性は装置形状、流れ場の状況に依存し、一般化されたものではない。

井上¹⁾は流体内に発生する流脈面、すなわち流体における委任の位置から連続的に発生する流体粒子が描く面(図1参照)の性状(形状、面積、撓動の状況)が混合に大きく関与していることを示した。これは、これまでの機械的エネルギーによる混合に、流れ場のパターン(フローパターン)の影響を加味して混合メカニズムを議論することで、流体混合におけるメカニズムを表現する一般化された理論が構築できるものと期待された。

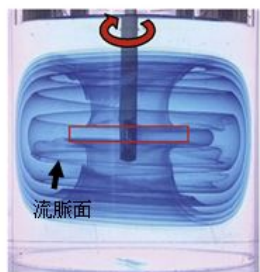


図1 攪拌槽内の流脈面の形成状況¹⁾

2. 研究の目的

本研究では攪拌槽内の層流から遷移、乱流域に至る広い範囲における混合現象を定量的に取り扱う一般化した理論の構築を目的とする。そのため非対称攪拌や設置条件を変えた2段翼等の複雑なフローパターンを呈する攪拌場について広いレイノルズ数範囲の混合について検討する。

層流混合においては、流脈面観測、その定量化を行い、層流混合過程、混合速度との関係を明らかにする。

遷移状態から乱流混合については、攪拌所要動力の時系列変化を解析することで、流脈面構造に関連する動力の周期的変動成分と乱流拡散に関連するランダム変動成分に切り分けることで混合条件と混合メカニズムの関係を明らかにする。さらに、それぞれの翼の完全邪魔板条件における攪拌所要動力測定を明らかにすることで翼固有の混合性能の解明をする。

3. 研究の方法

(1) 流脈面を用いた層流混合に関する検討

層流混合に関する手は、まず、実験的に攪拌槽内に流脈面を生成し、その光切断面の観測を行った。実験装置の概略を図2に示す。攪拌翼には2枚パドル翼を用い、非対称攪拌の検討を行うため、同翼を槽中心から偏心させた位置に設置する実験も行った。また、2枚

パドル翼を2段翼として設置した場合についても観測を行った。攪拌液はグリセリンおよびグリセリン水溶液を用いレイノルズ数を変化させた検討も行った。

さらに層流混合については数値流動シミュレーションを用いた流脈面の再現について検討し、数値実験により層流混合を検討する手法の開発を行った。またシミュレーションで得られる詳細かつ定量的な流脈面デー

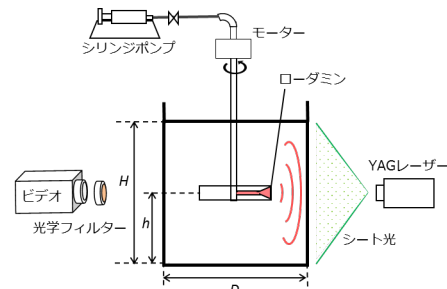


図2 流脈面の観測実験装置の概略

タに基づき、流脈面構造を数値として扱う指標を提案した。

(2) 遷移状態から乱流混合における攪拌所要動力変動に関する検討

遷移状態の混合、および乱流混合では、翼が発生する吐出流の槽内循環による混合、いわゆる対流混合と乱流の変動に基づく乱流拡散とが重畳して進行する。このような混合を一般化するためには、攪拌所要動力の時系列を解析し、対流混合に寄与するであろう周期的変動成分と、乱流拡散混合を支配するランダム成分に各々明確にし、取り扱う必要がある。本事項では、各種パドル翼および大型特殊翼を対象に中心攪拌邪魔板有、無、偏心攪拌におけるトルクの時系列データを取得するとともに、周波数解析に基づく流れの成分分離を試みた。また、研究の過程で動力と同時に測定を行った、翼に作用する水平荷重が、上述の成分分離に対して高感度であることが明らかとなったため、水平荷重の変動についても検討を行った。

(3) 完全邪魔板条件における攪拌所要動力に基づく翼の対流混合性能の検討

完全邪魔板条件における攪拌所要動力は、攪拌翼の形状に基づき、それぞれの攪拌翼のもつ最大の液流の吐出性能、すなわち、対流混合性能に対応する。この値を攪拌翼形状との関係で整理することは混合理論の一般化のために極めて重要である。しかし、完全邪魔板条件における攪拌所要動力を実測することは、労量と実験機材を要し比較的である。特に、種々の翼形状、設置条件における値を得るためには多くの時間、労力を要する。本研究では、この完全邪魔板時における攪拌所要動力を簡便に測定する、起動トルク測定法を開発し、種々の形状を有するパドル翼、および数種の大型特殊翼の値を明らかにした。

4. 研究成果

(1) 流脈面を用いた層流混合に関する検討

数値流動解析による流脈面シミュレーション

本研究で開発した流脈面のシミュレーション法について示す。解析では先ず、予め攪拌槽内の流動は連続の式、NS方程式を解くことで求める。流動解析には汎用熱流体解析ソフト RFLOW((株)アルフロー)を用いた。流脈面の解析は邪魔板なし層流攪拌槽内で行うため、定常流かつ軸対称である。計算負荷の軽減のために、翼先端に蛍光トレーサを模した 10000 個のマーカー粒子を鉛直方向に配し、その軌跡(流跡)から流脈面を算出する手法を構築した。図 3 にその手法を模式的に示した。t = 0 s で翼先端(a 点)から放出した粒子は、t 後に b 点に移動する。2 t 後と 3 t 後についても同様に c 点、d 点と移動し、abcd 点から粒子の流跡線を得ることができる。本解析では t = 0.02 s とした。ここで、翼の初期位置まで各時刻の粒子座標とともに回転させると、粒子は b' 点、c' 点、d' 点へ移動し、ab'c'd' 点を繋いだものが流脈線となる(図中赤線)。これらの流脈線を粒子 10000 個について算出し、繋ぎ合わせることで流脈面を得る。図 4 に結果の一例として、実験的に観測された流脈面の光切断面とシミュレーションで得られた結果を重ねて示した。両者はよく一致しており、数値実験による研究の妥当性が確認された。

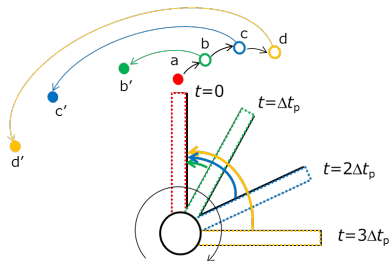


図 3 流脈面のシミュレーションイメージ

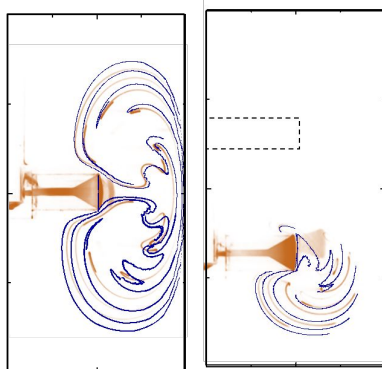


図 4 実測(橙色)とシミュレーション(青色)による流脈面の比較

流脈面による混合過程の検討

流脈面を用いた混合過程の解析、検討の事例として、図 5 1 に 2 段パドル翼において翼の設置条件を変化させたときの流脈面の伸展状況を示す。なお、結果はシミュレーションで得られた流脈面の切断面の経時変化として示してある。

5 周期の結果より単段翼では一つの流脈面であったものが、二段翼では上段下段の流脈面はそれぞれ独立に存在することがわかった。単段幅広翼では単段翼に比べ流脈面は槽内の広範囲に広がり、その形状も複雑であることがわかる。20 周期の流脈面については青と赤の流脈面をわけて表示した。単段翼および単段幅広翼では、青の流脈面が槽壁付近から下方に伸展していくが、二段翼の場合赤と青の流脈面は独立したままとなった。100 周期では単段翼、単段幅広翼の青、赤の流脈面はそれぞれ反対方向まで多数伸展しており、とくに単段幅広翼では槽内にはほぼ均一な状態であることがわかる。一方、二段翼の場合時間が進んでも互いの流脈面は独立していることがわかった。このように、流脈面の解析から、攪拌槽内の混合過程が極めて敏感かつ明確に検討できることが分かった。

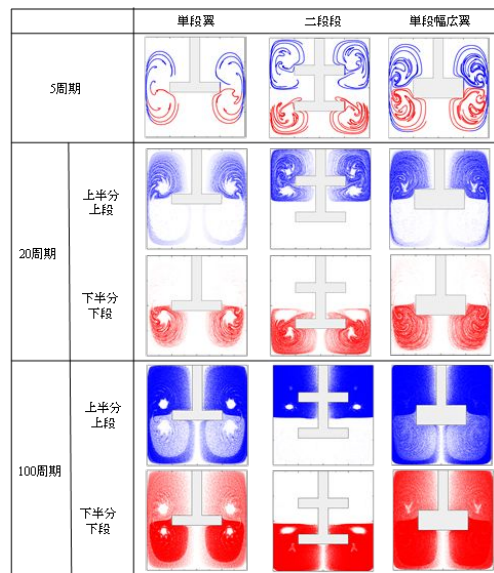


図 5 流脈面による混合過程の検討

流脈面構造の定量化指標と混合現象

流脈面は流れによる引き伸ばしや折りたたみの作用を受け、複雑な形状を有している。流脈面構造を定量化するための指標として、流脈面面積、流脈線長(流脈面を構成する流脈線の平均長)、流脈面拡大長(流脈面末端の長さ)、曲率分布等を定義し、攪拌条件との関係を調査した。また、別途行った最近接粒子間距離を混合指標とした数値混合実験と比較することで、それぞれの流脈面構造定量化指標と混合過程の相関性について検討した。図 6 には 2 段パドル翼の設置条件を種々変化させた場合の流脈面拡大長の経時変化と、数値混合実験で得られる平均最近接粒子間距離の経時変化を示す。両者の傾向はよく一致しており、混合過程を推定する流脈面構造定量化指標としては拡大長が有効であることを明らかにした。

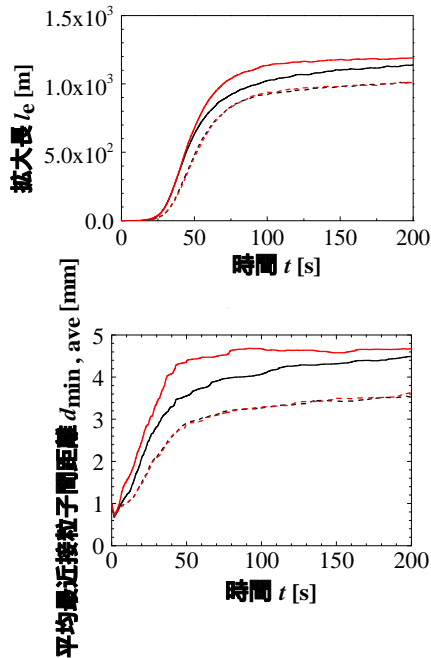


図6 流脈面拡大長と混合過程

(2) 遷移状態から乱流混合における攪拌所要動力変動に関する検討

遷移状態から乱流状態での混合を理論化する上で重要となる、動力の変動挙動について示す。各種パドル翼を遷移状態で攪拌させ測定したトルク（攪拌所要動力に動力に比例）の時系列データを周波数解析した結果を図7に示す。また、図8には翼に作用する水平方向の歪み量（水平荷重に比例）に関する結果を示す。図7、8中のシャープなピークで示されるような周期的な変動と、その裾野のような広い周波数に広がるランダムな変動があることが分かる。これらはそれぞれ、対流混合と乱流拡散混合に関連するものと考えられ、それぞれの混合機構と相関が期待

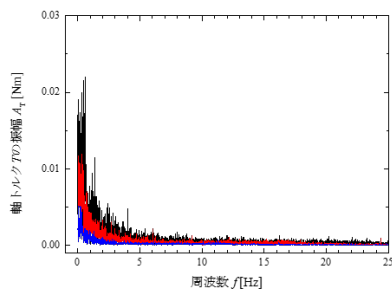


図7 軸トルクの周波数解析

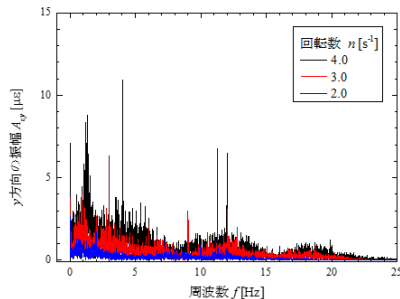


図8 軸歪み量の周波数解析

できる。また、図7と8の比較において軸歪み量での周波数解析がより、敏感かつ明確に成分分析できることが分かる。これはトルクには常に回転方向のねじれがバイアスするのに対して、歪み量ではバイアスが相殺されるため、変動成分が明確化したためと考えられる。そこで、歪み量に基づき、周期的変動成分とランダム変動成分に分離し、その無次元相関を試みた。図9にはパドル翼の羽根幅を変えて測定したランダム変動成分に関する結果を示す。なお横軸は攪拌レイノルズ数、縦軸は本研究で新たに定義した無次元数（水平荷重数）である。ランダム変動成分はレイノルズ数の低下に伴った急進に減少することが分かる。ここでは図は割愛するが、周期的変動成分については動力全図と同様な挙動を示した。これらの値を流脈面構造、混合速度と相関することで、翼形状寄らない、線図として混合現象がまとめられる見通しが得られた。

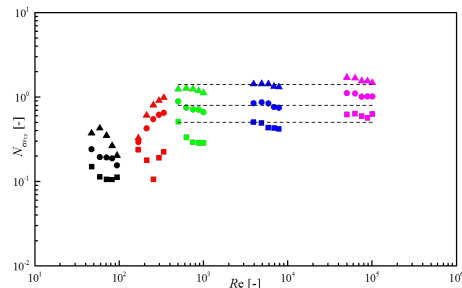


図9 水平荷重のランダム変動成分の無次元線図

(3) 完全邪魔板条件における攪拌所要動力に基づく翼の対流混合性能の検討

永田²⁾は完全邪魔板条件における攪拌所要動力から計算される動力数と攪拌翼起動時の動力、あるいは槽径無限大の攪拌槽での動力に基づき得られる動力数が等しいことを予想していた。本研究では攪拌翼起動時の動力測定を行い、永田の予測の妥当性を検証したうえで種々の翼の完全邪魔板条件時の動力、その翼形状因子との関係について検討した。

図10に翼起動時のトルクの時系列変化を示す。起動トルクには攪拌開始後、瞬時に立ち上がる定常トルクより大きな第1起動トルクとその後に発生する定常トルクより大

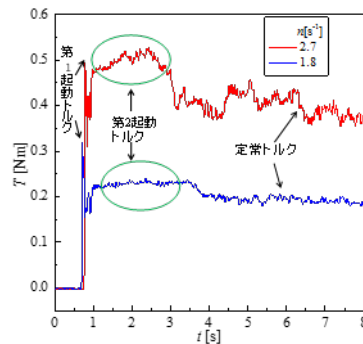


図10 起動時トルクの経時変化

きな1~2s間にわたる第2起動トルクの2種類があることがわかった。第1起動トルクのピークを T_{s1} 、第2起動トルク1~2s間中の最大ピークを T_{s2} と定義した。同図より低回転数の場合(青線)には、第1起動トルクと比較して第2起動トルクは小さい。高回転数の場合(赤線)には、第1起動トルクと比較して第2起動トルクが大きくなる。種々検討を行った結果、 T_{s1} は翼が流体に回転させ始める、いわゆる翼の加速過程発生していることがわかった。一方、 T_{s2} は攪拌翼が液に対する相対速度最大の条件で発生するトルクであることがわかり、完全邪魔板条件と良好に一致することがわかった。本法を用いることで、極めて迅速に完全邪魔板条件における攪拌所要動力の測定が可能となる。本研究では具体的に各種パドル翼(羽根枚数や羽根幅を変えたもの)を対象とした測定を行い、有意な相関式を得た。

<引用文献>

- 1) Hashimoto, S., K. Natami and Y. Inoue, "Mechanism of mixing enhancement with baffles in impeller-agitated vessel, part I: A case study based on cross-sections of streak sheet," Chemical Engineering Science, 66, 4690-4701 (2011)
- 2) Nagata, S.; Mixing-Principles and Applications, Koudansha, Tokyo, Japan, p.44 (1975)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

- K. Nishi, K. Sonoda, R. Misumi, M. Kaminoyama, "Torque and Horizontal Load on an Agitating Shaft in an Eccentric Mixer with a MAXBLEND Impeller in a Turbulent State," J. Chem. Eng. Japan, 査読有, in press (2016)
- K. Nishi, N. Enya, R. Misumi, M. Kaminoyama, "Powre Consumption and Mixing Performance of an Eccentrically Located Maxblend Impeller," J. Chem. Eng. Japan, 査読有, Vol.47, No.2, 2014, pp.146-150, DOI:10.1252/jcej.13we109

[学会発表](計20件)

- M. Hayashi, K. Nishi, R. Misumi, M. Kaminoyama, "Effect of Double Stage Paddle Impeller Setting Conditions on Structure of Streak Lobe in Laminar Mixing Vessel," 16th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress, 2015/9/27-10/1, Australia

K. Nishi, Y. Bando, R. Misumi, M. Kaminoyama, "Starting Torque and Flow Dynamics of Vertical Paddle Impeller," 16th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress, 2015/9/27-10/1, Australia

仁志和彦, "攪拌翼からの流れと諸現象," 化学工学会第47回秋季大会, 2015年9月9-11日, 北海道・札幌市

田辺仁, 三角隆太, 仁志和彦, 上ノ山周, "垂直パドル翼を用いた偏心攪拌における軸トルクと翼に作用する水平荷重の検討," 化学工学会第47回秋季大会, 2015年9月9-11日, 北海道・札幌市

仁志和彦, 三角隆太, 上ノ山周, "大型翼を用いた偏心攪拌," 化学工学会第80年会, 2015年3月19-21日, 東京都・江東区

仁志和彦, 坂東祐真, 三角隆太, 上ノ山周, "攪拌翼の起動トルクと翼形状の関係," 化学工学会第80年会, 2015年3月19-21日, 東京都・江東区

林萌夏, 三角隆太, 仁志和彦, 上ノ山周, "層流攪拌槽内における二段パドル翼の設置条件が流脈面構造に及ぼす影響," 化学工学会第80年会, 2015年3月19-21日, 東京都・江東区

林萌夏, 三角隆太, 仁志和彦, 上ノ山周, "層流攪拌槽内における単段および二段パドル翼の流脈面構造の定量化," 化学工学会第46回秋季大会, 2014年9月17-19日, 福岡県・福岡市

坂東祐真, 仁志和彦, 三角隆太, 上ノ山周, "垂直パドル翼の起動トルクに及ぼす翼形状および液粘度の影響," 化学工学会第46回秋季大会, 2014年9月17-19日, 福岡県・福岡市

二宮和大, 三角隆太, 仁志和彦, 上ノ山周, "垂直パドル翼に作用する水平荷重に及ぼす翼形状および液粘度の影響," 化学工学会第46回秋季大会, 2014年9月17-19日, 福岡県・福岡市

Y. Bando, K. Nishi, R. Misumi, M. Kaminoyama, "Study of the Starting Torque of Vertical Paddle Impellers," International Symposium on Mixing in Industrial Processes 8, 2014/9/14-17, Australia

K. Nishi, K. Sonoda, R. Misumi, M. Kaminoyama, "Horizontal Load on Agitating Shaft of Eccentric Mixing using MAXBLEND Impeller," International Symposium on Mixing in Industrial Processes 8, 2014/9/14-17, Australia

仁志和彦, 園田一史, 三角隆太, 上ノ山周, "マックスブレンド偏心攪拌槽における水平荷重," 化学工学会第79年会, 2014年3月18-20日, 岐阜県・岐阜市

K. Nishi, "Mixing in Chemical

Engineering,” 7th International Conference of Chemical Engineering on Science and Applications, 2013/9/18 - 19, INDONESIA

K. Nishi, K. Sonoda, R. Misumi, M. Kaminoyama, “Torque and Horizontal Load on an Agitating Shaft in an Eccentric Mixer with a Maxblend Impeller,” 4th Asian Conference on Mixing, 2013/9/10 - 13, CHINA

園田一史, 仁志和彦, 三角隆太, 上ノ山周, “マックスブレンダー偏心撹拌槽における動力および混合時間に及ぼすスケールアップの影響,” 化学工学会第78年会, 2013年3月17-19日, 大阪府・大阪市

寺西瞳, 仁志和彦, 三角隆太, 上ノ山周, “流脈面の可視化観測に基づく撹拌槽内における混合過程の定量的検討,” 化学工学会学生発表会米沢大会, 2013年3月2日, 山形県・米沢市

K. Nishi, N. Enya, R. Misumi, M. Kaminoyama, “Power Consumption and Mixing Performance of an Eccentrically Located MAXBLEND Impeller,” International Workshop on Process Intensification 2012, 2012/11/8 - 9, KOREA

仁志和彦, 三角隆太, 上ノ山周, “中高粘度液を対象としたマックスブレンダー翼偏心撹拌における流動状態と混合性能,” 化学工学会第44回秋季大会, 2012年9月19-21日, 宮城県・仙台市

園田一史, 仁志和彦, 三角隆太, 上ノ山周, “マックスブレンダー翼付き偏心撹拌槽における軸トルクおよび翼への水平荷重の計測,” 化学工学会横浜大会, 2012年8月30-31日, 神奈川県・横浜市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仁志 和彦 (NISHI, Kazuhiko)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 20262412