

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月10日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656176

研究課題名（和文）

流脈線ローブのダイナミクスに基づく3次元流体混合機構の解明

研究課題名（英文）

Analysis of mixing mechanism in 3D fluid system based on the dynamics of streak line lobes

研究代表者

井上 義朗 (INOUE YOSHIRO)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：30093371

研究成果の概要（和文）：

攪拌槽内における流体混合は、最も基本的な単位操作のひとつであるにも拘わらず、混合機構に関する理論的研究はほとんど行われてこなかった。その最大の原因は、混合パターンすなわち流体中の形の動きと、流体物質自体の動きを混同したことにある。本研究では、流線パターンや流体粒子軌跡ではなく、流脈線や流脈面が混合パターンを生み出す鋳型となることを示し、それを用いて3次元攪拌槽内の層流混合機構を説明する新しい理論を提示した。その理論の正しさを実験的に実証するとともに、これに基づいた新しい攪拌装置を開発した。

研究成果の概要（英文）：

Fluid mixing in an agitated vessel is one of the most basic unit operations. However, the theoretical study on the mixing mechanism has not been done. The primal reason is that the movement of the mixing pattern, namely the change of the forms in the fluid, is confused with the motion of fluid matter. In this study, the template that creates the mixing pattern is not a streamlines or pathlines, but streaklines or streaksurfaces. On the basis of the fact, the new theory of mixing has been proposed to explain the mechanism of laminar fluid mixing in an agitated vessel. Furthermore, the justice of the theory has proved experimentally, and the some new mixing systems have been proposed with the new theory.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	0	1,500,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	180,000	2,280,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：プロセス工学，化工物性・移動操作・単位操作

キーワード：攪拌・混合操作，流体混合理論，カオス力学系，流脈線，流脈面，鋳型

1. 研究開始当初の背景

攪拌・混合は、化学工学において古くからある単位操作のひとつであるにも拘わらず、

「攪拌操作に理論なし」と言われてきたように、理論的な解析はほとんど行われてこなかった。近年のCFD技術の発達により、層流

条件下であれば、三次元攪拌槽内の流れは、精密に数値計算できるようになった。それにも拘わらず対流混合機構に関する理論的な解析に本質的な進展はなかった。それには二つの理由がある。第一は、流体混合現象が特別な装置を用いなくても容易に観測できるため、多くの錯覚や安易な推測を誘発し、理論的な現象解析を妨げてきたことである。第二の理由はもっと本質的で、流体物質自身の流動と、流体中における「パターンの動き」が同一視され混同されたことにある。

流体混合とは、流体自身の動きではなく、「流体中のパターン」の動きに関する現象である。さらに、混合パターンは、無数の流体粒子位置の集団的な長時間変化によって生み出される。したがって、瞬間的な流線パターンの空間分布や、小数個の流体粒子の長時間にわたる運動軌跡を調べるだけでは、流体混合現象の本質は把握できない。さらに、乱流混合とは異なり、層流混合では全ての過程が確率的曖昧さのない一定の規則の下に進行する。言い換えれば、層流混合現象には明確な規則が存在し、それに基づいて正確に混合パターンが生み出されるはずである。

従来の攪拌槽内の混合解析では、このような視点が欠如していたため、攪拌翼や攪拌槽ごとに、また、攪拌流体の物性や攪拌操作条件ごとに実験データを相関シグラフ化していた。詳細な実験データが入手可能な場合には、現場での応用に大きな支障はなかったが、層流混合現象に対する基本的かつ統一的な視点が欠けていたため、新しい現象や予期しないトラブルへの対応には無力であった。これが、攪拌・混合操作は経験と勘が支配する技術であるという迷信を生み出す大きな原因であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、攪拌槽内の層流混合現象に関する、明確な理論的基礎を構築することにある。そのためには、カオス現象をはじめとする非線形ダイナミクス理論を基盤にして、決定論的な立場から、力学系としての3次元層流混合理論を構築する必要がある。

流体が動かない限り対流混合は起こり得ない。しかし、流体の動きを知っただけでは、どのような混合パターンが生成するかは簡単に予測できない。この両者を結びつける概念を見つけることがまず必要である。

次にその概念を用いて、層流場での対流混合の機構を明らかにする。流れに僅かでも非定常性が加われば、速度ベクトル分布や流線パターンなどから見た流れ場が単純であっても、予想もできないほど複雑な混合パターンが生み出される場合が多い。本研究では、その理由を明らかにする。

流れ場の可視化実験と数値シミュレーションを併用しながら、複雑な混合パターンを生み出す要素的な混合機構をひとつひとつ明らかにし、実際の攪拌槽内ではそれらが複合化されて複雑な混合パターンが生み出される機構を明らかにする。これにより、従来の混合機構に関する通説が必ずしも正しくないことを証明する。

従来の混合促進方法として、邪魔板の挿入や翼形状の変形等が用いられてきたが、それらの理論的な根拠を、本研究で提示した混合理論を用いて明らかにする。

本研究はあくまで層流場での対流混合に関するものであるため、分子拡散効果や乱流混合効果は考慮していない。しかし、高粘性流体の混合や高分子の重合反応では、流れが乱流化しにくいため層流混合操作になる場合が多い。また、バイオ系の混合操作では、激しい攪拌が細胞などに損傷を及ぼすため、穏やかな流動条件下での層流混合操作が不可欠である。流れ場自身がカオス力学系であれば、原理的には原子・分子スケールの細かい混合パターンを短時間で達成することが可能であるため、分子拡散効果に依存する割合は少ない。以上の理由から、分子拡散効果を含んでいない層流混合の機構を明らかにする本研究が果たす役割は大きい。

3. 研究の方法

(1) 理論と実験の併用

混合現象の解析では、まず混合パターンを見ることが基本である。そのため、攪拌槽内の3次元混合パターンを、後述する様々な手法を用いて可視化する。攪拌槽内部の混合パターンの詳細を見るために、従来の脱色法だけでなく、蛍光発色剤を添加した混合流体に、外部より鉛直平面あるいは水平面状のレーザーシート光を照射して、混合パターンの内部構造を表す断面内の流脈パターンの時間変化を可視化した。しかし、実験結果と混合理論との比較を行うためには、数値シミュレーションの併用も不可欠である。また、カオス現象を利用した混合では、極めて微細なフラクタル的な混合パターンが形成されるため、実験による可視化だけでは限界がある。よって、3次元の攪拌槽内の流れを模擬した簡易流動モデルを用いた数値シミュレーションを併用して、微細な混合パターンが形成される過程を調べる。

(2) 混合の鑄型としての流脈の可視化

通常運転では、攪拌槽内で攪拌翼が一定時間ごとに通過するため、速度場は周期的に時間変化する。そのため、攪拌翼の回転周期の整数倍時間ごとに観測すると、速度分布は同じになる。このような周期的力学系を解析する場合は、周期時間ごとの離散写像力学系と見なすと解析が簡単化でき、この手法は非線形力学系の解析でしばしば利用されてきた

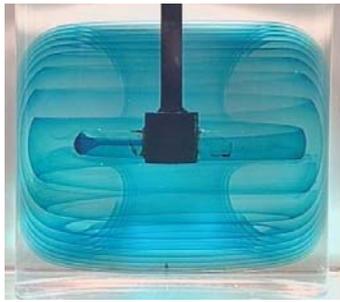


図1 実験による流脈面

ものである。この場合、流れ系に固有の1個の写像行列が存在し、それが時間的に不変な鑄型となって流体移動や混合パターン変化が表現できる。本研究でも、混合過程の解析にこの手法を用いる。

3次元空間における混合を規定する鑄型は、翼先端から着色液を流出させた場合に得られる流脈として可視化できる。実際、この流脈の形を、翼の回転周期毎に観測すると、時間的不変性を持つことが確認できる。混合パターンはこの流脈の形に沿って形成されることは、実験や数値シミュレーションからも確認できる。

(3) 流脈の変形と対流混合との関係の解明

混合パターンは、翼先端から伸びる流脈によって規定される（すなわち流脈が鑄型となる）ため、その形が複雑に屈曲しているほど、混合性の高い流れと言える。したがって、流脈線やその集合体（包絡面）としての流脈面の変形状態や変形作用を引き起こす要因を明らかにする。特に、流脈面の効果的な折り畳み操作が何度も反復される機構に着目する。

(4) 混合促進技術の理論的説明

混合を促進するために、攪拌槽内への邪魔板の挿入や、翼形状の変形が行われることが多い。これらが、いかなる流脈面の折り畳み変形や、変形の反復作用に影響するかを明らかにする。

(5) 新しい攪拌方法の提案

本研究で明らかになった混合機構を踏まえて、高い混合性能を有する攪拌翼形状、攪拌操作、邪魔板の形状と設置方法などについての提案を行うと同時に、それらの有効性を実験あるいは数値計算により確認する。

4. 研究成果

(1) 翼先端からの流脈は対流混合の鑄型

①流脈線と流脈面の関係

パドル翼先端から着色液を流出させて形成した流脈は、多重螺旋曲面となり、混合領域を稠密に埋めるように広がった（図1）。これは翼先端からの流脈線が不安定多様体に対応しているためである。また、翼先端から伸びる流脈線の集合体が、実験で得られたのと同様の多重螺旋曲形状になることを、数値シ

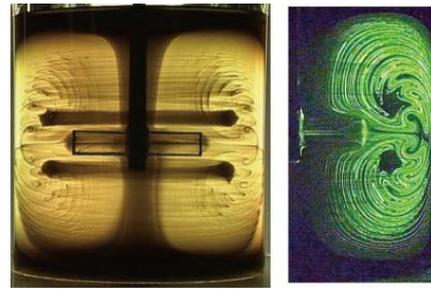


図2 混合パターン(左)と流脈面の鉛直断面(右)

ミュレーションで確認した。

②流脈の時間的不変性

攪拌翼先端から伸びる流脈面を、翼の回転周期毎に観測すると、その形が変化しないことを実験により確認した。

③流脈面と混合パターンの関係

混合パターンの輪郭形状と翼先端から伸びる流脈面形の形状が酷似していることから、この流脈面が混合パターン形成の鑄型となっていることを確認した（図2）。他方、2次元混合系の数値シミュレーションにおいても、時間経過とともに、混合パターンの輪郭がよどみ点から伸びる流脈線（不安定多様体）の形に漸近することを確認した（図3）。

(2) 流脈の変形と混合の関係

①流脈線の可視化

翼先端から伸びる流脈線の集合体が流脈面となることは、数値シミュレーションでは確認できたが、通常の実験方法では、有限サイズの開口部を持つ出口から伸びる流脈線は短

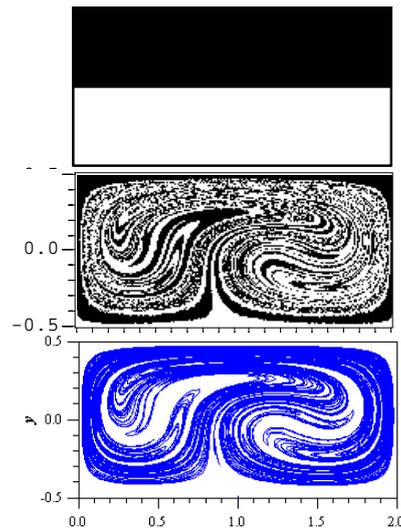


図3 計算による2次元の初期混合パターン(上)、混合パターン(中)、流脈線パターン(下)

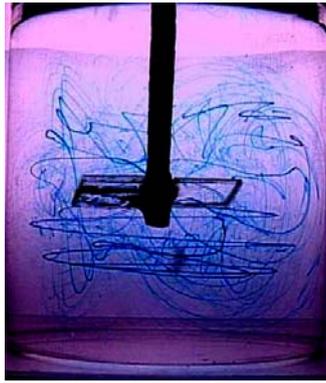


図4 実験による流脈線

時間のうちに急速に面状に広がるため、流脈「面」は可視化できても流脈「線」は実験で確認することはこれまでできなかった。しかし、流脈を形成する着色液に特殊な界面活性剤を混入することにより、流脈の「線」としての可視化に成功した(図4)。

②流脈線と混合

実験で得られた翼先端から伸びる流脈線の可視化像は、流線や流体粒子軌跡とは全く異なる形をし、複雑に屈曲した曲線あるいは折れ線となった。これは、数値計算で得られた流脈線形状に酷似していたが、流線の形とは全く異なっていた(図5)。混合パターンは流脈線を鋳型として形成されることから、単純な流線パターンの流れ場からでも、複雑な混合パターンが生じ得ることが、これによって実験的に証明された。

③流脈面と混合

翼先端から伸びる流脈面は、不安定多様体としての流脈線の集合体であるため、この流脈面の形状が複雑化すれば、混合パターンも複雑かつ微細になる。流脈面の可視化実験より、一見単純に見える流脈面が、様々な折り畳みの反復操作を受けることにより、超多層を形成することを見出した。この現象は、外観は滑らかで単純に見える流脈面であっても、そこから極めて複雑な混合パターンが生み出されることを示すものである。

(3) 流脈面変形の種類

①速度分布の周期変化による流脈面の変形

攪拌翼が回転することによって、速度場に誘起される僅かな周期的摂動が、翼からの吐出流が当たる側壁近傍で流脈面を上下方向に大きく屈曲させ、これがパドル翼やタービン翼による攪拌槽内の対流混合の主要因であることを見出した。これは、2次元カオス力学系におけるローブに対応している。これより、攪拌槽内の層流混合は、回転翼の近傍からではなく、吐出流が当たる側壁近傍から始まることを実験的に証明した。翼先端から伸びる流脈面はこの作用によって、上下に屈曲した

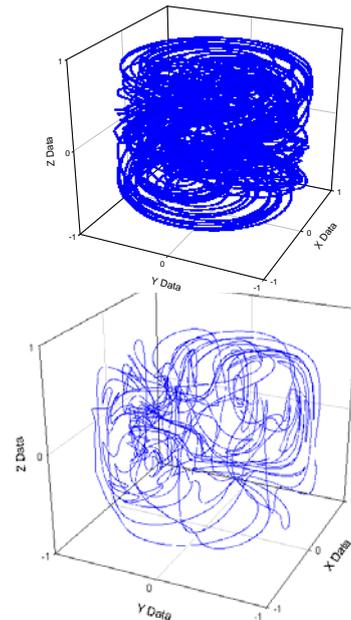


図5 計算による流体粒子軌跡(上)と流脈線(下)

多重螺旋曲面となり、それがカオス的な対流混合の鋳型の基本形を形成する。

②翼先端の通過による流脈面上の折り畳み

①で形成された多重螺旋曲面状の流脈面近傍を、翼先端のエッジ部が通過すると、流脈面上に局所的凹みを形成し、部分的な折り畳み変形を生じる。この作用が何度も反復されることにより、流脈面は多重層となる。しかし、流脈面の外形を見ただけでは、このような多重構造が隠されていることはわからない。

③邪魔板挿入による流脈面の折り畳み

邪魔板挿入は、流脈面に鉛直方向の折り目を形成することを、流脈面の可視化画像から確認した。この折り畳み操作が反復されることにより、②とは別方向の折り畳み変形を流脈面に加えるので、混合効果が更に高まる。このように、層流条件下では、邪魔板を挿入した場合においても、規則的な手順で混合作用が進行することを確認した。すなわち、邪魔板の挿入が流れを乱すことによって混合が促進されると言った、曖昧な理由で説明される現象ではないということが明らかになった。すなわち、従来考えられていたように、邪魔板の挿入が、上下方向の流れを誘発することや邪魔板背後に乱れを起こすことによって、混合が促進されるのではないことがわかった。

④変形翼による流脈面の上下非対称化

パドル翼やディスクタービン翼のような、上下対称性をもつ攪拌翼では、流れ場も翼取り付け高さを対称面とする上下対称性を有している。これは、流脈面が側壁近傍を除いて、

翼の上下領域で対称形となることから実験的に確認できた。これは攪拌槽内の流体の上下方向への混合を妨げる大きな要因である。この欠点なくす一つの方法は、上下対称性を持たない攪拌翼を用いることである。プロペラ翼や傾斜パドル翼のような、強い軸流を伴わない上下非対称翼のひとつに交替傾斜パドル翼がある。この翼を用いて攪拌実験を行った結果、流脈面が上下非対称になり、それによって混合が促進されることを実験的に確認した。

(4) マックスブレンド®攪拌翼系への応用

流脈面に基づく混合機構の解析法の応用とその有効性を確認するために、マックスブレンド翼の混合機構を明らかにした。この単純かつ特異な形状の翼で攪拌すると、一見緩やかな流れ場にも拘わらず、低粘度から中粘度の広い範囲で優れた混合性能を発揮することはよく知られていたが、その理由はこれまで不明であった。流脈線を用いた本解析法を適用することにより、これまで言われていたような槽全体を一筆書きでカバーするような流れ場ではなく、3周期で回転しながら上方にシフトする螺旋状ロールセル対からなる対流パターンであること、そのロールセル内部では流体は螺旋状に上昇し、ロールセルの周辺部では螺旋状に下降するという、極めて特異な2重構造流れを形成していることを明らかにした。これにより、大規模、中規模、小規模の様々なスケールで r , θ , z の全方向に偏りなく混合を引き起こす優れた流れ場であることを明らかにした。

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6件)

- ①井上義朗, 加藤禎人, 大坂良太, 男網和也, Oketch Lamék Onyango, 川又麻起子, 橋本種運助, 流脈面の変形による混合の促進, 化学工学論文集, 査読有, 38巻, (2012) (印刷中)
- ②橋本俊輔, 西村亮俊, 井上義朗, 可逆反応と不可逆反応による混合時間の差異, 化学工学論文集, 査読有, 38巻(2012), 19-24
- ③橋本俊輔, 西川達哉, 新野純一, 西村亮俊, 井上義朗, 鮮明な流脈線の可視化, 化学工学論文集, 査読有, 37巻 (2011), 490-495
- ④井上義朗, 流脈線を基にした層流混合モデルにおける不変構造と可変特性, 化学工学論文集, 査読有, 37巻, (2011), 211-222
- ⑤岡田文太郎, 石丸 拓, 橋本俊輔, 井上義朗, 流体混合概念の再考, 化学工学論文集, 査読有, 37巻 (2011), 4-11
- ⑥井上義朗, 橋本俊輔, 流脈線ローブに基づ

く3次元攪拌槽内の混合機構の解析, 化学工学論文集, 査読有, 36巻 (2010), 355-365

[学会発表] (計16件)

- ①井上義朗, 加藤禎人, 橋本俊輔, 流脈面のトポロジーと混合特性, 化学工学会, 2012.3.10, 工学院大
- ②新野純一, 橋本俊輔, 井上義朗, マックスブレンド翼における混合と流動, 化学工学会, 2012.3.10, 工学院大
- ③貴志聡史, 橋本俊輔, 井上義朗; ツイスト型スタティックミキサーの混合性能評価, 化学工学会, 2012.3.10, 工学院大
- ④山東篤生, 橋本俊輔, 井上義朗, 屈曲型微小チャンネルの混合性能比較, 化学工学会, 2011.9.15, 名古屋工業大
- ⑤井上義朗, 伊藤寛之, 中田繕和, 橋本俊輔, 攪拌槽内における孤立混合領域の理論的解析, 化学工学会, 2011.9.14, 名古屋工業大
- ⑥橋本俊輔, 西村亮俊, 井上義朗, 化学反応を利用した混合時間測定の問題点, 化学工学会, 2011.9.14, 名古屋工業大
- ⑦新野純一, 橋本俊輔, 井上義朗, 流脈線を利用したマックスブレンド翼における流れの可視化, 化学工学会, 2011.9.14, 名古屋工業大
- ⑧橋本俊輔, 西川達哉, 井上義朗, 鮮明な流脈線可視化手法の開発, 化学工学会, 2011.9.14, 名古屋工業大
- ⑨川又麻起子, 橋本俊輔, 井上義朗, 攪拌羽根により誘起される摂動が層流混合に及ぼす影響, 化学工学会, 2011.9.14, 名古屋工業大
- ⑩橋本俊輔, 伊藤寛之, 井上義朗; 回転翼攪拌による水和物スラリー中における結晶粒子径・形状制御, 化学工学会, 2011.3.22, 東京農工大
- ⑪井上義朗, 層流混合における不変構造と可変特性, 化学工学会, 2011.3.22, 東京農工大
- ⑫近持祐介, 橋本俊輔, 井上義朗, Moffatt 流れを利用した二次元層流カオス混合の解析, 化学工学会, 2011.3.5, 神戸大
- ⑬西村亮俊, 橋本俊輔, 井上義朗, 可逆反応を利用した攪拌槽内における混合時間の測定, 化学工学会, 2011.3.5, 神戸大
- ⑭Onyango Oketch, 橋本俊輔, 井上義朗, Analysis of Enhancement Mechanism on Mixing with Baffles by use of Three-Dimensional Streak Visualization, 化学工学会, 2010.9.7, 同志社大
- ⑮岡田文太郎, 石丸 拓, 橋本俊輔, 井上義朗, 流体混合概念の一般化, 化学工学会, 2010.9.7, 同志社大
- ⑯橋本俊輔, 男網和也, 井上義朗, 回転翼攪拌槽における邪魔板の挿入による混合促進機構～流脈断面の可視化による検討～, 化学

工学会, 2010.9.6, 同志社大

〔図書〕 (計 1 件)

化学工学会編 (I-6 章担当と執筆), 丸善出版, 改訂七版 化学工学便覧, (2011) 1128 頁

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cheng.es.osaka-u.ac.jp/hiratlabo/index.i.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 義朗 (INOUE YOSHIRO)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号 : 30093371