

古くて新しい流体混合



研究ノート

井上 義朗*

Old but New Fluid Mixing

Key Words : Fluid Mixing, Dynamical System, Information Theory, Chaos

1. はじめに

液体を混ぜるという行為は、日常生活でごく普通に行われている。また化学プロセスにおいても、混合・攪拌操作は基本的な単位操作の一つである。反応や分離操作を行うにはある程度の知識が必要となるが、混合操作はそうではない。エントロピー増大の熱力学第2法則が保証するように、通常は放っておいても混合過程が進行する。

しかし、混合がたやすく起こるということ、混合現象が理解しやすいということは全く別問題である。複雑系と呼ばれる現象の多くがそうであるように、混合現象もまた実現は容易であるが、その理由を正確に理解することは難しい。流体の混合には幾つかの機構があるが、ここでは流体のマクロな運動による混合、いわゆる対流混合に話を限定する。

2. 工学としての流体混合

工学として混合現象を考える場合、次の3つが重要課題となる。1)混合機構の解明、2)混合の評価、3)高効率の混合流れ場の創成。流体を適当に攪拌するだけで、ある程度まで流体は混合する。しかし、均一に混合することは意外に難しい。激しく攪拌することにより流れを乱流にできる場合、いわゆる乱

流混合が支配的となるため、理屈は理解できなくても短時間のうちに均一混合に近い状態にすることができる。しかし、高粘性流体の混合やバイオリアクター内の攪拌のように、激しい攪拌操作ができない場合、緩やかな層流条件下で混合しなければならず、乱流混合の助けを借りることはできない。そのとき始めて、何故混合するのか、なぜ混合斑が残るのかを考え、混合機構の解明の必要性を痛感することになる。

化学プロセスの中で混合操作を行う場合、次の4つの評価が必要になる。a)混合状態や混合の達成度、b)流れ場の混合能、c)混合速度、d)混合に要するエネルギー。最初のa)に関しては、空間位置による濃度変化の分散値などを基にした“混合度”がよく用いられる。しかし、3種以上の流体の混合では、各流体種間のどのような相互関係に着目して“混合”を捉えるかが必ずしも明確でないため、認知科学の根元的な問題に関わるようなある種の不透明さが残る。また、図1のような複雑な混合パターンを、“混合度”という一つのスカラー指標だけで表現すること自体にも無理がある。混合度という指標は初期の濃度パターンに依存することに注意する必要がある。初期濃度パターンが不明であれば、攪拌後の混合状態や



*Yoshio INOUE
1947年8月生
1972年大阪大学大学院基礎工学研究科
化学工学専攻 修士課程修了
現在、大阪大学大学院基礎工学研究科 物質創成専攻 化学工学領域、教授、工学博士、輸送現象論
TEL 06-6850-6276
FAX 06-6850-6276
E-mail : inoue@cheng.es.osaka-u.ac.jp

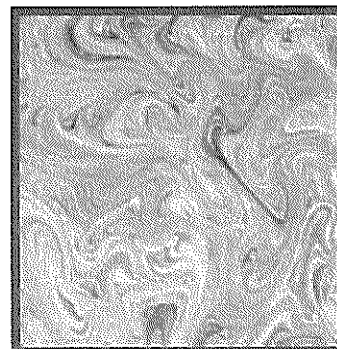


図1 2次元混合パターン

混合度を議論すること自体が意味を持たない。しかし、たとえば攪拌機メーカーの立場に立てば、自社の攪拌機がいかに高性能であるかを一般的に示すためには、初期濃度パターンに依存しない形で混合性能を表示することが必要になる。その場合、攪拌機が作り出す流れ場そのものが持っている固有の混合能力を、いかにして表現するかが問題となる。流れ場は非線形の Navier-Stokes 方程式で記述されるが、数学的には一種の力学系である。力学系がもつ固有の複雑さや混合性は、位相的エントロピーや測度論的エントロピーやリアプノフ指数など様々な指標で表現されるが、工学的に使いやすい量とはいえない。これらの指標は力学系に固有の不変特性であるため時間には依存しない(ように定義する)。しかし、工学的な混合操作の立場からすれば、無限に長い時間攪拌操作を続けるわけではないので、攪拌時間に依存する形の混合能の指標が望ましく、これにはc)の混合速度の問題も関係する。

攪拌機のメーカーやユーザーにとって、攪拌所要動力は最も重要な測定量の一つである。しかしよく考えてみると、攪拌所要動力は流体を攪拌するのに必要なエネルギーであり、必ずしも流体の混合に必要なエネルギーとはいえない。混合とは、流体という物理的実体の上に乗った混合パターンという情報を変化させる操作であると考えれば、流体の攪拌に要するエネルギーと混合だけに要するエネルギーとを分離することは可能であろうか？ また、最小混合エネルギーや最適混合エネルギーという概念はあり得るのだろうか？

3. 流体混合で陥りやすい間違い

すでに述べてきたように、攪拌・混合操作は化学プロセスの現場では日常的な操作であるが、高粘性流体の混合だけでなく、気体、液体、固体が混ざり合った複雑な混合物の攪拌・混合などは、いまだに勘やノウハウが頼りのアートの世界である。混合現象を複雑に見せかけている要因が他にもあり、それらは流れをある程度知っている者ほど陥りやすい誤解である。

- 1) 速度分布や流線パターンを見れば混合パターンは容易に予測できる。
- 2) 複雑な混合パターンは複雑な速度場からのみ生成される。

3) 流れ場を詳しく見れば見るほど混合現象は理解しやすくなる。

4) 粘性流体の混合現象の解析には保存力学系は役立つたない。

1)は流れ場が時間に依存しない定常流れであれば正しい(ただし流通系は除く)。しかし、流れが時間とともに変化する系では、各瞬間の流線パターンや速度分布の図を見ただけで混合パターンを予測することはできない。混合パターンには、各流体粒子の速度ベクトルを時間積分して得られる軌跡が本質的に関与するため、各瞬間の速度ベクトルの空間分布だけでは情報不足なのである。では流体粒子の軌跡である流跡線や流体中に色素を定常的に注入したときに見られる流脈線はどうかというと、これも混合パターンの形成機構に直接関与する概念とはいえない。実は混合パターンを決める主役は、流れ場中の双曲型不動点から伸びる安定多様体と不安定多様体およびそれらが交錯し合っできるターンスタイル・ロープと呼ばれる小領域である¹⁾。安定多様体を直接可視化することはできないが、不安定多様体は双曲型不動点近傍に色素を注入し、一定の時間間隔でストロボ観測することにより見ることができ、非線形ダイナミクス理論によれば、不安定多様体が混合パターンの実質的な輪郭を形成し、混合パターンの時間的变化は、ターンスタイル・ロープという鋳型の上を次々に移動する流体塊の運動として理解することができる。

2)については、単純な方程式から複雑な動的挙動が生まれるカオス現象が広く知られるようになった現在、それほど違和感はないかも知れないが、現場で攪拌操作を行っている技術者にとっては感覚的に理解しにくいことなのかも知れない。

3)では、カオス力学系の解析にポアンカレ写像が有効であるように、混合場の解析にも一定の時間間隔で観測することが有効であることを示している。一個の流体粒子の運動軌跡を連続的に観測すると、空間内で複雑にからまりあつてきた糸まりのように見えるだけで、そこから流れ場と混合パターンの関係を引き出すことは困難である。しかし、流体粒子の軌跡と横断的に交差する断面をとり、面を通過する軌跡の点の動きや点列のパターンを観測すると、流れ場の背後に隠された混合特性が鮮明に現れる場合がある。混合に直接関係する情報が、本質的でな

い過多情報の中に埋められると、かえって情報不足に陥る典型例である。

層流では流れ場の決定に粘性が本質的役割をはたす。しかし、混合場として流れを取り扱う場合、その速度分布が粘性などを考慮してどのような経緯で導出されたかは本質的でない。大切なことは、その速度ベクトルを時間積分して得られる、各流体粒子の軌跡すなわちラグランジアン的な情報である。特に2次元系の流体混合の解析は、形式的にはハミルトン力学系の解析と同じである。したがって、ハミルトン力学系で研究されてきた多くのカオス現象は、そのまま2次元流体系のカオス的混合現象と同一視することができる。粘性流体におけるカオス的な混合現象は、散逸力学系におけるストレンジ・アトラクター上のカオスではなく保存力学系のカオスとして捉えることができる。

4. 情報流体工学への新たな展開を目指して

流体混合はローテクの代表とも言える古い技術である。しかし、非線形ダイナミクス理論の発展やコンピュータ・グラフィック化技術の発展により、再び新しい息吹を吹き込まれ、アートからサイエンスへと変身し続けている。特に、カオス力学やローブ・ダイナミクスの発展により2次元流体系の混合機構の解明は飛躍的に進歩した。2次元系で成功した理論が、3次元系にどこまで拡張できるかは今後の課題である。混合評価に関しては、マルチフラクタル解析の応用や、統計熱力学的形式とのアナロジーを利用した混合度とエントロピーと情報量の有機的統合が必要であろう²⁾。混合機構が解明でき、混合評価が高精度で実現できても、混合に有効な新しい流れ場が創成できなければ工学としては不十分である。混合機構を踏まえてそこから新しい流れ場を設計するという一種の逆問題は、多くの工学問題がそうであるように困難を伴う場合が多い。

最後に、ちょっとした工夫で層流混合が促進できた例を紹介しよう³⁾。マイクロリアクターなどで利用される微小なチャンネル内では、流れはすべて層流であり、攪拌機などの可動機器を挿入して混合することは極めて困難である。そのため、混合促進のための様々な試みが行われている。チャンネルをジグザグ

にしてコーナー部で働く僅かな遠心力による2次流を利用する方法や、チャンネル底面に微細な凹凸の加工を施して2次的な流れを誘起させる方法⁴⁾などがある。チャンネルをジグザグにただけでは混合は不十分であるが、図2のようにチャンネルの側壁を僅かに傾けて、2次流の上下対称性を破ると混合はさらに促進される。このチャンネルでは、底面の微細加工が不要であるばかりでなくメンテナンスも容易である。

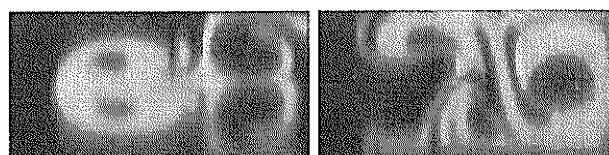


図2 屈曲部を一回通過後のチャンネル内混合パターン (左)長方形断面、(右)台形断面

前述の例からもわかるように、流れ場にほんの僅かな摂動を加えるだけで、混合パターンが劇的に変化する場合が多い。速度分布を力づくで変えるというより、流体粒子の軌跡をほんの僅かにずらせばいいのである。したがって、流体混合操作はエネルギー的な操作というより情報操作に近い(一種のサイバネティクスである)。しかし、混合情報は流体の上に乗っている。この意味で、流体混合論は“情報流体工学”(これは筆者の造語と呼んだ方が適切であるかも知れない。混合度や混合能の評価にも、情報という視点が不可欠であることは言うまでもない。情報流体工学という視点が、新しい流体工学の分野を拓くことを夢見ている。

参考文献

- 1) 井上義朗, 平田雄志: 化学工学論文集, 25, 294-302 (1999)
- 2) 井上義朗, 平田雄志: 化学工学論文集, 29, 313-319 (2003)
- 3) 安積高靖, 平田雄志, 井上義朗: 化学工学会第37秋季大会要旨集, Q325 (2005)
- 4) A.D.Stroock, S.K.W.Dertinger et al. : Science 295, 647-651 (2002)