

乱流と混合

中 辻 啓 二*

はじめに

混合・拡散の一例はウイスキーを水で割るときにみられる。ウイスキーに水を注いで静かにしていると、いつまでたっても混ざらない。実際は分子のブラウン運動によって全ての流体分子は不規則な動きをしており、非常にゆっくりと混ざり合っている。しかし、口径10cmのグラスの中が均質になるまでには100日あまりの時間が必要となる。うまそうなものを前において3カ月もとても待てない。慌ててグラスにスティックを突っこみ上下に動かす。すると、グラスの中に種々のスケールの乱れが生じて、ウイスキーと水とが混ざり合い始める。さらに早く喉を潤したいのなら、スティックを廻して流体を回転させるのが得策である。(バーテンダーの shake-up を想像せよ。) 常日頃、無意識のうちに行っている所作ではあるが、流体力学的にみれば乱流をうまく制御(?) していると言える。

物質の拡がり率を示す拡散係数を用いて混ざり具合を表現すれば、上述の3つの段階で拡散係数の値は 10^{-6} 、 10^0 、 10^8 と飛躍的に増大す

ることになる。拡散係数の次元は $[\text{cm}^2/\text{s}]$ である。それは乱れ強度 $[\text{cm}/\text{s}]$ と乱れのスケール $[\text{cm}]$ の積で表わされており、乱流の構造を議論することが混合・拡散の度合を考えることにつながるようになる。ここでは、もう少し詳しくこの関係を考えてみよう。

流れと乱れ

自然をとりまく流体運動は水であれ、大気であれ、時間的にも空間的にも不規則で乱雑である。このことから、乱流現象は大小さまざまな渦の集合体と考えられる。この渦の無秩序な運動が流体粒子の位置の不規則な移動をもたらす。いま、簡単のために、流れ場が染料雲の径よりも小さな渦と、これよりはるかに大きな渦とから構成されている場合の染料雲の拡散過程を図-1に示す。染料雲の重心は流れ場のより大きな渦の回転運動によって移流する(図-1(a))と同時に、その径以下の渦の作用によって染料雲は相対的に拡がりを増す(図-1(b))ことになる。つまり、対象と考える染料雲のスケールより大きなスケールの流動は平均流的に運ぶ作用をするのに対して、より小さなスケール

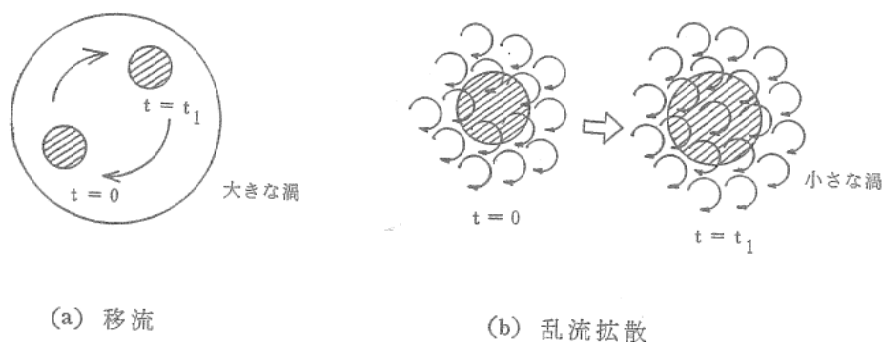


図1 流れと乱れの拡散への寄与

*中辻啓二 (Keiji NAKATSUJI), 大阪大学, 工学部, 土木工学科, 講師, 工修, 水理学

の流動は乱流要素として拡散する作用をするものと理解される。したがって、種々の大きさの渦群から構成される流れ場では拡散に関与する渦は現象のスケール L とともに変わる。 L が大きくなるにつれ、より大きなスケールの渦、より多くの渦が拡散に関与することになるから渦動拡散係数は大きくなる。古くは、Richardson (1926) が大気乱流拡散の研究から『拡散係数が L の $4/3$ 乗に比例する』という相対拡散の概念を提唱している。

流れと乱れの区別でいま一つ注目すべき点はエネルギースペクトルである。乱れの等方性を仮定すると、スペクトルは波数、つまり渦のスケールのみの関数となり、それは各種スケールの渦のもつエネルギーの分布形を示している。波数の小さい、大きなスケールの渦は系外からエネルギーをとりこむのでエネルギーは大きい。また、波数の大きい、小さなスケールの渦ではエネルギーが粘性によってどんどん熱に変換することからエネルギーの小さな分布形をしている。両者にはさまれた波数空間では、渦動間の非線形相互作用により波数の小さな渦から波数の大きい渦へとエネルギーが順次伝播されており、これはエネルギーのカスケード過程と呼ばれる。もっと平たくいえば、大きいスケールの渦が崩れて小さな渦に分割されることを示している。

図-2 に乱れエネルギーと相対拡散への渦の

寄与率を各波数成分に対して示す。図よりわかるように、着目するスケールより小さな渦の乱流拡散に対する寄与率は高いものの、乱れのエネルギーは小さいので、乱れエネルギーと拡散寄与率の積で表わされる実質的な拡散への貢献は小さくなる。つまり、『実質的な拡散寄与率には着目する現象のスケールと同程度の大きさの渦の寄与が最も重要である。』ことがわかる。

さて、実測されたエネルギー分布はどのような形をしているのだろうか。海洋での実測によれば、エネルギー分布は上述のように連続的で、かつ系外からのエネルギーが最も大きい渦に与えられるだけでなく、中間的なスケールの渦にも直接的に与えられている。たとえば、風波はそれに固有のスケールの渦 ($L_0 \approx 10\text{m}$) に、起潮力は潮流のスケールの渦 ($L_1 \approx 10\text{km}$) に、また地球の自転は地球規模の渦 ($L_2 \approx 1,000\text{km}$) に、それぞれ直接的にエネルギーを供給する多重構造的性を示し、 $L_0 \sim L_1 \sim L_2$ の間でエネルギーのカスケード過程が階段状に生じていることが報告されている。これらは階層性と称される。このような外力要因に加えて、地形形状や海洋の鉛直構造等に基づく非線形効果が影響を与えときには、エネルギー分布はより複雑になり、拡散物質におよぼす移流と拡散の区別は難しくなる。

たとえば、沿岸海域における物質の拡がりを考える場合、数時間後の変化を問題にすると

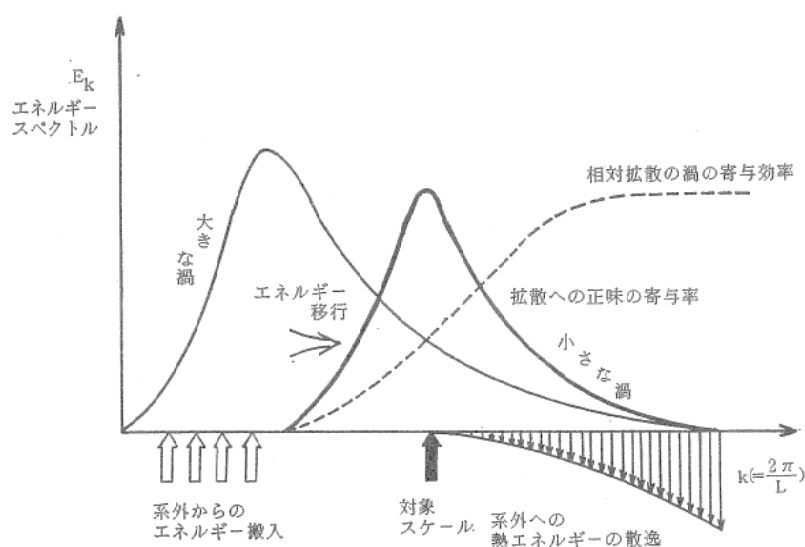


図2 エネルギースペクトルと拡散効果

には半日あるいは一日周期のエネルギーピークを有する潮流は周期性を帯びた移流とみなされるが、1カ月あるいは1年といった長時間にわたる物質の変化を問題にするときには潮流は移流というより、むしろ渦動として拡散に寄与することになる。このように、客観的に存在する流れ場であっても、観測する現象のスケールによってその現象に有効な拡散係数の値が著しく変わるという端的な例を示しており、興味深い。

表層密度噴流の界面における混合

現象のスケールの認識という難しい問題はあるものの、何らかの平均操作を施して決定論的な過程と不規則な確率論的な過程とに分離することにより、乱流の解明の糸口が捉えられると考えられていた。

ところが、最近の研究では乱れとみなされてきた流動のなかにも、乱雑でない、秩序立った運動 (orderd motion or coherent structure) が存在し、それがエネルギーの生成や乱流輸送に本質的な役割を果たしていることが明らかになってきた。これは最新の測定機器による精緻な測定ではなく、むしろ単純な可視観測によった発見であるのは皮肉であり、おもしろい。つまり、乱雑な乱れのなかにも、必然性のある、決定論的な過程が存在しており、それをいかにうまく抽出して動力学的に解析するかが、今日の乱流研究の課題となっている。

ここで、二次元表層密度噴流の可視観測で捉えた大規模な秩序立った渦運動の例を写真-1に示そう。写真中の黒く見える部分が注射器を

用いて連続的に注入した螢光染料の描く流脈線である。放流口近くで発生した擾乱が流動とともに成長して高速淡水側に巻き上った渦状運動 (rolling-up) を呈している。この渦状運動の発生位置や発生周期はある平均値をもっており、乱雑な現象ではない。また、写真-2は先行する渦構造を後続する渦構造が追いかけて合体して一つの大規模な渦構造に融合する様子を示している。この過程で下層の低速側塩水流体を挟むように上層に連行しているのが観察される。可視化された渦構造の通過周波数や流速変動スペクトルの推移を調べると、この秩序立った渦構造は合併・融合を繰り返しながら規模を増大させるとともに、エネルギーの融合も行うことがわかる。とくに合併時にレイノルズ応力 $-\overline{uv} > 0$ の生成がみられ、せん断層の速度勾配 $\partial U / \partial z$ と相乗して乱れエネルギーの生成 $(-\overline{uv} \cdot \partial U / \partial z)$ に貢献している。この渦構造はせん断層全幅のスケールを有することからも、両流体間の混合への寄与が絶大であることが前節の説明から推察されるであろう。

おわりに

乱流のもつ一側面を平易に解説することに努めた。筆者は土木工学の環境水理の分野で原子力発電施設からの温排水の放流あるいは河口流出流の海域での拡がりや混合過程の解明を主テーマに研究を進めている。乱流理論は何度読んでも難解なものであるが、身のまわりの現象と結びつけて考えることにより、乱流の特性を少しでも理解していただければ幸いである。

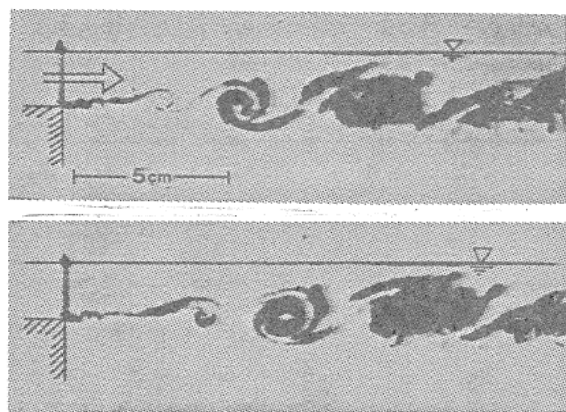


写真1 大規模な秩序立った渦構造

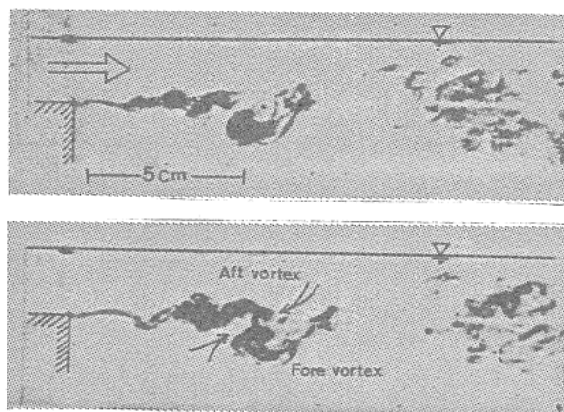


写真2 渦構造間の合併・融合過程