

乱流要素渦

核融合科学研究所 木田重雄 (Kida Shigeo)

1 はじめに

乱流の研究に新しい展開が始まろうとしている。それは、乱流の「分子」とでもいうべき基本要素の存在が確認され、その物理的特性が明らかになりつつあることによる。

混沌とした乱流運動の中に、比較的長時間個性を保つ組織構造の存在することが、壁乱流において実験的に見出されたのは、1950年代のなかばであった。これは、予測不可能な不規則運動とみなされていた乱流の概念を根底からくつがえす驚くべき発見で、当時の乱流研究者の大部分は、その発表に半信半疑であったし、また重要とは思っていなかったそうである。ところが、今日では、それは、流れ方向渦とよばれる組織的渦構造で、壁面近傍で主流方向に長く延び、横断方向にはほぼ一定の距離を隔てて並ぶ低速流体塊の縞構造を形成し、また壁面に作用する乱流摩擦抵抗の増大に大きな寄与をするなど、力学的に大変重要なはたらきをしていることがわかっている (Kim *et al.* 1971; Cantwell *et al.* 1978; Miyake *et al.* 1995)。このような組織的渦構造は、壁乱流だけでなく、混合層乱流や噴流乱流、あるいは後流乱流などの自由剪断乱流、そして等方乱流においても共通に見られる。流れの種類に応じて、ロール (横渦)、リブやブレイド (縦渦)、あるいはワーム (管状渦) などと名づけられている (Ducros *et al.* 1996; Bernal & Roshko 1986; Wu *et al.* 1996)。これらの管状渦は、乱流輸送 (拡散, 混合)、乱れ生成、流れの不安定化、間欠性、等々において中心的なはたらきをしている。

ところで、最近の大規模で高精度な乱流の数値シミュレーションによって、細長い管状の領域に集中した旋回渦の物理特性が定量的に明らかになってきた (第3節)。上記の組織的渦構造のあるものはこの管状旋回渦そのものであり、またあるものはそれらが複数個寄せ集まってできているものと考えられている。この意味で、管状旋回渦を乱流場を構成する「乱流要素渦」とみなすことができる。その物理的性質と相互作用を明らかにすることによって乱流力学を構築しようとする試みが冒頭で述べた新しい展開である。

2 乱流力学と熱力学

乱流要素渦の乱流力学における意義を考えるのに、熱力学の発展の歴史を振り返るとおもしろい対応があることに気づく。熱力学では、まず巨視的状态量 (気体の密度, 圧力, 温度, 内部エネルギー, 自由エネルギー, エントロピー, エンタルピー, 等) の相互関係を表す現象論が提案され、数世紀にわたるさまざまな実験によって検証された。やがて、気体の基本要素である分子が発見されたが、気体分子運動論によって現象論が基礎づけられたのは、ずっと後になってからである。これに対し、乱流力学においては、コルモゴロ

フ則や対数速度分布則などの現象論がすでに1900年代中ごろに提案され、これらをサポートする実験も十分蓄積されている。しかし、流体の運動方程式から解析的にこれらの法則を導くことは至難のわざで、直接相互作用近似理論 (Kida & Goto 1997) などの統計理論もまだ発展途上にある。乱流場の分子ともいえるべき乱流要素渦の物理特性が明らかになってきたので、これを用いて乱流理論に新しい切り口を開くことが期待されているのである。

3 乱流要素渦の特性

旋回する管状渦の中心では、一般に圧力が低くなっている。実際、このことを利用して、回転円筒内に発生する細い旋回渦が気泡でみごとに可視化された (Bonn *et al.* 1993)。流体要素の自転を表す渦度の高い領域が必ずしも、管状渦に対応しないことに留意し、渦度と変形速度テンソルの相対値を用いた渦構造の表現法が工夫され、圧力のラプラシアン (変形速度テンソルの第2不変量に等しい) の大きな領域が渦管を表すことが示された (Tanaka & Kida 1993)。

管状渦構造は、さまざまな方法で可視化されている。Jiménez *et al.* (1993) は、渦度の絶対値の極大値 (渦度に垂直な面内で) を結ぶ線を中心軸とし、渦度分布を軸対称な誤差関数で近似することで渦管を定義し、等方乱流における渦管の統計的性質を詳しく調べた。渦管の径 ($e^{-1/2}$ 径) がコルモゴロフ長の6~8倍程度であるという結果が得られている。Tanahashi *et al.* (1997) は、圧力のラプラシアンの極大値 (渦度に垂直な面内で) を結ぶ線を中心軸とし、そのまわりの旋回流速が最大値をとるところを芯の境界面とする渦管を定義した。等方乱流、剪断乱流、回転乱流、そして磁気乱流など、乱流の種類によらず、芯の径はコルモゴロフ長の8倍程度であった。

これらと時期を同じくして[†]、筆者らは、圧力の最小値 (圧力ヘシアンの第3固有ベクトルに垂直な面内で) を結ぶ線を中心軸とし、そのまわりで旋回条件を満たす領域を渦管とした (Miura & Kida 1997; Kida & Miura 1998a, 1998b)。渦管の径は、やはりコルモゴロフ長の7倍程度であり、上記の2つの異なる定義と同程度の結果を与える。ここでは、われわれの低圧力渦を乱流要素渦とみなすことにして話を進める。

4 二重らせん構造

強い渦管は旋回運動によってそのまわりに二重らせんの渦層を形成する。単純剪断流中の強い直線渦管による渦線の構造が漸近解析によって得られており、渦線の引き伸ばし、変向、巻き込み、そして渦管内における垂直渦度の排除機構が議論されている (Kawahara *et al.* 1997)。

この二重らせん構造は、等方乱流中の渦管においてもひんぱんに見られる。乱流場から渦軸をひとつ選んで、その断面内の渦度分布を図1に示す。(a) は渦度の絶対値、(b) は渦度の渦軸に平行な成分、(c) は同じく垂直な成分、(d) は渦軸と断面を表す。渦軸に平

[†]Jiménez *et al.* (1993) で採用された方法は、筆者が1992年の8月に NASA Ames で開催された乱流の夏の学校に参加するため1ヶ月滞在した折り、同室の Dr. A. Wray に勧めたものである。しかし、渦管を渦度ベクトルの方向に追跡する方法 (Tanahashi *et al.* (1997) の方法も同様) は、等方乱流のように背景の平均渦度がゼロの場に対してはそれほど悪くないが、平均渦度が大きな値をとる剪断乱流では、渦度ベクトルが渦管の方向とはかけ離れた方向を向き、とんでもない方向へ追跡するという危惧があるので、以下に述べる低圧力渦の方法を考察した。

行な成分は、渦管中心に局在しているのに対し、垂直成分は中心から少し離れたところで二重らせん構造をしている。これは、Lundgren (1982) によって見出されたらせん渦とは全く異なるものであることに注意したい。Lundgren のらせん渦では、渦度が渦軸に平行であるのに対し、われわれの二重らせん渦層内の渦度は、その渦軸に垂直な成分が卓越しているのである。

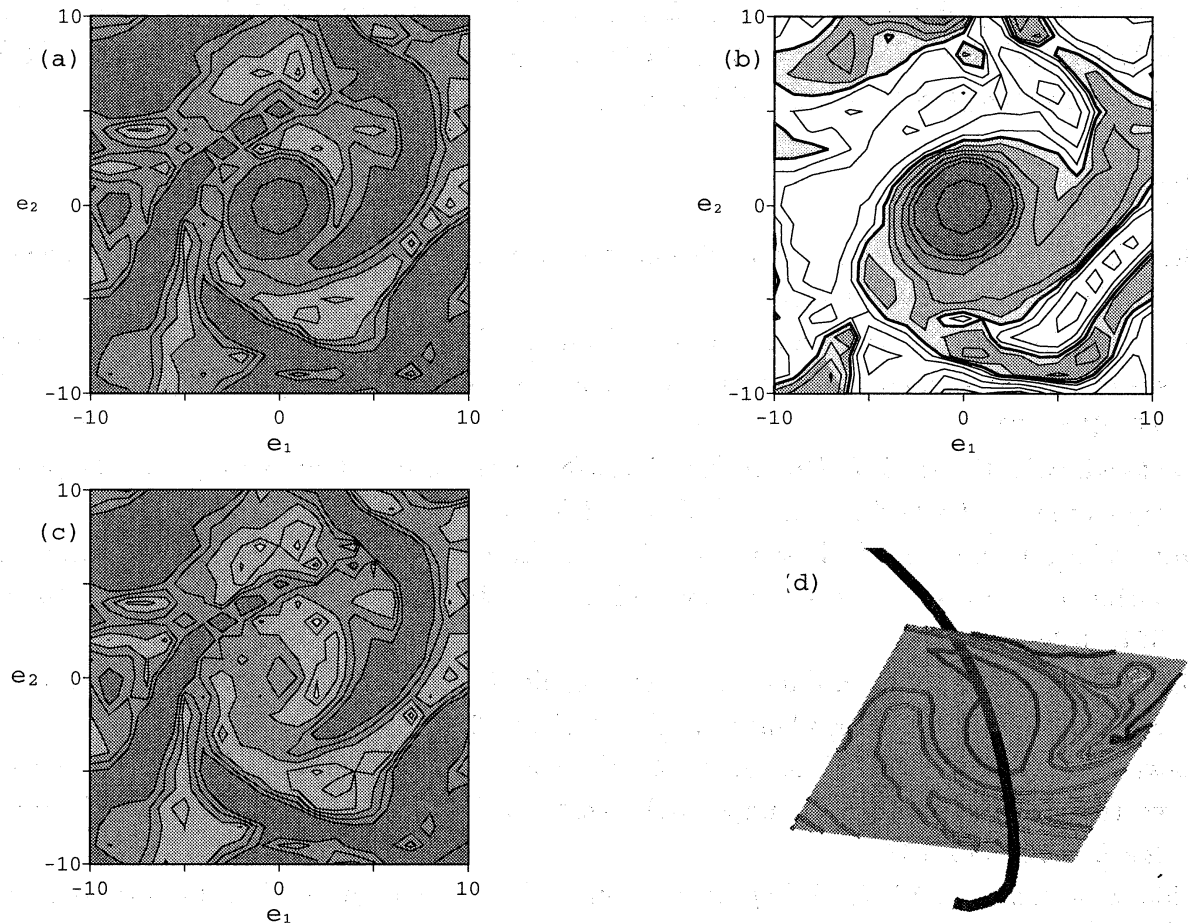


図1. 低圧力渦を囲む二重らせん渦層構造. (d) に示す渦軸に垂直な断面における (a) 渦度の絶対値, (b) 渦度の軸方向成分, (c) 渦度の断面成分の大きさの等高線。(a) と (c) では、濃い部分が高い値を表す。(b) では、灰色（あるいは白色）の部分で渦度は向こう（あるいは手前）向きである。断面の座標 (e_1, e_2) の単位は、数値シミュレーションで採用された格子幅である。

5 展望

乱流要素渦とは、乱流運動を記述する最小の組織構造である。これは、筆者が学生のころ（1970年初期）に、井上栄一先生が提唱されていた「乱子」と思想的に相通じるところがあるかも知れない。しかし、当時は、乱流の微細構造を直視するすべはなく、乱子の概念も想像の域を出ていなかったようである。渦領域のかたまりのようなものを乱流の基本要素と考えておられたように思われる。これに対して、乱流要素渦は管状の旋回渦と

して具体的な実体が明らかである。

乱流要素渦は次のような特徴をもっている。(i) 生成・消滅する。(ii) 分裂・融合する。(iii) 管状構造をしている。径はコルモゴロフ長の10倍程度、長さは積分長程度である。(iv) 周囲にらせん状の渦層を伴う。このような変幻自在の乱流要素渦の解析には、不生不滅(極端な状況を除き)の分子とは異なった理論的取り扱いが要求されよう。乱流要素渦については、(1) その大きさ、形、付随する物理量、普遍性などの特徴付け、(2) エネルギー散逸、乱流輸送、間欠性、大規模組織構造、等、力学的重要性、(3) レイノルズ数依存性、などが今後調べていきたい課題である。

引用文献

- Bernal, L.P. & Roshko, A. (1986) 'Streamwise vortex structure in plane mixing layers', *J. Fluid Mech.* **170**, 499-525.
- Bonn, D., Couder, Y., van Dam, P.H.J. & Douady, S. (1993) 'From small scales to large scales in three-dimensional turbulence: The effect of diluted polymers', *Phys. Rev. E* **47**, R28-R31.
- Cantwell, B.J., Coles, D. & Dimotakis, P. (1978) 'Structure and entrainment in the plane of symmetry of a turbulent spot', *J. Fluid Mech.* **87**, 641-672.
- Ducros, F., Comte, P. & Lesieur, M. (1996) 'Large-eddy simulation of transition to turbulence in a boundary-layer developing spatially over a flat plate. *J. Fluid Mech.* **326**, 1-36.
- Jiménez, J., Wray, A.A., Saffman, P.G. & Rogallo, R.S. (1993) 'The structure of intense vorticity in isotropic turbulence', *J. Fluid Mech.* **255**, 65-90.
- Kawahara, G., Kida, S., Tanaka, M. & Yanase, S. (1997) 'Wrap, tilt and stretch of vorticity lines around a strong straight vortex tube in a simple shear flow', *J. Fluid Mech.* **353**, 115-162.
- Kida, S. & Goto, S. (1997) 'A Lagrangian Direct Interaction Approximation for homogeneous isotropic turbulence', *J. Fluid Mech.* **345**, 307-346.
- Kida, S. & Miura, H. (1998a) 'Identification and analysis of vortical structures', *European Journal of Mechanics B/Fluids* **17**, 471-488.
- Kida, S. & Miura, H. (1998b) 'Swirl condition in low-pressure vortices', *J. Phys. Soc. Japan* **67**, 2166-2169.
- Kim, H.T., Kline, S.J. & Reynolds, W.C. (1971) 'The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer', *J. Fluid Mech.* **50**, 133-160.
- Lundgren, T.S. (1982) 'A small-scale turbulence model', *Phys. Fluids* **25**, 2193-2203.
- Miura, H. & Kida, S. (1997) 'Identification of tubular vortices in turbulence', *J. Phys. Soc. Japan* **66**, 1331-1334.
- Miyake, Y., Ushiro, R. & Morikawa, T. (1995) 'On regeneration of quasi-streamwise vortices of near wall-turbulence', *Trans. Japan Soc. Mech. Engin.* **61**, 1272-1278.
- Tanahashi, M., Miyauchi, T. & Ikeda, J. (1997) 'Scaling law of coherent fine scale structure in homogeneous isotropic turbulence', *Proc. 11th Symp. on Turbulent Shear*

Flows. **1**, 4-17 - 4-22.

Tanaka, M. & Kida, S. (1993) 'Characterization of vortex tubes and sheets', *Phys. Fluids A* **5**, 2079-2082.

Wu, J., Shwridan, J., Welsh, M.C. & Hourigan, K. (1996) 'Three-dimensional vortex structures in a cylinder wake', *J. Fluid Mech.* **312**, 201-222.