

乱流渦と乱流場との相互作用について

高橋 直也 (電通大), 高橋 匡康 (JAXA), 山本稀義 (JAXA), 宮崎武 (電通大)

Interaction between a columnar vortex and turbulence

N. Takahashi*, T. Takahashi**, K. Yamamoto** and T. Miyazaki*

* Dept. Mechanical Engineering and Intelligent Systems, Univ. Electro-Commun.

** Japan Aerospace Exploration Agency

ABSTRACT

The interaction between a columnar vortex and external turbulence is investigated numerically. As the columnar vortex, the Lamb-Oseen vortex and the q -vortex are used. The columnar vortex is immersed in an initially isotropic homogeneous turbulence field, which itself is produced by a direct numerical simulation of decaying turbulence. Using visualization techniques, we investigate the formation of inhomogeneous fine turbulent eddies around the columnar vortex, the vortex-core deformations and the dynamical evolution in the passive scalar field.

Keywords: Turbulence, Vortex Breakdown, Passive Scalar

1 目的

大規模な秩序渦構造が乱流場と相互作用する現象は、自然界や工学上の問題として現れる。これまで筆者ら [1] は、Lamb-Oseen 渦と乱流場との相互作用過程について直接数値計算によって再現し、(1) 渦核における渦波の発生と大規模構造の変化、(2) 周辺乱流場の微細渦構造の渦輪状構造の形成、を捉えている。本論文ではこれを発展させ、I. Lamb-Oseen 渦と背景乱流場との相互作用に伴うスカラー輸送の促進過程、及び II. 軸流のある秩序渦 (q -vortex) と背景乱流場との相互作用で起こる渦構造の変化過程、を流れ場の可視化によって捉えることを目的とする。

流れ場はフーリエ・スペクトル法を用い、Navier-Stokes 方程式、パッシブスカラーの方程式を直接数値計算した。秩序渦には、Batchelor 渦をモデル化した q -vortex [2] を、それぞれ用いた。これらの渦を、渦中心を z 軸とした円柱座標系 (r, θ, z) で表わすと、速度場 (U_r, U_θ, U_z) は

$$U_r = 0, \quad (1)$$

$$U_\theta = \frac{\Gamma_0}{2\pi r} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \right\}, \quad (2)$$

$$U_z = \frac{\Gamma_0}{2\pi r_0 q} \exp\left\{-\frac{r^2}{r_0^2}\right\} \quad (3)$$

となる。ここで旋回パラメタ q は、スカラー輸送の解析に用いた Lamb-Oseen 渦では $q = -\infty$ に、軸流のある秩序渦の解析では周方向波数 $m = 1$ について最大の増幅率を持つ $q = -0.45$ (Mayer and Powell [3]) に、それぞれ設定した。また r_0 は初期条件における秩序

渦の半径であり、 Γ_0 は秩序渦の循環を示す。秩序渦の循環 Γ_0 は、背景乱流に比べて十分に大きくするため、背景乱流場の渦度の自乗平均 ω と秩序渦の半径 r_0 を用いて $\Gamma_0 = 40r_0^2\omega$ と設定した。

2 スカラー輸送過程の変化 (Lamb-Oseen 渦, $q = -\infty$)

初期条件として、次に示す Case 1, Case 2 と 2 通りの分布を与えた; Case 1: $s_1(r) \propto \exp\left\{-\frac{r^2}{r_1^2}\right\}$, Case 2: $s_2(r) \propto \frac{r^2}{r_0^2} \exp\left\{-\frac{r^2}{r_1^2}\right\}$ 。

Case 1 では、渦核内に分布するスカラーの振舞いを調べるため、Lamb-Oseen 渦 ($q = -\infty$) の渦度の z 成分の分布に一致させ、時間発展させた (図 1)。渦核

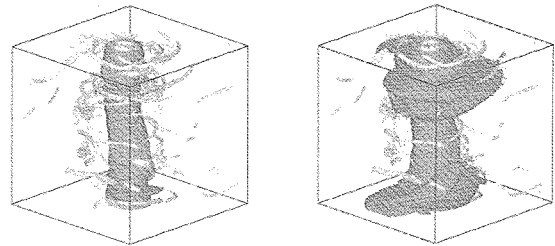


図 1: 渦構造とパッシブスカラーの変化。灰: 高エンストロフィー領域の等値面, 黒: パッシブスカラーの等値面 (最大値の 16%)。 (a) Case 1, (b) Case 2.

が存在しない場合と比較すると、パッシブスカラー場は渦核 ($r \sim r_0$) 内に $t \simeq 10$ まで保持され、それ以降の時刻でも渦核外への顕著な輸送は見られなかった。

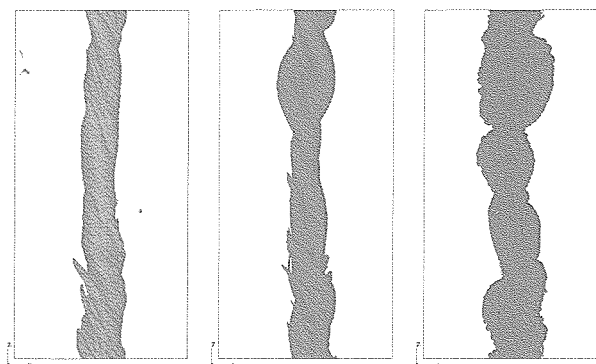


図 2: エンストロフィーの等値面 (q -vortex, $q = -0.45$); $t =$ (a) 0.8, (b) 1.3, (c) 1.7.

このとき渦核は内部に発生した渦波によって大規模構造が変形するが、パッシブスカラーの大規模構造もそれに伴って変化する様子が観察された。このときスカラーは渦核外部に流出することはなく、このため渦核外 ($r > r_0$) に発生する渦輪状の微細渦構造による輸送はほとんど確認できなかった。

また Case 2 では渦核表面での輸送現象の変化に注目するため、スカラー分布の最大値を渦表面上 ($r \simeq 1.7r_0$) に持つ分布に設定し、時間発展させた (図 1(b))。このときパッシブスカラーは、Case 1 と同様に渦核内にあったパッシブスカラーは保持された。一方渦核周辺では、渦輪状の微細渦構造の発達に伴い、スカラー輸送が活発になる様子が観察された。このときスカラーの輸送が顕著なのは、渦核表面に発生した微細渦構造が密集している場所である。このため微細渦のスカラーの輸送能力について、単体では低いものの、複数がクラスターを形成することによって効率よく輸送することが考えられる。

3 q -vortex

図 2 は、渦構造の変化を渦度の等値面により示したものであり、図中では各時間帯での渦度の空間全体の自乗平均の 3 倍を閾値としている。初期状態において、初期乱流場に q -vortex を重ね合わせたただけであるので、秩序渦はほぼ円柱状の構造を保っていた。その後の時間発展とともに、 q -vortex は周辺乱流場の影響を受け始め、変形を始める。時間発展開始から、 q -vortex は捻れた構造 (ツイスト構造) を呈し (図 2(a))、その後さらに捻れながら半径方向に膨らみ続けた (図 2(b))。秩序渦が 1 回転するころ (図 2(c))、2 つのスパイラル状の渦が巻き付いた様な構造 (スパイラル構造) に変化した。このため、線形不安定な q -vortex の崩壊は乱流の特徴的な流れ場による影響よりも、渦核自身の線形不安定性に大きく依存していると考えられる。

この直後に突発的な崩壊が始まり、一気に秩序渦の

微細化が進んでいく様子が観察された (図 2(c))。この突発的な崩壊が始まるまでに q -vortex 自身は 1, 2 回転しかせず、前述した一連の構造変化と崩壊は、軸流を持たない Lamb-Oseen 渦に比べ、非常に早い時間帯で起こることがわかった。特に崩壊する過程での高渦度領域では、 q -vortex が突発的に崩壊する際、一時的に複数の細かい渦輪状の高渦度領域を持った特徴的な構造へ変化している事が捉えられた。

4 結論

秩序渦と乱流場との相互作用の直接数値計算を行った。

Lamb-Oseen 渦と乱流場との相互作用に伴うパッシブスカラー場の輸送現象について解析した。渦核内にあるパッシブスカラーは、その内部に保持され、渦核の構造変化に伴って変形することが観察された。一方、渦核表面のパッシブスカラーはその周辺に生じる微細渦構造によって輸送が促進された。この現象が顕著に見られた部分は、微細渦構造が集中している領域に対応した。

また軸流のある秩序渦、線形不安定な q -vortex の渦構造の変化を捉えるため、3 次元スペクトル法での直接数値計算を高解像度で行なった。その結果、線形不安定な構造から突発的な渦構造変化が捉えられた。その過程の特徴として、一次不安定では線形不安定性によって形成された 2 本のブレードを持つヘリカル構造が、二次不安定ではブレード上に形成された微細な渦輪構造が、それぞれ観察された。この直後、渦核内部では高波数攪乱が励起され微細化が顕著に促進され、秩序渦が突発的に崩壊した。この特徴的な渦構造と、秩序渦の表面に現れることは、渦輪の曲率不安定性 [4] との関連を示唆する。

参考文献

- [1] 高橋, 石井, 宮寄, 山本. ながれ マルチメディア, 21(6):497-498, 2002. 秩序渦と乱流場の相互作用について,
- [2] M. Lessen, P. J. Singh, and F. Paillet. The stability of a trailing line vortex. part 1: Inviscid theory, *J. Fluid Mech.*, 63:753-673, 1974.
- [3] E. W. Mayer and K. G. Powell. Viscous and inviscid instabilities of a trailing vortex, *J. Fluid Mech.*, 245:91-114, 1992.
- [4] Y. Fukumoto, The three-dimensional instability of a strained vortex tube revisited, *J. Fluid Mech.*, 493:287-318, 2003.