低圧力渦の自動追跡

Automatic chasing of low-pressure vortex

槇原孝文,核融合研,岐阜県土岐市下石町 322-6, E-mail: makihara@toki.theory.nifs.ac.jp 木田重雄,核融合研,岐阜県土岐市下石町 322-6, E-mail: kida@toki.theory.nifs.ac.jp 後藤 晋, 核融合研, 岐阜県土岐市下石町 322-6, E-mail: goto@toki.theory.nifs.ac.jp Takafumi Makihara, NIFS, 322-6, Oroshi-cho, toki, Gifu, 509-5292, Japan Shigeo Kida, NIFS, 322-6, Oroshi-cho, toki, Gifu, 509-5292, Japan Susumu Goto, NIFS, 322-6, Oroshi-cho, toki, Gifu, 509-5292, Japan

The coherent tubular vortices exist in turbulent flows, and play important roles in turbulence dynamics. We visualize them in isotropic turbulence using the low-pressure vortex method. Since a plenty of vortices are moving about, it is not easy to trace a particular vortex by our own eyes. We propose an automatic chasing scheme of low-pressure vortices which may be useful to investigate the dynamics of individual vortices.

1. はじめに

乱流中に普遍的に存在する管状の渦構造は乱流運動を理解する上で重要な役割を演じているものと考えられている.そのため管状渦構造を直視する様々な可視化方法が提案されている. 例えば,渦衛臣を置続する様々なり祝化力法が提案されている。 例えば,渦度の絶対値の極大値を結ぶ線を中心軸とし,渦度分 布をこの軸に対称な正規関数で近似して渦管を定義したり,渦 度に垂直な面内で圧力のラプラシアンの極大値を結ぶ線を中心 軸とし,その中心軸周りで位回速度が最大値をとる面の内部を 福とし、この中心和周りで旋日速度が取く値をとしる面の内部を 渦管と定義したものがある⁽¹⁾⁽²⁾.また、これらの手法とは別に 著者の一人は圧力のヘシアンの第3固有ベクトルに垂直な面内 での圧力の極小値を結ぶ線を中心軸とし、圧力の変曲面の内部 を渦管と定義する低圧力渦を提案してきた⁽³⁾.この手法は渦管 を構成する手続き内に主観的なパラメータを含まないという著 しい特徴があり,本論文においてもこの低圧力渦による管状渦 の可視化手法を採用している.

の可税化手法を採用している。 管状渦は、それぞれが生成、成長、崩壊という一連の過程を 繰り返す、この過程を解き明かすことは乱流運動を理解するこ とにつながるものと考えられる、しかしながら渦の数は膨大で あり、個々の渦の追跡は自動化をしなければ実行不可能である、 そこで本論文では低圧力渦によって可視化される管状渦の自動 追跡のアルゴリズムを提案し、一様等方乱流中で任意に選んだ 低圧力渦を追跡できることを示す、また、最近、乱流中の流体 線(material ling)や落体面(material aufford)が著者によって 線 (material line) や流体面 (material surface) が著者によって 研究され⁽⁴⁾,その統計性質が低圧力渦のもつ統計性質と関係することが示唆されている.そこでこの流体線および流体面と低圧力渦を同時に追跡し,それぞれの変形と低圧力渦の関係を観 察する

2. 低圧力渦の同定

2. 低圧力渦の高足 低圧力渦は旋回中心で圧力が低くなることに注目し,渦軸を 圧力へシアンの最小固有値に対応する固有ベクトルに平行な圧 力の極小点の集合と定義する.渦領域は渦軸に垂直な平面内で 圧力が下に凸の領域($\partial^2 p / \partial r^2 > 0$),渦境界は圧力の変曲面 $(\partial^2 p / \partial r^2 = 0)$ と定める

本論文で提案するこの低圧力渦の自動追跡スキームは保存している低圧力渦のデータに依存する.そこでまず低圧力渦の同 定法を以下に簡単に示す(詳細は文献3参照).

- 1. 全ての計算格子点に対して圧力へシアンの固有値と固有 ベクトルを計算し,2つ以上の固有値が正である格子点を 探す.
- 1を満たした格子点に対して固有値と固有ベクトルを用いて圧力の極小点を求める.この点が格子点から格子間隔の半分以内になければ除外する.
- 3. 2 を満たした極小点に対して,第3固有ベクトルに垂直な 面内での2次元的な流線を考え,流線が楕円状となる条件 (旋回条件)を満たさない点を除外する.
- 4. 以上で得られた極小点をつなぎ渦軸を構成する.
- 5. 渦軸のまわりで圧力の変曲面を求め,渦領域を決める.

この結果,低圧力渦の保存データには以下の特徴がある.

- 圧力の極小点自身の座標だけでなく,極小点が属する格子 点を記憶している.
- 各格子点には多くとも1つの極小点しか属さない.
- 極小点には,それが属する渦軸の番号と渦軸内での番号が つけられている.
- ● 渦領域は渦軸を構成した後に決定される。

 低圧力渦の自動追跡スキーム 提案する自動追跡スキームでは,先に流れ場の計算を行い, 各時刻で個別に同定した低圧力渦を引き続く時刻で関連づける ことによって追跡する

保存データの特徴から渦軸だけを追跡すればよく, さらに渦 軸を構成する極小点自身ではなく, 極小点が属する格子点を捕 らえている渦軸に関連づければよい.簡単のためにこれを2次 元で説明する(図1).ただし,実線(数線はそれぞれ声動)た $t + \Delta t$ における渦軸で,細い線は計算格子である.本自動追跡 スキームでは,渦軸は短い時間ステップ後には元の渦軸の近傍 に存在すると仮定する.

1. まず両時刻における渦軸を構成する.

- 2. 時刻 t において任意に選んだ渦軸について構成する極小点 が属する格子点(緑色)を確認し,1つの格子点に対して自 身を含むその格子点の近傍 9 点 (濃青色領域)を考え,そ の全格子点 (淡青色領域全点) が $t + \Delta t$ に認識している渦 軸を列挙する.
- 3. 上記の仮定から,時刻tで選んだ渦軸の子孫は $t + \Delta t$ で 列挙された中で,数多く認識されるので,認識された数の 多い渦軸を子孫とみなす(黄色).
- 4. ただし, 渦軸はその発達過程の中で分裂, 結合を繰り返す ため,子孫とみなす場合に以下の条件を加える。
 - (a) 1 点しか認識されなかった場合は子孫としない.
 - (b) 時刻 $t + \Delta t$ で認識した渦軸の構成点が t での構成点 の2倍以上になった場合は子孫としない.
 - (c) 8点以上認識した場合は最大数でなくても子孫とする.
- 4. 数值計算

前節で提案した自動追跡スキームを用いて低圧力渦を追跡す る.流れ場は周期2mの定常乱流で,256³の計算格子を用いて スペクトル法によって計算した.テイラー長に基づくレイノル ズ数は $R_{\lambda} = 85$ である.

4.1_定圧力渦の自動追跡

図2に流れ場内に構成した中で任意に選んだ2つの低圧力渦 を追跡した結果を示す.ただし,表示した領域は全領域の1/8 で、他の渦軸も青色で同時に示した.また、経過時間は動粘性 係数 ν とエネルギー散逸率 ϵ から得られるコルモゴロフ時間 $\tau_n \equiv (\nu/\epsilon)^{1/2}$ を単位としている.引き続く図の間では,31 回 の自動追跡スキームが実行されている、多数の渦の中から任意 に選んだ低圧力渦が成長していく過程が良好に捕らえられてい



Fig. 1 Automatic chasing of a vortex axis

る、特に緑色で示した渦は長くなりながら,最後には4つに分裂している.ここでは2つの渦のみの追跡例を示したが,さらに多くの渦も同様に追跡できる.

4.2 流体線および流体面と低圧力渦

乱流中の流体線は,その全長 L(t) が指数関数的な伸張

$$L(t) = L(0) \exp[\gamma t] \tag{1}$$

を受ける.ここで伸張率の平均値 γ はレイノルズ数 R_{λ} によらず

$$\gamma \approx 0.17 \tau_{\eta}^{-1} \tag{2}$$

と評価される $^{(4)}$.また,流体線の曲率半径の平均値 r は伸張率 と同様にレイノルズ数 R_{λ} によらず

$$r \approx 10\eta$$
 (3)

となる.ただし, η はコルモゴロフ長で, $\eta = (
u^3/\epsilon)^{1/4}$ であ る. 一様等方乱流中における低圧力渦の平均直径が 10η, 軸方 向の平均渦度が $2.5\tau_{\eta}^{-1}$ 程度であることから,流体線の変形と 向の平均渦度が 2.5₇⁻¹ 程度であることから,流体線の変形と 低圧力渦には何らかの関係があると考えられる.図3に流体線 と低圧力渦を同時に追跡した結果を示す.流体線上の赤色の部 分では伸張率が大きい.この図から流体線の伸張は低圧力渦の 周りで顕著に起こっていることがわかる. 図4に,流体面と低圧力渦を同時に追跡した結果を示す.流 体面の統計の定量的評価は現在研究中であるが,この図から流 体面の変形にも強く低圧力渦が関係していることが想像される. 例えば最後の図における流体面の変形は,低圧力渦周囲の二重 スポイニル構造⁽⁵⁾たら時していることのに思える。

スパイラル構造⁽⁵⁾を反映しているように見える.

5. おわりに 本論文では低圧力渦によって可視化した乱流中の管状渦を自 動的に追跡する手法を提案した.このスキームを一様等方乱流 に適用した結果,低圧力渦を良好に追跡できることがわかった. さらに乱流中の流体線もしくは流体面と低圧力渦を同時に追跡 した結果,低圧力渦の周囲で線や面の変形が顕著であることが わかった。本論文では線や面と低圧力渦の関係の定性的な理解 にとどまったが、本自動追跡スキームを駆使して定量的評価を 行う予定である.

参考文献

- Jiménez, J., Wray, A.A., Saffman, P.G. and Rogallo, R.S., J. Fluid Mech., 255, (1993), pp. 65-90.
- 2. Tanahashi, M., Miyauchi, T. and Ikeda, J., Proc. 11th Symp. Turbulent Shear Flows 1, (1997), pp.4-17 - 4-22.
- 3. Kida, S. and Miura, H. Euro. J. Mech. B, 17, (1998), pp.471-488.
- 4. Goto, S. and Kida, S., Proc. 2nd Int. Symp. on Turbu-lence and Shear Flow Phenomena II, (2001), pp.27-29.
- Kida, S. and Miura, H., J. Phys. Soc. Japan, 69, (2000), pp. 3466-3467.



(a) $t = 0.0\tau_{\eta}$



(b) $t = 5.6\tau_{\eta}$



Fig. 2 Automatic chasing of two vortex cores



(a) $t = 0.0 \tau_{\eta}$



(b) $t = 3.5 \tau_{\eta}$



Fig. 3 Material lines and a vortex core



(a) $t = 0.0 \tau_{\eta}$



(b) $t = 1.6 \tau_{\eta}$



Fig. 4 Material surface and a vortex core