

渦構造同定方法についての考察

熊 鰲魁, 小林 勝男, 伊澤 精一郎, 福西 祐 (東北大工)

Discussions on the methods of vortical structure identification

A. K. Xiong, K. Kobayashi, S. Izawa and Yu Fukunishi

Dept. of Mech. Eng., Tohoku University

ABSTRACT

A new method of vortical structure identification, named π method, is proposed. The method focuses on the relation between the vorticity vector and the rotating condition of its neighboring fluid. The results are compared with the other methods, namely the Q method, the λ_2 method and the Δ method, using the DNS data of a forced isotropic homogeneous turbulence and a collision of four vortex rings. It is shown that π method has the advantage of being not sensitive to the threshold.

Key Words : vortex identification, DNS, π method

1. はじめに

乱流中には、管状や層状に渦度が集中した高渦度領域が、乱流変動の時間スケールに比べて長時間安定した構造として存在することが知られている。これらの構造は、乱流の秩序構造あるいは組織構造と呼ばれているが、その力学的なはたらきや総合的に見た乱流の特性とどのような関係があるのかについては、いまだによくわからない点が多い。秩序構造の一例としては、壁乱流の壁面近傍に見られる主流方向に長く伸びた低速ストリークや、噴流中での前後の渦輪を結ぶように発達するリブ構造などがあげられる。これらの秩序構造としての渦が、流れ場全体あるいは乱流現象全体にどのような影響を及ぼしているのかを議論しようとするれば、まず流れの中から渦を適切に同定しておく必要がある。ところが、時間的に変動しているような流れ場に対して渦を明確に定義することは難しく、研究者によって渦を表現する際に用いる物理量も異なるのが現状である⁽¹⁾。

そこで本研究では、単純明快な考え方にもとづく渦領域の定義を新たに提案し、その定義にもとづいて乱流中から渦を同定し、これまでに用いられている様々な渦の定義方法（ここでは特に代表的な Q 法⁽²⁾、 λ_2 法⁽³⁾、 Δ 法⁽⁴⁾を取り上げる）との比較及び検討を試みた。なお、

定義方法の検証には、強制一様等方性乱流と複数の渦輪の衝突の2つの3次元非圧縮性流れ場のDNSデータを用いた。

2. π 法

本研究で提案した渦の同定方法の概略を以下に示す。各格子点上で与えられる渦度ベクトルに対して、それに垂直な面内で、その周囲の流体がすべて同じ回転方向に回転していればその格子点は渦の一部であると定義する。これは渦度ベクトルに垂直な平面上でこれを取り囲むように流線が閉じていることに対応し、数学的には、その平面上で2次元速度勾配テンソルの固有値が複素共役根をもつ（旋回条件）ことに相当する。すなわち、速度勾配テンソルの特性方程式の判別式 D が

$$D = (S_{11} - S_{22})^2 + 4S_{12}^2 - 4\Omega_{12}^2 < 0 \quad (1)$$

を満足するという形で表される。ここで、 S_{ij} 、 Ω_{ij} は、渦度ベクトルに垂直な平面上における2次元のひずみ速度テンソルと渦度テンソルである。これを整理すると、最終的に次式が得られる。

$$-4Q - 4\frac{\omega_i S_{ik} S_{kj} \omega_j}{\omega^2} + \frac{(\omega_i S_{ij} \omega_j)^2}{\omega^4} < 0 \quad (2)$$

ここで、 Q は速度勾配テンソルの第2不変量である。上式の左辺を π とおき、この π 値が負である領域が渦と定義される。したがって、このように定義された「渦」の領域では、渦自身を作る相対速度によって、至る所で流体粒子が同じ方向に回転していることになる。

流れ場が2次元であれば、この π 法を含め、 Q 法、 λ_2 法、 Δ 法などの渦の定義式はすべて等しくなるため、定義方法による違いはない。

3. DNS データを用いた渦の同定

3.1. 強制一様等方性乱流 はじめに、格子ボルツマン法により計算した強制一様等方性乱流のデータを用いて、渦の同定方法による違いを調べた。計算格子は 128^3 であり、境界条件として周期境界条件を与えている。乱流場を維持するために、波数1から4のモードからなるランダムな速度場を計算領域全域にわたって連続的に注入した。なお、テイラー長レイノルズ数は110である。また、抽出された渦構造の体積がそれぞれの方法で等しくなるようにしきい値を決定した。また、計算領域全体に占める同定された渦構造の体積割合を比体積として定義している。

Fig. 1に、 π 法によって抽出された渦構造を示す。図は、比体積20%とした場合の結果である。比較しやすいように、 $x = 1 \sim 10$ の範囲の渦を取り出し、 yz 断面に射影させて表示したものをFig. 2に示す。図中の丸で囲った領域A、Bに着目してみると、 Q 法と λ_2 法、 Δ 法と π 法でそれぞれ似たものを渦とみなしているように見える。このことは、渦と認定された領域の共通部分を比較すると明らかとなる。

Table 1に見られるように、 Q 法と λ_2 法は極めて相関が高い。これに対して、 Δ 法はこの両者との相関が低い。本研究で提案した π 法は、いずれの方法ともおよそ80%前後の一致となっている。同様の傾向は、同定された渦のせん断ひずみテンソル $\|S\|^2$ と渦度テンソル $\|\Omega\|^2$ の確率分布にも表れている (Fig. 3)。 Q 法における渦の定義式は $Q > 0$ すなわち $\|\Omega\|^2 > \|S\|^2$ であるから、 Q 法では渦は図中の $\|\Omega\|^2 = \|S\|^2$ の実線の上側の領域に限られる。 λ_2 法もほぼ同じ分布となっている。これに対して、 Δ 法では、せん断ひずみテンソルよりも渦度テンソルが7桁程度小さい領域まで渦とし

て同定していることがわかった。 π 法の分布は、前者に近いものの双方の間をとったような分布になっている。

3.2. 複数の渦輪の衝突 続いて、渦運動が計算領域中の一部分に限られるような場を取り上げた。ここでは、4つの渦輪が連続的に衝突する場を考える。計算は 128^3 の格子を用いてスペクトル法により行った。渦輪の循環で定義されるレイノルズ数は、30,000である。Fig. 4は、しきい値に対する渦構造の体積変化を示したものである。 Q 法や λ_2 法では、しきい値を大きくしていくと、同定される渦の領域が急激に増加してしまうことがわかる。 π 法は、従来の定義方法と比べると、最もしきい値の変化に対して鈍感であった。これは好ましい傾向である。

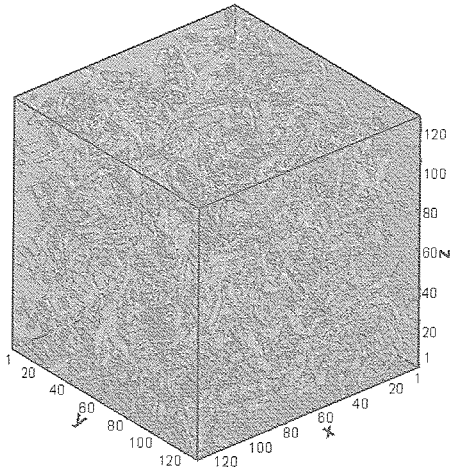
細かい観察をすると、 π 法でや Δ 法で同定された渦輪の表面には、細かな凹凸が見られた。これは、もともと Q 法や λ_2 法が低圧領域を渦と同定しており、圧力分布はおだやかな変化を示す傾向があるのに対し、 Δ 法や π 法では流線がら旋状となる旋回条件を課しているという違いのためであると考えることができる。

4. まとめ

新しい渦領域の定義を提案し、それにもとづいて乱流中にある渦を同定し、3次元非圧縮DNSデータを用いて、従来の渦の定義法である Q 法、 λ_2 法、 Δ 法との比較及び検討を行った。その結果、同定される渦構造が少しずつ異なることを示した。また、本研究で提案した π 法は、しきい値の取り方に対して最も鈍感であるという点で優れていることがわかった。

参考文献

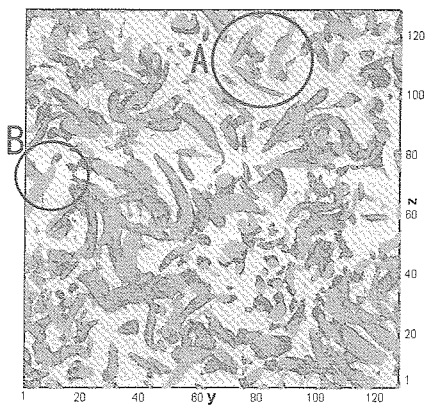
- 1) 三浦英明, 木田重雄: ながれマルチメディア 98 (ながれ 第17巻 第3号), (1998).
- 2) Hunt, J. C. R., Wary, A. A and Moin, P., Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows, *CTR-S88*. (1998), p. 193.
- 3) Chong, M. S., Perry, A. E and Cantwell, B. J., A general classification of three-dimensional flow fields, *Phys. Fluids A*(2) (1990), pp.765-776.
- 4) Jeong, J. and Hussain, F., On the identification of a vortex, *J. Fluid Mech.* 285 (1995), pp. 69-94.



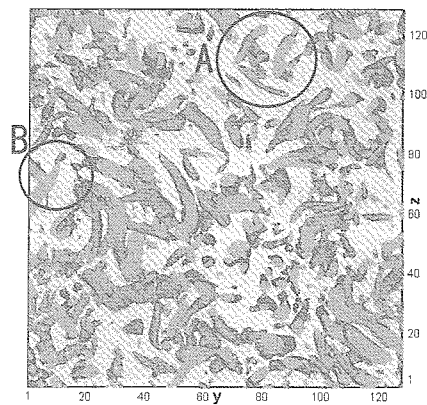
	Q法	λ_2 法	Δ 法	π 法
Q法	100	94.4	72.0	83.6
λ_2 法	—	100	70.6	80.7
Δ 法	—	—	100	79.0
π 法	—	—	—	100

Table 1 共通して渦と同定された領域の比較

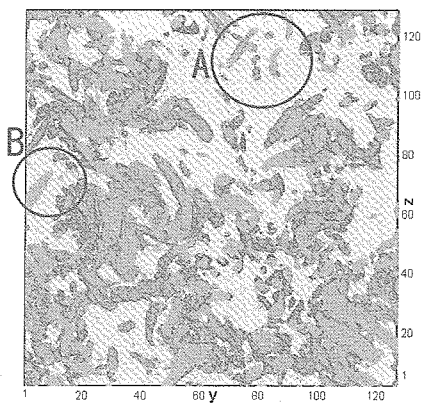
Fig.1 π 値 ($=-23,235$) の等値面



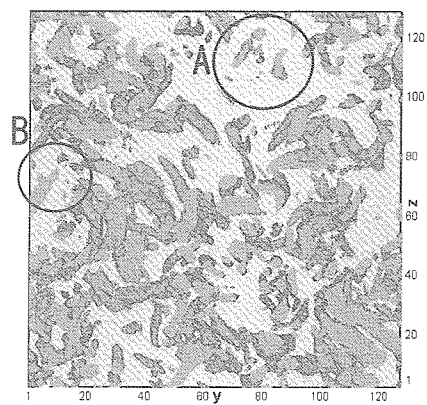
(a) Q法



(b) λ_2 法



(c) Δ 法



(d) π 法

Fig.2 yz 平面における抽出された渦構造の比較 ($x = 1 \sim 10$)

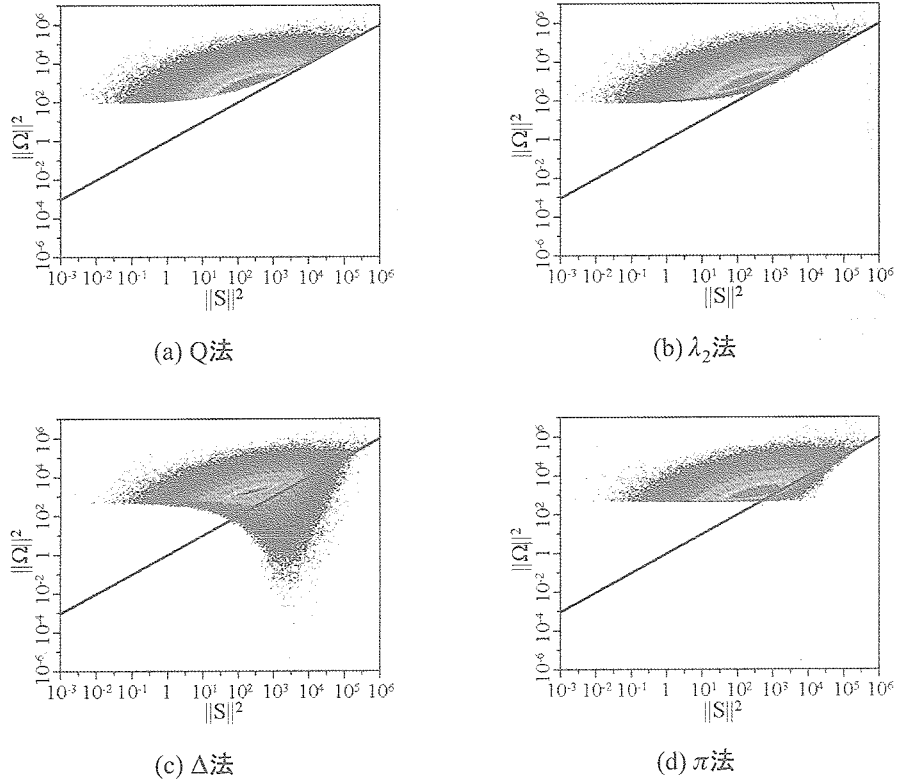


Fig.3 同定された渦の $\|S\|^2$ と $\|\Omega\|^2$ の確率分布

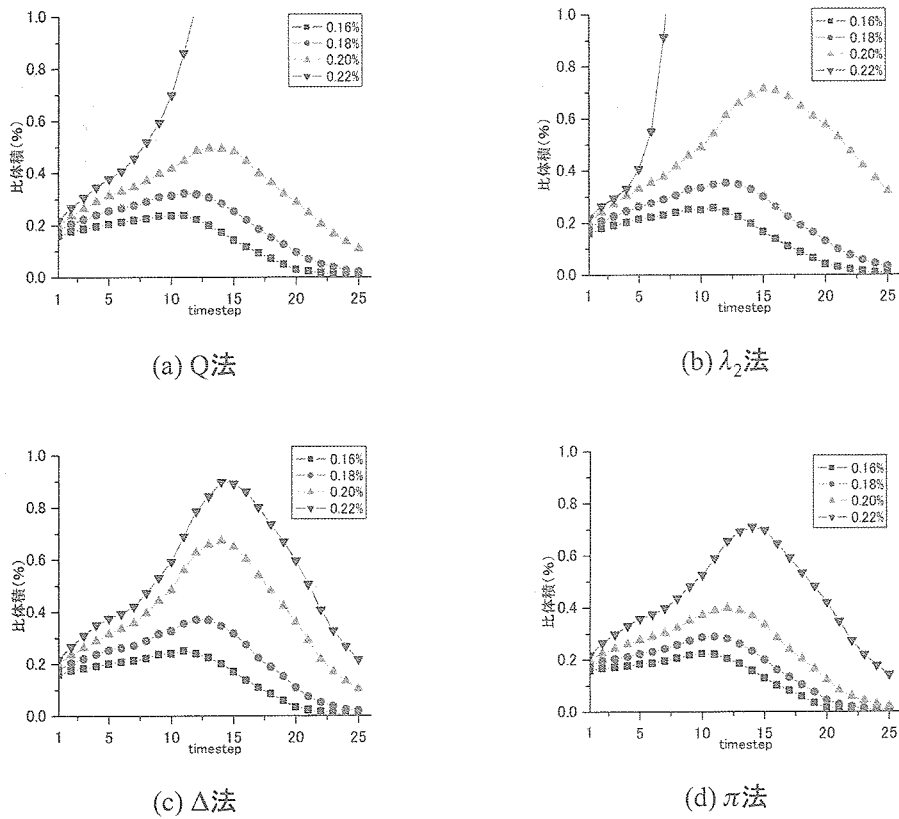


Fig.4 しきい値に対する渦構造の体積変化