

乱流中の微細秩序渦を実験的に検出する試み

佐々浩司（高知大理）

Experimental detection of fine-scale coherent vortices in turbulence

K. Sassa

Dept. of Natural Environmental Science, Kochi University

ABSTRACT

Some trials to detect fine-scale coherent vortices in turbulence are presented in the present paper. The simplest method is a conditional measurement using an X-probe. We could measure various turbulence fields at $R_\lambda=19\sim 2300$ by this method and obtained the Reynolds number dependences of the characteristics of the fine-scale coherent vortex. But, such data showed an error caused by the third velocity component unmeasured. So we employed a double-X probe that can measure three components of instantaneous velocity fluctuation. The resultant data showed that the fine-scale coherent vortex was slightly different from the Burgers' vortex. We also examined the array of X-probe that can measure instantaneous 2-D velocity profiles. Though it is in progress of such experiments, the primary results showed the validity of the conditional measurement using single X-probe.

Key Words: fine-scale coherent vortex, turbulence, hotwire measurements

1. 序論

乱流要素渦¹⁾と呼ばれる微細秩序渦は、様々な DNS 乱流場^{2, 3)}において見いだされている。しかし、現時点で世界最高性能を誇る地球シミュレータを用いても達成可能な高解像度の乱流場は $R_\lambda < 1000$ であり⁴⁾、大気乱流のような高レイノルズ数乱流中においてはどのような形態で存在するのか、そもそも普遍的に存在するものなのかどうかも明らかでない。実験的にはヘリウムチャンバーを用いた熱線計測⁵⁾で $R_\lambda \sim 5000$ が達成されているが、場の設定や計測上の問題を抱えているように思える。DNS 同様の 3次元速度場を与えるものとして 3D-PIV による実験⁶⁾もなされているが実験の制約からあまり高レイノルズ数の乱流場は期待できそうにない。

著者らは、大気乱流中において微細秩序渦の存在可能性を把握することを目的として、最も一般的で信頼されている計測手法である熱線流速計を用いて微細秩序渦の検出に挑戦⁷⁻¹⁰⁾してきた。ここではこれらのうちこの 1～2年に進めてきたものを紹介する。

2. Xプローブ1本による計測

微細秩序渦の回転面がセンサーを通過する際に横方向速度が急変することを利用すると Xプローブ一本で検出が可能となる¹¹⁾。著者らは横方向速度成分の微分値が、その rms の 2.5 倍を超えることを検出条件として、条件付き検出を行った^{8,9)}。検出に用いた乱流場は表 1 に示す様に温度勾配を含む安定成層格子乱流 LSG, LSE、

一様せん断乱流 ST1, ST2、大気乱流 Run1, 2 であり、乱流レイノルズ数は $R_\lambda=19\sim 2390$ の広範囲をカバーしている。使用した X プローブの空間分解能は Kolmogorov スケール η と同等か、やや大きいものであったが、サンプリング間隔はいずれも 10kHz であり、時間分解能は の数倍以上であった。360 万点のデジタル記録データにより条件付き計測を行った。

図 1 に LSG, LSE, ST1, Run1 における鉛直速度変動成分の条件付き平均波形を示す。図中に描かれた破線は条件付き計測結果と同じ最大周方向速度と渦径を持つ Burgers 渦の速度分布を示したものである。微細秩序渦が主としてプローブに対して直交する回転軸をもって通過したものとすれば、鉛直速度変動の条件付き平均波形は速度勾配や成層の有無やレイノルズ数に関わりなくいずれの乱流場においても Burgers 渦が通過した場合とよく似た速度変化をすることがわかる。正負のピーク $\pm w_{\max}$ が渦核における最大周方向速度を示すものとする、渦の直径 d はピーク間の幅により求められる。この渦径は η で規格化するとどの図もほぼ同じように見えるが、最大周方向速度は各乱流場によって大きく異なり、 R_λ に大きく依存していることが伺える。

最大周方向速度より内側の渦核においては Burgers 渦の速度分布に等しいが、外側は R_λ の増加

表1 微細渦検出に用いた乱流場の諸特性

Turbulence field		U (m/s)	u'/U	w'/U	η (mm)	R_λ
Run1	nocturnal surface layer	1.9	0.334	0.154	0.71	2391
Run2	nocturnal surface layer	1.5	0.335	0.117	0.51	1260
ST1	homogeneous shear turbulence	8.0	0.153	0.092	0.23	820
ST2	homogeneous shear turbulence	5.0	0.149	0.097	0.32	586
LSE	stable-stratified and excited turbulence	5.0	0.248	0.136	0.14	300
LSG	stable-stratified grid turbulence	5.0	0.030	0.020	0.31	19

とともに Burgers 渦よりも速度の減衰が遅くなっている。これは、すべての乱流場において検出条件を同じにしたことが関わっている。すなわち、 R_λ の増加によって乱れの強くなった乱流場では、渦軸がプローブに対して傾斜して通過するものもカウントされるようになり、見かけ上、裾野の増速をもたらしたと思われる。なお、観測面に対して傾斜して通過する微細秩序渦が平均に含まれても渦径の評価には大きく影響しないことは DNS によっても確認されている¹²⁾。

検出された微細秩序渦の渦径、最大周方向速度、渦レイノルズ数 $R_\Gamma = \Gamma/\nu$ のレイノルズ数依存性を DNS 結果^{1,13)}や他の実験結果^{5,14)}とともに図2に示

す。多少ばらつきはあるものの、同じ検出条件下では渦径は R_λ によらずほぼ一定の約 10 となる。この結果は DNS^{2,13)}をほぼ支持するもので、Belinら⁵⁾が示したレイノルズ数依存性とは異なっている。最大周方向速度については $R_\lambda < 300$ では木田ら¹⁴⁾の結果を支持する増加傾向にあるが、 $R_\lambda > 500$ では減少傾向に転じる。この結果、渦レイノルズ数においても同様な傾向となる。Belinら⁵⁾は最大周方向速度は R_λ によらないとしているものの、図中に示す $R_\lambda = 700$ を境として渦の特性が変化することを指摘しており、これは本結果に示した傾向が変化する R_λ に近い。本実験も Belinらと同様に高レイノルズ数乱流においてはせん断が作用して

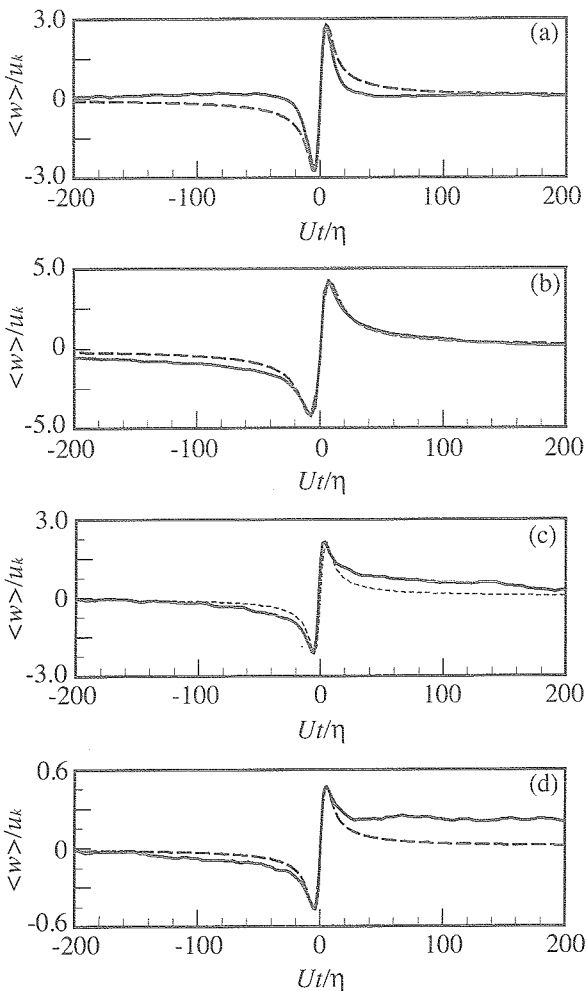


図1 横方向速度変動成分の条件付き平均波形
(a): LSG, $R_\lambda=19$, (b): LSE, $R_\lambda=300$,
(c) ST1, $R_\lambda=820$, (d): Run1, $R_\lambda=2391$.

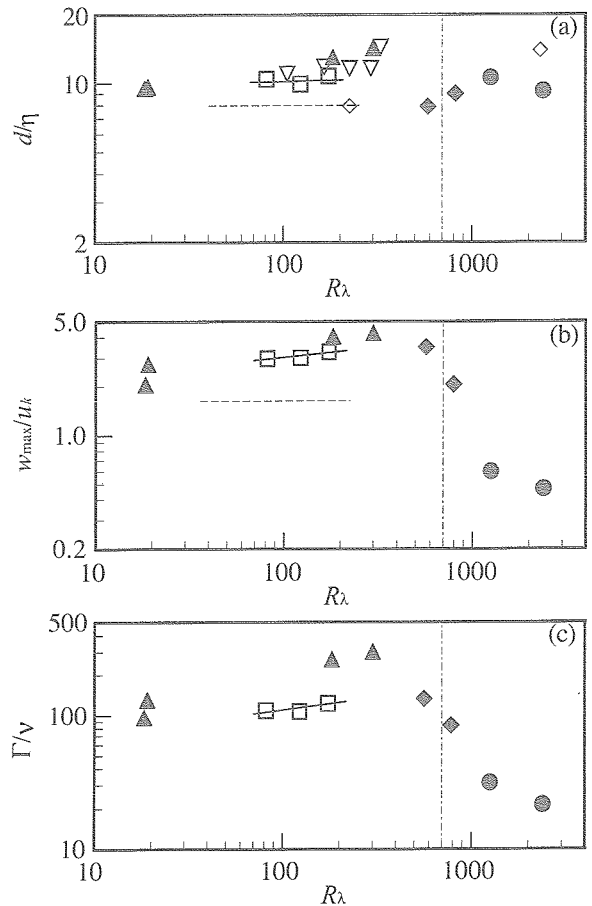


図2 微細秩序渦の (a)直径、(b)最大周方向速度、
(c)渦レイノルズの乱流レイノルズ数依存性
●:Run1, 2, ▲:LSE, LSG, ◆:ST1, 2,
□:DNS¹⁾, ◇:Helium tank⁵⁾, ▽:Grid turbulence¹⁴⁾
—:Re-dependence¹⁾, ----:Re-dependence¹³⁾
|:critical Reynolds number⁵⁾

いるため、それによって微細秩序渦が主軸方向に配向することが高レイノルズ数における減少傾向をもたらす可能性もあるが、彼等が指摘したように乱流構造が変化したとも考えられ、今後高レイノルズ数におけるより詳細な検証が必要であろう。少なくとも本実験における同一検出方法による結果では、DNSにより得られたスケーリング則は高レイノルズ数で成立しない。

3. Xプローブ2本による3次元計測

Xプローブ1本の計測においては、確かに横方向速度変動成分はBurgers渦によく似た波形を示したが、同時計測された主流方向速度成分は図3cに見られるように渦中心付近であたかも加速するような波形⁸⁻¹⁰となった。これはXプローブでは計測できない第3の速度成分の影響と思われる。Burgers渦は伸張渦であり、渦核内において軸方向の速度成分を持つことが期待されるが、Xプローブにおいてはこれがすべて2センサーの和として計測される主流速度成分に加えられるであろう。そこで、Xプローブ2本を90度回転させて配置したプローブを大気乱流中に設置して2成分ずつ計3成分の瞬間速度を同時計測し、微細秩序渦の検出条件としてXプローブ1本の時と同様の鉛直速度変動の微分値に加え、水平方向の速度変動が正であるという条件を課した。

鉛直速度変動微分の条件だけでは図3のように u, w は

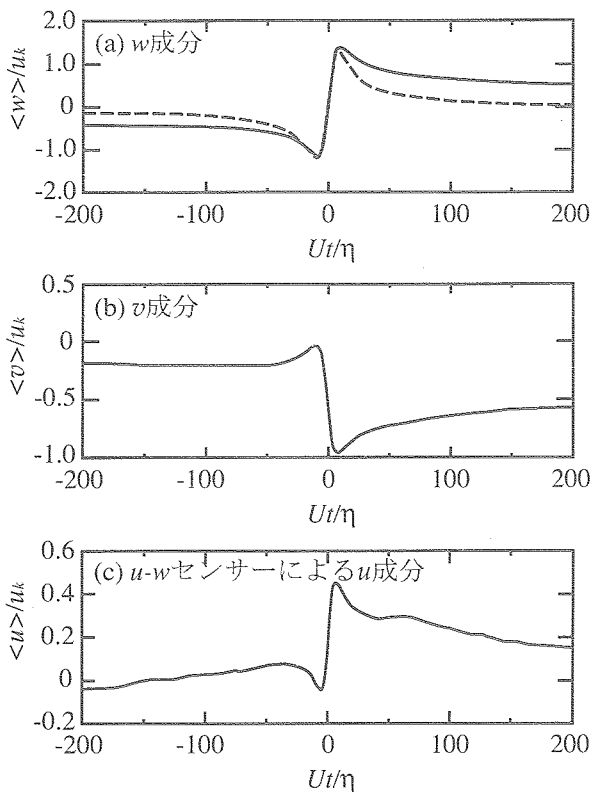


図3 鉛直速度成分の時間微分のみを検出条件とした条件付き平均波形

Xプローブ1本の結果^{8,9}と同様であり、 v 成分はプローブに対して斜めに通過する渦を反映して位相は反転するが w 成分と似た変動が見える。水平速度の条件を課すと図4bに示すように、確かに渦核に相当する位置で v 成分がピークを持つが、 w 成分(図4a)は渦核の前後で非対称となり、Burgers渦の速度分布とはかなり異なるものとなってしまった。この波形は偶然にもBelinらが高レイノルズ数で得た波形⁹と極めてよく似ていることから、大気乱流のような高レイノルズ数乱流では微細秩序渦はBurgers渦と似たものではないことを示唆している。これはまた、図2に示した高レイノルズ数で最大周方向速度が小さくなることの原因を示すように思える。しかし、大気乱流中において、主流方向を的確に見定めることは難しく、プローブそのものがいずれかの方向に迎角を持っていたことが影響していた可能性もある。

4. Xプローブ列による速度場の計測

ここまで来ると3成分同時計測とは言え一点計測のみで渦構造を捉えることにやはりもどかしさを感じ、著者らが進めた秩序渦検出の原点⁷に立ち返って瞬間速度分布を計測することにした。Xプローブが計測できない第3の速度成分の影響を受けるにしても、それらを並列に並べて瞬間速度場を求めれば、少なくとも微細秩序渦の2次元断面を捉えることはできそうである。

そこで、検査体積 $0.8 \times 0.8 \times 0.4 \text{m}^3$ のXプローブを

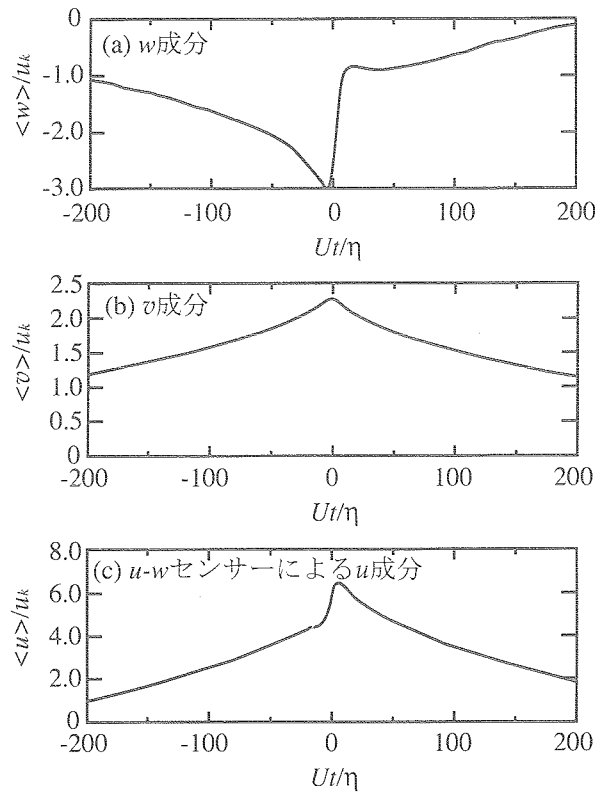


図4 鉛直速度成分の時間微分と横方向速度を検出条件とした条件付き平均波形

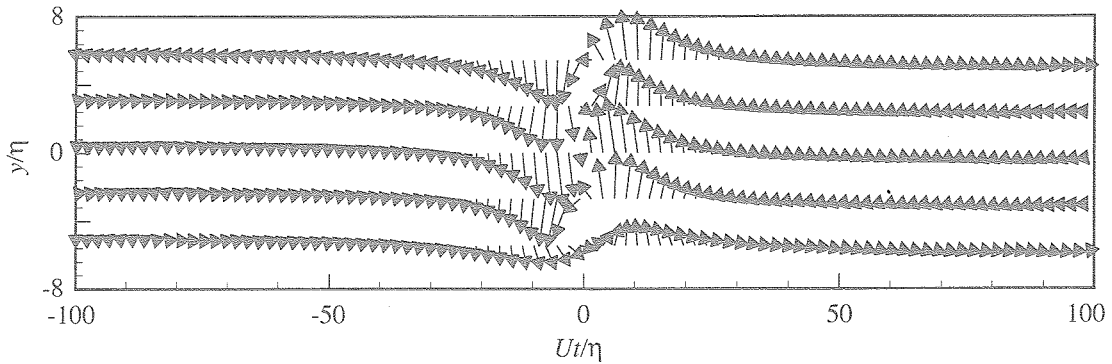


図5 Xプローブ列により得られた条件付き平均速度ベクトル分布

1.5mm 間隔で6本並べたXプローブ列を制作し、格子乱流中($Re_\lambda \sim 30$)において計測を行った。計測時には片端のセンサー1本が断線したため、有効なXプローブは5本となった。この計測によって得られた瞬間速度分布より、真ん中のセンサーが捉えた鉛直速度成分の微分値が大きいことを条件にして条件付き平均を行った。

得られた速度ベクトル分布を図5に示す。これを見ると、検出に用いたプローブを中心とする渦運動が明確に認められる。このことは、Xプローブ1本で行ったきた従来の条件付き計測が全くでたらめであるというわけではなく、十分妥当であったことを示している。

今後は速度勾配テンソルの第2不変量などを検出基準として、微細秩序渦を検出していく予定であるが、その構造を十分詳細に捉えることができるほどプローブ間隔が小さくはないため、さらに微細なセンサーの開発を進めている。

5. まとめ

これまでの実験を通じて微細秩序渦が大気乱流のような高レイノルズ数乱流においても存在することは確認された。しかし、その詳細な構造については多チャンネルセンサーを用いて、瞬間速度場を詳細に計測しない限りは得られそうもない。今後、十分な分解能を有したセンサーを用いて、高レイノルズ数乱流における微細秩序渦の形態や特性を明確にしていきたい。

謝辞

本研究会における講演後、JAXAの高木正平博士に今後の研究を進めるにあたって有益な助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 木田他2名, 日本流体力学会年会講演論文集 (2002) 21.
- 2) Yamamoto & Hosokawa, *J. Phys. Soc. Japan*, 57 (1988) 1532.
- 3) 店橋他3名, 日本機械学会論文集(B編) 65-638 (1999) 3244.
- 4) Kaneda 他3名, *Phys. Fluids* 15 (2003) L21.
- 5) Belin 他3名, *J. Phys. II France* 6 (1996) 573.
- 6) Bos 他3名, *Phys. Fluids* 14 (2002) 2456.
- 7) Sassa, *Special publication of NAL SP-48* (2000) 61.
- 8) 佐々他2名, 日本流体力学会年会講演論文集 (2002) 242.
- 9) 佐々他2名, 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集(II) (2003) 181.
- 10) 佐々他2名, 第52回理論応用力学講演会講演論文集 (2003) 139.
- 11) 佐々, 日本流体力学会年会講演論文集 (2003) 222.
- 12) 店橋他3名, 数理解析研究所講究録 1141 (2000) 184.
- 13) 店橋他3名, 数理解析研究所講究録 1285 (2002) 15.
- 14) Mouri 他2名, *Phys. Rev. E* 67 (2003) 016305.