

多線プローブによる乱流微細渦の検出

高知大理 佐々浩司 (Koji Sassa)

高知大理院 松永修二 (Shuji Matsunaga)

1. はじめに

乱流の基本構成要素として注目されている乱流微細渦は主として DNS による研究 (Yamamoto and Hosokawa 1988, Vincent and Maneguzzi 1991) が進められてきた。さらに乱流本来の普遍性を有する十分レイノルズ数の高い乱流場も模擬可能となりつつある。しかし、そこから得られる莫大なデータは解析そのものを困難とするため、微細渦の研究は比較的低レイノルズ数の数値乱流場 (Kida and Miura 1998, Tanahashi et al. 1999) で行われることが多い。最もレイノルズ数の高い $R_\lambda \sim 170$ の乱流場 (Jiménez et al. 1993) においてもそのスペクトル分布中に明確な慣性小領域は認められず、微細渦が乱流場の普遍構造と成り得るかどうか検証が待たれる。一方、実験では可視化手法による定性的なもの (Maurer et al. 1994) を除いて微細渦が見い出された例はほとんど無い。

本研究は、高レイノルズ数乱流中における乱流微細渦の実験的解明を目的とするものである。ここではまず、動的乱流発生装置を用いて風洞中に実現した高レイノルズ数乱流場中で多線プローブを用いた瞬間速度場の計測を行い、瞬間速度勾配の分布などを求めて微細渦検出の可能性について調べた。

2. 実験

実験は測定部の断面が $350\text{mm} \times 450\text{mm}$ の小型風洞で行った。本風洞は測定部上流に設置した動的乱流発生装置 (Makita and Sassa 1991) により、強い乱れを誘起することができる。格子サイズは $M=25\text{mm}$ である。熱線プローブは図 1 に示すように 21 本の I 型プローブを格子状に配置したものを自作した。長さ 0.5mm 、直径 $2.5\mu\text{m}$ のタングステン線を溶接した各プローブの間隔は 1mm である。

プローブ全体でも市販の I プローブよりわずかに大きい程度であり、流れを大きく妨げることはない。各チャンネルのブリッジ出力は 16bit A/D コンバータによりサンプリング周波数 10kHz で取り込まれコンピュータ内で線形化処理された。今回は中

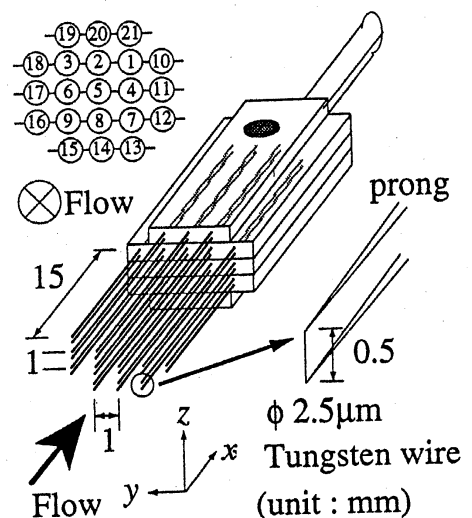


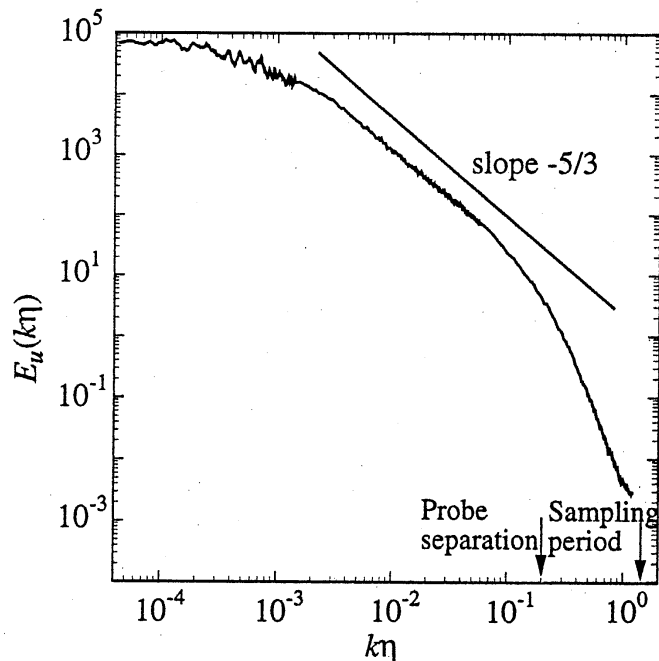
図 1 多線プローブ

央部 9 本のセンサーから得られた結果についてのみ解析した。

3. 乱流場

実験は平均風速 $U=5\text{m/s}$ で行った。このとき計測位置の $X/M=80$ においては、主流乱流強度 13.6%、Taylor マイクロスケール $\lambda_g=7.3\text{mm}$ 、乱流レイノルズ数 $R_\lambda=289$ の乱流場が形成される。図 2 に主流方向速度成分の 1 次元パワースペクトルを示す。スペクトル分布中には 2 桁近い帯域にわたる広い慣性小領域が明確に認められ、本乱流場が十分発達した普遍平衡状態にあることがわかる。図中に矢印で示すように、A/D サンプルング周波数で規定される時間分解能は本乱流場を解析するのに十分であるが、各プローブの空間分解能は

Kolmogorov 散逸スケール η の約 2.5 倍、プローブ間隔は 5 倍に相当している。これらは微細渦を検出する上では、ぎりぎりの分解能である。



4. 結果と考察

ここでは図示しないが、

図 2 パワースペクトル

各センサーの出力波形は9チャンネルいずれもほぼ同じものであり、プローブにより流れ場が変形されていないことが確認された。しかし、高周波の変動は微妙に異なっている。例えば、図3に示す波形では時刻0.54secのCh.4の加速時にCh.5が減速しており、その結果、最下段に示す速度勾配 du/dy には大振幅のスパイク状波形が間欠的に発生するのが認められる。もちろんこれは単なる速度勾配の一成分であり、プローブにより主流方向速度成分 u の分布のみが得られる本実験ではDNSで微細渦の同定に用いられるような速度勾配テンソルの第2不変量は計算できない。このため、任意性はあるものの速度勾配の大きいところをもって高渦度の微細渦が通過したものと判断する。同じCh.4とCh.5の速度勾配波形と

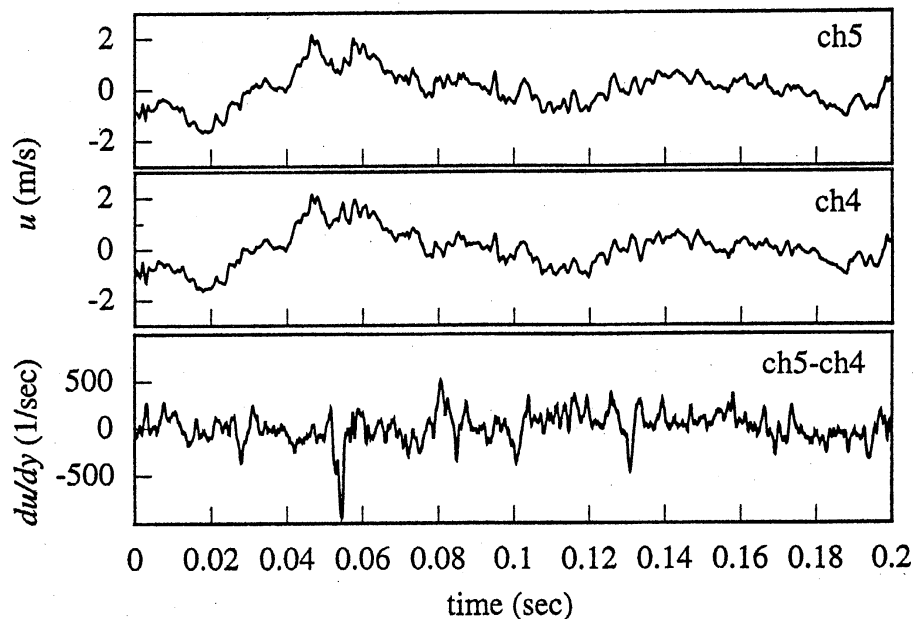


図3 Ch.4,5の速度変動と速度勾配 du/dy の波形

ともに各チャンネルの速度微分 du/dx のウェーブレット解析結果を図4に示す。 du/dy が渦度のみならず、エネルギー散逸にも寄与するのに対し、 du/dx はエネルギー散逸のみに関連している。 du/dx の大きい領域はほぼ $k\eta > 0.05$ の粘性散逸領域に限定されている。また、それらが発生する位相は大振幅の du/dy が現れる位相と必ずしも一致しないものの、 du/dy のスパイク波形は必ずその近傍に du/dx の大きい領域を伴っている。微細渦がエネルギー散逸に大きく寄与することは知られているが、このことは Brachet(1991)や Kida and Ohkitani (1992)の計算結果に見られるように微細渦中心でなくその周辺に高散逸領域を伴っていることを示すものである。

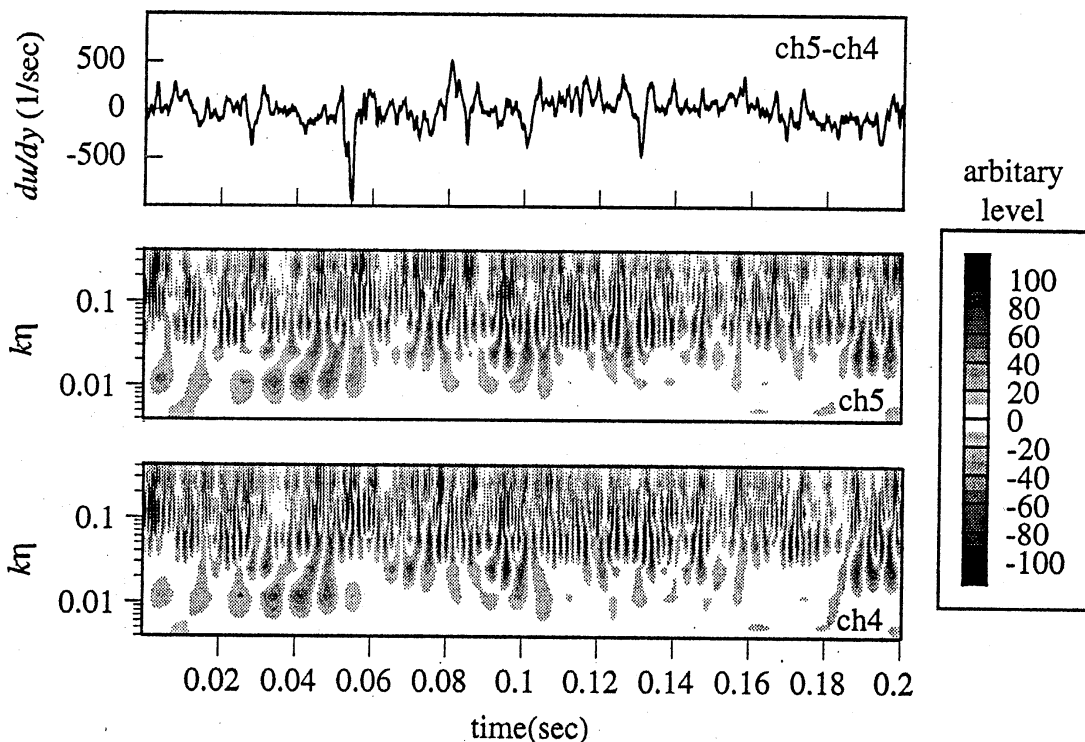


図4 Ch.4,5 の du/dy 波形と du/dx のウェーブレット解析

なお、大振幅の du/dy を伴わない高散逸域は、 du/dz など他方向成分の軸を持った渦に関連するものと考えている。

これら各チャンネルから得られた速度勾配の瞬間分布をまとめた等値線図を図5, 6に示す。速度勾配の大きい領域は必ずしも微細渦の存在を示すものとは思われないような1点のみ局所的に現れるものもあるが、多くは複数のチャンネルに跨る明確な空間的構造を有しており、それらは間欠的に現れている。すなわち、それらがプローブを通過した微細渦を示している。プローブの構造上空間分解能に差を生じること

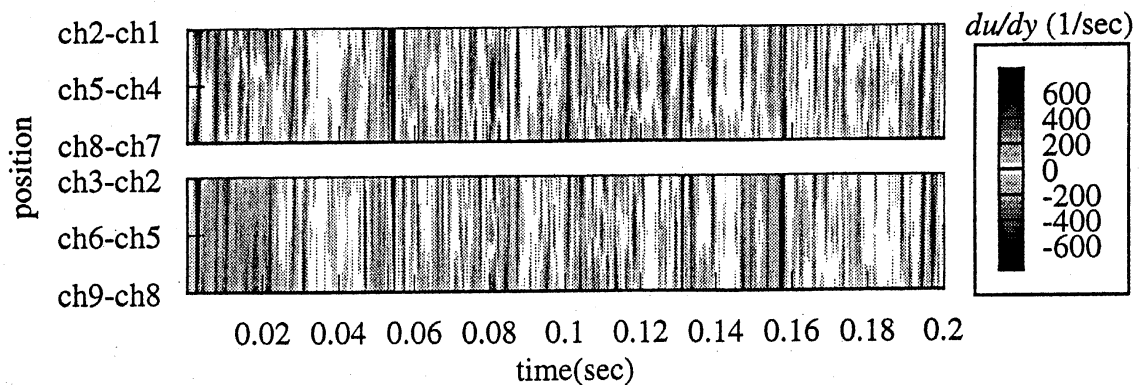


図5 速度勾配 du/dy の等値線図

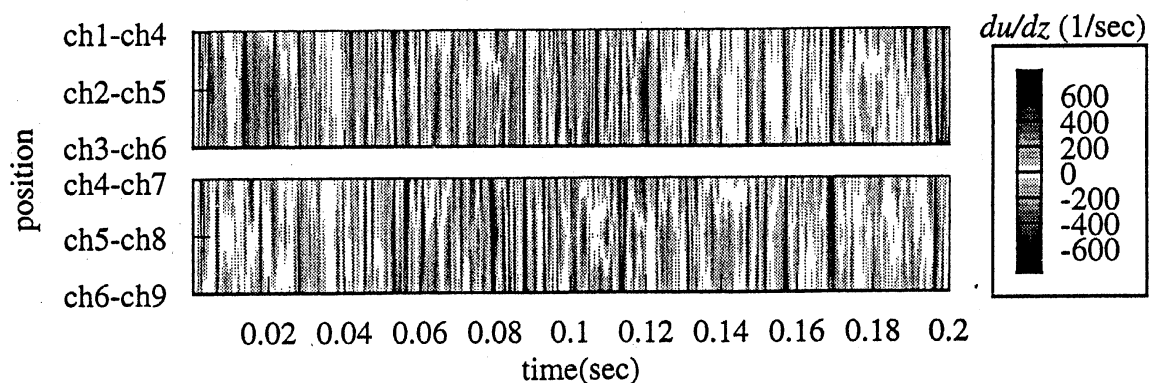


図6 速度勾配 du/dz の等値線図

が懸念されたものの、 du/dx と du/dz の分布にはレベルなど際だった差異は認められなかった。

図 5, 6 に基づき、速度勾配の rms 値の 2 倍を越える大振幅域のみを抽出してプロットしたものが、図 7 である。ここに示すように、乱流場に散布している微細渦の存在が実験によって初めて示された。プローブ分解能には制約を受けるものの、高分解能の時間軸から判断しても微細渦の直径は 10η 程度であり、DNS の結果 (Kida and Miura 1998, Tanahashi et al. 1999) を支持するものであった。ここでも微細渦近傍に du/dx の大きい高散逸領域を伴っていることが明確に示されている。今後、X 型熱線列などを用いた計測により、流れ方向に軸を持つような微細渦を検出すれば積分特性距離程度と言われる微細渦の長さについて知ることができよう。

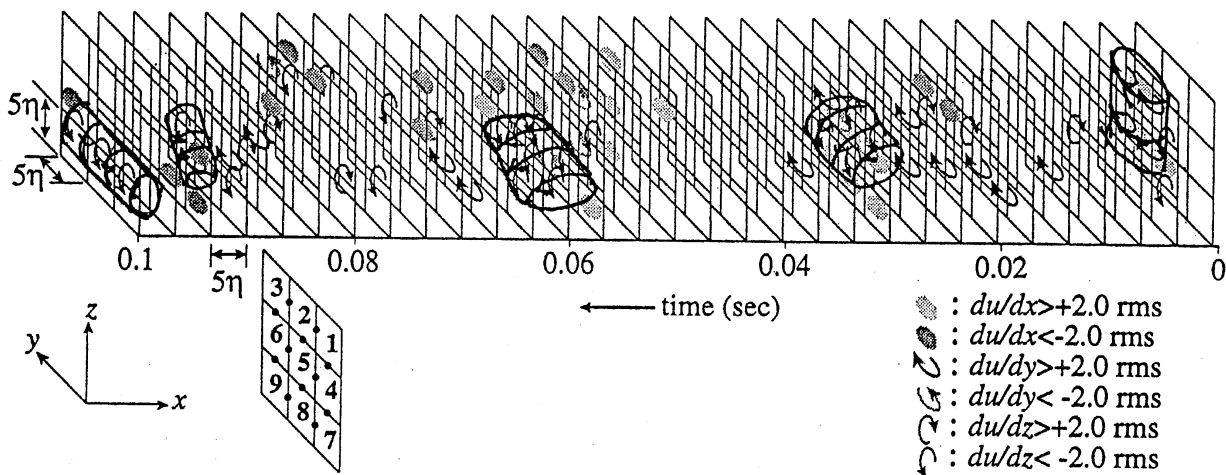


図 7 多線プローブにより検出された微細渦

5. まとめ

多線プローブにより、任意性は含まれるものの乱流微細渦を検出することが可能であることがわかった。その直径はDNSの結果を支持する 10η 程度であった。

本研究の一部は、文部省科学研究費（課題番号 10650180）の補助を受けて行われたものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- M.E. Brachet 1991: *Fluid Dyn. Res.* 8 pp.1
- J. Jiménez, A. A. Wray, P. G. Saffman and R. S. Rogallo 1993: *J. Fluid Mech.*, 255 pp.65.
- S. Kida and K. Ohkitani 1992: *Phys. Fluids* A4(5) pp.1018.
- S. Kida and H. Miura 1998: *J. Phys. Soc. Japan*, 67 pp.2166.
- H. Makita and K. Sassa 1991: *Advances in Turbulence* 3 pp.495.
- J. Maurer, P. Tabeling and G. Zocchi 1994: *Europhys. Lett.*, 67 pp.983.
- M. Tanahashi, T. Miyauchi and J. Ikeda 1999: *IUTAM Symp. on Simulation and Identification of Organized Structures in Flows* pp.131.
- A. Vincent and M. Maneguzzi 1991: *J. Fluid Mech.*, 225 pp.1.
- K. Yamamoto and I. Hosokawa 1988: *J. Phys. Soc. Japan*, 57 pp1532.