

平成21年 6月10日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560169  
 研究課題名（和文） カオス力学に基づく乱流制御への新しい提案—クエット乱流での試み  
 研究課題名（英文） New proposal for turbulence control based on chaos-dynamics -In the case of turbulent Couette flow

研究代表者  
 鬼頭 修己（KITOH OSAMI）  
 名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：10093022

研究成果の概要：クエット乱流の特異な性質（流路中央部に存在する大規模な縦渦とストリーク）を調査した。高速・低速ストリークは流れ方向に長く繋がり、流れ方向波長（40-65）h 横方向の間隔（4-5）h の空間構造をもっていることを明らかにした。縦渦構造を解明するため渦度を測定できる渦度熱線プローブを開発した。渦度プローブの測定精度を確認したあとこれを用いて実験によりクエット乱流中では変動渦度と変動速度の特別な影響の仕方により大規模な縦渦が長く維持されることを示した。乱流制御の検討については現在研究中である。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：乱流，乱流制御，クエット乱流，カオス

## 1. 研究開始当初の背景

壁乱流の制御はその工学的インパクトの大きさからこれまで多くの試みがなされてきた。その多くは、壁面近傍（内層）に発達する壁組織構造（準縦渦，低速ストリーク）を制御あるいは破壊することにより乱れを抑えるという考えに基づいている。しかし、現実にこの考えに基づく制御を実施するのは困難である。制御系を構築するのが難しいとか制御に必要なエネルギーが回収できるエネルギーより大幅に超過するなどの問題があるためである。

最近、カオス力学（力学系）の観点から乱

流を捉える試みが進んでいる。力学系では考えている系のある瞬間の運動状態を相空間での一点で表し、時間とともにその点がどのような軌道を描いたかを調べる。従って流れ場を内層とか外層のように分けるのではなく、系全体を一つのものとして見るのである。乱流ではその軌道が大変複雑に入り組んだカオストラクター（あるいはストレンジアトラクター）と呼ばれるものになっている。さらに運動の自由度が無限に近いことから現実の乱流の軌道を描くことは極めて特殊な場合を除いて困難である。

クエット乱流の最近の研究からカオスアトラクターのふるまいに関連すると思われる以下の二つの報告がなされた。

(i) ミニマルクエット乱流という幾何学的に狭い空間に制限された領域でDNSによりクエット乱流を生成した流れを用いてKawahara & Kida (JFM, 2001) はカオスアトラクターの中にあると予測されている周期解の二つを具体的に示した。その一つは大きな乱れを伴う解で他の一つは乱れの小さな静穏解である。二つの周期解を分けている領域に軌道が近づいたとき、軌道が静穏解に吸引されるようにわずかな攪乱を与えるとその後の乱流は乱れの小さいものになる。河原は計算機上でそのような制御が可能であることを示した(京大数理研講究録 1454, 2005)。

(ii) クエット乱流の実験において、流路入り口から十分下流で完全に発達したクエット乱流が得られる。この完全発達したクエット乱流の平均速度分布など統計平均量が、流路入り口のわずかな攪乱の有無により大きく影響を受けることが Kitoh et al. (JFM, 2005) によって報告された。具体的には、攪乱が原因となって完全発達領域のコア部に準定常大規模縦渦が誘起され、これにより異なった種類の完全発達流が現れる。この報告ではこの現象とカオスアトラクターとの関連について述べられていないが、統計平均量が異なればそのカオスアトラクターも異なっていると考えるのは自然である。よって、流路入り口においてある特定の微小攪乱により特定のカオスアトラクターを選択することが可能であることを予見させる結果とみることができる。

## 2. 研究の目的

本研究では (ii)で報告された流路入り口の攪乱に対する完全発達流の依存性をカオス的な乱流制御法の一つと位置づけ以下の点について明らかにする。

(a)クエット流路入り口での攪乱が下流でどのように準定常縦渦に発達するのか、(b) 準定常縦渦に発達するために必要な平均速度とかく乱の条件は何か、(c) 系統的に攪乱の波数を変化させた場合、下流に現れる完全発達クエット乱流(カオスアトラクター)が何種類あるか、(d) 異なるカオスアトラクター間の性質の違い(フラクタル次元などによる調査)は何か。

これらの結果を総合して、クエット乱流において入口攪乱の有無が下流域での流れの変化をもたらすことがカオス力学にもとづく乱流制御であると結論できるか、そうであればそれを可能にするための条件は何かを明らかにする。

上に述べたように、これまでの乱流制御とは異なってカオス的な制御法は流れ場全体を制御対象としてとらえ、制御として特定の構造にターゲットを絞ることはない。さらにこの方法の大きな特徴は、制御に必要な操作は微小攪乱のみでありそれに必要なエネルギーは一般に極めて小さいので、これが可能になればその工学的意義は大変大きい。(i), (ii)で紹介した報告の内容が実際のクエット乱流での乱流制御法として具体化されるのか、また他の壁乱流の制御法として適用できるのかについては現段階では分からない。河原はチャンネル乱流においてもクエット乱流と同様不安定周期解が発見され同様の制御の可能性があると述べている(京大数理研講究録 1454, 2005)。

(i)で紹介した研究は狭い領域に制限された乱流を対象としたもので、これに類似した研究は低自由度の力学系の制御も含めこれまでいくつか、例えば Ott et al. (Phys. Rev. Lett., 1990)報告されている。狭い領域に制限した乱流を対象とする研究手法は、理論的な考察が比較的容易で明確な結論を得られる特徴があるが、実在の無限自由度に近い乱流場とのギャップが非常に大きいという問題がある。

本研究は実在のクエット乱流を研究対象としてカオス力学的制御法の可能性を調査するものでこれまでの(i)の研究手法(比較的低い自由度の計算機実験)とは異なる。クエット乱流の入口攪乱依存性(報告(ii))をカオス的制御法に結びつけた点に本研究の独創性がある。実験的に調査するため(i)の手法に比べ理論的な考察が難しいが、実在の乱流を対象としているためこれまでの研究結果とは異なった切り口の結論が得られる。

## 3. 研究の方法

(i) クエット乱流中の大規模構造の特性調査

流路入り口における微小攪乱により十分下流においてコア領域に現われる大規模構造(縦渦, ストリーク)に大きな影響があることが示されている。このためコア領域に現われる大規模構造(縦渦, ストリーク)特性を調査する。具体的には以下の手順で行う。

① 流路中央断面において低速・高速ストリークの空間構造を解明する。このため16チャンネルのマルチ熱線計測によりストリークの揺らぎをとらえ、これをウエーブレット分析することにより特異な空間構造を抽出しストリーク特性を解明する。

② クエット乱流ではコア部に大規模縦渦がなぜ維持されるか、その機構を解明する。機構解明には渦度の輸送方程式を基礎として考察する。渦度輸送方程式の主要な項として変動渦度・変動速度相関項がある。この項を測定するためには変動渦度と変動速度の同

時測定が不可欠である。そこで渦度プローブ（4-X型熱線プローブ方式）を開発し、その測定精度のチェックをポアズイユ乱流を用いて行う。渦発生器によりコア部に縦渦を人為的に導入したクエット乱流とポアズイユ乱流を比較すると、クエット乱流では渦が下流まで維持されるがポアズイユ乱流では急速に減衰することが分かっている。この性質を用いて、クエット乱流において渦度プローブによる変動渦度・変動速度相関を測定し、縦渦の維持機構を渦度輸送方程式に基づいて明らかにする

(ii) 縦渦の下流への発達過程

クエット乱流の流路入口に攪乱を与え、攪乱の下流への縦渦への発達状況を種々の断面での平均速度分布測定から確認する。比較対照としてチャンネル乱流の場合も測定。縦渦への発達状況結果から適当な数断面を選び、そこでの変動速度・変動渦度相関、レイノルズ応力を渦度プローブにより測定。測定結果を渦度輸送方程式、レイノルズ応力輸送方程式、乱れ運動エネルギー式に摘要し、縦渦生成の機構、運動エネルギー的な考察、力学的な考察により攪乱の縦渦への発展過程を解明する。比較対照のチャンネル乱流（この場合攪乱は減衰）の結果と比較することにより、平均速度、乱れ強さ分布のどのような特性が攪乱を縦渦に発達させるかを明らかにする。

(iii) 流路入口での微小攪乱の下流への発達

流路入口攪乱が異なれば、下流に現れる発達乱流の速度分布も異なると予想される。ここでは攪乱のспан方向周期攪乱の波数を系統的に変化させ、波数変化と攪乱の下流への発達状況、完全発達流の速度分布への影響を調べる。縦渦はспан方向に並んで存在しているので予想としては、縦渦のспан方向波数  $k_v$  と攪乱の波数  $k_d$  の比が整数の場合に強い縦渦が発達すると考えられる。よって、攪乱の波数によって下流に発達する縦渦、すなわち流れを制御できる可能性があるかと予想される。縦渦の存在により、壁面摩擦力がспан方向に周期的に20%程度変化することがすでにこれまでの結果から分かっている Kitoh et al. (JFM, 2005)。入口攪乱の選択により、より強い縦渦を生成できれば、さらに大きな壁面摩擦力あるいは壁面からの伝熱量のспан方向変化が現れ、工学的な応用が期待できる。

(iv) 攪乱波数の影響と等速度点集合のフラクタル次元による調査

流路入口条件により流路下流に異なる完全発達乱流が現れるが、そのカオストラクターがどのように異なっているかを調査す

る。一般に実在の乱流のカオストラクターを描くことは極めて困難である。従って、間接的な手法でその特徴を表現する必要がある。Sreenivasan (Ann. Rev. Fluid Mech., 1991) は一点における時系列速度の等速度点集合のフラクタル次元を用いて乱れ特性を表現した。このフラクタル次元は、カオストラクターのフラクタル構造のある側面を反映していると考えられる。よって、ここでは熱線流速計により計測した速度の等速度点集合のフラクタル次元を計測することにより、カオストラクターの特性の変化を調べ、ここで対象としている流れの制御がカオス力学に基づく制御法であるか調査する。

4. 研究成果

(i) クエット乱流中での大規模ストリーク空間構造の解明

上図は実験で用いた装置の概略である。十分に発達した断面 ( $x_1=240h$ ) においてスモー

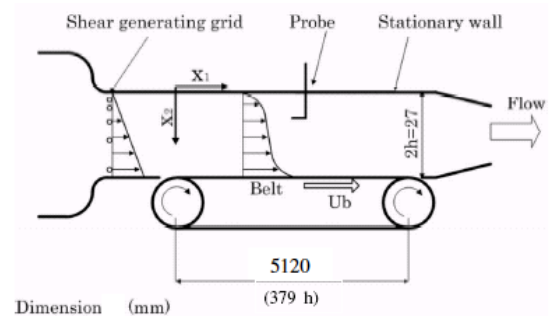
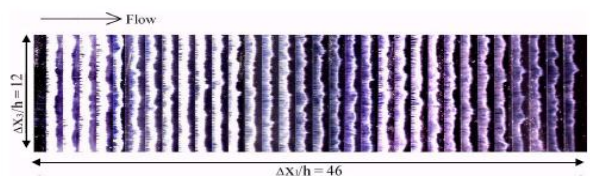


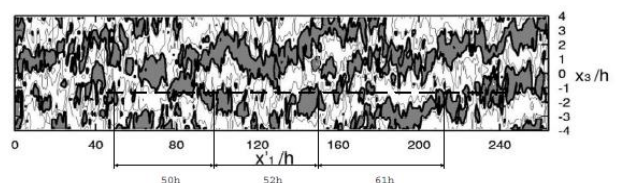
FIG. 1. Experimental apparatus and coordinate system.

クワイヤによる可視化法と16チャンネルI型熱線による流れ方向速度を測定した。下図はスモークワイヤによる可視化例を示す。32本のスモークワイヤによる流れ方向速度のタイムラインが示されている。このタイムラインから流れ方向速度変動の  $x-z$  面内分布が得られ、これより低速・高速ストリークの空間構造が得られる。ただし、可視化範囲が狭いため大規模構造を解明するには十分とはいえない。

下図は多チャンネルI型熱線による計測結果から得られた低速（灰色）および高速（白色）ストリークである。熱線からの時系列データ

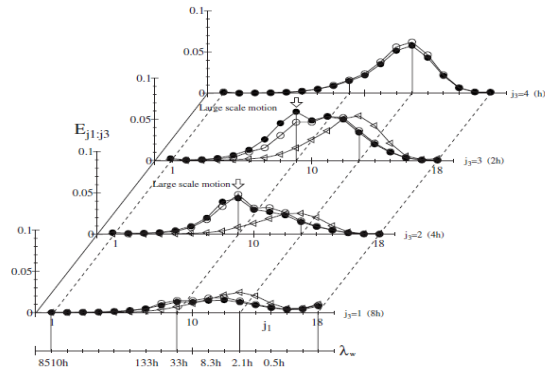


は、凍結乱流仮説により空間データに変換し

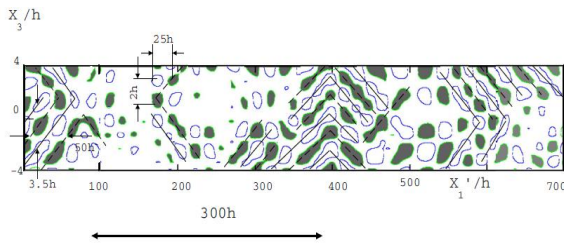


である。熱線データへの凍結乱流仮説適用の有効性はスモークワイヤ結果との比較により確認した。この結果から、クエット乱流中央部に大規模なストリークの構造が明確に見られる。ストリークは流れ方向に対し斜めの構造や波状に変化する構造さらに部分的に全くランダムと思われる領域も見られる。熱線からのデータをウェーブレット分析

(Daubechies 10 ウェーブレット関数) し、ウェーブレットエネルギースペクトルを下図に示す。



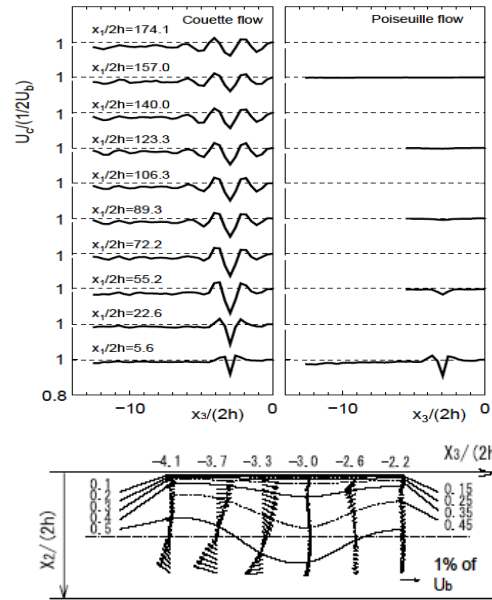
横軸は流れ方向スケールパラメータである。4つの図はそれぞれスパン方向スケールパラメータに対応する。黒丸がクエット乱流、白丸がポアズイユ乱流の結果である。エネルギーの高いパラメータの成分を用いて再構成して得られたのが以下の図である。



特徴的なストリークの空間構造が明確に示されている。およそ流れ方向に 40h~65h のスケールの構造が非一様に広がっている。この大きな構造はおよそ 300h 程度の空間を隔て繰り返し現われている。

(ii) 大規模縦渦の維持機構の解明

ストリーク構造の存在はそれに対応する大規模縦渦構造の存在を予想させる。以下の図は流路入口に微小攪乱を与えた場合の下流断面におけるスパン方向速度分布を示したものである。クエット乱流では攪乱がスパン方向に広がって波状の分布を示すが、ポアズイユ乱流では攪乱は減衰して消滅している。クエット乱流での速度波状変化の原因は次の図に示すような縦渦の存在によるものであることが分かっている。なぜクエット乱流では縦渦が維持されるかを調べた。そのため 4-x 型熱



線渦度プローブを開発した。下図はポアズイユ乱流の乱れ強さと渦度強さを過去の実験結果・DNS結果と比較したものである。

いずれも両者よく一致しておりこのプロー

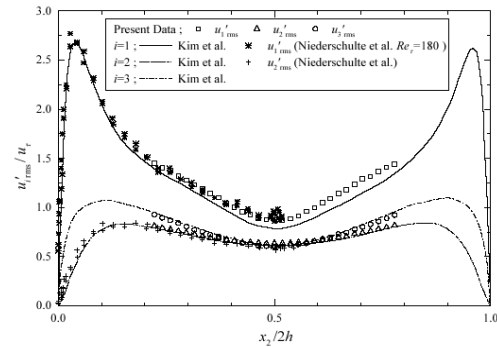


Fig. 6.6: Root-mean-square of velocity fluctuations.

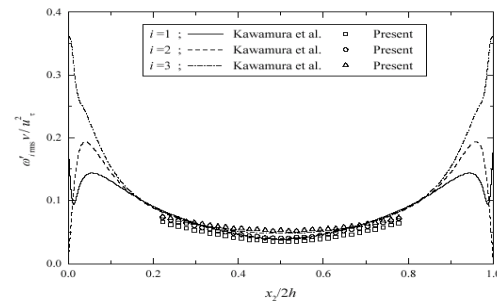
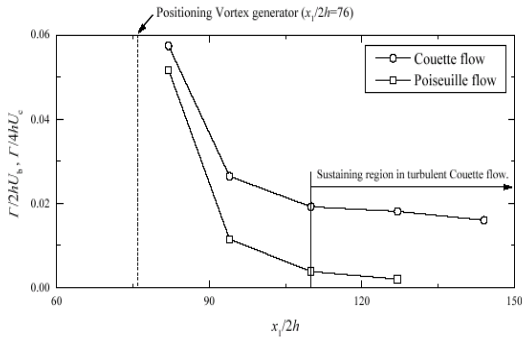


Fig. 6.7: Root-mean-square of vorticity fluctuations.

ブの測定精度が確認された。縦渦の維持機構を調べるため、流路途中に人工的に渦発生器により縦渦を導入しその維持の様子を渦度プローブにて調査した。以下の図は導入した縦渦の循環値の下流への変化の様子である。ポアズイユ乱流 (□) は急速に減衰し零になっている。これに対しクエット乱流 (○) では急減のあとほぼ一定に保たれ渦が維持されていることが分かる。

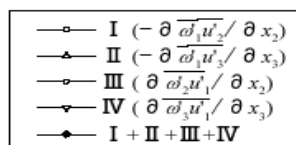
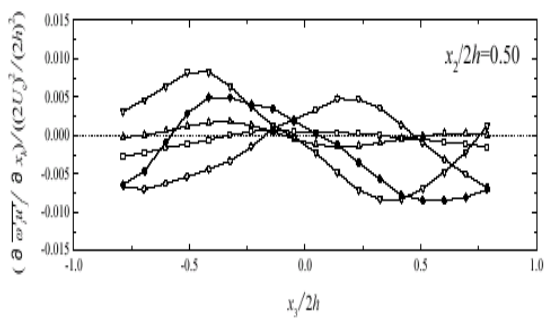




二つの流れに対し、以下の流れ方向渦度輸送

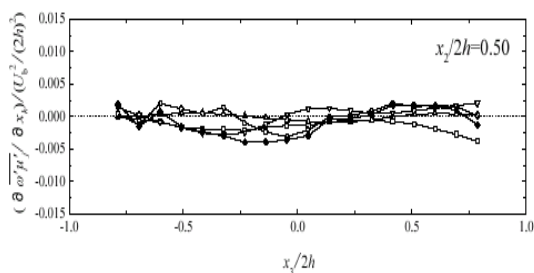
$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{\omega}_1}{\partial x_j} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_2} (-\bar{\omega}'_1 \bar{u}'_2)}_{\text{I}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_3} (-\bar{\omega}'_1 \bar{u}'_3)}_{\text{II}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_2} \bar{\omega}'_2 \bar{u}'_1}_{\text{III}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_3} \bar{\omega}'_3 \bar{u}'_1}_{\text{IV}}$$

方程式右辺各項を測定し比較した。それによるとポアズイユ乱流では以下に示すようにⅡ項（乱れ輸送）とⅢ、Ⅳ項（テイルテイング）により渦度が減衰することが分かった。



一方クエット乱流では以下の図で示すようにいずれの項も非常に小さく渦の減衰作用がほとんどないため渦が維持されることが分かった。

(iii) 流路入口での微小攪乱の下流への発達



現在研究継続中である。

(iv) 攪乱波数の影響と等速度点集合のフラクタル次元による調査  
現在研究継続中である。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

O. Kitoh and M. Umeki, Experimental study on large-scale streak structure in the core region of turbulent plane Couette flow, Physics of Fluids, 査読有, 20, 2008, 025107-1-11.

[学会発表] (計 1 件)

佐藤由隆, 鬼頭修己, 牛島達夫, 渦度プローブによる平行平板間クエット乱流中における大規模縦渦維持機構の解明, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2007年11月17, 18日, 広島大学.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

鬼頭 修己 (KITOH OSAMI),  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・  
教授, 10093022

(2) 研究分担者

牛島 達夫 (USHIJIMA TATSUO),  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・  
助教, 50314076

(3) 連携研究者