

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 1 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560161

研究課題名（和文）壁せん断乱流実験での線形攪乱モードの探索とそれに基づく構造と統計量の橋渡し

研究課題名（英文）Exploration of the linear disturbance modes in a wall-bounded turbulent shear flow and bridging the gap between their structures and the turbulent statistics

研究代表者

松原 雅春 (MATSUBARA MASAHARU)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：10324229

研究成果の概要（和文）：周期攪乱の発達と秩序構造との関連を調べるため、試験平板に埋め込まれた小型のスピーカーにより初期攪乱を発生させ、計測した流速をアンサンブル平均することにより、励起した周期攪乱を抽出した。小さい初期攪乱振幅の範囲では、励起された攪乱の強さが初期攪乱振幅と比例しており、強い非線形現象である乱流境界層の中に線形攪乱が存在していること、その構造が乱流中の秩序構造の一つであるヘアピン渦と似ていることが明らかとなった。この線形攪乱は攪乱方程式に基づく理論的な解析が容易にし、そのことが乱流構造から乱流統計値への橋渡しとなり、乱流の解明につながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, artificial pulse jet disturbance from to a wall surface is introduced to a flat-plate turbulent boundary layer using a small speaker and development of the disturbance was investigated using hot wire anemometry. The velocity signals were ensemble-averaged with phase of the initial disturbance. This averaging enables extraction of disturbance components related to the artificial disturbance. The result shows that their disturbance structure does not depend on strength of the initial disturbance and that amplitude of these disturbances are proportional to that of the initial disturbance. This is evidence that there exist linear disturbances in a turbulent boundary layer. This linear disturbance would be greatly utilized in analysis and prediction of turbulence statistics in not only the turbulent jet but also wide-ranging turbulent shear flows.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流

1. 研究開始当初の背景
近年申請者は、強い非線形現象のひとつであ

る乱流において線形攪乱モードを実験で発見した。このモードは平均流の大きさに相当

する強い振幅になるまで線形性を維持しており、非線形振幅でも攪乱構造はほとんど変化しない。攪乱方程式からみると、この線形モードが存在する条件は他の攪乱との非線形項がモードの振幅に比例することが唯一の条件であるため、どの乱流場でも線形モードが普遍的に存在していると考えられる。非線形振幅まで攪乱構造が維持されることから、十分発達したこのモードが条件抽出法などで観察される乱流の攪乱構造を表していると推察できる。本研究の目的は、この線形攪乱モードとその時間発達過程を壁乱流において実験的に定量化し、攪乱構造と乱流統計量を直接結びつけることである。具体的には、乱流場として平板境界層乱流と円管パイプ乱流に初期攪乱を導入し、多点センサーを用いた測定量をその初期攪乱を基準にしてアンサンブル(繰返し)平均することにより線形攪乱モードを抽出する。さらに、実験を高レイノルズ数範囲に広げ、このモードの普遍性についても考察する。モードの時間発展を重ね合わせにより解析することで乱流統計量を直接導きだすことが、研究期間内での最終目標である。乱流解析においてこの線形攪乱モードの有用性が明らかとなれば、乱流の解釈についての大きな前進となると考えられる。

近年の計算機の性能や計測技術の急速な向上により、不足していた乱流の速度場の情報が急増し、一様乱流やせん断乱流中の攪乱構造の詳細についても明らかになりつつある。しかし攪乱構造の時間発展を追跡することは乱流中の他の強い攪乱が存在するため容易ではなく、そのことが攪乱構造と流れ場の統計量との関連付けに大きな障害となっている。もしそれらの橋渡しをすることができれば乱流に対する理解が飛躍的に向上すると思われる。

本研究では、初期攪乱を導入して得られた速度・圧力場をアンサンブル平均することでせん断乱流中に存在する線形攪乱モードを抽出し、そこから乱流統計量を導出することを目的とする。

乱流噴流中の線形攪乱モードは、近年申請者によって明らかになりつつある。このモードは本研究の本質にかかわる重要な現象なので、すこし長くなるが説明する。噴流の噴出口が十分発達した二次元チャンネル乱流の場合、噴流は初めから乱流で、噴流内の速度場には卓越した周波数ピークが存在しない。しかし、噴出口に強い二次元周期攪乱を人工初期攪乱として入れると、横方向に噴流が振動するフラッターリングが速度変動スペクトル中の卓越周波数とともに観察される。初期攪乱を弱くしていくと乱流の連続スペクトルに埋没しスペクトル卓越周波数は見られなくなり、時間平均量を加えた流れ場で

はフラッターリングが直接観察できなくなる。しかし、その場合も攪乱周期に同期してアンサンブル平均を行うと、フラッターリングと同じ構造の攪乱成分が抽出できる。驚くことに初期攪乱が弱い範囲では、攪乱振幅は初期攪乱に比例しており、その流れ方向の成長曲線は減衰過程も含め初期攪乱振幅によらずよく一致している。これは乱流中に線形的性質をもつ攪乱モードの存在を示している。また、攪乱振幅が非線形性を示すほど大きい場合でも、その攪乱構造は線形振幅の場合とほとんど変化していない。フラッターリングの性質を持つ線形攪乱モードは別の周波数でも存在し、非線形振幅でも構造を維持することから、噴流乱流における大規模な横方向二次元振動はある周波数帯に広がったこの線形攪乱モードの重ね合わせと見なすことができる。ここで攪乱モードの線形性について誤解されるかもしれないが、この線形攪乱モードは他の攪乱と相互作用をしており、その意味で非線形的な力学系での攪乱モードである。しかし、その非線形の影響がこの攪乱モードの振幅に比例しており、振幅がある程度小さい場合は線形的な性質をもつということである。このことは運動方程式からも言える。まず、速度成分 u_i の時間平均 U_i 、初期攪乱に同期する規則変動としてのアンサンブル平均から平均量を引いた量 $\tilde{u}_i = \langle u_i \rangle - U_i$ 、初期攪乱に対して不規則変動であるそれ以外の変動成分 $\hat{u}_i = u_i - \langle u_i \rangle$ とすると、速度成分 u_i は $u_i = U_i + \tilde{u}_i + \hat{u}_i$ のように分解できる。ここで $\langle \rangle$ はアンサンブル平均を表す。この三成分分解をナビアーストークス方程式に代入すると \tilde{u}_i に対する攪乱方程式

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + U_m \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_m} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_m \partial x_m} - \tilde{u}_m \frac{\partial U_i}{\partial x_m} - \frac{\partial}{\partial x_m} \widetilde{\tilde{u}_i \tilde{u}_m} - \frac{\partial}{\partial x_m} \widetilde{\hat{u}_i \hat{u}_m}$$

が導ける。これら各項を評価してみる。実験結果から規則変動と不規則変動との非線形項である右辺最後項を見積もると、規則変動攪乱の振幅にほぼ比例していることが確かめられている。右辺の4番目の項は規則変動攪乱自身の非線形項で、この項は規則変動攪乱の振幅が小さいうちは無視できるので、攪乱方程式からも線形攪乱モードが成立することがわかる。さらに、実験結果から各項を見積もると非線形項に比べ線形項が支配的であり、そのことから非線形振幅でも構造変化が小さいことが理解できる。

この乱流中の線形攪乱モードは、初期攪乱による規則変動と不規則変動との相互作用を表す非線形項が規則変動攪乱の振幅に比

例すれば存在するので、他の乱流場に対しても存在すると考えられる。乱流構造を決める攪乱が自己に対しても非線形性を持つ場合でも、その発達段階で振幅が十分小さい間は線形的に扱える。また発達段階がなく初めから非線形攪乱であっても、それを励起させた初期攪乱が小さい場合を仮定することで、ほぼ同じ構造の線形攪乱モードを決定できる。よって、この線形攪乱モードは乱流中の攪乱構造の性質を表していると言える。

2. 研究の目的

本研究では、乱流噴流内での線形攪乱モードを抽出した方法を壁せん断乱流に適用し、従来言われてきた壁近傍の攪乱構造に対応する線形攪乱モードの構造とその時間発展を実験的に定量化する。このモードの一般性を確認するため、平板境界層流と円形パイプ流の二つのせん断乱流場に対し広いレイノルズ数範囲での実験を行う。さらに、このモードを用いて乱流解析を数値的に行い、そこから乱流統計量との関係を定式化することを試みる。

3. 研究の方法

本実験では回流型の風洞を用いた。試験部は幅 400 mm、高さ 600 mm、長さ 4350 mm である。試験平板は先端がノズル出口より 1510 mm 下流に鉛直に設置されており、座標原点を攪乱孔真上にとり、流れ方向を x 、壁面垂直方向を y 、スパン方向を z とする。また乱流への遷移を促進するために“V”字に印字したテープを平板上のリーディングエッジから 320~410mm の範囲に 5 枚張った。実験平板上のリーディングエッジから 1500 mm の位置に直径 1:0 mm の小孔が開いており、直径 2:5 mm、長さ 6:0 mm の管を通り小型のスピーカーと繋がっている。このスピーカーにサイン状の周期的な電圧を印加することで壁に垂直な方向の噴流を発生させた。ここでは、このスピーカーに与える電圧振幅が初期攪乱の強さに比例しているものとして、攪乱強さの基準として用いた。本研究のように初期攪乱を周期的に発生させた場合速度成分が周期性を持つ。そこで、初期攪乱の位相に基づいて周期ごとにアンサンブル平均することで、周期平均した $\langle u \rangle$ が求まる。この値から周期変動速度 $\tilde{u} = \langle u \rangle - u$ 、非周期変動速度を $\hat{u} = u - \langle u \rangle$ と定義できる。この周期変動速度を用いて重要な周期成分を取り出すことができる。

4. 研究成果

図 1 に初期攪乱周波数が 200 Hz のときの初期攪乱の電圧振幅と周期成分の関係を示す。この値は $x = 10$ mm、 $y = 0.7$ mm の点で

得られた周期変動成分の二乗平均平方根の値である。横軸に初期攪乱の強さをとり縦軸に周期変動成分をとって直線近似とともに示す。初期攪乱振幅が 0:06 V 付近までは初期攪乱振幅が強くなると抽出された攪乱も線形的に変化している。しかし、それ以上強い初期攪乱振幅になると抽出された周期成分の値は初期攪乱振幅に対して線形な関係ではなくなり、直線近似からそれていく。このことから、乱流境界層に弱い初期攪乱を与えた場合その強さに応じた線形的な性質を持つ攪乱が存在していることが明らかとなった。

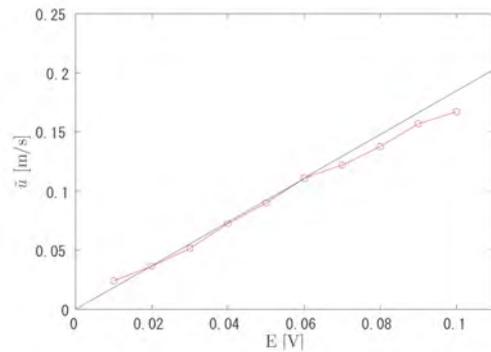


図 1 初期攪乱強さと攪乱振幅の関係

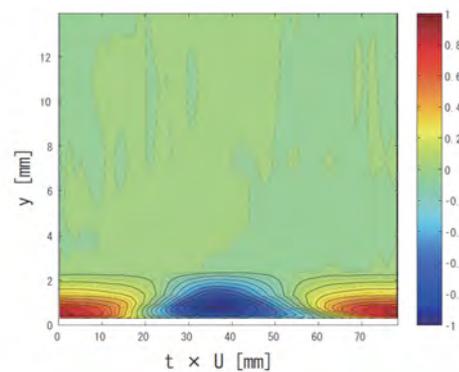


図 2 周期変動振幅 \tilde{u} の等高線図。 $x = 2$ mm、等高線間隔 0.1 m/s。

図 2 は初期攪乱周波数が 200 Hz、初期攪乱振幅が 0:06V の時の $x = 2$ mm、 $z = 0$ mm 上での周期変動成分の $y - t$ 分布である。横軸は主流流速をかけることで長さスケールに変換している。この図から低速ピークと高速ピークが交互に同じくらいの強度を持って分布しており、さらにピークの位置はお互いにおよそ 40 mm 間隔で $y = 1$ mm の高さに分布している。これはサイン状の電圧を印加したためであると考えられる。図 3 に攪乱孔より下流 $x = 50$ mm の点で計測した結果を

示す。全体的にピークの値は弱くなっているものの先ほどと同様にほぼ 40 mm 間隔で低速ピークと高速ピークが存在しており、この地点でも初期攪乱により励起された攪乱が確認できる。また、ピークの範囲が $y = 8$ mm 付近にまで表れており初期攪乱によって励起された攪乱が主流側に広がっている。図. 4 にはさらに下流の $x = 100$ mm の結果を示す。先ほどと同様に値は弱くなっているもののピークの位置などの特徴から励起した攪乱を追えているものと考えられる。壁近くの値に近い値が非常に高い範囲の境界層厚さ付近にまで及んでいる。図. 5 は $x = 50$ mm における壁からの高さが 3 mm 付近での $z - t$ 断面である。中央のピークの値は 8 mm 程の幅を持ち、そのすぐ外側に逆の速度が存在していることからその間に渦軸が存在しているのではないかとと思われる。これらの結果から、この励起された攪乱のスケールを粘性長さスケール 1 ($= \nu / u$) を用いて無次元化すると、 $x^+ = 2270$, $y^+ = 410$, $z^+ = 180$ であり、Adrian ら(1)により示されたヘアピン渦とほぼ同じスケールである。このことから、ヘアピン渦と同じスケールを持つ攪乱を励起できているのではないかと考えられる。

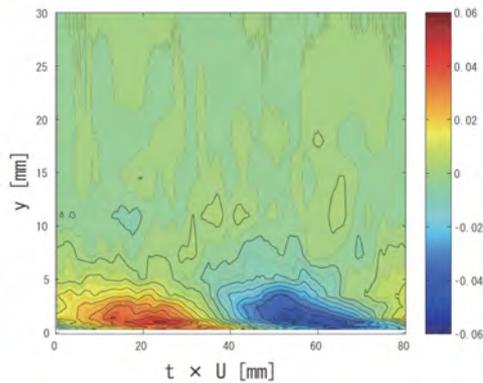


図 3 周期変動振幅 \tilde{u} の等高線図. $x = 50$ mm, 等高線間隔 0.006 m/s.

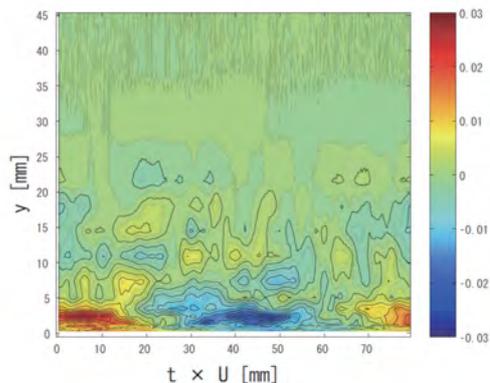


図 4 周期変動振幅 \tilde{u} の等高線図. $x = 100$ mm, 等高線間隔 0.005 m/s.

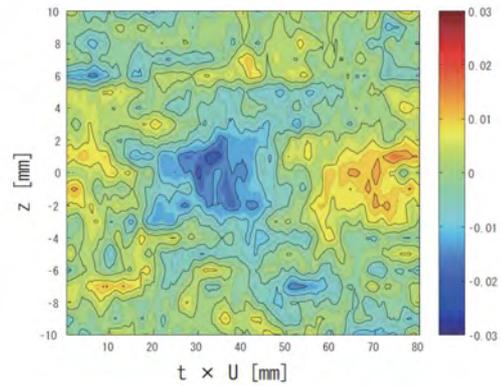


図 5 周期変動振幅 \tilde{u} の等高線図. $x = 50$ mm, 等高線間隔 0.005 m/s.

乱流境界層内に小さい初期攪乱振幅の噴流攪乱を挿入することで、初期攪乱の強さと抽出された周期成分との間に比例関係が存在していることが判明した。このことから、強い非線形現象である乱流境界層の中に線形的な性質を持つ攪乱が存在していることがわかった。さらにその励起された攪乱が下流に行くに従い壁から離れた範囲にまで達している様子を捉えることができた。この手法を用いることで励起した攪乱を壁近くだけでなく主流近くまで観察でき、この線形攪乱が乱流地中に存在している秩序構造と関連しているならば、この攪乱の成長を追うことで乱流境界層全体を説明することが可能ではないかと考えられる。

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)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 松本幸之輔, 長崎将成, 松原雅春, 平坂乱流境界層内での線形攪乱の構造について, 日本機械学会北陸信越支部第 50 期総会・講演会, 2013, 3, 9, 福井
- ② Masaharu Matsubara, Yasuyuki Sendai, Konosuke Matsumoto and Taiki Mishiba, Influence of tripping on spatiotemporal correlation between velocity and wall pressure in a turbulent boundary layer, iTi CONFERENCE ON TURBULENCE V, 2012, 10, 2, Bertinoro, Italy.
- ③ Konosuke Matsumoto, Taiki Mishiba, Yasuyuki Sendai and Masaharu Matsubara, Experimental Study of Linear Disturbance in a Turbulent Boundary Layer, Ninth International Conference on Flow Dynamics, 2012, 9, 20, Sendai.
- ④ Kounosuke Matsumoto, Yasuyuki Sendai,

Taiki Mishiba, Masaharu Matsubara,
Linear Disturbance Excited by a Finite
Initial Disturbance in a Turbulent
Boundary Layer, Eighth International
Conference on Flow Dynamics,
2011, 11, 10, Sendai.

- ⑤ 松本幸之輔, 松原雅春, 乱流境界層における壁からのパルス噴流により励起された攪乱の成長と線形性について, 日本流体力学会学会年会 2011, 2011, 9, 8, 東京・八王子
- ⑥ 三柴大輝, 仙台康之, 松本幸之輔, 松原雅春, 周期パルス加熱式熱線を用いた乱流測境界層計測, 日本流体力学会学会年会 2011, 2011, 9, 7, 東京・八王子
- ⑦ Yasuyuki Sendai, Masaharu Matsubara, Influence of Tripping on Spatiotemporal Correlation Between Velocity and Wall Pressure in a Turbulent Boundary Layer, Seventh International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomema, 2011, 7, 29, Ottawa, Canada.
- ⑧ 仙台康之, 松本幸之輔, 松原雅春, 平板乱流境界層におけるトリッピングの影響, 日本流体力学会年会 2010, 2010, 9, 9, 札幌

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松原 雅春 (MATSUBARA MASAHARU)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：103244229