

高レイノルズ数乱流境界層の実験

福西 祐* 小濱 泰昭* 小林 陵二*

Experiment on a High Reynolds Number Turbulent Boundary Layer

by

Yu FUKUNISHI, Yasuaki KOHAMA and Ryoji KOBAYASHI

Faculty of Engineering, Tohoku University

ABSTRACT

A smooth roof of a high-speed train was used to investigate turbulent boundary layers at high Reynolds number. 19 hot-wire probes were used simultaneously to obtain data. Conditional sampling technique was applied to the data in order to investigate the features of coherent structures in turbulent boundary layers at high Reynolds numbers.

Keywords: coherent structure, turbulent boundary layer, high Reynolds number, conditional sampling technique

1. ま え が き

乱流境界層中に秩序運動あるいは組織的構造と呼ばれる一定のパターンを持った運動が見られることは、風洞実験、水槽実験、数値シミュレーション等で研究され、もはや疑う余地がない。そこで次には、偶然性に支配されているはずの乱流中のどこから秩序運動の秩序性が生じるのかという疑問が生まれてくる。秩序運動の構造や規模を決定するのはどのような機構であるのかが説明されなければならないわけである。

ここに、乱流境界層中の秩序運動を研究している研究者の多くが共通して持つ危惧が一つある。それは実験あるいは数値シミュレーションしている流れのレイノルズ数が十分に高いと言えるかという点である。実験においては実験設備の大きさによって、数値計算においては、計算機の性能と計算時間の制約によって扱える流れのレイノルズ

数の上限が自ずと限られてくる。

では、レイノルズ数が十分に高くないということが、秩序運動にどのような関係があるか考えてみる。まず、層流境界層から自然にあるいは人工的に遷移させて作られた乱流境界層の場合、レイノルズ数が十分に高くなければ、その遷移過程で起こった現象のなごりが乱流境界層中に残存している可能性が考えられる。また、レイノルズ数が低いということは、乱流になってはいてもその流れの中の最大の渦と最小の渦のスケールの差が小さいことを意味し、そのような場合、境界層のようなせん断流においては流体小部分の変形が等方的には起こらないことを合わせて考えれば、現在知られているような特定の大きさ・傾きの渦からなる秩序運動が、乱流中に確率的に多く存在してもそれほど不思議ではない。すなわち、秩序運動の存在がレイノルズ数が十分に高くないことに起因している恐れがあるのである。

この疑問に答えるには十分に高いレイノルズ数

* 東北大学工学部

での実験を行えば良いわけであるが、大気境界層のような実験条件がコントロールできない場では高いレイノルズ数は得られなかった。

今回、高速鉄道車両のまわりの流れを測定する機会に恵まれたので、その先頭車両の滑らかな屋根上に発達する境界層を研究の対象として、高レイノルズ数乱流境界層、とくにその中の秩序運動について測定を行った。測定には19本の熱線流速計プローブが用いられ、通常の室内実験と比較して2桁高いレイノルズ数での乱流境界層が調べられた。

2. 測定方法

図1に測定方法を模式的に示す。19本の熱線流速計プローブを支持するサポートは、列車先頭車両の屋根の最後部にあり、サポート全体を上下することで熱線プローブを境界層外に出してキャリブレーションできるようになっている。図2は熱線プローブの配置を示している。列車の屋根の表面に垂直に13本プローブが配置されているが、壁面に近い2本のプローブはそれぞれ平行熱線プローブとなっており、合計15本のシングルセンサーが鉛直方向に並んでいる形となっている。なお壁面を原点として、この鉛直方向をY方向と定めている。

さらにY=120mmの高さには屋根に平行に横に突き出す形でプローブサポートが取り付けられており、そこには4本の熱線プローブが配置されている。図3は測定システムのブロック図を表している。熱線からの信号のAC(変動)成分は10台のDAT(デジタルオーディオテープ装置)に、DC(直流)成分は1チャンネル当たり3kHzで変換を行うA/D変換器を経て車両上のパソコンに取り込まれる。

3. 結果

3.1 速度等の平均分布の測定

秒速75m/sで走行する列車の先頭車両の屋根の長さは25mほどあり、そのレイノルズ数は結果と比較する室内実験¹⁾に比べ2桁ほど高い。図4には境界層内Y方向の風速、乱れ、間欠係数の分布

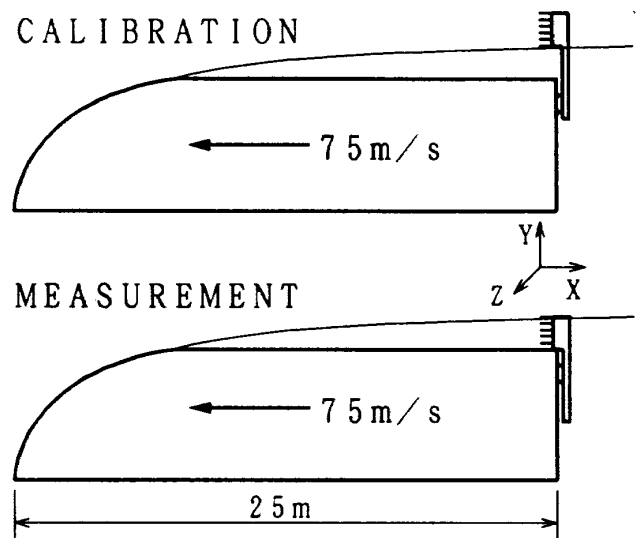


図1 測定方法

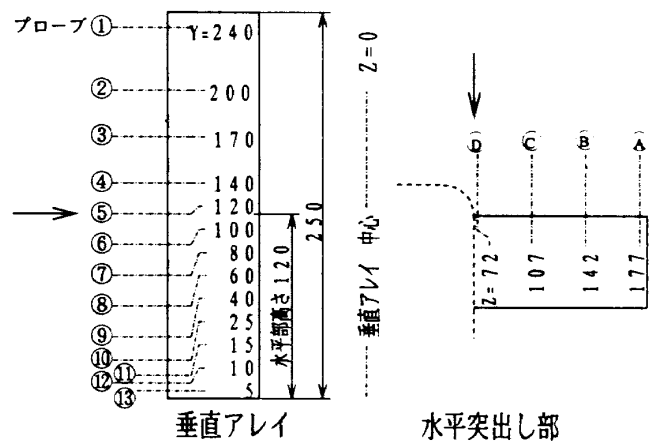


図2 プローブの配置図

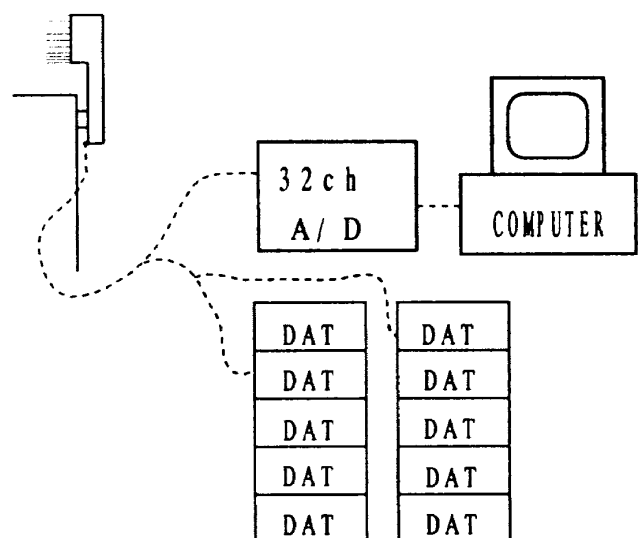


図3 測定システムブロック図

を示してある。境界層厚さはこの間欠係数の曲線と Klebanoff²⁾との比較から、294mmと求めた。図5は対数速度分布を求めてみたもので、点線で示す標準的な傾きとは一致しないが、測定点のばらつきから見てこの不一致は論ずるに足るものではないであろう。

3.2 秩序運動3次元構造の条件付抽出

図6にYZ面内のプローブの配置図を示す。左図中の×を付けたプローブを秩序運動検出用に使い、壁面に垂直に梯子上に並んだプローブ列をサンプル用に用いれば、検出用プローブとサンプル用プローブとの相対的な位置関係は右図のようになり、検出用プローブが秩序運動を捉えた時の3

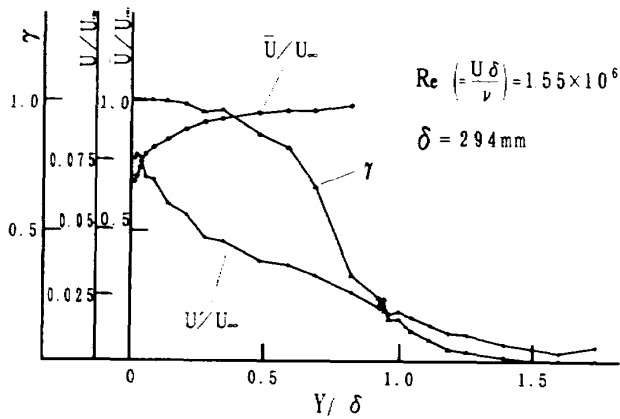


図4 風速・乱れ・間欠係数のY方向分布

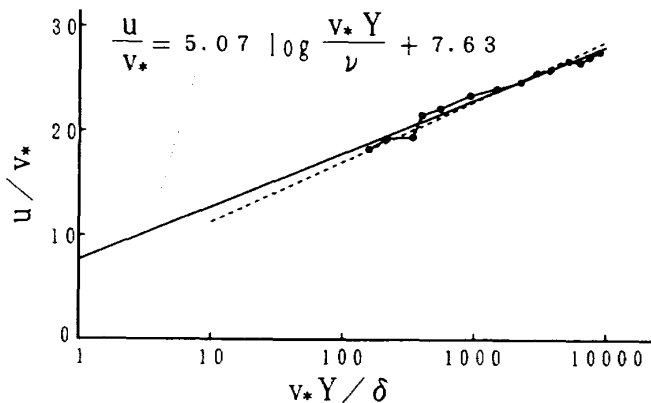


図5 対数速度分布

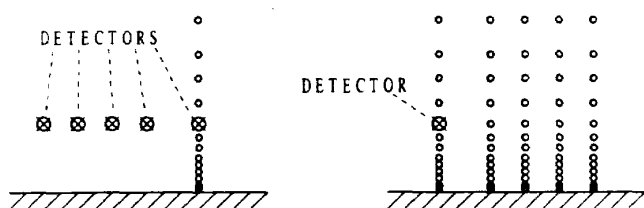


図6 YZ面内のプローブの配置

次元な流れ場の構造が求められる。検出条件は速度信号に600Hz相当のローパスフィルターをかけた信号が、検出位置の平均速度の-10%以下になる瞬間を捉える、低速条件によっている。

図7が平均速度からのずれ量u'のコンター図、図8は速度uのZ方向の勾配のコンター図である。今回の測定ではU成分しか測定していないため、渦度ωy等は得られないが、これらの結果からは図9に示すような構造の存在が推定され、はるか

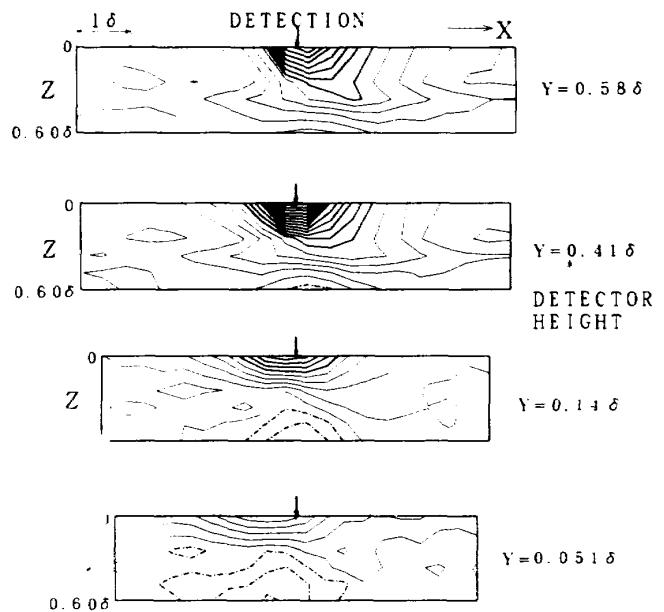


図7 乱れ成分u'のコンター図

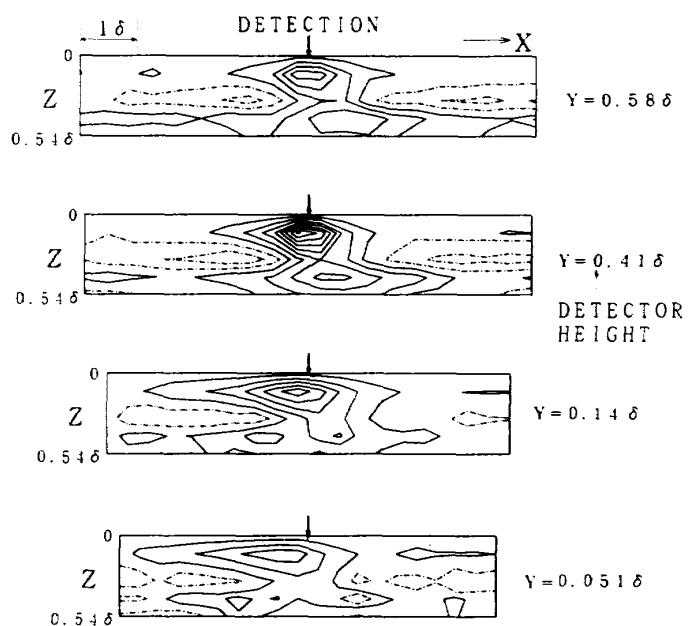


図8 ∂u/∂Z のコンター図

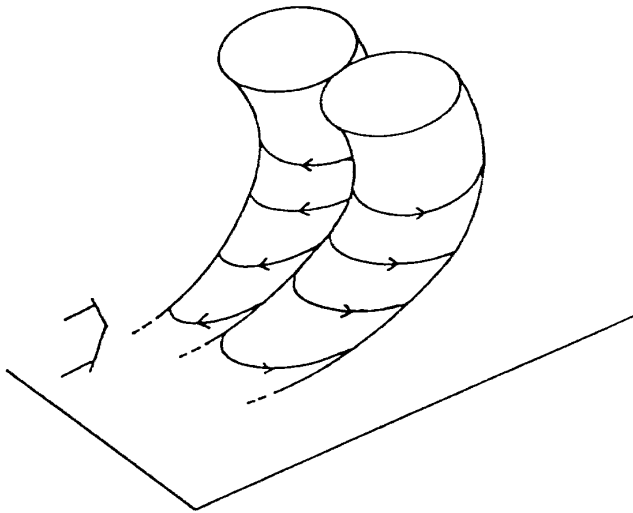


図9 検出された組織的運動のスケッチ

にレイノルズ数の低い風洞実験で得られた結果¹⁾とほぼ一致している。

4. ま と め

高速で走行する列車の屋根を利用することで、従来よりも2桁ほど高いレイノルズ数の乱流境界層中から秩序運動を抽出する実験を行った。その結果抽出された組織的構造は、室内実験と同様のいわゆるイジェクション型の組織的構造の特徴を有していた。大幅なレイノルズ数の違いにも関わらず秩序運動がやはり存在し、その特徴も似かよっていることは、乱流境界層中の秩序運動の普遍性の高さを示している。

引 用 文 献

- 1) Y. FUKUNISHI and H. SATO : Formation of intermittent region by coherent motions in the turbulent boundary layer, Fluid Dynamics Research, 2 (1987) pp.113-124.
- 2) P. S. KLEBANOFF : Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient, NACA Rep. 1247 (1955).