

風洞気流に含まれる低周波数変動について

奥田 泰雄・谷池 義人

LOW FREQUENCY FLUCTUATION IN WIND TUNNEL FLOW

By Yasuo OKUDA and Yoshihito TANIKE

Synopsis

Recently, a turbulent boundary layer is generally used to investigate wind effects of tall buildings. In this case, it is thought that the flow in the wind tunnel is usually divided into the mean and fluctuating components, and each statistic has a unique value if an averaging time is determined. However, in practice, each statistic is changed in accordance with the length of this averaging time, and it is not uniquely determined. This is caused by the fluctuating components with a longer period than averaging time in the flow wind tunnel. So the experiments were conducted in some wind tunnels investigating the low frequency fluctuations which affect the decision of the averaging time. We found that there are low frequency components with longer scales than the length of wind tunnel.

1. ま え が き

建築物の風洞実験を行う場合、今日では乱流境界層のような乱流を用いるのが一般的になっている。この場合風洞気流は平均成分と変動成分に分けられ、ある平均化時間があれば、各統計量が唯一に得られるものと考えられている。しかし、実際にはこの平均化時間の長さによって各統計量がばらつき、平均化時間をどの程度の長さにすべきなのか問題となる。これは風洞気流にある定めた平均化時間よりも長い周期をもつ不規則な変動成分が含まれているためである。これまで風洞気流に関する研究は、周波数の高い或は波長の短い現象についてのものが多かったが、このような統計量に影響を及ぼすほど長いスケールをもった変動についての研究は、ほとんどなかった。本報は、風洞実験を行って各統計量を求める場合、平均化時間の決定に影響を及ぼすような低い周波数の変動に注目して実験を行い、風洞実験法について若干の考察を加えたものである。

2. 実験方法と実験結果

実験は京都大学防災研究所の吹出し型の境界層風洞とゲッチンゲン型の開放式風洞で行った。

Fig. 1の実験は、吹出し型の境界層風洞の測定部に、約15 mにわたって2次元ラフネスを敷きつめ、その上に発達した乱流境界層中の風速変動の波形である。測定高さは z/δ (δ は境界層厚さ) ≈ 0.1 で十分乱れたところと考えられる。平均風速が約4.2 m/s、乱れ強さが約21%である。細かく乱れた波形の中にかなり長い周期の変動が含まれている。この波形にカットオフ周波数が0.1 Hzのローパスフィルターを通してより高い周波数の変動成分をカットしたのが、Fig. 1の破線である。フィルターを通して波形の最大値と最小値の差は平均風速値の40%以上あり、大きくかつ不規則な変動が残っている。

Fig. 2の実線は、境界層風洞の測定部の上流に約20 cm間隔の格子を設置した場合の一例乱流中の風速

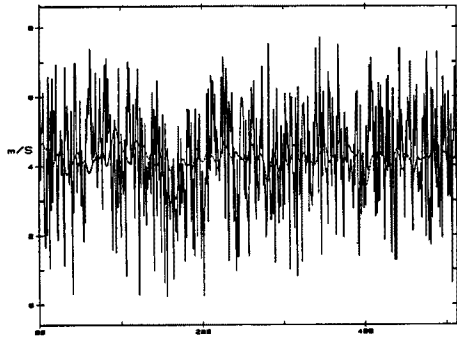


Fig. 1. Wind velocity fluctuation in turbulent boundary layer.

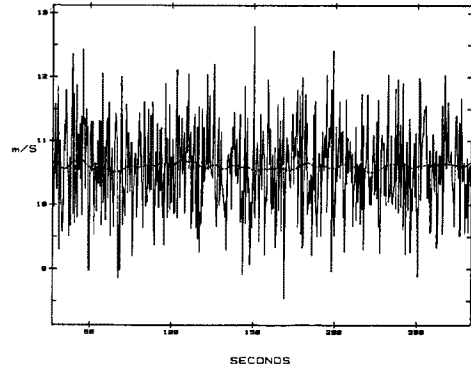


Fig. 2. Wind velocity fluctuation in uniform turbulent flow.

変動である。測定位置は格子の1 m 風下の地点で、平均風速は約 10.5 m/s, 乱れの強さが約 6% である。この波形にカットオフ周波数が 0.1 Hz のローパスフィルターを通したのが、Fig. 2 の破線である。乱れの強さは Fig. 1 の約 1/3 以下と小さいが、Fig. 1 と同様細かく乱れた波形の中にかなり長い波長の変動が含まれている。

Fig. 3 は、ゲッチング型風洞の測定部に 2 次元ラフネスを敷きつめた地面板を設置し、その上に発達した乱流境界層の内外での速度圧の変動である。Fig. 1 と同様にカットオフ周波数が 0.1 Hz のローパスフィルターを通して。境界層内部ではかなり大きな低周波数の変動が存在するが、境界層の外側の一様流中ではそのような変動は全くない。つまり、この低周波数の変動は、ファンの回転ムラや風洞内の 2 次元流といった風洞固有の現象ではなく、乱流中に含まれるきわめて規模の大きい現象と考えられる。

Fig. 4 は、約 1 時間の風洞気流のデータをもとに作成したパワースペクトルである。周波数帯域が 10^6 以上あるために、アナログフィルターを用いて 4 つの帯域に分けそれぞれのパワースペクトルを FFT によって求め合成した。低周波数側は特に大きなピークをもっていないが、極めて低い周波数までその変動成分が存在していることを示している。このような小さなパワーは、熱線風速計やレコーダーなど計測器に含まれる誤差ともみなされるが、別のシステムで行なっても同様な結果が得られているので、このような誤差の影響はほとんどないと考えられる。つまり、この低周波数の変動は不規則で、そのパワーは小さいが 0 にはならないために、各統計値のばらつきの原因になると考えられる。

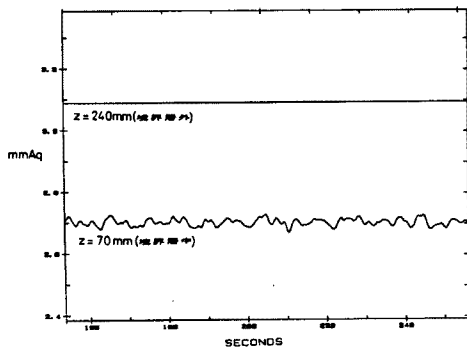


Fig. 3. Velocity pressure in and above turbulent boundary layer.

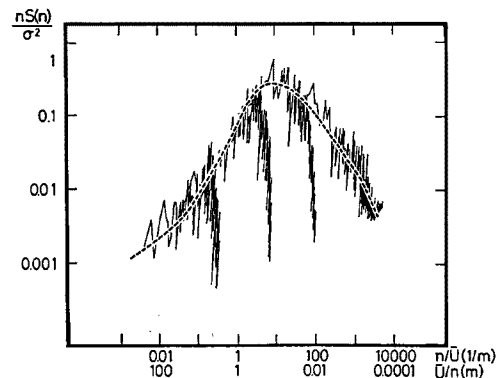


Fig. 4. Power spectrum of wind velocity fluctuation in turbulent boundary layer.

Fig. 5(a)~(c) は乱流境界層中の主流方向の風速変動の空間相関値 $R(r, \tau)$ で、順に主流方向、横方向、鉛直方向である。主流方向の場合は $R(r, \tau)$ の最大値で、横方向と鉛直方向では、 $R(r, 0)$ の値である。それぞれ、0.1, 1, 10, 100, ∞ Hz の 5 種類のカットオフ周波数のローパスフィルターを使用した。測定高さでの平均風速は約 10 m/s である。ローパスフィルターのカットオフ周波数が 0.1 Hz と 1 Hz の場合、相関値がほぼ同じであるのに対し 10 Hz 以上のカットオフ周波数では相関値に大きな差が生じている。この結果から 1 Hz と 10 Hz の間に含まれている変動の不規則性がそれよりも低い周波数の変動の原因と考えられ、またこれは主流方向の風速変動のスペクトルで最もエネルギーの大きい周波数領域にあてはまる。

Fig. 6 は空間相関値 $R(r, 0)$ より求めた空間スケールである。主流方向の空間スケールはカットオフ周波数によって約 20 cm ~ 3 m と 15 倍も変わるのに対し、横方向と鉛直方向の空間スケールはカットオフ周波数によらず 5 cm ~ 15 cm 程度となった。つまり横方向や鉛直方向にわずか数 10 cm 離れた 2 点では、低周波数成分まで全く異なる流れになっていることになる。

尚、この現象がこの風洞特有の現象ではないことを確かめるために、東京電機大学の河井宏允助教授と日

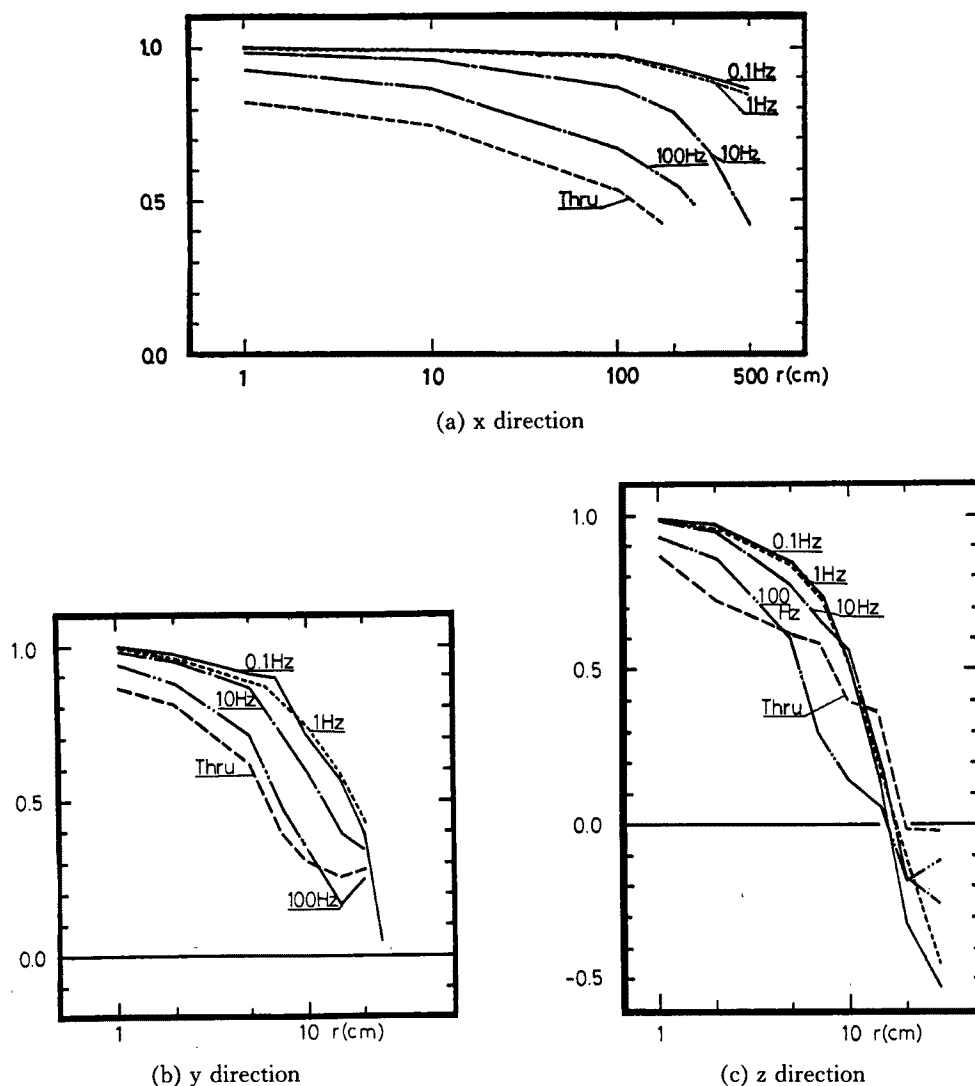


Fig. 5. Cross correlation coefficient of wind velocity fluctuation (u-component).

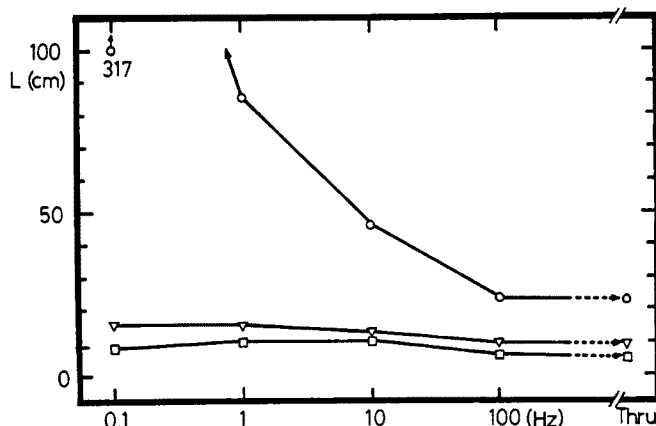


Fig. 6. Longitudinal turbulent scale in turbulent boundary layer.

本建築総合試験所の西村宏昭氏の御協力により同様な風洞実験を行なって戴いた。その結果、本報で問題としている低周波数の変動の存在が確認できた。

3. 考 察

この低周波数の変動は主流方向にはよく伝播するが、横方向や鉛直方向には風下においてあまり伝播しないという現象から、この変動は乱流中に含まれる極めて規模の大きな“縦渦”のようなものとも考えられる。これまでの研究で乱流境界層中には主流方向渦度成分をもつ2種類の縦渦が存在すると考えられている。一つは不規則で非定常なもの¹⁾で、他の一つは定常的に存在し前者よりもはるかに規模の大きなもの²⁾である。前者は、層流境界層から乱流境界層に遷移する場合に流れの不安定性から生じる乱流塊で、後者は、風洞の整流洞にある金網によって測定洞上流の風速分布の均一性が崩れることによることがわかっている。しかしながら、本報で問題としている低周波数の変動は、不規則でかつ非定常であるが主流方向には極めて長いスケールをもち、どちらの“縦渦”の現象もあてはまるものでもない。

風洞ではファンが等速回転しているかぎり必ずその平均成分が存在するはずで、Fig. 3のように一様流中では確かに平均成分が存在して、平均化時間の長さによらずまた測定した時刻によらず平均値が求められる。しかし、乱流中ではその平均成分の上に低周波数の変動が存在するために、その平均化時間の長さが問題となる。今回の実験ではローパスフィルターのカットオフ周波数が0.1 Hzまでであったが、これを更に下げても、つまり平均化時間をどれほど長くしても必ず何らかの変動が残ると考えられ、この変動を完全に除去してしまうことは不可能であると思われる。従って、工学上の観点からは、平均化時間をどの程度の長さにすれば統計量に含まれる誤差が小さくなるか、ということが問題になると思われる。Fig. 7は2次元ラフネス上に発達した乱流境界層中で主流方向の風速を測定した場合、平均化時間に対する平均値とr. m. s. 値の推定誤差の関係の一例である。平均風速が約11 m/s、乱れの強さが約13%である。誤差は平均化時間に対してほぼ同じべき指数 ($\alpha \approx -0.5$) で減少するが、例えば平均化時間が10秒程度では、平均値で約1.3%、r. m. s. 値で約8%の誤差を含んでいる。自然風中での測定時間から風洞実験での平均化時間を求めることは可能であるが、これには自然風と風洞気流が相似であることが必要である。しかし、自然風を平均成分と変動成分に分けられるような平均化時間は実際には存在しないし、また少なくとも本報で問題としている風洞気流に含まれる低周波数の変動と相似な構造をもった変動が自然風で存在するのか、或はそのようなものが考えられるかどうか疑問である。つまり、風洞実験を行う場合、自然風との相似性から平均化時間を決定するよりも、測定値に含まれる誤差をどの程度におさえるか、といった観点から平均化時間を考えるほうが妥当なのではないだろうか。

Fig. 8は、Fig. 7と同じ乱流境界層中に置かれた縦横比が2の正四角柱に加わる抗力の時間変化である。

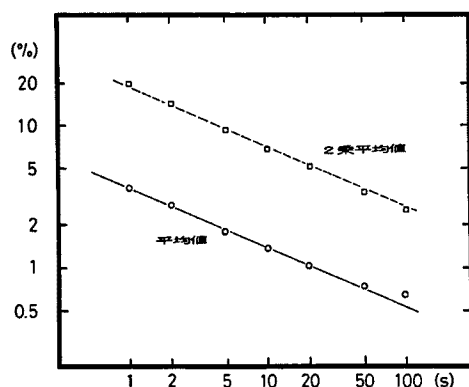


Fig. 7. Averaging time vs. standard error of mean and r.m.s. values in turbulent boundary layer.

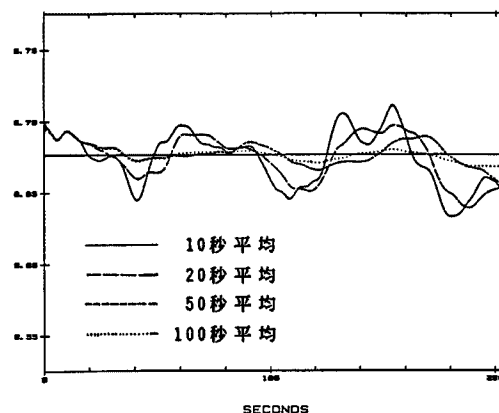


Fig. 8. Drag coefficient of a square prisms in turbulent boundary layer.

図は、角柱の同一流線上の上流でかつ模型と同じ高さの位置で同時に測定された速度圧を基準圧として抗力係数の形で表し、それぞれ10, 20, 50, 100秒の移動平均をかけてある。10秒平均では抗力係数の最大値と最小値の差が抗力係数値の10%以上にも及び、測定する時刻によって値が大きくばらついてしまうが、平均時間を長くするとその差はかなり小さくなって定常的に抗力係数が求められる。またFig. 8の抗力係数に含まれる誤差は、同じ平均化時間の場合、Fig. 7の平均風速に含まれる誤差よりもかなり大きくなっている。これにはいくつかの理由が考えられる。第一に、抗力が風速の2乗に比例するため抗力の測定値に含まれる誤差は、風速の測定値に含まれる誤差よりも大きくなる。第二に、風速は一点での測定値であるが、角柱に加わる抗力はある面積或はある体積をもった流れ場に加わる力となり、誤差が大きくなる。また第三に、空気力係数や圧力係数を求める場合、その基準圧となる速度圧を測定する位置を吟味する必要がある³⁾。とくに、Fig. 8のように基準圧を同時測定する場合、この低周波数の変動の影響がなくなるようにするには対象物体と同一流線上で測定する必要がある。なぜなら、この低周波数の変動の横方向や鉛直方向の空間スケールはより高い周波数の変動のスケールとほぼ同程度と小さいため、横方向や鉛直方向に数10 cm離れた2点間での流れは、高周波数の変動だけでなく統計量に影響するような低周波数の変動も全く異なった流れになるためである。従って、基準圧の測定位置を対象物体の横や上方にとると全く異なる流れを測定してしまう恐れがある。

4. ま と め

風洞気流に含まれる低周波数の変動成分についてまとめる。

- 1) この変動は乱流中に含まれる極めて低い周波数の不規則な変動である。
- 2) この変動は主流方向には極めて長い空間スケールをもつが、横方向や鉛直方向にはより高い周波数の変動スケールとほぼ同程度と小さい。ただし今回の実験では、この変動が物理的にどのような構造をもつのか、また乱流境界層と一様乱流に含まれる変動は同じ構造をもっているのかわからなかった。
- 3) 乱流中での測定から各統計量を得る場合、平均化時間の長さ、この変動による各統計量に含まれる誤差とはほぼべき指数的な関係にあり、平均化時間の決定はこの誤差により決定するのが妥当と思われる。

今後の課題としては、

- 1) どのようなモデルであれば物理的に説明できるか更に研究する必要があると思う。
- 2) 例えば、乱れの強さの大きい流れと小さい流れの中に含まれる低周波数の変動の影響の関係のように、定量的な評価が必要であると思う。

本研究を行うにあたり有意義な御助言を戴いた、京都大学防災研究所桂順治教授に感謝の意を表します。また、実験に御協力下さった同研究所技官羽野淳介、杉政和光両氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A. and Rundstadler, P. W.: The Structure of Turbulent Boundary Layer, J. Fluid Mech., vol. 30-4, 1967, pp. 741-773.
- 2) 古屋善正・大坂英雄：二次元的乱流境界層の横方向不均一性，日本機械学会論文集，第40巻，339号，1974，pp. 3045-3053.
- 3) 桂 順治・谷池義人・奥田泰雄：静圧勾配のある乱流境界層中の角柱に加わる風圧力について，京都大学防災研究所年報，第29号 B-1，1986，pp. 151-158.