複雑地形上の乱れの構造の風洞内再現

WIND TUNNEL SIMULATION OF ATMOSPHERIC TURBULENCE OVER COMPLEX TERRAINS

加藤 真規子*

Makiko KATO

ABSTRACT: Wind tunnel experimental conditions of simulating atmospheric turbulence over complex terrains were examined by comparison with the observed data. The similarity conditions are found that (1) the vertical wind distribution is set to be similar to the field one, (2) the Reynolds number is set larger than 4×10^4 . Wind tunnel spectra agreed well with the field ones with nondimensional frequency.

1. はじめに

大気境界層内の気流特性を風洞内で調べるには、大気中と相似な乱流を風洞内に再現する必要がある。定常、中立時の各種地表状態の風速鉛直分布や粗度定数等は観測結果があり、相似な気流を再現する資料となっている。一方、乱れの構造に関しては比較できる観測資料が少なく、風洞内の乱流の相似性を検討できる機会も少ない。ここでは、風洞実験の相似則を平坦地形上において検討し、その相似則が複雑地形上の乱流の再現にも適用できるかどうか、超音波風速計を使用して得られた観測データとの比較によって調べる。

2. 風洞実験の相似則

大気境界層の気流に関する実験では、「レイノルズ数 (Re数) の独立」の概念 (Townsend¹⁾) が一般に用いられている。即ち、「ある程度大きな Re 数では、乱れの構造は Re 数に関係なく相似になる」ことから、大きな Re 数の気流は野外と相似であるとしている。乱れの構造の相似に対するクリティカルなレイノルズ数 (Rc数) は 10^5 程度とされているが、実験条件によっても異なるので、何等かの方法で確認する必要がある。

気流の相似性の評価項目には次のようなパラメータが挙げられる^{2), 3)}。即ち、模型の幾何学的相似は当然のこととして、

- ① 風速鉛直分布
- ② 乱流強度鉛直分布
- ③ 乱れのスペクトル
- ④ 乱流レイノルズ数
- ⑤ レイノルズ応力
- ⑥ 粗度定数 (z_0)

等の一致である。

野外と風洞で、風速鉛直分布が相似であれば、摩擦速度 (u_*) と粗度定数 (z_0) も相似であると考えら

れる。乱流強度、乱流レイノルズ数、レイノルズ応力は u_* の関数として表され、風速鉛直分布が相似であれば、パラメータ ②, ④, ⑤ は相似になると考えられる。一方、スペクトルの相似は、「レイノルズ数の独立」から Re 数を Rc 数以上に設定することによって得られる。

以上のことから、相似の条件は次の 2 項目となる。

- (1) 風洞気流のレイノルズ数をクリティカルレイノルズ数以上に設定する。
- (2) 風速鉛直分布を一致させる。

3. 風洞実験

地形模型は、平坦地は気象研究所鉄塔を中心とする模型 (縮尺 1/1000, 2.0m ϕ)、複雑地は山陰本線余部橋梁を中心とする模型 (縮尺 1/1500, 3.0m ϕ) と島根地区の海岸に面する複雑地の模型 (縮尺 1/1000, 2.0m ϕ) を用いた。

実験は気象研究所大型気象風洞を使用し、中立成層で行った。

乱流境界層の生成には、地形と地表の粗度を考慮して模型前方約 9m に立方体ブロックを並べた。複雑地形の場合にはスパイヤ型の乱流発生装置を併用した。

風速鉛直分布は、平坦地では観測の結果からべき指数 0.3 のべき分布、複雑地ではべき指数 1/9 の海風を設定した。風洞風速 U_∞ は、5.0m/s (平坦地、島根) と 6.0m/s (余部) を用いた。

風速測定は、I 型と X 型熱線センサーを用い、定温型熱線風速計により行った。平均と乱れの風速は、0.72秒毎のサンプリングで、200 個の平均により求めた。スペクトルはアナログスペクトル解析装置⁴⁾、コスペクトルは 2 台のバンドパスフィルターとフлакクスメータを使用して求め、解析時間を 4 分とした。

風洞気流の Rc 数は、平坦と複雑地形模型上で Re 数を変化させ u 成分スペクトルを測定して求めた。結果

* 気象研究所 物理気象研究部 室長

Head, Meteorological Research Institute

を図1に示す。Re数の代表長さは $U\infty$ の95%値を示す境界層高さで定義した。縦軸のスペクトルはピークの値を一致させてある。図1からRe数は、平坦地 3.7×10^4 、複雑地 3.8×10^4 でほぼ等しい結果となった。これらの結果から、本研究のRe数は 1.0×10^5 （平坦地、島根）と 1.7×10^5 （余部）で行った。

図1 u成分スペクトルのRe数による変化。
上：平坦地形（高さ50m，鉄塔）
下：複雑地形（高さ45m，橋梁上）

4. 平坦地上の乱流の風洞内再現^{5), 6)}

平坦地の風の資料は気象研究所の鉄塔（高さ213m）で観測されたものを使用した（Hanafusa et al.⁷⁾）。風観測は、10、25、50、100、150、200mの6高度で、1980年3月10日の低気圧接近時に行われた。30分間毎に平均した風速（ U ）、乱れ（ σ_u 、 σ_w ）、レイノルズ応力（ $-\overline{uw}$ ）、スペクトル（ u 、 w 成分）、コスプレクトルが8ラン得られおり、8ランの観測結果には大きな時間変化はない。大気成層状態はほぼ中立で、風向は西北西で一定であった。風速鉛直分布はべき指数0.3のべき分布で表せる。

風洞内には観測で得られたべき風速分布を再現した。高さ10~200mについて風洞と鉄塔の結果を比較すると、乱流強度は図2、レイノルズ応力は図3、スペ

図2 風洞と鉄塔における乱流強度分布の比較。

図3 風洞と鉄塔におけるレイノルズ応力の比較。

図4 風洞と鉄塔におけるu成分とw成分スペクトルの比較。

図5 風洞と鉄塔におけるコスペクトルの比較。

クトルは図4、コスペクトルは図5となる。共に非常によく一致した結果が得られ、風洞内には野外と相似な乱流が再現されていることがわかる。図4と図5の横軸は無次元周波数 f ($f = nz/U$, n は周波数)で、縦軸はピークの値を一致させてある。

以上の結果から、大気境界層の気流に関する平坦地実験では、 Re 数以上の乱流中で風速鉛直分布を野外と相似にすることにより、摩擦速度、乱流強度、スペクトル、コスペクトル等が相似になることがわかった。

図4で、野外と風洞のスペクトルが無次元周波数で一致する結果 ($f_w = f_f$) から、風洞の長さの縮尺率を α 、風洞の風速の野外との比を β とすると ($z_w =$

図6 橋梁上中心における風向の鉛直分布(風洞)。風速計の高さを点線で示す。

図7 北風Run 4と風洞風向NNW, および、北風Run 1と風洞風向WNWのスペクトルの比較。

αz_f , $U_w = \beta U_f$ 、次の関係が得られる。

$$n_w = \frac{\beta}{\alpha} n_f$$

添え字 w と f は風洞と野外を表す。この式から、風洞での時間スケールは野外の α/β 倍に縮小されていることがわかる。

5. 複雑地形上の乱れの構造の風洞実験と野外観測の比較 8), 9), 10)

5.1 山陰本線余部橋梁上

風の観測は、1987年3～5月の約2カ月間、山陰本線余部橋梁上で行った。橋梁は長さ310mで、峡谷上の高さ41m、東西方向に架けられている。周囲の地形は、峡谷が南と西の方向に延び、北～北東方向が海に面して、三方は標高200～600mの山に囲まれた複雑な地形となっている。

測定は、平均風速が約6m/s以上で、少なくとも30分以上安定した風向と風速で吹いた風を0.1秒間隔のサンプリングで磁気テープに収録した。

風洞実験から、橋梁上の風向が地形の影響を受け、一般流風向とかなり異なる場合があることがわかった(図6)。スペクトルも一般流風向によって異なる分布を示した。

野外と風洞のスペクトルの比較の例(Run 4、Run 1)を図7に示す。Run 4、Run 1ともに風洞のスペクトル(実線)とよく一致している。

スペクトルの比較から、野外と風洞の無次

図8 野外と風洞の無次元ピーク周波数 f_p の比較。

元ピーク周波数 f_p を北風と南風で求めた結果を図8に示す。北風の f_p は南風よりもばらつきは大きい。野外と風洞ではほぼ一致している。したがって、複雑地形上でも野外の乱流が相似に再現されている。

5.2 島根地区の複雑地形

地形は北側が海に面し、約1km 後方南側が高さ150m程の山に囲まれた複雑地形の中の小さな半島の地上高さ12m (標高47m) で、風の観測をデジタルとアナログの収録により行った。

風洞実験で、観測地点の風向、風速、乱流強度、スペクトルを一般流風向20° 毎に測定した結果、各測定値に風向依存性があり、風向は一般流と30° も異なる場合があることがわかった。

以上のことから、野外資料の解析は風向が一定している日の約1時間の4つの時間帯 (Run 1~4) を選んで風洞で測定したスペクトルと比較を行った。

Run 1~4の風向は風洞での測定結果から、一般流風向80°, 60°, 40°, 20° の風向にほぼ対応することがわかった。野外と風洞のスペクトルを無次元周波数で比較した結果を図9に示す。野外のデータはアナログデータを32倍の速さでアナログスペクトル解析装置を使って解析したものである。野外と風洞の結果は一致しており、複雑地形上の比較的高度の低い地点でも野外と相似な乱れの構造が風洞内に再現されることがわかった。

6. まとめ

大気境界層内の気流に関する風洞実験は、平坦地形・複雑地形ともに、次の2つの条件を満足させることにより、風の乱れおよびスペクトルの相似が得られ、大気中と相似な乱流が再現できる。

- (1) 風洞気流のレイノルズ数をクリティカルレイノルズ数 (Re_c 数) 以上に設定する。
- (2) 風速鉛直分布を一致させる。

Re_c 数は、代表長さを U_∞ の95%値の境界層厚さで定

図9 島根地区複雑地形上の野外と風洞のスペクトルの比較。

義すると、平坦と複雑地形ともに約 4×10^4 となった。

島根地区の実験は、(財)原子力安全研究協会との共同研究の一部である。

参考文献

- 1) Townsend, A. A., 1976: The Structure of Turbulent Shear Flow, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, pp.53-59.
- 2) 北林興二, 1985: 模型実験の相似律, 気象研究ノート, 152, pp.6-12.
- 3) 北林興二, 1988: 実験気象学入門, 東京堂出版, pp.177-217.
- 4) Kato, M., 1982: An Application of Electrical Filters to Spectrum Analysis, Pap. Met. Geophys., 33, 137-147.
- 5) 加藤真規子, 花房龍男, 1992: 平坦地形上の気流の風洞内再現, 日本気象学会講演予稿集, 62, p.212.
- 6) Kato, M. and T. Hanafusa, 1994: Wind Tunnel Simulation of Atmospheric Turbulent Flow over a Flat Terrain, Atmos. Environ. 投稿中
- 7) Hanafusa, T. et al., 1981: Characteristics of High Winds Observed from a 200 m Meteorological Tower at Tsukuba Science City, Pap. Met. Geophys., 32, 19-35.
- 8) Kato, M., 1992: A Wind Tunnel Study of the Topographical Effects on Atmospheric Turbulent Flow and Diffusion, Geophys. Mag., 44, 59-117.
- 9) 加藤真規子, 花房龍男他, 1990: 複雑地形上の気流の乱流特性, 天気, 37, 171-183.
- 10) 加藤真規子, 花房龍男他, 1994: 複雑地形上における乱れのスペクトル, 日本気象学会講演予稿集, 65.