

日中と夜間における大気境界層の乱流特性

Turbulent Properties of an Atmospheric Boundary Layer
in Day and in Night

松永信博*・杉原裕司**・福田和代***・本地弘之****・是枝伸和*****
By Nobuhiro MATSUNAGA, Yuji SUGIHARA, Kazuyo FUKUDA,
Hiroyuki HONJI and Nobukazu KOREEDA

A field observation was made to investigate turbulent characteristics in the lower region of an atmospheric boundary layer in day and in night. Horizontal and vertical wind speeds, and wind direction were measured by using a doppler sodar at 13 points in the range of 55m to 425m above the ground. Vertical profiles of the mean wind speeds, the Reynolds stress and the turbulent intensities were obtained from the measured data. The diurnal profiles were compared with the nocturnal ones. Their profiles show that the diurnal boundary layer had a strong convection caused by the solar-heating and the nocturnal layer was relatively stable. The Reynolds stress decreased linearly with height both in day and in night.

Keywords : atmospheric boundary layer, turbulence,
field observation, doppler sodar

1. 緒言

大気中に放出された汚染物質の移流・拡散や都市のヒートアイランド化等、大気環境に関する諸問題に対処する上で、境界層内の乱流構造を理解することは大変重要である。しかしながら、大気境界層内の風系は大規模な気象条件に依存するだけでなく、地表面の形状および日射・放射の影響を強く受けるため、かなり複雑なものとなる。このような理由から、大気境界層は人間生活と密接に関係した大気環境であるにも関わらず、その詳細についてはそれ程明らかにされていない。

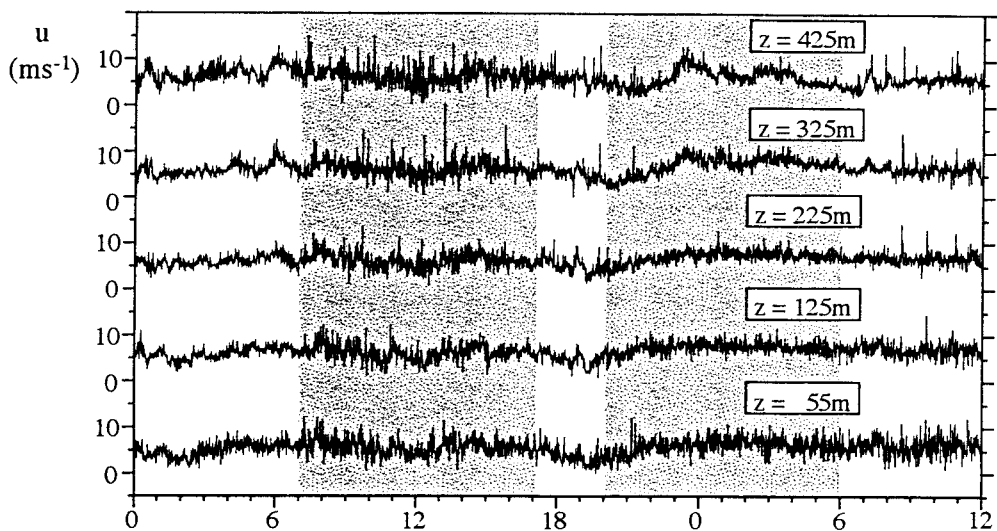
近年、大気境界層下部における風観測にドップラーソーダが用いられている。ドップラーソーダは、地上から水平および鉛直方向の風速と風向を同時にしかも多点で計測することができ、大気境界層内の乱流構造を観測する上で大変有用である。例えば高木ら¹⁾は、大気境界層における乱流運動エネルギーの鉛直分布をドップラーソーダ観測により求め、その特性を $k-\varepsilon$ モデルを用いシミュレートすることを試みている。また、福田ら²⁾は海陸風通過時における大気乱流の構造をドップラーソーダを用いて調べている。

本研究では、ドップラーソーダを用いて地上55mから425mにおける水平風速、鉛直風速および風向を1.5日間にわたって連続測定し、平均風速、レイノルズ応力および乱れ強度の鉛直分布を求め、日中と夜間における大気境界層内の乱流特性の違いについて検討している。

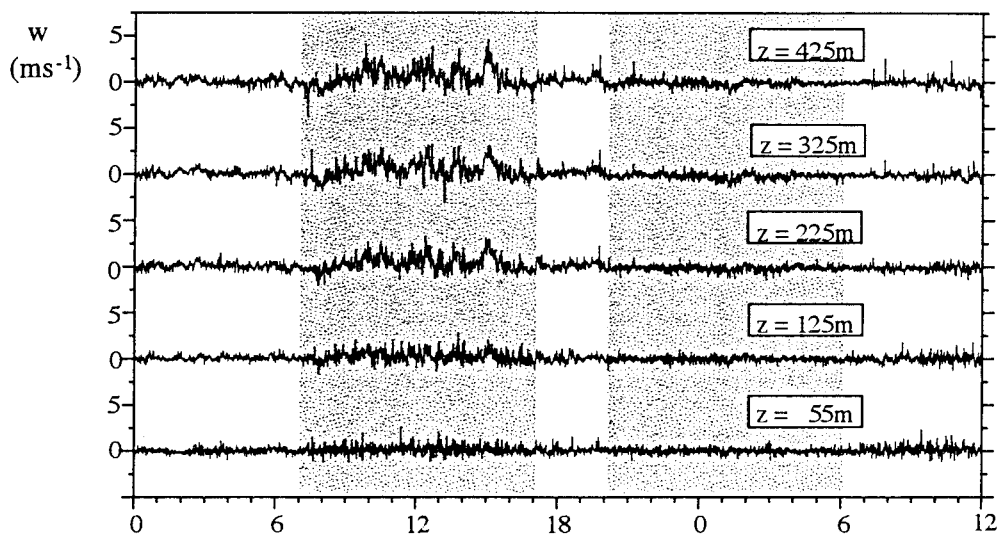
2. 観測概要

大気境界層のドップラーソーダ観測は、福岡県春日市九州大学大学院総合理工学研究科構内で行われた。図-1に示すように、観測地点は北西を博多湾、南西を脊振山(標高1055m)および南東を三郡山(標高938m)に挟まれ

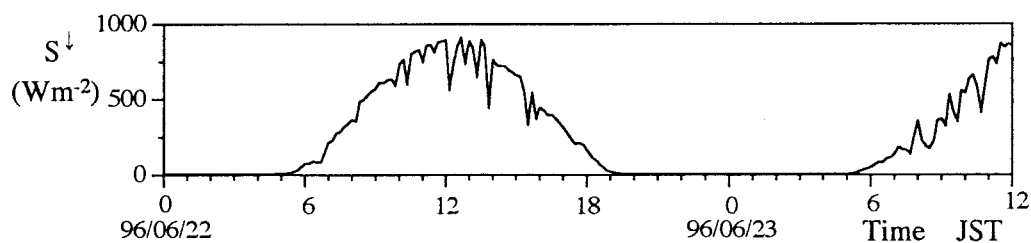
・	正会員	工博	九州大学助教授	総合理工学研究科 (〒816 福岡県春日市春日公園6-1)
**	正会員	工修	九州大学助手	総合理工学研究科
***	学生員		九州大学大学院	総合理工学研究科 修士課程
****		理博	九州大学教授	総合理工学研究科
*****		工修	建設技術研究所	福岡支社 (〒810 福岡市中央区渡辺通 2-1-10)



(a)



(b)



(c)

図-2 測定データの時系列
(a) 水平風速, (b) 鉛直風速, (c) 日射量

た福岡平野の南部に位置する。観測期間は1996年6月22日0時から6月23日12時までの計1.5日間であった。観測高度 z は地表面より55mから425mまでの計13高度であり、各高度における水平風速 u 、鉛直風速 w および風向を15秒間隔で測定した。得られたデータは1分間に渡って平均化され、その平均値をファイルに記録した。また、全天日射計により10分平均された日射量 $S^{\downarrow}$ も同時に測定された。なお観測期間を通して日本の南海上には梅雨前線が停滞していたが、福岡地方は晴天であった。

3. 風速および日射量の時系列データ

図-2(a)と(b)に、今回の観測で得られたデータのうち、 $z = 55, 125, 225, 325, 425\text{m}$ の5高度における u および w の時系列をそれぞれ示す。また、図-2(c)に $S^{\downarrow}$ の時系列を示す。なお、風向は観測期間を通してほぼ一定で南東寄りであった。日中における u の変動は上空に行く程大きくなっている。また夜間においては、 $z = 325, 425\text{m}$ で u の長周期変動が見られる。 w に関しては、日射による地表面の加熱が強まる6月22日8時頃から変動が大きくなり、17時頃まで変動が続く。このことから、日中では日射の地表面加熱により大気境界層が不安定化して対流が生じていることがわかる。一方、夜間における w の変動は日中に比べてかなり小さく、夜間の大気の状態はかなり安定であるものと思われる。

日射量と風速データに基づき、日中および夜間における統計解析対象データとして、図-2(a)と(b)においてそれぞれハッチで示した2つの時間帯を選ぶことにする。以下では、日中(6月22日7時~6月22日17時)および夜間(6月22日20時~6月23日6時)の各10時間における600個のデータを用いて得られた平均風速および乱流特性量の鉛直分布について検討する。

4. 平均風速と乱れの鉛直分布特性

図-2(a)および(b)からわかるように、観測データには長周期の変動と短周期の変動が混在している。長周期の変動は約1時間の周期をもち、境界層の乱れよりも比較的大きなスケールの気象変動によるものと思われる。大気境界層における日中および夜間の乱流特性を議論する上では、観測データからこの長周期成分を除去することが妥当である。そこで、1分平均データに底辺32分の三角フィルターをかけることによって長周期成分を求め、観測データからその成分を差し引くことによって短周期の変動成分 u', w' を抽出した。

図-3および図-4は、それぞれ日中および夜間において10時間平均した水平風速 U および鉛直風速 W の鉛直分布を示す。日中における U の分布は、 $z = 150\text{m}$ より上空ではほぼ一様となる。夜間の U は日中に比べて大きくなる。一方、 W は日中において z とともに線形的に増大し、 $z = 400\text{m}$ 付近では約 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ の上昇流が生じていることがわかる。この上昇流は日射の地表面加熱によって大気不安定化することにより発生したものと思われる。夜間における W はほぼ0である。

図-5は、日中および夜間におけるレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の鉛直分布を地表面における摩擦速度 u_* を用いて無次元化したものである。ここで、 u_* はレイノルズ応力分布を $z = 0$ へ外挿することによって求めており、日中において $0.67\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、夜間においては $0.55\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。夜間におけるレイノルズ応力の分布は z 方向に線形的に減少する傾向が認められる。一方、日中におけるレイノルズ応力分布は、夜間同様 z とともに線形的に減少するが、 $z = 200\text{m}$ 以上ではばらつきが大きくなっている。

図-6、図-7は、それぞれ水平風速の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ および鉛直風速の乱れ強度 $\sqrt{w'^2}$ の鉛直分布を u_* を用いて無次元化したものを示す。日中における $\sqrt{u'^2}$ は $z = 100\text{m}$ 付近で最小となり、それより上空では次第に増大する。夜間の $\sqrt{u'^2}$ は z とともに単調に減少する。また、 $\sqrt{w'^2}$ は日中において z とともに増大するが、夜間においては水平方向の乱れ強度よりも小さく、 z 方向にほぼ一定値を取る。以上の結果から、日中においては 100m より上空で浮力による乱れエネルギーの生成が行われ、水平風速および鉛直風速の乱れ強度は z の増加とともに増大するが、夜間では大気の安定成層のために鉛直方向の乱れはかなり抑えられることがわかる。

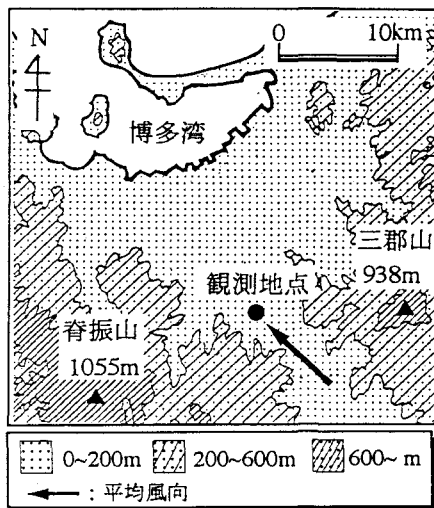


図-1 観測地点

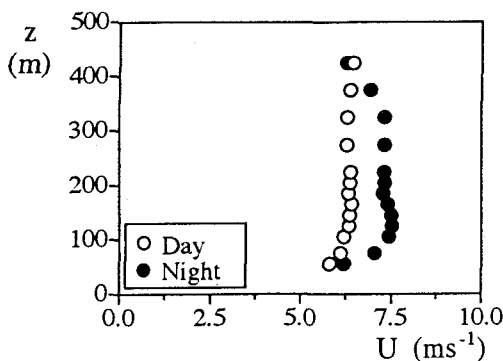


図-3 平均水平風速の鉛直分布

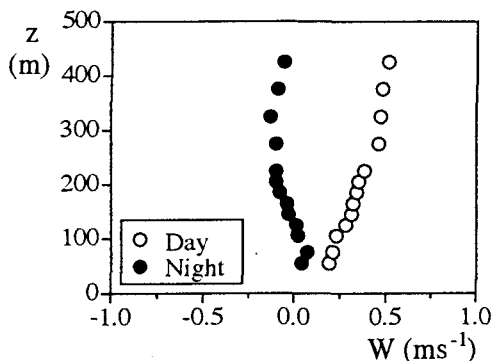


図-4 平均鉛直風速の鉛直分布

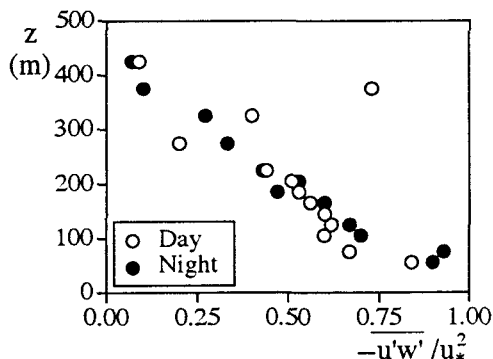


図-5 レイノルズ応力分布

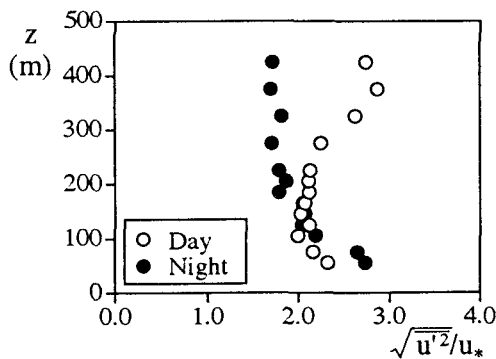


図-6 水平風速の乱れ強度分布

5. 結論

大気境界層下部において、1分平均風速をドップラーソーダによって観測し、平均風速、レイノルズ応力および乱れ強度の鉛直分布を日中と夜間とで比較した。観測より得られた結果を要約すると以下のようになる。

- 1) 日中では平均水平風速 U と平均鉛直風速 W の鉛直分布から、日射による地表面加熱によって強い対流が生じていることがわかった。
- 2) レイノルズ応力分布は、日中・夜間を問わず高さの増加とともに線形的に減少することが認められた。
- 3) 水平方向の乱れ強度は夜間において高さとともに単調に減少するが、日中においては日射の影響で 100m

付近で最小値を取った後、高さとともに増大する。また鉛直方向の乱れ強度は、日中においては上空で浮力による乱れエネルギーの生成が行われており、夜間では大気の安定成層のために乱れが抑制されているものと推測される。

今後はドップラーソーダによる乱流計測と温度の鉛直測定を同時に行い、より詳細なデータを提供するとともに、日中・夜間における大気境界層下部の乱流構造について調べていくつもりである。

参考文献

- 1) 高木久之・北田敏広：ドップラーソーダによる大気境界層下部の乱れの鉛直分布とその $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる解析, 天気, 41, pp.827-846, 1994.
- 2) 福田忠弘・西村修・神田学・清水源治：ドップラーソーダによる海陸風フロントの乱流構造, 土木学会第51回年次講演会講演概要集第2部, pp.406-407, 1996.