

海岸近傍の境界層内におけるリチャードソン数と乱れの関係

Relation between Richardson number and turbulence in boundary layer near coast

○伊東 和美 (大阪大学) 正 近藤 明 (大阪大学)
正 加賀 昭和 (大阪大学) 井上 義雄 (大阪大学)
Kazumi ITO*¹ Akira KONDO*¹ Akikazu KAGA*¹ Yoshio INOUE*¹
*¹ Osaka University, 2-1, Yamadaoka, Suita-shi, Osaka

In order to understand the structure of vertical turbulence, the relation between Richardson number and the turbulence was investigated from observation data near the coast. The perturbation of vertical velocity normalized by the horizontal velocity was expressed by a function of Richardson number. A new formulation for eddy diffusivity was proposed from this relation. Using this formulation and Mellor & Yamada model, the vertical profiles for horizontal wind speed and for temperature were calculated and were compared with observed data. These results suggested that this formulation was reasonable.

Key Words : Richardson number, turbulence, boundary layer, eddy diffusivity

1. はじめに

近年の深刻な大気環境問題のひとつとして、急速な都市化による大気汚染や人口廃熱の増加によるヒートアイランド現象が挙げられる。熱や汚染物質の拡散に支配的な役割をするのが、鉛直方向の乱流である。それゆえ大気環境問題の理解と解決のためには、大気境界層の乱流構造の把握が必要であるものの、その測定の困難さからあまりよく知られていない。そこで、関西国際空港対岸で測定された実際のデータを基に、大気の安定度を示すリチャードソン数と大気の乱れの関係を明らかにすることで乱流構造を把握し、さらにその関係から乱流拡散係数を定式化し、1次元大気境界層モデルを用いて風速と温度の鉛直分布の再現性を確かめた。

2. 観測データ

Table.1 measurement items

| 観測地点 | 測定項目 | | |
|--------------------|---------|----------|----------|
| スカイブリッジ 高度 110m | 水平風速 | 水平風向 | 水平風速標準偏差 |
| | 鉛直風速 | 鉛直風速標準偏差 | |
| | 気温 | | |
| | 高度別気温分布 | | |
| 南部処理場 高度 26m | 水平風速 | 水平風向 | 水平風速標準偏差 |
| | 鉛直風速 | 鉛直風速標準偏差 | |
| | 気温 | | |
| | 日射量 | 放射収支量 | 紫外線量 |

2006年3月から2007年2月までの1年間で1時間ごとに測定された高度110mと高度26mの観測データを使用した。観測データの位置をFig.1に、測定項目をTable.1に示す。また、2地点は3キロメートルほど離れているが、ここでは同一鉛直方向にあるものと仮定した。

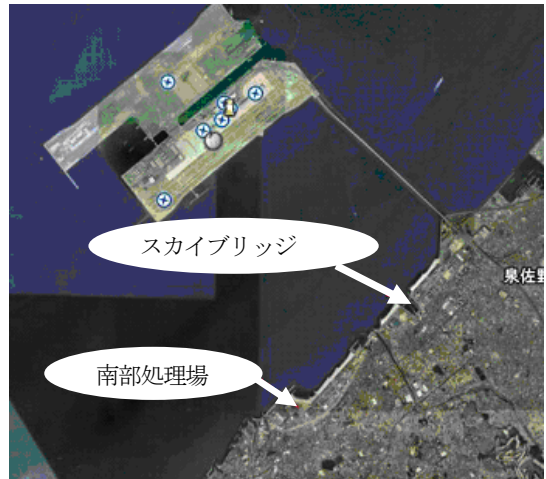


Fig.1 Observation points

2. 大気の乱れの指標

乱流状態における気象要素は絶えず変動している。その変動量を表すものとしてよく用いられるのが、その値のばらつきを示す標準偏差である。つまり鉛直方向の乱れに関しては、鉛直風速標準偏差が指標となりうるが、ここでは鉛直風速標準偏差を水平風速で割り無次元化したもの（以後 w'/u と表記）を指標として考えた。

一方、大気の状態の指標として、パスキル安定度がよく用いられる。パスキル安定度とは、風速と日中は日射量、夜間は放射収支量を用いて大気の状態をA（不安定）からG（安定）に分類したものであり、A-Bが不安定、BC-Dが中立、E-Gが安定である¹⁾。パスキル安定度分類表をTable.2に示す。

Table2.Classification of Pasquill's Stability¹⁾

| Wind Speed (WS) m/s | amount of Solar Radiation (SR) M.J/m ² h | | | | amount of radiation balance (RAD) M.J/m ² h | | |
|------------------------|---|----------------|---------------|----------|--|-------------------|------------|
| | SR ≥2.1 6 | 2.16 >SR ≥1.08 | 1.08 >SR ≥0.5 | 0.54 >SR | RAD ≥-0.07 | -0.07 >RAD ≥-0.14 | -0.14 >RAD |
| WS<2 | A | AB | B | D | D | G | G |
| 2≤WS<3 | AB | B | C | D | D | E | F |
| 3≤WS<4 | B | BC | C | D | D | D | E |
| 4≤WS<6 | C | CD | D | D | D | D | D |
| 6≤WS | C | D | D | D | D | D | D |

パスキル安定度と w'/u を比較することで、 w'/u が大気の流れを反映しているかどうかを確かめた。Table.1 に従い、高度26m で測定された日射量・放射収支量と風速を用いて、パスキル安定度を算出した。なお、夜間は日の入り前1時間から日の出後1時間とし、月ごとに時間設定を変えた。12-3月を冬としてパスキル安定度ごとの累積分布をFig.2に示す。 w'/u を乱れの指標として用いるため風速が大きくなる中立と風速が弱くなる安定度GはFig.2には示していない。Fig.2より、 w'/u の50%値でパスキル安定度が不安定から安定の順に並んでおり、 w'/u は乱れの指標と考えられる。

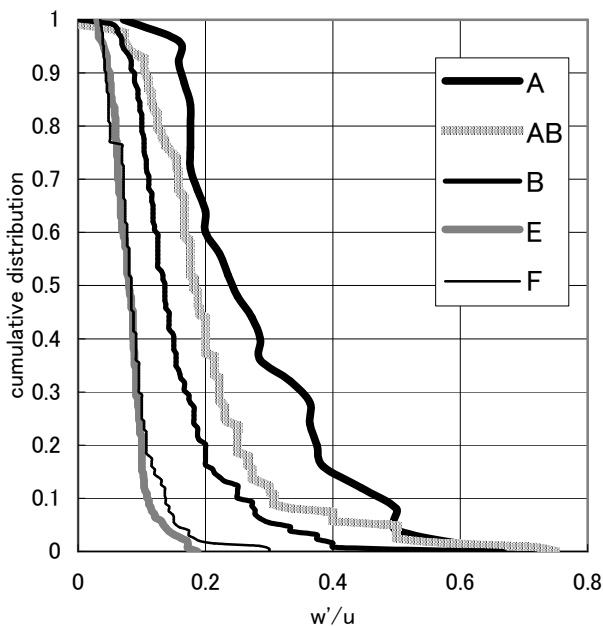


Fig.2 Cumulative distribution by pasquill's stability in winter

3. リチャードソン数と乱れの関係

パスキル安定度のほかに大気安定度を表すものとしてよく用いられるのがリチャードソン数(以後 Ri と表記)である。 Ri はある高さにおける大気安定度を表す無次元数であり、式(1)で定義される²⁾。

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{\partial \theta / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度(=9.80665ms⁻²)、 T は平均温度(K)、 θ は温位 (K)、 u は水平風速(ms⁻¹)、 z は高度(m)である。 Ri が正のとき安定、0のとき中立、負のとき不安定である。

使用したデータは、高度26mと110mの2点で観測されているので、式(1)の勾配を式(2)、(3)で近似した。平均気温 T は110m地点と26m地点の平均気温とした。

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta_{z=110} - \theta_{z=26}}{\Delta z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_{z=110} - u_{z=26}}{\Delta z} \quad (3)$$

また、温度を温位に換算するために温度減率は乾燥断熱減率より小さい0.006(Km⁻¹)を用いた。1年間のデータを対象にパスキル安定度別の Ri と w'/u の関係をFig.3に示す。

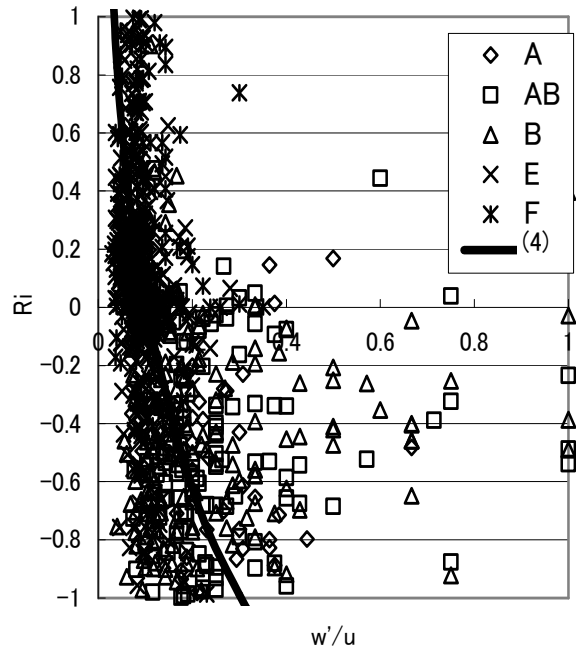


Fig.3 Relation between Ri and w'/u (all data)

Ri と w'/u の関係は対数型で近似できると仮定し、関係式(4)を求めた。

$$Ri = -10 \ln \left(\frac{9}{10} \frac{w'}{u} \right) \quad (4)$$

4. 乱流拡散係数の推定

鉛直方向の乱流拡散係数は時間スケール τ が大きいとき式(5)で表される。

$$K = \langle V^2 \rangle T \quad (\tau \gg T) \quad (5)$$

ここで K は乱流拡散係数、 V は鉛直風速、 $\langle \cdot \rangle$ はアンサンブル平均、 T はラグランジェの時間スケールである。

また、鉛直風速のアンサンブル平均と標準偏差 σ には式(6)の関係が成り立つ。

$$\sigma^2 = 2 \langle V^2 \rangle T \tau \quad (\tau \gg T) \quad (6)$$

標準偏差 σ と鉛直風速標準偏差 w' との関係は τ を用いて式(7)で表される。

$$\sigma = w' \tau \quad (7)$$

また、 τ は大気境界層内における渦乱流の長さスケール L と u を用いて式(8)の関係があると仮定する。

$$\tau = \frac{L}{u} = \frac{\kappa z}{u} \quad (8)$$

ここで、 κ はカルマン定数(=0.4)である。以上より、 K は式(9)のように表現できる。

$$K = \frac{\sigma^2}{2\tau} = \frac{w'^2 \tau}{2} = \frac{w'^2}{2} \frac{\alpha L}{u} = \frac{1}{2} \left(\frac{w'}{u} \right)^2 u \kappa z \quad (9)$$

式(4)を式(9)に代入すると乱流拡散係数 K は Ri を用いて表現することができる。(以降 PM と表記)

$$K = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{10} \exp \left(- \frac{10}{9} Ri \right) \right]^2 u \kappa z \quad (10)$$

1 次元大気境界層モデルの拡散係数に、大気境界層の乱流解析によく用いられる Mellor&Yamada level2.5 モデル³⁾ (以後 MYM と表記) を用いた計算と式(10)で示した拡散係数を用いて水平風速と温度の鉛直分布の計算を行った。MYM で計算した結果と、式(10)で計算した結果の 26m における 3 月と 8 月の温度と水平風速の観測値との比較を Fig.4, 5 に示す。

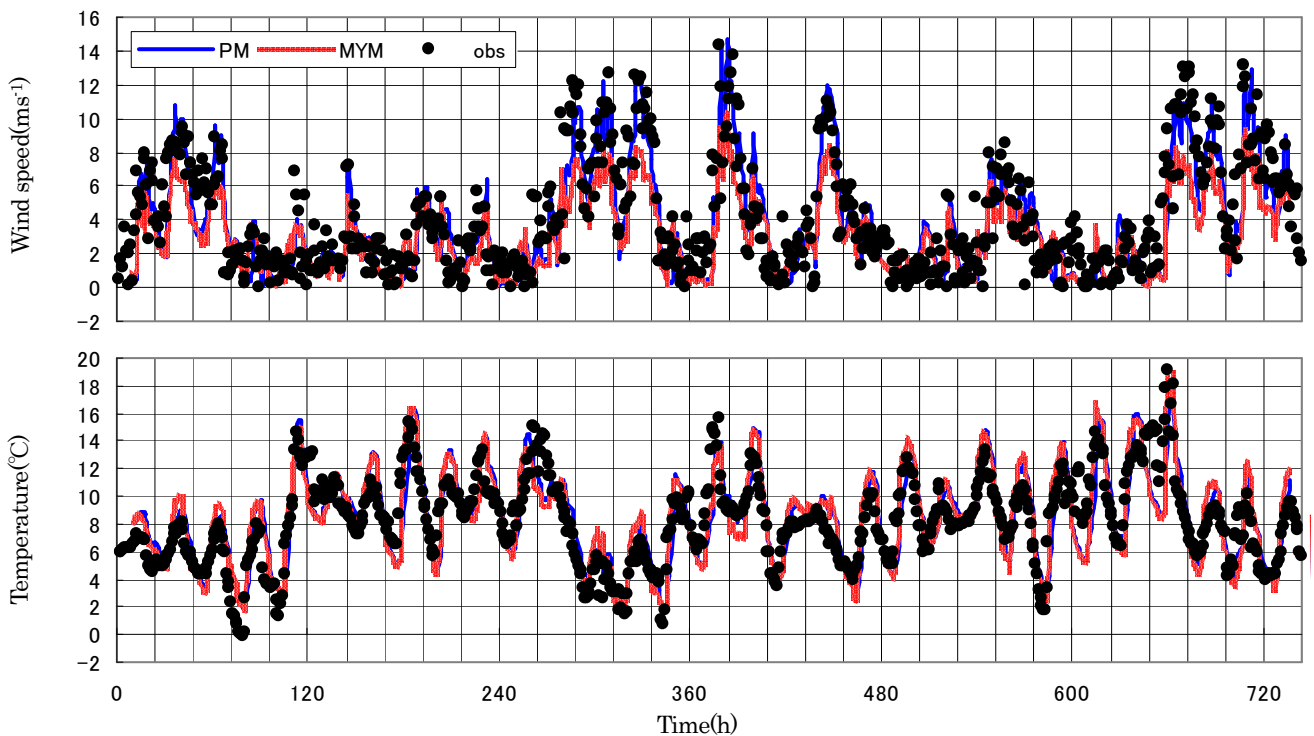


Fig.4 Comparison of observed values and calculated values at 26-meter attitude on March

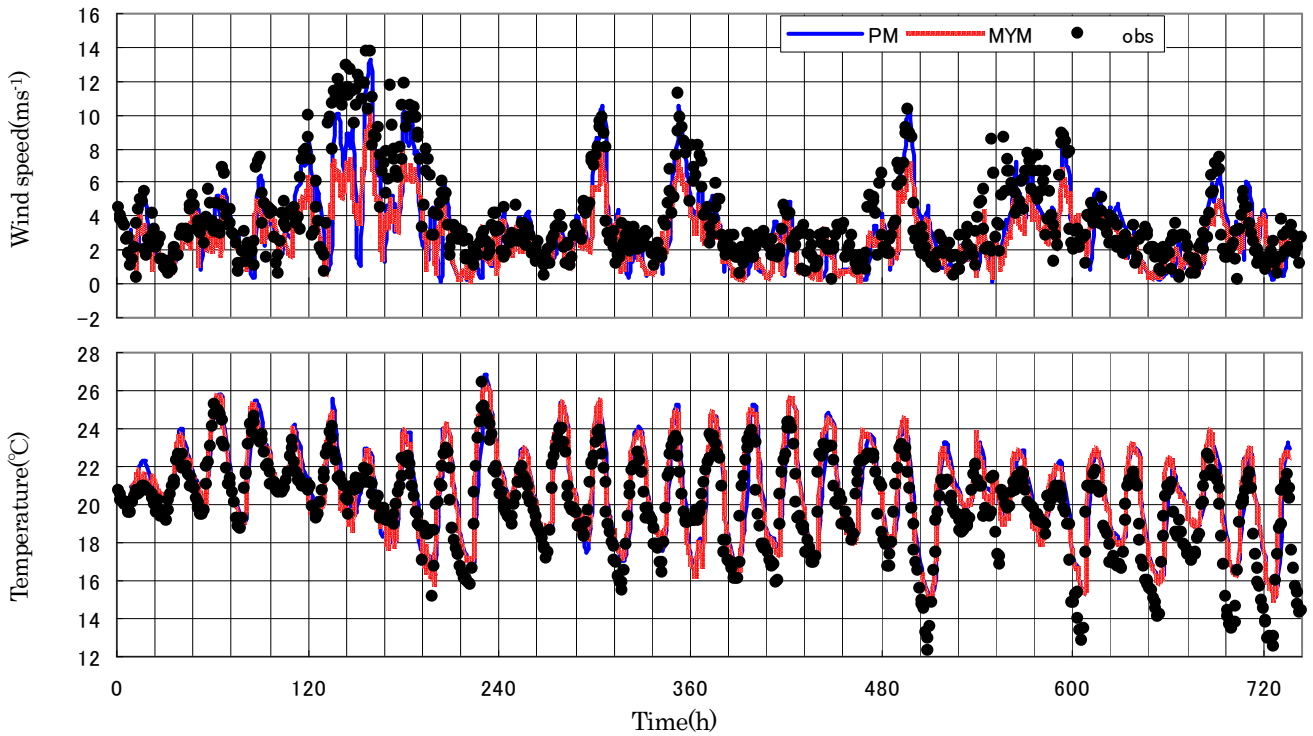


Figure.5 Comparing calculation value and MY model's value to observation at 26-meter attitude on October

温度に関してはPMとMYMの計算結果に大きな差は見られないが、水平風速に関しては、観測された風速が速いときにはMYMは過小評価する傾向があるが、PMの再現性は良い。さらに、相関係数と、観測値と計算値の時間的ずれを表す平均絶対誤差 (Mean Absolute Gross Error : MAGE)、パターンのずれを表す平均偏り (Mean Bias : MB) の3つの統計指標を用いてモデルの性能を評価した。相関係数・MAGE・MBはそれぞれ次のように定義される。⁵⁾

$$\begin{aligned} \cdot \text{相関係数 } r &= \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \\ \cdot \text{MAGE} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_i - O_i| \\ \cdot \text{MB} &= \bar{M} - \bar{O} \end{aligned}$$

ここで O_i はある時刻における観測値、 M_i は O_i に対応する計算値、 N は M_i と O_i がともに存在するデータの数、 $\bar{\quad}$ は平均値を表す。10月と3月の結果をTable.2に示す。PMの統計指標値はMYMの統計指標値とほぼ同じである。このことより、式(10)に示した拡散係数は妥当であることが示された。

Table.2 Statistical evaluations of PM and MYM

| | | wind speed | | temperature | |
|------|-----|------------|-------|-------------|-------|
| | | October | March | October | March |
| r | MYM | 0.80 | 0.84 | 0.90 | 0.84 |
| | PM | 0.75 | 0.85 | 0.87 | 0.84 |
| MAGE | MYM | 2.25 | 1.65 | 1.11 | 1.50 |
| | PM | 1.44 | 1.42 | 1.25 | 1.43 |
| MB | MYM | 1.48 | 1.02 | 0.73 | 0.24 |
| | PM | 0.74 | 0.34 | 0.72 | 0.22 |

参考文献

- 1) 環境庁大気保全局大気規制課, 1995 : 窒素酸化物総量規制マニュアル
- 2) 竹内清秀・近藤純正, 1981 : 大気科学講座 I 地表に近い大気, 東京大学出版会
- 3) 金湘栢, 2002 : 大気境界層に用いられる乱流モデルの相互比較とその適用可能性に関する研究, 大阪大学大学院博士論文
- 4) Kundan Lal Shrestha, 2007 : Coupling and evaluating MM5 and RAMS meteorological models with CMAQ air quality model for better assessment of air pollutants, 大阪大学大学院修士論文