

神戸大学工学部 ○道奥 康治

Univ.Karlsruhe Erich PLATE

Univ.Karlsruhe Rolf KAISER

Univ.Karlsruhe Matthias RAU

1. はじめに：晴天時の午前中においては、熱対流により地上から排出される汚染物質が広範囲に拡散し、しかも低高度の逆転層により鉛直輸送が遮られるため高濃度の物質が境界層内に捕捉される。この大気環境的に最も過酷な条件下の対流境界層を実験的に再現するためにカールスルーエ大学水文水資源研究室(IHW)では新型成層流風洞を開発した¹⁾。本研究では平均流と長時間平均乱流構造に関するこれまでの検討に引き続き²⁾、乱流エネルギーや乱れの二次モーメントに関して風洞の再現性能を検討する。

2. 成層流風洞の仕様¹⁾：風洞と大気との相似性を確保するためには最大 200℃の温度差を有する高温成層を限られた助走区間で達成する必要がある。IHW では図-1 のように成層流風洞を閉鎖循環型として、短い助走距離で対流境界層を再現した。風洞の上段は鉛直 10 層に分かれた循環部で、各層に独立のファンとヒーターが設置されている。下段は長さ 10m, 幅 1.5m, 高さ 1.5m の計測区間であり、底面にはヒーターを埋め込んだアルミニウム板が設置されている。各ファン、ヒーターの出力は PC 制御され、計測区間入り口で所定の風速・温度分布が得られる。図-2 で示すように、ほぼ均一な温度分布の混合層, ΔT の温度ジャンプを有する逆転層および一定の温度勾配(dT/dz)で安定成層化した自由大気層からなる典型的な対流境界層に関して実験が行われた。風速は二成分 LDV で、温度は抵抗線式温度計で各々計測された。

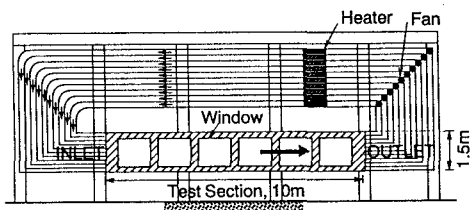


図-1 成層流風洞の構造

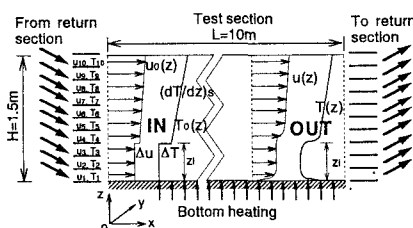


図-2 風洞計測部に再現される対流境界層

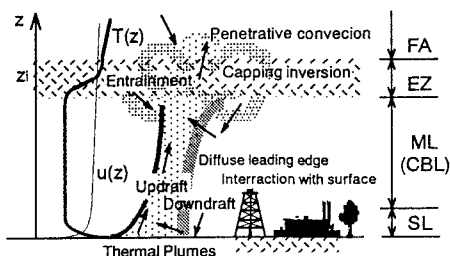


図-3 対流境界層(CBL)の様子

風上端から $x=3.98, 5.63, 7.28\text{m}$ の各計測断面(Windows-3, 4, 5)における逆転層高さは各々 $z_i=0.3, 0.325, 0.375\text{m}$ であった。

3. 対流境界層の概要：図-3 のように、表層(SL)はブルームが発生する乱れの生成領域、混合層(ML)は主としてブルームの updraft によって熱・物質の鉛直輸送が卓越する乱れの拡散領域、連行量域(EZ)は逆転層の安定な温度勾配がブルームの運動を抑制し自由大気層と混合層間の連行を促進する乱れの逸散領域、に各々相当する。

4. 乱流エネルギーフラックス(TKE)：流れは定常で流れ方向の変化は鉛直方向に比べて小さく無視できる。この時、基準化された乱流エネルギー $e = (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})/2$ の平衡式は以下のようにあらわされる。

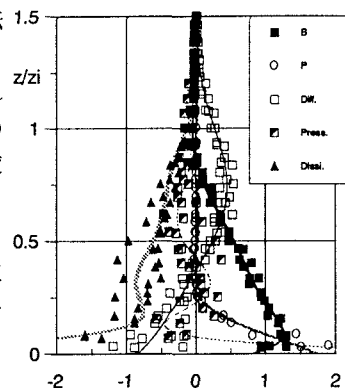


図-4 TKE-budget Eq.の各項

K. MICHIOKU, E.PLATE, R.KAISER, M.RAU

$$0 = \underbrace{-\frac{gz_i(\overline{w'\theta'_v})}{w_s^2\theta_v}}_B - \underbrace{\frac{z_i}{w_s^2}\overline{w'w'}}_P \frac{\partial \overline{U}}{\partial z} - \underbrace{\frac{z_i}{w_s^2}\frac{\partial(\overline{w'e})}{\partial z}}_{\text{Diff.}} - \underbrace{\frac{z_i}{w_s^2}\frac{1}{\rho}\frac{\partial(\overline{w'p})}{\partial z}}_{\text{Press.}} - \underbrace{\frac{z_i\epsilon_w}{w_s^2}}_{\text{Diss.}}$$

図-4はWindows-3, 4, 5で計測された上式各項の鉛直分布を示す。乱流エネルギーは表層(SL)で浮力フラックス B により生成される。混合層(ML)では、圧力再配分(Press.)と乱流拡散(Diff.)の作用を受けて乱れが均一化され、浮力の乱れ生成量 B は高さとともに減少する。連行領域(EZ)では、下層への自由大気の連行加入とサーマルブルームの上層への貫入(Penetrative Convection)にともなう仕事のために浮力エネルギーが消費され負の値をとる。平均せん断流による乱れの生成 P は表層ごく近傍に限定される。SLからML下部にかけての領域では、乱流拡散項 $Diff.$ が浮力起因の乱れを吸収し鉛直上方へ拡散する energy sink の役割をなし($Diff.<0$)、 $0.4<z/z_i<1.2$ の領域では、乱流拡散により輸送されたサーマルブルームが乱れを駆動して連行を促進する energy source($Diff.>0$)となる。熱的・機械的擾乱の複合作用による乱れの生成が活発なSLにおいては乱れの散逸 $Diss.$ が大きく、これは高さとともに減少する。風洞で再現された乱流エネルギーの平衡関係は、せん断生成項 P の貢献を除いて、鉛直一次元水槽で再現される対流境界層(図-5³⁾)と類似している。

5. 乱流二次相関項：鉛直方向の乱流熱フラックス $\overline{w'\theta'}$ 、温度の二次相関 $\overline{\theta'^2}$ 、流速二次相関項 $\overline{u'w'}$ の平衡式は各々以下ようになる。

$$\overline{w'\theta'}\text{-budget}$$

$$0 = \underbrace{-\frac{z_i}{w_s^2\theta_v}\overline{w'^2}\frac{\partial\overline{\theta_v}}{\partial z}}_P - \underbrace{\frac{z_i}{w_s^2\theta_v}\frac{\partial(\overline{\theta'_v w'^2})}{\partial z}}_{\text{Diff.}} + \underbrace{\frac{\overline{\theta_v'^2}}{\theta_v^2}}_B + \underbrace{\frac{z_i}{w_s^2\theta_v}\frac{1}{\rho}[p'\frac{\partial\overline{\theta'_v}}{\partial z}]}_{\text{Press.}} - \underbrace{\frac{2z_i\epsilon_{w\theta}}{w_s^2\theta_v}}_{\text{Diss.}}$$

$$\overline{\theta_v'^2}\text{-budget}$$

$$0 = \underbrace{-\frac{2z_i}{w_s\theta_v^2}\overline{w'\theta'_v}\frac{\partial\overline{\theta_v}}{\partial z}}_P - \underbrace{\frac{z_i}{w_s\theta_v^2}\frac{\partial(\overline{w'\theta_v'^2})}{\partial z}}_{\text{Diff.}} - \underbrace{\frac{2z_i\epsilon_\theta}{w_s\theta_v^2}}_{\text{Diss.}} - \underbrace{\frac{2z_i\epsilon_R}{w_s\theta_v^2}}_{\text{Rad.}}$$

$$\overline{u'w'}\text{-budget}$$

$$0 = \underbrace{-\frac{z_i}{w_s^2}\overline{w'^2}\frac{\partial\overline{U}}{\partial z}}_P - \underbrace{\frac{z_i}{w_s^2}\frac{\partial(\overline{u'w'^2})}{\partial z}}_{\text{Diff.}} + \underbrace{\frac{z_i}{w_s^2}\frac{g\overline{u'\theta'_v}}{\theta_v}}_B + \underbrace{\frac{z_i}{w_s^2}\frac{p'}{\rho}[\frac{\partial\overline{u'}}{\partial z} + \frac{\partial\overline{w'}}{\partial x}]}_{\text{Press.}} - \underbrace{\frac{2z_i\epsilon_{uw}}{w_s^2}}_{\text{Diss.}}$$

図-6, 7, 8に平衡式各項の鉛直分布を示す。図-6より、 $z/z_i<0.3$ のSLにおいて鉛直上向き熱輸送の大部分が生成され、 $0.7<z/z_i<1.1$ のEZにおいて連行による鉛直下向き熱輸送が生成されている。ML内では温度が均一化され顕著な熱輸送はなく各項とも小さい。図-7に関して、SLにおいて浮力による温度変動の生成とその拡散が卓越している点は大気の観測値と類似であるが、EZにおける生成量は大气に比べ非常に小さい。図-8において、表層内で負の $\overline{u'w'}$ (すなわち正のレイノルズ応力)がSLにおいて主に平均せん断流により生成されており、浮力起因のサーマルブルームもレイノルズ応力の増加に貢献していることが示される。

参考文献

- 1) Rau, M. and Plate, E.: *Wind Climate in Cities*, Kluwer, pp.431-456, 1995.
- 2) Fedorovich, E., Kaiser, R., Rau, M. and Plate, E.: *J. Atmos. Sci.*, Vol.53, pp.1273-1289, 1996.
- 3) 室田・道典・口田：土木学会論文集，No.393/II-9, 67-76, 1988.

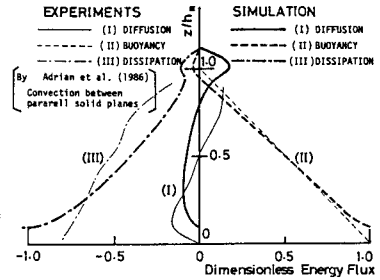


図-5 TKE-budget (鉛直一次元系)

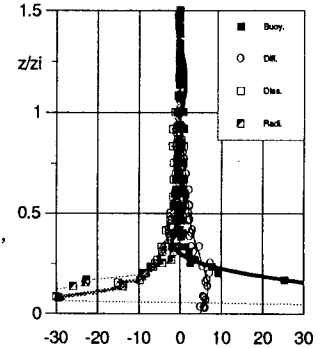


図-6 $w'\theta'$ -budget Eq.の各項

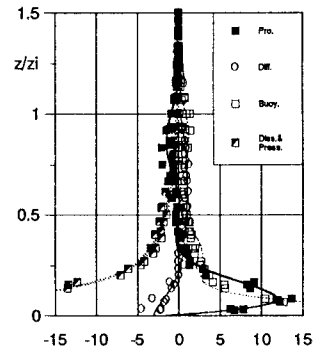


図-7 $\theta_v'^2$ -budget Eq.の各項

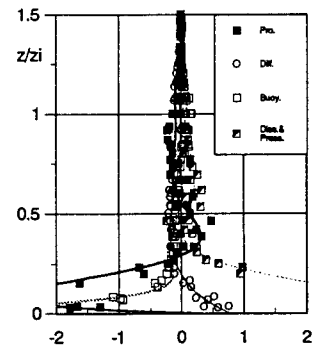


図-8 $u'w'$ -budget Eq.の各項