

No.22

地面に衝突する鉛直重力流の統計的性質

長田泰一（NASDA）、井山和人、小尾晋之介、益田重明（慶大理工）

Statistical Characteristics of Vertical Gravitational Flow
Impinging onto Horizontal GroundT.Nagata*¹, K.Iyama**, S.Obi**, S.Masuda***National Space Development Agency of Japan,
** Dept. of Mechanical Engineering, Keio University

ABSTRACT

As a laboratory model of downburst, statistics of turbulent velocity field of a vertical gravitational flow is investigated. By mechanically breaking a thin film placed at the bottom of a cylindrical container, a finite mass of a high-density liquid begins to fall into a stationary low-density liquid, forming a vertical thermal, impinging onto a horizontal ground and diverging radial outward. By employing PIV, the ensemble-averaged maps of velocity vectors, azimuthal vorticity and turbulent stresses in a meridian plane are obtained. The statistical characteristics in the downdraft stage, impinging stage and diverging stage are examined.

Key Words: Gravitational flow, Flow Visualization, PIV, Downburst

1. 緒言

気象現象のダウンバースト[1]は、上空で冷やされた空気塊が落下し、地面に衝突し水平方向に発散する現象である。航空機事故防止の観点から、その地表付近での速度場を知ることが求められている。ドップラーレーダーを用いた観測実験[1][2]が行われているが、現象の局所性および突発性から、いずれも時・空間解像度およびサンプル数が不足しているのが現状である。

したがって、初期条件や境界条件を系統的に設定し繰り返し再現可能な実験室規模でのシミュレーション研究が有効である。Lundgrenら[3]は高密度流体塊を静止した低密度流体中に落下させ、水平な地面に衝突させるモデルを提案し、可視化による観察を行っており、地面上での水平発散流先端の移動速度が実際のダウンバーストの観測結果とおおむね一致することを示した。しかし、速度場は測定していない。同じモデルを用いて、Alahyariら[4]はPIVによる速度場計測を行っており、随伴渦輪が発生することを示している。しかし、瞬時速度場を計測したのみで、統計量については述べていない。

数値シミュレーションは、降水、相変化及び熱移動を1次元の時間依存モデルで行ったもの[5] (Srivastava, 1985, 1987) や地面を考慮して衝

突後の重力流を加えたモデル[6] (Proctor, 1988) があるが、自然界で実際に起こった特定の事例をなるべく精密に再現することを目的としているため、降水（混相流）、相変化および熱移動を考慮した複合モデルである。したがって、個々の仮定に対する個別の検証が必要であるが、観測結果が少ないため数値モデルの検証は不十分であると言える。また、地表付近に限れば、鉛直重力流の地面への衝突を再現すれば十分であると考えられる。

本研究では、鉛直重力流が地面に衝突した場合の地面付近での速度場の統計的性質を実験的に求めることを目的とする。降水、相変化、熱移動は考慮しない。図1にモデルの概要を示した。ある一定量の周囲との密度差が $\Delta \rho = \rho_1 - \rho_0$ の高密度流体塊が低密度流体中に開放されると、鉛直重力流が形成される。重力流の周囲にはせん断層が形成され、衝突後は地面とのせん断が発生し、これらは乱流の生成に寄与する。

非圧縮、ブシネスク近似および粘性係数が同じと仮定すると、運動方程式は、

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla(p - p_0) - \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g\mathbf{k} + \frac{\mu}{\rho_0} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

となる。ここで、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 p_0 は周囲

¹ E-mail: nagata.taiichi@nasda.go.jp

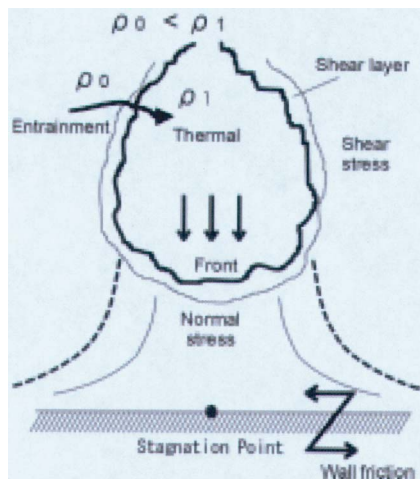


Fig1 Schematic diagram of vertical gravitational flow impinging onto a horizontal ground

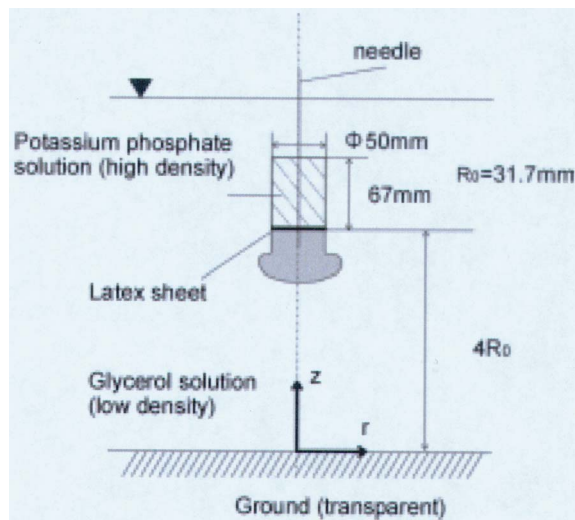


Fig2 Experimental setup

の圧力、 g は重力加速度、 \mathbf{k} は鉛直方向上向きの単位ベクトルである。右辺第2項が駆動力である浮力をあらわす。時間スケールを、

$$T_0 = \left(\frac{R_0 \rho_0}{g \Delta \rho} \right)^{1/2} \quad (2)$$

とする。渦度輸送方程式には、浮力による渦度の生成項である $-g(\nabla \rho / \rho) \times \mathbf{k}$ を含み、これは周方向渦度の生成を意味している。代表長さを、高密度流体塊と同じ体積を持つ球の半径 R_0 で定義し、代表速度は $V_0 = R_0 / T_0$ とする。本モデルの無次元パラメータはレイノルズ数 $Re \equiv \rho_0 R_0 V_0 / \mu$ のみである。

2. 実験装置、方法

図2に装置の概要を示す。底面をLatex膜で閉じた円筒形ポットに高密度流体を入れ、この膜を直動ギア付きステッピングモーターに取り付けられた針によって瞬時に割ることにより、高密度流体が重力により低密度流体中に落下し下面の水平板に衝突するようになっている。長さスケール R_0 は一定で 31.7mm、レイノルズ数 Re は 2070 である。時間スケールは $T_0=0.45\text{sec}$ 、初期放出高さは $4R_0$ である。

流れ場全体にナイロン 12 (粒径 $90\mu\text{m}$ 、比重 1.02) のトレーサー粒子を混入し、厚さ 5mm のストロボシートを地面に垂直または地面上に平行に照射して断面を可視化した。そして、CCDカメラを用いて側方から撮影を行い、画像処理流速計 (PIV) により速度場を計測した。PIV のアルゴリズムには、濃度パターン相関法を用いた。また、1画素未満の精度を持たせるために、サブピクセル補間を行った。さらに、偶然相関係数値が大きいために、誤った対応付けがされてしまったベクトル (過誤ベクトル) に対して、速度の絶対値が周囲8近傍の平均値の1.6倍よりも大きい時はそれを棄却するという処理を行った。空間分解能は $0.295\text{mm}/\text{Pixel}$ 、時間分解能は 33msec である。また、PIV計測の際に、高密度流体と低密度流体の屈折率の違いにより過誤ベクトルが発生する問題を回避するため、屈折率の近いリン酸カリウム溶液 (高密度流体) とグリセリン溶液 (低密度流体) との組み合わせを採用した[7]

3. 結果および考察

図3にアンサンブル平均速度場の結果を示す。軸対称を仮定しており、中心軸から右側のみを示している。時間は地面への衝突の瞬間を $t/T_0=0.0$ としている。衝突の瞬間の定義は後述する。また、PIVの制限から $z \geq 0.09R_0$ ($\approx 2.9\text{mm}$) の範囲の速度場を示している。

$t/T_0=-1.8$ の下降期では、下降流と周囲静止流体との間に、大きな循環領域が形成されているのがわかる。これは渦輪と考えられ、Alahyariら[4]が瞬時速度場で示した結果と一致している。この渦輪は成長を続け、 $t/T_0=1.9$ の衝突期および t/T_0 の発散期を通じて見ることができ。渦の発生は、緒言で述べたように、この場合周囲流体とのせん断によるものと浮力による渦度生成が考えられる。ここで見られる渦輪がどのような機構で発生したかを考察するためには、密度場と速度

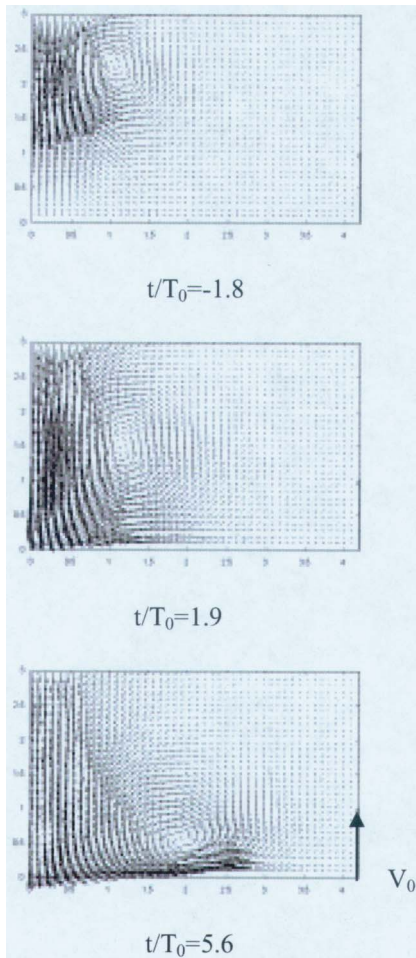


Fig3 Ensemble-averaged velocity vector maps in a meridian plane.

場を同時測定し、比較することによりはじめて明らかになるため、現状では分からない。

平均場の水平方向の最大速度は、 $t/T_0=2.8$ で $0.7 \pm 0.3V_0$ であり、その位置 (r, z) は $(1.2R_0, 0.1R_0)$ で観測された。また、鉛直下向きの最大速度は、 $t/T_0=0.74$ で $1.1 \pm 0.5V_0$ 、位置は中心軸上で高さ $z=1.2R_0$ となっている。

図4に中心軸上における平均速度の z 方向成分のプロファイルを示す。下降期の分布に着目すると、放物線上の分布と直線状の分布に分かれることがわかる。 $t/T_0=-1.8$ では、 $Z/R_0=2.2$ 付近で速度はピークを持ち、 $Z/R_0=1.4$ までは速度の絶対値は急激に減少する。 $0 < Z/R_0 < 1.4$ では地面に近づくにつれてなだらかに減少し、地面上ではほぼゼロとなる。この $Z/R_0=1.4$ はサーマルの下限であると考えられる。つまり、サーマル内部の速度場とサーマルによって下に押し付けられることにより誘起される速度場を表している。このことから、この速度プロファイルが不連続になる位

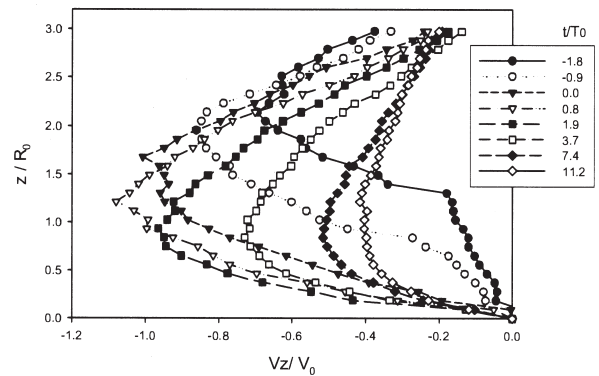


Fig.4 Time variation of average vertical velocity V_z along the centerline.

置が地面に接する時刻を衝突の瞬間として定義した。

図5にレイノルズ応力の分布を示す。本実験の鉛直重力流発生方法（Latex膜を針で破る方法）では、初期攪乱が大きく、さらに、その攪乱の影響が十分無視できるようになるまでの緩和時間も十分でない。したがって、ここで示す乱れの相関とは、本来の意味である、乱流によって自己発生する乱れ成分であるレイノルズ応力とは完全に一致しない点に注意する必要がある。

下降期では、鉛直成分 v_z^2 がサーマル境界内で存在しており他の成分よりも大きい。また、サーマルの先端領域で時間とともに増加し、衝突直前の $t=-0.2T_0$ で最大値 $v_z^2 \approx 0.3V_0^2$ となる。図6には鉛直応力の生成項 P_{zz} の分布を示しているが、サーマルの先端付近に集中している。このことは、 v_z^2 の分布とよく対応している。半径方向成分の v_r^2 は下降期ではより小さいが、衝突期で急速に増加し、 $t=0.37T_0$ に地表付近で最大値 $v_r^2 \approx 0.1V_0^2$ となる。半径方向の生成項 P_{rr} を見ると、衝突期の地面付近でもっとも顕著である。これは、流れが鉛直方向から水平方向に変化する場所である。生成項 P_{rz} は下降期には、サーマルの側面のせん断層で大きく、衝突期では P_{rr} と同じ領域に存在している。このように、レイノルズ応力とその生成項との対応が定性的には取れていることから、初期攪乱の影響は致命的ではないと言える。

4. まとめ

ダウンバーストの実験モデルとして、鉛直重力

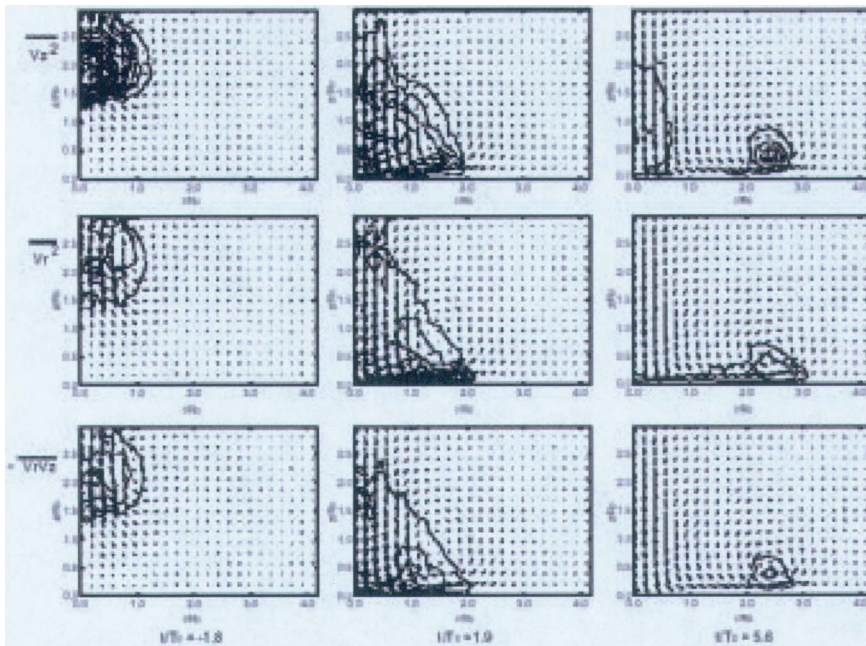


Fig.5 Contour of apparent Reynolds stress components and velocity vector map in a meridian plane. Contour interval is $0.015V_0^2$.

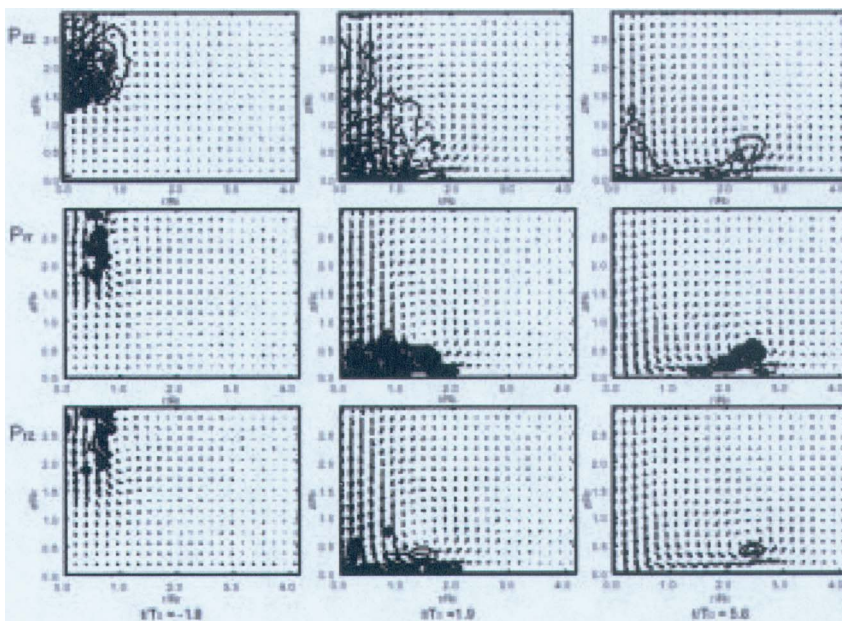


Fig.6 Contour of production rate of apparent Reynolds stresses and velocity vector map in a meridian plane. Contour interval is $0.035V_0^3/R_0$. Shaded region means negative values.

流の水平地面への衝突について実験を行った結果以下の点が明らかになった。

- ・ 随伴渦輪が見られる。
- ・ 平均場の水平方向の最大速度は、 $t/T_0=2.8$ で $0.7 \pm 0.3V_0$ であり、その位置 (r, z) は $(1.2R_0, 0.1R_0)$ で観測された。また、鉛直下向きの最大速度は、 $t/T_0=0.74$ で $1.1 \pm 0.5V_0$ 、位置は中心軸上で高さ $z=1.2R_0$ となっている。
- ・ レイノルズ応力は、サーマル領域内に存在し、鉛直応力の生成項 P_{zz} は鉛直方向のせん断が大きなサーマルの先端部で大きく、一方、半径方向成分 P_{rr} は下降期ではサーマルの側面のせん断領域で、また衝突期以降では発散流の先端部分で大き

い。

参考文献

1. Fujita, T.T.: The Downburst. Univ. Chicago Press, 1985
2. Wilson, J. W., et al.: J. Climate and Applied Meteorology, 1984, Vol. 23, 898-915
3. Lundgren, T.S., et al. J. Fluid. Mech., 1992, Vol.239, 1992, 461-488.
4. Alahyari, A. et al.: AIAA, 1995, Vol.33, No.11, 2128-2136.
5. Srivastava, R.C.: J. Atmospheric Sciences, 45(21), 1004-1023, 1985.
6. Proctor, F.H.: J. Atmospheric Sciences, 45(21): 3137-3160, 1988.
7. Alahyari, A. et al.: Experiments in Fluids, vol.17 (1994), 434-440.