

# 空間的に加熱される雲型ブルームの流体力学的挙動

環境システム工学専攻 2年 佐藤 巧  
指導教員 陸 旻皎  
楊 宏選

## 1. はじめに

密度噴流とは周囲流体と密度が異なる流体が運動量を持って排出される流れである。そのうち密度差のないものをピュア噴流、密度差のみ排出するものはブルームと呼ばれている。これらは流体力学の分野で大量に実験的に解明され、連行のコンセプトに基づく積分法を始めとして解析法が確立されている。しかし同じく浮力で上昇する積乱雲をブルームの積分モデルを用いて解析を試みた研究があったもののうまく機能しなかった<sup>1,2</sup>。積乱雲の連行特性がブルームと異なるからではないかと考えられた。積乱雲の場合、凝縮する過程で放出される潜熱により加熱され浮力は上昇途中で得られている。これはソースから浮力をもって排出され上昇しながら拡散していく旧来のブルームとは対照的である。上昇拡散過程に加えられた浮力が混合・連行プロセスに与える影響を調べた実験がいくつか行われたが、これまでの浮力の存在が連行を強めるという共通認識を覆し、この浮力が連行を弱めるという実験結果<sup>3</sup>が得られた。一方、同様の設定の下で行われた別の実験では連行を強めるという共通認識を支持する結果<sup>4</sup>を得ている。この相反した結果は実験・計測の難しさによる精度低下に起因すると思われる。

本研究は拡散区間で加えられた浮力の影響を数値実験にて調べる。まず特性があまり知られていない選別的に加熱した噴流（以下、加熱噴流）の数値計算の有効性を比較的知られている噴流、密度噴流から評価する。次に、自由せん断流で一般的にせん断層に集中する渦が螺旋状に巻きあがり、2次元噴流では渦対が形成される<sup>5</sup>が、この組織的渦構造が噴流・ブルームの連行に支配的影響を与えるとされて

いる<sup>6</sup>ことから、噴流に加えて渦対を放出する数値実験を行い、進行拡散する渦塊に着目して渦塊半径及びその半径を通る流量（渦塊流量）を算出、噴流・渦対にかかる浮力の影響に関して考察した。

## 2. 手法

本研究では非圧縮性で Boussinesq 近似を適用した標準  $k - \epsilon$  モデルを用いて、図 1 に示すような 2次元面対称モデルにおいてピュア噴流 (pure jet)、密度噴流 (buoyant jet)、加熱噴流 (heated jet) の数値計算を行う。その後、半径 ( $x$  軸) 方向における流速、トレーサー濃度、領域内の基準温度からの温度差に対し、経験式として Wang & Law<sup>7</sup> が提示したガウス分布 (式 1, 式 2, 式 3) と比較することで加熱噴流の数値計算の有効性を評価する。また、主流軸 ( $z$  軸) 方向において噴流の幅にあたる噴流断面積及び断面積部分に流れる噴流流量を算出した。次に噴流と同じ条件の下、噴流の噴出を 2 秒後に止めて形成される渦対 (各噴流に対しそれぞれピュア渦対 (pure vortex)、密度渦対 (buoyant vortex)、加熱渦対 (heated vortex) とここで呼ぶ) の数値計算を行い、渦塊半径及び半径部分に流れる渦塊流量を算出、その変化について調べた。そして各々の加熱強度 (Hadd) を変化させた場合においても数値計算を行い、加熱強度の大きさと浮力、連行の関係についても調べた。さらに、噴流・渦対の挙動 (流線) や主流軸方向における流速、トレーサー濃度、温度差の分布からも連行に関して考察する。なお、噴流断面積、渦塊半径及び各流量を算出する際、噴流出口に濃度が 1 である流れに影響しない受動スカ

<sup>1</sup>Squires, P., and Turner, J. S.: An entraining model for cumulonimbus updrafts, Tellus 14, 1067, 1962.

<sup>2</sup>Warner, J.: On steady-state one dimensional models of cumulus convections, J. Atmos. Sci. 27, 103, 1970.

<sup>3</sup>Bhat, G. S., and Narasimha, R.: A volumetrically heated jet: Large eddy structure and entrainment characteristics, J. Fluid Mech., Vol. 325, pp.303-330, 1996.

<sup>4</sup>Agrawal Amit and Prasad, Ajay K.: Evolution of a turbulent jet subjected to volumetric heating, J. Fluid Mech. 511, 95, 2004.

<sup>5</sup>福本康秀: 渦運動の基礎知識: 3. 渦層, ながれ, 24, pp.443-457, 2005.

<sup>6</sup>Sreenivas, K. R., and Prasad, Ajay K.: Vortex-dynamics model for entrainment in jets and plumes, Phys. Fluids, 12, pp.2101-2107, 2000.

<sup>7</sup>Wang, H., and Law, A. W.-K.: Second-order integral model for a turbulent buoyant jet, J. Fluid Mech., Vol.459, pp. 397-428, 2002.

ラーであるトレーサーを投入し、その濃度の閾値をもって噴流流体の抽出を行っており、今回は濃度が0.01以上になる部分を抽出している。

$$\frac{U}{U_c} = \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x}{b_U} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\frac{C}{C_c} = \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x}{b_C} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$\frac{T}{T_c} = \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x}{b_T} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$U_c, C_c, T_c$  : 中心軸上の各値,  $b_U, b_C, b_T$  : 各半値幅

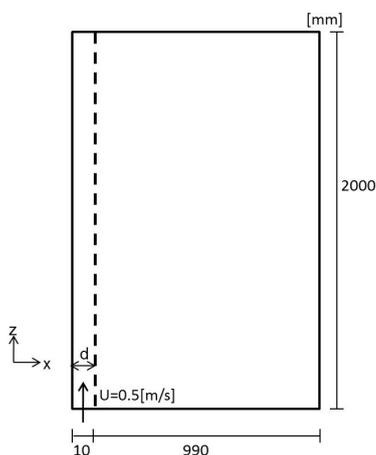
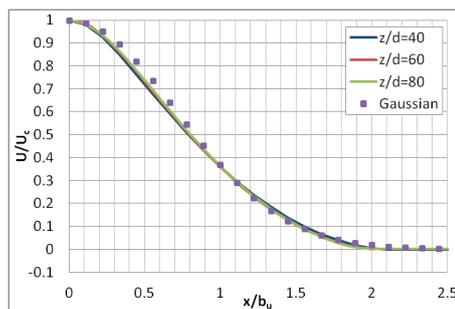


図 1: モデル概略図

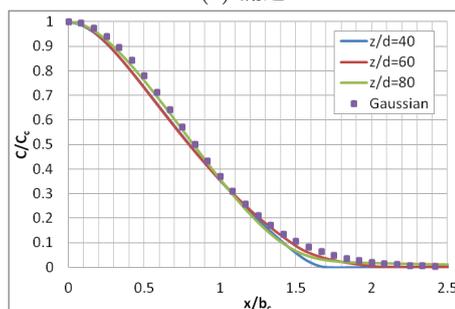
### 3. 結果及び考察

#### 加熱噴流の有効性の評価

ピュア噴流及び密度噴流のケースにおいて式1及び式2, 式3に倣って無次元化を行った半径方向における流速及びトレーサー濃度, 温度差の分布を図2及び図3に示す。実線で示す計算結果の分布と点線に示すガウス分布を比較すると、どちらもほとんど値に差が見られなかったため、今回の数値計算法は特に問題なかったと考えられる。



(a) 流速



(b) トレーサー濃度

図 2: 半径方向における流速, トレーサー濃度, 温度差の分布 (ピュア噴流)

加熱噴流の場合の各分布を図4に示すが、温度差の分布に関して Wang & Law の実験結果<sup>7</sup>にも見られた top-hat (平頂) ガウス分布を示しており、こちらの観点から見ても加熱噴流の計算結果が少なくとも合理的なものだったといえる。

#### 噴流・渦対の連行に関する考察

始めに中心軸における流速及びトレーサー濃度, 温度差の分布を図5に示す。噴出口付近では速度が減衰しないポテンシャルコア領域が存在するため、加熱強度を与えられて続けて浮力が加わった加熱噴流以外は各値の増加は起こらない。この領域を抜けて拡散領域に至ればトレーサーはより早く拡散し、流速及び温度差に関しては減衰が弱まりつつ進行していくことから、噴流流体にはある程度の連行があったことを示している。

次に噴流断面積及び噴流流量の分布を図6に示す。ピュア噴流を基準にすると浮力を与えられた密度噴流の噴流断面積は小さく、噴流流量は大きくなっており、こちらも Wang & Law の実験結果<sup>7</sup>と定性的に一致している。浮力が加わり続けた加熱噴流は密度噴流よりも顕著な変化を示し、こちらに関して

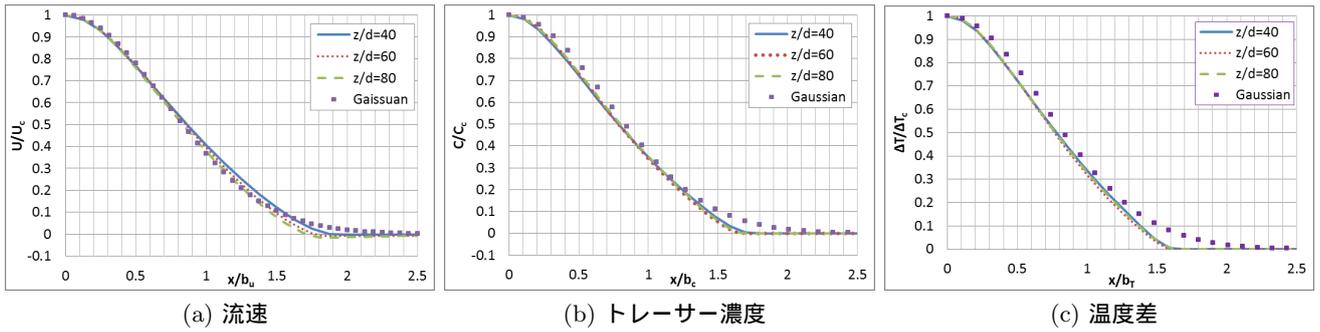


図 3: 半径方向における流速, トレーサー濃度, 温度差の分布 (密度噴流)

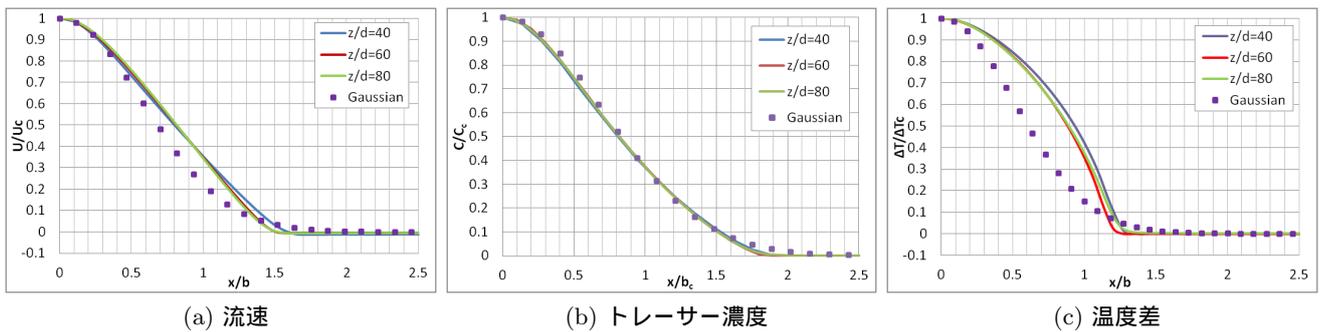


図 4: 半径方向における流速, トレーサー濃度, 温度差の分布 (加熱噴流)

も合理的な結果を得た。加熱強度を大きくさせた場合、断面積はあまり変化しないが流量は比例して増大していく。これらを説明する要因として浮力の存在が連行を強めているという効果があり、従来の共通認識と一致する形をとった。

さらに渦塊半径及び渦塊流量の分布を図 7 に示す。こちら噴流と同様にピュア渦対を基準とすると、密度渦対及び加熱渦対において浮力が与えられると渦塊半径は小さくなり、渦塊流量のピークは増大した。加熱強度を大きくするとその傾向はさらに大きくなる。このことから、渦対においても浮力の存在が連行を強めていると考えられる。しかし、加熱渦対における渦塊流量の分布が不安定なものであることと、ここでは示さないが挙動そのものが他の 2 つとは異なり、形成された渦対が対称軸から離れていくと同時に渦塊の構造が崩れていく様子を確認することができた。これらのことから、渦対に加熱強度が加わると組織的な渦構造を破壊してしまう可能性がある。

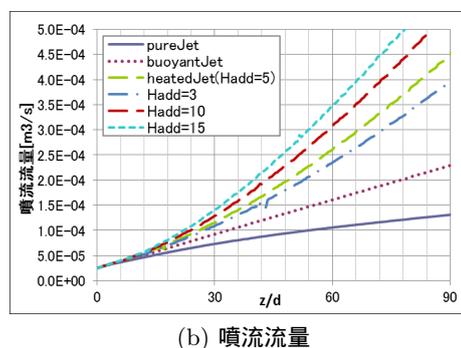
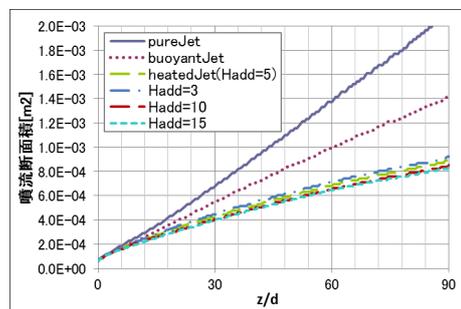


図 6: 噴流における算出結果

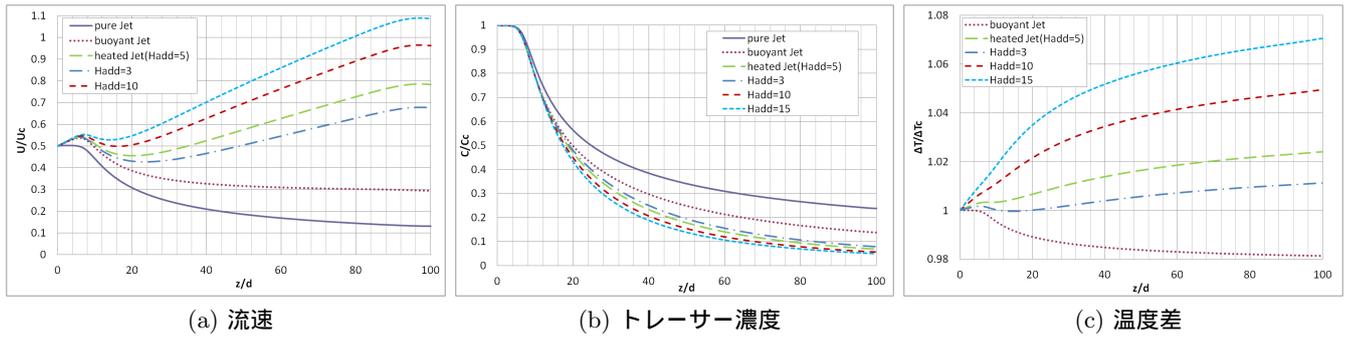


図 5: 主流軸方向における流速, トレーサー濃度, 温度差

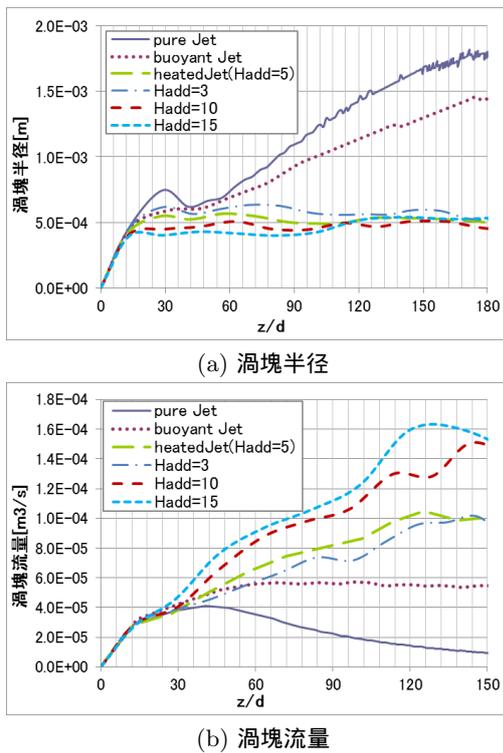


図 7: 渦対における算出結果

#### 4. まとめ

本研究では加熱噴流の有効性の評価及び噴流・渦対に対して連行に関する考察を行った。加熱噴流の数値計算法に関してはピュア噴流, 密度噴流の結果及び既存の研究結果から少なくとも合理的であるといえる。また, 噴流・ブルームにおける浮力の影響に関して挙動や流量の変化から考察したところ, 噴流・渦対において浮力の存在が連行を増加させる働きを示し, 従来の認識を支持する結果を得た。なお, 渦対においては空間的に熱が加えられることによってその渦の組織的構造を破壊されたような動きを見ることができた。本研究は連行特性の定性的な考察にとどまっているが, もし定量化ができた場合, ブルームの積分モデルを積乱雲に拡張し手早く容易に積乱雲を解析できるようになる展開が期待できる。