

建物周辺における浮力のあるガスの拡散の数値予測 (その1)

—ε方程式における浮力による生産項のモデル化の検討を中心として—

Numerical Prediction of Plume Diffusion Around Building
—Study on Buoyant Production Term in ε Equation—

村 上 周 三*・持 田 灯**・山 村 真 司**
Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Shinji YAMAMURA

1. 序

浮力のあるガスがwake内の地表面より排出された場合の周辺への拡散に関して、 k -εモデルの結果と風洞実験を比較し、特に浮力によるεの生産のモデル化に関して検討した結果を示す。ここでは、Rodi等による方法^{1,2)}、Viollet等による方法³⁾等を取り上げ、ε方程式中の浮力項の取り扱いの相違が流れ場、拡散場に及ぼす影響について調べる。

2. 数値シミュレーションの概要

- (1)解析対象 (図1) 建物から1Hb風下の地表面より、ガスが $W_s/U_b=0.25$ の排出速度で発生。
- (2)計算の概要 浮力を考慮した k -εモデル (表1, 2) を使用して3次元でMAC法により解析。時間差分はAdams-Bashforth, 空間差分は2次精度の中心差分。スカラーの移流項はQUICKスキーム、ただし、空間的振動の発生する箇所は、一次的に一次精度風上差分を使用⁴⁾。メッシュ分割を図2に、境界条件を表3に示す。
- (3)計算種類 (表4) 浮力のあるガスが排出された場合の計算 (case 2~4) に先立ち、ガス排出無し (case

0), 等密度ガスの排出 (case 1) の各計算を行った。浮力のあるガスの排出を対象としたcase 2~4ではεの生産のモデル化に、表2に示すtype 1~3を使用し結果を比較した。

(4)εの生産項のモデル化 文献1)でRodiは、表2中の(10)式の形でεの生産項を定義し、2次元垂直せん断流の場合は $R_f=0$ 、2次元水平せん断流の場合は、 $R_f=-G_k/(P_k+G_k)$ という形で R_f を定めている。加藤等は非等温室内気流の数値予測において、表2式(11.1)、(11.2)により速度の鉛直成分が卓越する流れ場と水平成分が卓越する流れ場を局部的に判別し、2次元流を対象としたRodiのモデル化を3次元乱流場へ拡張している⁵⁾。本研究では、このモデル化をtype 3と呼ぶ。一方、Demuren, RodiはCooling towerから鉛直方向に排出されるplumeの拡散の3次元数値解析において、流れ場全体に、垂直せん断流の場合に対応する C_3 の値 ($C_3=C_1=1.44$) を与えている²⁾。本研究ではこれをtype 2と呼ぶ。また、Viollet等は、流れ場の評価を浮力によるεの生産項

U_i : 平均風速の3成分	記号	h_1 : 壁面第一セルの幅
Hb : 建物高さ		k_1 : 壁面第一セルの k
U_b : Hbにおける風速		ϵ_1 : 壁面第1セルのε
D : ガス排出口の口径(Hb/20)		ρ_s : 排出ガス密度
W_s : 排出速度		ρ_a : 空気密度
k : 乱流エネルギー		$\Delta\rho : \rho_s - \rho_a$
ε : kの散逸		Fr.d : 密度フルード数
ν_t : 渦動粘性係数		(Fr.d = $\Delta\rho H_b g / \rho_a U_b^2$)
l : 乱れの長さスケール		g : 重力加速度
u^* : 摩擦速度		C : 濃度
P_k : 平均流によるkの((5)式)		C_0 : 基準濃度 ($q/U_b \cdot H_b^2$)
G_k : 浮力によるkの生産項 ((6)式)		q : ガス発生量 ($q = W_s \times D^2$)
Rf : フラックスリチャードソン数	suffix t : 接線方向	
(Rf = $-G_k/(P_k+G_k)$)	n : 法線方向	

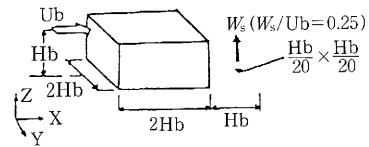
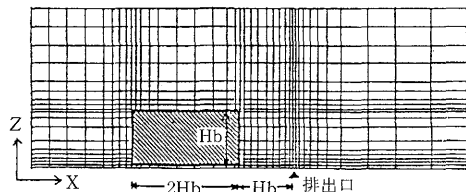


図1 建物モデル



メッシュ数: $55(x) \times 50(y) \times 25(z) = 68750$
計算領域: $30.2H_b(x) \times 22H_b(y) \times 7.8H_b(z)$
 $h_1 = 1/12H_b$

図2 メッシュ分割図 (建物周辺拡大図)

*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

**東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

表1 浮力を考慮したk-εモデル (3次元)^{1,2,5)}

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(P + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - Fr. d \cdot C \cdot \delta_{i3} \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + (P_k + G_k) - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_1 P_k + C_3 G_k) - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (5) \quad G_k = Fr. d \cdot \frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial x_i} \delta_{i3} \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

$C_0 = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_3$: 表2参照
 $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, \sigma_c = 1.0$

表2 ε方程式における生産項の取り扱い((4)式A項)

type 1 ³⁾	表1(4)式④項 $\cdot G_k > 0$ (不安定)のとき $C_3 = C_1$ (8.1) $\cdot G_k \leq 0$ (安定)のとき $C_3 = 0$ (8.2)
type 2 ²⁾	表1(4)式④項において $C_3 = C_1 (=1.44)$ (9)
type 3 ³⁾	表1(4)式④項を次のように書き替える。 $A = C_1 \frac{\epsilon}{k} (P_k + G_k) (1 + C'_3 Rf)$ (10) ただし, $C'_3 = 0.8$ $U_1^2 + U_2^2 \leq U_3^2$ のとき $Rf = 0$ ((10)式を(4)式④項の形に直すと $C_3 = C_1$) (11.1) $U_1^2 + U_2^2 > U_3^2$ のとき $Rf = -\frac{G_k}{P_k + G_k}$ ($C_3 = 0.29$ に相当) (11.2)

表3 境界条件 (諸量はUb, Hbで無次元化)

流入面	$U(z), k(z), l(z)$: 風洞実験値 $(U(z) \propto Z^{1/4}, l(z) = C_0^{1/4} U(z) \int \tilde{R}_x dx)$ (\tilde{R}_x は自己相関関数) $V(z) = 0, W(z) = 0, C(z) = 0$ $\epsilon(z) = C_D k(z)^{3/2} / l(z), \nu_t(z) = k^{1/2}(z) l(z)$
上空間, 側面, 流出面	境界外圧力 $P = 0, U_i, C, k, \epsilon$: free slip
地上面 建物壁面	U_i : 1/4のpower law, $U_n = 0,$ C, k : free slip ϵ : Launder, Spalding等のwall function ⁶⁾ $\epsilon_1 = (C_D^{3/4} k_1^{3/2} / l_1) \cdot 1/2 \cdot \ln(2E y^+)$ ただし, $y^+ = (1/2 h_1) u^* / \nu$ $= (1/2 h_1) \cdot C_D^{1/4} k_1^{1/2} / \nu$ $l_1 = 1/2 \kappa h_1, C_0 = 0.09, E = 9.0$

表4 計算種類

CASE No.	ε方程式の浮力項(表2参照)	W_0/Ub	ρ_s/ρ_a	Fr.d数
CASE 0	—	0	—	—
// 1	—	0.25	1.0	0
// 2	type 1	//	0.3	-5.6
// 3	type 2	//	//	//
// 4	type 3	//	//	//

G_k の各セルの値の正負によって行い, C_3 を決定する方法を提案している³⁾. 本研究ではこれをtype 1と呼ぶ. type 1では, 流れ場が安定 ($G_k \leq 0$) の場合は, εの負の生産

を抑えるために $C_3 = 0$ とし, 流れ場が不安定 ($G_k > 0$) の場合, これに伴う消散の増加を評価するために C_3 を C_1 と等しくしている. 以下ではtype 1~3を比較検討する.

3. 実験の概要

模型は20cm(W)×20cm(D)×10cm(H)の直方体. Re数 ($Ub \cdot Hb / \nu$) は 0.25×10^4 ⁷⁾. 風速の測定にはタンデム型熱線風速計を使用. 排出ガスは C_2H_4 と He をガス密度に応じて混合したものを使用し, FIDにより濃度を測定した.

4. 計算結果

4.1 平均風速ベクトルの比較 (図3)

(1)ガス排出無しの場合 ($W_0 = 0$, 図3(1), (2)) 風洞実験結果 (図3(1))と数値シミュレーション結果 (図3(2))は, 全体の流れのようすは良く対応している. しかし, 数値シミュレーションがwakeの大きさを多少大きく評価する傾向は立方体モデルに関する既往の研究^{8,9)}と同様である.

(2)等密度ガスが排出される場合 (図3(3))

排出ガスの影響は排出口の上方面のごく一部にかぎられており, 他の領域の気流分布は排出ガス無しの場合 (図3(2))とほとんど同じである.

(3)浮力を持つガスが排出される場合 (図3(4), (5))

浮力を持つガスが排出される場合, wake内の建物背面から排出口までの間で風速のW成分が大きくなっており浮力の影響が顕著である. また, case 2はcase 3に比べ排出口直上のW成分が大きくなっている.

4.2 乱流エネルギーkの分布の比較 (図4)

case 0の結果 (図4(2))は既往の計算と同様^{8,9)}, 実験 (図4(1))に比べて建物前方のkを大きく, またwake内の値を過小評価している.

4.3 濃度分布の比較 (図5, 6)

(1)等密度ガスが排出される場合 (図5)

実験 (図5(1))に比較して数値シミュレーション (図5(2))は高濃度域を大きく評価しているが, 高濃度ガスが排出口から建物背面の間の地表面付近に停滞しこれが後方に広がるようすはおおむね良く再現されている.

(2)浮力を持つガスが排出される場合 (図6)

実験結果 (図6(1))を見ると, 等密度ガスが排出される場合 (図5(1))に比較してwake内の濃度が全体的に小さい. 特に排出口から建物背面の間で, ガスが浮力のために斜め風上に拡散され, 地表面付近の濃度が大きく減少している¹⁰⁾. 数値シミュレーションにおいても case 2 (type 1) では, 等密度 (case 1) に比べてwake内の濃度が減少する傾向は再現されているが, case 3 (type 2) ではこの傾向が再現されておらず, case 4 (type 3) ではcase 2とcase 3の中間の傾向を示す. 一

研究速報

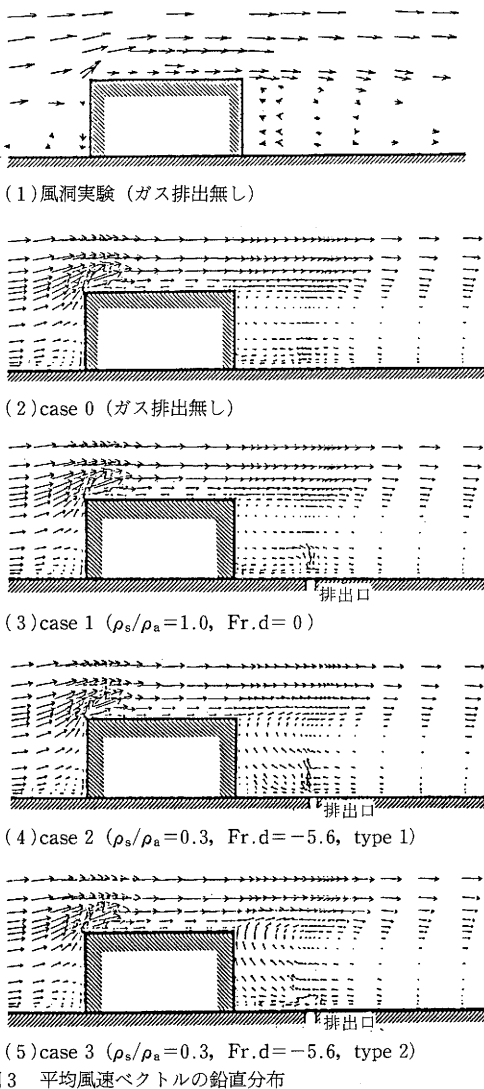
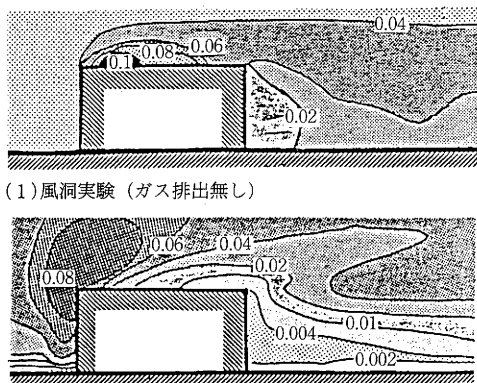


図3 平均風速ベクトルの鉛直分布



(2) case 0 (ガス排出無し)
図4 乱流エネルギーkの鉛直分布

方、浮力の影響で建物背面側の地表面付近の濃度が大幅に減少する傾向に関して、case 2 (type 1) で最も良く再現されているが、case 3 (type 2), case 4 (type 3) ではほとんど再現されていない、図7に各typeにおいて設定された C_3 の分布を示す。図中 \square の領域では ϵ の輸送方程式における P_k と G_k の寄与は等しく ($C_3=C_1=1.44$)、他の部分では G_k の寄与は P_k に比べてはるかに小さい ($C_3=0$ (type 1), $C_3=0.29$ (type 3))。また、ここには示さぬがtype 2では、流れ場の状態にかかわらず、すべての領域で $C_3=C_1$ となっている。type 1とtype 3を比較すると、建物背面とガス排出口の間の地表面付近において、type 1では $C_3=0$ となっているのに対し、type 3ではこの領域内の大半の部分で $C_3=C_1$ となっている。この差が建物背面側の地表面付近の濃度分布の相違(図6(2), (4))の原因となっているものと予想されるが、実験結果との対応から考えて、type 1で用いた C_3 の設定方法のほうがtype 2, 3に比べてより妥当であると思われる。建物背面側の地表面付近では流れ場は安定状態にある(図7(1)において $G_k < 0$ 、注参照)。type 1の結果が、このような領域における浮力のおおむね良く再現するという点に関しては、今回の結果はViollet等¹⁰⁾と同様である。一方、 $G_k > 0$ の領域(図7(1) \square)では、いずれのtypeを用いても実験に比べて濃度が大きくなっており、不安定状態における拡散効果の増大が正しく再現されていない。この点もViollet等¹⁰⁾と同様であり、今後の大きな課題と思われる。

5. 結論

- (1) 浮力の影響の大きい流れ場では、 ϵ の浮力による生産のモデル化の相違は流れ場に大きな影響を及ぼす。
- (2) 今回検討した3つのtypeの ϵ の浮力生産項の中では、 C_3 を G_k の正負で決定する方法 (type 1) が、浮力が地表面付近の濃度分布に及ぼす影響を最も良く再現していた。
- (3) これに対して、 C_3 を流れ場全体で一定値 ($C_3=C_1$) にした計算 (type 2) は、浮力効果の再現に関して最も劣っていた。
- (4) C_3 を風速の鉛直成分、水平成分の大小関係から決定する方法 (type 3) の結果はtype 2に比べて改善がみられた。
- (5) 今回の計算では、浮力の有無にかかわらず、いずれのケースでもwake内の濃度が多少大きくなる傾向にあり、この点は今後の課題としたい。

(1988年10月13日受理)

注) 図6(1)から判断して、今回解析する流れ場ではガス排出口から建物背面の間の地表面付近で、流れ場は $\partial C/\partial z > 0$ 、すなわち $\partial \rho/\partial z < 0$ の安定状態になっており、 $C/C_0 \geq 8$ の高濃度域の上方では $\partial C/\partial z < 0$ 、すなわち $\partial \rho/\partial z > 0$ の不安定状態になっているものと推察される。

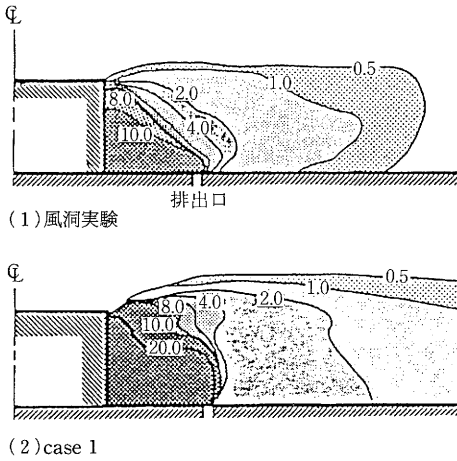


図5 濃度分布(C/C_0): 空気と密度差のないガス ($\rho_s/\rho_a=1.0, Fr.d=0$)

謝辞 本研究を進めるに際して、W. Rodi教授 (西独、カールスルエ大学)が外国人客員研究員として、1988年度夏に本所に滞在中、有益なご助言を頂いた。また、古谷助手をはじめとする本所電子計算機室の方々には、種々の御助力を頂いた。あわせてここに感謝し謝辞とする次第である。

参考文献

- 1) W. Rodi [Turbulent Models for Environmental Problem] Prediction Methods for Turbulent Flows, Hemisphere Publishing, 1980
- 2) A.O. Demuren and W. Rodi [Three Dimensional Numerical Calculations of Flow and Plume Spreading Past Cooling Towers] Journal of Heat Transfer, Vol. 109, 1987. 2
- 3) M. Gabillard and P. Viollet [The Three Dimensional Computation of Secondary Flow and Density Currents in A Curved Pipe] Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Proc. of 3rd Int. Symp. on 1988. 7
- 4) J. Zu and M.A. Leschziner [A local Oscillation-Damping Algorithm for High-Order Convection Schemes] Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1987. 2
- 5) 中川, 村上, 加藤 [非等温室内気流の数値解析に関する研究その1 水平非等温噴流に関する実験と数値解析の試み] 日本建築学会学術講演梗概集1988.10
- 6) B.E. Launder and D.B. Spalding [The Numerical Computational of Turbulent Flows] Computer Method in Applied Mechanics and Engineering Vol. 3, 1974
- 7) 持田, 村上 [単独建物周辺のガスの拡散に関する研究 (その4)] 日本建築学会関東支部研究報告集, 1983
- 8) 村上, 持田, 他 [建物周辺気流の数値シミュレーションの診断システムに関する研究 (第4報) 一建物近傍のメッシュ分割及び ϵ の境界条件に関する検討一] 生産研究, 第40巻, 第1号, 1988. 1
- 9) 村上, 持田, 他 [建物周辺気流の数値シミュレーションの診断システムに関する研究 (第6報) 一 $k-\epsilon$ モデルにおける建物風上の k の過大評価とモデルの検討一] 生産研究, 41, 1, 1989. 1
- 10) P. Viollet [The modeling Tunbulent Recirculating Flow for The Purpose of Reactor Thermal-Hydraulic Analysis.] Nuclear Engineering and Design Vol. 99, 1987

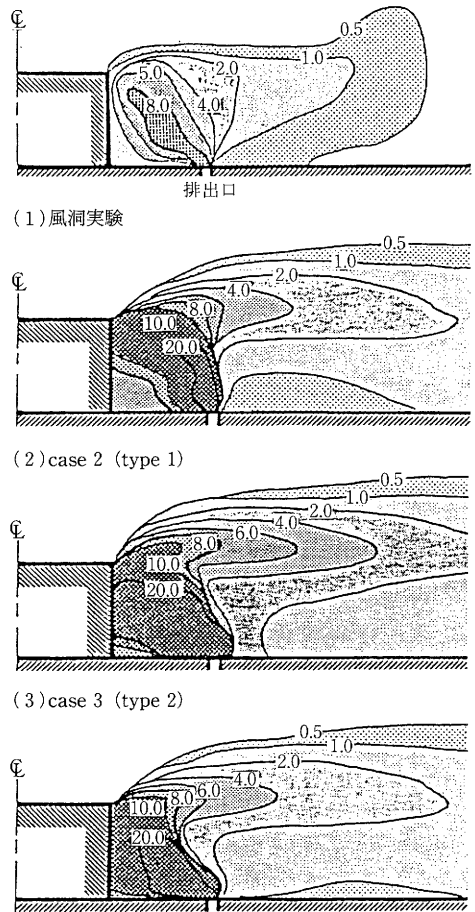


図6 濃度分布(C/C_0): 空気より軽いガス ($\rho_s/\rho_a=0.3, Fr.d=-5.6$)

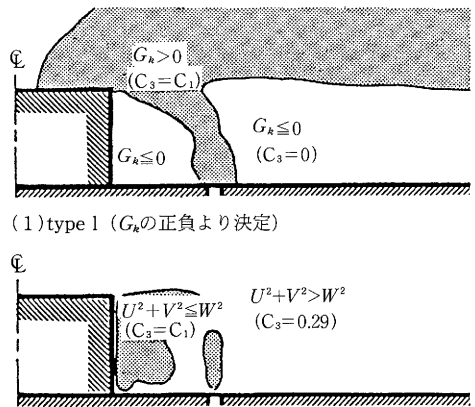


図7 各タイプにおける C_3 の設定 (type 2ではすべての領域で $C_3=C_1$)