

風洞模型実験による建物近傍の汚染ガス濃度予測に関する研究

——既往の拡散モデルの予測精度の検討——

大 場 正 昭*

EXPERIMENTAL STUDIES FOR PREDICTING CONCENTRATIONS NEAR A BUILDING USING WIND TUNNEL TECHNIQUES ——PREDICTION ACCURACY OF PROPOSED DIFFUSION MODELS——

Masaaki OHBA

As building air intakes are usually set on the upper part of buildings, considerable air pollution would often occur if the contaminant gas is exhausted from short stacks on building roofs. Many investigators have proposed diffusion models of predicting concentrations near an isolated building so as to determine whether ambient air quality or health conditions are likely to be exceeded or not.

This paper investigates the prediction accuracy of these model formulae using wind tunnel data. It is found that Halitsky's formula for estimating dilution near the building air intake appears to be low accurate if the distance between the roof vent and the building air intake is short.

1. 序

建物屋根面に熱源機器、中水処理機器等からの排気口が設けられる場合、排出される有毒ガスと不快な臭気ガスにより空調外気取り入れ口からの取り入れ空気はしばしば汚染される。設計上の制約がなければ、排気煙突を十分高くして排気ガスのブルームと空調外気取り入れ口を接触しないよう配慮すればよい。しかし現実には、排気煙突は低く抑えられるので建物近傍で空気汚染が発生し、設備機器の腐食・汚損が生じる^{1,2)}。

Meroney³⁾, Wilson^{4,5)}, Halitsky^{1,6)}らは風洞模型実験結果を基に基本的な建物形状に対して建物近傍濃度を予測する拡散モデルを提案し、提案さ

れた拡散モデルは建物の基本設計段階で建物近傍汚染の程度を把握するのに利用されている。しかし、わが国では、これらの拡散モデルの予測精度を調べた研究報告は少ない⁷⁾。

本研究では建物形状の基本形である直方体模型を用いて、提案された拡散モデルによる建物近傍濃度の予測精度を検討したので報告する。

2. 記号

- H : 模型高さ (H=0.1 m)
- U₀ : 基準点の平均風速で X=0, Z=0.1 m の風速 [m/s]
- U/U₀ : 風速比
- $\sqrt{u^2}/U_0$: 乱れの強さ
- h_s : 煙突高さ [m]
- h_e : 有効煙突高さ [m]

- h_A : 空気力学的な煙突高さ [m]
 C : 無次元濃度 $C=C_i/C_o$
 C_o : 基準化濃度 $C_o=q/(U_o \cdot H^2)$ [m^3/m^3]
 C_i : 測定濃度 [m^3/m^3]
 q : トレーサーガス流量 [m^3/s]
 α : 排出速度比 $\alpha=V_g/U_o$
 V_g : 排ガス速度 [m/s]
 C_{max} : 地表面の無次元最大濃度
 X_{max} : 模型風下壁面から C_{max} 発生点までの距離 [m]
 A : 模型風上面面積 [m^2]
 A_o : 排気口面積 [m^2]
 S : 排気口から空調外気取り入れ口までの最短距離 [m]
 D : 希釈係数 $D=\text{測定濃度}/\text{排気口濃度}$

- C_d : 希釈濃度 [m^3/m^3]
 X : 模型風下面からの水平距離 [m]
 Z : 風洞床面からの高さ [m]

3. 実験概要

(1) 風洞 図-1に示す。風洞はエッフェル型押し込み式で、測定部は長さ14m、幅1.2m、高さ1.0m。電動機は11kwの直流モーターで、最大風速は18m/s。平板境界層を除く領域で平均風速の偏差は1%以内、乱れの強さは0.2%以下である⁸⁾。

(2) 模型 図-2に示す。幅15cm、奥行き15cm、高さ10cmの直方体。トレーサーガスの排気口の面積は $(H/20)^2$ とした。

(3) 計測器 風速測定には定温度型熱線風速計、濃度測定には炭化水素分析計を用いた。

(4) 測定点 ①濃度 図-2に示す。模型壁面の測定点は風上面9点、風下面9点、側面9点及び屋根面34点の61点。地表面は風洞床面に模型風下壁面から $Y=0$ 軸上に $H/2$ 間隔に $X=19H$ までの38点を選定した。②風速 図-3に示す。鉛直面内の風速ベクトル分布は $Y=0$ 軸上の $X=-3H$ から $X=7H$ までの92点。

(5) 測定方法 ①濃度 C_2H_4 ガス(濃度100%)を屋根面の煙突から排出し、炭化水素分析計で測定した。平均化時間は2分。②風速 $X=0$ の $Z=0.1m$ の位置で基準風速 U_o を設定した後に、サンプリング間隔0.03秒、平均化時間30秒で測定した。鉛直面内の流れパターンはタンポポの穂を針金の先に付けたものを微動装置のサポートに取り付けて、タンポポの穂のなびく方向を目視により判定した。

(6) 実験種類 接近流の鉛直風速分布を図-4に示す。べき指数は1/4。表-1に実験種類を示す。実験No.1-1~No.1-13は排出速度比 α を一定に保ちながら、煙突高さ h_s を変えることにより有効煙突高さ h_e を変化させたタイプである。実験No.2-1~No.4-9は有効煙突高さよりも排出速度比を大きく変化した条件である。タイプ数の合計は40。

(7) 有効煙突高さの算定 Lucasは図-5

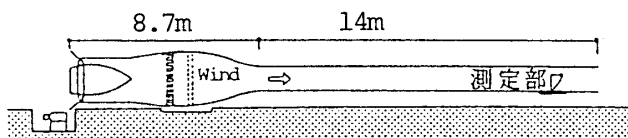


図-1 風洞断面図

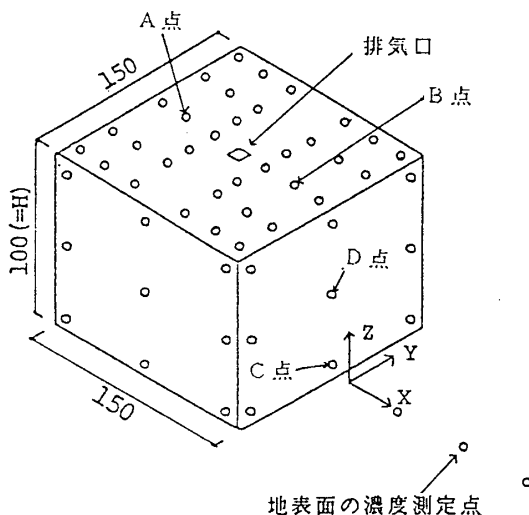


図-2 直方体模型 (単位mm)

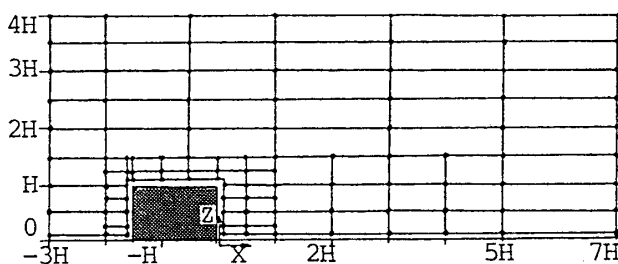


図-3 鉛直断面の風速ベクトル分布の測定点 ($Y=0$)

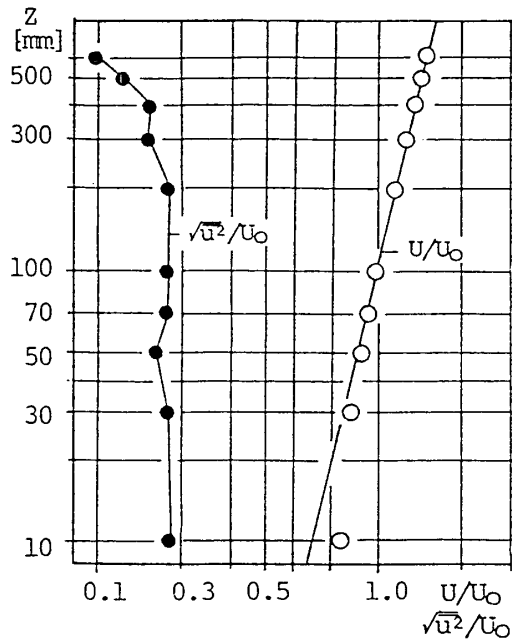


図-4 接近流の鉛直風速分布

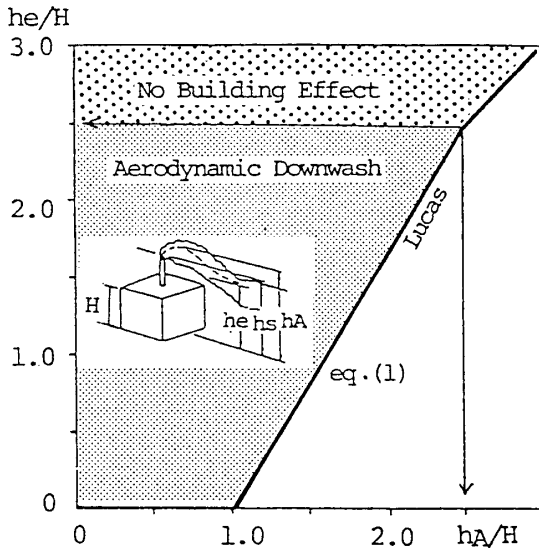


図-5 有効煙突高さの算定

に示すように、建物幅が建物高さよりも大きいときに、煙突を建物屋根面に設置した条件で有効煙突高さ he と空気力学的煙突高さ h_A との関係を調べ、 $1 \leq h_A/H \leq 2.5$ において

$$he/H = 5(h_A/H - 1)/3 \quad \cdots(1)$$

ここで

$$h_A/H = [h_s + 2(Vg/U_0 - 1.5)do]/H \quad \cdots(2)$$

do : 排気口の直径

の関係式を提案した^{1),12)}。 h_A は平坦地に煙突を単独で設置したときに煙が上昇する最大高さを示し、煙突後流の気流による煙の降下分を考慮した高さである。また、 he は煙突を建物屋上に設置したときの煙の最大上昇高さを示し、 h_A と建物形状の関数である¹²⁾。図-5 から $h_A/H < 2.5$ では he は建物後流に形成される渦により h_A よりも低く抑えられ、 $h_A/H > 2.5$ になると建物の影響は小さくなるが判る。

4. 実験結果

4.1 建物周りの気流性状

(1) 風速ベクトル分布 図-6 に結果を示す。風速は模型高さの風速 U_0 で無次元化した。風向を判定できない点の風速ベクトル分布は矢の前後に矢印を付けた形で表示した。屋根面の風上端部で剥離した流れは $X = -H/2 \sim X = 0$ で屋根面

表-1 実験種類

実験 No.	U_0 [m/s]	α	h_s [cm]	he/H	実験 No.	U_0 [m/s]	α	h_s [cm]	he/H
1- 1	2.0	1.67	10	0.03	2- 8	2.0	1.62	11	0.19
2			11	0.20	9		2.27		0.20
3			12	0.36	3- 1	2.0	0.01	12	0.09
4			13	0.53	2		0.03		0.09
5			14	0.70	3		0.06		0.09
6			15	0.86	4		0.10		0.10
7			16	1.03	5		0.30		0.13
8			17	1.20	6		0.60		0.19
9			18	1.36	7		1.00		0.25
10			19	1.53	8		1.62		0.35
11			20	1.70	9		2.27		0.46
12			21	1.87	4- 1	2.0	0.01	14	0.42
13			22	2.05	2		0.03		0.42
2- 1	2.0	0.01	11	0.0	3		0.06		0.43
2		0.03		0.0	4		0.10		0.43
3		0.06		0.0	5		0.30		0.47
4		0.10		0.0	6		0.60		0.52
5		0.30		0.0	7		1.00		0.59
6		0.60		0.02	8		1.62		0.69
7		1.00		0.08	9		2.27		0.80

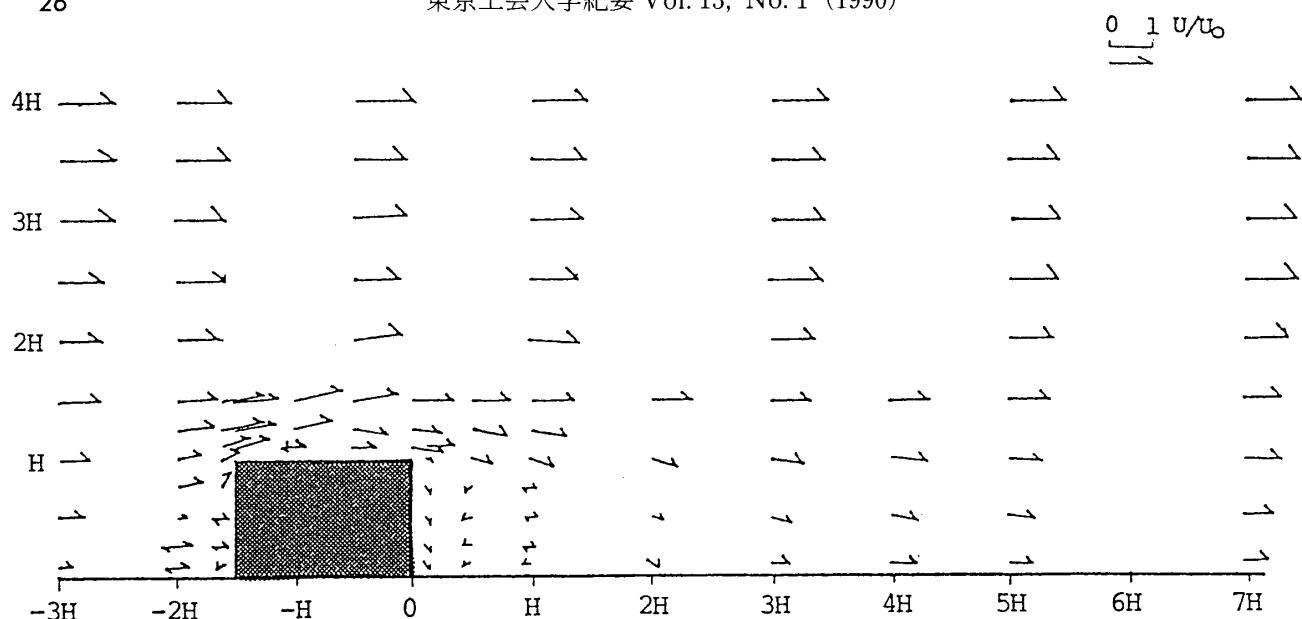


図-6 鉛直風速ベクトル分布

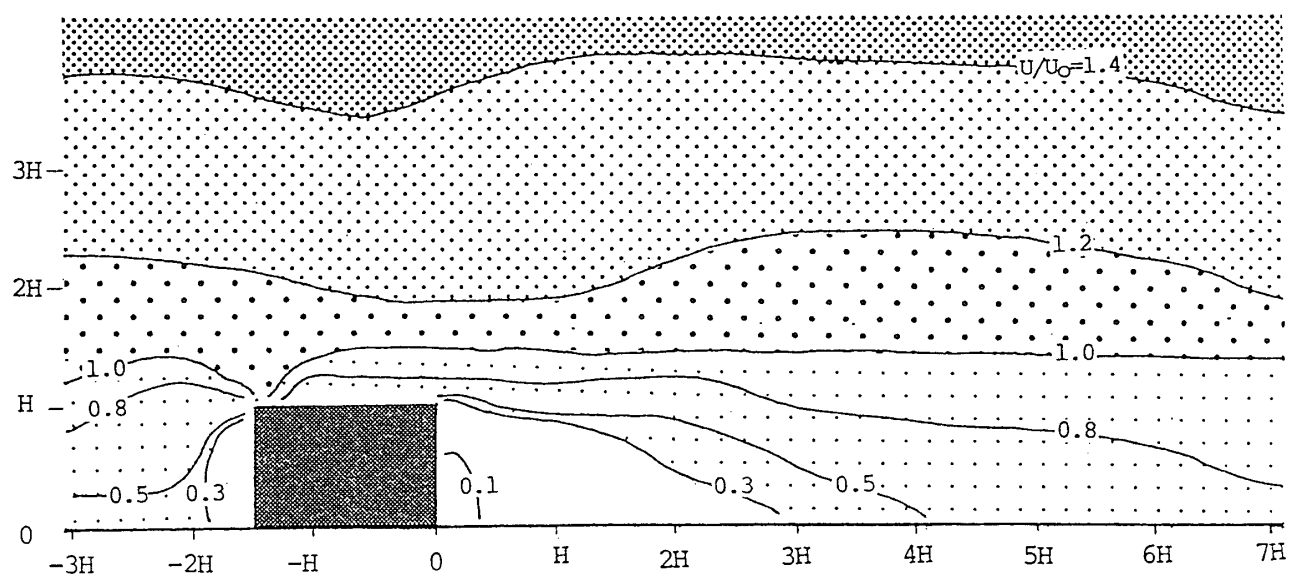


図-7 風速比分布

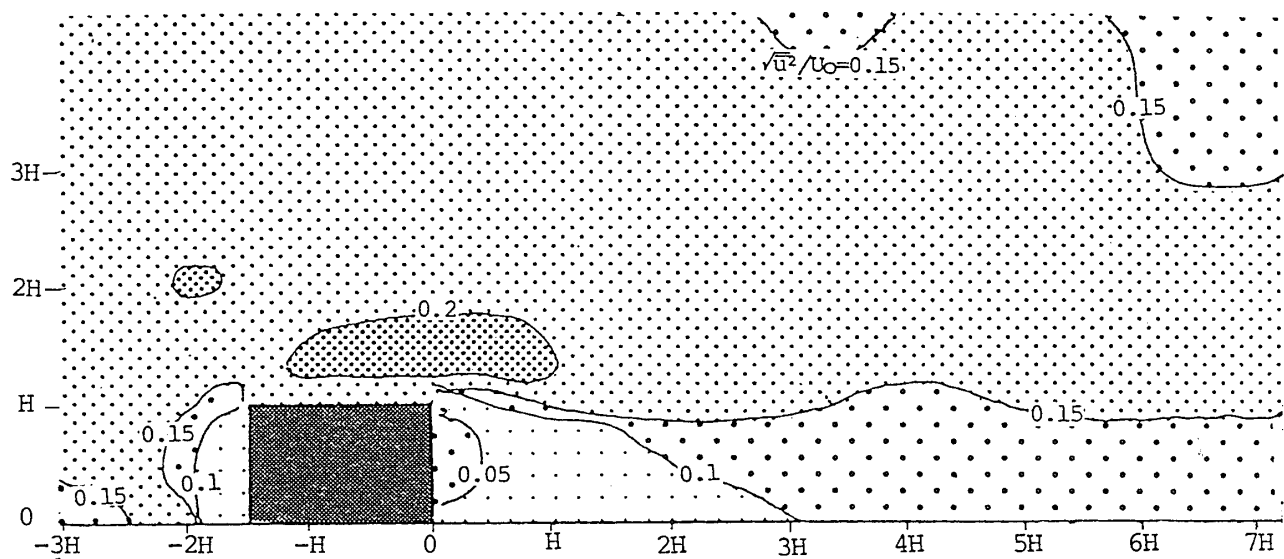


図-8 乱れの強さの分布

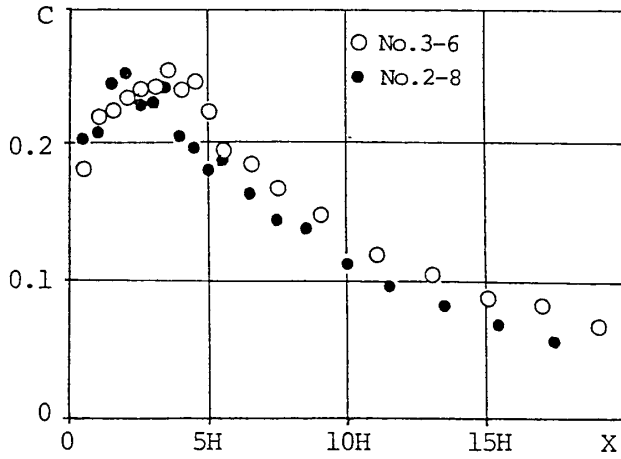


図-9 Lucasの有効煙突高さの算定式の検討

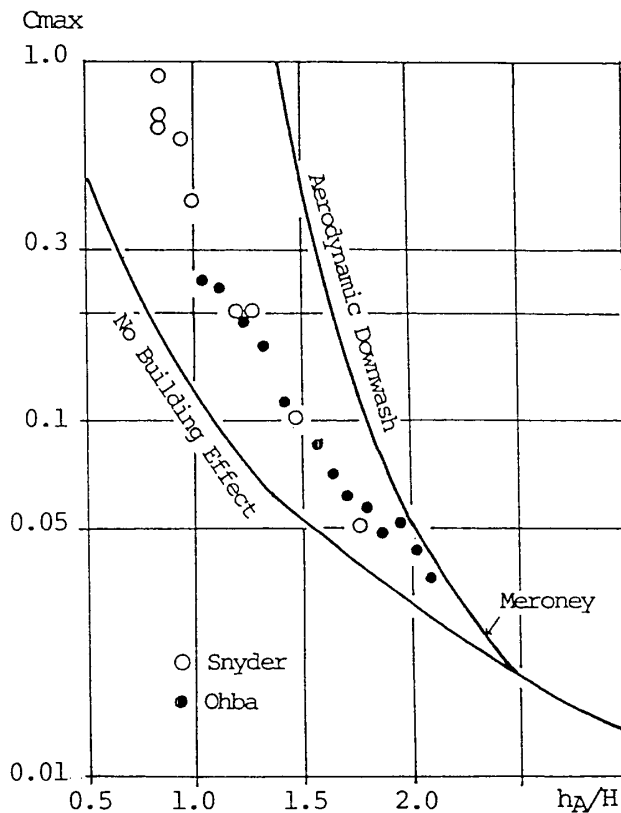


図-10 地表面最大濃度と空気力学的煙突高さとの関係

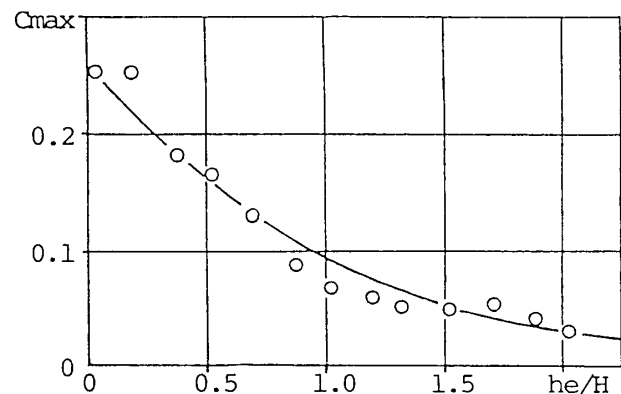


図-11 地表面最大濃度と有効煙突高さとの関係

に再付着し、模型後流で小さな渦を形成する。また地表面に近い $Z=H/10$ での水平面風向の判定結果から、この剥離流の地表面での再付着点は $X \approx 3H/2$ であることを得た。従って、直方体模型の再循環長さは模型風上壁面面積 A で基準化すれば $X/\sqrt{A}=1.2$ となり、二棟模型の $X/\sqrt{A}=1.9$ と比べてやや小さい^{8,9)}。

(2) 風速比分布 図-7 に結果を示す。模型屋根面の風上側端部付近で形成される $U/U_0=1.0$ の等風速比線は $X=0$ で $Z \approx 1.45H$ に達し、模型後流においてほぼ同じ高さを保つ。風下壁面近傍の $X=0 \sim X=2.8H$ と風上壁面近傍 $X \approx -2H \sim -1.5H$ で $U/U_0 < 0.3$ の領域が存在し、渦の形成される所で U/U_0 は小さい。

(3) 乱れの強さの分布 図-8 に結果を示す。模型風上端部で剥離する流れの影響により、 $\sqrt{u^2}/U_0 > 0.2$ の大きな領域は一部が屋根面上にかけた $-1.2H \leq X \leq H$ に存在し、最大値は 0.27 である。 $\sqrt{u^2}/U_0 < 0.05$ の領域は模型風下面近傍に存在する。模型の影響は $X > 7H$ 以上に及ぶ⁹⁾。

4.2 Lucas の有効煙突高さの算定式の検討

Lucas の(1)式を検証するために、煙突高さ h_s と排出速度比 α は異なるが、有効煙突高さ h_e は同じである実験 No. 2-8 と No. 3-6 の地表面濃度を比較した。煙の拡散に対して建物周辺の気流の乱れによる乱流拡散は大きな影響を及ぼすので、実験では接近流の風速と建物形状を一定に保つことにより気流の乱れの影響を同じにした。従って、判定するデータとして空間濃度分布によらずに地表面濃度分布を用いても判定に大きな影響を及ぼさないと考える。図-9 に結果を示す。測定濃度は基準化濃度 C_0 で無次元化されている。以後、無次元濃度を濃度と呼ぶ。No. 2-8 の濃度は $X \geq 4H$ で No. 3-6 の濃度よりも小さいが、その差は約 0.015 と微小であるので、両者は比較的一致していると判断される。従って、Lucas 算定式は本実験でも有効であると判定し、(1)式により表-1のごとく有効煙突高さを算定した。

4.3 模型後流の地表面濃度の予測精度の検討

図-10 に空気力学的煙突高さ h_a/H と模型後流地表面の最大濃度 C_{max} との関係を示す。2本の曲

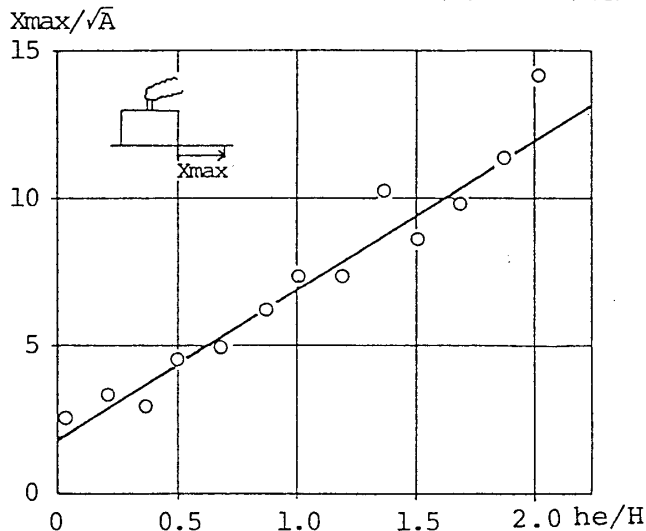


図-12 地表面最大濃度の発生位置と有効煙突高さとの関係

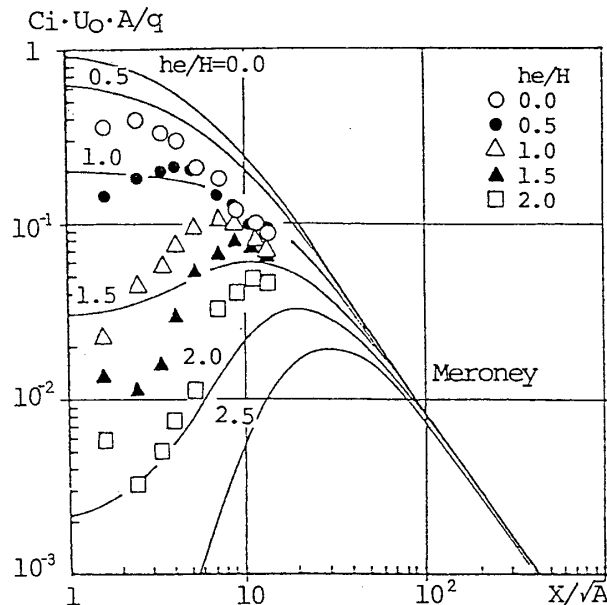


図-13 模型後流の地表面濃度分布

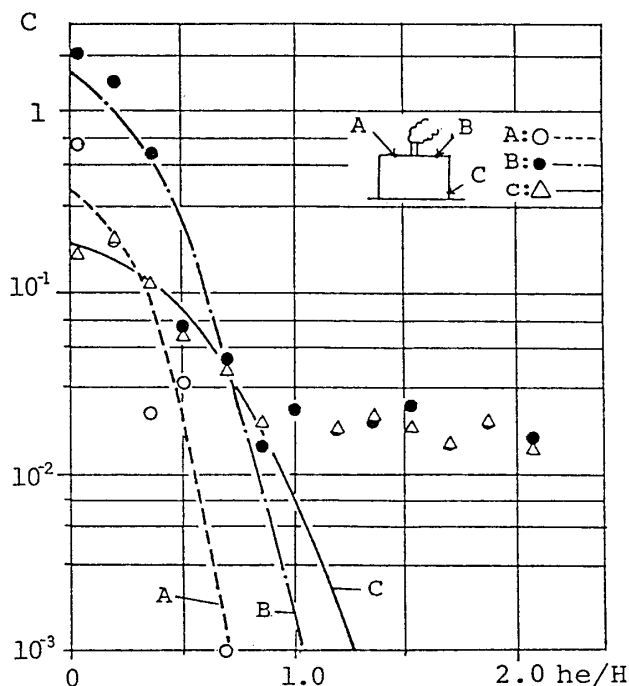


図-14 壁面濃度と有効煙突高さとの関係

線で囲まれた領域は Meroney ら¹⁾が得た空気力学的ダウンウォッシュの生じるところである。図中に実験の No.1-1～No.1-13 の C_{max} を記入した。全ての測定値はこの領域に含まれている。実験 No.1-13 の結果から煙突高さを建物高さの 2.2 倍の大きさにしても、排出速度比を 1.7 にすると空気力学的ダウンウォッシュは生ずることが判る。実験値は Snyder¹⁰⁾ の測定値と同じ傾向を示した。

図-11 に地表面最大濃度と有効煙突高さとの関係を示す。回帰式は

$$C_{max} = 0.26 \exp[-1.06(he/H)] \cdots \cdots (3)$$

である。 C_{max} は he の指数関数で減衰し、 $he/H = 2.0$ のとき $C_{max} = 0.031$ となる。図-12 に C_{max} の発生位置 X_{max} と he との関係を示す。 X_{max} は模型風上面面積 A の平方根で基準化した。回帰式は

$$X_{max}/\sqrt{A} = 5.05(he/H) + 1.83 \cdots \cdots (4)$$

で、 X_{max} は he に比例し、 $he/H = 2$ のとき $X_{max}/\sqrt{A} = 11.9$ で C_{max} が生ずる。

図-13 に $Y=0$ 軸上の地表面濃度分布を示す。測定濃度 C_i は $q/(U_0 \cdot A)$ で基準化した。Meroney¹⁾ らは模型後流の $Y=0$ 軸上の地表面濃度分布に対して he が大きくなるにしたがって山なりの分布になる拡散モデルを提案している。本実験の結果も he の増大とともに山なりの濃度分布を示したが、Meroney の予測曲線と比べて小さな $he/H = 0.5$ でもはっきりしたピークが生じ、濃度も小さかった。全体に予測精度は低い¹¹⁾。

4.4 模型壁面濃度の予測精度の検討

屋根面の煙突風上側と風下側及び風下壁面に測定点を選び、壁面濃度と有効煙突高さとの関係を調べた。図-14 に結果を示す。いずれも $Y=0$ 軸上の点である。Wilson は壁面濃度が指数関数の $(he/H)^2$ に反比例すると報告している^{4,5)}。実験値は $he/H > 0.7$ で一定な分布を示すので、 $he/H < 0.7$ の濃度から回帰式を算定すれば

$$A \text{ 点: } C = 0.35 \exp[-11.6(he/H)^2] \cdots (5)$$

$$B \text{ 点: } C = 1.34 \exp[-7.08(he/H)^2] \cdots (6)$$

$$C \text{ 点: } C = 0.17 \exp[-3.16(he/H)^2] \cdots (7)$$

となり、回帰式は濃度分布をよく近似する。この回帰式から煙突風上側屋根面の A 点では $he/H =$

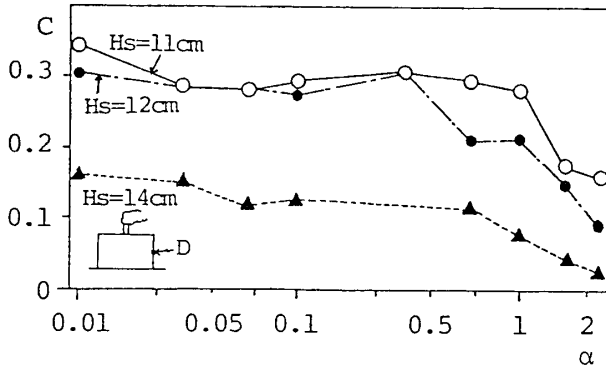


図-15 壁面濃度と排出速度比との関係

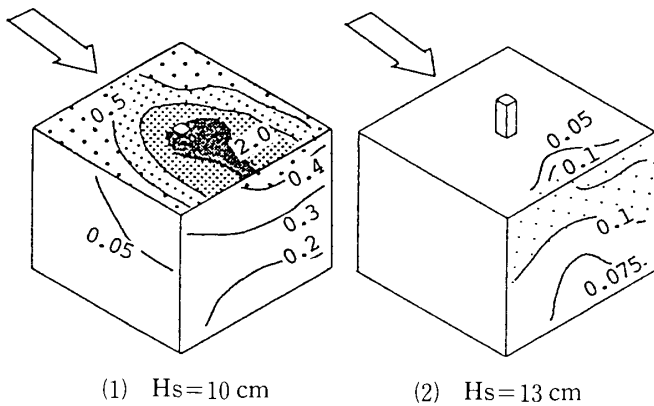


図-16 壁面濃度分布

0.5 のとき $C=0.02$ となる。煙源のある屋根面濃度は、小さな有効煙突高さのときに図-16(1)のように屋根面の殆どで $C>0.5$ となるので、 $C=0.1$ を汚染ガスの逆流発生判定基準にすれば、 $he/H=0.5$ 以上になると汚染ガスの屋根面風上側への逆流発生は少なくなると判断される。

図-15 に風下壁面の D 点における排出速度比 α と壁面濃度との関係を示す。実験データは No.2-1~No.4-9 を用いた。排出速度比を大きく変化させても、表-1 に示すように he の変化幅は小さいので、 α による C の変化は小さい。むしろ C は α よりも he に対応する。

図-16 に煙突高さ $hs=10$ cm と 13 cm の壁面濃度分布の結果を示す。実験データは No.1-1 と No.1-3. $hs=10$ cm では汚染ガスは屋根面の風上側に逆流する。屋根面濃度は 0.2~3.0 であるが、風下壁面では 0.16~0.41 に減衰する。 $hs=13$ cm になると he は 0.03 から 0.53 に増大するので屋根面濃度は大幅に減少し、汚染ガス濃度は僅かに風下端部にみられるだけである。

4.5 空調外気取り入れ口希釈濃度の予測精度の検討

Halitsky ら¹⁾ は屋根面に煙突が設置される場合に、空調外気取り入れ口で濃度はどの程度希釈されるかを検討した。ここでは実験データ No.1 を用いて Halitsky らの提案した濃度予測式の精度を検討した。図-17 に結果を示す。図では C 点の希釈係数 D ($=$ 測定濃度/排気口濃度) に基準化濃度 ($=q/(U \cdot A)$) を乗じた希釈濃度 Cd で表示した。Halitsky らは C 点の Cd を次式で予測した。

$$\text{Halitsky : } Cd = 0.147(S/\sqrt{A})^2 + 1.36(S/A)(Ao/A)^{0.5} + 21.7(Ao/A) \quad \cdots(8)$$

$$\text{Briggs : } Cd = 0.25(S/\sqrt{A})^2 \quad \cdots(9)$$

$$\text{Wilson : } Cd = 0.11(S/\sqrt{A})^2 \quad \cdots(10)$$

Halitsky によれば予測精度は S が短いとき低下すると述べているが、実験結果も小さな S のときに予測精度は低下した。提案された予測式(8)~(10)にはいずれも有効煙突高さ he の項がなく、とくに Briggs と Wilson の予測式は排気口と空調外気取り入れ口との距離 S を \sqrt{A} で基準化した距離だけで希釈濃度が決まるとしている。 he は、実

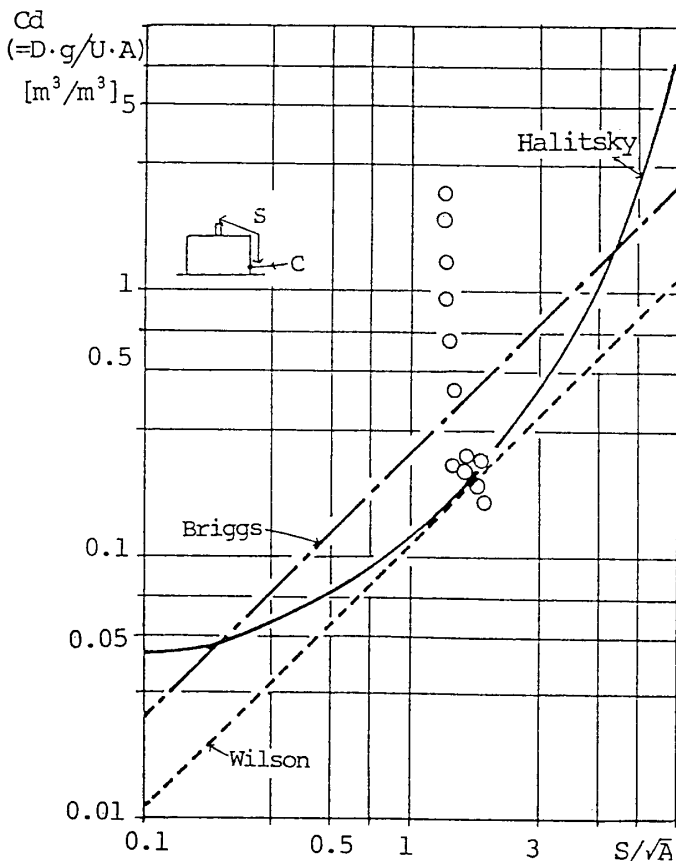


図-17 空調外気取り入れ口の希釈濃度と排気口から空調外気取り入れ口までの最短距離との関係

際の煙突高さ h_s 以外にも汚染ガスの浮力効果と排ガス速度比の支配を受ける。従って、 S が一定でも、汚染ガスの浮力効果や排ガス速度比により h_e が大きくなるときに予測精度は低下すると考えられる。

5. 結 語

直方体模型の屋根面中央に汚染ガスの排気口を設置した条件で、模型周りの建物近傍濃度を既往の拡散モデルで予測し、予測精度を検討した。その結果、次のまとめを得た。

1) Halitsky らの空調外気取り入れ口での希釈濃度の予測式は、かなり限られた S/\sqrt{A} の範囲で行った実験結果によれば、排気口と空調外気取り入れ口との距離が短いときに予測精度が低下した。

2) 壁面濃度は指数関数の $(h_e/H)^2$ に反比例し、Wilson の拡散モデルは h_e/H の小さいときに実験値をよく近似した。

3) 模型後流における $Y=0$ 軸上の地表面濃度分布は有効煙突高さの増大とともに山なりの分布を示し、Meroney の拡散モデルは低い予測精度を示した。

4) 本実験の模型後流地表面の最大濃度と発生位置は

$$C_{\max} = 0.26 \exp[-1.06(h_e/H)]$$

$$X_{\max}/\sqrt{A} = 5.05(h_e/H) + 1.83$$

の回帰式により予測できた。

6. 謝 辞

本実験を行うに当たり東京工芸大学卒業研究生の関谷潤、塚本晋、坪井淳一、望月孝昭各氏の協力を得ました。ここに深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) E. Plate: Engineering Meteorology, Elsevier,

452-525, 1987

- 2) 鎌田元康: 建物近傍における汚染物拡散に関する実験的研究(1), 日本建築学会論文報告集, 279, 117-126, 1979
- 3) R. N. Meroney, B. T. Yang: Wind-tunnel Study on Gaseous Mixing due to Various Stack Heights and Injection Rates Above an Isolated Structure, CER 71-72 RNM-BTY 16, 1972
- 4) D. J. Wilson: A Design Procedure for Estimating Air Intake Contamination from Nearby Exhaust Vents, ASHRAE Transactions, Vol. 89, No. 2, 136-152, 1983
- 5) D. J. Wilson, R. E. Britter: Estimates of Building Surface Concentrations from Nearby Point Sources, Atmospheric Environment, Vol.16, No. 11, 2631-2646, 1982
- 6) ASHRAE 1985 Fundamentals Handbook, 14.1-14.8, 1985
- 7) 電力中央研究所, 発電用原子炉施設の安全解析のための風洞実験手法の研究, 電力中央研究所報告, No.219, 1985
- 8) 大場正昭: 建物近傍の汚染ガス拡散に及ぼす建物隅角部での流れの剝離現象に関する実験研究, 接近流の気流条件の影響について, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 406, 21-30, 1989
- 9) R. P. Hosker: Flow and Diffusion Near Obstacles, Atmospheric Science & Power Production, DOC/TIC-27601, 241-326, 1984
- 10) A. H. Huber, W. H. Snyder: Building wake effects on short effluents, Third Symp. on Atmospheric Turbulence, Diffusion and Air Quality, Am. Meteorol. Soc., Raleigh, N. C., 235-242, 1976
- 11) A. G. Robins: Plume Dispersion in the Vicinity of a Surface Mounted Cube, Central Electricity Generating Board, R/M/R 220, 1975
- 12) D. H. Lucas: Choosing Chimney Heights in the Presence of Buildings, Proc. Int. Clean Air Conf., 47-52, 1972