

# 建物ダウンウォッシュ発生時の大気拡散モデル 「ISC-PRIME」について

エンジニアリング本部 都市・地域計画部

飯塚 俊明

## 1. はじめに

煙突からの排出ガスが近傍の建物背後に発生する渦に巻き込まれて降下する現象(建物ダウンウォッシュ。ダウンドラフトともいう)が発生する際の拡散計算を行うモデルの一つである、ISC-PRIMEを紹介する。

ISC-PRIME (Plume Rise Model Enhancements) とは EPA(米国環境保護庁)が開発した大気拡散モデルで、ISC モデル(Industrial Source Complex Model)を基に、建物ダウンウォッシュを扱えるように改良したものである。

なお、ISC-PRIME のプログラムソース、実行ファイルは EPA のホームページで公開されている。  
([http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion\\_alt.htm#iscprime](http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion_alt.htm#iscprime))

図 1 の左側に示すように、建物近傍にある煙突(この図では建屋の直上)から排出されたガスは、建物背後の乱流域(near wake)に引き込まれて降下し、地上付近の大気汚染物質が高濃度となることがある。図の右側は、建物が煙突から遠いため

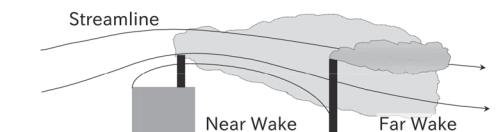


図 1 建物ダウンウォッシュの模式図

に、煙突から排出されたガスが建物の影響を受けずに拡散していく様子を示している。

煙突近傍の建物の影響を考慮するモデルとしては、経済産業省による低煙源工場拡散モデル「METI-LIS」や、排出ガスの有効煙突高について Huber の式によりブルーム主軸の低下分を減じたうえで、通常のブルームモデルによる拡散計算を行う方法もある。

なお、煙突からの排出ガスが煙突自体の空気力学的影響による渦にとりこまれる場合があるが、これを煙突ダウンウォッシュといい、建物ダウンウォッシュとは区別されるものであり、ISC-PRIME では考慮しない。

## 2. ISC-PRIME の計算手順

ISC-PRIME は正規型ブルーム拡散モデルを基本としており、建物ダウンウォッシュの影響を以下の手順により計算する。

### 2.1 建物ダウンウォッシュの発生条件

建物の寸法および煙突と建物の配置について、  
①建物高さ $H$ と建物の風向方向投影幅の小さい方の  $1.5$  倍に建物高さを加えたものより煙突高さが低い。  
②煙突と建物との距離が建物高さ $H$ と建物の風向方向投影幅の小さい方の  $5$  倍以内である。  
これら両方の条件を満たす場合に建物の影響を考慮する。

## 2.2 建物背後乱流域・遠方後流域の大きさ

風の流れる方向に存在する建物について、建物背後に生じる乱流域(near wake 領域)および遠方の後流域(far wake 領域)の、風下方向の距離  $x(m)$ における幅 ( $W_C(x)$ ,  $W_W(x)$ )と高さ ( $H_C(x)$ ,  $H_W(x)$ )を求める(図 2 参照)。

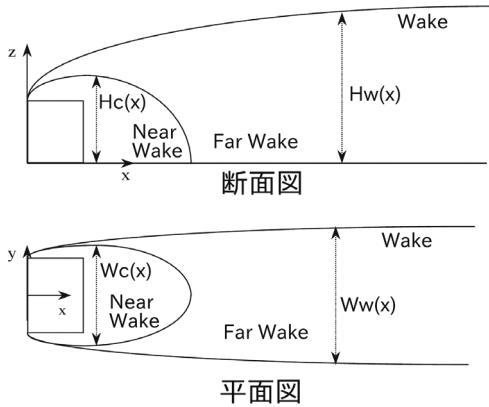


図 2 建物背後に生じる乱流域の模式図

建物の風下方向の投影幅が  $W(m)$ 、風下方向に沿った長さが  $L(m)$ 、高さが  $H(m)$  のとき、 $W$  と  $H$  の小さい方を  $B_S$ 、大きい方を  $B_L$  とし、建物長の尺度を  $R = B_S^{2/3} B_L^{1/3}$  で定義する。このとき、建物の風下側の面からの near wake 領域の長さは、

$$L_R = \frac{1.8W}{[(L/H)^{0.3}(1.0 + 0.24W/H)]}$$

で与えられる。ただし、 $L/H < 0.3$  のときは  $L/H = 0.3$ 、 $L/H > 3.0$  のときは  $L/H = 3.0$  とする。

このとき、建物の風上側の面からの距離  $x$  における near wake 領域の高さ  $H_C$  と幅  $W_C$  および near wake 領域の最高高さ  $H_R$  は以下の式により求められる。

$L > 0.9R$  のとき、

$$H_C = H \quad (0 < x \leq L)$$

$$H_C = H \left[ 1 - \left( \frac{x-L}{L_R} \right)^2 \right] \quad (L < x < L + L_R)$$

$$H_R = H$$

$L \leq 0.9R$  のとき、

$$H_C = H_R + \frac{4 \left( x - \frac{R}{2} \right)^2 (H - H_R)}{R^2} \quad (0 < x \leq R/2)$$

$$H_C = H_R \left[ 1 - \frac{\left( x - \frac{R}{2} \right)^2}{(L + L_R - R)^2} \right]^{1/2} \quad (R/2 < x < L + L_R)$$

$$H_R = H + 0.22R$$

$$W_C = \frac{W}{2} + \frac{R}{3} - \frac{(x-R)^2}{3R} \quad (0 < x \leq R)$$

$$W_C = \left( \frac{W}{2} + \frac{R}{3} \right) \sqrt{1 - \left( \frac{x-R}{L + L_R - R} \right)^2} \quad (R < x < L + L_R)$$

また、far wake 領域の高さ  $H_W$  と幅  $W_W$  は、以下の式により求められる。

$$H_W = 1.2R \left[ \frac{x}{R} + \left( \frac{H}{1.2R} \right)^3 \right]^{1/3}$$

$$W_W = \frac{W}{2} + \frac{R}{3} \left[ \frac{x}{R} \right]^{1/3}$$

## 2.3 仮想煙源

仮想煙源の高さについて、まず流線の傾きを図 3 に示す区分毎に表 1 に示す式により求め、 $z > H$  に対しては、流線の上昇域(図 3 の㊸および㊹)では  $[(z-H+R)/R]^{-0.3}$  を、下降域(㊺および㊻)では  $[(z-H+R)/R]^{-0.1}$  を流線の傾きに

掛ける。プルームの上昇分については質量・エネルギー・運動量の保存則に従い計算する。また、拡散幅を乱流強度に基づいて求める。

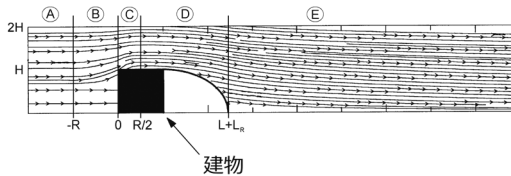


図 3 流線の傾きを求める区分

表 1 流線の傾きを求める式

区分	流線の傾き ( $z \leq H$ )	風下方向の距離
①	$\frac{dz}{dx} = 0$	$x < -R$
②	$\frac{dz}{dx} = \frac{2(H_R - H)(x + R)}{R^2}$	$-R \leq x < 0$
③	$\frac{dz}{dx} = \frac{-4(H_R - H)\left(\frac{2x}{R} - 1\right)}{R}$	$0 \leq x < R/2$
④	$\frac{dz}{dx} = \frac{(H_R - H)(R - 2x)}{\left(L + L_R - \frac{R}{2}\right)^2} \left(\frac{z}{H}\right)^{0.3}$	$R/2 \leq x \leq L + L_R$
⑤	$\frac{dz}{dx} = \frac{-2(H_R - H)}{L + L_R - \frac{R}{2}} \times \frac{R}{x - (L + L_R - R)} \times \left(\frac{z}{H}\right)^{0.3}$	$x > L + L_R$

#### 2. 4 near wake に取り込まれたプルーム

プルームのうち near wake 領域に取り込まれた体積源については、建物背後の地表面上に置かれた点煙源としてモデル化し、拡散計算により near wake と far wake の各領域に対する濃度( $C_N$  および  $C_F$ )を以下の式により求める。

$$C_N = \frac{BfQ \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_{yc}}\right)^2\right)}{U_H H_c W_B'}$$

$$C_F = \frac{fQ \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right)}{\pi U_s \sigma_{zc} \sigma_{yc}}$$

- f : near wake 領域に取り込まれたプルームの割合
- B : near wake 内の濃度の再循環係数(=3)
- Q : 大気汚染物質の排出量
- $U_H$  : 建物高さにおける風速(m/s)
- $U_s$  : 煙突高さにおける風速(m/s)
- $H_c$  : near wake 領域の高さ(m)
- $W_B'$  : 風向方向の建物投影幅  
(下限値= $H_B/3$ 、上限値= $3H_B$ )
- $H_B$  : 建物高さ(m)
- y : 風向に直角な水平距離(m/s)
- $\sigma_y$  : 水平方向の拡散パラメータ(m)
- $\sigma_{yc}$  : 仮想排出源の水平方向の拡散パラメータ(m)
- $\sigma_{zc}$  : 仮想排出源の鉛直方向の拡散パラメータ(m)

#### 2. 5 乱流域境界での接続

near wake 領域と far wake 領域の境界の前後一定の区間については、建物背後からの距離に応じて  $C_N$  と  $C_F$  とを線形に加重平均する。

#### 2. 6 near wake に取り込まれなかったプルーム

near wake 領域に取り込まれなかったプルームからの far wake 領域に対する濃度( $C_P$ )を以下の式により求め、 $C_F$ に加える。

$$C_P = \frac{(1-f)Q \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{H_p}{\sigma_z}\right)^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right)}{\pi \sigma_y \sigma_z U_s}$$

- $H_p$  : 仮想排出源の高さ(m/s)
- $\sigma_z$  : 鉛直方向の拡散パラメータ(m)
- その他は前述のとおり。

### 3. モデル使用上の留意点

EPA によるオリジナルモデルは米国で入手可能な諸条件を用いることが前提とされているため、国

内の業務でこのモデルによる予測計算を行う場合には注意が必要である。主な留意点は以下のとおりであるが、これらの中には ISC-PRIME に特有のものではなく、元々の ISC モデルに由来するものも含まれている。

### 3.1 計算方向

ISC-PRIME のオリジナルモデルでは、計算の方向は北を基準に 10 度刻みになっており、風向方向における建物の投影幅や建物長さも 10 度毎に設定される。

国内の環境影響評価業務では通常 16 方位による風向・風速の観測結果が用いられるが、例えば北東の風の場合では風向が 45 度となり、風向に対する建物の投影幅や建物長さは 10 度刻みで設定した場合とは一致しない。このような場合についても建物の投影幅や長さを精密に設定したうえでの計算をしたいときには、風向に合わせて建物や予測点の座標を回転するか、あるいはプログラムを改変するなどに対応する必要がある。

### 3.2 大気安定度の区分

大気安定度は A～F の 6 区分となっている。Pasquill の安定度階級分類法では、A と B、B と C、C と D のそれぞれの間の区分を設けているが、ISC-PRIME を用いる場合は表 2 のように集約するのが一般的である。

表 2 大気安定度の集約例

集約前の 大気安定度	A	AB	B	BC	C	CD	D	E	F	G
集約後の 大気安定度	A		B		C		D	E	F	

### 3.3 土地状況

計算対象となる土地の状況に合わせて、RURAL (田園地域)か URBAN (都市域)のどちらであるかを設定する必要がある。

拡散パラメータの設定においては、土地状況が RURAL の場合には Pasquill-Guifford 線図の近似式を、URBAN の場合には Briggs の内挿式を用いるものとされている。

### 3.4 風速の高さ補正のためのべき指数

煙源高さにおける風速は、観測高さでの風速を基に以下の式により補正する。

$$U = U_0 (H/H_0)^p$$

U : 煙源高さにおける風速 (m/s)

U<sub>0</sub> : 観測高さにおける風速 (m/s)

H : 煙源高さ (m)

H<sub>0</sub> : 風速観測高さ (m)

p : 大気安定度に応じた値

このとき用いられるべき指数 p は、大気安定度別、風速階級別に任意の値を設定することができる。オリジナルプログラムでのデフォルト値は表 3 のようになっている。

表 3 風速補正に係るべき指数の初期設定値

大気安定度		A	B	C	D	E	F
土地 状況	URBAN	0.15	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30
	RURAL	0.07	0.07	0.10	0.15	0.35	0.35
参考: CDM <sup>甲</sup> で 示されている値		0.10	0.15	0.20	0.25	0.25	0.30

注) EPA による長期濃度シミュレーションモデル

### 3.5 混合層高度

気象条件として混合層高度を入力する必要があるが、混合層高度は日本における気象観測では通常得られるデータではない。「窒素酸化物総量

規制マニュアル(新版)」には、混合層高度が観測時刻までの積分日射量の 1/2 乗に比例することが示されているが、比例係数は日あるいは地点によりかなり異なるとされている。また、(独)産業技術総合研究所が開発した化学物質の大気環境濃度推定及び暴露評価モデルである「ADMER」では、関東地方における気象データの解析結果を基に混合層高度のデフォルト値として表 4 に示す値を採用している。

表 4 混合層高度の設定例

大気安定度	A	B	C	D	E,F
混合層高度(m)	600	500	400	200	70

#### 4. 計算例

煙突近傍に建物がある場合として、以下に示す条件について ISC-PRIME による拡散計算を行った。気象条件は大気安定度と風速の組み合わせ 3 ケースとした。また、比較のため通常のプルームモデルによる計算も行った。

煙突と建物との位置関係を図 4 に、計算条件を表 5 に示す。

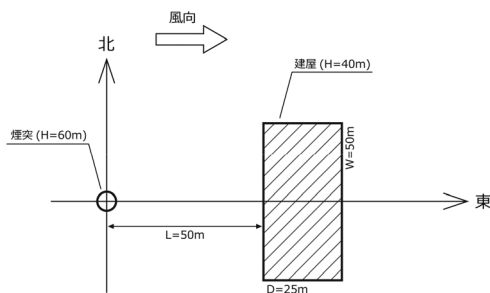


図 4 煙突および建物の配置図

表 5 計算条件

項目	条件		
煙突高さ, 口径	H=60m , $\phi=5m$		
排出ガス温度	120°C		
排出ガス吐出速度	10m/s		
NOx 排出量	20Nm <sup>3</sup> /h		
土地状況	RURAL		
気象条件のケース	①	②	③
大気安定度	A	B	C
べき指数	0.07	0.07	0.10
混合層高度	600m	500m	400m
煙突高さでの風速	2m/s	2m/s	3m/s
風向	西から東		

地上高さにおける風下方向の濃度分布は図 5 に示すとおりである。

大気安定度がいずれのケースでも、ISC-PRIME による計算結果は通常のプルームモデルによる計算結果と比較して、最大着地濃度が高く、また、遠距離まで濃度の高い状態が続いている。これは、ISC-PRIME を用いた計算では建物の背後に生じる乱流域に排出ガスが引き込まれて下降し、大気汚染物質の濃度が高くなる現象が再現されていることを示すものである。

このように、ISC-PRIME による拡散計算では、通常のプルームモデルよりも風下方向の大気汚染物質濃度が高く計算される。そのため、建物ダウンウォッシュが生じる可能性がある場合については、煙突からの排出ガスの影響が過小評価とならないために、ISC-PRIME などの煙突近傍の建物を考慮できるモデルによる拡散計算を行うことが望ましいと言える。

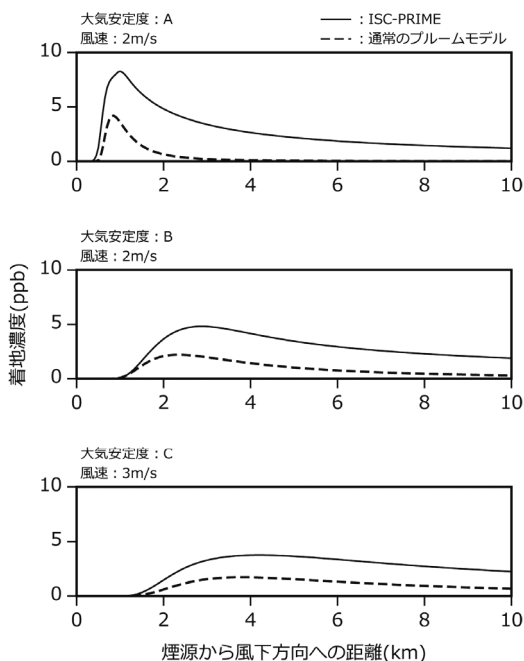


図 5 計算結果

## 5. あとがき

火力発電所の設置に係る環境影響評価事業等においては、建物ダウンウォッシュ発生時の短期高濃度について ISC-PRIME による検討を求められることが多い。ISC-PRIME は無償で利用でき、建物の影響を考慮した大気拡散計算を簡易に行うことができるモデルであるが、米国において開発されたものであるため、国内の案件に適用するには、以下の点について留意する必要がある。

- ① 計算の方向が 10 度刻みになっているため、16 方位での風向観測データを用いる際に工夫が必要である。
- ② 混合層高度等、日本では一般的に測定されていないパラメータについては、なんらかの方法により設定する必要がある。
- ③ 大気安定度や風速の補正係数等が日本で通常使うモデルと若干異なるので、状況に合わせてパラメータを適切に設定する必要がある。

大気汚染を予測するモデルは数多くあるが、安易に利用するのではなく、モデルの特性や、利用するデータおよびパラメータ等を十分に検討した上で、適切に使用することが重要である。

## <参考文献>

- 1) 「Development and evaluation of the PRIME - plume rise and building downwash model」 (Journal of the Air & Waste Management Association, 2000 年 5 月, Air & Waste Management Association )
- 2) 「窒素酸化物総量規制マニュアル(新版)」 (平成 12 年 12 月, 公害研究対策センター)
- 3) 「暴露・リスク評価大気拡散モデル(ADMER)の開発」 (大気環境学会誌 第 38 巻 第 2 号, 2003 年 3 月, (社)大気環境学会)