

冷却塔排気の白煙化領域予測法の開発

Prediction Technique for Visible Plume from Cooling Tower

技術本部 河内昭紀*¹ 大場良二*²
岡林一木*¹ 野中剛*³

近年、我が国では、IPP（卸電力業者）の電力業界への参入に伴い、小規模な火力発電所が多数建設される傾向にある。これらの小規模電源では、海水による冷却方式ではなく、循環水による冷却塔を用いた冷却方式が採用される場合が多い。この方式では温排水放出による水環境への影響はない。しかし、湿式冷却塔の排気は高温・多湿であるため、排ガスが白煙化し、景観を損ねたり、視程障害等を引起し、周辺的生活環境や空港、高速道路等の交通機関に悪影響を与える可能性がある。本研究では、冷却塔からの白煙の挙動を予測するための数値計算コードを作成し、その計算結果を、既存の冷却塔白煙の野外観測結果と比較検討した。両者の比較結果は良い相関を示した。

Recently in Japan, independent power producers tend to construct small-scale thermal power stations with wet cooling towers instead of the conventional sea water-cooled system. Exhaust emissions from such cooling towers contain a high moisture content and are relatively high-temperature. Water vapor inside the plume condenses when contacting cool ambient air, making the exhaust plume visible. This becomes an environmental problem because the large plume descends to the ground carrying droplets that cause loss of light, low road visibility, and other problems. We developed a numerical simulation model that handles phase-change effects of water and gravity effects on large droplets to predict visible plume behavior. Its calculation results were compared with field observation data for existing cooling towers of other countries.

1. ま え が き

近年、IPP（卸電力業者）制度の導入に伴い、国内では湿式の冷却塔を採用した小規模な火力発電所が多数建設される傾向にある。湿式冷却塔からの排気は大容量・高温・多湿であるため、図1に示すように周辺大気との温度差により過飽和状態となり、水蒸気が水滴に相変化し、いわゆる白煙（Visible Plume）となる場合がある。さらに、特に凝結量が多い際には水滴落下を引起すケースもある。一般的に、冷却塔排気の白煙領域の長さは数十mから長い場合には数kmに及ぶといわれている。そのような場合、白煙は景観を損ねたり、交通機関において視程障害等を引起し、周辺的生活環境や空港、高速道路等の交通機関に大きな影響を与える。欧米では内陸の地域に大型冷却塔が建設される例も多いために、白煙に関しては1970年代の後半から問題視されるようにな

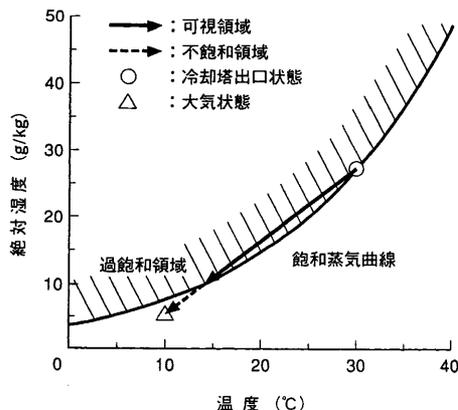


図1 冷却塔排気の変相変化 冷却塔から出た高温・高湿度の排気は大気状態へと変化する過程で飽和状態となり、可視煙となる。
Phase change in exhaust gas from cooling tower

り、種々の簡易予測モデル開発や野外観測実験が行われてきた。しかし、我が国では、地熱発電所等を除外すれば、発電所において冷却塔が建設されることはまれであり、冷却塔白煙の環境問題に対してこれまではさほど注意が払われていなかったため、白煙問題に関する研究例は少ない。しかしながら環境改善に対する社会的なニーズは高まりつつあり、これからのIPPにおける冷却塔建設では冷却塔排気の白煙化領域の予測技術が必要不可欠になってくるものと考えられる。本研究では、冷却塔等からの白煙の挙動を予測するための数値計算コード（相変化や重力による水滴の落下効果も考慮可能）を作成し、その計算結果を、既存の冷却塔白煙の野外観測結果と比較検討した。

2. 数値計算モデル

2.1 基礎方程式

今回開発した数値計算モデルには、気象や天気予測の際に一般的に用いられる雲物理モデル⁽¹⁾を導入し、以下の仮定をおいた。仮定(1)：水分は水蒸気、微小水滴（雲水）、大水滴（雨滴）の3種類の形態で存在する。

仮定(2)：微小水滴は重力の影響を受けない（ガス体と同じ挙動を示す）。

仮定(3)：大水滴は大きい液滴とし、重力の影響を受け速度 V_R (mass weighted mean velocity) で落下する。

仮定(4)：大水滴の動きは流速場 (u, v, w) に影響を及ぼさない。

これらの仮定の下、流れ場は温度浮力を考慮した標準 $k-\epsilon$ モデルを用いて解く。また水の潜熱の授受を考慮した温度場や、水蒸気、微小水滴、大水滴の拡散場に関する方程式は式(1)～(6)のとおりである。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_{Tj} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) - \frac{C_w l_{cw}}{C_p T_0} \left(u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{C_w l_R}{C_p T_0} \left(u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} - V_R \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

*1 長崎研究所流体研究室

*2 長崎研究所流体研究室主査 工博

*3 長崎研究所第二実験課

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_j \frac{\partial q}{\partial x_j} = -P_R + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_{jj}^w \frac{\partial q}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial l_R}{\partial t} + u_j \frac{\partial l_R}{\partial x_j} = P_R + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_{jj}^R \frac{\partial l_R}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (V_R l_R) \quad (3)$$

ここで、

$$\phi = \frac{1}{T_0} \left(T + \frac{L}{C_p} r \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (V_R l_R) = \frac{\partial}{\partial z} \int R_{DdD} v_D dD \quad (5)$$

$$q = r + l_{cw} \quad (6)$$

x, y, z : 座標 (m)

u, v, w : 流速 (m/s)

t : 時間 (s)

T : 大気温度 (K)

T_0 : 基準温度 (K)

C_p : 空気の定圧比熱 (J/kg)

$K_{jj}^R, K_{jj}^w, K_{jj}^s$: 乱流拡散係数 (m²/s)

L : 水の蒸発潜熱 (J/kg)

r : 水蒸気量 (kg/kg)

C_w : 水の比熱 (J/kg/K)

l_{cw} : 微小水滴量 (kg/kg)

P_R : 大水滴の生成項 [(kg/kg)/s]

D : 大水滴粒径 (m)

R_{DdD} : 粒径が $D \sim D+dD$ の範囲の大水滴量 (kg/kg)

v_D : 粒径 D の大水滴の落下速度 (m/s)

l_R : 大水滴量 (kg/kg)

q : ($=r+l_{cw}$) (kg/kg)

ϕ : 相当温位

V_R : 大水滴の落下速度 (各大水滴の落下速度を重量で重みを掛けて平均化した落下速度) (m/s)

式(1)は水の蒸発潜熱も考慮したエンタルピー (相当温位) 保存の式であり、この式より計算される ϕ と飽和蒸気圧曲線及び式(6)から計算される q から r, T, l_{cw} を計算することができる。

式(2)は微小水滴量と水蒸気量の和の保存方程式であり、これは前述の仮定(2)に基づいている。すなわち、微小水滴と水蒸気は重力の影響を受けず、ガス体と同じ挙動を示すので、これら2つの量の挙動をまとめて取扱っていることに相当する。

また、式(3)中の右辺最後の項は雨滴の落下による雨滴の移動を表す項である。したがって、本モデルを用いれば、白煙領域の予測だけでなく、水分の凝結による水滴落下量の予測も可能である。

2.2 モデル化

前述の方程式中に出てくる各パラメータについて次のように定式化を行った。

2.2.1 V_R の定式化

雨滴粒径が $D \sim D+dD$ の範囲にある雨滴の混合比を R_{DdD} とする。また、その粒径を持つ雨滴の落下速度を v_D とする。空気中のある単位質量中の雨滴の平均的な落下速度 (重量平均) が V_R であり、前述したとおり次式で表される。

$$V_R = \int v_D \frac{R_{DdD}}{l_R} \quad (7)$$

この V_R を計算するためには、 R_{DdD} 、すなわち雨滴の粒径分布を知る必要があるが、粒径分布は次式で表されると仮定する。

$$n_R(D) = n_{OR} \exp(-\lambda_R D) \quad (8)$$

ここで、

n_R : 粒径 D の雨滴の数密度 (個/cm³)

n_{OR} : インターセプトパラメータ ($= 8 \times 10^{-2} \text{cm}^{-4}$)

λ_R : スロープパラメータ [$= \left(\frac{\pi \rho_w n_{OR}}{\rho l_R} \right)^{1/4}$]

ρ : 空気密度 (g/cm³)

ρ_w : 水 (液体) 密度 (g/cm³)

一方、 v_D は次式(9)で表される。

$$v_D = a D^b \text{ (cm/s)} \quad (9)$$

ここで、

$a = 2115 \text{ (cm}^{1-b}\text{/s)}$

$b = 0.8$

式(8)、(9)を用いると、式(7)は解析的に積分可能で式(10)のようになる。

$$V_R = \frac{a \Gamma(4+b)}{6 \lambda_R^b} \text{ (cm/s)} \quad (10)$$

2.2.2 雨滴の生成項 P_R の定式化

雨滴の生成項 P_R は次のようにモデル化する。

$$P_R = P_{REVP} + P_{RACC} + P_{RAUT} \quad (11)$$

ここで、右辺の3つの項はそれぞれ次の量を表している。

P_{RAUT} : 雲水同士の凝縮・合併による生成 (autoconversion) 項 (g/g/s)

P_{RACC} : 雨滴と雲水の衝突合併 (accretion) による生成項 (g/g/s)

P_{REVP} : 蒸発による生成項 (g/g/s)、負の値を持つ

これらの3つの項はそれぞれ式(12)、(13)、(14)のように定式化した。

$$P_{RAUT} = \rho (l_{cw} - l_{wo})^2 \times \left[1.2 \times 10^{-4} + \frac{1.569 \times 10^{-12} \times N_1}{D_0 (l_{cw} - l_{wo})} \right]^{-1} \quad (12)$$

ここで、

l_{wo} : autoconversionのしきい値 [$= 2 \times 10^{-3} \text{ (g/g)}$]

N_1 : 雲水の数密度 ($= 1000 \text{ 個/cm}^3$)

D_0 : 拡散係数 [$= 0.15 \text{ (cm}^2\text{/s)}$]

$$P_{RACC} = \frac{\pi n_{OR} l_{cw} \Gamma(3+b)}{4 \lambda_R^{3+b}} \quad (13)$$

$$P_{REVP} = \frac{2\pi(S-1)n_{OR} \left[0.78 \lambda_R^2 + 0.31 S^{1/2} \Gamma \left(\frac{b+5}{2} \right) a^{1/2} \nu^{-1/2} \lambda_R^{-(b+5)/2} \right]}{\rho \left(\frac{L^2}{K_a R_w T^2} + \frac{1}{\rho_s \phi} \right)} \quad (14)$$

ここで、

S : 飽和度

r_s : 飽和水蒸気量 (kg/kg)

R_w : 水蒸気的气体定数 ($= 461.5 \text{ J/kg/K}$)

K_a : 空気の熱伝導率 J/(m·s·K)

Sc : シュミット数

ν : 空気の動粘性係数 (cm²/s)

ϕ : 水蒸気の拡散係数 (cm²/s)

T : 温度 (K)

2.2.3 白煙可視の判定

実現象における白煙の見え方は、空気中に含まれる微小水滴及び大水滴の量、背景の色や明るさ等によって変化すると考えられる。

しかし、今回の計算においては簡単のために、空気が飽和状態になっている領域、すなわち l_{cw} が正の値を持つ領域を可視領域と判定した。

表 1 野外観測における冷却塔の排気諸元と気象条件
Specification of cooling tower and weather conditions

地点	冷却塔形式	冷却塔高さ (m)	冷却塔出口等価口径 (m)	観測日時	気象条件			排気諸元		
					風速 (m/s)	湿度 (%)	気温 (°C)	排気速度 (m/s)	排気湿度 (%)	排気温度 (°C)
Chalk Point (Maryland, U. S. A.)	湿式自然通風	124	54.9	1972/6/17 15:00	4.8	84	22	4.8	100	40
				1972/6/24 11:00	4.1	64	25	3.7	100	44
				1972/6/18 11:00	6.8	61	27	4.0	100	40
Paradise (Kentucky, U. S. A.)	湿式自然通風	133	61.8	1973/2/12 15:00	7.0	43	7	6.0	100	29
Luen (France)	湿式自然通風	109	51.3	1972/11/28 13:00	13.0	61	3	4.8	100	39
				1972/11/30 13:00	9.0	64	7	5.3	100	40
				1972/12/2 12:00	5.3	53	8	3.5	100	28

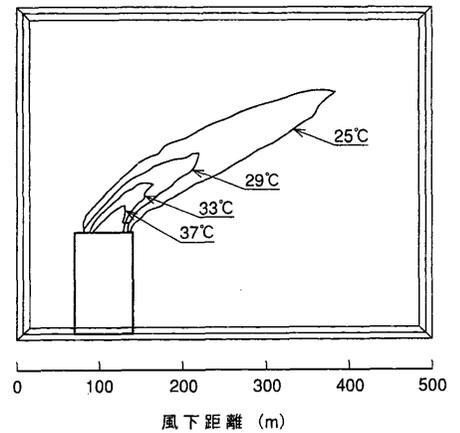


図 3 温度分布計算結果 Chalk Point (1972年6月17日)のデータに基づく数値シミュレーション結果を示す。
Temperature contours of calculation result

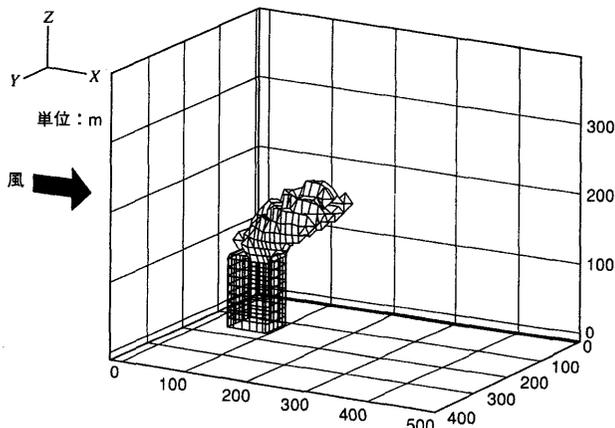


図 2 白煙領域計算結果 Chalk Point (1972年6月17日)のデータに基づく数値シミュレーション結果を示す。
Calculation result of visible plume

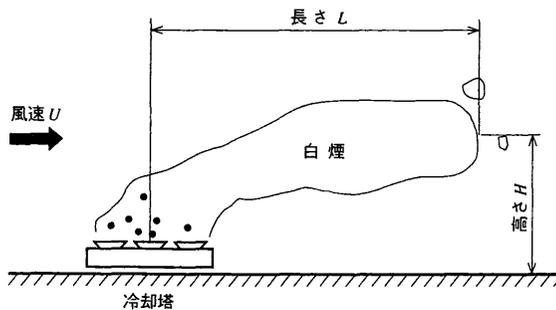


図 4 白煙長さ及び上昇高さの定義
Definition of visible plume length and height

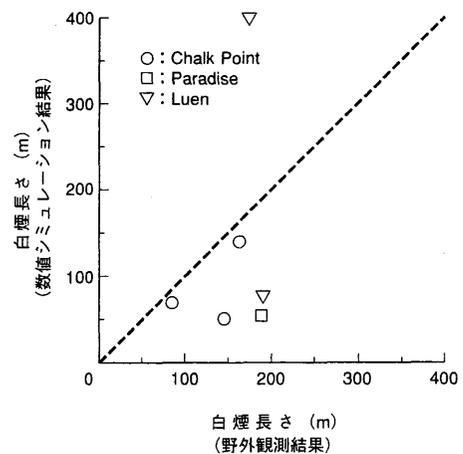


図 5 白煙長さの比較 白煙の長さを、野外観測結果と数値シミュレーション結果で比較示す。図中の点線に近いほど予測精度が高い。
Comparison of visible plume length

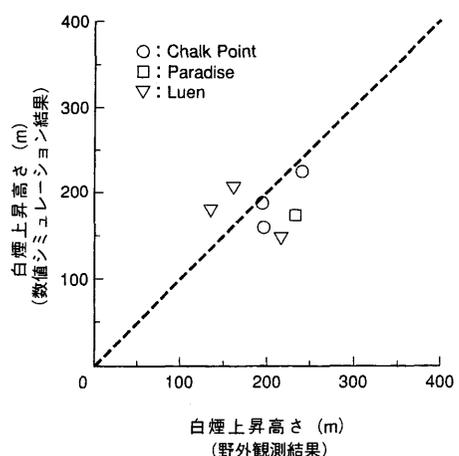


図 6 白煙上昇高さの比較 白煙の上昇高さを、野外観測結果と数値シミュレーション結果で比較示す。図中の点線に近いほど予測精度が高い。
Comparison of visible plume height

3. 計算結果と野外観測の比較

3.1 野外観測

日本国内とは対照的に、欧米では内陸地域に発電施設を建設する際に従来からよく冷却塔が建設されている。したがって、冷却塔排気の白煙化の問題も以前から指摘されており、白煙に対する環境アセスメントや規制に関する検討がなされている。その一環として、1970年代後半から1980年代にかけて、白煙の野外観測が行われた実績があり⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾、当時の簡易的な予測モデルとの比較が行われてきた実績がある。しかし、それらの冷却塔のほとんどは、

当時の主流であった自然通風式の湿式冷却塔であり、また、その後、野外観測が実施された例も少ないことから、強制通風式の冷却塔に関する野外データは少ない。

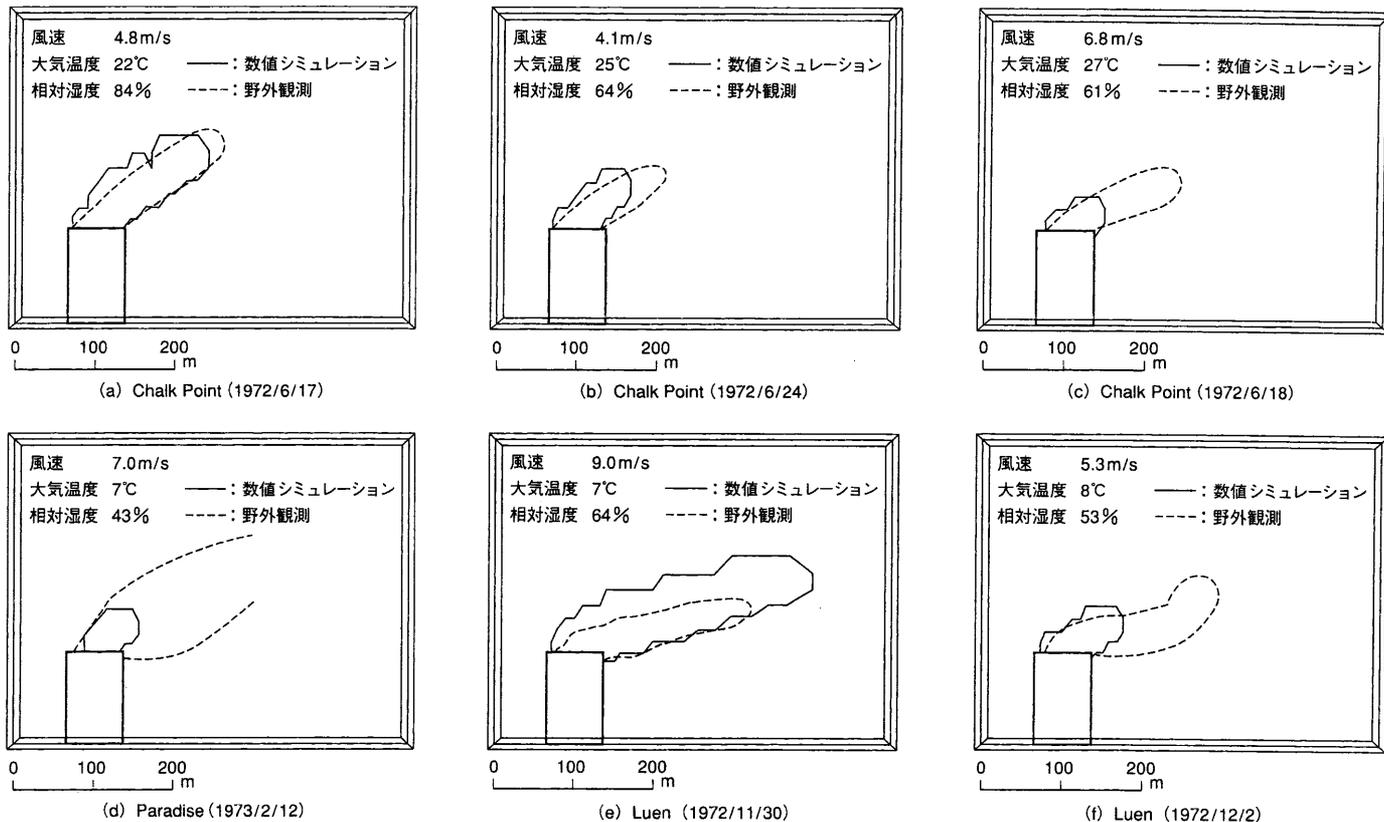


図7 白煙形状の比較 野外観測と数値シミュレーションによる冷却塔排気白煙形状を比較し示す。図中、点線は野外観測結果を、実線は数値シミュレーション結果を示している。

Comparison of visible plume shape

一方、国内においては、近年、小規模な機械通風式冷却塔において野外観測を行った例があるがデータは公開されていない。

今回はこれら既存の野外観測結果のうち、入手できたものを対象にして、前述のモデルを用いて数値シミュレーションを行い、結果を比較した。

表1には比較対象として選定した野外観測の概要及び計算の境界条件として用いた各々の気象条件、冷却塔排気条件を示す。

3.2 比較及び考察

図2及び図3に温度分布及び白煙領域の計算例を示す。いずれの図も Chalk Point の条件に基づいて計算した結果である。冷却塔から、相対湿度 100% で排出されたガスは、排出直後に大気との混合により温度が低下し、水分量が飽和蒸気量を上回り、過飽和状態となる。その結果、過飽和分の水分は水滴化し、白煙となる。

次に、冷却塔白煙の長さ L 及び上昇高さ H (図4参照) の野外観測結果と数値計算結果の比較を図5及び図6に示す。また、現地観測結果で白煙の形状データが入手できたものに関しては、形状の比較も行った (図7参照)。

白煙長さ・高さに関しては野外実測と数値計算結果の両者でよい相関が得られていた。しかし、白煙の形状 (大きさ) に関しては計算結果は野外実測結果を過小評価する傾向にある。

この理由としては次のことが挙げられる。

白煙の大きさは現地観測の平均化時間に大きな影響を受ける。すなわち、白煙化の現象は排煙プルームの瞬間的な振舞い (瞬間的な濃度分布) に依存しており、瞬間的に高濃度の領域が存在すれば白煙化すると考えられる。しかし、今回のモデルでは、平均化時間の効果まで考慮できていないために、白煙化領域を過小評

価しているものと考えられる。

いずれにせよ、現段階では、実測データの精度が十分期待でき、かつ、比較の対象となり得るような野外観測例が少ないために、モデルの精度を十分に検証することができないのが現状である。特に国内で建設増加が見込まれる強制通風方式冷却塔に関しては観測例が少ないので、今後データを蓄積してモデルの検証を更に進めていく必要がある。

4. ま と め

気象予測の分野で用いられている雲物理モデルを応用し、冷却塔からの白煙・水滴落下の挙動を予測できるプログラムを開発した。今回、白煙の大きさに関して、計算結果と野外実測結果に良い相関が得られることを示したが、今後環境アセスメントに応用していくためには、水滴落下も含めた予測精度の検証と、さらなるモデルの改良を行う必要がある。

参 考 文 献

- (1) Orville, H. D. et al., A Numerical Simulation of the Life History of a Rainstorm, Journal of the Atmospheric Science Vol.27 (1970) pp.1148-1159.
- (2) EPRI, Studies on Mathematical Models for Characterizing Plume and Drift Behavior from Cooling Towers, CS-1683, Volumes 1, 2 (1981)
- (3) Mever, J. H. et al., Chalk Point Cooling Tower Project: Chalk Point Surface Weather and Ambient Atmospheric Profile Data, NTIS, PB 284-211 (1976)
- (4) Schatzmann, M. et al., An Advanced Modeling for Cooling Tower Plume Dispersion, Atmospheric Environment (1983) pp. 663-674