

発電施設からの熱放出が大気に及ぼす影響*

菊池 幸雄**

1. はじめに

発電所で電気エネルギーをつくるときの効率は、ほぼ1/3と言われている。火力発電の場合には、石油または石炭の燃焼によって発生する熱エネルギーを、原子力発電の場合には、核分裂によって発生する熱エネルギーを電気エネルギーに変えているわけであるが、その際、電気エネルギーに変わるのは発生熱量の1/3で、残りの2/3の熱量は冷却水によって除去される。たとえば、典型的な1,000 MWの電力を作っている発電所では2,000 MWの熱の除去が必要である。

この除去された熱は、結局は大気へ放出されるわけであるが、その放出には、現在三つの方法が使われている。第1の方法は、熱を奪った冷却水をそのまま海中へ放出する方法である。この場合、温排水とまわりの海水との混合の程度にもよるが、通常、温排水とまわりの海水との温度差は10分の数度といわれており、温排水のために海面から大気へ放出される単位面積当たりの熱量の増加は小さい。したがって、この熱量の増加によって大気が直ちに影響を受けるということはない。すなわち、発電の際の余剰熱を海中へ放出する方法は大気への影響をやわらげているといえる。しかし、海中の動植物へ与える影響は問題となる。

第2の方法は、熱を奪った冷却水を冷却池へ放出する方法である。冷却池へ排出された温水は、池を通過する間に大気へ熱を放出して冷え、再び冷却水として使われる。この場合、冷却池の水面と大気の間大きな温度差が得意やすい。たとえば、アメリカ、アリゾナ州のフォー・コーナース発電所にある約5 km²の冷却池では、冬期、

水面と大気の温度差が40°C近くにも達することがある(Currier et al., 1974)。この結果、冷却池の上に、しばしば蒸発霧が発生し、風下へと流され、時には、それが層雲に変わったりする。

第3の方法は、熱を奪った冷却水を冷却塔を使って冷やす方法である。冷却塔については次節で詳述するが、ごく簡単にいうと、冷却塔は太い煙突で、口径は10 m~80 mあり、温水はその側面を流れていて、ちょうど、自動車のエンジン冷却水を冷やすときのように、外気が冷却塔の側面から中へ取り込まれるとき温水から熱を取り去り、暖まった空気は冷却塔の口からブルーム(plume)として放出される。この場合ブルームが凝結を起こす目に見えるブルームとなり、さらには、雲の形成へと結びつく。この結果、地表に到達する日射量の減衰や、降水量の増大を引き起こして、発電所周辺の天候に影響を及ぼす。

わが国では、余剰熱を除去するため、温水の海中放出の方法がとられているので、周辺の大気へ与える熱の影響は問題になっていないが、アメリカでは、主に、余剰熱の除去に冷却塔が用いられているので、熱放出の周辺大気へ与える影響が問題になっている。もちろん、一つの発電所だけの影響を考えると、それほど大きなものではないであろう。しかし、アメリカでは、エネルギー需要の増大を補うための発電所の増設に関して、発電所団地の建設、すなわち、ある地域に多くの発電所を集中して作るという構想のもとに計画を進めている。この発電所団地の総発電量は10,000 MW~50,000 MWを予定しているから、余剰熱の放出は20,000 MW~100,000 MWにも及ぶ。一つの発電所の熱放出量に比べ、1~2桁大きい値で、このエネルギーが5~100 km²の面積から放出される。これは、自然界のメソ現象と同程度のエ

* Atmospheric effects of heat release at large power plants.

** Y. Kikuchi, 気象研究所応用気象研究部.

エネルギー放出で、大気への影響も大きいと考えられる。このようなわけで、アメリカでは、冷却塔からの熱放出が大気に及ぼす影響を明らかにする研究が求められており、すでに、かなり以前からこれに関する研究が始められている。

筆者は、昨年、第4回日米大気汚染気象委員会に出席する機会を与えられ、会議の中で、アメリカで行なわれているこの問題についての研究の紹介があり、非常に興味を感じた。たまたま、天気編集部より、日米大気汚染気象委員会に関連したトピックスの執筆を依頼されたので、日本ではあまり行なわれていない研究ではあるが、今後、人工熱の放出に伴う局地的な気候や天候の改変に関する研究と結びつくと思われるので、その現状を紹介することにした。

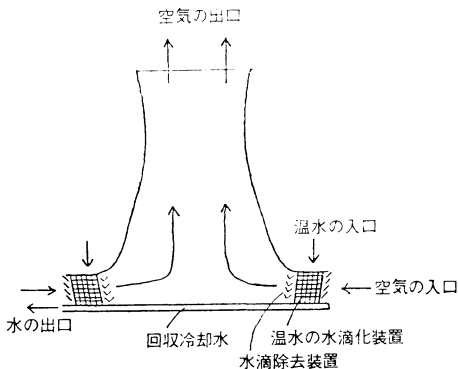
冷却塔からの熱放出が大気に与える影響として問題になっているのは、ブルームが凝結して目に見えるようになること、雲の形成、霧の発生、降水量の増加等であり、また、熱放出に伴って冷却塔から排出される水滴の沈着も問題になっている。以下では、まず、冷却塔の説明をした後、以上の問題について、順次、観測事実とその予測法を主体に述べることにする。最後に、発電所団地が及ぼす影響にふれることにしよう。

筆者は、この問題に精通しているわけではないので不十分な紹介になると思うが、いたらない所は参考文献で補っていただきたい。

2. 冷却塔

発電所で電気エネルギーを作り出すときの余剰熱は冷却水の循環を通して除去されるが、冷却塔は、余剰熱を吸収した温水を冷却する装置である。

冷却塔は、温水の冷却方法によって、湿潤冷却塔(wet cooling tower)と乾燥冷却塔(dry cooling tower)と



第2.1図 自然通風湿潤冷却塔の断面図。

に分類できる。さらに、その各々は、通風の方法によって、自然通風冷却塔(natural draft cooling tower)と機械通風冷却塔(mechanical draft cooling tower)とに分けることができる。

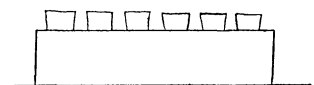
第2.1図は、自然通風湿潤冷却塔の説明用断面図である。冷却塔に流入した温水は、水滴化装置を流れ落ちるとき無数の水滴となり、冷却塔の下方側面から流入した空気はこれら水滴の間を通り抜ける。

このとき、水滴は蒸発や伝導によって熱を失う。温水を水滴化するのは、空気と水の接触面積を大きくし、冷却効率を上げるためである。小さい水滴は空気と一緒に冷却塔の内部へ流れ込もうとするが、水滴除去装置によって捕捉される。しかし、ごく僅かの水滴は冷却塔の内部へ入り込む。これを漂流水滴(drift)といっている。以上のことから明らかなように、冷却塔内部の空気は高温で、ほぼ飽和の状態にあり、しかも少量の漂流水滴を含んでいる。この冷却塔内部の空気と外気との密度差によって、空気を冷却塔へ流入させる力が生じ通風が行なわれる。自然通風と呼ばれるのはこのためである。通風を引き起こす力を強くするため、自然通風冷却塔は大きく作られる。口径は40m~80mで、高さは100m~150m、塔の側面は双曲線を描いている。

この冷却塔では、温水の冷却に水滴の蒸発が大きな役割を果たしており、冷却に使われた空気は湿ってしまう。このような冷却方法を用いている冷却塔を湿潤冷却塔という。一方、乾燥冷却塔とは、温水の冷却の際に、空気と温水が直接接触しないような装置を用いたものである。したがって、この場合、冷却に使用された空気は乾燥したままである。

機械通風冷却塔は、冷却塔の排出口近くにファンを取り付け、ファンによって上昇気流を作り出し通風を行なうものである。したがって、塔をそれほど大きくする必要はなく、口径は10m~20m、高さは20m前後である。また、側面の大部分から空気を取り入れるように作ってある。この機械通風冷却塔は、5~10個を直線状(第2.2図)またはドーナツ状に並べ、一つのユニットとして建設される。

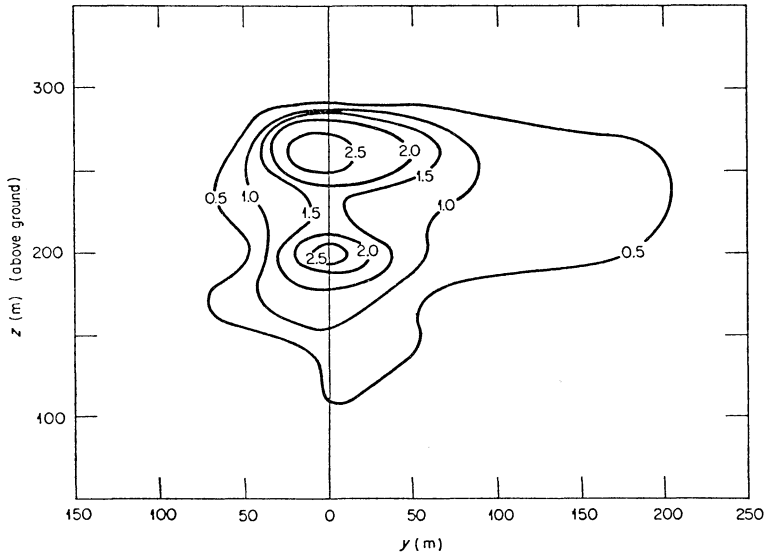
現在用いられている冷却塔の大部分は湿潤冷却塔である。第2.1表は、湿潤冷却塔の排出口付近のブルーム



第2.2図 機械通風冷却塔。

第 2.1 表 湿潤冷却塔から放出される初期のプルームの特徴 (Hanna, 1978 a)

型	半 径	鉛 直 速 度	温度差 (プルームの温度 -まわりの温度)	湿 度	水 滴 量
機 械 通 風	5~10 m	10 m/sec	10~20 °C	100%前後	0.0001~0.001 g/g
自 然 通 風	20~40 m	5 m/sec	10~20 °C	100%前後	0.0001~0.001 g/g



第 3.1 図 折曲がりプルームの風下 150 m におけるプルームに直角な断面内の温度 (°C) 分布 (プルームとまわりの大気との温度差) (Hanna, 1978 b).

の平均的特徴を示している (Hanna, 1978 a). もちろん、プルーム内でのいろいろな物理量の分布は一様ではない。たとえば、排出口におけるプルームの水平断面内の鉛直速度は中心付近では 1 m/sec 程度であるが、中心から 2 m の所で最大の 12~14 m/sec に達し、中心からさらに遠くなるにつれて減少するという測定結果もある。しかし、多くのモデルでは、プルームの水平断面内の物理量の分布は一様であると仮定する。

3. 見えるプルーム

湿潤冷却塔から放出されるプルームはほぼ飽和に達しているため、殆どの場合、上昇を始めると直ちに凝結を起こし、目に見えるようになる。このプルームは、風の強いときには、折曲がりプルームとなって、上昇を伴いながら水平に流れるが、風の弱いときには垂直に上昇する。折曲がりプルームとして扱うか鉛直プルームとして扱うかは、風速が 1 m/sec より大きい小さいかを基準とするのが普通である。

1976 年 6 月 22~23 日、チョーク・ポイント (Chalk

1979 年 7 月

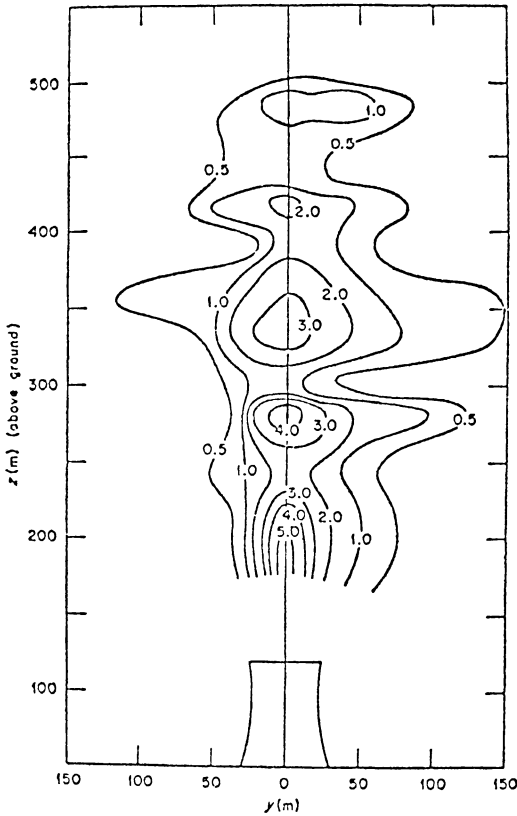
Point) で飛行機によるプルームの断面観測が行なわれた。得られた温度分布が第 3.1 図と第 3.2 図に、まわりの大気との温度差として示されている (Hanna, 1978 b)。第 3.1 図は、折曲がりプルームの風下 150 m の地点におけるプルームに直角な断面図である。この断面図の、高さ 200 m における温度分布はほぼ正規型になっている。第 3.2 図は、鉛直プルームの中心を通る鉛直断面図である。この図は同時測定の結果ではなく、各高度を異なった時刻に測定したデータから作られているから、泡状の分布は実在するかどうか問題がある。この場合も、一定高度の温度分布はほぼ正規型である。

プルームの流れに直角な断面内の平均温度とまわりの大気との差を ΔT とするとき、 ΔT の予測式が Hanna (1974) によって提案されている。

折曲がりプルーム：

$$\Delta T / \Delta T_0 = \left\{ 1 + 0.4 \left(\frac{z}{R_0} \right) \left(\frac{w_0}{u} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \quad (3.1)$$

鉛直プルーム：



第3.2図 鉛直ブルームの中心を通る鉛直断面内の温度(°C)分布(ブルームとまわりの大気との温度差)(Hanna, 1978 b).

$$\Delta T/\Delta T_0 = \left(1 + 0.15 \frac{z}{R_0}\right)^{-2} \quad (3.2)$$

ここで、 z は高度、 R はブルームの半径、 w はブルームの上昇速度、 u は風速で、subscript 0は初期の値、すなわち、排出口における値を表わしている。

チョーク・ポイントの観測では、 $w_0=4.6$ m/sec, $(T_{plume})_0=36.8^\circ\text{C}$, $T_{air}=24^\circ\text{C}$, $u=4$ m/sec, $R_0=24$ mであったので、 $z=200$ mの ΔT は(3.1)式より 0.6°C となり、観測値 1.5°C に近い値になる。また、(3.2)式のテストの結果によれば、予測値は実測値より2倍ほど常に大きくなるが、 ΔT の高さによる減少の割合はよく表現されている。

目に見えるブルームの長さの観測は不完全ながら多くの場所で行なわれており、ほぼ似たような結果を得ているが、アメリカ、ケンタッキー州のパライダイス(Paradise)にある自然通風冷却塔からのブルームについての

1年間にわたる観測によれば、ブルームの長さは季節変動が大きく、夏の150 mに対し、冬は600 mで、年平均は410 mである。これを日変化で見ると、午前中は620 m、午後は190 mである。また、観測されたブルームの中で最も長いものは14 kmにも達していた(Coleman・Crawford, 1978)。

次に、見えるブルームの長さの簡単な予測方法を述べよう。

体積フラックス(volume flux)を、折曲がりブルームについては $V=uR^2$ (初期の値は $V_0=w_0R_0^2$)、鉛直ブルームについては $V=wR^2$ と定義すると、初期の体積フラックスに対する高さ z の体積フラックスの比は、折曲がりブルーム:

$$V/V_0 = [1 + 0.28(z/R_0)(u/w_0)^{1/2}]^2 \quad (3.3)$$

鉛直ブルーム:

$$V/V_0 = (1 + 0.11z/R_0)^2 \quad (3.4)$$

によって与えられる(Hanna, 1972; 1978 a)。記号の説明は(3.1)(3.2)式の所で済んでいるので省略する。

さて、ブルームが見えるための条件は、凝結を起こすための条件にはかならないから、

$$V_0Q_0 \geq V(q_s - q_e) \quad (3.5)$$

である。ここで、 Q_0 はブルームの初期の水分量(気体と液体を含む)、 q_e と q_s はそれぞれまわりの大気の実際の水蒸気量と飽和水蒸気量である。

ブルームの初期の値とまわりの大気 q_e , q_s がわかれば、(3.5)と(3.3)あるいは(3.4)を用いて、見えるブルームの高さを求めることができる。鉛直ブルームについては求めた高さがそのまま長さになるが、折曲がりブルームについては、次に示すブルームの高さと風下距離の関係式(Briggs, 1975)を用いて、求めた高さより長さを計算する。

$$z = 1.8 F^{1/3} x^{2/3} / u \quad (3.6)$$

ここで、 x は風下距離、 F は初期の浮力フラックス(buoyancy flux)で、 $F = \frac{g}{T_0} V_0 \Delta T_0$ で与えられる。

第3.1表には、オーク・リッジ(Oak Ridge)における見えるブルームの長さとお高さについて、観測結果と上述の方法による予測結果との比較が示されている(Hanna, 1978 a)。予測値と観測値の相関係数は高い値を示しているが、予測値は、長さについて20%、高さについて50%程度過大評価の傾向がある。

4. 雲の形成

冷却塔から放出されたブルームは、まわりの空気を吸い込みながら上昇するので、100 mも上昇すると、ブル

ーム内の空気の大部分はまわりからの吸込み (entrainment) による空気によって占められる。このように、ブルームはまわりの空気を持ち上げる働きがある。ブルームによって持ち上げられた空気が凝結高度に達すると雲を作るわけである。

前節で述べた見えるブルームの長さを求める方法は、大気の状態が高さによってあまり変わらないときに適用できる。大気の状態が高さによって著しく変化するときや雲物理過程が重要になるときは、もっと精密なモデルを必要とする。ところで、見えるブルームも雲の発達も、結局はブルーム内での凝結の問題であるから、両者は同一のモデルで扱えるわけである。雲の発達の数値モデルは数多くあるが、ここでは、Hanna (1976; 1978a) によって提案された定常1次元モデル (パラメータが z のみの関数) について説明しよう。

Briggs (1975) は、運動量ブルーム、温度ブルーム、水蒸気ブルームの有効半径 R_m, R_t, R_w の間には、

$$R_m \geq R_t > R_w \text{ (等号は鉛直ブルームの場合)}$$

の関係のあることを見出した。さらに、温度ブルームに対する運動量ブルームの断面積の比 E_m と水蒸気ブルームに対する温度ブルームの断面積の比 E_w は、

$$E_m = 2.25 \quad (4.1)$$

$$E_w = 2.0 \quad (4.2)$$

となることが知られている。 E_w は peak factor とも言われる。

ブルームの半径と吸込み率 $O = \frac{1}{V} \frac{dV}{dz}$ は、次のように表わされる。

鉛直ブルーム:

$$\left. \begin{aligned} O_m = O_t = 0.15, \quad O_w = 0.107 \\ \frac{\partial R_m}{\partial z} = \frac{\partial R_t}{\partial z} = 0.15 - R_t(g/T_p) \\ \quad \quad \quad (T_p - T_e)/2w^2 \\ \frac{\partial R_w}{\partial z} = 0.71 \frac{\partial R_t}{\partial z} \end{aligned} \right\} (4.3)$$

折曲がりブルーム:

$$\left. \begin{aligned} O_m = 1.2, \quad O_t = 0.8, \quad O_w = 0.57 \\ \frac{\partial R_t}{\partial z} = 0.4 - (R_t/2u) \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial R_w}{\partial z} = 0.71 \frac{\partial R_t}{\partial z} \\ \frac{\partial R_m}{\partial z} = 1.5 \frac{\partial R_t}{\partial z} \end{aligned} \right\} (4.4)$$

ここで、 T_p はブルームの温度、 T_e はまわりの大気温度、subscript m, t, w はそれぞれ、運動量ブルーム、

第3.1表 オーク・リッジにおける見えるブルームの長さおよび高さの観測値と予測値 (Hanna, 1974).

日付	長さ (m)		高さ (m)	
	観測値	予測値	観測値	予測値
1972. 12. 29	静穏		150	160
1973. 1. 10	500	490	200	520
1973. 1. 11	静穏		200	380
1973. 1. 31	静穏		175	240
1973. 2. 1	250	240	200	280
1973. 2. 5	125	170	100	190
1973. 2. 6	100	100	75	140
1973. 2. 7	200	140	200	260
1973. 2. 26	静穏		75	140
1973. 3. 9	静穏		75	120
1973. 3. 12	静穏		50	60
1973. 3. 20	500	1000	500	720
1973. 4. 8	150	170	100	190
1973. 4. 19	100	160	100	180
1973. 4. 26	1500	3600	500	600
1973. 5. 10	静穏		400	430
1973. 5. 17	700	1040	500	1220
相関係数		0.98	0.87	
予測値/観測値		1.2	1.55	

温度ブルーム、水蒸気ブルームに関する量であることを表わしている。

雲モデルを構成するそのほかの方程式としては、次のようなものがある。

運動方程式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(w^2/2)}{\partial z} = & (g/E_m) \{ [T_p(1+0.61E_wq_p) \\ & - T_e(1+0.61q_e)] / [T_p(1+0.61E_wq_p)] \\ & - E_w(Q_c+Q_h) \} - O_m w^2 / R_m \quad (4.5) \end{aligned}$$

ここで、 q は水蒸気量 (比湿)、subscript p と e は、それぞれブルームとまわりの大気に関する量であることを表わす。また、 Q_c は cloud water (落下速度が無視できるほど小さい水滴)、 Q_h は hydrometeor water (落下速度が無視できない水滴) である。

上式の右辺は、浮力による加速度、水滴による drag、吸込みによる drag を表わしている。

温度方程式:

$$\frac{\partial T_p}{\partial z} = -[(LE_w/c_p)\frac{\partial q_{ps}}{\partial z} - g/c_p - O_t(T_p - T_c)/R_t + [(L_i E_w/c_p)(Q_c + Q_h)/\Delta z] - [(LE_w/c_p)O_w(q_p - q_e)/R_w] \quad (4.6)$$

ここで、[]のついた項はブルームが飽和しているときのみ用いる項、 Δz は方程式を積分するときを使用する z の格子間隔、 L と L_i はそれぞれ、水と水蒸気および水と氷の間の相変化のときの潜熱、 q_{ps} はブルームの飽和水蒸気量である。

上式の右辺各項は、凝結による熱の獲得、乾燥断熱膨張による温度下降、空気の入込みによる温度下降、水滴の凍結による熱の獲得、吸込み空気を飽和するための水滴の蒸発による熱損失を表わしている。

水蒸気方程式：

$$\text{不飽和} \quad \frac{\partial q_p}{\partial z} = -O_w(q_p - q_e)/R_w \quad (4.7)$$

$$\text{飽和} \quad \frac{\partial q_p}{\partial z} = \frac{\partial q_{ps}}{\partial z} \quad (4.8)$$

ブルームが不飽和のときは (4.7) を、飽和のときは (4.8) を用いる。(4.7) の右辺は吸込みの効果、(4.8) の右辺は凝結の効果を表わしている。

cloud water 方程式：

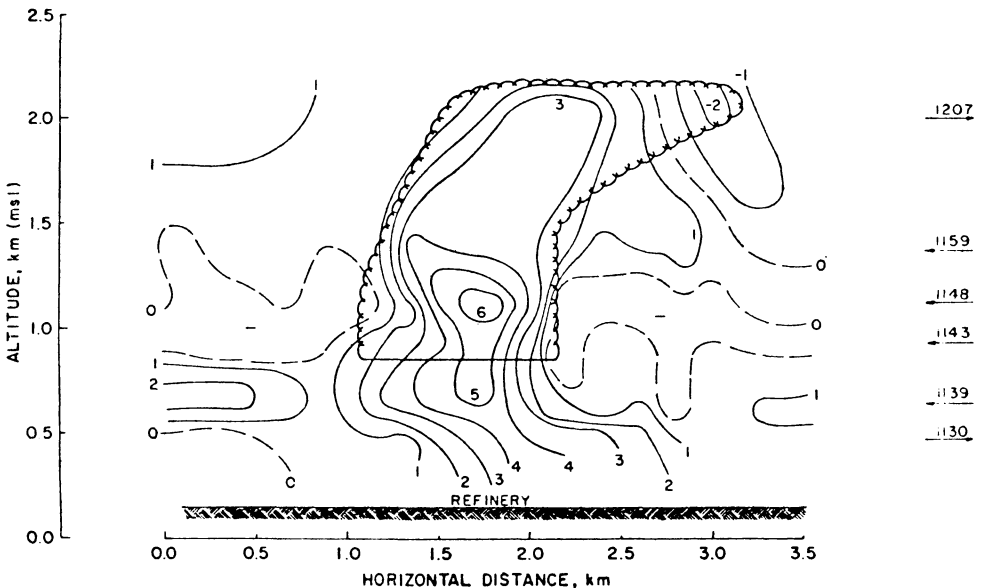
$$\frac{\partial Q_c}{\partial z} = -\frac{\partial q_{ps}}{\partial z} - 10^{-3}(Q_c - 0.0005)/w - 0.00522Q_c(1000Q_h)^{0.875}/w - O_w(q_p - q_e)/R_w + K_2/\Delta z \quad (4.9)$$

上式の右辺は、凝結による水滴の生成、conversion (電氣的力や乱流等による cloud water drop の合併および凝結の続行によって cloud water drop が hydrometeor water drop に成長すること) による hydrometeor water への転換、併合 (coalescence) による hydrometeor water への転換、吸込みによる水滴の損失を表わしている。計算にあたっては、吸込み空気を飽和するため、まず、cloud water が蒸発し、なお、不飽和のときは、hydrometeor water が使われるものとする。

hydrometeor water 方程式：

$$\frac{\partial Q_h}{\partial z} = 10^{-3}(Q_c - 0.0005)/w + 0.00522Q_c(1000Q_h)^{0.875}/w - 4.5Q_h(1000Q_h)^{0.125}/(wR_w \cos[\arctan(w/u)]) - O_w Q_h/R_w + K_2/\Delta z \quad (4.10)$$

上式の右辺は、conversion と併合による hydrometeor water drop の生成、降水による消失、吸込みによる消失を表わしており、最後の項は、吸込み空気を飽和するため、cloud water がすべて蒸発しつくしても、まだ、不飽和のとき蒸発の不足分を表わす補正項である。この不足分は hydrometeor water の蒸発によって補われるが、なお、飽和しきれないときは、ブルームから水滴がなくなる。



第 4.1 図 精油所からの熱放出により発達した積雲と鉛直速度 (m/sec) 分布 (Auer, 1976).

雲モデルの数値計算では、飽和比湿の式が必要であるが、ここでは、精度の高い Goff-Gratch の式をあげておく。

$$\left. \begin{aligned}
 &T_1 = 273.16^\circ K < T < 373^\circ K \text{ のとき,} \\
 &\ln q_s = 2.303 \{ 10.79574(1 - T_1/T) \\
 &\quad + 1.50474 \times 10^{-4} [1 - 10^{-8.2969(T/T_1 - 1)}] \\
 &\quad + 0.42873 \times 10^{-3} [10^{4.76955(1 - T_1/T)} \\
 &\quad - 1] \} - 5.028 \ln T/T_1 - \ln p + 1.355 \quad (4.11) \\
 &T < T_1 = 273.16^\circ K \text{ のとき,} \\
 &\ln q_s = 2.303 [-9.09685(T_1/T - 1) \\
 &\quad + 0.87682(1 - T/T_1) \\
 &\quad - 3.56654 \ln T_1/T - \ln p + 1.355
 \end{aligned} \right\}$$

ここで、 q_s は飽和比湿、 p は気圧である。

(4.1)~(4.11)を用い、まわりの大気の状態 T_e, q_e, u と初期条件 $R_0, w_0, T_{p0}, q_{p0}, q_{ps0}, Q_{c0}, Q_{h0}$ を与えると、高さ z における $R_t, R_m, R_w, w, T_p, q_p, Q_c, Q_h$ を求めることができる。すなわち、1次元ではあるが、雲の高さ、雲の大きさ、雲の中での各種物理量の分布がわかるわけである。

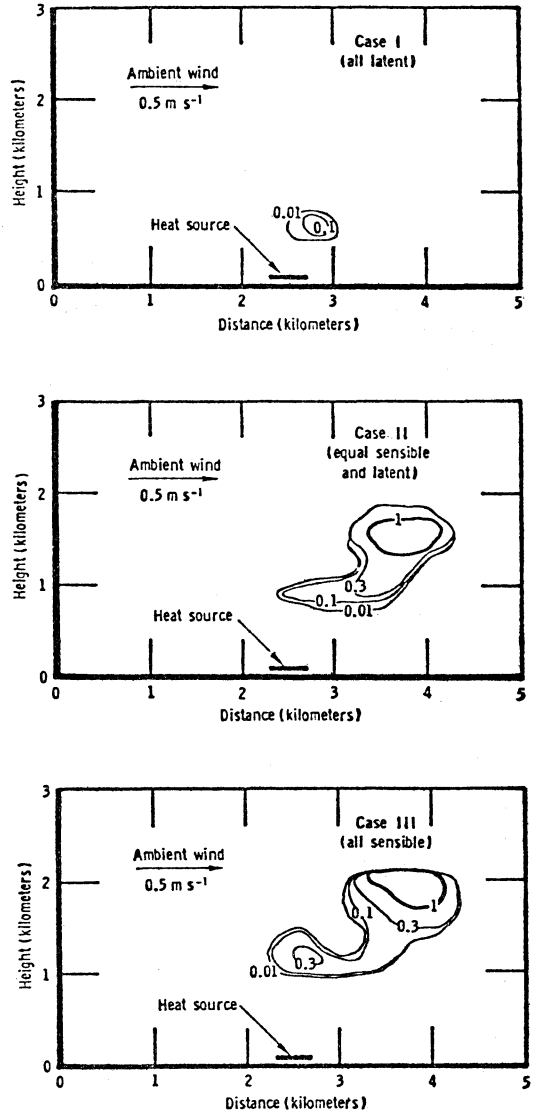
方程式系の数値積分にあたっては、 Δz を $0\text{ m} \sim 10\text{ m}$ では 0.01 m に、 $10\text{ m} \sim 100\text{ m}$ では 0.1 m に、 100 m 以上では 1 m にとり、 $u = 1\text{ m/sec}$ を基準にして、 u

第 4.1 表 ウッド・リバー精油所の上で発生した積雲について、観測値と雲モデルによる予測値との比較 (Hanna, 1976 b).

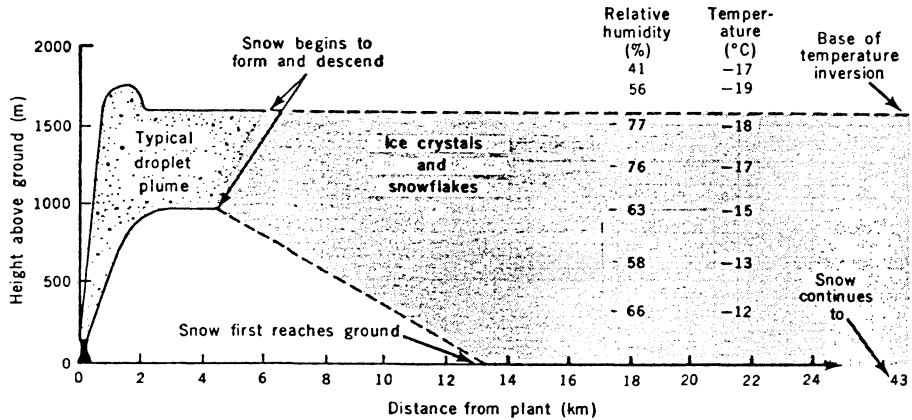
	観測値	予測値
雲底高度 (m)	700	650
雲頂高度 (m)	2050	2350
高度 (m)		
	水滴量 (g/m ³)	
930	0.46	0.56
1270	0.10	0.75
1860	0.44	1.30
	鉛直速度 (m/sec)	
500	3	2.0
1500	4	2.0
2000	3	2.3
	温度差 ($T_p - T_e$) (°C)	
500	0.2	0.1
1500	-0.5	0.3
2000	-0.2	0.5

がこれより大きい所では折曲がりブルームに関する式を、 u がこれより小さい所では鉛直ブルームに関する式を用いる。

冷却塔は通常いくつかグループで作られるので、各冷却塔から放出されたブルームの合併が起こる。この場合は次のように計算する。ブルームの半径が冷却塔間の距離の半分に等しくなったとき合併が起こるものと



第 4.2 図 雲モデルにより計算された60分後の雲分布 (水滴量: g/kg). 上の図: すべて潜熱, 中の図: 潜熱と顕熱が同量, 下の図: すべて顕熱 (Koenig et al., 1978).



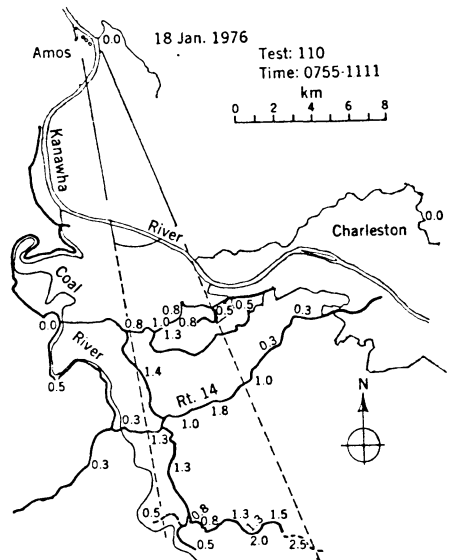
第 5.1 図 降雪を伴うプルームの断面図 (Kramer et al., 1976).

し、合併後のプルームは $N^{1/2}R$ (N はプルームの数, R は半径) の半径を持つものとする。これは、合併プルームの断面積は、各プルームの断面積の和になるという考え方に基づくものである。

1973年8月10日、アメリカ、イリノイ州のウッド・リバー (Wood River) にある精油所からの熱放出によって、孤立した降水なしの定常性積雲が発生し (第 4.1 図)、飛行機による詳細な観測がなされた (Auer, 1976)。この観測例に前述の雲モデルを適用し、比較した結果が第 4.1 表に示されている (Hanna, 1976 b)。雲底および雲頂の高さはモデルによってよく予測されているが、鉛直速度は予測値が 20~50% ほど小さく、水流量は 3~10 倍ほど大きい。温度差の誤差は 0.8°C 以内におさまっている。

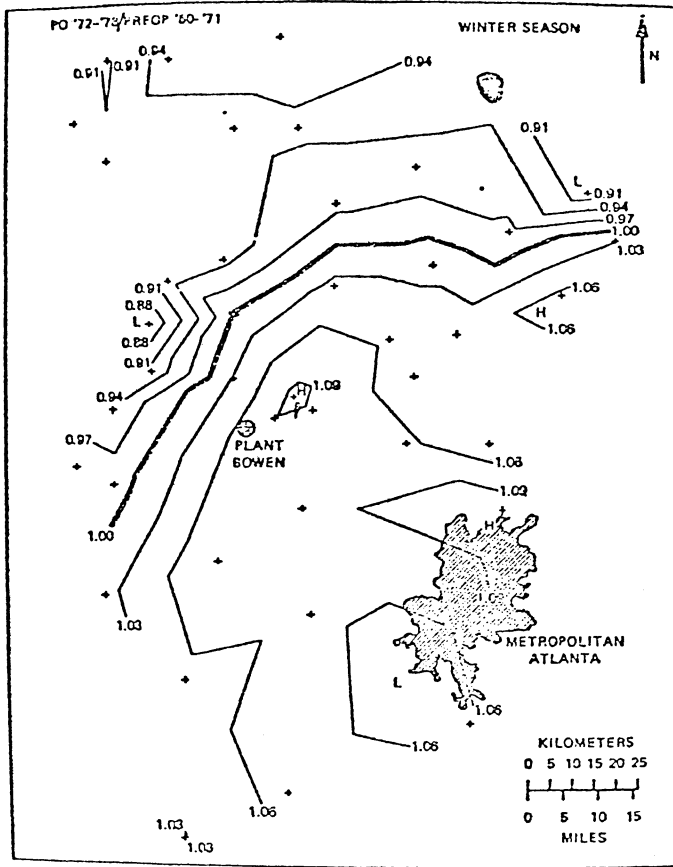
湿潤冷却塔から放出されるプルームと乾燥冷却塔から放出されるプルームの雲の形成に対する違いを見るため、Koenig et al. (1978) は、全放出熱量は同じであるが、すべてが潜熱の場合、潜熱と顕熱が同量ずつ含まれる場合、すべてが顕熱の場合について雲の発達の数値シミュレーションを行なった。モデルは、運動量、温度、水蒸気量、水流量等に関する 2 次元の方程式系から成り、K 理論に基づく拡散効果や前述の 1 次元モデルで述べたような雲物理過程のパラメタリゼーションを含んでいる。熱放出は、各時間ステップ毎に、特定の格子点における顕熱や水蒸気の発生として与えられた。

第 4.2 図は、熱放出後 60 分経過したときの雲の様子を示している。放出熱がすべて顕熱の場合、上昇速度、雲頂高度、雲の中とまわりの大気との温度差、水流量のいずれも、他の場合に比べて大きく、雲の発達が最も盛ん



第 5.2 図 プルームからの降雪量 (cm) (Kramer et al., 1976).

なことを示している。一方、放出熱がすべて潜熱の場合には、雲の発達が最も弱い。このことから、放出熱の中に含まれる潜熱の量が多いほど、初期の浮力が小さいので、プルームは大きな雲を作るほど上昇できないが、放出熱の中で顕熱の割合が大きいほど、初期の浮力が大きく、プルームはまわりの空気を吸い込みながら高い所まで上昇するので雲の発達も盛んになることがわかる。したがって、湿潤冷却塔の方が乾燥冷却塔より雲を作りにくいと言える。



第 5.3 図 冬季における発電所操業後降水量の操業前降水量に対する比の分布 (Hanna, 1978 b).

5. 降水量の増加

冷却塔の上で雲が形成されるという事実は、しばしば観測されているが、降水の増加についての報告は数少ない。以下、いくつかの例について述べよう。

1976年1月18日、アメリカ、西バージニア州のアモス (Amos) 火力発電所上空は晴れていたが、風下で、この発電所の冷却塔から放出されたブルームから降雪が見られた (Kramer *et al.*, 1976)。当日は寒い日で地上気温は -12°C 、1,600 m に逆転層があった。上昇したブルームは 400 m で煙突から排出された煙流と合併し、1,600 m まで上昇し、以後はほぼ水平に流された。07時55分から11時11分まで飛行機によるブルームの観測が行なわれ、第 5.1 図の結果を得た。ブルームの中の水滴は、冷却塔から風下 5 km で過冷却水滴から氷晶に変わりはじめ、11 km ですべてが氷晶になり、この氷晶のブルーム

は 43 km まで続いた。できた氷晶は、成長しつつ下降をはじめ、13 km で雪が地上に達した。降雪は 43 km まで続いた。雪は非常に軽い綿毛のようであったが、積雪量の最高は 2.5 cm に達した。積雪の状態は第 5.2 図に示すように、ほぼブルームの真下に限られた。降雪の条件は、放出される水蒸気量の割合にもよるが、気温が -12°C かそれ以下で、安定な成層へブルームが流れ出ることが必要のようである。

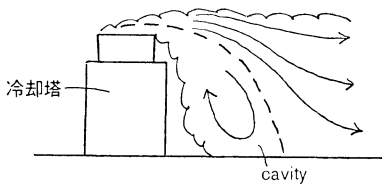
1960年12月21日夜から22日朝にかけて、オーク・リッジ (Oak Ridge) の冷却塔のブルームから、断続的で僅かではあるが、降雪があった (Culkowski, 1962)。雪は風下 5 km から降りをはじめ、8 km までは積雪があり、さらに、16 km までは非常に僅かではあるが降雪が認められた。積雪の幅はほぼ 1.6 km であった。3~8 km に降った雪片は 0.6 cm の大きさであった。

また、Otts (1976) は、アモス発電所の冷却塔のブルームからの降雪で 15 cm の積雪があった例を報告している。

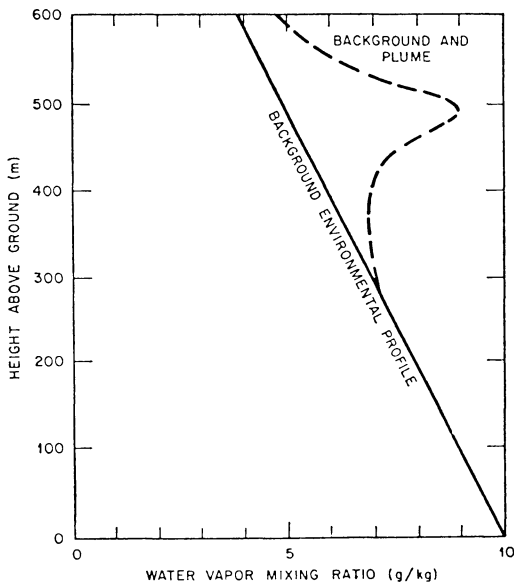
ブルームの中で雪が作られて地上に達するまでには時間がかかるので、通常、降雪は冷却塔の近くには見られず、風下 10 km くらいからはじまる。

夏季、しゅう雨性対流の起こりやすい条件のとき、冷却塔から放出されたブルームが引き金になって降水を引き起こすことは可能であろう。また、広い地域をおおい、降水を伴っている雲にブルームが合併したとき、降水量を増大させることも考えられる。しかし、これらは、いずれも検証がむずかしい。

アメリカ、ジョージア州のボーエン (Bowen) 発電所の 25 km 以内で、発電所の操業前から長期間にわたって雨量の観測が行なわれた (Patrinos, 1978)。冬季の降水量について、発電所操業後の操業前に対する比を示し



第 6.1 図 ダウン・ウォッシュと cavity。



第 6.2 図 プルームが存在するときの水蒸気量分布 (Hanna, 1978 a)。

たのが第 5.3 図である。発電所の平均的な風下で、操業後、降水量の増加が見られるのは興味深い。もちろん、その有意性を確かめるには、この地域の降水量の自然変動度等を調べる必要がある。

6. 霧の発生

風が強いとき、機械通風冷却塔の後には、ダウン・ウォッシュ (downwash) が起こりやすい (第 6.1 図)。オーク・リッジ (Oak Ridge) での観測結果によると、ダウン・ウォッシュは 50% の頻度で発生している。このとき cavity 内の水蒸気量は、

$$q = Q/Au \quad (6.1)$$

である。ここで、 Q は水蒸気の放出率、 u は風速、 A は cavity の流れに直角な断面積である。 q が飽和水蒸気量を越えると霧になる。機械通風湿潤冷却塔の場合、ブルームは殆ど飽和しているから、ダウン・ウォッシュを起こすと cavity 内には霧がでやすい。ブルームは cavity 領域を出ると浮力により再び上昇するから、霧の発生領域は冷却塔の風下 200 m 以内に限られることが多い。

自然通風冷却塔の場合には、側面が双曲線型をしているため、ダウン・ウォッシュが起こりにくい。

霧が発生しやすいのは大気が安定なときであろう。このとき、折曲がりブルームが存在するとすると、水蒸気量の分布は第 6.2 図のようになる。大気は安定であるから、水蒸気量分布は地表に近いほど大きくなり、そのような水蒸気量分布の上にブルームの持つ水蒸気量が重なることになる。ブルーム内の多量な水蒸気の地表への到達は、水蒸気量の少ない所から多い所へ向かっての輸送になるので、達成はむずかしい。冷却塔から放出された折曲がりブルームが、風下で地表に達し霧を発生するという観測事実が殆どないのは、このためであろう。

7. 漂流水滴の沈着

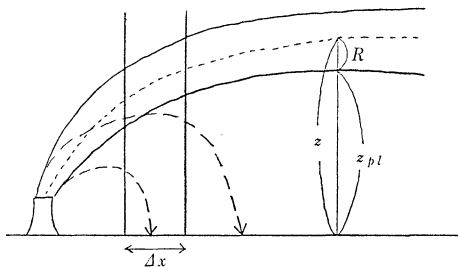
第 1 節で述べたように、湿潤冷却塔からは熱放出の際に漂流水滴も放出される。漂流水滴は大気に与える影響よりも、建物や植物等に沈着し、水滴に含まれている化学成分が害を及ぼすので問題になっている。ダウン・ウォッシュの起こりやすい機械通風冷却塔では、この漂流水滴の沈着が大きい。

以下では、折曲がりブルームからの漂流水滴の沈着モデルについて述べよう (Hanna, 1978 c)。

水滴の粒径と終端速度 (terminal velocity) の関係が第 7.1 表に示されている。200 μ の粒径の終端速度は 0.72 m/sec で、乱流鉛直速度変動と同じオーダーであるから、粒径 200 μ 以下の水滴は、ブルーム内の乱流に

第7.1表 水滴の粒径と終端速度

粒径 (μ)	終端速度 (m/sec)
50	0.06
100	0.27
200	0.72
400	1.62
600	2.47



第7.2図 200 μ 以上の漂流水滴の軌道。

よって拡散を受けつつ沈降するものとし、200 μ 以上の粒径の水滴は、プルームに流されつつ、乱流には左右されずに終端速度で沈降するものとする。

200 μ 以下の水滴は、粒径によって五つのクラスに分け、各クラスで水滴はそのクラスの平均粒径をもっているものとし、各クラス毎に沈着量を計算する。放出された水滴は正規型プルーム・モデルを用いてその拡散を計算し、プルーム内での濃度分布を求めるが、プルームの軸は $V_g t$ だけ下降するものとする (第7.1図)。沈着量は (地上濃度) $\times V_g$ として求める。ここで、 V_g は終端速度で次の実験式より計算する。

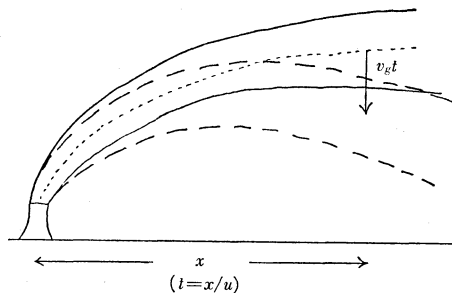
$$\left. \begin{aligned} D < 0.0093 \text{ cm のとき } V_g &= 3.2 \times 10^5 D^2 \\ 0.0093 \text{ cm} < D < 0.068 \text{ cm のとき} \\ V_g &= 6816 D^{1.177} \\ 0.068 \text{ cm} < D < 0.26 \text{ cm のとき} \\ V_g &= 2155 D^{0.746} \\ 0.26 \text{ cm} < D \text{ のとき } V_g &= 1077 D^{0.224} \end{aligned} \right\} (7.1)$$

上式で D は粒径、 V_g の単位は cm/sec である。

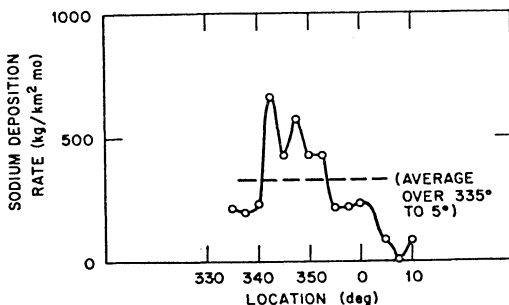
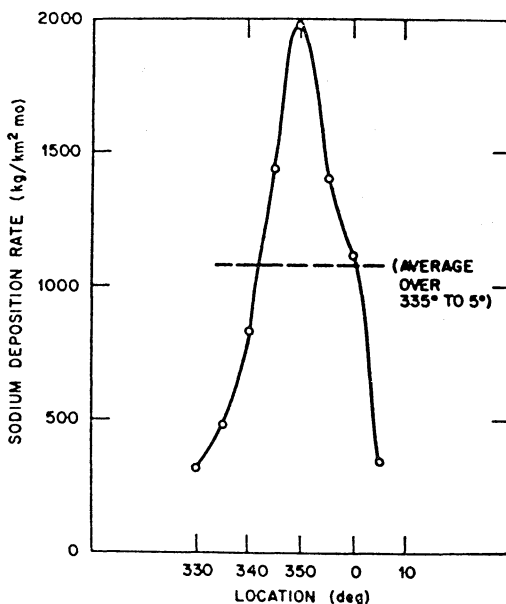
粒径 200 μ 以上の水滴の場合には、粒径により10のクラスに分け、各クラス毎に計算する。プルームを第7.2図のように、 Δx 毎に区切ると、区間 Δx でプルームを脱出する水滴の割合は、

$$f = \frac{V_g(\Delta x/u)}{2R} \quad (7.2)$$

となる。 f を最初の区間から順次、各区間について加え



第7.1図 200 μ 以下の漂流水滴のプルーム。



第7.3図 冷却塔から0.5 km (上図) と 1 km (下図)における漂流水滴の沈着量の風向別分布 (Meyer・Stanbro, 1977)。

第 7.2 表 チョーク・ポイント冷却塔の排出口における水滴の粒径分布 (ESC, 1977).

粒径 (μ)	全質量に対する割合 (%)	粒径 (μ)	全質量に対する割合 (%)
10~30	13.8	350~400	0.9
30~50	28.8	400~450	0.7
50~70	13.4	450~500	0.6
70~90	8.9	500~600	1.0
90~110	6.2	600~700	1.0
110~130	4.2	700~800	0.9
130~150	3.4	800~900	0.8
150~180	3.8	900~1000	0.7
180~210	3.0	1000~1100	0.6
210~240	2.3	1100~1200	0.4
240~270	1.7	1200~1300	0.1
270~300	1.3	1300~1400	0.1
300~350	1.4		

ていき、総和が1になった所で、そのクラスの全水滴がブルームから脱出し終わったと考える。

ブルームの下面の高さ z_{pl} は $z_{pl}=z-R$ であるから、 z は (3. 6) を用いて x より求め、また、 R は $R=R_0+0.5z$ より計算すると、 z_{pl} がわかる。ブルームを脱出した水滴は uz_{pl}/V_g だけ風下に流されて地表に達するから、この間の水滴の蒸発とそれに伴う粒径の変化を考慮して沈着量を求めることができる。

1977年6月16日、チョーク・ポイント (Chalk Point) で、冷却塔を循環する冷却水に放射性染料を投入し、冷却塔から放出される漂流水滴の沈着量を測定した (Meyer-Stanbro, 1977)。冷却塔から 0.5 km と 1 km における風向別の沈着量を示したのが第 7.3 図である。分布は正規型で、平均の沈着量は 0.5 km で $1,080 \text{ kg/km}^2 \cdot \text{month}$ 、1 km で $330 \text{ kg/km}^2 \cdot \text{month}$ であった。なお、水滴の大きさは、0.5 km で $250 \sim 450 \mu$ 、1 km で $200 \sim 400 \mu$ で、平均はそれぞれ、 340μ と 260μ であった。

この日の拡散実験の結果を、前述の沈着モデルによる予測値と比較した。Hanna, 1978 a ; 1978 c)。沈着モデルの計算にあたっては、放射性染料の放出率 = 1.86 g/sec 、 $R_0=27 \text{ m}$ 、 $w_0=4.5 \text{ m/sec}$ 、冷却塔の高さ = 124 m 、 $T_{p0}=35.6^\circ\text{C}$ 、 $T_e=20^\circ\text{C}$ 、 $u=8 \text{ m/sec}$ 、風向の変動度 = 30° 、湿度 = 93% および第 7.2 表に示されているチョーク・ポイントの冷却塔の排出口における水滴の粒径分布を用いた。以上は観測に基づく値である。予測の結果は、0.5 km で風向 30° 内での平均沈着量が $3,600$

$\text{kg/km}^2 \cdot \text{month}$ 、1 km で $1,000 \text{ kg/km}^2 \cdot \text{month}$ で観測値より3倍ほど大きい値を示した。ただし、この計算ではブルームを脱出した水滴の蒸発は無視した。また、予測による水滴の平均粒径は 0.5 km で 470μ 、1 km で 290μ であった。

8. 発電所団地の影響

現在、アメリカでは、発電所のある地域に集中的に建設することを計画しているが、このような発電所団地から放出されるエネルギーは、メソ現象のもつエネルギーに匹敵するので、大気に与える影響の大きいことが予想され、そのアセスメントが求められていることはすでに第 1 節で述べた。この場合、まず、問題になるのは雲量の増加であろう。雲量の増加は日射のしゃへいや降水量の増大に結びつき、周辺地域の気候や天候を変えてしまうからである。

Hanna (1977) は、第 4 節で述べた定常 1 次元の雲モデルを用いて発電所団地が雲の発生に及ぼす影響を調べた。熱放出源としては、(1) 10^3 MW の単独冷却塔 ($R=30 \text{ m}$)、(2) 10^4 MW の単独冷却塔 ($R=91 \text{ m}$)、(3) 10^5 MW の単独冷却塔 ($R=300 \text{ m}$)、(4) 10^5 MW の冷却塔集団の四つの場合を考えた。(4) の場合、冷却塔集団は 10^3 MW の冷却塔 100 本から構成され、4 本ずつ 25 のグループに分かれていて、各グループの 4 本の冷却塔は 1 km 間隔に並んだ正方形の一つにおさまっており、一つの正方形の中では、4 本の冷却塔が 200 m 間隔で配置されているものとした。

ナッシュビル (Nashville) における、1974年の春夏秋冬の1日2回のゾンデ観測のデータを用い、前述の四つの熱放出について雲の発生の予測を行なった。その結果の雲の発生頻度が第 8.1 表に示されている。 10^5 MW の単独冷却塔の上には、殆ど常に雲 (厚さ $2,500 \text{ m}$) があることが予測されている。しかし、同じ熱放出量でも、(4) の場合のように冷却塔を配置すると雲の発生頻度は 10^3 MW の単独冷却塔と 10^4 MW の単独冷却塔の場合の中間になり、その影響は大きく軽減される。 10^5 MW の単独冷却塔は、 10^3 MW の 100 本の冷却塔を無限に接近させた極限と考えられるから、冷却塔集団の影響を小さくするには、冷却塔間の間隔を充分とり、ブルームの合併が起こらないようにすることである。ブルームの半径の増加は $0.5z$ ($R=R_0+0.5z$) で与えられるから、ブルームの上昇高度がほぼ $1,000 \text{ m}$ であることを考慮すると、冷却塔の間隔を 1 km 以上にとればブルームの合併を防ぐことができる。

第 8.1 表 雲モデルによって予測された雲の発生頻度 (Hanna, 1977).

月	単独冷却塔			冷却塔集団
	10 ³ MW	10 ⁴ MW	10 ⁵ MW	10 ⁵ MW
1月	0.41	0.70	0.97	0.59
4月	0.34	0.59	0.96	0.43
7月	0.51	0.76	0.97	0.59
10月	0.31	0.54	0.89	0.39
平均	0.39	0.64	0.95	0.50

第 8.1 図は、1974年 7 月 2 日の観測データを用い、雲モデルによって計算されたブルームの鉛直速度である。10⁵ MW の冷却塔集団のカーブが途中から枝分かれしているのは、ブルームの合併が起こったことを意味している。当然のことながら、ブルームの上昇到達高度と雲の発生頻度の間により相関のあることがわかる。

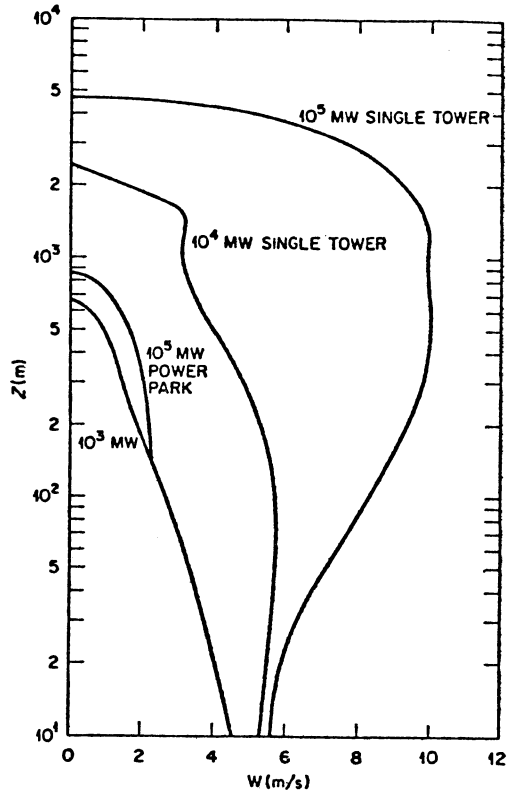
Lee (1976) は、Hanna とほぼ同じ定常 1 次元雲モデルを用いて、アメリカ、ルイジアナ州のシュレブポート (Shreveport) における 1960 年の 1 月と 7 月の観測データに基づき、雲の発達を調べた。冷却塔は 300 m 間隔で並んでいるものとし、その数をいろいろ変えてみた。

結果が第 8.2 図に示されている。冷却塔の数が、ある値を越えるとブルームの上昇到達高度が不連続的に増大することがわかる。すなわち、冷却塔の数が、あるしきい値を越えると飛躍的に雲の発生頻度の多くなることを意味している。なお、そのしきい値は気象条件によって左右されるようである。

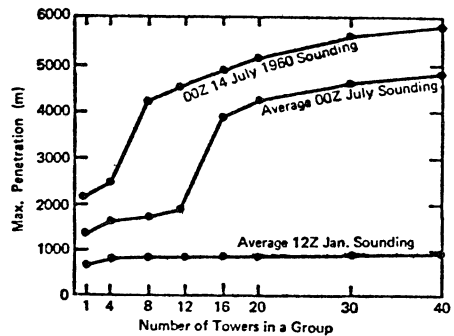
Rao・Hosker (1978) は、定常 2 次元の closure モデル (拡散に関して、K 理論の代わりに、高次相関量を用いる) を用いて、湿度と雲の発達の関係、各種物理量の 2 次元的分布等を調べた。放出熱量は 1,000 MW/km² とし、放出面積としては 20 km² を考えた。すなわち、20,000 MW の発電所団地に相当する。

第 8.3 図は、湿度 90% のとき発電所団地の上の雲の状態を表わしている。雲底高度は 300 m、雲頂高度は 800 m であるが、湿度が減少するにつれて雲は高くなり、湿度 60% では雲底高度が 980 m、雲頂高度が 1,430 m になる。また、第 8.4 図に示すように、発電所団地の風下では、混合層高度が次第に高くなり、気温も風下 18 km では 2°C ほど上昇している。

Bhumralkar (1976) も非定常 2 次元雲モデルを用い 1979 年 7 月



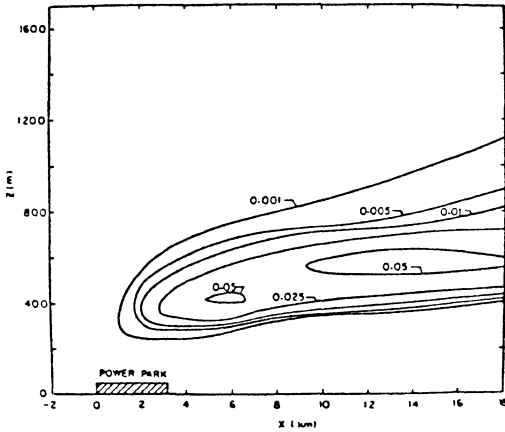
第 8.1 図 雲モデルにより計算されたブルームの鉛直速度分布 (Hanna, 1977).



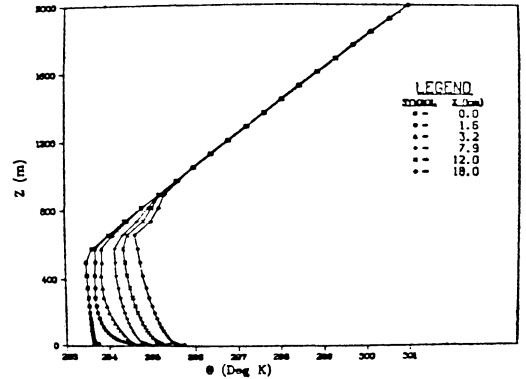
第 8.2 図 冷却塔の数とブルームの上昇到達高度との関係 (Lee, 1976).

で発電所団地の雲の発達に及ぼす影響を調べ、風速が強くなったときや、大気が安定なときは雲が発生しにくいという結果を得ている。

発電所団地のエネルギー放出が大気に与える影響を予測する一つの方法は、自然的あるいは人工的な同程度の



第 8. 3 図 冷却塔集団の上に発達する雲の状態(水滴量 : g/kg) (Rao・Hosker, 1978).



第 8. 4 図 冷却塔集団の風下における気温分布 (Rao・Hosker, 1978).

第 8.2 表 自然的あるいは人工的エネルギー放出とその特徴 (Hanna・Gifford, 1975).

Source	Area	Time duration	Total power	Observations
Surtsey volcano (Bourne, 1964)	1 km ²	Several months	100,000 MW	Continuous cloud water spouts
Australian bushfire (Taylor <i>et al.</i> , 1973)	50 km ²	Several hours	100,000 MW	Cumulus cloud convergence
Booster rocket test (Morris, 1968)	300 m ²	150 seconds	148,000 MW	Cumulus cloud
Oil burners (Dessens, 1964)	3.2 km ²	Several hours	700 MW	Cumulus cloud dust devils
Oil fires (Davies, 1959)	—	Day	10,000 MW	Large plume
Large city (Peterson, 1969)	10 ³ km ²	Continuous	100,000 MW	Effects on climate
Thunderstorm (Hanna, Swisher, 1971)	10 km ²	Hour	50,000 MW	2 cm h ⁻¹ rain
Power park	5 to 100 km ²	Continuous	100,000 MW	—

エネルギー放出に伴って、実際にどんな現象が起こっているかを見ることである。第 8.2 表には、自然的あるいは人工的のいろいろなでき事とそれに伴うエネルギー放出および誘発される現象等がまとめられている (Hanna・Gifford, 1975)。積雲はほぼ共通に誘発されているが、時には旋風やたつ巻が起こることもある。

ところで、Briggs (1974) は上昇気流に伴う渦運動が強化されるかどうかの判定を次のように与えた。V_B を代表的な鉛直速度、V_∞ を代表的な水平速度の接線方向の成分とすると、(1) V_∞/V_B > 0.9 のときは渦度の集中化は起こらず、流れは全体として回転するだけである。(2) 0.15 < V_∞/V_B < 0.9 のときは、渦度の集中化が起

こり、渦運動が発達する。(3) V_∞/V_B < 0.15 のときは、渦度の集中化は起こらず、浮力の効果が卓越する。発電所団地の場合は (2) のカテゴリーに属し、渦運動が発達する可能性を持っているので、発電所団地からの熱放出が旋風や雷雲発生トリガーになり得るということは注意すべきであろう。

9. おわりに

これまで述べてきた所から明らかなように、現在、この分野の研究は、まだ、不十分な理論や観測に基づいているので、今後、これらの点の改良が必要なことはいうまでもない。まず、雲モデルや漂流水滴の沈着モデルの精密化が必要であろうし、さらには、ブルームの合併の

問題、複合雲の成長とまわりの大気との相互作用の問題、熱放出に伴う渦の発達の問題、ダウン・ウォッシュの問題等についても研究を進めることが必要であろう。

また、観測事実の集積も、現象の理解とモデルの開発のために努力しなければならないことである。

文 献

- Auer, A.H., 1976: Observations of an industrial cumulus, *J. Appl. Met.*, 15, 406-413.
- Bhumralkar, C.M., 1976: Weather modification caused by waste heat rejected into the atmosphere from cooling towers at large power parks, Preprints, 3rd symp. on atmospheric turbulence, diffusion and air quality, 581-585.
- Briggs, G.A., 1974: Plume rise from multiple sources, *Cooling tower environment-1974*, 161-179.
- , 1975: Plume rise predictions, *Lectures on air pollution and environmental impact analyses*, 59-111.
- Coleman, J.H. and T.L. Crawford, 1978: Characterization of cooling tower plumes from Paradise Steam Plant, *Cooling tower environment-1978*, 1131-1150.
- Culkowski, W.M., 1962: An anomalous snow at Oak Ridge, Tennessee, *Mon. Wea. Rev.*, 90, 194-196.
- Currier, E.L., J.B. Knox and T.V. Crawford, 1974: Cooling pond steam fog, *J. Air Poll. Cont. Assoc.*, 24, 860-864.
- Hanna, S.R., 1972: Rise and condensation of large cooling tower plumes, *J. Appl. Met.*, 11, 793-799.
- , 1974: Meteorological effects of the mechanical draft cooling towers of the Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant, *Cooling tower environment-1974*, 291-306.
- , and F.A. Gifford, 1975: Meteorological effects of energy dissipation at large power parks, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 56, 1069-1076.
- , 1976a: Predicted and observed cooling tower plume rise and visible plume length at the John E. Amos Power Plant, *Atmos. Environ.*, 10, 1043-1052.
- , 1976b: Comments on "observations of an industrial cumulus", *J. Appl. Met.*, 15, 1232-1233.
- , 1977: Predicted climatology of cooling tower plumes from energy centers, *J. Appl. Met.*, 16, 880-887.
- , 1978a: Atmospheric effects of energy generation, *Atmospheric sciences and power production*, Chapter 15.
- , 1978b: Effects on the atmosphere of heat rejection from large wet or dry cooling towers, Presented at Forth U.S.-Japan joint meeting on air pollution related meteorology, 1-22.
- , 1978c: A simple drift deposition model applied to the Chalk Point dye tracer experiment, *ATDL Contribution File No. 78/3*, 105-118.
- Koenig, L.R., F.W. Murray and P.M. Tag, 1978: Differences in atmospheric convection caused by waste energy rejected in the forms of sensible and latent heats, *Atmos. Environ.*, 12, 1013-1019.
- Kramer, M.L., D.E. Seymour, M.E. Smith, R. W. Reeves and T.T. Frankenberg, 1976: Snow-fall observations from natural-draft cooling tower plumes, *Science*, 193, 1239-1241.
- Lee, J., 1976: A numerical simulation of atmospheric convection caused by heat dissipation at large power centers., Preprints, 3rd symp. on atmospheric turbulence, diffusion and air quality, 563-570.
- Meyer, J.H. and W.D. Stanbro, 1977: Fluorescent dye, a novel technique to trace cooling tower drift, Presented at 4th joint conf. on sensing environ. pollutants.
- Ott, R.E., 1976: Locally heavy snow downwind from cooling tower, *NOAA Tech. Memo. NWS-62*.
- Patrinos, A., 1978: Is it raining in Georgia? *Oak Ridge Nat. Lab. Review*, 11, 22-29.
- Rao, K.S. and R.P. Hosker, 1978: A numerical study of meteorological effects of waste heat and moisture releases from hypothetical power parks, *ATDL Contribution File, No. 77/26*.