大 気 拡 散 実 験 風 洞*

——大気境界層とその中の温度成層シミュレーション——

小 川 靖**・植 田 洋 匡**
近 藤 次 郎****Key words:** Thermal stratification; simulation; atmospheric diffusion; wind tunnel

1. は じ め に

大気汚染物質の拡散現象を考える際に、大気の安定度（温度成層状態）がきわめて大きな役割をはたしている。通常大気中では上空に行くに従って気温は下降する（ $-0.98^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ）。これが中立の大気安定度で、地面が暖められて温度の勾配がこれより急激だと、暖かい空気の対流が生じ、大気の状態は不安定になる。逆に地面が冷却されて、温度の勾配が中立時よりゆるやかだと、空気の上下運動はおさえられる、これが安定な大気の状態である。多くの大気汚染エピソードでは大気安定度が大きな要因となっている。わが国においては冬の夕方から夜間にかけて高い NO_2 の汚染が観測されているが、これは接地性の逆転層（地表面の放射冷却によって生ずる地表近くの強い安定成層）によって自動車などの排気ガスの上下混合がおさえられ、高濃度が出現する。このような強い安定時における拡散の問題はようやく手がつけられたのが実状であり今後の大気汚染の問題の一つである。

ほかにも大気汚染で重要な問題は温度成層が複雑な場合で、このうちの一つが海岸近くでの高い大気汚染濃度現象である。通常海水は大気よりも冷たいので海の上では安定成層が発達する。この海風が陸地に侵入すると、より暖かい地面によって海岸から内部境界層（上層安定、下層不安定）が発達する。海岸近くに高い煙突からの排出がある場合、煙ははじめ上層の安定成層中を拡散がおさえられたまま移流する。この煙が内部境界層におつくと不安定成層のため急激な混合がおこり、煙が地上に達して、内陸部において高濃度汚染をもたらす。これがいわゆる“fumigation”であり、わが国のように臨海工業地帯の多いところでは十分考慮されなくてはならないのに、いまだに現象の解

明はほとんどなされていない。

以上のように大気汚染現象にかかわる単独、または複合した大気温度成層を再現し、その拡散現象におよぼす影響を調査する風洞を製作し、現在実験中である。その基本となったデザインは；

- (1) 大きな測定断面で壁面の影響を小さくする
- (2) 天井高さの可変
- (3) 任意の温度成層を作るために一般気流温度、気流温度分布、床面温度分布のそれぞれ独立したコントロール
- (4) 任意の風速分布を作るための風速分布コントロール
- (5) 測定の自動化

2. 風洞のデザイン

第1図に風洞の概略図を示す。風洞は堅型の回流式で、測定部は2階の空調されたドーム内にあり、回流部は地下室に設置されている。測定部は高さ2 m、幅3 m、長さ24 mで、測定部入口には温度成層用カート (TPC) 速度成層用カート (VPC) があり、それぞれ空カート (EC1, EC2) と交換可能である。TPCは測定部の最先端に必要に応じて挿入される。これは20セクション (各セクション10 cm 高さ) にわかれ、各セクション内には43本のシーズヒーター (12φ) が配列され、気流温度を 30°C 上昇できるようになっている。したがって各段の温度をコントロールすることにより温度成層が作れる。

VPCは必要に応じてTPCの風下に挿入される。これも20のセクションに分割されており、いわゆる“ヤブレ格子式”によって通過空気量を調節することによりさまざまな風速分布を作ることができる。これらTPC, VPC, ECの組合せによって各種の温度、風速分布が設定できる。

測定部床面は $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ のパネル8組 (合計24 m) から成り、各パネルは独立に床面温度を $7^{\circ}\text{C} \sim 112^{\circ}\text{C}$ の任意の温度に設定できる。したがって回流部の温度調節器によって一般気流温度を $15^{\circ}\text{C} \sim 87^{\circ}\text{C}$ の任意の温

* 昭和57年4月7日、日本航空宇宙学会第13期年会講演会にて講演。昭和57年8月31日原稿受理 Atmospheric Diffusion Simulation Wind Tunnel—Simulation of Thermal Stratification in the Atmosphere

** 国立公害研究所 Yasushi OGAWA, Hiromasa UEDA and Jiro KONDO

第1図 大気拡散風洞の概略図

度に設定し、さらに TPC を使って温度の分布を作り、これと床面の各パネルの任意の温度コントロールによってさまざまな単独、または複合した温度分布が作れるようになっている。

3. 風洞気流の性質

当風洞では4種類のカート(温度成層カート(TPC)速度成層カート(VPC)、各カート(EC1, EC2))の交換一般気流温度の変化、および床面温度の変化によってさまざまな流れの状態が作れるが、その性能および性質を第1表および第2表に示す。

第1表では流れの動的な性質について示してある。

VPC や TPC を使うと抵抗が増すために、最大風速は減少し、乱流強度は増加する。また、乱流強度はカートから風下距離によって変化するので第1表に示した値は風下距離 $X=10\text{m}$ のものである。

平均風速分布の一様性(境界層の外側)は平均風速の大きさが小さくなるにつれて悪くなるが、それでも $U_a=1\text{m/s}$ 程度で $\pm 1\%$ に止まっている。

VPC を使用する際には平均風速分布はやや悪くなる。この場合の値が第1表の最下段に示してあるが、このときは風速分布は $\partial U/\partial z=1.0\text{s}^{-1}$ の直線分布を作ったときの Y 方向の分布の一様性で、 $\pm 3\%$ 程度であった。

第1表 Dynamic characteristics of the flow in the test section

Item	Cart configuration value		Notes
Range of mean velocity	EC1 and EC2	0.2m/s→10.5m/s	
	EC1 and TPC	0.2m/s→8.4m/s	
	VPC and TPC	0.2m/s→6.5m/s	
Turbulence	EC1 and EC2	0.2%	} $x=10\text{m}$
	EC1 and TPC	0.6%	
	VPC and TPC	2.4%	
Accuracy of mean velocity distribution	EC1 and EC2	$\pm 0.5\%$	Velocity at $U_a=10.0\text{m/s}$
Y-direction (crosswind)	EC1 and EC2	$\pm 1.0\%$	Velocity at $U_a=1.0\text{m/s}$
	VPC and EC2	$\pm 3.0\%$ across $y=\pm 1\text{m}$ from center	Linear profile $\partial U/\partial z=1.0\text{s}^{-1}$, $U_a=2.2\text{m/s}$, at $x=10$, $z=1\text{m}$

第2表 Thermal characteristics of the flow in the test section

Item	Cart configuration value		Notes
Range of mean temperature	EC1 and EC2	12°C→87°C	
Accuracy of temperature control (while testing)	EC1 and EC2	0.4°C	Any U_a , T_a
Accuracy of temperature distribution	EC1 and TPC	0.1°C	$U_a \leq 5\text{m/s}$, any T_a
Outside of boundary layer	EC1 and TPC	$\pm 0.3^\circ\text{C}$	Any U_a , T_a
Inside the boundary layer	EC1 and TPC	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	$U_a=2\text{m/s}$, $T_a=87^\circ\text{C}$, $T_f=16^\circ\text{C}$ at $z=50\text{mm}$, $y=\pm 40\text{cm}$ from center
Range of floor temperature	Any configuration	7°C→112°C	
Accuracy of temperature control (while testing)	Any configuration	0.3°C	
Accuracy of temperature distribution	Any configuration	$\pm 0.2^\circ\text{C}$	
Range of temperature profile ($\partial T/\partial z$)	EC1 and TPC	up to $25^\circ\text{C}/1\text{m}$	$U_a \leq 5\text{m/s}$
Accuracy of temperature control (while testing)	EC1 and TPC	$\pm 0.1^\circ\text{C}$	
Accuracy of temperature distribution	EC1 and TPC	$\pm 0.3^\circ\text{C}$	Outside of boundary layer; $y=\pm 1.1\text{m}$ from center
Set-up time			
Ambient	Any configuration	≤ 1 hour for $T_a=12^\circ\text{C} \rightarrow 87^\circ\text{C}$ *	*Most difficult condition; ambient air conditioning and TPC
Floor	Any configuration	≤ 2 hours for $T_f=30^\circ\text{C} \rightarrow 7^\circ\text{C}$ *	*Most difficult condition
		≤ 1 hour for $T_f=20^\circ\text{C} \rightarrow 112^\circ\text{C}$

第2図 側壁有無による平均風速、温度の水平方向分布の変化

第2表には流れの熱的な性質について示してある。地下室の温調器を使うことにより、 T_a は $12^{\circ}\text{C} \sim 87^{\circ}\text{C}$ まで可変であるが、 T_a が高くなるにつれ温調器から測定部までの間の壁などから熱の損失が増加し、温度コントロールと分布の一樣性はやや悪くなる。したがって通常はTPCが併用される。

T_a が増加すると測定部での気流温度と外部の温度差が大きくなり、測定部の壁にそって冷気が下降し、2次流が発生する。これにより測定部の低い所で温度、風速の水平分布が悪くなる。

これをさけるために T_a が高いときに測定部に内壁をもうけ、冷気をその部分に閉じ込めてしまえるようになっている。この内壁は高さ1.0mのアルミニウムの板で、測定部の壁から内側30cmのところ設置される。これにより使用可能な測定部の大きさは減少するが、風速と温度の水平分布はきわめてよくなる。第2図は $T_a=86.5^{\circ}\text{C}$ 、 $T_f=16.1^{\circ}\text{C}$ 、 $U_a=2.08\text{m/s}$ のときに $X=10\text{m}$ 、 20m での $Z=50\text{mm}$ における平均風速と温度の水平分布である。内壁がない場合には水平分布は中央部分でへこみをもつが、内壁がある場合には、中央部での分布は温度分布で $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、風速分布で $\pm 5\text{cm/s}$ である。

TPCは10cmごとの20段が独立に入口気温を 30°C 上昇できるのでこれを使って温度分布が作れる。第3図にこの一例として下層1mを $\partial T/\partial z=25^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、上層1mを $\partial T/\partial z=5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ の分布を作ったときの風下での変化を示す。床面は $T_f=25^{\circ}\text{C}$ に保てている。このとき、作られた温度勾配は $X=20\text{m}$ の下流でもほぼ同じに保たれているが、温度は風下でやや減少している。詳細についてはOGAWAら(1981)¹⁾に示してある。

第3図 温度成層用カート使用時の平均風速、温度分布の例
高さ0→1m $\partial T/\partial z=25^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、
高さ1→2m $\partial T/\partial z=5^{\circ}\text{C}/\text{m}$

4. 温度成層の拡散現象におよぼす影響

大気中では温度の成層状態によって拡散現象は大きく変化する。第4、5、6図にはさまざまな大気の状態における煙の挙動を示す。模型煙突は8cmの高さで、乱流境界層の内にある。各写真とも排出速度1m/secで白煙にはヘリウムを加え浮力をややもたせてある。また一般風速はおおの約1m/secに保たれており、したがって写真の中で異なるのは温度成層状態だけになっている。

ニュートラル(中立)では一般気流温度 $T_a=26^{\circ}\text{C}$ 床

第4図 中立時の煙の挙動

第5図 不安定の煙の挙動

第6図 安定時の煙の挙動

第7図 中立, 不安定, 安定時の u 方向の乱れ強度分布

面温度 $T_f=26^\circ\text{C}$ に保たれている。通常の風洞実験はもっぱらこの中立状態の大気中でおこなわれている。

アンスティブル (不安定) では $T_0=25^\circ\text{C}$, $T_f=98^\circ\text{C}$ であり, 床面からは大きな対流が生じ煙は上下に変動する。その結果煙突からの煙は近くで地上に達し, 短時間ではあるが高濃度をもたらす。

ステイブル は $T_0=87^\circ\text{C}$, $T_f=16^\circ\text{C}$ であり, 安定成層により煙の上下混合はおさえられ, 煙は濃度がこいまま移流する。煙の輪郭は他に比べて明瞭であり, ひげ状の枝を出す。風下距離が大きくなると煙のもつ排出時の乱れもしだいに小さくされ, 煙はいわゆるコラプスした状態になる。煙突が高い場合には煙は地表に

は到達しないが, 風下に山や建物がある場合には濃い煙が直接ぶつかることになり, きわめて高い汚染が出現する (SNYDER & OGAWA, 1982)³⁾。また, 排出が地表に近いと煙は拡散されないまま移流するため近隣に高濃度汚染をもたらす。これが前述した接地逆転層内での高い NO_2 汚染の原因の一つである。

第7, 8図に中立, 不安定, 安定時の流れ方向 (u) 鉛直方向 (w) の乱れ強度分布を示す。流れ場の測定は熱線, 冷線風速温度計のシステム (DISA) によっておこなった。X型の熱線と冷線によって u, w, t の瞬間値の測定をおこなう。高い温度差と低い風速のもとで地表面での運動量フラックス, 熱フラックスを測定

第8図 中立, 不安定, 安定時の鉛直方向の乱れ強度分布

するのはわずかしいので, もう一組のI型の冷線によって地面近く(0.4~1.2mm)の範囲で温度と風速の傾度を測定してこれから求めた。

大気の安定度はモーニン・オブコフ長さ;

$$L = -u_*^3 \theta / \kappa g Q_0$$

ここで u_* は摩擦速度, Q_0 は熱フラックス, κ はカルマン定数である。通常中立では ∞ , 不安定では正の値で, この値が負で小さいほど安定が強いことを示している。流れ場の測定時は煙の写真のときと温度の条

件がほぼ同じで, それらの値は第7図に示してある。

乱れの強度は u 方向, w 方向とも不安定が最大で, 次に中立で, 安定時には u 方向, w 方向とも乱れがきわめて小さくなっている。これが煙の挙動に影響をおよぼしている。

5. 海風フューミゲーション

第9図に海風フューミゲーションの状態を示す。この場合, 風洞の上流側12mは海側として7.9°Cに冷却され, 下流側12mは陸側として109.2°Cに加熱されている。このときの煙突の高さは8cmで陸側30cmに煙突は位置している。流入気温は86.8°Cで海上では強い安定成層ができていて, したがって海岸近くの高いところから排出された煙は, 初め安定層の中にあるから煙の拡がり幅は小さい。海風が陸地に侵入するにつれ, 海岸線より熱的内部境界層(TIBL)が発達する。この層内では強い不安定であり, これに煙がぶつかるとそこから煙の下降が生じ, 内陸で高い汚染を引き起こす。

第9図の下図には煙の輪郭に風速分布, 温度分布を重ねて示してある。内部境界層は $\partial T / \partial z = 0$ の点を結んだ一点鎖線で示してある。これによるとTIBLが煙と交わった所から煙が下降しいわゆるフューミゲーション(いぶし現象)が発生するのがわかる。

このフューミゲーションはLYONSとCOLE(1973)によりミシガン湖の湖風が陸地に侵入して高い汚染をもたらすとして報告された。OGAWAら(1975), MERONEYら(1975)はこの現象を風洞で再現したが, こ

第9図 海風時の煙の挙動と風速, 温度分布

第10図 陸風時の煙の挙動と温度分布

れによると高い地表面の汚染を引き起こす危険があることを指摘している。

6. 陸風ロフティング

第10図に陸風時の煙を示す。この場合、上流側12mは陸側として103.6°Cに加熱され、下流の12mは海側として9.3°Cに冷却されている。煙突などの排出条件は海風時のものと同一である。流入気温は $T_a = 19.6^\circ\text{C}$ であり、陸側には不安定成層ができていて、これが海に侵出すると冷たい海の上で安定成層が下から形成される。煙突からの煙は不安定成層内に排出されるから、煙はいわゆるルーピングの状態を示す。しかしこの煙は海面上に作られた安定成層をつきぬけて海面には到達しない。この状態がいわゆるロフティングである。

第10図にはこの場合の平均気温の鉛直分布を示し、この上に煙の輪郭を描いている。明らかに海面上に形成された安定成層をつきぬけて煙の到達は見られない。詳細についてはOGAWAら(1982)²⁾に示してある。

7. 安定な温度成層が孤立した山のまわりの流れ、および拡散現象におよぼす影響

近年エネルギー事情の変化により各国で、石炭火力発電所や地熱発電所などがより複雑な地形に建設されつつある。これに伴ってこれら複雑地形の大気拡散現象に対する影響が大きく問題化しつつある。アメリカE. P. A.では3カ年計画で十数億の巨費を投じて孤立した山岳まわりでの拡散実験をおこなっている。

また、重大な汚染は強い安定時に出現するので、実験は冬期夜間におこなわれた。主たる目的は風上側に煙突がある場合、どの程度高くすれば煙は山を越すかという点にしばられている。すなわち、中立時には風上側の煙突からの煙は山を越すが、安定が強くなると煙は山を越せず山腹をはうことになり、山腹に高濃度をもたらす。

E. P. A.の実験はアイダホ州の平原で、ここの孤立した山(シンダーコーンビュート)を実験に使用した。実験では気象観測のため120mの塔を常設し、他にも数十メートルの塔を数カ所設置している。煙および SF_6 トレーサーガスは100mのクレーン車の任意の高度から放出し、煙が山を越すか、また、濃度分布はどうなるかということをも山腹の約100点のサンプラーで測定している。

国立公害研究所ではE. P. A.との共同研究として、E. P. A.が実施した実験を風洞内に再現して、現象の解明をおこなった。使用した風洞は国公研の大型風洞で、野外実験ではバルクフルード数 $Fr = U/(g\Delta TH/T)^{1/2}$ 、ここで ΔT は地上と山の高さ H との温度差で、この値が0.2~0.4のような強い安定成層が観察されたが、これを再現するためには、強い温度差と低風速で風洞を運転する必要がある。種々の実験の結果、モデル高さにおいて風速0.1~0.4m/s、 $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ 程度の安定した流れが再現できた。第11図は中立時の煙の流れで $U = 0.2\text{m/s}$ 、煙突は Γ 型になっており、白煙にはHeを混入して浮力を調節してある。第11図の上は側面からの写真で、下は上面からの写真であ

側 面

上 面

第11図 中立時の煙の挙動

る。煙は山を越している。山は完全な孤峰ではなく“ふたこぶ”で高度約 100 m (模型では 14 cm)。同様な風速時に強安定な流れにしたものが第 12 図である。煙は山を越せず、山腹の限られた高度にたなびき、ここに高濃度をもたらす。

8. お わ り に

大気中での拡散現象を解明することは大気汚染防止のための重要な研究であるが、その一つに風洞を使った実験がおこなわれてきた。従来の風洞実験では温度のコントロールはなく、大気中の温度成層を考慮した風洞実験はほとんどおこなわれていなかった。しかしながら、重大な大気汚染現象は中立時よりはむしろ例として示したように安定時に多く出現している。この

側 面

上 面

第12図 強安定時の煙の挙動

ような大気の安定度と汚染の問題は最近ようやく研究がはじまったばかりであるが、当風洞でもこれらの問題の解明に努力してゆきたい。

参 考 文 献

- 1) OGAWA, Y., DIOSEY, P. G., UEHARA, K. and UEDA, H.: A Wind Tunnel for Studying the Effects of Thermal Stratification in the Atmosphere, *Atmospheric Environment*, Vol. 15 (1981), pp. 807-821.
- 2) OGAWA, Y., DIOSEY, P. G., UEHARA, K. and UEDA, H.: Plume Behavior in Stratified Flows, *Atmospheric Environment*, Vol. 16 (1982), pp. 1419-1433.
- 3) SNYDER, W. H. and OGAWA, Y.: Simulation of Flow and Diffusion over Cinder Cone Butte in a Stratified Wind Tunnel, in preparation.