

第4章 気象・大気汚染物質濃度変化と分布

4.1 気象の影響

4.1.1 はじめに

大気汚染の発生と持続に最も大きな影響を及ぼす気象因子は、風と大気安定度である。大気安定度は気温の垂直分布と深い関係がある。大気汚染は、地上から数 km の大気の底で発生するため低層大気の構造を正しく把握する事が重要である。

4.1.2 大気境界層

大気汚染物質の多くは地上付近から排出されるため、環境大気中における挙動は低層大気の気象の影響を強く受ける。地球は太陽からのエネルギーを地表面で吸収する。このエネルギーが大気中に放出される事により、様々な気象現象が生まれる。地表面の影響を直接的に受ける大気層が大気境界層である。この層の厚さは地表面の性質や気象条件により異なるが一般的には1～3 km 程度である。これより上の層は自由大気と呼ばれる。大気境界層の中でも地表から数 10 m の層を接地境界層と言う。

4.1.3 気温の垂直分布

気温の垂直分布の違いにより大気拡散の程度は大きく異なる。実際の標準的な大気では気温は 100 m 上昇すると 0.65℃ の割合で低下する。しかしこの値は気象条件により大きく変化する。大気汚染物質の拡散に最も影響を及ぼす気温の垂直分布に気温逆転層がある。これは大気下層の気温が上層の気温よりも低くなる状態である。逆転層の中に大気汚染物質が閉じこめられ拡散しないため、大気汚染濃度が高まる。気温逆転の主要生成要因としては、放射性逆転、沈降性逆転が知られている。この中でも冬季の晴れた夜間などによく出現する放射性逆転は高濃度大気汚染の発生と持続の大きな要因となる。一方、晴天の日中には地表面が日射により暖められるため熱的な対流が生じ、上下の混合が促進される。この層は混合層と呼ばれる。日中における混合層の高さは積算日射量 I (cal/m^2) の平方根に比例する。東京の夏季の観測結果によれば、時刻 t における混合層高度 $Z(t)$ (m) は、12 時までは (1) 式で近似的に表されることが分かっている。12 時以降は、この値に係数を掛けて求める事が提案されている。具体的には、この係数は 15 時で 1.127、18 時で 0.696、21 時で 0.357 である。(1) 式も含めてこの様な値は地域の特性を強く反映しているため、それぞれの場所での観測との照合が必要である。

$$Z(t) = 76.8I^{0.499} \dots\dots\dots (1)$$

我が国の場合、夏季には北太平洋に中心を持つ高気圧におおわれ、晴天が持続し上空に沈降性逆転層が存在する事が多い。日中に発達した混合層はこの逆転層に抑えられるため地上から 1,000～2,000 m の気層内において高濃度の光化学大気汚染が発生する。

4.1.4 気温の垂直分布と拡散

煙突から排出された煙の挙動に関する観察結果から煙の流れと気温の垂直分布との関連性が調べられている。乾燥空気塊が大気中を断熱的に100m上昇すると気温は、0.98℃下がる。大気の状態がこの値と同じ時、大気は熱的に中立であると言い、これよりも気温減率が大きい時は大気は熱的に不安定、逆に小さい時は熱的に安定状態にある。また上層の気温が下層の気温より高い場合を4.1.3で詳しく述べたように気温逆転の状態と言う。

煙の挙動は、気温の垂直分布により幾つかの典型的なタイプに分類される。大気が中立もしくはやや安定な時には煙は円錐タイプ (coning) に拡散する。このような状態は、曇天の日中や比較的、強風の時に発生する。冬季の夜間などの様な安定層または逆転層の中では鉛直方向の拡散が抑制され扇型タイプ (fanning) となる。夏季の日中などの様に晴天で弱風の場合には下層が不安定で上層が安定な気象状態となる。この様な場合には煙は水平、垂直方向に蛇行しループタイプ (loping) となる。上空に沈降性の逆転層が存在する場合には上方への煙の拡散が抑制され、拘束タイプ (trapping) となる。この時、下層の大気が不安定であれば煙は地上付近まで急速に拡散し地上付近に高濃度をもたらす。この様な状態をいぶしタイプ (fumigation) と言う。

地表面の凹凸、すなわち粗度が変化するような場合には内部境界層が形成される。例えば地表面粗度の小さい海や湖から粗度の大きい陸地に向かって風が流れると、内陸側に海や湖よりも乱れの大きい内部境界層が発達する。沿岸地域にある工場や発電所からの大気汚染物質が海側の乱れの小さい領域から陸側の乱れの大きい内部境界層に達すると急激な混合・拡散が生じ地上付近に高濃度をもたらすことがある。これを内部境界層フュミゲーションと言う。

4.1.5 風の垂直分布

風の垂直分布もまた、重要な気象因子である。地上100~200m程度までの風速分布は経験的に(2)式で表わされる。

$$\frac{u}{u_1} = \left(\frac{z}{z_1}\right)^p \dots\dots\dots (2)$$

ここで u_1 は、高さ z_1 での風速である。また指数 p については以下に説明する。すなわち、風速は上空に行くにつれて指数関数的に増大するが、その程度は地表面の物理的な性質や安定度により異なる。指数 p の大まかな目安としては中立で0.25程度、不安定で0.1~0.2、安定で0.3程度である。一日のうちでも日中は小さく、夜間に大きい値となる。地表面の粗度が変化するような場合には粗度が大きくなると p は増加する。このため市街地では郊外よりも大きな値となる。市街地における p は0.2~0.4程度の値である。

4.1.6 市街地風と大気汚染

道路が周りの建物に囲まれて谷のようになっている状況をストリートキャニオンと言う。このストリートキャニオンでは特別な市街地風が発生しこの風が沿道における大気汚染に大きく影響する。市街地風は建物の高さ、密度、道路幅などの物理的条件や風向・風速や大気安定度などの気象条件と密接に関係する。一般には道路に直角に風が吹く時に最も典型的な状況となる。図 4.1.1 にこの様な時のストリートキャニオン内の風の分布を示す。

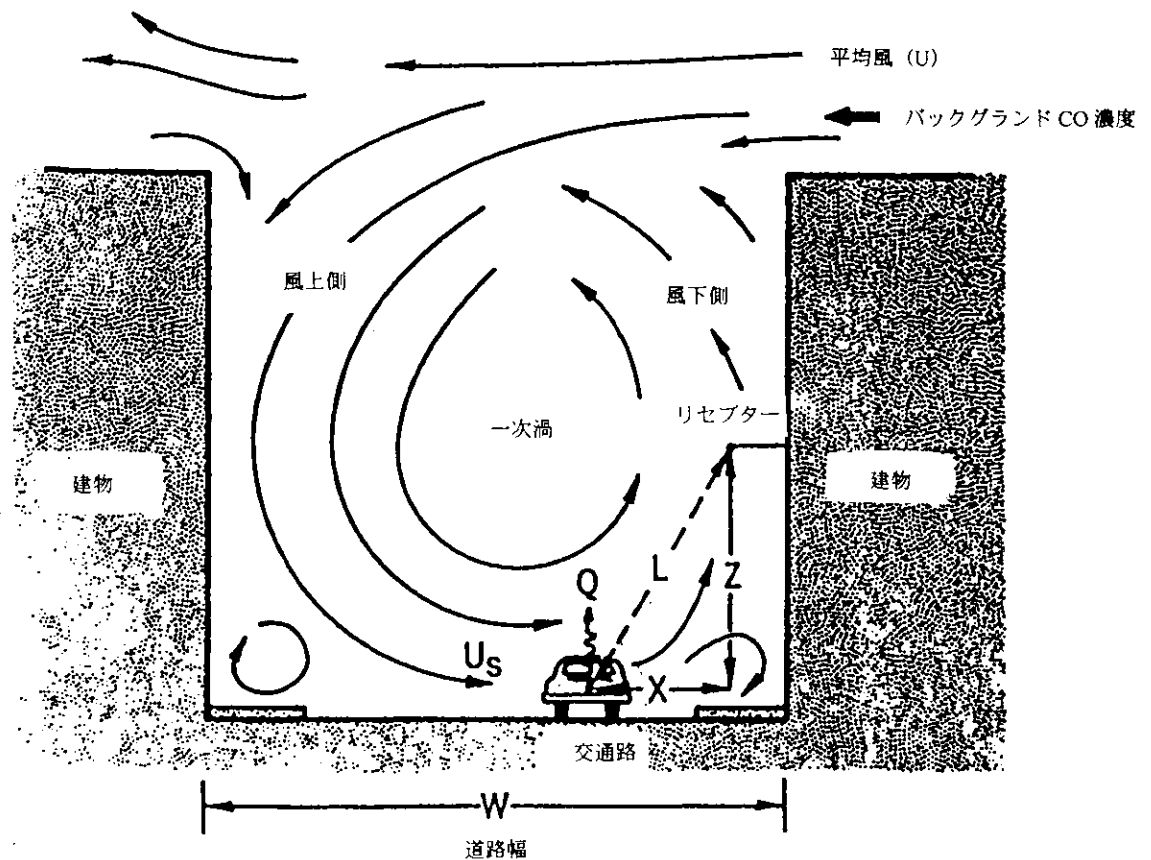


図 4.1.1 ストリートキャニオン内の風の分布

(Johnson, W. B., Ludwig, F. L., Dabberdt, W. F. and Allen, R. J.: An Urban Diffusion Simulation Model for Carbon Monoxide, Journal of the Air Pollution Control Association, Volume 23, No. 6, 490-498 (1973) から転載)

この時リセプターでの濃度 C_L は (3) 式で表される。

$$C_L = \frac{Q}{k_1 k_2 (U + 0.5) [(x^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} + 2]} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 H : 建物高さ (m)、 W : 道路幅 (m)、 X : 車線中央からリセプターまでの水平距離 (m)、 Z : 車線中央からリセプターまでの垂直距離 (m)、 U : ストリートキャニオンの上層の風速 (m/s)、 Q : 排出線源強度 (mg/m/s)

$k_1 k_2$ は定数であり経験的に $K = \frac{1}{k_1 k_2} = 7$ と定められている。この式は単純ではあるが、沿道における最大濃度を大まかに把握するためには有用である。ただし K の値は市街地の状況や安定度によりかなり変化するためトレーサー実験や風洞実験などによる検証が必要である。

4.1.7 都市境界層と大気汚染

都市の存在により生じる都市境界層などの局地的な気象の変化は大気汚染物質の分布と極めて密接な関係を持つ。都市境界層は内部境界層の一つである。一般に都市地域は建造物が立て込んでいるため郊外よりも粗度が大きい。また地表面の熱的な特性や人工排熱量も異なるため、力学的要因と熱的要因により都市境界層が形成される。都市境界層は、都市の風上周縁部から都心に向けて発達することが知られている。周縁部からの距離を X とし、地表付近での顕熱収支のみを考慮すれば、 X における都市境界層の厚さ $Z_h(X)$ は (4) 式で示せる。この式は主に冬季の夜間に成立する。ここでは U は一般風速、 γ は接地逆転層の温度勾配、 $\frac{Q_s}{C_p \rho}$ は顕熱フラックスである。また郊外の気温 T_r と都市の気温 T_u の差を ΔT_{u-r} とすれば (5) 式が成り立つため、都心の地点 X と郊外との気温差は (6) 式で表わされる。これがヒートアイランド現象である。

$$Z_h(X) = \left(\frac{2}{U \gamma} \int_0^X \frac{Q_s}{C_p \rho} dx \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta T_{u-r} \propto \gamma Z_h(X) \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta T_{u-r} \propto \gamma^{\frac{1}{2}} U^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^X \frac{Q_s}{C_p \rho} dx \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (6)$$

(3) 式から都市と郊外の温度差は周縁部からの距離を X の間に付加された顕熱総量の平方根に比例し、都市における一般風速の平方根に反比例する事が分かる。この都心部において気温が周辺地域よりも高くなるヒートアイランドは都市域における大気汚染物質の滞留・循環と高濃度の持続をもたらす。都市内部で排出された大気汚染物質は、この都市境界層内部に閉じこめられ高濃度大気汚染が発生する。一方、都市の風上側に建設された施設から排出された大気汚染物質が上空の安定層をあまり拡散・希釈されないままに輸送され都市境界層面から都市域において、 $Z_h(X)$ に取り込まれると、内部境界層フュミゲーションが発生する。

4.1.8 総観気象と局地気象

風の強さや風向、大気の安定度は地球規模の空気の流れと地球表面の物理的な特性から生じる高・低気圧の動きによる総観規模 (Synoptic scale) の気象現象に基本的には支配されるが、これとともに局地的な気象の変化が大気汚染の分布に極めて重要な影響を及ぼす。

その中でも特に重要なものが海陸風である。海や湖は大きな熱容量を持っているため温度の日変化は小さいが、陸地は温度変化が大きい。この結果、日中には陸地の温度が水面の温度よりも高くなり夜間は低くなる。このため、陸上と水上の気温差が出来、大気圧に差が生じる。これにより日中は海や湖から陸上へ、夜間は、逆方向の気流が生じる。これが海陸風である。海陸風は重力流の特性を持っておりその先端部分が渦状となっているため、先端部分で閉鎖系の気流場を形成する。このため、大気汚染物質がその中に閉じこめられ高濃度が生じる。海陸風は時間とともに移動するので高濃度の地域もこれとともに移動する。海風、陸風がそれぞれ侵入する時に出来る風の不連続線を海風前線、陸風前線と言う。また山岳地域や盆地では斜面と谷の同高度の高さの空気温度が異なるため、日中は谷から山へ、夜間は山から谷へ向かう風の流れが出来る。この山谷風による空気の循環が大気汚染に影響を及ぼす。