

大気汚染質の拡散について*

横 山 長 之**

1. 大気汚染現象のスケール

大気汚染など環境汚染の防止には汚染質を出さないことが理想的であり、また現実にも汚染質の除去技術を完成させる方向に研究を進めなくてはならないが、多種多様の汚染質全部を除去することは現在のところ不可能に近いであろう。一度大気中へ放出された汚染質は気象条件と密接な係わりを持つことになる。すなわち、汚染質の移流、拡散、変質、沈着あるいは雨洗などの過程は気象学の対象であるし、気象学の応用分野である。この気象学的な過程の各々の重要度と対象としなければならないスケールは汚染質の種類とその排出条件によって異

なる。現在特に問題になっている汚染質は産業排ガス中のいおう酸化物、ばい塵、すす粉塵、特定の工業プラントが対象となる HF, H₂S, Cl, Cd, 等の特定有害物質、自動車排ガス中の CO, NO_x (NO_x+NO₂), HC (炭化水素) などである。

産業排ガス中のいおう酸化物や特定有害物質について見れば、普通の場合、工業地帯の周辺数km～数10kmの範囲での移流と拡散が問題になる。一方、自動車排ガス中の NO_x や HC, またこれらの光化学反応によって生成されるオキシダントについてはより広域の都市汚染が問題となり、これは数10km～数100kmの範囲での汚染

名 称	水平の広がり(m)	垂直の広がり(m)	気象現象の例	大気汚染の例
シノスケール	半 球 的	1～2×10 ⁴ (10～20km)	偏西風, ジェット気流	CO ₂ , ばいじんなどによる気候変動, 放射能, 鉛などの地球汚染
	10 ⁷ (数万km)		季節風, 太平洋高気圧	
	10 ⁶ (数千km)		温帯低気圧, 移動性高気圧, 台風, 前線	
メスケール	10 ⁵ (数百km)	1～6×10 ³ (1～6 km)	局地前線, スコールライン, 積雲対流	SO ₂ , CO, 光化学スモッグなど都市汚染
	10 ⁴ (数10km)		境界層風, 海陸風, 局地風, ヒートアイランド	
スモール	10 ³ (数km)	10 ⁻¹ ～10 ³ m (数cm～数百m)	局地風, 境界層風, じんせん風, たつまぎ	SO ₂ , NO ₂ など特定有害物質による産業汚染
マイケール	10 ² (数百m)	10 ⁻² ～2 m (数cm～2 m)	接地気層風	
	10 ¹ (数10m)			
	1 (数m)			

(注: 境界層風など厳密には気象現象でないものも記入した。気象のスケール等については気象協会, “大気汚染事前調査に関する方法”を参照した)

第1表 大気汚染のタイプと気象現象のスケール

* On the Dispersion of Atmospheric Pollutants

** O. Yokoyama, 通産省公害資源研究所

質の移流，都市大気構造とその内部での拡散が対象とされねばならない。

また CO₂ は汚染質ではないが，石炭，石油の燃焼によって大量に生成されていて，これが地球的な熱収支の状態を変えることが考えられるが，この場合にはグローバルな移流，拡散，および海水，植物等との収支を考えるとなくてはならないであろう。

これらの汚染現象と対象スケールなどをまとめて第1表に示す。本文ではメソスケールより規模の小さいスケールでの拡散に関する研究，汚染予測の方法などを2，3紹介する。

2. 拡散実験と拡散場の構造の研究

(i) 定常で一様な境界層における拡散

トレーサーを用いた拡散の実験は，汚染質の大気中での拡散，希釈を調べる最も直接的な方法である。拡散実験は従来から多数行なわれて来たが，最も単純で規模も小さいのは接地気層中での拡散実験である。このような実験は Sutton⁹⁾ 以来数多く行なわれ，Monin と Obkhov²⁾ に始まる接地気層流の“相似理論”によって統一的にまとめられる (e.g. Monin³⁾, Pasquill¹²⁾)。これらの結果は距離数 100m，高度数 10m の範囲での拡散に適用される。これより大きな規模として距離 10~20 km，高度 1~2 km の範囲での拡散は工業地帯や都市の一部での大気汚染と直接的な関連がある。この規模では接地気層での拡散と同様に，水平的に一樣で鉛直方向に変化する構造を持った拡散場が普通には取扱われる。対象となるのは大気境界層全体および自由大気層の下層部である。

この規模での拡散実験は都市の大気汚染に関連して McElroy と Pooler⁵⁾，工業地帯での汚染に関連して桜庭ら⁶⁾，横山⁷⁾ などによって行なわれている。これらの実験ではトレーサーとして蛍光顔料粒子 (F.P. トレーサー) (Leigrlton ら⁸⁾) や気体の SF₆ が用いられる。トレーサーは汚染源に合せた高度から連続的に放出し，源の風下で源を中心とする同心円上に約 10~100 点程度配置した捕集器で捕集し濃度分布を求める。この程度のスケールでは前述したとおり，水平方向に一樣な場の中での拡散と見做すことができるので拡散状態を表わす最も重要なパラメーターは煙流に直角で水平の方向の拡散幅と鉛直方向の拡散幅であろう。すなわち，これらの拡散幅によって拡散状態を表わすことができる。前述の実験においても拡散幅を求めることが主要な目的になっている。

気象要素	拡散との関係
風速	移流，煙の中心部の移動
乱流強度	拡散幅と直接的な比例関係がある
風速勾配	機械的な乱流の発生
温度勾配	熱的な乱流の発生，対流
乱流スケール	乱流強度と乱流スケールの積は拡散係数に比例する，拡散の相の分岐点と関係
風向シアー	水平方向への拡散を増大させる

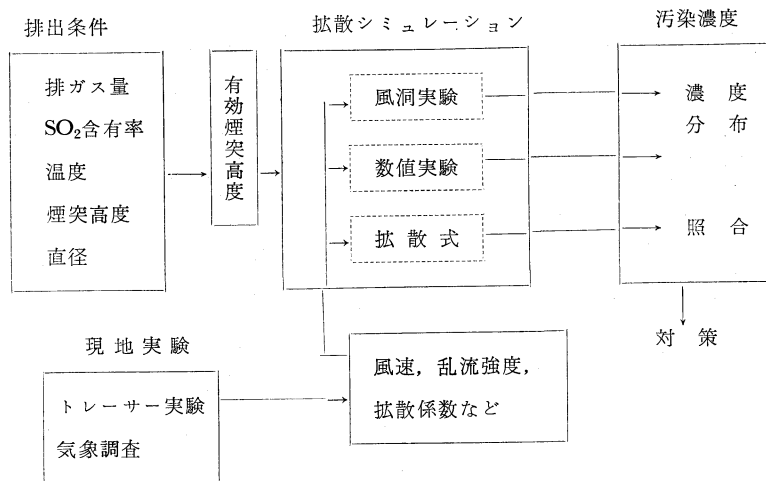
第2表 拡散と気象要素の関係

次に，拡散幅と気象要素の関係が調べられる。このスケールで拡散と特に関係が密接と考えられる要素は乱流強度，風速，温度勾配，大気安定度である。拡散幅と乱流強度の関係は Cramer⁹⁾，Slade¹⁰⁾，横山¹¹⁾ などが求めている。温度勾配および Pasquill¹²⁾ の安定度と拡散幅の関係は McElroy と Pooler⁵⁾，桜庭⁶⁾ などが明らかにしている。さらに大気境界層の上部ではエクマンスパイラルとして知られている風向の高度による変化があり，この風向シアーの拡散幅への影響が理論計算で示唆されている (Tyldesley と Wallington¹³⁾ など)。しかし，実験ではこれまで煙源の高度は高くても 500m 程度に限られているので風向シアーと拡散幅の関係はまだ明らかにされていない。拡散幅と関係のある気象要素をまとめて第2表に示す。

拡散幅と気象要素の関係が明らかにされると，次にこれらの要素の鉛直分布と出現頻度を求めることが必要である。

接地気層の構造は，先に述べたとおり“相似理論”によって統一的に取扱うことができ，風速，乱流強度，温度分布あるいはこれを組合せて求められる拡散係数などを安定度長さ (Monin length) と地面粗度の2つの量から得ることができる。大気境界層の残りの部分，いわゆる外部境界層の構造はまだ十分明確にされていないが，定常，順圧，中立の大気境界層の構造は Csanady¹⁴⁾ Gill¹⁵⁾，Blackadar と Tennekes¹⁶⁾ などによって最近，モデルが提案されている。外部境界層における気象要素の観測はあまり多くは行なわれていないが，Kaimal，と Haugen¹⁷⁾，横山¹⁸⁾ などによる結果が公表されている。

これらの気象要素の出現頻度は局地性が大きいと考えられ，各対象地域で個々に調べることが必要と思われる。一般には，これら要素の鉛直分布の頻度分布を求めることは困難で，地上や塔などの数高度で風向，風速，Pasquill¹²⁾ の安定度など気象台，測候所などで一般に観



第3表 通産省 APCS 研究会による拡散シミュレーションと汚染制御の方式

測している気象要素を統計解析することが行なわれている。(e.g. 横山¹⁸⁾).

(ii) 複雑な構造を持つ大気中での拡散

拡散の規模がさらに大きくなり、数10km以上になると、メソスケールの大気現象の持つ複雑な構造の大気中における拡散を調べることが必要になる。局地的な風系、海陸風、山谷風、都市の Heat Island などが大気汚染にとって特に重要である。このような複雑な構造の大気中での拡散の研究はまず構造の解明を行ない、その内部での移流、拡散の順に研究が進められるであろう。すなわち、構造の解明が拡散研究の前提条件となる。現在、このようなメソスケールでの拡散の研究は始まったばかりで、十分明らかではないが、一例を次に述べる。

Lyons²⁰⁾ は米国ミンガン湖における湖(海)風の分布、気温の水平、垂直の分布を詳細に測定し、海風が陸へ入ると内部境界層が発生することを明らかにしている。またこの内部境界層は海岸付近で、排出された汚染質を急激に地上へ拡散させ、内陸部に高い濃度をもたらす。また、地上が陸風の場合にも上空ではその補償流として逆風が吹いていることをノンリフトバルーンを使って明らかにしている。さらに海風の前線にそって汚染濃度の高い区域が発生する。これらのことは海風の構造を測定して明らかになって来た。

都市大気構造モデルは関口²¹⁾などによって提案されている。都市では風が弱く、温度が郊外と異なることは良く知られている。このような条件下では都市で排出された汚染質は拡散せず、停滞する。

これら、メソスケールの気象現象が関係する拡散には

大気の構造を十分に明らかにすることが重要である。

3. 大気汚染の予測法

拡散実験の結果を基礎にして、数多くある汚染質の排出源からの重合汚染濃度の予測が行なわれる。現在用いられている方法は簡単な拡散式による計算法、風洞実験による方法、拡散の微分方程式による方法である。

計算式としては Sutton¹⁾, Pasquill²⁾, 坂上²²⁾ の式がしばしば用いられる。

地形が複雑な場所での拡散の推定には風洞実験が用いられる。風洞での乱流強度、風速は、出来るだけ現地の条件に合わせるように、相似則を用いて適切な値を選ぶ(井上²³⁾, 根本²⁴⁾).

さらに自由度の大きい実験として最近、拡散の微分方程式に基づく数値実験が行なわれている(日野²⁵⁾). この方法では地形の影響、拡散係数の変化の影響を取入れることができる。これらの方法を組み合わせ通産省の APCS 研究会 (Air Pollution Control System) では第3表に示すシステムを作り、新設、既設の工業地帯における周辺地域でのいおう酸化物濃度の予測を行なっている。

4. 今後の問題

先にも述べたとおり拡散の規模が大きくなるにつれて複雑な構造をした大気中での汚染質の移動、拡散を明らかにすることが必要になる。今後、問題となると考えられる構造としては、エクマンスパイラル、海陸風、山谷風、熱対流などである。さらに非定常な場での拡散も解明することが必要であろう。

引用文献

- 1) Sutton, O.G. 1953: *Micrometeorology*, McGraw-Hill, New York.
- 2) Monin, A.S. and A.M. Obukhov, 1954: Basic regularity in turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere, *Geofiz. Inst. A.N.S. S.S.R.*, **24**, 151, 163-187.
- 3) Monin, A.S. 1959: Smoke propagation in the surface layer of the atmosphere, *Adv. in Geophysics*, **6**, 331-343.
- 4) Pasquill, F. 1966: Lagrangean similarity and vertical diffusion from a source at ground level, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **92**, 392, 185-195.
- 5) McElroy, J.L. and F. Pooler, Jr. 1968: St. Louis dispersion study Vol. II, Analysis, U. S. Dept. of Health Education and Welfare, N.A.P.C.A. Report No. AP-53.
- 6) 桜庭信一, 森口実, 山路勲, 佐藤純次, 1967: 小名浜地区大気拡散調査, *気象庁研究時報*, **9**, 1-42.
- 7) 横山長之, 1968: エアトレーサー実験と拡散気象条件調査における計測, *公害*, **3**, **2**, 39-47.
- 8) Leighton, P.A., W.A. Perkins, S.W. Grinnel and F.X. Webster, 1965: The fluorescent particle atmospheric tracer, *J. Appl. Met.*, **4**, **3**, 334-348.
- 9) Cramer, H.E. 1957: A practical method for estimating the dispersal of atmospheric contaminants, Paper presented at 1st National Conference on Applied Meteorology, Hartford-Conn.
- 10) Slade, D.H. (Ed.) 1968: *Meteorology and atomic energy*, U.S.A.E.C.
- 11) 横山長之, 1970: 高煙源からの拡散, *公害と対策*, **6**, **12**, 967-971.
- 12) Pasquill, F. 1961: The estimation of the dispersion of windborne material, *Meteorol. Mag.*, **90**, 33-49.
- 13) Tyldesley, J.B. and C.E. Wallington, 1965: The effect of wind shear and vertical diffusion on horizontal dispersion, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **91**, 388, 158-174.
- 14) Csanady, G.T. 1967: On the resistance law of turbulent Ekman layer, *J. Atmos. Sci.*, **24**, **5**, 467-471.
- 15) Gill, A.E. 1968: Similarity theory and geostrophic adjustment, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **94**, 402, 586-568.
- 16) Blackadar, A. K. and H. Tennekes, 1968: Asymptotic similarity in neutral barotropic planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.*, **25**, **11**, 1015-1020.
- 17) Kaimal, J.C. and D.A. Haugen, 1967: Characteristics of vertical velocity fluctuations on 430m tower, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **93**, 397, 305-317.
- 18) 横山長之, 1971: 高度 500m までの気層中における乱流構造と拡散に関する実験研究, *公害資源研究所報告*, No. 2.
- 19) 横山長之, 1971: 気象観測と公害気象観測, *公害と対策*, **7**, **3**, 223-231
- 20) Lyons, W.A. 1970: Mesoscale transport of pollutants in the Chicago area as affected by land and lake breezes, Paper presented at 2'nd International Clean Air Congress, held at Dec., 1970, Washington D.C.
- 21) 関口武, 1970: 都市気候学, *天気*, **17**, **3**, 1-8.
- 22) 坂上治郎, 1960: 拡散パラメータと気象条件の関係について, *お茶の水大学自然科学報告*, **11**, 2.
- 23) 井上栄一, 1959: 温度成層を考慮に入れた自然風現象の風洞模型実験について, *農業気象*, **15**.
- 24) 根本茂, 1968: 局地風とその模型風の相似について, *Paperes in Met. and Geophys.*, **19**, **2**, 131-230.
- 25) 日野幹雄, 1966: 排煙濃度分布に関する数値解析, *電力中央研究所報告*, No. 65058.