海外文献

Pasquill-Gifford-Turner の拡散予測手法の再検討

石川 義紀* 西田 耕之助**

はじめに

本稿で紹介する論文*は、大気拡散の予測手法として我が国でも NO_x 総量規制をはじめとして広く用いられている Pasquill-Gifford の拡散予測手法を接地境界層に関する近年の成果をもとに Venkatram が再検討したものである。Venkatram は30年以上も前の PG 線図があまり信用できないこととこれを修正する方法を示しているのであるが、この報告の中でも述べられているように、Pasquill は風速については単にその高さを“reference height (参照高さ)”と述べているのみである。Venkatram はこの点についての検討と Monin-Obukhov 長を用いた拡散係数、すなわち拡散幅 σ_z の表現を与えている。先に、訳者らは面源からの大気拡散モデルについて Chrysikopoulos らの報告を本誌上で紹介¹⁾したが、この場合の拡散係数の扱いも本報告における Venkatram の扱いとよく似ている。また、訳者らは Chrysikopoulos らの報告をもとに Pasquill 安定度を用いる計算方法について本誌上で報告²⁾したが、その結果を今回の Venkatram の報告と比較すると興味深い。

Venkatram の方法による拡散幅 σ_z と Pasquill-Gifford-Turner の方法による σ_z との比較は本報告中では表の形で(本文表3)示されているが、ここでは図をも作成して示した(本文図-1~3)。

本報告中で引用された Turner³⁾の“Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates”は改訂されて第2版⁴⁾が出版されている。この中で風速の高さについて Turner は安定度階級を決める際の風速は高さ10mのものをを用いること、風速の巾乗分布を求める際には風速計の位置を使うことと述べている

のみである。また、Monin-Obukhov 長を用いた安定度の表現と拡散係数の表現についてはこの第2版の付録の中で参考として挙げられている。

なお、本稿は海外文献の紹介であり、全訳したものではなく、省略した部分もある。詳細を必要とする読者は原典を参照されたい。

Venkatram の論文のあらましは以下のようなものである。Pasquill-Gifford-Turner の拡散幅を与える線図は、小規模工場の発生源について規制を行う際の解析に用いられる大気質モデルの大部分に使われている。Venkatram は、まず接地境界層の相似理論(SST; surface-layer similarity theory)を利用してこの PGT 拡散幅線図の線図の理論的な根拠について検討している。そして、PGT による鉛直拡散幅の推定値を PrairieGrass の実験(Barad, 1958)条件について SST による拡散幅と比較し、その結果、PGT による拡散幅の推定値は広い範囲にわたり SST により得られるものと矛盾しないものの、接地境界層内の拡散については限られた部分しか表現できないことがわかったとしている。PGT の拡散手法を用いる際には、ガウス型の拡散方程式中の風速に用いる参照高さ(reference height)について注意深く検討することが必要で、実際に(PGT が行うような)参照高さの選定はそれほど意味のあることではない。これは鉛直方向の拡散が輸送風速とは独立でないからである。Venkatram は PGT 法の欠点は接地境界層の相似理論を適用することで容易に修正できるとしている。

- 1) 石川, 西田他:「地表の面源からの排出に対する3次元定常大気拡散沈降モデル」, 環境技術, 23(12), pp.733-741, 1994
- 2) 石川, 西田他:「面源からの大気拡散の計算について」, 環境技術, 24(9), pp.523-531, 1995
- 3) D. B. Turner: “Workbook of Atmospheric Dispersion

* 滋賀県立大学環境科学部 Yoshinori ISHIKAWA
** ㈱臭気対策研究協会常任理事 Konosuke NISHIDA

Estimates 2nd. ed ", Lewis Pub., 1994

- 4) D. B. Turner : "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates", U. S. Dpt. of Health, Education and Welfare, 1969

(※) "An examination of the Pasquill-Gifford-Turner dispersion scheme"

Akura Venkatram

Atmospheric Environment, Vol.30, No.8, pp.1283-1290, 1996

Key Word : PGT 曲線, 安定度階級, 接地境界層の相似理論, Prairie Grass の実験, 鉛直拡散, 接地層内の拡散.

1. PGT の拡散予測手法について

PGT の拡散手法は1961年に Pasquill がはじめて提唱した手法がその基礎となっている。この手法は濃度分布が水平、鉛直ともにガウス型であると仮定し、地表面濃度のピーク値は次式で与えられている。

$$C_p = \frac{\alpha Q}{uh\theta x} \quad (1)$$

ここで、 α は定数、 Q は排出量、 x は排出源から風下方向へとった距離、 h プリュームの鉛直方向の広がり、 θ はプリュームの広がり角、 u はある高さで測定した「地表」風速である。しかしこの高さについては原典 (Pasquill, 1961) では明らかにされていない。プリュームの鉛直方向の広がり h は、濃度が地表面での最大値の1/10となる高さとして定義される。鉛直方向にもガウス分布を仮定すると、標準偏差 σ_z と Pasquill の高さ h との関係は、

$$h = 2.15\sigma_z. \quad (2)$$

となる。同様に、プリュームの水平方向の広がり θx もガウス分布の σ_y と関係づけることができて、

$$\theta x = 4.3\sigma_y. \quad (3)$$

となる。

Pasquill が提唱した鉛直方向の広がり σ_z は、1956年にネブラスカ州で行われた Prairie Grass の実験 (Barad, 1958) での測定結果がその基礎となっている。ネブラスカ州の実験地は平坦で5~6cmの高さの短い草で覆われ、有効粗度長は0.6cmであった。気象測定はタワーの25mと16mの間の高さで風速、温度、湿度について行われた。1956年の6月と8月の実験では70回の測定が行われている。どの測定も、高さ46cmから SO_2 を10分間放出して (63~68回目の測定では1.5m)、濃度は放出点から50m, 100m, 200m, 400m, 800mの距離にある円弧状の測定網で測定されている。この濃度は高さ1.5mで測定されたが、

距離100mの円弧だけは0.5mから17.5mの範囲の高さの6本のタワーで行われている。

100mの円弧だけが濃度の鉛直分布から h を直接に計算することができる。その他の距離では、 h は式(1)から推定しなければならない。測定は800m以上の距離では行われていないことに注意すべきである。

つまり、Pasquill の h は次のように要約できる。

- (1)中立の条件では、 h は Calder (1949) が K-理論で予測したものに基いている。この推定は Prairie Grass での実験の測定値を Cramer (1957) が解析したものとは矛盾していない。
- (2)他の安定度条件に対する h の推定は主に Prairie Grass での実験の測定値を Cramer (1957) が解析したものに基いている。100mの円弧での鉛直分布の測定は比較対照データとなる。
- (3)1 km以上の距離での h の推定はイギリスで行われたいくつかの測定を使った外挿である。
- (4) Pasquill は高い点からの放出の場合の h の推定を与えていない。彼は鉛直の広がりを推定するために排出源における風の傾き (inclination) の標準偏差の測定値を用いることを示唆している。このような測定値は得られていないので、地表面ベースの h を試みに用いることも示唆している。
- (5) Pasquill は式(1)に用いる風速 u の測定高さは曖昧なままにしている。地表面放出の場合に対して、彼は測定の高さを特定せず、「地表面」の値を用いることを示唆している。高さのある点からの放出の場合、また境界層の一部分に広がるプリュームの場合について、プリュームの厚さ全体で平均した風速を用いることを示唆している。この示唆は実際に行うには困難であることがはっきりしている。

この拡散に関する線図は表1に示す安定度階級に

表1 Pasquill の安定度階級

Wind speed at 10m (ms ⁻¹)	Insolation			Night	
				Thinly overcast or $\geq 4/8$	
	Strong	Moderate	Slight	low cloud $\leq 3/8$	cloud
< 2	A	A-B	B	—	—
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

対応するようになっていく。この表では安定度階級 A, B, C が不安定の条件に対応し、この場合は浮力により生ずる乱れがシアーによる乱れに加わる。これらの条件の下では熱フラックスは上向きである。最も不安定な階級 A は拡散速度が最も早くなる。階級 D は中立の条件に対応し、このときは乱れの生成はシアーにのみ支配される。階級 E と F は安定の条件に対応する。

Gifford (1961) は、式(1)の中で使われる広がり角 θ と鉛直方向の広がり h を扱いやすいガウス型の σ に変換した。また、Turner (1970) は定性的な日射量の表現を太陽高度角と雲量でおきかえた。

PGT 拡散線図を、これを定式化したものと PGT 法によるプリュームの広がり の推定値を接地層の相似理論 (SST) と比較することで検討できる。

2. 接地層の相似理論による結果

Prairie Grass の実験による大気質と気象の測定結果は、Van Ulden (1978) や Briggs (1982) が横方向の積分濃度 $\bar{C}^y$ を排出点からの距離の関数としてモデル化するのに利用している。彼等のモデルは地表面摩擦速度 u_* 、地表面粗度 z_0 、Monin-Obukhov 長 L で定式化されている。地表面粗度 z_0 は流れの障害となる要素のディメンジョンに比例する。地表面摩擦速度 u_* は次の式で定義される。

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_a}} \quad (4)$$

ここで、 τ_0 は地表面とその上の空気の流れでつくられるシアーの応力で、 ρ_a は空気の密度である。機械的に生成される地表面付近の乱流速度の大きさが u_* と釣り合うことになる。

Monin-Obukhov 長は、大ざっぱに言えば、機械的な手段によって造られる乱流速度が浮力によって生成する乱流速度にほぼ見合うようになる高さである。浮力によって生成する乱流速度 σ_{wb} は、地表面の熱フラックス Q_0 と地表面からの高さ z に比例し (Wyngaard, 1973),

$$\sigma_{wb} = 1.3 \left(\frac{g}{T_0} \frac{Q_0}{\rho_a C_p} z \right)^{1/3} \quad (5)$$

ここで、 T_0 は地表面温度、 g は重力速度、 C_p は定圧比熱である。

発生源が熱を持たなければ、機械的に生成される乱流速度 σ_{ws} は約 $1.3u_*$ となり (Wyngaard, 1973), Monin-Obukhov 長 L が σ_{wb} が σ_{ws} とほぼ見合う高

さとなる。この二つの速度を等しいとおくと、

$$L = -\frac{T_0}{g} \frac{u_*^3 \rho_a C_p}{k Q_0} \quad (6)$$

を得る。ここで、負の符号は不安定な条件と安定な条件とを区別するためである。Von Karman の定数 k ($=0.35$) が式の中にあらわれているが、このことから L が浮力で生じる乱流速度がシアーによる乱流速度と見合う高さの約 3 倍 ($1/k$) となることは容易にわかる。

Q_0 が不安定な条件下で地表面から上への方角を指す場合には、これを正とし、Monin-Obukhov 長 L を負とする。安定な条件下では熱フラックス Q_0 は負で、 L は正である。

Van Ulden (1978), Briggs (1982), Venkatram (1982) は微気象の理論と拡散の理論とを用いて行った Prairie Grass の測定結果を解析しているが、これらの研究の結果を Venkatram (1992) は風に直交な方向の積分濃度について次のような簡単な形の表現にまとめている。

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \bar{x}^{-1} \quad (\bar{x} \leq 1.4) \\ &= 0.9 \bar{x}^{-2/3} \quad (\bar{x} > 1.4, \text{安定}) \\ &= \frac{1}{\bar{x}(1+0.006\bar{x}^2)^{1/2}} \quad (\bar{x} > 1.0, \text{不安定}) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\bar{x} = x / |L|$ および $\bar{C} = \bar{C}^y u_* |L| / Q$ であり、 Q は排出量である。

式(7)は排出高さ x とレセプターの高さ z が両方とも地表面と仮定している。この近似は、鉛直方向のプリュームの広がり σ_z が排出高さ x とレセプター高さ z の和 (本報告の場合は 2 m) と同程度で非常に安定な条件の場合を除けば合理的である。これらの条件の下では鉛直方向の広がり σ_z の推定値のもつ誤差は約 25% である。

式(7)から鉛直方向のプリュームの広がり σ_z を求めることが可能である。この式(7)を地表面から放出した場合の地表面の横方向積分濃度に対するガウス型の式と対比すると、

$$\bar{C}^y = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Q}{u \sigma_z} \quad (8)$$

ここで u はある参照高さにおける風速の測定値である。

式(7)と(8)の対比から

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{u_* L}{u} \bar{x} \quad \text{for } \bar{x} \leq 1.4$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{u_* L}{u} 1.12 \bar{x}^{2/3} \quad \text{for } \bar{x} > 1.4, L > 0 \\
 &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{u_* |L|}{u} \frac{\bar{x}}{(1 + 0.006 \bar{x}^2)^{-1/2}} \\
 &\quad \text{for } L < 0
 \end{aligned} \quad (9)$$

この σ_z は参照風速の関数となっている。このことから、PGT 法では鉛直の広がり σ_z は風速とは独立に特定できるが、これは正しくないことがわかる。

横方向の積分濃度についての表現、つまり式(7)は地表面放出の場合には、積 $\sigma_z u$ にのみ関係し、風速とは独立である。このことは式(7)と(8)の両方に同じ値を用いる限りは、風速の参照高さが横方向の積分濃度の計算には係わりを持っていないことを意味している。しかしながら、水平方向の広がり σ_y が風速に逆比例するので実際の濃度は風速に依存する。このことは、風速の特定が濃度の実用的な推定においては未解決の問題である。

3. PGT と SST の拡散予測手法の比較

(1) 定性的な比較

Pasquill (1961) はこれらの線図を図のみでしか表現しなかったが、幾人かの研究者がそれを解析的な形に変換し、コンピュータモデルで利用できるようにした。このような形の一つが Martin (1976) のもので、

$$\sigma_z = ax^b \quad (10)$$

ここで、係数 a と b は安定度に依存する。安定度 A に対しては $b \approx 1.9$ 、安定度 E に対しては $b \approx 0.7$ である。これらの b の観測値は SST の式(9)で予測される σ_z の漸近的な挙動とは矛盾しない。非常に安定な条件下では σ_z は $x^{2/3}$ ($b \approx 2/3$) に比例して大きくなり、非常に不安定な条件下では σ_z は x^2 ($b \approx 2$) に比例して大きくなる。

ここで PGT 線図の係数 a について考えてみる。風速が増加すれば、安定度階級 A から D へと移行するにつれて、係数 a で具体化されている拡散の速度は減少する。この挙動については次のような定性的な説明ができる。拡散の速度は乱れのレベルに比例し、風速に逆比例する。乱れのレベルは二つの要素から成る。一つは浮力で、もう一つはシアである。シアによる乱れの風速に対する比は風速にあまり依存しないが、浮力による乱れの風速に対する比は風速の増加とともに減少する。これは浮力による乱れが風速に依存していないからである。つまり、乱

れのレベルが風速の増加とともに大きくなるとしても、拡散の速度は減少するのである。

安定の条件下では、PGT 線図の拡散速度は風速とともに増加している。雲量の増加により安定度階級は D のほうへ移行する。雲は地面に向かって熱を放射し、そのために地表面の放射冷却の効果が減じるからである。境界層を安定させシアによる乱れの生成を抑えるのはこの冷却である。日中には、雲の存在により日射量が減少し乱れの生成を進める地表面の熱フラックスが減少して拡散の速度は減少する。

SST がこのような拡散速度に関する挙動を説明出来るかどうかをみるために、 σ_z の漸近的な表現を次のように書き直してみる。

安定の条件下では、

$$\sigma_z \sim \frac{u_*}{u} L^{1/3} x^{2/3} \quad (11)$$

不安定の条件下では、

$$\sigma_z \sim \frac{u_*}{u} |L|^{-1} x^2$$

そうすると、拡散の速度 a の表現は次のようになる。

安定の条件下では、

$$a \sim \frac{u_*}{u} |L|^{-1} \quad (12)$$

不安定の条件下では、

$$a \sim \frac{u_*}{u} L^{1/3}$$

a の表現は L の定義 [式(6)] を用いて書き直すことができて、

安定の条件下では、

$$a \sim \left(\frac{u_*}{u} \right)^{5/3} u^{2/3} \left(\frac{T_0 u_* \rho_a C_p}{g Q_0} \right)^{1/3} \quad (13)$$

不安定の条件下では、

$$a \sim \left(\frac{g Q_0}{T_0 \rho_a C_p} \right) \frac{1}{u_*^2 u}$$

大ざっぱに言えば安定の条件下にある間は Q_0/u_* は一定であるという経験的な測定結果を用いると、風速が増加するにつれて u_*/u も増加し中立の時の値に近づくことが容易に示せる (Venkatram, 1980)。これはもちろん式(13)から、安定な条件の間は観測結果が示すように a は風速とともに増加することを意味する。雲の多い条件下では下向きの熱フラックス Q_0 が減少し、拡散の速度 a も減少する。この依存性は風速によるものよりもずっと小さい。

不安定の条件下では、 a は風速とともに急速に減少し、上向きの熱フラックスとともに増加することが式(13)からわかり、この挙動は“PGT”の観測結果と一致している。

非常に不安定な条件の下では鉛直方向の広がり の挙動には特別の注意が必要である。式(9)は、不安定の条件に対する σ_z が、距離の大きい場合には距離の自乗（つまり x^2 ）に比例して増加することを示している。このみかけの増加は不安定条件下のブリュームの“lift-off”（浮揚）に関係している。このことは、地表濃度が急速に減少し最高濃度の位置が上昇することを示す（Lamb, 1982; Briggs, 1988; Weil, 1990）。地表面上に最高濃度を仮定するガウス型の定式化では急速に σ_z を増加させることで、この現象を説明しているのであるが、このことは不安定条件下でのガウス型分布が濃度の推定に誤差をもたらす可能性のあることを示している。

以上のことから SST は PGT の拡散線図で具体化された σ_z の挙動の観測結果を説明していることがわかる。また PGT で行われているようなブリュームの広がりを風速から切り離すことはあまり意味がないということを SST は示している。この PGT の手法は、有効な風速がブリュームの中では一定ということを暗黙のうちに仮定している。この仮定は接地境界層内の大きな風速勾配という点からみて非現実的である。

(2) 定量的な比較

式(9)による推定値と、PGT 線図との比較には、参照高さ z_0 と地表粗度 Z_0 の特定が必要となる。これが得られれば、相似則の関係から u_*/u の比を計算できる（Businger et al., 1971）。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \left(1n \frac{z}{z_0} - \psi_1 \left(\frac{z}{L} \right) + \psi_1 \left(\frac{z_0}{L} \right) \right) \quad \text{for } L < 0 \quad (14a)$$

ここで、

$$\psi_1 = 21n \left[\frac{(1+x)}{2} \right] + 1n \left[\frac{(1+x^2)}{2} \right] - 2 \tan^{-1} x + \frac{\pi}{2} \quad (14b)$$

$$x = \left(1 - 15 \frac{z}{L} \right)^{1/4} \quad (14c)$$

安定の条件（ $L > 0$ ）に対しては、

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \left\{ 1n \left(\frac{z}{z_0} \right) + 4.7 \frac{(z-z_0)}{L} \right\} \quad (15)$$

次の段階は Monin-Obukhov 長と PGT の安定度階級とを関係づけることである。Golder (1972) は PGT の階級と Monin-Obukhov 長の逆数との間の経験的な関係を導いている。この関係は図で表されているが、Seinfeld (1986) が次の形の式にまとめている。

$$\frac{1}{L} = A + B \log_{10} z_0 \quad (16)$$

ここで z_0 は地表粗度で、 A と B は 6 段階の安定度階級ごとに決められている。

PGT と SST の σ_z 曲線とを Prairie Grass の実験結果を用いて比較してみる。 z_0 を 0.006m とし、SST による鉛直方向の広がりを二つの参照高さについて計算する。一つは $z = 0.46m$ で、放出の高さである。もう一つは $z = 10m$ で、PGT 階級の項目に対して用いられる高さに対応する。表 2 には安定度階級に対応する微気象の項目を示した。計算は式(16)を用いて PGT の安定度階級に対する L を推定し、次いで式(14)と(15)を用いて u_*/u を推定した。

表 3 には排出源からの距離が 100m から 2000m の範囲について PGT の鉛直方向の広がりを SST のものと比較した結果を示した。これ以上大きい距離については推定を行わなかったが、これは Prairie Grass のデータが 800m までであったことによる。SST の文脈の中では表に示した二つの σ_z の推定値は地表面からの排出に対しては同等に利用可能である。これは、 σ_z の計算に用いる風速 u と組み合わせる場合には、両方とも同じ希釈率 $\sigma_z u$ で減少するからである。

一方、PGT はある与えられた距離と安定度に対して一つの σ_z の推定値しか与えない。つまり、SST と PGT との比較には SST により推定した $z = 0.46m$ の σ_z の値と $z = 10m$ のものの間を選ぶことが必要になる。濃度を計算する際に排出高さの風速を用いるやり方は、排出高さ $z = 0.46m$ に対応する σ_z を用

表 2 PGT 安定度階級に関する微気象項目

Stability	1/L (m ⁻¹)	L (m)	u_*/u	u_*/u
			$z = 0.46m$	$z = 10m$
A	-0.160	-6.25	0.085	0.057
B	-0.101	-9.90	0.083	0.055
C	-0.042	-23.8	0.082	0.052
D	0.0	Infinity	0.081	0.047
E	0.044	22.7	0.079	0.037
F	0.115	8.7	0.076	0.027

表3 PGT 線図と接地境界層相似理論による
推定値の比較

Stability	χ (m)	PGT σ_z (m)	SST σ_z (m)	
			$z=0.46\text{m}$	$z=10\text{m}$
A	100	14	11	7
	500	124	213	143
	1000	450	846	571
	2000	1950	3380	2280
B	100	11	8	6
	500	51	133	88
	1000	110	520	345
	2000	240	2070	1370
C	100	8	7	4
	500	32	62	39
	1000	61	221	140
	2000	114	856	542
D	100	5	7	4
	500	18	33	19
	1000	32	65	38
	2000	53	130	75
E	100	3	4	2
	500	13	13	6
	1000	22	20	9
	2000	35	31	15
F	100	2	3	1
	500	8	9	3
	1000	14	14	5
	2000	24	22	8

いることを意味している。他方では、地表からの排出では排出高さは基本的にゼロであるから、安定度階級を選ぶ PGT の処方は $z=10\text{m}$ を用いるのが当然であることを意味する。

表3および図-1～3では、安定度階級A, B, C, Dの PGT の σ_z の値が、これに対応する $z=0.46\text{m}$ の SST の値よりもずっと小さい。安定度階級BとCの SST の σ_z の値は1000mの距離ではPGTの約5倍である。しかしながら、安定度Aの σ_z の値とは安定度Bの SST の値とほぼ同様である。安定度Cの PGT の σ_z の値は安定度Dの σ_z の値とほぼ一致している。安定度EとFについてはPGTとSSTは排出源からの距離全体にわたって近い σ_z の値を示している。 $z=10\text{m}$ について σ_z を計算すると、SSTの値は安定度AおよびDの PGT の値とほぼ同等となる。

図-1 Venkatram による σ_z ($z_0=0.006\text{m}$, $z=0.46\text{m}$) 図-2 Venkatram による σ_z ($z_0=0.006\text{m}$, $z=10\text{m}$) 図-3 PGT 線図による σ_z

4. ま と め

式(16)で与えられる安定度階級と Monin-Obukhov 長との関係は近似的なもので、PGTとSSTとの間に乖離があることは予想できる。SSTとPGTの鉛直方向の広がりとの一致は、安定の条件のもとで、しかも参照高さは0.46m、排出高さはPrairie Grassの実験の高さ、粗度長は0.6cmにとった場合に

のみ得られるものである。一方、安定度AとDの条件下では参照高さを10mにとれば最もよく一致する。このことは、PGTの σ_z 曲線を用いるには、ガウス型の濃度予測式で用いる風速についての参照高さに対する注意深い検討が必要になり、一つの風速のみを用いて拡散係数を行うことの困難さを示している。

式(7)を用いた場合のPGTの拡散測定手法のもつ問題を避けることは簡単にできる。拡散計算を行うのにガウス型の式を使いたければ、式(9)を利用できる。この式には微気象の項目であるL, u_* , z_0 が必要であるが、これらはVan Ulden and Holtslag(1985)の方法などにより通常の気象観測から推定できる。

PGTの安定度階級による方法を用いるのであれば、Golderの補正を行って安定度階級と推定粗度長からMonin-Obukhov長を推定することもできる。したがって、地表面からの排出の場合の鉛直方向の広がりを実算する実用的な方法は、次のような手順となる。

- ①安定度階級を決める。
- ② z_0 の推定値を用いてGolderの補正方法によりLを求める。〔式(16)〕
- ③L, z_0 および高さ10mまたは既知の高さの風速を用いてBusinger-Dyerの式から u_* を計算する。〔式(14), (15)〕
- ④求めたい距離の σ_z を式(9)から計算する。L, 高さ10mの風速, u_* はわかっている。これは σ_z ではなく希釈率 $\sigma_z u$ を計算することと同じである。

参 考 文 献

- Barad M. L. (1958) Project Prairie Grass—A field program in diffusion, Vols I and II. Geophysical Research Paper No. 59, Air Force Cambridge Research Center, Bedford, Massachusetts, NTID PB 151424, PB 1514251.
- Briggs G. A. (1982) Similarity forms for ground-source surface layer diffusion. *Boundary-Layer Met.* **23**, 489–502.
- Briggs G. A. (1988) Analysis of diffusion field experiments. In *Lectures on Air Pollution Modelling* (edited by Venkatram A. and Wyngaard J. C.), pp. 63–118. Amer. Meteor. Soc., Boston.
- Businger J. A., Wyngaard J. C., Izumi Y. and Bradley E. F. (1971) Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.* **28**, 181–189.
- Calder K. L. (1949) Eddy diffusion and evaporation in flow over aerodynamically smooth and rough surfaces: a treatment based on laboratory laws of turbulent flow with special reference to conditions in the lower atmosphere. *Q. Jl Mech. Appl. Math.* (Oxford) **2**, 153.
- Cramer H. E. (1957) A practical method for estimating the dispersal of atmospheric contaminants. In *Proc. 1st Nat. Conf. Appl. Met.*, Hartford, Connecticut, October, 28–29, Boston, Massachusetts, p. C-33.
- Gifford F. A. (1961) Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion. *Nucl. Safety* **2**, 47–51.
- Golder D. (1972) Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary-Layer Met.* **3**, 47–58.
- Horst T. W. (1979) Lagrangian similarity modeling of vertical diffusion from a ground level source. *J. appl. Met.* **18**, 733–740.
- Lamb R. G. (1982) Diffusion in the convective boundary layer. In *A Short Course on Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modeling*, 21–25 September 1981, The Hague, The Netherlands. Reidel, Dordrecht.
- Martin D. O. (1976) The change of concentration standard deviation with distance. *J. Air Pollut. Control Ass.* **30**, 26.
- Pasquill F. (1961) The estimation of the dispersion of wind-borne material. *Meteor. Mag.* **90**, 33–49.
- Seinfeld J. S. (1986) *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. Wiley, New York.
- Turner D. B. (1970) *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. USEPA, ASRL, Research Triangle Park, North Carolina.
- Van Ulden A. P. (1978) Simple estimates for vertical dispersion from sources near the ground. *Atmospheric Environment* **12**, 2125–2129.
- Van Ulden A. P. and Holtslag A. A. M. (1985) Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications. *J. Clim. appl. Met.* **24**, 1196–1207.
- Venkatram A. (1980) Estimating the Monin-Obukhov length in the stable boundary layer for dispersion calculations. *Boundary-Layer Met.* **19**, 481–485.
- Venkatram A. (1982) A semi-empirical method to compute concentrations associated with surface releases in the stable boundary layer. *Atmospheric Environment* **16**, 245–248.
- Venkatram A. (1992) Vertical dispersion of ground-level releases in the surface boundary layer. *Atmospheric Environment* **26A**, 947–949.
- Venkatram A., Strimaitis D. and DiCristofaro D. (1984) A semi-empirical model to estimate vertical dispersion of elevated releases in the stable boundary layer. *Atmospheric Environment* **18**, 823–928.
- Wark K. and Warner C. F. (1981) *Air Pollution, its Origin and Control*. Harper and Row, New York.
- Weil J. C. (1985) Updating applied diffusion models. *J. Clim. appl. Met.* **24**, 111–1130.
- Weil J. C. (1990) A diagnosis of the asymmetry in top-down and bottom-up diffusion using a Lagrangian stochastic model. *J. Atmos. Sci.* **47**, 501–515.
- Wyngaard J. C. (1973) On surface layer turbulence. In *Workshop on Micrometeorology* (edited by Haugen D. A.), pp. 101–150. AMS, Boston.