



天 気

1989年12月
Vol. 36, No. 12

109: 402: 405 (大気境界層; 大気汚染; 海洋気象)

海上および沿岸地域での拡散モデル*

岡本 眞一**・塩沢 清茂***

1. はじめに

最近、海上に道路、空港などの公共施設や各種工業施設が建設されるようになり、その環境への影響を予測する必要性が生じてきた。しかし、従来の大気拡散の研究は大部分が陸上での観測に基づくものである。海水は土壌より熱容量が大きく、日射の影響による温度変化は地面より小さい。そして、同一の風速と日射量の場合でも、陸上の大気安定度と海上の大気安定度は、まったく異なるといつてよい。さらに、海上では、表面がなめらかなため、機械的な攪拌作用は小さく、このことが、海面近くの大気の状態に影響を及ぼしている。このため、水面上での大気拡散を正しく予測するには、陸上のみを対象とした既存の知識では不十分である。このため、近年、アメリカにおいて洋上拡散実験などの大規模な調査が実施されている。

また、海上のみではなく、沿岸に立地する施設についても、冷たい海面上を吹く風が暖かい陸地の上に達すると、上層に逆転層があり、かつ下層が不安定な大気の状態となり、下層に排出された汚染物質は上層の逆転層によって蓋をされて、いぶされた状態となることがある。これが、いわゆる沿岸型ヒュミゲーションと呼ばれるものである。このような状況下では、高煙突の風下でも局地的に高濃度汚染が発生する可能性がある。アメリカで

は、1970年以降、原子力発電所の緊急時被曝線量の予測の問題に関連して、このようなヒュミゲーションについての調査研究が多数行われている。

ここでは、日本では比較的遅れている海上及び海岸での大気拡散についての観測及びそのモデル化の研究について、内外の文献から最近の研究動向などを調査した。ここにその結果を紹介する。

2. 海上での拡散調査

海上での煙の拡散について、系統的にかつ大規模な観測及び実験が行われるようになったのは1970年代からである。海岸に立地する発生源を対象としたエアートレーサー拡散実験はそれ以前にも多数あるが、その多くは陸上と海上との拡散場の相違に注目したのではなく、その特性をこれらの実験結果から把握することは困難な場合が多い。

ここで、海上（湖上）と陸上との拡散場の差に注目した沿岸地域での拡散実験及び海上（湖上）での拡散実験の実施例を第1表にまとめた。

1970年代前半までに行われた海上でのエアートレーサー拡散実験は Draxler (1984) によってまとめられている。ここでは、ニューヨーク州の Long Island での実験、カリフォルニア州 Oceanside 及び Bolsa Island での実験、テキサス州 Victoria での実験、テキサス州 Corpus Christi での実験について、その概要を紹介し、沿岸地域での拡散特性について考察を加えている。海上での気象観測については、これ以前にも報告されており、

* Diffusion models for offshore and coastal region.

** Shin'ichi Okamoto, 東京情報大学経営情報学部.

*** Kiyoshige Shiozawa, 早稲田大学理工学部.

第1表 海岸での大気拡散についての観測例

| 著者 | 場所 | 年月 | 観測項目 |
|--|------------------------------------|-------------------------------|--|
| Collins, 1971 | Cape Cod 湾 | 1969年夏季 | 気象観測, 煙の可視化 |
| Lyons, 1972 | Chicago 地域 (Michigan 湖岸) | 1967年8月 | 気象観測, テトルーン観測, 航空機によるエーロゾル観測 |
| Lyons, 1972} Lyons, 1975} | Michigan 湖岸 | 1970年 5~6, 8月 | } 気象観測, 上層 SO ₂ 濃度 |
| Raynor <i>et al.</i> , 1974, 75 | Long Islnd 沿岸 | 1972年8月 ~74年2月 | |
| 西, 沢田, 1978 | { 泉南沖 神戸沖 播磨沖 | 1973年8月 1973年8月 1973年8月 | ヘリコプターからのトレーサー拡散実験, 気象観測 |
| 大倉, 西, 1982} 大倉, 西, 1984} | 泉州沖 | 1978年8月 | 船舶およびヘリコプターからのトレーサー拡散実験, 気象観測 |
| Portelli, 1982 Hoff <i>et al.</i> , 1982 Misla and Onlock, 1982} | Nanticoke 発電所 (Erie 湖北岸) | 1978年6月 | 気象観測, 航空機, LIDAR, COSPECによる煙流観測 (SO ₂ 濃度) |
| Shair <i>et al.</i> , 1982 } McRae <i>et al.</i> , 1982} | El Segundo 発電所 (Santa Monica 湾) | 1977年7月 | 気象観測, 煙道焚込トレーサー拡散実験 |
| 神戸市, 1980 | 神戸ポートタワー | 1979年10月 | トレーサー拡散実験, 気象観測 |
| Zannetti <i>et al.</i> , 1981 | California 沿岸 | 1980年9月 1981年1月 | トレーサー拡散実験(船舶より), 気象観測 (MMS) |
| Dabberdt, 1986 | California 沿岸 | 1981年12月 1982年6月 | トレーサー拡散実験(船舶より), 気象観測 (MMS) |
| Dabberdt <i>et al.</i> , 1983 | Cameron(メキシコ湾) | 1981年7月 1982年2月 | トレーサー拡散実験(船舶より), 気象観測 (API) |
| [Skupniewicz, 1986参照] | | | |
| 角田, 安達, 坂井, 1983 | 東海村 | 1982年8月 | トレーサー拡散実験, 気象観測 |
| McElroy, 1986 | 南部 California 沿岸 | 1982年7~8月 | 航空機による LIDAR 観測, 気象観測 |
| Johnson, 1985 | Kewaunee 発電所 (Michigan 湖岸) | 1982年5~6月 | { 気象観測, トレーサー拡散実験, ソンダー等リモートセンシング, 航空機, 船舶での観測 (SEADEx 計画) |
| Hanna <i>et al.</i> , 1988 | California 沿岸 | | トレーサー拡散実験, 気象観測 (API) |

水面上の小さい粗度の影響, 水温と気温の差が大気安定度に及ぼす影響などについても議論されていた。

Oceanside での実験は Smith and Niemann (1969) [Draxler, 1984 参照] が報告しており, 海上から蛍光粒子トレーサーを噴霧し, 陸上のサンプリング地点でその捕集を行っている。この結果より, 著者は次のような結論を述べている。

(i) 海上での拡散幅 σ_y の増大はゆるやかであり, 陸上における安定大気時の値に相当する。

(ii) ブルームが陸上に達すると, 拡散幅 σ_y は急速に増大する。

Brookhaven 国立研究所の気象グループはニューヨーク州 Long Island 沖に建設が予定された原子力発電所に関する環境影響調査の一環として, 海上での気象観測及びエアートレーサー拡散実験を行っている。この実験で

は, 沖合数 km に停泊した船舶より oil fog トレーサーを噴霧し, 海岸においてトレーサー濃度の測定を行っている。

Draxler (1984) は, これらの海上での拡散実験で得られた拡散幅 σ_y のデータを整理している。この結果より, Draxler (1976) による拡散幅 σ_y と風向変動幅 $\sigma\theta$ の関係がそのまま海上でも適用できることを示唆している。ただし, 海上での $\sigma\theta$ は陸上での値よりもかなり小さい。

また, 初期の拡散実験では, 濃度の鉛直分布を直接に測定せず, 海岸での地表濃度から, 拡散式を用いて拡散幅 σ_z を求めているものが多い。このため, 測定誤差やトレーサーの沈着の影響を強く受けることもあり, その信憑性には多少問題があることを Hosker (1974) は指摘している。そして, 将来における海上での拡散実験では濃度の鉛直分布を直接に測定することを求めている。

第2表 MMS および API による拡散実験

| 場所 | 期間 | トレーサー 放出地点 | サンプリング 地点数 | 延実験時間数 | 実施期間 |
|----------------------|----------------------|---------------|---------------|--------|------|
| (i) Ventura, CA | Sept. 1980~Jan. 1981 | 沖合 5 km | 41 | 34 | MMS |
| (ii) Pismo Beach, CA | Dec. 1981~June 1982 | 沖合 6 km | 65 | 62 | MMS |
| (iii) Cameron, LA | July 1981~Jan. 1982 | 沖合 4~8 km | 71 | 53 | API |
| (iv) Carpinteria, CA | | 沖合 0.3~1 km | 40 | 37 | API |

Hosker (1974) も1970年代前半までの海上での拡散実験データを整理して、拡散幅の推定方法について検討を加えている。この結果、拡散幅 σ_y の推定には、平均風速 u と風向変動幅 $\sigma\theta$ の測定値が重要であり、推定式の中に $\sigma\theta$ を含まない推定方法は精度が劣ることを明らかにしている。

アメリカでは、1970年代の後半から外部大陸棚(Outer Continental Shelf; OCS) に建設される施設の環境影響評価の必要性が生じてきた。これらの事業は内務省(DOI) の Mineral Management Service (MMS) の所管となっている。このため、DOI は予測手法開発の一環として、各地で大規模なエアートレーサー拡散実験を実施した。

ここで、DOI によるカリフォルニア州 Ventura 沖、Pismo Beach 沖での実験、及びアメリカ石油研究所(American Petroleum Institute; API) によるメキシコ湾岸 Cameron 沖での実験について、その概要を第2表に示す。この MMS の拡散実験については、Zannetti *et al.* (1981), Skupniewicz and Schacher (1986), Dabberdt (1986) などが報告している。

Zannetti *et al.* (1981) によれば、Ventura 沖での実験により、広い大気安定度の範囲のデータが収集できたこと、トレーサーガス濃度の水平方向及び鉛直方向の濃度分布はともに正規分布で近似できること、拡散幅 σ_z の分類には NPS (Naval Postgraduate School) の安定度階級、 σ_y の分類には風向変動幅 $\sigma\theta$ が適していること、などを報告している。

ここで、NPS の安定度階級は Schacher (1982) [Skupniewicz and Schacher (1986) 参照] が提案したものである。この方法では、表面粗度 z_0 とモニン-オブコフの安定度長さ L からパスキル安定度階級 (PG 安定度) を求める Golder (1972) の方法を基本として、水面上の境界層の気象パラメータの推定法と組み合わせて、海面上における PG 安定度と同等な安定度階級 (PG 等価安定度階級) を求めている。

この NPS の安定度階級は、海面上の風速 (20 m 高度)、気温と海水温との温度差、相対湿度より求めるものである。ただし、相対湿度の影響はあまり大きくない。

Skupniewicz and Schacher (1986) はこの NPS の PG 等価安定度を用いて、拡散実験データを整理している。ここで、風下距離 0.1~12 km の範囲において、

$$\sigma_y(x) \propto x^\alpha \quad (1)$$

$$\sigma_z(x) \propto x^\beta \quad (2)$$

における係数 α , β を推定している。ここで、十分なデータの得られた安定度 D, E 階級では、 α , β ともに 0.6~0.7 程度となっており、陸上より小さな値となっている。これらの解析結果によれば、NPS の安定度階級はトレーサー実験から求まる拡散幅 σ_z を説明するには適しているが、拡散幅 σ_y の推定には不十分であると述べられている。

Dabberdt (1986) も Pismo Beach 沖でのトレーサー拡散実験のデータを利用して、海上での大気安定度階級の設定方法及び拡散幅の推定方法について検閲している。ここで、取り上げられた大気安定度の分類方法は下記の4種類である。

(i) USGS: アメリカ Federal Register で述べられている方法であり、Turner (1970) のワークブックの方法である。一般には Pasquill の大気安定度と呼ばれている。なお、海上であることを考慮して、安定度 C 階級よりも不安定側では、C 階級と設定する (MMS 修正パスキル安定度)。

(ii) NRC: アメリカ原子力規制委員会の Regulatory Guide (規制指針) に記述されている方法であり、高度 100 m までの気温勾配より安定度を求める。

(iii) $\sigma\theta$: Pasquill (1961) が提案した安定度階級の分類表であり、風向変動幅 $\sigma\theta$ より安定度を求める。

(iv) NPS: 海面上の風速、水温と気温との差、相対湿度より Pasquill-Gifford 等価安定度を求める。

以上4種類の安定度分類法にしたがって、安定度を求

第3表 各大気安定度分類法による出現頻度の相違 (Dabberdt, 1986より引用)

| 安定度階級 | USGS | $\sigma\theta$ | NRC | NPS |
|-------|------|----------------|-----|-----|
| A | 0 | 7 | 0 | 0 |
| B | 0 | 1 | 0 | 0 |
| C | 16 | 3 | 0 | 0 |
| D | 44 | 7 | 0 | 52 |
| E | 0 | 13 | 62 | 10 |
| F | 0 | 31 | 0 | 0 |
| G | 2 | 0 | 0 | 0 |

(数値は出現時間数)

めた結果を Dabberdt (1986) より引用して第3表に示す。この結果, USGS 及び $\sigma\theta$ 法では広い範囲の安定度が出現しているが, NRC ではすべてE階級となっている。

次に, 拡散幅 σ_y, σ_z の推定方法として, 下記の4種類の方法について検討している。

(i) USGS: Turner (1970) のワークブックに記載されている Pasquill-Gifford 線図に基づく方法

(ii) Pasquill: Pasquill (1976) が提案した方法で, 式(3), (4)により σ_y, σ_z を推定する。

$$\sigma_z = a_i x^{b_i} (z_0/15)^{0.2} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \sigma\theta x f_y(x);$$

$$f_y(x) = (1 + 0.0308x^{0.4548})^{-1} \quad (4)$$

ここで, z_0 は表面粗度 (cm), x は風下距離 (m), $\sigma\theta$ は風向変動幅 (ラジアン) である。

(iii) Draxler: Draxler (1976) が提案した方法であり, 式(5), (6)により σ_y, σ_z を推定する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= \sigma\theta x f_y(t/t_L); \\ f_y(t) &= [1 + 0.9(t/1000)^{0.5}]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \sigma w t f_z(t/t_L); \\ f_z(t) &= 1: \text{不安定} \\ f_z(t) &= [1 + 0.9(0.02t)^{0.5}]^{-1}: \text{中立, 安定} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(iv) Briggs: Briggs (1973) が提案した線図に基づく方法。

なお, (iii) Draxler の方法においては, 鉛直風速の変動 σ_w を測定していないため, $\sigma_w = 0.5 u / \ln(Z/Z_0)$ により推定した値を用いている。これら4種類の拡散幅 σ_y, σ_z の推定値と実測値との比較を行っている。これらの解析結果より, Dabberdt (1986) は次のような結論をまとめている。

(i) 海上での大気安定度を NPS の方法により設定

し, USGS(Pasquill-Gifford 線図) あるいは Briggs(Briggs 線図) により拡散幅 σ_y を推定する方法では, 推定値と実測値との間にまったく相関関係が見られず, きわめて不適切な方法である。しかし, 風向変動幅 $\sigma\theta$ により安定度階級を設定すれば, USGS 及び Briggs においても推定値と実測値との間に正の相関が見られる。

(ii) 拡散幅 σ_y の推定に関しては, Pasquill (1976) による $\sigma\theta$ を用いる方法の整合性が最も良好である。

(iii) 拡散幅 σ_z の推定に関しては, 4種類の推定法のすべてが満足できるものではなかった。この原因としては, 次のような事項があげられる。i) 海上での鉛直方向の風向変動 $\sigma\phi$ あるいは風速変動 σ_w が測定されていないこと及びこれらのパラメータの推定方法が適切ではなかったこと。ii) 実験により得られた σ_z の値にバラツキが小さく, 大部分が同程度の値であり, 広い大気の状態に対応するものではなかったこと。

Hasse and Weber (1985) も海上における大気安定度について検討している。ここでは, Pasquill の大気安定度と Golder (1972) による モニン-オブコフ の安定度長さの関係についても考察を加え, 地上での両者間の関係が海上では成立しないことを述べている。

3. 海上での拡散モデル

3.1 海上及び沿岸での拡散モデル

海上及び沿岸に立地する発生源による大気汚染を予測するために, 拡散モデルが利用されるようになったのは1960年代からである。初期の研究としては, 沿岸に立地する原子力施設などを対象としたものが多く, このような研究については Van der Hoven (1967), Raynor (1980) などが報告している。これらの報告では, 拡散モデルに関する記述の多くの部分を沿岸地域でのヒュミゲーションに関する事項に充てている。

原子力施設以外では, 海上に設置される石油及び天然ガスの採掘施設が対象となった調査が多い。アメリカでは, Outer Continental Shelf (OCS) Lands Act により, これらの事業の管轄は内務省 (DOI) となっているため, DOI はカリフォルニア州の沖合で計画されている事業の環境影響調査に関連して, Southern California Air Quality Model Validation Study (SCAMS) を実施した。この SCAMS プロジェクトの目的は陸上において通常に用いられている予測手法が OCS 施設にも適用できるか否かを調査することである。

1982年にアメリカ気象学会 (AMS), Brookhaven 国立研究所 (BNL), エネルギー省 (DOE) は共同で, 沿岸

域での大気中輸送プロセスについての討論会（ワークショップ）を開催した。この会議の概要は SethuRaman (1983) が報告している。この会議では、始めに海上及び沿岸での大気中輸送プロセスの解明を必要としている行政機関などの要望について議論され、最後に提言がまとめられている。この提言の要旨は以下のとおりである。

(i) 過去に沿岸地域において実施された野外観測データを収集整理し、データ集 (Coastal Data Archive) を作成する。

(ii) 各種の地理的条件の場所を対象として、5～10 年計画で総合的な海洋及び沿岸地域大気環境調査を実施する。この調査により 3 次元予測モデルの開発と検証に必要なデータの収集を行う。

(iii) 既存の沿岸地域での拡散モデルの評価と相互比較を実施する。

(iv) 各種の予測モデル開発のための研究を継続すべきである。このモデルとしては、利用者向き（行政対応可能な）拡散モデル、研究用 3 次元力学モデルなどを含むものである。

(v) 当該調査研究に関係する各機関の間の調整を行うための継続的な委員会を発足させる。

3.2 OCD モデル

アメリカ内務省(DOI)の Minerals Management Service (MMS) へ提出するために、Environmental Research and Technology (ERT) 社が開発した海上及び沿岸地域に適用するための拡散モデルが Offshore and Coastal Dispersion Model (OCD) モデルである。このモデルは EPA の MPTER モデル (Pierce and Turner, 1980) を基本として、海上での大気の乱れの状態や海岸における内部境界層中での拡散状況に対応するための修正が施されている。ここで考慮されている事項は下記のとおりである*1。

(i) 船舶や海上構造物（石油掘削施設など）による排煙上昇及び拡散への影響（建屋後流拡散モデル）の考

慮

(ii) 海上での拡散幅の考慮

(iii) 海岸での内部境界層に伴うヒュミゲーションの考慮

(iv) 陸上での拡散幅の考慮

(v) 海岸近くでの起伏の影響（複雑地形上拡散モデル）の考慮

(vi) 煙流中での汚染物質の化学変化の考慮

ここで、海上での拡散幅 σ_y , σ_z の推定法及びそのための気象パラメータの設定方法について、Hanna *et al.* (1985) より引用して、ここに示す。

水平方向の拡散幅 σ_y は式(7)により求められる。

$$\sigma_y^2 = \sigma_{yt}^2 + \sigma_{yb}^2 + \sigma_{ys}^2 + \sigma_{yo}^2 \quad (7)$$

ここで、

σ_{yt} : 大気中の乱れに起因する拡散

σ_{yb} : 排煙上昇による拡散

σ_{ys} : 風向変化（シア）による拡散

σ_{yo} : ダウンドラフト等の構造物周辺の気流の乱れによる拡散

鉛直方向の拡散幅 σ_z についても、式(7)と同様に

$$\sigma_z^2 = \sigma_{zt}^2 + \sigma_{zb}^2 + \sigma_{zo}^2 \quad (8)$$

により求められる。添字の意味は σ_y の場合と同様である。

浮力上昇に伴う初期拡散については、MPTER モデルと同様に式(9)により求める。

$$\sigma_{yb}^2 = \sigma_{zb}^2 = (\Delta H)^2 / 10 \quad (9)$$

ここで、 ΔH は排煙上昇高度である。

大気中の乱流による拡散については、乱流強度 $i_y (= \sigma_y/u)$ 及び $i_z (= \sigma_z/u)$ を用いて、式(10)により計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{yt} &= i_y x S_y(x) \\ \sigma_{zt} &= i_z x S_z(x) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで、 $S_y(x)$ 及び $S_z(x)$ は Briggs (1973) の方法により推定する。

$$S_y(x) = (1 + 0.0001x)^{-1/2}; \quad x \leq 10^4 \text{ m} \quad (11)$$

$$S_z(x) = \begin{cases} 1 & ; \text{大気安定度 A, B} \\ (1 + 0.0002x)^{-1/2}; & \text{C} \\ (1 + 0.0015x)^{-1/2}; & \text{D} \\ (1 + 0.0003x)^{-1/2}; & \text{E, F} \end{cases} \quad (12)$$

風向シアによる拡散については、Pasquill (1976) による式(13)を使用する。

$$\sigma_{ys}^2 = 0.03 (\Delta WD)^2 x^2 \quad (13)$$

ここで、 ΔWD は濃度平均化時間（通常 1 時間）内の

*1 アメリカ内務省 (DOI) は Federal Register 45 FR 37816 (1980年6月5日) において、大陸棚上での石油と天然ガスの採掘に関連する施設の環境アセスメントに利用される拡散モデルとして、CRST ER モデルを推奨し、より予測性能の高い拡散モデルの募集を発表した。そして、DOI は新たに ERT 社から提出された OCD モデルを審査の上、推奨モデルとして承認した。これに伴い、CRST ER モデルの承認は 1985年6月26日をもって失効することとなった。(50 FR 12248, 1985年3月28日)

第4表 OCD モデルと CRSTER モデルとの比較結果 (Herkhof and Dabberdt, 1985より引用)

| モデル | 全データ | | 計算値と実測値の比率 (pred/obs) | |
|----------------------|-------|------|-----------------------|-----|
| | 差の平均* | 相関係数 | 最高値 | |
| CRSTER MMS 修正パスキル安定度 | -2.3 | 0.22 | 0.3 | 0.3 |
| NPS 安定度 | -1.8 | 0.17 | 1.0 | 0.6 |
| OCD | 0.035 | 0.36 | 1.9 | 1.3 |

* $d = \text{pred} - \text{obs}$ ($10^{-6} \text{ sec. m}^{-3}$)

風向変動あるいは排煙上昇高度間での風向シアである。

発生源が海岸にある場合には、式(7), (8)で拡散幅を求めるが、陸上の大気安定度(乱流強度あるいは安定度パラメータ)を用いる。また、発生源が海上にある場合、あるいは海岸にあって内部境界層の影響を受ける場合には、陸上での拡散幅に対する仮想煙源からの風下距離を計算し、この仮想煙源の位置を用いて、拡散幅を計算する。

また、内部境界層に伴うヒュミゲーションについては、Deardroff and Willis (1982)の方法を採用している。

OCD モデルでは、海上での乱流強度 i_y , i_z が必要である。しかし、これらのパラメータが測定されていない場合には、海水温、気温、風速、相対湿度より i_z を推定する。また、式(12)における $S_z(x)$ の推定に必要な大気安定度は海上でのモニン-オブコフの安定度長さ L により階級を設定する。また水平方向乱流強度 i_y が測定されていない場合には、

$$i_y = 0.5/u \quad (u < 10 \text{ m/s}) \quad (14)$$

により、 i_y を推定する。この推定式は Schacher *et al.* (1982) [Hanna, 1985 参照] によりカリフォルニア州 Ventura 沖及び Pismo Beach 沖での観測データの解析から得られたものである。

また、Herkhof and Dabberdt (1985) は Pismo Beach でのトレーサー実験のデータを利用して、OCD モデルと CRSTER モデル*2 との比較検討を行っている。この結果は、第4表に示すように、洋上での拡散に関しては、CRSTER モデルなど従来の陸上を対象としたモデルでは不十分であり、洋上での拡散特性を考慮できるモデルの使用が不可欠であることを示している。

Hanna and DiCristofaro (1988) は OCD モデルの改良と新たなデータベースに基づく改良モデルの検証を行っている。この研究はアメリカ石油研究所 (API) の委

第5表 Carpinteria でのデータベースに基づく評価 (全データ中の最高濃度についての計算値と実測値との比率) (Hanna and DiCrisofaro, 1988より引用)

| モデル | σ_u/u 測定値を使用 | σ_u/u 推定値を使用 |
|---------|---------------------|---------------------|
| OCD/API | 1.21 | 0.95 |
| OCD | 0.84 | 2.91 |
| CRSTER | 0.30 | — |

託によるものであり、この改良モデルを OCD/API モデルと呼んでいる。主な改良点は以下のとおりである。

(i) 拡散幅 σ_y 推定には、式(11)に代えて、式(5)に示す Draxler の方法を採用する。

(ii) 海岸近くの地形の起伏を考慮する。分配流線高度の理論に基づいてブルーム主軸高度を推定する。

(iii) 内部境界層高度は地形に沿って、変化させる。カリフォルニア州 Carpinteria 沖での37時間分のトレーサー実験により得られたデータベースによる評価の結果を第5表に示す。この結果より、従来の OCD モデル、CRSTER モデルよりも改良された OCD/API モデルの方が予測性能が高いことが示された。

Londergan and Anderson (1984) は第2表の(i), (ii), (iii)のデータを用いて、CRSTER モデルと同等な MPTER モデルの評価を行っている。この解析結果より、場所による評価値の差が大きく、場所による拡散

*2 CRSTER モデルはアメリカ EPA が開発した正規型ブルーム式に基づく拡散モデルであり、平坦地あるいは緩やかな起伏のある地域(煙突高度より高い山が近くにはない)にある孤立点煙源(火力発電所など)を対象としている。このモデルは EPA の拡散モデルについての指針において、推奨モデルに選定されている (US. EPA, 1977 参照)。MPTER モデルも EPA が開発した正規型ブルーム式に基づく拡散モデルであり、基本的な機能は CRSTER モデルと同等である。

特性の相違を重視することの必要性を指摘している。

4. 沿岸でのヒュミゲーションの調査

4.1 観測例

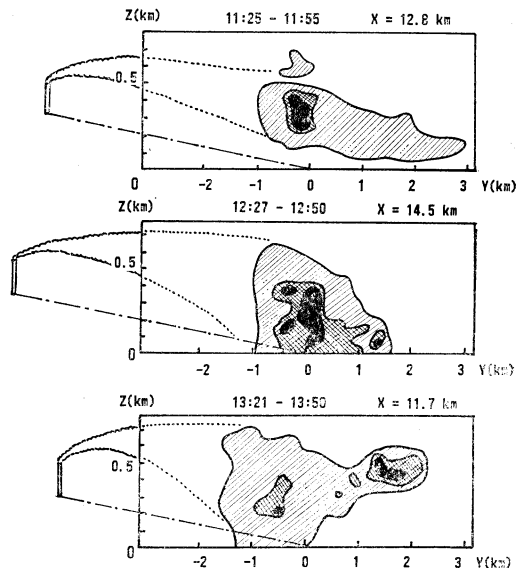
冷たい海上から暖かい内陸へ向かって風が吹く場合、海上を流れていた冷たい安定な大気が陸上では地表近くから次第に暖められて、下層は不安定、上層は安定な大気の状態となる。この下層における不安定層、すなわち混合作用の大きい大気層を内部境界層 (Internal Boundary Layer: IBL, あるいは Thermal Internal Boundary Layer: TIBL) とも呼んでいる。そして、海岸あるいは海上の発生源からの煙がこの TIBL を横切って流れるようになると、下層では煙が急速に拡散されて、地表濃度が著しく高くなることもある。この現象は沿岸型ヒュミゲーションあるいは単にヒュミゲーションと呼ばれている。内陸地域でも、接地逆転層の解消時に同様のヒュミゲーションが発生するが、このタイプのヒュミゲーションは数十分程度で解消することが多い。しかし、沿岸地域の内部境界層に伴うヒュミゲーションは数時間程度持続することもあり、内陸地域のものと比較して、発生期間が長時間に及ぶことが多い。このため、沿岸地域での大気拡散の研究においては、ヒュミゲーションがとくに注目されている。

このような状況は常に発生するものではなく、非常に限られた条件の場合に見ることができる。したがって、このような現象の観測は一般に困難であり、調査観測の蓄積は少ない。このような観測においては十分な調査期間を設定しても、典型的な観測事例が得られるのは数例に過ぎないことが多い。このような点を考慮すれば、現在において、最も質量ともに優れたデータベースはカナダの Nanticoke 発電所での観測によるものであると思われる。

Collins (1971) は Cape cod 湾で行われた実験データを解析し、海風中ヒュミゲーション時に適用できるモデルについて考察している。この実験の目的の1つは Van der Hoven (1967) の方法を検証することである。

Lyons (1970, 1972, 1975) は Chicago, Milwaukee など Michigan 湖西岸において、湖上及び陸上での気象観測、煙霧層の写真撮影、航空機による上層での SO_2 濃度測定を行っている。これらの観測例は Lyons (1975, 1983) に集大成されており、沿岸地域での大気拡散に関する総説としては、最もよくまとめられたものの1つである。

エリー湖北岸にある Nanticoke 火力発電所は出力 4,000 MW (煙突高さ 198 m, 2本) のカナダ最大の発



第1図 LIDAR 観測による Nanticoke 火力発電所ブルームの鉛直断面, 1978年6月6日 (Hoff, et al., 1982 より引用)

電所である。湖風 (lake breeze) 中での排煙の拡散などを調査するために、1978年5月29日～6月16日の期間に大規模な観測が実施され、この結果は Portelli (1982) などが報告している。

この期間中の6月6日におけるヒュミゲーション観測結果を Hoff (1982) より引用して、第1図に示す。この図は、Nanticoke 発電所より風下へ約 15 km 離れた地点で、ブルーム主軸とほぼ直角な鉛直断面での LIDAR による観測結果である。図の上段はヒュミゲーションが発生する直前の11時25分より11時55分の観測結果であるが、煙の中心が上層にあり、地表濃度はあまり高くなっていない。中段の図はヒュミゲーションが生じている12時27分より12時50分の観測結果であり、煙の高濃度部分が地表に達している。下段の図は日射が弱くなった13時21分より13時50分の観測結果であるが、再び煙の高濃度部分が上層に移り、ヒュミゲーションが終わりつつある状態であることがわかる。

Shair et al. (1981) は陸風時に海岸から海上へ輸送された煙が海風時に陸上へ吹き戻される現象をエアートレーサー拡散実験により解析している。この実験はカリフォルニア州南部の Santa Monica 湾岸にある El Segundo 発電所において行われた。この実験では、夜間の陸風時に SF_6 を煙道焚込みにより放出し、陸上及び海上 (船舶) で SF_6 濃度の測定を行っている。また、McRae

(1982)もこの海上でのデータを解析している。そして、陸風時には、暖かい海上においてヒュミゲーションが生じ、これが翌日の海風時に陸上での高濃度の原因となる可能性を報告している。

西, 沢田 (1978), 大倉, 西 (1982, 84) は関西新空港予定地で行われたエアートレーサー拡散実験のデータを解析している。1978年に泉州沖で行われた実験では、海岸から約 5 km 沖合の海上 30 m 高度 (船舶) から SF₆, 海上 200 m 高度 (ヘリコプター) より CBrF₃ を噴霧し、海岸及び陸上の約 50 地点でトレーサーの 30 分平均濃度を測定している。この結果、低煙源では海岸のすぐ近くからヒュミゲーションに近い状況になっていることが示唆されている。

米国原子力規制委員会 (U.S. NRC) は下記 2 つの目的のために 1982 年より沿岸地域を対象とした大規模な調査計画を実施した。

(i) 沿岸地域に適用される拡散モデルの評価に必要な高品位なデータベースを確立すること。

(ii) 原子力発電所での緊急時対応に必要な気象観測項目の選定のための基礎資料を収集すること。

この計画は Shoreline Environment Atmospheric Dispersion Experiment (SEADEx) と呼ばれており、この第 1 期調査 (SEADEx-I) はミシガン湖西岸の Kewaunee 発電所周辺において 1982 年 5 月 28 日 ~ 6 月 8 日に実施された。

この調査では、地上、湖上及び上層での気象観測、航空機搭載 LIDAR による煙流観測、エアートレーサー拡散実験などを行っている。

4.2 模型実験

風洞及び水槽を用いたヒュミゲーション時の拡散についての研究もいくつか報告されている。Meroney *et al.* (1975) はコロラド州立大学の風洞を用いて、Ogawa and Hoydysh (1977) は New York 大学の風洞を用いて、内部境界層 (TIBL) が風上の安定層内を流れてきたブルームと交差する場合の濃度分布などについて検討を行っている。

Meroney *et al.* (1975) によれば、ヒュミゲーション時の地表濃度は中立状態での最高値よりもさらに 3 倍程度高くなることを示している。また、Ogawa and Hoydysh (1977) では、中立時に比較して、ヒュミゲーション時には、1 桁高い濃度が出現する可能性のあることを述べている。そして、内部境界層の高さと強さは風速、海と陸との温度差、表面温度などによっても変化し、これらの相互関係については十分に把握されていないと述べられ

ている。

Deardorff and Willis (1982) は水槽実験により、ヒュミゲーションについて検討している。この結果、内部境界層の上端はなめらかな曲面となっているのではなく、局所的な凸凹が大きいことを明らかにしている。したがって、ブルームが内部境界層の上端に接して下層不安定層への煙 (トレーサー) の拡散が始まってから、完全に上層から下層へ煙 (トレーサー) が取り込まれるまでには、ある程度の時間を要することも明らかにしている。そして、この考え方に基づくヒュミゲーション時の拡散モデルも提案している。

5. ヒュミゲーション時の拡散モデル

ヒュミゲーション時に適用される拡散モデルとしては、Van der Hoven (1967), Lyons and Cole (1973), van Dop *et al.* (1979), Misra (1980) など多数が提案されている。また、国内においても、溝尻, 伊藤 (1982), 蒲生, 横山 (1982), 大倉, 西 (1984), 木村, 竹内 (1977), 末延, 植田 (1983) などがある。なお、木村, 竹内 (1977) などの数値解モデルについては、海陸風循環の機構を大気の運動方程式により記述し、この計算された風の中での煙の拡散をシミュレートするものである。この海陸風の機構については、この小文の範囲を越えているので、ここでは扱わないものとする。

5.1 Van der Hoven のモデル

Van der Hoven (1967) は沿岸地域に立地する原子力発電所からの排気の拡散について、1960 年代中期までの研究動向などをまとめており、この中で沿岸型ヒュミゲーションについても触れている。ここで、上層安定層中のブルームと内部境界層が交差して、煙が急速に下方へ拡散を始める風下距離 X_1 を求めるための線図 (チャート) も示されている。そして、この風下距離 X_1 での地表濃度は式 (15) により計算される。すなわち、内部境界層の内側では、拡散が急速にすすむので、鉛直方向の濃度分布は一様となる。

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y u H} \quad (15)$$

ここで、 σ_y は海上の安定層中の拡散幅であり、さらに遠方では煙源高度 H を境界層高度 L に置き換える。

5.2 Lyons and Cole のモデル

Lyons and Cole (1973) は Turner のワークブックに記載されている逆転層解消時 (inversion break-up) の拡散モデルを改良して、沿岸型ヒュミゲーションのモデルを提案している。このモデルでは、ブルームの下端 (H

$-2.15 \sigma_z$ 及び上端 ($H+2.15 \sigma_z$) が内部境界層 TIBL と交差する風下距離を、それぞれ X_B , X_E とする。そして、 $X < X_B$, $X_B < X < X_E$, $X_E < X$ の3区域に分けて、濃度を計算する。

(i) $X < X_B$

通常の正規型拡散式により、安定層中の拡散幅を用いて濃度を計算する。

(ii) $X_B < X < X_E$

鉛直方向一様分布、水平方向正規分布により濃度を表現し、式(16)により濃度を計算する。

$$C = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \sigma'_{ys} u L} \left[\int_{-\infty}^p \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{p^2}{2}\right) dp \right] \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma'^2_{ys}}\right) \quad (16)$$

ここで、添字 s は安定層中の拡散幅を表す。 L は TIBL の高さであり、風下距離の関数である。さらに、 p , σ'_{ys} は式(17)で表される。

$$\left. \begin{aligned} p &= (L-H)/\sigma_{zs} \\ \sigma'_{ys} &= \sigma_{ys} + \frac{H}{8} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

(iii) $X_E < X$

この領域では、リッド高度が風下距離とともに増大すること以外はトラッピング時(上空に逆転層があり、この下側に汚染物質が閉じ込められる、すなわちトラップされた状態)の拡散式と同様である。

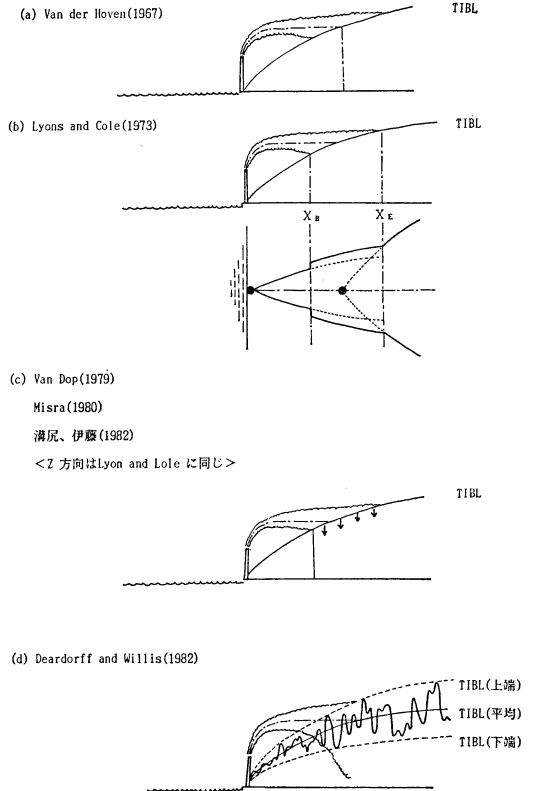
$$C = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \sigma_{yu} Lu} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_{yu}^2}\right) \quad (18)$$

ここで、拡散幅 σ_{yu} は、不安定層中での値であり、第2図(b)に示すような仮想源からの風下距離に対応するものとする。

5.3 その他のモデル

Van Dop *et al.* (1979) は Lyons and Cole (1973) の拡散モデルを改良し、ヒュミゲーション時のモデルを提案している。このモデルではヒュミゲーションの生ずる範囲を、第2図(b)における $X_B < X < X_E$ の領域に限定せず、1つの数式で全領域をカバーしているが、この改良による濃度計算値の相違は小さい。また、横方向の拡散幅 σ_y として、ヒュミゲーション開始直後から混合層内の不安定側の推定値を用いると、濃度を過小評価する危険があるので、上層安定層中の拡散幅と下層不安定層中の値の両者を考慮した拡散幅 σ_y 推定法を採用している。

Misra (1980) も van Dop (1979) と同様の拡散モデルを提案している。このモデルでは、上層安定層中の風速を u_s 、混合層内の風速を u_u として、分けて扱って



第2図 沿岸型ヒュミゲーション時拡散モデルの比較

る。

Lyons and Cole, van Dop, Misra などのモデルでは、境界層の上部は、なめらかな曲面であると仮定して、ヒュミゲーション時の拡散モデルを提案している。しかし、Deardorff and Willis (1982) は水槽実験により、境界層の高さ $L(x,y)$ はなめらかではなく、局所的な凸凹が大きく、境界層の高さ $L(x,y)$ の変動は上層安定層中のブルームの拡散幅 σ_z の数倍にも達し、拡散モデルとしては無視できないことを指摘している。そして、この境界層の高度の変動を考慮に入れた拡散モデルも提案している [第2図(d)参照]。

溝尻, 伊藤(1982), 蒲生, 横山(1982), 大倉, 西(1984)なども沿岸地域でのヒュミゲーション時の拡散モデルについて考察している。

5.4 モデル性能比較

このようなヒュミゲーション時の拡散モデルの性能評価を扱った報文としては、Stunder and SethuRaman

第6表 沿岸拡散モデルについての定量的な性能評価 (Stunder and SethuRaman, 1986 より引用)

| model | obs. | pred. | a | b | RMSE |
|-----------|------|-------|-----|------|------|
| CSFM | 164 | 134 | 118 | 0.10 | 193 |
| SLDM | 164 | 190 | 99 | 0.56 | 148 |
| SLDM/emp. | 164 | 47 | 36 | 0.10 | 193 |
| SLDM/dd. | 164 | 108 | 84 | 0.15 | 172 |

obs.: 実測値平均

pred.: 予測値平均

RMSE: 平均二乗誤差の平方根

a: 回帰定数 (切片)

b: 回帰係数 (勾配)

(1986) などがある。ここでは、Nanticoke 発電所でのデータベースを用いて、下記4種類の拡散モデルの予測性能を統計的に評価している。

(i) CSFM: (修正 CRSTER モデル; Lyons and Cole (1973) の方法を採用)

(ii) SLDM: (Misla (1980) の方法)

(iii) SLDM/emp.: (Deardorff and Willis (1982) に従い、安定層から混合層への流入量を調整したモデル)

(iv) SLDM/dd.: (混合層内において広い領域を占める下向きの気流を考慮して、修正したモデル)

これらの結果は第6表に示すように、Misla (1980) による SLDM が最も良好であった。また Deardorff and Willis (1982) による混合層 (TIBL) 高度の変動を考慮したモデル、また混合層内の下向きの流れを考慮したモデルでは、むしろ予測性能が低下している。また、Misla (1980) のモデルでは、検証のためのデータベースとは異なるが、同じ Nanticoke 発電所のデータを開発段階において使用しているので、他のモデルと同等な条件下の比較とは言えないことにも注意する必要がある。このような問題点も考慮すれば、CSFM と SLDM の差はあまり大きくなく、SLDM に対する2つの修正はあまり重要ではないという結論が妥当であるように思われる。

また、Nanticoke 発電所でのデータベース以外に、この種の拡散モデルの性能評価に利用できる質量ともに十分なデータベースは存在しないのが現状である。したがって、今後海上及び沿岸域での大気拡散の研究に関しては、このようなデータベースの整備が最も重要な課題であると思われる。

6. まとめ

海上及び沿岸に立地する発生源に関する濃度予測及びそれに関連する水面上の大気拡散、沿岸地域特有のヒュミゲーションなどについて、文献を収集し、この分野における最近までの研究の動向を調査した。

水面上では、煙の拡散に影響を及ぼす大気の乱れの状態が陸上とは異なっている。したがって、従来の陸上での実験や観測に基づく大気拡散の知識を海上に外挿して用いることは不相当である。すなわち、水面上での煙の拡散を扱う場合、陸上においては広く利用されているパスキルの大気安定度分類はまったく役にたたず、拡散幅の推定には乱れの直接測定が最も有効であること、それが得られない場合には、風速及び水温と気温との差から拡散幅に対応する安定度パラメータを推定する方法がある程度は利用できることなどが、最近の研究から明らかにされている。

一方、沿岸地域でのヒュミゲーションは比較的に発生頻度の低い現象であるため、適切なデータの収集は不十分である。このため、拡散モデルも多数提案されているが、かならずしも十分な検証に基づく信頼できる予測方法は確立されていないのが現状であると思われる。

参考文献

- Bierly, E.W. and Hewson, E.W., 1962: Some restrictive meteorological conditions to be considered in the design of stacks, *J. Appl. Meteorol.*, 1, 383-390.
- Briggs, G.A., 1973: Diffusion estimation for small emissions, NOAA ATDL, ATDL-106.
- Collins, G.F., 1971: Predicting "sea-breeze fumigation" from tall stacks at coastal regions, *Nuclear Safety*, 12, 2, 110-114.
- Dabberdt, W.F., 1986: Overwater atmospheric diffusion: measurements and parameterization, *J. Climate Appl. meteorol.*, 25, 1160-1172.
- Deardorff, J.W. and Willis, G.E., 1982: Ground-level concentrations due to fumigation into an entraining mixed layer, *Atmos. Environ.*, 16, 5, 1159-1170.
- Draxler R.R., 1976: Determination of atmospheric diffusion parameters, *Atmos. Environ.*, 10, 99-105.
- , 1979: A summary of recent atmospheric diffusion experiments, NOAA tech. memo. ERL ARL-78.
- , 1984: Diffusion and transport experiments, chapter 9 of "Atoms. Sci. and Power Production" DOE/TIC-27601, 367-422.
- Golder, D., 1972: Relations among stability para-

- meters in the surface layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **3**, 47-58.
- Hanna, S.R., Paine, R.J. and Schulman, L.L., 1984: Overwater dispersion in coastal region, *Boundary-Layer Meteorol.*, **30**, 389-411.
- , Schulman, L.L., Paine, R.J. and Pleim, J.E., 1984: Users guide to the offshore and coastal dispersion (OCD) model, DOI/DF-85/001 b, NTIS: PB 85-164200.
- , Schulman, L.L., Paine, R.J., Pleim, J.E. and Baer, M., 1985: Development and evaluation of the offshore and coastal dispersion model, *J. Air Poll. Control Assoc.*, **35**, 10, 1039-1047.
- , and DiCristofaro, D.C., 1988: Modeling overwater and coastal transport and dispersion, 8 th symp. Turb. and Diff., 236-239, *Am. Meteorol. Soc.*
- Hasse, L. and Weber, H., 1985: On the conversion of Pasquill categories for use over sea, *Boundary-Layer Meteorol.*, **31**, 177-185.
- Herkhof, D.C. and Dabberdt, W.F., 1985: Characteristics of atmospheric dispersion and model predictions offshore the central California coast, 78 th annual meeting Air Poll. Control Assoc., paper 85-24 A. 5.
- Hosker, R.P., Jr., 1974: A comparison of estimation procedures for over-water plume dispersion, proc. symp. Atmos. Diff. and Air Poll., *Am. Meteorol. Soc.* 281-288.
- Hoff, R.M., Trivett, N.B.A., Millan, M.M., Fellin, P., Ahlauf, K.G., Wiebe, H.A. and Bell, R., 1982: The Nanticoke shoreline diffusion experiment, June 1978-III. Ground-based air quality measurements, *Atmos. Environ.*, **16**, 3, 439-454.
- Johnson, W.B., Uthe, E.E., Dickson, C.R., Start, G., Coulter, R.L. and Kornasiewicz, R.A., 1983: The shoreline environment atmospheric dispersion experiment (SEADEx), *Air Poll. Modeling and Its Appl. IV*, NATO CMS vol. 7, 311-326
- Kerman, B.R., Mickle, R.E., Portelli, R.V., Trivett, N.B.A. and Misra, P.K., 1982: The Nanticoke shoreline diffusion experiment, June 1978-II. Internal boundary layer structure, *Atmos Environ.*, **16**, 423-437.
- Larsen, S.E., 1986: Dispersion climatology in a coastal zone, *Atmos. Environ.*, **20**, 7, 1325-1332.
- Lindsey, C.G. and Ramsdell, J.V., 1983: Fumigation potential at inland and coastal power plant sites, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-3352.
- Londergan, R.J. and Anderson, M.K., 1984: An evaluation of model performance for predicting onshore impacts from offshore sources, 4 th Joint Conf. Appl. Air Poll. Meteorol., 247-250, *Am. Meteorol. Soc.*
- Lyons W.A., 1970: Mesoscale transport of pollutants in the Chicago area as affected by land and lake breezes, 2nd Int. Clean Air Cong., 973-978.
- and Olsson, L.E., 1972: Mesoscale air pollution transport in the Chicago lake breeze, *J. Air Poll. Control Assoc.*, **22**, 11, 876-881.
- and Cole, H.S., 1973: Fumigation and plume trapping on the shores of Lake Michigan during stable onshore flow, *J. Appl. Meteorol.*, **12**, 494-510.
- , 1975: Turbulent diffusion and pollutant transport in shoreline environments, Chapter 5 of "Lectures on Air Poll. and Environ. Impact Analyses" *Am. Meteorol. Soc.*, 136-208.
- , Schuh, J.A., Keen, C.S., McCumber, M. and McNider, R., 1979: Trajectory observations compared to computations using a regional mesoscale model to study air pollution in a lake breeze, 72nd annual meeting Air Poll. Control Assoc., 79-15. 3.
- , Keen C.S. and Schuh, J.A., 1983: Modeling mesoscale diffusion and transport processes for releases within coastal zones during land/sea breezes, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-3542.
- McElroy, J.L. and Smith, T.B., 1986: Vertical pollutant distributions and boundary layer structure observed by airborne lidar near the complex southern California coastline, *Atmos. Environ.*, **20**, 8, 1555-1566.
- McRae, G.J., Shair, F.H. and Seinfeld, J.H., 1981: Convective downmixing of plume in a coastal environment, *J. Appl. Meteorol.*, **20**, 1312-1324.
- Meroney R.N. and Cermak, J.E., 1975: Modeling of atmospheric transport and fumigation at shoreline sites, *Boundary-Layer Meteorol.*, **9**, 69-90.
- Misra, P.K., 1980: Dispersion from tall stacks into a shore line environment, *Atmos. Environ.*, **14**, 397-400.
- , 1980: Verification of a shoreline dispersion model for continuous fumigation, 73rd annual meeting Air Poll. Control Assoc., 80-55. 6.
- , 1980: Verification of a shore-line dispersion model for continuous fumigation, *Boundary-Layer Meteorol.*, **19**, 501-507.
- and Onlock, S., 1982: Modeling continuous fumigation of Nanticoke generating station plume, *Atmos. Environ.*, **16**, 3, 479-489.
- Ogawa, Y. and Hoydysh, W.G., 1977: Sea breeze

- effects on diffusion: A wind tunnel study of fumigation and plume trapping, *proc. Fourth Int. Clean Air Congress*, 180-183.
- Pasquill, F., 1976: Atmospheric dispersion parameters in Gaussian plume modeling Part II. Possible requirements for change in the Turner workbook values, U.S. EPA, EPA-600/4-76-030 b, NTIS: PB 258036.
- Pierce, T.E. and Turner, D.B., 1980: Users guide for MPTER, A multiple point Gaussian dispersion algorithm with optional terrain adjustment, EPA-600/8-80-016.
- Portelli, R.V., 1982: The Nanticoke shoreline diffusion experiment, June 1978-I. Experimental design and program overview, *Atmos. Environ.*, 16, 3, 413-421.
- Raynor, G.S., Michael, P., Brown, R.M. and SethuRaman, S., 1975: Studies of atmospheric diffusion from a nearshore oceanic site, *J. Appl. Meteorol.*, 14, 1080-1094.
- _____, _____, and SethuRaman, S., 1980: Meteorological measurement methods and diffusion models for use at coastal nuclear reactor sites, *Nuclear Safety*, 21, 6, 749-765.
- Ryznar, E. and Touma, J.S., 1981: Characteristics of true lake breezes along the eastern shore of Lake Michigan, *Atmos. Environ.* 15, 7, 1201-1205.
- SethuRaman, S., 1982: Summary of the proceeding of the workshop on coastal atmospheric transport processes, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 64, 12, 1367-1369.
- Shair, F.H., Sasaki, E.J., Carlan, D.E., Cass, G.R., Goodin, W.R., Edinger, J.G. and Schacher, G.E., 1982: Transport and dispersion of airborne pollutants associated with the land breeze-sea breeze system, *Atmos. Environ.*, 16, 9, 2043-2053.
- Skupniewicz, C.E. and Schacher, G.E., 1986: Parameterization of plume dispersion over water, *Atmos. Environ.*, 20, 7, 1333-1340.
- Stunder, M. and SethuRaman, S., 1986: A statistical evaluation and comparison of coastal point source dispersion models, *Atmos. Environ.*, 20, 2, 301-315.
- Turner, D.B., 1970: Workbook of atmospheric dispersion estimates, U.S. Public Health Service Publ.
- U.S. EPA, 1977: User's manual for single source (CRSTER) model, EPA-450/2-77-013.
- Van der Hoven, I., 1967: Atmospheric transport and diffusion at coastal sites, *Nuclear Safety*, 8, 5, 490-499.
- Van Dop, H., Steenkist, R. and Nieuwstadt, F.T.M., 1979: Revised estimates for continuous shoreline fumigation, *J. Appl. Meteorol.*, 18, 133-137.
- Zannetti, P., Wilbur, D.M., Baxter, R.A., and Schacher, G.E., 1981: Southern California offshore air quality model validation study, Vol. II-Synthesis of findings, U.S. Dept. Interior, Bureau of Land Management AV-FR-81/559.
- 占部武生, 1983: 環境影響評価(大気質)の事例調査, 昭和56年度東京都清掃研究所研究報告, 87-109.
- 大倉光志, 西 亮, 1982: 海上空港による大気汚染の予測(II)大気拡散パラメータの推定法, 大気汚染学会誌, 17, 3, 187-194.
- _____, _____, 1984: 海上空港による大気汚染の予測(III)内部境界層による拡散過程の解析, 大気汚染学会誌, 19, 3, 194-202.
- 蒲生 稔, 横山長之, 1982: いぶし現象の拡散モデル, 公害, 17, 5, 67-75.
- 木村富士男, 竹内清秀, 1977: 海風によるいぶし現象の数値実験, 気象研究所研究報告, 29, 1, 17-28.
- 神戸市, 1970: 第7次クリーンセンター環境影響評価書案(概要版), 神戸市環境局, 23-38.
- 末延龍雄, 植田洋匡, 1983: 二次元海陸風場における大気汚染の数値実験, 第24回大気汚染学会講演要旨集, 272.
- 角田道生, 安達隆史, 坂井隆夫, 1983: 海風時の大気拡散実験とブリュームモデルの比較, 第24回大気汚染学会講演要旨集, 267.
- 西 亮, 沢田照夫, 1978: 海上空港による大気汚染の予測(I)トレーサー実験による予測モデルの精度の検討, 大気汚染学会誌, 13, 1, 17-25.
- 溝尻純枝, 伊藤昭三, 1982: フェーミゲーション状態下での大気拡散モデル化, 大気汚染学会誌, 17, 3, 228-235.

今年お世話になったレフェリーの方々 (平成元年)

鵜野伊津志, 大場 良二, 川島 茂人, 北林 興二,
北村 佳照, 木村富士男, 笹野 康弘, 佐橋 謙,
沢井 哲滋, 杉 正人, 武田 重夫, 田畑 明,
千葉 長, 長沢 親生, 花輪 公雄, 深堀 正志,

藤部 文昭, 藤吉 康志, 櫃間 道夫, 本母 利広,
森 滋男, 安成 哲三, 山形 俊男, 山内豊太郎,
山元龍三郎, 吉崎 正憲, 吉門 洋, 渡辺 朝生
(敬称略)