

海陸風を含む模擬気象場における パフ・プルームモデルを用いた 大気汚染物質リスク評価モデルの検証

VERIFICATION OF A RISK ASSESSMENT MODEL OF ATMOSPHERIC
POLLUTANTS WITH PUFF-PLUME MODELS USING SIMULATED
WEATHER CONDITIONS INCLUDING LAND AND SEA BREEZE

玉井昌宏¹・有光 剛²

Masahiro TAMAI and Tsuyoshi ARIMITSU

¹正会員 工博 大阪大学助教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²正会員 工修 関西電力株式会社 電力技術研究所 (〒661-0974 尼崎市若王寺3-11-20)

Environmental risk assessments will be necessary in the near future when every facility that may exhaust pollutants such as a chemical plant or a waste disposal plant is constructed. The puff-plume model is commonly used for the environmental assessments of atmospheric pollutions in Japan. Although the puff-plume model is applicable to calculating pollutants concentration in relatively simple wind fields, we have to examine whether it satisfies requirements of the risk assessment model. The aim of this study is to verify the model using common weather conditions simulated by a three dimensional atmospheric model. Pollutants concentrations were calculated by the puff-plume model and compared to those by three-dimensional simulations. The puff-plume model doesn't calculate pollutants concentrations accurately in the bay area under a weather condition that sea and land breeze is rising.

Key Words : Air pollution, Sea and land breeze, Three dimensional simulation model, Puff-plume model

1. はじめに

海域の人工島や埋立地,あるいは臨海地域に,各種工場や廃棄物処分場など大気汚染物質を排出する事業所を建設する場合には,PRTR制度に基づき排出する化学物質の届出を行うだけでなく,周辺の海域陸域環境に及ぼす影響について総合的な検討を行い,環境悪化につながる要因については,これを最小限に抑制するような対策を講じることが求められている。

我が国の環境アセスメント中での大気汚染の予測においては,パフ・プルームモデルを用いることが標準となっており,3次元の大気拡散数値解析は要求されていない。しかしながら既に米国では3次元数値解析が一般的に用いられていること,我が国でも数値解析モデルの開発,利用が急速に進展していることを勘案すれば,我が国においても早晚パフ・プルームモデルから数値解析モデルへと移行されることであろうと予測される。

独立行政法人産業技術総合研究所化学物質リスク管理研究センターにより,大気汚染物質のリスク評

価モデルAIST-ADMER^{1,2,3)}(Atmospheric Dispersion Model for Exposure and Risk Assessment)が開発され,既に公開されている。このモデルはアメダスデータの統計値と平面2次元のパフ・プルームモデルを用いた簡易モデルである。一般に公開されていること,時間やコスト面で有利であること等から,今後益々利用者が増加してゆくと考えられる。しかしながらアメダスデータそのものが海域に存在しないことや海岸線付近での大気流動場の複雑な3次元構造のために,同モデルを海域の埋立地あるいは臨海地域に対して適用する場合には十分な検討が必要であると考えられる。

本研究では,3次元の大気流動モデルにより海陸風の発生が見込まれる模擬気象場を作成し,その条件下で仮想的に得られたアメダスデータを用いてADMERによる拡散計算を実行した。同時にその模擬気象場を用いて3次元の物質移流拡散の数値計算を行い,ADMERの計算結果と比較することで,パフ・プルームモデルの海域あるいは臨海地域の大気汚染物質排出源への適用性について検討した。

2. 模擬気象場の作成

(1) HOTMACの概要

3次元の大気流動計算による模擬気象場の作成には、米国で開発されたメソスケール気象モデルHOTMAC⁴⁾(Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation)を用いた。大気成層中の乱流輸送は、Mellor-Yamadaの乱流完結モデル⁵⁾で記述されており、様々な地形や森林キャノピー、海陸境界の影響などを考慮した再現性の高いモデルである。筆者らは既に大阪平野の海陸風に関する数値計算を実施しており、計算手法の妥当性については検証を済ませている⁶⁾。

(2) 気象条件

a) 計算条件として用いる気象条件

HOTMACの大気流動場の計算においては、計算対象領域における土地利用などの条件が決定されている場合には、計算領域よりも大きな空間スケールの流動場と、太陽による短波放射の2つが最も重要な外的条件となる。既往の研究により、気象庁の高層観測データと計算領域中心付近の日射量を用いることによって、計算領域内の大気流動場が良好に再現されることが分かっている。そこで本研究においては、高層風と日射量を外的条件として、計算条件に用いることとする。

b) 高層風

気象庁の1997年1年間の高層気象観測データから、計算領域周辺の潮岬、輪島、米子の3地点における850hPa面(上空1500m付近)での風向風速の出現頻度を検討した。

図-1は850hPa面における風向出現頻度である。風向については、年間を通してほぼ常に西よりの風が出現していることが分かる。そこで本研究では計算条件に用いる高層風は西風を与えることとした。

次に同じ高さにおける高層風の風速について検討した。高層風は1日4回程度観測されており、上記の各地点において年間で1400個程度の観測データがある。これを大きさ順に並べて、さらに要素数が概ね等しくなるように3つのグループに分割する。図-2は各グループの風速の範囲、出現回数、平均風速を示している。全風速データを風速が弱い方から並べて1/3のグループの平均風速と、風速が強い方から並べて1/3の平均風速は、それぞれ4m/sと16m/sである。そこでこれらを高層風の弱い条件と強い条件として与えることとした。

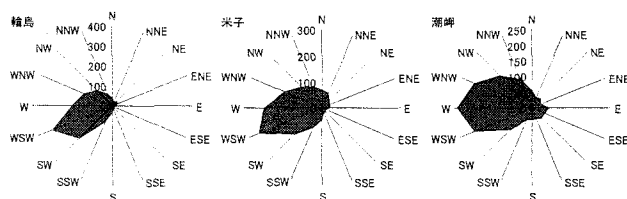


図-1 850hPa面における1997年の風向出現頻度

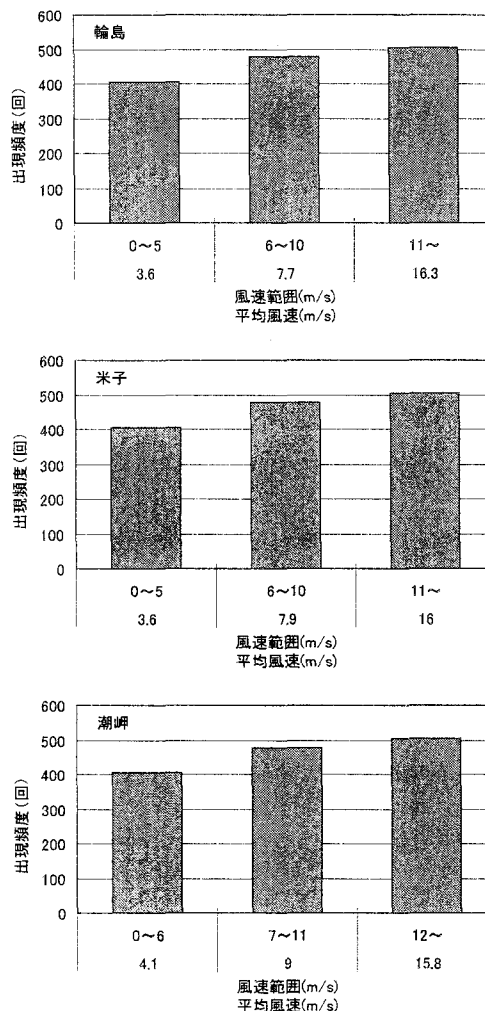


図-2 850hPa面におけるパターン代表風速

なお、本数値計算において逆転層の高さは1000mに固定されており、この高さを超える計算ポイントにおいて、高層風をナッジングにより取り込む。ナッジングとは計算値と観測値の差をニュートン緩和法で補正する手法であり、これを式(1)のように、時間、空間方向に行うのがFDDA(四次元データ同化手法: Four Dimensional Data Assimilation)である。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi, x, y, z, t) + G_{\phi}(\phi_{obs} - \phi) \quad (1)$$

ここで ϕ は予報する物理変数(u, v, θ など), F は ϕ についての通常の方程式, G_{ϕ} は ϕ についてのナッジング係数, ϕ_{obs} は観測値である。運動方程式についてのナッジング係数 G_u は、一般的にコリオリ係数程度の値($10^{-3} \sim 10^{-4} s^{-1}$)を用いることが多い。本研究では、ナッジング係数として、 $G_u = 5.0 \times 10^{-4} s^{-1}$ を使用している。

c) 日射量

HOTMAC実行段階において、月日を特定すれば各計算ポイントにおける緯度経度から太陽高度が自動的に計算される。ここでは海陸風の発達が見込まれる夏季の晴天時を条件として計算を行うこととした。模擬気象場の計算条件を表-1に示す。

表-1 模擬気象場計算条件

	D_{start}	$U_{lsf} (m/s)$
Case1	200	16
Case2	200	4

ここに D_{start} , U_{lsf} はそれぞれ1年を365日で表示した場合の計算開始日と高層風の風速である。なお、計算期間は1ヶ月間としている。

(3) 計算領域

図-3に計算領域を示す。計算領域は大阪市を中心とする南北350km、東西250kmの範囲とし、大阪湾、伊勢湾の一部、若狭湾が計算領域に入るように設定した。

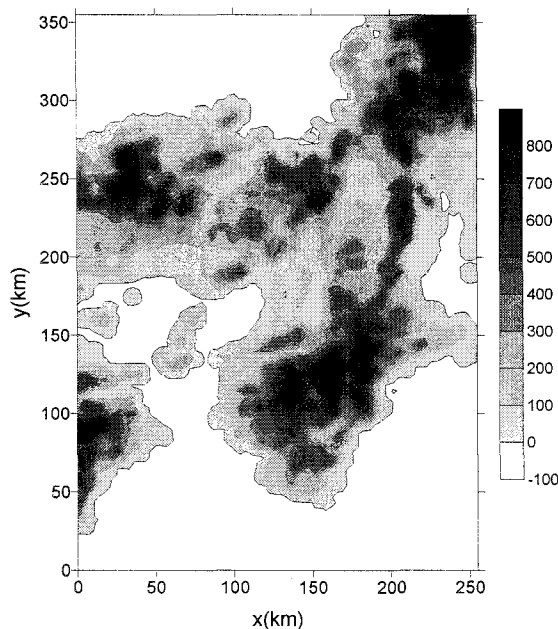


図-3 計算領域と地形

3. 拡散計算モデルの概要

(1) 拡散計算の概要

HOTMACで作成した模擬気象場を条件として、パフ・ブルームモデルと3次元拡散モデルRAPTAD(Random-Puff Transport and Diffusion)による大気汚染物質の拡散シミュレーションを行った。パフ・ブルームモデルによる計算には独立行政

法人産業技術総合研究所で開発されたAIST-ADMER ver.1.0を使用した。ADMERの実行の際には、アメダスデータを読み込む必要があるため、HOTMACで計算した風況、気温、日射量からアメダスと書式を合わせた仮想のアメダスデータを作成した。

(2) パフ・ブルームモデルADMERの概要

ADMERではアメダスの観測年報の各時刻のデータを6つの時間帯に分類する。分類されたデータ毎に、風向16方位、風速5階級、大気安定度6階級の平均値と頻度分布を作成する。これらの4時間毎の16方位×風速5階級×大気安定度6階級=480パターンについて濃度計算を行う。各パターンの濃度値にパターンの生起確率を乗じ、さらに480パターンについて積分することで期間平均の濃度分布を求めている。

移流拡散過程は混合層以下を均一濃度とした2次元パフ・ブルームモデルを用いている。風速1m/s未満ではパフモデルを用いており、 T 秒間連続放出されたパフの中心からの距離が (x, y) の地点における濃度 C_0 は式(2)で表される。

$$C_0 = \int_0^T \frac{q}{2\pi\sigma_y h} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_y^2}\right) dt \quad (2)$$

ここで q ：排出強度、 h ：鉛直混合高さ、 σ_y ：拡散幅である。風速1m/s以上の条件では式(3)で表現されるブルームモデルを用いる。

$$C_0 = \frac{q}{\sqrt{2\pi}\sigma_y U h} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (3)$$

ここで U ：風速である。

(3) 3次元拡散モデルRAPTADの概要

3次元の拡散計算を行ったRAPTADは、濃度分布の移流と大規模な拡散についてはランダムウォークモデルにより、サブグリッドの乱流拡散効果についてはパフモデルによって表示するモデルである。パフの中心位置は、排出源から放出される粒子を追跡することにより算出している。放出された粒子は、平均風速成分と乱流風速成分からなる気流にのせて流す。第 k 番パフの濃度分布は次式に示すガウス分布である。

$$c_k(x, y, z) = \frac{Q\Delta t}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{xk} \sigma_{yk} \sigma_{zk}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{(X_k - x)^2}{\sigma_{xk}^2} + \frac{(Y_k - y)^2}{\sigma_{yk}^2} + \frac{(Z_k - z)^2}{\sigma_{zk}^2}\right)\right\} \quad (4)$$

ここに、 $c_k(x, y, z)$: (x, y, z) 点の第 k 番パフによる濃度、 Q : 第 k 番パフの発生する地域の単位時間あたりの負荷量、 Δt : パフの発生時間間隔、 σ_{xk} : 第 k 番パフの x 方向拡がり幅（ガウス分布の標準偏差）、 (X_k, Y_k, Z_k) : 第 k 番パフの中心位置である。

4. 汚染物質の排出条件

本研究では移流拡散過程にのみ着目しており、化学反応や沈着による汚染物質の消失については考慮していない。ADMER実行時に設定が要求される沈降速度、消失係数、乾性沈着係数、洗浄係数の各パラメータはすべて0に設定した。RAPTADの計算においても同様である。ADMERでは汚染物質は保存される形になるが、RAPTADについては、パフの中心がひとたび計算領域外に出てしまうと当該パフを消去させるために、質量は保存されないことになる。長期間の計算を行う場合には、領域外から再流入するパフの影響が大きくなることも予想されるが、ここではその影響は考慮していない。

排出源としては、海陸風の影響の大きい沿岸域と近隣にアメダスデータの存在しない海域にポイントソースがあるもの仮定して、前述の2つの異なる風速の高層風に対して計算を行う。具体的な発生源の位置については表－2に示す。表中の値はUTM座標で表示されており、領域53の原点からの距離を示している。Case Aは大阪港付近、Case Bは大阪湾中央付近に位置している。

排出量は計算時間内で一定値を保持するものとして、ここでは100g/sとしている。

表－2 汚染物質排出ポイント(UTM)

	$U_{lsf}(m/s)$	$x(km)$	$y(km)$
Case1-A	16	542.661	3833.167
Case1-B	16	519.750	3822.353
Case2-A	4	542.661	3833.167
Case2-B	4	519.750	3822.353

5. 計算結果

(1) Case1（高層風が16m/s）

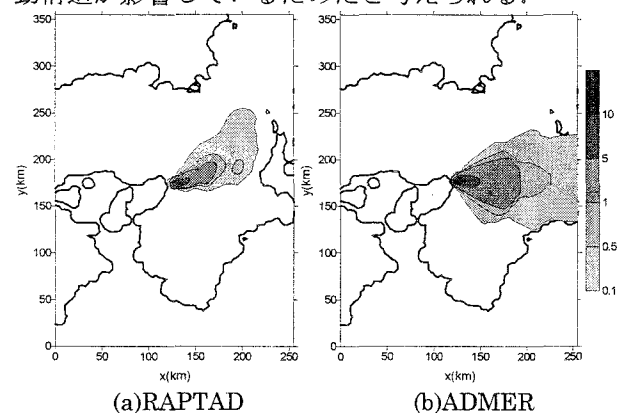
図－4は高層風16m/sとして、大気汚染物質を大阪湾沿岸から排出したCase1-Aに対してADMERとRAPTADとで計算された濃度分布を示している。RAPTADは地上の第1メッシュの値を表示している。

高層風が西風16m/sと大きいために海陸風の影響は小さくなりいずれの方法によっても東方向へ引き伸ばされたような分布になっている。ADMERの結果では汚染源に最も近いアメダスポイント（大阪）において西風が卓越しているために、濃度分布は東方向のみに広がるような形となる。一方、RAPTADの結果は奈良東方の笠置山地、布引山地あるいは紀伊山地の影響を受けて東から北東方向に広がる分布である。

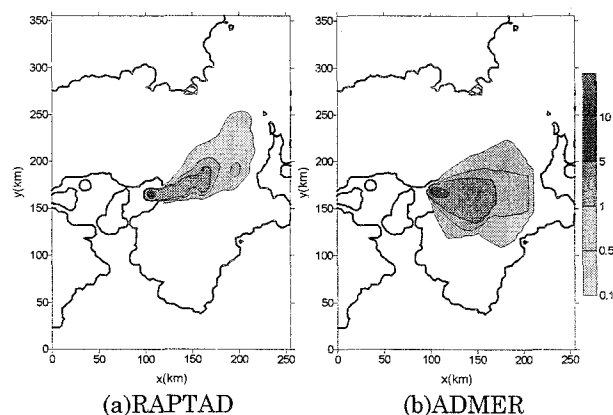
図－5はCase1-Bの濃度分布である。RAPTADの結果はCase1-Aと似た分布となっているが、海上では乱流拡散が小さくなるために、流下方向に長く、それと直交する方向の広がりが小さくなっている。一方ADMERにおいては、Case1-Aと比較して流軸方向の広がりに変化はないが、神戸や洲本などのアメダスポイントの影響が大きくなるために流軸は若干南に傾いている。

(2) Case2（高層風が4m/s）

図－6は高層風4m/sで排出源を大阪湾沿岸部としたCase2-Aの結果である。RAPTAD、ADMER両者の結果に大きな差異が生じていることが確認できる。特にADMERの東西方向に長い濃度分布に対して、RAPTADは南北方向がより長い分布形状になっている。これは上空が西風であることに影響して時間的に平均した風速分布が西風になっていることから、ADMERでは東方に伸びた分布になるのに対して、3次元モデルによる計算では特に地形の影響による局地的な流動構造が影響しているためだと考えられる。



図－4 RAPTADとADMERの濃度分布(Case1-A)



図－5 RAPTADとADMERの濃度分布(Case1-B)

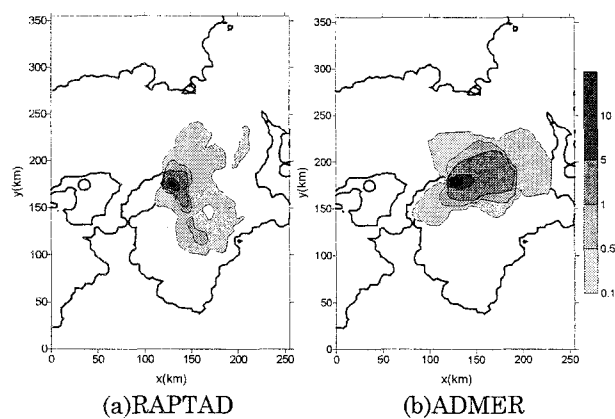


図-6 RAPTADとADMERの濃度分布(Case2-A)

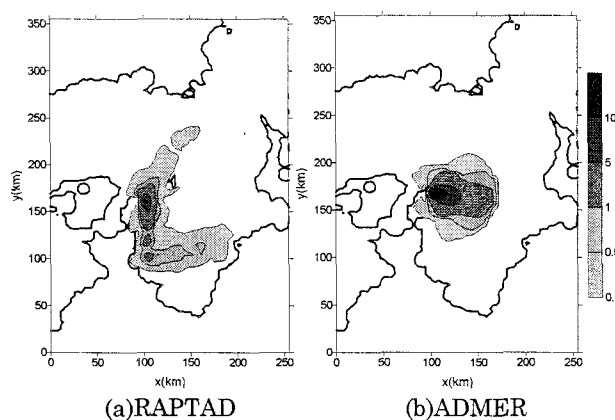


図-7 RAPTADとADMERの濃度分布(Case2-B)

図-7は排出源を大阪湾上に設定したCase2-Bの計算結果であるRAPTADの結果では、大阪湾中央付近で放出されると、海陸風による東西方向の輸送はあまり見られなくなり、南北方向の濃度分布の伸張が顕著になる。また南方では、紀伊山地を取り巻くような濃度分布となり、排出源を大阪湾沿岸部に設定したCase2-Aにおいて紀伊山地北側に高濃度域が広がっているのとは対照的である。同じ気象条件であっても、排出源の位置のわずかな差異によって汚染物質の影響範囲が大きく変化することは非常に興味深い。これに対してADMERの結果では同様の傾向は認められず、大阪湾沿岸部に排出源を設定したCase2-Aの濃度分布との差異は、東西方向の広がりや抑制されていることと、扇型濃度分布の中心軸がやや南側へずれている程度である。

(3) 濃度分布に及ぼす風況の影響

図-8はCase2においてHOTMACにより計算された1ヶ月平均の風速ベクトルの分布を示している。RAPTADの計算において南北方向へ伸張する分布が、紀伊山地上で収束する流動と、布引山地や鈴鹿山脈で収束する伊勢湾から流入する海風などによって引き起こされていることが確認できる。一方、ADMERは発生源付近の時間平均された風況データに基づいてパフ・ブルームモデルによって計算されるために、発生源を中心とした円形分布と扇型分布が重なったような濃度分布となる。

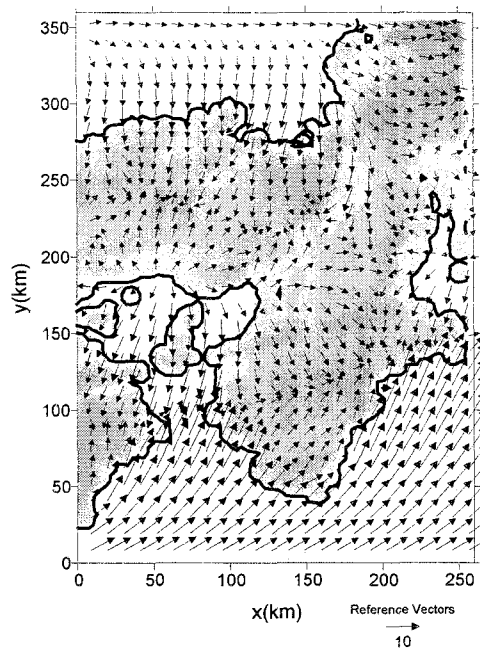


図-8 1ヶ月間の平均風速ベクトル分布

(4) RAPTADとADMERの比較

図-9～12は、各ケースにおける同一地点でのRAPTADとADMERの濃度値の比較である。表-3には、y切片を0とした時の近似直線の傾きと相関係数をまとめている。

高層風の影響が大きく、海陸風の影響の小さいCase1では、ADMERとRAPTADの結果が比較的良く一致しているが、発生源が大阪湾中央部付近の場合は相関係数が低下することが分かる。高層風の影響が小さいCase2では全体的に相関係数が低い。さらに発生源を大阪湾中央部に設定すると、予測濃度レベルの不一致が顕著になる。

図-8に示した1ヶ月平均の風速ベクトルから、海陸風が顕著に現れるような状況においては、大阪湾が海陸風のソースあるいはシンクであるような気流場となっていることが分かる。したがって、周辺の陸地のアメダスデータの内挿値によって、湾内部の気流場を表現することは困難であると予想される。

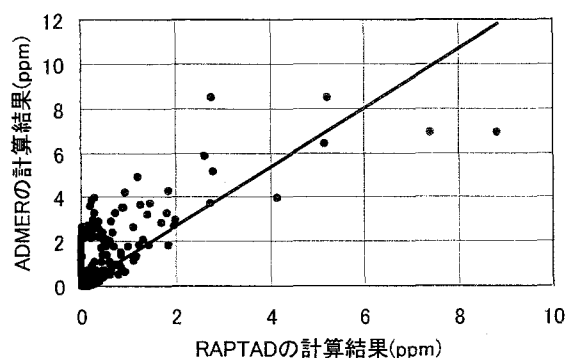
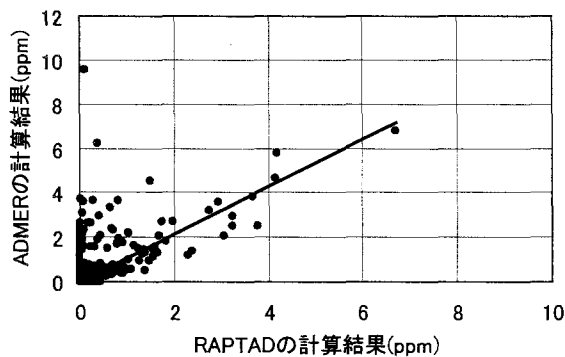
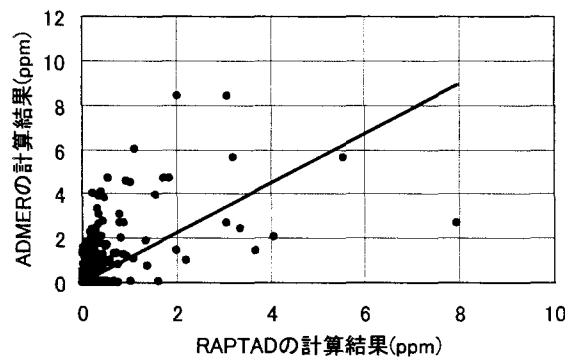


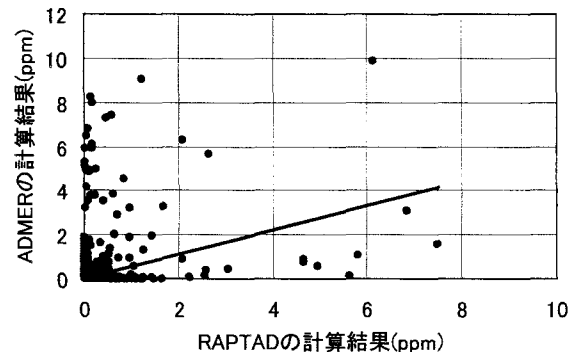
図-9 RAPTADとADMERの濃度比較(Case1-A)



図一10 RAPTADとADMERの濃度比較(Case1-B)



図一11 RAPTADとADMERの濃度比較(Case2-A)



図一12 RAPTADとADMERの濃度比較(Case2-B)

表一3 近似曲線の傾きと相関係数

	傾き	相関係数
Case1-A	1.3	0.74
Case1-B	1.1	0.60
Case2-A	1.1	0.59
Case2-B	0.55	0.28

6. 結論

本研究では、より高精度のリスク評価モデルの必要性を検討するために、パフ・ブルームモデルの予測精度を検証した。

以下に本研究で得られた主要な結果をまとめる。

(1) 高層風が強い場合は、パフ・ブルームモデルと3次元数値モデルの計算結果の一致は比較的良好である。一方、高層風の弱いケースでは、両者の予測結果の一致度は低下する。これは海陸風のような海上に収束や発散のポイントが生じるような気流場は、陸上のアメダスポイントのデータの補間による予測が困難であることに起因している。同様の理由で、大気汚染物質の発生源を湾中央付近に設置すると沿岸域に設置するよりも予測精度は著しく低下する。

(2) パフ・ブルームモデルの予測精度は、アメダスポイントの空間密度が確保されるとともに、山地や湾などの収束や発散が生じるような地形条件が含まれず、一様な気流場が想定されるような状況下においてはある程度保障されるかもしれない。しかしながらこのような条件が揃わない状況下では、高い予測精度を望むことは不可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 東野晴行, 北林興二, 井上和也, 三田和哲, 米澤義堯: 曝露・リスク評価大気拡散モデル(ADMER)の開発, 大気環境学会誌, 第38巻, 第2号, pp.100-115, 2003.
- 2) 東野晴行, 北林興二, 横山長之, 高月峰夫, 米澤義堯: 化学物質運命予測モデルの開発, 大気環境学会誌, 第35巻, 第4号, pp.215-228, 2000.
- 3) 東野晴行: 曝露・リスク評価大気拡散モデル(ADMER)を使ってみる, <http://unit.aist.go.jp/crm/2ndADMER.pdf>
- 4) T. Yamada: A numerical simulation of urbanization on the local climate, *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81, pp.1-19, 1999.
- 5) G. L. Mellor and T. Yamada: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.* 31, pp.1791-1806, 1974.
- 6) 石井義裕, 玉井昌宏, 村岡浩爾: 大阪平野におけるヒートアイランドと海陸風の相互作用, ながれ(日本流体力学会誌), vol.19-2, pp.139-142, 2000.