

盆地を中心とした立体風系による大気汚染物質輸送過程の夏季の特徴

— 津山盆地の事例 —

永田純一*, 原田和男**, 松田正典***

*広島大学ベンチャービジネスラボラトリー

**くらしき作陽大学食文化学部

***広島大学総合科学部

**Some Features of Air Pollutants Transport Processes in Summer Driven by
Three-dimensional Wind Distributions in Basins**

— The sample of Tsuyama basin —

JUNICHI NAGATA*, KAZUO HARADA** AND MASANORI MATSUDA***

*Venture Business Laboratory, Hiroshima University,

Higashi-Hiroshima 739-8527, Japan

**Faculty of Food Culture, Kurashiki-Sakuyo University, Kurashiki 710-0292, Japan

***Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University,

Higashi-Hiroshima 739-8521, Japan

Abstract : The relation between the staying time of air pollutants inside Tsuyama basin and their path was studied based on the three-dimensional wind distributions, in summer time (from August 10 to August 29, 1991). The measured data on the direction of wind and the speed are provided by AMEDAS. By the interpolation of those data with use of the so-called " Mathew-model", we predicted the three-dimensional wind distributions. The path, the time and the pattern of air pollutants were obtained by means of the trace analysis, where the air pollutants were treated as quasi-particles. As the result, it was shown that the quasi-particles released around the noon stay inside the basin for short time and those released around the midnight stay inside the basin for long time. The staying time depends on the distribution of the direction and the speed of wind in basin. Because we have the east and west extents longer than the south and north ones in Tsuyama basin, we presume that the staying time of the air pollutants should depend on the direction of their path. In order to study the relation between the pattern of trace and the staying time, we introduced the following two indices, F and β . F is the ratio of the east-west component of the trace to the south-north one. β is the averaged speed of quasi-particles in the three-dimensional wind distribution. The obtained results showed that the large F and the small β caused a long staying time inside the basin as our presumption.

Keywords : air pollutants, wind distribution, basin, mathew model

§1. はじめに

近年、交通網の発達に伴って山間部を高速道路が走り、アクセスのよさから内陸工業団地の開発が行われてきた。特に都市をかかえる内陸の盆地は自動車交通の要衝となり、常時大気汚染物質が発生している。従来、大気汚染に関する環境影響評価は、人口が集中し生産活動の盛んな沿岸部を中心に実施されてきた。沿岸部は平野が開けている場合が多く、地形の起伏を無視して近似的に平面地形における大気汚染の予測手法が使用されてきた。また、風系は統計的に出現頻度の高い風向・風速で代表する場合が多かった。このような方法は、大気汚染の予測を容易にする利点はあるが、地形や風系が複雑になるとともに現実性を失ってくる¹⁾。この点を改良するため複雑地形における大気拡散の予測手法が開発されてきた^{2),3),4)}。しかし、盆地における輸送過程に注目した研究は少なく最近では会津盆地を対象とした例が見られる程度である⁵⁾。盆地は地形が複雑というだけでなく周囲を山で囲まれており、ある標高までは水平方向の輸送に対して閉じている。このため盆地は、汚染物質の滞在する可能性が平野部より高い。また、時間の経過に伴って山谷風と沿岸部から進入する海陸風が交代し複雑な風系が出現する⁶⁾。最近、コンピュータの情報処理能力が飛躍的に高まってきたとは言え、複雑な地形条件と刻々変化する風系を取り入れた大気汚染の予測は容易ではない。従って実際に環境影響評価を行う立場に立てば、予測手法の開発とともに大気汚染物質の輸送過程を調べ予測対象とする現象を選別する必要がある。本報では、以上の問題意識に立ち津山盆地を対象に立体的風系による輸送過程を調べた以前の解析⁷⁾をもとに、さらに解析期間を拡大した結果を報告する。津山盆地は、岡山県の東北部に位置し、東西約30km、南北約20kmである(図1)。盆地内には、中国自動車道、国道53号線を中心とした道路網があり、工業団地も点在している。津山盆地は大気汚染が特別激しいわけではないが、盆

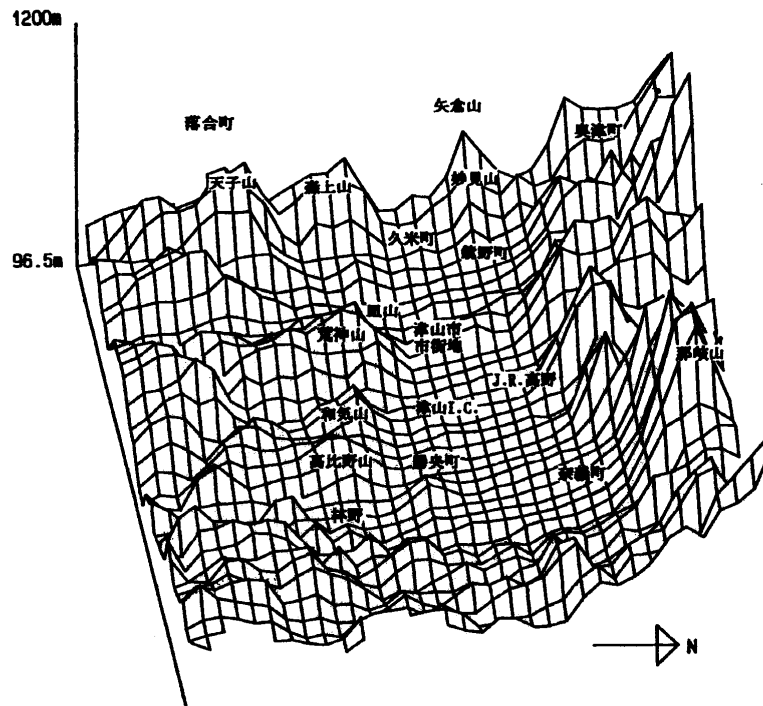


図1 津山盆地の地形
兵庫県側よりの鳥瞰図

地特有の輸送過程の把握にとって適切な事例である。盆地全体の風系は、アメダスの観測データを MATHEW MODEL⁸⁾ を使用して補間し推定した。そして、流跡線解析⁹⁾ の手法を使い大気汚染物質に模した仮想粒子の軌跡を求め、滞在時間と軌跡のパターンの対応を調べた。

§2. 流跡線解析の方法

2.1. 立体的な風速分布の推定

盆地の地形は起伏に富んでおり、風系は地形の影響を受ける。このため流跡線解析には立体的な風系を知る必要がある。地上風の観測は、気象庁の気象観測網（アメダス）、環境庁や地方公共団体の環境大気測定局において常時行われている。しかし、これらの観測網の分布は数十 km 範囲の

輸送現象を調べるには粗い。そこで盆地全体の風系は、観測データをもとに MATHEW MODEL⁸⁾ によって推定した。このモデルの概要を以下に述べる。

MATHEW MODEL の基本的な考え方は、連続の式を満たすように観測値の測定誤差を修正することで任意の点の風向・風速を求めるというものである。数学的には次の汎関数を最小にするように Lagrange multiplier λ を決定する。

$$E(u, v, w, \lambda) = \int [\alpha_1^2(u - u_0)^2 + \alpha_1^2(v - v_0)^2 + \alpha_2^2(w - w_0)^2 + \lambda(\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z)] dx dy dz \quad (2.1)$$

$\mathbf{V} = (u, v, w)$ は修正された風速、 $\mathbf{V}_0 = (u_0, v_0, w_0)$ は修正前の風速、 α_1, α_2 は風速成分に対する重み係数である。観測データから \mathbf{V}_0 を決める方法は後に述べる。

変分原理 $\delta E = 0$ により以下の式が導かれる。

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + 1/(2\alpha_1^2) \cdot \Delta \mathbf{V} \quad (2.2)$$

$$\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z = 0 \quad (2.3)$$

ここで、 $\Delta \mathbf{V} = (\partial \lambda/\partial x, \partial \lambda/\partial y, \alpha_1^2/\alpha_2^2 \cdot \partial \lambda/\partial z)$ である。式 (2.2) を式 (2.3) に入れ λ の偏微分方程式 (2.4) を得る。

$$\begin{aligned} & \partial^2 \lambda/\partial x^2 + \partial^2 \lambda/\partial y^2 + (\alpha_1^2/\alpha_2^2) \partial^2 \lambda/\partial z^2 \\ & = -2\alpha_1^2(\partial u_0/\partial x + \partial v_0/\partial y + \partial w_0/\partial z) \end{aligned} \quad (2.4)$$

式 (2.4) に対する境界条件は、気流の流入出のある面において $\lambda = 0$ 、地表面において $\partial \lambda/\partial \mathbf{n} = 0$ とした。 $\partial \lambda/\partial \mathbf{n}$ は、地表面における法線方向の微分で、風速の法線成分に比例する。比 α_1^2/α_2^2 は、

風速の水平成分の補正に対する鉛直成分の補正の大きさを決めるパラメータである。文献10)によって $\alpha_1/\alpha_2 = 1/32$ とした。ここで、 $\alpha_1 = 1 \text{ sec/m}$ である。これは α_1 は観測値の標準偏差 σ の逆数程度で与えられると考えられ、アメダスのデータが 1 m/sec として、 $\alpha_1 \sim 1/\sigma \sim 1 \text{ sec/m}$ となる。文献8)でも同程度の値が用いられている。コンピュータによって λ の数値解を求め式(2.2)に入れ風速の立体分布を求める。

修正前の風速 $V_0 = (u_0, v_0, w_0)$ はアメダスの測定値を内挿してもとめた^{8),11)}。まず観測点ごとに鉛直方向の風速分布 $U(z)_P$ を式(2.5)のベキ法則を使用して決める。

$$U(z)_P = U(z_0)_P \cdot \{(z-h)/(z_0-h)\}^a \quad (2.5)$$

ここで、 h : 地表面の標高、 z_0 : 観測点の標高、 $U(z_0)_P$: 地点 P の風速の観測値である。ベキの大きさは文献10)によって $a = 0.2$ とした。次に標高 z の水平面内の点 (x, y) における風速を距離

による重み関数法(式(2.6))によって求める。

$$V_0(x, y, z) = \sum_{P=1}^N W_P \cdot U(z)_P / \sum_{P=1}^N W_P \quad (2.6)$$

ここで、 W_P : 任意の地点と観測点との距離の逆数、 N : 観測点数である。補間点より 20km までの観測点を考慮する⁹⁾。アメダスの観測データは風速の鉛直成分がないため $w_0 = 0$ とした。

2.2. 流跡線の計算

流跡線は、刻々変化する風系によって輸送される粒子の軌跡である。軌跡上の各点の位置は、粒子が瞬間的に存在する点の風速ベクトルを次式で積分し求めた。

$$R = R_0 + \int_0^t V(x, y, z, t) dt \quad (2.7)$$

ここで、 \mathbf{R} :時刻 t における粒子の位置ベクトル, \mathbf{R}_0 :粒子の放出点, \mathbf{V} :粒子が通過する点の風速ベクトルである。

粒子が移動中地面に衝突する場合は以下の式で反射させた¹²⁾。

$$\mathbf{R}' = \mathbf{R} - 2n\{n \cdot (\mathbf{R} - \mathbf{R}_P)\} \quad (2.8)$$

ここで、 \mathbf{R}' :反射後の粒子の位置, \mathbf{R}_P :粒子が地表に衝突した位置, \mathbf{n} :地表面の法線ベクトルである。式(2.7)をコンピュータを利用して数値積分する際、時間刻みは1分とした。

§3. 津山盆地に対する計算条件

流跡線解析の対象範囲は、東経 $133^\circ 44' 15'' \sim 134^\circ 18'$, 北緯 $34^\circ 59' 30'' \sim 35^\circ 11'$, 標高 96.5m ~ 1200 m とした。これは東西約 40km, 南北 22km に相当する。津山盆地および周辺のアメダスの観測点は、奈義, 古町, 久世, 津山, 福渡, 和気である。これらの緯度経度を表 I に与える。対

表 I. アメダス観測地点の緯度経度一覧

観測所名	海拔 (m)	緯度	経度
奈義	245	$35^\circ 07.1'$	$134^\circ 10.9'$
古町	240	$35^\circ 07.0'$	$134^\circ 19.8'$
久世	145	$35^\circ 04.3'$	$133^\circ 45.4'$
津山	145	$35^\circ 03.7'$	$134^\circ 00.7'$
福渡	63	$34^\circ 51.8'$	$133^\circ 54.5'$
和気	35	$34^\circ 48.7'$	$134^\circ 11.2'$

象期間は、1991年8月10日1時 \sim 29日24時とした。風速の計算格子は、東西方向 22, 南北方向 11, 鉛直方向は 30層とした。鉛直方向の各層の厚さは、盆地の最低標高(96.5 m)から計って 100m までは 10m, 100 \sim 200m は 20m, それより上層は $\Delta_z = 20 + 10 \cdot k$ ($k = 1 \sim 10$) で与えた。

仮想粒子は、津山測候所の位置(東経 $134^\circ 0.7'$, 北緯 $35^\circ 3.7'$, 標高 145m) から 1時間間隔で毎正時に放出し、上記の対象範囲の外に出るまで追跡した。

§4. 結果と考察

図2は、盆地内に放出された粒子が滞在する時間を示したものである。滞在時間は、粒子の放出時刻によって変化している。全体を通して深夜に放出された粒子の滞在時間は長くなり、正午を中心とした時間帯に放出された粒子は短い滞在時間になる傾向が見られる。また、10日は平

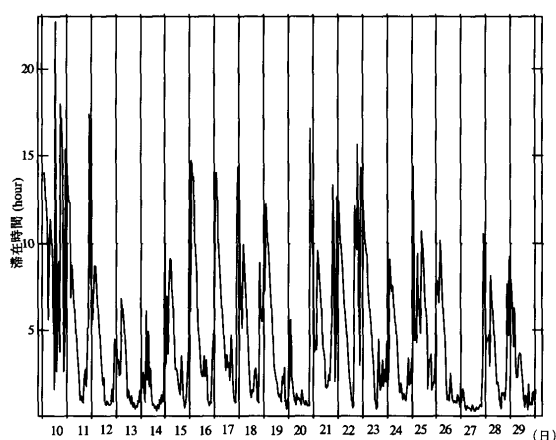


図2 粒子の滞在時間

均的に放出された粒子の滞在時間が10時間以上とかなり長くなっている。最小時間は27日の12時と13時に放出された粒子でその滞在時間は23分であった。最大時間は、10日正午に放出された粒子で、滞在時間は22時間40分であった。図3は、滞在時間を1時間毎の単位として、その出現の頻度をヒストグラムにして与えてある。

滞在時間を決める要因は、盆地の形状と風系の風向・風速分布である。津山盆地は、東西軸方向が南北軸方向に比較し長い(図1)。したがって粒子の軌跡が東西軸・南北軸のいずれに偏るかで滞在時間が変わってくる。また、各軸への偏りの程度が同じであっても、粒子が移動中に出会う風速の大きさでも滞在時間が変わる。以上の点を考慮し軌跡のパターンと滞在時間との対応を

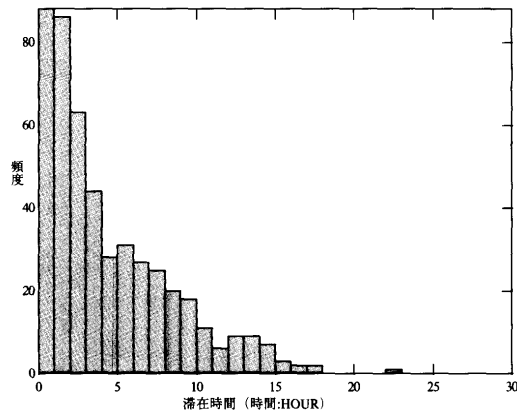


図3 滞在時間の頻度

分類するために二種の指標を定義する。粒子の移動方向と盆地の全体的形状との対応を見る指標として比 $F = S_{EW}/S_{SN}$ を導入する。 S_{EW}, S_{SN} は、軌跡の東西軸に沿う長さや南北軸に沿う長さである。また、粒子の会場の平均的な風速 β を軌跡の全長 S と滞在時間 T の比で定義する。 S_{EW}, S_{SN}, S の各量は以下の式で計算する。

$$S_{EW} = \sum_i |x_{i+1} - x_i|, \quad S_{SN} = \sum_i |y_{i+1} - y_i|,$$

$$S = \sum_i \{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2\}^{1/2} \quad (4.1)$$

ここで、 x_i, y_i, z_i は1分毎の粒子の位置座標である。図4に全点(480個)のプロットを示す。(a)は全ての点をプロットしており、(b), (c), (d)はそれぞれ粒子の滞在時間が(b)1時間未満、(c)1時間以上14時間未満、(d)14時間以上に対応する。ここで得られた平均風速は0.4~8.3m/s、軌跡の偏りの指標は0.03~7.14の範囲にある。1時間未満(\times)の場合は、平均風速が2m/s以上あり、1未満の F の割合が多く軌跡はほぼ南北軸に偏っている。14時間以上(\blacksquare)の場合、平均風速は0.5~1.1m/s、1以上の F の割合が多く軌跡は東西軸にはほぼ偏っている。滞在時間が1時間以上14時間未満(\circ)の場合、上記(b), (d)と異なって平均風速 β 、軌跡の偏り F は分類の指標としては不十分である。平均風速 β がほぼ同じでも、風向の変化の度合いによって仮想粒子の軌跡が直線的かあるいは複雑な曲線かで F の値が異なってくる。今後、 β, F に軌跡全体の形状を表す指標を

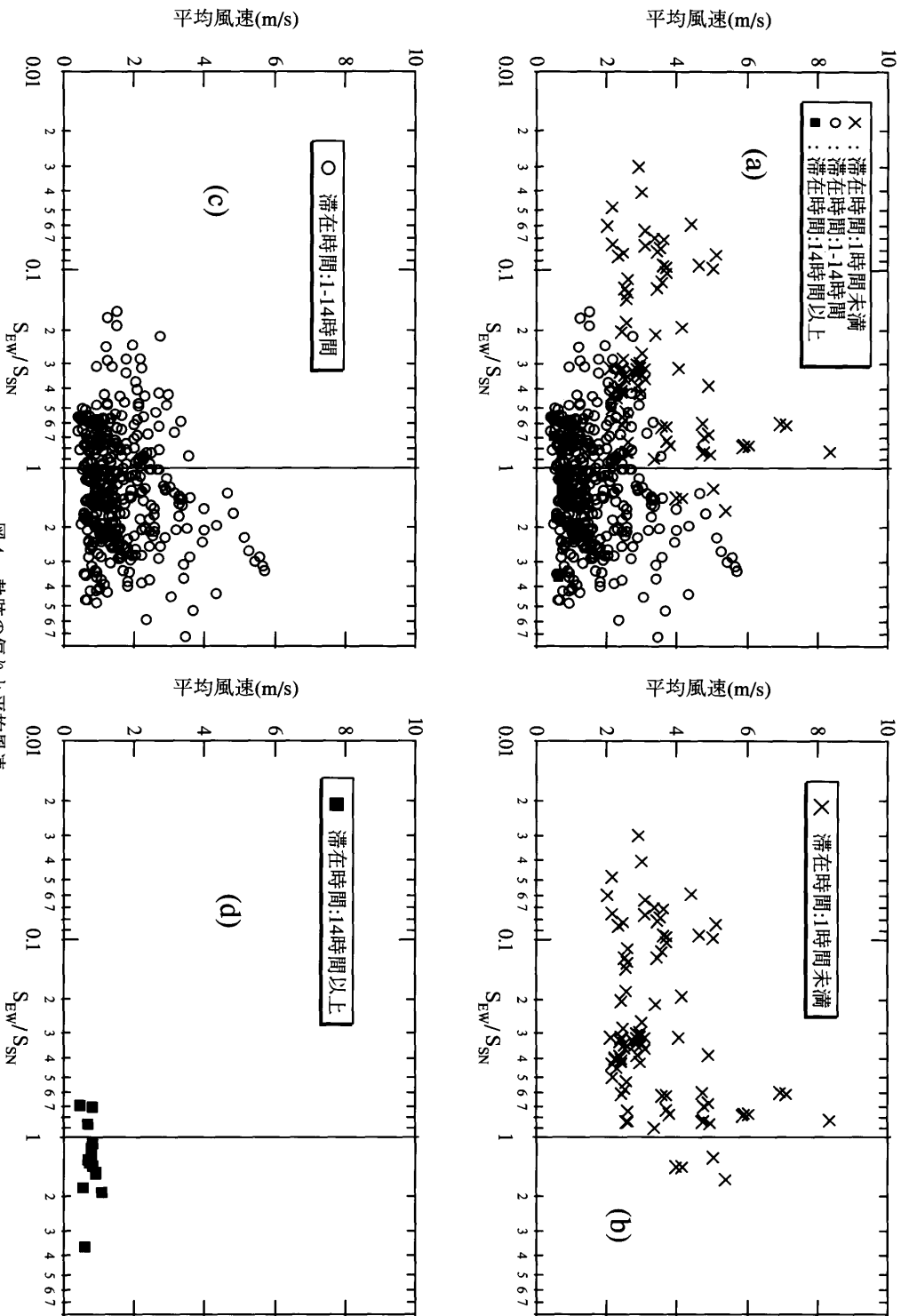


図4 軌跡の偏りと平均風速

加え滞在時間の分類を再検討する。

引用文献

- 1) 水野建樹 (1992) : 高濃度大気汚染出現時の中規模スケールの気象, 大気汚染学会誌, Vol. 27, 101 ~ 110.
 - 2) 井手靖雄 (1993) : 複雑地形における大気拡散の研究, 大気汚染学会誌, Vol. 28, 51 ~ 57.
 - 3) 塩沢清茂, 長沢伸也 (1986)a : 起伏のある地形上における大気汚染予測モデルの開発 (1), 環境技術, Vol. 15, No. 5, 415 ~ 422; 塩沢清茂, 長沢伸也 (1986)b, Vol. 15, No. 6, 473 ~ 477.
 - 4) 市川陽一, 四方浩 (1985) : 風の場合計算のための擬似ポテンシャル流モデルの開発, 土木学会論文集, 第363号/II-4, 61 ~ 69.
 - 5) 近藤祐昭, 吉門洋, 北林興二 (1993) : 会津盆地の加熱・冷却と盆地の外からの影響について, 大気汚染学会誌, Vol. 28, 341 ~ 347.
 - 6) 原田和男 (1993) : 風向風速観測値の可視化システム, 作陽音楽大学・作陽短期大学研究紀要, 第26巻, 第1号, 21 ~ 35.
 - 7) 原田和男 (1995) : 盆地を中心とした立体風系による輸送過程の特徴 : 作陽音楽大学・作陽短期大学研究紀要, 第28巻, 第2号, 21.
 - 8) Sherman, C. A. (1978) : A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain, J. Appl. Met., Vol. 17, 312 ~ 319.
 - 9) 若松伸司, 畠野昌治 (1981) : 関東地方における局地風系パターン, 大気汚染学会誌, Vol. 16, 371 ~ 378.
 - 10) 産業公害防止協会 (1987) : 光化学大気汚染モデルの感度解析, 60 助研資料 1-33, 26 (昭和 62 年 6 月).
 - 11) 松梨順三朗 編著 (1993) : 環境流体汚染, 森北出版株式会社, 289 ~ 290.
 - 12) 市川陽一, 佐田幸一, 朝倉一雄 (1994) : 高次の乱流統計量をもとにした大気拡散モデル, 大気汚染学会誌, Vol. 29, 297 ~ 312.
-