

# GPV を用いた短期濃度予報システム構築のための基礎研究 Basic study to construct daily forecasting system on atmospheric pollutant concentration by using GPV data

0004 岡崎 隆治

We set the initial condition and boundary one of  $\varphi\omega$  åeld from GPV data which were provided from the Meteorological Agency every day, and we predicted the subsequence  $\varphi\omega$  åeld by using meteorological model. It was found that the predicted  $\varphi\omega$  åelds were more precise than that one interpolated GPV data only. Next, we estimated the amount of NO<sub>x</sub> and HC emissions around Osaka Bay Area. We decided the initial condition of atmospheric pollutant from two methods; one is the interpolation of observed data, another is Nudging method. On the pollutant concentration simulation, observed high O<sub>3</sub> concentration at the day time could be reappeared by using Nudging method. I think Nudging method is good way to make the initial condition of the concentration.

キーワード; GPV データ, 光化学オキシダント, 流れ場計算, 濃度計算, ナudging法

Keywords; GPV data, photochemical oxidant, calculation of  $\varphi\omega$  åeld, calculation of atmospheric pollutant, Nudging method

## 1. はじめに

今日の環境問題の多くは、私たちの通常の社会経済活動に起因している。そして環境の悪化の影響は地球環境や将来の世代まで及ぶ。都市大気環境のレベルで見ると光化学オキシダントや窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) といった有害物質が問題となってくる。光化学オキシダントは、工場・事業所や自動車から排出される窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や炭化水素類 (HC) を主体とする一次汚染物質が、太陽光線の照射を受けて光化学反応により二次的に生成されるオゾンなどの物質の総称であり、いわゆる光化学スモッグの原因となる。平成 10 年には警報の発令はなかったものの、光化学オキシダントの注意報発令延べ日数は 135 日<sup>1)</sup>(22 都道府県)、光化学大気汚染によると思われる被害届出人数は 1,270 人と依然大きな問題となっている。

光化学オキシダントを中心とした大気汚染物質濃度シミュレーションに関する研究はこれまで国内外を問わず多くの研究者によって行われてきたが、その多くが土地開発や工場の施工後の影響など長期的な予測を目的としたものであった。我が研究室でも濃度シミュレーションに関する研究を行っていたが、短期の濃度予測を行おうとした場合、適切な初期条件・境界条件を与えることができなかつたため一日中晴れた海陸風の卓越した夏の日という限定された条件下でのみしか濃度計算を行うことができなかつた。そこで本研究は気象庁から配信される GPV(Grid Point Value) データを用いることにより計算対象日特有の流れ場の計算を行い、短期の大気汚染物質濃度を予測し、注意報、警報発令等の基となる基礎情報を提供するシステム構築を目指した。

## 2. GPV を適用した流れ場シミュレーション

光化学オキシダントを中心とした大気汚染物質濃度予測を行うためには、計算対象地域の詳細な流れ場を予測することが必要である。そこで気象庁から配信される GPV (Grid Point Value) データを初期条件、境界条件に用いることによって計算対象日特有の流れ場を再現しつつ、基礎方程式を満たすように計算を行った。

### 2{1 GPV データの概要と空間内挿

GPV とは Grid Point Value の略であり、気象庁が領域モデル (RSM: Regional Spectral Model) を用いて地上から高層まで一定間隔の格子に分割し、大気の状態を算出したものである。GPV データは「RSM 地上」、「RSM 上層」の 2 種類からなり、水平格子間隔は「RSM 地上」で東西方向に 15 分、南北方向に 12 分間隔であり、これは北緯 35 度で南北、東西方向とも実距離で約 22km である。「RSM 上層」の格子間隔は「RSM 地上」の二倍で、「RSM 地上」の格子点を一つおきに間引いたものとなっている<sup>2)</sup>。RSM 上層データは気圧面により 950hPa, 925hPa, 850hPa, 700hPa, 500hPa 面の 5 つのデータからなる。GPV データの構成を表 1 に示す。GPV データの間隔は「RSM 地上」で東西・南北方向ともに図 1 のようにメッシュをそれぞれ 5 分割し、約 4km × 4km の計算メッシュを作成した。ただし「RSM 上層」は格子間隔が「RSM 地上」の 2 倍であるため 10 分割した。

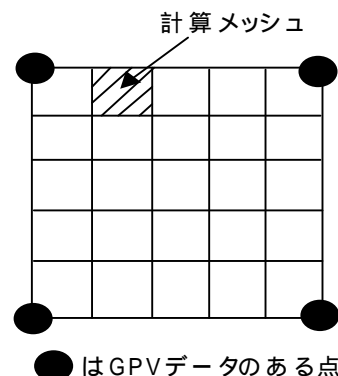
表 1 各データの構成

RSM 地上		RSM 上層	
要素	単位	要素	単位
風速 (U)	m/s	geo-potential 高度	m
風速 (V)	m/s	風速 (U)	m/s
気温		風速 (V)	m/s
相対湿度	%	気温	
降水量	mm	相対湿度	%
予報雲量	-	鉛直 p 速度	hPa/h
気圧	hPa		

1. 水平方向で全要素を非スタガード格子で内挿した。図 2 のように各点での GPV 値をそれぞれ  $P_1, P_2, P_3, P_4$ 、求めるメッシュの非スタガード格子での値を  $P$ 、各点と  $P$  で作る四角形の面積をそれぞれ  $A_1, A_2, A_3, A_4$  とすると以下の式で求められる。

$$P = \frac{P_1 A_4 + P_2 A_3 + P_3 A_2 + P_4 A_1}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} \quad (1)$$

2. 鉛直方向にはジオポテンシャル高度を用いて計算メッシュに非スタガード格子で線形内挿した。海拔高度の高い山地などでは RSM 上層データが定義されている点のジオポテンシャル高度が地表面の海拔高度より低くなる場合がある。この場合には地表面より低くなっている RSM 上層データは使用せず地表面より上に存在する RSM 上層データと RSM 地上データを用いて線形内挿した。
3. 全メッシュ非スタガード格子からスタガード格子に線形内挿を行った。図 3 のように  $u, v, w$  の値は格子側面の中心点で定義されているためその面を構成する 4 点の値を平均して線形内挿した。気温などのスカラー量は格子の中点で定義されるため立体を構成する 8 点の平均によって線形内挿した。



● は GPV データのある点  
図 1 計算メッシュ分割

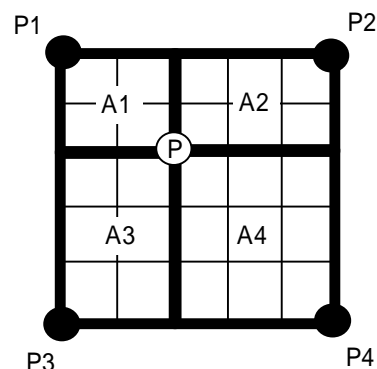


図 2 面積比での内挿

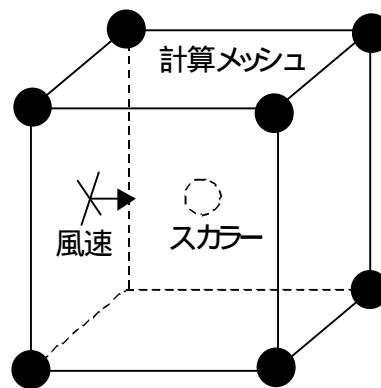


図 3 各データの定義点

## 2{2} 流れ場予測モデル

濃度計算を行うにあたり必要となる流れ場の予測に用いる基礎方程式は、運動方程式、温位の保存式、比湿の保存式、連続の式、静水力学方程式であり、その解法は近藤ら<sup>3)</sup>と同様で行った。

## 2{3} 流れ場初期条件

水平風速  $u, v$  は第 2-1 節で示した GPV 内挿値を用い、鉛直風速は  $0.0(\text{m/s})$  を与えた。GPV データには気温や湿度といったデータも含まれているが、後に述べるナッジング法を用いると正しく計算されると思われるものの、線形内挿値を初期値とした場合計算が発散したため本研究では水平風速のみを用い、温位の初期値は海面高さで  $298(\text{K})$ 、温位勾配  $0.005(\text{K/m})$  で設定し、比湿は海拔  $2000\text{m}$  以下では相対湿度  $50\%$ 、 $2000\text{m}$  以上は  $20\%$  で与えた。エクスマ関数は静水力学の式から求め、水平拡散係数は  $10000.0(\text{m}^2/\text{s})$ 、運動量・熱ともに鉛直拡散係数は Mellor & Yamada Level 2.0 Model より決定した。

## 2{4} 流れ場境界条件

境界条件で用いるデータは GPV 上層のデータが 3 時間ごとであるため、各タイムステップで前後 2 つのデータから時間的に線形内挿した。境界条件も初期条件と同様の理由で、上端・左右端境界に水平風速のみ GPV データを用いた。上端での鉛直風速は勾配が 0、温位・比湿については初期値のまま不変とした。左右端の境界では温位・比湿が勾配=0 になるように与えた。

## 2{5} 流れ場計算結果と精度評価

図 4 の領域で行った 1998 年 8 月 4 日の流れ場の計算結果を風速  $u, v$  について国設大阪、南海団地、加古川市役所の観測値と比較を行った。図 5 に各地点における  $u, v$  の比較を示す。図中の cal は計算値、obs は観測値、gpv は GPV 線形内挿値をそれぞれ示す。観測値が急激に変化している時間帯を除けばほとんどの地点で観測値と計算値の変動のパターンが一致している。計算値と GPV 線形内挿値を比較してみると多くの時間帯で計算値の方が GPV 線形内挿値よりも観測値に近づいている。このことから約  $20\text{km}$  間隔で配信される GPV データを単純に線形内挿するのではなく地形などを考慮に入れて基礎方程式を解くことにより求められた計算値の方がより正確に狭い範囲での風向・風速を再現していると言える。

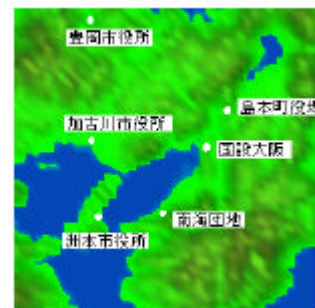


図 4 計算領域と観測所

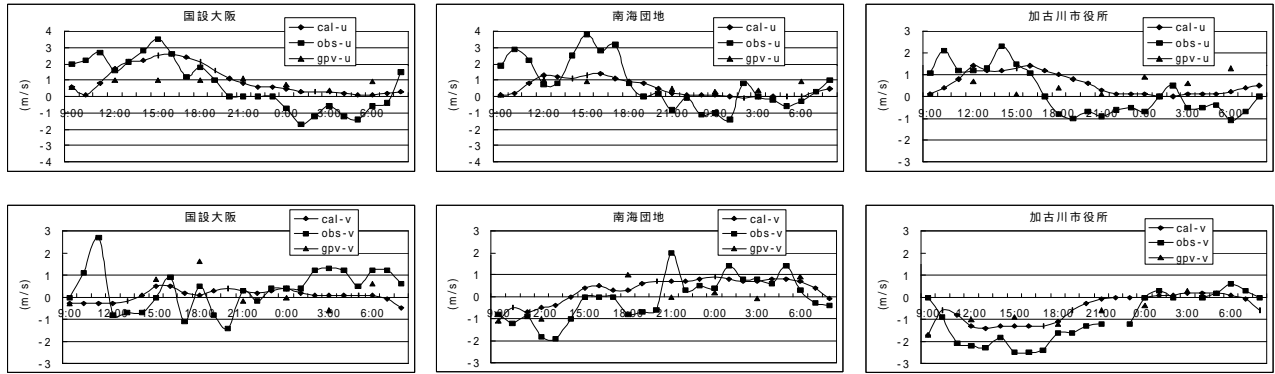


図 5 各地点における u,v の比較

また、モデルの精度評価として 20 日間の計算結果に対して MVD, MAD<sup>4)</sup> と一致性インデックス d<sup>5)</sup> を用いて評価した。計算値と GPV 内挿値の日平均 MVD, MAD, d を表 2 に示す。網掛け部分は計算値と GPV 線形内挿値を比較した際、より観測値に近い方の結果であることを示す。

è MVD, MAD

MVD (Mean Velocity Difference), MAD (Mean Angle Difference) の求め方は次式の通りである。ここで、MAD を求める際には観測値、計算値のいずれかの風速が 1.0[m/s] 以下の場合については除いて計算を行った。

$$MVD = \frac{\sum_{i=1}^n |V_{cal,i} - V_{obs,i}|}{n} \quad (2)$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n \arccos\left(\frac{V_{cal,i} \cdot V_{obs,i}}{|V_{cal,i}| |V_{obs,i}|}\right)}{n} \quad (3)$$

ここで n はデータ数、 $V_{cal}$  は計算値の風ベクトル、 $V_{obs}$  は観測値の風ベクトル、 $(V_{cal}; V_{obs})$  は  $V_{cal}$  と  $V_{obs}$  の内積である。

è 一致性インデックス d

一致性インデックス d の求め方は次式の通りである。

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |V_{cal,i} - V_{obs,i}|^2}{\sum_{i=1}^n (|V_{cal,i}|^2 + |V_{obs,i}|^2)} \quad (4)$$

ただし、 $V_{cal}^0 = V_{cal} - \overline{V_{obs}}$ ;  $V_{obs}^0 = V_{obs} - \overline{V_{obs}}$  で、 $\overline{V_{obs}}$  は観測値の平均の値である。

MVD についてみると計算値が GPV 線形内挿値よりも改善された日は 20 日のうち 11 日、変わらなかった日は 2 日、観測値から離れてしまった日は 7 日となり、わずかではあるが計算値の方が GPV 線形内挿値よりも観測値に近い日の方が多くなった。MAD は計算値が GPV 線形内挿値よりも改善された日は 20 日のうち 17 日、観測値から離れてしまった日はわずか 3 日であり、風向に関してはほとんどの日で計算を行うことにより修正されていることがわかる。一致性インデックス d に関しても計算により改善された日が 20 日中 15 日、変わらなかった日が 2 日と多くの日で改善されたことがわかる。全ての評価指標をみても GPV データを初期値・境界値に用いて流れ場予測モデルで計算を行った結果が GPV データを単純に線形内挿したものよりも改善されたと評価できる。

表 2 計算値と GPV 内挿値の日平均 MVD, MAD, d

日	計算値			GPV線形内挿値		
	MVD(m/s)	MAD(度)	d(-)	MVD(m/s)	MAD(度)	d(-)
1	1.7	26.5	0.57	1.3	35.9	0.62
4	1.1	57.3	0.54	1.4	86.4	0.48
5	0.9	68.3	0.52	1.1	88.8	0.47
6	1.0	61.2	0.50	1.3	72.8	0.46
7	0.9	43.6	0.52	0.9	53.4	0.45
8	1.1	65.1	0.49	1.2	73.4	0.47
9	0.9	61.8	0.53	0.8	43.8	0.49
11	1.1	31.9	0.54	1.3	52.2	0.49
13	1.1	35.6	0.51	1.2	48.2	0.46
14	1.0	38.1	0.53	1.0	69.3	0.46
15	1.0	36.1	0.58	1.4	68.4	0.51
16	1.1	27.5	0.52	1.4	38.6	0.48
17	1.0	41.5	0.53	1.1	53.3	0.45
18	1.2	36.4	0.51	1.5	59.6	0.51
19	1.3	30.2	0.51	1.1	35.2	0.53
20	1.2	43.9	0.52	0.9	62.8	0.47
21	1.3	67.6	0.50	1.1	41.7	0.50
22	1.2	53.3	0.52	1.0	51.4	0.50
23	1.5	36.4	0.56	1.4	46.5	0.55
24	1.5	35.3	0.56	1.6	41.4	0.58

### 3. 排出量の算定

#### 3{1 算定の概要

オキシダント濃度の予測を行ううえで一次汚染物質の排出量の把握は非常に重要である。そこで発生汚染物質として窒素酸化物と炭化水素を対象とし排出量の算定を行った。排出源は窒素酸化物については、工場・事業所、自動車、航空機、船舶の4種類、炭化水素については、貯蔵、出荷、給油、製造、塗装、建築塗装、印刷、金属等表面処理、クリーニング、接着剤その他の溶剤使用過程等、ばい煙発生施設、自動車の12種類の人工発生源と植物からの自然発生源の計13種類である。

#### 3{2 窒素酸化物排出量

工場・事業所は、環境庁による「大気汚染物質排出量総合調査」の結果をもとに求めた。自動車からの排出は、細道路・幹線道路からの排出に分けられ、細道路については大阪、兵庫、京都のデータから各市町村ごとの排出量が人口にほぼ比例していることが確かめられた。その他の県についてはこの関係を用いて人口から市町村ごとの細道路NO<sub>x</sub>排出量を推定した。幹線道路についてはまず窒素酸化物総量規制マニュアル<sup>6)</sup>に従い車種別の排出原単位を作成し(高速道路では80km/h、一般道路では30km/hの一定旅行速度とした。但し、軽自動車は高速道路で60km/h)、各幹線道路の交通量データに排出原単位を乗じることにより算定した。航空機については、大阪国際空港に離発着する航空機数に排出原単位を乗じることによって求めた。船舶からの排出については、航行隻数、航行時間、及び航海長さを算出しそれに排出原単位を乗じて推定した。ここでその算定結果として表3に窒素酸化物の種類別排出量を示す。

#### 3{3 炭化水素排出量

炭化水素の排出量の算定法は、平成7年度石炭等導入地域影響調査報告書<sup>7)</sup>から排出原単位を作成し、その原単位にフレーム値を乗じて算定した。出荷・製造・塗装・印刷・金属等表面処理・クリーニング・接着剤その他の溶剤使用過程等は、フレーム値として主に品目別工業製造品年間出荷額を用いた。給油については、ガソリン・軽油を対象とし、各市町村ごとの燃料小売販売額に排出係数を乗じて求めた。建築塗装は、各市町村建築物着工面積より求めた。ばい煙発生装置は、ボイラーについて代表的な燃料の種類別の窒素酸化物と炭化水素の排出係数比をその種類別使用量から求めた、排出係数比にNO<sub>x</sub>の排出量を乗じて求めた。自動車からの排出は、窒素酸化物と同様に排出係数を求め、それに幹線道路および細道路での走行量に乗じて求めた。植物起源の排出量は、発生源の森林および水田の面積にそれぞれからの排出係数を乗じて排出量を求めた。その算定結果として表4に炭化水素の種類別排出量を示す。また、自然発生源は単位面積当たりの排出量は小さいものの総量としては非常に大きな排出源となっている。

### 4. 大気汚染物質濃度シミュレーション

#### 4{1 計算条件

濃度シミュレーションは1998年8月20日、21日を対象とし流れ場計算と同じ領域で計算を行った。なお濃度の上面境界条件は初期値から一定とし、側面境界条件は濃度勾配=0とした。濃度初期条件は表5に示す条件で初期濃度場を作成し計算を行った。

#### 4{2 客観解析による濃度場作成

各計算メッシュの中心点から10km以内にある観測所の観測データを用いて距離の2乗に比例させて作成した。10km以内に観測所のないメッシュについては求められた濃度の最小値を与えた。

表5 初期濃度場設定のための計算条件

条件名	計算条件
Case 0	1998年8月20日午前9時の常時観測値を客観解析して作成した初期濃度場で計算開始
Case 1	1998年8月20日午前9時の常時観測値を客観解析して作成した初期濃度場で24時間計算を行い計算結果の8月21日午前9時のデータを初期濃度場として計算開始
Case 2	1998年8月20日の常時観測値を用いてナッジング法で24時間計算を行い計算結果の8月21日午前9時のデータを初期濃度場として計算開始

表3 各排出源からのNO<sub>x</sub>排出量(t/年)

	排出量
工場	97502.11
幹線道路	70171.46
細道路	17812.91
航空機	1870.80
船舶	37007.56

表4 各排出源からのHC排出量(t/年)

	排出量
貯蔵	4051.32
出荷	7965.77
給油	36020.77
製造	17412.54
塗装	99263.02
建築塗装	66089.07
印刷	38810.23
表面加工	12994.71
クリーニング	22062.32
溶剤	6108.08
ばい煙	716.27
自然発生源	1089678.32

#### 4{2 ナッジング法

ナッジング法<sup>5)</sup>とはナッジングを利用した4次元データ同化法であり、モデルの予報値と観測値との差をニュートン緩和法で補正する形で次式のように表せる。

$$\frac{\partial \hat{U}}{\partial t} = F(\hat{U}; x; y; z; t) + G_{\hat{U}} \zeta W_t \zeta W_{xyz} \zeta (\hat{U}_{obs} - \hat{U}) \quad (5)$$

ここで、 $\hat{U}$ は予報する物理変数(各汚染物質濃度)、 $F$ は $\hat{U}$ についての通常の方程式、 $G_{\hat{U}}$ は $\hat{U}$ についてのナッジング係数、 $W_t, W_{xyz}$ はそれぞれ時間的、空間的な重み係数、 $\hat{U}_{obs}$ は観測値である。本研究ではナッジング係数は0.01、時間的な重み係数 $W_t$ は時間によって変化せず常に1.0とし、空間的な重み係数 $W_{xyz}$ は最大が1となるように観測所のあるメッシュからの距離に反比例させた。

#### 4{3 濃度計算結果

洲本市役所における各CaseごとのNO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>経時変化と観測値を図6に、Case2の17時のO<sub>3</sub>濃度空間分布を図7に示す。経時変化は、8月20日の計算は助走計算であるため特に8月21日の計算結果に注目して考察を行う。NO, NO<sub>2</sub>では各Caseともに観測値とよい一致を見せている。O<sub>3</sub>についてみるとCase0では昼間の高濃度が再現されず低いままである。Case1, Case2を比較すると、ともに夜間での計算値が観測値をやや上回っているものの15:00から16:00にかけてのピーク濃度に達するまではよい計算結果が得られた。特にCase2では助走計算でナッジング法を用いて観測値に近づけながら計算を行ったため午前9:00の初期値からピーク濃度となる夕方まで観測値と非常によく濃度パターン変化が再現できた。図7では大阪湾を取り囲むようにO<sub>3</sub>高濃度域が見られる。

#### 5. まとめ

GPVデータを初期条件、境界条件に用いることによって流れ場計算を行った結果、観測値と計算値との比較を行うとGPVデータを単純内挿したものよりもGPVデータを初期条件・境界条件にのみ用いて流れ場予測モデルで計算を行った結果の方がより観測値に近い結果となった。一次汚染物質排出量の算定では窒素酸化物と炭化水素を対象とし、人口や交通量、品目別工業製造品年間出荷額等から算定を行った。濃度シミュレーションを行う場合、ナッジング法を用いて24時間助走計算を行い計算対象日の初期濃度場を作成するということが有効な手段であることがわかった。

#### 6. 今後の課題

本研究で使用しなかったGPVの温度や圧力のデータを有効利用し、降雨モデルなどを組み込むことによってさらに対象日特有の流れ場が再現でき、濃度予測の精度向上が期待される。

#### 参考文献

- [1] 環境庁編：環境白書 平成11年度版 総説, 大蔵省印刷局, 406
- [2] 気象庁編(1997)：最新数値予報ガイド-新COSMETSと解析予報システム-, 気象業務支援センター
- [3] Akira Kondo, Katsuhito Yamaguchi and Hee Kwan Ahn : Simulation of Climatic Effects by construction of Reclaimed Island in Pusan, Korea, Atmos. Environ., Vol.30, No.13, 2437-2448 (1996)
- [4] 呉銀珠(1998)：境界適合曲線座標系を用いた都市大気環境予測モデルの開発とその応用に関する研究, 大阪大学大学院環境工学専攻博士論文
- [5] 鶴野伊津志, 大原利正, 若松伸司, 松井一郎(1996)：近畿地域の局地循環シミュレーションと評価, 天気, 43, 303-317
- [6] 環境庁大気保全局大気規制課編(1993)：窒素酸化物総量規制マニュアル [改訂版], 公害対策研究センター, 188-195
- [7] 兵庫県生活文化部環境局(1996)：平成7年度石炭等導入地域影響調査報告書

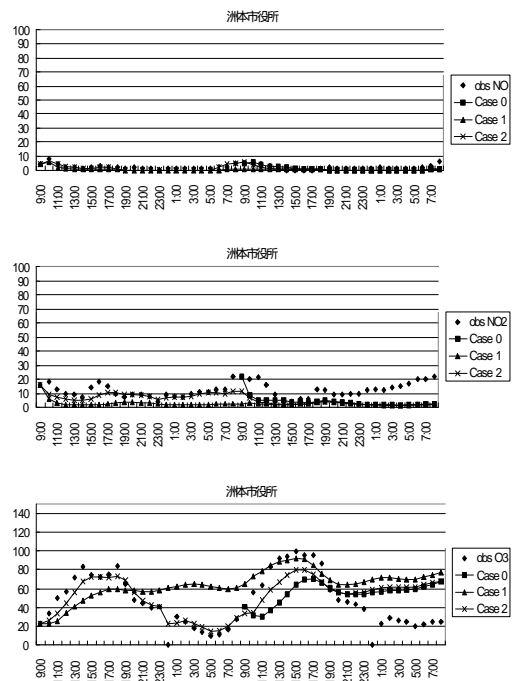


図6 洲本市役所における各汚染物質経時変化

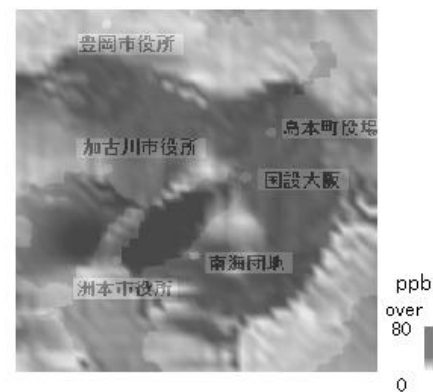


図7 Case 2, 17時のO<sub>3</sub>濃度空間分布