

内陸工業団地規模の工場群からの大気汚染と 汚染防止に対するアセスメント

(2) 汚染対策ならびに他地域からの移流
——能褒野工業団地を例として——

工藤市兵衛・近藤 高司・佐田 栄三*・熊沢 英博**

Development of Environmental Assessment Technique for
Air Pollution from Industries Situated in Inland Area and
Its Control

(2) Counterplan for Air Pollution Control and Advection of
Pollution from Other industrial Areas
——As an Example of NOBONO Industrial Area——

Ichibei KUDO, Takashi KONDO, Eizo SADA* and Hidehiro KUMAZAWA**

内陸工業団地規模の工場群から発生する大気汚染の正確な予測手法の確立と、環境影響評価の手法の確立を目的とした一連の研究の事例研究として能褒野工業団地を解析した。能褒野・鈴鹿両地区を一工業地域としてアセスメントの対象とすべきことを指摘した。

緒 言

内陸工業団地は、工場の再配置ならびに地域開発にと
もない増加しつつあるが、沿岸部工業地帯と異なり、住
宅、農耕地に近いこと、および環境容量が比較的小さい
こともあり、より精度の高い環境調査が必要とされてい
る。また将来汚染予測に対してもより詳細な検討が必要
とされる。著者らは、前報において、三重県、能褒野工
業団地のSO_x汚染の現状と、将来生産能力に対する大気
汚染の予測を、測定結果ならびに大気拡散モデルのシミ
ュレーションをもとに検討し、大気環境の評価を試みた。
その結果、将来、稼働率が最大のとき、弱風で汚染が重
合しやすい風向のとき、きわめて限られた狭い地域でSO₂
濃度が40ppb (24時間値) に近づく可能性がある。しかし
このような気象要素ならびに最大稼働状態が24時間続く
可能性はきわめて少なく、計算では考慮できない風向の
変動および計算に用いたメッシュ幅が250mであること

を考えると、SO₂ 汚染濃度が40ppbに近づく可能性は、
さらに小さくなる。したがって将来、この工業団地自身
からのSO₂汚染により、1時間値の1日平均濃度が40ppb
を越えることはないと言える。しかし、局地的な高濃度
汚染（その濃度は40ppb以下ではあるが）の出現を回避
するために、より合理的なSO₂排出強度の配分、したが
って燃料の配分ならびに排出強度に応じた煙突高さの設
定に関する問題を解明することは有意義と思われる。

さらに、前報¹⁾では、能褒野工業団地から排出されるSO₂
による周辺への汚染の程度を評価する際、四日市、鈴鹿
のような他地域からの移流による汚染の重合を十分に考
慮しなければならないことも指摘した。この点は上述の
問題以上に解決がせまられている問題と思われる。そこ
で本論文では、1) 能褒野工業団地自身に起因する局地的
な高濃度汚染を回避するための合理的な対策、および
2) 他地域、鈴鹿からの移流の影響について、大気拡散
シミュレーションの結果に基づいて考察する。

1. 大気拡散シミュレーション

1.1 拡散計算式

前報では、大気拡散シミュレーションに煙流のパフモデルを用いた。このモデルは計算対象地域空間をメッシュに区切り、地形や地面粗度を考慮してメッシュ内の風の x, y, z 成分 (u, v, w) を求め、煙源からのパフの流線を算出し、流線上の仮想煙源から静穏時のパフモデルに基づいて拡散させる。着目地点の濃度は各々のパフからの寄与濃度を重ね合わせることによって求められる。したがって平坦でない地形での拡散シミュレーションに対して従来の手法ではとり入れられない風向、風速の変化も考慮されているので一歩進んだものである。しかし精度を上げるためにはメッシュ幅を細かくする必要があり、計算時間が著しくかかる。そのため前報では、計算対象地域を5km×5km程度のせまい地域とし、微風で煙源が重合する風向という悪条件下のシミュレーションの結果から環境評価を行った。

しかし、風速が年平均値 (3 m/s) 程度になると最高着地濃度を示す領域は計算対象地域を越えてしまうため計算対象地域を拡大する必要のあること、将来の環境評価をきめ細かく行うためにはさらに広い気象条件を考慮すべきこと、また研究地域の長期平均濃度を算出する必要のあることから、本研究では大気拡散計算式にブルームモデル²⁾を用いることにした。このモデルは煙流の濃度分布に正規分布を仮定したもので、現在、有風時の拡散シミュレーションに広く利用されている。

ブルームモデルによると、地表面 ($z=0$) の濃度は次式で与えられる。

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H_0}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (1)$$

ここで、

x : 風向に沿った風下距離 (m)

y : x 軸に直角な水平距離 (m)

u : 風速 (m)

Q : 汚染質排出速度 (Nm³/s)

H_0 : 有効煙突高 (m)

σ_y : y 軸方向の拡散幅 (m)

σ_z : z 軸方向の拡散幅 (m)

1.2 拡散パラメータ

有風時のブルームモデルの拡散幅 σ_y, σ_z には、Suttonの式を用いた。これは拡散幅が風下距離 x 関数としてつぎの式で与えられる。

$$\sigma_y = \frac{C_y}{\sqrt{\frac{1}{2}}} x^{1-\frac{n}{2}} \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{C_z}{\sqrt{\frac{1}{2}}} x^{1-\frac{n}{2}} \quad (3)$$

ここで C_y, C_z, n は表1となる。

1.3 有効煙突高

煙の上昇高さ ΔH の推定には、前報と同様、中小煙源を対象とした実験式であるCONCAWE (Conservation of Clean Air and Water, Western Europe)の式を採用した。

$$\Delta H = 0.175 Q_H^{1/2} / U^{3/4} \quad (4)$$

$$H_e = H_0 + \Delta H \quad (5)$$

ここで、 H_0 : 煙突の実高 (m), ΔH : 煙の上昇高さ (m), Q_H : 煙の排出熱量, $= \rho_a Q_{ocp} \Delta T$ (cal/s) ρ_a : 15°Cにおける排ガス密度 ($= 1,225 \times 10^3$ g/m³) Q_o : 総排ガス速度 (Nm³/s), cp : 排ガスの定圧比熱 (≈ 0.24 cal/g°C), ΔT : 排ガス温度と気温の温度差 (°C)

表1 Suttonの拡散パラメータ

地上からの汚染源の高さ [m]	強い減 ($n=0.20$)		弱い減または中立 ($n=0.25$)		中位の逆転 ($n=0.33$)		強い逆転 ($n=0.50$)	
	C_y	C_z	C_y	C_z	C_y	C_z	C_y	C_z
0	0.37	0.21	0.21	0.12	0.21	0.074	0.030	0.047
10	0.37	0.21	0.21	0.12	0.12	0.074	0.030	0.047
25		0.21		0.12		0.074		0.074
30		0.20		0.11		0.070		0.044
45		0.18		0.10		0.062		0.040
60		0.17		0.095		0.057		0.037
75		0.16		0.086		0.053		0.034
90		0.14		0.077		0.045		0.030
105		0.12		0.060		0.037		0.024

(Air pollution Handbook, 1956 より)

2. 計算結果および考察

2. 1 能褒野工業団地

まず、能褒野工業団地から生じる将来の汚染予測を行った。その際、汚染質（SO₂）の排出強度には、能褒野工業団地に全企業が配置され、すべての企業が最大稼動しているときの値を選んだ。気象条件のうち風向については、(i) 年間最多風向（W）および(ii) つぎに多い風向（WNW）、(iii) 各煙源からの汚染の重合が最も大きい風向（NNW）、風速については微風と年間平均風速（3.5m/s）、大気安定度としては2（弱いてい減または中立）を選んだ。

煙源位置を図1に、煙源資料（煙突高さ、SO₂ 排出量、総排出量、排出ガス温）および気象要素を表2

に示す。Case1, 2, 3, 4 に対する拡散シミュレーションの結果をSO₂濃度分布として図2, 3, 4, 5に与えた。計算対象域は前報の4倍の10km×10km、メッシュ幅はΔX=169.5m、ΔY=102.0mである。（前報では、5km×5km、250mメッシュ）

Case1, 2, 4では風速が1.6%と低く、大気安定度を不安定としたため、煙源から近い風下地点に高濃度の出現が予想される。図2, 3では最高濃度は10~20ppb、図5では20~30ppbである。

さらにCase3のように風速が3.5%（年平均風速）とやや強くなると、汚染濃度10~20ppbとなる地域ははるかにせまくなる。いずれもSO₂の環境基準¹1時間値の1日平均値が40ppb以下であり、かつ1時間値が100ppb以



図1 能褒野工業団地計画煙源位置図

(10km x 10km)

WNW 1.6m/s ST:2

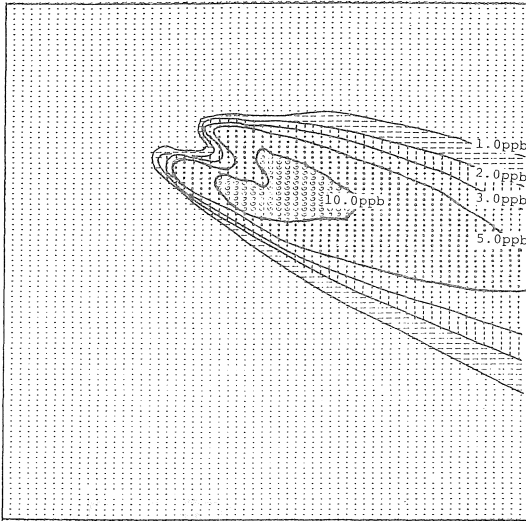


図2 拡散計算による二酸化硫黄濃度分布

WNW 3.5m/s ST:2

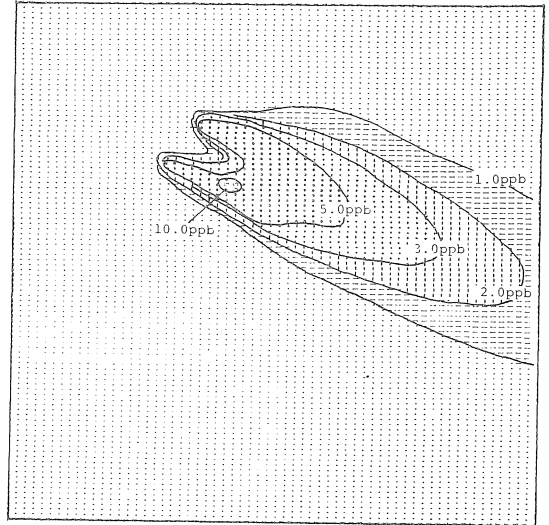


図4 拡散計算による二酸化硫黄濃度分布

W 1.6m/s ST:2

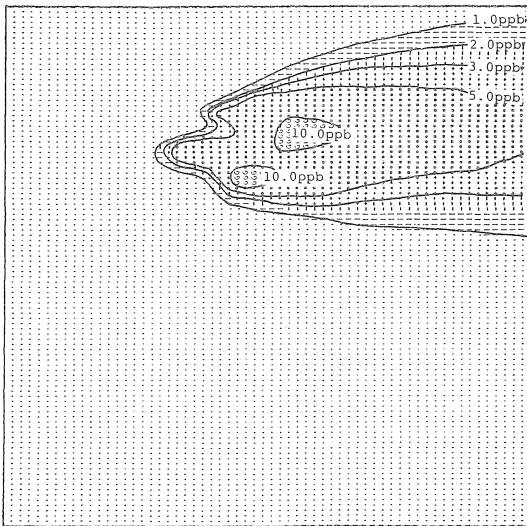


図3 拡散計算による二酸化硫黄濃度分布

NNW 1.6m/s ST:2

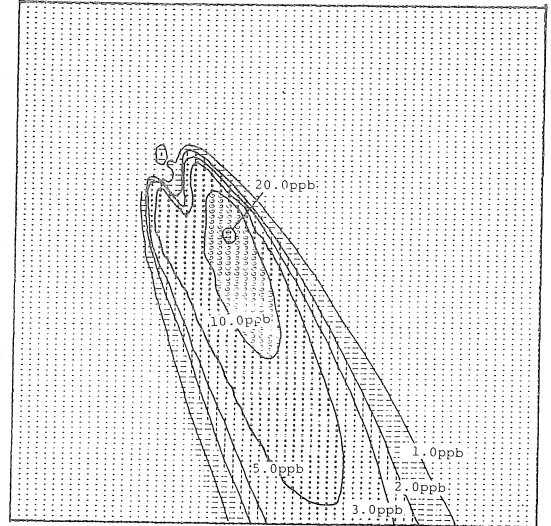


図5 拡散計算による二酸化硫黄濃度分布

下であること々を十分に満足している。しかし、計算入力煙源は工業団地および付近の工場に限られているので他地域の大煙源からの汚染の重合については考慮されていない。南寄りの風るとき、隣接した鈴鹿の工場群からの汚染の影響を著しく受けることは容易に想像される。この移流を考えたとき、能褒野工業団地自身による汚染度は出来るだけ低い方がよいので、以下において前報に示した高濃度域の出現に対する煙源別寄与の計算結果に基づいて、高濃度出現を回避する対策を種々検討することにする。

煙源 110はSO₂排出強度が1306cc/sと大きい割に、煙突がきわめて低い(12m)ため、高濃度域の出現に大きく寄与していた。そこでまず、このNo. 110の煙突高さを12mから40mに変更し、他の煙源には変更を加えなかったときのSO₂濃度分布を求めた。結果を図6に示す、図5と比べわずかに存在していた20~30ppb域は消えているが全体的にその汚染パターンはほとんど改善されていない。これは、No. 110の煙突の実高さは確かに12mから40m高くなっているが、その気象条件、排出条件のときの有効高さは61.6mから89.6mに高められたにすぎない

表 2 能褒野工業団地計画煙源資料

煙源番号	位 置 X (m)	Y (m)	煙突高さ (m)	排出ガス量 (Nm ³ /s)	SO ₂ 排出量 (cc/g)	排ガス温度 (°C)
101	3040	7300	20	1.6085	23.0	240
102	2760	7400	18	1.5300	13.4	220
103	3200	7300	14	0.9800	4.9	264
104	3200	7300	6	3.6800	36.8	135
105	2850	7450	25	3.6800	36.8	135
106	2650	7350	7	0.0300	13.7	120
107	2940	4500	50	42.5000	2811.4	90
108	3640	4750	15	0.4330	372.8	194
109	3500	6500	15	0.7980	357.7	240
110	2940	8000	12	2.9140	1306.7	190
111	3550	7420	20	1.3840	532.0	270
112	4640	6640	15	0.3700	1.3	190
113	3040	4750	11	0.4600	4.6	120
114	2300	7200	20	1.9600	980.0	120

からである。つぎにNo. 110のSO₂排出量を $\frac{1}{2}$ にしてみた。そのときの汚染パターンを図7に示す。これは高煙突化より明らかに有効な改善方法であることがわかる。SO₂排出量が $\frac{1}{2}$ に低下することは、(i) 操業率を $\frac{1}{2}$ にする。(ii) 操業率は変えないで使用燃料中の硫黄含有量を $\frac{1}{2}$ にすることと解することができる、いま後者とすると、ランニングコストの上昇を招くが、中小規模の煙源にとっては容易に実行しうる環境改善対策であろう。

燃料の低イオウ化はSO₂汚染の低減に有効な方法であることが分かったので、さらにつぎのような計算を行った。まずSO₂排出量が上位3位までの煙源、107、110、114のSO₂排出量を $\frac{1}{2}$ にしたときの汚染パターンを計算し

NNW 1.6m/s ST:2

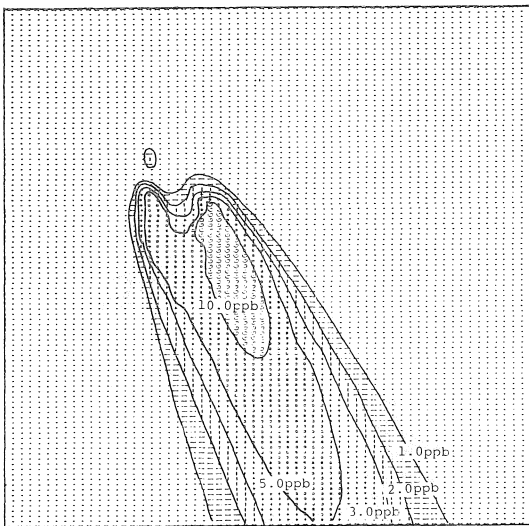


図 6 拡散計算による二酸化硫黄濃度分布(対策-1)

NNW 1.6m/s ST:2

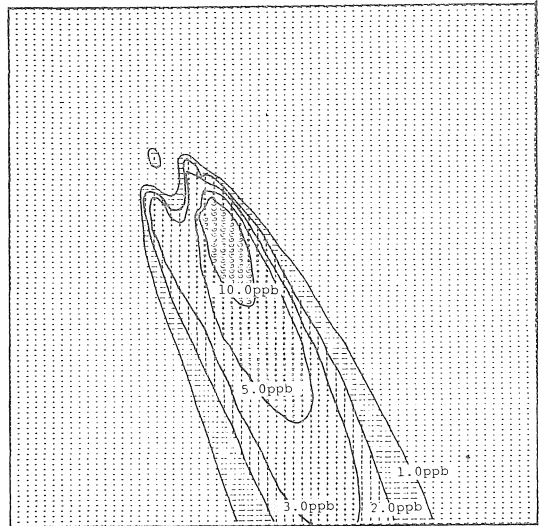


図 8 拡散計算による二酸化硫黄濃度分布(対策-3)

NNW 1.6m/s ST:2

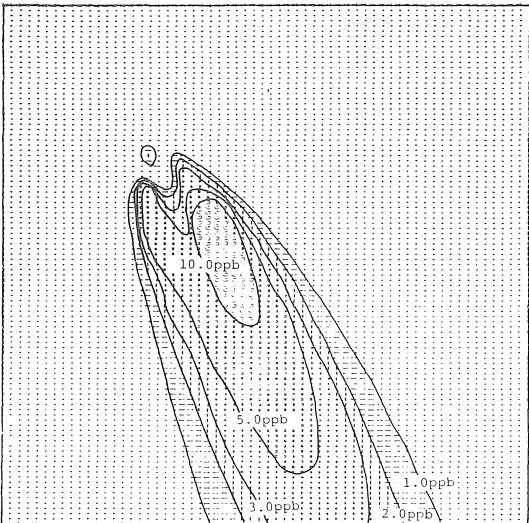


図 7 拡散計算による二酸化硫黄濃度分布(対策-2)

NNW 1.6m/s ST:2

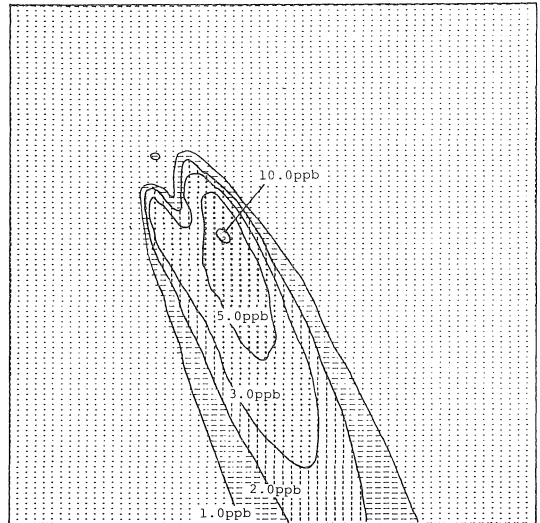


図 9 拡散計算による二酸化硫黄濃度分布(対策-4)

た。図8はその結果である。また図9はNo. 107～111とNo. 114のSO₂排出量を $\frac{1}{2}$ に低下したときの汚染パターンである。環境は著るしく改善され、汚染濃度はほぼ5～10ppb以下となる。

上述の計算から能褒野工業団地およびその周辺は、他地域からの汚染の移流がないならば、SO₂汚染に対してかなりの環境容量を有するものと判断される。そこで、当地域の大気環境は、団地内の企業のどれ程の増設に対応できるのか、の指針を得るためにSO₂排出量を表2に与えた値の3倍としたときの汚染パターンを求めた(図10)。きわめて限られた地域で20～30ppbとなっているが、環境基準と比べて問題になるようなものではない。

2. 2 鈴鹿の工場群からの影響

前報¹⁾において、能褒野工業団地およびその周辺地域の汚染度の将来予測をする際、他地域からの汚染の寄与を

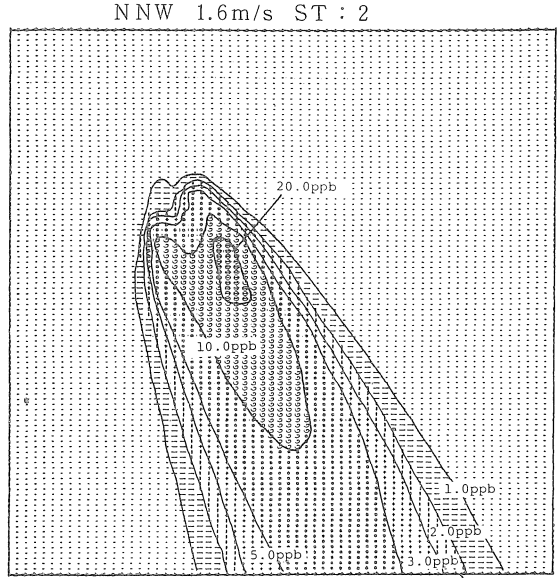


図10 拡散計算による二酸化硫黄濃度分布(3倍増設)

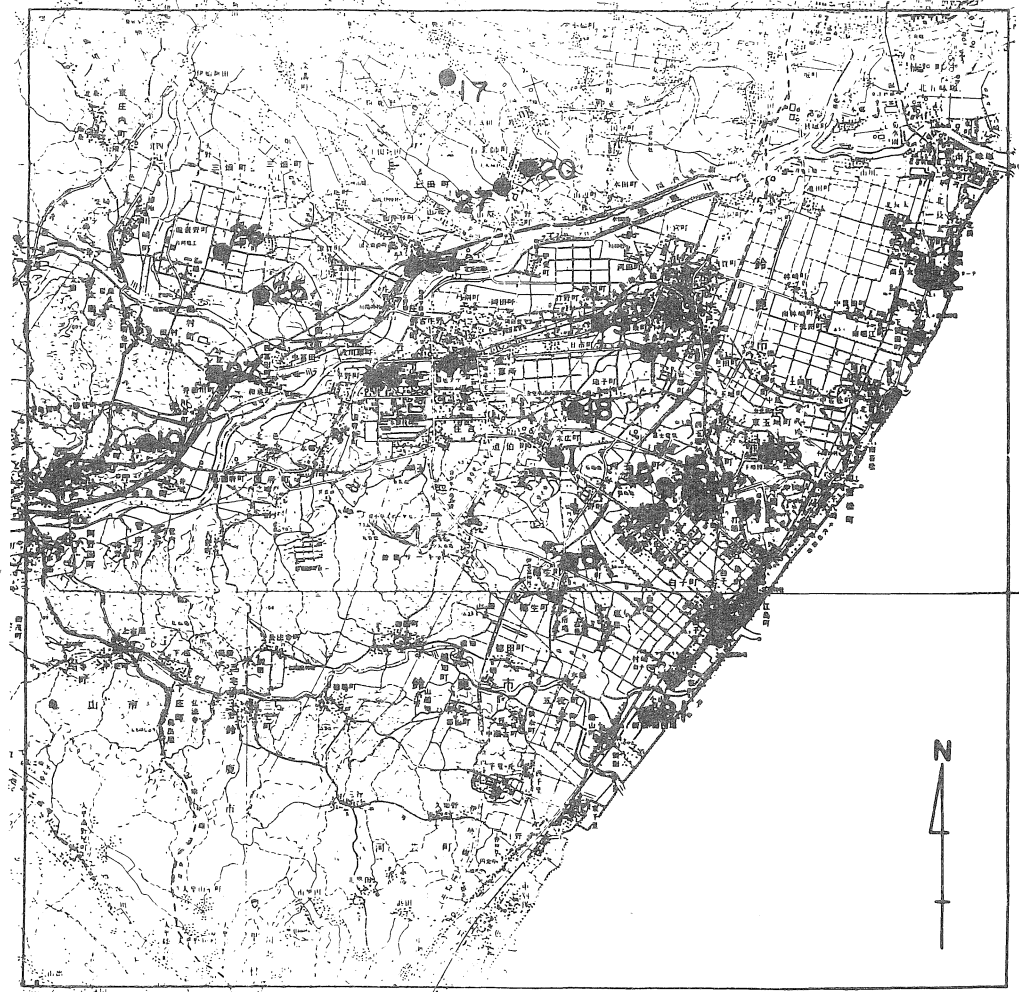


図11 鈴鹿地域主要煙源位置図

十分に考慮しなければならないことを指摘した。実際、東寄りの風のとき工業団地およびその周辺のSO₂濃度が3~4 ppbかさ上げされた実測結果にも鈴鹿からの移流の影響が現われていた。本節では、鈴鹿市内の工場群の煙源資料に基づいて大気拡散シミュレーションを行い、鈴鹿市ならびに能褒野町の汚染度を算出した。

鈴鹿市内とその周辺の工場群の煙源位置を図11に、煙源資料を表3に示す。計算対象地域は17.5km×17.5kmである。図12は風向WNW、風速1 m/s、安定度中立の場合のSO₂濃度分布である。入力条件は、主要企業が西北西から東南東を結んだ周辺に位置しているため、汚染が最も重合しやすい風向でしかも微風であるという条件であり、悪条件とみなすことができる。図には150ppbを越える高濃度域が出現している。この場合、高濃度域は海上に位置しているが、1時間値100ppbを満足す

表3 鈴鹿地域煙源資料

煙源番号	位 置 X (m) Y (m)	煙突高さ (m)	排出ガス量 (Nm ³ /s)	SO ₂ 排出量 (cc/s)	排ガス温度 (°C)
10101	11370, 8950	14	2,1650	180.6	150
10102	11370, 8950	14	0.7283	61.1	150
10103	11370, 8950	14	1,0925	91.7	150
10104	11370, 8950	15	0.1706	808.3	190
10105	11370, 8950	14	0.5827	50.0	150
10201	7510, 11030	45	4,1944	6469.4	263
10202	7510, 11030	43	4,5278	4944.4	250
10301	11555, 8650	25	2,5972	2533.3	270
10302	11555, 8650	25	7,3333	2411.1	320
10401	11160, 11320	18	0.1730	277.8	150
10601	6230, 10880	24	0.8878	722.2	235
10602	6230, 10880	24	0.7853	638.9	270
10603	6230, 10880	24	0.9222	750.0	245
10604	6230, 10880	30	2,1169	1719.4	190
10605	6230, 10880	30	2,1169	1719.4	190
10801	9686, 7525	10	0.2614	269.4	270
10802	9686, 7525	10	0.2614	269.4	270
10901	10270, 11770	15	0.0544	394.4	240
11001	2150, 9670	9	0.3000	272.2	300
11002	2150, 9670	7	0.2958	205.6	200
11101	12825, 8530	50	0.9444	2794.4	250
11102	12825, 8530	50	0.9444	2794.4	250
11103	12825, 8530	15	0.2472	261.1	254
11104	12825, 8530	15	0.2472	261.1	254
11105	12825, 8530	15	0.2472	38.9	254
11106	12825, 8530	15	0.2472	261.1	254
11107	12825, 8530	15	0.2472	261.1	254
11108	12825, 8530	15	0.2472	261.1	254
11109	12825, 8530	15	0.2472	261.1	254
11110	12825, 8530	15	0.2472	261.1	254
11111	12825, 8530	15	0.2472	261.1	254
11112	12825, 8530	15	0.2472	261.1	254
11113	12825, 8530	15	0.2472	261.1	254
11114	12825, 8530	15	0.2472	261.1	254
11115	12825, 8530	19	0.1222	130.6	254
11201	16225, 12666	25	3,6667	3038.9	220
11202	16225, 12666	25	3,6667	3038.9	220

11203	16225, 12666	16	0.9583	794.4	450
11204	16225, 12666	12	0.8665	591.7	350
11205	16225, 12666	14	0.7000	583.3	420
11206	16225, 12666	12	1.4167	422.2	250
11207	16225, 12666	22	3.8633	1525.0	140
11208	16225, 12666	19	6.3333	1152.8	120
11301	13100, 9536	45	5.9500	7727.8	240
11302	13100, 9536	45	2.8761	3736.1	270
11303	13100, 9536	45	2.0942	2727.8	250
11304	13100, 9536	30	1.1894	172.2	250
11401	12225, 8395	45	1.6667	1643.9	300
11402	12225, 8395	45	2.5166	2305.6	270
11403	12225, 8395	45	1.6366	2705.6	280
11404	12225, 8395	26	2.8833	2633.3	300
11701	7400, 16240	15	1.1901	1519.4	210
11702	7400, 16240	15	1.8172	1563.9	280
11501	12110, 8570	31	0.4039	1177.8	130
11502	12110, 8570	31	0.4039	1177.8	130
11503	12110, 8570	31	1.6050	1683.3	280
11601	11536, 8660	45	11.6667	4294.4	395
11602	11536, 8660	45	1.8333	2233.3	345
11603	11536, 8660	14	1.2481	1150.0	250
11801	9835, 10030	45	3.4083	1836.1	210
11802	9835, 10030	45	1.0972	1444.4	275
11803	9835, 10030	45	1.8278	2408.3	230
11804	9835, 10030	12	3.3333	966.7	300
12001	9310, 13930	8	2.2222	663.9	220
12101	11080, 4810	10	0.3642	472.2	250
12102	11080, 4810	9	0.2650	344.4	290
12103	11080, 4810	10	0.2786	297.2	250
12104	11080, 4810	15	0.3607	611.1	370
12301	6905, 12836	15	0.7507	913.9	200
12302	6905, 12836	25	2.6131	2711.1	250
12303	6905, 12836	17	0.5208	497.2	170
12304	6905, 12836	17	0.5208	497.2	170
12305	6905, 12836	25	2.6131	3194.4	250
12501	4120, 12766	15	0.2288	55.6	150
12601	3420, 13125	20	1.3372	625.0	270
12701	3500, 11000	10	0.0569	172.2	300
12702	3500, 11000	10	0.0569	172.2	300
12801	8510, 14660	15	5.0278	1041.7	170

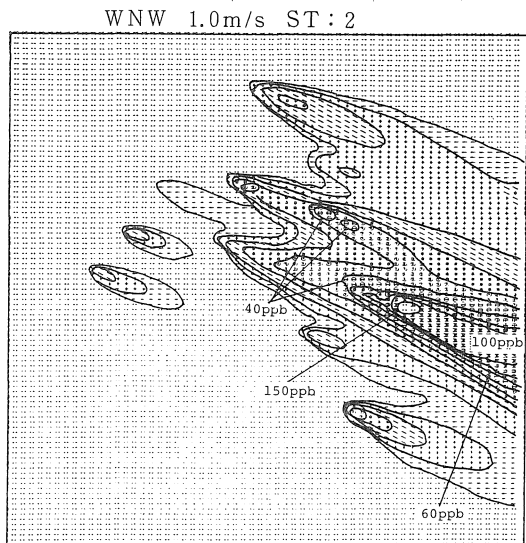


図12 拡算計算による二酸化硫黄濃度分布

WNW 2.0m/s ST:2

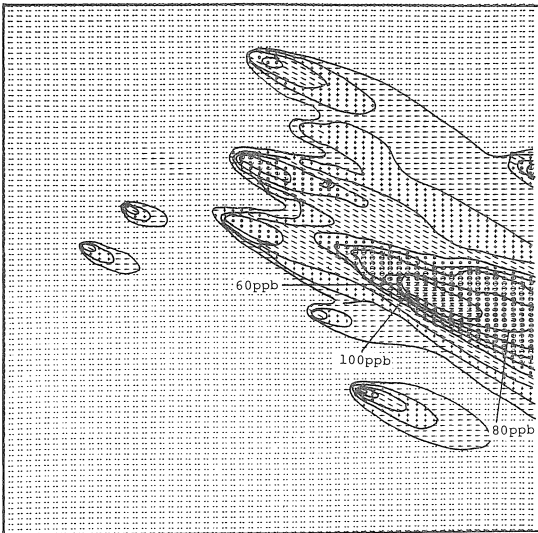


図13 拡散計算による二酸化硫黄濃度分布

ESE 1.0m/s ST:2

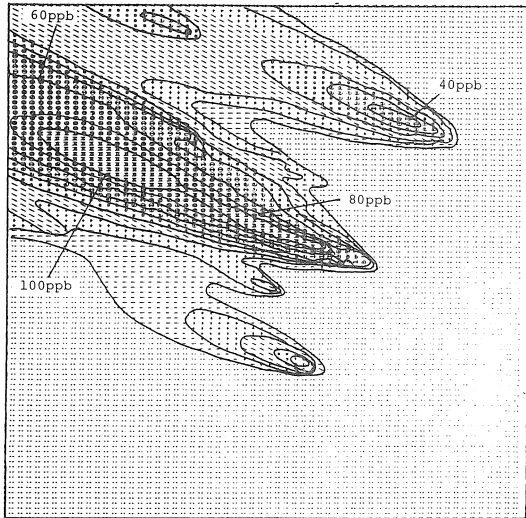


図14 拡散計算による二酸化硫黄濃度分布

るように、煙源に対する総量規制が必要と思われる。しかし、最悪風向であっても風速が2%と増加すると、最高濃度は80～100ppbまで下る(図13)。いずれにしても能褒野工業団地に比べ、はるかに汚染度は高い。したがって、風向がESEになった場合、鈴鹿の工場群は能褒野町に著じるしい汚染をもたらすことは容易に想像される。図14は風向ESE、風速1%、安定度中立のときの汚染パターンである。海岸の工場群風下のほぼ東西10km、南北0.6kmの範囲に100～150ppbが現われている。能褒野工業団地へは約60～100ppbの汚染を及ぼしている。したがって、能褒野工業団地およびその周辺の環境評価

を行う際、鈴鹿の工場群からの寄与を無視することはできない。計算結果はむしろこれらの工場群からの汚染の方が支配的であることを示している。この事例では、能褒野・鈴鹿両地域を一工業地域としてアセスメントの対象とすべきことを示唆している。

つぎに、能褒野工業団地にとって鈴鹿の工場群は長期的平均的にみてどれ程の汚染度を与えるよのであるかを算出してみた。この値は鈴鹿からの移流分と称せられる値と考えられるからである。年平均濃度はつぎのようにして求めた。風速、大気安定度については、その最頻値(

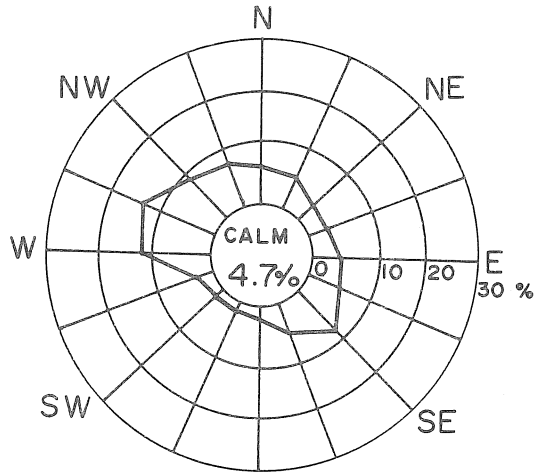


図15 鈴鹿地域年間風配図

LEVEL 1: 0--0.5 ppb	5: 5.0-10.0 ppb
2: 0.5-1.0	6: 10.-20.
3: 1.0-2.5	7: 20.-30.
4: 2.5-5.0	

(17.5km x 17.5km)

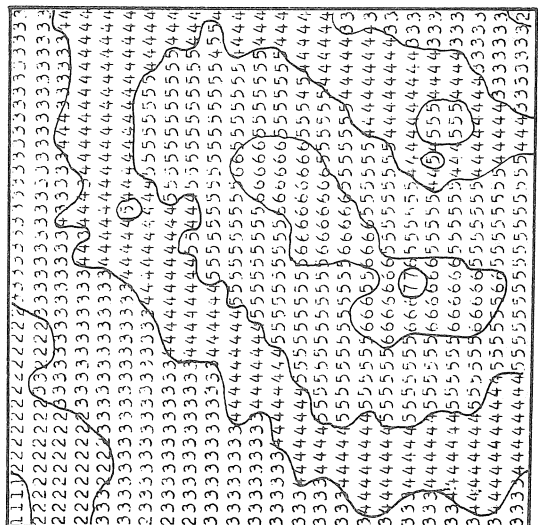


図16 鈴鹿地域年間平均汚染濃度図

3%, 中立) で代表し, 風向については, 鈴鹿保健所における昭和50年度の風配図(図15)から得た16方位の出現頻度率をもとにして, 拡散シミュレーションの結果を加重平均して年平均濃度とした。図16は結果を濃度分布図の形で示したものである。能褒野町の平均濃度は2.5~5 ppbと算出されている。また, 鈴鹿市街地は10~20 ppbとなっており, 鈴鹿保健所における年平均濃度の実測値(昭和48年度:19ppb, 49年度:20ppb, 50年度:16ppb)とよく一致している。

引用文献

- 1) 工藤市兵衛ら:愛知工業大学研究報告, No.12, p.77 (1977)
- 2) 環境庁大気保全局大気規制課: `総量規制マニュアル、公害研究対策センター (1975)

謝辞

本論文における大気汚染シミュレーションの数値計算は名古屋大学・大型計算機センター(FACOM 230-75(M7))によりました。ここに深く感謝の意を表します。