報 文

平均流線を用いた長期的大気汚染の解析

——千葉市南部地区のSO₂汚染——近藤 充輔*・門脇 徹*
莊司 栄徳*

Analysis of Air Pollution Using the Flow Pattern Based on Averaged Wind Vectors

— Application of the Technique to Ambient SO₂ Concentrations and Winds in Chiba-Seaside Area —

Abstract

A technique for analyzing air pollution by using the flow patterns based on averaged wind vectors was developed. To make the flow patterns, the determined data at the municipal monitoring stations were classified by two methods, one is based on relationship between ambient SO₂ concentration and wind direction, and the other on the wind direction crossing table.

The technique was applied to analyze the characteristics of a high SO₂ concentration in the air over the southern district of Chiba City in the Chiba-Seaside Area. The results showed that SO₂ concentration over the district almost always increases when the wind blows from SSW or WSW direction. This tendency was observed even under the windy weather when the atmospheric stability was nearly neutral, and no unusual temporal or seasonal deviations was found in this tendency.

The above results suggest that the high SO₂ concentrations were caused by the complex emission sources in the Keiyo Industrial Zone.

摘 要

大気汚染測定局で測定されるSO₂、風向・風速をもとに、長期的な大気汚染の特性、汚染原因の解明を目的として、平均流線を用いる解析方法を提案する。平均流線は類似の風と考えられるグループに分類されたデータについて、各測定局の風向・風速の平均値から推定される。データの分類は風向と濃度による方法と風向クロス表による方法の二つを用いた。

この解析方法を千葉県臨海地域に適用して千葉市南部地区にみられた比較的高いSO₂汚染の特性を解明し、汚染原因の推定を試みた。その結果、千葉市南部地区で汚染が高まるのは平均流線が南西系となる場合が大部分で、大気安定度が中立となる強風時のデータに限定してもこの傾向は不変であり、汚染が出現する時刻、季節に特異な片寄りはみられない。SO₂発生源の位置、排出量を考慮すると、結局この汚染は京葉工業地帯の重合汚染と推定することが最も合理的である。

*川崎製鉄(株)千葉製鉄所 環境安全部

Michisuke Kondō, Tōru Kadowaki, Yoshinori Shoji
Environmental & Safety Control Dept.
Kawasaki Steel Corp. Chiba Works.

1. はじめに

一般環境における大気汚染測定局は逐年拡充、整備され、現在では多数の測定局で風や環境濃度に関する膨大なデータが時々刻々収集されている。測定データは一年単位で集計され、環境基準の適合状況が把握されている。他方、風向・風速別、時刻別、季節別の平均濃度、累積度数分布等の方法で整理され¹⁾²⁾、拡散シミュレーション、環境アセスメント等の基礎資料に用いられている。

これらの整理方法のうち風向・風速別の平均濃度は気象条件と汚染現象との関係がわかり、汚染源の推定にも役立つとされている¹⁾。しかし、周囲の建物等の影響を受け易い測定局では測定風向と地域全体の風の流れとが大きく異なることが考えられ、発生源が複数存在する地域では、発生源の立地状況、測定局との位置関係によっては汚染源の推定を誤る恐れが大である。

我々は流線解析の手法を適用し、長期間の環境濃度データの解析から汚染源の推定を行う方法を試み、千葉市特に千葉南部地区で昭和40年代半ばに観測された相対的に高いSO₂汚染の原因について考察を行った。

千葉市およびその南西方向の海岸線には、埋め立て地を利用して発電所、製鉄所、石油精製所、石油化学工場が立地し、日本有数の重化学コンビナートを形成している。この京葉工業地帯は昭和40年以降操業が本格化した。通産省、千葉県等によって大気汚染の未然防止を目的とした産業公害総合事前調査が昭和41³⁾44⁴⁾、48⁵⁾年と実施され、大気汚染予測調査結果に基づく企業への行政指導によって、千葉市の大気汚染は他の大都市、重化学コンビナート地帯より低いレベルに維持されてきた。そして現在ではSO₂の環境基準がほぼ達成されるに至っている。

我々は千葉県臨海地域の約70局（図-1参照）の測定データ（SO₂、風向、風速の各1時間値）を用いて解析を行った。

本報は汚染レベルが高く、測定局が充実した昭和47年度の解析結果を詳述し、他の年度については経年的推移を示し、千葉県臨海工業地域の汚染の特性を考察したものである。

2. 千葉市のSO₂濃度の経年変化

千葉市の溶液導電率法によるSO₂の測定は昭和39年に開始され、その後測定局の新設や設置場所の変更等が行なわれてきたが、昭和47年には一挙に6局増設さ

図-1 京葉工業地帯と大気汚染測定局（昭和47年度現在）位置図

れ、密度の高い測定網が整備された。以下千葉市SO₂の経年的推移を年平均値、日平均値、1時間値の各指標について、昭和53年度に設置されている測定局を基に示す。

2.1 年平均値^{6) 7)}

年平均値の経年変化を表1に示す。最高値は衛生研究所（42年度）の0.039 ppmで、43年度に0.032 ppmとなり、以後48年度の0.027 ppmまでほぼ同レベルで、49年度に0.014 ppmと低減している。その他の測定局でも47年度までは多少のばらつきはあるが、同レベルで推移し48、49年度に低下する傾向がみられる。

2.2 日平均値^{7) 8)}

日平均値の2%除外値を表2に示す。これは現在の環境基準の指標であるので旧環境基準が適用された45年以前のデータは含まれていない。最高値は福正寺（47年度）の0.150 ppm、次は同年度の寒川小の0.123 ppmである。この指標も逐年低下し、52年度には1局を除き環境基準（長期的評価）が達成されている。

2.3 1時間値^{7) 9)}

1時間値が0.1 ppmを超える時間数を表3に示す。0.1 ppmを超える時間数も48、49年度以降の改善が顕著だが、47年以前の経年変化は測定局でかなりばらつき、発生源から測定局の方向へ吹く風の頻度、大気安定度等の気象条件の違いが影響していると考えられる。

表1 SO₂年平均値の経年変化

番号	測定局	42年度	43年度	44年度	45年度	46年度	47年度	48年度	49年度	50年度	51年度	52年度	53年度
①	千葉市役所				(0.022)	0.018	0.013	0.017	0.026	0.025	0.023	0.021	0.022
②	千草台小学校		(0.021)	0.034	0.022	0.021	0.02	0.015	0.013	0.009	0.013	0.011	0.010
③	衛生研究所		0.032	0.030	0.027	0.023	0.03	0.027	0.014	0.014	0.017	0.014	0.015
④	末広中学校	0.039			(0.029)	0.022	0.02	0.020	0.012	0.013	0.019	0.015	0.013
⑤	寒川小学校					(0.024)	0.03	0.020	0.013	0.013	0.017	0.012	0.015
⑥	福正寺					(0.032)	0.03	0.024	0.018	0.015	0.016	0.012	0.009
⑦	蘇我中学校				(0.015)	0.024	0.01	0.011	0.010	0.008	0.011	0.007	0.009
⑧	蘇我保育所							0.020	0.016	0.010	0.012	0.012	0.011
⑨	松ヶ丘中学校	☆0.028	☆0.018	☆0.014	☆0.023	(0.018)	0.011	0.016	0.012	0.016	0.013	0.015	0.015
⑩	明德学園	(0.029)	0.016	0.018	0.013	0.015	0.01	0.014	0.016	0.009	0.012	0.007	0.008
⑪	臨海ドライブイン		(0.025)	0.025	0.018	0.021	0.02	0.016	0.017	0.014	0.014	0.015	0.011
⑫	ろう学校					(0.015)	0.01	0.010	0.011	0.009	0.010	0.011	0.011
⑬	大宮小学校		(0.018)	0.013	0.013	0.025	0.02	0.012	0.009	0.014	0.013	0.015	0.012
⑭	千城北小学校					(0.012)	0.01	0.010	0.012	0.008	0.012	0.012	0.009
⑮	桜木小学校		*0.026	*0.027	*0.023	(0.019)	0.03	0.012	0.010	0.008	0.013	0.008	0.011
⑯	山王小学校					(0.015)	0.02	0.015	0.013	0.011	0.017	0.008	0.009
⑰	花見川第1小学校				◎	(0.018)	0.02	0.015	0.015	0.013	0.016	0.009	0.011
⑱	宮野木	◎	◎(0.021)	◎0.017	◎0.022	◎0.020	◎0.020	◎0.021	0.022	0.013	0.019	0.016	0.015
⑲	検見川小学校			(0.019)	0.022	0.022	0.02	0.013	0.010	0.016	0.014	0.010	0.013
⑳	都公園										0.012	0.009	0.008
㉑	土気											0.007	0.007
㉒	霞川自排局									0.018	0.018	0.017	0.022

☆ 大森出張所， * 工業試験場， ◎ 市立高校

()は年度の途中から測定が開始されたもの。

表2 SO₂日平均値2%除外値の経年変化

番号	測定局	46年度		47年度		48年度		49年度		50年度		51年度		52年度		53年度	
①	千葉市役所	0.050	×	0.031	○	0.038	×	0.045	×	0.039	○	0.038	○	0.036	○	0.038	×
②	千草台小学校	0.066	×	0.043	×	0.035	○	0.041	×	0.023	○	0.033	○	0.025	○	0.028	○
③	衛生研究所	0.058	×	0.093	×	0.104	×	0.036	○	0.036	×	0.037	×	0.034	○	0.035	×
④	末広中学校	0.113	×	0.078	×	0.067	×	0.040	○	0.036	×	0.053	×	0.037	○	0.033	×
⑤	寒川小学校			0.123	×	0.081	×	0.042	×	0.040	○	0.041	○	0.031	○	0.037	○
⑥	福正寺			0.150	×	0.085	×	0.075	×	0.050	×	0.045	×	0.035	○	0.025	○
⑦	蘇我中学校	0.080	×	0.041	○	0.029	×	0.025	○	0.027	○	0.028	○	0.019	○	0.029	○
⑧	蘇我保育所					0.057	×	0.048	×	0.033	○	0.030	×	0.027	○	0.025	○
⑨	松ヶ丘中学校	(0.050)	×	0.028	×	0.036	○	0.025	○	0.031	○	0.023	○	0.028	○	0.029	○
⑩	明德学園	0.053	×	0.036	○	0.040	×	0.052	×	0.029	○	0.025	○	0.019	○	0.024	○
⑪	臨海ドライブイン	0.054	×	0.048	×	0.047	×	0.046	×	0.036	○	0.030	○	0.039	×	0.023	○
⑫	ろり学校			0.041	×	0.029	○	0.026	○	0.020	○	0.017	○	0.025	○	0.024	○
⑬	大宮小学校	0.102	×	0.056	×	0.039	×	0.030	○	0.030	○	0.029	○	0.033	○	0.030	○
⑭	千城北小学校			0.040	×	0.031	○	0.034	○	0.030	○	0.027	○	0.030	○	0.024	○
⑮	桜木小学校	(0.062)	×	0.090	×	0.039	○	0.028	○	0.027	○	0.033	○	0.025	○	0.027	○
⑯	山王小学校			0.066	×	0.045	×	0.037	○	0.034	○	-		0.020	○	0.025	○
⑰	花見川第1小学校			0.035	×	0.036	×	0.048	×	0.034	○	0.037	○	0.024	○	0.027	○
⑱	宮野木	◎0.046	×	◎0.040	○	◎0.047	×	0.040	○	0.027	○	0.033	○	0.029	○	0.026	○
⑲	桜見川小学校	0.059	×	0.045	×	0.031	○	0.023	○	0.038	×	0.030	○	0.020	○	0.030	○
⑳	都公園											0.024	○	0.022	○	0.024	○
㉑	土気													0.020	○	0.015	○
㉒	霞川自排局									0.035	○	0.034	○	0.040	○	0.044	×

○，×は日平均値0.04ppm超2日連続の有無，○無，×有

◎：市立高校

()は年度の途中から測定が開始されたもの

表3 S O₂ 1時間値0.1ppm超の時間数

(時間)

番号	測定局	44年	45年	46年	47年	48年度	49年度	50年度	51年度	52年度	53年度
①	千葉市役所		(80)	101	10	6	3	1	1	0	0
②	千草台小学校	388	169	112	96	17	29	0	0	2	0
③	衛生研究所	137	124	60	298	379	6	0	9	1	0
④	末広中学校		(368)	402	159	156	8	3	9	5	0
⑤	寒川小学校				524	280	14	8	5	3	1
⑥	福正寺				738	414	178	40	17	16	1
⑦	蘇我中学校		(96)	440	80	2	2	2	0	0	0
⑧	蘇我保育所					32	33	24	4	0	0
⑨	松ヶ丘中学校	☆ 194	☆ 248	(128)	8	6	0	2	0	0	0
⑩	明德学園	215	104	160	55	21	64	3	0	0	0
⑪	臨海ドライブイン	259	186	206	125	55	17	3	0	3	0
⑫	ろう学校				58	15	1	0	0	0	0
⑬	大宮小学校	69	14	258	126	62	9	2	0	0	0
⑭	千城台北小学校				36	16	10	0	1	0	0
⑮	桜木小学校	* 208	* 312	(66)	262	20	6	0	0	0	0
⑯	山王小学校				296	27	10	0	1	0	0
⑰	花見川第1小学校				6	15	30	0	0	0	0
⑱	宮野木	◎ 70	◎ 59	◎ 41	◎ 6	◎ 9	1	0	0	0	0
⑲	検見川小学校		64	74	25	6	0	0	0	0	0
⑳	都公園								0	0	0
㉑	土気									0	0
㉒	葭川自排局							0	0	2	0

☆ 大森出張所， * 工業試験場， ◎ 市立高校
()は年度の途中から測定が開始されたもの
47年以前は暦年，48年度以降は年度単位の集計

上記のように、千葉市のSO₂濃度は逐年改善され、52年度では環境基準をほぼ達成するに至ったが、過去の汚染レベルについても、昭和40年代初期の東京¹⁰⁾、川崎¹¹⁾、大阪¹²⁾等と比べると数段低いレベルで推移してきたといえる。

3. 解析方法

3.1 平均流線の推定方法

本報では特定の日の時の大気汚染を問題とするのではなく、長期的なデータを基に汚染原因を考察するものである。

通常、1時間値等の短い時間については各測定局の風向、風速から流線を描き、毎時の流線と濃度との関係から汚染源を推定する方法¹³⁾がとられるが、ここでは一定期間のデータ(1時間値)を3.2に述べる方法で類似の風と考えられるグループに分類し、そのグループの平均流線と平均濃度との関係から汚染源を推定する。平均流線はグループに属するデータについて、各

測定局の風向・風速をベクトル量として処理した平均値をもとに求める。

ここで推定しようとする領域は東西約30km、南北約50kmを対象とした。このような領域には2次曲面式による流線の推定方法¹⁴⁾¹⁵⁾が適用できるであろう。風の東西成分をU、南北成分をVとし、これを位置座標(x, y)の2次式で表わすと次式となる。

$$U = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy \quad (1)$$

$$V = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4y^2 + b_5xy \quad (2)$$

a_i, b_i : 定数

いま千葉市の千葉駅(x₀, y₀)を原点として、各測定局(x_k, y_k)における風の東西および南北成分をU_k, V_kとする。これを(1)(2)式に代入し、最小自乗法で定数を決定すれば、対象とする地域の任意の地点の風向・風速が推定できる。さて(1)(2)式の定数が決定されると座標を指定してその時の風向・風速の計算を行い、この計算を繰り返し行ってなめらかな流線を機械的に描くことが出来る。

3.2 データの分類方法

3.2.1 風向と濃度による分類

特定の測定局に着目して、その局にどの方向からどの程度の汚染がもたらされたかを知りたい。一般に、SO₂ 1時間平均濃度の頻度分布は対数正規分布で近似される¹⁶⁾。その分布の特性からすると、高濃度の出現回数は少なく、大部分は低濃度である。一方、風向によって平均値や分散等は異なるが、風向別に分類した濃度の頻度分布も同様の形となる。従って、特定の風向では一定の値以上の高濃度ばかりが観測されるというのではない。

そこでまず濃度を風向別に分類し、濃度の風向別頻度分布を作成する。そしてその頻度分布の90パーセント以上濃度が観測された日時のデータを1グループとする。各グループの平均濃度、つまり風向別SO₂濃度上位10%の平均値によりその測定局にもたらされた汚染の程度を評価し、一方各グループの平均流線を求め、この相対的に高い汚染がもたらされた方向を推定する方法を用いた。すなわち、各風向別に比較的高い濃度のみに着目する方法である。一般に、弱風時(ここでは2.9 m/s以下)のデータは流れの場の非定常性が大きい傾向があり、地上流線解析だけから汚染源を推定することが困難であるとされている¹⁷⁾。また雨天時のデータは比較を妨げる。従ってこれらのデータは上記の取り扱いからあらかじめ除外することとした。

(1)(2)式を用いて平均流線を求め、各測定局を通る平均流線とSO₂濃度上位10%の平均値との相互比較によって汚染源の相対的な関係が把握される。

3.2.2 風向クロス表による分類

対象とする地域に吹く風とそのときに生じる汚染の地域的分布との平均的な関係を明らかにするために以下のデータ処理を行う。

代表測定局を2局選び、両局の風向を「行」と「列」に配置した風向クロス表⁸⁾でデータを256要素(16方位×16方位)に分類する。この風向クロス表の各要素に含まれる日時のデータを1グループとして、例えば両局の風向がSとSWである要素(S-SW)というグループの平均流線と各測定局の平均濃度を求める。すなわち本報で対象とした千葉県臨海地域全体の流れの場を1測定局の風向であらわすことが困難であるので、二つの測定局の資料を組み合わせる流れの場を分類することとした。ただし、代表測定局の風向が1時間前の風向と2方位以上異なるデータは流れの場が時間

的に変化する非定常データとして除外することにより平均流線の精度を高めるようにした。

この方法は3.2.1の分類方法とは異なり、SO₂濃度とは全く無関係に風向だけを分類基準としているので、各要素に含まれる日時の各測定局のSO₂濃度を平均して比較することには意味がある。これは対象地域に平均流線方向の風が吹く場合に生じるSO₂の平均的な地域的分布をあらわす。

各測定局の平均濃度から次式に示す「距離の関数を通り」とする加重平均による補間法¹⁹⁾でメッシュ点(200 m間隔)の濃度を推定し、等濃度線図を作成する。

$$\hat{C} = \left\{ \sum_{k=1}^K \left(\frac{C_k}{1 + \beta l_k^2} \right) \right\} / \left\{ \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{1 + \beta l_k^2} \right) \right\} \quad (3)$$

$\hat{C}$: メッシュ点の推定濃度 (ppm)

C_k : 測定局 k の平均濃度 (ppm)

l_k : 測定局 k とメッシュ点との距離 (km)

β : 定数 (ここでは 10^6 km^{-2})

各要素の平均流線とSO₂等濃度線をそれぞれ比較検討することにより、対象地域にどの方向からどのような領域に汚染がもたらされたかが推定できる。

4. 解析結果

4.1 風向別平均流線による方法

図-2に各測定局における風向別のSO₂濃度上位10%の平均値と平均流線の解析例を示す。これは昭和47年度の解析結果で、対象とした測定局は千葉県南部地区の福正寺、寒川小、末広中、臨海ドライブイン、製鉄所から北東へ約5.5 km離れた桜木小、および同じく南へ約5 km離れた八幡小の6局である。図に示した風向は各測定局からみて工場の方向を示すものと、風上に主な発生源は見当たらないが比較的高い濃度レベルが高い風向である。

例えば図-2.1中WNW 0.208 (19)は福正寺⑥における測定風向がWNWのSO₂濃度上位10%の平均値が0.208 ppmであり、そのデータ数が19であることを意味し、平均流線は福正寺の風上部分のみ描いてある。

図-2によると各測定局の測定風向とその平均流線とはほぼ一致する例が多い。しかし中にはかなり差のある例もある。例えば福正寺の風向Wの平均流線はSW方向を示し、桜木小の風向Wの平均流線もSWの方向を示す。また臨海ドライブインの風向WNWの平均流線はWSW方向を示し、これらはいずれも測定風向と平均流線の方向に約45°もの開きがある。すでに述べ

図-2.1 福正寺(番号 ⑥)

図-2.2 寒川小(番号 ⑤)

図-2.3 末広中(番号 ④)

図-2.4 桜木小(番号 ②⑨)

図-2.5 臨海ドライブイン(番号 ⑪)

図-2.6 八幡小(番号 ②⑨)

図-2 風向別 SO₂ 濃度上位10%平均流線と平均濃度

たように平均流線は地域全体の流れの場を比較的合理的に現わすが、各測定局の測定風向はその局所性が強いのでこの様なずれが生じる。

SO₂濃度が高い値を示すのは各測定局の風向とは無関係に平均流線がSW系(SSW~WSW方向)となる場合である。臨海ドライブイン、八幡小のN系(NNW~NNE方向)の平均流線(図-2.5, 2.6)に対応する濃度が約0.04~0.07 ppmであるのに対し、福正寺、寒川小、末広中、桜木小のSW系の平均流線(図2.1~2.4)に対する濃度は約0.15~0.30 ppmとその比は3~4倍のレベルに達する。また臨海ドライブイン、八幡小のW~WSW方向(市原市の工場群の方向を示す方向)を示す平均流線に対応する濃度も約0.11~0.15 ppmと比較的高い。

4.2 風向クロス表による方法

表4は公害研②と寒川小⑤を代表測定局とする昭和47年度の風向クロス表である。各要素のデータの多くは両代表測定局の風向が一致する対角線(左上から右下)に近い位置を占めるが、SないしSW寄りの風系では寒川小の風向が公害研(寒川小より南に位置する)

の風向より1~2方位西寄りとなるものが非常に多く、逆に東寄りとなるものはほとんどない。

4.2.1 平均流線と等濃度線

風向クロス表要素の平均流線とSO₂の地域的分布を示す等濃度線を図-3に示す。これは千葉市南部地区の汚染解析に重要と思われる6要素を選んだものである。図中の矢印は各測定局の風向・風速の平均値、点線は(3)式による等濃度線で0.05 ppm以上の領域を示す。以下に各要素についての平均流線と濃度分布の特性を記述する。

- 図-3.1は公害研の風向がS、同時刻の寒川小の風向がSという要素(S-S)に対応するもので、平均流線はS系の風を示し0.05 ppm以上の領域は寒川小⑤付近にわずかに現われている。
- 図-3.2~3.4は同様に要素(S-SW),(SSW-SW),(SW-SW)に対応するもので、平均流線はいずれもSW系の風を示すが、流線のわずかな違いによって0.05 ppm以上の領域は顕著な差を示す。

図-3.2はやや南寄りの流線で0.05 ppm以上の領域

表4 風向クロス表（公害研究所－寒川小学校）

（時間数）

測定局	公害										研究所					合計		
	風向	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW	N
寒川小学校																		
	NNE	51	42	28	12	7	1	3					1		2	10	56	213
	NE	18	62	71	20	9	3	1					1			2	14	201
	ENE	8	55	106	43	13	4	1								1	3	234
	E		11	61	61	21	8										1	163
	ESE	2	2	25	96	38	12	2					1					178
	SE	1		8	93	111	32	5	1	1	1							253
	SSE			1	13	37	97	28	3									179
	S					1	3	31	65	16	1							117
	SSW					1		16	57	195	220	2						491
学校	SW	1				2	9	14	81	305	82	11	2	2				509
	WSW	1					3	4	20	57	73	51	33	23	5	1	1	272
	W	8	8	1	1	2	1	2		3	14	17	32	29	5	1	1	125
	WNW	1	1			2				1	1	2	3	44	66	47	5	173
	NW	7				1	1	1			1	6	4	16	122	358	111	628
	NNW	21	1	1		1	1	2	1			1	2	1	21	181	200	434
	N	127	35	13	5	4		1					1	1	4	110	223	524
	合計	246	217	315	346	251	219	186	317	588	174	88	80	116	225	711	615	4694

数字は同一時刻における公害研の風向と寒川小の風向の組合せに該当する1年間のデータ数（時間数）を示す。
1時間前の風向と2方位以上異なるデータは非定常データとして削除した。

図-3.1 (S-S)

図-3.2 (S-SSW)

図-3.3 (SSW-SW)

図-3.4 (SW-SW)

図-3.5 (W-W)

図-3.6 (NW-NW)

図-3 風向クロス表の要素別平均流線とSO₂等濃度線 (矢印…各要素の平均風向, 風速 (|→| は風速 5 m/秒) 点線…SO₂の平均濃度が 0.05 ppm 以上の汚染領域 n ……データ数)

は寒川小と山王小⑩付近に、図-3.4はやや西寄りでは0.05 ppm以上の領域は臨海ドライブイン⑪や大宮小⑫付近に出現している。図-3.3はそれらの中間で千葉市以南の工場群とほぼ平行な風を示し、0.05 ppm以上の領域は製鉄所を覆う形で約5.5 km 風下の桜木小⑬に至る巾の狭い帯状の領域を形成している。

c. 図-3.5は要素(W-W)に対応し、平均流線はW系の風を示すが平均風速が他に比べて小さく(千葉市の18測定局の平均風速は2.5 m/s。次項表5参照)、0.05 ppm以上の領域は広域的で弱風汚染の典型例である。

d. 図-3.6は要素(NW-NW)に対応し、平均流線はNW系の風を示すが、0.05 ppm以上の領域は全く現われていない。

4.2.2 風向クロス表要素の特性

風向クロス表で分類された1年間のデータは各要素にランダムに配分されているのではなく、各要素はそ

れぞれ顕著な特性を有している。前項で示した6要素についての特性を表5にまとめた。以下に要点を述べる。

- 要素に含まれるデータの各測定局における風向の標準偏差を計算し、千葉市の18測定局について標準偏差の平均値を求めると、要素(S-SSW)が18°と最も小さく、最も大きい値を示すのは要素(W-W)の59°であった。
- 同様に平均風速の千葉市18局の平均値は要素(SSW-SW)が7.5 m/sと最も大きく、要素(W-W)が2.5 m/sと最も小さい。
- 要素に含まれるデータの時刻別頻度分布は図-4に示すように要素(S-S), (S-SSW)は夜間の頻度が多く10~15%, 要素(SSW-SW), (SW-SW), (W-W)は10~20%と日中の頻度が多い。要素(NW-NW)は日中、夜間ともほぼ一定の頻度で数%前後である。

図-4 風光クロス表要素の時刻別頻度分布

d. 同様に月別頻度分布は 図-5 に示すように要素 (S-S), (S-SW), (SSW-SW) は夏季の頻度が20%~40%と多く, 要素 (NW-NW) は冬季の頻度が20%と多い. 要素 (W-W) は特に季節的な片寄りはなく10%前後. また要素 (SW-SW) は3, 11, 12月の頻度が多い (20%) .

e. 千葉市18局について, 1時間値が0.1ppm を超える濃度の出現時間数を合計すると要素 (S-SW), (SSW-SW), (SW-SW) が80~500時間と多い.

4.3 経年変化

2.1~2.3で千葉市の SO_2 濃度の経年変化を概観したが, この経年変化は発生源の改善による外, 発生源から測定局の方向に吹く風の頻度の多少や安定度等も影響していると考えられる. そこで4.1で述べた風向別平均流線による方法を用いて発生源から測定局に向う風を指定して SO_2 の経年変化を検討した.

図-6は風向別 SO_2 濃度上位10%の平均値を風系別に示すものである. SW系については測定局福正寺, 寒川小, 末広中, 桜木小の各風向 (平均流線がSW系を示すもの) の上位10%の平均値をその測定回数で重みづけ, N系については測定局臨海ドライブイン, 八幡小の各風向 (平均流線がN系を示すもの) の上位10%の平均値をその測定回数で重みづけしてそれぞれ加重平均した値で, 47年度から52年度までの経年変化を示す. 本図によるとSW系の濃度は49年度まで逐年大巾に低下し, その後も低減傾向を示す. N系の濃度はSW系の濃度と比べると各年度ともかなり低く, 経年的にもSW系ほど顕著な低減傾向はみられない. 千葉市の SO_2 濃度が逐年低下した経緯 (表1.2.3参照) は, SW系の濃度レベルが大巾に低下した影響によることが明瞭である.

図-5 風光クロス表要素の月別頻度分布

4.4 汚染原因の推定

以上の解析結果から千葉市特に千葉市南部地区の SO_2 汚染の原因について以下に述べる。

SO_2 濃度が比較的高い値を示すのはいずれもSW系の平均流線に対応する場合である(図-2)。この高濃度は千葉市南部地区に所在する発生源周辺の測定局に限らず、発生源から約5.5km離れた桜木小にもみられる。この汚染の原因について、千葉市南部地区に所在する低煙源によるものであるとの指摘^{20) 21)}があるが、汚染は発生源に近い範囲にとどまらないことから、低煙源のみに起因する現象とは考えられない。

風と汚染領域の関係をあらわす図-3.1~3.6のうち、0.05ppm以上の領域が明瞭に現われるのは図-3.2~3.4と図-3.5である。

図-3.5の汚染はW系の風の弱い場合に発生し、時間的には日中に集中しており、東京湾の海風下での現象と推定される。弱風汚染については地上流線解析では

汚染源の解明が困難であるといわれている¹⁷⁾が、図-3.5にもこの傾向が現われている。例えば、衛研③は製鉄所の真北約1.5kmに位置する測定局で、この風上(西方向)には47年度当時主な SO_2 発生源は全く存在していない。にもかかわらず、衛研③は図-3.5では0.05ppm以上の領域に含まれている。従ってこのW系の弱風汚染の原因については京葉、京浜工業地帯の発生源から排出された SO_2 ガスの東京湾内での挙動と東京湾の気象特性の解明が必要であろう。

残る図-3.2~3.4はいずれもSW系の風で京葉工業地帯の風下に0.05ppm以上の領域が現われている。しかし図-3.6のNW系の風の場合には京葉工業地帯の風下であっても、0.05ppm以上の領域は全く現われていない。

SW系の場合は現われ、NW系の場合は現われないという違いが生ずる理由は、第1に気象条件の違い、第2には煙源の重合度合の違いの二つの理由が想定さ

表5 風向クロス表要素の特性

要素 番号	風向クロス表要素		データ数	風向の標準偏差 (deg) (注1)	風速の平均値 (m/s) (注2)	日変化の パターン	季節変化の パターン	0.1 ppm 超の 時間数(注3)
	公害研	寒川小						
1	S	S	16	20	4.7	夜型	夏型	5
2	S	SSW	195	18	5.8	夜型	夏型	237
3	SSW	SW	305	19	7.5	昼型	夏型	525
4	SW	SW	82	24	7.0	昼型	3, 11, 12月	82
5	W	W	32	59	2.5	昼型	flat	49
6	NW	NW	122	21	5.4	flat	冬型	0

(注) 千葉市18局についての統計。

1. $\hat{\sigma} = \frac{K}{\sum_{k=1}^K} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\theta}_k - \theta_{ki})^2}{n}} / K$, K : 測定局数, n : 要素のデータ数, θ_{ki} : k 測定局の要素のデータ i の風向
2. $\hat{U} = \frac{K}{\sum_{k=1}^K} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n U_{ki}}{n} \right\} / K$, U_{ki} : 測定局 k の要素のデータ i の風速
3. $P = \sum_{k=1}^K P_k$, P_k : 測定局 k の 0.1 ppm 超の時間数

れる。

気象条件の違いが汚染の出現に影響するか否かは気温の鉛直分布, 日射量等の気象資料がないので厳密には明らかにできない。しかし気象条件が関与するとす

図-6 風光別上位10%平均濃度の経年変化

れば, 一般にいわれているように風速が6m/s以上になると安定度は中立状態に近づく²²⁾と考えられるので, 代表測定局の風速が6m/s以上の場合に限定して風向クロス表を作成した。この要素の平均流線がSW系の場合とNW系の場合のSO₂の地域的分布を比較すれば, 気象条件の影響をほぼ等価にした比較ができる。図-7にこれを示す。図-7.1は要素(S-SSW), 7.2は(SSW-SW), 7.3は(SW-SW), 7.4は(NW-NW)の平均流線とSO₂の地域的分布であるが, この強風で安定度は中立という同一の条件下においてもSW系の場合には0.05ppm以上の領域が図-3.2~3.4と同様に現われ, NW系の場合には全く現われない。従って, 図-3の風速に制限を与えない場合についても, 気象条件が関与する割合は低いと推定される。

次に, 特定の気象条件がSW系の風による汚染の出現に大きく影響しているとするれば, 汚染の生じる時刻や季節に片寄りが現われると考えられるので, この点について検討する。

まず時間の特徴についてみると, 同じSW系の風でもやや南寄りとなる要素(S-SSW)のデータは夜間の頻度が多く(図-4.2), それより西寄りとなる要素(SSW-SW), (SW-SW)は日中の頻度が多い(図-4.3, 4.4)。つまりSW系の風は昼と夜とで若干ずれる。このためSW系の風が吹く時の各測定局のSO₂濃度は

図-7 風向クロス表の要素別平均流線と SO_2 等濃度線

風速 6 m/秒以上
 矢印 各要素の平均風向、風速 (→ は風速 5 m/秒)
 点線 SO_2 の平均濃度が 0.05 ppm 以上の汚染領域
 n データ数

図-8 SW系風時の時刻別 SO_2 平均濃度
 (寒川小の風向が SSW, SW, WSW で 1 時間前の風向との差が 1 方位以内のデータ)

図-8に示すように顕著な時間変化を示すが、ピーク時の濃度レベルには大差がなく、日中と夜間とで高濃度が観測される場所(測定局)が異なるだけである。すなわち日中は福正寺、桜木小の濃度が上昇し(0.07~0.11 ppm)、夜間は寒川小、末広中の濃度が上昇する(0.07~0.11 ppm)。(図-8でSW系の風とは寒川小の風向がSSW, SW, WSWであって、その1時間前の風向との差が1方位以内のものに限定した。)

季節の特徴に着目すると、SW系の風は夏季に頻度が多いが(図-5.2, 5.3)、要素(SW-SW)には冬季のデータもかなり多く含まれている。そして夏季の頻度が多い要素(S-SSW)、(SSW-SW)と同様にこの要素(SW-SW)の場合にもSO₂ 0.05 ppm以上の領域が明瞭に現われている(図-3.4)。

SW系の風の場合には時間帯、季節とは無関係に同程度の濃度上昇が生じており、この濃度上昇に対し特定の気象条件が大きく影響している可能性は低い。

以上のように、強風、中立状態の条件下におけるSO₂濃度の比較及びSW系の風と濃度の時間的、季節的特徴の検討から推定すると、SW系の風に限って0.05 ppm以上の領域が現われる現象に対し気象条件の関与する度合は少ない。

第2の理由については、京葉工業地帯の配置(図-1)をみると、煙源の重合条件が全く異なることがわかる。SW系の風の場合には各工場からの排煙が次々に重なって重合していく関係にあるが、NW系の風の場合には各工場の排煙はそれぞれの風下に到達するのみで、煙の重なりは生じにくい関係にある。また、SO₂の地域別排出量(図-9)をみると、解析結果の詳細を示した昭和47年度時点において千葉市のSO₂排出量が約3,400 t/月に対しその南西方向に位置する市原市、袖ヶ浦町の排出量は約13,000 t/月で約4倍と多量である。そしてこの京葉工業地帯のSO₂排出量は逐年減少しており、減少傾向はSW系の風の場合のSO₂濃度の低下傾向(図-6)と符合している。

結局、SW系の風の場合に限って0.05 ppm以上の領域が生じる現象は京葉工業地帯の工場群の排煙が重合することによると推定することが最も合理的である。

前述図-2のSW系の平均流線に対応する各測定局のSO₂濃度が一樣に高い現象も、京葉工業地帯の排煙の重合によるものである。

以上の解析結果からみると、千葉市のSO₂濃度が逐年改善された経緯は京葉工業地帯、特に市原市以南の工場群の改善に起因するところが大部分である。

図-9 SO₂ 排出量の経年変化

5. むすび

一般環境における大気汚染測定データ(SO₂, 風向, 風速)をもとに長期的な大気汚染の原因を推定する方法として、平均流線による方法を提案し、千葉県臨海地域のデータを用いて、昭和40年代半ばに千葉市で観測された比較的高いSO₂汚染の解析を行った。

その結果、千葉市の高濃度は千葉市以南の京葉工業地帯の工場群がほぼ一直線状に配置されているため、この工場群に沿って吹く南西系の風により、排煙が重合することによって生じる現象であることが明らかになった。

従来、汚染の観測された測定局の風向で汚染源のおよその方向を推定したり、大気汚染予測シミュレーションに際して、代表測定局の風向で流れの場を直線的に規定する方法が用いられている。しかし本報の解析結果によると、一測定局の風向と地域全体の平均流線とが約45°も異なる場合があり、平均流線は必ずしも直線ではなく、そのパターンのわずかな違いによって、SO₂濃度の地域的の分布が顕著に異なる。流線が曲率をもつ場合についても、すでにいくつかの拡散モデルが提唱されているので^{23) 24)}、本報で提案した平均流線による方法で風と汚染との関係を解析し、大気汚染予測

モデル検討の基礎資料に供することにより、予測精度の向上が期待される。

謝辞

本報を終えるにあたり、解析方法等全般にわたってご指導を賜った大阪府立大学工学部教授伊藤昭三先生に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 環境庁, 総量規制マニュアル, p.59
- 2) 窒素酸化物調査検討委員会, 窒素酸化物調査検討委員会中間報告, p.60
- 3) 通商産業省, 千葉県五井, 姉ヶ崎地区産業公害総合事前調査報告, 産業公害総合事前調査報告書集, p.3, 昭和47年7月
- 4) 通商産業省他, 五井, 姉ヶ崎地区補完調査報告書, 産業公害総合事前調査報告集, p.71, 昭和47年7月
- 5) 京葉地区大気汚染防止対策協議会, 京葉地区大気汚染予測結果報告書, 産業公害, Vol.11, No.6, p.77.
- 6) 環境庁, 日本の大気汚染状況, 昭和48年版, 同49年版, 同50年版
- 7) 千葉市, 千葉市大気汚染調査報告, 昭和50年, 51年及び同, 千葉市大気汚染測定結果報告書, 昭和52年度, 53年度
- 8) 千葉県, 千葉県環境白書, 昭和49年版
- 9) 千葉市, 千葉市大気汚染調査報告, 昭和44年, 45年, 46年, 47年
- 10) 東京都, 昭和48年度大気汚染状況測定結果関係図表, 昭和49年11月
- 11) 神奈川県, 公害防止計画策定地域概況等調査書, 昭和46年6月
- 12) 大阪市, 大阪市の公害の現況と対策, 昭和48年版
- 13) 千葉市, 千葉市大気汚染気象調査結果報告, 昭和45年度
- 14) 埼玉県, 光化学スモッグ広域立体調査報告書, p.69 昭和49年6月
- 15) 船橋市, 船橋市大気汚染物質の移流に関する調査報告, p.156, 昭和49年3月
- 16) R.I.Larsen, A new mathematical model of air pollution concentration averaging time and frequency, J.A.P.C.A., Vol.19, No.1, p.24, 1969
- 17) 三谷一郎他, 京葉臨海工業地帯の大気汚染(第3報) 研究時報, 21巻, 7号, p.67, 1969
- 18) 鈴木達三他, 大気汚染の実態と住民意識との関連分析, その基礎的考察, 統計数理研究所彙報, 第24巻, 第2号, p.95 1977
- 19) 岡本真一他, 差分近似式による大気汚染モデルの開発と計算例, 天気, Vol.23, No.12, p.29, 1976
- 20) 千葉県, 千葉県公害白書, p.35, 昭和46年版
- 21) 千葉県, 千葉県公害白書, p.34, 昭和48年版
- 22) 大気汚染研究全国協議会第三小委員会, 大気汚染ハンドブック(3), p.204, 昭和48年
- 23) 広尾純他, メソスケール領域におけるガウス型ブルームモデル, 大気汚染学会誌, 第14巻, 第1号, p.25,

1979

- 24) 西亮, 沢田照夫, 海上空港による大気汚染の予測(第1報, 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, 第13巻, 第1号, p.17, 1978