

伊勢湾地域における二酸化窒素 (NO₂) 濃度の冬と夏の特徴朴 恵淑¹ 長屋 祐一² 目崎 茂和³ 田中 博⁴¹三重大学人文学部, ²三重大学生物資源学部³南山大学総合政策学部, ⁴筑波大学地球科学系

朴 恵淑, 長屋祐一, 目崎茂和, 田中 博. 伊勢湾地域における二酸化窒素 (NO₂) 濃度の冬と夏の特徴. 日生氣誌 37 : 105-116, 2000. 本研究では, 冬季の1997年1月16日-17日, 夏季の1998年7月15-16日に伊勢湾地域の三重県, 愛知県, 岐阜県の195地点での二酸化窒素 (NO₂) 濃度の同時測定を行い, 風の流線, 収束・発散域の解析によって, 大気汚染物質の発生源, 輸送, 滞留に及ぼす地形効果と地上風 (海陸風) の影響について考察した. 風の収束・発散は地形や海陸風と密接に関係している. 伊勢湾岸地域において, 海風のように内陸に向かう風は, 山地にぶつかり山麓で収束する. つまり, 海風の内陸への進入の際の通り道である谷沿いや内陸山地の麓に収束域が形成されることが分かった. また, 伊勢湾岸上, 三重県の伊勢平野から鈴鹿山脈に至る地域, 濃尾平野, 養老山地, 伊吹山地, 美濃三河高原地域での収束・発散域を把握することができた. 二酸化窒素 (NO₂) の高濃度地域は名古屋市, 四日市市, 桑名市の大都市やコンビナート周辺の他に, 各務原市と多治見市においても示された. 大気汚染の発生源の少ない小都市である各務原市と多治見市の汚染濃度が高いことについて, 各務原市は四日市市や桑名市方面からの南西風に, 多治見市は四日市市や桑名市方面から名古屋市を經由する南南西風に乗って内陸まで輸送され, 滞留される. つまり, 夕方, 深夜から早朝にかけて, 海岸付近の都市・工業地域・道路上において発生した二酸化窒素 (NO₂) が, 日中, 海風に乗って内陸まで輸送され, 収束域となる谷沿いや内陸山地の麓に滞留され, これらの地域が溜まり場となるメカニズムが明らかになった.

キーワード : 伊勢湾地域, 二酸化窒素 (NO₂), 発生源, 溜まり場, 海風

PARK H-S¹, NAGAYA Y², MEZAKI S³, TANAKA H⁴. *Variations of NO₂ in winter and summer in Ise Bay area.* Jpn. J. Biometeor., 37: 105-116, 2000. —This study covers research on the simultaneous measurement of NO₂ concentration conducted at 195 sites in the Ise Bay area of Mie, Aichi, and Gifu prefectures. The research was conducted over two seasons, winter of 1997 (January 16th-17th) and summer of 1998 (July 15th-16th). Due to our grasp of the wind trajectory and the area of divergence, we were able to analyze the effects of land and sea breezes on the source of pollution, transportation, stagnation, and geographic features (topography). The area of divergence is closely related to the topography and sea breezes. In the Ise Bay area the sea breezes diverge at the base of inland mountainous areas. In short, we now understand that the divergence area is created between the valleys and the bottom of the inland mountainous areas that serve as the pathway for the inland penetration of the sea breezes. In addition to the Ise Bay area, we also have a good

¹Faculty of Humanity and Social Science, Mie University

²Faculty of Bioresources, Mie University

³Faculty of Business Administration, Nanzan University

⁴Institute of Geoscience, The University of Tsukuba

別刷請求先 : 〒514-8507 津市上浜町1515 三重大学人文学部文化学科

Correspondence Address: Hye-Sook PARK, Faculty of Humanity and Social Science, Mie University, 1515 Kamihama-cho, Tsu, Mie 514-8507

(受付 2000年6月9日/受理 2000年10月11日)

grasp of the area of divergence covering Mie Prefecture from the Ise Plain to the Suzuka Mountain Range, Nobi Plain, Yoro Mountains, Ibuki Mountains, Minomikawa High Lands. The research shows that areas with a high concentration of NO_2 pollution include Nagoya City, Yokkaichi City, Kuwana City, Kagamigahara City and Tajimi City. According to the analysis of the wind trajectory and our calculation of divergence by Tanaka and Milkovich method, we were able to estimate the source of the pollution, transport route, and the area of stagnation. The reason for the high concentration of pollution in Kagamigahara City and Tajimi City, which are not big cities or industrial areas, is that Kagamigahara City is in the path of the Southwest winds from Yokkaichi City and Kuwana City, while Tajimi City is in the path of the South-south-west wind from Yokkaichi City and Kuwana City, that passes through Nagoya City. The evening and midnight to early morning winds that blow through the cities, industrial areas, and roads are carried by the sea breezes, and delivered to the inland areas. Daytime winds carry less pollution, while at night, Yokkaichi City produces NO_2 , and that NO_2 is carried on the winds to be deposited at the divergence spots where the winds stagnate.

Key words: Ise Bay area, NO_2 , Source, Stagnation, Sea breeze

1. 研究目的

近年、固定発生源による大気汚染のみならず、自動車の増加で移動発生源による広域の大気汚染が懸念されている。さらに、日本は湾岸に沿ってコンビナートや大都市が立地し、道路が発達し、内陸部が山地で囲まれ、大気汚染物質が溜まりやすい。このため、(1) 固定発生源と移動発生源からの大気汚染物質の発生、(2) 海風による大気汚染物質の輸送、(3) 山地の山麓部が大気汚染物質の溜まり場となる問題、といったことを考え合わせて、大気汚染問題を特定の発生源地域に限った公害問題ではなく、広域の環境問題として認識する必要がある。

湾岸都市の大気汚染は、海陸風の循環系と密接な関係を持ち、大気汚染物質の分布状況は、季節や時間帯によって異なる。海陸風が発達しやすい気象条件では、海風による大気汚染物質の内陸への輸送が著しく、海風前線付近での大気汚染物質の停滞がこれまでの研究で明らかになっている(河村, 1987・1996)。特に、沿岸に多くの工業地帯や人口密集地域から発生された汚染物質が海風によって内陸に輸送され、沈着することが予想される。

しかし、これまでに東京湾周辺における研究は多く行われているが(福岡ら, 1972; 河村, 1987・1996; 菊地, 1983)、伊勢湾周辺の大気汚染に関する研究は数少なく、しかも名古屋市

(三輪・大和田, 1979; 大和田, 1994)、四日市市(水越・古市, 1978; 谷山, 1989)や津市を中心とした地域(福山・サンガ, 1996)に限られていたため、伊勢湾岸地域全体の特徴を把握することは非常に困難である。

伊勢湾周辺地域では過去、四日市公害問題で知られる大気汚染が深刻な地域であった。環境規制や脱硫装置などの技術導入といった積極的な環境政策できれいな空気を取り戻し、四日市市は1995年に国連のグローバル500賞¹⁾を受賞している。しかし、伊勢湾周辺地域の大気汚染問題は完全に解決されたのか、伊勢湾からの海風による大気汚染物質の輸送メカニズムや山地など地形による溜まり場はどこなのかを探ることは解明されていない部分が多い。

本研究は、三重県、岐阜県、愛知県を取り込んだ伊勢湾岸付近の大気汚染の実態を把握するため、冬季と夏季に二酸化窒素(NO_2)の同時測定を行い、その分布特性を把握した。また、風の収束・発散に伴う二酸化窒素(NO_2)の輸送や沈着について調べた。即ち、伊勢湾岸における大気汚染問題の実態を季節別に調べ、時間的・空間的分布特性を明らかにし、そのメカニズムの考察を目的とする。

2. 研究方法

(1) 研究対象地域の地理的特性

伊勢湾周辺の三重県、愛知県、岐阜県の風向、

風速のAMeDASデータ(46地点)と大気汚染常時監視測定局のデータ(46地点)によって伊勢湾周辺の高陸風循環の特徴、局地不連続線、海風前線の地理的位置を把握した。天気図によって気象条件の把握、地形図や土地利用図を用いて伊勢湾岸の地形的特徴や土地利用の現況(市街地、工業地帯の分布など)を調べた。

研究対象地域は、伊勢湾岸地域の緯度34°Nから35.5°N、経度136°Eから137.7°Eの約150×150 kmの地域である。地形的特性は、海岸部では伊勢湾と三河湾を知多半島が、三河湾と遠州灘を渥美半島が区切っており、平野部では中央に濃尾平野、伊勢湾左岸に伊勢平野、三河湾東岸に岡崎平野、豊橋平野が位置している。木曾川、揖斐川、長良川、庄内川が伊勢湾に、境川、矢作川、豊川が三河湾に流れている。濃尾平野を囲むように鈴鹿山脈、養老山地、伊吹山地、三河高原が位置する。また、木曾山脈や赤石山脈などの2,000 m級の山々が連なる中央アルプスの南西100-200 kmに位置する。

(2) 二酸化窒素 (NO₂) の測定

1995年の全国の大気汚染の観測地点は、二酸化硫黄(SO₂)が1,702局、二酸化窒素(NO₂)が1,825局、光化学オキシダント(O₃)が172局となる(環境庁, 1997)。これらの常時監視測定局は定点に固定され、その場所での大気汚染の経年的変化を捕らえるには優れているが、設置場所が限られているので、一局の測定値が必ずしもその地域の広域な代表値とはなりえない。簡易測定法はこれらの測定局によるモニタリングネットワークの補完的な役割を果たしている。二酸化窒素(NO₂)の簡易測定法は、広範囲の汚染地域の調査、電力の供給のない地域でのモニタリングなどの目的に応じた数多くの種類があり、同じ用途でも多種類の簡易サンプラーが用いられている。

天谷式簡易測定カプセルでは、大気中の汚染物質と結合する試薬(捕集液)を浸み込ませたろ紙を捕集管の中に入れて、ろ紙の表面にガス分子になっている汚染物質が衝突することで汚染物質が捕集され、この量を測ることができる。捕集される汚染物質の量は大気中の汚染物質の濃度の暴露時間に比例するため、暴露時間と捕集量を測定す

れば、暴露時間内の平均濃度が求められる。汚染物質の種類によって捕集液と分析試薬を選べば、種々の汚染物質の濃度が測定できる。天谷式簡易測定法では24時間の内ろ紙に付着した二酸化窒素(NO₂)の量を測って大気中の濃度を求めるが、誤差範囲が5%以内で、非常に高い信頼性を持つ(天谷, 1993; 長屋・谷山, 1998)。

天谷式簡易測定カプセルによる二酸化窒素(NO₂)の同時測定を冬季の1997年1月16日午後4時から17日午後4時(24時間)まで、夏季の1998年7月15日午後4時から16日午後4時(24時間)まで、三重県の64か所、岐阜県の49か所、愛知県の82か所の合計195地点で行った(Fig. 1)。

測定地点の選定は、伊勢湾岸地域の東西約150 km、南北約150 km範囲を各10 km、人口密集地は5 km、2.5 kmメッシュをかけ、測定地点を決めた。測定地点の選定には、環境教育と情報教育の接点の一貫としての大気汚染監視ネットワークの形成を狙い、人口規模に比例して存在している町の小学校を対象とした。小学生と先生と一緒に大気汚染物質を測定し、分析することによって、「わが小学校は町の環境測定局」である認識を持たせることができ、大気汚染問題を身近な環境問

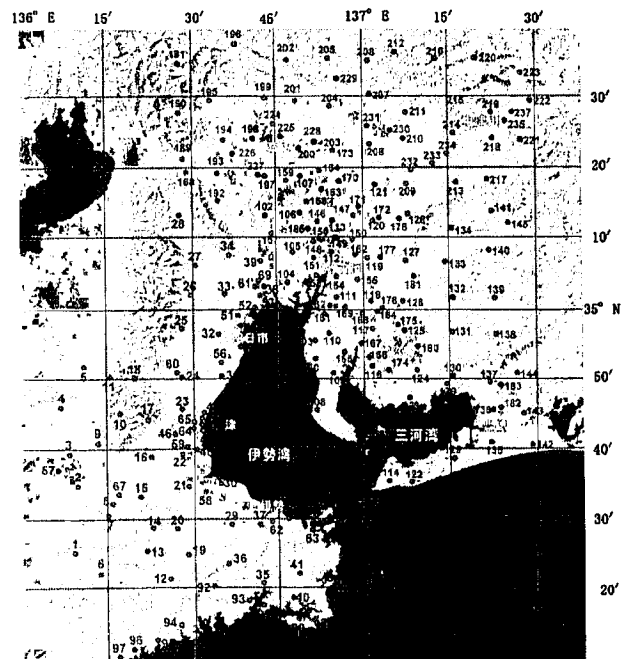


Fig. 1. Distribution of NO₂ observation points in Ise Bay area

題の一つとして認識するように試みた。

(3) 汚染物質の広域拡散

AMeDASデータ及び大気汚染常時監視測定局のデータ(風速, 風向)を用いて, 風の収束・発散の計算を行い, 大気汚染物質の広域拡散の動態及び大気汚染物質の発生源から輸送, 沈着の地理的(空間的・時間的)特徴を明らかにした。

風の収束・発散の計算は, 平面近似法(Tanaka and Milkovich, 1990)を用いた。局所的な気象観測データを用いて収束・発散計算を行う際に用いられることが多い(甲斐ら, 1995)。対象地域において格子点を中心とした円を求め, この円の中に含まれる地点の風のU, V成分を平面近似することでその微分である収束・発散を計算する方法である。まず, 任意に定めた領域内の原点から全観測点までの距離のx-y座標を求める。次に, 風の東西成分, 南北成分をそれぞれU, Vとし, 最小二乗法により次式で近似する。

$$U(x, y) = Ax + By + C \quad (1)$$

$$V(x, y) = Dx + Ey + F \quad (2)$$

単位円内の全観測地点についてU, Vそれぞれを式で表わし, これらについて重回帰計算を行い, 重回帰係数として, A, B, C, D, E, Fを求める。収束・発散の $\nabla \cdot V$ は次式で表される。

$$\nabla \cdot V = \partial U / \partial x + \partial V / \partial y \quad (3)$$

ここで, $\partial U / \partial x = A, \partial V / \partial y = E$ とおけるので,

$$\nabla \cdot V = A + E \quad (4)$$

となる。即ち, 各円における風のU成分, V成分の傾きを足し合わせたものが, 収束・発散の値になる。 $\nabla \cdot V$ が負なら収束, $\nabla \cdot V$ が正なら発散である。

3. 結 果

(1) 測定日の天気状態

Fig. 2は, 二酸化窒素(NO₂)の測定日である冬季の1997年1月16日と17日の午後6時の天気図である。1月16日の天気図をみると, 弱い気圧の谷が東へ抜けて, 移動性高気圧が緩やかに本州付近を覆ってくる穏やかな日となっている。1月17日の天気図をみると, 北日本の日本海側を除いて平年より3-6°C高く, 3月頃の陽気となっていた。初冬の窒素酸化物高濃度発生機構と気象現象との関係を示した近藤・水野(1990)の研究によると, 安定層が形成しやすい接地逆転層が発達する冬季には, 地表付近での大気汚染物質の停滞が起こりやすいので, 大気汚染濃度が高くなる。福山・サンガ(1996)の研究によると, 津市周辺の高濃度発生時の気圧配置は, 冬季や初春に本州付近全体が移動性高気圧に覆われたり, 高気圧の中心が中部地方に位置する場合である。

Fig. 3は, 二酸化窒素(NO₂)の測定日である

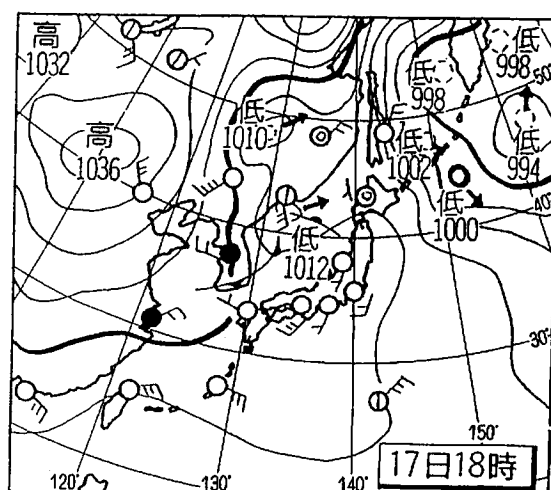
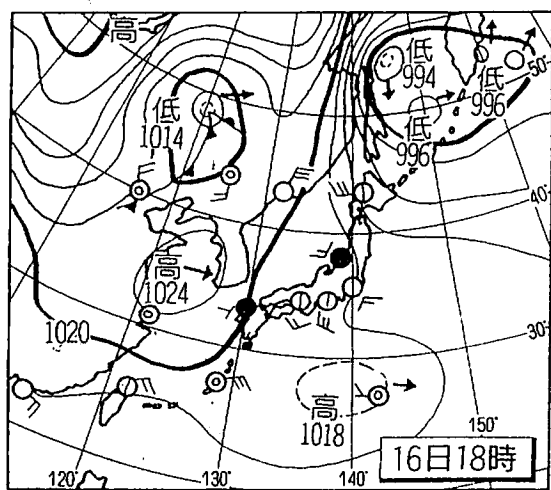


Fig. 2. Weather maps in winter (1997.1.16.18:00 and 1997.1.17.18:00)

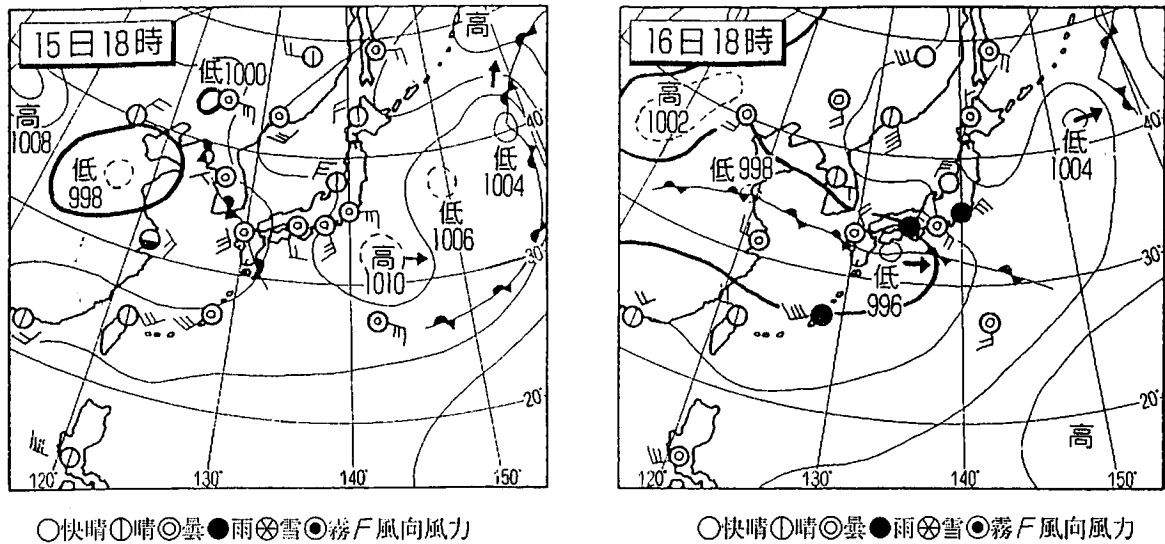


Fig. 3. Weather maps in summer (1998.7.15.18:00 and 1998.7.16.18:00)

夏季の1998年7月15日と16日の午後6時の天気図である。7月15日の天気図をみると、梅雨前線の活動は活発になり、東海地方へ近づいたため、夕方から平野部を中心に雨が降った。四日市市で54 mm、桑名市で34 mmの降水量を記録した。7月16日の天気図をみると、南海上に低気圧が発生し東へ進み、前線は本州の南海上へ下がり、午後からは雨が上がり、天気は回復に向かった。

(2) 二酸化窒素 (NO₂) の地理的分布

Fig. 4は、冬季の1997年1月16日午後4時から17日午後4時まで(24時間値)の伊勢湾岸における二酸化窒素 (NO₂) の濃度分布図である。二酸化窒素 (NO₂) の環境基準は、濃度の1時間値の日平均値が0.04-0.06 ppmの範囲内またはそれ以下で、三重県の環境保全目標値は0.02 ppm以下と定められている。

汚染濃度が高い地域は、愛知県名古屋市の中心部及び北部から一宮市、江南市、各務原市など長良川に沿った地域、名古屋市の北東部から春日井市、多治見市など土岐川に沿った地域、知多市、半田市で、汚染濃度は約0.03-0.035 ppmを示す。また、三重県四日市市の近鉄駅周辺やコンビナート周辺、桑名市地域は、約0.03-0.035 ppmの高い値を示す。特に、桑名市周辺は0.045 ppm以上の最高値を示すが、この値は環境基準値である1時間値の1日平均値が0.04-0.06 ppmに近い。三重県の上野市、名張市などの汚染濃度は約

0.02-0.025 ppmで、比較的高濃度を示す。

一方、汚染濃度が低い地域は、岐阜県の大垣市を除いた濃尾平野地域、伊吹山地、養老山地周辺、愛知県的美濃三河高原周辺、碧南市、西尾市など矢作川下流地域で、汚染濃度は約0.005-0.010 ppmを示す。地理的分布の特徴として、大都市や工業地域では高濃度を、平野や山地では低濃度を示す。

Fig. 5は、夏季の1998年7月15日午後4時から16日午後4時までの伊勢湾岸における二酸化窒素 (NO₂) の濃度分布図である。

汚染濃度が高い地域や低い地域は冬季と大差がないが、小牧市、春日井市周辺が約0.03 ppmの高濃度を示すなど、局地的な高濃度地域が細胞状に現われる。特に、土岐川、木曾川に沿って、土岐市、恵那市、中津川市まで0.015-0.020 ppmの比較的高濃度地域が帯状に伸びている。

冬季に比べて、汚染濃度が半減されているが、高温多湿な気象で二酸化窒素が光化学オキシダントに変質したものと考えられる。三重県内の30か所の大気汚染常時監視測定局(一般環境測定局24か所、自動車排出ガス測定局5か所、上層気象測定局1か所)を対象にし、冬季と夏季のこの研究の測定日と同じ日における二酸化窒素と光化学オキシダント濃度の関係を比較した。冬季は二酸化窒素の濃度が高く、夏季は光化学オキシダント濃度が高い特徴を示し、冬季と夏季の二酸化窒素と光化学オキシダント濃度の割合は約2対1で

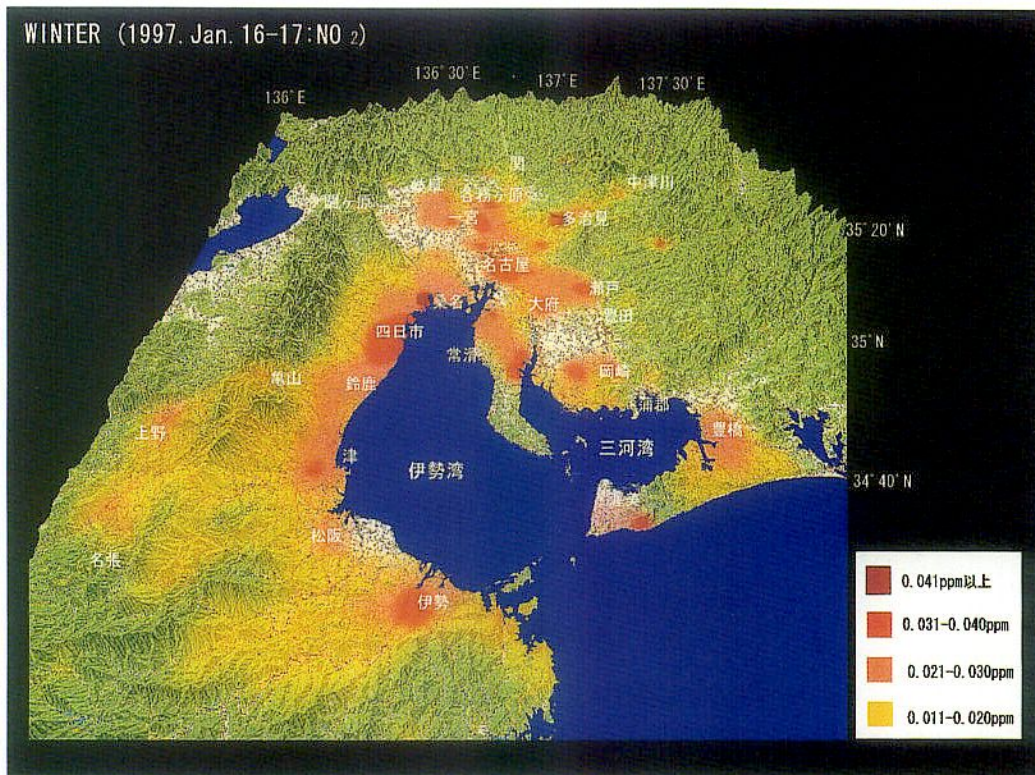


Fig. 4. NO₂ concentration (ppm) in winter in Ise Bay area (24 hrs from 1997.1.16.16:00 to 1997.1.17.16:00)

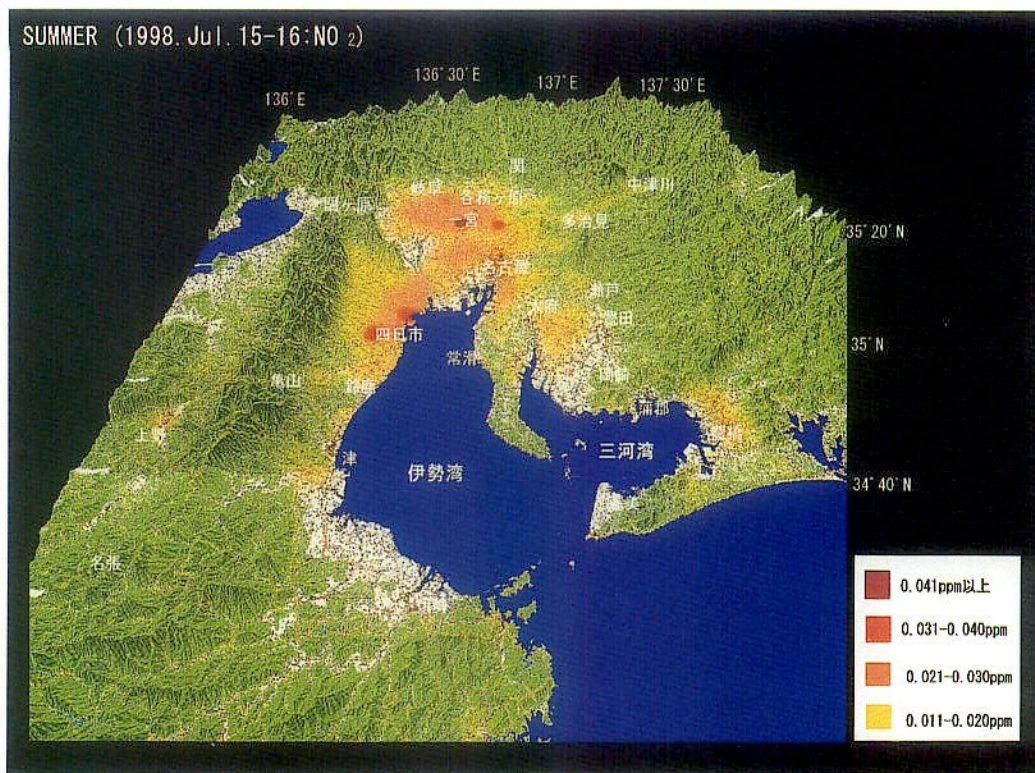


Fig. 5. NO₂ concentration (ppm) in summer in Ise Bay area (24 hrs from 1998.7.15.16:00 to 1998.7.16.16:00)

あった。つまり、夏季の二酸化窒素濃度は冬季の約半分ほど低くなっているが、光化学オキシダントに変質したことによることが分かる。特に、四日市市三浜小学校での冬季の二酸化窒素の平均値は0.042 ppmで、夏季の平均値の0.02 ppmより2倍以上大きい。日平均濃度の最大値は冬季が0.062 ppmで、夏季の最大値の0.041 ppmより51%も大きい。光化学オキシダント濃度は二酸化窒素のパターンと逆である。夏季の光化学オキシダント濃度の平均値は0.02 ppmで、冬季の平均値の0.011 ppmより2倍ほど大きい。日平均濃度の最大値は夏季が0.038 ppmで、冬季の最大値の0.027 ppmより41%も大きい。

谷山 (1976) は、津市における光化学オキシダント発生の条件として、伊勢湾からの東または東南東風、風速が5 m/s以下、気温が20°C以上、日射の強い晴天日にほぼ発生する結果を示している。福山・サンガ (1996) による1990年の津市における光化学オキシダント汚染の月別発生日数(平均値より高い日数)をみると、年間の総汚染日数は92日で、発生率は25%である。暖候期

(4月～9月)に頻繁に発生し(発生率48%)、寒候期(10月～3月)は10%以下である。暖候期の日平均濃度の最大値の平均は0.056 ppmで、寒候期の平均値0.04 ppmより40%も大きい。気圧配置との関係では、高気圧が本州全土を覆う移動性高気圧型や高気圧の中心が中部日本にある高気圧中心型、南高北低型の典型的な夏型の場合である。森・北田 (1999) は、濃尾平野における大気汚染物質の高濃度日の出現状況と気象条件との関係について調べ、二酸化窒素の高濃度日が寒候期(10～3月)に多く出現するが、光化学オキシダントの高濃度日は暖候期の広域海陸風が約9割を占め、先駆物質の主要発生源が位置する臨海部を風上として吹く海風との強い関連を示唆した。

光化学オキシダント汚染は、発生過程に紫外線が大きくかかわっているため、暖候期の高温多湿な晴天時に発生しやすい。伊勢湾周辺の典型的な光化学オキシダント汚染は、一般風の影響が小さい日に海風が強くなると共にみられ、午後、日射により光化学オキシダント発生量が増え、伊勢湾からの海風で内陸部へ輸送されながら、光化学オ

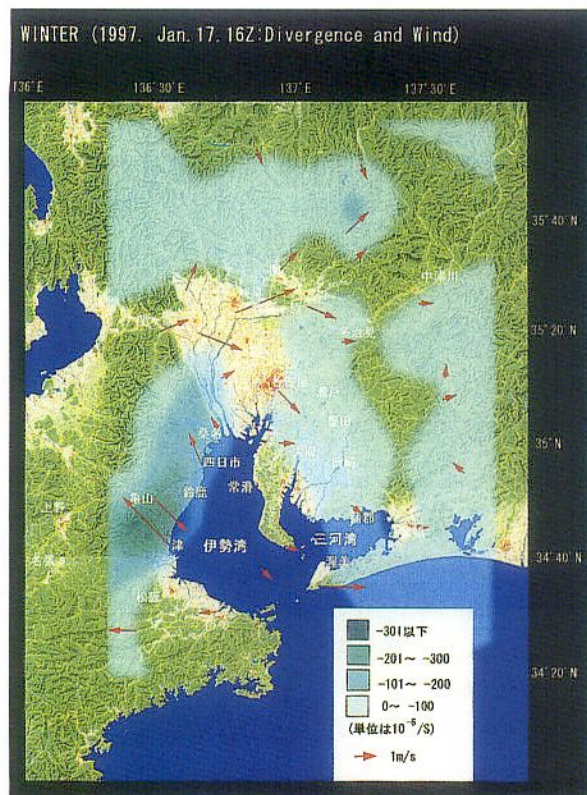


Fig. 6. Divergence and wind in winter in Ise Bay area (1997.1.17.16:00)

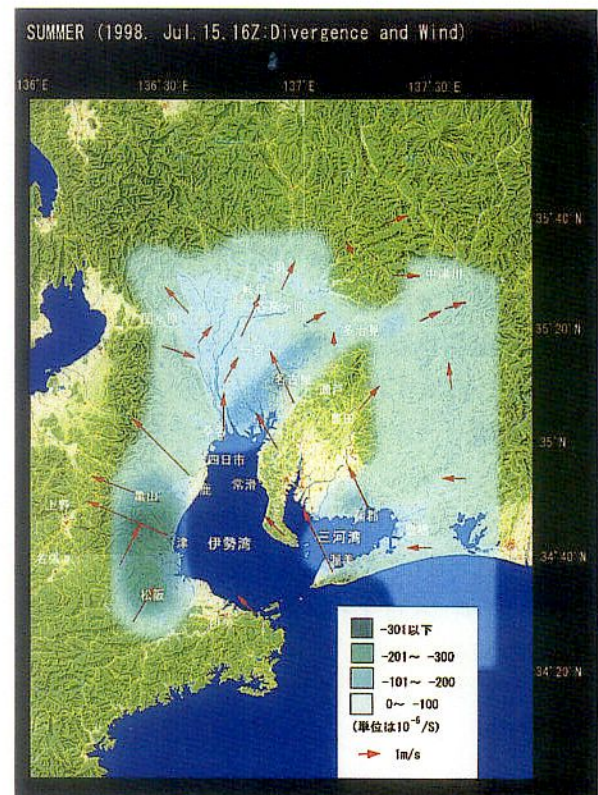


Fig. 7. Divergence and wind in summer in Ise Bay area (1998.7.15.16:00)

キシダント汚染へ発達していくことが予想される。

(3) 伊勢湾岸地域の風の動態

二酸化窒素 (NO_2) 測定の開始時である冬季の1月16日午後4時の風の分布をみると、伊勢湾岸は、若狭湾から琵琶湖を経て鈴鹿山脈を越えてくる北西風が卓越する。内陸域は養老山地から吹き込み中部山岳地帯へ向かい約2-3 m/sの西風または北西風、海岸付近は鈴鹿山脈を越えてくる北西風に覆われており、一般風の風速は約2-3 m/sで、比較的一般風が強い。夜間12時の風の分布をみると、北西風が卓越するパターンに変化はないものの、内陸で風速が約1-2 m/sの弱風または無風となっている。鈴鹿山脈、伊勢平野の伊勢湾左岸において西風が伊勢湾に吹き込む風系と、伊吹山地、濃尾平野からの北風との伊勢湾岸上で収束帯を形成していることが分かる。岡崎平野、三河高原からの東風で、弱いながら収束帯が形成されている。しかし、渥美半島や三河湾、伊勢、鳥羽地域などの伊勢湾の湾口付近では遠州灘、太平洋に向かって強い北西風が発達している。1月17日午前8時の風の分布をみると、愛知県は北東風が、岐阜県は北風が、三重県は南西風と前日の午後や夜中に比べると、風向が変わっており、内陸においては無風状態がかなりの地域で見られる。この無風地域においては、発生源から離れた地域においても風によって輸送された汚染物質の沈着により、汚染濃度が高くなる可能性が考えられる。午後4時の風の分布図 (Fig. 6) をみると、濃尾平野から鈴鹿山脈に至る伊勢湾左岸では風速約1-3 m/sの弱い海風が出現している。三河湾周辺では、西風が卓越し、伊勢湾からの海風であることが分かる。

これらのことから解析時間において風系を三つに分けることができる。つまり、(1) 北西風に覆われる (1月16日午後4時頃から午後12時頃まで) (2) 陸風・無風 (1月17日0時頃から午前8時頃まで) (3) 海風 (1月17日午前8時頃から午後4時頃まで) である。地上風データによる解析の場合、弱い一般風と海風との区別が困難であるため、ここでは海岸線に対して海側から吹く風を海風とし、陸側から吹く風を陸風とした。しかし、

解析時間において海風から陸風、陸風から海風への交替が認められたこと、高気圧に覆われた晴天日であったことから海陸風日であったといえる。

風の収束・発散の計算結果を用いて量的にどのくらい収束しているのかを調べた。図中の単位は 10^{-6}s^{-1} で、これは、シノプティックスケールのじょう乱による収束・発散の通常のオーダーである。点線のマイナス域が収束域であり、その絶対値が大きいほど収束の程度が大きくなる。

日中 (1月16日午後4時) には、伊勢平野から伊勢湾上を経て知多半島、名古屋市、岐阜市、各務原市、木曾川一帯、美濃三河高原周辺で弱いながら海風が収束しているため ($-50 \sim -200 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$)、二酸化窒素 (NO_2) の内陸への輸送、停滞が予想される。夜間 (1月16日の午後12時) には、伊勢湾を縁取るように海岸線に沿って収束している ($-50 \sim -100 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$)。海岸付近の四日市市、桑名市、津市などで収束域が形成されている。また、内陸の岐阜市、各務原市、美濃三河高原周辺にも収束域が形成されている ($-50 \sim -100 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$)。しかし、三河湾で ($200 \sim 250 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$) の大きな発散が見える。午前 (1月17日の午前8時) には、伊勢湾周辺では夜間と同様に収束域が形成されている ($-50 \sim -100 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$)。内陸の濃尾平野中央に位置している大垣市、尾西市付近、伊吹山地、養老山地、美濃三河高原周辺の山間地方には強い収束域が形成されている ($-200 \sim -250 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$)。午後 (1月17日の午後4時) には、伊勢湾上、伊吹山地に発散域 ($100 \sim 200 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$) が形成される (Fig. 6)。その他の地域、すなわち、鈴鹿山脈周辺 ($-200 \sim -300 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$) 強い収束域が形成されることが分かる。伊吹山地、木曾川一帯、美濃山地、美濃三河高原周辺には弱いながらも収束域が形成される ($-50 \sim -100 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$)。全体として日中に海風が鈴鹿山脈、内陸では伊吹山地や養老山地、木曾川一帯、美濃三河高原周辺では弱いながら海風が収束しているため、二酸化窒素 (NO_2) の内陸への輸送、滞留が予想される。

夏季の7月15日午後4時の風の分布図 (Fig. 7) をみると、伊勢湾周辺は、風速約3-4 m/sの海風が発達し、濃尾平野一帯に風速約3-4 m/sの海風が、伊勢平野から鈴鹿山脈の麓に至る地域では、

風速約4-5 m/sの海風が発達している。三河湾周辺から風速約3-4 m/sの海風が、美濃三河高原の西麓一帯まで海風が入り込んでいる。夜間0時の風の分布をみると、伊勢湾西岸においては、風速約1-2 m/sの海風が発達している。7月16日の午前8時の風の分布をみると、濃尾平野一帯に風速約2-3 m/sの海風が、鈴鹿山脈周辺には風速約5 m/sの海風が、渥美半島から三河湾を越えて風速約3 m/sの海風が発達している。午後4時の風の分布をみると、鳥羽市、四日市市、名古屋市、岐阜市、岡崎市付近で風速約4 m/sの海風が、渥美付近では風速約6 m/sの海風が発達し、伊勢湾岸から約100 km内陸まで海風が入り込んでいる。

夏季は、日中、夜間を通して海風が発達し、日中には海岸から約100 km近い内陸まで収束域(-50 ~ -400 × 10⁻⁶s⁻¹)が形成される。この収束域は特に、土岐川、木曾川に沿って、土岐市、恵那市、中津川市まで伸びており、窒素酸化物の内陸への輸送、停滞が予想される。鈴鹿山脈付近(-100 ~ -400 × 10⁻⁶s⁻¹; 7月15日午後4時)、

伊勢湾の海上(-100 ~ -150 × 10⁻⁶s⁻¹; 7月16日午後4時)にかなり強い収束域が形成されている。特に、鈴鹿山脈付近から濃尾平野一帯(-50 ~ -100 × 10⁻⁶s⁻¹)に至る広域に収束域が形成されているが、この地域は二酸化窒素(NO₂)濃度の比較的高い地域(0.02 ppm以上)と対応している。

風の流線や収束・発散の図と地形図を見比べると、山地や山脈に沿って、その麓で収束域が形成されることがわかる。例えば、Fig. 6の1月17日午後4時の伊勢湾左岸の伊勢平野と鈴鹿山脈との間、木曾川沿いの各務原市や多治見市と美濃三河高原との間で収束域が認められる。

伊勢湾岸地域の風の時間的変化と局地不連続線との関係を調べた大和田の研究(1994; Fig. 8)によると、暖候季における伊勢湾岸地域の局地不連続線は、夜間から早朝にかけて伊勢湾海上に現われ、特に、夏季の太平洋高気圧に覆われた夜間には、伊勢湾岸上に留まらず伊勢平野や濃尾平野北部、および庄内川沿いなどの内陸部にも発生する。また、日中は主に内陸に発生し、木曾川沿いの各

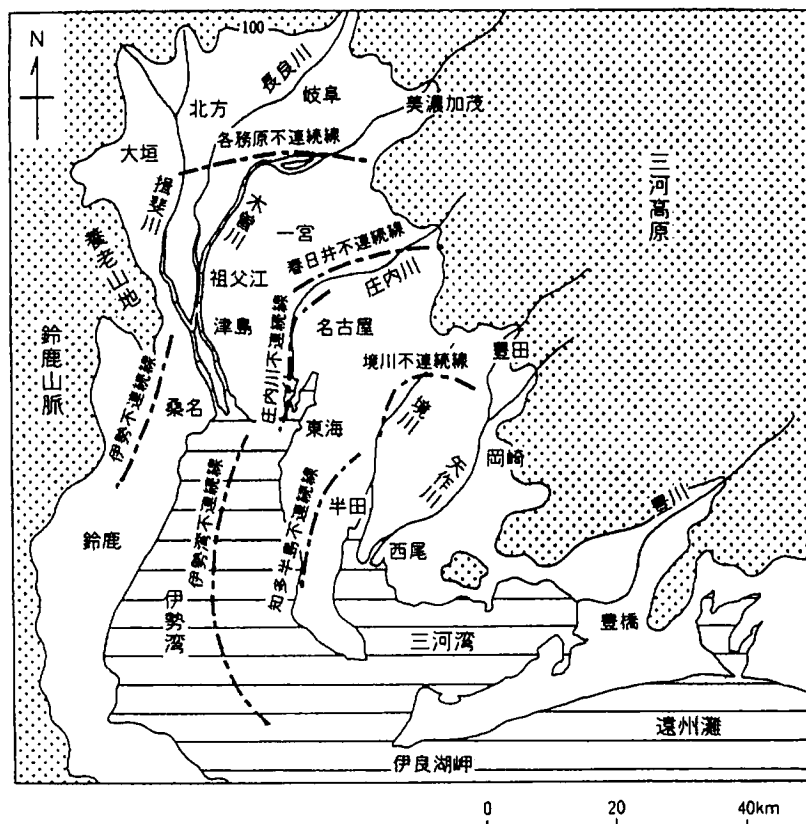


Fig. 8. Local Fronts in Ise Bay area (Owada, 1991)

務原を中心とする地域, 庄内川沿いの春日井付近, および知多半島と境川沿い, さらに移動性高気圧時においては豊川沿いの新城付近にも現われることが明らかになっている。特に, 出現頻度が高いのは, 山風と陸風吹走時における伊勢湾不連続線, 海風吹走時の各務原不連続線と知多半島不連続線である。

風の風向, 風速の分布図及び収束・発散の計算から, 気圧配置によっては, 冬場でも海風の発達するときには, 伊勢湾からの海風が地形の影響により, 鈴鹿山脈, 伊吹山地, 木曾川一帯, 美濃三河高原周辺で収束域を形成し, 汚染物質の溜まり場となっていることが分かる。つまり, 二酸化窒素 (NO_2) の濃度が内陸で高濃度を示すメカニズムについて次のような過程が考えられる。名古屋市を中心部及び北部の一宮市, 江南市, 各務原市などの木曾川に沿った地域, 名古屋市の北東部から春日井市, 多治見市など土岐川に沿った地域で, 汚染濃度が 0.03–0.035 ppm を示した。これらの地域は土地利用からみると, 汚染物質を排出する都市域やコンビナートなどの工業団地でもなく, むしろ汚染物質を低減する森林などに覆われている地域である。しかし, これらの地域の汚染濃度は発生源である海岸付近のコンビナート周辺の四日市市や桑名市の汚染濃度と等しい。つまり, 海岸近くの発生源からの汚染物質が海風によって内陸まで輸送され, これらの地域が汚染物質の溜まり場となっていることが考えられる。

4. 考 察

宇野 (1998) は, 朴 (1997, 1998) の研究結果と AMeDAS や大気汚染濃度測定局の風向・風速のデータを用いて, 伊勢湾岸地域の風系を再現する風一層モデルを構築し, 二酸化窒素 (NO_2) の内陸への輸送, 滞留について研究を行った。この内陸までの輸送の過程を風一層モデルでの結果を用いて説明した。

1月16日午後4時から24時の風系においては, 各務原市, 多治見市の高濃度地域をみると, モデルの結果と非常によく一致している。つまり, 濃尾平野での伊勢湾からの海風と濃尾平野内陸の中部山岳地域からの北西風の間でできた収束域と著しく一致していることが分かる。内陸の高濃度地

域の各務原市の北部一帯の汚染源をバックトラジェクトリー解析的に推定すると, 桑名市付近と考えられる。つまり, 桑名市付近からの南西風に乗って内陸まで運ばれたと考えられる。多治見市などの北東部一帯の汚染源は桑名市または名古屋市と考えられる。桑名市から名古屋市を通過する南南西の風によって内陸まで運ばれると考えられる。1月17日午前0時から午前8時の風系においては, 内陸域全体が北西風の弱風の陸風・谷風場に占められており, 汚染物質は海岸付近に滞留すると考えられる。この時間帯は内陸での汚染物質が除去されると考えられる。1月17日午前8時から午後4時の風系では, 濃尾平野の中央に収束域が形成されている。早朝に海岸付近にあった収束域が海風の強まりと共に内陸域に侵入したことが考えられる。これまでの研究において収束域 (局地不連続線) では, 汚染物質が高濃度になることが知られているので, この収束域の内陸への侵入は, つまり, 汚染物質の内陸への侵入と同じ意味であると考えられる。桑名市や名古屋市からの汚染物質が内陸に輸送されていることが分かる。

本研究は, 簡易測定器 (天谷式カプセル) を用いて, 半径約 2–4 km のスケールをもつ小学校を「町の環境測定局」として位置付け, 数多い測定局を構築することで, 大気汚染物質の発生源から風による移動, 地形による溜まり場の地理的分布の詳細な特徴を把握することができた。既存の大気汚染常時監視測定局はその立地に地域的ばらつきがあるため, 広範囲に及ぶ地理的分布を調べるには困難である。例えば, 三重県内の監視測定局は一般測定局が 24 地点, 自動車排出ガス測定局が 5 地点, 上層気象測定局が 1 地点の合計 30 地点あるが, 四日市市内の一般測定局が 11 地点, 自動車排出ガス測定局が 2 地点, 四日市周辺の上層気象測定局 1 地点など, 約半分当たる 14 地点が密集しており, 南北約 170 km にも及ぶ三重県全域には四日市周辺を除くと 16 地点しかなく, データが非常に限られている。特に, 伊勢, 鳥羽より南部地域には尾鷲, 熊野の 2 地点しかない。本研究では, 四方 2.5 km, 5 km, 10 km のメッシュ地点が得られ, 大気汚染物質の発生, 輸送, 溜まり場となる詳細な地理情報が取りやすくなっていることが分かる。

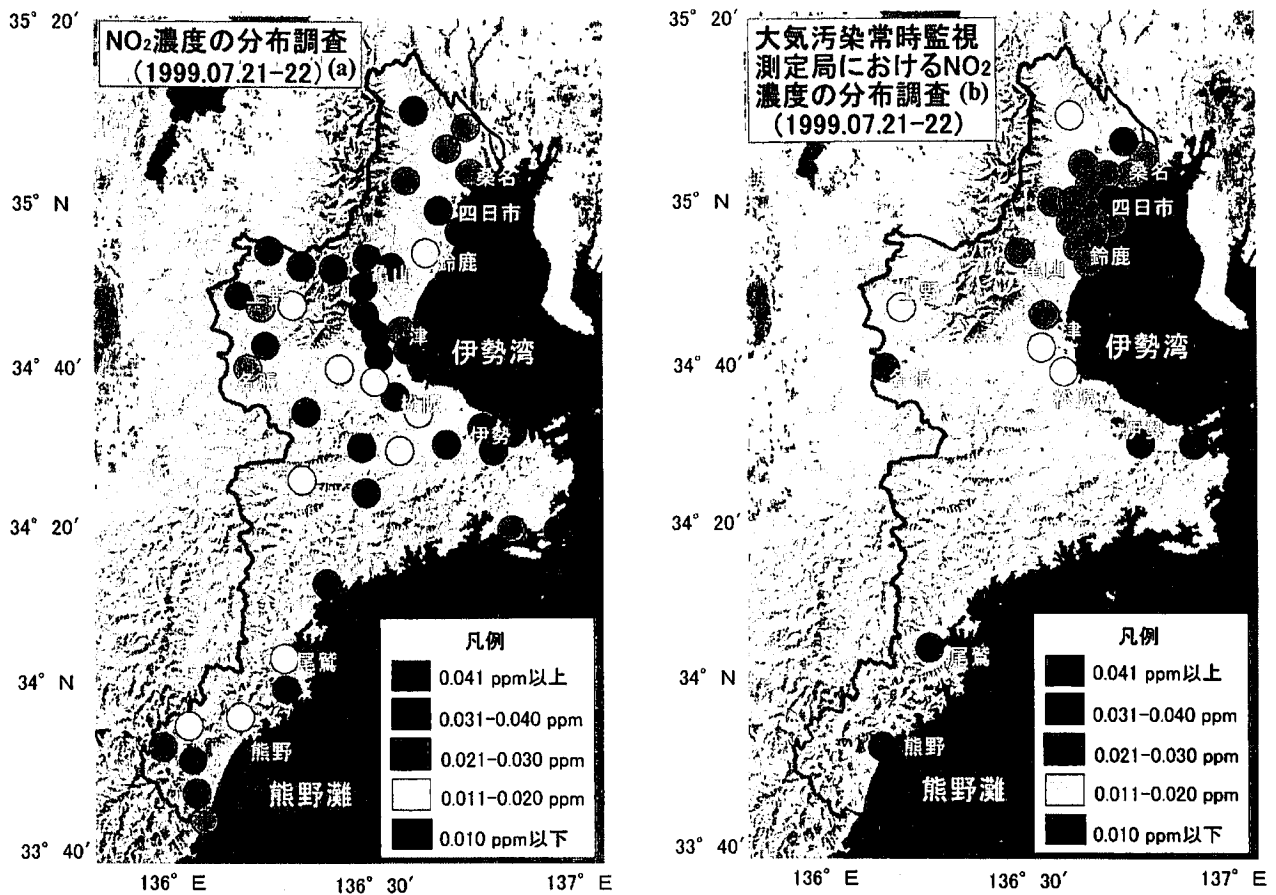


Fig. 9. NO₂ concentration (ppm) in summer in Mie Prefecture (24hrs from 1999.7.21.16:00 to 1999.7.22.16:00)
 (a) Elementary School Monitoring Network
 (b) Air Pollution Monitoring Station

三重県における本研究で構築された小学校のネットワークと大気汚染常時監視測定局との結果を比較した (Fig. 9 (a), (b)). 両方とも大気汚染濃度分布は桑名, 四日市, 亀山, 津などの北部の都市が尾鷲, 熊野の南部地域に比べて大気汚染濃度が高い結果を示した. しかし, 大気汚染常時監視測定局による Fig. 9(b)では, 伊勢, 鳥羽から尾鷲, 熊野に至る地域の測定局がないため, 中部山間地域の実態が解明できない. それに比べると, Fig. 9(a)では三重県全域をカバーするネットワークが構築されたために, 各地域における大気汚染の実態が明らかになっている.

2002年からは, 小・中学校における総合教育が実施されることとなっているが, 特に, 環境教育及び情報教育のあり方が主な焦点となっている. 「町の環境測定局」としての小学校を対象とした大気汚染測定ネットワークが確立された以上, 継続的な二酸化窒素 (NO₂) の測定を行うことによって, 環境教育と情報教育の接点を探ること

とも今後の課題である.

5. 結 論

本研究では, 冬季の1997年1月16日-17日, 夏季の1998年7月15-16日において伊勢湾地域の三重県, 愛知県, 岐阜県の195地点での二酸化窒素 (NO₂) 濃度の同時測定を行い, 風の流線, 収束・発散域の把握によって, 大気汚染物質の発生源, 輸送, 滞留に及ぼす地形効果, 地上風 (海陸風) がどのように影響を与えているかを解析した.

風の収束・発散は地形や海陸風と密接に関係している. 伊勢湾岸地域において, 海風のように内陸に向かう風は, 山地にぶつかり山麓で収束する. つまり, 海風の内陸への進入の際の通り道である谷沿いや内陸山地の麓に収束域が形成されることが分かった. また, 伊勢湾岸上, 三重県の伊勢平野から鈴鹿山脈に至る地域, 濃尾平野, 養老山地, 伊吹山地, 美濃三河高原地域での収束・発散域を

把握することができた。

二酸化窒素 (NO_2) の高濃度地域は名古屋市, 四日市市, 桑名市の他に, 各務原市と多治見市が高濃度を示した。風の流線解析や収束・発散の計算によって, 汚染源と輸送経路, 滞留地を推定することができた。主な大気汚染の発生源である大都市や工業地域でもない, 各務原市と多治見市の汚染濃度が高くなったのは, 各務原市は四日市市や桑名市方面からの南西風に, 多治見市は四日市市や桑名市方面から名古屋市を經由する南南西風に乗って内陸まで輸送され, 滞留されることが明らかになった。つまり, 風の日変化から次の過程が考えられる。まず, 夕方, 深夜から早朝にかけて, 海岸付近の都市・工業地域・道路上において発生した二酸化窒素 (NO_2) が, 日中, 海風に乗って内陸まで輸送され, 収束域となるこれらの地域で滞留される溜まり場となる。

今後の課題として, 夏季の高温多湿な気象条件により, 二酸化窒素 (NO_2) を含む窒素酸化物は光化学オキシダントの原因物質となるため, 夏季の大気汚染物質の滞留特徴に関する詳細な研究調査, つまり, 発生源から滞留地までの大気汚染濃度の濃度差, 時間差の調査が必要となる。また, 二酸化窒素 (NO_2) は主な発生源が自動車による移動発生源であるため, 固定発生源である硫黄酸化物 (SO_x) の発生, 輸送, 滞留とはメカニズムが異なることに注意する必要がある。この問題を解明するには, 伊勢湾岸の主要幹線道路上の交通量の分析も併せて行う必要がある。

謝 辞

二酸化窒素 (NO_2) の測定は三重県, 愛知県, 岐阜県の195か所の小学校の先生と生徒にお願いした。測定に際しては三重県, 愛知県, 岐阜県の教育委員会並びに三重県環境部や三重県教職員組合の多大な協力を頂いた。本研究への取組や対象小学校の選定, 協力への呼びかけの際には三重大学生物資源学部の高山 進教授に, GISには国士舘大学文学部の長谷川 均教授に数多くの助言や協力を頂いた。二酸化窒素 (NO_2) の分析に関しては三重大学人文学部大学院の橋 元輝氏及び磯谷明子氏に, AMeDAS資料の収集に際しては大気協会協会の小泉 隆氏に全面的にご協力を頂いた。

注

- 1) 国連環境計画 (UNEP) が制定した環境問題解決へ顕著な功績を上げた個人や団体に贈る賞。日本の地方自治体としては, 北九州市と四日市市が受賞している。

文 献

- 天谷和夫 (1993). 大気の汚れ. 合同出版, 84 p.
- 宇野 恵 (1998). 伊勢湾岸地域の大気汚染物質に影響を与える地上風の解析的研究. 筑波大学第一学群自然科学類地球科学専攻卒業論文, 55 p.
- 大和田道雄 (1994). 伊勢湾岸の大気環境. 名古屋大学出版会, 219 p.
- 甲斐憲次, 浦 憲一, 河村 武, 朴 (小野) 惠淑 (1995). 東京環状八号線道路付近の上空に発生する雲 (環八雲) の事例解析. 天気, 42(7): 417-427.
- 河村 武 (1987). 大気環境論. 気候と人間シリーズ, 朝倉書店, 138p.
- 河村 武 (1996). 東京湾の汚染と災害. 東京湾シリーズ, 築地書館, 208 p.
- 環境庁 (1997). 環境白書一各論一. 大蔵省印刷局, 83 p.
- 菊地 立 (1983). 関東地方の局地風系と高濃度大気汚染の関係についての研究. 国立公害研究所研究年報, 44: 31-55.
- 近藤祐昭, 水野建樹 (1990). NO_x 濃度はなぜ12月に高くなるのか. 公害, 25: 25-33.
- 谷山鉄郎 (1976). 伊勢湾周辺地域 (三重, 岐阜, 愛知) におけるアサガオ被害からみた光化学オキシダント汚染の広がり と汚染の原因について. 三重大学環境科学研究紀要, 第1号, 143-160.
- 谷山鉄郎 (1989). 恐るべき酸性雨. 合同出版, 143 p.
- 水越 治, 古市恒明 (1978). ラバークラッキング法による伊勢平野北部における大気中オゾン濃度地域分布の推定. 三重大学環境科学研究紀要, 第3号, 117-132.
- 三輪 英, 大和田道雄 (1979). 名古屋市域における O_3 濃度の分布と気圧配置との関係について. 愛知教育大学地理学報告, 49: 12-20.
- 森 博明, 北田敏広 (1999). 濃尾平野における高濃度日の出現状況と気象条件との関係. 大気環境学会誌, 34(5): 352-375.
- 朴 惠淑 (1997). 伊勢湾の汚染気象学. 伊勢湾地域の総合的利用と保全に関する研究 & 研究報告書 (中間報告), 三重県高等教育機関連絡会議, 75-78.
- 朴 惠淑 (1998). 伊勢湾の汚染気象学—二酸化窒素 (NO_2) 濃度分布の特徴. 伊勢湾地域の総合的利用と保全研究報告書 (中間報告2), 三重県高等教育機関連絡会議, 92-107.
- 長屋祐一, 谷山鉄郎 (1998). 二酸化窒素測定用簡易サンプリャー及び簡易比色計の点検評価. 人間と環境, 24(1): 10-16.
- 福山 薫, サンガ・ンゴイ・カザデイ (1996). 人工衛星データと気象観測資料等の解析による伊勢湾周辺の環境変動に関する研究. アジアの地域・自然環境と開発に関する調査研究論文集 (第3巻・最終号), 三重大学・国連連合地域開発センター (UNCIRD), 244-251.
- 福岡三郎, 伊藤政志, 大平俊男 (1972). 広域オキシダント汚染の解析. 東京都公害研究所年報, 3: 87-104.
- TANAKA, H.L. and MILKOVICH M.F. 1990. A heat budget analysis of the polar troposphere in and around Alaska during the abnormal winter of 1988/89. *Mon. Wea. Rev.*, 118: 1628-1639.