

# 八木山キャンパス沿道における大気環境と影響因子間の相関分析

内田 美穂\* 階上 昇平\*\* 舟木 由一\*\* 柳沼 慶行\*\*

## Correlation Between Atmospheric Pollutant and Environmental Factors at a Roadside in Yagiyama Campus

Miho UCHIDA\*, Shohei HASHIKAMI\*\*, Yoshikazu FUNAKI\*\* and Yoshiyuki YAGINUMA\*\*

### Abstract

We surveyed nitrogen dioxide and ozone concentrations, particulate matter (PM), traffic volume, and weather conditions including temperature, relative humidity, atmospheric pressure, wind speed, wind direction, solar radiation intensity, and ultraviolet radiation intensity at the side of a city road in Yagiyama Campus. Temporal variations in the relationships between atmospheric pollutants and environmental parameters were analyzed. At this site, traffic volume was not positively correlated with atmospheric pollutant concentrations, whereas ultraviolet radiation intensity was positively correlated with ozone and PM concentrations. This site experiences a westerly prevailing wind that blows from the road to the measurement site. Accordingly, higher concentrations of PM were recorded as coming from the west. Ozone concentrations were positively correlated with PM concentrations and negatively correlated with nitrogen dioxide concentrations. Temporal variations in the correlation coefficients representing associations between atmospheric pollutants and environmental factors were insignificant.

### 1. はじめに

日本の大気汚染対策は、工場などの固定排出源から発生する有害物質を対策する固定発生源対策と自動車から発生する有害物質を対策する移動発生源対策に分けられる。固定発生源対策としては、高度経済成長に伴う工場からの有害物質、ばい煙を制限するために1968年大気汚染防止法が制定された。移動発生源対策は自動車普及による自動車排ガスの増加のため2001年自動車NO<sub>x</sub>・PM法を制定し環境基準を定めた[1]。このような環境や人体に害を与える大気中の有害物質を常時監視するために、大気汚染防止法第22条に基づき一般環境測定局(一般局)、大気汚染防止法第20条及び22条に基づいて自動車排出ガス測定局(自排局)で測定している[2]。東北工業大学が立地する仙台市においては、計19測定局(一般局13局、

自排局6局)で測定を行っている[3]。大気汚染常時監視項目のうち、二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)、光化学オキシダント(Ox)、浮遊粒子状物質(SPM)、微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)の環境基準[4]と2018年度の全国の環境基準達成率[5]を表1に示す。

表1 大気常時監視項目の環境基準と環境基準達成率(2018年度)

項目	環境基準	基準達成率 [%]	
		一般局	自排局
NO <sub>2</sub>	日平均値が0.04 ppm~0.06 ppmの範囲内もしくはそれ以下	100	99.7
Ox	1時間値が0.06 ppm以下	0.1	0
SPM	日平均値が100 µg/m <sup>3</sup> 以下かつ1時間値が200 µg/m <sup>3</sup> 以下	99.8	100
PM <sub>2.5</sub>	年平均値が15 µg/m <sup>3</sup> 以下かつ日平均値が35 µg/m <sup>3</sup> 以下	93.5	93.1

Oxの環境基準達成率が著しく低く、他の項目は近年の環境基準達成率は一般局、自排局ともに高い。

窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)は、大部分が一酸化窒素として排出され、大気光化学反応により二酸化窒素に

2020年9月4日受理

\* 環境応用化学科 教授

\*\* 環境エネルギー学科 学生

変化し、さらに大気光化学反応により一酸化窒素へ変化する。Ox は、大気中で、工場や自動車から排出された窒素酸化物などの大気汚染物質が、太陽光の紫外線の働きによる光化学反応で生成される酸化性物質で、大部分はオゾンである[6]。粒子状物質(Particulate Matter; PM)のうち SPM (粒径  $10\mu\text{m}$  以下の粒子で 100%カット値)はその発生源として、工場などから出るばいじんや粉じん、ディーゼル車の排出ガス中に含まれる黒煙などの人為的発生源によるものと、土壌の飛散や黄砂などの自然発生源によるものがある。PM<sub>2.5</sub>(粒径  $2.5\mu\text{m}$  以下の粒子で 50%カット値)は SPM と同様に発生源から直接大気中へ粒子として放出される一次粒子と、大気に放出された気体が光化学反応や物理変化などにより粒子化する二次粒子に分けられる[7]。このように、大気汚染物質の生成は互いに影響を及ぼし合っているため、前述した環境基準達成率が高い項目であっても、今後も注視が必要となっている。

仙台市太白区八木山地区では 2015 年 12 月 6 日の市営地下鉄東西線の開業に合わせ、八木山動物公園駅に接続するひより台大橋が同年 10 月 17 日に、郡山折立線が同年 11 月 21 日、長町八木山線が同年 11 月 28 日に開通した。相次いで都市計画道路が開通したことにより、沿道環境、特に交通量は短期間で大きく変化すると考えられ、本研究室では沿道の大気環境、交通量及び気象条件の調査を行いその関係性を調査した [8]。この沿道調査では、測定時間帯を固定し、短時間(15~20 分間)の測定を実施したが、大気環境、交通量及び気象条件の関連性を明確にするためには比較的長時間測定可能な定点測定ポイントで連続測定する必要があると考えられた。そこで定点測定地点として東北工業大学八木山キャンパス前の市道八木山線沿道を設定し、沿道の大気環境、交通量及び気象条件を 5~6 時間連続測定した。これらの調査では測定項目間の相関を分析する際、同時刻または近接測定時刻のデータを用いた。しかし前述のように大気中の物質の生成には物質濃度や光化学反応、気象条件、そして物質の濃度には拡散等の物理条件も影響すると考えられ、それらの影響は時間差をもって生じる可能性があると考えられる。

そこで、本研究では東北工業大学八木山キャンパス前の沿道を測定地点に設定し、沿道の大気環境、交通量及び気象条件を測定し、測定項目間の相関分析に新たに時間差を考慮し、大気中の物質

濃度に影響因子と考えられる他の測定項目が時間差で影響を及ぼす可能性について検証した。

## 2. 調査方法

### 2.1 調査場所

市道八木山線東北工業大学八木山キャンパス沿道にて全項目の測定を行った。測定地点を図 1 に示す。



図 1 測定地点と交通量計数方向

調査時間内で太陽光を遮るものが無い、地点 B で日射強度と紫外線強度を測定した。それ以外の項目は全て地点 A で測定した。また、交通量は東北工業大学八木山キャンパスの西側を北東~南西方向に片道 1 車線で敷設されている市道八木山線の往来車両数を計数した。

### 2.2 調査日時

2019 年 5 月 15 日, 7 月 3 日, 7 月 10 日, 9 月 4 日, 9 月 12 日, 9 月 18 日, 10 月 2 日, 10 月 18 日, 10 月 23 日, 10 月 30 日, 11 月 6 日, 11 月 22 日, 12 月 6 日, 12 月 11 日, 12 月 23 日の計 15 回調査を実施した。

調査時間は 10:00 から 14:00 までの 4 時間とした。雨、強風、雪のない条件下で測定を実施し、測定中に降雨などがあった場合は測定を中止した。降雨等の気象状況や機器の不具合等により、データを取得出来なかった時間があった。

### 2.3 測定方法

#### (1) 二酸化窒素濃度

窒素酸化物捕集装置を作製し、ザルツマン試薬 25mL を容量 25mL のガラス製インピンジャーに入れ大気吸引の流量を 100mL/min に設定し、10 分

間吸引, 大気を流通させた。大気捕集は 15 分毎に 1 回ずつ行った。亜硝酸イオン標準液により, 二酸化窒素濃度 0 ppb から 25 ppb 相当の標準液を 5 段階に分け調製し, ザルツマン試薬と反応させた。標準液はザルツマン係数を 0.84 として調製した。この反応溶液の吸光度を 545 nm で測定し, 検量線を作成, 同様に捕集吸収液の吸光度を測定し, 二酸化窒素濃度を求めた。この濃度を測定時の気温から 20 °C換算に補正した値を最終的な二酸化窒素濃度とした。

## (2) オゾン濃度

オゾン検知管 (GASTEC No.18L) を手動型気体採取器に取り付け, 1 回 100mL, 1 分間の吸引を計 10 回行い, 合計 1000mL の大気を流通させた。この操作を 15 分毎に行なった。大気流通後のオゾン検知管の変色部をデジタルカメラで撮影し, 撮影した画像を Adobe Photoshop で RGB 値を読み取った。使用した検知管の 10 回吸引測定時の検出限度は 10ppb であることから, 検知管の目盛線上, または目盛線の間を 2 または 4 つに等分割した位置(13, 25, 38, 50, 63, 75, 83, 100 ppb 相当)の RGB 値を読み取りポイントとした。R/G 値が 0.8 より大きく, かつ, R-G 値が-25 より大きい値を示す層を青から白に変わった変色層として濃度を測定した。

## (3) PM 相対濃度

光散乱方式デジタル粉じん計 (KANOMAX 3442) を用いて相対濃度 (CPM; count per minute) 測定した。吸引口を上向きに, 地表面から高さ約 1m の位置に設置した。測定は 1 サイクル 5 分で連続 4 時間測定した。

## (4) PM 平均質量濃度

多段平行板式分級装置(SIBATA C-30 型)を吸引口に取り付け, ローボリウムエアサンプラー (SIBATA SL-30N 型) により流量 30 L/min で大気を吸引した。この条件において 10 $\mu$ m 以上の浮遊粒子は 100%カットされて吸引される。PM 捕集には直径 55mm のテフロンバインダーガラス繊維フィルター(SIBATA TF98)を用いた。

粉じん計とローボリウムエアサンプラーの併行測定時の沿道への機器設置状況を図 2 に示す。

捕集前後のフィルター質量を精密電子天秤 (SHIMADZU AUW120D) で 0.01 mg 単位で測定し, 捕集前後の質量差を捕集粉じん質量とした。捕集粉じん質量をサンプリングした大気の体積で除して平均質量濃度を計算した。



図 2 沿道測定地点への PM 測定機器設置状況

## (5) 質量濃度変換係数 (K 値)

相対濃度計による相対濃度測定値と捕集粉じん質量から質量濃度変換係数 (K 値) を計算した。K 値 [mg/(m<sup>3</sup>・CPM)] は, 捕集した粉じん質量 [mg] を吸引大気の体積 [m<sup>3</sup>] [大気吸引流量 [m<sup>3</sup>/min] に吸引時間 [min] を乗じて算出] で割り, さらに平均相対濃度 [CPM] で除して計算した。通常 K 値は相対濃度測定値から質量濃度を算出するために用いられるが, 本研究では粉じんの特性指標として, 粉じん 1 カウントあたりの質量濃度として評価した。以下に K 値の計算式を示す。

$$K \text{ 値} [\text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{CPM})] = \frac{\text{捕集した粉じん質量} [\text{mg}]}{\text{吸引流量} [\text{m}^3/\text{min}] \times \text{吸引時間} [\text{min}] \times \text{平均相対濃度} [\text{CPM}]}$$

## (6) 交通量

調査地点にビデオカメラを設置し, 調査地点前を通過する 双方向の車両を撮影した。撮影後に自動二輪車, 乗用車, バス, 小型貨物車, 大型貨物車の種別に, 台数を計数した。

## (7) 日射強度・紫外線強度

測定日時の太陽高度, 太陽方位を予め調べ, 三脚台のステージを太陽方位の方向に向けステージを日射角に垂直になるように調整した。このステージに紫外線強度計 (UV-340C: 波長範囲 250 ~ 390nm), 日射強度計 (ST530: 波長範囲 400 ~ 1100nm) のセンサーを置き, 15 分毎に測定した。

## (8) 気象

気象観測計 (Kestrel Pocket Weather Tracker Kestrel 4500, 5500) に風向測定用ウインドベインを取付け, 専用三脚に観測計を固定し, 図 1 に示した測定地点 A で 5 分毎に気温, 大気圧, 相対湿度, 風速, 風向を測定した。風向・風速データにより風配図を風配図作成ソフトウェア (Wind Rose PRO3, Enviroware) により作成した。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 風況

大気拡散の状況の参考とするために、測定地点の風向・風速データから風況をとりまとめた。表2に卓越風向とその割合を示す。風速0.3 m/s以下は「Calm(静穏)」とした。

図3に季節別と全測定日の風配図を示す。2019年の測定では8月以降風向のデータが取得できなかったため、2018年に同測定地点で測定したデータにより作成した風配図を併せて掲載した。

表2 地点A及び地点Bの風況

	地点A					地点B
	2019年	2018年			2018年	
	5,7月	夏季	秋季	冬季	全日	
第1卓越風向	西	北北東	西北西	西南西	西	西
頻度 [%]	16.3	15.8	16.3	31.9	13.6	13.8
第2卓越風向	西北西	西	西	西	西北西	西南西
頻度 [%]	15	14.6	12.1	17.6	11.8	9.6
平均風速 [m/s]	0.8	0.9	0.6	0.9	0.8	0.5
最大風速 [m/s]	2.7	2.8	3.6	4.3	4.3	3.7
Calm [%]	17.0	20.1	31.5	21.9	26.9	48.3

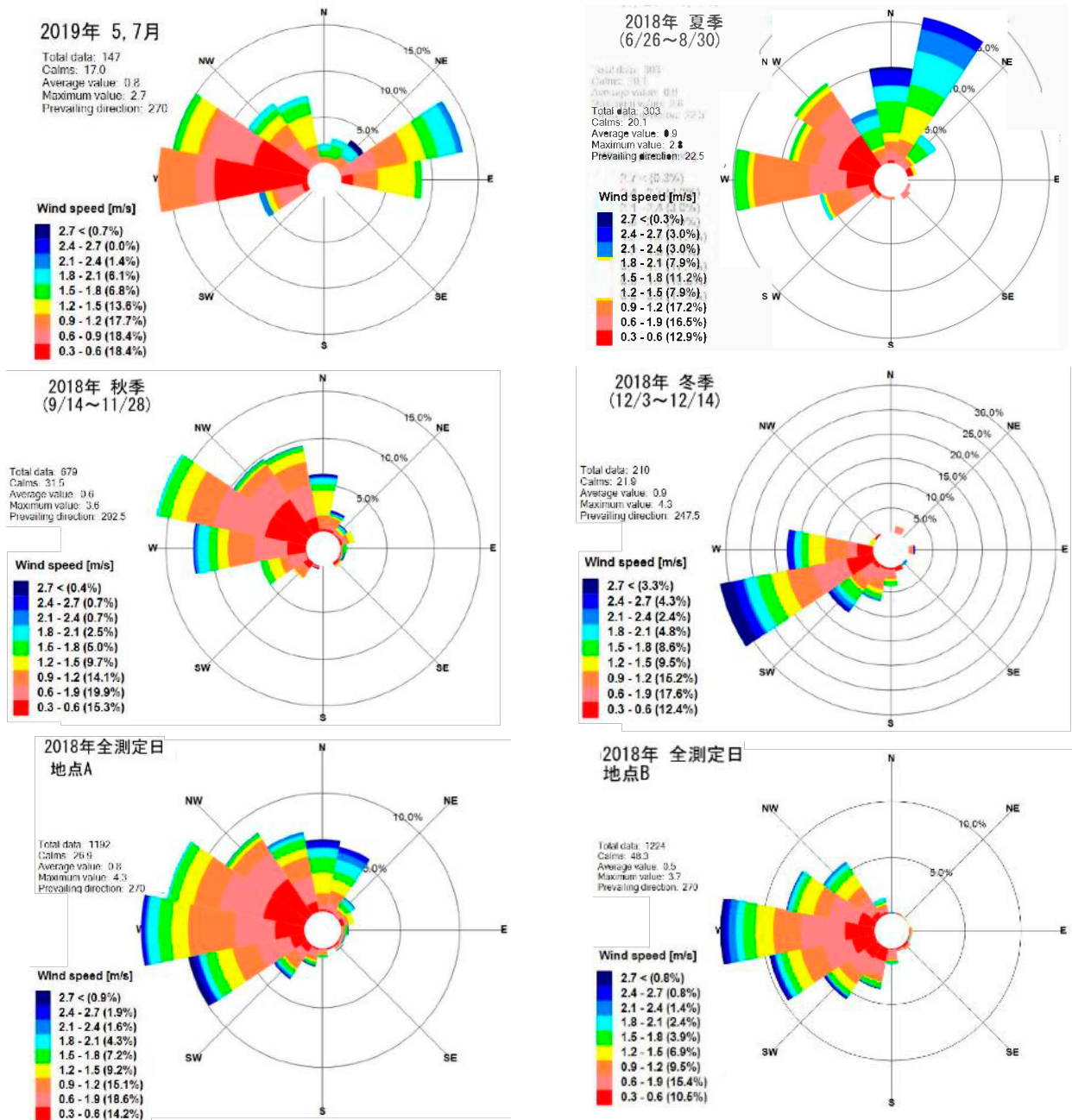


図3 測定地点A, Bの風配図 (2019年, 2018年)

地点 A の卓越風向は 2019 年 5,7 月, 2018 年 6 月～12 月ともに西であった。地点 B においても 2018 年 6 月～12 月期の卓越風向が西であり, 風配図も地点 A と類似していた。このことから, 地点 A では沿道とは反対方向(東側)に八木山キャンパス 1 号館の 3 階建ての建物があるため東側からの風の影響を受けないと予想されたが, 地点 A では建物の遮蔽により東側からの風が吹かないのではなく, 調査地点特有の風況として西からの風の影響を受けやすい場所であることがわかった。この結果から測定地点における卓越風向は, 市道から測定地点(八木山キャンパス)に吹き込む風向であり, 沿道を発生源とする物質がキャンパス側に拡散しやすい傾向が予想される。

季節毎(夏季; 6 月～8 月, 秋季; 9 月～11 月, 冬季; 12 月)の風配図を比較すると, 夏季に北寄りの風の割合が多い傾向がみられ, 季節により卓越風向に変化がみられたが, どの季節も西寄りの風の割合が多かった。また, 全ての測定時において平均風速は 1m/s 未満であったことから, 本測定時において風による急激な移流・拡散の影響は大きくないと考えられる。

### 3.2 大気汚染物質の傾向

#### (1) 二酸化窒素

図 4 に各測定日の二酸化窒素濃度の平均値と変動幅(最低値～最高値)を示す。

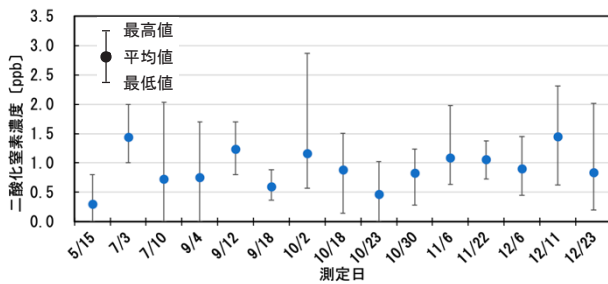


図 4 各測定日の二酸化窒素濃度の平均値と変動幅

測定日により相対濃度の変動幅は大きく異なっていた。全測定期間において二酸化窒素濃度の最高値が 2.9ppb, 平均値が 0.9ppb, 最低値が 0.0ppb だった。季節的な濃度変化は夏から冬にかけては見られなかったが, 春から夏にかけては増加の傾向がみられた。

#### (2) オゾン

大気汚染常時監視項目の一つである光化学オキシダントの成分はオゾン, パーオキシアセチル

ナイトレート, その他の光化学反応により生成される酸化性物質とされている[9]。光化学オキシダント成分は公定法で中性ヨウ化カリウム捕集溶液を用いる吸光光度法[10]で測定されている。本研究では光化学オキシダントの主成分であるオゾンを簡易分析法である検知管法により測定した。

図 5 にオゾン濃度, 図 6 に紫外線強度の各測定日の平均値と変動幅(最低値～最高値)を示す。

全測定日におけるオゾン濃度の最高値は 100ppb, 平均値は 59.8ppb, 最低値は 13ppb だった。紫外線強度の最高値は 59.1 W/m<sup>2</sup>, 平均値は 20.8 W/m<sup>2</sup>, 最低値は 4.5 W/m<sup>2</sup>だった。

オゾン濃度は, 変動幅に季節変化はみられなかったが, 平均値は, 春, 夏, 秋, 冬と徐々に低くなった。これは太陽の日照時間が関係していると考えられ, 日照時間が短い秋から冬の時期はオゾン濃度が低くなったと考えられる。

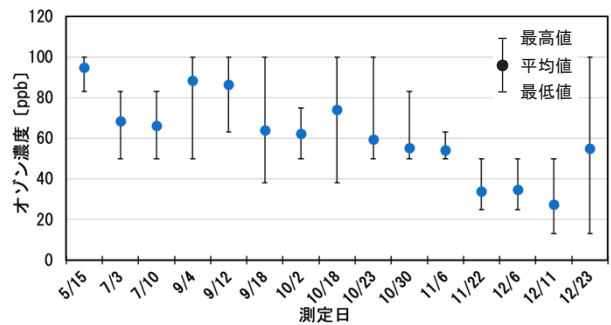


図 5 各測定日のオゾン濃度の平均値と変動幅

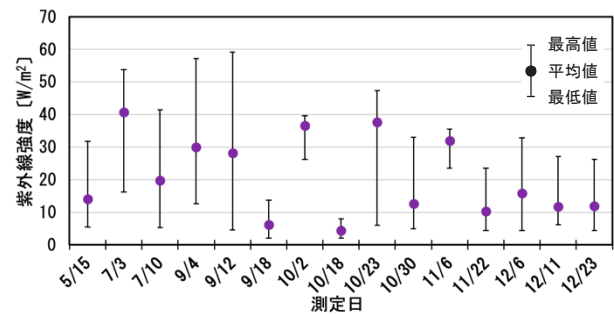


図 6 各測定日の紫外線強度の平均値と変動幅

オゾンは大気中で, 工場や自動車から排出された窒素酸化物などの大気汚染物質が, 太陽光の紫外線の働きにより光化学反応をおこして生成される酸化性物質[6]であることが報告されている。オゾンの生成に影響する紫外線強度については季節よりも測定日ごとの天気による影響が大きく, 晴れの日には紫外線強度が高く, 曇り日は低くなった。

(3) 粒子状物質

図 7 に各測定日の PM 相対濃度変動幅(最低値～最高値)と平均値を示す。また、図 8 に各測定日の PM 捕集質量と  $K$  値を示す。

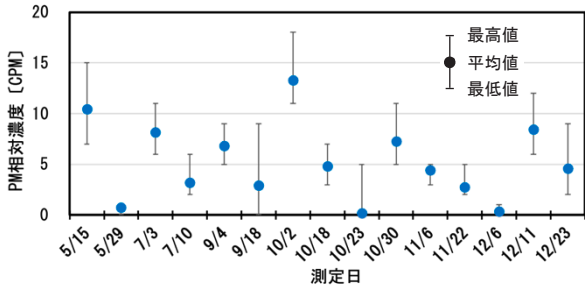


図 7 各測定日の PM 相対濃度の平均値と変動幅

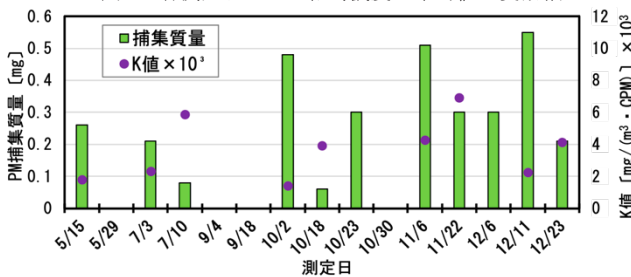


図 8 各測定日の PM 捕集質量及び  $K$  値

PM 相対濃度の平均値は測定日により 0～14 CPM の範囲で変化した。濃度の変動幅や平均値の高低に季節的な変動の傾向はみられなかった。

PM 捕集質量は 0～0.55mg の範囲であった(ただし、5/29, 9/4, 9/18 は未測定)。

PM 捕集質量が N.D.(検出限界未満)の 10/30, PM 相対濃度が著しく低かった 10/23, 12/6 を除いた場合の  $K$  値は  $1.4 \times 10^{-3} \sim 6.9 \times 10^{-3} \text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{CPM})$  の範囲であった。 $K$  値は日間で同オーダーレベルで変動していた。

捕集質量と相対濃度のデータに欠損がなく、相対濃度が著しく低い場合を除外して、4 時間連続測定の累積 PM 相対濃度と PM 捕集質量間の相関を検証した。図 9 に累積 PM 相対濃度と PM 捕集質量の散布図を示す。

相関係数は 0.43 となり、中程度の正の相関を示した。しかし、高い相関を示さなかったこと、 $K$  値が測定日により幅をもっていることから、測定地点の PM は日によりその組成・性状が変動していることが示唆された。後述する交通量の日間変化が大きくなかったことから、組成・性状の変動が変動する要因としては PM 発生源が自動車由来と大気中の化学反応による二次生成と複数存在するためと考えられる。

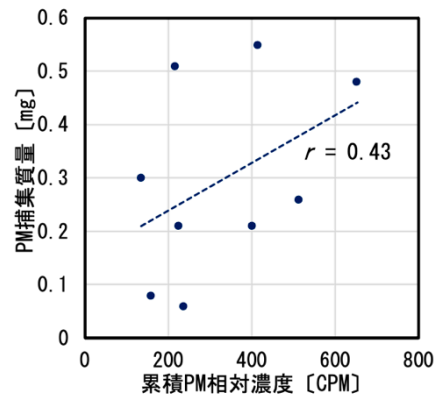


図 9 累積 PM 相対濃度と PM 捕集質量の相関

図 10 に 2019 年 5 月, 7 月の地点 A の風向と PM 相対濃度の散布図を示す。

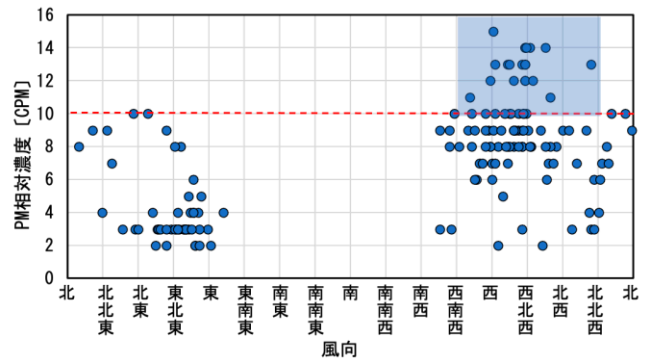


図 10 風向と PM 相対濃度の散布図(2019 年 5 月, 7 月)

10 CPM 以上の比較的高濃度の PM が観測されたのは風向が西南西～西～北北西の時であった。また、測定地点の同時期の卓越風は西, 西北西であり、高濃度の PM が観測された時の風向とほぼ一致した。図 3 より西の風は市道から測定地点に向かう風であり、道路を走行する自動車由来の PM を検出している可能性が示唆された。

3.3 交通量

図 11 に測定日毎の (a) 総交通量と (b) ディーゼル車交通量を示す。本研究における大気汚染物質への影響因子測定項目の最小測定サイクルを 5 分に設定しているため、総交通量とディーゼル車交通量は、5 分あたりの平均値に換算して整理した。

総交通量(図 11(a)), では 10 月 23 日が最高値を示し、ディーゼル車交通量(図 11(b))では 10 月 18 日に最高値を示した。

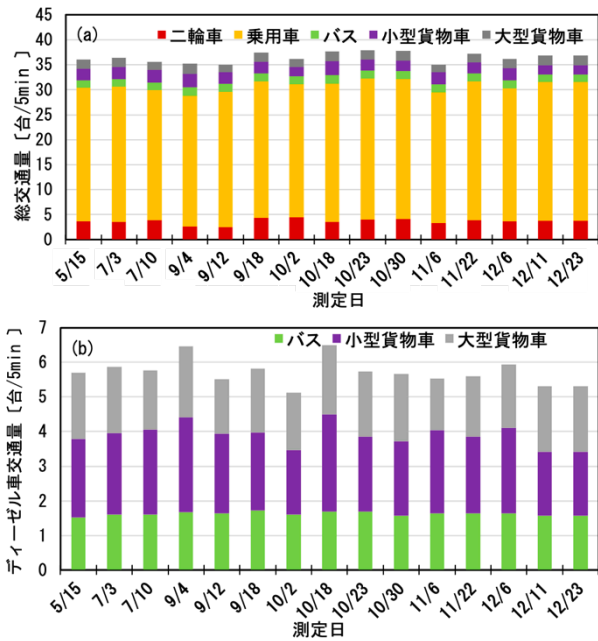


図 11 測定日毎の 5 分間平均交通量  
(a)総交通量, (b)ディーゼル車交通量

総交通量全体の日間の変動係数が 2.6%, ディーゼル交通量全体では 36% となり, ディーゼル車の交通量の日間変動が大きかった。また, 測定時間 10:00~14:00 の範囲で 10:00~10:30 に二輪車の交通量が他の時間帯よりも多少多かったが, その他の項目では測定時間内での増減はほとんどなかった。季節毎に測定時間内での交通量の変化を整理したが, 季節による変化はみられなかった。

### 3.4 各測定項目間の同時刻相関

大気汚染物質と他の測定項目間の同時刻の測定値を用いて相関分析を行った。気温, 相対湿度, 気圧, 風速, 交通量は 10:00~14:00 における 5 分毎の測定値を用いた。15 分間隔で測定した項目(日射強度, 紫外線強度, 二酸化窒素濃度, オゾン濃度)は 15 分毎の測定値を 15 分間その値を平均値として保持していると仮定し, 5 分×3 回分の値として用いた。

#### (1) 二酸化窒素

二酸化窒素濃度の測定値(データ数  $n=720$ )を用いて他の測定項目との間の相関係数を算出した。図 12 に同時刻測定値による二酸化窒素濃度と各測定項目間の相関係数を示す。

日射強度との間に弱い正の相関( $r = 0.22$ ), 相対湿度との間に負の相関( $r = -0.43$ )を示した。また, オゾンとの間の相関係数は負の値 ( $r = -0.21$ )を示した。

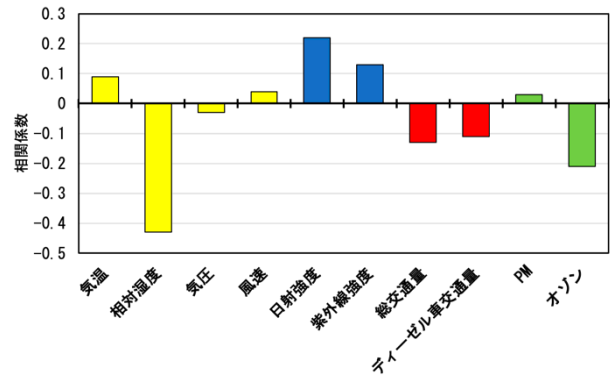


図 12 同時刻測定値による二酸化窒素濃度と各測定項目間の相関係数

正の相関を示した日射強度について日射強度の高低レベルにより測定値を 2 グループに分け, それぞれのグループで二酸化窒素濃度と日射強度の相関分析を行った。

日射強度の高低レベル分けの閾値を決定するために全測定値のヒストグラムを作成した。図 13 に日射強度の階級別データ数のヒストグラムを示す。

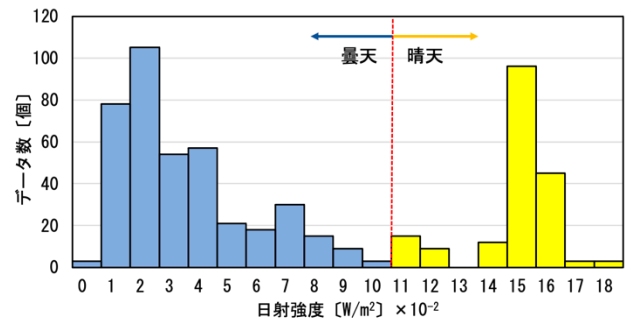


図 13 日射強度の階級別データ数(全測定)

日射強度は 200W/m<sup>2</sup> にピークをもつ低強度のグループと 1500W/m<sup>2</sup> にピークをもつ高強度のグループに分かれた。そこで 1000W/m<sup>2</sup> 未満を日射強度の低い「曇天」, 1000W/m<sup>2</sup> 以上を日射強度の高い「晴天」と定義して, 全データを 2 グループにわけた。

「曇天」データ群, 「晴天」データ群にわけ, 日射強度と二酸化窒素濃度の相関分析を行った。

天候別の二酸化窒素濃度と日射強度の散布図を図 14 に示す。「晴天」のデータ数は 258 個, 「曇天」のデータ数は 462 個である。晴天時の二酸化窒素濃度と日射強度の相関係数  $r$  は -0.36 となり, 曇天時の  $r$  は 0.15 となった。日射強度の高低グループにより相関性が異なることから, 二酸化窒素濃度と日射強度の間には直接的な相関がないと考えられる。

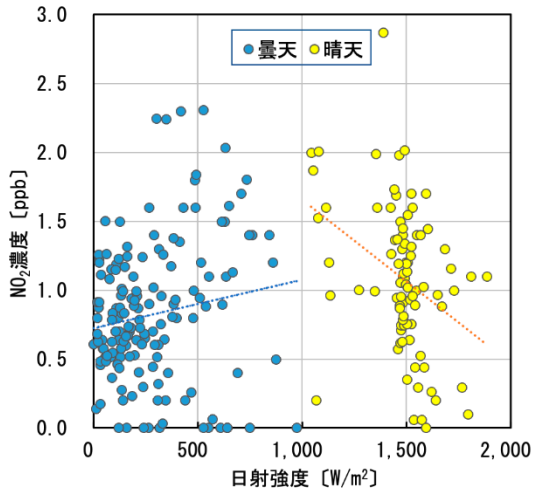


図 14 天候別二酸化窒素濃度と日射強度の散布図

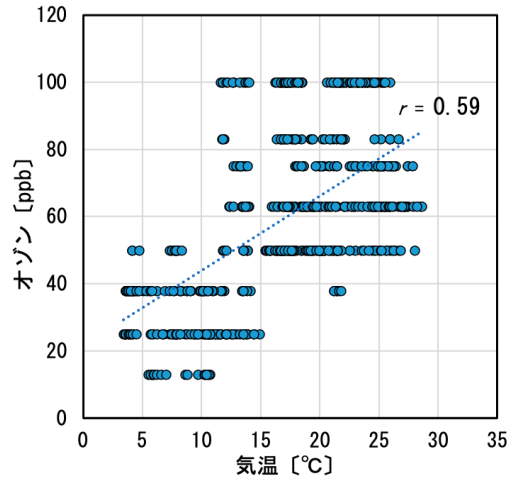


図 16 オゾン濃度と気温の散布図

(2) オゾン

図 15 に同時刻測定値によるオゾン濃度と各測定項目間の相関係数を示す。

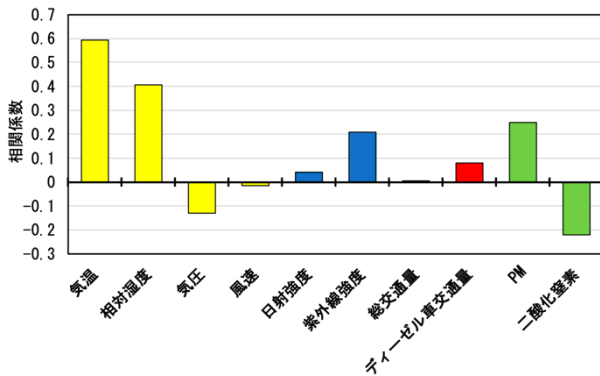


図 15 同時刻測定値によるオゾン濃度と各測定項目間の相関係数

同時刻(時間差 0 分)で正の相関(相関係数  $r > 0.2$ )を示したのは、気温、相対湿度、紫外線強度、PM だった。また二酸化窒素は負の相関を示した。以下に相関を示した項目について散布図より相関性の検証を行った。

気温とオゾン濃度の散布図を図 16 に示す。オゾン-気温間の相関係数は  $r = 0.59$  と正の相関を示した。また、オゾン-紫外線強度間の相関係数は  $r = 0.21$  と弱い正の相関を示した。オゾンと高レベル紫外線強度(30W/m<sup>2</sup>以上;全データ 720 のうち 210 が該当)の測定値の散布図を図 17 に示す。紫外線強度が高い場合限定するとオゾン-紫外線強度間の相関係数は  $r = 0.57$  と大きく上昇した。これはオゾンの生成に紫外線による光化学反応が関与しているという報告[6]と一致している。

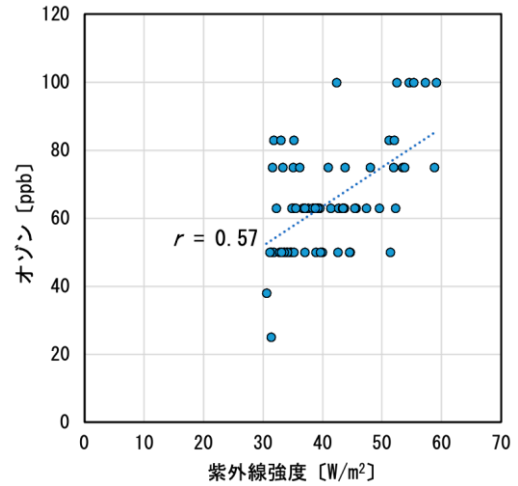


図 17 オゾン濃度と高レベル紫外線強度(30W/m<sup>2</sup>以上)の散布図

図 18 に気温と日射強度、紫外線強度の散布図を示す。

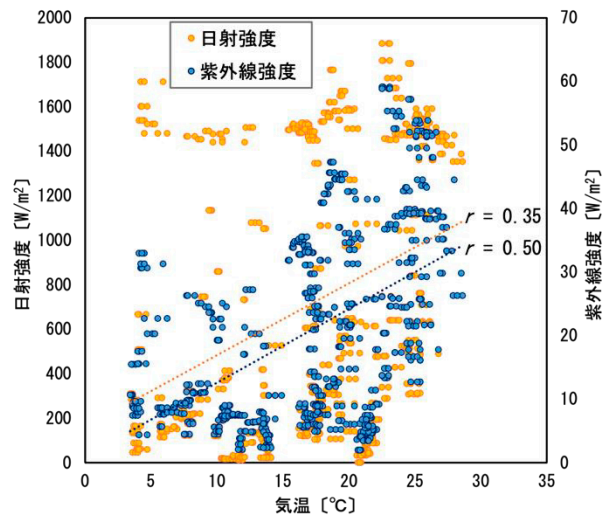


図 18 気温と日射強度、紫外線強度の散布図



気温と日射強度間の相関係数は  $r = 0.35$ 、紫外線強度との間の相関係数は  $r = 0.50$  といずれも正の相関を示した。オゾン濃度と気温、オゾンと高レベル紫外線強度、気温と紫外線強度の各相関はいずれも高いが、これは紫外線強度が高い晴天時は気温が高く、その条件下でオゾン濃度が高くなったとも考えられる。気温は直接オゾン生成に影響を及ぼしているのではなく、オゾンと気温との間には擬似相関が生じている可能性がある。

図 19 にオゾン濃度と二酸化窒素濃度の散布図を示す。

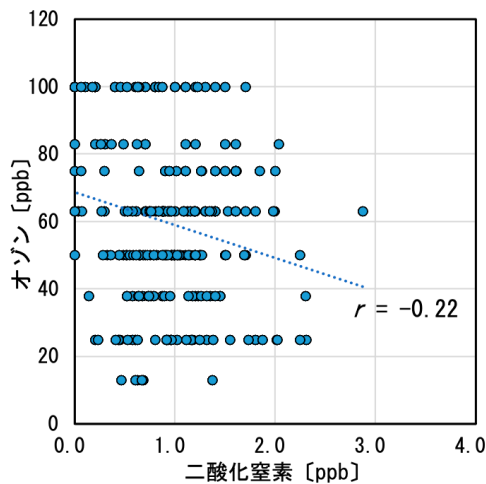
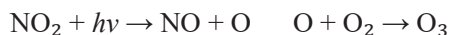


図 19 オゾン濃度と二酸化窒素濃度の散布図

オゾン-二酸化窒素間の相関係数は  $r = -0.22$  となり、負の値を示した。オゾンの生成経路のひとつとして、空気中の二酸化窒素が太陽光の紫外線による光化学反応により一酸化窒素と原子状の酸素に分かれ、その原子状の酸素が空気中の酸素と結びつき生成することがわかっている[11]。化学反応としては次のようになる。



そのためオゾンと二酸化窒素の間には生成-消費の関係があり、負の相関が予想され、本研究でも相関係数は負の値となった。しかし、本研究で測定された二酸化窒素濃度の範囲は非常に狭く、オゾンと二酸化窒素間の相関については明確にはわからなかった。

また、オゾンと相対湿度の間の相関係数は 0.41 と正の相関を示した一方で、二酸化窒素と相対湿度の間の相関係数は -0.43 と逆に同程度の負の相関を示した。大気中の水蒸気がオゾンや二酸化窒素の生成や消失に及ぼす影響については、今回の研究では明確にすることはできなかったが、オゾンと二酸化窒素の間には生成-消費という相補的な関係があることから、オゾンと相対湿度、二酸

化窒素と相対湿度の相関は直接的に影響を及ぼしているのではなく、擬似相関にあると考えられる。

### (3) 粒子状物質

PM の相関分析において累積 PM 相対濃度が著しく低い測定日は相関分析の対象外とした。

図 20 に同時刻測定値による PM 相対濃度と各測定項目間の相関係数を示す。

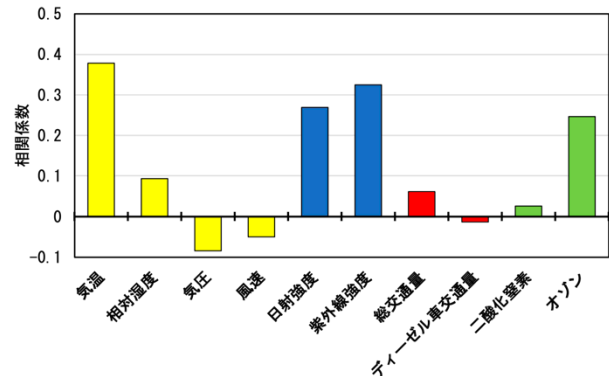


図 20 同時刻測定値による PM 相対濃度と各測定項目間の相関係数

測定時刻を一致させた時間差 0 分において、PM 濃度に対して正の相関(相関係数  $r > 0.2$ )を示した項目は、相関係数の高い順に気温、紫外線強度、日射強度、オゾン濃度であった。

一方、交通量とは正の相関を示さなかった。このことから本研究の測定地点において、PM 濃度は移動体等からの直接排出よりも、光化学反応等による二次生成に大きく影響を受けていると考えられる。

気温と PM 相対濃度には最も高い相関が見られた。気温と PM 濃度の関係としては PM の光化学反応による二次生成で気温が高いことによる反応の促進が考えられる。一方で、前述のように、本測定において気温と紫外線強度の相関も相関係数 0.50 と高いことがわかっている。気温と紫外線強度の両方が高い状況として天候が「晴天」であることが考えられる。「晴天」の条件で紫外線強度が高いことで PM の二次生成が促進され、同時に「晴天」であることから気温が上昇し、結果として気温と PM 濃度の相関が高くなる擬似相関の関係にある可能性が考えられる。

紫外線強度と PM 相対濃度には気温に次いで高い相関がみられた。紫外線強度は前述のように PM の二次生成に関与する。紫外線強度との間に高い相関を示す一方で交通量との相関が低かったことから、本測定条件下において PM は移動体

の排出源からの直接排出よりも大気中での二次生成が主要であることが示唆された。

日射強度とPM 相対濃度には紫外線強度との間よりも少し低い正の相関があった。図 21 に日射強度と紫外線強度の散布図を示す。

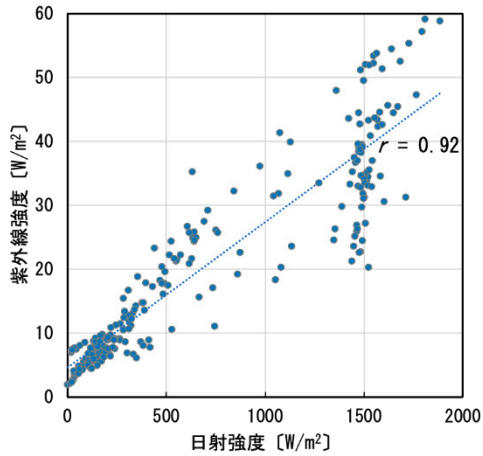


図 21 日射強度と紫外線強度の散布図

日射強度と紫外線強度の間には非常に高い正の相関( $r = 0.92$ )があり、前述の理由から日射強度が高いという条件は「晴天」の天気でもあり同時に紫外線強度が高いという条件でもあるので、見かけ上弱い正の相関を示した(擬似相関)と考えられる。これは後述の日射強度の高低レベルでデータをグループ分けし、PM との相関分析した結果、高低いずれのグループの相関係数も低下したことからも示唆される。

オゾン濃度と PM 相対濃度間は弱い正の相関を示した。これは、PM の二次生成にオゾンが関与している[12]ことが関係していると考えられる。

### 3.5 各測定項目間の時間差相関

各測定項目に対して大気汚染物質(二酸化窒素, オゾン, PM)濃度を 5 分刻みで遅延対応させて時間差相関分析を行った。

#### (1) 二酸化窒素

図 22 に二酸化窒素と各測定項目間の相関係数の時間変化を示す。

0~30 分の範囲で相関係数が±0.1 以上変化した項目は無かった。最も変化が大きかったのはディーゼル車交通量で、15 分まではほとんど変化が無かったが、15 分から 30 分にかけて相関係数は-0.12 から-0.18 に低下した。また、オゾンは 0 分から 15 分にかけて相関係数は上昇し、その後 30 分まで低下した一方で、交通量はその逆の変化を示した。

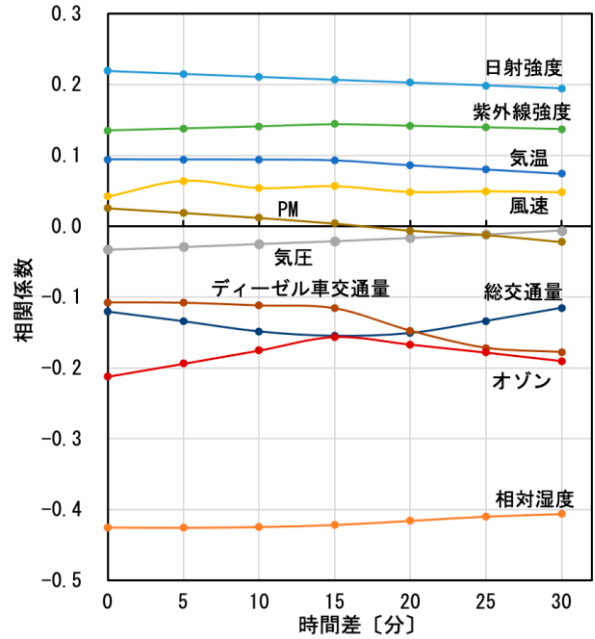


図 22 二酸化窒素濃度と各測定項目間の相関係数の時間変化

#### (2) オゾン

図 23 にオゾンと各測定項目間の相関係数の時間変化を示す。

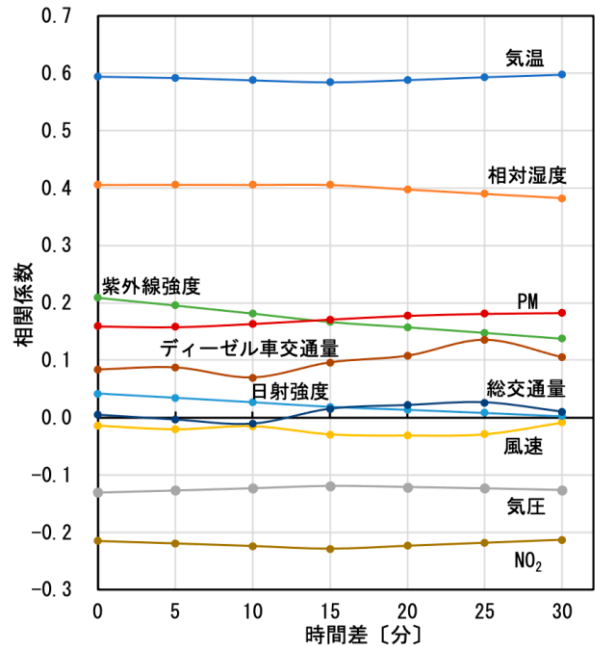


図 23 オゾン濃度と各測定項目間の相関係数の時間変化

0~30 分の範囲で相関係数が±0.1 以上変化した項目は無かった。最も変化が大きかったのは紫外線強度で、0 分から 30 分にかけて一様に減少し、0.21 から 0.14 になった。この結果から、紫外線の光化学反応によるオゾンの生成はその速度が速く、時間経過した遅延発生は小さいと考えられる。特に、揮発性有機化合物(VOC)が存在しない場合、

オゾンの生成は”分”スケールを超えない時間で生成すると報告されている[13]。

(3) 粒子状物質

図 24 に PM と各測定項目間の相関係数の時間変化を示す。

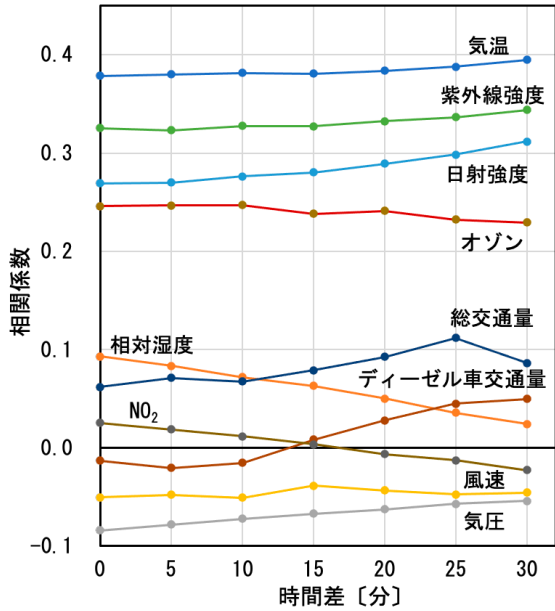


図 24 PM 濃度と各測定項目間の相関係数の時間変化

0~30 分の範囲で相関係数が±0.1 以上変化した項目は無かった。時間差が大きくなるとともに相関係数が上昇した項目は紫外線強度、日射強度、気圧、総交通量、ディーゼル車交通量で、逆に低下した項目は相対湿度、オゾン、二酸化窒素であった。

正の相関を示した日射強度については、時間差が大きくなるとわずかに相関係数が上昇したことから光化学反応で PM が生成するまで時間がかかる可能性も考えられる。そこで、日射強度の高低レベルにより測定値を 2 グループに分け、それぞれのグループで PM 相対濃度と日射強度の相関分析を時間差別に行った。日射強度の高低の閾値は 3.4(1)と同様に 1000W/m<sup>2</sup> 未満を日射強度の低い「曇天」、1000W/m<sup>2</sup> 以上を日射強度の高い「晴天」と定義して、全データを 2 グループに分けた。また、対応させるデータは時間差 0 分の組み合わせと、日射強度測定時刻に対して 30 分後の PM 相対濃度を対応させた時間差 30 分の組み合わせで行った。

図 25 に日射強度と PM 相対濃度の散布図[(a)時間差 0 分, (b)時間差 30 分]を示す。

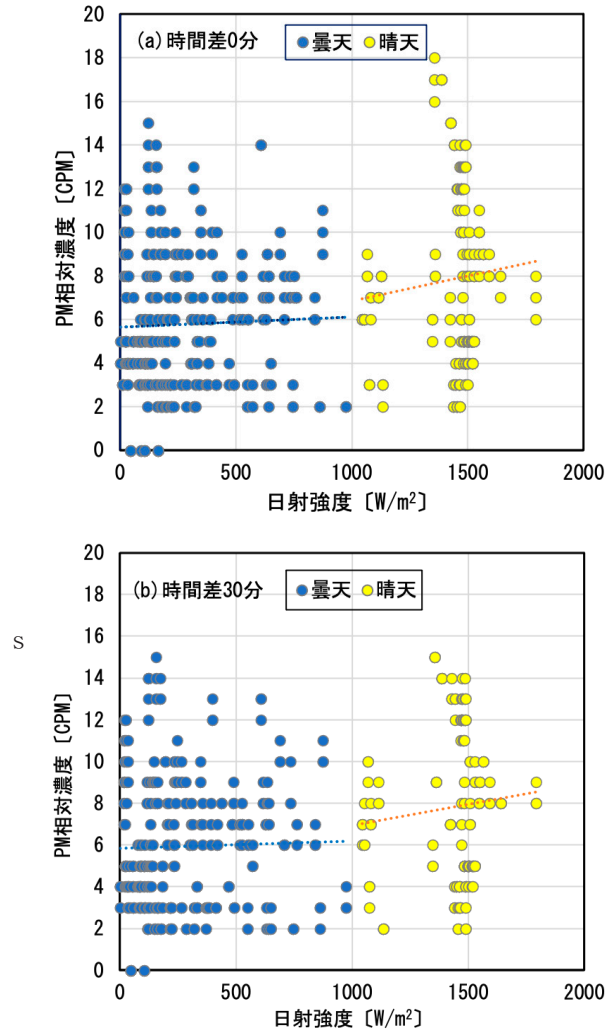


図 25 PM 濃度と日射強度の散布図, 時間差 (a) 0 分, (b) 30 分

時間差 0 分において曇天時の相関係数  $r$  は 0.03, 晴天時は 0.09 となり、日射強度レベル別に 2 グループに分けると相関係数は全測定値による値から低下した。時間差 30 分において曇天時の相関係数  $r$  は 0.03, 晴天時は 0.09 となり時間差 0 分の場合とほとんど変化しなかった。このことから日射強度の高低のレベルと時間は直接的に PM の生成に影響を及ぼしていないと考えられる。

4. まとめ

仙台市道八木山線東北工業大学八木山キャンパス沿道に設置した定点測定地点において、大気汚染物質濃度(二酸化窒素, オゾン, PM), 交通量, 日射強度, 紫外線強度, 気象(気温, 気圧, 相対湿度, 風向, 風速)をそれぞれ測定し、大気汚染物質生成に係る影響因子間の相関分析を同時刻と時

間差対応で行った。

測定地点における卓越風向は西寄りの風で、市道から測定地点（八木山キャンパス）に吹き込む風向であり、高濃度のPMが観測された時の風向とほぼ一致した。

測定期間、時間内の交通量の日内・日間変動は小さく、また、大気汚染物質濃度との相関も低かった。

二酸化窒素濃度と高い正の相関を示す測定項目は無く、相対湿度との間に負の相関を示した。

オゾン濃度と正の相関を示したのは気温、相対湿度、紫外線強度、PMであった。紫外線強度データを30W/m<sup>2</sup>以上に限定した場合に、その相関は高くなり、オゾン生成に紫外線が影響していることが示された。

PM濃度は気温、紫外線強度、日射強度、オゾン濃度と弱い正の相関を示した。

気温と日射強度及び紫外線強度、日射強度と紫外線強度との間には高い相関があった。これらの項目の一つが大気汚染物質濃度と正の相関を示している場合、他の項目が介在した擬似相関を生じている可能性がある。

各大気汚染物質とその他の測定項目間の相関係数の時間変化はほとんど無かった。

本研究により、測定項目対象の中で、測定地点における大気汚染物質の生成に影響を及ぼしている因子を一部明らかにすることができた。

## 謝 辞

東北工業大学工学部環境エネルギー学科卒業論文として本研究の先行研究となる沿道測定に携わっていただいた赤川陽太氏、鈴木美里氏、加藤祐美氏、櫻井英人氏、皆川大地氏、渡邊勝也氏には大気測定、サンプリング、試料分析、データ解析等多くの測定分析を担当していただきました。ここに記し厚く御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- [1] 新・公害防止の技術と法規 2018 I 公害総論, 公害防止の技術と法規 編集委員会 編, pp.2-3, pp.91-92, 2018.
- [2] 環境法のフロンティア, 黒川哲志, 奥田進一, 成文堂, p.45,48, 2016.
- [3] 仙台市 大気環境情報サイト, <http://sendaitm.jp/taiki/>
- [4] 大気汚染に係る環境基準, 環境省  
<https://www.env.go.jp/kijun/taiki.html>

- [5] 平成30年度大気汚染状況について, 環境省  
[http://www.env.go.jp/air/osen/jokyo\\_h30/index.html](http://www.env.go.jp/air/osen/jokyo_h30/index.html)
- [6] 新・公害防止の技術と法規 2018 II 大気概論, 公害防止の技術と法規 編集委員会 編, pp.71-74, pp.80-81, 2018.
- [7] 関口和彦, “入門講座 PM<sub>2.5</sub>-第1講 PM<sub>2.5</sub>の特性”, 大気環境学会誌, 45 巻4号, pp.A54-A60, 2010.
- [8] 内田美穂, 矢目和也, 山家魁貴, 阿部誠也, 生出隼涼, 福島慧二郎 “仙台市八木山地区都市計画道路開通による沿道環境への影響”, 東北工業大学紀要 理工学編, 第37号, pp.11-19, Mar. 2017.
- [9] 詳細リスク評価書シリーズ 24 オゾン-光化学オキシダント-, 中西準子, 篠崎裕哉, 井上和也, pp.13-14, 2009.
- [10] 大気中のオゾン及びオキシダントの自動測定器, JIS B 7925, 日本規格協会, 2006.
- [11] SPM とオキシダントの生成メカニズム, 環境省  
<https://www.env.go.jp/air/osen/voc/materials/101.pdf>
- [12] 微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)とは, 環境省  
<http://www.env.go.jp/air/osen/pm/info.html#ABOUT>
- [13] 詳細リスク評価書シリーズ 24 オゾン-光化学オキシダント-, 中西準子, 篠崎裕哉, 井上和也, pp.20-26, 2009.