

## 臨海部大気環境中濃度測定調査

平成 30 年 12 月 17 日  
東京都環境局環境改善部

## 1. 背景と本調査の目的

1988 年以降、二酸化硫黄 ( $\text{SO}_2$ ) 環境基準は都内測定局において全局達成の状況である (2000 年度三宅島の噴火を除く)。しかし、 $\text{SO}_2$  を含む硫黄酸化物 ( $\text{SO}_x$ ) の大気中の酸化反応によって生成される硫酸塩 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) は、夏季において高濃度事象が確認される  $\text{PM}_{2.5}$  の主成分である。2015 年度における都内  $\text{SO}_x$  排出量では、約 7 割を船舶が占め、発電所も一定の割合を占めている。これらは臨海部に集中しているが、大気汚染常時監視測定局は設置されていない。また、船舶からの排出については、国際海事機関 (IMO) により世界的に海洋汚染防止条約 (MARPOL 条約) で規制されており、船舶燃料油の硫黄分規制は、2020 年より現行の 3.5% 以下から 0.5% 以下に強化されることが決定している。

本調査では、船舶が停泊・航行する臨海部において、 $\text{PM}_{2.5}$  の主成分である硫酸塩の生成源である  $\text{SO}_2$  を含めた大気環境の実態を把握するため、臨海部における大気環境調査 ( $\text{SO}_2$  濃度等の測定) を実施し、 $\text{PM}_{2.5}$  濃度への影響を考察・検討するための基礎資料とすることを目的とした。

## 2. 調査方法

## 2.1. 調査期間

2018 年 7 月 20 日から 9 月 13 日の 8 週間

## 2.2. 調査地点

都内臨海部 4 地点と大気汚染常時監視測定局 3 地点。調査地点と調査項目を表 1 及び図 1 に示す。

表 1 臨海大気環境濃度測定調査地点と測定項目

調査 No	調査地点	測定項目			
		$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	$\text{O}_x$	$\text{PM}_{2.5}$
1	埋立管理事務所 (埋立地区)	○	○	○	○
2	臨海トンネル換気所 (青海)	○	○	○	
3	都立若洲ヨット訓練所 (若洲)	○	○	○	
4	城南島海浜公園 (城南島)	○	○	○	
5	港区台場一般環境大気測定局 (台場局)	○	○	○	○
6	中央区晴海一般環境大気測定局 (晴海局)	○	○	○	○
7	大田区東糀谷一般環境大気測定局 (東糀谷局)	○	○	○	○

\* 地点 5～7 は大気汚染常時監視測定局 (以下「常時監視測定局」という。)



図 1 臨海部大気環境調査地点

黄色：調査期間に設置した調査地点、白色：大気汚染常時監視測定局  
 国土地理院の電子地形図（タイル）の淡色地図を基に作成

## 2.3. 測定方法

### (1) 測定方法（表 1 地点 1～4）

原則として、「環境大気常時監視マニュアル（第 6 版）（平成 22 年 3 月 環境省）」（以下「常時監視マニュアル」という。）に準拠して測定した（測定項目は表 2 のとおり）。  
 各測定項目の他、気象（気温、湿度、風向、風速）を 10 分毎に測定した。

表 2 調査地点における測定方法とデータ収集単位

測定項目	測定方法	測定機器	収集単位
SO <sub>2</sub> （常時監視型）	紫外線蛍光法（乾式）	東亜 DKK 製 GFS-312	1 分
SO <sub>2</sub> （高感度型）	紫外線蛍光法（乾式）	Thermo Fisher 製 Model 43i-TLE	1 分
NO <sub>x</sub> （NO、NO <sub>2</sub> ）	化学発光法（乾式）	堀場製 APNA-370	1 分
O <sub>x</sub>	紫外線吸収法（乾式）	堀場製 APOA-370	1 分
PM <sub>2.5</sub>	β線吸収法	紀本電子工業製 PM-712	1 時間
風向・風速	風速：発信方式 風向：ポテンションメーター	タマヤ計測製 KDC-S04	10 分
気温・湿度	温度：白金測温抵抗体 湿度：静電容量式	タマヤ計測製 HMP155	10 分

\*SO<sub>2</sub>（高感度型）、PM<sub>2.5</sub>については、地点 1 の埋立地区において測定を実施した。

## (2) その他

臨海部周辺の常時監視測定局3地点（表1地点5、6、7）において、大気汚染自動測定機（SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、O<sub>x</sub>）について、データロガーを用いて、1分値を取得した（表3のとおり）。

取得した測定データその他、測定局のPM<sub>2.5</sub>及び気象データについても速報値を取得した。

表3 データロガーを用いて取得した常時監視測定局の測定項目と測定方法等

測定項目	測定方法	測定機器	収集単位
SO <sub>2</sub>	紫外線蛍光法（乾式）	東亜 DKK 製 GFS-312	1分
NO <sub>x</sub> （NO, NO <sub>2</sub> ）	化学発光法（乾式）	堀場製 APNA-370（地点5・6） 紀本電子業製（地点7）	1分
O <sub>x</sub>	紫外線吸収法（乾式）	堀場製 APOA-370	1分

## 3. 結果及び考察

### 3.1. 常時監視型 SO<sub>2</sub> 計と高感度型 SO<sub>2</sub> 計の比較

埋立地区で実施した常時監視型と高感度型の SO<sub>2</sub> 計の関係を考察した。常時監視型と高感度型の SO<sub>2</sub> 計の関係を図2に示す。冬季予備調査と同様に、高感度型と常時監視型の SO<sub>2</sub> 計は概ね良好な関係が得られたことから、常時監視型の SO<sub>2</sub> 濃度についても高感度型の SO<sub>2</sub> と同等に SO<sub>2</sub> の濃度傾向を捉えることが可能だと考えられる。一方、冬季予備調査と異なり、濃度差は低濃度から高濃度まで概ね 2 ppb 程度のバラつきがあることが確認された（図2右図）。また、図3に示すように、調査期間全体でみると、濃度ピークは高感度型と常時監視型では概ね同様の傾向が確認された。

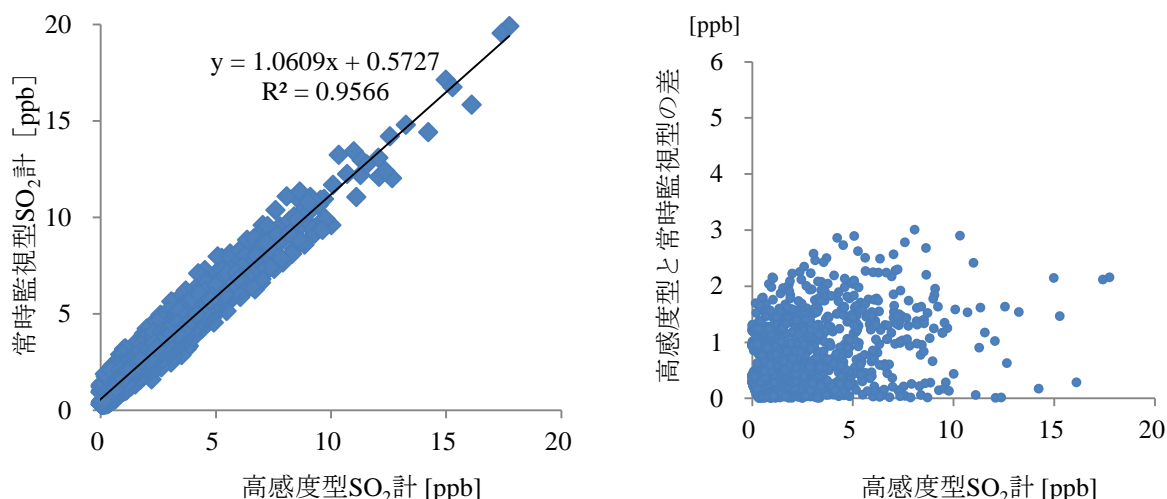


図2 埋立地区における常時監視型と高感度型の SO<sub>2</sub> 測定機の関係

本調査のような SO<sub>2</sub> 濃度が高くなる臨海部等においては、常時監視マニュアルで定める測定機による測定結果を用いても、気塊の移流の考察等、濃度変化の比較による影響解析は十分可能であると考えられる。

今後の考察では、埋立地区については高感度型、その他の地点については常時監視型の測定結果を用いて考察した。

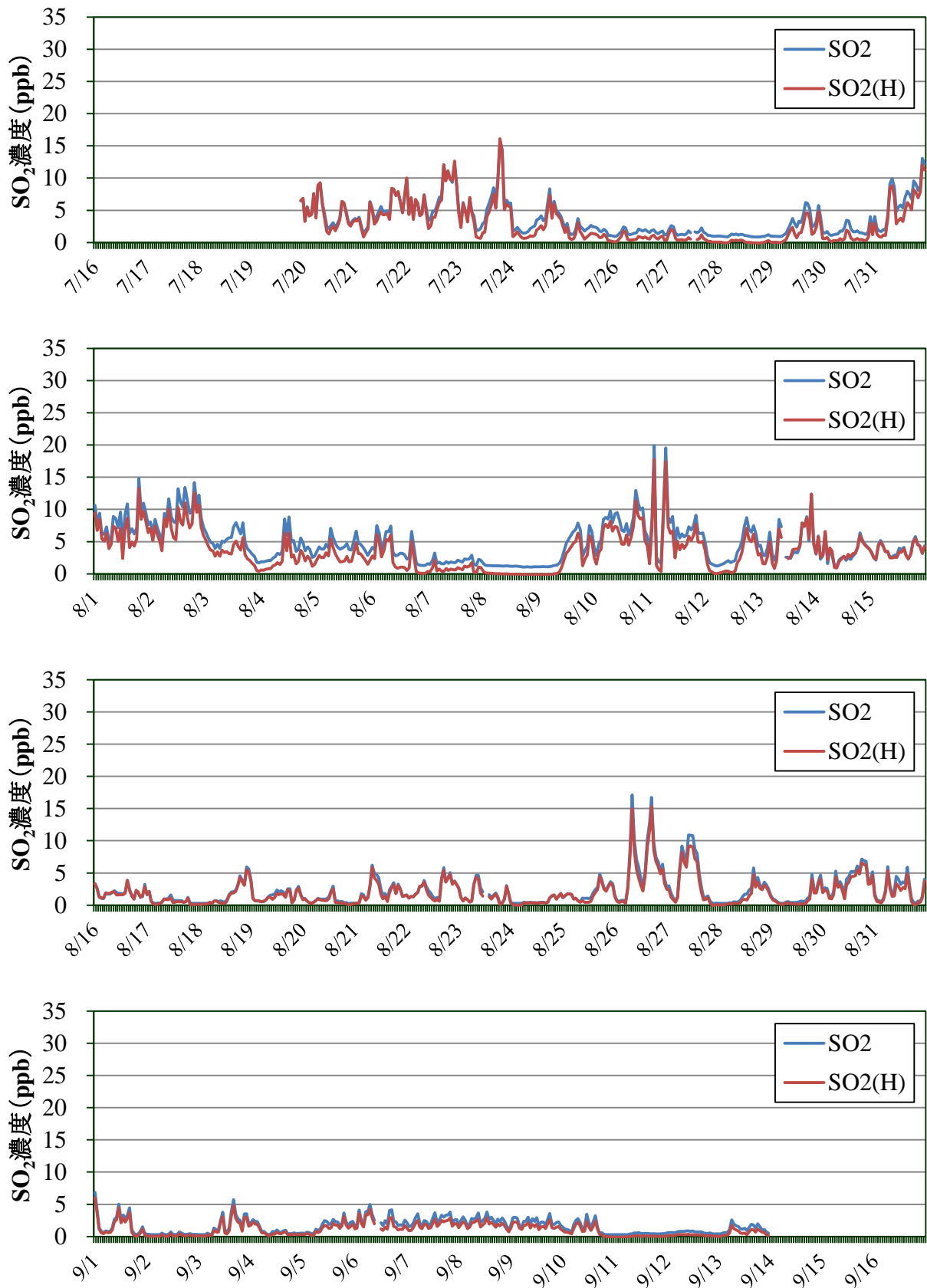


図 3 調査期間における埋立地区の SO<sub>2</sub> 濃度 (常時監視型、高感度型)  
 SO<sub>2</sub> : 常時監視型、SO<sub>2</sub>(H) : 高感度型

### 3.2. 測定結果

調査期間における各調査地点の測定結果を表 4、図 4～図 8 に示す。測定値は、データロガーで取得した1分値を平均して1時間値に整理した。臨海部周辺のどの調査地点でも、比較的高濃度のピークがいくつかみられ、若洲を除いて濃度変動は同様な傾向が確認された。SO<sub>2</sub>、Ox、PM<sub>2.5</sub>に着目した場合、高濃度傾向を示したのは、以下の期間であった。

- ・ SO<sub>2</sub> (10 ppb 以上を高濃度傾向と設定)  
7月23～24日、7月30～31日、8月1～2日、8月10～12日、8月25～28日
- ・ Ox (100 ppb 以上を高濃度傾向と設定)  
7月23～24日、8月1～4日、8月27日
- ・ PM<sub>2.5</sub> (30 µg/m<sup>3</sup> 以上を高濃度傾向と設定)  
7月22～24日、8月2～6日、8月25～27日

表 4 各調査地点における測定結果 (期間平均値及び期間最大値)

測定項目	項目	埋立地区	測定局					
			若洲	城南島	青海	晴海局	台場局	東糀谷局
SO <sub>2</sub>	平均値	2.4	2.0	2.7	3.4	2.5	3.6	2.6
	ppb 最大値	17.7	13.4	24.6	27.1	21.5	30.0	18.6
NO	平均値	8.1	3.9	5.7	6.0	2.6	5.6	3.3
	ppb 最大値	48.1	40.3	59.7	55.3	53.9	71.9	45.6
NO <sub>2</sub>	平均値	14.6	11.4	13.4	16.5	14.5	15.9	14.3
	ppb 最大値	59.9	46.9	55.6	58.8	56.2	65.8	49.4
Ox	平均値	16.7	24.0	22.1	18.3	23.3	21.0	22.3
	ppb 最大値	131.8	134.4	142.0	133.0	129.1	119.4	153.3
PM <sub>2.5</sub>	平均値	13.3				11.6	13.0	13.6
	µg/m <sup>3</sup> 最大値	49.4				46.0	45.0	48.0

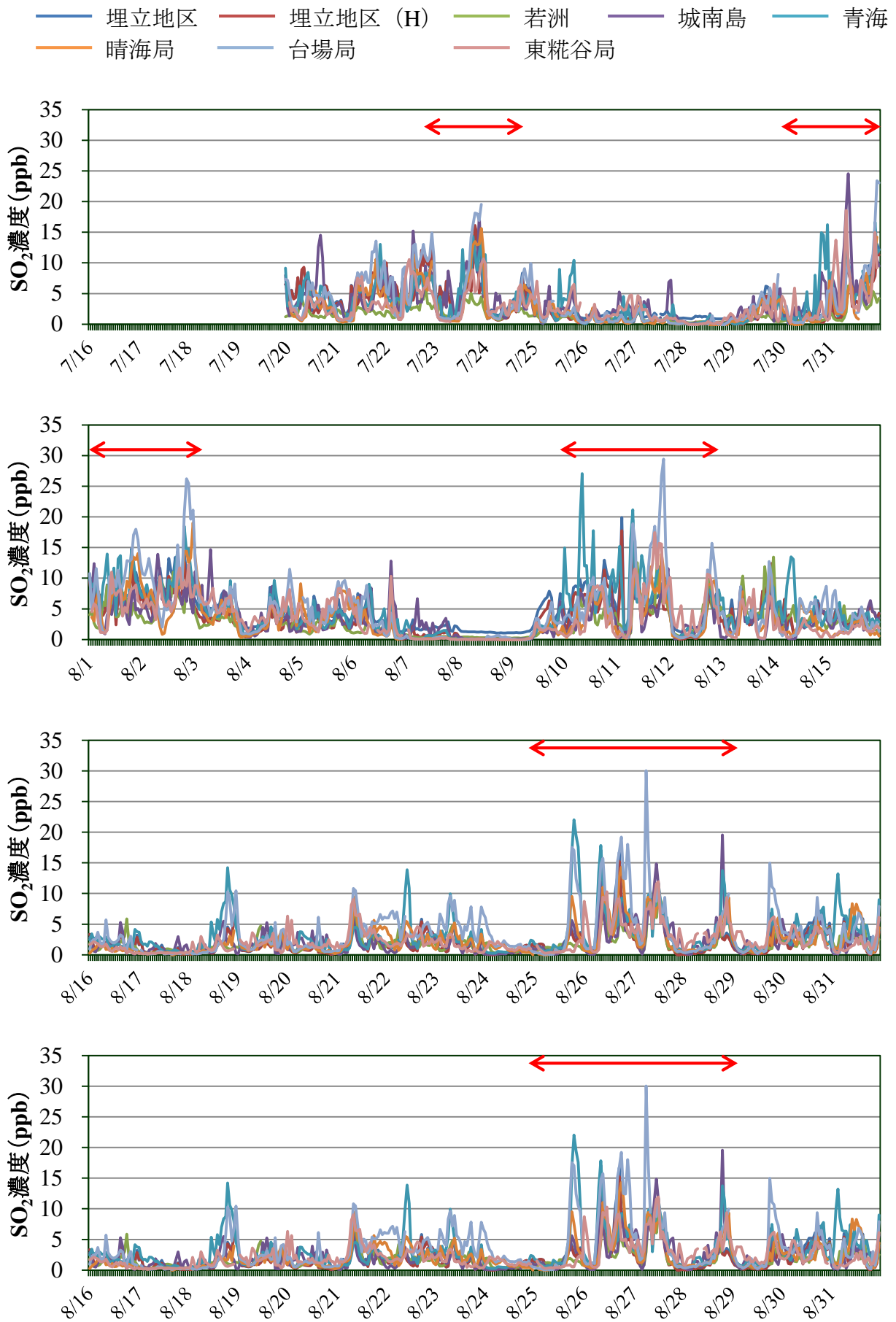


図 4 各調査地点における測定結果 (SO<sub>2</sub>)  
赤矢印は高濃度傾向に設定した期間

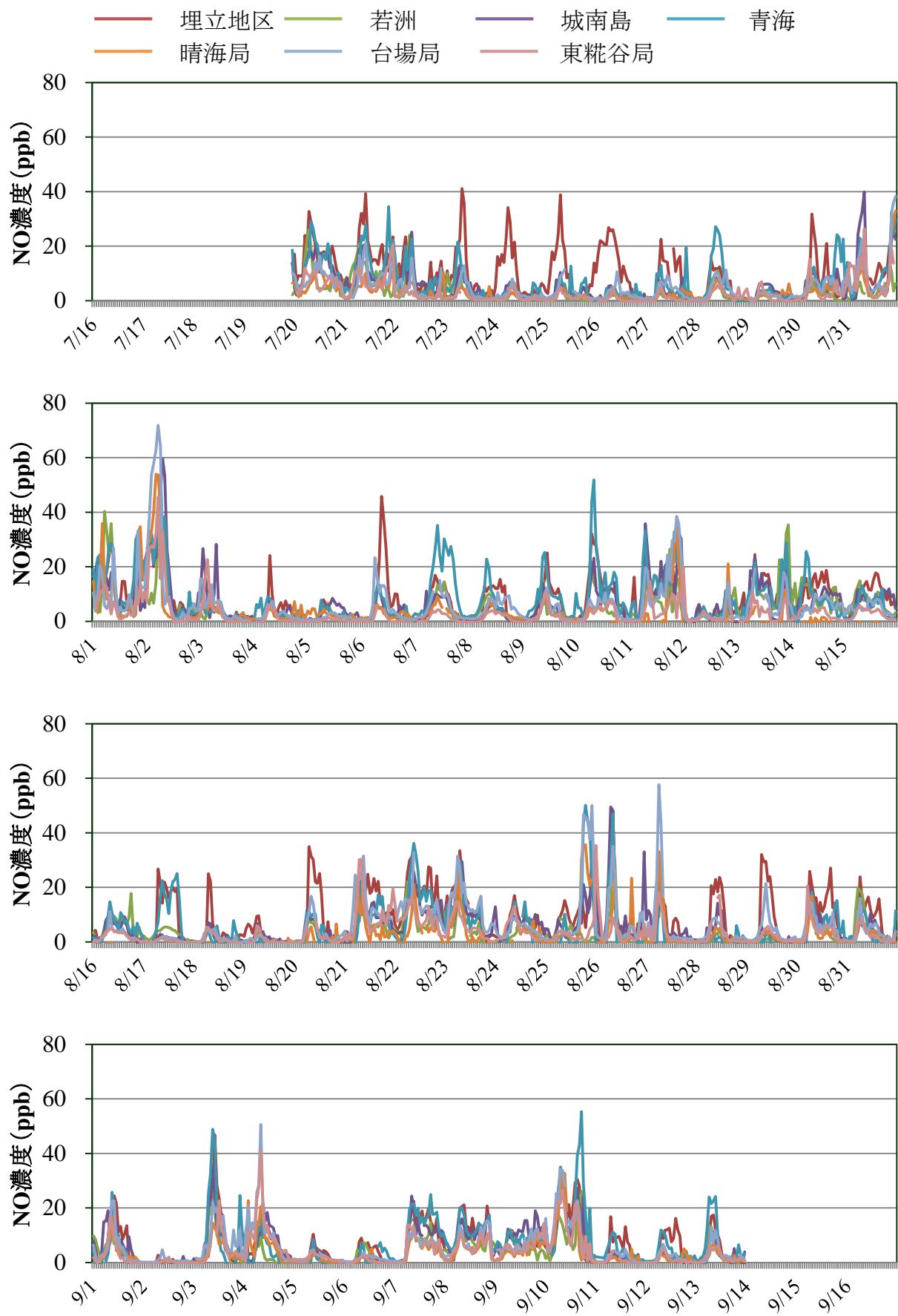


図 5 各調査地点における測定結果 (NO)

赤矢印は高濃度傾向に設定した期間



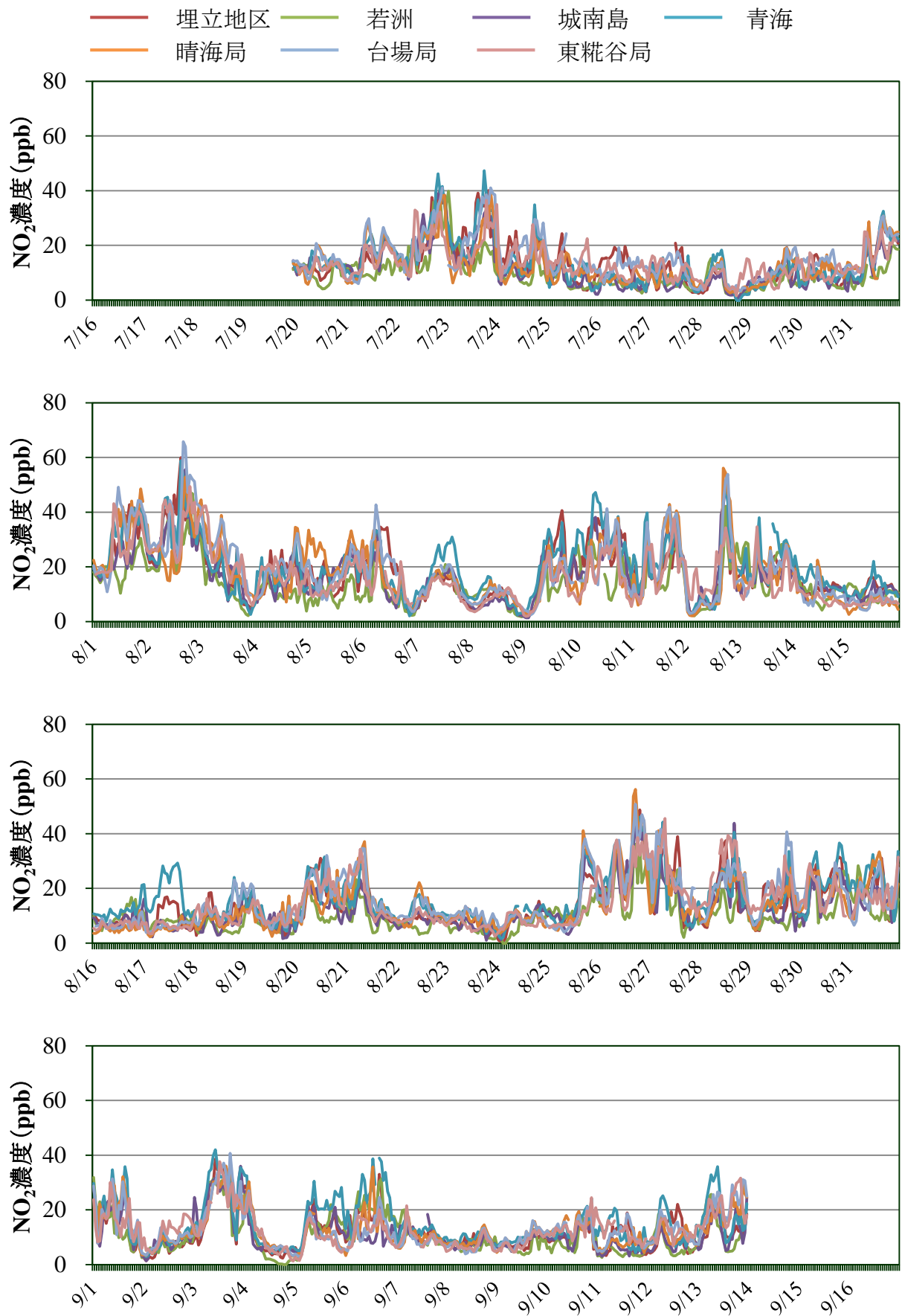


図 6 各調査地点における測定結果 (NO<sub>2</sub>)

赤矢印は高濃度傾向に設定した期間



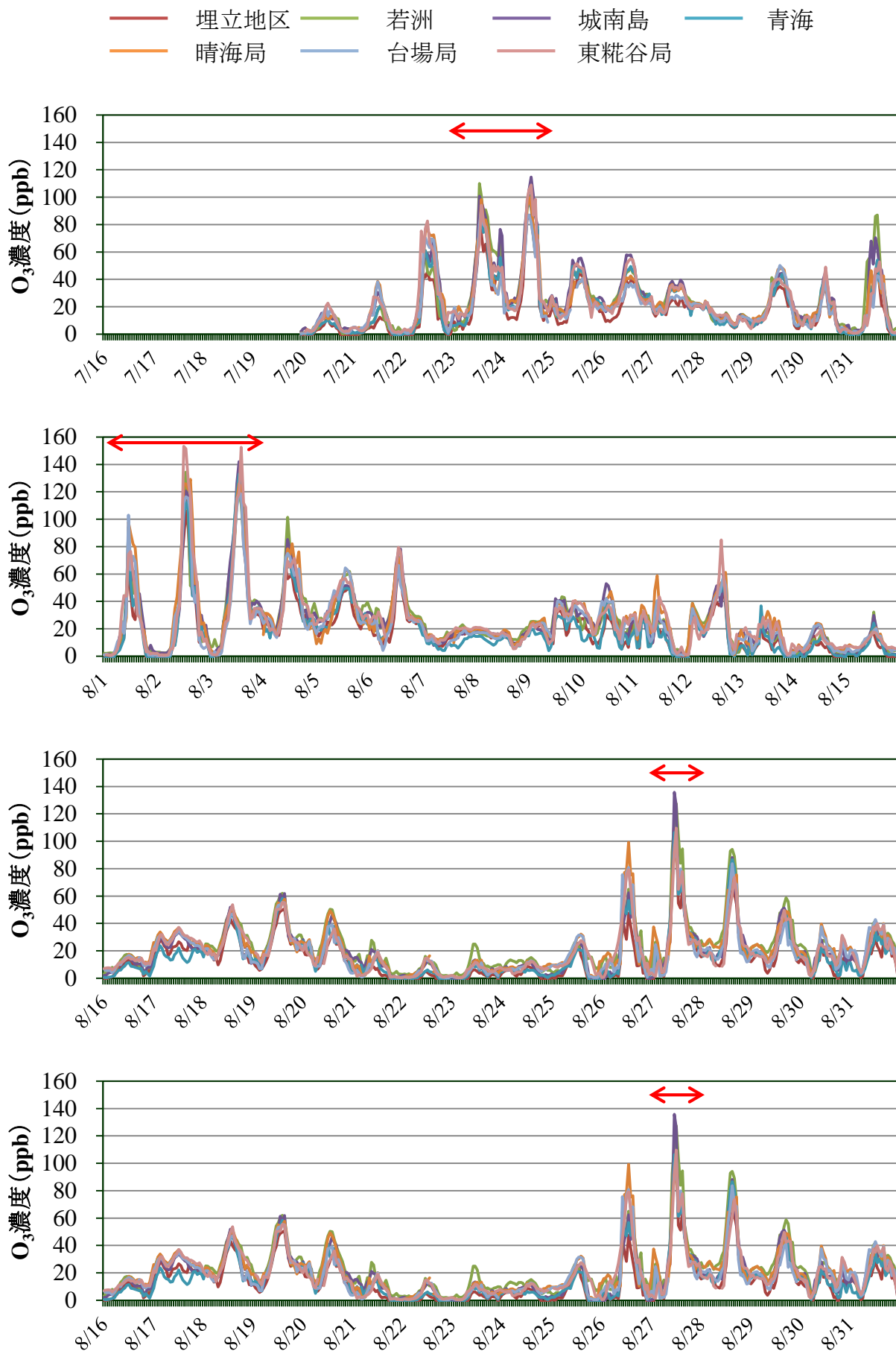


図 7 各調査地点における測定結果 (O<sub>x</sub>)  
赤矢印は高濃度傾向に設定した期間

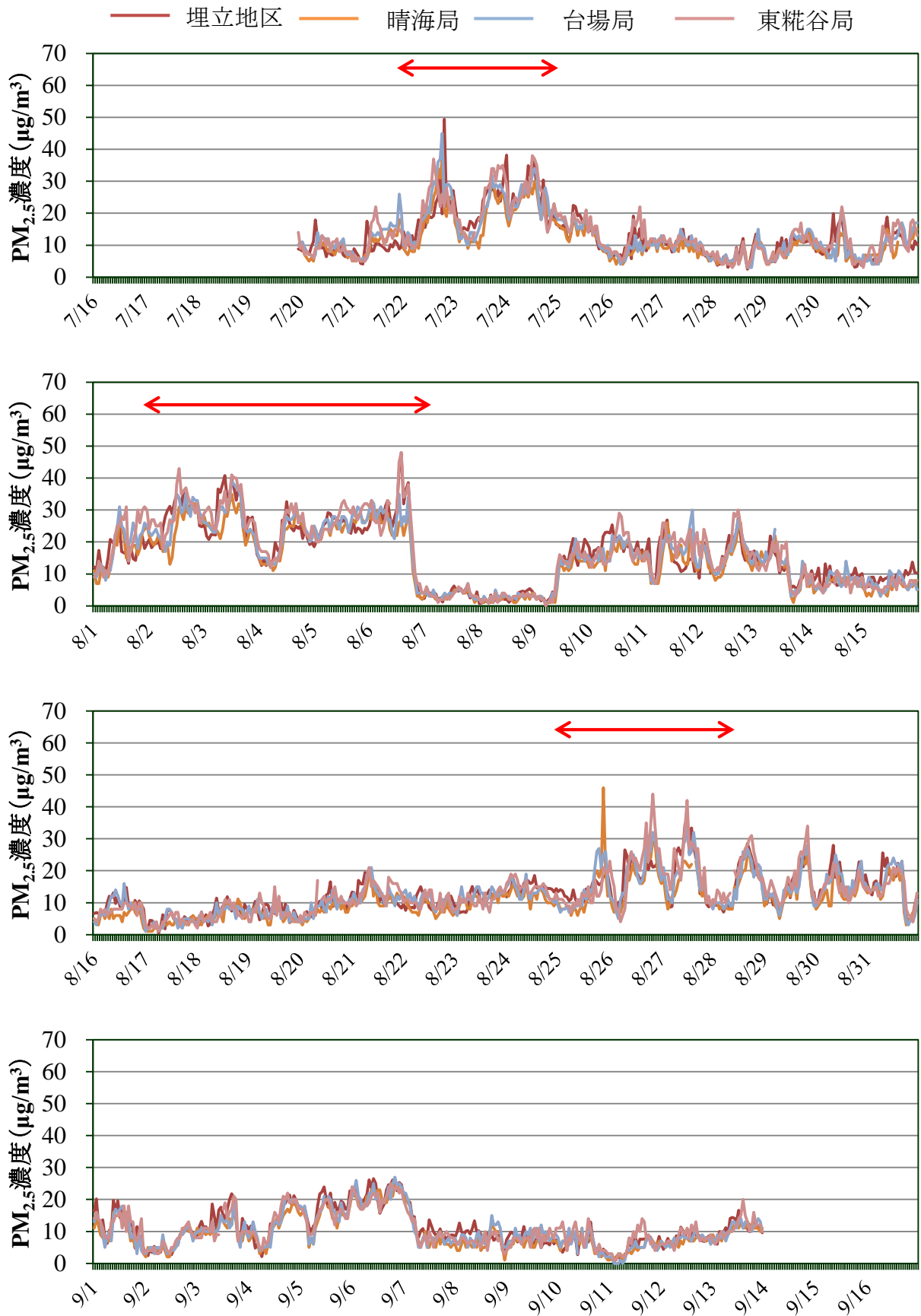
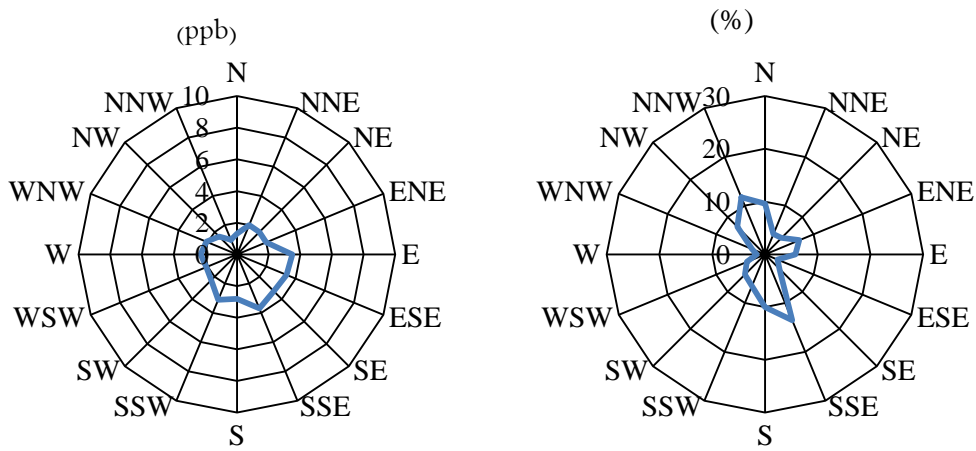


図 8 各調査地点における測定結果 (PM<sub>2.5</sub>)

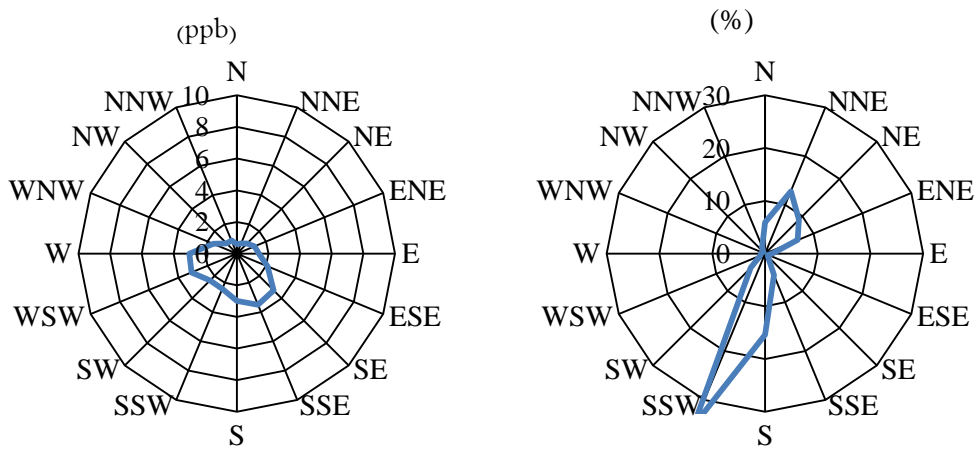
赤矢印は高濃度傾向に設定した期間

### 3.3. 風向別 SO<sub>2</sub> 濃度

調査期間における各調査地点と風向別 SO<sub>2</sub> 濃度を図 9 から図 11 に示す。どの地点でも南風系が主立った際に SO<sub>2</sub> 濃度が高くなることが確認された。



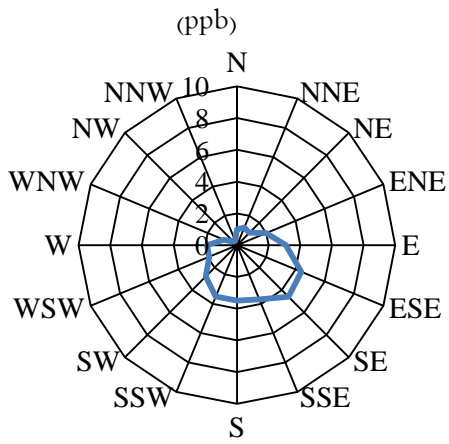
地点：埋立地区



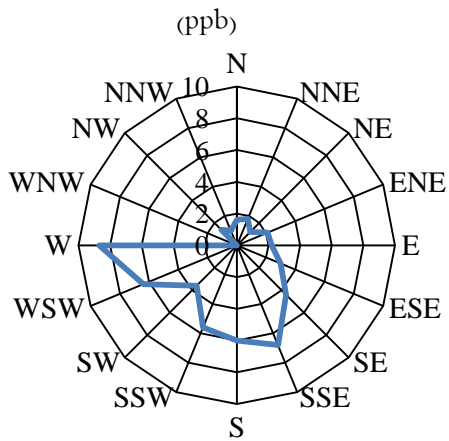
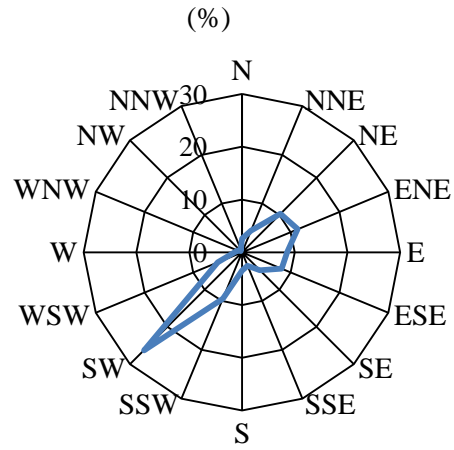
地点：若洲

図 9 臨海部調査地点における風向別 SO<sub>2</sub> 濃度（埋立地区、若洲）

左図：風向別 SO<sub>2</sub> 濃度 右図：風配図



地点：城南島



地点：青海

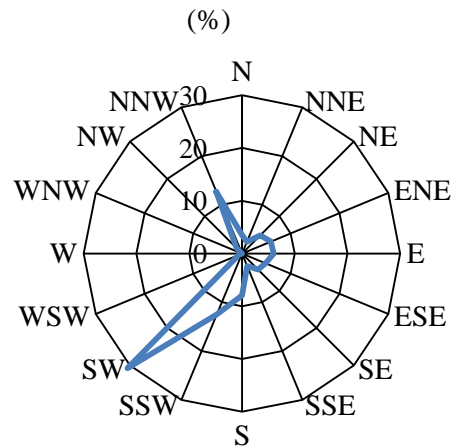
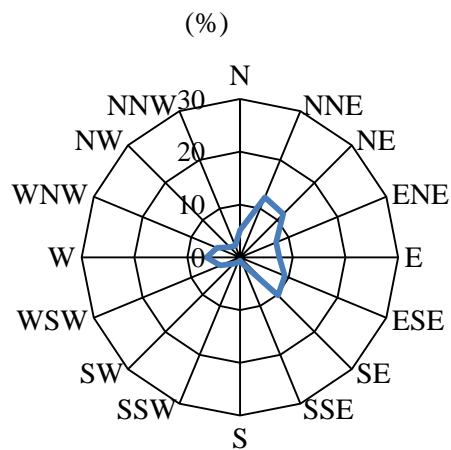
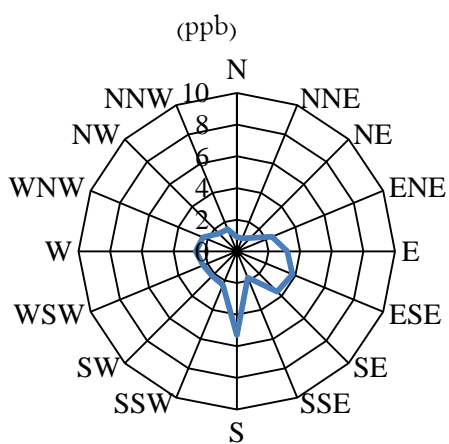
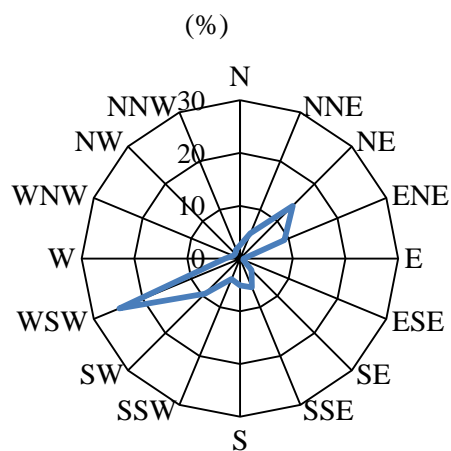
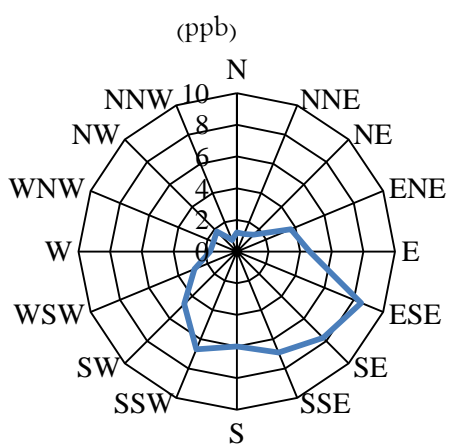


図 10 臨海部調査地点における風向別 SO<sub>2</sub>濃度（城南島、青海）

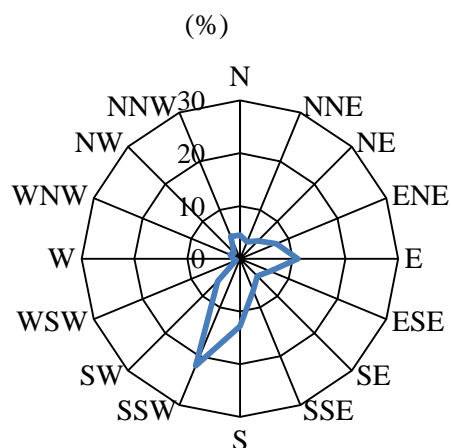
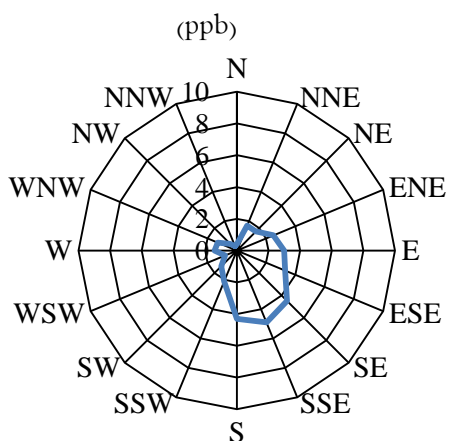
左図：風向別 SO<sub>2</sub>濃度 右図：風配図



地点：晴海



地点：台場



地点：東糀谷

図 11 臨海部調査地点における風向別 SO<sub>2</sub>濃度 (晴海、台場、東糀谷)

左図：風向別 SO<sub>2</sub>濃度 右図：風配図

### 3.4. 東京港入出港データによる船舶影響の考察

3.3 では南風系が主風向の場合に、SO<sub>2</sub>濃度が高くなる傾向が確認され、東京湾を含む臨海部周辺における発生源の影響が示唆された。臨海部付近の海上を航行する船舶等の濃度影響を考察する場合、船舶の挙動を把握し、濃度傾向とともに確認することが必要である。

そこで、東京都港湾局における入出港データ（速報値）を基に、船舶とSO<sub>2</sub>の濃度影響を考察した。東京港に着岸・離岸する船舶は、図12に示す係留エリアに主に停泊する。ここでは、東京港の埠頭全体の入出港データを対象として、時間毎の停泊している船舶を計上した。また、船舶は大きさによって排出実態が異なると考え、隻数ではなく、該当する船舶の総トン数を計上し、船舶の「延べ総トン数」と大気汚染物質濃度の比較を行った。



図12 東京港における主な係留地点（港湾局HPより引用）

船舶の入出港データ（速報値）と大気汚染物質濃度の経時変化を図13、図14に示す。船舶の延べ総トン数とSO<sub>2</sub>濃度では以下のような傾向が確認された。

- ① 「延べ総トン数」が大きく、SO<sub>2</sub>濃度が高い。
- ② 「延べ総トン数」が大きく、SO<sub>2</sub>濃度が低い。
- ③ 「延べ総トン数」が小さく、SO<sub>2</sub>濃度が低い。

③については、主に8月8日~9日で確認されたが、該当期間は台風であったため、係留した船舶も少なくSO<sub>2</sub>濃度も低かったと考えられる。①については、南風または西風系が主立った場合に濃度が高くなる傾向が見られた。②については、北風系が主立った場合にSO<sub>2</sub>濃度が低い傾向にあった。

南風系の時にSO<sub>2</sub>濃度が高くなる傾向を考慮すると、係留する船舶が多く、それに伴い臨海部周辺を航行する船舶もある程度想定されることから、臨海部では、風向きによって船舶の影響でSO<sub>2</sub>濃度が高くなる可能性が考えられる。ただし、調査地点によってはふ頭全体が主に北側に位置することもあり、本調査結果では、臨海部のSO<sub>2</sub>濃度がふ頭に係留する船舶のみの影響を受けていることを意味するわけではないことに留意する必要がある。

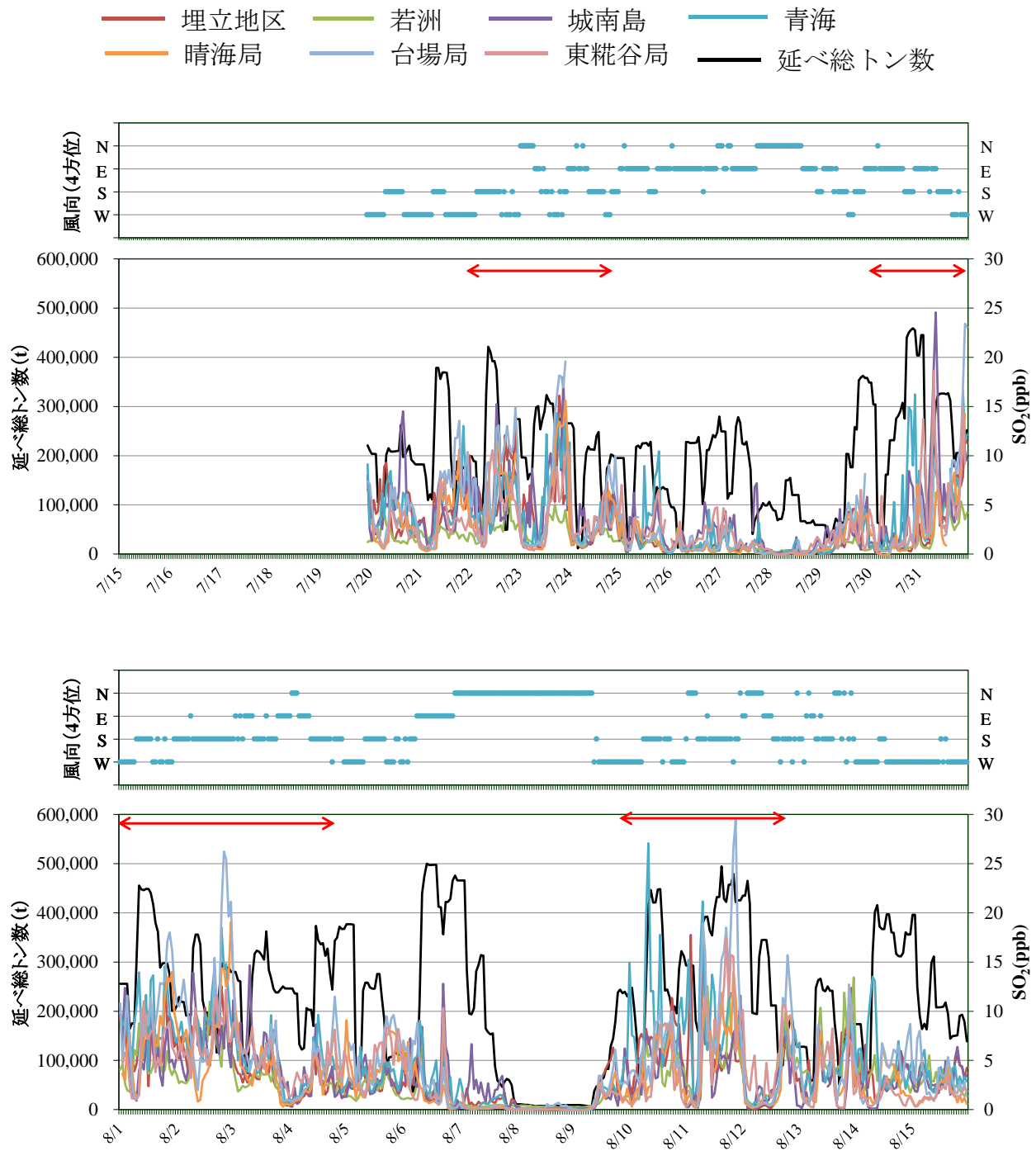


図 13 東京港の入出港データ（速報値）を基に求めた「延べ総トン数」と各調査地点の SO<sub>2</sub> 濃度（7 月後半～8 月前半）

- \* 風向は簡易に表記するため、代表として青海の測定結果を示し、北 (N)、東 (E)、南 (S)、西 (W) の 4 方位で示した。
- \* 赤矢印は SO<sub>2</sub> の高濃度傾向の期間を示す。



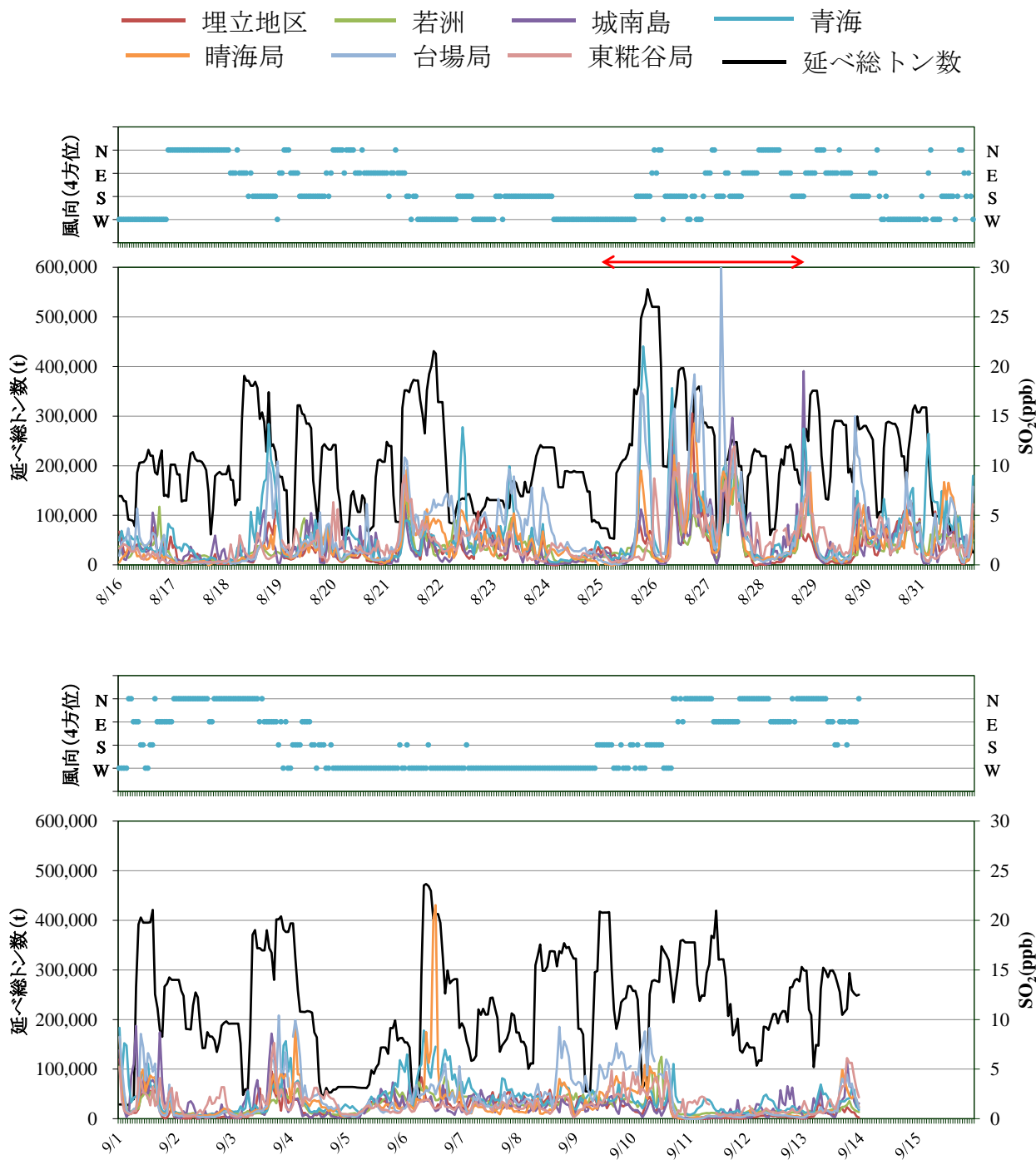


図 14 東京港の入出港データ（速報値）を基に求めた「延べ総トン数」と各調査地点の SO<sub>2</sub> 濃度（7 月後半～8 月前半）

- \* 風向は簡易に表記するため、代表として青海の測定結果を示し、北 (N)、東 (E)、南 (S)、西 (W) の 4 方位で示した。
- \* 赤矢印は SO<sub>2</sub> の高濃度傾向の期間を示す。

### 3.5. 高濃度期間における考察

調査期間のうち、臨海部において大気汚染物質が高濃度の傾向を示した期間を対象として考察を行った。高濃度期間として選定した期間を表 5 に示す。それぞれの高濃度傾向の期間を期間①、期間②、期間③とし、以下の解析を行った。

表 5 成分分析を実施する高濃度期間と高濃度傾向の測定項目

期間 No	期間	高濃度傾向の測定項目
1	7月22日(日)～24日(火)	SO <sub>2</sub> 、PM <sub>2.5</sub> 、O <sub>x</sub>
2	8月1日(水)～6日(月)	SO <sub>2</sub> 、PM <sub>2.5</sub> 、O <sub>x</sub>
3	8月25日(土)～29日(水)	SO <sub>2</sub> 、PM <sub>2.5</sub> 、O <sub>x</sub>

#### (1) 埋立地区における PM<sub>2.5</sub> 成分分析

埋立地区における PM<sub>2.5</sub> 測定では、質量濃度計測後のテープ状 PTFE ろ紙について、裏移りのないようカバーテープを付けて回収した。そこで、高濃度期間において、臨海部と関連の高い成分 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Na<sup>+</sup>) の成分分析を実施した。臨海部では海塩由来の硫酸塩が考えられるため、Na<sup>+</sup>を基に非海塩性の硫酸塩 (nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> : non-sea-salt SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) を算出した<sup>1</sup>。また、考察に当たって、SO<sub>2</sub>濃度と SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度に占める SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度の割合を粒子化率とし、高濃度期間を対象に算出した<sup>2</sup>。

期間①～期間③までの埋立地区における PM<sub>2.5</sub>、Na<sup>+</sup>、SO<sub>2</sub>、nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、粒子化率、O<sub>x</sub>濃度を図 15 に示す。

SO<sub>2</sub>、nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、粒子化率、O<sub>x</sub>濃度に着目すると、SO<sub>2</sub>濃度上昇後、O<sub>x</sub>濃度が上昇に応じて nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の濃度上昇が確認され、それに伴って粒子化率が上昇する傾向が確認された。また、PM<sub>2.5</sub>は nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>と同様の濃度挙動を示していた。

粒子化率については、O<sub>x</sub>濃度上昇に応じて nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とともに上昇したことから、臨海部においても光化学反応により SO<sub>2</sub>から SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が生成されている可能性が示唆された。

<sup>1</sup> nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の算出に当たっては、次式より算出する。

$$[\text{nss-SO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - 0.06028 \times [\text{Na}^+] \quad (\text{単位 } \mu\text{mol/L})$$

ここで、海水中の濃度を、Na<sup>+</sup>=468.3 mmol/L, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>=28.23 mmol/L とする\*。

\*気象庁編：海洋観測指針，第1部，財団法人気象業務支援センター，pp31（1999）

<sup>2</sup> SO<sub>2</sub>から SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>への粒子化率については、次式より算出する。

$$\text{粒子化率 (\%)} = \frac{\text{SO}_4^{2-}(\text{mol})}{\text{SO}_2(\text{mol}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{mol})}$$

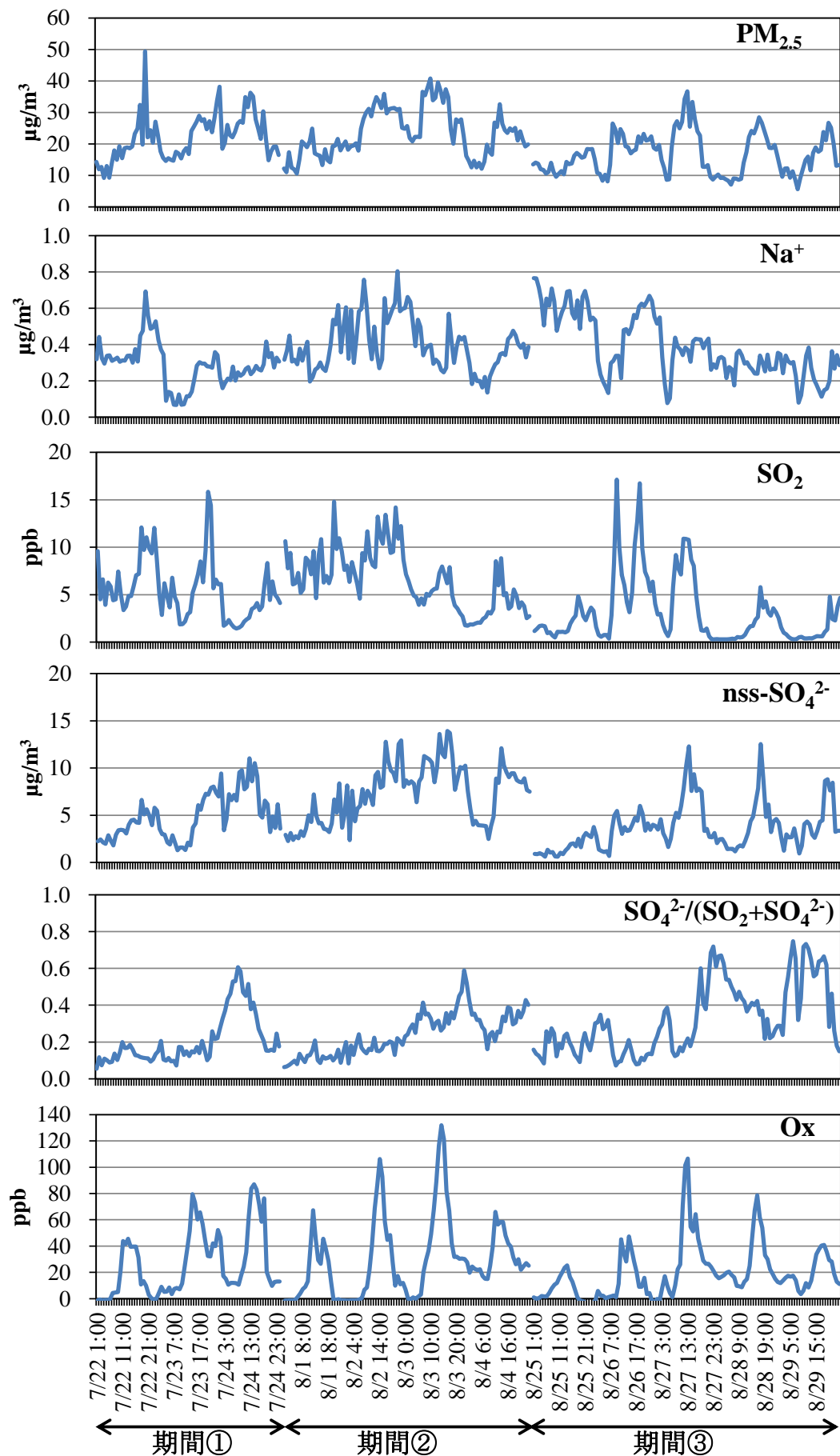


図 15 埋立地区における PM<sub>2.5</sub>、Na<sup>+</sup>、SO<sub>2</sub>、nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、粒子化率、Ox 濃度の経時変化

(2) 臨海部以外の地点と比較（スーパーサイト）

都内では、大気汚染常時監視測定局の他、常時監視項目だけでなく PM<sub>2.5</sub> の成分や前駆物質の連続測定を行うことで、大気汚染物質の生成メカニズム等に関する詳細なデータを取得する測定局（スーパーサイト）を区部に位置する江東区大島局（大島）と東京都環境科学研究所（都環研）、多摩部に位置する狛江市中和泉（狛江）に設置している（図 16 のとおり）。

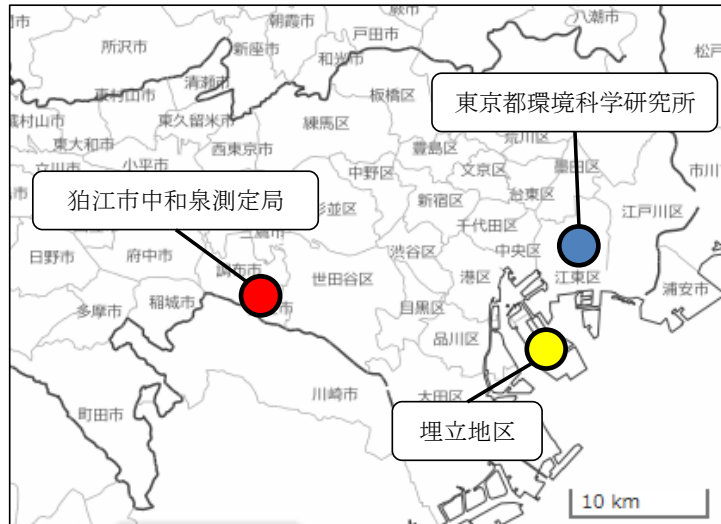


図 16 埋立地区と都内スーパーサイト 2 地点の位置図

国土地理院の電子地形図（タイル）の白地図を基に作成

そこで、埋立地区において成分分析を実施した測定値と、都環研及び狛江におけるスーパーサイトの測定値の比較を行った。各地点における高濃度期間の成分分析結果（SO<sub>2</sub>、nssSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、粒子化率）を表 6、図 17 に示す。

Na<sup>+</sup>では全体的に埋立地区で高い傾向が確認され、臨海部では PM<sub>2.5</sub> において海塩粒子の寄与も比較的大きいことが確認された。また、SO<sub>2</sub> 濃度は、高濃度傾向を示した期間①～期間③のいずれにおいても、埋立地区で高い傾向にあり、粒子化率は内陸の多摩部に位置する狛江に行くにつれて高い傾向にあることが確認された。

風向きや拡散等の影響もよるため、臨海部の SO<sub>2</sub> 全てが都内内陸の SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> を生成するわけではないが、SO<sub>2</sub> 濃度の占める割合が埋立地区で大きいことは、他地点に比べて発生源から排出されて SO<sub>2</sub> ガスの影響を強く受けていることを示唆している。一方、内陸に行くにつれて硫黄分に占める SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 粒子の割合が大きくなることが確認された。

表 6 高濃度期間における PM<sub>2.5</sub> と成分分析結果

項目	埋立地区			都環研			狛江		
	期間①	期間②	期間③	期間①	期間②	期間③	期間①	期間②	期間③
PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	22.1	23.5	16.6	20.2	20.7	12.6	16.2	18.6	12.9
Na <sup>+</sup> (μg/m <sup>3</sup> )	0.3	0.4	0.4	0.3	0.0	0.3	0.2	0.2	0.2
SO <sub>2</sub> (ppb)	5.5	6.6	3.1	1.9	2.2	1.3	1.0	1.9	1.1
nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (μg/m <sup>3</sup> )	4.9	7.3	3.6	6.2	8.1	3.6	4.4	6.1	3.7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / (SO <sub>2</sub> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.6	0.5	0.7

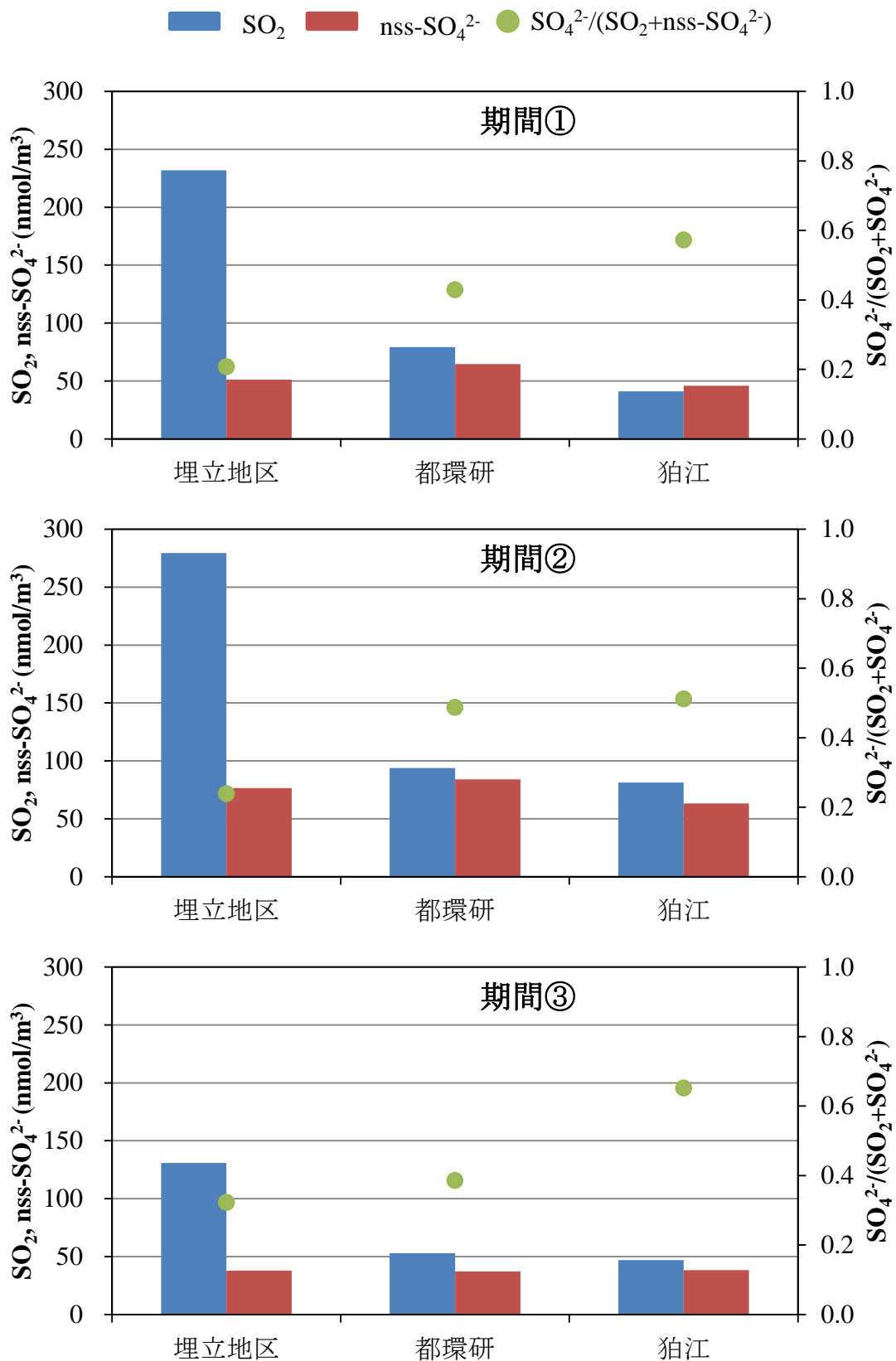


図 17 各地点における各高濃度期間の  $\text{SO}_2$ 、 $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 、粒子化率

#### 4. まとめ

臨海部に大気環境中濃度測定調査の結果を以下に示す。

- $\text{SO}_2$  濃度が高くなる臨海部等においては、常時監視マニュアルで定める測定機による測定結果を用いても、濃度変化の比較による影響解析は十分可能であると考えられた。
- 風向  $\text{SO}_2$  濃度では、南風が主風向の場合に  $\text{SO}_2$  濃度が高くなる傾向が確認され、東京湾を含む臨海部での発生源の影響が示唆された。
- 東京港における船舶の延べ総トン数と調査地点の  $\text{SO}_2$  濃度を比較したところ、風向きによって船舶等の影響で  $\text{SO}_2$  濃度が高くなる可能性が考えられた。ただし、臨海部では発電所等の  $\text{SO}_2$  濃度影響も考えられ、本調査結果は、臨海部の  $\text{SO}_2$  濃度が必ずしも船舶のみの影響を受けていることを意味するわけではないことに留意する必要がある。
- 高濃度期間における成分分析結果では、 $\text{Ox}$  濃度上昇に応じて粒子化率が  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  とともに上昇したことから、臨海部においても光化学反応により  $\text{SO}_2$  から  $\text{SO}_4^{2-}$  が生成されている可能性が示唆された。
- スーパーサイトとの比較により、埋立地区では、他地点に比べて発生源から排出されて  $\text{SO}_2$  ガスの影響を強く受ける一方、内陸に行くにつれて硫黄分に占める  $\text{SO}_4^{2-}$  粒子の割合が大きくなることが確認された。