

福岡都市圏におけるNO₂の時空間変動

P30

～多地点MAX-DOASとドップラーライダーの複合的解析～

植木 洸¹, 高島 久洋¹, Martina M. Friedrich², 入江 仁士³ 第22回 CEReS 環境リモートセンシングシンポジウム

1 福岡大学, 2 ベルギー宇宙航空研究所, 3 千葉大学環境リモートセンシング研究センター

2020/02/20

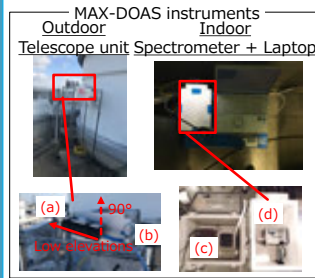
要旨

福岡都市圏における詳細なNO₂の3次元の時空間分布とその変動要因を明らかにするため、2018年10月から、都市中心部から約1 km ほど離れた薬院 (33.58°N, 130.40°E) と約5 km ほど離れた福岡大学 (33.55°N, 130.36°E) で同時にMAX-DOASによる連続的なNO₂プロファイルの観測を行った。
 • 2018年の秋季～冬季の期間、都市上空で11～14時頃にNO₂濃度が増大する事例をしばしば観測し、2018年11月29日の例について詳細な解析を行った。2地点のNO₂プロファイルと3次元走査型コヒーレントドップラーライダー(3-D CDL)による風の観測結果を照合したところ、地表付近の高濃度のNO₂を含む空気塊が、10時30分頃から都市上空へ輸送され、海からの清浄な空気塊が、14時頃から吹き始める強い海風によって都市域に流入したことが示唆され、NO₂の時空間変動は、福岡平野上空の風と整合的であった。
 • MAX-DOASによって得られたNO₂の鉛直積算量を真値とし、人工衛星Sentinel-5Pに搭載されているTROPOMIから得られた対流圏NO₂の鉛直積算量と比較したところ、先行研究 (e.g. Kanaya et al., 2014) と同様に衛星観測には最大約5割程度の負のバイアスがあることが示唆された。

はじめに

窒素酸化物 (NO_x = NO + NO₂) は、対流圏における大気化学反応系において、オゾンの前駆物質として重要な役割を担っており、都市域におけるNO_xの空間分布は発生源の複雑さと短寿命性に起因して不均質である (e.g., Martin et al., 2006)。
 • 対流圏NO₂の面的な空間分布の観測は、人工衛星によって行われており、合わせて衛星データの検証や、衛星が不得意な地表付近のNO₂の挙動の調査のため、しばしばMAX-DOAS (Multi Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy) によって観測が行われてきた (e.g., Irie et al. 2008a.)。
 • 我々は、都市域NO₂の3次元の時空間分布とその変動要因を明らかにするため、2地点でMAX-DOASを行った。本研究では2地点でのMAX-DOASによるNO₂プロファイルの結果に加え、SKYNETの観測サイト春日 (33.52°N, 130.48°E) の結果を示し、ドップラーライダーによる3次元風観測からNO₂の時空間変動要因について考察する。また、高空分解能 (7 km×7 km) で衛星観測を行うTROPOMI (Tropospheric Ozone Monitoring Instrument) (Veefkind et al., 2012) のプロダクトと比較を行う。

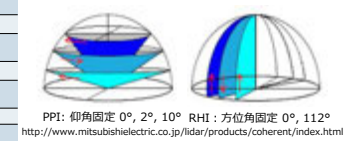
観測・解析



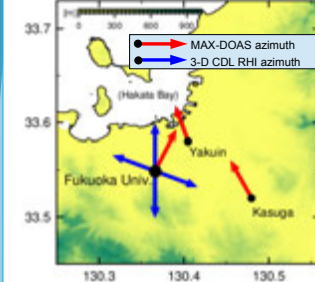
MAX-DOAS
 地上から複数の仰角で紫外/可視の太陽散乱光を観測し大気中のエアロゾルや微量ガスのプロファイル測定する自動式のリモートセンシング観測手法 (e.g., Hönenninger et al., 2004; Frieß et al., 2006)。天頂方向 (90°) を参照スペクトルとしたときの、低仰角 (2°, 3°, 4°, 5°, 10°, 20°, 30°) スペクトルの差分吸収に基き、それぞれ仰角ごとのNO₂差分傾斜オゾン濃度を導出。また、同時に大気中の鉛直分布が既知のO₂-O₂ (O₄) 差分傾斜オゾン濃度も導出し、そこからエアマスマークを求め、NO₂プロファイルを得る。その後、MMF (Mexican Maxdoas Fit) (Friedrich et al., 2019) の放射伝達計算によって、NO₂プロファイルを得る。薬院、福岡大学のMAX-DOASは左記のシステムを使用し、時間分解能4分のデータを取得、春日のMAX-DOASは時間分解能15分の国際地上大気観測ネットワーク (SKYNET) のデータを使用。

(a) テレスコープ	仰角 = 2°, 3°, 4°, 5°, 10°, 20°, 30°, 90° FOV (Field Of View) < 0.6°	• AZD-66A0C, Orientalmotor
(b) ファイバー	長さ : 10 m 直径 : 100 μm × 7 cores	• Ocean Optics
(c) 温度装置	15.0 °C ± 0.1 °C	• KT4H, Panasonic • E5CC, Omron
(d) 紫外可視分光器	露光時間 : 100 ms, 150 ms 半値幅 : 0.6 nm	• USB4000, Ocean Optics

3次元走査型コヒーレントドップラーライダー (3-D CDL)
 大気中にパルスレーザー光を照射し、エアロゾル粒子からの散乱光を受信。移動するエアロゾルからの信号は、その移動速度に応じたドップラー速度成分を持つ。ここから、大気によって運ばれるエアロゾルの移動速度、すなわち装置を取り巻く大気中の風速を測定。仰角0°, 2°, 10°でのPlan Position Indicator (PPI) スキャン (5 scans : 0°, 0°, 2°, 10°, 0°) の観測と、方位角0° (北方向)、112° (北から時計回り) のRange Height Indicator (RHI) スキャン (8 scans : 0°, 0°, 0°, 0°, 112°, 112°, 112°, 112°) の観測を30分毎に行う。



Laser	DFB-Er doped fiber laser (Yb:YAG)
wavelength	1.54 μm (Er: Glass)
Pulse energy	1.0 mJ/pulse
Pulse repetition rate	4000 Hz
Pulse width	200 ns
Telescope diameter	120 mm
Range resolution	60 m
Measurable distance	up to 12 km (200 range bins)



観測地点	緯度, 経度	観測期間	類型
薬院	33.58°N, 130.40°E	Oct. 27, to Nov. 30, 2018	Urban
福岡大学	33.55°N, 130.36°E	Oct. 25, 2018~	urban
春日	33.52°N, 130.48°E	Dec. 7, 2013~	urban

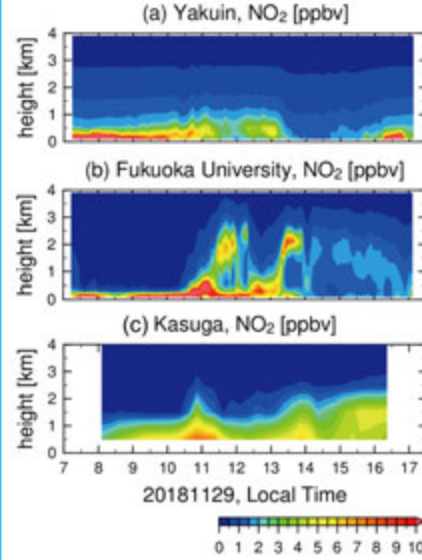
• TROPOMI (TROPospheric Ozone Monitoring Instrument)
 2017年に打ち上げられたSentinel-5Pに搭載。7 km×7 kmの空間分解能で観測可能。本研究では、KNMI (オランダ国立気象研究所) の提供するOFFLINE-LEVEL2-ver. 1.2.2を使用。

参考文献

Frieß, U., Morita, S., Remus, J. J., et al.: MAX-DOAS O₄ measurements: A new technique to derive information on atmospheric aerosols: 2. Modeling studies, *J. Geophys. Res. Atmos.*, doi:10.1029/2005JD006618, 2006.
 Hönenninger, G., von Friedeburg, C., and Platt, U.: Multi Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy (MAX-DOAS), *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 3(6), 5595–5658, doi:10.5194/acpd-3-5595-2003, 2003.
 Kanaya, Y., Irie, H., Takashima, H., Iwibuchi, H., Akimoto, H., Sudo, et al.: Long-term MAX-DOAS network observations of NO₂ in Russia and Asia (MADRAS) during the period 2007–2012: Instrumentation, elucidation of climatology, and comparisons with OMI satellite observations and global model simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, doi:10.5194/acp-14-7909-2014, 2014.
 Martin, R. V., Sioris, C. E., Chance, K., et al.: Evaluation of space-based constraints on global nitrogen oxide emissions with regional aircraft measurements over and downwind of eastern North America, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 111(D15), 1–15, doi:10.1029/2005JD006880, 2006.
 Michalek, Friedrich, M., Rivera, C., Stremme, W., Djeddi, et al.: NO₂ vertical profiles and column densities from MAX-DOAS measurements in Mexico City, *Atmos. Meas. Tech.*, 12(4), 2545–2565, doi:10.5194/amt-12-2545-2019, 2019.
 Veefkind, J., Aben, I., McKulian, K., et al.: TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GEMS mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications, *Remote Sens. Environ.*, 120(2012), 70–83, doi:10.1016/j.rse.2011.09.027, 2012.

結果と考察

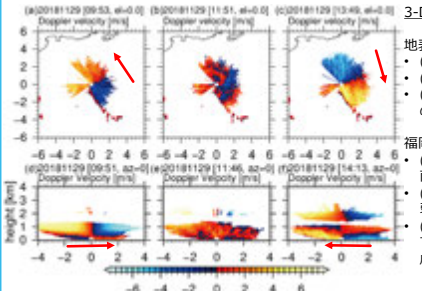
2018年の秋季～冬季の期間において、2地点でのMAX-DOASによるNO₂プロファイル観測の結果、図1. (b)に示すような上空で11～14時頃にNO₂濃度が増大する事例をしばしば観測。2018年11月29日の例について詳細に解析。



NO₂の時空間変動

- (a) 薬院では、7時から10時ごろまで、地表付近で高濃度のNO₂を観測。また、13時30分～15時頃、地表付近でNO₂濃度の極小を観測。
- (b) 福岡大学では、7時頃～12時30分頃まで、地表付近で高濃度のNO₂を観測。また、10時30分～12時頃にかけて、高濃度のNO₂を時間とともに高い高度で観測。その後、14時～16時30分頃までの間、(a) 薬院より約30分遅く地表付近でNO₂濃度の極小を観測。
- (c) 春日では、11時30分頃まで地表付近で高濃度のNO₂を観測。その後、14時～16時30分頃までの間、(a) 薬院より約30分遅く地表付近でNO₂濃度の極小は確認された。

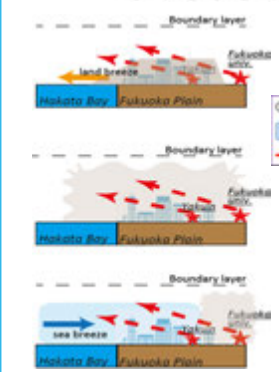
図1 2018年11月29日に(a) 薬院、(b) 福岡大学、(c) 春日でMAX-DOASによって観測されたNO₂濃度 (ppbv) 鉛直分布の時系列。



3-D CDLによる福岡平野上空の風

- 地表付近において、(a) 9 : 53に、約1~2 m/sの南東風。(b) 11:51に、空間的に不均質な微弱な風。(c) 13:49に、午前中より強い3~5 m/sの北風。
- 福岡平野の南北方向上空では、(d) 9 : 51、地表～約0.3 kmの薄い層で南風 (陸風) 成分の風。(e) 11 : 46、地表～約1.0 kmにかけて微弱な風。(f) 14 : 13、地表～約0.6 km付近にかけて約4~6 m/sの北風方向のトッパー速度成分の風。

図2 2018年11月29日に3-D CDLで観測されたドップラー速度 (m/s)の水平断面((a), (b), (c))と南北鉛直断面((d), (e), (f))。暖色系の色は装置から遠ざかる成分、寒色系の色は装置へ近づく成分を示す。



Legend:
 ● Air mass with high NO₂ conc.
 ○ Clean air mass
 --- Viewing azimuth direction (MAX-DOAS)

- 3地点におけるNO₂プロファイルと3-D CDLの風観測結果から、朝 (7時～10時頃)、都市域で排出された高濃度のNO₂は、地表付近の陸風のうすい層にトラップされた状態。
- 地表付近の高濃度のNO₂を含む空気塊は、10時30分頃から都市上空へ輸送。
- 海からの清浄な空気塊が、14時頃から吹き始める強い海風によって都市域に流入。
- 他の2地点よりも内陸に位置する春日では、清浄な空気塊が都市大気と混合したのち流入している可能性が示唆。

MAX-DOAS:TROPOMIの比較

	TROPOMI NO ₂ VCD (molec/cm ²)	MAX-DOAS NO ₂ VCD (molec/cm ²)	TROPOMI/MAX-DOAS (%)
薬院		6.8×10 ¹⁵	79 ~ 154%
福岡大	(5.4~10.5)×10 ¹⁵	15.7×10 ¹⁵	34 ~ 67%
春日		13.2×10 ¹⁵	41~80%

MAX-DOASで得られたNO₂の鉛直積算量を真値とし、TROPOMIのNO₂の鉛直積算量と比較したところ、先行研究 (e.g., Kanaya et al., 2014) と同様に衛星観測は、最大約5割程度過小評価傾向であることを示唆。

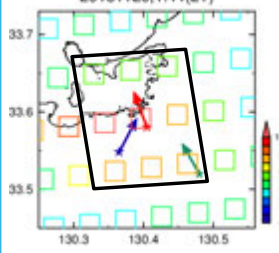


図3 2018年11月29日 13:44、TROPOMIから観測された対流圏NO₂VCD (鉛直積算量)。★はMAX-DOASの観測点(赤: 薬院、青: 福岡大学、緑: 春日)、矢印は観測方位。黒枠はMAX-DOASと比較したTROPOMIの対流圏NO₂VCDの範囲を示す。

今後の展望

現在データ数を増やし、2019年9月～12月の福岡大学でのMAX-DOASとTROPOMIの比較を行っている。その結果、約5割程度の過小評価傾向が確認されている。今後2地点MAX-DOASを長期的に使い、都市大気におけるNO₂不均質性に伴う過小評価要因を調査していく。

Acknowledgement

本研究はベルギー宇宙航空研究所に開発されたQDOAS (Danckaert et al., 2013) ソフトウェアを使用した。MAX-DOAS一部データは国際地上大気観測ネットワークSKYNET (http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skynet/)から使用しました。TROPOMI対流圏NO₂データは、KNMI (Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut) のOFFLINE-LEVEL-2 ver. 1.2.2 (https://schub.copernicus.eu) を使用しました。