2版

様　式　C－19、F－19－1、Z－19　(共通)

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 29 年　 6 月　 1 日現在

機関番号：１２５０１
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2015～2016
課題番号：１５Ｋ１２２１６
研究課題名（和文）ハイパースペクトルイメージングによる大気汚染気体の可視化

研究課題名（英文）Visualization of gaseous air pollutants by means of hyperspectral imaging

研究代表者
眞子　直弘（Manago, Naohiro）

千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・特任助教

研究者番号：００６４４６１８

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　1,800,000円

研究成果の概要（和文）：可視光を約1000個の波長チャンネルに分解できるハイパースペクトルカメラ（画素数640×480）を用いて天空光のスペクトルを解析し、大気中に含まれる二酸化窒素（NO2）の空間分布を可視化する方法を開発した。この手法を用いて千葉大学にあるビルの屋上から360度周囲を見渡す観測を行ったところ、交通量が多い都市域の方向でNO2が比較的多く見られた。また、飛行機が離陸する前後の周辺大気を観測したところ、飛行機の離陸に伴って滑走路上のNO2濃度が増加し、風に流されて拡散する様子が捉えられた。

研究成果の概要（英文）：We have developed a method for visualizing the spatial distribution of nitrogen dioxide (NO2) in the atmosphere by analyzing hyperspectral images of skylight obtained with a hyperspectral camera (image size: 640 x 480) which can divide the visible light into ~1000 spectral channels. Using this method, we have observed the 360-degree view of skylight from the rooftop of a building on the campus of Chiba University. It was found that NO2 concentration was relatively higher in the directions of urban areas with heavy traffic. Also, we have observed the atmosphere on and around the runway, and found the increase in NO2 concentration during the takeoff, followed by dissipation by winds.

研究分野：大気環境リモートセンシング

キーワード：ハイパースペクトルカメラ　イメージングMAX-DOAS　ガス可視化

１．研究開始当初の背景

気体の濃度測定手法として差分吸収分光法（DOAS 法）がある。これは大気を通過してきた光のスペクトル中の吸収線強度から対象気体の濃度を算出する手法であり、通常は点光源（例えば太陽）と単眼センサー（分光器）を用いて１度に１方向の測定が行われる。多軸 DOAS 法（MAX-DOAS 法、Hönninger et al. 2004）は光源に天空光を使用するため、視線方向を変えることで複数方向の測定が行える。MAX-DOAS 法に複眼センサーを用いれば１度に複数方向の測定を行うことができるが、高い空間分解能に加えて二酸化窒素（NO_2）の測定に必要な高波長分解能（〜1 nm）を合わせ持つ装置の開発は困難であった。最近になって十分な波長分解能を持つハイパースペクトルカメラ（HS カメラ）が開発されたため、これを利用して人の眼に見えない NO_2 の分布を可視化することが可能になった。

２．研究の目的

窒素の酸化等によって発生する NO_2 は代表的な大気汚染物質の一つであり、直接人体に悪影響を及ぼす他、さらに酸化されて硝酸や亜硝酸となり、酸性雨等の悪影響を及ぼす。NO_2 は波長の短い可視光を吸収するために十分濃度が高ければ褐色に見えるが、通常の大気中における濃度（< 60 ppb）では人の目で見ることはできない。本研究では、HS カメラを用いて NO_2 の空間分布を可視化することにより大気汚染の状況をモニターする手法を開発することを１つの目的としている。メインターゲットは NO_2 であるが、酸素二量体（O_4）や水蒸気（H_2O）等、可視光領域（400〜750 nm）に適当な吸収帯を持つ気体分子の可視化も可能である。

３．研究の方法

⑴ 概要

まず、HS カメラで取得した天空光のハイパースペクトル画像（HS 画像）から MAX-DOAS 法を応用して NO_2 等の気体分子の濃度（数密度に実効光路長を掛けたもので、差分スラントカラム量と呼ばれる量、以下 ΔSCD と書く）を導出する手法を開発する。次に、開発された手法で導出された ΔSCD を既存の MAX-DOAS 装置で測定された値と比較することにより精度の検証を行う。最後に、データをリアルタイムに処理するために解析の高速化について検討する。

⑵ 装置

本研究ではエバ・ジャパン社で開発された HS カメラの高波長分解能モデル（SIS-H、画素数 640 × 480、視野角 13 度 × 9 度、波長範囲 400〜750 nm、サンプリング間隔 0.4 nm、波長分解能 1 nm FWHM)）を用いる。この HS カメラは横１行（640 画素）のデータを一度に取得でき、内蔵されたスキャン機構によって縦方向（480 画素）に自動的にスキャンして１枚の HS 画像を取得できる。

⑶ 解析

MAX-DOAS 法では２方向の天空光スペクトル、すなわち低仰角方向のターゲットスペクトルと天頂付近の基準スペクトルを取得し、前者を後者で割った値の対数を取って差分光学的厚さ（Δτ）の観測スペクトルを求める。その際、Rayleigh 散乱等の波長依存性の小さい成分を低次（2 次程度）の多項式フィッティングで見積もって取り除く。これとは別に、各気体の吸収断面積と ΔSCD から透過率を計算し、その対数を取ることによって Δτの計算スペクトルを求める。ここでも波長依存性の小さい成分は低次多項式フィッティングで見積もって取り除く。こうして得られた Δτの計算スペクトルが観測スペクトルと一致するように、各気体の ΔSCD を最適化する（スペクトルマッチング）。

観測スペクトルの誤差を減らすためには、HS カメラの画素毎に正確に波長校正を行っておく必要がある。また、計算スペクトルを観測スペクトルに合わせるためには波長分解能を観測スペクトルに合わせて調整する必要がある。スペクトルマッチングでは波長依存性の大きい成分のみを利用するため、吸収スペクトルの細かい構造が十分に分解できる程度（〜1 nm 程度）の波長分解能が必要である。

４．研究成果

(1) NO_2 ΔSCD 導出手法の開発

① 波長校正

波長校正では、あらかじめ水銀ランプの HS 画像を使って画像中心で３次の校正係数を求めておき、観測で取得した天空光の HS 画像を使って画素ごとに校正係数のゼロ次の項（波長オフセット）を最適化する。

まず、HS カメラに透過型拡散板を付けた状態で水銀ランプの HS 画像を取得し、画像中心付近における 5×5 画素の平均スペクトルを求める。次に、400 〜 600 nm の範囲にある５本の吸収線のピークに対応するチャンネル番号と波長の関係に適合する３次多項式を求める。この際、スプライン補間を使って元の波長サンプリング間隔より細かい精度でピーク位置を決定する。

次に、観測で取得した天空光の観測スペクトルを放射伝達シミュレーションで得られた計算スペクトルと比較し、NO_2 吸収帯付近における両者の相関係数が最大になるように各画素の波長オフセットを最適化する。この際、スペクトルから波長依存性が小さい成分を低次多項式フィットで見積もって差し引いておく。波長オフセットは HS 画像の縦方向（スキャン方向）で同一と考えられるため、天空光が写っている範囲で縦方向の平均値を計算する。このようにして求まった波長オフセットの例を図１に示す。

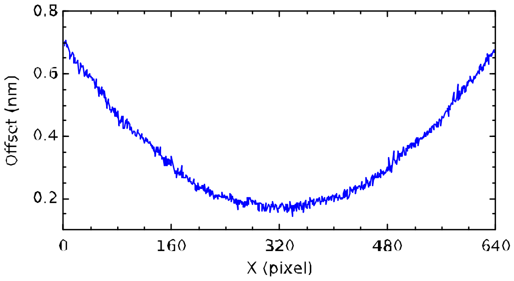

図 1. 波長オフセットの例

② スペクトルマッチング

気体の ΔSCD は前述したスペクトルマッチングによって導出される。ある 1 画素における実測データのスペクトルマッチングの例を図 2 に示す。

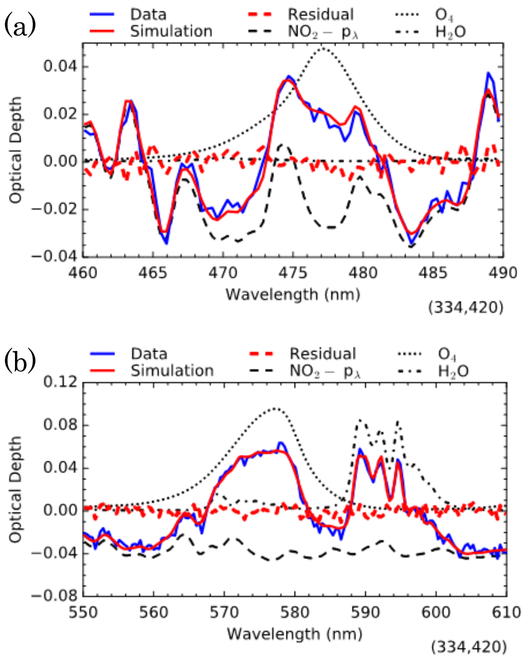

図 2. スペクトルマッチングの例。(a) 波長帯 460 ~ 490 nm、(b) 波長帯 550 ~ 610 nm。青線は観測スペクトル、赤実線は計算スペクトル、赤破線は残差を表す。黒破線、黒点線、黒 1 点破線はそれぞれ NO_2、O_4、H_2O の計算スペクトルへの寄与を表す。

図 2(a)の波長帯は 460 ~ 490 nm であり、この例では ΔSCD として NO_2: 2.6 × 10^{17} molecule/cm^2、O_4: 7.6×10^{43} molecule^2/cm^5 という値が得られた（H_2O の ΔSCD は 1.5×10^{23} molecule/cm^2 に固定した)。図 2(b)の波長帯は 550 ~ 610 nm であり、ΔSCD として NO_2: 3.3×10^{17} molecule/cm^2 、O_4: 9.1×10^{43} molecule^2/cm^5 、H_2O: 1.4×10^{23} molecule/cm^2 という値が得られた。どちらの波長帯においても、残差は装置のノイズレベルになっており、各分子による吸収は十分な S/N 比で測定されていることが分かる。

(2) NO_2 ΔSCD のイメージング計測

① NO_2 空間分布の非一様性測定

NO_2 空間分布の非一様性を調べるため、千葉大学にある 8 階建てビルの屋上から全方位角をカバーする観測を行った（2016 年 2 月 19 日)。観測で得られた HS 画像から作成した RGB 合成画像を図 3(a)に示す。(ラインレートは 1 秒間にスキャンした HS 画像の行数。）観測方向は西向き（北から東向きに測って−84.6 °）であり、手前には千葉市のビル群が見えている。この HS 画像を解析して得られた NO_2 ΔSCD の疑似カラー画像を図 3(b)に示す。この図から NO_2 が下層に多く分布していることが分かる。手前の建物部分で NO_2 ΔSCD が小さくなっている主な原因は実効光路長が短いためであり、NO_2 の多くは建物より後方に分布していることが分かる。複数の HS 画像を繋げることにより、水平方向 360 °×鉛直方向 9 °のパノラマ画像を作成した。このパノラマ画像から導出された NO_2 ΔSCD を図 3(c)に示す。NO_2 ΔSCD は北西方向および東方向で大きいことが分かる。千葉大学から見て北西方向には海岸線に沿って高速道路があり、都市化も進んでいる。東方向には混雑度の高い高速道路のインターチェンジがあり、これらが NO_2 ΔSCD が大きい原因になっていると考えられる。

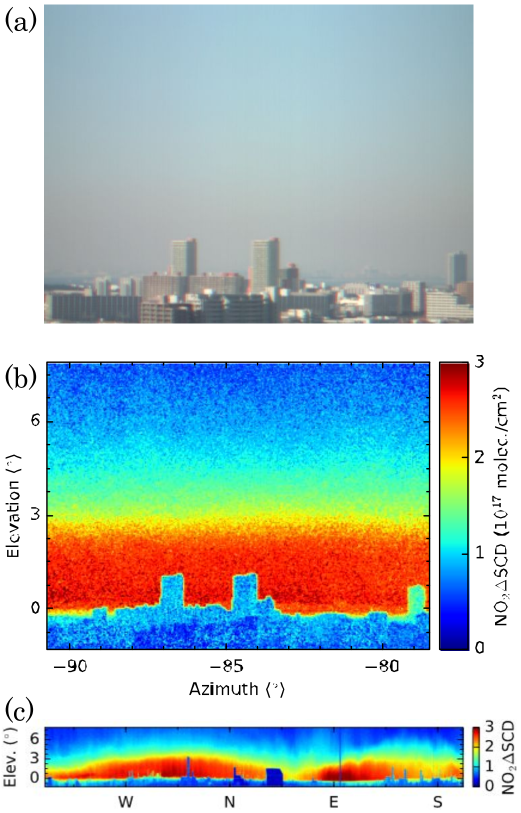

図 3. 千葉大学における NO_2 ΔSCD のイメージング 計測結果（ターゲット画像取得日時：2016 年 2 月 19 日 11 時 24 分、ラインレート：40 line/s)。(a) RGB 合成画像、(b) NO_2 ΔSCD 分布の疑似カラー画像 、(c) NO_2 ΔSCD のパノラマ画像

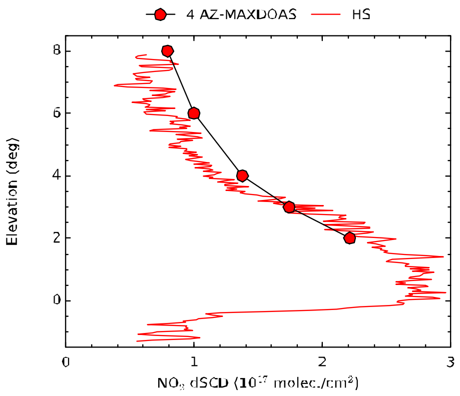

図 4. 4 方向 MAX-DOAS システム（4 AZ-MAXDOAS）と HS カメラ（HS）で測定された NO_2 ΔSCD の比較

HS カメラで測定された NO_2 ΔSCD の値を同じ千葉大学のサイトに設置された 4 方向 MAX-DOAS システムで測定された近い時刻の値（方位角 4 点、仰角 5 点）と比較すると、測定精度の範囲で両者がほぼ一致することが確かめられた（図 4）。

② 局所排出源における NO_2 の時間変化測定

局所源から排出される NO_2 の時間変化を調べるため、千葉県成田市の協力を得て成田空港近くの公園（成田市さくらの山公園）から成田空港滑走路方向の観測を行った。観測日（2017 年 1 月 23 日）は早朝に曇っていたが、昼前には低仰角方向を除いて雲はなくなった。気象庁の観測によると、成田市では 11 時から 14 時頃まで継続的に北西または北北西方向から平均風速 9〜12 m/s 程度の強い風が吹いていた。ある飛行機が離陸した直後に取得した HS 画像を解析した結果、ちょうど飛行機が離陸した付近で NO_2 ΔSCD が大きくなっており、両翼にあるエンジンから NO_2 がジェットのように噴き出している様子が確認できた。また、20 秒間隔の連続撮影で取得した HS 画像を解析した結果、NO_2 が排出されて ΔSCD が増加し、風によって拡散されて ΔSCD が減少する様子がはっきり見て取れた。

(3) 解析の高速化

通常の解析では ΔSCD の値から計算される Δτ の計算スペクトルが観測スペクトルと一致するように ΔSCD を最適化するが、それには多大な計算時間（1 画像当たり数時間程度）が必要である。一方、いくつかのピーク波長における Δτ の値を足したもの（ピークサム）は高速に（1 画像当たり数分程度で）計算することができ、且つ ΔSCD と良い相関を示すことが分かった。このピークサムを利用することにより、解析を高速化できる目途が立った。

現在、本研究で得られた研究成果を査読付き論文として発表するための原稿を準備中であり、間もなく投稿が完了する予定である。

＜引用文献＞

① G. Hönninger, C. von Friedeburg, and U. Platt, Multi axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS), Atmos. Chem. Phys., 4, 2004, pp.231-254.

5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計　2　件）

① <u>眞子 直弘</u>、野呂 直樹、高良 洋平、安藤 史識、鈴木 睦、<u>久世 宏明</u>、ハイパースペクトルカメラを用いた局所排出源における NO2 のイメージング計測、SICE 第 42 回リモートセンシングシンポジウム、2017 年 3 月 8 日、千葉大学・松韻会館・千葉県・千葉市

② <u>眞子 直弘</u>、野呂 直樹、高良 洋平、安藤 史識、鈴木 睦、<u>久世 宏明</u>、ハイパースペクトルカメラを利用した大気中 NO2 のイメージング計測、日本リモートセンシング学会平成 27 年度秋季学術講演会、2015 年 11 月 26 日〜11 月 27 日、長崎大学・良順会館・長崎県・長崎市

〔産業財産権〕

○出願状況（計　1　件）

名称：情報処理装置、情報処理方法、及びプログラム
発明者：<u>久世 宏明</u>、<u>眞子 直弘</u>（他 4 名）
権利者：エバ・ジャパン株式会社、国立大学法人 千葉大学
種類：特許
番号：特許願 2015-215665
出願年月日：平成 27 年 11 月 02 日
国内外の別：国内

6．研究組織

(1)研究代表者

眞子　直弘（MANAGO Naohiro）
千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・特任助教
研究者番号：00644618

(2)連携研究者

久世　宏明（KUZE Hiroaki）
千葉大学環境リモートセンシング研究センター・教授
研究者番号：00169997