

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1424 March 2025

船舶排出ガス中の NO₂ カラム濃度の見える化

細川 真也, 和泉 隆夫, 本間 翔太, 大倉 翔太

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨

1. まえがき	4
2. 基礎的知見の整理と事前の検討	6
2.1 研究に用いたハイパースペクトルカメラ	6
2.2 光学原理に基づいた大気環境計測の基礎知識	7
2.3 本研究における濃度の推定方法の検討	8
2.4 検証の対象とする発電機が排出するガスの NO ₂ 濃度	11
2.5 まとめ	12
3. 排気ガス中の NO ₂ 濃度の測定手法の検討	13
3.1 はじめに	13
3.2 濃度の推定方法	13
3.3 ハイパースペクトルイメージの取得及び解析方法	13
3.4 結果	16
3.5 考察	17
4. 船舶排出ガス中の NO ₂ カラム濃度の見える化	20
4.1 はじめに	20
4.2 方法	20
4.3 結果	25
4.4 考察及びまとめ	29
5. あとがき	30
謝辞	30
参考文献	30
付録 A 燃焼機関から排出される主要成分と光の吸収	32
付録 B フェンスを背景とした場合の工夫	33
付録 C 規格化のメリットとデメリット	34

Visualization of NO₂ column density in ship emission

Shinya HOSOKAWA*,**

Takao IZUMI***

Shota HOMMA****

Shota OKURA*****

Synopsis

The emission of air pollutants is regulated to protect human health. The sulphur content in the fuel oil used on board ships has been limited since 2020. As a result, a decrease in SO₂ concentrations in coastal areas has been observed. However, the NO_x emissions regulations have not changed since 2011 in the areas including Japan. The rise in environmental awareness predicts that the regulation on NO_x emissions will be tightened in the future, and the need for monitoring and visualization of the monitoring results will increase. In this study, we focused on NO₂, one of the nitrogen oxides that may have a negative impact on human respiratory organs, and we visualized the column density of NO₂ in the gas plume from ships using an optical method. We first organized the issues of visualizing NO₂ using an optical approach. Then, we verified the approach in indoor conditions and examined the sensitivity of the approach against the exhaust from a generator outdoors. Based on the reviews, we concluded that visualizing NO₂ in the exhaust gas was possible but that estimating the light intensity without the exhaust gas (the intensity of reference light) is important for ensuring its accuracy. Finally, we attempted to visualize the column density of NO₂ in the gas plume from board ships operated through the mouth of Tokyo Bay. We concluded that visualization is possible if the column density of NO₂ is higher than 2×10^{16} molecule cm⁻². However, we still have to resolve to verify the conditions for applying the estimation method for the intensity of reference light and validating the method for separating light absorption by NO₂ from the absorption by other substances, such as water droplets and black smoke. In addition, it will also be necessary to estimate the plume width (optical path length) and temperature to convert from the column density if the conversion is required. It will be necessary to overcome many more challenges before the technology can be established.

Key words: Ship emissions, Nitrogen oxides, Visualization, Spectral intensity, Absorption cross-section

* Head of Marine Environmental Information Group, Marine Environment Control System Department
** Head of Big Data Technology Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
*** Member, Marine Environmental Information Group, Marine Environment Control System Department
**** Researcher, Big Data Technology Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
***** Senior Researcher, Marine Environmental Information Group, Marine Environment Control System Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5107 Fax : +81-46-844-0575 e-mail: hosokawa@p.mpat.go.jp

船舶排出ガス中の NO₂ カラム濃度の見える化

細川 真也^{*,**}・和泉 隆夫^{***}・本間 翔太^{****}・大倉 翔太^{*****}

要 旨

大気汚染物質の排出は、人の健康の保護を目的として規制されている。船舶では、2020 年から硫黄分の燃料油中濃度の規制が強化され、沿岸域の SO₂ 濃度の低下が見られるようになってきているが、NO_x 排出の規制は 2011 年以降に大きな変化はない。しかし、環境意識の高まりから、今後、その規制が強化されモニタリングの必要性が高まり、さらに、可視化技術があれば、船舶排気中の窒素酸化物濃度の見える化への需要が顕在化する可能性がある。本研究では、窒素酸化物の中でも人の呼吸器に悪影響を与える恐れがある NO₂ に着目し、光学的手法に基づいた船舶から排出されるガスに含まれる NO₂ カラム濃度分布の観測及び見える化を試みた。本論文では、まず、光学的手法による NO₂ の見える化の課題を整理し、次に、室内での検証や屋外での発電機を対象とした検討を行うことで、NO₂ の見える化は可能であるが、その精度の確保においては参照光の推定が重要である事を示した。最後に、東京湾口を航行する大型船舶を対象として、排気ガスのブルーム中の NO₂ カラム濃度の分布の見える化を試みた。この結果、NO₂ カラム濃度が概ね 2×10^{16} molecule cm⁻² よりも高い濃度であれば、見える化は可能である事を示した。しかし、参照光の推定手法の適用条件の検証や水滴・黒煙等の NO₂ 以外の光を吸収する物質の影響の分離方法の妥当性の検証の課題を残した。また、濃度への換算が求められる場合には、ブルームの奥行き（光路長）と温度の把握も必要となり、見える化に求められる単位によっては、技術の確立までにさらに多くの課題を乗り越えなければならない。

キーワード：船舶排気，窒素酸化物，見える化，スペクトル強度，吸収断面積

* 海洋環境制御システム研究領域 海洋環境情報研究グループ長
** インフラ DX 研究領域 ビッグデータ研究グループ長
*** 海洋環境制御システム研究領域 海洋環境情報研究グループ 技術補助員
**** インフラ DX 研究領域 ビッグデータ研究グループ 研究官
***** 元海洋環境制御システム研究領域 海洋環境情報研究グループ 主任研究官（現国土技術政策総合研究所）
〒 239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5107 Fax：046-844-0575 e-mail: hosokawa@p.mpat.go.jp

1. まえがき

窒素酸化物（NO_x）等の大気中へ排出される汚染物質は、国民の健康を保護するとともに生活環境の保全を目的として、大気汚染防止法による規制の対象になっている。自動車から排出される NO_x と硫黄酸化物（SO_x）は、1960 年代に社会問題となり始め、その後の規制によりそれらの濃度は着実に減少している（図—1.1）。我が国における SO_x 排出量の自動車からの割合は、2015 年度時点では、大きな割合を占める火山を含めるとほとんど無視できる程度であり、火山を除いたとしても¹⁾。一方で、NO_x 排出量の割合は全体の 23% となっている¹⁾。

船舶から排出される大気汚染物質の割合は、2000 年代以降に貿易の活発化により、東アジアで増加傾向にある²⁾。我が国において、火山を除いた中で船舶からの排出量の割合は、2015 年度時点で SO_x では半分程度、NO_x でも約 35% を占めており¹⁾、自動車からの排出割合よりも高い。このように、船舶は人為起源の中で SO_x と NO_x の主要な排出源であることから、近年、その排出に対する関心は相対的に高まりつつある³⁾。

船舶から排出される SO_x・NO_x 等の規制は、船舶の運航や事故による海洋汚染の防止を目的とした MARPOL 条約の中の付属書 VI で規定されている。この付属書は 2005 年 5 月に発効され、同時に、国内法である「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律」が改正されている。当時の改正の内容は、それまでの我が国の対応を大きく改善するものではないことから、その効果は疑問視されていた⁴⁾。

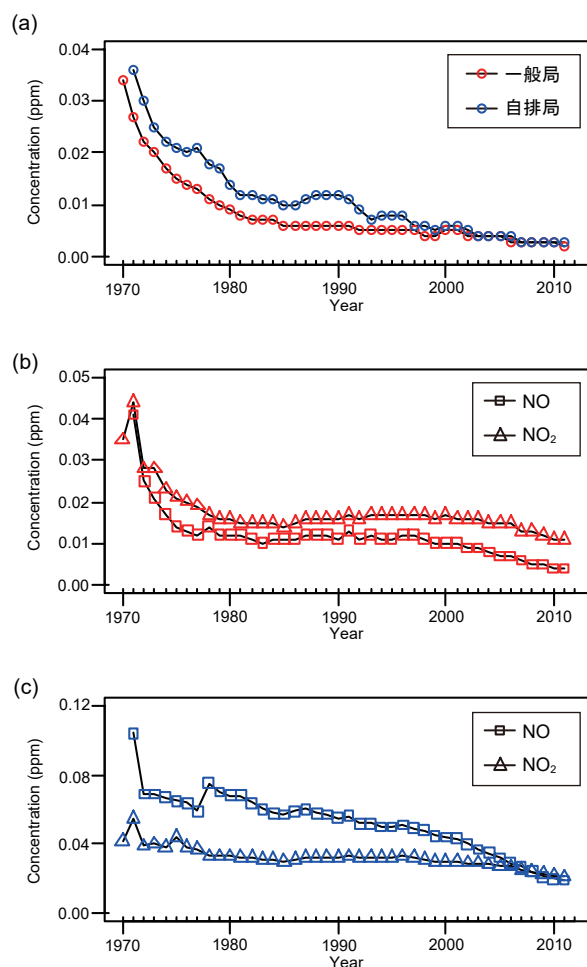
しかし、その後も付属書 VI の改訂は続けられおり⁵⁾、SO_x と NO_x に関しては、2025 年 3 月時点で、それぞれ複数回改訂されている（図—1.2）。SO_x に関する規制は燃料油硫黄分濃度で規定がされており、我が国を含む一般海域全域では、その上限が 3.5wt% であったものが、2020 年より 0.5wt% に強化されている⁶⁾（図—1.2a）。瀬戸内海周辺では、この規制以降に大気中の SO₂ 濃度が急激に低下した事が報告されている⁷⁾。この変化は一般環境大気測定局のデータから見る事もできる（図—1.3c）。

NO_x の規制に関しては、我が国を含む一般海域では 2011 年から始まった 2 次規制が適用されている⁸⁾（図—1.2b）。一般環境大気測定局のデータから、沿岸域での NO₂ 濃度に SO₂ 濃度ほどははっきりとした変化を見る事はできないものの（図—1.3e 及び f）、新型コロナウイルスの蔓延に伴うロックダウン後に低下したという報告もある⁷⁾。

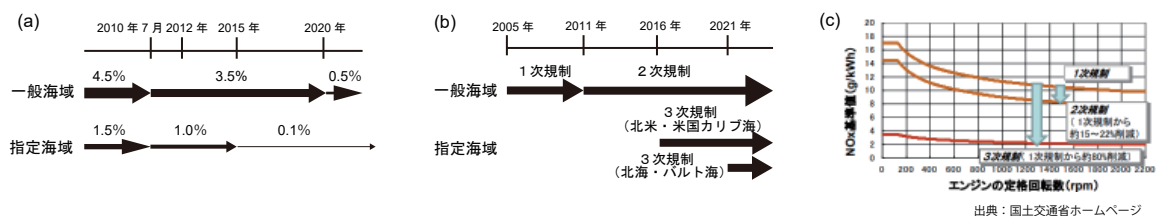
自動車から排出される NO_x 濃度は規制によって着実に低下してきたのに対し、NO₂ の濃度低下は依然として緩慢である（図—1.1c）。高濃度の NO₂ は人の呼吸器に悪影響を与えることから、今後は NO₂ への関心が高まる可能性がある。

また、近年は海洋分野における脱炭素化の実現を目的とした化石燃料から水素やアンモニア等の転換の動きがある。これは、同時に船舶から排出される NO₂ 等の汚染物質に対する関心をさらに高める可能性がある。

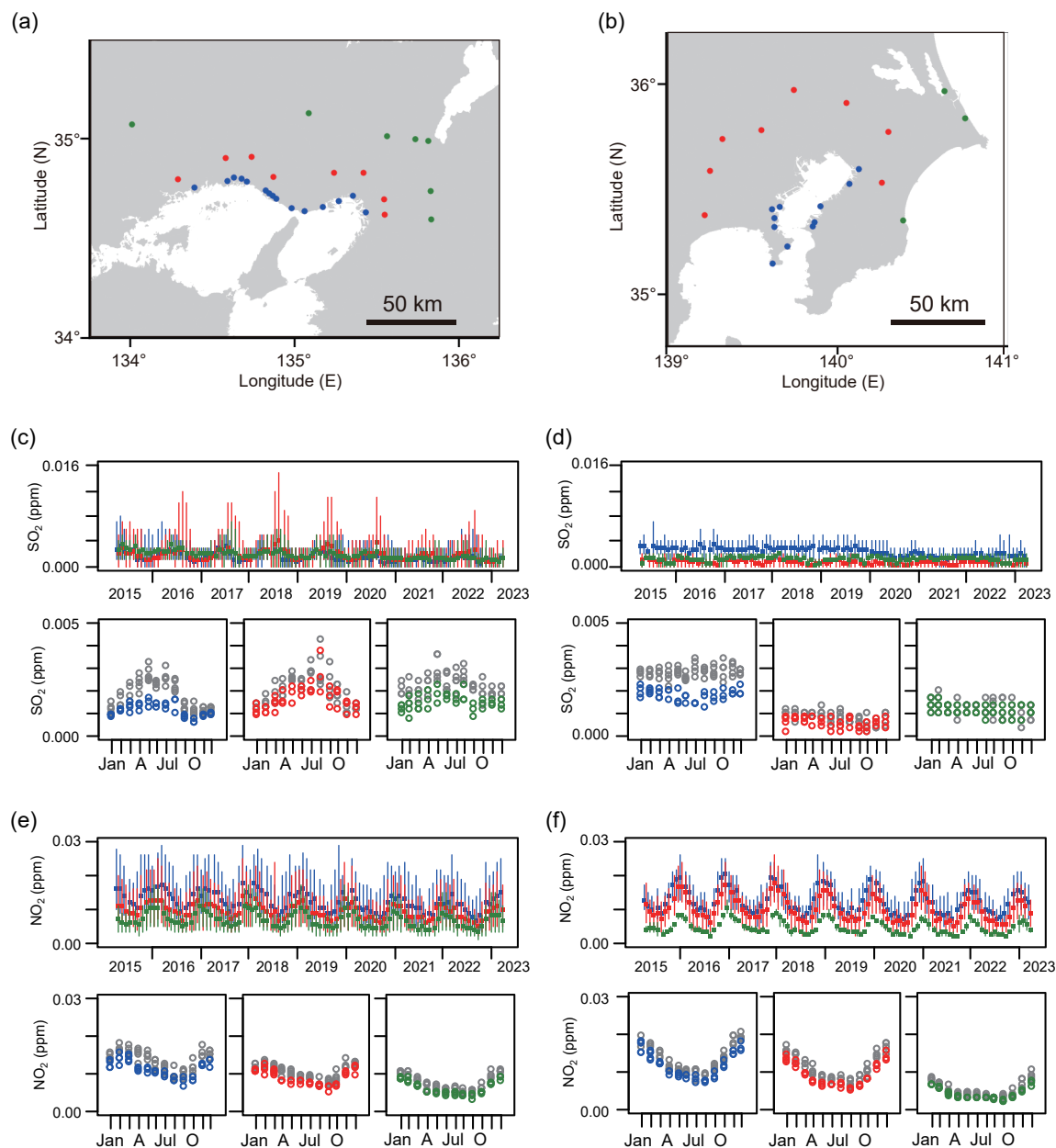
データの「見える化」は、環境モニタリングの重要なアウトプットの 1 つとなっている。例えば、市街地の大気環境を対象とした光学的アプローチによる NO₂ 濃度の測定手法に関する研究が行われており、ppb レベルの低濃度の NO₂ の測定技術が可能となっている^{9)–13)}。光学的アプローチは、ガスを直接サンプリングする必要がない事に加え、比較的容易



図—1.1 大気中濃度の年平均値の推移。(a) SO₂ 濃度の一般環境大気測定局（一般局）と自動車排出ガス測定局（自排局）における推移と NO 及び NO₂ 濃度の (b) 一般局及び (c) 自排局における推移を示している。データは、いずれも、環境省ホームページ (https://www.env.go.jp/air/osens/jokyo_h23) から引用している。なお、一般局は、環境大気の汚染状況の常時監視を目的とし、一定地域における大気汚染状況の継続的把握、発生源からの排出による汚染への寄与及び高濃度地域の特定、汚染防止対策の効果の把握のために配置される。一方、自排局は、自動車排出ガスによる環境大気の汚染状況の常時監視を目的としており、自動車走行による排出物質に起因する大気汚染の考えられる交差点、道路及び道路端付近に配置される (<https://www.nies.go.jp/igreen/explain/air/kyo.html>)。いずれの測定局も大気汚染防止法に基づいて設置されるものである。



図—1.2 MARPOL 条約付属書 VI で規定されている船舶から排出される物質に係る規制。(a) 船舶用燃料油中の硫黄分濃度の規制と (b) 船舶から排出される NO_x の規制の変遷を示している。(c) NO_x はディーゼルエンジンの定格回転数に対する燃料消費量当たりの NO_x 排出量の上限值が設定されている。



図—1.3 大気中 SO₂ と NO₂ の濃度変化。(a) 大阪湾及び播磨灘周辺及び (b) 東京湾周辺の一般環境大気測定局の位置を示しており、青色、緑色、赤色は、それぞれ、内湾沿岸、内湾沿岸から離れた場所及び中間域であり、それぞれの領域における大気中 SO₂ 濃度 (c 及び d) と NO₂ 濃度 (e 及び f) を示している。各パネルのプロットとバーは、それぞれ、カテゴリ内の平均と最小—最大値を示している。c, d, e, f の下段のパネルは、年間の変化をクローズアップして示したものであり、2019 年以前 (灰色) と 2020 年以降 (色付) を示している。この年間の変化は、領域毎に一般環境大気測定局間で平均した値である。

に NO_2 濃度の空間分布の見える化が可能であり、これからの環境モニタリングの技術になる可能性が高い。

船舶から排出されるガスは、周辺の大気に比べて高温であることから、排気口から出た後に浮力を持って上昇し、さらに、周辺大気の気流の影響を受けながら、複雑に拡がっていく。船舶から排出される汚染物質は、この排気ガスのプルームの中で空間分布を形成している事が予想される。港湾労働に従事する人や管理する人、あるいは、港湾もしくは航路周辺で生活する人にとっては、自分達が高い濃度の汚染物質に晒されているのかが関心事になる。船舶の排気プルーム中の SO_2 に関しては、既に見える化の試みが行われており¹⁴⁾、 NO_2 濃度の見える化技術があれば、その需要が顕在化する可能性がある。

本研究では、船舶から排出されるプルーム中の NO_2 濃度の「見える化」を可能とする光学的アプローチに基づく技術の開発を目的とした。光学的アプローチによる NO_2 濃度の見える化技術には、 NO_2 が数 km にわたって分布する市街地の大気環境中での適用事例があるものの^{9)–13)}、船舶のプルームでは視野方向の幅が短くなる点が技術開発のハードルになる。しかし、船舶排気中の SO_2 の見える化は既に成功しており¹⁴⁾、 NO_2 でもできる期待がある。

本研究では、まず、船舶排気に含まれる NO_2 の光学的アプローチによる見える化の課題を整理し、その可能性を検討

した。次に、実際に NO_2 が含まれているものと考えられる排気ガスを対象とし、ハイパースペクトルカメラを用いてガス中の NO_2 濃度を測定する上での技術的課題を整理した。この検討では、まず、環境条件を整えた室内で定量可能性を検証し、次に、発電機から排出されるガスを対象として屋外における測定の課題を抽出した。最後に、東京湾の航路を航行する大型船舶を対象として、排気プルーム中の NO_2 カラム濃度の見える化を試みた。

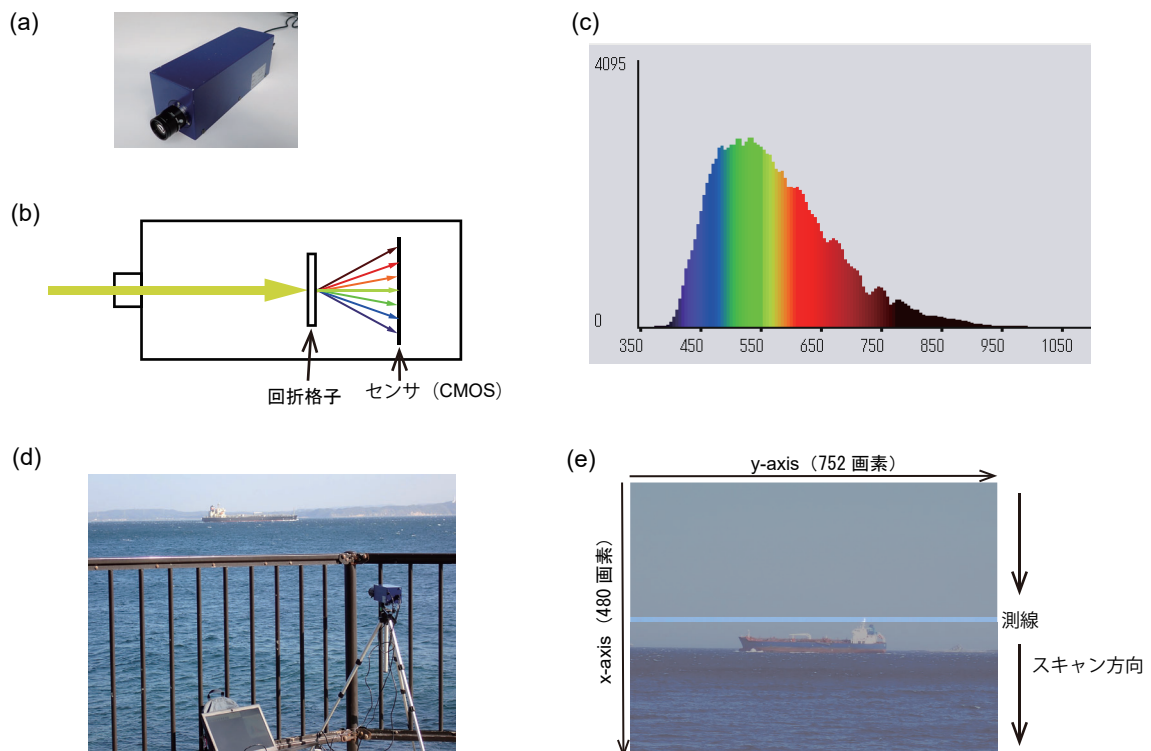
2. 基礎的知見の整理と事前の検討

2.1 研究に用いたハイパースペクトルカメラ

自然の光は、様々な色が合成されたものである。光の色は電磁波の波長によって決まり、物質は特有の波長の光（色）

表—2.1 使用したハイパースペクトルカメラ（NH-3、エバ・ジャパン社製）の仕様

項目	仕様
画像解像度：	752×480 画素 (36 万画素)
波長範囲：	350 nm から 1100 nm まで
波長分解能：	5 nm
スキャン速度：	36 万画素スキャン：（標準）4.8 秒



図—2.1 使用するハイパースペクトルカメラ（NH-3）の概要。 (a) NH-3 の外観。 (b) NH-3 による分光のイメージ図と (c) 分光して得られるスペクトル強度の例。 (d) 屋外での観測風景及び (e) NH-3 によるイメージスキャンの方法。

を吸収する性質をもっているものが多い。我々が認識する物質の色は、吸収されずに反射された波長の光によって決まっている。これは大気中の物質も同様である。

光から色を分ける事を分光と呼び、分光は光を波長ごとに分ける事を意味する。マルチスペクトルカメラやハイパースペクトルカメラは、波長ごとにイメージを取得できるカメラである。マルチとハイパーは、分光できる光の数によって呼び分けられているようである¹⁵⁾。

本研究では、船舶からの排気ブルーム中の NO_2 のモニタリングに適した波長について、ハイパースペクトルカメラ(NH-3, エバ・ジャパン社製:図—2.1a)を用いて抽出した。NH-3は、カメラに内蔵された回折格子によって光を分光し、センサによってその強度を測定する(図—2.1b)。NH-3では、信頼性の高い分光方式によって実現している5 nmの波長分解能¹⁵⁾と151の波長帯(バンド)により、350 nm(近紫外光)から1100 nm(近赤外光)までの波長域のスペクトル強度を取得できる(表—2.1及び図—2.1c)。また、NH-3はライン分光タイプであるが、内蔵されスキャン機構により二次元イメージを取得可能であり、この内臓機構によって屋外でも比較的容易に使用できる(図—2.1d)。

NH-3では、1測線ごとにハイパースペクトルイメージを取得し、スキャンにより二次元イメージを取得する(図—2.1e)。このことは、二次元イメージの取得に時間がかかる欠点をもたらしているが、これは、実用化の段階では機器の最適化の過程で解決できる課題である。本研究では NO_2 を見える化する波長帯を見つける事を目的としている事から、この欠点は本研究の議論の対象とはならない。

2.2 光学原理に基づいた大気環境計測の基礎知識

(1) 概要

光学原理に基づいた大気中の物質濃度の検出方法には、

吸収、散乱、発光、イオン化等が挙げられる¹⁶⁾。吸収は、大気中を通過する事で物質に吸収された光の強度から物質濃度を測定する方法であり、以下のランベルト・ベールの法則を利用する：

$$\ln(I_0/I) = \sigma NL \quad . \quad (1)$$

ここに、 I_0 及び I は、それぞれ、入射光及び透過光の強度、 σ は物質の吸収断面積、 N は物質の分子数密度(濃度)、 L は光路長である。吸収断面積は、分子数あたりの面積の次元を持つパラメータであり、この値が大きい物質ほど光を吸収しやすい。

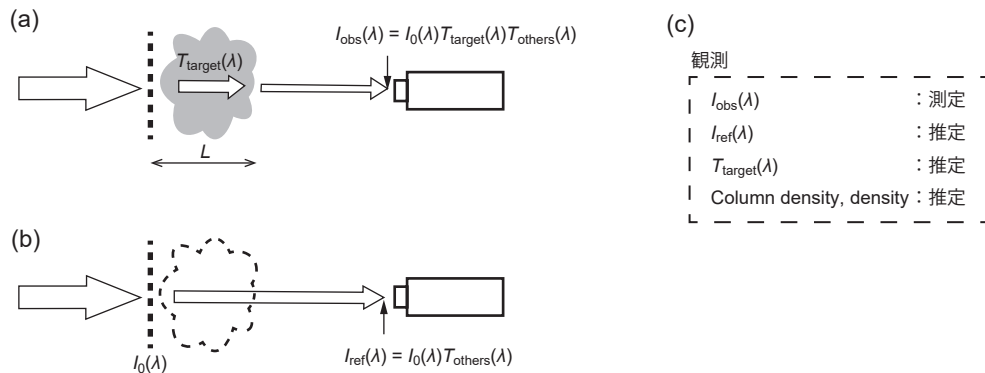
このランベルト・ベールの法則は、1つの物質による光の入射と透過の関係を簡潔に表したものであり、屋外の大気ではもう少し複雑になる。対象物質を含むガスへの入射光の強度($I_0(\lambda)$)は、ガスを透過して減衰し、観測光($I_{\text{obs}}(\lambda)$)として計測機器に到達する(図—2.2a)。ただし、ガスの中には対象物質だけでなく、その他の空気分子やエアロゾル等も含まれているため、光の強度はこれらによっても減衰する。ここに、入射光と観測光の関係は、対象物質による透過率($T_{\text{target}}(\lambda)$)とその他の空気分子やエアロゾルによる透過率($T_{\text{others}}(\lambda)$)を使って表すと以下となる：

$$I_{\text{obs}}(\lambda) = I_0(\lambda) T_{\text{target}}(\lambda) T_{\text{others}}(\lambda) \quad . \quad (2)$$

ただし、それぞれの変数は光の波長(λ)の関数としている。

(2) 波長に係る用語の定義

波長は、光の強度や吸収断面積の大きさと強く関係するため、重要なキーワードとなる。本論文では、幅を持った波長の事を波長帯と呼んでおり(図—2.3)、本研究では、波長帯を議論の対象とする事がほとんどである。また、NH-3が識別する波長帯の事をバンドと呼び、本論文では波長帯とは用語を使い分けている。



図—2.2 観測可能な光強度の模式図と用語の整理。測定場所において、(a) 対象ガスがある場合の光強度(I_{obs})と(b) 無い場合の光強度(I_{ref})が分かれば、対象ガス中の透過率を推定することができる。本研究では、この関係から NO_2 濃度を推定する方法を採用しており、入射光の強度(I_0)を測定する必要はない。(c) この方法で直接測定しているものは I_{obs} のみであり、他はすべて推定している事になる。

(3) 光路長と濃度及びカラム濃度

光が対象物質を透過する光路長 (L) は、濃度の定量性を確保する上で重要なパラメータである。例えば、低濃度の物質の測定を目的とした実験系の計測では、検出器が正確に測定できる程度にまで透過率を下げるために光路長を長くする (図—2.4)。また、屋外でも、数 km 離れた航空障害灯を光源とすることで、航空障害灯から観測地点までの NO_2 の平均的な分子数密度を ppb レベルの低濃度で測定する事が可能である^{9),10),11),16)}。屋外ではガスの存在範囲が分からず光路長を特定する事が困難な場合が多いが、絶対濃度の高度分布が既知な酸素分子の 2 量体 (O_4) から平均光路長を推定する手法もある^{17),18)}。しかし、それでも光路長を測定もしくは推定できない事も多い。この場合、濃度の代わりに光路長も含めたカラム濃度 (NL) を推定する。

本研究では、第 3 章では光路長が既知な条件で測定を行っている事から濃度を算出しているが、第 4 章では海域を航行する船舶を対象としているため、排気口の幅は未知であり、濃度ではなくカラム濃度を推定している。

(4) 吸収に基づいた大気環境計測の例

吸収に基づいた大気環境計測の方法として、透過率と波長に強く依存する吸収断面積の特性を利用した差分吸収分光法がよく使われている。

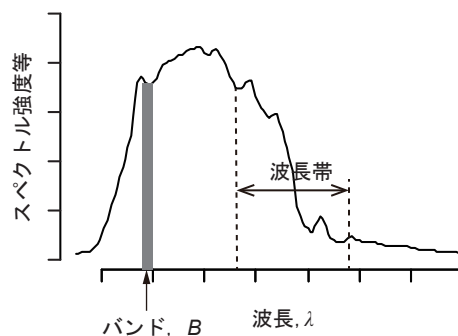
差分吸収分光法では、 $T_{\text{target}}(\lambda)$ の強い波長依存性を利用して、物質の平均的な分子数密度を推定する。例えば NO_2 の場合、吸収断面積は 1 nm 以下の短い波長の中で大きく振動する¹⁹⁾。一方、空気分子の透過率は既知であり、また、エアロゾルの透過率は波長依存性が弱い事から^{9),10),11),16)}、 $I_{\text{obs}}(\lambda)$ は NO_2 と空気分子の吸収断面積の波長特性に対応して変動する。つまり、 $I_0(\lambda)$ 及び $I_{\text{obs}}(\lambda)$ を観測できれば、既知な $T_{\text{others}}(\lambda)$ と式 (2) から、 $T_{\text{target}}(\lambda)$ を算出する事ができる。Yoshii et al. (2003)⁹⁾ や Fuqi et al. (2005)¹⁰⁾ は波長分解能が 0.3 nm の分光光度計を用い、Manago et al. (2018)¹²⁾ は波長分解能が 1 nm のハイパースペクトルカメラを用いて NO_2 を透過した後の $I_{\text{obs}}(\lambda)$ の細かい吸収パターンを測定し、 NO_2 の濃度もしくはカラム濃度を観測している。

なお、差分吸収分光法では、本来なら式 (2) に装置定数を考慮する必要があるが、ここでは簡略化して記述している。

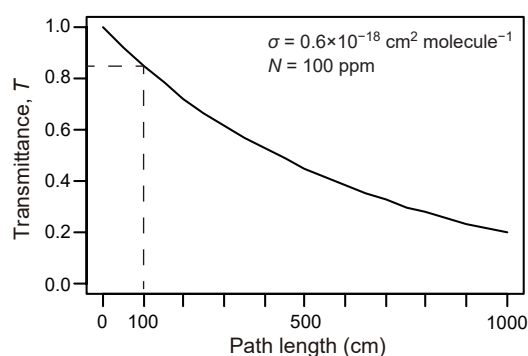
2.3 本研究における濃度の推定方法の検討

(1) 本研究で採用する濃度推定方法の概要

既往研究による差分吸収分光法を使った NO_2 濃度の観測では、少なくとも 1 nm よりも短い波長分解能を有した機器を用いられている^{9),10),12)}。しかし、NH-3 の波長分解能は 5 nm であり、これでは差分吸収分光法を適用する事は困難である。そこで、本研究では、以下に示す、対象物質を含むガスが有る場合の観測光の強度 (図—2.2a) と無い場合の観測光



図—2.3 波長、波長帯、ハイパースペクトルカメラのバンドの説明。



図—2.4 光の透過率と光路長の関係。対象ガスの吸収断面積が $0.6 \times 10^{-18} \text{ cm}^2 \text{ molecule}^{-1}$ 、濃度が 100 ppm の場合の関係を示している。透過率は、対象ガスの温度が 273 K (0°C) として算定している。算定方法については 3.2 を参照できる。

の強度 (図—2.2b) の比較によって濃度を推定する手法を採用した。

対象物質の濃度が他の物質濃度に影響を与えないとすると、式 (2) の $T_{\text{target}}(\lambda)$ を 1.0 と考えればいい事から、対象物質が無い場合に観測する光の強度 ($I_{\text{ref}}(\lambda)$) は $I_0(\lambda)T_{\text{others}}(\lambda)$ となる。すると、対象物質を含むガスが有る場合の観測光 $I_{\text{obs}}(\lambda)$ は以下に書き換えることができる：

$$I_{\text{obs}}(\lambda) = I_{\text{ref}}(\lambda)T_{\text{target}}(\lambda) \quad (3)$$

つまり、対象物質を含むガスが有る場合と無い場合の 2 つの光の強度があれば、対象物質によって低下する透過率を推定できる。

本研究では、この NO_2 による透過率を推定した後に既知の NO_2 吸収断面積を使って濃度もしくはカラム濃度を推定する手法を採用した。Prata (2014)¹⁴⁾ は事前のキャリブレーションから SO_2 カラム濃度を推定する手法を採用しているが、本研究の方法はそれとは異なる。

本論文では、 $I_{\text{ref}}(\lambda)$ を参照光と呼ぶ。なお、差分吸収分

光法では $I_0(\lambda)$ を参照光と呼ぶ事もあるため、本論文との違いに注意が必要である。

(2) 参照光の推定の重要さ

対象物質を含むガスを容易に取り除く事が出来るのであれば、参照光を観測する事ができる。しかし、この操作は屋外では不可能であるため、参照光の推定が必要になってくる。

参照光の推定が必要となる事は、本研究で採用する手法でも差分吸収分光法でも同様であるが、それに求められる正確さと精度は手法によって異なる。差分吸収分光法では、短い波長の中での $I_{\text{obs}}(\lambda)$ の波長間でのスペクトル強度の差がより重要であるが、参照光 $I_0(\lambda)$ にはさほど正確性を求めている。このことから、差分吸収分光法を採用している研究では、ガスがない方向から取得したスペクトル強度をそのまま参照光としている。

一方、本研究で採用する手法では、式 (3) の関係に基づいて $T_{\text{target}}(\lambda)$ を求め、この値から物質濃度を定量するため、参照光 $I_{\text{ref}}(\lambda)$ にも求められる正確さ及び精度は $I_{\text{obs}}(\lambda)$ に求められるものと同程度である。Kuhn et al. (2022)¹³⁾ は、排気プルームに含まれる NO_2 を対象として、プルーム周辺のスペクトル強度から空間補間により参照光を推定したが、この場合、周辺のスペクトル強度の測定精度に加え、補間による正確性も参照光の推定精度に影響する。これらの測定や補間の不正確さは、物質による光の吸収が小さいほど（透過率の低下が小さいほど）無視できなくなり、透過率の推定精度は下がる。

本研究で対象とする船舶からの排気中の NO_2 濃度は比較的高濃度であり透過率は大きく低下すると想定されるため、参照光の推定精度に求められるシビアさは軽減される事が期待される。一方で、参照光の推定では、実用を意識した簡易な手法も必要となり、この簡易化においては、推定精度の低下に注意を払う必要がある。

なお、本研究では、測定、推定、観測の用語が出てくるが、図—2.2c のとおり使い分けている。

(3) NO_2 の測定が可能な波長帯

NO_2 の吸収断面積は、波長 400 nm 付近にピークを持つ分布を有しており¹⁹⁾、この吸収断面積がある程度の値を持つ波長帯においては、 SO_2 と H_2O を除けば、燃焼機関の排気ガスに含まれる主要な成分による吸収の影響を受けにくい(付録 A)。しかし、 SO_2 及び H_2O の吸収断面積の分布は NO_2 の吸収断面積の分布と重なっていることから、 NO_2 の測定における SO_2 及び H_2O の吸収の影響をあらかじめ検討しておく必要がある。ここでは以下の光学的厚さ (τ) を導入して、その影響の可能性を検討した：

$$\tau_{\text{target}}(\lambda) = \sigma_{\text{target}}(\lambda)NL \quad (4)$$

なお、 $\tau_{\text{target}}(\lambda)$ は $-\ln(T_{\text{target}})$ でもある。吸収断面積のデータは、

高分解能透過分子吸収データベースである HITRAN²⁰⁾ から取得した。

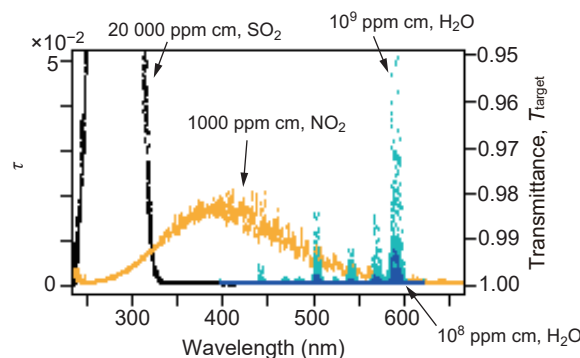
NO_2 のカラム濃度が 1000 ppm cm の場合、透過率は概ね 0.98 まで低下する(図—2.5)。本研究では、第 3 章及び第 4 章で示すとおり、観測光及び参照光ともに数 % のノイズを含む事から、おそらく、この辺りが透過率もしくはカラム濃度の定量限界である。

SO_2 の吸収断面積の大きさは NO_2 と同程度であるが、 NO_2 の吸収が強くなる波長 400 nm 付近ではほとんどゼロの値を取る(付録 A)。船舶から排気される SO_2 を研究した事例では最大で 20000 ppm cm のカラム濃度が報告されており¹⁴⁾、これを想定しても、400 nm 付近よりも長い波長帯であれば、 SO_2 による吸収が NO_2 の測定にほとんど影響を及ぼすことはない(図—2.5)。

H_2O の吸収断面積は NO_2 に比べて 5 桁低い(付録 A)。つまり、ガス中に NO_2 よりも 5 桁の高さのカラム濃度 (10^8 ppm cm) を持つ H_2O が存在していたとすると、 NO_2 の測定に影響する可能性があり、まず、600 nm 付近に影響が見られるはずである(図—2.5)。

Kuhn et al. (2022)¹³⁾ は、吸収断面積の比較から(付録 A)、430 から 445 nm の波長帯において NO_2 の吸収に影響が現れる H_2O のカラム濃度が 6×10^{23} molecule cm^{-2} であるとしている。これは、1 気圧及び 293 K の下で、相対湿度が 100% の状態が光路長 10 km の範囲で存在する場合に見られる。

極端な場合として、船舶から 1 気圧及び 273 K の H_2O のみによって構成される理想気体 (10^6 ppm) が排出されるとして、それが 100 cm の排気口(光路長)から出ているとすれば、このカラム濃度は 10^8 ppm cm に換算される。しかし、このカラム濃度であったとしても、600 nm 付近を除けば、 H_2O は NO_2 の測定にほとんど影響しない(図—2.5)。ディーゼルエンジンの場合、排気ガスに含まれる水蒸気濃度は最大に見積もったとしても 1.3×10^5 ppm (13%) であることから(付録 A)、カラム濃度が 1000 ppm cm よりも低濃度な NO_2 の定量性を追求しない限り、 H_2O の影響はほとんど無いと結論づ



図—2.5 NO_2 、 SO_2 及び H_2O の光学的厚さと透過率。

けてよさそうである。

(4) 相対的に粗い波長分解能への対応

NH-3 の波長分解能は 5 nm であり、これは NO₂ の吸収断面積に対して粗い (図—2.6a)．吸収断面積の振動よりも粗い波長分解能の機器を用いて NO₂ による光の吸収を測定している他の研究では、いずれも、フィルターを通した結果を観測しているものとした補正をしており^{12),13)}、本研究でも、NH-3 を使った NO₂ による光の吸収の測定でもその補正が必要となる可能性について考察した。

NH-3 の波長分解能は、光の強度のピーク値の半分になる波長の幅 (Full Width at Half Maximum : FWHM) を示している (図—2.6b)．すなわち、NH-3 の 1 つのバンドでは、主として 5 nm よりも狭い範囲の波長帯の光を測定しているが、それよりも広い範囲の波長帯の光も測定している。

あるバンドで観測する光強度 $I_{\text{obs}}(B)$ は、観測される分光放射強度 ($I_{e,\text{obs}}(\lambda)$) が NH-3 が有する特有のバンドパスフィルター $f_B(\lambda)$ を通った結果の積分値であると考え、以下で記述できる：

$$I_{\text{obs}}(B) = \int_0^\infty f_B(\lambda) I_{e,\text{obs}}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

また、観測する光強度 $I_{\text{obs}}(B)$ は式 (2) より以下である：

$$I_{\text{obs}}(B) = \int_0^\infty f_B(\lambda) I_{e,0}(\lambda) T_{\text{target}}(\lambda) T_{\text{others}}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

$T_{\text{others}}(\lambda)$ は、他の研究でも波長に対して滑らかな変化をする事が仮定されていることから、ここでは 5 nm のバンド内では定数と考える。また、光源自体が細かく振動するという報告はないことから、 $I_{e,0}(\lambda)$ もバンド内では一定である仮定すると、 $I_{\text{ref}}(B) = I_0(B) T_{\text{others}}(B)$ とする事ができ、以下の関係が得られる：

$$\frac{I_{\text{obs}}(B)}{I_{\text{ref}}(B)} = \int_0^\infty f_B(\lambda) \exp(-\sigma_{\text{target}}(\lambda) NL) d\lambda \quad (7)$$

ただし、 $T_{\text{target}}(\lambda) = \exp(-\sigma_{\text{target}}(\lambda) NL)$ であり、 $f_B(\lambda)$ は積分すると 1 になる分布を考えている。波長分解能は異なるが同じメーカーのハイパースペクトルカメラを用いた Manago et al. (2018)¹²⁾ は、波長分解能の相対的な粗さについて、同様の考え方で $f_B(\lambda)$ にガウス分布を採用していることから、本研究でもこの分布を採用する。ただし、平均がバンドの波長、標準偏差が FWHM の 1/2.35 倍のガウス分布とした (図—2.6b)。

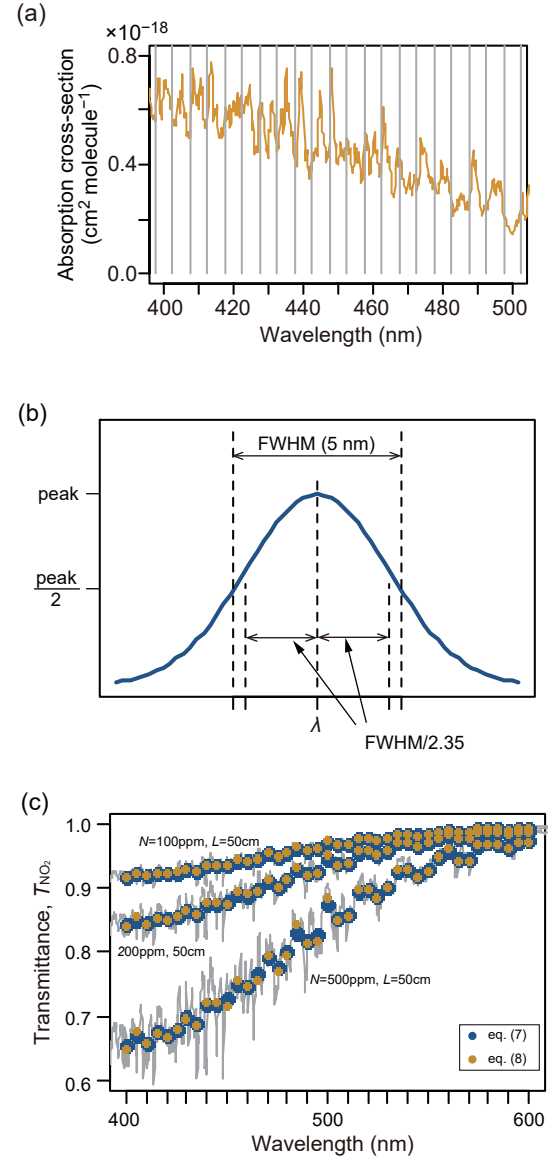
また、 $f_B(\lambda)$ に FWHM 内が一定で、FWHM 外でゼロとなる簡単なボックスフィルターも考えた。ただし、計算を簡略化するため、以下で近似した：

$$\frac{I_{\text{obs}}(B)}{I_{\text{ref}}(B)} = \exp(-\overline{\sigma_{\text{target}}(\lambda)} NL) \quad (8)$$

ここに、 $\overline{\sigma_{\text{target}}(\lambda)}$ は、吸収断面積のバンド内算術平均である。

式 (7) と式 (8) を使い NH-3 のバンド毎に透過率を算出すると図—2.6c になる。これより、波長分解能が 5 nm であれば

NO₂ の吸収断面積の振動を追従していない事が理解できる。つまり、NH-3 では差分吸収分光法の適用が難しい事が理解できる。透過率は、いずれのフィルターを通っても、どのバンドにおいても大きな差はないが、ボックスフィルターを通った方が考慮される波長帯が狭く平滑化の効果が薄い分、隣合う波長帯の透過率にばらつきがある。



図—2.6 NO₂ による光の吸収と使用する NH-3 との関係．(a) NO₂ の吸収断面積と NH-3 の波長分解能との関係，(b) NH-3 のバンドで捉えている光の強度の説明，(c) NO₂ を透過した光の透過率と波長の関係．パネル a の縦線は NH-3 のバンドを示し、波長パネル c における丸は、スペクトル応答関数が半値幅 5 nm の正規分布に従う場合 (式 (7)) と吸収断面積を波長分解能内で平均した場合 (式 (8)) の透過率を示している。透過率は、対象ガスの温度が 273 K (0°C) として算定している。算定方法については 3.2 を参照できる。

2.4 検証の対象とする発電機が排出するガスの NO₂ 濃度

(1) 概要

港湾空港技術研究所は非常用発電機（定格出力 160 kW、西日本発電機株式会社製：図—2.7a）を所有しており、第 3 章では、これから排出されるガスを対象として NH₃ による NO₂ 濃度の観測を試みた。本節では、あらかじめ、このガスに含まれる NO₂ 濃度を別の方法で測定して検証材料を準備した。なお、この発電機の排気口の幅は 20 cm である。

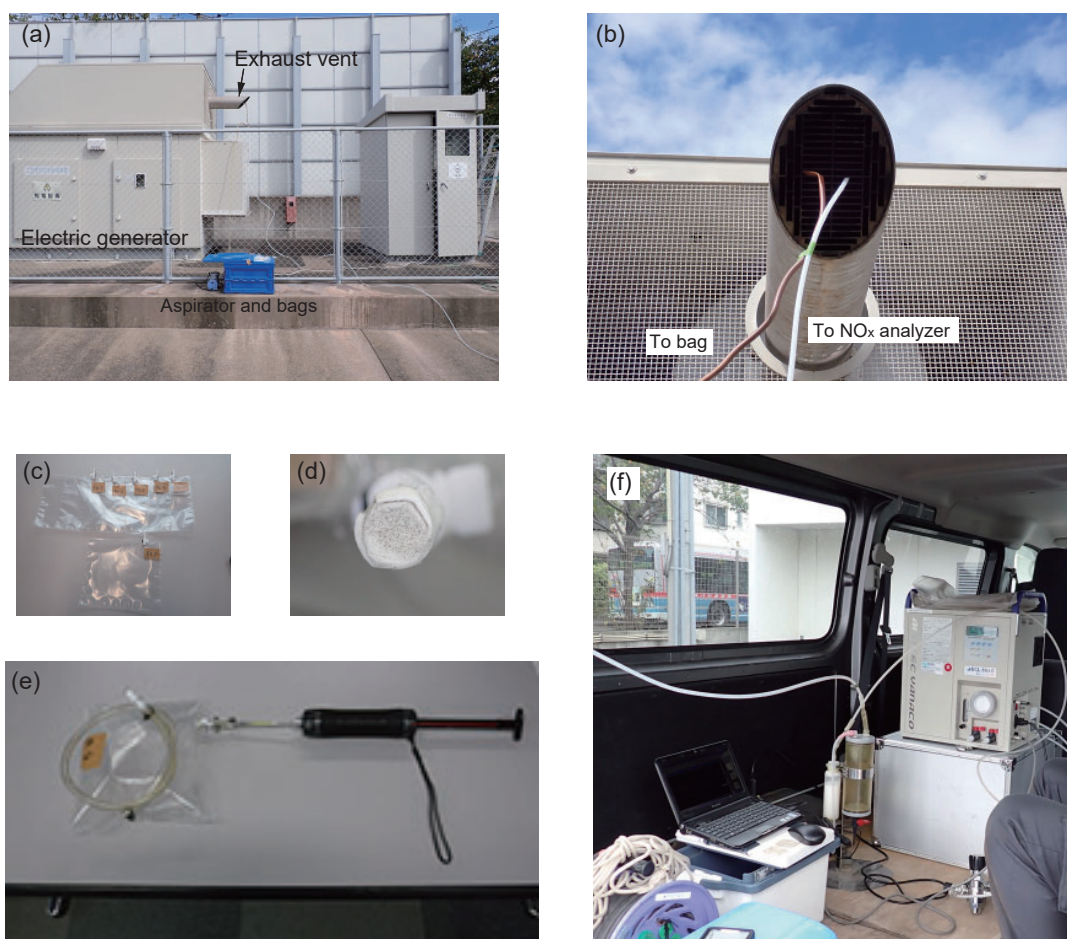
(2) 方法

発電機のアイドル運転時のガスをサンプリングして、検知管と分析機器による2つの方法で NO₂ を測定した。いずれの方法においても、まず、排出されたガスをバッグへサンプリングした。このサンプリングでは、排気口に銅パイプを挿し込み（図—2.7b）、サクシオンポンプを用いて 2 L のテドラーバッグに吸引、封入した（図—2.7c）。NO₂ 濃度の変化を確かめるため、発電機を 1 回起動するたびに、数分間隔で数回のサンプリングを実施した。これを計 5 セット実施した。

検知管による測定では、検知管式気体測定器（GV-100S、ガステック社製）を用いた（図—2.7e）。排気ガスの性質を把握するため、NO₂ だけでなく CO と高級炭化水素（HC）も定量した。検知管は、各項目及び濃度に対応したものを選択した。

分析機器を用いた NO₂ 濃度の測定を 2023 年 8 月 22 日に実施した。上述の方法により、排気ガスをテドラーバッグにサンプリングして、分析室で NO₂ 濃度を測定した。バッグ内に過酸化水素水 0.3%+ 水酸化カリウム 0.001 mol L⁻¹ の捕集液を 20 mL 直接導入し、2 分間振り混ぜた後、捕集液中の NO₂⁻ 及び NO₃⁻ をイオンクロマトグラフ（Dionex ICS-5000+ 型、Thermo Fisher Scientific 社製）で定量した。バッグ内のガス量については、成分捕集後にバッグ内に残っていたガスを積算流量計で計測して求めた。

この発電機の稼働時に NO_x の計測も行った。NO_x は、発電機の起動から 30 分の間に連続的に分析した。銅パイプに抱き付かせたテフロンチューブを排気口に挿し込み（図—



図—2.7 非常用発電機と排出されるガスの採取方法及び物質濃度測定方法. (a) 発電機とサンプリングバッグの配置及び (b) ガスの採取方法. (c-e) 検知管による物質濃度の測定方法. (d) 紙フィルターは、ハイパースペクトルイメージによる NO₂ 濃度測定に影響する煤を除去するために重要であるが、検知管による測定時においては装着していない. (f) NO_x アナライザーによる測定風景。

2.7b), ワンボックスカー内の荷台に設置した分析計で O_2 と同時に分析した (図—2.7f). 分析計上流で排ガス中の異物除去や除湿を行った. バイパスフローチョッピング式 CLD 及び減圧形 CLD 検出器を搭載した NO_x 計とフローチョッピング式ガス分析法を採用した磁気力式 O_2 計をワンユニット化した 2 成分計の計測器 (ECL-88AO Lite, ヤナコ製) を用いて分析した.

(3) 結果

検知管による排気ガス分析の結果, CO と HC の濃度は, エンジン起動直後に最大となり, その後低下する傾向を示した (図—2.8a 及び b). 一方, NO_2 濃度は, CO 及び HC のような時間的な変化がなく, 数十から 200 ppm の間で変動していた (図—2.8c).

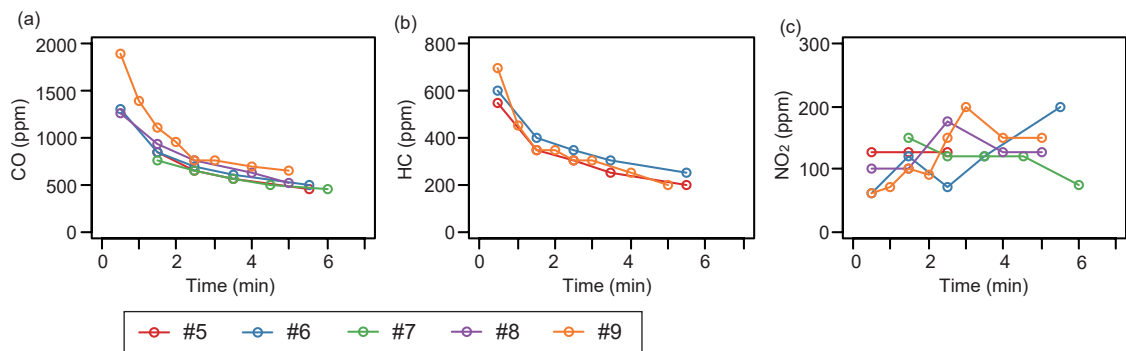
発電機稼働中の排ガス中酸素濃度は 18.5% であり, 空気過剰率が 8 以上の超希薄燃焼であった (図—2.9). NO_x 濃度は 100 ppm を超えていたが, 排ガス中 NO_2 濃度は NO_x の

1/3 程度であった.

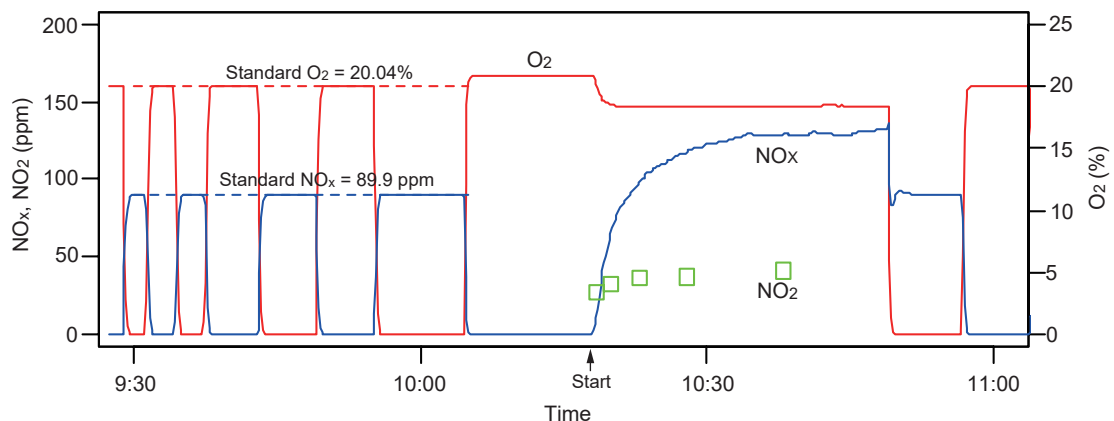
NO_2 の濃度は, 検知管による方法と分析機器による方法との間で 1 オーダー異なる値を示した. この差の原因が, 手法によるものか, 稼働条件によるものか判断できないものの, 濃度の概ねの範囲は, 数十から 200 ppm である事は間違いなさそうである. 発電機の排気口の幅は 20 cm であることから, これらの値をカラム濃度に換算すると数百から 4000 ppm cm となり, 2.3(3) で検討した NH_3 のおそらくの定量限界 (1000 ppm cm 程度) を上回る事が期待される.

2.5 まとめ

本章では, 研究に用いるハイパースペクトルカメラの仕様と光学原理に基づいた大気環境計測の基礎知識を整理した上で, 燃焼機関から排出されるガス中の NO_2 濃度の推定に係る課題を以下のとおりまとめた: (1) 本研究で採用する NO_2 濃度の推定手法においては, 参照光の推定の正確さと精度



図—2.8 検知管による発電機排気ガス中の物質濃度の測定結果. 発電機起動後の時間に対する CO , 高級炭化水素 (HC), NO_2 の濃度を示している. 測定番号は, それぞれ, 以下の通り: #5, 2022/03/24; #6, 2022/04/28; #7, 2022/05/25; #8, 2022/06/21; #9, 2022/07/26.



図—2.9 発電機排気ガス中の NO_2 濃度及び NO_x 濃度の分析機器による測定結果 (2023 年 8 月 22 日). 緑色プロットは, テドラーバッグにサンプリングした排気ガス中の NO_2 濃度を実験室において分析機器で測定した結果であり, 青色と赤色の線は, それぞれ, 発電機稼働時に現地でバイパスフローチョッピング式 CLD 及び減圧形 CLD 検出器を用いて測定した NO_x 濃度と O_2 濃度を示している. 現地での分析は, 分析計の暖気開始のため, 発電機の起動 (10:18 頃) よりも早く始めている. 分析計の暖気開始後に 3 回の標準ガス校正を行っている. 非常用発電機には, 排気口上流に巨大なサイレンサーがあり, さらに, 分析計の上流にはインピンジャーが配置されているため, 分析結果には大きな遅れが生じている.

が鍵となる。(2)NO₂ の測定は、400 nm より長く、吸収断面積が大きな波長帯を選択すれば、燃焼機関の排気ガスに含まれる他の主要成分による吸収の影響を受ける事はなさそうである。(3)NH-3 による見える化の検証に用いる発電機から排出されるガス中の NO₂ カラム濃度は、数百から 4000 ppm cm であり、本研究の手法でも検出できる可能性は十分にある。

3. 排気ガス中の NO₂ 濃度の測定手法の検討

3.1 はじめに

光学原理に基づいた排ガス中の NO₂ 濃度の測定にあたって、前章では3つの課題をまとめた。このうち、参照光の推定に係る課題は、実験室のアプローチで環境条件をコントロールすれば回避できる。よって、本章では、まず、環境条件をコントロール可能な実験手法を開発し、NO₂ 濃度を測定するための波長帯と NH-3 による定量性に適した波長帯を検討した(表—3.1)。次に、屋外の発電機を対象として、参照光の推定と発電機から排出されるガス中の NO₂ 濃度の定量の課題に取り組んだ。

3.2 濃度の推定方法

(1) 濃度及びカラム濃度の整理

大気中の物質濃度は、体積比の濃度 (ppm や ppb : カラム濃度では ppm cm や ppb cm) として表現される事が多いが、ランベルト・ベールの法則に基づいて測定される物質濃度は体積当たりの分子量 (molecule cm⁻³ : カラム濃度であれば molecule cm⁻²) である。この点に注意しつつ、以下では濃度の推定方法を説明する。

NO₂ による透過率の低下が NH-3 によってどのように検出されるかについて、2.3(4) では、波長分解能の相対的な粗さを考慮して2つのフィルターを使ってシミュレーションした。ここでは、逆に、これら2つのフィルターを使ったカラム濃度の推定方法を示す。なお、分子量に基づくカラム濃度は NL として表記されるが、以下では、バンド毎のカラム濃度である事を強調するため $CD(B)$ として表記している。

ボックスフィルターによる方法 (式 (8)) では、分子量に基づく対象物質のカラム濃度 ($CD_{\text{molecule}}(B)$) は以下で求められる：

$$CD_{\text{molecule}}(B) = -\frac{1}{\sigma_{\text{target}}(\lambda)} \ln\left(\frac{I_{\text{obs}}(B)}{I_{\text{ref}}(B)}\right) . \quad (9)$$

次に、FWHM が 5 nm の正規分布を持つバンドパスフィルターによる方法 (式 (7)) では、解析的に解を得ることができないため、以下の条件を満たす $CD_{\text{molecule}}(B)$ を Newton-Raphson 法により求めた：

$$g = \sum f_B(\lambda) \exp(-\sigma(\lambda) CD_{\text{molecule}}(B)) \Delta\lambda - \frac{I_{\text{obs}}(B)}{I_{\text{ref}}(B)} = 0 . \quad (10)$$

ただし、 $f_B(\lambda)$ は平均が λ 、FWHM が 5 nm の正規分布である。また、この式は、あらかじめ式 (7) を離散化した上で導いている。

(2) 体積比濃度への換算

理想気体において、気温 273 K (0° C)、体積 22.4×10³ cm³ に存在する分子数 (アボガドロ数) は 6.02×10²³ である。シャルルの法則 (気体の体積は温度と比例する関係) から、気温 T_{mp} における 1 cm³ あたりの分子数は以下となる：

$$N_A(T_{\text{mp}}) = \frac{6.02 \times 10^{23}}{22.4 \times 10^3} \frac{273}{(273 + T_{\text{mp}})} . \quad (11)$$

さらに、気温 T_{mp} において観測された体積比のカラム濃度 (ppm cm) は以下のとおりである：

$$CD_{\text{ppm}}(B, T_{\text{mp}}) = 10^6 \times CD_{\text{molecule}}(B) / N_A(T_{\text{mp}}) . \quad (12)$$

$CD_{\text{ppm}}(B, T_{\text{mp}})$ を光路長 (L) で割る事で濃度 ($D_{\text{ppm}}(B, T_{\text{mp}})$) に換算できる。

3.3 ハイパースペクトルイメージの取得及び解析方法

(1) ガスバッグからの取得

室内において、テドラーバッグにサンプリングした対象ガスのハイパースペクトルイメージを取得した (図—3.1a 及び b)。ハイパースペクトルカメラと光源は、テドラーバッグの上方に設置し、テドラーバッグの下に標準反射板 (φ1.25" SRS-99-

表—3.1 前章で整理した3つの課題へのアプローチ方法

観測の対象	課 題		
	NO ₂ 濃度を定量する 波長帯の検討	発電機 NO ₂ 濃度の 定量性の評価	参照光 ($I_{\text{ref}}(B)$) の推定
サンプリングバッグと標準ガス	○	○	
サンプリングバッグと発電機	△	△	
屋外での発電機		△	△

010, Labsphere 社製) を配置した。また、ハイパースペクトルカメラへ入射する散乱光を極力抑えるため、カメラレンズとバッグの間に筒を設置した。本研究では屋外での観測を最終目標としている事から、屋外を模擬するために光源として人工太陽照明灯 (XC-100B, セリック社製) を使用した。

対象ガスは、空気バランス 510 ppm-NO₂ の標準ガス (図—3.1c) と港湾空港技術研究所の非常用発電機からサンプリングした排気ガスとした。発電機の排気ガスは、30% 負荷運転時とアイドル運転時に採取した。排気ガスのサンプリング方法は 2.4 に示す通りであるが、このサンプリングでは、テドラーバッグの吸入口に紙フィルタ (ホダカ HT-1651) を挿入し、排気ガスに含まれる煤等を除去した (図—2.7d)。

対象ガスの観測光を取得した前後で、対象ガスのテドラーバッグと空気を封入したテドラーバッグを置き換え、参照光のスペクトルイメージを取得した。イメージ取得時の室温は 293 K (20° C) とした。この方法では、光はテドラーバッグを 2 度透過してハイパースペクトルカメラに到達している事から、光路長は 18 cm として見積もった。これらのパラメータを用いて NO₂ 濃度を算出した。

(2) 屋外における排気口付近における取得

非常用発電機から排出されるガスのハイパースペクトルイメージを取得した。ハイパースペクトルカメラは、イメージを真

横から取得できるように配置し、三脚で固定した (図—3.2)。排気ガスのハイパースペクトルイメージを妥当性を持って抽出するためには、背景が一樣で、かつ、NO₂ の測定に用いる波長帯付近で特異な吸収特性がない事が望ましいが、屋外ではこのような環境を自然に得る事は難しい。よって、まずは、420 nm よりも長い波長帯で反射率が一定である白色のフェンス (付録 B) が背景となるようにカメラを設置した。これに加えて、本研究では屋外での観測を最終目標としていることから、空を背景としたイメージを取得して、その課題の抽出を行った。

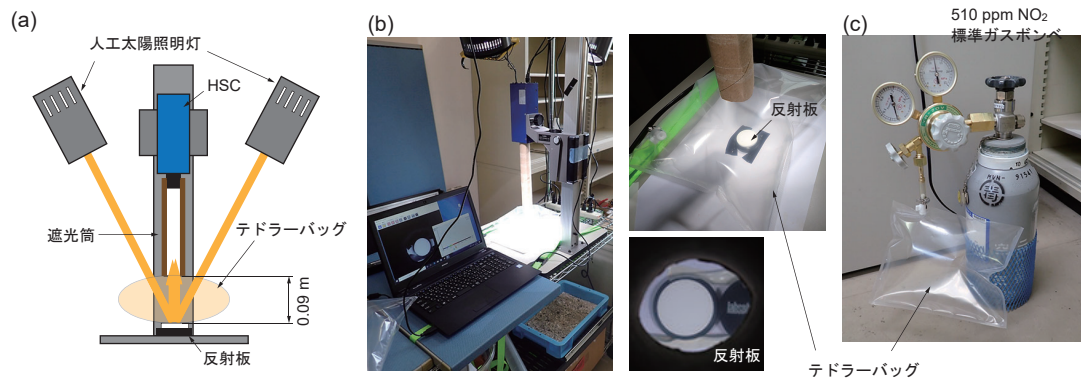
撮影時における排気ガスの温度は、排気口付近に設置した温度計で計測した。発電機の排気口の幅は 20 cm であることから、これを光路長として NO₂ 濃度を算出した。

(3) 黒レベル補正のためのイメージ取得

デジタル画像データでは、黒色であってもシグナルが得られてしまう事から、これを取り除く黒レベル補正が必要となる。ガスバッグと屋外のいずれにおいても、観測光及び参照光の取得と同じタイミングで、レンズにキャップを被せた状態のハイパースペクトルイメージを取得し、これを黒レベル補正用のデータとした。

(4) イメージ取得から解析までの手順

ハイパースペクトルイメージを取得した後の解析の手順及びは



図—3.1 室内におけるガスバッグのハイパースペクトルイメージの取得方法。(a) イメージ取得方法の概要と (b) 取得風景。(c) テドラーバッグに標準ガスをサンプリングしている様子。



図—3.2 非常用発電機におけるハイパースペクトルイメージの取得風景。

図—3.3 に示す通りである。ガスバッグから取得したイメージにおいては、解析するポイントを広く選定した。一方、発電機の排気口は円筒形であるため、解析するポイントを鉛直方向に広く取ってしまうと、異なる光路長の下での透過率をまとめて解析してしまう事になる。このことから、排気口の中央付近の9ピクセルのみからの選定とした。

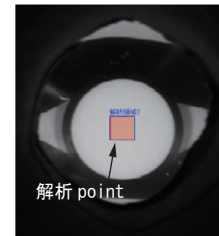
屋外で取得した排気ガスの参照光は、Kuhn et al. (2022)¹³⁾と同様に、ガスのブルームの範囲外のスペクトル強度から、3次の多項式近似によりブルーム内を補間して推定した。ブルームの範囲は手作業で指定した。

室内におけるガスバッグの観測光と参照光は、700 nm のスペクトル強度で規格化して解析に供した。規格化は、透過率の低下を過小評価する事もあるが（付録 C）、室内におけるガスバッグのイメージは、ガスを単離できており、700 nm 付近の波長帯の光が吸収される事は想定されないため、規格化して問題ないものと判断した。一方、屋外における排気口付近のイメージでは、対象物質以外の物質が含まれ、規格化により透過率の低下を過小評価してしまう恐れがあることから、規格化をしない手法を標準とした。

1. 観測光，参照光，黒レベルのスペクトルイメージを取得する。
2. 得られたイメージの中から解析する point を決める。

【屋内ガスバッグから取得する場合】

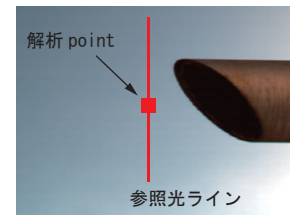
3. 解析 point の各グリッドでスペクトル (I_{obs} , I_{ref}) を規格化 (I_{obs}' , I_{ref}') する。
4. スペクトルをグリッド間で平均する。
5. 対象ガスの透過率 (I_{obs}' / I_{ref}') を求める。



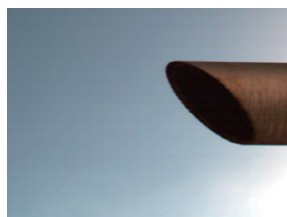
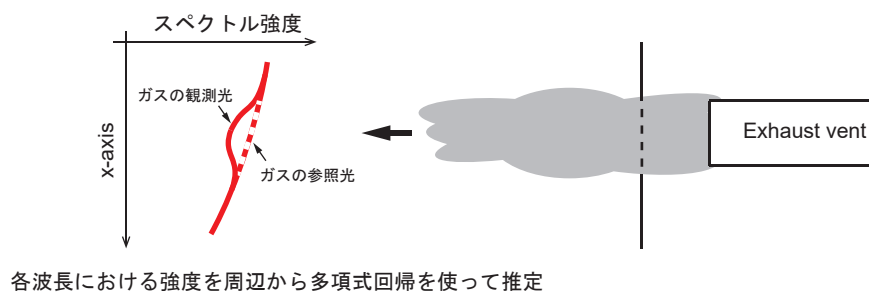
室内でのイメージ取得時に使った反射板

【屋外における排気口付近から取得する場合】

3. 解析 point の各グリッドのスペクトル (I_{obs}) をグリッド間で平均する。
4. 参照光のラインのうち、排気ガスの影響を受けている範囲を指定し、影響を受けていない範囲の多項式回帰から補間して、影響を受けている範囲のガス無しのスペクトル (I_{ref}) を推定する。
5. 対象ガスの透過率 (I_{obs}/I_{ref}) を求める。



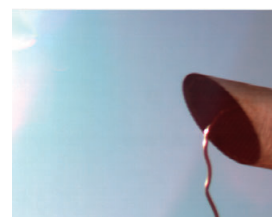
排気口付近におけるガスのイメージ取得



均質な青空背景



雲が多い場合



太陽が入り込む場合

図—3.3 解析の手順。

3.4 結果

(1) ガスバッグ

人工太陽照明灯の下でのガスバッグのスペクトル強度（およそ 2500 ピクセルの平均）の形状は、600 nm 付近にピークを有するベル型であった（図—3.4 及び 3.5）。スペクトル強度の変動係数は、400 nm 以下及び 800 nm 付近よりも長い波長帯で高い値を示していたが、スペクトル強度が高い波長帯では 2% 程度であった。

NO₂ の標準ガスを封入したバッグにおける透過率は、700 nm 付近のバンドで 1.0 近くであり、400 nm 付近のバンドで 0.9 を下回った（図—3.4）。また、700 nm よりも短く、かつ、スペクトル強度の変動係数が小さいバンドの範囲では、透過率は NO₂ の吸収断面積を裏返したような形状を示していた。この透過率の形状は、発電機の 30% 負荷運転時にサンプリングしたガスバッグにおいても見られた（図—3.5a）。

標準ガスを封入したガスバッグの NO₂ 濃度は、400 から 500 nm のバンドで 510 ppm に近い値であった（図—3.4）。しかし、波長が 500 nm より長くなると推定値は偏差した。こ

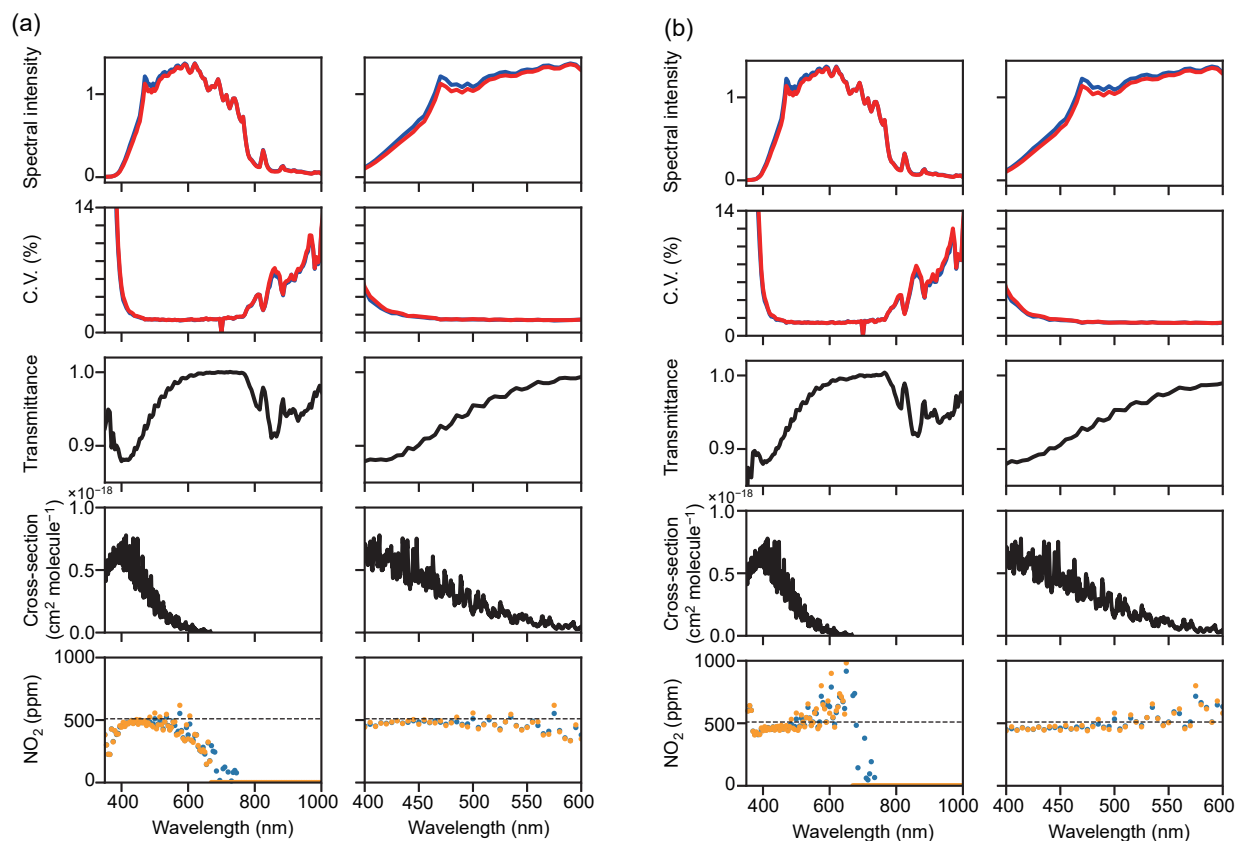
の NO₂ 濃度の傾向は、発電機の 30% 負荷運転時の排気ガスでも見られた（図—3.5a）。これらの結果は、排気ガスであっても、NO₂ 以外の物質は観測にほとんど影響していない事を示唆している。

発電機のアイドル運転時の透過率は、標準ガスや発電機の 30% 負荷運転時の排気ガスほど低下せず、最も小さくても 425 nm 付近において 0.98 であった（図—3.5b）。ただし、標準ガスと発電機 30% 負荷運転時の排気ガスと同様に、400 から 500 nm のバンドの NO₂ 濃度の推定値は安定し、この NO₂ 濃度は 75—80 ppm であった。

ボックスフィルターとバンドパスフィルターによる推定手法の違いでは、NO₂ 濃度に差が見られるバンドがあったものの、概ね 400 から 500 nm の波長帯であれば、いずれのフィルターでも推定値はほぼ一致していた（図—3.4 及び 3.5）。

(2) 屋外における排気口付近

屋外において取得した発電機の排気ガスのスペクトルイメージから、太陽光のスペクトルは、概ね 500 nm よりも長い波長のバンドで強度が弱く、人工太陽照明灯と比較すると、強い



図—3.4 人工太陽照明灯下におけるガスバッグに封入された標準ガス（510 ppm）のハイパースペクトルイメージの取得結果. (a) 1回目（2499 ピクセル）と (b) 2回目（2597 ピクセル）の結果を示している. それぞれのパネルの上から、スペクトル強度平均、スペクトル強度の変動係数 (C.V.)、透過率、NO₂ の吸収断面積、NO₂ 濃度の推定結果を示している. それぞれのパネルの右側は、左側の波長帯をクローズアップして示したものである. スペクトル強度の青色と赤色は、それぞれ、規格化した参照光と観測光を示している. NO₂ 濃度のオレンジ色と青色は、それぞれ、ボックスフィルター（式 (9)）とバンドパスフィルター（式 (10)）による推定値を示している. NO₂ 濃度は、温度を 293 K（20° C）、光路長を 18 cm として計算している. NO₂ 濃度の図の横線は、標準ガスの濃度（510 ppm）を示している.

強度が低波長側に偏った形状であった（図—3.6）. この偏りの傾向は、フェンスを背景とした場合（図—3.6a）よりも空を背景とした場合の方が強かった（図—3.6b）.

観測光のスペクトル強度の変動係数は、いずれの背景においても、大きく振動していた（図—3.6）. この稼働と同じタイミングでガスバッグにサンプリングしたガスと比べても（図—3.5a）、この振動の大きさは明らかである. 屋外の解析に供した観測光のピクセル数は9個であり、この極端に少ないピクセル数が変動係数が振動していた理由であると考えられる.

背景をフェンスとした場合と空とした場合では、スペクトル強度の縦方向（x軸方向）の分布形状が異なっていた（図—3.7）. フェンスを背景とした場合、475 nmと500 nmのバンドのスペクトル強度が緩やかな弓状の分布形状であったのに対し、空を背景とした場合のスペクトル強度は、強い傾きを持った直線的な形状であった. しかし、いずれの背景でも、多項式近似はスペクトル強度の形状を再現した.

ブルーム内のスペクトル強度は、いずれの背景でも、目で認識できるような多項式近似からの差異はなかった（図—3.7）. この稼働と同じタイミングでサンプリングしたガスの透過率が0.9近くにまで低下していたのに比べて（図—3.5a）、

屋外では透過率の明確な低下がなかった（図—3.6）.

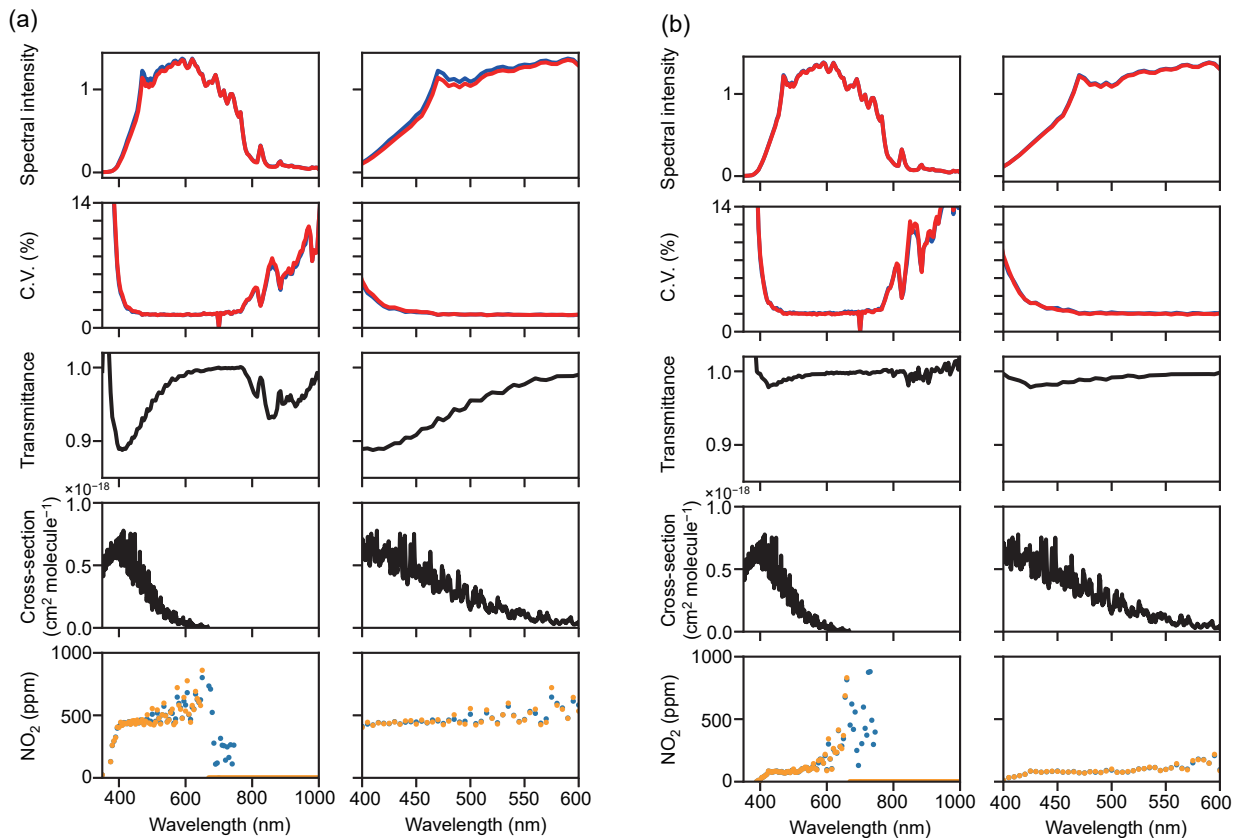
発電機の30%負荷運転時における排気口付近の温度は235°C（508 K）以上の高温であり、ガスの体積を0°Cの状態から2倍近く膨張させ、分子数密度を1/2程度にまで下げるものであった. この影響は、排気口近くで透過率を下がりにくくした理由の1つであると考えられる. 実際に、この透過率であっても、体積比濃度では100から200 ppm程度が得られている（図—3.6）. この事は、たとえNO₂が高濃度なガスを対象としても、それが高温であれば、光学的な手法では検出が難しくなる事を意味している.

アイドル運転時には、温度が37°C（310 K）であったものの、透過率は明確には低下せず、かつ、大きく振動していた（図—3.8）. NO₂濃度は、30%負荷発電時に比べると低く、定量性が不確かなレベルであった.

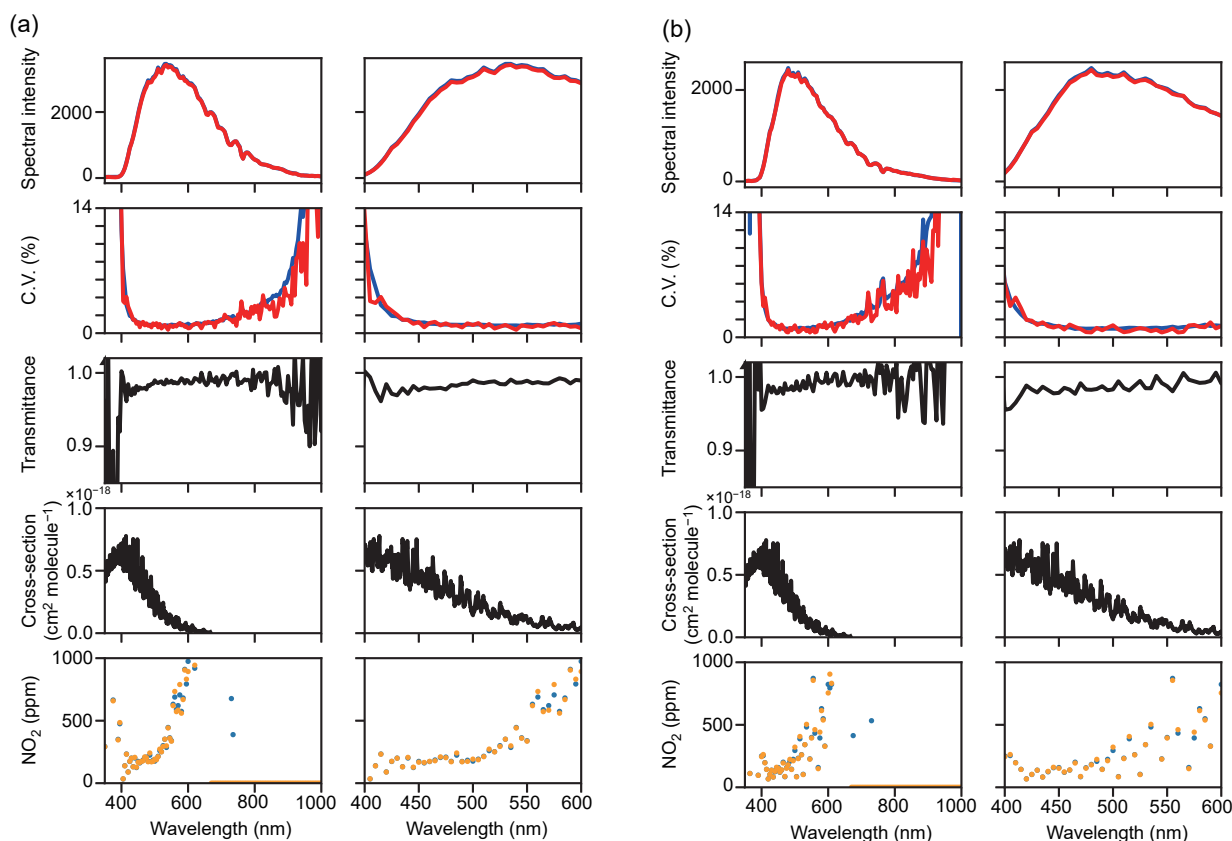
3.5 考察

(1) 定量性

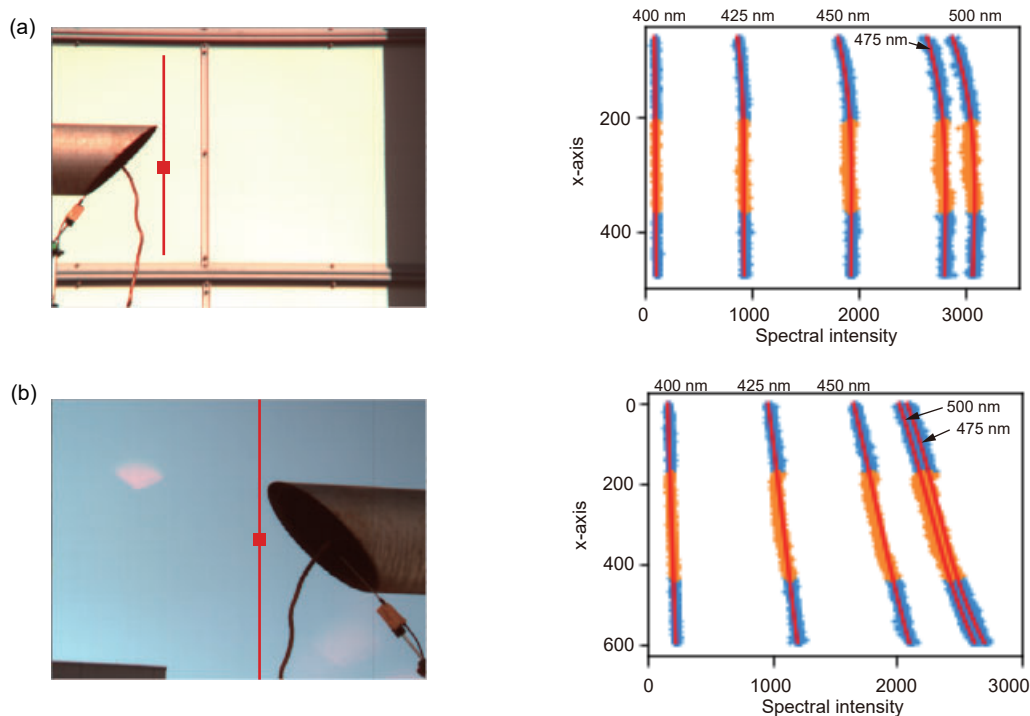
ガスバッグのハイパースペクトルイメージは、400 nmから500 nmのバンドにおいてNO₂濃度の推定値が比較的安定する事を示した. 推定値がバンドの間でも安定していた結果



図—3.5 人工太陽照明灯下におけるガスバッグに封入された発電機からの排出ガスのハイパースペクトルイメージの取得結果. (a) 30%負荷運転時の結果（2023年10月13日；2597ピクセル）と（b）アイドル運転時の結果（2023年8月2日；1089ピクセル）を示している. 濃度は、温度を293 K（20°C）として計算している. その他の説明は図—3.4と同じである.



図—3.6 屋外において発電機から排出されるガスのスペクトルイメージを直接取得した結果 (30% 負荷発電時:2023 年 10 月 13 日). 背景を (a) フェンスとした場合 (9 ピクセル数) と (b) 空とした場合 (9 ピクセル) を示している. スペクトル強度の青色と赤色は、それぞれ、参照光と観測光を示している. いずれの強度も規格化はしていない. 排気口で測定した温度は、それぞれ、510 K (237°C) 及び 508 K (235°C) であり、濃度はこれらの温度に基づいて計算している. その他の説明は図—3.4 と同じである.



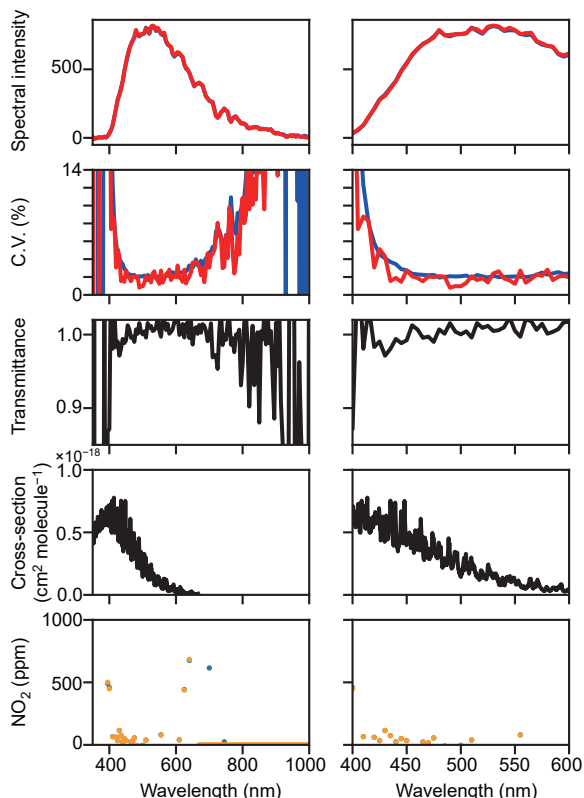
図—3.7 屋外において発電機から排出されるガスのスペクトルイメージを直接取得した結果 (30% 負荷発電時:2023 年 10 月 13 日). 背景を (a) フェンスとした場合と (b) 空とした場合を示している. それぞれのパネルの左は RGB イメージを示し、右は特定のバンドにおけるスペクトル強度を示している. 青色とオレンジ色は、それぞれ、ガスのブルームの範囲外と内の結果である. 赤色の線は、ブルームの範囲外のスペクトル強度を多項式近似した結果である.

は、機器の波長分解能が NO_2 の吸収断面積の振動よりも粗くても、正確に NO_2 濃度を推定できる事を示している。標準ガスは純度が高いため、このバンドの光を吸収する他の物質がガスバッグの中にほとんど含まれていなかった事もこの正確な推定値が安定して得られた理由として考えられる。発電機からの排気ガスでは、紙フィルターを介してサンプリングした事が効果を発揮したのかもしれない。

既往の研究でも、この NO_2 濃度の推定に 400 から 450 nm^{9),10)} や 430 から 445 nm¹³⁾ の波長帯を採用しており、我々の結果と良く一致している。おそらく、この辺りが NO_2 濃度の推定に適した波長帯であると判断できる。

(2) 定量のための波長帯の選択

NO_2 濃度を推定するための波長帯の最適化を検討した。排気ガス中の H_2O が高濃度になると 500 nm 付近では影響が出る可能性があるため（図—2.5）、安全のため、波長帯を 400 nm から 475 nm に絞り、5つのバンドの組み合わせで濃度を推定した（図—3.9）。この結果、400, 405, 410, 415 nm のバンドを含んだ推定値のばらつきは大きく、この傾向は、特に屋外で取得した排気ガスのスペクトルイメージで



図—3.8 屋外においてフェンスを背景として発電機から排出されるガスのスペクトルイメージを直接取得した結果（アイドル運転時：2023年8月2日）。排気口における温度は 310 K (37°C) であり、濃度はこの温度に基づいて計算している。その他の説明は図—3.4 及び図—3.6 と同じである。

強かった。また、アイドル運転時に屋外で取得した結果のうち、450 nm 以上のバンドを使った推定値のバーはゼロに掛かっている。この不確かな推定値は、このバンドの透過率が 1.0 を超えていた事が原因であると考えられる（図—3.8）。

これらの結果は、 NO_2 濃度の推定において広い波長帯を使うと、定量の信頼性が損なわれてしまう事を意味する。本研究では、420 から 445 nm までのバンドに基づく推定値が標準ガスの濃度に近い値を出し、かつ、ばらつきも小さかったことから、これらのバンドに絞って NO_2 濃度を推定する事とした。

(3) フィルターの優劣

本研究では、 NO_2 濃度を推定するための2つのフィルターを提示したものの、フィルター間に大きな差は見られなかった。合理性を求めるのであれば、 NH_3 の応答を考慮したバンドパスフィルター（式 (10)）を使った手法の方に優位性があるが、この方法は、解を求める過程で繰り返し計算を必要とする。濃度推定を必要とするピクセル数が多くなる場合、このことは1つのデメリットになる事が予想される。機器のスペックを上げる事が出来ない中で画面全体で可視化する必要がある場合には、繰り返し計算が不要なボックスフィルター（式 (9)）の方が優れた方法になりそうである。

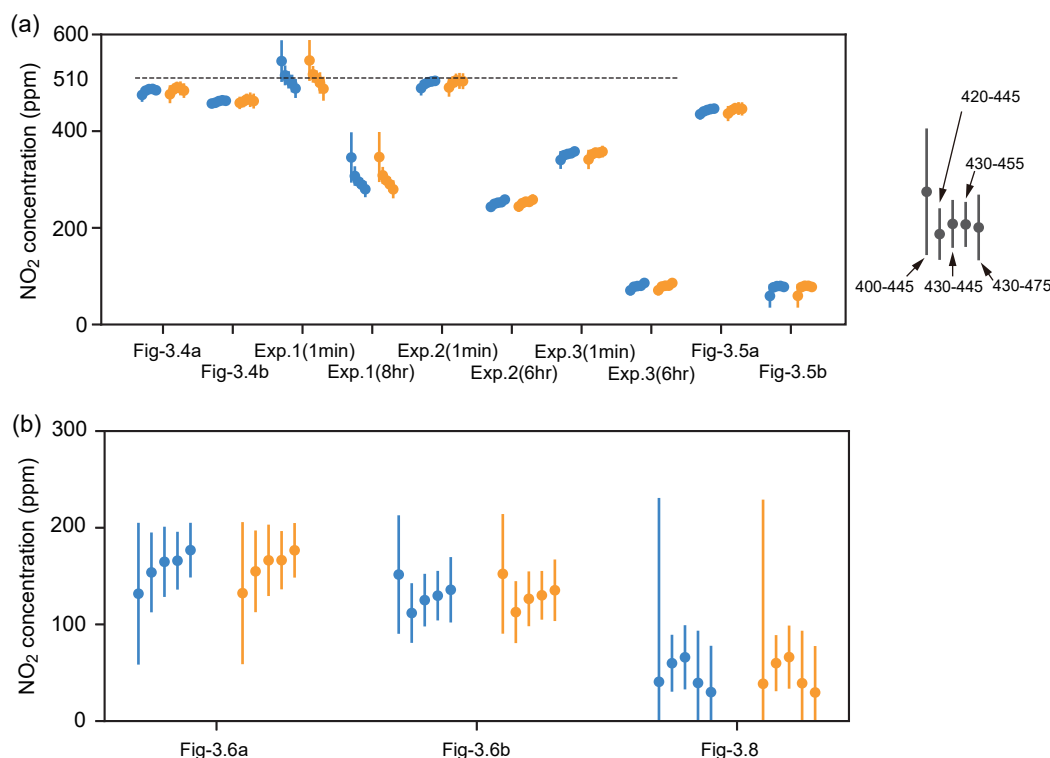
(4) 実践へ向けた考察

たとえ NO_2 濃度が高くても、高温であれば分子数密度が低くなる事ため、ガスの透過率は下がりにくい。このため、高温になる可能性がある船舶から排出されるガスを対象とする場合、透過率の低下を感度よく検出できる必要がある。

検出感度は、吸収断面積が大きくなる波長帯の選定に加え、推定する参照光の精度が重要となってくる。本章の参照光は、ガスのプルームの範囲外のスペクトル強度から多項式近似を使って推定したが、必ずしもこれが精度の高い方法とは限らないし、プルームの範囲を目視で抽出する必要がある点には客観性に欠けるというデメリットもある。参照光の推定については、精度と客観性を確保するための他のアイデアも含めた検討が必要である。

(5) NO_2 濃度の複雑な変化と見える化の意義

NO_2 は、排気口直後で低い濃度で排出されても（図—3.6a）、時間が経つと高濃度になる可能性が示された（図—3.5a）。この変化が起きた理由として、排気口直後では NO の形態であったものがサンプリング後に酸化した可能性が考えられる。逆に、図—3.9a の Exp.1, Exp.2 及び Exp.3 の1分後と6もしくは8時間後の比較から分かったとおり、標準ガスであっても時間が経てば低濃度になっている。これには、光化学反応 ($\text{NO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}_3$) の進行が影響した可能性がある。この窒素酸化物の時間経過に伴う形態の変化は、 NO_2 濃度が船舶の排気プルームの中でも複雑に変動する可能性を示唆する。



図—3.9 NO₂ 濃度の推定結果のまとめ。(a) 室内でガスバッグから取得したハイパースペクトルイメージに基づいて推定した NO₂ 濃度と (b) 屋外において発電機の排気ガスから直接取得したスペクトルイメージからに基づき推定した NO₂ 濃度を示している。パネル a の Exp は、本文中では詳述しなかった標準ガスの観測結果を示しており、それぞれ、標準ガスをガスバッグに採取した直後 (1 min) と数時間経過した後にスペクトルイメージを取得して NO₂ 濃度を推定した結果を示している。オレンジ色と青色は、それぞれ、ボックスフィルター (式 (9)) とバンドパスフィルター (式 (10)) による推定値を示している。推定値のプロットとバーは、それぞれ、右側の凡例で示すバンドを使って求めた平均と標準偏差を示している。

NO₂ 濃度もしくはカラム濃度の見える化により、排気ブルーム中の窒素酸化物の形態の変化を捉え、NO₂ が高濃度になる場所を示す事ができるのかもしれない。このような排気ブルーム中における NO₂ 濃度の空間分布が分かれば、その動態や船舶からの排気の人への影響のメカニズムの解明に繋がるかもしれない。

4. 船舶排ガス中の NO₂ カラム濃度の見える化

4.1 はじめに

実海域を航行する船舶を対象とした観測では、光条件や背景のコントロールが出来ない等、制約が多くなる。また、船舶から排出されるガスが高温であれば、たとえ高濃度の NO₂ が排出されていたとしても透過率は下がりにくく、それを検出するための参照光の推定精度が重要となってくる。さらに、NO₂ による透過の検出を阻害する他の物質の存在も懸念材料に加わる。

本章では、東京湾口を航行する船舶を対象として、NH-3 を使ったブルーム中の NO₂ 空間分布の可視化を試みた。参照光の推定については、まず、第 3 章で採用した多項式近

似による方法を適用しつつ、簡易さと精度の高さの両方の実現を目指したアイデアの適用を試みた。次に、NO₂ 以外の物質による光の吸収の寄与を分離・推定し、その妥当性を評価する手法を提示した。

4.2 方法

(1) 観測場所、対象とする船舶、カラム濃度

東京湾は、多くの大型船舶が輻輳する海域である²¹⁾。浦賀水道航路は、東京湾内に入港するすべての船舶が通過する航路であり (図—4.1a)、本研究を実施するにあたって適した場所である。また、東京湾内には用途が様々な港湾が位置していることから、多種多様な船舶を観測できる (表—4.1)。

観音崎の展望園地は、浦賀水道航路の近くに位置しており、かつ、構造物や山などを背景に入れずに大型船舶を観測する事が可能な場所である (図—4.1b)。

光学的アプローチにより NO₂ を検出するためには、視線方向における面積当たりの NO₂ の分子数が重要となる。つまり、小型船舶よりもエンジンの出力が大きい大型船舶の方が排出する NO₂ を見える化しやすい。このことから、本研究では大型船舶を対象とした。浦賀水道航路を航行する船舶の動力

源にもいくつかの種類があるが（表—4.1）、本研究では、航行する船舶の中で主要な動力源であると見られるディーゼルエンジンを搭載している船舶に着目した。

実海域を航行する船舶の排気口の幅は分からず、また、ブルームの奥行を測定する事も難しい。このため、光学的アプローチで観測できるNO₂は体積中の濃度ではなく、視線方向のカラム濃度となる。

(2) 観測方法

展望園地において、構造物や山などが船舶排気口周辺の背景に入らないよう、ハイパースペクトルカメラを北方向に向かって配置した。ハイパースペクトルカメラは、時間が経っても同じ視線を撮影できるよう、三脚で固定した。あらかじめ、浦賀水道航路への船舶入航予定時刻を事前に確認の上、多くの大型船舶が航行する 10:00 から 12:30 に出向いて観測を実施した。

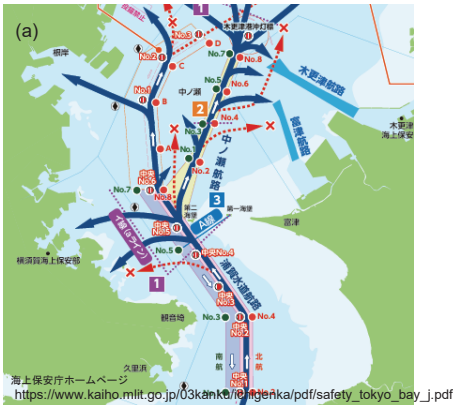
(3) 参照光の推定

船舶から排出されるガスのブルームの範囲の参照光は、まず、RGB に落とし込んだイメージに基づいてブルームの範囲を目視で判定し、ブルームの範囲外から多項式近似により推定した。これは第 3 章と同じ方法である。しかし、この目視による判定は、手法が解析者の技量に依存する事と、判定に時間を要する事から、実用化を想定すると非現実的な作業である。

参照光の推定について、本研究では、この方法に加えて、仮定に基づいた次の2つの方法による推定を試みた。1つ目の方法は、背景の y 軸（水平）方向への一様性を仮定した方法である。この方法は、任意の x 軸方向の1測線を y 軸方向すべての参照光とするものである（図—4.2a）。この方法では、ハイパースペクトルイメージの撮影は1回で済むものの、基準となる測線の選択が必要となり、これは解析者の判断に依存する。2つ目の方法は、背景が時間的に変化しない事を仮定した方法である。この方法では、船舶のブルームがな

表—4.1 浦賀水道航路を航行していた大型船舶の例。2023 年 12 月から 2024 年1月までの間の 8 日間に観測した船舶の種類、隻数、特徴を示している。ただし、およそ 10:00 から 12:30 までの時間帯のみの観測結果である。

船種	隻数	特徴
油	12	・多くがディーゼル船であると推測された。ただし、スクラバを後付けしたと推測される船舶もあり。 ・多くが出湾方向であった。
タンカー	3	・主要寸法はターミナル規格に合致していた。 ・全て出湾方向であった。
ガス（LPG）	8	・多くがボイルオフガス燃焼蒸気タービンだが、稀に多種燃料ディーゼルもあり。 ・多くが出湾方向であった。
ガス（LNG）	8	
コンテナ船	13	・300 m を超える大型船舶も見られた。 ・多くがディーゼル船と推測された。 ・1 隻を除く全てが入湾方向であった。
自動車運搬船	12	・内航の RO-RO 船が多かった。 ・全てが入湾方向であった。
その他	24	



図—4.1 浦賀水道航路付近における船舶の動き。参考として、海上保安庁が示している（a）東京湾への入湾時のルート・航法を転載している。（b）東京湾へ入湾する大型船舶の一例。

い数分前の背景を参照光とするため（図—4.2b），2回の撮影が必要となる．しかし，解析者による作業が入らない事がこの方法のメリットである．

(4) 規格化

規格化は，スペクトル強度の時間的な変化の影響を補正できる可能性があるが，規格化の基準とする波長の選択を誤ると透過率の低下を過小評価してしまうデメリットもある（付録C）．実際に航行している船舶は未知な物質を含んでいる可能性があるため，このデメリットの可能性を無視する事はできない．よって，本章では，規格化を行わない事を基本とした．ただし，規格化は参考のために実施した．規格化の基準となる波長として，700 nmを採用した．

(5) 光学的厚さ

透過率を自然対数に変換し，負号を付けたものは光学的厚さと呼ばれる．光を吸収する物質が複数ある場合，光学的厚さを使う事で，これらの寄与を線形で考える事ができる．NO₂以外の光を吸収する物質を含む可能性がある場合，光学的厚さは要素の分離において便利な考え方である．

本研究では，船舶からの排気ガスに含まれる物質による光学的厚さを以下と考えた：

$$-\ln(T_{\text{obs}}(\lambda)) = \tau_{\text{NO}_2}(\lambda) + \tau_{\text{const}} + \tau_{\text{dis}}(\lambda) \quad (13)$$

ここに， $\tau_{\text{NO}_2}(\lambda)$ は NO₂ による吸収の光学的厚さであり，ここ

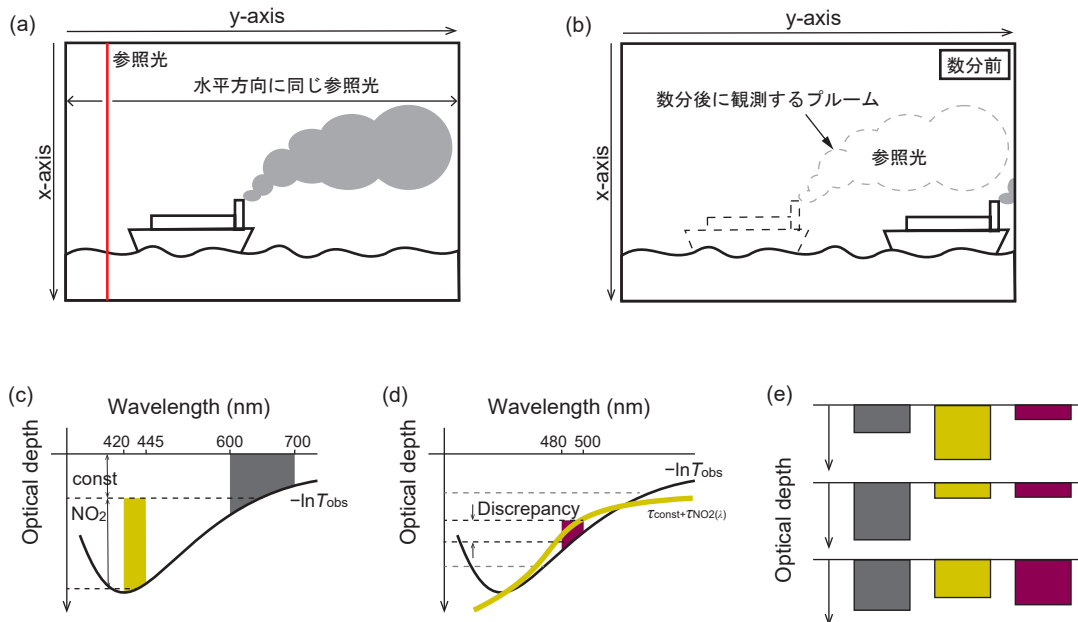
まで述べてきたとおり光の波長への依存を考えている．一方， τ_{const} は，水蒸気が凝縮した小さな水滴や黒煙による光学的厚さであり，エアロゾルの透過率に波長依存性が弱いという知見を援用して^{9),10),11),16)}，本研究では波長に依存しない事を仮定とした． $\tau_{\text{dis}}(\lambda)$ は，NO₂ 及び水滴・黒煙等では説明しきれない光学的厚さであり，これらのみで説明する事の妥当性，もしくは水滴・黒煙の光学的厚さが波長に依存しない事の妥当性を診断するために導入した．

ここに，水蒸気と水滴は，それぞれ，気体と液体であり，光の吸収の特性は大きく異なる．水蒸気の光の吸収は波長への依存性が強く，その波長帯は NO₂ による吸収の波長帯の一部に重なる事は第2章で既に述べた通りである．

(6) NO₂ カラム濃度の推定方法

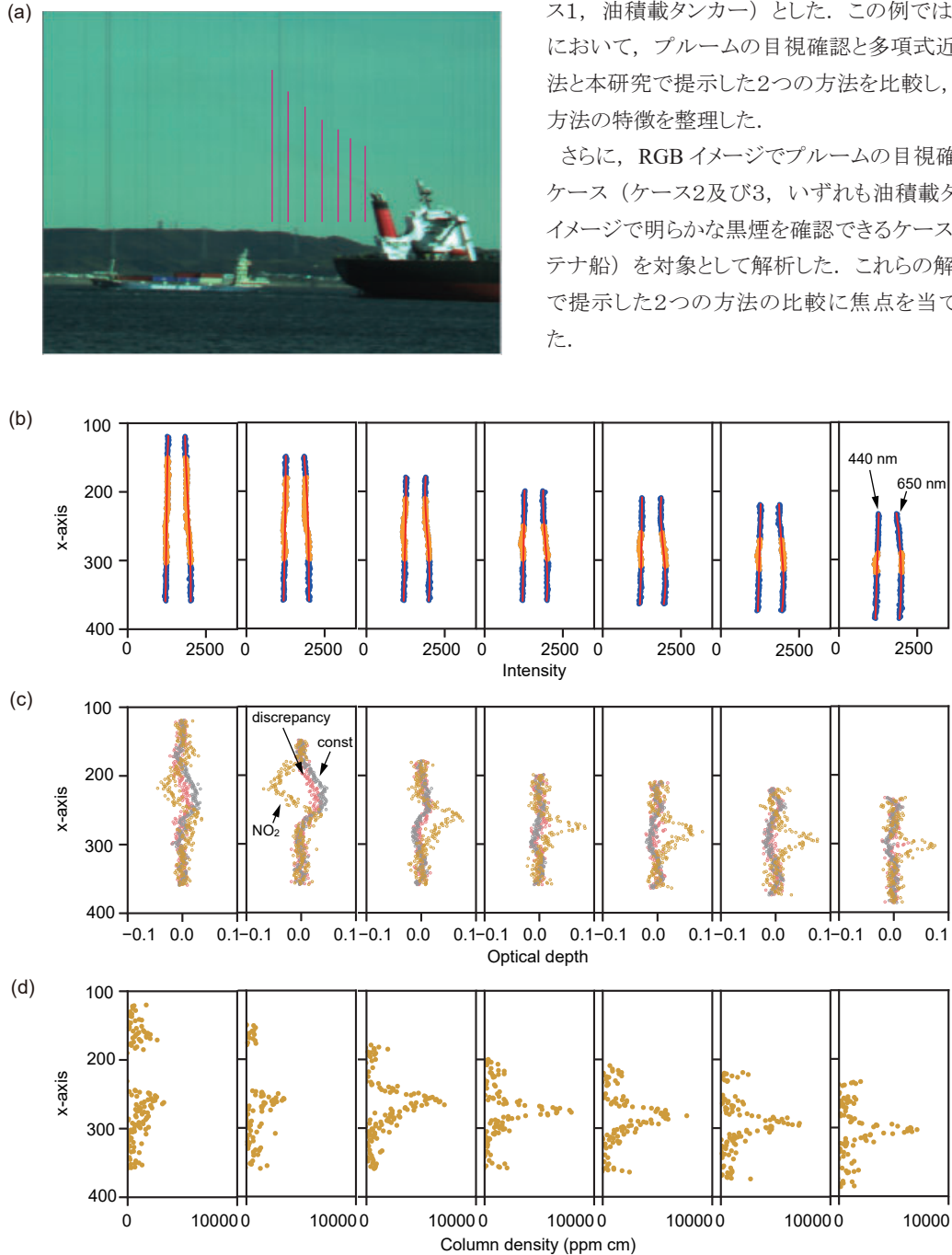
NO₂ カラム濃度の推定にあたり，まず，観測された光学的厚さから水滴・黒煙による寄与と分離した．NO₂ は波長が 600 nm 以上であれば光をほとんど吸収しないことから（図—2.5），600 から 700 nm の波長帯における吸収による光学的厚さは，すべて水滴・黒煙等によるものと考えた（図—4.2c）．

次に，NO₂ による寄与を抽出した．第3章の検討では，NO₂ カラム濃度の推定に適した NH-3 のバンドを 420—445 nm とした事から，これらの波長帯における光学的厚さのうち，水滴・黒煙による寄与を除いたものを NO₂ の寄与によるものと考え，これから NO₂ カラム濃度を推定した．最後



図—4.2 参照光の推定方法と NO₂ 及び水滴・黒煙の吸収による光学的厚さの分離方法．参照光は，(a) x 軸方向の任意の1側線の測定値を他の y 軸すべてに適用する方法と (b) 数分前の観測光を適用する方法を採用した．(c) 観測された光学的厚さ ($-\ln T_{\text{obs}}$) のうち，600 から 700 nm における光学的厚さは黒煙の吸収によるものと考えた．次に，420—445 nm の光学的厚さから水滴・黒煙の吸収による光学的厚さを差し引いたものを NO₂ の吸収による光学的厚さとした．(d) 480—500 nm における NO₂ 及び水滴・黒煙の吸収による光学的厚さと観測された光学的厚さとの不一致を評価し，(e) NO₂ と水滴・黒煙の分離の妥当性を診断した．

に、 NO_2 による吸収がありつつもカラム濃度の推定に使わなかった波長帯 (480—500 nm) に着目し、 NO_2 及び水滴・黒煙の吸収による光学的厚さと観測された光学的厚さとの不一致を評価した (図—4.2d)。この光学的厚さの不一致から、 NO_2 と水滴・黒煙の寄与の分離がうまく行えているか、もしくは他の物質による吸収の影響がないか評価した (図—4.2e)。



図—4.3 船舶から排出されるガスのプルームを容易に目視確認できないケース (ケース1) における NO_2 カラム濃度の推定. (a) RGB イメージと NO_2 カラム濃度の推定を試みたライン (赤色) を示し, (b) そのライン上におけるプルームの範囲内 (オレンジ色) 及び範囲外 (青色) の区間を示している. 赤色の線は、プルーム範囲外の区間から多項式近似で推定した参照光のスペクトル強度である. (c) 水滴・黒煙 (const) と NO_2 の光学的厚さ, 及び観測された光学的厚さとそれらとの不一致 (discrepancy), さらに (d) NO_2 の光学的厚さから推定された NO_2 カラム濃度を示している.

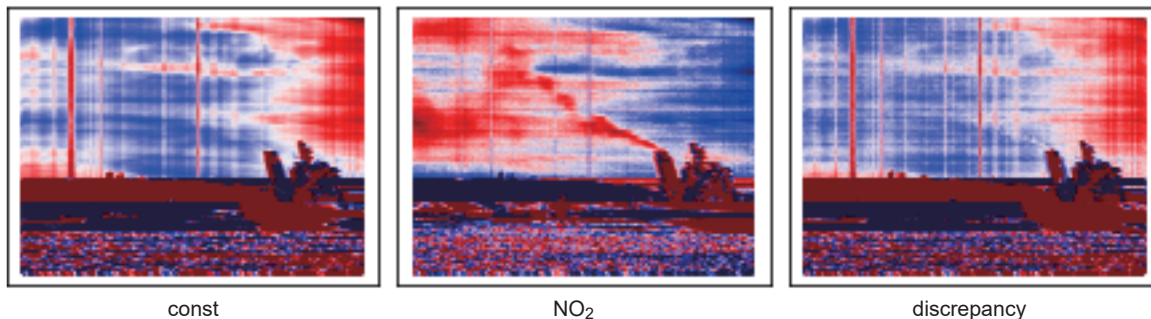
NO_2 カラム濃度の推定方法として、計算負荷の低いボックスフィルターによる方法 (式 (9)) による方法を採用した。ただし、この式における $I_{\text{obs}}(B)/I_{\text{ref}}(B)$ は $\exp(-\tau_{\text{NO}_2}(\lambda))$ とし、温度は仮に 100°C (373 K) として推定した。

(7) 解析の流れ

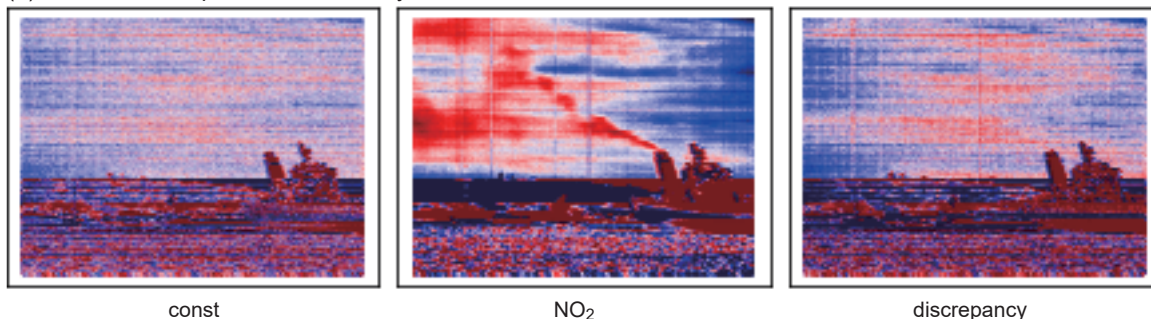
解析は、4 隻の船舶を対象として実施した。1 つ目の対象は、RGB イメージではプルームの目視確認が困難なケース (ケース1, 油積載タンカー) とした。この例では、参照光の推定において、プルームの目視確認と多項式近似で補間する方法と本研究で提示した2つの方法を比較し、目視確認による方法の特徴を整理した。

さらに、RGB イメージでプルームの目視確認が困難な他のケース (ケース2及び3, いずれも油積載タンカー) と RGB イメージで明らかな黒煙を確認できるケース (ケース4, コンテナ船) を対象として解析した。これらの解析では、本研究で提示した2つの方法の比較に焦点を当てて特徴を整理した。

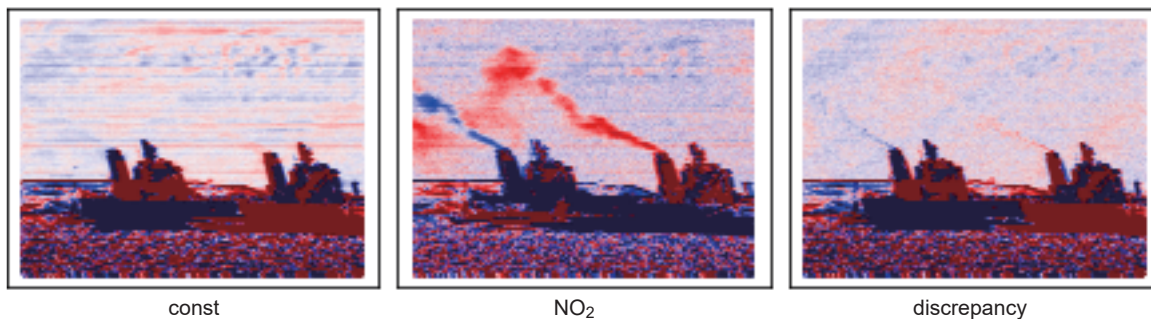
(a) With an assumption of horizontally uniform, and without normalization



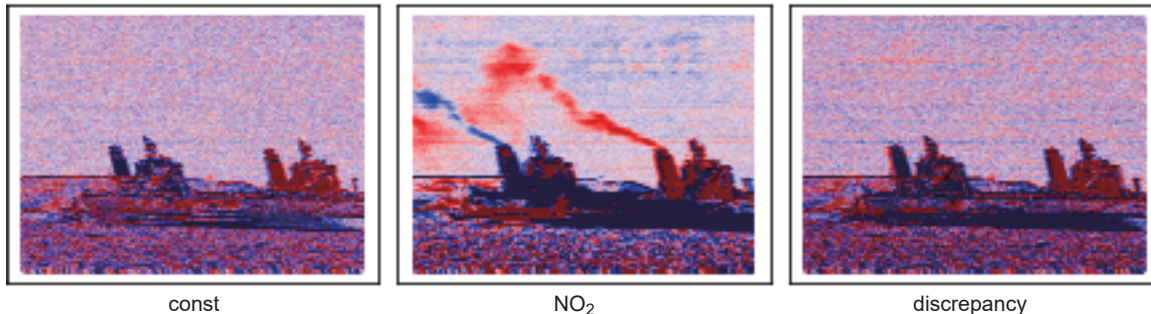
(b) With an assumption of horizontally uniform and normalization



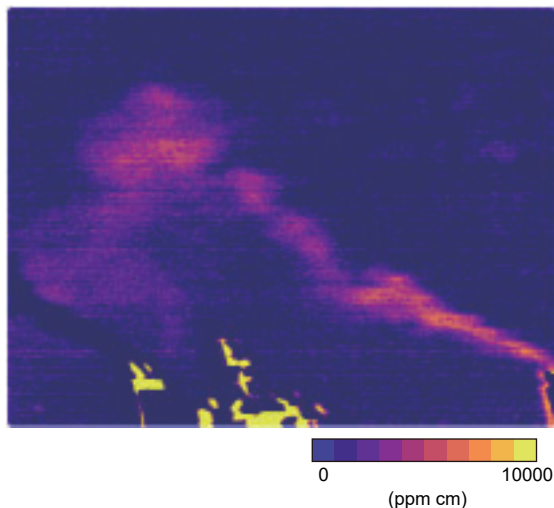
(c) With an assumption of no time change, not without normalization



(d) With an assumption of no time change and normalization



図—4.4 船舶の排気ガスの光学的厚さ。左から、黒煙及び NO_2 の光学的厚さと不一致分の光学的厚さを示している。背景が、(a) y 軸方向に一樣である事を仮定した場合、(b) y 軸方向に一樣を仮定して規格化した場合、(c) 時間変化なしを仮定した場合、(d) 時間変化なしを仮定して規格化した場合に推定された参照光に基づく光学的厚さを比較している。いずれも、赤色と青色は、光学的厚さが正の場合と負の場合を示しており、その範囲は -0.1 から 0.1 までである。



図—4.5 船舶排ガス中のNO₂ カラム濃度の推定例。時間変化なしを仮定（規格化なし）に基づき推定した結果を示している。

4.3 結果

(1) プルームの範囲を目視で判定した場合

ケース1のプルームは、RGB イメージから目視で確認する事が困難であるが（図—4.3a）、目を凝らす事で、その範囲は排気口に近い程狭く、排気口から遠くなる程広がっている事を読み取る事ができた（図—4.3b）。NO₂ の光学的厚さの分布は、排気口付近ほどパルス状でピーク値も大きく、プルームの後方ほどx軸方向に広がって薄くなり、負になっている範囲もあった（図—4.3c）。負の光学的厚さは、明らかに誤った推定である。

NO₂ カラム濃度のピーク値は、排気口付近において10000 ppm cm よりも少し低い程度であった（図—4.3d）。排気口の幅を100 cm 及び200 cm と仮定すると、濃度は発電機のアイドル運転と同等程度である100 ppm 及び50 ppm に換算された。しかし、発電機のアイドル運転時の濃度は、明確には検出できなかったものの、このケースではカラム濃度が高い事から明確に検出できている。

(2) 2つの仮定で参照光を推定した場合

ケース1におけるy軸方向の一様性の仮定と時間変化なしの仮定のいずれの仮定に基づいた方法でも、明確なプルームを示すNO₂ の光学的厚さを抽出できたが、光学的厚さと背景とのコントラストは方法によって異なっていた（図—4.4）。時間変化なしの仮定では、背景が一様でプルームが鮮明に浮かび上がっていたが、y軸方向の一様性の仮定では、背景がまだらであり、縦線のノイズが目立った。

この縦線のノイズは、レンズにゴミが付着した状態で縦方向にスキャンして得られた結果である。このノイズは、時間変化なしの仮定に基づいた方法ではキャンセルされており、y軸

方向に一様を仮定した方法であっても規格化をする事で目立たなくなっている。屋外では、レンズへのゴミの付着は十分に起こり得る事であり、y軸方向の一様性の仮定に基づいた方法であれば規格化を行わなければ、この影響を避ける事は難しい。

プルームを目視判定した方法ではNO₂ の負の光学的厚さが見られたが（図—4.3c）、時間変化なしの仮定に基づいた方法では見られなかった（図—4.4c 及び d）。また、y軸方向に一様の仮定に基づいた方法では、背景に負値を持つ霞が見られたが、プルーム内では見られなかった（図—4.4a 及び b）。目視による方法では、プルームの範囲の誤った判定により、光学的厚さを負に推定してしまった可能性がある。また、背景に空間的な不均一性がある場合、当然、y軸方向の一様性の仮定が成り立たない。この仮定に基づいた方法で背景に負値を持つ霞が見られたのは、おそらく背景の空間的な不均一性によるものである。

ケース1において、時間変化なしの仮定の下に参照光を推定し、カラム濃度を可視化すると、明瞭なプルームの構造を見る事ができた（図—4.5）。

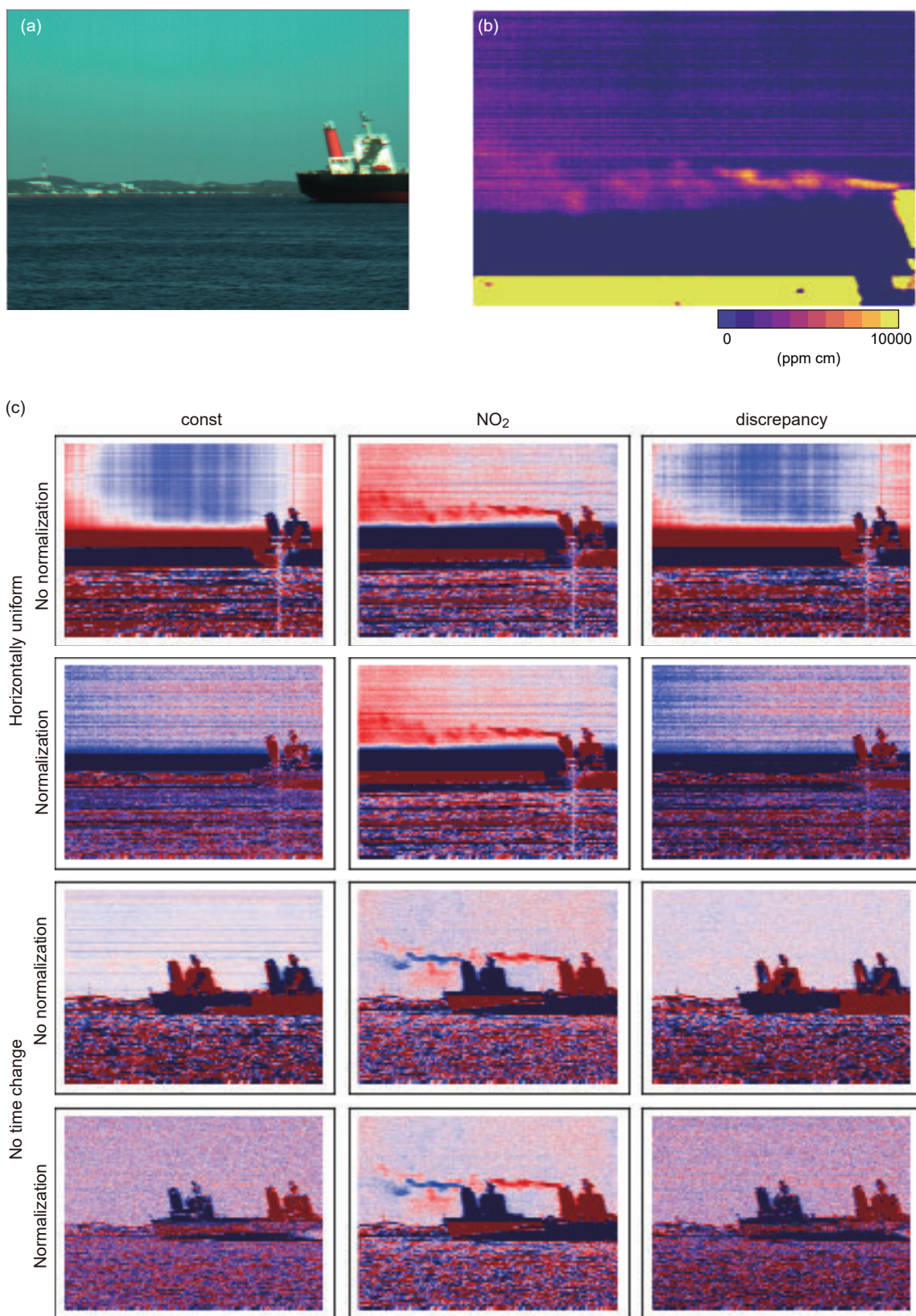
(3) 他の3つのケースにおける推定結果

ケース2は、ケース1と同様に、RGB イメージからプルームを目視で確認する事が困難であるものの（図—4.6a）、NO₂ カラム濃度の分布を明確に確認できたケースである（図—4.6b）。NO₂ カラム濃度は、ケース1よりも排気口直後で濃く、プルームの中では、後方へ行くに従って薄まっている。しかし、ケース1に比べると、背景に横線のノイズが多い。これは、参照光の推定においてy軸方向に一様を仮定した方法を選択したためである。

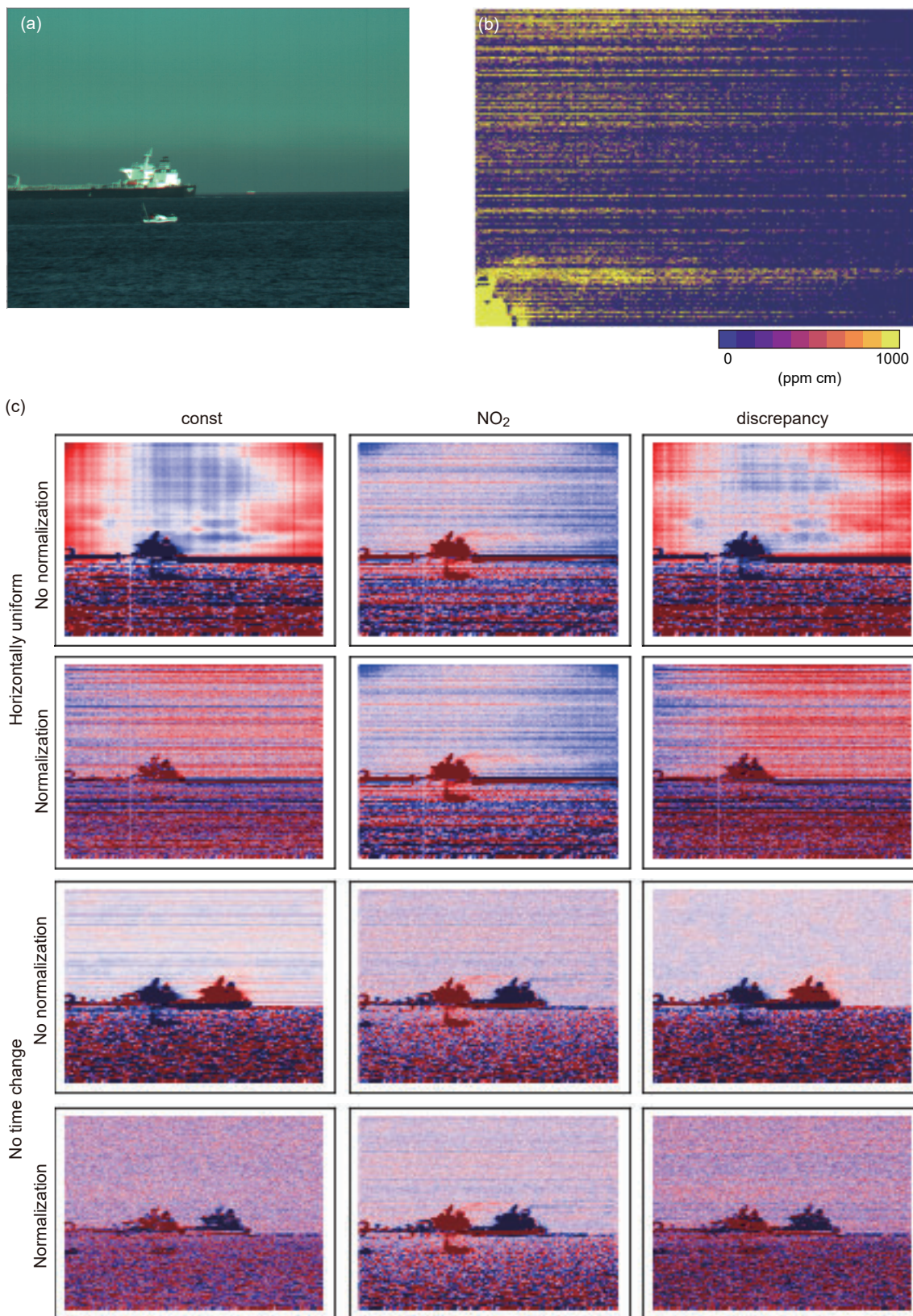
このケースにおいて時間変化なしの仮定に基づいて求めた光学的厚さの背景は、ケース1と同様に明瞭であるが、船の残像によってプルームの全体像が欠けてしまった（図—4.6c）。船の残像が入ってしまう事は、時間変化なしの仮定の大きな欠点と言える。

ケース3の排気プルームは、RGB イメージから目視で確認する事が困難である（図—4.7a）。また、このケースのNO₂ カラム濃度は、前述の2つのケースよりも1桁低く表示しているが、それでもプルームの確認が困難な程に低濃度である（図—4.7b）。さらに、光学的厚さは、NO₂ だけでなく水滴・黒煙等及び不一致のいずれにおいても薄い（図—4.7c）。

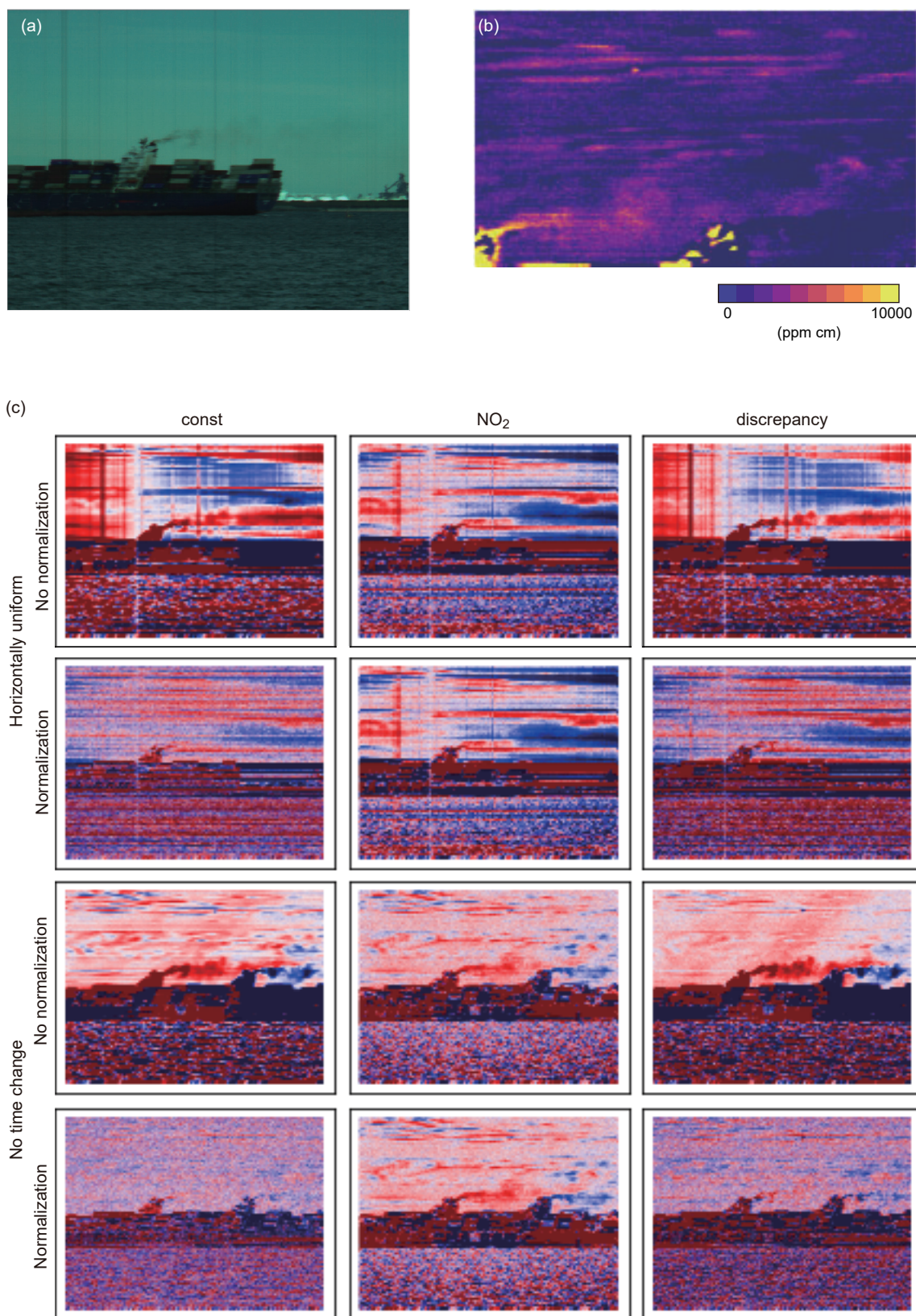
ケース4は、RGB イメージでも明らかに黒いプルームが排出されているケースである（図—4.8a）。NO₂ カラム濃度は、排気口付近で濃いものの、ケース1及びケース2と比べるとプルームの中では低い（図—4.8b）。このケースでは、時間変化なしの仮定に基づいて参照光を推定したNO₂ カラム濃度を示しているが、他の3つのケースに比べて、背景がまだらである。



図—4.6 背景の条件がいい場合の推定（ケース2）. (a) RGB イメージ, (b) 船舶排ガス中の NO_2 カラム濃度の推定結果, (c) 2つの仮定（ y 軸方向一様仮定, horizontally uniform: 時間変化なしの仮定, No time change）と規格化（normalization）の有無による異なる参照光の推定方法による光学的厚さの違いを比較している. いずれも, 赤色と青色は, 光学的厚さが正の場合と負の場合を示しており, その範囲は -0.1 から 0.1 までとしている. NO_2 カラム濃度の推定結果は, 時間変化なしの仮定ではブルームに船舶の影が重なってしまうことから, y 軸方向一様仮定（規格化なし）に基づく方法で参照光を推定した.



図—4.7 船舶排気のパルームを捉えられなかった一例（ケース3）．図の詳細な説明は，図—4.6 のとおり． NO_2 カラム濃度の推定結果は，時間変化なしの仮定ではパルームに船舶の影が重なってしまう事から， y 軸方向一様仮定（規格化なし）に基づく方法で参照光を推定した．



図—4.8 船舶排気のパルームが目視でも確認できた一例（ケース4）．図の詳細な説明は，図—4.6 のとおり．NO₂ カラム濃度の推定結果は，時間変化なしの仮定ではパルームに船舶の影が重なってしまう事から， y 軸方向一様仮定（規格化なし）に基づく方法で参照光を推定した．

光学的厚さは、他のケースに比べて、背景が霞んでおり（図—4.8c）、 y 軸方向の一様性及び時間変化なしの仮定に基づいた参照光の推定が困難なケースであると言える。時間変化なしの仮定の下に規格化した場合、水滴・黒煙のブルームが見えにくくなっている点もこのケースの特徴である。

4.4 考察及びまとめ

本章では、東京湾の湾口を航行する船舶を対象として、ハイパースペクトルイメージから NO_2 カラム濃度の推定及び可視化を試みた。この結果、その可視化は可能であるが、必ずしも全ての船舶で可能という訳ではなく、排出される NO_2 カラム濃度の高さ、参照光の推定手法の精度、 NO_2 以外の吸収に影響する物質の存在等がその可否を決めている可能性がある。以下では、この3つの観点から、 NO_2 カラム濃度の可視化の限界について考察する。

(1) 可視化できるカラム濃度

解析した4つのケースから、本研究で採用した手法で可視化できる NO_2 カラム濃度は、概ね 1000 ppm cm よりも高い濃度と言えそうである。ppm 濃度は仮定したガス温度に依存するため、より確かな分子数に基づくカラム濃度に換算すると、この値は 2×10^{16} molecule cm^{-2} となる。この値は、既往研究が同一メーカーのハイパースペクトルカメラを使って差分吸収分光法で観測した大気中の NO_2 カラム濃度の下限¹²⁾と同程度である。

ただし、 NO_2 カラム濃度の定量性は、本研究で採用した参照光の推定精度が透過率の低下を如何に検出できるか、もしくは、その低下を検出できたとしても、 NO_2 の光学的厚さを如何に分離できるか、に強く依存する。これらの課題がクリアできていなければ、必ずしも上述の定量下限を得られるとは限らない。

(2) 参照光の推定に適した方法

ブルームの範囲外から多項式近似で参照光を推定する方法は、スペクトル強度が周辺の強度分布と空間的な近似性を有しているという仮定に基づいている点に合理性があり、他の研究¹³⁾でも採用されている実績のある方法である。しかし、ブルームの範囲の目視判定には時間を要する事から、即時のアウトプットが求められる場合には不利な方法である。また、範囲の判定を誤れば、 NO_2 カラム濃度の推定に影響を及ぼす事は本章の結果で示したとおりである。

本章で提示した参照光を推定する2つの方法に基づいて得られた光学的厚さと NO_2 カラム濃度は、4つのいずれのケースにおいても異なった結果を示した。時間変化なしの仮定に基づいた方法は、気象が安定していればブルームを明瞭に浮かび上がらせる優れた方法であったが、ブルームに船舶の残像が重なってしまう点が残念であった。 y 軸方向の一様性の仮定に基づいた方法は、ブルームが浮かび上がるケー

スもあったが、光学的厚さの背景にノイズが目立つケースが幾つかあった。

(3) 規格化の必要性

規格化は、 y 軸方向の一様性の仮定に基づいた方法において、レンズに付着したゴミによるノイズを除去するのに役立った。一方で、規格化の基準となる波長の光が未知の物質によって吸収されている場合は、透過率の低下を過小評価してしまうデメリットがある（付録 C）。水滴・黒煙等のような広い波長帯で光を吸収する物質がガス中に多く含まれている場合、規格化に適した基準となる波長を選定する事は困難であり、透過率の低下の過小評価は避けがたい。実際、ケース4では、規格化によって光学的厚さのブルームが見えにくくなっている。

規格化による透過率の低下の過小評価は、実際に規格化をしてみないと見えてこないものであり、これを標準の手法としてしまうと、カラム濃度の過小評価のリスクを抱えてしてしまう。しかし、ノイズを除去するメリットが大きい場合は規格化を選択できるようにしておく事が望ましい。

(4) 参照光はどのように推定すればいいか？

多項式近似や本章で提示した2つの仮定に基づく参照光の推定方法には、それぞれ一長一短があり、ベストな手法を判断する事は出来ない。

理想的な手順は、複数の手法で解析できるように備えておく事である。たとえば、現地では、時間変化なし仮定に基づいた手法に対応できるよう、複数回の撮影をしておく事が望ましい。また、ベストなカラム濃度の推定値を事後に選別できるよう、解析者が規格化の有無や規格化をするための波長を選択できるようにしておく事が望ましい。

(5) 光学的厚さの分離

本研究で示した NO_2 及び水滴・黒煙の光学的厚さの分離手法は、ケース1とケース2では機能しているように見えた。しかし、水滴・黒煙の吸収に波長依存がない事の仮定がどこまで適切なのか、我々には確かな知見がない。

(6) まとめ

本章では、光の透過の精度を確保しつつ比較的簡易に参照光を推定する手法の提示、 NO_2 及びそれ以外の物質による吸収の寄与を分離・推定する手法の提示、さらに、これらの実海域を航行する船舶への適用により、光学的アプローチによる船舶からの排気ブルーム中 NO_2 カラム濃度を見える化が可能であることを示した。ただし、本章で提示した参照光を推定するための仮定はどのような条件でも適用できるものではない事や NO_2 と水滴・黒煙と NO_2 との分離方法の普遍性が不明である等の課題も残した。提示した参照光の推定方法が適用できる条件や黒煙と NO_2 との分離方法の妥当性の検証は必要である。

5. あとがき

本研究は、特定の波長に着目することで、海域を航行する大型船舶から排出される NO₂ カラム濃度の見える化に成功した。本研究で示した手法は比較的簡易な技術に基づくことから、安価な機器の開発や船舶から排出される NO₂ カラム濃度を視覚化したモニタリングへの展開が可能となる。既に研究事例のある SO₂ カラム濃度の視覚化¹⁴⁾と技術的に共通点も多く、SO₂と共に見える化する事で、船舶から排出される汚染物質の拡散の理解が進むかもしれない。

しかし、幾つかの課題も残した。本研究で示した方法では、NO₂ カラム濃度を浮かび上がらせる参照光の推定手法が鍵となったが、手法の適用条件の検証や NO₂ と水滴・黒煙の分離方法の妥当性には検証の余地がある。また、現行の船舶から排出される NO_x の規制への適合をモニタリングするためにはエンジンの定格回転数や燃料消費量の把握が必要であり(図—1.2c)、大気汚染防止法で定める NO_x の規制への適合をモニタリングするためにはカラム濃度から濃度への換算に必要となるガスの温度とプルームの視線方向の奥行(光路長)の情報を取得しなければならない。

本研究で示した手法は、現状では NO₂ の濃淡に見える化するだけの域を超えないものであり、規制への適合をモニタリングするための技術に発展させるのであれば、さらなる技術の高度化が必要である。

(2025 年 1 月 31 日受付)

謝辞

本研究は、2016 年における海上技術安全研究所との統合を契機として、船舶から排出される物質濃度の東京湾口におけるモニタリングの可能性に関する意見交換を重ねて取り組んだテーマである。また、2020 年から始めた国立研究開発法人海洋研究開発機構との共同研究の中で、宮川拓真氏から本研究を実施するにあたって参考となる知見を共有して頂いた。さらに、元技術補助員の沼田千賀子氏には、得られたスペクトルイメージの解析を通じて、室内での検証から現地観測の最適化に貢献して頂いた。みなさまに対して、ここに感謝の意を表す。

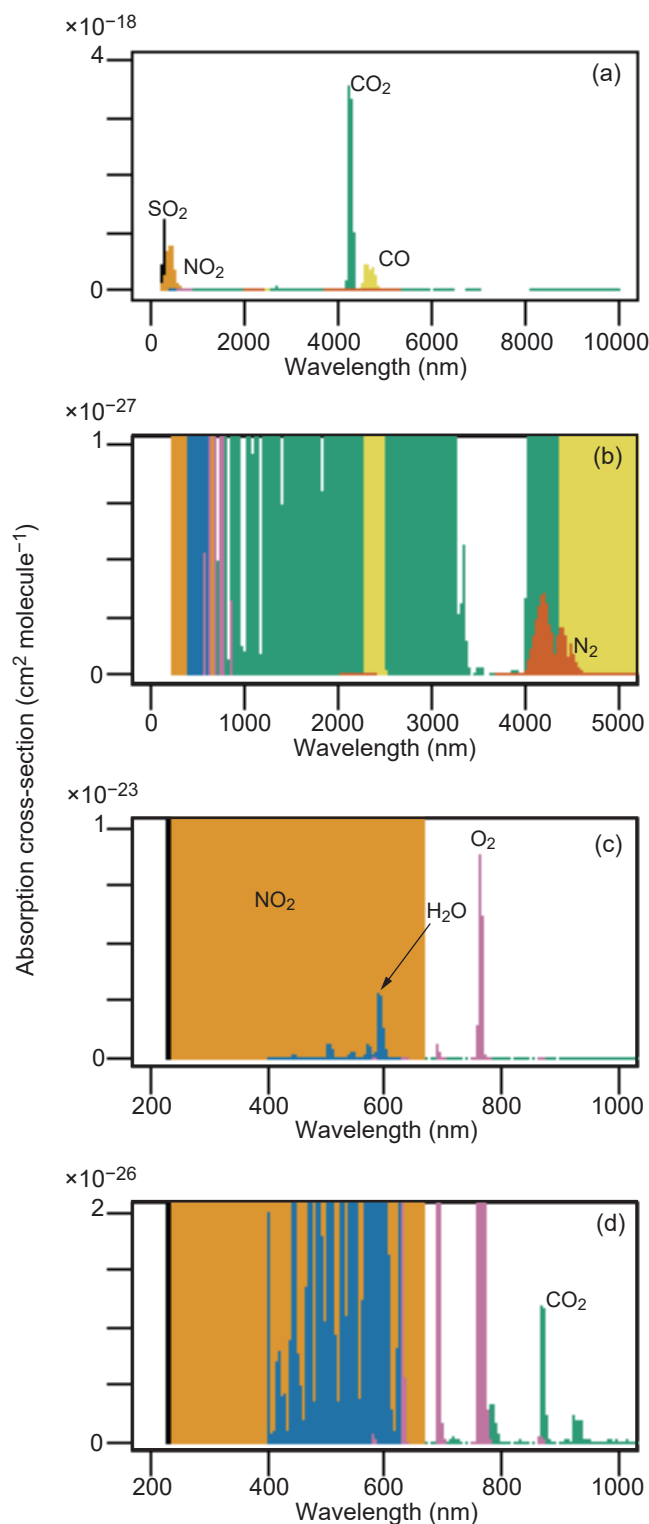
参考文献

- 1) 微小粒子状物質等専門委員会(第12回)議事次第・配付資料, <https://www.env.go.jp/council/07air-noise/y078-12/900427200.pdf>
- 2) Liu, H., M. Fu, X. Jin, Y. Shang, D. Shindell, G. Faluvegi, C. Shindell, and K. He. Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia. *Nature Climate Change* 6: 1037–1041, 2016. <https://doi.org/10.1038/nclimate3083>.
- 3) 株式会社環境計画研究所:平成23年度船舶・航空機排出大気汚染物質削減に関する検討調査報告書,

- https://www.env.go.jp/air/car/ship_%20plane/h23.pdf
- 4) 藤田昌廣:東京港における停泊船舶の排ガス対策について. *環境技術*, Vol. 35: 119–123, 2006. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jriet1972/35/2/35_2_119/_pdf/-char/ja
- 5) 華山伸一:船舶からの粒子状物質規制の国際的な動向とその背景—国際海事機関(IMO)における議論の行方—. *日本マリンエンジニアリング学会誌*, Vol. 48: 73–78, 2013. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/48/4/48_496/_pdf/-char/ja
- 6) 国土交通省海事局資料, <https://www.mlit.go.jp/common/001292832.pdf>
- 7) Tauchi, M., K. Yamaji, R. Nakatsubo, Y. Oshita, K. Kawamoto, Y. Itano, M. Hayashi, T. Hiraki, Y. Takaishi, and A. Futamura. Evaluation of the effect of Global Sulfur Cap 2020 on a Japanese inland sea area. *Case Studies on Transport Policy* 10: 785–794, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.02.006>.
- 8) 国土交通省海事局資料, <https://www.mlit.go.jp/common/001198530.pdf>
- 9) Yoshii Y, H Kuze, N Takeuchi: Long-path measurement of atmospheric NO₂ with an obstruction flashlight and a charge-coupled-device spectrometer. *Applied Optics* 42: 4362–4368, 2003.
- 10) Fuqi, S., H. Kuze, Y. Yoshii, M. Nemoto, N. Takeuchi, T. Kimura, T. Umekawa, T. Yoshida, T. Hioki, T. Tsutsui, M. Kawasaki. Measurement of regional distribution of atmospheric NO₂ and aerosol particles with flashlight long-path optical monitoring. *Atmospheric Environment* 39: 4959–4968, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.002>.
- 11) Kambe Y, Y Yoshii, K Takahashi, K Tonokura: Continuous monitoring of urban air quality with a pulsed DOAS technique. *The seventh International Conference on Urban Climate*, Yokohama, Japan, July 2009.
- 12) Manago, N., Y. Takara, F. Ando, N. Noro, M. Suzuki, H. Irie, and H. Kuze. Visualizing spatial distribution of atmospheric nitrogen dioxide by means of hyperspectral imaging. *Applied Optics* 57: 5970–5977, 2018. <https://doi.org/10.1364/AO.57.005970>.
- 13) Kuhn, L., J. Kuhn, T. Wagner, and U. Platt. The NO₂ camera based on gas correlation spectroscopy. *Atmospheric Measurement Techniques* 15: 1395–1414, 2022. <https://doi.org/10.5194/amt-15-1395-2022>.
- 14) Prata, A. J. Measuring SO₂ ship emissions with an ultraviolet imaging camera. *Atmospheric Measurement Techniques* 7: 1213–1229, 2014. <https://doi.org/10.5194/amt-7-1213-2014>.
- 15) 高良洋平:スペクトルイメージングと産業応用への期待. *Optronics*, Vol. 8: 68–70, 2019.
- 16) 戸野倉賢一:光を用いた大気環境計測技術. *光学*, Vol. 41: 2–8, 2012. <https://annex.jsap.or.jp/photonics/kogaku/public/41-01-sougouhoukoku.pdf>
- 17) Kanaya, Y., H. Irie, H. Takashima, H. Iwabuchi, H. Akimoto, K. Sudo, M. Gu, J. Chong, Y. J. Kim, H. Lee, A. Li, F. Si, J. Xu, P.H. Xie, W. Q. Liu, A. Dzhola, O.

- Postylyakov, V. Ivanov, E. Grechko, S. Terpugova, M. Panchenko. 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. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14: 7909–7927, 2014. <https://doi.org/10.5194/acp-14-7909-2014>.
- 18) 高島久洋, 金谷有剛, 竹谷文一 : MAX-DOAS 法による船上エアロゾル・ガス観測装置の小型化. *JAMSTEC Report of Research and Development* 23: 34–40, 2016. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamstecr/23/0/23_34/_html/-char/ja
- 19) Vandaele, A. C., C. Hermans, P. C. Simon, M. Carleer, R. Colin, S. Fally, M. F. Mérienne, A. Jenouvrier, and B. Coquart: Measurements of the NO₂ absorption cross-section from 42 000 cm⁻¹ to 10 000 cm⁻¹ (238–1000 nm) at 220 K and 294 K. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 59: 171–184, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(97\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(97)00168-4).
- 20) Rothman, L. S.: History of the HITRAN database. *Nature Review Physics* 3, 302–304, 2021.
- 21) 日本海難防止協会 : 東京湾における船舶の航行安全. 日本海難防止協会情報誌, No.524, 2005.

付録 A 燃焼機関から排出される主要成分と光の吸収



図—A.1 希薄燃焼ガスの主成分である CO_2 , CO , H_2O , N_2 , O_2 の吸収断面積 (Absorption cross-section). データは、高分解能透過分子吸収データベースである HITRAN から取得した。

(1) 主要成分とその吸収断面積

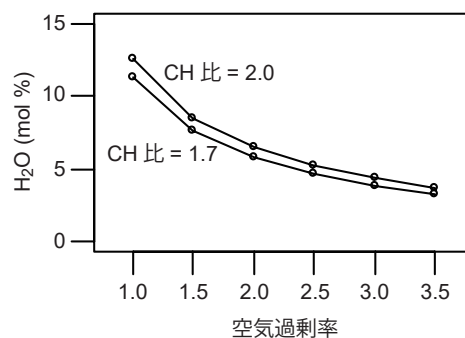
希薄燃焼する燃焼機関から排出されるガスに含まれる主な成分は、 CO_2 , CO , N_2 , NO_x , O_2 , H_2O であり、燃料由来として SO_x が挙げられる。

NO_2 の吸収断面積が大きくなる波長帯は、 CO_2 , CO , N_2 及び O_2 の吸収断面積が大きくなる波長帯とは重なっていない。しかし、 SO_2 と H_2O の吸収断面積が大きくなる波長帯は、 NO_2 のそれと重なっている (図—A.1)。

(2) SO_2 と H_2O による吸収の影響

本文では、検出できるであろう NO_2 カラム濃度を想定し、既往文献で示されている現実的な SO_2 カラム濃度と比較することで、 SO_2 による吸収が NO_2 の測定に影響を及ぼさない事を結論付けている。 H_2O については、現実に関り得るよりも高い濃度を試算して検討した。

炭化水素の燃料がすべて燃焼したとすると、排出されるガス中の H_2O 濃度は、化学量論から、図—A.2 のとおりに試算される。一般的な燃料の CH 比は2を超えることはなく、また、一般的な空気過剰率は概ね 1.5 以上であり、少なくとも 1 を下回る事はない。 CH 比が 2 で空気過剰率が 1.0 であるとしても H_2O 濃度は 12 から 13% であり、船舶排気ガス中に含まれる H_2O 濃度は、おそらく、最大でもこれを上回る事はない。本文では、この値に基づき、 H_2O による吸収が NO_2 の測定に影響を及ぼさない事を考察している。



図—A.2 希薄燃焼ガス中の H_2O 濃度の試算。

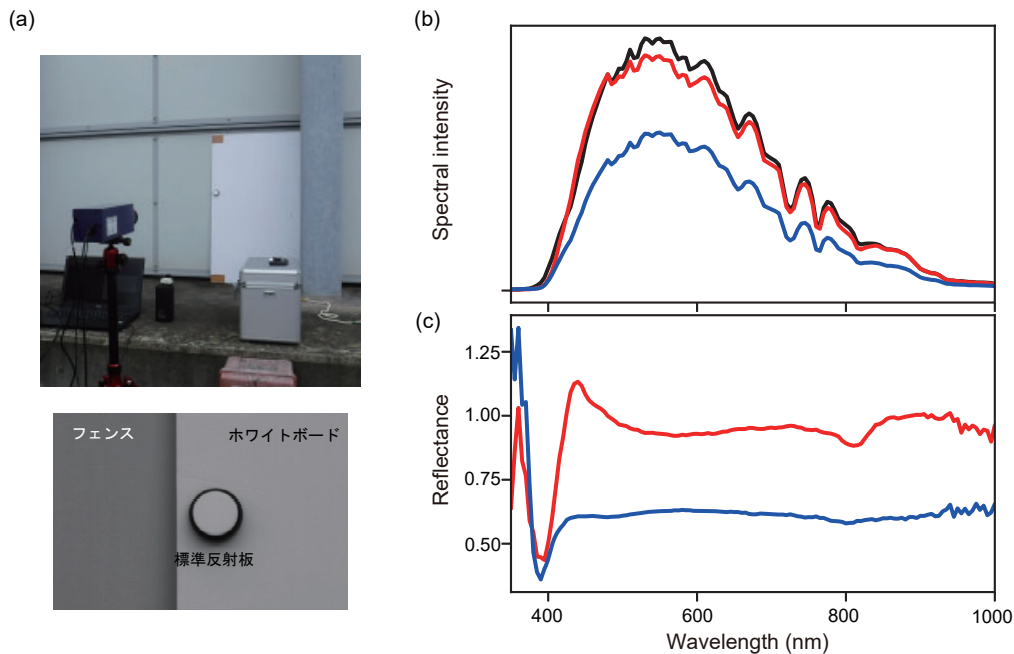
付録 B フェンスを背景とした場合の工夫

発電機の公道側には白色のフェンスがある事から、状況に応じて、これを背景として参照光を推定した。ただし、あらかじめ、標準反射板を用いてフェンスの反射特性を把握した(図—B.1)。また、ホワイトボードとの比較も行った。

ホワイトボードの反射率は、広い波長帯で 1.0 に近い値を示していた。ただし、ホワイトボードの反射率は、波長が 440 nm 付近で高く、そこから 400 nm へ向かうに従って急激に低下した。一方、フェンスの反射率は、広い波長帯で 0.6 程

度であり、400 nm 付近で最小値となったが、ホワイトボードほどの急激な変化ではなかった。

NO₂ の吸収断面積が高くなる波長帯は、ホワイトボードの反射率が急激に変化する付近にあり、ホワイトボードを背景にすることは好ましいとは言えない。これに対し、フェンスは、比較的、NO₂ 測定のための背景として利用可能であると言える。ただし、フェンス背景のスキャンでは 420 nm 以下のスペクトル強度が小さくなることを留意する必要がある。



図—B.1 フェンスとホワイトボードの背景としての評価。(a) 評価のための撮影風景を示している。(b) 標準反射板(黒色)、ホワイトボード(赤色)、フェンス(青色)のスペクトル強度を示し、(c) ホワイトボードとフェンスのスペクトル強度を標準反射板のスペクトル強度で除した反射率を示している。

付録 C 規格化のメリットとデメリット

参照光は、観測光と比較して透過率を求める際に必要となる。しかし、参照光と観測光を同時かつ同じ点で測る事はできないので、同じスペクトル強度を得られる事はない。場合によっては、その差は大きくなる事もある（図—C.1a）。その場合、参照光を観測光と比較可能とするために規格化が必要となる（図—C.1b）。しかし、基準となる波長帯の選択を誤ると正しく透過率を求める事ができない。ここでは、規格化するための手順について考察した。

入射光のスペクトル強度と対象ガスの透過率が図—C.2aであれば、対象ガスを透過した後のスペクトル強度は図—C.2bとなる。スペクトル強度のピークは、入射光よりも透過光の方が長い波長側にシフトしている事が分かる。ここで、規格化の基準となる波長として、光強度がピークとなる波長、700 nm（透過率分布の裾がやや被っている波長）、800 nm（透過率がほぼゼロとなる波長）とした場合を考えた。

規格化の基準となる波長が変わると、規格化スペクトルの大きさは入射光と透過光との間で変わる（図—C.2c-e）。基準を800 nmとした場合、推定される透過率は真値にほぼ一致しており、700 nmを基準とした場合の推定結果も真値に近い（図—C.2f）。しかし、基準を光強度がピークとなる波長にすると、透過率は過大評価となる。波長によっては、1.0を超

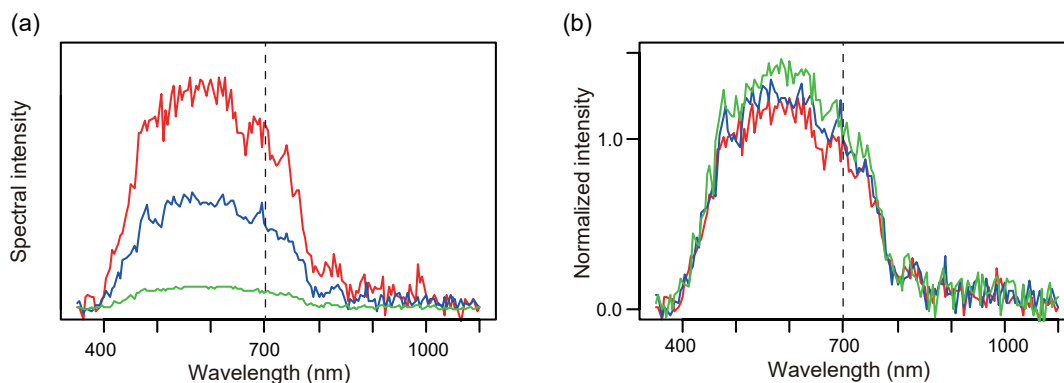
えている。以上の検討は、スペクトルの規格化の基準となる波長の選択において、吸収断面積がゼロとなる波長帯が重要である事を意味している。

規格化のメリットは、時間差を比較可能にする。しかし、実際には、吸収断面積がゼロであっても、スペクトル強度が小さくノイズの影響が相対的に大きくなる波長帯もあるし、他の物質による吸収が影響する波長もあり、必ずしもどのような環境でも規格化に適しているわけではない。よく分からないものが入っていれば、上述の検討のとおり透過率を過大評価（対象物質濃度を過小評価）してしまうデメリットがある。よって、室内と屋外、及び参照光を得る時間の差の有無で使い分けた。

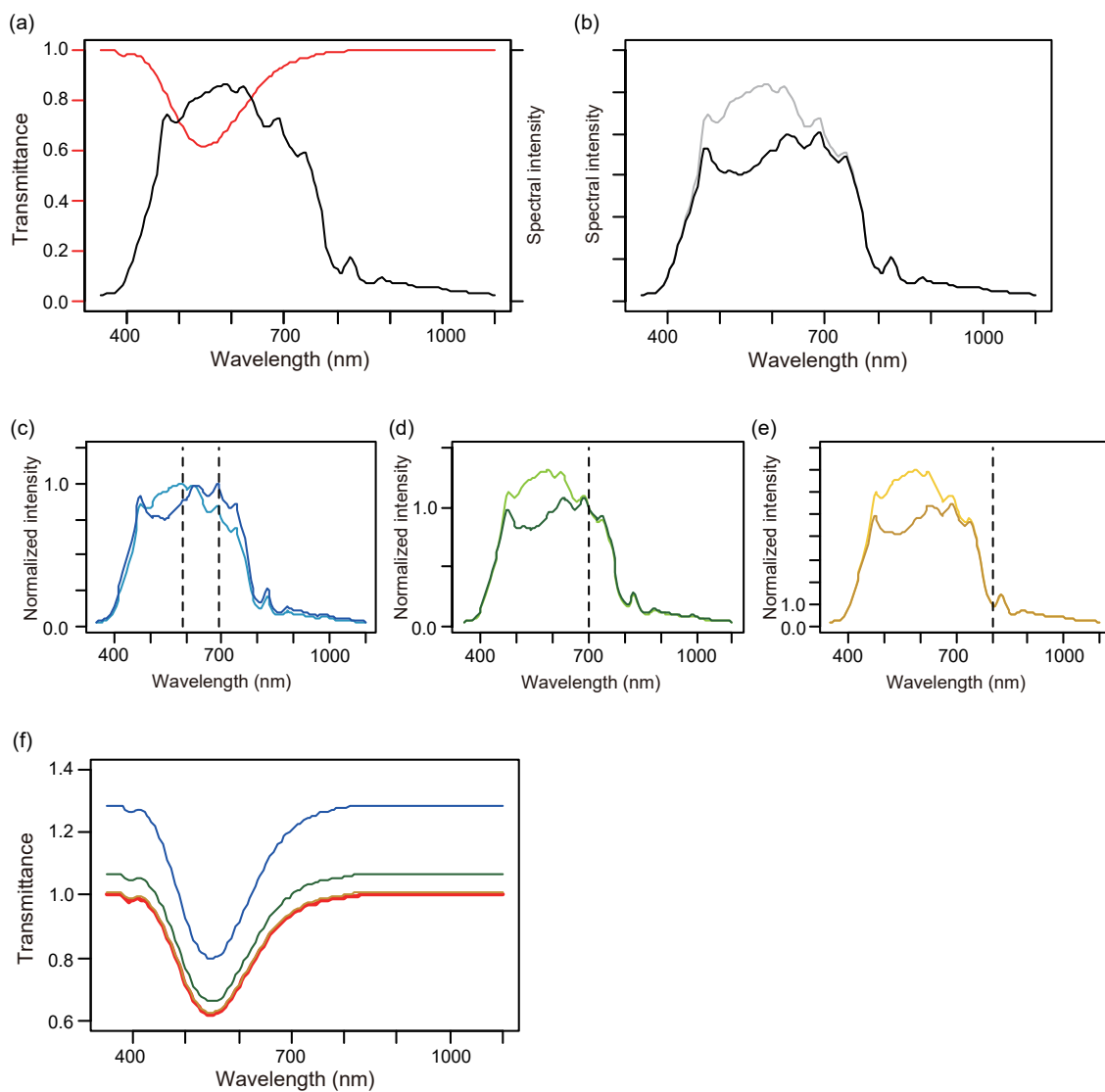
室内で行うガスバグのスキャンでは、観測光と参照光のスキャンの時間が異なるが、スキャン時の条件をコントロールできることから規格化を採用した。規格化の基準となる波長として、NO₂の吸収断面積が十分に小さくなりつつも、ある程度のスペクトル強度が得られ、かつ、他の物質の吸収の影響を受けにくい700 nmを採用、以下で規格化スペクトルを求めた：

$$I_{\text{obs}}'(\lambda) = I_{\text{obs}}(\lambda) / I_{\text{obs}}(\lambda=700\text{nm}) \quad (\text{C.1})$$

$$I_{\text{ref}}'(\lambda) = I_{\text{ref}}(\lambda) / I_{\text{ref}}(\lambda=700\text{nm}) \quad (\text{C.2})$$



図—C.1 スペクトル強度の規格化のイメージ。(a) 3つの異なる強度を持つスペクトル強度 (I) と (b) それぞれのスペクトル分布において、波長700 nmで規格化した後のスペクトル (I') のイメージ。



図—C.2 スペクトル強度の規格化手法の検討. (a) 波長 550 nm 付近にピークを有する透過率とスペクトル強度と (b) 透過後のスペクトル強度. (c), (d), (e) はそれぞれ、スペクトル強度のピークで規格化した場合、700 nm のそれぞれの光強度で規格化した場合、800 nm の光強度で規格化した場合を示している. 規格化は、入射光（薄い色）と透過光（濃い色）のそれぞれで行っており、縦の破線は規格化の基準とした波長を示している. (f) 800 nm の光強度で規格化して透過率を推定した結果（黄色）は、真の透過率（赤色）とほぼ一致し、700 nm で規格化した結果（緑色）も真の分布に近い. しかし、スペクトル強度のピーク値で規格化した結果（青色）は透過率を過大評価している.

港湾空港技術研究所資料 No.1424

2025. 3

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <https://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2025) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。