

排出ガスモニタリングの大手となる UV分光法

コーリー・ボニー、サマラ・ゴメス

分光法は広範囲な応用が可能な強力なツールであり、大気汚染のモニタリングや規制によって環境保護にも利用できる。

デンマークの多国籍企業であるダンフォスIXA社 (Danfoss IXA) は、紫外線 (UV) 吸収分光法に利用して、貨物船から排出される窒素酸化物 (NO_x)、二酸化硫黄 (SO₂)、アンモニア (NH₃) をモニタリングする海洋排出ガス分析装置を開発している。光学デバイスは船舶の排気システム内に設置され、極端な温度、振動、腐食環境

などの過酷な環境にさらされるため、分光システムには独自の環境要件が求められる。これにより、輸送船はすべての環境規制を確実に遵守できる。

なぜ煙突排出を モニタリングするのか

国際間を行き交う船舶の煙突からの排出ガスは、世界中の人々の肺障害や

心血管疾患の早期死亡の原因となっている (図1)。船舶の排出ガスに起因する心肺死亡と肺がん死亡は、世界で年間6万人以上になると推定されている⁽¹⁾。これは図2のように、自然災害と暑さ・寒さによる死者を合わせた推定年間死者数を上回る。人間の健康に影響を及ぼすだけでなく、海洋や陸上の生態系にもダメージを与える深刻な問題だ。



図1 国際間の海運は温室効果ガスと大気汚染物質の主要な排出源であり、気温上昇、気候変動、心肺および肺がんによる早期死亡の原因となっている

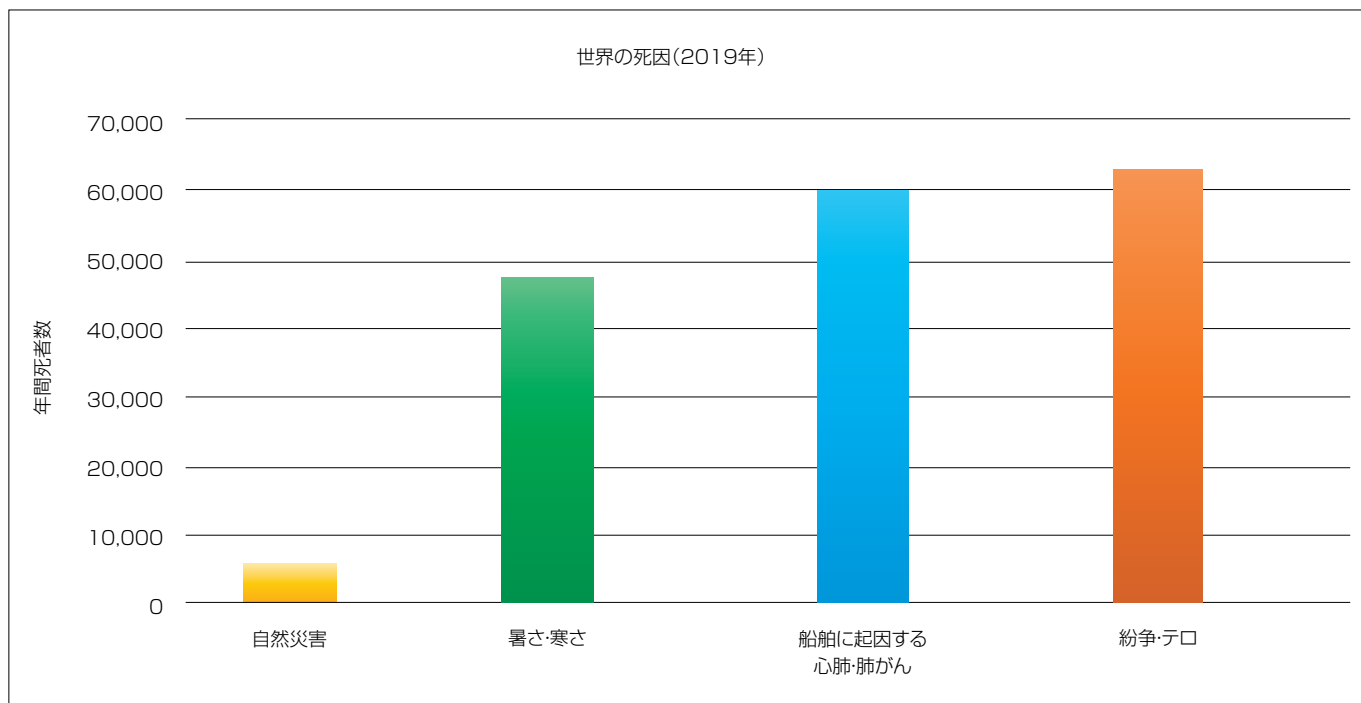


図2 2019年における世界の死因では、船舶の排出ガスに起因する死者数は自然災害と暑さ・寒さを合わせた死者数を上回る^(1,2)

国際海事機関(IMO)と米国環境保護庁(EPA)は多くの国の周辺海洋で排出規制区域(ECA)を指定し、厳しい排出規制を設けている。これらの地域を通過しなければ、多くの主要港にアクセスすることは不可能だ。

例えばダンフォスIXA社が開発したような分析装置以外に、当局が船舶の排出ガスを監視して規制を強化するための便利で信頼できる方法は他にない。多くの地方や地域では、船舶からの大気排出を制限するように設計されたイニシアティブが存在する一方で、これらの政策を実施することは困難だ。分光法をベースとした海洋排出ガス分析装置は、リアルタイムで船舶の排出ガスを正確に測定する強力なツールである。

UV分光法システム

分光法の基本原理は、物質には固有の吸収スペクトルがあり、原子や分子の組成に基づいて異なる光の波長を吸

収するというものである。ダンフォスIXA社のUV分光法システムは、高強度のUV光源とUV分光器、ファイバ

やレンズやミラーなどのUV強化光学部品で構成されている(図3)。異なる波長がどのように吸収されるかを見て



図3 ダンフォスIXA社のガス分析装置は船舶の煙突に直接挿入される(画像出典: ダンフォスIXA社)

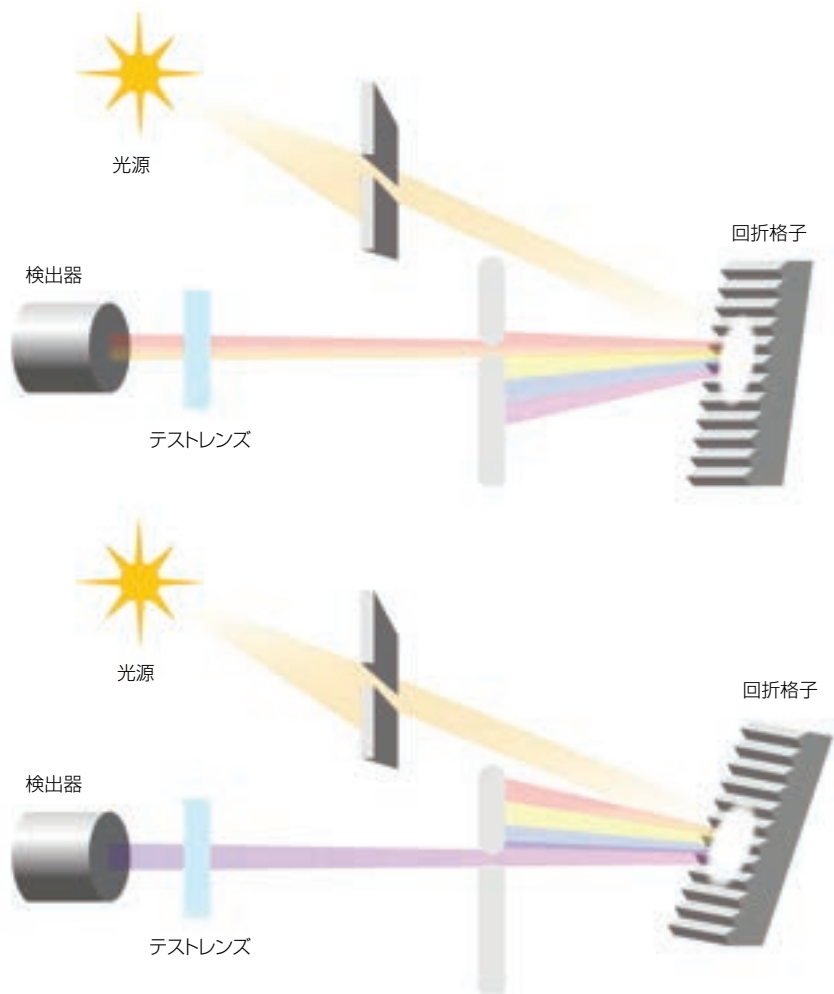


図4 分光器のテスト波長は、広帯域放射を1次元センサアレイに分離したり、モノクロメータ内部の回折格子やプリズムの角度を変えたりすることで、ここに示すように細かく調節できる

排出ガスの組成を決定するために、分光計は光源からの広帯域放射を1次元検出器アレイ上に空間的に分離し、全UVスペクトルを同時に測定する。

同社のシステムではモノクロメータを波長分離を目的に使用していないが、多くの分光システムは使用している。このような場合、UV光源からの光はモノクロメータの入射スリットに入射し、回折格子やプリズムなどの分散素子を用いて成分波長に分割する(図4)。

モノクロメータの出口スリットは、デバイス内を移動する排気サンプルを通過した狭帯域を除く、すべての波長

を遮断する。回折格子やプリズムの角度を変えると出口スリットを通過する波長が変わるため、テスト波長帯域を細かく調整できる。サンプルを通過した光は検出器に照射され、発生した吸収を測定する。こうして、排出ガスの分子組成を算出する。

回折格子を用いるモノクロメータの場合、回折格子の格子周波数は通常1mmあたりの溝の数として算出される。格子周波数が高いほど光学分解能は向上するが、使用可能な波長範囲は狭くなる。一方、格子周波数が低いほど使用可能な波長範囲は広がるが、分解能は犠牲になる。

環境要求事項

このようなシステムの開発は、非常に困難である。なぜなら、極めて高い温度と圧力が要求されるためだ。温度が高いと、光学部品の熔融や熱ストレスによる故障の原因となり、使用できる光学材料の種類が著しく制限される。また、高温は光学アセンブリ内の接着剤のガス放出を引き起こし、システムを汚染する可能性がある。このシステムは、500℃もの高温にさらされるため、高い圧力が要求され、光学システムの密閉性が決定的に重要になる。光学系は、UV光をほとんど吸収せずに通過する必要があるため、利用

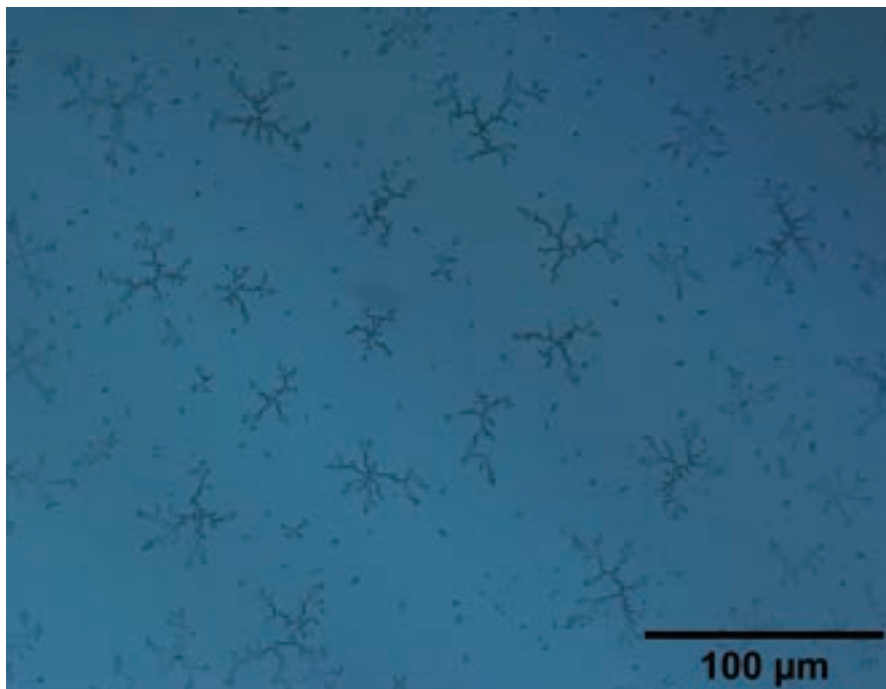


図5 コーティングされていない石英ガラス窓へのUV暴露による汚染の例。しかし、この画像は3W未満のUVレーザー照射を6週間行った後に撮影されたもので、ダンフォスIXA社のガス分析装置とは異なる使用例だが、発生しうるUV汚染の種類を表現するのに役立つ⁽³⁾

できる光学材料も限られている。

光学系のUV劣化

このプロジェクトが直面するもう1つの課題は、UV光学系は寿命が限られる傾向にあることだ。その主な原因は、環境と相互作用する高出力のUV光子による汚染と、光学系のコーティングや基板を破壊するUV光である。どちらも、時間とともに光学部品の性能を劣化させる。

高出力のUV光がシステム内にある微粒子、水蒸気、有機物、その他の汚染物質と相互作用すると、光学系の表面に不要な物質が堆積する可能性がある。排出ガスやその他の空気中に浮遊する分子汚染物質は、一般的に光学系表面に炭素ベースの堆積物を引き起こす。図5に、UVが原因の汚染物質の樹脂状成長の例を示す。

光学系を取り囲むガスとの相互作用も汚染物質の堆積につながるため、シ

ステムに流入する排気はすべて汚染源となる。波長400nm以下のUVの光子エネルギーは、周囲の分子の結合エネルギーと同じスケールで近づくため、UVはこれらの結合の一部を破壊する。これにより、光学系表面を汚染するイオンや分子が生成される。

UV光学系のコーティングや基板材料自体も、高出力のUV光にさらされると光疲労による経時的な劣化の影響を受けやすい。長時間にわたって使用すると故障の原因となり、材料の変色

やその他の変化を生じさせることになる。屈折率が変化して、局所的に強度が増加するレンズ効果を生み出すことがある。また、自己トラップされた励起子が形成され、吸収中心が蓄積されることもある。

これらの影響により、UV光学系は時間経過とともに交換が必要になることがある。しかし、密封、除去、洗浄を適切に行うことで、これらの影響を軽減できる。

ダンフォスIXA社のガス排出分析装置に対する厳しい環境は、システムの光学系および光学機械設計に多くの課題をもたらした。しかし、デバイスは成功を収め、現在では世界中の何千もの船舶の排出ガスのモニタリングに活用されている。

これは環境に対して大きな勝利であり、国際海運で排出されるNO_x、SO₂、NH₃を最小限に抑えるための一歩である。このような汚染が減少すれば、海運の排出ガスが原因とされる心肺および肺がんによる年間死者数を減らすことができるだろう。

要求の厳しい環境で動作する光学システムを設計する際には、特定の環境要求事項について、光学部品の製造業者と議論すべきである。製造業者は、主要な検討事項を案内して、トレードオフを明確に説明し、必要なシステムの性能を保証してくれるだろう。

参考文献

- (1) M. Dwortzan, "Smarter regulation of global shipping emissions could improve air quality and health outcomes," MIT News (Aug. 17, 2021); <https://tinyurl.com/yt4srx2a>.
- (2) H. Ritchie, F. Spooner, and M. Roser, "Causes of death," Our World in Data (Dec. 2019); <https://ourworldindata.org/causes-of-death>.
- (3) B. Arnold, C. Rashvand, L. Willis, and M. Dabney, Proc. SPIE, 12300 (Dec. 2, 2022); doi:10.1117/12.2638404.

著者紹介

コーリー・ボニーは米エドモンド・オプティクス社(Edmund Optics)の主任技術マーケティングエンジニア、サマラ・ゴメスはダンフォスIXA社のマーケティング・コーディネータ。
e-mails: cboone@edmundoptics.com, samara.gomes@danfoss.com
www.edmundoptics.com, www.danfoss-ixa.com