

温室効果ガスモニタリング装置と 関連手法の進化



奈良 英樹

1 はじめに

昨今、世界各地で気候の極端現象が報告されており、それに伴う自然災害の増加が懸念されている。このような極端現象の発生頻度増加の背景には地球温暖化の影響があると考えられている。2015年12月には国連気候変動枠組み条約第21回締約国会議（COP21）で世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃未満に抑えるという目標を掲げた、パリ協定が合意された。国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC：intergovernmental panel on climate change）は、第4次評価報告書の時点で地球温暖化の原因が大気中における人為起源の二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、および亜酸化窒素（N₂O）等の温室効果ガス（GHG：greenhouse gas）の増加にあるとほぼ断定しており、GHGの排出量の削減対策を設定・評価するために各種GHGの全球分布、発生・消滅量（全球収支）の正確な推定が必要である。

2 温室効果ガスのモニタリング

米国のスクリップス海洋研究所のCharles Keelingが、1958年にハワイのマウナロアでCO₂のモニタリングを開始して以来、様々な機関によりGHGの観測が実施されてきた。これらの観測から、GHGの中でも温室効果に最大の寄与を持つCO₂と、それに次ぐCH₄の時間的・空間的な変動が大きいことが明らかになった。このため、CO₂とCH₄の全球分布の正確な推定には、より多くの地域代表性を有するような地点でモニタリングを実施し、それに基づく人工衛星観測や数値モデル計算と組み合わせた解析が必要とされる。

世界気象機関（WMO：world meteorological organization）は全球大気監視（GAW：global atmosphere watch）計画を1989年に開始し、組織的なGHGのモニタリングと解析を行っている（表1）。このGAW計

表1 温室効果ガスモニタリングにおけるCO₂およびCH₄の従来主力装置と赤外レーザー吸収分光法の比較

	NDIR (非分散型赤外分光計)	GC-FID (水素炎イオン化検出器付きガスクロマトグラフ)	IRLAS (赤外レーザー吸収分光計)
測定成分	CO ₂	CH ₄	CO ₂ および CH ₄ (同時)
全球平均濃度 および観測許容不確かさ [†]	407.8±0.1 μmol/mol 0.1 μmol/mol	1869±2 nmol/mol 2 nmol/mol	その他の気体も同時分析成分に選択可能
典型的な測定精度 (±1σ)	0.03 μmol/mol	1.7 nmol/mol	CO ₂ : 0.03 μmol/mol CH ₄ : 0.3 nmol/mol
時間分解能	0.05~1 秒	<10 分	0.01~5 秒
環境因子の変化による影響	大きい	小さい	非常に小さい
校正頻度	1 日に数回	1 日に数回	数日に 1 回
可搬性	高い	低い (水素ガス必要)	高い

[†] 世界気象機関 (WMO: world meteorological organization) による解析。

画の観測拠点の多くは、直接的な人間活動の影響を避けるために遠隔地に地上観測所を設置しているが、航空機や船舶等の移動体もある。これらの拠点では装置の仕様、設置スペースやアクセス等が制限されることが多く、装置が温湿度、圧力、および振動といった環境因子の変化に曝されることもあるため、拠点によって観測データの品質水準が異なる。このため、WMOでは観測手法や観測データの不確かさに関するガイドラインを制定する等、観測データの品質管理に努めており、高水準のデータを取得するために、高い分析能（精度、確度および安定性）を持つ装置が求められている。

3 赤外レーザー吸収分光法の発展

ここ数十年の間、GHGモニタリングでは、非分散型赤外分光計（NDIR：non-dispersive infrared）と水素炎イオン化検出器付きガスクロマトグラフ（GC-FID：gas chromatography-flame ionization detector）が、それぞれCO₂とCH₄の主要計測装置として用いられてきた。この一方で、1980年代の終わりから近赤外レーザーを用いた、赤外レーザー吸収分光法（IRLAS：infrared laser absorption spectroscopy）が急速に発展し、2000年代後半には、GHGの観測に実用十分な性能を持つIRLASが開発された²⁾。IRLAS装置は単体で複数のGHGの同時計測が可能であり、従来装置に匹敵するか、それ以上の分析能と可搬性を有する（表1）。このため、IRLASの導入は、各拠点におけるGHGモニタリングの高水準化に資するだけでなく、ランニングコストと労力の低減にも寄与することから、急速に普及して

いる。英国国立物理学研究所（NPL: national physical laboratory）等の国家計量機関では、IRLASの特性に応じたGHGの標準ガスを開発しており³⁾、WMOの中央校正施設を担っている米国海洋大気庁（NOAA: national oceanic and atmospheric administration）でも、NDIRとGC-FIDを用いていたCO₂とCH₄の標準ガスの校正システムを、IRLASを用いたシステムに切り替えている⁴⁾。このように、IRLASはGHG観測における新たな主力装置として従来装置に取って変わりつつある。

4 赤外レーザー吸収分光法の野外観測への適用

旅客機や船舶等の大型の移動観測プラットフォームによるCO₂のモニタリングは、比較的lowコストで、領域あるいは全球規模での分布を高頻度で効率よく観測することができるため、今までに多くの知見の蓄積に貢献してきた。CH₄についてはGC-FIDの仕様上、移動体を用いた観測が比較的困難であったが、IRLASを用いることでCO₂同様の観測が可能になり、その分布の理解が進んでいる。この一方で、小型の移動体を用いた地域規模での発生源の観測が増えている。

小型の航空機を用いた例では、アマゾン盆地での観測報告がある⁵⁾。それまでの研究で、アマゾン盆地がCH₄の大規模な発生源となっていることが示唆されていたが、当時の観測網では検証が不十分であった。IRLAS装置を搭載した小型航空機による観測の実施により、アマゾン盆地が確かにCH₄の発生源となっていることが確認され、数値モデル解析により、その規模が従来研究の結果に整合することが示された。航空機の他にも、自動車を用いた観測例がある。近年シェール産業が急激に発展した米国では、石油・天然ガス採掘時のCH₄の漏えい規模の推定が急務となっており、油田・ガス田地帯の一つである、ユタ州ユインタ盆地でGPS、風速計、そしてIRLAS装置を車載した自動車による観測が行われた。この観測で、IRLASによるCH₄とその炭素安定同位体比、およびトレーサーとなるエタン（C₂H₆）の観測結果から、油井およびガス井から漏えいした、CH₄の寄与率推定に成功している⁶⁾。

上記の例は有人の移動体によるものだが、無人航空機への搭載用にカスタマイズしたIRLAS装置の開発も進

んでおり、既に観測例も幾つか報告されている。このような観測手法が成熟することで、観測に危険性を伴うような発生源、例えば大規模な森林火災現場等での観測も可能になると期待される。

5 おわりに

IRLASの技術発展により、GHGの計測手法はCO₂やCH₄を主として従来法からIRLASへシフトしつつある。本稿では近赤外レーザーを用いたIRLASを紹介したが、より高感度な中赤外レーザーを用いたIRLASも発展してきている。現時点では安定性や寿命に課題が残るものの、CO₂とCH₄よりも濃度が低いN₂Oや、それらの安定同位体比等の計測も可能となっており、IRLASによる観測の幅が広がりつつある。今後、IRLASの小型・軽量化および高感度化が進むと共に、無人航空機などの発展が著しい新しい分野の技術と組み合わせることで、今後のGHGの観測研究が発展し、個々のGHGの全球分布および全球収支についてより理解が深まっていくものと期待される。

文 献

- 1) WMO: *Greenhouse Gas Bulletin*, **2019**, 15.
- 2) E. Crosson: *Appl. Phys. B*, **92**, 403 (2008).
- 3) P. Brewer, R. Brown, M. Miller, M. Miñarro, A. Murugan, M. Milton, G. Rhoderick: *Anal. Chem.*, **86**, 1887 (2014).
- 4) P. Tans, A. Croftwell, K. Thoning: *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 2669 (2017).
- 5) H. Chen, J. Winderlich, C. Gerbig, A. Hofer, C. Rella, E. Crosson, A. Van Pelt, J. Steinbach, O. Kolle, V. Beck, B. Daube, E. Gottlieb, V. Chow, G. Santoni, S. Wofsy: *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 375 (2010).
- 6) C. Rella, J. Hoffnagle, Y. He, S. Tajima: *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 4539 (2015).



奈良英樹 (Hideki NARA)

国立環境研究所地球環境研究センター炭素循環研究室（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）。東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。博士(理学)。《現在の研究テーマ》主に船舶を用いたアジア・オセアニア域における大気中微量物質の観測研究。《趣味》ドライブ、ロードバイク、ボードゲーム。

E-mail: nara.hideki@nies.go.jp