

〈特集〉

レーザーレーダー手法による二酸化炭素の遠隔計測

杉本伸夫

(独)国立環境研究所 大気圏環境研究領域
(〒305-8506 つくば市小野川16-2 E-mail: nsugimot@nies.go.jp)

概要

温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)の成功によって二酸化炭素、メタンの全球的な観測が可能となり、炭素循環の科学的な理解と監視に関する大きな成果が期待されている。一方、次世代の温室効果ガス観測衛星では、より高頻度、高精度の観測の必要性が指摘され、レーザーレーダー手法を応用した能動的センサーの研究開発が米国、欧州、日本などで行われている。二酸化炭素の $1.6\mu\text{m}$ または $2\mu\text{m}$ の吸収を用いた、変調方式、パルス方式の複数の異なる方式のセンサーが開発されている。本文では、これらの手法と研究開発の動向について報告する。

キーワード：温室効果ガス、二酸化炭素、遠隔計測、レーザーレーダー、ライダー

原稿受付 2010.4.8

EICA: 15(1) 12-15

1. はじめに

GOSAT「いぶき」の成功で全球的な炭酸ガス分布の観測が可能となり大きな成果が期待されている。その一方で、次世代の温暖化ガス観測衛星では、より高頻度、高精度の観測が必要であることも指摘されており、レーザーレーダー(ライダー)手法を応用した能動方式の二酸化炭素観測センサーの研究開発が米国、欧州、日本などで進められている。

太陽光を光源とする受動方式のセンサーでは、原理的に夜の測定ができない他、雲のある領域の測定が困難なため観測頻度が非常に制限される。また、大気中のエアロゾルが測定に影響することも問題とされている。レーザーを光源とするライダー手法では、測定する視野が狭く光路長も正確に測定されるため、雲の切れ目の光路や雲の上端までの測定も可能である。また、エアロゾルの影響も受けにくい。現在、米国ではNASAを中心にASCENDS(Active Sensing of CO₂ Emissions over Nights, Days, and Seasons)が検討され、この中で複数の方式の二酸化炭素測定用ライダーの研究開発が行われている¹⁾。欧州ではASCOPE(Advanced Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth)が提案され、ライダーによる二酸化炭素測定の検討が行われてきた²⁾。これは現在、EXCALIBUR(EXperiment on Carbon dioxide by Lidar for Biosphere and climate URgency)という名称で検討が続けられている。日本でも、情報通信研究機構(NICT)や、三菱電機、宇宙航空研究開発機構(JAXA)、首都大学東京などで二酸化炭素測定用ライダーの研究開発が行われている。なお、ASCENDS、

EXCALIBUR共に、二酸化炭素の計測のみではなく、炭素循環の理解に必要な植生や海洋の観測を含む広い視野に立った検討が行われている。

2. 能動方式二酸化炭素センサーの測定原理

レーザーを用いた温室効果ガスの測定原理は、パルスレーザーを用いてエアロゾルの散乱を利用する差分吸収ライダー(DIAL: Differential Absorption Lidar)または、地表面の反射を利用する長光路差分吸収ライダー(LAS: Laser Absorption Spectrometer)である。後者ではパルスレーザーだけでなく連続波のレーザー(CWレーザー)を用いる方式もある。衛星からの二酸化炭素測定では、エアロゾルの散乱強度が小さいことから、長光路差分吸収方式の検討が主流になっている。現在、二酸化炭素の $1.6\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ のいずれの吸収帯を用いるか、パルスかCWか、直接検波かヘテロダイン検波かなどが論点となっている。

波長の選択では、まず測定対象の吸収線の強度が適当であることが条件となる。二酸化炭素は、 $1.6\mu\text{m}$ と $2\mu\text{m}$ に測定に適する吸収帯を持つ。DIALやLASでは基本的に一本の吸収線を用いて測定を行うが、最近ではレーザーの波長制御技術が進んでおり、吸収線の中心波長ではなく、吸収線の裾の適当な波長にレーザー波長を正確にロックすることができる。これは、測定の最適化において大きな意味を持つ。大気中の分子の吸収スペクトルは圧力広がりにより高度依存性を持ち、低高度ほど線幅が広い。従って、吸収線の中心からシフトした波長では大気下層の吸収の寄与が大き

Table 1 Lidar or laser absorption spectrometer system for measuring carbon dioxide

衛星計画	機 関	波長	光 源	検波方式	検 出 器	文献
GOSAT 後継?	JAXA/三菱電機	1.57 μm	CW-AM 変調：半導体レーザー & ファイバーアンプ	直接検波	InGaAs-フォトダイオード	3, 4)
GOSAT 後継?	NICT	2.0 μm	パルス：固体レーザー	ヘテロダイン検波/ 直接検波	InGaAs-フォトダイオード	5)
ASCENDS	NASA-LaRC/ITT	1.57 μm	CW-AM 変調：半導体レーザー & ファイバーアンプ	直接検波	HgCdTe	1, 6)
ASCENDS	NASA-GSFC	1.57 μm	パルス：半導体レーザー & ファイバーアンプ	直接検波 光子計数	光電子増倍管	1, 7)
ASCENDS	JPL	2.0 μm	CW：固体レーザー	ヘテロダイン	InGaAs-フォトダイオード	1, 8)
A-SCOPE/ EXCALIBUR	DLR	1.57 μm	パルス：光パラメトリック発振器	直接検波	InGaAs-アバランシェフォト ダイオード	2)
A-SCOPE/ EXCALIBUR	IPSL/LMD	2.0 μm	パルス：固体レーザー	ヘテロダイン検波	InGaAs-フォトダイオード	2, 9)
地上観測	首都大学東京	1.57 μm	パルス：光パラメトリック発振器	直接検波 光子計数	光電子増倍管	10)
地上観測	NASA-GSFC	1.57 μm	パルス：光パラメトリック発振器・ アンプ	直接検波 光子計数	光電子増倍管	11)
地上観測	NASA-LaRC	2.0 μm	パルス：固体レーザー	ヘテロダイン/直接	InGaAs-フォトダイオード, HgCdTe-フォトリソスタ	12)

い。言いかえれば、吸収の重み関数が中心波長からの波長差に依存して異なり、シフトが大きいほど低高度の寄与が大きい。一方、二酸化炭素などの分子は大気下層の濃度が高く、また、排出量、吸収量を推定するためには大気下層の濃度変化が重要である。これらのことから、吸収の大きな吸収線の裾の波長を（複数）使って、測定を最適化することが行われている。この観点からは吸収強度の高い $2\mu\text{m}$ 帯が有利と考えられている。

一方、波長の選択では、光源、検出器の特性や技術的な容易性などの観点も重要である。光源としては、 $1.6\mu\text{m}$ 帯では CW の半導体レーザーとファイバーアンプ、光パラメトリック発振器 (OPO) など、 $2\mu\text{m}$ 帯では Tm, Ho: YLF レーザーなどが用いられる。

パルスレーザーを用いるか CW レーザーを用いるかに関しては、エアロゾルの散乱や薄い雲の影響を考えればパルス方式が優れているが、装置の観点からは CW 方式が容易である。検波方式については、吸収測定ではヘテロダイン検波はスペックルの影響が大きく不利であるので、直接検波が主流となっているようである。

Table 1 にこれまでに開発が報告されている主な二酸化炭素測定用の能動センサーを掲げる。次節以下では、これらの中のいくつかの例を紹介する。

3. 能動方式二酸化炭素センサーシステム例

3.1 長光路差分吸収 (LAS) 方式

三菱電機と JAXA で開発されている LAS 方式は、 $1.6\mu\text{m}$ 帯の CW レーザーを用い、吸収波長と参照波

長の 2 波長をそれぞれ異なる周波数で振幅変調して送信し、地表面の反射を受信する。変調周波数によって、2 波長の受信光強度を分離して炭酸ガスの吸収を導出する³⁾。LAS システムのブロック図を Fig. 1 に示す。送信部では、波長ロックした 2 波長の半導体レーザー光をそれぞれ振幅変調した後に結合し、ファイバーアンプで同時に増幅し出力している。受信光は直接検波で受信される。現在、航空機搭載システムが開発され、GOSAT の検証実験に利用されている。LAS では光路長も同時に測定する必要があるが、変調の位相差を利用してこれを実現している。

現在、JAXA では衛星搭載システムの検討も進められている⁴⁾。衛星からの測定では地表までの距離が遠いため、受信望遠鏡とレーザーパワーを大きくする必要があり。望遠鏡直径を 1 m 程度、レーザーパワーを 20 W 程度とすることで衛星搭載システムが可能である。GOSAT などの受動センサーに比べて、視野が狭く、雲の影響を受けるケースが少なく、また夜の測定も可能となるので測定頻度は格段に向上する。

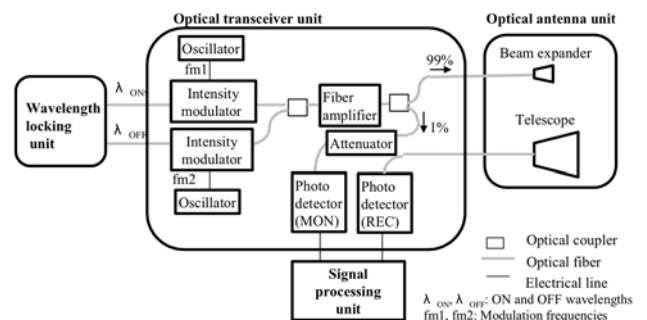


Fig. 1 Block diagram of the LAS system using a CW laser³⁾

但し、CW方式のLASは、測距機能を持っていても光学的に薄い巻雲やエアロゾルの影響を除けない問題が指摘されている。そのため、測距機能の強化や、雲、エアロゾルを独立に測定する後方散乱ライダーとの同時搭載が望まれる。

米国のNASAとITT社でもASCEND計画の中で、ほぼ同様の構成のLASシステムが開発され、これまでに航空機実験が繰り返し行われている^{1,6)}。

NASA Goddardで開発されているパルス方式のLASシステムは、変調方式ではなく1.57 μm 帯のパルスを用いる。また、765 nm帯のパルスを送信して、地表までの測距と酸素の吸収を用いた気圧の測定が行われる。この手法では、地表からの反射光が時間分解して測定されるため、光路内のエアロゾルや薄い雲の影響を受けずに炭酸ガスの吸収が測定される^{1,7)}。

3.1 差分吸収ライダー (DIAL) 方式

DIALでは大気中のエアロゾルの後方散乱と測定対象気体の吸収の両方を利用してレーザービームに沿った気体の濃度分布を測定する。測定対象の吸収の大きい波長と小さい波長の2波長でエアロゾルの後方散乱を測定すると吸収の大きい波長では後方散乱信号の減衰が大きい。この2波長の後方散乱信号の比を解析すれば距離毎に吸収、すなわち測定対象気体の濃度が導出される。ここでは、二酸化炭素測定用DIALの例として、航空機や衛星搭載を目指して開発されているNICTの2 μm コヒーレント方式のシステム⁵⁾と、地上からの観測に特化して開発された首都大学東京の1.6 μm のシステム¹⁰⁾について紹介する。

ヘテロダイン検波を用いるコヒーレント方式のライダーは、本来ドップラーシフトを利用した風速測定的手法として提案された。初期には、遠赤外の炭酸ガスレーザーを用いた研究が行われ、1990年頃から2 μm の固体レーザーを用いたシステムが数多く行われ製品化もされている。コヒーレント方式のDIALは、これを気体分子の吸収測定に応用した技術である。NICTでも、二酸化炭素の吸収測定用のDIALの開発は、風速測定用のコヒーレントドップラーライダーの開発と並行して行われている。NICTのDIALシステムは、2台のCW固体レーザーでインジェクションシーディングしたTm:Ho:YLFレーザーを光源とする。これまでに、地上システムによる測定実験が行われ、水平距離数kmまでの二酸化炭素の測定が実現されている。地上システムのレーザー出力は、80 mJ、繰り返しは30 Hz、受信望遠鏡口径は10 cmである。現在、航空機搭載システムの開発が進められている。2 μm の固体レーザーを用いたDIAL技術は、衛星からの二酸化炭素測定にも応用が期待される。衛星から

の測定ではエアロゾルの後方散乱信号が小さいため、高度分解測定ではなく地表反射を利用したパルスLAS方式が考えられている。しかし、地表面付近をある程度高度分解できれば二酸化炭素収支の推定に有用との議論もあり、今後、重み関数を利用した多波長のLAS測定とDIALとの優位性の比較が必要であろう。

首都大学東京が開発した1.6 μm のDIALは、地上ネットワークによる二酸化炭素の測定が有効であるという考察に基づいて、地上測定用に設計されたものである。**Fig. 2**にライダーシステムのブロック図を示す¹⁰⁾。**Fig. 3**は、このシステムによって測定された二酸化炭素の高度分布の一例である。

レーザーは、分布帰還型(DFB)半導体レーザーでインジェクションシーディングされたOPOで、レーザーの出力は、5 mJ/pulse、繰り返し110 Hzで、5秒毎に2波長が切り替えられる。受信望遠鏡口径は35 cmで、赤外用光電子増倍管を用いてフォトンカウンティングで受信信号が測定される。現在、首都大学東京では、受信系の狭帯域化による昼間の測定や、気

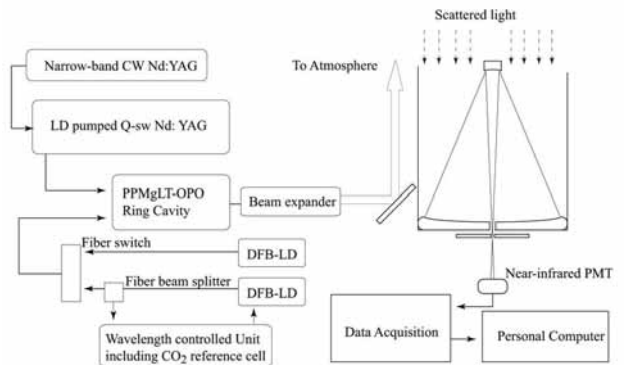


Fig. 2 Block diagram of the 1.6 μm DIAL for measuring carbon dioxide¹⁰⁾

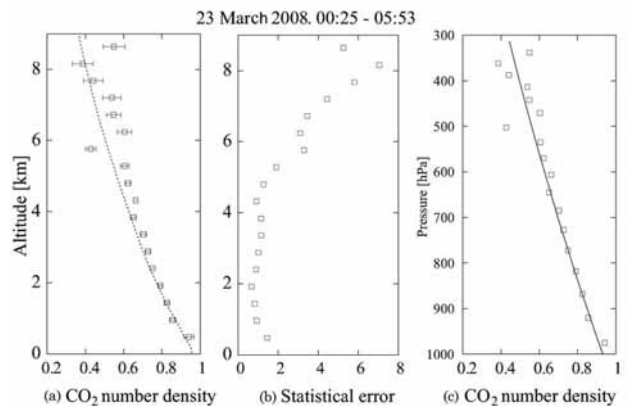


Fig. 3 Example of the observed CO_2 profile and percent error with the 1.6 μm DIAL¹⁰⁾

圧、気温など二酸化炭素の導出で必要となるパラメータを DIAL で同時に測定する手法の研究が行われている。

4. おわりに

本文ではレーザーレーダー手法による二酸化炭素の測定について述べた。同様の手法は原理的にはメタンなど、他の温室効果ガスの測定にも応用可能である。しかし、現在最も実現が期待されるのは、人工衛星からの高頻度、高精度の二酸化炭素の測定であろう。理論的には、 $2\mu\text{m}$ 帯のパルス方式の LAS が優れていると考えられるが、技術的な完成度から、 $1.6\mu\text{m}$ の LAS 方式の実現性が最も高い。CW 方式の LAS の場合、薄い巻雲やエアロゾル影響が問題となる。このため、変調方式の改良による測距機能の強化や、別途、雲エアロゾル検知用のパルスライダーを搭載するなどの工夫が必要である。

最近、国際宇宙ステーションなどを用いた地球観測の検討も行われている。宇宙ステーションは軌道傾斜角が小さく、高緯度域の観測ができないが、その一方、太陽同期でないため、日変化の情報が得られるという利点がある。また、軌道高度が低いいため、能動方式のセンサーの実証実験には最適なプラットフォームと言える。将来の高精度の温室効果ガスの監視技術の実証と、GOSAT や米国が打ち上げを予定している OCO2 などの受動センサーの検証を目的として、能動方式センサーの実証実験が実現されれば非常に大きな意義があると考えられる。さらに炭素循環の把握に必要な植生（樹冠高度など）や大気海洋交換に関するセンサーが同時に搭載されることが望まれる。

参考文献

- 1) NASA Science Definition and Planning Workshop Report, Active Sensing of CO₂ Emissions over Nights, Days, and Seasons (ASCENDS) Mission, July 23-25, 2008 University of Michigan in Ann Arbor, Michigan.
- 2) European Space Agency, Candidate Earth Explorer Core Mission, A-Scope — Advanced Space Carbon and climate Observation of Planet Earth, Report for Assessment November 2008 SP-1313/1
- 3) S. Kameyama, M. Imaki, Y. Hirano, S. Ueno, S. Kawakami and M. Nakajima: Development of 1.6 micron CW modulation ground-based DIAL system for CO₂ monitoring, SPIE Asia-Pacific Remote Sensing 2008, Noumea, SPIE Vol. 7153 71530L-1
- 4) 境澤大亮, 川上修司, 中島正勝: CO₂ カラム観測用レーザーセンサの衛星検討, 第14回大気ライダー観測研究会 2010年3月2日, 東京
- 5) S. Ishii, K. Mizutani, H. Fukuoka, T. Ishikawa, H. Iwai, P. Baron, J. Mendrok, Y. Kasai, T. Aoki, A. Sato, K. Asai and T. Itabe: Development of 2 Micron Coherent Differential Absorption Lidar, 24th Int. Laser Radar Conference, 23-27 June 2008 Boulder, Colorado
- 6) E. V. Browell, M. E. Dobbs, J. Dobler, S. Kooi, Y. Choi, F. W. Harrison, B. Moore III and T. S. Zaccheo: Airborne Demonstration of 1.57-micron Laser Absorption Spectrometer for Atmospheric CO₂ Measurements, 24th Int. Laser Radar Conference, 23-27 June 2008 Boulder, Colorado
- 7) J. B. Abshire, H. Riris, G. Allan, S. R. Kawa, J. P. Mao, E. Wilson, M. Stephen, M. A. Krainak, X. Sun and C. Weaver: Laser Sounder Approach for Global Measurement of Tropospheric CO₂ Mixing Ratio from Space, 24th Int. Laser Radar Conference, 23-27 June 2008 Boulder, Colorado
- 8) G. D. Spiers and R. T. Menzies: Airborne Carbon Dioxide Laser Absorption Spectrometer for IPDA Measurements of Tropospheric CO₂: Recent Results, 24th Int. Laser Radar Conference, 23-27 June 2008 Boulder, Colorado
- 9) F. Gibert, P. H. Flamant, D. Bruneau and C. Loth: Two-Micro Meter Heterodyne Differential Absorption Lidar Measurements of Atmospheric CO₂ Mixing Ratio in the Boundary Layer, Appl. Opt. Vol. 45, pp. 4448-4458 (2006)
- 10) D. Sakaizawa, C. Nagasawa, T. Nagai, M. Abo, Y. Shibata, M. Nakazato and T. Sakai: Development of a 1.6 μm Differential Absorption Lidar with a Quasi-Phase-Matching Optical Parametric Oscillator and Photon-Counting Detector for the Vertical CO₂ Profile, Appl. Opt. Vol. 48, pp. 748-757 (2009)
- 11) J. Burris: Development of a CO₂ DIAL Lidar at 1570 nm, 24th Int. Laser Radar Conference, 23-27 June 2008 Boulder, Colorado
- 12) F. Gibert, G. Koch, J. Beyon, T. Hilton, K. Davis, A. Andrews, S. Ismail and U. Singh: A Preliminary Study of CO₂ Flux Measurements by Lidar, 24th Int. Laser Radar Conference, 23-27 June 2008 Boulder, Colorado