

大気微量成分計測のための赤外吸収レーザーレーダ方式の検討

Analysis of Infrared Absorption Laser Radar Schemes
for Measuring Atmospheric Trace Species

小林 喬郎 , 植木 雅敬 , 西川 善栄

Takao Kobayashi, Masataka Ueki, Yoshie Nishikawa

福井大学工学部

Faculty of Engineering, Fukui University

Infrared absorption laser radar schemes are analyzed for global observation of the atmospheric trace species. Three types of the absorption schemes are compared ; (1) long-path absorption spectrometer (LPS), (2) long-path absorption lidar (LPAL), and (3) differential absorption lidar (DIAL). By using tunable light sources such as optical parametric oscillators or optical mixing devices, most of the trace species can be measured with column average or range resolved modes in airborne or mobile systems.

はじめに。最近に至り、赤外域での広帯域チューナブル光源として非線形光学効果を利用した光パラメトリック発振器 (OPO) 及び差周波光混合発生法 (DFG) の研究が進展してきた。そこで、これらのチューナブル光源と直接検波法を併用した大気微量分子を計測するレーザーレーダとして、以下の3種類の吸収方式について特性の検討を行い、実現可能性を示す。

(a) 長光路吸収法 (Long-Path Absorption Spectrometer; LPS)

コーナリフレクタ等の反射鏡によりレーザー光を折り返して、2波長差分吸収法や微分吸収法によって光路中の平均分子濃度を求める構成である。

(b) 長光路レーザーレーダ (Long-Path Absorption Lidar; LPAL)

地表面や海面などの地形物ターゲット (Topographic target) を散乱体としてレーザー光を受信し、差分吸収法によって光路中の平均分子濃度を測定する方式である。

(c) 差分吸収レーザーレーダ (Differential Absorption Lidar; DIAL) 大気のエアロゾルを散乱体としてミー散乱を受信し、2波長差分吸収法を適用することによって分子の空間分布を測定する方式である。

大気微量分子のスペクトル 大気分子の吸収スペクトルのデータベースとして、AFGLの“HITRAN”を、また大気吸収モデルとして“FASCODE”を利用した。大気透過スペクトルの例として、Fig. 1 に波数 1060 cm^{-1} (波長 $9.4 \mu\text{m}$) 付近における大気の主には O_3 による透過率を示す。光路長として高度10kmから地表を見た場合とし、測定のスเปクトル分解能 $\Delta\nu = 0.03 \text{ cm}^{-1}$ を仮定している。

次に、Table 1 に大気分子の吸収線の波数と最大吸収係数 $\alpha (= N\sigma)$ を示す。ここで、スペクトル幅 $\Delta\nu = 0.1 \text{ cm}^{-1}$ と仮定した。この結果より、微量分子の多くは大きな吸収係数を持っていることが分る。

最小検出可能分子濃度 Fig. 2 に DIAL、LPAL、LPS の各方式での最小検出可能分子密度 N_{min} の測定距離 (または光路長) による変化の様子を示す。ここで、システムパラメータはレーザーパルス出力エネルギー $E_0 = 100 \text{ mJ}$ 、パルス幅 100 ns 以下、集光鏡面積 $A_r = 0.28 \text{ m}^2$ ($0.6 \text{ m}\phi$)、全効率 $K = 0.1$ 、検出器 $NEP = 4.0 \times 10^{-11} \text{ W}$ 、帯域幅 $B = 10 \text{ MHz}$ 、距離分解能は DIALでは $L = 100 \text{ m}$ 、LPALでは 50 m 、大気吸収係数 $\alpha = 0.1 \text{ km}^{-1}$ 、LPAL でのターゲットの反射率 $r = 0.1$ 、大気の体積散乱係数 $\beta = 10^{-8} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ と仮定している。

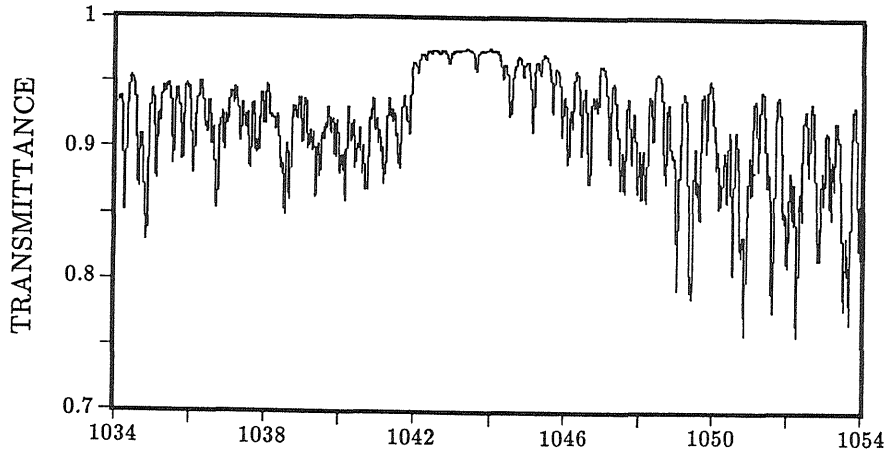


Fig. 1 Transmission spectrum of the atmosphere.
(1034~1054 cm⁻¹, virtual path: 0~10 km)

また、DIALでは大気分子の分布状として空間にほぼ様な分布と局所的な分布との比較を行っている。また、LPS方式では他の方式と異なり極めて小出力のパルスレーザやCWレーザ(出力100mW以下)でも十分に高いS/Nが得られるため、総合誤差 ϵ をパラメータとして選んで N_{min} を示した。

Fig. 2の結果より次の様な結論が得られる。(1) DIALでは、距離分解100mで $m=10^4$ のパルス積算により数kmまで1~10ppbの分子濃度の測定ができる。(2) LPALでは、 $m=1$ の単一パルス測定でも約20kmまでの地形物散乱体に対し、0.1~1ppbの区間平均濃度の高感度測定ができる。(3) LPSでは、光路長を数10km、総合誤差 ϵ を 10^{-3} 以下にすれば10ppt程度の極微量分子濃度の測定の可能性がある。

衛星搭載型レーザレーダとしては赤外域の直接検波法のDIAL方式では実現困難であるが、将来的にはヘテロダイン検波法での動作が期待できる。また、航空機搭載型で地表面をターゲットとするLPAL方式では、直接検波法でも大気微量分子のコラム量のグローバル計測は十分な実現可能性がある。

Table 1 Absorption line frequencies and absorption coefficients of atmospheric molecules.

Mol.	Frequency		Coeff. ⁽¹⁾ atm ⁻¹ cm ⁻¹	Mol.	Frequency		Coeff. ⁽¹⁾ atm ⁻¹ cm ⁻¹
	cm ⁻¹	μ m			cm ⁻¹	μ m	
SO ₂	517.8	19.31	1.8	NH ₃	789.5	12.67	1.8
	1151.7	8.68	1.6		950.3	10.52	150
	1362.0	7.34	17		1630.2	6.13	18
NO ₂	1605.5	6.23	0.92	CO	2096.1	4.77	1.2
	1616.9	6.19	36		2143.3	4.67	120
	2906.1	3.44	1.7		4260.1	2.35	0.93
O ₃	1042.1	9.60	11	CFC -12	920	10.87	100
	1103.1	9.01	0.9		1102.0	9.07	6.9
	2110.8	4.74	0.93		1161.1	8.61	28
CO ₂	667.4	14.98	80	CH ₄	1310.8	7.63	26
	2336.6	4.28	38		3018.9	3.31	58
	2349.1	4.26	1000		6005.0	1.67	0.3
N ₂ O	1284.9	7.78	45	H ₂ O	1594.7	6.27	78
	2209.5	4.53	15		3755.9	2.66	62
	2223.8	4.50	270		5331.3	1.88	7.5
NO	1842.9	5.43	0.069				
	1876.0	5.33	18				
	3723.9	2.69	0.29				

(1) Spectral width $\Delta\nu = 0.1 \text{ cm}^{-1}$

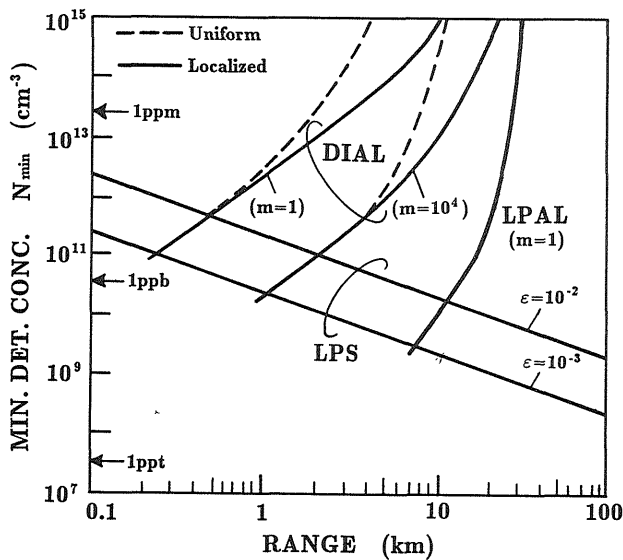


Fig. 2 Range dependence of the minimum detectable concentrations for three absorption schemes.

(m: pulse averaging number, ϵ : detection accuracy)