

Abstract

The present study aims at defining objectives of satellite-borne lidar (laser radar) measurements of the global atmosphere and establishing the specifications of a lidar system to be developed in the near future. To do this, numerical simulation studies, investigations on data utilization, and surveys on elemental technique feasibility were carried out. Specifications of a lidar for a small-sized satellite, which might be launched by a J-1 rocket, was defined on the basis of results from these studies.

It was shown that a lidar system for a small-sized satellite could be developed with the limits of the power consumption of 150 W and the mass of 150 kg, which could be applied to global observations of clouds and stratospheric dense aerosols after major volcanic eruptions.

1. はじめに

本報告は、地球環境観測における人工衛星を利用したライダー（以下、「スペースライダー」と呼ぶ）観測の意義と技術的な実現性に関し、環境庁地球環境研究総合推進費により実施した、平成3年度から6年度までの調査結果を取りまとめたものである。調査に当たっては、(財)光産業技術振興協会に調査委員会を設置し、有識者の参画を得た。

既に、地上からのライダー観測は多くの実績が積み、その有用性が実証されている。また、1994年9月にはスペースシャトルを利用した雲・エアロゾル測定用のライダー観測実験が世界に先駆けて、米国宇宙航空局(NASA)により試みられた(LITE実験)。シャトルの場合、積載重量、消費電力等のリソースの点で、地上実験と変わらないほどの条件に恵まれている。しかしながら、長期的な観測にシャトルを用いることは出来ないため、人工衛星を利用した観測システムの開発が必要となる。衛星搭載を考える場合には、重量、消費電力の厳しい条件のもとでの機器開発が不可欠であり、自ずから機器仕様を制限を設けざるを得ない。

スペースライダーの検討において、レーザー波長、レーザー出力、受信望遠鏡口径、検出系等、主要要素サブシステムの仕様と、重量・消費電力、観測性能(観測精度、鉛直分解能、水平分解能)との間に、相互に依存するあまりに多くのトレードオフの関係があるため、ある程度、搭載する衛星を固定して考えないと、システム仕様を一意に決めることが非常に困難である。そこで、J-1ロケットで打ち上げられる程度の専用の小型衛星を想定し、比較的厳しい重量・消費電力の制限のもとで実現可能な、スペースライダーシステムの提案を行うこととした。

本報告で提案するスペースライダーは、限られたリソースのもとで、可能な限りの観測要求に応えるものである。このことは、しかしながら、実用的な観点から見て、性能的に不十分であるということを意味するものではない。衛星の大型化等、リソースの条件が緩和されれば、観測精度の向上、観測項目の追加、空間分解能の向上等、種々の改良を図ることが出来るという意味で、設計のベースラインを与えるものである。

2. スペースライダー観測の意義

本調査では「地球温暖化に及ぼす雲の効果」、「地球の気候と雲の放射特性」、「大循環気候モデルにおける雲の問題」、「オゾン層破壊に関連する雲・エアロゾル」という観点から気象・気候の専門家を交えた検討会を開催し、観測の意義について検討した。

取りまとめると、地球温暖化の機構を考える上で雲の果たす役割を明らかにすることが極めて重要である一方で、雲のグローバルな分布、出現高度や、雲の光学的な性質あるいは放射に関する諸量の正確な情報が欠如している事実が明らかにされ、これらの観測の重要性が指摘された。従来の受動的な衛星センサーによる観測データだけでは、そのような情報を抽出することは困難であり、また地上からのライダー観測では小数の観測点だけとなることから、これまでのところ十分なデータの蓄積にまで至っていないのが現状である。

スペースライダーは能動的(アクティブ)センサーであり、雲の高さ、厚さ、オーバーラップした雲の情報に水平的な広がりとともに観測できるという大きな利点を有している。特に、巻雲のグローバル観測に果たすスペースライダーの有効性が明らかにされた。また、その他のセンサー(受動的センサー、マイクロ波センサー)等との複合的な観測データの利用によって、ライダーだけでは得にくい高次の情報が抽出できる可能性が指摘された。

衛星の軌道が、観測対象領域を制限することに考慮を払う必要がある。軌道傾斜角(赤道上空を衛星が通

過するときの軌道が赤道となす角度) が小さいとき、両半球の高緯度地域の上空は衛星が通過しない。極成層圏雲を観測対象とするならば、衛星を極軌道に乗せる必要がある。しかしながら、J-1ロケットで打ち上げられる小型衛星の場合、極軌道をとらせることは燃料重量の点で非常に困難とされている。その反面、低軌道傾斜角の衛星として、赤道を挟む低緯度地方の上空を繰り返し観測することが可能であり、熱帯域の雲システムに関する観測に貢献することが出来る。

3. スペースライダーの実現可能性

近い将来に実現可能なスペースライダーの具体的な仕様を提案することを目的に、衛星関連機器メーカーの協力を得て、仕様の検討を行った。以上に述べたような検討結果を踏まえて、スペースライダーの目的を極成層圏雲を含む雲の全球的な観測においた。また、仕様検討に当たっての指針とするために、ある程度の機器仕様のガイドラインと、観測空間分解能の要求値を与えた。

すなわち、衛星としては、宇宙開発事業団で検討が進められているJ-1ロケットで打ち上げが可能な小型衛星クラスの衛星を想定した。また、観測目的をグローバルな雲(極成層圏雲を含む)の3次元分布の測定に置き、昼夜の別なく1年間の観測が行えるものとする。さらに、次の前提条件をおいた。ここで、小型衛星を想定したことから、スペースライダーに許容される重量、消費電力は150kg、150W程度と、きわめて厳しい条件となっている。

(1) 衛星高度	500 km
(2) 消費電力	150W以下
(3) 寸法	100 cm (x) × 100 cm (y) × 70 cm (z) 以内 (但し、z方向が地球指向面)
(4) 質量	150 kg以下
(5) 熱制御	独立熱制御とする
(6) 環境条件	J-1ロケット搭載機器条件による
(7) レーザー光源	波長1 μm付近、出力500 mJ/パルス程度、繰返し10~50パルス/秒程度(可能な限り大きくする)とする。眼への安全性を考慮して地上において口径300 mm以下の望遠鏡で観測しても眼に損傷を与えないこと
(8) 受信鏡口径	100 cm程度
(9) 衛星進行速度	7.5 km/秒
(10) 空間分解能	衛星直下の雲について、高度分解能100 m、水平分解能1.5 kmで測定する。
上記前提条件(2)、(3)、(4)はミッション機器(スペースライダー)のみの総量である。	

4. 小型衛星搭載用スペースライダーの提案

4.1 提案仕様

概念検討を依頼した衛星機器メーカー3社からの提案内容をもとに、小型衛星搭載用のスペースライダーシステムとして、表1に示す仕様を提案する。但し、レーザー結晶(波長)、レーザーパルス当たり出力(繰返し数、レーザービーム拡がり角)の選択は、今後の実設計における検討結果を待つこととし、それぞれの可能性を併記した。光検出器として、ここでは仮にSi-APDを採用した。また、このときの重量、消費電力は表2に示す程度になると見積もられる。それぞれの値は比較的合理的なものになっている。

4.2 観測性能の評価と、観測可能性

(1) 数値シミュレーション条件

次に定める大気モデルを用いて、夜・昼別に受信光電子数、S/N比に関する評価を行う。昼間は、バックグラウンドの違い(地表面または低層雲上面(2ケース))を考慮する。大気散乱は、以下に示す空気分子、エアロゾル、巻雲から構成されるものとする。なお、地上高度をz(m)とする。

なお、低層雲は仮想的に高度0 kmに上端を持つものとし、低層雲からのレーザー光の散乱は計算しない。しかしながら、低層雲の後方散乱係数は、巻雲の後方散乱係数に比較しても十分大きいと考えられるので、巻雲からの散乱以上の散乱光が受信出来ると考えてよい。なお、低層雲による背景光輝度に関しては、内野(1995、私信)のデータによった。また、極成層圏雲は巻雲モデルで代表させた。

上により与えた大気モデルで計算される後方散乱係数の高度分布を、図1に示す。受信光電子数はいずれも、高度分解能(d)、水平(衛星進行)方向分解能(L)に比例することから、S/Nはd、Lの平方根に比例する。一方、上式の分母において背景光成分が卓越するときには、S/Nは分子の項に比例する。すなわち、エアロゾルあるいは雲の後方散乱係数に比例する。

(2) シミュレーション結果に基づく観測可能性の評価

表1に示した提案仕様に基づいて、観測性能を計算した。レーザー1パルス当たりのエネルギーを小さくする代わりに受信視野角を狭めることで、同じ観測性能(S/N比)を保ちながら、アイセーフティを確保することが出来る。したがって、表1中の、2種のレーザー出力等の仕様は、このシミュレーションでは区別する必要がない。以下に示す結果の図は、高度分解能(d)が100 m、水平(衛星進行)方向分解能(L)が1.5 km(測定時間0.2秒)の場合のものである。図1に、それぞれの条件での測定のS/Nを、同様に高度の関数として描いている。

Table 1 Specifications of a space lidar

laser wavelength (nm)	around 1060
laser energy (mJ/pulse)*	50 / 500
pulse repetition (pulse/sec)	100 / 10
transmittance of transmitting optics	0.85
beam divergence (mrad)	0.1 / 0.3
diameter of receiving telescope (m)	1.0
effective area of telescope (m ²)	0.7
field of view (mrad)	0.1 / 0.3
transmittance of receiving optics	0.1
filter band width (nm)	0.1
photon counting	
detector	Si-APD
quantum efficiency	0.02
dark count	100
analog detection	
detector	Si-APD
quantum efficiency	0.3
multiplication factor	100
noise factor	0.003
accumulation number	20 / 2
vertical resolution (m)	100
horizontal resolution (km)	1.5

*Two possibilities of pulse

Table 2 Mass and power assignment

Mass (kg)	
receiving telescope	48
receiving optics/detectors	5
transmitting optics	2
laser oscillation	10
laser power supply	30
signal processing	10
power supply	7
thermal control	6
structures	25
harness and others	7
total	150
Power (W)	
laser oscillator/power supply	80
detectors	10
signal processing	22
power supply	10
thermal control	10
others	18
total	150

空気分子の後方散乱係数 ($\lambda = 532 \text{ nm}$)

米国標準大気によれば対流圏におけるスケールハイトは約 7 km ($\pm 1 \text{ km}$) であるので、次式で近似する。

$$\beta_2(z) = 1.54 \cdot E-6 \exp(-z/7000)$$

散乱パラメータ

$$S_1 = 8 \pi / 3$$

波長依存性

$$\beta_2(\lambda) \propto \lambda^{-4}$$

エアロゾルの後方散乱係数 ($\lambda = 532 \text{ nm}$)

$$\beta_1(z) = 2.47 \cdot E-6 \exp(-z/2000)$$

$$+ 5.13 \cdot E-9 \exp[-(z-20000)^2 / 6000^2]$$

散乱パラメータ

$$S_1 = 50$$

波長依存性

$$\beta_1(\lambda) \propto \lambda^{-1}$$

巻雲の後方散乱係数 ($\lambda = 532 \text{ nm}$)

$$\beta_c(z) = 3.0 \cdot E-5 \cdot \exp[-(z-10000)^2 / 1500^2]$$

$$= 0 \quad \text{for } z = 9000\text{m} - 11000\text{m}$$

$$\text{for } 0\text{m} - 9000\text{m} \text{ 及び } 11000\text{m} - 50000\text{m}$$

散乱パラメータ

$$S_c = 10$$

波長依存性

$$\beta_c(\lambda) \propto \text{const}$$

バックグラウンド輝度 ($\lambda = 1000\text{nm}$ 付近)

(夜間はいずれも、0とおく)

地表面 (Aを地表面アルビードとする)

$$P_b = 0.043 \text{ W/m}^2/\text{nm/sr}$$

$$(P_b = I_b \cdot A / \pi : I_b = 0.668 \text{ W/m}^2/\text{nm}, A = 0.2)$$

低層雲上面 (Aを地表面アルビード、 τ を低層雲の光学的厚さとする; 内野、私信 (1995))

$$P_{bc} = 0.11 \text{ W/m}^2/\text{nm/sr}$$

$$(A = 0.2, \tau = 16, \text{太陽天頂角} = 30^\circ)$$

$$= 0.23 \text{ W/m}^2/\text{nm/sr}$$

$$(A = 0.2, \tau = 128, \text{太陽天頂角} = 30^\circ)$$

空気分子による散乱成分、背景光成分は精度よく求められるものと仮定して、S/N計算は、以下の計算式により行う。

$$S/N = n_a / n_t^{1/2}$$

$$= n_a / (n_a + n_m + n_b)^{1/2}$$

ここで、

n_t は総受信光電子数 ($n_t = n_a + n_m + n_b$)

n_a はエアロゾル及び巻雲による受信光電子数

n_m は空気分子による受信光電子数

n_b は背景光 (地表面または低層雲上面) による受信光電子数

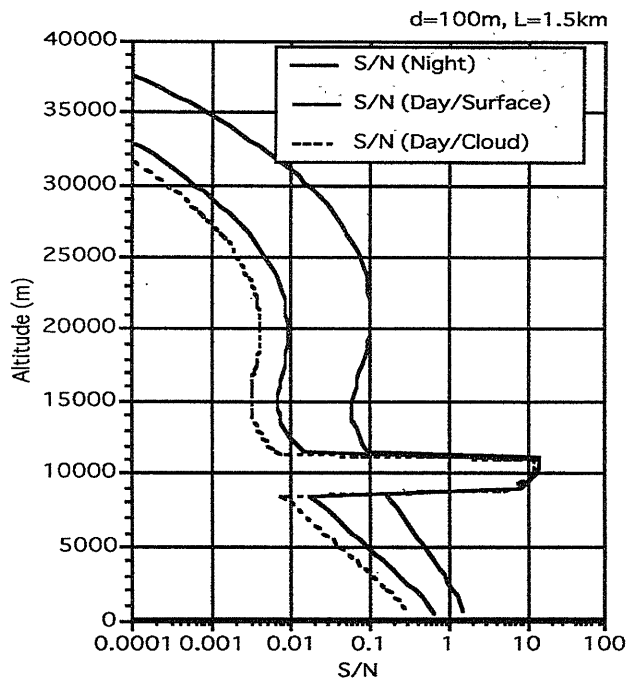


Fig. 1 Signal to noise ratios for space lidar measurements during night and day. Lower boundary is cloud deck or ground surface.

大気大循環数値モデルの改良に向けて、そのグローバルな測定が期待されている。

成層圏エアロゾルについては、ここで与えたエアロゾル分布（バックグラウンドエアロゾル）に関する限り、測定は非常に難しい。高度分解能を1 km（10倍）、水平分解能を300 km（2.00倍）程度まで落とせば、S/Nは4.5倍程度増大し、夜間であればエアロゾル層の中央部などの測定は可能である。

成層圏エアロゾル量が大规模火山爆発の直後のように、バックグラウンド条件に比べて非常に増大している時期には、観測が可能である。例えば、成層圏エアロゾルが上で与えた大気モデルに比べて10～100倍程度多い場合には、ある程度空間分解能を落とせば、十分な精度で成層圏エアロゾルが検出される。

5. おわりに

スペースライダーによるグローバルな雲・エアロゾルの分布の観測は、地球の気候システムの変動メカニズムの理解を深め、気候予測モデルの開発・検証を行う上で、非常に重要なデータを提供する。これらの観測データは、たとえ短期間のものであっても、その価値はきわめて高い。しかし、本来、地球観測データのうちでも大気環境データに関しては、長期に亘って高頻度でデータを取得することが望まれるものである。スペースライダーにあっても、長期の継続観測の可能性を追求する必要がある。

一方、ライダーによる観測と、その他のパッシブな（受動的）雲画像センサーなどとの複合観測は、雲の3次元的な分布とその変動を理解する上で、きわめて有用である。したがって、本調査報告で提案したような専用小型衛星によるスペースライダー観測だけでなく、その他のセンサーとの組み合わせも考慮した複合観測システムへ発展させることも検討すべきである。

本調査では、今後の検討のベースラインを提供する目的で、小型衛星に搭載するスペースライダーシステムの仕様を提案した。大型衛星への搭載、あるいはスペースステーションの暴露部（JEM）の利用など、小型衛星以外にもスペースライダーを搭載する可能性はあり得る。その場合には、今回提出した仕様をベースとして、それぞれの飛翔体の特性、リソースに応じた改変を加えることで、検討を進めることが出来る。また、オゾン、水蒸気等の気体成分測定用のDIALシステム、風測定用のドップラーライダーシステムなど、いずれも、本調査で検討した雲/エアロゾル測定用のライダー技術が基本となるものであり、将来のスペースライダー開発計画の第一弾として、雲/エアロゾル測定用スペースライダーの実現が望まれる。

参考資料

笹野・小林（編）：衛星搭載レーザーライダーによる地球規模大気環境の評価に関する調査報告（4）最終報告書、国立環境研究所資料F-82-95/NIES、96pp、1995

これによれば、高度10 kmにある巻雲の測定は昼夜を問わず、S/Nが10程度で行え、巻雲の雲頂高度、厚さが、推定出来ることが分かる。また、ここでは計算していないが、地表面や低層雲は巻雲に比較して、十分に大きな後方散乱係数を有していると考えて差し支えないから、地表面の形状、低層雲雲頂は、巻雲の存在下でも十分な精度で測定される。低層雲の厚さ、構造の測定可能性については、低層雲そのものの光学的厚さに依存する。

大気低層のエアロゾル層の測定は、ここで与えた観測条件のもとでは、S/Nの観点からは非常に難しい。しかしながら、都市域の大気汚染現象などの局所的なエアロゾル分布構造を対象とするのであれば、水平分解能1.5 kmである必要は全くない。大陸上あるいは海洋上の大気境界層の厚さの推定などを目的とするならば、水平分解能は数十 kmから百数十 kmまでが許される。そのような場合にはS/N比は10倍程度改善されることから、本システムで測定が可能となる。大気境界層の厚さは、大気境界層における風速、気温分布や、熱、水蒸気、運動量の鉛直輸送に関するパラメタリゼーションにおいて、重要なパラメータのひとつであり、