

衛星搭載レーザーレーダーによる
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

Feasibility study on space lidars for measuring
global atmospheric environment No.4
Final Report

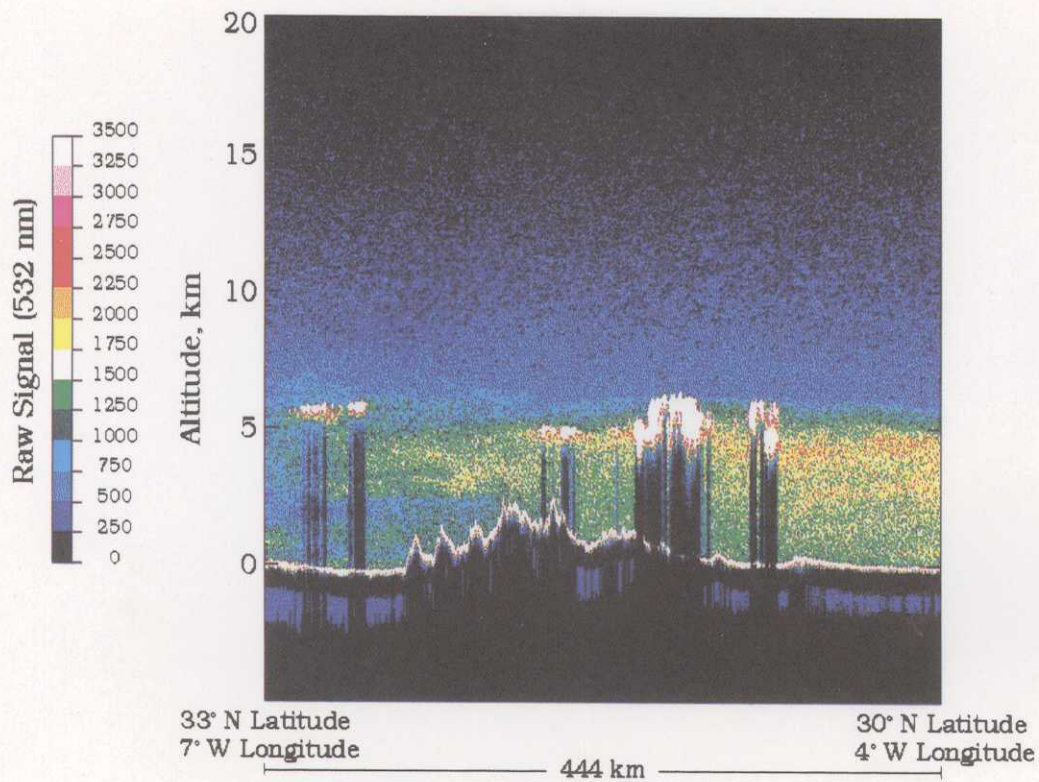
笹野泰弘・小林喬郎¹ 編
Edited by Y. Sasano and T. Kobayashi¹

地球環境研究グループ
¹客員研究員(福井大学工学部)
Global Environment Division
¹Guest Researcher (Faculty of Engineering, Fukui University)

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立環境研究所

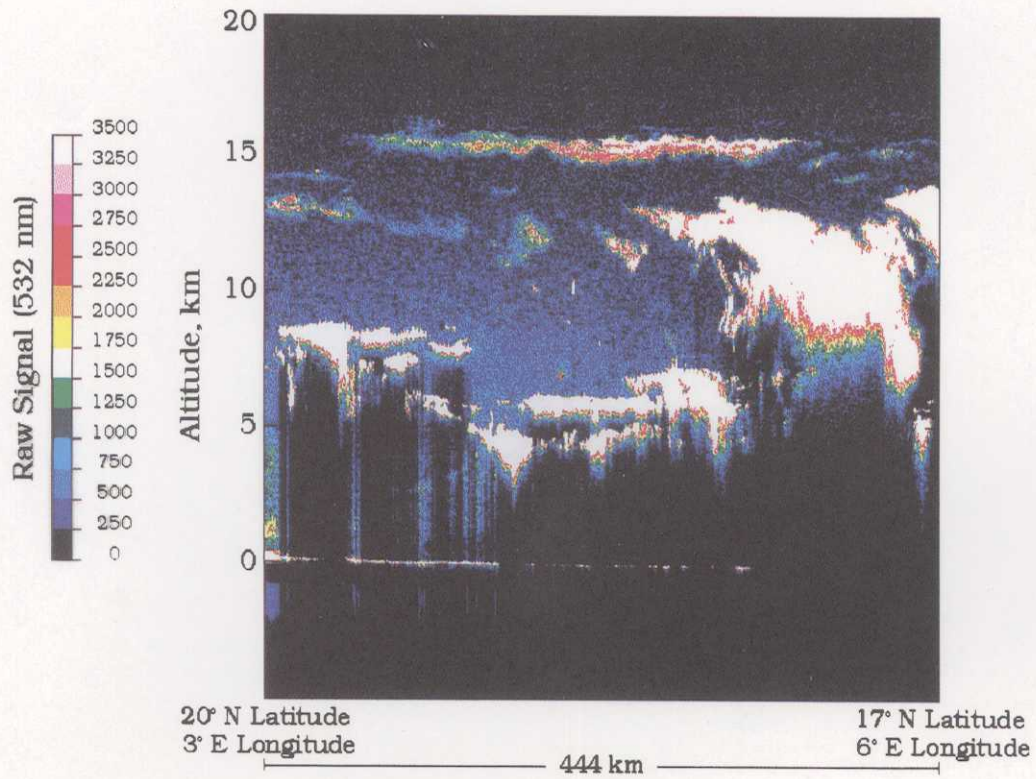
LITE Measurements Over Northwestern Africa, Atlas Mountains



LITE観測例 - 1

アトラス山脈(北西アフリカ)上空を高度-水平距離の2次元図として表示されたLITEの生データ(波長532nm)。1994年9月12日(1時43分25秒)GMTから60秒間、スペースシャトルがアトラス山脈(北西アフリカ)上空において北西から南東に向けて飛行中に、ライダーを直下の方向に向けてデータを取った。山脈の上空及び南西部がエアロゾル(ダストあるいは砂)層でおおわれている。エアロゾル層の一部は大西洋に向かって北西方向に延びている。部分的に厚い雲に遮られて雲の下の地表面が観測されていない。

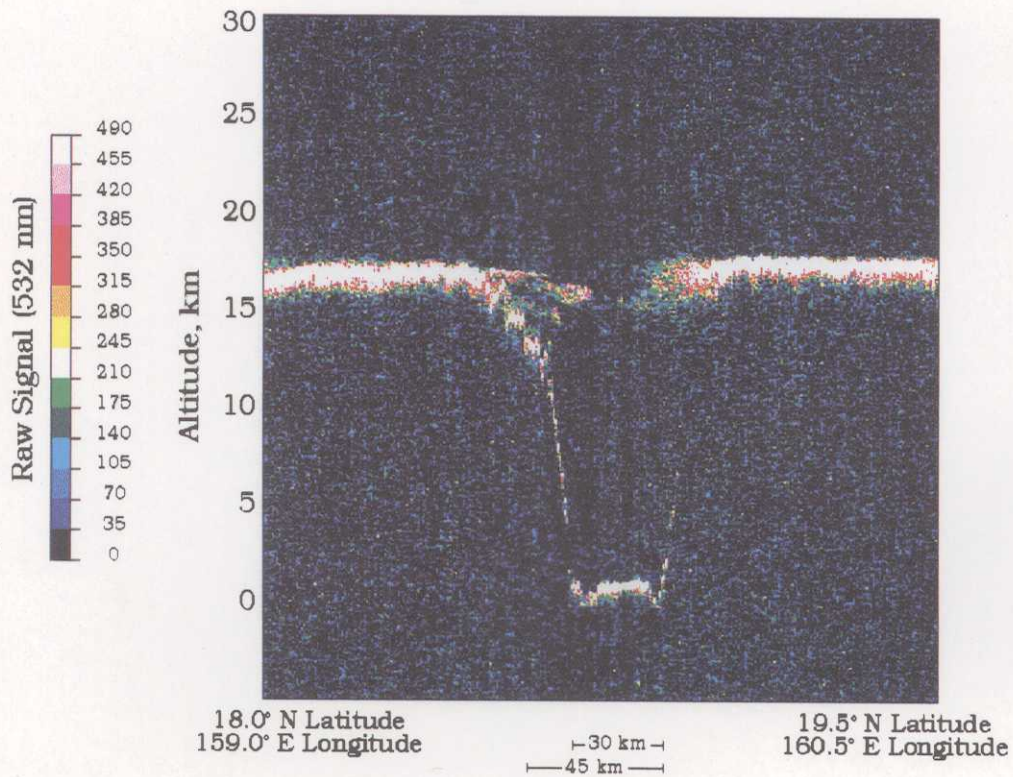
LITE Measurements Over West Africa



LITE観測例 - 2

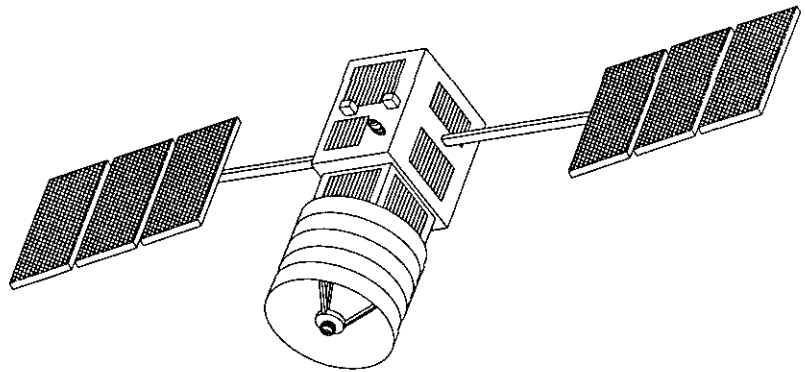
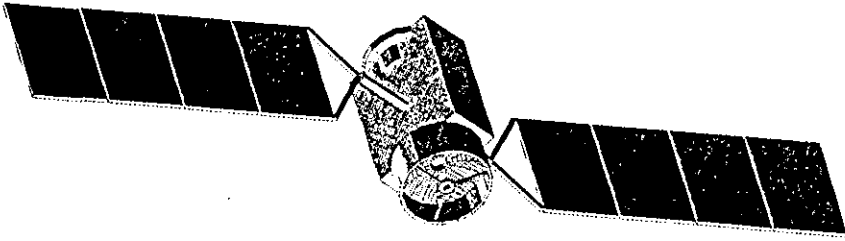
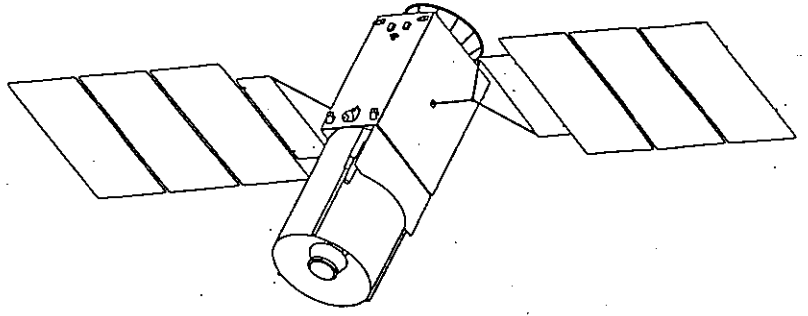
西アフリカ上空。1994年9月12日(1時47分25秒) GMTから 60秒間。熱帯収束帯の上空で雲の生成域を示している。上空の薄い雲を通して多層雲の構造が観測されている。

LITE Measurements Over Typhoon Melissa



LITE観測例 - 3

太平洋上の台風の目の断面図。1994年9月14日(3時57分03秒) GMTから 60秒間。台風の目の回りが高度15-17kmの背の高い巻雲で囲まれている。目の内側では、上層の雲層から海面付近の低層雲にまで雲の壁が延びている。目の大きさは、高度17kmで45kmくらい、海面付近で30km程度である。



スペースライダーイメージ図

序

本調査は、平成6年度環境庁地球環境研究総合推進費による「オゾン層の破壊」分野の研究のうち、新型レーザーレーダー計測技術の開発に関する研究の一環として行ったものである。

本調査の実施に当たり、(財)光産業技術振興協会に調査を委託し、同協会の下に専門家から成る調査委員会を設置し検討を進めた。調査委員会は福井大学工学部の小林喬郎教授を委員長とし、レーザーレーダー等のリモートセンシング研究者、衛星システムの専門家、レーザー、光学部品、電子機器等の開発技術者等を擁するもので、合計3回の調査委員会を開催し、議論を行った。調査委員会では、平成3年度以来の調査検討結果を踏まえて、近い将来実現可能と考えられる、衛星搭載用のレーザーレーダーシステムの提案を行うに到った。

本書は、平成6年度調査委員会における、これらの検討結果を主として取りまとめたものである。また、国立環境研究所が衛星機器メーカー3社に依頼して実施した、システム検討の結果報告書の一部を、参考資料として巻末に付した。広く関連研究者、行政担当者ならびに宇宙開発関連の担当者の皆様の参考としていただくため、国立環境研究所の出版物(資料集)として発行するものである。

調査委員会の構成を次頁に記し、ここに委員の先生方ならびに事務局として取りまとめに当たられた(財)光産業技術振興協会に謝意を表します。

地球環境研究グループ
衛星観測研究チーム
笹野 泰弘

1994年（平成6）年度 衛星搭載レーザーレーダー調査委員会 名簿

（敬称略・順不同）

委員長	小林 喬郎	福井大学 工学部 電子工学科 教授
委員	浅井 和弘	東北工業大学 工学部 通信工学科 教授
”	石井 重夫	宇宙開発事業団 筑波宇宙センター 技術開発本部 要素技術研究部 観測技術研究室 副主任開発部員
”	板部 敏和	郵政省 通信総合研究所 地球環境計測システム部 光計測研究室 室長
”	川田 恭裕	宇宙開発事業団 筑波宇宙センター 技術開発本部 システム技術研究部 軌道上システム研究室 副主任開発部員
”	輿石 肇	(財)リモート・センシング技術センター 技術参与
”	斎藤 保典	信州大学 工学部 情報工学科 助教授
”	杉本 伸夫	環境庁 国立環境研究所 大気圏環境研究部 高層大気研究室 室長
”	中島 正勝	宇宙開発事業団 地球観測システム本部 地球観測衛星グループ 副主任開発部員
”	永井 智広	気象庁 気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 第三研究室 主任研究員
”	鈴木 誠司	浜松ホトニクス(株) 電子管事業部 技術部 応用開発グループ 主任部員
”	辰巳 賢二	三菱電機(株) 電子システム研究所 光・マイクロ波機器開発部 レーザー・光制御グループマネージャー
”	津野 克彦	(株)東芝 小向工場 宇宙設計部 設計第一担当 主務
”	三浦 紳治	(株)ニコン 特機事業室 特機設計部 第2グループ・リーダー
”	安田 升	日本電気(株) 無線事業本部 誘導光電事業部 主管技師長
ワザナハ	笹野 泰弘	環境庁 国立環境研究所 地球環境研究グループ 衛星観測研究チーム 総合研究官
事務局	長 富士夫	(財)光産業技術振興協会 開発部 主査
”	高野 洸	(財)光産業技術振興協会 開発部 主幹

目 次

・ LITE観測例	
・ スペースライダーイメージ図	
・ 序文	
・ 1994(平成6)年度 衛星搭載レーザーレーダー調査委員会 名簿	
1. はじめに	1
(参考)ライダーの原理	1
2. 調査の背景と結果の概要	3
2.1 調査の背景	3
2.2 調査結果の概要	4
2.2.1 スペースライダー観測の意義	4
2.2.2 観測シミュレーションの結果	6
2.2.3 技術的検討結果	6
(1) レーザー光源	
(2) 検出器	
(3) 受信光学系	
(4) 信号処理	
(5) システム化	
3. スペースライダーの実現可能性	9
4. 小型衛星搭載用スペースライダーの提案	13
4.1 提案仕様	13
4.2 観測性能の評価と観測可能性	13
4.2.1 数値シミュレーション条件	13
4.2.2 シミュレーション結果に基づく観測可能性の評価	17
5. おわりに	18
・ 謝辞	19
・ 参考資料	19
(財)光産業技術振興協会 衛星搭載レーザーレーダー調査検討委員会 委員名簿	
(参考) Lidar In-space Technology Experiment (LITE) Overview	
・ 付属資料	
A-1 A社の提案報告書	25
A-2 B社の提案報告書	61
A-3 C社の提案報告書	87

1. はじめに

本報告書は、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する、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。

ライダーとはレーザーレーダーとも呼ばれ、レーザー光を利用した遠隔計測技術のひとつである。光と物質との相互作用を利用して、雲、エアロゾル等の大気中の粒子の分布や、オゾン、水蒸気等の気体成分の分布等を、種々の原理に基づいて測定することができる。

（参考）ライダーの原理

レーザーレーダー（ライダー）は文字通り、レーザー光を用いたレーダーである。電波を用いたレーダーは天気予報などでなじみが深い。また、船舶や飛行場などでも他の船舶や航空機の位置検出に用いられている。レーダーは RAdiowave Detection And Ranging の頭文字をとってRADARと名付けられたもので、パルスの電波（Radiowave）を大気中に送りだして散乱物体からの散乱電波を受信することで、散乱体の検出（Detection）と散乱体までの距離を測定する（Ranging）ものである。

ライダーは電波の代わりに、レーザー光を用いて散乱体の検出と距離の計測を行う。また、散乱信号の強度測定から散乱体の散乱効率（散乱体の濃度等）の検出を行う。ライダーは Light Detection And Ranging の略である。電波の代わりに光の領域のレーザー光を用いることで、雲や雨粒に比べてさらに微小なエアロゾル（微粒子）を散乱体として利用でき、その分布が検出可能となる。計測に用いるレーザー光の波長と同程度の大きさの粒子による散乱現象を利用して、粒子の分布を計測することからミー散乱ライダーと呼ばれる。

ライダーから大気に向けて、非常に短い時間の間だけ発振されたレーザーパルス光が射出され、その光は大気中に浮遊する雲やエアロゾルによって散乱される。散乱体が均質球形で、その大きさがレーザー光の波長と同じ程度であるとき、散乱現象はミー散乱理論で記述される。散乱された光のうち後方に散乱された光は、ライダーの受信望遠鏡（集光鏡）で集光され、その強度が測定される。レーザー光はパルスで出されるので、パルス光が発射されてから後方散乱光が受信されるまでの時間遅れは、散乱体までの距離を表している。すなわち、散乱体の分布状態が距離の関数として求められる。

ミー散乱ライダーの受信信号強度は次のライダー方程式で記述できる。

$$P(R) = KP_0 \beta(R) [T(R)]^2 / R^2$$

$$T(R) = \exp \left[- \int_0^R \{ \alpha(r) + \sigma N(r) \} dr \right]$$

ここで、Kはシステムの定数、 P_0 は送信レーザー出力強度、 β は雲やエアロゾルによる後方散乱係数 β_1 と空気分子による後方散乱係数 β_2 の和、 α は消散係数で同様に α_1 と α_2 の和である。また、Nは吸収を示す気体成分の濃度、 σ はその吸収断面積を意味している。ミー散乱ライダーでは通常、気体による吸収の無視できるレーザー波長を用いるので、 $\sigma = 0$ と考えてよい。受信信号P(R)から、ある種の仮定のもとに $\beta(R)$ または $\alpha(r)$ が求められる。

ミー散乱ライダーは極めて簡単な原理に基づいており、ライダーシステムはレーザー発振部、送信光学系、受信光学系、データ処理系から構成される。ミー散乱ライダーでは雲やエアロゾルの分布の計測

が主たる目的であるので、大気中の他の気体成分によって吸収されるような波長のレーザー光を利用することは避けられる。Nd:YAGレーザー等の基本波(1064nm)や第2高調波(532nm)を用いることが多い。

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できないため、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、自ずから機器仕様に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、本報告書で詳細に記載する小型衛星の利用の他に、当初はADEOS衛星クラスの大型衛星の利用についても、検討の範囲としていた。しかしながら、ライダーシステムを検討していくと、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、システム仕様を一意に決めることが非常に困難であった。そこで、最終的には、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。

本報告書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。しかしながら、このことは実用的な観点から見て、性能的に不十分なものであるということの意味するものでは決してない。むしろ、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でき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。

本報告書の構成は次の通りである。

第2章で、本調査を進めるに至った背景と調査目的、調査結果の概要を記す。そこでは、スペースライダーによる雲及びエアロゾルの観測の意義、観測の数値シミュレーション結果、ライダー技術の現状把握の結果などが、簡潔に述べられている。これらの詳しい内容は、既に出版されている調査報告書(巻末参考文献リスト参照)に記されている。

第3章においては、近い将来の開発を前提とした、システム仕様の検討結果を述べている。これは、国立環境研究所が実施した、衛星機器メーカー3社による委託調査の結果報告に基づくものである。これを参考として、本調査研究の結論としての、スペースライダーの提案仕様を第4章に述べた。これは、現状の技術あるいは、近い将来実現可能と判断される技術によって、開発が可能と考えられるものである。さらに、提案したライダーシステムによって観測可能な諸現象について、数値シミュレーションに基づいて議論した。

メーカー3社の検討結果報告を付属資料として添えた。また、LITE実験の概要(英文)を22ページに、得られたデータの予備的な解析結果を巻頭に、参考のためそれぞれ示した。