

衛星搭載・植生ライダー “LOVES”

—炭素・水循環システムの理解を深める植生情報-樹冠高さ-雲・エアロゾル情報の同時観測—

LOVES : Lidar Observation of Vegetation Environment from Space

浅井和弘¹、斎藤保典²、杉本伸夫³

Kazuhiro Asai¹, Yasunori Saito², and Nobuo Sugimoto³

東北工業大学¹、信州大学²、国立環境研究所³

*Tohoku Institute of Technology¹, Shinshu University²
, and National Institute for Environmental Research³*

Abstract

Since the MDS-II/ELISE program of NASDA was canceled in 2001, no spaceborne lidar program has been restructured in Japan. Alternatively, GLAS and CALIPSO of NASA lidar missions gave us valuable data for better understanding of clouds and aerosols effects regarding the global warming issue. In this paper, as restructuring of Japanese spaceborne lidar program, we propose a newly advanced spaceborne vegetation lidar named Lidar Observation of Vegetation Environment from Space (LOVES) for observing not only cloud/aerosols but also actively NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) relating to the atmospheric CO₂ fixation through the photosynthesis within vegetations.

1. ミッション概要

旧 NASDA は、世界的に未開拓領域であったアクティブ・光リモートセンシング（ライダー）技術の開発を目的に、2002 年打ち上げを目標に MDS-2 搭載の Mie ライダー（ELISE : Experimenta Lidar in Space Environment）ミッション計画を進めていた。しかし残念ながら、MDS-2 は諸般の諸事情により打ち上げまでには至らなかった。その後、NASA では GLAS(Geoscience Laser Altimeter System)、CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)を 2003 年、2006 年にそれぞれ打ち上げ、今なお地球環境科学の分野に貴重な観測データを提供している。一方、ESA は大気風、雲・エアロゾル観測を目的に ADM-Aeolus と、JAXA との共同プログラムである EarthCARE/ATLID を開発中である。

ここで提案するライダー・ミッションは、かつては世界最初の宇宙ライダーを目指した MDS-2 ミッションのパイオニア精神と技術遺産を受け継ぎ、NASA と ESA が開発を進めて来た/来ている方向とは異なる“植生環境情報の取得”を目的としている。以下、この提案ライダーを“植生ライダー”と呼ぶ。

植生ライダーは、クロロフィル吸収バンドに一致した可視光線と細胞構造に起因して反射率が高い近赤外光線を同時に発振出来る二波長レーザーを用いて、パッシブセンシングで用いられている正規化植生指数 (NDVI) をアクティブセンシング技術で得ると

共に、レーザー高度計モードによる樹冠高情報を同時に得て、より多角的な植生環境情報を取得することを目的としている。なお、この植生ライダーは当然のことながら電磁エネルギーの反射・散乱・吸収現象を観測原理としているので、雲・エアロゾルに関する大気環境の情報も同時に捉えることが可能であり、炭素循環、水循環における植生の役割に対する知見を深め、ひいては気候変動へのメカニズム解明に向けて寄与するであろう。

また非常にチャレンジングではあるが、もし技術的にも、経費的にも大口径受信望遠鏡（2.5m φ ~ 3.5m φ）が搭載可能であるならば、クロロフィル蛍光検出チャンネルを付加して光合成情報のカギを握っているクロロフィル蛍光の直接観測も実現しうるであろう。

2. 科学的意義

太陽は、植物の生存にとって必要不可欠な光合成用電磁波エネルギー源であると同時に、電磁波エネルギーの強度があまりにも強すぎると植物にとっては非常なストレスとなる。

植物にとってストレスとなる要因には、強い入射電磁エネルギーの他に水分、土壌などがある。Table 1 は、ストレスと光合成との関係をまとめたものであるが、Table 1 が示すように低ストレス下では、入射光エネルギーの 80%以上が光合成に費やされるが、高ストレス下の場合では、入射光エネルギーの殆ど

は光合成による体力消耗を押さえるために、熱に変化されて、葉面から発散されている。これがキサントフィル・サイクルとしてよく知られている植物の生理現象である。

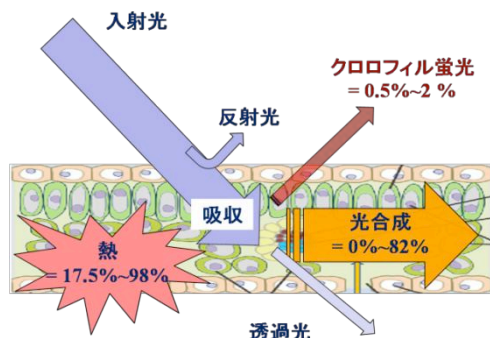


Figure 1 Light energy conversion within leaves

| | クロロフィル蛍光 | 光合成 | 熱発散 |
|-------|----------|-----|-------|
| 低ストレス | 0.5% | 82% | 17.5% |
| 高ストレス | 2.0% | 0% | 98.0% |

Table 1 Chlorophyll fluorescence yields under environment of low /and high vegetation stress.

また、植物表面からの反射・散乱光を軌道上の分光放射計で計測して植生情報を収集しているパッシブ・リモートセンシングにとっては、太陽が放射光源のため Daytime 観測が基本であり、そのため多くの植生情報は高ストレス状態でのデータであると言える。

一方、本提案による植生ライダーは、光反射・散乱光源であるレーザ送信器を備えたアクティブ・リモートセンシングであるため、低ストレス下での植生情報、例えば nighttime 観測も可能であり、daytime 観測のみのパッシブ・リモートセンシングによる観測データとは異なる植生情報の知見を得ることができる。また、660nm のレーザ光はクロロフィル a の吸収波長に一致しているため、LIF (Laser Induced Fluorescence) 方式によるクロロフィル蛍光検出から、光合成状況やキサントフィル・サイクルを直接観測が可能となり、地球規模での植生環境科学へのインパクトは大であろう。

3. 実用的意義

植生ライダーは、パルス・レーザ励起による Lambertian 反射、散乱、共鳴吸収、蛍光を観測原理としているため、植生情報の収集だけに留まらず、雲・エアロゾルに関する情報を通して地球の放射収

支を論じる大気科学の分野、レーザ高度計モードでの氷床観測も可能である。また、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき (GOSAT)」で代表される微量気体の観測ミッションは今後も重要であり、観測精度を高めるためにも光路中の Cirrus、エアロゾル層に対する高度、光学的厚さ、組成成分などの情報は有益である。

受信望遠鏡の口径が“1 m φ”の場合と、集光能力が“1 m φ”に比べ 6.25 倍～12.25 倍とより微弱的な光子を集光できる“2.5m φ～3.5m φ”を用いた場合には、実用的な観測対象も異なってくる。本植生ライダーの達成目標を口径別に分けて、それぞれの場合について Minimum success, Full success に分類すると以下ようになる；

「受信望遠鏡の口径：1 m φ では」

(1) Minimum success

- ・正規化植生指数 NDVI (1340nm/670nm)
- ・樹冠の高さ
- ・雲頂、雲底、PBL 高度
- ・イベント時でのエアロゾル鉛直分布 (黄砂、山火事)

(2) Full success 上記 (1) + 下記の成果

- ・高緯度地域の NDVI
- ・Cirrus (高度、光学的厚さ、組成)
- ・雲 (組成)、エアロゾル鉛直分布と組成

「受信望遠鏡の口径：2.5m φ～3.5m φ では」

(1) Minimum success

上記 (1)、(2) の成果、

(2) Full success、上記 (3) + 下記の成果

- ・クロロフィル蛍光とキサントフィル・サイクル検出
- ・海中の植物プランクトン情報

4. 技術的新規性

(1) 世界初の植生観測ライダー

- ① 高度計モードによる樹高測定と正規化植生指数 (NDVI) 観測モード (1320nm/660nm) による植生の同時観測
- ② クロロフィル蛍光の直接観測 (680nm-780nm) へのチャレンジ (可能か?)
- ③ 新しいレーザ波長 (1320nm/532nm、従来は主に 1064nm/532nm) の発生法
- ④ 大口径・送受信望遠鏡システム技術の確立

(2) 我が国最初の本格的スペース・ライダー

- ① 宇宙スペックのレーザ技術と排熱技術の確立

② アクティブセンサーに対する耐熱歪み/耐機械的歪み抑止技術の確立

Table2 に、世界のライダーミッションとの比較を示す。

| | MDS-2 ELISE | GLAS /CALIPSO | ADM-Aeolus | EarthCARE | 提案ライダー |
|------------|-------------------------------------|--|-----------------------|---------------------|-------------------------------------|
| 観測ミッション | 雲 エアロゾル | 雲 エアロゾル 地表面高度 | 大気風 雲 エアロゾル | 雲 エアロゾル | 植生 樹冠高さ 雲 エアロゾル |
| レーザ結晶 | Nd:YLF | Nd:YAG | Nd:YAG | Nd:YAG | Nd:YAG |
| 出力 | 84mJ@1053nm 10mJ@527nm x100Hz | 60mJ@532nm /110mJ@532nm 120mJ@1064nm /110mJ@1064nm 40Hz/20Hz | 150mJ@355nm x100Hz | >25mJ@355nm 70Hz | 100mJ@660nm 100mJ@1320nm 50Hz |
| 基本波 | 1053 nm | 1064 nm | 1064 nm | 1064 nm | 1320 nm |
| 第2高調波 | 527nm | 532 nm | 532 nm | 532 nm | 660 nm |
| 第3高調波 | — | — | 355 nm | — | — |
| 受信望遠鏡口径(m) | 1m | 1m | 1.5m | 1m | 1m or 2.5m~3.5m |
| 高度 | 550km | 590km/705km | 400km | 450km | TBD |

Table 2 A list of spaceborne lidars, MDS-II/ELISE, GLAS/CALIPSO, ADM-Aeolus, EarthCARE, and the vegetation lidar, “LOVES”, proposed in this paper.

(4) 観測モードについて

| | | Nighttime | | | Daytime | | |
|-----------------------|--|-------------------------|--------|------------|---------|--------|------------|
| | | 1320 nm | 660 nm | 680-780 nm | 1320 nm | 660 nm | 680-780 nm |
| Vegetation | NDVI: Normalized Difference Vegetation Index | ◎ | ◎ | | ○ | ○ | |
| | Canopy Height | ◎ | ◎ | | ◎ | ○ | |
| | Chlorophyll Fluorescence | — | — | ◎/○ | — | — | × |
| Atmosphere | Cloud | Top Height | ◎ | ◎ | | ◎ | ◎ |
| | | Ice/Water | ◎ | ◎ | | ◎ | ◎ |
| | | Optical Depth | ◎ | ◎ | | △ | △ |
| | | Horizontal Distribution | ◎ | ◎ | | ◎ | ◎ |
| | | Vertical Distribution | ◎ | ◎ | | ○ | ○ |
| | Aerosols | PBL Height | ◎ | ◎ | | △ | △ |
| | | Characterization* | ◎ | ◎ | | △ | △ |
| | | Horizontal Distribution | ◎ | ◎ | | △ | △ |
| Vertical Distribution | ◎ | ◎ | | △ | △ | | |

Table 3 Typical operation mode of the LOVES

5. 緊急性

以下の理由により、2015年頃に植生ライダーを打ち上げる計画はタイミング的にも、また地球科学、

環境科学分野への世界貢献の点からも、ぜひ早急に取り組むべきである。

(1) 日本のライダー技術を途絶えさせない

- (2) 現在運用中のGLAS (2003年から5年間)、CALIPSO (2006年から3年間) は共にまもなく運用が終了し、その後に打ち上げが予定されているライダーミッションはADM-Auolus(2010年打ち上げ予定、3年間)、EarthCARE (2013年から3年間) だけで、2015年頃に打ち上げが予定されているライダーの計画はない
- (3) GLAS 後継機の計画もあるが、エアロゾル観測に必要な偏光測定チャンネル設置の予定なし
- (4) IPCC は気候数値モデルの高精度化、全球森林炭素量の観測機能の強化努力を勧告しており、今後もエアロゾルおよび植生観測の重要性が望まれている

度化、全球森林炭素量の観測機能の強化努力を勧告して、今後もエアロゾルおよび植生観測の重要性が望まれている

- (2) 放射収支ミッションのコアセンサーであるライダーライダー搭載 EarthCARE の運用期間と植生ライダーの運用が重畳すると、国際的にも国内的にも軌道上での共同観測が可能となる
- (3) ESA が進めている “Living Planet Program” の Earth Explore の次期コア3候補センサーの一つに P-バンド SAR によるバイオマス監視が FS に選ばれ、2016年打ち上げを目標とした FS が始まったが、2015年打ち上げを目標とした植生ライダーは強い協力関係を築くことができる
- (4) ICESAT Follow-On との協調関係

6. 国際協調

- (1) 前述の通り、IPCC は気候数値モデルの高精

7. 提案している植生ライダーの仕様

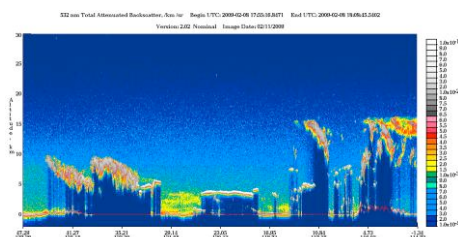
| | |
|--|--|
| 送信系 | |
| ・Nd:YAGレーザー | 出力 100mJ@1320nm、100mJ@660nm 繰り返し 50Hz パルス幅 <10nsec |
| 送受信光学系 | |
| ・SiC鏡 ・ノンスキャンニング | 口径 1,000mmφ(蛍光測定なし) 2,500mmφ~3,500mmφ (クロロフィル蛍光も測定) |
| 観測検出系 | |
| ・NDVIチャンネル ・樹冠高チャンネル ・クロロフィル蛍光チャンネル ・雲・エアロゾル ・偏光解消度チャンネル | アナログ系、フォトン計数方式 アナログ系 フォトン計数方式 アナログ系、フォトン計数方式 アナログ系 |

Table 4 A specification of LOVES

(2) 植生ライダーの仕様は、CALIPSO(100mJ@1064nm、100mJ/532nm、口径

1000mmφ、アナログ検出)とほぼ同程度である。参考のためにNighttimeでの観測例@532nmを示す。

(a)P成分+S成分



(b)偏光解消度

