

JEM-EUSO における大気モニターシステムの開発

Development of the Atmospheric Monitoring System for JEM-EUSO

和田智之, 小川貴代, 前田康大, 戎崎俊一, 大森整
Satoshi Wada, Takayo Ogawa, Yasuhiro Maeda, Toshikazu Ebisuzaki

理化学研究所
RIKEN

Abstract

Exist of high energy particle more than 10^{20} eV in the space is a basic problem in fundamental physics, because it means the brake of the GZK theoretical limitation. JEM-EUSO will try to detect such high energy particle in the space by the optical fluorescent, when the high energy particle incident to the atmosphere. For calibration of the background of the measurement, the atmospheric monitoring system consisted of a spaceborne lidar with an ultraviolet pulsed laser and an IR camera is used for measurements of the height of the cloud. The IR camera acquire a temperature data of clouds with the $\pm 500\text{m}$ precision. On the other hand, ultraviolet lidar measure the height of surface of cloud with the 30m precision. Finally, we obtain the 3D map of clouds. At present, we request the laser with $20\text{mJ/pulse}@355\text{nm}, 50\text{Hz}$, single longitudinal mode, $M^2 < 1$, conduction cooling.

1. はじめに

大気モニターの目的は、JEM-EUSO 望遠鏡視野内の大気の状態を常時監視することにある。空気シャワー(EAS)から放射される大気蛍光とチェレンコフ光の強度および伝搬過程は、大気の透過率や雲量および雲頂高度に影響を受ける。そのため、これらは精度よく決められていなければならない。 10^{20}eV を越える高エネルギー事例では、雲の存在が EAS からのシグナルそのものから判別できることが分かっている[1]。しかし、EAS 観測と同時に JEM-EUSO から地球大気をモニターすることは、望遠鏡の実効観測時間を精度良く決めることができる点や、エネルギー閾値付近の事例についての信頼性をあげる点で有効である。そこで JEM-EUSO では、質量・電力バジェットに対し影響が小さい範囲で、装置群を相補的に用いることによって、大気の状態を監視することにした。大気モニターとして 1)赤外線カメラ、2)Lidar、そして 3)JEM-EUSO 望遠鏡の Slow Data の 3つの装置を用い、視野内の雲頂高度を 500m 以下の精度で推定することを計画している(図1)。本講演では、その中でも特に Lidar を中心に、要求仕様の検討とそれに基づく概念設計について報告する。

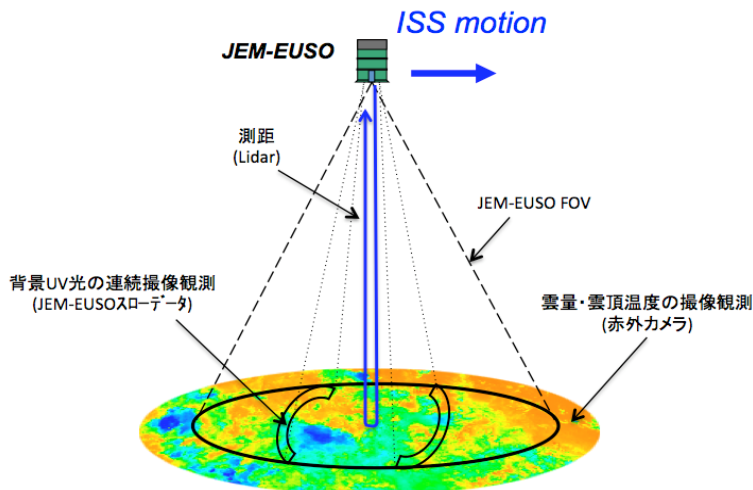


Figure 1. Concept of the Atmospheric Monitor

2. 目的と概要

二次元的な雲分布は赤外線カメラによって撮像観測される。赤外線カメラによって取得されたデータからは雲頂の輝度温度が得られるが、大気モデルを用いてその地点の高度方向の温度分布を推定することにより、雲頂高度が得られる。雲分布と雲頂高度は、EAS のプロファイルから極限エネルギー粒子のエネルギーを推定するときに信頼性を向上させる重要なパラメータである。しかし、赤外線カメラによる雲頂高度決定精度の要求値は ± 500 m 程度であり、赤外線カメラのみでは、本研究での要求値(温度で ± 1.4 K, 高度で ± 200 m)を満足しない。そこで、より高い精度で雲頂高度を決定するために、望遠鏡視野内の数点を測距観測することが、Lidar の目的である。Lidar によって得られる雲頂高度の直接観測データは、赤外線カメラにとっての較正データとしての役割を担う。Lidar の測距分解能は 30 m である。このようにして、赤外線カメラと Lidar によって得られたデータから、三次元的な雲分布と雲頂高度を決定することになる。

JEM-EUSO の Lidar は送信系と受信系からなる。送信系は、Nd:YAG レーザーと射出ビームのポインティング機構からなり、光源として Nd:YAG レーザーの第三高調波、 $\lambda=355$ nm を用いる。Lidar 送信系は JEM-EUSO 望遠鏡に取り付けられ、レーザー光は、受信装置である JEM-EUSO 望遠鏡の空間分解能程度に拡散される。また受信系には JEM-EUSO 望遠鏡自身を用いる。レーザーの波長は、JEM-EUSO が観測する大気蛍光光とチェレンコフ光の波長範囲($\lambda=330\text{--}400$ nm)に含まれるので、光検出器としては JEM-EUSO の焦点面検出器(マルチアノード型光電子増倍管)を用いることとする。光の射出方向のステアリングはビームポインティング機構によって行われる。ビームポインティング機構については MEMS (micro electro mechanical system)鏡の利用を検討している。Fixed scan mode では望遠鏡視野内の 3~5 点を MEMS でスキャンしながら観測する。また Burst scan mode や Targeting mode では EAS による発光が観測される地点にライダーを向けて観測する。表 1 に、Lidar の送信系、受信系、MEMS についての要求仕様を示す。

Table1.Specification of JEM-EUSO Lidar

Laser specification		Receiver	
Laser pulse energy	> 20 mJ per	Ranging accuracy	< 200 m (corresponding to a time resolution $\Delta t = 1.3\text{-}30 \text{ } \mu\text{s}^*$)
Pulse width	5~15 ns		
Pulse energy stability	$\leq \pm 3\%$	Photo detector	MAPMTs (equivalent to main telescope)
Beam quality	M ² = 1	Timing chart of ranging measurement	Delay time $t_d = 2.5\sim 8 \text{ ms}$ and measurement duration $t_m = 50 \text{ } \mu\text{s}\sim 2 \text{ ms}$ after laser shot
Repetition rate	> 50 Hz		
Wavelength	355 nm		
Wavelength stability	0.1 nm	Steering performances	
Laser system lifetime	> 5 years	Pointing stability	$\leq \pm 2 \text{ mrad}$ (TBC)
Total number of shots	> 10 ⁹	Beam steering direction	$\pm 30^\circ$
Beam divergence	$\sim 2 \text{ mrad}$ (TBC)	Fixed scan mode	3~5 directions (TBD)
Measurements	5 shots (TBD)	Burst scan mode	(TBD)
Timing pulse accuracy	< 1000 ns	Targeting mode	5~10 directions around a target (TBD)

この仕様を満足するために、現在、我々が開発しているレーザーシステムについて概要を述べる。励起モジュールとしては、中心にレーザーロッド、その周辺に三角形状に発光イオンのドープしていないホスト結晶を三角状に融着し、本体であるレーザーロッドを保護する状態を作り上げる。さらに、そのレーザーロッドを、三角形の頂点に置いたレーザーダイオードによって励起する。冷却には溶媒を利用せず、JEM-EUSO 本体を構成する金属での熱伝導による直接冷却を予定している。また共振器については、振動やねじれに強い共振器とするために、プリズムペアを利用したコの字型レーザー共振器を用いる。現在

までのところ、水冷を用いた 3 方向からの擬似 CW 励起により、励起モジュール単体で 200 mJ/pulse を達成している。さらに、EO-Q スイッチを挿入した共振器により、100 mJ/pulse、20 ns の出力を最大繰り返し周波数 400 Hz まで得られており、基本波(1064 nm)の段階では、大気モニターシステムに必要な基本仕様が得られることが実験室レベルで確認されている。この基本波を波長変換して、第三高調波 355 nm を発生させる。現状での出力は、LBO 結晶を利用して 30 mJ/パルス程度が得られている。

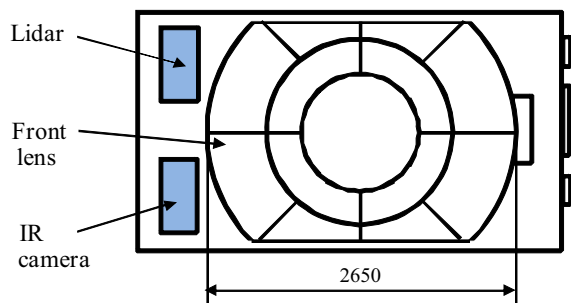


Fig 2. Layout of the Lidar in JEM-EUSO

Table 2. Budget of Lidar system

Budget	
Mass	17 kg (including 30% margin)
Power	91 W (including 30% margin)
Dimension	300 x 300 x 500 mm
Telemetry	< 25 kbps (applied to the main telescope)

図 2 は実際に搭載する場合の Lidar のレイアウト案である。Lidar は JEM-EUSO 望遠鏡のサイドに設置され、光ファイバーを用いてレーザー光が照射される。大気モニターシステムは、望遠鏡本体の設計への影響を極力抑えるため、設置できる面積や重量・サイズ等に制約がある。表 2 に、Lidar の Budget を示す。今後は実際の搭載を目指して、レーザーのシステム設計、伝導冷却および JEM-EUSO との通信系などについて更なる検討を進めていく予定である。

3. シミュレーション

上述の通り、Lidar では、JEM-EUSO 望遠鏡自身を受信系として用いる。このため、Lidar を搭載することによる望遠鏡光学系および焦点面検出器の変更が最小となるように、Lidar に用いるレーザーの発振波長を種レーザーの波長(1064 nm)の第 3 高調波にあたる波長 355 nm に設定している。ここで Lidar の性能を、シミュレーションによって検証した。大気モデルとして、US Standard 1976 を用いた。

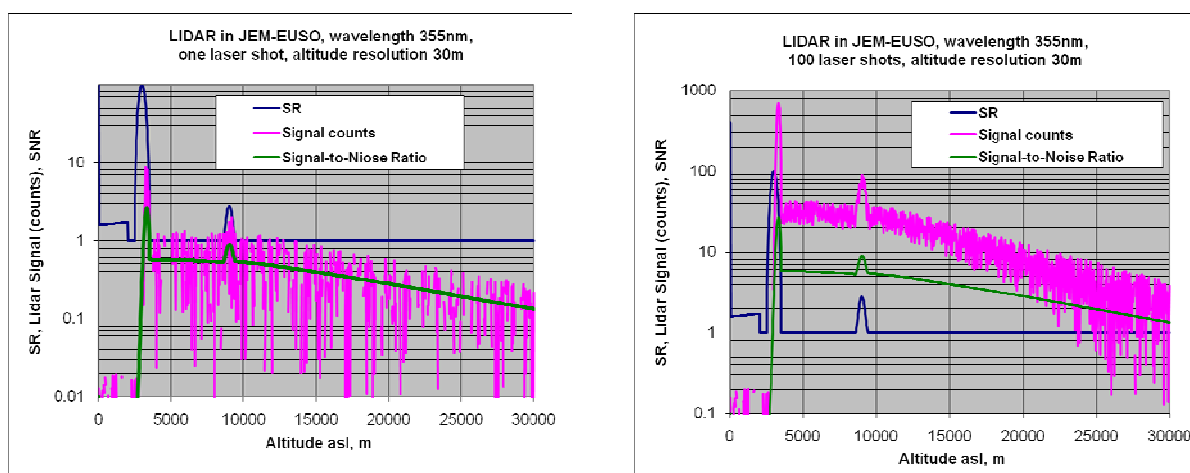


Fig 3. Calculated signal counts and SNR for (a) single shot measurement with Lidar and (b) integration of 100 measurements with Lidar

シミュレーションの結果を図3に示す。図3(a)は、Lidar の1ショットのみの結果を、(b)は100ショットの積分結果を示す。図の横軸は高度で、縦軸は雲の SR (Scattering Ratio)と信号雑音比(SNR)を示す。図中の SR は波長 355nm の場合の値であり、表 4.4.3-3 のものとは異なる。両図から、現状の Lidar 仕様では、1 ショットデータからは opaque cloud のみ検出可能であるが、100 ショット積分すると sub-visible な雲でも SNR=9 で検出が可能である。

4. まとめ

本講演では、JEM-EUSO 搭載用大気モニターのうち、特に高い測距分解能をもつ Lidar について、仕様検討とシミュレーションを行った結果を報告した。今後、実験室レベルでの試作を継続して行い、レーザーのシステム設計、伝導冷却および JEM-EUSO との通信系などについて更なる検討を進めていくとともに、実際の測離性能などを検討する予定である。

Reference

- [1] Takahashi,Y. Et al., *29th Int. Cosmic ray Conf.*, 2005, **8**, 351; EUSO-PI-REP-005(Section D), D36-D38, 21 Apr. 2004.