

ISS-IMAP 搭載可視分光撮像装置 VISI による大気光観測計画

*坂野井 健¹, 山崎 敦², 大塚 雄一³, 田口 真⁴, 阿部 琢美², 武山 芸英⁵, 小淵 保幸⁵
齊藤 昭則⁶, 江尻 省⁷, 中村 卓司⁷, 鈴木 睦², 久保田 実⁷, 吉川 一朗⁸, 星野尾 一明⁹
坂野井 和代¹⁰, 藤原 均¹, 山本 衛⁷, 石井 守¹¹, 陣 英克¹¹, 河野 英昭¹²

1 : 東北大理, 2 : ISAS/JAXA, 3 : 名大 STE 研, 4 : 立教大理, 5 : ジェネシア, 6 : 京大理
7 : 京大 RISH, 8 : 東大理, 9 : 電子航法研, 10 : 駒澤大総合教育, 11 : NICT, 12 : 九大理

1. はじめに

大気光のイメージング観測から、熱圏・中間圏における大気ダイナミクスと化学反応過程のリモートセンシングが可能である。これまで、大気光観測は主に地上から実施されてきている。この観測から、中間圏・下部熱圏では水平波長 30-100km の大気重力波が存在すること、電離圏 F 領域では水平は蝶 100-1000km の中輝度・大規模電離圏擾乱が存在することが分かってきた。近年、光学ネットワーク観測による日本上空の大気光分布の時間変動と、それと同時に捉えられた日本全国に約 1000 点存在する GPS 受信網による電離層電子密度変動から、中規模伝搬性電離層擾乱が移動する様子が捉えられている。しかし、この観測は陸地付近上空に限られ、海洋上の観測がないために、擾乱が何処から来て何処で消失するかといった、基本的な情報を知ることができていない。また、F 領域大気光分布が磁気共役点において共役性をもつことが分かってきているが、これも地上からは視野が限られるため、広域の情報をすることができない。このような背景から、大気光を衛星による観測を実施すれば、これまで知ることが出来なかったグローバル・広域の大気光生成、伝播、消滅の振る舞いや、共役性の様子を捉えることが可能である。このような大気光の空間分布を捉えた例は、IMAGE 衛星による極端紫外線領域における亜熱帯領域の観測のみであり、中緯度の観測例は存在しない。国際宇宙ステーション(ISS)の IMAP ミッションは、低軌道から中緯度においても大気光分布を高時間・高空間分解能で取得する可視・近赤外分光撮像装置 (VISI) を搭載する。ここでは、主に VISI について報告する。

2. IMAP ミッション概要

ISS-IMAP (Ionosphere, Mesosphere, upper Atmosphere, and Plasmasphere mapping mission) ミッションは、ISS の日本実験モジュール (JEM) 第 2 期ポート共有装置の一つであり、可視・近赤外分光撮像装置 (VISI)、極端紫外線撮像装置 (EUVI) とミッションデータ処理 (MDP) から構成される。現在、ミッションは Phase-B であり、打ち上げは 2012 年の予定である。

ISS の軌道は、高度 350 - 450 km、周期 90 分、軌道傾斜角 52°、地理緯度範囲 ±51° である。VISI は、図 1 に示すように、日陰時に地理緯度全範囲 (±51°) で観測を実施する。観測の詳細は次節に記述する。一方、EUVI はほぼリム方向に視野をもち、O+ (30.4nm) と He+ (83.4nm) の太陽共鳴散乱光のイメージング観測を実施する。

チーム体制

PI が斎藤昭則、VISI 担当が坂野井健、大塚雄一、田口真、江尻省、中村卓司、阿部琢美、久保田実、EUVI が吉川一朗、山崎敦、MDP が菊池雅行、鈴木睦美 (いずれも敬称略) となっている。

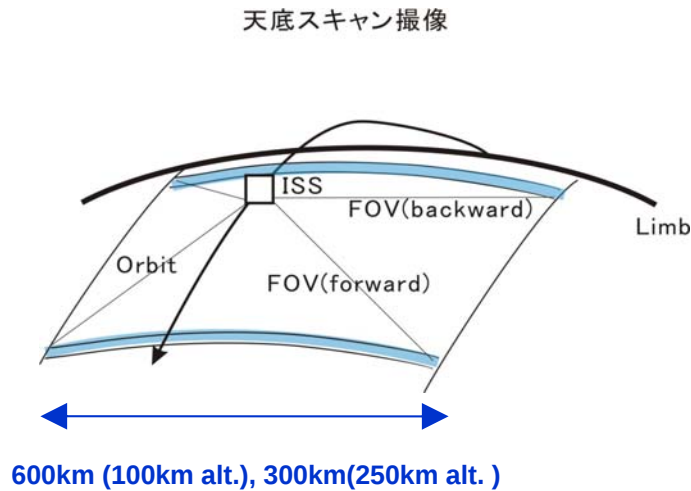


図1. ISS-IMAP/VISI 観測概念図。VISI は前方、後方それぞれ 45° 方向に視野をもつステレオ観測を実施する。軌道直交方向の視野は 90° である。高度 100km と 250km における視野に対応する空間幅を示してある。

構成

JEM の共通バス部 (E-Box) に対して、IMAP は MDP が I/F となる。MDP の下層には、IMAP とならんで GLIMS と呼ばれる雷関連短時間発光現象 (TLE もしくはスプライト現象) を捉えるセンサが接続される。MDP は、IMAP、GLIMS 両者に対して、バス電源から個別電源の生成、センサの電源 ON/OFF、センサデータならびに HK データの A/D と取得、CMD/TLM 処理を主な作業とするコンピュータである。

2. 可視・近赤外分光イメージング観測装置 (VISI)

観測対象

可視・近赤外分光イメージング観測装置 (Visible and near-infrared Spectrograph Imager: VISI)は、これまで例のない、中・高緯度から低緯度にかかる広範囲の大気光分布を捉えることを可能とする可視・近赤外分光撮像装置である。観測ターゲットを図2に示した3波長である。酸素原子 (O) 630nm

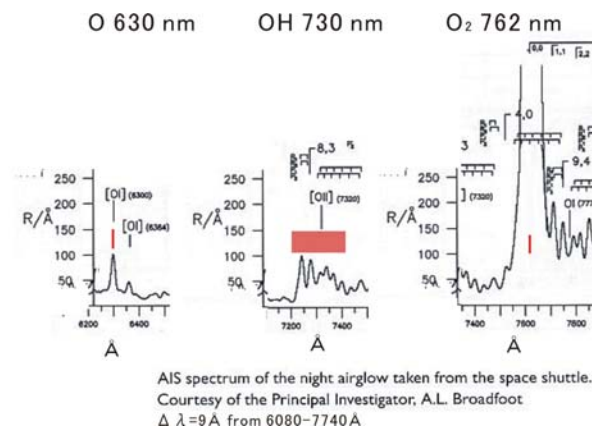


図2. VISI の観測ターゲット3波長。

表 1. 観測パラメータのサマリー (1R=106/4/π (photons/str/cm2/sec))

Airglow	Region	Target	Spatial res.	Typical intensity at mid-latitudes	S/N for variation of airglow intensity
OH (730nm)	mesopause (85 km alt.)	Gravity wave, temp.	15km	400R/nm	4.4 for 50R/nm variation
O2 (762nm)	lower-thermosphere (95km alt.)	Gravity wave	15km	1000R	2.1 for 50R variation
O (630nm)	upper-thermosphere (250km alt.)	Gravity wave, Ionospheric disturbances	25km	100R	1.9 for 10R variation

発光は輝線であり、F 領域（高度 250km）の発光であることが知られている。ここから、電離圏 F 領域のプラズマと中性大気の相互作用、電離圏擾乱現象を捉えることができる。OH 分子マイネルバンド (730nm) はバンド発光であり、中間圏界面付近（高度 85m）の大気重力波の情報を含む。酸素分子 (O2) 762nm 発光は、高度 95km の下部熱圏発光であり、OH 発光層と近いため、大気重力波の鉛直伝播特性をしることが期待される。また、O2 発光のアドバンテージは、対流圏に存在する酸素分子のため、下層からのアルベドや町灯りが吸収されるため、バックグラウンドが暗くなり、コントラストが高い画像を取得することが可能な点である。

表 1 に、観測ターゲットの観測パラメータをまとめた。これまでの地上観測等から、OH, O2 発光については 30km スケール、O630nm 発光については 50km スケールの現象が知られているため、装置設計としてはその倍の空間分解能で設計する。また、それぞれの明るさは、中緯度における典型的な値を示している。観測したいものはこの絶対強度ではなく、大気重力波によって引き起こされた変動成分であり、その変動成分がに対して十分な S/N で観測可能であることが求められる。従来の観測結果の統計的な分布から、OH 発光と O630nm 発光については、絶対強度に対して約 10% の変動が、O2 発光については 5% の変動が捉えられれば、十分な成果が可能であると判断された。これらの変動成分の明るさに対して、現在の設計から見積もられるシグナル成分と、自然統計ノイズ、背景ノイズ、読み出し・ダークノイズを合計したノイズ成分から、最終的に見積もられた S/N 値を表 1 最右コラムに示してある。これについては、後述するシミュレーションにより詳細に示す。

運用・視野

VISI は、ISS が日陰時の地理緯度 +51° から -51° まで、全域に渡り運用する。ISS 軌道速度が約 8km であるため、視野と軌道の関係は、図 1 に示されたとおりであり、高度 100km と 250km では、視野幅はそれぞれほぼ東西方向の 600km と 300km である。スリット幅に対応する空間スケールは 1km 以下と十分小さくなる予定であり、軌道方向の空間幅は露出時間により決定される。表 1 に示された空間分解能を達成するためには、露出は 2 秒以下でなければならない。また、隙間無く大気光分布をとらえるためには、露出後十分な速さで読み出しを行い、ただちに次の露出を開始する。これにより、大気光分布を連続的にスキャンしていくことが可能となる。

VISI は、軌道方向に対して前後 ±45° の視野をもつが、その理由を概念的に示した物が図 3 である。

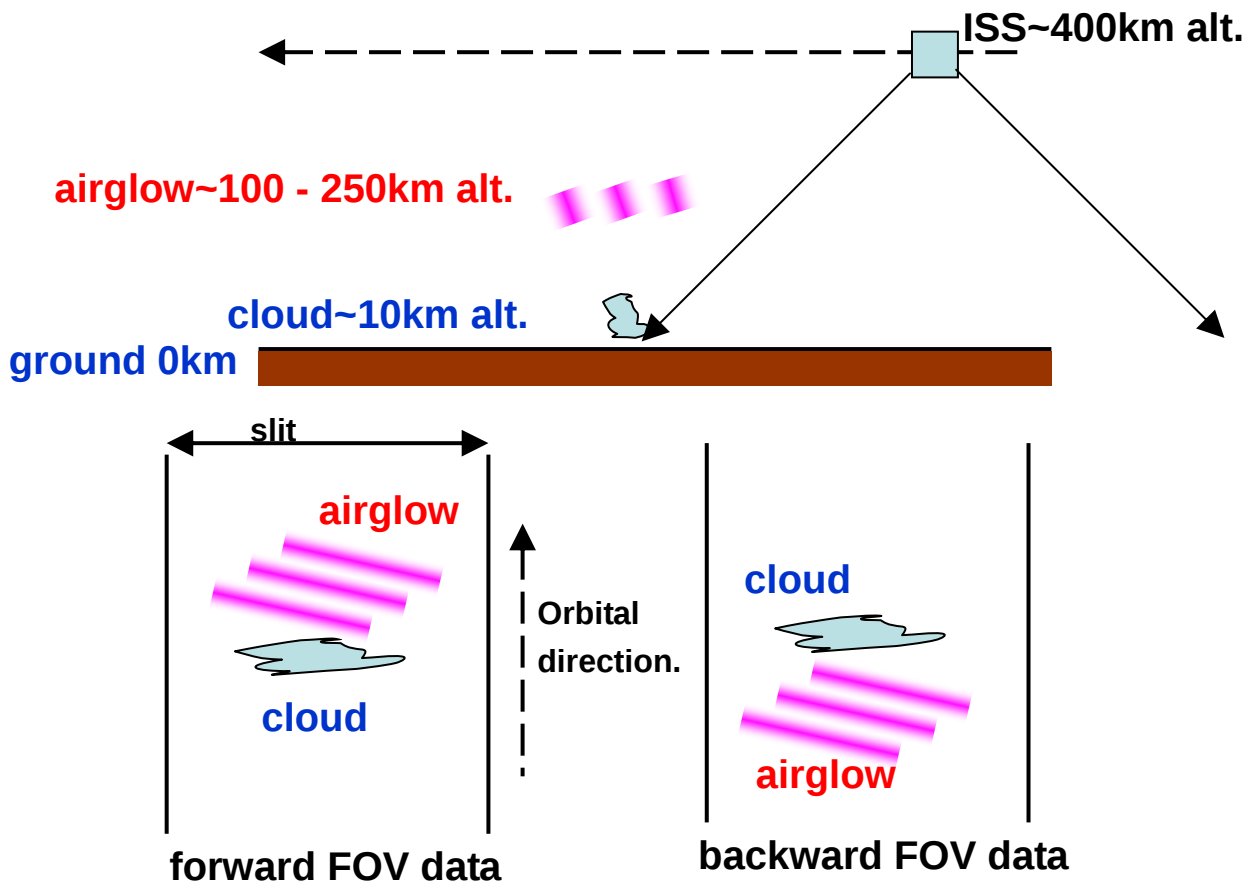


図 3. VISI ステレオ観測の概念図。

VISI は、可視から近赤外にかけての撮像となるので、背景の雲や地形の月明かりのアルベドや、町灯りが深刻なコンタミとなりうる。特に、雲に関しては、大気分布と似ているため、分離するのが困難である。これを達成するために、ステレオ観測を実施する。図 3 にしめたように、前方と後方の視野からそれぞれ得られたスキャン画像には、高度の違いから、雲と大気光では配置が異なる。これを利用して、大気光成分のみ抽出することが可能となる。さらに、OH ならびに O₂ 発光観測の場合には、同じ領域を撮像するのに、前後の視野では約 80 秒間の時間差が存在する。大気光の移動速度は約 100m/s であるため、80 秒間に 8km 移動する。OH 発光や O₂ 発光は明るいため、露出時間を 1 秒以下の撮像から大気光検出が可能な場合もあり得ると考えられるため、前後の視野データの相関解析から、大気光の移動方向、すなわち運動量の輸送方向を導出可能となる可能性がある。

装置

図 4 に現状における VISI の光学と装置のレイアウト例を示す。VISI の光学系は、対物ユニットに視野角 90 x 90 °、F/0.9 のディストーションフリー光学系をもつ。第一結像面には、前後視野 45° 方向に対応してスリットが 2 本存在し、そこを通過した光りはコリメータ部において透過分散素子であるグリズムにより分光される。波長分解能 $\Delta \lambda = 0.5 \text{ nm/pix}$ (TBD) である。グリズムで分光された光は、結像光学系により CCD 面上に結像する。この際、CCD 片反面に前方視野像が、もう片反面に後方視野像が結像される。CCD はペルチェにより、-30℃以下に冷却される。放熱パスは、下部パネル外側（地球側）

に配置された放熱板に熱的に結合される。CCD センサに、e2V 社 CCD47-20AIMO（背面照射型）を仮定した場合、観測波長帯における感度は $\sim 0.06 \text{ el/R/sec/pix}$ である。VISI の諸元を表 2 にまとめた。

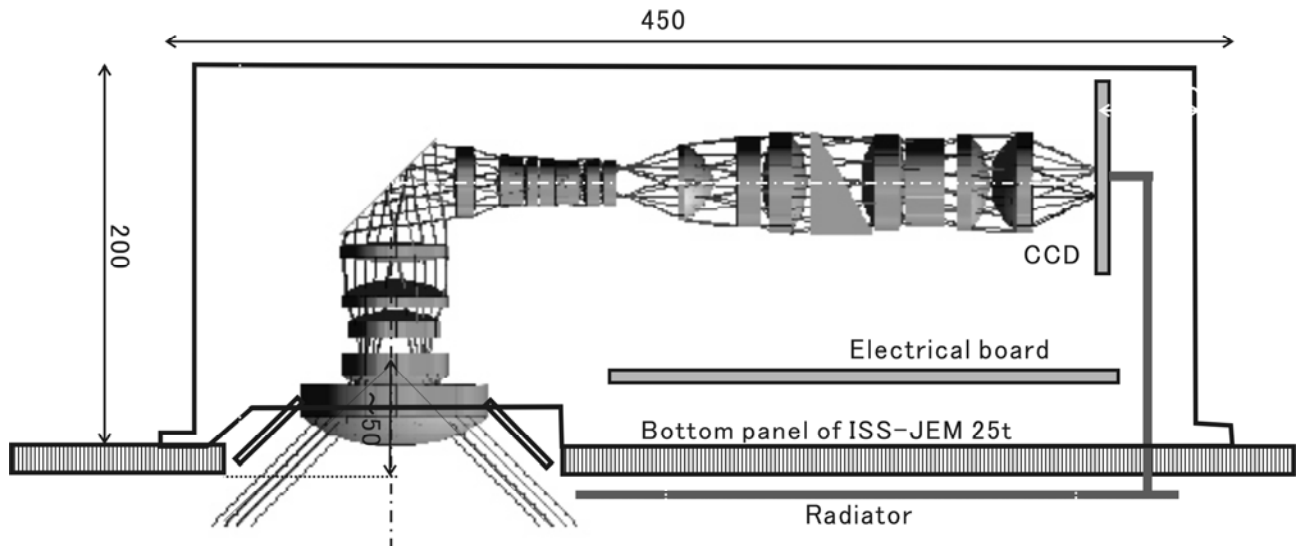


図 4. VISI の光学・装置レイアウト図。

表 2. VISI 諸元

対物レンズ	F=6.8 mm, F/0.9
視野	前方 45°、後方 45° 方向にそれぞれ 90°（軌道直交）x0.09°（軌道；TBD）
姿勢決定要求 ／安定要求	絶対姿勢 0.3 度よりも高い精度 ／ 0.15 度/sec
分光部	グリズム素子、波長範囲 630-762 nm、波長分解能 0.5nm/pix（TBD）
検出器	CCD 電子冷却（-30℃） 1024x1024 ピクセルをオンチップビニング（8x8、16x16 ないしは 1x8、1x16 ピクセルなど；TBD）
観測波長	0 630nm, 0H 730nm, 02 762nm およびその背景光
露出時間	0.5 秒 - 1 秒（ノミナル値）- 数秒
運用条件	日陰時のみ
視野要求	前後左右 $\pm 42^\circ$ の視野に加えて、それぞれ 5° の視野干渉マージン
寸法	200x250x450 mm（TBD）
重量	15 kg（TBD）
電力	15 W（TBD）
通信レート	5kbps（ノミナル値）

4. VISI 観測シミュレーション

まず、 S =大気光の変動量、 $N=\text{SQRT}(\text{大気光絶対強度} + \text{自然背景光} + \text{ダークノイズ} + \text{読み出しノイズの2乗})$ で定義される S/N を見積もる。

仮定は以下の通り。

- ・ 大気光の絶対値（中緯度における値）： 0 630nm 発光 100R、OH 発光 400R/nm、O2 発光 1000R
- ・ 大気光変動量（中緯度における値）： 0 630nm の 10%変動、OH, O2 発光の 5%変動。
- ・ 空間分解能要求： 0 630nm 発光 50 x 50km、OH 発光と O2 発光 32 x 32 km。
- ・ 露出時間： 1 秒
- ・ 自然背景光： 50R/nm。
- ・ ダークおよび読み出しノイズ： 0.24 el/sec/pixel および 10 el rms。
- ・ ビニング： 8x8（フレーム全体）

ここで、 S/N の S は発行量変動成分、 N は $\text{sqrt}(S + N_{\text{bk}} + N_{\text{d}} + N_{\text{ro}}^2)$ である。ここで、 N_{bk} は背景光、 N_{d} はダークノイズ、 N_{ro} は読み出しノイズである。この結果得られる O630nm 発光、OH 発光、O2 発光の S/N は、 $S/N(63) = 0.31$ 、 $S/N(\text{OH}) = 1.8$ 、 $S/N(\text{O2}) = 0.86$ となった。

この時の 1bin (8x8pixel) に対応する空間スケールは O630nm 発光高度では 2x2km、OH と O2 発光高度では 5x5km あり、露出 1 秒（～8km）であるので、空間分解能としてはそれぞれほぼ 2x8km、5x8km といえることができる。要求空間分解能は、0 630nm 発光で 50x50km、OH 発光と O2 発光で 32x32km であり、ナイキスト定理よりプレートスケールはその 1/2 以下であることが求められる。したがって、0 630nm 発光で 25x25km、OH 発光と O2 発光で 16x16km を満たすことが可能な bin 数は、0 630 発光、OH 発光、O2 発光それぞれ 12x3bin、3x2bin、3x2bin となる、この bin 数分 CCD から読み出し後に足し合わせる事が可能であり、最終的に O630nm 発光、OH 発光、O2 発光の S/N は、 $S/N(63) = 1.9$ 、 $S/N(\text{OH}) = 4.4$ 、 $S/N(\text{O2}) = 2.1$ となる。

この最終的に見積もられた S/N 値を基に、観測シミュレーションを行った。ここでは、理想的な振幅±1のサイン曲線の大気光変動に対して、ガウス分布のノイズ源をランダムに与えている。計算している空間は、横軸が VISI の軌道直行方向の視野±45° の場合に対応しており、縦軸は軌道方向である。このシミュレーション結果を図5に示す。このシミュレーション結果は、以下の観点から評価される。

- （1）波状構造が目視で明らかに確認できるか。
- （2）2次元フーリエ解析で、特徴的な空間周波数＝波状構造の定量的パラメータが、ノイズレベルに対して十分多いか。

図5に示すとおり、3波長いずれにおいても、大気光波状構造は明らかに目視で確認できることは明らかである。また、（2）のフーリエ解析結果は掲載していないが、実施済みであり、波の定量的パラメータが精度良く見積もることが可能であることも明らかになった。

以上から、本装置によって、中緯度において大気光変動現象を捉えることが可能であることが示された。なお、低緯度においては、大気光強度は数倍から 10 倍程度大きいので、より高い S/N 値のデータ取得が可能である。

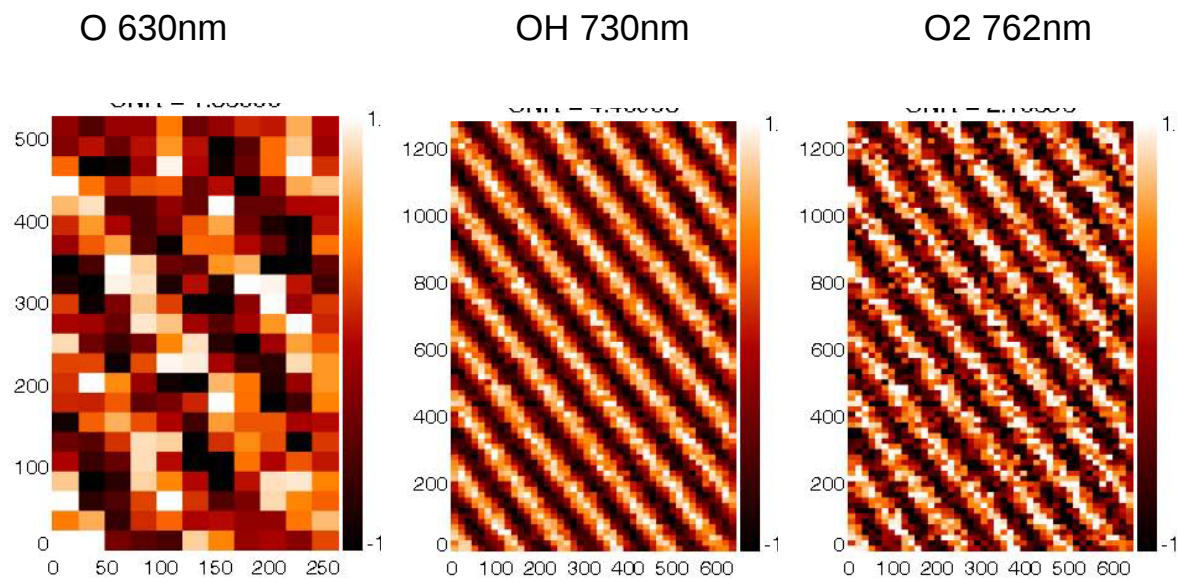


図 5. O 630nm 発光、OH730nm 発光、O2 762nm 発光それぞれにおける観測シミュレーション結果。横軸は観測視野に対応した軌道著好方向、縦軸は軌道運動方向を表す。大気光波状構造は軌道に対して 45° 傾きを持っていると仮定し、O 630nm 発光、OH730nm 発光、O2 762nm 発光それぞれの水平

5. まとめ

本報告では、ISS 搭載 IMAP ミッションの可視・近赤外分光観測装置 (VISI) について、観測内容、シミュレーション結果および開発の現状をまとめた。以下に項目毎に例挙する。

- ・ VISI は、ISS (高度約 400km) の日陰時に、地理緯度 $\pm 51^\circ$ の範囲で連続的に観測する。
- ・ VISI の観測ターゲットは、O 630nm(高度 250m)、OH 730nm(高度 85km)、O2 762nm(高度 95km)の 3 波長である。
- ・ VISI は、前後 $\pm 45^\circ$ の 2 方向、軌道直交方向に 90° の視野を持ち、背景のコンタミを除去するとともに、大気光運動方向を決定を試みる。
- ・ 装置は、ディストーションフリー対物光学ユニット、2 本のスリットとグリズム分光ユニットをもつ光学系をもつ。また、CCD 検出器は放熱板と熱結合されたペルチエにより -30°C 以下に冷却される。
- ・ 観測シミュレーションの結果、VISI によって中緯度大気光が十分な S/N で取得できることが示された。数倍以上発光強度が大きな低緯度大気光観測は、より容易である。
- ・ 運用は 2012 年開始予定である。これに向けて、現在開発が進められている。