

## ESCAPE: 欧日米の観測装置による地球大気流出の総合観測ミッション計画 / A mission proposal for ESA-M5 to systematically study Exosphere and atmospheric escape using European, Japanese, and US instruments

*I. Dandouras<sup>1</sup>, M. Yamauchi<sup>2,\*</sup>, J. De Keyser<sup>3</sup>, O. Marghita<sup>4</sup>, H. Reme<sup>1</sup>, I. Yoshikawa<sup>5</sup>, T. Sakanoi<sup>6</sup>, and the ESCAPE proposal team*

*1: Institut de Recherche en Astrophysique et Planeologie (IRAP), Universite de Toulouse and CNRS, Toulouse, France*

*2: Swedish Institute of Space Physics (IRF), Kiruna, Sweden*

*3: Royal Belgian Institute for Space Aeronomy, Brussels, Belgium*

*4: Institute for Space Sciences, Bucharest-Magurele, Romania*

*5: University of Tokyo, Kashiwa, Japan*

*6: Tohoku University, Sendai, Japan*

*\* correspondence (M.Yamauchi@irf.se)*

### Abstract

ESCAPEはESAの中型（800億円クラス）科学ミッション計画ESA-M5（2029年打ち上げ）に応募した地球周回衛星計画である。その目的は過去数十億年の大気流出を定量的に推定するのに不可欠な各種物理量を直接観測することであり、そのために高度500km以上での中性・電離大気（電離圏上部、Exosphere、並びに地球近傍の磁気圏）の総合観測を行なう。具体的には、各種粒子の直接観測（欧州・米国）と光学遠隔観測（日本提供）を組み合わせることで、同領域における（1）中性大気分布の世界初観測（2）主要同位体の世界初観測（3）主要元素の原子・イオン比の世界初観測を目指す。観測結果は固有磁場のある惑星の代表的な値として、比較惑星学における基本数値を与え、同時に複数の宇宙科学分野に異なる寄与をする。例えば太陽系外惑星の光学観測の意味するところをより正確に理解するための拠り所となる。光学遠隔観測を担当する日本側の観測装置は極めて重要な役割を果たし、そのためにスピン衛星にあえて光学用デスパンを載せる。

ESCAPE is a mission proposed in response to the ESA-M5 call. The purpose is to quantitatively estimate the amount of escape of the major atmospheric components (nitrogen and oxygen), as neutral and ionized species, over geological time scale. To allow such an estimate, the mission will combine in-situ direct particle measurements and optical measurements and make the following first-time systematic observations ever: (1) the spatial distribution of the each species of the neutral atmosphere (density and temperature); (2) isotope ratio of major neutrals and ions; and (3) ion-neutral ratio (substantial ionization rate) of major species, in an extended altitude range from the exobase/upper ionosphere (500 km altitude) up to the magnetosphere. The result will be used as a reference to understand the atmospheric/ionospheric evolution of magnetized planets, and will also contribute many field in space-borne science, e.g., can be used as a reference in understanding optical observations of the atmospheres of the exoplanets. To achieve this goal, a slowly spinning spacecraft with despun platform is proposed, with strongest suite of particle in-situ measurement in the spinning part, and optical remote-sensing instruments in the despun platform. Japanese instruments take care of optical measurements from despun platform that is specifically made for these Japanese instruments.

### Proposal Copy

2016年10月にESAに出した提案書のコピーは以下のURLで入手できる

[http://cluster.irap.omp.eu/public/ESCAPE/ESCAPE\\_M5\\_Proposal\\_V1.1.pdf](http://cluster.irap.omp.eu/public/ESCAPE/ESCAPE_M5_Proposal_V1.1.pdf)

## 1. Introduction

過去30年ほどの火星各ミッションや理論的研究から、軽くて磁場のない火星では、宇宙空間への大気の流出量が大きく、火星大気の歴史、ひいては火星本体の進化の鍵の一つであるという認識が深まって来た (e.g., Lammer, 2013)。その一方で、地球に関してはつい数年前まで無視できると信じられてきた。その最大の理由は、流出経路に乗る粒子の直接観測が困難で、多くの仮定のもとに量的に無視されたり (e.g., Brinkmann, 1970)、地球磁場から逃れられないと仮定されたりした (e.g., Seki et al., 2001) からであり、観測による裏付けがあったわけではない。

しかるに2001年に欧州宇宙機関ESAが打ち上げたCluster衛星により、極冠領域から流れ出すイオンの多くが地球磁気圏ではなく太陽風内に向かう事と (Nilsson et al., 2011)、その量が磁気圏活動に強く依存する事 (Slapak et al., 2017; Schillings et al., 2017)、そしてそれを過去の太陽系の歴史に投影すると非熱的窒素イオン流出だけでも

$$JF > 10^{18} \text{ kg} / 4 \text{ Gyr} \quad (1)$$

となる事が分かってきた。これは大気中の窒素総量に相当する。窒素は海洋にはほとんど存在せず、有機物に含まれる総量も大気中の窒素よりはるかに少ない。地殻やマントルにこそ大気中と同量以上の窒素はあるものの (e.g., Johnson and Goldblatt, 2015)、それらは循環する性質のものであり、宇宙空間への流出をどれだけ補なえるかは疑問である。従って、式 (1) の結果は、1億年で大気中の窒素が数パーセント変わる得ることを意味する。大気中の酸素と窒素の比率が数%変化するだけでバクテリアなどの活動が大きく変わること (e.g., Loesche, 1969; Hill, 1976; Harrison, 2010) を考えれば、これは極めて大きな数字であり、大気流出をより正確に知ることが、地球の歴史ならびに生命の進化の研究に不可欠であることを示唆する。

流出には大きく熱的流出 (熱化学反応に大気の加熱が根本原因) と非熱的流出 (イオン化と電磁現象の組み合わせが主因) とがある。表1に大気流出の各素過程をまとめる。

大気流出を観測から推定するには、非熱的・イオン流出のみならず、熱的流出・中性原子流出も同時に調べる必要がある。というのも、実は両者とも、その流出量を決めるものが何なのか未だに不明瞭だからである。特に前者は、最近5年ほどのExosphere (外気圏) の散発的な観測に伴って、exosphereが極めてダイナミックかつ非一様で、それを知らないことには流出モデルの組みようがないことが分かってきた。実際、地球周回衛星による水素原子の輝線観測 (Lyman-alpha 122 nm, Lyman-beta 103 nm) や、ひさき衛星のEUVスペクトロメーター観測によれば、地球Exosphereの中性原子分布は時間変化している上に、時折空間構造すら持っており (e.g., Zoenchen et al., 2017; Kuwabara et al., 2017; Qin et al., 2017)、一様な静水圧平衡を仮定した従来のモデルでは、Jeans散逸を正しく推定できないのである。大気の異常な膨張は、cubesatの軌道解析からも示唆されており、特に昨年9月のXフレアー (11年ぶりの規模) に伴う磁気嵐時には、cubesat群の高度が突然下がったこと (大気dragが1日だけ極端に強くなった) がQB50のcubesatプロジェクトで分かっている (Masutti, 2017)。Exosphereの変動や空間構造は火星でのEUVスペクトロメーターでも見つかっており (Clark et al., 2017)、普遍的なものだと考えられる。少なくとも地上付近の分厚い大気のように、静水圧平衡で近似出来るものではない。そのため、実はExobaseの高度 (衝突が十分に少なくなって、原子・分子が気体としてでなく単体粒子として軌道運動を行なうようになる高度) すら不明なのが現状である。

表1の第4欄と第5欄に、各流出量を推定するのに不可欠な物理量と、これら物理量の現時点での観測的知識をまとめた。物理量の過半数が分かっていないのが実情であり、特に中性成分についてはほとんど測定されていない。その理由は、表2にまとめたように、過去の熱圏上部・exosphereの中性大気ミッションがあまりに貧弱な観測装置に頼っているためであり、同時に300km以上の高高度が事実上無視されてきたためである。大気流出・進化の研究には、これらの空白を系統的に測定するミッションが不可欠である。本稿で紹介するESCAPEは、この実現に特化したミッション案である。

Table 1: Present knowledge of escape mechanism

| 流出の種類   | 熱的・非熱的        | 流出メカニズムの説明  | 推定に必要な物理量   | 過去の観測     |
|---|---------------|---|---|-----------|
| mechanism                                     | type          | explanation   | Determining factors   | past obs. |
| Jeans escape                                  | 熱的<br>th      | Thermal tail exceeds the escape velocity  | Exobase altitude, n and T there, for each species                               | no        |
| Photochemical heating                         | 熱的<br>th      | Release of energy through, e.g. recombination, gives escape velocity                | same as above   | no        |
| Hydrodynamic blow off                         | 熱的<br>th      | Massive escape when thermal energy exceeds escape energy (currently H+ only)        | same as above   | no        |
| Momentum exchange                             | 非熱的<br>non-th | Light neutrals collide with heavy molecules   | Outflow flux of neutrals and exospheric ion column density                      | no        |
| Charge-exchange                               | 非熱的<br>non-th | Heavy trapped ion with escape velocity strikes an electron from neutral             | Ion flux and exospheric neutral column density                                  | partial   |
| Ion pickup                                    | 混合<br>both    | Ions that are newly exposed to solar wind are removed by the solar wind ExB         | *(magnetopause location and neutral density there)                              | partial   |
| Atmospheric sputtering                        | 非熱的<br>non-th | The energetic ions/neutrals interact with the atmospheric molecules/atoms/ions      | Ion influx to the exobase   | no        |
| Large-scale momentum transfer & instabilities | 非熱的<br>non-th | Solar wind dynamic pressure and EM forces push the planetary plasma anti-sunward    | *(Various large-scale interaction between the solar wind and the magnetosphere) | yes       |
| Ion energization by E// & EM waves            | 非熱的<br>non-th | Field-aligned E// acceleration (DC field) and wave-particle interactions (AC field) | Exospheric ion distribution   | yes       |
| Plasmaspheric wind and plumes                 | 非熱的<br>non-th | Detachment of bulk plasma or neutrals by internal plasmaspheric processes           | Plasmapause location and n and T there  | partial   |
| Magnetopause shadowing                        | 非熱的<br>non-th | The drift ions overshoot the magnetospheric boundary.                               | *(magnetopause location and inner magnetospheric plasma convection)             | yes       |

\*: Not provided by ESCAPE (apogee within the magnetosphere).

Table 2: Past exospheric/upper thermospheric observations of cold/thermal neutrals

| ミッション   | 高度  | 遠隔観測   | 現場観測   | 粒子の種類                                    |
|---|---|--|--|--|
| Mission   | Altitude range                                      | Remote-sensing method                              | In-situ method   | species                                  |
| DE-2 (1981-1983)  | thermosphere (300-500 km) & apogee 1000 km          | -  | mass spectrometer  | major species (N <sub>2</sub> , N, O, H) |
| AE-C, D, E (1973-1978)  | thermosphere (< 400 km)                             | UV   | mass spectrometer, accelerometer                         | major species (N <sub>2</sub> , N, O, H) |
| Air Force SCs (1968-), Castor (1975-1979), San Marco 5 (1988) | thermosphere (< 220 km), (250-600 km), (260-690 km) | -  | accelerometer  | total mass density                       |
| Jacchia atmospheric model                                     | thermosphere, lower exosphere                       | -  | satellite drag   | total mass density                       |
| MSS (1980-1989)   | thermosphere (< 250 km)                             | UV occultation                                     | -  | O <sub>2</sub> density                   |
| IS Radars   | thermosphere-exosphere                              | UHF  | -  | Temperature                              |
| TIMED (2001-now)  | thermosphere < 400 km (target: < 180 km)            | multi-wavelength UV (from 600 km)                  | -  | major species (N <sub>2</sub> , N, O, H) |
| IMAGE (2000-2005)   | exosphere   | Lyman-alpha  | -  | H only                                   |
| TWINS (2006-now)  | exosphere   | Lyman-alpha  | -  | H only                                   |
| GOES (-now)   | exosphere   | Lyman-alpha (from 6.2 RE)                          | -  | H only                                   |
| <b>ESCAPE</b>   | <b>exosphere (&gt;500 km)</b>                       | <b>multi-wavelength UV (from various altitude)</b> | <b>mass spectrometer, velocity distribution analyser</b> | <b>all species (including isotopes)</b>  |

## 2. Needs for virgin observations

表1、表2にまとめたように、過去の観測ではexosphereはほとんど未解明のままである。大気流出の推定に不可欠な各種物理量を得るということは、必然的に複数の世界初観測が必要となる。それらは大きく以下の3つにまとめられる。

- (1) 高度500km-2000km (Exosphere, 熱圏上部, 電離層上部) の中性大気並びに熱的イオンの密度分布ならびに温度・速度分布の網羅 (中性は水素以外が初)
- (2) 主要粒子 (O, N, H) の同位体比 (D/H比以外は地球超高層では初)。
- (3) 直接観測と遠隔光学観測の組み合わせ (軌道上を遠隔観測した1時間後にその軌道上で直接観測する) による遠隔光学観測の検証と時間・空間構造分離

これらは、地上からの電離層・熱圏観測でも重要な項目で、ESCAPEミッション計画では、2022年稼働予定のEISCAT\_3Dなど最新施設との共同観測を予定している。以下に、(1)-(3)の新観測が必要な理由を簡単に記述する。

(1)については表1から自明であり、多くの流出メカニズムのうち、重要なものが何であるかを知るには、exosphere・exobase・熱圏上部の知識が不可欠となる。更に、主要メカニズムの相対的・絶対的重要度は、太陽活動 (EUV量やFlare) や磁気嵐などで異なることが予想されるゆえに、高度500km-2000kmの観測は、異なる太陽・太陽風・磁気圏・電離圏活動度に対してそれぞれ行なう必

要がある。なかでもexosphereは熱的・光化学的プロセスによる流出が起こっている場所であり、同時に非熱的プロセスの担い手となるイオンを生成している場所でもあって、そこでの基本量を押さえないと、量的なモデリングは出来ない。Exosphereの重要性はそれだけではない。charge-exchangeを通して捕捉イオンの流出に寄与し、大気膨張の際には密度は桁で変化して衛星減速のモデルに不可欠な知識となっている。

(2)の同位体比は、惑星科学においては、過去の大気流出量や惑星・小天体の起源を推定する重要なパラメータとして認識されてきた。しかしながら、流出イオンの同位体比は、メカニズムによって大きく異なる。例えば電磁場が関係する非熱的流出の場合、質量と電荷の比率に対して比例するプロセス、平方根に比例するプロセス、全く依存しないプロセスと複数のプロセスが混在するため、同位体比から逆に流出量を推定するのは困難だった。類似の事情は中性原子・分子の流出にも当てはまる。というのも、それぞれのプロセスで、一番重要な高度(exobaseかupper exosphereか熱圏か)が異なり、同時に同位体比が高度によって異なるからである。高度によって同位対比が異なるのは、鉛直対流のない(静水圧平衡となっている)層では、重い同位体ほど大気下層に溜まり、事実上の重力フィルターとなるからである。そのscale heightは地球では300kmと推定され、exosphereの高度と比べて無視できない。一方で、鉛直対流の無視できない層では、重い同位体も軽い同位体も同様に混ぜられるため、同位体比は均一になる。だから、たとい最も主要な流出メカニズムが判明しても、そのプロセスが実際に効く高度での同位体比が分からなければ、流出と同位体比の関係は決まらないのである。逆にいえば、同位体比から大気膨張や対流が多少推定できる。そして、対流が同位体比の高度分布を決める重要な要素である以上、同位体比は時間変化や緯度・経度構造を持つと予想される。現に火星ではMAVEN衛星により同位体比の時間変化が観測されている(Clark et al., 2017)。そして、一番確実に観測出来る地球での流出と同位体比の関係が分からなければ、同位体比から惑星大気の過去の流出の見積もりは定性的な議論を超えることはない。

(3)のLimb観測とin-situ観測との同時観測は、Limb観測があまりに多くの仮定に依存していることから必須である。というのも、Limb観測は密度分布に鉛直構造があると無力だからである。しかもTIMED衛星による最新のLimb観測は標準モデルと合わない(Meier et al., 2015)。鉛直構造は磁気嵐時など時間変化の大きい状況で特にあり得ることであり、宇宙天気イベント等の、まさにそういう変化や構造が(衛星dragなどのモデルのために)必要な時に役に立たないのである。それ故に、かねてから直接観測が必要であったが、表2にまとめるように、独立した直接観測すら35年前のDE2以来全くなかった。ましてやLimb観測とin-situ観測の同時比較は全く手がつけられていなかった。ちなみに必要な高度解像度は、上記scale heightを考慮すると、約100km程度となる。それは現在の粒子測定技術で可能である。

これら(1)-(3)を考慮し、ESCAPE計画では、周期約10時間の楕円軌道から、紫外線による撮像と、イオンや中性粒子の直接観測を組み合わせるという世界に前例のない手法を用いて、exosphereのダイナミクスを高さ方向100km、空間方向数度の解像度で調べる。

### 3. ESCAPE mission: Instrumentation, Spacecraft, and Orbit

表3にESCAPE衛星の観測装置を、図1に衛星上での各装置の配置を示す。観測装置の選択に当たっては、従来の磁気圏ミッションの流れである時間分解能を捨て、代わりに質量分解能・速度分解能を優先した。具体的には非熱的粒子の観測では、過去にない質量解像度ならびに質量幅でイオン流出を成分ごとに求めるべく観測装置を選定・開発し、熱的粒子の観測では、中性・イオン双方とも速度分布や同位体比まで求め、熱的・非熱的流出がどこまで重力によるフィルターを受けているかを調べるべく観測装置を選定・開発した。その結果、衛星は図1のようにスピンを行なう本体(Ø2.4m x 1m)と、スピンをキャンセルして事実上の3軸固定となるdespun部(Ø0.35m x 1.5 m)に別れ、光学視線積分観測の為に装置は、このdespun部に載せる。その意味では、2つの異なる衛星を一つにした構造になっている。Despun部を独立させなかったのは、その方が作製・運用費用が圧倒的に安い(総費用で3-4割減)だからである。

観測の為にインフラは衛星に限らない。特に2020年代に完全運用となるEISCAT\_3D極地レーザーは重要で、それと組み合わせることにより、ダイナミクスの空間・時間構造の分解も行なう。



Table 3a: ESCAPE instrumentation (spinning main body)

| SI name | function  | PI institute                                 | TRL      |
|---------|---|--|----------|
| INMS    | Cold ion and neutral mass spectrometer ( $M/dM > 1000$ )            | Univ. Bern, Switzerland                      | 7-8      |
| WCIMS   | Cold ions $f_{dist}$ neutrals ( $n$ & $T$ )                         | NASA/GSFC, USA                               | 7        |
| MIMS    | Light hot ions ( $M < 20$ , about 5 eV/q - 40 keV/q)                | IRAP, U. Toulouse and CNRS, France           | 5        |
| NOIA    | Heavy hot ions ( $M > 10$ , 10 eV/q - 30 keV/q)                     | IRF, Kiruna, Sweden                          | $\geq 6$ |
| EMS     | Energetic ions (20 - 200 keV)                                       | Univ. New Hampshire, USA                     | $\geq 6$ |
| ESMIE   | Electrons (about 5 eV - 20 keV)                                     | UCL/MSSL, London, UK                         | $\geq 6$ |
| Waves   | 5 Hz - 20 kHz analyzer & Search Coil                                | ASCR, Prague, Czech & LPC2E, Orleans, France | $\geq 5$ |
| SLP     | Sweeping Langmuir probe (e- density, E-field, spacecraft potential) | BIRA-IASB, Brussels                          | 4-5      |
| MAG     | Magnetic field  | IWF, Graz, Austria                           | 8        |
| ENAI    | ENA imager (2-200 keV)  | INAF/IAPS, Rome                              | $> 5$    |

Table 3b: ESCAPE instrumentation (despun platform)

| SI name | function  | PI institute        | TRL |
|---------|---|---------------------|-----|
| UVIS    | UV imaging spectrometer (85-140 nm, 83, 58, 30 nm for H, N, O, O <sup>+</sup> , He, He <sup>+</sup> ) | 東大新領域, <b>Japan</b> | 6-7 |
| AMC     | Aurora and airglow camera (670 nm and 630 nm for different altitude)                                  | 東北大理, <b>Japan</b>  | 7-8 |

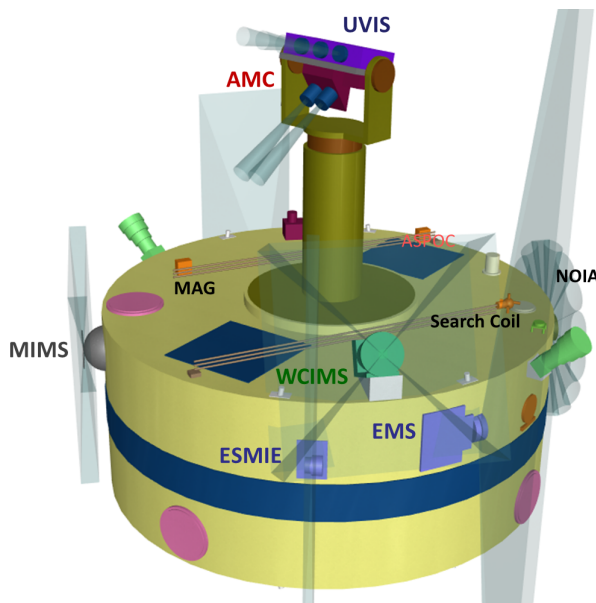


Figure 1: Instrument accommodation

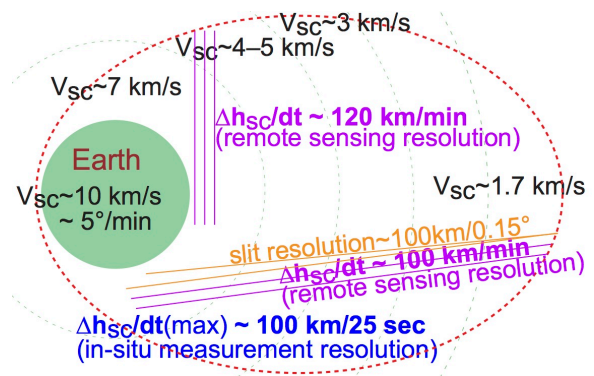


Figure 2: ESCAPE orbit

ESCAPEでは中性粒子以外にイオンの非熱的流出も同時に調べるが、そのためには、極域からの流出と磁気圏尾部から内部磁気圏への還流の双方を観測する必要がある。具体的には遠地点が内部磁気圏と磁気圏尾部の境近くまで来るような極軌道で、同時に高度500kmまで粒子の直接観測を行うべく近地点を低くとる楕円軌道が理想的となる。図2に軌道（高度500km x 33000km, inc. 90°）を示す。この軌道と空間分解能100kmの要請から時間分解能が決まり、各観測要素は2分、スピン周期は20秒程度となる。

一方、光学観測装置を日陰に位置し、Langmuir Probeを日照に位置させるため。衛星のスピンの軸は太陽を向く（despun部が本体の陰になる）。従って、毎週約7°ずつのManeuverが必要となるが、その際に燃料が粒子観測を汚染しないよう、窒素系や炭素系の燃料の代わりに希ガス系のcold propulsionを用いる。

ESCAPE計画では、過去数十億年に渡る大気流出の定量的な推定も目標に掲げている。そのためには、過去の太陽により近い条件での観測が不可欠である。過去の観測（イオン流出や電離層・熱圏温度など）から、流出に大きく寄与する物理量として、太陽紫外線と太陽風が挙げられる。過去の太陽はそれらが非常に強いが、現在でもXクラスの太陽フレア時にそういう状況となりうる。したがって、ミッション期間は、強いXフレアを含む必要がある。その意味では太陽活動極大期やその数年後が理想的ではあるが、極小期であってもミッションが3年以上続けば十分である。一方、極小期のミッションだと、観測装置のセンサーへの負荷が少なく、装置の劣化が防ぎやすいという利点もある。それらを考慮するとESA-M5（ESCAPE計画の提出先）が予定している2029年打ち上げはESCAPE計画にとって決して悪いものではない。

ミッションの目的は大気流出の定量的推定だが、前節で記述した初測定などにより、副次的に複数の分野の問題に貢献する。

#### (4)宇宙環境での実質電離度（基礎物理）

熱圏中性大気の観測（TIMED）が標準モデルと合わない理由のひとつとして、宇宙環境での実質電離度が実験室のそれと異なる可能性が挙げられている（Meier et al., 2015）。中性原子・分子の電離度は地上実験室で測定された値を用いているが、それが電磁場環境と圧力・温度の全く異なる宇宙空間で成り立つ保証はないからである。上記（1）の要請により、この項目は自動的に測定される。

#### (5)宇宙天気の高層への影響（衛星工学）

Xクラスの太陽フレア時など宇宙天気イベントと他の状態との違いをきちんと調べる事が目的の一つで、かつ地上・電離層に影響が及ぶ経路上を観測するゆえ、宇宙天気に関する諸問題に寄与する。特に宇宙天気イベント時の大気膨張は、cubesatなどの大気減速（satellite drag）と、それに伴う軌道変化を増加させるため、その予測のためのデータベースが必要となっており、それに直接寄与する。

#### (6)内部磁気圏ダイナミクス（磁気圏・電離圏物理）

ミッションの軌道は内部磁気圏をカバーし、かつ過去に類例のない粒子観測パッケージと紫外線観測により、内部磁気圏のダイナミクス、特に地球起源の重い元素やマイナーな元素をきちんと調べる事ができる。さらに小さな質量差でも検知可能であることから、ダイナミクスにおける質量（同じエネルギーだと重い粒子ほど対流の影響を受けにくい）の影響を正確に求める事ができる。一方で近地点はわずか500kmであり、電離層上部を網羅する。電離層のこの領域を、ESCAPEのような強力な粒子観測パッケージかつ光学観測との組み合わせで調べられたことはなく、電離層における中性粒子の役割や、微量成分の振る舞いをより深く理解し、それによってエネルギーの分配の解明に寄与できる。

#### (7)人工衛星による天文観測（宇宙物理）

宇宙空間や恒星・系外惑星の特定元素を観測から求める場合、輝線・吸収線の地球大気での減衰が定量化の障害となる。そのために地上だけでなく人工衛星に望遠鏡を載せるミッションが数多くある。しかし人工衛星の高度では地球大気（Exosphere）での吸収の影響は補正できない。ESCAPEは高度500km以上の各原子・分子・イオンを求めることから、この補正を可能にする。

#### (8)系外惑星観測データ解釈のreference（惑星科学）

系外惑星観測では、光学観測から大気の状態や進化を推定することが将来的な目標となっている。例えばESA-M4の最有力候補ARIELはまさに大気成分の解明に手を付けるミッションである。その際に障害となるのが、光学観測の解釈である。ESCAPEはこの光学観測を粒子直接観測と結びつけ、光学観測の解釈に大きく寄与する。

#### 4. Japanese contribution

表3並びに図1に示すように、despun部の光学観測（遠紫外線分光器UVISとオーロラ大気光カメラAMC）は完全に日本側の担当となる。いわば準独立した衛星が日本の観測装置のためだけに準備されるようなものである。これは、日本の光学観測装置が欧米と比較しても世界でトップレベルであることの帰結であり、その意味で日本の貢献は非常に重要である。

日本の装置のうちUVIS（PI: 吉川一郎/東大新領域）は、複数の輝線を調べることで、主要原子・イオン（H, N, O, O<sup>+</sup>, He, He<sup>+</sup>）の視線積分密度を求める。20個のスリット（0.1°x1°）を使うのでImagingが可能であり、それによって100km解像度が遠地点でも可能となる（図2参照）。装置そのものは「ひさぎ」「Bepi-Colombo」で開発・小型化済み（7kg）であり、それを地球の観測に向けて調整する。現時点の単純はExosphereモデルによる各成分密度推定によればH(103nm)が2分値で簡単に求められ、He+(30nm), He(58nm), O+(83nm), N(95nm), O(99nm)は10分-3時間積分値で求められる。

AMC（PI: 坂野井健/東大理）は2波長の可視カメラで、異なる波長を使うことで異なる高度でのオーロラ・エネルギーをモニターする。それにより電離層へのエネルギー流入量を推定する。この推定はEISCAT\_3Dなどの地上観測と照らし合わせる。装置は「れいめい」で開発済みであり、ESCAPEでは「れいめい」ほどの空間解像度を必要としないことから、ピクセルの合計数を調整することで、異なる距離に対応する。

#### 5. Summary

ESA-M5に提案したESCAPEミッション計画は、複数の世界初観測を通して、地球大気の流出を過去に渡って定量的に推定する。さらに、他の観測と合わせ、大気流出の直前で何が起きているかの物理的・化学的基礎過程の解明にも繋がる。

世界初観測の柱の一つが本格的なexosphere探査であり、水素以外全く分かっていなかった分布や温度を世界に先駆けて測定する。2つ目の柱が、電離層/exosphere/磁気圏での本格的な同位体比測定である。更に中性粒子と熱的イオンを同時に系統的に調べることで、宇宙におけるイオン-中性相互作用の解明という基礎物理にも貢献する。この他にも多くの分野に寄与する、ミッションの目的こそ大気流出だが、その貢献分野は非常に幅広い。

観測戦略も過去にない要素がある。一つは光学遠隔観測と粒子直接観測の準同時（数時間以内のタイムラグ）観測で、2つ目は世界の流れである「時間分解能向上」「微細構造分解」を捨て、質量分解に注力したことである。3つ目は近年の粒子計測器のダイナミックレンジの拡大を受けて近地点を低く設定して後半な高度を調べる点にある。これに加えてEISCAT\_3Dのような新しいタイプ（3次元空間同時把握）の地上観測と組み合わせることで、conjugate studyの新しい地平を切り開く。

#### Appendix (ESA-M missions)

ESAのScience Programは、2010年以降、フラグシップと位置付けられるL-class ミッション（2022年、2028年、2034年打ち上げを目指す）を策定してきた他、3年に一度の打ち上げを目指すM-class ミッションを適時公募している。予算規模は観測装置を除いて450-550Meuro（日本円で700億円内外）で、観測装置は各国の宇宙機関が別途に予算を組む。選定の基準は、まず第一に実現可能性であり、予算規模の審査の他、観測装置もすでに開発済みであること（あるいは2年以内に開発が完了する事）が要求される。これはM1-M3の選定からの教訓でM4選定から優先されるようになった。そして、その基準をクリアした提案のうちサイエンスとしてもっとも魅力のあるものを選ぶ。その意味では技術開発の延長という要素が重要なISASミッションの選定方式と対照的である。

現在までにM1-M3（Solar orbiter, Euclid, PLATO）が決まり、現在M4（予算規模450Meur）が2月の選定待ち（ARIELが推薦されている）である他、M5が2次審査（約30の提案から1次審査で予算規模550Meur以内で実現可能と判断された12個の候補をさらに3つに絞る）の結果待ちである。例えばISASが採択したSPICAも、ここに記述したESCAPEも、この12個に含まれる。現時点のスケジュールは2019年までがPhase-A studyで、最終選考が2020年、打ち上げが2029-2030年である。



## References

- Brinkmann R.T. (1970), Departures from Jean's escape rate for H and He in the Earth's atmosphere, *Planet. Space Sci.*, 18, 449.
- Clarke J.T., Mayyasi M., Bhattacharyya D., et al. (2017), Variability of D and H in the Martian upper atmosphere observed with the MAVEN IUVS echelle channel, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 2336-2344, doi:10.1002/2016JA023479.
- Johnson B. and Goldblatt C. (2015), The nitrogen budget of Earth, *Earth Sci. Rev.*, 148, 150-173, doi:10.1016/j.earscirev.2015.05.006.
- Harrison J., et al. (2010), Atmospheric oxygen level and the evolution of insect body size, *Proc. R. Soc. B*, 277, 1937-1946, doi:10.1098/rspb.2010.0001
- Hill S. (1976), Influence of atmospheric oxygen concentration on acetylene reduction and efficiency of nitrogen fixation in intact *Klebsiella pneumoniae*, *Microbiol.*, 93, 335-345, doi: 10.1099/00221287-93-2-335.
- Lammer H., Chassefiere E., Karatekin O., et al. (2013), Outgassing history and escape of the Martian: atmosphere and water inventory, *Space Sci. Rev.* 174, 113-154, doi:10.1007/s11214-012-9943-8.
- Loesche W.J. (1969), Oxygen sensitivity of various anaerobic bacteria, *Appl. Microbiol.*, 18, 723-727.
- Masutti D. (2017), Lessons learned from the first educational CubeSat constellation, presented at ESWW14, 29 November, 2017, Ostende, Belgium.
- Meier R.R., Picone J.M., Drob D., et al. (2015), Remote Sensing of Earth's Limb by TIMED/GUVI: Retrieval of thermospheric composition and temperature, *Earth Space Sci.*, 2, 1-37, doi:10.1002/2014EA000035.
- Nilsson H. (2011), Heavy ion energization, transport, and loss in the Earth's magnetosphere, in: *The Dynamic Magnetosphere*, edited by: Liu, W. and Fujimoto, M., [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0501-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0501-2_17), IAGA, Springer.
- Schillings A., Nilsson H., Slapak R., et al. (2017), Relative outflow enhancements during major geomagnetic storms -Cluster observations, *Ann. Geophys.*, 35, 1341-1352, doi:10.5194/angeo-35-1341-2017.
- Seki K., Elphic R.C., Hirahara M., et al. (2001), On atmospheric loss of oxygen ions from Earth through magnetospheric processes, *Science*, 291, 1939-1941.
- Slapak R., Schillings A., Nilsson H., et al. (2017), Atmospheric loss from the dayside open polar region and its dependence on geomagnetic activity: Implications for atmospheric escape on evolutionary time scales, *Ann. Geophys.*, 35, 721-731, doi:10.5194/angeo-35-721-2017.
- Yamauchi M. and Slapak R. (2018), Energy conversion through mass loading of escaping ionospheric ions for different Kp values, *Ann. Geophys.*, 36, 1-12, 2018, doi:10.5194/angeo-36-1-2018.
- Kuwabara M., Yoshioka K., G. Murakami G., et al. (2017), The geocoronal responses to the geomagnetic disturbances, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 1269-1276, doi:10.1002/2016JA023247.
- Zoennchen J. H., Nass U, Fahr H.J., and Goldstein J. (2017), The response of the H geocorona between 3 and 8 Re to geomagnetic disturbances studied using TWINS stereo Lyman- $\alpha$  data, *Ann. Geophys.*, doi:10.5194/angeo-35-171-2017.
- Qin J., Waldrop L., and Makela J.J. (2017), Redistribution of H atoms in the upper atmosphere during geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2017JA024489.