

# みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へ その2 ～サブミリ波分光計JUICE-SWIの挑戦～

笠井 康子<sup>1,2</sup>, 佐川 英夫<sup>3</sup>, 関根 康人<sup>4</sup>, 黒田 剛史<sup>5</sup>,  
菊池 健一<sup>6</sup>, 西堀 俊幸<sup>7</sup>, 真鍋 武嗣<sup>8</sup>, JUICE-SWI日本チーム

(要旨) 欧州宇宙機関の次期木星圏探査機JUICEに搭載される科学観測装置の一つに、サブミリ波分光計 Submillimetre Wave Instrument (SWI)がある。深宇宙探査機の歴史の中で、サブミリ波を用いた惑星観測はこれまでに例がなく、SWIが世界で初めての提案となる。サブミリ波分光計とは何か？ 本稿ではサブミリ波観測の紹介を皮切りに、我々がSWI開発に至った経緯、SWIが拓くと期待されている科学、それを達成するための観測装置、そして最後にJUICE ミッションへ向けた抱負を述べる。

## 1. サブミリ波とは何か？

### －惑星科学への可能性－

ここではSWI惑星科学を述べる前に、まずはサブミリ波を用いた惑星観測がどのようなものかを説明したい。

#### 1.1 サブミリ波

サブミリ波電磁波は、マイクロ波ミリ波よりもさらに高周波の電磁波であり、一般に周波数300 – 3000 GHz (波長0.1 – 1.0 mm)の周波数帯を示す。遠赤外光と電波の境界領域であるサブミリ波の検出技術が発展してきたのは比較的最近のことである。サブミリ波の検出方法には、遠赤外光の検出技術として従来用いられてきたボロメータ方式と電波の受信に利用されてきたヘテロダイン検波方式があるが、SWIは後者の技術を使用している。アンテナで集光した観測対象からのサブミリ波熱放射はミキサで局部発信器からのサ

ブミリ波基準信号と混合し、扱いやすい低周波数帯に変換し、分光器を通して周波数分解されたスペクトルを得る。ヘテロダイン検波方式はボロメータ方式と比較すると、帯域が狭いものの、周波数分解能が極めて高い(SWIの場合は100 kHz)高感度な観測が可能となる。サブミリ波分光計は可視紫外や赤外、そしてミリ波の分光計と比較すると、「小型軽量」と「高い周波数分解能」の両者を同時に実現することが可能になる。また、マイクロ波の観測と比較すると、同じアンテナ口径の場合、サブミリ波観測の方が高い空間分解能を達成できる。これは、視野角内のアンテナ感度特性(アンテナビーム)の広がり、観測周波数が高いほど小さくなるという性質によるものである。

#### 1.2 サブミリ波観測から得られる化学情報と物理情報

サブミリ波観測は比較的質量の軽い分子(CO, SO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, OCS, HCN, C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>CN, CH<sub>3</sub>OH, H<sub>2</sub>CO, O<sub>3</sub>, HO<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub>), ラジカル(C, O, SH, OH, HCO, CN, CCN, NO, CS, CCCS), イオン(C<sup>+</sup>)などの観測を得意とし、これら多種の分子測定による惑星大気の組成や惑星の化学進化などの議論を可能とする。また、HDOやH<sub>2</sub><sup>18</sup>Oをはじめとする同位体分子の観測から得られるD/Hや<sup>16</sup>O:<sup>17</sup>O:<sup>18</sup>Oの値、あるいはH<sub>2</sub>OやNH<sub>3</sub>における水素のオルトパラ

1. 情報通信研究機構

2. 東京工業大学

3. 京都産業大学

4. 東京大学

5. 東北大学

6. 国立天文台

7. 宇宙航空研究開発機構

8. 大阪府立大学

ykasai@nict. go. jp

比や、 $O_2$ などで見られる磁場の影響によるゼーマン分裂など、分子内部の物理情報により、惑星における物質循環や物理進化の議論が可能になる。ドップラー効果を利用した大気中の風速推定などもその一つである。

また、サブミリ波は大気中の分子スペクトル観測のみではなく、惑星地表面からの熱放射も観測する。この時に観測される輝度温度は、地表面温度と地表面物質の物性などによる放射率が掛け合わされたものを観測する。地表面温度を何らかの方法で決めてやると、地表面を構成する物質の種類やその状態を制約することができる。この特徴はマイクロ波地球観測で確立されている手法であるが、サブミリ波でも同様の観測原理が成り立つ。

天文分野では新しい波長・周波数での観測が常に新しい発見をもたらしてきた。サブミリ波による新しい宇宙の姿を切り拓く目的で、2011年9月から南米チリ大型サブミリ波干渉計ALMAが初期科学運用を開始している。SOとcyclic- $C_3H_2$ の観測を用いて惑星系円盤が形成されつつある際に劇的な化学変化が起こることを明らかにする[1]など、驚くべき発見が相次いでいる。このように画期的な発見をもたらす魅力を持つにも関わらず、これまでサブミリ波が深宇宙における惑星探査に用いられなかったのは何故だろうか？それは、サブミリ波が光と電波の境界領域で10-20年ほど前までは「未開拓周波数帯」と呼ばれてきた新規技術であり、ようやく観測の有効性が実証されてきた「さあ、これから」というフェーズであるということに集約される。サブミリ波観測は、まさに今、惑星観測の新しい姿を切り拓いていこうとしている。

### 1.3 SWIの背景

これまでサブミリ波衛星観測技術は主に地球周回軌道からの地球上層大気観測において発展してきた。これまでに米国NASAのUARS/MLS(Microwave Limb Sounder) (1991年打上)、Aura/MLS (2004年打上)、スウェーデン・カナダ・フランス3カ国共同のOdin/SMR(Submillimetre Radiometer) (2001年打上)、日本の国際宇宙ステーション(ISS)搭載超伝導サブミリ波サウンドJEM/SMILES(2009年打上)の4機のサブミリ波衛星が軌道上から地球大気観測を実施している。SMILESの特徴は4 Kに冷却した超伝導ミキサと

20 K、100 KのHEMTアンプを搭載することで、MLS、SMRと比較し10-20倍もの良い感度を実現したことである。SMILESの観測により地球大気の新しい一面が明らかになっている。特筆すべき点としては、成層圏や中間圏に体積比で1000億分の1程度しか存在しないBrOラジカルの日変動のふるまいを世界で初めて捉え、中間圏における塩素系ラジカルのふるまいを明らかにしたことであり、これらを通して人間活動により放出された物質が成層圏のみではなく中間圏においても活発な大気化学を展開していることを明らかにした。また、その高感度スペクトルを用いて世界で初めて成層圏下部および中間圏における風速を導出し、気象モデルの精度向上の一役にも立っている。ここでは紹介しきれないが、これらをはじめとするSMILESの地球大気観測成果は[2]にまとめてあるのでそちらを参照されたい。

地上のサブミリ波望遠鏡や干渉計を利用した金星、火星や木星といった惑星大気の観測も、数は少ないながら実施されており、各惑星大気における微量成分の測定や大規模スケールの風速場の導出など、他の波長帯での観測とも相補的な研究がなされてきている。木星観測においては、1994年のShoemaker-Levy 9(SL9)衝突によって木星大気上層に注入された微量成分の定量が行われている[3] (本稿2章に詳述する)。

地上からのサブミリ波観測では地球大気がどうしても観測の邪魔となる。その問題点を解決したのが、欧州の宇宙天文台Herschelである。Herschelは地球-太陽の第二ラグランジュポイントに置かれた口径3.5 mのサブミリ波・遠赤外望遠鏡である。搭載機器の一つであるサブミリ波分光器HIFI(Heterodyne Instrument for the Far Infrared)はSMILESと同様に4 K超伝導ミキサを搭載し、サブミリ波・テラヘルツ波を利用した太陽系天体の観測を実施した。そのハイライトは木星族彗星103P/Hartley2の水蒸気同位体比観測である[4]。HIFIは木星族彗星103P/Hartley2におけるHDO、 $H_2O$ の509.292、556.936 GHz放射スペクトルを観測し、それらからD/H比を導出したところ、地球海洋におけるD/Hの値と非常に良く似た値を示した。これは彗星が地球の水の起源として重要な役割を持つ可能性を示唆している。これらは彗星探査機Rosetta搭載のサブミリ波観測装置MIRO (Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter)によりさら

に解明されていくことと期待される。

こうしたサブミリ波惑星観測の新たな局面として登場するのがJUICE-SWIであるが、この観測装置の構想が始まったのは、木星探査計画がまだLaplaceという名前で呼ばれていた頃である。JUICEそのものの検討の変遷は前回の記事[5]に詳しいのでここでは割愛するが、その頃からドイツ・マックスプランク太陽系研究所(MPS)を中心としてフランス・パリ天文台やアメリカ・JPLなどとの国際協力のもとで観測装置の提案が練られてきた。そして、JUICEへの搭載観測装置が募集された際に、ちょうどその頃JEM/SMILESでの経験を将来の惑星探査用小型サブミリ波観測器の開発に繋げようとしていた日本チームもSWIの開発に合流することとなり、まさに日欧米のサブミリ波惑星科学コミュニティが一体で取り組む国際共同プロジェクトとなった。その後、JPLが撤退となったものの、現在、スイスやスウェーデン、ポーランドなども参加した測器開発が鋭意進行中である。

## 2. JUICE-SWIの科学

### 2.1 サブミリ波観測が拓く木星ガリレオ衛星の科学

ここでは、SWIが行うガリレオ衛星のサブミリ波観測に焦点を絞り、その科学的意義や波及効果について述べる(対象を、本記事のタイトルにも含まれている「氷衛星」とせず「ガリレオ衛星」と取替えているのは、イオの希薄大気の観測もSWIの重要な科学目標の一つだからである)。SWIの特徴である高周波数分解能を活かした、ガリレオ衛星希薄大気の同位体観測や、エウロパから噴出するプリューム[6]に含まれる内部海由来の溶存ガスやイオンの測定など、JUICEミッション全体の科学目標の達成(木星系のキャラクター化、氷衛星のハビタビリティの理解)に深く関わる観測も、これに含まれている。

前者の木星系氷物質の同位体組成は、太陽系物質科学のみならず、惑星形成論や系外惑星系円盤の天文観測にとっても重要なデータとなり、後者は宇宙におけるハビタビリティの理解という意味で、惑星科学のみならず地球化学や極限微生物学にも広い波及効果をもつだろう。JUICEの探査が実現する2030年代という先を見越した期待を述べれば、SWIが行う多様な観

測対象や分子種の観測データは、それぞれの学問分野の進展に貢献するに留まらず、これらの分野を結びつけた新たな学問領域(アストロバイオロジーや比較惑星系円盤学)を創成する種にもなるであろう。

#### (1) ガリレオ衛星希薄大気観測と惑星形成論

太陽系の氷衛星は、周ガス惑星系円盤中の固体物質の集積によって形成したと考えられている[7]。近年のガス惑星形成理論によると、氷衛星が形成するガス惑星形成後期の周ガス惑星系円盤内では、低圧低温のため化学反応がほとんど起こらなかったことが示されている[7]。その場合、氷衛星の材料物質となる氷微衛星の組成は、原始太陽系円盤のガス惑星形成領域の氷物質組成を反映したものとされる[7]。従って、原始太陽系円盤の木星形成領域(標準モデルでは5 AU)の物理化学情報を得るためには、ガリレオ衛星(特に、地質活動が乏しく、初期の情報を保持しているであろうカリスト)の化学・同位体組成を理解することが重要となる。

SWIが行うガリレオ衛星の希薄大気中での重要な観測項目の1つに、 $H_2O$ のD/H比の測定がある。過去の研究から、分子雲において水と水素ガスのD/H比は大きく異なることが示唆されている[8]。低温の外側太陽系では、これら分子雲由来のD/H比は保存されるが、内側太陽系の水の雪線付近では水と水素ガス間の同位体交換が活発に行われることが予想されている[8]。このような原始円盤における同位体交換効率は、円盤温度やガス粘性といった円盤の物理パラメータに大きく影響を受ける。言い換えれば、現在の太陽系において、始原的な氷の持つD/H比の動径方向の分布が得られれば、上記の物理パラメータを制約することにつながる。

上記の原始円盤における物理パラメータは、惑星形成論において惑星系の大構造を決定する極めて重要な値であり、これが惑星探査から実証的に制約できる意義は大きい。実際、Cassini探査機によって、土星衛星エンセラダスの水のD/H比が、彗星のものとよく一致していることが確かめられている。同様の水のD/H比分布や、上記の制約に対して大きな意味を持つだろう。このような物質・同位体分布の理解や、原始太陽系円盤の物理化学状態の理解は、地球の材料物質(特

に水の起源)を、より詳細に制約することにもつながる。さらに、ALMAをはじめとする高空間分解能を持つ地上大型望遠鏡によって、系外惑星系円盤の温度構造や同位体分布が、近年急速に明らかになりつつある。このような天文観測結果と、探査結果および円盤モデルにより推定される原始太陽系円盤の姿を比較することで、太陽系の初期条件が、数多の系外惑星系円盤のなかで普遍的なものか特殊なものなのかを理解することもできるだろう。このような惑星形成論や原始円盤モデルは、日本が世界をリードする分野である。今後もしも当該分野を引っ張る存在であるためにも、望遠鏡を使った天文観測のみならず、SWIを始めとする太陽系探査との連携は重要となる。

## (2) エウロパリウムとハビタビリティ

地球上の生命は、(a)液体の水、(b)生命必須元素、(c)自由エネルギーの3つを必要とする。生命自体を探すことの困難さを考えれば、上記の3要素が満たされる環境を宇宙において探すことが、現状において地球外生命発見のための第一歩となるだろう。エウロパの場合、Galileo探査機がもたらした様々な証拠から判断して、液体の水が内部に存在することはほぼ間違いない。しかし、これでエウロパが生物学的にハビタブルであると結論できるかといえばそうではない。エウロパの生命生存可能性を理解するためには、(b)や(c)の条件が満たされているかを明らかにする必要がある。そのためには、内部海の詳細な化学組成の情報が不可欠である。しかしながら、エウロパ内部海は厚い氷地殻の下に存在するため、塩だけでなく溶存ガス種も含む化学情報を、観測によって直接得ることは困難であろうと思われる。

Hubble望遠鏡によってもたらされた大きなブレイクスルーは、エウロパにおいてもエンセラダスのようなプリウム活動が存在することが明らかになったことである[6]。この発見により、探査機の周回(あるいはフライバイ)観測から、エウロパ内部海の化学組成を明らかにすることができる可能性が示された。エウロパプリウムでの重要な観測項目は、炭素( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ )、硫黄( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ )、窒素( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ )といった元素を含む分子種の検出および定量である。これらの元素は生命必須元素であり、内部海におけるこれら元素の存在形態や量を調べることは上記(b)の理解に

直結する。さらに、これらの分子種は地球上の生命活動によっても生成・消費される分子種であり、エウロパにおける上記(c)の理解や生命活動の有無を調べるバイオマーカーともなりうる。以下、この点を少し詳しく述べる。

エウロパのような太陽光の届かない内部海では、生命が利用できる自由エネルギーは、分子種の酸化還元反応によって得られると考えられる[9]。エウロパでは、内部での海底熱水反応によって還元剤(例えば $\text{H}_2$ )が生成され、氷地殻内での放射線分解反応によって酸化剤(例えば $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ )が生成されている可能性がある[9]。これら還元剤、あるいは酸化剤の供給によって、内部海組成は化学的に非平衡となる。地球化学的物質循環において、生命は非常に効率のよい触媒である。もしエウロパに生命が存在すれば、酸化還元反応によって還元剤や酸化剤を消費し、内部海組成をより低いエネルギー状態(あるいは平衡状態)にするであろう。したがって、内部海組成に非平衡が存在すれば、上記(c)の自由エネルギーが存在することを示し、上に挙げたような生命関連分子の存在量比に、熱水活動や放射線分解などの非生命過程で説明できない異常が見つかれば、それがバイオマーカーとなるだろう。この際、重要となるのは、エウロパにおける非生命過程で生じる酸化還元反応の理解である。日本ではこれまで、地球化学と極限環境微生物学の研究者が協力し、地球の海底熱水噴出孔での非生命酸化還元過程の理解を、深海探査および実験的に制約し、海底熱水噴出孔における生命存在可能性を議論してきた。現在、惑星科学の研究者がこれに加わり、世界に先駆けてエウロパなどの氷衛星での非生命酸化還元過程の実験的・理論的制約を行っている。

JUICE探査機の観測機器の中でプリウムの化学組成を調べることができるのは、SWIとUVI(UV Imaging Spectrograph)による分光観測である。SWIは極性分子である $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SiO}$ などに感度がよく、存在量が微量であっても検出・定量できる可能性がある。また、UVIは単純な $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$ などの分子種の観測を行うことができるだろう。SWIとUVIは、相補的に観測可能な分子種をカバーし合い、プリウムに含まれる主要溶存種の化学組成の全容を明らかにすることができるかもしれない。これら探査結果と、実験や深海底探査に基づいたエウロパ内部海

モデルによるそれらの解釈は、エウロパにおける生命存在可能性の理解を本質的に前進させてくれるだろう。

## 2.2 木星成層圏大気観測とその意義

JUICEにおける木星本体の探査に対して、SWIは木星大気観測の中心的役割を担う。木星という巨大ガス惑星における大気物理現象を理解するということは、地球大気理解をベースに発展してきた大気物理学を、より普遍的な惑星大気物理学に発展させるための大きなブースターになると考えられる。

木星大気理解における最終目標は、流体力学・気象学・惑星物理学・大気光化学・熱化学をベースとして、極から赤道に至るまで、コアから最上層に至るまでのガス惑星構造と組成、および物理諸過程の解明である。地球より自転周期が短く、太陽放射のみならず内部熱源の影響も受ける木星大気について、その循環・温度場・雲層・大気組成を決定する力学・放射・化学メカニズムの理解は、比較惑星気象学の観点からも興味深い。木星の大気は100 hPa付近を境界に対流圏と成層圏に分けられる[10]。対流圏上部にはアンモニア、アンモニア化合物、水蒸気による雲層が存在し、よく知られる縞模様構造や大赤班はこの雲層の構造を見ている。また成層圏上端(0.001 hPa付近)より上には、熱圏上層大気が存在する。しかしながら、木星大気鉛直方向の循環や物質輸送がどのような過程において、どのような規模で、どのような深さまで互いに影響し合うのかはわかっていない。

SWIは、木星成層圏の物理化学プロセスをターゲットとした大気観測を行う。この高度領域は、内部熱源によって循環が駆動されている対流圏と、外部からのエネルギー供給が支配的となる上層大気とを繋ぐ高度領域であり、木星大気循環や熱収支を理解する為には重要な鍵となる。さらにこの観測は、雲層より深い対流圏の観測を対象とする米国のJUNO探査機搭載マイクロ波放射計MWIによる観測と互いに相補的な面を持つ。

以下にSWIの目指す主な木星大気科学を述べる。

### (1) 成層圏風速場および気温場観測

一般的な惑星大気において、対流圏では大小の対流セル構造がエネルギーや運動量輸送を担うのに対し、成層圏では放射と大気波動の影響が強く効いていると

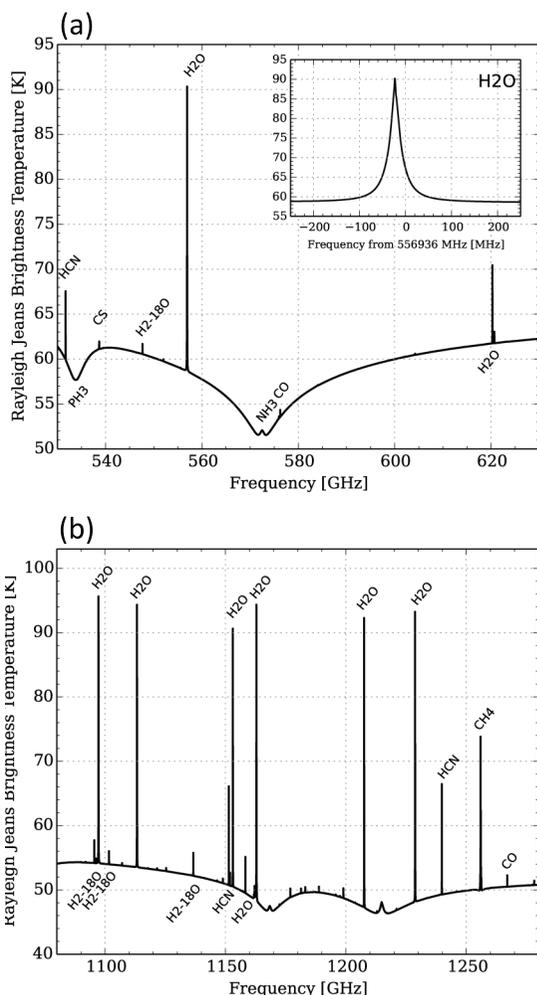


図1: SWIの観測周波数帯である(a)600 GHz帯および(b)1200 GHz帯における木星大気スペクトル(リム放射)のシミュレーション図。1000 hPaの接線高度を観測したケースを想定。(a)内部の図は、556 GHzのH<sub>2</sub>O吸収線拡大図。木星大気の高速回転によって、吸収線の中心周波数がドップラーシフトをしている。

考えられている。雲層付近で生成された大気波動は、成層圏へと上方伝搬する。コリオリ力が相対的に小さい赤道域では、下層大気からの大気波動は主に東西風を加速・減速させる効果をもたらす。その一方で中緯度帯においては、コリオリ力と作用し子午面風を駆動する。このメカニズムにより大気東西風の向きが周期的に入れ替わることになり、地球で見られる準二年周期振動などをもたらす要因となっている[11など]。

木星の場合はどうか。VoyagerやCassini探査機、地上赤外線望遠鏡などによる木星成層圏の気温場観測の

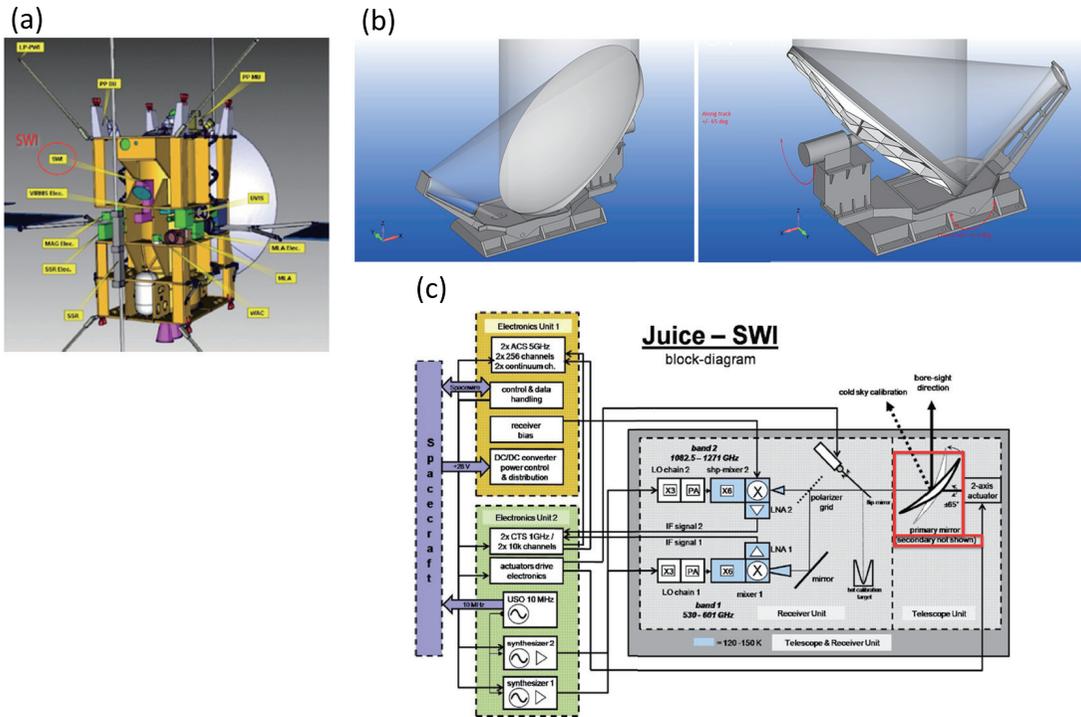


図2：SWIの概念図。(a)JUICE探査機とSWI(JUICE Yellow Bookより)，(b)SWIアンテナ光学系，(c)SWIブロックダイアグラム。

結果を見ていくと、赤道域で約4地球年周期での変動の存在が示唆されている[12など]。この準四年周期振動(Quasi-Quadrennial Oscillation, QQO)とも呼ぶべき変動はモデル計算による再現も行われているものの[13]、その存在を定量的に検証するような成層圏風速場の直接的な観測結果は未だ得られていない。現在までに得られている木星大気循環に関する観測的研究は、雲構造をトレーサーとして対流圏の大気運動を可視化するような観測、あるいは成層圏の気温場から温度風近似を利用して東西風速を求めるような研究に限られている。後者としてはCassini探査機で得られた気温場を利用したものがあるが、そこでは低緯度帯(23°N, 5°N)に60–140 m/sにも達する高速東西風の存在が示されている[14]。そのような高速流は安定して存在するか、QQOとの関連性はどうか、また温度風近似が成り立たない赤道域の様子や、成層圏子午面循環の情報など、未だ多くの観測的情報が欠落したままである。

SWIでは木星成層圏に存在する微量大気成分(CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, HCN, CO, CS等)からの大気放射を、非常に

高い周波数分解能で観測する(図1)。またサブミリ波観測の大きな利点として、分子吸収線のドップラーシフトを用いて大気風速を直接的に観測することが可能なことが挙げられる。こうした風速観測は地上のサブミリ波望遠鏡を利用しても可能ではあるが、周回軌道からの観測を行うことで、空間分解能の改善だけではなく、鉛直方向の情報分離も可能となる。SWIでは、0.01–400 hPaと広い高度領域をカバーすることを目指している。

1995年に投下されたGalileoプローブによる測定や地上望遠鏡による観測から、対流圏では東西風ジェットは長期にわたり持続的に、また高度方向にはほぼ一様に(少なくともGalileoプローブが測定した22 000 hPaより上の領域では)吹いており、さらに大赤斑のような渦状構造が長期的に持続して存在することが示唆されている。このような対流圏における大気運動が成層圏にどのような影響を及ぼしているか、JUNO/MWIによる対流圏深部の観測と合わせて新たな知見が得られることが期待される。

## (2) 成層圏大気微量成分の解明

木星の大気組成は、1章で述べたSL9衝突にも見られるように、惑星外部からの影響を度々受けると考えられている。SL9衝突の際には、CSやCO、HCNといった分子が木星大気に注入されている。こうした外的要因が惑星の大気組成の進化にどのように影響を及ぼしてきたのかを知る為に、成層圏大気組成の空間・時間変化をモニター観測していくことが必要である。特に先ほど述べたようなCSやCOといった分子は、化学的に比較的安定な為、SL9衝突発生後惑星全体に広がり、その後希薄化していく様子が観測されており、木星大気における大気循環や渦拡散を定量的に測るトレーサーとなっている [3]。近年のCassini探査機による観測では、空間分解能の良い観測が実現した結果、HCNとCO<sub>2</sub>が木星上で異なる空間分布(HCNが極域では殆ど存在しないのに対し、CO<sub>2</sub>は南極にその存在量の極大を持つ)が示されている [15]。SWIではこうした物質循環を高い空間分解能(緯度分解能1度)で観測を行い、様々な空間・時間スケールの水平移流と拡散プロセスを定量的に明らかにする。

また、H<sub>2</sub>OもSWIの重要な観測ターゲットである。木星成層圏におけるH<sub>2</sub>Oは、赤外線宇宙天文台による観測で発見されたが [16]、その起源は未だ定量的な理解は出来ていない。SL9衝突の様な突発性事象でもたらされたという説 [17]も存在するが、それ以外にも、惑星間ダストにより恒常的に木星大気へと降り込んでいくとする説、木星周囲のリングや氷衛星から磁力線を介して取り込まれているとする説などが唱えられている。SWIではH<sub>2</sub>Oの鉛直分布を観測し、その緯度分布をモニターすることで、巨大ガス惑星におけるH<sub>2</sub>Oの起源を定量的に評価する。

## 3. JUICE-SWI センサ概要と開発スケジュール

SWIの測器概要を図2に、測器性能を表1に、観測分子を表2に示す。図2aはJUICE探査機とSWIである。図2b, cに示すようにSWIのアンテナは開口直径30 cmのオフセット・カセグレン鏡である。木星や氷衛星のマッピング観測の他、信号レベルの較正のために深宇宙を指向する必要があるため、アンテナ系は直交した2軸方向に走査を行うための駆動機構を持ち、JUICEの軌道面内方向には±76°、それに直交する方

向にも±4.3°の範囲で視野を移動できる。SWIは2系統の独立した受信機を搭載しており、600 GHz帯で直交する二偏波の観測を行う(1系統を1200 GHz帯の受信機に置き換えるオプションも検討している)。受信機のフロントエンドはショットキー・バリア・ダイオード・ミキサであり、ここで観測信号と局部発振器信号とを混合することによって、サブミリ波帯の観測信号をマイクロ帯の信号に変換する。マイクロ波信号は最終的に高分解能分光計(CTS)と広帯域分光計(ACS)へと導かれ、分光スペクトルとして検出される。

SWIの開発はMPSをとりまとめ機関とする国際分担で進められており、日本はアンテナ鏡面の開発を担当する。惑星観測のためにはアンテナ指向性向上やサイドローブ抑制などが重要になるが、アンテナ鏡面に関して、日本はSMILESの開発経験から高い技術的成熟度を持つ。観測対象のサブミリ波強度を正確に知るにはアンテナ鏡面の損失などの較正データが重要であるが、日本チームは鏡面のオーミック損失を評価する特許技術などを有しており、地上でのアンテナ光学系の評価を主導することも期待できる。

JUICEの2022年の打ち上げを目指し、日本担当分については2018年にフライト品を完成し、MPSへ輸送する計画である。MPSでは各国で開発されたコンポーネントを組み上げ、SWI全体としての試験を実施した後、SWIをJUICEへと引き渡す。

SMILESのヘリテージを最大限に活かすため、日本分担分の開発においては、SMILESのアンテナ開発の実績があるメーカーとの協体制を構築する。電気性能(サブミリ波性能)に関わる設計・試験はSWIチームが実施し、担当メーカーは主鏡、副鏡、第3鏡の機械設計・製作、および機械測定(鏡面精度・粗度測定、周期的歪みの測定)を実施する。2014年度には、SWI国際チームが分担して開発するコンポーネント間のインターフェースを確認するためのモデル(デモンストレーション・モデル)の開発を行い、MPSにおいてSWI全体としての機能を確認する試験を実施する。また、並行して鏡面のサンプルを用いた環境試験(高強度放射線に対する耐性と低温環境を含む広範囲温度における安定性等)を行い、鏡面が木星環境での使用に耐えることを確認する予定である。

表1：SWIの測器仕様.

観測性能	
観測周波数	600 GHz帯 (～ 530–600 GHz), 1200 GHz帯 (1075–1275 GHz) (オプション)
システム雑音温度	1500 K (DSB <sup>[1]</sup> , 600 GHz 帯), 3000 K (DSB, 1200 GHz 帯) (オプション)
空間分解能	1000–2000 km@15木星半径 (0.5–1.0 km @ 500 km)
アンテナ系	
ビーム幅	約 0.11° @600 GHz
鏡面精度	<6 μm r.m.s
駆動範囲	軌道面内方向：-73 – +73° 軌道面に直交する方向：-4.3° – +4.3°
ポインティング精度	<5秒角 (knowledge) (設定精度は<30秒角)
受信機系	
ディテクタ	ショットキー・バリア・ダイオード
分光計	
形式	広帯域分光計 (ACS <sup>[2]</sup> ), 高分解能分光計 (CTS <sup>[3]</sup> )
観測帯域	ACS : 5 GHz, CTS : 1 GHz
周波数分解能	ACS : 19.5–4.9 MHz (256–1024 ch), CTS : 0.1 MHz (10000 ch)

[1] SWIは両側波帯 (double side band, DSB) の受信機である.

[2] Autocorrelation Spectrometer

[3] Chirp Transform Spectrometer

表2：SWI観測物理量と観測精度.

	氷衛星	木星	
地表面	大気 温度・風速・組成の3次元プロファイル		
<ul style="list-style-type: none"> <li>ガニメデのレゴリスの理解：600, 1200 GHzバンドより表層の輝度温度を高空間分解能で測定</li> <li>レゴリスの表面～1cmの熱波の振幅と位相を導出</li> <li>レゴリスの熱・物理的特性を測定</li> <li>大気と表層の特性の相関を見る</li> </ul>	トレーサー分子の3次元構造モニタリング	ガニメデ/カリスト： H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , COからの <sup>17</sup> O, <sup>18</sup> O, D, オルト・パラ比	
	新しい分子種の探査	NH <sub>3</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> OH, H <sub>2</sub> CO, CN, C <sub>2</sub> N, CS, C <sub>3</sub> S, NO, SiO, OH, HO <sub>2</sub> , HC <sub>3</sub> N, CH <sub>3</sub> CCH, halides (HCl···)···, <sup>17</sup> O, <sup>18</sup> O, D, <sup>13</sup> C, <sup>15</sup> N, <sup>34</sup> S (from HCN, CO, CS), C <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O, CS, HCN, CO, OCS (SL9衝突や木星外部由来の大気分子)
	鉛直分解能	1 km	～ scale height
	水平分解能	2–10 km	<5 degrees
	温度観測精度	<2 K in collisional range	<5 K
	ドップラー風速観測精度	10 m/s	10 m/s (CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O)

## 4. これから

本稿では駆け足ではあるが、JUICE搭載サブミリ波分光計SWIについて述べた。初めての探査機からのサブミリ波惑星観測は惑星科学の発展にどのような

ブレイクスルーをもたらすのであろうか。SWIの科学目標の中でも、「氷衛星の物理化学」に関しては日本のSWIサイエンスチームの活躍が期待される場所である。また、GALAなど他の観測装置から得られる情報と連携することで、さらなるサイエンス展開が期待される。そうしたサイエンスの議論を日本のコ

コミュニティが牽引できるよう、今からしっかりとした準備をしていきたい。その為には、ALMAなどを用いた地上観測によりサブミリ波惑星観測の実績を重ねることも非常に重要である。また、若い分野である「サブミリ波惑星探査」は大いなる可能性を秘めている。SWIの測器開発で培う惑星探査の技術を次世代の若者に継承し、これからの学生諸君に夢と発見を与える日本オリジナルのサブミリ波惑星探査機[18]を実現していくことに挑戦していきたい。

## 5. 謝辞

本連載を企画し、SWI紹介の機会を与えて頂いた木村淳氏(東京工業大学地球生命研究所)に感謝する。

## 参考文献

- [1] Sakai, N. et al., 2014, *Nature* 507, 78.
- [2] SMILES Publications, [http://smiles.nict.go.jp/pub/publication/publications\\_all.html](http://smiles.nict.go.jp/pub/publication/publications_all.html)
- [3] Moreno, R. et al., 2003, *Planet. Spa. Sci.* 51, 591.
- [4] Hartogh, P. et al., 2011, *Nature* 478, 218.
- [5] 木村淳ほか, 2013, *遊星人* 22(3), 146.
- [6] Roth, L. et al., 2014, *Science* 343, 171.
- [7] Canup, R.M. and Ward, W.R., 2006, *Nature* 441, 834.
- [8] Mousis, O. et al., 2000, *Icarus* 148, 513.
- [9] Zolotov, M.Y. and Shock, E.L., 2004, *J. Geophys. Res.* 109, E06003.
- [10] Seiff, A. et al., 1998, *J. Geophys. Res.* 103, 22857.
- [11] Baldwin, M.P. et al., 2001, *Rev. Geophys.* 39, 179.
- [12] Simon-Miller, A.A. et al., 2006, *Icarus* 180, 98.
- [13] Friedson, A.J., 1999, *Icarus* 137, 34.
- [14] Flasar, F.M. et al., 2004, *Nature* 427, 132.
- [15] Lellouch, E. et al., 2006, *Icarus* 184, 478.
- [16] Feuchtgruber, H. et al., 1997, *Nature* 389, 159.
- [17] Lellouch, E. et al., 2002, *Icarus* 159, 112.
- [18] Kasai, Y. et al., 2012, *Planet. Space Sci.* 63-64, 62.