

## 分光器の限界を押し広げる 惑星／深宇宙アプリケーション

ゲイル・オーバートン

深宇宙／惑星観測装置は、極高低温や振動、放射線、宇宙ゴミなど、性能を脅かすさまざまな状態に挑まなければならない。その状況は技術者に、より頑強な光学部品の開発を要求し、分光器の性能を極限にまで高める。

アメリカ航空宇宙局(NASA)の宇宙船、ボイジャー1号は現在、太陽系の外側の、太陽から110億マイル以上離れた地点を飛行している。驚いたことに、ボイジャー1号に搭載された紫外分光器(UVS)は、まだ正常に動作している。ボイジャー1号のUVSは-31°Fの温度条件で設計されているが、NASAは、この温度条件を気にすることなく、エネルギーを節約してボイジャーの寿命を2025年まで伸ばすために、ボイジャー1号のUVSが収められている部分のヒーターのスイッチを切った。現在の温度は-110°F以下であるにもかかわらず、ボイジャー1号が木星や土星に接近した際に活発に動作していた分光器は、現在でもデータを送信し続けている。

明らかに、太陽を測定する分光器や、米オーシャン・オプティクス社(Ocean Optics)が開発し、月に水氷があることを立証した分光器、ALICEなどの深宇宙／惑星向け分光装置は、極高低温や振動、宇宙ゴミなど、性能を脅かすさまざまな状態にさらされているため、科学者には新しい光学部品を使用した新技術の開発が求められている。

### ボイジャー以降

ボイジャー1号が打ち上げられてから35年以上が経った。米アリゾナ大学(University of Arizona)の月・惑星研究所で惑星学科の教授を務めるロジ

ャー・イエール氏(Roger Yelle)は、「ボイジャーのUVSの実験は、太陽系の外部に関するわれわれの理解を根本から変えた。しかし、それ以上に、同実験はUV分光、特にUV掩蔽(えんぺい)ある天体が他の天体の前を通過してそれを隠す現象)の力を示すことになった」と述べている。

アリゾナ大学は、仏パリ大学(Université Paris)および米カリフォルニア工科大学(California Institute of Technology)にあるNASAのジェット推進研究所(JPL: Jet Propulsion Laboratory)と共同で、土星探査機カッシーニの紫外線撮像分光装置(UVIS: Ultraviolet Imaging Spectrograph)が観測した星の掩蔽のデータを使用して、土星最大の衛星であるタイタンの標高400~1400kmの中間圏と熱圏の探測を行っている。カッシーニのUVIS装置は、米コロラド大学(University of Colorado)の大気宇宙物理学研究所(LASP: Laboratory for Atmospheric and Space Physics)が開発したUVISのことで、JPLが開発した宇宙船カッシーニ・ホイヘンスに搭載されて、1997年に宇宙に向けて打ち上げられた。

タイタンの大気のスเปクトル情報が得られるのは、星が惑星の周縁部に見えるときである。掩蔽されない既知の星のスเปクトルと、惑星の大気を通して送信された星のスเปクトルとの比較

によって、その惑星自体の成分が明らかになる。

カッシーニのUVIS装置は、望遠鏡とトロイダル回折格子搭載分光器、1024×64(スเปクトル×空間)「ピクセル」で各ピクセルの寸法が0.025×0.1mmの2次元パルス計数マイクロチャネルプレート検出器から構成される。望遠鏡の入射ひとみは20×20mmで、軸外放物面鏡(22×33mm)が備えられ、焦点距離は100mmである。掩蔽はすべて、視野角(FOV: field of view)が1.5×60 mradのUVISの遠紫外(112~191nm)チャンネルによって、幅が0.15mmの低分解能のスリットを使用して観測された。

分光器のデータは、タイタンの大気が複雑な光化学の場で、タイタンの成層圏で観測される有機物ヘイズの形成に重要な役割を担う炭化水素とニトリル系物質が形成されていることを示している(図1)。分光器のデータによって明らかになったメタンとその他の炭素-水素化合物の密度分布は、タイタン全体の大気に関する重要な情報をもたらすだけでなく、エアロゾルの微小な種からフラクタル凝集体への成長といった大気に関する幅広い洞察を可能にする。

### ラマン天体分光法

UV分光器以外では、米サウスカロライナ大学(University of South Car-

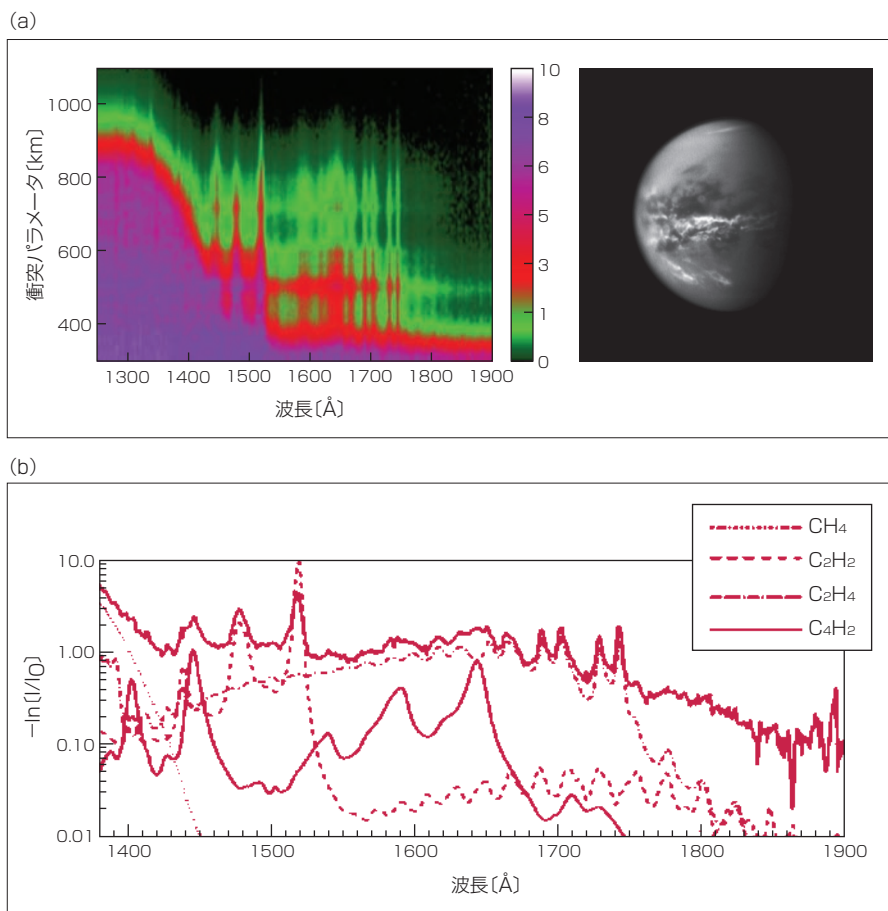


図1 タイタンからの光学的深度の線(写真はタイタンの画像を示す。提供: NASA JPL)は、エアロゾルとそれ以外の物質の両方による吸収の拡張によって示された減光層(光学的深度の高い層)を示す(a)。光学的深度のスペクトル(bの実線)は、平均700~750kmの大気範囲を超える。その他の点線は、最良の柱密度に基づいた異なる吸収装置からの寄与を示す(提供: アリゾナ大学)。

olina)化学・生化学部化学生態学科の教授であるスタンレー・ミハエル・エンジェル氏(Stanley Michael Angel)とフレッド・M・ヴァイスマン(Fred M. Weissman)パルメット・チェア氏は、米ハワイ大学(University of Hawaii)およびNASAのエイムズ研究センター(Ames Research Center)の共同研究者と共に、惑星の遠隔探査にラマン分光法を適用している。

ラマン分光器の仕様は、爆発物の探知や、あらゆる種類の化学物質の分析に使用される地上用携帯型分光器と同様に、振動周波数や相対強度、試料のスペクトルのバンド数に基づいて鉱物

や化学物質を分析できるように改善された。可視、近赤外での熱反射・放射分光器は、特に混合物が存在する際に、スペクトルが広い範囲で重なっているが、ラマン分光器はいまいさを低減し、最大数百メートル離れた地点からの測定に能力を発揮できる。

2012年初めエンジェル氏は、惑星用ラマン分光器に向けた、空間的ヘテロダイナミクス干渉計を使用するラマン分光器(SHS)の実用化に向けた開発で、応用分光学会からWilliam F. Meggers賞を受賞した。

分散型(回折格子)手法は、高いスペクトル分解能を実現するために、大規

模な分光器と非常に細いスリットを必要とするが、UV SHSはそれとは異なり、分解能とスループットの弱いカップリングをもつだけである。そのため、UV SHSは小型で、最大のスループットを得るために広いスリットを使用できる。SHSは、厳しい地球大気圏外での作業のための可動部品を持たず、インターフェログラムの中で、すべての光路長の差をICCDアレイを使用して同時に測定する。同手法はパルスレーザーを使用したゲート型検出と互換性がある。これは、周囲背景を遮断し、惑星表面で遭遇する可能性のある予期せぬ物質からの蛍光を低減する。

欧州宇宙機関のExoMarsミッションは、着陸船(2018年に打ち上げ予定)を備えた人工衛星(2016年に打ち上げ予定)を含み、着陸船には、鉱物分析用のレーザー誘起ブレイクダウン分光(LIBS:Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)システムと共に、初めてラマン分光器が搭載される予定である。LIBSシステムは、マイクロモードかマクロモードのいずれかで動作する。マイクロモードでは、細かい(20~100 $\mu\text{m}$ の大きさの)粒状に砕かれたサンプルを調べる。マクロモードでは、着陸船のロボットアームに装着されたプローブが、直径の大きい(数百 $\mu\text{m}$ )光源ビームを使用して、測定領域を拡大する。ラマン分光器は、鉱物の分析のほか、シアノバクテリア(藍色細菌)や葉緑素、あるいは地球外生命の存在を示すアミノ酸などの生物学的分析物を遠隔で検出するために使用することも検討されている。研究では、こうしたバイオマーカーを判別するために、ラマンシステムには500~1700 $\text{cm}^{-1}$ のスペクトル範囲で16 $\text{cm}^{-1}$ の分解能が要求されることが示されているが、エンジェル氏は、ラマン分光器はUV励起を使用して

ほぼフェムトモルレベルでアミノ酸を検出できることを明らかにした(図2)。

ラマン天体分光器はまた、金星に送り出すことも検討されている。ハワイ大学で行われた遠隔操作によるラマン測定では、9m離れた地点から最高1003Kの高い温度下で鉱物を識別できたほか、金星表面の約95気圧で423Kの超臨界的な二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)環境下でも鉱物を識別できた。無水硫酸塩や炭酸塩、ケイ酸塩など、金星に重要な鉱物は、暗光と周辺光の両方の環境下で検出され、遠隔操作によるラマンシステムが、苛酷な金星の表面に着陸することなく表面の鉱物を分析したり大気成分を識別できることが示された。

### 過酷な環境に耐える

水星探査機メッセンジャーのミッションは、水星の高温環境の下で接近飛行を継続し、反射率と高解像度の画像データに基づいて、広大な平原の形成には火山が関連し、表面の化学物質と鉱物は多彩であることを明らかにしている。水星の形成メカニズムについては、メルティ(MERTIS:水星放射計・熱赤外分光計)からの中赤外線スペクトルと温度の詳細な分析データを通して、多くが理解されることになるだろう。メルティは、欧州宇宙機関(ESA: European Space Agency)の水星表面探査機ミッション、ベピ・コロombo(Bepi-Colombo)計画の一部で、2015年に打ち上げ、2022年までに水星に到着する予定である。

プッシュブルーム型赤外線回折格子分光計(TIS:7~14 $\mu$ m)とマイクロラジオメーター(TIR:7~40 $\mu$ m)を搭載したメルティは、センサーヘッドモジュールや電子回路モジュール、パワー/キャリブレーションモジュールから構成され、重量は3.4kg、消費電力は13W

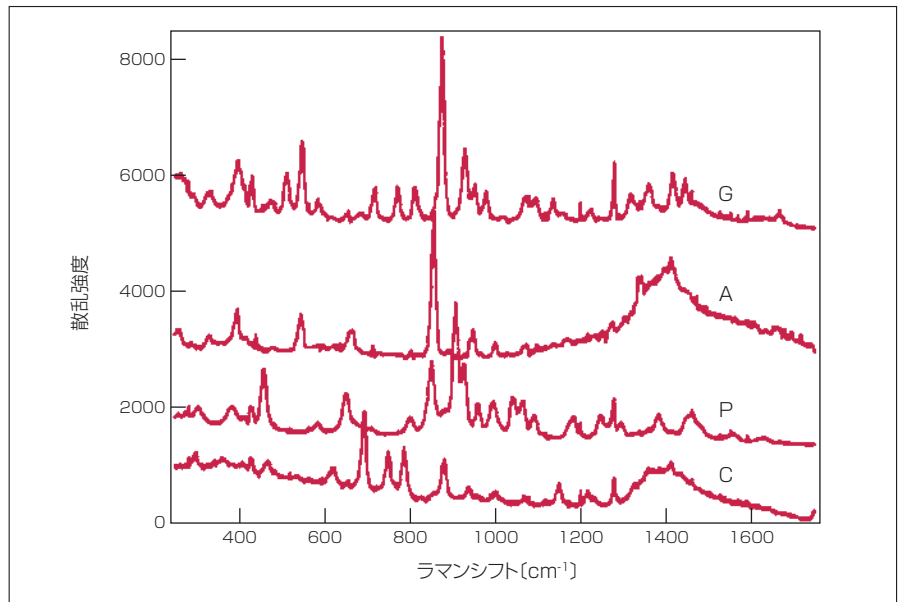


図2 アミノ酸の1種であるグルタミン(G)、アラニン(A)、プロリン(P)、システイン(C)のラマンスペクトルを示す。これらのアミノ酸は、地球外生物の存在を示す重要なバイオマーカー(生物指標)である。(提供: 南カリフォルニア大学)

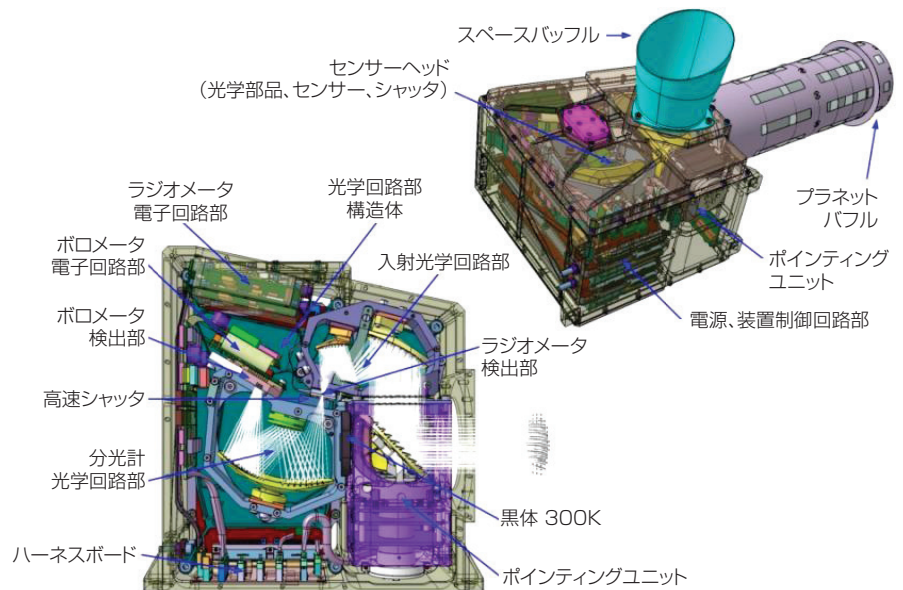


図3 MERTISの構造および熱モデルを示す。(提供: ミュンスター大学、ドイツ航空宇宙センター)

未満である(図3)。すべてのモジュールは、性能を最適化するために熱的に分離され、飛行中のキャリブレーション処理は、惑星、深宇宙、搭載された2つの黒体源の4つのターゲット(視準標)の逐次観測結果を使用する。バッフルと光学系の間にある45°のチルトミラーによって、(300および700Kで

の)キャリブレーションターゲットと、互いに垂直方向に切り離された2つのバッフルを通して見えるコールドスペースと水星の両方を、放射線から光学回路と電子回路を保護するシリンダの作用で繰り返し参照することができる。

焦点距離が50 mmの望遠鏡(f/2)は4°の視野角を作り出し、TIS分光計が

500mの空間分解能で惑星全体を測量することを可能にする。非冷却マイクロボロメータアレイを使用して検出するTIS撮像分光器は、3ミラーアナスタグマート(TMA)とオフナー格子分光計を改良したものを組み合わせている。

ドイツ航空宇宙センター(DLR)および独ミュンスター大学(University of Munster)のスタッフで、惑星学および宇宙飛行計器の分野で30年以上の経験をもつガブリエル・E・アーノルド氏(Gabriele E. Arnold)は、「中赤外分光器は、惑星表面の成分と構造の研究／測量用に、多くの異なる様式が提供されている。水星に関するこうした情報を集めることによって、水星の形成と成長過程についてより多くを学ぶことが望まれる」とした上で、「メルティはモジュール方式を使用した最新の測定器である。メルティ開発における独自の挑戦が、消費電力と重量が最小の新しい光学および光学機械、フロントからエンドまでの電子ソリューションを必要とした。そして、新しいテクニカルエンジニアリングの考え方に統合される必要があった」と付け加えた。

分光器は、水星と金星の過酷な気象条件や、深宇宙のゴミや粒子衝突といった、飛行中または軌道を回っている間の危険に直面するほかにも、厳しい宇宙環境に対して最も耐性が優れている光電子部品や材料を見極める役割を担っている。2009年に行われたSTS-129シャトルミッションでは、NASAの材料曝露実験装置(MISSE: Materials International Space Station Experiment)の一環として、米ステラネット社(StellarNet)が開発した小型分光器BLUE-Wave 2機が打ち上げられた。BLUE-WaveはMISSE7装置の一部で、700種類以上の新しい光電子材料を評価するために、国際宇宙ステーション

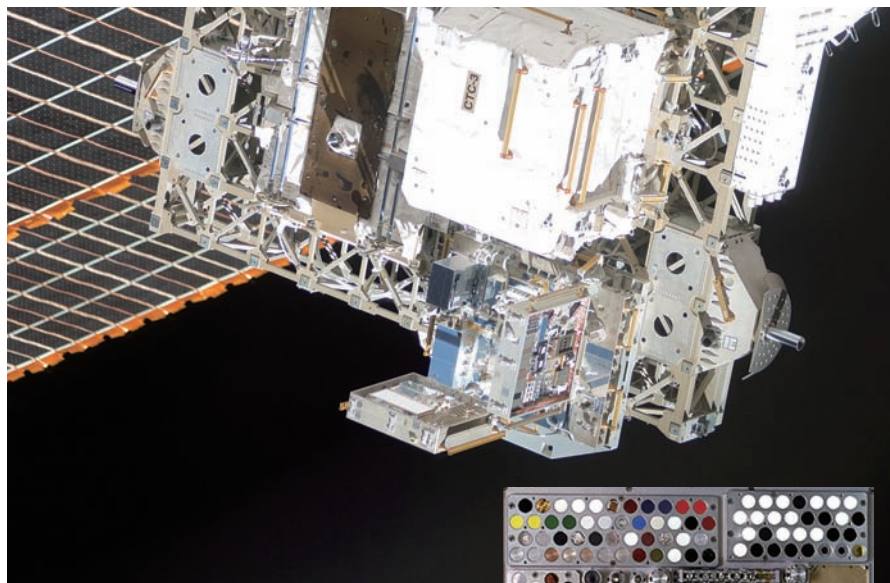


図4 STS-129の宇宙飛行士の船外活動によって、国際宇宙ステーションのMISSE7試験が撮影された。同試験は、材料と、光と電子の混成試作品(写真を参照)を外部環境に曝すものである。材料は、太陽電池やコーティングされた光部品、センサー、電子部品、構造および保護用材料で、これらは実地と曝露後の両方で、BLUE-Wave分光器などのさまざまな機器を用いて評価される。(提供: NASA)

(ISS)の外部に取り付けられた。頑強な分光器は、原子状酸素、UV放射、直射日光、真空空間、宇宙ゴミの衝突、極高低温に対する曝露の関数として材料の光学的性質を試験した(図4)。

MISSE5までは、実験は装填した受動部品の前後比較のみに限られたが、MISSE7で初めて、デジタルデータを試験装置からISSを通して複数の地上局にリアルタイムで送信した。

MISSE7用BLUE-Waveの実地におけるスペクトル反射データによって、次世代の材料が、宇宙空間に置かれたときの耐久性について多くのことが明らかになった。これらの材料は、地球

圏をはるかに超えて飛行する将来の宇宙船に使用されるだろう。ステラネット社で事業開発部門のディレクターを務めるジェイソン・ピアース氏(Jason Pierce)は、「分光器は小型化し、頑強で価格も低下していることから、研究所や実地での標準的な調査の範囲をはるかに超えた、新しく魅力的なアプリケーションが登場するだろう」と述べ、さらに、「ステラネット社が初めて小型で頑強な分光器を開発した20年前、いつの日か人間がその分光器を宇宙ステーションに設置して、新境地の探求に向けた特殊な材料を試験することを誰が想像しただろう」と結んだ。

#### 参考文献

- (1) T.T. Koskinen, Icarus, 216, 507-534(2011).
- (2) S. Michael Angel et al., Appl. Spectros., 66, 2, 137-150(February 2012).
- (3) N.R. Gomer et al., Appl. Spectros., 65, 8, 849-857(August 2011).
- (4) G.E. Arnold, et al. "Advanced mid-IR remote sensing for planetary exploration," SPIE Newsroom(Jul. 29, 2010); doi:10.1117/2.1201007.003101.