

# ◆feature

レーザー通信

## レーザー通信実証装置、 小惑星探査機「サイキ」に搭載されて 深宇宙へ

サリー・コール・ジョンソン

NASAは、3億km(1億8600万マイル)離れた深宇宙でレーザー通信の実験を行う予定である。

NASAは2023年10月5日に、深宇宙光通信(Deep Space Optical Communications: DSOC)技術実証装置を打ち上げる予定である(訳注:実際の打ち上げは10月13日に行われた)。小惑星探査機「サイキ」(Psyche)に搭載する形で、近赤外線(NIR)送受信機を打ち上げ、データ伝送を高速化して、深宇宙との宇宙通信に現在使われている無線周波数(RF)システムをはるかに超える通信容量を実現するために、レーザーが利用できるかどうかの調査を行う。

不格好なジャガイモのような形の金属でできた小惑星プシケ(Psyche)の調査を目的としたこのミッションによって、最終的には地球の核の形成過程の謎が解明される可能性があるが、プシケに到達するまでの(6年間の)同探査機の旅路の最初の2年の間に、DSOC送信機(図1)は、カリフォルニア州にある2つの地上ステーションと通信して、検出器、レーザー送受信機、深宇宙から送信される信号の復号方法の試験を行う予定である。

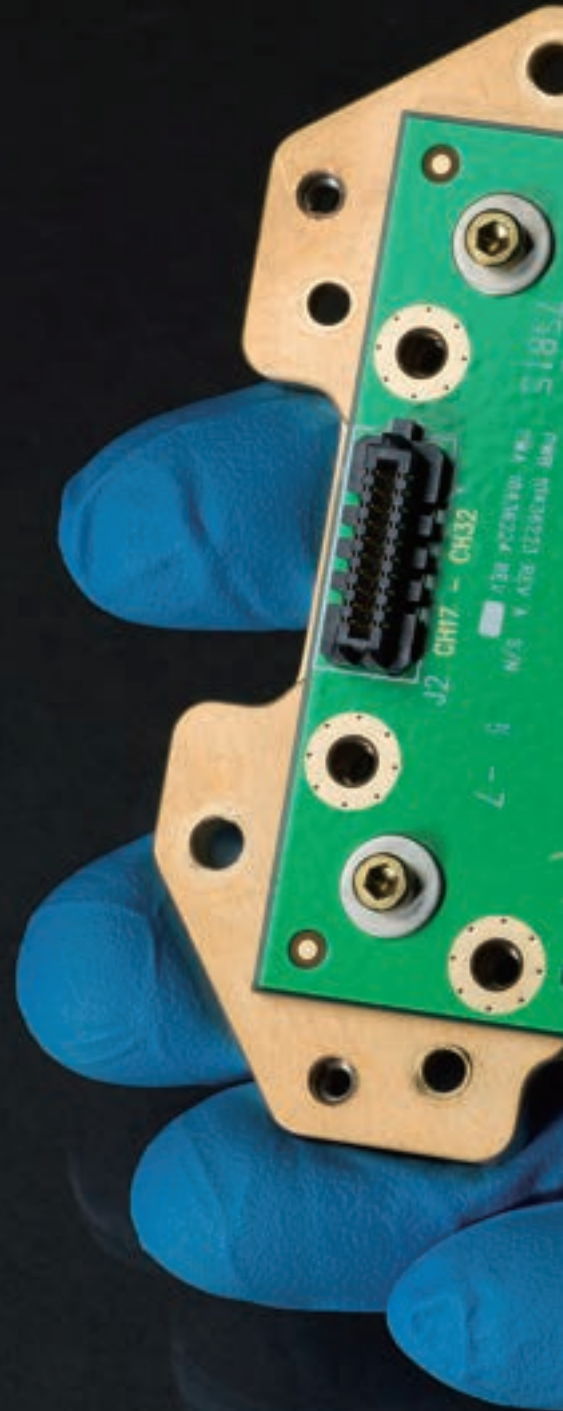
「これまで、NASAミッションのデータ通信容量は、無線周波数を増加させることによって拡大されてきた。これを光周波数にまでさらに拡張すれば、帯域幅を大幅に拡大することができ、レーザー、検出器、アクチュエータ、

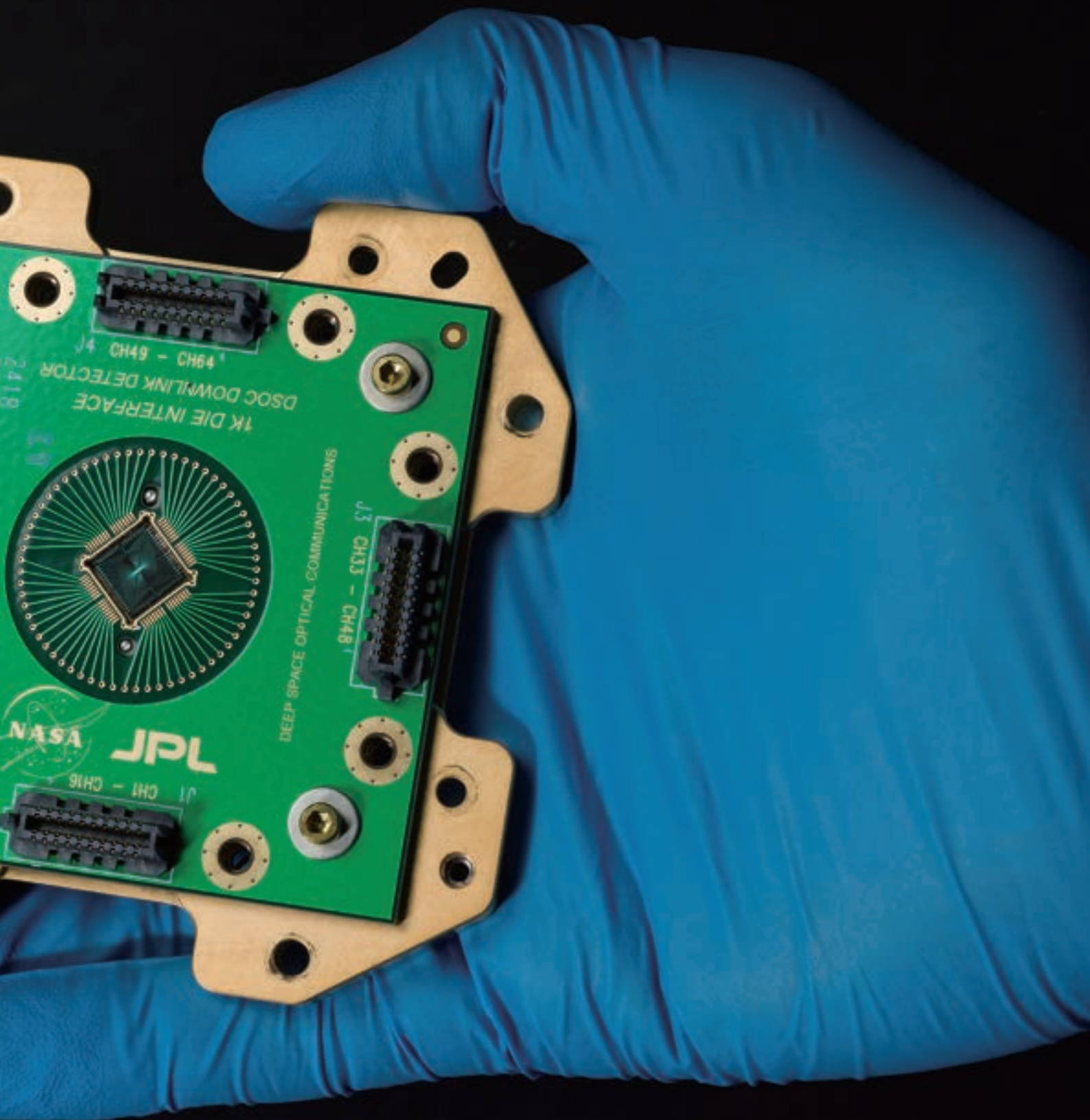
信号処理技術の進歩によってそれが可能となっている」と、NASAのジェット推進研究所(Jet Propulsion Laboratory)で光通信の監督者を務めるアビ・ビスワス氏(Abi Biswas)は述べている。

NASAが着目するのは、NIRレーザー通信である。RFと同様に電磁波を利用してデータを伝送するが、RFシステムよりもはるかに波長の短い波にデータを詰め込むことができるため、地上ステーションが一度に受信できるデータ量が増加する。実際、DSOCのNIRレーザー通信は、宇宙で現在使われている最先端のRFシステムの10~100倍のデータ通信容量を実現するように設計されている。

地球近傍軌道の衛星や月周回衛星のための広帯域幅レーザー通信は既にも実証されているが、深宇宙通信は新たな未開拓領域であり、はるかに大きな課題を伴う。

「火星や金星とその先まで網羅する惑星範囲を対象としたレーザー/光通信の設計は、月までの範囲と比べて距離が大幅に増加する。より幅の狭いレーザービーム、より厳密な指向制御、より微弱なレーザー信号を検出する能力が、その設計を効率的に押し上げている。われわれは、検出した個々の光子からできるだけ多くの情報を絞り出す特殊





DSOC ダウンリンク検出器は、探査機サイキが深宇宙を飛行する中で DSOC 送受信機から送られてくる近赤外線レーザー光の光子を検出するために、パロマー天文台で使用される (写真提供: NASA/JPL-Caltech)

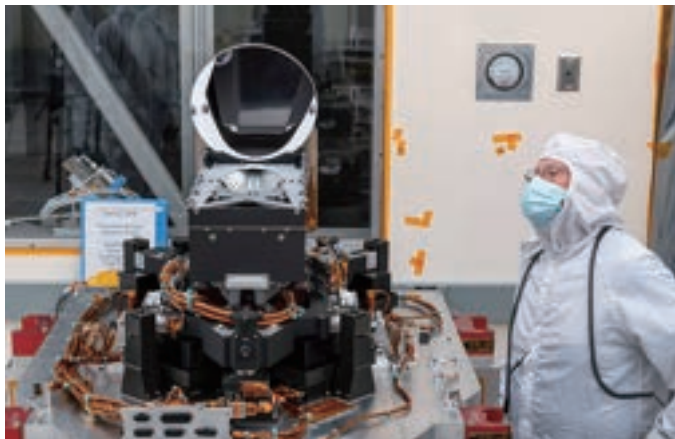


図1 DSOCのフライトレーザー送受信機

な手法も開発済みである」とビスワス氏は述べた。

### 搭載される新技术

DSOC送受信機には、MITリンカーン研究所(MIT Lincoln Laboratory)によって開発された、まだ一度も宇宙に打ち上げられたことのない光子計数型カメラが採用されている(図2)。カメラは、探査機サイキの側面に搭載された口径22cm(8.6インチ)の望遠鏡に取り付けられている。望遠鏡は、探査機のあらゆる振動の中で光学部品を安定化させるためのストラットとアクチュエータの上に搭載されている。送受

信機は、カリフォルニア州テーブルマウンテンにある光通信望遠鏡研究所(Optical Communications Telescope Laboratory:OCTL)によって送信される高電力のNIRレーザーアップリンクを、自律的にスキャンしてそれにロックオンするように設計されている(図3)。

「光子計数は、深宇宙距離からの微弱信号を検出し、リンクの両端に実装されている。宇宙側では、光子計数型カメラが地球から送信された『微弱』なレーザー信号を検出する。その信号は、宇宙から地球に向かうダウンリンクレーザーの指向基準としての役割を果たす。カメラは、毎秒キロビットレベル

のアップリンク通信に対応する。地上では、光子計数検出器アレイが格子到着の『時間タグ付け』に使用される。これらの時間タグをほぼリアルタイムに処理することにより、火星の距離からの毎秒メガビットレベルのデータレートでの情報抽出が可能になる」と、ビスワス氏は説明した。

アップリンクレーザーにロックオンしたDSOC送受信機は、テーブルマウンテンの南約100マイル(130km)に位置する、米カリフォルニア工科大(Caltech)のパロマー天文台(Palomar Observatory)にある直径5.1m(200インチ)のハール望遠鏡(Hale Telescope)を特定する。この状態で同送受信機のNIRレーザーは、高レートのデータをパロマー天文台に向けて送信する。

ハール望遠鏡は、超伝導ナノワイヤシングルフォトン検出器アセンブリを装備する。このアセンブリは、単一の入射レーザー光子を検出してその到着時間を記録できるように、極低温に冷却されている。これがどれほど素晴らしいことであるかは、次の事実が物語っている。パルス列として送信されたレーザー光は、3億km(1億8600万マイル)を超える距離を伝送した後によく、微弱信号として検出されて、情報を抽出するために処理される。

### 深宇宙における課題

深宇宙との間のデータ伝送の距離は、気が遠くなるほど壮大で、リンクアクイジションとその莫大な距離のトラッキングによって、「横方向速度は比較的高くなり、光の往復時間は長くなるため、アインシュタインの特殊相対性理論を表す指向誤差を補正する必要がある」と、NASAのジェット推進研究所のプロジェクトマネージャーを務めるビル・クリップスタイン氏(Bill

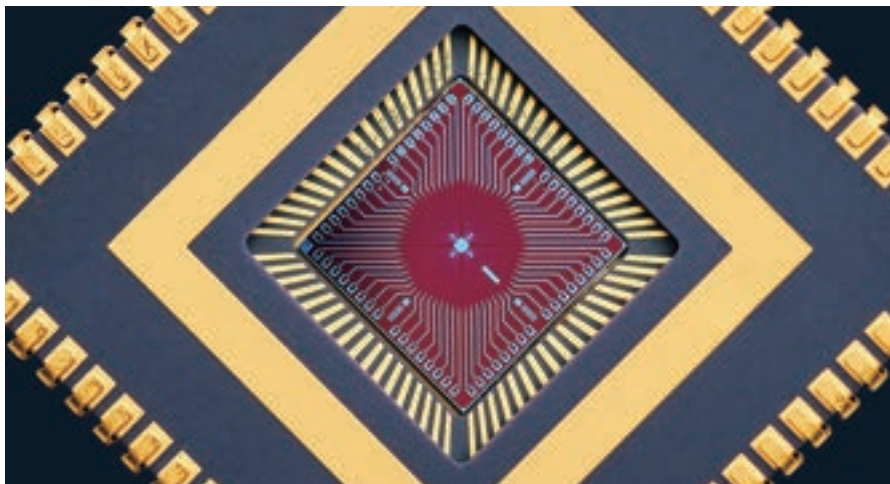


図2 64ピクセルの超伝導ナノワイヤシングルフォトン検出器は、100ピコ秒未満の時間分解能で毎秒10億個を超える光子を計数することができる。このアレイは、チップキャリアに搭載されており、5mの望遠鏡に効率的に結合可能である

Klipstein)は述べた。

これはどれだけ難しいことなのか。ビスワス氏はこれを、1マイル離れた場所にある10セント硬貨に、硬貨と人間の両方が高速で移動する状態で矢を当てようとする動作になぞらえた。

「この恐るべき問題を解決するためのわれわれの設計は、比較的帯域幅の制御で能動的に誤差を感知するとともに、高周波の擾乱を隔離または減衰しつつ、レーザー信号を地上と宇宙の間で交換するというものだ(図4)。高レート通信を可能にするには、残余誤差を許容できるレベルに抑えなければならない」と同氏は述べた。

推察されるとおりに、このプロジェクトの最も驚くべき側面の1つは、「作業の範囲が非常に多くの専門分野にわたることから、さまざまな特定分野の専門家との交流が生まれ、それに伴って継続的な学習過程が得られたことだ」とビスワス氏は述べた。「実りある素晴らしい経験だった」(ビスワス氏)。

## DSOC ミッションの マイルストーン

DSOC技術実証には、以下を含む多数の実証目標が掲げられている。DSOCのキャリブレーションおよびコミッションングフェーズで、フライトレーザー送受信機と地上システムが互いのレーザー信号にロックオンできることを実証すること。探査機サイキが地球から遠ざかっていくにつれて、規定されたダウンリンクデータレートが実現されることを実証すること(ダウンリンクデータレートは距離の増加に伴って低下する)。最大1天文単位(Astronomical Unit: AU、1億5000万km/9300万マイル)の距離のデータアップリンクを実証すること。サイキの打ち上げから2年の間、週1~2回の頻度



図3 NASAのジェット推進研究所のテンプルマウンテン施設にある高電力のNIRレーザー送信機は、低レートのデータを宇宙の送受信機に向けて送信する



図4 NASAの小惑星探査機サイキに搭載されたDSOCフライトレーザー送受信機

で通信を行う動作が継続できることを実証すること(2年間の予定だが延長される可能性がある)。

1AUのアップリンク通信がこの技術実証に対して規定されているが、DSOCが実際に目標とする2AUの距離にはビーコンサービスが必要である。地上から送信されたレーザーは、指向基準ビーコンと低速データレートキャリアの両方としての役割を果たす。

「このDSOC技術実証および検証は、近い将来の光通信機能に向けた道を切り拓くものである。比較的近い将来については、将来のNASAミッション用の地上インフラを開発しつつ、ナビゲーションと光科学に対する有人ミッションの要件を満たすように性能のスケ

ーリングを行うことが、サービスの自然な流れになるだろう。より長期的な目標としては、太陽系外へのミッションを特に対象とした、地上送信レーザーの補助なしでの光通信の運用が期待できる」とビスワス氏は述べた。

このDSOC技術実証のパートナーにエールを送りたいと思う。同実証装置のパートナーは以下のとおり。L3Harris SSG Inc.(光送受信機アセンブリ)、Controlled Dynamics Inc.(アイソレーション指向アセンブリストラット)、CACI(レーザー送受信機アセンブリ)、MIT リンカーン研究所(光子計数型カメラ)、Fibertek(アップリンクレーザーアセンブリ)、First Mode(アパーチャカバー)。