小型月着陸実証機SLIMと最新の衛星技術について

JAXA宇宙科学研究所
福田 盛介

はじめに（自己紹介）

名前：　福田 盛介（ふくだ せいすけ）

所属：　宇宙航空研究開発機構（JAXA）　宇宙科学研究所（ISAS）　准教授
本年より東大大学院電気系工学専攻准教授を兼担

専門：　東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻卒(2000年卒)
廣澤春任先生の研究室にて、マイクロ波リモートセンシングや
合成開口レーダに関する研究を行い、博士の学位を取得

現在，宇宙研で衛星システムや衛星搭載機器（レーダ，カメラ）、
センサ信号処理の研究開発に従事

宇宙研に入所以来，以下のような研究開発業務を担当

- 小型衛星れいめい(INDEX)のインハウス研究開発(2005年打上)
- 小型科学衛星ひさき(SPRINT-A)のバス･システム開発(2013年打上)
- 小型科学衛星ERGのバス･システム開発(2016年打上)
- 月着陸実験機SLIMの開発(2021年度打上予定)
  → システム，画像航法系，着陸レーダ

JAXA研究開発部門第一研究ユニット　研究領域主幹を併任

イプシロンロケットによるひさき(SPRINT-A)の打上げ

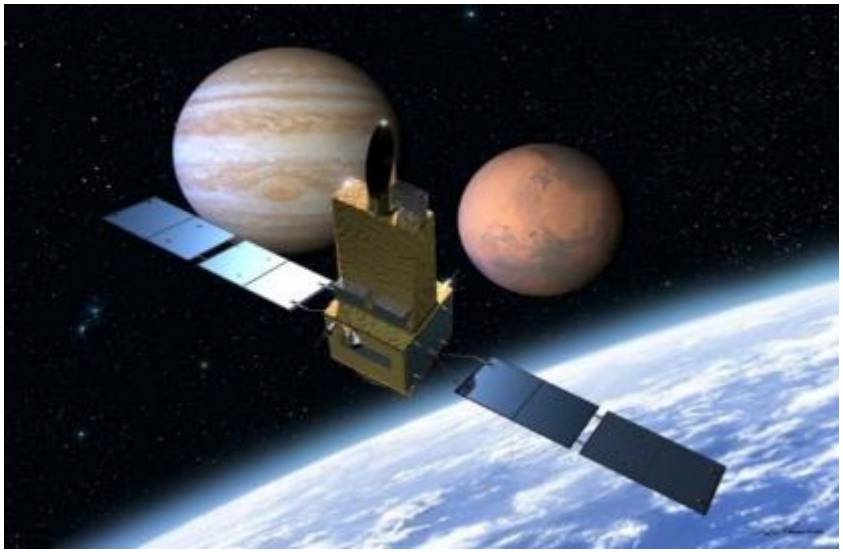
惑星分光観測衛星「ひさき」(SPRINT-A)

金星、火星、木星を極端紫外光(EUV)で観測することで、木星のイオトーラスのエネルギー収支機構の解明や、地球型惑星の太陽風との相互作用による大気流出機構の解明を目指す。

<u>衛星の主要スペック</u>

- 重量:　約370kg
- サイズ:　約1m×1m×4m
- 発生電力:　約900W
- 軌道:　950km×1150km (±50km)
  （軌道傾斜角31deg）
- 姿勢:　三軸姿勢制御
  （バス単体精度1.5分角程度*）

  *ミッション部ガイドカメラからの姿勢補償情報で、姿勢安定度としては±5秒角を達成予定



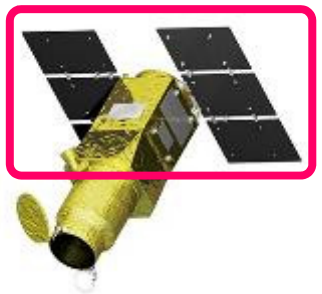
SPRINTバス（≈ NEXTARバス）

- ISAS/JAXAとNECが開発した小型科学衛星用の標準バス
- バスとしては200kg級

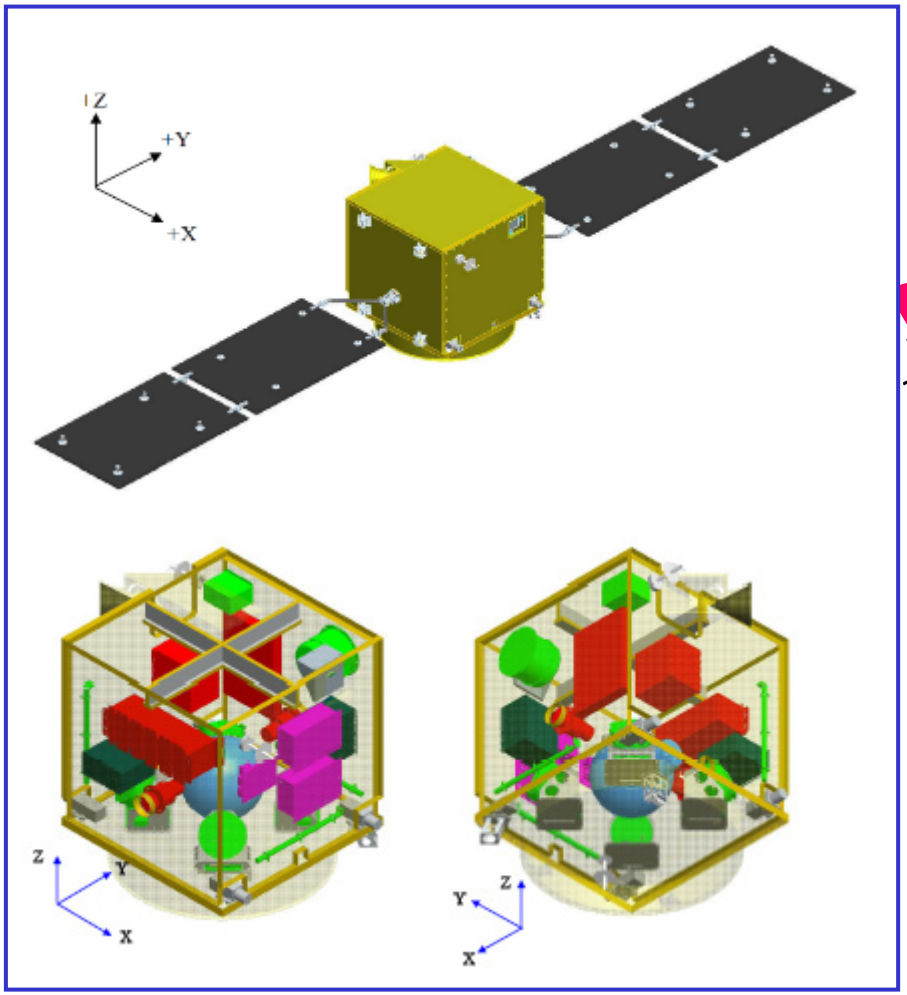
  →300-400kg程度のミニサットクラスの衛星のプラットホーム

  ✓ SPRINT-A: 348kg
  ✓ ERG: 355kg(wet)

- 「セミオーダーメイドな標準バス」コンセプト
- ある種の究極的な目標として，三軸姿勢制御の観測衛星とERGをイメージしたスピン衛星を同一のバスアーキテクチャで実現することを念頭に，SPRINTバスの開発は進められた

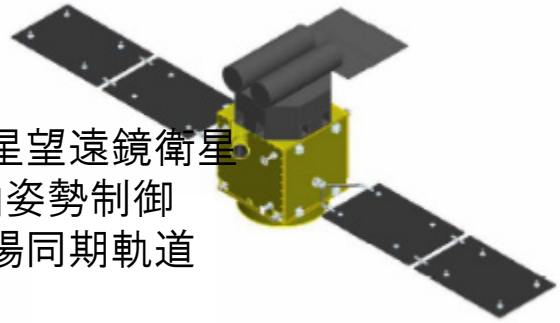


柔軟な標準バス

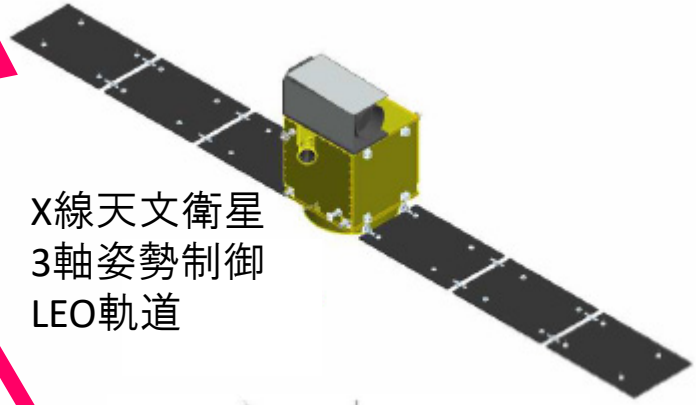


多様なミッション要求を支える
柔軟な標準バス (Flexible Standard Bus)

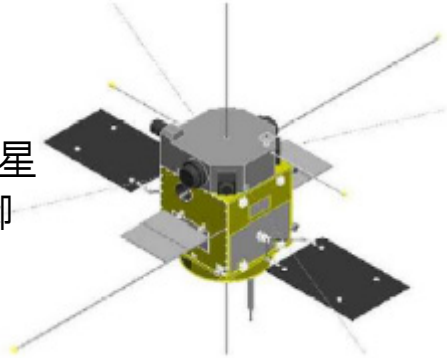
多様なミッションに適用可能



惑星望遠鏡衛星
3軸姿勢制御
太陽同期軌道



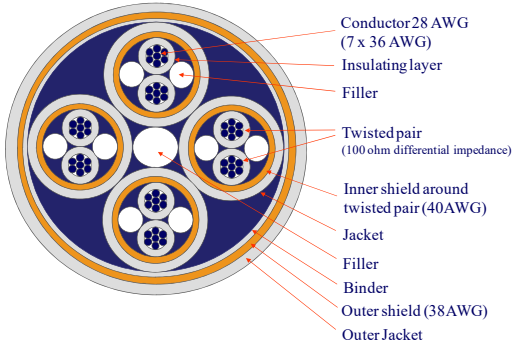
X線天文衛星
3軸姿勢制御
LEO軌道

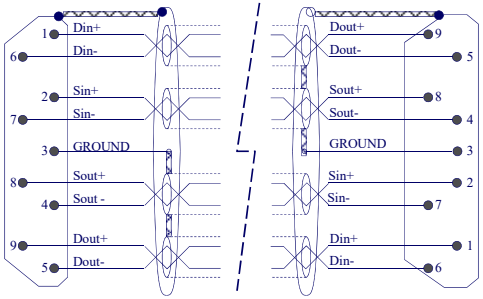


磁気圏観測衛星
スピン姿勢制御
長楕円軌道

SpaceWire

- IEEE-1355をベースとした宇宙機用高速シリアル伝送規格
  Data-Strobe (DS) Encoding, Packet規格
- 機器ごとにデータレートが可変（2M～200Mbps）
- 信号レベルはLVDS
- ケーブル，コネクタなど物理層まで標準化
- ルータを用いた自在なネットワーク構成が可能
- 上位プロトコルのRMAP(Remote Memory Access Protocol)を用いることにより，ネットワーク越しの他ノードのメモリ空間のデータに容易にアクセス可能





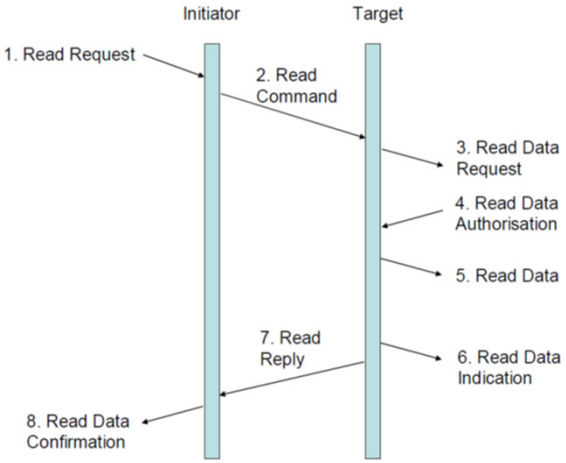
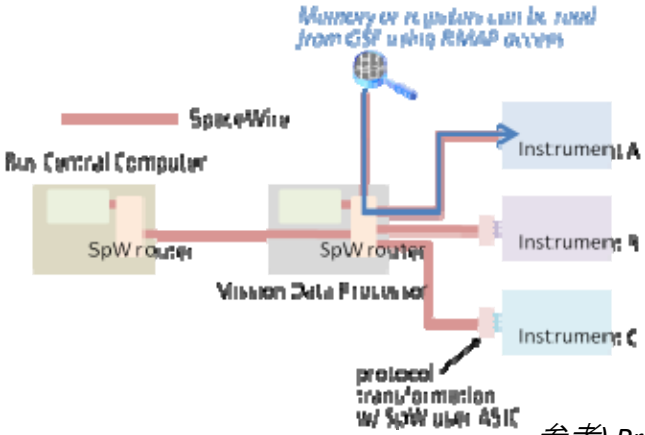
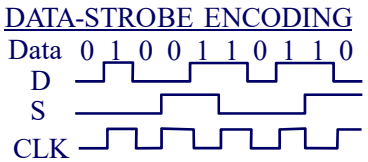
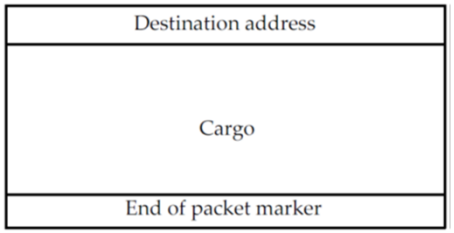


Figure 5-10: Read Command/Reply sequence



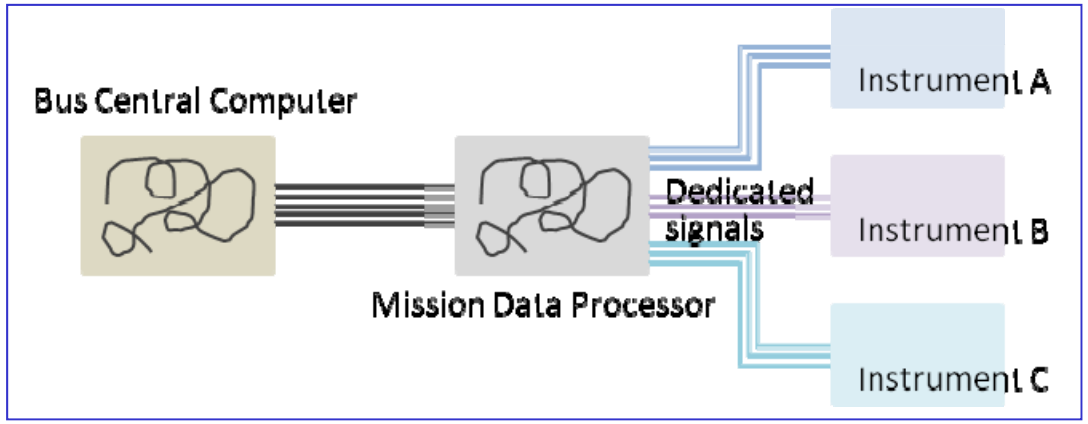


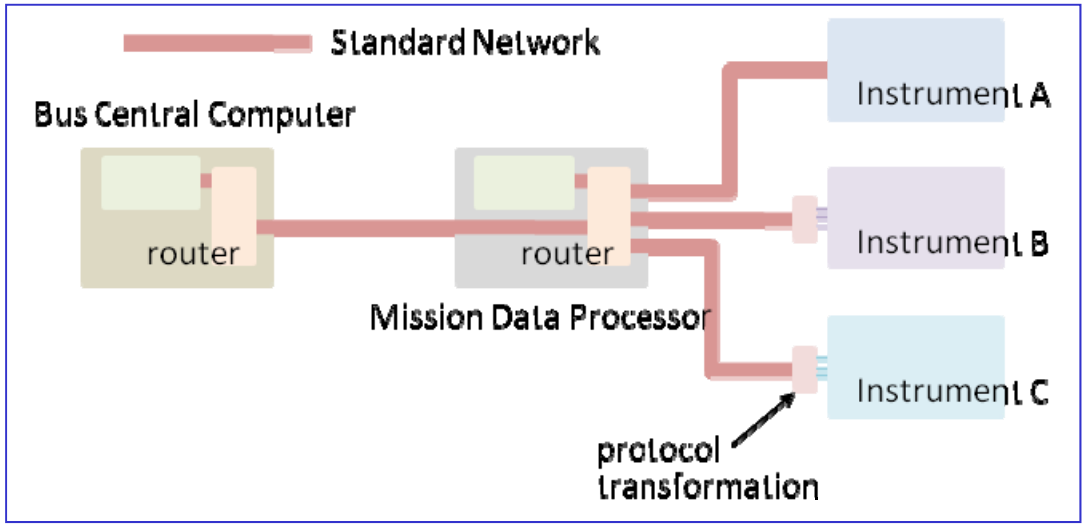
Packet format



参考) Presentation by S. Parkes on MAPLD2006
http://klabs.org/mapld06/seminars/spacewire/

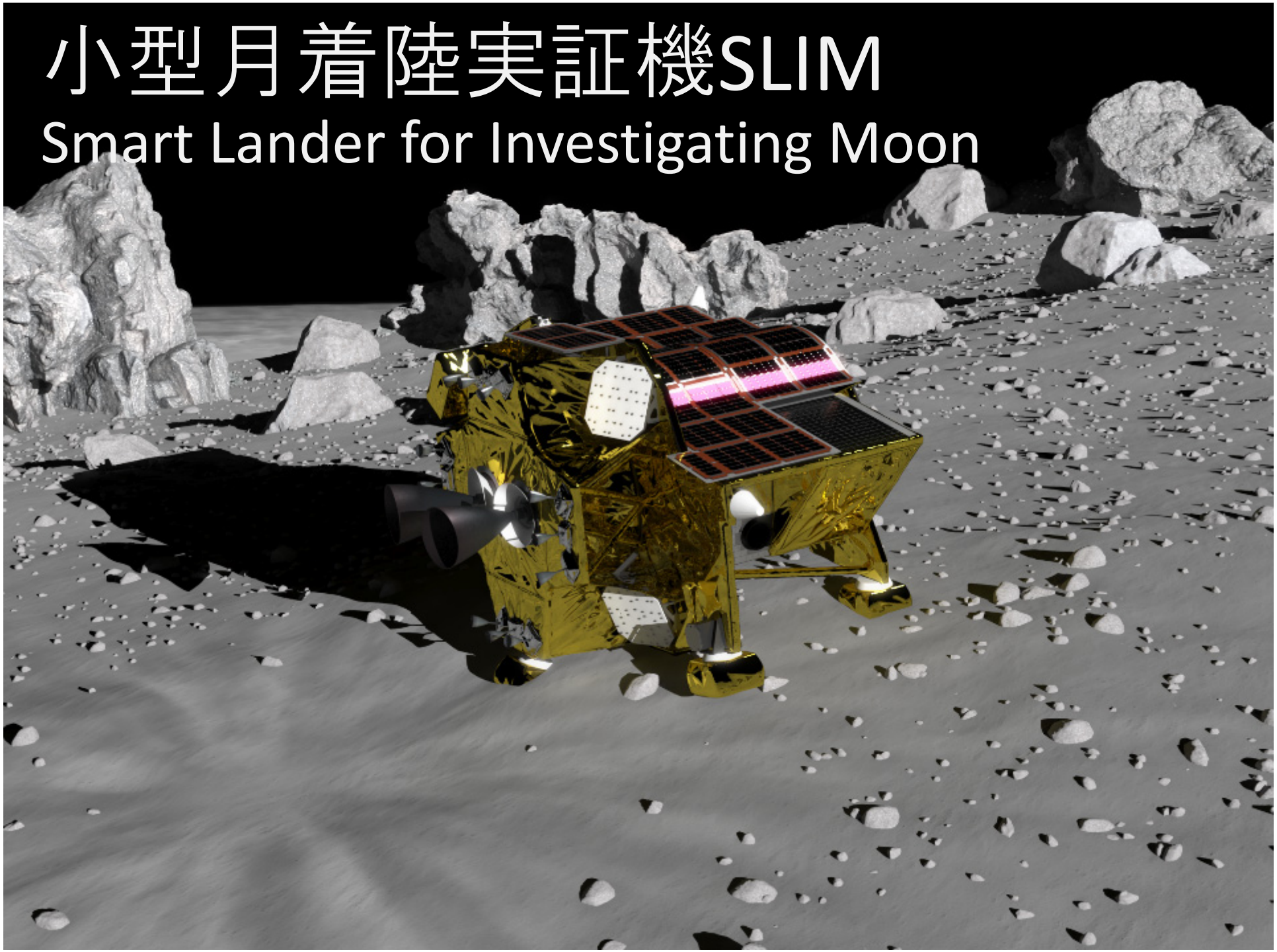
標準ネットワーク・コンポーネント





小型月着陸実証機SLIM

Smart Lander for Investigating Moon



「これまで」の月面着陸

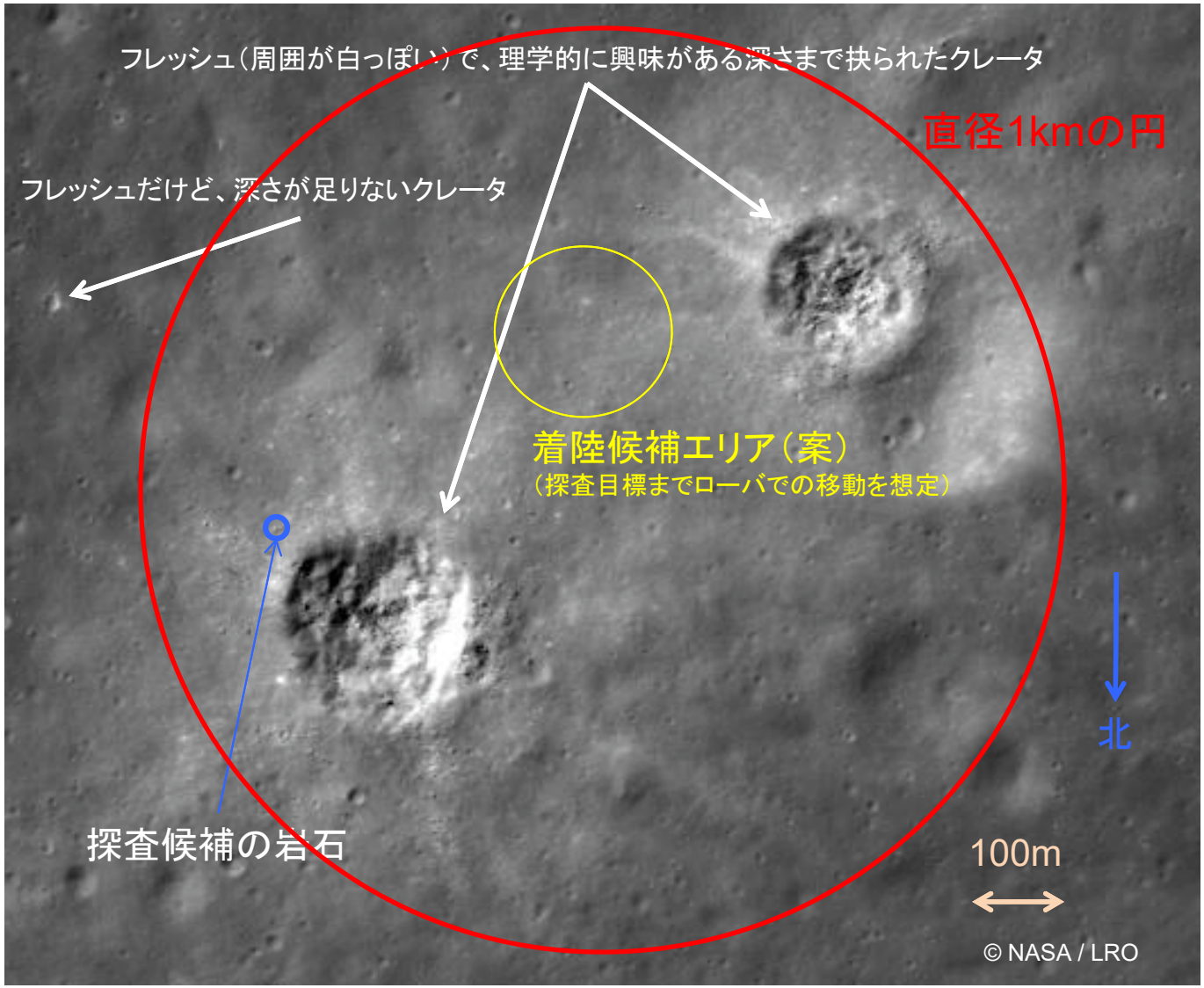
- アポロ計画のような有人機、あるいはそれに先立つサーベイヤー計画での複数の無人機など、これまで月面には多くの無人・有人機が軟着陸してきた。
- これらはいずれも、なるべく広い範囲にわたって安全そうな領域を選び（多くは”海”といわれる平地）、そのどこかに降りる、という考え方の着陸であった。
- そのため、それほど高い着陸精度は必要とされておらず、具体的には「着陸精度（誤差楕円）」という数字では、数km～10数km程度、ということになっていた。
- この精度の着陸であれば、地上から電波を使って着陸機の位置（軌道）を調べ、ナビゲーションすることで十分であった。

過去の探査機の月面着陸精度

- 1960～70年代の計画については、着陸精度情報が公表されているものをリストアップした
- 嫦娥3,4号については、論文によれば、“着陸精度要求6km”とされている。

計画名	実施国	打上年	ミッション概要/着陸精度	質量
サーベヤー１号～７号	米国	1966 ～1968	アポロ計画のプリカーサ	995 ～1039kg
アポロ11号	米国	1969	誤差楕円 20km(down range) × 5km (cross range)	司令・機械船28.8t 着陸船：15.2t
アポロ12号	米国	1969	誤差楕円 13km(down range) × 5km (cross range)	司令・機械船28.8t 着陸船：15.2t
ルナ9号	ソ連	1966	（”Luna-9,13はシンプルなナビゲーションだった”。エアバッグによるランダ軟着陸）	1538kg
ルナ13号	ソ連	1966		1620kg
ルナ20号	ソ連	1972	（”Luna-18クラッシュ地点から1.8km”）	5727kg
嫦娥3号（ Chang'e 3）	中国	2013	赤道付近に軟着陸（2013/12/14） 着陸精度要求6km、障害物回避機能有	3780kg
嫦娥4号（ Chang'e 4）	中国	2018	月の裏側（東経177.6度、南緯45.5度）に軟着陸(2019/1/3)。3号機と同一設計	3780kg
SpaceIL Lunar Lander	イスラエル （民間）	2019	探査機自身がホッピングにより移動	600kg

現代の月探査に求められるもの



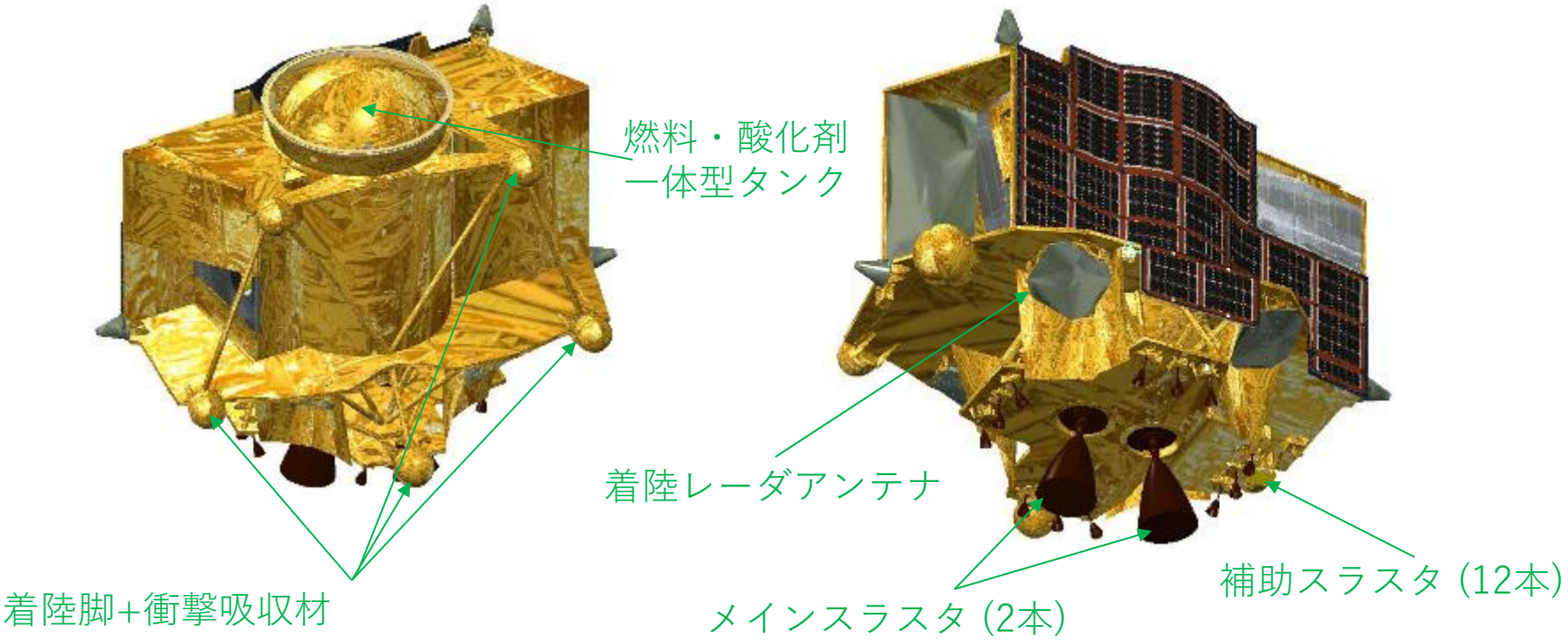
- 月科学として関心のある対象の例。半径100m程度のクレーターの付近に、クレータ内部から飛散し、従って月内部に近い組成を持つと考えられる岩石が分布している。
- このような岩石のその場観測（組成分析など）を実施するためには、近傍の平坦地を選んで探査機を着陸させる必要がある。

現代の月探査に求められるもの

- これらの例が示すように、今後の月探査の対象は、極めて狭い、特定された領域に絞られつつある。
- これらの領域は、例えば比較的新しいクレータの近くなどにあることも多く、この場合、付近の地形は “海”などと比べて複雑で、岩石なども多く分布している。
- 従って今後、科学探査のための月面着陸においては、特定のターゲット付近を狙って、着陸する必要がある。
- すなわち新たに「ピンポイント着陸」の技術が求められている。
- 必要な着陸精度としては、およそ100m級の精度が必要であると考えられる。

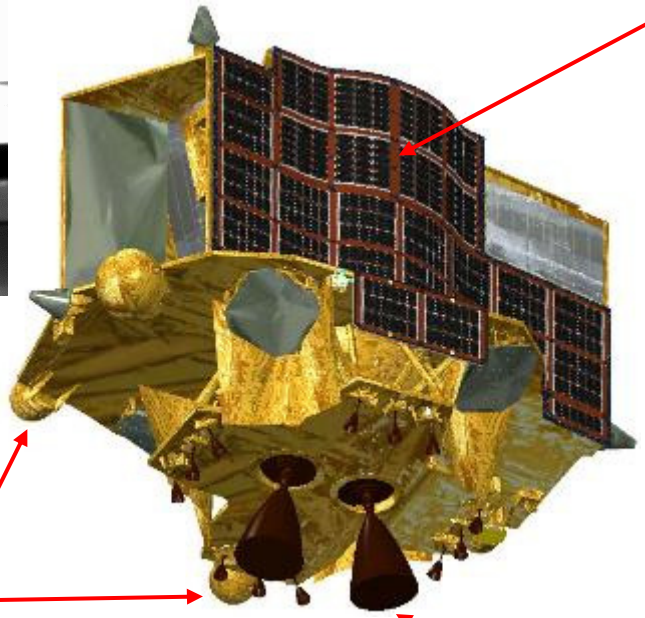
SLIM探査機の概要

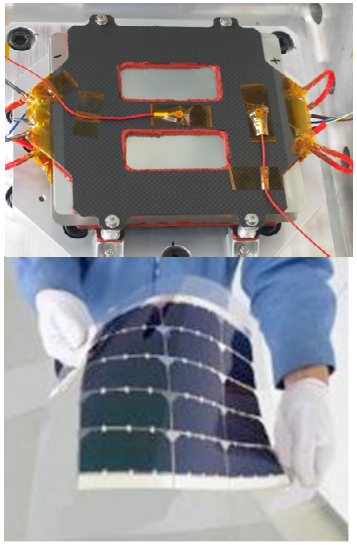
- 推薬を除いたドライ質量は約200kgであり、従来の月着陸機と比べて小型・軽量。
- 推薬を含む打上時質量は約700kg。打上質量の約3/4が推薬であり、これを反映した構造となっている（ロケットに近い）



SLIMにおける小型・軽量化技術

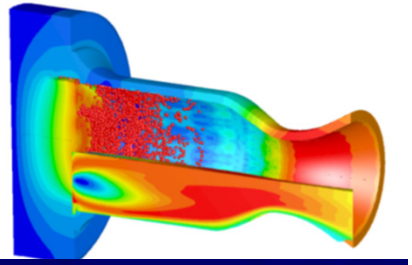
電源系：軽量な「SUSラミネートバッテリ」と「薄膜太陽電池セル」を採用

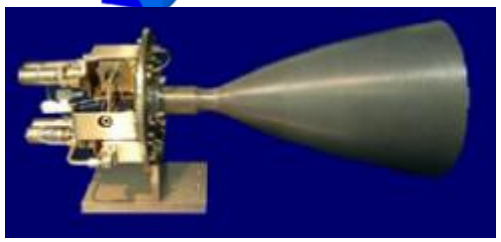




着陸脚: 関節方式ではなく、「ポーラス金属」が潰れることで、着地時のエネルギーを吸収する方式

メインエンジン：高効率で推力可変な「セラミックスラスタ」を採用

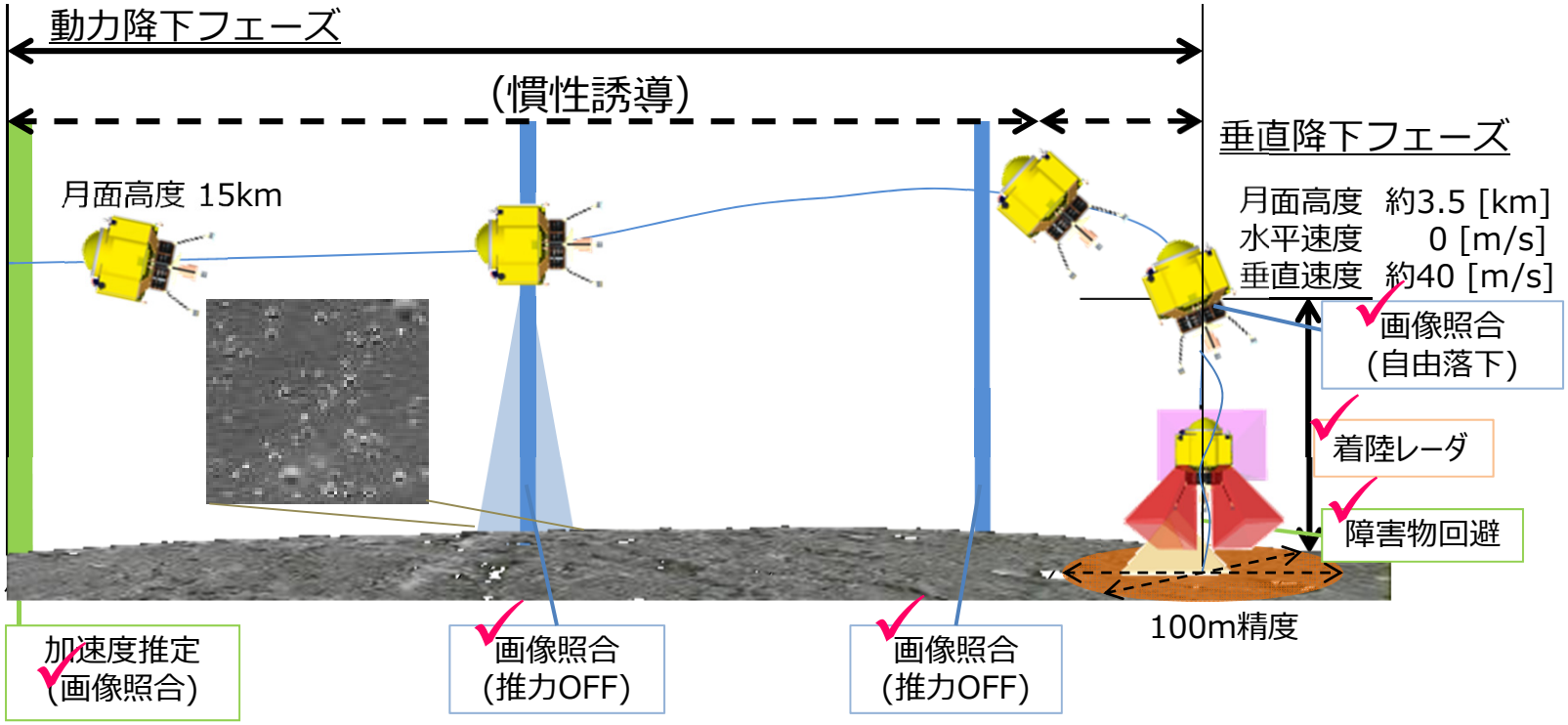




なお、酸化剤・燃料一体型タンクを主構造とする構造様式も、軽量化に大きく貢献している

SLIMの着陸シーケンス

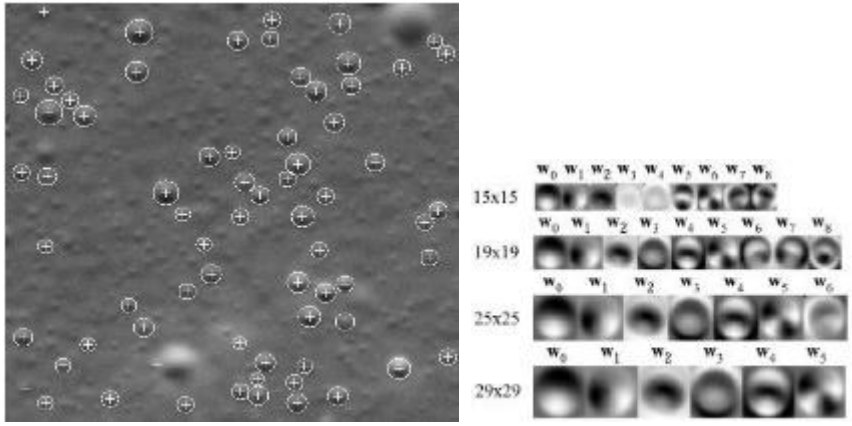
ピンポイント着陸の要となる航法センサ・手段として、工学カメラを用いた「画像照合航法」と、対月面の高度・速度を同時測定可能な着陸レーダ」の研究開発を行ってきており、SLIMにおいて実証を行う。



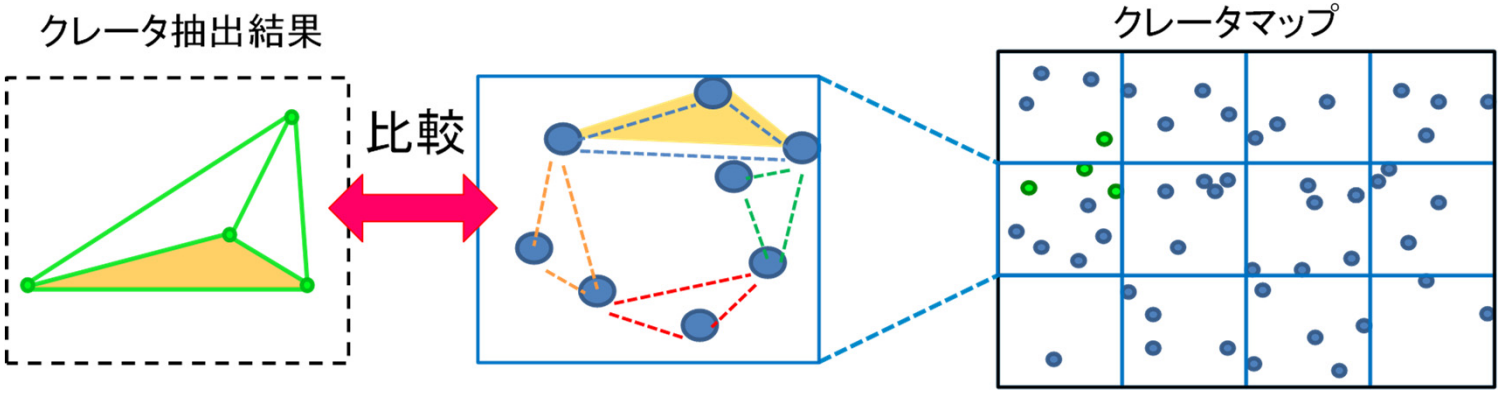
SLIMの画像照合航法

主成分分析ベースのクレータ抽出アルゴリズム

- 探査機上の処理は主成分との積和演算と閾値処理のみで構成可能(計算量の削減)
- クレータサイズ情報も正確に出力可能



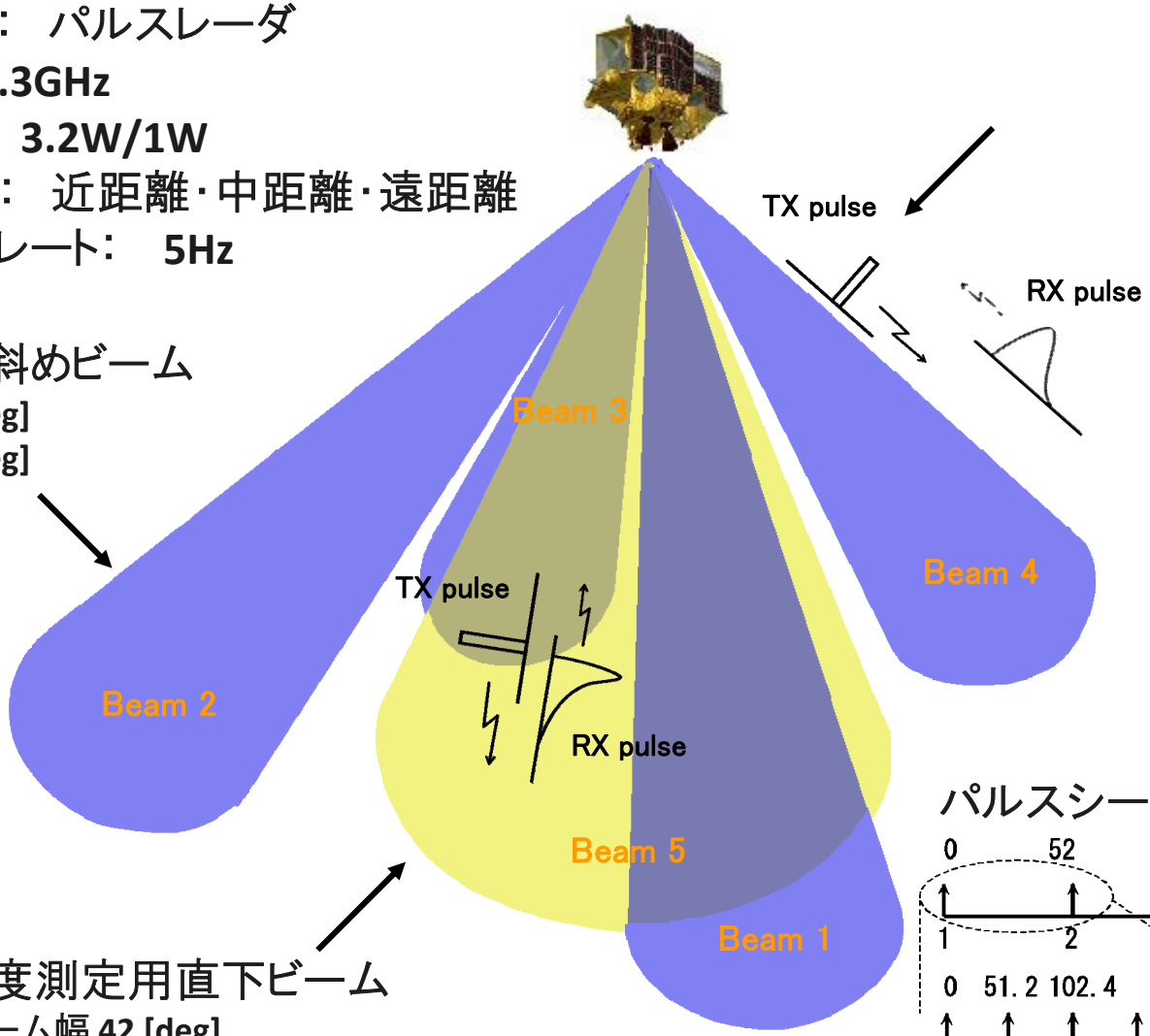
クレータマッチング処理



SLIMでは、これらクレータ抽出・マッチング処理をFPGA 1チップで動作させる予定

着陸レーダ

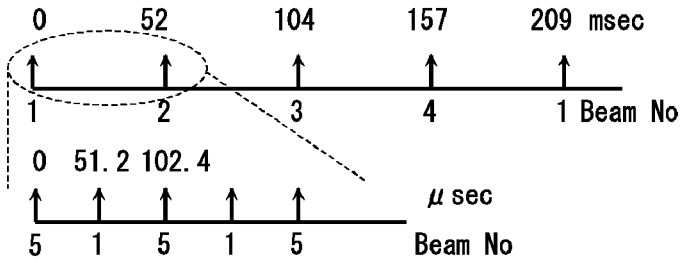
レーダ方式： パルスレーダ
周波数： **4.3GHz**
送信電力： **3.2W/1W**
測定モード： 近距離･中距離･遠距離
データ更新レート： **5Hz**



速度測定用斜めビーム
･ビーム幅 **15 [deg]**
･ビーム角 **30 [deg]**

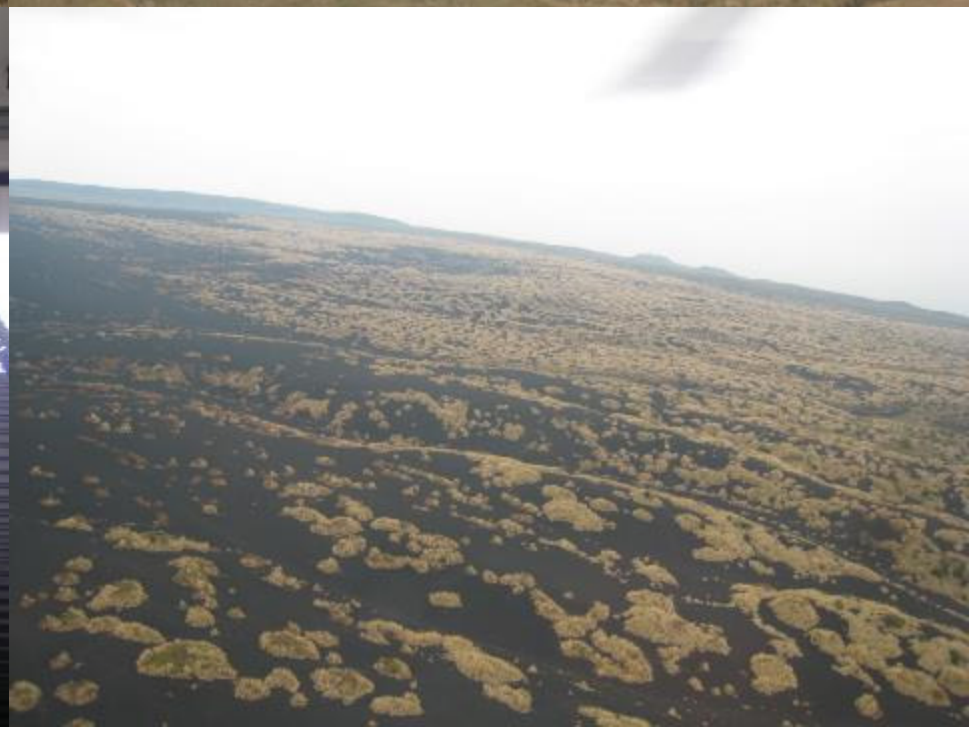
高度測定用直下ビーム
･ビーム幅 **42 [deg]**
･ビーム角 **0 [deg]**

パルスシーケンス



2006.03.23

2004.03.09



将来の方向性

- ✓ ディープラーニングに代表されるAI技術は，自律性を要求される深宇宙探査機との親和性は非常によい
- ✓ 一方で，探査機搭載の計算機環境のリソース制約（地上の1～2桁落ち）のため，現状は，アルゴリズムを必要最小限にシンプルにしつつ，システムとしてロバスト性を確保している状況
- ✓ この先，発生電力量がさらに格段に厳しくなる外惑星領域で，自律的かつ難易度の高い探査を実現するためには，パラダイムの転換が求められている
- ✓ その一つのキーワードとして，当方の研究室では，「ニューロモーフィック」に注目して研究を始めている

"The science of today is the technology of tomorrow" —Edward Teller

AEROSPACE

Game Changer

NEUROMORPHIC COMPUTING: THE POTENTIAL FOR HIGH-PERFORMANCE PROCESSING IN SPACE

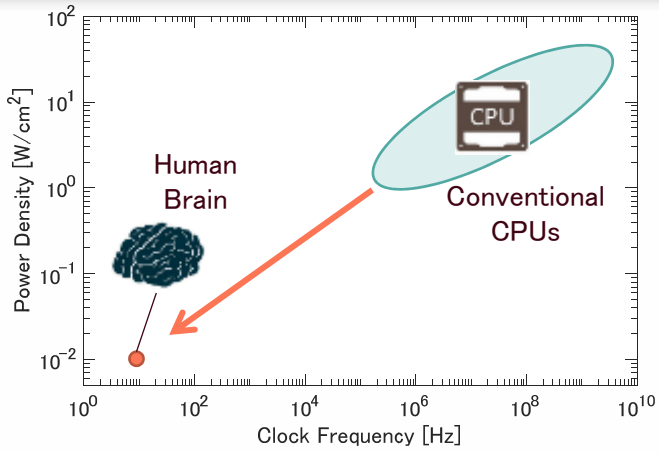
Gennadi Bersuker, Maribeth Mason, and Karen L. Jones

Artificial intelligence (AI) depends upon generating near-realtime data analysis, yet modern computers are often inefficient in the tasks of recognizing, analyzing, and classifying large volumes of information.

探査機画像航法のニューロモーフィックなアプローチ

■ 目的

- 低消費電力なプロセッサでの画像航法の実行
  - **神経模倣型(*Neuromorphic*)プロセッサ**
    - ニューラルネットワークとして動作
    - 画像認識タスクに適性
  - TrueNorth(IBM)では73mWでの画像認識[1)]



Power and clock of processors

Neuromorphic computer

- 低クロックでの動作 (< KHz)
- 非同期的処理 (clock free)
- 統合された処理回路&メモリ
- **電力消費量少**
- Neural networkとしての動作

Conventional computer

- 高クロックでの動作 (> GHz)
- 同期的処理 (global clock)
- CPU&メモリ間ボトルネック
- **電力消費量大**
- 論理回路による動作

消費電力面で神経模倣型プロセッサは
自律画像航法タスクに有用か？

1) Merolla, P., et al., Science, 345.6197, pp. 668-673, 2014.

ご清聴ありがとうございました
SLIMの月面ピンポイント着陸、ぜひご期待下さい