第55回 内閣府宇宙政策委員会 宇宙科学・探査小委員会

月面ミッションフィージビリティスタディ 各課題の成果概要

2023年5月18日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 国際宇宙探査センター

FS 課題A

月面利用の拡大に向けた超小型・高機能な宇宙放射線計測技術とリアルタイム被ばく線量評価システムの構築

名古屋大学宇宙地球環境研究所 三好 由純

研究グループ:

- 三好由純(1)、永松愛子(2)、笠原慧(3)、中村紗都子(1)、佐藤達彦(4)、寺沢和洋(5、2)、岸本祐二(6)、玉川徹(7)、臼井英之(8)、原田裕己(9)、西野真木(3)、関華奈子(3)
- (1)名古屋大学宇宙地球環境研究所、(2)JAXA、(3)東京大学、(4)日本原子力研究開発機構、

本FS研究の背景



1. 今後の月面での有人活動における放射線計測の重要性

- 月面での有人活動を行う際に、
 宇宙放射線(太陽放射線、銀河宇宙線、磁気圏電子)は
 被ばくや帯電を通してきわめて危険な存在。
- 宇宙放射線の様子を定常的に把握し、さらに予測を行っていくことは今後の宇宙開発にとって必須。
- 2. 月面多点(月面百葉箱)での放射線計測を可能にするための必要技術
- 月面における放射線計測は 有人活動が行われるすべての場所を対象に行うことが必要。 省電力かつ小型の放射線計測装置を開発が必須。
- 可搬型(モバイル)、ローバー搭載可能型の放射線計測装置、 月面無人放射線観測モニター装置への展開を

本FS研究の開発目標

開発目標とロードマップ



ASIC(集積回路) 化による、放射線計測の省電力化・小型化 の技術開発

ゲートウェイ、ローバー搭載、モバイル化に向けた技術開発



開発目標



- 1. 月多点での宇宙放射線計測の実現(月面百葉箱)
- 2. 宇宙放射線環境リアルタイムモニタリング(評価・予測)を実現
- 3. 帯電・被ばく量の導出と、月面被ばくハザードマップの策定

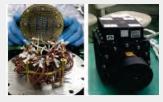
技術の 活用イメージ

- ・月面のグローバル環境モニター
- ・月面における構造物・システムの安定運用
- ・モバイル計測器による縦孔底・地下空洞など環境サーベイ

本FS研究の実施内容と成果

月面・月周回における省電力・小型放射線計測装置:ASICによる小型化を達成

被ばくに関する 計測技術





PS-TEPC(位置有感生体組織等価比例計数箱)

…陽子・重粒子(中性子起因を含む)の被ばく線量計測

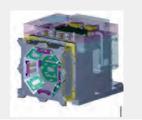
陽子、重粒子、中性子のLET(線エネルギー付与)。0.2-1000 keV/µm 分布と物理線量の計測。

Lunar-RICheS (月探査機搭載用チェレンコフ検出器)

…太陽高エネルギー粒子(SEP)、銀河宇宙線(GCR)の エネルギースペクトル測定

15MeV-2GeVの太陽粒子線(SEP:フレアを含む)、銀河宇宙線(GCR)の入射エネルギーの弁別。

____に関する 計測技術



LEXUS(月探查機搭載用電子検出器)

…磁気圏・惑星間空間電子のエネルギースペクトル測定

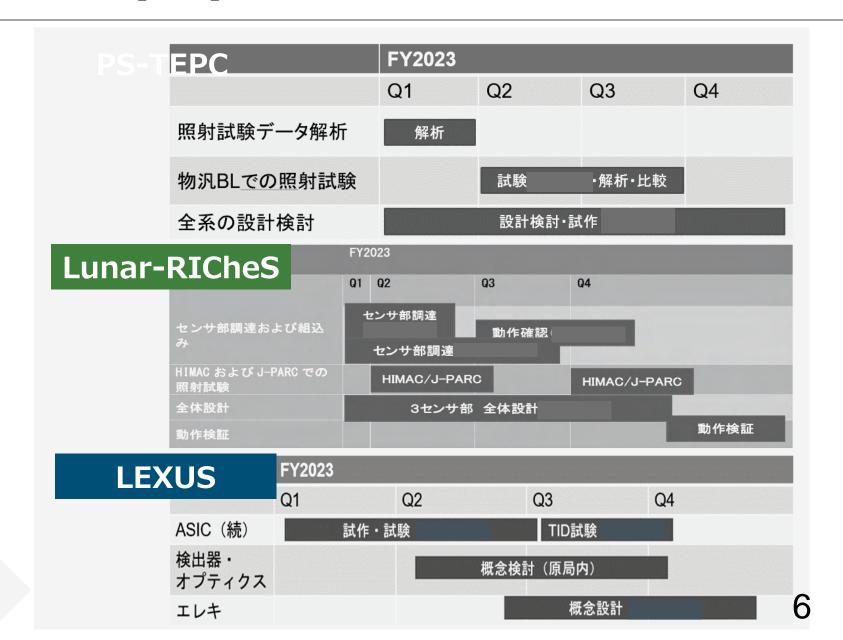
固体物質の帯電を引き起こすkeV-MeVの電子について、その入射エネルギーと到来方向を計測。

今後のフロントローディング(FL)に向けた活動計画

本FSで獲得した ASIC化技術をもとにFLへ移行

FLゴールイメージ

ゲートウェイ搭載状況の見通しを ふまえつつ、BBMもしくはEM ready phaseを目指す



開発計画

まとめ

研究の意義と課題の識別

月面および月周回活動において、 宇宙放射線が及ぼす影響の把握と予測は、 被ばくならびに環境計測の観点から、今後の月探査において必須。

課題解決に向けた方向

小型化による可搬・ローバー搭載を可能にし、 月面の多点(月面百葉箱)における放射線計測を通して、 実時間のモニタリングと予測を実現。

本FSの取り組みと 達成成果

本FSでは、省電力・小型放射線計測装置の開発に向けたフィジビリティスタディに着手、 ASIC化を通した小型化を達成。

FLに向けた展望

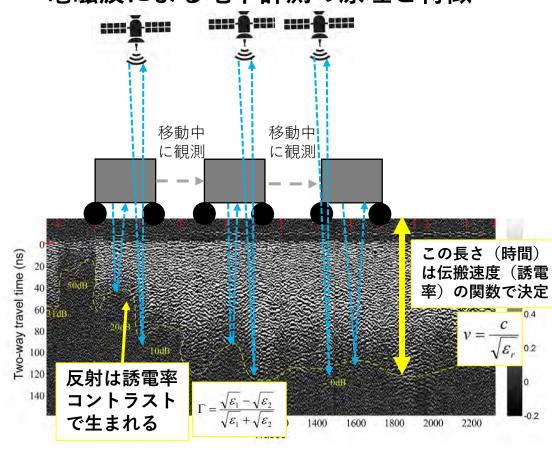
フロントローディングフェーズに移行し、 **ゲートウェイ等の搭載**機会に向けた開発を進め、 月周回・月面上での**データ取得を実現**していくことを希望。



初期の段階の月資源開発は、深さ30cm程度までが鍵と考えている



電磁波による地下計測の原理と特徴

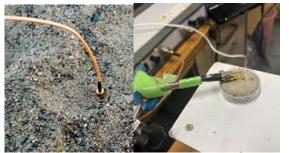


- *地下の構造(含氷部)の分布評価(氷等の資源量評価に役立つ)
- *地下の岩塊や断層等の有無を検出可(ローバ危機判別、掘削前判断)
- *移動しながら非接触・短時間で観測可能

電磁波(どんな波長でも)による地中探査と同時に誘電率が正確に求められれば、得られる情報が一気に増大→(これがこのFSの狙い)

本FSにおいて月面での誘電率計測手法を4つ検討

誘電率測定器の検討①:同軸プローブによる反射強度測定



月面レゴリスのような粒子形状の変化も粒子サイズ頻度分布も大きな粉体に対しては、プローブ形状が非常に重要であり、比較的小さな平らな面を圧着させて計測するのが最も精度が高い

(スピンオフ) 月模擬物質について誘電率を異なる環境下で計測し、誘電率の温度依存性を発見 (Kobayashi et al., 2023)→異なる温度で誘電率を測定することで、氷の有無が変別可能と判明

結論:単純なプローブの追加で誘電率の計測は可能である

誘電率測定器の検討②:集中定数法による計測器の検討



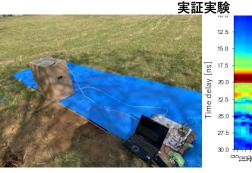
電離圏ロケット用の電子密度計測装置を応用し、静電容量を計測

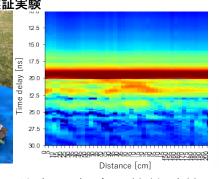
結論:単純なエレキの追加で誘電率の計測は可能である

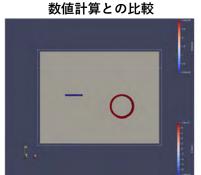
比較的低リソースでの誘電率測定が可能である

(ただしプローブの接触あるいは貫入が必要であり、探査機移動の制約となる可能性がある)

誘電率測定器の検討③:エコー強度による方法







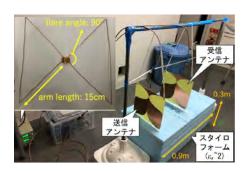
野外実証実験と数値計算を比較

結論:アンテナ形状と信号の数値モデルから、ある程度の結果を得る ことは可能だが、高精度は困難である

誘電率測定器の検討40:マルチスタティック法の検討







アンテナ間、アンテナと地面との距離 (オフセット) が重要となり、その最適値を得た

(スピンオフ) アンテナの超小型化、 小型・軽量レーダの開発にも成功

結論:期待通りに誘電率も決定できた。

マルチスタティック法が最も有望であり、非接触かつ比較的高い精度での誘電率測定が可能であることがわかりた

フロントローディングを見越した今後の展望

①BBM開発 1年間:FMCWレーダの直線性とサンプリング数の担保

- ・アナログ及びデジタル方式のチャープ生成・レンジ圧縮部のBBMを開発
- ・レンジ圧縮性能、消費電力等の評価をもとに概念設計を完了しPDR相当のレビューを完了

②EM開発 1年間

- ・GPRとして完結した装置を構成
- ・基本的な性能試験(③と関連)、振動試験等やインターフェース試験を実施
- ・詳細設計を進め、CDR相当のレビューを完了

③地上実証実験 3 か月-1年間:国内外模擬フィールドでの徹底的な検証

- ・国内外(山梨県河口湖町、オーストラリア等)の模擬環境での計測実験を実施
- ・月面での運用計画の具体化、制御コマンド・機上データ処理内容の再確認、 クイックルックデータ判定の練習を検討
- ・探査機の機構モデル等が利用可能な場合は機体による反射の影響についても評価

④FM開発 1年間

- ・宇宙機搭載可能部品や放射線試験をパスした民生品を用いてEMと同行性の FM製作(一部②と並行する可能性も想定)
- ・各種試験を実施後、インターフェース試験に合流
- ・アンテナ展開状態での電磁干渉試験、較正データの取得も実施

想定している研究体制

人員		
○宮本、熊本、千秋、小林、PD1名		
○熊本、土屋、石山、宮本、小林+明星電気		
○西堀、辻、佐藤、宮本+㈱キーコム		
〇岩田、千秋、PD1名、宮本		
○辻、小林、宮本研学生(修士2名、博士1名)、Chin		
○宮本、小林、Culton、Chin		

宮本(東大) Nozomi MDC, Hayabusa AMICA, SELENE TC, Hayabusa2 ONCの開発・運用・解析、地球惑星の地質学、地中レーダ観測; 熊本(東北大) SELENE搭載LRS (チャープ式サウンダ)の開発・運用実績; 西堀(JAXA/研開・センサ研究G) ISS搭載サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES)・アンテナ系開発の実績次世代Lバンド合成開ロレーダ開発の経験; 千秋(千葉工大) はやぶさ 2 搭載LIDAR・TIR・NIRS3の開発・運用経験; 岩田隆浩 (JAXA/ISAS) SELENE搭載Rstar, Vstar (VLBI観測装置) Hayabusa2 NIRS3 (近赤外分光計)の開発・運用実績; 土屋 (東北大) ERG/PWE/HFA (プラズマ波動受信機)の開発・運用実績; 石山(鶴岡高専) SELENEデータ解析の実績。電磁界解析; 辻(九大) 地震波、レーダ等地下探査工学の実績; 佐藤(東北大) 地上の地中レーダ技術で非常に幅広い実績; 小林(東大) 地中レーダ開発でPhD, PDx1; 宮本研修士学生名; Culton, John (アデレード大) 衛星観測研究室・室長



参考資料

本検討で見えてきた機器の可能性

誘電率測定計(ローバ搭載

・宇宙飛行士手持ち)

ローバ移動中に直下を見る地中レーダ/掘削前の障害物検知

(誘電率も測定でき、深さの目盛りが付く) ローバ移動中の前方地下障害物の観測 宇宙飛行士手持ちの高精度地中レーダ (地下の障害の有無を高速判定)

プローバ移動中の削万地ト障害物の観測 (地下の障害の有無を高速判定)

理学的意義

・レゴリス構造の理解(粒径・組成の不均質性の理解、氷や金属等の濃集部の発見)→レゴリス進化の解明

-0.5m

-1.5 m

=2.0m

・地質構造の理解(基盤層や断層の有無、レゴリスや溶岩の層厚など)→地質プロセスの解明

工学的意義

- ・土砂の圧密度や土砂粒径の把握・・資源の有無/有望領域の推定
- ・地下の岩塊や空洞の有無の判定(走行や歩行、基地建設時の安全性確保)
- ★宇宙資源開発に直接役立つ、資源探査・埋蔵量調査が可能

- ・土砂飛散可能性や安定性の把握
- ・掘削前の障害物検知

13

着陸機搭載 (観測可能

な高度は未定)

本検討で見えてきた機器の具体的なリソースと科学・工学的利便性

種類	ローバ搭	Š載レーダ	小型(ローバ搭載または	宇宙飛行士手持ち)	上空からのサウンダ	(着陸機搭載など)
名称	モノスタティックレーダ	マルチスタティックレーダ	小型地中レーダ	誘電率計測器	小型レーダー	サウンダー
	直下の地下2m程度までの地下	直下の地下2m程度までの地下構	直下の地下2m程度までの地下		直下の地下数メートルまでの平均的	直下の100m程度までの地下構造
	構造を水平解像度10cm以下、	造を水平解像度10cm以下、垂直	構造を水平解像度10cm以下、		な誘電率の測定と、一部地下構造の	を数メートル程度の分解能で把
機能	垂直解像度10cm以下で把握	解像度10cm以下で把握	垂直解像度10cm以下で把握	誘電率の高精度測定	把握	握
		誘電率も同時に計測可のため、		装置を地面に触れさせる		高高度からのダイポールアンテ
	ごく少量の氷や岩石や空隙の存	地下構造までの距離を正確に把	ごく少量の氷や岩石や空隙の存	必要がある。左のレーダ	比較的低高度からのビバルディアン	ナでの送受信。地表面の凹凸と
	在も検知可能。ただしその組成	握可。ごく少量の氷や岩石や空	在も検知可能。ただしその組成	システムに追加すること	テナでの送受信。地表面の凹凸と高	高度に依存して、解像度と検出
備考	などは一意には決まらない	隙の存在も検知可能。	などは一意には決まらない	も、独立して動作も可	度に依存して解像度と検出能が変化	能が変化
	2.2kg程度(1.8kgエレキ、	4.0kg程度(1.8kgエレキ、2.2kg	2.2kg程度(1.8kgエレキ、			
質量	0.36kgアンテナ)	アンテナ)	0.36kgアンテナ)	0.5kg程度以下	3-6kg	4-6kg
電力	最大12W	最大12W	数ワット程度	1ワット程度	最大12W	最大20W
	160x210x150mm(エレキ)、	180x210x150mm(エレキ)、	160x210x150mm(エレキ)、			
	236x260x10mm程度(アンテ	236x260x10mm程度(アンテナ	236x260x10mm程度(アンテナ	200x200x100mm程度	200x300x200mm程度(エレキ)、	200x300x200mm程度(エレ
サイズ	ナx2)	x 6)	x 2)	(エレキ) +プローブ	アンテナは周波数依存	キ)、アンテナは周波数依存
搭載/利用方法	エレキ部 TX RX アンテナ	エレキ部		or or	****	**
	1計測地点1秒程度以下(移動	1計測地点2秒程度以下(移動し	1計測地点1秒程度以下(移動			
計測時間	,	ながら計測可能)	しながら計測可能)	1計測ミリ秒程度	1計測ミリ秒程度	1計測ミリ秒程度
	10kBytes(fft処理後)/分(最大	50kBytes(fft処理後)/分(最大で	10kBytes(fft処理後)/分(最大	数bytes(最大1MBytes	10kBytes(fft処理後)/分(最大で	10kBytes(fft処理後)/分(最大で
データ量	で50MBytes/分)	250MBytes/分)	で50MBytes/分)	程度)	50MBytes/分)	50MBytes/分)

<u> </u>			
科学的主目的	科学観測項目	誘電率測定時のメリット	マルチスタティックのメリット
レゴリス構成史、ガーデニング	レゴリス層厚の測定、レゴリス内部構造の把握		
による成熟効果、宇宙風化効果	(空隙率変化、岩塊や粒径分布の把握)、基盤	層厚や深さの絶対値が決定する。空隙率の絶	左の要素に加えて、複数層の地下構造につ
の把握	岩までの深度の測定	対値が推定可。	いても正確な推定値が得られる
火山活動の精査、火山地質学的	溶岩流の層厚、噴出物の噴火史、火口の把握、	層厚や深さの絶対値が決定する。空隙率の絶	左の要素に加えて、表土下の地下構造に関
調査、比較惑星火山学	火山堆積物の組成分布など	対値が推定可。	する深さ情報の入った推定値が得られる
	氷層/濃集物の発見、その空間分布、鉛直分布	氷の有無の判断の確実度が向上。氷層までの	左の要素に加えて、複数の氷層についても
氷、揮発性成分の分布調査	の調査	深さの絶対値が求まる	正確な推定値が得られる
		構成物の特に金属量と空隙率に関する情報が	左の要素が、複数層の地下構造についても
地殻構成物の多様性の把握	地殻構成物の化学組成に応じた誘電率分布	得られる	得られる
	衝突クレーター周囲の構造探査、断層・ダイク	層厚や深さの絶対値が決定する。空隙率の絶	左の要素に加えて、複数層の地下構造につ
地質学的構造調査	等の発見・分布探査	対値から、構造把握が容易になる。	いても正確な推定値が得られる