「かぐや」搭載月レーダーサウンダー(LRS)による月地下探査及び自然波動観測

熊本 篤志¹, 小野 高幸¹, 中川 広務¹, 山口 靖², 押上 祥子² 山路 敦³, 小林 敬生⁴, 笠原 禎也⁵, 大家 寛⁶

2008年10月30日受領, 2009年2月5日受理.

(要旨)月周回衛星「かぐや」に搭載された月レーダーサウンダーによる月地下探査及び自然電波・プラズマ 波動観測の初期運用結果および初期成果を紹介する.2007年10月から2008年8月までの観測運用によって 98.4日分のサウンダー観測データ,269.9日分の自然波動観測データが得られた.サウンダー観測によって複 数の海領域で地下数100mの深さの反射層が観測された.また自然電波の観測では、地球・太陽・木星を起 源とする自然電波が観測された他,月周辺における地球からの人工電波のノイズレベルの基礎データが得ら れた.プラズマ波動の観測から、月ウェイク内外の電子密度が導出され、月ウェイクの境界付近に特有のプ ラズマ波動現象が初めて見出された.

1. はじめに

月の起源・進化・テクトニクスを解明していく上 で、月の地質構造探査の重要性は高い。Apollo 17号 ミッションでは司令船に搭載されたHF帯サウンダー (ALSE)による月表層下の地質構造探査が行われた [1-2]. 地中レーダーの技術は地球の南極のボストーク 湖や,火星の極冠の厚さ・内部構造や埋没クレータの 探査にも利用されており[3-7]、将来の外惑星系の氷衛 星,小惑星探査への応用も検討されている[8]. ALSE のサウンダー実験はHF帯サウンダーによる月地質探 査の有効性を示したが、運用上の制約から、観測領 域は月面のごく限られた領域にとどまった. また1970 年代当時の技術的な制約から、エコーの遅延時間の 計測精度は8µ秒, レンジ分解能は1200m(真空中)だ った.「かぐや|搭載月レーダーサウンダー (LRS)は. ALSEで実証されたサウンダーによる月の地下構造探 査を、全球で、かつ高精度に行うことを目的として計

- 4. 韓国地質資源研究院
- 5. 金沢大学総合メディア基盤センター
- 6. 福井工業大学工学部宇宙通信工学科

画された[9]. 観測周波数はALSE同様HF帯を選択し, 深さ数kmまでの地質構造を探査対象としている.

高速の太陽風プラズマが吹きつける月の後方にはウ ェイクと呼ばれる真空に近い領域を形成することが報 告されていた[10]. また月面には磁化した地殻による 磁気異常領域が発見されており[11-12], 太陽風プラズ マ中で「ミニ磁気圏」を形成していると考えられている. これまではWINDが月から8Rm(Rmは月の半径)で行 ったプラズマ波動観測が月の最も近くで行われた観測 だった[13]. 「かぐや」LRSでは、レーダーサウンダー 用に展開する2組のダイポールアンテナを利用して, 月面近傍の高度100kmでのプラズマ波動観測装置(MAP) が搭載されており[14-15], プラズマ波動の励起にかか わる波動・粒子相互作用を議論することが可能である.

月には地球のような電離圏はなく,また地球の人工 電波源からも遠いため,木星デカメータ電波などを観 測対象とする低周波電波天文観測には有利な条件をも っている.「かぐや」LRSは月周回軌道からLF ~ HF 帯自然電波の観測を行う.この観測は月面・月周辺で の自然電波観測の予備調査としての側面をもっている.

本稿ではサウンダーによる地下構造探査, プラズマ 波動計測,自然電波計測の初期観測結果について紹介

^{1.} 東北大学大学院理学研究科

^{2.} 名古屋大学大学院環境学研究科

^{3.} 京都大学大学院理学研究科

する.

2. 観測機器の概要

LRSはサウンダー送受信部(SDR), HF帯自然波動 受信部(NPW), VLF帯波形受信部(WFC)及びX/Y2 対のダイポールアンテナから構成される[9,16].

図1に示すようにX/Y2対のダイポールアンテナは、 衛星の+Z面に取り付けられており、衛星の姿勢制御 により、アンテナ面は常時月面に向けられる.アンテ ナの全長は30mでサウンダー観測で用いられる5MHz 前後では半波長ダイポールとなる.

サウンダー観測では、サウンダー送信部で生成され た4~6MHz・幅200µs・800Wのchirp pulse(時間と ともに周波数を1次関数的に増加させたパルス信号) が繰り返し周期50msで、Xアンテナから送信される. 送信パルスの原信号はテーブルデータをD/A変換す ることによって生成される.レンジサイドローブ(パ ルス圧縮のために行うFourier変換においてパルス幅 が有限であるために得られたスペクトルに生じるサイ ドローブ)の抑制のためパルス波形にはcos状のエンベ ロープがかけられている.

月表面及び地下からの反射波(エコー)は同じXア ンテナで受信され、サウンダー受信部において参照 信号とミキシングされた後、6.25MSPS(Sample Per Second)・2048点の波形データとしてサンプリング され、地上に伝送される. 伝送された波形データを Fourier変換することによってA-scan 図(レンジ対エ コー強度)、軌道に沿ってA-scan図を並べることによ ってB-scan図(水平距離対レンジ)が得られる. B-scan 図はレーダーグラムとも呼ばれる. レンジ分解能は



図1:「かぐや」衛星の外観およびX/Yアンテナの位置. アンテナ 面は常時月面に向いている.

chirp pulseの帯域幅で決定され,真空中で75mである. 最大探知深度は観測データのノイズレベル,地中での 損失(tan δ =0.001 ~ 0.01)によっても変化するが5km 前後と見積もられている.銀河背景放射と同等のレベ ルの地下エコー信号を検出するためには,かぐや衛星 の搭載機器が放射するノイズ,搭載機器間を流れるコ モンモード電流で衛星構体パネル間に生じる電位差が 問題となる.かぐや衛星では電磁適合性(EMC)の厳 しい基準を設け,個別の機器・衛星システムとして不 要ノイズの評価・対策を系統的に実施することによっ て,4~6MHzのノイズレベルを銀河背景放射レベル 以下に抑えることに成功した[17].

自然電波・プラズマ波動観測は、サウンダー観測の 実施中も休止中も継続して行われる.

HF帯自然波動受信部(NPW)は広帯域掃引受信部と 高周波波形受信部(サウンダー受信部と兼用)より構成 される.広帯域掃引受信部はサウンダー観測休止中に 運用され,2組のダイポールアンテナで検出された電 場2成分の20kHzから30MHzまでのスペクトルを観測

観測対象	観測モード	出力形式(周波数レンジ)	レート	時間分解能	観測時間	合計時間
			[kbps]	[sec]	[day]	[day]
地下構造	SDR-W	波形	488	0.05	71.9	98.4
	SDR-A	波形	80	0.4	26.5	
自然波動	NPW-W	波形(20k ~ 10MHz)	488	0.1	13.9	269.9
	NPW-DS	スペクトル	16	2	106.6	
	NPW-PL	(20k \sim 30MHz)	2	16	51.0	
	NPW-A	波形(4~6MHz)	16	4	26.5	
	NPW-S	スペクトル(4 ~ 6MHz)	4	8	71.9	
プラズマ 波動	WFC-H	スペクトル(1k ~ 1MHz)	160	0.5	106.6	269.9
	WFC-L	及び波形(100~100kHz)	80	0.5	26.5	
	WFC-H	スペクトル	4	2	85.8	
		(1k \sim 1MHz)	2	4	51.0	

表1:LRSの総観測時間(2007年10月29日から2008年9月10日まで)



図2: サウンダーのデータ処理.受信した波形データをフーリエ変換することによってA-scan図(レン ジ-エコー強度),軌道に沿って並べることによってB-scan図(水平距離-レンジ)を得る.B-scan図 はレーダーグラムとも呼ばれる.近接した軌道でのレーダーグラムを対比することで側方からの 表面エコーと地下エコーは識別が可能である.



図3: 木星電波の観測例(左・赤で囲んだ箇所)、観測時のイオ位相角(反地球方向とイオ衛星方向が木星中心でなす角)・ CML(地球に対向する木星の中央子午線経度)を右パネルに赤丸で示す、右パネルの黒の斜線は東北大惑星圏蔵王観 測所で1974年から1990年までの期間に木星電波が観測された際のイオ位相角・CMLの分布を示す、非Io-Aデカメータ 電波が低周波数帯に伸びたイベントと考えられる。

する.周波数掃引時間は2秒である.X/Y2成分を偏波 分離してR/L成分のスペクトルを出力することも可能 である.高周波波形受信部はXアンテナで検出された 電場1成分の波形を100ms毎に25MSPS・4096点の波形 データとしてサンプリングする.高周波波形受信部は 時分割によってサウンダー観測との同時観測時には受信信号 がサウンダーのTRスイッチ[9,16]を経由するため、4 ~6MHz帯以外の感度は若干悪化する.

VLF帯波形受信部(WFC)は、1kHz ~ 1MHzのスペ クトル観測を行なうWFC-Hと、100Hz ~ 100kHzの 波形観測を行なうWFC-Lで構成される[18]. サウンダ ー観測中はサウンダーパルスの送信に用いていないY アンテナが、サウンダー観測休止中はX/Y2対のアン テナがプラズマ波動観測に用いられる.WFC-Lに対 してはYアンテナを2本のモノポールアンテナとして 別々に入力することも可能である.WFC-Lに入力さ れた信号は250kSPSでサンプリングされ波形データと して出力される.WFC-Hに入力された信号は2MSPS でサンプリングされた後、Programmable Down Converter (PDC)を用いたデジタル信号処理による周 波数変換を経て機上でスペクトルデータに変換される.

2007年10月29日から2008年9月10日までの総観測時 間を表1に示す.10か月間の運用で正味269.9日間の観 測を行った.この内サウンダー観測は98.4日間行われ た.「かぐや」が地上に伝送できるデータの総量は地 上追跡局の運用計画に依存するため,定常運用では, 出力データレートの大きいLISM(TC/MI/SP),LRS, HDTV間でデータレートの調整が行われた.LRSは時 間分解能を落とすことでデータレート制限に対応した. 時間分解能を落とすことなく,高分解能で観測できた 時間は,サウンダー観測(SDR-W)は71.9日間,自然電 波観測は120.5日間,プラズマ波動観測は133.1日間で ある.

3. サウンダー観測・初期結果

サウンダーのデータ処理の例を図2に示す. 嵐の大 洋(Oceanus Procellarum)で観測されたレーダーグラ ムにおいて,強い表面エコー (Surface Echo)に加え て,見かけ深さ470mと900mの位置に地下の反射層か らの連続したエコー(Subsurface Echo)を見出すこと

ができる.これらのエコーが、軌道の側方に反射しや すい地形があるために, 直下点の表面エコーから遅れ て検出された側方からの表面エコーであるとするな らば、側方反射を引き起こしている表面地形は10度 以上の緯度(距離にして300km)に渡って軌道からほぼ 10kmないし20kmの距離を保って存在していなければ ならないが、そうした表面地形は確認されていない. また経度69.5°Wのレーダーグラムのエコーが側方か らの表面エコーであるとするならば、東に9km離れた 経度69.1°Wのレーダーグラムにおいて、それらは異 なる深さで観測されていなければならない. しかしな がら表面エコーからの遅れ時間は双方のレーダーグラ ムでほとんど差が見られない.これらの検討から、レ ーダーグラムにおいて確認されたエコーは、側方から の表面エコーではなく、地表下に広く分布した反射層 によるものと結論される。比誘電率 *ε*_rの媒質中を伝わ る電磁波の速度は光速の $(\epsilon_r)^{-0.5}$ 倍となるため、実際 の反射層の深さも見かけ深さの $(\epsilon_r)^{-0.5}$ 倍となる.月 表層の岩石の比誘電率は4~8程度と推定されており [19]、実際の深さは235m、450mもしくはそれ以下と考 えられる。これらの反射層は海の溶岩層に埋まったか つての月表面のレゴリス層であると推定している。他 の海領域でも地下数100mの深さに反射層が見出され ており、現在解析を進めている。

4. 自然波動観測·初期結果

地球オーロラ帯を起源とするオーロラキロメート ル電波,太陽電波III型バースト,HOM帯域の木星電 波の観測に成功した.図3に木星電波の観測例を示す. 観測時のイオ位相角(反地球方向とイオ衛星方向が木 星中心でなす角)・CML(地球に対向する木星の中央 子午線経度)からデカメータ帯の非Io-A電波が低周波 数帯に伸びたイベントであると推定される.太陽電波, 木星電波の観測例はまだあまり多くはないが,高周波 波形受信部を用いた25MSPSの波形観測時にイベント が発生すれば,地上観測が難しい10MHz帯以下での 波形データが衛星搭載受信器で初めて得られることに なる.自然波動の観測に加えて,月周回軌道における 地球の放送波の干渉状況についての基礎データが得ら れた.地球起源の放送波は図4に示すように月の表で のサウンダー観測に実際に干渉し,微弱な地下エコー



図4: サウンダー観測に対する地球起源の人工電波の干渉例.上パネルは図2と同様の形式のレーダーグラム,下パネルは図3 と同様の形式の自然波動のスペクトログラムを示す.サウンダー観測では表面エコーを観測する直前までは背景ノイズ のみが観測される.地球のある経度帯が夜側で月に対向する場合に,衛星が地球側に回ってきたタイミングで,レーダー グラムの表面エコーより上方の背景ノイズレベルが5dB程度上昇している.



図5: 月周回軌道における地球起源の人工ノイズの干渉レベル.満月の前後では,地球の夜側電離圏を透過して地球からの放送 波が低周波数帯(4MHz)にまで干渉する.



図6:WFC-Hによるプラズマ波動の観測例.

の検出に影響を与えた. 図5に満月をはさんだ2週間(地 球の夜側電離圏が月に対向)の期間の20kHz ~ 14MHz の電波の平均受信レベルを示す. 横軸は月に対向する 地球の経度を表す. 地球の夜側電離圏を透過して地球 からの放送波が低周波数帯(4MHz)にまで干渉してい る. これに対し, 新月の前後の期間には地球の昼側電 離圏で放送波が遮蔽されるため, 放送波の干渉がなく なることも観測から確かめられている.

WFC-Hで観測されたスペクトログラムを図6に示す. 100~600kHzに地球からのオーロラキロメートル電 波(AKR)が観測されている.月の日照領域で20kHz付 近に見られる狭帯域の波動は電子プラズマ波動で,そ の周波数は背景プラズマの数密度の1/2乗に比例する. 電子プラズマ波の周波数は日陰領域では1/10以下に低 下しており,電子密度が2桁以上急減していることを 示している.この観測結果は,月の日照領域で太陽風 プラズマ中に滞在していた「かぐや」が,月の日陰側 に形成されるプラズマの希薄な月ウェイクの領域数を詳 細に解析することによって月ウェイクの密度構造を求 めることができる.22:10~23:20UTの太陽風中で は電子プラズマ波より下の帯域で強い自然波動が観測 されている. それに対し23:20UT以降の月ウェイク 領域では,通常は自然波動活動が静穏で,23:25UT, 23:45UT付近で時折強い波動が観測される. これら の波動現象の特性については現在解析を進めている.

5. まとめ

2007年10月から2008年9月までの「かぐや」月レーダ ーサウンダー(LRS)で観測されたデータをもとにした 初期成果を以上に紹介した.サウンダー観測によって 複数の海領域で地下数100mの深さの反射層が観測さ れた.自然電波の観測では、地球・太陽・木星を起源 とする自然電波、地球からの放送波、月ウェイクのプ ラズマ構造、月ウェイク境界付近のプラズマ波動現象 が観測された.今後は、高地も含めたサウンダーデー タの解析を進め、海領域以外の地下構造も明らかにし ていくことを目指す.表面エコーが複雑に重畳する高 地の解析を行うためには、高精度の表面地形・軌道デ ータが必要となるが、「かぐや」に搭載されたLALT、 HDTV, TC、重力場の解析が進むことによってこうし たデータも利用できるようになると期待される.プラ ズマ波動の観測も「かぐや」に搭載されたMAPによる

LRS_HFC

磁場・プラズマ粒子の同時観測データとの対比を進め, 月ウェイク・磁気異常近傍でのプラズマの波動・粒子 相互作用を明らかにしていきたいと考えている.

謝 辞

「かぐや」月レーダーサウンダー (LRS)の開発・運 用に当たり、JAXAの「かぐや」プロジェクトチーム の皆様,ならびに明星電気株式会社のLRS担当者の皆 様に多大なご協力をいただきました.ここに深く感謝 いたします.

参考文献

- Phillips, R. J. et al., 1973, NASA Spec. Publ. 330, 22-1.
- [2] Porcello, L.J. et al., 1974, The Apollo Lunar Sounder Radar System, Proc. IEEE, 62(6), 769.
- [3] Oswald, G. K. A. et al., 1973, Nature 245, 251.
- [4] Kapitsa, A. P. et al., 1996, Nature 381, 684.
- [5] Picardi, G. et al., 2005, Science 310, 1925.
- [6] Watters, T. R. et al., 2006, Nature 444, 905.
- [7] Seu, R. et al., 2007, Science 317, 1715.
- [8] Chyba, C. F. et al., 1998, Icarus 134, 292.
- [9] Ono, T. and Oya, H., 2000, Earth Planets Space 52, 629.
- [10] Ness, N. F. et al., 1969, J. Geophys. Res. 74, 6425.
- [11] Lin, R. P. et al., 1998, Science 281, 1480.
- [12] Halekas, J. S. et al., 2001, J. Geophys. Res. E11, 27841.
- [13] Kellogg, P. J. et al., 1996, Geophys. Res. Lett. 23, 1267.
- [14] Saito, Y. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 375.
- [15] Shimizu, H. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 353.
- [16] Ono, T. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 321.
- [17] Kumamoto, A. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 333.
- [18] Kasahara, Y. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 341.
- [19] Campbell, B. A., 2002, Radar Remote Sensing of Planetary Surfaces (Cambridge Univ. Press).