

「あかつき」による太陽コロナの電波シンチレーション観測

今村剛 (ISAS/JAXA)、安藤紘基、宮本麻由 (東大理)、徳丸宗利 (名大 STE 研)

1. 観測の狙い

2011年6月下旬に金星探査機「あかつき」が太陽をはさんで地球のほぼ反対側を通る機会(外合)があり、この際に太陽コロナの電波掩蔽観測を実施した。「あかつき」から地上局に向けて送信される電波は太陽の近くを通過する。この電波を臼田局で受信して位相や振幅の時間変動を分析することにより、コロナの密度揺らぎの空間スペクトルや太陽風加速などの情報を得る。観測時には1-wayとし、超高安定発振器(USO: Ultra-Stable Oscillator)を使用した。USOはもともと金星大気の構造を電波掩蔽で調べるために搭載されたものである。

太陽コロナの電波掩蔽観測は海外のミッションで行われたことがあり、日本でも「すいせい」や「のぞみ」を用いた観測実績があるが、今回は太陽表面まで $0.5 R_s$ (太陽半径)というあまり前例のない距離まで迫れること、S帯に比べプラズマに感度の低いX帯を使うことで太陽近傍まで良質のデータを取得できること、USOを持っていること、臼田局に高時間分解能の専用記録装置があることに強みがある。

観測はほぼ予定どおり実施され、我々は世界的にもユニークなデータを手にすることができた。以下では観測のセットアップ、外合運用、得られたデータについて述べる。

2. 観測領域

電波の経路が太陽に最も近づいたのは2011年6月25日であり、このとき「あかつき」は地球から見て太陽の北極側にいた(図1)。電波の最近接距離は太陽中心から約 $1.5 R_s$ で、最小SEP角(太陽-地球-衛星角)は約0.4度である。このあたりではプラズマ密度は 10^7 cm^{-3} に達するとされる。コロナの特性が太陽からの距離によって変化する様子をとらえるために、約1ヶ月間にわたって全16回の観測を行い、 $1.5 \sim 20.5 R_s$ の範囲をカバーした。太陽までの距離がとくに小さくなる6/24~6/27には太陽観測衛星「ひので」との同時観測も実施した。観測条件を表1にまとめた。

3. 観測手法

衛星からはUSOを原振とする1-way無変調X帯信号を送信し、UDSC 64mで受信、水素レーザーに同期した局発信号のミキシングにより100 kHz程度までダウンコンバートしたのちオープンループ記録した。データの記録には電波天文学グループが整備したIP-VLBI装置を使った。サンプリング周波数500 kHz、記録帯域幅250 kHz、ダイナミックレンジ8 bitsとした。

観測中は地上からのアップリンクを停止した。コマンド運用を行わない外合期間中は、AOS(入感:地上局から衛星が見え始める時間)から1時間とLOS(消感:地上から衛星が見えなくなる時間)前の30分間にテレメトリモニターを行う以外の時間は全て、電波掩蔽に割り当てた。1回あたりの観測時間は概ね5~7時間であった。

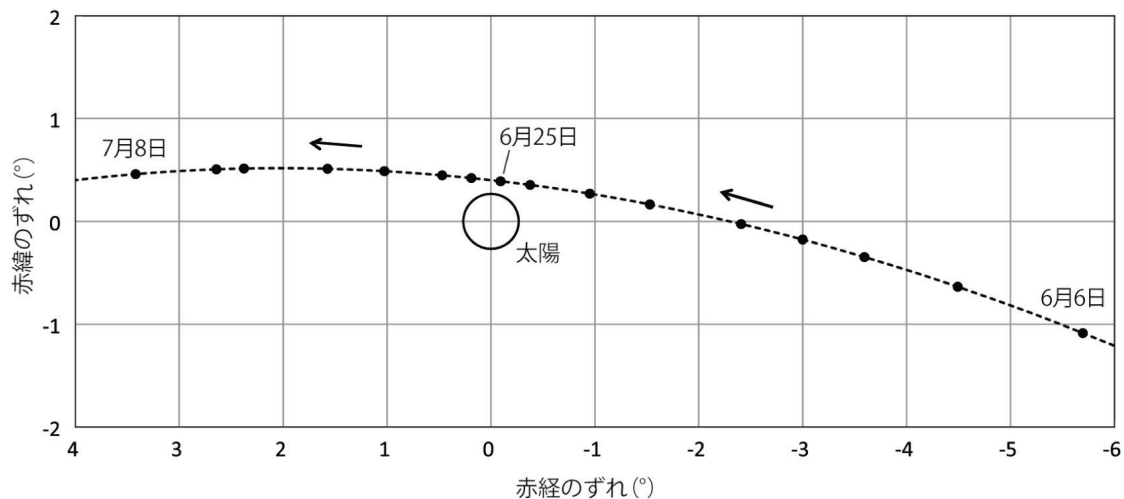


図1 太陽方向を基準とする、地球から見た「あかつき」の方向

表1 観測条件

観測日	観測開始/終了時刻 (UT)	衛星-地球-太陽角 (°)	光線-太陽間距離 (R_S)	衛星-地球間距離 (AU)	衛星-太陽間距離 (AU)
6/ 6	01:30-04:30	5.39	20.51	1.69	0.68
6/10	01:56-06:56	4.19	15.98	1.70	0.69
6/13	01:00-07:00	3.33	12.68	1.71	0.70
6/15	01:00-07:00	2.76	10.54	1.71	0.70
6/17	01:00-07:00	2.21	8.44	1.72	0.70
6/20	01:00-07:00	1.41	5.39	1.72	0.71
6/22	01:00-07:00	0.91	3.48	1.73	0.71
6/24	01:00-07:00	0.49	1.89	1.73	0.71
6/25	00:00-07:30	0.40	1.53	1.73	0.72
6/26	00:00-07:30	0.46	1.74	1.73	0.72
6/27	01:00-07:00	0.62	2.38	1.74	0.72
6/29	01:00-07:00	1.06	4.05	1.74	0.72
7/ 1	01:00-07:00	1.53	5.85	1.74	0.72
7/ 4	01:00-07:00	2.25	8.58	1.74	0.73
7/ 5	01:00-06:00	2.48	9.48	1.74	0.73
7/ 8	01:17-06:00	3.19	12.16	1.75	0.73

4. 観測データ (初期解析)

受信強度の変動量が太陽からの距離によって変化する様子を図2に示す。5 R_S 以下では変動量が平均強度と同程度となっており、いわゆる強散乱の領域であることがわかる。信号スペクトルは図3のように太陽近傍で著しく広がっている。

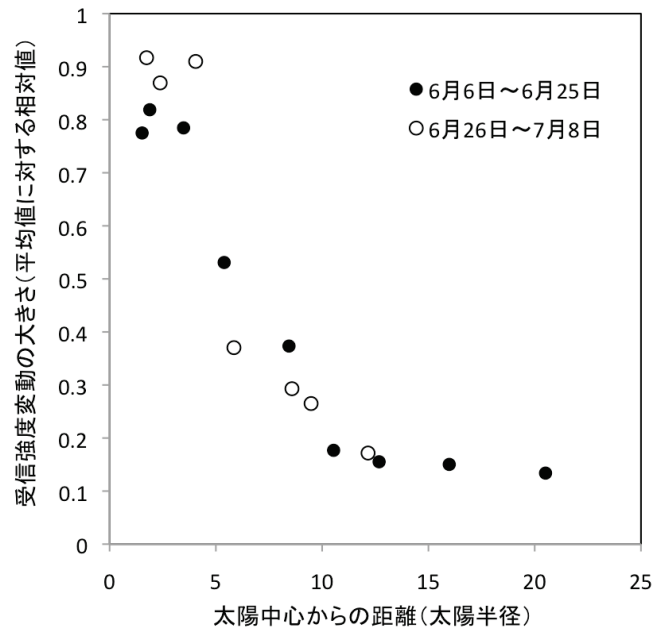


図2 受信強度変動の大きさ (scintillation index) の距離依存性

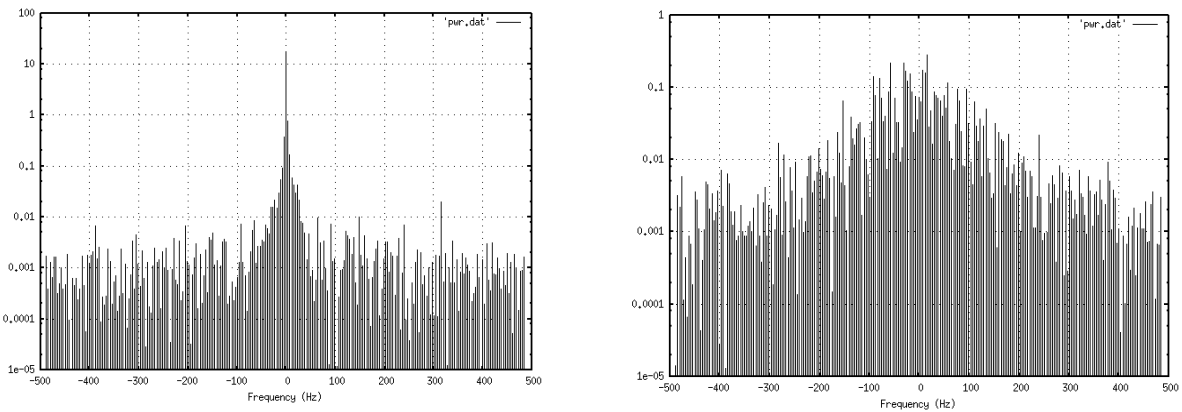


図3 受信信号スペクトルの例。帯域 1 kHz。(左 : 20.5 R_S 、右 : 1.7 R_S)

信号強度の時系列のパワースペクトルを図4に示す。信号強度の変動は主にコロナ中の微細な密度擾乱による電波の回折で生じる。スペクトル中の肩のような構造の周波数や形状が、密度擾乱の伝搬速度や乱流スペクトルといった情報を含む。2.3 R_S 以下では肩のような構造が高周波側と低周波側の両方に見られるが、これは強散乱の理論と整合的である。初期解析では太陽風が太陽からの距離と共に加速される様子が捉えられている。

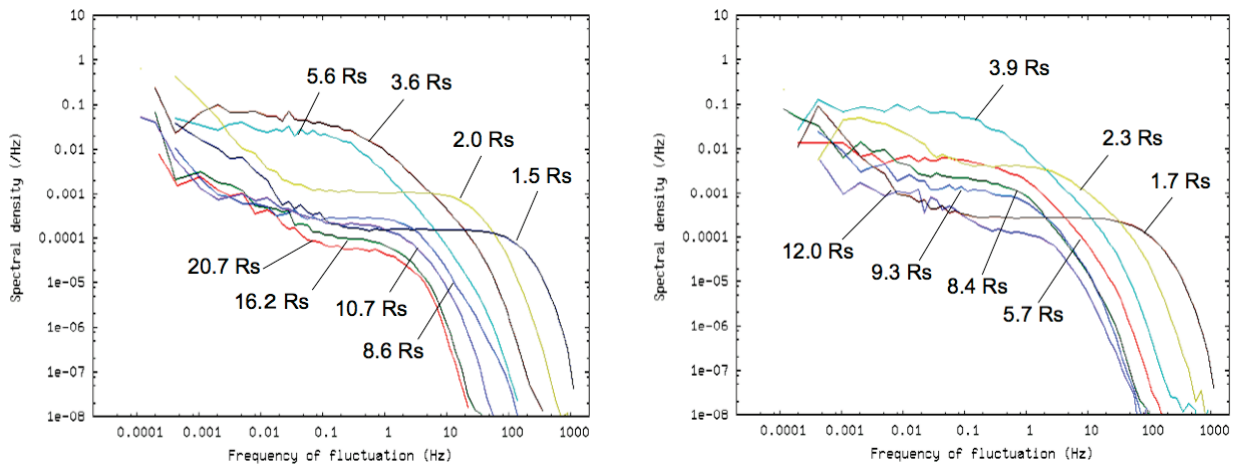


図4 受信強度変動のパワースペクトル (左 : 6/6-6/25, 右 : 6/26-7/8)

受信周波数の時系列のパワースペクトルを図5に示す。受信周波数の変動は主に、電波経路に沿って積分したコラム電子密度の変化がもたらす位相変化によって生じる。これらのスペクトルはコロナの密度変動スペクトルに対応する。3 R_s より遠方では Kolmogorov 乱流の冪乗則らしきものが見えるが、それより内側では 0.005 Hz 付近に盛り上がりが見える。これは何らかのエネルギー源、たとえば太陽光球の対流で励起される周期が数分の Alfvén 波の存在を示唆するかもしれない。

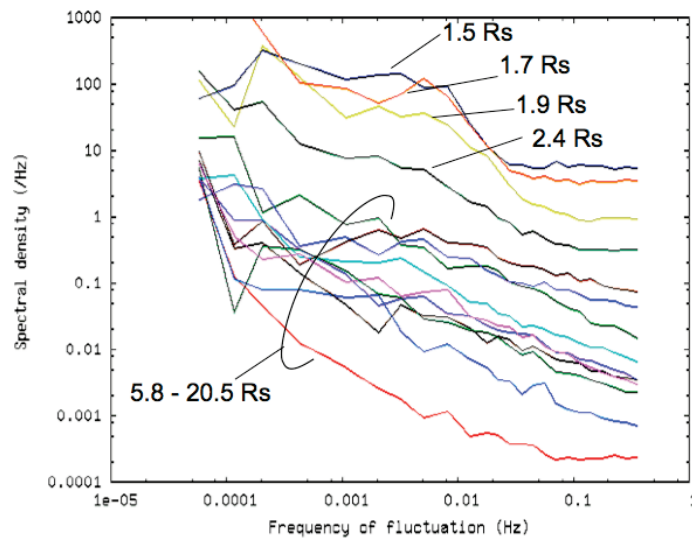


図5 受信周波数変動のパワースペクトル