

一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その15 ～ IR2カメラによる黄道光観測～

佐藤 毅彦¹，上野 宗孝¹，上水 和典¹，石黒 正晃²，臼井 文彦¹，
鈴木 睦¹，あかつきIR2チーム

(要旨) 金星探査機「あかつき」搭載IR2カメラの重要な目的のひとつに、地球軌道よりも内側領域における塵の空間分布を調べる「クルージング中の黄道光観測」がある。金星到着前の2010年10月22日から23日にかけて行った黄道光観測につき報告する。

1. 黄道光観測の意義

黄道光は、太陽系の中に漂っているちり、惑星間塵が太陽光を散乱することにより生じる光で、光害の少ない場所では、日没後の西空や日の出前の東空に「舌」のように延びる光芒として観測される(図1)。

もととなる惑星間塵は主としてcmから μm サイズで、太陽を中心に円盤のように広がっていると考えられているが、詳しい分布は分かっていない。黄道光の観測は従来、地上からと、地球を周回する衛星からの

ものに限られていたからである。

黄道光のもとである惑星間塵は上述したように大きなサイズをもつから、地球軌道のはるか外側へと太陽輻射圧により吹き飛ばされる効果は小さい。一方、このサイズの塵は、ポインティング・ロバートソン効果を受けて角運動量を失い、1億年以内程度の時間で太陽に落下してしまう。そのため、黄道光が存在するという事は、塵が常に供給され続けている(おそらく、彗星や小惑星などの小天体から)ことを示唆する[1]。

その供給メカニズムを解明するためにも、惑星間塵の分布を太陽からの距離の関数として知る必要がある。上述のように地球近傍だけに限られていた黄道光観測、それを初めて地球から離れた場所から実施することが、あかつきIR2による黄道光観測の意義なのである[2]。

2. IR2黄道光観測の方法

2.1 黄道光モードでの検出器駆動

IR2のPtSi検出器は電気的には 1040×1040 画素のCSD/CCDである。CSD(Charge-Sweep Device)は縦転送を担う。ある瞬間は一つの画素に蓄積された電荷を扱い、縦転送路を掃き寄せてゆく。転送路終端に到達した電荷は横方向へCCD転送される。このように、縦のCSD転送路はその全長で「1画素分の電荷」を保持できればよいから、幅を細くすることが可能である。



図1：マウナケア山頂、すばる望遠鏡制御棟の上から見た日没後の黄道光(明るい星は木星)。佐藤が科学教育ツールとして開発した星座カメラi-CANで撮影したもの。

1. 宇宙航空研究開発機構

2. ソウル大学

satoh@stp.isas.jaxa.jp

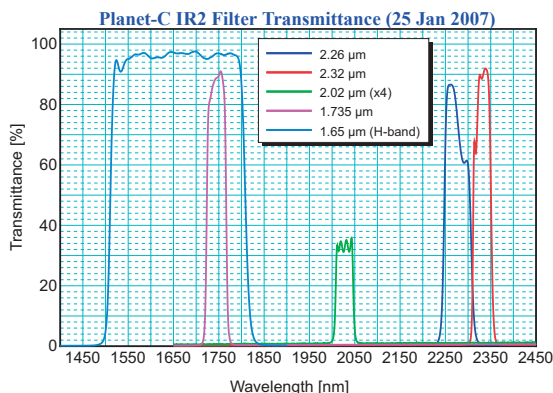


図2：IR2搭載フィルターの透過特性

IR2検出器の大きな開口率(59%)は、この構造の恩恵を受けている(IR1カメラ[3]も同様)。

赤外線に感度をもたせるため、IR2検出器はこの 1040×1040 画素のうち 1024×1024 画素のエリアに白金をショットキ接合し、有感領域としている。その外側には8画素幅の「不感領域(赤外線に対する)」が取り巻くこととなるわけで、黄道光観測においてはこれをダークレベルの基準とすることができる。

通常の金星撮像時には有感領域 1024×1024 画素が読み出されるが、黄道光撮像時には全領域 1040×1040 画素を読み出す。黄道光の大局的な空間構造をとらえる目的から、画像は 2×2 ピニングをほどこして 520×520 画素のサイズとして取得する。

微弱な黄道光をとらえるために、読み出しアンプのゲインは10倍の設定、ピニングによる足し合わせ、使用するH-bandフィルターの広い透過幅(図2)により、金星撮像時の400倍の感度を与えている。さらに120秒積分(金星の最短積分時間の40倍)により微弱天体をとらえるのである。

2.2 黄道面のスキャン

IR2カメラの写野角は 12° 四方である。となり合う

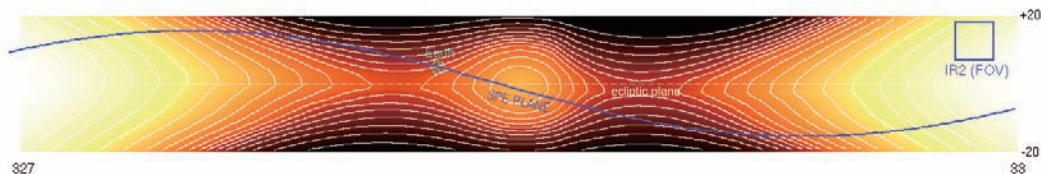


図3：期待される黄道光の輝度分布。図は黄道面を中心に、縦軸を黄緯($\pm 20^\circ$)、横軸を太陽離角としている。中央が対日照。また正弦波様の曲線はSPE面の投影を示す。

画像で写野を半分ずつ重ねてゆくならば、探査機を 5.5° ステップで回転させ、各静止点において撮像を行えばよい。このときの回転軸は、探査機座標のY軸である。

探査機には「太陽光を当てないことをノミナルとする放熱面」があり、それが+Y面と-Y面である(IR2カメラの冷凍機および放熱プレートも-Y面に取り付けられている)。したがって黄道面をスキャンするためには、探査機Y軸が黄道面に垂直に立つ必要がある。

クルージング中のノミナル姿勢は、太陽～探査機～地球の三者を含む平面(SPE面と呼ぶ)に対し探査機Y軸が垂直となるような姿勢である。あかつき軌道は黄道面と完全に一致していないから、SPE面垂直は黄道面垂直ではない(図3)。そのため、黄道面スキャンを開始する前には「Y軸を黄道面に垂直に立てる」姿勢マヌーバを実施する。

Y軸を黄道面垂直にしたのち、太陽の東側離角 37° からスキャンを開始し、反太陽点を経て太陽の西側の離角 37° までスキャン撮像を行う。各ポイントでの撮像はDark, Sky, Sky, Sky, Darkの順に行う。

3. 黄道光観測の実施

3.1 クルージング初期の電力不足

あかつきは打ち上げ後いったん地球軌道の外側へ出て、しばらくしてから1天文単位の内側へ入る軌道をとった。そのため初期には太陽電池による発電が十分ではなく、IR2カメラは6月8日～9日に25.5時間の冷凍機運転を行い初期チェックをしたものの、それ以降しばらく冷凍機オフで休眠状態であった[4]。

黄道光観測を目指して冷凍機オンとしたのは、9月2日のことであった。

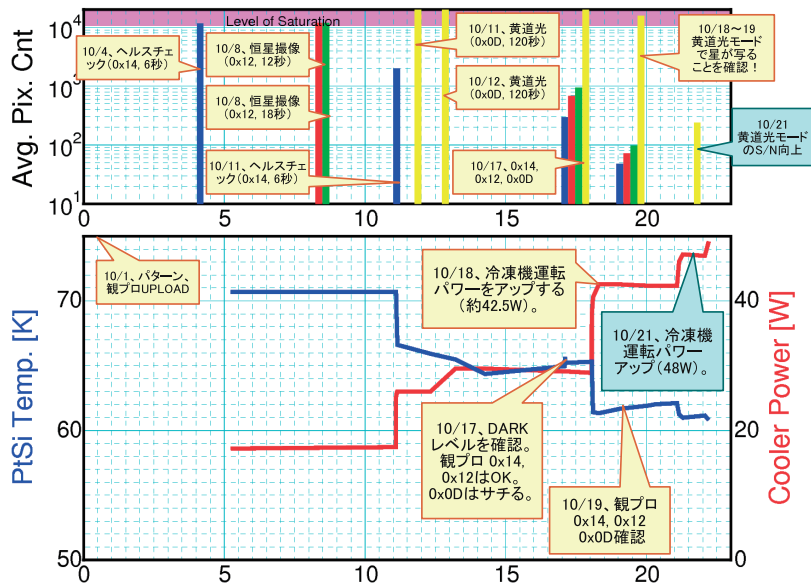


図4：2010年10月のIR2冷凍機運転パワー，検出器温度，画像のダークカウント推移を示したもの。

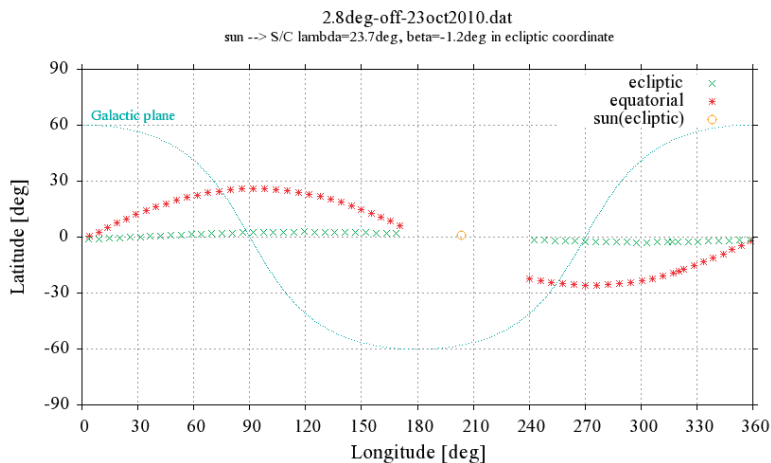


図5：実際の観測を行った点をプロットしたもの。本文中に記述したとおり，黄道面から約3°傾いた面をスキャンしている（緑色の×：軸は黄経・黄緯）。それを赤道座標変換したものが赤色の※（軸は赤経・赤緯）。

3.2 姿勢マヌーバの難しさ

IR2チームの計画は，黄道面内のフルスキャンを行う前にスキャン点数を間引いたり範囲を狭めたりするなどした簡略版(short, ultra short などと呼ばれた)を実施して安全性を確認するものであった。その第一回から問題が発生した。黄道光撮像の目的方向への姿勢変更・撮像は実施したものの，そこからノミナル姿勢

へ戻ってくることができなかったのである。

主な原因は，ミッション系メンバーが「あかつき」の姿勢変更マヌーバの振舞いを適切に理解していなかったことと，地上の姿勢系シミュレータにフライト実装との不整合が残っていたこと，である。前者は，たとえて言えば，ドローツールで曲線を描く作業に似ている。つまり，出発点(ノミナル姿勢)～複数の観測点～帰着点(ノミナル姿勢)を結んでゆくわけだが，その

ときりアクションホイール飽和やゼロクロス、カメラ開口部(衛星の-Xパネル)の太陽直射といった回避条件がつく。こうした振舞いを徐々に理解しながら、時間ぎりぎり観測計画を立案した。ところがここに第二の問題が重なって、撮像姿勢からの帰路にマヌーバ不可能を示すエラーフラグが立ってしまった、というのが実際に起きたことであった。

「あかつき」の観測計画立案ソフトPCNAVが金星周回軌道上での計画立案を優先してインターフェイス開発されていたこともあり、ミッション系メンバーの習熟に時間を要した。また姿勢系のシミュレータの不整合の改修作業もあって、黄道光観測はそのスタートが当初計画より大きく遅れることとなった。

3.3 検出器温度の大きな変動

いよいよ黄道光観測を目指し、10月11日から冷凍機の運転パワーを調整しながら黄道光観測に適した検出器温度の達成を目指した。

図4のグラフは、冷凍機運転パワー(赤線)および検出器温度(青線)の時間履歴を示したものである。運転パワーの増大にしたがい、検出器温度は下がっているものの、一定の印加電圧での運転を継続した場合(たとえば10月15日～18日、18日～21日のトレンド)、次のような変化が見られた：

- ・実効パワーが徐々に低下し、
- ・検出器温度が徐々に上昇する。

これは、探査機の太陽からの距離が徐々に小さくなること、または日々の姿勢変化、あるいはその両方により機体の温度ポテンシャルが高まる傾向にあり、IR2温度もそれに影響されたものと考えられる。

上述したように、トータルで金星撮像の1万倍もの低照度撮像モードであるから、検出器温度が高いことは致命的である(ダークレベルが容易に飽和してしまう)。

10月11日の調整開始から一週間を経て、ようやく黄道光モードで恒星の写ることが確認され、それからさらに冷凍機運転パワーをアップして本観測に挑んだ。

3.4 いよいよ観測

以上のような問題はあったものの、それらに対処して2010年10月22日の消感後、非可視中に黄道光のフルスキャン(太陽の西側離角 37° から遠ざかる方向へ、

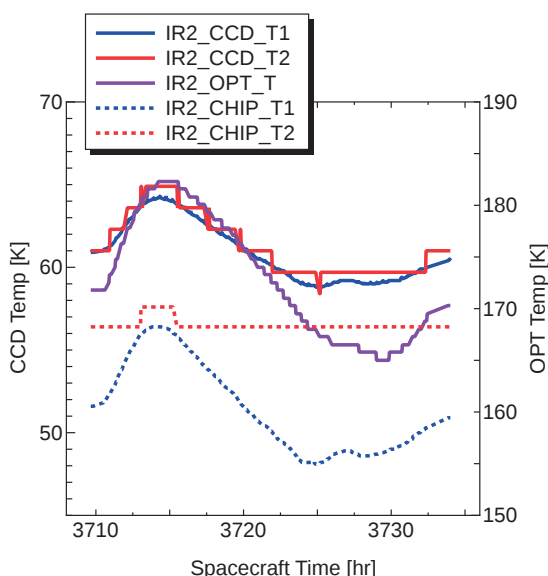


図6：黄道光撮像中のIR2検出器温度の変化。横軸は探査機時間で、3720時が探査機クロック起動からちょうど155日目を示す(10月23日)。3714時頃に検出器温度はピーク(64～65K)となり、これは図5に見るようにダークで飽和してしまうレベルである。その後、温度は下がり、3720時頃からは安定した星空が写るようになった。

東側離角 37° まで)撮像を実施した(22日06:08:20に最初の観測プログラム、23日06:19:48に最後の観測プログラムがタイムラインにより実行されている)。

なお、この時期はY軸反転(ヨーアラウンド)を要するタイミングに近づきつつあり、日々Y軸と黄道面法線との開きが大きくなっていった。したがって、10月22日の観測ではスキャン面を完全に黄道面に一致させず約 3° 離れた面をスキャンした(図5：Y軸の倒れ角 $\sim 13^\circ$)。

4. 黄道光観測の結果

撮像データは週明け、10月25日から27日にかけてダウンリンクされた。画像を確認したところ、太陽の西側から撮りはじめて数枚ほどのちからカウント値が異常に高くなりサチってしまった。これはフードからの入熱によるか、または機体そのものの温度変化によるか、あるいはその両方によってか、検出器温度が黄道光モードには適さない温度まで上昇してしまったからである(図6)。

およそ20スキャンほどしてカメラ開口部が太陽か

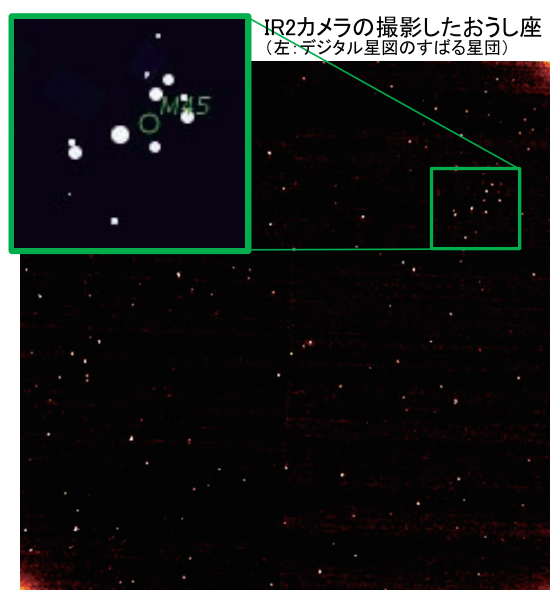


図7：一連の黄道面スキャンの途中で、すばる星団を含むおうし座の星空を撮影した。

ら遠ざかったあたりから再び星野が写るようになり、反太陽方向では冬の星座がきれいに見られた。図7はそのようなひとコマで、おうし座のプレアデス星団がはっきりと捉えられている。この黄道光観測ののち、2010年10月26日の地球観測を終えて、IR2冷凍機は再び電源をオフとされた(10月27日00:14)。

上述したように検出器温度が上がってしまったため、星空は写ったもののそこから黄道光情報を引き出すことは難しそうである。

5. まとめ

IR2黄道光「初期」観測は、金星到着までという限られた時間内に習得・解決しなければならない問題や、いくつかの制約があり、十全なものとはいかなかった。チームとして多くの点を反省し学ばなければならないと痛感している。

一方、「あかつき」は2010年12月7日の金星周回軌道投入に残念ながら失敗し、もう少しの間、太陽系内を人工惑星として公転することとなった[5]。黄道光観測の機会としては少し増えるわけで、第一回に不十分であった点を改善して、当初の目的を達成したい。チームはそのための準備を行っているところである。

参考文献

- [1] Ishiguro, M. et al., 2002, SPIE 4842, 366.
- [2] 佐藤毅彦 他, 2009, 遊星人 18(2), 105.
- [3] 岩上直幹 他, 2009, 遊星人 17(4), 244.
- [4] 山崎敦他, 2010, 遊星人 19(3), 228.
- [5] 中村正人, 2011, 遊星人 20(1), 68.