ー番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その40 劣化のせい? IR2感度の温度依存性が明らかに!

佐藤 毅彦^{1,3}, 佐藤 隆雄², Choon Wei Vun³

(要旨) あかつき IR2カメラの夜面データを測光に使う処理を行っていたところ,その感度が温度依存性を もつらしいことが明らかになってきました.その発見の経緯と抽出手法,温度依存性の定量的決定について 報告します.今後IR2データから測光を行う際,ここで確立した補正式を適用することで,より正しい結果 が得られるはずです.

1. はじめに

あかつきのIR2(とIR1)カメラは、両者をまとめて 制御するエレキIR-AEの電源不具合が発生したこと により、2016年12月以来観測休止を余儀なくされて しまいました[1]. それまでの短い期間に取得したデ ータはしかし、高い空間分解能と赤道周回軌道の利点 をおおいに発揮し、特に大気力学の分野では赤道ジェ ットの発見[2]に代表される優れた成果を挙げていま す.

その一方,測光にもとづく研究(雲粒子のサイズや 密度分布,COの分布など)は進みませんでした.理 由は,IR2検出素子に特異な「点広がり関数PSF」があ り[3],昼面から漏れ込む光が夜面の精密測光をじゃ ましていたからです.これに対しては,デコンボリュ ーションを用いた手法により状況を改善する努力が進 行中であり,光明が見えてきています[4].

ところがここにきて, もうひとつ補正しなければな らないものが発見(?)されてしまいました. IR2の感 度が温度依存性をもっているらしく, それが本稿のテ ーマです.

 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所
 北海道情報大学・経営情報学部・システム情報学科
 総合研究大学院大学・物理科学研究系・宇宙科学専攻 satoh@stp. isas. jaxa. jp

2. 「発見」のきっかけ

IR2の金星夜面観測が最も集中的に行われたのは、 軌道24(2016年8月中旬)と軌道25(同下旬)でした. 多くの日に8回(2時間間隔)の観測が行われています. 最初の画像から最後の画像までの14時間,探査機は 「金星観測姿勢」を保ち,それ以外の時間は高利得ア ンテナを地球へ向けデータ送信,という日課でした. この軌道24と25の画像データの夜面を先に述べた手 法でクリーンにし,連続画像からムービーを作ってい るうちに不思議なことに気づきました. どの日も最初 の画像がいちばん明るく,時間を追うごとに画像が暗 くなってゆくのです(図1). 金星から30万km以上離 れた遠金点付近ではあかつきの軌道運動速度はゆっく



図1:2016年8月29日に2時間間隔で撮影した金星夜面画像(夜面 のクリーンアップ済み).同じグレースケールですべてを 表示しており,最初(上段左)と最後(下段右)では明るさが 異なる.



図2:a) 軌道24,25の波長2.26μm画像から金星近傍宇宙空間領域(昼面の光がPSFにより広がっている)を測光し,温度を横軸に とったグラフにプロットしたもの.温度が高くなると測定される光量が減少することが分かる. b) a)の測定を0.5 K刻みにまとめたもの

りで、金星の観測ジオメトリは14時間の間にごくわ ずかしか変化しません、「え?どうしていつもこうな の?」と感じるとともに、これはきちんと理由を調べ なければならない、と作業に着手したわけです.

細い三日月状の金星昼面と大きな夜面が見えるとき, 当然のことながら金星の近くに太陽が輝いていて, 観 測カメラの開口面には盛大な熱入射があります. その ため,14時間にわたり「金星観測」姿勢を保っていると, 徐々にIR2検出器温度が上昇し, その影響ではないか と考えたわけです.

3. 夜面データの解析

次のようにして画像の明るさ変化を時系列に追って みることとしました.

- ・ 軌道24から8月18, 19, 20日, 軌道25から8月26, 27, 28, 29日データをピックアップしました. 使う 波長は2.26 µmのみです(温度依存性が波長にも依 存するとは考えにくいため).
- ・金星昼面の三日月と同形の測光用マスクを昼面から
 金星半径だけ外側に当てて、本来なら宇宙空間である領域へ漏れ出している光の量を測定しました.
 IR2の大きなPSFがここでは役立ったわけです(ウレシサ半分).
- ・日ごと、画像ごとに金星視直径は異なり、したがっ

てマスク面積も変化しますので,測定された光量の 平均値(マスク面積で割った値)を求め,横軸に検出 器温度をとったグラフへプロットしました(図2a).

 ・なお各日の昼面明るさは太陽位相角に応じて変わり ますから、どの日もデータを放物線で近似し、検出 器温度67 Kの値で正規化することにより日ごとの 変化をキャンセルしています。

グラフを見ると、温度に依存した変化がどの日も同じ ように起きていることが明らかですね。8月26日は温 度67 Kが含まれていない唯一の日で、そのため他と は外れていますが、これらの点も係数1.12で割るとま ったく同じ曲線の上に乗ります。そして温度0.5 Kご とにまとめエラーバーを付したのが図2bです。低温 の65 Kから高温の70 Kにかけて25 %もの感度低下 を生じているわけで、これでは精密測光には大きな問 題となってしまいます。

4. 昼面データの解析

温度依存で起きる現象ならば、昼面データも同様の 影響を受けているはずです。そして昼面を観測してい るとき、探査機は太陽光を「背中から」受けています ので異なる温度環境、より低温までの温度依存性を調 べられます。というわけで、昼面2.02 μmデータも解 析しました、ただし昼面はちょっと厄介です。理由は、



図3:波長2.02 µm昼面画像から抽出した温度依存データを関数 近似したもの.図2bの夜面データも重ねてプロットしてあ る.

- ・波長2.02 μmはCO₂吸収帯をターゲットとしているので、雲頂の変化が明るさの変化をもたらす可能性があります(それを利用した雲頂高度測定のために搭載しているフィルターなのです).
- 小さな太陽位相角では、「後光」をはじめとした複 雑な位相角依存の明るさ変化が含まれる可能性もあ ります。
- といったものです. そこで次のような手順としました.
- ・軌道18, 19, 20から6月18, 22, 26, 24, 28日, 7月2日 データをピックアップしました.
- ・6/18, 22, 26は4日おきですから、大気スーパーロー テーションにより同じ雲の構造が戻ってくる、つま り雲頂変化の影響を受けにくいことを期待していま す。
- ・6/24,28,7/2も同様.
- ・これらのデータで59 Kから71 Kまでの幅広い温度 範囲をカバー.
- ・赤道±30°の範囲、太陽光入射角45°以下、出射角45°以下の画素から輝度を抽出しました。輝度は入射角のコサインで割ることで、ランベルト面的な成分を補正しています。

データの太陽位相角範囲は25°~60°ほどでこの補正も 必要なのですが、これと温度依存性はたやすくは分離 できません、反復的な手法が必要となります。

・温度依存性を表す関数を「仮に」設定します.

- ・これにより全データを補正します.
- ・補正されたデータが描く位相曲線を位相角の4次関数で近似します.
- この関数からの残差が小さいほど、よい温度依存性の近似と位相曲線の近似の両方ができたものと判定します。
- ・最適解が得られるまで、関数を記述するパラメータ
 を変化させます。

驚いたことに,低温領域では逆に「検出器温度が低い と感度も低い」データとなっていました.そこで温度 依存性を表す関数は次のようなものとしました.

・低温側
$$(T < T_0)$$
: $I_{\text{corrected}} = I_{\text{original}} / \left[1.0 - p_{59K} \times \left(\frac{T - T_0}{59 - T_0} \right)^2 \right]$

・高温側
$$(T \ge T_0)$$
: $I_{\text{corrected}} = I_{\text{original}} / \left[1.0 - p_{70\text{K}} \times \left(\frac{T - T_0}{70 - T_0} \right)^2 \right]$

つまり最大感度となる温度 T_0 [K] でふたつの放物線 (上に凸)が接続している形になります.これを記述す る(T_0 , p_{59K})のふたつのパラメータを最適化します (p_{70K} は夜面データから0.25に固定).計算を回し, T_0 =65.2 K, p_{59K} =0.13を得ました.昼面+夜面の全デー タを一緒にプロットしたグラフを図3に示します.

5. なぜこんな現象が?

実はよく分かっていません. IR2の検出素子は国産のPtSiであり[5],開発者である木股雅章先生(立命館 大学)にもこれらのグラフを持参しおたずねしたので すが,「これ!」という決め手は見つけられませんで した.しかし,事実は事実.これほどにきれいな曲線 にすべてが乗るのでは,これを受け入れざるを得ませ ん.また,IR2ではこれまでも「電気的に独立に読み だされる四象限間の感度補正」を温度の関数として行 っています[3].実はここで発見したような温度依存 性が各象限で少しずつ異なり,それを補正していたの であろうと考えられます.

しかし、どうして打ち上げ前にこれに気がつかなか ったのでしょう?そう思って、焦点調整試験時のデー タを再度調べてみました. IR2焦点調整では光学系温 度による焦点移動も調べるため、冷凍機運転パワーを 変えながらスポット像を取得していました. 光学系と 検出器は連動して冷やされるため、光学系温度を変え ることイコール異なる検出器温度での撮像、となるわ けです.しかしこのデータの中には図3を匂わせるようなものは見つかりませんでした.前述の木股先生は,「読み出しアンプやその周辺の部品が放射線劣化した影響では」とコメントされています.

6. おわりに

打ち上げから9年,周回軌道入りから4年,IR-AE がダウンしてから3年,この時期になってこんなこと を「発見」してしまうのは情けない気もしますが,デ ータと長く付き合わないと見えないこともあるようで す(周回軌道に入ってからは日々の運用や,データ処 理標準手順の確立,そしてIR-AEダウンの原因究明 などに追われました).データ取得期間は限られてし まいましたが,ベストのIR2データを世界中の研究者 に使ってもらえるよう,この温度依存性の補正やデコ ンボリューションを施したデータをアーカイブしてゆ く予定です.

参考文献

- [1] http://www.isas.jaxa.jp/topics/000901.html
- [2] Horinouchi, T. et al., 2017, Nature Geoscience 10, 646.
- [3] Satoh, T. et al., 2017, Earth Planets Space 69, 154.
- [4] Vun, C. W. et al., 2019, SGEPSS秋学会 R009-25.
- [5] Kimata, M. et al., 1992, SPIE 1762, 350.