ー番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その59 ~LIRの"Re"calibration~

神山 徹¹, 田口 真²

(要旨)中間赤外カメラ(LIR)はあかつきの打ち上げ直後(2010年)から2024年最新の観測まで実に10年 を超える期間正常に動作し、2016年4月以降はほぼ毎日観測を行ってきました.このような長期連続観測 を、しかも宇宙空間で続けるとなると装置の性能が正しく維持されるかは大きな問題となります.これは LIRも例外ではなく、詳しい調査により観測期間中にLIRには5%以上の感度低下が生じており、金星の 観測温度に長期の見掛け上の温度変化を生じさせていることが分かりました.そこでLIRチームでは感 度の時間変化量を定量化し、新たなプロダクトとして「Level2d」を定義して観測温度の補正を行ったデー タを公開しています.本記事では、Earth、Planets and Space誌に発表した論文[1]に基づきLIRの追 加キャリブレーションについての紹介、またこの成果に基づくプロダクトの配布、および補正済みデータに よる時系列解析事例について紹介します.Level2dプロダクトが、特に長期の金星温度観測解析に役立 てられることを期待しています.

LIRによる金星観測とこれまでの センサキャリブレーション

中間赤外カメラ(LIR)は8-12 μmの波長領域で, 対象からの熱放射を利用して観測を行います[2,3]. このためLIRは金星自身から放たれる熱放射を観 測することができ,加えてこの波長帯では太陽光の 反射は十分暗いことから,金星を昼·夜区別なく観測 することができます.ノミナル観測は2016年4月以降 実施され,金星の合の前後の期間を除きほぼ毎日観 測を続けてきました.LIRの設計寿命である4年を 優に超えても,大きな性能低下を起こすことなく金星 の熱赤外線画像を送り続けています(図1).

受光エネルギーに応じて生じる光電子を計測す るCCDなどとは異なり、LIRで使われているボロメ ター素子では受け取る熱放射に応じて変化する電 気抵抗値を利用して対象の輝度温度を計測します.

1.産業技術総合研究所 デジタルアーキテクチャ研究センター
2.立教大学 理学部
t.kouyama@aist.go.jp

LIRでは装置内に取り付けられたシャッターの温度 (24℃)を基準として採用し、シャッター画像と対象 の観測画像と差分を取ることで抵抗値変化に応じた デジタル値を調べる方針を取っています.地上試験 では温度一様性の高い黒体プレートを想定される金 星温度(高度70 km想定, -60℃)まで冷却し、そこで 様々な温度に変化させ、実際の金星観測に用いる計 量線を取得しました[2].

金星軌道投入後, 観測が開始されてから初期に認 識されたのは, LIR遮光フードの温度に依存して金 星や背景宇宙の観測輝度温度が激しく変化するさ までした.これは遮光フード温度に応じた熱放射に よりレンズが温められ,さらに温められたレンズから 熱放射が放たれるためです.地上試験ではフードか らの熱放射は模擬していませんでした.観測画像に 追加される熱放射量と遮光フードの温度変化の間に は強い相関関係が認められたため,深宇宙を撮影し た画像を利用して遮光フードの温度に応じた追加熱 放射量を計測し,観測画像に生じた温度変化をキャ ンセルする手法を新たに開発しました[4].得られた

2023-05-17





図1: LIRによる金星観測例. 左図は軌道投入直後に撮影された画像, 右図は最近の運用で取得された画像.





図2:(左図) 深宇宙領域で計測された輝度温度の時間変化(Taguchi et al. [1]より抜粋). 実際の深宇宙温度ではなくLIRの観測下限値を示す. +は各観測ごとの計測値, 黒実線は21日平均値. (右図) 画面中央に異常画素の生じた画像例.

ままのデジタル値「Level 1b」, 輝度温度に変換した 「Level 2b」に加え, 較正済み「Level 2c」プロダクト を新たに定義し公開してきました.

2. 長期運用により判明したLIRの 感度低下

1章で紹介したキャリブレーションは短期的な観 測条件によってパラメータが決まるものであった一方 で,約10年にわたるLIRの運用から,長期にわたる性 能変化についても評価することが可能になりました.

LIRの観測では金星と同時に背景に写る深宇宙 領域の温度データも調査することができます. もち ろん深宇宙からの熱放射は無視できるほど小さいた め,深宇宙の領域では観測下限温度(~180 K)が出 力されます.深宇宙領域はいつ観測しても一定の観 測下限温度が出力されると予想されていましたが, 実際には観測を継続するに従い,深宇宙領域の観測 温度が単調に増加する様子が見られ, 2020年には 200 Kを上回るなど顕著な増加となっていました(図



図3:LIRの感度低下による影響の概略図.感度低下が生じると基準ターゲット(高温)と観測対象(低温)の間の出力差が小さく(=温度差が小さ いとみなされる)なり、観測対象の輝度温度が感度低下前より高く出力される.同時にダイナミックレンジを下回る画素が生じやすくなる.

2左).特にLIRの動作安定を目的に常時電源を入れ た状態を維持する運用を開始した2016年10月以降, その傾向が顕著になっています.

また別の事象として、キャリブレーション目的に取 得された深宇宙のみを観測した画像のうち、画像中 央にLIRのダイナミックレンジを下回る異常画素の 発生が見られるようになりました(図2右中、白点で示 された画素). こちらも観測初期には見られておらず、 長期運用によって生じた事象となっています.

以上の観測温度の経時的な単調増加,またダイナ ミックレンジを下回る画素の発生はLIRの感度低下 によって説明することができると考えています(図3). LIRは熱放射量に比例した電気抵抗値変化をデジ タル値に変換して記録します.絶対値そのものは温 度変換には用いられませんが,差分を取る前の画像 では入力される熱放射量に応じてデジタル値が出力 されます.そのためLIRに感度低下が生じると基準 となるシャッター画像も、ターゲットの金星画像も、 また深宇宙画像もその出力値が減少します.ここで 感度低下は出力値に乗じる形で影響を及ぼすため、 元の出力値が大きい高温基準ターゲット(=シャッ ター)ほど値としての変化は大きく、低温ターゲット (=金星や深宇宙)では変化は小さくなります.そのた め感度低下が起きた方が高温基準ターゲットとの出 力値の差分が小さくなり,計測上ターゲットの温度 が高く記録されます.

同時に、感度低下が生じるとわずかにですが深字 宙画像も出力値の低下が起きます.この低下により 出力値がLIRの画像化に用いているダイナミックレ ンジの範囲外に逸脱する可能性が高まり、結果とし て下限を下回る画素の発生が起こりやすくなります. LIRの特性から画像中央ほど電気抵抗値からの変 換出力が小さく記録されるので、画像中央付近に下 限を下回る画素が集中することになります.これらの 考察からLIRチームではLIRに感度低下が生じてい ると結論付けています.

感度低下の要因は現在もわかっていません. セン サ製造時にセンサ内部は真空封じされています. LIR はセンサ内部を40℃,常温よりやや高温に維持しな がら駆動されます.累積の駆動時間は2000日を超え ているため,センサ内部には徐々に揮発する成分な どがたまっている可能性が高いです.それらがセン サ窓内壁や受光素子に付着して光の透過率や受光 効率を下げたり,センサ内部の熱伝導率を上昇させ て検出器であるボロメータの温度変化が起こりにくく なったりしたことが要因ではないかと考えています.

3. 感度低下補正

深宇宙領域で計測された輝度温度の変化に見ら れたLIRの感度変化がLIRの観測でどのように表 れるか式で評価します. 観測で得られる熱放射量を *I*。(*T*,*t*)とおけば, 観測値は感度低下の影響を受ける ことに注意して:

$$I_o(T,t) = (1 + \alpha(t'))(I(T) - I(T_s)) + I(T_s) \quad (1)$$

のように表現できます. ここでTをターゲットの真 の輝度温度, I(T)をTに相当する熱放射量, T_s を シャッター温度(=24 \mathbb{C}), $I(T_s)$ をシャッター温度に相 当する熱放射量, tを観測時刻, t'を感度低下に影響 するLIRの累積駆動時間, $\alpha(t')$ を感度変化率として います. 今回は感度低下のケースのため α は負の値を 持ちます.

次にLIRの観測初期の感度低下が無視できる時 刻 t_0 に対して(すなわち I_0 (T, t_0)=I(T)),時刻tの感 度低下による観測熱放射の変化量を $\Delta I(t, t_0)$ とおけ ば,

$$\Delta I(t, t_0) \equiv I_o(T, t) - I_o(T, t_0)$$
$$= I_o(T, t) - I(T)$$
$$= \alpha(t')(I(T) - I(T_s))$$
(2)

となります. ここでLIRの運用では, 深宇宙観測の 時系列データ(図2)から2つの観測を比較すること で $\Delta I(t,t_0)$ を得ることに着目して, $I(T_b)$ を感度変 化がないとしたときの観測熱放射とし(2)式を変形 すれば

$$\alpha(t') = \frac{\Delta I(t,t_0)}{I(T_b) - I(T_s)} \tag{3}$$

と表現できます(このとき T_b は観測下限の180 K). こ のようにして得られた $\alpha(t')$ を図4に示します. ここか ら感度低下量は実に5%を超える有意なものであっ たことが明らかになりました.

図4に示したように、細かな変動はあるものの全体として明瞭な線形の単調減少傾向が見られたことから、LIRチームではα(t')を累積駆動時間に対する 1次のトレンドで近似して補正係数を求め、(1)式に代入することで計測したいI(T)を導出しました.図5に感度補正後の深宇宙観測の計測温度の時間変化を示します。図1で見られた増加傾向をキャンセルでき



図4:見積もられたLIRの感度低下(Taguchi et al. [1]より抜粋). 横軸はLIRの累積稼働時間.+は各観測の計測値,破線は線 形近似した感度低下傾向.



図5:感度低下補正後の深宇宙領域(=観測下限)の輝度温度時間 変化(Taguchi et al. [1]より抜粋).

ていることが分かります.また同様に観測された金 星輝度温度にも感度低下補正を適用しました.図6 はLIR画像中の金星ディスク中心(赤道~低緯度帯) の温度変動を示しています.補正前は金星輝度温 度は長期的に上昇傾向があるように見えましたが, 補正後は上昇傾向は見られません.補正の成立性に ついて,[1]で用いた解析期間を超えて,より最近の データにも問題なく適用できていることを確認して います.

4. 補正済み画像による時系列解析

本章では実際に補正済みデータを用いて温度の長 期変動に着目して行った解析の例を示します.図6右 に示した金星ディスク中心温度の時間変化のうち,

感度低下補正前 感度低下補正後 center temperature 235 235 center temperature 230 230 Venus (Venus LIRの 感 度 低 下 に よ る 225 225 ~5Kの温度上昇トレン ۲ 220 220 ο 2500 500 1000 1500 2000 ٥ 500 1000 1500 2000 2500 Days since VOI-R Days since VOI-R

240

図6:感度補正前(左図)と補正後(右)の金星ディスク中央で計測した輝度温度(Taguchi et al. [1]Figure 5を改変). +は各観測の計測値, 実 線は21日平均値.



図7: (左図)熱潮汐波成分を除去してえら得た金星ディスク中央での輝度温度. +は各観測の計測値,実線は21日平均値.また破線は周期解析 で得られた最も強い振幅成分を示す. (右図)Lomb-Scargle法による周期解析結果. 破線は信号の99%信頼区間を示す.

明瞭に確認できる約200日周期の変動は熱潮汐波 [5]によるものであり、あらかじめ熱潮汐波の構造を 調べておくことでその影響をキャンセルすることが できます、実際に図7左に熱潮汐波成分を除去して 得られた温度の時間変化の結果、図7右にLomb-Scargle法を用いて行った周期解析の結果を示しま す.また図7左では、温度変動に周期的な成分があ ると仮定して行った周期解析の結果、得られた最も 強い振幅成分(約800日周期)を重ねて図示していま す.この振幅成分と観測結果の比較から800日周期 変動は確からしいことが見て取れます、このような周 期解析結果の検証は3章で述べた見掛け上の温度 増加トレンドを除去したことにより、明瞭になったと 言えます.

5. まとめ

今回の補正によって、センサの感度低下による見 かけの輝度温度変化はうまく補正できたと考えてい ます、4章で示した通り、これによって金星輝度温度 の長期変動の研究に耐えうるデータの提供がなされ ています、またこの追加の較正処理を施したデータを 「Level 2d」プロダクトとして新たに定義し、すでに 公開を開始しています、一方、まだデータの質に関し ていくつかの問題が残されています、一つは、図4、5 を見ると気がつくように、200日くらいの周期で深字

240

宙温度と金星輝度温度のばらつきが大きくなる現象 が見られます.深宇宙温度は自然にこのようにばら つくとは考えられないため,機器由来ではないかと 想像されます.また,LIRが導出する雲頂温度が過 去の観測に基づく大気モデルの温度と比較してやや 低いことも,自然変動なのか機器に原因があるのか 見極める必要があります.これらの課題にLIR機器 チームは取り組んでいます.

参考文献

- Taguchi, M. et al., 2023, Earth Planets Space 75, 53. https://doi.org/10.1186/s40623-023-01803-w
- [2] Taguchi, M. et al., 2007, Advances Space Research 40, 861.
- [3] Fukuhara, T. et al., 2011, Earth Planets Space 63, 1009.

- [4] Fukuhara, T. et al., 2017, Earth Planets Space 69, 141.
- [5] Kouyama, T. et al., 2019, Geophysical Research Letters 46, 9457.



神山 徹

産業技術総合研究所デジタルアーキテクチャ研究セ ンター地理空間サービス研究チーム,研究チーム長. 東京大学大学院理学研究科博士課程修了.博士(理 学).産業技術総合研究所特別研究員,研究員,主 任研究員を経て2023年4月より現職.専門は惑星気 象.地球電磁気・惑星圏学会,日本惑星科学会,日本 リモートセンシング学会に所属.日本リモートセンシ ング学会理事を務める.

田口 真

立教大学 理学部 教授.東北大学大学院理学研 究科博士課程中退.博士(理学).東北大学助手,国 立極地研究所准教授を経て,2008年4月より現職. 専門は惑星大気物理学.地球電磁気・地球惑星圏学 会,米国地球物理学連合,日本地球惑星科学連合に 所属.