

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その45 ～IR2夜面データのクリーンヒット! 静穏領域 CALMの発見～

佐藤 毅彦^{1,2}, LEON/IR2チーム

(要旨) あかつきIR2による金星夜面データを「測光」仕事に使うことを妨げる問題点, それを解決するために開発した手法, そして金星大気中の静穏領域CALMの発見について紹介します。内容としては, 科学雑誌Icarusに発表した論文[1]のエッセンスで, それをストーリー仕立てで語ります。

1. 「昼面からのコンタミ」を取り除け!

あかつきIR2カメラの顕著な業績はこれまで, 「赤道ジェットの発見」[2]や「下層雲の形態学」[3]などでした。これらは何らかの画像強調処理を行って雲の模様を見やすくし, その運動を追跡したり, 形状変化を追ったりする仕事です。当然のことながら強調処理を行った画像は, 模様の正確な明るさを調べる「測光」仕事には向きません。「雲粒子の光学的・物理的性質(波長2.26, 1.735 μm の組合せ)」や「大気下層のCOの定量(波長2.26, 2.32 μm の組合せ)」といった, IR2カメラの重要研究テーマでありながらこれまでなされなかったのはその「測光」仕事ですから, 強調処理前の「素のデータ」からそれを測らなければなりません。しかしそこに立ちはだかる問題があったのです。

それが「昼面からのコンタミ」です(図1a, b)。IR2の検出素子(白金シリコンPtSi)は厚み400 μm のシリコン基板に微細加工で形成されています。シリコンは赤外線には透明なので, どうやら基板内部で多重反射が起きるらしく, 強い点光源からの光は大きく外へ広がってゆきます(点広がり関数PSFの裾

野が広い)[4]。金星夜面を撮像するとき, 同じ視野内に何桁も明るさの違う昼面三日月が入ります。これがPSFで広がる影響=「昼面からのコンタミ」は甚大で, 夜面の明暗はすべて「下駄を履いた」形になりますし, しかもそれは昼面からの離れ具合によっても一定しません。「素のデータ」がこれでは「測光」仕事ができない…IR2チームに危機感が漂います。

この「昼面からのコンタミ」除去を達成すべく, 精鋭の悪戦苦闘が続いていました。

2. 「コロンブスの卵」

できてしまえば単純なことでありますが, 時間的に近接して得られた2.26 μm 画像(図1a)から2.32 μm 画像(図1b)を引き算することで, このコンタミ除去が達成できました。その原理は次のとおりです。

- ・ 両画像は波長が近いことから, 昼面の明るさは似ています。当然, 夜面に被さるコンタミの強さも似ています。1に近い係数で若干の明るさ補正をした上で引き算することで, コンタミは消えてしまいます。
- ・ 一方, 夜面の雲模様は熱い下層大気による下からの熱赤外線により照らされています。波長2.32 μm はその下層大気に存在する一酸化炭素の吸収で減光していますので, 引き算をしたあとも夜面の

1.宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

2.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

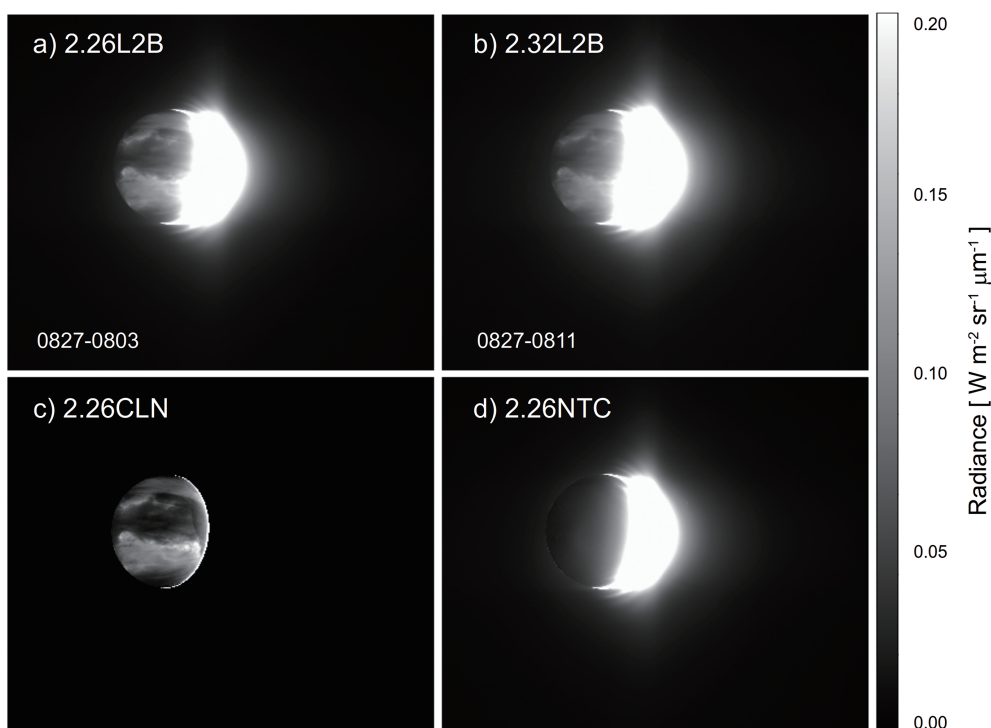


図1: 「昼面コンタミ」除去プロセス. a) オリジナル2.26 μm 画像. b) オリジナル2.32 μm 画像. c) aからbを引いて夜面をクリーンにしたもの. d) aからcを引いて「昼面コンタミ」成分だけを残したもの. (文献[1] CC-BY 4.0)

雲模様はしっかりと見え続けます.

基本的な原理は、たったこれだけのことです. とはいえ良好な測光精度を得るためには、各ステップでもうちょっと考慮すべきことがあります.

- ・ 引き算をする際に乗じる補正係数は「本来の昼面の明るさの違いを補正」と「キャリブレーション誤差分を補正」の両方を行います. 最適な係数は昼面から深宇宙に広がった光を実測し、実データから求めます.
- ・ 引き算後に見えている夜面は、当然のことながら、2.26 μm 夜面本来の明るさではなく「目減り」しています. どれだけ目減りするかは、CO吸収波長帯である2.32 μm 夜面の明るさによる、すなわちこの目減り分を評価することで副次的に下層COの量がおおまかに分かる、というおまけがついてきます.

はい、これで「引き算ののちに目減り分を補正」して、昼面コンタミの影響が取り除かれた2.26 μm データ(図1cの2.26CLN: cleaned night)が得られ

ました. これを元の2.26 μm 画像から引くと、何が残るでしょうか?それは「昼面のコンタミ」そのものです(図1dの2.26NTC: net contamination). もうひとつの夜面波長である1.735 μm データに対しては、この2.26NTCをまた係数倍して引き算することで、昼面コンタミの影響を軽減できたのです(いろいろな理由で「除去」とまでいえないところが、少々苦しいですが).

こうして、初めて「測光」仕事に使えるIR2夜面データを手にし、いよいよデータ解析となります.

3. 座標に縛られるな. 座標を使いこなせ!

伝統的に、2波長(2.3 μm , 1.74 μm)で測定された夜面模様の明るさを相関プロットにし、その中から情報を引き出す手法がとられています[5, 6]. クリーンになったIR2データをその方法でプロットしても、どうも特徴がうまくつかめません(図2a). そこ

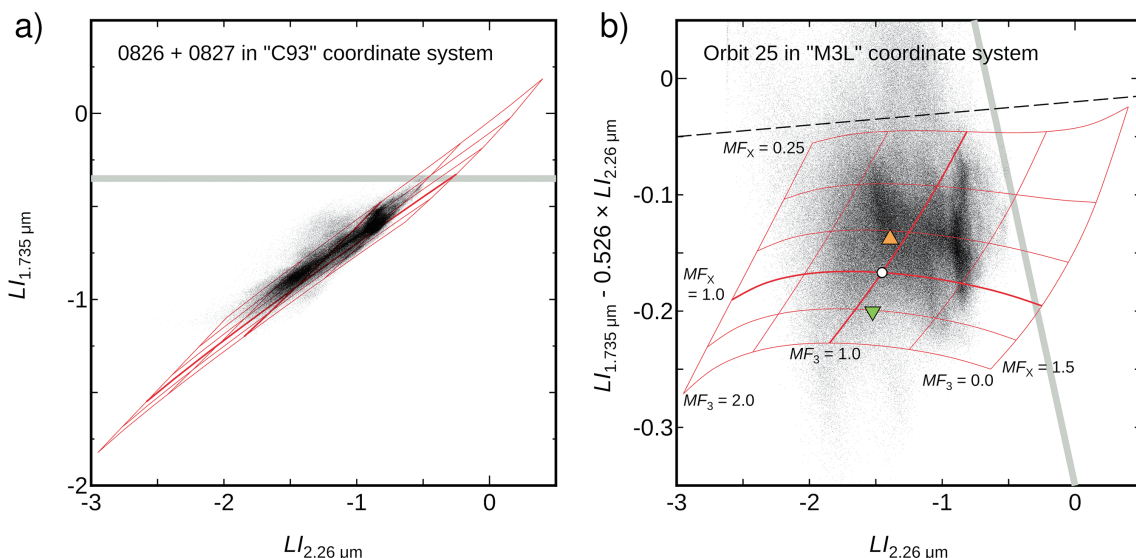


図2: クリーンとなったIR2データを2波長(2.26 μm と1.735 μm)の相関プロットで解析. a) 通常用いられる座標系(横軸2.26 μm , 縦軸1.735 μm ともに常用対数). b) 新しく導入したM3L座標系にプロット. 中央右寄りの縦に集中したデータ群がCALM. (文献[1] CC-BY 4.0)

で、座標変換により特徴抽出を試みました。まず図2aの右上がり直線が水平になるような「せん断変換」を導入し、次に縦軸を拡大して特徴を見やすくしたものが図2bです。金星雲粒子のモード3(大粒子)を増減させたときの明るさ変化がほぼ水平になるような変換なので、この新しい座標系をM3L(Mode 3 Leveled)座標系と名付けました。図にオーバーレイしているグリッドは、おおよそ水平方向の変化がモード3粒子を増減させた場合(M3Lの定義ですね)、おおよそ垂直方向の変化がそれ以外の粒子を増減させた場合に対応しています。

そうすると、とても特徴的なデータ点の集団が見えてきました。われわれはこれをCALM(Clouds Aligned Linearly in M3L)と命名し、その性質を調べてみることにしたのです。それにしても座標を変換するだけでこんなものが見えてくるというのは、なかなか愉快なことですね(この頃には、危機感はすっかり薄れてしまっています)。

4. CALMの正体を探れ!

次には、CALMはどのような領域なのか、データ点をIR2画像に再マップして調べてみました(図3)。

図でピンクに色づいた領域がCALMに対応した場所です。黄色はCALMではない普通の(?)場所、濃い紫色は特に1.735 μm でコンタミ軽減が不十分なもの(「除去」といえないのは、このあたりが理由です)場所に対応しています。

こうして見るとCALMは、中緯度～高緯度の明るい、そして「グチャグチャ感のない」領域に対応しているようです。そして面白いのは、赤道の暗いバンドとの境界を形成する特に明るい領域はCALMではない(図3の0826-2203画像)ことです。さらに、明るいストリークもその周辺にCALMのピンク色があるものの、コア部分はCALMでなくなっています(図3の0828-2203画像)。これらのことから、われわれはCALMを次のような場所であると解釈しました。

- ・ CALM領域は比較的静穏な場所、そこではモード粒子の構成比が、原材料である硫酸蒸気の量、平均的な鉛直対流場などにより達成される平衡状態で決まると考えられます。
- ・ 赤道暗帯との境界、ストリークのコアなどはおそらく強い下降流が生じている場所と考えられます(実際に後者は、高解像度数値計算により、モデル上ではそうであることが示されています[7])。そのような場所ではモード粒子の構成比が平衡状態

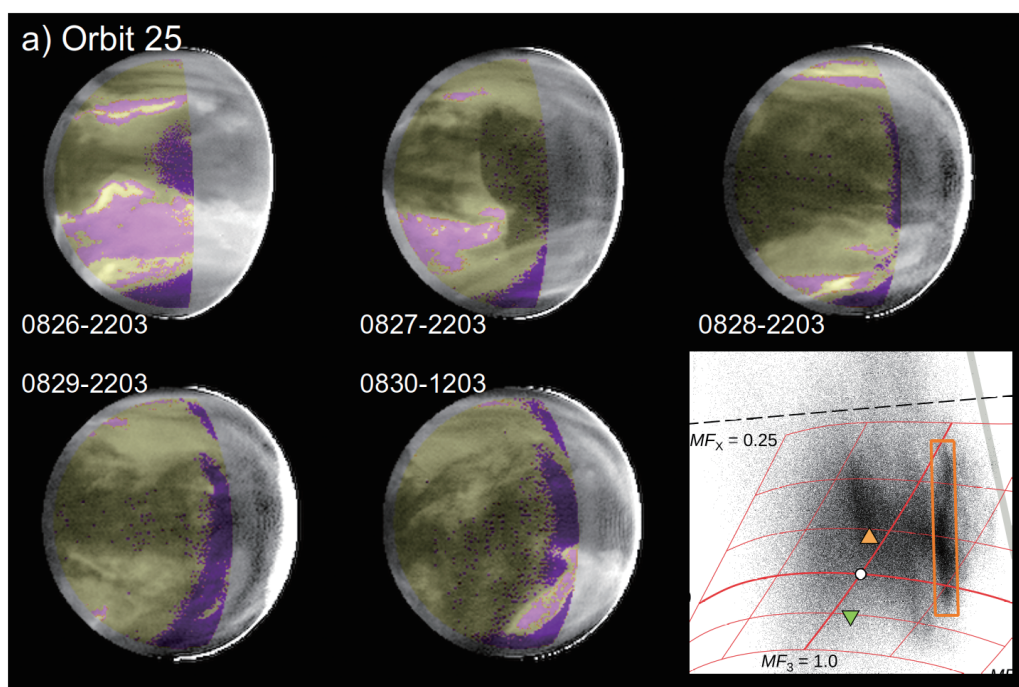


図3: CALMの夜面画像における識別(ピンク色の領域). (文献[1] CC-BY 4.0)

を保ち続けることができず, CALMから外れるでしょう。

というものです. CALMという名は, この「静穏な場所」という意味をもたせるためにつけたわけです。

金星の観測データから直接的に鉛直運動を示すことは難しいのですが, この解析結果はそれを可能にするひとつの方向性を示したと考えています。

5. IR2データをしゃぶりつくせ!

というわけで, IR2夜面データを「測光」可能な品質に向上させることができ, そこから第一弾としての科学成果を得ることができました。「昼面コンタミ」除去として他にも検討・開発している手法(デコンボリューションを用いるなど)もあり, IR2データをしゃぶりつくすフェーズの入り口に, ようやくたどり着いたといえます。危機感は期待感に変わりました。

参考文献

- [1] Satoh, T. et al., 2021, Icarus 355, 114134.
- [2] Horinouchi, T. et al., 2017, Nature Geoscience 10, 646.
- [3] Peralta, J. et al., 2019, Icarus 333, 177.
- [4] Satoh, T. et al., 2017, Earth Planets Space 69, 154.
- [5] Carlson, R.W. et al., 1993, Planet. Space Sci. 41, 477.
- [6] Wilson, C. et al., 2008, J. Geophys. Res. 113, 10.1029/2008JE003108.
- [7] Kashimura, H. et al., 2019, Nature Communications 10, 23.