

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その52 ～光線を追え!IR2検出器点広がり関数PSFの 物理モデリング～

佐藤 毅彦^{1, 2}, IR2チーム

(要旨) あかつきIR2検出器に宿命的な点広がり関数PSFを, 検出器の構造と其中で起きる物理過程とに立ち返ったモデリングにより再現を試みたところ, 多重リングという重要な特徴を再現することができた. 一方, 十字状パターンは再現できず, これは幾何光学的ではなく波動光学的に起きている現象と考えられる. このPSFシミュレーションは, 検出器を加工した場合の性能向上を見積もるツールとしての活用も可能である.

1. IR2検出器点広がり関数PSFのおさらい

シリーズ「その45」[1]で述べたように, IR2夜面データは「昼面からのコンタミ」に悩まされています[2]. 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たものです. シリコンは赤外線領域では透明度が高く, その屈折率は波長2 μm において約3.4です. そのため検出素子面でいったん光が散乱されるとたやすく全反射状態, つまりシリコン基板から光が脱出できず多重反射を繰り返すモードに入ります. この効果により, 強い点光源からの光が大きく広がってゆく, つまり裾野が広い点広がり関数PSFを生じるということが, IR2検出器の「宿命」ともいえる問題点です.

画像の後処理によりそれを軽減する手法も研究され, 画像同士の引き算を上手に行うことにより「その45」で紹介したような測光研究の成果が得られています[3]. この方法では, 広がった光を引き算によりキャンセルしているだけで, PSFそのものを正確に知る必要はありません. それは簡便でよいのですが, やはりPSFをきちんと知りたいという要求(画像

のデコンボリューションをしたいなど)もあります. 波長2.02 μm の昼面画像は画素飽和の問題も少なく, 数学関数で近似したPSF([2]を改良したバージョン2)を用いたデコンボリューションが良い結果を与えています[4]. しかし夜面画像では大きく飽和した三日月状の昼面が共存し, そこから広がった光を精度よく取り除くため, なかなか満足のゆくPSFを得ることができずにいました.

考えてみれば, IR2検出器の構造はよく分かっています(何しろ, ミッションチームと三菱電機とで時間をかけ議論をして作ったのですから). 基板内で起きている物理プロセスを丹念に追えばPSFの物理モデルを構築できるのではないかと発想から, この作業に着手したわけです.

2. 多重反射のモデリング

モデリングの根幹となる考え方は, 二つ(AとB)に分けることができます. シリコン基板の下面に検出素子などの部品が形成されていて, 上面は基板とレンズ側外界との境界面(平面)であるとします.

2.1 点光源を出発点とした素過程(過程A)

A1. 下面のどこか一点からあらゆる天頂角・方位角へと広がる光線を追跡します. 上面への入射角が

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

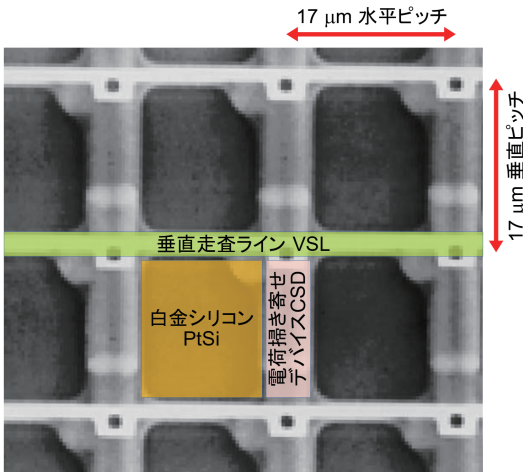


図1: IR2検出器素子面の電子顕微鏡写真. PtSi, CSD, VSLの各要素が見える.

全反射の臨界角より大きければ, 100パーセント鏡面反射され下面へ戻ります. 臨界角以下の場合, 外へ出る光と, 基板内へ戻る光とに分かれます.

A2. 下面には白金シリコン検出素子(PtSi, 開口率 APR), 電荷掃き寄せデバイス(CSD), 垂直掃引ライン(VSL)が $17 \mu\text{m}$ ピッチで, 1040×1040 画素分形成されています(図1). これら要素は, それぞれに仮定された反射率で鏡面反射するものと考え, ひたすら反射光をトレースしてゆきます(面積平均した反射率は R_{ave}). PtSi部分を経由する場合には, 量子効率(QE)相当分の光が光電子に変換され蓄積されます。「どこか一点」を始点とした光により各PtSi素子に蓄積される光電子マップを, Mirror Reflectionの意味で**MRR**

と呼ぶことにします.

A3. 下面に達した光は, 鏡面反射される, あるいは光電子に変換される以外に, 各場所で散乱されて二次的な光源になります(図2). つまり, A1で考えた「どこか一点」からの光は検出器全面に無数の光源を生み落とす結果となります。「どこか一点」を始点とした, この新たな光源分布を Diffuse Sourceの意味で**DFS**と呼ぶことにします.

さて実際に点光源(恒星のような)からやってきて, IR2レンズを経由し検出器に結ばれる像は(ニコンにより高い性能を達成していても), A1で考えたような「理想的な点像」にはもちろんなりません. その像を True Optical PSFの意味で**TOP**と呼びましょう. すると, A1~A2の過程を経て, PtSi素子に蓄積される光電子マップは

$$TOP * MRR \rightarrow IMG_1 \quad (1)$$

で得られます(アスタリスクは二つの二次元マップの畳み込みです).

また, 次のステップで考慮しなければならない新たな光源分布は

$$TOP * DFS \rightarrow DFS_1 \quad (2)$$

の畳み込みで得られます.

2.2 素過程の繰り返しによるPSF再現 (過程B)

ここまでで, 「鏡面反射パターン**MRR**」と「新たな光源分布**DFS**」という二つの素過程を得ました. 次に, 子が孫を産み, 孫がひ孫を産む, そうした繰り返

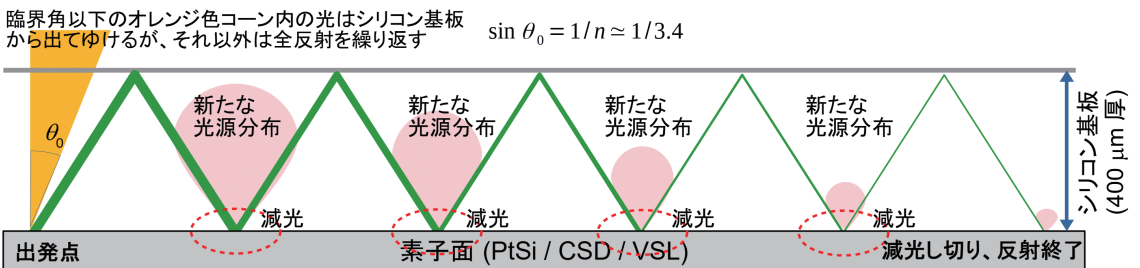


図2: 一点からスタートする多重反射の模式図. 下面で反射するたび, そこに新たな光源を生んでゆく.

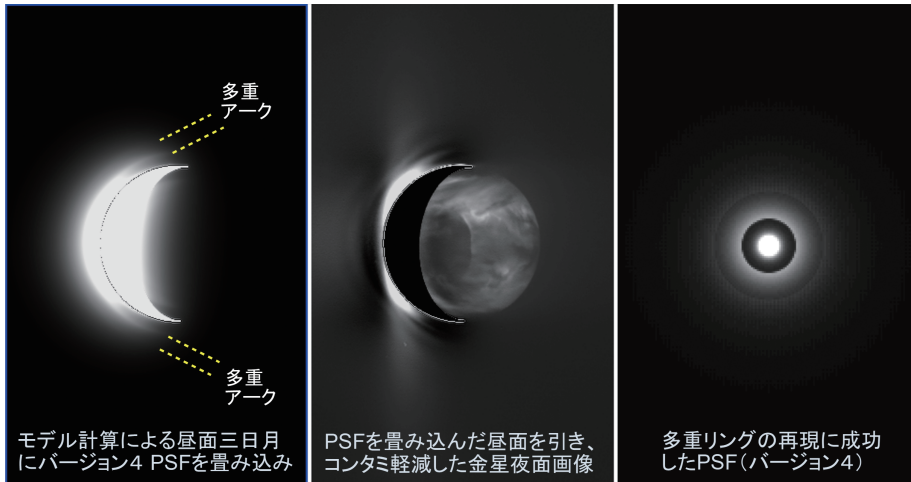


図3: シミュレーションで得たPSF(右), それをモデル昼面に適用したもの(左), 夜面画像から引き去りコンタミ軽減したもの(中央).

返しを定式化してやればよいことになります。

上記した第一ステップで得られた DFS_1 が次のステップの光源分布ですから,

$$DFS_1 * MRR \rightarrow IMG_2 \quad (3)$$

$$DFS_1 * DFS \rightarrow DFS_2 \quad (4)$$

のように, やはり畳み込みによって検出器に蓄積される光電子マップ IMG_2 と, さらに次のステップの光源分布 DFS_2 が得られます。一般化すれば,

$$DFS_i * MRR \rightarrow IMG_{i+1} \quad (5)$$

$$DFS_i * DFS \rightarrow DFS_{i+1} \quad (6)$$

ですね。シリコン基板下面の反射率は1未満なので, いずれ光は十分に微弱になり, 多重反射はストップします。そのためのステップ数を N とすれば,

$$IMG_{ACC} = \sum_{i=1}^N IMG_i \quad (7)$$

で光電子をすべて積算できます。これに光学系で生じる TOP を加えた

$$IMG_{ALL} = \frac{QE \times APR}{R_{ave}} \times TOP + IMG_{ACC} \quad (8)$$

がトータルのPSFとなります(全体を規格化します)。

3. 何かを得られ, しかし何か足りない…

こうして得られたPSFを図3のいちばん右側に示します。中心部分は光学系で生じる TOP であり, そのまわりに広がる多重リングが式(7)で得られるものです。多重リングを再現できたというのは大きな収穫で, これをモデル計算の昼面に適用すると図3左のように三日月が多重アーチとなり, 実際の画像と定性的によく似てきます。そしてこれを夜面画像から引くことで, コンタミをかなり軽減することができました(図3の中央)。

残念ながらこのシミュレーションでは再現できない特徴のあることも, 同時に分かりました。それはPSFの「十字状パターン」です。これを手がける前は, 「素子が格子状に並んでいるのだから, 縦方向または横方向へのガイドのように働くことで, 十字の方向に反射しやすい。それが十字状パターンの原因であろう」と考えていました[2]。しかし予想に反して, 実際のシミュレーションでそのような結果を得ることはできませんでした。いまでは十字パターンは幾何光学的にはなく, 素子面が回折格子として働き波動光学的に生じている, と考えています。これを現在の

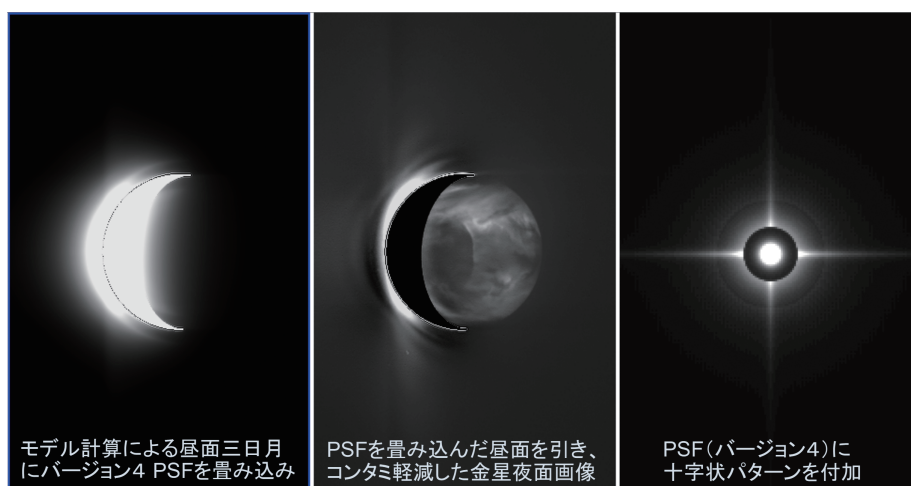


図4: 図3と同様だが、人為的に十字状パターンを加えたPSFによるもの。

計算コードに組み込むことは容易ではないので、十字パターンは再び数学関数近似で導入することとしました。図4はこうして得られたPSF(右)、モデル昼面に適用したもの(左)、夜面からコンタミを軽減したもの(中央)を示しています。中央の画像を図3のそれと見比べると背景の宇宙空間の平坦度が向上している、つまりより適切に光を引き去っていることが分かると思います。

4. 副産物も!

検出器の基本構造に立ち返りそこで起きている物理過程をきちんと定式化してゆくと、それらしいPSFが得られるというのはなかなか新鮮な驚きでした。このことは、たとえばシリコン基板をどのくらいまで削り込む(薄化する)とどのような性能向上が見込めるか、などを見積もることのできるツールを手にしたことを意味します。実は世界的に見て、大フォーマットの2 μm 帯検出器は入手が非常に難しい(環境規制でHgCdTeが作りにくくなったため)状況となっています。一方、われわれの手元にはまだまだPtSiチップが多数残っており、それを加工してスーパーPtSi検出器を世界へ供給する、というのも夢ではないかも知れません!

参考文献

- [1] 佐藤毅彦ほか, 2021, 遊星人 30, 14.
- [2] Satoh, T. et al., 2017, Earth Planets Space 69, 154.
- [3] Satoh, T. et al., 2021, Icarus 355, 114134.
- [4] Sato, T. M. et al., 2020, Icarus 345, 113682.

著者紹介

佐藤 毅彦



宇宙航空研究開発機構宇宙科学
研究所教授、総合研究大学院大
学物理科学研究科教授、北海道
大学大学院理学院客員教授、東
京理科大学大学院理学研究科博
士課程修了、博士(理学)、ハワイ

大学天文学研究所客員研究員、NASAゴダード宇
宙飛行センター研究員、東京理科大学計算科学フロ
ンティア研究センター講師、熊本大学教育学部准教
授を経て、2006年12月より現職。専門は惑星大気科
学。日本天文学会、日本惑星科学会、地球電磁気惑
星圏学会、アメリカ天文学会、アジア大洋州地球科
学会などに所属。アジア大洋州地球科学会事務総
長補佐を務める。