

「あかり」と IRSF によるデブリ円盤の探査と、 SPICA コロナグラフ装置の許容誤差解析

名古屋大学 M1 尾関真二

1. イントロダクション

デブリ円盤とは、下の絵の通りで、中心星の周囲を囲う塵でできた円盤のことである。



イラスト:神林光二
JAXA 提供

図1 中心星を囲むデブリ円盤

これらは惑星形成の理解に重要な観測的証拠であり、写真手前のような微惑星同士の衝突により、軌道上にまき散らされた塵とされている。これらの塵は、中心星からの超過成分として赤外線で検出することができる。この中心星からの超過成分としてというのは、中心星がある温度を持つ黒体としてみなす時に、図2のような超過成分が見られる。この図は、横軸波長で縦軸フラックスを示している。このことから、周囲の円盤が中心星からの放射を赤外域で再放射していることが予想できる。

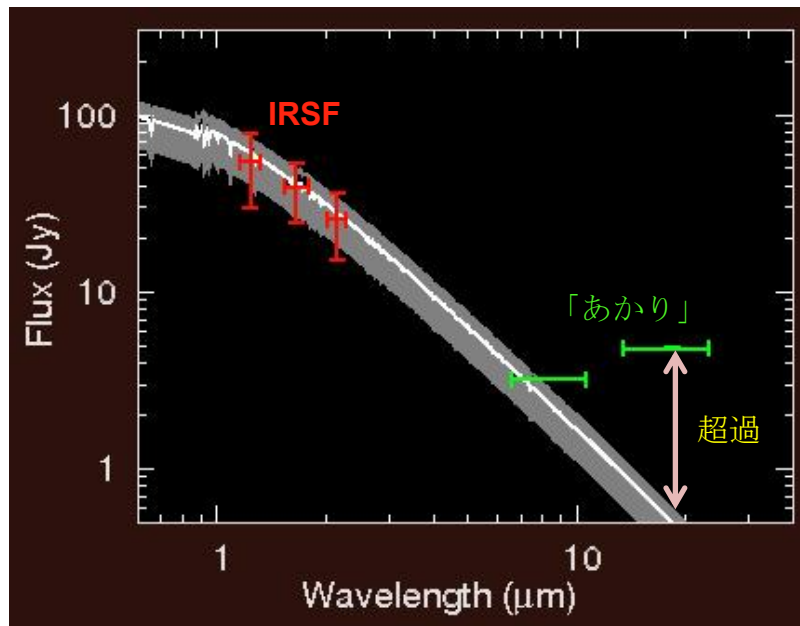


図2 円盤を持つと予想できる星のスペクトル

デブリ円盤を観測すると何がよいのだろうか。これまでで、天文衛星である「あかり」とアフリカにある地上望遠鏡の IRSF を用いて次のような観測をしてきた。図2にあるように、IRSF を用いて中心星の黒体モデルを仮定し、「あかり」を用いて観測を行うことで、超過の有無を見る。こうしていくつもの観測を行った結果、全天の内で「あかり」の18 μ m で見つかった主系列星が1735天体、そのうちこのような超過からデブリ円盤が候補天体を含めて見つかったのが236天体となっている。



図3 左:赤外線天文衛星「あかり」、右:地上望遠鏡 IRSF

図4に観測例を示す。これは横軸が観測波長で、縦軸が超過量を表している。緑の線に注目すると、Fayalite という、シリケイトに鉄がくっ付いた結晶があった時にどういった観測結果が得られるかというモデルを示している。また、赤と白の丸は実際に得られた観

測を表している。これらの結晶は、地球に存在するものの、地球内部で作られたわけではないとわかっている。それが遠い宇宙のデブリ円盤から見つかったのだ。こういった結晶の存在は、そこでアニーリング、加熱されて、少しずつ冷やされて、といったことが起きたことを表している。つまり、このような特徴が見えると、このデブリ円盤で起きた現象が理解できるということである。こういった特徴が見られるのも赤外線観測のメリットだ。

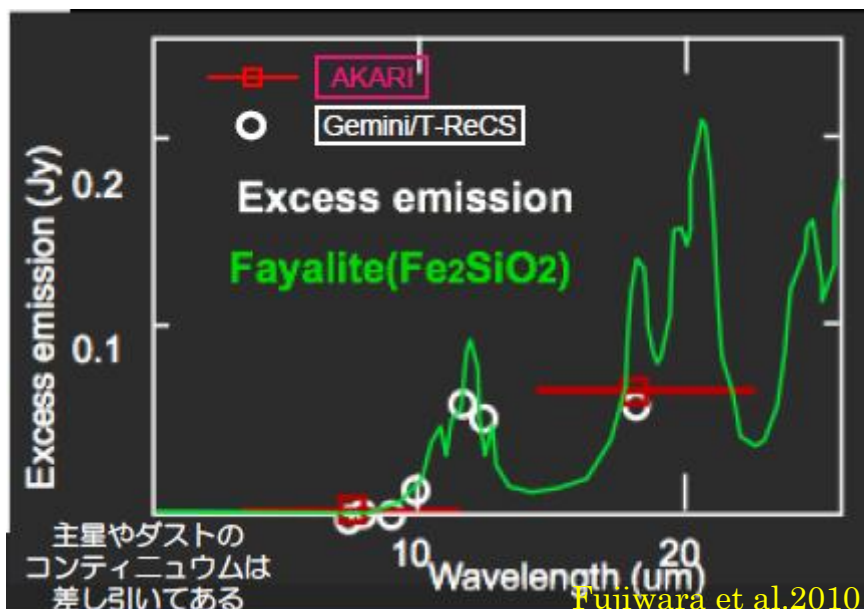


図4 デブリ円盤中に検出された結晶質シリケート

ただし、中心星に比べてデブリ円盤は暗く、超過は見えても空間分布まではわからない。そこで、高分解能と中心星の明るさの除去をする必要がある。そこで、次なる赤外線天文衛星 SPICA に注目する。

2. 今後の観測に必要とされているもの

SPICA は 2020 年代初頭に打ち上げ予定となっていて、なんといっても 6K という極低温まで冷えた口径の大きな(3.2m)宇宙望遠鏡であることが特徴である。また他の特徴として、中間赤外から遠赤外線までの広い波長帯を持つことや、撮像・分光もできる。口径が大きくなったことで、「あかり」よりも高分解能の観測ができる。そして観測波長が中間赤外線であることから、図 4 や 5 の右にあるような、シリケートや有機物の組成などを分光観測することで見るることができる。デブリ円盤を見るために必要なのは高い分解能と、中心星の明るさを除去することであった。そこで、この SPICA にコロナグラフを設置する。

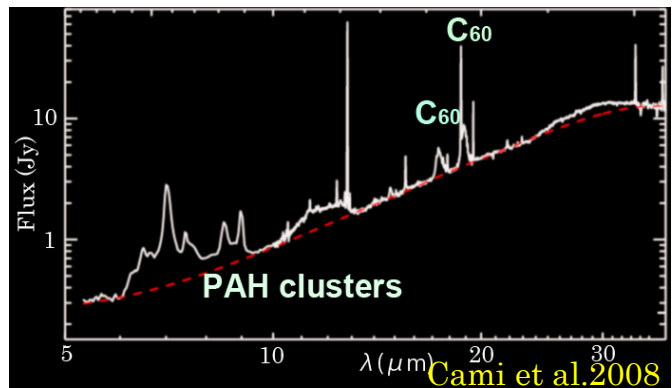
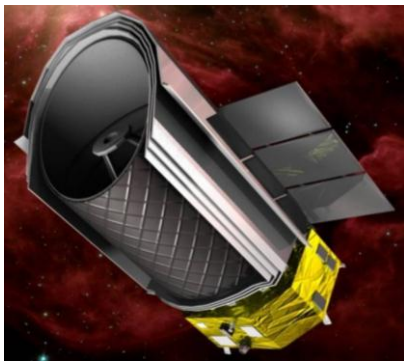


図 5 左:次世代赤外天文衛星 SPICA 右:中間赤外線で見える有機物のスペクトル

SPICA のコロナグラフで通称 SCI と呼んでいる。SCI では回折と干渉を用いて、邪魔な光の除去をする。図 6 ではこの機能を簡潔に示している。横軸が中心星からの距離で、縦軸が明るさを示している。コロナグラフがないと、左のように中心星からの回折光が空間的に広がっていて、暗い天体が埋もれてしまう。そこで、コロナグラフを使うと右のように中心星の広がった明るさが抑えられて、暗い天体が見えてくるようになる。このコロナグラフは従来のものとは少し異なった方法を取っている。

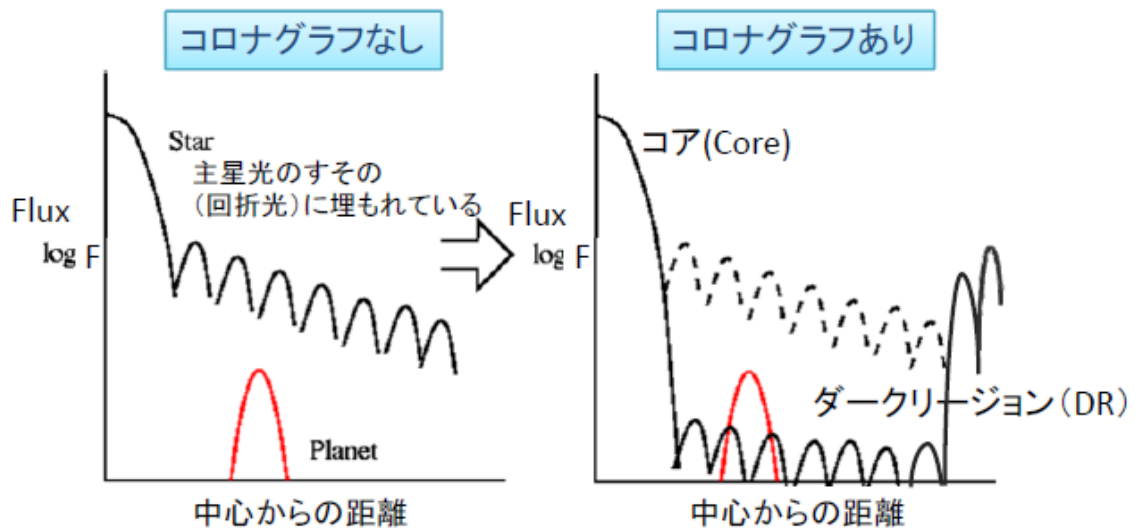


図 6 コロナグラフ装着設置前とその後の結果

さてこれで、観測する目的とターゲットが決まり、そしてそれを観測する装置がそろった。しかし装置を作って打ち上げるには、まだ 5 つの要求を満たす必要がある。まず信頼性が必要だということ。打ち上げても動かないのでは使えない。さらに、宇宙では重力がないこと、赤外線観測のために極低温まで冷やさなければならないこと、打ち上げ時の振動に耐えられなければならないこと、重量制限があることである。これらの要求をクリアしなければ、どんなに優れた能力を持っていても、動かないただのゴミになってしまう。

そこで、まずは2つ、重力開放と冷却による望遠鏡と SCI の設置時の許容誤差を求める。

3. 研究内容

5つの要求をクリアするために現在私が行っているのが許容誤差解析というものである。図7はSCIの光学設計図となっている。図の左から望遠鏡の光が来て、望遠鏡焦点面で一度像を結び、SCIへと光が入っていく。ここからの説明の便宜上、光軸に垂直な2方向をX,Y、光軸に沿った平行な軸をZ軸とする。

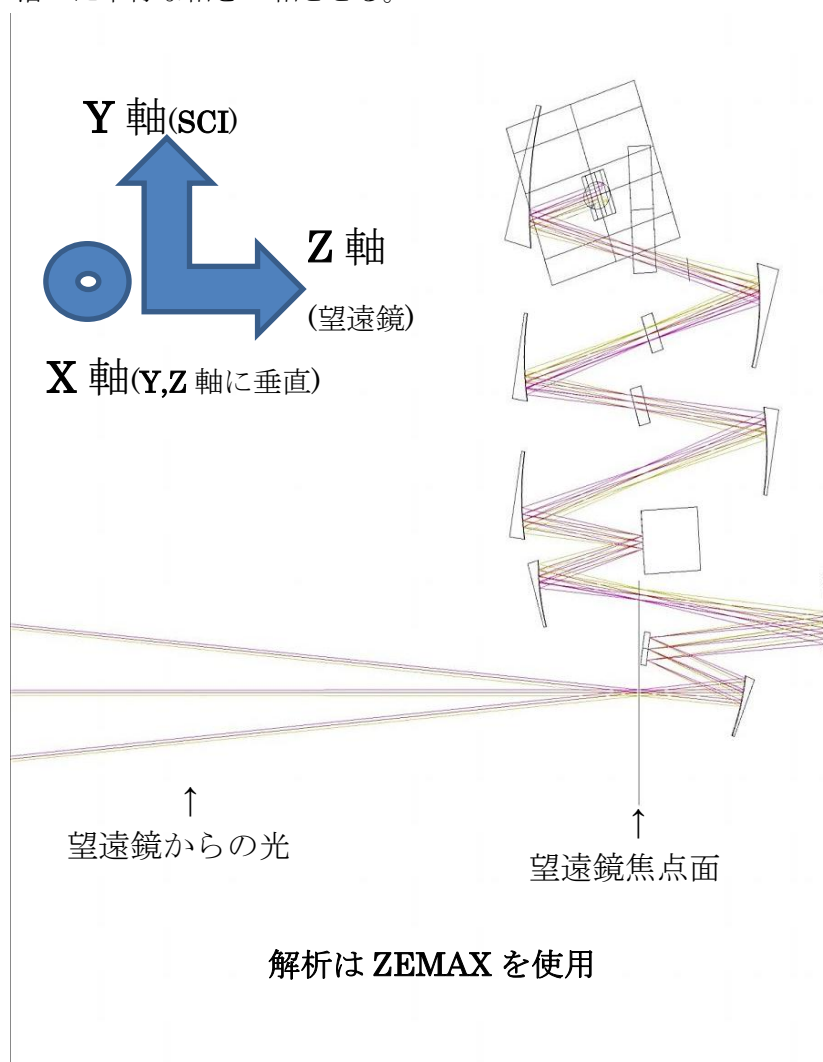


図7 SCIの光学系

解析の手順として、まず望遠鏡焦点面以降を動かし、相対的に望遠鏡からの光がずれて入ってくることを仮定する。動かすのはX,Y,Z軸にそれぞれ平行移動させたり、傾けたりする。すると、自然と最後の検出器面の像が崩れることが予想できる。像の崩れはZEMAXのスポットダイアグラムをみる。図8は、上が入射面、左下が平行移動前の検出器面、右下がx軸方向に0.3mm平行移動した時の検出器面を表している。赤字はそれぞれのRMS

直径である。平行移動前は、中心に集光された像が見えるが、移動後では歪んだ像となっている。これが x 軸方向に平行移動した影響である。図 8 はそれぞれ縮尺が異なっていて、一見左下の方が広がっているように見えるが、右下の像は左下の RMS 半径で 2 倍近くあるので、やはり平行移動した時は像が大きくなり、形も崩れることがわかる。

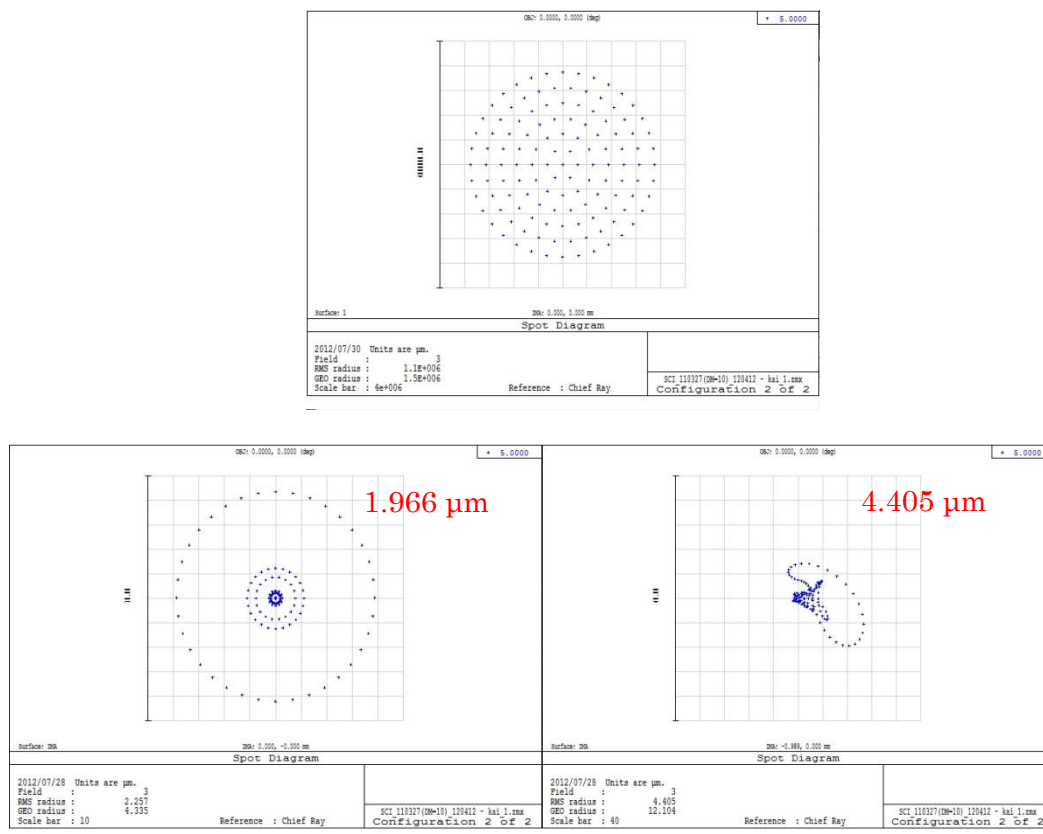


図 8 上:入射面 下:検出器面のスポットダイアグラム
左下:平行移動前 右下:平行移動後

ここで、今見ている検出器面は検出器全体ではないことを考える。図 8 の検出器面では、検出器の中心、光軸上を見ている。つまり、中心部以外でより集光された点があるかもしれないと考えるのである。そこで、少しずれた位置を見るとどうなるか。その結果は図 9 に示す。形は平行移動する前(図 8 の左下)に近くなっていることがわかるだろう。RMS 半径も同じくらいとなった。このようにして、最も像の広がりが小さくなったところを最適位置とする。

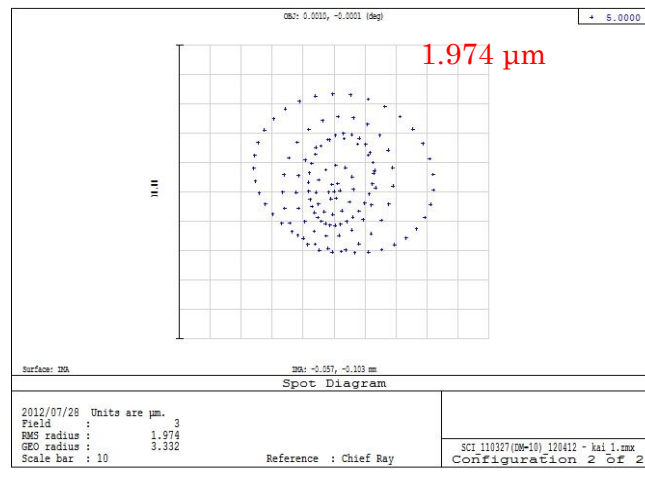


図9 X軸方向に平行移動した後の最適位置での検出器面

4. 結果

図10で、横軸はX,Y,Z軸のずれ、縦軸は緑が光軸上、青が最適位置での像の大きさを示している。まず、それぞれの図で緑と青の変化を見ると、軸の移動が大きくなるにつれて差が大きくなっていることがわかる。逆に言えば、像の大きさは最適位置ではほとんど変化していない。次に、3つの図を見比べてみると、X,Y軸の横軸はZ軸の10倍刻みで動かしているにもかかわらず、Z軸程のシビアな動きではX,Y軸のずれは影響が見られないことがわかる。同様にして、X,Y軸の傾きに対するRMS半径の大きさも見た。ここで、像の大きさは望遠鏡の姿勢安定度から許容サイズを考えると、次のようになった。光軸に対して垂直方向(X,Y軸)は0.5mmより広くても許容できるが、光軸に沿った向きでは $17\mu\text{m}$ くらいずれると問題である。また、傾きは0.1度程度なら像に変化は見られなかった。

Z軸方向の補正は望遠鏡の副鏡が担っている。しかし、SPICAにはSCI以外にも複数の装置を積んでいるため、SCIのためだけに副鏡を動かすわけにはいかない。他の装置がどの程度まで許容できるのかわからないが、SCIを基準とすると、 $17\mu\text{m}$ が最大となるということがわかった。

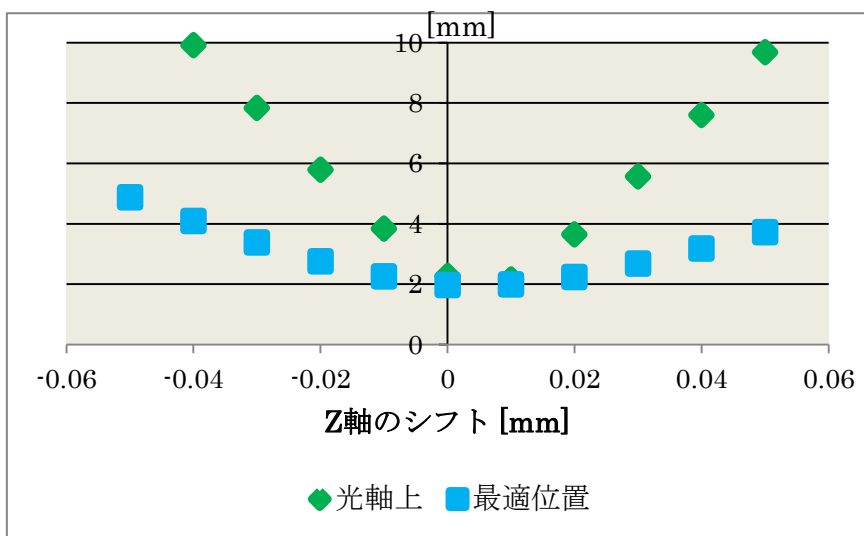
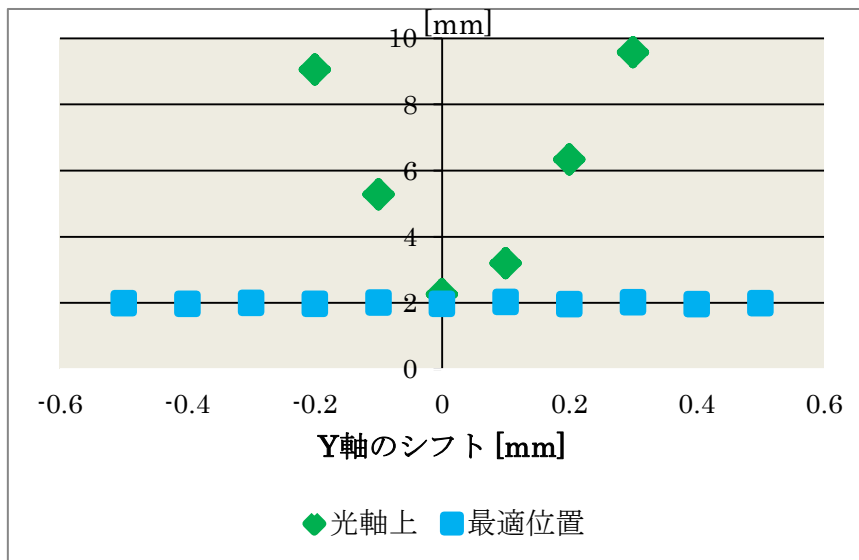
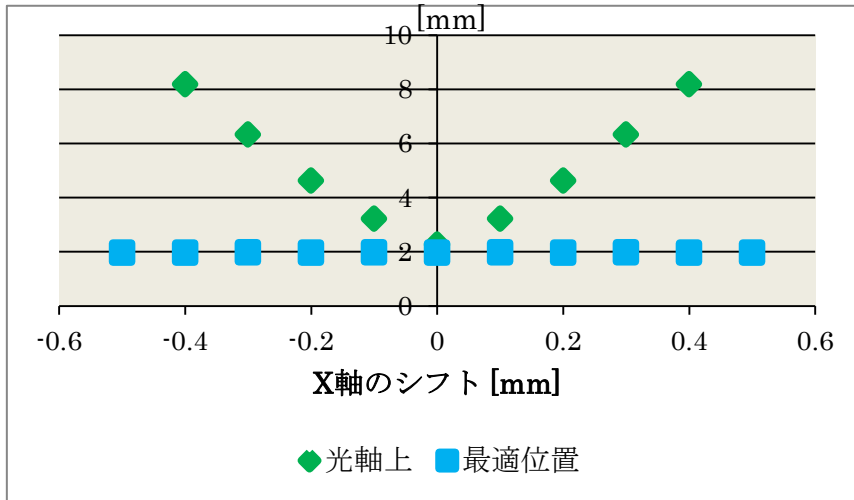


図 10 X,Y,Z 軸の平行移動に対する RMS 半径の大きさ

5. まとめ

デブリ円盤は惑星形成過程の謎に迫るための重要な要素であり、これまでに「あかり」と IRSF でデブリ円盤の存在を示す星を探索してきた。しかし、中心星が明るいためそれらの探索では空間分布までわからない。そこで、空間分解能を上げた赤外線天文衛星 SPICA にコロナグラフを組み込んでデブリ円盤を観測する。しかし、それにはまだまだ問題があるので、許容誤差解析を進めて 5 つの問題点のクリアを目指す。