

j. 赤外線光学系 —天体観測装置—

山室 智康

1. はじめに

可視光線用の光学系は1600年頃から眼視で使用され、感光フィルムの時代に成熟を進めた後、1990年以降のCCDやCMOSの発展に伴って多様性が増した。一方の赤外線光学系は1990年以前はほとんどが単素子の検出器に合わせたもので、凹面鏡を組み合わせた簡単な構成のものが多かった。しかし1990年代以降は2次元検出器が供給されるようになり、この20年の間に可視光線用にも引けをとらない性能の光学系が作られるようになってきた。本稿では著者が関わりの深い天文学用光学系を通して、近年の赤外線光学系について述べる。

2. 2000年以降の赤外線天体観測装置

1990年代は天体観測装置が劇的に変わった時代であった。その背景には上で述べた2次元電子検出器の発展により、広い視野の画像を精密に計測し、かつそれを計算機で演算可能になったことと、計算機の進歩によってハードウェアの精密な制御が可能になったことが大きく寄与している。これらの恩恵を受けた装置として馴染み深いのは、ハッブル望遠鏡や日本のすばる望遠鏡、それに赤外線天文衛星のあかりが挙げられる。これらのうち2000年以降の主要赤外線装置の一部を以下に紹介する。

・すばる望遠鏡用 AO188+LGS (国立天文台)¹⁾

すばる望遠鏡には補償光学(AO)を行うための36素子可変鏡を持つ装置が2001年から搭載されていた。この後継機として世界最多の188素子可変鏡を持つAO188が2008年から運用開始された。さらに、AOは波面補償を行うための明るい“ガイド星”が観測目標天体の近傍に必要であるが、地上から打ち上げる589nmレーザーによって高層90kmの大気中のNa原子を励起し、人工的にガイド星を作り出すレーザーガイド星(LGS)装置も2011年から本格始動した。このAO188+LGSをすばる望遠鏡の主力観測機器であるIRCS (Infrared Camera and Spectrograph/InSb 1024x1024画素)やCOMICS (Cooled Mid Infrared Camera and Spectrometer/Si:As 320x240画素 x6個)と組み合わせることによって、従来は大気揺らぎに埋もれてしまっていた細かく暗い天体を観測することが可能になった。またコロナグラフ装置Hi-CIAO (High Contrast Instrument for new generation Adaptive Optics)と組み合わせることで恒星の近隣にある太陽系外惑星の発見にも活躍している。AOは赤外線特に重要な技術であるため、第4章で再度述べる。

・MOIRCS (Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph)²⁾

(東北大学・国立天文台)

2005年から運用開始されたすばる望遠鏡用近赤外線撮像・分光装置。2048x2048画素のHgCdTe検出器を二つ搭載し、各々に対応した屈折光学系2系統をすばる望遠鏡焦点に並べることで、広い視野にわたって撮像を行うことができる。また望遠鏡焦点(=MOIRCSの入り口)に複数のスリットを並べ、かつ光路の途中に“グリズム”と呼ばれる直視型透過回折格子を置くことで、それら全てのスリットのスペクトルを同時に得られる“多天体分光モード”も大望遠鏡では世界で初めて搭載した。この広視野の撮像・分光性能により、100億光年以上遠方の銀河を高い効率で観測できるようになった。

・あかり (宇宙航空研究開発機構 (JAXA))³⁾

口径68.5cmの反射望遠鏡を持ち、その焦点部に以下の個別の観測装置を並べた赤外線天体観測衛星。

「IRC」: 3つの波長域 (1.7~5.5 μm/5.8~14.1 μm/12.4~26.5 μm) に合わせて独立した3つのカメラを搭載する。最初の波長域にはInSb 512x412、あとの二つの波長域にはSi:As 256x256の検出器を使用しており、いずれも屈折光学系と組み合わせることで、小型ながらも広視野の撮像を可能にする。また光路中に直視プリズムを置くことで分光観測も行える。

「FIS」: 遠赤外線に感度を持つGe:Ga検出器を4つ搭載し、フィルターとの組み合わせで4つの波長域 (50~80/60~110/110~180/140~180 μm) を同時に撮像できる観測装置。内部の光学系は反射型。

あかりが感度を持つ中間~遠赤外線は地上からは大気に吸収されて天体観測が困難もしくは全く不可能であるため、衛星である特徴を生かしてそれらの波長の全天サーベイ等で成果を上げた。2006年に打ち上げられ、目標寿命3年を上回る5年の活躍の後、2011年に運用が終了している。

3. 高空間分解能・広視野を実現するための屈折光学系の躍進

前章で述べた装置のうち、あかりFISは2~3列の画素の2次元検出器を使っているが、その他はいずれも数百×数百画素の赤外線2次元電子検出器の発展によって実現・活躍できるようになった装置である。検出器の発展は現在も続いており、例えばHgCdTeの4096x4096画素やSi:Asの1024x1024画素の開発が進められている。そしてこれらの検出器を活かすには、その画素数に相応しい光学系

が当然必要となる。しかし赤外線光学系は従来は次のような難しさがあつた。

- 透過材料が結晶を中心とした限られた種類しかないため、色収差を良好に補正することが難しかった。
- 赤外線光学系（特に高いS/N比を狙うもの）は、撮影画像のバックグラウンドレベルに混入する光学系自身からの熱輻射を低減するために冷却されることが多い。しかし冷却温度での屈折率が一部の材料しか分かっておらず、信頼性の高い設計が難しかった。

このため、1990年代までの広波長域用の赤外線光学系は、屈折系を避けて反射系で構成されるものが主流であつた。しかし反射系は光路が折り返しになるために光学面数を増やすのが難しく、その結果としてコマ収差や非点収差を広い視野範囲にわたって補正することが困難であつた。このような状況に対し、少しずつではあるものの、新しい光学材料が供給されるようになり、また透過材料の低温での屈折率測定が行われてきた。

このうちまず材料の種類について見てみる。現在レンズ用に使用可能な近赤外線透過材料うち、代表的なものの波長1.25-2.2 μm における特性をFig.1に示す。屈折レンズ系では、屈折率 n が大きければ球面収差などのSeidel収差が補正しやすく、アッペ数 ν の大小離れた材料を2枚組み合わせると2波長に対する色収差を補正し、部分分散比 θ の揃つた材料を組み合わせるか、或いは3種以上の θ を組み合わせると3波長以上の色収差補正をする。

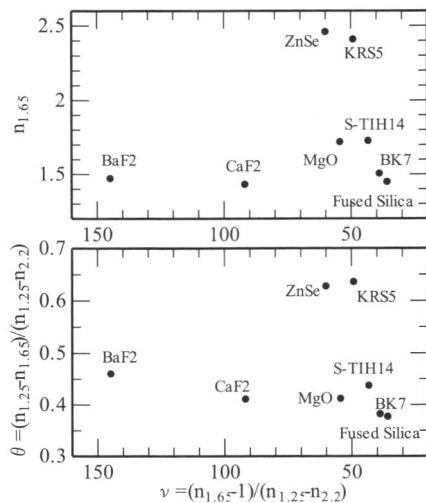


Fig.1 近赤外線における透過材料の光学特性

従来、近赤外線ではCaF₂とFused Silicaを組み合わせると色消しレンズとすることが一般的であつたが、Fig.1を見ると分かるように、CaF₂とFused Silicaは θ にやや差がある。これに対してCaF₂とMgOの θ はほぼ揃つており、3波長目について良好な色収差補正を期待

できることが分かる。このMgOは10年程前まではレンズ用の大きな材料を得ることが難しかったが、近年は ϕ 50mmまでの材料が供給されるようになり、実用的になった。他にFig.1から読み取れるもう一つの有力候補はBaF₂とオハラ社の光学ガラスS-TiH14の組み合わせである。 θ の一致度合いはCaF₂+MgOに及ばないものの、BaF₂の ν が非常に大きく、逆にS-TiH14は小さいため、CaF₂+MgOと比較して凸/凹の各レンズのパワーが弱くても色収差が補正でき、その余裕により色収差以外の諸収差補正が行いやすい。ただしS-TiH14は波長2 μm より長いところで僅かに内部吸収があるため、厚いレンズが必要になる大型光学系ではやや難がある。以上の材料を組み合わせると色消しレンズとする場合の残留色収差の波長特性をFig.2に示す。この図は、各々の材料を貼り合せて薄肉色消しレンズを構成し、1.25 μm と2.2 μm で色消しとなるように最適化した場合に、その間の波長で生じる軸上色収差を横軸方向にとってプロットしてある。なお横軸は貼り合せレンズの合成焦点距離を1として規格化してあるため、目盛「0.1E-3」は合成焦点距離の1/10000だけその波長のピント位置がずれることを表している。ちなみにCaF₂の単レンズだとおよそ11E-3の色収差を発生する。

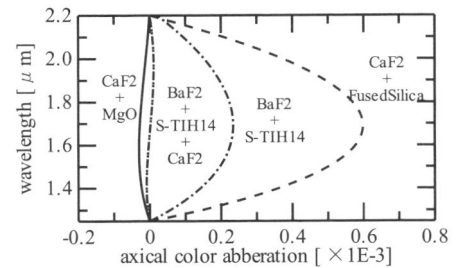


Fig.2 近赤外線色消しレンズの軸上色収差

Fig.2を見ると、従来のCaF₂+Fused Silicaと比較して、CaF₂+MgOは劇的に残留色収差が小さいことが分かる。BaF₂+S-TiH14はそこまでには及ばないものの、上でも書いた通りにレンズのパワーが弱くて済むために、他の収差補正に有利という別の優位性があり有用である。なお3種以上の材料を組み合わせると理論上はどのような材料でも3色色消しができるが、現実的にはレンズのパワーが強くなりすぎるなどで実用的でない場合も多い。しかし、BaF₂+S-TiH14+CaF₂はFig.2に示した良好な色収差補正が容易に実現できる強力な組み合わせである。この組み合わせを実際に採用した光学系の例を示す。

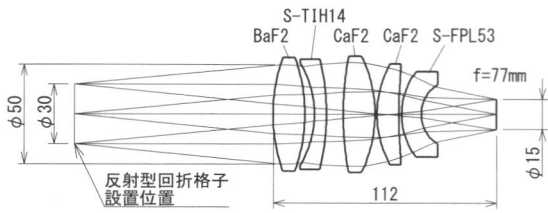


Fig.3 近赤外線分光器 NICE の結像光学系

Fig.3は東京大学が中心になって開発した近赤外線分光器NICE (Near-Infrared Cross-dispersed Echelle spectrograph) に組み込まれている集光光学系である⁴⁾。主要部にBaF₂+S-TiH14+CaF₂の組み合わせを採用して0.9-2.5 μmの波長範囲全域で良好な色収差補正を実現している。またこの光学系は入射瞳径がφ30mmで、実効的なF値=2.6であるが、分散素子後の光線が広がる位置に置かれるため、第1レンズでの光線径はさらに一回り大きなφ50mmに対応できている。このような明るい光学系は反射系では難しく、Fig.2の特性を利用した屈折系で初めて実現可能になった。

さて、赤外線用屈折光学系のもう一つの難しさ、即ち低温環境での屈折率については、CaF₂等のフッ化物結晶やSi、Ge、ZnSeについては1980年頃までに測定結果が報告されていた⁵⁾⁶⁾⁷⁾。これに加え、合成石英や光学ガラスの合計20種(ただしフッ化物結晶も含む)については著者を含む名古屋大学のグループが365nm~3.3 μmの波長域、80~293Kの温度範囲で実測を行った⁸⁾。MgOについても国立天文台とJAXAにより2009年に同様の測定が行われている。これらの中から参考として名古屋大学の測定結果の一部をFig.4に示す。横軸に温度、縦軸に常温293Kからの屈折率の変化量Δnをとってプロットしてある。材料によって屈折率変化に大きな違いがあることと、低温になるに従い緩やかではあるが、その傾きが変わっていることが読み取れる。このような変化は材質により、また波長により異なるが、詳細は参考文献8)を参照のこと。

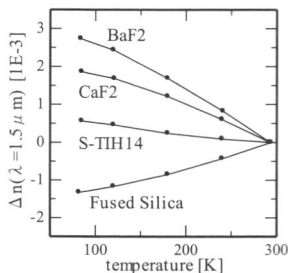


Fig.4 屈折率の温度変化

これらの低温環境での屈折率測定結果を取り入れることで、Fig.1の材料を採用しつつ、高い信頼性を持つ低温環境用屈折光学系を設計できるようになった。Fig.3のNICEもこれらのデータに基づ

づいて、120Kの温度に最適化して設計された光学系である。また、第2章で紹介したMOIRCS等の多くの装置開発で同様の最適化が行われている。新しいところでは、東京大学のグループがチリのアタカマ山地に建設を予定している口径6.5m望遠鏡用に、近赤外線観測装置SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) の製作がやはり低温に最適化して進められている。その光路図をFig.5に示すが、望遠鏡焦点面でφ210mm、結像面でφ105mmをカバーする光学系は赤外線天文装置の中では国内最大となる予定である。なお、MOIRCSとSWIMSの光学系にはZnSeが組み込まれている。屈折率の高いZnSeであるが、コーティングの進歩によって0.9-2.5 μmの波長域全域で95~98%の透過率が得られるようになっており、従来にも増して魅力的な材料となっている。

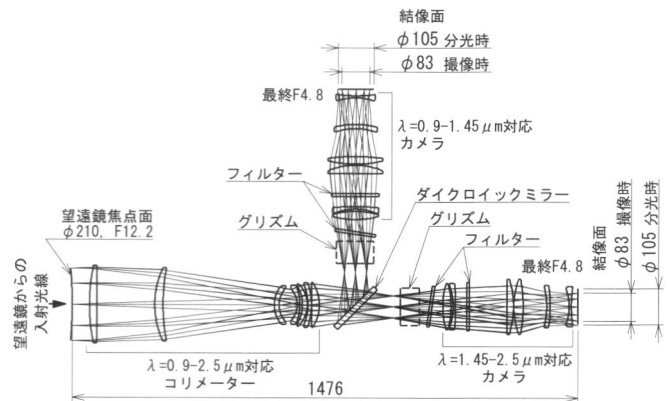


Fig.5 東京大学アタカマ天文台 6.5m 望遠鏡用 近赤外線撮像・分光装置SWIMS

以上では屈折系に注目したが、波長範囲が12 μm以上を含む中間~遠赤外線の装置では、レンズ材料にKRS-5, CsI, KBr程度しか使用できない状況が続いており、近赤外線のような高性能な色消し屈折系は実現できないため、引き続き反射系が重要である。反射系は屈折系ほどの系統だった進歩はこの10年に見せていないが、非球面鏡の製作技術が向上してきているため、今後新しい展開が期待される。例えばJAXAが計画している次世代赤外線天文衛星SPICA (SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics) では非球面鏡を組み合わせた光学系が複数検討されている。

4. 補償光学 (AO) の原理と発展

すばる望遠鏡のAOについては第2章で触れたが、AOは地上からの天体観測や、逆に人工衛星から地表を観測する装置に組み込まれ、年々大きな役割を担いつつある。その原理はFig.6左側に示すように、大気が揺らぐことによって生じる波面の乱れに対して、装置の光学系途中に置いた可変鏡をリアルタイムに変形させてその波面

の乱れをキャンセルする技術である。本稿で注目したいのはAOが赤外線では活躍している点である。大気の揺らぎについては、観測装置の目標分解能に応じて、“揺らぎが十分に小さい”と仮定できる空気の塊の大きさが知られているが、その塊の大きさは波長の1.2乗に比例する。このため、例えば波長 $0.55\mu\text{m}$ では $2.2\mu\text{m}$ に比較して固まりの大きさが約1/5になり、可変鏡をより細かく分割して制御する必要が生じる。さらに細かな塊はたくさん光路中を通過するために高速で可変鏡を制御することも必要になる。この分割数や高速処理に対して、計算機も含めた制御速度がちょうど適合しているのが近赤外線より長い波長域であり、AOが赤外線では活躍している所以である。

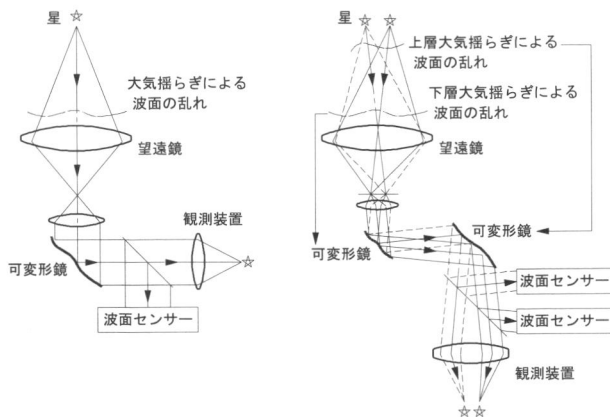


Fig.6 補償光学の原理

さて、Fig.6左側に示した従来のAOは波面センサーおよび可変鏡を各々1つ搭載していたため、視野中心しか波面補償を最適化できず、大気の上層でずれた位置を通る斜めの方角の光線には波面補償が効かなかった。この制約を解消するために、波面センサーや可変鏡を複数搭載し、広い視野にわたって波面補償を行うシステムが開発されつつある。その一つの典型的な方式はFig.6の右側に示したように、大気を上・下の2層と仮定し、2つの可変鏡を各々に共役な位置に置くことで、両層の波面補償を行うMulti Conjugate AOである。この方式は従来より広い視野で高い波面補償能力を発揮できるが、大気を2層と簡略化しているため、広視野化には限界がある。そこで、波面の乱れは下層が大きい点に着目し、Fig.6右側と同様に2つ（以上）の波面センサーを使用するものの、可変鏡はこれとは違って下層用の1つのみを搭載し、波面センサーからの演算により下層の成分のみを抽出して補償するGround Layer AOという方式も計画されている。こちらは上層の成分の補償を諦めるため、最終的な空間分解能はMulti Conjugate AOには及ばないが、下層の成分はより広い視野で共通のため、視野の広さを優先するサーベイ装置等で注目されている。いずれにしても、これらの次世代

のAO機器は広い視野にわたって、大気揺らぎの影響を低減させた高分解能の画像を提供する。このため、組み合わせる撮像装置や分光装置はそれに相応しい広視野化および高分解能化が求められる。これを両立する光学系は、第3章でも述べた通り、反射系中心に構成することは難しく、必然的に屈折系が主役になると著者は考えている。

5. これからの赤外線装置

以上で見てきたように、赤外線の光学系はこの10年間で大きく進歩し、様々な撮像や分光の用途に活躍できるようになった。そしてこの発展を活かす次世代の計画が進められている。

人工衛星で代表的なものは、NASAが主動して開発を進めているJWSTや日本のSPICAが挙げられる。JWSTはハッブル望遠鏡の2.5倍にあたる有効口径 6.1m 相当の合成鏡を有し、かつ赤外線に重点を置いて開発される予定である。SPICAはJWSTより小さい口径 3m クラスで検討されているが、冷凍機を搭載して望遠鏡全体を 6K まで冷やすことで、熱輻射に敏感な中間～遠赤外線でJWSTを上回る性能が期待されている。JWSTとSPICAはいずれも地球周回軌道ではなく、太陽及び地球からの熱輻射を低減しやすい、地球から 150万 km 離れたラグランジュポイントに置かれる予定である。両衛星とも2010年代後半～2020年頃の打ち上げを目指して進められている。

地上望遠鏡ではすばる望遠鏡等の $8\sim 10\text{m}$ クラスを大きく上回る口径 $20\sim 30\text{m}$ 相当の望遠鏡計画がスタートしている。代用的なものでは2018年頃の完成を目指している 30m 望遠鏡 (TMT) と巨大マゼラン望遠鏡 (GMT/口径 21m 相当) で、いずれも複数の国による協力体制が組まれているが、日本はTMTへ参加することが検討されている。また、すばる望遠鏡などの現在の主力望遠鏡についても、将来を見据えたアップグレードが検討されている。特に第4章で述べたAOの発展は、 $20\sim 30\text{m}$ クラス、およびすばる望遠鏡を含む $8\sim 10\text{m}$ クラスの地上望遠鏡の両方にとって必須となる技術であり、これらの望遠鏡で赤外線がますます重要になっていくことを示している。

このように、衛星および地上望遠鏡のいずれも、赤外線に重点を置かれて取り組みが進められており、周辺技術の一層の進展が望まれると共に、その成果が期待される。

参考文献

- 1) <http://www.naoj.org/Observing/Instruments/AO/index.html>
- 2) <http://ayashi.astr.tohoku.ac.jp/~moircs/>
- 3) <http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/>
- 4) Yamamuro et al. : PASJ 59, 973 (2007)

- 5) H. W. Icenogle, B. C. Platt, and W. L. Wolfe : Appl. Opt. 15, 2348-2354 (1976)
- 6) H. H. Li : J. Phys. Chem. Ref. Data, 9, 161 (1980)
- 7) H. H. Li : J. Phys. Chem. Ref. Data, 13, 103 (1984)
- 8) Yamamuro et al. : Optical Engineering 45(8), 083401 (2006)
(受付 2011 年 12 月 31 日、受理 2012 年 1 月 31 日)

■ 著者紹介 ■

氏名 山室智康

所属 オプトクラフト (〒252-0144 神奈川県相模原市緑区東橋本 3-16-8)

1999 年、名古屋大学理学研究科博士後期課程満了後、光学会社に勤務。2006 年、オプトクラフト設立、2009 年東京大学理学研究科博士号取得、現在に至る。

所属学会：日本赤外線学会、日本天文学会、応用物理学会

E-mail : yamamuro@optcraft.com

