

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740131

研究課題名（和文）モスアイ効果を利用した中間赤外線天文観測用シリコンレンズの開発

研究課題名（英文）Development of silicon lens with the moth-eye effect for mid-infrared astronomical observations

研究代表者

酒向 重行 (SAKO SHIGEYUKI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：90533563

研究成果の概要（和文）：モスアイ反射防止効果を用いた中間赤外線天文学用の高効率レンズの開発を行った。長波長中間赤外線（波長 25-50 μm ）に最適化したモスアイ突起構造をシリコンの曲面上に製作し、低反射損失のレンズを実現した。

研究成果の概要（英文）：A high efficiency lens with the moth-eye anti-reflection effect has been developed for mid-infrared astronomical observations. A conical moth-eye structure optimized for the long mid-infrared (25 to 50 micron) has been fabricated on a curved surface of a silicon lens and low reflection-loss has been achieved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：赤外線天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：赤外線天文学, 中間赤外線, 反射防止, モスアイ, シリコン, RIE, レンズ, TAO

1. 研究開始当初の背景

中間赤外線（波長 10-40 μm ）は宇宙の温かい領域（300-25K）や、ダストに埋もれた天体の観測に有効である。特に、濃いダスト雲の中で誕生する原始惑星の起源と進化に関する研究においては中間赤外線による観測が欠かせない。その母体となる原始星もまた、進化初期にはダストに埋もれており、エネルギーの多くを中間赤外線です再放射する。申請者らの研究グループは、これまでにすばる望遠鏡用観測装置 COMICS を開発し、世界に先駆けて短波長中間赤外線（8-25 μm ）によるダストに埋もれた天体の高解像度観測を実施し、成果をあげてきた。同時に赤外線天文衛

星「あかり」による高感度な全天サーベイをおこない、若い星、晩期型星、AGN を含む数多くの中間赤外線源の検出に成功している。このサーベイ観測により、地球大気に遮られるため研究が十分に進んでいない長波長中間赤外線（25-40 μm ）の観測の重要性がしめされた。長波長中間赤外線を用いれば、ダストに深く埋もれた誕生直後の星・惑星システムを直接的に調べられるとともに、星や惑星の主材料であるダストを 30K 以下の低温領域にまで追跡することができる。これにより、宇宙の物質循環とその中で生まれる星・惑星の起源への理解が飛躍的に進むと期待される。しかしながら、あかりは高感度であるも

の衛星ゆえ口径が小さく、高解像度のデータを取得できない。あかりが検出した長波長中間赤外線源の地上大口径望遠鏡による高解像度の追観測が望まれる。

現在、申請者らは、チリ・アタカマのチャナントール山（標高 5640m）に口径 6.5m の光赤外線望遠鏡を建設する東京大学アタカマ望遠鏡(TAO)計画を進めている。すばる望遠鏡のあるマウナケア山（標高 4200m）では大気吸収のため長波長中間赤外線の観測ができないが、光赤外線望遠鏡サイトとしては世界最高地となるチャナントール山では、この波長帯にも大気の窓が現れる。申請者らはチャナントール山で新たに観測が可能となる長波長中間赤外線帯のフロンティアを地上望遠鏡の大口径を活かした高解像度観測により切り開く計画を進めている。2009年には、6.5m 望遠鏡の先行計画として同サイトに口径 1.0m の miniTAO 望遠鏡が建設される。これにより、地上から初となる 25-40 μ m 帯の観測が可能になる (Sako et al 2008a, SPIE)。

長波長中間赤外線帯の観測装置を実現するうえで、最も大きな問題は透過光学材料の選定である。赤外線観測装置では一般に光学フィルタとデュアー入射窓に透過材料が使われる。また、光学系をコンパクトにして一定の空間に多くの機能を搭載するためには、光線の折り返しが必要な反射光学系でなく、レンズを用いた直線的な透過光学系が適している。しかしながら、波長 25 μ m 以上では赤外線帯で使用される光学材料の大半が不透明となるため、高効率な透過光学系を構成できない。現在、安定した透過基板として用いることができる材料はシリコンとダイヤモンドの2種のみである。ダイヤモンドはCVD法により平行基板を製作することができるが、高硬度ゆえレンズ形状への加工は難しい。一方、シリコンの加工は容易であり、特に半導体分野において精密加工の実績がある。また、シリコンは高屈折率($n=3.4$)であり且つ中間赤外線帯において色分散が少ないため、単レンズ構成で広視野レンズを実現できる。このようにシリコンは長波長中間赤外線レンズを構成する最適な材料と言える。しかし、未だシリコンレンズの天文観測装置への搭載例は無い。その理由は高屈折率のために生じる大きな反射損失にある。異なる屈折率 n_1, n_2 の境界面における電磁波の反射率は $(n_1-n_2)^2/(n_1+n_2)^2$ と表わされるため、シリコンの1面あたりの反射損失は30%におよぶ。境界面を2面持つレンズを複数枚組み合わせる場合、その総損失は極めて大きい。一般に可視・赤外線波長ではレンズ表面に屈折率が異なる物質を多層にコートし、膜間の干渉を利用することで反射損失を抑制する。しかし前述したとおり、長波長中間赤外線帯には他に透過材料が無い場合、多層膜干渉法を用い

てシリコンレンズに反射防止処理を施すことができない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、天文観測用中間赤外線装置の性能を飛躍的に向上させる「高効率レンズ」を、従来の干渉効果を利用するアプローチとは全く異なる原理の反射防止処理であるモスアイ構造による反射防止効果を利用して実現することである。

モスアイ効果とは物質の表面に、波長より小さなスケールの円錐状の突起物を敷き詰めることで、その波長帯の反射率を低減するものである。この微小な円錐状突起物は「モスアイ構造」と呼ばれ、蛾の複眼の表面の形状と酷似していることに由来する。モスアイ構造に関する先行研究には Huang+ 2008, Nature 等がある。蛾はモスアイ構造の目を持つことで、可視光を効率よく捉えることができる。本研究では、生命が進化の過程で獲得したシンプルかつ効率的な手法を宇宙科学技術へと転用する。波長スケールより小さい直径のモスアイ突起構造からなる面は平滑に見える（波面を乱さない）。モスアイの高さを波長程度とした場合、その波長にとっては屈折率が空気中($n=1.0$)からシリコン($n=3.4$)に連続的に接続するように見えるためそこで反射波が発生しない。この効果は光ファイバー技術におけるテーパーの役割と同じである。モスアイは空気中を伝搬する電磁波に対するテーパー・アレイとして働くことになる。反射防止効果が有効な波長幅が多層膜干渉法よりも広いこともモスアイ方式の特徴である。モスアイ構造は半導体技術である反応性イオンエッチング(RIE)法を用いることでシリコン上に高い精度で形成できる。本研究では、モスアイ構造をレンズ曲面に高精度に形成する研究をおこなう。

3. 研究の方法

本研究では高効率シリコンレンズを実現するために、複数の試験ステップを重ねて開発を行った。以下に各試験の方法を述べる。

(1)長波長中間赤外線 (25-40 μ m) 帯に反射防止が有効なモスアイ構造を設計した。反射防止効果が有効な波長帯は、モスアイ構造の形状とピッチにより決定される。最適なモスアイ構造を導出するには、電磁波と屈折率分布を持つ構造との相互作用の厳密解を得る RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis) 法を用いたシミュレーションが効果的である。モスアイ構造を持つシリコン平板モデルに平面波を入射させ、その透過率・反射率を計算し、高効率で広いバンド幅を持つモスアイ形状を探索した。シミュレーションには R-Soft 社の電磁解析ソフトウェア DiffractMOD を用いた。

(2)電磁波解析シミュレーションにて設計したモスアイ構造を実際に製作した。シリコン基板の片面(10mm x 10mm)に電子ビームでマスクパターンを形成した後にRIEにてモスアイ構造を加工した。製作にはNTT-AT社の電子ビーム描画装置とRIE装置を用いた。製造したモスアイ・シリコン平板の透過率を、東京大学天文教室の赤外線フーリエ (FTIR) 分光器を用いて測定し、評価を行った。

(3)モスアイ加工面で入射電磁波の波面を乱さない「一様かつ大面積」のモスアイ構造を形成する試験を行った。光学素子の結像性能はその形状の製作精度に強く依存する。高い結像性能が求められる天文観測装置では素子の理想形状からのずれを $\lambda/16$ 程度以下に抑える必要がある。モスアイ加工面の場合、錐構造の形状の分散(ばらつき)が光学素子全体でこの範囲内になくなくてはならない。本試験では一様かつ大面積のモスアイ構造を実現する電子ビーム描画とRIEのプロセス条件の探査を行った。また、製作した一様大面積モスアイ基板の評価も行った。

(4)シリコン平板の両面にモスアイ構造を加工する試験を行った。高効率の光学素子を実現するには素子の両面への反射防止処理が必須である。モスアイ構造の形成に用いるRIEは、材料をステージに密着固定した状態で片面にのみ加工するプロセスである。従って、両面を加工する場合は、加工済みの面を裏返してステージに固定する必要がある。本試験では、おもて面の加工済みのモスアイ構造が破損しないよう、裏面を加工する際にモスアイ構造の無い外側の領域をステージに密着させて固定する方法をとった。製作した両面モスアイ基板の評価も行った。

(5)天文観測に用いるシリコンレンズ(平凸)の曲面上にモスアイ構造を加工する試験を行った。モスアイ構造の加工に用いるRIEは外部から付加した電場に沿ってイオンが運動し、材料の表面に衝突もしくは表面物質と反応することで掘り進むプロセスである。電場は材料の表面に垂直に形成されるため、材料の表面形状が曲面であってもそれに垂直に加工が進む。従って、曲面に垂直なモスアイ構造の形成が可能である。しかし、モスアイ構造を形成するには、個々の「錐」の位置に事前に金属マスクを配置する必要がある。マスクパターンの作成にはフォトリソグラフィや電子ビームによる描画が用いられるが、一般的な方法では光学的な被写界深度の制限(最大で数 $10\mu\text{m}$)により、レンズのような深度の深い面へのパターンニングは困難である。そこで本試験では、電子ビームの出射パラメータを調整して、解像度とひきかえに深度を増加させる描画条件の探査を行った。基板となるシリコンレンズは天文用観測装置で実用的な有効径30mm、曲率半径450mmの

平凸形状とし、その曲面にモスアイ構造を加工した。また、製作したモスアイシリコンレンズの評価も行った。

4. 研究成果

本研究では「3. 研究の方法」で述べたように複数の試験ステップを重ねて研究を行った。以下に各試験の成果を述べる。

(1)長波長中間赤外線帯に反射防止が有効なモスアイ構造の設計を行った。モスアイ構造の一般的な特性を調べるために様々な先端形状の円錐 60° 隣接配置の構造と、四角錐 90° 隣接配置の屈折率モデルをたて、その反射率をRCWA法にて計算した。結果、単純な円(四角)錐もしくは先端が丸まった円(四角)錐の時に広帯域で反射防止効果が得られることがわかった。次に反射率の入射角度依存性を調べた。結果、アスペクト比が4以上であれば入射角度 40° 以下で反射率の増加は生じないことがわかった。また、モスアイ構造による回折の影響も調査した。ピッチx屈折率より短波長では突起による回折光が生じるため、直進光の透過率が低下することがわかった。以上の検討で、形状による反射率依存性は円錐 60° と四角錐 90° の場合で大きな差が無いことがわかった。このことから、実際に製作するモスアイには、RIEによる構造形成がより容易である先端形状(1-z)の円錐(直径が高さに比例)を 60° 隣接配置する構造を採用した。また、入射角カバレッジの観点からアスペクト比を4とし、使用する最短波長 $=20\mu\text{m}$ の制限から、ピッチは $5\mu\text{m}$ とした。製作するモスアイの形状と期待される性能を図1に示す。

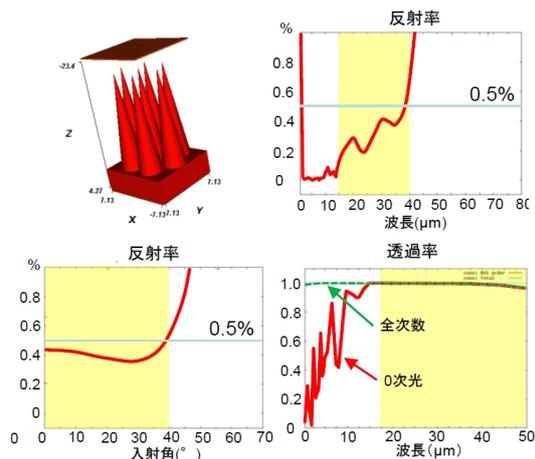


図1. (左上) 波長 $20\sim 40\mu\text{m}$ に最適化したモスアイ構造。(右上、下) 反射率と透過率の計算結果。ピッチ $5\mu\text{m}$ 。アスペクト比4。先端形状z-1。円錐 60° 隣接配置。屈折率 $n=3.4$ 。

(2) 電磁波解析シミュレーションにて設計したモスアイパターンをシリコン平板の片面に加工した。製作したモスアイ構造のSEM画像を図2に示す。この試験では、加工の深さを知らずために突起の先端の $1.0\mu\text{m}$ を非加工とした。突起形状の裾部にはひだ構造が見られ、これはモスアイ加工部の場所により異なる。このひだ構造は指向性の強いイオンが突起の谷間で多重散乱し、その際にスパッタリング効果により表面が削り取られたことが原因と考えられる。こうした不規則な構造は、入射電磁波の波面を乱すことに繋がる。プロセスの工程と条件を見直すことで、波面を乱さないようなモスアイ構造を実現する必要がある→(3)。

製作したモスアイ基板の透過率の測定結果を図3に示す。シリコンの1面あたりの反射率は屈折率 $n=3.4$ より $R=(1-n)^2/(1+n)^2=0.3$ である。平行平板の場合、反射面が2面あるので総透過率は $T=(1-R)/(1+R)=0.54$ となる。図3の未処理シリコンの透過率は $5-25\mu\text{m}$ を除きこの値に一致している。(5-25 μm 帯にはシリコンのフォノン吸収が見られる。)一方、片面をモスアイ加工したシリコン平板の透過率は長波長中間赤外線(25-45 μm)で0.7に達している。これは、モスアイ加工面の反射率がほぼゼロに低減されたことを意味する。ピッチ \times 屈折率 $=17\mu\text{m}$ より短波長では、電磁波解析シミュレーションの結果と同じく、回折による透過率の損失が見える。

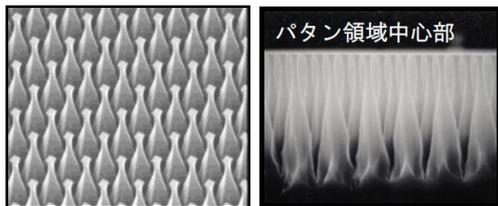


図2. 製作したモスアイ基板のSEM画像(左)鳥瞰画像(右)断面画像。円錐のピッチは $5\mu\text{m}$

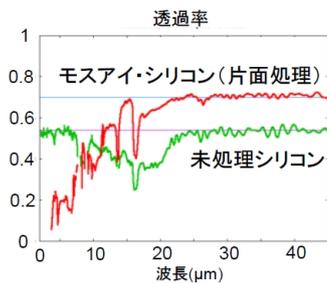


図3. 製作したモスアイ基板の透過率の測定結果

(3) 入射電磁波の波面を乱さない「一様かつ大面積」のモスアイ構造を形成する試験を行った。天文観測装置用として実用的なビーム径である $\Phi 40\text{mm}$ の領域内にモスアイ構造

を加工し、その全面で錐構造が可能な限り一様な形状になるようにRIEの条件を調整した。その結果得られた最も一様な錐構造を持つサンプルの写真を図4に示す。また、このサンプルの中央付近と両端のSEM画像を図5,6に示す。モスアイ加工部の全面にわたり同形状の錐構造が形成されていることがわかる。錐の裾の形状は複雑であるため、SEM画像からだけではその分散(ばらつき)を評価できない。しかし、錐形状の差が反射率の差として現れる事を利用して、各部での透過率を測定することで形状の分散を評価した。図7にモスアイ領域の中央と端における透過率の測定結果を示す。両領域の透過率に優位な差は見られなかった。このことから、今回製作したサンプルはモスアイ領域の全面に渡り、一様な錐構造が形成されていると言える。より定量的な形状誤差を導出するためには再結像光学系のコリメータ部にサンプルを設置して評価を行う必要がある。

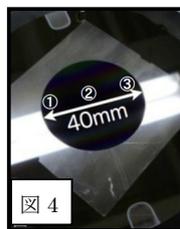


図4. 大面積モスアイ基板の概観可視画像。モスアイ部は黒く見える。

図5. モスアイ部のSEM画像。上から見た図。ピッチ $5\mu\text{m}$ 隣接配置。

図6. 断面図。錐の深さ $15\mu\text{m}$ 。

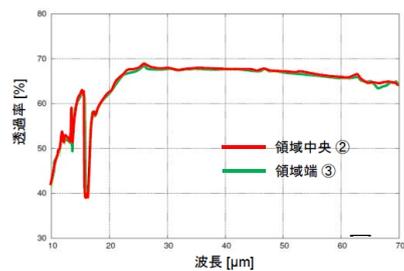
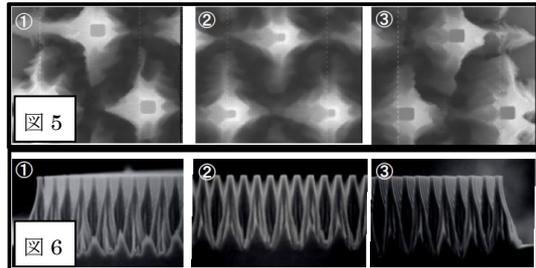


図7. モスアイ領域中央と端の透過率の比較。優位な差は見られない。モスアイ構造が一様であることを示している。

(4) シリコン平板の両面にモスアイ構造を加工する試験を行った。モスアイ構造の形状は図1のサンプルと同じである。得られたモスアイ構造のサンプルのSEM画像を図8,9に示す。モスアイ処理部の中央と端で形状が異なることがわかる。こうした形状の不均一性は、おもて面加工で最適化したRIE処理条件

が必ずしも（固定方法が異なる）裏面加工で最適でないことに起因すると考えられる。この問題はエッチング処理領域を小さくすることで固定領域（非エッチング領域）を十分に確保し、裏面加工に最適な RIE 処理条件を調査することで解決できると考えられる。図 10 に両面モスアイサンプルの透過率の測定結果を示す。モスアイ構造が不均一のため、場所により透過率が異なることがわかる。

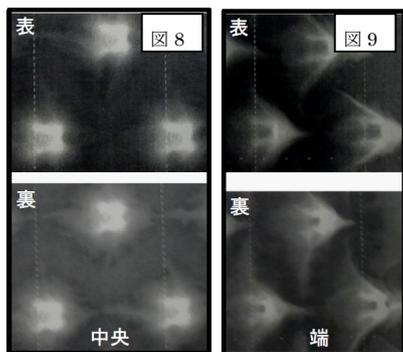


図 8. モスアイ部の中央付近の SEM 画像(上面より)。

図 9. モスアイ部の端付近の SEM 画像。中央と端で錐の形状が異なることがわかる。

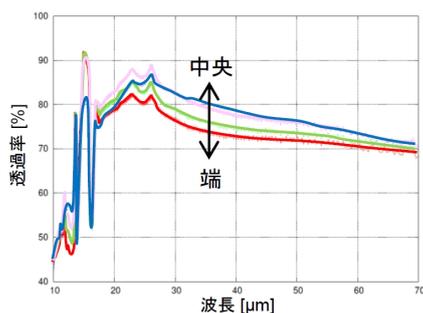


図 10. 両面にモスアイ加工したシリコン平板の透過率の測定結果。測定場所により透過率プロファイルが異なる。理想的には 100%に達するべきだがモスアイ形状が適切でないために 85%以下にとどまっている。

(5) シリコンレンズの曲面上にモスアイ構造を加工する試験を行った。電子ビームの出射パラメータを調整して、解像度とひきかえに深度を 0.5mm にまで増加させる描画条件にてパターニングを行った結果、天文用観測装置で実用的な有効径 30mm, 曲率半径 450mm の平凸シリコンレンズの曲面に図 1 と同じパターンのモスアイ構造を加工することに成功した (図 11, 12, 13, 14)。このレンズは加工深度 (SAG) が最大 0.45mm にもかかわらず、パターンは ±1% 程度のピッチ誤差で形成された (図 12)。RIE 加工も曲面に垂直に進行し、各部の曲面に垂直な方向に深さ 15 μm の錐が形成された (図 13, 14)。平面の加工と同じ RIE 条件

で加工したため、錐の頭がやや大きく残っている。また、領域の端では部分的に錐の形状が崩れる現象がみられた。これらは曲面加工に適した RIE 条件を探すことで改善されると考えられる。本試験により、RIE により曲面へのモスアイ加工が可能であることが実証された。最適な加工条件を探す試みは次年度に行う予定である。

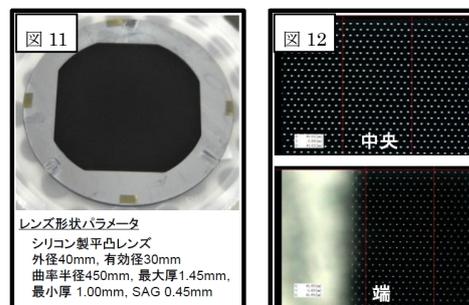


図 11. シリコンレンズの曲面上にモスアイ加工したサンプルの概観写真。中央部の□30mm 付近をモスアイ加工した。

図 12. 中央付近と端のマスクパターン。パターンのピッチの誤差は処理部の全域で ±1% 程度。

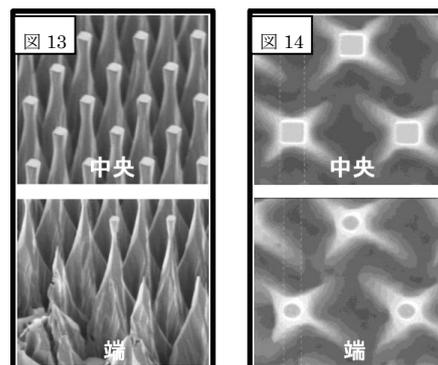


図 13. モスアイ加工部の SEM 鳥瞰画像。領域の端で構造の一部が不完全。中央でも頭が若干大きい。

図 14. 上面からの SEM 画像。頭の大きさ以外はほぼ同形状に見える

製作したモスアイレンズは透過光の進行方向を変えてしまうため、分光器を用いて透過率を測定することは困難である。同じ曲率半径の平凹レンズ(ヌルレンズ)と組み合わせることで分光器による透過率の測定が可能になる。この試みは次年度に行う予定である。本研究では製作したモスアイレンズによる結像性能の評価を行った。十字線を持つピンホールをモスアイレンズで再結像した波長 10 μm の画像を図 15 に示す。モスアイ有のレンズでは透過率が改善されるため画像の S/N が向上していることがわかる。十字線

の縦線部の横方向の信号強度変化を図 16 に示す。モスアイ無しと有りで結像性能に優位な差が無いことがわかる。これは、モスアイ加工面にて波面が殆ど乱れていないことを意味している。この実験により、モスアイレンズが結像光学系に適用できることが実証された。

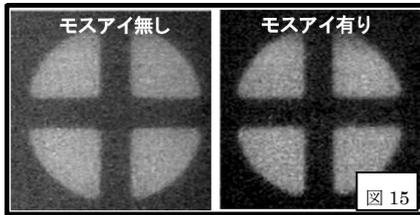


図 15. シリコンレンズで再結像させた波長 $10\mu\text{m}$ の十字ピンホール像

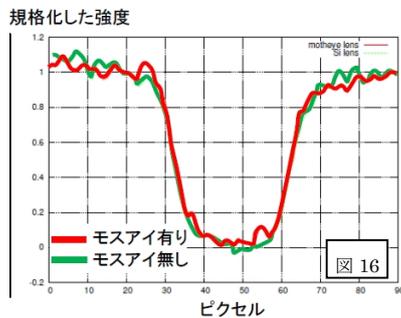


図 16. 十字ピンホール像の縦線部の横方向の信号強度分布

これら一連の研究により、「長波長中間赤外線モスアイ・シリコンレンズ」を実現するための基盤技術が確立された。来年度以降に本研究で得られた成果を融合して、実際の天文用観測装置に搭載する高効率シリコンレンズの開発を行う。そして、現在、東京大学天文学教育研究センターが開発中の、TAO 6.5m 望遠鏡用中間赤外線観測装置 MIMIZUKU に製作したレンズを搭載し、実際の使用環境における性能試験を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 酒向重行、TAO 計画 4 : 6.5m 用中間赤外線分光撮像装置の開発、日本天文学会春季年会、2010 年 3 月 27 日、広島大学
- ② 酒向重行、TAO-3:6.5m 用中間赤外線装置 MIMIZUKU の開発進捗報告、日本天文学会春季年会予稿集、2011 年 3 月 18 日、筑波大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒向 重行 (SAKO SHIGEYUKI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号 : 90533563

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :