

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月19日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340041

研究課題名（和文）モザイク望遠鏡用ナル干渉型ステラコロナグラフの開発

研究課題名（英文）Development of nulling interferometric coronagraph for segmented-mirror telescopes

研究代表者

馬場 直志 (BABA NAOSHI)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70143261

研究成果の概要（和文）：モザイク型望遠鏡（多くの小型の鏡を配列して大きな口径の望遠鏡とする）で太陽系外惑星を直接観測するために、恒星からの光波を横ずらしして打消し合う干渉状態（ナル干渉）とする装置の開発を行った。波面の横ずらしとナル干渉を実現するために、大きさの異なるフレネルロム（内部全反射により直交偏光成分間に位相差を与える素子）の使用を提案し、実験的に提案した方法の有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：We developed an instrument for observing directly extra-solar planets with segmented-mirror telescopes. It is desirable to extinct starlight for observing directly extra-solar planets. In order to achieve nulling and lateral shearing simultaneously for starlight we proposed use of a pair of two Fresnel rhombs with different sizes in the Mach-Zhender interferometer. We showed the experimental verification of our proposed method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：光学赤外線天文学・大型望遠鏡・太陽系外惑星・観測装置

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在検討が進められている次期の大型望遠鏡は、TMT(Thirty Meter Telescope)のように、単一鏡ではなくモザイク鏡（多くの六角形の鏡を密に配置して有効口径を30m程度以上とするもの）となる。

(2) 大型望遠鏡による主要な観測の一つに、太陽系外惑星の直接撮像・分光がある。太陽

系外惑星を大型望遠鏡で観測し、その特性を詳細に調べることは、現代の天文学の大きな課題となっている。

(3) 恒星の極近傍の惑星までも観測できるように、掩蔽型ではなくナル干渉型（恒星からの光を打ち消しあう干渉状態にして消光し、暗い惑星を観測できるようにする）のステラコロナグラフを採用するのが好ましい。

2. 研究の目的

太陽系外惑星をモザイク大型望遠鏡で直接観測するためのナリ干渉型コロナグラフ装置を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) ナリ干渉型ステラコロナグラフをモザイク望遠鏡に用いる場合には、モザイク鏡間のギャップが大きな問題となる。このために、モザイク望遠鏡に特化したナリ干渉型ステラコロナグラフとして、ラテラルシアリング(波面横ずらし)干渉装置に着目した。

(2) 2光波ナリ干渉のための基本光学系として、マッハ・ツェンダー干渉計を採用することにした。これは、対称性良く2光波干渉させることができるためである。

(3) ラテラルシアリング(波面横ずらし)のため大きさの異なるフレネルロム対を使用することを本研究で提案した。大きさの異なるフレネルロムを接合すると、出射ビームは入射ビーム方向とはズレた方向に平行で出てくる。これにより、ラテラルシアリングが可能となる。(図1:大きさが δ 異なるとビームのずれ量は下図のように s となる)

波面の横ずらし量は、接合するフレネルロムの大きさの差に依存する。この横ずらし量はモザイク型望遠鏡のセグメント鏡の大きさにより決められる。

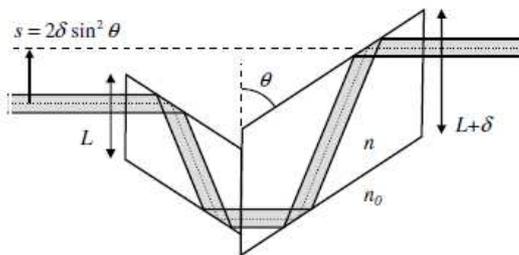


図1 フレネルロムによるビームシフト

(4) フレネルロムを2つ接合することで半波長板となり、p偏光とs偏光間に π の位相差をつけることができ、ナリ干渉が可能となる。フレネルロムによる位相差は内部全反射を利用するものであり、広い波長領域で π の位相差を実現でき、暗い系外惑星の撮像に有利となる。

2つのフレネルロムでp偏光とs偏光間に π の位相差をつけられるが、干渉させるためには偏光板が必要となる。偏光板を挿入すると光量が半減となるため、暗い系外惑星の撮像に不利となる。マッハ・ツェンダー干渉計で、p偏光およびs偏光それぞれにおいて π

の位相差で干渉するようにさせることが望ましい。このために、Mawetが提案したように、各アームのフレネルロム対を互いに90度傾けて挿入するようにした。

以上の要点を考慮した光学系が図2である。この図に恒星の光によるTMT(Thirty-Meter Telescope)型望遠鏡の瞳像と惑星光による瞳像が記載されている。なお、瞳像には多数の六角形セグメント鏡、副鏡およびスパイダーの陰が見て取れる。恒星光はナリ干渉により、リヨ絞り通過後、出射されなくなる。一方、惑星光はマッハ・ツェンダー干渉計に傾いて入射するため、全ての波長で打消し合う干渉とはならず、大半の光が出射され、惑星像形成に与る。マッハ・ツェンダー干渉計の上と下のアームで、異なった大きさのフレネルロムで接合された素子が90度傾けられて挿入されている。

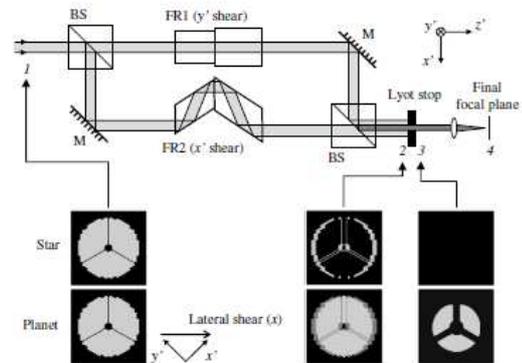


図2 横シアリング・ナリ干渉計

4. 研究成果

提案した光学系を評価するために、まず、計算機シミュレーションを行った。この計算機シミュレーションでは、モザイク望遠鏡のモデルとしてTMTを想定し、セグメント鏡の大きさを公表されているものと同じにした。フレネルロムの材質としては、赤外域での性能からZnSeとした。また、観測波長域はKバンド(2.0~2.4 μ m)とした。恒星のモデルには、太陽と同様に表面温度5800Kの黒体放射を仮定した。

次に、提案した干渉計の有効性を確認するために、実験室で光学系を組み実験を行った。異なった大きさのフレネルロムによる横シアリングの実証、および、マッハ・ツェンダー干渉計の2つのアームに互いに90度傾けてフレネルロム対を配し各偏光成分毎にナリ干渉させることの実証を行った。

実験では、広い帯域でのシアリング・ナリ干渉を確認するために、光源に2色のレーザ

一を用いた。このため、実験に用いたフレネルロムの材質は可視光用のBK7とした。波面の横シアリングのために、横幅が 10.0mm と 10.5mm のフレネルロムを使用した。これらによる波面の横シアリング量は、 $s=0.67\text{mm}$ となった。

以下に、計算機シミュレーションによる主な結果および実験結果の一例を示す。これらは、下記の発表雑誌論文①に記載されており、詳しくはそちらを参照願いたい。

(1) 計算機シミュレーションで想定したモザイク望遠鏡である TMT の瞳像と x シアリングおよび x-y シアリング (2 方向同時シアリング) の場合の惑星光透過率マップを図 3 に示す。x 方向の横シアリング量は六角形セグメントの横幅である 2.16m とした。

x-y シアリングは図 2 のマッハ・ツェンダー干渉計をタンデムに連ねることで可能となる。惑星光を検出できる領域が制限されるものの、恒星が点光源と見なせなくなる場合に消光比の改善が見られる。

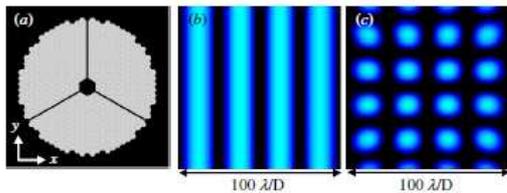


図 3 TMT 瞳と x および x-y シアリング透過率マップ (惑星光)

(2) 恒星が点状と見なせる場合の x 方向シアリング・ナル干渉の消光性能を調べた。計算機シミュレーションにより出てきた結果を図 4 に示す。

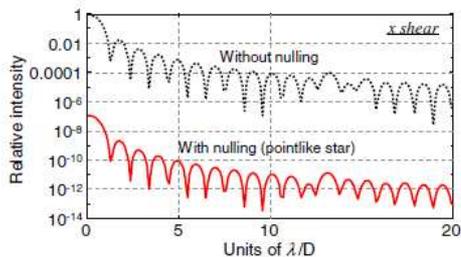


図 4 点状星の場合の x 方向シアリングによる消光性能 (点線はナル干渉させない場合の透過特性)

この図から明らかなように、光軸上で 10^{-7} の消光となっており、 $5\lambda/D$ の位置では 10^{-10} の消光が得られている。このことは地球型の惑星を検出できることを意味する。

本提案光学系におけるナル干渉の性能はフレネルロムの特性に大きく依存する。特に、フレネルロムの製作において高精度が要求される。ここでの計算機シミュレーションでは、鋭角 65.10 度のフレネルロムを想定して計算したが、この角度が 0.01 度ずれてしまうと消光比は 10^{-9} となってしまう。

(3) 恒星が点状と見なせない場合、消光性能は著しく制限されてしまう。例えば、恒星の視直径が $0.15\lambda/D$ となる場合には x 方向のみのシアリング・ナル干渉では、消光比は光軸上で 10^{-3} と劣化してしまう。これを改善するためには、x 方向のみならず、y 方向にも波面をシアして多光波干渉を実現するのがよい。このことを検証したのが図 5 である。

x 方向および y 方向シアリング・ナル干渉により、恒星の視直径が $0.15\lambda/D$ であっても、光軸上で 10^{-6} 、 $5\lambda/D$ の位置で 10^{-9} の消光を達成できることが分かった。

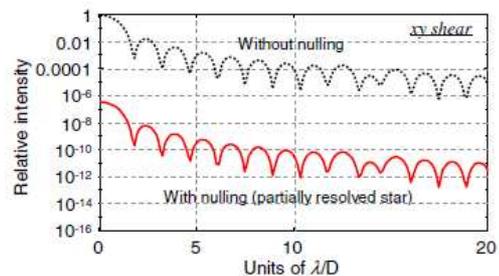


図 5 有限な視直径を有する恒星の x-y シアリング・ナル干渉の消光性能

(4) 光学実験を行い、本提案光学系を実証した。本実験で使用したフレネルロムの鋭角は 55.2 度であった。経費の都合上、特注ではなく市販されているフレネルロムを購入して使用した。フレネルロムの特性を良くするには、薄膜コーティングすることが望ましいが、これも経費の関係上、断念した。

実験では、波長 633nm の He-Ne レーザーと波長 532nm の半導体レーザーを用い、本提案干渉法のアโครマティックな特性を調べた。消光性能は 2 波長でほぼ同等であり、アโครマティックな特性を検証できた。

マッハ・ツェンダー干渉計に入射させる光を 0 度、 45 度、 90 度の直線偏光として、本提案干渉法の偏光依存性を調べた。実験の結果、偏光状態に依らずに、同等の消光性能

を達成できていることを示せた。

光源に He-Ne レーザーを用いた場合の実験結果を図 6 に示す。波面を横ずらしして、ナール干渉させた状態が左図である。入射ビームを傾けて（惑星光に相当）、強め合う干渉状態としたのが右図である。

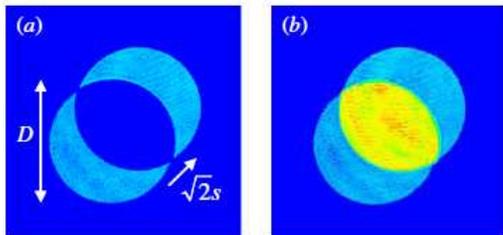


図 6 シアリング・ナル干渉と斜入射光に対するシアリング・強め合い干渉

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)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① N. Baba, K. Kobayashi, Y. Kogoma, and N. Murakami, “Lateral shearing with a pair of double Fresnel rhombs for nulling interferometry,” *Opt. Lett.* **36**, 3611-3613 (2011) 査読有
- ② N. Murakami and N. Baba, “Common-path lateral-shearing nulling interferometry with a Savart plate for exoplanet detection,” *Opt. Lett.* **35**, 3003-3005 (2010) 査読有
- ③ N. Murakami, K. Yokochi, J. Nishikawa, M. Tamura, T. Kurokawa, M. Takeda, and N. Baba, “Polarization interferometric nulling coronagraph for high-contrast imaging,” *Appl. Opt.* **49**, D106-D114 (2010) 査読有
- ④ N. Baba, N. Zubko, H. Shibuya, and N. Murakami, “Spectral reconstruction method for exoplanets,” *J. Modern Optics* **57**, 1803-1807 (2010) 査読有
- ⑤ N. Miura, Y. Noto, S. Kato, F. Yokoyama, S. Kuwamura, N. Baba, Y. Hanaoka, S. Nagata, S. Ueno, R. Kitai, K. Ichimoto, and H. Takami, “Solar adaptive optics system using an electromagnetic deformable mirror,” *Optical Review* **16**, 558-561 (2009) 査読有

[学会発表] (計 10 件)

- ① 三浦則明、宮崎順一、桑村 進、馬場直

志、花岡庸一郎、高見秀樹、上野悟、仲谷善一、永田伸一、北井礼三郎、一本潔
 「太陽補償光学系 KITAO の開発：装置開発状況 (4)」日本天文学会秋季年会、鹿児島大学/鹿児島 (2011 年 9 月 19-22 日)

- ② 小後摩佑介, 村上尚史, 馬場直志 「ダブルフレネルロムによるシェアリング・ナル干渉計の検証実験」日本天文学会 2011 年春季年会 V85a (2011 年 3 月 16-19 日, 筑波大学/つくば、東日本大震災のため開催中止なるも学会成立。予稿集有り)
- ③ Naoshi Baba, Keita Kobayashi, and Naoshi Murakami, “Nulling interferometry for lateral shearing by use of double Fresnel rhombs,” *SPIE Astronomical Instrumentation* (June 29, 2010, San Diego, USA).
- ④ 小林溪太, 馬場直志、村上尚史、小後摩佑介 「シェアリング・ナル干渉ステラコロナグラフの特性」第 45 回応用物理学会北海道支部学術講演会、北大/札幌 (2010 年 1 月 8 日)
- ⑤ 小林溪太, 馬場直志、小後摩佑介、村上尚史 「セグメント型望遠鏡用シェアリング・ナル干渉ステラコロナグラフの検討」日本天文学会秋季年会、山口大/山口 (2009 年 9 月 14-16 日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

馬場 直志 (BABA NAOSHI)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70143261

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

三浦 則明 (MIURA NORIAKI)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：30209720

田村 元秀 (TAMURA MOTOHIDE)

国立天文台・光赤外研究部・准教授

研究者番号：00260018