

光学赤外干渉計による天体観測

吉澤 正則*・西川 淳**

Astronomical Observations with Optical/Infrared Interferometers

Masanori YOSHIZAWA* and Jun NISHIKAWA**

The construction of new optical/infrared interferometers to be used for the future astronomical observations in the new century progressed drastically in the last ten years. Soon many large telescopes at the world best sites for astronomical observations will take part in the millisecond of arc resolution astronomy. The optical/infrared stellar interferometers operated at present are accumulating the new information on the fundamental physical quantities of stars including diameter and mass. The astronomical objects studied with the new large interferometers will include the active galactic nuclei, the protoplanetary disks, and the many stars of astrophysical interests together with their circumstellar envelopes.

Key words: optical/infrared interferometry, Michelson stellar interferometers, large telescopes, diameter of stars, active galactic nuclei

1. 光学赤外干渉計の現状

ハワイ島・マウナケア山頂にある Keck 望遠鏡で最近、天体の干渉フリンジ検出への試みが開始された[†]。Keck 干渉計は、すでに完成している口径 10 m の 2 台の巨大望遠鏡と（現在建設中の）4 台のサブ望遠鏡（口径 1.8 m）から構成され、すべて完成すれば最大基線長 140 m の光学赤外干渉計となる。南天のチリには、同様の規模をもつ ESO（欧州南天天文台）の VLTI が建設中で、これは 4 台の 8 m 望遠鏡と 3 台の 1.8 m 鏡を組み合わせる光学赤外干渉計である（最大基線長 202 m）。一方、マウナケア山頂にある Keck 望遠鏡、すばる望遠鏡などを含めた 8 台の大望遠鏡を光ファイバーで結合して干渉計（最大基線長 800 m）を構築しようという OHANA 計画が進展中で、2002～2003 年にいくつかの実験的な観測を実施する。これらの光学赤外干渉計が狙うターゲットは活動銀河核の中心、原始惑星系円盤の詳細な構造、あるいは活動星とその周辺などである。21 世紀の最初の 10 年間に大規模光学赤外干渉計による新しい天文学が始まるのは間違いない。

一方、恒星を主な観測対象とする恒星干渉計は、1980 年

代よりすでに何か所かで稼動している。これまでは 2 素子のみによる観測が主であったが、恒星の基礎物理量の研究において新しい情報をもたらしつつあり、今後ますます多くの観測結果が期待されている。すでに、視直径 1 ミリ秒角（以下、ミリ秒角を mas=milli-arcsecond と略す）程度のセファイド型変光星の脈動を定量的に検出する観測も試みられている¹⁾。光学赤外干渉計による撮像観測はまだ発展途上であるが、COAST（ケンブリッジ大学）では 3 素子の開口合成法を使った連星 Capella (α Aur) の撮像観測に成功している²⁾。現在は、CHARA や NPOI (BOA) のような（いずれも米国）、基線長 300～400 m で撮像能力の高い干渉計が立ち上げ中で、数年以内には具体的な成果が得られるはずである。

表 1 に、立ち上げ中・検討中も含め、21 世紀に稼動する光学赤外干渉計をまとめておく。日本の現状については、最後の章で簡単に紹介する。なお、世界の光学赤外干渉計（地上およびスペース）の最新情報が米国ジェット推進研究所のホームページ^{††}に掲載されている。

*国立天文台位置天文・天体力学研究系（〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1） E-mail: ma.yoshizawa@nao.ac.jp

**国立天文台光学赤外線天文学・観測システム研究系（〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1） E-mail: jun.nishikawa@nao.ac.jp

[†]<http://huey.jpl.nasa.gov/keck/>

^{††}<http://huey.jpl.nasa.gov/olbin/links/links.html>

表1 21世紀に稼動する光学赤外干渉計.

名称	国(機関)	口径(m)	素子数	最大基線長(m)	分類	現状 ()内数字は稼動素子
OHANA	複数国連合 MKO	10, 8, ほか	8	800	撮像	推進中(ファイバー結合)
Keck main	米(Caltech ほか)	10	2	85	撮像	立ち上げ中 2003年
VLT main	欧州連合 ESO	8	4	130	撮像	立ち上げ中 2003年
LBT	米	8.4	2	23	撮像	立ち上げ中
Magellan	米(Carnegie Inst. ほか)	6.5	2	60	撮像	1台目完成; 2台目建設中
MIRA	日(国立天文台)	4	64	1000	撮像	検討中
ISI	米(UC Berkeley)	2	2	35	撮像	稼動中(10 μ m Heterodyne)
Keck sub	米(Caltech ほか)	1.8	4	140	撮像	建設中 2002年
VLT sub	欧州連合 ESO	1.8	3	202	撮像	建設中 2002年
GI2T	仏(CERGA)	1.5	2	65	撮像	稼動中
CHARA	米(Georgia St. U.)	1	7	350	撮像	立ち上げ中
NPOI(BOA)	米(海軍天文台)	0.5	6	437	撮像	立ち上げ中
USNOAI	米(海軍天文台)	0.5	4	40	位置	稼動中(3); NPOIの中心部
PTI	米(JPL)	0.5	3	110	狭位置	稼動中(2); 撮像も可
COAST	英(Cambridge U.)	0.5	5	20	撮像	稼動中(4); 基線拡張中
IOTA	米(Harvard U. ほか)	0.45	3	38	撮像	稼動中(2)
MIRA-I.2	日(国立天文台)	0.3	2	30	撮像	立ち上げ中 2001年
SUSI	豪(Sydney U.)	0.2	11	640	撮像	立ち上げ中(2)

2. マイケルソン型光学赤外干渉計

天体の各点から地上にやってくる光を地上の2地点で受け、そこからコヒーレンス関数を構築する。このコヒーレンス関数を2地点の相対位置について逆フーリエ変換することで、天体における2次元光度分布が得られる(van Cittert-Zernikeの定理)³⁾。観測地点を3次的に配置することで、天体の分光情報の収集も可能となり、フーリエ変換分光撮像法あるいはダブルフーリエ空間分光干渉法とよばれている⁴⁾。

このいわゆる波面分割型のマイケルソン干渉計を実際の天体観測に応用するには、いくつかの克服すべき技術的な課題がある。光学赤外領域での地上天体干渉計の最大の障害は大気である。大気中における屈折率の時間・空間変動は、波面の傾斜や遅延量のランダムな変動を引き起こす。これらの変動はコルモゴロフ乱流理論でよく近似できる⁵⁾。シーイングが1"以下であるような条件のよい観測地では、可視域でのコヒーレンス時間は10 ms、コヒーレントサイズを表すフリードパラメーターは10 cm程度である。

大気の変動による波面傾斜を補正して(tip-tilt鏡)2つの分割波面を回折像サイズの数パーセントで重ね、かつ、恒星の日周運動による光遅延量の滑らかな変動(30 mの基線長で最大2 mm/s)に重なった大気遅延変動(コヒーレンス時間内に数十マイクロメートル)を $\lambda/10$ 以下の大きさに抑えるためには、複雑な制御システムが必要となる。電波の領域に比較するとこれらの条件は桁違いに厳しく、これが近代的な光干渉計の誕生を遅らせた主要因であった。

光の波としての性質を利用して、Michelson(1920)は

Mt. Wilsonの100インチ望遠鏡を用いて恒星の視直径を初めて計測した⁶⁾。しかし、精度の高い定量観測を実現できる技術はしばらく確立しなかった。1980年代の後半になってようやく、いくつかの実験装置で実用的な観測が可能になった^{7,8)}。

3. 光学赤外干渉計による恒星の基礎物理量の観測

初期の恒星干渉計の多くは2素子であり、このため観測対象は構造の単純なもの、すなわち恒星の視直径や連星の軌道決定などに限られていた。今日まで、直径の大きな巨星・超巨星の視直径観測を中心に、ミラ型変光星、炭素星、あるいは近接連星など、400近いさまざまな恒星の観測が行われている。これらの観測結果は、恒星の実直径と有効温度の決定、連星の軌道要素の決定とそれに基づく恒星質量と力学視差、進化理論との比較など、恒星の基礎物理量に関係する幅広い研究に利用されている。

観測された恒星の視直径は、Betelgeuse(α Ori; 視直径44 mas)やMira(ι Ceti; 極大光度期で視直径36 mas)などのいくつかを除けば、ほとんどは数~20 masの大きさである。より長い基線をもつ干渉計を使えばもっと高い分解能を達成できるが、一般に視直径の小さな恒星は遠方であって暗く、限られた口径の望遠鏡では光の量が十分ではない。このために、現在稼動中の恒星干渉計の基線長は30~40 mのものがほとんどである(可視光領域で λ /基線長~数masに相当)。表2にマイケルソン型の恒星干渉計による恒星の視直径の観測精度を、他の観測手段の値と比較して掲げてある。

表2からわかるように、現在のマイケルソン型の恒星干渉計では数パーセントの相対精度で恒星の視直径の観測が

表2 恒星直径の観測手段と相対決定精度.

観測手法	相対誤差 ($\Delta\theta/\theta$) (%)	補足事項
月による掩蔽	~15 (≤ 25) (α Tau は 2)	月縁の形の補正
スペckル干渉計	10~30	CERGA 20 m
強度干渉計	2~6	Hanbury Brown ほか (1974)
食連星(光度曲線)	~5	300 食変光星
表面輝度法(測光)	~5	IR 測光+大気モデル
マイケルソン型光学赤外干渉計		
PTI	~4	K-band 基線長=110 m
IOTA	≤ 10	K-band 基線長=38 m
Mark III	1~5	700~800 nm, 基線長=40 m

可能になっている。この他に、いくつかの観測では、位置角による視直径の変化、すなわち球対象性からのずれを示す結果も得られている^{9,10)}。

4. 日本の光学赤外干渉計計画

最後にわが国の光学赤外干渉計の現状と将来計画について簡単に紹介しておく。国立天文台の光赤外干渉計推進グループは、現在、基線長 30 m の 2 素子干渉計 MIRA-I.2 を三鷹キャンパスに建設中である。天体からの光を口径 30 cm の平面鏡(サイデロスタット)で受け、これを観測室内で約 1/6 のビーム径に縮小した後、真空パイプ内を通して、50 m ほど離れた干渉光学系室に伝送する。MIRA-I.2 の tip-tilt 波面補償系や精密光遅延線は、コヒーレンス時間が数ミリ秒である厳しい条件にも対応できるように設計されている。

MIRA-I.2 の限界等級は可視域で約 4.5 等、2~4 mas の分解能をもち、主に恒星の視直径や連星の軌道要素などを観測する(今秋より)。特に視直径の観測は相対誤差 1% をめざしている。これが実現すると、高い精度でセファイド型変光星の半径変動の検出を行うことができ、変光星の距離についての独立な情報を得ることが可能となる。セファイド型変光星は、宇宙の距離を測る最も基本的な光度指標であるが、その距離の較正をさまざまな方法で行うことは、系統誤差を極力除去するという観点からも、きわめて重要である。

表 1 に示すとおり、今後 10 年間で、相当数の大型光学赤外干渉計が立ち上がってくる。活動銀河の中心核を 1

mas の分解能で日常的に観測できる 때가遠からずやってくる。筆者の周辺でも、日本がもつべき大型光学赤外干渉計の将来計画の検討を進めているが、天文分野のみならず広く光学研究者・技術者のご支援をいただければ幸いである。

文 献

- 1) J. T. Armstrong, R. B. Hindsley, D. Mozurkewich, A. R. Hajian, M. E. Germain and T.E. Nordgren: "Estimating errors in stellar angular diameters: Does the NPOI see the pulsation of δ Cephei?", Proc. SPIE, **4006** (2000) 634-639.
- 2) J. E. Baldwin, M. G. Beckett, R. C. Boysen, D. Burns, D. F. Buscher, G. C. Cox, C. A. Haniff, C. D. Mackay, N. S. Nightingale, J. Rogers, P. A. G. Scheuer, T. R. Scott, P. G. Tuthill, P. J. Warner, D. M. A. Wilson and R. W. Wilson: "The first images from an optical aperture synthesis array: Mapping of Capella with COAST at two epochs," Astron. Astrophys., **306** (1996) L13-L16.
- 3) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 7th ed. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1999) pp. 572-574.
- 4) 伊東一良, 平井亜紀子, 吉森 久: "干渉分光映像法の進展と超高速並列処理システム", 応用物理, **66** (1997) 426-436.
- 5) M. M. Colavita, M. Shao and D. H. Staelin: "Atmospheric phase measurements with the Mark III stellar interferometer," Appl. Opt., **26** (1987) 4106-4112.
- 6) A. A. Michelson and F. G. Pease: "Measurement of the diameter of α Orionis with the interferometer," Astrophys. J., **53** (1921) 249-259.
- 7) L. Koechlin: "The I2T interferometer," *High-Resolution Imaging by Interferometry*, ESO Proc., **29** (1988) 695-704.
- 8) M. Shao, M. M. Colavita, B. E. Hines, D. H. Staelin, D. J. Hutter, K. J. Johnston, D. Mozurkewich, R. S. Simon, J. L. Hershey, J. A. Hughes and G. H. Kaplan: "The Mark III stellar interferometer," Astron. Astrophys., **193** (1988) 357-371.
- 9) A. Quirrenbach, D. Mozurkewich, J. T. Armstrong, K. J. Johnston, M. M. Colavita and M. Shao: "Interferometric observations of Mira (*o* Ceti)," Astron. Astrophys., **259** (1992) L19-L22.
- 10) A. Quirrenbach, K. S. Bjorkman, J. E. Bjorkman, C. A. Hummel, D. F. Buscher, J. T. Armstrong, D. Mozurkewich, N. M. Elias II and B. L. Babler: "Constraints and the geometry of circumstellar envelopes: Optical interferometric and spectropolarimetric observations of seven Be stars," Astrophys. J., **479** (1997) 477-496.

(2001年4月9日受理)