

最近の技術から

超精密切削金属鏡の望遠鏡への応用

河野 嗣 男

金沢大学工学部 〒920 金沢市小立野 2-40-20

鏡といえば磨きガラスにめっきを施したものである。しかし、正倉院の鏡が金属鏡であるように、かつての鏡は金属表面を研磨して作られた。近年でも、金属面を研磨した金属鏡が使われることはあるが、かなり限られており、光学的鏡面としては不十分な場合が多い。最近、ダイヤモンド旋削技術が急速に進歩し、ガラス鏡に近い超精密金属鏡が製作されるようになった。これらは、電算機用メモリディスク、複写機用ポリゴンなどに実用化され、さらに広範囲に利用されようとしている。ダイヤモンド旋削による金属鏡は、研磨加工による金属鏡と比較して、高精度、高反射率、低散乱光、低加工歪、高速加工であり、とくに低コストという優れた面をもっている。この超精密切削金属鏡の天体望遠鏡への応用について考察してみる。

ダイヤモンド切削に用いられる素材は、銅やアルミニ

ウムなどの軟質金属である。とくに、アルミニウムとその合金の一部は、密度や弾性係数などの物性的な特性がガラスによく似ており、各種の鏡面材料として広く用いられるようになっている。望遠鏡主鏡に用いる材料としては、熱膨張係数 α が小さいことが大切であるが、これと並んで熱伝導率 k が大きいことも重要な性質である。これは、外界や鏡材の一部に温度変化があって熱歪が生じたとき、これを短い時間で一樣にする能力に関係する。このような理由で、 k/α を望遠鏡主鏡材料の一つのメリット係数と考えることもでき、他の特性とともに表 1 に比較を示す。これを見ても、アルミニウムの優れた面が知られるが、さらに、これをダイヤモンド切削した場合と、研磨した場合、そしてガラス鏡とを加工コストの例を中心に比較したのが表 2 である。望遠鏡のコストは、口径が大きくなるに従ってその 2.7 乗という高率は

表 1 金属材料とガラスとの物性的性質の比較

	密度 ($\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	ヤング率 ($\times 10^{10} \text{ Pa}$)	線膨張 α ($\times 10^{-6}$)	熱伝導 k ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比 k/α ($\times 10^6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
銅	8.9	13.0	20	403	20.2
アルミニウム	2.7	7.0	29	238	8.2
石英ガラス	2.2	7.3	0.4	1.5	3.8
パイレックス	2.3	6.3	3.3	1.1	0.3
ガラス(平均)	2.5	7.6	9	0.9	0.1
ベリリウム*	1.8	29.0	14	218	15.6

* 金属鏡として優れており、衛星などの望遠鏡として利用されているが、これらはいまのところ研磨鏡である。

表 2 金属鏡とガラス鏡との比較

	切削金属鏡	研磨金属鏡	ガラス研磨鏡
価 格 (例)			
30 cm ϕ 球 面 (万円)	6	50	60
20 cm ϕ off axis パラボラ (\$) ポリゴン (万円)	2,000	—	50,000
	5	—	40
加 工 時 間	1 時間	2 週間	4 カ月
耐 候 性 (年)	~ 5	~ 1	~ 2
熱 損 傷 閾 値 (kW/cm^2)	50	45	—
反 射 率 (%)	99.2 max	97.5 max	90 平均

上昇するため、このアルミニウム切削鏡の圧倒的な優位が大口径でさらに発揮されると予想される。

このように優れた面をもつダイヤモンド切削金属鏡を望遠鏡として利用するための大規模なテストは、まだ行なわれていない。そこで、われわれは口径 20 cm のダイヤモンド切削金属鏡を望遠鏡として使用し、小規模なテストを行なってみた。使用した金属鏡は2枚で、いずれも NC 加工により焦点距離 160 cm の放物面に切削された。望遠鏡は、ニュートン式で、恒星、木星、土星等を中心に観測し、恒星においては、星像(点像)のほか、鏡面近くに孔の開いたハルトマン板を置き、焦点前後で写真を撮ることによりハルトマンテストを行なった。さらに実験室において、フーコーテストや干渉計によって面形状の観察も行なった。第1の鏡は、星像やフーコーテストで三角形状を示した。原因を究明したところ、下加工における三爪チャックの歪が、精密仕上げ加工を行なった後にしだいに現われてきたもので、加工後2~3か月間は、歪量が增大するように観察された。そこで、第2の鏡では、下加工後に熱処理をする工程を加え、歪の除去を行なった。その結果、星像はほぼ完全な円となり、その中心核の半値幅は2秒角程度という良好な像となった。しかも、この状態は半年以上にわたり、ほとんど変化が認められなかった。ただし、鏡面には送りマークと呼ばれるバイトの送りピッチに相当する微小な凹凸が残存しており、このため、星像中心核のまわりに約20秒角に広がるハローが生じて像の鮮鋭度をやや低下させる原因となっている。図1に第2の鏡の干渉計による形状を示す。総じて、送りマークがなくなるなど

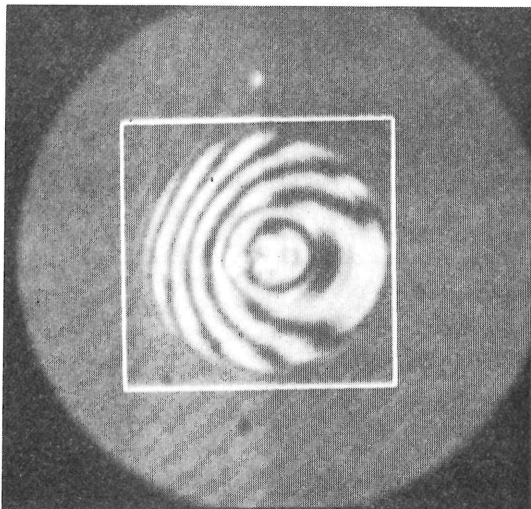


図1 20cmφダイヤモンド切削金属鏡の面形状(万能干渉計による)

の加工技術上の進歩を前提とすれば、少なくとも小口径の望遠鏡に関する限り、金属鏡が天体望遠鏡として使用できることが示されたといえる。逆にいえば、形状および表面粗さにおいて、ほぼ1桁近くの精度向上を実現させることが課題として残るが、これは今後の努力によって達成されるものと考えられる。しかし、その高精度を安定的に維持し、つねに最高精度の鏡面を製作可能な状態に保つことは、それほど容易なことではない。この点に開発努力を集中すべきであり、金属鏡実用化のカギもこの辺にあると思われる。

具体的には、旋盤のよりいっそうの精度向上、加工技術の確立など直接的な研究開発以外に、良質な天然または人工ダイヤモンドの結晶軸を決めた高品質バイトを開発すること、温度や振動などの加工環境を安定にすることなどがある。しかし、最終的には、バイトの先端と加工物との相対位置が鏡面精度を決める。そこで、われわれはバイトと加工物との相対位置を直接測定して、これをインプロセスで制御することを提案している。超精密加工の特徴は、一度切削した部分が最終の面形状であり、同時にこの面が光学的鏡面である点にある。これが研磨加工との大きな相違であり、間隔を直接精密測定して制御することを可能にしている。

面測定は、微小形状(粗さ、うねり)と形状とに大別されるが、この場合はインプロセス計測となり、非接触、高速、高精度という条件が必要である。われわれは、微小形状測定には、光ディスク検出ヘッドを改良し、高精度化した光学ヘッドを、形状測定には、ファイバグレーティングを用いたハルトマンテストを用いる計画を進めている。また、バイトの切込み量を微小変化させるアクチュエータとしては、電歪素子が適していると思われ、並行して開発を行なっており、これらを結合し

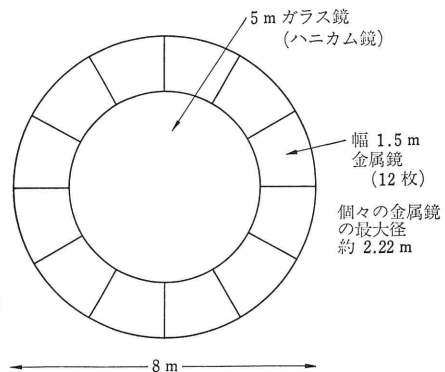


図2 複合鏡望遠鏡(hybrid mirror telescope)主鏡概念図

たフィードバック制御も、近い将来実験に移し、超精密を維持する加工法を実証したいと考えている。

本誌別稿にもあるように、現在、大口径望遠鏡の建設計画が進められている。現在の案は、“口径 5 m 以上の single dish telescope”であるが、もしこれが 5 m そこそこになる場合は、諸外国の 7.5~25 m という超大型計画に大幅な後塵を拝することが心配される。そのため、精度の高さに特長を出すよう努力することになるが、それでも多くの天文学者などに大口径を望む声は強い。しかし他方で、主として技術的理由から、今回の“純単一鏡”で 5 m を大幅に越えることは困難である。そこで、図 2 に示すような案が一部で検討されはじめている。中心はガラス鏡であり、高解像の観測に用いられるが、周辺鏡は軸外し放物面金属鏡で、光量を重視する観測において使用される。金属鏡はアダプティブに支持

され、7~8 m 鏡全体として $\lambda/5$ (λ : 可視光) 程度の精度を維持することを目標とする。この案の成否は、先に述べたいいくつかの問題に帰するが、一方では、これと並行して、望遠鏡をはじめ、レーザー核融合や X 線物理学などに応用する目的で、口径 2 m 以上の超精密非球面金属鏡を開発する大規模なプロジェクトが計画されていて、これがもし実行に移されれば、その成果は上記の案の実現に直結するものとして期待される。

以前、アメリカでアルミニウムの金属鏡望遠鏡が作られたが、歪が多くて失敗し、これが金属鏡の評判を悪くする原因となった。しかし最近、ヨーロッパから、長期間安定に動作している実例をあげ、この評判には同意できないとして、現在計画中の望遠鏡に金属鏡を用いることが決まったと伝えられている。

(1984 年 5 月 31 日受理)