

ハネカム式大型軽量鏡の話

野 口 猛*

1. 大型望遠鏡では鏡の軽量化が必要である

大きな望遠鏡を作る場合に、常に頭を悩ませる問題の一つとして鏡の重量増加のことがある。理想的な鏡面を保持するには、鏡が自重変形を起こさないように強固に作る必要があり、従来の常識では鏡厚対口径の比が1/6とされている。従って望遠鏡の口径が大きくなれば鏡の重量も急激に増加して、支持構造に負担がかかり、ひいては望遠鏡全体の重量増加につながり製造価格に影響を及ぼす。言葉をかえれば、鏡の軽量化は望遠鏡をコストダウンに導くための重要な手段でもある。

軽量鏡の開発は天文衛星搭載用の望遠鏡として、比較的小型のものが実用化されているが、地上の望遠鏡でも古くはパロマー山の200インチ鏡のハネカム構造に始まり、石英板を融着して作ったホプキンス山のMMT(口径1.8m望遠鏡を6台束ねて、有効口径4.5m鏡として現在活躍を始めた)のエッグクレート式、マウナケア山のUKIRT 3.8m鏡の薄型鏡方式など、各種の重量軽減策が試みられている。

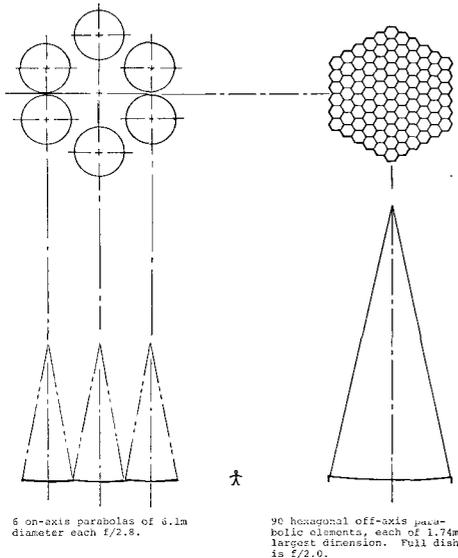


図1 アメリカの15m新技術望遠鏡の光学概略図、左が6台の6.1m鏡を束ねたMMT方式、右が1.74mの小型鏡を90枚並べたSMT方式。

現在アメリカにおいては、キットピーク国立天文台を中心として、アリゾナ大・カリフォルニア大・テキサス大学の機関の協力のもとに、NNTTと呼ばれる15mの新技術望遠鏡開発の準備が進んでいる。口径15m鏡ともなると通常の方法では鏡を作ることが非常に困難であるし、その過大な重量を支持する構造も一筋縄ではいかない。そこで色々な提案が出されて、その中から実現可能な方式として図1に示すような2方式が具体的に検討されている。MMT方式のものは口径6.1m、F比2.8の独立した6台の望遠鏡で集めた光を合成するものであり、既に上述のホプキンス山で活躍中のものが原型としてある。SMT方式と呼ばれているものでは、1.74mの亀甲形の薄い鏡を90枚並べて、F比2.0の1枚の大型放物面鏡として用いる。この計画において技術的難関は、MMT方式では6mもの大型鏡を6枚も作らなくてはならないし、SMT方式では90枚にも及ぶ軸外放物面鏡を作ると共に、1枚の大型鏡として保持するために個々の鏡をコントロールすることである。ここではNNTT計画中の大型鏡製造の有力方法として注目を浴びている、ハネカム構造をもつ鏡の鑄造について紹介したい。

2. ハネカム鏡とは

ハネカム構造をもつ鏡を作るには、鑄造する時に図2で示すような整形したジルコン砂の核を鑄形の中に配列して、ボロシリケートガラス材(パイレックスガラス相当品)を電気炉で1250°C程度に熱する。ガラス材は溶けて流れて核を包み込んで鏡材を形づくる。冷えた鏡材の中の核を、予めあけておいた砂抜穴から圧搾空気を吹き付けてとり除く。すると核の部分が中空となり、一体となった強固で軽い鏡材ができる。砂抜穴は空気の換気

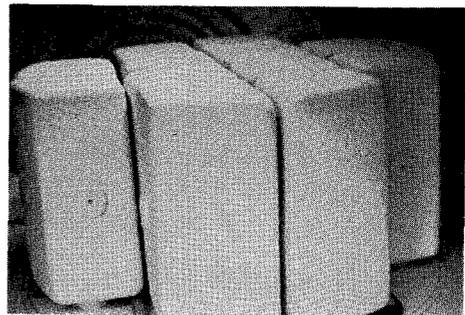


図2 60cmハネカム実験鏡の鑄造に用いられたジルコン砂の核。

* 東京天文台 Takeshi Noguchi: Fabrication of a Honeycomb Mirror Using Borosilicate Glass.

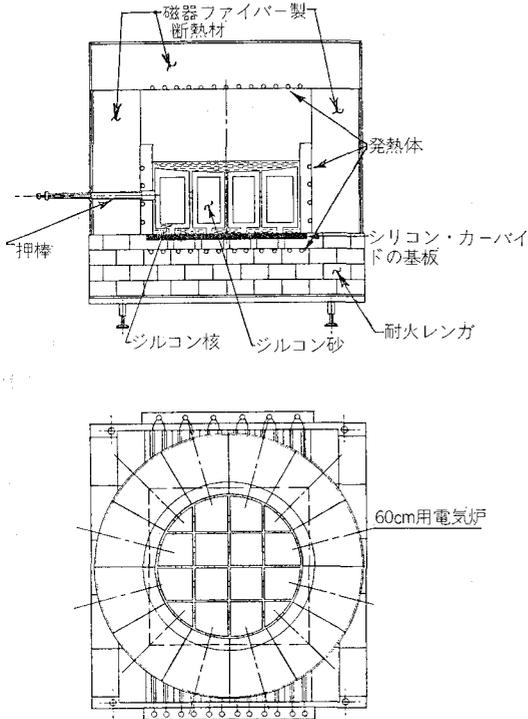


図 3 60 cm ハネカム実験鏡の鑄造に用いられた電気炉の模式図。

口として鏡材の温度変化を短時間で馴染ませるのに役立つ。従って超低熱膨張係数ガラス (ULE, セルビットなど) を使わなくても十分鏡面の熱変形に耐えるものを作ることができる。核を除いた空間部分の占める割合が多いほど軽量化が図れる訳であるが、強固な鏡材を得るためには表面板と底面板の厚さとそれを支えるためのリブ (肋材構造) の強度が必要である。

NNTT 計画の予備調査では、昨年 8 月に口径 60 cm, 鏡厚 33 cm, 表面と底面板の厚さが 2.5 cm, それを支える 6 mm 幅のリブが 14 cm 間隔の井ゲタ状に並んだ構造をもつハネカム鏡を鑄造した。ハネカム鏡の製作実験はアリゾナ大学のロジャー・エンジェル氏が中心となって行われており、図 3 は鑄造に用いられた実験用電気炉の模式図である。筆者らが昨年 11 月中旬にツーソン市を訪れたのと期を同じくして、既に鑄造されていた 60 cm ハネカム鏡はキットピーク天文台の光学工場で研削が行われた。図 4 は研削後まもない 60 cm ハネカム鏡材である。続いて研磨が始まり、12 月中旬には面精度 1/4 波長の球面にまで仕上がった。鏡面検査はヘリウム・ネオンのレーザー・インターフェロメーターを使って、研磨面のフリンジパターンを測定する方式である。このフリンジパターンには、研磨に起因した変形や、熱などの影響により生じ得るリブ構造の様相が見えていない。

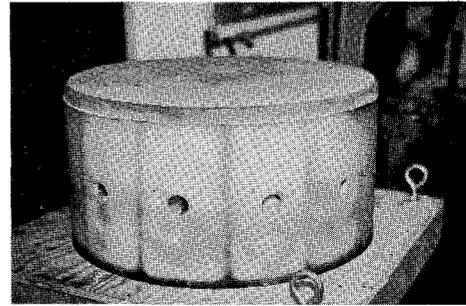


図 4 キットピーク天文台光学工場で研削後まもない 60 cm ハネカム鏡材。

最終研磨 (1/10 波長) に到達する前の話であるが、60 cm ハネカム鏡の鑄造実験は成功を取めたというのがキットピーク天文台での結論であった。

60 cm に引き続いて 1.8 m 鏡を鑄造するための準備が進んでいる。この 1.8 m 鏡はホプキンス山の MMT 中の 1 台と交換して、さらに詳細な光学検査を行う計画である。その結果が良好ならば、6.1 m ハネカム鏡 6 台を束ねた MMT 方式が採用されて、1984 年から NN TT の本計画が実施される。1.8 m 鏡の鑄造に用いられる 2 m 電気炉は 60 cm の経験を生じて改良型のもので作られている。その電気炉はアリゾナ大学の光学工場の一角に設置されており、図 5 はその外観である。鉄骨の

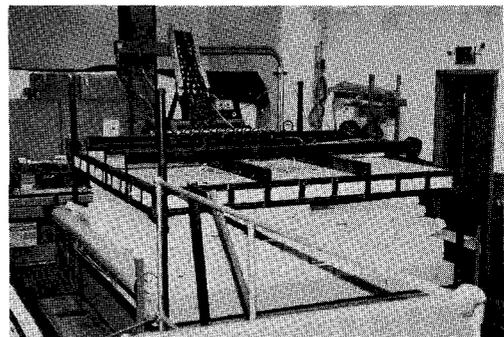


図 5 2 m 電気炉の外観、鉄骨の外枠に支えられた断熱用レンガ壁が見える。



図 6 電気炉内の 90 本にも及ぶ発熱体。

外枠に支えられた断熱用レンガ壁に磁器製ファイバー材による断熱用上蓋を被せる。上蓋の底には測温のために多数のK型サーモカップルが配置されており、図6に示す90本にも及ぶ発熱体を図7の温度制御系で調節して電気炉内の温度を一定に保つ。筆者らが滞在中に、この電気炉で10mの曲率をもつ1.5×1m、鏡厚5cmのサブミリ波用の鏡の一部分が、約2週間で鑄造された。

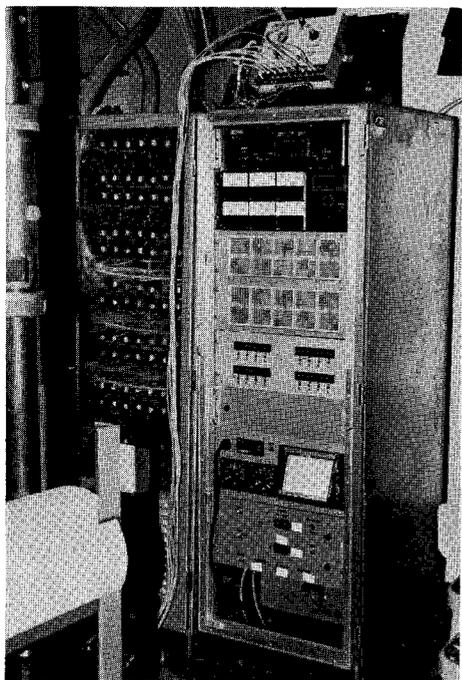


図7 電気炉内の温度を一定に保つための温度制御系。

3. 何故ボロシリケートガラスを用いるのか

ハネカム鏡では表面と底面板をリブで支えている。この表底面板厚とリブの幅をできる限り薄くすることが軽量化の秘訣である。そこで鑄型の中の狭いリブ構造の所へ溶融されたガラス材が流れ込むためには、粘性の比較的低いものが望ましい。ULEなどの超低熱膨張係数材は粘性が高いのでリブを薄くするには不向である。しかもボロシリケートガラスに比べて高価である。そのような理由からボロシリケートガラスがハネカム鑄造に適している。

ハネカム実験の当初用いられていたのは、200インチ鏡の残りの鏡材であった(コーニング社のパイレックス7160)。ところが、このガラスは製造中止となっていて、これに代るものとして熱膨張係数も優れている小原光学硝子社のE6が注目されている。ハネカム鏡を鑄造する時に用いられるガラス材は、その特性が均質であることが望まれる。特に熱膨張係数が部分的に異なるとリブ構

造の熱変形が生じて鏡面を乱す原因になる。そこでE6がもつ熱膨張係数の均質性についての調査を小原光学硝子社に依頼した。熱膨張係数の測定方法としては、押棒式示差熱膨張計法と干渉法の2種がある。これまで小原光学では溶解毎の坩堝から冷却前に採集した試料を押棒式で測定していた。ところが、この方式の測定は100~300°Cの温度域を対象としており、測定精度も悪い。干渉法の場合は測定温度域も-30~70°Cと実用的であり精度も高い。そこで干渉法を用いて溶解坩堝毎及び坩堝内の場所による熱膨張係数の相違などを改めて計測していただいた。試料としては、1968年3月に溶解したのから最近のものまで5溶解坩堝の中の11試料が得られた。それらの測定結果を表1にまとめてみた。

表1 E6の熱膨張係数(干渉法)

溶解坩堝番号	試料数	$\alpha \times 10^{-7} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C}$ (-30~70°C)	屈伏点 (°C)
5058	1	27.94	673
A318624	1*	27.86±0.03†	672
A318687	4	27.94±0.07†	658
A318804	4	27.79±0.14†	668
A318823	1	27.79	

* 測定精度検定のため4回測定した。† 最大誤差

測定精度を知るために調べたA318624の試料は4回測定されて $\pm 0.03 \times 10^{-7} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C}$ の結果が得られた。坩堝内での均質性を知るためには、A318687とA318804の溶解坩堝の中で場所の異なるそれぞれ4試料について測定が行われて、坩堝の均質性としては $0.07 \sim 0.14 \times 10^{-7} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C}$ の結果が得られた。さらに5溶解坩堝中の11試料の測定では最大 $0.4 \times 10^{-7} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C}$ 以内の均質性が確認された。この他にも冷却時の熱履歴の相違による熱膨張係数への影響も測定されて、100°C/日の冷却速度差当り $0.12 \times 10^{-7} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C}$ が得られており、熱履歴の相違が熱膨張係数へさほど影響を及ぼさないことが判った。E6の1回の溶解量は600lであり、これは約1200kgに相当する。従って大きな鏡材は異なる溶解坩堝のものを用いることになる。ハネカム鑄造時に必要な熱膨張係数の均質性は $0.5 \sim 1 \times 10^{-7} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C}$ であり、今回の測定結果によれば坩堝の異なるものも十分安定していることから、大型ハネカム鏡の製作に用いるガラス材に適していると結論できる。

4. 日本で計画中の3m鏡をハネカムで作るとすると

日本で計画が進行中の3m望遠鏡の鏡材をハネカム方式で製作すると、どれだけの軽量化が図れるものかについて試算してみた。概略値を知る意味で試算したので

鏡材は円筒形と考えて、上面は底面板と同じ平面とした。鏡厚に対する口径化は従来の常識通り 1/6 とした。試算に用いた数値を列挙すると、鏡材口径 302 cm・鏡厚 50 cm・表底面板は共に 2.5 cm 厚・リップ幅 6 mm・間隔 15 cm・砂抜穴径 2 cm、で求めた体積に用いるガラスの比重 2.3 を考えて重量とした。その結果；

通常の方式 8,240 kg (115 g/cm²)

ハネカム式 1,480 kg (21 g/cm²)

となり、通常のものに比べて 1/5.5 程度の軽量化が見込まれる。因みに岡山の 188 cm 鏡は 2000 kg、木曾の 150 cm 鏡は 1250 kg であるから、いかに軽量であるかが判る。この場合においても表面と底面板が占める割合は全重量の 55% にも達している。エンジェル氏達は表底面板厚を 10 mm にしたいと考えており、それが可能ならば重量対鏡面積の比が 10 g/cm² となり、全重量もここで試算したもののさらに 1/2 となる。

リップの幅と間隔は表面と底面板を支えるための強度を十分もつことが必要である。NNTT 計画での 1.8 m の場合も 60 cm と同様の構造で設計されている。これはリップ構造が単位面積当りの重量を保持するのに十分な強度をもつと考えれば、口径の拡がりは全体としての撓みにしか影響を及ぼさない。つまり箱状のリップ構造単位で

強固な鏡を作ると考えれば、通常のものと同程度の鏡面を保つことができる。従って 3 m 鏡の場合も同様の構造でよいことになる。アメリカの NNTT 計画では 1.8 m の結果を見て 6.1 m 鏡への応用を考えているので、日本の 3 m 鏡がハネカム鑄造を計画するならば、その結果は中間情報としてアメリカの計画に協力することができる。

ここまでの話はアメリカで実験中のハネカム鑄造の見聞によるものであり、我々自身で考えたり経験したものは少ない。E6 ガラスの特性の調査は、日米協力という観点に立って考える時に、15 m NNTT 計画へ参画できる機会をもつという一面もあり、今後国内においてもハネカム鏡の鑄造実験を試みる必要を感じる。まずはハネカム構造の強度計算を手始めに、3 m 鏡用の電気炉設計のための炉材の吟味、さらにはガラスの再溶解時における脱泡技術、焼鈍温度の適正值を知ることなど色々検討すべき問題はあつた。それらの見通しを立てハネカム鏡の鑄造技術を確立することは、現在進行中の 3 m 鏡計画のみならず、超大型望遠鏡を開発しなければならない折の礎石となるはずである。日本の高い工業技術水準をもってすれば、これらの問題を解決するだけの能力はある。

訂正

7月号の小暮智一氏記事「イラク国立天文台の建設計画」中の脚註「Tomoichi Kogure」を「Tomokazu Kogure」

と訂正し、お詫び致します。

同月号、豆辞典「V.S.O.P.」において、「Bretagnon 女史」を「Bretagnon 氏」に、「予稿集、B14」を「予稿集、A14」にそれぞれ訂正致します。

1982年5月の太陽黒点 (g, f) (東京天文台)

1	—	—	6	5,	35	11	5,	41	16	6,	43	21	10,	66	26	9,	94	
2	6,	34	7	6,	58	12	7,	37	17	8,	48	22	12,	64	27	9,	134	
3	3,	34	8	11,	66	13	11,	35	18	11,	51	23	9,	88	28	10,	114	
4	5,	47	9	7,	69	14	—	—	19	11,	58	24	10,	89	29	9,	101	
5	4,	48	10	3,	49	15	6,	21	20	—	—	25	8,	92	30	5,	52	
(相対数月平均値: 99.4)																31	—	—

昭和57年7月20日	発行人	〒181 東京都三鷹市東京天文台内	社団法人 日本天文学会
印刷発行	印刷所	〒162 東京都新宿区早稲田鶴巻町251	啓文堂 松本印刷
定価 300 円	発行所	〒181 東京都三鷹市東京天文台内	社団法人 日本天文学会
		電話 三鷹 31 局 (0422-31) 1359	振替口座 東京 6-1 3 5 9 5