

天文学へのガラス材料・素子の応用 [1]

岸井 貫 千葉工業大学 付属研究所 教授

Tōru KISHII

問合せ/ キシイ トオル (自宅) 〒 168 東京都杉並区高井戸東 3-14-11 Tel 03-3329-3537

連載予定

- 1. 天文学と光, 電波, 通信 本号
- 2. 光学望遠鏡
 - 2.1 屈折望遠鏡
 - 2.2 反射望遠鏡 6月号
- 3. シュミットカメラ 7月号
- 4. 能動型補償光学系
- 5. 多天体同時観測装置
- 6. 宇宙用光通信器
- 7. 電波天文学への応用
 - 7.1 電波望遠鏡
 - 7.2 電波 (ミリ波) 干渉計とヘリオグラフ
 - 7.3 長基線干渉計
- 8. X線望遠鏡 8月号
- 9. 光学用窓, 放射線用窓, フィルター
- 10. レーザージャイロスコープ
- 11. 宇宙線により生ずる「空気シャワー」の研究
- 12. ニュートリノ (中性微子) 観測系
- 13. おわりに

1 天文学と光・電波・通信

天文学は電波から遠赤外線・可視光線・紫外線・X線を含みガンマ線までの電磁波を観測するようになり, また望遠鏡は地上だけでなく地球周回人工衛星・惑星探査衛星に搭載されて使われるようになった. このような事情に対応して, 材料も高性能のもの多種が構造用・機能用に選択・使用されている. 本稿ではガラスを主として記すが, ガラスと同じまたは関連した用途に使われる結晶化ガラス・セラミックス・結晶・プラスチックにも触れる.

シリコンの CCD 画像センサーが発達し, 近赤外線から X 線までの波長域での画像を得られるようになった¹⁾⁻⁸⁾. 遠赤外線用画像センサーも開発が終わりかけているように思われる²⁾. 画像はデジタルデータとして遠方に伝達し, あるいは画像処理を加え, データベースに蓄積することができるようになった. 地上および衛星上の望遠鏡を遠方から精密に制御・操作することも普通になった.

シリコン CCD センサーの量子効率 (資料により 60% ないし 100%) は写真のそれ (同 2% ないし数%) よりも高いので, 光量がそれだけ増大したのと同じ効果がある. また X 線の場合には, 1 光子が 1 画素中に発生させた電子数が光子エネルギーに比例するので, エネルギー・

スペクトルを撮ることができる⁷⁾。

天文学はこれらの技術を取り入れて発展して来た。既設の天文台でも同様に時代とともに性能が向上してきた例が多い。

2 光学望遠鏡

2.1 屈折望遠鏡⁹⁾

天文学の初期の観察はガラスレンズを使った屈折望遠鏡から始まった。天体の実像を長焦点の対物凸レンズで作り、これを接眼レンズで拡大するのが原理である。

屈折望遠鏡最大のもは約 100 年前に作られたリック天文台 (91cm ϕ) とヤーキース天文台 (102cm ϕ) のもので、現在でも使われている。歴史的には 125cm ϕ のものが作られた。これ以上の大型化はガラス素材の入手の難しさと、レンズの厚さが増し光吸収が増加することのために実現していない。

(1) 対物レンズ用ガラスの特性

ガラスの屈折率が光の波長によって違う (屈折率の分散) ので、星の光は一点には集まらず、拡がりを持ち色づいた像になる (図 1)。望遠鏡の対物レンズの焦点距

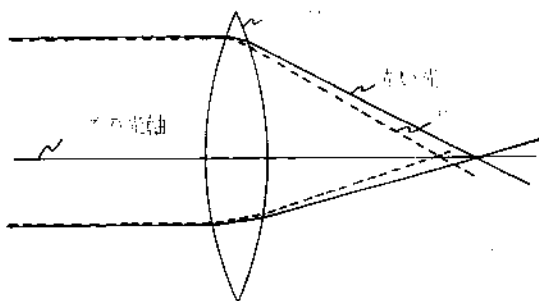


図 1 星の光の波長による対物凸レンズ焦点の違い

離は長いので、色による焦点の違いが目立つ。

ガラスの一般的傾向として、屈折率が高いガラスは屈折率分散も大きい。高屈折・高分散ガラス (フリントガラス) の凹レンズと低屈折・低分散ガラス (クラウンガラス) の凸レンズとを組み合わせ、全体として凸レンズになるよう設計して各色に対する焦点を狭い範囲に集め (「色消し」) られる (図 2)。

計算の例を次に示す。

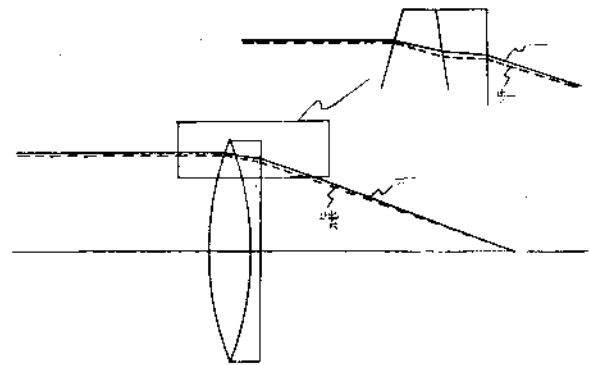


図 2 低屈折・低分散凸レンズ (1) と高屈折・高分散凹レンズ (2) との組み合わせによる色消しレンズ

兩種ガラスとも波長-屈折率関係が一次式で表される場合は、非常に良い色消し状態に出来る (図 3)。

一般には波長-屈折率関係はもっと高次の多項式である。フリントガラスが二次式、クラウンガラスが一次式の間接を持っていると、二つの波長での焦点距離を一致させ得る (図 4)。フリントガラスが三次式の間接を持っていると三つの波長での焦点距離を一致させうる (図 5)。もっと色消しを良くするには第三のガラスを組み合わせる必要がある。

色消しを良くするには、第一次の焦点位置差 (色収差) が小さいように低分散ガラスが必要であり、次に波長-屈折率関係の非直線性が適合した高屈折率ガラスと組み合わせることが必要で、さらに残った色収差を消すためには通常ガラスとは屈折率/分散特性や波長/分散特性が違うガラスがあると都合が良い。

(2) 光学ガラスの屈折率-分散関係

光学用ガラスの波長-屈折率特性を記述するために波長の標準として使われるスペクトル線の一部を表 1 に掲げる。ガラスの屈折率と分散とで分類し打点すると図 6

表 1 光学ガラスの特性表示に使われるスペクトル線

スペクトル線	A'	C	d	F	h	i
光源元素	K	H	He	H	Hg	Hg
波長 (nm)	768	656	588	486	405	365
色	赤	赤	黄	青	紫	紫外

の様な図形になる¹⁰⁾。この図では縦軸は d 線 (ヘリウム

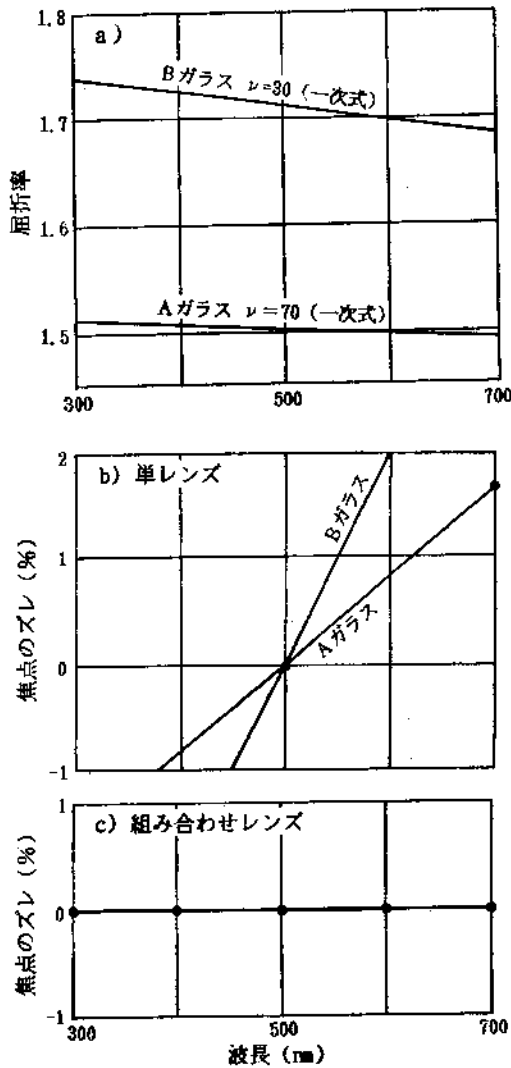


図3 色消しレンズの設計:二つのガラスの分散がともに波長の一次式で表される場合
 a) 低屈折・低分散ガラス(A ガラス)と高屈折・高分散ガラス(B ガラス)の波長-屈折率関係
 b) 単レンズを作ったときの波長-焦点距離変化の関係
 c) 色消し組み合わせレンズを設計した場合の波長-焦点距離関係

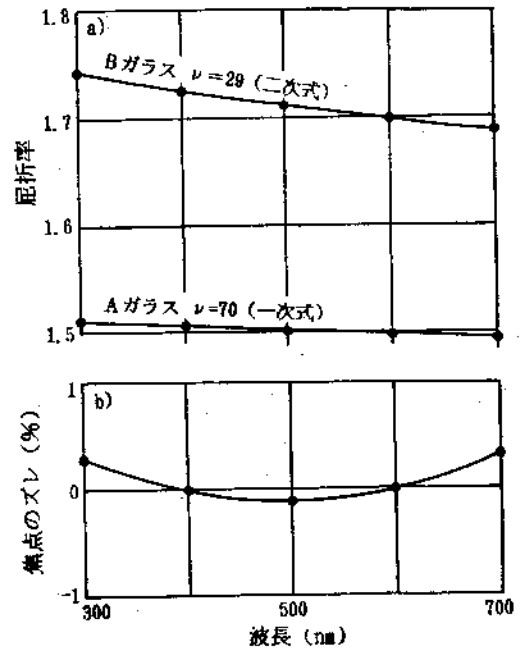


図4 色消しレンズの設計:ガラスの波長-屈折率関係が一方は1次式,他方は2次式で表される場合
 a) ガラスの波長-屈折率関係
 b) 色消し組み合わせレンズを設計した場合の波長-焦点距離変化関係

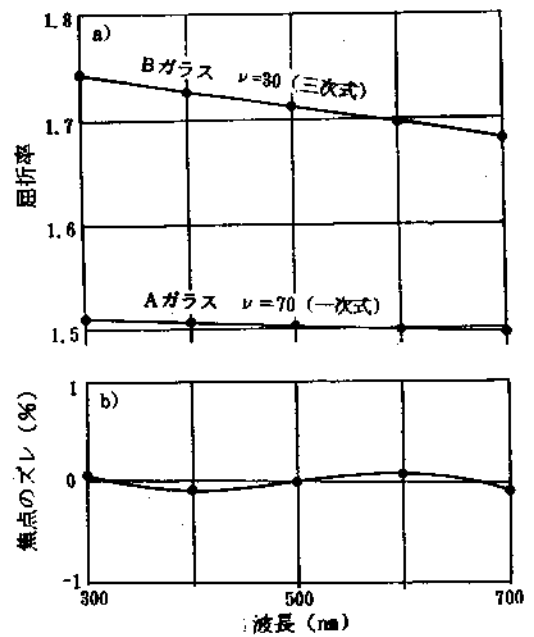


図5 色消しレンズの設計:ガラスの波長-屈折率関係が一方は1次式,他方は3次式で表される場合
 a) ガラスの波長-屈折率関係
 b) 色消し組み合わせレンズを設計した場合の波長-焦点距離変化関係

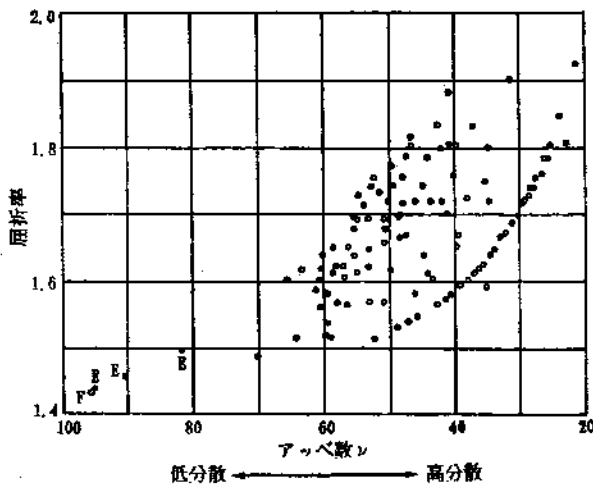


図6 光学ガラスのアッペ数-屈折率関係 株式会社オハラ資料による。図中の E は ED ガラス、F は蛍石である。

の黄線。波長 588nm) に対する屈折率 n_d 、横軸は F 線 (水素の青線。波長 486nm) と C 線 (水素の赤線。波長 656nm) に対する屈折率の差 (分散) を使ったアッペ数

$$\nu = (n_d - 1) / (n_F - n_C)$$

を採っている。

点は日本地図の様な形に分布する¹⁰⁾。ここから「日本列島」に沿って「東北-南西」方向に配列する二種のガラスを選んでレンズを 2 枚作り組み合わせれば、前記のように少なくとも二つの波長の光で焦点を合致させられる。さらに良好な色消しには「列島」から離れた位置にある第三のガラスが望まれる。

次に天体の像の拡大率まで一致させるために、低屈折・高分散ガラスと高屈折・低分散ガラスとを組み合わせることも必要である。それには「列島」を横切る線に沿ってガラスを選ぶ必要がある。このためにも「列島」から離れた位置に相当するガラスがあると、レンズ設計の自由度が増える。さらに、長波長域の分散/短波長域の分散の比が通常の光学ガラスと違う (異常分散) もがあれば、さらに都合が良い。

古い光学ガラスは窓用板ガラス (クラウンガラス。ソーダー-石灰-シリカガラス。名前は手吹きで板ガラス

を作る「クラウン法」から来た。)・エタガラス (フリントガラス。鉛-アルカリ-シリカガラス。純度の高いシリカ質原料として珪石 (火打ち石=フリント) を使用した。) の組成を引き継いでいたが、化学工業の発達に伴いホウ酸・希土類酸化物・リン酸・酸化ニオブ・酸化タンタル・酸化チタン・フッ素などが順次ガラス成分に導入されて、ガラスの光学特性の幅を拡げ、レンズ設計に貢献して来た。

(3) 低屈折率ガラスと蛍石

最近の発展として蛍石 (CaF_2) の人工単結晶¹⁰⁾と「ED ガラス」¹²⁾の対物レンズへの導入がある。

蛍石はガラスに比べて屈折率・分散がともに小さいことを特徴としているので、これを凸レンズにすると、ガラスの凹レンズと組み合わせると性能が良い色消し対物レンズを設計できる。現状では大きさは 150mm までである。

蛍石と同様に低屈折・低分散を目的として作られた光学ガラスがあり、「ED ガラス」として中型屈折望遠鏡に多く使われる。「ED」の意味には「超低分散」と「異常分散」の二つの解釈があるが、ED ガラスはこの二つの性質を同時に持っている。蛍石と特性がほとんど同じものまでも作られている。(例: オハラ S-FPL ガラス。図 6 参照。シヨット FK ガラス)。

光学ガラスの分散を波長域ごとに調べた結果を図 7 に示す。短波長域 (水銀の紫色、h 線と水銀の藍色、g 線との間) の分散と長波長域 (水素の赤線、C 線とカリウムの近赤外線、A' 線との間) の分散をそれぞれ $(n_F - n_C)$ で割ったもの (比分散。図 8) を見ると、ED ガラスの比分散は、普通のガラスの傾向を外挿した値よりも短波長では大きく、長波長では小さいという意味の異常性がある。

低屈折や低分散ではない「異常屈折ガラス」もあり、シヨット社のカタログでは短波長域での分散の大・小に対応して「Lg」・「Kz」の符号で表される。オハラ社には BPH8 (シヨット社 KzFS8 に相当する) がある。

低屈折ガラスは双眼鏡用対物レンズ、カメラ用望遠レンズにも適用される。大型望遠鏡でピントの合う画角範囲を拡げるための副光学系としても有効であるとして検討されている (「すばる望遠鏡 (後記)」の例)⁴⁾。

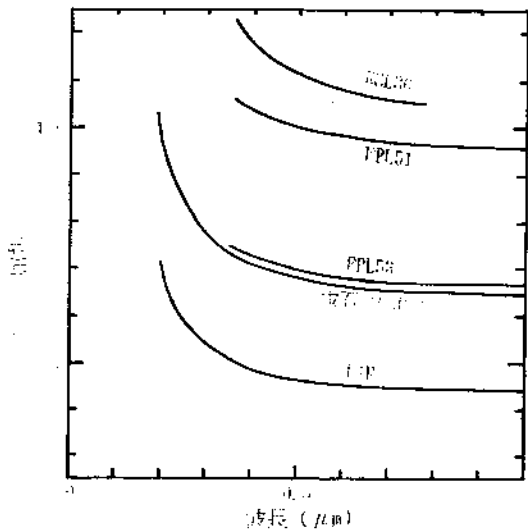


図7 光学用結晶(蛍石 CaF_2 と LiF)、ED ガラス (FPL51, FPL53) の波長-屈折率関係。NSL36 は比較のための非 ED 型ガラス。(オハラ社および応用光研の資料による)

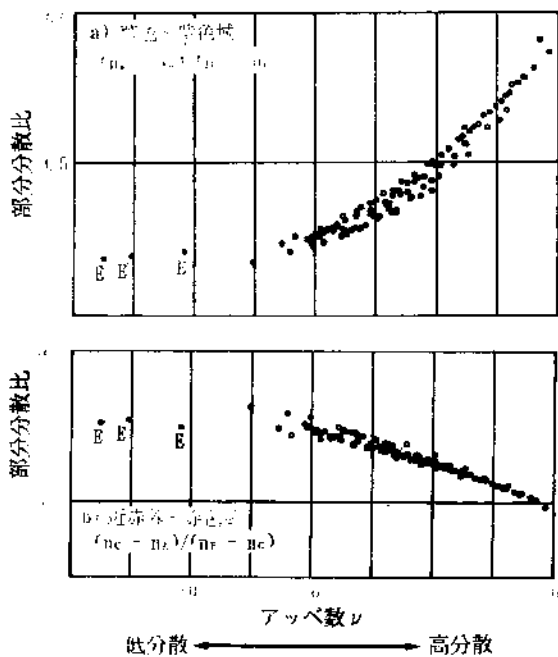


図8 光学ガラスの a) アッベ数-短波長域の部分分散関係及び b) アッベ数-長波長域の部分分散関係, E は ED ガラスを示す。(オハラ社の資料による。)

[参考文献]

- 1) 須藤 靖, 科学朝日, 1992年8月号 p.43
- 2) 浜部 勝也, 他, 天文月報, 88 [8] 341 (1995)
- 3) 山下 卓也, 天文月報, 88 [5] 206 (1995)
- 4) 上野 宗孝, 天文月報, 88 [9] 399 (1995)

天文学へのガラス材料・素子の応用[2]

岸井 貫 千葉工業大学 付属研究所 教授

Tōru KISHII

問合せ/ キシイ トオル (自宅)

〒 168 東京都杉並区高井戸東 3-14-11

Tel 03-3329-3537

2.2 反射望遠鏡¹³⁾⁻¹⁴⁾

反射式天体望遠鏡は星の光を凹面鏡で一点に集め結像させる。凹面を回転放物面にすると光軸に平行に入射した星の光は厳密に一点に集まる (図9)。反射鏡は材料

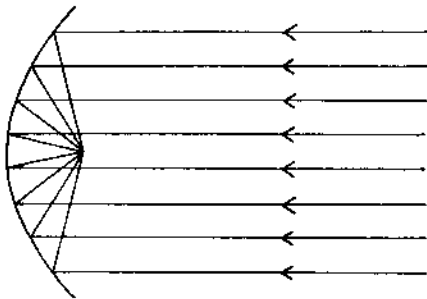


図9 平行光線が凹面鏡により一点に集まる状況

の光学特性の均一度はレンズの場合に比べれば要求が緩いし、大型化に伴う光吸収増加もないと言う利点がある。

(1) 高性能化と大口径化

反射鏡の直径が大きいほど大量の星の光を集めて、遠方・微光の天体まで観測できる。また星像の分解能が上がり (表2)、天体の微構造まで研究できるはずなので、大型の物が徐々に開発されてきたが、最近はその開発の速度が高まり、同時に設置台数が急増している¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。

現在では望遠鏡の高性能化が、1) 人形の単一鏡面をつくる、2) 複数の小型鏡面の集積で大形鏡面と同じ性能を

表2 望遠鏡の口径と理論的角度分解能

口径 cm	分解能 角度(秒)
10	1
100	0.1
300	0.03
1000	0.01

実現する、3) 複数の同型望遠鏡の像データを総合 (干渉計として使用または像データの加算) する、の三つの方法でそれぞれ進められている (表3)¹⁷⁾。かつては、4) 同設計のものを近づけて配置し、共通の焦点へ光学的に光を集める方法も検討された¹⁸⁾。同設計の複数の望遠鏡の場合には、近接して設置される場合と南北両半球にそれぞれ設置される場合とがある。

単一鏡面の大型化の例は日本の国立天文台の「すばる望遠鏡」(8.2mφ、ハワイ島に建設中、後記) とヨーロッパ南天天文台の8mφ鏡(4基建設中、後記)がある。複数の鏡集積の例は「ケック望遠鏡」(ハワイ島、1.8mφ鏡のモザイク型集積により実効的に11mφの鏡面を得ている)がある。複数設置の例はケック・ヨーロッパ南天・ジェミニである。ジェミニは南北両半球にそれぞれ置か

表3 大型望遠鏡プロジェクト (ショット日本社 芦野 豊氏による¹⁷⁾)

ガラス	名称・ 略称・ 愛称	口径・ 実効径 (m)	設置場所	完成・ 完成予定・ 一台目完成	鏡面体	台数
E6	MMT upgrade	6.5m	アリゾナ	1996	シングル ハニカム	1
E6	マゼラン	6.5m	チリ	1997	シングル ハニカム	1
E6	LBT	8m	アリゾナ	1998	シングル ハニカム	2
ゼロデュア	HET	10m	テキサス	1996	セグメント	1
ゼロデュア	ケック	10m	ハワイ	1993	セグメント	2
ゼロデュア	VLT	8m	チリ	1997	シングル メニスカス	4
ULE	ジェミニ	8m	ハワイ/チリ	1999	シングル メニスカス	2
ULE	すばる	8m	ハワイ	1998	シングル メニスカス	1

- 注) シングル : 単一鏡面
セグメント : 小型鏡面の集積・複合
ハニカム : 高剛性・軽量化のため裏面を蜂の巣状にする。
メニスカス : 薄い曲面板状、弾性変形し易いが保持法の工夫で形を精密に保つ。
MMT upgrade : アリゾナ大ほか、以前のMMT(複数鏡を持つ望遠鏡のプロジェクト)の機能向上版
マゼラン : カーネギー研ほか
LBT : 伊・米ほか
HET : ペンシルバニア州立大ほか
ケック : カリフォルニア大ほか
VLT : ヨーロッパ南天天文台
ジェミニ : 英米ほか数カ国
すばる : 日本国立天文台

れる。

(2) 軽量化・低膨張化

望遠鏡は天文学でのX線用・紫外用・彗星探査用のほか、資源・海洋・気象用などのためにも人工衛星に搭載されるものが多くなった。この場合には軽量化とともに日射の急変への対策としての低膨張化が必要である。軽量化のために鏡材鑄込み時に形成するハニカム構造、削り込みによる軽量構造(図10a)、封着・接着によるハニカム構造(図10b)や「エッグクレート」構造(後出図18)などの方法が適用される。

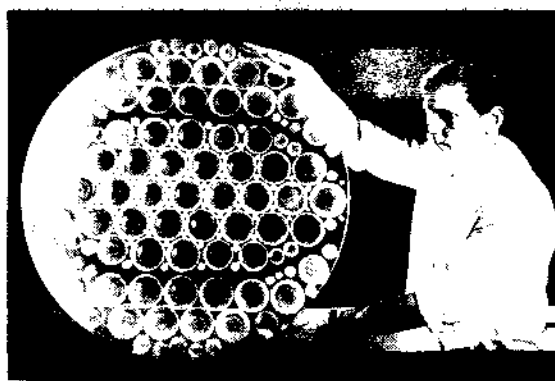
寿命が有限な人工衛星に搭載する望遠鏡用の需要のため、中・小型の望遠鏡の工業的生産体制ができてきた。

(3) 鏡の材質

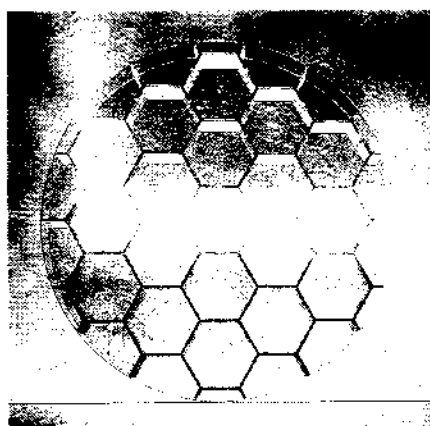
2.5mφ鏡までは板ガラス類似の材料を使用していたが、戦後に5mφ鏡がホウケイ酸ガラス(米国コーニング社のパイレックス®)を使って完成した。これを超える大形化は最近まで永く完成しなかったが、望遠鏡の別の面での高性能化(鏡面形状の保持など)を目的として熱膨張係数の小さいガラスを使った3.5mφクラスのものも多く作られた。

熱膨張係数の小さい材料には、ガラスには石英ガラスと酸化チタン含有シリカガラス(ULE: ユーエルイーまたはウレトウムULETM®、「極低膨張望遠鏡材料」の意味)があり、結晶化ガラスにはゼロデュア®・セルビット®がある。

素材ガラスの熱膨張曲線を図11に示す。



a)



b)

図10 軽量化された鏡面素材

a) 削り込みによる軽量化

b) 封着により作られたハニカム鏡

(ショット日本社のご厚意による)

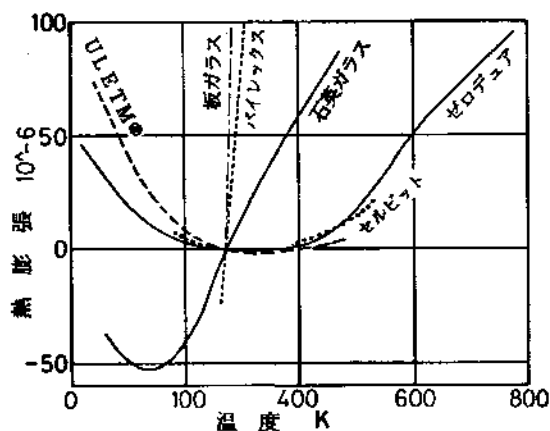


図11 反射望遠鏡用鏡材ガラスの熱膨張曲線

低膨張ガラスの熱膨張係数は他の材料の熱膨張係数に比べて極めて小さいので、示差式膨張計では意味のある測定ができない。測定には光の干渉現象を利用し、膨張の標準物質を使わず、干渉系を真空中に置いて光波長を一定に保つ、という条件が必要であり、特に精度を高めるにはさらに単一モード発振・波長安定化レーザー光源を使うことも必要になる。日本ではJIS R3251「低膨張ガラスのレーザー干渉法による線膨張率の測定方法」がフィゾーの干渉計と二重光路式マイケルソン干渉計とを、工業的に実用性のある膨張測定法として規定している。

最近の6~10mφの望遠鏡のプロジェクトは、素材とその製造技術を含めて多くの新技術を取り入れている(表3)。これらの多くはULEまたはゼロデュアを使うが、一方ではオハラ社のE6ホウケイ酸ガラスを鋳込んで6mφ鏡を作るプロジェクトが進められ、これら3種のガラスが並行して採用されている。

(4) 鏡材の製造工程

結晶化ガラスは、ガラスを溶解してから素材の形に鋳込み、次に結晶化のための熱処理をする。石英(シリカ鉱物)–ユークリプタイト(酸化リチウム–アルミナ–シリカ系の鉱物)固溶体が析出して、その負膨張特性が母相ガラスの正膨張特性を打ち消して、全体としてゼロ膨張になる。

結晶化ガラス鏡材としては、ドイツのショット社が「ゼロデュア[®]」を生産している。「セルビット[®]」(米国オウエンズ・イリノイ社)は多くの実績を持つが、製造を中止している。

ULEは四塩化ケイ素とチタン化合物の混合気体を酸素とともに燃焼反応させ、生成物を化学蒸着・集積する方法でガラス素材にする。小型の素材を作ってから集め炉内で軟化させて互いに融着させ大型素材にすることができる。化学成分は酸化チタン7.5%–シリカ92.5%である。

E6ガラスのプロジェクトでは、カレットを購入して型に詰め、加熱・軟化させて成形する。型にはハニカム構造を作るための多孔質ブロックも取り付けられている。

大口径主鏡ではFナンバー(焦点距離/口径の比)を小さく設計するので、曲率が大きくて深く曲がり込んだ形になる。素材自体を曲面にしないと研削・除去する体

連載

積が大きくて材料も工程も無駄なので、その対策が工夫された。

E6ガラスとゼロデュア素材ガラスとの場合には、ガラスを鑄込むときに型を毎分数回で回転し、流体状のガラスを遠心力で曲面形に保ったまま冷やして固める。

ULEガラスでは平面形の素材を作ってから耐火物製の曲面型の上で加熱し、軟化変形させて曲面形の板にする。

中・小型の反射鏡材にはホウケイ酸ガラス（コーニング社：パイレックス[®]とショット社：デュラン[®]）を使うことが多い。

(5) 光学系の高度化

回転放物面では、入射光が光軸と角度を持つと像が急激に悪くなるるので、使用できる視野が狭い。この点を改良するために、もう一つの鏡面（副鏡）や（副鏡＋レンズ）系と組み合わせて使う設計が数多く工夫され、そのために大型望遠鏡の主鏡の多くは回転放物面を僅かに補整した形を採用している。

副鏡はガラス・結晶化ガラスなどの他に、観測に使う波長域によってはシリコンカーバイドやファインセラミックスで作る例がある。

巨大な反射鏡を持つ望遠鏡では、設計段階で集光力・高解像度のいずれかに重点を置く場合がある¹⁶⁾。

(6) 巨大径化の過程とガラス素材

終戦時までの最大の反射望遠鏡はウィルソン山（ロサンジェルス付近）の2.5mφのフッカー望遠鏡であった（1917年）。これは「青板ガラス（性質は板ガラスに近い）」を素材としていた⁵⁾（図12）。この天文台の取り付け道路建設には日本人達の参加があった（図13）。

当時としては特に大型・大重量の望遠鏡を星の日周運動に同期して滑らかに動かすために架台（赤道儀）に工夫があった。約25年前に赤道儀がコンピューター制御に更新された。クリスマス・イブを除き昼間は一般見学者を受け入れていた。

しかしその後には使用中止の期間があったようで、1995年末に使用を「再開」したとの報道があった。

観測できる距離は5億光年（1光年＝光が1年間に進む距離）と言われ、ここでの研究が、銀河星雲が地球か



図12 ウィルソン山2.5mφ望遠鏡



図13 ウィルソン山天文台への取り付け道路の工事
「120人の頑丈な日本人が他のワーカーとともに筋肉のパワーと爆発性のパウダーにより、小径を拡張した。1906年夏に始まった作業は1907年5月にワゴンを通せるようになって完了した。」
ウィルソン山天文台資料展示室

ら遠ざかりつつあることを見いだして「膨張宇宙論」の始まりとなった。

その次に、より遠くの銀河星雲の観測のためにパロマ山（ロサンジェルス南方）の5mφが計画され、1948年に完成した（図14.「ヘイル望遠鏡」）。10億光年ま

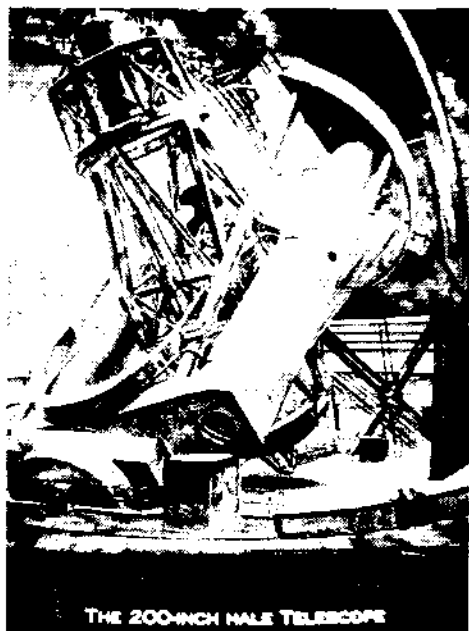


図14 パロマ山5m(200インチ)φヘイル望遠鏡 ウィルソン山天文台資料展示室

で（現在の資料では80億光年まで）の銀河星雲を観察でき、他方でアンドロメダ星雲（距離200万光年）中の恒星を分解できた。素材はパイレックス®ガラスであった。ウィルソン山との二つの天文台での研究により、「膨張宇宙論」が確立した。

程なく旧ソビエト連邦でパイレックス類似のガラスを使った6m鏡が作られた。これは後に極低膨張の結晶化ガラスに取り替えられた。

1960年に当時の日本最大のものとして建設された岡山天体観測所の1.8mφ鏡もパイレックス材で、英国グラブ・パーソンズ社が研磨した。平成8年当時でも日本最大である。

昭和30年代に大阪工業技術試験所（現、大阪工業技術研究所）で、大型（2mφ）望遠鏡用ガラス素材の成形と、シュミットカメラ（天体用広角写真機、後記）の設計について集中的に研究が行われた¹⁹⁾。その項に電気単位系の精密決定のための標準インダクタンスを作るプロ

ジェクトがあり、巻き線ボビン用として研究されていた膨張係数 $26 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ のホウケイ酸ガラスが選ばれた。小型の場合は坩堝から（図15）、大形の場合はタンク炉

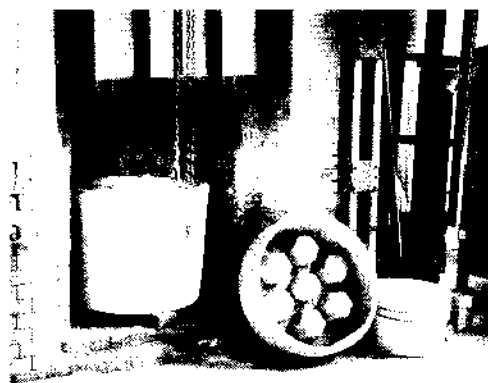


図15 ガラス溶解用坩堝とハニカム形素材用鑄型 大阪工業技術試験所（現・大阪工業技術研究所）

から耐火物製の型へガラスを鑄込み、軽量ハニカム形の素材にした。1/3、2/3倍の大きさの製品を順々に作りながら経験を積み、最終的に泡のない2mφの製品を得た（図16）。小型の製品は岡山観測所や京都・花山天文台



図16 試作された2mφおよび小型のガラス素材（図15・16は大阪工業技術研究所及び同所 山下博志 光機能材料部長（写真）のご厚意による）

のシュミットカメラを作るのに充てられた。

(7) ゼロ膨張素材の望遠鏡¹⁵⁾

1) 純石英ガラス製の例

- ヨーロッパ南天天文台3.6mφ鏡（チリ所在、ガラスはコーニング社製）
- アリゾナ大学2.5mφ鏡（チリ所在）

連載

- ウィリアム・ハーシェル望遠鏡4.2mφ鏡 (カナリヤ諸島)
- MMT (表3のMMT upgradeの前段階で実行されたプロジェクト. 複数の鏡を使う系である) 1.8mφ鏡6個による実効4.5mφの望遠鏡 (アリゾナ所在)

2) セルビット製の例

- カナダ-フランス-ハワイ3.6mφ望遠鏡 (ハワイ島所在)
- 英国 3.8mφ赤外線望遠鏡 (ハワイ島所在)
- オーストラリア サイディングスプリングス3.8mφ鏡
- インター・アメリカン4mφ鏡 (チリ所在)

など多数

3) ゼロデュア製の例

- ドイツ-スペイン天文台2.2mφ鏡 (スペイン所在)
- マックス・プランク研究所3.5mφ鏡 (スペイン所在)
- ヨーロッパ南天天文台3.6mφ鏡 (図17 (チリ所在))
- ケック望遠鏡 (表2, ハワイ島)

など3.5mφ級のものが多く作られた。

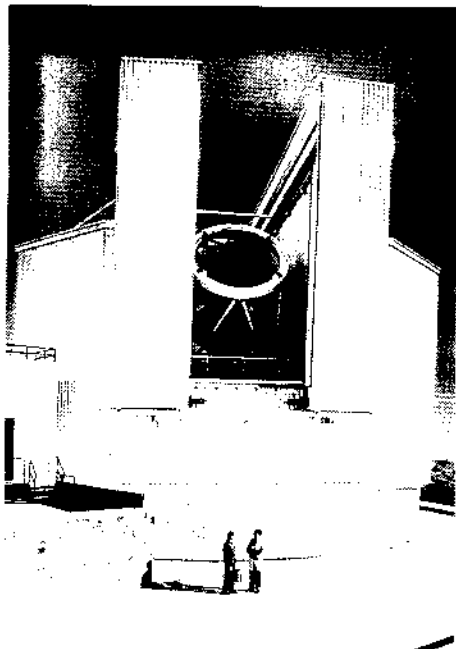


図17 ゼロデュア3.5mφ鏡を入れるヨーロッパ南天天文台 (チリ所在) (ショット日本社のご厚意による)

日本の公共施設に納入された中型の例として鳥取県佐治村「さじアストロパーク」のゼロデュア製1mφ鏡がある。

4) ULE製のもの

- ヨーロッパ南天天文台の4mφ鏡²⁰⁾
- ハッブル宇宙望遠鏡の2.4mφ鏡

(8) ハッブル宇宙望遠鏡

ハッブルは遠方にある銀河星雲・星雲団の距離-後退速度関係を調べ、宇宙膨張論を唱えた天文学者である。「ハッブル宇宙望遠鏡」は直径2.4mの反射鏡を持つ望遠鏡を人工衛星に乗せ、大気による揺動とボケのない尖鋭な像を得る目的で開発された。1990年に打ち上げられ、当初は収差補正系の不備や組み立て誤差などによりピントが甘かったが、スペース・シャトルを使つての修理²¹⁾を経て、現在はその性能を発揮している。[1982年の資料 (Am. Ceram. Soc. Bull, 1982年11月号, 図18) により記す]

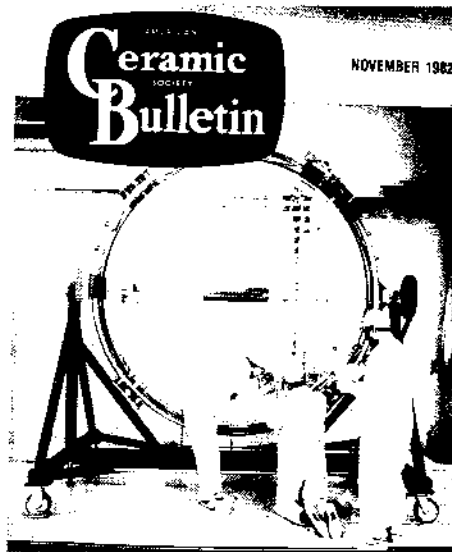


図18 米国セラミック協会のセラミック・ビュレティン誌1982年11月号表紙。ハッブル望遠鏡用ULE2.4mφ主鏡の検査作業 格子形は接着された「エッグクレート」形保持台である (米国セラミック協会のご厚意による)

地上の5mφ鏡 (例: パロマ山「ハイル望遠鏡」) に比べて40倍の分解能で7倍まで遠く見通すと予想された。恒星に伴っている惑星の検出・準星 (「クエーザー」, 遠方で莫大なエネルギーを主として電波, 一部を光として

放出している銀河星雲と推定される。)の正体の解明・白色矮星/褐色矮星/中性子星/ブラックホールの研究・宇宙起源論などの課題を持っている。

主鏡は重さ900kgでULEガラスであり、数片に分けて作り炉中で融着して大型素材にしてから研磨に回した。パーキン・エルマー社が研磨を担当する。球面→回転放物面→最終高精度研磨面の順序に磨いて行く。最終研磨は無重力場を模した130点支持の状態で行われ、干渉計で検査しながらコンピューター制御で2nm以下の誤差に磨き上げる。アルミニウム65nmとMgF₂25nmを蒸着して反射面にする。

30cmφの副鏡はゼロデュアで作られ、二つの放物面の組み合わせの形である。これは拡大鏡の役目をするので、高い面精度が必要である。

望遠鏡保持部はカーボンファイバー強化エポキシ樹脂で作られ、その熱膨張はレーザー干渉式膨張計で測られ、対策が施される。

最近にブラックホール(の候補)や形成中の恒星の像などが次々に発表された。

主鏡の製作の経験が日本の「すばる望遠鏡(後記)」の製作に伝えられていると感ずる。

(9) すばる望遠鏡²⁰⁾, 22-24) (図19)

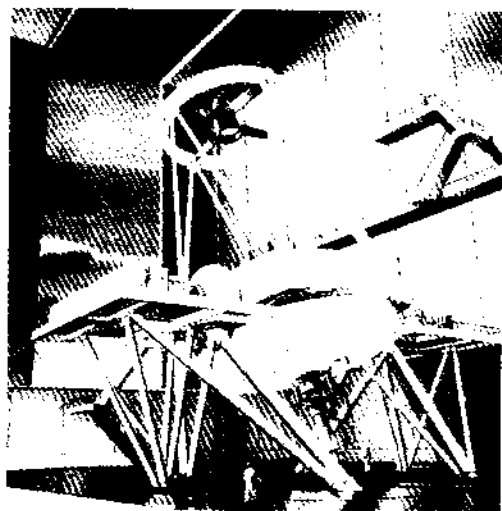


図19 すばる望遠鏡の完成予想図(図19・20は国立天文台すばる室のご厚意による)

国立天文台がハワイ島のマウナ・ケア山上に建設するもので、ULEの8.2mφ鏡を米国で研磨中である(図

20) . 反射面は回転放物面に近い近似回転双曲面に設計



図20 すばる望遠鏡用主鏡の加工工程。凸面側(裏側)を加工している

されている。

100億光年の距離にある天体の観測を目標としている。素材は厚さ20cm、重量20トン以上で、厚さは直径に比べて薄いので全体として焼み易い。圧電素子を組み込んだ多数の支持体で鏡を支え、鏡の姿勢に関係なく正しい鏡面を実現する。また大気の揺動による星像の揺がりを鏡面形状の実時間変化で防ぐ補償光学系(後記)が適用される。

ガラスは多数の六角形の部分に分けて作られてから、寄せ合わせて加熱・融着して一体のものにした。次に上に凸の形をした耐火物製の型の上に置き、加熱・軟化させて曲面板とし、研削加工を始めた。

波長0.3μmないし30μmの波長範囲の光で観測する。遠距離の天体からの光は波長が伸びている(赤方偏移)ので、赤外線域での性能を特に高くするように計画された。赤外線波長域での「すばる」の性能を予備実験で確認するためにULE製1.6mφ望遠鏡も作られた⁶⁾。これは口径の点では岡山のものに次ぎ日本第二のものである(同口径の赤外線用望遠鏡が運輸省通信総合研究所にある)。

すばる望遠鏡は4000mを超える高所にあるので、居住性の面から、管理・運用の多くの部分を山の麓と中腹にある管理所から遠隔操作で行う。²⁵⁾このために光通信ケーブルを使うシステムが備えられているのが好都合である。ハワイ・マウイ島ハレアカラ山に設けられる東大の2mφ望遠鏡(1997年完成予定)でも同じである。この場合は日本からの遠隔操作・運用が予定されている。

(10)「ケック望遠鏡」^{16),26)}

ハワイ島で「すばる」に隣り合う所にある。2台建設する計画で1台は1991年に部分的に完成し、所期の性能を示した。この結果を確認して2台目のものが製作されている(図21)。これらの間の間隔は85mである。36



図21 2台のケック望遠鏡が完成したときの天文台(手前の二つ。ハワイ島マウナ・ケア山頂)の想像図(図21, 23, 24, 25はショット日本社のご厚意による)

枚のゼロデュア六角鏡を組み合わせて実効11mφの鏡とする。鏡の傾角と相対位置がセンサーで検出され、これらを正しい関係に保つよう電磁力で位置決めされる(図22)。

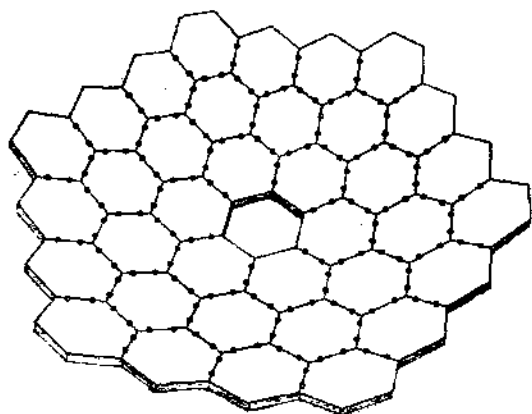


図22 36枚の六角鏡の集積による実効10mφ鏡の概念図。相互位置センサーの位置を小丸で示す

1号機はアルミニウムめっき、2号機は赤外線域を目的として銀めっきされる。――

(11) ヨーロッパ南天天文台

8mφ鏡4台を建設する計画である。ゼロデュア鏡材は8.4mφ、44tのガラスとして回転(毎分6回転)する金

型に鑄込まれ(図23)曲面板素材になる。1台目の素材

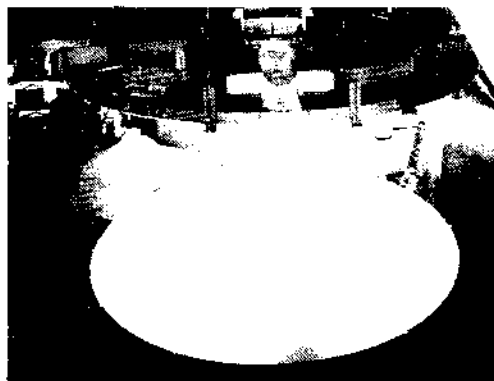


図23 ゼロデュア8φ鏡の素材ガラスの鑄込み

は1991年に鑄込まれた。初期の機械的加工→結晶化熱処理→後期・最終加工を経て上鏡になる(図24,25)。



図24 ゼロデュア8mφ鏡の加工工程

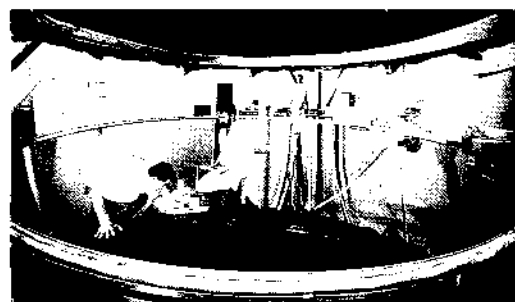


図25 ゼロデュア8mφ鏡の研磨面の検査

[参考文献]

- 5) 田中 好一, 天文月報 89[3]111(1996)
- 6) 田中 済, 天文月報, 88[9]426(1995)
- 7) 田原 謙 他, 天文月報, 88[6]264(1995)
- 8) 清水 敏文, 天文月報, 88[7]316(1995)
- 9) 吉田 正太郎, “望遠鏡光学・屈折編”, 誠文堂新光社(1992)

- 10) 株式会社 オハラ, 「OHARA OPTICAL GLASS」
- 11) 応用光研, カタログ
- 12) 文献9), p.144
- 13) 吉田 正太郎, “望遠鏡光学・反射編”, 誠文堂新光社 (1992)
- 14) 山下 康正 “反射望遠鏡”, 東大出版会(1992)
- 15) 吉田 正太郎, “大望遠鏡の時代(1981); 巨大望遠鏡への道”, 誠文堂新光社(1995)
- 16) C.S.ハウエル, 日経サイエンス, 1992年2月号 p.94
- 17) 芦野 豊, 平成6年度ニューガラス産業対策調査研究報告書, ニューガラスフォーラム
- 18) R.ラーナー著, 小尾 信弥 他訳, “図説 天文学における望遠鏡の歴史”, 朝倉書店(1984)
- 19) 大阪工業技術試験所50年史, p.190,374(1967)
- 20) 安藤 裕康, 天文月報 87[8]348(1994)
- 21) 傳田 紀代美, 天文月報 87[5]207(1994)
- 22) *O plus E*, No.143, すばる一大望遠鏡計画の全貌 特集, 1991年10月
- 23) 文献14), p.362
- 24) 天文ガイド, すばる望遠鏡の全容 特集, 1996年2月
- 25) 沼澤 茂美, 天文ガイド, 1996年2月号 p.116
- 26) M.B.Murrill 他, *Schott Information* 英語版, No.60, p.12(1991)
- 27) A.Schweitzer, *Schott Information* 日本語版, No.5, p.12(1994)
- 28) P.Lanoy, *Schott Information* 英語版, No.76, p.16(1995)

天文学へのガラス材料・素子の応用 [3]

岸井 貫 千葉工業大学 付属研究所 教授

Toru KISHII

問合せ/ キシイ トオル (自宅) 〒168 東京都杉並区高井戸東 3-14-11 Tel 03-3329-3537

3 シュミット・カメラ²⁹⁾

望遠鏡が高解像度で微光天体を観察することを目的にするのに対して、広い範囲の天体を短時間に写真撮影し、研究すべき天体を拾い出す目的に使われるのが「シュミット・カメラ」である。結像面 (= 感光面) を球面にして広い角度範囲で尖鋭な天体像を得る (図 26)。

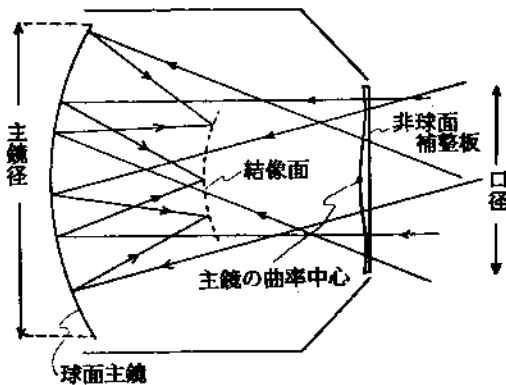


図 26 シュミット・カメラの光学系

シュミット・カメラも大口径で集光力が大きいことが望ましいが、球面鏡を使うという設計上の制約もあって、現状では最大主鏡径は望遠鏡の鏡径に比べて小さい。

シュミット・カメラは屈折系と球面鏡との組み合わせである。現在の世界最大のものは口径 134cm、主鏡径 200cm である。補整板には大型素材を得られる光学ガ

ラスが選ばれる (BK7 など)。写真に良く感ずる可視光の短波長域や近紫外線を良く通す UBK7 を使う場合も多い。遠紫外線も利用したいときには石英ガラスが使われる。

主鏡の材質はバイレックスまたはその類似ガラスのことが多い。東京大学木曾観測所のもは世界第 4 の大きさ (口径 105cm, 主鏡径 150cm) であり、主鏡にセルピットを使った (図 27)³⁰⁾。

4 能動型補償光学系¹⁰⁾

大型望遠鏡の場合に解像度が悪くなる原因の一つは、大気の変動による光のちらつきである。これの対策としてちらつきに伴う光波面の乱れを副光学系の変形により補償する考えがある (図 28)。像の全体的な移動を補償する系と波面の形を平面に戻す系とが結合されている。

1991 年現在で「すばる望遠鏡」について次の二つの案が検討されていた^{31),32)}。

- 1) 基盤と補償用鏡との間に多数の圧電素子を入れた構造である。波面の乱れが実時間で測定され、これを補償するように圧電素子群に電圧を配分する、および
- 2) 薄板状の圧電素子の一面を鏡とし、これに分割電極をつけて各部分ごとにバイメタル型の変形を起こさせる、というものである。



図 27 東京大学理学部天文学教育研究センター木曾観測所の口径 100cm シュミット・カメラ (右上はドーム中のシュミット・カメラ) 同観測所の撮影・ご厚意による

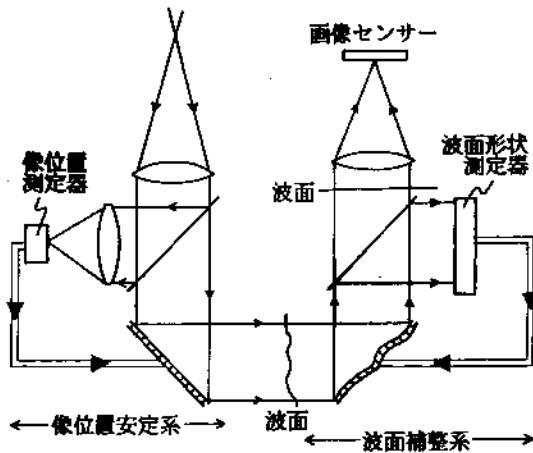


図 28 能動型補償光学系の概念図^{31),32)}

1996 年には、薄板ガラスの裏面に 36 個の圧電素子を貼り付けたものを鏡とした光学系が通信総合研究所で実験されていた³³⁾。補償光学系によるピントの向上効果が実証された。これはすばる望遠鏡だけでなく、地上-衛星間高速光通信でのギガビット・レート伝送にも利用される計画である。

5 多天体同時観察装置^{2),34)}

銀河星雲団のように銀河星雲が数百個集まった天体がある。個々の星雲が我々から遠ざかる速度を測り、星雲への距離、速度の統計的特徴、星雲団内の構造などを知りたいとする。各星雲の速度は星雲の光をスペクトル分解することで得られるが、そのためには星雲ごとに大口径望遠鏡での長い露光時間が必要である。

望遠鏡の焦点面で、個々の星雲の実像から光ファイバーで分光計へ光を導き、数十個の星雲のスペクトルの記録を一回の露光で終えてしまう装置が計画されている(図 29)。

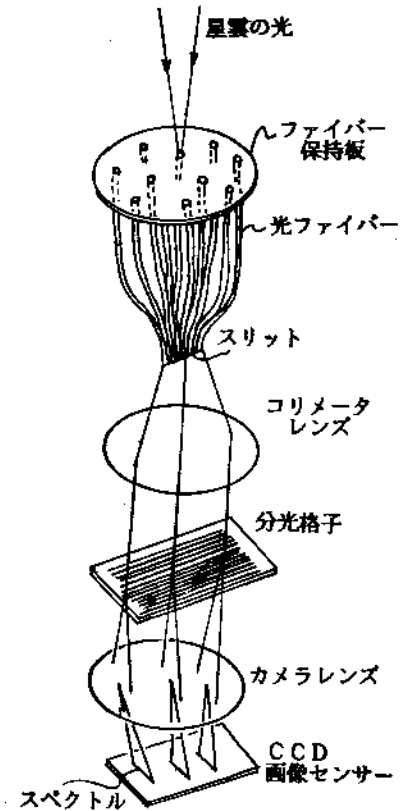


図 29 多天体同時分光器の原理図³⁴⁾

全天をデジタル記録する計画があり、そのためには 320 本のファイバーを使った装置 2 個が使用される予定である。

6 宇宙用光通信器³⁵⁾

地上-人工衛星間または人工衛星-人工衛星間で光通信をするには、光をできるだけ平行光束にして送らなけれ

ばならない。光源・光学系部品の相対位置が狂わないことを要する。

径 250mm の主鏡を持つ光学系で、主鏡-副鏡間の距離は厚さ 1.9mm の外筒をスペーサーとして $\pm 2\mu\text{m}$ の精度で保たれる。主鏡・副鏡・外筒はゼロデュア[®]で造られた。電波通信に比べて通信速度大・エネルギー束の集中度が高い・装置が軽いという利点がある。

7 電波天文学への応用^(36),37)

電波を放射している天体は太陽を始め幾種類もある。これらの電波を観測して電波発生の機構を始めとして関連する研究をするのが電波天文学である。オーストラリア・サイディングスプリングスの 3.9m ϕ 光学望遠鏡を電波望遠鏡に使用して、波長 2.6mm の CO 分子のスペクトル線を初めて捕らえたという例もあった。

日本には野辺山に国立天文台・宇宙電波観測所があり、45m ϕ 電波望遠鏡 (図 30)・電波干渉計 (図 31)・電



図 30 国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 45m ϕ 電波望遠鏡

波ヘリオグラフ (図 32) の三つが設備されている。

7.1 電波望遠鏡

電波をパラボラアンテナで集め、その時間的変化・周波数分布などを解析する。拡がりのある天体に対して



図 31 ミリ波干渉計のアンテナのうちの 3 個を示す (一番右側のは背景の 45m ϕ 鏡と重なって見える。見学会の状況である)



図 32 電波ヘリオグラフのアンテナ群 (左半遠景)

は、アンテナで走査して電波源の形と強度分布を決める (マッピング) 方法も使われる。周波数 115GHz (波長 2.6mm) の電波では分解能は角度で 11 秒である。

45m ϕ 鏡 (パラボラ・アンテナ) は姿勢に拘わらず放物面の形を保持するように設計されている。そのために鏡面を軽く作る必要があり、アルミニウム製ハニカム板の両面にガラス繊維強化樹脂を貼り付けたもので構成された。これは熱膨張係数が小さくて、温度による形のゆがみが小さいことでも有利であった。

この鏡はミリ波を集めるために放物面の形の誤差として 0.25mm 以下が必要とされた。700 個のガラスコーナークューブを鏡面上に配置し、中心部から半導体レーザー光を送って距離を自動的に測る方法で精度を確認し

また保持している。0.18mmの精度を得た。

電波は二酸化テルルの単結晶を音響光学素子に使った装置で周波数スペクトル分析されている。素子の一端にニオブ酸リチウムの圧電素子が貼り付けられており、これに天体からの電波信号を印加すると、単結晶内を弾性波が通過する。弾性波内の張力/圧力はテルル内の光学的な粗密波を伴い、結晶は光学回折格子として働く(図33)。レーザー光を粗密波の進行方向に直角に通過させ

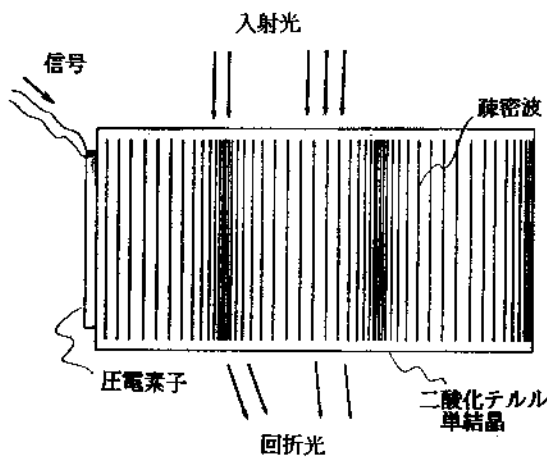


図33 電気音響式電波スペクトル分光器の原理

ると、粗密波の空間的周期により格子を通過する光は進路を曲げられる。曲がる角度は信号の周波数によるし、複数の周波数が共存してもそれぞれに対応する回折光が生ずる。回折光をラインセンサーで受けて回折角を知り、実時間でハード的にスペクトル分解できる。音響光学素子としてはガラスでも水でもよいけれども、性能を検討した結果二酸化テルルが選ばれた(図34)。

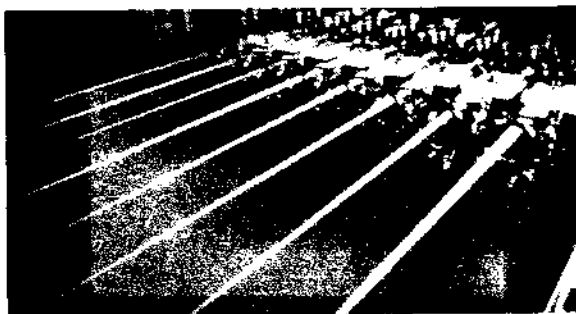


図34 大型電気音響式電波分光器(図34,35は国立天文台 野辺山宇宙電波観測所のご厚意による)

7.2 電波(ミリ波)干渉計とヘリオグラフ

電波の波長が光に比べて長い為、大型の電波望遠鏡でも空間的分解能が光学望遠鏡に劣る場合が多い。これを補うために、複数のアンテナを広い領域に分散させて、それらが拾う信号の間の時間的相関を計算・交換・総合して、空間的分解能を高めるとともに、拡がりのある電波源内の電波強度分布を決める技術が電波干渉計である。

野辺山の電波干渉計は10mφのパラボラアンテナ5台の組み合わせで、115GHzで角度分解能1秒を得た。1994年4月に6素子化し、このセットでの試験観測に成功している³⁸⁾。

ヘリオグラフは太陽面観察を目的とした電波干渉計で、84個のアンテナで構成された。波長1.7cm、周波数17GHzの電波を使って観測し、角度分解能10秒で毎秒20枚の像を得ている。

アンテナ-解析装置間の信号伝達時間がいずれのアンテナについても電波波長の1/10相当よりも良い精度で知られている必要がある。このような目的のための信号伝達用に、ヘリオグラフでは光ファイバーケーブルが使用された^{39),40)}。温度変化による信号伝達時間の変化が特に小さいケーブルを選んでおり、伝送可能帯域が広い、周波数による伝送損失の変化が小さい、など性能面の利点の他に、ファイバーケーブルが細くて軽いことも多数のケーブルの敷設に有利であり、又アンテナが太陽の日周運動を追う時にもケーブルが容易に撓んで追従する。すべての光ファイバーの長さは30cm以内の差で一定にされ、ケーブルダクトは1日中の温度変化0.1°C以下に保たれかつ温度が測定されて、信号伝達時間が補正される。ケーブル長さの伸縮は60μm以内である。太陽面の電波源の分布が表示される(図35)。

アンテナの副鏡はファインセラミックスに金の薄膜を貼り付けた構造を持ち、これで周波数選択性を得ている(図36)³⁹⁾。

電波干渉計でもケーブルを光ファイバーのものに交換する予定がある⁴¹⁾。

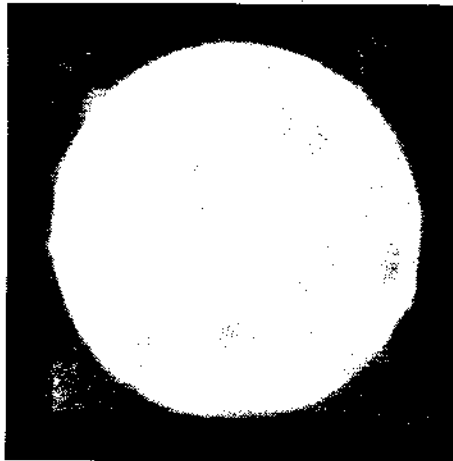


図 35 電波ヘリオグラフの信号処理・画像処理によって得られた太陽面の電波源分布



図 36 電波ヘリオグラフ用アンテナの模型(左)とアンテナ用セラミック副鏡 セラミックス・フェアの展示

7.3 長基線干渉計

前記のように干渉計の空間分解能は角度で数秒くらいである。しかしアンテナの分布範囲を 2km にすると 300GHz で 0.1 秒 (月の視直径の 1/18000 に相当する) に達するとの試算がある⁴²⁾。アンテナの配置の範囲が長く広いほど干渉計の分解能が上がる。遠距離にあるアンテナの間で干渉させるものが長基線干渉計または超長基線干渉計である。

野辺山にあった 6mφ電波望遠鏡が鹿児島大学へ移設され⁴³⁾て、野辺山の 45mφ鏡、岩手県水沢の 10mφ鏡^{44),45)}、通信総合研究所鹿島 34mφ鏡⁴⁶⁾と組んで長基線電波干渉計 (VLBI) としても働く。36GHz(波長

8.5mm)~850GHz(波長 0.35m) の電波を 2GHz の帯域幅ごとに 5~7GHz の中間周波数に変換して、上部機器室から光ファイバーで観測室へ送る。これが電波望遠鏡に光ファイバーを使った初めての例である⁴³⁾。野辺山 45mφ鏡の信号伝達にも現在の同軸ケーブルを光ファイバーケーブルに換える計画がある⁴¹⁾。

この干渉計は測時・測地・地球回転測定などに光学望遠鏡よりも数十倍の高い精度が得られ、地球流体核運動の研究にも役立つ^{44),45)}。

[参考文献]

- 29) 吉田 正太郎, 文献 13) p.111
- 30) 石田 恵一, 天文月報 87 [8] 340 (1994)
- 31) 高見 秀樹, 文献 22) p.90
- 32) 家 正則, 1992 年第 23 回画像工学コンファレンス
- 33) 板部 敏和, シンポジウム 96 明日をめざす科学技術 平成 8 年 2 月 26 日
- 34) 前原 秀夫, 星座と望遠鏡 P.150(昭 61) 丸善
- 35) H.J.Juraneck, Schott Information 英語版 no.76 p.3 (1995)
- 36) 海部 宣男, 電波望遠鏡をつくる (1986) 大月書店
- 37) 躍進する電波天文学 特集 星の手帳, vol.59 (1993)
- 38) 1996 年度理科年表によれば 6 台である。
- 39) 西尾 正則, 天文月報 84 [5] 156 (1991)
- 40) 内村 直之, 科学朝日 1992 年 8 月号 p.147
- 41) 野辺山宇宙電波観測所のご教示による。
- 42) 中井 直正, 天文月報 86 [12] 515 (1993)
- 43) 面高 俊宏, 天文月報 86 [11] 484 (1993)
- 44) 亀谷 収, 天文月報 88 [12] 500 (1995)
- 45) 真鍋 西二, 科学朝日 1996 年 3 月号 p.104
- 46) 三好 真, 天文月報 89 [1] 11 (1996)

連載◆

天文学へのガラス材料・素子の応用[4]

岸井 貫 千葉工業大学 付属研究所 教授

Toru KISHII

問合せ/ キシイ トオル (自宅) 〒168 東京都杉並区高井戸東 3-14-11 Tel 03-3329-3537, Fax 03-3329-3890

8.X線望遠鏡

X線は大気を透過しないから、X線望遠鏡は人工衛星に搭載される(図37)。X線は屈折しないで物質を透過

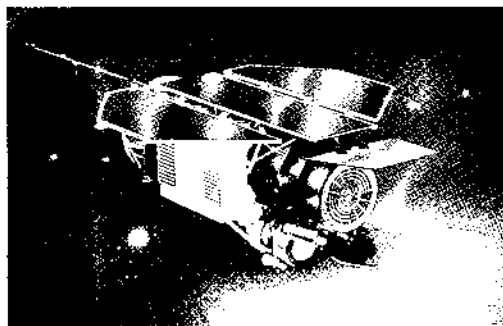


図37 X線望遠鏡を載せた人工衛星のイラスト

図37・40・41・43はショット日本社のご厚意による。

するので、レンズや普通の形の反射鏡を作れない。物質の表面にすれすれの角度で入射するときには全反射を起こすので、このことを利用すると反射鏡が作れる⁴⁷⁾。

単一回転放物面による反射鏡(図38)や、これに共焦点関係にある回転双曲面を組み合わせたもの(図39)がX線顕微鏡用に研究された。X線天文学ではそれらを流用している。一面だけでは捕捉できるX線束が少ないので、多数の鏡を同心的に重ねている(図38・40)。

ゼロデュア(図41)やULEで精密に作ると解像度の

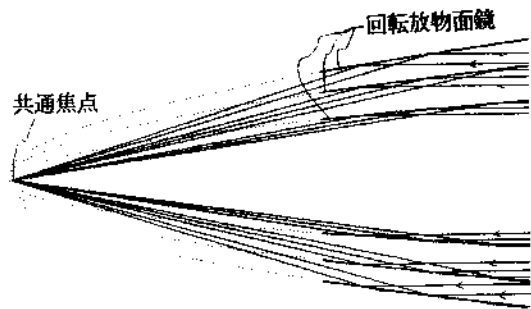


図38 複数の回転放物面鏡によるX線用撮像系

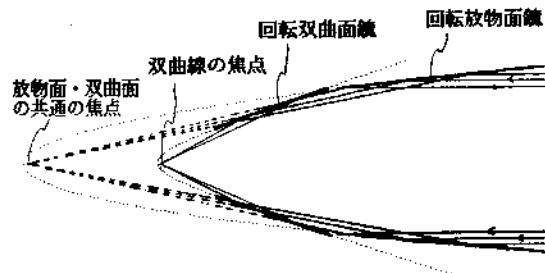


図39 共通焦点を持つ回転放物面と回転双曲面を組み合わせたX線用撮像系

高い望遠鏡になる。しかし組み込める枚数が少なくてX線束の利用率が小さい。型を使ってエポキシまたはアクリル樹脂で薄く成形し、反射面に金を蒸着したものは、解像度は落ちるが120枚を組み合わせたことができ、効率が上がる。エポキシ成形のときには、反射面はガラス

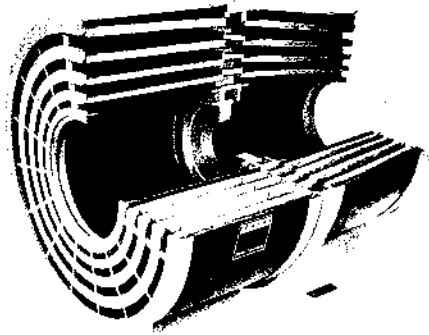


図40 X線用撮像系のカット・モデルのイラスト



図41 X線用ゼロ重力鏡面の加工

製の型によって形成される^{48)~50)}。

日本のX線天文衛星「あすか」は4台の望遠鏡を搭載し、10keVのエネルギーのX線による観測をする。スペクトル分析もできる⁴⁹⁾。

9. 光学用窓・放射線用窓・フィルター

宇宙に漂う微塵が集積を始めて恒星や恒星/惑星系を作る。この過程では塵が原始星の光を散乱したり、光で暖められて赤外線を放射したりする。散乱光は入射方向/射出方向の間に関係に応じた偏光性を示す。塵が磁場の影響で異方的に配列している所を通過した光は偏光になる⁵¹⁾。シンクロトロン放射の機構で発生した光は偏光である。これらの研究に偏光度の観察が必要である。

コーニングガラス社がガラス質の偏光フィルター（ポーラコア®）を販売している。ガラス内に異方的

に配列した粒子を析出させた微構造をもつもので、有効な光の波長範囲は740~1550nmであり、偏光度には500:1,1000:1, 10000:1の三つのグレードがある⁵²⁾。

現在はヨードキノン分子を合成樹脂膜に異方的に吸着させた「ポラロイド」型偏光板も使用されている⁵³⁾。

軟X線による太陽観測用の天文衛星「陽光」では、画像をシリコンCCDセンサーで得ている。金属板とガラスフィルターとをターゲット式に組み合わせてセンサーの前に置き、切り換えて太陽面の軟X線像と可視光像とをほぼ同時に撮影して比較できる⁸⁾。

紫外線用光学系の窓としてフッ化リチウム(LiF)の人工結晶¹¹⁾や石英ガラスが使われる。X線用画像センサーの一つである撮像式ガス蛍光比例計数管はX線→電子→放電→紫外線→光電子増倍管の経路でX線を検出する。その経路中に石英ガラスが使われる⁴⁸⁾。

10. レーザー・ジャイロスコープ⁵⁴⁾

人工衛星打ち上げ用ロケットには姿勢・進路の制御用にレーザー・ジャイロスコープが搭載される。レーザー光を二つに分け、閉曲線光路内を互いに逆方向に進めて再び合致させると、二つの光の間の位相差が閉曲線経路の回転に伴い変化する。位相差変化速度が回転速度に、位相差が回転角度に比例する。位相差は干渉縞の移動で表現でき計数される。

この原理のままでは感度が不十分（例：1hr当たり角度1度の回転速度で光路差 10^{-11} m）なので、光路を光ファイバーの多重巻きで作ると 18° s^{-1} 当たり $0.2\mu\text{m}$ の感度になる。閉光路内でレーザー発振させ、互いに反対方向に進む二つの光を作り、光路を廻ってから結合させる（図42）と、角度1秒の回転が干渉縞1個の移動に対応するくらいになる。

レーザー・ジャイロスコープの実現には、使用を続けても発振条件や光路の長さが変わらないことが必要であり、さらにヘリウムが透過で失われることの無い材質が求められる。この理由で熱膨張係数が小さいゼロ重力製の光学系が使われる（図43）。

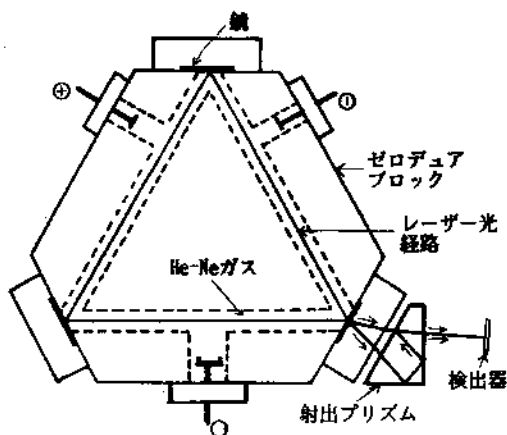


図42 閉光路内にレーザー発振器を持つレーザー・ジャイロスコープの構造⁵⁴⁾

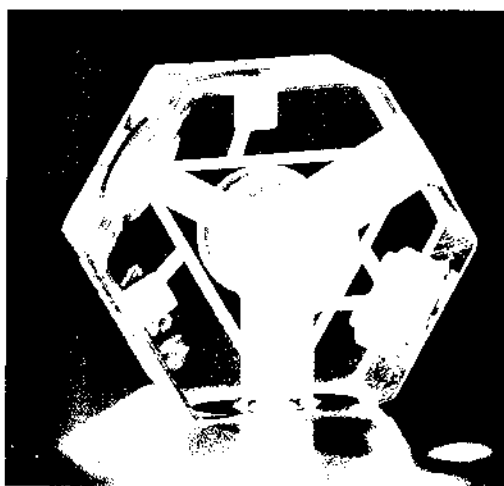


図43 ゼロデュア製レーザー・ジャイロスコープの光路部品

11. 「宇宙線による空気シャワー」の研究⁵⁵⁾

「宇宙線」は地球外から入射して来る原子核粒子（大部分は陽子である）であり、非常に高いエネルギー（例えばプレー中のテニスボール程度）を持つものがある。この起源や高エネルギーまで加速される機構は明確には知られていない。頻度分布はエネルギーが高いほど小さいが、エネルギーの上限の有無についても結論がでない。現在では 10^{20} eV以上の範囲が問題にされている。また

高エネルギー粒子が入射すると、上空大気中の分子との衝突でネズミ算式に帯電粒子を増やして「空気シャワー」

を生ずる。地上の広域に多数のセンサー（例：シンチレーター・放電箱など）を配置し、同時に検出された入射事象を解析する（図44）。センサーに入った粒子エネ

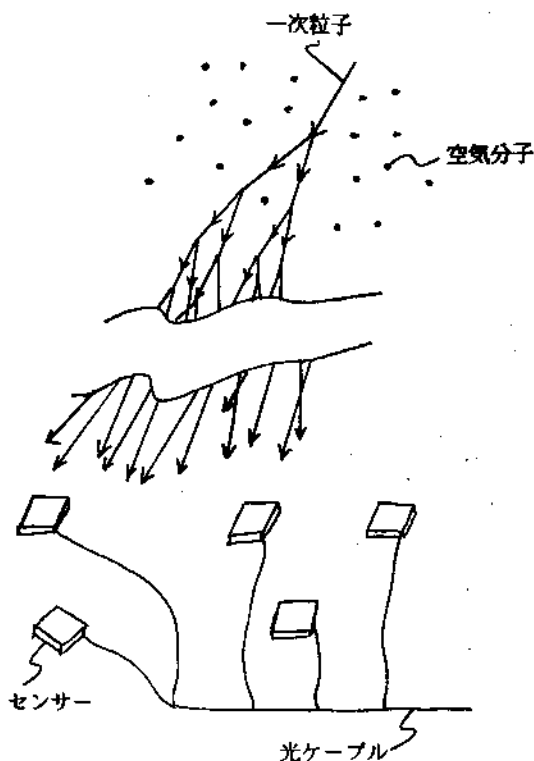


図44 宇宙線により発生する空気シャワーの説明図

ルギーの全量から入射した一次粒子のエネルギーが推定され、センサー間の粒子到達時間の差から一次粒子の入射角度・方向が決まる。

頻度の小さい高エネルギーシャワーを統計に必要な回数だけ観察するために広い観察装置系が必要である。

起源が銀河系外であると、高エネルギー一次粒子の入射方向は起源天体の推定に役立つ。入射方向の算定にセンサー間での入射時刻の差が必要である。これは電波干渉計の場合と全く同じであり、光ファイバーを使う利点大きい。その上に広い野外に露出して敷設しても、信号が落雷の影響を受けない。

東京大学宇宙線研究所は山梨県・明野を始め数市町村にまたがる 100km^2 の設備を持ち研究を続けている（図45）。センサーの敷設域は $1 \rightarrow 20 \rightarrow 100\text{km}^2$ とスケールアップされてきた。 20km^2 の時から光ケーブルが使用された。この系ではシャワーの到達時刻を測るための時刻標準信号も中央制御所から光ケーブルで配られ、この信

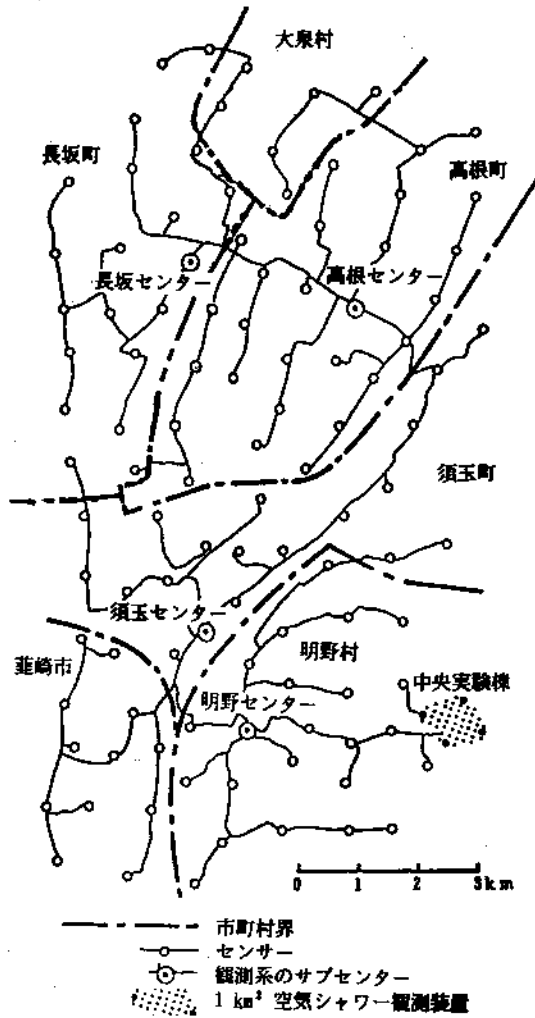


図45 東京大学宇宙線研究所明野観測所の観測系

図45・46は 永野 元彦 明野観測所長および三省堂パリティ編集部のご厚意による。

号が送り返えされるまでの時間により信号伝達時間が監視される。使用されたケーブルの全長は130km、ファイバーは50 μ m ϕ の屈折率勾配型多モードのコアを持ち、毎秒10Mビットで信号が交換されている。

今後のスケールアップでは衛星通信を使う必要があると予想している。1993年に 2×10^{20} eVの一次粒子によるシャワーを観測した。ここで得られた宇宙線のエネルギースペクトルは、超高エネルギー域だけは観測回数が少なく不確かさがあるが、他の部分は標準データとして各国で使用されている(図46)。

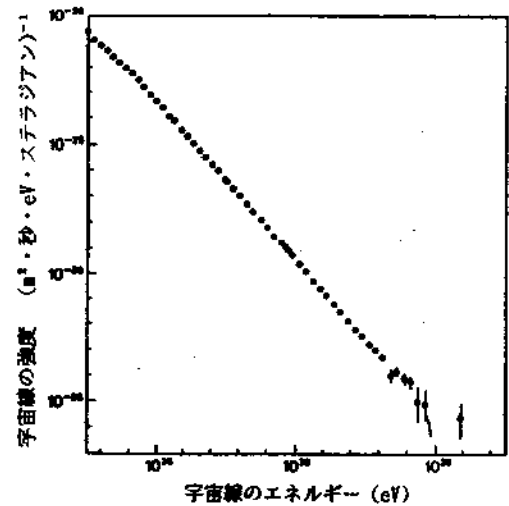


図46 明野観測所で得られた宇宙線のエネルギー・スペクトル

12. ニュートリノ (中性微子) 観測系

ニュートリノは恒星中心での核反応に伴い発生する。超新星爆発においては、爆発直前に恒星内部が超高密度になってニュートリノを閉じこめ蓄積し、爆発とともに放出する⁵⁶⁾。

地球には太陽からのニュートリノが多く到達しているが、ニュートリノと物質との相互作用の確率が極端に小さいために、多量の物質中での反応を監視・観察する必要がある。反応生成物の定量、反応に伴う放射線の検出、放射線や反応生成物の水中でのチェレンコフ効果による発光の検出などの手段でニュートリノの到達を監視する。水中での発光検出の場合には、陽子の自然崩壊の観察も目的に記される場合がある。

日本では岐阜県の旧神岡鉱山の地下で水との反応を監視する方法(「カミオカンデ」・「スーパーカミオカンデ(1996年4月に始動した)」)が行われ、マゼラン星雲中の1987年超新星からのニュートリノを検出した。

ハワイ沖の海中で数千mの深度に観測系を作り、ニュートリノと海水との反応を観察している(図47)。反応に伴う発光を広域に配置した多数の光センサーで受ける方法である。この系とその予備実験系において光・電力複合ケーブルが使用された⁵⁷⁾。

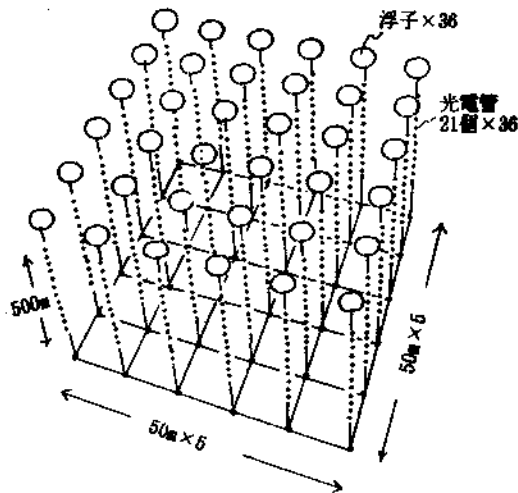


図47 深海底でのニュートリノ検出系の概念図(57)

13. 終わりに

天文学・宇宙線学・宇宙開発には、材料に工業の場合とは異なった意味での高い性能が要求され、他方で商業的なコストは二次的なものとして、材料が開発・選択される。そういう点で興味を感じて、本稿を纏めてみた。

謝辞 文献調査に利用させて頂いた東京工業大学と千葉工業大学の図書館に謝意を表す。

次の方々から多くのご教示と図・写真の撮影・掲載・転載の許可を頂いたことを記して謝意を表す(掲載順)。

株式会社オハラ及び同社開発部中原宗雄氏、ショットグラスヴェルケ社、ショット日本株式会社及び同社 芦野豊氏、通商産業省大阪工業技術研究所及び同所山下博志光機能材料部長、米国セラミック協会および同協会セラミック・ビュレティン編集部、文部省国立天文台すばる室及び同室林正彦氏、文部省東京大学天文学教育研究センター木曾観測所及び同所祖父江義昭所長、文部省国立天文台野辺山宇宙電波観測所及び同所坂本章弘技官、棚橋五郎東京大学名誉教授・岩手県立短大大学長、東京大学宇宙線研究所 明野観測所及び同所永野元彦観測所長、三省堂パリティ編集部。

[参考文献]

- 47) 小川原 嘉明, 別冊数理科学 宇宙, p.177 昭和62年サイエンス社
- 48) 田原 譲 他, 文献 7)
- 49) 堂谷 忠清, 天文月報, 86[6]261(1993)
- 50) 国枝 秀世, 天文月報, 85[9]384(1992)
- 51) 田辺 俊彦, 天文月報, 86[2]54(1993)
- 52) コーニング社, 天文月報, 87[8] 広告(1994)
- 53) 佐藤 修二, 天文月報, 87[8]292(1994)
- 54) J. J. Roland 他, Optics and Laser Technology, 1981年10月号 p.239
- 55) 永野 元彦, Phys. Rev. Lett., 73[26]3491(1994); パリティ, 9[8]43(1994)
- 56) 高原 まり子, "壮絶なる星の死", p.76(1994) 培風館
- 57) 大橋 陽三, 別冊 数理科学 宇宙, p. 101(昭62)サイエンス社; 東大宇宙線研究所ニュース, No.2 p.8(1989)