

気球による太陽観測

徳家 厚*

1. まえがき

地球は厚い大気層で取巻かれているため、地球外から来る輻射は途中で吸収散乱され、地上まで到達するものは極く限られた一部の輻射波長域のみである。その上特に光学的観測では、いろいろな原因で大気中に異常な疎密が生じ、その大きさの程度が時間的にも空間的にも複雑に変化するため、この大気層を通って来る天体からの光は、不規則に屈折し良い像質¹⁾ (Quality of image) が得られない。この現象は殆んど地表に近い密度の大きい層で起り、特に局地的な気象条件に支配される比較的低い層と、大規模な気象現象に支配される圈界面の大気の亂れが原因していると考えられている。

このような障害を克服するためには、人工衛星で観測装置を大気圏外に運び出して観測することが最も望ましいことであるが、非常に大がかりなものとなる。現在紫外域やX線の観測に最も多く使用されているロケットについても、滞空時間が短いので短時間の観測にしか利用出来ない。より少ない費用と設備で実現可能な観測テーマもある。それは気球を利用する方法である。高度の点ではロケットとは比較にならないが、搭載能力が大きく、比較的穏やかに浮遊し、滞空時間も必要に応じて相当永くでき、何といっても費用が少なくてすむので、割合手軽に実行出来るという利点がある。

気球の上昇高度は大体 33,000 m が限度であるため、紫外域やX線の観測は不可能である。しかしこの程度の高度でも、可視域特に赤外域の吸収散乱は相当少なくなり、また像質の点では殆んど完全に近いものが得られると想像される。したがって気球の観測テーマとしては、太陽面、惑星面、星雲等の微細構造や外部コロナ、黄道光、夜光の観測が考えられ、また適当な装置による赤外域での惑星、恒星、星間物質等の分子スペクトルの観測も可能であろう。

観測の種類に応じて得失があるので、ロケットによる観測と平行して、気球による種々の観測が現在各所で行なわれている。このうち太陽に関するもののみを、以下簡単に紹介したいと思う。

2. ブラックウェルとドルフュの粒状斑の観測

粒状斑の存在は約 1 世紀前から知られていたが、始めのうちは奇妙なものとして取扱われ、太陽望遠鏡の分解能のテストに使われていた程度であり、その本質がわから

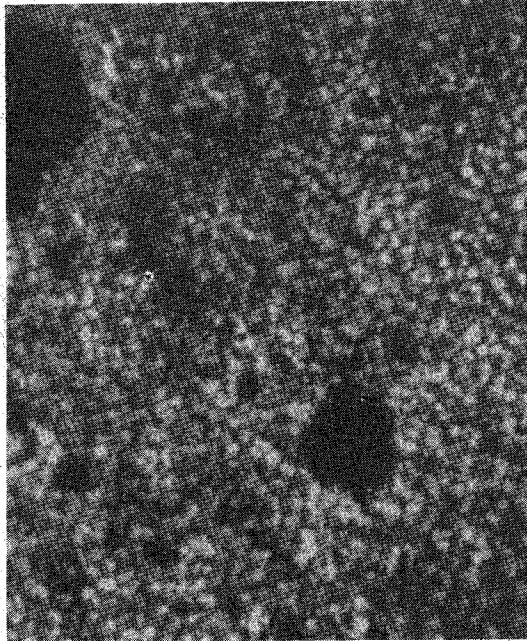
り始めたのは比較的最近のことである。粒状斑の理論は、光球の下に対流層が存在することから出発し発展した。対流層で発生した対流が、勢い余って光学的深さ $\tau = 1 \sim 0.3$ の光球まで入り込み、我々に粒状斑として観測される。この粒状斑によって引き起された光球の振動は音波の形で上層に伝播して行く。圧力の低下に伴ない衝撃波となり、遂には熱エネルギーに変換される。そのため、輻射平衡にある光球に乱流を生じ、彩層のスピキュールの激しい運動となって現われ、コロナの高温が維持されているのではないかと考えられている。また黒点は対流層の電離ガスの対流が磁場によって抑えられ、この対流によるエネルギー輸送の分だけ周りの光球よりエネルギーの流れが減少するため黒く見えるのだとされている。

このような理論的重要性にもかかわらず、粒状斑の大きさ、形状、コントラスト、寿命等については、観測者によりいろいろ異なったものが与えられており、粒状斑自身の構造の解明が初步の段階にとどまっている唯一の理由は、その観測の困難性にある。昼間観測しなければならない太陽の像質が、夜間のものとは非常に異なることは容易に想像される。太陽の輻射によるドームのスリット附近の乱流と、地表からの上昇気流による比較的低い層での空気の乱れが、像質に特に関係してくる。また望遠鏡も注意深く設計しなければ、これを通過する強い太陽輻射束のため像の乱れを生ずる（特に第 1 焦点附近に）。昔から良い写真は望遠鏡の設計と観測場所の選定に対して、特別な注意を払うことによってのみ得られている。前世紀末ムードン天文台で、ジャンセンが見事な粒状斑の写真を撮影して以来、最近のレッシュやブレイ、ラウヘッド等の観測にいたるまで、多くの努力にもかかわらず 0.7" (口径 20 cm の望遠鏡の理論的分解能に相当する) 以下の分解された写真は撮られておらず、また最上級の写真が得られる比率も失望するほど小さい。地上からの観測は事実上限界に来ているように思われる。

昼間の像質を悪くする主な原因である上昇気流による乱流層の厚さは、日によっても、また観測地附近の地形的条件によっても変化するが、5000~6000 m の上空から観測すれば、少なくともこの層から起る像の乱れは避けられ、地上からのものよりはずっと良い像質が得られることが期待される。この推測をテストするため、ケンブリッジ天文台のブラックウェルとムードン天文台のドルフュが、ムードン天文台から気球に乗り、粒状斑の撮影を試みた。²⁾

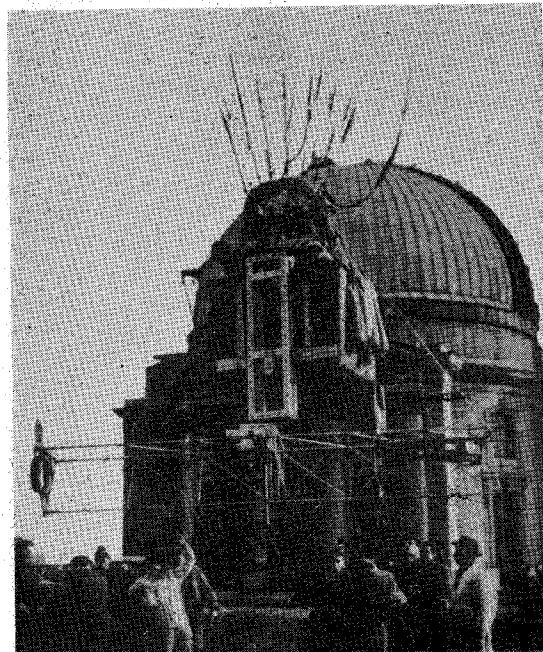
* 東京天文台

A. Tokuya: Solar Observations from Balloons.



第1図 ジャンセンが口径 13.5 cm の屈折望遠鏡で
1885年7月5日撮影写真の一部。画面の
大きさ: 51''×42''

気球の下に 2 人の観測者が乗る籠を釣るし、この下に取付けた屈折望遠鏡を、籠の中から操作するようになっている。対物レンズの口径は 28 cm、焦点距離 294 cm の眼視用 2 枚構成である。鏡筒は薄いアルミ合金チューブ製のフレーム構造で、重量僅か 5.5 kg であるが、撓



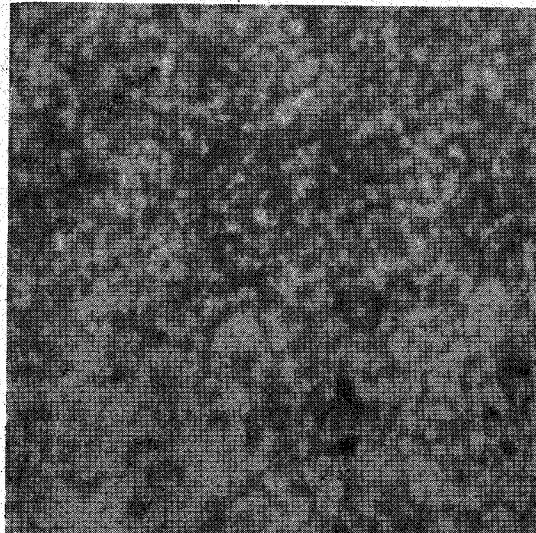
第2図 ムードン天文台からの浮上直後

みは非常に少なくなるように設計されている。この後端に、シャッター、拡大レンズ、フィルター、マガジンを含む光学ベンチが取付けられている。対物レンズで作られる太陽の直接焦点像を、焦点距離 2.5 cm のアイピースで 46 cm に拡大し、フィルターを通して、17 呪の 35 mm フィルムに連続的に、最高 1 分間に 15 コマの割合で撮影できるようになっている。露出は直接焦点の位置に置かれたコンタックスカメラのフォーカルプレン・シャッターによって、1/1250 秒にセットされた。なおこの主シャッターの直前には太陽の強い輻射束から、主シャッターを守るために予備シャッターと、太陽像の光度を調節するための灰色フィルターの輪がある。観測者の 1 人が望遠鏡をガイドし、他の 1 人が光学ベンチの操作をすべて電気的にコントロールできるようになっている。電源として蓄電池が積まれ、これはまた望遠鏡の平衡錘の役目をも果している。気球は絹にゴムを塗ったもので非常に軽く、容積は 1,200 m³ であり、望遠鏡、籠、2 人の観測者で気球の総重量は 750 kg であった。撮影後の着地を容易にするため、対物レンズとカメラを取り外した後、望遠鏡は別個にパラシュートで落された。

望遠鏡を上空に上げて観測する場合に最も困ることは、焦点の位置が地上で決めた位置からズレることである。これは高度によって空気の屈折率が変わるために、温度の変化で望遠鏡の鏡筒と対物レンズの各要素の大きさが複雑に変化するためである。この焦点の位置の変化を正確に予想することは非常に困難であり、結局 ±2 mm の範囲にわたって 10 コマ毎に 0.1 mm のステップで拡大レンズの位置を移動しながら撮影した。このため当然、撮影した写真的うち良いピントにあるものの数は非常に少なくなる。

このような方法で、第 1 回の観測が 1956 年 11 月 22 日に行なわれ、5400~6000 m の高度で 3 時間浮遊し、390 コマの写真を撮影した。しかし始め予定していたフォーカルプレン・シャッターの 1/1250 秒露出が、温度の低下のため 1/500 秒になってしまったため、得られた写真が露出過度になったばかりでなく、この思わぬ長時間露出のため、粒状斑もブレたものとなり、最良の写真でも 0.9'' 程度の分解能にとどまった。

引き続き第 2 回の観測が 1957 年 4 月 1 日に行なわれた。気球の不安定性から起る写真的ブレをなくすため、新しく設計した 1/5000 秒露出のフライイング・スリット・シャッターをコンタックスシャッターに取替えた以外は、殆んど前回と同じ装置である。今回は 3 時間の浮遊中に 5400 m の高度から 480 コマの写真を撮影した。一方ムードン天文台に於てもこの浮遊中、注意深い太陽観測が行なわれた。地上からの像質は非常に悪かったにもかかわらず、5400 m の上空から撮影した写真の中には今迄



第3図 1957年4月1日撮影。画面の大きさ：60''×60''

地上で得られた最良の写真以上のものが得られ 0.5'' の分解能を持っていた。しかしこれらの写真を検討した結果、一様に良い像質を得るには 5400 m の高度でもなお不充分であることがわかった。残りの像の乱れは、多分鏡界面の大気の乱れが関係しているのであろう。

この観測で得られた結果によると、粒状斑の大きさは 0.8~2'', 平均 1.4'' であり、個々の粒状斑は今迄得られた写真よりも幾分不規則な構造を示し、円形のものは稀れで、多くは多角形とか、細長いものとか、いろいろ複雑な形をしており、その大部分のものは明瞭な縁をもち、一様な明るさである。また望遠鏡（対物レンズ、拡大レンズ、フィルム）のコントラスト伝達関数を実験的に求め、この結果を測微光度計の記録の補正に使い、粒状斑とその背景の平均コントラストは 40%（温度差で 520°K）であると結論している。

3. ストラトスコープ I 計画

A) シリーズ I : 一方アメリカに於ても、プリンストン大学天文台のシュヴァルツシルドを中心として、大気の乱れに影響されない高鮮明度の粒状斑の写真撮影を目的として、望遠鏡を無人気球で成層圏に上げることが 1955 年より計画され、1957 年の夏から秋にかけてミネソタで 3 回観測が行なわれている⁸⁾。容積 28,300 m³ のポリエチレン製気球の下に、回収用のパラシュートを釣るし、さらにその下に望遠鏡を納めたジンバル構造を釣り下げ、ロケットの分光写真観測で開発された、光電追尾方式の指向装置で望遠鏡をガイドし、これに自動撮影カメラを組合せて、自動的に連続撮影できるようになっている。

この望遠鏡の設計においては、光学系の選択、熱に対する考慮、指向の精度に特別な注意が払われている。主

鏡は口径 30 cm、焦点距離 240 cm の反射式で、この主鏡で作られる直径 23 mm の第 1 像の極く一部分を 45 度傾いた小さな平面第 2 鏡で直角に反射し、焦点距離 8.1 cm の拡大レンズで 25 倍に拡大し、フィルターを通して 35 mm フィルムに撮影される。カメラには強コントラスト・超微粒子フィルム 1000 呪が納められ、フォーカルプレン・シャッターで 1/1000 秒の露出が与えられ、毎秒 1 コマの割合で 8000 コマ撮影可能である。

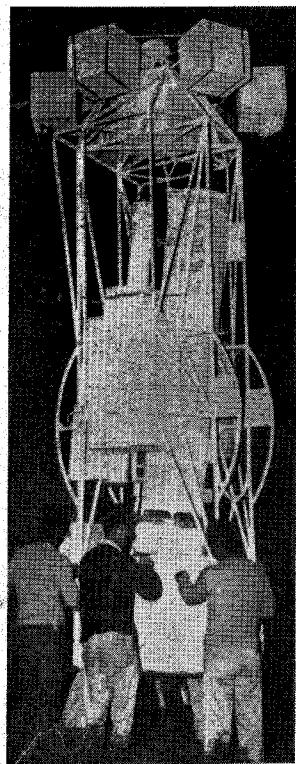
温度変化の影響を少なくするため、主鏡、第 2 鏡共に熔融石英製で、鏡筒もインバールで作られている。第 2 鏡も、支柱がシャッターと運動している軸の周りに毎秒 1 回転し、撮影時の 1/30 秒のみ第 1 像を横切るようになっており、異常高温となるのを防いでいる。

焦点位置の変化に対しては、予想される焦点の附近を、ある範囲（第 2 回は 2 mm、第 3 回は 1 mm）にわたって、拡大レンズを少しづつ移動させながら週期的に撮影したため、実際に得られた写真のうちピントの合っているものは 20 コマに 1 コマの割合である。

望遠鏡はジンバル構造の中の高度軸に取付けられ、このジンバル構造がパラシュートの取付け装置に対して方位軸の周りに回転できるようになっている。そして実際の運動は、高度方向ではジンバル構造の振子運動に対して与えられ、方位方向

ではこの目的のために特別に取付けられたジンバル構造の上の輪に対して与えられる。この輪には電源用の蓄電池が取付けられ、望遠鏡を含めたジンバル構造に匹敵する慣性モーメントを持っている。

指向装置には光電池の対からなる眼が使われ、高度用粗眼 2 個と方位用粗眼 4 個がそれぞれ鏡筒とジンバル構造に取付けられ、4 個の精眼（高度・方位用共に 2 つづつ）プロックは鏡筒の上端に取付けられ、この幾組かの精粗両眼からのシグナルで働く 2 つのモーターによって、望遠鏡が 2~3'/10 の精度で常に太陽の中心を指向する。



第4図 ジンバル構造に納められたストラトスコープ I 望遠鏡

自動制御方式となっている。浮上には、約6時間の準備の後、風の弱い日の出頃が選ばれ、大体次のような順序で観測が行なわれた。浮上後1時間40分で約24000mの予定された最高高度に到達する。タイマーによって電気装置が働き始め、指向装置が垂直位置の望遠鏡を太陽の中心に向ける。望遠鏡が熱平衡状態に入ってから、自動カメラが撮影を開始する。2時間20分で8000コマを撮り終ると、望遠鏡は再び垂直に戻される。浮上6時間後にタイマーによって自動的に気球からパラシュートが切放され、40分後に着地する。

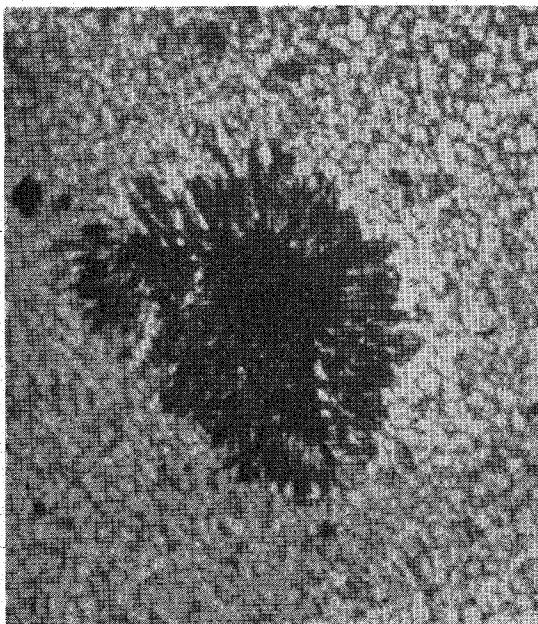
このような方法で1957年8月22日、9月25日、10月17日の3回にわたって観測が行なわれた。気球の追跡には飛行機が使われ、着地時の衝撃による損害も、ジンバル構造の底に取付けられたパッドのため比較的少なく、装置の全製作費の5%程度で、割合簡単な修理によってそのまま次回の観測に使用できた。第1回の観測は指向装置の精度を調べるのが目的であったため、テストカメラを納めた模型の望遠鏡が積まれた。大体満足すべき結果が得られたので、引き続き実際に粒状斑を撮影するため第2回の観測が行なわれた。望遠鏡は太陽の中心に向かうと、8000コマ撮影した。このうち400コマはピントが合っていると期待されたにもかかわらず、實際には画面全体にわたって鮮明なものが4枚、一部分のみ鮮明なものが1ダース程度しか得られなかった。第3回の観測では粒状斑ばかりではなく、太陽の縁をも撮影することが計画され、このために常に太陽の中心を指向している精眼ブロックが、カム装置で30分週期で望遠鏡に対して傾けられた。得られた結果は前回より幾分良い程度であった。これらの写真を詳細に検討した結果、高鮮明の写真的数が少ないので指向装置と自動撮影カメラのモーターから起る振動が原因していることが分った。

B) シリーズII: 前シリーズで、今迄地上で得られたものとは比較できないほど鮮明な写真が得られたが、その数が少なく、粒状斑の時間的変化を調べるには充分でなく、また幾つかのボア(pore)と小さな黒点は撮影されたが、大きな黒点は撮れていなかった。これらの欠点を除くため、機械的振動を小さくするばかりでなく、地上基地から遠隔操作で望遠鏡のピントを合せ、太陽面の望みの位置を指向出来るようにするため改良が加えられた。指向装置のサーボモーターは新しいものと取替えられ、テレビジョン、テレメーター、指令装置が新たに付加された。光学系も少し変更され、機械的振動を小さくするため、廻転第2鏡は、 2.0×2.8 mmの小さなステライド(特殊合金)平面鏡を、熱伝導の良い銅板に埋込んだ固定式に改められ、新たに主シャッターの後にフィルムとテレビカメラの両方に光を分けるための光線分割器が付加された。主シャッターは回転スリット・シ

ャッターで、前シリーズと大体同じ露光をフィルムに与えるため、0.0015秒にセットされた。

この改良されたストラトスコープIで、1959年の7月11日、8月17日、9月4日、9月24日の4回にわたって観測が行なわれた⁴⁾。地上基地としては、予想される気球の浮遊軌道の大体中央で、電波障害の少ない視界の開けた場所が選ばれ、4人で望遠鏡を遠隔操作した。このシリーズでは大黒点・小黒点・静穏の3領域に分けた粒状斑の観測が行なわれた。第1回の観測ではサーボ系統を改良したにもかかわらず、振動のため、鮮明なものは1ダース程度にとどまった。サーボ系統の振動を少なくするために多大の努力を払った結果、引続いて行なった第2、第3回の観測では、400コマ以上の高鮮明度の写真が撮れた。太陽の縁と黒点本影の撮影を目的とした第4回の観測では、今迄の低感度フィルムの代りに、中コントラスト、高感度のフィルムが選ばれ、シャッターも0.001秒にセットされた。しかし浮上時の失敗で、フライホイールから蓄電池が1個もぎ取られたため、バランスが悪くなり、余り良い結果は得られなかった。これら一連の観測から得られた結果を簡単にまとめてみよう。

粒状斑は一般に極めて不規則な多角形で、大きさは300~1800 km(725 kmが1"に相当する)に分布している。個々の粒状斑は幅の狭い暗いすじの網の目で囲まれている。この粒状斑の不規則な細胞構造は実験室でよく研究されている、層流型対流の示すべナール細胞とは異なったものであり、またよく発達した乱流とも異なって



第5図 1959年8月17日撮影。
画面の大きさ: 90" × 83"



第6図 コロナスコープの浮上直前の光景

いる。丁度これらの中間の非定常型対流に類似している。粒状斑の平均寿命は 8.6 分であり、粒状斑とその背景の光度の標準偏差は $\pm 7.2\%$ (温度差で $\pm 92^\circ\text{K}$) である。平均 $\sin \theta = 0.99$ に位置する白斑は、同じ位置の静穏な光球より 64% 明るく、また白斑の周りの光球は、静穏な光球より 6% 明るい。黒点半暗部についても、驚くべき微細構造が明らかになり、幅 300 km のやや暗い背景でお互に分離された、幅 300 km 長さ 5000 km の明るいすじが大体放射状に、場所によっては極めて複雑に配列しており、平均寿命は粒状斑より可成り永く、約 5 倍程度である。もっともこの 300 km というのは、この望遠鏡の分解能の限界であるから、実際にはもっと狭いものかも知れない。

4. コロナスコープ計画

空気の分子は太陽光を散乱し空を明るくする。レーリーはこの現象を始めて詳しく研究した。彼の理論から空の明るさは大気圧に比例することが期待され、一方大気圧は高度に伴ない指数的に減少するので、24,000 m の高度の空の明るさは地上の僅か 3% 程度となり、計算上太陽コロナは近赤外域で見られるようになる筈である。しかし流星物質、塵、その他の煙霧質粒子によって、レーリー型散乱以外の散乱光のため、実際の空はもっと明るくなっているだろうと想像される。そのため成層圏からのコロナ測光の可能性については疑問が残っていた。この問題を解決するため、ハイ・アルティチュード天文台では、対物レンズの前方 150 cm に遮蔽円板を置き、リオーラ型コロナグラフの僅か 1/500 程度の器械的散光しかもたない外部遮蔽型コロナグラフを作成し、これをプリンストン大学天文台から提供されたストラトスコープ I のジンバル構造に納め、24,000 m の成層圏へ送り観測した。1960 年の 9 月 10 日と 10 月 3 日の 2 回にわたって行なわれ⁵⁾、各々 8 時間浮遊し、太陽近傍の空の明るさの波長と角度による変化を連続的に測定した。この観測によれば、24,000 m の高度でも空気の分子以外の粒子による散乱が相当あり、[8500 Å] で撮影した写

真では、コロナがかろうじで看取し得る程度であった。以上の観測から、器械的散光をさらに減らし、1.2 μ 程度の赤外域で観測することによって空の暗さをかせぎ、地表からの塵埃や煙霧をなるたけ避けるため 30,000 m かそれ以上の高度に気球を上げるならば、太陽の中心から太陽半径の 6 倍までコロナの観測は可能であることがわかった。将来の計画で数時間にわたる外部コロナの構造と運動を観測することに希望がもてそうである。

太陽の観測以外にも、金星の大気や黄道光等の観測がすでに行なわれており、今年の 3 月には口径 90 cm のストラトスコープ II で火星の観測が行なわれ、気球による観測は今後ますます盛んになることと思われる。

参考文献

- 1) Transactions I. A. U., **10**, 388, 1958; 天文月報 **55**, No. 3, 63, 1962.
- 2) D.E. Blackwell, D.W. Dewhurst, A. Dollfus, Observatory, **77**, 20, 1957; M.N. **119**, 98, 1959
- 3) M. Schwarzschild, Ap. J. **130**, 345, 1959
- 4) F.N. Edmonds, Ap. J. **131**, 57, 1959
- 5) J.B. Rogerson, Jr., Ap. J. **130**, 985, 1959
- 6) J. Bahng, Ap. J. **128**, 1958
- 7) R.E. Danielson, Ap. J. **134**, 275, 1961
- 8) J. Bahng, M. Schwarzschild, Ap. J. **134**, 312, 1961
- 9) J. Gaustad, J.B. Rogerson, Jr., Ap. J. **134**, 828, 1961
- 10) J.B. Rogerson, Jr., Ap. J. **134**, 331, 1961
- 11) J. Bahng, M. Schwarzschild, Ap. J. **134**, 887, 1961
- 12) G. Newkirk, Jr. J.A. Eddy, Sky and Tel. **24**, 77, 1962; A.J. **67**, 119, 1962

天	文	教	室
佐伯 恒夫著	僕等の天体観測	¥350	
関口 直甫著	人工衛星の観測法	¥230	
野尻 抱影著	肉眼・双眼鏡 小望遠鏡 星座見学	¥280	
東亜天文学会	天体観測の手引	¥300	
星野 次郎著	望遠鏡の作り方	¥350	
佐伯 恒夫著	火星とその観測	¥280	
小槻孝二郎著	流星とその観測	¥300	
中野 繁著	星雲星団の観測	¥250	
下保 茂著	変光星の探求	¥350	
服部 忠彦著	ぼくらの球面天文	¥280	
力武 常次著	地球の構造	¥320	
山本 一清著	星の宇宙	¥250	
村上 忠敬著	ロケット宇宙旅行	¥230	
片方 善治著	宇宙通信	¥230	
関口 直甫著	月面裁判	¥320	