

月面の微細構造 (I)

赤羽 徳英*

月面を光学的に観測すると、他の観測からは得られない表面の地質学的、物理学的性質を知ることができる。例えば、満月では月面上到る所一様な明るさであり、周辺減光が見られない。(普通に乱反射する球に光を当てて、光源方向から視ると、必ず中心部から縁の方へ明るさが減少する。)この特異な月の性質は300年も以前にガリレオによって認められていたし、その後、ブーゲ(Bouger)は月の山による影の影響を考慮してこの問題を解こうとした。従って200年も昔に、月の光学的性質とその表面構造の間には深い関係のある事が分かっていった。しかし、信頼できる結果を導くためには正確な観測が必要であり、それは近年になって漸やく可能になってきた。最近ではラジオ観測も盛んに行なわれているが、ここでは測光法による研究から月面における特徴を解析してみる。

§1 座標系

1. 月面座標 (月の経度と緯度)

月面上の任意の地点は月の経度(λ)と緯度(β)によって決定される。月の北極と南極は地球のそれと同じ方向にとり、この二点を結ぶ大円に直交し且つ月面の中心を通る大円が月の赤道である。経度は赤道に沿って中心から東西の方向へ計り、西向きを正にする。緯度は赤道から両極の方向へ計り北半球を正にとる。

2. 測光座標 (入射角, 反射角, 方位角, 位相角)

月面上のある地点Pの明るさは一般に入射角, 反射角, 方位角の函数である。しかし、方位角はその地点の経度緯度に関係するから、その代りに位相角を用いる方が便利

である。月が球であると仮定して、その中心から地球方向と太陽方向へ引いた直線が球面と交わる点をそれぞれE, Sとすれば、任意の点Pに対して、入射角 $SP=i$, 反射角 $PE=e$, 位相角 $ES=\alpha$, 方位角 $\widehat{EPS}=A$ である(第1図)。定義から明らかであるが、満月の時は $\alpha=0^\circ$ 下弦の時は $\alpha=90^\circ$, 新月では $\alpha=180^\circ(-180^\circ)$, 上弦では $\alpha=-90^\circ$ である。ESを結ぶ大円と赤道はほぼ一致している。

§2 位相光度曲線

満月の見かけの等級は昔から測定されてきたが、最近の結果をあげると次の通りである。

プティット(E. Pettit, 1926) $-12^m.75$ (ラジオ観測)

カーダー(W. A. Calder, 1937) $-12^m.69$ (光電測光)

ニコノヴァ(E. Nikonova, 1949) $-12^m.67$ (光電測光)

これらは写真眼視等級に換算した値である。

満月のみならず、各月齢における光度を測定し、これを位相の函数としてグラフに表わした曲線を“位相光度曲線”, と呼ぶ事にする。この場合光度(B)は地球方向へ投影された単位面積単位立体角当りの明るさで定義されるが、グラフを画く場合には、満月の光度を100に換算した相対的光度(R)が用いられる。

この他に明るさを表わす量として、光度因数や光度係数も用いられる。

$$\text{光度因数 } \rho = B/B_n$$

$$\text{光度係数 } r = B/B_i$$

但し、 B は観測された光度、 B_n は入射光線に対して直角に置かれた白色幕の光度、 B_i は B と同じ入射角をもつ白色幕の光度である。

$$\rho \text{ と } r \text{ の関係は、 } \rho = r \cos i \text{ で与えられる。}$$

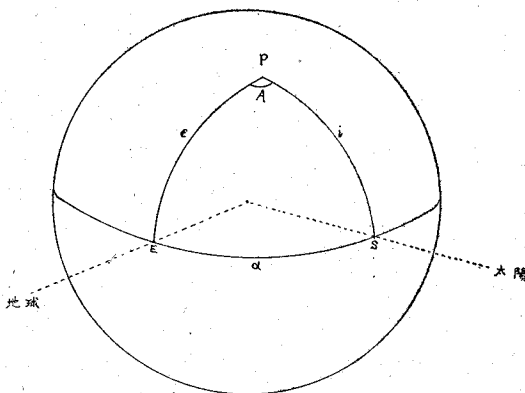
更に

$$\rho = \rho_0 f(i, \epsilon, \alpha)$$

とおき、 $i=\epsilon=0$ の時 $f(i, \epsilon, \alpha)=1$ となるように函数 f を規約する。 ρ_0 は満月における中心部分の ρ の値で標準反射能と呼ばれ、 $f(i, \epsilon, \alpha)$ は測光函数と呼ばれる。

第2図はルージェ(G. Rouger, 1953)の観測した月面全体の明るさ(I)をグラフにしたものである。図からは分かりにくいだが、各月齢における明るさを比較すると、三日月の頃は26日月頃よりも暗いが、上弦から満月までの明るさは満月から下弦までの明るさよりも強い。

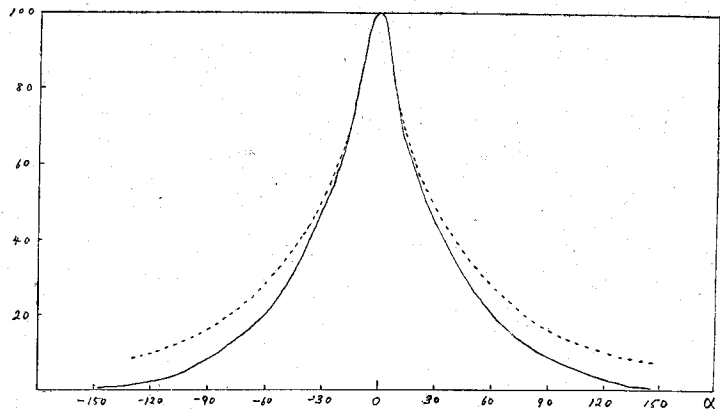
位相角 α の月の輝いて見える面積の満月に対する割合は $\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \cos \alpha\right) / \pi = \frac{1}{2}(1 + \cos \alpha)$ であるから、この



第1図 測光座標

* 花山天文台

T. Akabane: Microfeatures on the Lunar Surface.



第2図 位相光度曲線

実線：月面の全光度 (I) 点線：平均光度 (\bar{R})

値でルージェの観測値を割ると平均光度 (\bar{R}) が得られる。これから月面のおおよその構造が説明できる。ラッセル (H. L. Russell, 1919) は次の如く述べている：“月面の大小様々な噴火口や山脈は表面に影を投じ、その大きさは入射角と共に増加する。これらの光度に対する影響は平均位相光度曲線によって示されるが、見え得る噴火口や山の影のみを考慮したのでは曲線の形を十分に説明できない。何物かの見えない影がかなり影響しているのだろう”と。従って平面に見える部分でも小さな不規則性をもっているに違いない。

詳しく調べるためには月面の各個所における光度を測定する必要がある。最近では、マルコフ (A. Markov, 1950, 10 箇所, 光電測光), フェドレッツ (V. A. Fedoretz, 1952, 168 箇所, 写真観測), シティンスカヤ及びシャルノフ (N. Sytinskaya, and V. V. Scharnov, 1952, 90 箇所, 眼視観測), ヴァン・ディゲレン (Van Diggelen, 1959, 45 噴火口原, 写真観測) 等の観測がある。第3図はこれらの観測値を平均した位相光度曲線である。

§ 3 月面の測光的性質

上にあげた観測資料から次の結果が得られる。

1. 月面の反射能はかなり低い。前節で定義した標準反射能は明るい部分と暗い部分では約3倍の差があるが、地球上の岩石よりは低く火山灰と同程度である。

暗い平原 (海)	0.065
明るい平原	0.091
高原地帯 (陸)	0.105
噴火口原	0.112
光条	0.131
最も明るい斑点	0.176
最も暗い斑点	0.051

2. 反射能の相異を無視すれば、満月の時月面の明るさは到る所一様で周辺減光が見られない。この事は $i = \epsilon$ ならば $f(i, \epsilon, \alpha) = 1$ を意味する。

シティンスカヤによると、満月の場合と同じ条件で観測される物体の光度分布は

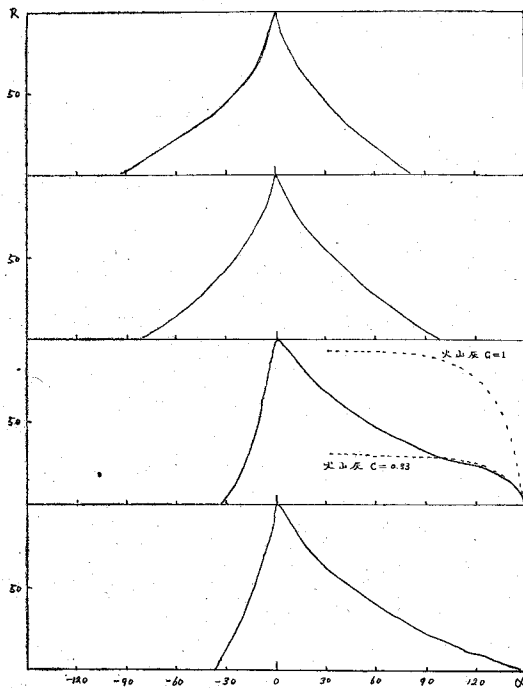
$$B = B_0 \cos^q i$$

で与えられる。ここに q はその物体の滑らかさを表わす因子であり、月の場合は $q=0$ に相当する。

- $q > 1$ 磨かれた表面
- $q = 1$ ランベルトの法則に従う理想面
- $q < 1$ 最も一般的な物質 (岩石 0.1~0.6, 砂 0.3~0.5, 砂礫層や痘痕面 0.1~0.2)
- $q = 0$ 月面 (周辺減光無し)
- $q < 0$ 部分的波状面 (植物 0.4~-0.14)

しかし、フェドレッツやマルコフは縁に近づくにつれて光度は僅かながら増加の傾向にあることを示している。これは $q < 0$ を意味する。

3. 月面上のどの点でもその光度は位置に関係なく満月の時最大に達する。この法則は最初バラシェフ (N. P. Barashev, 1922) によって発見され、その後マルコフ、フェドレッツ等によって確証されている。もし月面が比



第3図 噴火口の位相光度曲線

上から	アルバテグニウス (3°49', -11°09')
	プラトー (-5°44', 51°27')
	グリマルディ (-67°49', -5°20')
	シッカルド (-59°00', -70°00')

較的滑らかであるならば、入射角が最小になった時最大光度に達するであろう。従って各地点の光度が最大に達する時刻は場所によって異なるはずである。

4. しかし、例外もあり最大光度が満月の時からずれているものもある。これらはすべて光条を持つ噴火口で、満月の後で最大光度に達し、その位相のずれは約10°である。

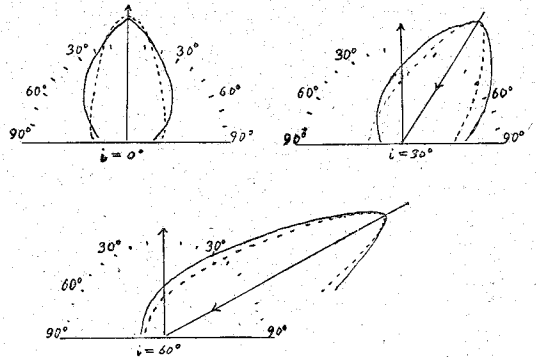
光条は白色のすじから成り、噴火口を中心としてすべての方向に放射している。大きさは様々であるが、「チコ」の光条は月面を南北に縦断しているし、「ケプラー」と「コペルニクス」の光条の一部は互いに結合している。光条は満月やその前後で何日も見ることができから月面の現象である。

5. 第3図から分かる如く、曲線は満月前後で鋭く変化している。これは入射光が光源方向に強く反射され、他の方向には余り散乱されない事を意味する。光条や明るい噴火口に対してはこの傾向が更に著しい。

6. 反射能の差異は別にして、任意の位相における等光度曲線は経線である (M. Minnaert)。即ち光学的赤道 (第1図の大円 ES) と地理的赤道はほぼ一致しているから、月面上の各地点の位相光度曲線の形は月の経度に依存し、緯度にはほとんど無関係である。(第3図参照)。ヴァン・ディゲレンは月面を緯度 $|\lambda|=0^\circ\sim 10^\circ$, $10^\circ\sim 30^\circ$, $30^\circ\sim 50^\circ$ の帯と緯度 $|\beta|=0^\circ\sim 20^\circ$, $20^\circ\sim 40^\circ$, $40^\circ\sim 90^\circ$ の帯に区切り、各区域内における平均値の位相光度曲線を画いて調べた結果同様の結論に達している。

§ 4 散乱の方向性

測光関数を理論的に解析し、光の透過、散乱の理論から物理的に位相光度曲線を導き出す試みは数多くなされてきた。理論的な散乱公式としては、ランベルトの法則、フェセンコフの法則、ロメル・ゼリガーの法則、チャンドラセカールの散乱公式、レイリーの散乱公式等があり、観測から求めた経験的な公式としてはエピック (E. Öpik) チュンコ (H. F. A. Tschunko)、フェセンコフ (B. Fessenkoff) 等の公式がある。しかしこれらはいずれも満月前後の急激な変化を表わし得ず、観測と余り良く合わない。実際の位相関数が一方に長く伴った葉状形をしているためである (第4図)。オルロバ (N. S. Orlova, 1956) は月面の構造に関して、ある結論を導き出す目的でシャルノフとフェセンコフの観測を検討した。彼女は月面上に同一タイプの対象物を選び、散乱の仕方は“海”も“陸”も同じであると仮定して、一定の入射角と位相角に対して各反射角における反射率を調べた。第4図から分かる如く、光源方向への散乱が強く、その度合は入射角と共に増加している。 r_0 を光源方向の光度係数、 r_s を鏡の反射方向と同じ方向における光度係数として



第4図散乱の方向性 (オルロバ)
実線：“陸” 点線：“海”

$$S = r_0 / r_s$$

とおくと、

$S = 1.6$	($i = \epsilon = 10^\circ$)
11	(海 $i = 60^\circ$)
10	(陸 $i = 60^\circ$)

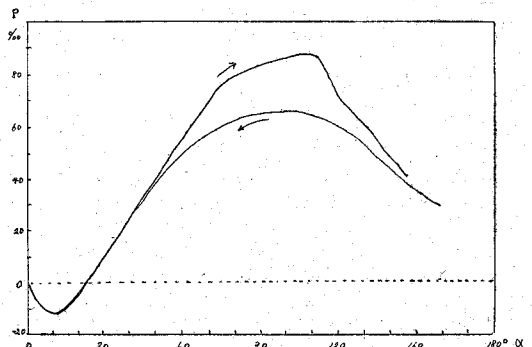
となる。“海”と“陸”では散乱の方向性はほぼ同じであるが、“海”の方が幾分強い傾向にある。

散乱の方向性を表わすグラフの形から、その表面が測光学的にどの程度の凹凸をしているか、その度合を知る事ができる。もし光源の方向に長く伸びているならば、面がかなり凸凹している事を示すし、鏡による反射方向と同じ方向に伸びているならば、面は滑らかである事を示す。従って月面は可成り凹凸に富み、滑らかな平面はごく少ないであろう。

地球上にある物質の散乱の方向性を調べてみると、火山岩滓や溶岩はほぼ月のそれに似ているが、入射角の増加に対し月の場合に比べて細長くならない。ここに得られた結果から推論すると、月面は火山岩滓に似た多孔質の物体から成っているかもしれない。

§ 5 偏光観測

月面の微細構造をより詳しく調べるために、偏光観測からも検討してみる必要がある。



第5図 月の偏光曲線

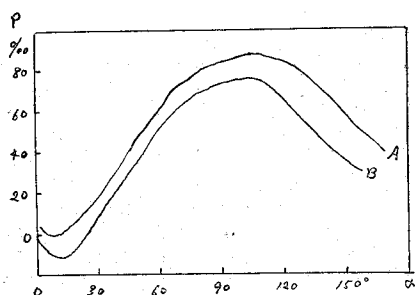
視平面は物体への入射光線と観測者の方向によって定義され、これら二つの方向に狭まれた角が視角 V である。観測された光線は二つの成分の振動を持っており、その一つは視平面に直角で、他の一つは視平面内にある。それぞれの強さを I_1, I_2 とすると偏光の度合は

$$P = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$$

で定義される。太陽光は自然光と見なし得るから、月の偏光は月面の光学的性質による。 P と V の関係を示す偏光曲線は月面の知識を知るための重要な手がかりである。物質の偏光曲線はその構造、透明度、屈折率等に関係しているから、偏光曲線が求めればその物質を知ることができる。

第5図はリオー (B. Lyot, 1929) が測定した月面全体の偏光曲線である。上弦と下弦の頃に P は極大に達しそれぞれ 0.088, 0.066 である。この差は“海”の分布の相異による。(上弦の月は下弦の月よりも約2倍の“海”の領域をもっており、一般に“海”は大きな偏光を示す。) 満月に近づくにつれて P は減少し、 $V = 23^\circ 30'$ で $P = 0$ となる。その後負の偏光を示し $V = 11^\circ$ で極小値 $P = -0.012$ に達し、満月では再び $P = 0$ となる。即ち偏光性は認められない。

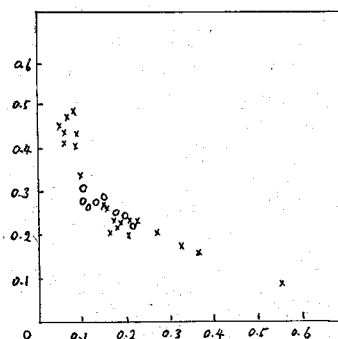
これと似た曲線を示す物質として不透明な粉末があげられる。実験によると、完全に不透明な物質の偏光は入射角にはほとんど無関係である。偏光は先ず負の方向に



第6図 混合火山灰の偏光曲線 (A) と月の平均偏光曲線 (B)

向き、最小値に達した後 $V = 18^\circ \sim 28^\circ$ で $P = 0$ を通り、その後 P は正となる。この負の部分が深く勾配が急であることは粉末が不透明な物質からできていることを示す目安となる。粒子が小さくなるにつれて負の部分は深くなるが、ドルフス (A. Dollfus, 1955) によると、この深さは完全不透明な微細粒子が大きな粒子に附着して荒い面上に堆積する時最も深くなる。リオーは月と同程度の反射能を示す種々の火山灰を混合し、その偏光を調べた。(第6図)。これは月の偏光とほとんど一致しており、月面は火山灰の様な低反射能の物質で被われていると思われる。

同様の結論は地球光の観測からも導かれる。地球光の偏光は気球等を測定する事により求まる ($V = 90^\circ$ の時 $P = 0.33$)。一方月面における地球光の散乱はその偏光の一部をなくしてしまう。従って月面上の各点の残差偏光 (residual polarization) はその切点の地球光を観測する事により決定できる。結果は第7図に○印で記入されてあるが、反射能の増加と共に残差偏光は減少している。この傾向は不透明な粉末物質の一般的性質である。同じ図に異った反射能をもつ火山灰の測定値もプロットしてある。これらは滑らかな一本の曲線で近似され、月の値も完全にこの上の上のっている。(以下次号)



第7図 入射光が完全偏光である場合、光源方向に散乱された光線の残差偏光
○印: 月 ×印: 火山灰
(横軸: 反射能, 縦軸: 残差偏光)

日本天文学会秋季年会記事

本会の秋季年会は10月11日(金)、12日(土)の両日東北大学金属材料研究所講堂で開催され、約130名の会員が出席するという盛況であった。

11日には宮地、弓、虎尾、秋山氏等が座長となって31の講演が行なわれ、12日には川口、畑中、長沢、野附氏等が座長となり、32の講演があった。また第1日の正午から理学部新館会議室で理事会、同夜には精養軒を会場に懇親会が催された。

理事会に於ては次の事項が承認された。

- (1) 明年の春季年会開催地は東京とする。
- (2) 法定理事故前山仁郎氏の後任に牧田貢氏、東京の支部理事(欧文報告担当)に寿岳潤氏を決定。
- (3) 欧文報告執筆者の頁チャージ(別刷代金)は Vol. 15, No. 4 より新公式 $(2n + 600 + 30p)p$ 円による。ただし p は頁数、 n は請求部数。
- (4) 欧文報告(年4冊)の定価を現在の一冊700円を来年度 Vol. 16 より1冊800円に、したがって外国向定価を年 \$ 12 から \$ 13 に値上げする。
- (5) 長期会費滞納者には今後出版物の送付を中止する。