

宇宙物理学教室における地球物理学および惑星科学研究

小暮智一（京都大学名誉教授）

始めに

京都大学に宇宙物理学教室の創設されたのは1921年であるが、教室における研究は地球物理学と深い関係がある。創立者の新城新蔵先生は測地学を通して地球物理学とゆかりがあり、戦時中は荒木俊馬、宮本正太郎両先生を中心として電離層の理論的研究が進められた。戦後は宮本先生が花山天文台において月惑星科学の発展に大きく寄与する。ここでは新城新蔵、宮本正太郎両先生を中心に宇宙物理学教室および附属天文台において進められた地球物理学、月惑星科学の研究の一端を振り返って見たい。以下、敬称を省略する。

1. 新城新蔵と測地学研究

1.1 新城新蔵の生涯

新城新蔵は明治6年（1873年）に会津若松の古い酒造家の六男として生まれた。その年、新しい酒蔵が落成したので新蔵と命名されたという。明治25年（1892）に東京帝国大学理科大学に入学、物理学を専攻する。測地学に興味を持っていたため、その後数年間、夏季に震災予防調査会（文部省）より磁力測定調査補助を嘱託されている。明治30年（1897）、砲工学校教授に任じられるが、翌年には併任として重力測定方を委嘱されている。

明治33年（1900）に京都帝国大学理工科大学の物理学第3講座に助教授として赴任するが、この年は新城にとって測地学委員に任命され、本格的な重力測定の始まった年でもある。最初の測定は大谷亮吉とともに水沢緯度観測所敷地内の重力調査であった。その後、新城の研究分野は次第に宇宙物理学に移っていくが、地磁気、重力の測定作業は後年まで続いている。昭和6年（1931）にも測地学委員会委員を委任されており、昭和8年（1933）にはリスボンで開かれた万国測地学地球物理学学会に日本代表として出席している。

新城が宇宙物理学へ移行する契機となったのは明治38年（1905年）から2年半に及ぶドイツ留学であった。ゲッチンゲン大学天文台でカール・シュワルツシルド教授の宇宙物理学の講義に大きく感銘し、将来の天文学は位置天文学や天体力学でなく、物理学を主体とした宇宙物理学でなければならないと確信するに至ったという。

大正3年（1914）に京都帝国大学理工科大学から理科大学が分離し、それに伴って新城は物理学第4講座担当教授に任じられている。大正7年（1918）に物理学科に宇宙物理学講座が新設されると、第4講座からこの講座担当に移り、さらに新しい学科の新設に中心となって取り組む。当時の秘話によると、文部省は日本には天文学科は1つでよいとして、学科の新設の難色を示したという。それを説得するためにも新しい理念が必要であった。

新城の宇宙物理学は当時の主流であったヘルムホルツ収縮論を基礎としているが、新たに「流星体の密集」という概念を導入し、太陽、恒星、太陽系から変光星¹⁾さらには銀河系の生成進化²⁾まで、宇宙の進化を広く統一的に説明しようと試みている。彼は天体生成の初期に普遍的ではあるが局所的に濃淡をもって分布する低温微小流星体の存在を仮定し、その濃密部分が角運動量を保存しながら凝集することによって各種天体の生成進化と変動現象が説明できると提唱した。これは星間分子雲からの星が生成されるという現在の理論を予想させる見解でもあった。

新城は観測天文学の体制整備にも力を注いだ。自ら重力、地磁気測定を推進していたこともあり、京都に赴任してからも観測機器の整備に心がけ、稜鏡子午儀や望遠鏡（ハイデ 10 c m 屈折鏡、ゲートリウス 18 c m 屈折鏡など）を設置し、京大の敷地内に京大天文台を設立した。しかし、その後、東大路通りが整備され、市電が通じるようになると、観測環境が悪化したので、昭和 4 年（1929）に天文台は山科の花山天文台に移される。



図 1 恩師田中館愛橘（左）と歓談する新城新蔵。
昭和 7 年、奈良の丹波市（たんばいち）（現在天理市）にて（出典：新城文庫）。

新城の天体物理学は荒木俊馬に、観測天文学は山本一清に引き継がれる。新城はまた、東洋天文学史においても古代中国の年代の決定などに大きな功績を残した。天文学史は藪内清に引き継がれる。しかし、新城の測地学測定作業は後継者がなく、測地学研究は地球物理学教室にゆだねられる。

新城は昭和 4 年（1929）に京都帝国大学第八代総長に選出され、昭和 8 年まで総長として困難な時代の対処に当たる。この時期は京都大学百年史においても「苦悩の時代」と称されており、昭和 6 年の満州事変の勃発を始め、日本が急速に軍国主義に傾いていく時代であった。その中で新城は学問の自由と大学の自治を維持するために歴代総長と共に力を尽くした。総長の任期が終わると昭和 10 年（1935）に上海自然科学研究所の所長に就任する。日中戦争が発端を迎えるという困難な状況の中で新城は中国との文化交流に力を注いだ。任期の途次、昭和 13 年 8 月に上海において逝去した。なお、上海自然科学研究所と京大理学部との関係については永野宏、佐納康治³⁾による詳しい紹介がある。

1.2 新城新蔵と測地学

新城の著書、文献、書簡などの資料は女婿である荒木俊馬のもとに残された。それらは整理されて、現在「新城文庫」として宇宙物理学教室に保存されている⁴⁾。残念ながら測地関係の資料はほとんど含まれていないが、文庫には長岡半太郎による追悼文「故新城新蔵君を憶う」⁵⁾が残されており、その中で新城の測地学研究に関する思い出を紹介しているので、少し長くなるが引用して見たい。ただし、文章は多少現代風に改めた。

「君(新城)は会津に生まれ、仙台の高等学校に学ばれ、…東大理学部に入り、物理学を修められたのは明治25年であった。当時、山川健次郎、田中館愛橘諸教授に鍼灸せられたが、予は両教授の下働きをしていたから、学生と教授の間に立ちて、双方の消息に通じていた。」

「君は卒業後、陸軍大学校で教鞭を執られた。予が外国留学より帰るとまもなく、明治30年頃より、東京その他の重要な地点において、重力測定に必要を感じ、君とともにこの仕事に従事した。これより日夕、君と議論を上下し、大谷亮吉君らと共に東京、京都、金沢、水沢等において、重力絶対測定を施行した。続いてポツダムと東京との比較測定をも為したるにより、本邦各所においてこれを実施する運びに立ち至った。その頃は時間の測定を為すに、今日のごとくラジオを利用する能わず、常に子午儀を携え、各地点において観測せねばならなかった。これにたいして君は頗る手腕を磨き、将来天文学に力を寄する基礎を樹立された。」

以上は京大赴任以前の仕事であったが、赴任後も観測を継続している。再び追悼文に戻ろう。

「毎年、夏休みを利用して、比較重力測定に出張せられたが、本邦に数多の測点あるは全く君の励精によるは申すまでもない。すなわち、本邦における地球物理学の研究上、肝要なる恒数を測定されたのである。」

「君は物理学を離れて…天文学に移られた。また、地球物理学も続けて設けられたが、これらは京大に欠けていた学科であったから、君の望むところになったけれども、経費その他の不足により、思わしく進行しなかった。しかし、重力測定が一時ほとんど京大独占となったのは、偏に君の努力に頼ったことは確かである。」

「新城文庫」にはまた、新城の「田中館部長あて」という自筆の手紙が残されている。これは大正11年3月1日(1922)の日付があり、京都帝国大学理学部紀要に投稿する草稿であろうか。3頁からなっており、1912年から1921年にかけての重力測定の報告である。1911年以前の方は測地協会に報告済みとしてある。この草稿では1912年からの10年間に30

京都帝国大学

Locality	range	date	Obs.	no. of stations	Remark
vicinity of Kyoto	1913-1919, 1913	m.	1		coral island
Talut Atoll.	1915	"	12		Shaggy state in the South Pacific
Sakurajima	1916, 17, 18	"	144		off the summit of the volcano
Beppu	1919	"	9		in hot spring district
Tong basin	1916, 17, 18	y.	115		large plain near Tong
Niigata	1918, 19, 20	m. y.	214		oil-field
Asama	1921	y.	17		active volcano
Mizusawa	1921	y.	12		International latitude station.

図2 重力測定に関する新城新蔵の田中館部長あての自筆の原稿の第2面。
表題は「1912-1921年における重力測定」(出典：新城文庫)。

箇所以上の観測地で観測を行ったことが示されており、第2ページには主な観測地と観測年、測定点数などが表示されている。京都近郊、利根川流域、桜島、別府、新潟油田などと並んで、1915年に行われた南太平洋のコーラル島ジャルイット・アトールの観測記録なども含まれている。書簡最後の署名の肩書きは「宇宙物理学教授、日本測地委員会委員」となっているが、この年は宇宙物理学教室が物理学教室から独立した翌年に当たっている。

また、ジャルイット・アトール島の観測は松山基範によって詳しく分析されており、新城への謝辞のなかで、この実地測定は新城の援助の下に行われたことを述べている⁶⁾。

田中館、新城、大谷らによる重力、地磁気測定の記念碑は岡山県津山高校、山口県豊浦高校、山口県下関市、北海道富良野市など、全国各地に残されている。富良野市の例を見ると富良野小学校の校庭に「北海道中心標」という石碑が立っており、その前に「北海道中央経緯度観測標」と記された黒い石碑がおかれ、市指定文化財となっている。当時の測定台座は石碑前の白い丸石の地下に保管され、その模型は富良野市図書館に展示されている。ここでは経緯度とともに重力の測定も行われ、文化財説明文では次のようになっている。

「大正3年、京都帝国大学教授新城新蔵博士が中心となり、地球重力、経緯度の測定のため富良野小学校校庭に長さ95cm、幅65cmの長方形のコンクリートの台座を建てた。この地点が北海道の中心に当たるところから「北海道中心標」と呼ばれ、俗に「北海道のへそ」として市民に親しまれている。」

2. 宇宙物理学教室における電離層の研究

戦時中の昭和19-20年にかけて、宇宙物理学教室では電離層に関する一連の研究が荒木俊馬教授のもとで遂行された。研究班には宮本正太郎、高木公三郎、清永嘉一らが加わっていたが、主導したのは宮本であった。研究班はチャップマンの理論(S. Chapman, 1931, 1939)の批判から始まったが、その骨子は上層大気における放射輸送をより厳密に扱うという点にあった。研究班の成果は宇宙物理学教室から「緊急科学報告」として日本語で報告されている。そのなかで宮本は「電離層成因論」として6編のシリーズ報告を行っている。その内容は次のようになっている。

- 1) 上層大気の輻射場
- 2) 上層大気におけるガス反応
- 3) 電離層の構造とその周期的変化および変動現象

電離層については、本文集のなかで加藤進さんが「宮本正太郎先生と私」という文の中で書かれているのでここでは詳しくは述べない。



図3 富良野市の石碑「北海道中央経緯度観測標」
(出典：富良野市ホームページ)。

3. 宮本正太郎と月惑星物理学の研究

宮本正太郎〔1912-1992〕は尾道市出身で姫路高校から京都大学に進学した。少年時代から熱心な天文アマチュアで、とくに火星表面の観測で目立っていたという。この頃の観測経験が後の花山天文台における月惑星の観測に活かされる。1950年代までの宮本の研究は太陽、恒星の大気論、特異星の広がった大気理論、星雲放射場理論など広い分野にわたっているが、太陽物理学では世界で始めて太陽コロナの電子温度を 100 - 200 万度という高温に推定したという業績も含まれている。

花山天文台は 1957 年に学部附属施設として教室から独立し、宮本は専任台長として天文台に移り、月惑星の本格的な観測的、理論的研究を開始した。ここでは火星と月面についての研究について紹介してみたい。



図4 宮本正太郎肖像(花山天文台にて)〔「星月夜」⁷⁾〕。

3.1 火星大気の観測と理論

火星は2年に一度、衝として地球に接近する。宮本はその機会に火星大気の変動をスケッチによって詳しく追跡した。観測された衝は1956年から1973年まで8回に及んでいる。宮本がスケッチ観測を行ったのは、写真では露出時間中に地球大気の揺らぎのために表面模様がならされてしまうからである。揺らぎの合間の瞬間に浮かび上がる火星面の構造を描きとり、火星面に発生伝播する雲の変動を追跡している。

1956年の衝のとき、宮本は巨大な黄色雲の発生を発見し、その広がり、伝播の観測から、雲の発生機構を検討している⁸⁾。この雲は1956年8月20日にノアチス山地付近(火星面経度 340° 、緯度 -30°)に突然出現し、東西方向にそれぞれ経度 100° ほど広がった。宮本は雲の運動から火星面の気圧配置を推定し、高圧帯と低圧帯が南極を取り囲むように分布することを見出した。雲の発生機構として、宮本は南極冠の消長に注目する。この年は南半球の夏で、これまでになく発達していた極冠が次第に収縮していく時期に当たっていた。黄色雲の発生は極冠の縮小率が最大に対応している。黄色雲は細かい塵状物質と推定されるので、火星表面の砂漠から対流または乱流によって吹き上げられたと見なせる。火星大気の特徴は水分が地球に比較して極めて低い点にある。通常では雲の発生する状況にはない。しかし、水蒸気が存在すると赤外線吸収によって気温を上昇させ、対流を生じる可能性がある。極冠の縮小に伴って水分が高緯度帯に流れ出し、水蒸気として対流を生じる。極冠からノアチス山地に向けて黒い条痕が現れたのでそれを水蒸気の供給路と見なすことが出来る。この条痕を通して水分の供給が続く限り雲は発達し、気圧配置に従って移動、拡散したと考えられる。こうして宮本は雲の発生から火星大気の熱力学的考察を進め、雲の発生機構を解明した。なお、この論文には73枚の火星面のスケッチが添えられている。

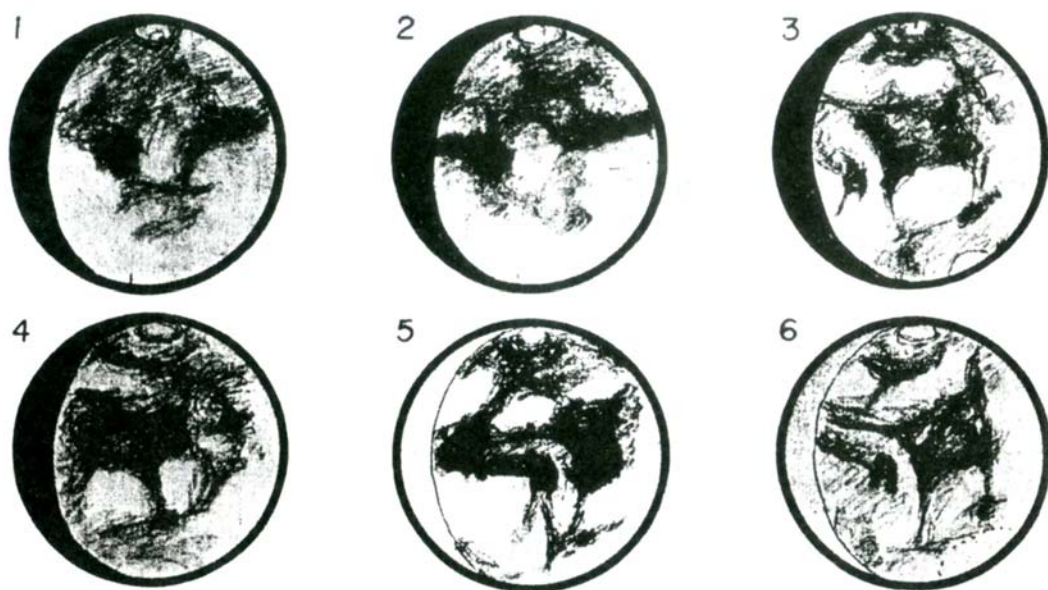


図5 花山天文台における火星面のスケッチの例
(1958年の衝における7月24日のスケッチ)。

1956年と1958年の衝における観測に基づいて宮本は火星大気的一般循環を考察している⁹⁾。一般循環については従来2つの見解があった。1つは火星面の模様の分布から火星には地球と同じように貿易風とモンスーンシステムが存在するというマクローリン (D. B. McLaughlin, 1954) の説、他は南極から北極へと両半球にまたがる循環があるというピッケリング (W. H. Pickering, 1930) の説である。後者は極冠の水分が北極冠から南極冠へ、また、その逆へと季節変動を示すことから唱えられた。宮本が注目したのは雲の運動と火星面における日射量の緯度分布である。大気圏外の日射量の分布は地球と同様で、緯度、経度の関数として計算できる。火星大気は希薄なので大気による吸収量が少ない。不透明度係数を 0.8 と見積もると火星面上の日射量の分布が見積もられる。それを見ると火星面の春分、秋分では日射量は赤道付近が最大で両極に向かって減少するが、夏至、冬至のときは日射量最大点がそれぞれ、北極、南極に移る。これは地球大気では日射の吸収量が大きいため極地方の温度は低下するが、火星では吸収量が小さく、また、極地帯では日照時間が長くなるためである。こうした温度分布から推定すると、春秋では大気循環は中緯度帯における偏西風や高低気圧配置など地球に似ている。これは 1958 年の衝における雲の動きから確認された。一方、夏至、冬至の時期には全く異なる循環流が期待される。例えば、南半球の夏のとき、南極からのエネルギーは赤道を越えて北半球に到達する。このとき南極付近は高圧帯になり、中緯度付近に低気圧ベルトが現れる。南からの風はコリオリ力によって東風卓越となるが、これは 1959 年の衝における巨大黄色雲の運動と調和している。こうして宮本は雲の運動と日射量の分布とから火星における大気循環が季節によって異なることを示し、従来の見解を統一した結論を与えている。

3.2. 月面地形と地殻構造

月面は月の海 (Mare) と呼ばれる暗い部分と大陸または山岳地帯と呼ばれる明るい部分に分けられる。クレータと呼ばれる多数のカルデラ状地形は無数にみられるが、山岳地帯に多く分布する。宮本は 1960 年に花山天文台の望遠鏡を用いて月面アトラスを作成し^{10, 11)}、それに基づいて月面の地形と地質構造について詳細な考察を行った^{12, 13)}。1960 年代に大きな問題になっていたのはクレー

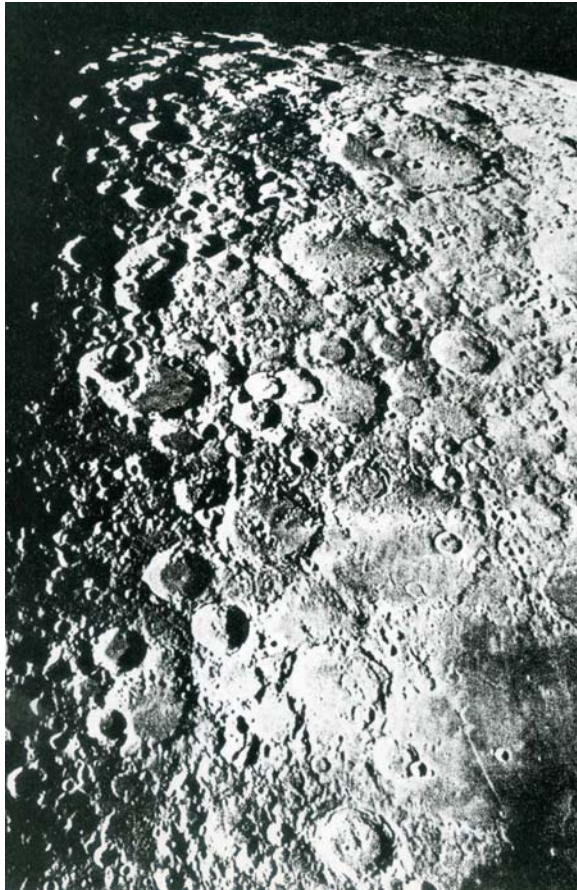


図6 花山天文台で撮影されて月面写真例(山岳地帯)。南極付近の山岳地帯。画面上方が南、上部右よりにクレータ・クラヴィウス、その左下がマキヌス、また、画面右下に湿りの海が見えている。

タの起源に関する隕石説と火山説との論争である。隕石説は主にボールドウィン (R. B. Baldwin, 1949) によって提唱された仮説で、大小すべてのクレータは隕石ないし小惑星の衝突によって生じた地形であると主張する。この説は月の質量が小さく、隕石物質の集積によって月が形成された後も内部加熱が十分でなかったため、溶融が生じなかったという仮定に基づいている。そのため、マグマ活動はほとんど現れなかった。それに対し、火山説はスパー (J. E. Spurr, 1944) によって体系化された説で、クレータの多くは地球の火山と同じように地殻の固化する過程で形成されたとの立場をとる。しかし、初期の火山説は地球の火山形成との類推が多かったため、月面地形の特徴を十分に説明することが困難であった。宮本は月面と地球表面とは環境が大きく異なる点に着目し、重力の差異、岩石の化学組成の違い、揮発物質の果たす役割の違いなどによって月独特の地形が形成されたとする新しい見解を展開した。

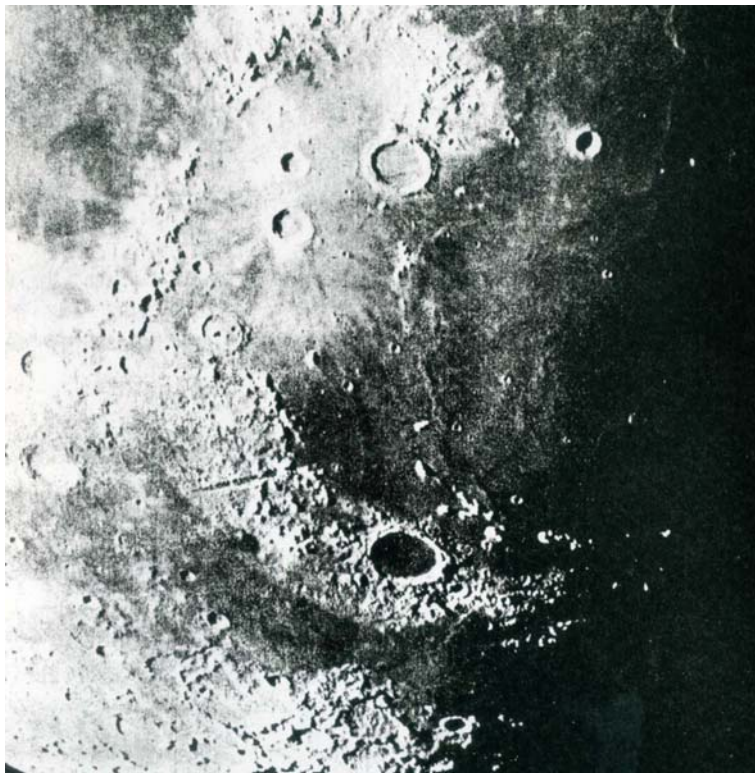


図7 花山天文台で撮影されて月面写真例(雨の海付近)。上が南、中央右寄りに広がるのが雨の海、その上部にクレータのアルキメデス、下部にプラトーが見えている。

(1) 重力効果

月は隕石物質の凝集によって生成され、当初は溶融状態にあったが、重力が小さいため冷却は急速に進み、厚みの薄い地殻が形成された。このため、大規模な造山運動は起こらず、海と山岳地帯の分布は不規則で、明白な山脈は存在しない。また、月の大気は薄いために浸食作用が働かず、クレータはほぼ形成時の形状を見せている。月面地殻のマグマ活動は長期に渡って続き、月の海にはゴーストクレータと呼ばれる溶岩原に埋もれたクレータの痕跡が多数見られるが、これらは重層的な溶岩流の発生を示している。また、山岳地帯でもクレータのサイズ、密度分布などに地殻形成時の歴史が刻まれている。

(2) 原始マグマの揮発成分

マグマ形成時に揮発成分を多く含む珪酸質物質と比重の大きい玄武岩質物質との分離が進んだが、この分離は地球ほど十分に進まず、月面の広い領域でマグマ活動が始まった。玄武岩質物質は海を作り、珪酸質物質は山岳地帯を形成する。揮発成分はマグマの固化温度を下げ、粘性を大きくするという効果をもち、特に粘性効果が重要である。

山岳地帯のマグマは珪酸質で揮発成分を多く含むため、火山活動は爆発的になり、溶岩流を生じない。これによって山岳地帯のクレータに溶岩流の痕跡のないことが説明される。また、それらのクレータの周壁が特に明るく輝くのは花崗岩質岩石の存在を示している。それに対し、海の部分は表面が極めてなだらかで粘性の小さい溶岩流によって形成されたことを示す。海に見られるクレータは山岳の裾野の傾斜が小さく、粘性はハワイ島のマグマより小さかったと推定される。

(3) 火山活動の継続性

1958年にコズイレフ (N. A. Kozyrev) はアルフォンスス・クレータに噴煙を認めて話題になった。その後の調べでは歴史的にもクレータからの噴煙や火山活動の記録が残されていることが知られるようになった。例えば三ヶ月の暗い月面に赤い斑点が認められたという記録もあるという。これらは火山説に有利であるが、まだ、困難が残されていた。ロシアのルーニク 2 号による探査で月には磁場のないことが示された。磁場の起源を内部のダイナモ作用とすると、月は中心まで固化していると推定される。これは現在まで続く火山活動と矛盾する。これについて宮本は高温の地殻内部には多数の揮発成分に満たされた泡状空洞が存在するためと説明した。月面下 20 km、温度 1000 度、圧力 500 気圧程度の空洞の温度が低下すると温度 700 度付近で揮発成分の結晶化が始まるが、水蒸気成分は次第に相対存在比を高め、それが花崗岩質蒸気の 7% 程度に達すると沸騰点を越えて爆発を起こす。岩石学で 2 次的沸騰と呼ばれる現象である。こうして沸騰した水蒸気の一部はアルフォンススに観測されたような噴煙となり、強烈的な爆発であればマグマ噴出となる。ただし、月面では重力が小さいため、泡状空洞からマグマの 2 次的沸騰まで 10 億年規模の長い時間を要し、また、その規模も大きくない。噴煙活動の記録が少ないのもそれを反映している。

このような宮本の研究¹⁴⁾は広く注目され、1964 年には国際月面学会会長、1967 年には国際惑星地質学会副会長に選任されている。

宮本は地質年代についてはあまり触れていないので、最近、月周回衛星「かぐや」が明らかにした月のマグマ活動史に触れておきたい¹⁵⁾。これは月面のクレータの数密度の解析から年代を決定するクレータ年代学による推定で、「かぐや」は高い測地精度で年代を導いた。それによると月面全般では 25 億年前まで、嵐の大洋、雨の海では 15 億年前までマグマ噴出が起こっていた。一方、月隕石の年代決定から 43 億年前にはすでにマグマ噴出活動が始まっていたことが知られているので、月の主要なマグマ活動は 20 億年にわたって続いていたと推定されている。

文献

- 1) Shinjo, S. 1924, Jap. Journ. Astronomy and Geophysics, Vol. 1, 183, General consideration of the variable stars from the standpoint of stellar evolution.
- 2) 新城新蔵、1931、岩波講座「物理学および化学」、宇宙物理学 II.C. 宇宙進化論.
- 3) 永野宏、佐納康治、京大地球物理学研究の百年、113 -127、上海自然科学研究所物理学科と京都帝国大学理学部との関わり.
- 4) 新城文庫目録、富田良雄ほか新城文庫研究会編、2000 年刊.
- 5) 長岡半太郎 1939、自然第 8 号、3 月号、82 - 85、「故新城新蔵君を憶う」、(「自然」は上海自然科学研究所刊行の日本語雑誌).
- 6) Matsuyama, M. 1918, Mem. College of Sci., Kyoto Imp. Univ., 3, 17 - 68, Determination of the second derivative of the gravitational potential on the Jaluit Atoll.
- 7) 宮本周子編、1993、星月夜—宮本正太郎追悼記.
- 8) Miyamoto, S. 1957, Contr. from Inst. Astrophys. and Kwasan Obs. No. 71,1, The great yellow cloud and the atmosphere of Mars (1957).
- 9) Miyamoto, S. 1960, Contr. from Inst. Astrophys. and Kwasan Obs. No. 88, 27, On the general circulation of the Martian atmosphere (1960).
- 10) Miyamoto, S. and Matsui, M. 1960, Photographic atlas of the Moon.
- 11) Miyamoto, S., Hattori, A., Nakai, Y. *et al.*, 1964, Photographic atlas of the Moon (Second edition).
- 12) Miyamoto, S. 1960, Contr. from Inst. Astrophys. and Kwasan Obs. No. 90,1, A geological interpretation of the lunar surface.
- 13) Miyamoto, S. 1960, Contr. from Inst. Astrophys. and Kwasan Obs. No. 96,1, Magmatic boiling and underground structure of the Moon.
- 14) Miyamoto, S. 1964, Icarus, 3, 486-490 ; 4, 421 - 424. Morphological aspect of the lunar crust., I, II.
- 15) 諸田智克 2011, ISAS ニュース No. 360, p.4, 「かぐや」が明らかにした月のマグマ活動史.

(著者略歴)

小暮智一：1926 年生まれ。京都大学理学部宇宙物理学科卒、理博（論文題目：輝線 B 型星の輻射場とバルマー通減率について）。茨城大学理学部物理学科教授、京都大学理学部宇宙物理学科教授を経て 1990 年退官、京都大学名誉教授。美星天文台長を歴任。専門は恒星分光学、銀河物理学。