

## 宇宙地質学の方法論について\*

V. K. YEREMIN\*, Ya G. KATS\*

岸本文男\*\*訳

全学問分野を含めた科学技術革新は、地質学の領域にも一大進歩をもたらした。世界の海底の調査や人類の宇宙飛行、それは地球の構造に関する我々の概念をいちじるしく拡げることとなった。宇宙空間からの研究法によって得られる情報は、地球の構造を惑星的規模で研究し、さらに理論地質学の最重要問題を解決し、鉱物資源の分布規則性を明らかにすることが可能な多量の資料を地質学者に与えてくれる。宇宙からの方法で入手した情報を解析し、総括するには、地質学の中で新しい方向——宇宙地質学 (cosmic geology) の創設が不可欠となってきた。この新しい方向は最近になって形作られてきたのにもかかわらず、今日すでに地殻の構造の研究、ひいては地球科学の発展への輝かしい未来が待っているものと自信を以て語る事ができる。

現在、宇宙地質学は、通常、航空地質学的研究 (aerogeological investigation) の実際の経験から受け継いだ地殻の遠隔研究法を用いている。この方法は天然対象物から放射、反射あるいは同対象物によって吸収される各種スペクトル領域の電磁波の利用を基本とするものであり、地球表面の多重周波帯探査 (multifrequency sounding) が宇宙空間からの遠隔研究形態の基礎である。利用する電磁波の振動周波帯によって、次のような宇宙地質学的研究法の区分ができる。

- 1) 肉眼観察 (0.4–0.7  $\mu$ )
- 2) 写真およびテレビジョン撮影 (像) (0.3–1.1  $\mu$ )
- 3) 分光撮像 (0.3–3.0  $\mu$ )
- 4) 赤外線撮像 (1.8–5.3  $\mu$  および 7–14  $\mu$ )
- 5) レーダー撮像 (1 mm–100 cm)

さらに、磁気研究法、ふく射研究法、X線研究法などの方法がある。

宇宙船からの地球表面の肉眼観察は Yu. A. GAGARIN が宇宙飛行したときに始まり、ひき続き他の宇宙飛行士によって行なわれてきた。特別に地質学の予備教育を受けた宇宙飛行士によって実施された上記肉眼観察法はきわめて有効な地質関係の情報をもたらしている。現在まで重ねられてきた、高度 300 km 前後で飛ぶ操縦可能な宇宙船から行なわれる肉眼観察の結果は、人間の眼が色のコントラストが弱く、延長の小さい対象物でも識別できることを示している。このような研究法は、たとえば、海水の微妙な色調の差から海底の深さを判断し、海堆の輪郭や陸棚の境界を画き、沿岸帯中の海底谷を識別し、海盆中で水が流れている河食崖錐地区を確認することを可能にしている。またこの方法は、B. V. VINOGRADOV と K. Ya. KONDRAT'YEV [5] が指摘しているように、写真撮影のために前もって指示されている対象を発見・確認し、さらにまた研究上興味あるものなのに何らかの原因によって宇宙飛行計画の立案の際にまだ知られてなかった対象を選び出すことに役立つはずである。

宇宙空間からの肉眼観察によって得られる情報の価値がきわめて高いにもかかわらず、地球の地質の研究に疑いもなく大きな役割を果し得る上記研究法は偵察的な意義しか与えられていない。しかし、ソ連では長寿命軌道ステーションの完成によって、近く、この方法が広く用いられるはずである。

宇宙空間からの写真およびテレビジョン撮影 (像) は、大量の情報入手を保証してくれるので、もっとも期待できる方法である。宇宙からの写真<sup>注1)</sup>は航空写真に較べて全く新しい価値を備えた性質のものである。航空写真は一般に 500–700 km<sup>2</sup> を越えない面積を一枚に収め、宇宙写真は航空写真の数10倍、ときには数 100倍もの面積を写しとる。宇宙写真のこの高い広視野性は、地球のきわめて大規模な

\*V. K. Еремин, Я. Г. Кац (1973): О методах космической геологии: Известия высших учебных заведений, геология и разведка, стр. 8-13.

\*\*鉱床部

注1) 以下、「宇宙写真」という。

地質対象（超大構造 megastructure）を認め得る可能性を与えてくれる。宇宙写真のまた別の特徴といえるのはその映像の大観効果である。すなわち、別の構造によってバラされ、或いは複雑にされた地域の構造の各細部が大観して再現された映像として把握できるのである。また、宇宙写真の面白い性質として、その写真にルーズな地層を「透し」て構造の「透視像」<sup>注2)</sup>が見られることも指摘できる。この性質は多くの卓状地地域の深部基盤構造をより正確に理解するのに役立つが、その際、撮影高度が高ければ高いほど堆積被覆層下の地殻の深部構造はより明瞭に読みとることができることも確認済みである。

以上のように、宇宙写真の大観性（小縮尺度）は、視野が広いということのほか、映像対象の幾何学のおよび光学的な一般化（generalization）の精度を高める。宇宙飛行体によって得られた写真映像上の地質情報は定性的な性質も定量的な性質も備え、それは常に撮影対象の地質構造の特性、地形の切刻程度、撮影時の気象条件、撮影に用いた写真機材・検知素子および装置などの品質とタイプに直接に左右される。

宇宙写真上の地質対象の検討は通常の写真地質解読法に従って行なわれるが、その際、映像のディテイルが減って、大きく一般化されるため、微地形の形態を表わす指標が失われ、小規模な侵食切刻像や割れ目分布帯を表わす手がかりも消え、より高次の上記諸コンポーネントの役割が「増幅」されることに注意しなくてはならない。

ソ連およびアメリカの研究者によって蓄積された、黒白・カラー・多重波長帯域の各宇宙写真を地質学的な目的に利用した結果は、宇宙からの映像を解析して得た情報が地球の地体構造区・地質構造区・地形区の各区分を正確に同一基準でそれぞれ行ない得ること、現世構造運動の活化度・出現度を分析し得ること、延長と落差を決定しながら地殻の古期構造断層を追跡し得ること、埋没潜頭地質構造を明らかにし得ること、基盤構造を解読し得ること、貫入生成体と新期熔岩被覆体の輪郭を画き得ること、そしてその他幾つかのかなり重要な地質学的課題を解決し得ること、を物語っている。

人工気象衛星から送られてきた地球のテレビジョン撮像の地質学的解読によっても、きわめて貴重な情報が得られる。宇宙テレビジョン研究法の主な特徴となっているのは、地球の全地域のほとんどがテレビジョン撮像として写し出されるという点にある。さらにこの方法の別の特徴は、地球表面の映像が人工衛星（「メテオール」、「コスモス」、「ニンパス」、「エッサ」など）に装備された望遠レンズによって直接感光膜上にでなく受像器に送られ、その信号が磁気テープに記録されるか、真直ぐに地球へ送られ、テレビスクリーンに撮像として再現される、ということにつく。地球軌道気象衛星に積みこまれているテレビジョン装置は、高度最高 1,000 km でもって分解能 0.3 km から 6.0 km となる各種縮尺（1 : 7,500,000から 1 : 14,000,000まで）のテレビジョン像を得ることができるようになっている。いうまでもなく、テレビスクリーンに写し出される撮像の質は宇宙写真の場合よりも一段低い。それだけでなく、一般に、宇宙テレビジョン撮像の際には必ずしも被写範囲の縦・横縮尺が揃うとは限らず、そのため立体観察は似かよった軌道からテレビジョン撮像した当該被写範囲セットがうまく組合せられる場合に限り可能となるのである。

テレビジョン撮像の質が宇宙写真の質よりも悪いにもかかわらず、その映像の研究は研究対象の地体構造に関して多くのきわめて重要な情報を提供し、褶曲や断裂の大規模な地質構造を解明し、地体構造区の区分を可能にする。地球表面のテレビジョン映像を解読した結果は I. I. BASHILOVA, V. K. YEREMIN, G. V. MAKHIN の論文に詳しくまとめられ、100万 km<sup>2</sup> 台という広大な範囲でオリジナルな地体構造区分布図を組み立てることに成功している。

宇宙写真とテレビジョン撮像の将来性を考えると、次のような状態を克服する必要がある。すなわち、テレビジョン撮像の利用が、その経済的効果や繰り返し再現性の利点があるにもかかわらず、テレビジョン撮像の縮尺・分解能ともに宇宙写真と比肩し得ないがために、現在まだ宇宙写真に入っていない地域だけを目標としていることである。

数種の特異な宇宙映像は地球の地球物理的パラメータを研究できる可能性を与え、人間の眼には見えない光学機器でも捕えられない電磁スペクトルの部分を地質学的目的に活用できる可能性を与えてい

注2) 実際に透過するのではなく、付随する feature から下部構造体が把握できるということである。

る。なかでも、現在もっとも発達してきたのは赤外線撮像と分光撮像および地球の磁場と放射能場の研究である。

分光撮像は、各種周波帯での天然対象物の自然電磁波スペクトルのふく射にもとづくものである。適当なスペクトル帯の選択は撮像課題によって決まる。

大気圏を研究するには、可視スペクトルおよびそれに近い赤外線スペクトルを利用している。赤外線スペクトルの測定はそのふく射表面の温度の不均一分布を決めるのに役立つ。波長 $\lambda = 1.5$  cmの場合には大気圏の影響が取り除けるので、マイクロウェーブ（レーダー）の映像はこの波長域の電磁線の地球表面からの反射を対象とする場合にもっとも普遍性が大きい。その際、それぞれの撮像対象はスペクトルの鮮明度特性曲線で解釈される。

1972年、地球資源観測法の開発をめざしてアメリカで技術衛星「ERST-1」が打ち上げられた。この衛星の遠隔探査システムは3種のスペクトル領域で作動する「スーパービジョン」型テレビカメラ3台を含み、4—5電磁波スペクトル帯で作動するスキミング装置を備えている。入手情報の記録は磁気レコーダを通して行なわれ、その蒐集と処理は地上自動ステーションで行なわれている。

スペクトル撮像法が備えている大きな将来性は、ソ連および外国での専用機材の急速な発達をもたらした。たとえば、フィルム「ベンディックス」（アメリカ）を用いて入手情報を機械的に処理し、前もって与えた或る色の中で各スペクトル帯別に記録された映像をコンピュータによって処理できる24チャンネル、スキミング装置が製作された。地質学上の目的にスペクトル指標を応用する上での問題点は、各天然対象物のスペクトル特性の研究が不十分なことにある。

赤外線撮像によると、地球表面の広域および惑星の規模の温度異常が確認できる。その温度異常は、太陽によるものと地球の内因的な熱によるものとの主として2種の天然熱源によって生ずる。大気圏による赤外線の選択吸収能と分散のため、赤外線撮像は赤外線スペクトルの狭い部分で実施する。アメリカの人工衛星は、完全な映像を得るのに適した周波数帯 $3.5-5.5 \mu$ で宇宙から撮映している。ソ連の人工衛星は周波数帯 $8-12 \mu$ で赤外線映像を得ており、まる一昼夜連続撮映を行なっている。通常、このような研究は大気圏上層の調査のためであったが、赤外線スペクトルによる宇宙写真は地球の下の大気圏の温度分布の不均一な状態を明らかにし、そのことが同写真を地質研究に活用できる可能性を与えてくれる。

現在の研究段階で大いに注目されているのは、人工衛星から使用できる最適な可能性を明らかにする目的で、自然媒体の探査のための赤外線撮像飛行体を開発することである。かつてアメリカで開催された第7回国際環境遠隔調査シンポジウムでの一連の講演の中で赤外線撮像の効果豊かな可能性を明らかにした具体的な成果が披露されている。たとえば、新期火山活動区の地質図化に当って有効な結果が得られ、同活動区の各種岩石の温度差と併せて火山活動性の大きい潜頭地域も記録されている。割れ目水の探査や地下水流の解明のための水理地質学的研究の実施に当たっても、赤外線撮像によって興味深い結果が得られている。また、特定条件下での赤外線映像は異なる熱容量の岩石の接触部や硫化物を含有する岩石を明らかにし得る。

レーダー映像は、気象条件に妨げられずに地球の表面を研究することができる。レーダー映像の地質学的解釈は画面のトーン、構成、構成体の輪郭の解析にもとづいて行なわれる。当該地質情報の質と量は、対象地域の地質が地形に反映している度合に左右される。しかし宇宙空間からのレーダー映像利用の試みは、装置がかさばるために制限されてしまう。そのほか、この種のレーダー映像利用上の難点となるのは、撮映範囲の座標軸の決定である。現在のところ、このレーダー投映はソ連の場合でも外国の場合でも、airplane version に利用されつつある。

宇宙空間からの地球の磁気探査は普通のタイプの地球磁場について考察する方法である。1958年からソ連で始められ、地球全域の磁気探査は極軌道からだ短時日で行なえるのに、赤道軌道で飛行する人工衛星から惑星規模の磁気分布測定が何回も行なわれている。その測定値はコンピュータで処理され、その結果は磁場ベクトル係数の各地球一周分布の形で、あるいは地球の主要磁場図の形で表現される。形態的には、後者は多くの広域異常を含んだ低周波数フィールドである。これを核とマンツルの境を源

とするフィールドと考えることができる。宇宙磁気探査の発達は各種高度からの地球磁場の研究を可能にただけでなく、他の惑星の磁場の研究も可能にしている。

宇宙軌道科学ステーションが多数出現するにつれて、天体の放射線や宇宙線ノイズの幅広い研究ができるようになってきた。1968年にソ連で「コスモス」シリーズの特殊な天文衛星が、そして1970年アメリカでX線衛星「ウグルー」がそれぞれ打ち上げられた。現在、「サリュート」型軌道衛星とアメリカの宇宙船によって、銀河系のさまざまな対象のX線ふく射線の定期観測が行なわれている。

上述の探査のほか、現在、紫外線スペクトルの地質学的目的への利用法や同じくレーザー光線の利用法が検討されている。

宇宙地質学 (cosmic geology) の発展は、地下の謎を解く質的に新しい段階にある。そして、宇宙地質学は広大な地域における理論上および実用上の問題を迅速かつ確実に解くことができる可能性を研究者たちに与えている。しかし、効果性が大きいにもかかわらず、研究者たちは頭の切換えができず、宇宙地質学的諸方法を地表での研究法の補助に用いているにすぎない。宇宙からの研究法と地表での研究法を総合して用いれば、最大の効果を得ることができる。宇宙的方法が出現したことによって、地球の到達困難もしくは到達不可能な地域の調査研究が可能になったが、ソ連の地質大臣、ソ連科学アカデミー正会員 A.V. SIDORENKO がいみじくも述べているように、「宇宙からの研究は、航空地質学的研究の場合と同じように、地球表面を直接に調査・研究しながら地質学者が潜頭鉱床を探査・発見し得るようになった現在でも、有用鉱床を直接発見するものでない。宇宙からの研究は鉱物資源の胚胎が考えられる地質構造を明らかにし、地殻の構造の規則性とその構造中での鉱物資源の配置をより正確に把握する上で役に立つ」。

宇宙地質学の適用分野でソ連の専門家が重ねてきた一定の実験は、まだ広範な地質学的問題の解明をもたらしたといえない。しかしその実験は一連の科学研究機関と生産機関の財産であり、それは広範な関係研究者集団に引き継がれる必要がある。

## 文 献

- BASHARINOV A. Ye., GUREVICH A. S., YEGOROV S. G. (1969): 探査衛星「コスモス-243」での熱輻射測定による地球物理パラメータの決定. Докл. АН СССР, т. 188, No. 6 (露文).
- BASHILOVA I. I. (1971): 宇宙からの地球. Наука и жизнь, No. 7 (露文).
- BASHILOVA I. I., YEREMIN V. K., MAKHIN G. V. (1972): 広域地質構造研究のため大気圏外から撮った地球のテレビ映像の利用結果. Советская геология, No. 1 (露文).
- VINOGRADOV B. V., KONDRAT'YEV K. Ya. (1970): 宇宙の地理学研究法およびその天然資源研究への開発と適用の道. Известия АН СССР, серия география, No. 1 (露文).
- VINOGRADOV B. V., KONDRAT'YEV K. Ya. (1971): 宇宙の地理学研究法. Гидрометеониздат (露文).
- GONIN G. B. ほか (1971): 宇宙高度からの写真撮映. 論文集「航空地質研究法」, Недра (露文).
- GONIN G. B., YAKOVLEV N. A. (1971): テレビジョン投映. 論文集「航空地質研究法」, Недра (露文).
- GUSEV N. A., KARIZHENSII Ye. Ya., SHILIN B. V. (1972): 活地熱活動地域研究のための赤外線航空写真. Советская геология, No. 1 (露文).
- YEREMIN V. K. (1971): 地質研究に適用される航空調査法. 論文集「航空地質研究法」, Недра (露文).
- 著者集団 (1972): 操縦可能軌道ステーションからの自然媒体の研究. Гидрометеониздат (露文).
- KELL' L. N., KOMAROV V. B. (1967): ソ連における航空調査法の現状と発展の道. 論文集「航空写真とその利用」, Недра (露文).
- SIDORENKO A. V. (1972): 宇宙と地質学. Наука и жизнь, No. 5 (露文).
- SKARYATIN V. D. (1970): 軌道からの地質学的情報: Авиц. и космонавт., No. 11 (露文).
- STREL'NIKOV S. I. (1972): 地質研究への指向性電波航空撮映資料利用法の諸問題. Советская геология, No. 3 (露文).
- TRIFONOV V. G. (1973): 地球の宇宙映像の地質学的解読の研究について. Изв. высш. учебн. завед.,

- геол. и разв., No. 7 (露文).
- SHILIN B. V., GUSEV N. A. (1969): カムチャツカ半島の火山の地熱写真. Советская геология, No. 5 (露文).
- KHAIN V. Ye. (1970): 地質学に科学的革新が生まれたか? : Природа, No. 1 (露文).
- AMAD M. U., GHOSH B. A., ANTALOVICH J. W. (1971): *Temperature survey of coal mines producing acid water*. Proceed. of the 7-th intern. symp. on remote sens. of environment Michigan.
- BODECHTEL J., GIERLAFF-EMDEN A. (1969): Weltraumbilder der Erde. München.
- BRENNAN P. A., LINTZ J. (1971): *IR-remote sensing of some sedimentary rocks*. Proceed. of the seventh intern. symposium on remote sensing of environment Michigan.
- CASSINIS R., MARINO C. M., TONELLI A. M. (1971): *Evaluation of thermal IR imagery on Italian volcanic areas-ground and airborne surveys*. Proceed. of the 7-th intern. sympos. on remote sensing of environment Michigan.
- DAVIES D. H.: Radar a new mapping clevice. *De Ingenieur*, N33.
- Earth photographs from Gemini III and V (1968) :NASA, Washington.
- Earth photographs from Gemini VI through XII (1968) :NASA, Washington.
- GARRIG Ch. (1971): Remote sensing: *Euro Spectra*, vol. 10, N3.
- HASE H. (1971): Surface heat flow studies for remote sensing of geothermal resources: *Proceed. of the 7-th intern. sympos. on remote sensing of environment Michigan*.
- HOWARD J. A. (1971): Passive remote sensing of natural surfaces by reflective techniques. *Geoexploration*, vol. 9, N2-3.
- KIRK J. N., WALTERS R. L. (1966): Radar imagery, a new tool for the geologist. *Compass gamma, Epsilon*, vol. 43, N2.
- LOWMAN P. D. (1966): Photography from space—geologic application. *New-York Acad. Sci. Ann.*, vol. 140.
- LOWMAN P. D. (1969): Geologic orbital photography; experience from Gemini program: *Photographia*, vol. 24.
- Verstappen H. Th. (1970): Orbital photography and the geosciences—a geomorphological example from the Central Sahara: *Geoforum*, N2.
- Wolfe E. W.: Thermal IR for geology: *Photogramm Eng.*, 1971, vol. 37, no. 1.