

日本人宇宙飛行士を対象とした地質学訓練

高橋 雅紀¹⁾

1. はじめに

国際宇宙探査に向けた機運がますます高くなっている今、日本人宇宙飛行士の募集が13年ぶりに行われました。JAXA(宇宙航空研究開発機構)は、NASAが主導する「アルテミス計画(国際的な有人月・火星探査計画)」に参画することが決定しています。これまで日本の宇宙飛行士は、地球低軌道を周回する国際宇宙ステーション(ISS)において、様々な実験を含む国際共同プロジェクトに参加してきました。そして、新たに始まった「アルテミス計画」では、2025年以降、月面に人類を送り、ゲートウェイ(月周回有人拠点)計画を通じて月に物資を運びます。そして、月面拠点を建設し、月面における人類の持続的な活動を目指します。日本人宇宙飛行士が、地球低軌道の活動から、月や地球外惑星に探査を広げる大きな転換点を迎えようとしているのです。JAXAでは、今後は5年に一回をめどに、宇宙飛行士の募集を行うとしています。

このような背景のもと、月面における探査や岩石試料採取など、これまでとは異なる技能が宇宙飛行士に求められます。そのため、地質学や惑星科学に関する基礎知識や、岩石試料を採取する際に必要なスキルを強化する必要が高まり、JAXAではこのたび国内で初めて宇宙飛行士向けの地質学訓練を行いました。筆者はJAXAよりこの分野の専門家として講師を依頼されました。この記事では、日本において始まった日本人宇宙飛行士に対する、筆者が担当した室内および野外における地質学訓練の様子を紹介します。

現在、日本人宇宙飛行士として、若田光一さん、野口聡一さん、古川 聡さん、星出彰彦さん、油井亀美也さん、大西卓哉さん、金井宣茂さんの7名が活躍しています。野口宇宙飛行士は2020年11月から2021年5月まで、星出宇宙飛行士は2021年4月から11月まで国際宇宙ステーションに長期滞在していましたので、今回の地質学訓練には参加できませんでした。若田宇宙飛行士は今年(2022年)の秋以降、古川宇宙飛行士は2023年頃に国際宇宙ス



第1図 今回の地質学訓練に参加した3名の日本人宇宙飛行士(©2017JAXA, ©2021JAXA)。

1) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

キーワード：宇宙飛行士，地質学訓練，地学教育

ーションでのミッションが予定され、訓練が続いています。そのような状況で、今回の地質学訓練には、油井さん、大西さん、金井さんの3名の宇宙飛行士が参加しました(第1図)。当然ですが宇宙飛行士の皆さんは多忙で、スケジュールは予定でびっしり埋まっており、計5日間の地質学訓練の日程調整は大変でした。今回の地質学訓練に際し、企画から調整、準備、そして訓練当日のサポートは、JAXA宇宙飛行士訓練担当の皆さんが対応してくださいました。

さて、日本における宇宙飛行士を対象とした地質学訓練は、すべてが初めての試みです。訓練を通じて新たな課題が浮かび上がり、その経験を次の訓練に活かすことによって、このプログラムをより効果的なもの向上させることができます。地質学訓練は手探りの状態で始まったばかりですが、あらゆることは最初の一步から始まるのです。

2. 地質学訓練(講義)

宇宙飛行士の地質学訓練は、室内における講義と屋外における野外訓練(実習)に分けて行いました。私は2014年から地学オリンピック日本代表高校生を対象に、地質学の講義と野外指導を行っています(高橋, 2017b)。今回の地質学訓練では、資料や教材、野外における地層や地形の観察地点などは、それらを活用しました。講義は2021年7月15日と16日の二日間に産総研の研究室で行い、野外訓練は翌週の19~21日に、埼玉県秩父盆地と群馬県妙義山で行いました。実際の岩石や地層を野外で観察することが地質学の基本なので、二日間の講義はそのために必要な最低限の知識を学ぶための時間です(第2図)。講義と野外訓練の間にあまり時間を空けず、知識と経験を効果的に結びつけ、体感的に地質を理解してもらうことを意図しました。

講義は二日間しかありませんから、初日は実際の地形図を用いた演習を行いながら、地形学の基本を学んでもらいました。地形学の基本は地形図の読図ですが、二次元の地形図に描かれた等高線から三次元の起伏を頭の中に再現することは、かなり高度な能力を必要とします。その理由は、私たちは生活のほとんどを地面の上で過ごしているの、鳥のように上空から眺めた景色を体験する機会が少ないからでしょう。地球が球体であることを実感することがほとんどないように、地形を三次元的な起伏として体験することもそれほど多くはありません。高い山を見ることはあっても、それは横から眺めた景色であって、広がりを持った起伏としては認識していないのです。最初は典型的な河岸

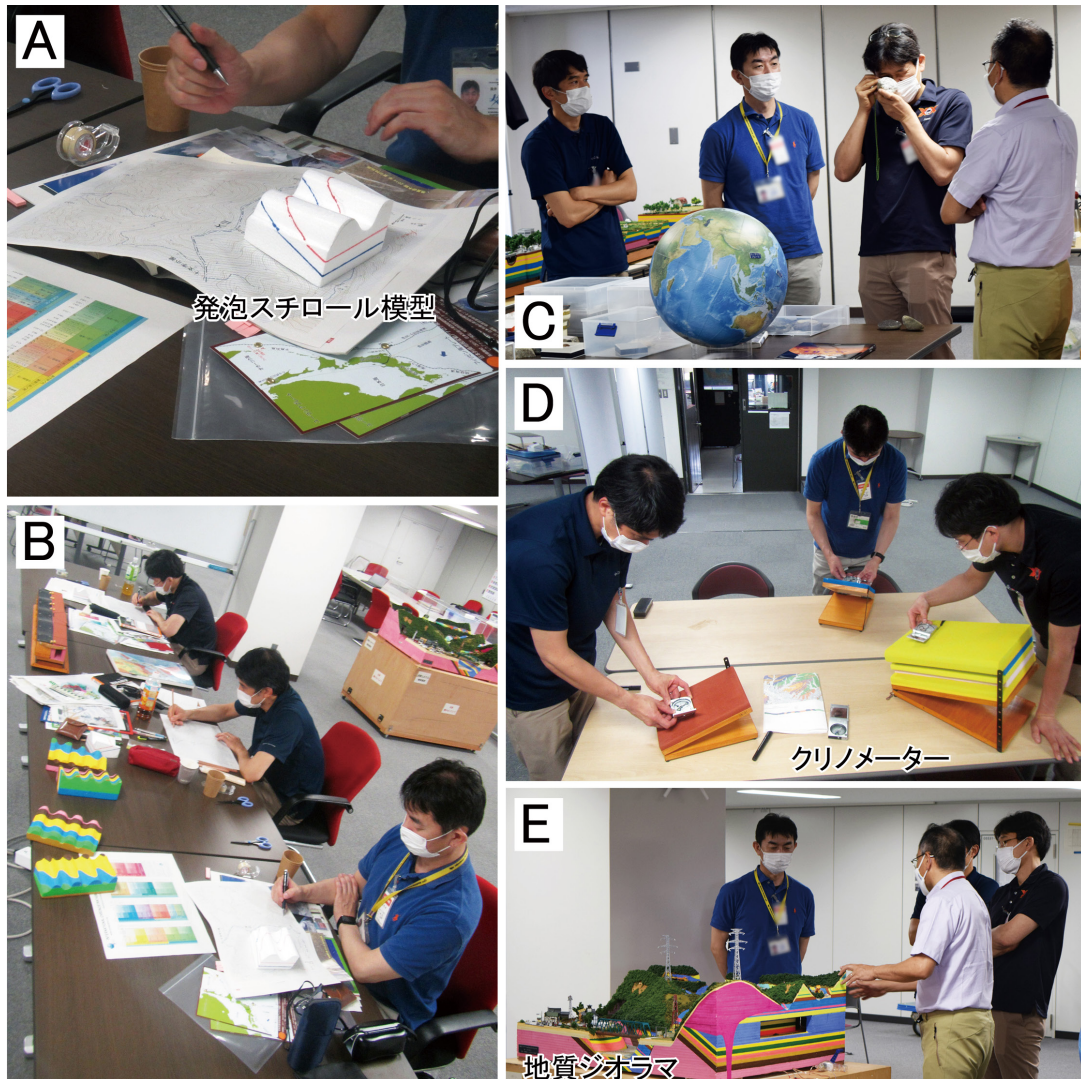
段丘が発達する地形図の読図から始めて、断層による直線的な侵食地形など、少しずつ観察する眼を養っていきました。

地形図に慣れたところで、次は地質図の基本から体感してもらいました。私は地学オリンピック日本代表高校生や大学の集中講義、さらに一般市民向けのアウトリーチ活動(小松原ほか, 2016; 高橋ほか, 2019)を目的に、地質学に関するさまざまなアナログ模型を製作しています(高橋, 2017a)。今回の地質学訓練でも、それらの模型を活用しました。最初は発泡スチロールで作った簡単な地形模型に、フリーハンドで露頭線を描く作業です(第2図のA)。露頭線とは、地層の境界面(地層面)と地形面の交線を地形図にトレースした境界線で、地質図の作図の基本です。実際にやってみると結構難しいのですが、地層が平面でも露頭線はなぜ曲線になるのかなど、理屈だけでなく体感しながら理解することができます。

つづいて等高線が描かれた架空の地形図を使って、地質図学に基づく露頭線の作図を行いました(第2図のB)。受講者の全員が高校の地学を履修しているわけではないので、地形図には最初から補助線を描いておきましたが、何通りかの作図作業を繰り返すと、地質図学の論理を理解することができます。最終的には、各自が補助線を引きながら、露頭線を作図することができるようになりました。

これらは室内で行う作業ですが、屋外における地質調査の事前訓練として、ルーペを使った岩石の観察(第2図のC)や、クリノメーターを用いた地層面の走向・傾斜の測定(第2図のD)も体験してもらいました。これらは条件の整った室内での擬似的な経験で、翌週に行う実際の野外での地質学訓練との違いも体感してもらいたいです。天候が悪いときや沢の奥の暗い場所では、明るい室内照明の下で典型的な岩石を観察する場合と状況が大きく異なります。同じ岩石でも、調査環境の違いによって見え方が異なることを理解していないと、岩石試料の採取に支障をきたします。そのため、様々な環境下での体験がとても重要になります。

これらの地形学および地質学の実習においては、私が手作りした地質ジオラマ(第2図のE)や断層模型なども活用しました。地形図や地質図は、それぞれ地球表層部の三次元の形態や地層・岩石の分布を表しているの、二次元の図に比べて三次元の模型の方がはるかに理解しやすいからです。講義はわずか二日間のため最小限の内容しか指導できませんでしたが、それらの体験を実際の野外で確認するため、翌週には埼玉県の秩父盆地と群馬県の妙義山に出かけて野外訓練を行いました。



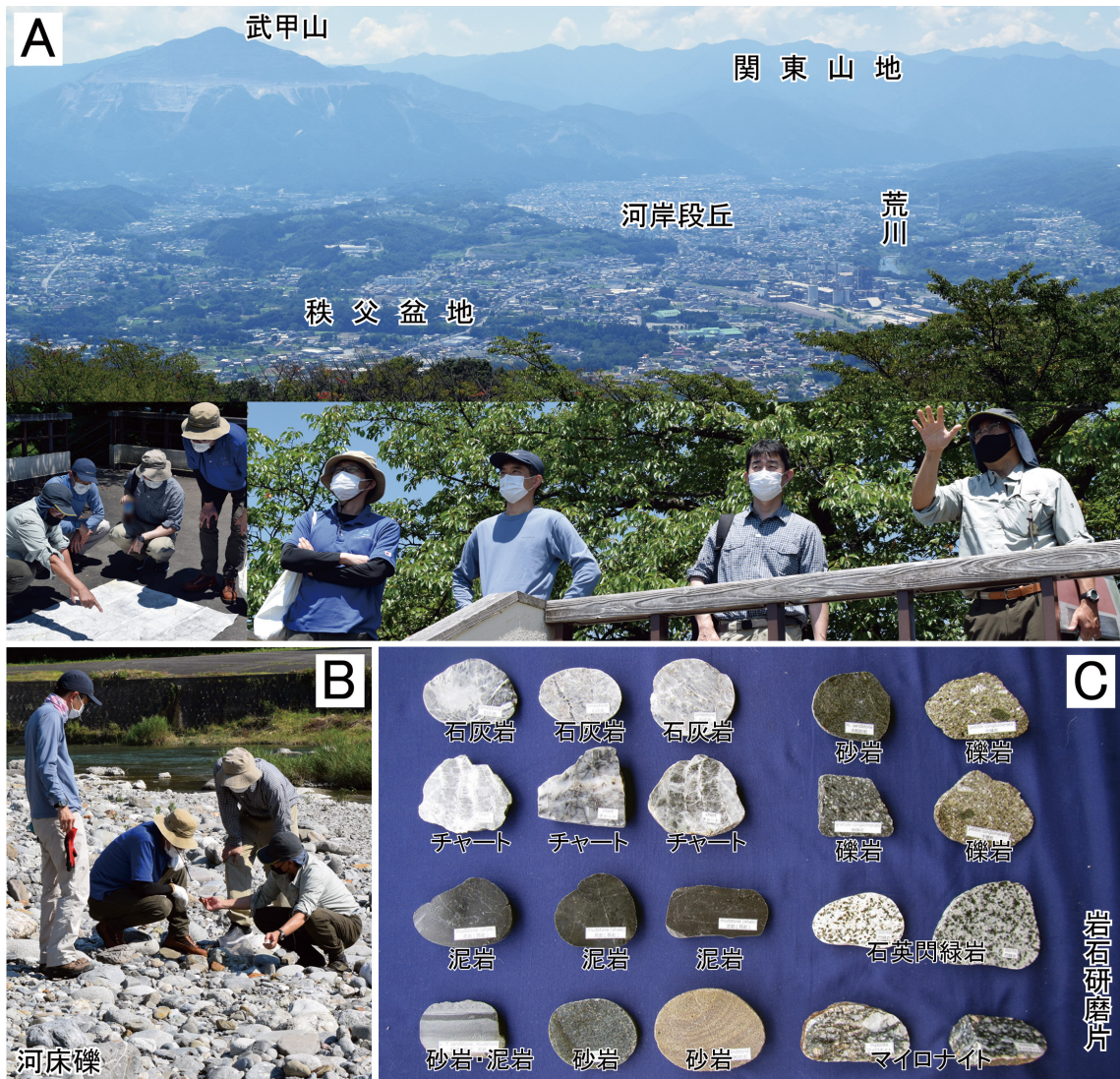
第2図 二日間行った室内における地質学訓練。A：発泡スチロール模型を使った露頭線の記入，B：地質図学に基づく露頭線の作図，C：ルーペによる実際の岩石の観察（©2021JAXA），D：クリノメーターを用いた走向・傾斜の測定，E：地質ジオラマ模型を用いての地層や断層面と地形面との関係の確認（©2021JAXA）。

3. 地質学訓練（野外実習）

地質学訓練の野外実習は、最初は実際の景色と地形図を見比べながら、地形図から地形の三次元的形態や特徴を見だし、さらに鳥瞰図を頭に思い浮かべる訓練から始めました。幸い天候にも恵まれたので、^{みのやま} 箕山山頂の展望台から、関東山地に囲まれている秩父盆地の地形や盆地の中に発達する河岸段丘を観察しました（第3図のA）。南に聳える武甲山は三畳紀の石灰岩からなり、昭和の高度経済成長を支えたセメント用の石灰石の採掘は現在でも続いています。そのため、武甲山の北面斜面は広い範囲が削られていて、水平方向の採掘跡（段差）が刻まれ三角形に露出した石灰岩は、まるで巨大なピラミッドのようです。一方、秩父盆地の地形を特徴づける河岸段丘は、展望台から何段も識別す

ることができます。異なる高さの段丘の境界は急斜面の段丘崖になっていて、それらは宅地や畑地等には使われないために、樹木による緑のベルトとして確認できます。現在の荒川は、最も低い河岸段丘の中を蛇行しながら河床を下刻しています。

つづいて荒川の河床に下りて、河原の石を観察しました（第3図のB）。河原の石の観察は、私が地質調査に初めて出向いたときに必ず行う作業です。河原の石は摩耗されているので表面が観察しやすく、岩石の種類や特徴を知るには最適です。同じ花崗岩でも、白亜紀（中生代）の花崗岩と新第三紀（新生代）の花崗岩では見かけの特徴が異なることが多く、やはり現物を観察するのが一番です。河原に転がっている石を種類ごとに集め、観察して目を慣らしていきます。地質調査において実際に観察する露頭は、日陰だった



第3図 埼玉県秩父盆地で行った地質学訓練の様子。A：養山（582 m）山頂の展望台（美の山公園）から見た秩父盆地の地形（©2021JAXA），B：荒川河床の礫の観察と上流域の地質の推定（©2021JAXA），C：主要な岩石の研磨片試料（標本）。

り風化していたり、必ずしも典型的な地層や岩石を観察できるわけではありません。そのため、前もって典型的な岩石を見ておくことは、その後の地質調査をスムーズに行うためにはとても大切な事前準備なのです。

さらに、河原に転がっている石は、必ず上流から流され運ばれてきたものです。したがって、この河原の上流に分布する地質を反映した岩石を、一ヶ所で観察することができるのです。事前に行った地形学の講義では、地形図に水系と分水界を描く作業を行っていただきました。ある地点（河床）を通過する流水は、その上流の水系に集められた雨水が全て通過します。すなわち、それらの水系を取り囲む分水界の内側に降った雨は、必ずこの地点を通過します。したがって、この河原には、分水界で囲まれた範囲に分布する地層や岩石が、礫として転がっているはずなのです。この理

屈を踏まえ、野外訓練では既存の地質図を河原に広げ、拾い集めた石が実際にこの地点の上流域に分布している地質と対応しているかどうか確認してもらいました。

集めた石は実験室に持ち帰り、後日岩石カッターで半割にして研磨したあと、岩石名を書いたシールを添付して受講者に渡しました（第3図のC）。主要な岩石については、調査しながら野外で岩石名を野帳（フィールドノート）に記載しなければなりません。摩耗された岩石表面と研磨面の見え方の違いを繰り返し観察することによって、無理なく岩石を憶えることができます。今後の地質学野外訓練を通じて、自分自身で採取した岩石の研磨片試料を標本として揃えていけば、知っている岩石の種類が自然に増えていくでしょう。

さて、訓練の2日目は本格的な地質調査です。秩父盆

地の中に分布しているおよそ 1650 ~ 1500 万年前の地層(赤平層群)を観察しながら、地質学の基本を理解してもらいました。事前に行った講義で学んだ地層と実際の露頭で見る地層は、スケールから質感に至るまでかなり異なります。頭の理解と現場での体感を繰り返しながら理解するのが、地質学の基本的な学習方法です。ですので、いろいろな地域に分布している地層や岩石について、事前の学習と現地に出かけて野外訓練を繰り返すのが効果的です。

最初の観察地点は秩父盆地の北西端を流れる岩殿沢で、赤平層群基底の礫岩を観察しました。段丘礫とは異なりかなり固結していることを確認し、地層が時間の経過とともに固くなる続成作用を体感してもらいました。礫の種類は周囲に露出する基盤岩類(ジュラ紀の付加体)に由来する砂岩や泥岩、チャート等の円礫で、石灰岩礫が少ないのは当時の後背地を反映していると推定します。これらの礫は前日の荒川河床で確認した岩石なので、識別は容易です。

一方、これまでの訓練では一度も観察していない礫について、この場所で気がついてもらいました。岩殿沢では、基底礫岩にマイロナイト化した深成岩の円礫が含まれています。前日の荒川河岸では、上流に露出する甲府花崗岩体や秩父鉾山付近に分布する石英閃緑岩体由来の深成岩礫を確認しました。それらは新生代の深成岩で、有色鉱物と無色鉱物が均質に混ざり合った岩石です(第3図のCの上から3列目右端の2個)。これに対し、岩殿沢のマイロナイト礫は岩石の表面模様が大きく異なります。鉱物の粒径が大きいだけでなく、鉱物が剪断変形に伴って帯状に配列する片状構造を呈し、一見してその履歴が複雑であったことを伺わせます(第3図のCの上から4列目右端の2個)。

岩石薄片を作って偏光顕微鏡で観察し、鉱物組み合わせやその量比、さらに組織の観察によって岩石名を決定することはもちろん重要です。しかし、地質調査において、まず石を見て何らかの違いや特徴を感じ取る感覚を養うことも大切です。月面や火星に降り立ち、目の前に広がる索漠とした大地から岩石を選んで採取するためには、岩石学的知識だけでなく、直感や違和感をも駆使する必要がありますでしょう。分析装置はもちろん、宇宙服を着た宇宙飛行士は、ルーペによる岩石表面の観察すらできません。ヘルメットの防護ガラス越しに見たその情報だけで、採るべき岩石を選択する。非常に高度な判断を求められることを念頭に、地質学訓練では露頭ごとに何らかの判断を求めるとを繰り返しました。

2日目の後半は、赤平川の右岸に見られる取方とりかたの大露頭で、海底扇状地堆積物を題材に、地層のでき方や特徴、堆積構造や地質構造、風化や侵食について解説しました(第4

図のA)。まずフィールドノートを配布し、露頭全体を概観した後に目の前の露頭をスケッチしてもらいます(第4図のBおよびD)。そのあと全員で各人のスケッチを見比べて、ひとりひとり見ている部分が異なることを確認します。

スケッチを見ると、右側(南側)に傾く地層の上に水平な地層が重なっていることが確認できます。もともと海底で水平に堆積した赤平層群の砂岩や泥岩は、その後の地殻変動によって傾いたのちに隆起・侵食されて、いま目の前に1600万年前の海底扇状地の断面として現れています。その上に水平に重なる地層は河岸段丘の堆積物で、数万年前以降の比較的新しい地層です。両者の関係は不整合で、その境界には1000万年を超える年代の欠如が存在しています。地質学は、空間スケールだけでなく時間スケールも大きいので、最初は誰でも戸惑ってしまいます。ところが、宇宙飛行士の皆さんは、「数万年前なんて、つい最近の出来事」と笑って話していました。宇宙の時空間のスケールに比べれば、地質学のスケールは大したことではないでしょう。

なかでも、油井さんのスケッチには驚きました。傾斜した地層や海底地滑りによる褶曲した地層だけでなく、それらを水平に覆う河岸段丘堆積物もきちんと記述されていました。さらに、川の蛇行をフィールドノートの折れ目を利用して立体的に再現しようとしていて(第4図のC)、三次元の露頭を三次元に表現しようとする発想の柔軟性に感心しました。

ところで、地質学を含む自然科学の研究において、スケッチはとても大切な行為です。全員のスケッチを見比べると、細かいところに違いがあることが分かります。注目しているところが、人それぞれ異なるからです。そして、他の人のスケッチを見て、「エッ、そんなのあったかなあ?」と無意識に口走ってしまいます。すなわち、自分には見えていなかったのです。このことは、とても重要なことを示唆しています。

研究者に限らず、人は見たいと思うものだけを見ているのです。言葉を換えるなら、「見よう」という能動的意識がなければ、何も見ることはできないのです。見えなければ認識できないので、その人にとっては存在していません。みな同じ世界を生きていると思っていますが、実は自分だけが認識する別々の世界を生きているのです。このことは、その認識の外側に、まだ見ぬ世界が存在していることを意味しています。この世には、目に映っても気がつかず、認識していない世界があるのではないかと気がつくだけでも世界は変わります。その意識の重要性を養うことが学ぶことであり、ひとりひとりの世界を広げることにつながる



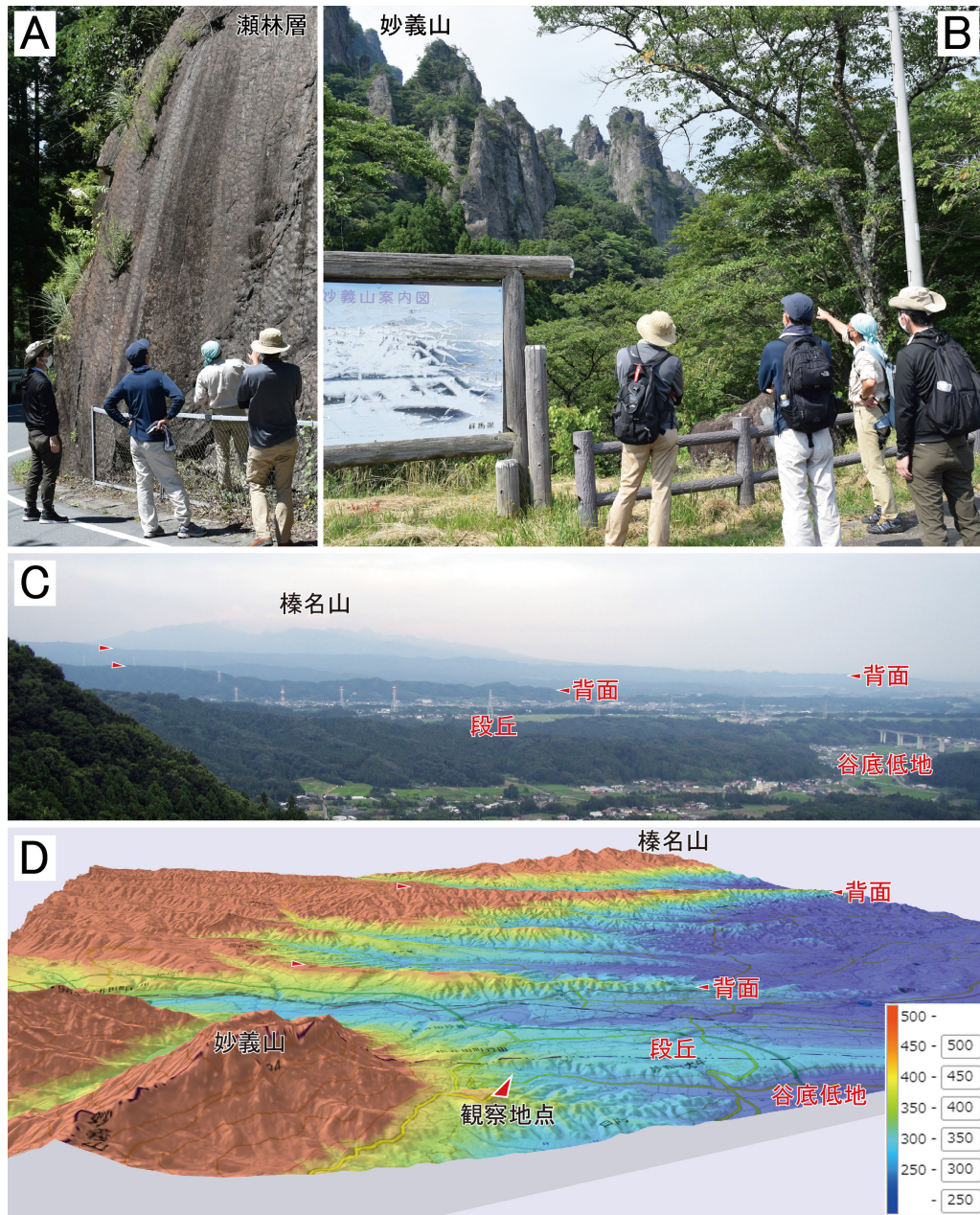
第4図 埼玉県秩父盆地で行った地質学訓練の様子。A：赤平川右岸に露出する1600万年前の海底扇状地堆積物（取方の大露頭），B：対岸からの取方の大露頭の観察（©2021JAXA），C：油井さんのスケッチ，D：地層をスケッチする金井さん，E：タービダイトと砂岩層基底の流痕の観察，F：長瀬の岩畳に露出する三波川結晶片岩の観察。

のです。露頭を前にほんの些細な体験ですが、意識を変えるきっかけになったのではないかと考えています。

地質学訓練の3日目は、長瀬^{ながとろ}に移動して三波川帯の結晶片岩の観察です。もちろん、月面や火星の表面に、高压型の変成岩が露出しているとは思えません。しかし、地質学訓練で身につけるべき能力は、何かを初めて見たとき、それまで培ってきた知識や経験をフルに活用して、そのものを正確に観察して記載し、対応を的確に判断することです。地下30kmで起こった地質現象（変成作用や変形）を、実際にその場で観察した地質研究者はいません。地質研究者

は目の前に露出している岩石から様々な情報を引き出し、7000万年前に地下深部で起こった地質現象を推定しているのです。データを材料にその成り立ちを論理的に組み上げて、ひとつの仮説を作り出す。自身の観察から得た情報から、理路整然とした考察に基づく解釈を組み立てる。宇宙飛行士の皆さんは熱中症の心配をよそに、炎天下の露頭の上で熱心に議論していました（第4図のF）。

その後、埼玉県立自然の博物館を見学したのち、秩父盆地から長野県の佐久まで続く山中地溝帯^{さんちゅう}に沿って西に移動しました。白石山や二子山の石灰岩からなる奇岩を北に見



第5図 A：山中地溝帯に分布する白亜系山中層群（瀬林層）の直立した層理面に残されている漣痕と恐竜の足跡化石，B：群馬県西部の妙義山の侵食地形，C：妙義山の東側山麓斜面から眺めた段丘地形と後方の背面（定高性の高い尾根），D：国土地理院の地理院地図（<https://geolib.gsi.go.jp/node/2555>）で作成した妙義山上空から榛名山を望む地形鳥瞰図。

上げ、志賀坂峠を越えたところでバスを降り、瀬林層（白亜紀）の直立した地層面に残された、恐竜と考えられている足跡化石を観察しました（第5図のA）。さらに、関東山地を北上して群馬県の下仁田を抜け、地質学訓練の最終観察地点である妙義山に移動しました。すでに陽は西に陰り始めていたため登山はせず、道路脇から妙義山の侵食地形を観察しました（第5図のB）。妙義山は数百万年前の火山で、侵食が著しいために火山体の内部を観察することができます。妙義山の東斜面には道路に沿って急崖が続き、火山角礫岩からなる地層の断面が見事に露出しています。地

質だけでなく特徴的な侵食地形も観察できるので、今回の地質学訓練に妙義山を加えました。

帰路の途中で道路脇から北東方を眺めると、わずかに東に傾いた見事な段丘面が広がっています（第5図のC）。その先には、同様に東に傾く真っ直ぐな稜線が幾重も認められます。これらは中新世の海成および陸成の堆積岩や、中新世から鮮新世の火山岩類が侵食された地形で、背面と呼ばれます。この背面は、段丘のように、実際に平坦な地形が広がっているわけではありません。定高性が非常に高い尾根を横から見ている“見かけの面”で、もともとは平坦な

地形であったと考えられています(第5図のD)。

第四紀火山である榛名山の手前の背面は標高が700～600 mで、その手前には標高が500～400 mの背面があり、背面と背面の間には標高が400～300 mの段丘面が広がっています。いずれも東ないし南東に緩く傾斜し、関東平野の北西側が隆起する過程で侵食されてできた地形でしょう。等高線で表現された地形図を見て三次元の地形を頭の中に再現することは、一朝一夕にはできませんが、地質学訓練に参加した宇宙飛行士のみなさんには、その重要性と必要性を実感してもらえたのではないかと考えています。

4. おわりに

アポロ計画を進めていたアメリカは、1961年のケネディ大統領の演説により、月面に有人宇宙船を着陸させる計画に変更したと言われています。そして、1969年のアポロ11号で、初めて人類を月に送り込むことに成功しました。その間にアメリカは、月面での活動を念頭に、アイスランドの玄武岩台地などで地質学訓練を行っています。一方ヨーロッパでは、宇宙飛行士に野外(フィールド)地質学の基礎を教えるため、パンゲア(PANGAEA: Planetary Analogue Geological and Astrobiological Exercise for Astronauts)と呼ばれるコースがESA(欧州宇宙機関)によって提供されています。このプログラムは、宇宙飛行士が地球・月・火星、そして小惑星の地質学的特徴を理解し、地球の管制塔に対して状況を簡潔かつ正確に報告し、科学的に重要な岩石試料を採取するスキルを習得することを目的としています。日本人宇宙飛行士はまだパンゲアに参加していませんが、来る地球外惑星・衛星の有人探査に向けた訓練は始まっています。

前述のように、2021年末には13年ぶりに日本人宇宙飛行士の募集が始まりました。選考は約1年かけて行われ、2022年度末までには新たな日本人宇宙飛行士候補者が誕生する予定です。もちろん、そのミッションは国際宇

宙ステーションのみならず、現在進められているアルテミス計画に合流し、月周回軌道上に有人拠点「ゲートウェイ」を建設し、月に人類の活動拠点を築くことです。そしてその先には、人類を火星に送るという目標が視野に入っています。国際協力の枠組みの中で、日本の宇宙開発技術や宇宙飛行士への期待はますます高まっているのです。

地球の表面の、狭い日本のさらにその傍らで、ただ黙々と地質を調べてきた私にとって、今回の地質学訓練はスケールの大きなテーマに関わる貴重な機会でした。私にできることは、壮大なプロジェクトに対するほんの些細な支援ですが、そのプロジェクトは、そのような小さいけれど数多のサポートの上に成り立っているのも事実です。30年間ずっとつむいて、足下の地層ばかり見続けてきた私ですが、時には夜空を見上げて遠い宇宙の果てを空想する気持ちも生まれました。サイエンスに境界線がないことを実感した地質学訓練でした。

謝辞: 本稿の執筆にあたり、写真の使用手続きや内容の確認等、JAXA宇宙飛行士訓練担当の方にご協力をいただきました。

文 献

- 小松原純子・野田 篤・田辺 晋・佐藤善輝・宮川歩夢・細井 淳・木下佐和子・斎藤 眞・高橋須葉(須美子)・宮地良典・高橋雅紀(2016) 2016年産総研一般公開サイエンスコーナー「アナログ模型で地質を学ぼう!」。GSJ地質ニュース, 5, 389-398.
- 高橋雅紀(2017a) アナログ教材を併用した地質図学実習。GSJ地質ニュース, 6, 9-14.
- 高橋雅紀(2017b) 地質学における次世代育成-地学オリピック合宿研修-。GSJ地質ニュース, 6, 15-21.
- 高橋雅紀・シュレスタ ガウラブ・森田啓子(2019) 産総研東北センター一般公開-学都「仙台・宮城サイエンス・デイ2019」-。GSJ地質ニュース, 8, 297-300.



高橋雅紀(たかはし まさき)

群馬県出身。1990年に東北大学で博士号を取得後、特別研究員を経て1992年に地質調査所(現産総研)に入所。関東地方を中心に地質を調べ、日本列島の成り立ちを研究。日本列島が山国に成長した原因を解き明かし、その内容は2017年にNHKスペシャル「列島誕生ジオ・ジャパン」で放映。NHK番組プラタモリの秩父、長瀬、下関、日本の岩石SP、つくば編に案内人として出演。

URL: <https://staff.aist.go.jp/msk.takahashi/>

TAKAHASHI Masaki (2022) Geological training for Japanese astronauts.

(受付: 2022年1月28日)