

米国西部における地質学学生巡検

A geologic field trip in western United States for university students

星 博幸*・山田 桂**
Hiroyuki HOSHI * and Katsura YAMADA **

* 愛知教育大学理科教育講座地学領域 (hoshi@aeu.ac.jp)
** 信州大学理学部地球学コース (katsurai@shinshu-u.ac.jp)

キーワード：アーチズ国立公園，キャニオンランズ国立公園，コロラド高原，デッドホースポイント州立公園，デスバレー国立公園，地学教育，地質学，グースネックス州立公園，グランドキャニオン国立公園，メサベルデ国立公園，メテオールクレーター（バリンジャークレーター），モニュメントバレー，ペトリファイドフォレスト国立公園，シップロック，米国西部

Key words: Arches National Park, Canyonlands National Park, Colorado Plateau, Dead Horse Point State Park, Death Valley National Park, Earth Science education, geology, Goosenecks State Park, Grand Canyon National Park, Mesa Verde National Park, Meteor Crater (Barringer Crater), Monument Valley, Petrified Forest National Park, Shiprock (Ship Rock), western United States

1. はじめに

筆者らは 2015 年 9 月に愛知教育大学（愛教大）と信州大学の大学院生および 4 年生を引率して，米国西部のコロラド高原（図 1）とその周辺で約 10 日間の地質巡検を行った。参加者は引率教員 2 名，院生 3 名，4 年生 6 名の合計 11 名であった。日程と巡検コースをそれぞれ表 1 と図 2 に示す。本論はその巡検の実施報告である。近年，外国で巡検を行う地学系教室が多くなったが，本論は米国西部で学生や生徒を引率して巡検を行うことを考えている大学教員や研究者，小中高教員，学芸員等の参考になればという意図で公表するものである。米国西部での学生巡検を企画・実施する際に留意すべきと思われる点についても最後にまとめてみる。

今回の巡検で観察した地層は，主に古生代と中生代に海底または陸上で堆積した碎屑岩層である。古生代から中生代にかけては複数の小大陸が集合してパンゲア超大陸が形成され，それが分裂して現在見られる大陸と海洋の分布に近づいていくプレート運動が進行していた。つまり，今回観察した地層は現在とは異なる場所（緯度）と環境で堆積したことに注意する必要がある。また，超大陸の形成・分裂に伴ってグローバルな気候変動が起こり，海水準も大きく変動して世界的な海進・海退も起こったと考えられている（丸山・磯崎，1998；田近，2009；Condie, 2011）。このような知識を持って，地層の形成をグローバルなテクトニクスおよび気候変動と関連づけて考えることが重要である。

紙数の都合から各訪問地の地図は省略し（読者には Google Map 等で調べてほしい），読者が調べるときの参考になるように公園ウェブサイト等の URL を示す。また，距離・高さの単位はメートル法で表記するが，実際に現地でも活動するときはマイル（mi）やフィート（ft）などヤード・ポンド法の使用が便利なので，必要に応じてそれらの単位も括弧書きで示す。入場料等の料金は巡検時のものである。

2. 出発

15 日，愛教大グループ 7 名と信州大グループ 4 名はそれぞれ国内線飛行機や電車等で出発した。成田空港で合流したが，愛教大グループの到着が遅れて両グループが一緒になったのは Los Angeles 行きの機内であった。外国旅行が初めてという学生もいて，学生たちは不安と緊張，そして期待を胸にした面持ちであった。Los Angeles で Las Vegas 行きの国内線に乗り継いだら，出発が 1 時間遅れた。そのため Las Vegas に到着したのは 15 日（日本出発日と同じ）の午後 3 時過ぎ

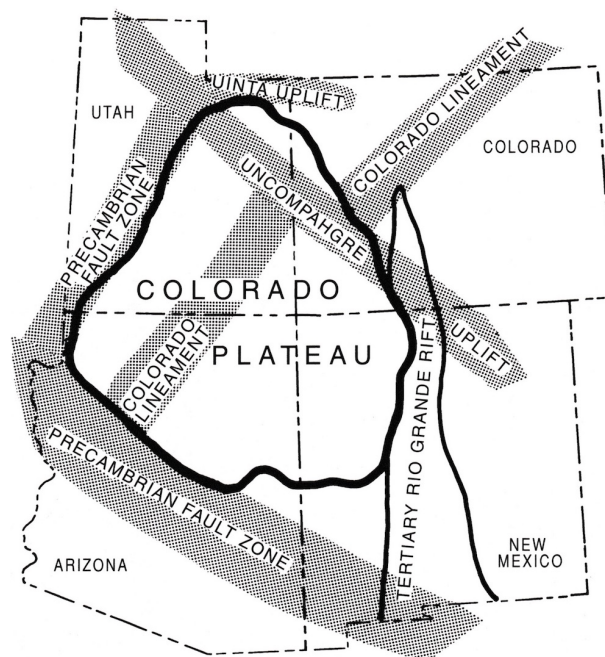


図 1 コロラド高原の位置(Chronic and Williams, 2002 より引用)。コロラド高原はコロラド州，ユタ州，アリゾナ州，ニューメキシコ州にまたがる。高原の縁辺部の一部は先カンブリア紀に活動した断層帯（現在も一部再活動している）。

表1 巡検日程 (2015年9月)。

日・曜日	コース
15日(火)	出国 → (Los Angeles 経由) → Las Vegas → Flagstaff (泊)
16日(水)	Flagstaff → メテオールクレーター (Meteor Crater) → ペトリファイドフォレスト国立公園 (Petrified Forest National Park) → Gallup (泊)
17日(木)	Gallup → シップロック (Shiprock) → メサベルデ国立公園 (Mesa Verde National Park) → Monticello (泊)
18日(金)	Monticello → アーチーズ国立公園 (Arches National Park) → Moab (泊)
19日(土)	Moab → デッドホースポイント州立公園 (Dead Horse Point State Park) → キャニオンランズ国立公園 (Canyonlands National Park) → グースネックス州立公園 (Goose-necks State Park) → Mexican Hat (泊)
20日(日)	Mexican Hat → モニュメントバレー (Monument Valley) → グランドキャニオン国立公園 (Grand Canyon National Park) → Tusayan (泊)
21日(月)	Tusayan → グランドキャニオン国立公園 → Las Vegas (泊)
22日(火)	信州大メンバー: Las Vegas → (San Francisco 経由, 機内泊) 愛教大メンバー: Las Vegas → デスバレー国立公園 (Death Valley National Park) → Las Vegas (泊)
23日(水)	信州大メンバー: 帰国 愛教大メンバー: Las Vegas → (San Francisco 経由, 機内泊)
24日(木)	愛教大メンバー: 帰国

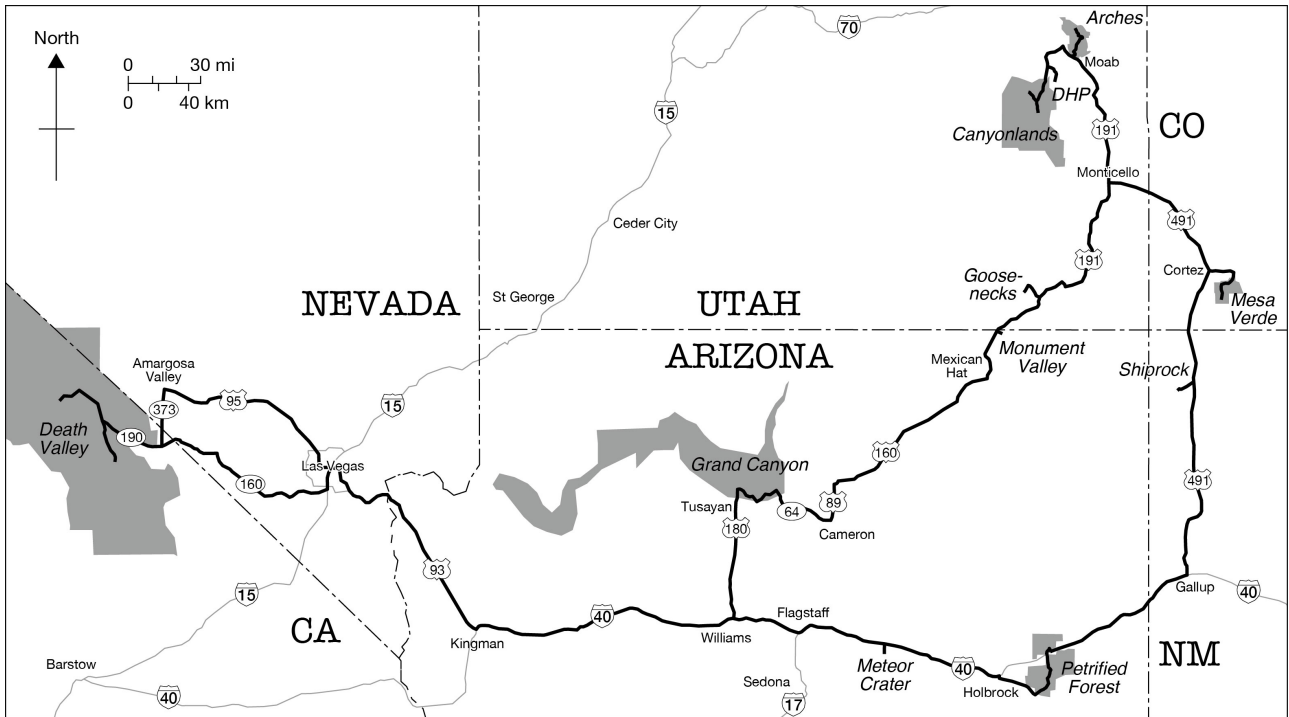


図2 今回の巡検コース(太い実線)と訪問地。灰色は訪問した国立公園。CA = California; CO = Colorado; DHP = Dead Horse Point State Park; NM = New Mexico。

であった。予約していた15人乗りバンのレンタカーを借りて、Las Vegasを出発したのは17時頃。結局Los Angelesでの遅れが響き、この日の宿泊地であるFlagstaffに到着したのは予定よりも1時間以上遅い22時頃であった。

3. メテオールクレーター

メテオールクレーター、別名バリンジャー (Barringer) クレーターは、おそらく世界で最も有名な隕石衝突孔(隕石孔)であろう(図3; URL1, URL2)。ここでは隕石衝突によって

生じた地形と地層変形を詳しく観察できる。隕石衝突という非定常的で地球全体の環境を急変させることもある現象について、実際にモノ(隕石孔、まくれあがった地層、隕石破片など)を見ながら想いを巡らすことができる絶好のフィールドである。学生たちにぜひ観察させたいと思い、今回の巡検の最初の訪問地にした。この隕石孔の詳細については星(2015)を参照されたい。

Flagstaffからは車で1時間弱。途中、州間国道40号線を走りながら、サンフランシスコ火山地帯(San Francisco Volcanic Field)の単成火山群の地形を車窓から観察した。こ



図3 メテオールクレーター (Google Earth を使用)。写真横幅は約 2540 m (8320 ft)。

の火山群はホットスポットの活動に関連していると考えられている (Tanaka et al., 1986)。メテオールクレーターへ通じる道路 (Meteor Crater Road) に入ると、進むにつれて前方に隕石孔のリムの高まりが大きく見えるようになる。緩やかなリムを上るとビジターセンターに着く。

メテオールクレーターは国定天然記念物に指定されているが、国立公園や州立公園にはなっていない。この管理・運営は Barringer Crater Company という会社が行っている。入場料は大人\$18 と高額。団体割引 (8 人以上) もあるがそれでも\$16 である。巡検時の為替レートは\$1 = 120 円程度だったので、団体割引でも 1 人 1900 円ほどになる。学生の出費を抑えるために入場料を少しでも減免してほしい。ネットでは入場料減免の情報を見つけれなかったもので、ダメもとで減免可能性についてメールで尋ねた。すると先方から「巡検の場合は入場料を減免できるので、巡検のシラバスを送付して」という返事が！ 巡検目的などを記載した文書を送付し、何度かメールのやり取りをしたが、「皆さんの来場を待ってます！」という返事を最後に結局減免してもらえなかろうかわからなかった。不安を抱いたままビジターセンターの受付に行ったところ、「全員無料」という嬉しい言葉が！

ビジターセンターに付属するミュージアムにはこの隕石孔を形成した鉄隕石の破片が展示されており、自由に触ることができる。表面には大気圏通過時に部分的に溶融してできた親指大の孔 (regmaglypt) が多数あいている。鉄隕石は日本の博物館・科学館でも観察でき珍しいものではないが、やはり実際の隕石孔で観て触って感じるこの意味は大きい。

ビジターセンターを出ると目の前に隕石孔が視界いっぱいに広がる (図 4)。学生たちは初めて見る壮大で荒々しい隕石孔に興奮していた。この隕石孔は円形ではなく角が取れた四角形のような形をしている (図 3)。しかし直径約 1.2 km の衝突孔のリムに立つとそれがわからず円形に見える。隕石孔の内壁にはまくれあがった地層 (砕屑岩と石灰岩を主体とするペルム系～三畳系) の断面が露出しており、さまざま



図4 メテオールクレーター。広角レンズを用いないと全体が写らない。



図5 メテオールクレーターのクレーター内壁に露出する地層を観察。

堆積構造と変形構造を観察できる。今回の巡検で初めて見る地層であり、普段なかなか見ることができない赤色岩と層状石灰岩が広がっていることもあり、学生たちは地層も熱心に観察していた (図 5)。コロラド高原南部の模式的な岩相層序を図 6 に示す。

4. ペトリファイドフォレスト国立公園

メテオールクレーターから州間国道 40 号線を東に移動し、途中 Holbrook で昼食をとった後、珪化木化石産地として世界的に知られるペトリファイドフォレスト国立公園 (URL3, URL4; 日本では化石の森国立公園と呼ばれる) を訪問した。ここでは樹径が数 10 cm 以上、長さ 10 m 以上にも達する巨大珪化木化石と、それを含む三畳系チンリ層 (Chinle Formation; 図 6) のカラフルな岩相を観察できる。この公園の珪化木化石は世界各地の博物館・科学館に展示されている。愛知県でも蒲郡市の生命の海科学館に常設展示されている巨大珪化木化石はこの公園が産地である。この公園のチンリ層は三畳紀の古環境研究対象として古くから注目され、最近ではチンリ層とその下位のペルム系メンコピ層 (Moenkopi Formation; 図 6) を掘削して地球史上最大規模の

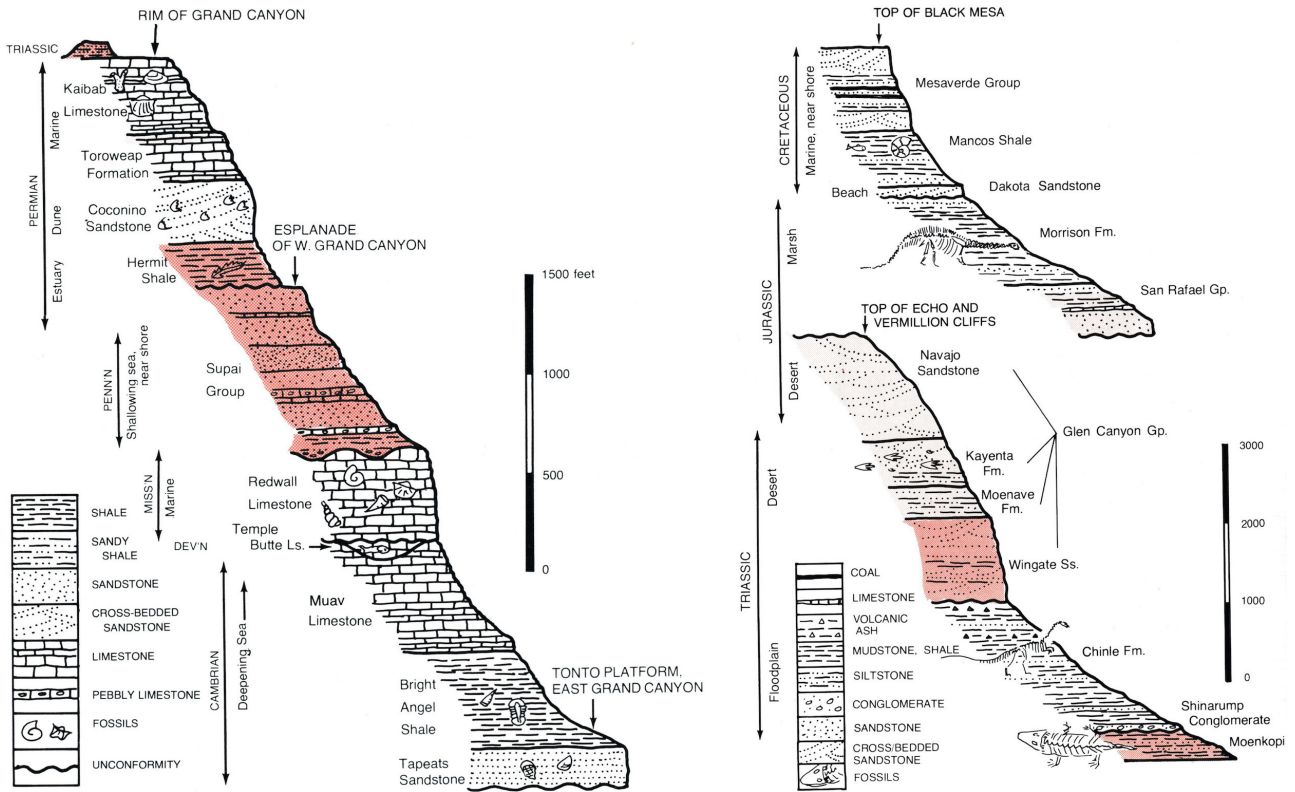


図6 コロラド高原南部の古生界と中生界の模式的な岩相層序 (Chronic, 2003 より引用)。



図7 Giant Logs Trail の巨大珪化木化石。



図8 Crystal Forest Trail を歩く。トレイルのまわりには大小の珪化木化石が転がっている。

大量絶滅が起こったペルム紀-三畳紀境界直後の古環境の解明を目指す研究が行われている (Witze, 2013)。米国西部の地質学学生巡検ではぜひ訪問したい場所の一つである。この公園については星 (2015) が詳しい。

この公園には北と南の2つのエントランスがあるが、今回は南から入場して公園内を北上した。この公園は教育活動での入場料減免制度があり (制度については公園の公式ホームページを参照)、事前に申請しておいたため入場料が無料になった。最初に南エントランスからすぐの案内所 (Rainbow Forest Museum) で地図とパンフレットを入手し、その横の Giant Logs Trail で珪化木化石と地層を観察した。学生たちは予想以上の大きさの珪化木化石が丸太を転がしたかのよう

にあちこちに横たわっていることに驚いていた (図7)。珪化木の多くはやや扁平な断面を示し (長軸が層理面と平行)、圧密過程で扁平化したと考えられる。このトレイルの地層は砂岩および細礫と中礫を主体とする円磨度の良い礫岩からなり、河川堆積物と推定される。次に、Crystal Forest Trail を歩いて珪化木化石を詳しく観察した (図8)。Jasper Forest, Blue Forest, Newspaper Rock と移動し、公園北部のいくつかの観察ポイントでチンリ層とそれを覆う後期中新世~前期鮮新世の玄武岩溶岩、チンリ層が広大に広がり特異な景観を示す Painted Desertなどを観察した。Painted Desert Inn という国定歴史建造物から Painted Desert に降りるトレイルを歩き、トレイルに沿ってチンリ層のカラフルな地層を詳しく観察

した。学生たちは遠望よりもやはり実際に歩いて地層を観察するのが好きなようである(さすが地質系!)。夕方、観察を終えた頃には薄暗くなり、北エントランスのビジターセンター(Painted Desert Visitor Center)には入館できなかった。

公園から州間国道 40 号線をさらに東進し、ニューメキシコ州の Gallup に到着。この日の宿は鉄道(Amtrak)の横のモーテルで、夜中に機関車の騒音がうるさかった。

5. シップロック

Gallup から国道 491 号を北上し、Four Corners(ユタ, コロラド, アリゾナ, ニューメキシコの 4 州の境界が交わる場所)に近づくと、かつての火山活動の痕跡である火山岩頸(volcanic neck)が点々と現れるようになる。火山体を構成していた噴出物は侵食で失われ、火山体の基盤をなす地層も数 100 m~1 km ほど削剥されて、現在は中心火道の岩頸とそこから派生した岩脈(いずれもかつてのマグマの通り道)だけが残っている。これらは母岩の堆積岩よりも風化と侵食に対する抵抗性が高いため、大平原の中で文字通り突出した地形を形成している。シップロック(ULR5, ULR6)はこの地域に見られる多数の岩頸の代表格である。シップロックは、高くそびえ立つ岩頸(周囲の平原からの比高約 600 m)とそこから放射状に派生する岩脈が作り出す特徴的な地形から国定天然記念物に指定され、多くの地質学教科書やガイドブックで紹介されている(例えば, Plummer et al., 2003; Maley, 2009)。放射状岩脈の典型例としてもコロラド州の Spanish

Peaks と並んでよく知られている。しかしビジターセンターや案内所などの施設はなく、ゲートもなく、入場料もかからない。

シップロックと岩脈を構成する岩石はミネット(minette; ランプロファイアーの一種)である。年代は約 30 Ma で(Naeser, 1971), 後期白亜紀の海成層であるマンコス頁岩層(Mancos Shale; 図 6)に貫入している。岩脈は比較的規模の大きいものが 3 枚, 小規模のものも含めると 6 枚確認されている(ULR5)。最も規模の大きな岩脈は走向方向に約 9 km 伸びており、全長のほぼすべてにわたって露頭が連続する。

今回の巡検では時間の都合でシップロックには近づかず(近づくには轍の深いダートを数 km 以上走る必要がある), 南に派生する最も規模の大きな岩脈とその母岩を観察した(図 9)。国道 491 号線からインディアンルート 13 号線に入り、南西に 10 km (6 mi) ほど走ると、道路がこの岩脈を横切るところがある。この地点は岩脈の 3 次元的形態と内部構造, および母岩との接触関係を観察できる絶好の露頭である。壁のようにそそり立つ岩脈の壁面は貫入面(母岩との境界)ではなく、貫入面から数 10 cm~1 m ほど内側にある。壁面に見られる亀甲状の模様は柱状節理の断面である(図 9)。岩脈は風化・侵食によって部分的に薄くなり、貫通して穴があいているところもある。この露頭で学生たちに 1 時間ほど自由に観察させた。これほど大規模な岩脈を見るのは初めてのためか、学生たちは岩脈に近づき、岩脈に登り、時に歓声をあげながら積極的に観察していた。



図 9 シップロック(右奥の高まり)とそこから南に派生している岩脈(左上の岩体)。岩脈は屏風のようなものである。左下の層理が発達する地層はシップロックと岩脈の母岩をなすマンコス頁岩層。



図 10 Cliff Palace のくぼみ (alcove) と住居遺跡。

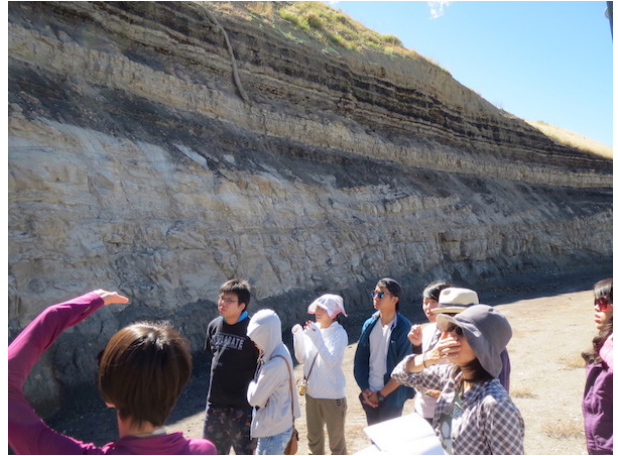


図 12 メサベルデ層群中部を構成するメネフィー層の堆積環境について議論中。

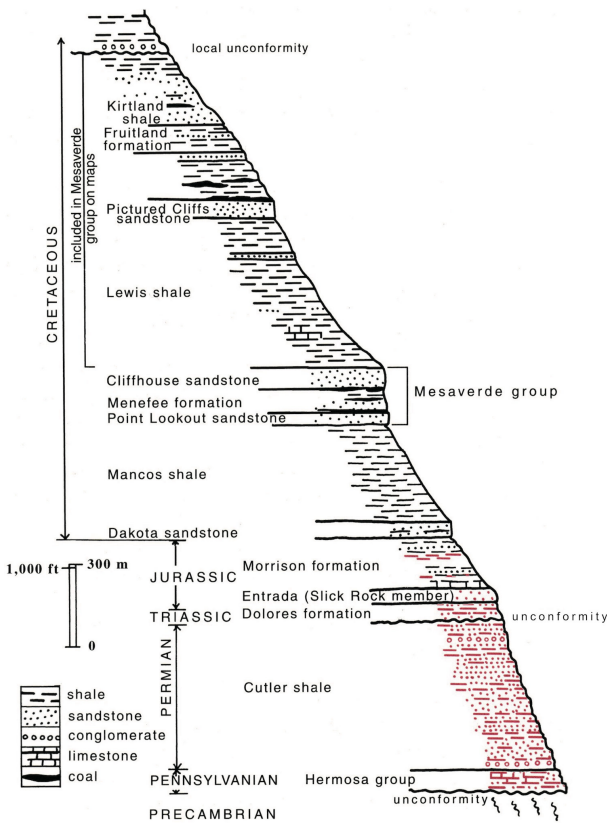


図 11 Four Corners 地域の模式的な岩相層序 (Chronic and Williams, 2002 より引用)。

6. メサベルデ国立公園

シップロックから国道 491 号線を北上するとコロラド州に入る。Cortez に近づくと、右手側 (東側) の規模の大きなメサ (mesa) の平頂部が南に緩やかに傾斜していることに気づく。このメサの上にメサベルデ国立公園がある (URL7, URL8)。ちなみにメサはスペイン語でテーブルの意味、ベルデ (verde) は緑の意味で、この公園は「緑のテーブル」ということになるだろう。事実、この地域はアリゾナやニューメキシコ、ユタの乾燥地帯よりも降水量 (雨と雪) が多く、そのため植生が比較的多い。

この公園は原住民族の一つであるプエブロ族 (Pueblo) の考古遺跡がよく保存されていることで知られる。かつてプエブロ族はこの地に西暦 550 年頃から 1300 年頃までの約 700 年間居住していたという。彼ら/彼女らはメサを刻む谷の岩壁のくぼみ (alcove) に石積みの住居を構えていた (図 10)。現在 600 ほどの住居跡が公園内に残り、保護されている。彼ら/彼女らは狩猟と農耕を行い、他の民族と交易も行っていた。公園内には大小約 5000 もの遺跡があるという (URL7)。

こうした考古遺跡だけでなく、この公園は地質と地形の観察にも適している。特にメサを構成する上部白亜系メサベルデ層群 (Mesaverde Group; 図 6, 11) の岩相と堆積構造を詳しく観察できる。この地域のメサベルデ層群は浅海～陸成の碎屑岩からなり、やや深い海底で堆積したマンコス頁岩層を覆っている。堆積学的研究によれば、メサベルデ層群の堆積場は後期白亜紀の北米西部内陸海路 (Western Interior Seaway) の海水準変動とテクトニックな昇降運動の両方の影響を受けたと考えられている (Roehler, 1990)。公園北側にあるエントランスからメサ頂部に向かって公園道路を登りながら、メサベルデ層群を構成する各層の岩相の移り変わりを断続的に見ることが出来る。遠望ポイントもあり、眼下に Mancos や Cortez のある平原、北東にサンファン山地 (San Juan Mountains)、西にユタの大地を眺めることができる。

ビジターセンターで情報収集後、エントランスで非商業団体料金として \$10 を支払い (ここは他の国立公園に比べて安いので減免申請をしなかった)、メサ北部の公園道路を登りながら地形と地質を観察した。層群下部を構成し急崖 (cliff) を形成するポイントルックアウト砂岩層 (Point Lookout Sandstone)、石炭を挟む陸成層からなる層群中部のメネフィー層 (Menefee Formation) の露頭を観察しながら (図 12)、この公園のハイライトである公園南部の住居遺跡 (Cliff Palace, Balcony House, Spruce Tree House) に向かった。これらの住居跡はメサベルデ層群上部を構成するクリフハウス砂岩層 (Cliff House Sandstone) の層準にある。Spruce Tree House のトレイルでクリフハウス砂岩層の岩相を観察した。この地層は細粒～中粒砂岩主体だが薄く連続性の悪い頁岩を挟み、居住跡のあるくぼみは砂岩と頁岩の境界に沿って生

じていることが多い (図 10; Harris et al., 1997)。頁岩とその上部の砂岩との境界から水が染み出しているところがあった。この水が居住跡のくぼみの形成に深く関わっていると考えられている。くぼみは次のようにして形成されたと考えられる (Harris et al., 1997)。砂岩は透水性が良いので、メサ頂部で降雨や融雪による水が砂岩に浸透する。水は砂岩中の間隙を移動するが、下位に頁岩層があると頁岩は砂岩に比べて透水性が悪いので、砂岩と頁岩の間の層理面に沿って水が側方に移動し露頭面から染み出す。このように移動する水によって砂岩中の炭酸塩セメントが徐々に溶解する。これは化学風化の一種であり、主要な水みちとなる層理面や節理面に沿って砂岩は徐々に脆くなる。それに加えて冬季には染み出した水が露頭表面で凍結し、物理風化の一種である凍結破壊が進行する。このように風化作用が複合的に進行して砂岩と頁岩の境界に沿って多数のくぼみが発生したと考えられる。

観察後、Cortez から国道 491 号線を北西に進み、この日の宿泊地であるユタ州の Monticello に移動した。

7. アーチーズ国立公園

Monticello から国道 191 号線を 1 時間ほど北上すると Moab に入る。Moab はマウンテンバイキングやオフロードドライビング、ロッククライミングなどアウトドアスポーツ・遊びの地として知られている。アーチーズ国立公園 (URL9, URL10) はこの Moab の近郊に位置する。Moab は後述のデッドホースポイント州立公園やキャニオンランズ国立公園の最寄り街でもある。スーパーマーケットと多くのモーター、飲食店があるため、コロラド高原の地質巡検では滞在する機会が多い街である。

Moab は Spanish Valley または Moab Valley とよばれる NW-SE 方向に伸びる「谷」の中にある (Google Earth で見るとよくわかる)。ただし谷と言っても日本人がイメージする谷とは違い、米国の谷 (valley) のスケールは日本の松本盆地や会津盆地などの内陸盆地のスケールに近い。谷の西側はモアブ断層 (Moab Fault) の断層崖になっており、メンコピ層やチンリ層、ウィングート砂岩層 (Wingate Sandstone) などの三畳系〜ジュラ系が壮大な岩壁を形成している (コロラド高原北西部の岩相層序を図 13 に示す)。Spanish Valley はこの正断層によって断層の東側 (上盤) が落ち込んだ半地溝である。アーチーズ国立公園にも Salt Valley と呼ばれる地溝がある (図 14)。この地域のこれらの地溝の形成は岩塩背斜 (salt anticline) と密接に関係していると考えられており、アーチーズ国立公園を特徴づけるアーチ (arch) の形成もやはり岩塩背斜と深く関わっている。

地溝とアーチの形成過程は次のように考えられている (図 14; Harris et al., 1997; Morris et al., 2012)。この地域の地下にはペンシルバニア紀 (後期石炭紀) のパラドクス層 (Paradox Formation) と呼ばれる岩塩層がある。その上位にペンシルバニア紀以降に堆積した碎屑岩主体の地層が厚く重なっている。地下深くの高圧下で岩塩層が流動変形すると低圧側 (= 上側) に流れ、岩塩ダイアピルとなって上側の地層を突

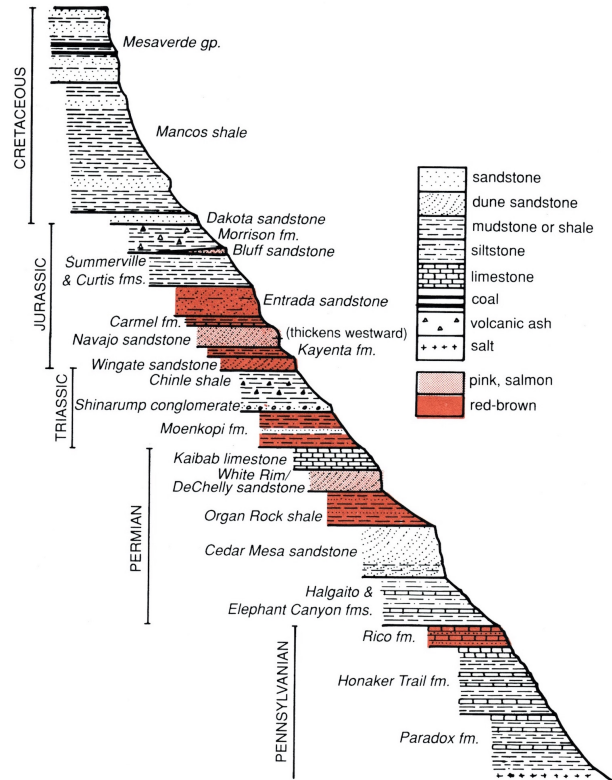


図 13 コロラド高原北西部 (主にユタ州) の古生界と中生界の模式的な岩相層序 (Chronic, 2002 より引用)。

き上げる。こうして岩塩背斜や岩塩ドームができる。背斜では外側 (地表側) の地層に層理面に平行かつ褶曲軸に直交する方向に引張応力が作用する。この引張応力によって正断層が活動し地溝が形成される。また、より小さなスケールでは引張応力と直交する方向に多数の平行節理が発達する (図 15A)。この節理は水みちになる。前述のメサベルデの場合と同様、染み込んだ水と反応することによって堆積岩 (特に砂岩) の炭酸塩セメントが溶解し、化学風化が進行する。すると節理に沿って選択的侵食が働くため、フィン (fin) と呼ばれる屏風のように突っ立った板状岩体が多数形成される (図 15B)。砂岩層の下に頁岩層がある場合、頁岩層には水があまり浸透しないため、水は砂岩と頁岩の間の層理面やその上位の砂岩中を側方に移動してフィン側面から染み出す。アーチーズ国立公園では、ほとんどのフィンやアーチはジュラ系エントラダ砂岩層 (Entrada Sandstone) のスリックロック部層 (Slickrock Member) という砂岩主体層に生じており、その下位にはカーメル層 (Carmel Formation) の頁岩主体層がある (この地域のカーメル層はエントラダ砂岩層デューブリッジ部層 (Dewey Bridge Member) と呼ばれることもあり、やや混乱している)。水みちに沿って砂岩は化学風化を受けて脆くなり、またフィン側面から染み出した水は冬季に凍結して砂岩の凍結破壊を起こす。風化で生じた碎屑物は風や大雨時の流水によって洗い出される。その結果、層理面上部の砂岩 (スリックロック部層) に徐々にくぼみが発達し、それがフィンを貫通すると穴が開き、やがてアーチが形成される (図 15C)。アーチは当然ながら不安定で、風化や落盤が進むと崩壊する (図 15D)。アーチが崩壊するとアーチを

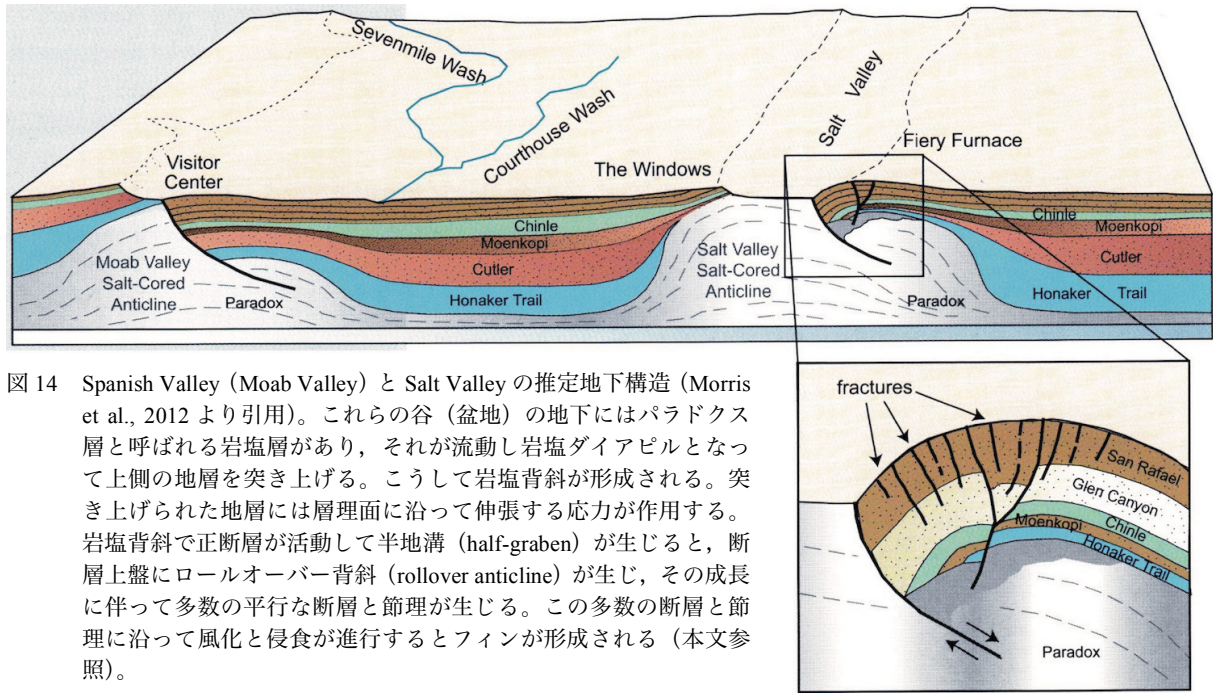


図 14 Spanish Valley (Moab Valley) と Salt Valley の推定地下構造 (Morris et al., 2012 より引用)。これらの谷 (盆地) の地下にはパラドクス層と呼ばれる岩塩層があり、それが流動し岩塩ダイアピルとなって上側の地層を突き上げる。こうして岩塩背斜が形成される。突き上げられた地層には層理面に沿って伸張する応力が作用する。岩塩背斜で正断層が活動して半地溝 (half-graben) が生じると、断層上盤にロールオーバー背斜 (rollover anticline) が生じ、その成長に伴って多数の平行な断層と節理が生じる。この多数の断層と節理に沿って風化と侵食が進行するとフィンが形成される (本文参照)。

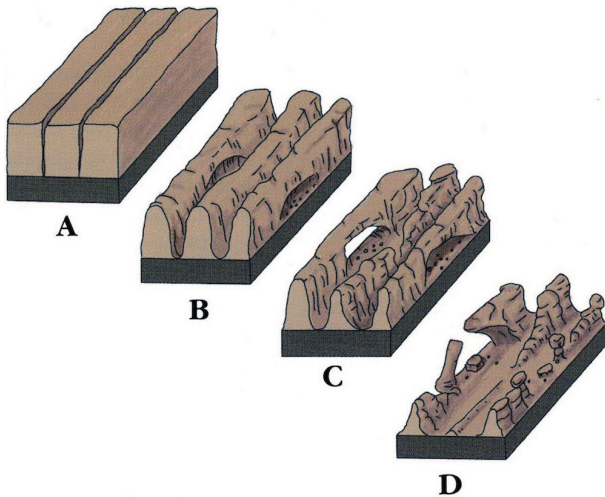


図 15 アーチの形成過程 (Morris et al., 2012 より引用)。A) 多数の平行な節理が発達する。B) 節理に沿って風化と侵食が進行し、フィンと呼ばれる突っ立った板状岩体ができる。C) 風化と侵食が進行し、やがてフィンを貫通する穴が開いてアーチが形成される。D) さらに風化と落盤が進むとアーチが崩壊する。

支えていた部分が板状または柱状に残り、それらはタワー (tower) やピナクル (pinnacle) となる。

ちなみに、アーチに似た地形に天然のブリッジ (bridge) がある。コロラド高原にも各地にブリッジがあり、特にナチュラルブリッジ国立公園 (Natural Bridge National Monument; URL11, URL12) は有名である。ブリッジは基本的に流水の侵食によって形成された地形である。

アーチズ国立公園は人気がある。私たちが訪問した日も混雑しており、1つしかないエントランスには長蛇の車の列が生じていた。エントランスで自家用車料金\$10を払い (こ

こも安いので減免申請をしなかった)、ビジターセンターで

地層と地形の概要やアーチのでき方について学習する自由時間を設けた。このビジターセンターは地学関係の書籍やポスターの品揃えが豊富で、それらを購入する学生もいた。この日はいくつかのトレイルを歩いて地層と地形をじっくり観察した。ビジターセンターを出発した私たちは、公園道路を登りながら車窓からナバホ砂岩層 (Navajo Sandstone)、カーメル層、エントラダ砂岩層 (スリックロック部層) の各層が作る雄大な景色に歓声をあげた。

いくつかのタワーを観察しながら進み、Petriified Dunes Viewpoint で一面に広がるナバホ砂岩層を観察した。ナバホ砂岩層は前期ジュラ紀の砂漠堆積物で風成デューンの堆積構造が発達する。その広大な分布と厚さ (最大約 700 m に達する)、および壮大な岩壁を形成することから (このような地層を cliff former という)、コロラド高原を代表する地層と言えるだろう。

Petriified Dunes Viewpoint から 5 km (3 mi) ほど北に進むと有名な Balanced Rock がある (図 16)。周囲トレイルを歩いてその地質と地形を観察した。上半部に乗っている岩がエントラダ砂岩層スリックロック部層の砂岩、下半部の層理が発達した地層がカーメル層の頁岩砂岩互層で、スリックロックの砂岩が今にも落ちそうである。この特異な地形は風化と風食 (wind erosion) による産物である (Harris et al., 1997)。

カーメル層の層理は波状にうねっている (図 17)。これは Balanced Rock でも観察できるが、この公園だけでなくキャニオンランズ国立公園などの周辺地域でも認められる。下位のナバホ砂岩層と上位のエントラダ砂岩層スリックロック部層の大部分は変形していない (スリックロック部層の最下部は変形に少し加わっている)。未固結時の変形であることは明らかである。この変形の原因については横圧縮による座屈褶曲、スランピング、荷重変形、地震に伴う液状化などいくつかの可能性が指摘されているが (Alvarez et al., 1998



図 16 Balanced Rock。高さ約 17 m (55 ft)。



図 19 Double Arch。



図 17 カーマル層 (高まりの下部の、層理が発達する地層) の変形。その下位のナバホ砂岩層 (写真下部の水平な層理が見られる地層) と上位のエントラーダ砂岩層スリックロック部層 (高まりの上部を構成する地層) の大部分は変形していない。



図 20 Delicate Arch Trail を登る。長い上り坂で、急ぐとバテる。



図 18 North Window (左側) と South Window (右側)。

がレビューしている), Alvarez et al. (1998) は隕石衝突に起因する強振動によって衝突当時の未固結層 (=カーメル層) が変形・液状化したという大胆な仮説を提唱した。彼らはキャニオンランズ国立公園の Upheaval Dome (後述) を形成した隕石衝突が原因だと考えている。

Balanced Rock の観察後, 私たちは The Windows Section に移動し, North Window や South Window (図 18), Double Arch (図 19) などを観察した。ここでは自由観察時間を設けて各自自由に行動した。午後はこの日のハイライトである Delicate Arch へのトレッキングを行った。Delicate Arch に行

くには Wolfe Ranch から往復 4.8 km (約 3 mi), 高低差約 150 m (480 ft) の坂道を歩かなければならない。このトレイルには日陰がほとんどなく, 途中にトイレもない。十分な飲料水を持ち, 私たちは自分のペースで Delicate Arch を目指して登った (図 20)。体力面で心配な学生もいたが元気に登っていた。このトレイルでは, もめた地層に産する玉髓 (チャートまたはフリントと言うべきか), 砂岩 (砂丘堆積物) の堆積構造 (図 21), 小規模な沢筋の下方侵食地形, 砂岩に発達するタフォニ (風化による微小地形) などが観察できる。トレイルを登りきると Delicate Arch に到着 (図 22)。早く着いた学生たちは写真撮影に精を出していた。このアーチも真横から見ると元々フィンであったことがわかる。周辺には同じ方向 (N70-80°E) に発達するフィンがいくつか確認できる。

この日の最後に Landscape Arch を観察した (図 23)。Landscape Arch は Delicate Arch と並んでこの公園を代表するアーチの一つである。Devils Garden Trailhead から往復 3.2 km (2 mi) ほどのトレイルを歩く。この周辺はフィンの地形がよくわかり (図 24), トレイルもフィンとフィンの間 (風化・侵食で広がった節理のところ) を抜ける。今にも崩壊しそうな Landscape Arch を見て学生たちは満足そうであった。なお Landscape Arch はトレイルの西側にあるので夕方は逆光になって撮影が難しい。



図 21 Delicate Arch Trail に露出するナバホ砂岩層の大規模斜交葉理。



図 22 Delicate Arch と、 その下で喜ぶ学生たち。

この日は Moab に宿泊。夜は自由行動にして食事とショッピングを楽しんだ。

8. デッドホースポイント州立公園

朝、Moab のスーパーマーケットで昼食を買い、この日最初の訪問地であるデッドホースポイント州立公園 (URL13, URL14) に向かった。この公園は後述のキャニオンランズ国立公園に隣接している。この公園とキャニオンランズ国立公園はいずれも流水による侵食作用によって地形がどのように形作られるかを学ぶには最高のフィールドである。

Moab から国道 191 号線を 15 分ほど北上し、州道 313 号線に入ってしばらく進む。この道路からの景色は素晴らしく、坂道を上るにつれて道路両側にチンリ層、ウインゲート砂岩層、カイエンタ層 (Kayenta Formation)、ナバホ砂岩層などが現れる。登りきってナバホ砂岩層がつくる高原状の台地を進み (標高約 1800 m)、途中左に折れて州道 313 号線を進むと、道路終点にデッドホースポイント州立公園がある。エントランスで入場料 \$10 (自家用車料金) を支払い、ビジター



図 23 Landscape Arch。長さ約 88 m (290 ft) に達する大きなアーチで、アーチズ国立公園では最長、世界でも 2 番目に長い。1991 年に起こった大規模な剥離・崩落によってさらに薄くなった (URL10)。



図 24 Fiery Furnace 付近に発達するフィン。この付近のフィンは Salt Valley の伸び方向 (NW-SE) と平行に発達する。

センターで情報収集とショッピング後、デッドホースポイントに移動した。デッドホースポイントには周囲を断崖で囲まれた尾根上の道路を進む (高所恐怖症の人は注意)。展望ポイントがいくつかあるが、今回は道路終点のポイントから地形と地層を観察した。コロラド川の下方侵食と側方侵食で形作られた侵食地形が見事である (図 25)。眼下に馬蹄状に曲流するコロラド川が見える。水は茶色に濁っている。絶壁を形成する地層は下位からカトラ層 (Cutler Formation)、メンコピ層、チンリ層、ウインゲート砂岩層、カイエンタ層である (図 13)。チンリ層を除きこれらの地層は赤褐色を呈するため、広大な大地全体が赤っぽい。地層は水平。これらの地層は頁岩と砂岩を主体としており、砂岩のほうが侵食されにくい。この差別侵食の結果、砂岩が急崖を形成し、頁岩が比較的緩やかな斜面を形成する (図 26)。川の穿入蛇行 (incised meandering または entrenched meandering) が進行すると、川の両側の急崖の崩落が進み、やがて曲流の「首」の部分で川の短絡 (cutoff) が起こる。短絡の結果、それまでの曲流部の内側に独立した高まりが生じる。この高まりを環流丘陵や繞谷丘陵 (meander core) というが、眼下にはこうしてできた複数の環流丘陵の名残が認められる。

この公園では、人が集まる展望ポイントには転落防止のための石垣や手摺りがあるが、そこから少し離れると何もない。間違っ足て足を滑らせたなら数 100 m の断崖を自由落下することになる。学生たちは注意しながらも断崖のドキドキ感を楽しみたいためか断崖に近づき歓声をあげながら写真撮影していた (図 27)。引率の身としてはハラハラしたが (実は



図 25 デッドホースポイントからコロラド川と階段状の侵食地形を望む。



図 27 デッドホースポイントの断崖に立つ学生たち。

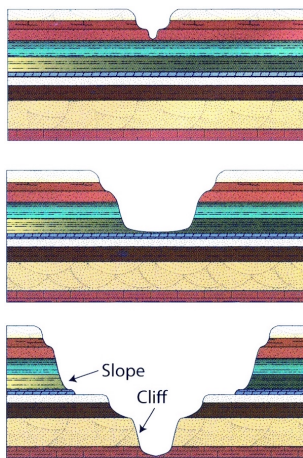


図 26 水平層の差別侵食による地形発達 (Morris et al., 2012 より引用)。砂岩が急崖 (cliff) をつくり、頁岩が比較的緩やかな斜面 (slope) をつくる。



図 28 ホワイトリム砂岩層の侵食地形 (Grand View Point)。

引率者もドキドキ感を楽しんだが), 日本と違ってこの国は基本的に Do it at your own risk (自分の責任で) である。

9. キャニオンランズ国立公園

キャニオンランズ国立公園は広大で、その面積は約 1370 km²に達する (URL15, URL16)。この公園は Island in the Sky, Maze, Needles という大きく 3つの地区に分かれている。これらを 1日ですべて巡るのは不可能だ。今回は北部を占める Island in the Sky の、その中でも 2つのポイントだけを訪問した。入場料は\$10 (自家用車料金)。

1つ目の訪問地は Grand View Point である。前述のデッドホースポイントと同じく、ここでの見所は河川による侵食地形である。眼下に広大な侵食地形が広がる。地質もデッドホースポイント州立公園とほぼ同じであるが下部がやや異なる。地層は下位からオーガンロック頁岩層 (Organ Rock Shale), ホワイトリム砂岩層 (White Rim Sandstone), メンコピ層, チンリ層, ウィンゲート砂岩層, カイエクタ層, そして最上部にナバホ砂岩層である (図 13)。この中でホワイトリム砂岩層とウィンゲート砂岩層, カイエクタ層, ナバホ砂

岩層が cliff former である。特にホワイトリム砂岩層が侵食に対する抵抗性が高い。ホワイトリム砂岩層の上面には涸れ川 (dry wash) があり、その先にはホワイトリム砂岩層が大きくえぐられた谷頭侵食地形がある (図 28)。この公園の年間平均降水量はわずか 220 mm だが (Shue and Herbert, 2010), 短時間に大雨が降ると土壌も植生もほとんどないため水は地中にしみ込まず地表流水 (runoff) となる。これが涸れ川を一気に流れ、ホワイトリム砂岩層のリムから滝となって流れ落ちる (Shue and Herbert, 2010)。このような現象は年に数回しか発生せず、1回のイベントの継続時間もわずか数時間である。しかしこうしたイベントがホワイトリム砂岩層のリムを急激に削り込み、谷頭侵食地形を形成する。

2つ目の訪問地は Upheaval Dome である。これは Island in the Sky の北部にある特異な地形と地質構造で、まるで広大な水平層地帯に生じた「おでき」のようである (図 29)。Upheaval Dome では中心部に直径約 2.6 km に達する深い凹地があり (ドーム状構造全体の直径は約 5 km), その縁を歩いて地形と地質を観察できる。中心部には層序的に下位の地層 (ホワイトリム砂岩層やメンコピ層) が露出し、そこから外側に向かってより上位の地層が分布している。中心部の地



図 29 Upheaval Dome (Google Earth を使用)。写真横幅は約 8.2 km (5.1 mi)。



図 30 Second Overlook の断崖から Upheaval Dome の地形と地質構造を観察。

層はかなり変形しており、明色化したメンコピ層の岩石と下位の砂岩が混ざり合っているという (Morris et al., 2012)。Upheaval Dome の成因としては従来、岩塩ドーム上昇に伴ってできたとする見解と隕石衝突によってできたとする見解があった。しかし最近、Buchner and Kenkmann (2008)はこのドームのカイエントラ層の砂岩中に衝撃石英を発見し、隕石衝突の証拠であると主張した。私たちは Upheaval Dome Trail を歩いて、First Overlook と Second Overlook という 2 つの展望地点に行った (First Overlook で昼食; 図 30)。トレイルでは小断層や砂岩脈も観察された。Upheaval Dome のドーム状構造にはナバホ砂岩層も加わっているため、その形成はナバホ砂岩層堆積後であるのは確実だが、形成時期の詳細は不明である。上記のように Alvarez et al. (1998) は Upheaval Dome の形成とカーメル層の未固結変形構造 (図 17) の形成が関連しているという仮説を立てており、それが正しければ隕石衝突はジュラ紀である。メテオールクレーター形成は約 5 万年前で、クレーター地形はまだよく保存されているが (図 3), Upheaval Dome のクレーター地形は侵食によって完全に失われ、現在は衝突クレーターの地下深部の地質構造が現れていることになる。

キャニオンランズ国立公園からこの日の宿泊地である Mexican Hat に移動する途中、Raplee Anticline (または Raplee



図 31 Raplee Ridge Monocline の撓曲。写真奥の水平層が写真手前の水平層に対して隆起し、両者の間の地層が撓曲している。



図 32 グースネックス (2013 年 9 月撮影)。

Ridge Monocline; Hilley et al., 2010) と呼ばれる撓曲の地形と地質構造を遠望できた (図 31)。素晴らしいので、予定外であったが州道 261 号線と国道 163 号線の T 字路で日が暮れるまで観察した。撓曲が一目でわかる地形は日本ではまず見ることができない。コロラド高原にはこうした撓曲が各所に発達している。なお、国道 191 号線と 163 号線はいわゆる scenic road (地形や地層の景観のよい道) である。

Mexican Hat は国道 163 号線沿いで巡検を行う場合は重要な位置にある集落である。赤色岩層の分布域にあるため土地が赤茶けている。このあたりは明かりが少ないため日が暮れると真っ暗になる。夕食後に車で町外れまで走り、コロラド高原の満天の星空をみんなで見上げた。

10. グースネックス州立公園

この公園 (URL17, URL18) の見どころはその名 (ガチョウの首) の通り穿入蛇行であり、穿入蛇行地形の典型例としてよく教科書等で紹介されるところである (図 32)。この地域ではサンファン川 (San Juan River) がペンシルバニア系のパラドクス層とホナカートレイ層 (Honaker Trail Formation) を深く削りこみ (図 33)、この公園では川面が周囲の平原よりも約 300 m (1000 ft) も低いところにある。朝と夕方は谷のほとんどが日陰になってしまっよ写真が撮れないのだが、それでも学生たちは教科書で見たことがある

世界的に有名な穿入蛇行のスケールに驚いていた。なお、この公園は数年前まで無料だったが、最近エントランスが設けられ、私たちの訪問時には入場料として\$20を徴収された。

11. モニュメントバレー

Mexican Hat から国道 163 号線を 15 分ほど南下すると、目の前にメサとビュート (butte)、ピナクルからなる特徴的な地形が見えてくる (図 34)。米国西部を最も特徴づける地形の一つと言えるだろう。

モニュメントバレー (URL19, URL20) はナバホネイション (Navajo Nation; 先住民の準自治領の一つ) の中にある。モニュメントバレーとして一般に知られる場所は、正しくは Monument Valley Navajo Tribal Park と呼ばれる。ここは国立公園や州立公園ではなくナバホネイションの公園である。入場料は高い。車 1 台で 11 人だと通常\$60 を超えてしまう。そのため事前にメールで減免申請をした。その申請が受理され、合計\$33 (\$3/人) に抑えることができた。エントランスで支払い後、ビジターセンターで情報収集とショッピング。ビジターセンターからはモニュメントバレーの風景を象徴



図 33 Mexican Hat 西方におけるサンファン川の穿入蛇行 (Google Earth を使用)。写真横幅は約 36 km (22.4 mi)。

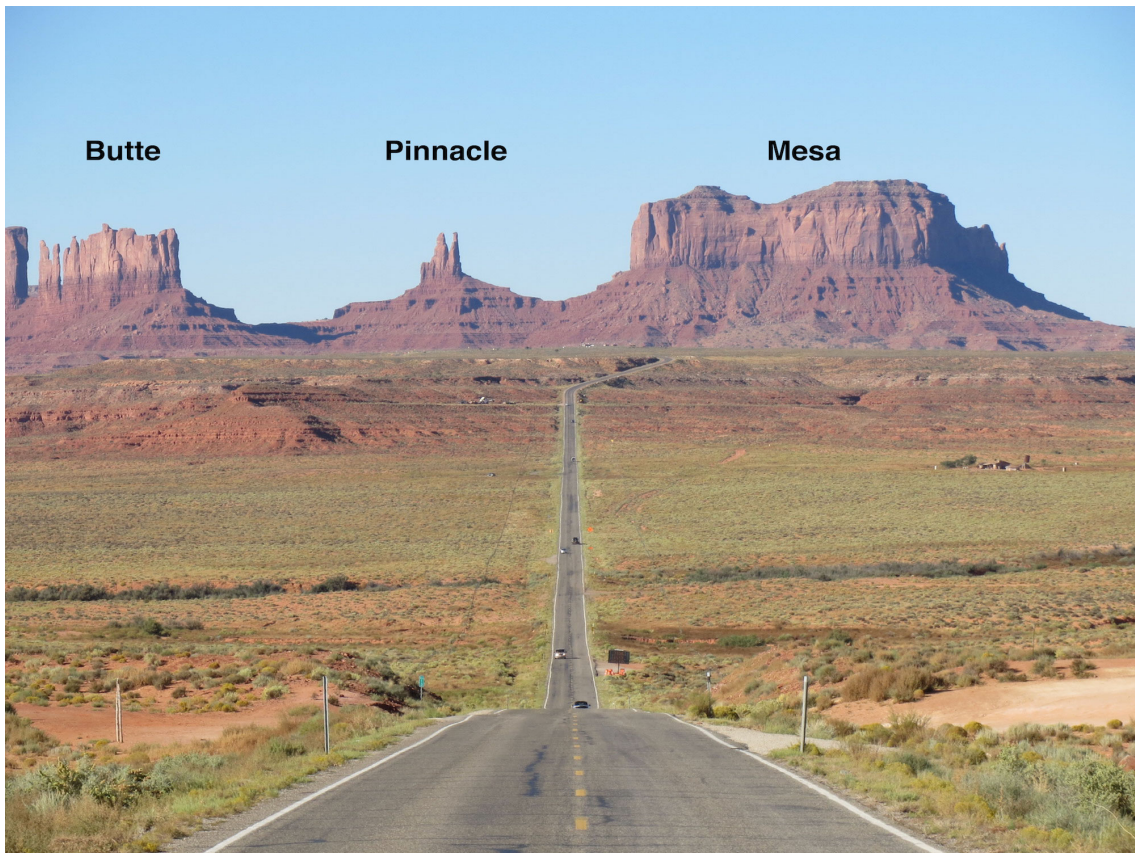


図 34 モニュメントバレー。メサ (mesa)、ビュート (butte)、ピナクル (pinnacle) はいずれも頂部が平らで周囲の平原から独立した高まりで、周囲を急崖で囲まれている。高さに対して水平方向の規模が大きいものをメサ、水平方向の規模が小さい (狭い) ものをビュート、ビュートよりも頂部が狭くて柱のようになっているものをピナクルという。メサよりも広大で数 10 km 以上の広がりを持つ台地をプラトー (plateau) という。急崖をなす部分は侵食に対する抵抗性が強い岩石から構成される。

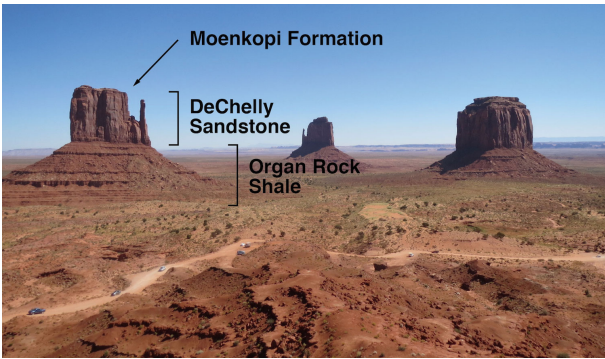


図 35 モニュメントバレーのビジターセンターから見た West and East Mitten Buttes および Merrick Butte。



図 36 チンリ層の珪化木化石を採取 (Cameron 北方)。

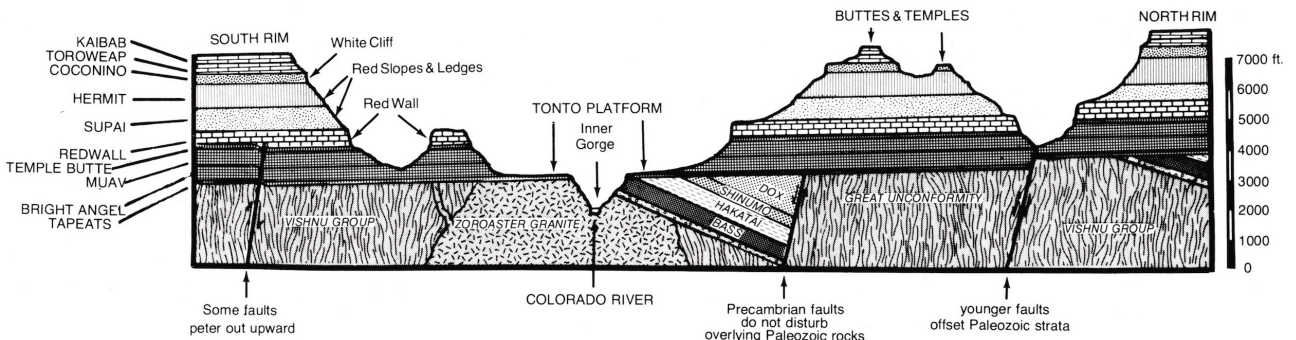


図 37 グランドキャニオン東部のN-S方向の模式地質断面図 (Chronic, 2003 より引用)。

する 3 つ並んだビュート (West and East Mitten Buttes と Merrick Butte) が見られる (図 35)。

モニュメントバレーのメサやビュート、ピナクルを形づくる地層は、ペルム系のオーガンロック頁岩層とデシェイ砂岩層 (DeChelly Sandstone), そして三畳系のメンコピ層である (図 35)。この中でデシェイ砂岩層が cliff former で、下位のオーガンロック頁岩層が緩やかな斜面を形成している。デシェイ砂岩層には縦方向の節理が発達し、一見すると柱状節理に見える。この砂岩層にもメサベルデやアーチーズなどで見られるような風化地形が所々に生じている。

モニュメントバレー訪問者の多くはビジターセンターから眼下に広がる風景だけを見て帰ってしまうが、この公園の本当の面白さは眼下に広がる赤茶けた大地を車で走ることだ。訪問者は Scenic Drive と呼ばれるダート道を自分の車で走ることができる。大きなバンでこのダートを走ることには不安があったが (星は 10 年前にここを走ったとき車がパンクした), やはり学生たちにあの楽しさを伝えたい。勇気を出して (?) Scenic Drive のガタガタ道を下り始めた。車は上下左右に激しく揺れ、乗っていた学生たちはキャーキャーと歓声 (悲鳴?) をあげた。このダート道を走るとメサとビュートを間近で見上げるように観察できる。涸れ川を渡り、風成リップルが発達する砂漠を突っ切る。Elephant Butte や The Three Sisters と呼ばれるビュートとピナクルを見ながらゆっくり車を進め、「駅馬車」などの西部劇の撮影ポイントとして有名な John Ford Point まで走った。Scenic Drive はこの先にも続くが、時間の都合で私たちはここで引き返した。

昼前にモニュメントバレーを出発し、グランドキャニオン

国立公園に向かった。その途中、予定外ではあったが Cameron 北方の国道 89 号線沿いでチンリ層の珪化木化石採取を行った (図 36; 公園ではないので道路脇で化石採取が可能)。親指大かそれ以上の大きさの珪化木化石を多数採取できた。簡単に採取できるので、暑い中ではあったが学生たちは夢中になって採取していた。ペトリファイドフォレストの場合と同様、この珪化木化石も樹木の模様が生々しくわかる。いいお土産になった。

12. グランドキャニオン国立公園

陽が傾いてきた頃、グランドキャニオン国立公園 (URL21, URL22) の Desert View Point 側のエントランスに到着した。入場料は 16 人以下の非商業団体料金で \$30 であった。減免制度があるので事前に申請したがレスポンスがなかった。

この公園は広大で、公園全体の面積は約 4900 km² に及ぶ。コロラド川を挟んで大きく北側 (North Rim) と南側 (South Rim) に分かれるが (図 37), ほとんどの人が訪れるのは南側である。今回の巡検も南側で行った。言うまでもなくこの公園の見どころはコロラド川によって刻み込まれた標高差最大 1800 m 以上 (後述の Bright Angel Trail 付近では約 1300 m) に達する大峡谷とその壁面に見られる地層である。

地質学, 特に自然地質学 (physical geology) と地史学の基礎を学ぶ上で、グランドキャニオンは最高のフィールドである。ここでは堆積岩, 火成岩, 変成岩という岩石の全カテゴリーを観察できる (火成岩と変成岩はキャニオン下部に露出)。地層に関する基礎原理 (地層累重, 水平堆積, 側方連



図 38 Desert View Point からの展望。Great Unconformity (中～新原生界グランドキャニオン超層群と古生界との傾斜不整合) がよくわかる。



図 39 Mather Point。

続など)の理解を深められる。風化, 侵食, 運搬, 堆積という基本的な地表プロセスの理解を深められる。断層や岩脈も見られる。堆積岩には化石が含まれ, 化石による古環境の推定と地史の復元ができる。「見ればわかる」と言えるほど露出が良いので, 地層の3次元的な分布を理解できる。そして, ビジターセンターの資料や公式アクティビティ(パークレンジャーが引率する巡検など)が豊富である。このようにグランドキャニオンは学生巡検地として大変優れており, 教員・研究者にとっても学ぶことが多いところである。

グランドキャニオンの N-S 方向の模式断面を図 37 に示す。堆積岩シーケンスの基盤を構成するのはヴィシュヌ片岩 (Vishnu Schist) とゾロアスター花崗岩 (Zoroaster Granite) で, いずれも古原生代の約 18~17 億年前に形成された岩石である。これらを不整合に覆って約 12~7.4 億年前(中～新原生代)に堆積したグランドキャニオン超層群 (Grand Canyon Supergroup; 図 37 では Bass Limestone や Hakatai Shale など北に傾斜した地層) と呼ばれる地層がある。この超層群は公園東側の Desert View Point から観察できる。さらにこれらを不整合に覆って, タピーツ砂岩層 (Tapeats Sandstone; カンプリア系) から始まるほぼ水平な地層が厚さ 1000 m 以上にわたって累重している。この水平層にはいくつかの平行不整合があり (図 6), 垂直方向の岩相変化も大きいため, い



図 40 カイバブ石灰岩層に含まれる化石を観察 (Bright Angel Trail)。



図 41 カイバブ石灰岩層に含まれるウミユリ化石 (Bright Angel Trail)。スケールの 5 セント硬貨は直径 21 mm。

くつかの層群に区分されている。最上部を構成する地層はペルム系のカイバブ石灰岩層 (Kaibab Limestone) である。

Desert View Point に到着した私たちは展望台から地形と地層を観察した (図 38)。学生たちはデッドホースポイントやキャニオンランズで侵食地形を観察してきたが, それでもやはりグランドキャニオンの圧倒的なスケールに感激したようだった。ここでは, 傾斜したグランドキャニオン超層群がカンブリア系以上の水平層 (実際にはごく緩く傾斜している) によって傾斜不整合に覆われるようすが観察できる。

その後 Desert View Drive (州道 64 号線) を走ってビジターセンターのある地区に移動し, Mather Point で観察 (図 39)。Desert View Point に比べて峡谷が深く, 「これぞグランドキャニオン!」という景色に学生たちは歓声をあげて写真を撮影していた。さらに Market Plaza に移動し, 日暮れまで自由行動にした。グランドキャニオンの楽しみ方は様々だが, 夕陽を浴びて真っ赤に染まり様相が刻々と変化する岩壁を絶対に見逃してはならない。Market Plaza や Village を中心として無料のシャトルバスが走っている。地図を片手にシャトルバスをうまく使って自由に移動し, 夕刻のグランドキャニオンを楽しむのがよい。園内の地図はビジターセンター (17:00 で閉まる) やシャトルバス内で手に入る。学生たちが迷子にならないか心配だったが, そんな引率者の心配をよそに学生



図 42 デスバレーは暑い！ 夏にはこのような警告が見られる (Mesquite Flat Sand Dunes)。

たちはそれぞれ行きたいポイントに向かって行動していた。

この日の宿は Market Plaza から南に約 8 km (5 mi) 離れた Tusayan のモーター。この時期、グランドキャニオンの Village 内に宿を確保するのは容易ではなく (団体の場合、遅くとも 1 年前には予約が必要)、料金も高い。Tusayan は公園から少し離れており、ここなら比較的容易に宿を確保でき、Village に比べれば安い。

翌日 (21 日) は午前中に Bright Angel Trail を時間の許す限り歩いて地質と化石を観察した (図 40, 41)。今回のグランドキャニオン訪問のハイライトである。このトレイルは Village からコロラド川を渡って Bright Angel Campground に至る、片道約 15 km (9.3 mi) のグランドキャニオンを代表するトレイルである (Thybonny, 2001)。トレイルヘッドの標高は 2091 m、トレイルがクロスするコロラド川の標高は 756 m なので、実に標高差 1300 m 以上である。これほど長く、高低差もあるトレイルを日帰りで行くのは自殺行為である。通常の登山と異なり、このトレイルは往路が降りて復路が登りになるので、「行きはラクだが帰りは辛い (降りすぎると地獄)」になることに注意しなければならない。また、降りるほど気温が上昇することにも注意が必要である。トレイルにはミュールの糞があちこちにあるので (ミュールに乗って登り降りすることもできる)、その糞を含む砂塵 (糞塵?) で足元が汚れることも知っておくとよい。私たちは集合時間をあらかじめ決めて、自由に歩いて地層と化石を観察した。降りるにつれてカイバブ石灰岩層、トロウイーブ層 (Toroweap Formation)、ココニノ砂岩層 (Coconino Sandstone)、ハーミット頁岩層 (Hermit Shale) など順次下位の地層の中を歩く (図 37)。半日ではせいぜいハーミット頁岩層分布域までが限界である。

Market Plaza でショッピングと昼食後、途中寄り道をしながら Las Vegas へ移動した。Las Vegas 到着時にはすっかり日が暮れていた。Strip 地区のメインストリートの真昼のような明るさと雑踏、林立するカジノホテルを見て、学生たちは大騒ぎであった。この晩は私たちもカジノホテルに宿泊。信州大グループが明朝一足先に帰路につくため、お別れ会を兼ねたディナーをステーキハウスで楽しんだ。



図 43 Furnace Creek ビジターセンターの気温表示。

13. デスバレー国立公園

22 日、愛教大グループは最後の訪問地であるデスバレー国立公園 (URL23, URL24) に向かった。Las Vegas から片道 240 km (150 mi)、2 時間半ほどのドライブである。このあたりは中新世に地殻が伸張して多数の地塁と地溝が形成されたベイスンアンドレンジ地域 (Basin and Range Province) の南部にあたる。公園中心部を NNW-SSE 方向に伸びる長大な谷 (デスバレー; 東北地方の北上低地帯ほどの規模) も地溝の一つである。デスバレーは横ずれ伸張によってできたプルアパートベイスン (pull-apart basin) と考えられている (Harris et al., 1997)。公園に向かう車窓からも地塁 (山地) と地溝 (平原) の地形をよく観察できる。

この公園の面積は 13000 km² を超える。今回の巡検で巡った公園の中で最も広大である。キャニオンランズやグランドキャニオンと同様、この公園も見どころを 1 日ですべて回るのは難しい。しかもこの公園のベストシーズンは日が短い冬である。夏や秋がベストシーズンでない理由はただ一つ、暑いからだ。ここは北米大陸で最も暑く、最も乾燥した地である。6 月～9 月はとにかく暑い。約 100 年前 (1913 年) の 7 月に 56.7°C (134°F) を記録し、これが地球上の最高気温の世界記録になっている (URL24)。夏の日中に 50°C (120°F) 近くまで気温が上昇することは珍しくない。不十分な装備と少ない飲料で夏に活動するのは大変危険である (図 42)。私たちはそんな暑い季節にここを訪問した。

デスバレーが特に暑い理由の一つは標高が低いことである。後述する Badwater Basin の標高は -86 m (海面下 86 m) で、北米大陸で最も標高が低い。デスバレーには海面下の標高の土地が広がる。

この日の巡検のキーワードは「砂漠、乾燥、蒸発岩」である。10 時頃に公園に入り、ビジターセンターのある Furnace Creek に向かった。デスバレーはその東西を標高 1000～3000 m 級の山地に挟まれている。私たちは公園東側 (Death Valley Junction 側) から入場し、標高約 1000 m の峠を越えて海面下の土地まで走り降った。荒涼として植生がほとんどなく、岩石と礫質堆積物 (土石流堆積物) がむき出しになっている



図 44 ファーニスクリーク層の岩相を観察。地層は急傾斜している (Golden Canyon Interpretive Trail)。

光景に学生たちは何を感じただろう。Zabrinskie Point では荒涼とした風景 (いわゆる badland) を観察した。

ビジターセンターで入場手続きをした。事前に減免申請をしておいたので入場無料になった (通常は自家用車 1 台 \$20)。ビジターセンターではデスバレーの地形とその形成過程, 主な岩石と鉱物などについて学ぶことができる。訪問時の気温は 42°C (107°F) であった (図 43)。ビジターセンター近くの Furnace Creek Ranch で昼食をとった。団体観光客が予想以上に多く (デスバレーの暑さを体験するツアーだと思われる), 大変混雑していた。

午後はまず Furnace Creek の北西約 30 km (19 mi) に位置する Mesquite Flat Sand Dunes に行った (図 42)。ここはデスバレー内に数多くある砂の吹き溜まりの一つで, 現世砂丘が発達している。暑い中, 砂丘に入り地形と堆積物を観察した。

次に, 来た道を戻って Furnace Creek の南 5 km (約 3 mi) にある Golden Canyon Interpretive Trail に行き, トレイルを歩いて地塁 (山地) を構成する地層を観察した (図 44)。かつてこのトレイルのある谷にはアスファルトの道路が伸びていたが, 繰り返し発生した土石流 (鉄砲水) によって下方侵食が進み, 道路がほぼ完全に失われ, 現在のトレイルはかつての路面よりも 1~2 m ほど低いところにある。その土石流の土砂は谷の出口を扇頂とする扇状地を形成している。デスバレー縁辺部 (=両側の地塁山地の麓) にはこうした扇状地が多数発達している。トレイル沿いには礫岩と砂岩からなる傾斜したファーニスクリーク層 (Furnace Creek Formation) が途切れなく露出している。この粗粒堆積物も 600~400 万年前の扇状地堆積物で, 現在のデスバレーが拡大する前に堆積した地層と考えられている (Miller, 2005)。この地層の露頭表面には白色の結晶が晶出しているところがある。これはホウ砂 (borax) である。デスバレーはかつてホウ砂の一大産地であった。露頭に晶出したホウ砂や塩の結晶が雨水に溶けてより標高の低いデスバレーに流れ出る。デスバレーで水分が蒸発すると, そこで再び晶出した塩類が残されて塩田 (salt pan) ができる。こうして塩類が徐々に堆積して蒸発岩ができる。後述する Badwater Basin の現世岩塩はこのようにしてできたものである。デスバレーは世界最大級の塩田の一



図 45 Badwater Basin の塩田。表面は多角形ブロック状に割れている。



図 46 扇状地の活断層崖。スケールは扇状地の籠の車。

つである。

Badwater Basin は上述のようにデスバレーで最も標高が低いところである。そのため周囲から地表流水が集まり, それ蒸発して大量の塩類が堆積する場になっている。この地帯は最近生成した岩塩によって覆われ, その上を歩いて観察することができ, 蒸発岩形成過程を学ぶには絶好の場所だ (図 45)。塩田表面は多角形ブロック状に割れていることがあり, ブロック縁部がまくれ上がっていることもある (この多角形ブロックの形成については Messina et al., 2005 が詳しい)。学生たちはそうした構造を観察したり堆積物を舐めたりしながら蒸発岩形成と表面構造の形成について議論していた。それにしても暑い! 私たちがここを訪問したのは 1 日のうちで最も暑い時間帯で, 腕時計の表示は 43°C であった。学生たちは暑さのためにバテてきたようだった。

デスバレーの構造運動は現在も続いている。そのわかりやすい証拠の一つは扇状地を切る活断層の存在である (図 46)。Badwater Basin でも扇状地が活断層により変位しているのを容易に認めることができる。

その後, 私たちは Artists Palette と呼ばれる変質地帯 (熱水変質によって赤鉄鉱や緑泥石が生じ, 岩石が赤色や淡緑色に変色している) を観察し, デスバレーを後にした。

14. 米国学生巡検の秘訣と注意点

星はこれまで米国での地質学学生巡検を3回経験した。個人的にはほぼ毎年、学会にあわせて米国各地で一人巡検を行っている。これらの経験を踏まえて、米国で大学教員や研究者等が学生・生徒を引率して巡検を行う際の秘訣と注意点についてまとめる。

1) 基礎的な英語を学ぶ

当然ながら現地の言葉は英語である。空港や観光地のショップでは日本語が通じることがあるが、大抵の場合日本語は通用しない。英語を話す、聞く、読むことができないと巡検が成立しないばかりか、非常時に大変困ることになる。引率者は最低でもレンタカーの手続き、ホテル/モーテルのチェックイン(チェックアウトは通常、鍵をドロップするだけ)、国立/州立公園での入場手続きなどを滞りなくできる程度の英語力が必要である。地学の専門英語としては、ビジターセンターの解説や露頭の地質案内板の内容を正しく理解し、それを学生に解説できる程度の英語力が必要であろう。学生や生徒も、空港での入国審査(質問に対する応答)や食事の注文は自分で行う必要がある。英語ができないよりもできるほうが良いに決まっているので、巡検に行くことが決まったら(と言うよりも普段から)基礎的な英語力を身につけるように努力しよう。地学の専門英語にもある程度慣れておけば、現地で英語の地質解説を読んで理解を深めることができる。

一人で英語を聞いたり読んだりするのは問題ないが外国人と対面して話そうとすると言葉が全然出なくなるという症状は、多くの学生・生徒が経験することであろう。これは経験を積むしかないが、最も大切なのは勇気だと星は思っている。学生には勇気を出して話してほしい。言葉の順番が不正確でも、伝えたい気持ちと勇気を持って言葉を発すれば、意外と何とかなるものである。

2) 費用をできるだけ抑える

学生・生徒の費用負担をできるだけ抑えるために、引率者は航空券予約、ホテル/モーテル予約、現地の移動手段、国立/州立公園の入場料減免申請など、さまざまな点で労力を惜しまないことである。航空券は、現在はネットで出発・到着予定時間や料金などを自分で調べて予約することができる(各航空会社のサイトやH.I.S.等の旅行業者のサイト)。ホテル/モーテルもExpediaやBooking.com、楽天トラベルなどいくつかの検索・予約サイトで比較・予約できる。10数人以下の少人数グループの場合はレンタカーを使うことになるだろうが、レンタカーの検索・予約もネットで可能である。大人数の場合、引率者が自らすべての予約をすることは大変なので、日本あるいは米国の旅行業者に予約等の代行を依頼することになるだろう。現地の移動手段も大型バスになるだろう。代行手数料やバス運転手にかかる費用も負担することになるので、この場合は費用が当然跳ね上がるが、それでも業者に希望を伝えてできるだけ費用を抑えるようにすることはできるだろう。

米国のホテル/モーテルは基本的に部屋に料金がかかるので、1部屋を1人で使うよりも2人や3人で使うほうがト

タルの支出を少なくできる。学生・生徒の希望に配慮した上で適切な部屋数を予約するとよい。

あまり知られていないが、ほとんどの国立/州立公園には教育活動に対する入場料減免制度(educational fee waiver)がある。この効果は大きい。各公園のホームページ(本論末尾のURLを参照)に申請方法や注意点が示されている。活動内容や目的等を英語で詳しく記述する必要があるので面倒ではあるが、引率者はぜひこの制度を活用すべきである。

3) 資料を入手する

書籍やネットで巡検予定地の地質と地形に関する情報を集めて予習しておく、学生・生徒の意識が高まり、巡検中の観察にも力が入るだろう。米国では地質や地形に関する一般向けの書籍が数多く出版されている。例えば、本論でも引用した*Roadside Geology* シリーズ(例えば、Chronic and Williams, 2002)は使いやすい。Grand Canyon Associationに代表される各公園の団体が出版または販売している書籍もよい(例えば、Morris et al., 2012)。また、折りたたみパンフレットになっている州単位や公園単位の地質図や地質解説も数多く出版されている。星は*Geologic Highway Map of Utah*(Hintze, 1997)と*Geologic Highway Map of Arizona*(Kamilli and Richard, 1998)を手放せない。これらは予習だけでなく巡検中にも大変役立つ。

ネットで上手に検索すれば、大抵の国立/州立公園の地質と地形に関する情報を入手できる。齋藤和男氏(山形大学名誉教授)のウェブサイト「コロラド高原で最近20億年の地層を見る」(URL25)は内容が充実しており、大変役立つ。

4) 移動計画を立てる

米国西部の広大な大地を転々と移動する場合、距離と移動速度、そして時間をよく勘案して移動計画を立てる必要がある。街中を除き、州間国道の最高速度は時速65~80マイル(mph)、国道や州道は55~65 mphである。日本の高速道路を移動する感覚で考えるとよいだろう。速度と距離の表示はすべてマイルなので、マイルで考えるのがポイントである。

時差と夏時間(daylight saving time)にも注意したい。西部にはPacific Time ZoneとMountain Time Zoneがあり、1時間の時差がある。3月中旬~11月初旬には夏時間の調整も加わるが、アリゾナ州の大部分は夏時間を採用していないので注意が必要である。

5) 持ち物・服装など

海外旅行の一般的な持ち物と服装、注意点などについては、『地球の歩き方』などの旅行ガイドブックや旅行業者のホームページに記述されているので参考にするとよい。当然ながらパスポートは必須で、現地でレンタカーを運転する場合は国外運転免許証も必要である(日本の運転免許証も忘れずに持っていくこと)。

コロラド高原は乾燥地帯で日差しも強烈なので、乾燥と日差しに対する準備を忘れずに。帽子とリップクリームは必須である。サングラスもあるとよい。昼夜の気温差が大きいので、夏でも長袖の服を持っていくとよい。

スマートフォンやタブレットがあれば、カメラとして使えるだけでなく、フィールドでの位置と標高の確認(GPS機能;

Google Mapなどの地図データをあらかじめ保存しておく(よい)やネット検索(ホテル/モーターだけでなく無料Wi-Fiスポットが各所にある)ができる。スマートフォンやタブレットは地質巡検の最高のツールであると星は考えている。

6) 健康管理と保険

学生・生徒の多くは外国旅行に不慣れであるため、引率者は出発前と巡検中に学生・生徒の健康状態を知っておく必要がある。日常的に薬を飲んでいる場合には忘れずに持っていくように伝える。米国のレストランで提供される食事は日本に比べて多く、つい食べ過ぎてしまうことが多いので、特に女性の場合は複数人で料理をシェアするなどの工夫が必要である(食べきれない場合はテイクアウトボックスをもらって持ち帰ることもできる)。懇親会などで盛り上がりすぎて体調を崩さないように。

引率者と学生・生徒は海外旅行保険に必ず加入すること。加えて、学生は学生総合共済や学生賠償責任保険などにも加入しておくべきである。

15. 謝辞

星が米国西部を好んで巡検するようになったのは、学生時代の恩師である齋藤和男先生(山形大学名誉教授)の影響が大きい。齋藤先生には粗稿を読んでいただいた。ただし本稿に間違いがある場合はすべて筆者らの責任である。メテオールクレーター、ペトリファイドフォレスト国立公園、モニュメントバレー、デスバレー国立公園では入場料を減免していただいた。信州大学理学部には信州大4名の旅費の一部を支援して頂いた。以上の皆様および機関に感謝します。

16. 文献・URL

- Alvarez, W., Staley, E., O'Connor, D. and Chan, M.A., 1998, Synsedimentary deformation in the Jurassic of southeastern Utah: A case of impact shaking? *Geology*, **26**, 579–582.
- Buchner, E., Kenkmann, T., 2008, Upheaval Dome, Utah, USA: Impact origin confirmed. *Geology*, **36**, 227–230.
- Chronic, H., 2002, *Roadside Geology of Utah, Eighth Printing*. Mountain Press Publishing, Missoula, 325p.
- Chronic, H., 2003, *Roadside Geology of Arizona, Eighteenth Printing*. Mountain Press Publishing, Missoula, 321p.
- Chronic, H. and Williams, F., 2002, *Roadside Geology of Colorado, Second Edition*. Mountain Press Publishing, Missoula, 399p.
- Condie, K.C., 2011, *Earth as an Evolving Planetary System, Second Edition*. Academic Press, Amsterdam, 574p.
- Harris, A.G., Tuttle, E. and Tuttle, S.D., 1997, *Geology of National Parks, Fifth Edition*. Kendall/Hunt Publishing, Dubuque, 758p.
- Hilley, G.E., Mynatt, I. and Pollard, D.D., 2010, Structural geometry of Raplee Ridge monocline and thrust fault imaged using inverse Boundary Element Modeling and ALSM data. *Journal of Structural Geology*, **32**, 45–58.
- Hintze, L.F., 1997, *Geologic Highway Map of Utah*. Brigham Young University Geology Studies Special Publication 3, Brigham Young University, Provo.
- 星 博幸, 2015, 地質巡検記: アリゾナ中部. 名古屋地学, no. 77, 18–29.

- Kamilli, R.J. and Richard, S.M., eds., 1998, *Geologic Highway Map of Arizona*. Arizona Geological Society and Arizona Geological Survey, Tucson.
- Maley, T.S., 2009, *Field Geology Illustrated, Second Edition*. Sheridan Books, Ann Arbor, 704p.
- 丸山茂徳・磯崎行雄, 1998, 生命と地球の歴史. 岩波書店, 275p.
- Messina, P., Stoffer, P. and Smith, W., 2005, Macropolygon morphology, development, and classification on North Panamint and Eureka playas, Death Valley National Park CA. *Earth-Science Review*, **73**, 309–322.
- Miller, M., 2005, Geological landscapes of the Death Valley region. *Earth-Science Review*, **73**, 17–30.
- Morris, T.H., Ritter, S.M. and Laycock, D.P., 2012, *Geology Unfolded: An Illustrated Guide to the Geology of Utah's National Parks*. Brigham Young University Press, Provo, 72p.
- Naeser, C.W., 1971, Geochronology of the Navajo-Hopi diatremes, Four Corners area. *Journal of Geophysical Research*, **76**, 4978–4985.
- Plummer, C.C., McGeary, D. and Carlson, D.H., 2003, *Physical Geology, Ninth Edition*. McGraw-Hill, New York, 574p.
- Roehler, H.W., 1990, *Stratigraphy of the Mesaverde Group in the central and eastern greater Green River basin, Wyoming, Colorado, and Utah*. USGS Professional Paper, no. 1508, US Geological Survey, 52p.
- Shue, J. and Herbert, B., 2010, *Canyonlands Geology: A Visual Toolkit*. Canyonlands Natural History Association, Moab.
- 田近英一, 2009, 地球環境 46 億年の大変動史. 化学同人, 226p.
- Tanaka, K.L., Shoemaker, E.M., Ulrich, G.E. and Wolfe, E.W., 1986, Migration of volcanism in the San Francisco volcanic field, Arizona. *Geological Society of America Bulletin*, **97**, 129–141.
- Thybon, S., 2001, *Official Guide to Hiking the Grand Canyon*. Grand Canyon Association, Grand Canyon, 68p.
- Witze, A., 2013, Geologists take drill to Triassic park. *Nature*, **502**, 14–15.

- URL1 <http://meteorcrater.com>
- URL2 https://en.wikipedia.org/wiki/Meteor_Crater
- URL3 <http://www.nps.gov/pefo/index.htm>
- URL4 https://en.wikipedia.org/wiki/Petrified_Forest_National_Park
- URL5 <https://geoinfo.nmt.edu/tour/landmarks/shiprock/home.html>
- URL6 <https://en.wikipedia.org/wiki/Shiprock>
- URL7 <http://www.nps.gov/meve/index.htm>
- URL8 https://en.wikipedia.org/wiki/Mesa_Verde_National_Park
- URL9 <http://www.nps.gov/arch/index.htm>
- URL10 https://en.wikipedia.org/wiki/Arches_National_Park
- URL11 <http://www.nps.gov/nabr/index.htm>
- URL12 https://en.wikipedia.org/wiki/Natural_Bridges_National_Monument
- URL13 <https://stateparks.utah.gov/parks/dead-horse/>
- URL14 https://en.wikipedia.org/wiki/Dead_Horse_Point_State_Park
- URL15 <http://www.nps.gov/cany/index.htm>
- URL16 https://en.wikipedia.org/wiki/Canyonlands_National_Park
- URL17 <https://stateparks.utah.gov/parks/goosenecks/>
- URL18 https://en.wikipedia.org/wiki/Goosenecks_State_Park
- URL19 <http://www.navajonationalparks.org/html/monumentvalley.htm>
- URL20 https://en.wikipedia.org/wiki/Monument_Valley
- URL21 <http://www.nps.gov/grca/index.htm>
- URL22 https://en.wikipedia.org/wiki/Grand_Canyon_National_Park
- URL23 <http://www.nps.gov/deva/index.htm>
- URL24 https://en.wikipedia.org/wiki/Death_Valley_National_Park
- URL25 http://franciscoalfonsokazuo3110.web.fc2.com/travel/colorado_plateau/set.html