

資料

魅力あるフィールドツアー創出の要諦を探る
—カリフォルニアでの土壌調査を足懸りに—柴田 誠^{*1, *2, *3}・中尾 淳^{*4}・北川夏子^{*2}・黒川耕平^{*4}・渡邊哲弘^{*1, *2}Keys to creating attractive field tours:
lessons from soil survey in CaliforniaMakoto SHIBATA^{*1, *2, *3}, Atsushi NAKAO^{*4}, Natsuko KITAGAWA^{*2},
Kohei KUROKAWA^{*4} and Tetsuhiro WATANABE^{*1, *2}

1. 背景

土壌は生命を支える基盤である—農学や環境学、生態学を志す者であれば、この言葉に疑問を抱くことはないだろう。ただしその中で、人生の大半をかけて学ぶ価値が土壌にあると感じる人がどれ程いるだろうか。土壌学者を名乗る人の中でも、生命を支える基盤側よりむしろ、支えられる生命の側を学ぶことにやりがいを感じる割合が増えているのではないだろうか。ここ数年、こうした懸念を抱きながら、具体的な打開策を提示できずにいた。

そんな中、今回我々は、カリフォルニア大学デービス校 (UC Davis) で長年ペドロロジーの教育研究に携わってきた Randy Dahlgren 教授に講師を依頼し、カリフォルニア州 (以下、加州) での7泊8日のフィールドツアーに参加する僥倖を得た。UC Davis の Teaching prize を受けたこともある彼が計画したフィールドツアーは圧巻であった。荷物を積み込みいざ出発かと思いきや、まずは大きな車の側面いっぱいに磁石を使って地質図を広げ、道中で見られるポイントの概要を具体的にレクチャーしてくれた。宝探しに行くようなワクワク感がたまらない。目的のフィールドに到着するや否や、手で触れ、匂いを嗅ぎ、耳を澄ませ、時には舌で味わい、五感を駆使した環境理解の

方法を伝授してくれた。五感では追跡しきれない生態系内の生物地球化学的循環や生態系をまたがる物質移動の説明には、文献データと基礎理論を体系的に整理した「紙芝居」を用意し、現場でレクチャーしてくれた。その日のツアーが終了しホテルにチェックインした後、気軽な散歩の時間にも、所々にサイエンスが隠されているのだから油断がならない。理論、情熱、そして遊び心満載のレクチャーは8日間をあっという間に感じさせ、大げさではなく魂が震えるほどの感動を味わうことができた。

その余韻に浸りつつ自覚せざるを得なかったのが、自らの至らなさである。参加者を感動に導くフィールドツアーの企画にこれまでどれだけ注力してこれただろうか。心のどこかで、「土壌は地味だし、興味持ってくれないだろうな……」という諦めに基づいたツアー構成にしていなかっただろうか。もちろん、日本とカリフォルニアではフィールドのスケール規模や遠距離へのアクセス性も含めてあらゆる点が異なるため、Dahlgren 教授の手法をそのまま転用することはできない。しかし、彼の指導方法や土壌のみにとどまらない生物地球化学観を要素として抽出し、日本の土壌生成環境に適した形に再構築することで、より魅力的なフィールドツアーを創出できるかもしれないと考えた。

*1 京都大学大学院地球環境学堂 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

*2 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)

*3 Corresponding author: 柴田 誠 E-mail: shibata.makoto.7c@kyoto-u.ac.jp

*4 京都府立大学生命環境科学研究科 (〒606-8522 京都府京都市左京区下鴨半木町 1-5)

2022年8月1日受付・2022年8月9日受理

そこで本資料では、我々が同教授のフィールドツアーから得た学びの一端を共有すべく、まず加州の地理の概要を紹介する。その後、フィールドツアーの中でも印象に残った学習内容の詳細について、生態系の階段を中心とした海岸山脈エリア（詳細①）、モノ湖を中心としたシエラネバダ山脈エリア（詳細②）、デルタ地帯を中心としたセントラルバレーエリア（詳細③）に分けて紹介する。そして最後に、今回の経験から得た教訓と今後のフィールドツアー創生に向けた指針を示したい。

2. カリフォルニア州の地理

加州は南北に長く、日本よりわずかに大きい面積（42.4万 km²）である。この縦長のエリアを緯線に沿って切り取った断面はM字型であり、2つの山脈の間に広大な低地が分布している。海岸沿いの山脈は海岸山脈、内陸側はシエラネバダ山脈と呼ばれる。前者は1,000 m級なのに対し、後者の方が3000～4000 m級の高山が多いため、M字型は南側から見て右肩上がりである。シエラネバダとは、スペイン語で雪に覆われた（= Nevada）山脈（= Sierra）を意味する。そして中央の大盆地はセントラルバレーもしくはグレートバレーと呼ばれる。

この大地形の成立には長い歴史がある。かつて、中生代の太平洋には南北に伸びた中央海嶺が存在し、そ

こから東向きに移動する海洋プレート（ファラロンプレート）が北米プレートの下に沈み込んでいたとされる（図1）。シエラネバダ山脈は、このプレート運動に伴うマグマの貫入上昇由来の巨大な花崗岩体（バソリス）を基盤とし、その上に噴出した新生代の火山岩類の成層によって形成された（Bateman, 1968）。火山岩から生態系への恩恵については詳細②において詳しく述べたい。これに対し海岸山脈は、プレートの沈み込みに伴い陸側に付加された古生代から新生代古第三紀までの堆積岩（砂岩、頁岩等）を基盤とし、その一部には加州の“State rock”である蛇紋岩が混じっている。セントラルバレーは古代の海盆（前弧堆積盆）であり、2つの山脈から侵食された堆積物の累積によって広大な低地を形成している。その中央には州最大の河川であるサクラメント川が北から南流し、シエラネバダ山脈に由来をもつサンワーキン川は南から北流する。その他多くの河川が中央部で合流してデルタ地帯を形成し、西流した後サンフランシスコ湾に注ぐ。なおこの大地形の形成に深くかかわったファラロンプレートは現存せず、約3千万年前に中央海嶺ごと北米プレートの下に沈み込んだという説が有力である（Atwater, 1970）。その後、北米プレートと太平洋プレートはサンアンドレアス断層に沿って横ずれ移動を続けており、この動きが海岸エリアでの地形隆起や沈降を引き起こし、海岸段丘の形成要因の一つとなっている（詳細①に詳述）。

加州の気候は、夏に乾燥し降水量のほとんどが冬にもたらされる地中海性気候であり、対応する土壤温度・水分レジームは、主にサーミック（Thermic）・ゼリック（Xeric）である。今回のフィールド調査で最も印象に残ったことの一つは、ゼリックな気候条件が加州の自然と農業に与えるインパクトが想像以上に大きいことであった。夏期の加州は多湿な日本では想像できないほど乾燥しており、低地であろうと山地であろうと、天水の恩恵はほとんど期待できない。ただし、シエラネバダ山脈は、その名の通り冬季には厚い雪に覆われ、春～夏季には雪解け水をはるか下流のセントラルバレーにまで供給する（詳細③に詳述）。一方で夏の強い乾燥による山火事の発生は更新世には既に起きており、その結果、山火事による植生の部分的な消失と復元のサイクルを前提とした生態系が発達したという説が有力である（Daniels *et al.*, 2005）。ただし、近年では山火事の頻度と強度が増すにつれ、生態系の復元が追い付かず荒廃した森林の割合が増加し続け

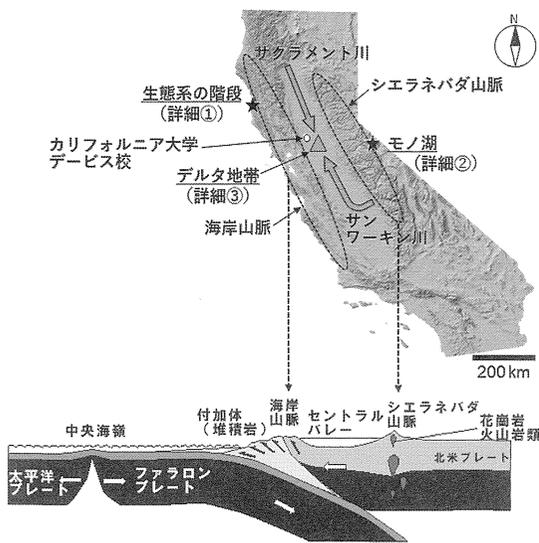


図1. カリフォルニア州の地理（上）と過去のプレート運動の様子（下）。

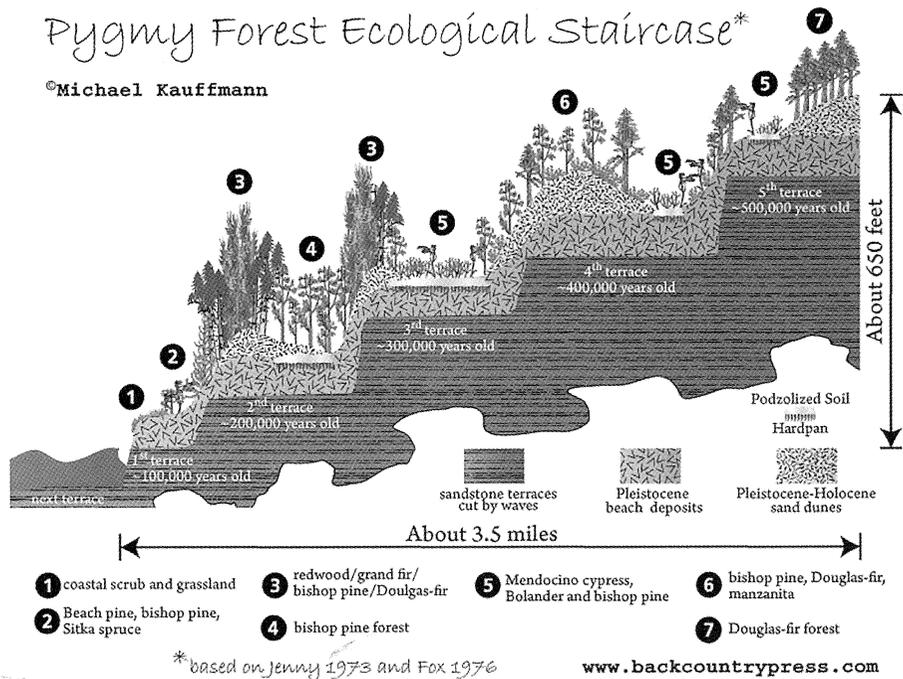


図2. 「生態系の階段 (Ecological Staircase)」の概念図 (Kauffmann, 2014)。

ている (Halofsky *et al.*, 2020)。大規模に焼け落ちた森林の姿には鮮烈なインパクトがあり、加州が抱える極端な乾燥と山火事の激甚化という気候変動の深刻さを強く実感させられた。

3. 詳細①海岸山脈と生態系の階段

加州北部、太平洋に面するメンドシーノ郡 (Mendocino County) の沿岸部には、「生態系の階段 (Ecological Staircase)」と呼ばれる年代系列となった土壌とそれに対応した自然景観が海岸段丘上に発達しており (図2)、土壌学や植物学、生態学、環境学など様々な分野から注目されてきた (Jenny, 1973)。更新世 (約258万年前～1万年前) 以降、大規模な気候変動による氷河の盛衰に起因する氷河性海面変動が繰り返し発生し、そのため地殻変動によって継続的に地盤が隆起した地域では、海水面の昇降に伴って階段状の海岸段丘が形成した。生態系の階段も同様に、約50万年前に最初の段丘が形成され、そこから継続的な隆起と、約10万年周期での氷河の融解に伴う海面上昇によって、計5段の海岸段丘が形成された。なお、現在も年間約3mmの速度で隆起が続いている (Merritts and Vincent, 1989)。

この海岸段丘を特徴付ける要因は大きく2点ある。1つ目は、形成された段丘面が平坦であるため侵食が極めて少なく、段丘面間での物質移動が限られる点であり、2つ目は、風成塵のような外部からの物質流入も乏しい点である。これらの特徴により、生態系の階段の各段丘面では土壌の更新が起こらず、主に地質年代のみが異なる土壌が階段状に分布していることが特徴的である。

当地の年平均気温は12.5℃であるが、カリフォルニア沖の寒流の影響により夏と冬の平均気温差が6℃以内であるため、土壌温度レジームはアイソメシック (Isomesic) であり、土壌水分レジームはゼリックではなくアスティック (Ustic) となる。海からの偏西風の影響によって比較的湿潤で (1000mm程度)、降水の少ない夏は霧が頻繁に発生するなど、曇り空の時期が頻繁に訪れる。この土壌温度・水分レジームの組み合わせは珍しく、加州では北部の海岸沿いのみに分布している。

それぞれの段丘面は約1kmの奥行きをもち、5つの階段を合わせた海岸線からの水平距離は約5km (3.5マイル) に及ぶ。第1段丘と第5段丘の標高差は約200m (650フィート) である。母材は砂岩の一種である硬砂岩 (Graywacke) であり、その上に海浜堆積

物 (Beach deposit) と古砂丘 (Paleo-sand dune) が順に層を成している。形成年代が最も新しい海側の第1段丘から、最も古い内陸側の第5段丘にかけて、土壌の酸性化および窒素 (N) の制限が顕著になる。

第1段丘は、海岸側に草原が、内陸側には森林が分布していた。土壌は全5段丘の中で最も深く発達し、水はけがよい。第1段丘の草原土壌への主な有機物投入源は根であり、ホリネズミ (gopher) などの土壌動物による生物攪乱によってA層がおよそ70 cmまで発達していた。また、長石が多く残っており、他の段丘の土壌に比べて粘土質であった。

第2段丘の土壌には、第1段丘とは異なり、薄いリター層 (Oi層) とその下によく発達した腐植層 (Oa層) からなる深さ約20 cmのO層が観察された。浅いA層の下には、移動集積した鉄が直径数 cmの結核を形成しており、初期のポドゾル化を示すB層が観察された。第2段丘ではまだNが植生の生育を制限するには至っていないようで、セコイア (*Sequoia sempervirens*) やダグラスファー (*Pseudotsuga menziesii*) 等の成熟した針葉樹の大木が観察された。

第3段丘から第5段丘の土壌は、長年にわたる風化作用および土壌生成作用を受け、アルカリ金属やアルカリ土類金属が溶脱し、いずれの段丘面も同様に強酸性でN欠乏の土壌が分布している。アイソメシクと年中冷涼なため微生物活動が抑えられており、植物遺体が分解されにくい。よって、堆積腐植層由来の有機酸によって鉄やアルミニウムが溶脱して生成したポトゾルが分布している。舌状に侵入した漂白層 (E層) の下には、有機物の集積層 (Bh層) と、鉄やアルミニウムの集積層 (Bs層) が明瞭に観察された (写真1)。Bs層では、結核の生成をはじめとする膠結作用によりオルトシュタイン (Ortstein) が形成されており、スコップで叩いてみたところ、驚くほど固く、静かな森林内に鳴り響く高音が印象的であった。このような硬盤は、根域を制限するとともに不透水層となるため、夏季は水不足を引き起こし、冬季は湛水状態を生み出すなど、両極端な水分状況をもたらす。乾燥と過湿を繰り返すことに加えて、強酸性かつN欠乏な土壌は植物が生育する上で厳しい環境を呈する。

このような土壌が分布する森林内に入ると、明らかに幹が細く、背丈も2 mぐらいの木が立ち並んでいる様子が観察され、その小さな様子から「Pygmy forest (矮林)」と呼ばれる。遷移初期にも思える森林だが、Dahlgren教授曰く、多くは樹齢100年以上だ

そうである。一般的には、樹高が20 m以上の針葉樹であるイトスギ属のメンドシーノサイプラス (*Cupressus goveniana* ssp. *Pygmaea*) やビショップマツ (*Pinus muricata*)、コントルタマツ亜種のポーラマツ (*Pinus cortorta* ssp. *Bolanderi*) でさえ、ここでは、N欠乏と極端な水分状況のためにやせ細った3 m未満の矮小な木にしか育たない。下層植生はツツジ科が優占し、マンザニータ (*Actrotaphylos nummularia*) や、カリフォルニアシャクナゲ (*Rhododendron macrophyllum*)、カリフォルニアハックルベリー (*Vaccinium ovatum*) など、厳しい環境に適応した種が分布していた。

Pygmy forestの植生は、二次代謝物質としてタンニンを生産し植物体内でタンパク質と結合させることでNを安定化し、系外へのN流出を抑えるN循環戦略を進化させてきた (Northup *et al.*, 1995)。植生の大部分は、タンニンから有機態Nを遊離させる酵素をもつ外生菌根菌と共生関係を築くことで、有機態Nを無機化せずに植物体内に直接取り込める。それにより、系外へのN損失を最小限に抑えつつ (Yu *et al.*, 1999)、他種に対して排他的なN獲得戦略を実現している。

Pygmy forestから車を20分程走らせて、次にDahlgren教授が案内してくれたのは、樹冠が見えないほど高く

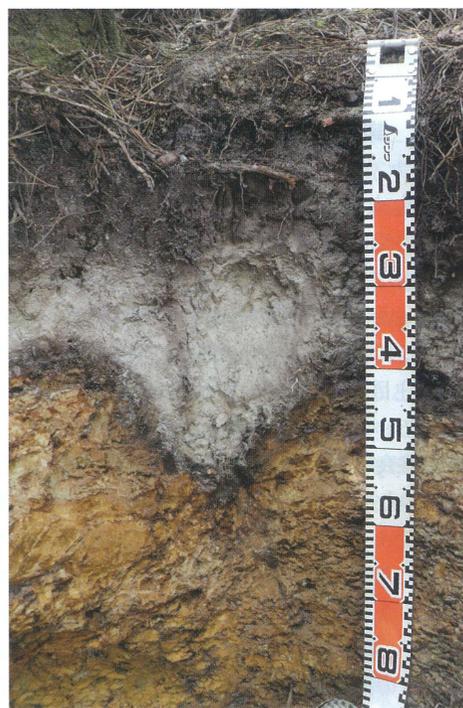


写真1. 第4段丘の土壌断面。漂白層の下にはっきりとしたBh層とBs層が観察された。

立ちはだかる、セコイア（レッドウッド）の巨木林であった。車を降りて少し歩くと、近くには川が流れていた。その川による侵食と運び込まれる河川堆積物によって土壌が更新されるため、近接した Pygmy forest と同様の気候条件であるにもかかわらず、このように対照的な植生が見られることに大変驚くとともに、侵食が土壌を更新してくれるポジティブな面を持ち合わせることを思い知らされた。

わずか 5 km という限られた空間の中にある生態系の階段には、生成年代が 10 万年単位で異なる土壌とそれに応じた多様な植生が存在し、そこに足を運んでみることで、土壌生成における時間という因子の重要性を初めて実感することが出来た。この時間スケールは、活発な造山運動と降水による物質移動、火山灰や黄砂の降下によって土壌が若返る日本では、得難いものである。土壌だけでなく周囲の植生や動物、環境との相互作用と合わせて五感を通して学ぶことによって、ダイナミックなペドロロジーを感じられるサイトであった。

4. 詳細② シエラネバダ山脈

シエラネバダ山脈には、先述したように標高 3000 m を超える山が連なっており、その主要な部分は大生代に貫入した花崗岩体からなる。断層地塊山脈であり、セントラルバレーに面した西側は比較的緩やかな一方、東側は急傾斜になっている。シエラネバダ山脈北部の花崗岩体上には新生代の安山岩が分布するところが多く、今回の調査では、安山岩質のラハール（火山泥流）堆積物の上に成立した気候系列の土壌 (Rasmussen *et al.*, 2007) の一部を観察した。

シエラネバダ山脈の気候は、乾燥したセントラルバレーから標高が上がるにつれ、海岸山脈で一度雨を落とした海からの風が特に高標高で降水をもたらす (500 ~ 1500 mm)。また、年平均気温は標高 160 m の 17°C から 2500 m の 4.5°C まで低下し、それとともに蒸発散量が少なくなる。植生は上述の気候を反映して分布し、典型的な樹冠構成種は乾燥した低標高帯のブルーオーク (*Quercus douglasii*) から、ポンデローサマツ (*Pinus ponderosa*)、コロラドモミ (*Abies concolor*) を経て、樹木限界近くのジェフリーマツ (*Pinus jeffreyi*) とコントルタマツ亜種のロジポールパイン (*Pinus cortada* ssp. *murrayana*) へと変化する。ちなみに、ポンデローサの松かさが巨大で刺々しいのに対し

て、ジェフリーのものは見た目同じだが棘が手に刺さらないため、手のひらの痛覚が両者を識別してくれる。

ここでは、気候を反映して、Mollisols → Alfisols → Ultisols → Andisols → Inceptisols と土壌が変化し、1600 m 付近にある Ultisols から Andisols への移行帯で、粘土含量や遊離鉄含量が急激に減少するなど土壌特性に変化がある。低標高帯では乾燥のために、また冬季に連続して積雪がある高標高帯 (1600 m 以上) では低い温度のために土壌生成が進んでいない。水と温度の双方の条件がよい 1000 ~ 1500 m にもっとも生成が進んだ Ultisols が分布し、土層が厚く有機物も多く蓄積している。粘土集積層の中心が 1 m よりも深いところに出現したことには驚いた。なるほど Soil Taxonomy では深さ 2 m まで土壌断面を作成することを求めているわけである。

この気候系列の土壌の内、最も木材生産に適しているのは、この Ultisols 上とのことであった。夏季の乾燥が強いこの地域では、水分がもっとも植物生産を規定するため、土層が深く有機物を多く蓄積した Ultisols は樹木の成長をもっともよく支える。その成長の速さは、現地でもコアリングした年輪の厚さに見ることができた。一定かつ厚い年輪は、より乾燥が強いシエラネバダ山脈東山麓のものとは対照的であり、気候に伴う土壌と植生および樹木成長の変化を強く感じた。

また、Dahlgren 教授は、安山岩質ラハール上と同様に、シエラネバダ山脈の玄武岩および花崗岩を母材とする土壌の気候系列においても土壌生成についての研究を行っており (Dahlgren *et al.*, 1997; Rasmussen *et al.*, 2010)、その類似性と差異を報告している (Dahlgren *et al.*, 2009)。興味深いのは、いずれも冬季に積雪がある標高帯で土壌特性値が大きく変化することである。これについては、土壌生成に対する温度の影響なのか、最終氷期の氷河の影響で土壌が若返っているのかといった議論があった。

シエラネバダ山脈の東山麓は、ユタ州のソルトレイクシティまで広がる非常に乾燥したグレートベースンの西端である。ここでは、湧水でニジマスやブラウントラウトの稚魚を育てているホットクリーク (Hot Creek) と、特異な地形をもつ内陸湖であるモノ湖で景観と土壌の観察を行った (写真 2, 3)。

Hot Creek は、ロングバレーカルデラの中にあり、シエラネバダ地下のマグマ活動によって温められた水が湧いている。アメリカでは珍しい温泉だが、湧水中

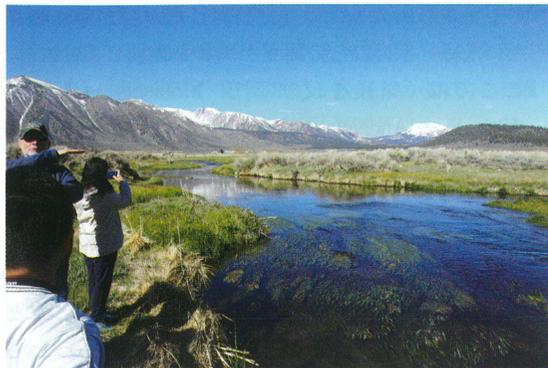


写真2. カルデラ内の湧水河川 (Hot Creek)。豊富な窒素とリンを含む温かい湧水が水草の成長を促進している。

の硝酸態窒素とリン酸の濃度が高いことも特徴的である (それぞれ 0.15 ~ 0.3 ppm, 0.3 ~ 0.6 ppm 程)。リン酸は火山ガラス中のアパタイトを、窒素は堆積岩あるいは湖成堆積物中を起源としていると考えられる。これらの養分は下流のクローリー湖に流れ込み、その自然状態での富栄養に寄与している (Gavigan, 2005)。豊富な養分と周辺よりも 5°C ほど高い温度のために、河川とその河畔は周辺とは画然と異なる緑色を示している (写真2)。夏の乾燥期にも水が枯れることがないことと併せ、Hot Creek は当地で重要なマスの孵化場を支えている。

モノ湖は、70 万年以上前に形成された北アメリカ最古の湖である。水の流出がない内陸湖であるために、塩分濃度は海水の約 3 倍であり、pH は 9.8 ~ 10 である。トウファとよばれる岩の柱が印象的だが、これは湧水中に含まれる重炭酸イオンが高 pH 下で炭酸イオンへと変わり、湖水中のカルシウムイオンと反応して炭酸カルシウムとして沈殿したものである。もともとは水中でできたものであるが、流入水がロサンゼルス用水として使われ湖面が 10 m 以上も下がったために露出している (写真3)。ここでは、湖畔の堆積物/土壌を掘りあげ、表面の酸化した層 (赤褐色)、その下の鉄還元層 (緑色)、さらに硫黄が還元し硫化物の異臭がする層 (黒色) を観察するとともに、それぞれの層での微生物代謝とエネルギー獲得について説明を受けた。また黒色層の下にはより還元度の低い緑色の層が現れており、地下の伏流水の影響だろうとのことであった。直線距離で 440 km 離れたロサンゼルスまで水をパイプラインで運ぶことに、加州の水の希少性感じるとともに、様々な化学変化を目で見ることで

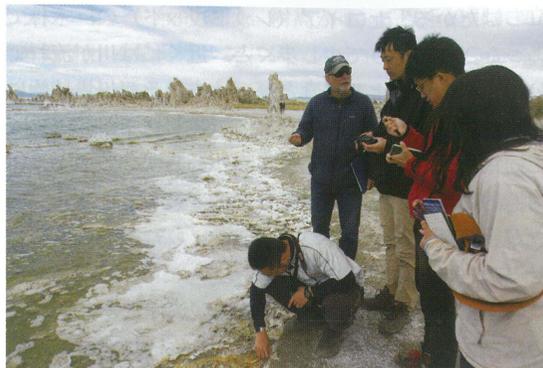


写真3. モノ湖の湖岸で炭酸カルシウムの沈殿を眺める様子。写真奥には炭酸カルシウムの柱状岩 (トウファ) が見える。

きるサイトであった。

5. 詳細③ セントラルバレー

東西を山脈に挟まれたセントラルバレー (グレートバレー) は、加州の中央部を南北に 700 km 延びる大盆地である (図1)。「バレー」と言っても、幅は広いところで 100 km にも達する。盆地中央からはシエラネバダの山々が霞むのみで、到底「谷」とは感じられない、まさにグレートなバレーである。この楕円形状に開けた谷底を、新生代の堆積物が、平均 730 m、所によっては 3000 m 近くもの厚さになって埋め尽くしている (Planert and Williams, 1995)。堆積物の主な給源は、かつてシエラネバダ山脈を覆っていた火山岩類である。数百万年にもわたる氷河作用や水食を受けて、関東平野がすっぽり 3 つも入ってしまうほどの広大無辺で平坦な沖積平野を形成した。

米国は世界最大の農産物輸出国であり、その農業大国を牽引するのが加州である。2019 年の農産物販売額は 500 億ドルを超え、全米断トツを誇る (California Department of Food and Agriculture, 2020b)。その大農業地帯の中心が、ここセントラルバレーなのである。平野部では、ナッツ類や野菜、牧草、水稲、メイズ等が、山麓部ではワインブドウや柑橘が、主に栽培される。見渡す限りの大農地に圧倒されたのだが、実は、農家 1 戸当たりの面積は 140 ha と全米平均を下回っているそう (USDA National Agriculture Statistics Service, 2019b)。米国全体の 3% にも満たない農地で (USDA National Agriculture Statistics Service, 2019c, b)、全米農産物輸出額の 16% を産み出している (California De-

partment of Food and Agriculture, 2020a)。米国の中では比較的小規模で労働集約的な特徴を持っているのが加州の農業と言える。では、一体何がその高い生産性を支えているのだろうか。3つのポイントを順に挙げていく。

まずは肥沃な土壌である。上述したように、侵食された火山岩類が母材となっており、土層の深いシルト質壤土が広がる。適度な土性で有効水が多いことに加えて排水性も良い。降水量が少ないために塩基類が多く残存し、中性～弱塩基性を呈す。クロライトの風化で生成したスメクタイトを多く含む Vertisols が分布するほか、Mollisols や Alfisols の分布域も広い。微量要素欠乏を防ぐため、硫黄やアンモニア肥料を施用してわざわざ酸性化を促している農地が多く見られた。盆地中央のデルタ地帯には Histosols が卓越する。泥炭は分解が良く進み植物遺体が判別できない Sapric であり、地下水や河川水が塩基を豊富に含むことから土壌 pH が 6 前後と、泥炭としては肥沃度が高い。加州の農業は、このデルタ地帯から始まったということだ。泥炭＝貧栄養と思っていた常識が覆された。蛇紋岩の影響を受ける地域では、蛇紋岩に起因する Mg による低い Ca/Mg 比を改善するために、石膏が施用されていた。このように改善の余地を残しつつも、当地域の土壌は総じて肥沃度が高い。

次に水資源である。降水量は、北部の 550 mm から南部の 150 mm まで、総じて少なく、夏季の乾燥が厳しいことから天水のみでは限界がある。ここで、東西にそびえる山脈が大きな役割を果たす。すなわち、山脈が受け止める降水が、集水域全体に地表水を供給する。特に重要なのが東のシエラネバダ山脈で、西側斜面に降る 1500 mm の降水はほとんどが冬季の降雪のため、雪解け水が徐々に地中に浸透して地下水を涵養し、水を域内に供給する。シエラネバダは、肥沃な土壌だけでなく豊富な水資源をも恵んでおり、セントラルバレーを灌漑農業の聖地に仕立て上げている。余談になるが、この地に水路網が張り巡らされたのは、農業地帯になるよりはるか昔、ゴールドラッシュに遡る。シエラネバダに由来する砂礫層の金を採鉱するために水圧掘削法が開発され、大量の水を供給するために一帯に用水路が建設された。その水路が現代の農業に不可欠なものとなっている事に歴史の妙を感じた。加州の灌漑水使用量は全米の 3 割にも及ぶ (USDA National Agriculture Statistics Service, 2019a)。農業用水量は過去 50 年間それほど増加していないに

もかわらず生産性が大幅に向上したのは灌漑技術の発達によるところが大きい。低コストだが水利用効率の低い (65-75% ; Sonke *et al.*, 2010) 古典的なタイプの湛水 (畝間) 灌漑は 1991 年に 7 割近くの面積を占めたが、2010 年には 4 割程まで減少した (Johnson and Cody, 2015)。それに代わって台頭したのが点滴灌漑やマイクロスプリンクラーに代表されるマイクロ灌漑で、2011 年には全体の 4 割を占めるようになった。水使用量が少なくすむ、作物の根元を狙えるところに特徴がある。設備投資は必要だが格段に水利用効率が高く (85-95% ; Sonke *et al.*, 2010)、肥料成分の溶脱も抑えられる。更に効率の良い地中埋設型の点滴灌漑も増えているようだ。湛水灌漑は単価の安いトマトやオリーブ畑で見られた一方、収益性の高いナッツ類やブドウではマイクロ灌漑の導入が進んでおり、ドリッパーから肥料を含んだ溶液が灌水されていた。施肥と灌漑を同時に行う “Fertigation” を、土壤環境モニタリングと組み合わせることで、適切な量の水と養分を、適切なタイミングで根域に与える自動制御が行われているという話には驚いた。ワインブドウも土性に関係なく自動制御で品質管理を行えるとのこと。スマート農業ではテロワールさえも制御されるのだろうか。

3つ目のポイントは気候パターンで、ゼリックの特性にある。夏季に乾燥するので、病虫害の発生が限定的なのである。パツさえばほとんど見ないというから驚きだ。作物が元気な夏でも虫はいないカビも生えない。Dahlgren 教授に不思議な世界だと感想を述べたら、逆に湿潤な日本のユニークさを力説されてしまい、自分の世界観がいかに生まれ育った土地に縛られているかを痛感した。ここでは夏の日照不足も心配無用だし、雨が降るのは蒸発散の少ない冬季なので、降水量の割には溶脱が進みやすく、塩の集積も起こりにくい。夏の乾燥は虫だけでなく土壌微生物活動も抑えられるので、有機物の分解も遅い。ゼリックのことを、アスティックと同じく乾季があるくらいしか考えたことがなかったが、年降水量の多寡だけでは捉えられない雨の季節変動パターンがもたらす様々な特異性に、目から鱗が落ちるばかりだった。

土よし水よし天気よし。虫もいなけりゃ病気もない。まるで巨大な人工気象装置だ。精密農業への相性は抜群である。あまりの好条件に、思わず笑ってしまった。しかしその一方で、特に水資源に関する影の部分に触れないわけにはいかない。加州では水利用の 6 割を地

下水で賄い、その8割以上が農業用水として利用される (Johnson and Cody, 2015)。干ばつが頻発した近年は、地表水よりも地下水を多く消費している (Dieter *et al.*, 2018) こともあり、地下水位は年間2 cm の速度で減少を続けている (Famiglietti *et al.*, 2011)。地盤沈下が深刻で、酷いところでは、1981年までに9 m も沈下し (Sneed and Brandt, 2015)、干ばつが頻発した2007年から2014年の間には年平均27 cm の沈下速度を記録した (Sneed and Brandt, 2015)。多くの農産物が過度な地下水利用の上に成り立つ側面は否定できないが、何を隠そう、我々が日本は加州農産物の輸出先第4位なのである (California Department of Food and Agriculture, 2020a)。我々は確実に加州の地下水を消費しているのだ。アーモンドやピスタチオは一粒の生産に4 L、クルミに至っては一粒に22 L もの水を要しているとのこと。衝撃の事実を知り、ビールのつまみに選びにくくなってしまった。

最後に、今回訪れたセントラルバレー北部の印象的だった光景を2つ紹介したい。

まずは、高速道路の真上を超低空飛行する黄色いプロペラ機である。驚いて行方を追うと田んぼに向かって飛んで行った。発芽種子を湛水直播していたのだ。幅15 cm、深さ10 cm の溝を切っておくと、種子を飛行機からばらまくだけで定着するとのこと。にわかには信じがたかったが、隣の田んぼでは確かにイネが筋になって育っていた。10 a 当たり約15 kg と日本の5倍の種を播くそうだが、1時間に20 ha も播種ができるという。カップラーメンを待つ間に1 ha が終わってしまう、驚きの作業効率だ。お昼に立ち寄ったコストコでは、米が1キロ1ドル台で販売されており、その安さにも衝撃を受けた。

もう一つ心に残ったのは、一面に広がる桜並木。加州には日本人が多いからなのかと呑気な事を考えていたが、とんでもない、それは桜ではなくアーモンドの木であった。アーモンドは加州で最も栽培面積の広い作物であり、世界の8割を生産している (International Nut and Dried Fruit Council, 2022)。加州の農産物生産額としては乳製品に次いで第2位だが、輸出額では断トツだ。生産量は2010年から2020年までに倍増している (USDA National Agriculture Statistics Service, 2022)。輸出額の第2位はピスタチオ、第5位はクルミと、ナッツ類の生産が非常に盛んである。ナッツの収穫方法には驚いた。2本の棒を持つ専用機が幹を挟み込み、大胆に揺さぶる。すると数千粒の実がシャ

ワーのように落ちてくる。数百本の木々を順々に揺らして行く。最後に、スパーと呼ばれる巨大な吸引機が落ちた実を一気に回収し尽くす。ワイルドだ。

かつて全米有数の生産を誇った麦類や綿花は、今は僅かに残るのみだそうで、ツアー中もほとんど目にする事はなかった。その代わり、農地が次々にナッツ園と化していく様子が目に焼き付いた。国際需給の状況と経済合理性の変化に応じて、何を植えるのが良いかを判断し常に変わり続けているのだろう。その転換を可能してくれる恵まれた環境と、執着せずに変化を恐れない人々のマインド。セントラルバレーは、米国の農業生産を支える、まさにグレートなバレーであった。

6. まとめ～何を受け継いでいくべきか？

今回のフィールドツアー参加者の専門が土壌学であることは共通であったが、土壌の周辺環境である地質や植生、水文に対する興味や知識の深さにはかなりの個人差があった。にもかかわらず、全員が全ての話題に高い関心を持つことが出来たのは何故か？参加者同士で議論した結果、いくつかのポイントが浮かび上がってきた (図3)。

1つ目は、調査を通じて、五感を駆使した観察を促されたことである。ジェフリーマツ樹皮の甘い匂い、葉中タンニンの渋み、アスペンの鈴のような葉音、泥炭の軽さ等々、これにより、我々の興味は一層引き立てられ、学んだ情報が記憶に残りやすくなったと感じた。視覚以外でも情報を得ようとする事は、教える側にとっても教わる側にとっても非常に有用であり、学びの助けになる事は間違いない。

2つ目は、土壌や植生などの観察対象について、現場で提示されたデータによって、分子レベルでのメカニスティックな理解が得られたことである。自分自身が講師の立場になった時には、口頭での説明のみで済ませてしまいがちだったが、聴講する立場でデータ付き「紙芝居」の説明を現場で受けることで、情報理解が遙かに深まる事を痛感した。ただし、この「紙芝居」方式は参加者数が10名を超えると難しいだろう。贅沢かもしれないが、フィールドツアーの学生講師比は1桁まで絞り込んだ方が個々の参加者に与えるインパクトは間違いなく大きい。

3つ目は、クリティカルゾーン内での土壌圏と水圏、大気圏、岩石圏、生物圏のかかわり合いや山脈と盆地

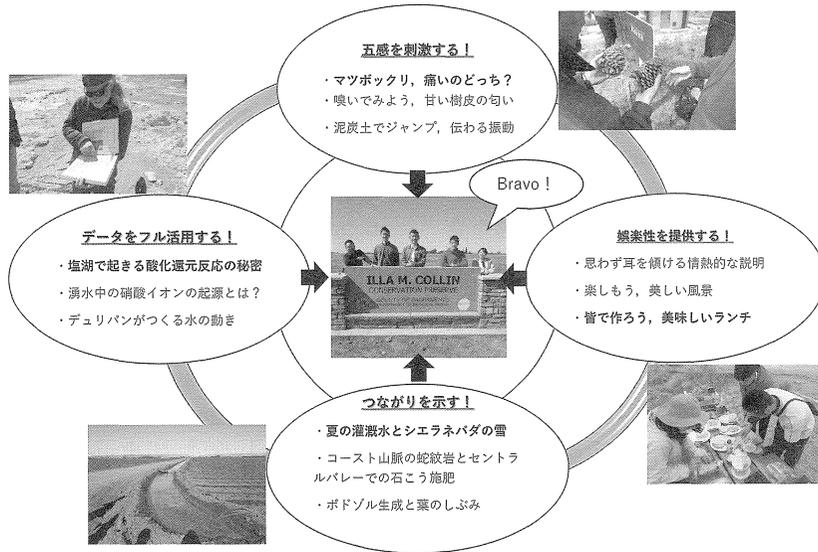


図3. 魅力あるフィールドツアーの要諦は？

の関係性など、一連の要素のつながりを意識させられたことである。土壌は大事だが、それ単体で存在するわけではないし、植物も動物も大気も水も等しく大事である。さらに、我々が行うフィールドツアーを考えれば、参加者は、植生や動物、水、地質により強い興味を持つことも多々あるであろう。その当たり前の事実を忘れ、土の説明に終始しがちだった過去を反省しなければならない。過酷な環境にたくましく適応した植物、地中をかき回して肥沃な表層を深くまで発達させた動物、周囲の山々が提供する肥沃な土と水と季節性を巧妙に利用して農業を発展させてきたヒト。点と点が有機的に結びつくストーリーに感動を感じる。土を取り巻く生態系全体を俯瞰し、土以外の要素との繋がりを我々自身がよく学び理解する必要がある事に気付かされた。冒頭で述べたように生命を支える基盤と、基盤に支えられる生命という二項対立で捉えるのではなく、それらが絡み合う精巧なドラマをあぶり出す。そうすることにより聞き手の興味の中心がどの圏にあっても、相互作用の重要性に気づくチャンスが生まれ、土壌を含め当初興味のなかった要素についてももっと知りたいという気持ちになるのではないだろうか。土壌を語らずして土壌を語る。それが土壌学の裾野を広げることにつながる気がしている。生物地球化学的循環の中心にある土に学ぶことが出来る我々土壌学者は、他分野との懸け橋になって、一人でも多くの人間を巻き込むことができる大きなパワーを秘めている

るに違いない。

4つ目は、移動が長時間にならないよう定期的にストップを入れてくれたことである。移動時間はどうしても気持ちが抜けがちになる。そこで、何か大きな目玉でなくとも、ちょっと止まって説明をしてもらえる事が集中を保つのに実に効果的である事を実感した。時間を節約しようと思うと、少々遠くても次の目的地に直行したくなるが、合間にちょっとした寄り道をして間延びしないような工夫をする方が、参加者への教育効果を高めるにはより一層大事なかもしれない。

そして、娯楽性である。真面目にフィールドツアーを組み立てようとするから見落としがちの部分だが、むしろ学習意欲を高める効果があると実感した。ジョークや逸話を盛り込んだ軽妙かつ情熱的なトークは参加者を笑顔にさせるとともに、解説者への集中力を高める。また、自然の中で美味しいランチを食するリラックスした時間の中でこそ生まれる会話があり、その中から新しい発見を得たりもした。理屈だけではなく、純粹に自然そのものを楽しむ時間を取り入れる事も大切かもしれない。前述の「つながり」と、ここで述べた娯楽性は、とりわけペドロジーの外側にいる研究者の関心を引き寄せる際に大きな効果が期待できるだろう。

最後に付け加えたいのは、何より自分自身が科学者としてフィールドを観察し続けることの重要性である。Dahlgren 教授自身、幾度となく訪れているサイ

トにもかかわらず、今回の調査中もいくつか新たな発見をされ、その度に一生懸命考え続けていた。何となく先頭を歩いているのではなく、神経を研ぎ澄まし、五感を駆使してつぶさに自然を観察しているのである。“Just observe, and think irrationally.”との金言を授かった。言葉にしてしまえば当たり前のことのように思えるが、これに全身全霊を捧げる姿には感銘を受けた。知りたいという欲求と、何かがわかった瞬間の嬉しさや楽しさ。シンプルな学びの原点が礎となっている。

数時間車を走らせれば雪降るシエラネバダから猛暑のセントラルバレーまで移動可能なカリフォルニアは、実に贅沢な環境学習のフィールドである。日本で同じスケール感のフィールドツアーを再現することは難しい。しかし、五感を駆使した観察やデータに基づく解説を組み合わせた、知性と感情両方に訴えかける指導法はすぐにでも取り入れることができる。土壌断面の魅力を伝えるためには、ツアー期間の断面観察時間を多少削ってでも、周辺環境の情報を伝え断面の成り立ちとのつながりを示すことも重要だと感じた。いづれも非常に入念な事前準備を必要とするし一朝一夕に出来るようなものではないが、我々がDahlgren教授に感化されたような経験を与えられる機会を設けて行きたいと思うし、自分自身が土壌のことを学ぶ姿勢も見習っていききたいと思う。

謝 辞

今回のフィールド調査の企画運営を一手に担い、調査の間我々に多くの感動と刺激を与え続けてくださったRandy A. Dahlgren教授に心より感謝を申し上げる。また、Dahlgren教授は、東北大学に在籍された先生方をはじめとする多くの日本人研究者とともに共同研究を行ってきたことは大きな財産であり、今回の調査はその恩返しでもあるとおっしゃっていた。故庄子貞雄先生、三枝正彦先生、南條正巳先生、高橋正先生、伊藤豊彰先生、松山信彦先生、中原治先生などの日本人研究者、また、Dahlgren教授の博士課程の指導教員だったFiorenzo C. Ugolini先生など、これまでに国際共同関係を培ってきた多くの方々に感謝するとともに、この様な関係を未来に向かっても育んでいきたいと思う。本調査に関する財源の一部は国際共同研究加速基金（国際共同研究強化（A）、20KK0261）を利用した。

引用文献

- Atwater, T. 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81(12): 3513-3563.
- Bateman, P.C. 1968. Geologic Structure and History of the Sierra Nevada. *UMR Journal -- V. H. McNutt Colloquium Series*, 1: 121-131.
- California Department of Food and Agriculture, 2020a. *California Agricultural Exports 2019-2020*: p.14.
- California Department of Food and Agriculture, 2020b. *California Agricultural Statistics Review, 2019-2020*: p. 157.
- Dahlgren, R.A., Boettinger, J.L., Huntington, G.L., Amundson, R.G., 1997. Soil development along an elevational transect in the western Sierra Nevada, California. *Geoderma*, 78(3-4): 207-236.
- Dahlgren, R., 2009. Soil Development along Elevational Transects in the Western Sierra Nevada, California, EGU: European Geosciences Union General Assembly 2009.
- Daniel, M.L., Anderson, R.S., Whitlock, C. 2005. Vegetation and fire history since the Late Pleistocene from the Trinity Mountains, northwestern California, USA. *The Holocene*, 15, (7): 1062-1071.
- Dieter, C.A., Maupin, M.A., Caldwell, R.R., Harris, M.A., Ivahnenko, T.I., Lovelace, J.K., Barber, N.L., Linsey, K.S. 2018. Estimated use of water in the United States in 2015: USGS Circular, 1441: 65.
- Famiglietti, J.S., Lo, M., Ho, S.L., Bethune, J., Anderson, K.J., Syed, T.H., Swenson, S.C., de Linage, C.R., Rodell, M. 2011. Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. *Geophys. Res. Lett.*, 38 (3).
- Gavigan, T., 2005. Recommendation to de-list Crowley Lake for nitrogen and phosphorus.
- Halofsky, J.E., Peterson, D.L., Harvey, B.J. 2020. Changing wildfire, changing forests: the effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest, USA. *Fire Ecol.*, 16 (4).
- Jenny, H. 1973. Pygmy forest ecological staircase -Description and interpretation. University of California. International Nut and Dried Fruit Council, 2022. Nuts &

- Dried Fruits Statistical Yearbook 2021–2022, Spain, p. 78.
- Johnson, R., Cody, B.A. 2015. California Agricultural Production and Irrigated Water Use. CRS Report, p. 25.
- Merritts, D., Vincent, K. 1989. Geomorphic response of coastal streams to low, intermediate, and high rates of uplift, Mendocino triple junction region, northern California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101 (11): 1373-1388.
- Michael Kauffmann. 2014. "The Ecological Staircases of Mendocino Country". <https://www.michaelkauffmann.net/2014/07/the-ecological-staircases-of-mendocino-county/> (アクセス日 2022年7月11日)
- Northup, R., Yu, Z., Dahlgren, R., Vogt, K. 1995. Polyphenol control of nitrogen release from pine litter. *Nature* 377: 227–229.
- Planert, M., Williams, J.S. 1995. Ground Water Atlas of the United States –Segment 1: California and Nevada. In: Gordon, P.E. (Ed.), *Hydrologic Investigations Atlas 730-B*, p. 28 U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Rasmussen, C., Dahlgren, R., Southard, R.J. 2010. Basalt weathering and pedogenesis across an environmental gradient in the southern Cascade Range, California, USA. *Geoderma*, 154 (3-4): 473-485.
- Rasmussen, C., Matsuyama, N., Dahlgren, R.A., Southard, R.J., Brauer, N. 2007. Soil genesis and mineral transformation across an environmental gradient on andesitic lahar. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71(1): 225-237.
- Sneed, M., Brandt, J.T. 2015. Land subsidence in the San Joaquin Valley, California, USA, 2007–2014. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372: 23-27.
- Sonke, D., Arnold, A., Ludwig, G., Dlott, J. 2010. California almond sustainability program-Irrigation management Almond Board of California, Modesto, CA.
- USDA National Agriculture Statistics Service, 2019a. 2018 Irrigation and Water Management Survey Volume 3 Special Studies Part 1. 2017 Census of Agriculture, p. 216.
- USDA National Agriculture Statistics Service, 2019b. California State and County Data Volume 1 Geographic Area Series Part 5. 2017 Census of Agriculture, p. 612.
- USDA National Agriculture Statistics Service, 2019c. United States Summary and State Data Volume 1 Geographic Area Series Part 51. 2017 Census of Agriculture, p. 711.
- USDA National Agriculture Statistics Service, 2022. 2021 California Almond Acreage Report, p. 8.
- Yu, Z., Dahlgren, R., Northup, R. 1999. Evolution of soil properties and plant communities along an extreme edaphic gradient. *Eur. J. Soil Biol.*, 35, (1): 31-38.