

報告

菅平高原での冬季実習を通じたフィールド教育

上野 健一^{1*}, 川瀬 宏明²

要 旨

長野県菅平高原における筑波大学による冬季の野外実習を通じて気象雪氷現象を題材としたフィールド教育の実践内容を報告する。実習では、近年の観測技術や数値計算の進展を念頭に、従来の地理系の野外巡検による教育効果を再考し、座学で学ぶ理論とリアルタイムの現象をつなげ、受講生が自主的に課題にとりくめる様々な工夫を行った。特に、安全対策から初期解析まで一連を行う日程を組み、受講生間で教えあえる班単位での探究活動を取り入れ、インターネット環境を最大限に生かしたデータ取得・共有を行った。実習課題例として、「積雪断面観測からひもとくこの冬の気象履歴」、「雪面上での気温・積雪深移動観測と微気象」、「スマホ顕微鏡を活用した雪片観測」、「広域探査に見る雪国の生活の知恵」を紹介し、これからのフィールド教育の在り方を論じた。

キーワード：フィールド教育、積雪観測、冬季の天候、菅平高原

Key words: Field education, Snow survey, winter weather, Sugadairakogen

1. はじめに

フィールド(野外)に出て現象の仕組みを学ぶ事は地球科学の基本である。自然現象と人との関わり方を体験的に学ぶ「野外教育」は、スポーツ・野外活動の普及から地域の歴史教育まで、学校教育の一翼を担っており、日本野外教育学会や日本教育研究所などで教授法や指導者養成に関する研究が進められている(自然体験活動研究会, 2011)。一方、大学が野外の試験地やモデル地域(フィールド)で実施する「フィールド教育」では、室内での講義(座学)に対比させて現場から現象に即した理論や研究手法を学ぶ「実践教育」または「主体的学習(アクティブラーニング)」が求められる(清水ほか, 1999)。地球科学に限らず、農林水産・生態系の分野でも確立されたカリキュラムがあり、人文社会系ではビジネスモデルのインターンシップなどでフィールド教育が活用されている。

地学・地理学・雪氷学はそもそも野外での調査を基本として成熟してきた歴史的背景があるため、強いて「フィールド教育」とは言わず、「巡検・野外調査・実験・実習」などの名称で野外での授業を実施している大学が多い(中牧, 2018)。それらの多くは、講義で教授する理論を背景とし、現象を野外で模擬的に観測・測定し、自前で調査研究が行えるための技術を習得する。フィールドワークを宿泊も含む集中授業として実施する大学も多い。気象学や気候学に関する分野でも、地理系の講座を有する大学では従来から風土や小気候を巡検や観測により学ぶ授業体系が組み込まれ、調査法に関する教科書も出版されている(牛山, 2000; 西沢, 2005; 上野・久田, 2011)。一方、地球物理学系の講座を有する大学では、遠隔測定や数値モデルを使った研究が進展し、地上気象観測の手法を授業として取り扱う講座はあまり多くない。観測技術や測器はたえず高度化し、観測手法も個々の研究者(教員)で多様化している。授業の受講人数や教材・旅費の費用を考えると、現実的には最先端の観測・測定技術を多人数が受講する授業に導入できない事情もある。その結果、地

1 筑波大学生命環境系

〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1

2 気象庁気象研究所

〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

* 問合せ先: ueno.kenichi.fw@utsukuba.ac.jp

理系のフィールド教育が古典的な機材を用いた野外観測の基礎を淡々と引き継ぐ一方、地球物理系の室内実験・演習授業では高度なデータ解析や数値シミュレーションを取り扱うなど、両者に乖離が生じている。情報科学や遠隔測定技術の進歩に伴い、「観測・調査の手法」をフィールドに出て教授する意味を再考する時代に突入している。

気候変化に応じた豪雨や猛暑などの極端な気象の発現頻度は日本でも増加し(気象庁, 2018a)、これに対応すべく天気予報の精度向上や予報域の細分化の努力が行われている(気象庁, 2018b)。将来、地球温暖化が進行すると、日本の広い範囲で冬季の降雪が減少する一方、中部山岳域では極端に強い降雪が増加する可能性も指摘される(Kawase *et al.*, 2016)。大都市が集中する太平洋側では夏の猛暑、集中豪雨の発生、冬の突発的な大雪などへの関心も高く、大学でも気象予報士の資格取得や気象関連会社への就職を希望する学生が増加している。同時に、リアルタイムに発信される膨大な観測データの見方や、衛星観測の物理的原理を習熟するニーズが高まっている。小中学校では野外教育は多くの学校で取り入れられるが、受験教育の弊害のために高校で地学を学ぶ学生数は激減している(吉田・高木, 2020)。

雪氷分野に関して、降積雪を題材とした雪氷・気象観測に関する実習の有無を、日本気象学会・日本雪氷学会のメーリングリストを利用して調査

したところ、北見工業大学・北海道教育大学がキャンパスにて実施している(2019年3月現在)、防減災や天気予報の知識普及のために、学会や大学が講演会やサイエンスカフェといった短期的な企画を催す頻度は増加してきた。

これらの状況を踏まえ、本稿では、筑波大学地球学類・生命環境科学研究科で開講されてきた大気科学野外実験の一環として、菅平高原で実施してきた気象・積雪観測でのフィールド教育の工夫を報告する。作業内容やレポートから読み取れる受講生の関心やニーズも分析し、これからの大学におけるフィールド教育が高等教育に果たす役割を、特に雪氷気象分野に関して議論・提言する。

2. 菅平高原の立地と教育環境

菅平高原は長野県北東部に位置し、根子岳西斜面の標高1200-1600m帯に広がる高原と大松山北東側の盆地から構成されている(図1)。高原南東に位置する筑波大学山岳科学センター・菅平高原実験所(標高1320m)の設立は古く、1934年の東京文理科大学付属菅平高原生物研究所の時代にさかのぼる。当時の研究目的にも「寒冷な高原地帯の生物や地理を研究する」との記載があり、現在でもこれらの立地条件を生かした実習が多数行われている。大気分野に関しても古くから菅平盆地で発達する冷気湖や草原の微気象に関する研究があり(例えば 柏木, 1984; Yoshino, 1984)、こ

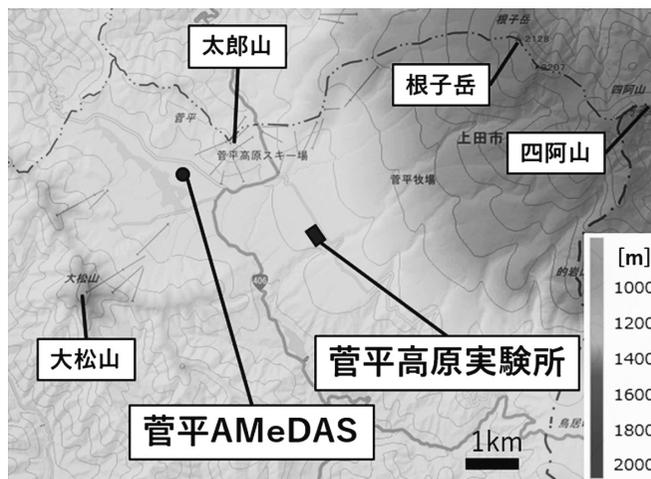


図1 菅平高原の地形および主要地点・山岳名(国土地理院電子地形図を加筆修正)。

れに付随して温湿度計や係留気球を用いた気象観測の実習も盛んに行われた。筆頭著者も、卒業研究(上野, 1993)を同地域で実施して以来、菅平高原との付き合いは25年以上になる。特に冬季の本州内陸で卓越する寒冷圏という「地の利」を生かした研究課題をいくつか発掘し(上野ほか, 2010; 佐藤ほか, 2012)、冬季の実習課題に活用している。実験所は高地ながら研究員・事務員が常駐し、宿泊体制も整っており、定期的に安心して野外実習を実施できる重要な基盤となっている。35 haの敷地は、果樹園、草原、混交林、小渓谷といった多様な土地利用から構成され、実験・講義室を備えた実験棟や高さ17mの林冠タワーも設置されている。実験棟にはWi-Fiが完備され、筑波大学筑波キャンパス(以下、筑波キャンパス)と同様のインターネット環境が整備されている。野外で実測した結果をインターネットで共有し、気象情報も付加してすぐ解析できる環境は後述する実習形態に威力を発揮している。

冬季の菅平高原は天気界に位置する(須田・上野, 2014)。その結果、冬型気圧配置の日でも晴天率が高い一方で、太平洋側を通過する南岸低気圧でも降水がもたらされ、積雪上の降雨(Rain on snow)など、様々な天候変化の記録が積雪に残る(上野ほか, 2010)。2月中旬に本州で春一番が卓越すると、年によっては大雨による極端な融雪が発生し、一方で2014年2月の関東大雪時には菅平でも歴代一位の積雪深(152cm)を観測している。菅平盆地の中央に設置されている気象庁AMeDASは全国でも数少ない高標高地点で、長期の気象データ解析や実習中の天気をリアルタイムでモニタリングするために活用されている。

野外で長期に実習を行う時に、まず検討すべき点は現地までの交通手段、宿泊施設および日程である。菅平高原は東京から上田まで新幹線で1時間半、さらにバスで1時間の移動となるが、茨城県つくば市に位置する筑波キャンパスからの移動時間、料金、および装備を考えると学生は自家用車に乗り合いで集合することが効率的となる。筑波キャンパスでの授業を考慮し、実習は週末や休日を利用する事が多い。しかし、冬季は高原周辺で積雪が生じるため安全運転が求められ、休日のスキー渋滞が予想される。これらを考え、実習は

現地集合・現地解散とし、そこまでの交通手段と時間調整は参加者の責任としている。一方で、実習期間中に高原内で必要となる移動は、教員が手配することを原則としている。大学が安価な宿泊施設を提供しているおかげで移動費が相殺され、実習参加費が安価に抑えられている。実験所がバランスの取れた食事を提供することも、実習を円滑に進行するうえで重要な要素となっている。野外活動での協調性を養うために自炊を推奨する教育方針も考えられるが、本実習では高等教育の一環としては衣食住にかかる個人的労力(時間)を節約し、データ解析や科学的な議論のための時間に割り当ててきた。

菅平高原の一つの難点は、病院が現地に無いことである。そのため緊急事態には上田まで下山しなければならない。過去に大きな事故はないが、体調を壊した学生を上田まで送り迎えしたことがあった。1300mは通常は高山病を発症する標高ではないが、最初のうちは気が付かないうちに低酸素による体調の異変が生じやすい。これは次の章で述べる日程策定時に考慮する点である。また、雪が未体験の学生や外国人参加者に対しては、食事の内容や装備に関して事前にガイダンスを行っている。

3. 実習目的と日程の策定

菅平での積雪実習は、そもそも第一著者の研究室で企画する冬季セミナーの一環として少人数で実施していた。2006年以降、学部(筑波大学では学類と呼ぶ、3年生での受講を推奨している)および大学院(1年生での受講を推奨している)での野外実験の枠組みで年に1回実施することになり、ティーチングアシスタント(TA)も同行して10-20名で2月の中旬に実施することが慣例となった(宿泊人数の都合で上限20名の受講制限をかけている)。この時期は、現地の積雪が平年でもっとも多く、一方で本学での講義が終了し、卒業認定関連の業務もひと段落する。日程を何日間に設定するかは、授業の枠組みに応じた単位数に依存する。移動日と現地でのまとめも考えると、最低限でも3泊4日を確保している。

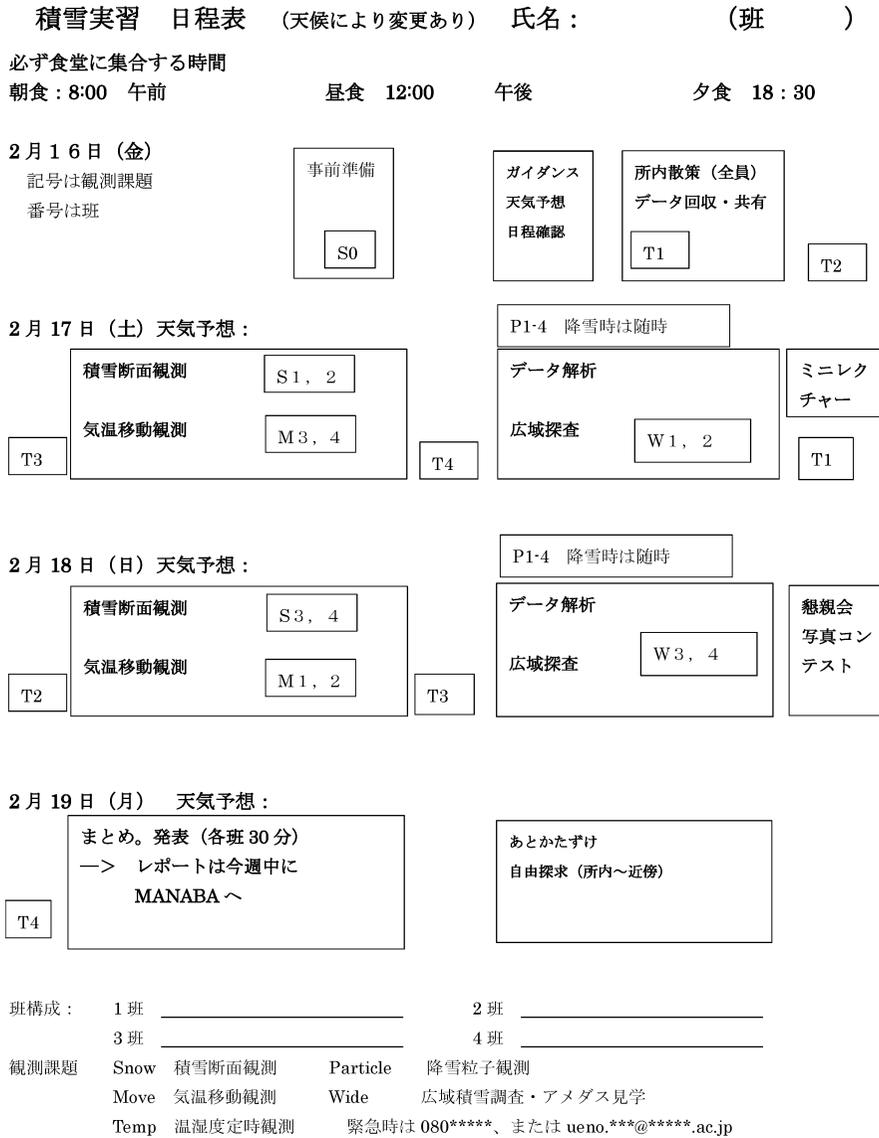
本実習は、1) 安全に実習を遂行・終了すること、2) 座学で学ぶ理論がフィールドで再現され

理解できること、3) 座学では学ぶことができない自分なりの発見・理解を現場で行えること、を大原則としている。1) に関しては、第一著者がヒマラヤ・チベットで培った国際共同観測での教訓に負うところが大きい。フィールドワークの安全対策は最優先であり(澤柿ほか, 2020)、参加者が遭難や怪我をしないことは当然であるが、使用する測器の安全(破損がないこと)、実験終了まで参加者間のトラブルが無いこと、そして目的とするデータを確実に取得する重要性も指導する必要がある。交通事故が授業責任と混同されて議論される場合があるが、これはあくまでドライバーの責任と考えている。むしろ、雪崩、遭難、怪我といったフィールドに付きまとう危険を回避する日程・行動計画を教員と TA 側が事前に十分検討する責務があり、一方の受講生には野外活動での事故を保障する保険への加入を促している。2) に関しては、計測器の使い方やデータ回収に関する観測手法のみを学ぶのではなく、得られたデータを現地で解析し、物理的な意味を学習し、簡易的なまとめまで行うことを目指している。そのために、理論にあった現象がいつどこで再現するか教員側は熟知しておく必要がある。先に述べたように、室内で理論を復習しそのまま野外で観測ができる施設を利用することで、地球科学に関する大きな学習効果を生む。3) に関しては、一方的な指示で日程や行動を規制するのではなく、その時の現象に応じた自由行動を容認する姿勢が重要となる。これは 1) と相反することも懸念されるが、実験所内の危険事項を指導者が熟知していれば時間と場所を限定しての実施は十分可能である。大学院での実習では、各自で企画した観測課題をレポートに課すこともある。

学校教育とは一線を画し、高等教育として履修生が実習に自主的に取り組むための工夫・改良を紹介する。まず、1) に関する「安全管理」に関しては、初めに現場で何をいつどのようにやるかを初日に受講生も含めて決める(図 2)。具体的には、最初に滞在期間中の「天気予想」を各自で行い、屋外・室内作業をどの日に行うのが最適かを全員で考える。第二著者のように気象予報士の資格を持つ参加者のアドバイスが威力を発揮する。次に、スノーシューをはいて小一時間実験所内の

視察を行い、危険個所の確認も行う。この時、教員側は同時期の積雪状態を把握し、受講生側はこれからどのようなフィールドで作業するのかを把握する。実験所の南にある大明神沢滝まで行くと、冬季の全面凍結した様子は圧巻で、どの受講生も写真撮影に夢中となる(図 3)。筑波大学生物学類が別途実施している陸域生物学学習のテキストに掲載されたアニマルトラッキング図を配布し、新雪に残る無数の小動物の足跡を観察することで、冬でも身近に動物の生息を実感し、野外での洞察力が高まる。「野外での実習が楽しそうだ」と最初に感じることは、3) の「現象の発見」に対する動機(インセンティブ)を与えることになる。特に筑波大学生は非雪国出身が多いため、雪を体験し記録することそのものが雪氷現象の理解につながる。その一環として、毎回写真コンテストを実施している。これは、滞在期間中に撮影したこれぞという写真を受講生に投稿させ、懇親会にて投票によるコンテストを行う企画である。受講生になるべく自分の目で見た記録を残してほしいという期待と、懇親会がただの宴会でおわらない工夫であるが、これはかなり好評である。一方で積雪は危険であるという認識も重要である。後述する積雪断面観測中に、平地で雪崩の弱層試験や簡易的な埋没体験を演じ、積雪が時として重く、またはもろく、危険であることを受講生に伝えている。第一著者は日本勤労者山岳連盟が主催する全国雪崩講習会に参加しており、この時の研修体験を本実習に生かしている。

自主的な学習を促す方法として、班(少人数)単位の活動とインターネットの活用も積極的に取り入れた。前者は学生参加型の実習に功を奏することが、阿部ほか(1998)でも指摘されている。そこで、3-4名の班を構成し作業や記録を分担させ、室内で観測データを共同で整理・考察する時間を取る。実験のレポートを他人から写すことは厳禁であると考えがちだが、実は解析段階から共同で作業することで互いが不明点を教えあい、全体としてレポートの質が向上することが分かった。レポート(報告)は実習後にあくまで個人で提出させるが、内容はなるべく現場で他人と相談して構築する指導を行うよう心掛けた。班のメンバーをどのように決めるかは悩むところだが、こ



★ 野外へ出るときの確認 : 防寒着、手袋、帽子、長靴、野帳、カメラ・スマホ、サングラス

図 2 実習期間中の日程表と観測課題の例.

れも自主的に構成させている。男女比を考慮し、学年・大学院生も混在させると作業効率が上がるようだ。一昔前の地学実習というと野帳にデータを必死に書き留めたりスケッチしたりしたものであった。近年はスマートフォンを野帳に代行させる学生が増加している。しかし、スマートフォンの紛失や低温時の停止、および手袋を取っての凍

傷の危険など、不都合も多い。その場での見聞やアイデアをメモに残すことは情報集約の始まりであり、野帳の持参は今後も推奨したい。

近年の気象測器は自動化され、実習中に取得されるデータ量も膨大である。実習中もこれらのデジタルデータを、筑波キャンパスでも活用している MANABA (<https://manaba.jp/>) という学習

管理システムによりその場で共有し、解析するよう心掛けている。MANABA は資料の共有から出席・レポート提出・ニュースの伝達など多くの機能を備えている (図 4)。受講者には各自 Wi-Fi 搭載型のノート PC の持参を求め、野外の測器から収集したデータを室内作業にて確認・共有し、班ごとに比較分析を行う。教員も、並行して観測データを分析・図化し、インターネットで広域の気象情報も取得し、ほぼリアルタイムに物理過程を解説する。大学院レベルになると、自前で客観解析やアメダス・高層気象観測のデータを取得



図 3 大明神滝での集合写真 (2019 年 2 月に撮影)。

し、数値計算を行い、観測値と比較分析する場合もある。

多くの内容を欲張って体験させて未消化になる実習は避けた。一方で、特定の課題に関する作業や計算ばかりに日程を割いて、3) で掲げた現場での発見・理解まで到達しないと、せっかく雪国まで遠出した意味が無い。気象の教材は生物や地学実習と異なり、数日の滞在で狙った現象が再現するとは限らない。急変する山の気象や特異的な雪氷現象そのものを教材にできるチャンスもある。本実習でも、これらをバランスよく実施できる実習テーマの選定には長年の紆余曲折があった。その結果、観測から解析までを 1 日単位で行えるいくつかの課題をパッケージにし、状況に応じて選択実施できるようなテキストを準備することで、一定の教育効果を保てるカリキュラムが完成した。今回は、その中から、積雪の物性と気象復元 (4 章)、移動観測と森林の影響評価 (5 章)、降雪粒子の観測 (6 章)、広域巡検による雪国体験 (7 章)、に関する課題を紹介する。

4. 積雪断面観測による気象の復元

雪氷学における積雪断面観測の手法は確立しており (日本雪氷学会北海道支部 (編), 1991), 積雪断面を定期的に多地点で観測し堆積・融解過程を

図 4 MANABA によるフィールドでの教材共有。

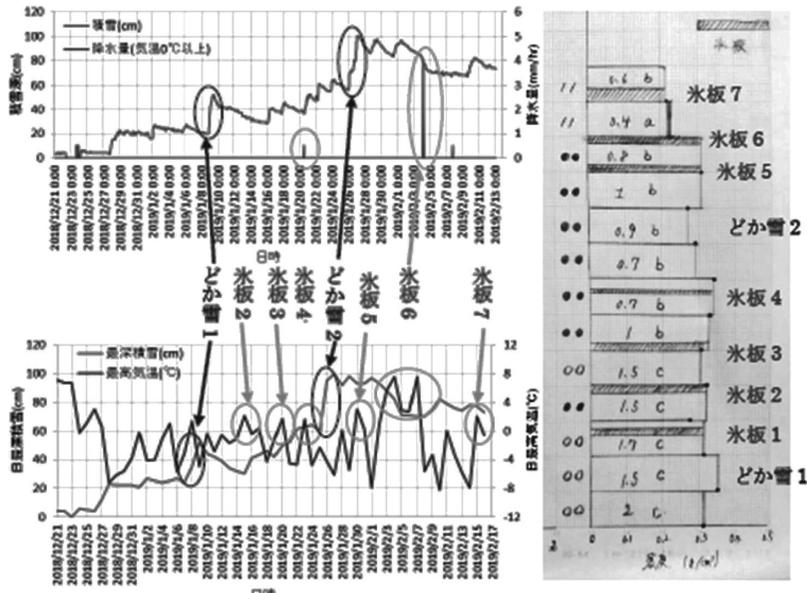


図 5 断面観測と気象の比較例 (小林勇輝君のレポートより)。

把握したり、これらを数値モデル・衛星観測の検証に用いることが多い。冬山で表層雪崩の可能性を探るときにも実施される。菅平高原の2月の積雪は平年 80cm 程度であるが、暖冬時には 30cm 程度の時もあり、日本海沿岸の多雪地域に比べるとやや物足りない。しかし、1m を超す積雪になると1地点の掘削作業が1時間を超え、かといって多様な積雪構造に巡り合えるとは限らない。菅平高原では低温環境で冬型と温帯低気圧による積雪層が混在して残り、積雪が薄いために温度勾配が大きくなり霜ざらめ系の雪質が発達する場合もある。積雪が層状である事も知らない学生にとって、作業日程的にも菅平の積雪はちょうどよいサンプルとなる。雪や氷の堆積物が過去の気候変動の証拠(プロキシ)となることは座学で学んでおり、地層形成の学習と類似点もあるため、地質系の学生も断面観測の意義は比較的容易に理解する。正式な断面観測では雪質、含水率、積雪硬度などの測定や化学的サンプリングを行う場合もあるが、本実習では雪密度、雪温、積雪水量の測定および層構造の把握を基本とし、1地点1時間以内で終了させるよう指示を出している。室内に持ち帰った測定値は、まずは手作業により方眼紙上に図化し、各地点の結果を並べさせて比較考察す

る(図5)。同時に EXCEL にデータを打ち込み、マクロソフトにより図化も行う。

断面観測の目的は様々だが、本実習では、A) 弱層や氷板はどのように形成され、B) それらの層が実習日以前のいつ形成されたか、を解明することを第一の目的に設定する。A) に関しては、積雪中での温度勾配に依存した水蒸気輸送と寒冷地での再凍結・積雪上での降雨(Rain on snow, 通称 ROS) 過程を副次的に学習させる。特に霜ざらめの形成は雪崩発生に関係する弱層形成にもかかわっており(福沢・秋田谷, 1991)、断面観測中に弱層試験をすることで容易に体験できる。大気の気温勾配を把握するには大掛かりな気象観測が必要であるが、積雪中の温度勾配は温度計一本で測定でき、乾き雪か濡れ雪かの判定にも有用である。菅平は山岳寒冷地のために、2月であれば確実に積雪中に0°C以下の積雪層が形成されており、その要因を考察する過程で積雪中への放射伝達や熱伝導を学習することができる。防寒対策の無い長靴で雪中作業すると足先が凍える理由も納得する。ちなみに、菅平高原での実習後に新潟県まで遠征して積雪断面観測を行ったことがあった。2m を超える暖地積雪での観測は、積雪を掘るだけで小一時間はかかり、非常に苦勞した割に

雪温も密度も大きな変化がない, といった印象が数多く寄せられた. 湿雪と乾雪の違いを理解し, 雪崩や屋根雪の耐荷重などが暮らす多雪地域の環境を学ぶ上では, 菅平を拠点として妙高や野沢温泉方面へ断面観測旅行を企画すると良い.

B) に関しては, この冬の気象の推移を天気図などから概観するとともに, 密度から積雪水量に換算し, 別途取得する菅平アメダスの日降水量・最大積雪深・日最高気温との対比から層の形成時期を推定する. まず, 根雪の開始時期を特定させ, それ以降の積算降水量と積雪水量の比較を行う. すると, 多くの年で積算降水量が現在の積雪水量に届かないことが生じる. 積もっている雪より降った降水量が少ないのである. さて何故でしょう? 座学の演習と同様に, フィールド教育でもなぜ解きは学生の主体的理解を始める. 次に, 「みなさんの観測地点は吹き溜まりでしたか?」と問う. この問いは次の章で扱う積雪の再配分過程の理解につながる. しかし複数の班が施設内の様々な地点で測定した積雪水量を比較しても, どこでも積算降水量が足りないことがわかってくる. そこで次の問を投げかける. 「降水量データは正しいのでしょうか?」. 多くの学生はデータを真値と考えている. しかしこの問いで学生の表情が変わったら, 事の重要性を理解した証拠である. 降水量計の降雪に対する捕捉率に関しては従来から多くの研究がなされ, 補正の方法も考案されている(中井・横山, 2009). しかし, 実習では最初にこれを教えない. 意地悪かもしれないが, 野外観測の諸問題を現場の作業で発見させる段取りもフィールド教育の定石と考える.

積雪の状態を数値モデルにより再現する研究も進んでいる(Niwano *et al.*, 2012). 大学院の実習で時間的に余裕がある場合, 観測値を入力データとして積雪モデルを運用し, 断面観測との比較を行う場合もある. この時には, 事前にモデルの仕組みを理解し, 入力に必要な放射データも根雪前から観測する必要がある. ただし, この内容を理解するのはかなり高度な物理過程および数値演算に関する知識が必要となる. そのうえで, 入力値となる降水量データを補正の有無で区別してみたり, 気温を疑似的に変化させて結果がどのように変わるかを考察することもできる. ただし, 2月

の時点では積雪の堆積期しか把握できず, 3月に入って急速に進行する融雪や, 春の低気圧活動の影響を診断できないなど問題もある.

5. 移動観測と微気象環境

地理学では, 物理量の分布状態を把握するために「移動観測」という手法をとることがある. 例えば気温計を車に搭載して都市内を移動することで, ヒートアイランドによる昇温域を把握することができる(例えば牛山, 2000). これを参考に, 測深棒とGPSを二人一組で持ち, 実験センター内を数組の班でくまなく歩いて狭域の積雪深分布を把握すると, 吹き溜まりが季節風に対する微地形や森林の配置と密接に関係していることが解る(Ueno *et al.*, 2008). 簡易測量により地形起伏(相対的な標高分布)を把握して積雪深分布に重ね, 一方で気象データから強風時の卓越風向を解析することで, 目に見えない風系と積雪の再配分過程を考察することもできる. このような積雪と風・微地形の関係を経験的に実測することを, 立石(1969)は既に菅平高原で実施しており, 共通の問題意識が過去にあったことに驚かされる. 局地的に生じる地上の風系を現場で可視的に説明することは非常に難しく, コンピューターシミュレーションや風洞実験が有効である. しかし, 菅平のような寒冷な積雪域では積雪再配分が卓越するため, 前章での断面観測と積雪深分布を狭域で同時に把握することで, 微地形や森林の影響を受けた大気の流れも間接的に理解することができる.

実験所内で冬季に気温の移動観測を行っても面白い. 以前に受講生が雪面上で0℃以上の気温を観測し, 「温度計が故障しているらしい」とレポートに書いたことがあった. 少し気象学を勉強した学生は天気図から「低気圧による暖気移流が要因」と考察する. ところが, その時の天候が冬型の気圧配置で, 実験センターより標高が低い菅平アメダス(それでも標高は1253m)の気温が氷点下であったりすると, 受講生は色々な考察を開始する. フィールド教育ではつじつまが合わない(想定外な)現象に遭遇するほど教員側も考え, 教育効果があがる. 「わからない場合は, 一緒に研究方法を考えよう」という姿勢が重要である. 実験所内にある林間タワーでは通年で気温勾配を測定して

いる。そこで、林内外の気温差と林内の気温勾配の関係を分析すると、晴天日の森林による大気加熱の効果がでてくる (Ueno *et al.*, 2017)。これは、冬季静穏日に森林周辺で気温の移動観測を実施したり赤外放射温度計で画像撮影をするだけでも把握することができる (図 6)。気温と位置データを地理データの表示に使用する KML (Keyhole Markup Language) ファイル形式に加工し、Google Earth 上に図画してその場で考察すると、例えば日中北風の時に森林風下では 2 度程度の昇温が生じていた (図 7)。このような熱環境の狭域変化は実は身近に発生しているのだが、積雪時に山岳森林域で放射温度・雪温・気温の観測を組み合わせることで顕在化させることができる。

別の発見を紹介しよう。雪面上で放射収支を実測するために観測小屋の近傍でアルベドを測定したことがあった。するとデータに異常な日変化が見られた。研究室では要因が思いつかなかったが、現場に行ってみると明らかに観測小屋の近傍は積雪が風で飛ばされてくぼみ、日中の太陽高度に応じてできる影が放射計の観測範囲に侵入していた。放射観測の失敗談にするのではなく、同様の状態を初日の視察時に撮影させ、データ解析時に問題提起することで、雪面放射・熱収支に対する興味を学生に伝えることができる。

6. 降雪観測で「天からの手紙」を読む

関東平野では、スマートフォンを活用した市民参加型の雪結晶観測が試行されている (荒木, 2018)。市販のスマートフォン用の顕微鏡 (スマホ顕微鏡) を使うと、比較的容易にきれいな雪の結晶を撮影することができる。ただし、東京などで雪が降るときには気温が 0℃ 以上のことが多く、降雪粒子をスマホ顕微鏡で撮ろうとしてもすぐに融けてしまう。それに対し、菅平高原では氷点下 5 度以下で雪が降ることも珍しくなく、日射などが無い限り、降った雪が融けることはない。そこで、黒いフェルト布に降雪粒子を捕捉し、ルーペを用いて観察したり、スマホ顕微鏡やデジタルカメラのマクロ機能を用いて撮影し (図 8)、雪の結晶と当日の気象の関係を考察させる。きれいな樹枝状の結晶がたくさんあると受講生のテンションも上がり撮影会が始まる。3 章で触れた写真コ

ンテストでは、毎年受講生が撮影した雪の結晶の写真がノミネートされている。

実習開始当初はフェルト布での観測の他に、雪のレプリカ (Schaefer, 1941) を作る実習も行ってた。雪のレプリカ実習の流れは以下の通りである。まず、ポリビニール・ホルマルをジクロロエタンに溶かした液を作り、冷やしておく。降雪時に外に出て、この溶液を垂らしたプレパラートの上に雪の結晶を捕捉する。捕捉した結晶を低温の場所に放置し、溶液を固めて乾燥させる。水分が蒸発すると雪の結晶の形と同じ形で溶液が固まり、雪のレプリカができあがる。これを実験室に持ち込み、ルーペを用いて結晶の形を観察するのである。雪の捕捉は気温が低く日射のない夜間が適しているため、夕食後あるいは懇親会中に降雪があると、皆で外に出て降ってくる雪を捕まえた。この時、降雪が少ないとプレパラートに「良質の雪の結晶」を乗せるのに四苦八苦する。逆に降雪が多すぎると、今度は雪の結晶が重なってプレパラートに乗ってしまい、これまた「良質の雪の結晶」を捕まえることができない。これも受講生にとっては良い経験であったが、近年ではスマホ顕微鏡など容易に雪の結晶の撮影ができるようになり、最近の実習では雪のレプリカの作成は行われなくなった。

雪の結晶は一般になじみのある樹枝状六花の結晶から、針状結晶、角版、つづみ型などなど様々な形をしている。Nakaya (1954) はそのような多種多様な雪結晶を様々な型に分類している。学生はまず室内の座学で、雪の結晶の違いがなぜ生じるのかを、この「中谷ダイヤグラム」を用いて学習する。中谷ダイヤグラムは室内実験により気温と過飽和度で雪の結晶を分類している。気温が低く (氷点下 15 度前後)、水蒸気が多い状況で成長すると樹枝状結晶、気温が高く (氷点下 5 度前後)、水蒸気が多い状況で成長すると針状結晶になる。雪が天からの手紙と言われる所以である。菅平高原は日本海からやや距離が離れていることもあり、雲粒の付いていない純粋な結晶を見ることができる。ただ、条件次第では雲粒がたくさんついた結晶が降ることもある。観測した日によって雪の結晶が異なる場合は、なぜそのような結晶が降ったのか受講生に考えてもらう。中谷ダイヤグ

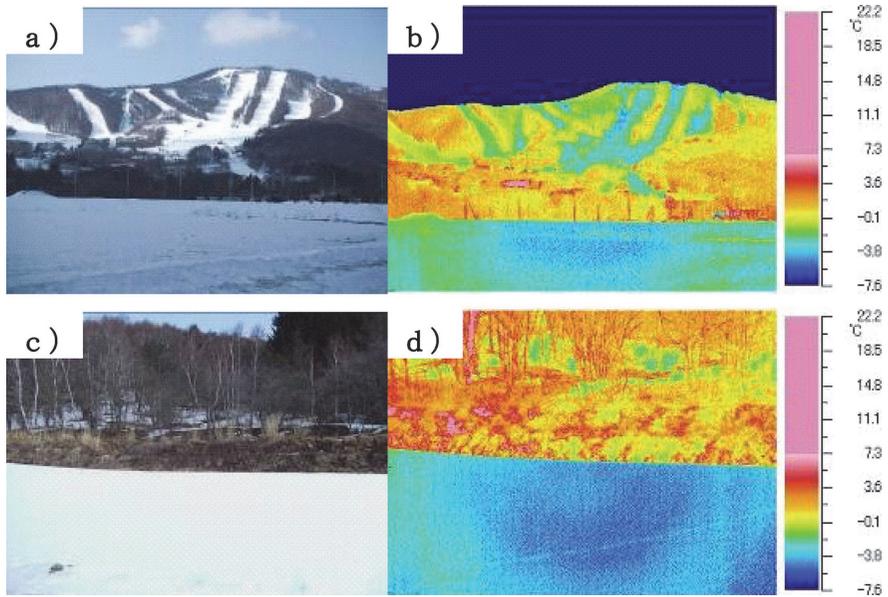


図 6 可視 (左列) および赤外放射温度計 (右列) で測定する冬季の菅平高原。上段は大松山斜面, 下段は森林とスキ草原の境界域を撮影。



図 7 冬季の日中における雪面上気温の分布例, 赤は -5°C ~ -6°C , 青は林内で -8°C 以下を示す。菅平アメダスは 12 時に北風, -8.0 度を記録していた。

ラムやその日の天気図を考慮し, 雪雲の中の状況を想像しながら課題に取り組むことになる。

気温の低い菅平高原では雪の降った翌日, 雪面

をよく見てみると, 雪の結晶がそのままの形で雪面に残っていることがある。さらに, 夜間の放射冷却により, 雪面に霜が付くこともある (これを

表面霜と呼ぶ)。いずれも雪の降らない太平洋側や湿雪が主体の日本海沿岸部ではほとんど見られない現象である。

ところで、盆地地形を有する菅平高原では雨水や凍雨も発生しやすい(松下・権頭, 2000)。雨水は上空に 0°C 以上の暖気層が入り、下層に氷点下の層があるときに発生する(川瀬・南雲, 2016)。雪が上空で融けて雨に変わったあと、下層の冷気層で冷やされ過冷却水(着水性の雨)になる。この雨が地上に落ちて木や建物に当たるとその衝撃で凍る。着水が進むと植物や木の枝を囲むように透明の氷が出来上がる。一方、凍雨は過冷却の水滴が地上に到達する前に何からの衝撃で再凍結したものである。半透明から透明の球形をしており、霰や雹とは形状が異なる。雨水と凍雨のうち、観測機器にとって厄介なのは雨水である。着水性の雨が風向風速計に付着し、雨水ができると観測

機器が止まってしまう恐れがある。菅平高原のアメダスデータを見ていると、氷点下で降水があった時に風が静穏になり、しばらくすると欠測値に変わることがある。これは着水性の雨が観測器を凍らせた可能性が高い。

2010年の実習で雨水と凍雨らしき氷の粒を発見した(図9)。この前日(2010年2月11日)は、関東平野のつくば市でも凍雨が観測されている。2月11日は本州の南を低気圧が通過する南岸低気圧のパターンであった(図10a)。館野の上空の気温をみると、地上から800hPa(上空約2000mあたり)までは氷点下であるが、その上800hPaから700hPaまでの1000m近い層が 0°C 付近の気温となっている(図10b)。つまり、この層で雪が融けていること(融解層)を示している。つくば市では、下層の厚い冷気層により凍雨が多量に発生したとみられる。標高の高い菅平高原では過冷却の雨が中心だったが、一時的に凍雨も降ったとみられる。

実習期間中に雨水や凍雨などの現象に遭遇する可能性は低いですが、ほぼ毎年、一度は降雪が発生し、受講生は降雪粒子の観察ができています。菅平高原では冬型の気圧配置時に日本海から流れ込む雪雲によってもたらされる降雪と、南岸低気圧によって発生する降雪が両方発生する。南岸低気圧通過時の降雪粒子は季節風によるものと形状が異なり、山岳域の雪崩の一要因となるという研究もあり(石坂ほか, 2015)、両者の違いを考察する機会があるかもしれない。また、たとえ雪が降らなくても、菅平盆地から見える大松山や根子岳に雲がかかった翌日は、過冷却水滴が樹木についた樹氷

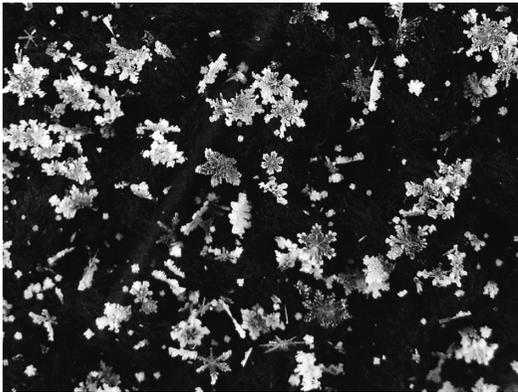


図8 フェルト布に落ちた種々の雪の結晶。

(a) 雨水



(b) 凍雨

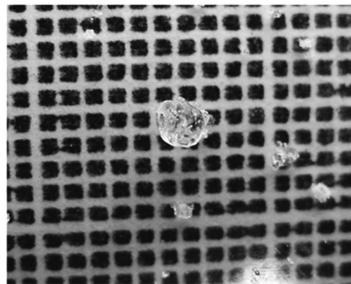


図9 菅平高原で見つけた (a) 雨水と (b) 凍雨。(b) の目盛りは1mm。

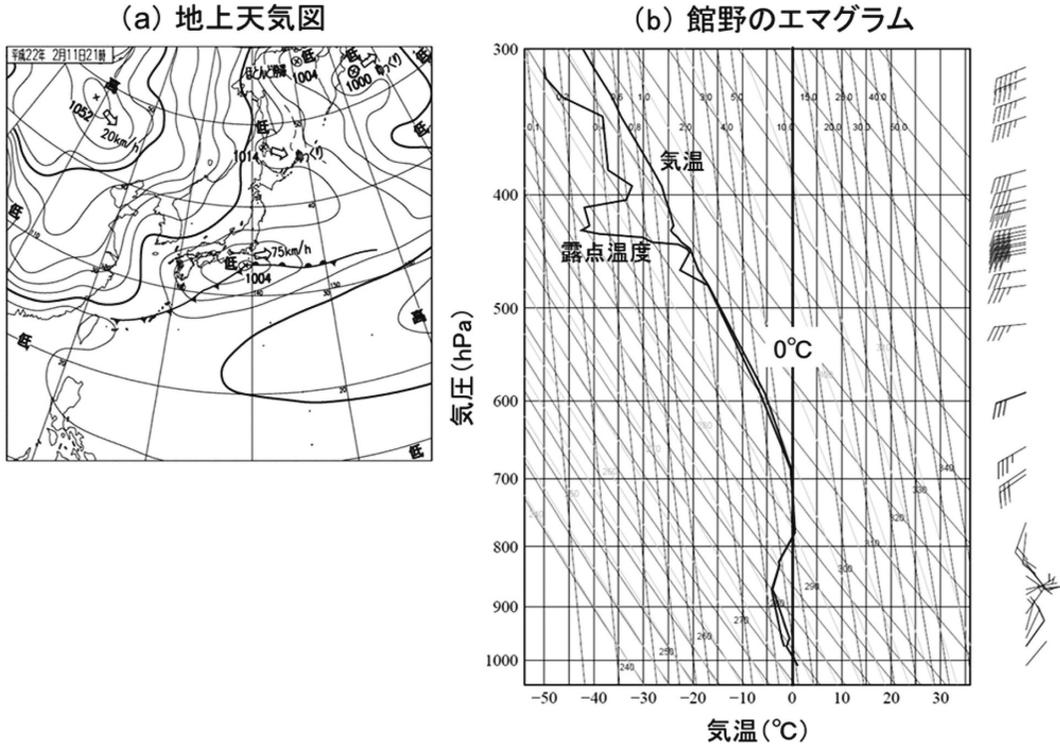


図 10 2010年2月10日21時の(a)地上天気図と、(b)館野(つくば)のエマグラムと風。

が成長し、青空と白い樹氷の美しいコントラストを見ることができる。冬の菅平高原は、太平洋側で学ぶ受講生にとって雪の結晶や様々な雪氷現象を観察できる最適な場所である。

降雪粒子観測は毎年実施してきたが、これまで観測は実験所での短時間の観測にとどまっていた。例えば、雪の降り始めから降り終わりまで連続的に観察して降雪粒子の変化を記録し、全球数値予報モデルあるいは客観解析データと合わせて見ると、上空の大気の状態と降雪粒子の変化を考察することができるだろう。ただ、ここで問題となるのは、菅平高原は日本海側の地域と比べて降雪頻度が少なく、必ずしも長時間、雪が降るとは限らないことである。色々課題はあるものの、「天からの手紙」を読む降雪粒子の観測はこれからも受講生にとって貴重な体験となるであろう。

7. 広域探査

せっかく長野県までやってきたのに、実験所内だけで実習を終わらせることはもったいない。実

習期間内の広域移動に制約がある中で、菅平盆地内に位置するアメダスの見学と、根子岳中腹に位置する菅平牧場での断面観測も時間に余裕のある限り実施するようにしている。いずれも他の班が実験所内で作業している時間帯に、公用車を利用して5-7名程度のグループで2時間程度の作業時間を見込んで行く。事前に授業の一環で訪問する許可を取り、受講生には大学の名前が入った腕章をつけて行動させている。関東甲信越の冬季最低気温が菅平アメダスで記録されたと報道されることが多い。盆地に囲まれた立地や、周辺の積雪状況を実際に見ることでアメダスの気温がどこで測定され、なぜ夜間の低温が出現しやすいかを理解させる。一方の菅平牧場は標高約1600mに位置し、晴天日は長野盆地から北アルプスまで一望できる。天候により樹木が白く輝く霧氷を体験できる一方で、強風時には地吹雪により視界不良で、長期滞在が危険な場合もある。安全を確保しつつ、厳しい冬山を体感させる事は、履修生にとって貴重な経験となる。

日本は世界にも類を見ない多雪地域であるが、いわゆる日本海側の暖地積雪は菅平の積雪とは大きく異なる。大学院の授業枠で一週間弱の実習期間をとれる場合、実習の後半で長野県北部から新潟県にかけて多雪地域まで遠征して断面観測を行うこともある。菅平からだど、上信越道を利用して妙高方面へ向かうか、国道 117 号線を北上して新潟県津南町方面へ向かう経路が考えられる。年により 2 月の積雪量が大きく異なる場合があるので、どちらに向かうかは路面の積雪状態により判断すると良い。暖地の断面観測でまず受講生が驚くことは、雪の深さと重さである。2 月でも多くの層がざらめ化し、積雪深のわりに積雪水量が菅平に比べて異常に大きい。周辺の家屋の構造や、道路に敷設された雪崩防止柵・スノーシェードなどを見学しつつ、多雪域での雪崩を紹介し、どのような気象で大雪となるかに解説をつなげる。雪国の暮らしや融雪技術をテキストで紹介し、移動中に車窓から景観を見学するだけでも、もう一度自前でゆっくり訪れたいという受講生が多数現れる。

本実習に学外からボランティアで講師の方に参加いただいたり、研究施設を訪問して解説いただく事もあった。例えば、気象研究所の研究員の方から最新の気候変動や数値シミュレーションの話の聞いたり、新潟県長岡市の雪氷防災研究センターまで遠征して暖地積雪域での研究活動を紹介いただいたりした。野外観測が実社会でどのように役立つかを学ぶ良い機会となっている。

8. これからのフィールド教育を考える

自然科学の多くがコンピュータを用いて多量のデータを扱い、現象を数値モデルや人工知能 (AI) により再現・予測することが主流になりつつある中、フィールド教育の在り方も再考を迫られている。単に現象の体験や測定方法の伝授を目標とするだけでなく、地球科学を学ぶ動機を与え、室内での講義・実験と連動して野外でこそ学習効果が最大となるカリキュラムが必要である。本報告では、長野県菅平高原を拠点として実施してきた学部・大学院での冬季実習を題材とし、主に雪氷気象観測を通じたフィールド教育の工夫と教育効果の質的变化をまとめた。

一定期間内に参加学生が経験可能な現象とその

変動を教材にし、理論を復習しつつ自分なりの発見をする大学レベルの実習カリキュラムを 12 年かけて構築した。まず、教員側は実習に特化したテキストを準備し、作業をマニュアル化し、期間中の現象を想定した実習課題を複数準備した。一方、実習中は受講生に対し一方的な作業指示は避け、安全かつ自主的に取り組むための動機を考えた。現地では最初に近傍の散策を行い、対象フィールドを認識したうえで、天気予想を踏まえた安全かつ課題の目標が達成可能なロードマップ (日程) 作成を確認・決定するところから始めた。測定手法や調査方法の学習を最終目的にするのではなく、現場で発見する学術的な課題 (いわゆる謎) の解明を主眼に置いた。特に時々刻々と変化する気象・雪氷現象にはリアルタイムのデータを積極的に活用すると良い。班単位 (少人数) で実測・データ分析を行うことで相互学習を促進し、最終日に簡易的な発表まで行う一連の日程を組むことで、実習中にレポートの骨子完成を目指した。

特に、多岐にわたる内容を一定の期間内に終了するために、野外での作業量は欲張らず、既存施設の立地や機能を最大限に活用する。室内でのデータ分析や班単位での議論時間を十分とる。インターネットを最大限活用し、自動観測により取得されたデータを現場で共有する。観測値のエラーや手法の問題も自分たちで発見し修正する。これらを短時間に迅速に行うために、電子学習管理システムを最大限に活用する、といった実習体系の確立には時間がかかった。当初は学部と大学院の授業目標を混同したり、積雪を体感することに主眼を置き、「フィールドを楽しむ」野外教育で満足していた時期があった。しかし、個人のノート PC 所持率が上がり、実習毎に多様な気象を体験することで教材の幅も広がり、学年や現状に適應可能な高度かつ多様な実習課題が整備されてきた。これは提出されるレポートの質の変化にも表れている。例えば、当初は現場でデータを共有する時間を十分とらなかったため、図表ばかりで考察の少ないレポートが多かった。学生間での理解度の差も大きかった。しかし、現場で班発表まで行うことで一定の学習目標に到達する学生数が増えた。さらに、気象観測の手法や原理は講義で解

説し、学年末に実施される本野外実習でそれらを実践できるという段取りが生まれた。過去の実習成果を紹介したり講師によるミニレクチャーを導入することで、単なる野外実習ではなく、より学術的な研究への応用志向が特に大学院生に芽生えている。本実習の受講生が共同執筆者となる学術論文も数編執筆され、テキストの参考文献としてフィードバックされている。一方で、授業アンケートには、もっと明確な作業指示が望まれる、班毎に分担を分け、全体の作業効率を上げてほしい、といった実習のマニュアル化を望む意見は根強い。野外作業を効率的に実施すること自体が授業の目的でないことを、今後も粘り強く説明する必要がある。

大学の教育課程が変化する中で、紹介した実習形態も変更せざるを得ない状況が生まれている。頻発する自然災害に関して多くの情報を体験無く得られる世の中において、現象を定量的に現場で測定し、そこから生まれる疑問を理論と比較し客観的に考察する実習カリキュラムは、地理・地学教育の基盤としてますます重要となると考える。さらに、地元の現象を教科書とは違う角度から計測・診断できる外部講師も参加して、フィールド教育と社会との接点を持つ仕組みも必要であろう。今回紹介した取り組みが、高等教育における実習カリキュラムの改善に少しでも役立てば幸いである。

謝 辞

菅平牧場畜産農業協同組合には牧場での積雪断面観測に多大な便宜を図っていただきました。実習に参加いただき積雪数値モデルの解説をお願いしました庭野匡思氏(気象研究所)、積雪観測施設および防災業務を解説いただいた中井専人氏(雪氷防災研究センター)、雪崩講習会にお招きいただいた川嶋高志氏(日本勤労山岳連盟)、実習・作図を補助いただきました浅野祐樹君・楠健志君・小林勇輝君(筑波大学生命環境研究科)に厚くお礼申し上げます。毎年長期にわたり実習を支援していただいた筑波大学実験所に常駐する教員・事務・技官職員の皆さまにも誌上にてお礼申し上げます。

文 献

- 阿部和厚, 小笠原正明, 西森敏之, 細川敏幸, 高橋伸幸, 高橋宣勝, 大 雄二, 小林由子, 山舗直子, 大滝純司, 和田大輔, 佐藤公治, 佐々木市夫, 寺沢浩一 (1998): 大学における学生参加型授業の開発. 高等教育ジャーナル, 4, 45-65.
- 荒木健太郎 (2018): シチズンサイエンスによる超高密度雪結晶観測「# 関東雪結晶 プロジェクト」. 雪氷, 80, 115-129.
- 福沢卓也, 秋田谷英次 (1991): しもぞらめ雪層の急速形成過程の観測. 低温科学 物理編, 50, 1-7.
- 石坂雅昭, 藤野丈志, 本吉弘岐, 中井専人, 中村一樹, 椎名 徹, 村本健一郎 (2015): 2014年2月の南岸低気圧時の新潟県下における降雪粒子の特徴—関東甲信越地方の雪崩の多発に関連して—. 雪氷, 77, 285-302.
- 柏木良明 (1984): 長野県菅平におけるススキ群落の微気候. 地理学評論, 57, 477-484.
- 川瀬宏明, 南雲信宏 (2016): 茨城県つくば市で観測された凍雨と雨水. 雪氷, 78, i-ii.
- Kawase, H., Murata, A., Mizuta, R., Sasaki, H., Nosaka, M., Ishii, M. and Takayabu, I. (2016): Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations. *Climatic Change*, 139, 265-278.
- 気象庁 (2018a): 気候変動監視レポート 2017, 気象庁, 87 pp.
- 気象庁 (2018b): 気象業務はいま 2018, 気象庁, 181 pp.
- 松下拓樹, 権頭芳浩 (2000): 雨水発生日数の地域分布に関する統計的解析. 雪氷, 62, 355-365.
- 中井専人, 横山宏太郎 (2009): 降水量計の捕捉損失の重要性. 天気, 56, 69-74.
- 中牧 崇 (2018): 大学・地理教育巡検の創造, 古今書院, 200 pp.
- Nakaya U. (1954): Snow crystals, natural and artificial, Harvard University Press, Oxford University press.
- Niwano, M, Aoki, T., Kuchiki, K., Hosaka, M. and Kodama Y. (2012): Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo. *Japan, J. Geophys. Res.*, 117, F03008, doi:10.1029/2011JF002239.
- 西沢利栄 (2005): 気候のフィールド調査法, 古今書院, 122 pp.
- 日本雪水学会北海道支部 (編) (1991): 雪氷調査法, 北海道大学図書刊行会, 244 pp.
- 佐藤香枝, 上野健一, 南光一樹, 清水 悟 (2012): 長野県菅平高原における冬季降雨の発生傾向. 水文・水資

- 源学会誌, **25**, 217-289.
- 澤柿教伸, 野中健一, 椎野若菜 (2020): フィールドワークの安全対策, 古今書院, 186 pp.
- 清水 弘, 秦寛, 笹賀一郎, 阿部和厚, 松田 彊 (1999): 敷設施設を活用した「自然・農業と人間」に関する教養教育の試み, 高等教育ジャーナル, **6**, 126-138.
- Schaefer, V.J. (1941): A method for making snowflake replicas. *Science*, **93** (2410), 239-240.
- 自然体験活動研究会 (2011): 野外教育の理論と実践 (野外教育入門シリーズ), 杏林書院, 194 pp.
- 須田耕樹, 上野健一 (2014): アメダス (気候気象観測システム) データを用いた冬季天気界の抽出. 地学雑誌, **123**, 35-47.
- 立石由己 (1969): 積雪分布におよぼす風速および微地形の影響. 地理学評論, **42**, 527-532.
- 上野健一 (1993): 日本海沿岸から脊梁山脈にかけた新雪中の主要化学組成の分布. 地理学評論, **66**, 401-415.
- Ueno K., Y. Watarai, A. Kusada, N. Hirose, and S. Shimizu (2008): Spatial heterogeneity of snow covers in Sugadaira, central Japan. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, **3**, 33-39.
- 上野健一, 大門亮太, 足立幸穂, 清水 悟 (2010): 菅平高原で観測された低気圧活動に伴う凹型積雪深変動. 雪氷, **72**, 237-253.
- 上野健一, 久田健一郎 (2011): 地球学調査・解析の基礎, 古今書院, 208 pp.
- Ueno K., S. Ueda, R. Kanai, D. Masaki, Y. Sato, S. Rin, M. Hirota (2017): Diurnal and seasonal variation of air temperature profile in the mountain forest at Sugadaira, central Japan. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, **13**, 1-12.
- 牛山素行 (2000): 身近な気象・気候調査の基礎, 古今書院, 195 pp.
- 吉田幸平, 高木秀雄 (2020): 高等学校理科「地学基礎」「地学」開設率の都道府県ごとの違いとその要因. 地学雑誌, 受理.
- Yoshino, M. M. (1984): Thermal belt and cold air drainage on the mountain slope and cold air lake in the basin at quiet, clear night. *Geo Journal*, **8**, 235-250.

Challenges of field education by snow survey in Sugadairakogen Highlands

Kenichi UENO^{1*} and Hiroaki KAWASE²

¹ Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, 305-8572, Japan

² Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052, Japan

* Corresponding author: ueno.kenichi.fw@u.tsukuba.ac.jp

(2019年8月22日受付, 2019年11月26日改稿受付, 2020年1月24日再改稿受付,
2020年1月24日受理)