

宇宙地球科学分野のリモート実験室計画

大 森 聡 一¹⁾

Remote Laboratory Project in Earth and Astro Sciences

Soichi OMORI

1. はじめに

遠隔科学教育における実験実習科目の実施は、長く検討され続けている課題である。この課題は、MOOCs (Massive Open Online Courses) が注目され、高等教育の方法の変革の可能性が議論されるにともなって再浮上してきた様である (Waldrop, 2013a,b) : 一人の教授が何万人を教える様な仕組みが立ち上がってきているが、そこに、科学教育は実験実習を含む完全な形で参加できるのだろうか。

この問題は、放送大学が提供する遠隔科学教育にも共通するだろう。本稿では、まず、遠隔教育における実験実習要素の提供方法を概観し、次に、放送大学の面接授業およびオンライン科目において、宇宙・地球領域のリモート実験室実現のために検討および一部実現した内容を紹介する。

2. 遠隔科学教育における実験実習

作業し、観察し、データを得て、解析する、という一連の流れを経験することは、好奇心の発現と「発見する思考回路」の形成に欠かせないと考えられている。すなわち、この経験の提供が実験実習の目的であるといえるだろう。以降、本稿で扱う「実験実習」とは、この過程を提供する科目を指すものとする。遠隔教育で実験実習科目を提供する方法は様々考案されている (例えば Ma & Nickerson, 2006, Waldrop, 2013b のレビューを参照)。ここでは、それらを次の3タイプに分類して紹介する：1) 家庭における実験、2) 仮想 (ヴァーチャル) 実験室、および3) リモート実験室。日本の通信制大学で義務づけられている面接授業は、遠隔教育とキャンパスにおける大学教育の折衷型で特殊な例と考えられるため、次章で、放送大学の例を紹介することにする。

「家庭における実験」型の実験実習は、実験のため

に必要な機材や薬品のセットを、受講生の家に送付し、受講生は家で実験を行い、終了後にセットを大学に返送する、という方式で行われる。英国の Open University では、この方式の実験実習が1990年代後半まで行われていた。この方式は、リアルな実験体験を提供するが、一方で安全性への懸念、薬品の廃棄、そして高費用という問題を含んでいる。この問題に対しては、安全性と薬品問題を、実験装置を可能な限り小さくすることで解決しようとしたマイクロケミストリー実験という方法 (たとえば、荻野, 2009) が提案され、マイクロスケール化された実験とそのための装置が考案されている。

「仮想実験室」は、コンピュータ内に再現した実験室または実験装置で実験操作を行い、コンピュータが作り出す反応 (レスポンス) を観察・観測し、データを取得する。その「実験室」の再現度は、ロールプレイング的な構成からヴァーチャルリアリティ技術が使われたものまで、幅が広い。受講生はネットワーク経由、または手元のコンピュータにアプリケーションをインストールして、「仮想実験室」プログラムを実行する。化学・生物・工学分野において、仮想実験室による遠隔実験に関する研究が盛んに行われ、実際に教育に用いられている。この方法は、受講生数に対するスケールアップが比較的容易に行えることが利点であるが、やはり、「それは本当に実験なのか」という批判は存在している。

「リモート実験室」は、ネットワーク経由で実際に遠隔環境にある機器を操作して実験実習を行う方式である。受講者はコンピュータを使用して機器のコントロールと状況観察、およびデータの取得を行う。遠隔環境では実際に機器が作動して実験が行われることになる。この方式も、仮想実験に分類されることもあるが、反応として返るのが、コンピュータによるシミュレーション結果ではなく、実在の機器が観測・測定した情報であるという点が前項で紹介した「仮想実験室」とは大きく異なる。実際の機器を使うため、受講

¹⁾ 放送大学准教授 (「自然と環境」コース)

者数への対応には工夫が必要であり、時間差による利用の仕組みや、機器数の確保が必要となる。

現実の実験環境は、この方式の遠隔実験になじみ易くなってきている。実際、実験室で実験を行っていても、データの取得にはセンサーを接続したコンピュータが用いられる場合が多くなり、また分析・計測に用いる機器には、コンピュータ経由でマウスによってコントロールする仕様がが増えてきている。操作する「つまみ」が無くなってきているのである。遠隔地の映像や音声の中継する手法は、webカメラの機能として実現されている。結果として、機器の隣でコンピュータを操作して実験しても、ネットワーク経由で遠隔で操作しても、ある種の機器を用いた実験では両者間の違いが少なくなっている。さらに、ピペットを使う様な、手先の操作をとまなう化学実験に対して、ある種のロボット実験セットを作成するといった提案もなされている。たとえば、大量の微小ペトリ皿を並べ、インクジェットプリンターの様な仕組みで、受講生が薬品を選んで指定量を自分の皿に添加し観察する様な仕組みが考案されている (Waldrop, 2013b)。本気で遠隔実験実習の実現を考える現場では、この様な新しい実験設備の開発も視野に入ってきている。

以上、遠隔教育における実験実習の方法の概要をまとめた。英国Open Universityでは、2013年からOpenScience Laboratory (<http://www.open.ac.uk/researchprojects/open-science/>) として、物理、化学、生物、健康科学、天文学、および地質学について、仮想実験室とリモート実験室の両方で、遠隔実験実習のプログラムが提供されている。仮想実験室ではロールプレイング方式の化学実験や顕微鏡観察、リモート実験室では、光学望遠鏡、電波望遠鏡、放射線メーターなどの機器を実際に操作するコースが提供されている (上記webページを参照)。

3. 放送大学における面接授業

放送大学においては、2016年現在、上記の3タイプの遠隔実験実習科目のいずれも提供されていないが、面接授業がこれを補う機能を担っている。面接授業は、通信制大学の卒業のために所定の単位数を取得することが義務づけられている、いわゆるスクーリングである。放送大学では、全国57カ所に配置された学習センターとサテライトスペースで面接授業を開講している。

2016年度の1学期および2学期に開講された面接授業科目のうち、理科関連科目は432科目あるが、そのうちの110科目が、何らかの実験実習を含む内容となっている (著者調べ)。その実習の内訳は、物質・エネルギー領域 (物理と化学) では、基礎物理学実験 (運動、光学)、物質の合成、化学分析、放射線測定など; 生物・生態領域では、野外実習、解剖、顕微鏡観

察、遺伝子解析など; 宇宙・地球領域では、野外実習、天体観測、化石標本の測定、岩石薄片の作成と観察、および本稿で紹介する電子顕微鏡^{注)} 実験など、となっている。多くは、特別な機器や設備を必要としない様に工夫された内容となっている。一方で、個人が高校までの理科教育で触れる機会のない様な機器や実験室設備 (学外利用を含む) を使用する内容として、遺伝子解析 (5センターが開講)、宇宙・地球領域では、天文台の望遠鏡の利用 (2センター)、岩石薄片の作成と偏光顕微鏡による観察 (1センター)、海洋実習関連 (2センター) などが開講されている。本稿で紹介する電子顕微鏡リモート実験室を含む講義は、3センターで開講した。しかし、これらの実験は実験科目全体の15%程度に留まっている。

現代の自然科学・産業分野において、機器を使用した観察や分析は普通に行われていて、機器を使用した実験体験も、教養教育の一環として重要であるだろう。しかし、各学習センターで高額でメンテナンスの必要な機器を利用した科学実験に対応することは、予算、スペース、人員的にも難しいことが上の結果に表れている。また、前述のマイクロケミストリー実験方式は、この問題への対応策の一つとして、実験室を持たない学習センターの面接授業にあたり一般講義室で化学実験を行うために用いられたこともある (荻野, 2009)。

4. 宇宙地球科学分野における「リモート実験室」

4-1 背景

放送大学の学部は、教養学部1学部のみで構成されており、いわゆる理科分野は、自然と環境コースを中心に社会と産業コースと生活と福祉コースにも関連教員が配置されている。私の所属する自然と環境コースは、基礎科学系の教員で構成され、科目作成の体系上、便宜的に、数理、物質・エネルギー、生命・生態、および宇宙・地球の4領域に分けられている。教養教育において基礎科学が何を目指すか、ということについて、しばしば教員間で議論になることもあるが、知識量を増やすよりは考える力を身につけることが重要である、という点では、おおよそ一致している。

宇宙・地球領域は、高校理科では「地学」に相当する内容を扱っている。前章で述べた様に、放送大学の実験実習科目は面接授業に依存して実施されている。よって、宇宙地球分野では、面接授業で行われている、望遠鏡の作成、天体観測、野外実習 (地質巡検)、岩石薄片の作成と偏光顕微鏡観察などが、現在提供している主な実験実習科目の内容ということになる。

宇宙・地球領域の実験実習で、「知識よりも考える力を」という目標を達成するために欠かせない要素

^{注)} 電子顕微鏡: 可視光のかわりに電子線を用いて物質の形態などを観察する装置。

が、機器を用いた観測や分析である。岩石学の例を後で詳細に述べるが、岩石の化学組成を確かめようとして、特別な機器を使用せずに、仮に薬品とガラス機器のみで分析しようとする、強酸などを用い、職人的な技を駆使することになり、地球科学の実習ではなく、分析手法の実習になってしまう。観察の一步先に進むには、適切な分析機器が必要なのである。この例は一端であるが、宇宙・地球領域の実験実習では、作業と観察は行うが、適切な機器を使用できないという理由から、その先のデータの取得と解析が欠けてしまうことがある。この場合、2章における実験実習の定義に厳密にしたがえば「実験実習」とは呼べないことになる。

そこで、導入を検討したのが「リモート実験室」タイプの遠隔実験である。宇宙・地球科学で使われている機器は、比較的遠隔操作による利用に適しているし、研究においてもすでに遠隔実験が活用されている。PCのリモートデスクトップ機能を用いれば、とくに特別な環境を用意しなくても、機器のリモートコントロール利用が可能となる。「リモート実験室」の活用法には、面接授業において教員の立ち会いの下で行う学生実験、および、オンライン授業において学生が一人で任意の時間に行う実験、の2つに場合が考えられる。今回検討した利用機器は、いずれも複数台数を用意することは難しいため、オンライン授業で提供するためには、利用時間の予約と割り当てという、コンピュータの時間分割共有利用の仕組みが不可欠である。また、外部から機器の管理コンピュータへの接続を許可するため、セキュリティの確保には十分に配慮する必要がある。これらの仕組みの確立を前提に、天文と地球科学分野で検討しているリモート実験室の内容を以下に述べる。また、地球科学分野では、一部すでに実施している面接授業における活用内容とその方法も示す。

4-2 天文分野のリモート実験室

天文分野では、天文学研究の現場でも望遠鏡のリモートコントロール観測は普通に行われていて、例えば、ハワイ島マウナケア山頂に設置されたすばる望遠鏡や、チリ、アタカマ砂漠のアルマ望遠鏡は、低地の制御室で研究者が観測を行っている。このような経緯もあり、教育の現場でも、望遠鏡を利用したリモート実験室が早くから提案、実用化されてきた（たとえば、佐藤ほか、1999；松本ほか、2000；高田ほか、2003）。近年では、リモートデスクトップ機能等により、遠隔地のPCをネットワーク経由で容易にリモートコントロールできるようになったため、インターネット天文台の利便性はさらに高まっている（慶應義塾大学インターネット望遠鏡プロジェクト、2016；高田ほか、2016）。

天文分野でリモート実験室を導入するメリットとしては、以下の3点が考えられる：1）光害の無い条件での観測、2）リモート実験室の設置場所によっては天候や時間に依存しない利用が可能、および3）高性

能・高機能の望遠鏡やセンサー（分光装置など）の利用。1と2は、地理的および時間的な利用条件の改善で、国内天文台や時差の大きい海外の望遠鏡をリモート実験室として利用することで得られる利点である。放送大学のみで実現できることではなく、国内研究機関や海外の公開大学などとの連携が必要であるため、大勢の学生が共有利用するという利用法には適さないが、一方、面接授業での利用であれば、メリットが十分に活かされることになると考えられる。3）は、講義で提供している天文学・宇宙科学の体系の中に実験実習を組み込むために重要な要素である。例えば、分光器を取り付けた望遠鏡で観測を行うことで、恒星や銀河の進化に関する講義内容に沿った実習が可能となり、また、分光法や恒星内の反応などの原理の理解へと学習を深めることが出来るだろう。

4-3 地球科学分野のリモート実験室とその一部実現

高校理科では、地学は暗記科目であると認識されていることが多い。その傾向は、放送大学の面接授業でも認められる。私の専門の岩石学では、その傾向がとくに強い。岩石といえば、玄武岩、安山岩、花崗岩…というイメージである。確かに、観察はするが、その対象の名前と意味を説明されて学習が終わる、というパターンは多いように思える。専門家の立場からすれば、岩石は地球の欠片で、地球の歴史も生成条件もそこに記録されていて、また、身近な地震や火山噴火も岩石から研究することができるなど、名前よりも学んで欲しいことが沢山ある。しかし、では、なぜそのようなことがわかるのか、その実証のためには、野外調査～肉眼では見えないような小さな領域の化学組成までを対象にした調査・分析が必要である。しかし、特に微小領域の研究には、電子顕微鏡やX線検出器などの高額（1千万円～数億円程度）機器が必要となる。結果として、この実証の体験が欠けた、知識の伝達のみで終わる場合が多いのだろう。

地球科学分野では、化学分析のために機器を使用する頻度が高く、これらの機器は、とくに1990年代以降に発売されたものは、ネットワーク経由でのリモートコントロールとの親和性が高い。試料交換などの作業は機器の設置場所で行う必要があるが、分析の操作は、ワークステーションやPC経由で行われるため、研究室レベルでは、X-windowやVNC（unix系のデスクトップ共有）による分析機器のリモートコントロールが実現していた。

この方法を、面接授業、および将来的にはオンライン科目に取り入れ、遠隔実験実習を含む地球・地球環境教育の体系を作ること計画した。使用する機器は、走査型電子顕微鏡と電子線により励起された原子が発生する特性X線を用いて化学分析を行うエネルギー分散型X線分光器（SEM-EDS）である。例えば、火山噴火を扱う過程で、噴火の様式はマグマの粘性に依存し、マグマの粘性はマグマの温度と化学組成で決まることが解説される。それでは、マグマの温度と化

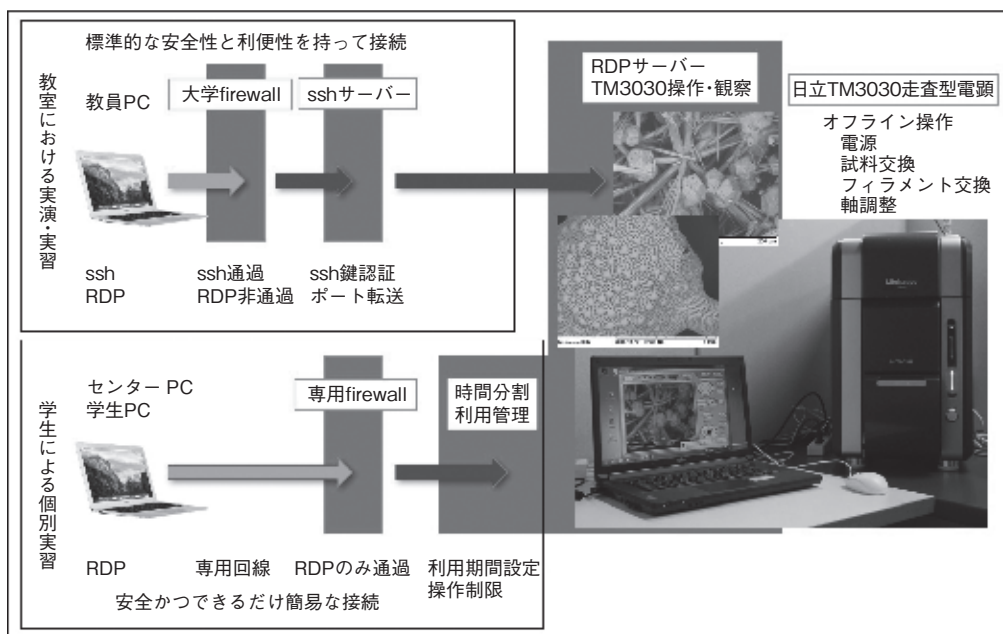


図1 リモートデスクトップ（RDP）機能を用いた、電子顕微鏡リモート実験室の構成



図2 面接授業における電子顕微鏡実験風景。スクリーンに映された電子顕微鏡操作画面を見ながら、受講生が操作・観察を交代で行った。

学組成はどのようにして見積めるのか。ここで、SEM-EDSを使用して、実際に富士山やハワイ島の岩石を分析し、自分で得たデータを元に化学組成や融解温度の議論ができれば、岩石生成の原理への理解も深まるだろう。また、地球環境を大きく支配している要素として、微生物による元素固定を説明するが、実際にその微生物の作った殻を観察するためには被写界深度の深い電子顕微鏡が不可欠であり、また、形態観察と同時に微小領域分析でその殻の化学組成を得ることができる。未知試料を与えられて、自分で観察分析し解明する、という過程の経験が可能になる。

この計画の第一弾として、走査型電子顕微鏡観察実験を2014年度2学期の面接授業から実施した（図1、

図2：大森, 2016)。使用機器には、電源のオンオフと試料交換以外の分析操作をWindows のアプリケーション上で行う走査型電子顕微鏡（日立ハイテック製TM3030型）を用いた。エネルギー分散型X線検出器は未設置なので、微小領域の形態観察が本実験の内容である。電子顕微鏡に接続された操作用PC（Windows 8.1 professional）でリモートデスクトップ（RDP）サーバーを動かし、観察のための操作を、Windowsのリモートデスクトップ機能でサーバーに接続して行う。授業では講師のPC（MacOS X+リモートデスクトップクライアント）を用いて実習を行った。およそ5 Mbps程度のインターネット回線速度で、直接操作とほぼ同じ感覚で操作可能である。面接授業会場からの接続にはsshのポートフォワーディング機能を用いて、セキュリティに配慮した接続を行った。

2016年度第2学期には、将来のオンライン授業化を想定して、面接授業受講生が自宅からRDPサーバーに接続する実習方式を試行した。学習センターにおける授業後、およそ2週間の期間中に、18名の学生が自宅または学習センターから個別にサーバーに接続し、一人あたり2時間の割り当て時間内に実習を行い、レポートを作成した。学生側PCにソフトウェア等を追加することなく、かつセキュリティを保った接続を実現するために、大学ネットワークではなくWiMAXによる専用回線を使用し、RDPのみを通過させるファイアーウォールを経由してRDPサーバーに接続する経路を作成した（図1）。学生には、あらかじめRDP設定ファイルと有効日時が限定された個別のパスワードを配布し、ネットワークに接続したPCで設定ファイルを開くだけで、容易にRDP接続を確立できる様に配慮した。RDPサーバーにおいては、実習に必要な

なソフトウェア以外を実行不可能として、万が一不正に接続された場合に備えている。

5. まとめ

「実験実習は、ものにリアルに触り五感を駆使しなくては意味がない」という意見も根強いらしい。しかし、さまざまな機器において、ユーザーのレベルでは、物理的に操作する「つまみ」は無くなりつつあるのは確かである。また、ヴァーチャルリアリティ技術の進歩は、将来、必要であれば、たとえ触覚や嗅覚であっても、現実と区別のつかない実験環境を再現する様になるだろうし、物理・化学現象のシミュレーション技術は、コンピュータ内で、実験で発生する現象をリアルに再現するようになるだろう。それにより、より多くの人が実験実習を仮想体験できるようになるのであれば、もちろんリアルに触る (hands-on) 実験が出来る環境も残されるべきであるが、遠隔実験実習は推進されるべきであろう。面接授業においても、電子顕微鏡の操作実習はおよそ好評である。年齢によるデジタルデバイドの問題 (三輪ほか, 2013) も将来は解決するはずである。結局のところ、重要なのは、実験実習で何を伝えるか、その理想を、その時できる技術を活かしてできるだけ提供する努力をすることだろう。そのような実験実習を含む講義体系を目指して、宇宙・地球分野における遠隔実験実習の充実化を推進して行きたいと考えている。

謝辞

本研究で使用した走査型電子顕微鏡の購入には、2014年度放送大学学長裁量経費を用いた。

引用文献

- 慶應義塾大学インターネット望遠鏡プロジェクト編 (2016) インターネット望遠鏡で観測！ 現代天文学入門、森北出版、160p.
- 黒須正明 (2011) 放送大学における地理的要因による受講困難者 — 離島居住者の学習状況と解決への道 —、放送大学研究年報 29, 103–113.
- Ma J. and Nickerson J. (2006) Hands-On, Simulated, and Remote Laboratories: A Comparative Literature Review, ACM Computing Surveys, Vol. 38, No. 3, Article 7
- 三輪真木子、高橋秀明、柳沼良知、仁科エミ、広瀬洋子、川淵明美、秋光淳生 (2013) 放送大学におけるデジタル・リテラシー教育の展開と成果、31, 65–74.
- 荻野博 (2009) 遠隔教育のための化学実験用教材およびキットの開発、科研費報告書、<https://kaken.nii.ac.jp/report/KAKENHI-PROJECT-19500756/RECORD-195007562008jisseki/>
- 大森聡一 (2016) 遠隔教育におけるリモート実験室 (1)：電子顕微鏡実験、地球惑星科学連合大会、幕張、2016.5.22
- 佐藤毅彦、坪田幸政、松本直紀 (1999) インターネット天文台の構築：その1。安く、早く、簡単に、天文月報 92, 312–317.
- 高田淑子、中堤康友、池田尚人、長島康雄、伊藤芳春、林美香、吉田和剛、松下真人、斉藤正晴 (2003) 宮城教育大学インターネット天文台の活用事例、天文月報 96, 572–578.
- 高田淑子、美濃山蛸、田村瑚春、中川萌野、熊谷祐輝 宮城教育大学惑星科学研究室 (2016) 宮教大インターネット天文台システム：モバイル望遠鏡への新展開、宮城教育大学・情報処理センター研究紀要、1–4.
- Waldrop M. (2013a) Campus2.0, Nature 495, 160–163.
- Waldrop M. (2013b) The virtual lab, Nature 499, 268–270. (2016年11月2日受理)