

日本の理数科教育をサポートする

Rimse

Research Institute for Mathematics and Science Education

No.4

MAY
2013

特集

防災教育における 理科教育の役割 I



C O N T E N T S

巻頭言

数学の何をいかに伝えるか …… 表紙裏

東京理科大学 理数教育研究センター長 秋山 仁

特集 防災教育における理科教育の役割 I

I 防災教育と理科教育 —総論— …… 2

京都大学防災研究所巨大災害センター教授 矢守 克也

II これだけは知っておきたい

—地震・津波災害を生き抜くために— …… 9

京都大学大学院地球環境学学助教 奥村 与志弘

連載 数学は人とともにある 第3回

数学は役に立っている …… 15

横浜国立大学大学院教授 根上 生也

連載 理科を活かして考えよう 第3回

見えないもの …… 18

高知工科大学教授 八田 章光

連載 社会の中の科学技術 第3回

「トランス・サイエンス」 …… 21

大阪大学全学教育推進機構准教授 中村 征樹

広場 地域教育で活躍する人々 第3回

埼玉県が発信する新たな挑戦

「中学生思考力チャレンジ大会」 …… 24

埼玉大学教育学部准教授 松崎 昭雄

科学史の散歩道 第4回

マイケル・ファラデーの電磁誘導リング …… 裏表紙

大阪教育大学名誉教授 鈴木 善次

巻頭言



東京理科大学 理数教育研究センター長

秋山 仁 / あきやま じん

1946年東京都に生まれる。上智大学大学院数学専攻修士課程修了。日本医科大学助教授、ミシガン大学数学科客員研究員、東海大学教授、米国AT&Tベル研究所科学コンサルタント(非常勤)、文部科学省教課審委員などを経て、2007年に東海大学教育開発研究所所長。現在は東京理科大学理数教育研究センター長。中国南開大学客員教授、(NPO法人)体験型科学教育研究所理事長、(社)全国幼児教育研究協会理事。理学博士。専門は離散幾何学、グラフ理論。1999年第1回“坊ちゃん賞”を受賞。2008年にヨーロッパ科学アカデミー会員に推挙される。現在NHK数学講座の講師。共著書は、『Factors and Factorizations of Graphs』(Springer Verlag)、『A Day's Adventure in Math wonderland』(World Scientific) など多数。

数学の何をいかに伝えるか

子供たちの心に溶け込み、脳裏に刻み込むように、数学や理科の複雑な概念や法則を教えることは意外と難しい。“人に教えること”と“自分が理解すること”は全く異なることだが、“人に教えること”が上手であるためには、まず十分に自分が理解していなければならないのは事実であろう。物理学者アーネスト・ラザフォードは、教える立場の人たちが肝に銘じなければならない次の言葉を残している。「難解で抽象的な数式や理論で表現されている定理や法則であっても、それを単純で平易な言葉で言い換えて説明できないというのなら、その人はその定理や法則の本質を本当の意味では理解してはいない」。

この言葉を噛み締めながら、数学の何をいかに教えるべきなのか、私見を述べよう。

I—実際の生活で数学の知識をそれほど必要としていない人々たちにとって、数学を学ぶことでどんなメリットがあるのか、数学の何が彼らの生活にどう役に立つのかを伝えていくことが必要だ。例えば古代ギリシャの時代より数学が学ぶべき大切な学問とされてきたのは、数学の知識そのものよりも、数学の学習を通して培うことのできる「ものの見方や分析のしかた、考え方」の習得が期待されていたからだった。だから、従来のように学年を進めるごとに数学の知識を増やしていく数学の伝え方ではない方法で数学を伝えることも必要だ。すなわち、“数学の世界だけでなく、実生活やビジネスシーンなどで出くわす問題の解決にも応用できるような考え方や発想を養うことができ、さほど多くの数学の知識を必要とせず、かつ、誰にとっても興味深く良質な問題やトピック”を紹介していくことが大切だと思う。

II—医療、映像、編集、印刷、音楽、デザイン、料理、ファッションなど、さまざまな分野で、かつては何年もの修業を積んだプロにしか使えなかった技術が、ハイテク機器の誕生によって、一般の人でも手軽に使えるようになった。数学についても同様な方法を考えるべきだと思う。従来から数学を用いてきた理工系や経済の分野に加え、会計や医療、福祉の仕事やマーケティングなどの多くのビジネス現場で数学を道具として使う必要がある人々のための数学教育法の確立が不可

欠である。それは、これまでのようにハードな修行や訓練を積まなくてもそれぞれの現場で道具としての数学をもっと手軽に使えるような方策をIT技術などを駆使して実現し、「こんなところでこんな風に使うと、もっとこんなことが可能になりますよ」ということを伝え、数学の需要を拡大していくことも大切だ。

III—研究者が美しい、素晴らしい、面白いと感じている真理をラザフォードの指摘に従い“単純で平易な言葉”で言い直したり、“五感に訴える表現”を用いて表現したりすることも大切だ。すなわち、多くの人々にとって無味乾燥にしか写らない定理や公式、抽象的で難解な最先端の数学の理論についても、表現方法を変えて、それらの本来の意義を伝えたり、実際にその理論を応用した身のまわりの製品やシステム等を紹介したりして、数学の多面的な魅力を伝える工夫が必要だ。

欧米では、研究者が象牙の塔に留まらずに抽象的、難解な理論をできるだけわかりやすい言葉で、またすべてを正確には伝え切れなくても、その本質的な美しさや意義だけはきちんと伝える目的で良質な本を多数著している。また、サイエンライターや教育活動に協力し汗をかいている研究者が日本よりもはるかに多いようだし、またそういった活動や挑戦、努力に対する評価も高い。

ユネスコの活動の一環として、筆者はこれまで製作してきた数学の作品を集めて世界各国を巡回してきたが、どの国も数学嫌いは多い。しかし、数学は嫌いだが、苦手だったと言いつつながら、この展示会に足を運び、作品に目を輝かして心底楽しんでくれる人もまた多いことも事実だ。このことから、実は潜在的に数学に関心を持っている人が多く、また、数学の持つ本来の魅力は多くの人々にとって、とても面白いものなのだと考えられる。ということは、教え方、伝え方の良し悪しが数学の未来に関わっていると言わざるを得ないのである。数学従事者の責任は極めて重大である。

一般財団法人 理数教育研究所が、数学や理科が学びがいのある、とても興味深いものであることを多くの若者たちに伝える理数教育の発信基地に発展することを心から期待する次第である。

防災教育における 理科教育の役割 I

I 防災教育と理科教育 —総論—



京都大学防災研究所巨大災害センター教授

矢守 克也 / やもり かつや

1963年大阪府に生まれる。1988年大阪大学大学院人間科学研究科博士後期課程単位取得退学。奈良大学社会学部助教授、京都大学防災研究所巨大災害研究センター助教授を経て、現在に至る。京都大学阿武山観測所教授、京都大学大学院情報学研究所教授、人と防災未来センター上級研究員などを兼任。博士（人間科学）。専門は、防災心理学。主著に、『防災ゲームで学ぶリスク・コミュニケーション』、『増補版〈生活防災〉のすすめ』（以上、ナカニシヤ出版）、『夢みる防災教育』（晃洋書房）、『ワードマップ：防災と減災の人間科学』（新曜社）など。その他、共同開発した防災教育教材に『クロスロード』など。

1 はじめに — 防災教育の現状と課題

A 順風と逆風

今、防災教育と理科教育に、順風と逆風の両方が吹いている。この現状認識には、大方の賛同を得ることができるだろう。

順風とは、阪神・淡路大震災（1995年）、東日本大震災（2011年）をはじめとする近年の大災害の頻発を受けて、防災教育の重要性を指摘し、それに期待する声が高まってきていることを指す。例えば、2011年（平成23年）に本格始動した「新学習指導要領・生きる力」では、防災教育に関する事項が従来よりも増強された。また、2012年に発表された防災教育に関する有識者会議の最終報告（文部科学省、2012）¹⁾でも、防災教育の指導時間の確保と系統的・体系的な整理の必要性が強く謳われている。これは政府に限ったことではなく、地方自治体、教育機関、地域社会、家庭からも手厚い防災教育を求める声は多くあがっている。

しかし他方で、逆風も存在する。「理科離れ」、「工学嫌い」など、防災対策のベースとなる研究領域に対する評価や人気は、特に近年、厳しい状況にある（例えば、岩田、1999）²⁾。理科（物理、地学）に対する子供たちの関心の低迷—つまり

国民的な関心の低迷—に、さらに、東日本大震災によって生じた地震学を中心とする防災学一般や原子力技術に対する不信心—「想定外だと言いつれ逃れるつもりか」—も加わった。

この結果として、少なくとも、これまでどおりの内容やスタイルをもった防災教育や理科教育に対して、その有効性を疑問視する向きもある。また、その渦中にある学問分野の側から「我々は社会に役立つ研究をしてきたか」といった反省の弁が呈されているのも事実である（例えば、日本地震学会、2012）³⁾。

B これまでの取り組み

順風はよいとして、逆風には対処しなければならない。そのための取り組みは既にいくつか展開されており、成果もあがっている（矢守、2011）⁴⁾。

例えば、第一に、災害や防災研究に関わる学会や研究機関の肝煎り^{きまじり}で、防災教育のためのプログラムが実施されたり、教材が作成されたりしている。

- ・「地震火山子どもサマースクール」（日本地震学会・日本火山学会、1999年度開始）⁵⁾
- ・「日本に住むための必須!! 防災知識」（土木学会、2005）⁶⁾
- ・「自然災害と防災」（北海道立教育研究所附属理科教育センター、2009）⁷⁾

などは、その代表的なものである。

第二に、防災教育を推進するための全国レベルの支援や交流の枠組みが近年相次いで立ち上がり、大きな成果をあげている。

- ・「防災教育チャレンジプラン」(防災教育チャレンジプラン実行委員会, 2001 年度開始)⁸⁾
- ・「ぼうさい甲子園」(毎日新聞社, 2004 年度開始)⁹⁾
- ・「ぼうさい探検隊」(日本損害保険協会, 2005 年度開始)¹⁰⁾

などが、その代表的なものである。こうした枠組みに後押しされる形で、学校における防災教育も、従来に比べて盛んになりつつある。

第三に、大学、高校などに、防災を専門に学ぶ機関や部門等が新たに整備され始めて、多くの在校生や卒業生が地域防災や災害復興の現場で力を発揮している。例えば、兵庫県立舞子高等学校環境防災科や、神戸学院大学防災・社会貢献ユニット、関西大学社会安全学部、静岡大学防災総合センターなどは、その先駆的かつ代表的事例である(矢守・諏訪・船木, 2007¹¹⁾; 諏訪, 2011¹²⁾; 神戸学院大学学際教育機構防災・社会貢献ユニット, 2012¹³⁾)。

C さらに求められる 2 つのこと

上記の取り組みは大きな成果をあげてきたが、しかし、それでも課題は依然存在する。筆者は、特に理科教育の視点から防災教育を見たとき、以下の二つことが今後さらに重要性を増すと考えている。

第一は、「敵を知ること／己を知ること」のバランスである。これは、「敵」としての自然現象を知ることと、「己」としての人間行動を知ることの両立が、防災教育には欠かせないとの意味である。この点、これまでの防災教育が前者に偏っていたことは否めない。

第二は、「教え／学ぶ」から「共にする」への移行である。防災教育としての理科教育は、単なる知識・技術の移転(教える者から学ぶ者への移転)ではなく、防災という活動を現場で「共にする」(専門家も非専門家も大人も子供も「共にする」という)スタイルへと重点を移す必要がある。

以下、筆者自身が最近取り組んでいる防災教育の事例を紹介しながら、以上の 2 点について具体的に説明しよう。

2 敵を知り己を知る

A 高知県四万十町興津地区

ここで紹介する個別避難訓練「タイムトライヤル」は、京都大学防災研究所の「減災社会プロジェクト」(代表者: 筆者)の一環として、筆者らと高知県四万十町興津地区(特に興津小学校)などが共同で開始した新しい津波防災訓練兼防災教育の手法である。より詳しくは、近藤ら(2012)¹⁴⁾、孫ら(2012)¹⁵⁾、孫ら(印刷中)¹⁶⁾、矢守(2012)¹⁷⁾などを参照されたい。

この取り組みの舞台となっている興津地区は、人口約 1,000 人で、漁業と農業を中心とした集落である。この集落は、現在、その発生が懸念されている南海トラフの巨大地震が起きれば、最悪の場合、震度 7 の震動に見舞われ、かつ 25 メートルもの波高の津波が襲うと予想されている。しかも、避難の障害となる程度の高さ(30 センチメートル)の津波が、最も早い場合、地震発生からわずか 15 分程度で人々が暮らす居住域にまで入ってくるという厳しい想定である。

しかも、図 1 に示したとおり、この地域は三方を海で囲まれ、近隣の地域とは山越えの隘路 1 本で結ばれているだけである。巨大地震・津波だけでなく、台風や地盤災害による交通遮断も日常的に懸念される厳しい地理的環境にある。このことも、地域の災害に対する脆弱性を高める一因となっている。



図 1 高知県四万十町興津地区 正面が太平洋、左側の入り江が漁港、右側にももう一つ浜が見える。手前の山道が集落への唯一のアクセス道路である。

こうした地域固有の事情から、この集落では従前から避難場所の整備、小学校を舞台とした防災教育や避難訓練(図2)など、災害への備えが活発に展開されてきた。それでも、あまりに過酷な津波想定を前にあきらめ感を漂わせる住民も出始めた。今回、「タイムトライアル」の試みを開始した背景には、こうした事情が存在する。



図2 興津小学校で行われている避難訓練 子供たちが高台に駆け上がっている。

B 個別避難訓練「タイムトライアル」

通常の避難訓練では多くの人が一斉に避難することが多い。しかし、この個別訓練は個人または家族で行う。訓練者は、自宅の居間などふだんいる場所から高台など自分たちが逃げようと思う避難場所まで、所要時間をストップウォッチで計りながら実際に逃げてみる。この一部始終を、地元の小学生たちがビデオカメラで撮影する。2台のカメラを用い、1台は逃げる人の表情を、もう1台は周囲の状況を撮影する。さらに別の子供が、避難の最中、時々状況をメモする。例えば、「(訓練者が) そろそろ疲れてきた」、「ブロック塀が崩れる危険性あり」といった具合である。

こうした作業をすべて小学生に依頼したのは、訓練を支援すること自体が、絶好の防災学習にもなるからである。また避難する人には、GPSのロガーを装着する。これによって、避難開始から何分後にどこにいたか、海拔何メートルの所まで到達していたかといった大切な情報を、後から電子地図上に表示することができる。

C 「動画カルテ」

以上の結果を、「動画カルテ」と呼ぶ映像にまとめる(図3)。画面は4分割されている。

- ・左上の画面には1台目のカメラ映像
 - ・右下には2台目のカメラ映像
 - ・右上には訓練参加者のつぶやき(上欄)と子供たちから参加者へのメッセージ(下欄)
 - ・左下には上述の地図
- が映し出されている。

地図中、丸印が現在位置、そこへと至る太線が移動経路で、画面中央左手が高台の避難所である。また、画面中央に時計表示があって、4つの画面はスタートからゴールまでずっと連動して動く。



図3 「動画カルテ」のサンプル 制作：京都大学防災研究所矢守研究室、タニスタ、NHK大阪放送局、ゼンリン(株)

さらに、この地図には、最新の想定に基づいた津波浸水シミュレーションの映像が、訓練者の実際の動きと重なって表示される仕組みになっている。地図の右の部分には海が見える。津波はまずこちら側からやって来る。だから、例えば、「ここまで逃げたときに、自宅には既に津波が押し寄せてきている、間一髪だった！」といったことが一目瞭然とわかる。

これを、「動画カルテ」と呼ぶのは、一人一人の避難の課題がここに集約されているからである。医師が患者の状態を個別にカルテに記録するイメージである。これを通じて、住民一人一人に寄り添って、本当に逃げられるのか、どこに注意が必要かについて細かく探り、問題解決を図ってほしいというねらいである。まだ数人分だけであるが既に個別訓練を実施し、それぞれの「動画カルテ」ができあがっている。いろいろな発見があった。意外に速く歩けると自信を深めてくれた高齢者がいる。逆に、思ったよりも時間がかかったと反省し、少しでも早く家から逃げ出せるよう家具固定などの重要性に気づいてくれた方もいる。

他方、子供たちも、自分たちが逃げるだけでなく(小学生の避難訓練はほとんど月1回のペースで別途実施されている、左ページの図2)、集落全体のために何が必要かという視点をもってくれた。“この橋は多くの人が避難に利用して大切だから地震で落ちないように補強が必要”、“坂道でお年寄りと一緒にになったら自分たちが助けられる”など、いろいろな提案や心強い意見が出た。

□ 津波と人間 — 「敵を知り己を知る」

「動画カルテ」という新しいツールの上で、津波(敵)と人間(己)が重なっていることを感じとることは、容易であろう。実際の学習では、まず、子供たちに、どのくらいの高さの津波がどの程度の時間でこの地域に押し寄せると想定されているのかについて、その理由も含めて繰り返して説明している。これは、「敵」について知ることに相当する。しかし、他方で、自分たちや高齢者を含む地域住民が避難することに伴う課題や解決法も、「動画カルテ」には映し出されている。こちらは、「己」について知ることに相当する。

津波からの避難は、この両者がクリアされてはじめて成功する。したがって、(津波に関する)防災教育にも、どうしてもこの両側面が必要である。「個別訓練—動画カルテ」は、この両側面を同じ舞台の上で重ね合わせる試みなのである。

(なお、「動画カルテ」の上で、専門家と非専門家の知恵も重なり、地域住民と子供たちとが関係づけられ、それによって、次にとりあげる本稿の2つめのポイント、「共にする」ことも同時に実現している点にも注目いただきたい。)

3 「教え／学ぶ」から「共にする」へ

A 「満点計画」による防災教育プログラム

防災のための知識や技術の高度化に伴って、近年、防災といえは専門家や実務者が担うもので、非専門家はそれに従っていけばよいとの考えが拡大してきた。この考え方のもとでは、“防災教育は、専門家が獲得ないし開発した正しい知識や高度な技術を非専門家に指導・伝達することだ”，あるいは，“そのための教材を開発することだ”と位置づけられがちである。要するに、「教え／学ぶ」というスタイルである。

しかし、そのような防災教育では、かえって、防災専門家と非専門家との障壁を高め、例えば、行政・専門家依存(「防災は行政や専門家がやることだ」との意識の増大)や、情報待ち(災害情報が質・量ともに充実するにつれて、逆に人びとが情報を待って、迅速に避難を行わない)といった問題を引き起こす恐れがある(矢守, 2009)¹⁸⁾。よって、今後は、非専門家が、防災を、自分たちも専門家と共に担うことができる、あるいは共に担うべき活動(「共にする」こと)だと実感できる形式の防災教育が重要となる。また同時に、専門家(研究者)も同じ認識を共有する必要もある。

そこで、筆者らは、一つの試みとして、専門家(大学)が行う最先端の研究活動(具体的には、「満点計画」と呼ばれる稠密地震観測活動)と小学生を対象とした初歩的な防災教育という両極をあえて連携させる取り組み—「満点計画学習プログラム」—を開始した。このプログラムも上述の減災社会プロジェクトの一環である。より詳しくは、飯尾ら(2012)¹⁹⁾、岩堀ら(2011)²⁰⁾などを参照されたい。

「満点計画」とは、新たに開発された小型・安価で保守の容易な地震計(満点地震計)を数多く(万点)に設置して充実した観測網を作ることによって、理想的な、つまり、「満点」の地震観測を行おうという計画である。しかし、観測点数が膨大になる分、設置場所の確保や設置後のメンテナンスが課

題となった。そこで、例えば、小学校に設置場所を提供してもらい、メンテナンス作業を通じて小学生が観測活動に参加すること（「共にする」こと）を促せば、最先端の研究の推進と理想的な防災教育の両方が実現可能になると考えたのである。

B 地震計のある小学校

具体的には、まず、2009年、京都府京丹波町の下山小学校に、次いで2010年、鳥取県日野町の根雨小学校に、満点地震計が子供たちの手によって設置された（図4）。



図4 小学生によって設置される満点地震計
（京都府京丹波町立下山小学校）

その後、現在に至るまで、地震観測とそれに連動した防災教育が継続されている。両観測点では、子供たちが設置からメンテナンスまですべてに関わり、測定されたデータは他の観測点のデータと合わせて実際に研究に活用されている。その結果、既に、遠地震を用いたレシーバ・ファンクション解析を通してモホロビッチの不連続面（地球の地殻とマントルとの境界面で、ここを境に地震波の速度が変わる）の深度について詳細なマッピングが実現するなど、具体的な研究成果もあがっている（京都大学防災研究所，2011）²¹⁾。

具体的な教育プログラムを簡単に紹介する。基本となるプログラムは、

- ① 満点計画について学び、満点地震計を設置する導入部分
- ② その後の継続的なメンテナンス（データカードや電池の交換・更新など）と観測
- ③ 地震や防災をテーマとする出前授業

の3つからなる。①と②が可能となったのは、満点地震計が、小学生にでも取り扱い可能なほどに、小型化・簡素化されて

いたためでもある。

また、両校とも、おもに6年生の児童がこのプログラムに参加しており、年度の終わりに下の学年（次年度の6年生）に引き継ぐ形がとられている。言い換えれば、両校とも「地震計のある小学校」として継続的にこの活動に参加しているということである。この意味で、本プログラムは、一過性の防災教育ではなく、息長く、自然災害や防災に関心を持ち続けてもらうための工夫でもある。

C おもな学習カリキュラム

上述のうち③の出前授業は、大学側のスタッフが小学校に出かけて、原則として、子供たち自身が観測した地震データを活用しながら行う授業である。地震計のメンテナンスに合わせて、年4回程度実施している。おもなカリキュラムは、以下のとおりである。

(a) 「満点計画」と満点地震計の紹介

最初の授業では、満点地震計の働きについて学習する。地震計が実際に微小な振動をキャッチするようすを、オシロスコープを通した地震計の波形デモで実際に体験しながら授業を進める（図5）。あわせて、地震計のメンテナンス方法を現場で教示する。

(b) P波とS波—緊急地震速報

過去の地震災害事例から、地震動に見舞われた人のようすを映し出した映像と、満点地震計が実際にとらえた波形を見せながら、P波とS波について紹介する。あわせて、両波の伝播速度の違いを利用した仕組みが「緊急地震速報」であることやその利用法も解説する。

(c) 地震学者になって土地の揺れを調べてみよう

満点地震計のデータを使ったグループワークで、数日分のデータから、地震による揺れを見つけだす体験を行う。さらに、列車や自動車の振動による揺れ、強風や雨による揺れ、川の流れによる揺れなど、学校周辺で観測できる微小な振動データを利用して、地域学習も進める。

(d) 長周期の揺れと短周期の揺れ

長周期の揺れと短周期の揺れの違いを、東日本大震災を引き起こした地震動データ（両小学校で実際に観測された）と、近地の小規模地震のデータとを比較して学習する。また、教室に地震計を持ち込み、実際に地震計を揺らしながら、2つのタイプの揺れの違いを体感する。



図5 オシロスコープを使って満点地震計がとらえた振動を見る子供たち（鳥取県日野町立根雨小学校）

□ 「阿武山地震観測所」－防災サイエンス ミュージアムとの連携

この満点計画学習プログラムは、「満点計画」本体の基地である京都大学防災研究所阿武山地震観測所のサイエンスミュージアム化プロジェクトと連動して進めている（図6）。このプロジェクトは、80年余りの歴史をもつ同観測所を、その資産（約80年前から歴代の地震計群や長年にわたる観測記録）を生かして、地震学（研究活動や研究者）と一般の方々との距離を縮めるための場、つまり、地震学のミュージアムとしても活用しようとする計画である。



図6 京都大学阿武山地震観測所（大阪府高槻市）

幸い、プロジェクト開始後わずか1年余りで、一定の訓練を経た一般の方々が、この観測所に保管されている歴史的な地震計の数々や地震学のイロハを来館された方々にレクチャーする役割（サイエンス・コミュニケーター）を担えるところまで、プロジェクトは進展してきた。専門家と一般の

人が共に地震学の普及・啓発の役割を担っているわけである。また、満点計画学習プログラムに参加している2つの小学校のうち、下山小学校は実際に阿武山地震観測所を訪れての校外学習を既に2回実施済みで、根雨小学校の子供たちはインターネット通信を介した遠隔授業で、この観測所を訪問している。

■ 「満点計画学習プログラム」の意義

最後に、まとめを兼ねて、「満点計画学習プログラム」の意義を箇条書きにしておこう。

〈1〉「共にする」ことの実現

最先端の地震研究に子供たち自身が参加することで、専門家のみが担ってきた防災実践を、専門家と非専門家の両方が担う防災実践（「共にする」こと）へと変える。そのためには、「子供だからこの程度で…」は望ましくない。子供だからこそ、一端であるにしても、「本物」の地震研究に関与させる形での教育が必要である。

〈2〉継続性

子供たち自身が防災実践の一角を長期間担うことで、1回限りのイベント型の防災教育に終わらせない。年度代わりには次学年に引き継ぎ、学校にも継続的な関与をお願いする。

〈3〉地域や身のまわりへの関心を喚起

観測に参加することで、以前とは違った視点（この場合、身体には感じない地面の揺れ）から地域を“見る”目を養う

ことができる。地震観測のためのツールも、工夫次第では、当初の目的とは別に、子供が地域の自然や社会を観察する動機を与える役割を果たし得る。両校に設置した満点地震計は、例えば、東日本大震災を引き起こした地震や北朝鮮の地下核実験による振動のほか、大雨による振動や学校近隣の列車走行振動なども感知していた。

〈4〉「理科離れ／科学嫌い」対策への糸口

科学には失敗がつきものであり、筆者らも子供たちもメンテナンスをする際にいくつかの失敗をしている。しかし、そのような経験を通して、防災や災害への興味・関心と「科学する面白さ」を喚起し、理科離れ、科学嫌いの傾向を払拭する。

〈5〉地震学の「アウトリーチ」

アウトリーチは、非専門家のため（だけ）ではなく、専門分野（この場合、地震学）の安定的な継続にとっても重要である。地震学が何を見だし、何を克服できずにいるかにつ

いて、広く一般の人びとと理解を共有することは、地震学に対する不当な誤解や過度の期待を抑止しつつ、地震学の社会的プレゼンスを高める効果がある。この点で、満点計画と連動した学習プログラムは、地震研究そのものにもプラスに作用する可能性がある。

4 まとめ

第一に、「敵を知ること／己を知ること」のバランス、第二に、「教え／学ぶ」から「共にする」へ。この2点は、理科教育を真の防災教育に磨きあげ、かつ、防災教育に確かな理科教育を伴わせるために必要な、重要な柱である。本稿で紹介した事例だけでなく、本特集を構成する他の論考で取り扱われている教育事例にも、ここで強調したことが生かされていることを感じていただければ幸いである。❖

参考文献

- 1) 文部科学省：「東日本大震災を受けた防災教育・防災管理等に関する有識者会議」最終報告(2012年)
[http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/sports/012/toushin/_icsFiles/afieldfile/2012/07/31/1324017_01.pdf]
- 2) 岩田弘三：「理工系人材養成をめぐる問題－理工系離れ、科学技術離れ、理科離れ－」，中山茂・後藤邦夫・吉岡斉（編）『[通史] 日本の科学技術 5-II 国際期 1980～1995』，学陽書房(1999年)，pp.586-599
- 3) 日本地震学会：「地震学の今を問う（東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会報告）」(2012年)
[http://zisin.jah.jp/pdf/SSJ_final_report.pdf]
- 4) 矢守克也：「防災教育の現状と展望－阪神・淡路大震災から15年を経て」，自然災害科学，29(2011年)，pp.291-302
- 5) 日本地震学会・日本火山学会：「地震火山こどもサマースクール」ウェブサイト[<http://www.kodomoss.jp/>]
- 6) 土木学会編：『DVD 日本に住むための必須!! 防災知識（小学校低学年）』，土木学会(2005年)
- 7) 北海道立教育研究所附属理科教育センター(2009年)：「自然災害と防災」[http://exp.ricen.hokkaido-c.ed.jp/tobira/htdocs/?page_id=1226]
- 8) 防災教育チャレンジプラン実行委員会：「防災教育チャレンジプラン」ウェブサイト[<http://www.bosai-study.net/>]
- 9) 毎日新聞社：「ぼうさい甲子園」ウェブサイト [http://www.mainichi.co.jp/event/edu/bousai]
- 10) 日本損害保険協会：「ぼうさい探検隊」ウェブサイト[<http://www.sonpo.or.jp/protection/bousai/index.html>]
- 11) 矢守克也・諏訪清二・船木伸江著：『夢みる防災教育』，晃洋書房(2007年)
- 12) 諏訪清二著：『高校生，災害と向き合う－舞子高等学校環境防災科の10年－』岩波ジュニア新書，岩波書店(2011年)
- 13) 神戸学院大学学際教育機構防災・社会貢献ユニット編：『災害ボランティアを考える－東日本大震災ノート』，晃洋書房(2012年)
- 14) 近藤誠司・孫英英・宮本匠・谷澤亮也・鈴木進吾・矢守克也：「高知県興津地区における津波避難に関するアクション・リサーチ (2) ～避難訓練の充実化を目指した“動画カルテ”の開発と展望～」，災害情報学会第14回研究発表大会予稿集(2012年)，pp. 374-377
- 15) 孫英英・近藤誠司・谷澤亮也・矢守克也：「高知県興津地区における津波避難に関するアクション・リサーチ (1) ～災害意識と避難行動パターンに着目～」，災害情報学会第14回研究発表大会予稿集(2012年)，pp. 370-373
- 16) 孫英英・矢守克也・谷澤亮也・近藤誠司(印刷中)：「南海トラフの巨大地震・津波を想定した防災意識と避難行動に関する住民意識調査」，災害情報，11
- 17) 矢守克也：「動画カルテ」がつなぐ避難訓練～高知県興津地区でのとりくみから，ウォロ (Volo)，478(2012年)，pp.14-15
- 18) 矢守克也著：『防災人間科学』，東京大学出版会(2009年)
- 19) 飯尾能久・矢守克也・城下英行・岩堀卓弥：「東北地方太平洋沖地震と地震防災に関する最先端の研究」，物理教育，60-4(2012年)，pp.282-288
- 20) 岩堀卓弥・城下英行・矢守克也：「正統的周辺参加理論に基づく防災学習の実践－「満点計画」を通して－」，第30回日本自然災害学会学術講演会(2011年)
- 21) 京都大学防災研究所：『歪み集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト平成22年度成果報告書』(2011年)，pp.98-117

II これだけは知っておきたい —地震・津波災害を生き抜くために—



京都大学大学院地球環境学堂助教

奥村 与志弘 / おくむら よしひろ

1980年京都府に生まれる。2008年京都大学大学院情報学研究所博士後期課程修了後、阪神・淡路大震災記念人と防災未来センター主任研究員を経て、2012年より現職。博士(情報学)。専門は津波防災、巨大災害。おもに津波や津波被害の発生メカニズム、巨大災害時の最適な災害対応に関する研究を展開。東日本大震災では、宮城県庁に常駐し、政府現地災害対策本部、宮城県災害対策本部などに対する支援を実施。また、南海トラフ巨大地震の脅威に直面している地域に対しては、自治体の防災会議の委員としての活動や、子供たちと被災地に行くなどの防災教育など、防災・減災のための活動に力を入れる。

1 はじめに

日本は、これまでに何度も地震災害、津波災害を乗り越えてきた。近年では、学術面の進歩によって、将来の災害の長期的な予測ができるようになり(数時間後の発生確率〇%というような短期的な予測ではなく、30年以内の発生確率〇%といった予測)、地震や津波といった災害を実際に起きる前から想定し、それに備えることができるようになった。今や地震・津波災害とどう向き合うべきかという問題は、一部の防災専門家や経験した人々だけの問題ではなく、日本で生きていく限り誰もが向き合うべき一般的な問題となっている。したがって、地震・津波災害の基礎的な知識もまた、一部の特別な人々にとってではなく、全国民にとって不可欠のものであろう。とりわけ社会に出る前の子供たちにとっては、自分たちの将来や自分たちが生きる地域や国の将来の姿を思い描くために欠かせない知識である。筆者は、地震災害や津波災害がこれまでになく身近な問題となった現在の社会において、こうした社会を生き抜くために必要な、これらの災害の基礎的な知識について書き記したい。本稿では、まず具体論として、最近の地震・津波災害、並びに今後発生が懸念される地震・津波災害の特徴を述べ、その後一般論として、地震災害、津波災害の特徴を述べる。

2 災害事例

A 阪神・淡路大震災

2013年1月、神戸で開催された阪神・淡路大震災の行事の中で神戸の被災者から発せられた言葉は「あの地震から18年間生きてきたという事実、必ず乗り越えられるときがくるという事実を東北の被災者に知ってもらいたい」というものであった。会場にいた東北の被災者の存在がこうした言葉を引き出したのだろう。地震から18年後の被災地の姿は、まだ被災して間もない東北の人びとにとって未来の自分たちの姿を思い描く大きな手がかりとなり得る。一方、被災して間もない東北の存在は、19年目を迎えた阪神・淡路地域に、東北に希望を与えられる19年目にしなければという思いを抱かせるのではないだろうか。

さて、阪神・淡路大震災をもたらした直接的な原因は、言うまでもなく「平成7年(1995年)兵庫県南部地震」である。しかし、災害による被害は、自然の外力だけでは発生しない。その外力が作用した場所に人間社会の営みがあつてはじめて、被害が発生する可能性が生まれるのである。したがって、災害による被害は、“自然の外力”と“社会がもつ災害に対する強さや弱さといった要素”を変数とする関数として表現できる。後者は、社会の防災力や脆弱性と言われている。

災害による被害 = $f(\text{自然の外力}, \text{社会の防災力})$

このことから我々が理解すべきは、自然の外力の大きさは私たちの力で制御できないが、災害による被害は制御できる余地があるということである。つまり、社会の防災力を高めたり、脆弱性を小さくしたりすれば、同一の外力が作用しても被害を小さくできる。このことを、地震災害・津波災害と向き合ううえで最も基本的な知識として、はじめに述べておく。

巨大災害の存在の認知 戦後20年ほどの災害多発時代を経て、自然災害による被害は減少傾向にあった。そのような中で、もはや日本においては一度の災害で死者が千人を超えるような災害(このような災害を巨大災害と呼ぶ)は起きないだろうと考えられていた。しかし、6,434名の死者が出た阪神・淡路大震災の発生によって、私たちはそうした認識の誤りに気づいたのである。上記の自然災害に関する関係式を念頭におけば、1995年以前の約35年間に一度も死者千人を超えるような災害が起きていなかったのは、単に都市という災害に対して極めて脆弱な社会に、一定規模以上の自然の外力が作用していなかったというだけのことであり、決してそのような規模の災害を克服したわけではなかったのである。阪神・淡路大震災は、巨大災害の存在を認知する契機となった災害といえる。

戦後の自然災害による犠牲者数の推移から巨大災害による犠牲者数を除けば、災害による犠牲者数は単調減少しており、戦後の20年ほどは年間700名規模の犠牲を出していたのが、ここ20年ほどは年間100名規模にまで減少している。筆者は、中小規模の災害に対しての対策の効果の現れであると解釈している。一方で、巨大災害に目を向ければ、犠牲者数が減少傾向にないことは誰の目にも明らかである。阪神・淡路大震災によって、巨大災害対策をどうするのかという新たな災害対策の視点が必要であることを我々は学んだ。それが“減災”という考え方であった。すなわち、災害による被害をゼロにするための対策だけではなく、被害を少しでも小さくするための対策にも目を向けるべきであるという考え方である。阪神・淡路大震災は“減災”の原点であり、この災害以降、減災研究が本格化した。なお、明治から現在までの約145年の間に、風水害による巨大災害が17回、地震や津波による巨大災害が17回発生しており、両者の発生頻度は同数となっている。単純に平均化すれば5年に一度は風水害か地震・津波による巨大災害が発生していることになる。

火災がなければ地震災害による犠牲は減る? 阪神・淡路大震災は“減災の原点”であると述べたが、一方で、防災研究とその対策が本格化した“防災の原点”となった災害が何かご存じだろうか。その災害は旧東京市の約45%を焼失させ、約10万5千人もの犠牲者を出した関東大震災(1923年)である。この災害は当時の専門家の間でも火災の印象が強く、震災予防調査会の幹事であった今村明恒博士は「自分が今回ノ地震ニツキ特ニ印象ヲ深くシタノ家屋ノ耐火能力デアル」と述べている。そして、「火災がなければ震災による犠牲は減る」との教訓が引き出されてしまい、その後70年近くの間、地震対策として火災対策が重視されることとなった。しかし、阪神・淡路大震災によって、地震災害対策の考え方は大きく変わった。すなわち、地震災害対策として最も重視すべきは、建物の耐火能力ではなく耐震性だと考えられるようになったのである。こうした考え方は、東京大学の目黒公郎教授の調査研究によって示された。同教授は阪神・淡路大震災で犠牲になられた方々の亡くなられた原因を丁寧に調査し、全体の犠牲者のうちの約12%を占める焼死や全身火傷を死因とする犠牲者の大部分が建物の倒壊に根本的な原因があることを明らかにした。また、瓦礫の下敷きになった人々の75%が住民の手で助け出されたという話から、共助の重要性がよく言われるが、一方で、救助活動に住民の手が取られ、地震時の同時多発火災に最も重要な住民による初期消火活動が後回しにされてしまった側面もあると指摘されている。なお、同教授らによって、関東大震災の火災についてもその根本的な原因は建物倒壊にあるとの研究結果が示されている。詳しくは、一般向けにわかりやすく書かれている教授の著書¹⁾があるので、そちらを参照されたい。

B 東日本大震災

広域巨大災害というタイプの災害 東日本大震災は、2011年3月11日午後2時46分に発生した。当日、筆者は阪神・淡路大震災記念人と防災未来センターの研究者として、近い将来の発生が懸念されている東海、東南海・南海地震対策に関するシンポジウムを神戸で開催していた。このシンポジウムで最も重要な論点は、阪神・淡路大震災でも経験していない複数の府県で同時に千人を超える犠牲が出たときにどのような困難が待ち受けているのかということであった。4年間にわたる実務者との協働研究プロジェクトによって、巨大災害の

中でも我が国がほとんど経験していない“広域巨大災害”というタイプの災害の特殊性が少しずつ明らかになってきている。例えば、津波によって使えない避難所が多く発生するなどして、避難所を被災市町村内で確保できなくなり、内陸の市町村へ集団避難をしなければならなくなるのではないかとことや、物流業者とうまく連携しなければ、救援物資が末端の避難所まで十分に行き渡らなくなるのではないかなどといったことが示された。詳細は、同センターのホームページからシンポジウム資料²⁾が閲覧できるので、参照されたい。

そして、シンポジウムの終盤を迎えようとしていたときに東日本大震災が発生した。この災害は、まさにこのシンポジウムで議論していた東海、東南海・南海地震による災害と同じ“広域巨大災害”であった。広域ではない巨大災害である阪神・淡路大震災からは全く想像もできないような問題がいくつも発生した。例えば、上記のシンポジウムで議論されていたことが実際に起きたことをはじめ、他にもさまざまな問題が発生した。岩手、宮城、福島を中心とする被災地にガソリンなどの燃料が行き渡らず、県や国の職員が被災市町村や避難所へ行くことさえ困難となり、広域的な支援をなかなか本格化させることができなかった。また、遺体の火葬が間に合わず、応急的な措置として土葬が行われたり、東京都などの協力を得るなどの対応が取られた。

想定を超える災害への対応の困難さ 東日本大震災の特徴で特に重要なものとして、発生した津波がそれ以前に想定されていた規模の2倍から3倍に達していたことがあげられる。筆者らの最近の研究により、想定を超える津波からの避難の困難さが少しずつ明らかになってきた。この種の津波避難には、想定範囲内の規模の津波から避難をする場合とは全く異なる困難さがある。すなわち、浸水予測範囲の外側にいる場合、自分たちがいる所は安全であるということになるため、なかなかそこからさらに避難行動を取ることができない。筆者らが調査した南三陸町のある施設スタッフの話では、市街地で砂埃があがったり、電柱が倒されているようすからは行動を起こせなかったという。見慣れたスーパーの看板が横に動いているようすが見えたり、市街地を横断する鉄道の盛土を越える津波のようすを見て初めて「ここも危ないかもしれない」と感じたときを振り返られている。ちなみに、彼らの施設は従来から想定されていた津波の高さ約7mに対して

約12~13mの標高の高台に設置されており、津波が発生したときに地域の人々が避難すべき場所として指定されていた。当日も住民が避難をしてきている。結果として、津波が海岸に到達するまでに地震発生から約45分あったが、当然、その間に避難行動を取ることはできず、さらにその約2分後、津波が鉄道盛土を越え始めてやっとさらなる高台を目指そうという判断になった。しかし、この時点からこの施設に津波が到達するまでの時間はわずか2分40秒程度であった。こうした中での避難では、初めに危機感を抱いた人間の「もしかしたらここも危険かもしれない」という雰囲気はいかに早くその場にいる全体に波及させられるかが重要になる。ここでは、大きな声で叫びながら施設内を通って避難したことが効果的であった。また、当時、施設利用者やスタッフが取っていた施設内での余震対策のための態勢や外に出やすい大きな扉が多数設置されていた建物の構造も有効であった。結果として、この施設の利用者69名のうち28名が避難に成功している。想定を超える津波からの避難においては、初めの数十秒単位の時間の違いが避難の成否を大きく左右する。

平時においては、予測浸水範囲の外側エリアに津波防災対策を実施することは容易ではない。南三陸町のこの施設では、介護福祉の教育や世代間交流事業の一環として、この施設とさらに高所にある高校との間に階段が設置されていた。それが想定を超える津波からの避難に有効であった。この階段がなければほとんどの方々々が命を落としていた可能性がある。これから想定を超える津波に対して柔軟に対応できる社会を作っていかなければならない。そのためには、津波防災対策だけに頼ってはいられないと考えている。

C 将来の地震・津波災害

(南海トラフ巨大地震など)

ここまでは、実際にこれまでに発生した地震・津波災害の事例を紹介してきた。ここでは近い将来の発生が懸念されている地震・津波災害について一つだけ事例を紹介しておきたい。既にご存じの方も多いと思うが、南海トラフ沿いで発生する東海、東南海・南海地震である。2012年8月、東日本大震災を受けて、新たな想定が政府から発表された。それは従来の想定よりもずいぶん大きな規模となり、“南海トラフ巨大地震”と名づけられた。現状のままでは最悪30万人にも及ぶ死者が見込まれている。この規模の地震・津波が発生

する確率についてはよくわかっていない。しかし、毎年必ず冬がやってくるように、近い将来、必ず南海トラフ沿いで巨大地震が発生する。したがって、これからの社会を担う世代には、私も含めてこの災害の発生を織り込んだ人生設計が求められる。そして、少しでも被害が小さくなるように社会の脆弱性を小さくし、そして防災力を高める取り組みが必要とされている。なお、過去300年程度の記録を踏まえて比較的発生する可能性が高いと考えられる従来の想定であっても、避難者数は最大で500万人と見積もられている。これは約50万人であった東日本大震災の10倍、約30万人であった阪神・淡路大震災の17倍である。こうした数字を見れば、応急的な避難所生活をどのように乗り切れるのかという問題をとっても、これまでの対策の延長線上に解がないことは明らかである。例えば、いずれのコミュニティーも自立して乗り切れる体制を準備するといった“自立した防災”ともいべき方針を徹底したうえで広域支援体制を構築するといった、次元の異なる対策と向き合わざるを得ないのではないだろうか。

3 地震災害の基礎知識

ここでは地震災害について知っておいていただきたい基本的な事項を5つ紹介する。特に、発生メカニズムに関する部分は、理科教育の中で防災上の意味と合わせて指導していただければ、生きた知識として生徒に習得していただけるだろう。

① 地震はプレートの動きに伴う断層の破壊が原因

今、読者の皆さんはほとんどの方が北米プレートかユーラシアプレートの上に立たれている。これらの陸側のプレートは海側のプレートである太平洋プレートとフィリピン海プレートからそれぞれ圧縮される方向に大きな力を受けている。もう少し丁寧に言えば、海側にあるプレートは年間5~10cm程度のオーダーで陸側のプレートの下に沈み続けているが、同時に陸側のプレートの端を引きずり込む方向に引っ張っている。その結果、陸側のプレート内のひずみが成長し、しだいにプレート内の弱い部分にひび割れが入る。これがいわゆる“地殻内地震”であり、直下型地震ともいわれている。阪神・淡路大震災を引き起こした地震がこのタイプである。

一方で、海側のプレートと陸側のプレートの境界が大きくずり動く場合がある。これを“プレート境界地震”と呼び、

海底地盤が大きく変動するため、津波を伴うことが多い。東日本大震災を引き起こした地震がこのタイプである。プレート境界地震が発生する前後は、陸側のプレートが大きく変形しているため、直下型地震が発生しやすくなる。南海トラフ沿いの巨大地震の発生が迫っている西日本と、東日本大震災が発生したばかりの東日本は、いずれも当面日本海側を含めて直下型地震への警戒を強める必要がある。

② 地震の発生源は点ではなく面である

震源とは、地殻内地震であれプレート境界地震であれ、たまったひずみを解放するために破壊が始まった断層面上の点を指す。震源から始まった破壊は、地震波を出しながらしだいに周囲へ広がる。したがって、地震の発生源は点ではなく面である。たとえ震源が遠くても、断層面が読者の皆さんの近くまで延びてくれば、地震波の発生源は遠くないのである。例えば、南海トラフ沿いの巨大地震であれば、紀伊半島や四国の下まで断層面が延びてくる可能性がある。もし仮に震源が紀伊半島の沖合にあったとしても、地震の発生源は自分の真下にあるかもしれない。

③ 断層の破壊は複雑である

同じ規模の地震であっても、断層面内のどこに強い地震動を出す領域があるのか(近くにあるのか、離れた所にあるのか)、また断層の破壊はどのような方向に進んでいくのか(自分に向かってくる方向か、離れていく方向か)によって、揺れの大きさは変わってくる。残念ながら、現在のところ、これらの条件がどのようになるのかは起きてみなければわからない。したがって、ある一つの想定の結果を見て、それが唯一の可能性だと考えることは間違いである。断層の破壊は非常に複雑なのである。

④ 柔らかい地盤で地震波は増幅する

地震の発生源から広がる地震波は比較的硬い地盤内を伝わって地表面付近に到達する。地表面付近には柔らかい地盤(表層地盤)があり、地震波はそこで増幅される。増幅されやすさは地盤によってさまざまである。やや難しく聞こえるかもしれないが、簡単に言えば、揺れやすい地盤と揺れにくい地盤があるということである。先述した断層の破壊の複雑さから、どのような地震波が生成されるかがわからなくても、揺れやすい地盤の上で生活している場合には特に耐震対策や家具の固定を徹底するべきであろう。なお、この表層地盤の増

幅率は防災科学技術研究所が運営する「J-SHIS Map 地震ハザードステーション」³⁾から約 250m 四方の地図で確認できる。

V 建物によって揺れ方が違う

表層地盤で増幅された地震波が同じであっても、その上に建っている建物がどれだけ揺れるのかは建物の高さや構造などによって異なる。一般に、高層マンションや高層オフィスビルなどはゆっくりと揺れる周期の長い波に弱く、そのようなタイプの地震波が作用した場合に大きく揺れる。逆に、木造2階建てなど低層の建物は小刻みに揺れる周期の短い波に弱い。東日本大震災をもたらした東北地方太平洋沖地震はプレート境界地震であり、断層の長さは500kmにも及ぶ。このような大きな断層をもつ地震では、高層建築物を大きく振動させるやや長周期の地震波が生成されやすい。そして、この種の地震波はエネルギーを弱めることなく遠くにまで伝わる性質がある。大阪にあるワールドトレードセンタービル(55階建て、現在は大阪府咲洲庁舎)はこの長周期の地震波による被害が報告されている。

4 津波災害の基礎知識

ここでは津波災害について知っておいていただきたい基本的な事項を6つ紹介する。海の近くに生活圏がなくても、四方を海で囲まれた日本では、どのような機会に津波に遭遇するかわからない。理科教育などの機会を通じて誰もが津波の特徴を学んでおく必要がある。また、流れとしての津波の怖さは、ゲリラ豪雨等の風水害とも共通する部分がある。

i 津波は大きなエネルギーをもった

“流れ”である

“流れ”としての津波のイメージは、東日本大震災の津波の映像などからほとんどの方々に定着したのではないかと想像される。津波は長波に分類される波であり、水深に対して非常に長い波長をもっている。津波は、確かに山と谷をもった波の形をしているが、あまりにも波長が長いために目で見てこれを波だと認識できる人はいないであろう。例えば、京都から名古屋までの距離で数mの高さの山があったとして、それを山だと認識できる人がいるだろうか。しかし、こうした波も水深の浅い海域にまで伝わってくると、流れも高さも大きく増幅される。そこで初めて津波の姿を確認できるよう

になるのである。津波は海面から海底まですべての水が動く。海面付近の水しか動かない台風時には、海の生物たちは海底付近に避難することができる。しかし、津波の場合にはそれができず、海の生物や海底の土砂などが陸域に流されてくる。泥かきのボランティアをした学生たちから、床下の泥からたくさんの腐った魚が出てきて非常に臭かったという話を聞いたが、筆者もまた岩手県内の被災地でカメを目撃している。



図1 津波で打ち上げられたウミガメ
(筆者撮影：2011年5月10日、岩手県宮古市)

ii 被害が面的に広がる

東日本大震災前の被害データから、木造家屋は津波の深さが2mを超えると全壊・流出することがわかっている。1階部分の半分がつかれる程度の津波に襲われれば、2階へ逃げても助からないと考えなければならない。こうした規模を超える津波が来襲すれば、木造家屋は軒並み同様の被害となるため、被害は面的に生じる。地震災害による建物の被害が弱い建物を中心に離散的に発生するのは、大きく被害の様相が異なる。

iii 被災程度にコントラストが出る

建物の被害の程度は、津波の深さがおもな要因となって決まるため、被災地に被害程度のコントラストがはっきりと現れることも津波災害の特徴であろう。例えば、海岸付近から内陸に向かって標高が高くなっている場合、津波の浸水深は内陸に向かって小さくなる。したがって、この場合、海岸付近に木造家屋が全壊・流出するエリアができ、その内陸側に浸水被害のエリアが続く、そしてさらに内陸側に全く被害のないエリアが続く。海岸付近のエリアは学校などの避難所施設が使えないため、内陸にそのような施設を求めなければならないが、浸水被害エリアのそうした施設はそのエリアの人々によって使われているため、さらに内陸の無被害エリアにまで行かなければならない事態となる。無被害エリアは、

そうした人々によって学校が避難所として使われなければ、通常どおり学校教育が行えるため、避難者は学校再開のタイミングでさらに別の避難所へ移動しなければならなくなり、負担がいつそう大きくなる。

IV 流された方々が見つからない

地震災害は、建物が全壊しても、もともとそこにいた人、そこにあったものはその場所にとどまり続ける。一方で、津波災害は、建物が全壊・流出すれば、人であろうと、家財道具であろうと津波の流れに飲まれ流されてしまう。そのため、津波災害では、流された方々や流されたものが見つからないという、地震災害では問題にならないことが大きな問題となる。津波に飲み込まれた方が住まわれていた町から離れた所に漂流してしまった場合には、遺体が発見されても身元を特定することが困難になる。その遺体が安置されている場所に、家族などが容易にたどり着けなくなるからである。

行方不明者の捜索が行われている中では、瓦礫の撤去作業にも慎重さが求められる。また、家族が行方不明のままでは心に区切りをつけることができず、復興に向けて動きだすことが難しくなる。このように、流された方々が見つからないという問題は、応急・復旧対応、復興対応に大きな影響をもたらす。東日本大震災でも同様で、今なお懸命の捜索活動が続いている。

V 被害が広域になる

津波は、エネルギーを減衰させることなく比較的遠方にまで伝播する。そのため、津波災害は、津波の規模によって被害が広域となる可能性がある。1960年のチリ津波は、約24時間かけて日本にまで到達し142名の死者が出たほか、2004年のインド洋大津波でもスリランカやインド、タイ、インドネシアなどインド洋沿岸諸国に甚大な被害をもたらした。東日本大震災における津波もまたアメリカにまで達し、カリフォルニア州に1名の死者が出ている。日本国内では、岩手、宮城、福島を中心に5mを超える津波が来襲し、いずれも千人を超える死者・行方不明者が出た。

VI 海水が市街地に溜まったままになる

津波は、氾濫した海水が市街地から排水されずに滞留したままになる場合がある。東日本大震災では、滞留した海水の中に津波避難ビルなど鉄筋コンクリート構造物へ避難した人々が取り残され、孤立してしまうという事態が多数発生し

た。消防がヘリでつり上げ救助を行ったり、自衛隊がボートで救助活動を行ったりしたが、救助活動が追いつかず、海水が引くまで建物内にとどまらざるを得ないケースも少なくなかった。海岸堤防の被災と地殻変動に伴う地盤沈下が重なり、満潮のたびに市街地に海水が流入する地域もあった。海水が市街地に滞留した状況ではあらゆる復旧作業に着手ができないため、復旧・復興に向けた対応に遅れが生じる。なお、海水が市街地に溜まったままになるという被災形態は、1959年伊勢湾台風災害でも発生している。当時は、この問題に集中的に取り組むために、関係省庁、関係市町村並びに関係団体からなる連絡小委員会が政府の現地災害対策本部内に設置された。3つ設置された連絡小委員会の1つがこれであることから、この問題がいかに重視されていたかが窺える。

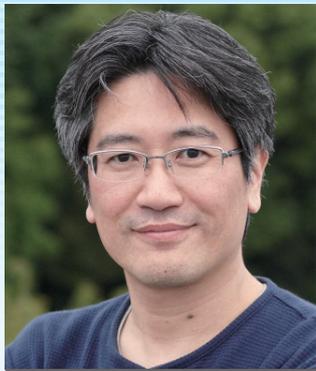
5 最後に

はじめにも述べたが、我が国においては今や地震災害、津波災害のことを考えずに生きていくことは不可能である。これからの時代は、理科教育などを通じてこれらの災害に関する知識を習得し、一人一人がこのような時代をうまく生き抜く力を養わなければならない。また、誰もがこれらの災害を乗り越えられるような社会を構築するため、それを実践できる人材をさまざまな分野に育てていかなければならない。もちろん、我々にとってのリスクは地震災害や津波災害だけではない。また、リスクを回避するために生きているわけでもない。したがって、適切なバランス感覚も求められるだろう。本稿ではそのような時代を生き抜くために最低限必要であると思われる基礎的な事項について述べた。これをきっかけにいろいろな文献を手にとっていただき、知識の絶対量を増やしていただけたら幸いである。また、教育の最前線で活躍されている読者の皆さまの教育を通じて、多くの学生にも役立ててもらえれば幸甚である。❖

参考文献

- 1) 目黒公朗著：『間違いだらけの地震対策』、旬報社(2007年)
- 2) 阪神・淡路大震災記念 人と防災未来センター：「スーパー広域災害」の応急期における課題の特徴と災害対応のあり方
[http://www.dri.ne.jp/tohokusp/]、2013年2月現在
- 3) 防災科学技術研究所：J-SHIS Map 地震ハザードステーション
[http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/]、2013年2月現在

第3回

数学は
役に立っている

撮影：宮島正信

横浜国立大学大学院教授

根上 生也 / ねがみ せいや

1957年東京都に生まれる。東京工業大学理工学研究科博士課程情報科学専攻(1983年中退)。理学博士。東京工業大学助手を経て、現在、横浜国立大学大学院環境情報研究院教授。「計算しない数学」を提唱する数学者。独特な数学の世界を展開する啓蒙的な論説や著作多数。「頭がしびれるテレビ」「和算に恋した少女」などを監修。

生徒たちの悲鳴

「こんな数学、何の役に立つのさ」

以前も書きましたが、たくさんの高校でこんな声が聞こえています。決して「何の役に立つのか?」という質問ではありません。「こんな数学をするのは嫌だ」という悲鳴です。

生徒たちがそんな気持ちになってしまうのも、数学の先生たちが、受験指導を急ぐあまりに、数学の意味を伝えずに、公式の暗記とその適用問題の反復練習を生徒に強いているからでしょう。実際、大学の新生入生たちに高校時代の数学の授業について事情聴取してみると、「どうしてそういう公式が成り立つのか」と数学の先生に尋ねると、「いいから、公式を覚えろ」と怒られるのだと吐露する学生がたくさんいます。

ある意味で、形式的に問題が解決できることは、数学のよさの一つです。例えば、小学生のころには、鶴亀算や旅人算のようなやり方をたくさん覚えなければいけなかったのに、中学生になって連立方程式を勉強すると、すべてが統合されて、機械的に答えが出せるようになる。そういう理解に至れば、数学も楽しくなります。

反対に、なぜわからない数を x と置くのか、なぜ2つの式の係数を揃えて引くのか、なぜ移項していいのか、などなど、具体的な意味を求めるあまり、形式的な数式の操作に気持ちがついていかない生徒もたくさんいます。そういう生徒たちは授業についていけず、だんだん数学が嫌いになっていくのでしょうか。落ちこぼれたら最後、数学の授業は忍耐の時間ではありません。そして、決して自分の人生の役には立たないと思うようになっていきます。

しかし、本当に数学は人生の役に立たないのでしょうか?

カーナビは数学のかたまり

いずれにせよ、数学が世の中で役に立っていることは、まぎれもない事実です。コンピュータが登場して以来、その様相はますます顕著になってきました。実際、さまざまな情報機器の内部は数学的な仕組みでいっぱいです。例えば、情報通信を行う際に、ノイズによって乱されたとしても、正しい情報が取り出せるような仕組みや、途中で悪意を持った第三者に傍受されても情報が読み取られないようにする仕組みがあります。前者は**符号理論**、後者を**暗号理論**と言います。

もちろん、専門的な勉強をしてからでないと、そういう仕掛けを厳密に理解することは難しいでしょう。そういう難解な数学なら、自分は理解しなくてもよいと思って当然です。専門家だけが理解していればよいのであって、私には関係ない。それはそのとおりです。

しかし、細かいことにはまでは踏み込まずに、仕掛けの原理を知ることになると、思わず「なるほど」とうなずいてしまうことも多いはず。例えば、『数学活用』の中でも紹介されているカーナビの仕組みを知ると、数学が役に立っていることを感じてもらえるでしょう。

まず、カーナビの基本的な機能の一つにGPSがあります。これはGlobal Positioning Systemの略で、日本語では「全

地球測位システム」というようです。つまり、あなたが地球上のどこにいるのかを特定する仕掛けです。簡単に言うと、地球のまわりの宇宙空間にある人工衛星から発信される電波を使って、人工衛星からあなたの車までの距離を測定し、それをもとに地球上の位置を特定するというものです。

では、なぜ人工衛星からの距離がわかると、自分の車の位置がわかるのでしょうか。その原理を理解するために、手始めに平面上の位置を特定することを考えてみましょう。まず、平面上に基地があり、そこから電波が発信されていて、それによってその基地から車までの距離がわかるとします。(どうやって距離がわかるのかは後述します。)

仮に、基地 A から車までの距離が 100km だとすると、その車は基地 A を中心とする半径が 100km の円周上のどこかにいることになります。しかし、その円周上のどこなのかまでは決定できません。

そこで、基地をもう 1 つ用意して、そこからの距離も考えます。仮に基地 B から車までの距離が 150km だったとすると、車は基地 B を中心とする半径 150km の円周上にいることになります。すでに、基地 A を中心とする半径 100km の円周上にいることもわかっているので、この 2 つの円周が交わる地点に車がいることになります。

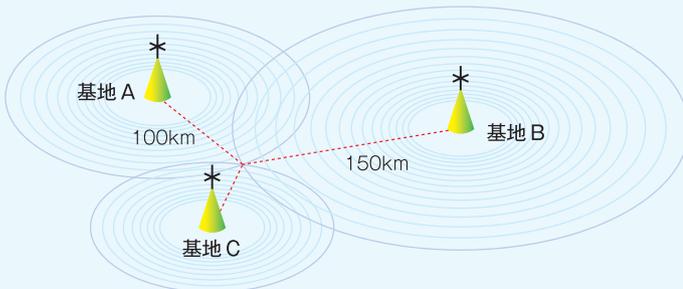


図1 カーナビの原理

しかし、一般的には、2つの円周の交点は2個あるので、このままではそのどちらの交点に車がいるのかは確定できません。そこで、さらにもう1つ基地を用意します。基地 C を中心とする円周も考えれば、車の位置は3つの円周が同時に交わる地点にすることになります。ただし、基地 A, B, C が直線上に並んでいると、3つの円周の交点は2点のままです。したがって、3つの基地は三角形を作るように配置されている必要があります。そのような配置を**一般の位置**といいます。

もし手元に3つの基地が載っている地図とコンパスがあるのなら、縮尺に合わせて3つの基地の点を中心に円周を描けば、その3つの円周が交わる点があなたの車の位置に対応しています。しかし、カーナビにはそういうことができないので、この解法を機械的な操作に置き換える必要があります。

ここまでは幾何の問題としてGPSの仕組みを考えましたが、それを代数の問題にしてみましょう。地図上の地点は緯度と経度とを使って指定できます。それは中学校で習った平面上の座標にほかなりません。そこで、あなたの車の座標を (x, y) 、基地 A の座標を (a, b) 、基地 A から車までの距離を r とすると、次の方程式が成り立ちます。

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$

もちろん、これは高校生のときに学ぶ**円の方程式**です。その円の中心の座標が (a, b) で、半径は r です。

上の式を展開すると、

$$x^2 - 2ax + a^2 + y^2 - 2by + b^2 = r^2$$

となります。基地 B と C に対しても同様の 2 次方程式が得られますが、どの方程式においても x^2 と y^2 の係数はともに 1 になっています。そのおかげで、2 つの方程式の差を作ると、 x^2 と y^2 が消去されて、 x と y を未知数とする 1 次方程式が得られることになります。

例えば、基地 A と B、基地 A と C の方程式の差を作れば、2 つの 1 次方程式が得られます。つまり、2 つの式からなる連立 1 次方程式が得られることになります。その連立方程式は中学校で習ったやり方で簡単に解くことができますね。もちろん、その解があなたの車のいる地点の座標です。

実際の GPS は、平面ではなく、3次元空間で問題を解くこととなりますが、基本的な原理は平面の場合と同じです。宇宙空間に浮かぶ人工衛星からの電波を頼りに距離を計算して、方程式を立て、それを解く。1つの人工衛星からの距離がわかれば、人工衛星を中心に、車までの距離を半径として描いた球面上にあなたの車がいることになります。

一般に2つの球面の交わりは円周なので、2つの人工衛星からの距離がわかっただけでは、車の位置の候補は無限にあります。さらに3つ目の球面を考えれば、交点は2点になります。そのどちらに車がいるのかを確定するために、さらに

もう1つ人工衛星が必要です。つまり、4つの人工衛星からの距離がわかれば、あなたの車の位置が確定できることになるのですが…。

速さと時間と距離の関係

ところで、人工衛星から車までの距離をどうやって計算すればよいのでしょうか。

おそらく多くの人が勘違いしていると思うのですが、人工衛星から車までの距離を計算しているのは、人工衛星ではなく、あなたの車に搭載されているカーナビのほうなのです。そもそも、地球上には何万台、何億台という車が存在するでしょう。その世話を数限られた人工衛星がしているとしたら、処理が追いつかないでしょう。

実は、個々の人工衛星は、人工衛星の位置と電波を発信した時刻のデータを送り続けているだけなのです。前者は3次元空間内の球面の中心の座標に相当します。となれば後者が「距離」に相当しているはずですが、実際に送信されているデータは「時刻」です。

ここで思い出してほしいのが、小学校の算数で学んだ速さと時間と距離の関係です。

$$\text{距離} = \text{速さ} \times \text{時間}$$

つまり、速さと時間がわかれば、距離がわかります。

電波は光と同じ電磁波なので、その速さは光速（およそ秒速30万km）です。ということは、人工衛星が電波を発信した時刻とそれをカーナビが受信した時刻の差を求めて、それに光速を掛ければ、人工衛星から車までの距離がわかることになります。実際、人工衛星が発信した電波にはその発信時刻のデータが載っているので、それとカーナビの時計とを比較すればよい。なるほど。

とはいえ、この考え方が成立するためには、人工衛星とカーナビの時計が完全に合っている必要があります。しかし、個人が所有している車のカーナビの時計が人工衛星に搭載されている原子時計とぴったり同じ時刻を告げているなんて、望み薄ですね。

そこで、どうするのかというと、カーナビの時計の遅れも未知数として方程式を立てるのです。時計に遅れがなければ、

4つの人工衛星の位置と車までの距離をもとに、4つの球面の方程式を考えれば十分でした。時計に遅れがある場合は、その時間差も未知数の1つとして、人工衛星から車までの距離を補正した方程式を考えればよいのです。しかし、未知数が1つ増えるので、方程式も1つ追加する必要があります。つまり、5つの人工衛星が利用できれば、宇宙空間のどこにいても車の位置を特定できます。実際のGPSでは、車が地球表面にいることを前提に、4つの人工衛星からの距離だけから車の位置を決めているそうです。

このGPSのほかにも数学が利用されているカーナビの機能はたくさんあります。例えば、目的地までの経路を探索するためには、**グラフ理論**という数学が利用されています。また、カーナビの画面に現れる立体的な街並みのCGを実現するためには、高校で学ぶベクトルや行列、三角関数などの数学が関係しています。カーナビに限らず、いろいろな情報機器の背後に潜む数学を探してみると面白いでしょう。

役に立つかではなく、役立てる

さて、皆さんは、ここまでを読んで心の中で何回「なるほど」とつぶやいたでしょうか。あえて細かいところまで解説しませんでした。論理や計算のすべてを理解しなくても、数学が役に立っていることを感じ取ることができたと思います。要するに、数学の問題を厳密に解くスキルを身につけていなくても、数学が楽しめたというわけです。

なるほど。数学は確かに世の中の役に立っているようだ。でも、やはり自分の人生には役に立っていない…。依然としてそう思っている人がいるかもしれませんね。しかし、心の中で何回も「なるほど」とつぶやき、数学が役立っていることを知り、それを楽しむことができた自分自身を自覚すべきです。あなたはすでにそういう数学が楽しめる世界で生きているのです。その世界では、あなたが教養として知っていた数学が役に立っています。

大切なことは、数学が自分に役に立つかどうかではなく、あなた自身が数学を役に立てるかどうかです。理工系の技術者になって直接的に役立てなくてもいい。あなたの教養の世界を広げるために、数学を役立ててください。❖

第3回

見えないもの



高知工科大学教授

八田 章光 / はった あきみつ

1963年愛知県に生まれる。京都大学工学部電子工学科卒業、同大学院修士課程電子工学専攻修了、博士後期課程単位取得退学。大阪大学工学部電気工学科助手、高知工科大学電子・光システム工学科助教授を経て、現在は同システム工学群教授、ナノテクノロジー研究所長、国際交流センター長。2012年より高知県教育委員会教育委員を務める。博士（工学）。専門は放電プラズマ工学、薄膜電子材料、エネルギー環境教育。



見えないもの

「見えないもの」はいろいろありますが、なんだか少し怖い感じがします。そもそも何も見えなければ、お化けを怖がる必要もないのですが、声はすれども姿は見えずとか、誰もいないのに物音が聞こえたりすると不安になります。超常現象、それは理科を活かして考えることで、ちゃんと理解できるはずの現象が、さまざまな要因で誤解、誤認されているものと考えます。

放射線は目に見えないし、低線量では何も感じません。見えない、感じない、ということが場合によっては必要以上に不安を煽る要因になるでしょう。正しく理解し、正しく恐れることが大切で、放射線教育は重要です。

理科では電気が苦手という先生も多いようですが、電気についてわかりやすく教えるのは難しいことです。正直なところ、筆者の専門分野である、電気電子工学の専門を目指す大学生でも、電気回路を理解するのは容易なことではありません。それは電流も電圧もまったく見えない現象、物理量であるからです。豆電球やLEDを光らせることで電気が見える、というのは誤った理解で、見えるのは電気によって発生した光です。本当にわかってもらいたいのは、実体の見えない電流や電圧という「もの」の本質です。

「見えない」ことは「何もない」ことではありません。そこに何かがあっても人間の視力では見えないものがたくさんあります。「見る」というのは光の空間的な分布を感じることです。「もの」が光に対して作用しないと見えません。また大きさがあまりに小さいと人間の視力では検知できません。

細菌やウイルスなど病原となるものの多くは非常に小さく、顕微鏡でなければ見ることはできません。顕微鏡を使ってさまざまな病原体を明らかにした野口英世博士の活躍は、広く世界に知られています。目に見えない病原体を精力的に顕微鏡観察で見いだしたことが医学の大きな進歩につながりました。そして今も私たちは目では見えない病原性大腸菌や、胃腸炎、インフルエンザを引き起こすウイルスとの戦いを続けています。

微粒子

大気汚染は国境や海を越えて深刻な問題となっていますが、窒素酸化物（NOx）や硫黄酸化物（SOx）等のガスに加えて、PM2.5と呼ばれる微粒子状物質の、健康への影響が懸念されています。花粉症の要因であるスギ花粉や肺炎の原因にもなるカビの孢子など、自然界にもさまざまな微粒子が存在していて健康を脅かすこともあります。人間の活動で大量に放出された微粒子は、自然界の微粒子とは性質や大きさが異なり、また大量であるが故に、人体にどのような影響を及ぼすのかまだわかっていないことが多く、心配されています。

空気中を漂う微粒子状物質を調べる場合、フィルターを通して大きなごみや塵を取り除き、微粒子だけを集めて分析します。フィルターの孔のサイズで捕集する微粒子のサイズを選別しています。直径が約2.5 μm以下の非常に小さな微粒子

子のみを捕集し、一定体積の空气中に微粒子がどれだけ浮遊しているかを微粒子の質量で示した値がPM2.5と呼ばれる値です (PMは、粒子状物質: Particulate Matterの略)。

このような微粒子を直接目で見ることができませんが、青空や山の緑が白っぽく霞んで見える、あるいは深刻な場合には太陽の光が遮られて昼でも薄暗くなることがあります。理科で「コロイドのチンダル(ティンダル)現象」を学習しましたが、これは光が微粒子で散乱される現象です。

小さな微粒子に光が当たると必ずしも直進せず、図1のようにさまざまな方向へ散乱されます(微粒子の大きさによって、レイリー散乱とミー散乱があります)。微粒子が浮遊している空气中や溶液中に光が入射すると、微粒子によって散乱された光が本来の光路とは異なる方向に散乱されることで、図1のように光路に沿って光の筋が見える、チンダル現象が観察されます。澄んだ空気では光はほとんど散乱されず、光路を見ることはできません。このように個々の微粒子を見ることはできませんが、チンダル現象によって微粒子の存在を知ることができます。

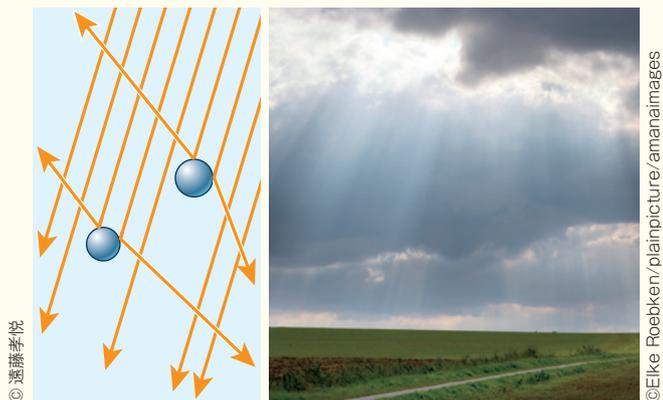


図1 散乱とチンダル現象

原子や分子

物質の構成要素である原子や分子はこれらの微粒子よりもさらに小さく、原子と原子の距離は0.1nm(ナノメートル)程度(1mmの1/1000が1 μ m, その1/1000が1nm)です。個々の原子や分子を目で見ることができず、また光学顕微鏡、レーザーを用いるレーザー顕微鏡でも0.1 μ m=100nmが限界で、原子や通常の分子は全く見えません。

ところがこのような小さな分子が確かにいる、ということ

を感じさせるのが「ブラウン運動」です。理科で勉強したとおり、コロイドの微粒子を顕微鏡でよく観察すると、ランダムにピクリ、ピクリと動いていることがわかります(図2)。目に見えない大きさの分子が、見えている微粒子に衝突したとき、その衝撃で微粒子が動くという説明を聞いて、改めてよく見ていると、なんだか見えないはずの分子が見えてきたような気になります。

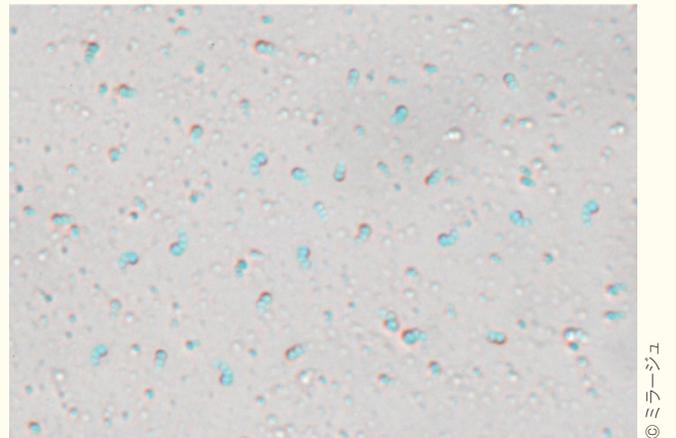


図2 ブラウン運動 牛乳1mLを水7mLに入れてよくかき混ぜ、顕微鏡(400倍)で観察すると、牛乳に含まれている脂肪球のブラウン運動が観察できる。

どこまで見えるのか

さて、人間の目はどこまで小さなものを見分けることができるのでしょうか。髪の毛の太さは個人で異なりますが、一般的には直径100 μ m=0.1mm程度です。きれいに掃除した床やテーブル、白い紙の上などに髪の毛がたった1本でも落ちてるととても気になります。これで髪の毛の太さである100 μ mくらいまではよく見えるということがわかりますが、その1/10、10 μ mとなるとかなり難しそうです。花粉症の要因であるスギ花粉は30~40 μ m、カビの胞子は数 μ m~数10 μ mで、一つ一つでは見るのが難しいですが、多数集まると存在がわかります。

普通の紙の厚さは髪の毛と同じ100 μ m程度ですが、紙の表面を虫眼鏡や顕微鏡で観察してみると、図3のように、細かい繊維が絡み合っていてできていることがわかります。しかしこのような繊維のようすを目で直接確かめることは難しいでしょう。人間の目の限界はどうして決まるのでしょうか。目の仕組みを思い出しながら考えてみましょう。

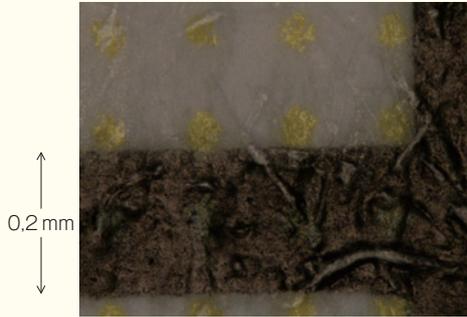


図3 紙の繊維 顕微鏡で観察した紙の表面のようす (筆者撮影)

眼は角膜と水晶体が凸レンズの役割を果たし、水晶体の厚みを調整して焦点距離を変化させ、網膜上に物体などの像を結像させます。網膜にある視細胞のうち、形状認識するための錐体は 1mm^2 あたり 10 万～30 万個なので、仮に縦横に整然と並んでいるとすれば、その隣り合う間隔は

$$\frac{1}{\sqrt{100000}} \doteq 0.003(\text{mm}), \quad \frac{1}{\sqrt{300000}} \doteq 0.002(\text{mm})$$

であり、およそ $2 \sim 3\mu\text{m}$ ということになります。網膜上でこれ以上小さな像を結んでも、隣り合った錐体はその違いを認識することができません。

図4のように凸レンズで結像するとき、もとの物体の大きさと像の大きさは、それぞれ凸レンズまでの距離に比例し、 $L_1:L_2=d_1:d_2$ となります。眼球の大きさは直径 25mm 程度なので、水晶体(凸レンズ)から網膜までの距離はほぼ 25mm で一定と考えられます。近くのものを見る時は水晶体をぐっと厚くして凸レンズの焦点距離を短くする必要がありますが、老眼になると水晶体の弾性が低下して難しくなります。今の筆者の場合、約 15cm までが限界で、これ以上近づいてピントを合わせることはできません。このとき対象物と網膜上の像の大きさの比は $150:25 = 6:1$ となり、網膜上で認識できる最小サイズが $3\mu\text{m}$ であれば、認識できる物体の最小サイズはその6倍、約 $20\mu\text{m}$ 程度ということになります。

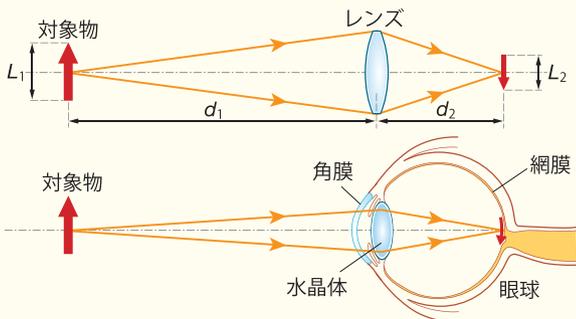


図4 凸レンズによる結像と眼の仕組み

拡大するほど狭くなる視野

当然のことながら、顕微鏡も望遠鏡も倍率を上げて拡大するほど視野が狭くなります。狭い領域だけしか見ていない、隣の空間は見ていない、また顕微鏡では焦点の部分しか見ていないということに常に注意しておくことが大切です。顕微鏡観察では、小さな試料片であってもそこに散りばめられたさまざまな情報をしっかりつかむには時間が必要です。低倍率で視野を広くして観察することも大切ですが、低倍率では見えないものもあり、見逃してしまうかもしれません。せっかくそこにある面白い発見を見逃さないためには、倍率を高くするほど時間をかけてじっくり観察することが必要です。

顕微鏡では被写界深度にも気をつけなければなりません。特に光学顕微鏡ではピント(焦点、フォーカス)が合っている領域は奥行方向に非常に薄い領域だけに限定され、その手前も奥もピントがずれてしまい何も見えません(図5)。理科の実験で顕微鏡観察を行う際、スライドガラスの傷やカバーガラスの上に付着したごみにピントを合わせてしまって、一生懸命観察したけれども、肝心の試料を見ていなかったという失敗があります。試料に厚みがある場合、視野の移動だけでなくピントを前後にずらして見ることも大切です。

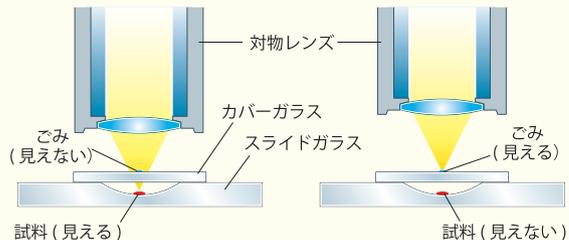


図5 光学顕微鏡での観察の深さ

そして大発見へ!

見えなかったものが見えるようになることは、科学技術に画期的な進歩をもたらします。しかし「見えない」のではなく、実は「見ていない」ことも多いのです。自分の視野が狭いのだということ、限定されているということを理解したうえで、一生懸命「見ようとする」努力や忍耐力、きっと何かがあると信念をもって観察することによって、いろいろな大発見のチャンスに遭遇することでしょう。

第3回

「トランス・サイエンス」



大阪大学全学教育推進機構准教授

中村 征樹 / なかむら まさき

1974年神奈川県に生まれる。1997年東京大学教養学部教養学科科学史・科学哲学学科を卒業、2005年東京大学大学院工学研究科先端学際工学専攻博士課程終了。博士(学術)。東京大学先端科学技術研究センター助手、文部科学省科学技術政策研究所研究官を経て、2007年より現職。専門は科学技術社会論・科学技術史。最近の編著に『ポスト3・11の科学と政治』(ナカニシヤ出版、2013年)。

震災が問いかけるもの

東日本大震災で私たちは、科学技術の抱えるリスクと限界を目の当たりにした。

なによりも福島第一原子力発電所の事故は極めて衝撃的であった。このような事故がよりによってこの日本で起こることはあり得ない、ほとんどの人びとがそう考えていたに違いない。私自身も、地震列島の日本に原子力発電所が立ち並ぶことの危険性について一抹の不安を覚えていたものの、正直なところ、まさか現実にはこれほどの事態が起きるとは思っていなかった。

科学技術が私たちに計り知れぬ利益をもたらすと同時に、さまざまな限界をもち、多くのリスクをもたらす得ること。科学技術のもつそのような両義性を、私たちはどう理解すればよいのだろうか？ さらにそのことを見据えたうえで、私たちは今後、科学技術とどのように付き合っていけばいいのだろうか？

そのような問題について考えるうえで、震災後、注目を集めている概念がある。今から40年ほど前にアルヴィン・ワインバーグという米国の核物理学者の提唱した「トランス・サイエンス」である。



©AIP Emilio Segre Visual Archives, Physics Today Collection

図1 アルヴィン・ワインバーグ (1915～2006年)

ワインバーグは、学位取得直後よりマンハッタン計画で原子爆弾の開発に携わり、後には、マンハッタン計画の一翼を担うべく設立されたオークリッジ国立研究所の所長も務めた人物である。原子力の研究に生涯を捧げながら、同時に、原子力に対する社会からの批判を正面から受け止めて活動を展開した。また、戦後の米国の科学研究体制に対して積極的に問題提起を行うなど、科学研究の在り方についても先鋭的な問題意識を抱いていた研究者だった。

今回は、ワインバーグが提唱した「トランス・サイエンス」について解説し、科学の限界をどう理解し、科学の限界を超えた問題とどのように付き合っていけばいいのかについて考えたい。

「トランス・サイエンス」

科学者は社会に対してどのように責任を負うべきなのだろうか。

そのことを考える際の一つのモデルは、科学は判断材料や手段を提供し、決定を下すのは政治であるというものだろう。

具体例としてワインバーグがあげるのは、超音速旅客機を開発すべきか否かという、今となってはやや時代を感じさせる問題である。超音速旅客機を利用することによって皮膚がんの可能性が高まるのか否か。その点について科学は何かしらの知見を与えてくれるだろう。政治は科学のもたらす知見に基づいて、超音速旅客機を開発を進めるのか否かを決定する。科学者の責任は、判断の前提となるような信頼できる科学的知見を提供することであり、その先は政治が考えるというモデルである。科学は客観的事実に関わり、価値の問題は政治や社会が扱う、そのように言い換えることができるかもしれない。

しかし、現実の科学と政治の関係はそれほど単純だろうか？ そうではないとワインバーグは指摘する。両者の境界はしばしば曖昧であり、より複雑である。政治的・社会的な問題だと思われていたものが実は科学的な分析を必要としたり、あるいは逆に科学的な事実の問題と見なされている問題が、科学的にはあまり意味がなく、むしろ政治的な検討を必要とすることがある。

科学か政治かといった線引きを前提とするのではなく、両者が重なり合う領域に注目し、問題をとらえていく必要があるのではないか。それがワインバーグの主張である。彼によれば、科学と社会の界面で発生している問題の多くが「事実に関する問題であり、科学の言葉で述べることができるものの、科学では答えることができない」。ワインバーグはそのような問題領域を「トランス・サイエンス」と名づける。

ここで「トランス・サイエンス」の事例として引き合いに出されるのが、原子炉の安全性に関わる問題である。

原子炉の安全性

原子炉の安全性は、科学的に答えることのできる問題である。運転中の原子炉の安全装置がすべて同時に故障した場合、何らかの対策がとられなければ深刻な事故に至ることは議論の余地がない。これは原子炉のメカニズムの問題であり、科学の問題であって、専門家の間に異論はない。

しかし、すべての安全装置が同時に故障することは現実問

題としてあり得るのだろうか。そのような事態に備えて、何らかの対策をとる必要があるのだろうか。あるいは、そのような可能性は無視しても構わないのだろうか。

そのような問題になると、専門家の間でも見解が分かれ、答えることが困難になる。もちろんそのような事故の起こる確率が極めて低いという点については、専門家の誰もが合意するだろう。しかし、安全装置が同時に故障する可能性が無視し得るか否かという点については、専門家の間でも評価が分かれる。ある面で科学的な問題でありながら、科学（だけ）では解決できない。このような問題は科学の領域を超えており、「トランス・サイエンス」と呼ばれるのである。

この事例は、福島第一原子力発電所の事故を彷彿させる。福島第一原子力発電所では、想定外の巨大地震により送電鉄塔が倒れ、外部からの電力供給がストップした。さらに、想定を大きく上回る津波が命綱の非常用電源を襲った。その結果、原子炉を冷却するための電源がすべて失われ、深刻な事故へと至ったのであった。福島第一原子力発電所の事故では「想定外」という言葉が繰り返されたが、発生頻度が極めて低い事象を「想定しなかった」こと、「想定から外した」ことが、深刻な事態を引き起こしたのであった。

ワインバーグの描き出す原子炉の安全性をめぐる議論では、科学的事実の領域と政治的・社会的判断の境界は明瞭ではない。原子炉の安全性の評価は、価値判断が関わるからといって政治の領域に丸投げできるわけではない。むしろその評価において、科学だけでは答えられないにもかかわらず、科学を無視できない。科学と政治の境界で考えることが求められるのである。

トランス・サイエンス的問題群

一面では科学の問題でありながら、科学の領域を超え、科学だけでは解決できない問題領域であるトランス・サイエンス。その実態は多様であるが、ここではワインバーグの指摘するトランス・サイエンス的問題群の中からいくつか特徴的な事例を紹介しよう。

① 低線量被ばくの影響

低線量被ばくの人体への影響は、福島第一原子力発電所事故後、我が国でも注目を集めている。地域によっては依然と

して一定の放射線量が記録されているところもあり、関心は高い。

さて、低線量被ばくによる発がん性の評価は、自然放射線による影響を取り除けないため、一定線量以下の被ばくについてリスクを評価することが原理的に困難である。動物に照射実験をする場合も、極めて低線量の被ばくリスクを評価しようとする、十分に信頼性のある結論を得るには数十億匹の実験動物が必要とされ、実験が実際上不可能となる。すなわち、低線量被ばくの生物学的影響をめぐっては、科学的に信頼し得る知見を得ることが現実問題として困難である。

② 想定外の事故が起こる可能性—原子炉の設計

発生頻度が極めて低いものの、いったん事故が発生すると深刻な影響を及ぼす問題もまた、それをどう評価するかをめぐって大きな課題がある。

原子炉の安全性の分析にあたっては、特定の箇所に不具合が発生したときに、それがどのようなかたちで波及していくか（あるいは影響の拡大が防げるか）を評価するため、イベントツリーが作成される。原子炉など事故発生時に深刻な影響をもたらされる場合には、何重もの安全装置・機能が用意されている。それらが作動した場合、作動しなかった場合、それぞれどのような帰結をもたらされるかがツリー状に描きだされる。それぞれの安全装置・機能について、どの程度の確率で不具合が生じるかを算定することで、深刻な事態に至る確率が計算される仕組みである。

先に見た原子炉の安全性のトランス・サイエンス的問題としては、ここで最終的に算出された安全性をどう評価するかがカギとなっていたわけだが、実はそこに至る段階にもいくつもの問題がある。ワインバーグによれば、そのようなかたちで算出される事故の発生確率は極めて低く、本当に信頼し得るものか疑わしい。発生し得るあらゆる問題が見落とされ、ないことが証明できない。さらに、事故の発生確率が極めて低いため（原子炉1基あたり1000万年に1度など）、その計算結果を実証的に確かめるすべもない。

低線量被ばくの事例と同様に、この事例もトランス・サイエンス的である。なぜなら、もし十分な時間と資金があれば、科学的な手法に厳密にのっとって信頼し得る知見を産出することは原理的には可能であるものの、現実問題としては不可能だからである。

③ 人間を対象とする研究

社会科学など、人間を対象とする研究では、対象の挙動が複雑すぎるために、自然科学の世界のように、厳密な知見を得ることが困難である。

物理学では物体に働く力と初期条件がわかっているならば、個々の物体の運動を正確に予測することができる。しかし人間の行動を対象とする場合、一個人の行動を正確に予測することは困難であり、できてもせいぜい平均的な個人の行動をある程度予測できるととどまる。多様性があり、意識をもつ個々の人の行動を物理学のように予測することは不可能である。

①、②が科学的に厳格な結論を得ることがコスト面・実務面で無理であるという問題だとすれば、③は研究対象のあまりの多様性に由来する問題である。

ワインバーグがトランス・サイエンスを提唱したのは1970年代初頭である。その時代状況もあり、ワインバーグはあまり触れていないが、バイオテクノロジーの発展に伴って、出生前診断をはじめとした倫理や価値が深く関わる問題も、今ではトランス・サイエンス的問題群の大きな一翼を担うようになっていく。

科学のもつ制約への理解

以上、「トランス・サイエンス」をめぐるワインバーグの議論の一端を紹介してきた。

これらの事例から見えてくるのは、トランス・サイエンス的問題に取り組んでいくためには、科学によって生み出される知見を盲目的に受け入れるのでは不十分であり、さらに進んで、そのような知見が産み出されるプロセスにどのような制約が潜んでいるのかを見極めることが重要という点である。そして、科学的知見がある種の不確実性を抱えていることを踏まえた、科学に対するより深い理解が、今後、ますます必要になってくるだろう。❖

埼玉県が発信する 新たな挑戦 「中学生思考力 チャレンジ大会」

埼玉県の取り組み

埼玉県（教育行政区分ではさいたま市を除く）では、県内すべての小・中学校の児童・生徒を対象として、「学力」、「規律ある態度」、「体力」の3分野について「教育に関する3つの達成目標」を掲げ、学力向上を目指したさまざまな取り組みを行っています。その一つに、埼玉県教育局市町村支援部義務教育指導課が主導する、「埼玉県中学生思考力チャレンジ大会」があります。筆者は、平成23年度に問題作成検討委員会副委員長として、また、平成24年度に問題検討委員として、本取り組みに携わる機会がありましたので、簡単に紹介いたします。

「中学生思考力チャレンジ大会」の概要

「埼玉県中学生思考力チャレンジ大会」は、平成23年度より始まりました。この大会は、埼玉県内の公立中学校に通う中学生を対象に、思考力と学ぶ意欲の向上を図ることを目的とした取り組みで、以下のような特色があります。

- ・「日常生活に関連した問題」や「教科の枠にとらわれない問題」等が出題されていること
- ・1～3年生すべてを対象としていること
- ・問題は、参加生徒全員が共通の問題に取り組むため、中学1年生の第1学期までに学習した内容で解決ができること

第2回 埼玉県中学生思考力チャレンジ大会 挑戦者大募集!!
全員に参加賞が出ます

中学生のみならず!! 「中学生思考力チャレンジ大会」(愛称「SHIKOチャレ」)に参加してみませんか。教科の枠(わく)にとらわれない問題、日常生活に関わる様々な問題を解く100分間のチャレンジタイム。難しい問題を解くこと、考えることを楽しんでみませんか。中学生のみさんのチャレンジを待っています。

図1 埼玉県中学生思考力チャレンジ大会のリーフレット



埼玉大学教育学部准教授

松崎 昭雄 / まつざき あきお

第1回大会は、二段階で実施されました。まず、2011年11月13日に地区大会が開催され、979名が参加しました。そして、12月3日に県大会が開催され、地区大会の成績上位者191名が参加しました。第2回大会は、2012年11月18日に県大会のみが開催され、1066名が参加しました。

出題された問題の例

例えば、第1回の県大会では、「日常生活に関連した問題」として、図2のような問題が出題されました。

5 チャレンジさんは友だちに手紙を書きました。そして、その手紙を下の図のように正確に三つに折って封筒に入れようと考えています。

今、チャレンジさんの手もには【手紙文の用紙】(問題用紙と一緒に配布された紙)1枚と等しい間隔(かんかく)の線が引いてある用紙(このページ)があります。

【手紙文の用紙】を正確に三つに折って封筒に入れるためには、どうすればよいでしょうか。配布されている【手紙文の用紙】を正確に三つに折ってみましょう。解答用紙には、どのようにして折ったのか、説明を書きましょう。必要であれば、図をかいてもかまいません。

※ただし、定規は使いません。

【手紙文の用紙】の縦の長さの3分の1の長さになるように2回折る。

三つに折る

図2 第1回県大会の問題

この問題では、生徒はどのような方法で三つ折りにするのかを解答用紙に記入するとともに、配布された【手紙文の用紙】を実際に三つ折りにします。解答例は、「手紙文の用紙を線の入ったページに斜めに置き、線を13本(線の間隔が12)利用して3等分できるようにする」となります。この問題のねらいは、「与えられた条件を把握・活用し、紙を3等分に折る方法を見つけだし、説明する力を見る」ことであり、平行線の性質を利用して解決することができます。この問題の正答率は17.8%で、県大会全問題のうち2番目に低い数値でした。参加生徒のアンケートには、「実際に紙を折りながら考えたところが面白かったから」、「ふだん、何気なく3等分しているが改めて考えるとよくわからなかったから」、

「いつもはきれに3等分できなかつたから」, 「今後使えそうだから」とあり, 45.0%の参加生徒が興味・関心を示していました。

第2回大会では, 古代エジプトの象形文字であるヒエログリフで表された友達の名前を, 【表】「日本語の五十音をヒエログリフで表したもの」を参考に, 読み取る問題が出題されました(図3)。

チャレンジさんの友達の名前



【表】「日本語の五十音をヒエログリフで表したもの」

	あ行	か行	さ行	た行	な行
あ段					
い段					
う段					
え段					
お段					

は行	ま行	や行	ら行	わ行	ん

図3 第2回大会の問題

解答は, 「さとうたかのり」となります。日本語の五十音表と対応させて友達の名前を読み取るためには, ヒエログリフの規則性や対応関係を確認することが必要となります。

他にも, 第1回の地区大会では, (当時) 建設中の東京スカ

イツリーを話題にして, 「景観写真と地形図を関連づけて位置関係を把握する力を見る」ことをねらいとした問題が出題されました。第1回の県大会では, 県東部にある首都圏外郭放水路を話題にして, 「自然災害を防ぐ県内設備に関する資料から必要な情報を読み取り, 条件に当てはめて説明する力を見る」ことをねらいとした問題も出題されました。また, 第1回大会は地区大会と県大会の二段階で実施されたため, 同様の話題が難易度を上げて出題されたものもありました。

今後の取り組みへの課題

「埼玉県中学生思考力チャレンジ大会」では, さまざまな思考力を試す問題が出題されています。例えば, OECDのPISA調査のリテラシーについての枠組み等を参照しながら, ねらいとする思考力を包括的にとらえていく枠組みを整備していくことが必要となるでしょう。第1回大会の問題作成検討委員会には, 県内の公立中学校の各教科の先生方, 学習塾の先生方, 県教育局指導主事の先生方, そして埼玉大学関係者と, さまざまな立場の方々が参画し議論を行いました。出題傾向を見ると, 数学科, 理科, 社会科に関する問題が比較的多く出題されています。各教科の学習内容を総合的に駆使して問題解決に取り組むような問題の作成を期待するとともに, 今後の取り組みを全面的にサポートしていきたいと思えます。

出題された「問題」, 「解答」, 「出題のねらい」等の情報は, 埼玉県HP内「埼玉県中学生思考力チャレンジ大会について」[<http://www.pref.saitama.lg.jp/page/shikouryoku.html>]に掲載されています。❖

参考文献

埼玉県教育委員会: 『平成23年度埼玉県中学生思考力チャレンジ大会実施報告書』平成24年3月

編集後記

東日本大震災から2年が過ぎましたが, 被災地の復興は福島第一原発の事故処理をはじめとして前途多難な状況です。今号と次号では, 「防災教育における理科教育の役割」をテーマに特集を組みます。理科教育においても, 防災教育の視点を加味することが必要ではないでしょうか。学校で取り組んでおられる防災教育の参考になれば幸いです。

(財)理数教育研究所 事務局

マイケル・ファラデーの電磁誘導リング

(英国王立科学研究所所蔵)

「電気文明」の時代といわれる現代。光源、熱源、動力源などさまざまな形で電気が私たちに便利で快適な生活を提供してくれています。写真はそうした生活の実現に重要な役割を果たした「電磁誘導リング」です。2本のコイル状の銅線が互いに、また鉄の輪とも絶縁状態で鉄の輪に取りつけられ、1本の銅線は電池とスイッチ、もう1本の銅線は検流計につながるようにになっています。1831年、職人気質のイギリス人科学者マイケル・ファラデー(1791~1867年)が「電気が磁気を発生させることができるなら、その逆もできるはず」(電磁誘導現象)と考え、試行錯誤の末に生み出した実験装置です。ここには「発電機」の原理が潜んでいます。ファラデーの「創造性」に思いを馳せながら、人間にとっての「電気文明」の意味を考えていただければ幸いです。

大阪教育大学名誉教授 鈴木 善次



© The Bridgeman Art Library/アフロ

Rimse (リムス)

No.4

編集・発行 (財)理数教育研究所

大阪オフィス

〒543-0052 大阪市天王寺区大道4丁目3番23号
TEL.06-6775-6538 / FAX.06-6775-6515

東京オフィス

〒113-0023 東京都文京区向丘2丁目3番10号
TEL.03-3814-5204 / FAX.03-3814-2156

E-mail : info@rimse.or.jp

http : //www.rimse.or.jp

※本冊子は、上記ホームページでもご覧いただけます。

印刷所：岩岡印刷株式会社

デザイン：株式会社 アートグローブ

本文イラスト：株式会社 アートグローブ

表紙写真：人型 コラージュ

©orion/amanaimages