日本の理数科教育をサポートする

Rimse

Research Institute for Mathematics and Science Education

No. 17
OCTBER
2016

特 集

‘学び’の変革 Ⅱ

ーアクティブ・ラーニングの視点に立った学びの推進 ー

Rimse （財）理数教育研究所

Contents

表紙裏 **巻頭言**
「知の地平線」を知ることの大切さ
自然科学研究機構 国立天文台 副台長・教授　渡部 潤一

特 集 ‘学び’の変革 Ⅱ
—アクティブ・ラーニングの視点に立った学びの推進—

2 Ⅰ 理科や算数・数学における「アクティブ・ラーニング」
文部科学省 初等中等教育局 主任視学官　清原 洋一

5 Ⅱ 理科におけるアクティブ・ラーニングの考え方
文部科学省 初等中等教育局 教育課程課 教科調査官　野内 頼一
文部科学省 初等中等教育局 教育課程課 教科調査官　藤枝 秀樹

10 Ⅲ 数学におけるアクティブ・ラーニングの考え方
文部科学省 初等中等教育局視学官　長尾 篤志

15 **連 載** 数学と音楽の織りなす世界　第6回
デザインの中に潜む数学
ジャズピアニスト・作曲家　中島 さち子

18 **連 載** サイエンス・フィクション？　第６回
雨垂れ石を穿つ
東北大学高度教養教育・学生支援機構 准教授　山内 保典

21 **連 載** ヒトの生物学を教えよう　第６回
アルコールの生物学
東京都立国立高等学校 主任教諭　大野 智久

24 **広 場** 地域教育で活躍する人々　第 16 回
「ふくやまサイエンスフェスティバル」の実施にいたる経過と課題
福山市立大学 教育学部 准教授　平松 和彦

裏表紙 **科学史の散歩道** 第 17 回
二人の理論物理学者の「予言」
～アインシュタインの「重力波」と湯川秀樹の「中間子」～
大阪教育大学 名誉教授　鈴木 善次

巻頭言

Kantougen

自然科学研究機構 国立天文台 副台長・教授
総合研究大学院大学 教授
渡部 潤一 ／ わたなべ じゅんいち

1960 年，福島県生まれ。東京大学大学院，東京大学東京天文台を経て，現在，自然科学研究機構国立天文台副台長・教授，総合研究大学院大学教授。理学博士。流星，彗星など太陽系天体の研究の傍ら，最新の天文学の成果を講演，執筆，メディア出演などを通してやさしく伝えるなど，幅広く活躍。国際天文学連合では，惑星定義委員として準惑星という新しいカテゴリーを誕生させ，冥王星をその座に据えた。おもな著書に『最新 惑星入門』（朝日新書），『面白いほど宇宙がわかる 15 の言の葉』（小学館 101 新書），『新しい太陽系』（新潮新書），『ガリレオがひらいた宇宙のとびら』（旬報社），『星空からはじまる天文学入門』（化学同人）など。

「知の地平線」を知ることの大切さ

若い人たちと話していて，なんとなく話が合わないときがある。インターネット時代に育った世代は，情報も氾濫していて，何でも答えがあって，既に世の中でわからないことはないと思い込んでいるようだ。確かにインターネットは便利で，答えらしきものにたどり着くことはできる。しかし，それが本当に答えかどうかはわからない。玉石混淆の情報の中で，情報の質を判断する修練も必要だが，どこにも答えがない問いがまだ世の中にはたくさんあることを認識していないらしい。とりわけ理科の世界でも「知の地平線」は広がり続けてはいるが，まだまだ果てしない，と言わざるを得ない。私の専門である太陽系においてさえ，最近になって海王星や冥王星のはるか彼方に第九惑星が存在している，と言われ始めている。観測できない領域，つまり地平線の向こう側が存在するのである。地平線の存在を知り，その向こう側を想像し，探ることがどれだけ楽しいか，想像してみてほしい。

実際の地平線の話から始めてみよう。私は福島県の会津という山に囲まれた盆地で育った。少年時代，盆地の周りを取り囲む山々を眺めては，その外側にある未踏の地を夢見ていた。あの山の端を越えたところはいったいどんな場所だろうか，と思いを馳せていたのである。まさにドイツの詩人カール・ブッセの「山のあなたの空遠く，『幸（さいわい）』住むと人のいふ」というフレーズそのものだった。自転車で走り回れるようになると，友人たちと峠を越え，冒険旅行に向かった。自分の行動範囲が広がること，いわば「自分の地平線」が広がることに，とてもわくわくした。中学では自転車ながらも県境を越えて出かけるようになり，その土地で自分たちとは異なるアクセントの方言に接したりすると，なんだか遠くに来た心持ちがして，いたく感激したものである。

地平線を越えて，それまで知らなかった世界を知る喜びは，知においても同じだった。少年時代，読書を通じて「知の地平線」を広げていくのも，全く同じわくわく感を持ったものだ。宇宙や昆虫の図鑑類などは，ぼろぼろになるまで眺めた。昭和 30 年代生まれの理科少年たちには，虫，星，アマチュア無線の３つくらいしか熱中できるものはなかった。

筆者の場合，星が中心になっていった。そして星への“憧れ”が，本格的に“天文学”へと進む強い動機に変わった大事件があった。1972年10月8日のジャコビニ流星群騒ぎである。その夜，流れ星が雨霰（あめあられ）のように降ると予測されていた。新聞でも大きく書き立てられ，筆者は小学校のグラウンドで，同級生とともに観測隊を組織し，大出現に備えた。当時の小学校の担任の先生は，深夜にもかかわらず，「親がついてくるなら学校の校庭で観測してもよい」と許可してくれた。実に寛容な時代だった。仲間とともに意気揚々と校庭に出かけ，流星の出現を待った。しかし，流れ星はたったひとつも出現しなかった。当時の天文学者の予想に反し，流星群の出現は無かったのだ。

この経験は，私に個人の知の地平線ではなく，「人類の知の地平線」を教えてくれた。それまで天文学は，すべて計算で予測ができると思っていた。日食や月食，あるいは日の出・日の入りなどの天文現象の予測は，秒単位で計算できる。それなのに，その流星群の場合，天文学者が大出現すると予測したのに当たらなかった。予測できなかったという事実の向こう側に，まだ解明されていない，謎に満ちた宇宙の未知の領域を感じたのだ。教科書に書いていないことが，まだ世の中にたくさんあることを実感した。そして，こう考えた。

「出現が予測されても，いまの知識では実際に出現しないことがある。とすれば，逆もありうる。つまり流星群の出現が予測もされていない夜に，大出現があるかもしれない」。

夜な夜な外に出て流れ星の観測を始めたのは，それからである。残念ながら大出現には遭遇できなかったが，ときどき現れる美しい流れ星が，私を慰めてくれ，勇気づけてくれた。それ以来，筆者は将来，天文学者になって，流星群の謎を解明してやろうと決めたのである。

「知の地平線」の存在を実感すること。それは個人的には学習することにほかならない。自分にとっての「知の地平線」を広げていく楽しさを知れば，学ぶことも楽しくなる。その地平線をさらに広げていくと，人類の誰も到達したことのない，真の意味での地平線，つまり「人類の知の地平線」に達する。そして，その距離はさほど遠くはない。科学技術立国を目指す日本の将来は，その地平線の向こうに広がる未知の世界の面白さを知り，それを広げていくことで最新の科学成果や技術を生み出していく将来世代にかかっている。 ❖

特集

‘学び’の変革 Ⅱ

―アクティブ・ラーニングの視点に立った学びの推進―

Ⅰ 理科や算数・数学における「アクティブ・ラーニング」

文部科学省 初等中等教育局 主任視学官
清原 洋一 ／ きよはら よういち

1957年生まれ。茨城県立高等学校教諭，茨城県教育研修センター指導主事を経て，2002年2月より国立教育政策研究所 教育課程調査官，文部科学省 初等中等教育局 教育課程課 教科調査官，2013年4月より文部科学省 初等中等教育局 視学官，2014年4月より現職。

1 ■ 諮問における「アクティブ・ラーニング」とその背景

平成26（2014）年11月に，文部科学大臣より中央教育審議会に，「初等中等教育における教育課程の在り方について」の諮問が出され，「アクティブ・ラーニング」が取り上げられた。

この諮問の背景として，「今の子供たちやこれから誕生する子供たちが，成人して社会で活躍する頃には，我が国は，厳しい挑戦の時代を迎えていると予想されること」，「生産年齢人口の減少，グローバル化の進展や絶え間ない技術革新等により，社会構造や雇用環境は大きく変化し，子供たちが就くことになる職業の在り方についても，現在とは様変わりすることになるだろうと指摘されていること」，「成熟社会を迎えた我が国が，個人と社会の豊かさを追求していくためには，一人一人の多様性を原動力とし，新たな価値を生み出していくことが必要となること」といったことが示されている。

そのうえで，将来を担う子供たちには，「こうした変化を乗り越え，伝統や文化に立脚し，高い志や意欲を持つ自立した人間として，他者と協働しながら価値の創造に挑み，未来を切り開いていく力を身に付けること」が求められており，そのために教育の在り方も時代の状況に応じ発展させるよう，「個々人の潜在的な力を最大限に引き出すことにより，一人一人が互いを認め合い，尊重し合いながら自己実現を図り，幸福な人生を送れるようにするとともに，より良い社会を築いていくことができるよう，初等中等教育における教育課程についても新たな在り方を構築していくこと」が必要であることが示されている。

このような背景を踏まえ，これからの時代に必要な力を子供たちに育むためには，「何を教えるか」のみならず「どのように学ぶか」という，学びの質や深まりを重視することが必要であり，課題の発見と解決に向けて主体的･協働的に学ぶ学習として「アクティブ・ラーニング」が取り上げられ，審議が続けられている。

2 ■ 現行学習指導要領と「アクティブ・ラーニング」

それでは，現行の学習指導要領と「アクティブ・ラーニング」は，どのような関係があるのであろうか。現行学習指導要領は，教育基本法の改正により明確になった教育の理念を踏まえ，子供たちの「生きる力」の育成をよりいっそう重視する観点から見直しが行われた。特に学力については，学校教育法第三十条第二項に示された「基礎的な知識及び技能」，「これらを活用して課題を解決するために必要な思考力，判断力，表現力その他の能力」および「主体的に学習に取り組む態度」の，いわゆる学力の三要素から構成される「確かな学力」をバランス良く育てることを目指し，教育目標や内容が見直されるとともに，学級やグループで話し合い発表し合うなどの言語活動や，各教科等における探究的な学習活動等を重視することとされた。

特に，理数教育においては，次代を担う科学技術系人材の育成がますます重要な課題になっている状況があるとともに，

科学技術の成果が社会全体の隅々にまで活用されるようになっている今日，国民一人一人の科学に関する基礎的素養の向上が喫緊の課題となっているといったことを踏まえ，「理数教育の充実」として大きく取り上げられた。思考力・判断力・表現力等の育成の観点からは，

・比較や分類，関連付けといった考えるための技法，帰納的な考え方や演繹的な考え方などを活用して説明する。
・仮説を立てて観察を行い，その結果を評価し，まとめ表現する。

といった学習の充実が求められた。

現行の学習指導要領は，「言語活動の充実」や「思考力・判断力・表現力等の育成」という面において，「アクティブ・ラーニング」とかかわりが深いと言えよう。そういう意味において，理科は，問題解決や科学的に探究する学習活動，算数・数学は，算数的活動・数学的活動の改善・充実が鍵となる。

理科における問題解決，科学的に探究する学習活動

現行小学校学習指導要領理科においては，問題解決の過程，また，中学校学習指導要領や高等学校学習指導要領の理科においては，科学的に探究する学習活動を重視している。つまり，児童・生徒が自然の事物・現象に興味・関心を持ち，そこから問題を見いだし，予想や仮説をもとに観察，実験などを主体的に行い，結果を整理し分析して解釈するなどして結論を導いていくといった学習過程を大切にしている。例えば，中学校学習指導要領の理科の第３の「指導計画の作成と内容の取扱い」には，「学校や生徒の実態に応じ，十分な観察や実験の時間，課題解決のために探究する時間などを設けるようにすること。その際，問題を見いだし観察，実験を計画する学習活動，観察，実験の結果を分析し解釈する学習活動，科学的な概念を使用して考えたり説明したりするなどの学習活動が充実するよう配慮すること」と示している。このような学習を重視し，言語活動の充実を図ることで，追究する意欲を高めたり，各自の考えをもとに討論する中で考えを深めたりなどの学習を重視している。

算数・数学における算数的活動・数学的活動

現行小学校学習指導要領算数においては，算数的活動，また，中学校及び高等学校の学習指導要領数学においては，数学的活動を重視している。算数的活動・数学的活動を，教科の目標や内容に示すだけでなく，例えば，中学校学習指導要領の数学の第３の「指導計画の作成と内容の取扱い」にも，数学的活動の指導に当たっての留意事項に，「数学的活動を楽しめるようにするとともに，数学を学習することの意義や数学の必要性などを実感する機会を設けること」，「自ら課題を見いだし，解決するための構想を立て，実践し，その結果を評価・改善する機会を設けること」，「数学的活動の過程を振り返り，レポートにまとめ発表することなどを通して，その成果を共有する機会を設けること」と示している。このように，数学的活動に主体的にかかわり，自ら課題を見いだし，解決するための構想を立て，実践し，その結果を評価・改善する。さらに，その過程を振り返り，考えを整理し発表することなどを通して，その成果を共有するなどの学習活動を重視している。

3 ■「主体的・対話的で深い学び」の実現に向けた授業改善

平成 28（2016）年 8 月 26 日，中央教育審議会教育課程部会において，次期学習指導要領等に向けた審議のまとめ（案）についての審議が行われた。この案の中で，「主体的・対話的で深い学び」，すなわち「アクティブ・ラーニング」の視点からの学びをいかに実現するかが示されている。

「主体的・対話的で深い学び」の実現

「主体的・対話的で深い学び」の実現とは，以下の①から③の視点に立った授業改善を行うことで，学校教育における質の高い学びを実現し，学習内容を深く理解し，資質・能力を身に付け，生涯にわたって能動的に学び続けるようにすることであるとしている。

① 学ぶことに興味や関心を持ち，自己のキャリア形成の方向性と関連付けながら，見通しを持って粘り強く取り組み，自己の学習活動を振り返って次につなげる「主体的な学び」が実現できているか。
② 子供同士の協働，教職員や地域の人との対話，先哲の考え方を手掛かりに考えること等を通じ，自己の考えを広げ深める「対話的な学び」が実現できているか。
③ 各教科等で習得した概念や考え方を活用した「見方・考え方」を働かせ，問いを見いだして解決したり，自

己の考えを形成し表したり，思いを基に構想，創造したりすることに向かう「深い学び」が実現できているか。

これら「主体的な学び」，「対話的な学び」，「深い学び」の三つの視点は，子供の学びの過程としては一体として実現されるものであり，それぞれ相互に影響し合うものでもある。また，学びの本質として重要な点を異なる側面から捉えたものであり，授業改善の視点としてはそれぞれ固有の視点であると言える。単元や題材のまとまりの中で，子供たちの学びがこれら三つの視点を満たすものになっているか，それぞれの視点の内容と相互のバランスに配慮しながら学びの状況を把握し改善していくことを目指している。

「主体的・対話的で深い学び」の実現に向けての留意事項

「主体的・対話的で深い学び」は，単元や題材のまとまりの中で実現されていくことが望ましい。例えば，主体的に学習を見通し振り返る場面をどこに設定するか，グループなどで対話する場面をどこに設定するか，学びの深まりを作り出すために，子供が考える場面と教員が教える場面をどのように組み立てるか，といった視点で指導計画を見直し実現されていくことが大切である。

「主体的・対話的で深い学び」の具体的な在り方は，発達の段階や子供の学習課題等に応じてさまざまである。高度な課題の解決だけを目指したり，そのための討論や対話といった学習活動を行ったりすることのみが「主体的・対話的で深い学び」ではなく，子供たちの実際の状況を踏まえながら，資質・能力を育成するために多様な学習活動を組み合わせて授業を組み立てていくことが大切である。

また，今回の改訂の審議では，「カリキュラム・マネジメント」は，学校の組織力を高める観点から重要な位置付けとしている。今回提起された「アクティブ・ラーニング」と「カリキュラム・マネジメント」は，教育課程を軸にしながら，授業，学校の組織や経営の改善などを行うためのものであり，両者は一体として捉えてこそ学校全体の機能を強化することができる。各教科の中でも，理科と算数・数学は緊密な関係にあり，「カリキュラム・マネジメント」の視点から2つの教科の関係性を踏まえ指導計画を見直し，改善・充実していくことも大切であると考えられる。

4 ■ 高等学校における数学・理科にわたる探究的科目

数理横断的なテーマに徹底的に向き合い考え抜く力を育成するため，数学と理科の知識や技能を総合的に活用して主体的な探究活動を行う新たな選択科目の設置が検討された。この新科目の基本原理については，アイディアの創発，挑戦性，総合性や融合性等の視点を重視しつつ，以下のとおり整理している。

①さまざまな事象に対して知的好奇心を持つとともに，教科・科目の枠にとらわれない多角的，複合的な視点で事象を捉え，
②「数学的な見方・考え方」や「理科の見方・考え方」を豊かな発想で活用したり，組み合わせたりしながら，
③探究的な学習を行うことを通じて，
④新たな価値の創造に向けて粘り強く挑戦する力の基礎を培う。

この新科目は，生徒が知的好奇心を持ってさまざまな視点から自然事象や社会事象を観察し，その中で得たさまざまな気付きや疑問から課題を設定して探究していくのであり，「主体的な学び」をより確かなものにしていく。粘り強く追究する中で，生徒同士，教師と生徒，さらには専門家との交流等を通して，「対話的な学び」も生じ，より「深い学び」となっていくことが期待される。まさに諮問に示された「課題の発見と解決に向けて主体的・協働的に学ぶ学習」の集大成とも言えよう。この新科目を教育課程の中に適切に位置付けていくためには，理数系の教師のみならず学校全体で意識を共有し積み上げていくことが大切であろう。

5 ■ 今後への展望

今後も，理科における問題解決，科学的に探究する学習活動，算数・数学における算数的活動・数学的活動を重視した学習指導を展開していくとともに，「主体的・対話的で深い学び」が実現するようさらに改善・充実していくことが求められている。そして，高等学校においては，数学・理科にわたる探究的科目の新設が提案されており，普段の授業改善に加え，新たな探究的科目についての検討を進めていくことも大切である。❖

Ⅱ 理科におけるアクティブ・ラーニングの考え方

文部科学省 初等中等教育局 教育課程課
教科調査官／国立教育政策研究所 教育課程研究センター 教育課程調査官・学力調査官
野内 頼一 ／ のうち よりかず
茨城県公立高等学校教諭，茨城県教育委員会指導主事を経て現職。

文部科学省 初等中等教育局 教育課程課
教科調査官／国立教育政策研究所 教育課程研究センター 教育課程調査官・学力調査官
藤枝 秀樹 ／ ふじえだ ひでき
香川県公立高等学校教諭，香川県教育センター指導主事等を経て現職。

1 ■ はじめに

平成 27（2015）年 8 月 26 日に中央教育審議会企画特別部会において，次期学習指導要領改訂の方向性を示す「論点整理」が出された。「論点整理」では，「社会に開かれた教育課程」を実現するという理念のもと，学習指導要領に基づく指導を通じて子供たちが何を身に付けるのかを明確に示していく必要があるとしている。

この中で，教科「理科」の検討に当たっては，以下のような方向性に基づき議論が進められたところである。

- 理科の勉強が楽しいと答える中学生及び高校生の割合が国際的に見ても低い傾向になるなど，学習する楽しさや学習する意義の実感等については，更なる充実が求められるところであり，理科好きの子供たちの裾野を拡大していけるよう，小・中・高等学校教育全体を通じて改善していくことが一層求められる。
- 小学校低学年における学習を通じて身に付けた資質・能力の上に，小・中・高等学校教育を通じて育成すべき資質・能力を，三つの柱に沿って明確化し，各学校段階を通じて，実社会との関わりを意識した探究的な活動の充実等を図っていくことが求められる。
- 高等学校教育においては，生徒の興味や進路に応じて，数理横断的なテーマに徹底的に向き合い考え抜く力を育成するため，数学と理科の知識や技能を総合的に活用して主体的な探究活動を行う新たな選択科目の設置を検討することが求められる。

上記の「論点整理」における理科に関する記述を踏まえ，理科ワーキンググループ（以下「理科 WG」）が設けられ，合計 8 回にわたる議論をいただいた。そして現在，その議論を「理科 WG におけるとりまとめ（案）」として，まとめているところである。

本稿では，現時点の検討状況を踏まえ，理科を通じて育成を目指す資質・能力と理科におけるアクティブ・ラーニングの関係を中心に述べていきたい。

2 ■ 理科の見方・考え方

理科において身に付ける資質・能力の育成のために中核的な役割を果たすのが，理科の本質に根ざした「見方･考え方」である。総則・評価特別部会においては，「見方・考え方」について，「様々な事象を捉える各教科等ならではの視点」と「各教科等ならではの思考の枠組み」であるとされたところである。

理科においては，従来，「科学的な見方や考え方」を育成することを重要な目標として位置付け，資質・能力を包括するものとして示してきたところであるが，今回の改訂では，資質・能力をより具体的なものとして示し，「見方・考え方」は資質・能力を育成する「視点と思考の枠組み」として全教科等を通して整理されたことを踏まえ，理科の「見方・考え方」を改めて検討することが必要である。この見方（様々な事象等を捉える各教科等ならではの視点）については，理科

における視点として整理することができる。また，理科の学習における考え方（思考の枠組み）については，探究の過程を通じた学習活動の中で，比較したり，関係付けたりするなどの科学的に探究する方法を用いて，事象の中に何らかの関連性や規則性，因果関係等が見いだせるかなどについて考えることであると思われる（図１）。この「考え方」は思考の枠組みであり，資質・能力としての思考力や態度とは異なることに留意が必要である。なお，図２は，従来の「科学的な見方や考え方」（左上）と，現在議論中の「理科の見方・考え方」（右下）についてのイメージを比較したものである。

自然の事物・現象を，質的・量的な関係や時間的・空間的な関係などの科学的な視点で捉え，比較したり，関係付けたりするなどの科学的に探究する方法を用いて考えること

高等学校 理科	自然の事物・現象を，質的・量的な関係や時間的・空間的な関係などの科学的な視点で捉え，比較したり，関係付けたりするなどの科学的に探究する方法を用いて考えること
中学校 理科	自然の事物・現象を，質的・量的な関係や時間的・空間的な関係などの科学的な視点で捉え，比較したり，関係付けたりするなどの科学的に探究する方法を用いて考えること
小学校 理科	身近な自然の事物・現象を，質的・量的な関係や時間的・空間的な関係などの科学的な視点で捉え，比較したり，関係付けたりするなどの問題解決の方法を用いて考えること

図１　理科の見方・考え方（案）

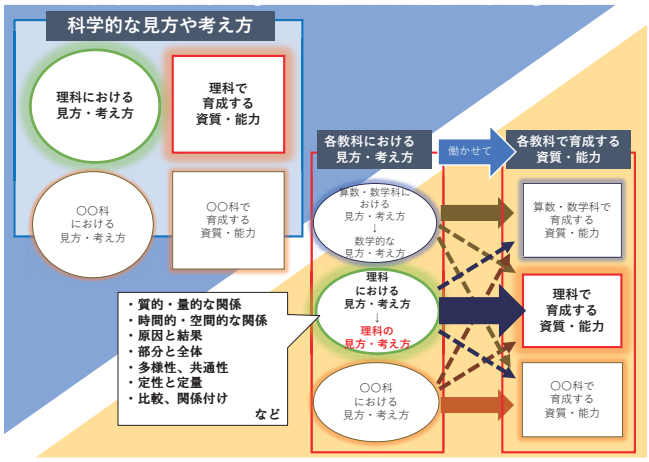


図２　「科学的な見方や考え方」と「理科の見方・考え方」

理科の学習においては，この理科の「見方・考え方」を働かせながら，知識・技能を習得したり，思考・判断・表現したりしていくものであると同時に，学習を通じて，理科の「見方・考え方」がさらに成長していくと考えられる。なお，「見方・考え方」は，まず「見方」があって，次に「考え方」があるといった順序性のあるものではない。

3 ■ 小・中・高を通じて育成すべき資質・能力の整理と，理科の目標の在り方

「論点整理」では，小学校，中学校，高等学校それぞれの学校段階において，各教科等でどのような資質・能力を身に付けさせるのかを明確にしていくことが必要であるとされた。

これを受けて，理科 WG においては，学校段階ごとに育成すべき資質・能力について，図３のとおり整理した。以下の枠囲みは中学校の事例であるが，◎は総括的な目標を示し，おもな資質・能力を①～③のように整理している。

【中学校】

◎　理科の見方・考え方を働かせて，問題を見いだし，見通しをもって課題や仮説を設定し，観察・実験などを行い，根拠に基づく結論を導き出す過程を通して，自然の事物・現象を科学的に探究するために必要な資質・能力を次のとおり育成することを目指す。

①　自然の事物・現象に対する概念や原理・法則の基本的な理解と科学的探究についての基本的な理解や観察・実験等の基本的な技能を養う。

②　見通しをもって観察・実験などを行い，科学的に探究したり，科学的な根拠を基に表現したりする力を養う。

③　自然を敬い，自然の事物・現象に進んでかかわり，科学することの面白さや有用性に気付くとともに，科学的根拠に基づき判断する態度を養う。

また，これらの資質・能力について，「知識・技能」，「思考力・判断力・表現力等」，「学びに向かう力・人間性等」の三つの柱に沿った整理を行った（図４）。資質・能力の第１の柱である「知識・技能」では，自然の事物・現象に対する概念や原理・法則の理解，科学的探究や問題解決に必要な観察・実験等の技能などが求められる。また，第２の柱である「思考力・判断力・表現力等」では，科学的な探究能力や問題解決能力などが求められる。さらに，第３の柱の「学びに向かう力・人間性等」では，主体的に探究しようとしたり，問題解決しようとしたりする態度などが求められる。

【高等学校】

≪発展：explore science≫（Especially Science for Interested studen世界をリードする人材として）
○ 科学的課題に徹底的に向き合い，考え抜いて行動する態度を養う。科学的な探究能力を活用して，専門的な知識と技能の深化・統合化を図るとともに，自発的・創造的な力を養う。
● 科学的な探究能力の育成を主体的に図ることができる「課題研究」を充実させる。　（理数科，理数探究（仮称））

≪応用：advanced science≫（Science for Interestedstudents科学技術立国としての日本を支える人材として）
○ 自然の事物・現象について，科学的に探究する能力と態度を養うとともに，論理的な思考力や創造性の基礎を養う。
● 「観察・実験」や「探究活動」を一層充実させて，科学的な探究能力の育成を図る。また，日常生活や他教科（数学，情報，保健体育，地理など）との関連を図る。

≪基礎：basic science≫（Scienceor All students善良な市民として）
◎ 理科の見方・考え方を働かせて，見通しをもって課題や仮説を設定し，観察・実験などを行い，根拠に基づく結論を導き出す過程を通して，事象を科学的に探究するために必要な資質・能力を次のとおり育成することを目指す。
○ ①自然の事物・現象に対する概念や原理・法則の理解と科学的探究についての理解や，探究のために必要な観察・実験等の基本的な技能を養う。
②見通しをもって観察・実験などを行い，科学的に探究したり，科学的な根拠を基に表現したりする力を養う。
③自然に対する畏敬の念を持ち，科学の必要性や有用性を認識するとともに，科学的根拠に基づき，多面的・総合的に判断する態度を養う。
● 「観察・実験」や「探究活動」を充実させることにより，科学的な探究の過程を通じて，中学校で身に付けた資質・能力をさらに高める。観察・実験が扱えない場合も，論理的に検討を行うなど，探究の過程を経ることが重要である。また，日常生活や他教科（数学，情報，保健体育，地理など）との関連を図る。

【中学校】
◎ 理科の見方・考え方を働かせて，問題を見いだし，見通しをもって課題や仮説を設定し，観察・実験などを行い，根拠に基づく結論を導き出す過程を通して，自然の事物・現象を科学的に探究するために必要な資質・能力を次のとおり育成することを目指す。
○ ①自然の事物・現象に対する概念や原理・法則の基本的な理解と科学的探究についての基本的な理解や観察・実験等の基本的な技能を養う。
②見通しをもって観察・実験などを行い，科学的に探究したり，科学的な根拠を基に表現したりする力を養う。
③自然を敬い，自然の事物・現象に進んでかかわり，科学することの面白さや有用性に気付くとともに，科学的根拠に基づき判断する態度を養う。
● 小学校で身に付けた，問題解決の能力をさらに高め，自然事象の把握，課題の設定，予想・仮説の設定，検証計画の立案，観察・実験の実施，結果の処理，考察・推論，表現等の学習活動を充実する。また，日常生活や他教科との関連を図る。例えば，１年：自然の事物・現象に進んでかかわり，その中から問題を見いだす。２年：解決方法を立案して実行し，結果の妥当性を検討する。３年：探究の過程を振り返り，その妥当性を検討する。

【小学校】
◎ 理科の見方・考え方を働かせて，自然にかかわり，問題を見いだし，見通しをもって観察・実験などを行い，より妥当な考えを導き出す過程を通して，自然の事物・現象についての問題を科学的に解決するために必要な資質・能力を次のとおり育成することを目指す。
○ ①自然の事物・現象に対する基本的な概念や性質・規則性の理解を図り，観察・実験等の基本的な技能を養う。
②見通しをもって観察・実験などを行い，問題を解決する力を養う。
③自然を大切にし，学んだことを日常生活などに生かそうとするとともに，根拠に基づき判断する態度を養う。
● 観察・実験の結果を整理し考察し表現する学習活動を充実する。また，日常生活や他教科との関連を図る。
● 問題解決の能力，例えば，３年：差異点や共通点に気付き問題を見いだす力，４年：既習事項や生活経験を基に根拠のある予想や仮説を発想する力，５年：質的変化や量的変化，時間的変化に着目して解決の方法を発想する力，６年：要因や規則性，関係を多面的に分析して考察し，より妥当な考えをつくりだす力を育成する学習活動を充実する。
● 目的を設定し，計測して制御するという考え方の学習活動を充実する。

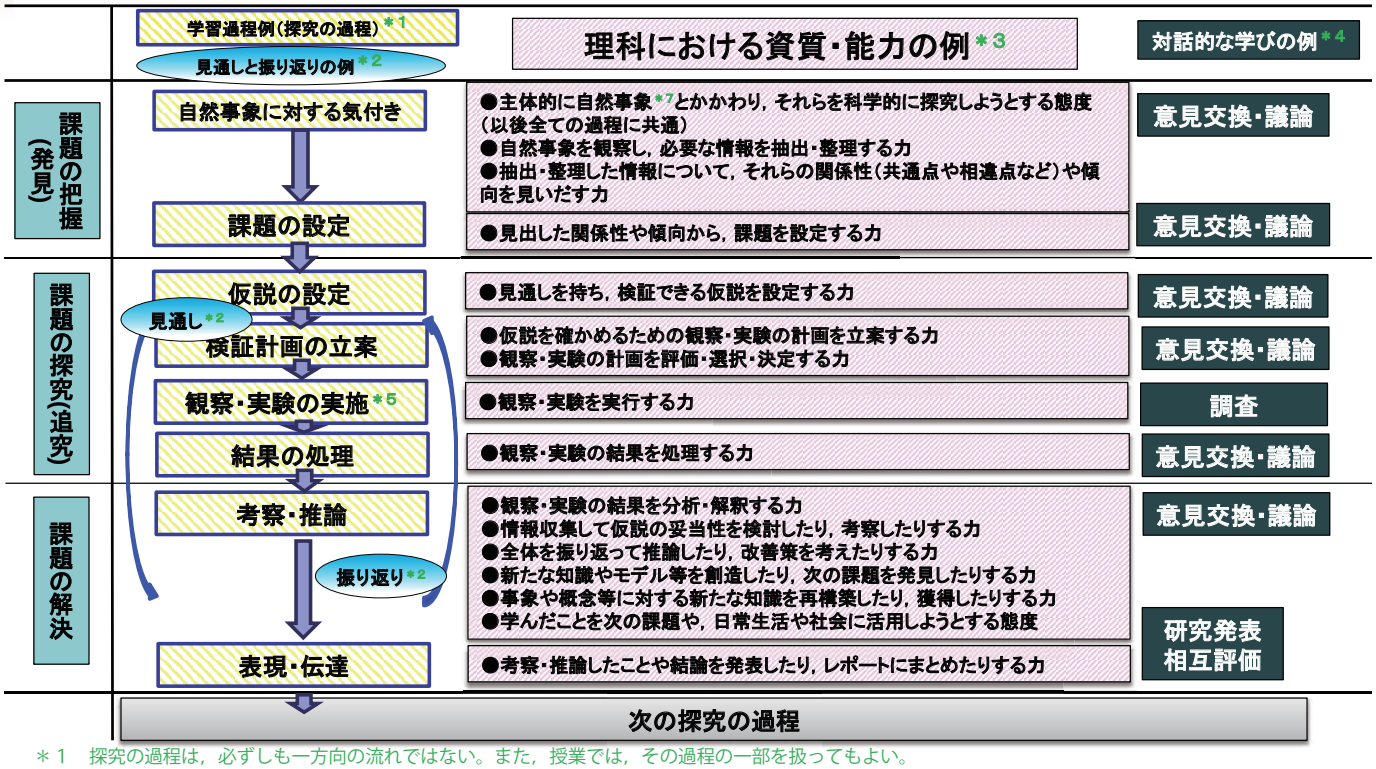
（小学校低学年）
例えば，【生活科】
○ 自然とのかかわりに関心をもち，自然を大切にしたり，その不思議さに気付いたりすることができる。
○ 身近な自然を観察したり，季節や地域の行事にかかわる活動を行ったりなどして，四季の変化や季節によって生活の様子が変わることに気付き，自分たちの生活を工夫したり楽しくしたりできる。
○ 身近にある自然を利用したり，身近にある物を使ったりなどして，遊びや遊びに使う物を工夫してつくり，その面白さや自然の不思議さに気付き，みんなで遊びを楽しむことができるようにする。
○ 動物を飼ったり植物を育てたりして，それらの育つ場所，変化や成長の様子に関心をもち，また，それらは生命をもっていることや成長していることに気付き，生きものへの親しみをもち，大切にすることができるようにする。

【幼児教育】（※幼児期の終わりまでに育ってほしい姿のうち、特に関係のあるもの記述）
・身近な事象に積極的に関わり、物の性質や仕組み等を感じ取ったり気付いたりする中で、思い巡らし予想したり、工夫したりなど多様な関わりを楽しむようになるとともに、友達などの様々な考えに触れる中で、自ら判断しようとしたり考え直したりなどして、新しい考えを生み出す喜びを味わいながら、自分の考えをよりよいものにするようになる。
・自然に触れて感動する体験を通して、自然の変化などを感じ取り、身近な事象への関心が高まりつつ、好奇心や探究心を持って思い巡らし言葉などで表しながら、自然への愛情や畏敬の念を持つようになる。身近な動植物を命あるものとして心を動かし、親しみを持って接し、いたわり大切にする気持ちを持つようになる。

図３　理科における教育のイメージ（案）

理科	知識・技能	思考力・判断力・表現力等	学びに向かう力・人間性等	資質・能力の育成のために重視すべき学習過程等の例
高等学校	＜選択科目＞ ●知識・技能の深化 ●自然事象に対する概念や原理・法則の体系的な理解	●科学的な探究能力（論理的・分析的・統合的に考察する力） ●新たなものを創造しようとする力	●果敢に挑戦する態度 ●科学的に探究する態度 ●科学に対する倫理的な態度	見通し：自然事象に対する気付き／課題の設定／仮説の設定／検証計画の立案／観察・実験の実施／結果の処理／考察・推論／表現・伝達：振り返り
	＜必履修科目＞ ●自然事象に対する概念や原理・法則の理解 ●科学的探究についての理解 ●探究のために必要な観察・実験等の技能	●自然事象の中から見通しをもって課題や仮説を設定する力 ●観察・実験し、得られた結果を分析して解釈するなど、科学的に探究する力と科学的な根拠を基に考えを表現する力 ●仮説の妥当性や改善策を検討する力	●自然事象に対する畏敬の念 ●諦めずに挑戦する態度 ●日常生活との関連、科学の必要性や有用性の認識 ●科学的根拠に基づき、多面的,総合的に判断する態度 ●中学校で身に付けた探究する能力などを活用しようとする態度	
中学校	○自然事象に対する概念や原理・法則の基本的な理解 ○科学的探究についての基本的な理解 ○探究のために必要な観察・実験等の基礎的な技能（安全への配慮,器具などの操作，測定の方法,データの記録・処理等）	○自然事象の中に問題を見いだして見通しをもって課題や仮説を設定する力 ○計画を立て，観察・実験する力 ○得られた結果を分析して解釈するなど、科学的に探究する力と科学的な根拠を基に表現する力 ○探究の過程における妥当性を検討するなど総合的に振り返る力	○自然を敬い，自然事象に進んでかかわる態度 ○粘り強く挑戦する態度 ○日常生活との関連，科学することの面白さや有用性の気付き ○科学的根拠に基づき判断する態度 ○小学校で身に付けた問題解決の力などを活用しようとする態度	見通し：自然事象に対する気付き／課題の設定／仮説の設定／検証計画の立案／観察・実験の実施／結果の処理／考察・推論／表現：振り返り
小学校	■自然事象に対する基本的な概念や性質・規則性の理解 ■理科を学ぶ意義の理解 ■科学的に問題解決を行うために必要な観察・実験等の基礎的な技能（安全への配慮，器具などの操作，測定の方法，データの記録等）	（各学年で主に育てたい力） ６年：自然事象の変化や働きについてその要因や規則性，関係を多面的に分析し考察して，より妥当な考えをつくりだす力 ５年：予想や仮説などをもとに質的変化や量的変化，時間的変化に着目して解決の方法を発想する力 ４年：見いだした問題について既習事項や生活経験をもとに根拠のある予想や仮説を発想する力 ３年：自然事象の差異点や共通点に気付き問題を見いだす力	■自然に親しみ、生命を尊重する態度 ■失敗してもくじけずに挑戦する態度 ■科学することの面白さ ■根拠に基づき判断する態度 ■問題解決の過程に関してその妥当性を検討する態度 ■知識・技能を実際の自然事象や日常生活などに適用する態度 ■多面的，総合的な視点から自分の考えを改善する態度	見通し：自然事象に対する気付き／問題の見いだし／予想・仮説の設定／検証計画の立案／観察・実験の実施／結果の整理／考察や結論の導出：振り返り

図４　理科において育成を目指す資質・能力の整理（案）



＊1　探究の過程は，必ずしも一方向の流れではない。また，授業では，その過程の一部を扱ってもよい。
＊2　「見通し」と「振り返り」は，学習過程全体を通してのみならず，必要に応じて，それぞれの学習過程で行うことも重要である。
＊3　全ての学習過程において，今までに身に付けた資質・能力や既習の知識・技能を活用する力が求められる。
＊4　意見交換や議論の際には，あらかじめ個人で考えることが重要である。また，他者とのかかわりの中で自分の考えをより妥当なものにする力が求められる。
＊5　単元内容や題材の関係で観察・実験が扱えない場合も，調査して論理的に検討を行うなど，探究の過程を経ることが重要である。
＊6　小学校及び中学校においても，基本的には高等学校の例と同様の流れで学習過程を捉えることが必要である。
＊7　自然事象には，日常生活に見られる事象も含まれる。

図５　資質･能力を育むために重視すべき学習過程等の例 (案)

4 ■ 資質・能力を育む学習過程の在り方

図４に掲げた資質・能力を育成していくためには，学習過程の果たす役割が極めて重要である。理科においては，図５に高等学校の基礎科目における例を示しているとおり，課題の把握（発見），課題の探究（追究），課題の解決という探究の過程を通じた学習活動を行い，それぞれの過程において，同じく図５に掲げてあるような資質・能力が育成されるよう指導の改善を図ることが必要である。その際，この学習過程については，必ずしも一方向の流れではなく，必要に応じて戻ったり，繰り返したりする場合があること，また，授業においてはすべての学習過程を実施するのではなく，その一部を取り扱う場合があることに留意する必要がある。

5 ■ 「目標に準拠した評価」に向けた評価の観点の在り方

「目標に準拠した評価」の実質化を図るとともに，教科・校種を越えた共通理解に基づく組織的な取り組みを促す観点から，観点別評価の観点については，資質・能力の三つの柱を踏まえたものとすることが求められている。

「知識・技能」については，事実的な知識のみならず，構造化された概念的な知識や，一定の手順に沿った技能のみならず，変化する状況に応じて主体的に活用できるまでに習熟した技能をも含めた広範な意味で用いられていることに留意することが必要である。また，資質・能力のうち「学びに向かう力・人間性等」の部分については，「主体的に学習に取り組む態度」として観点別評価（学習状況を分析的に捉える）を通じて見取ることができる部分と，観点別評価や評定にはなじまず，個人内評価（個人のよい点や可能性，進歩の状況について評価する）を通じて見取る部分があり，ここでは観点別評価として見取るべきものを掲げていることに留意する必要がある。

なお，実際の評価に際しては，資質・能力の三つの柱について，毎回の授業ですべてを見取るのではなく，カリキュラム・マネジメントの考え方のもと，単元や題材を通じたまと

まりの中で，学習・指導内容と評価の場面を適切にデザインしていくことが求められる。

6 ■ 理科におけるアクティブ・ラーニング

「論点整理」においては，子供たちに目指す資質・能力を総合的に育むためには，学びの量とともに，質や深まりが重要であるとされ，各教科等における習得・活用・探究の学習過程全体を見渡しながら，「主体的な学び」「対話的な学び」「深い学び」の三つの視点に立って学び全体を改善していくことが提言されている。

理科においては，これまでも知的好奇心や探究心を持って，自然に親しみ，目的意識を持って観察・実験を行い，その結果を整理し考察する探究的な学習活動を重視してきたところであるが，今後は，以下の「主体的な学び」「対話的な学び」「深い学び」の三つの視点から学習過程をさらに質的に改善していくことが必要である。なお，これら三つの視点はそれぞれが独立しているものではなく，相互に関連し合うものであることに留意が必要である。

【主体的な学び】学ぶことに興味や関心を持ち，自己のキャリア形成の方向性と関連付けながら，見通しを持って粘り強く取り組み，自己の学習活動を振り返って次につなげる学び

・理科において「主体的な学び」を実現していくためには，例えば，i）自然の事物・現象から問題を見いだし，見通しを持って課題や仮説の設定や観察・実験の計画を立案したりする学習場面を設けることや，ii）観察・実験の結果を分析・解釈して仮説の妥当性を検討したり，全体を振り返って改善策を考えたりする学習場面を設けること，iii）得られた知識や技能をもとに，次の課題を発見したり，新たな視点で自然の事物・現象を把握したりする学習場面を設けることなどが考えられる。

【対話的な学び】子供同士の協働，教職員や地域の人との対話，先哲の考え方を手掛かりに考えること等を通じ，自己の考えを広げ深める学び

・理科において「対話的な学び」を実現していくためには，例えば，課題の設定や検証計画の立案，観察・実験の結果の処理，考察・推論する場面などでは，あらかじめ個人で考え，その後，意見交換したり，議論したりして，自分の考えをより妥当なものにする学習場面を設けることなどが考えられる。

【深い学び】各教科等で習得した概念や考え方を活用した「見方・考え方」を働かせ，問いを見いだして解決したり，自己の考えを形成し表したり，思いを基に構想・創造したりすることに向かう学び

・理科においては，自然の事物・現象について，理科の「見方・考え方」を働かせて，探究の過程を通して学ぶことにより，資質・能力を獲得するとともに，「見方・考え方」も成長するものであると考えられる。さらに，獲得した資質・能力や成長した「見方・考え方」を次の学習や日常生活などにおける問題発見・解決に活用することによって，「深い学び」につながっていくものと考えられる。

このような学習場面については，既に多くの学校で取り組まれているものも多いと考えられる。その際，このような学習場面を通じて児童生徒の「主体的な学び」「対話的な学び」「深い学び」が実現できているのかについて確認しつつ進めることが重要であり，身に付けさせることを目指す資質・能力およびその評価の観点との関係も十分に踏まえたうえで指導計画等を作成することが必要である。

小・中・高等学校を通じ，発達の段階に応じて，子供たちが知的好奇心や探究心を持って，自然に親しみ，目的意識を持った観察・実験を行うことにより，科学的に探究するために必要な資質・能力を養うことができるように授業の改善・充実を図っていただきたい。❖

追記

本原稿は平成 28 年 8 月中旬段階のものであり，その後の中央教育審議会教育課程部会等の議論によって修正や変更があることを申し述べておく。

Ⅲ 数学におけるアクティブ・ラーニングの考え方

文部科学省 初等中等教育局視学官
長尾 篤志 ／ ながお あつし

1982年４月より広島県立高等学校教諭，1994年４月より広島大学附属中・高等学校教諭，2001年４月より国立教育政策研究所教育課程研究センター教育課程調査官（文部科学省初等中等教育局教育課程課教科調査官併任），2011年４月より現職。

1 ■ はじめに

現行の学習指導要領について述べることから始めたい。

現行の学習指導要領では，小学校算数科の目標は「算数的活動を通して」で始まっており，中学校および高等学校の数学科の学習指導要領の目標は「数学的活動を通して」で始まっている。特に，中学校および高等学校の学習指導要領では，以前の数学科の目標では中ほどにあった数学的活動という言葉を目標の最初に置いて，目標全体に関係させることで強調している。

算数・数学科では，「アクティブ・ラーニング」を現行の学習指導要領に記載されている「数学的活動」の充実と考えている（小学校算数科では，これまで算数的活動という言葉を使ってきたが，次期学習指導要領からは中学校・高等学校と合わせて数学的活動という言葉を使うことが議論されている）。

2 ■ 数学的活動

小学校の算数的活動，中学校・高等学校の数学的活動について少し振り返っておこう。

算数的活動とは，「児童が目的意識をもって主体的に取り組む算数にかかわりのある様々な活動」のことである。学習指導要領では，各学年の内容に，例えば６学年では次のように記述されている。

〔算数的活動〕

内容の「A 数と計算」，「B 量と測定」，「C 図形」，「D 数量関係」に示す事項については，例えば次のような算数的活動を通して指導するものとする。

ア　分数についての計算の意味や計算の仕方を，言葉，数，式，図，数直線を用いて考え，説明する活動
イ　身の回りで使われている量の単位を見付けたり，それがこれまでに学習した単位とどのような関係にあるかを調べたりする活動
ウ　身の回りから，縮図や拡大図，対称な図形を見付ける活動
エ　身の回りから，比例の関係にある二つの数量を見付けたり，比例の関係を用いて問題を解決したりする活動

中学校の数学的活動とは，「生徒が目的意識をもって主体的に取り組む数学にかかわりのある様々な営み」のことである。学習指導要領では，各学年の内容に，例えば２・３学年では次のように記述されている。

〔数学的活動〕

「A 数と式」，「B 図形」，「C 関数」，「D 資料の活用」の学習やそれらを相互に関連付けた学習において，次のような数学的活動に取り組む機会を設けるものとする。

ア　既習の数学を基にして，数や図形の性質などを見いだし，発展させる活動
イ　日常生活や社会で数学を利用する活動
ウ　数学的な表現を用いて，根拠を明らかにし筋道立てて説明し伝え合う活動

高等学校の数学的活動とは，「数学学習にかかわる目的意

識をもった主体的な活動」のことである。学習指導要領では，第３款 各科目にわたる指導計画の作成と内容の取扱い の３に次のように記述されている。

指導に当たっては，各科目の特質に応じ数学的活動を重視し，数学を学習する意義などを実感できるようにするとともに，次の事項に配慮するものとする。

(1)　自ら課題を見いだし，解決するための構想を立て，考察・処理し，その過程を振り返って得られた結果の意義を考えたり，それを発展させたりすること。
(2)　学習した内容を生活と関連付け，具体的な事象の考察に活用すること。
(3)　自らの考えを数学的に表現し根拠を明らかにして説明したり，議論したりすること。

小学校の算数的活動と，中学校・高等学校の数学的活動は小さな文言の違いはあるものの本質的には同じものである。次期学習指導要領で，小学校の算数的活動を数学的活動という言葉を使うことが議論されている理由もそこにある。

なお，高等学校の数学的活動は，次の図１を用いて説明することが多い。図中 (1)，(2)，(3) はおおむね高等学校の数学的活動の (1)，(2)，(3) に対応している。

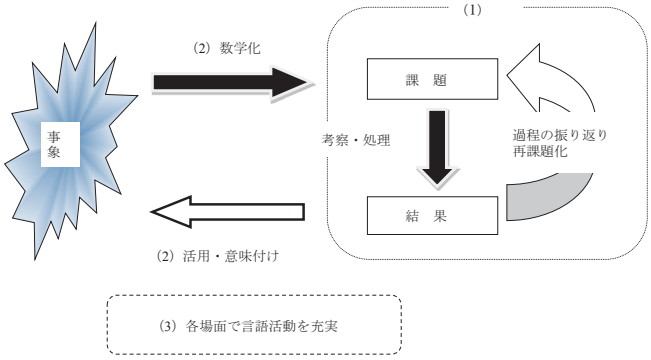


図１　数学的活動

図１からもわかるように，数学的活動は典型的には問題解決型の学習になる。

3 ■ 算数・数学科のアクティブ・ラーニングで育てる資質・能力

次の図２は図１をさらに精緻化したもので，12 ページの

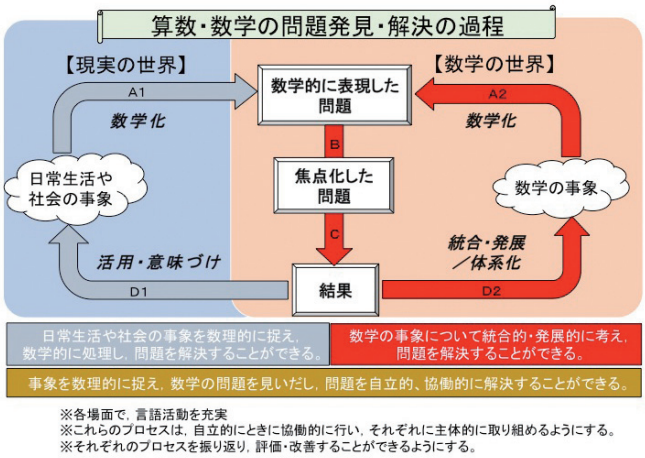


図２　算数・数学の問題発見・解決の過程

図３は図２の各プロセスに必要な能力を挿入したものである。少し説明を加えておきたい。

図2：

図中の「焦点化した問題」とは，「数学的に表現した問題」を，「事象を関数の式で表すとどうなるか」とか「この関数の最大・最小はどうなるか」など，より限定した問題のことである。また，「数学化」という言葉は，日常生活や社会の事象を数学的な問題に表現する場合にも，数学の事象からさらに新たな数学的な問題に表現する場合にもともに用いられる。「数学化」という言葉ではなく「定式化」という言葉が用いられることもある。

図２のプロセスに基づく典型的な展開は次のようになる。

日常生活や社会の事象⇒A1 ⇒数学的に表現した問題⇒B⇒焦点化した問題⇒C⇒結果⇒〔D2 ⇒数学の事象⇒A2 ⇒数学的に表現した問題⇒B⇒焦点化した問題⇒C⇒結果〕⇒・・・〔　〕のサイクルを繰り返す・・・⇒D 1⇒日常生活や社会の事象

もちろん，授業では次のようなプロセスも考えられる。

日常生活や社会の事象⇒A1 ⇒数学的に表現した問題⇒B⇒焦点化した問題⇒C⇒結果⇒D1 ⇒日常生活や社会の事象

あるいは，

数学的に表現した問題⇒B⇒焦点化した問題⇒C⇒結果⇒〔D2 ⇒数学の事象⇒A2 ⇒数学的に表現した問題⇒B⇒焦点化した問題⇒C⇒結果〕⇒・・・〔　〕のサイクルを繰り返す・・・⇒D 1⇒日常生活や社会の事象

実際の授業では，例えば，「焦点化した問題」は飛ばして「結

果」を得る場合など，さらに多様な展開もあり得るだろう。

図3：

各プロセスに挿入した能力は，およそそのプロセスで必要とされると思われるもので，他の能力や知識・技能などは必要ないということではない。例えば，「A１ 日常生活や社会の問題を数理的に捉えることについて」は，日常生活や社会の事象から見いだした問題を数学的に表現することで，そのためには「事象の数量等に着目して数学的な問題を見いだす力」や「事象の特徴を捉えて数学的な表現を用いて表現する力」が必要になるが，その際，統計に関する知識や技能，図形の性質に関する知識なども必要になる場合もあるであろう。

右の表１は，現行の小学校算数の目標，中学校数学の目標および高等学校数学の目標，図３の能力などを踏まえ，知識・技能，思考力・判断力・表現力等，学びに向かう力，人間性等の３つの柱に沿って整理したものである。図３の能力よりは少し大きなくくりで記述している。

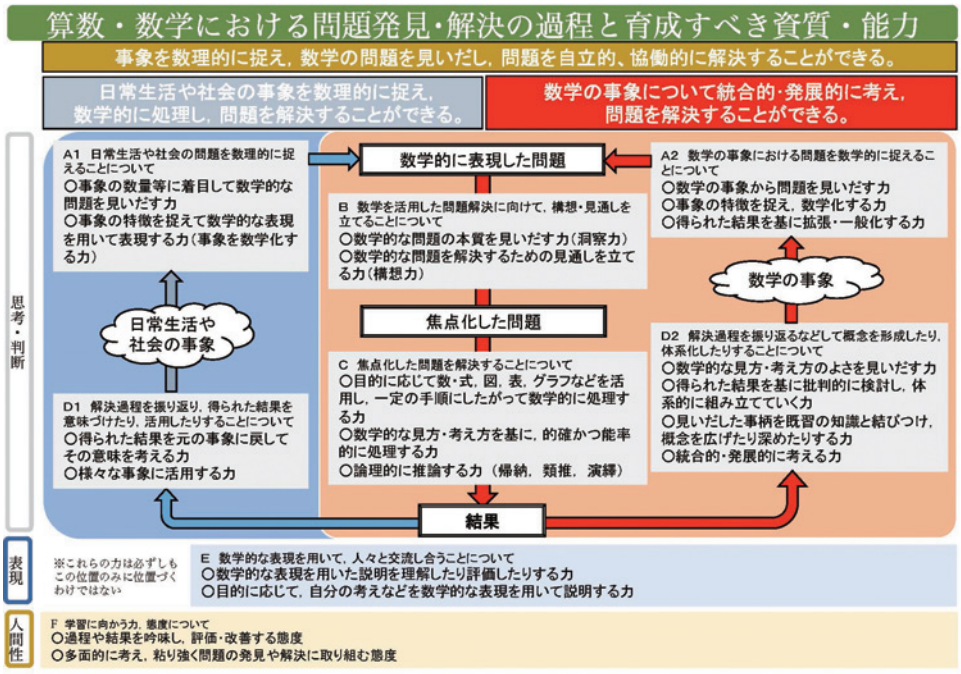


図３　算数・数学における問題発見・解決の過程と育成すべき資質・能力

表１　算数・数学科において育成すべき資質・能力

資質・能力の三つの柱に沿った、小・中・高等学校を通じて
算数・数学科において育成すべき資質・能力の整理

	知識・技能	思考力・判断力・表現力等	学びに向かう力、人間性等	資質・能力の育成のために重視すべき学習過程の例＊
数学 高等学校	● 数学における基本的な概念や原理・法則の体系的理解 ● 事象を数学化したり，数学的に解釈・表現したりする技能 ● 数学的な問題解決に必要な知識	● 事象を数学的に考察する力 ● 既習の内容を基にして問題を解決し，思考の過程を振り返ってその本質や他の事象との関係を認識し，統合的・発展的に考察する力 ● 数学的な表現を用いて事象を簡潔・明瞭・的確に表現する力	● 数学的に考えることのよさ，数学の用語や記号のよさ，数学的な処理のよさ，数学の実用性などを認識し，事象の考察や問題の解決に数学を積極的に活用して，数学的論拠に基づいて判断する態度 ● 問題解決などにおいて，粘り強く，柔軟に考え，その過程を振り返り，考察を深めたり評価・改善したりする態度 ● 多様な考えを生かし，よりよく問題解決する態度	・ 疑問や問いの発生 ・ 問題の設定 ・ 問題の理解，解決の計画 ・ 計画の実行，結果の検討 ・ 解決過程や結果の振り返り ・ 新たな疑問や問い、推測などの発生
数学 中学校	● 数量や図形などに関する基礎的な概念や原理・法則の理解 ● 事象を数学化したり，数学的に解釈・表現したりする技能 ● 数学的な問題解決に必要な知識	● 日常の事象を数理的に捉え，数学を活用して論理的に考察する力 ● 既習の内容を基にして，数量や図形などの性質を見いだし，統合的・発展的に考察する力 ● 数学的な表現を用いて事象を簡潔・明瞭・的確に表現する力	● 数学的に考えることのよさ，数学的な処理のよさ，数学の実用性などを実感し，様々な事象の考察や問題解決に数学を活用する態度 ● 問題解決などにおいて，粘り強く考え，その過程を振り返り，考察を深めたり評価・改善したりする態度 ● 多様な考えを認め，よりよく問題解決する態度	・ 疑問や問いの発生 ・ 問題の設定 ・ 問題の理解，解決の計画 ・ 計画の実行，結果の検討 ・ 解決過程や結果の振り返り ・ 新たな疑問や問い，推測などの発生
算数 小学校	● 数量や図形などについての基礎的・基本的な概念や性質などの理解 ● 日常の事象を数理的に処理する技能 ● 数学的な問題解決に必要な知識	● 日常の事象を数理的に捉え，見通しをもち筋道を立てて考察する力 ● 基礎的・基本的な数量や図形の性質や計算の仕方を見いだし，既習の内容と結びつけ統合的に考えたり，そのことを基に発展的に考えたりする力 ● 数学的な表現を用いて事象を簡潔・明瞭・的確に表したり，目的に応じて柔軟に表したりする力	● 数量や図形についての感覚を豊かにするとともに，数学的に考えることや数理的な処理のよさに気付き，算数の学習を進んで生活や学習に活用しようとする態度 ● 数学的に表現・処理したことを振り返り，批判的に検討しようとする態度 ● 問題解決などにおいて，よりよいものを求め続けようとし，抽象的に表現されたことを具体的に表現しようとしたり，表現されたことをより一般的に表現しようとするなど，多面的に考えようとする態度	・ 疑問や問いの気付き ・ 問題の設定 ・ 問題の理解，解決の計画 ・ 解決の実行 ・ 解決したことの検討 ・ 解決過程や結果の振り返り ・ 新たな疑問や問いの気付き

＊学習過程については，自立的に，ときに協働的に行い，それぞれに主体的に取り組めるようにする。

4 ■ 図２のプロセスに沿った授業の展開例

現行の高等学校数学Ｂ　数列の「漸化式と数列」の展開を図２のプロセスの展開例として取り上げる。

漸化式は生徒には「わかりにくい内容」と受け取られることが多い。原因の一つとして，漸化式を考える必然性を感じ取りにくいことが考えられるが，そうであれば問題解決型の学習が効果を発揮する内容である。学習指導要領では，「漸化式について理解し，簡単な漸化式で表された数列について一般項を求めること」とされている。ここで言う「簡単な漸化式」とは，一次の形の隣接二項間の漸化式のことである。

漸化式の導入として，ハノイの塔の問題を最初に提示する。

ハノイの塔の問題とは次のような問題である。

「A，B，Cの３本の棒があり，Aの棒には真ん中に穴の空いた円盤が大きい円盤から順に 10 枚重ねられている。この 10 枚の円盤をBの棒を利用してすべてCの棒に移す。何回で移すことができるか。ただし，１回で１枚の円盤しか移すことはできない。また，大きい円盤をそれより小さい円盤の上に重ねることはできない。」

この学習指導のまとまりにおけるおよその指導の流れは表２のとおりである。

表２　漸化式の指導

第１次	・問題の提示 ・問題を解決するとき，あることがらと次のことがらとの関係を考えることが有効であることがあることを確認 ・「n本の直線で平面はいくつの部分に分割されるか」という問題の提示 ・漸化式の定義・表記の説明
第2次	・数列の一般項と漸化式のよさの確認 ・等差数列，等比数列，階差数列の漸化式の考察・練習
第3次	・第１次の問題を漸化式で表し，一般項を求める ・$a_{n+1}=pa_n+q$ の形の漸化式から一般項を求める方法の考察
第4次	・漸化式を用いていろいろな問題を解決

各次の指導時間は２～３時間を想定している。

授業の展開を図２のプロセスの展開と対比して述べればおおむね，日常生活や社会の事象⇒A1 ⇒数学的に表現した問題⇒B⇒焦点化した問題⇒C⇒結果⇒D1 ⇒日常生活や社会の事象　である。

漸化式は，漸化式から一般項を求めることも大切であるが，むしろ漸化式を作ることを重視したい。漸化式を作るには，事象の本質を洞察することが必要であり，複雑に見える事象も単純な漸化式で表されることに生徒は興味を持つと考えるからである。例えば，「n本の直線で平面はいくつの部分に分割されるか（ただし，直線はどの２本も平行でなく，どの３本も１点で交わらない）」という問題では「平面の分割は境界線の数だけ増えていく」ととらえる。n本の直線があるとき$n+1$本目の直線を引くと交点がn個生じるので境界線は$n+1$できる。したがって，n 本の直線で平面がa_n個に分割されるとすると$n+1$本の直線では次の式が成り立つ。

$$a_{n+1}=a_n+(n+1)$$

第３次では，$a_{n+1}=pa_n+q$の形の漸化式から一般項を求める方法として，次のように第１次で扱ったハノイの塔の問題を取り上げ考察したうえで特性方程式の考えへと導く。

漸化式は，$a_{n+1}=2a_n+1$，$a_1=1$

具体的に数列を列挙すると

1，3，7，15，31，63，127，・・・

各項に１を加えると

2，4，8，16，32，64，128，・・・

数の並びから，各項に１を加えた数列の一般項は 2^n と推測される。それを認めれば，数列$\{a_n\}$の一般項は$a_n=2^n-1$ である。

このことを漸化式で確認する。

漸化式 $a_{n+1}=2a_n+1$ の両辺に１を加えると

$$a_{n+1}+1=(2a_n+1)+1$$
$$=2(a_n+1)$$

したがって，数列$\{a_n+1\}$は，確かに公比２の等比数列であることがわかる。

漸化式 $a_{n+1}=pa_n+q$ で表される数列について，同様に考える。この漸化式が

$$a_{n+1}-r=p(a_n-r)$$

に変形されたとすると，この式を元の漸化式と比較して

$$r=pr+q$$

である。逆に，この式が成り立つとき，$q=r-pr$ だから，$a_{n+1}=pa_n+q$ は $a_{n+1}-r=p(a_n-r)$と変形される。したがって，数列$\{a_n-r\}$は公比 p の等比数列であることがわかる。

5 ■ アクティブ・ラーニングにおいて配慮すべきこと

教育課程部会高等学校部会では，主体的・対話的で深い学びの実現（「アクティブ・ラーニング」の視点からの授業改善）について，次のように示されている（高等学校部会で示されているものから順序は変更して記述している）。

【主体的な学び】

学ぶことに興味や関心を持ち，自己のキャリア形成の方向性と関連づけながら，見通しを持って粘り強く取組み，自らの学習活動を振り返って次につなげる「主体的

な学び」が実現できているか。

【対話的な学び】

子供同士の協働，教員や地域の人との対話，先哲の考え方を手掛かりに考えること等を通じ，自らの考えを広げ深める「対話的な学び」が実現できているか。

【深い学び】

習得・活用・探究の見通しの中で，教科等の特質に応じて育まれる見方・考え方を働かせて思考・判断・表現し，学習内容の深い理解や資質・能力の育成，学習への動機付け等につなげる「深い学び」が実現できているか。

これらはたいへん重要な指摘であるが，図２（または図１）で示される学習プロセスを実行することで実現されると考えている。いくつかの補足をしておきたい。

主体的な学び：

生徒が学習内容に興味や関心を持ち粘り強く取り組むようにするためには，提示する問題を工夫することが大切である。問題は，生徒の身近にあるものか，多様なアプローチが可能か，発展性のあるものか，難易度は適切か，ゲーム的な要素を含ませるなど生徒が楽しめる工夫は可能か，などの視点から工夫するとよい。また，生徒の疑問や誤りなども適宜「生徒からの提案問題」のような形で取り上げ，正しい・正しくないの判断をして終えるのではなく，正しい考えへと進めるにはどうすればよいかを考えさせることも大切である。

また，図１で「過程を振り返る」ことが示されている（図２ではD2の統合・発展／体系化に当たる）が，過程を振り返って統合・発展／体系化するだけでなく，さらに一定のまとまりごとにその時点での学習状況を把握し，その後の学習をコントロールすることが必要である。つまり，その時点での学習で，何ができて何ができないかを明らかにし，その後何をどのように学ぶかを自分で判断することが必要である。したがって，指導者はこのような学習を促すようにしなければならない。

対話的な学び：

同じ問題を与えられても，解決の視点などはそれぞれの生徒によって多様である。そのような視点を交流することで生徒は考えを広げることができる。さらに，お互いの説明などに対して率直に疑問などを提示し考えていくことで考えを深めることもできる。ただ，この対話的な学びにおいても振り返りが大切である。対話を通してお互いに納得した（合意した）こと，大切だと考えたこと，新たな疑問などをまとめておくことが次の学びにつながると考えるからである。

深い学び：

算数・数学科での深い学びを簡潔に述べれば，身に付けた知識・技能を適切に活用して問題解決ができるような学習ということができよう。ただ，そのためには，知識・技能の意味が理解され，新たな知識は既習の知識と統合され体系化されておく必要がある。また，数学的活動のプロセスなども身に付け，いろいろな場面で数学的な問題を見いだし，数学的な見方・考え方を働かせて考察する態度も育てるべきである。

指導においては，これらのことを授業改善の視点として頭に置いておき，毎時間の指導の後，簡単でもよいので自身の指導を振り返るようにしたいものである。

6 ■ おわりに

現場の先生方から「主体的・対話的で深い学びとなるような授業を行いたいが時間がない」ということをよく聞く。これはもっともなことだと思う。しかし，どうしても授業時間には限りがあり，指導計画を適宜工夫するしかない。指導内容と生徒の実態を考慮し，重視して指導すべきところで十分な時間をかけるように工夫したい。

また，授業においてはどのような目標を設定して授業を展開するかが大切であるが，目標では「どのような知識・技能を身に付け，どのような資質・能力を身に付けるか」を明確にすべきである。そのため，評価観を確かなものにすべきであり，評価の改善をいっそう進めることが喫緊の課題であると考えている。❖

引用・参考文献

高等学校学習指導要領解説　数学編　理数編，2009，文部科学省

品質 Vol.45，No.4「数理的問題解決能力の育成」長尾篤志，2015，日本品質管理学会

中央教育審議会教育課程部会 算数・数学ワーキンググループ資料

中央教育審議会教育課程部会 高等学校部会資料

第6回

デザインの中に潜む数学

ジャズピアニスト・作曲家
中島 さち子 / なかじま さちこ

1996年国際数学オリンピックインド大会で日本人女子初の金メダル，翌年のアルゼンチン大会で銀メダル獲得。東京大学で数学を専攻する一方，ジャズに出会い，卒業後本格的に音楽活動開始。2010年ピアノトリオCD "REJOICE" リリース。2012年『人生を変える「数学」そして「音楽」』（講談社）出版。現在は，音楽活動や数学研究のほか，全国で数学や音楽の講演活動，教育，グローバル人材育成（Phoenix Consulting）などに携わる。「算数・数学の自由研究」作品コンクールの中央審査委員を務める。

繰り返し紋様と対称性

だまし絵で有名なオランダの画家マウリッツ・コルネリス・エッシャー（1897～1972年）をご存じでしょうか。エッシャーは，数学的趣向の強い，極めて独創的な作品を多数生み出した画家です。特に，彼は，スペインのグラナダにあるアルハンブラ宮殿で，ムーア人による神秘的なモザイクを見て大きな衝撃を受けて以来，繰り返し紋様を利用した不可思議な作品を多数生み出すようになりました。

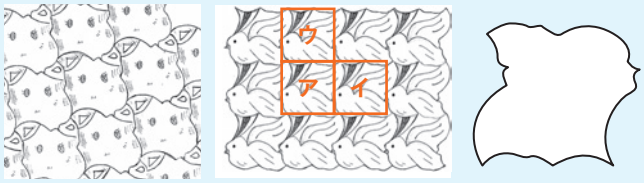
From Wikimedia Commons, the free media repository

図1　アルハンブラ宮殿

エッシャーに限らず，イスラム芸術や結晶の形，壁紙の紋様などにはさまざまな繰り返し紋様が現れます。必ずしも平面や空間全体が敷き詰められていなくとも，同じ形が繰り返し現れるような紋様は日本の着物などにもたくさんあり，そうした紋様やデザインの中には実は不思議な数学が眠っているのです。その鍵は「対称性」。今回は音楽には踏み込まず，いろいろな繰り返し紋様の中に潜む「対称性」の数学をご紹介します。（なお，バッハの音楽の楽譜にはたくさんの繰り返し紋様が現れます。こちらの話はまた改めて！）

エッシャーに挑戦！

私の本『人生を変える「数学」そして「音楽」』（講談社）でも「エッシャーに迫る！」というコーナーで，繰り返し紋様の簡単なつくり方と作品例を数点載せました。一番シンプルなパターンを図2に掲載します。AとBは同じ基本領域から生まれた犬と鳥です。他にもさまざまな絵のアイディアが浮かぶことでしょう。あなたは，この基本領域から何を想像しますか？



A：犬　　B：鳥　　基本領域

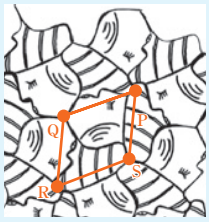
図2　繰り返し紋様の例（1）　『人生を変える「数学」そして「音楽」』（中島さち子著，講談社）より抜粋・編集

エッシャーの作品は著作権上の問題によりここに掲載ができないため，娘や母の協力を得て，いくつかの対称性のタイプに基づくオリジナル作品を次ページの図3にいくつか掲載します。多少の画像の粗さやずれなどは，ご容赦ください。この後を読み進める前に，是非，図3の絵をじっと見て，いろいろと気づいたことを書き出してみてください。

さて，あなたはどのようなことを発見したでしょうか？

一般に，平面上で形を変えない移動（合同変換）には，「平行移動」，「回転移動」，「裏返し（線対称）移動」などがあり，逆にすべての合同変換はこれらの組み合わせで表されることが知られています。こうした移動により絵の形が保たれるとき，その絵は「〇〇の対称性を持つ」といいます。

では，例えば，図2のBでは，どのような対称性がある

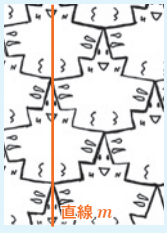


C：どんぐり頭の男性

D：カラス

E：魔法使い

F：蝶ネクタイをした犬



G：不思議な妖精

H：帽子をかぶった女性

図３　繰り返し紋様の例(2)　赤い点や線は図形に含まれません。

でしょうか。少し考えてみましょう。

Ｂでは（紋様が無限に四方に続いていると仮定すると），四角形アを四角形イに移すような平行移動を施してもＢの絵は変わりません。また，四角形アを四角形ウに移すような平行移動を施してもＢの絵は変わりません。このようにＢは「２方向への平行移動」という対称性を持ちます。

図３のＣではどうでしょうか。Ｃでは，点Ｐで 120 度回転すると，Ｃの絵の形が全く変わらないことがわかるでしょうか。点Ｑ，点Ｓではどうでしょうか。

また，Ｄ，Ｅ，Ｆでは，どうでしょうか。いろいろな回転移動での対称性を探してみてください。なお，ＤとＥは，よく見ると，実は全く同じ基本領域を持っています。そのため，もちろん対称性の型は同じです。でも，一見全く違う図形に見えますよね。このように，数学では，一見全く違うものでも，視点の置き方次第で本質的に同じに見えることがあります。逆に，数学的に全く同じ対称性を持つ図形でも，一見全く異なるデザインを無数に生み出すことも可能です。

さて，Ｇの不思議な妖精の対称性はどうでしょうか。直線 m について線対称移動を施しても，Ｇの形は全く変わりません。Ｇでは，他にどのような対称性があるでしょうか。

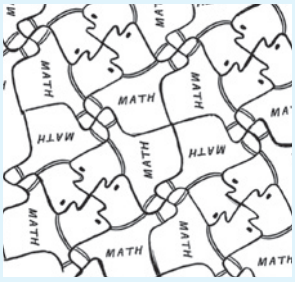
Ｈでは，少し変わった対称性があります。直線 n に沿って少しずらしてから n について線対称移動すると，Ｈの絵の形は全く変わりません。

ちなみに，Ｈの女性は帽子をかぶっていますが，その帽子は他の女性の首にもなっています。このように１つの形が２つ以上の意味を同時に持つような作品も，エッシャーは多数生み出しています。

ここで，簡単なクイズです。

図４の絵は，実は，Ａ～Ｈのある絵と同じ対称性の型を持ちます。

いったいどれでしょうか？[※1]



I：怪獣君

図４　この絵の対称性は？

実は，平面の繰り返し紋様の対称性の型は，全部で 17 種類しかないことがわかっています。正式には，1924 年にジョージ・ポリア（1887 ～ 1985 年）によって証明されました。なお，空間の繰り返し紋様の対称性の型は 230 種類です。

余談ですが，「17 種類」のうち，平行・回転対称性を持つ繰り返し紋様の型の一部は，実は以下のような方程式の自然数解を求める問題につながっています。こんなシンプルな方程式の自然数解と，平行・回転対称性を持つ繰り返し紋様の対称性の型の種類（の一部）が対応するなんて，不思議だと思いませんか？

$$\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}+\cdots+\frac{1}{n_k}=k-2$$

（n_1, n_2, $\cdots$, n_k, k は自然数）

上記の方程式の自然数解[※2]をすべて求めることができるか，挑戦してみましょう。

例えば，$k=3$ に対する一組の解（n_1, n_2, n_3）＝（3, 3, 3）は図のＣの対称性の型に対応します。これは，360 度÷３＝120度の回転対称性を持つ点が本質的に３つ（点Ｐ, Ｑ, Ｓ）あることを示しています。なお，Ｃは，平行四辺形 PQRS を基本領域（この平行四辺形をうまく平行・回転移動すれば，平面全体を敷き詰め可能）としてとることもでき，PQ と RQ，PS と RS を同一視して貼り合わせてできる正三角形のざぶとんこそが，Ｃの対称性を象徴する空間（軌道空間）です。

もしこのざぶとんの表（正三角形 PQS）と裏（正三角形 RQS）に全く同じ絵を描いたとすると，表の点と裏の点を同一視することにより，対称性を象徴する空間は正三角形の平たいせんべいになります。

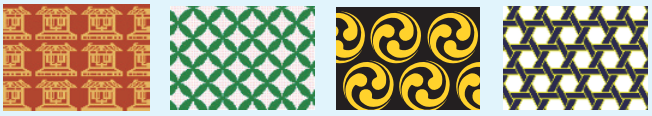
また，（n_1，n_2，n_3）＝（2，3，6）はＤやＥに対応します。これは，360 度÷２＝180 度，360 度÷３＝120 度，360 度÷６＝60 度の回転対称性を持つ点があることを示しています。見つかりましたか。また，本図形の最小基本領域として，どのような多角形がとれるでしょうか（答えは一つではありません）。なお，ＤやＥの対称性を象徴する空間（軌道空間）は，90 度･60 度･30 度の三角形が２枚合わさったざぶとんとなります。

k＝3，4，５の場合はどのような自然数解があるでしょうか。また，n_j＝５となるような自然数解は存在するでしょうか。

繰り返し紋様は身近な世界の中にも，実はたくさん発見することができます。歩きながら，壁紙，天井，路面などから多彩な繰り返し紋様を探し，さまざまな対称性や基本領域の発見に挑戦してみてください！

社会・自然の中の対称性

平面の繰り返し紋様の対称性の型が 17 種類と証明されるはるか以前から，人間は 17 種類の対称性を経験的に発見していました。例えば，先述したアルハンブラ宮殿の装飾には 17 種類の対称性の型がすべて現れていますし，日本の着物などの紋様にも 17 種類の対称性のすべての型が見いだされています。

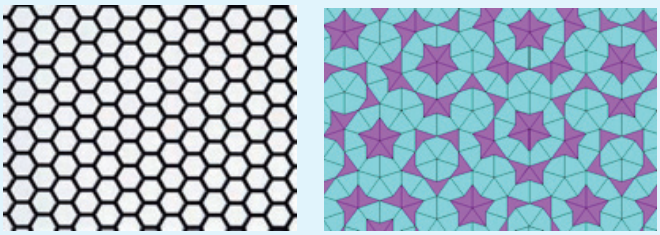


屋形文錦　七宝繋ぎ　三つ巴　籠目

図５　着物などの紋様

対称性とは，社会や自然の中でも大いに役立つ重要概念です。例えば，先日，竹中工務店は，車や人に踏まれても枯れにくく歩行しやすい路面緑化システム「ハニカムグリーン」を開発しました。ハニカムグリーンとは，六角格子（ハニカム格子，図6の左図）を利用した，芝生を踏圧や輪荷重から守る保護材の一種です。従来の正方格子による芝生の保護材よりも，対称性の高い六角格子は，より効果的に芝生を守ることが実証されています。ハニカム格子はハチの巣にも見られます。

多くの物質の結晶構造も，空間を敷き詰めることができる



ハニカム格子　ペンローズ・タイリング

図６　平面充填タイリングの例

空間充填の基本立体でできており，対称性が高い形になっています。結晶構造は物質の特性を決定する重要な鍵です。例えば，極めて高い対称性を持つダイヤモンド結晶は，鉛筆と同じ炭素原子でできているにもかかわらず，結晶構造の違いから美しさや硬さに大きな差異が生じています。

また，平面では，図６の右図のように，平行移動による対称性を持たず回転対称性のみを持つペンローズ・タイリングのような不思議な配置もあります。ダニエル・シェヒトマン（1941 年～）は，1982 年に三次元版のペンローズ構造を持つ準結晶を発見し，2011 年ノーベル化学賞を受賞しました。

このように，「対称性」は，社会や自然のあらゆる分野で非常に重要な概念であり，数学と社会・芸術・科学を結ぶ大きな鍵なのです。

さて，デザインの中には，実は「対称性」という数学がこっそり深く潜んでいたこと，感じていただけたでしょうか？

なお，本内容は，今夏に私たちが＜数理女子＞にて企画した「母娘で体験する数理ワークショップ ～デザインの中に潜む数学～」の中で，より主体的な発見・創造を主眼に置いて実施しました（東京大学大学院数理科学研究科主催）。

こちらのレポートは次回改めて！ ❖

補注

※１　図４と同じ対称性の型となるのは，図３のＦ（90 度回転対称性の中心が２点，180 度回転対称性の中心が１点）です。図４の怪獣君と図３のＦの犬の形は異なりますが，繰り返し紋様としての「対称性の型」は同じです。図２のＡ，Ｂは平行移動対称性のみ，図３のＣには 120 度回転対称性の中心が本質的に３点，図３のＤ，Ｅには 60 度，120 度，180 度回転対称性の中心が１点ずつ。図３のＨは「ずらし」（平行移動＋裏返し）の対称性を持ち，図３のＧは線対称性とずらしの対称性を持ちます。

※２　自然数解は，k=3 のとき (n_1,n_2,n_3)=(2,3,6),(3,3,3),(2,4,4)，k=4 のとき (n_1,n_2,n_3,n_4)=(2,2,2,2)，$k \leqq 2$，$k \geqq 5$ の場合は自然数解なし。

第6回

雨垂れ石を穿つ

東北大学高度教養教育・学生支援機構
准教授
山内 保典 / やまのうち やすのり

1977年愛知県に生まれる。2005年名古屋大学大学院教育発達科学研究科博士課程後期課程修了。博士（心理学）。名古屋大学大学院情報科学研究科（研究員），大阪大学コミュニケーションデザイン・センター（特任研究員・特任助教），大阪大学全学教育推進機構（講師）を経て，2016年より現職。コミュニケーションを軸に，科学の営み，科学者と市民の対話，科学技術政策形成への市民参加を研究・実践している。現在は，将来の科学者や研究者が学ぶ高等教育の在り方にも関心を広げ，カリキュラムの調査，開発，実践にも取り組んでいる。

小さい頃の思い出

「うんとこしょ，どっこいしょ，それでもカブは抜けません」。小さい頃「おおきなかぶ」という童話を読んだ記憶があります。言葉の響きが楽しかったことに加えて，最後にネズミの小さな力が，大きな結果をもたらすうえで決定的な役割を果たしたことも強く印象に残っています。

もう一つ，文字が流れていくように見える電光掲示板も好きでした。電車などで今でも時々見てしまいます。一つのライトだけを見ていると，ただ単に点滅を繰り返しているだけなのに，全体を見ると，その点滅の集合により，文字が動いているように見えるのが不思議でなりません。

この二つの思い出には，ある一つの共通点があります。それは，一つ一つの動きは単純で，微々たるもので，何の意味もないように見えるのに，それが集まったり，ある関係性を持ったりすると意味が生まれるという点です。

今回の作品では，このような現象が重要な鍵を握っています。ただし，この作品で起きてしまうのは，「おおきなかぶ」や「電光掲示板」のように有益なものではありません。作品内に老婦人が出てくるのですが，彼女のある行為が重大な事件の一部になってしまうのです。

そして，科学技術の発展がもたらす，あるタイプの悪影響を考えるとき，私たちは，この老婦人と似た立ち位置にいるように思います。老婦人の行いは，悪事だといえるのかを考えながら，概要をお読みください。

今回のポイント―個と全体

この作品は，この後，会の真相や会員の行動の意味を知らされた老婦人が，どう思いを巡らせ，どのような境地に至るのかも見どころです。ぜひ原作をお読みください。

さて作品において，老婦人をはじめとする会員たちは，長電話したり，犬の散歩をしたり，個々の行為としては，何も悪いことをしていません。しかし，会員による個々の行動が連鎖することで，巧妙な殺人計画が実現されます。老婦人は意図せずとも，結果的には犯罪に加担したのです。

作中で青年は老婦人に「あなたさまは，長電話をなさった。それを悪事だとお思いになりますか」と質問しています。さて，ここで質問です。皆さんが老婦人であれば，どのように答えるでしょうか。

「悪事だと思わない」という立場

老婦人は，「（自首）しないわよ。そんな巻きぞえはごめんだし，あたしが殺したのじゃないもの」とこたえました。その前には，「知らなかったからよ」とも言っています。

老婦人は直接手を下したわけではありません。「あたしが殺したのじゃないもの」というのは，確かにそのとおりです。あくまで偶然が重なった事故なのです。

また老婦人は，この計画を知りませんでした。老婦人は殺人をするつもりはなく，刺激が欲しくて長電話をしただけです。この長電話という行為が，どのような結果をもたらすのかも知りませんでした。そして，その結果はまさに想定外の

作品の概要　「入会」星　新一

『どこかの事件』（新潮社）収録

なに不自由なく生活している老婦人がいた。強いていえば，退屈が問題だった。ある日，青年が老婦人を訪れてきた。精神的な刺激を得られる会を紹介しているという。

その会は秘密が多かった。青年は名刺ももっていない。会の存在も秘密で，名称さえなく，会員どうしも顔を合わせない。ニュースになると問題になり，会員としての楽しみもなくなる存在で，誰かに秘密を明かせば制裁もあるというのだ。老婦人はその秘密めいたところにひかれ，仮入会をした。当然，仮入会したことも秘密だ。青年は，何をするのかをいずれ電話で知らせると言い残して帰っていった。

しばらくして，青年から電話があった。ある電話番号が告げられる。その番号はメモしてはいけない。すぐに電話をかけ，出た相手とできるだけ長く話をしてほしいという依頼だった。老婦人はそれをするとどうなるのかをたずねたが，青年は「あとのお楽しみでございます」と答えた。老婦人はさっそく電話をかけた。彼女は時のたつのを忘れるほど熱中し，1 時間半ほど話して受話器をおいた。

何日かして青年が訪れてきた。青年は「おかげさまで，なにもかも，うまくまいりました」といい，お礼として紙幣の入った封筒をさし出した。老婦人は驚き，どういう役に立ったのかをたずねた。青年は口ごもり，申し上げられないと答えた。老婦人は，わけがわからず落ち着かない。「どうしたら，教えていただけるの」と老婦人がたずねると，青年は正式会員になれば教えるといった。入会金は安くなく，青年は仮入会でいることをすすめた。しかし老婦人は入会した。

青年は説明を始めた。ある金持ちの老人がおり，彼はレストランで夕食をとることを習慣にしている。その日，老人が注文をすると，居合わせた客が同じ料理を注文した。この客は，じつは会員だという。会員である客は，あるスパイスを使うようシェフに依頼した。珍しい味付けになって老人も喜ぶだろうということで，老人の料理にもスパイスが用いられた。しかしスパイスが体質に合わず，老人は気分が悪くなってしまった。老人はレストランからかかりつけの医者に電話をかけたが，電話は何度かけても話し中であった。

そこで老婦人が「なぜ……」とたずねた。青年は「それは，つまり，あなたさまが，その番号へおかけになっていたからで……」とこたえた。

青年は話をつづけた。店を出た老人にはさまざまなことが起こる。親切な車に乗せてもらったが，途中で降ろされ，案内された道を歩いていくと墓地についた。夜の墓地は神経が過敏になる。そのときに，そばで何かが光る。偶然誰かがライターをつけたのだ。さらに白い犬に不意にほえつかれる。誰かが犬の散歩をしていたのだ。気がめいった老人は，追い詰められた気分でボートに乗る。すると偶然近くを大きな船が通りかかり，その波でひっくり返ってしまう。老人は助けを呼んだが，偶然誰かが自動車のクラクションを鳴らし続ける。こうして偶然が重なったあげく，老人は水死したという。

しかし青年の話によれば，電話がつながらないなど，すべての偶然は，会員が依頼を受けて起こしたものだ。老婦人は「だったら，殺人じゃないの……」と声を高めた。青年は，老婦人自身も含め，誰も殺そうと考えて行動をした人はいなかったとこたえた。老婦人は「知らなかったからよ。こんな大それたことは，いつかは発覚するわよ」といった。

しかし青年は「あなたさまは，長電話をなさった。それを悪事だとお思いになりますか。そのことで，警察に自首なさいますか」と問う。老婦人は「しないわよ。そんな巻きぞえはごめんだし，あたしが殺したのじゃないもの」とこたえる。青年はいう。「さようでございましょう。どなたさまも，そういうご気分なのでございます。雨だれが石に穴をあけるという，ことわざがあります，どの一滴のためか，最初の一滴か，最後の一滴か，途中のどれかなど，判定のつけられないことなのです」

ものでした。長電話が緊急の連絡を妨げ，巡り巡って悲劇をもたらすとは，普通は考えません。逆に，もしそのような想定までしなければならないとしたら，私たちは何一つ行動できないでしょう。

「悪事だと思う」という立場

その一方で老婦人は，この一連の行動の連鎖を聞いた後に，自ら「だったら，殺人じゃないの……」と言っています。この直感は否定し難いものがあります。確かに青年の説明は筋

が通っており，行為の連鎖が存在し，計画が実行された可能性は高いでしょう。老婦人の長電話をした経験とも矛盾せず，入会時の約束や謝礼の支給などの不思議なことも説明できます。作中では老婦人が青年を疑う場面もありますが，仮に青年が真実を語っていた場合，老婦人が長電話をしていなければ，老人はかかりつけの医者と連絡がついて，大事には至らなかったでしょう。その意味で，老婦人の罪は重く，計画に大きく加担しているといえます。

ただ，もし老婦人が「ある会に入会し，そこからの依頼で長電話をしたら，巡り巡って殺人をした」と警察に自首しても，真剣には受け止められないでしょう。また会の存在や青年の説明が信頼できることを示す確かな証拠もありません。こうした目に見えない，想定外の因果関係を周囲に知らせるのは容易ではないのです。

現代の私たちとのつながり

作品では，行為の連鎖を計画して，会員に指示を出す人物がいました。もちろん，その点は違いますが，科学技術と社会の間で生じているさまざまな問題で，私たちは老婦人と似た立場にいるように思います。なぜなら，今の私たちの何げない，罪にもならない一つ一つの行動が積み重なって，時間や空間を超えて大きな影響を与えると予測されているからです。

例えば，私たちはふだん電気を使って生活しています。そこに何ら悪意はありませんし，直接何か悪い結果をもたらしているわけではありません。それ自体は誰もが行っていることですし，特に罪に問われることもありません。

電気を社会に供給するためには，火力発電や原子力発電を行う必要があります。これらの発電もすぐに悪い影響をもたらすわけではありません。しかし火力発電が多くなれば，二酸化炭素の排出が増え，地球温暖化が深刻になる可能性があります。地球温暖化の影響は，今の日本では直接経験することが困難です。深刻な被害を受けるのは，最貧国の人々や数世代先の子孫だといわれています。

一方で，原子力発電であれば，高レベル放射性廃棄物が問題となります。最終処分場は数万年もの間，安全を維持しなければなりません。仮に安全に保たれたとしても，例えば，地震が来るたびに地域住民は不安を感じるかもしれませんし，建設によって地下水脈が変わることも考慮すれば，その不安が広がる範囲は予想もつきません。万が一にも，処分場に欠陥があれば，今の私たちの行いが，数万年後に正確には想像のできない悪影響をもたらすことになります。

老婦人の場合と同じように，私たちはこれらの被害を意図して生活していませんし，将来世代に恨みもありません。また直接手を下すわけでもありません。小さなことが重なって生じる問題であり，個人の責任とはいえません。

また被害状況を直接経験することができません。作中で青年が果たした個々の行為とその結末をつなぐ因果関係を示す役割は，科学者が果たすことになります。当然，超長期的な大規模な予測なので，大きな不確実性があります。因果関係も必ずしも明確ではありません。作中で老婦人が青年を疑ったように，現実では科学者の信頼が問われるでしょう。

もし連鎖が事実だとしても，作中で老婦人の自首が信じてもらえないと推測されたのと同じように，遠い連鎖の話なので誰も信じず，意識して行動しなかったりするかもしれません。そうであれば，罪の意識をもったり，連鎖を周囲に伝えたりするのは，個人としては苦しい決断です。自分一人だけ不自由な生活をしても，結果は大きく変えられませんし，個人としては不利益を被るだけだからです。

しかし，「だったら殺人じゃないの……」という老婦人の率直な感想は，やはり引っかかります。青年の話に比べれば，温室効果ガスや放射性廃棄物が問題になるという説明は納得できますし，科学者は信頼できると思います。私たちは，どうすればいいでしょうか。

「おおきなかぶ」や「電光掲示板」の事例では，個々の小さな行動の連鎖により，有益な結果をもたらしていました。この可能性にかけるのはどうでしょう。もちろん良い結果をもたらす場合も，実現はずいぶん先の話です。そのような連鎖が見つかるのか，それは連鎖の予測は正しいのか，それは将来の世代から歓迎されるのか否かなど，多くの疑問もあります。これらは行動しない理由になるでしょうか。

老婦人と私たちには異なる点があります。それは，私たちはその悪影響を予測しているという点です。ある意味では，青年の説明を受けた後の老婦人の立場に近いのかもしれません。行動を変えるにせよ，変えないにせよ，老婦人のように「知らなかった」ということはできないのです。

あなたはどうしますか。「おおきなかぶ」のネズミは，あなたかもしれませんよ。 ❖

第6回

アルコールの生物学

東京都立国立高等学校 主任教諭
大野 智久 / おおの ともひさ

1981年茨城県に生まれる。2004年東京大学大学院総合文化研究科修士課程修了。在学中は松田良一教授に師事。2006年都立高校の教諭（理科・生物）となり，2015年より現任校に勤務。日本生物教育学会，日本生物教育会に所属。東京都生物教育研究会を中心に活動。日本人類学会や日本人類遺伝学会などの学会と連携し，「ヒトの生物学」の高校現場への導入を模索。上越教育大学の西川純教授の提唱する『学び合い』の考え方に基づく協働学習を実践。NHK高校講座の生物基礎の講師を務める。

今回は，「アルコール」を取り上げます。生物では，肝臓の解毒作用の例で登場するだけで，飲酒の影響等は保健体育で詳しく扱われています。しかし，保健の教科書でも，「しくみ」についてほとんど説明がないままに，「飲酒の害」について羅列的に記述されているだけです。しかし，アルコールに関する内容は，そのような扱いではもったいないくらい，多くの生物学的な内容と関連しているのです。それらを見ていくことにしましょう。

アルコールはどう処理されるか？

アルコールは，肝臓で代謝されます。その過程が図１に示されています。アルコールは，ADH（アルコール脱水素酵素）の働きによってアセトアルデヒドになります。続いて，ALDH（アルデヒド脱水素酵素）の働きにより酢酸になります。ADH と ALDH は脱水素酵素であり，エタノールやアセトアルデヒドから奪った電子を使って NAD を還元し NADH にします。

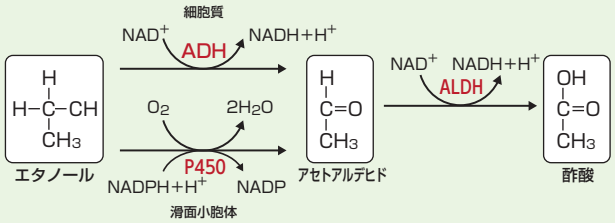


図１　肝細胞におけるアルコール代謝

酒を飲むと脂肪肝になる？

いわゆる「脂肪」は，グリセリンに３つの脂肪酸が結合した「トリグリセリド」とよばれる物質です。エネルギーが不足するときには，この脂肪を分解し，脂肪酸を炭素２つ分ずつ切断し，CoA と結合させ，アセチル CoA がつくられます。これをβ酸化といいます。アセチル CoA は，その後呼吸のクエン酸回路に入っていきます。

アルコールの分解が盛んに起き，ADH や ALDH の働きによって NADH が合成されている場合には，NADH：NAD の濃度比が増加します。すると，NAD が不足し，NAD を必要とする反応速度が低下することになります。NADH を消費する電子伝達系も反応速度に限界があるため，NADH が多量にある場合には，NADH が細胞内に蓄積し，NAD が不足するために，NAD から NADH をつくる反応である解糖系，クエン酸回路，β酸化などの反応系がうまく進まなくなります。すると，脂肪の分解は進まなくなり，逆に，過剰になったアセチル CoA から脂肪酸を合成する反応が起こります。そして，脂肪は脂肪滴として肝細胞内に蓄積していきます。これが，「酒を飲むと脂肪肝になる」しくみです。ちなみに，脂肪肝は，脂肪性肝炎，肝硬変と進行し，肝がんが生じることもあるので，注意が必要です。

酒は「飲むと強くなる」のか？

「酒を飲むと強くなる」と言われます。図１を見ると，エタノールの代謝には，ADH 以外に P450 という酵素も働い

ています。ADH の活性はあまり変わりませんが，P450 は酒を飲むと活性が高まることが知られています。これが，「酒を飲むと強くなる」，つまり多くの量の酒を飲めるようになるしくみです。しかし，P450 の活性が高まると，アルコールが分解されやすくなり，酔いを感じるためにはより多量のアルコールの摂取が必要となったりします。また，P450 はさまざまな薬物の代謝に働いているため，その活性が高まると薬が効きにくくなるなどの影響も考えられます。あまり P450 に頼るのは賢明な策ではなさそうです。ちなみに，飲酒時に薬を飲むと，薬物代謝を行う P450 がアルコール代謝を行っているため，薬物の効果が出すぎてしまうこともあります。飲酒時に薬を飲むことは絶対に避けなければなりません。

酒を飲むとなぜフラフラする?

酒を飲むと，足元がおぼつかなくなり，ふらつくことがあります。これはなぜなのでしょうか。エタノールは，脳に作用することが知られています。脳には，「血液脳関門」と呼ばれるバリアがあり，有害な物質が脳に入ってこないようになっています。しかし，小さい分子や脂溶性の物質はこのバリアを通り抜けることができます。エタノールはこれらの条件を満たすため，血液を介して脳内に入ってきてしまいます。ちなみに，妊娠時には母体から胎児へ胎盤を通じて酸素や栄養が供給されますが，エタノールは血液脳関門を通過するのと同様に胎盤も通過してしまいます。妊婦が飲酒をすると胎児にエタノールが運ばれ，発生に深刻な影響を及ぼすこともあります。ですから，妊娠中の飲酒は厳禁なのです。

脳内に入ってきたエタノールは，脳内の神経伝達物質であるGABAやグルタミン酸の受容体に作用するなど，さまざまな作用機序で細胞に影響を与え，脳を麻痺させると考えられています。脳の部位によって影響の受けやすさも変わるようです。例えば，歩行時のふらつきは，平衡感覚に関する小脳の機能が低下するためだと考えられます。これ以外の影響としては，理性を失ったり，あるいは記憶がなくなったりということもあります。これらも，理性を司る前頭葉や，記憶を司る海馬の機能が低下するためだと考えられます。また，「急性アルコール中毒」では，アルコールの血中濃度が一気に高まり，呼吸や心臓の拍動を司る延髄までもが麻痺し，死に至ることもあります。「一気飲み」による死亡事故はこうして起こると考えられます。

「酒の強さ」を決める遺伝子

酒を飲んで気持ち悪くなるのは，アセトアルデヒドが原因だと考えられています。「酒に強い人」は，アセトアルデヒドが速やかに分解される人であり，ALDH の活性が高い人ということができます。ALDH には ALDH1 と ALDH2 があり，ALDH2 をつくる遺伝子には，活性の高い型（N 型）と低い型（D 型）があります。遺伝子型が NN の人は，ALDH2 の活性が高く，アセトアルデヒドがすぐに分解されるため，酒に強い人です。逆に DD 型の人は酒に弱い人です（ただし ALDH2 の多型だけでは酒の強さを説明できません）。ND 型の人は，NN 型の人に比べて ALDH2 の活性が半分あるように感じますが，実際にはそうではありません。実は，ALDH2 は 4 量体で働く酵素です。そして，4 量体を構成するタンパク質がすべて N 型でないと活性を持ちません。そのため，ND 型の人からできる 4 量体のうち，16 分の 1 しか活性を持たないのです（図 2）。

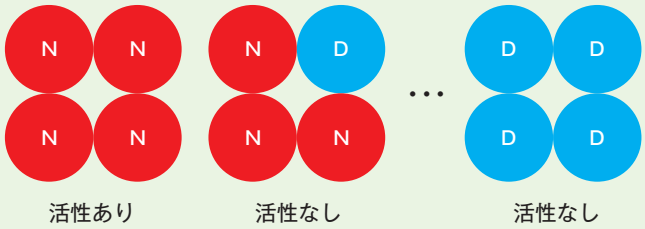


図 2　ALDH2 の 4 量体と活性のイメージ

ALDH2 の N 型と D 型では，遺伝子上に一塩基の違いがあります。その結果，N 型では 487 番目のアミノ酸がグルタミン酸になっているのに対し，D 型ではリシンになっています。それでは，この多型はいつどこで生じたのでしょうか。これに関する非常に興味深い研究があります。

遺伝子でわかるヒトの移動

欧米やアフリカの人はほとんどが NN 型ですが，日本人では ND 型が 38%，DD 型が 4% 見られます。世界的には，D 型は東アジアに特有のものであることがわかってきました（図 3）。

このデータから，先述した一塩基の変異が東アジアのどこかで生じたのではないかという仮説が浮かびます。

また，日本に限って言えば，北海道，東北，九州にはN型遺伝子の頻度が比較的高いのに対し，北陸，中部，中国，近畿ではN型遺伝子の頻度が比較的低いという研究も報告されています。大陸から日本に渡ってきた人がどのように移動したのかを推測する材料にできるかもしれません。

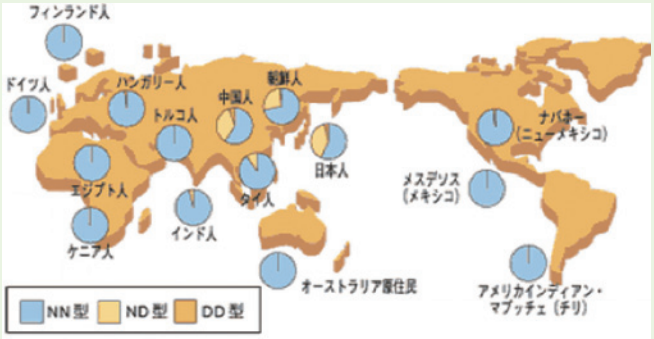


図3　各国のALDH2の遺伝子型の割合

http://www.athome-academy.jp/archive/biology/0000000176_all.html より引用

遺伝子でわかる進化の歴史

ADHの一種であるADH4は，肝臓や網膜などに存在しており，エタノールの代謝に関係しています。ADH4を霊長類で分析し，アルコール代謝能力がいつ高まったのかを調べようという論文が2015年に出ました。その結果，ヒト，チンパンジー，ゴリラのもつADH4はエタノールを分解することができるが，オランウータンのADH4はエタノールを分解することができないということがわかりました。つまり，オランウータンがヒト，チンパンジー，ゴリラと分岐した後，ADH4のエタノール分解活性が高まったと考えられます。

もともと霊長類は樹上生活を送っており，果実を食べていました。それらが発酵するとある種のアルコールを含むので，アルコール代謝ができるほうが適応的であったのでしょう。実際に，この論文でも，オランウータンのADH4も，エタノールではない別のアルコールを分解する活性があることが確認されています。

エタノールの分解に関しては，オランウータンに比べて，ヒト，チンパンジー，ゴリラの共通祖先は地上での活動が増えたため，より発酵の進んでいる果物を食べるようになり，エタノールを摂取する機会が増え，エタノールを分解できる変異が適応的になったのではないかと考えられています。アルコール代謝から，霊長類の進化について考えることができるのは，とても興味深いことです。

高校生物との関連性

下の表1は，ここまで述べたアルコール関連の内容と高校生物との関連性をまとめたものです。脂質の代謝や血液脳関門など，一部，高校生物の範囲外のものもありますが，それ以外の内容は高校生物の学習範囲でも十分に理解できるものばかりです。知識を活用して考えるという点においても，日常生活や社会との接点という点においても，アルコールに関する種々の話題は授業で取り上げてみてもよいのではないでしょうか。

表1　アルコール関連の内容と高校生物との関連性　（　）内は高校生物の範囲外

科　目	内　容
生物基礎	酵素の性質：ADH，ALDH 肝臓の構造と機能：アルコール代謝
生物	呼吸：NADH，電子伝達系，（β酸化），（脂質の生合成） 遺伝子の働き：ADH，ALDHの多型 脳の構造と機能：小脳，延髄，前頭葉，海馬，（血液脳関門） 進化のしくみ：ADH，ALDHの進化と適応的意義

最後に，大学一年生では「一気飲み」の死亡事故が今でも起こっており，問題となっています。このような背景もあるので，授業で扱う際は，単に酒への興味を駆り立てるような扱いではなく，酒の害をしっかりと伝え，そのうえで生物学的な興味深い話題を取り上げるなど，十分な配慮が必要です。❖

参考資料

坂井建雄他，2008年，『人体の正常構造と機能』，日本医事新報社

「酒の強さは遺伝子で決まる（筑波大学・原田勝二）」

http://www.athome-academy.jp/archive/biology/0000000176_all.html

Carrigan MA. et al.(2015): Hominids adapted to metabolize ethanol long before human-directed fermentation. PNAS, 112, 2, 366–371.

「ふくやまサイエンスフェスティバル」の実施にいたる経過と課題

福山市立大学 教育学部 准教授
平松 和彦 ／ ひらまつ かずひこ

行事の概要

福山市立大学は広島県東部に位置する人口46万人の中都市，福山市に2011年4月開学した，教育学部と都市経営学部からなる小規模な大学である。この大学を会場にして，2013年の9月の晴れ渡った一日，初の試みとして「ふくやまサイエンスフェスティバル」が開催された。好評に応えて，今年度で3回目を迎える。これは市立大学として地域への貢献の一環として，小学生（児童）をおもな対象とし，科学実験を楽しみ，実験名人によるサイエンスショーに触れて，科学の本質を学ぶ機会を提供することをねらいとしている。

大学による地域連携の具体的な取り組みとして市内の小学校理科教育研究会や中・高等学校の関係者のほか，地元企業の協力を得ながら実施されたことも特長のひとつである。福山市は古くから「ものづくり」の伝統を持つ地方都市であり，オンリーワンといえるようなユニークな中規模の企業が複数存在しているからである。

図1　ふくやまサイエンスフェスティバルの会場

背景にあるもの

最初の実施は大学開学からすでに3年目とはいえ，それまで培ったいくつかの素地があり，その延長線上で実現したと言える。伏線になっている背景について整理してみよう。

第1に挙げられるのは，開学時から市内の小学校に本学の教員が積極的に出前授業を行っていたことである。大学の教育研究交流センターが主導して，両学部の教員に個々の専門性を生かした出前授業を依頼し，集計されたリストを市内の学校に提示し，各校が希望する授業と時期を示して大学側へ応募するという形で実施された。その数は開学の2011年度には市内33校，翌2012年度は26校に及んだ。だが，出前授業を通じて大学と小学校の教員の間で授業を通じて交流を行うことには限界があった。シラバスに従った形で出前授業に来てもらいたいという小学校側の希望に対して，大学教員側は必ずしも時間的に対応できないこともあるうえに，実際に授業に出向いても，その指導内容が小学校の教員側にスキルとしてすぐには伝わらないという一種のもどかしさがあった。理科専科の教員が配置されていても，出前授業で実施した実験を参考に，授業をあらたに組み立てて活用しようという段階までは難しい。教材研究の時間も十分に取れない現状では，外部講師に授業を丸投げするような形になり，1コマの授業を大学教員が代行するかのような場面すらあった。

教育研究交流センターでは，当時のセンター長を中心に，出前授業のあり方を再検討していく中で，逆に，理科教員が大学に出向いて，自ら実験を子ども達に指導するという形態もよいのではないかという発想が生まれていった。小学校教員が大学のキャンパスで，集まってきた子ども達に実験を演示するという普段とは違った体験型学習の場の提供となる。

第2の素地として触れておきたいのは，2012年の9月に日本雪氷学会と日本雪工学会の合同大会「雪氷研究大会」が大学で開かれて，それに付随する形で日本雪氷学会主催の市民向け普及イベント「雪氷楽会」が開催されたということである。雪氷の研究に携わる者たちが，子ども達や一般市民を対象に雪氷関係の実験や，遊びの要素を含む体験型の実習を楽しんでもらおうという企画であるが，このとき野外ステージを使ったサイエンスショーも行われた。特に防災科学技術

研究所の研究者が青空の下，中庭のステージで演じたパフォーマンスは圧巻であった。校舎の配置が，科学イベントを開催するのに適したデザインであることも幸いし，参加型の実験ブースがたくさん出展され，多くの子ども達や一般市民が訪れて雪氷科学の世界を楽しんだ。この経験がサイエンスフェスティバル実現の際に，大いに活かされたわけである。

第３に，教育学部では他大学と同様に，通常３年次で教育実習を行っているが，このほかに実地体験という名称で，２～４年次までの学生が授業協力やクラブ活動指導を補助するなどさまざまな形で，日頃から小学校に出向いて行う活動がある。市立大学ならではの教育現場との連携や，培われてきた学生の子ども達への対応，日常的に市立小学校と交流が行われていることなども，このサイエンスフェスティバルが成功する原動力の一つになったと考えられる。

最後に，福山市は「ものづくり」の優良な企業が活躍しているにもかかわらず，科学館施設を持っていないという事情を挙げておこう。保護者が子ども達を連れて行くとすれば，広島市のこども文化科学館，府中市のこどもの国，倉敷市のライフパーク科学センターや，隣町の笠岡市にあるカブトガニ博物館など市外になってしまう。１日だけとはいえ，アクセスのよい大学を会場にしてこのイベントが実施されたことは，福山市民にとって好都合であったことも見逃せない。

実行委員会と構成内容

初年度の実施に先立ち，前年の2012年12月に大学でフェスティバル準備委員会が開催された。主催は本学教育研究交流センターと福山市学校教育研究団体連絡協議会・小学校理科研究会とし，その他の企業などが協賛や協力・後援団体として参加することが決定した。このあと３回にわたる実行委員会を経て，当日のプログラムを３部構成とすることが決められた。その内容は以下のとおりで，現在も継続している。

【第１部　実験ブースコーナー】

基本的に大学側から３～４つ，小学校側から３ブース，さらに中学・高等学校から２ブースがこの３年間のブースである。中庭を使い，テントを張って机とパネルを設置した。

【第2部　製作体験】

アリーナ（室内体育館）を使って，企業側が提供する「ものづくり」体験が行われた。

【第３部　サイエンスショー】

中庭に常設されているステージを使用。良質のショーを見てもらうために，国内の科学館で活動する実験名人を招き，ユーモアたっぷりで笑いを誘いながら科学の面白さを披露し，子ども達の興味をかきたてていた。このステージでは吹奏楽サークルが開会と昼休みに演奏を披露し，大学での開催ならではの彩りを添えた。

今後に向けた課題

今後，継続していくにはいくつかの克服すべき問題がある。一つは教員がどの程度この企画にエネルギーを注ぐことができるかという問題。小学校から大学の教員に至るまで最近では提出書類の作成など，非常に多くの雑用をこなさなければならず，やや無理をしながら開催にこぎつけているというのが実情である。また秋の学期が始まる直前の土曜日に実施しているが，ちょうど各種学会や研究会が集中する時期でもあり，この行事に関わることができる大学教員も多くはない。また，本学は市立大学なので，福山市役所の職員が大学事務局に配置されているが，土曜日に開催するには事務局サイドの全面的な理解と協力がなければ成り立たない行事である。

一方，予算面での課題もある。前年度の市役所内での予算申請を経て，翌年の実施が実現する運びとなる。特に持ち帰りの工作の場合には消耗品の事前購入が不可欠だが，立替払いができない市役所の会計システムが踏襲されるために，個々人の持ち出しを避けられないのが実態である。継続していくとすれば，外部資金の申請など新たな方策が必要な時期を迎えているのかもしれない。ささやかなイベントであっても表に現れない個々のエネルギーの集積が不可欠なのである。❖

編集後記

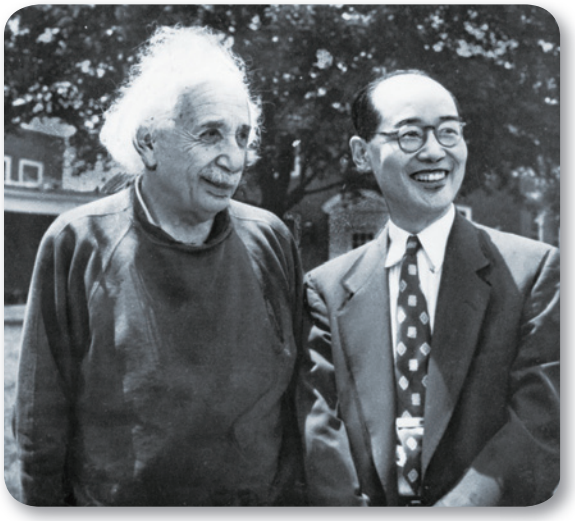
リオデジャネイロオリンピック・パラリンピックでは最後まであきらめずに戦い抜いた選手の姿に感動しました。選手のあふれ出る笑顔と涙，そしてコメントがきらきらしていてとても美しかったです。次は，東京大会です。その2020年にはいよいよ小学校で新しい学習指導要領が実施され，主体的に学ぶ「アクティブ・ラーニング」が本格的に始まります。教育も社会のグローバル化に向けて大きく舵を切ろうとしています。

（財）理数教育研究所 事務局

科学史の散歩道　第 17 回

二人の理論物理学者の「予言」

～アインシュタインの「重力波」と湯川秀樹の「中間子」～



©毎日新聞社／アフロ

プリンストン高等学術研究所のキャンパスを散策するアルベルト・アインシュタインと湯川秀樹（1953年6月）

今から 100 年ほど前，アインシュタイン（1879 ～ 1955 年）は「時間が伸びたり，空間が縮んだり，光が曲がる」などそれまでのニュートン力学とは異なった，いわゆる「相対性理論」（高度な幾何学を活用）を発表しました。今年（2016 年）2 月，その「理論」で「予言」された「重力波」（天体など物体の運動によって周囲の空間が歪み，それが波となって伝わる現象）が初めてアメリカの研究者たちによって観測されたことが新聞や雑誌などで伝えられました。日本や他の国でもその観測準備が進められてきていますが，「予言」が「実証」されれば，宇宙の誕生の解明につながるという期待の声も聞かれます。そのアインシュタインが 1922 年に出版社の招きで一度だけ日本を訪れました。「相対性理論」で有名になっていた彼は物理学の専門家に留まらず，ジャーナリズムの取り上げ方も影響し，人々に大歓迎されました。このアインシュタイン来日が一つのきっかけとなって後に理論物理学の道に進み，「中間子理論」（1935 年）を生みだしたのが湯川秀樹（1907 ～ 1981 年）です。彼は原子核の中の陽子や中性子がなぜばらばらにならないのかという疑問を抱き，それらを結びつけている新たな粒子（「中間子」と命名）が存在することを理論的（数学的）に「予言」しました。初めは無視されていたのですが，1947 年に宇宙線の研究によって「確証」されました。この 2 つの「予言」は，ペンと紙，そして「数学の才」によってもたらされたのです。

大阪教育大学名誉教授　鈴木 善次 / すずき ぜんじ

Rimse（リムス）　No.17

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 : アフロ

©Rimse 2016

2016年10月20日発行