

科学的な見方や考え方を深める理科の授業

Science Classes that Cultivate a Scientific Mindset and Approach

大嶋 一夫

Kazuo Oshima

1. はじめに

これから訪れようとしている社会（Society 5.0）は、人工知能（AI）、Internet of Things（IoT）、ビッグデータ、ロボティクス等の先端技術が高度化し、あらゆる産業や社会生活に取り入れられる。そこでは、「文章や情報を正確に読み解き対話する力」や「科学的に思考し活用する力」、「価値を見つけ生み出す感性と力、好奇心・探究力」等が求められることとなり、理科教育の果たす役割がますます重要になる。

今回改訂された学習指導要領では、各教科等の特質に応じた物事を捉える視点や考え方である「見方・考え方」が示されている。「見方・考え方」を働かせながら、知識を相互に関連付けてより深く理解し、情報を精査して考えを形成し、問題を見いだして解決策を考え、思いや考えを基に創造することなどの過程を重視した学習が求められている。

「理科の見方・考え方」については、「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」とある。さらに、理科では、資質・能力を育むために必要な学びの過程として、「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、資質・能力が育成されるよう指導の改善を図ることが重要となる。

高等学校の新学習指導要領は令和4年度入学生から年次進行で実施される。そこで、高等学校理科の改訂の基本的な考え方を確認し、着実な実施に向けての取り組みを考えたい。

2. 新学習指導要領のポイント

(1) 理科の目標（高等学校学習指導要領新旧対照表）

新（平成30年3月告示）	現行（平成21年3月告示）
<p>第1款 目標</p> <p>自然の事物・現象に関わり、<u>理科の見方・考え方を働かせ、見通しをもって観察、実験を行うこと</u>などを通して、自然の事物・現象を<u>科学的に探究するために必要な資質・能力</u>を次のとおり育成することを旨とする。</p> <p>(1) 自然の事物・現象についての理解を深め、科学的に探究するために必要な観察、実験などに関する技能を身に付けるようにする。</p>	<p>第1款 目標</p> <p>自然の事物・現象に対する関心や探究心を高め、目的意識をもって観察、実験などを行い、科学的に探究する能力と態度を育てるとともに自然の事物・現象についての理解を深め、科学的な自然観を育成する。</p>

- | |
|--|
| <p>(2) 観察、実験などを行い、科学的に探究する力を養う。</p> <p>(3) 自然の事物・現象に主体的に関わり、科学的に探究しようとする態度を養う。</p> |
|--|

改訂では、目標の前文中に「理科の見方・考え方を働かせ」が追加となり、「目的意識をもって」が、「見通しをもって」に変更された。どのような学習の過程を通してねらいを達成するかを示している。(1)では育成を目指す資質・能力のうち「知識及び技能」を、(2)では「思考力、判断力、表現力等」を、(3)では「学びに向かう力、人間性等」をそれぞれ示し、三つの柱に沿って明確化され、資質・能力をより具体的なものとして示すとともに、資質・能力を育成する過程で働く、物事を捉える視点や考え方として整理された。「資質・能力の三つの柱」は、中央教育審議会答申の中で次のように示されている。

<p>「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。「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。「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。</p>

(2) 各科目の内容

今回の改訂では、各科目ともに「知識・技能」を「ア」で示し、「思考力・判断力・表現力等」を「イ」で示し、理科の目標を達成するためには、科学的に探究するために必要な観察や実験などを行い、「ア」に示す知識及び技能と「イ」に示す思考力、判断力、表現力等を相互に関連させながら身に付けるように指導することが大切であるとしている。

また、「探究の過程（課題解決型学習）」の強調「観察、実験などを行い」や「資料に基づいて」など、各科目ともに課題解決的な学習を展開することを強調している。これは「3 内容の取扱い (1) イ」でも「この科目で育成を目指す資質・能力を育むため、観察、実験などを行い、探究の過程を踏まえた学習活動を行うようにすること。」という一文が追加されたことから読み取ることができる。

各科目等の表現の一部

【物理基礎・物理】

- ・これまで「理解する」としていたもののなかに、新しく「実験などを行い、〇〇の関係を見いだして理解する」や「実験などを行い、〇〇と関連付けて理解する」といった実験などを行うことが明示されたものがある。

【化学基礎・化学】

- ・「〇〇について、観察、実験を通して理解するとともに」「〇〇について、観察、実験を通して探究し〇〇を見いだして表現すること」といった表現が見られる。

【生物基礎・生物】

- ・「理解する」としていたものが、「〇〇を見いだして理解する」になった。
 - ・「資料に基づいて」、もしくは「観察、実験などを行い」などの文言が追加された。
 - ・「扱うこと」「触れること」などの文末表現が変更になっている箇所がみられる。
- (用語に関わる概念を、思考力を発揮しながら指導することが求められる。重要となる用語の目安とし「生物基礎」では200語程度から250語程度、「生物」では500語程度から600語程度として示された。)

【地学基礎・地学】

- ・「理解する」としていたものが、「○○を見い出して理解する」「○○を見い出して表現する」になった。
- ・「資料に基づいて」、もしくは「観察、実験などを行い」などの文言が追加された。

(3) 資質・能力を育成する学びの過程

中央教育審議会答申（平成28年12月）では、「理科においては、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、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。そして、このような探究の過程全体を生徒が主体的に遂行できるようにすることを旨とするとともに、生徒が常に知的好奇心を持って身の回りの自然の事物・現象に関わるようになることや、その中で得た気付きから疑問を形成し課題として設定することができるようになることを重視すべきである。」と示されており、高等学校学習指導要領解説にも、「資質・能力を育むために重視する探究の過程のイメージ」が右図のように示されている。

理科の学習においては、「理科の見方・考え方」を働かせながら、知識及び技能を習得したり、思考、判断、表現したりしていくものであると同時に、学習を通して「理科の見方・考え方」が豊かで確かなものとなっていくと考えられるとしている。

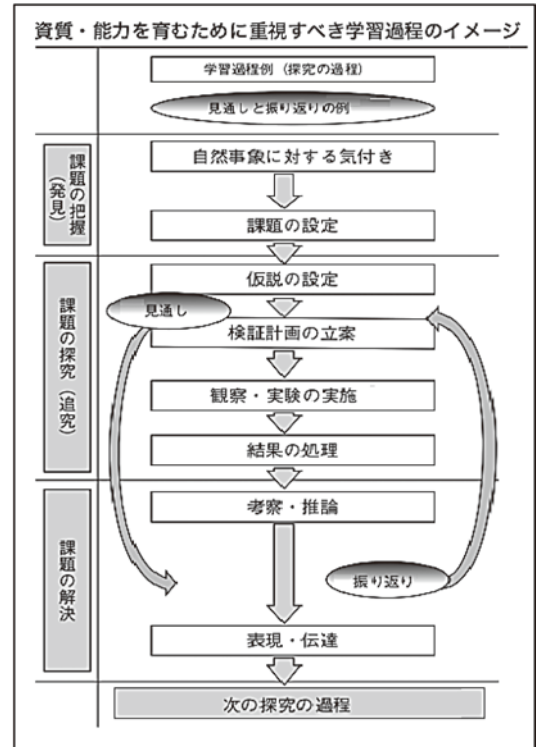


図1 『高等学校学習指導要領（平成30年告示）解説 理科編 理数編』より

(4) 「主体的・対話的で深い学び」の実現に向けた授業改善

単元など内容や時間のまとまりを見通し、その中で育む資質・能力の育成に向けて、生徒の主体的・対話的で深い学びの実現を図るようにすること。その際、理科の学習過程の特質を踏まえ、理科の見方・考え方を働かせ、見通しをもって観察、実験を行うことなどの科学的に探究する学習活動の充実を図ることとしている。

「主体的な学び」について

- ・自然の事物・現象から課題や仮説を設定し、観察、実験などの計画を立案したりする学習場面を設ける。
- ・観察、実験などの結果を分析し解釈して仮説の妥当性を検討し、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。
- ・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。

「対話的な学び」について

- ・課題の設定や検証計画の立案、観察、実験の結果の処理、考察などの場面では、あらかじめ個人で考え、その後、意見交換したり、科学的な根拠に基づいて議論したりして、自分の考えをより妥当なものにする学習場面を設ける。

「深い学び」について

- ・「理科の見方・考え方」を働かせながら探究の過程を通して学ぶことにより、理科で育成を目指す資質・

能力を獲得する。

- ・様々な知識がつながって、より科学的な概念を形成することに向かうようにする。
- ・新たに獲得した資質・能力に基づいた「理科の見方・考え方」を、次の学習や日常生活などにおける課題の発見や解決の場面で働かせるようにする。

3. 自然事象に対する気付きの大切さ

理科は従来から、探究的な学習の過程（問題解決の過程）を大切にしてきた教科である。中央教育審議会答申（平成28年12月）でも、「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、資質・能力が育成されるよう指導の改善を図る必要がある」とあるように、理科では学習の過程がいかに大切であるかが読み取れる。この資質・能力を育成する学びの過程（探究の過程）のスタートである「自然事象に対する気付き」がなければ、「課題設定」→「仮説設定」→「検証計画立案」→「観察・実験の実施」→「結果の処理」→「考察・推論」→…と進まない。この「気付き力」を育成することがとても重要だと考えている。

(1) 教師を目指す学生の「気付き」について

理科指導法Ⅳを受講している学生38名に、下記の文を与え、感想を聞いてみた。

『宇宙誕生のきっかけとなるビッグバンが起こったのは今から138億年前です。そして46億年前に太陽系が形成され始めました。私たちの住む地球は、約45億4000万年前に誕生しました。生命の誕生は約38億年前です。この頃の地球は、地上に強い紫外線が降り注ぎ、火山活動も活発で生物の生存には厳しい環境にあったため生命の誕生は海の中でした。そして、人類の誕生は、600万年～500万年前。より大きな脳を持ち二足歩行で楽に歩けるようになった霊長類です。猿人で有名なのはアウストラロピテクスです。』

[学生の感想]

ア 歴史の壮大さに感動した内容（主なもの）19名

- ・人類の誕生は地球の長い歴史から見ると最近のことだと改めて感じた。
- ・生命の誕生までに7億年もの間の期間があってその間はどのような風景であったのだろう。
- ・宇宙ができてから今に至るまで考えると、私が存在している時間はほんの少しであると改めて感じた。また、何億年前という歴史単位になると想像することが難しくなると感じた。
- ・ビッグバンが起きたのは約138億年前とのことで想像もできないような年月がかかっていると感じた。ビッグバンが起きてから人類が誕生するまでの時間は人類が誕生してから現代までよりも時間がかかっており、その間に何があったのか見当もつかない。

イ 生命の進化に対する内容（主なもの）16名

- ・生物の誕生から人類の進化の過程まで長い年月がかかっているが、昔のように今の人間が何かしら進化していくことはあるのだろうか疑問に感じた。
- ・大昔の地球から考えると、このように現在の地球が出来上がっているということは思いもよらないことだといえる。このように歴史をたどることで、人間の進化のすばらしさや頑張りを見ることができると感じた。
- ・人類の歴史をざっくりと理解することができました。かなりの年月をかけてここまで進化したことにも驚いた。

ウ その他 3名

- ・生命の誕生について化石などから予測できてすごいと思った。

- ・宇宙は無制限の広がりがある中で、ビックバンは、はじめ何を軸としておきたのか、なぜ元素が集まって意志を持ち動く生命体が完成されたのか。始祖の部分に関する謎が非常に多いと感じる。
- ・書物や壁画といった『記録する文化』がまだ無い時代、ましてや人類が生まれてすらいない時代のさわりを詳細に、あたかもそこに伝達能力を備えた記録者が存在したかのように感じた。人類は見てもない記録を読み解くほどに各種分野が発展してきているのだというある種の証拠ではないか。

(2) 学生に「気付き」の意識を持たせる

(1) の『宇宙誕生…』の文を読んだ多くの学生は「そうか宇宙の誕生は138億年前ということなんだ。ヒトが誕生したのはそれに比べれば最近のことだなあ、それにしても何億年前という歴史単位になると壮大だ。進化についても驚きだ。」など感想を述べる。中には、「ビックバンはなぜ起きたのか」「人類は見てもない記録をどうして作れたか」などの疑問を持つ学生もいたが、文書に書かれている情報は、ほとんどの学生は素直に受け入れられ知識として蓄積されるだろう。しかも、その情報の正誤を判断することも少なく、情報の裏付けも確認もしないのである。

例えば、「〇年前というのはどうして分かったのだろう。」という意識があればすぐに気が付くことでも、意識しなければ気付かない。地球最古の化石は、37億7000万～43億年前の人間の髪の毛よりも細い長さ最大0.5mmの海生バクテリアのもので、それ以前の年代の根拠は何か。太陽系の形成や宇宙の始まりはどうして分かったか。等「気付き」の意識を働かせることが、学びの過程ではとても重要だと考えている。

理科の教員を目指す学生は、文書を読むときや事象を見るときには、その裏付けや根拠、原因や理由についても考え、日常から「不思議さ」や「疑問」の意識を持つことが大切である。また、指導する生徒に対しても同じような意識を持たせ、教科書に記載されている表面的な事柄を教えるだけでなく、物事を見る目、観察する力、考える力も育成するべきである。調べて分かる知識を覚えることに大きな意味は失われており、自分で探究する課題を見つけ、様々な情報と知識を結び付けながら、自分の課題の解決を目指すような態度が求められている。

(3) 「当たり前」に疑問を持つことの大切さ

ノーベル医学生理学賞を受賞した京都大学特別教授の本庶佑さんが、研究で心掛けていることは「好奇心、そして簡単に信じないことだ」と語っていた。基本的な姿勢は「自分の目で確信できるまでやる。自分の頭で考えて、納得できるまでやる。」ことだそうだ。そして、「重要なのは知りたい、不思議だと思ふ心を大切にすること。教科書に書いてあることを信じない。諦めない。」と子供たちへメッセージを送っていた。「教科書に書いてあることを信じない」という言葉はとても衝撃的でしたが、よく考えてみると「当たり前と思われていることをそのまま鵜呑みにしてはいけない」という意味だと推察される。また、不思議だと思ふ心や好奇心をもつことで、知ろうとする力が発揮される。『教科書を鵜呑みにするのではなく、好奇心や不思議に思ふ心を持ち、実際に確かめて、自分の五感を通して気づいたことや学んだことが何よりも大切である。』というメッセージは理科教育の原点だと考えている。

生徒が自然事象と向き合う中で、自ら疑問を持ち問題を見だし、観察・実験などを通して意欲的に探究し、そうした一連の学習の中で、基礎的な知識や技能はもとより、より高度な思考力・判断力・表現力、そして強い志を育てていくことの大切さを再認識するとともに、理科の教員も探究していく気持ちを持続することが必要である。

(4) 生徒の学習意欲を引き出す

生徒には、身の回りの事象を見渡して、不思議に思ふこと、疑問に思ふことがたくさんあることを意識させたい。「そういわれてみれば、なぜ？」というような題材を授業に導入することで次第に、生徒自身が問

題を発見するようになり、意欲も引き出すことができると考える。

例えば、授業の導入などで、次のような質問を試みる。

- ・植物の葉の色は緑色、それでは光合成で使われている色も緑色なのか？
- ・電線はいつも弛んでいるのはなぜか？（ピンと張れないのはなぜか？）
- ・レインボーブリッジの鉄塔はなぜ高いのか？（低い方が建設コストも安いのに）
- ・パルテノン神殿は柱だけが残っているのはなぜか？
- ・青と黄色の絵具を混ぜると緑色になる。ところが、日光を黄色のガラスに通し、次に青色のガラスに通すと、真っ黒になってしまうのはなぜか？
- ・可視光線のスペクトル（紫……赤）に、金色や銀色はないのはなぜか？

このような比較的身近な事象についての質問に対し、きちんと説明できる生徒は少ない。しかし、解説すると多くの生徒が納得し興味を持つようになる。そして、理科の学習を通して疑問を解決できると分かれば、意欲もさらに大きくなる。生徒には、日常的に物事を科学的に見る習慣を持たせ、当然視するのではなく、好奇心をもって見ることの大切さを教えたい。

人は、ものを見ているようで見ていないことも多く、例えば、時刻を知るために時計を見ても、針だけをチラと見ておしまい。時刻を知るという目的は達成するが、時針の形の面白さや時計の仕組みまで想像することまではしない。小林秀雄氏が「美を求める心」の中で、「例えば、諸君が野原を歩いていて一輪の美しい花の咲いているのを見たとする。近づいて見ると、それは堇の花とわかる。何だ、堇の花か、と思った瞬間に、諸君はもう花の形も色も見のを止めるでしょう。堇という言葉が、諸君の心のうちに這入って来れば、諸君は、もう眼を閉じるのです。（中略）堇の花だとわかるということは、花の姿や色の美しい感じを言葉で置き換えてしまうことです。」と書いている。花の名前を表す記号だけで、わかったようになり、それ以上、しっかり見たり、考えたりしないのだ。ものを見るということについて、あらためて、考えさせらる。

4. ガリレオの『新科学対話』にヒントを得た教材の工夫

ガリレオは、科学を研究するのに、物事を観察したばかりでなく、実際の実験に基づいて推論し、自然の中から真理を見つけだそうとする観察と論理を結びつける現代科学の方法で成果を上げた。「見えないと始まらない、見ようとしないと始まらない」はガリレオの言葉。物事を意識して、注意深く見ようとする力（気付き力）が大切であることを示している。自然事象に対する気付きがあり、課題が設定され、物事の意義・本質などを調べ、見きわめようとする課題の探究・解決へとつながっていく探究の過程をガリレオの科学の方法から学びたい。

『新科学対話』では、落下運動や放物運動についてガリレオが探究した過程が3人の対話形式で書かれている。（サグレド：ヴェネチア市民、サルヴィヤチ：新しい科学者（ガリレオの代弁者）、シンプリチオ：アリストテレス哲学に通じた学者の3人がそれぞれの立場で科学について4日間議論し、サルヴィヤチが実験と数学の力でシンプリチオを論破していくという設定で教会対策のために対話形式で書かれた）

そこで、『新科学対話』にヒントを得て、ガリレオが落下運動を探究した過程を生徒にたどらせるという方法で、自然を科学的に探究する能力と科学の基本概念を育てる指導を探っていきたい。

(1) ガリレオの落下法則の研究1（思考実験より）

当時支配的であった落下速度に関するアリストテレス派の「重たいものは軽いものより速く地上に落ちる」という説を、直接実験をせずに、思考実験により論破し自分の考えの正しさを証明している。この方法・過程を教材として取り上げ、思考実験を通して 論理的思考力・科学的な見方を学習したい。

【『新科学対話』第1日からの引用】

サルヴィヤチ いや、たいして実験をしなくても簡単にそして確実に、二つの物体が同じ材料からできていて、要するにアリストテレスが言ってるような物でありさえすれば、重い物体の運動は軽い物体より速くないことが証明できます。でシンプリチオ君にお伺いしますが、どんな落体でも、自然によって定められた一定の速さ、即ち外力あるいは抵抗力なしには増減する事の出来ない速度を持っている、ということをお認めになるでしょうか。

シンプリチオ 一定の媒質中を運動する一定の物体は自然が決めてくれた一定の速度を持っていて、外から運動量が増えられなくてはその速度は増えず、又何かがそれを阻む抵抗力がなくてはその速度は減じない、ということは疑いありません。

サルヴィヤチ ではもし自然速度の異なる二つの物体をとって、二つを結び合わせた場合、速い方の物体は遅い方の物体のために幾分かその速さを緩められ遅い方は速い方のため幾分か速められるということがあるわけですね。こういう考えでは私と一致するでしょうか。

シンプリチオ まったく仰せの通りです。

サルヴィヤチ しかし、もしこれが本当だとし、そしてもし大きな石が例えば8の速さで、一方の小さな方の石が4の速さで動くとするればその二つが結び合わさったものは8よりも小なる速さで動くでしょう。ですが二つの石が結合されれば、その大きさは、以前の8の速さで動いていた石よりも大となりますから、重い物体が軽い物体よりも速度が小であるという、あなたの仮定とまったく相反する結果になります。これで、あなたの仮定、即ち重い物体が軽いお物体より速度が大きいうということから理を推していけば、重い方が軽い方よりも一層速度が小さくなる、と言えることがお分かりでしょう。

シンプリチオ それは困った。小さな石を大きな石に結びつけるとその重さが増し重さを増しながらどうして速さが増さないのか、或いはせめてどうして減らないでいることさえできないのか、私には分かりません。

サルヴィヤチ ここでもあなたは誤りを犯していますよ。シンプリチオ君、小さな方の石は、大きな石の重さを増しはしないのですからね。 (中略)

サルヴィヤチ ……私達はすでに、小さな石の速さが小であれば或程度まで大きな石の運動を遅くし、それで二つを結合すると、それは大きな方の石よりも重い物体であるが、その速さはより小さくなるだろうと、あなたの仮説とは反対の結論に達したのですから比重が同じであれば大きな物体も小さな物体も同じ速さであると推論することができます

シンプリチオ あなたの議論の運び方はまったく敬服に値します。しかし、それでも私には散弾が砲弾と同じ速さで落ちるとはちょっと信じられないと思います。

サルヴィヤチ なぜ、一粒の砂が石臼と同じ速さで、と言わないのですか。しかしシンプリチオ君、私はあなたを信じていますが、あなたは多くの人達の遣り口を真似て、議論を主題から逸らし、ほんの毛程の弱みを持った私の言葉尻を捉えて、それでもって船の碇綱程もある大きな誤りをその陰に隠すようなことはなさらないでしょうね？と申しますのは、アリストテレスは「100キュービットの高所から落ちる100ポンドの鉄球は、同時に同じ高さから落下し始めた1ポンドの球が1キュービット落ちたときに、地面に達する」と申します。私は双方同時に地面に達するというのです。あなたは実験をして、大きい方は指幅二つだけ先んじている、即ち大きな方が地面に達したとき、小さい方は指幅二つだけ遅れていることを見いだします。そこであなたはこの指幅二つの陰にアリストテレスの99キュービットを隠したり、また私のこの小さな誤りをはやし立てて、しかも彼の非常に大きな誤りを見逃したりなさらないでしょうね？

【資料をもとにした学習活動】

I ガリレオの考えを代表するサルヴィヤチは、「重たいものは軽いものより速く地上に落ちる」という考えを、思考実験により論破した。その方法をまとめる。

ア 論理的骨格－帰謬法（きびゆうほう）

この論法は、「AならばBである」ことを反論するためには、Bとはならないことをいえば、「BでなければAでない」によって最初の命題Aを否定できるというものでガリレオは好んで使ったようである。

〈思考の過程〉

(ア) 命題Aにあたるものはなにか。

(イ) 2物体（重い+軽い）を理想的なひもでつないだら2つの命題B、B'が結論としてでてくる。それをまとめよ。

(ウ) 命題B、B'とが矛盾していることを確認する。

(エ) よって命題Aは正しくない。（この論法を帰謬法という）

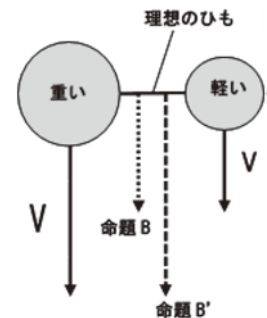


図2 ガリレオの思考実験

II 簡単な実験

重さが非常に違う二つの物体（例えば本と鉛筆）を糸で結ぶ。それを色々な向き（鉛筆が上で本が下、あるいはその反対など）に落としてみよ。糸に注目して、その結果をまとめよ。



図3 簡単な実験

III 最後のサルヴィヤチの言葉には、自然観察の際の大事な原則が述べられているが、どのようなことを言っているのかを考える。

ア 2つの見方

釘と爪楊枝とを同じ高さから同時に落とすと、正確には同時に地面に到達しない。このことをアリストテレスの理論ではどのように説明したのだろうか。また、ガリレオの説明ではどうかをまとめる。

イ 自然現象の観察

日常観察される世界は複雑である。たとえば、落下する物体を観察するとき落下の法則と空気抵抗の効果を同時に見ていることになる。観察した事実を理解するためには単純な場合から考えることが基本であることを知る。

IV 真空中の運動

ガリレオの『新科学対話』第一日目の、先に引用した箇所から十数ページ後ろのほうにいくと（岩波文庫『新科学対話』上p.110～）真空中の運動という論題の導入を与える。すなわち、「真空中では全ての物体は同じ速さで落下する」という落下原理の定立を果たすのである。ここでも、思考実験によりアリストテレスが真空否定の根拠とした「同じ物体が異なる媒質中を落下する場合、その媒体の抵抗に反比例する」という考えが虚偽であることを証明している。

当時としては実現困難であった真空が、現在では簡単に真空に近い状態を実現できる。そのひとつの方法として、生徒が簡単に実験できる多機能真空容器（バキューター）を用いて真空落下実験器を製作し、空気抵抗が小さい状態での落下運動を観察する。

ア 多機能真空容器（バキューター）の真空度合を調べる

多機能真空容器は、食料品の保存、一度栓を抜いたワインの保存などの目的



図4 多機能真空容器

に作られた家庭用品である。市販の容器750mℓ（実際は1000mℓ）をもちい、ポンプを上下させる回数における重さを測定することで真空度合いを求める。

ポンプをパッキンに当てるときの密着度、ポンプの上下の運動のばらつきなどにより、誤差がともなうので、できるだけ慎重に行った。

結果は表1、図5のようになり、ポンプの回数が100回以前でほとんどの空気が抜ける限界に近づいてしまう。

表1 ポンプの回数と容器の重さ
(気温17.0℃、気圧1013hPa)

回数 [回]	容器の重さ [g]	重さの変化量 [g]
0	194.78	0.00
10	194.46	-0.32
20	194.25	-0.53
30	194.11	-0.67
40	194.00	-0.78
50	193.95	-0.83
100	193.92	-0.86
200	193.91	-0.87
300	193.90	-0.88
400	193.89	-0.89
500	193.88	-0.90

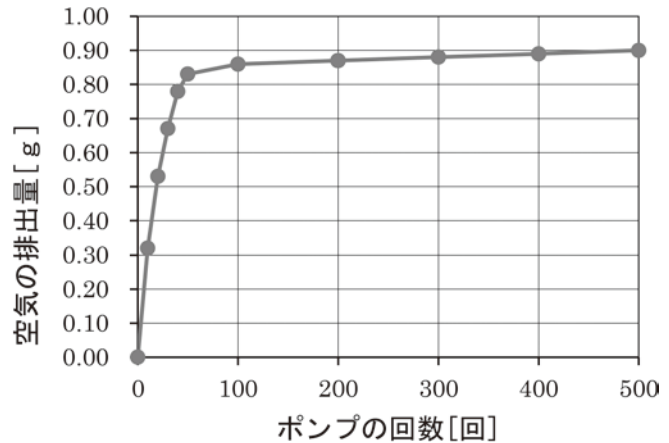


図5 ポンプの回数との空気の排出量 [g]

[空気を理想気体に近似した計算]

① 500回で0.90 [g] の空気が排出された。排出量の割合を計算してみた。

$P=1.0$ [atm]、 $T=290$ [K]、 $V=1.0$ [ℓ]、 $R=0.082$ [atm・ℓ/mol・K] として気体の状態方程式を用いて最初に在った空気の状態を計算する。

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \times 1}{0.082 \times 290} = 0.042 \text{ [mol]}$$

空気1 [mol] の質量は28.8 [g] なので0.042 [mol] あたりの質量は、
 $28.8 \times 0.042 = 1.2$ [g] となる。

よって排出量の割合は

$0.9 \text{ [g]} / 1.2 \text{ [g]} = 0.75$ となり4分の3の空気が排出されたことになると推測される。

イ 落下実験器の製作・実験

(ア) 製作手順

- ① アクリル管に合うゴム栓を2個用意する。
- ② ギュム栓の1個にコルクボーラーで穴をあけペットボトルの口の部分を取り付ける（接着剤で固定する）。
- ③ ペットボトルの口部分にパキューテナーのストッパーを取り付ける。
- ④ ギュム栓の内側に布を貼り付ける。
(試料がゴム栓に付かないようにするため)
- ⑤ 試料を入れゴム栓でアクリル管を密封する。

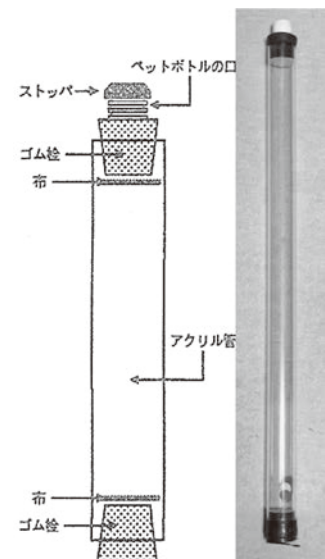


図6 落下実験器

(イ) 観 察

- ① 試料は、羽毛・金属板・紙を用いる。
- ② アクリル管の空気をぬかない状態で、素早く倒立させて観察する。
- ③ 管内の空気をポンプで吸引した後、素早く倒立させて観察する。
- ④ 2つの場合を比較する。

(ウ) 従来の真空落下実験器との比較

- ① 簡単に製作ができ、班ごとに実験が可能である。
- ② 実験器がガラス製ではないので破損する危険性がなく扱いやすい。
- ③ 管内の空気をポンプで吸引するときに大気圧を体験できる。
- ④ 手軽に何度でも繰り返し実験ができる。

(2) ガリレオの落下法則の研究2 (仮定→推論→実験)

ガリレオの『新科学対話』第三日目(岩波文庫『新科学対話』下p. 27～)で、ものが落下する際には重さには関係しないことを証明するとともに、実験によって「落下速度は時間に比例する」「落下距離は時間の二乗に比例する」ことを見いだした。この方法は、その後の自然探究の方法としてのモデルを提供することになった。この方法・過程を教材として取り上げ、探究学習の方法を学びたい。

I 仮 説

ガリレオは、はじめに「落下速度は落下距離に比例する」と考えていた。「落ちる高さが高いほど終速度は大きくなる」という命題は、日常的に正しそうである。しかし、ガリレオはこの誤りに気づく。そして、「速度は時間に比例する」という考えに至った。ガリレオの『新科学対話』第三日目の、第二部自然加速運動に入り十数ページ後ろのほうにいくと(岩波文庫『新科学対話』下p. 27～)サルヴェチアが次のように述べている。

サルヴィヤチ もし速度がその通過した、或いは通過すべき距離に比例するとすれば、それらの距離は何れも同一時間内に通過されることになります。従ってもし、物体が4キュービットの距離を通過するときの速度が、初めの2キュービットを行くときの速度の2倍であるとすれば、これらの通過に要する時間は全く相等しいのです。しかし、同一物体でありながら8キュービットが、4キュービットと同一時間内に通過されるということは、ただ瞬間運動の場合にのみ可能なことです。しかるに、われわれは落体の運動は時間を要するものであり、2キュービット行くには4キュービットを行くよりも少ない時間で済むことをみているのです。ですから、速度が落下距離に比例して増加するという事は間違っています。

II 推 論

仮説からしばらくすると(岩波文庫『新科学対話』下p. 35～)次のような命題がでてくる。続いて落下運動の法則の定立過程がある。

命題1

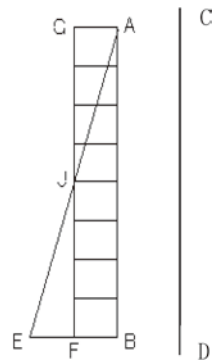
物体が静止してから出立して、一様に加速される場合、それが任意の距離を進むのに必要な時間は、同じ物体が同じ距離を、その速さが加速運動の始まる直前の速度と最高の速度との平均値に等しい等速運動を行う場合の所要時間に等しい。

命題2

静止から等加速度運動をもって落下する一つの物体によって通過されるべき距離は、それらの距離を通過するに要する時間間隔の平方に比例する。

〈落下運動法則の定立〉

ABは一つの物体が静止の状態からはじまって、一定の距離を通過するのに要する時間tをあらわすものとする。時間の全体を小時間部分にわけ、各部分に相当する速度の大きさをABの垂線上に移す。EBは終速度vである。つぎにABに立てられた垂線の全ての端を結ぶと、直線AEをうる。AEはEB (v) およびAB (t) と一つの三角形をつくる。



ついで、 $FB = 1/2EB = 1/2v$ の上に一つの平行四辺形をつくると、面積の等しい図形ABEおよびABFGがえられる。両者とも線分AB、EB、およびFBの大きさから明らかのように $1/2vt$ に等しい。従って時間t内に物体が等加速度運動によって通過する距離は、その物体がやはり時間t内につねに等しい速度 $1/2v$ で運動した場合の距離に等しい。

したがって、物体が静止の状態から等加速度で落下するときは、一定の時間内に通過する距離は、時間の二乗に比例するという命題を証明した。

すなわち $v = gt$ とすると $S = 1/2gt^2$ となる。

III 実験 (斜面の実験)

命題からしばらくすると (岩波文庫『新科学対話』下p. 42 ~) 有名な斜面の実験がサルヴェチアによって述べられている。

サルヴィヤチ ……………長さ12キュービット、幅1/2キュービット、厚さ3指幅の定規または角材を持ってきます。その線に幅1指幅あまりの溝を切ります。この溝はきわめてまっすぐに作られ、平滑に、かつ磨かれ、なおその内側に、できるだけ平滑な、つるつるした羊皮紙が貼ってあります。その上を硬く、平滑な、完全に丸い真鍮の球を転がすのです。この板を、その一端が他端より1ないし2キュービットひきあげて傾斜した位置に置き、上に述べた球を溝にそって転がし、その落下に要する時間を次に述べるような仕方て記録するのです。われわれはこの実験を繰り返して、再度の観測の差が1脈拍の10分の1を超えないまでに精密なものにしました。その結果がじゅうぶん信用できると考えられるまで、これを繰り返した後、今度は球を溝の長さの1/4だけ転がして、その落下時間を測ってみますと、前の場合のちょうど半分であることを見いだしました。次にわれわれは異なった距離で行い、全体の長さに対する時間を1/2あるいは2/3、3/4等任意の分数をなすものと比較してみました。この実験を100回はたっぴり繰り返したのですが、かような実験においてわれわれは常に、経過距離が時間の二乗に比例すること、また、それが板のすなわちわれわれが球を転がした溝の傾斜がなににかかわらず真なることを見いだしたのであります。……………

時間を測るためには、水を入れた大きな器を高いところに置いて用いました。この器の底には直径の小さな管がろう付けされており、それを通して細い水滴を流出せしめ、溝の全体にせよ、その長さの一部にせよ、毎度の降下時間、その水滴の水を小さなコップに集めました。かようにして集められた水は、下降のつど、きわめて精密な天秤で秤量されたのであります。その重さの差および比が得られたわけですが、それはきわめて精密なもので、幾回繰り返してもその結果には目立った偏差は生じなかったのです。

IV 結論

球を溝の1/4の長さだけ転がして落下時間を測ると、全体の長さを転がしたときのちょうど半分である。また、斜面の傾斜角度によらず、経過距離が時間の二乗に比例することを見いだした。このことから分かることは、Sの長さを転がったときの時間をT、速度の大きさを V_1 、1/4Sだけ転がったときの速度の大き

さを V_2 とすると、 $S=1/2V_1T$ $1/4S=1/2V_2(1/2T)$ となり、 $V_1=2V_2$ の関係がわかる。速度が2倍になれば時間も2倍になることを示している。

さらに、斜面の傾斜角度によらず $S \propto T^2$ の関係が得られたことから、 $S=1/2VT$ より $V \propto T$ が導かれる。よって、実験の結果により「速度は時間に比例する」という仮説は正しいと結論づけられた。

V 資料をもとにした学習活動

ア ガリレオの探究の過程をまとめよ。

- (ア) 観測→仮定→推論→実験および修正のサイクルにあてはめて考える。
- (イ) 仮説を直接試さなかったのはなぜか、実際はどのような実験をしたかまとめる。
- (ウ) この過程の中で帰納法と演繹法とがどのように組み込まれているのか考える。

イ ガリレオの行った実験を簡単な実験で検証する。

ガリレオが用いた斜面の長さは12キュービット（6～7m）でとても大がかりなものであったが、もっと手軽にできないものかを試みた。

(ア) ゆるやかな斜面の運動

① 移動距離と時間の関係

「自然運動(自由落下運動)によって通過される距離は時間の平方に比例し、等しい時間に通過された距離は1から始まる奇数列をなす」このことが成り立つならば、

$$\text{時刻0から時刻1までの通過距離} \cdots 1^2 - 0^2 = 1$$

$$\text{時刻1から時刻2までの通過距離} \cdots 2^2 - 1^2 = 3$$

$$\text{時刻2から時刻3までの通過距離} \cdots 3^2 - 2^2 = 5$$

となる。よって、等しい時間の通過距離は奇数の比 $1:3:5:\dots$ をなす。

この命題を、斜面を利用して検証する。

② 斜面の傾きの角度を変える

斜面の傾きの角度を変えてもその角度については、ころがる距離に関係なく加速度が一定であることを検証する。

(イ) 実験方法

下図のようなコの字型の真鍮棒に鉄球をころがしてその運動を観察する。本実験では比率1の長さを10cmとした。始点、10cm、40cm、90cmの点に目印をつける。また、真鍮棒がたるまないように木の棒をそえた。

実験①については、鉄球をいくつか用意して1つ目の印を通過したとき次の鉄球をスタートさせる。

実験②については、斜面の角度を変えてそれぞれの角度における通過時間を測定する。

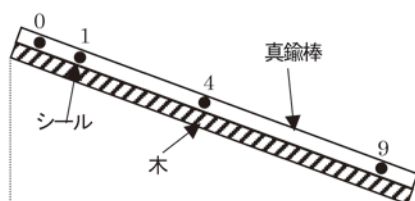


図8 斜面上の目印

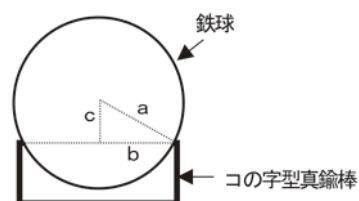


図9 レールと鉄球

(ウ) 結果

〈実験①について〉

何度も繰り返して行うにつれて、鉄球はほぼ10cm、40cm、90cmの点に並ぶのが観察される。これは、一定の時間差（0～10cmの通過時間）をつけてスタートさせるので鉄球間はすべて同じ時間の間隔を持つ。よって通過距離が時間の平方に比例し、等しい時間に通過距離は、1から始まる奇数列をなすこと（等加速度運動）が検証できる。

表2 斜面の角度と移動時間

斜面の角度 [度]	始点からの時間 [秒]		
	10cmの地点	40cmの地点	90cmの地点
1	1.27	2.96	3.96
2	0.83	1.93	2.99
3	0.76	1.59	2.46
4	0.63	1.37	2.22
5	0.53	1.13	1.88
6	0.50	1.08	1.67
7	0.41	0.97	1.60

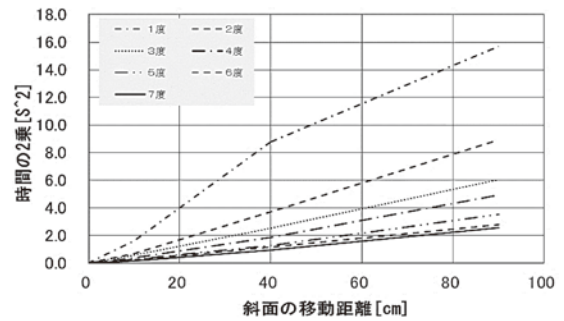


図10 斜面の角度と移動時間の2乗

〈実験②について〉

それぞれの角度において、移動時間の2乗と移動距離の関係を表すとグラフのようになる。ほぼ一次関数となり距離と時間の2乗が比例し、加速度が一定であることが検証できた。

(エ) 理論式による計算

半径aの球が斜面をころがる場合、高さh分だけころがり落ちたとすると、その位置エネルギーmghは、運動エネルギー(1/2)mv²と回転運動エネルギー(1/2)Iω²になる。

$$mgh = (1/2)mv^2 + (1/2)I\omega^2$$

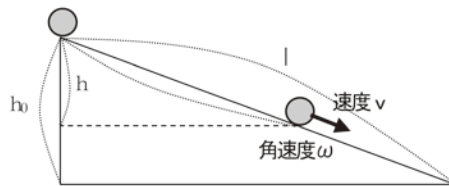


図11 斜面上の条件

鉄球のような球全体が均一なものでできている場合の慣性モーメントは、

$$I = (2/5)ma^2$$

と計算できる。本実験では、鉄球が2本のレールの上に乗ってころがり落ちるので、

$$c\omega = (a^2 - b^2)^{1/2} \quad \omega = v$$

の関係が成り立つ。よって、

$$mgh = (1/2)mv^2 + (1/2)I\omega^2 = (1/2)mv^2 + (1/2)(2/5)ma^2\omega^2$$

$$= (1/2)mv^2 + (1/2)(2/5)ma^2v^2/(a^2 - b^2)$$

$$= (1/2)mv^2 \times \{1 + (2/5)a^2/(a^2 - b^2)\}$$

$$(1/2)mv^2 = \{1 + (2/5)a^2/(a^2 - b^2)\}^{-1}mgh \quad \dots(1)$$

$$v^2 = \{1 + (2/5)a^2/(a^2 - b^2)\}^{-1}2gh$$

$$v = \{1 + (2/5)a^2/(a^2 - b^2)\}^{-1} 2gh)^{1/2} \dots (2)$$

を得る。また、高さ h のかわりに、斜面にそってころがり落ちる距離 χ であらわすと、 $\chi/h = 1/h_0$ だから

$$v = \{1 + (2/5)a^2/(a^2 - b^2)\}^{-1} 2g\chi h_0/1)^{1/2}$$

となる。斜面にそって χ の長さだけころがり落ちるのに要する時間を t とすると、

$$\chi = (1/2)vt \text{ より } t = 2\chi/v = \{1 + (2/5)a^2/(a^2 - b^2)\} \cdot 2\chi / (gh_0)^{1/2} \dots (3)$$

本実験で用いた値を代入してみる。

$$\begin{aligned} l &= 1.0 \text{ [m]} & a &= 1.27 \times 10^{-2} \text{ [m]} & b &= 4.50 \times 10^{-3} \text{ [m]} & g &= 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]} \\ m &= 8.36 \text{ [g]} & h_1 &= 1.7 \times 10^{-2} \text{ [m]} & h_2 &= 3.5 \times 10^{-2} \text{ [m]} & h_3 &= 5.2 \times 10^{-2} \text{ [m]} \\ h_4 &= 7.0 \times 10^{-2} \text{ [m]} & h_5 &= 8.7 \times 10^{-2} \text{ [m]} & h_6 &= 1.05 \times 10^{-1} \text{ [m]} & h_7 &= 1.22 \times 10^{-1} \text{ [m]} \end{aligned}$$

(1) 式より $(1/2)mv^2 = 0.686 mgh$

となり、位置エネルギー mgh の 0.686 が並進運動のエネルギーになる。

(1) 式の $K = \{1 + (2/5)a^2/(a^2 - b^2)\}^{-1}$ について、いま $a=1$ とすれば $0 < b < 1$ (図9参照) の範囲をとり、 $K = 1 - 2/(7 - 5b^2)$ となる。

実験では $b/a = 0.354$ で $K = 0.686$ となるが、これは斜面上転がり落ちるのに必要な回転エネルギーとあまり変わらない。

実験では $b/a = 0.354$ で $K = 0.686$ となるが、これは斜面上転がり落ちるのに必要な回転エネルギーとあまり変わらない。

また、鉄球が斜面を滑らずに転がる条件を求めると静止摩擦係数 μ の範囲は

$$\mu > (5/7) \tan \theta \quad (\theta = 7 \text{ 度}: \mu > 0.088)$$

となり、この値からすると滑らずに転がるというてよい。

また、 $a^2 - b^2 = c^2$ が a^2 に比べて小さければ回転運動のエネルギーが増し運動は遅くなる。

すなわち、直径の小さい球ほど運動が遅いことになる。

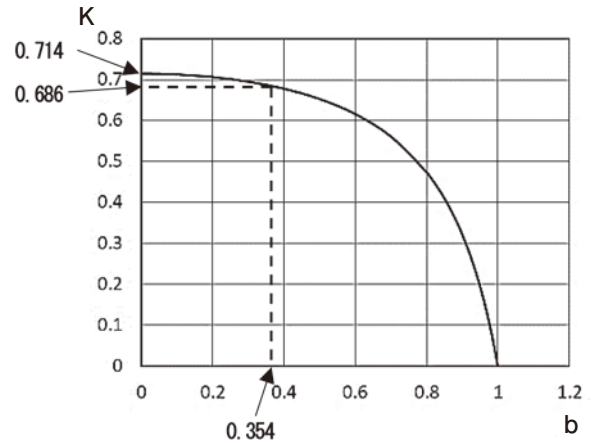


図12 $K = 1 - 2/(7 - 5b^2)$

(3) 式に斜面の角度が1～7度までの条件を代入し対応する $t_1 \sim t_7$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} t_1 &= 3.67 \chi^{1/2} & t_2 &= 2.91 \chi^{1/2} \\ t_3 &= 2.39 \chi^{1/2} & t_4 &= 2.06 \chi^{1/2} \\ t_5 &= 1.85 \chi^{1/2} & t_6 &= 1.68 \chi^{1/2} \\ t_7 &= 1.56 \chi^{1/2} \end{aligned}$$

時間の2乗と移動距離の関係を、測定値と理論値をグラフ上で比較すると斜面の角度が5度、6度、7度、8度当りが測定値と理論値が近い。ガリレオが実際におこなった斜面は約4度であった。

表3 理論値と測定値

斜面の角度 [度]	始点からの時間[秒] ()内は測定値		
	10cmの地点	40cmの地点	90cmの地点
1	1.16 (1.27)	2.32 (2.96)	3.47 (3.96)
2	0.92 (0.83)	1.84 (1.93)	2.76 (2.99)
3	0.75 (0.76)	1.51 (1.59)	2.26 (2.46)
4	0.65 (0.63)	1.30 (1.37)	1.95 (2.22)
5	0.58 (0.53)	1.17 (1.13)	1.75 (1.88)
6	0.53 (0.50)	1.06 (1.08)	1.59 (1.67)
7	0.49 (0.41)	0.99 (0.97)	1.48 (1.60)

(3) ガリレオの放物体の運動の研究、振り子の運動の研究

ガリレオは、発射体の軌道が放物線であることを明確に示した最初の科学者である。『新科学対話』4日目の記述とガリレオの思考方法を取り入れ、「ゆるやかな斜面の運動」を平面上の運動に拡大して放物運動についての放物運動を斜面上での実験を試みた。①重力の成分が平板の傾きによって自由に換えられるのは、放物運動の観察にとっても有効である。板を水平にして実験をすれば、ほぼ等速直線運動するが、徐々に角度をつけていくと放物運動に変わり、放物運動は重力の影響を受けていることが検証できる。②放物運動が水平方向と鉛直方向の運動の合成である。水平方向は等速直線運動であり、鉛直方向は自由落下運動であることが検証できる。③放物運動の水平速度は鉄球を放つ高さだけで決まり、同じ高さではすべて速さが等しい。よって到達距離も同じである事が検証できる。などの成果が得られた。

また、振り子の運動についても「振り子の揺れが大きくても小さくても、振り子の往復にかかる時間は同じである」という仮説を立て、実験により、振り子の重さではなく、振り子のひもの長さによって往復にかかる時間に差が出ることを証明し、振り子の周期を求める式を導いた。『新科学対話』1日目の最後の部分に振り子に関する記述があり、追実験をしたり、今日用いられる振り子の周期の式との違いを考察するなど、有効な教材になる。

5. おわりに

理科教育が従来から大切にしてきた「科学的な見方や考え方」「自然に対する興味・関心や態度を育てる」「探究学習」「問題解決の能力の育成」等の指導は、新学習指導要領でより具体的に表現されるようになり、探究の過程を通じた学習活動が明示された。指導法についても、「単に理解させるのではなく、実験や観察などを行い、日常生活と関連付けて理解させること」や「科学的に探究しようとする態度を養う」といった理科教育の原点を大切にしたものともいえる。この学習活動を効果的に行うためには、学習者の学ぶ意欲が不可欠である。そこで、幼い頃は誰でも持っていた「なぜ?」「どうして?」という単純な気持ちを思い出させ、日常から物事を科学的に見る習慣をつけさせたい。次に、当然視するのではなく、好奇心をもって見ることの大切さを教えたい。そして、想像力をふくらませて新しい考えや観点を生み出し、これまでにない仮説や仮定を立てる「創造的思考」と、ある主張の真偽や妥当性を検討してみる「批判的思考」(非難することでも何でもただ疑うということでない)の2つの思考を育成することが大切だと考えている。

また、新学習指導要領では、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がとって重要となっている。この実現に向けての教材として、現代科学の父といわれるガリレオの思考過程を取り上げてみた。(過去に行った実験データを用いており、新たな実験器具等を用いて再度実験する必要がある。)問題解決の中で用いられる科学的な方法を科学史から直接学びとることで、その探究の過程が疑似体験できる。ここで提示した内容はガリレオが残した業績のほんの一部にすぎないが、ガリレオの考え方や研究の進め方の典型である。物事を観察するばかりでなく実際の実験と試験に基づいて推論し自然の中から真理を見つけだそうとする観察と論理を結びつける現代科学の方法(思考力・判断力)を育てるには『新科学対話』はとてもよい手本となる。ガリレオは自分で仮説を立て、そして実験・検証するということを常に行い、あくまで「自分で確かめる」ことにこだわり続けていた科学者である。自分の目で確かめ検証するという姿勢は、現代の私たちも学ぶ必要があるのではないだろうか。

【参考文献】

- 板倉聖宣『ぼくらはガリレオ』岩波書店(1976)
 金子 務『思考実験とはなにか』講談社(1989)
 ガリレオ・ガリレイ(今野武雄・日田節次訳)『新科学対話』岩波書店(1973)

小林秀雄『考えるヒント3』文藝春秋（2013）

文部科学省『高等学校学習指導要領解説(理科編 理数編)』（平成30年告示）（令和3年8月一部改訂）

渡邊正雄・石川孝夫・笠耐監修『プロジェクト物理1』コロナ社（1977）