

理科課題研究とつながる、
探究型学習を意識した理科教材の開発
—その1—

筑波大学附属駒場中・高等学校 理科

宇田川麻由・梶山 正明・真梶 克彦
高橋 宏和・仲里 友一・吉田 哲也

理科課題研究とつながる、 探究型学習を意識した理科教材の開発

—その1—

筑波大学附属駒場中・高等学校 理科

宇田川麻由・梶山 正明・真梶 克彦
高橋 宏和・仲里 友一・吉田 哲也

要約

2005年にまとめた「先駆的な科学者・技術者を育成するための理科実験 ～スーパーサイエンスハイスクール開発教材の紹介～」で取り上げた実験について、各分野ごとに、現行のカリキュラムにおける位置づけや内容についての変更点をまとめた。また、「理科課題研究」とつながる知識や技能について整理し、それらを育成するために、どのような探究型学習が考えられるか、評価・検討を行った。

キーワード：理科課題研究、スーパーサイエンスハイスクール、SSH、教材開発

1 プロジェクト発足と基本方針

1.1 プロジェクト発足の経緯

本校は、今年度新たに「国際社会に貢献する科学者・技術者の育成をめざした探究型学習システムの構築と教材開発」を研究主題として掲げた、第4期目のスーパーサイエンスハイスクール事業（SSH）の指定を受けた。SSH事業の中では、「国際社会に貢献する科学者・技術者の育成をめざした探究型学習の教材開発と実践」を柱に据え、中学3年に「テーマ学習」、高校2年に「理科課題研究」を設置し、開発した教材をもとに実験を中心とした開発型プログラムを展開しようとしている。また、発展性のある課題に取り組んだ生徒には、高3の「理科課題研究（発展）」で専門的な探究活動へと深化させようとしている。さらに、「主体的な探究活動をするための基礎力育成カリキュラムの開発と実践」も別の柱に据え、理数系基礎力の充実と科学的リテラシーの涵養を目指そうとしている。

「理科課題研究」では、過去15年間のSSH事業に於いて研究・開発してきた教材をできるだけ生かしていくつもりである。本プロジェクトでは、この「理科課題研究」への対応として、現行の理科カリキュラムを再構築し、高1・高2での必修科目における基礎力の獲得を確実にするとともに、高2・高3での選択科目における探究型学習による応用力の育成につながるよう、生徒実験や演示実験、講義での探究型学習を意識

した理科4科目の教材開発に注力していく。

初年度では、各科目において既存の教材の見直しを行うところから始める。2005年にまとめた「先駆的な科学者・技術者を育成するための理科実験 ～スーパーサイエンスハイスクール開発教材の紹介～」で取り上げた実験について、現行のカリキュラムにおける位置づけや内容についての変更点をまとめていく。その中で、「理科課題研究」とつながる知識や技能について整理し、それらを育成するために、どのような探究型学習が考えられるか、まず既存の教材の中での評価・検討を行っていききたい。

2 SSH事業で開発した実験教材の見直し

2.1 物理分野

物理分野では、次の3点に考慮し、実験テーマを設定してきた。

- ① 物理学史上で概念が質的に大きく転換した代表的実験、あるいは高校過程の物理で解明できる身近な物理現象
- ② 実験原理に高校過程で習う物理概念が多く登場し、実験を通して実験技術ばかりでなく理論面も大いに鍛えられる実験
- ③ 粒子概念および波動概念が確立され、ミクロな世界を対象とする物理学では不可欠な量子概念の第一歩となるような実験

これに基づいて、高2対象には主に波動分野の実験

教材を、高3対象には主に原子分野の実験教材を開発・実践してきた。この間、取り上げた実験テーマ自体に大きな変更はないものの、平成21年の高等学校学習指導要領の改訂も考慮し、実験の方法や実施時期の見直しを含め、より効果的な実施方法を模索しながら改良を積み重ねてきた。

2.1.1 音

① 弦の固有振動と弦楽器の秘密

当初、弦を伝わる波の伝搬速度に影響を与えるパラメータとしては、張力・弦長のみを扱った内容であった。これに線密度を加え、さらなる拡張を行った。具体的には、線密度の異なる5種類の弦（同一材質で太さが異なる）を用意し、伝搬速度との関係を導く実験を追加した。

$$V \text{ (伝搬速度)} \propto \sqrt{\frac{T \text{ (張力)}}{\rho \text{ (線密度)}}}$$

② 気柱の固有振動と管楽器の秘密

当初、気柱共鳴の実験は、スピーカーから発信した正弦波を気柱で共鳴させ、それをマイクで受信してシンクロスコープで観察していた。しかし、この方法を複数の班で行うと、班の数だけ音が発信されることによる干渉が問題となっていた。また、生徒は共鳴現象をダイナミックに捉えようとするため、自然と音量が大きくなって聴覚に不快な影響がでることも悩みの種であった。

そこで、気柱内部の振動の様相を直接捉える聴診器と小型マイクの導入を行った。これによって発信される音が小さくても現象をダイナミックに捉えることが可能となり、実験室内の環境も改善された。また、気柱内部にできる定在波の様相を連続的に、かつ五感で捉えられる効果は大きい。

さらに、波長をダイレクトに計測できるので、開口端補正、音速などを比較的容易に算出することも可能となった。

③ 音波の波長および伝搬速度の測定

気柱共鳴と同様、複数の班での一斉実施が困難な実験である。よって、測定自体は教員による演示実験で実施することに変更した。

一方、データロガーを新たに導入し、距離を隔てて設置したマイク2本でパルス波を捉え、到達する時間差から伝搬速度を求める演示実験も合わせて実施することにした。パルス波・連続波・定在波それぞれの特性を活かした音速の測定方法を示すことによって、理解が深まる効果も期待できる。

2.1.2 光

① レーザー光の回折と干渉

緑色、青色レーザーを導入し、光の波長による回折角の違いを確認する演示実験を新たに行うことにした。一方、赤・緑・青のエネルギー密度が異なるため、ダブルスリットの干渉縞では色の違いは視認しにくいので扱わなかった。

② CD記録面での反射光の干渉と溝の間隔測定

多くの生徒が2桁の制度で溝の間隔を導くことができ、教育的効果も高い実験である。これにDVDやBD(Blu-ray Disc)も追加し、レーザー光の波長とのマッチングも確認させたいと考えている。

2.1.3 交流

交流における各素子のはたらきとLC共振回路

電気回路に関心の高い生徒にとって魅力的な素材である一方、シンクロスコープの扱い等を修得しきれていない生徒にとってはハードルが高い一面もある。機器の扱い方の修得にももう少し時間をかけることや、微小な経時変化をストレージできる機能を併せ持ったシンクロスコープの導入も検討したい。

2.1.4 原子

「比電荷」「プランク定数」「リュードベリ定数」を扱う3つの実験と「フランク-ヘルツの実験」を合わせた4つについては、例年、高3の2学期にまとめて実施してきた。力学・波動・電磁気それぞれの分野を一通り学習し終えた後なので、初めて見る実験装置であっても生徒は躊躇せず主体的に取り組む。欲を言えば、4つの実験が歴史的にも関連が強いことを感じとってほしいと願う。「F-Hの実験」では、陰極管内のネオン（当時は水銀）が加速電子からエネルギーを得て発光する。このスペクトルを「リュードベリ定数」で用いる分光器で観測するなど、2つの実験を融合する発展的な取り組みは有効である。

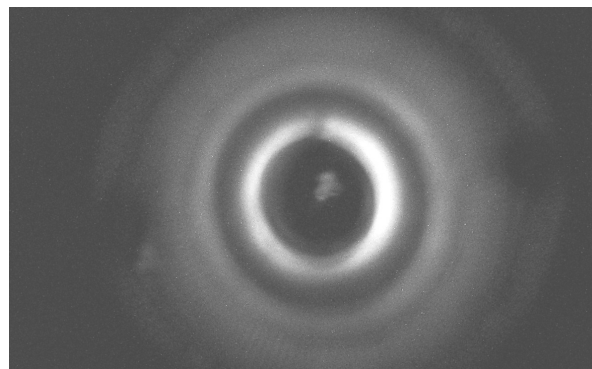


図1. ネオン原子の発光リング

2.2 化学分野

化学科では SSH 導入から現在に至るまでに、小型分光器、紫外可視分光光度計 (UV-VIS)、フーリエ変換型赤外分光光度計 (FT-IR)、ガスクロマトグラフなどを導入し、おもに光 (電磁波) を活用した実験教材を開発してきた。基本的な実験内容についての変更はしていないが、高校の生徒実験だけではなく理科課題研究での活用や、中学 3 年生の総合学習の時間で実施している選択講座「テーマ学習」などでも UV-VIS を用いた実験をおこなうなどの工夫を行っている。理科課題研究では、導入した分析機器を活用した実験を行ったり、紹介をすることで、生徒が自らの課題研究に取り組む際に活用できるように実験環境をととのえている。

2.2.1 光と色との関係

SSH が始まった当初の段階では、UV-VIS や FT-IR を用いた実験が中心であったが、その前段階として光 (電磁波) の性質や目に見えている色と物質が吸収している色の関係を調べる実験を導入した。紫外線、可視光線、赤外線について、光の波長とエネルギーの関係を学習したあとで、UV-VIS の仕組と操作について実験を通して学習する機会を作った。

また、小型分光器を用いて炎色反応や加熱時のガラスの色、蛍光灯の光を分析したり、スライド投影機の光をプリズムで分光・観察する演示実験を行っている。これらの実験を行うことで、高 2 の理科課題研究などでは、有色のサンプルを分析する際に積極的に UV-VIS を活用するようになってきている。

2.2.2 アルカンの光反応とアルケンの付加反応

有機化学の学習においては、「アルカンは置換反応、アルケンは付加反応」と教えられることが多い。しかしながら、アルカンの置換反応の本質は光によるハロゲンのラジカル反応であり、これを理解させるために、UV-VIS を用いている。臭素水にヘキサンを加えて臭素を抽出した、臭素-ヘキサン溶液を用いる基本的な実験と同時に、石英セルを用いて紫外可視吸収スペクトル (300~800 nm) を測定させている。基本的な操作方法は、「光と色との関係」で学習しているので、簡単な確認をしてから班ごとに UV-VIS を操作させ、吸収極大波長がおおよそ 390 nm 付近であることを確認する。光のエネルギー E は、アボガドロ定数 N_A 、プランク定数 h 、真空中の光速 c 、光の波長 λ との間に次の関係が成り立つ。

$$E = N_A h c / \lambda$$

吸収極大波長から計算すると、光を照射された臭素分子が吸収する電磁波のエネルギー E は、おおよそ 307 kJ/mol となる。臭素分子の結合エネルギーは、190 kJ/mol なので臭素分子が光を吸収してラジカルを生成していることが理解できる。この実験では、紫外部の吸収を測定するので石英セルを用いるが、この経験から理科課題研究ではセルの使い分けを生徒自らが行うようになる。

2.2.3 エステル合成と赤外吸収スペクトルの測定

本校では FT-IR と ATR 装置の組合せを用いて、生徒が生成したエステルを分析している。あらかじめ機器の仕組みや分子固有の振動、指紋領域と官能基領域などについての講義をおこなった後、実験結果から得られたチャートをライブラリに照合することで、エステルを同定している。ATR 装置を使用することで数滴のサンプルで分析が出来ることが大きなメリットとなっている。大型モニターを用いてバックグラウンドである大気中の赤外吸収を示し、地球温暖化の関係までを 2 時間の生徒実験の中で実施している。本実験を通して生徒は UV-VIS だけではなく赤外線までも含めた電磁波を用いた分析の有効性を実感し、化学的な思考力が高まるようである。

理科課題研究では有機合成に取り組む生徒がいるが、FT-IR を用いて分析をする意欲的な生徒が現れることが期待できる。但し、現在用いている機器については諸々の条件から今後の継続使用が厳しく、現在機器の更新を検討している。

2.2.4 フェノールフタレインの退色反応速度

フェノールフタレインの塩基性色 (赤色) は、強塩基性下で徐々に退色する。この反応は擬一次反応であり、濃度変化を吸光度で追うことが可能であることから UV-VIS を用いて反応速度の授業で展開をしている。 $[\text{OH}^-]$ が赤色のフェノールフタレイン濃度 $[\text{PP}^{2-}]$ に比べて大過剰にあり測定中に変化しないものとみなすと、吸光度 A 、フェノールフタレイン濃度 $[\text{PP}^{2-}]$ 、反応速度定数 k 、時間 t との間には下記の関係が成り立つ

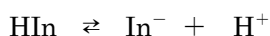
$$\log A = \log [\text{PP}^{2-}]_0 / K - k [\text{OH}^-] t / 2.303$$

したがって、 $\log A$ は傾きが $-k [\text{OH}^-] / 2.303$ の直線関係にあり、吸光度の時間変化と $[\text{OH}^-]$ を測定すれば、反応速度定数 k を算出できる。かつて、「ゼミナール」という形式で展開していたときにも反応速度をテーマ

に研究をする生徒がいたが、ごく少数であった。現在は、高校2年から3年生で取り扱う授業の内容を精査し、高校2年生の理科課題研究を受講している段階で、普通授業において反応速度をテーマにした本実験を導入した。このことは、理科課題研究で物理化学分野における研究に着手しやすく、今まで以上に幅広い研究が期待できる。授業で展開している本実験以外で、理科課題研究を選択した生徒に向けたUV-VISを用いた分析が出来ないか検討中である。

2.2.5 酸・塩基指示薬の色と電離定数

酸・塩基指示薬は、それ自身が弱酸もしくは弱塩基であり水溶液中の酸や塩基と反応することで特定の変色域において色が変わる(In: Indicator)。



この反応の平衡定数 K は下記のようになる。

$$K = [\text{In}^-][\text{H}^+] / [\text{HIn}]$$

これを变形して両辺の対数をとると、

$$\log[\text{In}^-] / [\text{H}^+] = \text{pH} - \text{p}K$$

したがって、横軸を pH、縦軸を $\log[\text{In}^-] / [\text{H}^+]$ にとれば、傾きが1の直線となり横軸との交点の pH の値が $\text{p}K$ となる。生徒実験では、プロモチモールブルーBTB、メチルレッドMR、プロモフェノールブルーBPBのうち1種を選び、緩衝溶液などを持ちて7種類の色調の異なるサンプルを調製する。それぞれのサンプルの吸光度をUV-VISを用いて測定し、エクセルに組み込んだマクロを用いてグラフを作成し、 $\text{p}K$ を求めさせている。どの指示薬を選択しても、ほぼ文献値に近い $\text{p}K$ を得ることが出来る。

かつてのゼミナールでは、特定の物質を合成したいという目的があるわけではないが、有機合成に挑戦したいという生徒がいた。最終的には、メチルオレンジなどの指示薬を合成していたが、変色域での色の変化による目視のみで合成の正否が確認していた。今後は、理科課題研究において $\text{p}K$ を測定することで合成した物質を同定する分析方法を活用できるようにしていきたい。

2.3 生物分野

2.3.1 古草菌の形質転換

遺伝子の本体がDNAであることの証明として、形質転換の実験は極めて重要な教材である。古草菌 (*Bacillus subtilis*) の栄養要求性の突然変異株へ、生徒自らが抽出した野生型DNAを導入する実験で、形

質の確認から始まる、3回の連続した生徒実験から構成されている。

この生徒実験が開発された経緯は、高等学校の現場で組換えDNAを用いた形質転換が行えないことを踏まえて、組換え体を一切扱わない形質転換実験だったことにある。しかし、現在では、特定の宿主・ベクター系と遺伝子に限って、高等学校の現場でも組換えDNAを導入する実験が認められるようになった。後述のオワンクラゲ (*Aequorea victoria*) の発光遺伝子GFPを大腸菌内で発現させる実験キットが普及している。

古草菌の形質転換の場合には、コンピテント状態へもっていくまでの手順が長く準備に時間がかかる。また、結果が選択培地上でのコロニー出現の有無だけで地味である。このような理由から、現在では行わなくなった。

理科課題研究においては、十分な時間がかけられるため、この実験を核にした発展的な実験を構築していくことが可能であろう。生体物質の中でもDNAが遺伝物質であることの証明を、生徒自らが組換えDNAなどを一切用いずに導き出す実験を計画し実施することが可能であると期待される。

2.3.2 pGLO遺伝子組換えキットを用いた形質転換と転写調節のしくみ

BioRad社が開発した、プラスミドpGLOを使った形質転換の実験は多くの高等学校でも導入されるようになった。本校では、独自に構築したGFP遺伝子領域の大部分を欠失させたpGΔ649による形質転換とグルコースによるカタボライト・リプレッションを見る実験を組み合わせ、高校2年生生命科学と高校3年生4単位生物の授業の中で行うようになった。

その代わりにaraC遺伝子の塩基置換突然変異体を用いた転写調節因子の機能解析の実験は、現在では行わなくなった。pGLOを扱った実験を既に数回にわたって実施していることが割愛の大きな理由である。また、この実験の紹介がインターネットに掲載されており、生徒が考察課題に対する解答を得るのに指導者の期待する手順を踏まずに容易に辿り着けるようになったことも大きい。

ただし、塩基置換体作成の実際を辿る意義はあり、課題研究の中で、生徒自らがDNAの改変を行うきっかけにすることが可能である。

2.3.3 形質転換体中の組換え DNA の検出

pGLO や pGΔ649 を用いた形質転換体、並びにプラスミドを導入していない HB101 について、araC 遺伝子領域、GFP 遺伝子領域の検出を目的としたコロニー-PCR を行う実験である。

当初は、GFP 遺伝子領域の検出は 1 対のプライマーのみで行い、β-ラクタマーゼ遺伝子領域の検出も組み合わせで行っていた。しかし BioRad 社の提供する宿主による問題から、β-ラクタマーゼ遺伝子領域の検出は行わなくなった。代わりに、pGΔ649 における増幅産物と pGLO における増幅産物の長さに違いが現れるような別のプライマーセットによる実験を組み合わせで行うように改良した。

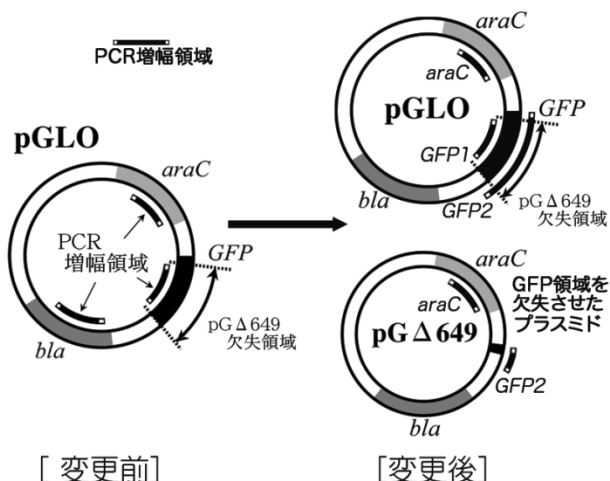


図 2. PCR 実験デザインの変更

生徒の作業をプレミックス 2 種と鋳型 DNA 溶液の混合だけに絞っているため、主に文科系の高 2 生徒が履修する生命科学の中での生徒実験でも良好な結果が得られやすいことから、現在も継続して行っている。

2.3.4 *in situ* ハイブリダイゼーションによるショウジョウバエ初期胚中のピコイド、オスカー-RNA の検出

PCR 産物を使った発展的な実験として、*in situ* ハイブリダイゼーションの実験を課題研究の中で実施してきた。特にオスカー遺伝子やピコイド遺伝子に限定せず、生徒たちに初期発生における発現パターンに興味をもった遺伝子を選択させ、実験を行ってきた。2007 年度からこれまでに、のべ 21 種類の遺伝子断片について PCR 産物を得て、mRNA の存在時期と場所を調べる課題研究を行ってきた。

実験手法として確立できているので、大変時間と手

間のかかる手技であるが、今後も課題研究の実験に組み入れていきたいと考えている。

2.3.5 サザン・ハイブリダイゼーションを利用した組換え DNA の検出

PCR の実験が安定に行えるようになったので、任意の塩基配列をもった DNA の検出には、あまり用いられなくなった実験手法であるが、課題研究の中では、別の目的での応用の場面が想定される。

2.4 地学分野

2003 年度からの本校高等学校の教育課程の改訂に伴い、地学が高校 2 年での選択科目になったため、一部選択者のみに SSH の授業を行うことになった。そこで、本校の中学 3 年生の選択科目である「テーマ学習」において、高校で扱う授業内容をスケールダウンして行うことにした。ここでは SSH で開発した教材を生かせるよう、高度な内容を簡易化して、同じ内容が中学生でも理解できるように工夫した。

2.4.1 貝化石標本をもとにした生物の個体成長と個体変異

カリキュラムの最初に、化石の種類の中で貝殻が溶けて外形の彫刻が地層中に残されている印象化石を取り上げている。一般に大学などで研究する場合には、印象化石にシリコンゴムを使って型を取って種の同定を行うのであるが、作業自体は簡単で、小中学生でも十分できる内容である。そのためこの内容を本校の社会貢献プロジェクトである「筑駒アカデメイア」において小学生を対象に行ったり、8 月の「教員免許更新講習」において本校の中学 1 年生と研修にみえた教員の方々にしたりしており、今後も小・中学生対象に継続して実施したい。



図 3. シリコンゴムの型(左)・セッコウの模型(右)

一方、二枚貝化石を種ごとに分けて電子ノギスで計測し、コンピュータに入力された計測値をグラフ化する授業も行っている。(ただし、中学生はふつうのノギスを使って計測し、電卓にて計算させる。本校の教育研究会(2005年度55期生(高校2年)、2009年度61期生(中学3年)、2012年度62期生(高校2年)において公開授業を実施している。)横軸に殻長(L)、縦軸に殻高(H)をとって、相対成長を表す散布図と回帰直線を求めて、各種の相対成長や個体変異の幅について考察させる。たとえばタマキガイの場合、殻長(L)と殻高(H)の間では、直線の傾きがほぼ1になり、回帰直線から離れた値が少ないことから、両者の成長に関する相関関係が高いことがわかる。この内容は高校課題研究でも十分取り組めるもので、材料さえあれば今後も引き続き行っていきたい。

また、二枚貝の頂角の大きさを、ゴニオメーター(接触測角器)を使って測定すると、タマキガイの頂角は概ね 130° のあたりにピークを持つ正規分布を示していることがわかる。タマキガイは計測できる形質が多く、外側の放射肋の本数、殻頂のかみあわせ部分である歯の数、内側のひだの数なども数えられる。このように二枚貝の様々な種で同様の研究が行え、課題研究の内容を充実させられるものと考えており、新たな発見を期待している。

2.4.2 火成岩の色指数の測定

火成岩の組織が違えば見かけ上の色指数が違ったように感じられる。鉱物が細粒なときと粗粒なときで色指数がどのように違って見えるかを、ほぼ同じ化学組成である火山岩の安山岩と深成岩の閃緑岩を使って授業を行っている。実験の手順は以下のように分かりやすく変更している。(2007年度教育研究会にて57期生(高校2年)対象に公開授業を実施。)

- ①顕微鏡下の視野で、安山岩や閃緑岩それぞれの最も良く組織が表されている部分をよく観察する。
- ②鉱物の同定を行った後、顕微鏡の鏡筒に取り付けたデジタルカメラで視野を撮影し、その画像をコンピュータに保存する。(画像は、対物レンズの4倍の倍率にズームがかかっていることに注意する。)
- ③保存された画像をプリントアウトし、方眼入りのOHPシートをその上に重ねて色指数をカウントする。

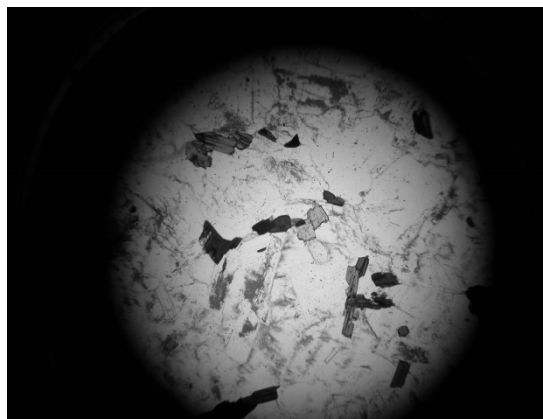


図4. 閃緑岩

学習指導要領の変更に伴って、中学校の教育課程でも火成岩の色合いとして色指数を取り扱えるようになった。中学3年生を対象に、あらかじめこちらで準備した花崗岩のスケッチをもとに色指数を調べさせる授業を毎年行っている。

3 まとめ

以上、既存の教材について再評価を行った。平成21年の高等学校学習指導要領の改訂では、探究的な学習が重視され、「課題研究」が、Ⅱを付した科目から取り出され新たな科目として設けられた。これを受けて、「基礎」を付した科目、より発展的な概念や探究方法を学ぶ「物理」「化学」「生物」「地学」でも、課題研究に繋がる観察・実験に、探究的な活動を取り入れることが求められるようになった。

本校がSSHで開発した教材の多くには、こうした探究的な活動を導く課題が既に設定されていたが、その後、約10年間の実践を経て、さらに発展的な課題を新設できた教材もあった。また、技術の進歩や機器の改良に伴い、実現可能となった課題も取り込むことができた。一方で、実社会、実生活を豊かにしてきた科学技術の発展を理解さえる一環で、新設「生物」では、分子生物学分野の知見が大幅に増強された。このような背景から実験に費やせる時間の限界もあり、実験のスリム化のために重複を割愛しなければならないものもあった。

今後は、課題研究への橋渡しを念頭に置いた、新規の実験教材を開発していきたいと考えている。

【参考文献】

1. 仲里友一ほか（2005）『先駆的な科学者・技術者を育成するための理科実験 ～スーパーサイエンスハイスクール開発教材の紹介』筑波大学附属駒場高等学校 理科
2. 仲里友一（2012）『パターン形成を操る遺伝子 ～単離と発現解析～ 研究論文集（2007～2011）』筑波大学附属駒場高等学校 生物科
3. 高橋宏和ほか（2016）『筑波大学附属駒場 論集第55集』 pp.103-112 筑波大学附属駒場中・高等学校
4. 梶山正明ほか（2017）『筑波大学附属駒場 論集第56集』 pp.49-60 筑波大学附属駒場中・高等学校