

課題研究をよりよくする 16 の視点

－ 課題研究の深化を目指して－



兵庫県立姫路東高等学校

はじめに

兵庫県立姫路東高等学校 SSH 推進部長
責任著者 川 勝 和 哉

高等学校における課題研究が広く行われるようになり、その内容も年々幅広く、また高度になっています。課題研究では、生徒自身によるテーマ設定が最も大切な段階で、ここに時間をしっかりととることによって、課題研究の目的の 8 割は達成できるとさえ言われています。早く実験や観察に入らせたいと焦って、教員がテーマを与えたり、失敗しないように（成果が出せるように）教員が先導したりすると、課題研究の目的である「探究力」の育成が遠のいてしまいます。テーマに関する成果を出すことが課題研究の目的ではありません。生徒が主体的にテーマを設定し、解決策を考えて実行し、得られた結果をもとにして議論し、他者に対して発信する能力を「探究力」というのですから、その過程こそ大切です。生徒が主体的に思考することなく、教員の「指導」に基づいて成果を上げることができたとしても、課題研究の目的は達成できないわけです。このあたりの内容は、2023 年の「聞くに聞けない課題研究の 32 の疑問への現場からの助言」にまとめましたので、参考にしていただきたいと思います。

わたしたちが暮らす社会には、答えや解決策がわからない課題が溢れています。労働人口の減少を補うために AI が普及していますが、人間でなければできない、あるいは「あなたにしかできないこと」でなければ、職を失う人が出てくるかもしれない」という方向に社会が進んでいるともいえます。社会が便利になる一方で、「わたし」はどのような力を持っていて、他者とは何が違うのかについて、しっかりと考えることが必要です。そのような社会で活躍するために必要な力が「探究力」です。この力を育成するために教員に求められるのは「指導」ではなく「助言」です。生徒との対話を通じて、生徒自身から気づきを引き出すことが重要ですから、課題研究のテーマ設定から教員が指示してしまうと、探究力の育成は遠のいてしまうのです。そして、自ら考え、目的をもって行動するという、培われた探究の力は、生徒の学力にも必ず反映します。

これまでは答えがわかっている課題に取り組み、答えに到達することを目的としていました。しかしこれからは、答えがわからない課題、あるいは答えがあるかどうかわからない課題を自ら設定し、解決しようと思える力も求められます。従来日本で行われてきた学びを大切にしながら、これまでとは異なる「学び」を加えることが必要だということです。

本冊子では、課題研究が軌道に乗り、内容をさらに深化させたいと考えた時に、どのような点に留意する必要があるのかについて、事例をまじえながらまとめました。ある程度、学校現場全体として課題研究が軌道に乗り、生徒の課題研究の質が高まってきたときに、参考にしていただけるような内容になるようにまとめましたので、課題研究の方法を網羅したものではありません。また、課題研究をさらに深化させるためには、研究に関する理念の理解が必要になりますので、それらについても多くの紙面を割きました。本冊子をひとつの「読み物」として読んでいただき、具体的には「聞くに聞けない課題研究の 32 の疑問への現場からの助言」、および「高等学校における科学倫理教育のロールモデルーその目的と方法ー」に目を通していただければよいと思っています。それぞれの学校現場で、課題研究の深化に役立てばと思います。

目 次

ポイント 1:もう一度確認しましょうー非効率の楽しみー	1
ポイント 2:卵の鮮度を確認するには	2
ポイント 3:原因と結果や目的が逆転していないか	5
ポイント 4:視点がいくつあるか	
(1) 複数の視点の設定	6
(2) 要素還元論と全体論	7
ポイント 5:先行研究の結果と異なる成果を得た場合	7
ポイント 6:間違いと屁理屈	10
ポイント 7:科学の限界を知る	11
ポイント 8:テーマを決めるときに確認しておきたいこと	
(1) テーマを選ぶ前に	12
(2) 物質が科学の対象	13
(3) 再現可能性	14
(4) 基礎(理学的)研究と工学的研究	15
(5) 定性的研究と定量的研究	16
(6) 矛盾があるが結果がそう示している場合	18
(7) 科学的な指標を設定できない場合	18
(8) 心理学や言語学研究の例	20
ポイント 9:総合化と論理的思考	22
ポイント 10:相関関係は因果関係ではない	23
ポイント 11:生成 AI との付き合い方	24
ポイント 12:どのくらい「行ったり来たり」できるか	25
ポイント 13:科学で夢を語ろう	27
ポイント 14:研究倫理と科学倫理の担保	
(1) 研究倫理	27
(2) 科学倫理	29
ポイント 15:グループ研究を論文に掲載するときの名前の順番	29
ポイント 16:発表会の心構え	
(1) 内容を絞り込む	30
(2) 聞く側も人それぞれ	31
さいごに	33
参考文献	34

ポイント 1：もう一度確認しましょう－非効率の楽しみ－



課題研究のテーマを決める

課題研究をはじめとする探究活動において、大切に守らなければならない姿勢が3つあることは、すでに「聞くに聞けない課題研究の32の疑問への現場からの助言」にまとめました。課題研究を深化させるポイントをまとめる前に、もう一度その基本的な姿勢について振り返っておきます。これは、課題研究が軌道に乗り始めると、ついつい忘れられたり蔑ろにされたりする傾向があります。

まず1つめは、「生徒の活動を信じて待つこと」です。これは、課題研究に「効率のよさ」を求めないということです。いつまでにこれをしなければならぬ、という発想は従来の教科指導で培われてきた、いわば教員の設定能力でもあるのですが、あまりそれに固執しすぎると、生徒の自由な発想や活動を阻害しかねません。多少の「間延び」や「遊んでいるように見える」、「ボーっとしているようだ」という状況があっても、生徒が主体的に活動することを信じて待つ勇気と根気が必要です。「こんなに時間に余裕があるのなら、さっさとすることをして、別のことをさせたらいいのではないか」という考えは、課題研究が始まった当初、全国の多くの教員が考えたことです。時間の無駄、という発想です。これまで時間を効率的に使って教育活動を行ってきた教員にとっては、何をしているのかよくわからない時間を、どう考えればよ

いものかわからず、それが新しく入ってきた課題研究となるとなおさらだっただけです。しかし、課題研究の効果を実感し始めている教員には同意いただけると思いますが、教員がレールを敷いて、その上を生徒は走るだけ、ということでは、時間をかける割には得られるものが多くありません。

学校現場によって状況はいろいろで、「本校の生徒を待っていたのでは、何も進まない」というご意見もあるでしょう。もちろん、何もしないでただ待っていても始まりません。大切なことは、指導ではなくて適切な時期に適切に「助言」することです。教員にとって、助言は指導よりもずっと難しいことです。「こうすればよい」という指導は簡単ですが、それは、答えや解き方がわかっている、従来の教科・科目のような課題では有効ですが、生徒の主体的な活動を引き出したり、生徒自身の気づきを引き出ししたりするためには、経験と心の余裕が必要です。生徒と対話しながら、教員自身が疑問に思う点を生徒に質問する形式は、生徒の自発的な活動を引き出すうえで効果的ですし、教員自身も「なるほど」という発見があって楽しいものです。

とにかく、成果を求めない姿勢を貫いてほしいと思います。いつまでに成果をまとめなければならぬ、という期限は、どのような活動にでもあります。「それまでに新しい発見や、少なくとも一定の傾向が出ていないとまとめられない」、「課題研究の成果として示すことができない」と考えて、とにかく成果を求めようとしやすいですね。あるいは、教員が考えるペースで課題研究が進んでいかないとイライラする、ということもあるかもしれません。自分が指導している生徒のグループが成果を出せていないと、「自分自身の指導力を問われる」という恐怖感を覚える教員もいると聞きます。課題研究で求められる成果とは、生徒の主体

的な活動による探究力の獲得です。どれだけ考えたか、どれだけいろいろとやってみたか、どれだけ議論したか、が大切なのであって、新しい発見や一定の傾向の解明が目的ではありません。「結果が出なければ課題研究をした意味がない」と考えるのは、大学入試に失敗したら勉強した意味はないというのと同じです。生徒の探究力を客観的に図る方法はありませんから、教員は皆心配になる

のですが、お互いに情報を共有し、助け合いながら進めていくことが大切です。

次の学習指導要領の改訂では、生徒の主体性が評価対象から外されるようです。だからこそ、課題研究における生徒の主体性を確保しなければなりません。効率主義、成果主義では課題研究の意義が失われてしまうのです。

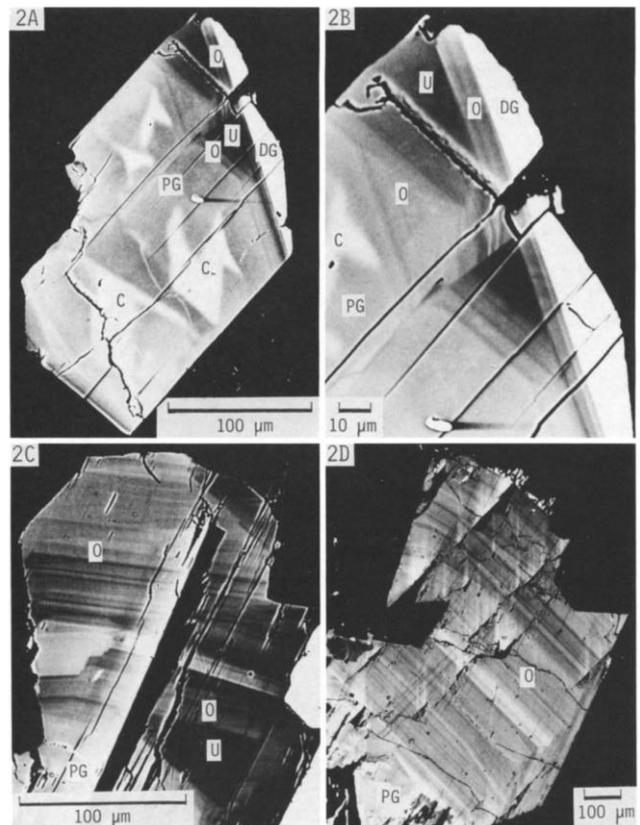
ポイント 2 : 卵の鮮度を確認するには

いつ買ったかわからない卵のパックが冷蔵庫から見つかりました。購入したのはそんなに昔のことではなかった気がしますが、鮮度が保たれていて食用に使えるかどうか不安です。このような場合、卵の鮮度を確認するにはどうすればよいでしょうか。試しに卵をひとつ割って、状態を観察してみることにします。それで残りの卵も大丈夫だといえるのでしょうか？もちろん直接確認していないので、残りの卵の中に傷んでいるものが入っていないか、という不安は拭えません。そこでさらにもうひとつ割ってみます、残りは大丈夫ですか？この話は、科学研究の場で頻繁に話題に上ります。

本校科学部の地学系研究部の生徒らは、閃緑岩という深成岩を構成する角閃石という鉱物から発見した、波状累帯構造の研究を行っています。波状累帯構造は、マグマが固結する最終段階で残る熱水残液という熱い水に、有用な金属などが混じった液体（熱水残液といいます）が循環することによって形成される構造で、幅 $1 \mu\text{m}$ 程度の微細な帯が幅数 mm にわたって、まるで陽イオンが波打つように配列する美しい構造です。

少し長くなりますが、今後もたびたび登場してきますので、波状累帯構造について説明しておきましょう。この構造は 1986 年に当時大学院生だっ

た私が、広島県の大東－横田地域の閃緑岩の角閃石から発見したもので、マグマ残液の循環によって形成されたことを化学的に示しました。この発

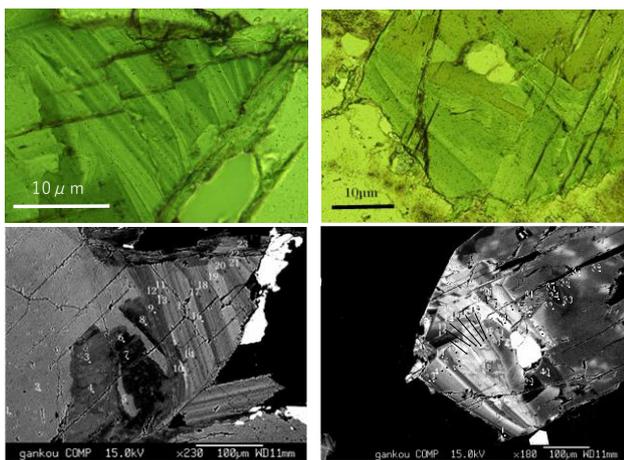
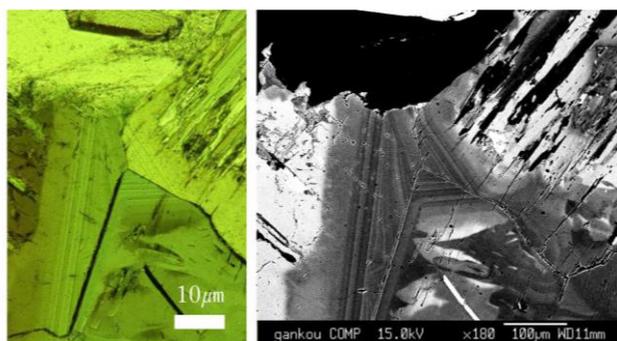


発見した角閃石の波状累帯構造

Successive zoning of amphiboles during progressive oxidation in the Daito-Yokota granitic complex, San-in belt, southwest Japan (Geochimica et Cosmochimica Acta, 51(3), 535-540, 1987)

見を、アメリカ鉱物学会で発表し、高い評価を得て、1987年に「Geochimica et Cosmochimica Acta」誌に掲載された論文は大きな反響を呼びましたが、マグマ分化の研究はあまりにも複雑で、物理化学系の内容であることからか、その後を引き継ぐ研究もなかなか進展しませんでした。

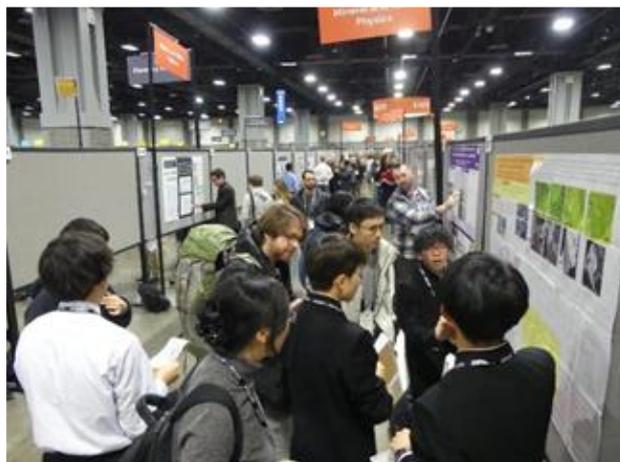
それ以降、私は地道に研究を進めていましたが、この論文を偶然読んだ本校生徒が、高校生ながら私の研究を引き継ごうと盛り上がり、それ以来マグマ分化末期の環境の推定の研究は5年目を迎えています。私の発見から長い時間が経過しましたが、生徒たちは「どうして進展しなかったのか」というよりも「先生は、途切れることなく研究を続けて、掘り下げていたことがすごい」といつてくれました。教師冥利に尽きます。



科学部が豪州 NSW 州の閃緑岩の角閃石から
発見した波状累帯構造
(偏光顕微鏡写真と反射電子線像)

高校生ながら、その後、国内外で波状累帯構造

を発見し、マグマ分化末期の環境についての研究成果を、国際学会で発表して注目を集めるなど、さらに高いレベルにまで引き上げてくれました。



豪州 NSW 州での露頭調査から
AGU2024 (Washington DC) での発表へ

ところで、大東－横田地域の角閃石は熱水残液で形成されたことは確かなのですが、だからといって熱水残液があれば、必ず波状累帯構造が形成

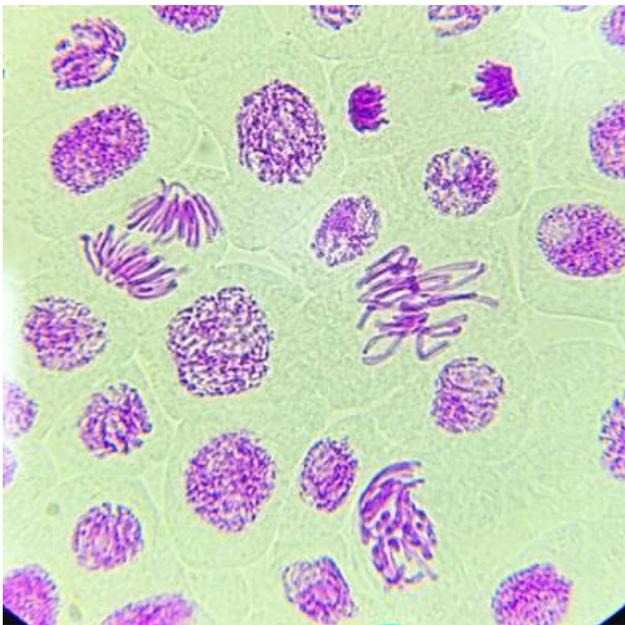
されるかという、そんなことは誰にも言えません。鉱物の全体が完全に置き換わってしまう可能性だってあるからです。波状累帯構造は熱水残液がやってきた指標となる、ということを生徒はいいたいわけですが、それを証明するためには、一般的な方法として実験を行うことになります。しかし、マグマからどのように岩石ができたかを再現実験することは、絶対に不可能です。マグマは開放系といって、物質の出入りが自由ですし、温度や圧力の環境も不規則に変化します。どのような岩石にマグマが貫入したかによっても、複雑に相互作用が起こります。しかもマグマが地下で固結するまでには、数万年から数百万年以上かかります。一方、実験は変数を絞り込んで一定の時間内に行うわけですから、実験結果によって証明することが極めて困難だということは理解できると思います。

生徒は、兵庫県南部や広島県北部の複数の岩体だけではなく、オーストラリア南東部ニューサウスウェールズ州の岩体でも調査し、「それらの岩体では」共通した結果を得ています。彼らは、いったいどのくらいの数の岩体を調べて同様の結果が得られたら、波状累帯構造がサブソリダス環境で、酸化がどんどん進んでいく累進的酸化条件下で熱水残液が循環した指標となることを示せるのか悩みました。つまり、統計学でいうところの「サンプリング」の意味をどう判断するかです。偶然特徴が一致している岩体を調査した場合、似た結果が得られることは容易に想像できます。しかし、世界中の岩体を調査しなければ、サンプリングした岩体の特徴が全体を反映しているかどうかわかり

ません。特に新しい発見の場合には、先行研究をいくらか突き合わせてみても、新しい構造が形成されたと考える条件や環境が示されていなかったり、そもそも調べられていなかったりします。結果を比較して結論を出すためには、どのような岩体で観察を行う必要があるのか、これは地学研究では問題です。「この研究からこのようなことがわかる」と一般論的にいえば、「本当にこれだけの研究でそこまでいえるのか」と言われますし、「本地域はこうでした」と限定していうと、「一般論までもっていかないと価値が低い」と言われるのです。地学研究者の集まりでは、共通認識があって、発表のときに特に違和感をもつことはないのですが、たとえば、広領域の研究者の集まりで発表すると、必ずといっていいほどこの議論になります。研究分野ごとに違いがあることも勉強です。いずれにしても、誠実に研究報告をするべきだと思います。

ちなみに、「一般論化」とはどういうことかという、今取り扱っている事象を深く調べ、場合によっては、ほかの対象にまで研究の幅を広げて、統計学的に「概ね一般的に、ほかの場所で起こる事象についても、こうまとめることができる」ということです。一般化がどうして大切かという、一般化すれば将来が予想できるからです。ですから、科学においては一般化できるかどうか大きな分かれ道です。高校生の研究であっても、近年では一般化まで研究内容を持ち上げているものが少なくありません。課題研究の深化を目指すのであれば、最終的には一般化できれば良いと思うのですが、テーマによってその難度は様々です。

ポイント3：原因と結果や目的が逆転していないか

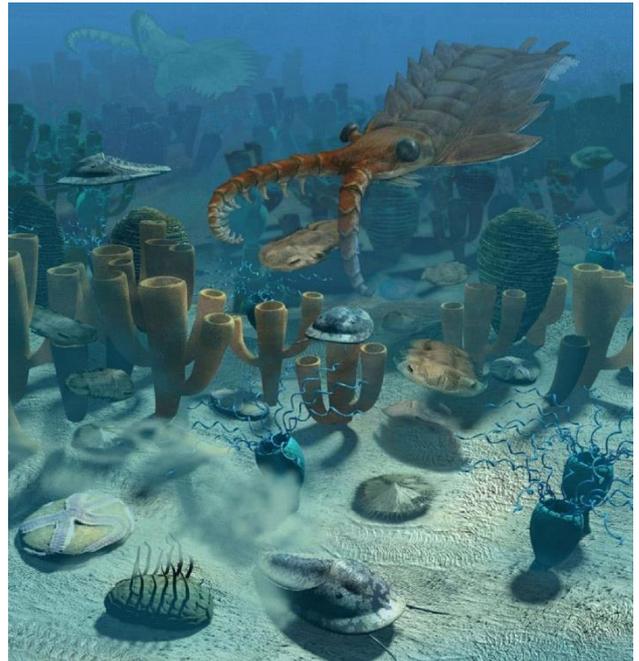


細胞分裂（熊本県立第二高等学校 HP より）

（https://kumamoto-d2hs.ed.jp/bbs/board.php?bo_table=lifes_news&wr_id=22&page=51）

細胞分裂の学習では、中期で染色体が赤道面に整列することを学びます。染色体があちこちに散らばっていると、中心体から出る紡錘糸という糸が染色体を両極に引っ張っていくことが困難でしょうから、実に機能的な動きだと感心させられます。しかしこれを「機能的に両極に引っ張っていくために染色体が中央に配列する」と表現してはいけません。進化についても、わたしたちは進化してどのように変化してきたのか、現在までの結果を知っているので、その結果に向かって進化したと勘違いしてしまいがちです。あるいは明確な意識を持っていなくても、たとえば「こうすることで、この生物は種の保存を図っている可能性がある」などといってしまう。実はこれは、本校の科学部の生徒が日本動物学会でポスター発表したときの話です。本当はそのように考えているわけではなかったらしいのですが、進化学者に「基本的に間違っている」と指摘され、その後いくら言い直しても信用してもらえず、以後の説明

も聞いてもらえなかったそうです。生物は、機能的になろうとして進化したわけではありません。様々な方向に変化し、その中で機能的だったものが、結果として生き残り、進化を遂げたのです。言葉は正確に使いたいものです。



カンブリア紀で絶滅した生物

（<https://u-teti-soni.blogspot.com/2021/11/kembrijskij-mir-chast-19-pochemu-zhivotnye-byli-melkimi.html>）

そのほかにも、たとえば、現在観察している角閃石に波状累帯構造がみられたとします。波状累帯構造は、マグマ分化末期に熱水残液が循環して、イオン置換を起こして形成される微細構造です。「この角閃石は、熱水残液の循環によって、波状累帯構造が発達している」というのが正しい表現です。実際に化学組成などを調べて、裏付けが取れていれば考察として成立します。その角閃石には、熱水残液が循環した形跡があり、化学組成によって置換が起こっていることを示すことができるからです。このとき、熱水残液の循環が原因で、この角閃石の波状累帯構造の形成が結果です。し

かし、「角閃石に波状累帯構造が発達していれば、熱水残液が循環したことを示す」と説明すると、この真偽はわからないので不適切です。とてもややこしい話なのですが、つまり数学でいうところの「必要条件」と「十分条件」です。熱水残液の循環が原因で、角閃石に波状累帯構造が形成されたといえますが、熱水残液「のみ」が原因で波状累帯構造が形成されるかどうかはわかりません。指標

として使えるかどうかは、様々な岩体で検証して、情報を積み上げるしかないのです。波状累帯構造は熱水残液の循環以外の原因で形成される場合があるかもしれないので、一般論化して「波状累帯構造は熱水残液が循環したことを示す」とは言えないのです。こういうためには、統計学的手法を使わなければなりません。つねに原因と結果や目的を正しく判断して考察する必要があります。

ポイント4：視点がいくつあるか

(1) 複数の視点の設定

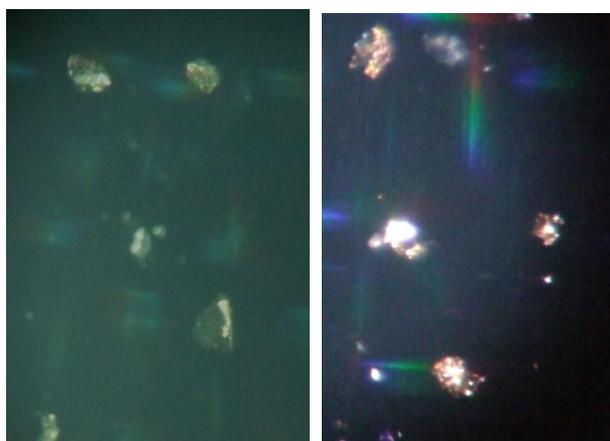
自然科学の研究においては、多様な視点が重要です。同じ結果であっても、視点を変えれば考察は異なってきます。教員は生徒に、他にも違った視点がないかどうか、常に助言することが必要です。リンゴを色の視点から見ると赤く、形の視点から見ると丸く、味の視点で考えると甘酸っぱい、となります。同じ対象に対して、考えられるすべての研究がなされているかという点、実際にはそのようなことはなく、したがって視点を変えるだけで、新しい研究テーマになったりするのです。赤いリンゴは、青い光の下では黒く見えたりします。対象物を触らなくても、周囲の環境を変えるだけで、また新しい研究テーマになります。ここから派生して、そもそも鏡の色は何色かなどと考えると、科学の面白さと複雑さを感じることができるでしょう。

かつて地学の教科書に「条痕色」という用語が掲載されていました。鉱物を粉末にすると、大きな結晶の時とは色が違って見えるという現象です。金(金鉱)は、いくら細かく粉末にしても金色ですが、同じように金色に輝く黄鉄鉱は、粉末にすると黒く見えます。生徒がこれらを粉末にして比較観察してみましたが、教科書のような色を確認す

ることはできませんでした。条痕の粒子は1~10 μm 程度の大きさで、この大きさだと鉱物本来の色が現れるということですが、生徒は色を変える粉末の大きさは鉱物によって異なることを明らかにしたわけです。漠然と「粉末にすれば本来の色



金(左)と黄鉄鉱(右)の条痕色
(china-shj.org.cn)



黄鉄鉱(左)と金鉱(右)を白色光で観察した鉱物の色(10 μm × 100倍)

を発色する」と言ってもだめで、同じ大きさの粉末を比較しても意味がないということです。結局この研究論文を発表した後、鉱物判定の指標として一考を要すということで、教科書から条痕色の記述は消去されました。

(2) 要素還元論と全体論

研究には2つの方向性があります。厳密に区別できるわけではありませんが、特徴的な2つの考え方をまとめておきます。

ひとつ目は要素還元論です。研究対象を理解するために、それを構成する要素にどんどん細分化していく方法です。たとえば、ある両生類の生体を理解するために、生物の体を解剖して臓器を観察します。さらに課題が生まれると、臓器を組織レベルにまで分割します。さらに細胞レベルにまで分解していくことによって、両生類の生体を理

解するという方法です。実際 19 世紀初頭の原子論や細胞説、19～20 世紀に発達を遂げた DNA 研究などは、この思考によって生み出された成果です。他方で、そうして得られた「部分の知識」を全部集めたとしても、全面的な解明には至りません。そもそも科学が人為的にフォーカスした部分（知りたいと考えた部分）について研究しているからということも関係しますが、樹木を理解するためには、樹木全体を観察することも必要です。枝や葉についていくら研究しても、樹木全体についての知識は得られません。これを全体論といいます。もうお分かりだと思いますが、要素還元論によって得られた成果をまとめて全体に「総合化」することが必要です。要素還元論によって各所の知見を得、その成果を全体論でまとめる、というプランニングをすることに留意する必要があります。科学は「分析」と「総合化」によってまとめられます。

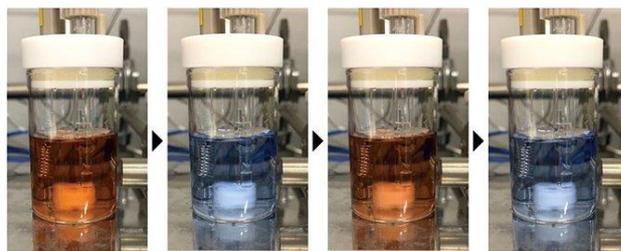
ポイント 5 : 先行研究の結果と異なる成果を得た場合

これまで、高校生の研究が新たな学術的成果を上げてきた例が多くあります。ひとつの例を紹介しましょう。ある高校の女子生徒が、化学実験のあとで片づけを怠っていたところ、翌日になって化学の大発見をした、という話です。

茨城県立水戸第二高等学校の数理学同好会所属の女子高生 6 人は、Belousov-Zhabotinsky 反応 (BZ 反応) と呼ばれる、色が周期的に変化する化学振動反応の研究に取り組んでいました。この化学反応は有名なもので、面白い化学実験として知られています。この化学振動はどのように始まるかについての研究は多く、原因も明らかにされていますが、どのように終わるのかについては、ほとんど知られていませんでした。彼女たちは、振動が終わったように見えたため、片づけをせずに放

置してカラオケに行き、翌週の月曜日に学校に行ってみたら、液の色が変わっていたことから、5～20 時間後に、また振動が復活することを偶然発見したのです。

2010 年度の日本物理学会で発表したところ、これも偶然に、テキサス大学のペトロスキー教授に論文にまとめるように勧められ、頑張った結果、



化学振動反応

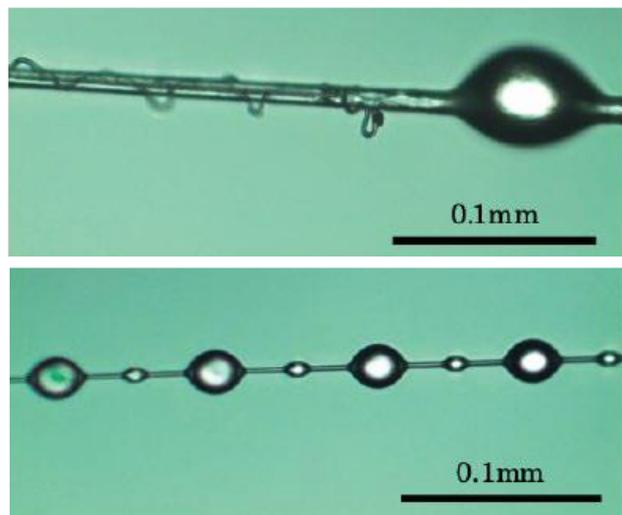
(https://note.com/kyotou_research/n/n2c97166b1260)

2011 年の「Journal of Physical Chemistry A」誌 (115, 14137-14142) に「Rebirth of a Dead Belousov-Zhabotinsky Oscillator」と題する研究論文が掲載されました (著者は、この現象を発見した H.Onuma, A.Okubo, M.Yokokawa, M.Endo, A.Kurihashi and H.Sawahata です)。

すでに結果がわかっている実験であっても、結果がよく知られたものではなかったときには、それをすぐに失敗と判断しないで、検証してみることが必要です。私は、幸運にもこの研究発表を会場で聞くことができましたが、この事例では、論文の執筆を勧めてくれた大学や顧問の先生の存在が大きかったようです。

私が指導した兵庫県立加古川東高等学校地学部の活動では、前に紹介した鉍物の「条痕色」の研究で、鉍物によって条痕色があらわれるサイズが異なること、したがって鉍物を識別する方法として条痕色はふさわしくないことを解明し、地学の教科書から条痕色が消されることになりました。クモの巣の研究を行った兵庫県立西脇高等学校科学部の研究では、これまでクモの縦糸には、獲物を捕らえるための粘着物質である粘球がないと考えられていましたが、等間隔に粘球が付着していることを明らかにしました。

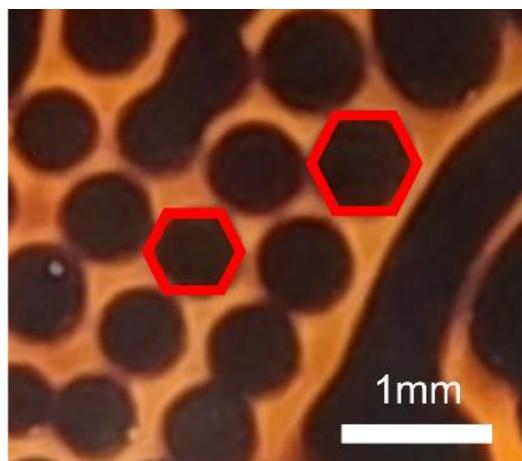
本校科学部のマグマ分化の研究班は、現在見ている鉍物は、結晶化した当初は異なる鉍物であっ



クモの糸に付着する粘球 (上が縦糸、下が横糸)

た可能性が高く、その後、度重なる流体相の循環によって全体が置き換えられてしまった可能性があることを明らかにしました。これまで、マグマ分化過程は、現在観察される鉍物の状況を基にして研究されていて、教科書にもそのように説明され、大学入試でも頻繁に出題されているのですが、鉍物全体が何らかの原因で置き換えられているとなると、もはやマグマ分化過程はどうだったかを、現在みられる鉍物をもとにして振り返って考えることが難しくなります。いわば、マグマ残液による「完全犯罪」なわけです。そのときに指標となるのが、鉍物に発達している波状累帯構造です。元の鉍物を残しながら、部分的に置き換えられた形跡を残しているのです。それをもとにして何が何に変わったのか、その時の環境はどうだったか、について推定することが可能になるというわけです。

また、身の回りで使用されているのにその性質がよくわかっていない機能性流体に、磁性流体があります。磁性流体の性質を解明するために、生徒は、磁性流体をガラス板で挟んで薄くして、上下から磁力を加えるという「ヘレショウセル法」を開発しました。偶然から見出された方法でしたが、この実験を行うと特徴的な図形 (ラビリンスパターン) が現れ、その特徴を観察することで、磁性流体と外部磁力 (磁束密度) の関係を解明しようとするものです。生徒たちはこの方法を使って、



磁性流体のラビリンスパターン

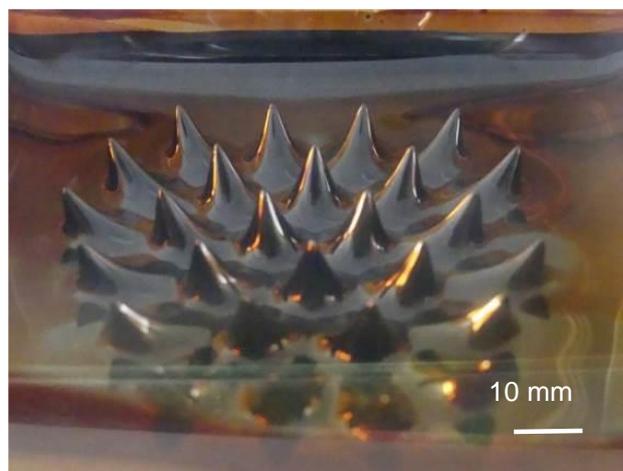
磁性流体の様々な性質を突き止めました。これらは様々な専門学会で高く評価されています。

このように高校生の研究が専門研究の進歩に貢献をしてきた事例は数多くあります。これらの研究成果は、先行研究と異なる結果が得られた時、あるいは予想していた結果と異なる結果が得られた時に、どのような行動をとったか、担当教員がどのように助言したかにかかっています。自分たちの研究では現れなかったものが、先行研究で現れるとされている場合、自分たちに見落としがあるか、条件を変えることで現れるのか、それとも全く新しい報告になるのかに分かれます。いずれにしても、すぐに否定せず、慎重に考えたいものです。その思考の過程がすべて考察につながるのですから。

ところで、先行研究からしっかりと学ぶことによって、先人の研究者の成果に基づいた研究を行うことができ、科学が前進するのですが、注意していないと、生徒が陥りやすい「落とし穴」が2つあります。ひとつは、先行研究ではこう書いてあるから、そのように結論付けようという無意識に行われやすい思考です。場合によっては、自分たちの研究結果を曲げてでも、先行研究に合わせようとする傾向が見られます。「自分たちは高校生だから」という「物おじ」に基づくものかもしれませんが、もっと自信を持つべきです。ふたつ目は、自分たちで行っていない実験結果を、先行研究から勝手に取り込んで、無意識のうちに一体化させてしまう行為です。これは別章でもまとめますが、研究不正に当たりますから絶対にすべきではありません。

本校の科学部は、基礎研究に取り組んでいて(生徒は工業的なモノづくりよりも基礎研究を好んでいます)、研究者の先行研究についてもよく読んでいます。本校科学部の磁性流体に関する基礎研究を行っている班で実際に起こった話を紹介します。先行研究には、ある外部磁力を加えると形成される、角のような形の「スパイクの底面の形状が4角

形になる」とあります。ところが生徒の研究では、4角形は現れませんでした。生徒は「4角形が現れるはずだ」との思いから、何とか4角形を生じさせようと頑張ったようですが、とうとう現れませんでした。生徒の心理としては、「専門の研究者が現われると書いているのだから現れるはずだ」と思ったのですが、結局勇気を出して「出現しなかった」と報告しました。さらに研究を続けると、特殊な条件下では見られることがあることがわかってきました。この研究は全国高等学校総合文化祭自然科学部門で堂々と発表し、見事に最優秀賞である文部科学大臣賞を受賞しました。



磁性流体のスパイク



全国高等学校総合文化祭で文部科学大臣賞を受賞

最後に、先行研究を調べる際に注意したい事があります。あまり気に留められていないことですが、先行研究は、「有意な結果が出た場合の成果をまとめたもの」であるということです。つまり、研

研究者が望むような成果が得られなかった場合には、研究論文にまとめられることも、学術雑誌に投稿されることも、したがって学術雑誌に掲載されて私たちの目に触れることもないわけです。先行研究がないからといって、これまでその研究がなされてこなかった、ということにはならないことに

注意してください。科学は、仮説に基づいて思うような結果が得られた時にだけ、陽の目を見るのです。課題研究では、うまくいったときの情報はもちろん欲しいですが、うまくいかなかった情報こそ必要とされます。失敗をまとめた先行研究はないのだということを頭に入れておきましょう。

ポイント 6 : 間違いと屁理屈

たとえば、算数の試験で $1 + 1 = 3$ と答えたとしましょう。数学的には誤りなのですが、もしも「今後、全く新しい自然界のとらえ方が提唱されて（たとえば量子コンピューターのように）、そこでは 3 もあり得るということになるかもしれないから、間違いとは決めつけられない」と生徒が反論してきたら、みなさんはどう答えるでしょうか。「屁理屈を言うな」と一蹴しますか？それとも「そのような決まりなのだ」と答えますか？この問いには、自然科学をとらえる重要なポイントが含まれています。

小学生の中には、「りんご 1 個とみかん 1 個、全部で何個？」という問いに苦戦する子どもがいます。すぐにのみこめる子どもが多い中、りんごとみかんは違うものなのに、どうして同じように扱えるのか、というところにひっかかってしまうのです。実は、これは算数の問題ではなく、概念の問

題です。物の種類は問わないのが算数なのだということが腑に落ちない子どもにとってみると、この問題はどうしても納得いかないのです。先生は「種類を問わない」ということを明確に説明したでしょうか。

割り算でもそうです。 $3 \div 4$ をするとき、0 を隣から「借りて」きますが、どうして借りてこられるのか、違う桁の数字は違うはずなのにおかしい、というわけです。こういう子どもは、しだいに置き去りにされ、算数ができない子どもというレッテルを張られていくのです。このことを指導者は理解しなければなりません。

$$\begin{array}{r} 0.75 \\ 4 \overline{) 3} \\ \underline{28} \\ 20 \\ \underline{20} \\ 0 \end{array}$$

割り算に関する疑問（この「0」はどこから？）

そのうえで、「屁理屈」だと感じてしまう場合は、基礎知識の理解が不十分であるとか、先行研究からの学びが不十分であるとか、ということが原因かもしれません。これは、生徒だけではなく、教員



りんごとみかん (<http://fruitssuki.jp/archives/834>)

にも当てはまります。いつも言っていることですが、研究論文の読み手や聞き手が違和感を覚える場合、その感覚は的を得ていることが多いのです。それらについて十分に確認しても、なお生徒の意見に齟齬がないのであれば、それは屁理屈ではないのかもしれませんが、教員が違和感を覚えたら、生徒とよく対話して、理屈で判断することができ

ればよいのだと思います。いずれにしても、「そんなはずはない」という言葉は、課題研究には禁物です。それは、現象そのものを見て発言しているのではなく、すでに自己の中に形成されている概念を基にしたフィルター越しに発する言葉だからです。

ポイント 7：科学の限界を知る

こんなことを書くと、研究を否定するように思われるかもしれませんが、科学にいつの間にか万能を求めてしまっていないか、ときどき検証することが必要です。非常に概念的な話になりますので、わかりにくいかもしれませんが、お付き合いください。

科学は、私たち人類が決めた一定の「範囲」の中で、客観的であり、有能なものです。したがって、自然現象の「すべて」が科学で解決できるわけではありません。このことは、課題研究のテーマ設定の段階でも注意しておかなければならないと思います。つまり、身の回りの不思議について研究テーマにしても、人間が科学の領域と定めた範囲の外の事象であれば、科学的な成果を上げること

ができないということです。それは、「再現可能なものであること、という制約です。

研究論文には、必ず実験方法が記載され、それを読んだ研究者が同じ方法で実験すれば、同じ結果が出るのが担保されている必要があるとされています。実際にいちいち検証する人はほとんどいないので、要するに科学は、互いの「信頼関係」で成り立っている、客観的に見れば脆弱なものです。

2014年にネイチャー誌に掲載されて、世界中で話題になった、理化学研究所の小保方晴子氏による「STAP細胞（刺激惹起性多能性獲得細胞）」に関する議論でも、再現性が問われました。この発見が正しければ、生物学に革命をもたらすと考えられたため、多くの研究者が再現性を確認しました。しかし、だれも再現できなかったことから、STAP細胞の存在は否定され、研究倫理に反すると結論付けられました。その結果、同じ理化学研究所の共著者であった笹井芳樹氏が自殺し、小保方氏本人も科学の世界から去ることになりました。笹井氏は、不正行為には直接関与していませんでしたが、小保方氏の結果をダブルチェックしなかったことが「重大な責任」と結論付けられています。研究倫理に目を向ける一大スキャンダルとなったわけですが、それは科学が再現可能なものだけを扱うことができるという大原則からはみ出て



万能の神ゼウス

(<https://swing-jyuku.jp/method/%E6%8E%A%E7%A9%B6%E6%8E%88%E6%A5%AD/development-of-inquiry-20210730/>)

いるため、再現できない小保方氏の STAP 細胞は「似非科学」と烙印を押されたわけです。

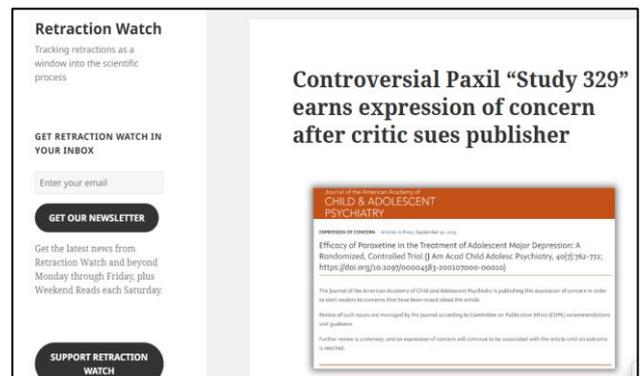


STAP 細胞 (<https://news.ntv.co.jp/category/international/310471>)

ところで、「信頼できる」という話にもいろいろな問題があります。論文を読んだ人に、実際に検証はしてみないが、「確からしそうだ」と思ってもらい、したがって論文を評価してもらうためには、一定の条件があります。それは、論文を読んだ研究者が自身の経験と知識に基づいて判断すると、確かに矛盾がないと思えることです。つまり、この意味から、科学における新しい発見には、一定のバイアスがかかっているということになります。「矛盾はなく、新しい見解だ」という研究が評価され、従来の見解と大きく矛盾していると「感じられる」研究は、仮にそれが自然科学の新しい発見であったとしても、めったに受け入れられない

のです。科学は人間臭いものでもあります。

自然科学は、仮説演繹法に基づいて研究されます。すべての研究者が他人の研究成果を信用せず、一から研究していたのでは、科学は一向に前へ進みません。先行研究を信用し、その成果に基づいて実験や観察を行うことによって科学は進歩しています。したがって、矛盾の有無によって科学の進歩がもたらされるということは、自然科学にとっての限界を示しているともいえるでしょう。現在、「Retraction Watch」というウェブサイト (<https://retractionwatch.com/>) のデータベースには、これまで学会誌から撤回された研究論文の一覧が示されています。すべてが不正行為ではなく、研究者がミスに気付いて撤回したものも含まれていますが、しかしその数は驚くほど多いです。



Retraction Watch (<https://retractionwatch.com/>)

ポイント 8 : テーマを決めるときに確認しておきたいこと

(1) テーマを選ぶ前に

テーマをどのように設定すればよいのかについて、延々と議論が続いていますが、残念ながら「このようにすればよい」という決まった方法はありません。「探究」とは本来、「どうすればうまくいく」とか「どうすれば答えにたどり着ける」といっ

た「How to」と一定の距離を保って行われる行為ですから、テーマ選定についても同様です。生徒ごとに選定の方法は違うはずで、ひとまとめにして「こうすればよい」というわけにはいかないのです。時間を節約して効率的に進めたいという思いは理解できますが、テーマ決定は探究において最も重要な過程ですから、生徒とよく対話をして

決定したいものです。

即座にテーマ選定ができない理由は明確です。澤潟久敬氏は、その著書「哲学と科学改版」でこう書いています。「ものをほんとうに知るには、(中略) ちょうど幼い子供が見るもの聞くものに驚きの目を瞠り、それらすべてに、ういういしい関心をよせるように、対象のひとつひとつに、幼児のような柔軟な感受性を示すことが出発点でなければならないのです。(中略) 平凡人は、あまりにも驚きません。しかし、それは対象が平凡なのではなく、その人間が平凡なのです。目の前に魅力的なテーマがあっても、それをそう感じる感性がなければ、「研究テーマになる」と気づかずに過ぎ去ってしまいます。いつも身の回りにアンテナを張って、感性を高めておくこと、つまり「セレンディピティ」の姿勢が備わっているかどうか大切です。テーマ選定のずっと前から、感性を張りめぐらせておくように助言しておくことが、課題研究のスタートです。「4月から課題研究が始まるから、それにあわせてテーマを考えてくるように」と指示しても、それ以前にセレンディピティが準備できていなければ、生徒は何も考えてくることができません。課題研究はたいへん息の長い長期戦なのです。

この話は、何も生徒だけにかかわるわけではなく、教員の側も、生徒からの提案を高い感性をもって受け止めることができなければ、せっかくの生徒の感性を、みすみす見逃してしまうことになりかねません。澤潟久敬氏のいう「驚き」はどこにでもあります。「どうせ、もうわかっているだろう」と感性をすすけた思考で封印してしまうのではなく、まだまだ明らかにしたいテーマはどこにでも潜んでいます。あるいは、もうわかっている事象であっても、生徒の感性がその事象に反応したのなら、取り組んでみればよいと思います。研究者が違えば、その手法も違い、新しい視点から見つめなおす研究になります。それでよいのだと思います。新発見を期待したり、成果を求

めたりする必要はありません。実は、おかしな話ですが、そのような姿勢で取り組んでいると、新発見や大きな成果が「結果的に」得られたりするものなのです。

(2) 物質が科学の対象

科学の対象は、あくまで物質の引き起こす現象です。現象は観察することができますから、それを一定の指標に基づいてまとめ、そこから考察します。様々な事実を調べて、それらに共通な一般的な「法則」を見出すのが科学です。ですから、物質ではないもの、たとえば、心とか魂、精神、意識とかいうものは、科学の対象にはなりません。物質そのものでなくても、物質が放つ様々な現象があれば、客観的な観察ができるので、科学になります。一方、物質ではないものを扱う学問が哲学です。科学と哲学は、その思考の方法には共通する部分があり、哲学的思考は科学研究をするうえで有意義なのですが、研究の、あるいは思考の対象が異なるのです。これについては、ここであれこれと書くのではなくて、「さいごに」で改めてまとめます。

ところで、いくら科学が進歩して、様々な現象が解明されたとしても、科学には絞りこまれた物質対象があるのだから、いくらそれを総合しても、それですべてが明らかになったとはいえない、というのが哲学者の考え方であり、それはそのとおりだと思います。ですから、いくら著名な研究者が論文発表しているテーマについて、眼前の高校生が研究したとしても、そこに異なる視点があれば、新たな考察が可能になるわけですし、事実、高校生による課題研究の質も年々あがっているわけです。

さて、ここで書いておきたいのは、課題研究のテーマとして、「幽霊について研究したい」などと相談に来る生徒についてです。みなさんの学校には、このような生徒はいないでしょうか。もちろ

ん、幽霊は物質ではなく、あるいは、たとえば電磁波とか何らかのものを発するというものもないのであれば観測もできず、客観的なデータを得ることもできませんので、それは哲学のテーマになり得ても、科学のテーマとはなりません。生徒には、科学とはどのようなものかについて、きちんと説明する必要があります。

(3) 再現可能性

さて、それでは課題研究のテーマを決めるときには、どのようなことに注意すればよいかというと、まず再現可能なテーマであるかどうかを考えることです。先行研究を調べて、確からしい内容であれば、それに基づいた仮説演繹法で研究を進めていきます。確からしいかどうかを生徒が判断するのは難しいでしょうから、担当教員の助言が大切になります。助言者は、テーマ設定時に最も重要な役割を担います。

一方で、再現不可能なテーマに取り組みなければ、統計的手法を用いることになります。たとえば、カエルの行動を実験によって明らかにする場合、「実験をする」という段階で科学であると思込みやすいですが、再現性は担保されません。まったく同じカエルで、同じように実験することはできないからです。一回実験を経験したカエルは学習するでしょう。疲れているかもしれません。眠くなっていたり、空腹になっていたりするかもしれません。似たようなカエル2匹を比較しても、それらは別の個体ですから、実は科学的に比較することはできません。こう考えると、後から論文を読んだ人が、同じ条件で実験することは不可能です。このような場合、科学的なテーマにはならないかということ、統計という新たな方法で科学に落とし込むことができます。同じ条件で多くの個体を使って実験することによって、それぞれの個体の行動は予測できなくても、集団としての行動を予測することが可能になります。そのためには、

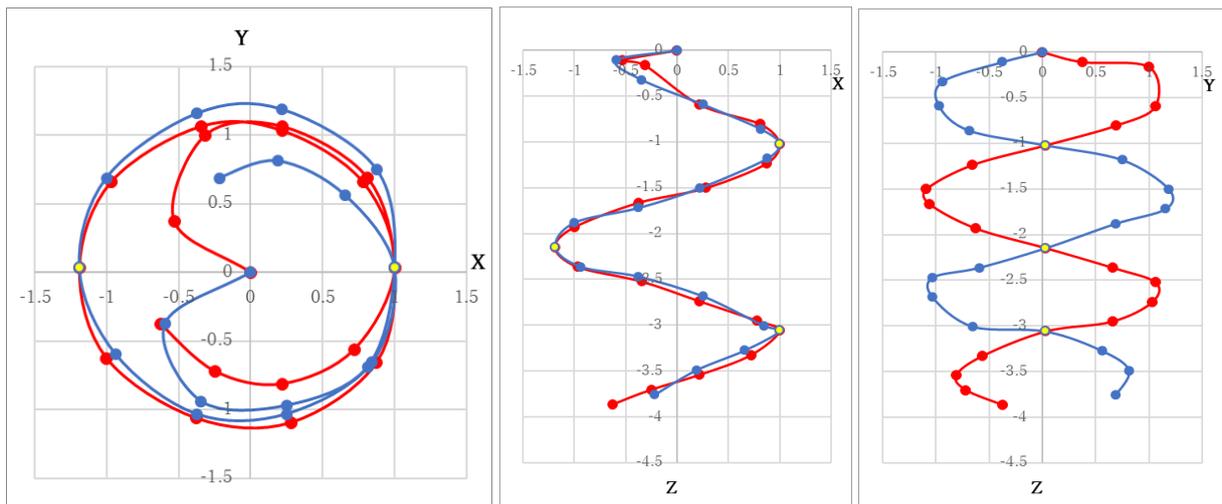
どのくらいの個体が必要でしょうか。％は百分率というくらいですから、数十匹のレベルでは科学にはなりません。テーマを決める際に、それだけの実験回数を確保できるかどうかを検討されるべきです。



カエル (https://aucfree.com/items/g1099444454#google_vignette)

統計的手法を用いることができるのは、数学を使うからです。数学は、それがリンゴかミカンかを問うことなく、 $1個 + 1個 = 2個$ と結論付けます。先に書いたように、小学校で算数に躓く子どもの多くが、「リンゴとミカンは違うじゃないか」と考えるそうです。この考え方はある意味で非常に科学的です。科学は、一切の断りもなしに「リンゴとミカンを区別しない」という暗黙の了解に従って進められます。一度立ち止まって、何と何を区別せずに扱うのかを整理する必要があります。その整理が終わって、方針が決まったら、あとは数学の出番です。結果を数式に落とし込むことによって、変形したり他の数式と掛け合わせたりすることによって、新しい発見に至るという場合が少なくありません。

本校科学部の研究テーマに、「サボテンの刺座配列の規則性」というのがあります。サボテンの刺座の配列が螺旋を描いているように見えたことから、様々な種のサボテンで調べたところ、変数は種によって違いますが、すべて同じ螺旋方程式で



サボテンの刺座の螺旋配列（赤は右回り、青は左回り、黄色丸は共有刺座）

表すことができる、という研究です。その後、校庭に生えているような雑草の葉も、同じ螺旋方程式で表されることを明らかにしました。生物の多様性と共通性の研究に数学を持ち込んだ、視点のユニークな研究であると評価されました。

立派なタイトルがついていて、いかにも科学だと思われそうですが、大きな落とし穴があることはもうおわかりでしょう。同じ種のサボテンであっても、同じ個体は世界に1つしかありません。ですから、ある種のサボテンの刺座配列はこうである、と結論付けても、それが正しいかどうかを確認することはできませんから、1つや2つの個体で結論付けても、それは科学ではありません。100個体をこえる観察によって、各個体はそうであっても、統計的にはこうである、という主張ができるようになります。

また、「マグマの熱水残液による角閃石の波状累帯構造形成」という研究テーマもありますが、こちらはもっと厄介です。そもそもマグマが固化する検証実験ができないわけですから、いくら調べても結論を出すことはできません。地学の研究ではこのような事例が多くみられることから、地学研究はなかなか進みません。このような場合には、考察における表現を工夫する必要があります。たとえば「本地域のマグマにおいては、この構造が指標になると考えられる」などです。統計的には

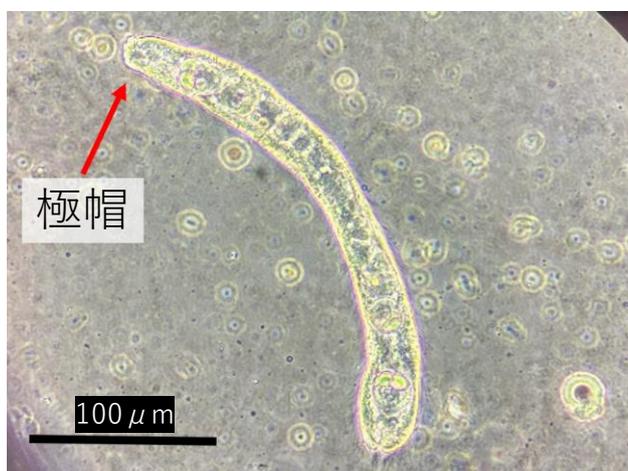
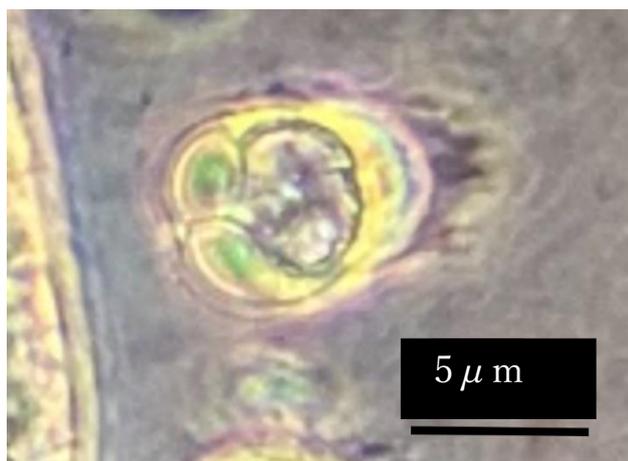
100以上必要、と言っていると、世界中の岩体を調べなければならなくなり、それは非現実的です。地学の研究が評価されにくいのは、このような事情があるからだと思います。地学分野については、簡単に結論を出さずに、調査地域についてきちんと研究成果をあげていることに対して評価すべきです。

最後に付け加えると、注意すべきなのは、統計的に標準であっても、目の前の生物にとっては平均値ではないかもしれないということです。逆に、目の前の生物にとっては普通でも、それは標準でないかもしれないわけです。

(4) 基礎（理学的）研究と工学的研究

高校生の研究では、工学的研究が基礎（理学的）研究よりも評価されやすい、という問題があります。「この研究が何の役に立つのか」と問われることが多く、本校の生徒も苦勞する場面がよく見られます。確かに、基礎研究には様々な分野の知識と理解が求められることが多く、高校生にはハードルが高いのですが、そのテーマに取り組みたいという思いがあるのであれば、評価を恐れずに取り組みばよいと思います。研究のずっと先に、社会への貢献が視野に入っているとすれば、逆に高い評価を得ることもあるからです。

本校科学部の生徒が取り組んでいるのは、実はすべて基礎研究です。工学的な研究には人気がありません。磁性流体は身の回りの様々な部分に多用されている機能性材料ですが、その基礎的な性質はまだ明らかになっていません。この基礎研究を行っている研究班は、この研究は、私たちの生活をより快適にする機器の開発につながると発表しました。サボテンの刺座配列を研究している研究班は、植物の器官や組織の配列の規則性を数学を用いて表現する研究を行っていて、自然の法則の共通性を示そうとしています。この研究は分野横断的だとして高い評価を得ました。マグマ分化に関する研究班は、鉱物の微細構造にマグマ分化末期の環境が記録されていると結論付けましたが、この研究のずっと先には、火山の噴火予知が見えてると、「American Geophysical Union 2024」で発表して、これもまた高い評価を得ました。ニハ

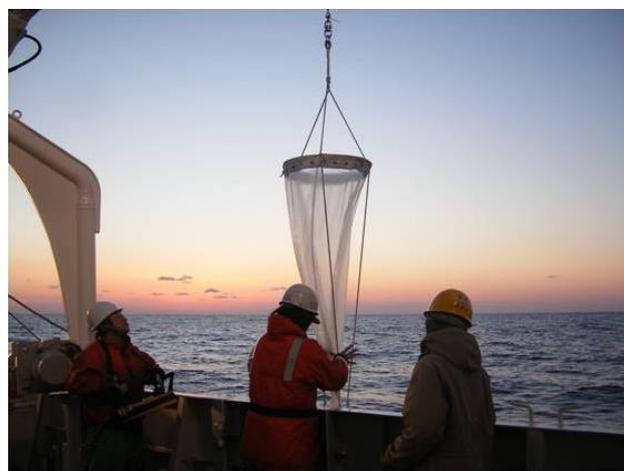


滴虫型ニハイチュウと蠕虫型ニハイチュウ

イチュウというタコやイカの腎囊に片利共生する、細胞数が（種によって異なりますが）20～40 程度の生物の研究をしている班があります。ニハイチュウは多細胞生物と単細胞生物の進化を繋ぐ重要な生物であるとされていますが、研究者が非常に少ない状況です。これを知った生徒たちは、ニハイチュウを何か月もかけて観察し、その生活環を解明しました。もちろんこの研究には、進化の解明のための基礎研究という位置づけがあります。これらの例のように、ぼんやりとでよいので、将来を予測する情報が入っていればよいと思います。

(5) 定性的研究と定量的研究

自然科学では、定性分析が初歩的で、定量分析は高等であると考えられがちです。中谷宇吉郎氏はその著書「科学の方法」でこんな例をあげています。少し長いですが引用しましょう（132～133 ページ）。海中で網を引き回して、プランクトンを集めて行う研究についてです。



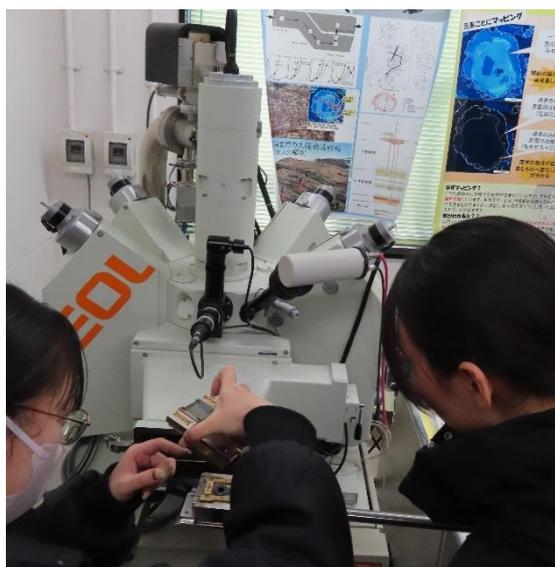
プランクトンの採集ネット

(http://www.plankton-science.jp/modules/pico/index.php?content_id=2)

「(たくさん採れたプランクトンの) その量は、天秤で測れば、簡単に測ることができる。定量的な研究は、簡単にできる。それでこの場合には、定量的の方は、初歩の研究と考えられている。このプランクトンの塊の中には、非常にたくさんの種

類のプランクトンがいる。(中略)それがどういう種類のものかを確かめるとなると、非常に骨の折れる仕事になる。しかしその方が、プランクトンの本態の研究には重要であり、かつ学問的にも価値の多い研究である。それでこの場合は、定性的研究の方が、定量的研究よりも骨が折れ、かつ進んだ研究である。雑多な種類のプランクトンを一まとめにして、その目方が何グラムあるかを、いくら正確に測っても、学問的には、意味が少ないからである」。要するに、今取り組もうとしている研究にとって、定性的に扱う方が価値を生むのか、定量的であるべきなのかについて、事前によく考えておくことが大切だということです。

分析化学の現場でも、同じようなことが見られることがあります。ある高校生の学会発表でのことです。彼らは、鉱物の形成過程を解明しようと考えて、大学の Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) を使って、精密に鉱物の様々な部分の化学組成を分析していました。一般の高校生では使うことができない高度な分析装置です。しかも出てきたデータは、エクセルファイルで先行研究のプログラムを使って処理しなければならず、さらに、その結果を評価するためには、高度な分子鉱物学や相平衡などの大学院レベルの知識が求められます。



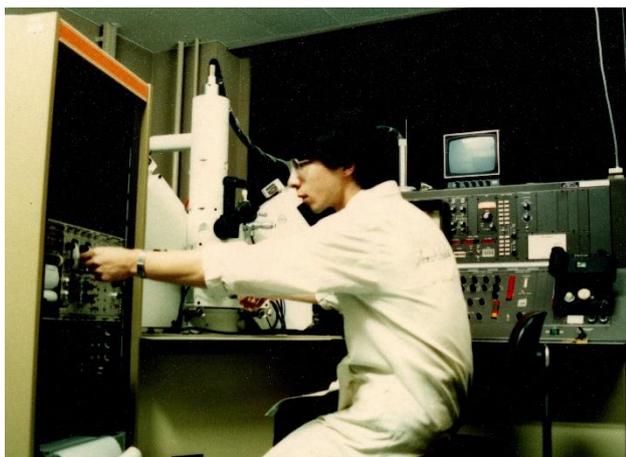
EPMA 分析装置 (京都大学理学部)

彼らに質問すると、その答えは、「EPMA 分析装置の仕組みはよくわからない」、「分析結果のデータは大学の先生に処理してもらった」、「大学の先生の指導の下で結果の評価を理解した」というものでした。この場合、彼らにとって定量的研究がどれほどの価値を持つのか疑問に感じました。同席したある大学の教員が助言していましたが、「偏光顕微鏡でしっかりと観察して得られる成果を、丁寧に解釈の方が意味があるのではないか」という意見には私もまったく共感したものでした。

その後、本校の科学部も鉱物の成分分析を行うことになりましたが、事前に何度も研修し、先行研究をしっかりと読んで、大学の教員の講義を聞いて許可証を得て、生徒だけで(分析に関する大学のサポートなしに)分析に臨みました。データの処理も生徒が行いました。私が大学院生だった1987年頃でも、大学院生がEPMA分析を行うことができたのは大変な幸運でしたから、隔世の感があります。生徒の研究発表会では、生徒が彼ら自身で考え実施した実験でしたから、質疑応答も立派なもので、世界最高峰の国際学会 American Geophysical Union 2024 では、高校生で初めて2年連続で発表に採択され、プレゼンテーションは高い評価を得ました。何でもかんでも定量的研究を行えばよいというものではなく、現場によってどのような研究手法をとるのが良いのかについて、生徒とよく話し合う必要があります。



生徒だけで EPMA 分析に挑む



私が EPMA 分析を許されたのは大学院でした

(6) 矛盾があるが結果がそう示している場合

実験結果から導き出した結論が、わたしたちが知っている知識(常識)と異なる場合、それをどう評価するかは難しい問題です。これに対応する方法には大きく3つあると思います。

1つは、「これまで科学が見過ごしてきた部分に光をあてる成果である」と評価することです。先に書いたように、科学では実験で人為的に変数を1つに絞り込みますが、選択した変数の条件や絞り込みの方法によって、これまで見つからなかった変化が露になるという場合です。この場合は、これまで得られていた知識(たとえば方程式など)を変化させることによって発見され、納得されるでしょう。

2つ目は、そもそも仮説が誤っている場合です。実験は仮説に基づいて行われますから、仮説が誤っていれば、それを証明しようと工夫した実験が行われることになります。結果がおかしければ、仮説の誤りに気付くこともあります。仮説に矛盾しない結果が出てしまうと、おかしな研究論文が仕上がってしまいます。これまで大きな発表会で、誤った仮説に基づいて実験が進められ、得られた結果に基づいて考察が行われた研究発表を、幾度となく目にしてきました。助言する教員は、このようなことが起こらないように、仮説の確か

らしさを予備実験によって確認する必要があるでしょう。

3つ目は、実験結果が全く新しい結論を導き出す場合です。仮説の確からしさや実験方法、得られた結果を検証し、その一連の過程に矛盾や見落としがないと判断した場合、それは新しい発見かもしれません。高校生の課題研究であっても、教科書を書き換えるような発見をすることがあります。先に「ポイント5：先行研究の結果と異なる成果を得た場合」で紹介した、化学の研究で世界の科学の常識を覆した女子高校生の研究は有名ですが、わたしが指導した鉱物の条痕色に関する研究でも、教科書の内容に矛盾する成果を得て学会で発表し、その後教科書が修正されたということがあります。

いずれの場合でも、助言する教員が生徒の研究に違和感を覚えないかどうか、その違和感を生徒に助言して解消しておく必要があります。専門的な知識があればそれに越したことはありませんが、専門外であっても違和感を覚える点がないかどうか、生徒とよく対話することが大切です。

(7) 科学的な指標を設定できない場合

現代の科学をもってしても、地震がいつ起こるかは予測不能だといわれています。地震を引き起こすひとつひとつの要素が解明されていても、それらが要素のすべてなのかどうかわからないばかりか、要素の解明のために条件を制限して実験を行うことから、それらがどのように関係しているかもわからないからです。物理学(流体力学)がこれだけ発達していて、ジェット機が空を飛ぶ時代でも、薄い紙がゆらゆらと左右に揺れながら落下する軌跡を予測することはできません。つまり、空中を進むときの物理がすべて解明されていなくても、空中を高速に進むためにはどうすればよいか、という目的に研究を収束させれば、その点においての結果が得られるということです。ジェッ

ト機が飛ぶからといって、空気の流れが解明できたわけではないのです。こういうふうに考えると、高校生の課題研究であっても、まだまだ取り組むことができるテーマは多くあると思えてきます。



ひらひらと舞い落ちる紙

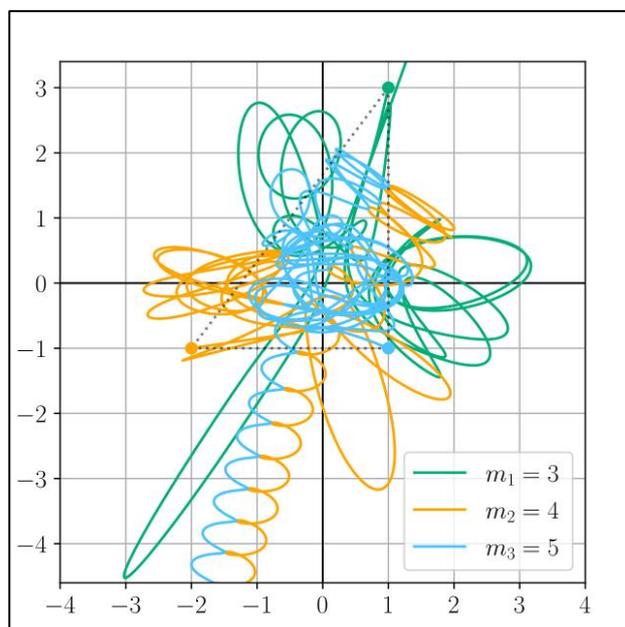
(https://www.freepik.com/premium-vector/abstract-vector-background-with-flying-falling-scattered-office-white-paper-sheets-documents_3528595.htm)

「身近な現象をテーマに設定しよう」というものの、これらを科学のテーマに設定することは困難です。それは、科学で用いられる手法の「実験」に限界があるからです。科学の実験には、変数を1つにすることが求められます。そこで、変化する可能性のある条件を一定であると設定して、ひとつだけ条件を変化させて結果の変化を確認します。しかし、3つの変数があると、それらが互いに影響を及ぼしあって予測ができないという「ピタゴラス三体問題」があるように、複数の条件下で自然現象が起こっているのですから、そもそも変数を1つにするという段階で、人為的だということを理解しておく必要があります。

【ピタゴラス三体問題】

もとは、互いに重力で影響しあう3つの質量を持った物体の運動は、数学的に記述できない(予測できない)という古典力学の問題です。初期条件がわずかに異なると、運動が予測困

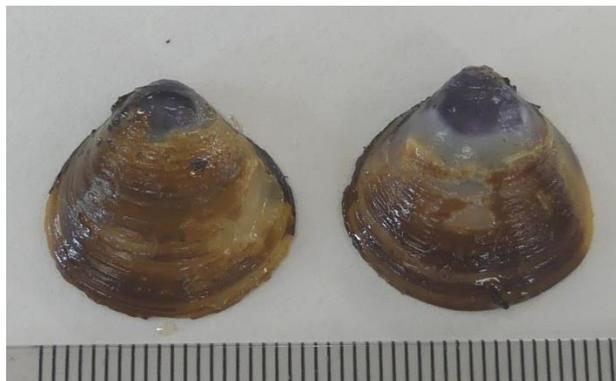
難なカオス状態になり、厳密な一般解を求めることができません。



ピタゴラス三体問題の数値解は…

(<https://www.wikiwand.com/ja/articles/%E3%83%94%E3%82%BF%E3%82%B4%E3%83%A9%E3%82%B9%E4%B8%89%E4%BD%93%E5%95%8F%E9%A1%8C>)

本校科学部は、シジミの貝殻の模様は、生息する地域によって特徴があるのではないかという直感的な疑問を持ち、研究することにしました。全国各地のシジミを100個体ずつ採集し、生息地の塩類濃度や酸素の割合などの地域環境の特徴と合わせて調査をしました。実際に目で見ると、明らかに模様の傾向が異なっているように見えますが、それをどのような指標で測定して、客観化



シジミの殻の模様に規則性はあるのか

すればよいのかが課題になりました。しかも殻には表側と裏側があり、それぞれ模様が異なるのです。

このように客観的な指標を設定することが難しいテーマでは、科学的な成果にまで押し上げるのは難しいかもしれません。ちなみに、科学部の生徒は、模様の表す面積や線模様の長さなどを指標に設定して、数千個体について地道に測定して、結果をまとめました。この場合、指標の妥当性については、「私たちは、これを指標にしました」と冒頭に宣言することが必要になります。このように、違いを客観的に示す指標を導入することで、科学の領域に押し上げることができます。

いずれにしても、自然科学の解明とは、到達できないゴールに向かうようなものです。生徒の課題研究では、ときどき、「これでひとつの自然現象が解明できた」という発表を目にしますが、科学の本質を理解させておくことも、重要な教育の一環だと感じます。科学は、何が存在するかは説明できますが、何が存在しないかは説明できないのです。

(8) 心理学や言語学研究の例

心理学や言語学のありかたは、自然科学とは少し違っています。本校では時々、心理学や言語学に分類され「得る」ようなテーマを提示してくる生徒がいます。そのテーマを無下に却下することはできないので、教員が集まってテーマ検討会にかけることになるのですが、「これはどう扱ったらよいものか」と悩みます。近年では、文系の生徒も課題研究に取り組みますから、すべてのテーマを自然科学と同じように判断することはできません。

たとえば、「透視能力はあるのか」という研究を行うとしたら、どう考えれば良いのでしょうか。自然科学をテーマとした研究の流れを参考にすると、予備実験→仮説→実験・観察→考察、となるのですが、この道筋は「透視能力はあるのか」の研究に



透視能力の実験

(<https://www.value-press.com/pressrelease/16048>)

おいても辿れそうです。対象がヒトになりますから、事前に、「ポイント 12：研究倫理と科学倫理の担保」で示すような、倫理的課題を解決しておく必要がありますが、それは自然科学と同じです。被験者には透視能力が「ある」(または「ない」)と仮定して、様々な実験を繰り返します。たとえば、まず被験者に2枚の絵を見せて、カーテンの後ろにある絵はそのどちらかを答えてもらうなどの実験です。この実験の結果、たとえば53.1%が正答であり、統計的有意性の基準を満たしていたとすると、被験者には透視能力があると判断してよいでしょうか？実は、このような研究が、2011年にコーネル大学心理学部のダリル・ベム教授によって行われ、超能力的直観、つまり被験者には「透視能力があると判断できた」と結論付けられました。しかも、この心霊研究の成果は、世界的な心理学権威の学術雑誌である、「Journal of Personality and Social Psychology」誌に掲載されたのです。世界的権威の雑誌に掲載されたと聞くと、それだけで、なんだか本当のような気がしてきますね。もちろん、だからといって、研究の信用度が高まったと判断する必要はありません。「大学の先生の言うことだから正しいのだろう」と考えてしまう権威主義と同じです。もしも、人は本当に透視能力を持っているのであれば、研究は誰でも同じ実験を行

えば、同じ結果が得られるはずだと考え、多くの研究者が追試を試みましたが、結果は有意差を認めませんでした。そこで、追試をした研究者たちは、ベム教授の心霊研究は間違いだという研究論文を書いて、同じ学術雑誌に投稿しましたが、査読に回されることなく、すべて編集長段階で却下されてしまいました。「過去の実験を繰り返した研究は、元の実験と結果が同じであろうとなかろうと、原著論文として扱わない」というのが理由だったそうです。

なんだか、とても複雑な話になってきましたので、このあたりでいったん整理しましょう。まず、ベム教授の実験方法が妥当なものだったとすると、そこから得られた結果によって「透視能力がある」と判断できるのかどうかです。これについて、ベム教授は統計学的に処理しており、「有意差が見られた」と判断しています。しかし、「偶然」によって起こった有意差なのか、本来持っている「能力」によって生じた有意差なのかについては、証明のしようがありません。つまり「なぜ」有意差が現れたのかについては、説明できません。自然科学の視点からすれば、この「なぜ」が大切なので、この点が説明できないから、安易に納得はできないと感じるのかもしれませんが。次に、他の研究者が行った検証実験の結果が、有意差を示さなかった点についてです。ベム教授の論文は、彼の「被験者」が透視能力を持っていると結論付けているのであって、人は「誰でも」透視能力を持っているとはしていません。その点で、ベム教授は科学的な表現に心がけているように思います。「だから、人は皆、透視能力を持っている可能性がある」などと風呂敷を広げないのです。その点で、査読者は掲載可と判断したのかもしれませんが。つまり、この研究においては、検証が不可能ということになります。「ベム教授の心霊実験の被験者を連れてきて検証実験をすればよいではないか」という考えがあるでしょうが、「被験者はそのときに透視能力を発揮したのであって、時間や場所が違えば、その能力

を発揮できなかった」と結論付けることだってできるわけです。能力はあっても発揮できなかったと。さらに、学術雑誌が検証実験に関する論文を却下したことについてです。自然科学では、全く同じ実験をした結果を掲載することはありません。その雑誌に掲載すると決めた場合、雑誌の査読者が新規性や世の中に対するインパクトなどについて検証したという内容保証がついているわけですから、二番煎じとなる論文は査読にさえかかりません。ベム教授の原著論文が掲載された時点で、結論が異なる論文を掲載できるのは、その研究手法が異なっている場合に限られます。ですから、他の学術雑誌に提出すれば、掲載のチャンスはあったと思いますが、追試を行った研究者らは、あくまでも同じ雑誌への掲載を目指したわけです。彼らは、「再現できないものは科学ではない」と主張しましたが、そもそもこの研究は再現できないものだったのです。ちなみにベム教授は、後のインタビューでこう述べています。「当然厳密さは大切であるが、実験は修辞的技巧である。自分の主張の裏付けになる実験を行い、データを収集した。それは相手を説得するためのものである」。「実験は仮説を証明するために行われる」という、「ポイント 8：テーマを決めるときに確認しておきたいこと」の「(6) 矛盾があるが結果がそう示している場合」で扱った話は、ここでも生きています。ですから、ベム教授の心霊研究の成果が「不正である」と判断することはできないのです。

そのほかにも、1996年にバルフ氏らによって行われた有名な実験があります。中立的な言葉で文章を作ったグループと、高齢者を連想させる言葉で文章を作ったグループで、実験後に帰って行くときの歩く速さを測定したところ、後者の方が歩く速さが明らかに遅くなる、という研究で、これも「Journal of Personality and Social Psychology」誌に掲載されました。その後、この論文は数多くの研究に引用され、心理学の教科書にも必ず出てきていた有名な研究です。しかし、それから長い

時間を経て、2012年に追試が行われた結果、有意差が認められませんでした。これは「不正」ではなく、理由がわからない「誤り」だったということです。心理学者が危機感をもって、いったいどのくらい再現性がある研究があるのか、2015年に調査しましたが、世界的権威のある「サイエンス」誌で39%、2018年の「サイエンス」誌と「ネイチャー」誌を合わせて62%でした。学者による研究でさえ、このような状況ですから、心理学に関わる課題研究には、あまり科学的根拠や再現性を求めても、それは難しいのだと思います。生徒が希望を出して来たら、自然科学研究のように「なぜ」とか「再現性」とかを追求せずに、研究手法の学びの一般ととらえたほうが良いと思います。研究で原因が究明できなくても、だからといって、研究のレベルが低いとは判断できません。

ここで、再現性の低さの話は、何も心理学に限ったものではないことを思い出しておかなければなりません。「ポイント7：科学の限界を知る」でも書いたように、自然科学の分野でも再現性が担保されていない、あるいは再現しようとしても、実験の詳細が書かれていない研究論文が多くあります。癌の治療薬の開発がなかなか進まない原因のひとつとして、再現性の低さ、あるいは実験内容の不記載問題があるといわれています。

ほかにも、「オノマトペ」をテーマにしたいという生徒もいました。オノマトペとは、擬音語や擬態語表現の一種で、言語学の範疇に入ります。たとえば、雨が「ザーザー」降っている、とか、影で

「コソコソ」話をする、「ソロリソロリ」と近づいてくる、などがそれで、学ばなくても自然に習得するものと考えられがちですが、使用法には様々な規則性があって、学習することが必要な語彙群です。オノマトペの研究をGoogle Scholarで検索してみると、多くの研究論文が発表されていることがわかります。収集に終わらなければ、立派な研究テーマになりますが、気を付けたいのは、その研究方法です。言語をどのようにしてデータ化したり分析したりするのかについては、一考が必要でしょう。そうでなければ、単なるレポートに終わってしまいます。これは、「なぜ」という問いかけと対極にあるテーマともいえるでしょう。

このように、自然科学以外をテーマにした課題研究では、純粋に自然科学研究の手法を踏めず、実験方法が妥当かどうか検証しにくいだけではなく、私たちが一番大切にしている「なぜ」に到達することができないことから、助言がさらに難しくなります。このようなテーマを取り扱う際には、客観的な実験結果から得られる可能性について、具体的に示すことが最終目標となると考えるべきでしょう。これまでは理系の生徒に対して、自然科学をテーマにした課題研究が課されてきましたが、これからは、文系の生徒に対しても課題研究が課されることとなります。その時には、文系を自然科学の手法に取り込むのではなく、自然科学の手法をどのように文系にアレンジするか、という発想が大切だと思います。

ポイント9：総合化と論理的思考

自然科学では、得られた実験結果を総合的に判断して結論を得ますが、自ら行った実験だけではなく、先行研究で示された結果を引用してきて、それと総合化させることによって、より一般論化

した成果を得ることができます。この点でも、先行研究は重要になりますから、きちんと文献として提示しておく必要があります。総合化させると、全体像を解明するために必要な部分が見えてきた

り、未解明な部分の結果が予見できたりします。個別の研究では見えてこなかった課題が、総合化によって明らかになってくるということは、一般の科学者も行っていることですが、高校生の課題研究でもよくあります。

本校の科学部の研究で、サボテンの刺座の配列の規則性を研究している班は、サボテンを扱ってはいますが、生徒が見ているのは植物としてのサボテンではなく、刺座の配列を図形として数学的に見えています。データを数学として扱うことによって、刺座配列を螺旋方程式で示すことができること、種によって変数が異なっても、サボテンに限らず様々な植物で同じ螺旋方程式になることを

明らかにしました。すべての植物で同じかどうか判断が難しいですが、植物学と数学を分野横断的に扱う研究は、まったく新しい知見をもたらしてくれます。

このように、総合化と新しい課題の発見において活躍するのが、数学というわけです。見た目では関係のないように見える物事を総合的に処理するために数学を用いると効果的です。もちろん、数学が有効ではない場合もありますが、そのときには、定性的な比較を行えばよいということになるでしょう。この話は「ポイント 8：テーマを決めるときに確認しておきたいこと」で詳しく書きました。

ポイント 10：相関関係は因果関係ではない

当たり前の話ですが、ここで確認しておきたいと思います。「相関関係があるからといって、因果関係があるとはいえない」ということです。科学では当然のことと捉えられていますが、高校生の課題研究においては、これが無意識に紐づいてしまいがちです。たとえば、統計をとってみると、身長が高い人がコーヒーをよく飲んでいたりしましょう。身長とコーヒー好きは相関関係にあります。しかし、だからといって、「身長が高くなるとコーヒーが好きになる」というわけではありません。この例では間違えることはないと思いますが、科学の実験で「なぜ」を追求していると、結果と相関関係にあるものを「原因」と判断してしまいがちです。

本校科学部のマグマ班が、角閃石から波状累帯構造を発見した時、角閃石には明らかな熱水残液の影響が残されていました。この微細構造の有無と熱水残液の影響の有無は、たしかに相関関係にあります。しかし、だからといって、熱水残液が循環すれば必ず波状累帯構造が形成されるかといえ



背の高い人はコーヒーが好き？

(https://unsplash.com/ja/%E5%86%99%E7%9C%9F/%E3%82%AF%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%82%BA%E3%82%A2%E3%83%83%E3%83%97%E5%86%99%E7%9C%9F%E3%81%AE%E6%B0%B4%E6%BB%B4--otqK_briYs)

ば、それはわかりません（証明のしようがありません）。逆に、波状累帯構造があれば、必ず熱水残液が循環した、とも言えません。このように、関連があるからといって、それらを原因と結果として位置付けるには、慎重さが必要です。どのくらいの岩体を調べれば、波状累帯構造が熱水残液循環

の指標であるといえるのか、因果律を証明することは大変難しいのです。人為的に様々な条件を変えて実験を行い、そのうちのいくつかが相関関係を示すと、高校生を含めて、研究者はすぐに、「この結果はこの原因から引き起こされている」と結

論付けようとしします。しかし、実験を行っていない原因、あるいは隠された原因が別にある可能性も考えなければならず、相関関係があるからといって、それらには因果関係があると安易に結論付けてはいけません。

ポイント 11：生成 AI との付き合い方

生成 AI を使う場面が多くなってきた印象があります。非常に便利ですが、生成 AI を使ったことを申請することが求められている論文コンテストや研究発表会が増えてきました。それは、生成 AI が発展途上であり、まだ多くの問題を抱えているからです。

生成 AI の技術的な問題に関する注意点として、以下が考えられます。まず、間違いを生成することがあるという問題です。ご存じのように生成 AI は、内容を理解して考えて答えているわけではなく、これまでに与えられて学習した情報「だけ」をもとに答えているにすぎないので、正しい内容と間違った内容が混在する可能性を含んでいます。また、生成 AI がどの程度学習しているのか、どのように回答を導き出したのかはブラックボックスになっているので、答えの根拠もわかりません。場合によっては、同じ質問をしても答えが異なる場合があります。これは、生成 AI に回答の創造性を向上させるための「ゆらぎ」パラメーターが組み込まれているためです。課題研究が専門性の高い内容になってくると、同様の先行研究が少ないために、生成 AI から返ってくる答えに誤りが多くなります。さらに、課題研究を英文化するために生成 AI を使うと、専門の論文の学習が不十分なために、見当違いの英文を答えたりすることも多くみられます。最初から生成 AI に頼らずに、少なくとも学校教育の現場では、まず自分で文章を書いたり、英文化したりする力を養いたいものです。

あくまでも、AI はその補助をするにとどめるべきです。

また、生成 AI はしばしば倫理的に問題のある回答や表現を使います。世界中で生成 AI が使われていて、地域によって社会情勢や価値観が異なりますから、回答を鵜呑みにすることが危険なテーマもあります。生成 AI はこれらの課題を含んでいますから、研究論文というセンシティブな執筆の場合には、最終的に人がファクトチェックする必要があります。



ChatGPT (<https://chatgpt.com/>)

逆に、生成 AI を利用することによって被害を受ける場合もあります。前に書いたように、生成 AI は入力者からの情報を基に学習していきますから、課題研究に活用する場合には、利用者の個人情報が適正に扱われなかったり、プライバシーが侵害されたりする危険性を孕んでいることを理解しておく必要があります。さらに、課題研究に生成 AI を活用することによって、研究の情報が他者に洩れる危険性もあります。研究の情報は大切なもの

ですから、公開するまでは漏洩させないように注意を払いたいものです。私が指導する生徒の研究でも、その内容が一部漏洩したことがありました。高校生の研究であっても、その内容を活用したい者、あるいは研究の邪魔をする目的で漏洩させる

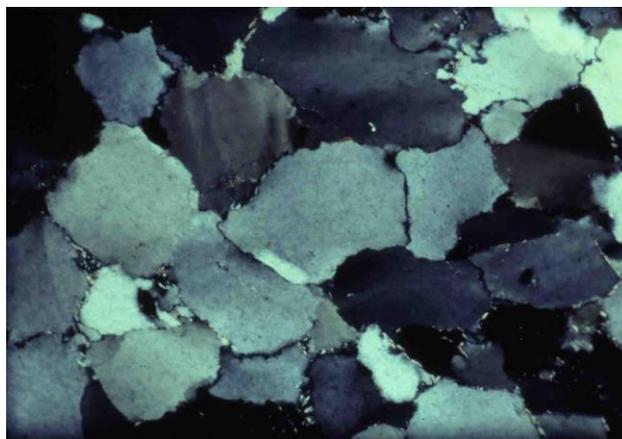
者がいることを知っておきましょう。基本的には、生成 AI が作成した文章が、生成のもととなった学習素材と類似することはよくあるので、場合によっては著作権を侵害する可能性もあります。

ポイント 12：どのくらい「行ったり来たり」できるか

研究の出発点は、テーマとなった対象や現象をよく観察することです。この時間はテーマ決定に次いで重要で、曖昧な観察からはよいアイデアは浮かんできません。観察しているうちに、「この原因はこうではないか」という発想がわいてきます。おそらく、観察と発想はほぼ同時並行に進むと思います。そこから仮説を立てることになるわけですが、この仮説が誤った方向に向かってしまうと、実験が本質から離れてしまいます。実験は仮説の有効性を確認するために行うものですから、仮説が誤っていると、誤った方向に結果が出るように「自分にとって都合の良い」実験を構想することになってしまうのです。このようにして、明らかに誤った結論を発表した高校生の発表を、いくつも見てきました。

たとえば、ある高校生は、砂岩を顕微鏡観察したところ鉱物の粒どうしが癒着しているように見えたことから、砂岩は熱の影響を受けているのではないかと仮説を立てたようです。ちなみに、砂岩は堆積岩であり、堆積岩と分類するように定義されています。砂岩が熱の影響を受ければ、それは変成岩と言わなければなりませんから、「熱の影響を受けて鉱物が癒着した砂岩」という表現は、科学的にも国語的にも誤っています。鉱物の粒どうしが癒着しているのは、続成作用という、堆積岩が固化する際の環境によるもので、熱の影響ではありません。実際の顕微鏡写真を見せましたが、まさに典型的な続成作用の影響を示し

ていました。砂粒（石英）から溶け出した SiO_2 が石英として沈殿して、砂粒を癒着させていました。



砂岩の顕微鏡写真

(<https://www2.city.kurashiki.okayama.jp/musnat/geology/mineral-rock-sirabekata/rock44/henkoukennbikyou-gansekisosiki/henkoukennbikyousedimentary/henkoukennbikyousedimentary.htm>)

この生徒の失敗の第一の原因は、よく観察しなかったことにあります。いろいろな砂岩を観察し、熱の影響かもしれないと思ったのなら、熱による変成岩についても観察すべきでした。ひとつやふたつの試料ではなく、もっと多くの試料の観察を徹底的にすべきでした。それから、教科書や専門書、先行研究からもしっかりと学ぶべきでした。彼にとって不運だったのは、よい助言者を得ることができなかったことです。そうすれば、仮説の問題点に気づき、そこから引き返したり、新たなテーマに修正したり、仮説を変えたりすることが

できたに違いありません。助言者は専門知識を有している必要はありませんが、「砂岩とは熱変成を受けているものだ」という仮説を聞けば、「どこかおかしいぞ」と教員の感性が反応したでしょう。

研究の本質は、専門家でも高校生でも変わりません。時々立ち止まって、広い視野で見つめなおすことが大切です。おかしいと思ったら、もう一度元に戻ってやり直せばよいのです。ここで紹介した高校生は、大きな発表会（千人以上が入った口頭発表でした）で、考えていたことが仮説の段階で覆されて、大きなショックを受けたことでしょう。高校生の科学的・論理的思考力の育成としては、難しい場面でした。研究では、どれだけ「行ったり来たり」できるかが大切です。疑問に思うなら振り返る、途中で方針を転換する、テーマを変えることだってあるでしょう。

逆に、十分な観察から大きなテーマが見えてきた例を紹介しましょう。本校科学部には、ニハイチュウという、イカやタコなどの底生軟体動物の腎囊に片利共生している微生物を研究している班があります。まだ生態が明らかになっていない生物で、彼らは何から研究すべきか悩んでいました。高校生はすぐに実験をしたがります。早く結論を得て、達成感を味わいたいからです。そして、「できれば何か発見できればいいな」くらいに考えています。あれこれと手を出しましたが、どれも行き詰まり、途方に暮れていたところ、ある研究者から「とにかくずっと長い時間観察しなさい」と助言を得ることができました。目的を設定せず、「とにかくよく見なさい」というのです。ずっと観察を続けて2か月くらいたったころ、「あれ、もしかして」という生態の特徴が見えてきました。それからテーマを設定し、目的に応じた観察や実験を繰り返し、とうとうニハイチュウの生活環を明らかにすることができました。途中で何度も「こんなことして、何か成果が出るんだろうか」

と挫折しかかりましたが、とにかく観察と先行研究の勉強を繰り返したことで、テーマが見えてきたわけです。研究者の助言がなかったら、今はもう研究していなかったかもしれません。

科学は、観察→仮説→実験・観察→一般則と進むものですが、決して一直線の活動ではなく、その過程では「行ったり来たり」を繰り返します。この繰り返しが多いほど、最後に研究は大きな成果となるのです。そして、仮説が慎重に立てられていないと、実験の段階では人為的な目的で、人為的に条件をしぼることになりますから、そのおかしさが表面に顕れなくなってしまいやすいのです。「行ったり来たり」を繰り返すことができるのは、どこかで少しの疑問や違和感を覚えるからで、そのためには最初にどのくらいしっかりと観察したかが問われるのです。澤瀉久敬氏は著書「哲学と科学」の中で、科学についてこうまとめています。

「観察は事実を確かめるものであるのに対して、実験は思想を調べるものである」。仮説が実験によって否定されたとき、私たちは落ち込むのではなく、仮説の衣をいったん脱ぎ捨てて、「どうしてこういう結果になったのか」と考えてみればいいのです。「出戻りになってしまった」と落ち込むことはありません。帰ってきたということは、研究対象に対して時間をかけて掘り下げたということの意味しますから、決して無駄ではないのです。

自然科学の研究においては、「なぜ」という問いかけが重要です。「なぜ」を考えることから、新しい発想が生まれ、それに沿って新たな実験が始まります。予定調和とならずに「うまくいかなかった」のではなく、「進むべき新しい方向が見えた」と喜ぶべきなのです。「なぜ」そうなったのかを別の実験によって調べることで、単なる「失敗」を、うまくいかなかった原因を明らかにした「発見」に変えることができます。

ポイント 13：科学で夢を語ろう

ここで、自然科学の研究で一番大切なことを書いておきます。課題研究では「夢を語ろう」ということです。科学にはさまざまな方法が確立されていて、これまで書いてきたように、守るべききまりや、注意しなければならないポイントがあります。それらについてひとつひとつ考えていくと、生徒に「面倒で大変だ」という印象を与えかねません。しかし、獲得したそれらのきまりは、社会に出てからも必要とされる能力ですし、それらをふまえて科学をすると、実は科学は大変面白いものだという実感を得ることができるようになります。制約が全くない中で活動しても、本当の面白さはわかりません。「勝手」と「自由」をきちんと理解し、そのうえで、課題研究で夢を見させてやって下さい。助言者である教員も、夢を語ってほしいと思います。事実を反しない限り、科学ではどん

な仮説を立てるのも自由です。それが間違っていると気づいたら、その時に軌道を修正すればよいのです。自由な発想をめぐらせて、夢のある楽しい課題研究であってほしいと思います。



日本地質学会での発表

ポイント 14：研究倫理と科学倫理の担保

(1) 研究倫理

教科書の巻末部分には、研究するにあたって守るべき倫理がまとめられています。詳細は、「高等学校における科学倫理教育のロールモデル－その目的と方法－」にまとめましたので、参考にしてください。また、研究倫理の理解と学びのために、公正研究推進協会 (<https://www.aprin.or.jp>) が、eラーニング eAPRIN を公開しています。これは日本の多くの学会が受講を推奨しているもので、中には日本物理学会のように、受講証明書を添付しないと発表申請ができないところもあります。

研究倫理は、高校生の課題研究であろうと、研究と名がつく限り守らなければならない倫理です。



eAPRIN の HP (公正研究推進協会)
(<https://www.aprin.or.jp/e-learning/eaprin>)

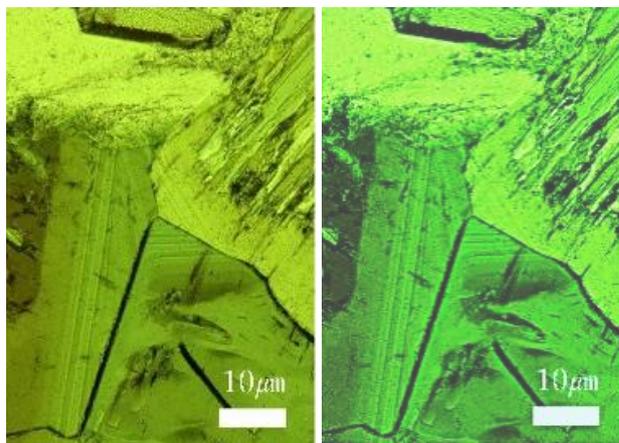
研究倫理には、捏造(ありもしないことを、あたかもあったかのように提示すること)、改竄(都合の悪いデータを、都合の良い数値に変えたりするこ

と)、盗用(自分ではしていないことを、あたかも自分でしたかのように扱うこと)などがあり、これを守らないと「研究不正」とみなされてドロップアウトされます。守らなければならない理由について、時間をとってきちんと学習することが必要です。この学びから、たとえば引用文献をきちんと明記する必要があることを理解できるでしょう。特に脊椎動物を扱う研究の場合には、厳しい規定が設けられていますから、事前の対応が必要です。

実験や観察の客観的データは、必ず実験ノートに記録しておきましょう。コンピューターが進歩した現代においても、実験ノートの価値は変わることがありません。コンピューター上に記録していけば、都合の悪いデータを、自由に消去したり書き換えたりすることができるからです。実験ノートは、消すことができないペンで記録し、教員が毎回チェックします。もちろん、手書きのノートであっても、あとから内容を書き換えることはできますが、少なくとも、データをペン書きしていれば、実験中の改竄や捏造を避けることができる可能性が高まります。そして、研究論文を発表するときには、求められていなくても、客観的なデータを資料として添付することを勧めます。

近年はコンピューターが発達して、撮影した画像をトリミングして都合の良い部分だけ残したり、色彩や鮮度を補正して見え方を変えたり、複数の画像を結合させたりすることが簡単にできるようになりました。生徒は安易に画像を「見栄えの良いように」変えようとはしますが、これも研究不正にあたります。もしも必要性があって画像を加工するのであれば、本文の中で、その方法と理由を説明しなければなりません。これから社会に出ていく生徒のために、撮影段階で注意するように指摘しておきたいものです。写真を安易に加工してはならない、ということは、あまり認知されていないかもしれませんが、不正にあたるので注意しておきたいものです。このような研究不正は、「ポ

イント7:科学の限界を知る」で示した、小保方晴子氏の STAP 細胞に関する研究論文でも多用されたことがわかっています。研究内容を主張するもっとも効果的な手段は、鮮明なカラー画像を示すことです。それも、できるだけ美しい画像であることが大切です。本校科学部の生徒が発見した角閃石の波状累帯構造は、その鮮明な画像によって受け入れられたといってもよいでしょう。都合の良いように写真に細工をすれば、研究論文全体の信用を失墜したでしょう。



波状累帯対構造を鮮明に見せるための加工(右)

科学は、社会の信頼の上に成り立っています。また、科学は、科学者同士の信頼の上に、つまり性善説の上に成り立っています。ですから、先人の研究が正しいかどうかを、すべてにわたって検証しているわけではありません。そんなことをしていたら、科学は前進する時間と機会を失います。それだけに不正が発覚して信頼を失うと、すべてがグレーという評価を受けてしまいます。自分の研究だけではなく、科学の信頼も失墜させる行為なのです。誰に検証されなくても、研究を行う者は、その信頼を裏切らないように自制することが求められています(それでも時々、研究不正がニュースになっていますが…)。たとえば、本校の科学部があちこちの露頭に行き、調査をしたり岩石試料を採取したりするとき、必ず事前に了解を得ています。調査を計画する時には、まずその露

頭が誰の所有なのか調べることから始めます。岩石といえども、勝手にハンマーでたたいて持ち帰る行為は窃盗と同じです。「調査のため」というと了解してもらえる場合が多いですが、これもまた互いの信頼関係の上に成立する話です。学校における課題研究の場合には、生徒ではなく担当する教員が了解を得るべきでしょう。

(2) 科学倫理

研究倫理は、研究者が守るべき倫理で明確な禁止規定がありましたが、科学倫理にはそのような明文化できる規定がありません。研究者ひとりひとりが考えるべき倫理です。たとえば、「脳死体からの臓器移植についてどう考えるか」などというテーマには、明文化される規定、つまり「答え」がありません。ひとりひとりが客観的な資料の理解に基づいて、その是非を判断するテーマです。「このようなテーマの課題研究はほとんどないから関

係ない」と考えないでください。

生徒の課題研究においてよくみられる科学倫理的課題に、アンケート調査の在り方があげられます。生徒も教員も、アンケートの目的や内容、取り方、データ処理の仕方などについてあまり問題にしないことが多いように思います。アンケートには、答える人が理解できる客観的な目的やデータの扱いなどが明示されていなければなりません。本校では、アンケート調査の希望があると、校長、教頭、SSH 推進部長、生徒部長、総務部長、教務部長、進路指導部長、各年次主任によって構成される（場合によって外部委員が加わる）倫理委員会が検討し、認可したり該当生徒に修正を求めたりしています（詳細は「高等学校における科学倫理教育のロールモデル－その目的と方法－」の巻末に示しています）。

自然科学に限らず、およそ研究と名の付く活動においては、研究倫理と科学倫理の知識と理解が求められます。

ポイント 15：グループ研究を論文に掲載するときの名前の順番

「これでよいのか？」と疑問に感じながら、曖昧に処理されやすいのが、論文やポスターに記す著者の順番です。まず大切なことは、著者というのは、その研究に主体的に関わり、成果を上げた人のことです。ですから、著者の全員が研究内容の全般について理解していて、内容について責任をもつということになります。専門研究者の論文でも、名前だけが付け加えられる場合があります、これが悪しき習慣になっていることもあります。高校生の課題研究では、このようなことが起こらないように、研究の過程から助言しておきたいものです。

さて、著者の記載についてです。これには3つの考え方があります。1つ目は、全員が研究に主

体的に加わったのだからという理由で、たとえば出席順に名前を並べる考え方です。これは一見すると平等のように見えますが、研究過程でリーダーを設定している場合、リーダーは全体の計画や実施で中心になってグループをまとめたのですから、逆に不平等になります。2つ目は、リーダーの名前を先頭に書く考え方です。私自身は、これが一番良いと考えています。大学入試では、ファーストオーサー（筆頭著者）かどうかで評価が変わったりします。もちろん、ファーストオーサーの評価は、それ以外の生徒よりも高くなることが多いようです。リーダーとしての役割をしっかりと担ったのであれば、先頭に書くのが良いと思います。3つめは、先に書いた2つの方法に付け加え



日本地球惑星科学連合大会での発表

るもので、著者を並べて書いた後、最後に助言担当者の教員の名前を書くものです。生物系の学会

では、著者一覧の最後に、(教)として、名前を書くように指示されています。ハイクラスの研究論文では、監督した上級研究者の名前を最後に付け加えますから、その考え方に則ったものでしょう。いずれにしても、研究を行った生徒の名前をどう書くのかについて、検討が必要です。

なお、生徒の課題研究の論文を公開するとき、名前も公開するかどうかについては、学校ごとに検討すればよいと思いますが、原則は、「誰が行った研究かわからない」論文は、論文として認められません。責任の所在が誰にあるのかを明示しないと、内容の信頼度が低くなり、公開する意味が失われてしまいますので、私は名前も公開すべきだと考えています。

ポイント 16：発表会の心構え

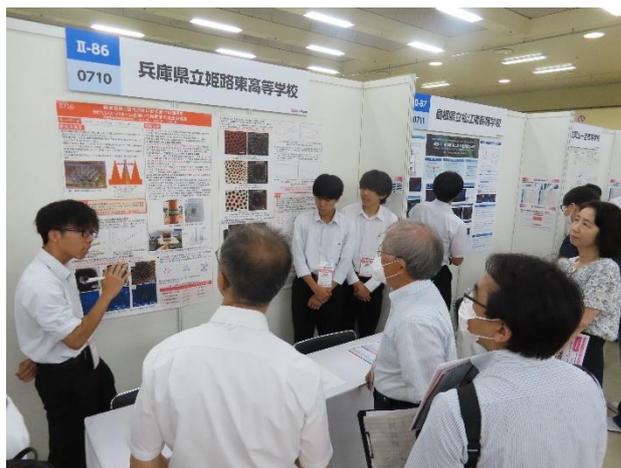
(1) 内容を絞り込む

これまで頑張ってきた研究の成果を、間違えないようにすべて正しく発表しよう、というのが高校生心理でしょう。間違っはいけない、という思いが強いほど、緊張するのかもしれませんが、しかし、自分がやってきたことをすべて発表しようとすると、結果的に相手には大切なことが伝わりません。生徒は半年～1年間かけてずっとその課題に向かい合ってきたのですから、意義や課題についてよく理解しているでしょうが、その話を初めて聞く人にとってみると、どこでどのように苦労したとか、こんな失敗があったとか、ほかにもこんな発見があったとかを話されても理解しきれません。一番伝えたいことは何かについて簡潔にまとめ、そのほかについては「質疑応答で話す機会があれば」くらいに考える方がいいと思います。間違ったらいけないと思って原稿を一生懸命に覚えている生徒も見かけますが、話す内容はポ



知の甲子園 Q-1 最終発表会(大阪・関西万博会場)





SSH 全国生徒研究発表会



国際的な研究発表会 (SKYSEF2024)



国連高校生サミット

スターや PowerPoint 画面に書いてあるのですから、あまり原稿に縛られない方が良い結果を生むと思います。

(2) 聞く側も人それぞれ

それから、質疑応答の場面では、様々なやり取りが繰り返されます。これまで多くの発表会に生徒を引率して参加してきましたが、質問攻めにする人、批判的な意見を言う人、そもそも興味のない人、まるで相談相手のように理解しようと努めてくれる人、など様々です。

かつては審査を伴う研究発表会で、要旨を読んで聞きに来た審査員に「私は君たちの研究を決して認めない」と最初に言い放たれたこともありましたが（こんなこと本来はあり得ません）。こちら側は立場が弱いので、できることは少ないですが、さすがにそれでも抗議しました（何の反応もあり

ませんでした）。

それはさておき、発表の場でいろいろと示唆を受けるわけですが、大学の先生にいわれると、すぐにそれを信じて方向を修正しようとする生徒が多いのが現状です。確かに方針を修正する必要がある場合はあるでしょうが、それもじっくりと検証すべきです。短時間の発表で相手から得た助言が「的を得た」ものかどうかは、検討してみないとわかりません。すぐに「専門家」という相手の立場によって、十分な議論をすることなく受け入れる必要はないでしょう。

相手を見て、話し方を変える人は、ずっと昔から一定数いるように思います。私自身が大学院生の頃に、角閃石の波状累帯構造を発見し、日本地質学会で口頭発表した時の経験をご紹介します。

う。現在では、それぞれの学会の会員を増やそうとして、さらには日本の将来の科学のために高校生を育てようとして、様々な学会が高校生の発表の場を提供していますが、私が発表した 1986 年当時は、高校生どころか大学生や大学院生が発表するなどということはありませんでした。私を指導してくださっていた鉱物学の権威である山口佳昭先生は、指導教官が発表するのが当たり前だった時代でしたが、「発見したのは君だから」と、私が壇上に上がるように配慮してくださいました。それは大変な驚きでしたが、いざ壇上に上がって発表が始まると、「学生の分際で、立場をわきまえろ」といった野次があちこちから飛び、私の発表の声など完全にかき消されてしまい、「やはり山口先生が発表すべきだったのではないか」という後悔にさいなまれました。当時の学会の重鎮には、「そんなものはない」と頭ごなしに言われたものです。山口先生は大変立派な方で、数日後、まだ落ち込んでいた私に、「国際鉱物学会に申し込む」とおっしゃるのです。英語が苦手だった私は、とにかく追い立てられるように発表要旨を作成して投稿したところ、発表に採択され、サンフランシスコに行くことになってしまいました。「国内の学会であんなことになるのだから、国際学会ともなると…」と、どうしても前向きになれない状態で渡米しました。ところが発表が始まると、周囲の研究者たちは、私が学生であることには関心がなく、私の研究内容そのものに興味を示して集まってきてくださいました。国際学会で評価されて、「ネイチャー」誌や「サイエンス」誌に次ぐ国際学会誌「*Geochimica et Cosmochimica Acta*」誌に研究論文が掲載されて以降、日本国内での対応はかなり変わりました。その後、私の研究を引き継いでくれた高校生による研究が進むと、続々と全国各地の岩体から、さらに海外の岩体から発見され、教材として販売されている深成岩からも見つかるようになって、マグマ分化の研究が大きく進みまし

た。私が大学生～大学院生の時代の話ですが、このようなことは、今でも起こっているのです。生徒に、このような経験を伝えることができるだけでも、あの経験は貴重なものだったと思います。

高校生の発表の場では、高校生の科学的思考力の育成が大きな目的ですので、教育的配慮が求められますから、丁寧に発表を聞いてくれて、穏やかに質問してくれることがほとんどです。生徒もその経験で、「発表が楽しかった」と感じ、次へのモチベーションになっていきます。しかし、もう少し発表会のレベルが上がって、審査員が登場したりすると、とたんに上下関係を意識させられる機会が増えます。発言が辛辣になったりするのも、このレベルの発表会に多く見られる傾向です。「研究者ぶっている高校生をやっつけてやる」と思っているのかと疑いたくなるような人も少なからずいます。さらにレベルが上がって、国際学会ともなると、そこに出てきて発表するような人は、互いに一定の尊敬をもって接するもので、それは高校生相手であっても同じ、あるいはそれ以上の驚きをもって迎えられます。聞き手の対応力の違いが、その発表会の質を示していると考えてもよいかもしれません。

審査員による評価といえば、工学的研究が高く評価され、理学的研究は評価されにくいという問題が依然としてみられます。「社会にとって何の役に立つのか」という質問は、ある意味で当然なのですが、それを強調されると、たとえば分類学の研究は評価を受けないことになってしまいますね。しかし、分類ができるということは、それらの本質が理解できており、分ける指標が明確であるということを示しているのですから。分類学が評価を受けないというのもおかしな話です。このことについては、「ポイント 8：テーマを決めるときに確認しておきたいこと」で取り上げましたので、ここではこのくらいにしておきます。

さいごに

文学博士と医学博士の2つを併せ持つ稀有な存在である、澤瀉久敬（おもだかひさゆき）氏の「哲学と科学」で、「科学者がほんとうに偉大な科学者になるためには、その専門分野だけにとどまっていたはいけないので、「存在一般に関する知識」つまり「哲学」を自ら勉強すべきであると思うのです。自分は科学者であるからと考えて、その狭い専門領域に閉じこもり、存在一般とか人生全体とかに対する哲学的理解を深めようとしなければ、その人は一人の科学者となることはできても、ほんとうに立派な学者となることは難しいと思います」と述べています。生徒の課題研究の目的が学者の育成にあるわけではないので、この文章を真正面からとらえる必要はないでしょうが、それでも分野横断的な広領域の研究が大切であることは理解できるでしょう。そして、「科学のありよう」に関連して、研究倫理や科学倫理の重要性もまた大切だということです。哲学者の話が出てくると関係ないように感じてしまわれるかもしれませんが、自然科学と哲学はきわめて近い存在です。哲学はあらゆるものをよく観察し、知ろうとする学問です。様々な知を総合して、統一的にとらえようとするものですから、自然科学と近親関係にあります。「自然哲学」という言葉があるように、哲学者の考えは課題研究にも大いに参考になります。かつて、「文学部は役に立たないから廃止してしまえ」という暴力的な意見が公然と議論されたことがありましたが、役に立つかどうかとか、分野ごとに何かを判断するとかいう考え方は、自然を総合的に理解しようとする自然科学と立場を異にしていますし、そもそも狭い領域の中に押し込められた研究では、論理的思考力の育成はできません。

「理系だから社会科は必要ない」とか、逆に「文系だから理科は必要ない」などという偏狭な考え方に支配されずに、広い視野で、あるいは複数の

視点で事象を見ることによって、その見え方も変わってきます。本校では、理系も文系も1～3年次全員が、課題研究に取り組んでいます。その過程で、理系の生徒と文系の生徒が、休み時間や放課後に意見交換をしている姿をよく見ます。令和6年度の本校における課題研究に関するアンケートをみると、実に82%の生徒が「分野を越えた議論をするように工夫した」と回答しています。また、61%の生徒が、その議論が研究を進めるために有意義であったと答えています。



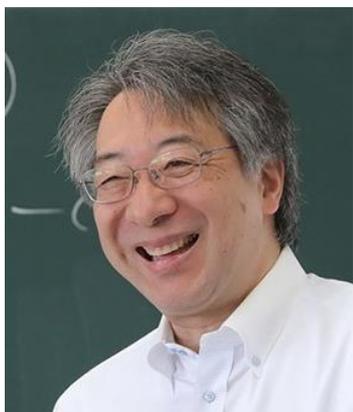
本校科学部の生徒

さらに、本校のSSHを推進する科学部にも多くの文系生徒が在籍していて、文理の枠をこえてグループ研究を行うことによって、新しい発想が生まれ出されています。文理を問わず、課題研究によって得られる、課題を自らが主体的に設定し、それを解決する方法を考えて実行し、得られた成果をまとめて発信するという、論理的思考力や議論する力、プレゼンテーション力などは、社会に出るとすぐに必要とされる力でしょう。AIが社会を変えようとしている中で、私たちは、そして生徒たちは、どのような力を持っていないといけないのかを考えた時、文理を問わない課題研究の深化がいかに大切であるかがわかつてきます。

参考文献

- J.A.Bargh et al. (1996) Automaticity of Social Behavior: Direct Effects of Trait Construct and Stereotype Activation on Action. *Journal of Personality and Social Psychology*, 71(2), 230-244.
- D.J.Bem (2011) Feeling the Future: Experimental Evidence for Anomalous Retroactive Influences on Cognition and Affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 100(3), 407-425.
- C.F.Camerer et al. (2018) Evaluating the Replicability of Social Science Experiments in Nature and Science between 2010 and 2015. *Nature Human Behaviour*, 2(9), 637-644.
- 澤潟久敬 (2024) 哲学と科学改版 (NHK ブックス)
- 川勝和哉 (2023) 聞くに聞けない課題研究の 32 の疑問への現場からの助言
- 川勝和哉 (2023) 高等学校における科学倫理教育のロールモデルーその目的と方法ー
- 中谷宇吉郎 (2025) 科学の方法 (岩波新書)
- Open Science Collaboration (2015) Estimating the Reproducibility of Psychological Science. *Science*, 349(6251). Aac4716.

責任著者略歴



兵庫県立姫路東高等学校教諭、SSH 推進部長。平成 17 年から課題研究に取り組み、多くの生徒研究を全国大会レベルに引き上げたほか、探究活動の普及に取り組んできた。2011 年と 2014 年に野依科学奨励賞、2012 年に物理教育功労賞（日本物理学会）、2013 年に文部科学大臣賞および優秀教職員表彰などを受賞した。また 2018 年と 2022 年に武田科学振興財団研究賞、2025 年に日本理化学会教育功労賞を受賞した。日本生命倫理学会会員、科学技術振興機構 JST 論理的法的社会的課題の研究課題（ELSI）研究協力者、VR 研究倫理学会および法務倫理研究会委員など、幅広い分野の学会で活動しており、日本地質学会や日本地球惑星科学連合代議員を務めるほか、教科書「理数探究基礎」、「地学基礎」、「地学」（啓林館）、「生徒の個性を生かすオーケストラ流クラス経営」（学事出版）、「バイオエシックス～その継承と発展」（川島書店）など、多くの著書がある。

課題研究をよりよくする 16 の視点
－ 課題研究の深化を目指して－

兵庫県立姫路東高等学校

〒670-0012 兵庫県姫路市本町 68 番地 70

電話 (079) 285-1166 (代) FAX (079)285-1167

URL <http://www.hyogo-c.ed.jp/~himehigashi-hs/>