

課題研究の進め方
と
科学論文の書き方

第3版

長崎県立長崎西高等学校

SSH 企画推進部

はじめに

昭和が平成へと変わるころ、高等学校の科学系部活動はけっこう盛んで、物理部、化学部、生物部、地学部などが多くの学校にあり、部誌の発行も行われていました。そのころの様子を先輩の方々にお聞きすれば、河川調査をして問題点を洗い出し環境汚染について保健所と共同で解決したこと、藍染めの殺菌効果を検証したこと、今のような音声分析ソフトがない中でプログラム言語を用いてソフトを自作し、昆虫の鳴き声を研究したことなど、枚挙に遑がありません。生徒数が減少する中で部活動の統廃合が行われ、令和になった今、科学系部活動は低迷しているかのように見えますが、科学をしたいという欲求は決して枯れてはいません。そして世の中では、これからも科学を活用して社会の改善を進めるために、科学技術人材の育成や、科学を理解し有効に利用できる人々の育成が望まれています。課題研究が教育課程の中に組み込まれてきたこと、学力の評価方法が改善されること、大学入試が変貌してきたことなどはその現れです。

未知なるものに挑戦し、それを明らかにできたときの喜びとともにその成果の重要性に気づいて世に発表することは、生き甲斐を感じると同時に、次に科学するエネルギーを生み出します。そのような経験をするには、成人する前の若者にとって、非常に重要な意味を持っています。まず、身の回りの不思議な現象、困っていること、もしあったらとても便利なことなどを見つけてみましょう。なぜその現象が起こるのかを確かめるため、また、困ったことを解決するアイデアを試すため、何らかの実験をすれば必ずその結果が現れてきます。その実験の方法をどうするか、結果の測定方法をどうするか、そこに工夫を加えることが面白さでもあります。専門の先生方に積極的に相談しましょう。アドバイスを理解して自分の研究を進めることをとおして、科学する手順が身につきます。得られた結果に考察を加え、次の実験立案・実施、結果の考察、これらを重ねた末に謎を解き明かすことができたとき、また、問題を解決する方法・技術を見出したとき、きっと科学する醍醐味を味わうことができるでしょう。長崎西高等学校で SSH 課題研究を実践し、現在はマサチューセッツ工科大学で活躍中の本多隆利 博士が次のように話してくださいました。「確かに今は高校生のころよりも用いる技術や方法論は高度なものになっています。一方で、課題解決の筋道をたてる際に、今あるものを駆使してどう挑むか、実験系に独自に工夫を重ねていく姿勢については、高校生のときに試行錯誤し、ワクワクしながら培ってきた経験がそのまま役に立っています。何より、研究活動の原動力が『面白い!』と思える好奇心であることは、高校生のころから変わりません」。その言葉から、高校生までの課題研究の経験が、とても大切なことがわかります。

課題研究の手法にしたがって研究を進めれば、科学的な研究を行うことができます。自分がおかれた状況の中で、入手できる道具を使って、自作できる実験器具を立案・開発して、科学することを体験できます。このガイドブックは、課題研究の手法を示しています。1章では、課題研究の進め方を説明し、身の回りの現象に科学のメスを入れる手順が書いてあります。そして、2章では、一通り研究が終わった後、それを報告する論文の書き方についてまとめました。

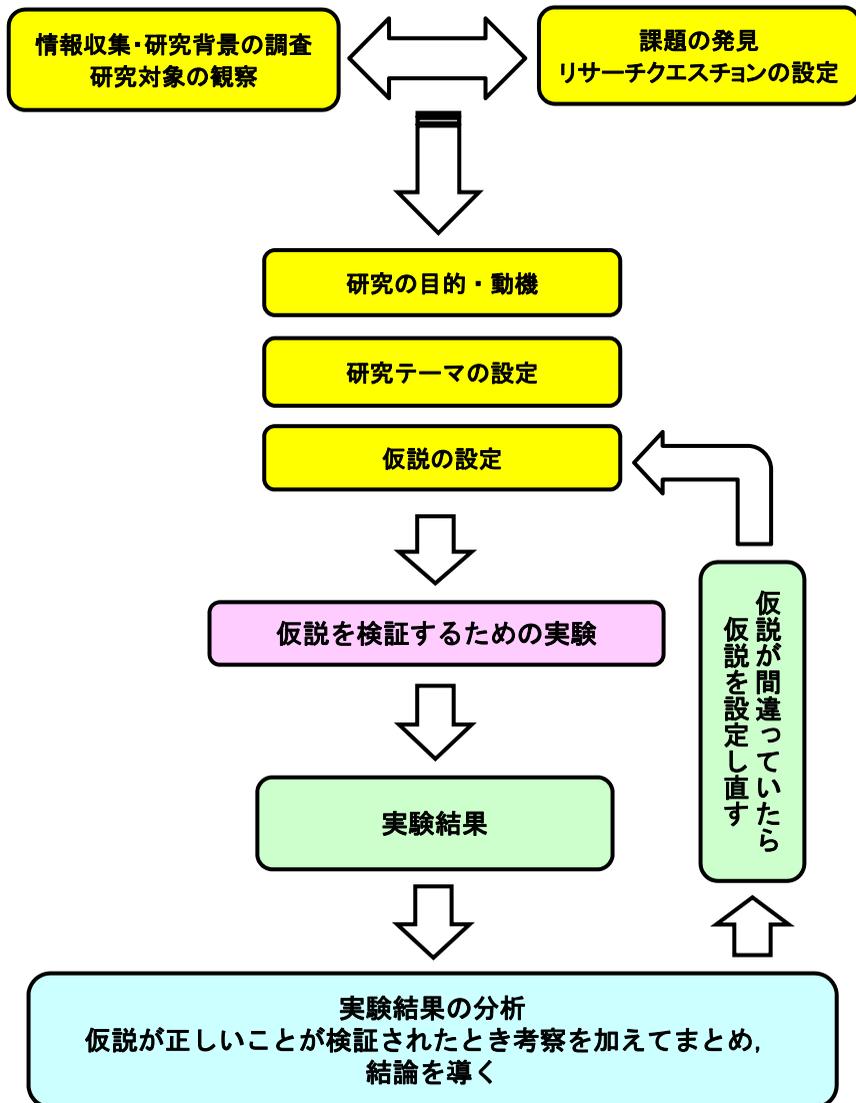
課題研究の手法習得に、このガイドブックが貢献できることを願っています。

2022年2月

長崎西高等学校 SSH 企画推進部

1章 課題研究の進め方

一般に科学的研究を進めるときは、次の図の  が示す手順で行われます。



課題研究の進め方について、前ページに示した手順の内容を、次の 1. ~ 10. に説明します。

それぞれの項目では、できる限り簡潔に内容を説明しました。課題研究を進めている途中で、その進み具合をチェックするとき、簡潔に書かれている方が照合しやすいと考えたからです。しかし、簡単な説明だけでは、その内容をイメージしにくい部分がありますので、その都度、例を挙げて説明しました。〈例〉として項目立てしたところでは、高校生が実際に実施した内容を示しました。

1章の〈例〉では、高校生科学技術チャレンジ (Japan Science & Engineering Challenge) 【JSEC2016】で、文部科学大臣賞と花王特別奨励賞のダブル受賞をした「オオアメンボ *Aquarius elongatus* の水面波への応答について」⁵の研究で、実際に野辺愛耶さん、近藤紀香さん、福澤咲知子さん、野田有紗さんたちが課題研究を進めた2年間の軌跡を、課題研究の進め方の段階に沿って紹介しています。

また、2章の〈例〉では、朝鍋遥さん、平野安樹子さん、桃坂瞳さんたちによって、【JSEC2017】に発表され、国内では60年ぶりの新種アメンボの発見につながった「大村湾における絶滅危惧アメンボの生息状況と新たに発見されたナガサキアメンボ (新称) について」¹の研究内容も取り上げさせていただきました。

1. 情報収集・研究背景の調査 実験対象の観察

課題研究がうまくいくかどうかは、そのテーマの設定にかかっています。研究テーマに出会うために、身近な現象で不思議に思うこと、こうなれば便利になると思うこと、問題点が解決できればその分野で発展できることなどに、常日頃からアンテナを張っておきましょう。また、そのアンテナの感度を高くするために、その分野での知識を増やすことです。専門的な知識が豊富になれば、何が問題なのかさえ気づくことができません。逆に、興味を持った内容があれば、関連する書物や論文を調べましょう。そうして知識を増やすなかで、その分野で何が解明され

ていて、どこから先がわかっていないかを知ることができます。このわかっていない領域こそが研究テーマになるのです。

- ① まず、私たちの生活の中や学問の分野で「ある操作をするといつも決まってこうなる。でも、それはなぜだろう…」、「ここがもっと変われば便利になるのに…」、「このことはみんなが困っているな…」などと思うことがらを見つけましょう。
- ② ①で見つけた興味のあることがらについて、大まかな分野で研究テーマとします。ここで、注意して欲しいことがあります。「こうしたらどうなるだろうか。やってみなければわからない」といった、研究の全てが試行錯誤である内容では、新発見につながることもありますが、何も結果が得られないこともある点です。「ある操作をするといつも決まってこうなる。でも、それはなぜだろう？」と思える内容で、ある操作（条件設定）をするといつも決まってこうなる（現象）ことの理由を探るために試行錯誤を含めた研究をする（仮説を立てて、それを検証する）ことは大丈夫です。また、「ここがもっと変われば便利になるのに…」と思える内容で、便利になることを予測して、もの作りなどで試行錯誤を含めた研究をすることも勧めます。
- ③ **研究テーマに関して、先行研究や事例を調べます。**これをバックグランドリサーチと言いますが、ここで調べたことが不十分だと、結果までたどり着いて大喜びした後で「何だ、誰かがもう研究して発見していたんだ」と、がっかりすることになります。研究テーマについてどこまでわかっているのかをはっきりさせた後で、その事実に基づいてこれからどのように研究を展開させていくのかを計画します。この段階で、過去に行われた研究に対して自分の研究の方針がしっかりとし、研究の価値が予測できるようになります。論文の「緒言」や「考察」で、引用文献・参考文献として記述する内容にも関係しますので、研究を進める途中や論文をまとめる段階でも、バックグランドリ

サーチを続けることが大切です。

学校の理科の授業でよく行われている結果のはっきりした確認実験と、課題研究は異なります。実験した後、「先生、この結果で良いのですか」と生徒のみなさんは聞くとと思いますが、確認実験ならそれで良いです。でも、課題研究では、担当の先生も（そして人類の誰もが）結果を知らない内容について研究テーマとして設定するのです。

- ④ **研究したい対象を良く観察します。** これまで、誰もそのような視点で観察したことはなかったはずですから、ここで独自の情報を得ることができます。また、研究テーマについて自分が研究したい領域を詳細に調査して、その情報をできる限り集め、研究テーマに関する知識を深めます。ここまでは、調べ学習、観察、調査などと呼ばれる段階です。

調べて収集したデータに新しい切り口で分析を加え、これまで誰も気づかなかったことを提案することもできます。観察や調査だけでも、これまでに明らかにされていなかった内容は報告の価値のある研究になります。

- ⑤ **調査、観察などによって得られた内容から、具体的なリサーチクエスチョンを設定します。** リサーチクエスチョンとは、研究の出発点になる、明らかにしたいと考える疑問のことです。不思議な現象について、「それはなぜだろう」という漠然とした疑問から始まります。リサーチクエスチョンを具体的にはっきりさせることで、研究の目的が見えてきます。

- ⑥ **リサーチクエスチョンに基づく仮説の検証方法について、計画する時点で注意することがあります。** それは、倫理・安全性・環境配慮に関するルールに従うことです。

危険性のある研究は、専門の施設で行う必要がありますし、専門知識のある指導者のもとで行うことが前提になります。人間を対象とする研究は、アンケート調査なども含めて、対象者

への十分な説明と同意が不可欠で、個人情報を守る義務があります。また、脊椎動物を死なせてしまったり傷つけたりする実験・研究は極力避けなければなりません。人間や脊椎動物を対象とする研究や、潜在的な危険性のある生物や装置を使う研究を行う場合のルールも決まっています。これらの倫理・安全性・環境配慮に関するルールについては、一般財団法人公正研究推進協会（APRIN）が無料公開している「中等教育向け教材 <https://www.aprin.or.jp/e-learning/rse>」を読み、理解しましょう。

研究が調査・観察によって進められる場合は、**調査計画・観察計画を立て、十分な準備をします**。野外調査の場合は、日程やコース選択などで無理のない計画を立てます。毒を持つ動植物、危険な地形、天候の急変などに対する対策として、身を守る道具や服装、救急用具を準備します。また、事故の際の連絡方法も確保します。調査地進入に関して、また、調査行為そのものに許可が必要な場合、事前に許可の手続きを済ませておきます。

- ⑦ **リサーチクエスチョンに基づく仮説の検証は、普通、実験によって進められます**。その場合、予備実験が可能であれば、リサーチクエスチョンに基づく試験的な実験を行い、研究方針の調整をしてリサーチクエスチョンを具体的なものとします。これは、設定する仮説の根拠となっていきます。
- ⑧ **実験対象や材料、生物種を選ぶとき、下の箇条書きした条件を満たすものが適しています**。テーマ設定のときに条件をチェックしてみましょう。生徒のみなさんが興味を持つ研究内容であることが第一ですが、指導する先生にとっても生徒と一緒に謎の究明に参加したいほど興味深い内容であることは意外に重要です。このような研究対象が見つければ、生徒のみなさんは勇んで課題研究に取り組み、先生も生徒が収集するデータを楽

しみに指導することができるでしょう。研究対象の候補として考えているものが、次に挙げる各項目を全て満たしている必要はありません。しかし、研究したい対象がこれらの条件のどれを満たしているかを検討することで、リサーチクエスチョンを明確にでき、研究計画を立てやすくなります。

- 研究対象について、詳しく知られていない内容がある。
- もし研究内容が明らかになると、世の中の役に立つ、学術的に意義がある、今は世の中での有効性は見えないが「なぜ」という疑問に答えることが興味深い。
- リサーチクエスチョンの起因となる現象が測定可能・観察可能、または、既知のデータがある。野外調査などでデータが得られる。
- 実験室内で検証実験が可能である。実験室内で飼育が可能で、野外調査の結果を実験によって検証できる可能性を秘めているような生物に関する現象である。
- 統計処理によって有意差などが検証できるデータ数が得られる。多くのデータを得るために、繰り返しの実験が可能である。生物学では、個体数が十分確保できる。学習に関する研究ではない場合は、繰り返しの実験によって個体に現れる学習の効果などが実験結果に影響しない。

<例>

アメンボが水面に落下した小さな動物からくる水面波に反応し、エサとして認識して捕食行動をとることは、よく知られていました。しかし、水面には風などさまざまな原因で起こる波が混在しています。これら雑音（雑波?）の中からどのようにしてエサが発する波を識別しているのか、明らかにされてはいませんでした。そんな情報を部活の先輩から聞いたメンバー

は、早速調べてみることにしました。科学雑誌、図鑑、学術論文だけでなく、インターネットやNHK for Schoolなどからも情報を収集し、次のようなことがわかりました。

- アメンボは水面波を使ってエサを探知している。
- 電動歯ブラシに針金を連結して水面波を発すると、アメンボが近寄ってくる。
- 雄は雌に対して水面波を発し、雌を呼び寄せている。

昆虫に詳しい先生のアドバイスをいただき、アメンボの中でもオオアメンボを研究対象に選びました。その理由は次のとおりです。

- 体が大きく調べやすい。
- 森林の木陰にある水たまりに生息していることから、飼育の前例はなかったが、実験室内でも飼育ができそう。
- 雄が雌に対してコーリング波という特殊な波を発して呼び寄せていることが知られている。

研究のおおまかな方向性としては、「オオアメンボが水面波のどのような要素を手がかりとしてエサを探知しているかを調べること」に決定しました。また、コーリング波も部員の興味をそそったことからです。

リサーチクエスションは「オオアメンボはどのようにしてエサから来る波、異性から来る波、どうでもいい波を区別しているのだろうか」です。

2. 研究の目的・動機

研究の背景を調べる中で見つかったリサーチクエスションを明らかにすることが、研究の目的や動機になります。

<例> 野辺ら (2016) ⁵

研究の目的「オオアメンボがエサから来る波、異性から来る波、その他から来る波を区別しているしくみを明らかにする」

3. 具体的な研究テーマの設定

研究の目的や動機にもとづいて、研究論文の題名の内容に関するような、具体的な研究テーマを設定します。1. ②で設定した大まかな研究テーマを、具体的に絞り込んだものになります。

研究論文の題名として注意することは、その題名を読んだ人がどのような研究がなされたかを推測できるような、また、研究内容を詳しく知りたいと思うような、具体的な内容が盛り込まれていることが大切です。

<例>

研究の題名は、研究が進んで結果が得られ、研究全体が見えたととき、ふさわしい題名をつけるのが普通です。研究のはじめでは「オオアメンボの水面波に対する反応について」などとしておきました。本文にもありますが、研究論文の題名として注意することは、その題名を読んだ人が、どのような研究がなされたかを推測できる具体的な内容を盛り込まなければなりません。「オオアメンボの研究」などとすると何が研究されていても通用する題名ですが、具体性に欠けます。「オオアメンボのエサの探知と求愛に用いる水面波の特性について」の方がよくわかると思いますし、専門家に興味をもって詳しく内容を読んでもらえる題名だと思います。

4. 仮説の設定

リサーチクエスションの答えとなるような、疑問点を解決する考え方や理論として「仮説」を立てます。仮説は、次の点に注意して設定します。

- ① **仮説の文章は、結論につながる可能性のある文章で、疑問形ではなく言明した文の形で書きます。**仮説が正しいかどうかを調べるのが検証実験ですから、仮説は、正しい場合もあり、間違っている場合もあることを含んでいます。したがって、実験結果を推測して仮説の文章を作ります。
- ② **実験や調査によって測定可能な内容にします。**測定によって結果を導くことができない仮説は検証できません。良い仮説は、何を条件設定して実験するのか、そして具体的にどのような結果を得ることができるのかが明確に記述されています。
- ③ 仮説に用いられる文体は、「〇〇のとき、△△である」が、一般的です。

「〇〇のとき」は処理実験の条件や操作方法を具体的に記述し、この内容で検証実験の「材料と方法」が立案・設計されます。「〇〇のとき」は処理実験の条件や操作方法ですから、その内容は実験者が自由に設定を変えることができます。したがって、これを「独立した変数 (Independent Variable)」と呼びます。1つの実験において、処理条件は1つだけ設定するのが普通です。いくつもの処理条件を一度に設定して実験すると、どの条件が結果に影響を及ぼしたのかわからなくなります。

「〇〇のとき」には、一つだけ処理条件として変えるものを設定します。

そして次の「△△である」で予測される結果を記述します。この表現のなかでは、測定可能なものをデータとして得られる内容になっていなければなりません。「△△である」の内容は、実験結果ですから、実験者が自由に変えることはできません。

その実験系の機能に完全に依存して結果が現れてきます。したがって、これは「従属した変数 (Dependent Variable)」と呼ばれています。この言葉は、実験による測定値を指しており、その結果を勝手に操作することはできないという意味を含んでいます。結果はそのまま受け入れて、仮説を検証できたかどうかの判断に使うのです。

<例>

小さな昆虫が翅を動かすとき、18~20Hz で動かしていることが文献を調べてわかっていました。そこで、オオアメンボは水面波の振動数を識別してエサを探しているのではないかと考え、次の様な仮説を立てました。

仮説1「オオアメンボは、18~20 Hz の振動でできる水面波に対して反応し、その波源に近づく」

この仮説で「〇〇のとき」に相当するのは、「18~20Hz の振動でできる水面波に対して」で、「△△である」に相当するのが「オオアメンボは、反応してその波源に近づく」です。そこで、18~20Hz の振動を作る方法を考えなければならぬことがわかります。また、アメンボが水面波に反応してその波源に近づくかどうかを観察することによって、測定可能であり、データを得ることができると考えました。

5. 検証実験

仮説が正しいことを確かめる実験を計画し実施します。対照実験と処理実験をうまく組み合わせて、それらを比較することで、仮説が正しいかどうかを判断できるように工夫します。

検証実験で大切なことは次のとおりです。

- ① 仮説に基づき、結果を予測しながら実験を計画します。
- ② **対照実験 (Control Group) を設定します。** これは、処理実験

(Treatment Group) の処理条件の影響を結果から比較できるように設定します。対照実験には2つのタイプがあります。

陰性対照群 (Negative Control Group) : 処理実験で何か (物質・操作・環境要因) を加えているのに対し、陰性対照群は、何も加えない実験群です。例えば、処理実験で溶液を加えてその影響を調べる場合は、対照実験ではその溶媒だけを加えるなど。

陽性対照群 (Positive Control Group) : 処理条件の有効性を確認するためや、実験系が正常に機能しているかどうかを確認するために、必ず処理の影響が結果に現れるような処理を行う実験群です。例えば、分子の大きさの違いで識別する電気泳動法では、分子量がわかっているものを同時に横のレーンに泳動させ、調べたい未知の資料と比較します。また、毒物かどうかを判断する実験をしているときは、陽性対照群として既知の毒物を使い、それを毒物だと診断されるかどうかを確認します。

- ③ **処理実験は、対照実験と条件を1つだけ変えて実験します。** 変えた条件が結果にどのように影響するか判断できるようにして、対照実験との結果の違いから、仮説が正しいかどうかを判断します。結果に影響を及ぼす条件が複数 (例えば、温度、酸素濃度、二酸化炭素濃度、光の強さ、暗期の長さなど) 考えられる場合は、1つの実験系ではそのうちの1つだけの条件を変えるように設定します。一度に複数の条件を変えて実験すると、そのうちのどれが結果に影響したか判断できなくなります。1つの実験系では、変えた条件以外は「制御された変数 (Control Variable) / 科学的定数 (Scientific constant)」（次の④で説明) として、対照実験と処理実験で同じ条件にします。2つ目の条件について調べるときは、新たに仮説を設定し、別の実験系を計画します。結果に影響するいくつかの条件について、それぞれ対照実験と処理実験が行われ、考察段階で様々なパターンで組み合わせることによって、複数の条件のそれぞれが結果にど

のように影響するのか、1つ1つベールをはがすように明らかになっていくのです。いくつかの処理条件を含んだ実験を同時並行で実施されることは良くあることですが、その場合でも、1項目の処理条件についてその影響が証明できるように、いくつかの対照実験が組み込まれていなければなりません。

- ④ 仮説「〇〇のとき、△△である」に記述されていない内容について、実際の実験では注意して設定しなければならないことがらがあります。それは、**処理実験と対象実験で互いに比較する条件以外の条件は全て同じに設定しなければならない**ということです。これは処理実験と対象実験のどちらにおいても一定に管理されるものなので「制御された変数 (Control Variable) / 科学的定数 (Scientific constant)」と呼ばれます。この値が変化すると結果に影響を及ぼす場合が普通で、実験の目的としてはあまり注目していないことがらですが、実験条件として慎重に設定することが要求されます。例えば、処理実験で温度を変えて実験するときは、その他の条件である酸素濃度や二酸化炭素濃度などは処理実験と対照実験とで同じ値に設定しなければいけません。
- ⑤ 「**実験ノート**」には、**実験条件や手順を詳しくメモし、測定値を記入して、実験記録の原簿として管理**します。実験結果としてレポートに示すときは、計算された値やグラフを使いますが、「実験ノート」の記録は計算する前の生データの部分が残っている点で重要な存在です。グラフを描く前の段階にもどり、計算方法や分析方法を変更することで、さらにわかりやすいグラフが得られることもあります。実験結果の解釈が間違っていると思った場合も、再検討するためには実験ノートの記録が必要です。

実験材料と実験方法について、条件などを詳細に「実験ノート」に記録しておきます。この内容は、論文の「材料と方法」

の項目で、第三者が同じ実験を実施できるように、簡潔かつ条件設定に漏れがないように記述することになります。「実験ノート」には、日付、時刻、実施した実験の内容、得られた測定値（結果）などはもちろんのこと、どのような状況でその実験を行ったか細かく記録し、推測的な考えでも気づいたことはメモに残すようにします。実験結果について考察するとき、なぜそのような結果が得られたか理解に苦しむときがあります。そのようなとき、詳細に書かれた実験ノートのメモに解決の糸口があるものです。

<実験ノート・観察ノート・調査ノート・フィールドノートなど研究ノートの具体的な書き方>

研究に関する活動の現場でメモする研究ノートの項目には次に挙げるものが一般的です。

- ◆ 水や有機溶媒で文字が消えないように、鉛筆書きがよい。
- ◆ 日付・時刻・実験の目的

日付・時刻と実施する実験・調査・観察の目的を明確に記します。これで、実施日の活動目的を確認でき、後に読み返したときに容易に実施内容を理解できます。

- ◆ 実験方法・調査方法・観察方法

実験の計画段階からのメモを残します。実験手順だけでなく、実験条件も細かくメモします。例えば、実験のための溶液の調合方法やその計算結果なども細かく記録しておくことです。溶液を調合するとき加える溶液の順番を違えるだけでも、溶液に溶けているイオンの状態にまで影響することがあるからです。後に実験方法を修正するときに十分な情報が記載されているように配慮して、実施した事実には忠実に細かい記録を残すことを心がけましょう。

- ◆ 結果の記録

実験方法・条件においてどのような結果が得られたか、

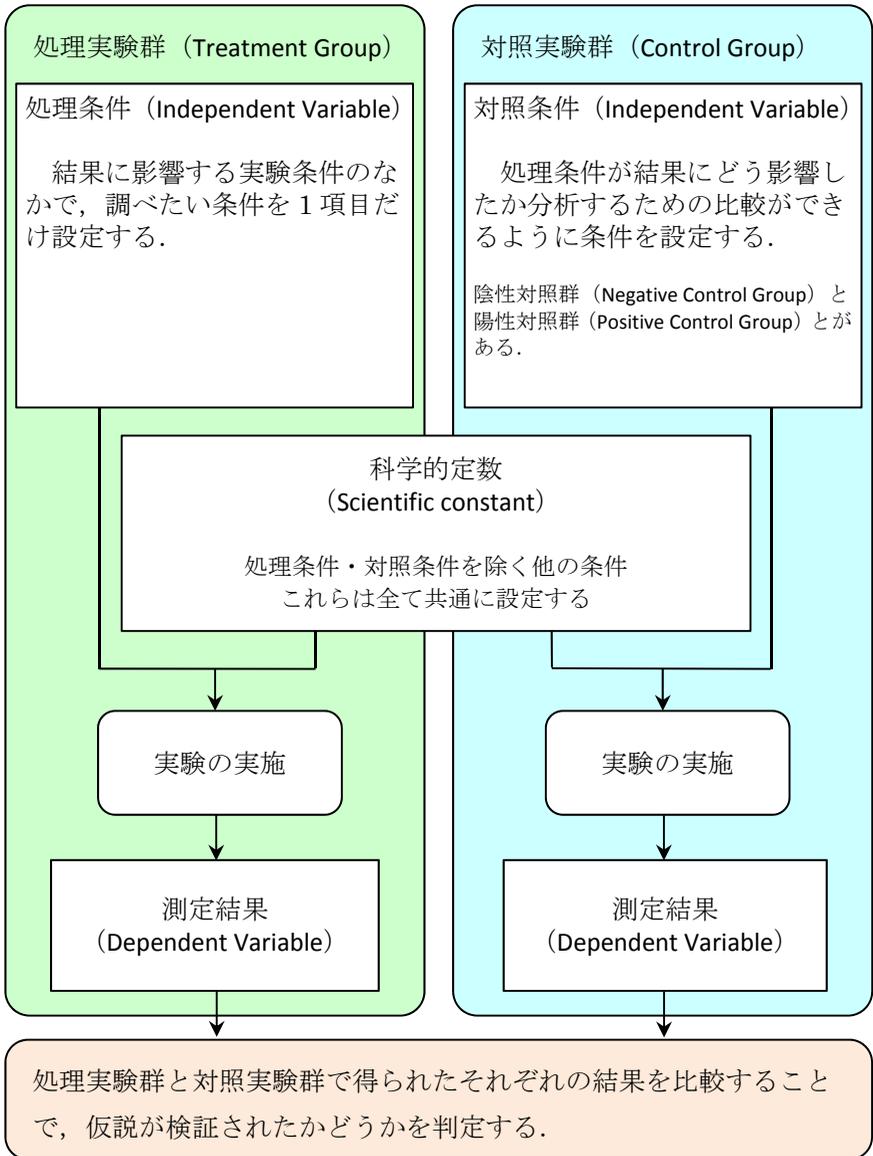
事実を記録します。うまくいっていないと思われる結果も、必ず忠実に記録します。

◆ 気づきメモ

考察は、論文を書くときにじっくりと行うにしても、この時点で結果についての考えをメモしておくことは大切です。気づきメモを書くことで、このまま同じ方法で実験を続ける確信を得ることや、実験操作の改善に早く気づくことにつながります。仮説どおりの結果が得られたとき、予想もしなかった結果に驚いたときなど、気づいたことを記録した内容は、研究方針の検討だけでなく、考察を行うときの参考として大いに役立ちます。

以上のことを踏まえて、実験の組み立て方について図に示すと、次の図のようになります。

実験の組み立て方



<例>

仮説1「オオアメンボは、18~20 Hz の振動でできる水面波に対して反応し、その波源に近づく」という仮説を検証するために行った【実験1】は、実験装置の開発から始めました。

オオアメンボのエサは、ふつう体長が10mm 足らずの小さな動物（昆虫）です。これらの昆虫は翅を18~20 Hz で動かして飛んでいるというレポートを見つけました。エサの昆虫は水面に落ちたとき翅を動かして水面波ができます。そこで直径が10mm の円盤を針金の先につけて、2.5~30 Hz で振動する波源装置を自作しました。扇風機のモーターの回転数をボルトスライダーで変化させるように接続し、モーター軸の回転をカムで針金の往復運動に変えるように改造した装置です。

次に、野辺ら（2016）⁵からの引用を示します。

.....

【実験1】

仮説1「オオアメンボは、18~20 Hz の振動でできる水面波に対して反応し、その波源に近づく」を検証するために次の実験を行った。

- ① 扇風機を改造した水面波発生装置（図1）を使い、オオアメンボに対して8つの方向（正面、右前、右、右後、真後、左後、左、左前）へ20cm 離れた水面に2.5~30Hz の波を起こし、オオアメンボの行動を観察した。
- ② 水面波の振動数は、ハイスピードカメラで撮影した波をコンピュータ画面上で分析して求めた。

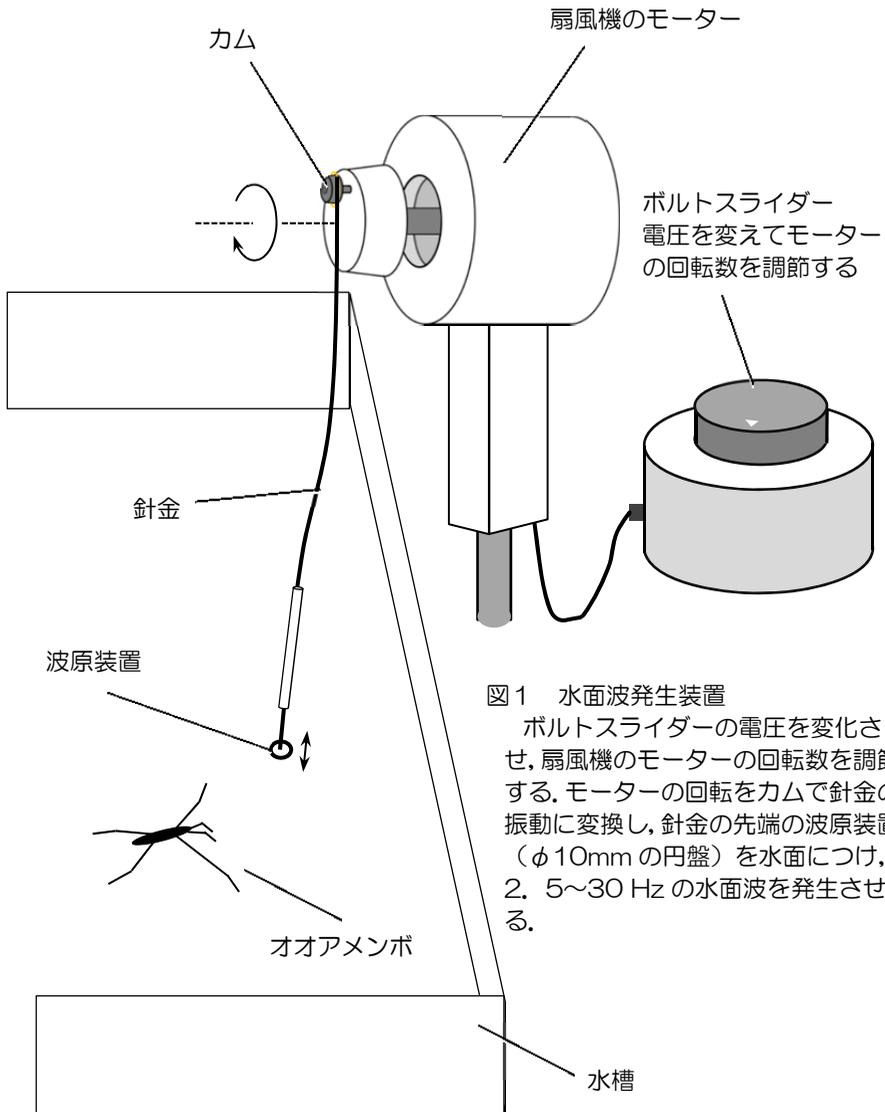


図1 水面波発生装置

ボルトスライダ―の電圧を変化させ、扇風機のモーターの回転数を調節する。モーターの回転をカムで針金の振動に変換し、針金の先端の波原装置（ $\phi 10\text{mm}$ の円盤）を水面につけ、2.5~30 Hzの水面波を発生させる。

水面波の振動数の測定方法

- ① 波源に発生した水面波を、ハイスピードカメラで撮影した。
 - ② ①をコンピュータ画面上で再生した。
 - ③ ②の再生映像について、1秒間に発生する振動の数をカウントして振動数とした。
-
-

6. 実験結果を示す

実験結果を記録した「実験ノート」から、表やグラフを作成し、結果をわかりやすく表現しましょう。このとき、仮説が正しいかどうか分かるような表し方を工夫することが大切です。

<例>

【結果1】として、実験ノートのデータから、次の様に表とグラフにまとめました。

次に、野辺ら（2016）⁵からの引用を示します。

.....

実験結果を、次の表1および図2に示す。

表1 オオアメンボの水面波に対する反応

水面波の振動数 (Hz)	2.5	4	7	20	27	30
オオアメンボの反応						
＋：波源に近づいた	＋	＋	＋	＋	＋	＋
－：波源に近づかなかった						

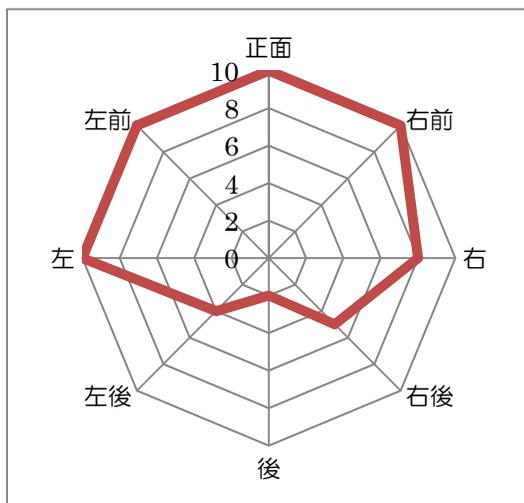


図2 オオアメンボの波源の方向に対する反応の強さ（相対値）

7. 結果を分析し、考察を行う

得られた結果についてどのように解釈するか述べ、理論的に分析していきます。グループで研究しているときは、そのメンバーで議論を重ねます。

<例>

この結果について、表やグラフから読み取れることを説明し、仮説が検証されたかどうかを判断しました。

次に、野辺ら（2016）⁵からの引用を示します。

【考察1】

「2015年8月の実験では、オオアメンボはどの振動数で

も震源の針金の先に集まった。さらに、水面波発生装置の波原装置を手で持って、1Hz 以下から 15Hz までの水面波を発生させても、オオアメンボはエサとして認識して近づいた。また、後方からの波より前方からの波に敏感に反応した。」

「実験結果より、仮説は検証できなかったが、オオアメンボは直径 10mm の円盤が作る 1.0~30 Hz の振動数のどの水面波にも反応して波源に近づくことが分かった。オオアメンボの水面波に対する反応は、正面方向からの波に敏感であった。」

.....

8. 仮説どおりに結果が得られなくても、あきらめずその原因を探る

検証実験の結果が仮説に反していることは、良くあることです。それでも簡単にあきらめないで、なぜ仮説と異なる結果が現れたのか、その理由をじっくりと考えながら、同じ実験を繰り返し、また、同時に実験方法を修正しながら実施し、仮説と異なる結果が導かれる原因を探ります。同じ実験を何度繰り返しても、仮説とは異なる結果が得られれば、仮説は間違っていたと判断します。しかし、それは、一般的に予想されることとは異なった結果が得られたのですから、それだけで新たな発見につながる場合もあるでしょう。仮説どおりの結果が得られないことが悪いことばかりではありません。

9. 最初の仮説が検証できなかつたら、新たな仮説を設定する

仮説が正しくないことが分かったら、その原因の分析に基づいて、新たな仮説を設定し直します。そして、新たな検証実験を計画します。

訂正した仮説が検証できるまで 4. ~ 9. を繰り返します。このようにして、これまでに全く知られていなかったことが、少しずつ明らかになっていくのです。この根気がいる取り組みこそが科学であり、結果を予測しながら実験を修正するときのワクワク感や、仮説が検証

できて本当のことがわかった時の感動は、何ものにも代えがたいものであり、研究の醍醐味でもあります。

<例>

仮説 1 は検証されませんでした。オオアメンボは水面波の振動数の違いによってエサを感知し、18~20 Hz の振動でできる水面波をエサから来る波と判断し、その波源に近づくと期待したのですが、何度実験しても、結果ははっきりとそのことを否定していました。

折れそうになった心に棒を添えて、次に考えたのが水面波の形についてでした。風などによって起こる波は、進む面が直線に近い平面波です。一方、水に落ちた昆虫などが発する波は、1点から同心円状に広がる球面波です。そこで、次の様な仮説を設定しました。

次に、野辺ら(2016)⁵からの引用を示します。

.....

仮説2「オオアメンボは、風などが起こす平面波には反応しないが、水面に落下した昆虫などが起こす球面波には反応してその波源に近づく」

この仮説を検証するために、次の様な実験を行いました。

【実験2】

- ① 平面波発生装置(図3)とオオアメンボの行動観察水層(180×90cm、水深4cm)を作成し、行動観察水槽の短辺(90cm)の端から平面波を発生させた。
- ② ①の平面波に対するオオアメンボの反応を観察し、【実験1】の球面波に対するオオアメンボの反応と比較した。

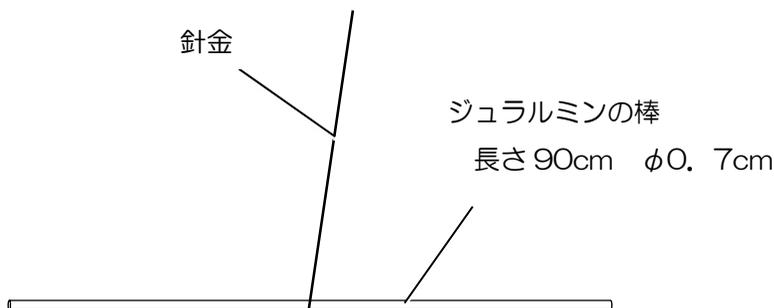


図3 平面波発生装置

ジュラルミン製の弓道の矢を利用した波原装置。
水面に波原装置を水平に浮かべ、針金で振動させて平面波を発生させる。

.....

【結果2】の本当のところ・・・

2015年9月の実験では、球面波に敏感に反応した【実験結果1】に対して、【実験2】での平面波に対してはまったく反応しませんでした。この時点では、その結果を受けて、仮説2は検証されたと結論付けました。そして、県の科学研究発表大会では、その結論を証明する説としてアメンボがエサを探知する際の「球面波識別説」を提唱したのでした。

ここで、この研究には決着がついたと誰もが思いました。オオアメンボは、1点の波源から発せられる球面波に反応し、エサを探知しているのだと・・・。研究メンバーたちは揚々として冬を迎え、シーズンオフとなりました。

次の2学年の夏が訪れたとき、オオアメンボの採集に出かけ、大漁旗を掲げて（実験するのに充分なだけの個体数を確保できた意味で、必要以上に採集することは慎みました）生物実験室に帰ってきました。そして、「球面波識別説」を確認すべく、

【実験2】の追試を行ったのでした。

ところが、この2016年7月の実験では、11回の実験のうち10回が、オオアメンボが平面波の波源にも近づく結果となったのです。実験をすればするほど、昨年の結果が再現できるものではないことを突きつけられる感じでした。

研究メンバーが1年生の2015年5月に研究を始めてから、飼育装置を考案・設計し、飼育に成功するまで2ヶ月かかりました。また、水面波発生装置を作る過程では、使わなくなった扇風機2台（1台は脚が壊れていましたが、もう一台はまだ使えるものでした）を再起不能にし、ミシンのモーター3台（これは完全に使わなくなったもの）も試してみてもガラクタになりました。結局、扇風機のモーターが最もよい働きをしてくれましたが、この装置の開発にも1ヶ月かかりました。平面波発生装置を考案・作成すると同時に、飼育装置よりも広い水面を確保し平面波に対する行動を観察できる行動観察水槽も製作しました。これらの努力が実るはずだった2年目の2016年7月の実験で、昨年の成果をすべて否定する結果が出てきて、4人のリケジョのみなさんは顔を見合わせながら途方に暮れてしまいました。正直、結果が期待どおりに得られなかったこと、長期間の取り組みの疲れもあって、半ばあきらめてしまっていたのが研究2年目の初夏でした。

生物実験室は2階にあります。その外廊下の手すりから真下には、中庭にSSH課題研究で生徒が手作りしたピオトープ池が見えています。2016年7月、採集してきたアメンボの中に、体が小さい個体が混じていたのでナミアメンボだと思い、この池に放していました。半月ほど経って見てみると、立派なオオアメンボに成長していました。池に放したときは幼虫だったらしいのです。そこで、「オオアメンボだったんだ」なんて言いながら彼女たちが眺めていると、当たり前の光景が始

まりました。ソーラーポンプで循環させている水で波が起こっている中にオオアメンボが悠然と静止しているのです。波で体が大きく上下に揺れているのに何も気にしていないようでした。エサの虫がおこしている波ではないので無視して当たり前のことです。実は、ここにヒントがありました。・・・体が上下するほど「大きな波には反応しない」のではないか・・・

水面波の振動数が関係せず、水面波の形に対してははっきりしない結果であれば、水面波の振幅が関係するのではないかとということ気づいたのでした。1年目、平面波に対する実験結果がきれいに出ていたので、そこに目を奪われていました。

長い間押されなかった（と感じた）始動スイッチが入り、一気にアクセル全開の部活動が再開しました。

設定した仮説はつぎのとおりです。

次に、野辺ら（2016）⁵からの引用を示します。

.....

仮説3「オオアメンボは、水面波の振幅の大きさを区別し、振幅の小さな水面波に対して敏感に反応する」

この仮説を検証するために、次の様な実験を行いました。

【実験3】

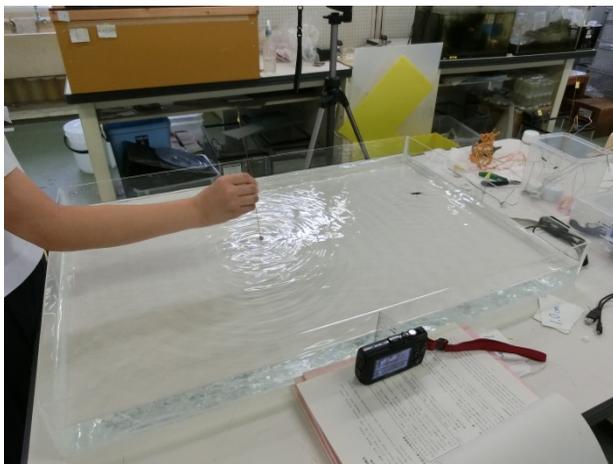
いろいろな振幅の水面波を発生させ、オオアメンボの行動と水面波の振幅を記録できる振幅測定水槽を作成し、波に対するオオアメンボの反応を観察しました。波源となるワイヤーの先に取り付ける透明円盤の直径を10mm、15mm、20mm、30mm、40mm、50mmのものを作成し、振幅の異なる水面波（振幅は0.2～4.5mm）を発生させることに成功しました。波源の円盤の直径が大きいほど、振動のエネルギーが水に伝わり、大きな振幅の水面波を発生させることができたのです。

水面波の振幅は、顕微鏡撮影モードを持ったデジタルカメラで振幅測定水槽の透明な壁から波の振幅を動画撮影し、コンピュータでその振幅を分析してデータを得ました。実験手順は次のとおりです。

- ① 透明な水槽壁に到達した水面波の振幅を記録できる振幅撮影装置を備えた振幅測定水槽（図4下）で、波源装置（図4上）を使って振幅の異なる水面波（振幅は0.2~4.5mm）を発生させた。
- ② オオアメンボに到達する水面波の振幅を測定するために、オオアメンボと振幅撮影装置からそれぞれ等距離（約20cm）離れた水面に水面波を発生させた。
- ③ オオアメンボの行動と水面波の振幅を、同時に動画として記録した。
- ④ 振幅撮影装置で記録した波の動画をコンピュータ解析し、その振幅を計測した。

データの分析方法

- ① 振幅測定水槽の透明な壁に到達した波の垂直方向の断面を壁の外からハイスピードカメラで撮影した。
 - ② ①をコンピュータ画面上で再生した。
 - ③ ②の再生映像は、最小目盛り1mmの目盛りとともに水面波の断面が映し出されるので、波の振動の最高点と最低点の高さの差を読み取り振幅を算出した。
-



振幅測定水槽での実験の様子

実はこの透明アクリル水槽，製作途中で掃除中に 1 年生がうっかりテーブルから落として割れてしまいました。それを見た実験中の 2 年生は呆然としていました。材料をもう一度取り寄せて作り直すには，そのとき，予算も発表までの時間もなかったのです。

顧問は半ば諦めたのですが，手先の器用さに自信がある 2 年生の K さんが，割れた破片を集めてアクリルボンドで修復することに挑戦しました。修復された水槽は，痛々しくなったものの，水漏れもなく見事に機能しました。これがなかったら，次の発見はありませんでした。

驚くべき実験結果について，次に，野辺ら（2016）⁵からの引用を示します。

.....

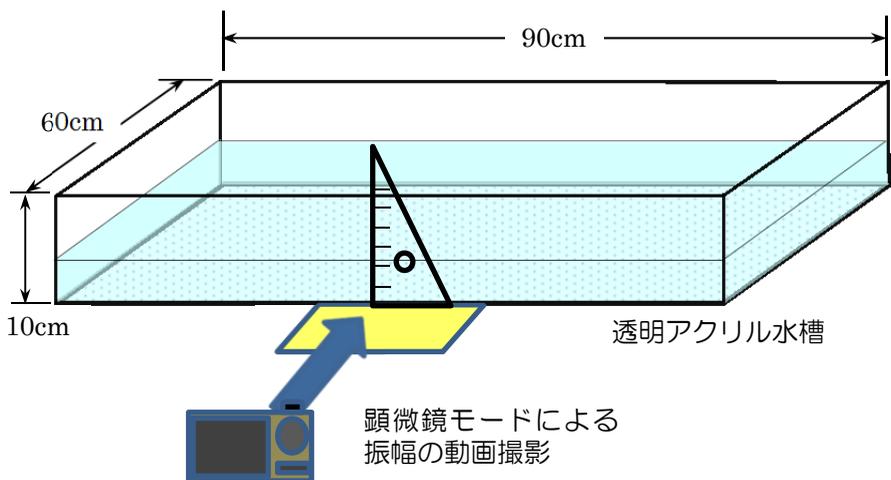
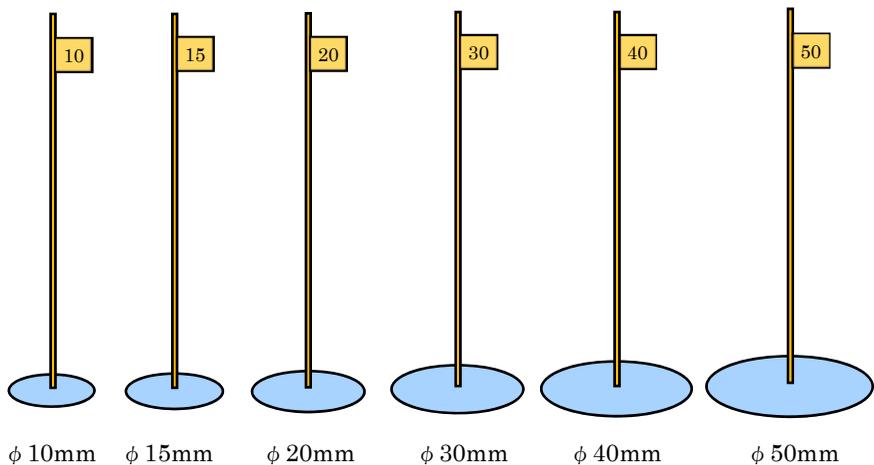


図4 さまざまな振幅の水面波の波源装置（上）と，振幅測定水槽（下）
 波原装置の円盤の直径を変えることで異なる振幅の水面波を作る
 透明アクリル水槽の壁面で水面波の振幅を顕微鏡モードで撮影し，振幅
 を分析する。

【結果 3】

【実験 3】の結果を次の図 5 に示す。

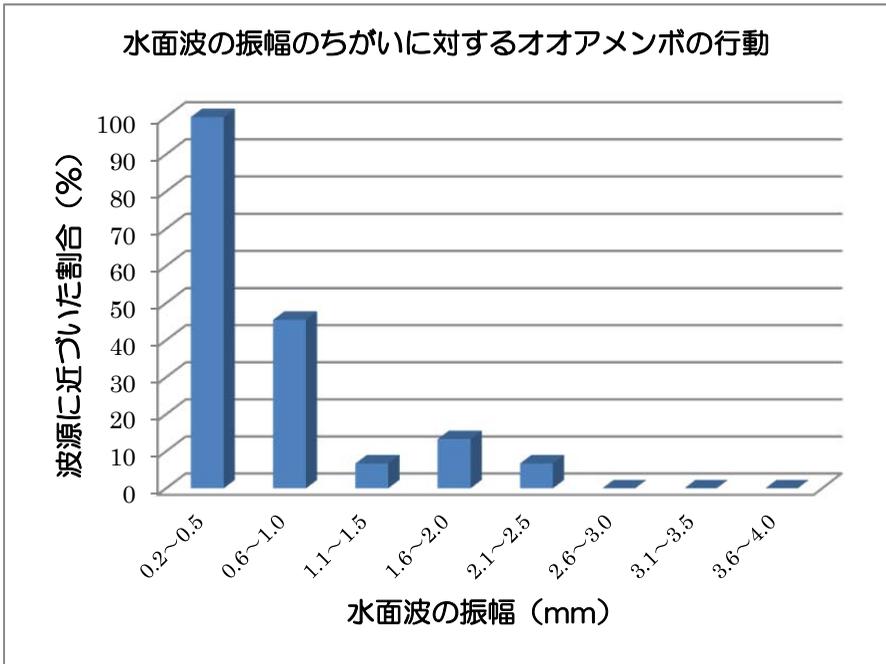


図 5 水面波の振幅に伴うオオアメンボの応答

【考察 3】

オオアメンボは、振幅の小さな水面波には獲物を捕らえるときのように波源に近づいたが、振幅が 2.5mm を越える水面波には、まったく近寄らない結果となった。捕食可能な小さな獲物に反応していると考えられる。

.....

10. 仮説が検証できたら、結論としてまとめる

仮説が正しいことが検証できたら、考察を加え、はっきりと結論づ

けられる内容があるときは、それをまとめて示します。

仮説が検証できて、そのことに関しては結論を出すことができた場合でも、実験結果を分析していった過程で新たな疑問がでてくるのが普通です。それを受けてさらに新しい仮説を設定し、研究を発展させていきます。このようにして、研究の開始段階では予測もしなかった深まりができていくこともあります。

<例>

全体の【考察】を行い、【結論】を次のようにまとめました。
次に、野辺ら（2016）⁵より引用した考察を示します。

.....

【考察】

【結果1】より、仮説1は検証できなかったが、オオアメンボは直径10mmの円盤が作る1.0~30Hzの振動数のどの水面波にも反応して波源に近づくことが分かった。【実験1】では水面波の振幅は測定できていないが、【実験1】のとき水面波発生装置の先端の円盤は直径が10mmであったので、【実験3】の結果から、振幅が1.0mm以下であったことが推測される。これらのことから、オオアメンボは、振動数の違いではなく、小さい振幅の水面波を識別して、波源に近づいたと考えられる。また、オオアメンボの水面波に対する反応は、正面方向からの波に敏感であった。

仮説2は、2016年の【結果2】から否定された。水面波が平面であるか球面であるかは、オオアメンボの水面波識別条件には重要ではないことが分かった。では、なぜ、平面波の実験で、2015年と2016年で逆の実験結果になったのだろうか。それは、【結果3】が示すように、振幅が異なったからであろうと推測される。2015年では、平面波発生装置を使って平面波を作った実験者と2016年にこの装置での平面波を

発生させた実験者は別人である。そして、900mm の棒が波源であれば簡単に水面にエネルギーが伝わり、大きな振幅の波ができてしまったと考えられる。平面波でもオオアメンボが波源に近づく場合、その振幅は 2.5mm を超えないことを、追試で確認した。以上のことから、オオアメンボは水面波の振動数や形ではなく、2.5mm を超えない小さな振幅の水面波を識別して、捕獲行動をとると考えられる。振幅の小さな波であれば、確かに小さな昆虫から発せられた波である場合が多く、それは格好のエサである可能性大である。振幅 2.5mm を超える大きな水面波は、自分が捕食されるかもしれない大きな動物が波源であることが多く、また、風による波かもしれない。大きな振幅の波に対しては、ビオトープにいたオオアメンボが示してくれたように、無視するという判断が妥当であろう。

【結論】

「オオアメンボは、振幅が 2.5mm より小さい波に反応し、捕食行動をとる。」

.....

この【考察】【結論】に至るまで、大変な遠回りをしたような気がします。後でわかったことですが、【実験2】で水面波の「形」と「振幅」の 2 つの条件を、知らないうちに同時に変わってしまっていたことが、迷路に迷い込んだ原因でした。

実験を行うときは、2 項目以上の処理条件を同時に変化させないようにしなければならないことを痛感しました。

この後、オスがメスを呼ぶときの求愛波が、オスの中脚と後脚の 4 着水点から同時に発せられる約 13Hz の干渉波であることをつきとめました。ここでは割愛します。

以上が課題研究の進め方のアウトラインです。

これらの課題研究の過程を科学論文としてまとめるときには、決まった構成があります。

次の2章では、論文の書き方の概要を説明しましょう。



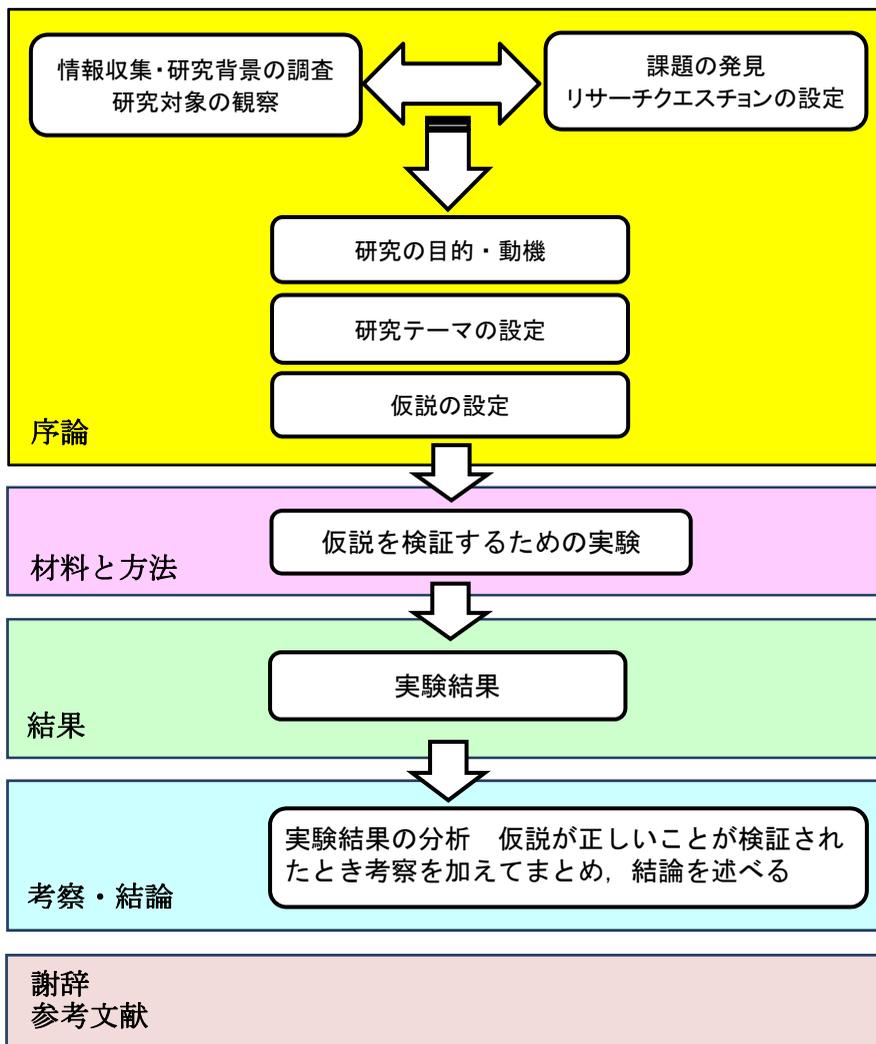
写真は、第三期 SSH 指定事業『Mission II 科学探究』で、生徒 4 人によって手作りされたビオトープ池です。完全に校舎で取り囲まれた中庭を 2 階の生物実験室前から見下ろすと、見事に水辺を再現できた池を臨めます。水はソーラーポンプで循環させることも可能です。現在、この池の周りは適度な攪乱を繰り返して維持された雑草が繁茂し、多様な生き物の生息場所になっています。トビムシ、カメムシ、コオロギ、バッタ、クモ、チョウなどが豊富で、農業に有望視される天敵資材の生息も確認されるなど、研究フィールドとして機能しています。

図らずも、この池で幼虫から羽化したオオアメンボは、研究メンバーに大切なことを教えてくれました。

2章 科学論文の書き方

1章では、科学的研究を進めるとき、図の  が示す手順で行われることを述べました。

2章で説明する科学論文では、これらを囲む  の左下にある項目に、その内容を記述します。



1. 研究要綱 (Abstract)

研究要綱は、研究全体の内容を簡潔にまとめたものです。論文審査や公式な学会発表では、論文や発表の前に研究要綱の提出が求められるのが普通です。字数や書式については発表する学会の指示に従って記述しなければなりません。限られた短い字数の中に内容を説明する必要があります。その構成は一般的に下に示したとおりです。しかし、発表する学会によっては構成についても指定してあることもありますので、その構成に従ってください。下に示した例の(4)～(8)については、パラグラフライティングをすることをおすすめします。パラグラフライティングについては、後に説明します。

Abstract は、書式や字数が決められているのが普通です。字数が大きく制限されている場合や外国の学会では、目的(何のために)、対象(何を)、方法(どうしたら)、成果(どうなった)を簡潔に記述し、下の(4)の研究背景などはほとんど必要ないようです。また、そのような学会では **Abstract** に段落はつけません。

一般の研究要綱の構成

(1) 研究タイトル

タイトルをただでどどのような研究がなされ、どんな分野で成果が上がったのか、推測できるようなタイトルをつけましょう。

(2) 研究者名

グループ研究では、研究者名を連名で書く場合がありますが、その最初に書かれた人が第一著者です。

(3) 研究者の所属名

(4) 研究背景

読む人が研究テーマの価値を理解できるよう、予備的な知識として必要な情報を紹介します。

(5) 研究目的・意義

関連する先行研究や事例の概要を紹介し、この研究で何を明らかにするのかを示します。仮説やその仮説を設定した根拠を説明

するのもここで行います。

(6) 研究手法

実験を再現できるようにスペースが許す限り具体的に記述します。

(7) 結果

実験結果を示します。

(8) 考察

実験結果を説明し、それに対する考察を加えます。

(9) 結論および今後の展望

結果・考察から導き出せる結論を示します。そして、この研究成果を踏まえて次にどのようなことが考えられるか、その将来計画や可能性を述べます。

(10) 参考・引用文献

研究の背景で参考となった文献、考察を加える際に参照した文献を示します。

2. 科学論文の文章の書き方

パラグラフライティングについて

論文の各段落の最初に、その段落をまとめた1つの文を書きます。これを主題文といいます。主題文は、その段落に何が記述されているか分かるようにまとめられた代表的な1文です。そして、1つの段落の中で主題文に続くいくつかの文を支持文といいます。支持文の中に主題文に関係のないものを書くと理解しにくい文章になるので、注意が必要です。支持文のはたらきとしては、分類列举、比較、意見と理由、指示・手順、因果関係、時間的順序、空間的配列などがあるようですが、科学論文では、主題文をわかりやすく例を挙げて説明することが多いです。このような文章を書けば、読者にとっては主題文を読むだけで内容を把握でき、それに続く支持文が何を主題のもとに並べられているかがわかるので、理解しやすく読

みやすい論文にすることができます。最後まで読まないといけない推理小説などとは違った書き方ですが、このような文章構成を行うことを、パラグラフライティングといいます。特に英語の論文では大切になる書き方です。パラグラフライティングをしていれば、読者が読みやすいばかりでなく、各主題文を集めれば論文全体の要約に相当する「要旨 (Summary)」を簡単に作ることができます。

〈例〉考察の文章について、次に2つのパターンを示します。少し長いですが、まずは読んでみてください。

【考察】パターン1

ナガサキアメンボとナミアメンボは非常によく似ているが、雄では触角を比較して、第4節が第2節より長いとナガサキアメンボの雄、触角の第2節と第4節が同等の長さであればナミアメンボ雄として区別できる。ナミアメンボの亜種であるアマミアメンボは、第2節が第4節より長いことからナミアメンボと区別されている。ナガサキアメンボがアマミアメンボとは逆で、第4節が第2節より長いことは、非常に興味深い点であり、区別するとき重要な形質となる。アマミアメンボは、汽水（河口付近で海水と淡水が混ざった水）で採集されたという記録もある。雌では、中脚と後脚の長さがナミアメンボに比べてナガサキアメンボはすべて相対的に短いことで区別できる。解剖では、雌雄の交尾器の形状も異なることが分かった。



図6 調査地点

飼育方法の確立と産卵・孵化に成功し、実験室で生理的な特

性を調べた。ナガサキアメンボは、塩類濃度 10~15ppt の汽水域が孵化や幼虫の生育に適していることが判明した。また、ナガサキアメンボの卵殻表面に卵殻の厚さと同じくらいの（ナミアメンボの突起の 3 倍の大きさがある）大きな顆粒状突起が多数存在することを発見した。大村湾での生息地は、離れ小島ではなく、陸地側の沿岸で川の流れ込みがあり、ナガサキアメンボに適した低濃度の汽水が得られるところであった。そこは、図6の写真のように自然が残っており、同時に他の海産アメンボの生息地と重なり、多様な海産アメンボが見られる貴重なエリアであることがわかった。

【考察】パターン2 朝鍋ら（2017）¹より引用

今回の調査・実験により、ナガサキアメンボについて、酷似するナミアメンボとの確たる相違点を明らかにすることができた。また、汽水域が多い大村湾の特殊な環境にあわせて進化したであろうナガサキアメンボの生息地は、貴重な海産アメンボ類の生息場所でもあることがわかった。

この研究では、まず、ナガサキアメンボとナミアメンボを区別する形態上の特徴を発見した。雄は触角を比較して、第4節が第2節より長いとナガサキアメンボ、触角の第2節と第4節が同等の長さであればナミアメンボとして区別できる。また、ナミアメンボの亜種であるアマミアメンボは、第2節が第4節より長いことからナミアメンボと区別されているが、ナガサキアメンボがアマミアメンボとは逆であることは、非常に興味深い点であり、区別するとき重要な形質となる。雌では、中脚と後脚の腿節および脛節の長さがナミアメンボに比べてナガサキアメンボはすべて相対的に短いことで区別できる。解剖によって、雌雄の交尾器の形状も異なることが分かった。また、ナガサキアメンボの卵殻表面には卵殻の厚さと同じくらいの

大きな顆粒状突起（ナミアメンボの突起の 3 倍の大きさがある）が多数存在することを発見した。

ナガサキアメンボは、汽水域の環境に適応していることが明らかとなり、生理学的にも淡水に生息するナミアメンボとは別種であることが判明した。飼育方法の確立によって産卵・孵化に成功したことから、実験室で生理的特性を調べることが可能となった。耐塩性の実験から、ナガサキアメンボは、塩類濃度 10ppt~15ppt の汽水域が孵化や幼虫の生育に適していることが判明した。ナガサキアメンボの大村湾での生息地調査の結果、陸地側の沿岸で川の流れ込みがある汽水域に生息していることがわかり、耐塩性の実験結果と一致した。

大村湾および外海における海産アメンボの分布調査結果は、大村湾沿岸が海産アメンボ類の宝庫であることを示した。その中でも、ナガサキアメンボの生息地は図6の写真のような自然が残っている汽水域で、そこは同時に他の海産アメンボの生息地と重なり、多様な海産アメンボが見られる貴重なエリアでもあることがわかった。

パターン1とパターン2とでは、パターン2の方が長いのですが、わかりやすいと思います。パターン1の段落の中には、それぞれ関係ない文が含まれていることが大きな原因です。思いついたことを列挙したままの状態です。パターン2では、それぞれの文を分類して関係のあるものを集めて一つの段落にし、その先頭に主題文を書き加えています。1つの段落にまとめることのできない内容は、パターン2のように別に段落をおこして記述するとわかりやすくなります。また、パターン2では、それ以後の3つの段落を大きくまとめた文章が1段落目に記述されて、4つの段落で構成されています。このような段落構成だと、読者も何を意識して読めば良いかが前もってわかり、

理解しやすいと思います。

実は、パターン2がパラグラフライティングです。（このように最後に種明かしをするのはパラグラフライティングではありません）

では次に、論文の構成に従って、その書き方を紹介しましょう。

3. 科学論文の構成とその書き方

科学論文の項目の構成とその書き方は、次の（1）～（10）の内容が一般的です。実際は論文雑誌が定める書式に従います。

（1） 表紙（Cover page）

論文のタイトルを書きます。タイトルをみただけでどのような研究がなされ、どんな分野で成果が上がったのか、推測できるようなものが良いでしょう。「カブトムシの生活について」より、「カブトムシの一日の活動に影響を与える土壌温度と日照時間について」となっていれば、どのような分野の研究でどんな成果が出ているのか論文内容を読みたくなるタイトルでしょう。

タイトルに続いて、研究者の名前と所属を記します。グループ研究の場合、最初に記載された人が第一著者（first author）となります。第一著者は、普通は論文に関する連絡先となる著者（corresponding author）です。順番は研究に対する寄与に応じて記載します。

（2） 要旨（Abstract または、Summary）

要旨は述べようとする内容の主要な点を短くまとめたものです。研究要綱または、以下の（3）～（7）で記述した各段落の主題文をつなげ、全体としてまとまりのある文章に訂正して作ります。

（3） 緒言・はじめに・序言 または 序論（Introduction）

普通は、「緒言」「はじめに」などと項目だてすることが多く、

研究の背景や目的, 意義についてまとめたものです. 緒言の中で, ①研究背景 ②研究目的 ③研究意義 のように項目に分けて書く例もよくあります. また, 「序論」と呼ぶ場合は, 博士論文など大がかりな研究を行って発表する際によく使われます. 1章 課題研究の進め方の, 「1. 情報収集・研究背景の調査, 実験対象の観察」, 「2. 研究の目的・動機」, 「3. 具体的な研究テーマの設定」, 「4. 仮説の設定」までの内容を簡潔に記述します. これによって, 研究テーマに関して現在直面している問題点・不明な点を説明し, その研究に取り組む意義を浮き彫りにします. そして, 仮説を設定した根拠とともに仮説を提示して, その仮説をどのような研究手法で検証するのかその方針を説明します. ここで意識しておく重要なことは, 学術的にどの分野で仮説の検証を進めていくかということです. この内容によって, 発表する学会のカテゴリーも異なってきます.

Introduction や後に説明する Discussion では, 過去に発表された研究を引用や参考にして, 研究背景, 研究の意義, 研究成果の重要性を説明することがよくあります. 過去に発表された研究に対して自分の研究がどのように位置づけられるかを簡潔に説明するのですが, 文献引用の記述方法にはある程度決まりがあります. 次にその例を説明しましょう. 情報収集によって引用したい文献があった場合は, 下の①または②の形式で引用します. 論文の内容を, 他の文献をもとに書く場合は, 自分の研究の成果とはっきりと区別し, 引用であることを明記しなければなりません.

① 直接引用

もとの文章をそのまま引用する方法です. そのとき, 著者の名字に続き発行年を () 内に記します. 本文中で引用した文章がどの部分であることを明記し, 引用する文章は, 句読点, 記号を含めて引用元の文から一字一句変えてはいけません. 引用する文章は, 本文の説明に関係する必要最

小限にします。

② 間接引用

引用元の文章をそのまま使わず、要約して引用します。このときも著者名に続き発行年を（ ）内に記します。引用元の文章の内容を変えてはいけなないので、引用した内容の部分には自分の意見などは書き加えず、それを受けて、自分がどう考えているかがわかるように別途記述します。また、簡潔に必要な部分だけを要約して引用します。当然ですが引用元の論文に書かれていないことを付け足してはいけません。

(4) 基礎 (Fundamentals)

論文の内容を理解する上で必要な専門知識や理論・法則、また、その研究に独特な技法について説明します。専門分野以外の読者に理解してもらうために、「基礎」が必要な場合があります。自然科学分野の論文にときどき見られますが、「基礎」がない場合もよくあります。

(5) 材料と方法 (Materials & methods)

仮説を検証するために行った実験の材料や実験道具、測定器具を示し、実験手順を詳細に記述します。その目的は、論文を読んで第三者が実験を再現できるようにするためです。そのため、実験条件なども細かく記載します。このことによって、同時に、実施した実験が仮説を検証するための方法として適していることを証明することにもなっています。したがって、ここでは、その実験方法を選んだ理由を説明します。また、これまでにない実験方法や自作の実験器具を使用した場合などでは、実験器具・測定器具の性能なども記述します。次の5つの項目について書くと良いでしょう。

- ① 調査・実験で何を調べ、どのような結果を得たいか、その目的を具体的に説明する。

- ② 得たい結果のために調査・実験する方法を述べ、なぜその方法が適しているのか、その方法ではどれくらいの精度で結果が得られるのか数値で示します。何かを測定する場合、測定器の仕組みとデータが得られる原理を説明します。また、測定器具として市販されているものを使用する場合は測定器具の名称とメーカー名・型式を明記します。
- ③ 使用した研究材料・研究対象・試料の種類と基礎的な性質について述べます。独自に作成した試料について測定した場合は、その試料の作成方法も示します。
- ④ 調査や実験の手順を、段階を追って詳細に記述します。このとき、実験条件などを必ず示しますが、できるだけ数値として明記します。
- ⑤ 実験で得られたデータをどのように処理して分析したか、その分析方法を説明します。また、結果としてまとめられたグラフなどが、どのようにして得られたのかがわかるように、その方法を説明します。
- ⑥ 材料や実験装置、実験方法の説明をわかりやすくするために、図や写真を掲載し、図1、図2、・・・などと番号をつけて指し示し、説明を加えると効果的です。

(6) 結果 (Results)

得られた調査・実験結果を、表やグラフで示します。「結果および考察」として結果と考察を同時に記述する場合があります。「結果」として独立させた場合は、得られたデータのみを示し、それに対する説明や執筆者の解釈は、次の「考察」で述べます。

結果を書くときのポイントは、表、グラフ、図を活用し、わかりやすくデータをまとめることです。

<表を使うとき>

表をもとにグラフを描くのが普通の手順です。そのとき、グラフのもとになった表も同時に示すことがあります。それは、

グラフで視覚的に表現することと同時に数値を示して考察したいときでしょう。また、表だけを示すこともあります。それは、数値のばらつき全体を示したいなど表を使うことでしか表現できなかったとき、または、数値で示した方が、グラフの縦軸の影響を受けずに正しく判断できると考えられたときなどです。

グラフがデータの全体の傾向や変化を強調したいときに有効なのに対し、表は、個々の実験データそのものやその平均値など統計処理された数値まで、考察に使う数値全体を全て示すことができる点が優れています。

<表で示すときの注意>

- ◆ 表の見出しをつける。
普通は、表の上に見出しをつけます。
- ◆ 単位など、表の数値が何を示すか明記して項目名（列と行の見出し）を示す。

<グラフの持つ特徴…グラフを効果的に使うために>

グラフは、統計処理されたデータの傾向や変化を視覚的に強調することに有効です。

- ◆ グラフの見出しをつける。
グラフを含めて図では、図の下に見出しをつけます。
- ◆ 図やグラフが何を示すのかを説明するため、見出しの下に簡潔な注釈を加える。
- ◆ グラフでは、縦軸と横軸の示す意味とその単位を記す。
- ◆ 複数のグラフが同じグラフ面にあるときは、その違いの説明を加える。
- ◆ 図やグラフも、引用したものであれば出典を明記する。

グラフには多くの種類があります。表現したいテーマにしたがって、効果的なグラフを選ぶことも重要になってきます。

- ◆ 棒グラフ
各項目の値を互いに比較するのに使います。

- ◆ 横棒グラフ
複数の値を互いに比較するのに最適です。
- ◆ 折れ線グラフ
普通は、時間の経過に伴う項目の値の変化を表すのに有効です。
- ◆ 面グラフ
複数のデータの時間経過に伴う変化を示し、データ間の差を強調します。
- ◆ 円グラフ
それぞれの項目の値がその合計に占める割合を比較するときに使います。各項目の値を合計でき、全て正の値で、データ系列が1つだけの場合に作成できます。
- ◆ ドーナツグラフ
それぞれの項目の値がその合計に占める割合を比較するときに使います。円グラフに似ていますが、複数の系列を表示できます。
- ◆ 散布図
2つの値の組を比較します。縦軸の値が横軸の順に並んでいない場合や、値が別々の測定結果を表す場合に使います。
- ◆ バブル図
散布図に似ていますが、同時に3つの値の組を比較します。
- ◆ 3-D等高線
連続した曲線で3次元にわたる値の傾向を表します。
3-D等高線を上から見た図を作ると、普通の等高線の図になります。
- ◆ レーダー
各項目の値を中心点からの距離によって比較します。項目を直接比較できない場合や、各項目のバランスを比較したいときに有効です。

(7) 考察 (Discussion)

(6) で示した結果をもとにした考察を述べます。結果と考察は組み合わせで示した方がわかりやすい場合もあり、その場合は「結果と考察」としてまとめて記述することもできます。それぞれの専門学会の書式に従いましょう。考察では、結果のグラフや表をどのように読み取るかを述べ、それから判断できること、可能性として考えられることなどを記述します。得られた結果について出てきた疑問に答える形で、考えられることを述べます。このとき、仮説が検証されるにいたる考え方を論理的に説明し、結論へ導きます。

考察のポイント

- ① 必要ならば結果全体のまとめを示す。
- ② データから読み取れることを文章で述べる。
- ③ 結果が示している事実を説明する。結果が示す内容が理解しにくいときは、結果をどう解釈するのか説明する。結果から疑問が生じたときには、それに答える形で理論を展開する。
- ④ 考察を加えたことで、直接的に結論が導かれるときは、ここで結論を述べても良い。
- ⑤ 考察の中で、さらに追求されるべき内容が出てくれば、将来計画として記述し、次の研究へとつなげる。

(8) 結論 (結言)・展望 (Conclusions)

結論は、取り組んだリサーチクエスションへの回答を述べる重要な項目です。研究のリサーチクエスションをここでもう一度示し、それに対して、得られた実験結果と考察をもとに論理的に答えて、結論づけます。博士論文などの大々的な論文でない場合は、「結論」ではなく「結言」と項目だてされることもあります。

展望では、この研究の成果を受けて、これから展開されるべき研究の方向性を示す内容を書きます。また、その研究が社会や学

術分野においてどのような貢献が見込めるかを述べます。

(9) 謝辞 (Acknowledgements)

課題研究を行った際、指導・助言、協力をいただいた方々へ、謝辞を述べます。

(10) 引用文献 (References)・参考文献 (Bibliography)

研究の背景で、参考となった文献、実験の考察を加える際に参照した文献を示します。下の①～⑨に岡本尚也 (2017)『課題研究メソッド』啓林館²に示されている例を参考にして、引用文献・参考文献の書き方についてその一例を紹介します。しかし、詳細については、それぞれの専門学会によって引用文献・参考文献の記載書式が指定されていますので、実際にはそちらに従って記載してください。引用文献・参考文献を明記することで、その論文の信頼性が高まるのですが、図などを含めた本文中に引用されていない文献を、ここに列挙することはできません。引用文献・参考文献が複数ある場合は、著者頭文字のアルファベット順に並べるのが普通です。

次に示すものは一つの例で、詳しくは各科学雑誌などが定める書式に従うことが大切です。

- ① 編著者がおらず、すべての章を一人の著者が書いている日本語の本
著者名，発行年．書名．出版社名，出版社の所在地。
- ② いくつかの章を異なる著者が書いており、編著者がいる日本語の本
著者名，発行年．引用する章のタイトル．編著者名，書名．出版社名，出版社の所在地。
- ③ 訳本
日本語の情報を記入した後、カッコ内に原書の情報を記す。
翻訳者名，発行年．訳本の書名．訳本の出版社名，出版社の所在地．（原書著者名，発行年．イタリックで書いた原

書名． 出版社名， 出版社の所在地)

- ④ 編著者がおらず，すべての章を一人の著者が書いている英語の本
著者名， 発行年． イタリックで書いた書名． 出版社名， 出版社の所在地.
- ⑤ いくつかの章を異なる著者が書いており，編著者がいる英語の本
著者名， 発行年． 引用する章のタイトル． 編著者名， イタリックで書いた書名， 出版社名， 出版社の所在地.
- ⑥ 日本語の論文
著者名， 発行年． 論文のタイトル． 雑誌名， 巻号：論文のページ.
- ⑦ 英語の論文
著者名， 発行年． 論文のタイトル． 雑誌名， 巻号：論文のページ.
- ⑧ 新聞
新聞名， 掲載年． 記事のタイトル． 地域， 掲載日， 刊.
- ⑨ インターネット上の資料
作成者， 公開年． **Web** ページのタイトル． **URL**， アクセスした日付け.

4. 研究倫理について

岡本尚也 (2017) 『課題研究メソッド』啓林館²に示されている例を参考にして，研究不正になる場合の例について，次の(1)～(3)を紹介します。また，その他で注意すべきと考えられることを(4)～(6)に示しました。

(1) 改ざん

結果の内容を自分の都合が良いように書き換えること。

(2) 捏造

自分の主張したいことが述べやすいように、存在しないデータを作り上げること。

(3) 盗用

他の研究者のアイデア、分析・解析方法、データ、論文または用語を当該研究者の了解、もしくは適切な表示（引用であること）をせずに自分の成果として流用すること。これに対して引用・参考を明記することは、先行研究に対する敬意を表す意味もあり、引用元を明記し、本文と引用した内容を明確に区別して記述することが大切です。そして、論文の最後に引用文献・参考文献としてそのリストをつけます。

(4) 読んでいない文献の引用

他の論文の文献リストを見ることで、関連する文献を知ることができます。しかし、自分の論文で文献を引用する場合は、必ず、その論文を取り寄せて読んでいないといけません。他の論文から判断して、その引用文献の名前だけをリストに挙げて本文を記述することは良くありません。また、本文に引用のない文献を引用文献として列挙することはできません。

(5) 二重投稿

同じ論文を2つ以上の学術雑誌に投稿することは、してはいけません。

(6) 著者名の記載についての注意

論文のタイトルの次に著者名を記載しますが、グループ研究の場合、最初に記載された人が第一著者（first author）となります。第一著者は、普通は論文に関する連絡先の著者（corresponding author）ですが、別途記載の場合もあります。順番は研究に対する寄与に応じて記載します。その研究に寄与した人の名前は漏れないように記載しますが、寄与していないのに名前だけを書くことはできません。

課題研究チェック表

項目・内容	チェック欄
1 情報収集・研究背景の調査 実験対象の観察について.	
<ul style="list-style-type: none"> ◇ リサーチクエスチョン（研究全体で何を明らかにしたいのかを示す「問い」）を設定するために十分な情報収集・研究背景の調査 実験対象の観察，文献の収集はできているか. 	
2 リサーチクエスチョンについて	
<ul style="list-style-type: none"> ◇ 独自性があるか. ◇ 答を出せる可能性がある「問い」であるか. ◇ 研究の背景に対して，しっかりとした位置づけのある（社会的に，または学術的に研究の価値のある）「問い」であるか. 	
3 研究テーマの設定について	
<ul style="list-style-type: none"> ◇ 研究の目的や動機にもとづいて，具体的な研究テーマを設定できているか. 	
4 仮説の設定について	
<ul style="list-style-type: none"> ◇ 仮説の文章は検証実験が可能なもの（調査・測定が可能なもの）になっているか. ◇ 仮説を検証できたとき，リサーチクエスチョンに答えることができる内容になっているか. 	
5 検証実験について	
<ul style="list-style-type: none"> ◇ 処理実験の内容から仮説が検証できるように対照実験が設定されているか. ◇ 実験方法の信頼性はあるか. ◇ 実験結果の分析方法は，論理的で客観性があるか. ◇ 実験結果に再現性があるか. 	

6 結果と考察について	
<ul style="list-style-type: none"> ◇ 実験データをまとめ、表や図、効果的なグラフによって、結果をわかりやすく示すことができているか. ◇ 結果から客観的に判断できることを論理的に述べているか. ◇ 結果が示す問題点に気づき、その理由を答えることができているか. 	
7 結論・展望について	
<ul style="list-style-type: none"> ◇ 結論は、リサーチクエストに答えたものになっているか. ◇ 研究の成果を正しく理解し、アピールできているか. ◇ 研究の成果を受けて、これから展開されるべき研究の方向性を示すことができているか. 	
8 質疑応答に対する準備	
<ul style="list-style-type: none"> ◇ 研究内容の不十分な点、疑問が生じる点を理解し、それに対する応答を準備しているか. 	

課題研究を進めるに当たって、このチェック表でその内容を確認してください。研究を客観的に自己評価するときや、研究をさらに深めるときなどに役に立ちます。

また、科学コンクールなどの審査基準も同様の内容から項目立てられている場合が多いようです。

みなさんの中で、一人でも多くの人が科学することの面白さに気づかれますよう、できれば新しい科学的な発見がありますよう、心から応援しています。

謝辞

本冊子を作成するにあたり、長崎西高等学校 SSH 運営指導委員として御指導・御助言をいただきました福永博俊 理事（長崎大学）、吉浦孝一郎 教授（長崎大学原爆後障害医療研究所）、光武範吏 教授（長崎大学原爆後障害医療研究所）、野瀬幹夫 客員教授（長崎総合科学大学大学院新技術創成研究所）、本田巖 教授（長崎総合科学大学大学院工学研究科）に、厚く御礼申し上げます。

また、本冊子内容の有効性検証において、お力添えをいただきました長崎県 SSH 管理機関（県教育庁高校教育課）、長崎県 SSH 指導機関（県教育センター）、長崎県高等学校理科教育研究会に心より御礼申しあげます。さらに、高等学校の理科教育における本冊子の有効性について貴重な御意見をいただきました川下秀一 先生、松本未来先生に、御礼申し上げます。

本校の課題研究指導において、〈例〉に示した生徒の研究活動に御指導・御助言をいただきました田中清 先生（長崎西高等学校外部講師、長崎市環境調査員、長崎県環境監視員、学芸員）、〈例〉に示した生徒の研究活動を御指導いただくと同時に、その科学コンクールでの発表指導、さらに、本ガイドブックの内容においても御指導いただきました安永智秀 博士（Research Associate, American Museum of Natural History, New York, USA）に深く感謝いたします。

そして、本ガイドブック第2版の内容について細部にわたりご指摘をいただき、第3版編集の指針をお示しいただきました野瀬重人 先生（元岡山理科大学理学部教授）に、厚く御礼申し上げます。

2022年2月
長崎西高等学校 SSH 企画推進部

参考文献

1. 朝鍋遥・平野安樹子・桃坂瞳, 2017. 大村湾における絶滅危惧アメンボの生息状況と新たに発見されたナガサキアメンボ (新称) について, JSEC2017 応募論文: 1—10.
2. 岡本尚也, 2017. 課題研究メソッド. 新興出版社啓林館, 大阪.
3. 廣岡慶彦, 2011. CD付改訂版 理科系のための入門英語プレゼンテーション. 朝倉書店, 東京.
4. 小泉治彦, 2010. 課題研究ガイドブック ～どうやって進めるか, どうやってまとめるか～. 千葉大学先進科学センター, 千葉.
5. 野辺愛耶・近藤紀香・福澤咲知子, 2016. オオアメンボ *Aquarius elongatus* の水面波への応答について. JSEC2016 応募論文: 1—10.

課題研究の進め方と科学論文の書き方

第3版

令和3年度 長崎西高等学校SSH企画推進部

「課題研究の進め方と科学論文の書き方」は、長崎西高等学校第三期SSH指定事業である科学系部活動『科学探究クラブ』、理系の課題研究活動『科学探究』、文系の課題研究活動『課題研究講座』、英語による課題研究の基礎講座『基礎科学情報』および、第四期SSH指定事業である新カリキュラム開発『科学探究講座Ⅰ』、文理協働型課題研究活動『科学探究講座Ⅱ』・『科学探究講座Ⅲ』、科学系部活動『科学探究クラブ』の実践をもとに、その成果を「課題研究ガイドブック」としてまとめたものです。

課題研究の進め方と科学論文の書き方

2020年3月15日 初版 第1刷

2021年3月15日 第2版 第1刷

2022年3月14日 第3版 第1刷

<http://nagasaki-w-ssh.sakura.ne.jp/nishi/>

課題研究の進め方と科学論文の書き方

著者 長崎西高等学校SSH企画推進部

発行者 長崎県立長崎西高等学校 本村公秀
