

④ 得られた研究結果から結論に至り、その科学的な意味を理解している。

▶ 得られた研究結果から結論を導き出すまでの過程が論理的に一貫性のあるものとなっており、分かりやすく明確に記述されている。また、その結論がどのような科学的な意味を持っているか分かりやすく明確に示されている。

◀ <指導・コーチング> 実験や観察で得られる結果（データ）が結論づけ（→研究テーマや研究仮説と実験・観察結果との整合性の検討）に正しく使用できることを前提に、想定される一定の結果を考えさせる。（→ロードマップ「研究の流れ」における具体的実験の方法の指導とコーチング）

Ⅲ 科学的な考察と処理能力に関するルーブリック

① 誤差や精度について配慮した実験データが示されている。

▶ 実験の回数や誤差について、統計的に処理されている。また、基本的な統計量が示されている。また、数値の扱い方について有効数字にも配慮がなされている。

◀ <指導・コーチング> 研究テーマや研究仮説を検証するため不可欠な実験・観察のデータについて、その信頼性を担保することが何より大切である。授業としての課題研究には時間的制約もあるが、実験・観察そのものの再現性や得られたデータの精度、信頼性を確保するための十分なデータ量（実験・観察の回数も含め）が得られることの必要性とその実行を指導、コーチングする。
研究成果の発表・発信において、不備や疑問が指摘される最も重要な観点の一つがこの点である。また、得られたデータ（数値）に対する「検定」による信頼度の判定や具体的にどのような数値をどこまでの精度で得るのかの検討も生徒グループに要求すべきである。（→ロードマップ「研究の流れ」における具体的実験の方法の指導とコーチング）

② 得られた研究結果・データを適切な図表やグラフで表している。

▶ 図表・グラフの種類や形式が適切に選択されており、図表・グラフのキャプション、縦軸・横軸が示すものや単位が適切に分かりやすく明記されている。

◀ <指導・コーチング> 実験や観察で得られたデータ（結果）を分かりやすく、正確に発信するための表現方法を想定しておくことを指導、コーチングする。このことにより、何を検証するためにどのようなデータが必要なかが具体的にイメージできる。
研究成果の発表や発信に際しての図や表、グラフ等については、その説明に必要な事項を表記し忘れないことを指導する。研究論文や発表ポスターには、査読者^{*1}や一般の人がいることを常に意識した表現ができることを指導、コーチングする。（→ロードマップ「研究の流れ」における具体的実験の方法、論文作成の指導とコーチング）

※1:ここでは、発信された研究論文を評価するすべての人の意。

③ 条件統一に留意し、必要ならば対照実験を行い、体系的に正確で十分な範囲のデータを収集している。

▶ 統一すべき条件がその理由とともに明確に述べられており、必要な対照実験が行われている。また、観察・実験が体系的に行われており、正確で十分なデータが得られている。

◀ <指導・コーチング> 研究テーマや研究仮説を検証するために不可欠な実験・観察の設定や実施に際して、条件の制御（目的に適する変数の設定、変数以外の要素の統一など）や対照実験の設定など、研究目的を裏付けるに十分で正確なデータが得られることを指導、コーチングする。（→ロードマップ「研究の流れ」における具体的実験の方法の指導とコーチング）

④ 得られた研究結果を科学的に分析し、考察している。

▶ 得られた研究結果を、科学の原理や法則などに基づいて適切に分析し、考察している。また、その過程が論理的に分かりやすく記述されている。

◀ <指導・コーチング> 実験や観察で得られるデータ（結果）を研究目的（科学的原理や法則に基づく研究仮説、作業仮説）を裏付けるのに十分なものとなっていることを分析（考察）し、結論に結びつけられるような実験・観察の設定を指導、コーチングする。（→ロードマップ「研究の流れ」における具体的実験の方法の指導とコーチング）

⑤ 参考文献を適切に本文中に引用し、直接得られたデータとインターネットなどからの2次情報を区別して、情報の質に注意を払っている。

▶ 「おおむね十分」の基準を満たすとともに、質の高い参考文献を活用するように心がけている。

◀ <指導・コーチング> 研究全体に対して、必要な先行研究の記録やインターネット検索の記録（その文献の名称と必要な内容など）は必ず残すよう指導する。また、先行研究の内容を一次情報のように扱わないことを指導する。（→論文作成の指導とコーチング）

IV 創造的な能力に関するルーブリック

① 課題の設定や問題の発見に独創性がみられ、その部分がわかりやすく示されている。

▶ 課題発見の着眼点に独創性がみられ、問題の発見から課題設定までのプロセスが科学的に丁寧に分かりやすく記述されている。

▶ <指導・コーチング>身近な現象や既習事項、興味関心事項等から、新たな疑問（未解明の課題）を見出し、科学的手法（数値など客観的データ）により、発見した疑問を理論的に解明することをコーチングする。また、このためには、日常的に、意識して科学的現象に対する「疑問」を持つことの必要性をコーチングする。（→ロードマップ「概要」「背景」「研究概念」の指導とコーチング）

② 観察・実験方法、探究方法に創意工夫が見られる。

▶ 観察・実験の方法や探究の方法に創意工夫が見られ、工夫した事柄が明確になるように分かりやすく記述されている。

▶ <指導・コーチング>実験や観察において、異なる素材により従来と同様な結果が得られる工夫、また、その研究独自の、より簡易に、より効率的に結果を得ることができる装置や方法等の工夫ができることをコーチングする。（→ロードマップ「研究の流れ」における具体的実験の方法の指導とコーチング、※このこと自体が研究テーマともなりうる場合がある。）

③ データ処理に創意工夫が見られる。

▶ 得られたデータを様々な切り口で整理し、もっとも適当な処理方法により、規則性や傾向を読み取ろうとしている。また、その結果が説得力のある論拠となり得ている。

▶ <指導・コーチング>実験や観察で得られるデータを、分析し、結論に結びつけるために最も適切なまとめ方（→表や図、グラフ等に表現）を指導、コーチングする。また、逆に、研究や実験・観察のデザインづくりにおいて、どのようなデータのまとめで、研究テーマ（仮説）を立証するのかを想定させることも効果的である。（→ロードマップ「研究の流れ」における具体的実験の方法、論文作成の指導とコーチング）

④ 研究の価値を自己評価できている。

▶ 研究の成果がどのような意味を持つのか、また、課題として残っていることは何かが明確に記述されている。また、研究を発展させるための方向性が示されている。

▶ <指導・コーチング>ロードマップ（研究計画）作成の意義（研究全体の計画をデザインするとともに、研究過程において、進捗状況の確認や軌道修正について、生徒グループ自身が判断、メタ認知する）を十分に理解、認知させるよう指導する。（→ロードマップの作成と検討における指導とコーチング）

バランス!!
どれか欠けると
崩れる!!

<研究テーマについて>

I 探究プロセス

① 研究課題決定までの道筋

II 基本的な概念、原理・法則

① 先行研究の十分な調べ

② 既習事項の十分な調べ

IV 創造的な能力

① 独創性のある課題の設定

<実験・観察テーマについて>

I 探究プロセス

② 観察・実験の適正なデザイン

③ 客観的な観察・実験結果

II 基本的な概念、原理・法則

③ 観察・実験の目的の理解

III 科学的な考察と処理

① 観察・実験における誤差や精度の配慮

③ 観察・実験の条件の整備、制御

IV 創造的な能力

② 観察・実験方法、探究方法の創意工夫

<研究のまとめや発信について>

I 探究プロセス

④ 観察・実験の論理的な考察

II 基本的な概念、原理・法則

④ 一次情報による結論づけとその理解

III 科学的な考察と処理

② 結果・データの適切な表現

④ 結果の科学的と分析、考察

⑤ 一次情報と二次情報の区別

IV 創造的な能力

③ データ処理の創意工夫

※課題研究の指導やコーチングに当たっては、指導者グループも、生徒グループの研究を「我がこととして」積極的に改善を要求すべきである。生徒グループの研究成果の発表、発信を評価を受けるのは、指導者グループの指導、コーチングの評価としてでもある。

第2章その3 良い論文，改良余地が多い論文

「課題研究ルーブリックの活用」と重ね合わせ、研究とその成果を表した研究論文は、研究内容そのものを表現している。従って、研究論文の評価は、研究そのものの評価を意味する。「良い論文」の内容の「どこがどう良いのか」を判断できれば、「このような研究論文が発信でいるような課題研究をデザインすること」を生徒グループに指導，コーチングできることにつながる。

さて、良い研究論文には、どのようなことが表現されているのか(=どのような研究がなされるべきなのか)。

研究論文	課題研究(←ロードマップのデザイン)
<p>○タイトル(表題)に研究成果が明確に反映されている。また、研究内容にとっての重要語句(キーワード)が示されている。</p>	<p>○研究の目的(何を発見したいか)が明確に設定され、理論的(科学的)に証明(結論づけ)される。</p>
<p>○研究のための思考や活動の過程(研究の背景や目的、実験・観察内容、その結果、結論)が簡潔に示された要旨になっている。</p>	<p>○科学的裏付け(原理や法則)に基づいた思考の過程を踏まえた研究の具体的内容が明瞭に示すことができる。※具体的な研究のデザインを簡潔、明瞭に示すことのできる研究になっている。</p>
<p>○序において、研究の背景と目的を査読者にも一般人にも分かりやすく具体的に示されている。また、必要に応じて、「境界条件」や「研究仮説(作業仮説、場合によっては対立仮説)」を示した上で検証方法とその結果の妥当性を論じることで研究目的と結論の整合性が示されている。</p>	<p>○研究者自身(生徒グループ自身)が研究目的や研究内容について詳細まで熟知し、研究を進めることができる。また、研究の結論を想定できている。</p>
<p>○研究テーマ(または、研究仮説)を検証するための実験や観察の具体的内容(素材、地域、方法など)が、信頼性や再現性を担保しながら行われているものが分かりやすく示されている。特に、査読者に、結論を十分納得させるデータが得られる方法が示されている。</p>	<p>○研修テーマ(研究仮説)を検証するための実験・観察を具体的にデザインし実行できる。また、独創性を加味したものを考慮する必要もあるが、それ以上に、信頼性、再現性のあるデータを得るためのプロトコルに注意を払い実験・観察ができている。 実験・観察の実行においては、確実かつ十分なデータを得る必要性を踏まえ、持続性、効率性やグループ研究における役割分担(作業責任の所在)が的確に担保できることも重要な要素である。</p>
<p>○実験・観察で得られたデータの結果が、研究テーマや研究仮説の実証になることを前提に示されている。</p>	<p>○実験や観察で得られるデータを図やグラフを用いて次の考察や結論づけに、研究テーマ(研究仮説)が「正しい」ことの「客観的事実」として指し示すことを前提に、デザインをイメージする。 大切なのは、自分たちの「解釈」ではなく、データによる客観的テーマのみを表に出せること。結論づけに「どれほどの」「どんな」データ必要なのかを予め想定した計画をつくる必要がある。</p>
<p>○考察は、論文の最も重要な部分。実験や観察の結果と研究テーマ(研究仮説)と結びつけて論じることで、いかに研究テーマ(研究仮説)が正しいかを証明する(研究テーマの再確認→結果に基づく研究テーマの立証→研究テーマの真偽の判断)。</p>	<p>○基本的に「考察」と「結論」は別の項目である。「考察」は、むしろ前項目の「結果」と結びつけ、「結果の考察」となる。「結果」が客観的事実のみの記述であるのに対して、ここでは、研究テーマ(研究仮説)の正当性を主張する。 従って、ロードマップ作成においては、研究の流れ全体を理論的な流れとして、よく認識しておく必要がある。実験や観察のルーチンワークの消化だけではなく、得られたデータでどのように考察するかを断続的に確認する必要がある。</p>
<p>○研究テーマ(研究仮説)が正しいことを簡潔に結論づける。「序」の部分とも整合性を図り、矛盾しないこと。 ※「今後の課題」は、考察の部分で記述する。</p>	<p>○容易に「研究テーマは正しい」とだけ、主張できるように、考察までに十分なデータが得られていることが必要である。</p>

図1 論文からロードマップへのフィードバック(※謝辞、引用文献は省略した)

指導者グループにとって、日常的に科学論文を読んだり、検討したりすることは、本来の業務をセカンドに置かない限り、困難な・・・無理なことである。反面、課題研究を適切に指導、コーチングするためには、先行研究の論文の内容を検討することは、欠かせない作業である。「研究」を主たる職にしていないう指導者グループにとって、時間的制限の中、科学論文（先行研究の内容）を検討するためには、「良い論文」を選び、より少ない論文数で効率的に検討する必要がある。

また、「良い論文」を選ぶ力も必要である。キーワードが合致するからといって、「改良余地が多い論文」を選んでいても、検討する時間が無駄に浪費したあげく、間違った結論を鵜呑みにして、生徒グループの研究を間違った方向へ誘導する可能性もある。従って、「良い論文」か「良くない論文」かを見分ける力をつけることが必要である。そのためには、日頃から「良い論文」に接していることが大切になる。

前述の通り、日常業務の中で多くの論文を読み込むことは、現実的に不可能なことである。そこで、よく言われる、次のことを試してみる。

- ① 生徒グループが提示した研究テーマ（仮）に関するキーワードをインターネットで検索する。
- ② 「これは？」と思う論文が出てきたら、まず、タイトルを読んで、「引きつけ度」を確認する。
- ③ 次に、アブストラクト（概要、要旨）を読む。「良い論文」なら、図1の要旨の内容が、明快にコンパクトに述べられているはずである。
- ④ 次に、イントロダクション（序論、序）を読む。「良い論文」なら、この段階で、研究内容の大筋が把握できるはずである。

次に挙げるのは、〔例1〕「熱音響冷却」「スタックの位置」（キーワード）についての本校課題研究の研究論文の一部（タイトル～序論）である。また、〔例2〕は、花粉管の伸長メカニズムについての投稿論文の一部（概要）である。

〔例1〕 熱音響冷却装置の製作と冷却原理の考察

要 旨

ステンレス製のパイプを束にして作ったスタックをアクリル製のパイプに挿入し、これに音波を入射させたところ、アクリルパイプ内のスタックの両端の空気の温度が下がることが確認できた。この原理として、音波の振動により、スタックとアクリルパイプ内の空気の間で熱交換が生じ、温度が低下していくというモデル(仮説)を考案した。

序 論

岡山県の吉備津神社では古来より「鳴釜神事」と呼ばれる神事が行われている。釜を炎で熱すると釜が共鳴し、「ボー」という大きな音が出て、この音で吉凶を占うという神事である。これは熱音響現象であるということを知り、熱音響について調べたところ、熱音響冷却という現象を見つけた。

先行研究は数多くあり、例えば Jang Woo Kim による「Thermal Management for Low-Power Handheld Electric Devices using Thermoacoustics and Forced Convection by Vibrating Cantilever Beam」がある¹⁾。この報告では、可逆断熱圧縮、不可逆等圧熱移動、可逆断熱膨張、不可逆等圧熱移動の4つの過程を繰り返し、冷却を行うという原理が報告されている。また、畠沢らの研究では、効率的なスタックの位置（アクリルパイプの全長に対する管口からスタックの中心までの距離の比率）を20%から30%が最も効果が高いとの報告がなされている²⁾。図2は、Jang Woo Kim の「Thermal Management for Low-Power Handheld Electric Devices using Thermoacoustics and Forced Convection by Vibrating Cantilever Beam」による。

当初私たちは、熱音響冷却装置内のスタックの位置と温度変化を比較することにした。そして、スタックの位置が温度変化に及ぼす影響について調べた。

(理数科集録より、図省略、サンプル①に本文)

〔例2〕 植物の受精・花粉管の伸長メカニズムの解明：カルシウムイオンにより制御された活性酸素の生成の重要性を発見 ～食糧・環境・エネルギー問題解決の一助となる作物の収量を高める技術開発に向けた一歩～

概 要

生体内で発生する活性酸素は、生活習慣病を始めとする多様なヒトの病気や、環境ストレスによる植物のさまざまな傷害の原因物質であり、それを分解・解毒する抗酸化物質に注目が集まっています。その一方で動植物は、活性酸素を積極的に生成するメカニズムを持ち、病原体に対する免疫応答や、発生過程(註1)におけるシグナル分子として重要な役割を果たしています。

被子植物の有性生殖の過程では、雌しべの柱頭で花粉は発芽し、花粉管が花柱の中を伸長し【参考資料1】、胚珠で受精が起きます。これまで、花粉管の伸長成長の過程で、活性酸素が積極的に生成されることが示

唆されていましたが、その分子レベルのメカニズムは不明でした。

今回の研究で、研究グループは、モデル植物であるシロイヌナズナの RbohH と RbohJ と呼ばれる 2 種のタンパク質が、伸長する花粉管の先端に局在し、カルシウムイオンの結合により活性化されて活性酸素を生成すること、この活性酸素の生成が、植物の花粉管の伸長、受精、種子の形成に重要な役割を果たすことを発見しました。

今回の発見により、植物の生殖や種子の形成における活性酸素の積極的な生成の役割とその制御のメカニズムの一端が解明されました。この成果は、植物の種子の形成、生殖、情報の処理・伝達のメカニズムの解明につながる、基礎的に重要な研究であると同時に、作物の収量を高める技術開発の基盤となる可能性も示唆しています。環境にやさしい農業への道を開き、食糧・環境・エネルギー問題の解決への第一歩となることが期待されます。一方、花粉アレルギーなど、人体に対する植物の花粉の影響に、花粉そのものが発生する活性酸素種が関与している可能性も指摘されており、こうした側面への応用も期待されます。

<https://www.tus.ac.jp/today/20140424103836.pdf> (東京理科大学の発表より、文末の表現は原文のまま)

上の〔例 1〕では、熱音響冷却における「新しい発見」が検証されていないことが、容易に分かる。また、〔例 2〕では、花粉管の伸長における「新しい発見」が検証されていることが、容易に分かる。

「良い論文」か否かは、「その手の専門家」ならば、その選択にそれ程の時間を要さない。指導者グループには、「専門家」とまではいかなくとも、経験豊かなメンバーがいるはずである。「良い論文」を紹介してもらうのも 1 つの手である。

また、指導者グループへの「論文講習」を指導者の資質向上プログラムとして構築する必要もある (図 2)。

研究論文に関する資質向上プログラム

- 研究論文講読
- 研究論文評価(ルーブリックによる評価)
- 研究論文添削
- ※研究論文評価からの研究活動へのフィードバック

図 2 研究論文に関する指導者グループ用の資質向上プログラムの項目 (→今後の実践課題)

生徒グループを対象に年 1 回行われる「論文講習会」(図 3) であるが、指導者グループも「課題研究ルーブリック」を用いた論文評価の講習内容を真摯に受け止め、「良い論文」が作成できるよう、研究活動における指導やコーチングの観点にフィードバックできるスキルアップを図ることが必要である。

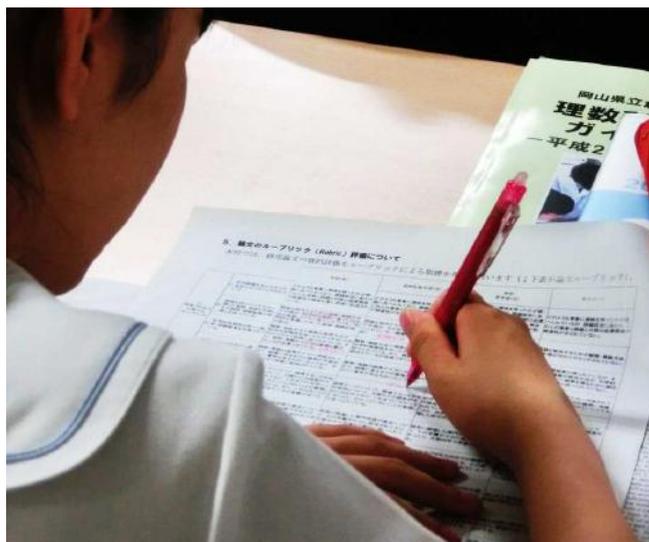


図 3 指導者グループも参加する課題研究ルーブリックを用いた論文研修会

なお、次に、研究論文「サンプル①」、「サンプル②」を掲載した。それぞれについて課題研究ルーブリックによる評価、「良い論文」か「改良余地が多い論文」の評価を実践してみるとよい。

熱音響冷却装置の製作と冷却原理の考察

Production of Thermoacoustic Cooling System and Consideration of Cooling Principle

研究メンバー名
指導者名

要旨

ステンレス製のパイプを束にして作ったスタックの両端の空気のパイプに挿入し、これに音波を注入させたところ、アクリルパイプ内のスタックの両端の空気の温度が下がることが確認できた。この原理として、音波の振動により、スタックとアクリルパイプ内の空気の間で熱交換が生じ、温度が低下していくというモデル(仮説)を考案した。

Abstract

We tried to insert a stack made of stainless steel pipe in a bundle of acrylic pipe and injected sound waves, it was confirmed that the temperature of the air at both ends of the stack inside the acrylic pipe drops. As a principle of this, we devised a model (hypothesis) that heat exchange occurs between the stack and the air in the acrylic pipe due to vibration of sound waves, and the temperature decreases.

キーワード：熱音響現象、熱音響冷却、スタック

1. 序論

岡山県の吉備津神社では古来より「鳴釜神事」と呼ばれる神事が行われている。釜を炎で熱すると釜が共鳴し、「ボー」という大きな音が出て、この音が吉凶を占うという神事である。これは熱音響現象であるということを知り、熱音響について調べたところ、熱音響冷却という現象を見つけた。



図1. 吉備津神社の神事「鳴釜神事」
(写真提供 吉備津神社)

先行研究は数多くあり、例えば Jang Woo Kim によ

図2は、Jang Woo Kim の「Thermal Management for Low-Power Handheld Electric Devices using Thermoacoustics and Forced Convection by Vibrating Cantilever Beam」による。

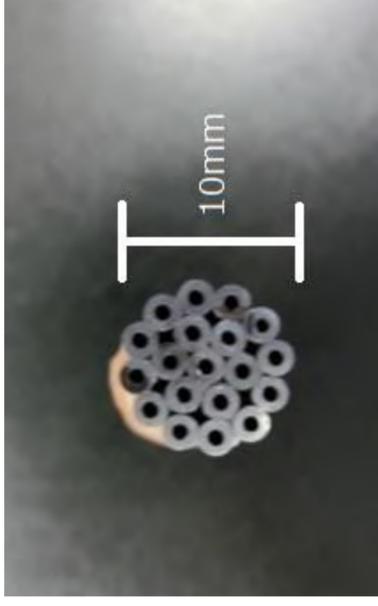


図3. スタック断面の写真
(ステンレスパイプの外径 2mm、内径 1mm)

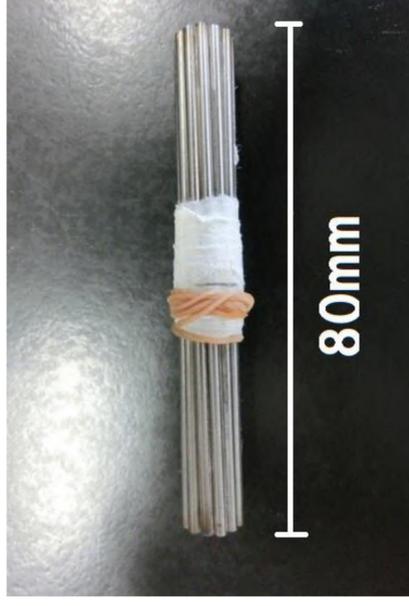


図4. スタック横の写真

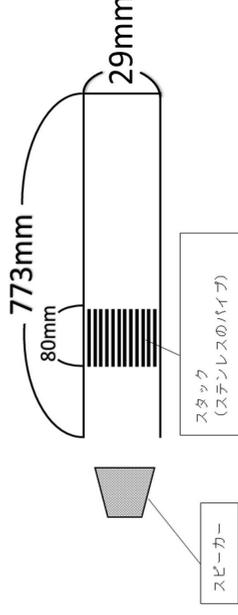


図5. アクリルパイプ熱交換器管内

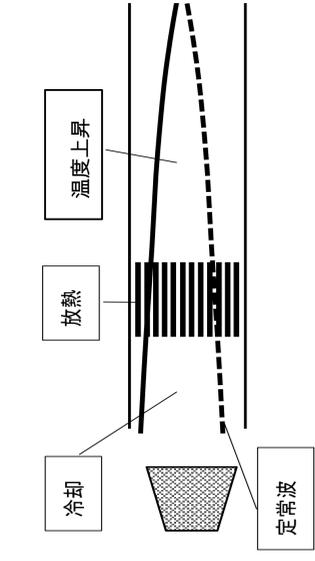


図6. スタック内の音波の様子(当初の仮説)
当初私たちは、熱音響冷却装置内のスタックの位置と温度変化を比較することにしました。そして、スタックの位置が温度変化に及ぼす影響について調べた

1. 研究内容

<当初の仮説>

音波を発生させるとアクリルパイプ内でスタックのスピーカー側(腹の側)の温度が下がり、スタックのスピーカーと反対側(節の側)の温度が上がるであろう。

<実験方法>

開口端からスタックの中心までの距離を、アクリルパイプ全体の長さの 20%、30%にそれぞれ合わせてスタックのスピーカー側、スタックの中心、スタックのスピーカーと反対側の温度を測定する。

実験1. スタック位置 20%の場合
実験の準備

実験1では20%の場合、スピーカーからスタックの中心までの長さを154mm、スタックの中心からアクリルパイプの端までの長さを619mm、アクリルパイプの全長を773mmとしスタックの長さは80mmになる。

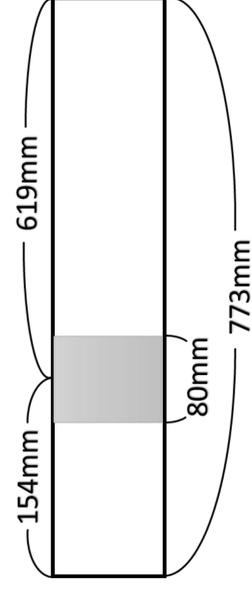


図7. 実験1の寸法

スタックの両端とスタックの中心に温度計を当てて図8、図9のようにし、音波を発生させる。

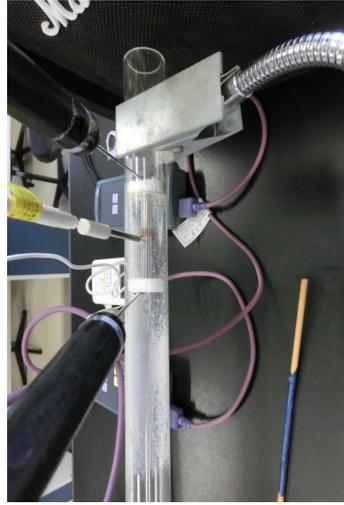


図8. スタックと温度計



図9. 実験全体の様子

実験方法

- ① スタックの中心の位置をパイプ全体の長さの20%で測定する。
- ② 100Hzの音波を注入させる。
- ③ 1分ごとにそれぞれの温度計に表示されている温度を記録する。
- ④ ①から③の操作は温度が3分間変化しなくなるとまで行う。完全に数値が定まることは無かったので、変動が0.3℃以下になった段階で記録を終了した。

<結果>

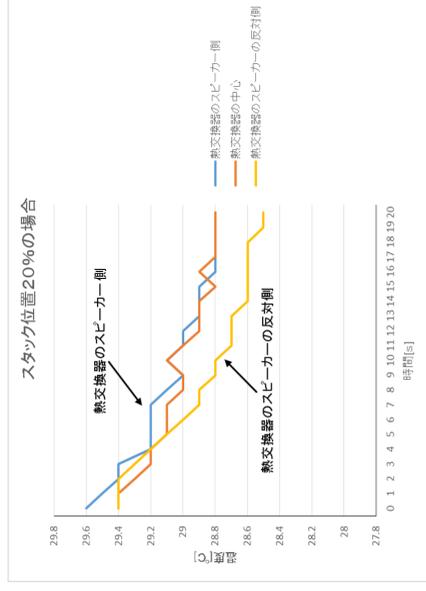


図10. スタック位置20%の温度変化

スタックのスピーカー側では0.8℃下がり、スタックの中心では0.6℃下がり、スタックのスピーカーの反対側では0.9℃下がった。よって、冷却することが確認できた。およそ20分で安定した。

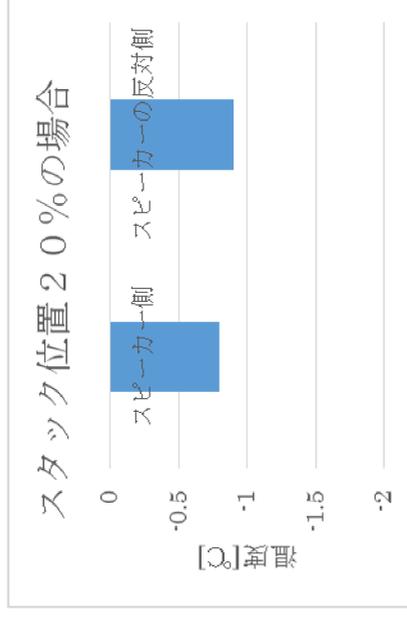


図11. スタック位置20%の温度冷却の比較

実験2. スタック位置30%の場合

実験の準備

実験2ではスタックの中心をパイプ全体の長さの30%の位置に設置した。各部のスケールはスピーカーからスタックの中心までの長さは231mm、スタックの中心からアクリルパイプの端までの長さは542mm、アクリルパイプの全長は773mmでスタックの長さは80mmである。

<考察>

実験1では、冷却現象は確認できたが仮説に反し、スタックのスピーカーの反対側の温度も下がった。また、スタックの中心部の温度も下がった。実験2では、冷却現象は確認できたが、実験1と同様に仮説に反して、スタックのスピーカーと反対側の温度も下がった。

当初の仮説では、スタックのスピーカー側の温度が下がり、スタックのスピーカーの反対側(節の側)の温度が上がると考えたが、実際の実験ではスタックのスピーカー側(腹の側)、スタックのスピーカーの反対側の温度が両方とも下がった。当初の仮説はスタックのスピーカー側の温度が下がり、反対側の温度が上がる現象が現れるはずだったが、今回は確認できなかった。

スタックの両端の温度が下がったため、スタックの中心部の温度の測定も行った。その結果、スタックの両端の温度が下がり、スタックの中心部の温度が上がった。そこから放熱が行われると考えたが、実験1と実験2からはスタックの中心部の温度も若干(0.5℃程度)下がった。

3. 新たな仮説とモデル

次に、スタックの両側で温度が下がるモデル(仮説)を考えた。ステレンレスパイプで作製したスタックと、空気塊との相互作用について、音波は縦波なので、左右に振動し、断熱圧縮で発生した熱をスタックの壁面に伝えて放出する。そして、断熱膨張をしてスタックの両サイドの温度が次第に下がる。

熱と音波との間ではお互いにエネルギーを受け渡しが行われる。そのような作用を用いて冷却を行う。まず、音波をアクリルパイプに入射させ、管内の気体をスタックに通す。スタックの中で、気体は断熱圧縮され体積が小さくなる。そして、体積が小さくなった気体は音波により再びスタックの外に移動して気体が断熱膨張し温度が下がるためスタック近傍でアクリルパイプ内の温度が下がると考えた。

- 井上龍夫 パルス管冷凍機の研究開発の現状
- 中井大貴ほか ループ管型熱音響冷凍機における冷却側スタックの形状及び設置位置が冷却性能に及ぼす影響

• A Study of Thermoacoustic Refrigeration System

Pranav Mahamuni

- 矢崎太一 細管内音波伝播と熱音響現象
- 畠沢政保ほか 突合せ形熱音響音波発生機の特

性

- 富永昭 熱音響現象の理解とその応用

- 堀田浩平ほか 熱音響冷却システムの小型化に関する検討

- 経田僚昭 枝管付きループ管型熱音響冷凍機の高

性能化に関する研究

- 富永昭 熱音響工学の基礎

- 坂本真一ほか 熱音響現象を用いた新しい冷却シ

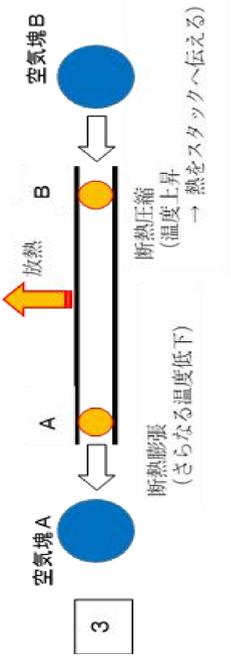
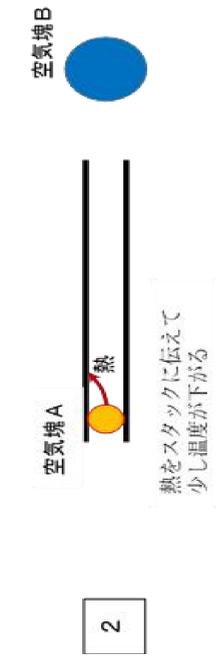
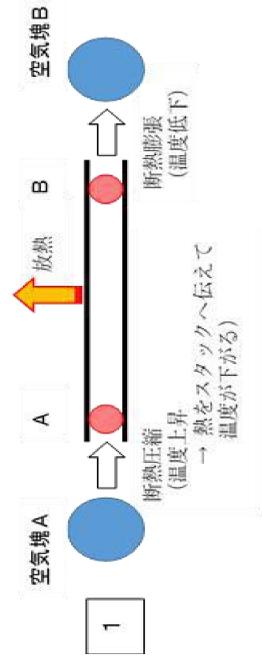


図 15. 熱音響冷却のモデル (仮説)

4. 結論

熱音響システムでは温度が下がる箇所と、温度が上がる箇所ができるが、今回の実験では下がる箇所は確認できたが、温度が上がる箇所は確認できなかった。

また、今後の課題としては、スタックの中心の位置を数%ずつ変えて測定してより細かいスタックの位置による温度変化の関係性について調べること、熱交換によって移動した熱がどこから放熱されたのかについて調べるということも挙げられる。

5. 参考文献

- Jang Woo Kim
Thermal Management for Low-Power Handheld Electric Devices using Thermoacoustics and Forced Convection by Vibrating Cantilever Beam
- 畠沢政保, 瀬尾直時 熱音響音波発生機の性能に及ぼすスタック位置の影響
• HISAKA 熱交換器事業本部 スタック
<http://www.hisaka.co.jp/cgi-bin/phe/catalog/index.cgi?d=1>
• 鷲見孝雄ほか ダブルループ型熱音響冷凍機の製作
• 立花一志ほか 大型熱音響冷凍機の開発

- 上田祐樹 進行波音波を用いた共鳴管冷凍機
- 西川宏明ほか ループ管方式による熱音響冷却システムの実用化に向けた検討—薄膜設置が管内音場および熱運送に与える影響—
- 石野貴廣 ループ管方式による熱音響冷却システムの実用化に向けた検討—分岐路による管内音場の制御—
- 吉田秀穂 細管内の音圧と粒子速度の位相差が熱音響冷却特性に与える影響について
- 辻良行 強制駆動時の熱音響現象における冷却特性とスタックの流路半径の関係について
- 飛原英治 共鳴波管型冷凍機
- 是永定美ほか 熱音響音波発生機の流れとその応用(熱音響発電)
- 是永定美ほか 熱音響音波発生器内の流れ

オオキンケイギクの繁殖原因と抑制手段

Causes of Fast-spreading and Control Method of Lance-leaved Tickseed in Japan

研究メンバー名

指導者名

要旨

本研究では、特定外来生物に指定されているオオキンケイギクの国内の急激な繁殖に着目し、その原因を発芽率や受粉の仕組みなどの観点から探求した。その結果、オオキンケイギクは春や秋に発芽しやすく、自家受粉でも結実が可能であるとわかった。また、サクラの枯れ葉の抽出液によって、同植物の発芽を抑制することができると明らかになった。

Lance-leaved Tickseed (*Coreopsis lanceolata*), which is invasive alien species of Japan, is spreading rapidly in Japan. The cause of fast-spreading was clarified and a control method was examined. As a result, Lance-leaved Tickseed is germinate well around 20°C and it can be both self-pollinated and cross-pollinated. Additionally, extraction of withered cherry leaves controlled the germination.

キーワード：オオキンケイギク, 特定外来生物, 発芽率, アレロパシー

1. 序論

近年、外来種が日本に入り、急激に拡大している。その一つであるオオキンケイギク (*Coreopsis lanceolata*) は、北米原産のキク科の多年草草本で、平成18年に特定外来生物に指定された外来種である。特に、本州では驚異的な繁殖が見られ、私たちの校舎や通学路などでも多く繁殖している。オオキンケイギクの種子の特性は、原産地の北米での研究などにより明らかになっている。同植物の種子について、結実後日を経れば経るほど、種子の生存率はより低くなるが、発芽率はより高くなる。これは、種子の後熟によって起こることだと考えられている²⁾。また、オオキンケイギクの種子の重量が重いほど、生存率はより高くなるが発芽率はより低くなり、これは種子の休眠によるものだと考えられている²⁾。

このような外来種の侵入、繁殖は、在来種の生育に大きな影響を与えており、在来種を保全するための植生管理をする上で大きな問題となっている。現在ではその対策として、刈り取り管理によ

2. 研究内容

実験1

オオキンケイギクの驚異的な繁殖の原因を解明する
(1) オオキンケイギクの発芽における気温および光の影響

〈目的〉

オオキンケイギクの発芽に最適な環境を明らかにする

〈方法〉

オオキンケイギクの種子は、あらかじめ採取して冷蔵保存したものを使用した。

滅菌済みシヤレ内に、熱湯をかけて消毒しておいたペーパータオル「キムタオル」を敷き、その上に種子20個をのせた。それを8個用意し、10°C、15°C、20°C、25°C設定の恒温器内に入れて、それぞれ2個のうち1個は白色光を当て続け、もう1個はアルミホイルを巻いて光を遮断した。28日間後、発芽数をかぞえそれぞれの発芽率を計算した。この操作を計2回行った（このことをn=2として表す）。なお、28日間は、予備実験によりオオキンケイギクが十分に発芽できると考えられる期間である。

（結果と考察）

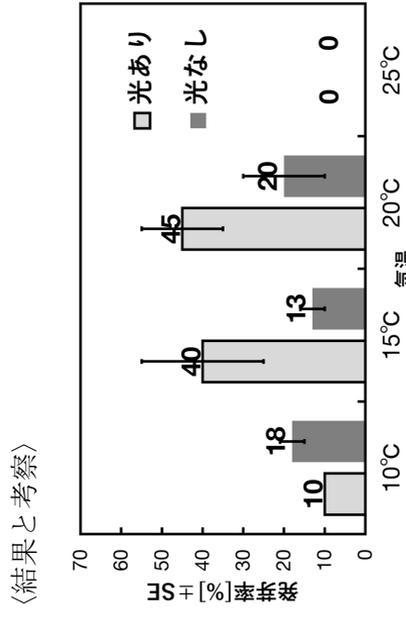


図1 オオキンケイギクの発芽率と気温および光の有無の関係 (n=2)

図1よりオオキンケイギクの発芽率は、光ありと光なしを比較すると、10°Cでは光なし、15°Cと20°Cでは光ありの発芽率が高くなり、25°Cでは光あり、なしの両方で全く発芽しなかった。気温で比較すると、いずれも20°Cで高い値を示した。光ありで20°C環境下にて45%と最も高くなったことから、誤差の範囲も考慮して15°C~20°Cの光照射ありの環境で発芽しやすいと考えられる。したがって、自然環境下では春・秋ごろにオオキンケイギクが発芽しやすいと推測される。

先行研究でも同様な結果が得られており、さらに、オオキンケイギクの種子に一定時間光を照射した後一定時間光のない場所に種子を置くと、

発芽率が高くなることがわかっている。このことから、オオキンケイギクの種子が主に春から初夏にかけて、場合によっては秋に発芽しやすいと考えられている²⁾。

また、結実後に種子が風や雨水等で流されたり、どり着いたときには、土壌の表面に種子が存在し、土壌中ではなく表面なので光が入り込みやすい。よって、本研究で種子の発芽率は光ありの方が高い値を示したことから、たとえ種子が土壌の中に入り込まなくても発芽できるため、オオキンケイギクが繁殖しやすい性質を持っていると推測できる。さらに、かく乱された川の手のような、障害物が少なく光が入りやすい場所でも、容易に発芽するということが推察できる。

(2) オオキンケイギクが自殖可能か

〈目的〉

オオキンケイギクが自殖可能かどうかを明らかにする
(方法)

自然環境下で繁殖しているオオキンケイギクの個体を用いた。まず、開花前の頭花を覆うようにネットをかぶせた。次に、開花したのち、一時的にネットを取り除き、管状花にある雄ずいと雌ずいの部分を筆の毛先を上下させることにより、人工自家受粉させ、再びネットをかぶせた。花弁が散り十分に結実したと考えられた後、ネットを取り除き、頭花あたりの結実した種子と結実していない種子数をかぞえ、結実率を求めた。

また、コントロールとして、自然環境下で生育した袋かけしていないオオキンケイギクの種子の結実率も求めた。

サンプル②



図2 オオキンケイギクの頭花と管状花

〈結果と考察〉

表1 袋かけ人工自家受粉と結実率の関係

サンプル	頭花数	1頭花あたりの総長 種子数の平均値 (個) ±SE	
		結実率の平均値(%) ±SE	種子数の平均値 (個) ±SE
袋かけなし	10	51 ± 5	87 ± 13
袋かけ人工自家受粉	5	42 ± 8	59 ± 12

人工受粉をした場合の結実率は、自然状態より約10%低くなったが、有意な差は検出できなかった ($P > 0.05$ t検定)。

この原因として、サンプル頭花数が少ない影響で有意な差を検出できなかったと考えられる。結実率の低下はあったが、自家受粉でも結実は可能で、オオキンケイギクには強力な自家不和合性が存在しないと考えられる。このことから、1個の種子から生じた1個体でも繁殖し、群落を形成できると示唆された。なお、キク科のなかでは自家受粉も可能な植物は少数であり⁴⁾、したがって、オオキンケイギクの繁殖力が他の植物のそれよりも強いと考えられる。

(3) オオキンケイギクの種子の形状と驚異的な繁殖の関係

〈目的〉

オオキンケイギクの種子や植物の形状から驚異的な繁殖の原因を考察する

〈観察〉

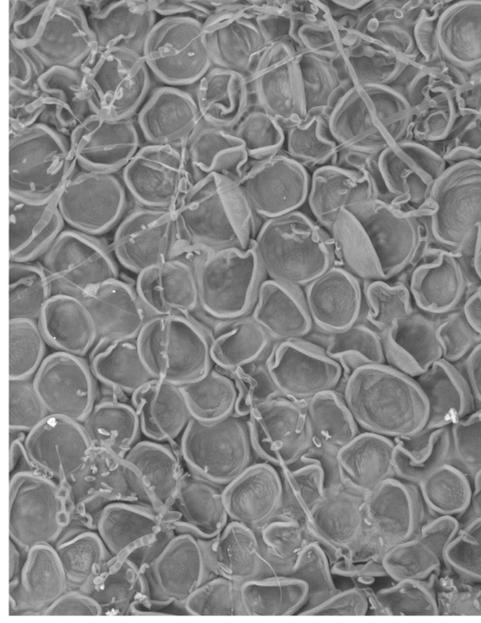
電子顕微鏡 (日立製TM3030) を用いて、オオキンケイギクの種子や植物、花粉を観察した。また、種子を水に浮かべさせて、28日間浮き続けるかどうかを観察した。

〈結果と考察〉



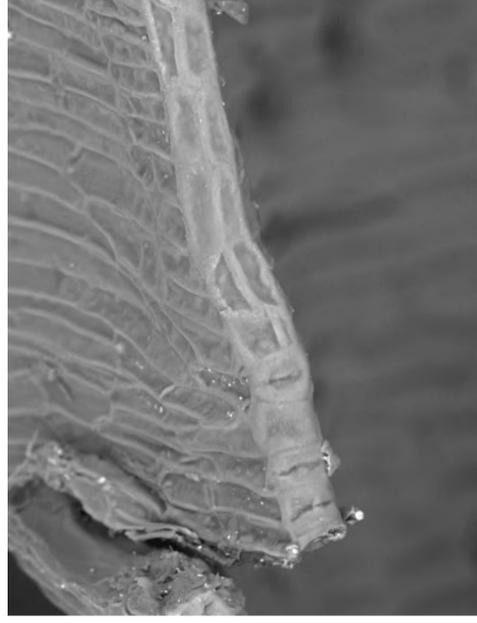
Miniscope 2017/09/13 HL D6.6 x30 2 mm

図3 オオキンケイギクの種子(電子顕微鏡写真)

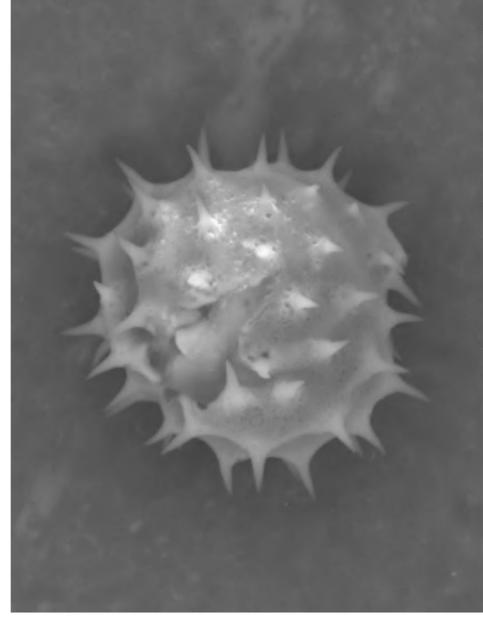


Miniscope 2017/09/13 HL D6.8 x600 100 μm

図4 オオキンケイギクの種子の表面(電子顕微鏡写真)



Miniscope 2017/09/13 HL D5.5 x600 100 μm



Miniscope 2017/10/10 HL D6.4 x3.0k 30 μm

図6 オオキンケイギクの花粉(電子顕微鏡写真)

オオキンケイギクの種子は、翼を持つ瘦果である(図3)。翼でない部分の表面は、多数のひだでできていると観察できた(図4)。さらに、図5より、オオキンケイギクの翼が1~2の細胞の層からできた薄いものであることが確認できた。

オオキンケイギクの花粉は、図6のような棘のようなものがついた、直径約30 μmの球形をしていることが確認できた。この花粉の形態は、キク科植物で多く見られる⁵⁾。棘のようなものは、花粉がさまざまな物質に付着しやすくなるためのもので、オオキンケイギクの花粉は虫媒に適した形をもっていると考えられる。

また、種子は28日間水に浮いていた。以上のことから、オオキンケイギクの種子は風散布と水散布に適した形をもっていると考えられる。

実験II

〈目的〉

オオキンケイギクの発芽を、アレロパシーによって阻害する

〈方法〉

実験IIにおいて、オオキンケイギクの種子は、実験日の数か月前にあらかじめ採取し、天日干しにより十分に乾燥をさせておいたものを使用した。他感作用(アレロパシー)をもつ植物として、サクラ(*Prunus*)の枯れ葉⁶⁾とオニグルミ(*Juglans mandshurica* var. *sachalinensis*)の根⁷⁾を用いた。抽

出液として、実験日の約一年前に採取したサクラの枯れ葉30gと水道水170 mLをミキサーに入れて粉砕し、得られた混合物をろ過したもの(サクラ抽出液とす)と、実験当日にオニグルミの個体から切り取って十分に乾燥させたオニグルミの根15gと精製水85 mLをミキサーに入れて粉砕し、得られた混合物をろ過したもの(オニグルミ抽出液とす)を用いた。

実験I(1)と同様に滅菌をしてペーパータオルを敷いたシャーレ内にオオキンケイギクの種子20個を置いた。このシャーレ5個用意し、それぞれに抽出液AまたはBの原液、10倍希釈、50倍希釈、100倍希釈、水道水を注いだ(図7)。コントロールとして、コマツナの子においても同様の実験を行った。5日経過後にコマツナの、28日経過後にオオキンケイギクの、それぞれの発芽数をかぞえ、発芽率を計算した。

サンプル②

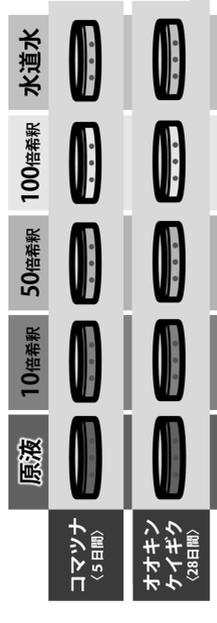


図7 実験Ⅲの手段

〈結果と考察〉

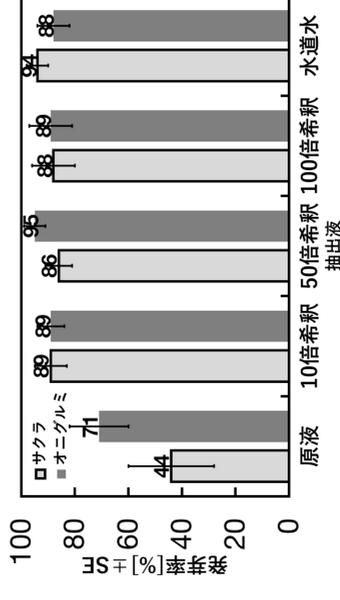


図8 抽出液の種類とコマツナの発芽率の関係 (n=4)