

2022 年度博士学位論文

Doctor Theses in the 2022 Academic Year (April 2022 - March 2023)

博士（学術）学位論文 13 名

課程修了による博士学位

資源循環学専攻

氏名	Weri Herlin
学位記番号	生博 乙第 1076 号
学位記授与の日付	令和 4 年 7 月 20 日
学位論文題目	Fitness performance of immatures under superparasitism and superparasitism strategy in an infanticidal semi-solitary parasitoid (Hymenoptera: Dryinidae): Effects of size of ovipositing females (子殺しを行う準単寄生蜂セグロカマバチにおける過寄生から得る利益と過寄生戦略：産卵雌の大きさの影響)
論文審査委員	主査 教授・塚田 森生 副査 教授・奥田 均 教授・松井 宏樹 名誉教授・山田 佳廣

要 旨

水田ウンカの寄生蜂であるセグロカマバチを用いて、過寄生（同種の個体によって既に寄生されている寄主への産卵）から得る適応度上の利益（主に子の生存率によって決まる）と過寄生時に起こる以下の意思決定への産卵雌の大きさの影響を調べた。①過寄生の受入：過寄生をするかどうか？②産卵場所：卵を先着者（第 1 回産卵雌の子）が産まれた側か異なる側に産むか？卵は寄主の前翅翅芽基部の下側に埋め込まれる。③性配分：雄を産むか雌を産むか？④先着者と異なる側に産卵する場合、先着者を毒針で殺すかどうか？この行動を、以降毒針刺しと呼ぶ。この種は子殺しを行う種である。これまで寄生蜂において産卵雌の行動とその子の生存率に対する産卵雌の大きさの影響は調べられたことはなく、それに関する新知見を得ることを目的として実験を行った。過寄生時との比較のため、単寄生（未寄生寄主への産卵）時

の産卵雌の大きさが子の生存率等に与える影響についても調べた。

単寄生時において、体サイズが大きい雌が産んだ子は、卵から成虫までの生存率が高く、成虫時の体サイズが大きかった。小さい雌が産んだ雌卵の生存率は極めて低かった。

過寄生については、同母と異母過寄生（前者は先着者と後着者の母親が同じ、後者は異なる）における第 1 回と第 2 回産卵の間隔が 0, 1, 24 時間の場合について調べた。異なる側過寄生（第 1 回産卵側と第 2 回産卵側が異なる）において、2 頭羽化（先着者と後着者両方の羽化）が産卵間隔 0, 1 時間の時しばしば起こった。同じ側過寄生においては、これまでの研究を基に先着者が必ず殺されると仮定したが、その仮説が正しいことが確認された。同じ側過寄生の場合の後着者の生存率は、異なる側過寄生の場合の後着者より低いことが多かった。産卵間隔の影響は、毒針刺しがな

い場合の異なる側過寄生の後着者でのみ見られ、後着者の生存率は産卵間隔が長くなるにつれ減少した。産卵間隔 24 時間の同母で、毒針刺しが起こった場合の後着者の生存率は、毒針刺しがない場合より高くなった。異母でも産卵間隔 24 時間の時、その可能性があったが、それ以外の産卵間隔ではなかった。また、毒針刺しがない異なる側過寄生で、第 1 回産卵雌または第 2 回産卵雌が小さい時、異母過寄生時の先着者と後着者の生存率は、同母過寄生時のそれぞれの生存率より高かった。

母親の体サイズの子の生存率への影響が過寄生下でも見られた：大きい母親の子は、高い生存率を示した。ただし、産卵雌と寄主に産まれた個体の間に血縁関係がないとき、その関係は見られなかった。例外が、毒針刺しがない異なる側異母過寄生時に見られた。その過寄生下では、第 1 回産卵雌の大きさは自身の子の生存率には正の影響を与え、後着者の生存率には負の影響を与えた。第 2 回産卵雌の大きさは自身の子の生存率にも先着者の生存率にも影響を与えなかった。こういった現象は、先着者が殺されたときは見られなかったため、産卵雌ではなく、子が出す物質が自分と他者の生存率に影響を与えていると考えられた。そして、大きい産卵雌の子は、小さい産卵雌の子と

比べ、寄主の生理を制御する物質を大量、あるいはより効果的に制御する物質を寄主体内に放出すると考えられた。

大きい寄生蜂雌はほとんどいつも過寄生を受け入れたが、中程度の大きさと小さい雌は産卵間隔が長くなるにしたがって過寄生を受け入れた。小さい雌は、産卵間隔が 0 のとき同母より異母過寄生をより高い頻度で受け入れたが、それ以外の大きさの雌では、産卵間隔に関わらずそういった差は見られなかった。毒針刺しの頻度は、大きい雌と中程度の大きさの雌においては、産卵間隔が長くなるにつれ異母と同母で増加したが、小さい雌では、産卵間隔に関わらずいつも低頻度であった。第 1 回産卵でも第 2 回産卵でも、産まれた卵のほとんどが雄であった。ただし、大きい雌は雌卵を産みやすかった。産卵側の選択においては、先着者と同じ側への産卵を避けやすかった。これらの行動特性は、過寄生から得られる適応度上の利益、同母過寄生であるか異母過寄生であるかを寄生蜂雌が必ずしも識別できないこと、産卵雌の体サイズの大きさの差のため起きる成熟卵保有数、期待寿命、産卵と毒針刺しにかかるコストの差、そして既寄生寄主との遭遇前に産卵に適した齢期の寄主にほとんど遭遇していなかったという実験環境を考慮したとき、適応的であると考えられた。

共生環境学専攻

氏名	DUAN TANGSHAO
学位記番号	生博 甲第 2157 号
学位記授与の日付	令和 4 年 9 月 21 日
学位論文題目	Research on Intelligent Diagnosis Technology of Rotating Machinery by Fault Feature Extraction of Vibration Signal (振動信号の故障特徴抽出による回転機械の知的診断技術に関する研究)
論文審査委員	主査 教授・陳山 鵬 教授・村上 克介 教授・王 秀崙 教授・森尾 吉成 准教授・福島 崇志

要 旨

近年、IoT やインダストリー 4.0 などによる生産設備の知能化、自動化および複雑化などへの進

化に伴って、知的設備診断技術も、設備の重大なトラブルや事故を未然に防止して安全・安心を確保するために必須な技術として益々注目される。

回転機械は農業生産、工業生産に最も多く使用されている設備であり、その重大なトラブルや事故は経済的・人的な被害だけでなく、時には環境にも悪影響をもたらす。回転機械の状態監視・異常診断は簡便さから振動法によるものが主流であるが、振動信号による回転機械診断の場合、設備初期異常時に、または異常部位から離れた場所で測定した診断信号はノイズに強く影響され、異常信号成分が比較的微弱で、このような診断信号から設備異常を検知することが困難であるから、設備異常の早期検出にはまだ多くの課題が残されている。本論文は、これらの課題を解決するために、振動信号の異常特徴抽出による回転機械の知的診断技術に関する研究成果をまとめたものであり、その内容を要約すると次の通りである。

- (1) 現場の回転機械設備の運転条件が複雑なため、診断信号に含まれるノイズは診断精度に悪影響を与え、また、高速回転機械の劣化は動的な過程であり、従来の信号処理方法では有効な異常特徴抽出が困難で劣化状態のトレンドを正確に把握しにくい。本研究では、上記の問題を解決するために、状態空間主成分追跡フィルタリング (SPCTF) によるノイズ除去と異常特徴抽出の方法を提案した。まず、スイッチング・カルマンフィルタリングを用いて、時系列振動信号の動的フィルタリング・モデルを確立し、各モデルの最適なパラメータを同定し、設備状態の特徴情報データを取得する。次に、主成分分析法を用いて、異常状態の特徴情報を抽出し、抽出した特徴信号のエンベロープ・スペクトル分析を行い、異常種類を識別する。提案手法は、少ない事前情報で設備状態のトレンドを有効に把握でき、複雑な背景ノイズを含む振動信号から異常特徴信号を効果的に抽出することができた。様々な回転速度条件において検証した結果、提案した方法により設備状態を比較的確正に識別でき、その有効性と汎用性が検証された。
- (2) 低速 (100rpm 以下) 回転機械においては、異常状態の振動信号が中高速回転機械に比べて比較的弱いいため、異常特徴信号の抽出およ

び異常種類の識別が難しい。この問題を解決するために、改良型ティーガー・エネルギー演算子、オートエンコーダおよび主成分分析による異常診断アルゴリズムを提案した。まず、改良型ティーガー・エネルギー演算子を用いて、低速回転機械の異常振動信号を増強する。次に、増強した異常特徴信号を深層学習のオートエンコーダ・モデルに入力して学習することにより特徴抽出のモデルを確立する。最後に、モデルの隠れ層の特徴パラメータを抽出して異常状態を反映した特徴データを取得した後、主成分分析を行い、学習データと診断データの主成分分布を比較して、異常種類を識別する。提案した方法を低速回転機械 (70rpm, 100rpm など) の状態診断に適用した結果、その有効性が検証された。

- (3) 以上提案した方法は、低速回転機械の状態監視・診断にも有効であるが、深層学習のオートエンコーダのロバスト性が比較的弱く、ネットワークの層を増すと、学習速度が遅くなり、局所最適解に収束する可能性も大きい。早期異常時に、特に学習データと診断データの確率分布の形状差異が大きい場合は、診断の効果が良くない。上記の問題を解決するために、深層学習モデルをボルツマンマシン (CRBM) に置き換えて設備状態をモデル化し、設備早期異常の特徴を抽出する方法を提案した。まず、モデルの可視層を2つの部分に分割し、入力と出力の同時確率分布をモデル化して目的関数を生成する。次に、生成した目的関数を用いて CRBM モデルの学習を行い、学習時のネットワークパラメータを設備状態特徴量として主成分分析を行う。最後に、学習時と診断時の主成分分布を比較して、設備状態を識別する。提案した CRBM モデル法は、学習・識別の効率向上、オートエンコーダ・モデルの局所最適化の問題解決に役立つ。実機の比較実験を通じて、提案した方法は回転機械の早期異常時にもよい診断精度が得られ、その有効性が証明された。

共生環境学専攻

氏名	NAHAR NAJMUN
学位記番号	生博 甲第 2158 号
学位記授与の日付	令和 4 年 9 月 21 日
学位論文題目	Environment-Friendly Sustainable Ground Improvement Using Agro-Waste Aggregate (農業廃棄物骨材を用いた環境に優しい持続可能な地盤改良)
論文審査委員	主査 教授・保世院座狩屋 教授・酒井 俊典 教授・岡島 賢治

要 旨

環境科学者は常に、セメントの代替品としてさまざまなセメント系リサイクル廃棄物の使用を推奨している。ヤシ油燃料灰、粉殻灰 (RHA)、サトウキビバガス灰などの農業廃棄物の利用は、1960 年代後半に建設業界で増加した。天然炭素の農業副産物である RHA は、すべての農業廃棄物の中で最も反応性が高くアモルファスシリカ (85～95%) を含み、すべての農業国が建設業で RHA を使用するようになっている。それは水稻が精米される時に粉殻として作られて、焼却により灰化したものである。世界では毎年 7 億トン以上の水稻が生産されており、粉殻をすべて燃やせば、水稻から約 3000 万～3500 万トンの RHA を作ることができる。RHA 廃棄物の投棄は、軽量なので、オープンエリア、川沿い、低地に廃棄物を投棄すると、環境汚染や人の健康に被害し、離れた場所でも問題が生じる。研究者らは、混和剤として、RHA が環境的に持続可能で経済的に実現可能な地盤改良のセメントに、部分的に置き換えることができることをすでに発見している。

RHA 中の化学組成、粒子サイズ、ボゾラン反応性、およびシリカの状態はすべて、焼却プロセス (燃焼条件、温度、時間、および冷却) と粉碎状態によって決定される。粘土の安定性に対応した種々のセメント比に関した、粉碎されふり分けされた RHA の研究はいくつかあるが、セメントを含む砂壤土に対する種々のセメント比に基づき、精緻に焼却処理された未粉碎の RHA の有効性を評価した研究はほとんど見当たらない。本研究では、(AASHTO 分類による) A-2-4 地盤改良

のための農業廃棄物骨材として未粉碎の RHA を用いた。具体的には、稲作国の新しい住宅、高速道路、商業ビル、トンネル、およびアースダムの地盤改良において、持続可能な建設パフォーマンスのために、地元で入手可能な未粉碎 RHA を用いた。この研究は米を生産する国々で、未粉碎で、地域にあるが、使われていない RHA を、新しい住居、道路、商用ビル、トンネルやアースダムの地盤改良に応用することを強化するために重要である。応用上の利点としては、①セメント生産、環境汚染、廃棄物処理の難しさ、建設価格、天然資源消費を減らすことによって間接的に CO₂ 排出量を削減すること、②地盤の強度と安定性を向上させること、の同時達成を期待している。

本論文では主に 2 つの異なるグループ、①粉殻のみによる地盤改良と②粉殻とセメントによる地盤改良について比較検討を行った。①前者については、土-RHA (0%, 5%, 10%, 15% RHA の土) と②後者については、土-RHA-セメント (0%, 5%, 10%, 15% RHA の土と、0%, 2%, 4%, 6% のセメント) の組み合わせの供試体を作成した。供試体の養生期間は、①について 7 日間で一定としたが、②については一定ではない。各サンプルについて、締固め試験、支持力 (CBR) 試験、圧縮 (UCS) 試験、定水位透水試験、せん断試験、三軸圧縮試験 (CD)、電子顕微鏡 (SEM) 試験、および X 線回折 (XRD) 分析を実施した。締固め試験では、最適含水率 (OMC) と最大乾燥密度 (MDD) を計算し、CBR 実験により支持力 (CBR 値) を決定した。UCS 試験によって、変形係数の値及び圧縮強度を示した。透水試験による透水

係数を計算し、一面せん断試験と三軸圧縮試験による、粘着力と内部摩擦角を計算した。土質試験に SEM および XRD 検査を加えたことによって、土、RHA、セメント及びその複合材の微細構造の変化と発達をより詳しく議論できた。

考察の結果、①土-RHA に関する実験的結果から、RHA の組み合わせが 0 %、5 %、10 %、15 % の地盤では、圧縮性、支持力、一軸圧縮強度、せん断強度及び微細構造が改善されたことが明らかとなった。②土-RHA-セメントの締固め試験

結果は、RHA の増加とともに最適含水比は増加するが、最大乾燥密度は減少した。土-RHA にセメントを添加すると、CBR、UCS、せん断強度、および浸透係数の値がより大幅に改善された。SEM 画像と XRD 分析により、改良地盤の微細構造の発達、粒子間の結合、および化学反応が明らかにした。③一連の実験結果から、環境に優しい持続可能な地盤改良のために、未粉砕の RHA は建設資材として実現可能であることが明らかとなった。

共生環境学専攻

氏名	SONG XUEWEI
学位記番号	生博 甲第 2159 号
学位記授与の日付	令和 4 年 9 月 21 日
学位論文題目	Research on Smart Condition Diagnosis System of Production Equipment-Intelligent Vibration Signal Processing Method for Condition Diagnosis of Rotating Machinery- (生産設備のスマート状態診断システムに関する研究 ―回転機械状態診断のための知的振動信号処理方法―)
論文審査委員	主査 教授・陳山 鵬 教授・村上 克介 教授・王 秀崙 教授・森尾 吉成 准教授・福島 崇志

要 旨

「安全と安心」及び「自然環境を考慮した持続可能な経済発展」が人類にとって重要な共通課題であることは言うまでもなく、人類は生活や社会活動に欠かせない生産設備などの人工物や人工システムの安全性を確保する必要がある。回転機械は農業生産、工業生産に最も多く使用される設備であり、その重大なトラブルや事故は経済的や人的な被害だけでなく、時には環境にも悪影響をもたらす。スマート設備診断技術は、情報工学などの手法を用いて設備状態を自動的に監視・診断する技術であり、今後、生産設備の大型化、高速化、知能化、無人化および複雑化の進行に伴って、生産設備の重大なトラブルや事故を未然に防止する重要な技術としてますます注目される。

本論文は、回転機械の異常を早期に発見し、異

常種類を早期に同定するために、振動情報や知的信号処理などによる回転機械設備の知的状態診断法に関する研究成果をまとめたものであり、その内容を要約すると次の通りである。

(1) 振動信号を用いて生産現場の回転機械設備を状態監視・診断する場合、一般に背景ノイズが比較的強いいため、設備異常時の特性周波数が敏感に抽出できないという問題を解決するために、重み付き尖度に基づく変分モード分解法と重み付き周波数エネルギー演算子に基づくノイズ抑制法を提案した。提案した方法は、設備異常時の特徴信号の増強により、ノイズの影響を効果的に減らすことができ、微弱な異常信号検出に役立つ。提案した方法の有効性は、低速回転機械の異常診断において、シミュレーション信号と実機信号を用いて検

証された。

- (2) 設備状態診断のために測定した振動信号の非定常性と非線形性に対処するために、適応型部分空間フィルタリングおよび 1.5 次元の 3 次パワースペクトルに基づく信号特徴増強法を提案した。最適な埋め込み次元を選択することにより、1 次元の振動信号が高次元空間に拡張され、ハンケル行列が自己決定的に再構築され、ノイズ成分を異常特徴成分から分離することができた。本方法の有効性は高速回転機械の故障診断で検証され、シミュレーションデータと実機データにより、診断信号中の背景ノイズが効果的に除去され、さまざまな回転速度において各異常種類を精度よく識別することができた。
- (3) 現場の設備診断時に測定した振動信号から回転周波数とその高調波を抽出しにくい問題を解決するために、改良された適応型マルチバンドフィルタリング法を提案した。この方法では、理論的な回転周波数を探索中心とし、正と負の偏差内にある最大値を実際の回転周波数成分として抽出して、マルチバンドフィルタリングを構成した。この方法を用いれば、実際の回転周波数とその高調波を正確に同定できるだけでなく、様々なノイズも効果的に除去できるので、異常時の特徴信号を自動的

に抽出でき、異常種類の識別精度が向上できる。提案した方法を回転機械の故障診断に適用した結果、構造系異常時に測定した振動信号の特徴を効果的に抽出でき、異常種類の識別精度がほぼ 100% に達した。

- (4) 設備異常を識別するために、1 次元の振動信号を 2 次元の画像データに変換して異常種類を画像パターンとして直観的に識別する場合がある。しかし、2 次元の画像データに変換した後、異常種類間の差異が鮮明にならないという問題を解決するために、増分累積ホログラフィックの対称ドットパターン (SDP) に基づく特性融合法を提案した。本方法では、まず、単一の特徴パラメータによる異常種類間の特徴差異が小さく識別が困難なことを回避するために、増分累積法に基づいて振動信号の時間領域と周波数領域の特徴パラメータを同時に抽出し、また、抽出された各状態の特徴信号間の差を増強するために、SDP 法に基づいて特徴信号を 2 次元の画像に変換して状態識別を行った。本方法は高速回転機械の軸受異常診断に応用した結果、軸受状態を反映した特徴信号が有効に抽出され、特徴信号が 2 次元の画像に変換された後、各状態間の差異が鮮明に現れ、軸受異常を精度よく診断できることが示された。

共生環境学専攻

氏名	ZHANG KUN
学位記番号	生博 甲第 2160 号
学位記授与の日付	令和 4 年 9 月 21 日
学位論文題目	Bearing Fault Diagnosis Method by Multilevel Spectral Segmentation Theory and Signal Fusion (マルチレベルスペクトルセグメンテーション理論と信号融合による軸受故障診断法)
論文審査委員	主査 教授・陳山 鵬 教授・村上 克介 教授・王 秀崙 教授・森尾 吉成 准教授・福島 崇志

要 旨

回転機械は工業生産、農業生産に最も多く使用されている設備であり、その故障による重大な事故は経済的や人的な被害をもたらすだけでなく、時には環境にも悪影響をもたらす。設備診断技術は、信号処理、情報処理、パターン認識などの手法を用いて設備状態を有効に監視・診断する技術であり、今後、設備の大型化、高速化、知能化、無人化および複雑化が益々進行するに伴い、設備の重大なトラブルや事故を未然に防止して安全を確保する重要な技術として一段と注目されている。回転機械の中にある回転体を支持する軸受は、回転機械に欠かせない最も重要な部品の一つである。軸受到損傷が生じると、損傷による異常振動も発生する。振動診断により軸受損傷を適時に検出し、効果的なメンテナンスやリペアを行うためには、軸受損傷による振動の発生原因や伝播特性、そして正常時の振動との関係および異常時の振動特徴を明らかにする必要があるが、現状では軸受の状態診断にまだ多くの課題が残されている。

本研究では、上記の課題を解決するために、軸受異常時の信号処理法および周期的な衝撃特徴抽出法に関して、モード分解、周波数スライスウェーブレット変換、経験的ウェーブレット変換およびクォータニオン特異スペクトル解析などを最適化することにより、マルチレベルのスペクトルセグメンテーション法、適応型タワー境界分布マップおよび特徴選別指標を提案し、軸受の健康状態を

診断する精度と効率を高めることができた。具体的な内容は以下のようにまとめられる。

- (1) 高速回転で動的な荷重を受ける軸受異常を診断するために、モード分解の適応性向上法および濾波範囲拡張法を提案し、モード分解を単一なバンドパスフィルタから複数周波数帯域を持つ多段可変スペクトルに拡張した。提案した方法は、可変スペクトルセグメンテーションフレームワークを用いて、軸受の診断信号に含まれるモード情報を自動的に分解することができ、軸受異常の特徴を特定できるため、異常検出の精度を高めることができた。提案した方法の有効性は高速回転軸を支える軸受の異常診断により検証された。
- (2) 低速回転で重い負荷を受ける軸受異常を診断するために、周波数スライス関数理論により周波数スライスウェーブレット変換をモード分解に設計・拡張し、周波数領域における特徴成分を高精度に抽出する方法を提案した。周波数スライス関数により各周波数帯域の特徴成分抽出法は、従来のフィルタリング法よりも優れたフィルタ効果を得ることができ、軸受異常時に発生する周期的なインパルス異常信号を敏感に抽出できるため、軸受異常信号を最大限に分離することができる。提案した方法の有効性は低速回転機械の軸受診断により検証された。
- (3) 軸受複合異常（内輪、外輪、転動体異常）を

診断するために、経験的ウェーブレット変換のスペクトル・セグメンテーション・モジュールの最適化法を提案し、信号の包絡線スペクトルにおける高調波の検出指標を持つ非ブラインドソースを設計した。また、高調波スペクトル尖度により包絡線スペクトルの高調波情報を抽出し、軸受異常時に発生する周期的なパルス信号を定量化し、ランダム・パルスなどのノイズの影響を抑制することができた。提案した方法の有効性は実際の軸受診断により検証された。

(4) 軸受診断の精度を更に向上させるために、多

種類信号（振動信号、音響信号、電流信号など）と多チャンネル信号の融合による軸受状態監視・診断法を提案した。提案したクォータニオン・モード分解法は、複数かつ大量のデジタル信号を同時に処理することができ、また、クォータニオン・フーリエトレンド・スペクトル・セグメンテーション法は、二等分周波数を自動的に取得し、信号を複数の周波数帯域に分割するだけでなく、周波数領域においてデジタル信号の複数グループの融合とモード分解を実現できた。提案した方法の有効性は実機信号により確認できた。

共生環境学専攻

氏名	稲垣 陽介
学位記番号	生博 甲第 2194 号
学位記授与の日付	令和 5 年 3 月 24 日
学位論文題目	レーザスペックル法による植物のストレス応答評価 (Evaluation of Stress Responses in a Plant Utilizing Laser Speckle Method)
論文審査委員	主査 教授・村上 克介 教授・王 秀崙 教授・長菅 輝義 教授・森尾 吉成 准教授・福島 崇志

要 旨

データ駆動型農業のさらなる発展のため、温湿度や土壌水分量など環境情報の利用だけでなく、植物体情報を加味した環境制御や肥培管理が加われば、より高品質・多収量の実現、病気の防除等による安定した農業生産が期待できる。すでに光合成能力の指標となるクロロフィル蛍光法や葉緑体の吸光度を利用した葉緑素計などは実用化されているが、環境変化に対して複合的に起こる植物生理応答について、単一の生理指標のみで説明することは難しく、様々な生体情報の計測・利活用が望まれる。

本研究では既存の植物センシング手法と原理が異なり、複雑な植物生体内動態をコヒーレント光による干渉現象の解析から評価するレーザスペックル法に着目した。レーザを物体に照射すると、光が対象表面や内部で拡散してカメラなどの撮像

素子上で干渉する結果、明暗の斑点模様（スペックル）が形成される。対象に動態が存在する場合、光の拡散・干渉条件が時間的に変化するためスペックルの明るさは変動する（スペックル変動）。スペックル変動には、複合的かつ特異的な生体内動態が反映されるため、各種刺激に対応した生理指標の提案が期待できる。そこで、本研究では、レーザスペックル法による植物のストレス応答評価を目的とし、スペックル変動要因の究明とそれに対する適切な解析手法を提案し、植物生理応答の識別・評価を実施した。以下に、本論文の成果を要約する。

1. レーザスペックル法による早期ストレス検出の可能性を調査するため、ダイズ葉における水分ストレス応答の検出可否を検討した。既往の報告で用いられてきた複数の解析手法を適用したところ、いずれにおいてもストレス

応答が検出可能であった。解析結果を画像化することで、水分輸送を担う主脈と側脈では解析値に差があり、葉面の部位によって生理応答が異なることが可視化できた。ストレス応答の検出精度は解析手法ごとに異なっており、植物が有する生理特性を踏まえた解析の必要性が示唆された。また、スペックル変動を引き起こす具体的な生体内動態が明らかでないことも課題として挙げられた。

2. スペックル変動要因となる生体内動態を調査するため、環境変化やストレスによって動態を変化させる葉緑体に着目して、次の実験を実施した。対象として、葉緑体動態の観察を容易にするためオオカナダモを供試した。1つの試料に対してスペックル変動ならびに葉緑体動態の観察を同時刻で実施できる実験系を構築し、電気刺激によって葉緑体動態を抑制し、スペックル変動と葉緑体動態を比較した。解析では、テクスチャ解析をスペックル変動に適応させた手法を提案し用いた。結果、電気刺激直後には葉緑体動態が抑制され、スペックル変動は減衰し、電気刺激除去後は、葉緑体動態は回復し、スペックル変動もほぼ初期状態まで回復した。解析も葉緑体動態を反映する手法として適しており、その有用性が示された。以上より、葉緑体動態がスペックル変動の一因であることが示された。
3. 環境ストレスに対する植物生理応答の識別・評価可能性を調査するため、葉緑体の応答特性を利用して塩分・水分ストレス検出の可否を検討した。塩分・水分ストレスの原因はそれぞれ浸透圧差による吸収阻害と水分不足に

よる吸収不能であり、初期症状が類似する。塩分ストレスの場合のみ葉緑体が肥大化すると報告されているため、前項で示した葉緑体動態を反映するスペックル変動解析が適用できると着想した。実験では、塩分・水分ストレス処理時のスペックル変動の観察と共に、簡易植物生理指標として葉緑素計や葉面温度の計測を実施した。結果、ストレス処理区間でスペックル変動の解析値に差異が確認された。また葉肉部分で解析値に経時的な変化が確認された一方、葉脈部分では変化が確認されなかった。葉脈部は、水や光合成産物の輸送路として維管束が通り、構造上、葉肉部に比べ細胞が少ない。そのため、葉緑体の肥大化やその動態が葉脈部分に比べ葉肉部分で強く反映されたものと考えられた。簡易植物生理指標ではストレス処理に伴うクロロフィルの分解などを反映した結果が確認されたものの、その値の変化率に比べスペックル変動解析の変化率が顕著に大きく表れた。したがって、環境ストレスの識別・評価においてレーザスペックル法が有用であることが示唆された。

以上の成果より、本研究提案の葉緑体動態に着目したレーザスペックル法が、植物のストレス応答評価に有効であり、新たな植物センシング手法ならびに生理指標の提案の可能性を示した。今後、生育段階や植物種ごとに本手法の適用可能性を調査することで、栽培環境の精密な制御からストレスの積極的利用による高品質生産を実現するなど、一層のデータ駆動型農業の発展が期待される。

生物圏生命科学専攻

氏名	伊藤 太一
学位記番号	生博 甲第 2195 号
学位記授与の日付	令和 5 年 3 月 24 日
学位論文題目	Characterization of plant cell wall degrading enzymes from <i>Paenibacillus</i> sp. (<i>Paenibacillus</i> 属の植物細胞壁多糖分解酵素の特性)
論文審査委員	主査 教授・荻田 修一 教授・稲垣 穰 教授・木村 哲哉

要 旨

Paenibacillus xylinclasticus TW1 株は、グラム陽性、通性嫌気性細菌であり、キシロースを唯一の炭素源として生育する。また、多様な糖質関連酵素遺伝子を有し、少なくとも、29 個の糖質加水分解酵素 (GH)、24 個の糖質結合モジュール (CBM)、溶解性多糖モノオキシゲナーゼ (LPMO) 等の遺伝子を持つ。また、*P. xylinclasticus* TW1 株は、化学的前処理をしていない草本系植物バイオマスの分解に関して、植物バイオマス分解性細菌として知られる *Clostridium thermocellum* と同等の分解性を示す。以上のような特徴から、*P. xylinclasticus* TW1 株は、草本系植物バイオマスの分解に利用できることが期待される。

本研究では、*P. xylinclasticus* TW1 株由来の 2 つの糖質関連酵素、GH ファミリー 43 に属する β -キシロシダーゼと補助活性酵素ファミリー 10 に属する LPMO に着目し、それらの酵素の機能解析を行った。

P. xylinclasticus TW1 株に複数存在する GH ファミリー 43 と相同性のある遺伝子のうち、 β -キシロシダーゼをコードすると推定される遺伝子が大腸菌により異種発現し、その遺伝子がコードする酵素の特性を解析した。この酵素は、アミノ酸配列から、GH ファミリー 43 サブファミリー 12 に属しており、触媒ドメインと、その C 末端側に機能未知モジュール (UM) を持つことが分かった。この UM は、触媒ドメインと共に発現し、糖と相互作用すると推定される芳香族アミノ酸残基を多数有していた。また、その構造が β -サンドイッチ構造であると推定でき、そのアミノ酸配列が、CBM として未登録であることから、新規の CBM

であると推定した。

触媒ドメインと UM の機能解析を行うため、それらを発現精製し、解析に用いた。触媒ドメインは、*p*-ニトロフェニル- β -D-キシロピラノシド (*p*NPX) に対して加水分解活性を示し、*p*NPX に対する最適温度、最適 pH は 54 °C、pH 7.1 であった。また、その条件での K_m 値と k_{cat} 値は 1.2 mM、 $2.8 \pm 0.15 \text{ s}^{-1}$ であった。また、キシロビオースからキシロペンタオースまでのオリゴ糖を加水分解した。しかし、不溶性キシランには加水分解活性を示さず、触媒ドメインは、キシロオリゴ糖に特異的な β -キシロシダーゼと判明した。これにより、この遺伝子がコードするタンパク質を *PxXyl43A* と命名した。

UM のオートスペルトキシランへの結合試験では、結合定数 K_a が $2.0 \times 10^5 \text{ M}^{-1}$ でキシランに結合した。この値は既知の CBM の結合定数の範囲にあり、UM はキシランに対して結合特異性を示す CBM と考えた。この UM の配列は既知の CBM と相同性がなく、糖質関連酵素の国際データベース CAZy に新規 CBM として申請をした。その結果、本研究の結果が採択され、UM が新規 CBM ファミリーと認められ、CBM ファミリー 91 が割り当てられた。

以上のように、*PxXyl43A* は β -キシロシダーゼであり、新規 CBM である CBM91 を有していることが分かった。*P. xylinclasticus* TW1 株は、複数のキシランナーゼを有しており、これらの酵素から生じたキシロオリゴ糖を分解するために *PxXyl43A* を使用していると考えた。また、この酵素が有する CBM91 は、酵素触媒ドメインが基質の近傍や表面で反応することに寄与していると

考えられる。新たなファミリーの CBM の発見は、糖質 - タンパク質相互作用の分野に、新たな知見を与えており、既に 1 万を超える配列が、CBM91 に分類されている。

LPMO は、糖質加水分解酵素と同様に、植物バイオマス分解酵素として注目されている酸化還元酵素であり、多糖のグリコシド結合を酸化的に切断する。また、加水分解酵素と相乗的に作用し、多糖類の分解を促進すると考えられている。

P. xylaniclasticus TW1 株には、LPMO に相同性のある遺伝子があり、それがコードする触媒ドメインの C 末端側に CBM3 を有したタンパク質を、異種発現後、精製し、その特性を調べた。機能解析のため、触媒ドメインのみのタンパク質を作製し、酵素特性を調べた。本タンパク質は、セロヘキサオースを分解することができ、その反応産物の質量を、MALDI-TOF/MS で分析したところ、C1 位酸化及び、C4 位酸化の両方から得られる反応産物を検出できた。また、市販セルラーゼ剤と同時に添加してセルロースを分解したところ、セルロースから分解して生じる還元糖量が増加した。

これらの結果から、このタンパク質は C1/C4 酸化型の LPMO であり、PxAA10A と命名した。

微生物由来の酵素による植物バイオマス分解において、長年の研究によりそのメカニズムが解明され、効率良い方法が開発されてきたが、未だ改良の余地が残されている。その例の一つが LPMO であるが、多くが糸状菌に由来するもので、本研究のような細菌由来の LPMO の報告は少ない。本研究では、*P. xylaniclasticus* TW1 株由来の LPMO を調べ、セルラーゼと相乗的に機能することを明らかにした。

本研究では、*P. xylaniclasticus* TW1 株由来の 2 つの糖質関連酵素、PxXyl43A と PxAA10A の機能解析を行った。その結果、PxXyl43A は CBM91 を有する β -キシロシダーゼであり、PxAA10A は C1/C4 酸化型の LPMO であることが分かった。本菌株は、多くの加水分解酵素と、これらの酵素を利用することで、高いバイオマス分解性を示すと考えられる。また、本菌株のバイオマス分解の過程とそのメカニズムの一端を解明することができた。

生物圏生命科学専攻

氏名	瀬田 智文
学位記番号	生博 甲第 2196 号
学位記授与の日付	令和 5 年 3 月 24 日
学位論文題目	褐藻アカモク <i>Sargassum horneri</i> C. Agardh の生態特性に合わせた養殖技術の確立 (Establishment of cultivation techniques for <i>Sargassum horneri</i> C. Agardh based on ecological requirements)
論文審査委員	主査 教授・古丸 明 教授・石川 輝 教授・松田 浩一

要 旨

アカモクは沿岸域の高い一次生産力を支えるガラモ場の主要構成種であり、近年では全国的に食用としての需要が増加している水産重要種でもある。現状では、アカモク原藻の確保は天然の藻体の採集に依存しているが、本種は一年生海藻のため資源の年変動が大きく、近年の急激な利用拡大によるガラモ場の衰退が危惧される。そこで京都

府では、アカモクの生産安定化および藻場の保全を図るため、本種の養殖に関する技術開発を行った。しかし、既存のアカモク養殖手法には、「良質な幼胚を効率的に採取するための手法が確立されていない」、「幼胚の冷蔵保存が不安定」、「種苗生産時に種苗を食害するヨコエビが大量発生する」、「収穫された藻体の藻体長や藻体重量に大きなばらつきが生じる」、「沖出し時の最適種苗サイ

ズが不明」,「収穫適期を見極めるための指標が無い」等,多くの課題があった。そこで本研究では,これらの課題を解決し,本種の生態特性に沿った効率的な養殖技術の確立と養殖生産の安定化を図ることを目的とした。

第1章では,異なる母藻から採取した4つの雌性生殖器床を培養し,生殖器床ごとの卵の放出パターン,日別の落下幼胚数および幼胚の発芽率等を調べた。また,幼胚の冷蔵保存実験により,収容時の幼胚の発生段階の違いが冷蔵保存後の幼胚の発芽率に及ぼす影響を調べた。これらの実験を通じて,アカモク種苗生産における幼胚の採取および冷蔵保存の最適化を図ることを目的とした。

生殖器床の培養実験により,幼胚の落下数,幼胚の仮根保有率および発芽率は,卵放出の回次が後半になるほど低下する傾向がみられることが明らかとなった。また,仮根保有率と発芽率の間には正の相関関係がみられたことから,仮根の有無が幼胚の状態(発芽率の高低)を見極めるための客観的な指標となりうるということがわかった。

幼胚の冷蔵保存実験により,幼胚の冷蔵保存の成否は冷蔵保存時の幼胚の発生段階に左右されることが明らかとなった。仮根を有する幼胚を冷蔵保存することにより,冷蔵保存した幼胚をほぼ100%発芽させることが可能となる。仮根を有する幼胚を効率的に採取するためには,自然落下した幼胚のみを採取することが重要と考えられた。

第2章では,アカモクの種苗生産時に大量発生して種苗を食害するヨコエビの炭酸ガス海水による効率的な駆除手法の確立を目的とした。

4種の実験により,pH 5.0 (CO₂(aq)濃度: 26262 μmol/kg)の炭酸ガス海水にアカモク種苗の食害生物であるニセヒゲナガヨコエビ属の一種 *Sunamphitoe namhaensis* を60分間浸漬することで,種苗にダメージを与えることなく100%駆除できることが明らかとなった。

第3章では,アカモクの種苗生産時に生じるサイズの差が後の成長や湿重量等に及ぼす影響を明らかにすることで,沖出し時の最適種苗サイズを見極めることを目的とした。さらに,成熟藻体に

形成された生殖器床の長さや成熟状況や藻体の湿重量との関係を明らかにすることにより,生殖器床の長さが養殖アカモクの収穫適期を見極めるための指標となるかどうかを検討した。これらの目的のために,水槽実験および海面養殖実験を行った。実験には,一対のアカモク雌雄に由来し,同一の生育環境における履歴を有する茎長の異なる人工種苗(幼体)を供した。これらを,水槽実験では大型の平面水槽内で数mに達するまで,海面養殖実験では中層延縄式の養殖施設で収穫サイズまで育成した。

水槽実験により,種苗生産時に生じる数cmから十数cmのサイズの差が養殖アカモクのその後の成長に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。海面養殖実験により,種苗サイズの差が養殖アカモクの生残率,湿重量(収穫量)および成熟にも大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

本章の研究により,アカモク養殖において大型で大きさの揃った藻体を収穫するためには,湿重量と生残率の両方の面で優れ,藻体間の成長のばらつきを抑えることが可能な茎長50mm以上の種苗を養殖用種苗として使用することが重要と考えられた。また,雌性生殖器床の大型化に伴って生殖器床の成熟(放卵)が進行し,生殖器床長と湿重量の間には有意な回帰式が得られたことから,生殖器床の長さが本種の収穫適期を見極めるための客観的な指標となりうるということがわかった。

本研究で養殖アカモクの安定生産の妨げとなっていたいくつかの大きな課題を解決し,今後の明確な養殖の作業方針(マニュアル)を示すことができた。この研究により,アカモク養殖の生産性や安定性は飛躍的に向上しつつある。本研究で得られた知見は,2019年以降京都府のアカモク種苗生産および養殖現場に導入されてきた。その結果として,京都府宮津市養老地先(アカモク養殖の一大漁場)における養殖アカモクの生産量(出荷時の可食部湿重量)は,2020年以降10t以上で維持されるようになった。このように,本研究で確立した技術は,アカモク養殖の安定化に大きく貢献するものである。

論文提出による博士学位

氏名	孫 塤
学位記番号	生博 乙第 1086 号
学位記授与の日付	令和 5 年 3 月 24 日
学位論文題目	中国における地理的表示制度の展開と産地振興への効果と課題 (Development and Subject of Geographical Indication System in China)
論文審査委員	主査 教 授・常 清秀 教 授・松村 直人 教 授・名田 和義 准教授・野中 章久 名古屋大学大学院生命農学研究科 教 授・徳田 博美

要 旨

地理的表示制度は、ヨーロッパ諸国で創設され、1994 年に合意された GATT ウルグアイ・ラウンドの「知的所有権の貿易関連の側面に関する協定」(TRIPS 協定) で知的財産権として認められたことで、世界的に導入が進んだ。その中でも中国は、登録品目数が飛び抜けて多く、地理的表示制度が最も普及している国の一つとなっている。中国で地理的表示制度が広がった背景には、この間の WTO 加盟など、グローバリゼーションへの対応もあるが、「三農問題」、すなわち、都市農村の経済格差の問題(農村問題)、農業産業化のレベルが低い(農業問題)、農村の貧困問題(農民問題)の解決策としての農業振興策の中に位置づけられていることがある。そのため、中国における地理的表示制度に関しては、その導入によって、地域農業の発展、産地振興にどのような効果が期待できるのか、またその実現のための課題は何かを明らかにすることは重要な課題である。本論文では、地理的表示登録品目数が最も多い山東省の 2 つの産地を事例として、地理的表示制度が産地振興に及ぼす効果と課題を実証的に明らかにした。

第 1 章では、中国における地理的表示制度の概要と既往研究を整理した。中国では地理的表示制度が後半に普及していく中で、地理的表示制度に関する研究は数多くなされている。その多くは制度の特徴や課題、期待される効果や消費者の認知度に関するものである。地理的表示制度導入産地に関する事例研究もみられるが、生産者などの行

動にまで立ち入った実証的調査を行っているものはわずかである。本論文では、生産者など関係者の行動にまで立ち入った実証調査に基づいて、地理的表示制度の効果と課題を検討した。

第 2 章では、中国における地理的表示制度の全体的な動向を分析した。中国では 1 万近い地理的表示登録品目があるが、その内容は多様である。本来の地理的表示制度は、地域の伝統産品で、一定の社会的知名度を得ている産品を保護し、「産地を守る」ことを目的としている。中国においても、そのような地理的表示産品もあるが、むしろ、まだ社会的知名度は低く、これから産地発展を目指している品目が地理的表示登録産品には多い。これは、中国の地理的表示制度では、三農問題対策としての産地振興が期待されていることがあると考えられる。そのため、中国における地理的表示制度では、「産地を守る」機能とともに、「産地をつくる」機能が期待されていると言える。本論文でも、「産地をつくる」機能という観点から、地理的表示制度を検討した。

第 3 章、第 4 章では、2 つの産地の実証分析を行っている。第 3 章で取り上げた事例産地は、山東省沿海部にある栄成市のイチジクである。栄成市では、リンゴをはじめとする様々な果樹が栽培されているが、イチジクはこれから振興を目指している品目である。イチジクは、地理的表示登録以降、販売価格はある程度上昇し、出荷地域の拡大がみられるなど、地理的表示登録の効果はみられる。しかし、その販売実態をみると、流通過程

で地理的表示がなされている品目は多くはない。その要因には、流通チャネルが従来の仲買業者を通じたもののままであり、このチャネルでは流通過程での地理的表示の管理が困難なことがある。また生産者に対するアンケート調査では、多くの者が地理的表示登録を認識してなく、地理的表示登録が求める生産・品質管理を遵守していなかった。栄成市のイチジクでは、地理的表示登録を地域でマネジメントする主体が明確でなく、それを十分に活かしかけていない実態が明らかになった。

第4章では、山東省内陸部の肥城市のモモを取り上げた。肥城市のモモは、長い歴史を有しているが、近年は生産が減少傾向にあり、その再振興が課題となっていた。肥城市では、地理的表示登録前から産地振興組織の設立、品種、技術の開発、普及などの総合的な産地振興策を進めていた。その過程で地理的表示登録も行われた。登録後も生産者組織、出荷組織の育成、ネット販売に向けた支援などを行ってきた。その結果、流通チャネル

は既存の仲買業者を通じたモノから、農民專業合作社が主体となり、ネット販売が主要なチャネルの一つとなり、ほとんどのモノで地理的表示がなされるようになった。肥城市のモモは、地理的表示登録による産地振興の成功事例と位置づけられるが、その要因は地理的表示登録のみでの産地振興ではなく、総合的な産地振興の中に地理的表示登録を位置づけ、その効果をより高めたことにある。

終章では、研究全体を取りまとめ、中国における地理的表示制度を産地振興に活かしていく上での課題を提示した。産地振興の中での地理的表示の役割は、農産物の品質基準などの明確化や消費者へのブランド浸透などにより商品力を向上させ、生産者の組織化を促進し、産地体制の構築に資することにあると考えられる。このような地理的表示の役割が発揮できるような総合的な産地振興の取組みが、中国における新たな「産地をつくる」ことを目指した地理的表示では、重要な課題である。

氏名	石井 正孝
学位記番号	生博 乙第 1087 号
学位記授与の日付	令和 5 年 3 月 24 日
学位論文題目	光周期の操作によるエゾバフンウニおよびキタムラサキウニの成熟促進に関する研究 (Study of Promoting Gonadal Maturation by Photoperiod Manipulation in the Sea Urchins <i>Strongylocentrotus intermedius</i> and <i>Mesocentrotus nudus</i>)
論文審査委員	主査 教授・村上 克介 教授・陳山 鵬 教授・古丸 明 玉川大学大学院農学研究科 教授・増田 篤稔 向阪技術士事務所 所 長・向阪 信一

要 旨

ウニの成熟が日長の影響を受けることは海外では古くから知られ、1970年代から様々な種で日長の変化と成熟の関係が調べられてきた。しかし、国内では1980年代後半に、本州沿岸に多く分布するバフンウニ、アカウニ、ムラサキウニの3種において、成熟は水温にのみ影響され、日長には

左右されないと報告された。ウニの種苗生産施設では成熟促進技術が求められるが、国内の種苗生産施設ではこれまで水温調節による成熟促進のみが試みられてきた。しかし、北日本に分布するエゾバフンウニ *Strongylocentrotus intermedius* 及び東日本に分布するキタムラサキウニ *Mesocentrotus nudus* の成熟と水温などの環境要素との関係については

明確にされていなかった。そこで、この2種類のウニの種苗生産における成熟促進手法を開発するために、北海道日本海沿岸で採取したウニを冬至から飼育し、海藻給餌や夏季の水温調整、および冬至からの光周期の変化を加速させるなどの環境操作を行い、成熟状況を比較した。成熟状況は月々の生殖巣指数（Gonad Index: GI）や組織観察により成熟ステージを判定するとともに、口器と体腔液を除いた後にろ過海水を体腔内に注ぎ生殖孔からの放精放卵する産卵反応の有無を確認した。

S. intermedius において、成熟に影響する可能性がある飼育環境要因の一つとして海藻給餌による効果を調べるため、2000年12月から2001年11月まで陸上水槽において給餌飼育したウニ（Experimental urchin: EU）と天然海域のウニ（Wild urchin: WU）の成熟状況を比較した。その結果、産卵以前の両者のGIと成熟ステージは類似し、海藻給餌が成熟を促進する効果は認められなかった。しかし、それらには産卵期間において両試験区間で有意差があり、海藻の飽食給餌は産卵期間を延長し、生殖巣の減少を遅延すると考えられた。

また、高水温に弱い本種において、夏季の水温上昇を抑制することによる成熟への影響を調べるため、2001年5月から11月までの期間において夏季の水温を18℃に冷却して飼育したウニ（Cooling water: CW）と調温せず飼育したウニ（Control: C）と成熟状況を比較した。その結果、産卵以前の両試験区のウニのGIの変化はほぼ同様であり、成熟を促進する効果は認められなかった。しかし、CWでは1ヶ月早くGIが減少し放出期のウニが出現したことから産卵したと考えられた。これらの結果から夏季の水温の冷却は成熟を促進するプラスの効果は示されなかったが、産卵の遅れを抑制し、種苗生産プロセスの安定化に貢献すると考えられた。

光周期の操作による*S. intermedius*の成熟促進の効果を調べるため、1999年と2000年の12月から翌年8月と11月まで、1年間の光周期の変化を8ヶ月及び6ヶ月と4ヶ月に短縮させた3通りの条件下（Photoperiod treatment: PT, PTI, PTII）と自然日長下（Control）で飼育実験を行い、成熟

状況を比較した。変化を加速したいずれの日長下で、ウニは自然日長下より2～3ヶ月早い6～7月に成熟し、得られた卵と精子による受精卵は問題なく稚ウニに成長した。これらにより日長の変化を加速することは本種の成熟促進と早期採卵に効果的であると結論できる。また、日長の減少後に配偶子形成を終えたステージのウニの出現と産卵反応個体の減少が確認でき、秋分の頃の長日から短日への日長の変化は配偶子形成を終える合図である可能性がある。

同海域で*S. intermedius*と同時期に成熟する*M. nudus*について、2001年から2004年に12月から9～11ヶ月間、光周期を操作してウニを飼育し、自然海域のウニと併せて成熟状況を比較した。試験では、2つの冬至の間の日長変化を6ヶ月（PT1）、10ヶ月（PT2）、8ヶ月（PT3）に短縮させ、また、自然の光周期の変化を2ヶ月間前倒したPT4と自然日長を模したPT5を設定した。光周期の変化の短縮や前倒を行ったいずれにおいても、ウニは8月に成熟し、沿岸のウニや自然の光周期を模したウニより1ヶ月、成熟が促進された。これらにより、*M. nudus*において光周期の変化の加速や前倒しが成熟促進に効果があることが示された。また、日長の減少後に成熟個体や産卵反応個体が減少したことから、日長の減少が成熟の終了の引き金になっている可能性がある。

著者は北日本及び東日本に分布する2種のウニについて、光周期の変化を加速するなどの操作により成熟が促進し、種苗生産において早期の配偶子の採取に有効であることを実証した。また、長日から短日への日長の減少が配偶子形成や成熟の終了に関係する可能性があるなど、*M. nudus*は成熟と光周期との関係性において*S. intermedius*と類似点があることを報告する。ヒーターや温泉熱、冷却機や深層水の導入など大きな初期投資を要する水温制御と比較して、光周期の制御設備は整備や運用の経費が安価で、利用可能な地域を限定しない利点があり、光周期の操作による成熟促進技術は実用的な方法である。

氏名	辻 威彦
学位記番号	生博 乙第 1088 号
学位記授与の日付	令和 5 年 3 月 24 日
学位論文題目	天然未利用資源を活用した食品素材の創出とその機能性評価 (Creation of food materials utilizing unused natural resources and evaluation of their functionality)
論文審査委員	主査 教授・木村 哲哉 教授・荻田 修一 教授・田丸 浩 鈴鹿医療科学大学 特任教授・学長付・奥村 克純

要 旨

ヒトの衣食住の生活様式において、食品の役割は極めて高く位置付けられる。食品を通じて生命機能を維持するために必要な栄養素やエネルギーの供給（一次機能）は言うまでもないが、美味しさを与え食事を豊かにする食品の嗜好性に対する機能（二次機能）に次いで、医食同源の観点から生体調節機能や生体防御機能である三次機能が注目されている。私が所属する辻製油株式会社は、食用植物油の製造を始め、食品添加物の大豆レシチンや農産物加工食品を提供してきたが、食品加工においては、風味や外観を良くするために、原料に含まれる生理機能を有する部位や成分を除去してしまい、これらを十分に活用できず、未利用資源として排出してきた。しかし、近年になりSDGs達成が社会の大きな目標となったことから、これら未利用資源の最大限の活用と食品の三次機能に着目し、研究に取り組むこととなった。本研究においては、これまで食用油脂の製造から培ってきた有機溶剤による抽出と高度加工精製を基盤とした研究技術を駆使し、未利用資源を再生活用した脂溶性成分を主とした新たな食品素材の創出を目的とした。その結果、複数の素材から機能性が期待される成分が得られ、さらにこれらの生理機能性評価を行い、食品素材として付加価値の可能性をもつ成分を複数見出した。

第一章では、油脂の精製工程で得られる副産物を活用し、新たに開発したキャノーラ油の機能性を評価した。この油は従来の製品と比べ、3倍以上の総トコフェロール (α , γ , δ -Toc) を有し、同族体の比率は同様である。 α -Toc は生体内で抗酸

化を担うビタミン E として知られているが、近年の研究において、同族体の γ -Toc についても利尿や体外へ食塩の排出を促進する特異的な機能が報告されている。そこで、 γ -Toc を多く含む油脂を連続的に摂取させることで、過剰摂取した食塩の体外への排出やその他の影響が見られるかについて、高食塩食負荷ラットを用いて評価した。その結果、28 日間の γ -Toc 連続摂取 (30.5 mg/kg/day) において、摂取量とほぼ等しい食塩が尿から排出され、通常油脂の摂取群 (コントロール群) と比較して、食塩の排出には有意差は見られないものの、尿量の増加が認められた。さらに、試験終了後に行った血液検査では、食塩の過剰摂取により上昇したと考えられる血糖値が、Toc 含有量を高めた油脂を摂取した群では、他群と比較して低下していた。この血糖値の違いは、 γ -Toc 摂取が肝臓における Toc の代謝バランスに作用した可能性が考えられた。血中に運搬された γ -Toc は、インスリン受容体に直接的に作用する、または、間接的に脂肪細胞に作用し、アディポネクチンの分泌を増加させ、細胞へ糖の取り込みを促進させていることが推定された。

第二章では、油脂の製造に使用する有機溶剤 *n*-ヘキサンを用いて、未利用資源であるショウガの搾汁粕から抽出したショウガヘキサン抽出物 (GHE) の生理機能性を評価した。ショウガの加工から排出される搾汁粕をヘキサンで抽出することで、力価が強い天然香料が得られる。また、この抽出物にはショウガの油溶性成分が濃縮されており、これらの成分のモノアミン酸化酵素 (MAO-A & B) への作用を *in vitro* 発光測定系で調べた。MAO は、

モノアミン代謝による神経伝達 の不活性化や強い酸化作用を持つ過酸化水素の産生を行うため、この酵素活性の阻害成分は脳機能の低下を改善することが期待できる。活性阻害を評価した結果、GHE に含まれる gingerol 類は MAO-A を選択的に阻害し、MAO-B は 1-dehydro-[6]-gingerdione により顕著に阻害された。これらの結果から、GHE は脳機能改善を意図する機能性食品の開発に繋がる可能性が考えられる。

第三章では、柑橘類の加工で生じる未利用資源の果皮を活用し、これらから *n*-ヘキサン抽出を行い、得られた油溶性抽出物の機能性を評価した。ゆず、すだち、かぼすの三つの果皮から得られた抽出物には、それぞれの柑橘類が持つ特徴的な香气成分が濃縮され、既に機能性が報告されている成分も含有していた。そこで、これら抽出物の抗肥満作用について、前駆脂肪細胞 3T3-L1 の分化誘導系を用いて評価した。分化誘導時にそれぞれの抽出物进行处理した結果、かぼす抽出物 (CSHE) において、脂肪滴が蓄積抑制された。さらに

CSHE で処理した細胞から RNA を抽出し、RNA-Seq 法で解析したところ、1180 遺伝子の発現変化が見られ、発現情報をもとに行ったパスウェイ解析から、糖質代謝の低下や β -酸化の促進が示唆された。また、CSHE に含まれる成分をシリカゲルクロマトグラフィーで分画した結果、ヘキサン：エタノールでの溶出画分に脂肪滴の蓄積抑制が見られ、LC/MS などを用いて解析した結果、この画分には水酸基を有するポリメトキシフラボン類が含まれていることが明らかとなった。

以上、食品加工から発生する未利用資源を活用し、従来の食品に機能性を付加する、または、未利用資源に秘められている機能性成分を含んだ新たな食品素材の創出に結びつけた。今後、これらの作用については、*in vivo* 評価やヒト試験によって有効性を検証し、作用の増強や相乗効果を目指した研究を行うことで、健康食品や機能性表示食品の設計の一助とすることができ、食を通じた健康維持に貢献する製品の実用化に繋がると期待できる。

氏名	石崎 大介
学位記番号	生博 乙第 1089 号
学位記授与の日付	令和 5 年 3 月 24 日
学位論文題目	中部日本におけるウグイの生活型多型に関する研究 (Study on the life history polymorphism of the Japanese dace <i>Pseudaspius hakonensis</i> in central Japan)
論文審査委員	主査 教授・吉岡 基 教授・神原 淳 教授・河村 功一 准教授・淀 太我 准教授・森阪 匡通

要 旨

ウグイ *Pseudaspius hakonensis* は日本産コイ科魚類で唯一、河川残留型と降海型が存在する種である。ウグイの降海型の割合は北方ほど高く、降海要因はサケ科魚類と同様、河川と海域との生産力の差により生活型が決定される有効餌料仮説が有効とされているが、分布域の比較的南方に位置している三重県の河川や滋賀県琵琶湖には、降海型ないし降湖型が存在する。そのため、ウグイの回遊には有効餌料仮説以外の要因が関与している可

能性がある。サケ科魚類では環境変動や種間競争が個体密度や成長に影響するため、結果的にこれらが生活型の選択にも影響することが知られている。そこで、中部日本の三重県加茂川と琵琶湖において、ウグイの回遊生態を解明するとともに、他魚種との種間相互作用の把握を行い、生活型に多型が維持されている要因について考察した。

第 1 章では、三重県加茂川の通し回遊型のウグイについて、回遊生態の把握と河川内における他の雑食性遊泳魚との食物をめぐる種間相互関係を

把握した。第1節では、降海型が存在すると予想された当河川において、春に産卵蛸集した個体について、耳石微量元素分析により回遊履歴を推定した。94個体の耳石中心から縁辺部までの線分析の結果、93個体で海域生活期が認められ、耳石半径と標準体長との関係から、これらの降海体長は最小18 mm、最大個体234 mm、降海年齢は当歳または1歳と推定された。一部の個体は降海後、再度の淡水生活期が認められたが、産卵前には再び海域生活に移行した。したがって、当河川のウグイはほとんどが当歳か1歳で降海し、一部の個体は淡水生活と海水生活を繰り返した後、産卵期に河川に遡上すると考えられた。第2節では、耳石微量元素分析と採捕調査により降海時期を推定した。その結果、純淡水域の産卵場付近では当歳魚と1歳魚のCPUEは春から夏にかけて減少し、同時期に汽水域で当歳魚が出現した。汽水域で採捕された1歳魚には、耳石微量元素分析により降海直後と判断された個体が存在し、それ以外の個体については降海時の推定体長から当歳で降海したものと推定された。したがって、当河川のウグイは、当歳か1歳の春から夏にほとんどの個体が降海すると考えられた。第3節では、アユ、ウグイ、オイカワ、カワムツの食物重複度をアユ遡上前の春、アユの存在する夏、アユの産卵死後の冬の3回に渡り調査した。その結果、コイ科3種の食物重複度は1年を通して高く、夏季において、ウグイはアユ、オイカワ、カワムツの全てと高い重複度を示した。このことから、河川での魚類の競合がウグイの生活史に影響を与えている、すなわち、降海の一要因になっているものと考えられた。

第2章では、琵琶湖と流入河川の石田川を回遊する非通し回遊型のウグイについて、回遊生態および河川環境とウグイの生息の有無の関係を把握した。第1節では、採捕調査と淡水域間の回遊には適用できない耳石微量元素分析の代替手法とし

て窒素安定同位体比分析を用いて当河川のウグイの回遊生態を調査した。その結果、4月から5月の浮上後、当歳魚CPUEが産卵場である流入河川域での急速な低下と同時に琵琶湖沿岸で上昇したことから、当歳魚は孵上後すみやかに降湖したと考えられた。一方で、9月から10月には、流入河川下流域においてウグイのCPUEが上昇し、それらの個体の窒素安定同位体比は上流で採捕された個体だけではなく、琵琶湖沿岸で採捕された個体とも同様な値を示し多様であった。したがって、この時期に下流域で採捕されたウグイには、上流から降下してきた個体と琵琶湖沿岸から遡上してきた個体が混在していると考えられた。このことから、石田川のウグイは多くの個体が浮上後直ちに琵琶湖に降湖するものの、一部の個体は琵琶湖流入河川に秋季に遡上すると推定された。第2節では、琵琶湖流入6河川において、秋季に33か所、春季に34か所で採捕調査を行い、河川環境とウグイの生息の有無を一般化線形混合モデルを用いて解析した。その結果、秋季には「河口からの距離」、「電気伝導度」、「溶存有機炭素」といった河川環境とウグイの生息の有無との間に有意な関係が認められ、いずれも負に相関していたことから、秋季のウグイは琵琶湖から遡上し、有機汚濁の進んでいない河川を選択していると推察された。

以上の異なる2水域のウグイの生活史に関する調査結果から、その生活型の選択には、①降海ないしは降湖による大型化、②降海ないしは降湖による生残率の低下、③河川におけるアユやコイ科雑食性遊泳魚との競合、④海（琵琶湖）までの移動コストが複合的決定要因となって存在することが示唆された。そして、中部日本においては、ウグイとニッチの競合する河川性の雑食性遊泳魚が多いことから、③の種間の競合が大きな要因となっていることが考えられた。

氏名	江崎 貴久
学位記番号	生博 乙第 2193 号
学位記授与の日付	令和 5 年 3 月 24 日
学位論文題目	漁村地域における無形観光資源の創出と活用及び評価に関する実証研究 (Empirical research on the creation, utilization and evaluation of intangible tourism resources in fishing village areas)
論文審査委員	主査 教授・常 清秀 教授・松村 直人 教授・松田 浩一 准教授・野中 章久

要 旨

漁業と観光業は、漁村地域の経済を支える基幹的産業であり、また、両者が「持ちつ持たれつ」の関係にある。しかし、1980 年代後半以降、水揚げ量の減少が主因として、漁業が産業として衰退しつつある状況にある。漁村地域の衰退は、一次産業が観光に提供している自然環境により形成された漁村風景の維持、および漁村地域社会に生きてきた人々の暮らしにより形成されてきた文化の継承や伝承に困難さを増すことになる。また、漁村地域の衰退は漁業生産により得られた自然の恵みである食の魅力の低下をもたらすことにもなる。つまり、漁村地域の衰退はその地域の観光資源の減少を意味する。漁村地域の活力の源泉である水産資源の減少が続く中、漁村地域に訪れた観光客に高い満足をどう維持させるのかは、漁業者、観光事業者や地方自治体を含む地域全体が直面している共通課題である。

本研究は、この地域的課題の解決に向けて、三重県鳥羽市を研究対象地域とし、漁村地域において、持続可能な漁業に資する無形観光資源の創出、それらの活用方法と効果について一連の実証的研究を行い、章ごとにそれぞれいくつかの点を明らかにした。

第 1 章では、漁業生産の現場から漁業者の“誇り”を起点に持続可能な漁業に寄与できる「資源管理」と「伝統漁法」を洗い出し、また、これらの資源要素は観光客の漁村地域での観光対象物としてのニーズに適応可能であることが確認できた。さらに、これらの無形観光資源を可視化するには、体験プログラムが有効であることを明らかにした。

第 2 章では、無形観光資源の活用により漁村地

域に経済的効果と社会的効果のいずれにおいても一定の効果をもたらしたことを明らかにした。

本章では、「資源管理」と「伝統漁法」を無形観光資源として、観光プログラムを開発し、活用している観光事業者を対象として、観光プログラムの概要と特徴の整理、および利用実態の把握を行った上、無形観光資源の活用により漁村地域にもたらす効果を経済的効果と社会的効果の双方の視点から考察を加えた。経済的効果については、分析対象とする無形観光資源を活用した観光プログラムの実施によりもたらされた経済的価値で確認した。社会的効果については、漁業に対する理解への変化、資源管理に対する関心度の変化、さらにそれらの変化に伴う観光客自身の行動等を通じて考察した。

それにより以下 5 点が明らかになった。1 点目は、観光客が無形観光資源を活用したプログラムに対して認知されていること。2 点目は、プログラム参加者に参加前後での意識変化が見られ、関心事の幅の広がりや深化が確認できた。3 点目は、プログラムへのリピート意欲、および漁村への貢献意識がともに高くなったこと。4 点目は、観光資源を活用したプログラムへの参加者数が増加傾向になり、観光事業者の収益増を実現し、一定の経済効果があること。5 点目として、観光客の再来訪意欲の高さと実際のリピーター率の低さのギャップが大きいことは課題として抽出された。

第 3 章では、第 2 章で抽出した課題に向けて、観光客を対象として、観光客の無形観光資源である「資源管理」と「伝統漁法」に対する認知度と、それと観光志向（消費行動）との関連に焦点を当てて、アンケート調査を実施し、その分析により

以下の点を明らかにした。

第1点目は、全般的に「資源管理」より「伝統漁法」に対する認知度が比較的高いこと。第2点目は、「海」は観光客の日常において身近に活用されている資源としての実態があり、観光資源としても最上位（約8割）で認識されている反面、その資源としての持続性を担保する「資源管理」は、「海」と結びついていないこと。第3点目は、「資源管理」は「伝統漁法」と比較して、観光客自身の関心に対する認識が困難であること。第4点目は、「伝統漁法」について約25%の人が漁業の手段として認識していない点である。第5点は、多くの観光客が「資源管理」（9割）と「伝統漁法」（7割）は持続可能な漁業に繋がると認識しているが、持続可能な漁業と自分との関わりについて認識していない人（4割弱）が多く存在していること。

第6点目は、「資源管理」については、10歳代・20歳代は上の世代より認知度は高いが、持続可能な漁業と自分との結びつきの認識はやや高い程度であり、他の世代と大きな差はないこと。第7点目は、観光客は、自分なりの漠然とした認識と生産側の意図とは違った認識を持ちながら、「資源管理」や「伝統漁法」と持続可能な漁業を理解する観光プログラムへの参加意向を持っていること。

終章では、全体をとりまとめ、漁業と観光業の共創による持続可能な仕組みづくりに、無形観光資源は経済的・社会的に機能することを提示した。持続可能な漁村地域の実現に向けて、漁業と観光業の一体的な循環システムの必要性、及び漁業と観光業双方からの学術的なアプローチの意義について示した。