

平成24-25年度 岩手大学 地域課題研究支援事業

平成24～25年度
地域課題研究報告書

平成27年1月

岩手大学 研究推進機構

地域課題研究支援事業報告書（平成24～25年度）の編纂にあたって

岩手大学地域課題研究支援事業について、平成25年度末に終了した課題研究の成果を報告書としてまとめ、構成員のみなさまにご紹介いたします。

本支援事業は平成22年度からスタートしました。平成23年度までに終了した研究課題についてはすでに報告書がまとめられており、本報告書は平成24年度以降にスタートした課題研究8件についての報告書となっています。

本支援経費は、産業、学術文化、教育等に係わる地域課題研究や特色のある研究に積極的に取り組み、成果の社会還元を進めるとともに、本学の教育研究活動のさらなる発展に寄与し、“岩手大学ブランド”の創出に繋がる研究を推進するために創設された、学内競争的資金です。なお、本支援経費による成果が社会に還元されるとともに、第2期中期目標期間評価において、Sレベル以上の評価に繋がることも期待しています。

支援対象としては、（1）これまでに研究実績を有する個人または研究グループ、（2）ここ数年のうちに成果が期待される個人または研究グループであり、支援分野としては、地域を対象としたグリーン・イノベーション、ライフ・イノベーションの推進に幅広く寄与する課題や“岩手大学ブランド”の創出に繋がる研究分野です。分野の具体的例示としては、（1）教育・福祉・防災に関する地域ネットワークづくりの分野、（2）地域文化・民族分野、（3）地域および現代の教育的諸課題分野、（4）地域資源を活用した6次産業の推進による地域活性化の分野、（5）金型・鋳造・複合デバイス・機能材料分野、（6）動物・獣医学、食の安全・安心の分野を挙げています。

2年間での総支援額は3,200万円であり、限られた経費でありましたが、支援経費本来の目的に則した研究成果が得られたものと考えています。

本報告書をご覧いただき、構成員のみなさんの今後の研究についての参考にしていただければ幸いです。

平成27年1月
理事（総務・研究・復興担当）・副学長
西谷 泰昭

目次

はしがき

I 平成24年度採択課題

平泉国際交流展「アートでつなぐ・2012-2013」

(平泉をテーマとした芸術文化側面からの震災復興支援に関わる研究)

教育学部 教授 藁谷 収 …… 1

マイクロ波センサを用いた農園における鳥獣検出システムの実現

工学部 准教授 本間 尚樹 …… 7

タンパク質膜挿入反応に必須の糖脂質酵素MPIase (Membrane Protein Integrase) の
構造機能解析とその応用

農学部附属寒冷バイオフィロンティア研究センター 教授 西山 賢一 …… 19

岩手リンドウのグローバルブランド化にむけた技術開発

農学部 教授[※] 堤 賢一 …… 29

癒しをもたらすライフ・イノベーション機能性鋳造品の研究開発 (スズ虫-風鈴プロジェクト)

工学部 准教授 永田 仁史 …… 41

地域気象観測ネットワーク「学校气象台」の構築と学校・市民への普及に関する研究

教育学部 教授 名越 利幸 …… 53

II 平成25年度採択課題

世界遺産教育「平泉」の実践的研究—小中連携のカリキュラム・プランの構築—

教育学部 教授 今野日出晴 …… 61

エピジェネティクス的人為的制御による牛体外受精胚の異常原因解明とその克服

農学部 教授 澤井 健 …… 71

I 平成24年度採択課題

研究課題

平泉国際交流展「アートでつなぐ・2012-2013」

(平泉をテーマとした芸術文化側面からの震災復興支援に関わる研究)

研究代表者 教育学部 教授 藁谷 収

【研究成果の概要】

2011年ユネスコ世界遺産登録された平泉は、東日本大震災からの復興という大きな要素も加わり、岩手の今後の地域づくりと活性化に大きな期待が寄せられている。平泉の価値を世界に発信し、新たな岩手、みちのくの精神文化の拠り所として、三陸沿岸被災地含めて、現下の状況にアートをどう生かすべきか大きな地域課題として問われている。

そのため、被災地の芸術文化の活動支援を図りながら、外国と国内からの芸術文化等のアーティストによる制作・発表・交流の場を設け、平泉国際交流展「アートでつなぐ」を継続して開催し、被災地の芸術文化の再起動につなげ、国内外に岩手・平泉をアピールする機会として開催実施をした。

招待作家等による作品制作は、アーティスト・イン・レジデンスという手法も取り入れながら、三陸沿岸被災地と内陸部との交流の機会、岩手大学を結ぶ機会として役立て、その作品展示・発表・交流を岩手大学、盛岡、平泉、一関において開催した。

※アーティスト・イン・レジデンス(Artist-in-residence program)とは、各種の芸術制作を行う人物を一定期間ある土地に招聘し、その土地に滞在しながら制作を行わせる事業のこと。

【支援経費交付額】

| 年 度 | 配 分 額 |
|------|------------|
| 24年度 | 2,500,000円 |
| 25年度 | 1,750,000円 |
| 計 | 4,250,000円 |

【キーワード】 平泉、国際化、東日本大震災、復興、アートでつなぐ

1. 研究の背景

2011年ユネスコ世界遺産登録された平泉は、岩手の今後の地域づくりと活性化に大きな期待が寄せられている。そのため遺産登録による注目や関心が一過性に留まることなく、平泉の価値を世界に発信し、新たな岩手、みちのくの精神文化の拠り所として、積極的に世界との交流の機会を創出しながら、将来に向けて国際的な文化として高めていくことが地域課題として問われている。

加えて、東日本大震災後の三陸沿岸被災地の心の拠り所としての芸術文化に関わる支援を含めて、岩手、東北が置かれている現下の状況に、国際的な交流展をどう生かすべきか課題となっている。

2. 研究の目的

平泉の価値を国際的にアピールし、東日本大震災による被災地の芸術文化の活動支援を図りながら、外国と国内からの芸術文化等のアーティストによる制作・発表・交流の場を設け、平泉国際交流展「アートでつなぐ」を継続して開催し、被災地の芸術文化の再起動につなげ、国内外に岩手・平泉をアピールする機会とする。

3. 研究の方法

招待作家等（海外からはイタリア・フランス在住の日本人作家、イタリア人作家）による作品制作は、岩手大学内で制作を行うアーティスト・イン・レジデンスという手法も取り入れながら実施した。招待作家の被災地見学、展示会を通じ三陸沿岸被災地と内陸部、岩手大学を結ぶ機会として、その作品展示・発表・交流を岩手大学、盛岡、平泉、そして第14回平泉文化フォーラムとの併催で一関において開催した。

平成24年度

- ・第38回盛岡彫刻シンポジウム企画展（アートでつなぐ2012共催）7. 2-7. 14
- ・第7回アートフォーラム企画展（アートでつなぐ2012共催）7. 30-8. 4
- ・アーティスト・イン・レジデンス（作品制作期間 9月上旬-中旬）
- ・アーティスト・イン・レジデンス交流会（9. 1）
- ・盛岡展-1（於盛岡ふれあい覆馬場プラザ）9. 29-10. 8
- ・大ヶ生で生まれた彫刻たち見学ツアー（アートでつなぐ2012共催）10. 7
- ・盛岡展-2（於もりおか歴史文化館前広場）10. 10-10. 25
- ・岩手大学会場展（於岩手大学附属図書館アザリアギャラリー）11. 19-11. 25
- ・平泉巡回展（於平泉文化遺産センターふれあいホール）3. 1-3. 7

・招待作家

杉山功（イタリア在住）、ミゲル・アウズーリ（イタリア）、村上誠

・参加作家（岩手大学）

阿部裕之、藁谷収（以上教員）

平井孝典、八上晃任、斉藤愛、森島久枝、小寺梓、永井純子、久保田結衣（以上学生）

・参加作家・団体等

盛岡彫刻シンポジウム実行委員会メンバー、アートフォーラム・いわて会員
高橋典雄、山内正宣、長内努、佐々木悦也、有馬辰樹、藤川健、菅川恵梨、中島香
緒里、菊池翔
高橋常雄（岩手大学アートフォーラム所蔵作品）

主催：岩手大学アートフォーラム、アートフォーラム・いわて
共催：盛岡市、盛岡彫刻シンポジウム実行委員会
後援：岩手県県南広域振興局、平泉町（以上平泉巡回展）

平成25年度

- ・第39回盛岡彫刻シンポジウム企画展（アートでつなぐ2013共催）7.1-7.13
- ・アーティスト・イン・レジデンス（作品制作期間 8月下旬-9月中旬）
- ・アーティスト・イン・レジデンス交流会-1（8.25）
- ・アーティスト・イン・レジデンス交流会-2（9.14）
- ・盛岡巡回展（於盛岡ふれあい覆馬場プラザ）9.29-10.6
- ・一関巡回展（於一関文化センター展示室）2.1-2.2
- ＊第14回平泉文化フォーラム（主催：岩手県教育委員会、いわて高等教育コンソーシアム）との併催

- ・招待作家
杉山功（イタリア在住）、ミゲル・アウズーリ（イタリア）、宇津宮功（フランス
在住）
- ・参加作家（岩手大学）
藁谷収（教員）
平井孝典、小寺梓、永井純子、岩井千暁、菊池知恵、石川亜理沙、佐々木菜央、
井元紗奈恵、スカリングェッラ・シルビア、メヒアル・アリ（以上学生）
- ・参加作家・団体等
盛岡彫刻シンポジウム実行委員会メンバー、アートフォーラム・いわて会員
菊地伸治、芝田典子、高橋典雄、山内正宣、長内努、佐々木悦也、藤川健、有馬
辰樹、菅原睦、柳田陽一
- ・大船渡高校美術部
阿部晶絵、阿部奈々子、及川叶恵、木下紗桜、近藤佳帆、金野由季、佐々木菜緒、
菅原綾乃、千葉恵太、村上茜、村上佳菜子、大畑莉奈、大和田梨紗、瀧田雅枝、
中島鈴子、渡邊小春

主催：岩手大学アートフォーラム、アートフォーラム・いわて
共催：盛岡市、盛岡彫刻シンポジウム実行委員会

4. 研究成果

平泉国際交流展は、2010年頃に岩手大学アートフォーラムとアートフォーラム・いわてを中心に企画したものである。平泉の世界遺産登録に向けた取り組みが盛んな中、アートフォーラムも登録を願いつつ、海外の作家を招いたアーティスト・イン・レジデンスによる公開制作、展覧会の企画等を準備に取り組んでいた。

間もなく、東日本大震災が起こり、アートフォーラムは様々な問題に直面し、今までのコンセプトを練り直し、平泉世界遺産登録記念と東日本大震災の復興を祈願した国際交流展を3年に渡って行うこととした。

第1回(2011年)には、岩手大学と国際交流協定を結んでいるイタリアカラーラ市美術アカデミーから3名の作家を招いた。この活動は平泉国際交流展と銘打っているものの、狭義のテーマ設定はせず、作家自身の表現を重視した。しかし、この未曾有の事態は、世界中から様々な関心や支援を頂き、イタリアから来た3名も、それぞれがこの現状をイタリア、世界に伝えたい、自分たちにどんなことができるか、と使命感を抱きながらこの取り組みに参加しようとする意志が感じられた。平泉で中尊寺、毛越寺での藤原氏の当時の想いを知り、その足で陸前高田・大船渡の被災地を巡った時のその様子を忘れる事はできない。そのような体験や2週間の交流を通して制作された3作品と、地元を中心に活躍する作家たち、画家、彫刻家、工芸家、音楽家、写真家、デザイナーと多岐にわたる展覧会を、岩手大学会場、平泉会場、水沢会場等6会場県内各地に巡回した。展覧会のオープニングレセモニーとして、平泉研究、世界遺産登録に向けてご尽力された故大矢邦宣氏による講演会にも多くの方々に聴衆頂いた。

翌年第2回は、カラーラ市美術アカデミー教授を含みイタリアより彫刻家2名、第3回はイタリアから彫刻家2名、フランスから1名の画家、東京在住の彫刻家2名を含めた5名を迎え制作に取り組んで頂いた。フランス在住の画家宇津宮功氏からは、作家と風土との関わりに学んだ。具体的にいうと、普段制作しているパリ近郊の光の強いどこまでも見える乾燥した地から、この雨の多い盛岡の木々に囲まれたアトリエでの制作は、作家の常時の感覚を変化させてしまうというレジデンススタイルへの疑問も生み出した。

これらの活動によって岩手大学の収蔵作品は12点、その他寄贈頂いた高橋常雄氏の木炭画4点を新たに含み、特設美術科からの所蔵作品を中心とした岩手大学収蔵の美術作品、教材作品の発表による岩手大学ミュージアム10周年記念事業と連携した岩手大学収蔵美術展が開催された。

アートフォーラムは、様々な市町村で展覧会を開催してきて、その一環で被災地での展覧会も試み、実態把握のための現地取材に何度か足を運んだ。現段階では残念ながら、具体的に事を進めるのは非常に難しく、それよりも急務であるのは、以前できていた日常



的な事がこれから再びできるようになる状態を少しでも早く取り戻していく事だと感じている。ただ、今後これらの制作活動、収蔵作品展が開催できた時、小さなひとつの復興の方法として支援できると確信もした。この活動は、これからも私たちの責務として引き続き何らかの形で続けたいと考えている。

5. 今後の課題

- ・三陸沿岸被災地における復興が思うように進まない状況下であり、中高生及び地域の方々の作品発表の場が制約される中で、心のゆとり、支えなど芸術文化面において果たす役割も多いと思われ、継続的な活動支援等が必要である。
- ・海外作家を招待したアーティスト・イン・レジデンスにおいて制作された作品の公開について、巡回展のみならず公的施設などを利用した展示公開の場を継続して確保して行く必要がある。
- ・アートティスト・イン・レジデンスについては、特に海外の作家においては制作環境や気候風土の違いによって制作への感覚の相違が生ずることもあり、制作環境のあり方、作家の制作支援等について、今後の運営課題となった。

6. 主な発表論文等

- ・交流展開催プログラムの検討及び地域資源調査報告書（2011.3）
- ・平泉国際交流展「アートでつなぐ」図録（2011.12）
- ・平泉国際交流展「アートでつなぐ2012」図録（2013.3）
- ・平泉国際交流展「アートでつなぐ2011-2013」開催記録集（2014.3）

研究課題

マイクロ波センサを用いた農園における鳥獣検出システムの実現

研究代表者 工学部 准教授 本間 尚樹

【研究成果の概要】

本研究ではマイクロ波を用いた害鳥獣の農園等への侵入検出センサを実現することを目的とし、検出アルゴリズムの開発、フィールド試験に基づいたセンサ性能の明確化、及びアンテナ最適配置法に関する検討を行った。本研究ではまず、侵入検出アルゴリズムの開発および実装を行った。今回開発したアルゴリズムでは、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) チャネルと呼ばれる複数アンテナ間の伝搬環境を表す伝達関数を観測し、その変動を検出することによって侵入を検出する。次に、開発したアルゴリズムを用いて、フィールド実験を行い、性能評価を実施した。フィールド試験では、環境による検出特性の比較を行うため3通りの異なる環境において行った。第1の環境は周辺に障害物が存在しないグラウンド (Outdoor1)、第2の環境は高さ2 mほどの木々が立ち並ぶ果樹園 (Outdoor2)、第3は机等の什器が置かれた屋内 (Indoor) である。特に、第2の環境は花巻市のブドウ農家の協力を得て実施した。さまざまなアンテナ素子間隔とアンテナ高を与えセンシング性能を評価した。実験結果より、センサアンテナはMIMO構成とすることで高い検出率が得られ、アンテナ配置の最適化により全ての環境において60%以上の検出率が得られることが明らかになった。なお、この検出率は瞬時検出率であり、数秒の観測データを用いることによって、十分に高い検出率を達成可能である。以上の手段によって障害物の有無に関わらず、今回開発したマイクロ波センサは高い確率で侵入を検出できることが明らかになった。

【支援経費交付額】

| 年 度 | 配 分 額 |
|------|------------|
| 24年度 | 1,950,000円 |
| 25年度 | 1,365,000円 |
| 計 | 3,315,000円 |

【キーワード】 (5つ程度)

野生鳥獣, MIMO, 侵入検出, 相関, マイクロ波センサ

1. 研究の背景

近年、人間や野生鳥獣による土地侵入や収穫前後の農作物の盗難被害等の屋外侵入犯罪が問題となっており、屋外環境セキュリティセンサの需要が増加している[1]. 従来の屋外侵入検出システムとしては防犯カメラや赤外線センサの利用が挙げられる [2] [3]. しかし、前者では死角、天候、照度等の環境による検出性能の劣化やカメラの高性能化に伴うプライバシーの侵害が問題となっており、後者では太陽光や白熱灯等の光がセンサに直射すると検出不可能となる点や一つのセンサで得られる情報が局所的である点が問題として挙げられる.

このような従来技術の問題点から、現在マイクロ波を利用した侵入検出技術が研究されている. ドップラーレーダを用いた侵入検出技術では侵入者の影響で生じるドップラー効果に起因する周波数の変移から検出対象の位置や移動速度の推定を行う[4]. 同技術はマイクロ波を用いた侵入検出技術であるため、環境による検出性能の劣化が少ない点が利点として挙げられる. しかし、検出対象と検出器の距離が離れることで検出性能が劣化するという問題がある[5]. 一方、マイクロ波は回折や散乱によって物陰に回り込むという性質があり、これをセンシングに応用すれば見通しが得られないような果樹園等においても野生鳥獣を高感度に検出できることが期待できる.

2. 研究の目的

本研究はこのようなマイクロ波センサの利点を活かし、野生鳥獣の検出に適したセンサシステムを開発することを目的としている. そのために、無線通信の分野において近年急速に研究・実用化が進められている MIMO (Multiple Input Multiple Output) 技術をセンサシステムに応用する. MIMO システムは送受信機に複数アンテナを用いて複数の信号を同時送受信することで周波数利用効率を飛躍的に増加させるシステムである. また MIMO における伝搬チャネルは環境依存性が強く、伝搬環境の変化により大きく時間変動することも知られている[6]. このような MIMO システムの特性を利用したマイクロ波センサとして、伝搬チャネルの変動から侵入検出を行う MIMO センサが注目されており、屋内侵入検出センサとして研究が進められている[7][8].

そこで本研究では、農園等の屋外環境に適した MIMO センサの開発を行った. まず、侵入検出アルゴリズムについて検討を行い、高い感度で侵入を検出可能な方法について明らかにする. 次に、複数環境での侵入検出実験により得られた結果から、屋外環境に適した MIMO センサのアンテナ配置を明らかにする. 特に、センサアンテナの素子間隔、アンテナ高の最適値について検討を行い、さらに送受信間距離に対する MIMO センサの検出特性から、開発したセンサの侵入検出性能を明らかにする.

3. 研究の方法

本研究では野生鳥獣の検出を目的としているが、定量評価を行うためにヒトが農園を歩行したときのセンサ性能を測定した. 図 1 に本検討の実験条件を示す. 本実験では、素子間隔を $0.24 \text{ m} \leq d \leq 3.0 \text{ m}$, アンテナ高を $1.0 \text{ m} \leq h \leq 3.0 \text{ m}$, 送受信間距離を $20 \text{ m} \leq D \leq 80 \text{ m}$ と変化させ、各アンテナ配置において時変動チャネルを測定し、MIMO センサの検出性能を評価する. アンテナ構成は 4×4 MIMO 構成とし、各アンテナは三脚に取り付けて固

定した。また、使用周波数は 2.4 GHz 帯、サンプリング周波数は 2.0 Hz、チャンネルの測定時間はアンテナ配置毎に侵入の無い環境のチャンネルを 60 秒間、侵入の有る環境のチャンネルを 18 秒間とした。

図 2 に実験環境を示す。本実験は環境による MIMO センサの検出性能を比較するために 3 通りの異なる環境で行った。同図(a)に 1 つ目の実験環境であるグラウンド (Outdoor 1) の様子を示す。グラウンドを囲むフェンスの外には建物や木々等が立ち並んでいるが、グラウンド内に障害物は存在しない。

同図(b)に 2 つ目の実験環境である果樹園 (Outdoor 2) の様子を示す。果樹園には多くのブドウの木や金属製のポールが立ち並んでいる。同図(c)に 3 つ目の実験環境である屋内 (Indoor) の様子を示す。屋内には机や椅子等の什器が配置されている。また、侵入の有る環境のチャンネルは同図(a)中に

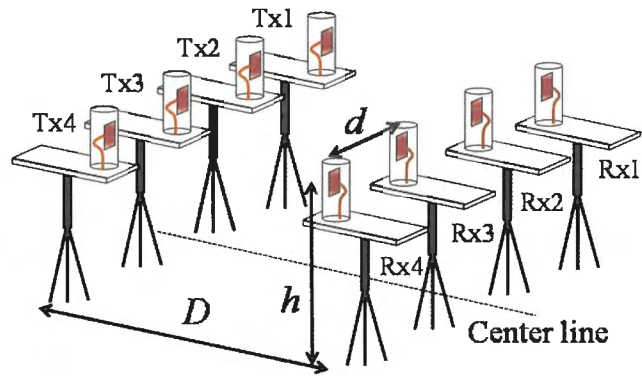
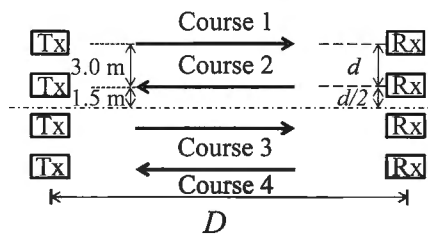
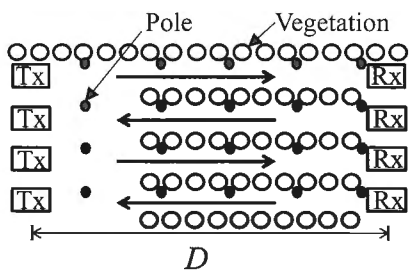


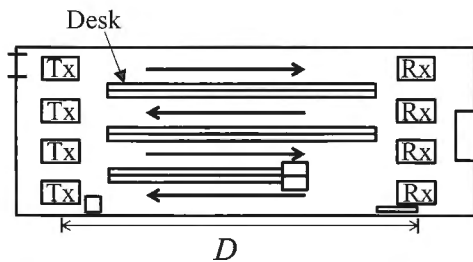
図1. 実験に用いたアンテナ構成



(a) グラウンド(Outdoor 1)

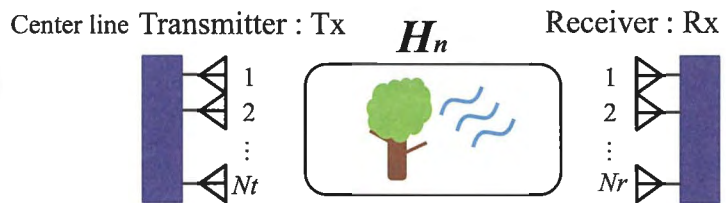


(b) 果樹園(Outdoor 2)

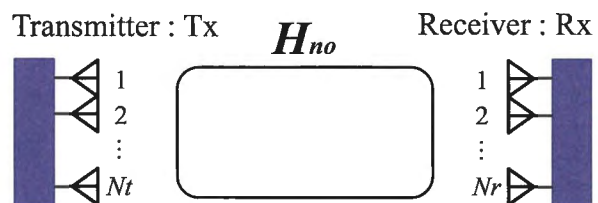


(c) 屋内(Indoor)

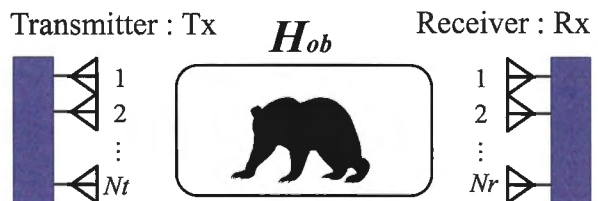
図2. 実験環境



(a) 実環境における侵入の無い環境



(b) 理想的な侵入の無い環境



(c) 侵入の有る環境

図3. 各環境に対するチャンネルの定義

Course 1 から Course 4 で示された各歩行コースを被験者が歩行する場合に測定した。各歩行コースの間隔は全実験環境において 3.0 m で共通とし、センターラインに対し左右対称な位置に固定した。

図 3 に本研究で考慮した環境の種類とそれに対応するチャネルの定義を示す。図中の N_r は受信アンテナ数、 N_t は送信アンテナ数を表す。同図(a)に実環境における侵入の無い環境のモデルを示す。実環境における侵入の無い環境のチャネル \mathbf{H}_n は木々の揺れ等の外乱や熱雑音により微小な時変動を生じる。同図(b)に理想的な侵入の無い環境のモデルを示す。理想的な侵入の無い環境のチャネル \mathbf{H}_{no} は外乱や雑音が存在しないため時変動を生じない。同図(c)に侵入が発生した環境のモデルを示す。この環境のチャネル \mathbf{H}_{ob} は侵入者の影響により大きく時変動を生じる。また、各環境下でのチャネル \mathbf{H}_n , \mathbf{H}_{no} , \mathbf{H}_{ob} を構成する各要素を $h_{n,ij}$, $h_{no,ij}$, $h_{ob,ij}$ と表す。各環境チャネルの第 (i,j) 要素 h_{ij} は j 番目の送信アンテナ素子から i 番目の受信アンテナ素子へのチャネル応答を表し、 $1 \leq i \leq N_r$, $1 \leq j \leq N_t$ である。

図 4 に各環境チャネルの時変動の一例を示す。図中に示す一例は測定した各環境チャネルの要素 $h_{n,11}$, $h_{no,11}$, $h_{ob,11}$ の振幅の時変動である。同図より実環境における侵入の無い環境のチャネル応答 $h_{n,11}$ は外乱や雑音により、侵入の有る環境のチャネル応答 $h_{ob,11}$ は侵入者の影響により時変動していることが確認できる。一方、理想的な侵入の無い環境のチャネル応答 $h_{no,11}$ は外乱等が存在しないため時変動を生じていない。しかし、実際には時変動を生じないチャネルの測定は不可能であるため、本検討では 60 秒間測定した実環境における侵入の無い環境のチャネル \mathbf{H}_n の時間平均を理想的な侵入の無い環境のチャネル \mathbf{H}_{no} と定義する。

本検討では侵入検出を行うために MIMO センサで取得した理想的な侵入の無い環境のチャネル \mathbf{H}_{no} と実環境における侵入の無い環境のチャネル \mathbf{H}_n , 侵入の有る環境のチャネル \mathbf{H}_{ob} 間のチャネル相関を求める[9]。チャネル相関を評価関数としてその変動を検出し、侵入の有無を判断する。雑音の評価関数 J_n と侵入の有る環境の評価関数 J_{ob} をそれぞれ、

$$J_n = \frac{|\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} h_{no,ij}^* h_{n,ij}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} |h_{no,ij}|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} |h_{n,ij}|^2}} \quad (1)$$

$$J_{ob} = \frac{|\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} h_{no,ij}^* h_{ob,ij}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} |h_{no,ij}|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} |h_{ob,ij}|^2}} \quad (2)$$

のように定義する。ここで $\{\cdot\}^*$ は複素共役を表す。評価関数は $0 \leq J_n \leq 1$, $0 \leq J_{ob} \leq 1$ で

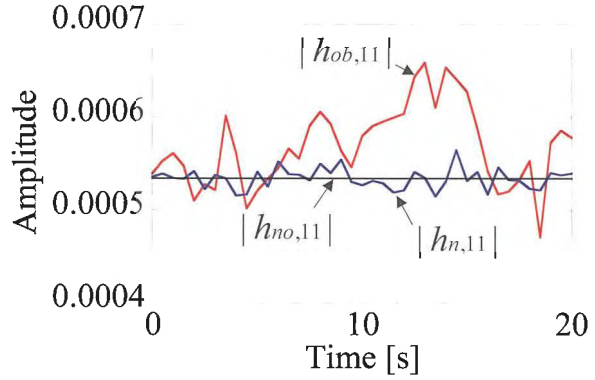


図4. 各環境チャネルの時変動

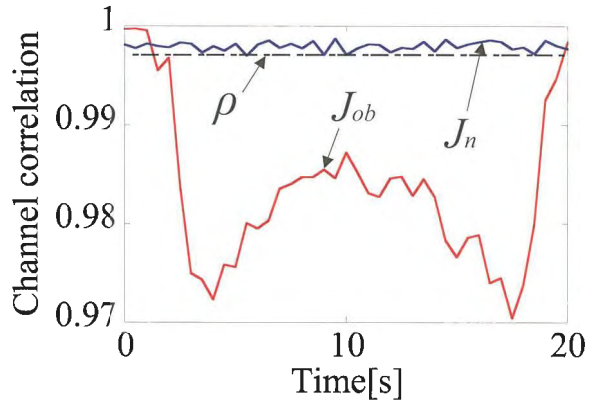


図5. 各評価関数の時変動

あり、相関をとるチャンネル間の変動が小さい場合は1に近づく。

図5に各評価関数の時変動の一例を示す。同図のように雑音の評価関数 J_n は外乱や雑音によるチャンネル変動の影響で常に1未満の値となる。このように外乱等が存在する場合、チャンネル変動の原因が侵入または外乱のどちらにあるのかを判断できない。そこで、本センサでは評価関数に適切なしきい値 ρ を設定し、各評価関数がしきい値 ρ を下回った場合に侵入があったと判断する。しかし、しきい値 ρ を高すぎる値に設定すると侵入が無い場合に外乱等の影響で侵入が発生したと判断する誤検出が発生する。したがって、しきい値 ρ は誤検出を発生させないために可能な限り低い値に設定しなければならない。

図6にしきい値 ρ に対する検出率・誤検出率の関係を示す。同図の縦軸は人が侵入した際の検出率と侵入の無い時に外乱等の影響で侵入が発生したと判断する誤検出率を示す。同図よりしきい値 ρ を低い値とすると誤検出率は低下するが、同時に検出率も低下することが分かる。本検討では低い誤検出率を実現しつつ可能な限り高い検出率を維持するため、一例として雑音の評価関数 J_n から誤検出率が1%となるようにしきい値 ρ を設定した。

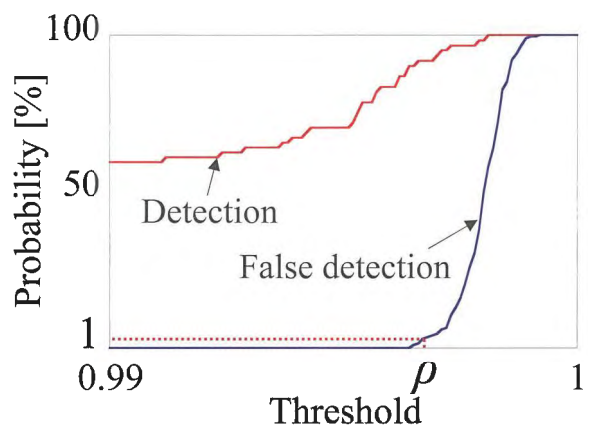


図6. しきい値の決定方法

4. 研究成果

本検討では各コース歩行時に2回/秒の間隔でチャンネルを取得し、各瞬間に侵入判定を行う。1秒間に1回以上 $J_{ob} \leq \rho$ を満たした場合、その1秒間での検出が可能と定義し、検出回数の合計を求める。以下では、受信アンテナ1素子あたりのSNR (Signal to Noise Ratio) を30 dBとしたときの検出範囲を図示したカラーマップと検出率(=検出回数/全測定回数)を用いてMIMOセンサの面的な検出性能評価を行う。

素子間隔特性

図7~9、にOutdoor 1, Outdoor 2, Indoorにおける各素子間隔毎の検出範囲を表すカラーマップを示す。実験時、アンテナ高は全環境において $h = 1.0$ mで共通とし、送受信間距離はOutdoor 1, Outdoor 2では $D = 20$ m, Indoorでは $D = 13.6$ mである。カラーマップの縦軸は各歩行コースを示しており、横軸は送受信機間距離 D を表す。カラーマップ上で灰色から黒で示されたエリアは検出不可能なエリア、明るい色で示されたエリアは検出可能なエリアとなる。はじめに、屋内環境であるIndoorと屋外環境であるOutdoor 1の検出範囲を比較するとIndoorの方が検出範囲が広いことが確認できる。また、屋外環境ではアンテナ直線上でのみ検出が可能であることも確認できる。これらは壁などの電波の散乱によりマルチパスが多く存在する屋内環境に対して、屋外環境では散乱が生じにくくマルチパスが少なくなるためと考えられる。続いて、障害物が存在しないOutdoor 1と木々が立ち並ぶOutdoor 2の両屋外環境の検出範囲を比較するとOutdoor 1に

比べ Outdoor 2 は検出範囲が狭いことが確認できる。これは草木の揺れ等の外乱による雑音成分の影響やパスが草木により遮られたことが原因だと考えられる。このように障害物が存在する屋外環境では検出範囲が縮小することが分かる。しかし、障害物が存在する屋外環境である Outdoor 2 の素子間隔毎の検出範囲に注目すると、素子間隔が広がるにつれて検出範囲が拡大することが確認できる。これは素子間隔が広がるにつれてパスが存在するエリアが広がったためと考えられる。

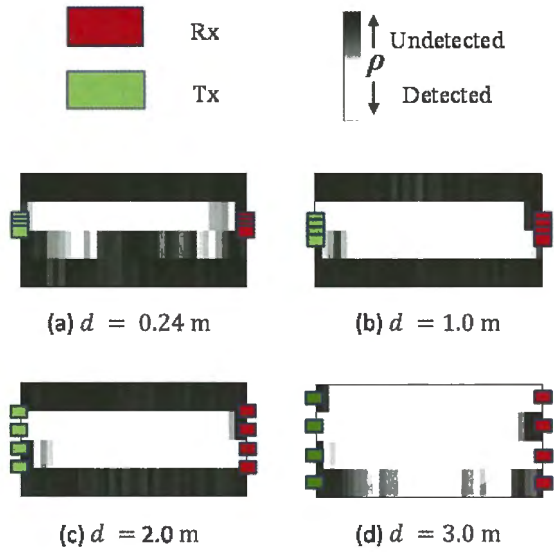


図7.素子間隔毎のカラーマップ(Outdoor 1)

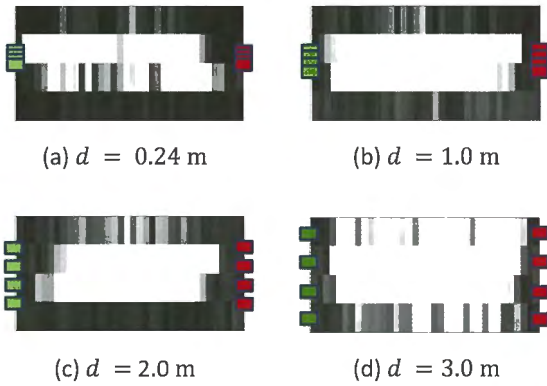


図8.素子間隔毎のカラーマップ(Outdoor 2)

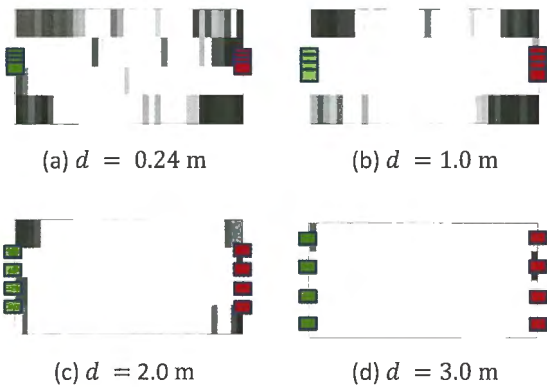


図9.素子間隔毎のカラーマップ(Indoor)

図 10 に各素子間隔に対する検出率を示す。同図より屋外環境に比べて屋内環境は高い検出率を有する点、木々が立ち並ぶ Outdoor 2 は障害物が存在しない Outdoor 1 に比べ検出率が低い点を確認できる。また、同図ではアンテナ構成の比較として 4 × 1 SIMO (Single Input Multiple Output) 構成を利用する。図中に示される SIMO 構成の検出率は MIMO センサを構成する 4 つの送信機に対応する 4 つの SIMO センサの平均検出率である。SIMO 構成と MIMO 構成の検出率を比較すると、全環境に共通して SIMO 構成より MIMO 構成の方が高い検出率を示していることが確認できる、特に多くの木々が存在する Outdoor2 の場合、素子間隔 $d = 3.0 \text{ m}$ では MIMO 構成にすることにより検出率が 20.5%改善することが分かる。これは送信アンテナが増

図 10 に各素子間隔に対する検出率を示す。同図より屋外環境に比べて屋内環境は高い検出率を有する点、木々が立ち並ぶ Outdoor 2 は障害物が存在しない Outdoor 1 に比べ検出率が低い点を確認できる。また、同図ではアンテナ構成の比較として 4 × 1 SIMO (Single Input Multiple Output) 構成を利用する。図中に示される SIMO 構成の検出率は MIMO センサを構成する 4 つの送信機に対応する 4 つの SIMO センサの平均検出率である。SIMO 構成と MIMO 構成の検出率を比較すると、全環境に共通して SIMO 構成より MIMO 構成の方が高い検出率を示していることが確認できる、特に多くの木々が存在する Outdoor2 の場合、素子間隔 $d = 3.0 \text{ m}$ では MIMO 構成にすることにより検出率が 20.5%改善することが分かる。これは送信アンテナが増

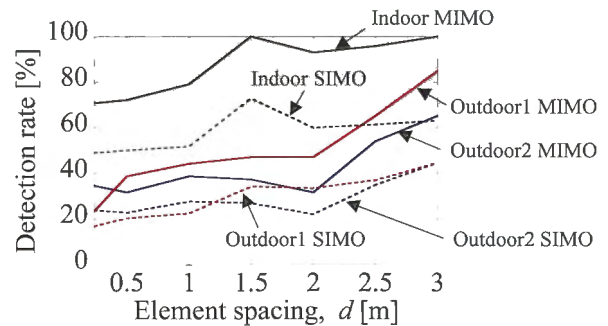


図10.素子間隔に対する検出率

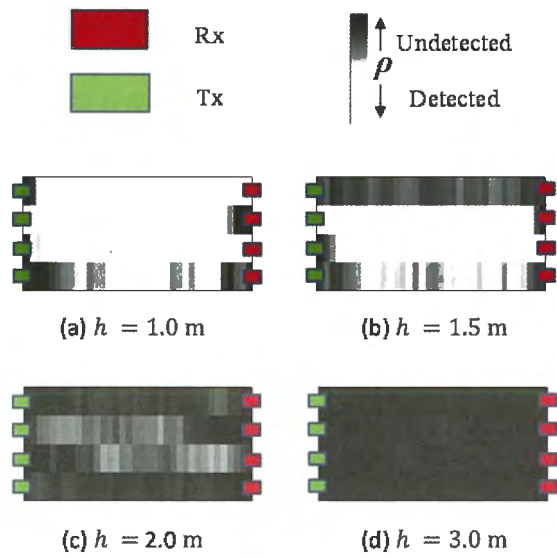


図11. アンテナ高毎のカラーマップ(Outdoor 1)

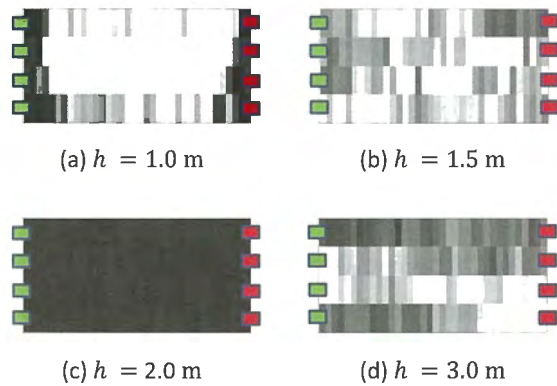


図12. アンテナ高毎のカラーマップ(Outdoor 2)

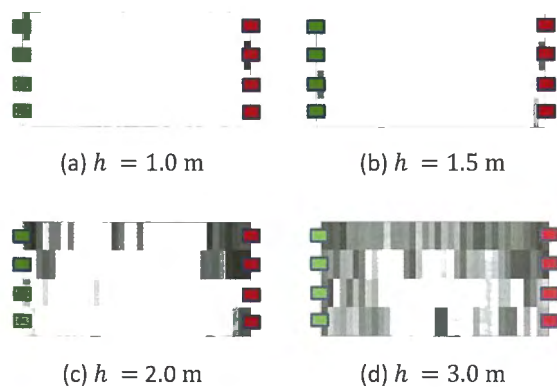


図13. アンテナ高毎のカラーマップ(Indoor)

えることでパスが増加するためと考えられる。また、MIMO 構成での検出率を素子間隔毎に見ると、Outdoor 2 において素子間隔 d を 0.24 m から 3.0 m に広げた場合、検出率が 30.6 % 改善することが分かる。以上から屋外環境における MIMO センサによる侵入検出では素子間隔を広げることによって検出性能が向上することが分かる。

アンテナ高特性

図 11~13, に Outdoor 1, Outdoor 2, Indoor における各アンテナ高毎のカラーマップを示す。実験時、素子間隔は全環境において $d = 3.0$ m で共通とし、送受信間距離は Outdoor 1, Outdoor 2 では $D = 20$ m, Indoor では $D = 13.6$ m である。これらの図より、素子間隔特性と同様に屋外環境に比べて屋内環境は検出範囲が広い点、木々が立ち並ぶ Outdoor 2 は障害物が存在しない Outdoor 1 に比べ検出範囲が狭い点を確認できる。続いて、各アンテナ高毎の検出範囲に注目すると、アンテナ高が人間の身長以下の場合に検出範囲が拡大していることが確認できる。特に電波の散乱が起こりにくい屋外環境では、アンテナ高が人間の身長を下回った途端に検出範囲が著しく拡大することが分かる。これは、パスがアンテナの高さに集中するため、アンテナ高が人間の身長以上となると検出が困難となることが原因と考えられる。

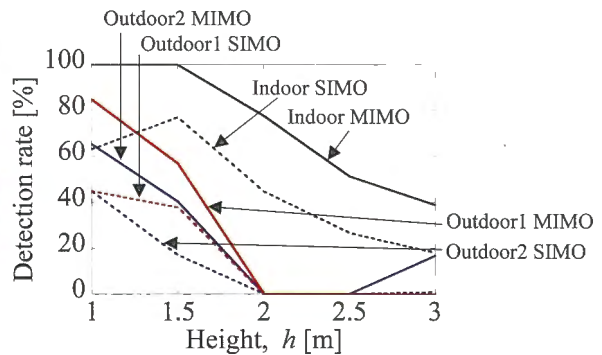


図14. アンテナ高に対する検出率

図 14 に各アンテナ高に対する検出率を示す。同図より素子間隔特性と同じように SIMO 構成より MIMO 構成の方が高い検出率を示していることが確認できる。また、MIMO 構成でのアンテナ構成毎の検出率に注目すると、Outdoor 2 においてアンテナ高 h を 2.0 m から 1.0 m に下げた場合、検出率が 65.3%改善することが分かる。以上から屋外環境における MIMO センサによる侵入検出ではアンテナ高を検出対象以下とすることで検出性能が向上することが分かる。

送受信間距離特性

図 15 に Outdoor 2 における各送受信間距離毎のカラーマップを示す。実験時、素子間隔は $d = 3.0$ m, アンテナ高は $h = 1.0$ m である。同図より送受信間距離が広がるにつれて検出範囲が縮小していくことが確認できる。これは送受信間距離が広がるにつれて電波が減衰すること、草木により電波が遮断されることが原因と考えられる。

図 16 に Outdoor 2 における各送受信間距離に対する検出率を示す。同図からも送受信間距離が広がるにつれて検出率が減少していくことが確認できる。また、今回の実験結果においては送受信間距離が $D = 40$ m の場合の検出率が 58.9%となっている。以上から送受信間距離が 40 m 以内であれば屋外環境における MIMO センサは有効であることを確認した。

5. 今後の課題

本報告では、MIMO センサの屋外環境への適応を検討し、複数環境での実験から屋外環境に適した MIMO センサのアンテナ配置を評価した。実験結果より、壁などでの電波の散乱によりマルチパスが多く存在する屋内環境に対して、屋外環境では散乱が生じにくくマルチパスが少なくなるため、アンテナ直線上、またはアンテナ高が検出対象の高さ以下の場合に高い検出率が得られることを確認した。しかし、アンテナ構成を SIMO 構成から MIMO 構成にすることで、多くの木々が存在する屋外環境 Outdoor 2 においても素子間隔 $d = 3.0$ m, アンテナ高 $h = 1.0$ m, 送受信機間距離 $D = 20$ m の場合、検出率が 20.5%改善することを確認した。さらに、MIMO 構成において Outdoor2 では素子間隔 d を 0.24 m から 3.0 m に広げた場合に検出率が 30.6%改善すること、アンテナ高 h を 2.0 m から 1.0 m に下げた場合では 65.3%改善することを確認した。また、送受信間距離に対する MIMO センサの検出性能の検討では、Outdoor 2 において送受信間距離 $D = 40$ m 時の検出率が

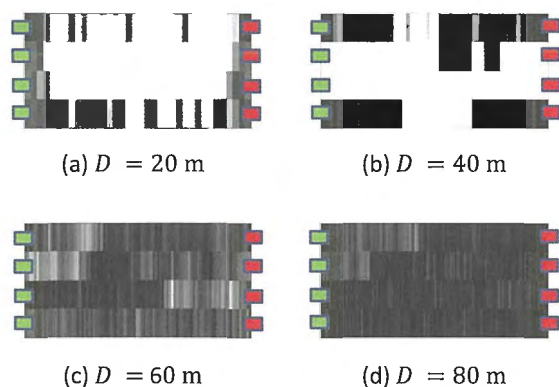


図15. 送受信間距離毎のカラーマップ(Outdoor 2)

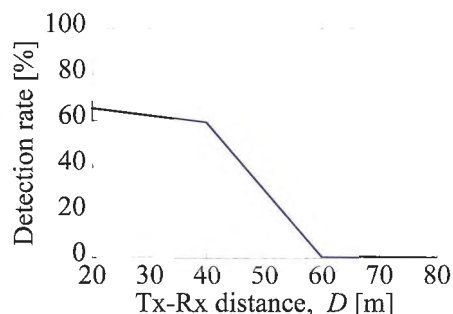


図16. 送受信間距離に対する検出率

58.9%となり、 $D = 40$ m 以内の場合であれば、屋外環境における MIMO センサは有効であることを確認した。

以上の結果より、屋外環境にて MIMO センサを用いて侵入検出を行う場合、素子間隔を広く、アンテナ高を検出対象以下としなければならないことが分かった。一方、実用化を考えるとアンテナは可能な限り小型に配置されることが望ましい。実際の広大な農園のエリア全体をセンシングするためには、小型なアンテナ配置であっても高い検出性能を実現することが求められるものと考えられる。実用化に向けた課題として、アンテナの高利得化やアンテナ数増加によって感度を向上し、アンテナ配置条件を緩和する方法について取り組む必要があると考える。

参考文献

- [1] 農林水産省 全国の野生鳥獣による農作物被害状況について(平成 23 年度)
- [2] 橋本学, “映像監視における CV 実用技術の現状と課題” 情報処理学会研究報告. CVIM,2005(112), 55-62, 2005-11-17
- [3] 加納梢, 中島信生, 大野宏, 石田勉, “赤外線センサによる人体移動検出特性の検討” 信学技報, vol. 108, no. 399, USN2008-61, pp. 1-6, 2009 年 1 月.
- [4] Y. J. An, B. J. Jang, and J. G. Yook, “Detection of human vital signs and estimation of direction of arrival using multiple doppler radars,” Journal of The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol. 10, no. 4, pp. 250 - 255, Dec. 2010.
- [5] H. Avagyan, A. Hakhoumian, H. Hayrapetyan, N. Pogosyan, and T. Zakaryan, “Portable non-contact microwave doppler radar for respiration and heartbeat sensing,” Armenian Journal of Physics, vol. 5, issue 1, pp. 8 - 14, Apr. 2012.
- [6] J. W. Wallace, and M. A. Jensen, “Time-varying MIMO channels: measurement, analysis, and modeling,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.54, issue 11, pp.3265 - 3273, Nov. 2006.
- [7] K. Nishimori, Y. Koide, D. Kuwahara, N. Honma, H. Yamada, H. Makino, “MIMO Sensor - Effectiveness of Distributed MIMO Antenna Configuration” Proc. of ISAP 2010, Nov. 2010.
- [8] N. Honma, T. Sugiura, K. Nishimori, H. Sato, Y. Tsunekawa, “MIMO sensor Experimental channel characterization in indoor environment - ,” Proc. of ISAP 2010, Session TF-272, Nov. 2010.
- [9] K. Nishimori, Y. Koide, N. Honma, D. Kuwahara, H. Yamada, H. Makino, “MIMO sensor - Effectiveness of distributed MIMO antenna configuration - ,” Proc. of ISAP 2010, Session TF-277, Nov. 2010.

6. 主な発表論文等

1. K. Ushiki, K. Nishimori and N. Honma, “Comparison of 4×1 SIMO and 2×2 MIMO sensors based on measured propagation channels,” 2012 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2012), Electric Proc. of ISAP 2012 , 3A2-5, Nov. 2012
2. N. Honma, K. Nishimori, H. Sato and Y. Tsunekawa, “Compact antenna arrangement for MIMO sensor in indoor environment,” 2012 International Symposium on Antennas and

- Propagation (ISAP 2012), Electric Proc. of ISAP 2012 , 3A3-1, Nov. 2012
3. M. Nango, N. Honma, K. Nishimori, and H. Sato, "Biological activity detection method using MIMO system," IEICE Communications Express, Vol. 2, No. 2, pp. 36-41, Feb. 2013
 4. N. Honma , K. Nishimori , H. Sato and Y. Tsunekawa, "Experimental Performance Evaluation of MIMO Sensor with Compact Antenna Arrangement," The 2013 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC'13), Electric Proc. of ATC 2013 , pp.82-84, Oct. 2013
 5. N. Honma, K. Nishimori, H. Sato, and Y. Tsunekawa, "Compact antenna arrangement for MIMO sensor in indoor environment," IEICE Trans. Commun., Vol.E96-B, No.10, pp.2491-2498, Oct. 2013
 6. K. Ushiki, K. Nishimori, N. Honma, and H. Makino, "Intruder detection performance of SIMO and MIMO sensors with same number of channel responses," IEICE Trans. Commun., Vol.E96-B, No.10, pp.2499-2505, Oct. 2013
 7. K. Konno, N. Honma, K. Nishimori and Y. Tsunekawa, "Detection Performance Evaluation of MIMO Sensor for Outdoor Surveillance Application," 2013 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2013), Electric Proc. of APMC 2013, F3D-2, Nov. 2013
 8. K. Ushiki, K. Nishimori, N. Honma, and H. Makino, "Experimental evaluation on MIMO sensor employing eigenvector diversity," IEICE Communications Express, Vol.3, No.2, pp.61-67, Feb. 2014
 9. K. Konno, M. Nango, N. Honma, K. Nishimori, N. Takemura, and T. Mitsui, "Experimental evaluation of estimating living-body direction using array antenna for multi-path environment," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., Vo. 13, pp.718-721, Apr. 2014
 10. D. Sasakawa, K. Konno, N. Honma, K. Nishimori, N. Takemura, T. Mitsui, "Localizing Living Body Using Bistatic MIMO Radar in Multi-path Environment," 8th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2014), Electric Proc. of EuCAP 2014, pp.3863-3867, April 2014
 11. 本間尚樹 他, 【次世代】ヘルスケア機器の新製品開発／4-17 生体情報モニタリングデバイスの開発・計測技術の応用展開・マルチアンテナシステムを用いた呼吸・心拍の計測技術と高感度化, (株)技術情報協会, 2014年5月
 12. D. Sasakawa, K. Konno, N. Honma, K. Nishimori, N. Takemura, T. Mitsui, "Array Antenna Calibration Method for Living Body Radar," 2014 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM 2014), vol.2, pp. 185-186, Aug. 2014
 13. K. Konno, N. Honma, D. Sasakawa, Y. Tsunekawa, K. Nishimori, N. Takemura, "Localizing Multiple Target Using Bistatic MIMO Radar in Multi-path Environment," 2014 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM 2014), vol.2, pp. 90-91, Aug. 2014

雑誌論文 (計 5 件, 査読有)

学会発表 (計 7 件)

図 書 (計 1 件)
産業財産権 (計 5 件)

研究課題

タンパク質膜挿入反応に必須の糖脂質酵素 MPIase (Membrane Protein Integrase) の構造機能解析とその応用

研究代表者 寒冷バイオフィロンティア研究センター 教授 西山 賢一

【研究成果の概要】

膜内在性タンパク質や分泌タンパク質は、合成後それぞれ生体膜に膜挿入したり生体膜を膜透過したりする。タンパク質膜透過・膜挿入の分子機構は、基本的な部分ではすべての生物で保存されている。我々はタンパク質膜透過・膜挿入の詳細な分子機構を明らかにするため、大腸菌を用いて反応に必要な因子を同定し、これらを用いてタンパク質膜透過・膜挿入反応を再構成することを目指し、研究を進めてきた結果、MPIase (Membrane Protein Integrase) と命名した糖脂質が反応に必要なことを明らかにした。MPIase の構造を決定し、その作用原理と応用に関して以下の知見を得た。MPIase は、基質膜タンパク質と直接相互作用し可溶化する分子シャペロン様の機能を持ち、膜挿入反応を触媒する。これらのことから、MPIase はタンパク質膜挿入に必須の「糖脂質酵素 (Glycolipozyme)」であるという概念を提唱した。続いて、MPIase はタンパク質膜透過チャンネル SecYEG や膜挿入に関与する YidC と相互作用し、これらと協調的に作用することを見出した。特に、YidC との機能的相互作用の発見は、YidC の役割を生化学的に示した初めての実験結果である。MPIase の普遍性を検証するため、ダイズ由来の脂質抽出物を検索したところ、MPIase と同様の膜挿入活性を持ち、さらに同様の化学的性質を示す物質を単離した。この物質は植物 MPIase ホモログであると考えられる。この結果は、「糖脂質酵素 (Glycolipozyme)」の概念の普遍性を実証するだけでなく、低温耐性作物の開発にも直結するものである。

【支援経費交付額】

| 年 度 | 配 分 額 |
|------|------------|
| 24年度 | 3,408,000円 |
| 25年度 | 2,385,000円 |
| 計 | 5,793,000円 |

【キーワード】 タンパク質膜挿入／タンパク質膜透過／糖脂質酵素／MPIase／低温感受性

1. 研究の背景

膜内在性タンパク質や分泌タンパク質は、合成後それぞれ生体膜に膜挿入したり生体膜を膜透過したりする。これらの反応は、基本的なレベルではバクテリアから高等動物まですべての生物で保存されている生命現象である。合成途中の膜タンパク質はシグナル認識粒子 (SRP) により認識され、リボソーム-新生鎖-SRP 複合体は膜上の SRP 受容体 (SR) に輸送される。その後タンパク質膜透過チャネル (トランスロコン; バクテリアでは SecYEG、真核生物では Sec61 複合体) 上で膜挿入が進行する (図 1 上段)。

一部の非常に小さな膜タンパク質や C 末端に膜貫通領域をもつタンパク質は SRP やトランスロコンとは無関係に膜挿入する (図 1 中段)。そのため、この膜挿入経路は「自発的」に進行すると考えられてきたが、我々は膜小胞

内に生理的な濃度のジアシルグリセロールが存在すれば、自発的膜挿入は完全にブロックされることを明らかにした (*J. Biol. Chem.*, 2006; 2008) ため、何らかの膜挿入因子の存在が示唆されていた (*Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 2010)。膜挿入反応においては、YidC タンパク質も反応に関与することが知られており、そのホモログはミトコンドリアや葉緑体にも存在する。しかし、*in vitro* 実験系では YidC が膜挿入に関与することを明確に示す結果は未だに得られていない。また、バクテリアでは分泌タンパク質の膜透過はタンパク質合成とは共役せずに進行し、膜透過を駆動する ATPase である SecA の作用も必要となる (図 1 下段)。

一般に、タンパク質膜透過や膜挿入反応は低温感受性である。低温下では膜脂質の流動性が低下するため、これらの反応が困難になるためである。実際、タンパク質膜透過や膜挿入に関わる遺伝子の変異体のほとんどが低温感受性である。

2. 研究の目的

我々はタンパク質膜透過・膜挿入の詳細な分子機構を明らかにするため、大腸菌を用いて反応に必要な因子を同定し、これらを用いて膜透過・膜挿入を再構成することを目指し、研究を進めてきた。その結果、従来、反応に必要なことが判明している SecYEG や SRP などのタンパク質性因子だけでは不十分であり、これらすべての経路において MPIase (Membrane Protein Integrase) と命名した糖脂質 (図 2 参照) が必要であるこ

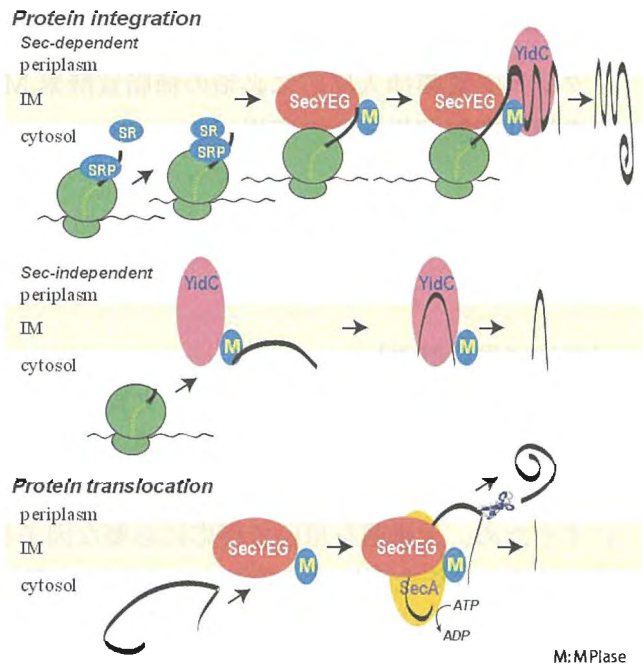


図 1 大腸菌におけるタンパク質膜挿入・膜透過機構。上段は Sec 依存、中段は Sec 非依存の膜挿入機構を示す。リボソームで膜タンパク質が合成されはじめると、疎水的な領域が SRP (シグナル認識粒子) により認識される。その後 SR (SRP 受容体) を介して膜に輸送され、SecYEG 上で膜挿入が起こる。大腸菌におけるタンパク質膜透過では ATPase 活性をもつ SecA も必要である (下段)。「M」は我々が発見した糖脂質 MPIase であり、膜挿入・膜透過に重要な役割を果たす。YidC は膜挿入途中のタンパク質と相互作用する。Sec 依存の経路はすべての生物において保存されている。

とを明らかにした（図1参照）。本研究では、まず MPIase の構造を明らかにし、構造-機能相関関係を明らかにすることを主な目的とした。MPIase は、従来タンパク質が担うと考えられてきた酵素様の活性を示すことから、MPIase は「糖脂質酵素 (Glycolipozyme)」であるという概念を提唱した。本研究では、MPIase がタンパク質膜挿入や膜透過反応においてどのような作動原理で機能しているのか、再構成系を用いた生化学的解析により明らかにすることを目的として研究を進めた。さらに、MPIase の生物種を超えた普遍性の検証を行った。

3. 研究の方法

3-1. MPIase の精製

MPIase は、大腸菌 MC4100 より抽出・精製した。まず、大腸菌から内膜画分を調製し、尿素抽出、コール酸抽出、トリクロロ酢酸抽出を連続的に行い、MonoQ カラムクロマトグラフィー、分配クロマトグラフィーを経て MPIase を得た。1000 L の培養液から約 50 mg の高度に精製された標品を得た。

3-2. MPIase の構造決定

MPIase の構造は、NMR 分析、MS 分析を駆使して決定した。構造の細部まで決定するため、MPIase の部分分解産物を調製し、その NMR 分析、MS 分析を行った。構造の決定が困難な部分についてはレファレンス化合物を化学合成し、これらと比較することにより決定した。NMR 分析、MS 分析、レファレンス化合物の化学合成はサントリー生物有機科学研究所、楠本所長（当時）、島本研究員らとの共同研究により行った。

3-3. プロテオリポソームの再構成とタンパク質膜透過・膜挿入活性の測定

(プロテオ) リポソームは、界面活性剤存在下で膜タンパク質と脂質を混合した後、透析により形成した。膜成分が溶媒に可溶性であるときは、溶媒存在下で混合し、乾燥後に水和してリポソームを形成させた。タンパク質膜透過・膜挿入活性は、膜透過・膜挿入したタンパク質でリポソーム小胞内部に取り込まれた部分が外部から加えたプロテアーゼによる消化を免れることを利用して測定した。

4. 研究成果

4-1. MPIase の構造決定

MPIase を加水分解しても、グルコサミンと大量のアンモニアが検出されるのみで、通常のアミノ酸は全く検出されず、その酵素様の機能にもかかわらず MPIase は非タンパク質性であることが明らかになった。¹H-NMR や ¹³C-NMR からは *N*-アセチル基や脂質のピークが同定され、不安定なアミノ糖を含む糖脂質であることが予測された。一方、³¹P-NMR からはピロリン酸ジエステルの存在が示唆され、糖鎖と脂質部位のリンカーになっていると考えられた。MPIase の MALDI-TOF-MS を測定したところ、特徴的な繰

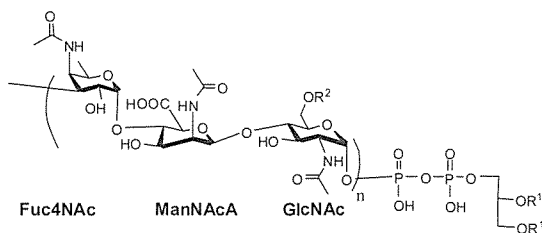


図2 MPIase の構造。n は 9~11 の整数、R¹ は炭素鎖 16~20 の飽和/不飽和脂肪酸残基、R² は水素原子またはアセチル基である。また、GlcNAc は *N*-アセチルグルコサミン、ManNAcA は *N*-アセチルマンノサミンウロン酸、Fuc4NAc は 4-*N*-アセチルアミノフコースを示す。

り返しパターンが得られた。不均一性は脂質部や糖の O-アセチル基の有無の多様性に由来するため、アルカリ処理により単純な 608 Da 間隔の繰り返しパターンに変化し、繰り返し数は 10 回程度であることが明らかになった。608 を親イオンとして MS/MS を行ったところ、187, 203, 217 の 3 つの部分構造から構成されていた。組成分析でグルコサミンが検出されているので、203 は N-アセチルグルコサミン(GlcNAc)に由来することが分かる。質量数差から、残る 2 つは N-アセチルアミノヘキソースのデオキシ糖とウロン酸であると予測した。NMR で 6 位メチル基と NOE を持つアミドが存在することから、デオキシ糖として 4-アセトアミドフコース(Fuc4NAc)を想定し、標品を合成して GC-MS で確認した。ウロン酸についても、数種類を合成して GC-MS を比較することで、N-アセチルマンノサミンウロン酸(ManNAcA)と同定した。糖鎖の配列は 2 次元 NMR から推定し、部分構造ユニットを合成して確認した。脂肪酸分析などの情報も勘案し、MPIase の構造を図 2 のように決定することができた (*Nat. Commun.*, 2012)。

4-2. タンパク質膜挿入反応における MPIase の作動原理

Sec 非依存経路として知られる膜挿入経路 (図 1 中段) において、自発的膜挿入は進行しないことが明らかになって以降、膜挿入因子が必要であることが判明し、その結果同定されたのが糖脂質酵素 MPIase であった。一方、変異体解析で明らかになった YidC タンパク質は、変異体解析では膜挿入反応に強い依存性が観察されるものの、*in vitro* 解析では膜挿入反応への関与を示す明確な実験結果は得られていない。これまでの我々の研究結果では、YidC のみでは膜挿入活性は全く検出でき

ず、YidC と MPIase を共存させても MPIase 単独のときと活性は全く変わらなかった。これらの実験では、放射能標識したメチオニンを使って基質膜タンパク質を試験管内合成して膜挿入活性を調べている。このとき放射性メチオニンの放射能比活性が高いため、合成される基質タンパク質の量は MPIase や YidC に比べて桁違いに少ない。したがって、MPIase が膜挿入反応において複数回機能し

なくても高い膜挿入活性が検出される。基質膜タンパク質が MPIase よりも多く生産されたとき、すなわち膜挿入反応が触媒的に進行する必要があるとき、YidC の依存性が観察される可能性があると考え、非標識メチオニンを加えて膜挿入反応を行った。その結果、非標識メチオニンを加えていないときと同様に YidC のみでは膜挿入活性は全く検出されず MPIase のみに依存した膜挿入活性が検出された。このことは基質膜タンパク質が多いときにも MPIase が膜挿入を触媒できることを示し、MPIase の酵素様作用を支持するものである。一方、MPIase と YidC を共存させたとき、MPIase 単独のときと比べ 3 倍程度の膜挿入の促進が認められた (図 3)。このことは MPIase と YidC は協調してタンパク質膜挿入反応を触媒していることを示している。さらに、MPIase と YidC が直接相互作用して機能している可能性を強く示唆している (*Nature*, 2014)。

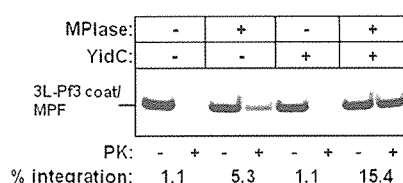


図3 MPIase によるタンパク質膜挿入と YidC による促進。MPIase と YidC を組み込んだリボソームを再構成し、3L-Pf3 coat タンパク質 (Sec 非依存の膜タンパク質の一種) の膜挿入活性を調べた。膜挿入したタンパク質は膜によりプロテアーゼ (PK) 消化から保護されたバンド (MPF) として検出される。

4-3. タンパク質膜透過反応における MPIase の作動原理

MPIase は Sec 依存の膜挿入経路にも必須であり、分泌タンパク質の膜透過にも重要である (*J. Biol. Chem.*, 2006)。SecYEG に MPIase を加えてプロテオリポソームを再構成して膜透過活性を調べると、MPIase がいないときに比べて 10 倍以上の活性の促進が観察された。このことは、MPIase は SecYEG と相互作用することを強く示唆している。我々は以前、

SecYEG 複合体を構成する SecG タンパク質は、タンパク質膜透過に共役して配向性の反転-回復サイクルを繰り返すことを明らかにした (*Cell*, 1996)。SecG の構造変化と共役することにより SecA の構造変化が円滑になり、その結果膜透過活性が上昇すると考えられる。この SecG の反転サイクルに関して、SecYEG を再構成したプロテオリポソームで検証してみたが、SecG の反転はまったく検出されなかった。MPIase は SecYEG と相互作用するため、SecYEG/MPIase プロテオリポソームを再構成したところ、効率の良い SecG の反転が検出された。このことは、MPIase が SecG 反転サイクルに必須であり、MPIase が SecYEG と相互作用した結果 SecG の

反転サイクルが作動できる構造に変化したことを意味している。MPIase 依存の構造変化の詳細を調べるため、SecE あるいは SecG の膜貫通領域にシステイン残基を導入した変異型 SecYEG を調製した。SecYEG 結晶構造に関する論文では、SecE を二量体の接触面とする構造が報告されている。実際 SecE の 106 番目にシステインを導入した SecYEG では、酸化処理により SecE の二量体を形成でき、この結晶構造に対応している (図 5 左、「back-to-back」)。しかし、MPIase が共存した条件では、SecE の二量体は形成できず、代わりに SecG の 60 番目にシステインを導入した SecYEG で SecG 二量体が形成できるようになった。このことは、MPIase 存在下では図 5 右に示すような「side-by-side」構造に変化すると考えられる。以上まとめると、MPIase と相互作用した SecYEG は「back-to-back」構造から「side-by-side」構造変化し、「side-by-side」構造では SecG 反転サイクルが作動できる環境が整い、その結果タンパク質膜透過活性が大幅に上昇すると考えられる (Proc. Natl. Acad. Sci., 2013)。

4-4. ダイズ MPIase ホモログの同定

市販の粗抽出フォスファチジルコリン (PC) のひとつは、ダイズから脂質抽出を行ったもので、PC 含有量が 15~20% である。この PC 標品を用いてリポソームを形成したとき、膜タンパク質の挿入効率が純度の高い PC を使用したときよりはるかに高いことが報告さ

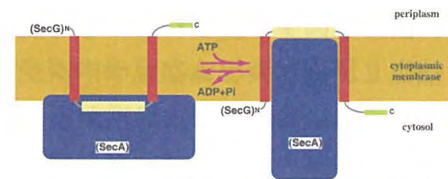


図4 SecA の構造変化に伴う SecG の膜内配向性反転サイクル。ATP の結合、加水分解を伴い SecA が膜挿入-脱挿入サイクルを繰り返す。SecA サイクルに共役して SecG は配向性反転-回復サイクルを繰り返す。分泌タンパク質前駆体や SecYE は省略している。

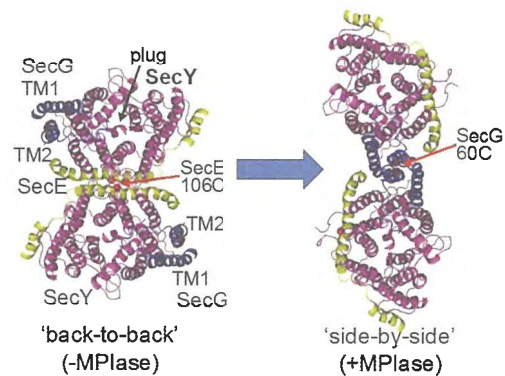


図5 MPIase による SecYEG 二量体構造の変化。報告されている SecYEG 二量体構造 (左、back-to-back) が MPIase と相互作用することにより side-by-side 構造に変化する。細胞質から膜上の SecYEG を見た構造を示す。「plug」はタンパク質が膜透過する通路がプラグで閉ざされている様子を示す。赤丸は、SecE の 106 番目の残基と SecG の 60 番目の残基を示す。TM は膜貫通領域。SecY、紫; SecE、黄; SecG、青。

れている (*Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014)。このことは、PC 粗抽出標品中に膜挿入反応に関わる因子が含まれている可能性を示唆している。この PC 粗抽出標品を種々の溶媒で抽出し、逆相カラムクロマトグラフィーを行った後、大腸菌のリン脂質に再構成したところ、非常に高い膜挿入活性が検出された。TLC 分画を行い、シリカゲルから展開物質を回収して膜挿入活性を調べたところ、大腸菌 MPIase が展開されるのと同じ画分から高い活性が検出された。これらのことは、この PC 粗抽出画分にダイズ MPIase ホモログが含まれていることを強く示唆している。現在、ダイズ MPIase ホモログの構造決定に向けた単離・精製を進めている。

4-5. 可溶性 MPIase 誘導体を用いた膜タンパク質可溶化剤の開発

MPIase をピロリン酸フォスファターゼで処理すると可溶性の糖鎖部分 (PP-MPIase) が得られる (図 2 参照)。PP-MPIase は Sec 非依存の膜挿入反応において、野生型よりもむしろ高い活性をもっていた (*Nat. Commun.*, 2012)。さらに、PP-MPIase は膜挿入前の膜タンパク質と直接相互作用し、可溶性の複合体を形成する (*Nat. Commun.*, 2012)。このことは、MPIase には膜タンパク質を可溶化する「分子シャペロン」様の機能があるといえる。一方、PP-MPIase には膜挿入活性があるため、リポソームを始めとする膜構造は PP-MPIase により影響を受けない。したがって、PP-MPIase は界面活性剤のような働きで膜タンパク質を可溶化するものの、膜構造には影響を及ぼさないといえる。この性質は、膜タンパク質可溶化剤として優れているものである。PP-MPIase は酵素処理によって調製しているが、一部未切断のものが残存するので、化学的処理によって同等の標品を調製することとした。MPIase の O-アセチル基は活性に重要であるため、まず MPIase を酢酸で処理した。この処理により O-アセチル基は保護されていることが確認できたが、リン酸部分を喪失していた。この標品 (AcOH-MPIase) が膜タンパク質と相互作用するかどうか調べたところ、ゲルろ過解析において全く膜タンパク質との相互作用が観察されなかった。したがって、予想に反して MPIase のリン酸残基は膜タンパク質との相互作用に必須であることが判明した。現在、PP-MPIase を出発材料として更なるアセチル化やベンジル化などの修飾を行っている。

5. 今後の課題

MPIase はタンパク質膜挿入に関わる因子として、再構成系を用いて生化学的に同定された。当初タンパク質性の因子であると想定していたが、結局は糖脂質であることが判明し、「糖脂質酵素 (Glycolipozyme)」という概念を提唱するに至った。「糖脂質酵素 (Glycolipozyme)」の発見は、ノーベル賞受賞対象ともなった RNA 酵素 (Ribozyme) の発見に次ぐ、インパクトの高い画期的なものである。今後は、「糖脂質酵素 (Glycolipozyme)」としての MPIase の普遍性を実証し、さらなる研究成果を発信することが「岩手大学ブランド」の創出につながると考えている。

植物 MPIase ホモログの発見は、直接、寒冷耐性植物の開発につながるものである。植物 MPIase ホモログの生合成経路を明らかにし、その経路に関わる遺伝子の変異株を構築することにより、低温耐性植物のスクリーニングが容易になる。

通常、MPIase のような二次代謝産物は多くの遺伝子産物により生合成され、しかも重要な合成酵素はしばしば重複して存在するため、変異体解析によりこの因子を同定するのは極めて困難であったと考えられる。我々の再構成系は生体内の反応を忠実に再現しているため、MPIase の発見に至ったと考えられる。一方、YidC 機能は主には変異体を用いた遺伝学的解析が進められ、膜挿入反応に極めて重要であると結論されている。しかし、膜挿入反応の再構成系では未だに明確な機能が示されていない。最近明らかになった YidC の結晶構造では、YidC は膜内部で疎水的な溝をもち、膜タンパク質はまずこの溝に取り込まれることが膜挿入に重要であると考えられている。そのため、基質膜タンパク質が大量に供給されたとき、MPIase 依存の膜挿入が YidC により促進されるという結果は、YidC 機能が初めて再構成系において明確に示されたものであり、さらに、効率の良い膜挿入には MPIase から YidC への膜タンパク質の受け渡しが重要であるといえる。このモデルは結晶構造に基づく膜挿入機構に極めて合致するものであり、MPIase—YidC 複合体の結晶構造解析の結果が待たれる。

MPIase は Sec 依存の膜挿入や分泌タンパク質の膜透過といった、SecYEG と協調した機能も重要である。今回の解析により、SecYEG の二量体構造は MPIase 添加により大幅に変化することが明らかになった。MPIase 存在下の構造 (side-by-side 構造) でのみ SecG の反転サイクルといった、大きな構造変化が可能となることも明らかになった。これらの結果より、SecYEG と協調して作動する MPIase について二つの可能性が考えられる。一つは、MPIase と相互作用し side-by-side 構造となった SecYEG のみが活性化された状態であるという可能性である。side-by-side 構造では SecG や SecA サイクルが円滑化されており、その結果膜透過活性が上昇する。Sec 依存の膜挿入においても、side-by-side 構造の SecYEG のみが膜挿入活性をもつ。これらの可能性においては、MPIase は SecYEG を活性化する「補酵素」的な働きであるといえる。もう一つは、Sec 非依存の反応においてみられたように、Sec 依存の反応においても MPIase が直接「Integrase」活性を示すという可能性である。このとき Sec 依存の膜挿入においては、タンパク質合成に共役して進行するため、SecYEG は「リボソーム受容体」の役割を果たし、膜挿入は MPIase が触媒する。タンパク質膜透過においても、膜透過の第一段階は分泌タンパク質前駆体のシグナルペプチドが膜挿入する段階であるため、この段階が MPIase により直接触媒される。今後この二つの可能性について検証する予定である。

MPIase の応用については、現在進行中の膜タンパク質可溶化剤開発の出発材料として有用であるという点と、さらにもう一点、試験管内機能的膜タンパク質合成システムの開発が挙げられる。ゲノムプロジェクトの遂行により、多くの機能未知の膜タンパク質の存在が知られている。また、膜タンパク質は新たな薬剤開発のためのターゲットとして注目されている半面、不溶性であるため取り扱いが容易ではない。そのため、MPIase や SecYEG、YidC といった膜挿入に必要な因子を組み込んだプロテオリポソームを用意しておけば、試験管内で膜タンパク質の合成とそれに続く膜挿入を行うことができる。膜挿入後はプロテオリポソームを回収すれば、ただちに膜タンパク質の機能解析を行うことができる。このシステムを用いることにより、多くの膜タンパク質の機能解析や薬剤のスクリーニングが容易にでき、しかも短時間で完了すると見込まれる。

MPIase は大腸菌の細胞質膜（内膜）から分離・同定したものである。図1に示す膜挿入機構、特に Sec 依存の機構は、基本的にすべての生物において保存されている。そのため、大腸菌を始めとするバクテリアだけでなく、広く高等動植物にまで MPIase に相当する化合物が保存されていると期待される。実際、植物由来の MPIase ホモログの解析が進行中である。近い将来、ヒト由来の MPIase ホモログの同定、および機能解析も進め、MPIase をターゲットとした創薬への展開も期待できると考えている。

6. 主な発表論文等

雑誌論文

1. Nishiyama K, Maeda M, Yanagisawa K, Nagase R, Komura H, Iwashita T, Yamagaki T, Kusumoto S, Tokuda H, Shimamoto K (2012) MPIase is a glycolipozyme essential for membrane protein integration.
Nat Commun 3: 1260
2. Moser M, Nagamori S, Huber M, Tokuda H, Nishiyama K (2013) Glycolipozyme MPIase is essential for topology inversion of SecE during preprotein translocation.
Proc Natl Acad Sci USA 110: 9734-9739
3. Kumazaki K, Chiba S, Takemoto M, Furukawa A, Nishiyama K, Sugano Y, Mori T, Dohmae N, Hirata K, Nakada-Nakura Y, Maturana AD, Tanaka Y, Mori H, Sugita Y, Arisaka F, Ito K, Ishitani R, Tsukazaki T, Nureki O (2014) Structural basis of Sec-independent membrane protein insertion by YidC.
Nature 509: 516-520
4. Nishiyama K, Shimamoto K (2015) Glycolipozyme Membrane Protein Integrase (MPIase): Recent Data
Biomol Concepts in press

学会発表

1. Nishiyama K, Kusumoto S, Tokuda H, Shimamoto K “MPIase (Membrane Protein Integrase), a glycolipozyme involved in protein integration into and preprotein translocation across membranes” The 2nd International Symposium on Chemical Biology of Natural Products: Target ID and Regulation of Bioactivity (Yokohama), Invited Talk, 28-29 Oct, 2013
2. Nishiyama K “Reconstitution of preprotein translocation across and membrane protein integration into the cytoplasmic membrane of *E. coli*” 「細胞を創る」研究会 7.0 (Tokyo Univ), Invited Talk, 13-14 Nov, 2014

その他

1. 岩手日報朝刊、「糖脂質の酵素機能を発見」平成 24 年 12 月 12 日
2. 岩手日報 WebNews、「世界初、糖脂質の酵素機能発見 岩手大の西山教授」平成 24 年 12 月 12 日
3. 読売新聞岩手版、「糖脂質に酵素と似た機能、岩手大など発見、低温に影響受けず」平成 24 年 12 月 13 日
4. マイナビニュース、「岩手大など、酵素と類似した機能を持つ糖脂質「MPIase」を発見」平成 24 年 12 月 13 日
5. 特定領域研究「タンパク質の社会」元班員による研究成果、「MPIase はタンパク質膜挿入に必須の糖脂質酵素 (glycolipozyme) である」平成 24 年 12 月
6. Nature Japan、注目の論文、「MPI アーゼはタンパク質膜挿入に必須の糖脂質酵素 (グリコリポザイム) である」平成 25 年 1 月
7. 2ちゃんねる (<http://anago.2ch.net/test/read.cgi/scienceplus/1355671292/>)

研究課題

岩手リンドウのグローバルブランド化に向けた技術開発

研究代表者 農学部 教授[※] 堤 賢一
研究分担者 農学部 教授 吉川 信幸
研究分担者 八幡平市花き研究開発センター 所長 日影 孝志
(農学部附属寒冷バイオフィロンティア研究センター 客員教授)

【研究成果の概要】

本研究は岩手リンドウのグローバルブランド化に向けて、リンドウの新育種技術の開発と新品種育種の効率化および生産効率の向上を目的とした。研究期間内で(1)リンドウの開花に関わる遺伝子を同定し、それらの遺伝子の発現を制御することによって開花までに要する時間を1年以上短縮することができた(早期開花技術)。また、(2)越冬芽の越冬生存に不可欠な遺伝子を同定し、この遺伝子の制御によって越冬生存率を上げることが可能であることを示すことができた(生産効率の向上)。さらに、(3)リンゴ小球形潜在ウイルス(ALSV)ベクターを用いて早期開花を誘導したリンドウの次世代個体は高確率でウイルスフリーとなることから、ウイルスフリーの次世代個体はそのまま育種素材として利用できると考えられた。これらはリンドウの育種や生産に関する新しい技術開発であり、岩手リンドウのブランド化に貢献することが期待される。

【支援経費交付額】

| 年 度 | 配 分 額 |
|------|------------|
| 24年度 | 3,890,000円 |
| 25年度 | 2,723,000円 |
| 計 | 6,613,000円 |

【キーワード】 (5つ程度)

リンドウ、開花制御遺伝子、早期開花、リンゴ小球形潜在ウイルス、越冬

※ 職名は採択当時のもの

1. 研究の背景

岩手県は全国一のリンドウ産地であり、特に八幡平市安代地区(旧安代町)を中心としたリンドウは岩手県の代表的なブランド花卉となっている。本課題は、岩手リンドウのさらなるブランド化に向けて、高品質リンドウ品種を育種するための新育種技術を開発し、その実用基盤を確立する。

リンドウはお盆・お彼岸には出荷量が多く高単価で販売されるが、他の時期に開花・出荷できる品種が少ない。生産・出荷時期拡大には開花調節の技術が必要であるが、これをコントロールする栽培技術が極端に少ない。リンドウの開花時期を制御し、リンドウ切り花の周年生産を達成するためには、開花期の異なる品種の育成が重要な課題である。岩手県八幡平市は開花時期の異なる種々の品種を交配育種で開発してきたが、これまでに得られた品種では開花時期に連続性がなく、生産が困難な時期が断続的に存在する。さらに、従来の青色リンドウに加えて、花色が赤の「赤いリンドウ」の育成が期待されているが、開花期が遅いことや株落ちするなどの問題があり、今後さらなる改良が必要である。一方、従来の交配による新品種開発には10年単位の長い年月を要するため、育種年限の短縮に繋がる効率的な育種技術の開発が求められている。そこで本課題では、リンドウの開花期を制御している遺伝子に着目し、(1)リンドウの開花制御機構の解明と(2)植物ウイルスベクターを利用した開花関連遺伝子の発現および抑制による開花制御(早期、晩期開花)技術を開発する。さらに(3)これらの成果を活用し、育種期間短縮によるリンドウ品種の新育種技術を実用化するための基盤を確立する。これが達成されれば、地元岩手県のリンドウ品種の独自性やイメージをさらに大きく向上させ、日本のみならず海外での活用も視野に入れた、岩手リンドウのグローバルブランド化に繋がるものと考えられる。

本研究では、リンドウ開花制御関連遺伝子の機能解明および開花関連遺伝子とウイルスベクターを利用したリンドウ早期開花技術の開発により、10年単位の長い年月を要する従来の育種年限を大幅に短縮する実用的技術を確認する点に独創性および新領域開拓性があり、岩手大学発のオリジナルな新技術に繋がるものである。リンドウは日本固有の花き品目であり、全国出荷量および生産量の約7割を占める岩手県において、出荷期を拡大する新しい新品種開発がなされれば、リンドウの国内での安定供給と海外を視野にいれた新規需要開拓が可能になる。

2. 研究の目的

岩手県は全国一のリンドウ産地であり、特に八幡平市安代地区(旧安代町)を中心としたリンドウは岩手県の代表的なブランド花卉となっている。岩手リンドウのさらなるブランド化には、高品質リンドウ品種をいち早く開発するための新育種技術を開発し、グローバルな競争に打ち勝つことができる基盤を確立することが必要である。

従来の交配によるリンドウの新品種育種には10年単位の年月を要するが、この育種期間の長さがリンドウのさらなるブランド化への障害となっている。そこで本課題では、リンドウの生長・開花制御機構を解析し、生長や開花時期(早期、晩期開花)を制御できる技術の開発を行って、育種年限の短縮に繋がる効率的な技術を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

開花関連遺伝子の構造と機能およびその作用機構を解析すると共に、ALSVベクターを用いて開花関連遺伝子のリンドウでの発現と抑制実験を行い、リンドウ生育過程での開花制御の解析を行う。さらに *AtFT* を発現するリンゴ小球形潜在ウイルス (ALSV) ベクター (*AtFT*-ALSV) を用いてリンドウ開花制御技術に関する基礎データを得る。

(1) リンドウの開花制御機構の解明

1) 開花時期関連遺伝子の機能解明

堤らが同定した開花抑制遺伝子 *GtSVP* や生長・越冬関連遺伝子 *W14/15* の遺伝子全構造を解明し、休眠や花成に関与する温度などによる発現制御の動態を解明する。(堤)

2) ALSV ベクターによる RNA サイレンシング法を利用してリンドウの *GtSVP* および *W14/15* 遺伝子の発現をノックダウンし、開花に及ぼす影響を解析する。(堤、吉川)

3) ALSV ベクターを用いて、リンドウの開花促進遺伝子 *GtFT* の発現および開花抑制遺伝子 *GtTFL* のノックダウンがリンドウの開花に及ぼす影響を解析する。(吉川)

これらの成果を基に、リンドウの開花制御（早期開花）技術にはどの遺伝子をターゲットにするのが最適かを判断する。

(2) ウイルスベクターを利用したリンドウの早期開花技術

ALSV ベクターを用いて *AtFT* 遺伝子をリンドウ実生で発現させると、本来2年近くかかる開花時期を3~4ヶ月に短縮できる結果を既に得ている。そこで、(1)の研究と平行して ALSV-*AtFT* によるリンドウ早期開花技術基礎データを得る。すなわち、

1) 各種リンドウ品種の実生苗に *AtFT*-ALSV を接種し、開花促進効果を調べる。(吉川、日影)

2) 早期開花したリンドウ花（雄蕊と雌蕊）の稔性を調べる。(日影)

3) 早期開花個体から得られた次世代個体に ALSV が種子伝染するかどうかを ELISA および RT-PCR 法で調べる。(吉川)

以上の結果から、ALSV ベクターを利用したリンドウ早期開花技術の基盤を確立する。

以上で得られた成果、すなわち(1)リンドウ早期開花技術でターゲットとする遺伝子の種類および(2)ALSV ベクターを利用したリンドウ早期開花技術の基礎データに基づいて、育種効率向上・育種期間短縮によるリンドウ品種の新育種技術の実用基盤を確立する。

1) ターゲットとする開花関連遺伝子の発現あるいは抑制によるリンドウの早期開花効果の解析。(堤、吉川)

2) 早期開花技術のリンドウ世代促進（育種期間短縮）への利用の検討。(日影)

3) 早期開花技術のリンドウ形質（花色や花型）評価への利用の検討。(日影)

以上の解析から、(1) 開花制御遺伝子の機能解析および (2) ウイルスベクターを利用したリンドウの早期開花技術に基づいた (3) リンドウ品種の新育種技術の実用基盤を確立する

4. 研究成果

最初にリンドウの多年草としてのライフサイクルについて簡単に述べたい(図1)。切り花用に栽培されているリンドウの主な品種の親はエゾリンドウ (*Gentiana triflora*) である。

この種のリンドウは春に播種すると夏から秋にかけて生長するが、1年目は開花せず越冬芽という冬芽をつくって越冬する。2年目の春に越冬芽から萌芽し、生長して夏から秋にかけて開花する。この間、新たな越冬芽が形成され、越冬して次の年に生長・開花する。このサイクルを繰り返す。

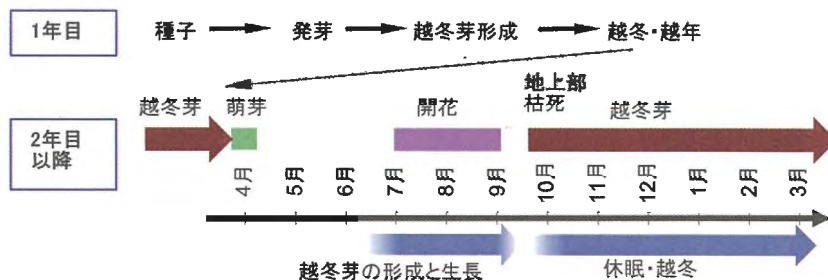


図1. リンドウのライフサイクル

このサイクルを繰り返す。

返す。従って、播種してから最初の開花までに1年半近くを要する。本研究の目的の1つはこの開花に要する時間を短縮できないか、というものである。もう1つは越冬芽の越冬生存率である。品種によっては越冬生存率が低く、切り花の効率的生産に影響を与えているので、越冬生存率の向上が求められている。

本研究ではこれらの問題を取り上げ、以下に述べるように、(1) リンドウの開花に関わる遺伝子を同定し、それらの遺伝子の発現を制御することによって開花までに要する時間を1年以上短縮することができた。また、(2) 越冬芽の越冬生存に不可欠な遺伝子を同定し、この遺伝子の制御によって越冬生存率を上げることが可能であることを示すことができた。さらに、(3) リンゴ小球形潜在ウイルス (ALSV) ベクターを用いて早期開花を誘導したリンドウの次世代個体は高確率でウイルスフリーとなることから、ウイルスフリーの次世代個体はそのまま育種素材として利用できると考えられた。

(1) リンドウの開花制御に関与する遺伝子を用いた早期開花技術の開発

a. リンドウの開花制御に関与する遺伝子 GtSVP の同定と早期開花技術への利用

開花に抑制的に働く遺伝子 GtSVP-L 遺伝子 (SVP: Short Vegetative Phase) をリンドウで新たに同定し、その機能を明らかにした。この遺伝子の一部をリンゴ小球形潜在ウイルス (ALSV) ベクターに組み込み、リンドウ (*Gentiana triflora*, 品種 AZ1) の幼苗に感染させた。ALSV ベクターは本研究グループの吉川らが開発したもので、目的とする遺伝子の一部を組み込んだ ALSV を植物体に導入すると、元の目的遺伝子の発現を抑制することができる (Virus-induced Gene Silencing; VIGS)。GtSVP 遺伝子の一部を組み込んだベクター (ALSV-SVP) を播種後 2~3 ヶ月のリンドウ幼苗に感染させ、その後の生長をコントロール (感染させなかった苗および GtSVP を組み込んでいないベクターを感染させた苗) と比較した結果が図 2 である。感染 2 ヶ月後の植物体を見ると、コントロール (非感染および

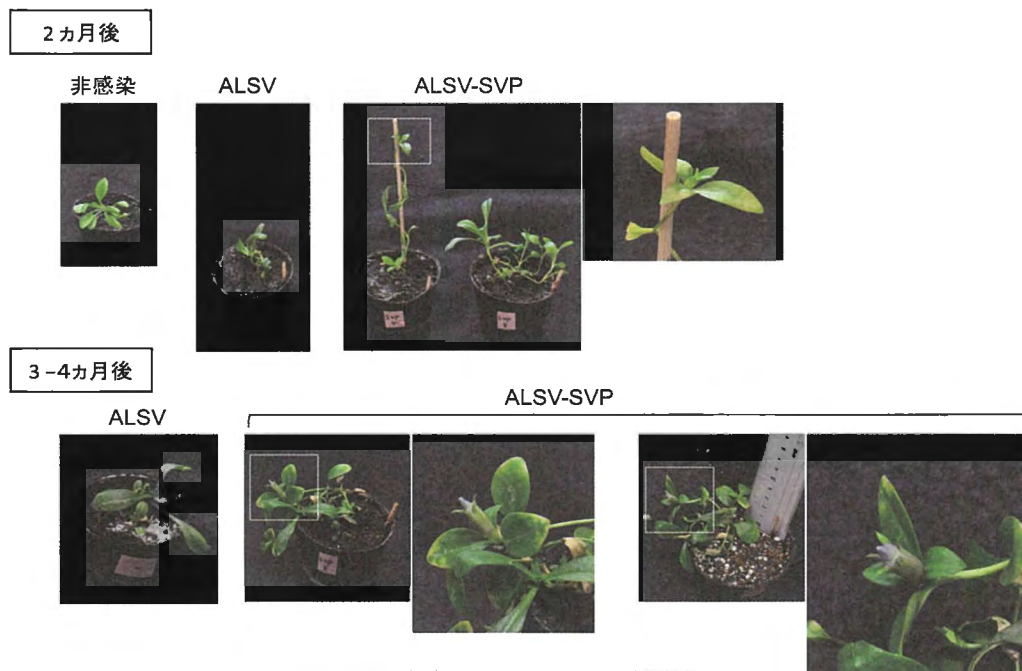


図 2. GtSVPの発現を抑制したリンドウの早期開花

ALSV) に比べて生長がやや早く、この時期に既に花芽ができていることがわかる。3~

4ヶ月後になると花芽がさらに生長し、開花している（写真中の白枠部分）。

ALSV-SVP を感染させたリンドウでの GtSVP の相対的発現量を real-time RT-PCR 法で解析した結果が図3である。

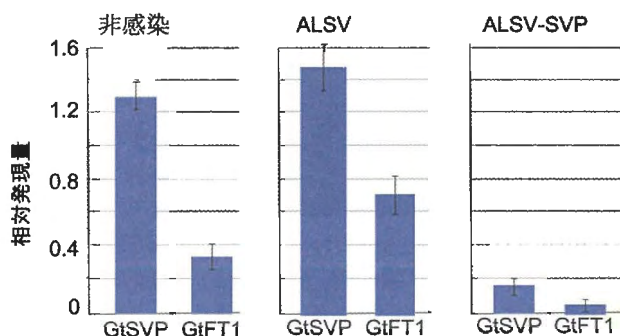


図3. ALSV-SVPを感染させたリンドウのGtSVPおよびGtFT1の発現。

量とともに、これと逆の機能（開花亢進）をもつ遺伝子 GtFT1 の発現も解析したが、この遺伝子の発現量におおきな変化はなかった。GtSVP は GtFT1 を抑制することによって開花を阻止することがシロイヌナズナなどで知られているが、リンドウでは GtFT1 経路とは別の開花経路があるのかも知れない（以下(1)-b 参照）。

以上のように、GtSVP の発現を抑制することによって開花までの期間を1年以上短縮できた（図1参照）。この成果は、リンドウの育種技術向上に大きく貢献する。特に、花の形態や色に関連する育種では、開花までの時間を1年以上短縮出来るので形態確認が短期間でできる。

b. 開花促進遺伝子 FT1 および抑制遺伝子 TFL を用いた早期開花技術の開発

上で述べた GtSVP の他にいくつかの開花関連遺伝子が知られている。本研究では、それらの内、FT 遺伝子（開花促進）と TFL 遺伝子（開花抑制）について早期開花技術に利用できるかを検討した。シロイヌナズナおよびリンドウの開花促進遺伝子（それぞれ AtFT1, GtFT1）、およびリンドウ開花抑制遺伝子（GtTFL）を上記(1)-a と同様に ALSV ベクターに組み込みリンドウに感染させた。なお、AtFT1 および GtFT1 は、それぞれの mRNA タンパク質コード領域全域を ALSV に組み込み、感染植物対内で高発現させた。GtTFL は一部のみを ALSV に組み込み VIGS によって植物体内で発現を抑制させた。

リンドウの極早生品種「いわて夢あおい」では ALSV-AtFT 感染区と非感染区を比較すると茎立ちの時期が ALSV-AtFT 感染区で12日早かった（図4）。

図からわかるように、ALSV-SVP を感染させたリンドウでは GtSVP の発現量が大きく低下している。従って、正常なリンドウでは GtSVP が働くことによって開花を遅らせていることになる。一方、図3では GtSVP の発現

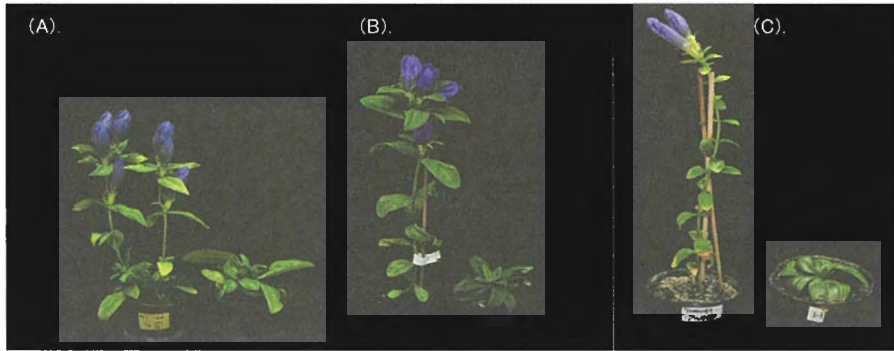


図 4. ALSV-AtFT1によるリンドウの開花促進。
 (A)極早生品種‘いわて夢あおい’, (B)中生品種‘いわて’, (C)極晩生品種‘アルタ’。
 それぞれ 左がALSV-AtFT1感染個体, 右が非接種個体。

感染後花芽が確認されるまでの日数は ALSV-AtFT1 で 63.7 日 (12.2 対葉期), 非感染では 92 日 (17 対葉期) であり, 約 1 カ月の差が認められた。さらに中生品種‘いわて’では感染後 2~3 ヶ月, ‘アルタ’ (極晩生品種) では感染後約 3 ヶ月で花芽が形成された。これに対して非感染区では極早生品種では花芽形成が認められたが, 中生および極晩生品種では少なくとも 6 ヶ月以上花芽の形成は観察されなかった。続いて各種 ALSV ベクターのリンドウ‘いわて’の花芽形成に及ぼす影響を調べた (図 5)。その結果, ALSV-AtFT1 が感染した 4 個体中では 4 個体が, ALSV-GtFT1 が感染した 5 個体中でも 5 個体が, そして ALSV-GtFT2 感染 3 個体中 1 個体が接種 3 か月以内に花芽を形成した。



図 5. リンドウ‘いわて’におけるリンドウ花芽形成遺伝子の開花促進効果(感染3ヵ月後)

ALSV-GtFT1/GtTFL 感染 (FT1 発現と同時に TFL 抑制) では接種後 3 ヶ月以内の花芽形成は確認されなかった。ALSV-GtTFL では茎立ちも認められなかった。

以上の結果より, ALSV ベクターを用いてリンドウにおける開花関連遺伝子の発現もしくは発現抑制を行った結果, *GtFT1* 遺伝子の発現はリンドウにおいて強い開花促進効果を示す一方で, *GtFT2* 遺伝子を発現もしくは *GtTFL* 遺伝子を発現抑制しても早期花芽形成には至らないことが明らかとなった。また, *GtTFL* 遺伝子を抑制して *GtFT1* 遺伝子を発現する ALSV-GtFT1/GtTFL も *GtFT1* 遺伝子もしくは *AtFT* 遺伝子単独での発現と比較すると花芽形成誘導効果は低いことが確認された。理由は不明であるが, リンドウの開花促進技術

に使用するベクターは ALSV-AtFT もしくは ALSV-GtFT が好適であると考えられる。

(2) リンドウの越冬生存に関与する遺伝子の同定

最初に述べたように、リンドウは発芽後 1 年目には開花せずに休眠・越冬し、次の年に萌芽・生長して開花する。従って、越冬芽の越冬生存率向上も育種上重要な課題である。

我々は、越冬芽で発現が高い遺伝子 W14/15 を同定し、この遺伝子には分類種や品種に特徴的な種々の変異があり（多型）、そのうちの特定のタイプの遺伝子（W15a 型）が越冬生存向上に、また別のタイプ（W14b 型）が越冬率低下に関与することを交配実験によって既に明らかにしている（Hikage et al., 2011, *Mol. Genet. Genomics* 285, 47-56; Tsutsumi and Hikage 2014, *The Gentianaceae vol 1, Characterization and Ecology*, pp 251 – 265, Springer）。

本研究では、W15a 遺伝子の機能を上記 I と同様に ALSV ベクターを用いて解析した。W15a 遺伝子の一部を組み込んだベクター（ALSV-W15a）を感染させた幼苗から出来た越冬芽の生存を越冬前と越冬後で観察したのが図 6 である。感染植物体での W15a の相対的発現量を上記 I と同様 RT-PCR で解析した（図 7）。図 6 からわかるように、コントロール（非感染および空の ALSV）に比べて W15a の発現を低下させても越冬芽の形成数に大きな変化はない。しかし、越冬後の越冬芽を見ると生き残って萌芽した越冬芽の数が有意に（50%以下）に低下していた。



図 6. W15a 遺伝子の発現を抑制したリンドウの越冬。
左:越冬前, 右, 越冬後. 白矢印が越冬芽(一部のみ).

これらの結果から、W15a 型遺伝子の発現は越冬芽の形成には関与しないが越冬生存（耐寒性や正常な休眠）に不可欠であることが明らかになった。実際、この遺伝子の発現は越冬前の休眠誘導時の越冬芽で高くなる。従って、W15a 型遺伝子を持たないリンドウ分類種や品種で発現させれば、越冬生存率を向上させ農業現場での生産効率をあげることが可能である。

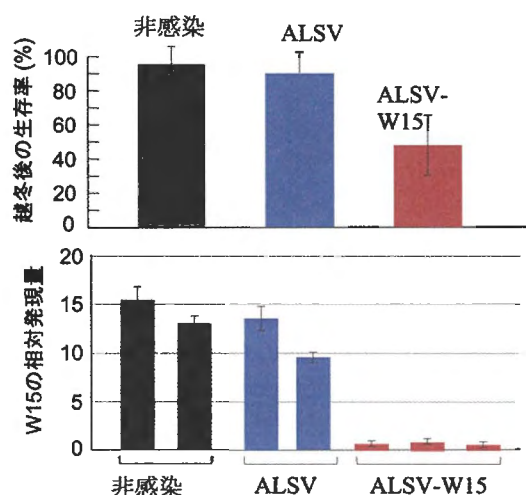


図7. 上:W15a 遺伝子の発現を抑制したリンドウの越冬生存率. それぞれ4個体, 24~26越冬芽の平均.
下:15遺伝子の発現量(個体ごと).

(3) ALSV ベクターの種子伝染率

ALSV-AtFT が感染し、早期開花したリンドウ‘いわて夢あおい’を自家受粉させて得られた種子を採取し、低温処理後に播種した。その結果、親植物が ALSV ベクターに感染していても次世代植物は正常に発芽・生長することが確認出来た (図 8)。また、ALSV-AtFT 感染‘いわて夢あおい’は開花後非感染‘いわて夢あおい’と同様に越冬芽を形成した。

さらに次世代個体33個体についてウエスタンブロット法を用いてウイルス検定した結果、すべての個体がウイルスフリーであった。

この解析によって、ALSVベクターを用いて早期開花させた個体の次世代は、高確率でウイルスフリーとなることが判明した。

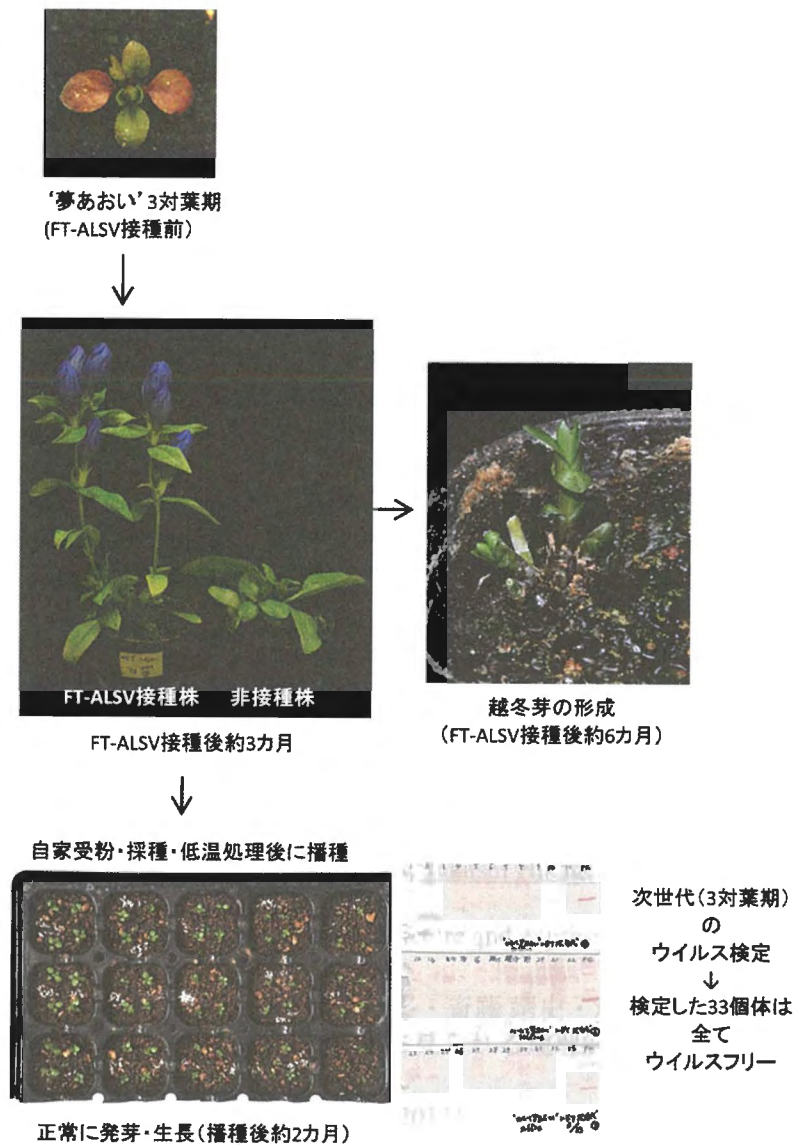


図 8. ALSV-AiFT感染リンドウ‘夢あおい’の越冬芽の形成と次世代個体への種子伝染の有無.

(4) 社会に還元される成果、又は“岩手大学ブランド”に繋がる成果

本研究ではリンドウの育種技術や生産率向上の上で解決すべき問題、開花時期の制御と越冬生存率向上に関して成果を得たと考えている。本研究では、リンドウの開花時期を1年以上短縮させる遺伝子／ベクターを複数開発し、また、越冬生存率を向上させる遺伝子／ベクターを開発した。

リンドウの新品種開発には10年以上もの年月を要する。本研究で得られたリンドウの早期開花技術は育種効率の向上や期間短縮に役立つ。また、越冬生存率向上につながる技術は栽培の現場において生産性向上に直結する。

本研究プロジェクトには八幡平市花き開発研究センター所長の日影孝志氏が分担者とし

て加わっている。花き開発研究センターでは花色や開花時期など種々の有用形質を持つ品種の育種を行っているが、これまでに多数の新品種の開発に成功し、栽培農家への配布を行ってきた実績がある。本研究成果は直ちに育種現場に導入できる。上記花き開発研究センターを中心として、実用化を目指したい。

5. 今後の課題

当初の目的であるリンドウの開花制御技術の開発と生産効率の向上（越冬生存率）に関してはほぼ達成でき、育種現場や生産現場に波及させることも可能であると考えている。

リンドウ切り花の生産・出荷は6月下旬から11月初旬である。農家の経営から見れば、出荷時期の期間拡大が好ましい。本研究で早期出荷につながる技術を開発したが、逆に開花遅延技術が開発できれば生産・出荷時期がより大きく拡大する。この技術の開発は今後の課題であろう。

一方、本研究期間内では、開花や越冬生存関連遺伝子・タンパク質の詳細な機能や作用機構の解明までには至らなかった。今後、生化学的、構造生物学的解析によって構造-機能相関等を解明すれば、基礎生物学レベルでの新たな発見につながることを期待される。

6. 主な発表論文等

雑誌論文

1. 高橋 由衣, 日影 孝志, 若目田 圭祐, 斎藤 靖史, 堤 賢一 (2014)
エゾリンドウ (*Gentiana triflora* var. *japonica*)と亜種エゾオヤマリンドウ(*G. triflora* var. *japonica* f. *montana*)の地域集団間の形態的変異.
育種学研究 (Breeding Res.) 16: 1-6.
2. 吉川信幸, 山岸紀子 (2014).
RNA ウイルスを用いた果樹の開花促進と育種年限の短縮.
遺伝 68: 112-116.
3. 今 辰哉, 吉川信幸 (2014).
アグロインフィルトレーション法による遺伝子発現と遺伝子機能解析.
遺伝 68: 125-129.
4. 吉川信幸 (2013)
非病原性植物 RNA ウイルスを用いた新育種技術(NBT)の開発.
バイオサイエンスとバイオインダストリー 71: 360-364.

学会発表

1. 山岸紀子、久米浩平、高橋由衣、Haniyeh Bidadi、日影孝志、斎藤靖史、
吉川信幸、堤 賢一 (2014)
リンドウの生長・開花を抑制する SVP 様遺伝子の発現と機能. 第 32 回日本植物細胞
分子生物学会大会
2. 山岸 紀子・日影 孝志・斎藤 靖史・吉川 信幸・堤 賢一 (2014)
リンドウ W14/15 遺伝子は越冬芽の越冬生存に関与する. 日本育種学会第 125 回講演会.
3. Haniyeh Bidadi, Kohei Kume, Keisuke Wakameda, Takashi Hikage, Yasushi Saitoh
and Ken-ichi Tsutsumi (2014)
SVP-like flowering-related genes in *Gentiana*: structure and expression. 日本育種学会第 125
回講演会.
4. 高橋 由衣・千葉さくら・日影 孝志・久米 浩平・斎藤 靖史・堤 賢一 (2014)
野生リンドウの W14/15 エステラーゼ遺伝子に見られる地理的変異. 日本育種学会第
125 回講演会.
5. 日影 孝志・久米 浩平・斎藤 靖史・堤 賢一 (2013)
W14/15 遺伝子マーカーを用いたリンドウ品種の越冬率の評価. 日本育種学会第 123 回
講演会.

図 書

1. Ken-ichi Tsutsumi and Takashi Hikage
Genes Expressed in the Overwinter Buds of Gentian (*Gentiana* spp.): Application to Taxonomic,
Phylogenetic and Phylogeographical Analyses.
The Gentianaceae (Rybczynski J.J., Davey, M.R. and Mikula, A. eds.), vol 1 Characterization and
Ecology, pp 251 - 265. Springer, Germany

研究課題

癒しをもたらすライフ・イノベーション機能性鋳造品の研究開発（スズムシ風鈴プロジェクト）

研究代表者 工学部 准教授 永田 仁史
研究分担者 工学部 教授 平塚 貞人
研究分担者 教育学部 教授 田中 隆充

【研究成果の概要】

機能性鋳造品の開発拠点形成に向けた第一歩として、スズムシの音色を有する南部風鈴の研究開発を行った。本研究では、まず、スズムシの音色が主に約 4kHz 付近の基音とその倍音によるものであることを確認し、次に、風鈴に対する有限要素法（FEM）を用いた振動解析とレーザー振動計による振動観測から、風鈴の音色がほぼ基音と基音の次に高い周波数の成分である第一上音、および、うなりによって決まること、また、FEM 解析によって風鈴形状からその振動がほぼ予測できることがわかった。これにより、風鈴の基音と第一上音の周波数をスズムシの基音と倍音に一致させた風鈴を開発することとした。次に、FEM による風鈴形状のコンピュータ設計を通し、容易に基音と倍音を発生できる台形円筒型を提案し、新しい形状の南部風鈴として特許出願した。また、成分と配合を変えた 29 種類の南部風鈴を鋳造し、各々の線スペクトル成分の減衰傾向から、スズムシの音色発生に適した風鈴材質について見通しを得た。さらに、風によらない電気的な方法による風鈴の発音方法の提案と試作を行った。台形円筒型の風鈴を設計、鋳造してその音色について検討した結果、意図した成分周波数を有するものの、成分間の強度バランスの違いや強い高次成分の発生により、スズムシの音色が達成できていないことがわかった。以上により、目的の成分周波数をもつ南部風鈴のコンピュータ設計についてその道筋をつけることができたが、音色全体の設計について更なる改良が必要であることがわかった。ただし、電気的な発音方法を用いた場合は、風鈴の高次成分や成分強度バランスには関係なくスズムシの音色を模擬できることも確認できた。

【支援経費交付額】

| 年 度 | 配 分 額 |
|------|------------|
| 24年度 | 3,408,000円 |
| 25年度 | 2,385,000円 |
| 計 | 5,793,000円 |

【キーワード】 南部風鈴、スズムシ、PTSD、有限要素法

1. 研究の背景

PTSDなどの心因性疾患の患者数は、平成20年に1,041万人を超えて現在も増加傾向にあり、その治療方法の開発には患者、家族、医療関係者から強い要望がある。ストレス障害の治療法としては、岩手大学の菅原正和名誉教授らの研究により音響刺激の有効性が確認されており、中でもスズムシの鳴き声が高い治療効果をもつことが報告されている。一方、岩手県は南部鉄器の産地であり、工芸铸件である南部風鈴は、癒しをもたらす音色を奏でる。南部風鈴の音は、3kHz以上の帯域に主要な周波数成分をもち、小鳥のさえずりなど自然の中でリラックスを与える音色と同じ周波帯であることから、スズムシの鳴き声と同じ音域(4kHz以上)と振動パターンを南部風鈴において生成することにより、これまでに類をみない工芸铸件の開発につなげることができると考えている。

ところで、岩手大学工学部は、全国に先駆けて鑄鉄研究を行っており、鑄鉄を南部風鈴のように薄肉化すると炭化鉄(セメント)となることを確かめている。また、この鉄炭化物(チル)を含む鑄鉄は振動吸収性が小さいため、これが南部風鈴が長い余韻をもつ要因であることを明らかにしている。しかし、南部風鈴の音色は材質、形状によって大きく異なり、どのような材質・形状がスズ虫の鳴き声に近い音を奏でるかなどは不明である。したがって、スズ虫の鳴き声と南部風鈴の音色を解析して両者の類似点を調べるとともに、鈴虫の鳴き声に近い音色を出す南部風鈴の材質、形状を調査することが課題であり、学内横断的な研究テーマとしてスズ虫の音色の風鈴開発実現を目指すこととした。

2. 研究の目的

従来、南部風鈴は、生活文化を彩る工芸品として買い求められており、実用品としての音質やデザイン性が重視されてきた。こうした中で、癒しの機能性を向上させ、ストレス障害の治療や予防にも貢献できる南部風鈴の研究開発を行うことが本研究の最初の目標である。これは、従来の南部風鈴の商品価値に革新的な変化をもたらすだけでなく、製造側にも伝統工芸品から、より消費者志向に応える「ニーズ対応型」あるいは「ニーズ先取型」の商品開発への意識変革をもたらすものと考えられる。特に、岩手大学における心理学の研究成果をもとに、岩手県の重要な地域資源である南部風鈴の新商品を開発し、岩手発の全国に向けたライフ・イノベーションを考慮した機能性鑄造品の研究開発の拠点形成を行うことが本研究の最終目的である。

3. 研究の方法

[研究体制] 南部風鈴の材質分析や試作品鑄造に関しては、鑄鉄を専門分野とする工学部材料物性工学科の平塚と附属鑄造技術研究センターの堀江が担当し、風鈴の形状と音色の関係の調査については、音響を専門とする工学部電気電子・情報システム工学科の永田が担当する。さらに、上述から得られたデータ等から最適で効果的な形状と社会ニーズ・ライフスタイルに適合したデザイン制作を教育学部の田中が担当する。

[研究の手順] スズ虫の鳴き声の鑄鉄製風鈴を開発するため、最初に現行の南部風鈴の化学分析、顕微鏡組織解析による材質調査を行った後、鑄鉄の成分と溶湯処理および形状を変化させた材質を持つ南部風鈴の造型、溶解、鑄造を行い、鑄鉄製風鈴を作製する。一方で、スズ虫の鳴き声と南部風鈴の音色を音響学的に分析して両者の類似点を調べるとと

もに、スズ虫の鳴き声に近い音色を出す南部風鈴の材質、形状を明らかにする。その後、コンピュータシミュレーションを用いた目的の音色をもつ南部風鈴の設計とデザイン面の検討を行い、鋳造して性能を評価する。さらに、短時間のスペクトルだけでなく、時間的な振幅変化についても鈴虫を模擬できるような構造について検討を行う。

4. 研究成果

4-1. スズムシの音色と南部風鈴の音色

まず、スズムシの鳴き声の振幅波形包絡とスペクトルを図1に示す。図1から、スペクトルは約4kHzの基本周波数とその2倍、3倍の周波数の線スペクトル成分からなり、それらの周波数はおおむね一定であることがわかる。また、振幅包絡は15～30回/秒で増減を繰り返していることがわかる、一方、南部風鈴については、ここで分析した風鈴の場合、図2に示すように、約3.5kHzの基音、および、9kHz、17.5kHzの線スペクトル成分からなっており、振幅包絡はうなりによって規則的に変化している。両者は線スペクトル構

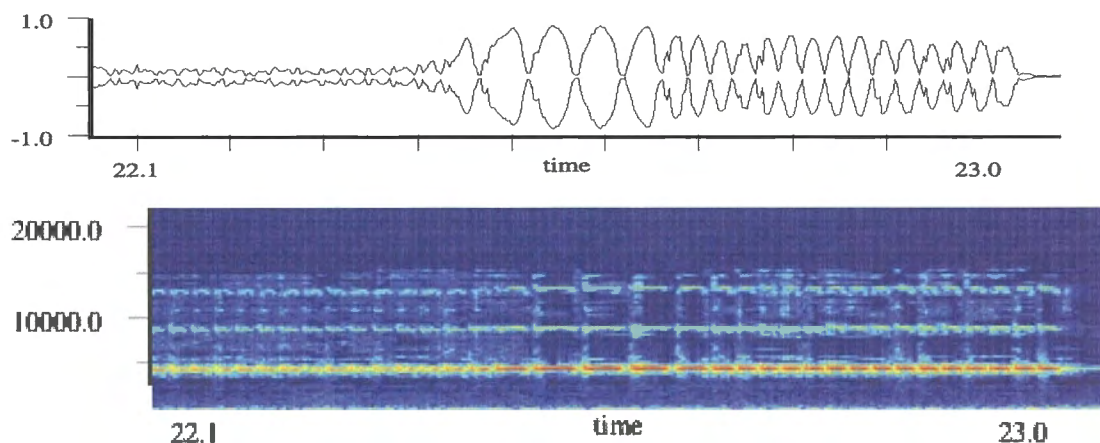


図1 スズムシの鳴き声の振幅包絡（上）とスペクトログラム（下）

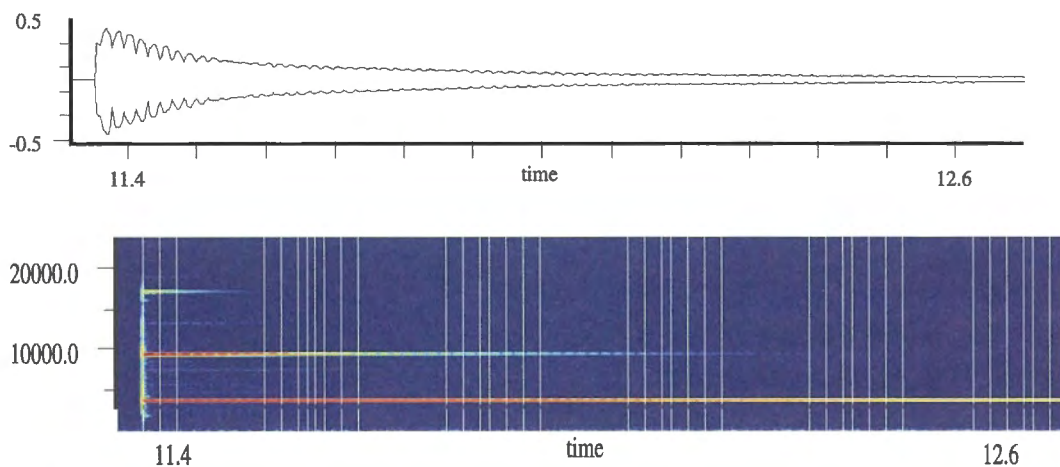


図2 風鈴の振幅包絡（上）とスペクトログラム（下）

造であることから、その成分スペクトル周波数とうなりの周期を一致させれば、似た音色にできるものと考えられる。

4-2. 南部風鈴の振動

■ 風鈴と鐘の振動モード

南部風鈴の音と振動に関する従来研究は少ないが、同じ鐘でも、ハンドベル、カリオン、教会の鐘、中国の編鐘、寺院の梵鐘などについては古くから多くの研究がなされている。これらによれば、鐘の音は鐘の胴体の固有振動に対応した正弦波の重ね合わせであり、強い振動成分は、主に、

側面の円筒に沿った定在波による振動モードから生じる。鐘の振動は、鐘の面上に縦方向の子午線節線と水平な円周に沿った円形節線を生じ、モードごとにこれらの節線数が異なる。この状況は、円板の振動モードにおいて、直径方向の節線と円周に沿った節線とが生じるのと似ているため、円板と同様に節線数でモードを区別し、子午線節線をなす半径の数が m 、円形節線数が n であるとき、これを $(m-n)$ モードと呼ぶ。振動モードの中で最も低い周波数のモードは、大抵の鐘で $m=4, n=0$ の $(4-0)$ モードであり、これを一次モードともよび、これに起因する音が基音である。また、振動モードは2つの振動からなる振動対をなすことが多く、例えば、 $(4-0)$ モードの場合、図3に示すように、対となる振動のパターンは、鐘の中心軸のまわりに 45° ずれる。これにより、振動に寄与する部位が対となる振動の間で異なることとなり、質量や形状の非対称性によって振動周波数がずれ、結果としてうなりを生じる。梵鐘においては、余韻の長い基音と2次モード($(6-0)$ モード)の音である第一上音、および、うなりが音色の印象に大きく影響するとされている。

南部風鈴の振動パターンは、有限要素法 (FEM) の固有振動モードの計算から得ることができるが、実際の鐘で観測される振動成分は、FEM 計算で求められる振動モードの一部であり、観測結果との照合が必要である。一方、振動パターンの直接観測については、ハンドベル他への時間平均ホログラフィー干渉の適用[4,7]や、振動ピックアップによる梵鐘の節線位置測定[9]などの例がある。しかしながら、これらの方法は、いずれも定常振動を与える加振機を鐘にとりつける必要があり、後者はさらに、振動ピックアップも取り付けが必要がある。風鈴は小さいので、荷重の付加による振動の変化が大きく、これらの利用は困難である。鐘の表面の近接位置をマイクロホンで走査する方法もあるが、間接的な測定であることや、風鈴の大きさの場合の分解能の問題がある。そこで、風鈴の振動様式の把握のため、FEM 解析と現象確認のための振動測定を行うこととした。振動測定においては、うなりを生じる振動対の振動パターンについて観測するため、荷重の付加なく非接触で振動を直接観測できるレーザードップラー振動計を用いた。

■ 振動モードの FEM 解析

FEM 解析には、物理シミュレーションソフトウェア COMSOL MultiPhysics を用いた。図4に分析対象の風鈴を示す。図には左から小、中、大と3種類の大きさ

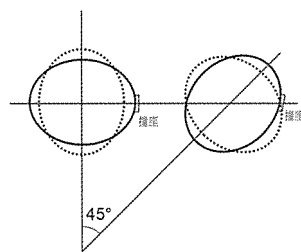


図3 振動対の変位の方向



図4 検討対象の風鈴

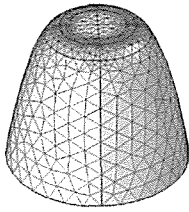


図5 FEM 分割モデル

のものを示したが、検討対象としたのは中央の中サイズのものである。南部風鈴としては一般的な形状であり、次章で振動測定にも用いる。寸法は、全高が 40mm、下端部の外径が 50mm、上端部の外形が 30mm である。板厚は均一ではなく不規則な偏りがあったが、FEM のモデルとしては全体にわたって均一に 2.4mm とした。FEM モデルの分割要素は四面体とし、要素数は 7102 とした。FEM モデルの要素分割図を図 5 に示す。材料は線形等方弾性体を仮定し、縦弾性係数はドイツのニハード鋳鉄と同じ 180GPa、ポアソン比と密度は一般的な鉄鋼材料と同じ 0.28、および、7.85g/cm³ とした。

■ 風鈴の振動との対応

モード分析の前に、解析対象の風鈴の音の分析結果について示す。図 6 に打撃時点近傍の離散フーリエ変換(DFT) スペクトルを示す。サンプリング周波数は 48kHz、DFT 点数は 8192、窓関数はハニング窓である。図を見ると、5 個の正弦波成分が現れているのが分かる。周波数は、低い順に約 3550Hz、9500Hz、17600Hz、20400Hz、21900Hz である。3550Hz の成分はこの風鈴の基音であり、振幅が 60dB 減衰する時間 (T_{60}) が 2 秒以上であるのに対し、周波数が高い成分ほど継続時間は短くなり、20400Hz、21900Hz の成分は T_{60} も 0.1 秒程度と短い。なお、各線スペクトル成分の周波数軸を拡大すると、5 個の線スペクトルは、各々 2 つのピークからなることがわかる。

次に、FEM により計算された固有モードの振動パターンを図 7 に示す。図 7 は、左側が風鈴の斜め上から見た場合、右側が真上から見た場合の振動パターンである。また、FEM によるモード周波数を図 6 上に●の印で示す。図 7 を見ると、(a) から(e) の表す各モード形状は、梵鐘や洋鐘についてこれまでに報告されてきたモード形状と一致し、各々、(4-0)、(6-0)、(8-0)、(4-1)、(6-1) モードである。また、次節の振動対の測定において詳述するが、実測スペクトルにおける 3550Hz、9500Hz、17500Hz 付近の各線スペクトル成分は、各々、(4-0)、(6-0)、(8-0) モードの振動形状を示しており、計算されたモード形状と

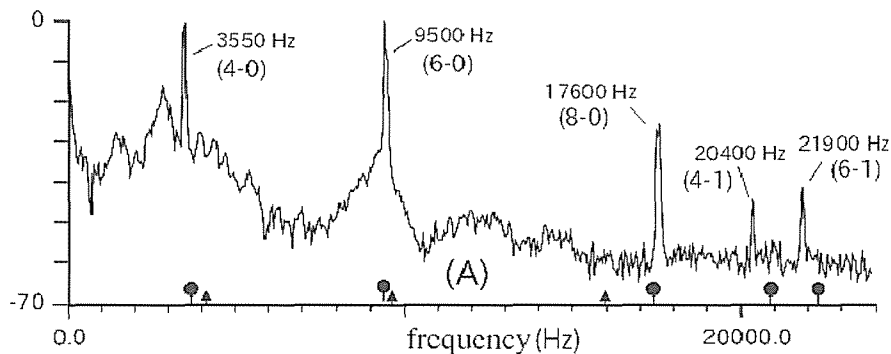


図6 解析対象の風鈴のスペクトル

一致する。図6から分かるように、(4-0)、(6-0)、(8-0)の各モードの周波数は、FEM 計算結果と観測値が概ね一致している。図7の(d)、(e)に関しては、振動形状の測定が困難であったため、確認はできていないが、FEM の(4-1)、(6-1)モードの周波数に近いので、これに対応すると思われる。周波数のずれの原因は、モデル形状と材料定数の実物との差によるものであろう。

また、FEM 計算結果において、図7に示した5つの各モードは、風鈴の中心軸のまわりの回転移動によって重なる同一形状の固有モードの対となっており、対の振動パターンは、(4-0)、(4-1)モードの場合 45° 、(6-0)、(6-1)モードの場合 30° 、(8-0)モードの場合 22.5° だけ中心軸まわりにずれている。梵鐘においては、撞座などの質量的非対称要素がない場合は、これらの対になるモードのモード周波数の違いは起こらないとする報告もあるが、ここでは、非対称要素がなくても対の間で周波数が2Hzから7Hzだけ異なっている。

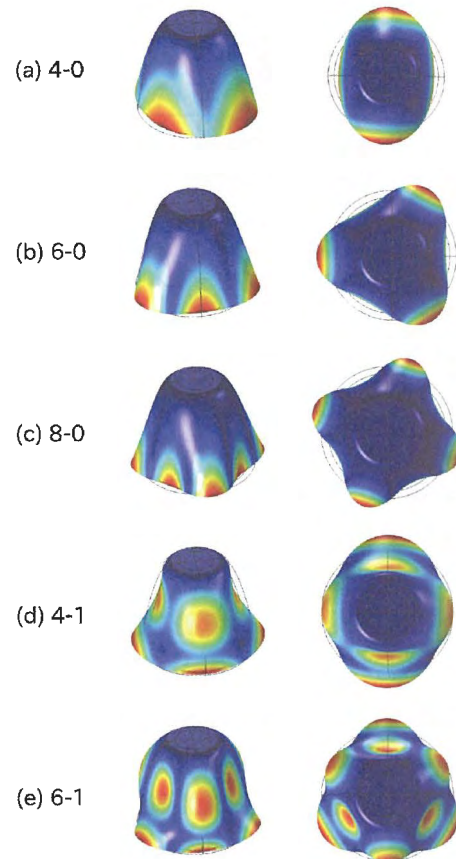


図7 FEM解析による振動モード

■レーザードップラー振動計による振動対の観測

FEM 計算結果が実際の観測スペクトルに対応していることを確認するため、風鈴の振動パターンを測定した。ここではレーザードップラー振動計（小野測器 LV-1800）を用いて風鈴の外周上の一定間隔の位置にレーザーをあて、打撃した場合の各位置の振動を観測することとした。この方法では、レーザーの照射位置を変えるごとに別個の打撃を風鈴に与えることになるため、照射位置を変えつつ風鈴への打撃力と打撃位置を一定に保つ必要がある。そこで、回転台の上に打撃装置と風鈴を固定し、打撃装置と風鈴の位置関係を変えずに全体を回転できるようにした。用いた実験装置を図8に示す。打撃装置は、8cm_のフルレンジスピーカの中心キャップ上にプラスチックの棒を接着し、その先端に尖らせた石を接続したものである。スピーカにはPCから打撃信号を与え、一定の力と間隔で打撃力を発生するようにした。この装置を用いて風鈴の外周に沿って 10° おきにレーザーを当て、風鈴の下端部と中腹部の円周上の振動を測定した。

■振動パターンの測定結果

まず、(4-0)モードに相当する3550Hzの成分について述べる。図9の左図(A)に風鈴下端部における測定結果を、同図(B)に中腹部の測定

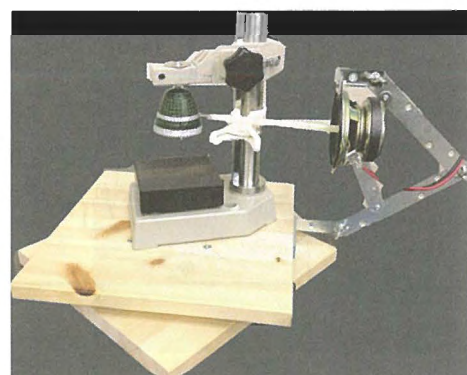


図8 振動観測用実験装置

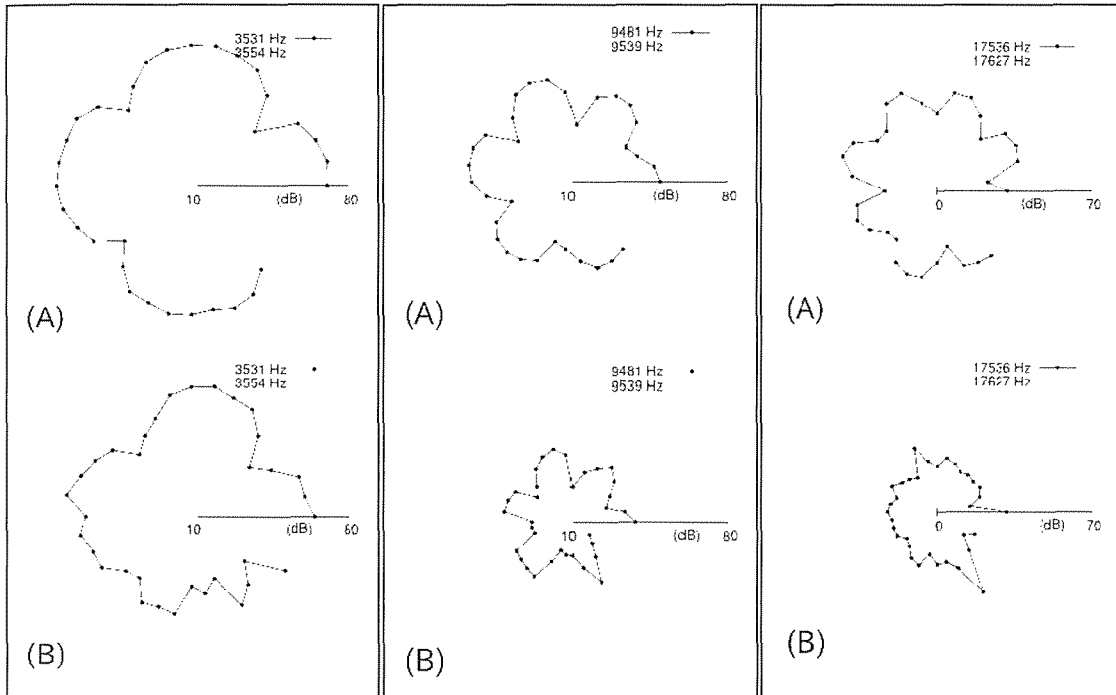


図9 レーザードップラー振動計を用いた振動対の観測結果
(左：4-0モード、中：6-0モード、右：8-0モード)

結果を示す。これらの図において、レーザーを照射した風鈴上の位置は、風鈴の中心軸まわりの角度に対応しており、照射位置の振幅レベルをその角度に対する極座標表示で示した。図中の実線が3531Hz、点線が3554Hzの周波数成分の振幅レベルである。図9左の図を見ると、2つの周波数成分の各々に関し、極大と極小が 90° おきに出現しており、2つの振動パターンは 45° のずれを持つことが分かる。また、同図の(A)と(B)を比べると、中端部の振幅は全体的に下端部の振幅よりも小さい事が分かる。これらの結果は、FEM分析の結果と一致する。なお、中腹部の3531Hzの振動パターンは、 -90° 方向のレベルが低く、対象なパターンからずれているが、打撃時の揺れによるノイズ混入によるものと考えられる。同様に、(6-0)モードに相当する成分では、振動対の周波数は9481Hzと9539Hzであり、振幅レベルの周期は 30° のずれ、(8-0)モードの振動対は17536Hzと17627Hzであり、振幅レベルの周期は 22.5° のずれをもつことがわかる。ただし、(8-0)モードの場合、(B)に示す中腹部の場合は振幅レベルが低く、規則性は見出せなかった。また、(4-1)、(6-1)モードに相当するスペクトル成分についても振幅レベルが低く、ノイズに埋もれて規則性は観測できなかった。

4-3. 南部風鈴の材料に関する検討

次に、種々の材質を用いて風鈴を鋳造し、振動の継続時間、すなわち、余韻の長さを計測して風鈴向きの材料について検討した。鋳造においては、一回の溶解量を3kgとし、高純度銑鉄(4.10%C, 0.29%Si, 0.07%Mn, 0.018%P, 0.004%S)、電解鉄、Fe-75.23%Si, Fe-73.88%Mn, Fe-50.83%Sを用いて、目標組成3.6~3.8%C, 2.1%Si, 0.4%Mn, 0.1%P, 0.08%Sとなるように10kHz, 20kWの高周波誘導電気炉を用いて溶解し、風鈴用銑鉄溶湯を溶製した。最高溶解温度 1500°C に昇温した後、 1450°C でFe-Si接種(Si量として0.3%)により接

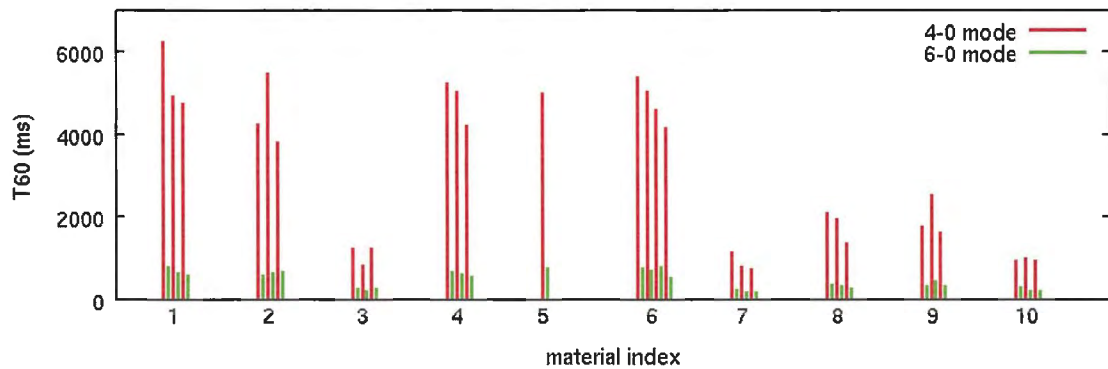


図10 風鈴の振動継続時間 横軸は下の表1に示す組成の番号

種処理を行い、1400℃で風鈴用砂型に注湯した。鑄造した各風鈴の4-0モードと6-0モードの振動に関する T_{60} を図10に示す。図10において、横軸の数字は材料組成の番号を表し、一つの組成について1～4通りだけ厚みを変えてあるため、これに対応して各番号について1～4個の結果を表示してある。図10を見ると、番号1、2、4、5、6の T_{60} が大きく、さらに、組成割合については、おおむね各組成番号の結果における左端の結果、すなわち、微量添加物が最も少ない場合の T_{60} が大きいことがわかる。スズムシは長く継続する音色が特徴であるので、 T_{60} の大きい1-1、2-2、4-1、5-1、6-1の材料と組成割合が有望であることがわかる。なお、6-0モードの T_{60} についても4-0モードの場合と同様だった。

表1 風鈴の化学組成(重量%)

| | |
|-----|-----------------------|
| 1: | C3.5、Si0.5 |
| 2: | C4.0、Si0.5 |
| 3: | C4.5、Si0.5 |
| 4: | C3.8、Si2.1、Te0.2 |
| 5: | C3.6、Si2.1、Te0.2 |
| 6: | C3.2、Si2.1、Te0.2 |
| 7: | C3.8、Si2.1、Cr0.5 |
| 8: | C3.6、Si2.1、Cr0.5 |
| 9: | C3.2、Si2.1、Cr0.5 |
| 10: | C3.8、Si2.1、Cr0.5 |
| | (Mn:0.4、P:0.1、S:0.08) |

4-4. スズムシの音色をもつ南部風鈴の設計

次に、スズムシの音色をもつ南部風鈴の設計について述べる。4-2節で述べたように、風鈴形状を与えればFEM解析によって線スペクトル成分の周波数がわかるため、目的のスペクトル構造をもつように振動解析と形状の修正を繰り返すことによって、スズムシの音色をもつような形状を決定できる。まずは、4-1節で述べたように、風鈴の基音と第一上音の周波数をスズムシの鳴き声の4kHzと8kHzにすることを考えた。通常の鐘形状の風鈴の場合、基音は4-0モード、第一上音は6-0モードの振動に起因し、その周波数は倍音関係にはならず、微妙

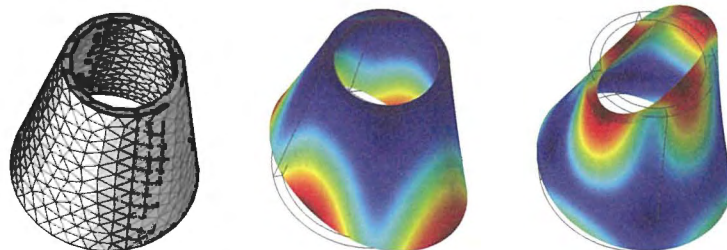


図11 台形円筒型風鈴

左：FEMモデル、中：下部の開口周りの4-0モードの振動形状、右：上部開口周りの4-0モードの振動形状

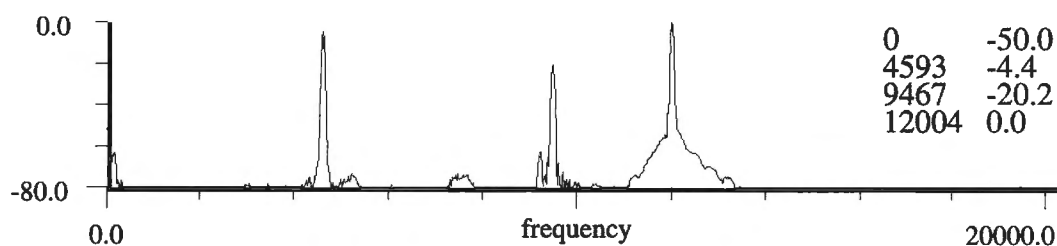


図 1 2 鋳造した台形円筒風鈴のスペクトル

な形状の調整が必要である。そこで、単純な形で倍音関係の音を発生できる形状の一例として台形円筒型の風鈴を考えた。設計した風鈴の形状を図 1 1 に示す。この形状の場合、基音は下の開口に沿った 4-0 モードであるが、倍音の第一上音は、6-0 モードではなく、上の開口の 4-0 モードによって発生するため、主に開口半径の調節によって所望の周波数の基音と倍音を生成できる。まずはこの形状によって鋳造を行った結果得られた鋳造品のスペクトルを図 1 2 に示す。図からわかるように、4.5kHz の基音と 9.5kHz の第一上音が生成されており、第一上音は倍音から少しずれたものの、狙った周波数に近い。しかしながら、6-0 モードに起因する 12 kHz の成分が予想より強く発生し、スズムシの音色とは異なった音色となった。この風鈴を打撃した場合は、すべての成分の音が放射されるのでスズムシの音とはならないが、次節で述べる電磁駆動型の場合は、鳴らす成分を選択できるため、この風鈴でも問題とはならない。

4-5. 風によらない発音機構に関する検討

風鈴の音は、短冊につながった舌の打撃によって発生するが、スズムシの鳴き声は強弱を伴って長く継続するため、その時間変化を打撃のみによって模擬することは大変難しい。そこで、電気的な方法によって発音を制御する方法について検討した。剛体の振動パターン観測法として、時間平均ホログラフィー干渉という方法があることを先に述べたが、この方法では電磁石による共振の励起を用いており、同じ共振励起は風鈴の発音に適用可能である。この方法では、風鈴に固定した磁石にコイルを近接して設置し、そのコイルに共振周波数の正弦波を印加して電磁誘導により振動させる。この方法では、印加電流によって発生音の周波数と振幅を制御できるので、印加電流にスズムシの鳴き声の振幅変化を与え



図 1 3 電磁誘導を用いた発音機構付き南部風鈴

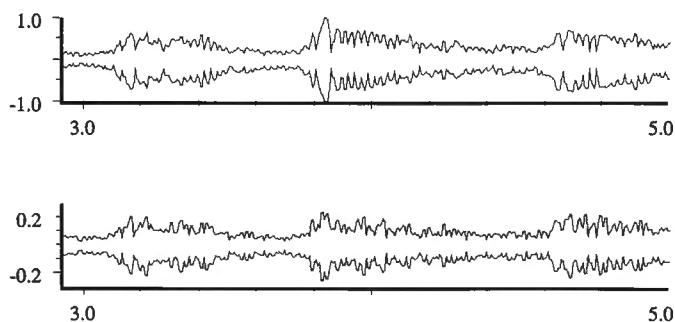


図 1 4 スズムシの振幅包絡（上）と風鈴印加電流の振幅包絡（下）

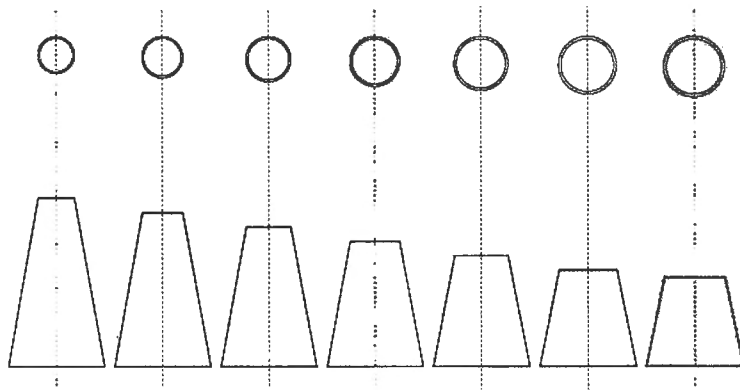


図15 台形円筒風鈴のデザインバリエーション



図16 曲率をもつ台形円筒風鈴デザイン

れば、スズムシのように発音できることになる。この方法によって試作した風鈴を図13に示す。この風鈴において、共振周波数以外の印加電流成分は熱損失になるだけであるので、風鈴の共振周波数の正弦波のみを用いる必要がある。

そのため、スズムシの鳴き声の振幅変化によって正弦波を振幅変調するような処理を行い、印加電流を生成する。発生音の例を図14に示す。図をみると、ほぼスズムシの鳴き声の強度変化を模擬できていることがわかり、音色もスズムシにかなり近い。

4-6. デザインの考察

近年、Bluetooth 対応のスピーカーが国内外のメーカーから多々販売されている。音響技術の向上により、スピーカーの形状の自由度があがり、球形のスピーカーや三次元曲面で構成されたスピーカー等、今まで技術的に難しかった形状が可能となった。また、従来までの箱形スピーカーは部屋の角に設置し、出来るだけ部屋の空間に溶け込むような配色を作り手は提供していたが、前述のように造形に自由度が増したことで、インテリアの一部、室内でのアクセントとしてのプロダクトにコンセプトが移行している。その反面、同じ音を奏でる風鈴は従来の原型を保持している。本研究開発では、スズムシの音色を奏でるために円筒台形型の条件があり、「(1) 台形の中でのデザインバリエーション」と「(2) 風鈴本体を支える機構」が従来の風鈴にはない特長であり、これらの特長を生かすことで視覚的にも「癒し」を表現できると考える。(1)は図15にあるように、上面から底面にかけての長さの比率の違いからデザインバリエーションを示すことができる。しかし、実際にスズムシの音色を奏でるためには、縦横高の比率に条件があるため、デザインの表現に幅がでない。しかし、上面から底面にかけてR状の曲面体にすると、造形に柔らかさが付加される(図16)。また、「癒し」を視覚的に表現する要素として、上述以外にも「配色」「テクスチャー」も重要である。例えば、従来の風鈴はコストや製造プロセスから1色の塗装が主軸だが、風鈴の高付加価値化により製造にコストがかけられるのであれば、図2で表現されているような塗装の表現も可能である。さらに、テクスチャーも大切な要素であり、「癒し」を感じるモチーフをデザイン化する必要がある。鋳物ではあまり繊細なテクスチャー表現は出来得ないため、限られた表面積の中で「癒し」を表現しなければならない。例えば、図16は桜の花びらをモチーフにしている。360度、回転させ

でも楽しめる表現であると共に、配色との関わりも必要である。

(2) の風鈴本体を支える機構については、風鈴本体をツルで支える方法と風鈴そのものをヒモで支える方法が考えられる。従来にないインパクトを与えるためには図16のようなツルを使った風鈴もデザイン案として有効である。さらに、現状のツル職人の減少を考えれば、あえてツルを使用しなければならないデザインも未来の南部鉄器の職人の継承では重要な役目かもしれない。

4-7. 社会に還元される成果、又は“岩手大学ブランド”に繋がる成果

以下の4点にわたり、県の産業振興の形で研究成果を社会に還元できるものと考えている。

①新型風鈴による風鈴製品のバリエーション拡大

南部風鈴の基本的な意匠は長年変化することはなく、表面の凹凸や色彩に変化を与える程度だったが、本研究プロジェクトにより、新規的な造形が大きな話題性を提供する可能性があり、南部鉄器産業に貢献できる。

②コンピュータ支援設計導入による風鈴製造法の革新

南部風鈴は職人の長年に渡る体験的な「勘」によって「形状、材質、肉厚等」と「音」の関係が成り立ってきた。しかし、三次元 CAD と有限要素法による振動解析とを導入することで、ユーザの要求する音を鋳造する前にシミュレーションできるようになる。さらに、3D プリントによる鋳型設計導入と職人の伝統的な勘と技術が加わることで、風鈴の製造プロセスは革新的な飛躍がもたらされる。つまり、高精度で自由度の高い「音」を南部風鈴で表現できることは、例えばものづくりで盛んな北上地域の CAD 関連企業への産業振興への寄与も大きくなる。

③鋳造産業のイメージ刷新・宣伝

本研究で提案した電磁的に風鈴を発音させる方法を用い、音域の異なる風鈴を並べて電磁的に並列にならすことにより、音楽など所望の旋律の演奏装置として機能させることができる。この装置を駅などの人目の多い場所に設置して演奏することにより、特に観光客への南部鉄器の魅力を訴求できるものと考えられる。また、風鈴駆動信号をスマートフォン等のアプリケーションによって生成すれば、携帯型の電磁駆動風鈴をスマホで鳴らすような応用も可能であり、演奏内容のコンテンツ制作企業の参画も将来的には見込まれ、本県の産業に大きく貢献できる。

④伝統職人の技術の継承

鉦職人が減少している現状を考え、風鈴を鉦で支えるようなデザイン形状にすることにより、本県の鉦職人の技術の継承をサポートできる。(現在、鉦職人は盛岡地区に1軒、水沢地区は機械生産が主流になりつつあり、後継者不足が深刻化している)

5. 今後の課題

今後は、本研究によって得られたアイデアと知見をもとに、新しい風鈴に関する製品化、事業化を目指す。すでに、岩手県の平成26年度いわて戦略的研究開発推進事業には申請したものの不採用となったが、A-STEP 平成26年度第二回公募に応募しており、採択された場合には、製品化の基礎を固める。そして、その先は、国等の大型研究開発資金・研究

開発成果の事業化に向けた競争的資金への申請を予定している。具体的には、厚生労働省科学研究事業による「安らぎ」の実証と、経済産業省や（独）科学技術振興機構の研究開発事業により試作の量産化により安らぎと健康を与える「いわての総合健康セット」をコンセプトに事業を推進していく。

安らぎと健康を与える「いわての総合健康セット」は、その一要素として、伝統工芸技術を活用した萌芽的要素のある研究事業を提案する予定でいる。つまり、本研究のプロジェクトで得られた知見とプロトタイプは主に伝統工芸で培われた技術を基軸に行われているが、本研究終了後は岩手医科大学と連携し「医学」からも、その知見とプロトタイプを検証する。実際には、スズ虫風鈴が「人」にどのような効果を与えているのかを工学や芸術工学、昆虫生理学の分野だけではなく、医学的な証明を追求する必要がある。例えば、MRI 等の医療機器による被験者の脳波測定や本研究のプロジェクトの本質的な目的である、東日本大震災等で被災し PTSD を発症している人への臨床試験等を行うことで、伝統工芸品としだけではなく医学系の研究者と共同研究を行い、「医療器」もしくは「抗ストレス・疲労」器具としての製品を目指す。また、電磁駆動の風鈴を並べた風鈴アレーの研究開発で得られる高機能南部風鈴を手軽に演奏できるようにするための PC・スマホ用アプリケーションも重要な事業になる。特に、スマートフォンの普及率が 2017 年には約 73% になると見込まれており、スマートフォンを活用した多角的なアプリケーションの要求度は極めて高い。さらに、アプリケーションは日常使用される目覚まし機能やメモ機能だけではなく、医療機能や抗疲労機能としてもより展開される分野である。風鈴アレーは、旋律を奏でることができることで、映像と同期させた音楽を事業化することも可能で、聴覚だけではなく、視覚的にも「癒し」を提供できると考える。

6. 主な発表論文等

雑誌論文 なし

学会発表

- ・南部風鈴の振動解析に関する検討、森田一真、松橋彩花、永田仁史、藤岡豊太、安倍正人、田中隆充、平塚貞人、堀江皓、鈴木幸一、計測自動制御学会東北支部 第 280 回研究集会 (2013.5)
- ・南部風鈴の音を出すおもちゃ箱の試作、張瑩、松山克胤、今野晃市、田中隆充、平成 25 年度第 1 回 芸術科学会東北支部研究会(2013.7)
- ・輸出用の南部鉄器のテクスチャーデザインの方法論に関する研究、張瑩、田中隆充、松山克胤、今野晃市：平成 25 年度 第 4 回 芸術科学会東北支部大会(2014.1)

図 書 なし

その他

特許出願

- ・特願 2014-070546 共振体及びそれを用いた風鈴並びに共振体の振動周波数の計算方法、鈴木幸一、田中隆充、永田仁史、平塚貞人、堀江皓

研究課題

地域気象観測ネットワーク「学校气象台」の構築と学校・市民への普及に関する研究

| | | | |
|-------|----------|--------|-------|
| 研究代表者 | 教育学部 | 教授 | 名越 利幸 |
| 研究分担者 | 情報基盤センター | 准教授 | 中西 貴裕 |
| | 教育学部 | 准教授 | 梶原 昌五 |
| | 工学系技術室 | 技術専門員 | 那須川徳博 |
| | 工学系技術室 | 技術専門職員 | 野田 賢 |
| | 工学系技術室 | 技術専門職員 | 藤崎 聡美 |
| | 附属小学校 | 教諭 | 尾崎 尚子 |
| | 附属小学校 | 教諭 | 高室 敬 |
| | | 名誉教授 | 井上 祥史 |
| | | 特任教授 | 田中吉兵衛 |

【研究成果の概要】

既存の「学校气象台」観測ネットワークに、新たな4地点に気象測定装置を設置した。また、岩手大学には積雪深計を教育学部2号館前に設置した。それら増設観測点を含む新しい「学校气象台」HPを作成し、配信することができた。さらに、研究期間中、「学校气象台」研究会と東京大学との共催で、「海と大気のはなし」と題して、講演会を実施した。学生、教員、气象台関係者はもとより、一般の方も参加され実りのある講演会が実施できた。一方、本観測のネットワークシステムに関しては、日本気象学会の機関誌「天気」（2013, 1月）に掲載され、この分野における岩手大学の先進性を全国に示すことが出来た。

【支援経費交付額】

| 年 度 | 配 分 額 |
|------|------------|
| 24年度 | 2,000,000円 |
| 25年度 | 1,400,000円 |
| 計 | 3,400,000円 |

【キーワード】 地域連携 局地気象 気象観測 社会貢献 情報ネットワーク

1. 研究の背景

本事業は、岩手大学と本学の所在する盛岡市内の小・中学校とが連携し、局地気象情報をリアルタイムデータとして公開しながら継続的に記録することにより、急激な気象変化の要因を探るデータを提供し、地域社会構築のためのセンター的役割を果たすことを目標としている。また、各観測地点は、すべて地域の防災拠点である学校としたことで、気象データは各学校の教育課程でも使用でき、地域の気象環境教育に対する実証的な教育効果を高めていくことも可能となる。このシステムの運用は、2010年1月1日から開始し、6点の観測地点からのデータが大学サーバーに蓄積され、岩手大学「学校气象台」ホームページで公開されている。今回の研究成果として、市内10地点に増設が完成し、大学サーバーにデータが蓄積されると同時に、HPのリニューアルが完成した。

【本研究の立ち上げに至った経緯】

岩手大学の平成20・21年度部局戦略経費による地域貢献活動、及び環境に関する事業としてスタートした。従って、メンバーは、本学から募り決定した。「学校气象台」の基本構想は、財団法人日本気象協会が実施した「これからの気象教育」というテーマの懸賞論文で入選した“「学校气象台」の構築と夢のネットワーク構想”名越（2005）をもとに計画された。地域の学校に総合気象観測装置を設置し、そこで得られたデータをLAN経由で大学サーバーに収集し、処理したデータを、ホームページで公開するという地域連携のネットワークシステムを構築しようとするものである。

2. 研究の目的

これまで、同様な事業の先駆的研究として、慶應義塾大学附属高校（1998）を中心とした、同女子校、同志木校の附属連携3校間ネットワーク（Panasonic 教育財団の支援による）がある。その後、下村他（2002）による地方气象台が中心となった地域気象教育プロジェクト「e-气象台&“こんにちは予報官です”」の取り組みが挙げられるが、学校の観測地点は1点のみである。地域に根ざした取り組みとして、仙台市科学館（2006）が構築した「お天気アイ」（JST地域科学館支援事業）があるが、測器の耐久性が悪く数地点でデータを取得できない状況が継続している。一方、国際的には、名越（1998）が紹介したNASAを中心とした環境教育のプロジェクトGLOBEがあり、現在日本からは176の学校が参加している。これには莫大な国家予算と学校教職員の負担がある。また、LiveE! 協議会・(独)情報通信研究機構（2008）が中心となったセンサーネットワークプロジェクト「Live E!」では、センサーとして「デジタル百葉箱」をあて、東南アジアを中心としたセンサーネットワークの構築をめざしているが、観測地点の均等な分布や測器の統一がなされていない。

そこで、本研究では、既存のネットワークと差別化するために、気象庁アメダスシステムより時間・空間の間隔を細かく取り、地域連携に特化し、観測測器の統一と耐久性を考慮、設置校教職員の負担軽減などに配慮した継続運用可能なネットワークシステムを開発することを目指した。この成果として、例えば盛岡市内のヒート・クールアイランド現象の状況や冷気湖現象などを、リアルタイムな情報として大学から地域市民に提供することが可能となる。また、情報の発信源が地域に根ざした学校であり、データの教育への利用も可能となる。学校が学区域の气象台の役割を担うことから「学校气象台」という名称を付した。

3. 研究の方法

①新たな観測点の検討・設置

学内では滝沢農場，盛岡市内では旧外山小学校など，盛岡市内桜城小学校を中心とするヒートアイランドが影響していないエリアの気象データを取得できる設備を構築するため，その検討と設置準備をする。

そこで，㈱パイサラ製WXT520の測定機器をセッティングし，学内LANのある滝沢農場及び御明神牧場に設置した。さらに，盛岡市内小中学校に設置する学校の検討を行い，南に位置する盛岡市立見前中学校及び，廃校になった藪川にある旧外山小学校に設置することができた。これら4地点を含めた10の観測地点データを，2015年1月1日に稼働できるように現在調整中である。

②学校現場や地域市民への普及活動

小・中学校教員への普及を図るため，「学校气象台」研究会の活動を学校の先生方対象で具体化する。さらに，一般市民向けに講演会を開催した。そこで，「学校气象台」研究会を，学校教員や一般市民を対象に計画する。そのために，「学校气象台」データを用いた教材開発などを教育学部附属小学校で継続実施し，その研究授業を一般市民に公開した。

4. 研究成果

既存の本システムは，盛岡市内6地点における2010年1月1日の運用開始から2年が経過した。東日本大震災による大規模停電に起因する欠測の他は，OMSの不具合，カラスによる超音波風速計センサーの破損を除き，気象観測測器，及び各プログラムなどのシステムは，順調に動作している。さらに，Webカメラによる岩手山画像や魚眼レンズによる全天画像の取得，それらの動画再生も可能となった。また，2011年11月1日より，気象業務法の範囲内で取得したデータの公開も実施した。これら成果は，大学ホームページから「学校气象台」ホームページへのリンクが張られており，ほぼリアルタイムの観測データが見られる。

この2年間，観測点の増設を本研究経費で随時実施してきた。これら本システムに関する論文は，日本気象学会に投稿，受理された（2013，1月）。また，システムの全体像に関する報告書が，日本気象学会東北支部だより第72号（2012年3月）に特集として掲載された。

教育実践において，過去3・4年前に「学校气象台」データを用いた研究授業を，本学教育学部附属小学校4年生に，理科「気温の変化」，5年生に理科「台風」として実施した。また，同附属中学校において，2年生の技術「情報の表現と伝達」に関して実施した。さらに，この2年間で本データを利用した小学校4年生，気温の日変化，及び，小学校6年生台風の領域において，2つの研究授業を公開した。これらは，盛岡タイムズに掲載された。一方，児童・生徒の学習内容理解の変容なども捉えた研究成果は，日本気象学会，日本理科教育学会，日本科学教育学会，日本地学教育学会などで，口頭発表を行った。

さらに，2011年10月30日に発足した「学校气象台」研究会により，気象教育及び科学教育の振興，気象の普及を図ることを考えた。この研究会における「学校气象台」データ活用のための研修会等を通して，教育現場や研究領域における利用が図られることを期待したい。また，本研究の成果として，東京大学先端科学技術センター中村尚研究室とのコラボで，「海と大気のはなし」という講演会を企画することができた。参加者には，学校関係者はもとより，一般市民，盛岡地方气象台，仙台管区气象台の職員の方々も参加された。

岩手大学「学校気象台」研究会 記念講演会
「新学術領域研究」気候系のhot spot アウトリーチ

海と大気のはなし



先生方、
共に学び
ませんか!

2015年12月21日(土) 12:30~17:00

講演1「僕らのドラマに惹きつけられる本当の理由
最近な疑問から知る気象“高”」
茂本 耕作 氏(独立行政法人 気象研究所 気象学 研究員)

講演2「キミを変える気象力」
立花 義裕 氏(三重大学大学院 生物資源学 研究科 教授)

講演3「海の世界への扉」
杉本 周作 氏(東北大学大学院 地球物理学系 研究科 助教)

講演4「海と気象・気候との関わり」
中村 尚 氏(東京大学先端科学技術研究センター 教授)

会場 岩手大学教育学部総合教育研究棟(教育系)2階「北橋ホール」

【主催】岩手大学「学校気象台」・文部科学省 科学研究新学術領域研究「中規模海洋と気候」
【後援】盛岡市教育委員会・岩手大学(Etc)

海と大気のはなし

この私たちの生活圏に何があるのか、「なぜか?」「どうして?」を問うてみる。「海と大気のはなし」は、その問いに答えるための一冊である。



写真 岩手海岸上(岩手県気象台提供)



作者 岩手海岸上(岩手県気象台提供)

目次

- 12:30~13:00 学校気象台総会
- 13:00~13:30 講演①「僕らのドラマに惹きつけられる本当の理由～最近な疑問から知る気象“高”～」茂本 耕作 氏(独立行政法人 気象研究所 気象学 研究員)
- 13:30~14:20 講演②「キミを変える気象力」立花 義裕 氏(三重大学大学院 生物資源学 研究科 教授)
- 14:30~14:55 総合討論 気象領域(グループディスカッション)
- 15:05~15:35 講演③「海の世界への扉」杉本 周作 氏(東北大学大学院 地球物理学系 研究科 助教)
- 15:55~16:25 講演④「海と気象・気候との関わり」中村 尚 氏(東京大学先端科学技術研究センター 教授)
- 16:40~17:00 総合討論 海洋領域(グループディスカッション)
- 17:00~ 閉会式

○会場アクセス



岩手大学教育学部総合教育研究棟(教育系) 2階「北橋ホール」
(岩手県盛岡市上里3-18-33)

○バス路線 盛岡駅(盛岡駅西口) 徒歩約15分
○バス路線 盛岡駅(盛岡駅西口) 徒歩約15分
○バス路線 盛岡駅(盛岡駅西口) 徒歩約15分

【お問い合わせ先】
国立大学法人 岩手大学教育学部 環境教育科 名越利幸
TEL/FAX 019-621-6547 Mail nagoshi@water-u.ac.jp

「海と大気のはなし」のパンフレット

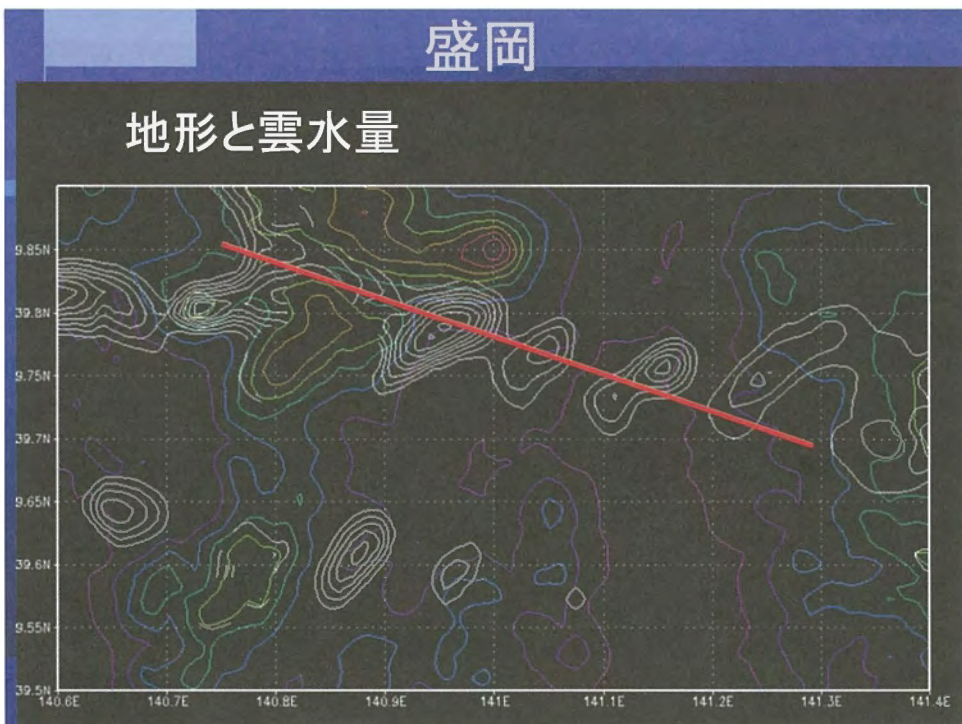
一方、純粋に気象学の現象に関して、盛岡独自の局地気象現象を解明することができた。「北岩手波状雲」である。盛岡では、冬季、お天気雨や風花が多く出現する。そのために、盛岡の人々は、雨が降っても傘をささない。これに関し、北西の季節風が吹く際、奥羽山脈越えの風下波が影響するのではないかと考えた。その様子を、1年間、「学校気象台」のデータベースにある岩手山方面に向けられたWebカメラの動画映像から調査し発見した。そこで、その様子の大気構造を調査するために、名古屋大学の雲解像モデルCRESSを用い数値シミュレーションを試みた。その結果、盛岡には、奥羽山脈越えの風枕雲、その風下側に定常なローター雲が同じ距離に3つ発生することを捉えた。その雲の前方には、上昇流域が、後方には下降流域があることがわかった。また、それらの雲の雲底高度は、岩手大学の「学校気象台」データから求めた約1200mと合致していることもわかった。したがって、盛岡の国道46号線に沿って、晴天域と雨域が交互にバンド上に生成されることが判明した。その影響により、お天気雨や風花が頻繁に発生すること、及び、空気中に水滴があり、太陽光が入るとい条件が整うことで、虹の発生率が高いことも判明した。

もう一つの成果として、国立大学法人三重大学地球環境気候学教育研究分野立花研究室に、Webシステムプログラムの供与を行った。立花研究室のWEBシステムのURLは以下である。

(<http://www.bio.mie-u.ac.jp/kankyo/shizen/lab1/livecam/>)

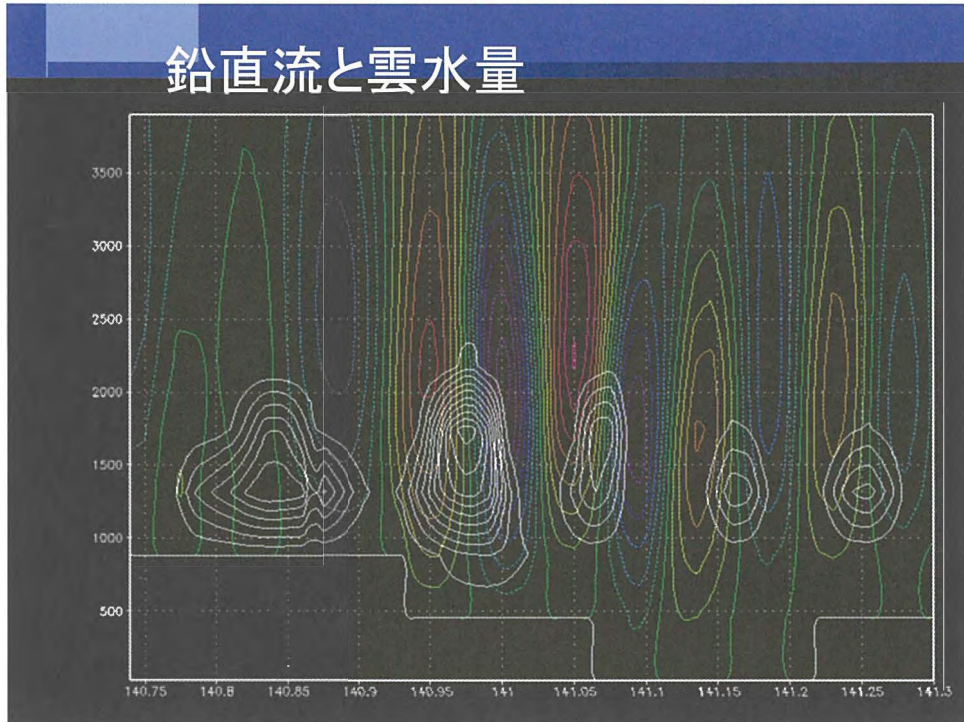


発見した「北岩手波状雲」



カラーコンターが地形の等高線，白のコンターが雲水量

鉛直流と雲水量



前図の直線の断面図，カラーコンターが上昇流と下降流，白が雲水量

5. 今後の課題

今後の展開として，本システムは，多地点への展開が可能であることから，全国の公立小中学校が参加すれば，各学校の学区は絶対重複しないため，気象庁アメダスにはない”湿度データ”を含む全国気象観測ネットワークシステムが構築される。このシステムこの構想が夢に終わるかどうかは，今後の「学校气象台」研究会の活動に掛かっていると言える。本研究経費により，現在より広いエリアのデータ観測点を設置し，夢に近づけたいと考える。このような取り組みは，全国に例がなく，岩手大学の先進性を広く周知できると考える。

今後，これら様々な活動をリニューアルされた「学校气象台」ホームページ (<http://mteoo.iwate-u.ac.jp/opening.html>) で随時紹介して行きたい。

次に，新しい「学校气象台」ホームページを提示する。運用は，2015年1月1日を予定している。岩手大学観測点には，教育学部2号館前に設置した積雪深計の運用を含んでいることを周知したい。

謝辞

この様な研究に対し，岩手大学には予算を配分して頂き感謝申し上げます。今後，この気象データを，教育学部のみならず，人社，農，工学部で利用されれば幸いである。尚，盛岡市教育委員会には，全面的にバックアップして頂いた。記して謝意を表する。

私たちは学校気象台

学校気象台とは

学校気象台全体図

組織

典型的な気象例

気象雑学

教育現場での活用

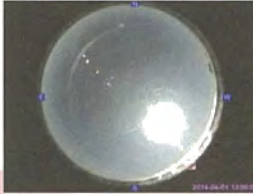
こんなこともできる

成果報告

今日の岩手山



全天画像



岩手大学

2014/04/01 16:30:00 | 気温 11.4°C | 湿度 23.1% | 気圧 1016.5hPa



岩手大学農学部附属御明神演習林

2014/04/01 16:30:00 | 気温 10.5°C | 湿度 23.1% | 気圧 1016.5hPa



岩手大学農学部附属滝沢農場

2014/04/01 16:30:00 | 気温 10.7°C | 湿度 23.1% | 気圧 1016.5hPa



岩手大学教育学部附属小学校

2014/04/01 16:30:00 | 気温 11.9°C | 湿度 23.1% | 気圧 1016.5hPa



盛岡市立仙北小学校

2014/04/01 16:30:00 | 気温 12.1°C | 湿度 23.1% | 気圧 1016.5hPa



盛岡市立桜城小学校

2014/04/01 16:30:00 | 気温 12.2°C | 湿度 23.1% | 気圧 1016.5hPa



盛岡市立黒石野中学校

2014/04/01 16:30:00 | 気温 11.3°C | 湿度 23.1% | 気圧 1016.5hPa



盛岡市立土淵中学校

2014/04/01 16:30:00 | 気温 13.0°C | 湿度 23.1% | 気圧 1016.5hPa



盛岡市立見前中学校

2014/04/01 16:30:00 | 気温 12.8°C | 湿度 23.1% | 気圧 1016.5hPa



前 盛岡市立外山小学校校舎

2014/04/01 16:30:00 | 気温 8.5°C | 湿度 23.1% | 気圧 1016.5hPa



ご意見やご不明な点がありましたら schmeteo@iwate-u.ac.jp までお問い合わせください。

私たちは学校気象台

学校気象台とは

学校気象台全体図

組織

典型的な気象例

気象雑学

教育現場での活用

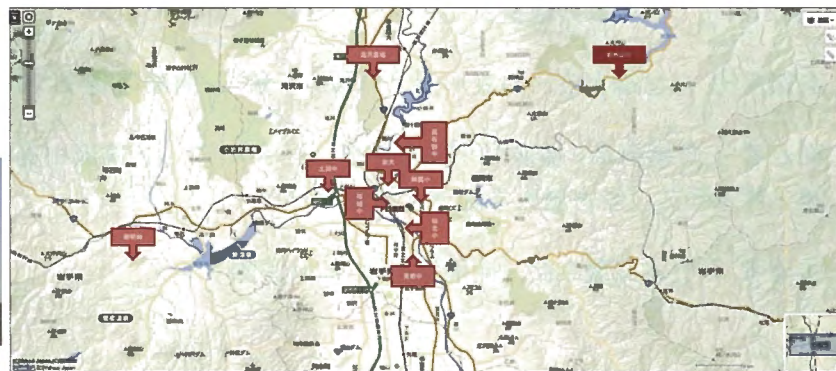
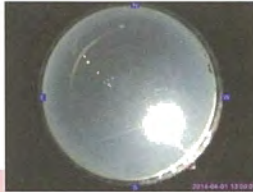
こんなこともできる

成果報告

今日の岩手山



全天画像



ご意見やご不明な点がありましたら schmeteo@iwate-u.ac.jp までお問い合わせください。

6. 主な発表論文等

雑誌論文

1. 気象観測ネットワーク「学校气象台」—岩手大学発信地域連携事業—

[天気, 60(1), 日本気象学会(2013年1月31日), pp.57-63] 名越利幸・他13名。

2. 地域気象観測ネットワーク「学校气象台」の構築と学校・市民への普及に関する研究

[岩手大学教育実践論文集, 1, (2014年3月31日), pp.40-45] 名越利幸, 井上祥史, 中西貴裕, 田中吉兵衛, 梶原昌五, 那須川徳博, 野田賢, 藤崎聡美, 尾崎尚子, 高室敬, 黄川田泰幸, 佐藤和史, 佐々木俊, 小室孝典, 灘山正和。

学会発表

1. 気象庁 DVD-NHM を用いた中学校理科での数値予報の試み

会議名称：春季大会, 発表形態：口頭(一般), 開催期間：2013年5月15日

発表者：名越利幸, 山本桃子, 八幡和典, 齋藤栞, 井上祥史

主催者：日本気象学会, 開催場所：国立オリンピック青少年総合センター

2. 気象庁「DVD-MHM」を利用した数値予報に関する中学校理科での授業実践

会議名称：日本地学教育学会第67回全国大会, 発表形態：口頭(一般)

開催期間：2013年8月17日, 発表者：山本桃子, 八幡和典, 齋藤栞

主催者：日本地学教育学会, 開催場所：岩手大学

3. 「肱川あらし」の霧の数値シミュレーション

会議名称：秋季大会, 発表形態：口頭(一般), 開催期間：2013年11月19日

発表者：名越利幸・齋藤栞・井上祥史(岩手大学), 吉岡真由美(東北大学), 加藤雅也・坪木和久(名古屋大学地球水循環センター)

主催者：日本気象学会, 開催場所：仙台国際センター

その他

・ホームページなど

○<http://meteo.iwate-u.ac.jp/opening.html> (リニューアル版「学校气象台」HP)

・報道関連情報(テレビ・新聞等)

○IBC ニュースエコー, 2012年11月2日, 「北岩手波状雲の発見に関して」

○盛岡タイムズ, 2013年12月24日, 8頁「データから不思議に迫る」

II 平成25年度採択課題

研究課題

世界遺産教育「平泉」の実践的研究ー小中連携のカリキュラム・プランの構築ー

研究代表者 教育学部 教授 今野 日出晴
研究分担者 教育学部 教授 田代 高章
研究分担者 教育学部 准教授 土屋 明広

【研究成果の概要】

本研究は、平泉町の協力を得ながら、平泉小学校、長島小学校、そして、平泉中学校で行われている「総合的な学習の時間」などの訪問調査を実施し、世界遺産「平泉」のカリキュラム・プランを通して、平泉町の子どもたちに、どのような資質・能力を育成しようとするのか、その目標・内容・方法を共同で検討しようとする実践的な研究である。そのために、①岩手県および平泉町の実態にふさわしい「地域学習」を核にした世界遺産教育の教材のあり方、②小中教員間での研究交流・実践交流のあり方と情報共有システムの構築、③子どもの発達の系統性を踏まえた連携・一貫カリキュラムの構築等について、研究代表者・分担者がそれぞれの専門性に基づきながら支援・援助をおこなった。世界遺産教育の内容（教材のあり方を含む）としては、平泉・長島小の6年生を対象に、初めて平泉学習講演会を開き、研究代表者が講演した（『岩手日報』『岩手日日』平成25/6/25）。また、小中一貫カリキュラムについては、12月の「第4回世界遺産学習全国サミット in なら」（主催：文科省、奈良市教委ほか）において、平泉小学校吉田よしみ教諭が「幼保小中の系統的な世界遺産・地域学習『平泉学』」と題した報告を、平泉小の5人の児童が、全体会「ひとつとつながる、地域とつながる世界遺産学習実践発表会」で「古都、平泉から学ぶ、歴史・人・絆」と題して発表をおこなった。さらに、平成26年6月には、平泉町小中交流研修会で、平泉小、長島小、平泉中の教員が一堂に会して、初めて「平泉学実践交流会」が開催され、3校のそれぞれの教育実践が報告され、研究代表者が交流会の意義を提示し、実践への助言をおこなった（『岩手日日』平成26/06/25『読売新聞』06/29）。

【支援経費交付額】

| 年 度 | 配 分 額 |
|------|------------|
| 25年度 | 1,500,000円 |
| 計 | 1,500,000円 |

【キーワード】

世界遺産教育、平泉、カリキュラム、小中連携、教育実践

1. 研究の背景

平成 23 (2011) 年「平泉一仏国土(浄土)を表す建築・庭園及び考古学的遺跡群」(以下、「平泉」)が世界遺産一覧表へ記載され、「平泉」は、「顕著な普遍的価値を有するもの」(世界遺産条約:第1条)として、「保護し、保存し、整備活用し」、次の「世代へ伝承することを確保することが」(第4条)求められることとなった。「締約国は、世界遺産の保存の必要性についての普及啓発を行うこと」と「世界遺産に関する教育活動を」、「学校、大学、博物館及びその他の地域、国の教育機関」でおこなうことが推奨されるのである。

しかし、その重要性にもかかわらず、日本での世界遺産教育はなかなか浸透せず、ようやく平成 22 (2010) 年に「世界遺産学習全国サミット」が奈良教育大学で開催され、「世界遺産学習、ESD の研究及び授業モデルの開発」と「実践交流」などが図られた。その中核を担ったのは、奈良教育大学と奈良市の連携による「世界遺産学習」であり、学習資料『奈良大好き世界遺産学習』の刊行、教師用指導書『ティーチャーズガイド』(I~IV集)の作成などが進められていた。そこで、平成 24 (2012) 年 8 月、研究代表者:今野は、ユネスコスクールとして ESD を推進し、大学の理念として、「『奈良・世界遺産』を生かした教育・研究の充実」を掲げている奈良教育大学(加藤久雄副学長、中澤静男持続発展・文化遺産教育センター講師)と、「世界遺産から ESD へ」という「世界遺産学習」を進めている奈良市教育委員会(西口美佐子指導主事)を訪ねて世界遺産教育の事例調査と資料収集をおこなった。そこでは、多くの世界遺産が、「持続性の証明」であり「幸運にも残った」ものとして、その「かけがえのなさ」を理解する学習がめざされ、「総合的な学習の時間」を中心に、フィールドワークや体験学習を組み込み、問題解決や探究活動を重視した、きわめて多様な実践が展開されており、現在の到達点をつくっていた。しかし、その一方で、幼稚園から小学校の実践が多くを占め、中学校や高校の実践は限られているだけでなく、それぞれの実践は学校ごとに個別におこなわれており、小・中学校連携の視点はみられなかった。

また、平泉町でも、児童・生徒向けガイドブックとして『ときめき平泉の文化遺産』(世界遺産推進室)が発行され、さらに、平泉中学校ではテキスト『郷土・平泉学』が作成され「総合的な学習の時間」で世界遺産教育がおこなわれていた。しかし、平泉小学校、長島小学校での「総合的な学習の時間」では世界遺産教育という視点が弱く、小中連携の体系的なカリキュラム・プランという志向性をもたないものであった。平泉町の子どもたちに、どのような資質・能力を育成しようとするのか、トータルな見通しが示されないままであり、さきのガイドブックやテキストブックなどが児童・生徒に配布されているが、それをどのように活用するのか、具体的な学習内容が吟味されているとは言い難いものであった。

すでに、「平成 22 年度岩手大学教育学部プロジェクト推進事業」において、研究代表者の今野は、「地域の歴史を対象とした歴史教育内容開発研究プロジェクト」(代表:今野、分担:菅野文夫、上田淳悟ほか 2 名)をすすめて、「平泉や盛岡藩などの地域の歴史を対象にして、中学校歴史的分野における授業モデルを附属中学校教員と教科教育、教科専門(歴史学)の研究者が協働して研究開発」をおこなった。それは、中学校社会「身近な地域の歴史—東アジアの中の平泉—」(授業者:上田)として、「平成 22 年度岩手県社会科教育

研究会」で提案授業として公開され、その実践記録は、上田淳吾「平泉の歴史的価値とは何かー東アジアの中の平泉ー」（『歴史地理教育』第791号、2012年）として刊行された。平泉の国際性に着目して研究開発されたこの授業は、歴史学や考古学などの近年の平泉研究を踏まえたもので、研究と授業実践の一つの方向性を示したが、その一方で、実践当時は、平泉が未だ世界遺産として登録されていないこともあって、世界遺産学習としての視点をもたないものであった。したがって、平泉の文化的な価値を意味づけていくために、「奈良市や奈良教育大学などが中心となってすすめている世界遺産学習としての『奈良大好き世界遺産学習』などを参考にしながら、『世界遺産学習』としての視点もより一層深めていく必要がある」（『平成22年度岩手大学教育学部プロジェクト推進事業 研究成果報告書』教育学部）ということが課題として残されていたのである。

以上のことから、世界遺産教育としての視点から、平泉町の子どもたちに、どのような資質・能力を育成しようとするのか、トータルな見通しのもと、地域と連携しながら解決すべき課題として、世界遺産教育「平泉」の実践的な研究の必要性が明らかになったのである（こうした点については、「平泉文化セミナー」で講演しており、『岩手日報』平成25年5月30日で報道された）。

2. 研究の目的

本研究は、平泉町の協力を得ながら、平泉小学校、長島小学校、そして、平泉中学校で行われている「総合的な学習の時間」などの訪問調査を実施し、世界遺産「平泉」を通して、平泉町の子どもたちに、どのような資質・能力を育成しようとするのか、世界遺産教育「平泉」の目標、内容・方法を共同で検討し、小学校・中学校を貫いて、系統的なカリキュラム・プランを構築しようとする実践的な研究である。同時に、世界遺産教育の視点から、小中連携のカリキュラム・プランをつくることで、世界遺産を「観光資源から教育資源へ」と深化させようとするものであり、地域の次の担い手を育成することによって地域に貢献するものである。

3. 研究の方法

平泉町との連携を基盤に、「総合的な学習の時間」を基軸にした、小・中連携の系統的なカリキュラム・プランを構築するために、次のような方法によってアプローチした。

1) 世界遺産教育の調査と資料収集

研究代表者は、すでに、奈良市と奈良教育大学の連携による「世界遺産学習」を中心に、調査しているが、国際的な比較や、国内の調査においても、十分とはいえない。そこで、準備作業として、平成25年3月に岩手大学UURRプロジェクトで中国の世界遺産教育の調査と資料収集をおこなった（曲阜師範大学およびその附属学校、ただし、これは、本研究支援経費の対象ではない）。国内では、平成25年11月には、和歌山県（世界遺産「紀伊山地の霊場と参詣道」）を対象に、和歌山県世界遺産センターや田辺市立本宮中学校、旧天野小学校への訪問調査をおこなった。本宮中では、全学年で熊野古道の道普請をおこない、世界遺産の保全のための活動（「体験学習」）を特色としていた。また、旧天野小では、史跡めぐりと天野歴史年表づくりなどが「地域学習」のなかで世界遺産が扱われていた。広域の世界遺産であるために、和歌山県世界遺産センターが中心となって世界遺産

について学習できるプログラム「世界遺産入門」などを開発し、専門の職員がそれを担当しているというものであった。

2) 平泉小学校・長島小学校、及び平泉中学校での「総合的な学習の時間」の調査

研究代表者・分担者で平泉町の小学校と中学校での「総合的な学習の時間」の具体的な聞き取り調査をおこなった。各学校の置かれたさまざまな条件を顧慮しないで、机上のカリキュラム・プランを作成しても意味がないのであり、学校、教職員、児童・生徒、保護者、そして地域の置かれた条件を把握する必要がある。ここでは、児童・生徒向けガイドブックとして『ときめき平泉の文化遺産』（世界遺産推進室）、及び、『郷土・平泉学』（平泉中学校）の活用状況もあわせて調査し、世界遺産教育の系統的なカリキュラムについての意見交換をおこなった。

3) 小中連携の系統的なカリキュラム・プランについて

上記の調査研究を踏まえて、「総合的な学習の時間」を基軸にした、小・中連携の系統的なカリキュラム・プランと、それを実施するための交流会や検討会について、実現可能性を検討する。カリキュラムと実際の学習とのあいだには、距離があり、カリキュラムの柱立てだけでは、不十分なのであり、実践したことの交流と検討が不可欠になってくる。それらも視野におさめて展望を明らかにする必要がある。

4. 研究成果

平泉小・平泉中では、「総合的な学習の時間」での「平泉学」を調査し、世界遺産教育の視点から、幼小中連携カリキュラム構想案についての意見交換と助言を行ったが、その際、①岩手県および平泉町の実態にふさわしい「地域学習」を核にした世界遺産教育の教材のあり方（総合的な学習の時間の活用、他教科における平泉に関する取り扱い）、②小中教員間での研究交流・実践交流のあり方と情報共有システムの構築（学校間での研究交流・実践交流会の設定、地域情報や授業実践事例の学校間ネット共有システムの構築）、③子どもの発達の系統性を踏まえた連携・一貫カリキュラムの構築（直感的体験－知的認識－問題解決的思考－社会的な行為・行動化といった、参加体験－思考理解－発信行動の系統性を意識したカリキュラム全体構想の模索、すなわち、スコープとシークエンスに基づく「平泉学」の系統カリキュラムの構築）等について、大学教員のそれぞれの専門性に基づきながら支援・援助をおこなった。

まず、③のスコープとシークエンスに基づく「平泉学」の系統的なカリキュラムの構築を考える場合、スコープはカリキュラムの内容的な領域、広がりであり（シークエンスはその配列・順序の計画）、学習内容の幅と深さを示すことになる。しかし、それと実際の授業との間には距離があり、それを埋めるために、具体的な教材をもとに学習内容として提示する必要がある。そこで、①の世界遺産教育の教材のあり方が課題になるのであり、平泉小学校、長島小学校のそれぞれの小学校がバラバラにおこなうのではなく、両校の児童がともに学ぶべき基本的な学習内容として、一つのモデルを提示することとした。平成25年6月24日、平泉・長島小の6年生を対象に、平泉学習講演会を開き、研究代表者が講演した。二つの小学校が、世界遺産「平泉」に関して、共通の内容を学習することは、初めての試みであり、メディアにも注目された（『岩手日報』『岩手日日』平成25/6/25）。

平泉の将来 児童担う

町、岩手大研究センター



今野日出晴教授(右)の講演に聞き入る子どもたち

歴史の学習に講演会 「郷土発信リーダーに」

平泉町は24日、平泉小を会場に、岩手大平泉文化研究センター(総務部長・今野日出晴)と協力し、町内の小学校6年生を対象とした平泉学講演会を初めて開いた。「平泉の文化遺産」の世界遺産登録から間もなく2年。平和な浄土を希求した「平泉の価値」を次代につなぐ存在として期待される子どもたちは、郷土の歴史への理解を深めようとする真剣な表情で聴講に聞き入った。

平泉、長岡岡小の6年生計40人が参加。平泉町の歴史を学ぶ機会を創出した今野日出晴教授が「平泉の価値」について語り、子どもたちに「平泉の歴史を学ぶ意義」を伝えた。今野教授は「平泉は、政治・軍事上の境界、陸上・水上交通の接点にあり、陸奥の國の中心にあった」と語り、平泉の歴史を学ぶ意義を述べた。

講演会、子どもたちは交流や感想文などに関する意欲を相次いで投げかけた。平泉小の校長は「平泉の歴史を学ぶ意義を伝えることが、子どもたちの成長に役立つ」と話した。これからは、郷土についてもっと勉強したい」と関心を高めていた。

講演会を担った今野日出晴教授は、東アジアの枠組みで平泉文化の意義を総合的に説明することを目的に昨年夏、学校を対象とした講演会は今回が初めて。平泉町以外の教育現場にも出向いていきたい」と力を込めた。

共通の学習内容として想定したのは、講演のタイトル「平泉の価値ってなんだろうー世界遺産の意味を考えるー」にあらわれているように、世界遺産を構成する文化財をもとにしながら、歴史的文化的な価値を定めようとするものであった。平泉が陸上交通・水上交通の要衝であっただけでなく、政治上・軍事上の境界としての意味を示し、仏教の中でも、特に浄土思想の考え方にもとづいて造られた多様な寺院・庭園及び遺跡が一群としてよく残っていること、それは、この世に理想世界をつくりだそうとしたもので、海外からの影響を受けつつも日本で独自の発展を遂げたものであること、

そして、平泉の理想世界の表現は、他に例のないものであることなどを示した。それは、学習内容をあらわすとともに、世界教育の目標として、「文化遺産について理解し、その価値について理解を深め、文化遺産を尊重する態度を育てる」ことにつながっている。この取り組みは、平成26年度も継続して実施した(6/27)。

次に、③の子どもの発達の系統性を踏まえた小中連携・一貫カリキュラムの構築については、平成25年12月に「第4回世界遺産学習全国サミット in なら」(主催:文科省、奈良市教委、奈良教育大学ほか)において、平泉小学校吉田よしみ教諭が「幼保小中の系統的な世界遺産・地域学習『平泉学』」と題した報告をおこない、平泉町での幼保小中による「平泉学」への取り組みを報告した。また、「ひととつながる、地域とつながる世界遺産学習実践発表会」(全体会)では、大牟田市立駛馬(ハヤ)北小学校、奈良市立済美

『岩手日報』2013年6月25日

小学校とともに、平泉小学校の5人の児童が、「古都、平泉から学ぶ、歴史・人・絆」と題して平泉小学校でおこなわれている3年～6年までの「総合的な学習の時間」での取り組みを発表し、「藤原4代が築いた黄金の都、平泉」の歴史に触れ、「清衡が理想とした戦乱のない平和な世界を願う浄土の心」から学んだことを全国に発信した。吉田教諭の報告では、「平泉学」のねらい（①平泉のよさを理解し、平泉に愛着を感じ、平泉を誇りに思う子どもを育てる。【地域学習】、②文化遺産について理解し、その価値について理解を深め、文化遺産を尊重する態度を育てる。【世界遺産学習】、③平泉学（平泉学習）をとおり、平和への願い、未来の自分、平泉について考え、発信する態度を育てる。【地域学習・世界遺産学習】）と、育てたい子ども像などが示されただけではなく、「地域学習」と「世界遺産学習」の二つの柱で「平泉学」を支える全体の構造と系統が明示された。

(4) 平泉学（平泉学習）の系統

| 幼稚園・保育所・小学校での平泉学習・地域学習 | | | |
|------------------------|---------|---|--|
| | | 平泉学習（歴史・文化遺産） | 地域学習 |
| ふれる 感じる | 幼・保・低学年 | 世界遺産の町を見て歩こう ・平泉のまちを歩く、散歩する ・世界遺産を訪れる | 地域を見て歩こう ・地域を探検する、散策する |
| ふれる 知る | 中学年 | 世界遺産にふれ・知ろう ・世界遺産を巡り、知る | 地域にふれ・知ろう ・地域の祭り、伝統行事について調べる ・地域の活動に参加する |
| 知る 考える | 高学年 | 平泉の歴史を知ろう・考えよう ・平泉の歴史を調べる ・歴史的建造物を知る ・先人の平和への願いを知る ・平泉の価値について考える | 地域を知ろう・考えよう ・地域の産業について調べ、考える ・地域の歴史、文化について調べ、考える ・先人の願いや工夫を知る ・地域の未来について考える |

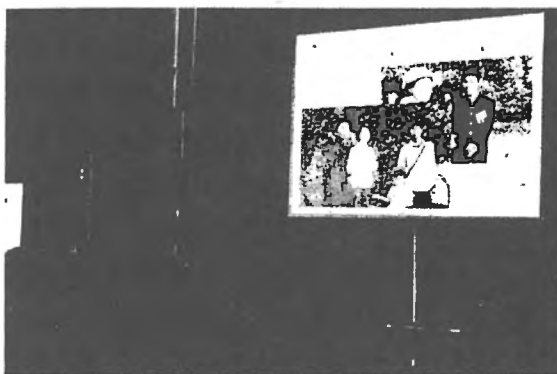


| 中学校での平泉学 | | |
|-------------------|----|---|
| 知る 見つめる 広げる | 1年 | 「過去を知る」～平泉の歴史と文化を学ぶ～ ・「平泉学」テキスト学習 ・「わくわく平泉学」体験学習 ・「平泉学」検定 |
| | 2年 | 「今を見つめる」～世界遺産になった平泉を見つめる～ ・世界遺産になった平泉を見つめる ・岩手の中の平泉 |
| | 3年 | 「未来に広げる」～日本の平泉から世界の平泉へ～ ・修学旅行での復興・平和への発信 ・平泉紹介（ガイド） |

吉田よしみ「幼保小中の系統的な世界遺産・地域学習『平泉学』」より

吉田報告では、各学年の実践の概要も報告され、助言者（奈良教育大学岩本廣美教授）からは、「岩手大学、教育委員会」と「地域の教育関係諸機関との連携がなされている」と評価されたのである。

また、②小中教員間での研究交流・実践交流のあり方に関しては、研究支援期間には実現できなかったが、平成26年6月には、平泉小、長島小、平泉中の教員が一堂に会して、はじめて「平泉学実践交流会」が開催された。カリキュラムが机上プランに終わらないためには、こうした実践交流が重要な意味をもつのであり、平泉小中交流研修会において、このカリキュラムのフレームワークを軸に、3校のそれぞれの教育実践が報告され交流が深まったのである。研究代表者もこれに参加し、実践交流会の意義を提示し、実践への助言をおこなった（『岩手日日』平成26/6/25）。



平泉町内の小中学校教職員が参加して開かれた平泉学の実践交流会

平泉学 深めるには

町内小中
教職員
各校の実践通じ探る

平泉町の小中学校教職
員を対象にした2014
年度町小中交流研修会
(町教委主催)は28日、
町立平泉中学校で開かれ
た。同校の授業提案を基
にした研究協議、平泉
学(平泉学書)を主題と
した実践交流を行い、郷
土を愛し学力、心身とも
に充実した子供たちを育
めるためにより良い学習
指導の在り方を考えた。
平泉学を主題とした実
践交流は初の試みで、互
いの取り組みを知ること
で、各校の実践に役立て
ようと実施。平泉、長島
の両小、平泉中の教職員
ら約50人が参加した。
13年12月に開かれた
「第4回世界遺産学習全
国サミット」ならびに
平泉小6年生による学
習成果の発表を映像で報
告。平泉小の吉田よし
み教諭、長島小の菊田美樹
教諭、平泉中の高橋厚教
諭が実践活動を発表、岩
手大教育学部の今野日出
晴教授が助言した。

このうち平泉中の高橋
教諭は、11年度、3年間
を貫通した学習の目標設
定と系統化を図ったこと
を紹介。目標を設定した
ことにより系統性を持た
せたカリキュラムが確立
できたことや、アビール
活動やガイド体験で生徒
の相手に伝える意識の向
上を図られたこと、地域
とのつながりや所属感が
醸成されたことなどを成
果とし、小学校での学習
とのつながりの把握、教
師側の自主研修や企画と
地域との連携などを今後
の課題とした。

今野教授は「平泉の実践
は、平泉の教育の

『岩手日日』2014年6月25日

世界遺産教育は、教育委員会をはじめ、各学校、教職員、児童・生徒、そして、保護者や地域の方々へと、その意義が理解されることが必要になってくる。そうした理解が前提となって、小中連携のカリキュラム・プランが十全に実施されていくのである。

今年度の実践交流会で報告されたように、平泉町における世界遺産教育の実践は、学校・家庭・地域の三者によって世界遺産「平泉」の価値が理解されてきたことを示している。平泉中の実践では、「郷土 平泉学」の集大成として、親子行事とタイアップし、グループ毎に平泉ガイド体験をおこなっていた。最初は、親に説明し（親が初めて知る内容も多い）、次に観光客へ説明し、話すことで自信が高まり、知識も明確になっていった。世界遺産教育で学習した成果を地域に発信して

責任として面として次世
代育成を目指す試み」と
して教師による実践交流
の意義を強調した上で、
テキストなどの形で内容
の系統性を保つよう助
言。
また▽世界遺産につい
ての学習▽世界遺産のた
めの学習▽世界遺産を通
じた学習という三つの
学びの視点から「文化遺
産について理解し、その
価値について理解を深
め、文化遺産を尊重する
態度を育てる学習が一番
大事。それは世界遺産に
関わっている当事者意識
を持つことだ」と述べ

いったのであり、さらには、平泉の地域をこえても展開された。平泉小6年生は、学習旅行で仙台市民に平泉を紹介する手作りパンフを手渡し、また、平泉中でも、修学旅行で銀座において、自作のパンフレットを配布した。こうして、学校をこえて平泉の地域のなかへ、さらに、平泉をこえて他の地域へと情報を発信するなかで、世界遺産の価値がより一層深く理解されていったのである。それは、これからの平泉町を支え、世界に発信、行動できる人材の育成へとつながり、こうした取り組みが教育を通じて地域社会へ還元されていくための一つの道筋を示しているといえよう。

5. 今後の課題

まず、第1には、これまで検討してきた小中連携・一貫の世界遺産教育「平泉学」のカリキュラムのフレームワークを軸に、実践的検証を通じて、修正・改善をはかることがあげられる。2014年度に平泉町小中交流研修会「平泉学実践交流会」が初めて開催され、ようやく、平泉町の小中学校の教員がともに、世界遺産教育「平泉学」カリキュラムの具体的な実施内容を相互に検討することができた。これを一つの契機にして、系統的なカリキュラムを実践的に検証して、修正を試みて、より充実したものへと改善をはかっていくことが課題としてあげられる。第2には、系統的なカリキュラムを実施するに際して、そこにあらわれた系統性をより一層吟味していく必要がある。今回のカリキュラムの系統性は、特に、子どもの発達の系統性を踏まえたものとして構想されている。幼稚園低学年「ふれる・かんじる」－中学年「ふれる・知る」－高学年「知る・考える」－中学校「知る・見つめる・広げる」というかたちは、平易な表現ながら、意味するところは、直感的体験から知的認識へ、そして、問題解決的な思考をへて、社会的参画へというもので、子どもの発達の系統を軸にして構想されている。しかし、その一方で、世界遺産教育の内容としての系統性は、小学校6年生段階で、共通な学習内容として提示することができたが、全体を見通せば、まだ、たたき台の段階にとどまっている。小学校から中学校へと、どのような内容を基礎的な共通領域として位置づけるのか、そして、それを踏まえて、発展的な選択領域としてはどのようなものを配置するのか、そうした点が、十分に検討されたとはいえない。

内容としての系統性を担保するものとしては、やはり、幼小中連携・一貫教育に対応した統一的な副読本の作成が必要になってくる。これまでの平泉に関する地域パンフレット、小学校で用いられてきた社会科副読本、中学校での「郷土・平泉学」などを、大学研究者、学校教員、教育委員会、平泉町行政、地域住民等で検討し、その内容の整理と新たな副読本の作成が求められている。その際、単に、対象としての「平泉」を記載するのではなく、平泉の文化遺産とその保護活動の学習を通して、自らの存在を見つめ直し、地域の担い手としての自覚を促すものとして、さらには、文化交流・文化変容の現在的な意味も同時に考察できるような内容が必要になっている。

本研究は単年度の地域課題研究であるため、平成25年度で終了するが、残された課題の大きさから考えると、本来は、地域課題研究の継続が望まれるところである（当初から、スタートアップ的な研究課題として構想された側面がある）。しかし、地域課題研究の主旨からすれば、科学研究費補助金等の申請採択を視野に入れる必要がある、学術的な意味での方向性を明瞭に示す必要がある。現在の残された課題としての副読本の作成や系統的

カリキュラムの実践的検討というものは、その点において、地域課題研究の主旨にそぐわないところがある。本研究のような地域の課題にこたえる実践的な研究への支援の方策も検討していただければと考える。

6. 主な発表論文等

- ・ 図書

今野日出晴, 世界遺産教育「平泉」の可能性, 『平泉文化の国際性と地域性』(藪敏裕編, 汲古書院, 2014年7月), 査読無, 127~146頁,

- ・ その他 報道区分: 新聞(研究成果で触れたものも含む)

「平泉の将来 児童担う 歴史の学習に講演会」(『岩手日報』平成25年6月25日)

「郷土平泉より深く 小学校で専門家講演 遺産の価値に理解」(『岩手日日』平成25年6月25日)

「平泉学 深めるには 町内小中教職員 各校の実践通じ探る」(『岩手日日』平成26年6月25日)

「平泉 世界遺産3年 全小中学び親しむ」(『読売新聞』平成26年6月29日)

研究課題

エピジェネティクス的人為的制御による牛体外受精胚の異常原因解明とその克服

研究代表者 農学部 教授 澤井 健

【研究成果の概要】

ブタやウシなどの家畜では、体外受精(IVF)や体細胞核移植などの発生工学技術を用いた育種改良やヒト医療用の薬剤生産や疾患モデル個体の生産が望まれている。しかしながら、家畜胚の体外生産胚には様々な問題があり、発生工学技術の改良が必要となっている。そのために、家畜初期胚の発生機構の一層の理解が求められているが、ブタやウシなどの家畜胚においては、胚の発育や組織分化、着床等を制御する機構について未だ不明な点が多い。そこで本研究では、マウス胚における内部細胞塊(ICM)および栄養膜細胞(TE)形成の必須因子であるOct-4に着目し、これら因子的人為的発現抑制を行ったウシ胚の胚発生および組織分化関連遺伝子発現について検討した。

Oct-4発現抑制を行ったウシ胚では、桑実期までの発生率に影響は認められなかったが、Day 6およびDay 7におけるBC期への発生率がコントロール区と比較して有意($P<0.05$)に低い値を示した。さらにOct-4発現抑制胚では、*Cdx2*および*Fgf4* mRNA発現量がコントロール区と比較して有意($P<0.01-0.05$)に低い値を示した。

以上の結果から、ウシ胚においてOct-4および*Cdx2*が様々な組織分化関連因子の発現を制御することで、ICMおよびTE分化を制御していることが明らかとなった。

【支援経費交付額】

| 年 度 | 配 分 額 |
|------|------------|
| 25年度 | 1,492,000円 |
| 計 | 1,492,000円 |

【キーワード】 ウシ 体外受精胚 エピジェネティクス 組織分化 ICM/TE

1. 研究の背景

東日本大震災時に発生した原発事故による牧草の放射能汚染などで自給飼料の生産量が減少し、岩手県を含む東北地方における乳用・肉用牛生産は極めて厳しい状況にある。さらに近年、我が国においては、乳用牛、肉用牛ともに人工授精後の受胎率が約40%前後にまで落ち込み、子牛生産効率の低下が畜産経営を圧迫する大きな要因となっている。酪農・肉牛生産経営を少しでも安定、向上させるためには、受精卵移植技術などの積極的な導入による効率的な子牛生産が重要である。現在、我が国における牛の体外受精(IVF)胚の移植頭数は年間約1万頭(胚移植全体の約15%)で推移しており、IVF技術は受精卵移植を利用した子牛生産にとって重要な技術となっている。しかしながら、牛では、IVF胚の受胎率が体内受精・体内発生胚と比較して低いこと、IVF産子に生時体重の増加(過大化)がみとめられることなどが問題となっており、これら異常の原因解明とその克服が極めて重要な課題となっている。

ウシIVF胚の異常原因として、IVF胚における遺伝子発現(エピジェネティクス)の異常があげられる。研究代表者はこれまでに、ウシのクローン胚やIVF胚に特異的な発現動態を示す遺伝子群を同定するとともに、家畜初期胚の発生に関与する重要因子の一つとして初期胚の内部細胞塊(ICM)と栄養膜細胞(TE)の分化に着目し、ICM/TE分化に関わる遺伝子の探索を進めてきた。その結果、牛および豚初期胚におけるICM/TE分化にOct-4およびCdx2遺伝子が重要な役割を担うことを見いだすとともに、ウシIVF胚ではFgf4などの組織分化関連因子の発現量が低いことを明らかにしている。しかしながら、Oct-4およびCdx2が家畜初期胚における組織分化制御の決定的因子であることの最終的な証明には至っておらず、またウシIVF胚におけるFgf4などの遺伝子発現量低下の原因は不明である。

2. 研究の目的

上述したように、我々はこれまでに、ウシおよびブタの胚盤胞期胚において、Oct-4およびCdx2遺伝子発現がそれぞれICMおよびTEで高い値を示すものの、ICMにおけるCdx2発現、TEにおけるOct-4発現も一定のレベルで認められることを見いだしている。このことは、牛初期胚においてもマウス胚と同様にOct-4およびCdx2が初期胚のICM/TE分化を制御する主要な因子である可能性を示唆するものであるが、上記したように、家畜初期胚においてはOct-4およびCdx2発現がICM/TE両組織に認められることから、Oct-4およびCdx2が家畜初期胚のICM/TE分化制御の主要因子であるか否かの結論は得られていない。

そこで本課題では、まず始めに、ウシ初期胚におけるICM分化を制御する決定的な因子がOct4であるか否かを明らかにするため、ウシ初期胚のOct-4遺伝子発現をRNA干渉法により人為的に抑制し、両遺伝子の発現抑制がウシ初期胚の組織分化におよぼす影響を明らかにする。ウシのIVF由来1-細胞期胚に、Oct-4を標的としたsiRNAのマイクロインジェクションを行い、それぞれの遺伝子発現抑制下において胚盤胞期でのICMおよびTE形成を調べる。さらに、家畜初期胚においても、Oct-4とCdx2が互いの発現を抑制する関係

にあるか否か、さらには両因子の発現抑制が Fgf4 や Nanog など他の組織分化制御因子の発現動態におよぼす影響を明らかにするため、Oct-4 発現抑制胚の遺伝子発現動態を RT-リアルタイム PCR 法ならびに蛍光免疫染色法により明らかにする。

3. 研究の方法

1) ウシ卵巣の採取および卵子の吸引

実験に供したウシ卵巣は、すべて食肉処理場に搬入屠殺されたウシより採取した。注射針 (TERUMO) を用いて直径 2-8 mm の小卵胞から卵胞液と共に COCs を吸引採取した。その後、実体顕微鏡下において、卵丘細胞が 3 層以上付着しており卵細胞質が変性していない COCs を選抜した。

2) 体外成熟培養

選抜後の COCs の体外成熟にはウシ卵子用体外成熟培地である IVMD-101(機能性ペプチド研究所、山形、日本)を用いた。IVMD-101 により作成した 100 μ l のドロップ内に COCs を移し(1 ドロップ当たり 10 個以下)、39°C、5% CO₂、in air 条件下の CO₂ インキュベーターにおいて 22 時間の成熟培養を行った。

3) 体外受精

ウシ卵子の IVF は、体外成熟後の COCs および洗浄・遠心分離(1800 rpm、5 分)を 2 度繰り返した凍結融解精子をウシ IVF 用培地である IVF-100 (機能性ペプチド研究所)のドロップに移し、39°C、5% CO₂、in air 条件下で 6 時間媒精することにより行った。IVF 培地における最終精子濃度は、5 \times 10⁶精子/ml になるように調整した。媒精終了後、ピペッティングにより卵子周囲に残る卵丘細胞を除去し、卵細胞質が変性していないもののみをその後の実験に用いた。

4) siRNA 注入

IVF 処理後の胚を IVC 培地である mTALP 培地に移動した。Oct-4 発現抑制用の siRNA は、ウシ *Oct-4* 遺伝子の塩基配列を基に設計した。siRNA の注入はマイクロマニピレーター(株式会社 ナリシゲ、東京、日本)、マイクロインジェクター(Eppendorf、Hamburg、Germany)およびインジェクションピペット(Femtotip; Eppendorf)を用い、受精卵の卵細胞質内に 50 μ M siRNA を約 10 μ l 注入にした。

5) 体外培養

siRNA の注入後、受精卵を mTALP 培地に移し、39°C、5% CO₂、5% O₂、90% N₂ 条件下で 2 日間培養を行った。その後、3%ウシ新生子血清(Invitrogen)を含む mTALP 培地に胚

を移し、さらに5日間培養を行った。なお、IVFを行った日を培養0日目(Day 0)とし、Day 2、Day 4、Day 5、Day 6、Day 7において胚の発生状況を実体顕微鏡下で観察した。

6) 遺伝子発現解析

mRNA のサンプリングは、IVF 後 5 日目に桑実胚を対象として実施した。サンプリング後の各サンプルの保存には -80°C フリーザーを用いた。mRNA の RT は、常法に準じて行った。RT 反応後、各 cDNA サンプルに DEPC 水を $10\ \mu\text{l}$ 添加し、最終サンプル液量が $31\ \mu\text{l}$ となるように調整した。これらの cDNA サンプルの保存は、 -30°C フリーザーを用いて行った。

リアルタイム PCR は常法に準じて行った。各サンプルにおける mRNA 発現量の比較には同一サンプル内のヒストン *H2a* 発現量で補正した値を用いた。

7) 蛍光免疫染色

桑実期胚(Day 5)を 4% paraformaldehyde PBS を用いて固定処理を行った。その後、0.2% Triton X-100 を含む DPBS 内で 30 分間処理することで透過処理を行った。Image-iT FX Signal Enhancer (Invitrogen) で 30 分間処理し、TXPBS を用いて 10 分間の洗浄処理を 2 回行った後、7% goat serum (Gibco) を含む TXPBS で 90 分間処理することでブロッキングを行った。Oct-4 の一次抗体 (Rabbit polyclonal Anti-OCT-4 primary antibody [SC-9081; Santa Cruz Biotechnology, Santa Cruz, CA, USA]) を用いて一次抗体反応処理を行った。1:400 倍に希釈した二次抗体 (Alexa 488-conjugated goat anti-rabbit secondary antibody [A11034; Invitrogen]) を用いて二次抗体反応処理を行った。

4. 研究成果

1) siRNA 注入による *Oct-4* mRNA 発現抑制効果の検証

Oct-4 発現抑制用の siRNA あるいは Control siRNA を注入した胚、それから siRNA 未注入(Uninjected)胚由来の桑実胚(Day 5)における *Oct-4* mRNA 発現量を解析した。Oct-4 siRNA 区における *Oct-4* mRNA 発現量は、Control siRNA 区および Uninjected 区と比較して有意 ($P<0.01$) に低い値を示した。

2) Oct-4 siRNA 注入胚における Oct-4 タンパク質発現

Oct-4 siRNA 区、Control siRNA 区および Uninjected 区における桑実胚の Oct-4 発現を解析した結果、Control siRNA 区および Uninjected 区では Oct-4 の蛍光シグナルが細胞核において強く検出されたのに対し、Oct-4 siRNA 区では蛍光シグナルの強度が弱くなっていた。この結果から、Oct-4 siRNA 注入により Oct-4 のタンパク質発現も抑制されていることが確認できた。

3) Oct-4 発現抑制がウシ IVF 胚の発生におよぼす影響

Oct-4 発現抑制を行ったウシ IVF 胚の分割率(Day 2)、16 細胞期以上(Day 4)、桑実期(Day 5 および Day 6)および BC 期以上への発生率(Day 5、Day 6 および Day 7)を調べた。Oct-4 siRNA 区、Control siRNA 区、Uninjected 区における分割率(52.2 - 61.9%)、16 細胞期以上への発生率(35.5 - 41.6%)および Day 5 における桑実期への発生率(22.8 - 26.1%)において差は認められなかった。Day 5 における BC 期以上への発生率は Uninjected 区(12.2%)と比較して Oct-4 siRNA 区(3.9%)で有意($P < 0.05$)に低い値を示した。また、Day 6 において桑実期にある胚の割合は、Control siRNA 区(7.8%)および Uninjected 区(6.6%)と比較して Oct-4 siRNA 区(18.2%)で有意($P < 0.05$)に高い値を示した。Day 6 および Day 7 における BC 期への発生率は Control siRNA 区(31.2 および 36.1%)および Uninjected 区(36.5 および 40.6%)と比較して Oct-4 siRNA 区(12.3 および 16.3%)において有意($P < 0.05$)に低い値を示した。また、Day 7 における BC 期への発生率は、Control siRNA 区(36.1%)および Uninjected 区(40.6%)と比較して Oct-4 siRNA 区(16.3%)で有意($P < 0.01$)に低い値を示した。

Control siRNA 区および Uninjected 区では Day 6 において多くの胚が胞胚腔形成を起こし、Day 7 では胚の拡張や透明帯から脱出する胚が多く認められた。Oct-4 siRNA 区では Day 6 においても胞胚腔形成を起こさず、桑実期の形態を維持する胚が多く認められた。さらに、Oct-4 siRNA 区では Day 7 においても胞胚腔形成を起こす胚は少なく、細胞が断片化している胚も多く認められた。

4) Oct-4 発現抑制がウシ IVF 胚における組織分化関連遺伝子の発現におよぼす影響

桑実期 (Day 5) における Oct-4 siRNA 区、Control siRNA 区および Uninjected 区における *Cdx2*、*Fgf4*、*Nanog* および *Ifn- τ* 遺伝子の mRNA 発現量を解析した。*Cdx2* mRNA 発現量は Oct-4 siRNA 区において Control siRNA 区および Uninjected 区と比較して有意($P < 0.01-0.05$)に低い値を示した。また、*Fgf4* mRNA 発現量も Control siRNA 区および Uninjected 区と比較して Oct-4 siRNA 区において有意($P < 0.01$)に低い値を示した。*Nanog* mRNA 発現量に関しては、各処理区間において有意な差は認められなかったが、Control siRNA 区および Uninjected 区と比較して Oct-4 siRNA 区ではその値が低い傾向($P < 0.1$)が認められた。*Ifn- τ* mRNA 発現量に関しては、処理区間に有意な差は認められなかった。

以上、本研究の結果から、Oct-4 はウシ胚の発生および組織分化に重要な役割を担うことが明らかとなった。さらに、Oct-4 発現抑制胚における *Cdx2* 発現動態の変化など、マウス胚での報告とは異なる結果が示されたことから、ウシ胚の初期発生および組織分化制御機構における Oct-4 の重要性とウシ胚に独自の組織分化制御機構の存在が示唆された。

「研究の背景」で記したように、牛では、IVF 胚の受胎率が体内受精・体内発生胚と比較して低いこと、IVF 産子に生時体重の増加(過大化)がみとめられることなどが問題となっ

ており、これら異常の原因解明とその克服が極めて重要な課題となっている。このような状況のなかで、本研究により、ウシ IVF 胚における異常に密接に関与すると考えられる胚の組織分化制御因子が同定された。すなわち、ウシ胚において Oct-4 および Cdx2 が ICM および TE 分化を制御する極めて重要な因子であることが明らかとなった。ウシ IVF 胚にみとめられる様々な異常は、胚の組織分化および胎盤形成に係るものであり、これまで、ウシ胚において組織分化を制御する機構は不明であった。そのため、IVF 胚における異常原因の特定やその発生機序を調べることは極めて困難であった。今回の研究により、ウシ胚の組織分化を制御する重要な因子が初めて明らかとなったことで、ウシ IVF 胚の異常原因の特定とその人為的な制御技術の開発が可能となった。

今後は、本研究成果を基にウシ IVF 胚の異常原因の特定とそれらを正常化する技術の開発を行い、東北地域における効率的な子牛生産に貢献したいと考えている。

5. 今後の課題

上記したように、本研究によりウシ初期胚の ICM 分化を制御する重要因子として Oct-4 が同定された。今後の課題として、これら両因子のウシ IVF 胚における発現動態の詳細な解析があげられる。すなわち、体内受精・体内発生胚における Oct-4 発現動態と IVF 胚における両因子の発現動態を比較解析する必要がある。また、今回の研究で同定された因子は、ウシ初期胚における組織分化制御の重要因子であるが、マウス胚などでは、初期胚における組織分化に関しては、Oct-4 および Cdx2 以外にも重要な役割をもつ転写因子の存在が明らかになっている。そのため、上記の検討を進めながら、他の制御因子の同定作業を継続する予定である。

また、今回得られた知見を、実際の子牛生産技術に生かす為には、Oct-4 および Cdx2 発現動態を指標とした IVF 胚の体外培養液の改良が必要となる。我々は、両因子の発現動態に関与する要因として、体外培養液への各種成長因子(IGF や EGF など)の添加に関して基礎的知見を有しており、今回の研究で得られた結果を基に、体外培養液への成長因子添加がウシ IVF 胚の組織分化制御因子発現におよぼす影響について検討し、IVF 胚にみとめられる異常を克服し得る体外培養技術の改善につなげていきたいと考えている。

さらに今回、研究期間が1年弱と限られていた事から、ウシ IVF 胚の Xist 遺伝子発現の人為的制御による IVF 胚の正常化に関する研究結果を得る事ができなかった。この課題に関しても、引き続き継続して取り組む予定である。

本研究結果を基にして申請した科学研究費補助金・基盤研究(B)が採択(平成 26 年～平成 29 年度)されたので、上記した研究課題を遂行し、効率的な子牛生産を可能とする IVF 技術確立を目指したい。

6. 主な発表論文等

雑誌論文

1. Fujii, T., Sakurai, N., Osaki, T., Iwagami, G., Hirayama, H., Minamihashi, A., Hashizume, T. and Sawai, K. (2013)
Changes in the expression patterns of the genes involved in the segregation and function of inner cell mass and trophectoderm lineages during porcine preimplantation development. *J. Reprod. Dev.* **59**: 151-158.
2. Sakurai, N., Fujii, T., Hashizume, T. and Sawai, K. (2013)
Effects of downregulating Oct-4 transcript by RNA interference on early development of porcine embryos. *J. Reprod. Dev.* **59**: 353-360.

学会発表

1. Sawai, K. (2013)
Epigenetic abnormality in bovine cloned embryos, and approaches for the overcoming. 2013 Biomodulation Symposium, Joining of Korea and Japan for the study on “From Germplasm to Cloning”, 5 June, Seoul, Republic of Korea.
2. Sawai, K., Sakurai, N., Inoue, K., Fujii, T., Hirayama, H., Kageyama, S., Hashizume, T., Yamanaka, K., Takahashi, M. and Ogura, A. (2013)
Effect of RNAi mediated knockdown of *Xist* on preimplantation and full-term development of bovine cloned embryos. Society for the Study of Reproduction 46th Annual Meeting, 22-26 July, Montréal, Canada.
3. Sakurai, N., Fujii, T., Hirayama, H., Kageyama, S., Ito, H., Hashizume, T. and Sawai, K. (2013)
Effect of downregulating Oct-4 transcript by RNA interference on early development of bovine embryos. Society for the Study of Reproduction 46th Annual Meeting, 22-26 July, Montréal, Canada.
4. 櫻井伸行, 羽田雅紀, 橋爪 力, 澤井 健 (2013)
体外発生培地へのプロゲステロン添加がウシ体外受精胚の発生におよぼす影響. 第 106 回日本繁殖生物学会講演要旨: j158.

図 書

1. 澤井 健
家畜における体外生産胚のエピジェネティクス特性とその人為的制御, 「エピジェネティクスの産業応用」. 畑田出穂, 久保田健夫(監修), シーエムシー出版, 東京, pp.379-387.