

令和 4 年度地球観測技術等調査研究委託事業
「環境音と衛星画像を用いたヒマラヤ山岳地帯の野生
動物保全・犯罪対応の拠点形成」
委託業務成果報告書

令和 5 年 5 月
東京大学

本報告書は、文部科学省の地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、東京大学が実施した令和 4 年度環境音と衛星画像を用いたヒマラヤ山岳地帯の野生動物保全・犯罪対応の拠点形成」の成果を取りまとめたものです。

目次

1	はじめに	1
1.1	委託業務の目的	1
1.2	業務の方法	1
1.2.1	技術開発の業務の方法	1
1.2.2	合意形成の業務の方法	2
1.2.3	人材教育の業務の方法	2
1.2.4	自発的な研究活動等	3
1.3	当該年度における委託業務の結果概要	3
1.3.1	技術開発の業務の結果概要	3
1.3.2	合意形成の業務の結果概要	3
1.3.3	人材育成の業務の結果概要	3
1.3.4	自発的な研究活動等業務の結果概要	4
1.4	技術開発の実施	4
1.4.1	背景	4
1.4.2	目標	6
1.4.3	評価実験	7
1.4.4	結果	8
1.4.5	環境音配信装置の実現可能性試験	10
1.4.6	専門家や企業との議論	12
1.5	合意形成の実施	13
1.5.1	技術協力要請の起案と内容	13
1.5.2	政府関係機関との合意形成	16
1.5.3	マナン地方の現地住民との合意形成	18
1.5.4	チトワン地方の現地住民との合意形成	22
1.5.5	議論	23
1.6	人材育成の実施	24
1.6.1	専門家の育成と論文発表	24
1.6.2	シンポジウムでの周知活動	25
1.6.3	議論	26
1.6.4	自発的な研究活動等	27
2	まとめ	28
2.1	技術開発のまとめ	28
2.2	合意形成のまとめ	28
2.3	人材教育のまとめ	29
2.4	自発的な研究活動等のまとめ	29
3	添付資料	29

1 はじめに

1.1 委託業務の目的

本委託業務の目的は、日本の宇宙開発技術を活用し、ネパール国内の野生動物保全と犯罪に課題解決を促進し、経済・GIS 分野の人材育成プログラムを加速することである。野生動物保全と犯罪に関連する組織として世界税関機構（WCO）と国際刑事警察機構（ICPO）が挙げられる。両組織は連携して世界各国で発生する野生動物犯罪に対処している。一方、本研究代表者は、インフラ未整備地域において、野生動物に装着したデバイスを用いた高度なサービスを実現するための空間情報技術の研究を行ってきた。そこで本業務では、本研究代表者はこれまでの研究成果を活用した国際事業推進のための技術開発、合意形成、人材教育を行う。具体的には研究代表者は 1992 年からネパール国内のステークホルダーや民間レベルの関係者と活動を行ってきた 2016 年には、ネパールの人文社会（貧困経済学分野）の研究者を日本国内で受け入れ、GIS 教育などを実施した。そこで本業務では、「人文社会×宇宙」分野での越境人材育成の国際事業を行い、将来的な国際協力事業の実現に貢献する。具体的には野生動物保全・犯罪対策に活用するため、野生動物が発する環境音と生息地の衛星画像を処理する情報基盤を開発する。そしてネパール国内の野生動物保全分野の専門家や日本国内のリモートセンシング企業との議論を行い、当該分野の知見を得る。本年度は、世界的なコロナパンデミックの影響が少なくなったこともありある程度の屋外活動を行えるようにあった。日本国内で衛星画像処理の予備実験を行い、現地に研究員を派遣した。本報告書はその成果について述べる。

1.2 業務の方法

令和 4 年度における実施内容は、以下の通りである。

1.2.1 技術開発の業務の方法

野生動物保全や犯罪対策に役立てるため、野生動物が発する環境音や生息地の衛星画像を処理する情報基盤の開発を行う。このために、日本国内の予備研究成果を活用し、野生動物の行動と人の行動が重なりやすい場所の空間条件を整理するとともに、ネパール国内の空間データの整備や、データ処理のためのアルゴリズム開発を行う。令和 4 年度には、令和 3 年度に取得した野生動物生息地域の衛星撮影データと地上データとの比較検証を行った。時系列的に衛星画像を取得し、衛星の軌

道要素等に依存する誤差を取り除いてから、過去の衛星画像との差分を求めることでその期間中に新たに建設された建物や塔を識別することができる。これを現地の情報と比較することで、生息地への人為的介入を検出するための基礎的な解析アルゴリズムを構築する。また、ネパール国内の野生動物保全分野の専門家や、日本国内のリモートセンシング企業との議論を通じて、当該分野の知見を深める。

1.2.2 合意形成の業務の方法

日本の宇宙技術の国際展開を促進するため、ネパール政府関係機関（森林省・財務省・外務省）との合意形成を進める。森林省の所轄組織である The National Trust for Nature Conservation (NTNC) と共同でシナリオ作成・技術協力要請書の取りまとめを行い、上記 3 省庁からの承認を得ることを目標とする。令和 4 年度は、ヒマラヤ山岳地帯の野生動物のモニタリングを宇宙技術を利用することにより得られる成果・利点やその指標を定量的・定性的にまとめる。NTNC や同 3 省庁の関係者とのオンラインミーティングを実施する。また、新型コロナウイルス感染症流行などの状況を踏まえつつ、可能であれば現地調査等も実施する。

1.2.3 人材教育の業務の方法

持続的な国際共同事業に向けた人文社会分野（貧困経済学）の人材教育として、人文社会分野人材を対象に専門家 1 名の教育を行う。令和 4 年度は、令和 3 年度に身に付けた空間的思考力を活かし、GIS 教材やオンラインツールを用いて、対象地域における野生動物調査のデータ処理及びシナリオ形成を行う。また、ネパール国内の研究者・学生を対象に、日本の宇宙利用技術について周知するための交流を実施する。なお、当該専門家 1 名については、国際協力分野の外国人研究者を雇用しているが、新型コロナウイルス感染症の流行の影響で渡航の予定が立たず、特例として令和 4 年 1 月 1 日付けで海外在住（ネパール）のまま着任している。

1.2.4 自発的な研究活動等

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進する。

1.3 当該年度における委託業務の結果概要

令和4年度における業務の結果概要は、以下の通りである。

1.3.1 技術開発の業務の結果概要

野生動物保全・犯罪対策への活用を目的に、野生動物が発する環境音と生息地の衛星画像を処理するための情報基盤開発を行った。具体的には、日本国内の予備研究成果を用い、野生動物の行動と人の行動が重なりやすい場所の空間条件の整理を行うとともに、ネパール国内の空間データの整備や、データ処理のためのアルゴリズム開発を行った。令和4年度は、令和3年度に取得した野生動物生息地域の衛星撮影データと地上データとの比較検証を行い、基礎的な解析アルゴリズムを構築した。また、ネパール国内の野生動物保全分野の専門家や、日本国内のリモートセンシング企業との議論を行い、当該分野の知見を深めた。

1.3.2 合意形成の業務の結果概要

日本の宇宙技術の国際展開を促進するため、ネパール政府関係機関（森林省・財務省・外務省）との合意形成を進めた。森林省の所轄組織である The National Trust for Nature Conservation (NTNC) と共同でシナリオ作成・技術協力要請書の取りまとめを行い、上記3省庁からの承認を得ることを目標とした。令和4年度は、ヒマラヤ山岳地帯の野生動物のモニタリングを宇宙技術を利用することにより得られる成果・利点やその指標を定量的・定性的にまとめた。NTNC や同3省庁の関係者とのオンラインミーティングを実施した。また、新型コロナウイルス感染症流行等の状況を踏まえつつ、現地調査等も実施した。

1.3.3 人材育成の業務の結果概要

持続可能な国際共同事業に向けた人文社会分野（貧困経済学）の人材教育として、人文社会分野の専門家1名を対象に教育を行った。令和4年度は、令和3年度に身に付けた空間的思考力を活かし、

GIS 教材やオンラインツールを用いて、対象地域における野生動物調査のデータ処理及びシナリオ形成を行った。また、ネパール国内の研究者・学生を対象に、日本の宇宙利用技術について周知するための交流を実施した。なお、当該専門家 1 名については、国際協力分野の外国人研究者を雇用しているが、新型コロナウイルス感染症の流行の影響で渡航の予定が立たず、特例として令和 4 年 1 月 1 日付けで海外在住（ネパール）のまま着任したが、その後、令和 4 年 7 月 4 日付けで国内にて着任した。

1.3.4 自発的な研究活動等業務の結果概要

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進した。

1.4 技術開発の実施

1.4.1 背景

野生動物の生息状況を効率的にモニタリングするために、衛星データを利用する技術を開発する必要がある。こうした野生動物は人里離れた場所に生息しており、地上からアクセスすることが難しい場所にも生息しているため、継続的かつ長期的にモニタリングすることが求められている。例えば、ネパールのアンナプルナ自然保護区に生息するユキヒョウについては、希少種の保護だけでなく、野生動物犯罪に対応するための頑強なモニタリングシステムが必要とされている。しかし、山岳地域では地上の電源や情報通信基盤が乏しいため、センサーを配備しても定期的に回収することが困難である。さらには山岳地帯の気象環境はセンサーの使用環境条件を満たさないこと場所であることが多くセンサーの動作が保証できないことが問題となる。さらに、商用電力網や情報通信ネットワークが未整備であるため、地上からのアプローチだけでは対応できない。つまりこのような状況でリモートセンシングを効果的に活用することが求められる。

リモートセンシングの手段としては、たとえばドローンを利用することが挙げられる。近年の技術的進歩により、ドローンの飛行可能時間は伸びており、また安価であるため様々な状況下において利用されている。その一方で飛行条件の制約が存在する。例えばネパール国内のアンナプルナの

ような標高の高い地域（およそ 4000m 超）での飛行は揚力の低下により制限を受ける。また同地区のような急峻な山岳地形では谷を抜ける風の影響を強く受けるため安定的な飛行も難しい。さらには複雑な地形が障害となるため安定的な電波の受信が困難な場所も存在する。よってドローンのような手法よりもさらに高い高度から観測が可能な衛星によるリモートセンシングが妥当と考えられる。

衛星による野生動物のモニタリングはテレメトリによる方法がよく行われている。テレメトリとは対象動物に動物装着型センサーを取り付け、そのセンサーから衛星宛にセンサーデータを送信する方法である。問題はこの手法は動物に装着したセンサーに電力を供給し続ける必要があることである。具体的には、動物に装着したバッテリーを定期的に交換するために動物自身を再捕獲する必要があるため、人的負荷が高いという問題である。そこで本業務では代わりに、バッテリーを必要としない小型のコーナリフレクタを用い、衛星の画像データを利用してすることでモニタリングに資する方法を実現する。この方法の利点は地上の支援が基本的に不要で、研究者や地域のコミュニティ、対象動物に負担をかけることが少ないことである。しかし衛星の光学的方法による野生動物個体の認識はほとんど行われたことがない。理由は衛星画像の解像度が十分に高くないと地上動物が識別できないため、技術的に困難だったからである。例えば可視画像を用いた例として Yang et al. (2014) が Geo-Eye 1 衛星 (50cm 解像度) を用いてアフリカサバンナで哺乳類を検出した研究がある。しかしながら、可視画像は上空が雲で覆われていると地表を観測することができない課題がある。

そこで本研究では合成開口レーダー (SAR) を用いて電波的に地表を観察することで、動物を検出する。しかしながら本研究の類似研究は少ない。それは SAR の解像度 (最大でも 1m 前後) が可視画像 (最大 30cm 以下) よりも一般的に劣ることや、SAR で観察した場合の地上側の比較評価用のデータの検証ができないからである。一方、この方法が可能になると気象条件に拘わらず地表を観察できるので、長期的な野生動物のモニタリングには有効となる特徴である。そこで本技術開発では、本手法の限界と改善を目指すための方向性を明らかにする。



図 1: アンナプルナ自然保護区の位置 (Kumari et al., 2014)

1.4.2 目標

最終的に評価実験を行う予定のネパール・アンナプルナ自然保護区(図1)はネパールの高地にある。本研究期間中に実際の現場に日本側の研究者が衛星の通過時刻に合わせて足を運び、現地に滞在することは容易ではない。そこで昨年度は現場での実用化を見据えた上でより迅速に開発を行うため、研究代表者らが2016年以来継続的に野生動物のモニタリングを行ってきた福島県浪江町にて検証を行ってきた。具体的には日本地球観測衛星サービス株式会社(JEOSS)から購入したXバンド合成開口レーダ(XSAR)画像を用い、現地の小丸牧場周辺において複数の牛の個体が観察できることを確認した。

一方で、本研究で調査を行う動物はその大きさが最大でも2m程度のサイズであり反射能が高くない問題がある。具体的には衛星の姿勢を回転させることでアンテナを撮像対象に合わせ高解像度の画像を取得するモードであるスポットライトモードを用いても、地表面からの背景反射などの条件によっては動物を明確に捕らえることができない場合もある。そのため、本年度はXSAR画像で認識できる対象の素材やサイズの限界を調べた。そして同時にXSAR画像に写る動物由来の輝点をより明確にするための技術開発として、コーナーリフレクタによる評価実験を行った。そして、衛星撮影データと地上データとの比較検証を行い、基礎的な解析アルゴリズムを構築した。

1.4.3 評価実験

合成開口レーダー(SAR)を用いた衛星画像データは、地球へ照射したマイクロ波の反射波を利用している。一方で、コーナーリフレクタは、照射されたマイクロ波を反射板で入射方向と同じ方向に打ち返すことで、SAR 画像に写る輝点をより明瞭にするための機材である。例えば小型船舶などの位置を特定するために目的で利用されることが多い。そこで様々なサイズのコーナーリフレクタを用意し SAR 画像を撮影することで、衛星画像で見分けることができる物体の大きさを見積もることができると考えた。一般的にコーナーリフレクタは、理論上はどの方面からレーダーを当てても必ず入射方向に反射波を反射するはずである。しかし現実には角度依存性があるため、将来的に動物に搭載することを考えると、その搭載角度まで考慮する必要がある。本研究では将来的に合成開口レーダーによる動物の画像をコーナーリフレクタを用いてより明瞭に撮影できるようにする。そのためには本研究では動物の身体のサイズや特徴、生息地状況、必要となる搭載角度を総合的に調べる必要がある。

そこで本研究ではまず、SUS304 ステンレス製コーナーリフレクタを長辺が 30cm(図 2)、20cm、15cm、10cm、5cm の 5 つのサイズで作成した(公差: JIS B0405B-m)。さらに、反射強度を高めるために表面に厚み 0.2mm のアルミニウム平板を張り、評価実験を行った。また、衛星からのレーダーをより効率的に反射できる形状を調べるため、発泡スチロール製の立方体に厚み 0.2mm のアルミニウム平板を張った簡易的なコーナーリフレクタ(図 3)も作成し、将来的に動物に搭載するにあたって最適なサイズと形状を模索した。最終的な評価実験は、ネパール・アンナプルナ自然保護区と空間・地表面の条件が似ている霞ヶ浦周辺の河川敷、及び背景反射が可能な限り小さい人工芝(東京大学柏キヤンパス内にあるスポーツ先端科学連携研究機構が所有するラグビー場)の上で行った。

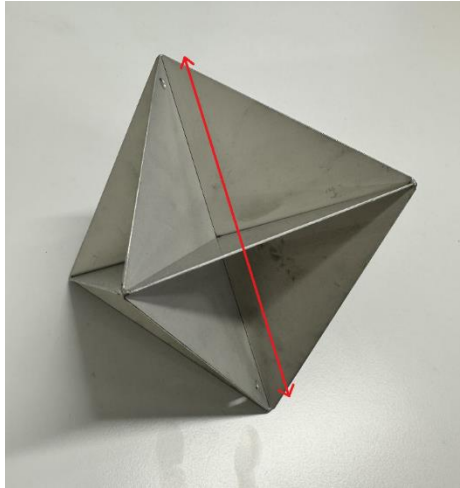


図 2: 長辺(赤矢印)が 20cm の SUS304 ステンレス製コーナーリフレクタ



図 3: 発泡スチロール製の立方体に厚み 0.2mm のアルミ平板を張った簡易的なコーナーリフレクタ。図は扇形を組み合わせたもので一辺の長さは 10cm。

1.4.4 結果

コーナーリフレクタは設置角度依存性が非常に大きい。アルミ平板を張った 30cm のステンレス製コーナーリフレクタでも、反射能の低い面を衛星に向けていた場合は SAR 画像には輝点が現れな

かった。その一方で、反射能の最も大きな面を衛星に向けていた場合は、15cm 程度のものでも輝点を確認することができた。また、三角形を組み合わせた形状のものよりも扇形を組み合わせたもののほうがはるかに反射効率がよいことが判明した。つまりこの形状であれば、XSAR 画像では条件が良ければ最小で約 7.5cm サイズのコーナーリフレクタを明瞭な輝点として捕らえることが可能であることが分かった(図 4)。さらに、発泡スチロールにアルミ板を張って作成したものでも十分な輝度を確認できたことから、コーナーリフレクタ自体の精密性よりもサイズと形状、設置角度が大きな要因となることが分かった。そこで、これらの実験を通して得られた結果から、ネパール・アンナプルナ自然保護区において動物に搭載する算段を立てることができた。最大でも 10cm 程度に収まるサイズで扇形を組み合わせたコーナーリフレクタを作成し動物の背部に衛星からのレーダーの照射角に合わせた仰角で設置するという算段である。そしてコーナーリフレクタ自体の精密性もさほど必要ないため、野生動物の生息状況をモニタリングするコーナーリフレクタの機器を作成することも可能であると分かった。ただし、屋外での設置が前提となるため、さびに強い機材を作る必要があるから素地としてステンレスを用いることが前提となる。そのため、実際の作成は専門業者への依頼が必要となる。

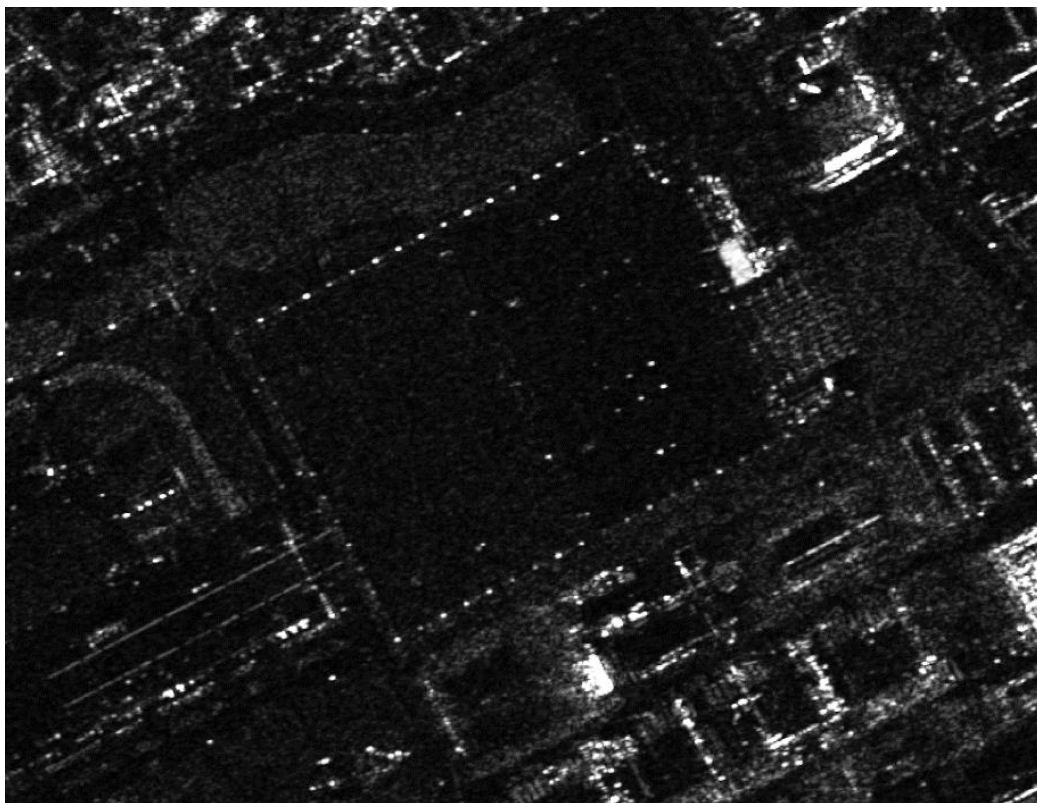


図 4: 東京大学スポーツ先端科学連携研究機構が所有するラグビー場の XSAR 画像。

図 4 に評価実験の結果を示す。ラグビー場内に並べられたコーナーリフレクタが輝点として見える。一方、こういった画像処理のアルゴリズムを構築する上での技術的な課題は現地建造物によるレーダー波の遮断にある。例えば、地元住民や野生動物犯罪者が建設する見張り塔や建物は高さが低く木材を主に利用しているため、森林の中ではレーダー波が木に遮られて識別できない場合がある。そこで図 4 がしめすように建造物の建ちやすい地理的条件を現地住民にヒアリングや現地調査することで、単なる衛星画像の差分を解析するよりも多くの情報を集めることができることが明らかになった。

1.4.5 環境音配信装置の実現可能性試験

2022 年 12 月末に日本からネパールの NTNC へ生態音響装置を発送した。これは本研究代表者が情報通信技術を用いて事前に研究開発したものである。しかし NTNC の研究者は、古典的な生態音響研究については取り組みの経験がある一方で、リアルタイムストリーミングやネットワークといった情報通信技術を活用したより高度な生態音響研究を行うための理解は不十分であった。実現可能性試験の準備を進め上で、当初は NTNC 研究者から技術的な問題やコスト、人材の問題についての疑問を数多く上げられた。そこで日本側の研究者らが段階的な対応や説明をすることで疑問をひとつずつ解消した。これにより NTNC 研究者の基礎的な能力構築を行うことができた。そして 2022 年 1 月の中旬には、研究代表者グループの 2 名がオンラインで NTNC の研究者に生態音響機器の基本的な操作について教えるためのミーティングを行った。そしてネパール側にて NTNC の研究者が生態音響学の基礎的な試験を行い、今後の本格的な研究への生態音響学の活用可能性について議論した。この議論により、生態音響機器の導入はネパールでの人間と野生生物の対立や違法な密猟の問題の解決に大いに役立つことが明らかになった。そして同月の 1 月の下旬には、日本から 2 名の研究者がチトワンの NTNC フィールドオフィスを訪問し（図 5）、生態音響情報のリアルタイム配信装置の具体的な導入計画についての相談を行った。実際に野生動物の生息地で試験的な運用を繰り返し行いながら今後の活用に向けて議論を行った。



図 5： リアルタイム配信装置の実現可能性試験を行う日本人研究者と NTNC 研究者

今回の試験的な運用では、NTNC の研究者自身が生態音響機器(図 6)を操作し、実用的な価値がある音声データを収集できることが確認できた。特に NTNC の研究者には、野生動物の生態系における音響情報の重要性や、生態音響機器を使用することで得られる情報が従来の方法では得られなかった情報であることを改めて認識してもらうことができた。また、生態音響機器を導入することで、野生動物の生息地や行動パターンをより正確に把握し、人間と野生生物の対立や違法な密猟などの問題を解決するための具体的な施策を考えることができるようになるという期待が示された。

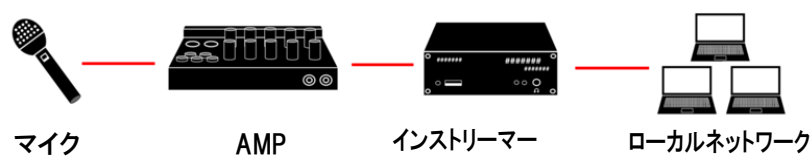


図 6： 生物音響装置の一般的なセットアップ (Uesaka et al., 2023 より編集)。

1.4.6 専門家や企業との議論

現地に派遣された研究者との議論を通じて、本研究で用いたコーナーリフレクタの大きさが実施に可能な大きさであることを確認した。具体的には保護動物としてモニタリング対象になっているサイ（体長 4m）やアジアゾウ（体長 6m）に搭載することが可能な大きさであることを確認した。また、現地の研究者と共に、具体的な生態音響情報のセンサー網のアイデアについても議論を行った。具体的には国内の山岳地帯に特化した低帯域で 360° 指向の生態音響機器を利用する用途を立てた。これは、前述の実現可能性試験の実施により、生態音響機器の利用が実際に有効だと評価されたからである。これらは実際に山岳地帯で野生動物保全業務を行う職員からの意見である。これにより、より正確な地上側の比較評価用のデータを得ることができ、保護動物の保護に役立つ情報を収集することができるようになる。

一方で、研究代表者らは、1998 年より地上側の電源・情報通信基盤が未整備な地域である原生林や帰還困難地域で生態音響情報のリアルタイム配信装置の研究開発を行ってきた。将来的に生態音響機器を導入する予定のチトワン・アンナプルナ地域も地上側の電源・情報通信基盤が未整備な場所である。しかし今回の日本側の研究者のネパールへ派遣により、チトワン・アンナプルナ地域の NTNC 事務所には十分な地上側の電源・情報基盤が存在することを確認した。将来的にここを拠点として研究を発展させることができることが明らかになった。さらには生態音響機器の電源・情報通信の互換性の互換性や、将来的に情報通信のトラフィックが増加しても同事務所の業務に問題がないことを確認した。また現地の研究者との議論では、生態音響情報のリアルタイム配信装置がチトワン国立公園内での密猟に関連する密猟者の会話や銃声の検出にも有効である可能性も挙げられた。具体的には、生態音響情報のリアルタイム配信装置を監視員の常駐が困難な密林の中央に設置することができれば、銃声と密猟者の会話をリアルタイムに収集することができる。この情報を現地で実際に監視する保全担当者へリアルタイムで通知することで、同担当者らにが野生動物犯罪に対して即時対応できる。そこでこうした生態音響情報のリアルタイム配信装置を複数の場所に設置することができれば、その周辺の動物犯罪軽減率は 60～70%程度にまで上ると NTNC の役員は期待していた。これは現地の保全担当者の感覚的な数値である。また、生態音響情報のリアルタイム配信装置により得ら

れる情報は、野生動物のモニタリングや犯罪対応だけでなく環境教育や観光業にも利用可能なコンテンツであることが示された。

1.5 合意形成の実施

1.5.1 技術協力要請の起案と内容

ネパール政府森林省の所轄組織である自然保護のためのナショナルトラスト（NTNC）と共同でシナリオ作成・技術協力要請書の取りまとめを行い、ネパール政府関係機関（森林省・財務省・外務省）からの承認を得ることを目標とした。この技術協力要請は、ネパールにおける持続可能な自然保護の実現と地元住民の生活促進に向けた日本の航空宇宙技術のニーズを考慮し、NTNC が起草したものである。こ r はネパールにおける人間と自然の調和のとれた共存社会を実現するために違法な野生生物の殺害と野生生物犯罪を最小限に抑えるための日本の宇宙技術の展開である。具体的には自然資源管理のための ICT の使用を強化するためのネパールの研究者と保全事業担当者の能力構築に焦点を当てた。特に、GPS 無線付き首輪、衛星画像、カメラトラップ、環境音センサー、早期警報センサー、および人工知能（AI）ベースのモバイルアプリケーションなどの技術である。これらはネパールでの人間と動物の対立や違法な密猟を減らすのに有用である。

まず、ネパールにおける野生生物モニタリングの一般的な方法である人による監視について述べる。複数の機関の共同取り組みにより、ネパールでは野生生物犯罪がある程度減少した。しかし、野生生物犯罪対策のための資金の多くは、観光客に人気で、国際的な注目を集め、更にはアクセスが良い大規模な国立公園に集中している。そのためアクセスの悪い山岳地帯の保護地区は人材や資金が大幅に不足している。そして国内の山岳部にある多くの保護地区では、未だに野生生物犯罪の正確な規模は不明である。こうした保護地区の野生生物レンジャーによる定期的なパトロールは、密猟者を特定する最も一般的な方法である。しかし、これらのパトロールが監視しなければならない保護地区のエリアが非常に広いことと、限られた資金と人材のため、密猟者の特定は容易ではない。一方、ネパールは世界でも有数の野生生物犯罪に対する厳しい刑罰制度を持っている国である。それでも野生生物関連の犯罪事件は数多く発生しているこれらが理由である。そこでネパール政府は地域社会の意識向上に積極的に取り組んでいる。しかし、違法取引、野生動物の体の一部の密輸、および動

物の密猟は大きく減少していない。これは主に上記で野生生物犯罪を効率的に取り締まるための技術が不足していることが原因である。

次に、ネパールにおける野生生物モニタリングにおける日本の航空宇宙技術の潜在的な利点について述べる。ネパールの場合、まず国立公園や保護地区の詳細な衛星画像を作成する必要がある。これは、野生動物の生息地内で違法な密猟が発生しやすい潜在的な場所（ホットスポット）を特定するのに有用である。詳細な航空地図はドローンや関連する衛星画像技術を利用して取得することができる。また NTNC の GIS の専門家は、ネパールの各国立公園の詳細な景観図の作成を担うことができる。また、GPS センサーや本研究で開発しているリフレクタ等は野生動物用のウェアラブルデバイスは、密猟者による野生動物の殺害に対して特に脆弱な希少種や絶滅危惧種に装備できる。これは野生動物の安全のリアルタイムで監視するのに役立つ。理由は希少種や絶滅危惧種は野生動物犯罪市場で経済価値が高く、密猟者が近づいてくるからである。また衛星画像は、野生動物の行動圏に関する情報を体系的に取得するのにも有用である。野生動物の行動圏の正確な情報を得ることは、そのその生息地のよりよい管理と希少種の効率的な保全のための適切な戦略の考案に有用である。

また、赤外線センサーを使用した警報システムにより、人間の居住地での野生動物による攻撃発生率を低減できる可能性がある。ネパールでは、動物が人間の居住地に入るのを防止するために、電気柵が広く使用されている。しかしこの方法には野生動物や時には人間の感電死に至る可能性がある。

日本から 2 名の研究者とネパールの自然保護官や地元住民との議論の中で、日本の高度な航空宇宙技術な使用することで、人間と野生生物の対立を減らすことができるとの意見が出された。これは航空宇宙技術の導入により保護地域の近くに住む地元住民の生命と財産を保護することができるからである。



図 7:ネパールの国立公園にカメラトラップを設置する NTNC 研究者

次に日本の航空宇宙技術を利用することで、ネパールが受ける恩恵について定量的指標を述べる。ネパールでは、野生生物を監視するためにカメラトラップ（図 7）が最も一般的に使用されている。NTNC の役員は、カメラトラップは操作が簡単で費用対効果が高いことから、野生生物犯罪の事件を少なくとも 25%減らすことができたと言った（この数は NTNC 研究者の印象に基づいている）。実際に大型哺乳類の一部、たとえばサイなどでは、数年間にわたって密猟ゼロを達成することができた。しかし、カメラトラップは非常に狭い領域しか監視できないため、現在においては従来の方法と見なされている。それにもかかわらず利用されているのは別の理由がある。具体的にはカメラトラップが与える密猟者が心理的恐怖である。具体的には野生動物の生息地において密猟者

は常にカメラの監視下にあるという心理的恐怖である。これにより動物犯罪の発生率の軽減に寄与している可能性がある。そこで日本の航空宇宙技術を採用することで、国立公園や保護地区の広い範囲を監視下に置くことができ、パトロールに必要な人件費と必要な森林レンジャーの人数を効率的に減らすことができる。リモートセンシングによる密猟者の監視などの高度な技術を使用することで、監視効率を大幅に向上させ、野生生物犯罪の発生率を少なくとも 50%減らすことができるとの意見があった（この数は NTNC 研究者の印象に基づいている）。

1.5.2 政府関係機関との合意形成

技術協力要請書は、日本の研究グループとネパール観光局自然保護センター（NTNC）の間で徹底的に議論され、技術協力の内容が最終的に決定された。そして NTNC によって森林環境省国立公園野生生物保護局（DNPWC）に提出・承認された。その後、森林環境省と財務省を経由して、最終的にカトマンズの森林省を通じて、2022 年 9 月 30 日にカトマンズの日本大使館に提出された。この技術協力要請書は、研究代表者らが 2019 年に NTNC の当時の事務局長と共にアンナプルナ自然保護区内のマナン地域を訪問した時に準備がはじまった。日本の高度な宇宙開発利用がネパールの自然保護のために必要であることをネパール側に理解してもらうきっかけとなったことから始まる。その後、2020 年に、NTNC と東京大学の両機関が公式に共同研究を行うための学術交流協定（MOU）が締結された。2021 年後半には、NTNC の事務局長が引退したが、東京大学と NTNC の業務は適切に引き継がれることとなった。そして NTNC は、引退に関係なく今後も継続的な協力を行うことを表明しており、東京大学側の研究代表者たちは、その旨を受け取ったメールを受信した。2022 年 4 月 21 日には、東京大学の研究チームが NTNC の新しい事務局長や管理委員会と Zoom ミーティングを行った。同様に、5 月の第 1 週には、研究代表者たちが NTNC を訪問し、事務局長や管理委員会と面会した。これは、研究代表者たちが NTNC の新しい管理委員会と会う最初の機会であった（研究代表者が 2019 年に NTNC を訪問した際には異なる管理委員会であった）。これにより研究代表者らは、技術協力要請書の提出に必要な手順について新しい管理委員会に説明する機会が与えられた。まず NTNC の主任研究員の一人から NTNC の活動や東京大学との連携意欲についての発表があった。そして NTNC が国際的なアカデミックプログラムを開始する計画について説明がなされた。

研究代表者らのグループは、2022 年 6 月にネパール現地で事務局長や管理委員会と再び打ち合わせをおこなった。2022 年 6 月 7 日に研究代表者らと NTNC の幹事と他の 2 名の研究者のグループは JICA ネパール事務所を訪問し、技術協力要請のプロセスの詳細を確認した(図 8)。その後、研究代表者と NTNC の研究グループは、Zoom ミーティングを通じて定期的に協議を行い、技術協力や共同研究について議論した。



図 8:2022 年 5 月の NTNC とのミーティング



図 9:2022 年 9 月の東京大学と NAST の覚書 (MOU) 締結

1.5.3 マナン地方の現地住民との合意形成

2019 年、研究代表者側のメンバー 2 名は当時の NTNC の事務局長とともにマナン地方を訪問した。そして 2022 年 4 月、同研究代表者のグループが、NTNC の自然保護官とともにマナン地方を改めて訪問し、地元住民、市民科学者と話し合いを持った (図 10)。マナン地方の NTNC の保全活動は、地域社会に利益をもたらすように設計されている (図 11)。このマナン地方のアンナプルナ保護地区プロジェクト (ACAP) 地域はハイキングや登山客や観光客に人気の高いロケーションである。このマナン地方において NTNC はアンナプルナの観光収入から毎年約 3 億ネパールルピーを生み出している。この資金のほとんどすべてが、代替エネルギー (太陽光発電の確立)、女性の社会的地位の向上、農業開発 (有機農業、家畜管理)、保全教育プログラム、天然資源保護 (植林、土壌と水の保全、野生生物の保護)、持続可能な観光管理、一般的な健康プログラム、文化と遺産の保護、コミュニティ開発プログラムなどのコミュニティ開発に投資されている。



図 10：市民科学者、NTNC 自然保護管との話し合い



図 11:ACAP 地域における NTNC の活動概要

このマナン地方の地元住民は、持続可能な生計を主に畜産に依存している。しかし、毎年、羊や山羊などの家畜がユキヒョウなどの野生動物に殺されている。これらの問題の解決に向けて NTNC は、マナンの農家に家畜の損失を補償するために少額の資金を提供している。しかし、NTNC が提供するこの資金は、農民がマナンで直面する実際の損失よりもはるかに小さい。したがって、農民の野生動物に対する怒りが増大し、同地区での野生動物の殺害（報復的な殺害）につながっている。対応例としてライト(フォックスライト)が挙げられる。一部の家畜農家には、家畜がユキヒョウに襲われるのを防ぐために、ユキヒョウを威嚇する明るいライト(フォックスライト) (図 12) が配置されている。しかしフォックスライトはユキヒョウを威嚇するのではなく、逆にユキヒョウが家畜の場所の特定するための手がかりとして機能していることが判明して問題となっていることが判明した。



図 12:ユキヒョウを威嚇し、ユキヒョウの攻撃からヤクを守るために使用されるフォックスライト

mongabay.com より引用 (写真クレジット : foxlights.com)

したがって、フォックスライトはユキヒョウの攻撃から家畜を救うための理想的な方法ではないことが分かった。そこで 2022 年 4 月の地元住民との議論の中で、日本の航空宇宙技術を活用した技術を導入することは、彼らの家畜を保護するのに役立つだろうという意見を受け取った。その

理由は生態音響情報のリアルタイム配信装置はフォックスライトのような家畜の場所の特定するための手がかりとしては機能しないからである。そしてこれはマナンの生物多様性の保全にも役立つと思われる。それは生態音響情報の以前から野生動物の効率的なモニタリングとして用いられているからである。そこでNTNCの役員と地元住民は、野生動物が家畜の囲いに入った際に地元住民に警告できるいくつかの警報システムを設置することが、家畜への野生生物の攻撃を最小限に抑えるのに効果的であると述べている。つまり日本の航空宇宙技術や生態音響情報のリアルタイム配信装置により野生動物に対する地元住民の態度は前向きになり、野生動物への報復的な殺害が最小限に抑えられる可能性がある

マナン地方の観光振興と地元住民の収入増加のために、日本の航空宇宙技術が必要であるという議論が行われた。同地区の一部の地元住民は家畜からの収入は日々の生活を維持するのに十分ではないため観光に従事する副業を行っている。そこで日本の航空宇宙技術や生態音響情報のリアルタイム配信装置によるユキヒョウの観察は同地元住民の収入増加に役立つ可能性があるとの報告があった。一般的にユキヒョウは、世界中のごく少数の国で見られる希少で捕獲が困難な動物であり、温度変化に非常に敏感であるため、「指標種」と呼ばれている。そこで世界各地からの観光客や研究者が、ユキヒョウを自分の目で確認するためにマナン地方を訪れる。しかし、ユキヒョウの生息範囲は広大であり（100 km²）、1ヶ月滞在してもユキヒョウを見つけることができない場合もある。しかし、日本の航空宇宙技術や生態音響情報のリアルタイム配信装置がマナン地方に導入され、記録された映像は生態音響情報が同地区の数か所の重要なスポットにリアルタイムで中継されれば、同地元住民はユキヒョウの推定場所を絞り込むことができるとの意見があった。これにより、外国人研究者や観光客はマナン地方での滞在期間を短縮することができ、時間とコストの両方を節約することができるからである。さらに、地元住民はツアーガイドとして働いたり、ユキヒョウのビデオや写真を販売することで収入を得ることができとの発言があった。

研究代表者は2022年12月1日にカトマンズで開催されたマナン地方出身の市民科学者による写真関連の展示会を訪れた。

1.5.4チトワン地方の現地住民との合意形成

2022年5月、研究代表者のグループとNTNCの自然保護官が、チトワン地方を訪問した。地元の生活を支援し、持続可能な保全を達成できる有用性の高い技術について保全担当者や地元住民と話し合った。一般的に違法な密猟と人間と野生生物との対立は、同地方の持続可能な保全に対する大きな脅威である。同地方ではネパール政府の保護政策が成功し、過去10年間でトラの数が2倍に増加した。しかし、野生動物（トラ等）の数の増加は、地元住民にとってある意味問題となっている。具体的にはトラやサイなどの動物の個体数の増加は、人間への攻撃の可能性を高めるからである。実際に過去数年間、およそ10人が動物の攻撃によって殺され、さらに多くの人が負傷している。さらには人間への動物の攻撃に加えて、農作物や財産も野生動物によって被害を受けている。保全担当者や地元住民との議論の中で、地元住民は、日本の航空宇宙技術や生態音響情報のリアルタイム配信装置により野生動物が集落に入った際に地元住民に警告する早期警報システムが実現できれば、人間と野生生物の対立の発生率を減らすことができるという意見を述べられた。



図 13：チトワンの手工芸センターの所有者（後列左から 3 人目）と従業員、NTNC 研究者との懇談

そして研究代表者のグループと NTNC の研究者が、チトワン地方にある地元の手工芸品センター（図 13）のオーナーと数人の労働者と話し合った。この手工芸品センターは、特に森林資源に直接依存しているチトワン国立公園周辺の社会から疎外されたコミュニティのメンバーに雇用機会を提供している。同オーナーは日本の航空宇宙技術や生態音響情報のリアルタイム配信装置の実装のために研究代表者のグループと協力することに大きな関心を示した。

2022 年 11 月には、研究代表者のグループはネパールの高校に地震などの自然災害について周知する活動を行う NPO（横浜を拠点とする NPO）と話し合った。具体的には宇宙技術と GIS ベースのツールを使用した災害範囲のマッピングについて意見交換がなされた。

1.5.5 議論

NTNC の職員によると、ネパールは違法な密猟を最小限に抑えるために最善を尽くしているとされる。実際にネパールはサイの密猟ゼロを数年連続で達成している。また、NTNC の役員は、主に動物の監視のためにカメラトラップに依存しているが、ドローンや AI ツールなどの最新技術を活用できれば、密猟者の追跡にさらに役立つ可能性があるとのべている。

ネパールにおいて、コミュニティフォレストは地元住民の主要な収入源であり、地元住民によって管理され、その収益は地元住民によって共有されている。また、コミュニティフォレストは多くの観光客が訪れる場所である。日本の航空宇宙技術や生態音響情報のリアルタイム配信装置の導入により野生動物の個体数が増加すれば観光価値が高まることが期待される。これにより、コミュニティフォレストの観光客数が増える。観光客数が増えれば森林製品の売上にも見込めるため、コミュニティが利益を得ることができる。また、チトワンのコミュニティフォレストに日本の航空宇宙技術や生態音響情報のリアルタイム配信装置を導入した場合、現在の収益の少なくとも 25%の総収益を増加させる可能性がある。

ユキヒョウは、ネパールの山々に生息する神聖な動物のひとつであり、山岳生態系の指標種として国際社会にとって重要である。この動物は気温の変化に非常に敏感であり、気候変動の指標として利用できる。ただし、ユキヒョウの行動圏に関する正確なデータは明確ではなく、動物用ウェアラ

ブルデバイスを使用してその動きのパターンをGISマップにプロットすることが望ましいとされる。そこでこのようなデータを収集することで、村人が動物の動きを正確に把握し、家畜を動物の攻撃から守ることができるようになる可能性がある。

1.6 人材育成の実施

1.6.1 専門家の育成と論文発表

持続可能な国際共同事業に向けた人文社会分野（貧困経済学）の人材教育として、人文社会分野の人材を対象に専門家 1 名の教育を実施した。具体的にネパールとの研究協力を促進するため、2022 年 1 月 1 日に、学際的な研究背景と日本、ヨーロッパ、アメリカでの豊富な研究経験を有するネパール人研究者を採用した。ただし、当該専門家 1 名については、国際協力分野の外国人研究者を雇用しているものの、新型コロナウイルス感染症の流行の影響で渡航の予定が立たず、特例として令和 4 年 1 月 1 日付で海外在住（ネパール）のまま着任した。COVID-19 の影響により、当該専門家は 6 月までネパールで業務を行った。具体的には当該専門家はネパールで活動しながらも、研究代表者のグループとネパールとの間の提携促進に努め、また、ネパールの様々な研究者を結びつけた。当該専門家は 6 月に来日した後、研究室メンバーとの定期的な交流により恩恵を受けた。また当該専門家は、空間技術や GIS の有用性を理解し、生態学に関連するさまざまな側面を理解した。このように、外国人研究者の当該専門家の採用により、ネパールと日本の国際協力を大きく前進させた。

2022 年度の主要な学術成果の 1 つは、Human-Computer Interaction Conference 2023 (HCII2023) での論文の受理である。掲載された研究論文は、「ネパールにおける野生生物保護のための生態音響ヒューマンインタフェースシステムの応用」と題され、HCII2023 の論文集の Lecture Notes in Computer Science (LNCS) に掲載された。この論文集は Springer 出版社から出版された。本論文は、研究代表者側のメンバー数名と NTNC の研究者 2 名が共同執筆した。

HCII 2023 の原稿では、東京大学で行う沖縄県西表島、福島県浪江町および秩父実験林におけるサイバーフォレストプロジェクトでのこれまでの生態音響学の研究を紹介した。その後、生態音響学の機材構成を述べた。議論の部分では、ネパールにおける生態音響研究の実現可能性と課題、ネパー

ルの研究者と保全担当官による生態音響学分野に関する認識、生態音響学とヒューマンインタフェース分野をつなげる必要性の3つの議論をおこなった。

1.6.2 シンポジウムでの周知活動

研究代表者は2022年11月29日に開催されたネパール日本学術振興会同窓会シンポジウムに招待された。衛星技術に関する研究活動に関する講演を行った(図14)。同シンポジウムには、ネパールの研究機関や大学で働く約100人の研究者が参加した。NAST 副学長、ネパール国家計画委員会委員、ネパール教育科学技術省長官、在ネパール日本国大使、および JICA ネパール事務所長が出席した。日本側からは、ネパール初の超小型衛星の開発に携わった日本の大学の教授と研究代表者が講演者として招待された。そこで研究代表者は、福島で進行中の研究と現在における航空宇宙技術とデータ管理の重要性について講演を行った。ネパール側の研究者は、宇宙技術、AI、生態音響学およびデータ分析についての研究に非常に興味を示した。そして本シンポジウムに出席した多くの若いネパール人学生が研究代表者の周りに集まり、日本での大学院への留学の可能性について尋ねていた。同様に、このネパール滞在中に、研究代表者は NAST の副学長および DNPWC の事務局長とも会談し、日本の高度な航空宇宙技術をネパールの研究に使用することについて話し合った。



図 14：ネパール日本学術振興会同窓会から感謝状を授与される研究代表者

1.6.3 議論

研究代表者は複数の学問分野の研究者が連携して社会問題に取り組むことを目指している。一般的に社会問題は複数の異なる専門分野にまたがる性質を持つことが多く、複数の分野の複数の研究者が連携した取り組みが必要とされるからである。例えば、ネパールの生物多様性保全のための日本の航空宇宙技術の必要性について研究代表者の研究グループに以前に所属していたネパールのポスドクとの議論の後に初めて明らかになった。具体的には経済学のバックグラウンドがあったポスドクは、空間情報研究で用いられる研究方法論について学ぶ機会がそれまでなかったからである。このようにして、研究代表者とポスドクフェローの両方が、保全には生態学的側面だけでなく、技術的および経済的側面もあることに気づいた。

そこで 令和 4 年度は、令和 3 年度に身に付けた空間的思考力を活かし、GIS 教材やオンラインツールを用いて、対象地域における野生動物調査のデータ処理及びシナリオ形成を行った。GIS 研究ツールは、研究代表者の専門技術の 1 つであり、このツールは研究代表者の研究グループで研究者

や学生により頻繁に使用されている。NTNC の研究者の中には、以前から GIS ツールに既に精通している者もいる。NTNC はこれを使用して、研究を行う保護地区の衛星地図を作成できた。動物犯罪の対象となることが多いサイやゾウなどの主要な動物種の生息地を GIS マップに挿入することが可能となった。これによりパトロール活動を実施し、密猟を最小限に抑えるのに有用だと明らかになった。

1.6.4 自発的な研究活動等

本活動の目的は、日本国内の学生等に対する教育活動を通じた周知の促進である。研究代表者が大学院の正規授業（単位制）を立ち上げて、「統合環境デザイン論」と「情報環境デザインスタジオ」を実施した。2022 年度は学生 39 名（36+3）名対象の教材として活用したことにより、目的を達成した。

東日本大震災からの時間経過とともに、被災地の現状を伝えるメディアが減少し、正確な情報や新しい情報に触れる機会が減少している。地域住民も不安を抱えており、浪江町住民懇談会の記録には、「世界中の人々に原発事故の悲惨さや放射線の正しい知識を広めて欲しい。そうすれば偏見やいじめはなくなるだろう」との声がある。地域住民の中には、被災地の現状を伝えるメディアが少なくなり、震災の記憶が薄れることで疎外感を感じている人も多い。この震災をローカルな問題として縮小するのではなく、日本全体の問題として取り組む必要があるが、現状は被災市町村レベルの問題になってしまっている。このような状況下において、震災の問題が未解決であることを改めて地域外の人々に発信することが必要である。しかし、現在の状況では、被災地自身で現状を発信することは、人的・資金的問題において困難がある。

研究代表者は、プロジェクトの成果物として大学院の正規授業（単位制）を立ち上げた。この授業は、東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学研究系に設置された、専攻横断型のデザイン教育プログラムの一環として実施された。このプログラムは、従来の「形を創り出す」行為にとどまらず、環境学が抱える諸課題の解決に向けた思考や概念を組み立て、それを様々な媒体で表現する行為の全てを含んでいる。研究代表者らは、同プログラムの一環として「情報環境デザインスタジオ」

を開講した（図 15）。「この取り組みは、帰宅困難区域を拠点として、浪江町民にふるさとの様子を伝える意図も含まれている。社会全体に帰宅困難区域内の様子を伝える手段として、本事業の貢献は大きい。

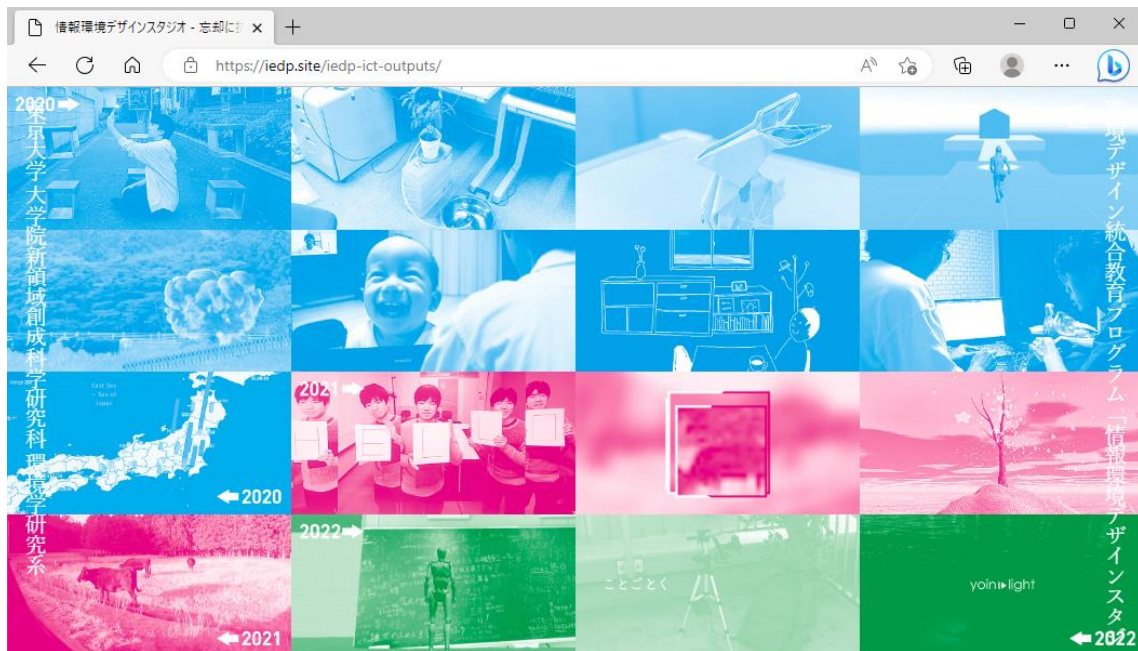


図 15：情報環境デザインスタジオ 授業成果発信 HP (<https://iedp.site/iedp-ict-outputs/>)

2 まとめ

2.1 技術開発のまとめ

野生動物保全・犯罪対応のため、野生動物が発する環境音と生息地の衛星画像を処理する情報基盤開発として、予備研究成果(国内)と空間条件の整理、空間データの整備と処理環境整備を行った。具体的には、予備研究成果(国内)として、立ち入りが困難な場所を対象に、野生動物の行動と人の行動が重なりやすい場所の空間条件を整理して、その特定方法と効率的なモニタリング方法について文献調査、データ取得を実施した。ネパール国内での利用に向け専門家や日本国内のリモートセンシングの企業との議論を行った。

2.2 合意形成のまとめ

ネパール現地において日本の宇宙開発利用のための政府関係機関との合意形成として、学術協定を締結したネパール国内機関を対象にシナリオ作成と技術協力要請書を用いて合意形成に向けた協議を行った。2022年3月14日にネパール政府側の森林環境省(MoFE)の正式な承認を既に得た。

2.3 人材教育のまとめ

持続的な国際共同事業に向けた人材教育として、人文社会分野人材（国際協力）を対象に研究代表者の兼任先の GIS 教材を用いて専門家 1 名の教育を行った。実際にモニタリングを実施することを想定したシナリオを検討し、その成果論文が情報学分野の国際会議に採択された。ネパール側主催のシンポジウムでの招待講演の依頼を受け、現地に於て 100 名程度の対象に本事業の講演を行った。

2.4 自発的な研究活動等のまとめ

日本国内の学生等への教育活動等も行い、周知につながる業務をおこなった。研究代表者が大学院の正規授業（単位制）を立ち上げて、学生合計 39 名対象の教材として用いることで達成した。

3 添付資料

該当なし

学会等発表実績

委託業務題目「環境音と衛星画像を用いたヒマラヤ山岳地帯の野生動物保全・犯罪対応の拠点形成」
機関名 東京大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
mdx: A Platform for the Data-Driven Future	Hill Hiroki Kobayashi	The annual symposium of Nepal JSPS Alumni Association (NJAA)	2022.11	国外

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Applications of Bioacoustics Human Interface System for Wildlife Conservation in Nepal	Leo Uesaka, Ambika Prasad Khatiwada, Daisuke Shimotoku, Laxmi Kumar Parajuli, Manish Raj Pandey and Hiroki Kobayashi	Distributed, Ambient and Pervasive Interactions. Smart Living, Learning, Well-being and Health, Art and Creativity. HCII 2023	2023.7	国外

（注）発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。