

UAV を活用した西之島の無脊椎動物の探索

森 英章¹、野口 克也²、中野 智之³、村上 勇樹¹、岸本 年郎⁴、川上 和人⁵

UAV-based exploratory survey of invertebrates on Nishinoshima Island

Hideaki MORI^{1*}, Katsuya NOGUCHI², Tomoyuki NAKANO³, Yuki MURAKAMI¹,
Toshio KISHIMOTO⁴ & Kazuto KAWAKAMI⁵

1. 自然環境研究センター (〒130-8606 東京都墨田区江東橋 3-3-7)
Japan Wildlife Research Center, 3-3-7 Kotobashi, Sumida, Tokyo 130-8606, Japan.
2. ヘキサメディア (〒332-0023 埼玉県川口市飯塚 1-2-117)
HEXaMedia, 1-2-117 Iizuka, Kawaguchi, Saitama 332-0023, Japan.
3. 京都大学フィールド科学教育研究センター瀬戸臨海実験所 (〒649-2211 和歌山県西牟婁郡白浜町 459)
Seto Marine Biological Laboratory, Field Science and Education Center, Kyoto University, 459 Shirahama, Nishimuro, Wakayama 649-2211, Japan.
4. ふじのくに地球環境史ミュージアム (〒422-8017 静岡県静岡市駿河区大谷 5762)
Museum of Natural and Environmental History, Shizuoka, 5762 Oya, Suruga, Shizuoka, Shizuoka 422-8017, Japan.
5. 森林総合研究所 (〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1)
Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan.

* hmori@jwrc.or.jp (author for correspondence)

要旨

西之島は 2013 年以降断続的に噴火を繰り返しており、2017 年からは毎年噴火が記録されている。特に 2019 年 12 月からの激しい噴火以降は火山活動への警戒により、島のはほぼ全てのエリアで上陸調査ができない状況が続いている。しかし、その期間中も西之島では生態系遷移が進むと考えられる。そこで無人航空機 (UAV) を活用することにより、遠隔からの生態系モニタリングを実施することとした。小型の無脊椎動物については撮影調査による情報収集が難しいことから、粘着トラップ、

吸引機、採水器を UAV で運搬して試料を採集する新規の手法により調査を試みた。粘着トラップではカクレイワガニとシラミバエの 1 種が捕獲され、採水サンプルの環境 DNA 解析では軟体動物、棘皮動物の DNA が検出された。生態系遷移の初期段階を明らかにするための調査においては網羅的な生物群の時間的変化を記録することが重要である。火山活動が続く西之島において安全に生態系モニタリングを継続するために UAV を活用した多様な生物の探索技術は重要な手段となりうる。

キーワード

一次遷移、遠隔離島、環境 DNA、吸引サンプリング、粘着トラップ

1. はじめに

小笠原諸島の西之島は 2013 年に約 40 年ぶりの噴火が始まった後、断続的に噴火を繰り返している。特に 2019 年 12 月以降の大規模な噴火では旧来の陸地が全て溶岩に覆われた上に、火山灰も厚く堆積したことにより、陸上生物のほとんどが死滅したと考えられる。また、西之島は最寄りの島である父島からでも 130km 離れており、日本本土からは約 840km の距離にある海洋島である。火山活動により現れた新たな陸地における生態系の形成過程についてはクラカタウ島（インドネシア）やスルツェイ島（アイスランド）において研究が行われている（Thornton, 1997; Fridriksson, 1975）。しかし、これらの島は他の島から 20km ほどの近距離にあること、付近の有人島の人間活動の影響を受けやすいことから生態系変化が比較的早く進行したものと考えられる。それに対し、西之島ではより孤立した位置にあることから、生物の侵入確率は低くなり、人為的な影響も小さくなる。このような条件から、西之島は、小笠原諸島、ハワイ諸島など他の陸地と繋がったことのない海洋島においてどのような順序で生物が定着し生態系が形成されていくのか、人為的な影響を受けにくい状況下で、生態系遷移の最初期の過程を緩やかな変化速度で観察できる可能性のある、地球上でも他に例のない場を提供している。

西之島では 2019 年 9 月に環境省による総合学術調査が実施され、様々な生物群の最新情報が取りまとめられた（植物：上條ほか、2020；鳥類：川上・小山田、2020；陸生節足動物：森ほか、2020；潮間帯生物：中野・港、2020）。2020 年以降も生態系の変化を記録するために継続的な調査が計画されていたものの、火山活動の活発化により、2020 年の調査は延期された。しかし、その間にも生態系の遷移は進行する。そこで 2021 年より火山活動に対する安全管理を徹底した上で調査が再開された。ただし、気象庁による噴火警戒範囲が火口より半径 1.5km であったことから、調査隊が上陸して直接的に調査できた範囲は北部の一部海岸にとどまった（川上ほか、2023、図 1）。全島的に、網羅的な生物群の時間的変化を記録することは、西之島の生態系遷移の成立過程を明らかにするためには重要な課題であり、調査隊員が上陸

できない時期においても生物情報を収集する必要がある。そこで、無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) を活用して全島的な空中撮影により大型の陸上生物の探索を行った。ただし、撮影調査による記録では小型の陸上節足動物や潮間帯の生物を記録することは困難である。そのため、大型の UAV を用い、粘着トラップ、吸引機、採水器を運搬して、試料の採集を試みる手法を開発することとした。本研究は、2021年7月8～12日(7月調査)および2021年9月3～7日(9月調査)に行った現地調査の結果のうち、無脊椎動物の探索に係る速報となる。なお、UAVを用いた撮影調査、鳥類の録音ロガーの記録については川上ほか(2023)に報告されている。

2. 方法

2-1. UAVを用いたロガーボックスの設置と回収

短期間の現地調査中に得られる情報には限界がある。そこで、UAVを用いてロガーやトラップを設置、翌調査で回収することで調査の合間となる期間中の情報を収集した。ロガーボックスにはステンレス製の板や支柱等を用いてプロテクターを作成し(300mm×200mm×120mm、ワイヤー支柱部分は除く)、その内側に自動録音装置(Song Meter mini, Wildlife Acoustics)1基、温湿度ロガー(おんどとり Jr, T&D)1基、粘着トラップ(バグトラップ, 住化エンバイロメンタルサイエンス)8基を格納した。これを5基作成して設置した(図2a, b)。7月調査においてUAVにより運搬して西之島の各地点に設置、9月調査において回収、電池交換、データ回収、トラップ回収の上、アルコール等を用いてすべて洗浄して検疫し、同じ地点に再設置した(図2c-f)。これらの機器は次回調査で回収する予定である。

2-2. 吸引機を用いたサンプリング

吸引機(マキタ VC261DZ)をUAV(DJI Matrice600Pro)に取り付けて運搬し(図2g, h)、遠隔操作による試料採集を行った。吸引機の先には火山灰等の土石を採取しやすいよう、金属製の釘、または金属ブラシを回転させるリューターをノズルの先に取り付けた(図2i)。各地において収集したサンプルは紙パックごと回収し、エタノールでノズルや機内を洗浄し、金属ブラシは毎回新品に交換するなどして、試料の混合を避けることとした。

2-3. UAVを用いた採水と環境DNA分析

西之島における潮間帯生物の生息状況を確認するため、UAVを用いた採水を試みた。西之島の海岸域に採水地点(8地点)を設定し、2021年9月3～7日に採水、濾過作業を行った。採水はUAV(DJI Matrice600Pro)に専用の採水器およびプラスチック製の1Lボトルを取り付けた状態で飛行させ(図2j, k)、遠隔操作で行った。採水は各調査地点につき2回ずつ行い、計2Lの海水を採取した。ダム湖におけるUAV

を用いた環境 DNA 用の採水事例 (Doi *et al.*, 2017) に比べて波の影響を受けやすいことから、採水器には浮力により開閉する蓋を付ける等、外洋での採水のための技術を加えた。海水はいずれも採水から 30 分以内に調査船上にて濾過を行った。水は平均孔径 $0.7\ \mu\text{m}$ のステリベクスフィルター (メルク・ミリポア) を用いて、ボトル 1 本あたり 500 mL、合計 1 L の加圧濾過を行った。濾過後、空のシリンジを用いてステリベクス内の余剰水分を排出し、毛細管スポイトを用いて RNAlater (Sigma-Aldrich Co. LLC) をステリベクスの注入孔から充填し、キャップで密閉した。処理後のステリベクスはチャックビニールに入れて密封し、 -20°C 以下に温度設定した冷凍庫にて保管した。なお、濾過時の DNA コンタミネーションによる偽陽性を検出するために、各作業日において採水サンプルと同様の手順で精製水を 1 L 濾過したブランク試料を作成した。DNA コンタミネーションを防止するため、採水およびろ過に際しては使い捨て手袋を着用して作業を行った。また、コンタミネーションを避けるため、採水機やプラスチック製ボトルは、採水前に次亜塩素酸ナトリウム溶液 (泡式ハイター) を吹き付け DNA の失活処理を行い、ペットボトル入りミネラルウォーターでリンスし、ペーパータオルで念入りにふき取った後に用いた。

処理済みの試料は各生物群に関するユニバーサルプライマーを用いて遺伝子解析を行い、対象生物群の DNA が含まれているか確認した。

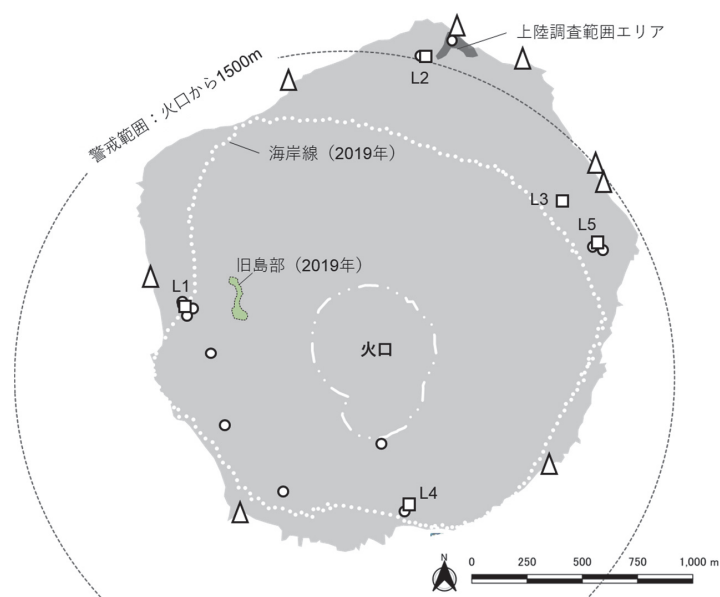


図 1. 西之島における UAV を用いた無脊椎動物探索調査の実施地点
□ : ロガーボックス ○ : 吸引機によるサンプリング △ : 採水。

Figure 1. Sites for UAV-based invertebrate search surveys on Nishinoshima Island
□, logger box; ○, vacuum sampling; △, water sampling.



図 2. UAV 調査に使用した機器類

a-g. ロガーボックス (a. 新規設置前 b. 粘着トラップの装着 c. 機器の回収時 d. 機器解体 e. 洗浄作業 f. 洗浄検疫後 g. UAV による運搬)、h-i. 吸引機 (h. 吸引機 i. 金属ブラシとリューターを接続したノズル)、j-k. 採水器 (j. 採水後 k. 吊り上げ)。

Figure 2. Equipment used for UAV surveys

a-g. Logger box (a, before the installation; b, attachment of sticky trap; c, at September collection; d, equipment dismantled; e, cleaning procedures; f, after cleaning and quarantine; g, transport by UAV); h-i, vacuum sampling (h, vacuum machine; i, nozzle part with metal brush and luter connected); j-k, water sampler (j, after water sampling; k, lifting up by UAV).

3. 結果

3-1. 粘着トラップの設置回収

調査地点 L2 で稚ガニ、L4 で稚ガニの脚、L5 でシラミバエの一種が確認された(図 3)。図 2d に示した通り、多くのロガーボックスではトラップが火山灰に埋もれており、既に機能しない状態となっていた。今回捕獲された個体はトラップが機能しなくなるまでの期間に捕獲されたものと思われる。捕獲個体のうち、カニは底面に設置したトラップに、シラミバエは天井面に設置したトラップに、それぞれ捕獲された。底面設置のトラップは地表徘徊性の生物、天井面設置のトラップは飛翔性の生物を、それぞれ想定して設置したものであったが、捕獲結果から、設置位置の効果が見られたと考えられる。

捕獲されたカニは遺伝子解析による同定の結果、カクレイワガニ *Geograpsus grayi* であった。シラミバエの一種は形態による分析により、*Olfersia* 属の 1 種であることが明らかとなった。

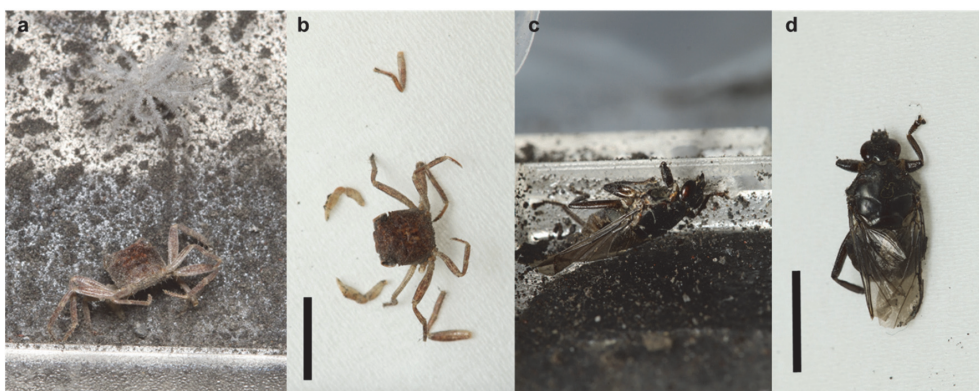


図 3. 粘着トラップで捕獲された節足動物

a-b.カクレイワガニ c-d.シラミバエの一種。a と b、c と d は同じ個体。バーは 5mm。

Figure 3. Arthropods captured in sticky traps

a-b. *Geograpsus grayi*, c-d. *Olfersia* sp. a and b, c and d are the same individuals. Black bars represent 5 mm.

3-2. 吸引機を用いたサンプリング

7 月調査においては 7 地点、9 月調査においては 5 地点において土石の吸引を行い、試料を得た。特に海鳥の営巣地周辺においては、営巣終了後の巣材など、昆虫やダニ、植物種子などを含むことが期待される土石を採集したものの(図 4)、生物由来のものは羽毛、魚の鱗等、海鳥類の営巣に伴う生物群の組織の断片のみにとどまり、節足動物や植物等は発見されなかった。

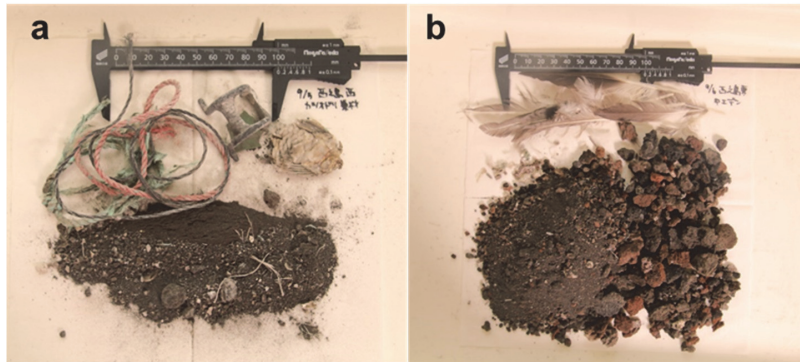


図 4. 吸引機にて採集された火山灰、礫、および巣材

A, 2021 年 9 月西之島西 L1 地点付近; b, 2021 年 9 月西之島東 L5 地点付近。

Figure 4. Volcanic ash, lapilli and nest material collected by the vacuum machine

a, September 2021 Nishinoshima West L1; b, September 2021 Nishinoshima East L5.

3-3. UAV を用いた採水と環境 DNA 分析

採水は図 1 の 8 地点で各 2 回、計 16 回の全てで成功した。保管した試料を用いて環境 DNA 解析を進めた結果、開発中の軟体動物および棘皮動物のユニバーサルプライマーで DNA の増幅が確認された。一方で、甲殻類の DNA の増幅は確認されなかった。今後、増幅した DNA の同定のための詳細な解析を進める予定である。

4. 考察

4-1. 海洋島の生態系の最初期における節足動物の確認

・海から陸に侵入する分解者

本調査の粘着トラップによってカクレイワガニが確認された。本種は中野・港 (2020) では報告されていないが、2019 年 9 月の調査時に島の西部で粘着トラップにて捕獲され、オオカクレイワガニ *G. crinipes* として記録された稚ガニ (森ほか、2020) には本種が含まれていたことが、その後の遺伝子解析により確認されている (中野 智之、未発表)。2019 年の調査では海岸付近のトラップで捕獲されていたことから、変態後の幼体が上陸したものと考えられ、海岸線の幅広い地域に上陸していることが窺える。ただし、今回カニが確認された粘着トラップは最も近い海岸線からでも 174m (L2)、および 97m (L4) の距離があり、いずれも火山灰が堆積した丘の上に設置されていた。甲幅 3.5mm ほどのサイズの稚ガニでも植生のない内陸に侵入可能であることを示している。北部、南部共に 2021 年時点では大きな海鳥営巣地は確認されておらず有機物がほとんど存在しないため、今回確認された地域においてすぐに本種が定着することは難しいと考えられる。一方、島の西部や東部にはカツオドリ類、アジサシ類の営巣地が存在する (川上ほか、2023)。営巣地のような、

カニ類にとってより食物を得やすい環境であれば生残個体が多くなる可能性がある。並行して実施した上陸地探索では火山灰やスコリアに覆われた大地上にはごく稀に海鳥の死体や放棄卵が存在していたが、ほぼ分解されない状態となっていた（川上ほか、2023）。西之島は最近接の父島からも 130km の距離にあり、昆虫等真の陸生動物が海を越えて偶然に侵入し定着するまでには長い時間を要するため、現在は分解者が不在の状態となっている可能性がある。一方、今回の記録から、カクレイワガニは浮遊幼生期における海流分散により既に西之島の各地へ頻繁に侵入していると考えられる。島が形成されてからまだ 3 万年ほどである南硫黄島では標高 900m 以上まで広域にカクレイワガニが確認されており（佐々木ほか、2018）、島内では大型の分解者として重要な機能を果たしていると考えられる。海洋島の陸域における生態系の形成過程の最初期において、カクレイワガニ等、陸生のカニ類はその分散様式と生態的特徴から、昆虫等の完全に陸生である節足動物よりも先に陸域生態系の分解者として機能する可能性がある。

・海鳥に依存する生物の残存

今回、西之島東部の海鳥繁殖地周辺で確認されたシラミバエの 1 種は 2019 年に島西部の海鳥繁殖地で生息が確認されたシラミバエ類（森ほか、2020）と同種であった。本種は海鳥に寄生する性質をもつことから、海鳥とともに西之島に生残できたと考えられる。同種と考えられるシラミバエ類はカツオドリ *Sula leucogaster* に寄生することが知られており（Levin & Parker, 2013）、今後、上陸調査等が行われた際には、宿主を確認することができれば、西之島に生残できた原因についてより詳細な検討ができると思われる。上陸探索時のカツオドリの死体下からはノミバエ類も発見されており（川上ほか、2023）、火山活動中も海鳥が西之島で繁殖を継続していたことにより海鳥由来の有機物を分解する生物の一部も絶滅せずに残存できた可能性がある。今後、島内の中心的な海鳥繁殖地に着目して詳細な調査を行うことにより、他の生物の残存も確認できる可能性がある。

4-2. UAV による無脊椎動物の探索技術の開発

本研究では UAV の運搬ツールとしての機能を活用することにより、小型の節足動物の捕獲に成功したほか、採水した試料の環境 DNA 分析により潮間帯、浅海域の海洋生物の存在を確認することもできた。火山活動の活発化により上陸を伴う調査隊員の直接的な調査が困難である状況下においても、無脊椎動物の生息確認を実現した。

生態系遷移の最初期の過程を解明するためにはどのような条件下においても網羅的な生物相の記録を残すことは必須である。今回の調査技術の開発は、調査員が直接には到達困難な調査地において撮影調査だけでは把握が難しい小型の生物の

生息状況を確認するための新たな探索技術を提案するものである。しかし、調査員が直接に調査を行うことに比較すると、まだ得られる情報量が少ない。現在も火山活動が継続する西之島においては不可欠な調査手段であることから、より効果的な調査手法となるよう、開発と改善の努力を継続していきたい。

5. 謝辞

本研究の成果は、環境省が主催した令和3年度西之島総合学術調査によるものである。調査の実施にあたっては、環境省、林野庁、海上保安庁、小笠原村、小笠原島漁業協同組合等の各関係機関に多大な便宜を図っていただいた。現地調査を行う上では、各分野の調査隊員の援助を、調査船の運用に関しては、第二開洋丸および第三開洋丸に多大な便宜を、それぞれ図っていただいた。捕獲されたシラミバエ類の分類については佐藤 雅彦氏（利尻町立博物館）、ロガーボックスの製作については涌井 茜氏（自然環境研究センター）に、UAVの運用においては日本放送協会に、それぞれご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を申し上げる。

6. 引用文献

- Doi H, Akamatsu Y, Watanabe Y, Goto M, Inui R, Katano I, Nagano M, Takahara T & Minamoto T (2017) Water sampling for environmental DNA surveys by using an unmanned aerial vehicle. *Limnology and Oceanography: Methods* 15: 939–944.
- Fridriksson S (1975) *Surtsey: Evolution of Life on a Volcanic Island*. Butterworth, 288p.
- 上條 隆志・廣田 充・川上 和人 (2020) 2019年における西之島の植物・植生・土壌. *小笠原研究* 46: 69–77.
- 川上 和人・小山田 佑輔 (2020) 2019年における西之島の鳥類相. *小笠原研究* 46: 79–94.
- 川上 和人・野口 克也・森 英章 (2023) 2021年における西之島の陸上生物相. *小笠原研究* 49: 71–86.
- Levin II & Parker PG (2013) Comparative host–parasite population genetic structures: obligate fly ectoparasites on Galapagos seabirds. *Parasitology* 140: 1061–1069.
- 森 英章・岸本 年郎・寺田 剛・永野 裕・荻部 治紀・川上 和人 (2020) 西之島の陸上節足動物. *小笠原研究* 46: 95–108.
- 中野 智之・港 隆一 (2020) 西之島の潮間帯海洋生物相. *小笠原研究* 46: 109–121.
- 佐々木 哲朗・山田 鉄也・向 哲嗣・堀越 宙・飴田 洋祐・関口 匠 (2018) 南硫黄島の陸生大型甲殻類, 特にその垂直分布について. *小笠原研究* 44: 305–314.
- Thornton IW (1997) *Krakatau: The Destruction and Reassembly of an Island Ecosystem*. Harvard University Press, 346p.

SUMMARY

UAV-based exploratory survey of invertebrates on Nishinoshima Island

Hideaki MORI^{1*}, Katsuya NOGUCHI², Tomoyuki NAKANO³, Yuki MURAKAMI¹,
Toshio KISHIMOTO⁴ & Kazuto KAWAKAMI⁵

1. Japan Wildlife Research Center, 3-3-7 Kotobashi, Sumida, Tokyo 130-8606, Japan.
2. HEXaMedia, 1-2-117 Iizuka, Kawaguchi, Saitama 332-0023, Japan.
3. Seto Marine Biological Laboratory, Field Science and Education Center, Kyoto University, 459 Shirahama, Nishimuro, Wakayama 649-2211, Japan.
4. Museum of Natural and Environmental History, Shizuoka, 5762 Oya, Suruga, Shizuoka, Shizuoka 422-8017, Japan.
5. Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan.

* hmori@jwrc.or.jp (author for correspondence)

Nishinoshima Island has been volcanically active since 2013, with eruptions recorded every year since 2017. Especially since the severe eruption in December 2019, almost all areas of the island cannot be surveyed ashore due to the warnings of volcanic activity. However, ecological succession on Nishinoshima Island may continue to progress even during the period. We utilised UAVs to carry out remote ecosystem monitoring. As it is difficult to collect information on small invertebrates by photographing surveys, we tried new methods for collecting samples by transporting a sticky trap, a vacuum cleaner and a water sampler using a UAV. *Geograpsus grayi* and *Olfersia* sp. were captured in the sticky traps. Environmental DNA analysis of the collected water samples detected molluscs and echinoderms. It is important to record temporal changes of a comprehensive biological dataset in order to clarify the earliest stages of ecosystem succession on oceanic islands. Various biological survey techniques using UAVs can be important tools for safely conducting continuous implementation of ecosystem monitoring on Nishinoshima Island, where volcanic activity is continuing.

Key words

Environmental DNA, Primary succession, Remote island, Sticky trap, Vacuum sampling