

無人航空機調査で明らかにする西表島マングローブ林の倒壊被害

渡辺 信¹⁾, 内山庄一郎²⁾, 宮城豊彦³⁾

Drone research revealed mangrove forest collapse damage on Iriomote island

Shin WATANABE¹⁾, Shoichiro UCHIYAMA²⁾, Toyohiko MIYAGI³⁾

Abstract: In Iriomote Island, located in the most southern and western part of Japan, we researched a mangrove forest that two super typhoons hit in 2007 using a drone and ground truth. As the result of the traverse survey, it was found that the ground level of the devastated area was lower by 30 to 50 cm than the ground level covered by mangrove forest. Our aerial photography also revealed that the devastated area had grown year and year. It was thought that the mangrove forest collapsed largely by typhoons induced soil erosion because the forest floor lost the forest crown to protect from rainfall. At the same time, the complex root system to keep mangrove peat stably from daily inundation was lost. Furthermore, it was also suggested that the dynamics of large-scale soil degradation and inundation had caused continuous soil erosion; thus, continued forest degradation has also been induced like a domino effect. It was thought that the changed ground level would not provide a suitable ecological niche for the present mangrove species (*Bruguiera gymnorrhiza* and *Rhizophora stylosa*) within the next several decades.

Keywords: mangrove, super typhoon, UAV (drone)

1. はじめに

大型電算機の処理能力がペタフロップスを視野に入れた頃からビッグデータという用語が主に天文学, 経済学, 物理学分野で使われるようになり, 今日では日常生活でも耳にするようになった。フィールドサイエンスは文明と対局にある自然界の情報収集活動が主であることからビッグデータとは縁が薄い状況が続いた。しかし近年のハード, ソフト双方の急激な進歩に伴いビッグデータを収集するための機材の小型化が著しく, フィールドサイエンスにおいてもその恩恵は身近な存在になりつつある。多様なフィールドサイエンスの中でもマングローブサイエンスは, 高湿多雨の熱帯・亜熱帯, マングローブ泥炭, 海水または汽水といった悪条件に阻まれ, データの収集にはより多大な時間, 労力, コストを要することから, 効率的なデータ収集を可能にする手法が常に望まれてきた。

一方, 2012年に中国のDJI社(Da-Jiang Innovations

Science and Technology Co. Ltd)が一般向けの安価な小型無人航空機(ドローン)を発売すると一大ブームとなり, 瞬く間に市場を席卷した。高精度なGPSと制御装置, リチウムイオンポリマー二次電池を搭載したクアッドコプター型のドローンは, 高度なスキルを要求される従来の模型飛行機よりも劇的に操作性が簡便化されていた。その後継機種に高性能のジンバルと高解像度小型カメラが搭載されると, 多大な手間と高額な費用を要してきた空撮業界にも多大な影響を及ぼすようになった。更に自動運転やバーチャルリアリティ研究の副産物として視覚イメージから三次元情報を取り出す技術が開発されると, ドローンで空撮した視覚映像情報から大量の数値データを引き出すことが可能となり, 「撮る」だけで「計る」ことも可能となりつつある。

こうした時代の流れを背景に我々は2013年からマングローブ研究にドローンを導入した(Uchiyama and Miyagi 2016)。導入のきっかけは2006年と2007年に最大瞬間風速60mを超えるスーパー台風が連続して西表島を直撃

¹⁾ 琉球大学熱帯生物圏研究センター西表研究施設 Corresponding author E-mail: iriomotejima@mac.com Iriomote Station, Tropical Biosphere Research Center, University of the Ryukyus, Taketomi, Yaeyama, Okinawa 907-1541, Japan

²⁾ 公益研究法人 防災科学技術研究所 National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan

³⁾ 東北学院大学教育学部地域構想学科 Department of Regional Design, Tohoku-Gakuin University, Izumi-ku, Sendai 981-3193, Japan



図1 西表島仲間川で確認されたマングローブの倒壊被害 (2015年6月空撮)

Fig. 1 Mangrove collapse damage confirmed in Nakama River, Iriomote Island (Aerial view in June 2015).

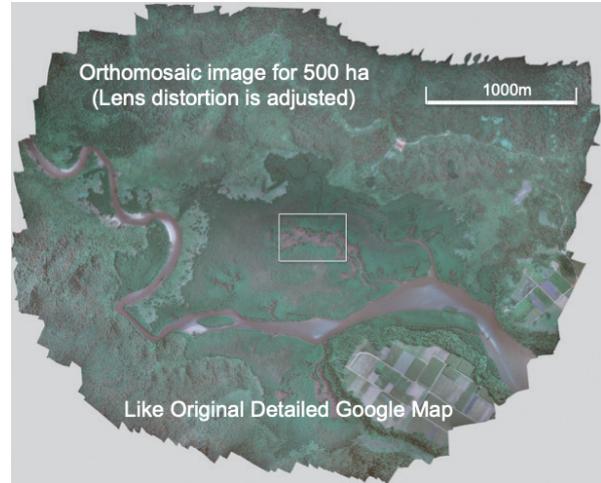


図4 空撮写真から合成されたオルソ画像

Fig. 4 Ortho image synthesized from aerial photographs.

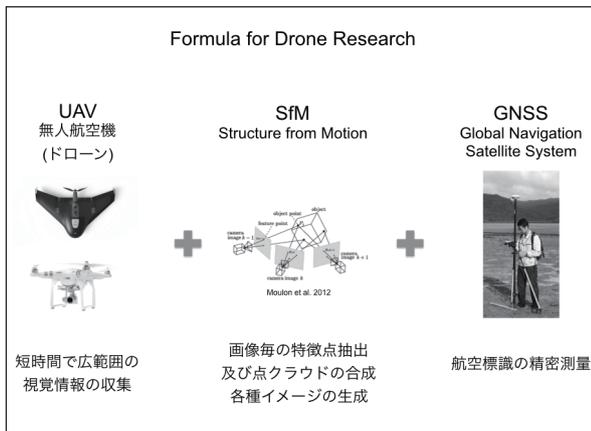


図2 無人航空機によるデータ収集と解析の手順

Fig. 2 Procedure for data collection and analysis by an unmanned aerial vehicle.

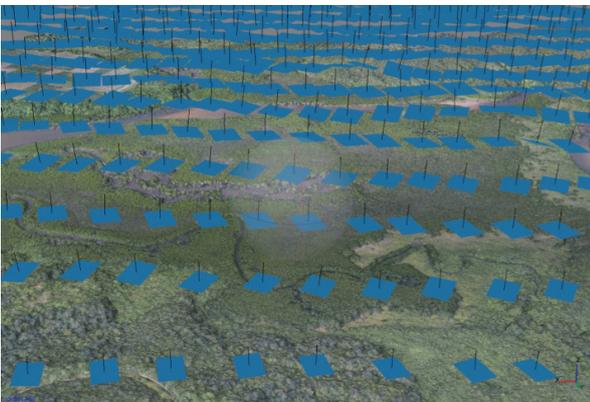


図3 プログラム飛行の軌跡 (画像データから飛行中の撮影位置とカメラの撮影角度が逆算される)

Fig. 3 Program flight trajectory: The shooting position and the camera's shooting angle during flight calculated back from the image data.

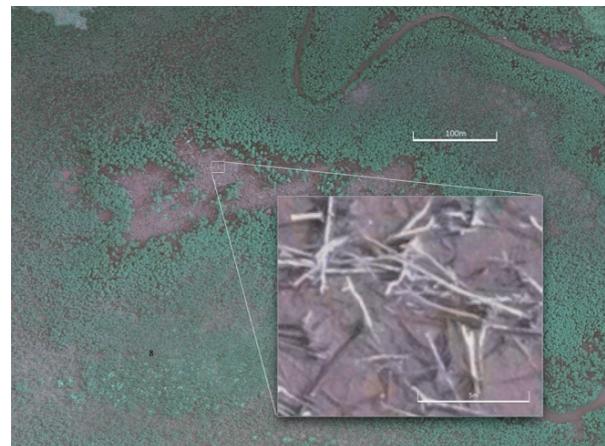


図5 生成されたオルソ画像 (1ピクセル4 cm 相当の高解像度画像)

Fig. 5 Generated orthoimage: High-resolution image equivalent to 1 pixel 4 cm.



図6 倒壊地の実地踏査の様子

Fig. 6 Field reconnaissance of the collapsed area.

したことによる。その後仲間川の支流の一つ、中央水路上流部のマングローブ林で大面積の倒壊が確認され(図1)(齊藤ほか2009), その森林倒壊と台風の関係を明らかにするためには鳥瞰俯瞰の視点が最適と考えられたからである。本稿では、ドローンと画像解析技術がマングローブを含むフィールドサイエンスに及ぼすインパクトを実例研究の中で紹介する。

2. 調査地と研究方法

2.1. 調査地

沖縄県八重山郡西表島には日本のマングローブの7割に相当する503 haのマングローブ林が存在する(Spalding et al. 2010)。その中で最も大面積のマングローブ林132 haが分布する仲間川を調査地とし、特に倒壊面積が大きな中央水路上流部の林分調査を行った。このマングローブ林は主にオヒルギ(*Bruguiera gymnorrhiza*)とヤエヤマヒルギ(*Rhizophora stylosa*)の2樹種で形成され、2013年の時点で複数箇所の倒壊が林野庁の調査で確認されている。

2.2. 地形および植生の画像データ収集

調査対象に設定したマングローブ林全域の地形および植生の概要を把握するため、ドローンによる空撮を2015年6月と12月、2016年8月と12月に実施した。ドローンを用いた空撮とそれ以降の作業の手順を図2に示す。西表島の9割以上は国有林で、全人口は2400人弱であることから、法令で定められた手続きを行い関係諸機関との調整を図れば、島のほぼ全域でドローンの空撮調査が可能である。

ドローンは米国 Trimble 社製固定翼機で40分以上連続飛行可能なUX5を用いた(図2左上の写真)。UX5を調査地上空の高度150mと250m、時速80~100kmでプログラム飛行させ、2秒間隔でスチルカメラによる自動撮影を行った(図3)。カメラはSONY社製ミラーレス一眼NEX-5Tを使用した。一回のフライトで3000~4000枚程度のRAW画像データを取得した。

2.3. 画像処理

三次元形状を仮想空間に復元するStructure from Motion (SfM) アルゴリズムを実装した露国 Agisoft 社製アプリケーション、PhotoScanPro (2019年Metashapeに改名)を用い、収集したRAW画像データ1枚毎に30000点のポイントクラウド(点群データ)抽出とその抽出点を元にしたアッセンブルを行った。2.5次元Digital Surface Modelと空撮時の歪みを補正した高解像度オルソ画像(撮影時の画角や焦点距離により生じる歪みを補正した画像)を生成し、調査地全体の微地形と植生分布の概要を把握した(図4, 5)。

2.4. 地上基準点の設定

作製した2.5次元モデルに地理空間座標を与えるため、空撮地に複数の地上基準点(GCP)を設定し、全地球航法衛星システム計測(GNSS)を実施した。測定機材には米国 Trimble 社製 Geo7xを用いた。

2.5. 測量とGIS解析

マングローブ林倒壊地と非倒壊地間の地盤高差を明らかにするために、2017年1月17日に縦断測量を実施し、レベルを測定した。測量箇所の位置座標 waypoint は米国 Garmin 社製ハンディ GPSMAP62SCJを用いた(仕様による最適条件時の位置精度誤差は3m)。解析には米 ESRI 社製 ArcGIS Spatial Analyst および 3D Analyst を用いた。

2.6. 実地踏査

倒壊地におけるマングローブ林再生の可能性を見極めるために、2016年2月24日と12月18日、2018年3月16日、4月17日および7月18日にマングローブ林倒壊地と非倒壊地のマングローブ実生の分布状況を調査した。

3. 結果と考察

3.1. 調査地の状況

2016年から2018年間の5回の実地踏査により、マングローブ林の倒壊はオヒルギの純林だけで発生していることがわかった。倒壊現場の地盤は通常のオヒルギ林よりも非常に緩い泥土で、深い泥の上に倒木が折り重なっていた(図6)。毎回の実地踏査で確認出来た新規実生は10本以下で、非常に緩い泥土に定着して不安定であった。無人航空機の空撮データを元に作成した標高地形図から、マングローブ倒壊地では最大で1.0m近く地盤高が低下した可能性が示唆された(図7)。

実地踏査の際に4本のラインのレベルを測定した結

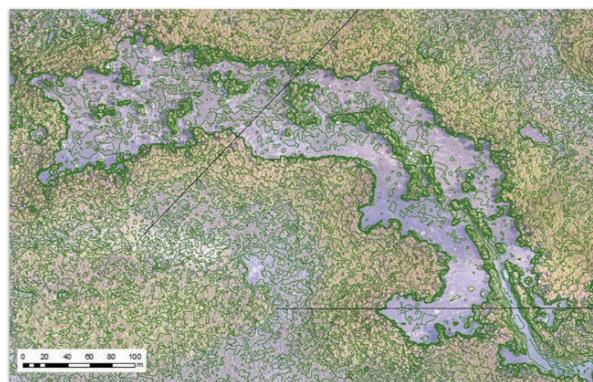


図7 空撮データを元に作成した等高線間隔1mの標高地形図
Fig. 7 Elevation topographic map with contour line spacing of 1 m created based on aerial photography data.

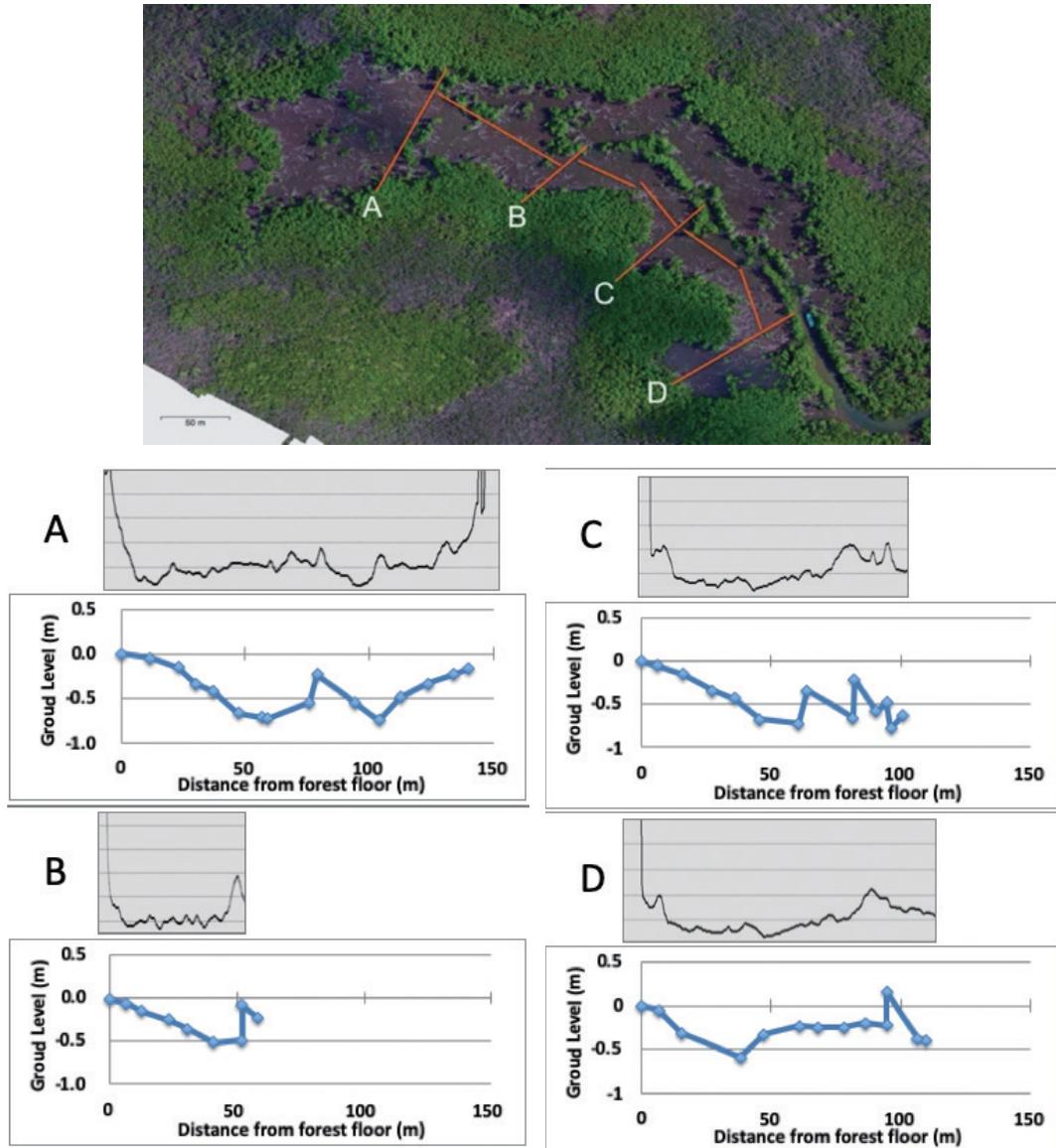


図8 4つのラインA、B、C、Dのレベル測量結果（青の折れ線グラフ）とSfMから作製した各レベルライン付近の断面図（各図中の黒の折れ線グラフ）SfM断面図の縦軸の補助線は50cm間隔、横軸は各レベルラインと同一スケール、折れ線グラフ両端の1.5m以上の立ち上がりはマングローブ林の存在を示す。

Fig. 8 Level survey results of 4 lines A, B, C and D (blue line graph) and cross-sectional geographic view near each level line created from SfM (black line graph in each figure). Interval of auxiliary line on the vertical axis of SfM cross section is 50 cm. The horizontal axis has the same length as each level line. The rise of 1.5 m or more at both ends of the line graph indicates the existence of a mangrove forest.

果、倒壊地の地盤高は周辺に現存するマングローブ林の地盤高よりも概ね50 cm程度低く、最大で78 cm低かった(図8)。空撮写真からSfM合成して得られるDigital Surface Modelはpoint cloudsと呼ばれる多数の点で植生を含む地表面を2.5次元で表現したイメージであるが、この2.5次元モデルから任意の場所の横断面図を得ることが出来る。ハンディGPSで取得した4本のラインA、B、C、Dのwaypoint座標は誤差数mと大きいため、レベル測量結果とDigital Surface Modelの横断面比較位置

を完全に合致させることはできないが、ドローン空撮で得られた地形横断面のイメージは概ねレベル測量のイメージを反映していることがわかる(図8)。このことを前提にオルソ画像から計算された倒壊面積43,739 m²に平均的な地盤高低下を50cmと仮定して失われた土壌堆積を計算すると、少なくとも2万m²の土壌が流出した可能性が示唆された。更に広域の空撮結果からは、仲間川流域では既存倒壊地の面積拡大だけでなく、新たな倒壊地も複数確認された(図4)。2018年4月に実施した西表森林生態

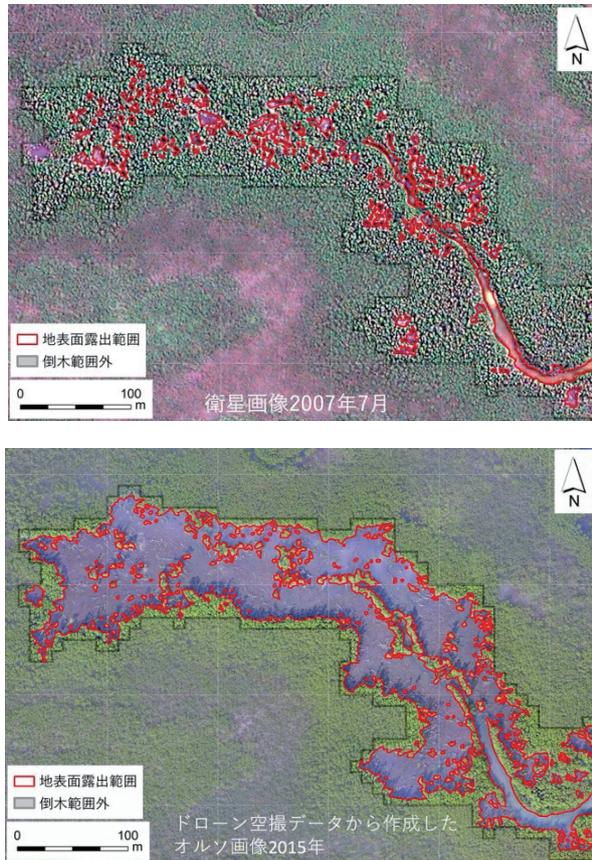


図9 2007年の調査地衛星画像と2015年のドローン空撮によるオルソ画像

Fig. 9 Survey site satellite images of 2007 and ortho image of 2015 by drone aerial photography.

系保全センターとの共同調査の結果では、新たな倒壊地の地盤高も周辺のマングローブ林床より低く、1m以上低い地点も確認された。本研究調査地同様に大量の土壌が流出した可能性が示唆されることから、土壌流出による河口域の汽水をニッチとする諸生物、更には沿岸域の珊瑚礁への悪影響が懸念された。

3.2. オヒルギ林大規模倒壊の原因

気象庁の統計資料によると、西表島北部の住吉地区測候所で1996年に最大瞬間風速61.6mが観測されてから最大瞬間風速60mを超える記録は10年間認められなかった。しかし2006年9月に最大瞬間風速69.9m、更に翌年の2007年9月に最大瞬間風速65.9mが観測されている。その後2021年まで最大瞬間風速60mを超える台風は観測されていないことから、2006年と2007年は過去20年に一度の大型台風が集中した時期だったと言える。内山・宮城(2020)の空中写真と衛星画像を用いた調査結果によると、本調査地の地表面露出範囲は2006年8月には3,485m²(人工衛星 QuickBird-2 画像使用)で

あったが、2007年7月には7,316 m²(人工衛星 IKONOS 画像使用)、2009年3月には22,195 m²(飛行媒体未確認デジタル空中写真)に急拡大している。その後も地表面露出範囲の拡大は止まらず、2015年には43,739 m²に達した。以上のことから、2006年および2007年の60m超の最大瞬間風速を伴う大型台風は、まとまった面積のマングローブ林倒壊を直接引き起こしただけでなく、その後のドミノ倒しのような長期連続倒壊現象の最初のトリガーとして作用したことが示唆された(図9)。

また、内山らの調査により太平洋戦争直後に当該地域のマングローブ林が半分以上択伐されていることも明らかとなった(内山・宮城 2020)。今村(2000)の文献調査によると、1939年に仲間川マングローブ林全域においてヒルギ50万本分の伐採を営林署が許可し、そのマングローブから染料のカッチを生産する工場が島内に存在したことがわかっている。このことに起因して仲間川のオヒルギ林の林齢が揃い、大部分の樹木は70年程度であることが推察されていたが、実際に共同研究者の宮城が文化庁の許可を得た上でオヒルギ倒木5本の年輪を調査したところ、それらの樹齢は69年もしくは70年であった(宮城ほか 2020)。これらの事実から、本研究調査地の大面積倒壊現象は過去の人為的活動により林齢が一様となった壮齢のオヒルギ林に、超大型台風の連続的な到来が引き起こした複合現象である可能性が考えられる。

一般にマングローブは海岸線や河口域の河岸に沿って樹種毎に帯状分布することが知られており(Chapman 1976, Watson 1928)、西表島に分布する7種類のマングローブも概ね帯状分布している。マングローブ林が成立した後は、地上部に露出した特殊な形状の根で水流が弱まることにより泥土の堆積が促進され、その地盤高が潮間帯の最高潮位面を超えた段階で陸上植物群落に遷移する(久馬ほか 1988)。西表島におけるマングローブ生態系の極相形態はオヒルギ林で、その純林のほとんどは内陸の亜熱帯林に隣接している(宮脇ほか 1983)。樹種毎の分布を決定づける主な環境要因は、立地毎の湛水頻度、塩分濃度、光量であると考えられるが(Alongi 2009)、オヒルギは潮間帯とはいえ湛水頻度が低く低塩分濃度の生育環境を好む樹種である(Popp et al. 1984)。本研究の対象であるマングローブ林の倒壊は、全てオヒルギの純林で発生していることを確認しており、今までの実地踏査の結果から以下の仮説が考えられた。

倒壊被害発生以前、極相状態のオヒルギ林は地盤高が高く、陸上植物群落への遷移直前の場所では樹勢も弱まり強風で倒壊する可能性も高まっていた。大型台風により極相状態のオヒルギ林がまとまった面積で倒壊すると、泥土一杯に張り巡らされていた根系も枯死し、林冠を失って露出した林床表面が降雨や潮汐作用で侵食された。その結果地盤高が低下し、オヒルギの生育に適した低湛水頻度と低塩類ストレスの好適環境が失われた。大面積の

林分倒壊により、胎生種子を供給する母樹が減少したことに加え、地盤高の低下によりたとえ胎生種子が散布されたとしても実生が定着するには困難な環境へと変化した。そしてオヒルギ林再生そのものが困難だけでなく、更なるオヒルギ林倒壊が継続する状態が継続している。

謝辞

本研究の实地踏査は、琉球大学熱帯生物圏研究センター西表研究施設の井村圭一技術職員と井村信弥技術職員の貢献で完遂することができた。本研究でご協力とご助力を頂いた国土交通省航空局、林野庁九州森林管理局沖縄森林管理署西表森林生態系保全センター、環境省野生生物管理センター、文化庁文化財部記念物課、沖縄県教育委員会、竹富町教育委員会の関係者に深く感謝申し上げます。また本研究遂行に当たり様々なご助言とご助力を頂いた琉球大学馬場繁幸名誉教授に心から感謝申し上げます。本研究はJSPS 科研費挑戦的萌芽研究（課題番号：JP16K14946）および基盤研究（B）（課題番号：17H02031）の助成を受けた。

なお、本論文第一著者と第二著者の本研究に対する貢献度は同等である。

文献

Alongi, M. D. (2009) : *The Energetics of Mangrove Forests*. 2.3.2 Salt, 2.4.1 Tree photosynthesis and respiration, 3.2 Tide. Springer (electric book) .
Chapman, V. J. (1976) : *Mangrove vegetation*. J. Cramer, Vaduz, Liechtenstein.
今村祐子 (2000) : 西表島仲間川流域におけるマングローブ生態系の利用. 東北学院大学大学院文学研究科ア

ジア文化史専攻平成 11 年修士論文.
久馬一剛・西村和雄・平井英明・舟川晋也 (1988) : マングローブ林下の土壌/堆積物の特性. 文部省「環境科学」特別研究・マングローブ生態系研究班『マングローブ生態系の動態と保全に関する基礎研究』123-147.
宮城豊彦・馬場繁幸・内山庄一郎・柳沢英明・渡辺 信 (2020) : 沖縄県西表島におけるマングローブ樹木の成長量と成長輪の対応. *Mangrove Science* 11: 17-22.
宮脇昭・奥田重俊・中村幸人・鈴木 伸一・村上雄秀・藤原一絵・大野 啓一 (2003) : 日本におけるマングローブの植生学的研究. *横浜国大環境研紀要* 10: 113-132.
Popp, M. (1984) : Chemical composition of Australian mangroves I. Inorganic ions and organic acids. *Z Pflangenphysiol* 113: 395- 409.
斉藤綾子・宮城豊彦・馬場繁幸 (2009) : 西表島船浦湾のオヒルギ林における台風破壊と修復過程に関する基礎的研究. *Mangrove Science* 6: 41-52.
Spalding, M., Kainuma, M., Collins, L. (2010) : *World atlas of mangroves*. Earthscan, London.
Uchiyama, S. and Miyagi, T. (2016) : Acquisition and utilization of high definition digital surface models through aerial photography using a small unmanned aerial system: an example of typhoon damage in Iriomote Island mangrove forests. *Transactions, Japanese Geomorphological Union* 37 (1) : 159-173.
内山庄一郎・宮城豊彦 (2020) : 70 年間の画像アーカイブによる西表島仲間川マングローブ林立地域の森林動態復元. *Mangrove Science* 11: 3-15.
Watson, J. G. (1928) : *Mangrove forests of the Malay Peninsula*. Malayan Forest Records No. 6, Fraser & Neave, Singapore.