

海食崖に立地するグスクの ドローン写真測量と3次元モデル作成の予備実験 — 沖縄県糸満市具志川城 —*

堀江 潔**, 岡本 渉***, 大浦 龍二**, 眞部 広紀**

**Preliminary Experiment for Drone Photogrammetry and 3D Modeling
of *Gusuku* ruins built on a Sea Cliff
— Gushikawa Castle, Itoman City, Okinawa, Japan —**

Kiyoshi HORIE**, Wataru OKAMOTO***, Ryuji OHURA**, Hiroki MANABE**

1. はじめに

日本列島各地には、各地域の歴史を刻む山城、城柵、チャシ、グスクなど防禦機能を持つ大規模遺跡が通時代的に多数存する。本研究グループは、それらを対象にドローン空中撮影を実施し、取得した写真測量画像を SfM/MVS ソフトウェア処理を行うことで3次元モデルを構築し、構造比較と防禦機能のシミュレーションを行う文理融合型の研究に取り組んでいる。将来的には、広く研究者や一般市民が利用できる3次元モデルのアーカイブ化を目指している¹⁾。

2019年12月、上記の研究目的に基づき、沖縄県糸満市喜屋武に所在する国指定史跡のグスク、具志川城のドローン空中撮影を実施した(図1。ドローン操縦・空中撮影:岡本が担当)。本報告は、『佐世保工業高等



図1 具志川城(東側から。ドローン空中撮影)



図2 具志川城(南側から。ドローン空中撮影)

専門学校研究報告』第56号(本号)掲載の他の事例報告²⁾と同じく、SfM/MVSソフトウェアを用いた3次元モデルの実験的作成につき、簡易報告を行うものである。

古代山城³⁾や北海道のチャシ⁴⁾と同様に、グスクの持つ機能についても、古来より、戦時の防禦施設に限らない見方がある⁵⁾。具志川城は、琉球石灰岩を打ち割って積み上げる「雑割り石積み」と呼ばれる技法を用いて、天然の要害と言える海食崖上に積み上げて防禦を固めており(図2)、また城門や土塁もつくられている⁶⁾。本研究グループが研究対象としている、戦時に備えた防禦機能を持つ施設と考えてよい。

次節で詳述するが、具志川城は沖縄本島南端部の海食崖上に立地しており、グスク内の全域の調査や見学は、転落事故や怪我、遺跡・遺物の破壊を招く危険性が高い。このような急崖上に立地する遺跡こそ、ドローンを利用する本研究グループの研究方法が本領を發揮する。

* 原稿受付 令和2年1月20日

** 佐世保工業高等専門学校 一般科目

*** 名古屋大学 全学技術センター

2. 具志川城の概略

具志川城が所在する沖縄本島南部は、約 170 万年前頃より形成が始まった、沖縄を代表すべき岩石・琉球石灰岩が広がっている⁷⁾。沖縄本島中南部のグスクは、琉球石灰岩の台地や断層崖、海食崖等、琉球石灰岩がつくる地形をうまく活用して造営されている。具志川城も標高約 17m の海食崖上に築かれており、琉球石灰岩を積み上げた城門(図 3)付近以外は三方を海に囲まれており、また海食崖の上に更に石材を積み上げて石垣を造っている(図 4・5)⁸⁾。

沖縄の本土復帰とともに1972年に国史跡に指定され、2000年から国・県の補助を受けて保存修理事業が始まり、糸満市教育委員会による発掘調査が開始され



図3 琉球石灰岩を積み上げた城門



図4 海食崖上に積み上げた石垣



図5 海食崖上に積み上げた石垣(拡大)



図6 ヒーフチミー(中央の穴)
(ドローン空中撮影)



図7 崩落した南端(右下の岩)
(ドローン空中撮影)

た。かつては築城後まもなく廃城もしくは他所に移動したと考えられていたが⁹⁾、発掘調査で青磁・白磁や天目茶碗等が出土しており、12世紀後半から15世紀中頃までグスクとして機能していたことが分かってきている¹⁰⁾。また特徴的な構造物として、城内には「ヒーフチミー(火吹き穴)」と呼ばれる海に通じている穴があり、荷物の上げ下ろしや有事の際の避難に使われていたと伝えられていることでも知られる(図6)。

このように具志川城は、海食崖の急崖上という特殊な立地にあり、構造から見ても城内から直接海に抜け出ることが可能な施設を持つ等、今後も保存整備を進めつつ研究を深めていくべき貴重な文化遺産である。しかし、一方でグスクの南端部は海食崖の崩壊によって原形をとどめておらず(図7)、また城内の地盤に自然空洞が2ヶ所あることが知られ、今後の地震等の災害による更なる崩壊の可能性も指摘されている¹¹⁾。

現状の遺跡形状を記録として残しておくため、今後の保存整備事業の方向性検討のための資料としても、現時点での3次元モデルの作成は意味があることと言えよう。

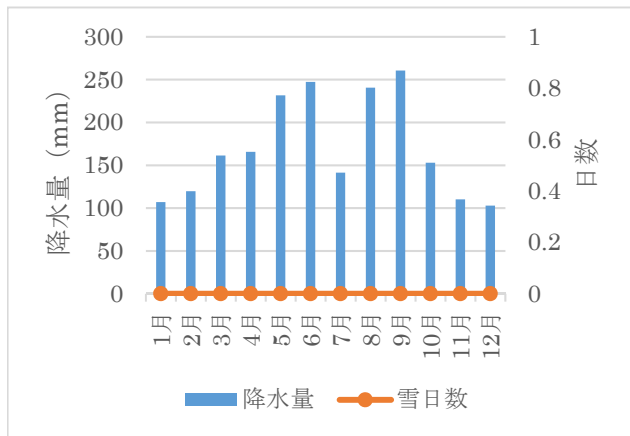


図8 那覇の降水量と雪日数の平年値
(気象庁ホームページの一覧をもとに加工して作成。)

3. ドローン空中撮影

眞部・岡本の協力のもと、ドローン空中撮影を計画した。計画立案には、雨が降るとドローン飛行ができないこと、草木の勢いが強い時期を避けること、この2点に注意が必要である。そこで那覇の気象データの平年値を調べたところ(気象庁ホームページ, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>), 降水量が最も少ないのが12月であることが分かったため(図8), 12月に撮影旅行を予定することとした。

しかしながら、実際には2泊3日で組んだ日程のうち最初の2日間はほぼ1日中雨が降り、ドローン飛行に適さない天候であった。雨がやむのを駐車場で待ち、2日目の昼過ぎにようやく雨が上がった瞬間をとらえ、急いでドローン空中撮影を実行した。幾度か小雨による中断を経ながらも、何とか撮影できたのは幸いであった。また、強い北風が南の海に向かって吹き付けていたため、ドローンが南の広大な海上に流されないか注意を要した。

雨がちな天候のためか、観光客はほとんどいなかったため、HP(ホームポジション。ドローンの離発着点)を城門手前の平坦地に定め、空中撮影を始めた(図9・10)。DJI社のMavic2Proで周辺の地形等を偵察飛行した後、計測撮影・領域モード(撮影範囲を決め、一定の間隔を空けた直線的に飛行するルートを決め、真上から写真測量画像を撮影する。以下「領域モード」と表記する。図11)と、計測撮影・建物モード(撮影対象の周囲を円を描きながら飛行し、斜め上の角度から



図9 HPからドローン発進



図10 ドローン空中撮影風景
(ドローン空中撮影)

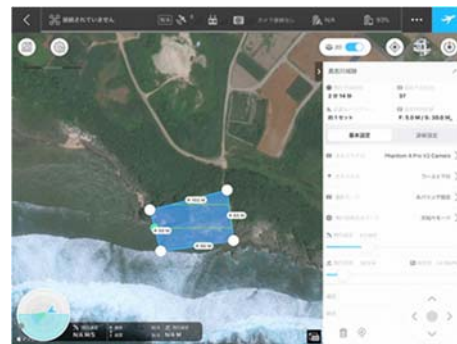


図11 フライトマップ(領域モード)

写真測量画像を撮影する。以下「建物モード」と表記する)の2方法で写真測量画像を撮影した。

4. 画像処理

SfM/MVS ソフトウェアはロシア Agisoft 社の Metashape Professional を使用した。以下の3次元モデルは、山船晃太郎氏(テキサス農工大学)に教わった内容を基本とし、岡本・大浦・眞部の協力を得ながら堀江が作成したものである。



図 12 3次元モデル1(領域モード)



図 13 3次元モデル2(建物モード)



図 14 3次元モデル3(領域モード+建物モード)



図 15 3次元モデル4(領域モード)



図 16 3次元モデル4(建物モード)



図 17 3次元モデル5(領域モード+建物モード)

5. 3次元モデルの評価

Metashape Professional を利用し、次の3通りの方法で3次元モデル化し、様々な角度から見比べて比較検討を行った(図12~17)。

方法① 領域モードで撮影した写真測量画像 293枚

方法② 建物モードで撮影した写真測量画像 246枚

方法③ ①②を合わせた写真測量画像 539枚

今回の3次元モデル化では、領域モードの欠点が如実にあらわれた(図12・15)。具志川城は海食崖の上に造営され、図11に明らかなおり、南からの波による侵食を受けやすい。真上からの撮影である領域モードでは、波浪による侵食を受けた海面に近い岩盤については、データが欠損してしまい、うまくモデル化できていない(図12の紅色の○印)。また、当然では

あるが、崖面に開けられたヒーフチミー(図の中央付近の穴)も、領域モードの図12では不明瞭である(図12の黄色の○印)。

これに比べて、図12とほぼ同じ角度で切り取った図13・14は、海面近くの海食崖も欠損しておらず、ヒーフチミーも明確に崖面の穴としてモデル化されており、図12と比較すると明らかに精度が高いモデ

ルができています。

図 15 も領域モードで撮影した写真測量画像を用いた 3 次元モデルであるが、やはり波浪の侵食を受けた部分等でデータ不足による欠損が見られる(図 15 の紅色の○印)。建物モードで撮影した写真測量画像を使っている図 16 と、それに領域モードで撮影したものを加えた図 17 とでは、どちらもほぼ同程度の高い精度の 3 次元モデルができています。この他、これらとは別の角度で抜き出して比較検討してみても、同じ結果が出た。

建物モードだけの場合(図 13・16)と、領域モードと建物モード両方を使った場合(図 14・17)とを比較すると、後者の方が使用している写真測量画像の数が倍以上多く、3 次元モデル化にかかる時間も、やはり倍以上かかった。

具志川城のように、海面に近い岩盤が波浪により侵食を受けたような地形に立地する場合は、建物モードによる写真測量画像の取得が 3 次元モデル化の際に効果を発揮することが分かった。

さらに精密な 3 次元モデルを得るためには、建物モードの撮影枚数を増やす、あるいは衝突の危険があるが、ドローンを海食崖近くを手動で飛行させ、手動で写真測量画像を撮影する等々、写真測量画像の撮影にあたっての工夫が必要になるであろう。

6. 今後の課題

本報告では沖縄県糸満市のグスク、具志川城の精密な 3 次元モデル作成のための予備実験を実施した。具志川城のように、100m 四方に満たない比較的小規模の、かつ海食崖という切り立った崖上にあつて真上から撮影した写真測量画像では崖面が精密にモデル化できないような遺跡の場合、計測撮影・建物モードが大きな力を発揮することが明らかとなった。

『佐世保工業高等専門学校研究報告』第 56 号(本号)に今回の具志川城を含めて計 7 事例を報告したが、各遺跡の 3 次元モデル作成に最適な自動飛行モードは異なっている。すなわち、ドローンを飛行させる前に、それぞれの撮影対象の遺跡について、どの撮影モードで撮影すればよいか、その選択が重要となる。これまで、写真測量画像の撮影に先立って、周辺の高度の高い建物や風の強さ等を調べるため、ドローンで偵察飛行を実施していた。具志川城程度の小規模な遺跡

であれば、これに加え、撮影前に適した撮影モードを検討するために、地形を細かに足で探査したいところであるが、急崖上という立地を考慮すれば、ドローンでの細かな地形観察がよい。

本研究グループの目指すところは、日本列島各地の山城等の防禦施設を備えた大規模遺跡について、3 次元モデルを用いた防禦機能の比較研究である。まずは精密な 3 次元モデルを作成することが先決だが、先に述べたとおり、現在の具志川城は、海に突き出した郭の先端部が海に崩落しており、グスクとして機能していた時期の地形とは異なる。可能であれば、既に報告した北海道斜里町のウトロチャシ(チャシコツ岬上遺跡)と同様に、崩落した岩(図 7 参照)も 3 次元モデル化して、崖面の地形に接合し、波浪により侵食されたその下部の地形を推定して復元することで、グスクとして機能していた時期の地形に近づけた後、防禦機能を検討できれば理想的である。

また、先に報告した北海道斜里町ウトロチャシ(チャシコツ岬上遺跡)やオロンコ岩チャシと同様に、具志川城も海に突き出した岬上に立地している。当然ながら、海からの船による攻撃にも備える必要がある。このように考えるなら、具志川城周辺の海底の地形も復元して防禦機能を検討する必要がある。浅海底をレーザービーム等を利用し精密に地形計測を行って大きな成果を上げている九州大学の菅浩伸氏の研究¹²⁾等に学ぶところが多いが、今後の課題としたい。

道のりは果てしなく遠いが、事例研究を少しずつ増やし、一歩ずつ目標の実現に近づいていきたい。将来的には、3 次元モデルをもとに大規模遺跡等の文化財のデジタルアーカイブ化にも取り組む予定である。これによって、全世界の諸分野の研究者や一般市民に対し研究成果の還元が可能となり、学問的貢献のみならず観光リソースとしての価値の高度化にもつなげていきたい。

注

- 1) 堀江潔, 眞部広紀, 岡本渉, ドローンによる西北九州地域の古墳・山城の空中撮影ー3D化によるアーカイブ構築を目指してー, 日本情報考古学会講演論文集, VOL.21 (通巻 41 号), pp.98-103, 2018, 堀江潔, 眞部広紀, 岡本渉, 三次元モデルによる古代山城比較研究試論ー佐賀県武雄市おつぼ山神籠

- 石と福岡県久留米市高良山神籠石一, 佐世保工業高等専門学校研究報告第 55 号, pp.48-51, 2019
- 2) 本号に, チャシコツ岬上遺跡・オロンコ岩チャシ(北海道斜里町), エンルムチャシ(北海道様似町), 志波城(岩手県盛岡市), 脇本城(秋田県男鹿市), 利神城(兵庫県佐用町)の事例を掲載している。
- 3) 向井一雄, よみがえる古代山城—国際戦争と防衛ライン—, 吉川弘文館, pp.10-72, 2017 など
- 4) 宇田川洋, チャシとアイヌ社会, 北海道チャシ学会編, アイヌのチャシとその世界, 北海道出版企画センター, pp.77-83, 1994, 初出 1982 など
- 5) 齋藤慎一, 南西諸島の城館, 齋藤慎一・向井一雄, 日本城郭史, 吉川弘文館, pp.280-286, 2016, 山本正昭, いわゆるグスクとは何か—グスク論争から半世紀を経て—, 第 59 回古代山城研究会例会「古代山城と祭祀・寺院—神籠石論争から四天王信仰まで—」プログラム・予稿集, pp.24-30, 2019 など
- 6) 国指定史跡 具志川城跡保存修理事業概報No1 よみがえれ古海城《フルウミグスク》～悠久の時の流れを感じさせる喜屋武岬先端の具志川城跡～, 糸満市教育委員会, pp.2-7, 2004
- 7) 新城竜一, 琉球弧の地質と岩石: 沖縄島を例として, 土木学会論文集 A2(応用力学) Vol.70, No.2(応用力学論文集 Vol.17), pp. I_7- I_8, 2014
- 8) 令和元年度沖縄県立博物館・美術館特別展 琉球王国のグスク及び関連遺産群 世界遺産登録 20 周年記念特別展「グスク・ぐすく・城—動乱の時代に遺産—」図録, 沖縄県立博物館・美術館, pp.16, 2019
- 9) 具志川グスク, 日本城郭大系 第 1 巻 北海道・沖縄, 新人物往来社, pp.323, 1980
- 10) 国指定史跡 具志川城跡保存修理事業概報No2 よみがえれ古海城《フルウミグスク》～悠久の時の流れを感じさせる喜屋武岬先端の具志川城跡～, 糸満市教育委員会, pp.5-10, 2007
- 11) 渡嘉敷直彦・藍壇オメル, 琉球石灰岩岩盤に対する岩盤分類の適用とその力学的特性の評価, 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, (社)土木学会, pp.387-388, 2011
- 12) 平成 28 年度～32 年度文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(S) 課題番号:16H06309「浅海底地形学を基にした沿岸域の先進的学際研究—三次元海底地形で開くパラダイム—」(研究代表者: 菅浩

伸)など。

付記

本研究は, 国立高等専門学校機構の「研究ネットワーク形成支援事業」に採択された「洞窟計測探査シミュレーションプログラム」(代表: 眞部広紀)の, 大規模遺跡調査部門のプロジェクトの一環として進めているものである。

謝辞

本研究で行った 3 次元モデル作成実験に際しては, サントリー文化財団「学問の未来を拓く」助成金「古代から中近世にわたる山城・城柵・グスク・チャシの変遷に関する研究—構造の 3 次元モデル比較と防禦機能に関するシミュレーション—」(代表: 堀江)の補助の一部により進めました。