

琉球大学学術リポジトリ

沖縄島本部山里の円錐カルスト地形に関する研究 ——コックピットカルストの土層厚と土層構造——

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 沖縄地理学会 公開日: 2022-09-16 キーワード (Ja): 石灰岩, 円錐カルスト, コックピットカルスト, 山里, 土層厚 キーワード (En): limestone, cone karst, cockpit karst, Yamazato, soil thickness 作成者: 廣瀬, 孝, 大河内, 萌 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/0002019446



【論 説】

沖縄島本部山里の円錐カルスト地形に関する研究
——コックピットカルストの土層厚と土層構造——

廣瀬 孝*・大河内 萌**

(*琉球大学国際地域創造学部・**明治コンサルタント株式会社)

A Study on Cone Karst Landforms at Yamazato, Motobu, Okinawa Island:
Soil Thickness and Structure on Cockpit Karst

HIROSE Takashi* and OOKAWACHI Moe**

(*Faculty of Global and Regional Studies, University of the Ryukyus.

**Meiji Consultant Co.,Ltd.)

摘要

本研究では、沖縄島本部山里に分布するコックピットカルストで地形測量や貫入試験を行った。その結果、本調査地のコックピットの底面は平坦で5 mを超える土層が存在した。土層厚は、コックピットの中央付近で厚く、周縁では薄かった。そのため、基盤形状は地表面形状と異なり中心にかけて低くなるような船底状で、また、谷線の影響がみられる形状も確認された。また、弱線の影響や水の集中による溶食の進行と土砂移動が示唆された。

キーワード：石灰岩，円錐カルスト，コックピットカルスト，山里，土層厚

Keywords: limestone, cone karst, cockpit karst, Yamazato, soil thickness

I. はじめに

石灰岩地域では、石灰岩の溶食によって独特なカルスト地形が形成されている。カルスト地形には、ドリーネやウバーレといった凹状の地形（凹地形）と、円錐カルストや石灰岩堤といった凸状の地形（凸地形）がある。凸状のカルスト地形は、湿潤な熱帯・亜熱帯で形成されていることが多く、日本では、沖縄で見られている。特に沖縄島本部

山里の石灰岩地域には、日本の中でも独特な円錐カルストが集中して分布している（たとえば、目崎 1984）。羽田（2021）は、これまで行われてきた円錐カルスト地形の研究について、円錐カルストの定義や、海外および琉球列島で行われた円錐カルスト研究の概要をまとめ、さらに、石垣島や宮古島の円錐カルストの地形形状についての調査結果を報告して、円錐カルスト地形研究の今後の課題をあげている。羽田（2021）によれば、円錐

カルストの地形形成に関しては、形成条件を含め、実態も十分に明らかにされているとはいえない。

琉球列島に分布する円錐カルストに関しては、これまで分布や形状の研究がなされてきた。目崎(1984)は、山里にある円錐カルストの分布や斜面形状について地図作業と若干の現地調査の結果を報告し、また、土壌中の地温や炭酸ガス分圧を計測して、凹状のカルスト地形が卓越する秋吉台や平尾台との比較を行っている。宮里ほか(2009)は、山里の円錐カルスト山頂に発達するピナクルの形状と山頂標高との関係性を報告している。また、廣瀬・玉城(2011)は、山里の円錐カルストを構成する石灰岩の熱風化に着目し、岩石表面の温度変化の野外観測と岩石試料を用いた熱風化実験を行っている。廣瀬ほか(2012)は、図上計測と現地写真測量により、第四紀琉球石灰岩地域に形成されている円錐カルストと山里の円錐カルストの比較研究を行い、山里の円錐カルストに比べて第四紀の円錐カルストの斜面勾配が小さいことを報告している。

以上のように沖縄の円錐カルストに対する研究では凸地形を対象としたものが多い。円錐カルストの地形形成を明らかにするには、溶食という地形変化を考慮すると、周辺に発達する凹地形からのアプローチも重要である。凸型カルストに囲まれた星形の凹地形はコックピットとよばれる(たとえば、荒川・三浦1990)。荒川・三浦(1990)は、山里の円錐カルストとコックピットカルストについて、弱線の影響や溶食の集中との関係性、円錐カルストの地形形成を考える上での凹地形であるコックピットの重要性を指摘している。羽田(2021)もコックピットの排水システムを同時に捉えることの重要性を課題にあげている。しかし、現地での測量などの調査は行われておらず、また、目崎(1984)が行った山里の凹地での地温や炭酸ガス濃度の計測も深度1 mまでの計測で、基盤までは達しておらず、山里の凹地の形状、土層厚(基盤までの深さ)や土層構造については不明瞭なままである。

以上をふまえて本研究では、沖縄の円錐カルストの地形形成を考えるために凹地形(コックピット)

カルスト)に着目し、凹地の形状や土層厚・土層構造の実態を把握することを目的とする。そのための一歩として、山里に発達する一つのコックピットを対象に行った現地調査の結果を報告する。

Ⅱ. 調査の概要

1. 調査地域の概要

研究対象地域は、円錐カルストとコックピットカルストが分布する沖縄島本部山里とした(図1)。この地域には、中生界三畳系の今帰仁層の石灰岩が分布している。今帰仁層の岩相について、沖縄県(1988)は、層状石灰岩・塊状石灰岩・緑色岩類を主とし、粘板岩などを挟んでいるとしている。尾方・大坪(2019)は、本部半島には本部層(塊状石灰岩)と今帰仁層(層状石灰岩)があり、層状石灰岩の今帰仁層は円錐カルストを形成しているが、塊状石灰岩の本部層には明瞭な円錐カルストがみられないと述べており、今帰仁層石灰岩の岩相は層状とされている。新城(2014)は、今帰仁層は塊状で緻密な石灰岩からなると述べている。このように、今帰仁層石灰岩の岩相が塊状なのか層状なのかは文献によって異なり、場所(地質層序)によっても異なると考えられるが、現地観察によると、調査地およびその周辺では層状石灰岩と認識できる多くのピナクルなどの露岩が分布している。

この地域には、20を超える円錐カルストとそれらに囲まれた凹地であるコックピットカルストが分布している(図1b)。この内、一つのコックピットを対象に地形および土層の調査を行った(図1bのX、図2)。このコックピットは、荒川・三浦(1990)でもコックピットとして示されており、畑地として利用されていたが、現在は大部分が放棄された状態で、また、所有者からの聞き取りによると畑地にするための土砂の搬入や大幅な盛土などは行っていないようである。周辺のほかのコックピットの底面形状や土地利用と比較して特異な差異はなく、当地域におけるコックピットカルストの地形形成を理解する上で適切な場所と判断された。このコックピットの底面標高は約147 mで、周辺を標高約195 m～223 mの円錐カルストに囲まれている。植生としては底面に放棄されたサト

沖縄島本部山里の円錐カルスト地形に関する研究
 ——コックピットカルストの土層厚と土層構造——

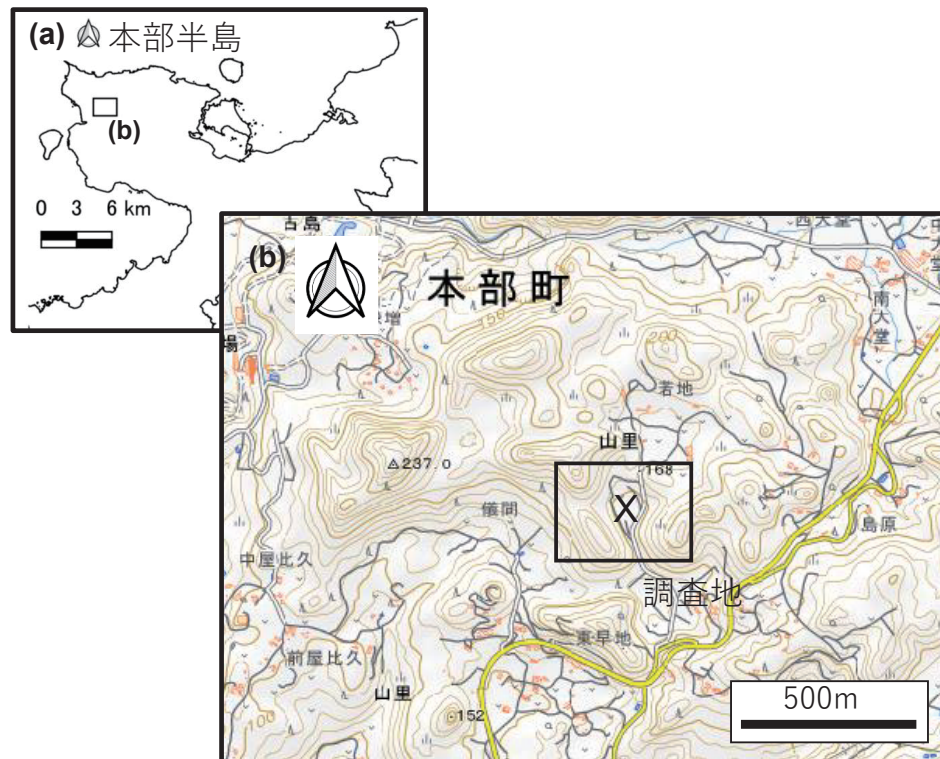


図1 研究対象地域
 (X が調査対象のコックピット, b の基図は地理院タイル)

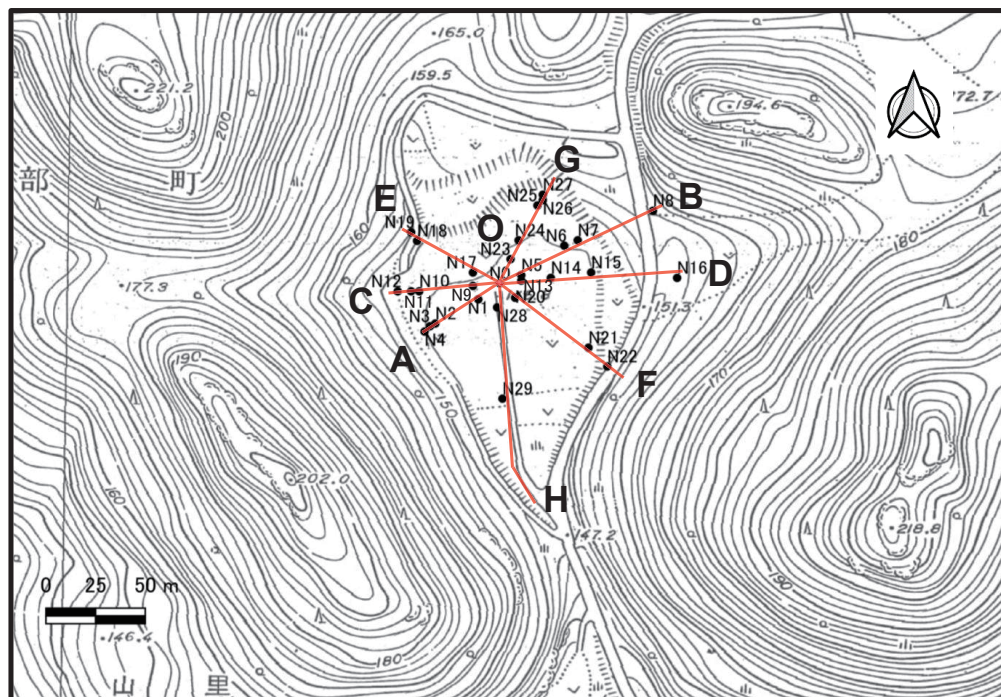


図2 調査対象のコックピット周辺の地形
 (基図は 1:2500 都市計画図, 赤線は地形測量の測線, ●N0 ~ N29 は貫入試験地点, 作図の一部には QGIS を使用)

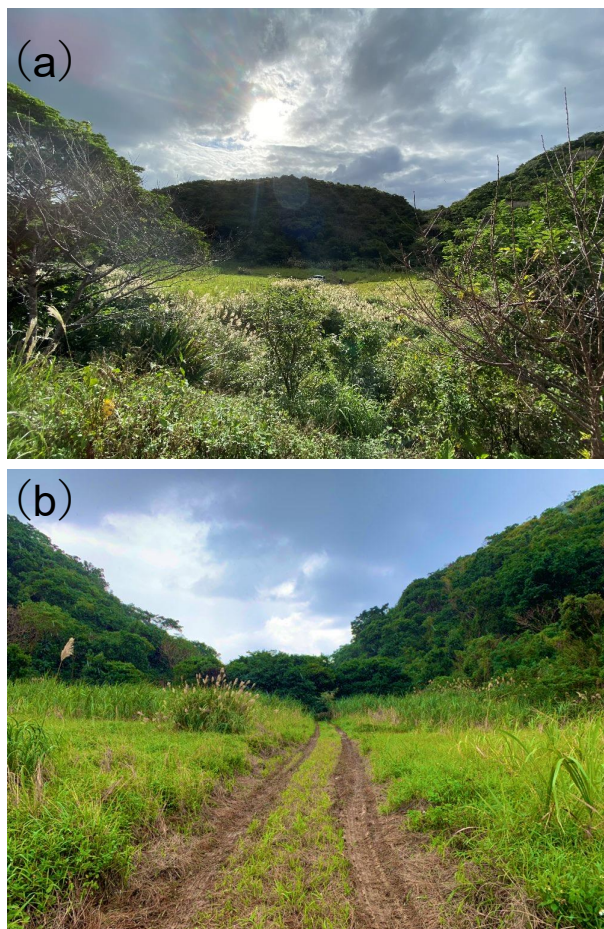


図3 調査地の様子
(a : B 付近から A 方向を望む, 大河内撮影,
b : 測線 O-H の様子, 赤嶺佳帆氏撮影)

ウキビヤススキが生育し、底面の周縁ではススキ・クワズイモ・リュウゼツランなども生育し、また周辺斜面には樹林も発達している。

2. 調査方法

選定したコックピットにおいて、地形測量と土層厚・土層構造の計測を行った(図2)。地形測量は、はじめにコックピットの中心付近に基準となる点 O を設定し、周辺の円錐カルスト(凸部)間を結ぶ測線(測線 A-O-B と E-O-F)と谷部を結ぶ測線(C-O-D と G-O-H)を設定した。この内、測線 G-O-H は、周辺の地形を考慮すると主たる谷線に相当する。コックピットおよび周辺の状況は図3のようであり、底面は平坦である。地形測量には主に 2 m の斜面測量器を使用し、レーザー距離計(Laser Technology 社 TruPulse 360)で補足を行った。

また、土層厚と土層構造を把握するため、斜面調査用簡易貫入試験機(筑波丸東株式会社製 TW-35)を用いて測線に沿って計 30 地点で貫入試験を行った(図2の N0 ~ N29)。コックピットの全体像を把握するため、基点 O から 10 m の距離の地点は必ず計測し、その他は測線の状況に合わせて傾斜変換点を中心として計測した。基点 O が N0 地点、A 方向に N1 ~ N4 の 4 地点、B 方向に N5 ~ N8 の 4 地点、C 方向に N9 ~ N12 の 4 地点、D 方向に N13 ~ N16 の 4 地点、E 方向に N17 ~ N19 の 3 地点、F 方向に N20 ~ N22 の 3 地点、G 方向に N23 ~ N27 の 5 地点、H 方向に N28 ~ N29 の 2 地点である。また、地図上への地点のプロットには、ポータブルタイプの GPS (Garmin 社製) と GIS ソフト(QGIS)を利用した。

貫入試験は 5 kg の重りを 50 cm 自由落下させ、ロッドの先端コーンが 10 cm 貫入するのにかかった回数(N_c 値)を記録した。簡易貫入試験による土層区分についてまとめた逢坂(1996)によると $30 \leq N_c$ を基盤としたものが多い。本研究でも基本的な考え方はこれを踏襲するが、石灰岩の化学的風化を考慮すると、石灰岩は基盤と土層・風化層の境界が明瞭であると考えられ、岩盤に当たったと判断できるところ、つまりほとんど貫入しなくなるところまで行うのが適当と考え、 N_c 値 30 を超えても少しずつではあるが明らかに貫入していくことがあった場合は継続した。

現地調査は 2020 年 11 月 28 日、11 月 29 日、12 月 1 日、12 月 12 日、12 月 13 日、12 月 20 日、12 月 30 日、2021 年 1 月 10 日の計 8 日間行った。

Ⅲ. 結果と考察

図4は、各測線の地形断面図および各地点の貫入試験結果(N_c 値の深度プロファイル)である。また、それぞれの貫入試験結果から基盤深度を判断し、基盤プロファイルを点線で示した。基盤の基準は N_c 値 30 だが、明らかに岩盤と判断できるまで試験を行ったため、その深度を基盤とみなした。その場合の N_c 値は計算すると 30 を大きく超えるため(全く貫入しなければ計算上は無無限大)、グラフの N_c 値の最大値は 50 にした。

地形断面をみると、4 測線ともにコックピットの

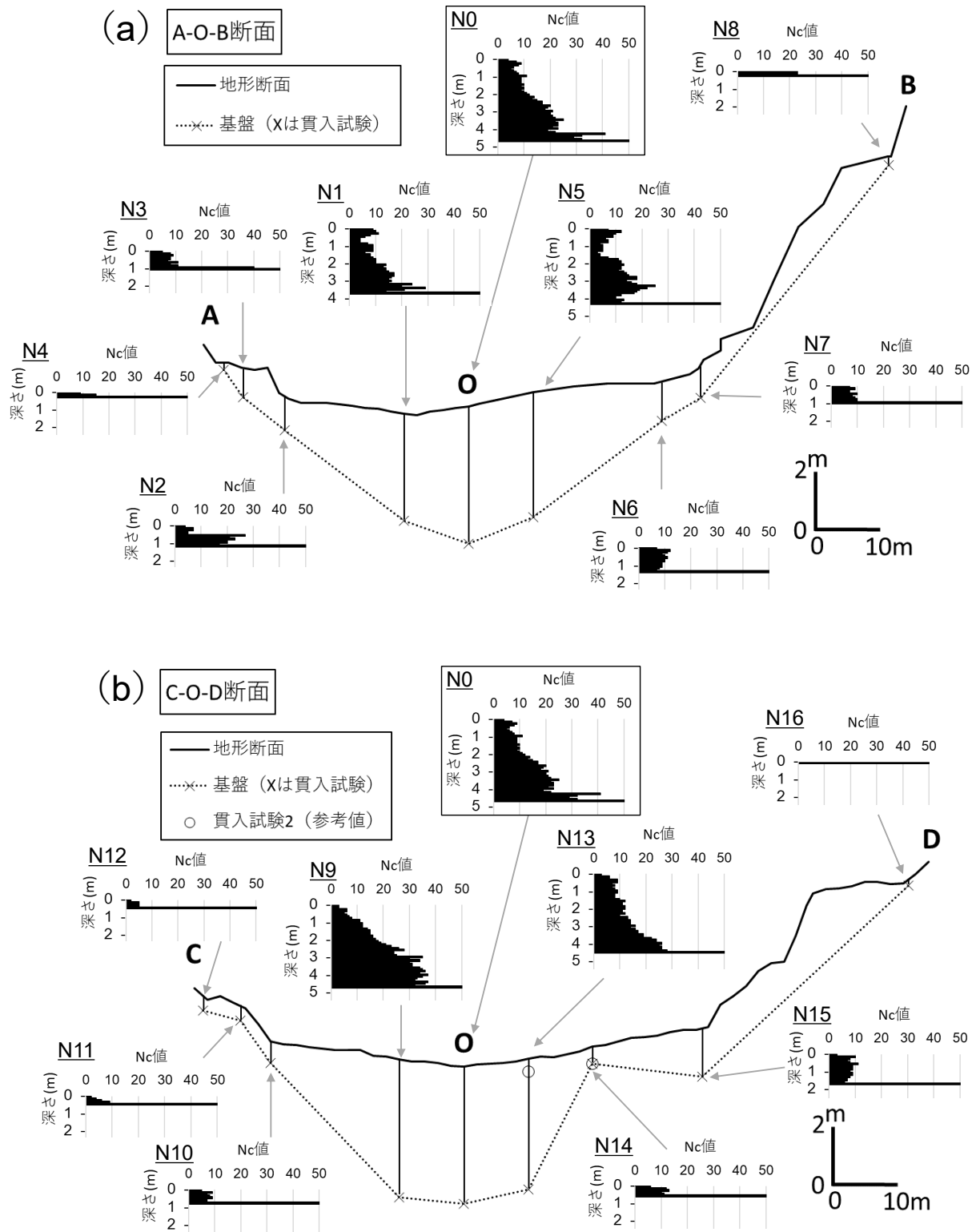


図4 地形断面と貫入試験結果

底部はほぼ平坦であり、特に、測線 A-O-B (図 4a) と C-O-D (図 4b) では、最大でも 1m 程度の高低差しかない。また、測線 E-O-F (図 4c) と G-O-H (図 4d) では、それぞれ、基点 O と凹地 (本研究では、

凹地と周辺の円錐カルスト斜面下部までの全体をコックピットと表現し、その中で特に底面域を表現する場合に凹地を用いる) の E 方向の縁, G 方向の縁との高低差が 2m 程度である。主たる谷の出

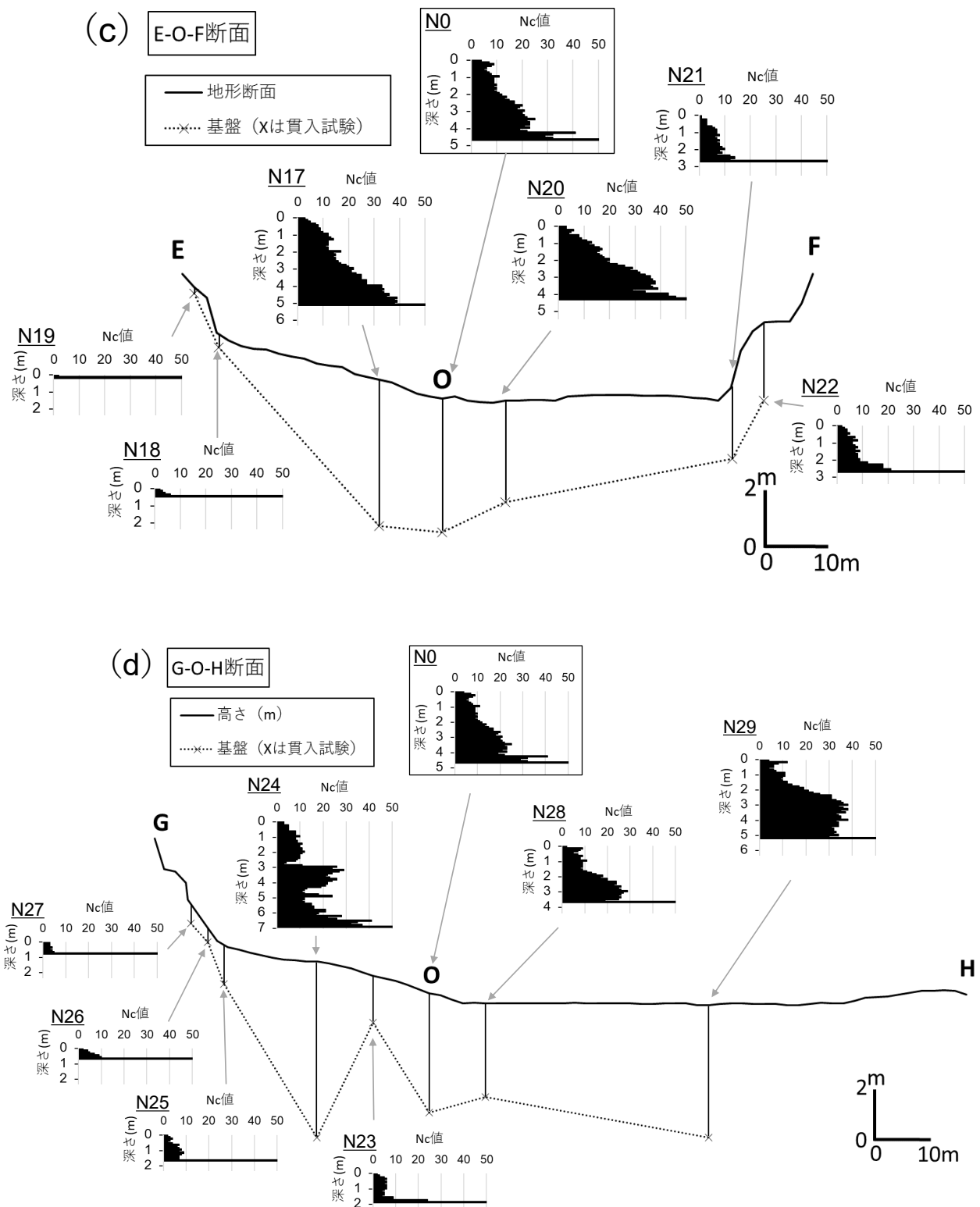


図4 (続き)

口であるH方向以外は、凹地の縁は急勾配で、周辺の円錐カルストなどに続く。

基点Oの貫入試験結果(N0)をみると、深さ2m

くらいまでは、Nc値10以下の軟弱な層であり、その後4mくらいまでは遷移的に値が増加し、4.65mで基盤に到達している。土層厚の最大はN24地点(図

4d) の 6.9 m で、最少は N16 地点 (図 4b) の 0.1 m で、B や F 地点では岩盤の露出がみられる。また、N23 地点 (図 4d) を除いて、コックピット中央付近では 3.5 m 以上と厚い土層があり、それと比較すると周縁部では薄く、1 m よりも薄いところが多い (N22 地点は、舗装道路建設に伴う盛土の影響がみられている)。

また、基盤までの深さが 2 m より浅いところの貫入試験結果からは、 N_c 値 10 以下の軟弱な層から急に硬い基盤になっていることがうかがえる。それに対して、3.5 m 以上の土層厚の地点では、基点 O の N0 地点でみられたような遷移層が基盤上に確認される。特に、N9 地点 (図 4b)、N17 地点と N20 地点 (図 4c) では、ほぼ表層から基盤まで遷移的なプロファイルを示しており、Hirose *et al.* (1994) で示されている、花崗岩地域の尾根部でみられるような風化層のプロファイル (尾根であるため斜面物質の移動が顕著ではなく、風化による土層構造の変化が示されている) と類似している。これらの 3 地点は、基盤の指標である N_c 値 30 を超えてから 1 m 以上貫入している。また、N17 地点で貫入試験終了後に抜きとった先端コーンをみると、かなり粘着性のある赤色の粘土が付着していた (図 5)。このような粘土が圧密されることによって、貫入試験で比較的高い N_c 値になった可能性もある。

貫入試験結果から推定される基盤の形状をみると、地表のように平坦ではなく、3 測線ではコックピット中央に向かって低くなる船底状をしており (図 4a ~ 図 4c)、谷線方向の測線 G-O-H では、出口 (H) に向かって低くなっていることも確認できる (図 4d)。測線 G-O-H の方向は、本調査地西方に位置する扁平な円錐カルストであるギマムイ (図 2 の頂点標高 202 m の円錐丘) の長軸方向とほぼ対応している。また、土層厚の空間分布をみるため、基盤深度の分布を 1m ごとの階級区分図を QGIS で作成した (図 6)。これをみると、凹地内で厚い土層があり、周辺では薄くなっている空間変化がより明瞭に読み取れる。これらのことから、凹地中央付近への水の集中と、弱線の存在による H 方向への水の流れによる溶食の進行が示唆される。

続いて、秋吉台の調査結果と比較する。Akiyama *et al.* (2015) は、秋吉台においてドリーネの土層厚・

構造を貫入試験と電気探査の両方を行って調査している。それによれば、ドリーネ斜面では、上部で土層が 0-1 m と薄く、下部に向かって厚くなり斜面最下部で 4 m の土層が存在し、また、ドリーネ底では最大 10 m の土層があると推定されている。貫入試験は 4 m 強まで行っており、その深さでは、 N_c 値 30 (基盤の値としている) を超えていない地点もあり、それより深いところは電気探査結果により推定されている。貫入試験結果で N_c 値 30 の基盤まで到達したプロファイルでは、 N_c 値 10 以下の軟弱な層から、基盤付近で急激に N_c 値が増大しており、本研究で比較的浅い土層のところで確認された結果と同様であった。また、秋吉台のドリーネではドリーネ斜面でもそれなりの土層が存在し、斜面下方で地表形状と基盤形状が対応している。これらは、本研究の凹地の縁から斜面にかけてみられた結果とは異なっている。秋吉台の調査ドリーネ底の幅は 20 m 程度、本研究の凹地底の幅は 60 m 程度と規模が異なり、また、周囲の地形も異なるので、より詳細な比較検討は今後の課題としたい。

次に、凹地内でみられた厚い土層の供給源やそのプロセスについて若干考察する。目崎 (1984) が示した本部の石灰岩および表土の化学成分比 (石灰岩鉱業協会の値より作成) をみると、石灰岩の



図 5 貫入試験機先端コーンに付着した赤色の粘土 (N9 地点、大河内撮影)

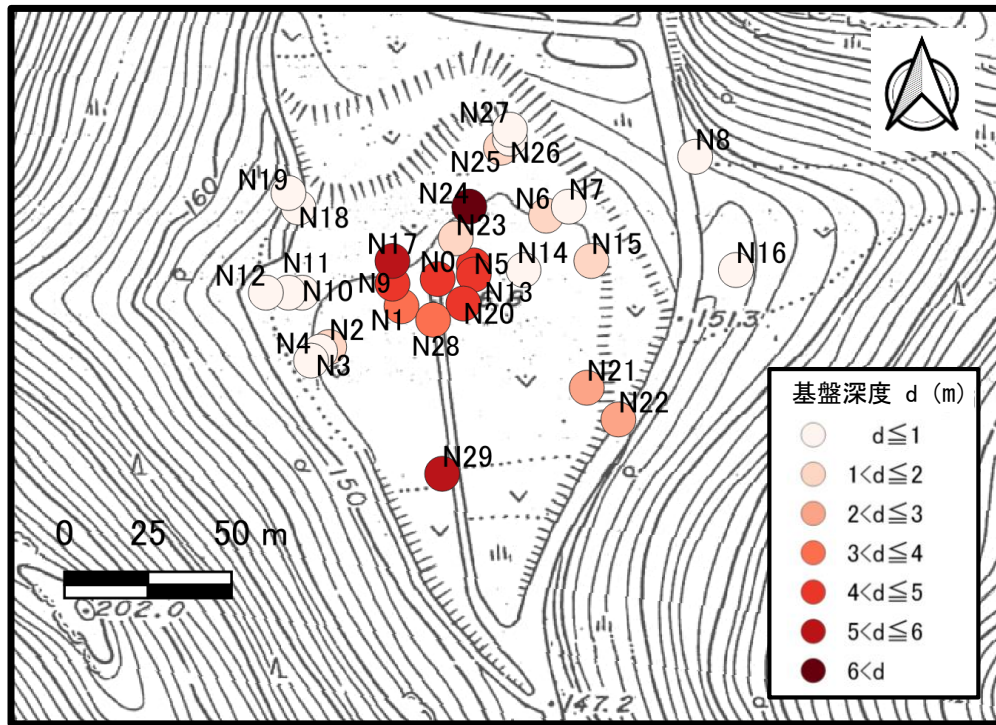


図6 基盤深度の階級区分分布
(基図は 1:2500 都市計画図, 作図には QGIS を使用)

溶解の溶け残りと思われる Fe_2O_3 や Al_2O_3 の比率の増加が表土でみられる。しかし、表土では石灰岩には含まれていない SiO_2 が 30-40% みられる。成瀬・井上 (1990) では、本部地域ではないものの、沖縄島の石灰岩地域の土壌（島尻マージ）には、37-60% の SiO_2 があることが報告されており、黄砂や火山灰などの風成塵の影響を示唆している。風成塵は斜面上部にも降下するはずであるが、それに加えて水が集中することで、斜面から土砂が運搬されて凹地に堆積して厚さをより増加させた可能性がある。前述したように調査地では円錐カルスト斜面の下部で岩盤が露出しており、宮里ほか (2009) の報告では、山頂付近のピナクル周辺にも土層がほとんどみられず（あっても数 cm 程度）、凸地形上にある土砂の凹地への運搬堆積作用が示唆される。また、凹地中央付近の貫入試験結果や先端コーンの付着物から、かなり圧密を受けた粘土であることが示唆される。試料採取を行って物性や成分の分析をすることで、より理解を深めることは今後の課題としたい。

最後に、凹地内の埋没ピナクルの存在など、基盤

形状がより凹凸のあるものであることの可能性について述べる。貫入試験はあくまでその地点の土層構造を示すもので、巨礫などが存在する場合でも基盤と判断される。本研究では、N13 地点と N14 地点では、1 回目の貫入試験で基盤までの深さがそれぞれ 0.5 m と 0.6 m であったため、その前に行った隣接の N0 地点や N5 地点の値と比較して差が大きいと考え、数 10 cm ずらして 2 回目の貫入試験を行った。その結果、N13 地点では基盤までの深さが 4.5 m と異なったが、N14 地点は 0.6 m と同じであった。図 4b では 2 回目の貫入試験の結果をその地点の値として採用し、1 回目の結果を参考値として示した。また、調査地周辺の斜面には図 7 のような切り立ったピナクルが点在しており、垂直に近い高角度な節理や層理の影響が示唆される。N13 地点のような、近接して基盤までの深さが大きく異なるような結果は、凹地内部の土層内にこのような形状のピナクルが埋没していたり、弱線の影響で高角度な岩盤の面が存在していたりする可能性がある。コックピットが、ドリーネが連結してできたものだとすると、個々のドリーネの斜面が残っている可能性もある。



図7 コックピット周辺の斜面にみられる
ピナクルの様子
(地点F付近)

また、基盤の指標である N_c 値 30 を超えて遷移的に深く貫入している地点では、このような高角度な岩盤の面に沿う形で貫入した可能性もある。基盤形状をより詳細に把握するためには、より密な間隔での貫入試験や電気探査・地中レーダーなどのほかの手法も考慮する必要がある。

IV. おわりに

本研究では、琉球列島の円錐カルストの地形形成を考えるために、これまで調査事例の少ないコックピットカルスト（凹地形）に着目して現地調査を行った。得られた結果をまとめると以下のようになる。

- ・本研究で調査した幅 60 m ほどのコックピットの底面は平坦である。
- ・コックピットには 5 m を超える土層が存在する。
- ・土層厚は、コックピットの中央付近で厚く、周囲の斜面下部では薄い。
- ・基盤形状は地表面形状と異なり中心にかけて低くなるような船底状である。また、谷線の影響がみられる形状も確認される。

これらのことから、弱線の影響や凹地中央方向への水の集中による溶食の進行や土砂移動が示唆された。また、埋没ピナクルなどの存在の可能性もあった。今後は、地中レーダーや電気探査などほかの手法を合わせたより密な調査、土壌試料の分析、水や炭酸ガスの調査などを行い、さらに調査対象を増やしていくことで円錐カルストの地形形成にアプローチしていく予定である。

本稿は、著者の一人大河内が提出した琉球大学法文学部人間科学科 地理歴史人類学専攻課程の卒業論文を骨子に加筆修正を施したものである。本研究を進めるにあたり、琉球大学地理学教室の先生方には貴重な助言をいただきました。また、本部町役場の比嘉 啓一郎氏には調査地に関する情報提供をしていただき、仲宗根 正次氏には快く調査の許可をいただきました。現地調査では、琉球大学学生の玉城魁聖氏、島袋仁人氏、赤嶺佳帆氏、藤 七美氏、福地友里氏にご協力いただきました。本研究をまとめるにあたりご協力頂いた多くの方々に厚く御礼申し上げます。本研究は、JSPS 科研費 (JP19K01160、研究代表者・羽田麻美) の助成を受けて実施した。

(受付 2021 年 5 月 10 日)

(受理 2021 年 7 月 16 日)

文 献

- 荒川達彦・三浦 肇 (1990) : 溶かされたサンゴ礁——カルスト地形——. サンゴ礁地域研究グループ編 : 『熱い自然——サンゴ礁の環境誌——』, 古今書院, 215-229.
- 逢坂興宏 (1996) : 斜面土層構造の測定. 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編 : 『水文地形学——山地の水循環と地形変化の相互作用——』, 古今書院, 15-23.
- 尾方隆幸・大坪 誠 (2019) : 琉球弧の地球科学的研究——断層と風化・侵食プロセスに関する研究の課題と展望——. 第四紀研究, 58, 377-395.
- 沖縄県 (1988) : 5 万分の 1 表層地質図「伊平屋島・伊是名島・伊江島・仲宗根」および簿冊. 『土地基本分類調査——伊平屋島・伊是名島・伊江島・仲宗根——』, 沖縄県.
- 新城竜一 (2014) : 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), 70 (2), 応用力学論文集, 17, I_3-I_11.
- 成瀬敏郎・井上克弘 (1990) : 大陸よりの使者——古環境を語る風成塵——. サンゴ礁地域研究グループ編 : 『熱い自然——サンゴ礁の環境誌——』, 古今書院, 248-267.

羽田麻美 (2021) : 円錐カルスト地形研究の概要と今後の課題. 法政大学地理学会創立 70 周年記念論文集, 47-58.

廣瀬 孝・寒川拓磨・青木 久・松倉公憲・前門 晃 (2012) : 沖縄の第四紀琉球石灰岩に分布する円錐カルストに関する研究. 沖縄地理, 12, 25-32.

廣瀬 孝・玉城玲奈 (2011) : 沖縄島本部山里の円錐カルストを構成する石灰岩の表面温度観測と熱風化実験. 沖縄地理, 11, 21-32.

宮里政史・青木 久・前門 晃 (2009) : 沖縄島本部半島山里地域における円錐カルスト頂部に発達するピナクルの地形的特徴. 沖縄地理, 9, 55-58.

目崎茂和 (1984) : 日本の主要カルストの地形形成について.

琉球大学法文学部紀要 史学・地理学篇, 27・28 合併号, 139-169.

Akiyama, S., Hattanji, T., Matsushi, Y. and Matsukura, Y. (2015) : Dissolution rates of subsoil limestone in a doline on the Akiyoshi-dai Plateau, Japan: An approach from a weathering experiment, hydrological observations, and electrical resistivity tomography. *Geomorphology*, 247, 2-9.

Hirose, T., Onda, Y. and Matsukura, Y. (1994) : Runoff and Solute Characteristics in Four Small Catchments with Different Bedrocks in the Abukuma Mountains, Japan. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 15A, 31-48.