

## 【論文】

# Gross Spitzkoppe（大スピッツコッペ）花崗岩体の地質と地形

千木良雅弘<sup>1</sup>・加藤弘徳<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 深田地質研究所

<sup>2</sup> 荒谷地質コンサルタント

## Geology and geomorphology of the Gross Spitzkoppe granitic pluton

CHIGIRA Masahiro<sup>1</sup>, KATO Hironori<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fukada Geological Institute

<sup>2</sup>Aratani Civil Engineering Consultants, Co., Ltd.

要旨：Gross Spitzkoppe（大スピッツコッペ）は、ドイツ語で大きな尖った頭を意味し、ナミビアにある高さ 700m の山である。それは尖った山容で独特の形態をしているが、その地形的特徴と地質との関係は明らかにされていない。この Gross Spitzkoppe の地形と地質の調査を行い、次のことを見出した。Gross Spitzkoppe は東に Pontok Mountain（ポントック山）を伴い、両者ともに、Gross Spitzkoppe 花崗岩ストックに属し、中心の塊状部と周囲の石柱群からなる。石柱群は屈曲し、屈曲部にアプライト脈を伴う。アプライト脈は延性的に湾曲し、まわりの花崗岩が破断後もまだ延性を保っている時に貫入したことを示唆している。中心の塊状部に接する石柱群は接触面にほぼ平行に急傾斜している。上記のような形態の特徴は、石柱群が形成後、岩体の塊状部のさらなる貫入に伴って変形したことを示唆している。

キーワード：Gross Spitzkoppe, 花崗岩, 地形, インゼルベルグ, 柱状節理

Abstract: Gross Spitzkoppe, which means a large sharp head in German, is a 700-m-high mountain in Namibia characterized by its distinctive conical morphology. Gross Spitzkoppe has not been characterized in geomorphology and its relation with the geology. We conducted topographic analysis and geological investigation of Gross Spitzkoppe and found the following features. Gross Spitzkoppe is associated with Pontok Mountain to its east. Both mountains are part of Gross Spitzkoppe granite stock and comprise internal massive portion surrounded by rock columns. Rock columns are bent with numerous aplite dikes in the bent zones. Aplite dikes are undulating in a ductile manner, which suggests that the aplite intrusion occurred when the neighboring granite was fractured but still ductile. Rock columns adjacent to the central massive portions incline steeply, subparallel to the contact. These structural features suggest that the rock columns initially formed were subsequently deformed by the continued intrusion of the massive portion of the pluton.

Keywords: Gross Spitzkoppe, granite, geomorphology, inselberg, columnar joints

### 1. はじめに

花崗岩類は、岩塔、巨礫原、岩塊原、インゼルベルグなどの特徴的な地形を作る (Migoń, 2006; Twidale, 1982; Twidale and Vidal Romani

2005)。ここでは代表的なインゼルベルグとされる Gross Spitzkoppe（スピッツコッペ）を対象として、その調査結果を述べる。Spitzkoppe というのはドイツ語で尖った頭という意味であり、特に Mountain をつけずに、それだけで山の名称

として使用されている。インゼルベルグは、もともとは Bornhardt が東アフリカのサバンナの平坦面に突出する孤立丘に使用した用語である (Thomas, 1978)。それは、周囲を平坦か極めて緩傾斜な土地に囲まれた孤立丘で、急激な傾斜変換線を隔てて立ち上がる山で、侵食に取り残された山である。Gross Spitzkoppe の 10 km 西には Klein Spitzkoppe (小スピッツコッペ) があるが、ここでは Gross Spitzkoppe を対象とし、Gross Spitzkoppe あるいは単に Spitzkoppe と呼ぶ。Gross Spitzkoppe の地形は Migoñ (2010) によって紹介された。Gross Spitzkoppe は、平原に屹立する高さ約 700m の尖った山であり、非常に特徴的な形態をなしており、アフリカのマッターホルンとも呼ばれている。その東側に隣接して高さ 600m の Pontok Mountain (ポントック山) がある。Migoñ (2010) は、Gross Spitzkoppe を地表から観察した結果を記述したものであり、衛星画像や空中写真を使うなどして山全体を観察したものではなかった。そのため、大きなスケールの地形や 3 次元的な地質構造については明確にならなかった。また、節理の性状についても明確にならなかった。

本研究の目的は、Gross Spitzkoppe と Pontok 山を構成する花崗岩の節理と地形の特徴を明確にすることである。

## 2. 地形と地質の概要

Gross Spitzkoppe は、ナミビアの首都ウィントフックから約 200 km 西北西、車で約 3 時間のところにあり、ナミブ砂漠の東にある (Fig. 1)。最も近い町は 45 km 離れたウサコスであり、そこから砂利道を 1 時間 30 分程度で容易にアクセスできる。気候は、亜熱帯気候で、雨季 (11 月頃～4 月

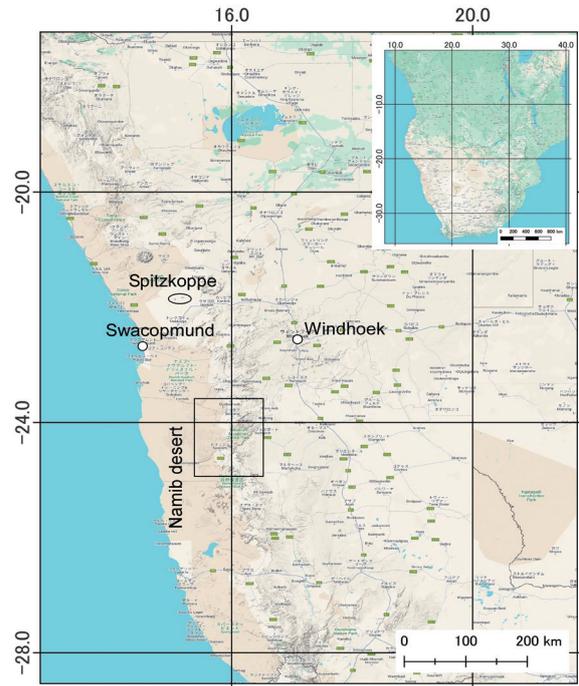


Fig. 1 Locality map of the Spitzkoppe and the Namib Desert. The quadrangle indicates the area of Fig. 8.

頃) と乾季 (5 月頃～10 月頃) に分けられ、年間降水量は 80 mm から 100 mm、平均最高気温は 7 月の 24℃ から 1 月の 32℃ である (Jacobson et al., 1995 in Migoñ, 2010)。ウィントフックから Gross Spitzkoppe 山周辺は標高 1000 m～2000 m の平原であり、ところどころ山が屹立している。その一つが Gross Spitzkoppe である。

本研究で主な調査地域としたのは、Gross Spitzkoppe と Pontok 山であるが、そこから 200～250 km 南方のナミブ砂漠東側の道路沿いにある花崗岩体の形を車窓から概略観察した結果についても触れる。

Gross Spitzkoppe と Pontok 山の 2 つの山は、花崗岩の Gross Spitzkoppe ストックからなり、このストックの露出面積は約 30 km<sup>2</sup> の面積を有する (Fig. 2; Frindt and Haapala, 2004)。その年代は約 125Ma (ジュラ紀) であり、周囲を取り囲む母岩

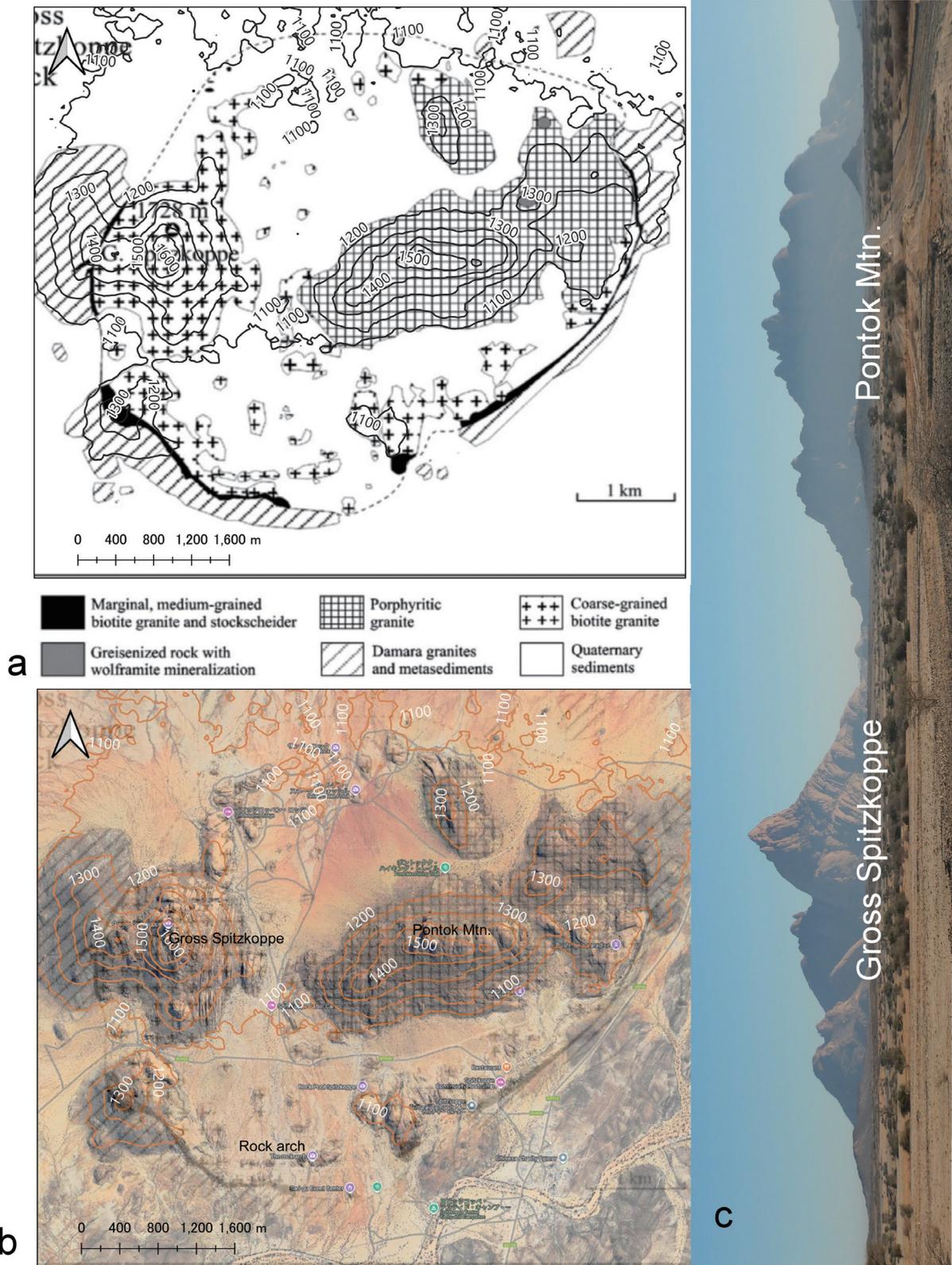


Fig. 2 Geologic map and the topography of the Gross Spitzkoppe stock. a) Geologic map from Haapala et al. (2007). b) Topographic image of the Spitzkoppe and Pontok Mountain. c) Photograph of Gross Spitzkoppe and Pontok Mountain.

は、新原生代の変成岩と約5億年前の Damara 花崗岩からなる (Frindt and Haapala, 2004). Gross Spitzkoppe ストックを構成する花崗岩には、大きく分けて4種類の岩相がある (Haapala et al., 2007). 中心部から東部にある斑状花崗岩 (Fig.3a, b), ストックの主体をなす粗粒花崗岩 (Fig.3c), 中粒等粒状の花崗岩でストックの縁辺にあるもの (Fig.3d), そして、石英とカリ長石の大きな結晶を含むもの、である。ミアロリティック晶洞が一般的にみられる (Fig.3e, f).

### 3. 調査方法

調査にあたって、衛星データと UAV を用いた地形観察、地質踏査、地理情報システムを用いたデータ処理を行った。衛星データは、Google Earth 画像, ASTER 全球3次元地形データ (GDEM, 解像度 30m) である。これらのデータを地理情報システムの QGIS バージョン 3.34 に取り込み、地形イメージ図や等高線図を作成し、また、QGIS 上で様々な地質調査結果を統合

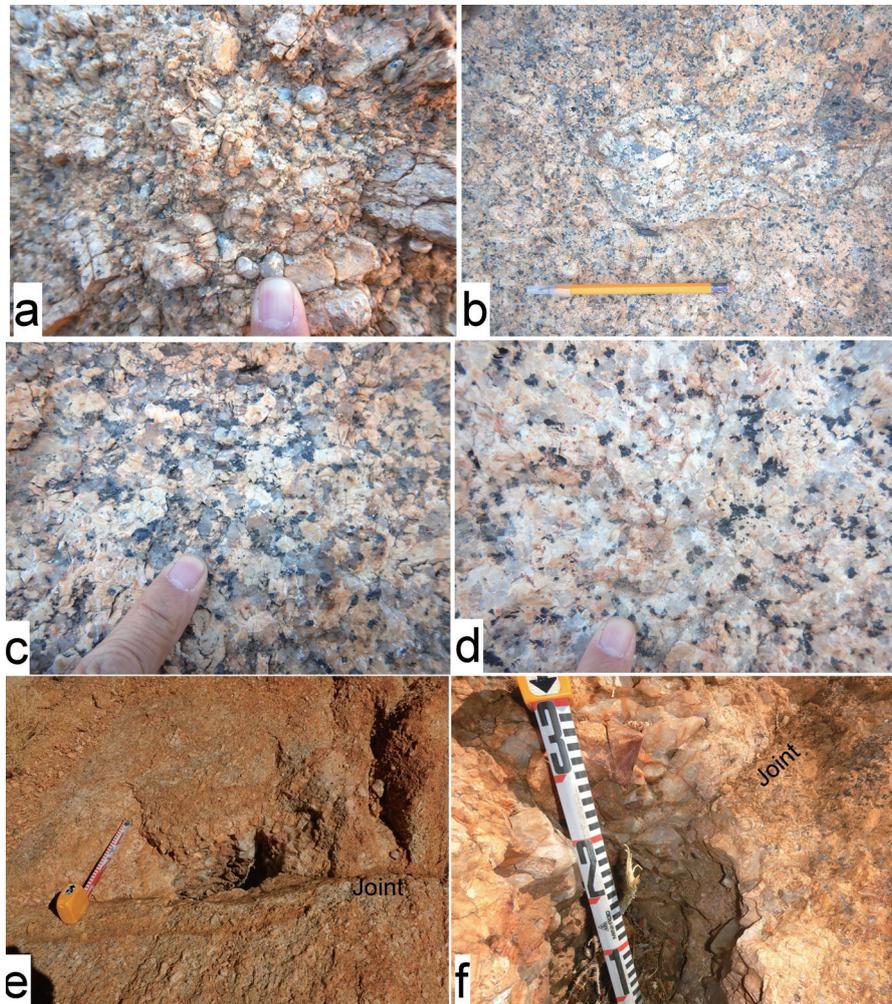


Fig. 3 Granite types of the Gross Spitzkoppe stock. a) Porphyritic granite. b) Porphyritic granite. c) Coarse-grained granite. d) Medium-grained granite. e) Pegmatite in a cavity. f) Close-up view of e. Note that the joint does not continue into the cavity, which may suggest that pegmatite crystallization still continued after jointing.

した。使用した UAV は、DJI Mavic 2 Pro であり、地上コントロールポイントは用いず、機体に搭載した GPS データを用いた。UAV の平均飛行高度は 107m、地上解像度は 2.3 cm / pix である。斜面は非常に急で登るには特殊な技術が必要であるため、山の下部 (Pontok 山の南側と Gross Spitzkoppe の主峰と南峰との間の鞍部から西側麓まで) を調査した。

## 4. 結果

### 4.1 Pontok Mountain

Pontok 山では、塊状の部分が中央の山を作っており (Fig. 4a, b)、この塊状部は、南北の節理によって幅 100m から 200m のユニットに分離している (Fig. 4b)。Pontok 山の塊状部南側に東西方向にのびる幅 200m から 300m の帯は、一

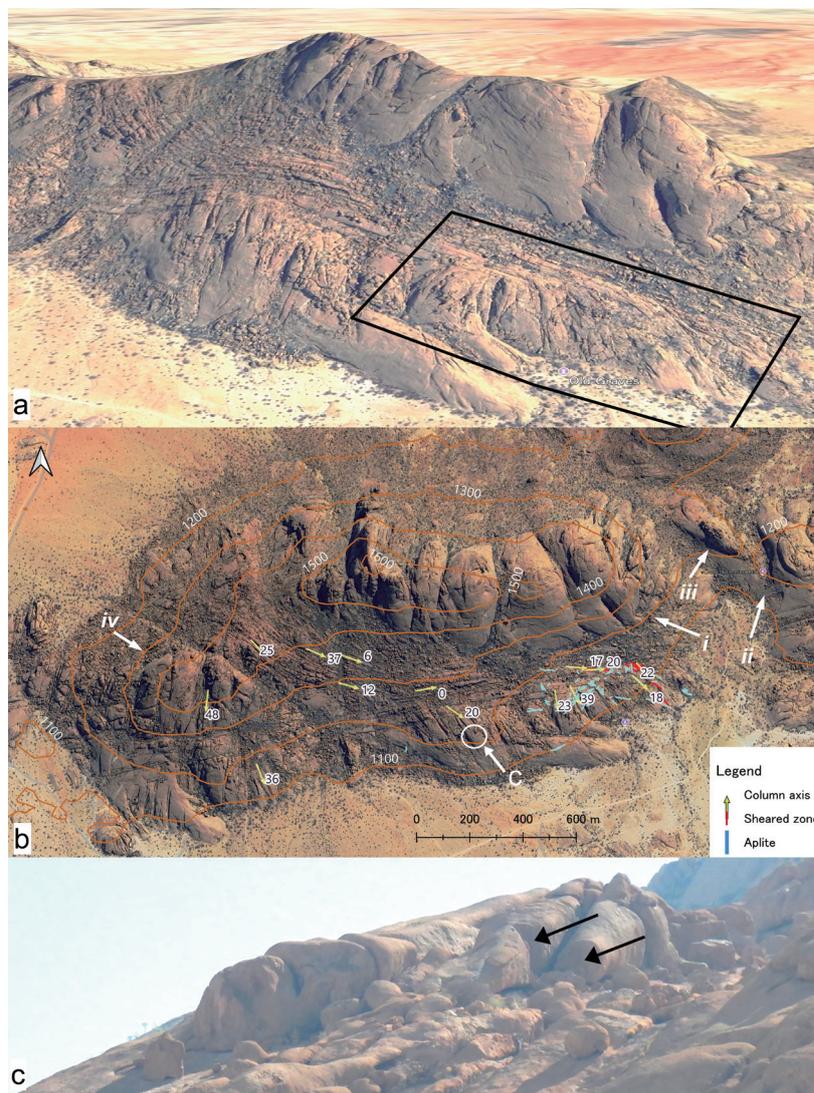


Fig. 4 Morphology of the Gross Spitzkoppe stock in the Pontok Mountain. a) Pontok Mountain looking to the northwest (image from Google Earth). b) Map image of Pontok Mountain (Google Earth) showing topographic contours, the attitudes of rock columns, and the trends of the sheared zone and aplite. c) Rock columns plunging forward. We see cross-sections of the columns as rounded polygons (indicated by arrows).

定方向に並んだ石柱が集合した帯となっている。この帯は、西に向けて塊状部の周りを北に回り込むような形をとる (Fig. 4b)。Pontok 山の北側は、侵食されて平原となっており、同様の帯があるかどうか不明である。個々の石柱は、直径 5m から 10m、長さ 10m から 100m である。石柱の断面は丸みを帯びた多角形をしている (Fig. 4c)。衛星画像と DEM データを用いた簡易計測と現地での実測によれば、石柱は、東から南東に最大約 50° プランジしている (Fig. 4b)。塊状部の上には、コアストーンが載っているところがある (Fig. 5a,

c, d)。また、塊状部周囲の急斜面の表面には石柱が張り付くように存在している部分がある (Fig. 5b, d)。

石柱集合帯は、東部で南東に屈曲している (Fig. 6a, b, c)。屈曲部の石柱には分離した破断面はなく、かつて破断面であったと考えられる面にはアプライトが侵入している (Fig. 6b, c)。アプライト脈の中には、屈曲の外側に向けて厚くなっているものが認められ (Fig. 6f)、それはかつての破断面の開口量を示している可能性がある。つまり、屈曲の外側で開口量が大きかったことが示唆

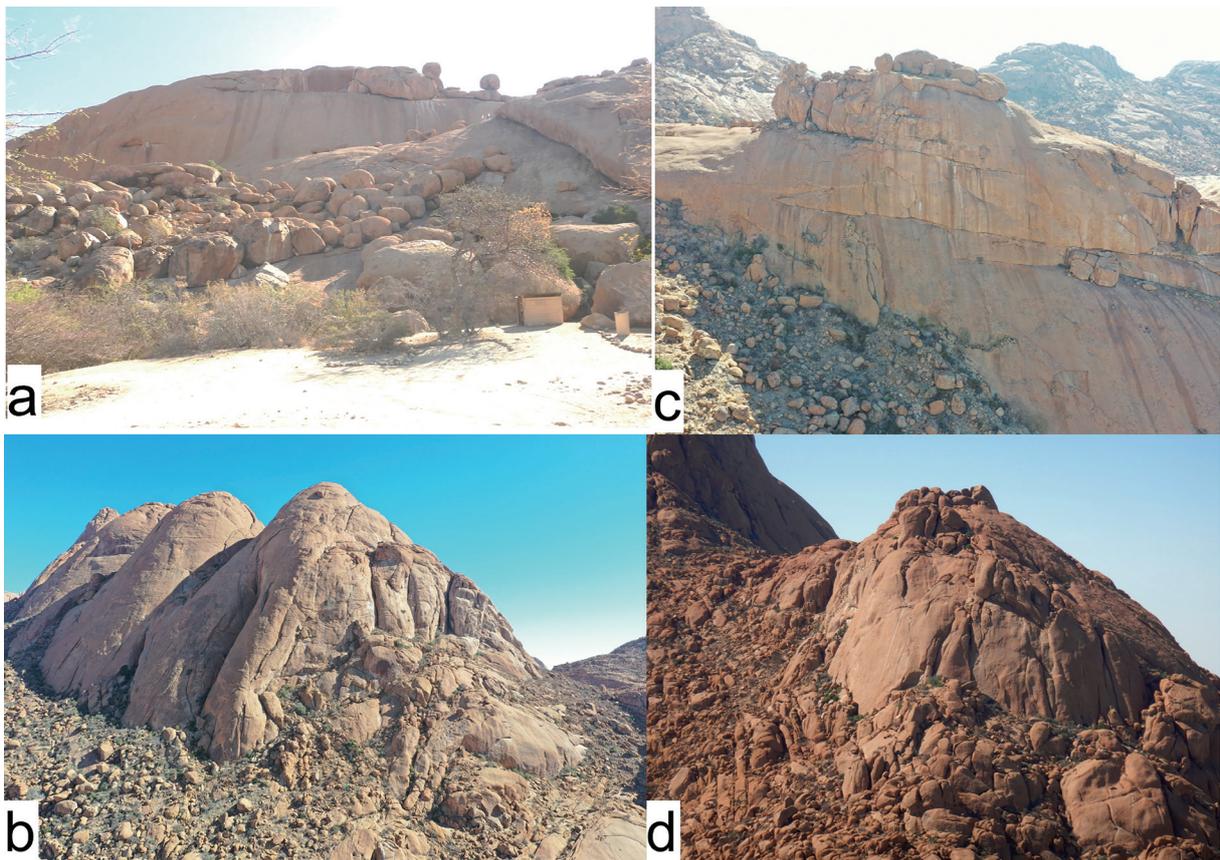


Fig. 5 Topographic features of Pontok Mountain. a) Boulder field (ii in Fig. 4b); the largest boulder is 10m in diameter. b) Massive portion of Pontok Mountain (i in Fig. 4b). c) Boulders on massive portion (iii in Fig. 4b). d) Massive portion beneath boulders (iv in Fig. 4b). The massive portion is surrounded by steeply-dipping rock columns.

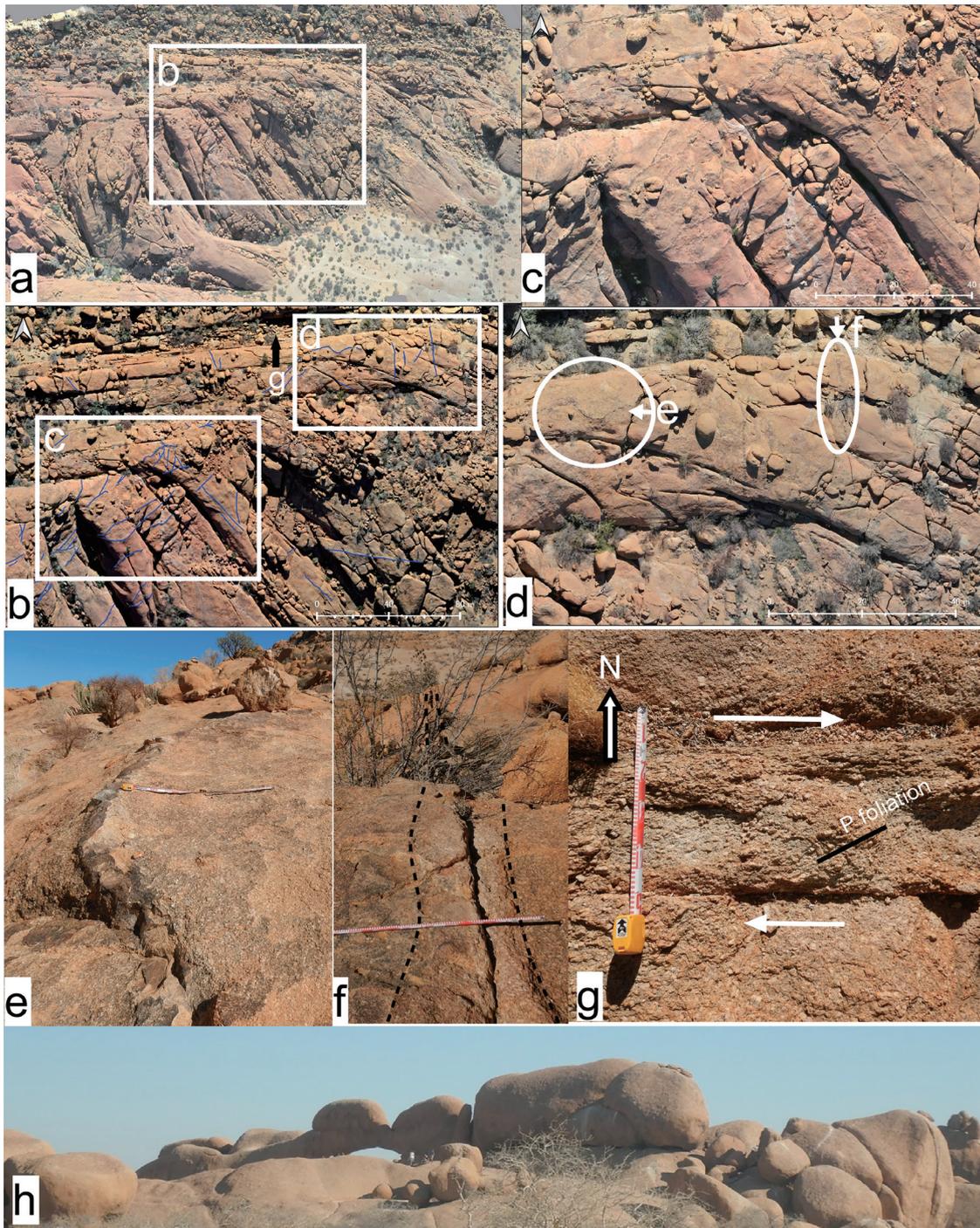


Fig. 6 Structural features of the Gross Spitzkoppe stock on Mt. Pontok and the rock arch to its south. a) Rock columns that are bent near the massive portion of the stock on Mt. Pontok (rectangular area in Fig. 4a). b) Bent rock columns with aplite dikes highlighted in blue. c) Close up view of the bend of rock columns. d) Close-up view of the bend showing the locations of the photographs e and f. e) Undulating aplite dike; scale=1m. f) Aplite dike that thickens toward the extrados of the bend (toward the front of the page). g) P-foliation in a shear zone, indicating the right-lateral displacement. This displacement sense is consistent with the shearing during the bending of rock columns (Fig. 7). The location is shown in b. h) Rock arch (see Fig. 1b for location).

される。さらに、アプライト脈は、平面的な境界面を持たずに、湾曲しているものも多いことから (Fig. 6e), 花崗岩が破断しても延性状態を保っている内に貫入したことが示唆される。石柱と石柱との間には、せん断による非対称構造が認められ (Logan et al., 1992), そのP面は、右横ずれのセンスを示している (Fig. 6g)。このセンスは、石柱の曲がりに伴うせん断センスと整合的であり (Fig. 7), 石柱の屈曲に伴って形成された可能性が

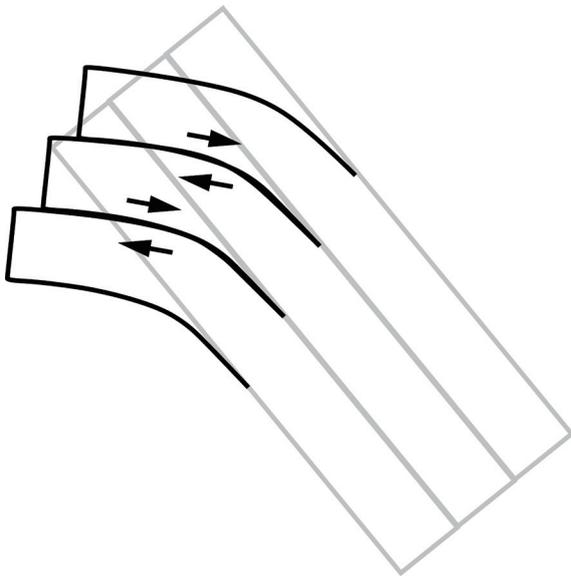


Fig. 7 Shear sense during the bending of rock columns.

ある。

#### 4.2 Gross Spitzkoppe

Gross Spitzkoppe の東半分は南北方向の高角節理が3mから40mの間隔で発達しているが、西半分は主に塊状である (Fig. 8e)。山頂の東側には、中心の岩塔に張り付くような高角の石柱群がある (Fig. 8a, b)。Gross Spitzkoppe を西側から見ると、下部に塊状部があり、その上に石柱が立っている様子が認められる (Fig. 8d)。

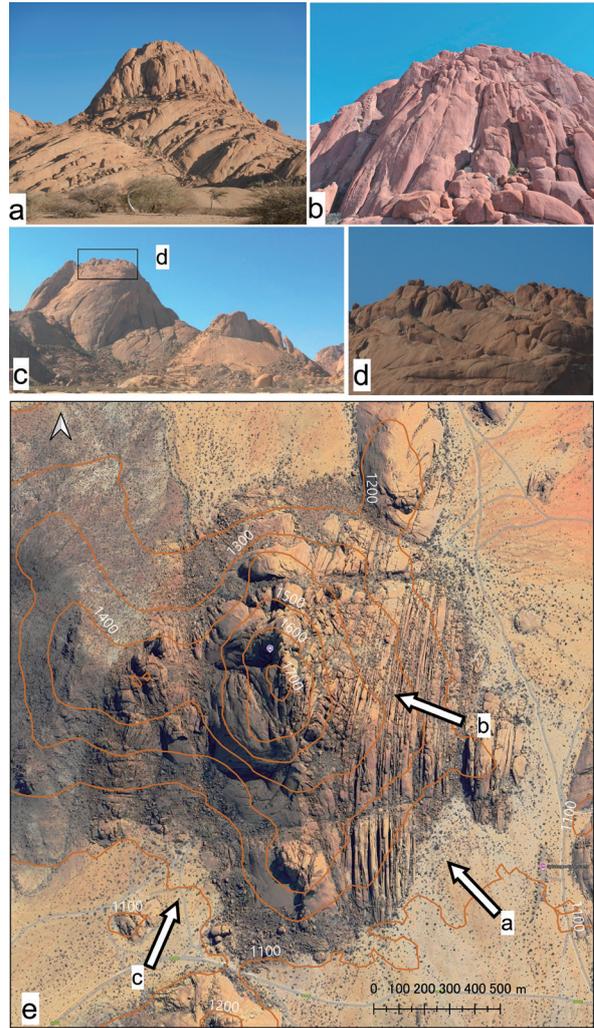


Fig. 8 Topographic features of Spitzkoppe. a) The summit viewed from the southeast. b) The summit covered by rock columns, view from the east-southeast. c) The summit viewed from the southwest, with massive portions in the lower part. d) Rock columns on top of the summit. e) Topographic contours of Spitzkoppe Mountain.

#### 4.3 コアストーンとアーチ

Pontok 山と Gross Spitzkoppe の両方とも、至る所に直径数 m から 10m のコアストーンが転がっている (Fig. 5a, 6h)。

Gross Spitzkoppe 岩体の南部には、Rock arch がある (Figs. 2b, 6h)。これは、直径 8m 程度の横倒しになった石柱が風化・侵食され、アーチ状になったものと思われる。

#### 4.4 ナミブ砂漠の花崗岩

ナミブ砂漠東側には、南北方向の道路に沿って花崗岩体が点々と分布している (Fig.9). いずれも、小丘を形作り、低い部分に塊状部があり、その上にコアストーンが載るような構造をしていることが道路からもよく見える (Fig.10). その中の一つ (No.2) をドローンを使って観察した. その結果、この小丘では、東西方向の節理に分離された花崗岩板が多角形断面を持つ石柱に分離し、さらにそれが球状風化してコアストーン化していることがわかった (Fig.10a, b).

#### 5. 考察

Gross Spitzkoppe と Pontok 山ともに、非常に特徴的なのは、山の中心部に塊状部分があり、その周りに石柱群が存在することである. また、Gross Spitzkoppe と Pontok 山での塊状部の

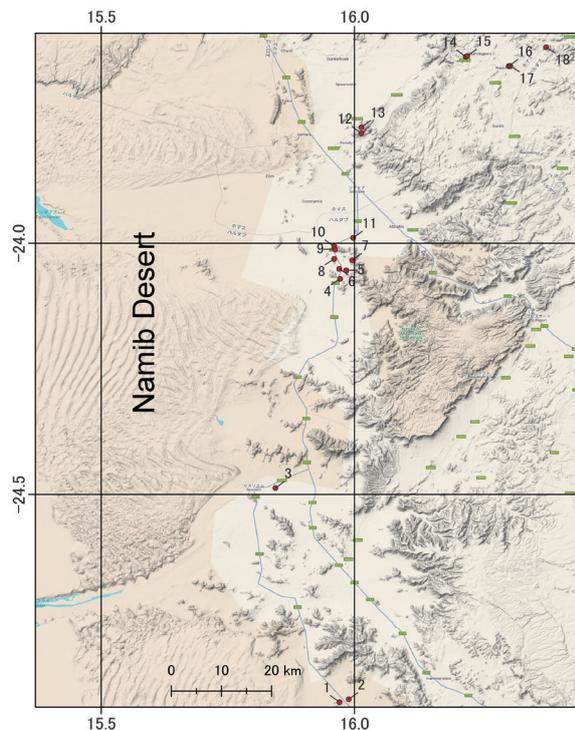


Fig. 9 Distribution of granite plutons near the Namib Desert.

縁の急傾斜部には石柱が張り付くように存在していた. 一方、Pontok 山の南東部では、石柱が塊状部に沿うように屈曲し、その屈曲部にアプライト脈が多数形成されていた. 石柱間にはせん断帯が形成されており、そこには、屈曲変形に整合的なせん断センスを示す非対称構造が認められた. Chigira and Kato (2024)

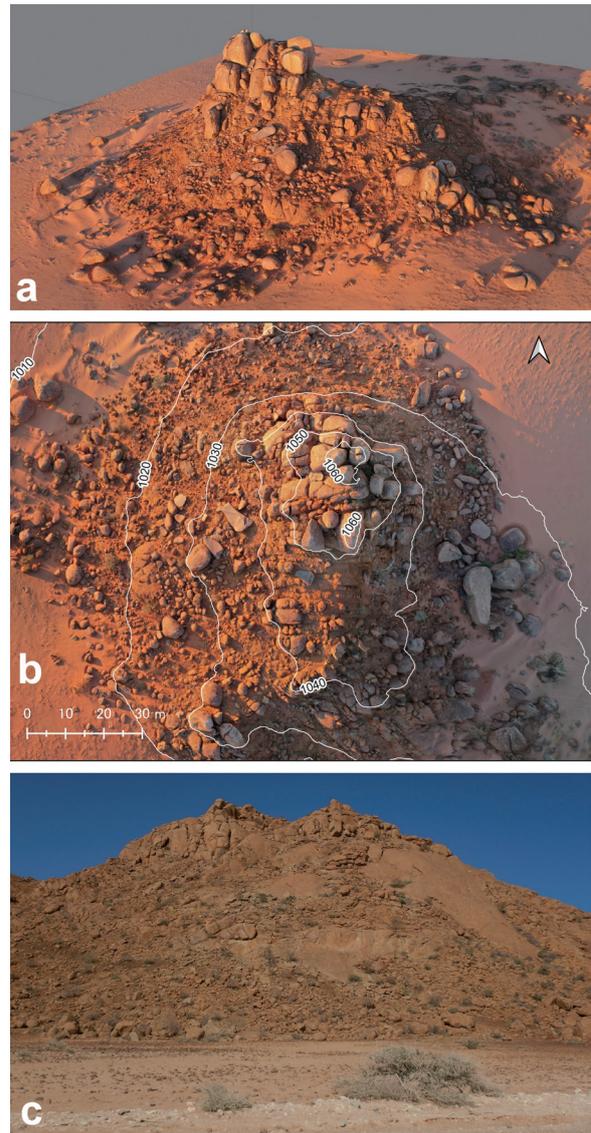


Fig. 10 Examples of the hills of granite plutons. a) Oblique view of Granite No.2, looking northeast. East-West-trending joints are visible. Numerous boulders derived from the rock columns are scattered. b) Map view of Granite No.2. c) Granite No.10. Locations are shown in Fig. 9.

によれば、花崗岩体のルーフやウォール近傍には、これらの面と高角度で交わる軸を持つ柱状節理帯が形成される。Gross Spitzkoppe と Pontok 山では、ルーフは失われているが、ルーフ直下に柱状節理帯ができていて、それが引き続く岩体の貫入によって変形し、この後続岩体の表面に平行するようになった可能性がある。柱状節理と石柱がいったん形成された後に回転するような現象があることは、千木良・加藤 (2024) によって推定されているが、そのメカニズムは明らかになっていない。一連の現象—柱状節理の形成、屈曲、アプライト脈の形成—を理解するためには、花崗岩マグマの貫入・定置履歴とレオロジーを合わせた検討が必要である (Petford, 2003)。

## 5. 結論

Gross Spitzkoppe 花崗岩ストックは Pontok 山と Gross Spitzkoppe を構成し、それらは2つとも中心部が塊状部で、その周囲は石柱群となる。

石柱には屈曲が認められ、その屈曲部にはアプライト脈が多く生じていることから、屈曲した際の破断面にアプライトが侵入したものと考えられる。

アプライト脈は延性変形していることから、アプライトが侵入したのは、花崗岩が破断してもまだ延性変形しうる時であったと考えられる。つまり、延性—脆性境界の条件であったと考えられる。

石柱間には石柱の屈曲と整合的な非対称せん断組織が認められた。

石柱が形成した後に、さらに岩体が貫入したことにより、石柱の変形と石柱間のずれが起こったと考えられる。

## 謝辞

本研究には科学研究費補助金 22K03740 (代表者千木良雅弘) を使用し、公益財団法人深田地質研究所の支援を受けた。

## 文献

Chigira, M. & Kato, H.(2024): A zone of columnar joints beneath the roof of a granitic pluton: The Okueyama granite, southwestern Japan. *Island Arc*, **33**, 1-13, doi: 10.1111/iar.12524.

千木良雅弘・加藤弘徳 (2024): 花崗岩体の内部構造とその応用地質学的意義. 日本応用地質学会研究発表会論文集, 高松, 89-90.

Frindt, S. and Haapala, I.(2004): Anorogenic Gross Spitzkoppe granite stock in central western Namibia: Part II. Structures and textures indicating crystallization from undercooled melt. *American Mineralogist*, **89**, 857-866.

Haapala, I., Frindt, S. and Kandara, J.(2007):Cretaceous Gross Spitzkoppe and Klein Spitzkoppe stocks in Namibia: Topaz-bearing A-type granites related to continental rifting and mantle plume. *Lithos*, **97**, 174-192, doi: 10.1016/j.lithos.2006.12.002.

加藤弘徳・千木良雅弘 (2024): 花崗岩類の冷却割れ目と貫入境界の構造的関係—愛媛県高月山岩体の例—. 日本応用地質学会 2024 年度研究発表会, 高松, 87-88.

Logan, J. M., Dengo, C. A., Higgs, N.G. and Wang, Z.Z.(1992): Chapter 2 Fabrics of Experimental Fault Zones: Their Development and Relationship to Mechanical Behavior. *International Geophysics*, **51**,33-67.

- Migoñ, P. (2010): Spitzkoppe: The world of granite landforms. In: Migoñ, P. (ed.) Geomorphological Landscapes of the World. Springer, 155-162.
- Migoñ, P.(2006):Granite landscapes of the world. Oxford university press, New York,384p.
- Petford, N.(2003). Rheology of Granitic Magmas During Ascent and Emplacement:*Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **31**, 399 -427, doi: 10.1146/annurev.earth.31.100901.141352.
- Thomas, M. F.(1978): The study of Inselbergs. *Zeitschrift Fur Geomorphologie N. F.*, **31**, 1 -41.
- Twidale, C.R.(1982):Granite landforms. Elsevier, Amsterdam,372p.
- Twidale, C. R. and Vidal Romani, J. R.(2005): Landforms and geology of granite terrains. A. A. Balkema Publisher, Leiden,359p.
- Jacobson P, Jacobson KM, Seely MK (1995) Ephemeral rivers and their catchments: Sustaining people and development in western Namibia. Desert Research Foundation of Namibia, Windhoek