

西オーストラリア Wave Rock（ウェーブロック）の地質と地形

千木良雅弘・金子 誠

深田地質研究所

Geology and geomorphology of Wave Rock in Western Australia

CHIGIRA Masahiro, KANEKO Makoto

Fukada Geological Institute

要旨：花崗岩は様々な特徴的な地形を作るが，その中に西オーストラリアのウェーブロックがある。これは波頭のような形態の岩壁として有名であるが，その成因については必ずしも良く理解されていない。私たちは，最近容易に入手できるようになった衛星データをフリーの地理情報システム（QGIS）で処理し，地形図を作成して現地調査を行った。その結果，ウェーブロックはハイデンロックという残丘の一部に形成されたもので，おそらく河川の蛇行の攻撃斜面であることがわかった。ハイデンロックには，特徴的な風化形態として，シーティング節理，グナマ，球状風化が認められた。グナマは，花崗岩表面の水分変化と地衣類の影響によって岩石表面が剥離して生じると考えられる。球状風化は，シーティングによって形成された岩板がさらに細かく割れて角がとれていって進行すると考えられる。

キーワード：ウェーブロック，花崗岩，風化，ハイデンロック

Abstract: Wave Rock in Western Australia is one of the characteristic topographies of granite. It is well known as a rock scarp like a wave crest, but its origin is not well understood. We downloaded satellite data, which is now easily obtained, and processed the data on the free geographical information system platform, QGIS. We made a topographic map and conducted a field survey with it, and found that Wave Rock was made in a part of Hyden Rock, which is an inselberg, probably as an undercut slope of meandering river erosion. Hyden Rock has other characteristic weathering topographies, such as sheeting, gnamma, and spheroidal weathering. Gnamma is probably made by the exfoliation of the rock surface caused by the expansion of the rock due to changes in water content and the effects of lichens. Spheroidal weathering is assumed to occur in rock blocks, which are made by fracturing of rock sheets caused by sheeting joints; the edges of these rock blocks are gradually removed.

Keywords: Wave Rock, granite, weathering, Hyden Rock

1. はじめに

波頭のような形状で有名な Wave Rock（ウェーブロック）は，西オーストラリア州の州都パースから東に約 350 km のハイデン郊外にある（図 1）。ウェーブロックの独特な形は興味深く，多くの観光ガイドに掲載されているが，それがどのような

場であり，どのような産状であるのか，適切な説明を見たことがない。私たちは，衛星データから地形図を作成し，それをういて現地調査することができたので，ここに紹介する。

ウェーブロックに関する地質と地形の総括的な報告は，Twidale and Bourne（1998）によってなされている。それによれば，ウェーブロックは，

Hyden Rock (ハイデンロック) と呼ばれる花崗岩のドーム状丘陵 (bornhardt, inselberg) の一部の岩壁につけられた名前である。この花崗岩は、太古代の 26.4 億年前のものであり、それが白亜紀に深部まで風化し、その後、始新世に侵食されて地上に顔を出したものであるとされている。

2. 地形

ハイデンロックの周囲は標高 300m から 340m の平原からなる。その北側には西北西-東南東方向の Camm palaeodrainage (カム古流路) があり (Twidale and Bourne, 1998), 衛星画像によれば、それは幅 1km の帯をなし、そこに多数の蛇行跡が認められる (図 1b)。この古流路は、あまりにも勾配が緩く、どちらが下流なのかわからなかつ

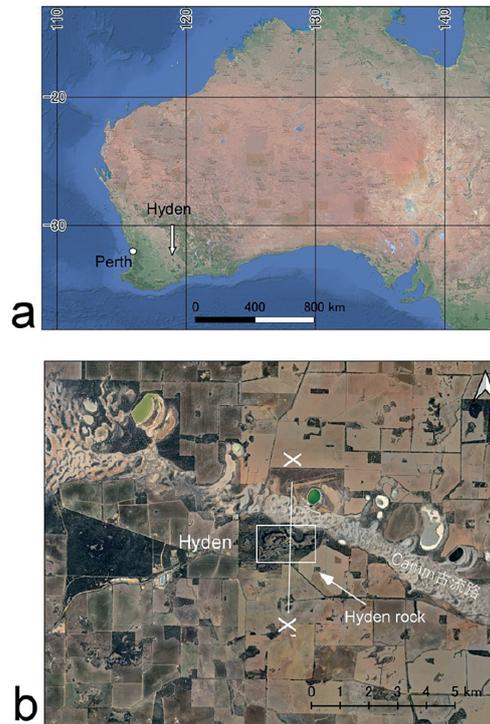


図1 ハイデンとハイデンロックの位置図.

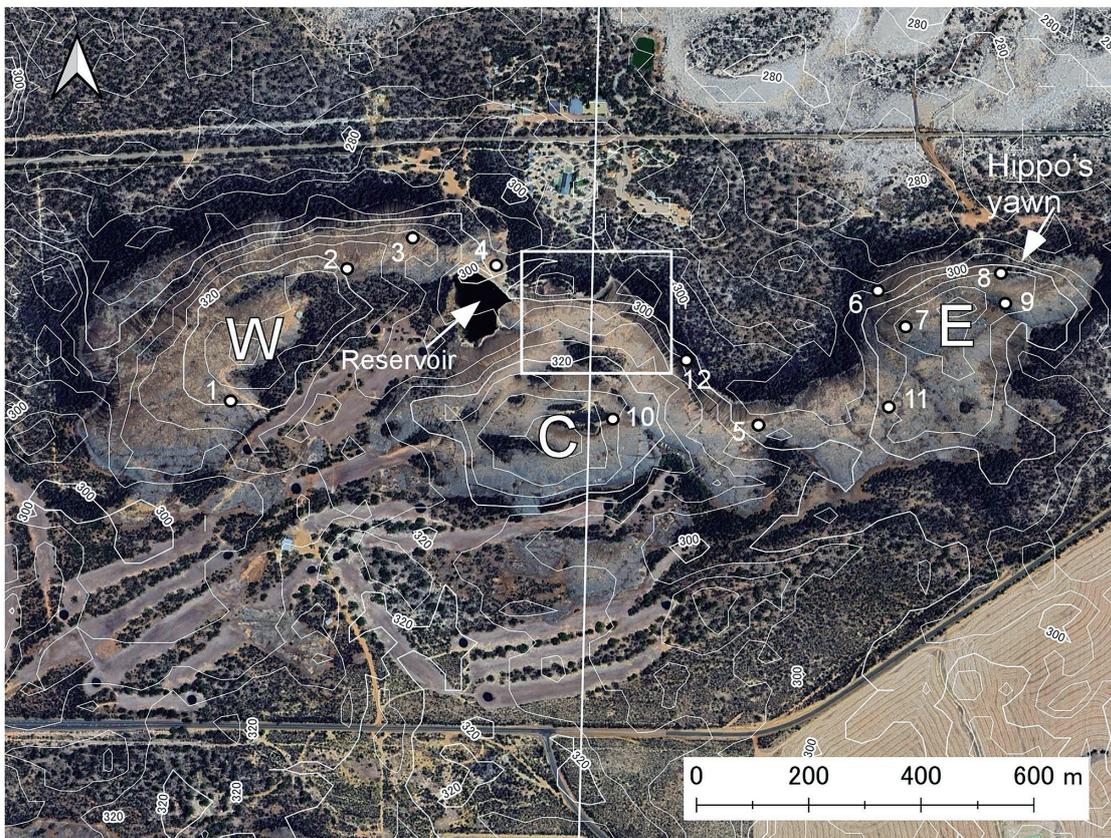


図2 ハイデンロックの地形。四角で示した場所にウェーブロックがある(図3参照)。

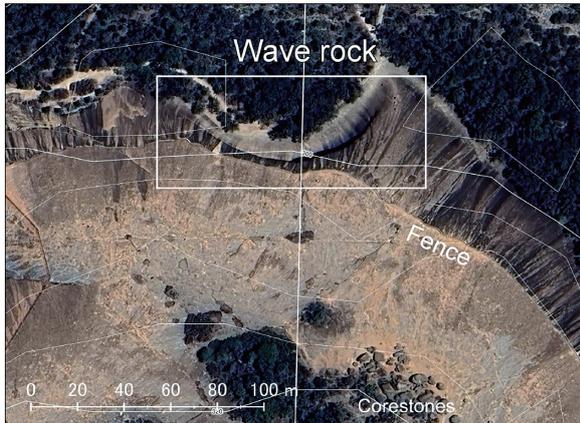


図3 ウェーブロックの衛星画像。フェンスの下方に雨だれもようがある。図2の四角枠内。

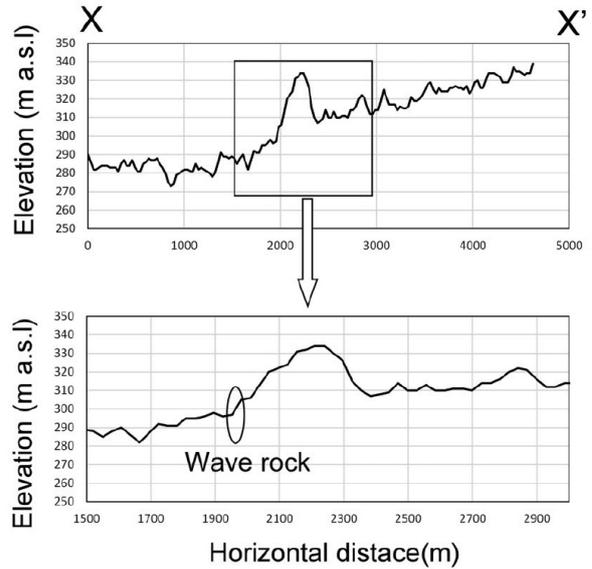


図4 ウェーブロックを南北に横断する地形断面図。断面線は図1b参照。

たが、西に向けて緩やかに高度を下げています。私たちが訪れた時には、水はなかった。

ハイデンロックは、東西 1.8km、南北 0.6km の東西に長い丘陵で、図2に示したように、西 (W)、中央 (C)、東 (E) の3つのドーム状高まりの複合である。そのうち中央ドームの北側にウェーブロックがある。ハイデンロックの標高は西ドーム頂上が 330m、中央ドーム頂上が 335m、東ドーム頂上が 315m で、その直下の平原の標高は、北側で 290m から 300m、南側でやや高く 300m から 310m である (図3)。つまり、ハイデンロックの高さは周囲の平原から 30m から 45m である (図4)。ウェーブロックの北側のカム古流路は標高約 280m である。

ハイデンロックを Google Earth 画像で見ると、ハイデンロックの縁を取り囲むように線が見え、その下方に斜面の傾斜方向に伸びた縞模様が見えるが、この線は人工的なフェンスで (図3、図5a)、ハイデンロック上に降った降水を貯水池 (図2、図5b) に導くためのものである。縞模様は、フェンスの隙間から染み出して下方に流れた水の痕跡である。



a



b

図5 ハイデンロックの縁を取り巻くフェンス (a) とそこから導かれた水を貯める貯水池 (b)。



図6 ウェーブロックとその周囲. a: ウェーブロック. 崖の下の平坦面に岩盤が露出していることに注意. b: 小規模な“ウェーブロック” (場所は図2の10). c: ハイデンロック北側のカム古流路. 遠方に見えるのは東ドーム.

ウェーブロックは、平面的にみて南に凸に湾曲しており、それ沿いの長さは105m、高さは15mで、一部オーバーハングしている(図3, 図6a). ウェーブロックにも水の流れた痕跡が縞模様として見えている. 特に崖の下半分では、露頭表面が薄く剥離して、白から褐色の岩石が露出している. 見逃しがちであるが、ウェーブロックの下の平坦な面に新鮮な花崗岩が露出していることは大きな特徴である(図6a). この平坦な面は緩やかにカム古流路につながっている(図6c). ウェーブロックを断面的にみると、岩盤面が下に凸のカーブを描いて周囲の平原につながっているという特徴がある. ハイデンロックの周囲は、いずれもこのように断面的に見て下に凸の形状になっているようである. ウェーブロックよりもかなり小規模であるが、湾曲した縦断面をもつ崖は他にも認められた(図6b, 図2の10). ここのやはり南に凸の平面形態を持つ. このような形態の岩盤斜面を Twidale and Bourne (1998) は、Flared slope と呼んだ.

衛星画像で見ると、ウェーブロックの平面的な湾曲の形態・スケールは、カム古流路に残された蛇行の形態・スケールとほぼ同様であり、ウェーブロックはカム古流路にほとんど接していることから、ウェーブロックは、河川の蛇行侵食の影響を受けており、蛇行の攻撃斜面であると考えられる. また、ハイデンロックの東ドームと中央ドームとの間の北側にも、平原が大きく南に凸に張り出した部分があり、ここも蛇行の影響を受けている可能性がある. ただし、カム古流路と反対側、つまり、ハイデンロックの南側にも小規模なウェーブロック様の地形 (flared rock) があることから、flared rock 自体は、河川侵食のかかわらない風化と削剥によって形成されるものと考えられる.

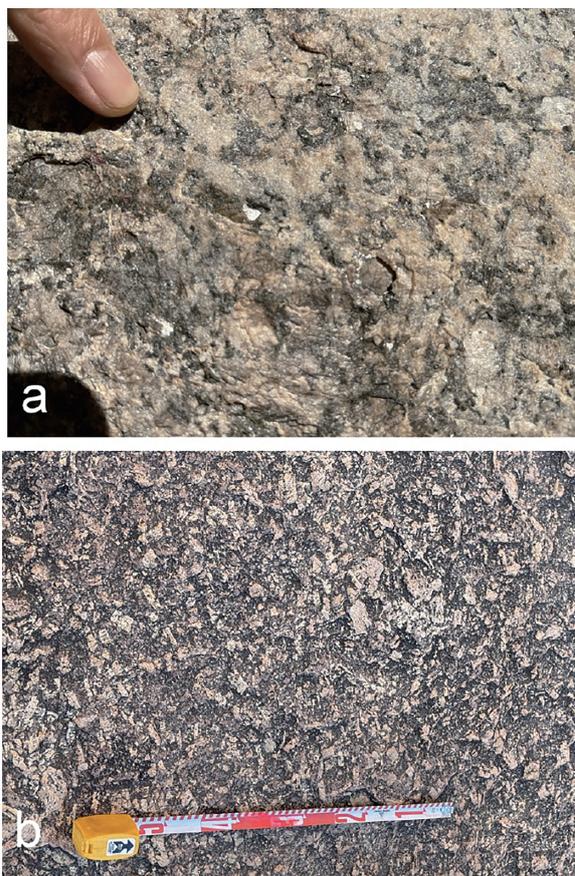


図7 ハイデンロックを構成する粗粒黒雲母花崗岩. a: 摩耗した面. b: 風化してカリ長石が白く浮き出た面.

3. 地質

ハイデンロックの表面のほとんどは、風化してざらざらしたものであったが、日本で良く目にするようなマサは認められなかった. ハイデンロックの岩石の主体は、最大3cm×5cm程度のカリ長石の結晶が目立つ粗粒黒雲母花崗岩である(図7). しばしば短冊状のカリ長石が同じ方向に配列している. また、しばしばアプライトやペグマタイトの脈を伴う(図8). アプライトの脈とペグマタイトの脈が複合したものも認められた.

ハイデンロックには、少ないものの節理も認められた. それらのほとんどは密着した癒着節理であったが(図9b)、東ドームには開口して植物の



図8 花崗岩に貫入した脈. a: アプライトとその中心にあるペグマタイト (場所は図2の12). b: アプライト脈 (場所は図2の4).



図9 節理の状況. a: 開口して灌木の根が侵入している (場所は図2の7). b: 癒着した節理 (場所は図2の1). スケールの長さは110cm. c: 直線的なへこみを作る節理 (場所は図2の9). d: cの拡大.

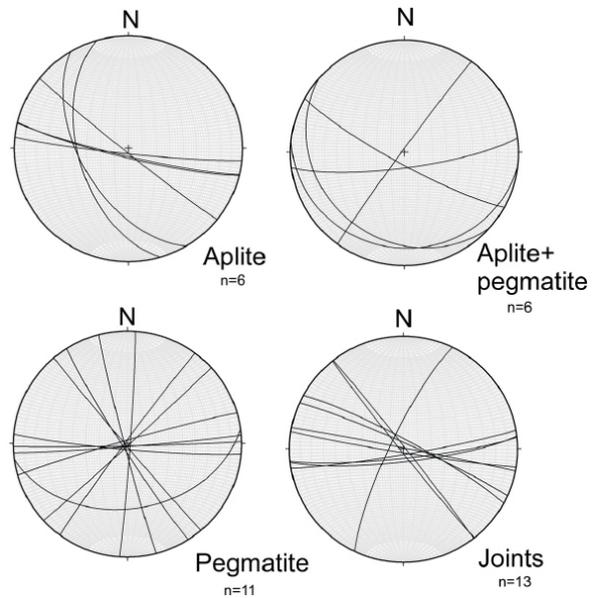


図10 脈と節理のステレオ網投影. 下半球. 等積投影. 本文参照.



図 11 シーティング節理と、それに起因する岩盤滑りとコアストン。a: 数 10 cm の間隔のシーティング節理と、それによって分離した岩板のすべり(場所は図 2 の 6)。b: 岩板の分離とわずかなすべりによる割れ目の開口(場所は図 2 の 8)。c: シーティングによる厚さ 1.5 m の岩板の形成と細分化 (場所は図 2 の 2)。スケールの長さは 110 cm。d: シーティングによってできて、細分化された岩板の球状風化。c の露頭の東側。

根に侵入されたものがしばしば認められた (図 9a, 9c, 9d)。

現地で測定した脈と節理のステレオ網投影を図 10 に示す。アプライト脈は、NW-SE 走向で高角なものが多いが、ペグマタイト脈は様々な方向の高角なものが多い。また、アプライトとペグマタイトからなる複合脈には高角なもの他に NW-SE 方向で低角なものも認められた。このような複合脈はウェーブロックの入り口付近にも認められる。節理には NW-SE から WNW-ESE 方向で高角なものが多かった。

4. 風化

4.1 シーティングと球状風化

ハイデンロックの表層部には、表面に平行なシーティング節理が認められた。シートの厚さは数 10 cm から 2 m 程度であった。30 度程度の急傾斜の場合には、シートが滑り落ちている部分もあった(図 11a)。20 度前後の傾斜の場合には、シートが小ブロックに分離して、ブロック間が開口している場合があった(図 11b)。シーティング節理によって形成された岩板がさらに割れて、球状風化を受けてコアストンとなっている場合もしばしば認められた(図 11c, 11d)。この場合、コア



図12 球状風化とタフォニ。a: Hippo's yawn. 窪みの中に人がいることに注意。b: aを上から見た写真(場所は図2の8)。c: コアストーン。コアストーンの下には高角節理はない。スケールは1m。d: コアストーンにできたタフォニ。タフォニの前に人がいる。

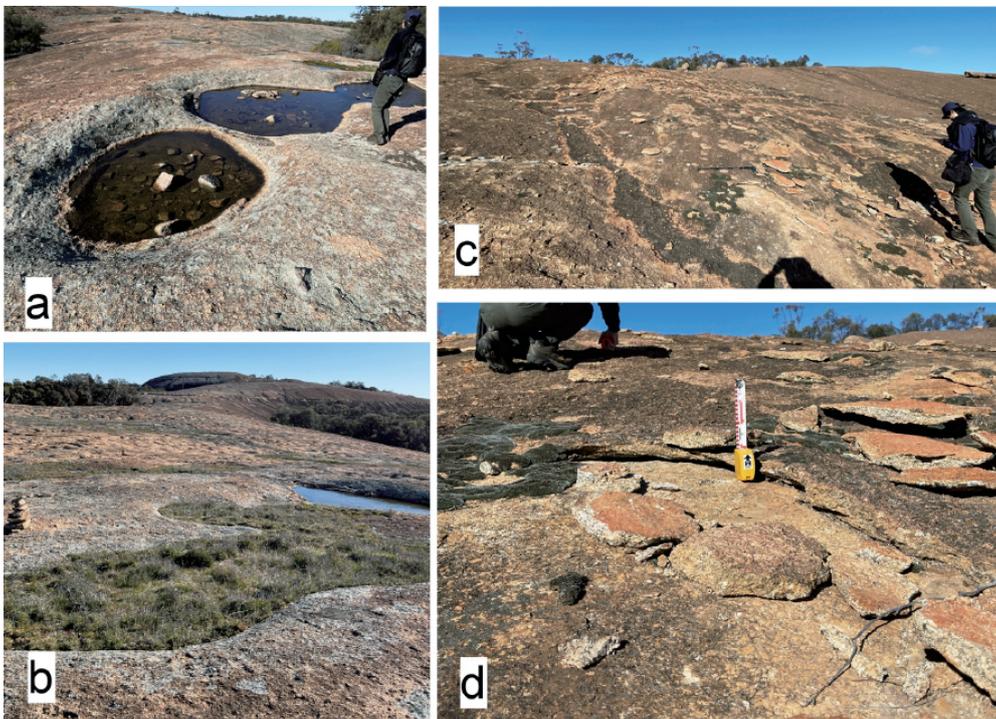


図13 グナマとリル。a: 水のたまったグナマ。グナマの縁は褐色で、それよりも高い部分に地衣類がある。3m×6m、深さ50cm(場所は図2の5)。b: 植生の生えたグナマ(場所は図2の11)。c: 地衣類の生えたリル(場所は図2の3)。d: 地衣類の生えた部分の花崗岩が薄く剥離。体積膨張による。場所はcと同じ。

ストーンは1枚のシーティング節理の上に乗っていて、このシーティング節理面には、高角節理は全く認められなかった。つまり、テクトニックな高角節理がコアストーン形成の要因にはなっていない。

ハイデンロック北東部の Hippo's yawn (カバのあくび) は、大きな岩塊で、上面は球状になっており (図 12b)、下側がタフォニのようにえぐられている (図 12a)。この岩の高さは約 10m。近傍の斜面上にはコアストーンが載っており (図 12c)、その中には下側がえぐれてタフォニになっているものがあった (図 12d)。これらの場合も、コアストンの縁をなすような高角節理は認められなかった。シーティングの中には間隔が数 m から 10m になるようなものもあり、それに分離されたシートが球状風化したものと考えられる。

4.2 グナマ

花崗岩の表面で、時々水の流れる部分には地衣類が生えていて、その部分が体積膨張して剥離したために剥離板の下に隙間が生じているものがあった。この剥離板は次第にはがれて、その部分がえぐれて窪み、水の流路になっていた (図 13c, 13d, Twidale and Bourne (1998) の Rillen)。おそらくこれと同じ現象が水平な岩盤面で起こり、次第に深くえぐれていったのがグナマと考えられる (図 13a, 13b)。グナマの中には、直径数 10cm から数 m、深さ数 10cm に至るものもあった。大きなものでは、グナマ内部に植物が生えていた。

5. 結論

ウェーブロックを含むハイデンロックの地形と地質を調査した結果、次のことが明らかになった。

- ・ハイデンロックは太古代の花崗岩からなり、平原に囲まれたドーム状の残丘である。
- ・ハイデンロックの北側の一部が、河川の蛇行に伴う攻撃斜面侵食によって形成され、現在のウェーブロックとなった。
- ・ハイデンロックの上にはコアストーンが数多く転がっている。
- ・これらのコアストーンは、シーティングによって板状に割れた花崗岩がさらに小さく割れて、それが球状になったものである。
- ・コアストーンには、タフォニとなったものも多数ある。

謝辞

本研究には、科学研究費補助金 22K03740 (研究代表者千木良雅弘) を用いた。ステレオ投影には、Allmendinger による Stereonet 9.5 を用いた (Allmendinger et al., 2011)。

文献

- Allmendinger, R. W., Cardozo, N. and Fisher, D. M. (2011): *Structural geology algorithms: Vectors and tensors*, Cambridge University Press.
- 千木良雅弘 (2021) : 私にとって画期的なクリノメーター : Fieldmove Clino. 深田地質研究所年報, **22**, 89–97.
- 千木良雅弘 (2022) : 最近の地質調査の道具立てと QGIS によるデータ統合. 深田地質研究所年報, **23**, 125–136.
- Twidale, C. R. and Bourne, J. A. (1998): Multistage landform development, with particular reference to a cratonic bornhardt. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, **80**(1), 79–94.

付録

1. 旅行事情

パースの中心街でレンタカーを借り、約4時間でハイデンに到着した。その間には、いくつかの町もあったが、食事のできる適当なレストランはみあたらず、スーパーマーケットで食料を調達した。道路はすべて舗装道路で、非常に走りやすかった。

ハイデンでは Hyden Hotel Motel というホテルに宿泊。レストランも併設されており、大変快適だった。

ハイデンロック周囲ではドローンの飛行はきびしく規制されている、とのインターネット情報があり、ドローン撮影は控えた。

2. 衛星データを用いた地形図作成

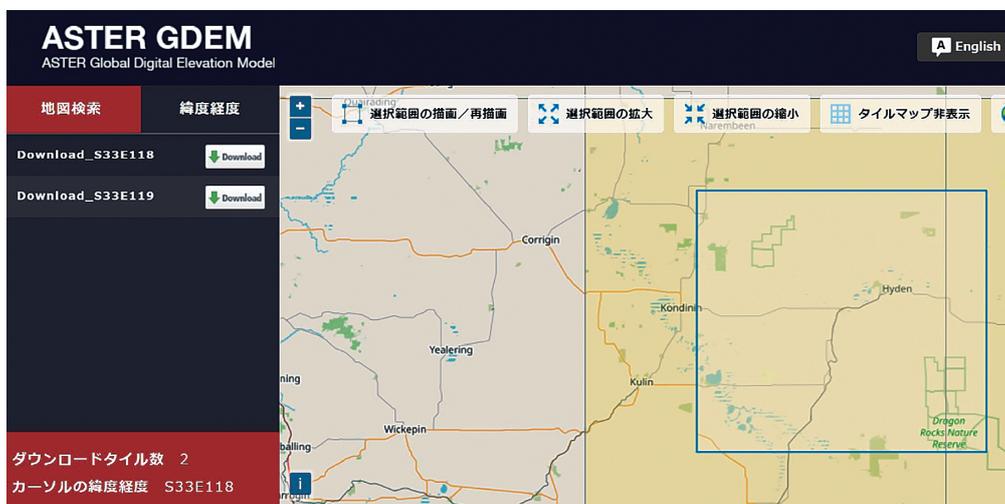
最近では、衛星データから作成された数値標高データがインターネットに公開されている。私たちは、そのうち、ASTER 全球3次元地形データから必要な部分のデータをダウンロードし、フリーの地理情報システム QGIS に取り込み、地形

図を作成して調査に用いた。いとも簡単に地形図を作れるので紹介する。QGIS については、千木良 (2022) に書いたもので、参照いただきたい。

日本の経済産業省と米国航空宇宙局は、共同で人工衛星搭載センサ「ASTER」を用いて、地球の陸域全てを対象に数値地形データ (ASTER 全球3次元地形データ / ASTER GDEM) の整備を進めている。2019年8月から、ASTER GDEM バージョン3の無償配布を開始した。ピクセル間隔30mで、高さ精度は7m~14mとされている。これが ASTER 全球3次元地形データ (ASTER Global Digital Elevation Model, GDEM) である。利用方法は次の通り。

2.1 データのダウンロード

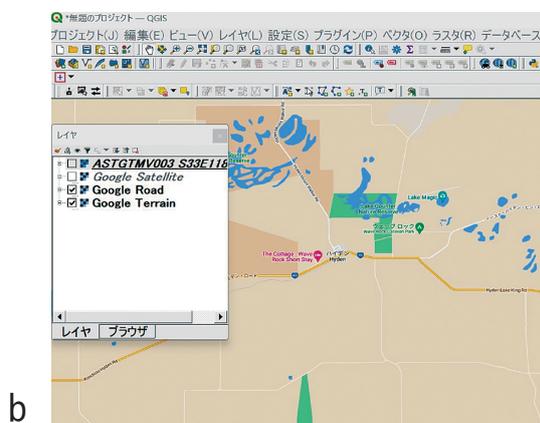
次のダウンロードサイトにアクセスする。
<https://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp/>
 そこで、選択範囲の描画 / 再描画をクリックして、地図上で選択する四角範囲を設定する (図附1)。そうすると、画面左に Download の文字が出るので、ここをクリックすれば ZIP ファイルでデータがダウンロードされる。これを解凍すると、dem.tiff と num.tiff のファイルが作成される。



図附1

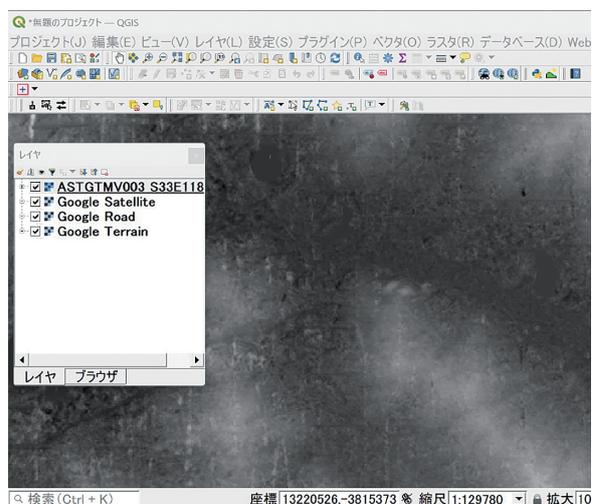
2.2 QGIS で, Google Maps と Google Earth を表示させる.

QGIS のメニューバーでプラグイン>プラグインの管理とインストールから, QuickMapServices をインストールすると, 画面上部 web ツールに 図附 2a が加わる.



図附 2

左の地球儀の+アイコン (QuickMapServices) をクリックして, Settings を選択し設定画面を開く. More services タブをクリック, Get contributed pack をクリックして, ダウンロード完了後 OK. 最後に完了をクリックする. 再度左の地球儀の+アイコンをクリックして一覧から Google の中の Satellite, Road, Terrain を選択すると, レイヤとマップビューが図附 2b のようになる. 次にダウンロードした dem.tif ファイルを QGIS にレイヤとして取り込む. そのためには, QGIS の上のメニューバーで, レイヤ>レイヤ追加>ラスタを追加, と選択するとラスタデータセットを選択するパネルが出るので, ここでさっきの dem.tif ファイルを選んで追加すればよい. そうすると, 図附 3 が表示される.



図附 3

2.3 直交座標系の再投影

この図附 3 ではぼんやりして地形の形態がわからないので, 傾斜図を作成する. しかし, その前に座標の再投影をする必要がある. この DEM の座標系は WGS84 になっていて, それでは傾斜の計算ができないので, 直交座標系に再投影する. ハイデンの辺りの直交座標系は, UTM zone 50 S なので, その座標系に再投影する. メニューバーで, ラスタ>投影法>再投影を選び, 変換元 CRS として WGS84 を, ラスタの CRS として UTM zone 50 S を選んで実行. すると, 結果が再投影されたラスタが仮の画像として表示されるので, このレイヤ名を右クリック>エクスポート>名前を付けて保存>表示されるパネルで名前を適当につけてフォルダに保存する.

ここまでくれば, この再投影した dem を用いて, 傾斜を計算して図示したり, 等高線を描いたりすることができる. 本報告に使用した図は, すべてこのようにして作成したものである.

3. QGIS 上での写真の表示

本報告では、多数の写真の位置を地図上に示した。これも Fieldmove Clino と QGIS のおかげで間違うことなく容易にできた。千木良 (2021) では、Fieldmove Clino から PC へのデータ共有において、写真のデータは csv ファイルとして位置やメモのデータが共有できるが、写真は別途 PC にダウンロードしなければならないと述べた。しかし実際には一緒に共有できる。これは、Clino のデータを PC に共有すると、project 番号 .fm というフォルダができ、その中に images というフォルダができ、そこに写真が入っている (千木良, 2021 ; 図 12)。このフォルダに入っている写真と、写真データを格納した csv ファイルとをうまくつなげればよい。

3.1 写真の位置をプロットする

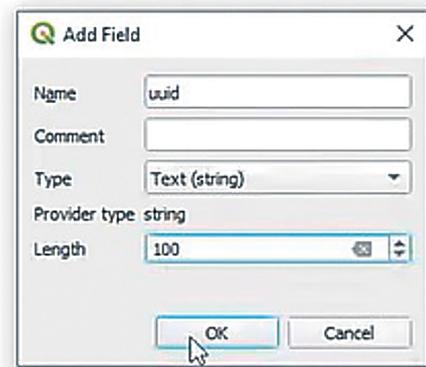
これは、千木良 (2021) に述べた走向傾斜の測定位置プロットと同じ方法でできる。写真の測定位置がプロットされたら、そのレイヤ名を右クリックして、エクスポート>新規ファイルに地物を保存で、形式 Geo package または shapefile のベクタを選択、レイヤ名とファイル名を適宜入力して QGIS のデータを入れているフォルダと同じ場所に保存する。こうすると、データを編集できるようになる。

フィーチャのロゴを変えるには、プロパティからシンボロジー、svg マーカーから適当なものを選ぶ (千木良, 2021 ; 図 15)。

3.2 属性表の設定

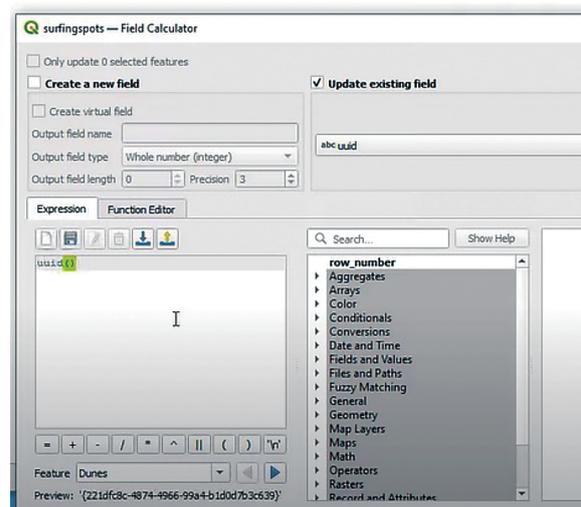
追加したレイヤを右クリックして属性テーブルを開くを選択する。属性テーブルが開いたら、一番左の鉛筆のアイコン(ショートカット:Ctrl + E)

で編集モードに切り替える。その後、新規フィールドアイコンを選ぶと、(ショートカット:Ctrl + W) から属性表に新しいフィールド画面を追加するためのパネルが表示される (図附 4)。ここで新しいフィールドの名前は uuid、型はテキスト、長さは 100 桁を入力し OK を押すと、フィールドが一番右の列に追加される。



図附 4

次に、属性テーブルを開いた状態からフィールド計算機を開く (ショートカット:Ctrl + I) を選ぶとフィールド演算が開く (図附 5)。ここで、既存のフィールドを更新にチェックマーク、すぐ下のプルダウンメニューから先ほど入力した uuid を選択、左の式タブには uuid() とテキストを入力して OK する。



図附 5

新しく追加したフィールドの uuid には、長い文字列が出るが気にしない (図附 6)。

	localityNa	longitude	latitude	heading	image name	timedate	notes	uuid	Rating
1	Locality 1	130.57908...	30.26...	84.91...	23_1671433678.jpg	Mon Dec 19 16:07:58 2022	Column	{640c408-02ec-4194-8e...	NULL
2	Locality 1	130.57707...	30.26...	255.6...	22_1671433678.jpg	Mon Dec 19 15:45:14 2022	Allyn	{766ddc25-bc6e-411a-8a...	NULL
3	Locality 1	130.56438...	30.25...	62.37...	18_1671415059.jpg	Mon Dec 19 11:05:05 2022	No joint Alyn 10 cm	{2df50994-d566-4492-890c- d16079747377}	NULL
4	Locality 1	130.56423...	30.25...	164.2...	18_1671415403.jpg	Mon Dec 19 11:03:23 2022	NULL	{8915083b-820b-4c2d-92...	NULL
5	Locality 1	130.56695...	30.26...	232.0...	16_1671413396.jpg	Mon Dec 19 10:32:16 2022	Corestone s...	{1cedd6d2-1367-4d3b-8f...	NULL
6	Locality 1	130.56934...	30.26...	25.10...	14_1671411368.jpg	Mon Dec 19 09:56:08 2022	Column	{39663808-e1bc-4078-a02- e02534963b03}	NULL
7	Locality 1	130.57049...	30.26...	213.1...	12_1671410540.jpg	Mon Dec 19 09:42:50 2022	Weathering or Allyn	{0448a870-4aca-4e05-9f50- e02534963b03}	NULL
8	Locality 1	130.57701...	30.26...	290.0...	10_1671406720.jpg	Mon Dec 19 08:38:40 2022	Qz	{8417a68c-9537-4d3b-b493- d4810003e697}	NULL
9	Locality 1	130.57911...	30.26...	292.5...	9_1671406216.jpg	Mon Dec 19 08:30:16 2022	Corestone	{b56f7b4a-4a84-496d-...	NULL

図附 6

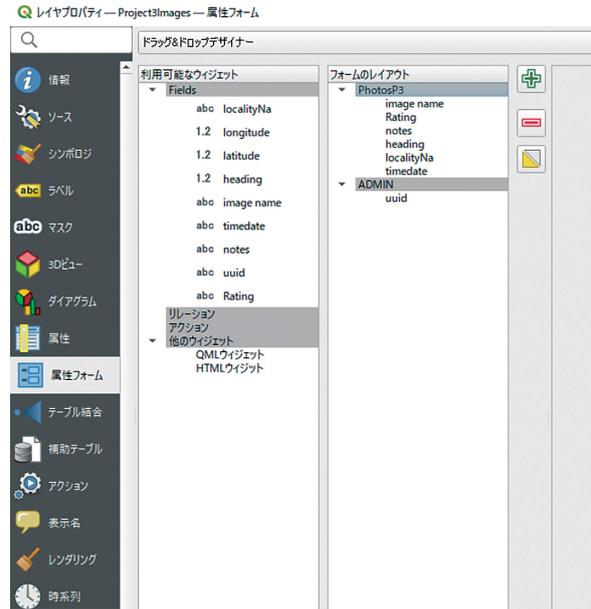
3.3 属性フォームの設定

QGIS のメインのパネルに戻り、属性ツールバーの地物情報の表示アイコン (i) をクリックして、写真の位置を示しているフィーチャをクリックすると、図附 7 のパネルが開く。

地物	値 (Value)
▼ Project3Images	
▼ image name	14_1671411368.jpg
▶ (派生した属...	
▶ (アクション)	
localityNa	Locality 1
longitude	130.5693458000000008
latitude	30.2615029500000001
heading	25.1013641400000001
image name	14_1671411368.jpg
timedate	Mon Dec 19 09:56:08 2022
notes	Column
uuid	{39663808-e1bc-4078-a02...
Rating	NULL

図附 7

次に、追加したレイヤをレイヤパネルからダブルクリックして、レイヤプロパティを表示して、属性フォームを選ぶ (図附 8)。



図附 8

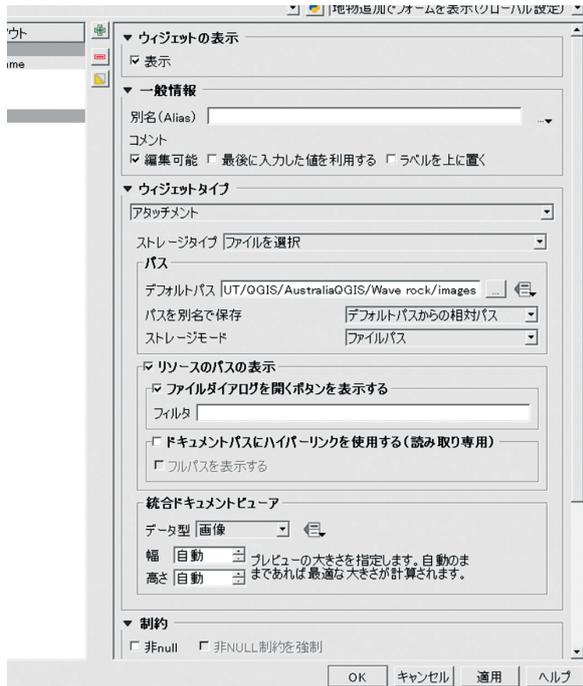
一番上のバーはドラッグ&ドロップデザイナーを選択。

フォームのレイアウトで適当なグループを作る。+アイコンをタップすると、グループの箱の作成を聞いてくる。PHOTO と ADMIN ラベルの箱を作る。PHOTO の箱を作るときにカラムを 1 にすると、後で写真を大きく表示できる。

PHOTO の箱には、image name, note, heading, timedate を入れると、あとで便利。ADMIN の箱には uuid を入れる。

image name をクリックすると、図附 9 のパネルが開く。そのパネルで、アタッチメントを選択。パスのデフォルトパスは、写真の入った images のフォルダを選択、プロジェクトからの相対パスをデフォルトからの相対パスに変更、統合ドキュメントビューアのデータ型を画像にする。

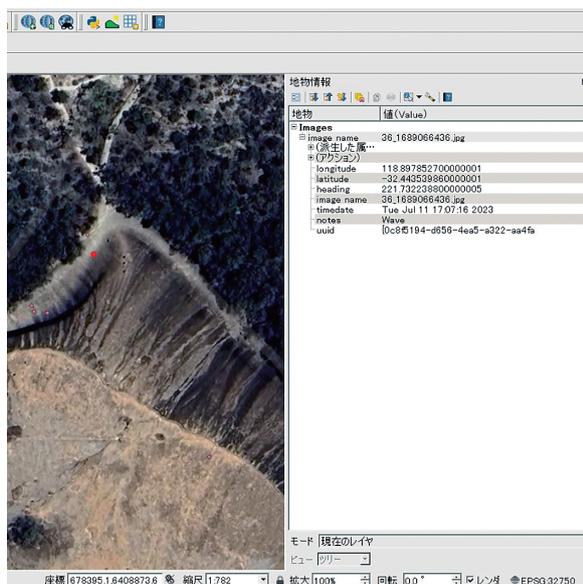
最後に OK をクリックして設定は終わり。



図附 9

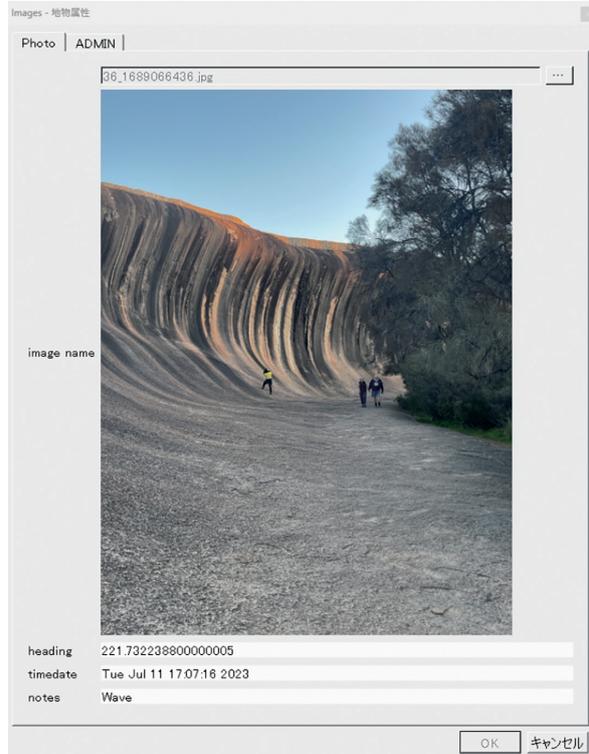
3.4 写真の表示

QGIS 画面で写真のレイヤをアクティブにして、ツールバーの地物情報表示アイコンを選択した状態でフィーチャをクリックすると、図附 10 が表示される。



図附 10

この左上の注射器（地物情報のすぐ下）をクリックすると、図附 11 のように写真が表示される。



図附 11

写真のレイヤの属性表を開き、新しいフィールドを追加して、そこに地点番号を入れ、それをラベル表示させれば、番号と写真とを対応させることが簡単にできる。