

ドローンによる高精度3Dモデルと片栗粉実験による 柱状節理形態の統計的観測とその成因に関する研究

柱状節理とは？

溶岩などの流動体が冷却され、固化し、体積が収縮するとき、ほぼ等間隔に核が形成される。その核を重心として形成される、六角形に近い形状のひび割れのことを柱状節理(写真1)という。さらに、表面から内部に向かって固化が進行し、六角柱に近い形状の岩石柱が形成される。(鈴木淑夫, 2005)



写真 1 爪木崎の柱状節理の空中写真

I—I 動機

伊豆半島は火山活動によって形成されたため、柱状節理が多く存在する。私たちが伊豆の国市に位置する、城山、白鳥山の柱状節理を観察したところ、六角形が主に存在している一方で、六角形以外の形状をした柱状節理も比較的多く存在した。貴重な地質遺産である柱状節理を統計的に解析することで、柱状節理が安定して六角形にならない原因をはじめとする、柱状節理の成因、形成状況を解明するために本研究を行った。

I—II 既存成果

昨年度は、比較的厚みのある溶岩やマグマ中にできた柱状節理を対象にした。爪木崎・大淀小淀に形成された柱状節理をドローンで観測し、データを収集・統計・考察した結果、柱状節理の角数が、冷却速度の均一さと相関があると結論付けた。

これを踏まえて今年度は次のような調査と実験を行った。

調査1 浮島海岸柱状節理のデータの収集、解析

調査2 海外の柱状節理データの収集、解析

実験1 片栗粉を用いた柱状節理再現実験による柱状節理形態の解析

II 実験概要、結果および考察

調査1 浮島海岸柱状節理のデータ収集、解析

《概要》

昨年度の研究では比較的厚みのある溶岩などに形成された柱状節理を調査したが、今年度は薄い岩脈に形成された静岡県賀茂郡西伊豆町にある浮島海岸の柱状節理（写真2、3）に対して、緯度・経度・高度情報を持った空中写真をドローン(DJI社 Phantom 4)を用いて撮影した。空中写真から、Agisoft社のPhotoScan Professionalというソフトウェアを用い3Dデータを作成した。3Dデータから、3Dデータの平面図であるオルソ画像を作成した。地理情報を閲覧、編集、分析することができるQGISというソフトウェアを用い、複数人でオルソ画像の判読を行い、232個の柱状節理の多角形データ(写真4)を手作業で作成した。そこから柱状節理の角数と面積データを下図のように収集し(表1)、各角数における面積を比較するために、縦軸を全体に対する個数の割合、横軸を角数とし、角数ごとグラフ化(グラフ1)した。さらに、昨年度の柱状節理のデータと比較した(グラフ2)



写真2：浮島海岸にできた柱状節理①



写真3：浮島海岸にできた柱状節理②

《結果》

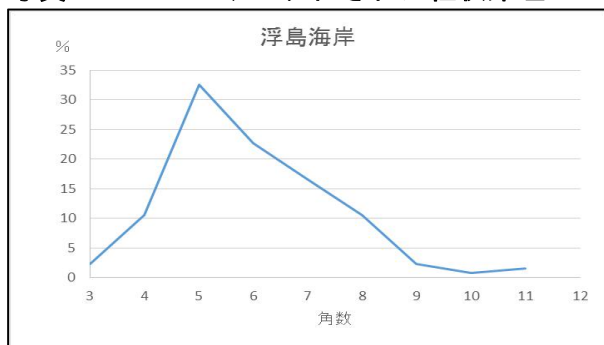
(グラフ1) から、昨年度調査した柱状節理では六角形が一番多いが、浮島海岸柱状節理では五角形が主に形成されており、ばらつきが多いことが分かった。



写真4：QGISでデータ化された柱状節理

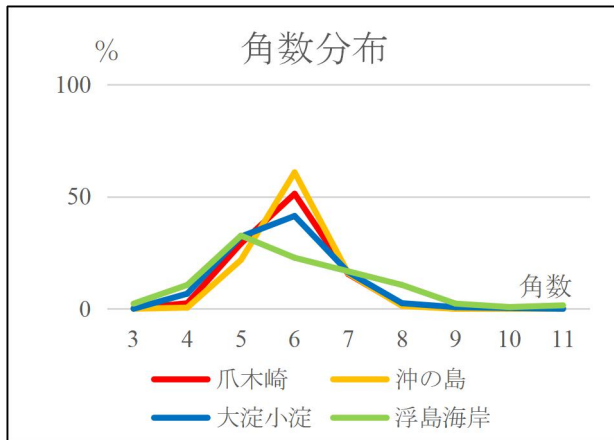
id	頂点	面積	周囲長	id	頂点	面積	周囲長
1	12	0.155421	1.66905	1	8	0.605809	2.882427
2	13	0.882519	4.01275	2	6	0.478159	2.721043
3	13	0.073055	1.04712	3	5	0.158048	1.583444
4	3	0.015213	0.59732	4	8	0.239823	1.584244
5	3	0.067358	1.20854	5	5	0.082553	1.254482
6	3	0.573484	2.25416	6	5	0.094784	1.308706
7	4	0.100947	1.36834	7	7	0.324178	1.943378
8	4	0.143732	1.6614	8	6	0.227027	1.905343
9	4	0.170284	1.7807	9	5	0.241749	1.934988
10	4	0.237702	1.95513	10	5	0.331833	2.349588
11	4	0.146349	1.61369	11	6	0.310588	2.209588
12	4	0.146349	1.70961	12	6	0.707936	3.165565
13	4	0.197813	1.98798	13	8	0.880647	3.764041
14	4	0.078829	1.31143	14	6	0.187178	1.65239
15	4	0.458705	2.78271	15	5	0.208487	1.762871
16	4	0.062	1.22247	16	7	0.160754	1.507165

表1：浮島海岸柱状節理の統計データ



グラフ1：浮島海岸の角数分布

《考察》



グラフ2

昨年度は比較的岩盤の厚い柱状節理を調査対象としており、浮島海岸は薄い岩脈でできているため冷却環境が悪く、そのことが角数分布のばらつきに由来するのではないかと考えられた。

調査2 海外の柱状節理データの収集、解析

《概要》

浮島海岸の柱状節理だけでは冷却状況による角数分布のデータの比較が難しいため、海外の文献から世界中の様々な柱状節理（図1、2）の角数分布に関するデータを収集し、（表2）グラフにまとめ、（グラフ3）浮島海岸柱状節理や昨年度調べた柱状節理との相関を調べた。

《結果》

文献を調べた結果、Burntisland dykeが薄い岩脈にできた柱状節理で、その他は厚い岩体にできた柱状節理であることが分かった。またグラフ3から海外の柱状節理も爪木崎柱状節理などと同様に六角形が一番多い角数分布となっていることが分かった。また浮島海岸柱状節理の角数分布は国内、海外の柱状節理と比べて尖度が小さいことが分かった。

角数	3	4	5	6	7	8
1 Burntisland dyke	6	33	50	24	3	0
2 Devil's Postpole	2	38	150	178	32	0
3 Proterozoic basalt flow	2	4	16	22	9	3
4 Giant's Causeway 1	0	6	49	102	40	4
5 Giant's Causeway 2	0	3	47	72	30	1

表2：海外の柱状節理の角数分布（単位：個）

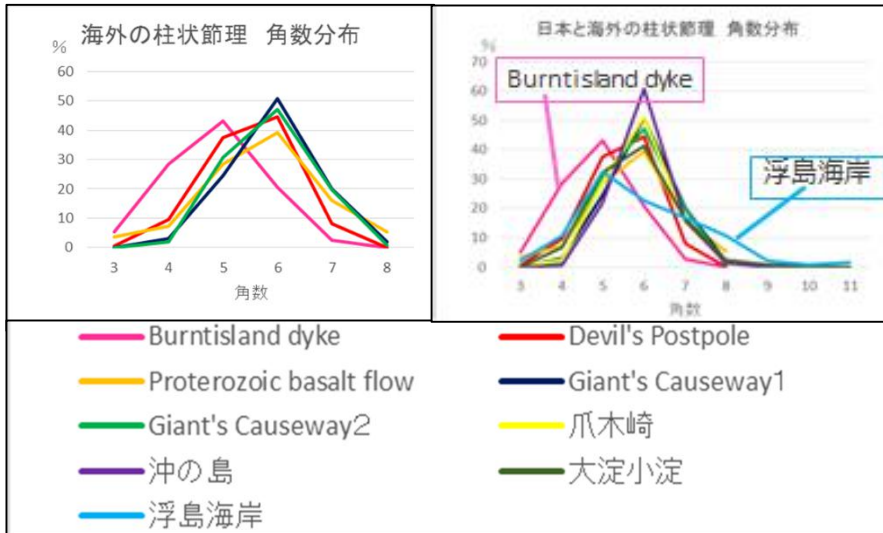


図1：Giant's Causeway（イギリス）



図2 : Devils Postpile (アメリカ)

《考察》



グラフ3

グラフ3から、比較的厚みのある溶岩やマグマ中にできた柱状節理は6角形が一番多く、尖度が大きい。岩脈の薄い Burntisland dyke や浮島海岸は角数にばらつきがあり、尖度が小さいことがわかった。そこから Burntisland dyke と浮島海岸が薄い岩脈でできており、冷却環境が悪かったことに由来するのではないかと考えた。

実験1 片栗粉を用いた柱状節理再現実験による柱状節理形態の解析

《概要》

粉体と流体の混合物が乾燥し収縮するとき、溶岩の体積が収縮するときと同様に冷却されるとき、核が形成され柱状節理となる(遠藤徳考ほか, 2017)。そこで粉体に片栗粉、流体に水を使用し、柱状節理を再現することにした。水と片栗粉の混合物をプラスチック製の容器(縦7cm×横20cm×高さ7cm)に入れ白熱電球を設置して人工的に柱状節理を作成した。今回は片栗粉水溶液を乾燥する段階で白熱電球を使用し、温度勾配をつけるために白熱電球を置く位置を変えた。(写真5, 6) 白熱電球によって本当に温度勾配ができているかを調べるためにサーモグラフィーカメラを用いて温度分布を調べた。(写真7) その結果形成される片栗粉柱状節理を撮影し複数人でQGISを用い手作業で柱状節理形状をデータ化した(写真8)。しかし、片栗粉柱状節理は自然に発生する柱状節理と異なり、きれいな形ができないので、面積から重心を求め、ボロノイ図形を作成することで、細かい凹凸の影響を除いた片栗粉柱状節理の形状を再現し、(表4) 面積、角数、熱源からの距離などのデータを収集し、グラフにまとめ分析した(グラフ4・5・6)。また、面積を熱源からの距離と比較するため、熱源を端に置いた場合と熱源を中央に置いた場合についてそれぞれ面積と熱源からの距離に関するグラフ(グラフ5・6)を作成した。さらに、角

数を熱源からの距離と比較するため三つの条件での角数と熱源からの距離に関するグラフ（グラフ7・8・9）を作成した。

実験の条件は次の通り（表3）である。

	1-1	2-2	3-2
片栗粉	300g	300g	300g
白熱球の位置	熱源を端に置いた場合	熱源を中央に置いた場合	インキュベータで均一に加熱した場合



※どの条件でも水を300グラム加えて乾燥させた。

表3

写真5：実験の様子①
(熱源を中央に置いた場合)



写真6：実験の様子②（熱源を端に置いた場合）

※ボロノイ分割について

隣り合う点を結ぶ線分の垂直二等分線を引き、各点の最近隣領域を分割する方法。また、この方法でできた図形をボロノイ図形（図3）という。

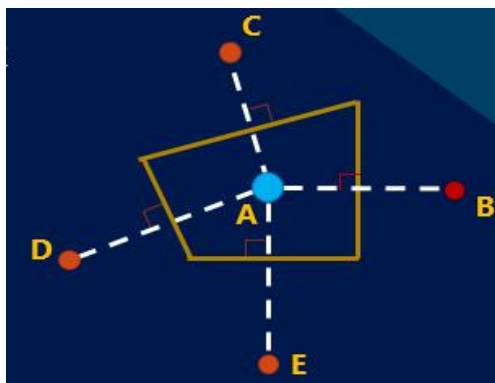


図3：ボロノイ図形

《結果》

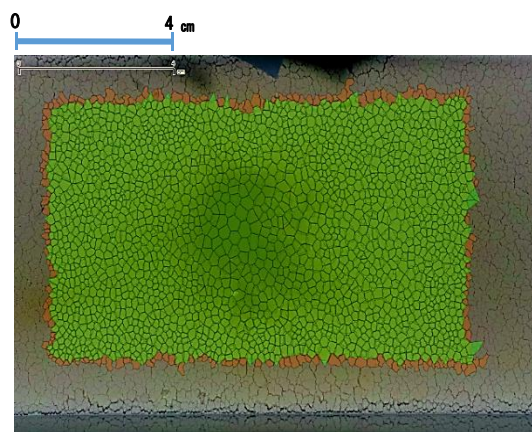
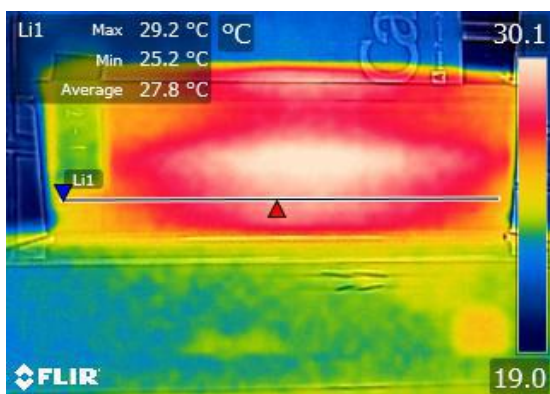
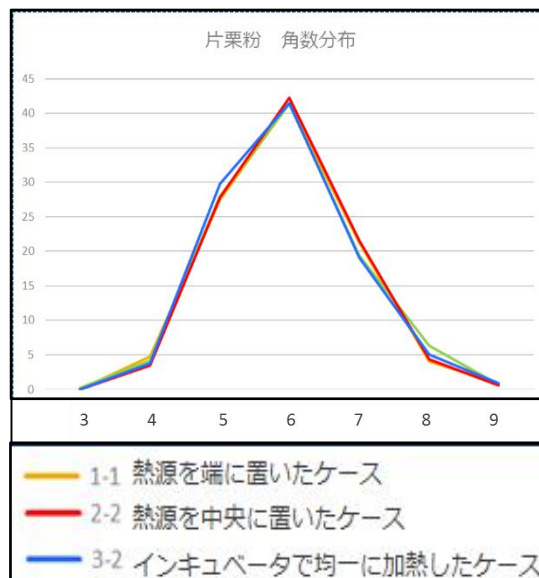


写真7：容器を真横から撮影した温度分布写真

写真8：ポロノイ分割した片栗粉柱状節理

	3	4	5	6	7	8	9	合計
1-1 端	0	28	162	244	125	24	5	588
2-2 中央	0	71	573	871	446	89	13	2063
3-2 均一に 加熱	0	28	224	312	144	38	7	753

表4：片栗粉柱状節理の角数分布（単位：個）

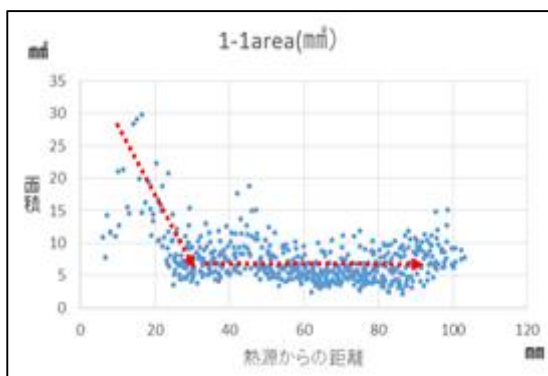


グラフ4：片栗粉柱状節理の画数分布

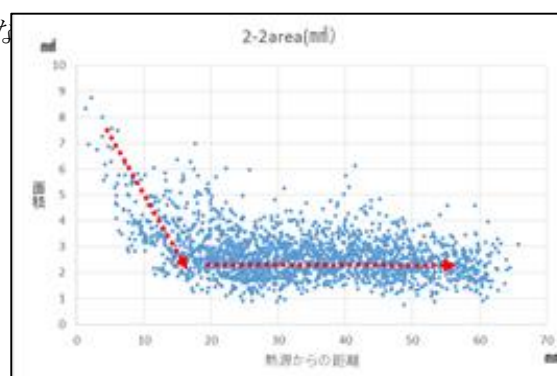
(写真4) から熱源である白熱電球に近いほど温度が高くなっており、白熱電球の位置を変えることで容器の中で温度勾配ができていることを確認できた。また、(表4・グラフ4) からどの条件下でも6角形が一番多く、グラフの形がほぼ一致していることが分かった。

《考察》

(グラフ5・6) から、不均一に加熱した二つの資料は熱源に近いところほど面積が大きくな

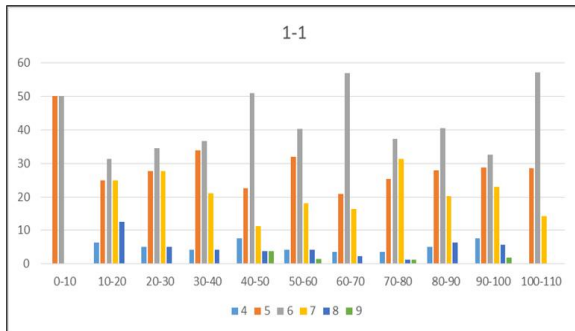


グラフ5：熱源を端に置いた場合

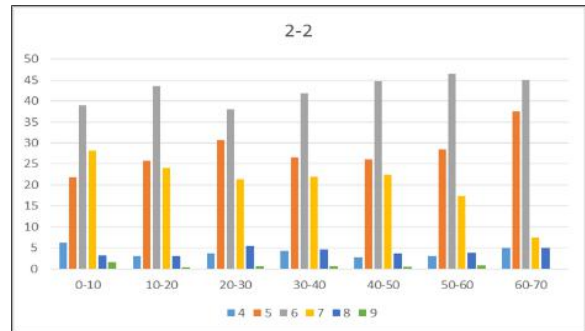


グラフ6：熱源を中央に置いた場合

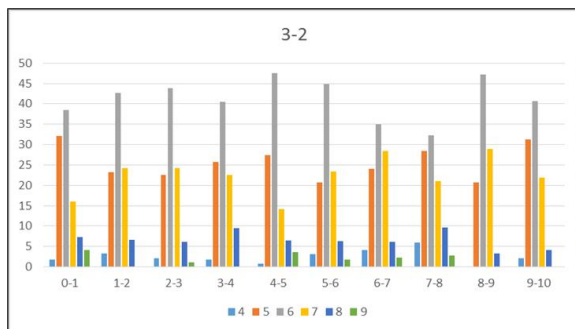
また（グラフ7・8・9）より、グラフから均一に加熱した場合は、6角形が突出した傾向があるが、熱源を端に置いた場合と中央に置いた場合は、均一に加熱した場合と比べて5角形と6角形の分布に差がなく、角数のばらつきが大きくなったことがわかった。このことから、加熱が均一でなかったことが柱状節理の角数の分布に関係しているのではないかと考えた。



グラフ7：熱源を端に置いた場合



グラフ8：熱源を中央に置いた場合



グラフ9：インキュベータで均一に加熱した場合

Ⅲ 全体を通しての考察

昨年度調査した柱状節理、浮島海岸、海外の柱状節理の統計から、浮島や Burntisland dyke の岩脈のように、薄いほうが角数分布にばらつきができ、冷却速度が均一であることが6角形が多く分布する条件であると考えられた。また、片栗粉実験でも、加熱温度に不均一さを持たせた柱状節理には角数にばらつきが生まれたので、実際の柱状節理の形成状況を片栗粉実験によっても再現することができた。

さらに、柱状節理の形成状況を統計解析により、その柱状節理の冷却環境について明らかにできる可能性があると考えられた。

Ⅳ 結論

柱状節理は厚い岩体ほど冷却速度が均一になるため、6角形が多く分布し、逆に薄い岩脈などでは6角形の分布が少なくなり、全体的に角数のばらつきが大きくなる。また、岩体や岩脈の厚さによる冷却速度の不均一さが、柱状節理の面積にもばらつきを生じさせる。

Ⅴ 謝辞

本研究を進めるに当たり、指導をしてくださった伊豆半島ジオパーク推進協議会事務局専任研究員、鈴木雄介様からは多大な助言を賜りました。厚く感謝を申し上げます。また我々の研究が円滑に進むよう力添えしてくださった渡邊充司先生にも感謝の意を表します。

VI 参考文献・引用

- ・地形現象のモデリング海底から地球外天体まで 第9章 柱状節理 — 火成岩の亀裂とそのモデル実験 水口 毅
- ・ Modelling the evolution of columnar joints Paul Budkewitsch and Pierre-Yves Robin
- ・ 鈴木淑夫, 岩石学辞書, 朝倉書店, 2005
遠藤徳考ほか, 地形現象のモデリング「海底から地球外天体まで」, 名古屋大学出版会, 2017
- ・ And TitanicExperience Tour From Belfast Port
- ・ Photos, Diagrams & Topos : SummitPost