

活動の成果概要

令和2年度年度 土佐清水ジオパーク構想活動支援事業

【事業対象者】 山本 由弦

【所属】 神戸大学理学研究科

活動の名称 竜串海岸が記録する足摺花崗岩体の上昇過程

-三崎層群の熱伝導度測定からのアプローチ-

【活動の成果概要】 図表 (カラー) 使用可

地質概説

土佐清水ジオパーク構想エリア南部の地質は、上部始新統～下部中新統の清水層とそれを不整合で覆う三崎層群によって構成される。エリア内の清水層は、泥岩優勢の砂泥互層が支配的で、オリストストロームと報告されている混在岩を挟むが、いわゆる異地性岩体に相当するオリストリスは含まれず、砂岩クラストのみから構成されるそれらは Broken Formation (Ramsey, 1984) に相当する。泥質基質は著しい非対称の剪断組織を示し、砂岩クラストの定向配列を伴うことから、多くがテクトニックメランジュに相当する。また、整然層においてもスレート劈開が顕著に発達している。

三崎層群は、下位から泥岩優勢砂泥互層の養老層、砂岩優勢砂泥互層の浜益野層、そして砂岩が著しく卓越する竜串層に区分され、その総層厚は 3,000 m に達する (甲藤・平、1978 ; 木村、1985 ; 奈良、2016) 。養老層と浜益野層は、硬質砂岩で構成される一方、竜串層の砂岩は軟質で、波浪や人間活動による地形改編を受けている。年代学的検討はほとんど行われていないが、唯一、内陸の上野地域において最下部の養老層から前期中新世後期に相当する浮遊性有孔虫が報告されている (木村、1985) 。足摺岬においては花崗岩体が貫入しており、その年代は 12.95 ± 0.06 - 13.12 ± 0.09 Ma と報告されている (Shinjoe et al., 2010) 。

土佐清水ジオパーク構想エリアの地質は、「①海山の衝突」と「②激動の日本列島」、そして「③未知のマグマ活動」が記録されていると考えられている。しかしながら、④

それらはいつ起こったのか？、⑧両者の時間的、地史的関係はどうか？については、未解明の部分がある。我々は、2019年に土佐清水市の研究助成を受け、主に三崎層群の堆積年代と被熱温度の検討を行った。その結果、三崎層群最上部の竜串層においては、下位の浜益野層境界から西に向かって（足摺岬から離れるに従って）最高被熱温度が明らかに減少していく、興味深いデータを得た（山本・千代延、2020）。これは、上記①と②のエリアが「③のイベントを記録していること」、そして「その運動像について貴重な情報を与えてくれること」を示している。そこで本研究では、ジオパーク構想エリア内の地質体について熱伝導度を検討した。

手法

調査地域において現地調査を行い、10 cm四方程度の岩塊を定方位にて計 26 地点で採取した。風化の影響を最小限にするために、新鮮な岩石が露出する波打ち際を、干潮時に採取した。なお、試料採取には環境省土佐清水自然保護官事務所および高知県幡多土木事務所に申請を行った。

1. 熱伝導度

熱伝導度の計測用試料は、以下の手順で準備した。採取した試料の中から各層に特徴的な岩相を示す 17 地点の岩石試料を、実験室内で地層面に対して垂直方向に直径 4 cm の円柱状に成形する。さらに、それらを高さ 3 cm にカットした。このため、成形された測定面は、地層面に平行な面となる。接面をストルアス社の MD グラインダーシステムを用いて # 500 まで研磨した。このシステムは研磨粉を使用しないため、測定面のコンタミネーションを最小化できる。これらを水に浸けて、真空デシケーターを用いて 1 週間以上かけて飽和状態とした。

測定は、京都大学工学研究科の TPS1500 を用いた Hot-Disk 法 (Gustafsson 1991; Iso 2008) で測定した。1 接面につき 7 回行い、熱的安定性を確保するために 2 回目以降計 6 回の測定データを用いて熱伝導度を算出した。それぞれの採取地点につき 2 面以上の測定を

行い、その平均をその地点の熱伝導度とした。

2. 空隙率

空隙率 (P) はアルキメデスの原理を利用して体積を測定することで求めた。試料は以下のように準備した。全 26 地点の岩石試料を実験室内で直径 25 mm、高さ約 20 mm の円柱状に成形した。これらを水に浸けて、真空デシケーターを用いて 2 週間以上かけて飽和状態とした。これらの試料について、水中で測定した水中重量 (W_{water})、水から出して表面の水分を拭き取った状態で測定した湿潤重量 (W_{wet})、さらに 80 °C のオーブンで約 1 週間かけて完全に乾燥させて測定した乾燥重量 (W_{dry}) を電子天秤で測定した。これらの測定値から水の密度を 1 g/cm³ と仮定して以下の関係式から空隙率を算出した。

$$P = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{V_{Bulk}} \times 100 [\%]$$

全岩体積 (V_{Bulk}) は以下の式で与えられる。

$$V_{Bulk} = \frac{(W_{wet} - W_{water})}{\rho_{water}}$$

結果

17 地点全 65 面における熱伝導度を測定した。砂岩は竜串層 4 地点、浜益野層 3 地点、養老層 2 地点、四万十帯 2 地点で採取し、泥岩は養老層 3 地点、四万十帯 3 地点で採取した。

熱伝導度測定を行った 17 地点における熱伝導度と花崗岩からの距離の関係を図 1 に、その結果を表 1 に示す。花崗岩からの距離は図 2 のように花崗岩の露出境を近似した円の中心 (図中★印) と試料採取地点を結び、その距離から近似円の半径を引いた距離のことである。この近似円は、重力異常 (産総研、2013) と調和的である。

砂岩における熱伝導度は東部の四万十帯 (あしずり港北)、浜益野層、養老層の試料

で 3.20-3.51 W/mK と同程度であった。一方竜串層の試料は、Thm20 (3.37 W/mK) をのぞいた 3 地点で 2.40-2.73 W/mK と低い値を示した。また、三崎断層を挟んだ西部の四万十帯 (片粕大橋) は、4.28 W/mK と高い値を示した。

26 地点において、四万十帯 5 地点 39 個、養老層 8 地点 38 個、浜益野層 5 地点 50 個、竜串層 5 地点 50 個、全 170 個のサンプルを測定した。測定したこれらの結果を表 2 と図 3 に示す。

空隙率は砂岩で高く、泥岩で低い傾向を示した。また、三崎層群の砂岩は四万十帯より空隙率が高く、下部の養老層から上部の竜串層にかけて連続的に上昇する傾向がみられた。泥岩は養老層で 1.7-3.84 %、四万十帯で 1.35-2.16 %と同程度の値を示した。

全試料の粒子密度が $2.68 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ で一定であるため、バルク密度は空隙率とほぼ反対の傾向を示し、バルク密度は同一層内において砂岩で低く泥岩で高い傾向を示した。

熱伝導度と空隙率の関係を図 4 に示す。砂岩において、熱伝導度と空隙率の間には負の相関 ($R^2=0.76$) が確認できたが、泥岩では熱伝導度、空隙率ともに変化が少なく、同程度の値を示した。また、泥岩は砂岩の熱伝導度より低い値を示す。

参考

前年度 (山本・千代延、2020) と同様にビトリナイト反射率の追加検討も行ったので、ここで併せて報告する。試料採取と測定方法は、山本・千代延 (2020) と同様に Yamamoto et al. (2017) に従った。

山本・千代延 (2020) に今年度追加測定した 4 試料を加えたビトリナイト反射率から計算された最高被熱温度と花崗岩からの距離の関係を図 5 に示す。なお、最高被熱温度の計算は、被熱時間を 100 万年と仮定し、Sweeny and Berhnan (1990) の計算式を用いた。最高被熱温度は竜串層以外では 253-314°C、竜串層で 142-214°Cと特徴的に低い値を示す。また、竜串層内で花崗岩からの距離にしたがって徐々に被熱温度が低下していることから、竜串層の被熱温度分布は花崗岩貫入時に受けた熱の影響を強く反映している

考えられる。

結果の意義と課題

ビトリナイト反射率の結果は、前年度研究（山本・千代延、2020）と整合的であり、竜串層と浜益野層上部の詳細な温度分布を明らかにした（図5）。これによって、清水層、養老層、浜益野層はほぼ一様に最高被熱温度が約300度であると単純化することができる。熱伝導度も、清水層、養老層、浜益野層はほぼ一様に砂岩が3.5 W/mK、泥岩が2.5-3.0 W/mKに単純化できることが示された。

一方その上位層である竜串層においては、浜益野層との境界付近から最高被熱温度が急減し、最終的に約140度程度に収束すること、が示された。

つまり、花崗岩による被熱の影響は、①花崗岩から浜益野層上部までが約300°Cに加熱される段階と②竜串層が浜益野層上部からの加熱を受けて東から徐々に最高被熱温度が上昇していく段階の2つに大別できる。それぞれの熱伝導度も単純化できるため、この被熱過程を計算することができる。

一方で、全体がほぼ一様な砂岩で合成されている竜串層に比べて、泥岩と砂岩の互層である清水層、養老層、浜益野層の正確な熱伝導度を検討するには、その砂泥比を検討する必要がある。また、花崗岩と清水層の境界付近（大浜南方）、被熱温度が急変する浜益野層と竜串層の境界付近（千尋岬南部）の被熱温度と熱伝導度の精査も求められる。これらを次年度以降の課題として挙げておきたい。

参考文献

- 木村公志, 1985. 四国南西部の第三系清水層および三崎層の層序および堆積相. *地質学雑誌*, **91**, 815-831.
- 甲藤次郎・平朝彦, 1979. 四国西南部の三崎層群. 高知大学学術研究報告 自然科学編, **27**, 165-180.
- 奈良正和・楠橋直・岡本隆・今井悟, 2017. 久万層群と三崎層群: 日本海拡大期の西南日本弧前弧中新統が記録するもの. *地質学雑誌*, **123**, 471-489.

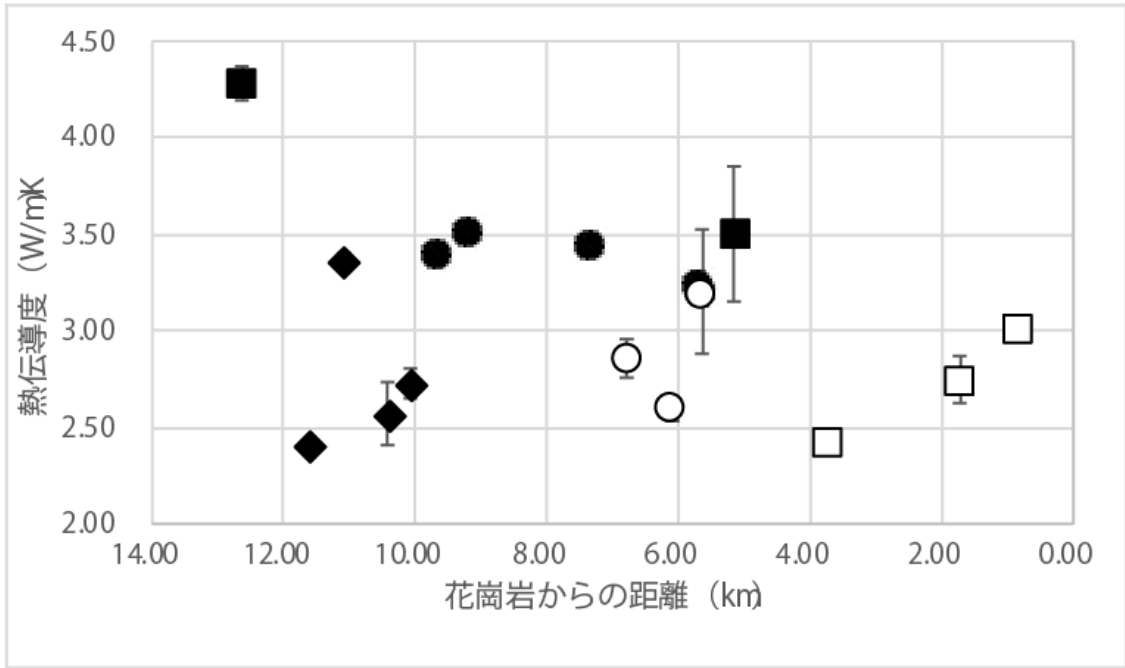
- Raymond, L.A., 1984. Classification of mélanges. In: Raymond, L.A. (Ed.), *Mélanges: their nature, origin and significance*. Boulder, Colorado: Geological Society of America Special Paper, vol. 198, pp. 7–20.
- Shinjoe, H., Orihashi, Y., Sumii, T., 2010. U-Pb zircon ages of syenitic and granitic rocks in the Ashizuri igneous complex, southwestern Shikoku: Constraint for the origin of forearc alkaline magmatism. *Geochem. Jour.*, **44**, 275-283.
- Sweeney, J. J., Burnham, A. K., 1990. Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Re-reflectance Based on Chemical Kinetics. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 74, 10, 1559-1570.
- 山本由弦・千代延俊, 2020, 土佐清水ジオパーク地質のきほん. 2019年度土佐清水ジオパーク構想活動支援事業報告書.
- Yamamoto, Y., Hamada, Y., Chiyonobu, S., Kamiya, N., Ojima, T., Saito, S., 2017. Geothermal structure of the Miura-Boso Plate subduction margin, central Japan. *Tectonophysics*, **710-711**, 81-87, 10.1016/j.tecto.2016.11.004.

Sample	lithological unit	Locality	Number	Them con. [W/mK]	SD(Them con.)	Host
Thm2	竜串層	竜串	3	2.73	0.08	sandstone
Thm4	竜串層	竜串	3	2.57	0.16	sandstone
Thm20	竜串層	海中展望塔	3	3.37	0.04	sandstone
Thm21	竜串層	弁天島西	6	2.40	0.00	sandstone
Thmm1	浜益野層	落窪	4	3.44	0.04	sandstone
Thm9	浜益野層	三崎浦	3	3.39	0.06	sandstone
Thm15	浜益野層	浜益野	3	3.51	0.03	sandstone
Thm7	養老層	養老港	3	3.20	0.32	mudstone
Thm24	養老層	養老港	3	3.19	0.06	sandymud
Thm25	養老層	養老港	4	3.24	0.07	sandstone
Thm32	養老層	松崎	4	2.59	0.06	mudstone
Thm33	養老層	松崎	3	2.86	0.10	mudstone
Thm6	四万十帯	あしずり港北	3	3.50	0.35	sandstone
Thm19	四万十帯	片粕大橋	4	4.28	0.09	sandstone
Thm22	四万十帯	中浜	4	2.75	0.12	mudstone
Thm23	四万十帯	尾浦崎	2	2.42	0.06	sandymud
Thm31	四万十帯	大浜	3	3.01	0.06	mudstone

表1: 土佐清水ジオパーク構想地域から得られた熱伝導度

Sample	lithological unit	Locality	Number	Porosity[%]	SD(Porosity)	B.Density	SD(B.Density)	Host
Thm2	竜串層	竜串	3	11.88	0.55	2.37	0.02	sandstone
Thm3	竜串層	竜串	9	16.64	0.45	2.23	0.01	sandstone
Thm4	竜串層	竜串	7	13.88	1.00	2.32	0.03	sandstone
Thm20	竜串層	海中展望塔	11	9.86	0.34	2.40	0.01	sandstone
Thm21	竜串層	弁天島西	13	16.80	0.98	2.20	0.03	sandstone
Thm1	浜益野層	落窪	21	4.41	0.18	2.54	0.01	sandstone
Thm9	浜益野層	三崎浦	2	8.40	0.11	2.44	0.00	sandstone
Thm10	浜益野層	落窪西	9	6.43	0.35	2.47	0.01	sandstone
Thm11	浜益野層	落窪西	2	3.00	0.36	2.60	0.01	sandstone
Thm15	浜益野層	浜益野	18	6.68	0.30	2.48	0.01	sandstone
Thm7-1	養老層	養老港	1	1.70	0.00	2.66	0.00	mudstone
Thm13	養老層	松崎	7	3.22	1.06	2.61	0.03	sandstone
Thm14	養老層	落窪東	3	2.78	0.13	2.64	0.00	sandymud
Thm24	養老層	養老港	4	2.23	0.35	2.64	0.02	sandymud
Thm25	養老層	養老港	6	2.71	0.62	2.60	0.02	sandstone
Thm26	養老層	養老港	7	3.84	0.32	2.54	0.01	sandstone
Thm32	養老層	松崎	5	1.82	0.11	2.69	0.01	mudstone
Thm33	養老層	松崎	5	2.58	0.32	2.65	0.01	mudstone
Thm6	四万十帯	あしずり港北	11	1.68	0.29	2.66	0.01	sandstone
Thm19	四万十帯	片粕大橋	5	0.76	0.10	2.68	0.01	sandstone
Thm22	四万十帯	中浜	6	1.35	0.12	2.71	0.00	mudstone
Thm23	四万十帯	尾浦崎	9	2.16	0.21	2.68	0.03	sandymud
Thm31	四万十帯	大浜	8	1.49	0.15	2.71	0.01	mudstone

表2: 土佐清水ジオパーク構想地域から得られた空隙率、バルク密度。試料名は、表1と同じ。



- ◆: 竜串層
- : 浜益野層/養老層(砂岩)
- : 浜益野層/養老層(泥岩)
- : 四万十帯(砂岩)
- : 四万十帯(泥岩)

図1: 熱伝導度と花崗岩からの距離の関係

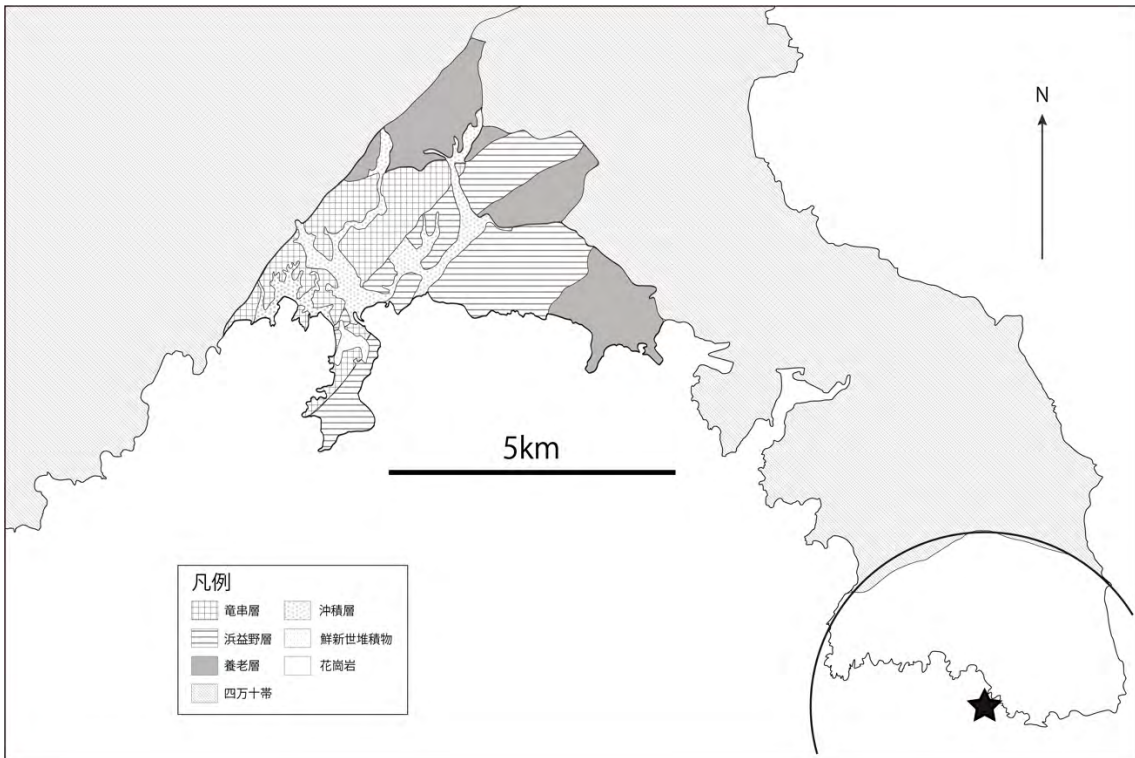
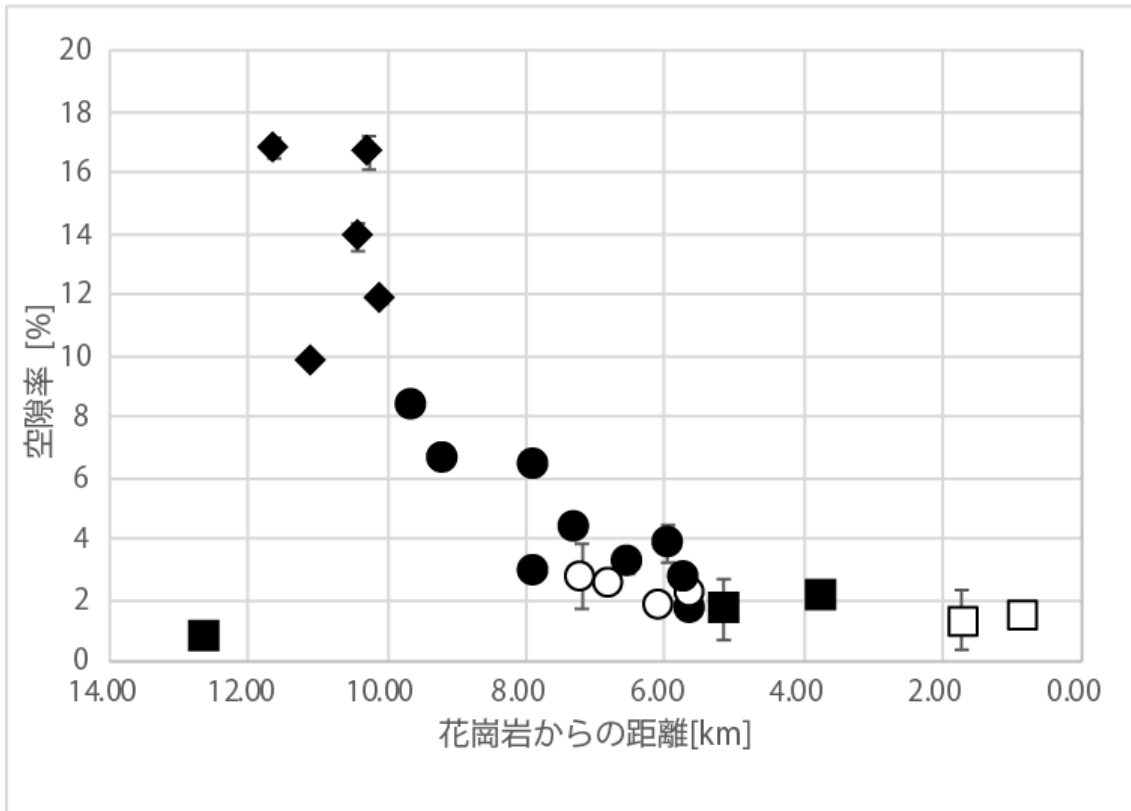
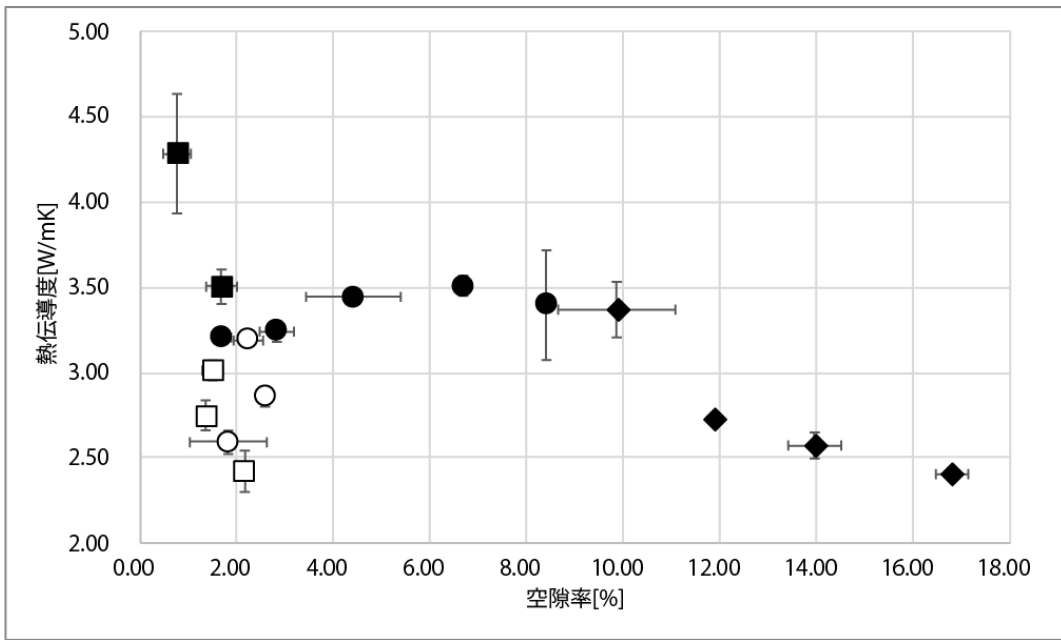


図2: 試料採取点から花崗岩境界の距離の求め方。花崗岩体の中心部(星印)と採取地点を結び、岩体の半径を引いて求める。



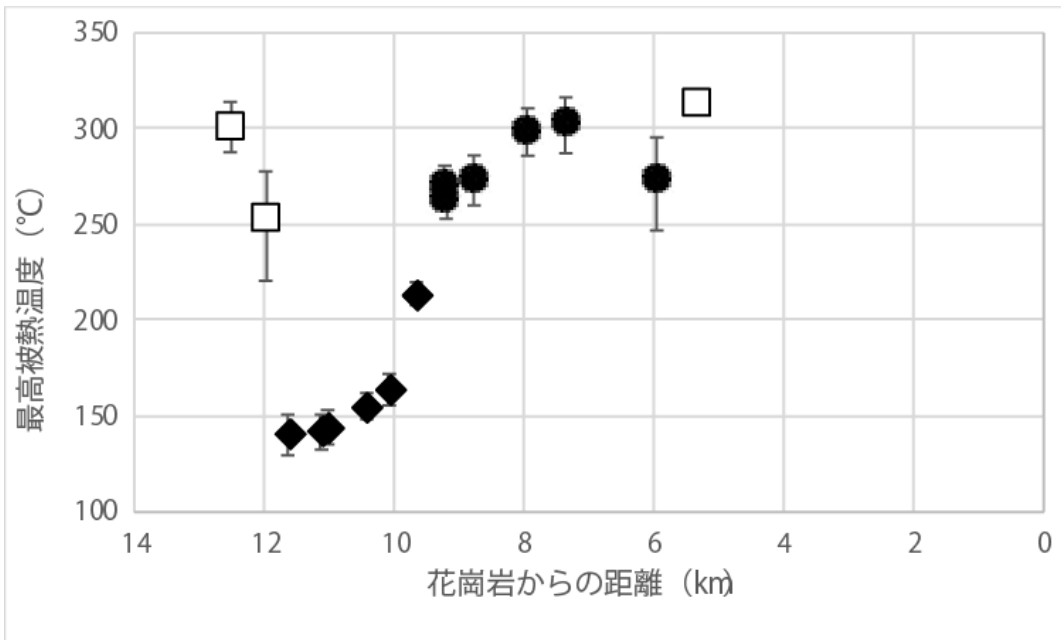
- ◆: 竜串層
- : 浜益野層/養老層 (砂岩) ■: 四万十帯 (砂岩)
- : 浜益野層/養老層 (泥岩) □: 四万十帯 (泥岩)

図3: 空隙率と花崗岩からの距離の関係



- ◆: 竜串層
- : 浜益野層/養老層 (砂岩)
- : 浜益野層/養老層 (泥岩)
- : 四万十帯 (砂岩)
- : 四万十帯 (泥岩)

図4: 熱伝導度と空隙率の関係



- ◆: 竜串層
- : 浜益野層/養老層 (砂岩)
- : 浜益野層/養老層 (泥岩)
- : 四万十帯 (砂岩)
- : 四万十帯 (泥岩)

図5: ビトリナイト反射率測定