

2.3 沖縄コンベンションセンター

コンベンションセンターでは、一次側を昨年度本事業で設置した熱交換井を含めたボアホール方式、二次（室内）側を放射パネル方式をメインとした地中熱利用を検討している。

当該施設管理者からのヒアリングにより、「今年度は機材の準備のみを行い、次年度以降に機器の設置と実証試験を行う」との情報を得た。

放射パネルは、近年注目されている技術の一つで、対流による「ドラフト」がないため、放射熱による均一な快適性と穏やかな室内環境が作れる、としている。但し、放射パネルは、放熱器の表面を結露させることで、湿度をさげることとなる。そのため、結露水を排水する工夫が必要となる。

コンベンションセンターの取り組みは、放射パネルの沖縄における適用性についての貴重な情報源であり、次年度以降継続的に情報を収集することとなる。

2.4 県立博物館・美術館における地中温度測定

県立博物館・美術館では、昨年度業務で設置した地中温度計の計測を平成 29 年 6 月から平成 30 年 2 月まで毎月 1 回の頻度で実施した。結果は表 2.4.1 地中温度測定記録表に整理してある。

1) 不易層の深度と温度

各月の深度方向の地中温度分布とその月毎の推移を図 2.4.1 に示す。各月の測定値は、地表に近い部分は測定値がばらつくが、10m以下の深度ではほぼ一定となる。この結果から、10m以下を本地域の不易層深度考えてよい。これは一般的に言われている出現深度と同じ傾向である。

不易層温度は年間平均気温に近いと言われるが、調査地点の不易層温度は 25℃～26℃を示し、那覇の年間平均気温 (23.1℃ : 1981～2010) に比べて 2～3 度近く高い。その理由はよく分からないが、地下構造物を有する博物館・美術館の建物が熱源となっているか、比熱が大きい (熱を蓄えやすい) 泥岩の特性によるものかも知れない。

2) 深度別の地中温度変化

各深度別の地中温度の月毎の推移を図 2.4.2 に示してある。図には、観測期間中の那覇市の月平均気温も併せて示してある。

1m深度の地中温度は、地表気温の推移に追随する形で敏感に変化する。最高温度は 8 月の 30.2℃、最低温度の 2 月の 20.1℃で、温度差は 10 度以上に達する。2m深度では 9 月と 2 月の温度差が 5.6 度となり、以下 3m : 4.3 度、5m : 1.8 度、7m : 1.0 度と、深度と共に温度差は小さくなる。

最高温度の出現時期に着目すると、1m深度 : 8 月、2m : 9 月、3m : 9～10 月、5m : 9～10 月となり、地表からの熱がゆっくりと地下に伝播する状況が確認される。7m以深ははっきりとしたピークは出現していない。

この結果から、地表気温と浅部地中温度の浅部地中熱利用を検討する場合、地表と地中の縦方向の熱交換あるいは熱移流は、パラメータとして無視できないことが想定される。

また、福島を観測事例では、「地中の最高温度が冬期、最低気温が夏期に出現し、半年のタイムラグは地中熱利用には有利である」との情報もある。

表2.4.1 地中温度測定記録表

場所：沖縄県立博物館・美術館

深度 (GL-m)	29年 6月 29日 11時			29年 7月 21日 10時			29年 8月 15日 10時			29年 9月 27日 10時			29年 10月 24日 11時			深度 (GL-m)
	計測温度(°C)			計測温度(°C)			計測温度(°C)			計測温度(°C)			計測温度(°C)			
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	
1.0	27.7	27.7	27.7	29.5	29.2	29.4	30.3	29.9	30.2	29.6	29.4	29.5	27.9	27.7	27.8	1.0
2.0	25.8	25.6	25.7	27.1	27.0	27.1	28.4	28.2	28.3	29.5	29.4	29.4	29.1	28.9	29.0	2.0
3.0	25.3	25.2	25.3	25.8	25.7	25.7	27.1	26.9	27.0	28.6	28.6	28.6	28.5	28.4	28.5	3.0
5.0	25.2	24.9	25.1	25.4	25.3	25.3	25.5	25.1	25.3	26.9	26.8	26.9	27.0	26.8	26.9	5.0
7.0	25.4	24.9	25.1	25.4	25.2	25.3	25.4	25.2	25.3	26.1	26.0	26.0	26.0	25.6	25.9	7.0
10.0	25.5	25.3	25.4	25.6	25.5	25.5	25.6	25.4	25.4	25.9	25.7	25.8	25.8	25.6	25.7	10.0
15.0	25.4	25.0	25.3	25.7	25.5	25.6	25.5	25.4	25.4	26.0	25.9	25.9	25.7	25.7	25.7	15.0
20.0	25.3	25.0	25.2	25.4	25.3	25.4	25.4	25.2	25.3	26.0	25.7	25.9	25.8	25.7	25.7	20.0
外気温	31.8	31.2	31.5	33.3	31.7	32.7	32.7	32.1	32.4	31.6	31.2	31.4	27.8	27.5	27.7	外気温

深度 (GL-m)	29年 11月 21日 10時			29年 12月 13日 10時			30年 1月 16日 10時			30年 2月 7日 10時			年 月 日 時			深度 (GL-m)
	計測温度(°C)			計測温度(°C)			計測温度(°C)			計測温度(°C)			計測温度(°C)			
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	
1.0	25.2	25.0	25.1	22.8	22.6	22.7	21.1	20.9	21.0	20.2	20.0	20.1				1.0
2.0	27.2	27.0	27.1	26.2	26.2	26.2	24.6	24.4	24.5	23.8	23.7	23.8				2.0
3.0	26.9	26.8	26.8	26.4	26.3	26.4	25.4	25.2	25.3	24.7	24.6	24.7				3.0
5.0	26.8	26.6	26.7	26.4	26.2	26.3	25.9	25.7	25.8	25.7	25.6	25.6				5.0
7.0	26.1	25.9	26.0	25.9	25.6	25.8	26.2	26.1	26.1	25.9	25.8	25.9				7.0
10.0	25.5	25.4	25.5	25.3	25.2	25.3	25.6	25.4	25.5	26.1	26.1	26.1				10.0
15.0	25.3	25.2	25.2	25.1	25.0	25.1	25.4	25.3	25.4	25.9	25.8	25.8				15.0
20.0	25.2	25.1	25.2	24.9	24.8	24.9	25.4	25.3	25.4	25.8	25.8	25.8				20.0
外気温	22.8	22.4	22.6	20.0	19.5	19.7	21.8	21.5	21.7	14.7	14.4	14.6				外気温

※各深度の計測時間は、通電後3分～6分とし、その間の最高、最低、平均の温度を計測。

月別地中温度

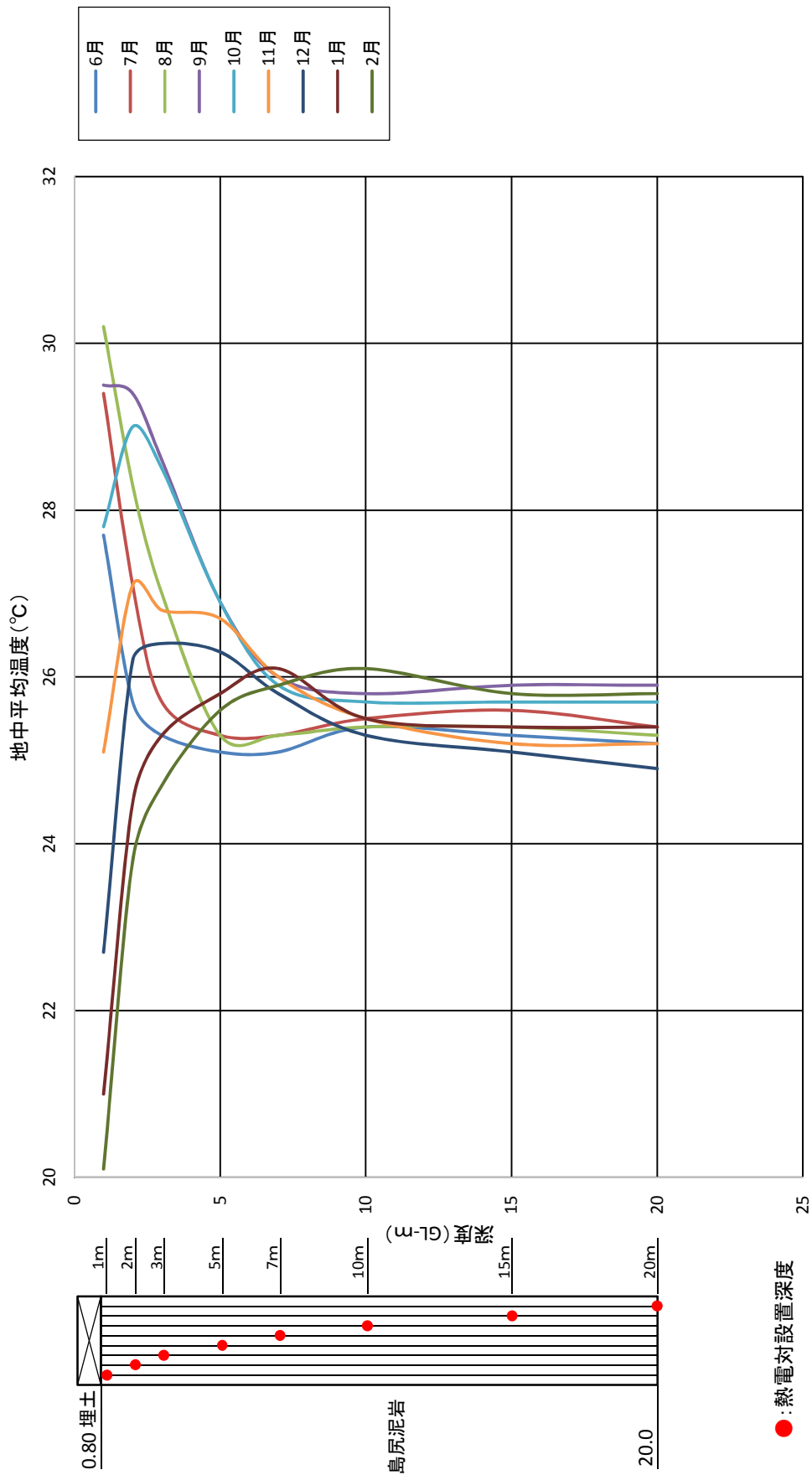


図2.4.1 地中温度の月別変化

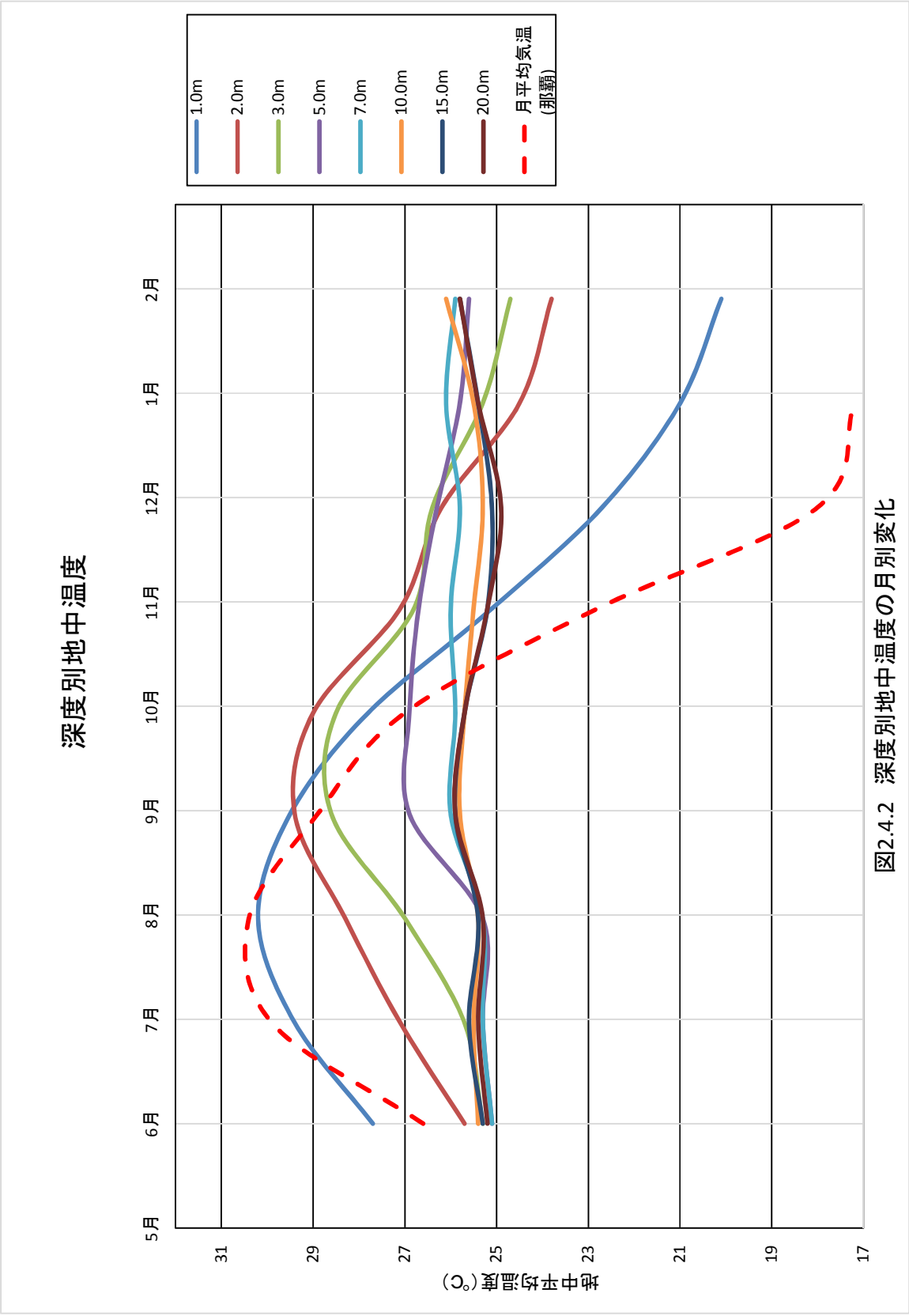


図2.4.2 深度別地中温度の月別変化

3. 熱物性に関する情報収集

3.1 ボーリング調査

熱物性試験の試料を得るため、赤土の分布する沖縄島北部、図 3.1.1 に調査地を示す地点でコア採取ボーリングを実施した。



図 3.1.1 ボーリング調査位置図

調査結果は、図 3.1.2 ボーリング柱状図に示してあるが、地盤状況は次のとおりである。

0～GL-4.5m：沖縄島北部の地表部に広く分布する段丘堆積物の「国頭礫層」である。礫層と言っても、粘土が主体で、砂分と礫を含む。砂分は細砂が主で、僅かに含む細円礫は石英である。明赤褐色～明黄褐色を呈する粘性土であり、基盤岩の風化土と共に「赤土」と呼ばれている。

GL-4.5～GL-20m：沖縄島北部の東側に広く分布する国頭層群の「嘉陽層」である。嘉陽層は、古第三紀始新世（5,600～3,400 万年前）の堆積物と言われ、砂岩や頁岩、それらの互層から成る。調査地では、表面近くの完全に粘性土化した強風化岩から、孔底に向かって岩芯に原岩色の灰色を残す中風化岩までが採取される。色調は明黄褐～明褐色で、粘性土化した強風化岩は国頭礫層と共に「赤土」と呼ばれている。

掘削中は削孔水を使うため、孔内水位が観測されているが、20m深度までに、地下水は分布しない。

ボーリング柱状図

調査名 平成29年度 地中熱を利用した省エネ技術の開発・普及事業委託業務

事業・工事名

ボーリング名	29B-1	調査位置	沖縄県国頭郡金武町金武10301地内			北緯	26° 27' 56.9"
発注機関	沖縄県環境部 環境再生課	調査期間	平成 29年 8月 28日 ~ 29年 8月 31日	東経	127° 56' 27.6"	ボーリング責任者	池村 利彦
調査業者名	中央開発・ワールド設計共同企業体 電話 (098-861-6553)	現場代理人	川満 和輝	ア コ 鑑 定 者	ハンマー 落下用具	ポンプ	
孔口標高		現代試験エンジン	YBM-05D				
総掘進長	20.00m	使用機種					

ボーリングNo

シートNo

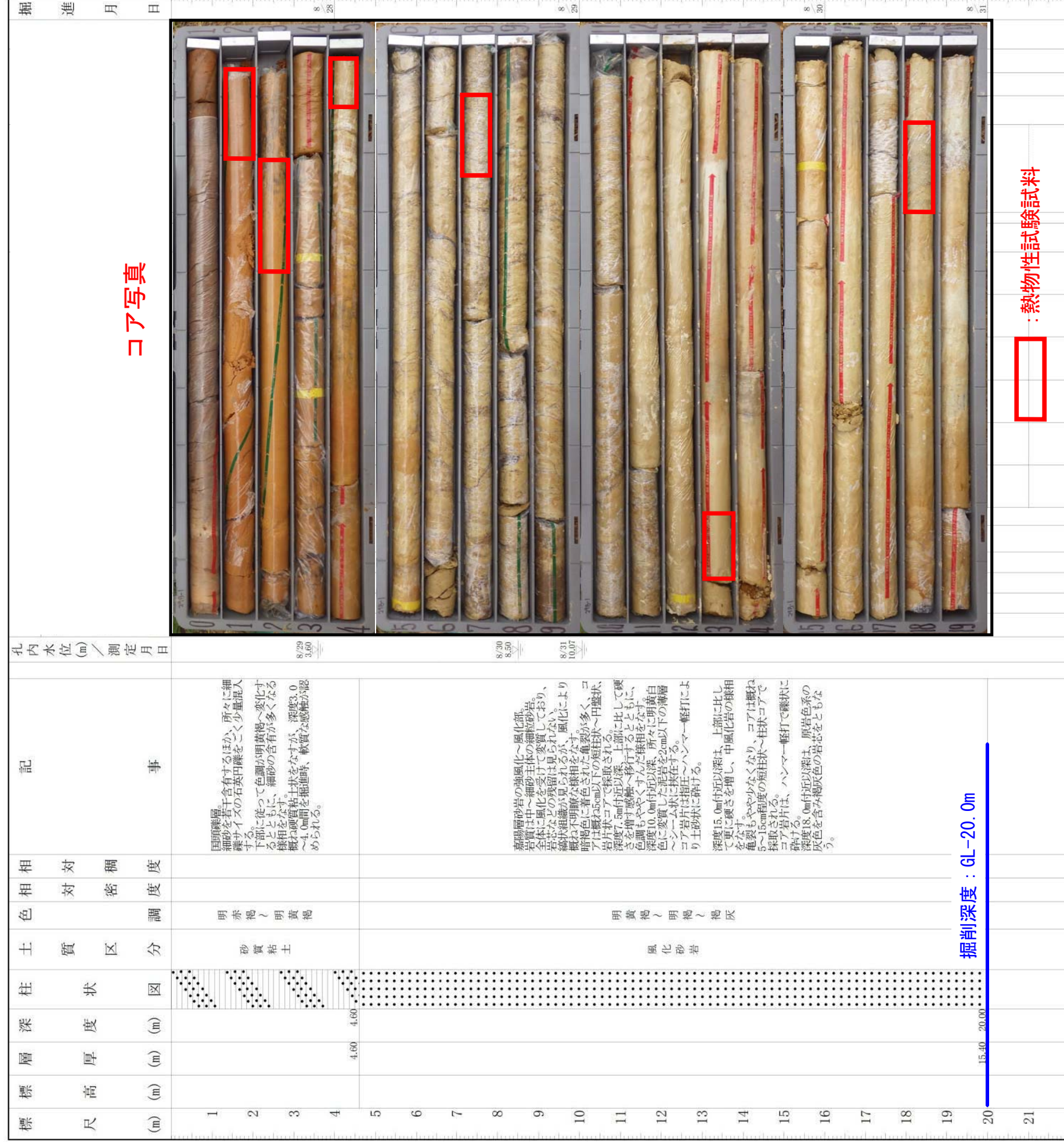


図3.1.2 ボーリング柱状図

3.2 熱物性試験

1) 測定方法および原理

ヒートバランスの変化を検討する際、地盤特性として熱伝導率、熱抵抗、比熱、密度が必要となる。熱応答試験の結果と併せ、コアサンプルを用いて熱伝導率および熱容量を求める必要がある。県内における琉球石灰岩や島尻泥岩などの熱物性値は、データに乏しく不明な点が多い。地中熱利用ヒートポンプシステムの設計において、費用対効果の高いシステムを構築するために地盤の熱物性値を精度良く把握することは必須と言える。

熱物性測定については、以下に示すような方法がある。

表 3.2.1 熱物性測定の方法（三井化学分析センターHP）

測定法	ホットディスク法	プローブ法	熱流量法	レーザーフラッシュ法
関連規格	ISO/CD 22007-2	JIS R2616	ASTM E1530	JIS R1611
測定例	<ul style="list-style-type: none"> 樹脂板 カーボン粉入り樹脂 放熱グリース など 	<ul style="list-style-type: none"> 樹脂フィルム 発泡樹脂シート 高配向FRP など 	<ul style="list-style-type: none"> バルク樹脂 樹脂積層帯 樹脂シート 保温材 など 	<ul style="list-style-type: none"> セラミックス薄板 断熱コートつき金属板 など
イメージ図	<p>試料(上) 試料(下) 加熱源 & 温度検出部</p>	<p>断熱体 加熱源 試料 温度検出部</p>	<p>高温側ヒーター 試料 熱流束検知部 低温側ヒーター</p>	<p>レーザー光により加熱 試料 放射温度計により検出</p>
タイプ	3次元、非定常	2次元、非定常	1次元、定常	1次元、非定常
測定範囲 (W/m.K)	0.01~100	0.02~10*1	0.1~15	0.05~400
測定精度	±5%	±5%*1	±5%	±10%
温度設定 (℃)	-20~200	制御不可	室温~300	-180~1300
標準サイズ*2 (mm)	40φ×40t (試料を重ねても可) 2片1組	30×110×25t 30×110×0.1~2t 上図中の横が110	50φ×0.2~15t (試料を重ねても可)	10φ×1~3t

※1 フィルム/シートでは測定範囲が狭くなり、測定精度も低下します。

※2 試料サイズは標準です。材料の特性等により必要サイズが異なる場合があります。

本業務では、ホットディスク法による手法を採用した。ホットディスク法熱物性測定は、等法性の断熱材、樹脂、セラミックス、金属、練り物、液体等の熱伝導率および熱拡散率が測定でき、さらにこれらの測定値により単位体積あたりの比熱容量を算出する。新素材

の研究開発，各種材料の応用や用途開発，製品の性能評価や品質管理に幅広く用いられている。

岩石や堆積物の熱伝導率は，熱の伝わり易さを表すパラメーターであり，比熱，熱拡散率とともに，物質の基本的熱物性値であり，以下の関係性がある。

$$\text{熱伝導率 (W/m}\cdot\text{K)} = \text{密度 (kg/m}^3\text{)} \times \text{比熱容量 (J/kg}\cdot\text{K)} \times \text{熱拡散率 (m}^2\text{/s)}$$

ホットディスク法による熱伝導率測定方法は，ISO/CD 22007-2 に準じて実施した。

- ①ホットディスクセンサーの基本構造は，二重らせん構造に加工した金属箔部分と，金属箔を測定試料と電氣的に絶縁するための絶縁膜からなる。
- ②金属箔の材料としては，温度変化に対する電気抵抗変化 (Temperature coefficient of resistance ; TCR) の大きいニッケルが一般的に用いられる。
- ③試料の測定面を上向きにセットし，センサーを密着させる。上部は試料もしくは熱物性値が既知であるウレタン等の材料をセットし測定を開始する。
- ④ホットディスクセンサーに一定電流を通電することによって発熱させ，その時のセンサーの電圧変化を測定する。
- ⑤この電流と電圧変化からホットディスクセンサーの電気抵抗がどのように変化していくかを測定する。

●ホットディスク法による試料のセットアップ

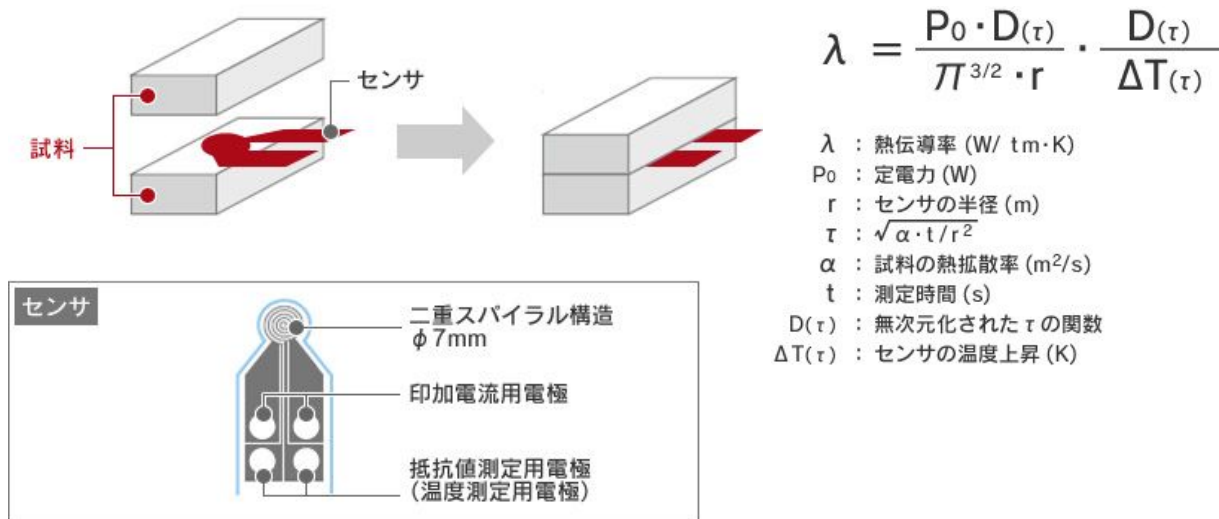


図 3.2.1 ホットディスクセンサーの概要

2) 測定試料

試験の対象とした試料は、今年度事業での採取分に加え、沖縄を代表する地質を主体とした 33 試料である（試料整形ができなかった 17-C-23 を除く）。

表 3.2.2 熱物性試験用試料

識別No.	採取区分	採取場所	孔番	採取深度 (GL-m)		コア長 (m)	地質	備考
				上端	下端			
17-C-1	今年度 事業 採取分	金武町金武	29B-1	1.80	2.00	0.20	赤土:国頭礫層	若干、細砂を含む
17-C-2			29B-1	2.60	2.80	0.20	赤土:国頭礫層	同上
17-C-3			29B-1	4.90	5.00	0.10	砂岩優勢頁岩互層:嘉陽層	岩芯まで脆弱化した強風化岩
17-C-4			29B-1	7.75	7.90	0.15	砂岩優勢頁岩互層:嘉陽層	岩芯まで脆弱化した強風化岩
17-C-5			29B-1	13.00	13.15	0.15	砂岩優勢頁岩互層:嘉陽層	中風化岩
17-C-6			29B-1	18.70	18.85	0.15	砂岩優勢頁岩互層:嘉陽層	中風化岩
17-C-7	既存試料	糸満市座波	B-2	1.50	1.60	0.10	琉球石灰岩	再結晶して緻密
17-C-8			B-3	1.30	1.45	0.15	琉球石灰岩	砂質碎屑性、多孔質
17-C-9		糸満市真壁	B-1	13.30	13.40	0.10	琉球石灰岩	碎屑性
17-C-10			B-1	14.70	14.80	0.10	琉球石灰岩	碎屑性
17-C-11		糸満市与座	B-3	9.40	9.55	0.15	琉球石灰岩	含サンゴ礫、碎屑性
17-C-12			沖繩市登川	B-1	5.60	5.75	0.15	琉球石灰岩
17-C-13		糸満市与座	B-1	4.30	4.50	0.20	琉球石灰岩	再結晶して緻密
17-C-14		旧石垣空港	B-6	3.60	3.70	0.10	琉球石灰岩	再結晶して緻密
17-C-15			B-6	4.60	4.70	0.10	琉球石灰岩	陸源の泥を含む
17-C-16		那覇空港	No.5	5.60	5.80	0.20	島尻砂岩	水浸すると崩壊する可能性あり
17-C-17		那覇市小禄	B-1	3.70	3.90	0.20	島尻砂岩	〃
17-C-18		名護市真喜屋	B-4	10.65	10.90	0.25	石英斑岩	有色鉱物:黒雲母、白色鉱物:長石の斑晶
17-C-19			B-6	14.35	14.50	0.15	石英斑岩	風化岩
17-C-20		国頭村与那(県道2号)	B-1	15.25	15.40	0.15	千枚岩:名護層	
17-C-21			B-1	9.60	9.80	0.20	千枚岩:名護層	
17-C-22		大宜味村謝名城	T#28	14.70	14.90	0.20	千枚岩:名護層	
17-C-23		恩納村谷茶	B-2	1.15	1.30	0.15	千枚岩:名護層	試料整形不可
17-C-24		名護市名護	B-1	7.60	7.70	0.10	緑色岩:名護層	
17-C-25			B-1	8.60	8.70	0.10	緑色岩:名護層	
17-C-26		恩納村恩納	B-3	5.00	5.25	0.25	緑色岩:名護層	弱風化岩
17-C-27		伊平屋村田名野甫線	B-4	5.30	5.45	0.15	粘板岩:田名層	礫岩質
17-C-28			B-4	6.50	6.70	0.20	粘板岩:田名層	礫岩質
17-C-29		名護市安和	B-5	24.40	24.60	0.20	石灰岩:本部層	
17-C-30			B-5	25.90	26.10	0.20	石灰岩:本部層	
17-C-31		旧石垣空港	B-6	9.60	9.70	0.10	泥質片岩:トムル層	
17-C-32			B-2	8.45	8.60	0.15	緑色片岩:トムル層	
17-C-33		新石垣空港カラ岳	B-25	42.25	42.50	0.25	泥質片岩:トムル層	
17-C-34		新石垣空港航空基地	RB-8	8.00	8.10	0.10	泥質片岩:トムル層	

3) 試験手順

(1) コア整形

ボーリングにより採取した外径 50mm のコア試料を、深度方向に垂直に切断した。コアの切断には下記の様なディスクカッターを用いた。試料の厚みは、ホットディスク法での熱伝達の影響範囲が 10mm 程度であることから、20mm 以上の厚みを持つように切断した。



写真 3.2.1 コア整形に用いるディスクカッター

(2) 湿潤試料の作成

湿潤状態での測定を行うため、1) で作成したコアを水等に浸し湿潤状態のコアを作成した。



写真 3.2.2 湿潤試料の作成状況

(3) 測定試料の作成

凹凸，空隙の少ない平滑な面を測定面として選定した。



写真 3.2.3 測定試料の作成①

測定面に空気等が混入しないよう注意しながら薄膜フィルム（サランラップ）を密着させ測定試料を作成した。



写真 3.2.4 測定試料の作成②

試料を反転させ，伸縮性のあるパラフィルム等で試料と薄膜フィルムを密着した（このときに試料から水が漏れ出さないように注意する）。



写真 3.2.5 測定試料の作成③

(4) 熱物性測定

(1) ～ (3) で作成した試料をホットディスクに設置し測定を行った。



写真 3.2.6 ホットディスクによる測定

(5) 物理試験

測定試料の基本的な物性値を求め、密度など熱物性値との関係性を整理した。求めた物性値は、粒子の密度、湿潤密度、乾燥密度、有効間隙率、吸水率、有効間隙比等である。

地中熱利用において熱交換を行う地盤（岩盤）は、基本的に固相、液相、気相から構成される。一般的な土（岩）粒子の熱伝導率と比較して、水（地下水）や空気（間隙）の値は小さいため、通常密度の小さい物質や間隙率の大きい物質は熱伝導率が小さくなる傾向がある。同じ地質であっても、時代の違いや風化の程度などにより密度や間隙率に違いが生じることから、熱物性試験結果を評価する際に必要な物性値となる。

なお、密度は熱伝導率の算定に直接必要な物性値でもあり、浮力法による密度を見掛けの湿潤密度、ノギス法による密度を湿潤密度と呼ぶ。以下、見掛けの湿潤密度（以下、密度）を用いて整理した。

(6) 超音波速度試験

測定試料を用いて、超音波速度試験を実施した。同試験から求められる P 波速度や S 波の弾性波速度は、土木地質調査等で広く使用される値であり、地域や地質毎に多くのデータが存在することに特徴がある。

弾性波とは、弾性体中を伝わる変形波であり、地質調査においては、主として P 波（縦波）、S 波（横波）が用いられる。弾性波伝播速度は、地層構成を把握するための調査や耐震設計を行う際の調査に広く用いられており、地質毎の研究事例や調査実績が多い特徴がある。したがって、熱物性値との関係性を蓄積することで、熱物性試験や TRT 試験の結果を補完し、その関係性から熱物性値を推定することや、地域毎の熱物性値の精度向上を期待することができる。

4) 地中熱利用における熱物性値の意味

熱物性値には、熱伝導率、比熱（熱容量）温度拡散率などがあり、前述したように次の関係式で示される。これらの値は、地中熱交換井の設計に必要な地盤情報として使用される。

$$\text{熱伝導率} = \text{密度} \times \text{比熱（熱容量）} \times \text{温度拡散率}$$

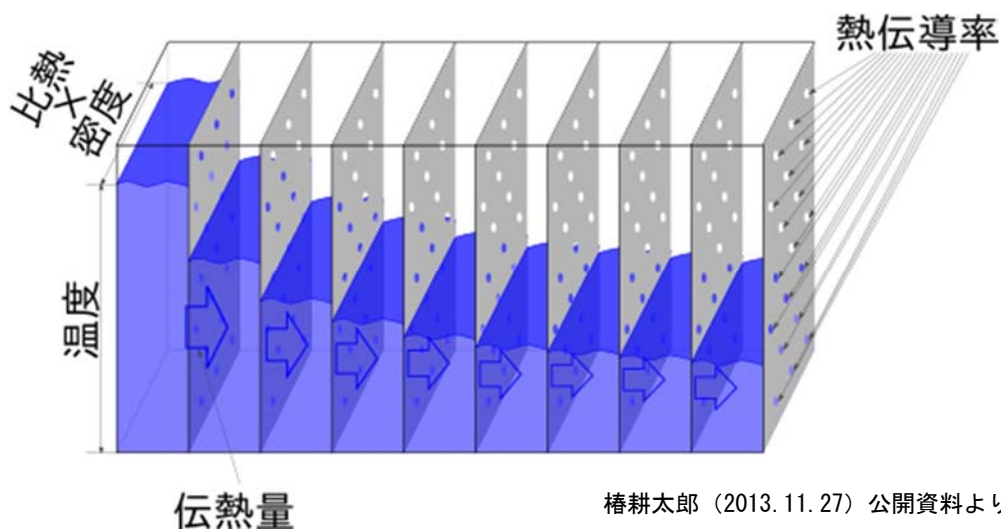
熱伝導率（W/mK）：熱の伝わりやすさを示す値。物質において温度差がある場合は、温度の高い部分から低い部分へと熱の移動現象が生じる。熱伝導率（W/mK）は、厚さ 1m の物質の両端に 1°C の温度差がある時、その物質 1 m² を通して 1 秒間に流れる熱量を指す。この熱移動の程度を熱伝導率として示す。

比熱（J/kgK）：1g の物質の温度を 1K 上昇させるのに必要な熱量。比熱が大きくなるほど温度変化を受け難い。

熱容量（MJ/m³K）：ある物質の温度を 1K 上昇させるのに必要な熱量を、単位体積で示した値。熱の含有可能量。ここで示す熱容量は、比熱に物質の密度を乗じた値で、物質の単位体積当たりの含有可能量を示した値となる。熱容量が大きくなるほど温度変化を受け難い。

温度拡散率（mm²/K）：温度の伝わり易さ（拡散）を示す値。拡散は、温度勾配に応じて内部エネルギーが熱として拡散する。この拡散は、温度勾配によって起こるため、温度場へ拡散が与える影響は温度の変化のし易さを表す値として示される。

熱伝導率、比熱等の関係を模式的に図 3.2.2 に示す。



椿耕太郎 (2013. 11. 27) 公開資料より

図 3.2.2 熱物性値の関係イメージ

図 3.2.2 は、伝熱量を水量に置き替えたもので、孔の開いた隔壁で幾つかに仕切られた容器の左側から水を注いだ場合の水の移動を示したものである。

- ◆温度拡散率は、温度の伝わりやすさを示す。図においては穴の大きさを示す。水位の高さが温度を示すので、温度勾配が大きい（水位差が大きい）ほど、伝わる温度が大きくなる。地盤の透水係数に相当する（動水勾配が大きいほど流速が大きくなる）。
- ◆比熱および熱容量は、温度の貯留容量を示す。図において、比熱は 1 区画あたりの断面積を示し、熱容量は容積を示す（密度が奥行き）。つまり、熱容量が大きい場合、採熱能力が持続しやすい（水位が変化しにくい）。その反面、採熱を行わない場合（水を抜く場合）の回復能力も小さくなる。地中熱利用においては、原則熱容量が大きいほど総採熱量が大きいと有利と言えるが、断続使用時の回復力や昼夜間で冷温熱を切り替える場合など不利に働く場合もある。
- ◆熱伝導率は、熱の伝わりやすさを示す。上図において穴の総面積を示す。地中熱利用においては原則大きい方が一次側のコストにおいて有利に働く。

図 3.2.3 は土や岩石の比熱と熱伝導率を示したものである。土の場合、粘土のようなものは比熱が大きく、熱伝導率は低い。

図 3.2.4 は、粘土と物性が逆に熱伝導率が高く、比熱が低い性質の砂礫と粘土の地盤について、地中熱交換器を長期運用した場合の設計採熱量の変化を示したものである。砂礫の場合、大きかった採熱量が、時間の経過と共に低下する。一方、粘土は極端な落ち込みは認められない。昨年開発された「地中熱採熱期待値マップシステム」は運用の仕方まで考慮して設計採熱量を算定することができる。

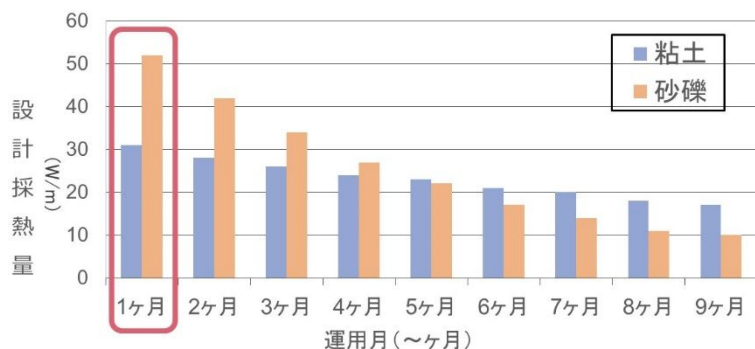


図 3.2.4 粘土と砂礫の設計採熱量推移

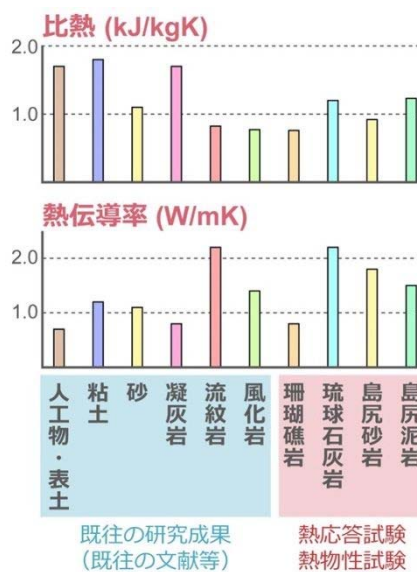


図 3.2.3 土や岩の熱物性

5) 熱物性測定結果

(1) 赤土 (国頭礫層)

①測定面の状態



【17-C-1】



【17-C-2】

②熱物性値

識別No.	採取場所	採取深度(GL-m)		コア長(m)	熱物性値		
		上端	下端		熱伝度率 W/mK	温度拡散率 mm ² /s	熱容量 MJ/m ³ K
17-C-1	金武町金武	1.80	2.00	0.20	2.00	0.69	2.90
17-C-2	金武町金武	2.60	2.80	0.20	1.58	0.51	3.12

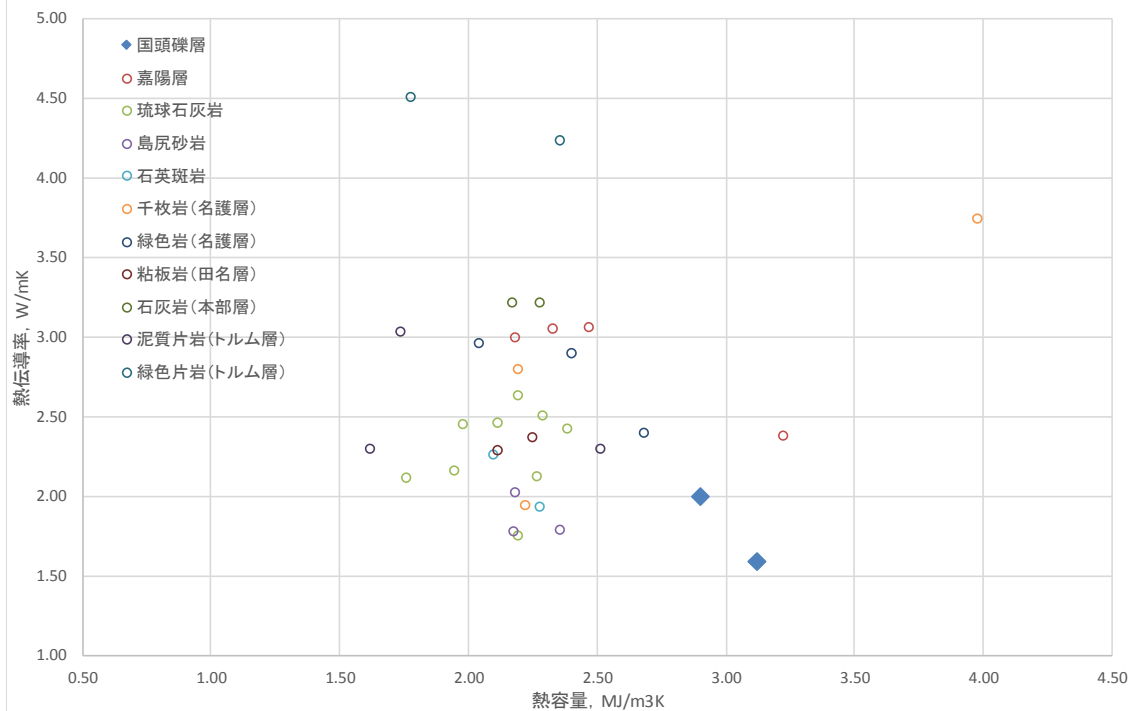


図 3.2.5 熱物性測定結果図 (赤土 : 国頭礫層)

(2) 砂岩優勢頁岩互層（嘉陽層）

①測定面の状態



【17-C-3】



【17-C-4】



【17-C-5】



【17-C-6】

②熱物性値

識別No.	採取場所	採取深度(GL-m)		コア長(m)	熱物性値		
		上端	下端		熱伝度率 W/mK	温度拡散率 mm ² /s	熱容量 MJ/m ³ K
17-C-3	金武町金武	4.90	5.00	0.10	2.37	0.72	3.22
17-C-4	金武町金武	7.75	7.90	0.15	3.05	1.31	2.33
17-C-5	金武町金武	13.00	13.15	0.15	3.06	1.24	2.47
17-C-6	金武町金武	18.70	18.85	0.15	3.00	1.38	2.18

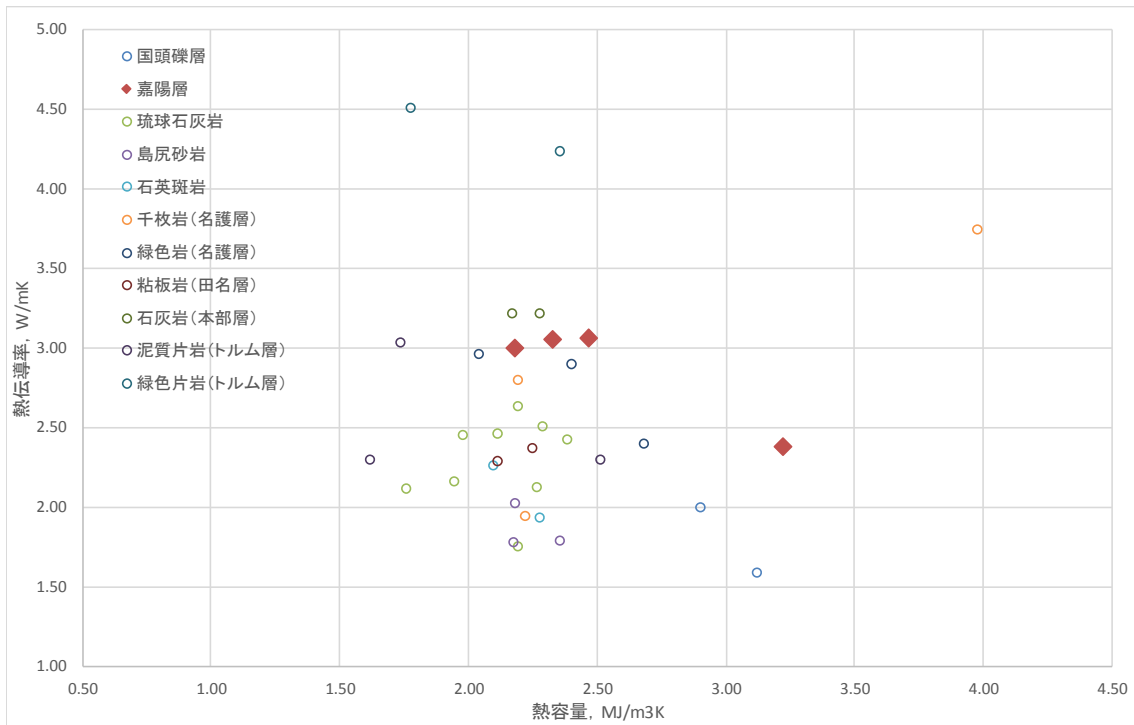


図 3.2.6 熱物性測定結果図 (砂岩優勢頁岩互層：嘉陽層)

(3) 琉球石灰岩

①測定面の状態



【17-C-7】



【17-C-8】



【17-C-9】



【17-C-10】



【17-C-11】



【17-C-12】



【17-C-13】



【17-C-14】



【17-C-15】

②熱物性値

識別No.	採取場所	採取深度(GL-m)		コア長 (m)	熱物性値		
		上端	下端		熱伝度率 W/mK	温度拡散率 mm ² /s	熱容量 MJ/m ³ K
17-C-7	糸満市座波	1.50	1.60	0.10	2.50	1.09	2.29
17-C-8	糸満市座波	1.30	1.45	0.15	1.75	0.80	2.19
17-C-9	糸満市真壁	13.30	13.40	0.10	2.12	0.94	2.27
17-C-10	糸満市真壁	14.70	14.80	0.10	2.11	1.20	1.76
17-C-11	糸満市真壁	9.40	9.55	0.15	2.45	1.24	1.97
17-C-12	沖縄市登川	5.60	5.75	0.15	2.63	1.20	2.19
17-C-13	糸満市与座	4.30	4.50	0.20	2.43	1.02	2.38
17-C-14	旧石垣空港	3.60	3.70	0.10	2.16	1.12	1.94
17-C-15	旧石垣空港	4.60	4.70	0.10	2.46	1.17	2.11

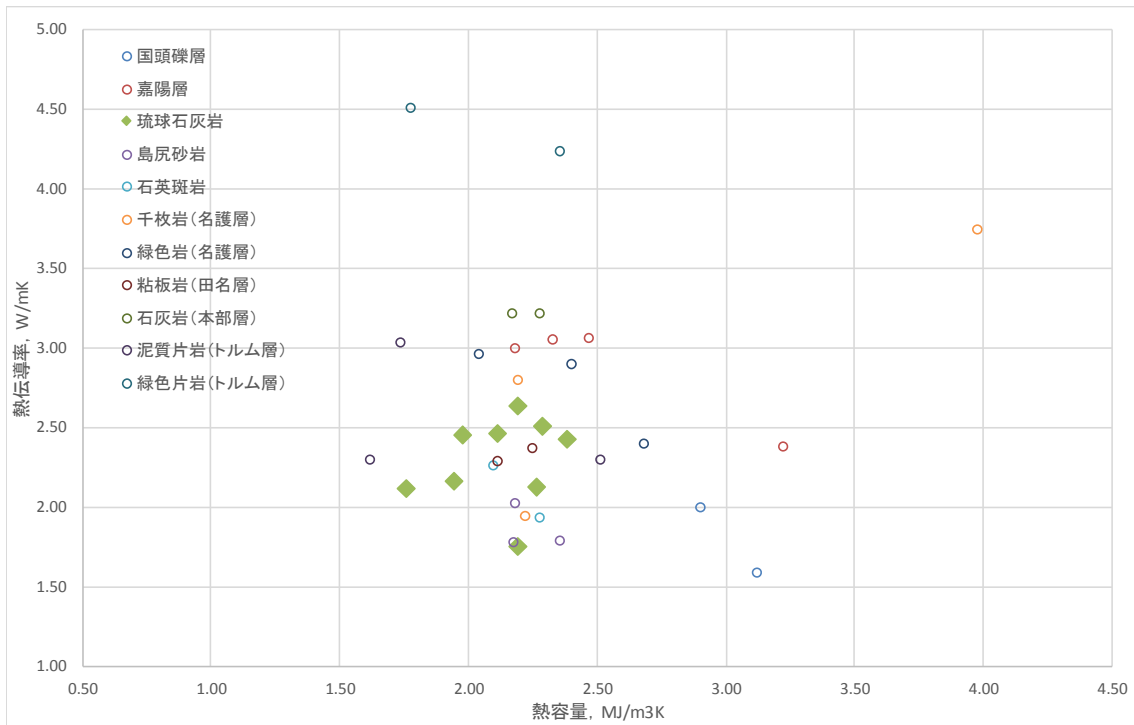


图 3.2.7 熱物性測定結果図 (琉球石灰岩)

(4) 島尻砂岩

①測定面の状態



【17-C-16-1】



【17-C-16-2】



【17-C-17】

②熱物性値

識別No.	採取場所	採取深度(GL-m)		コア長(m)	熱物性値		
		上端	下端		熱伝度率 W/mK	温度拡散率 mm ² /s	熱容量 MJ/m ³ K
17-C-16-1	那覇空港	5.60	5.80	0.20	1.78	0.82	2.17
17-C-16-2					1.78	0.76	2.36
17-C-17	那覇市小禄	3.70	3.90	0.20	2.03	0.94	2.18

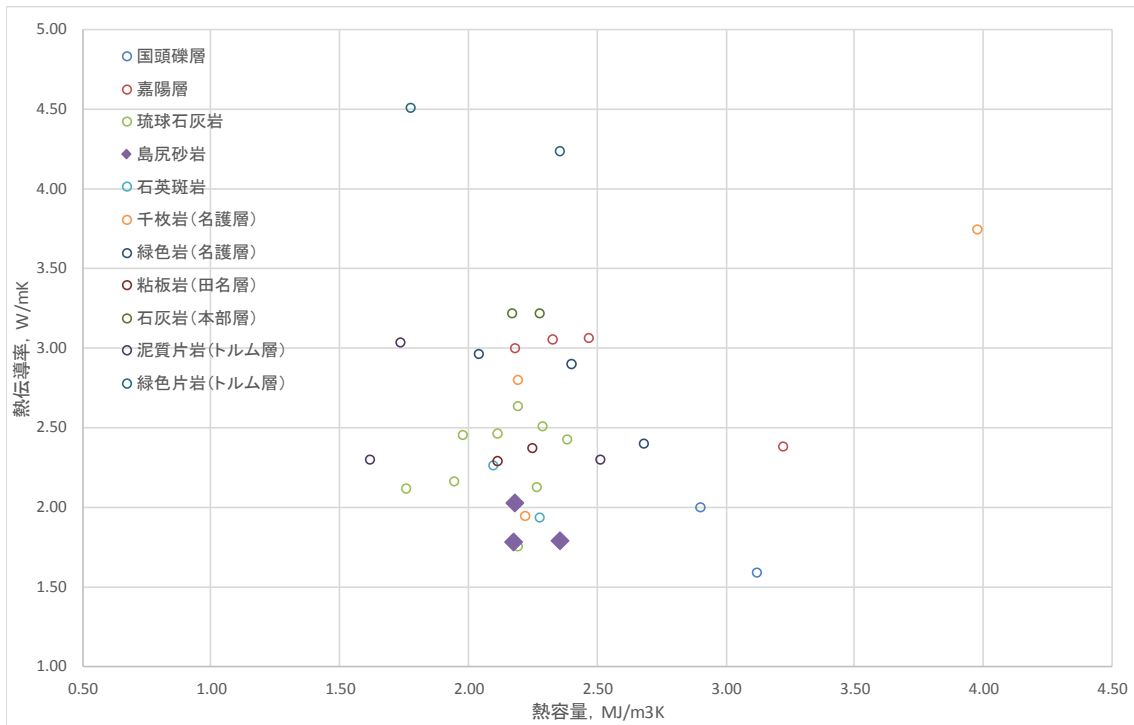


图 3.2.8 熱物性測定結果图 (島尻砂岩)

(5) 石英斑岩

①測定面の状態



【17-C-18】



【17-C-19】

②熱物性値

識別No.	採取場所	採取深度(GL-m)		コア長 (m)	熱物性値		
		上端	下端		熱伝度率 W/mK	温度拡散率 mm ² /s	熱容量 MJ/m ³ K
17-C-18	名護市真喜屋	10.65	10.90	0.25	2.26	1.08	2.10
17-C-19	名護市真喜屋	14.35	14.50	0.15	1.93	0.85	2.28

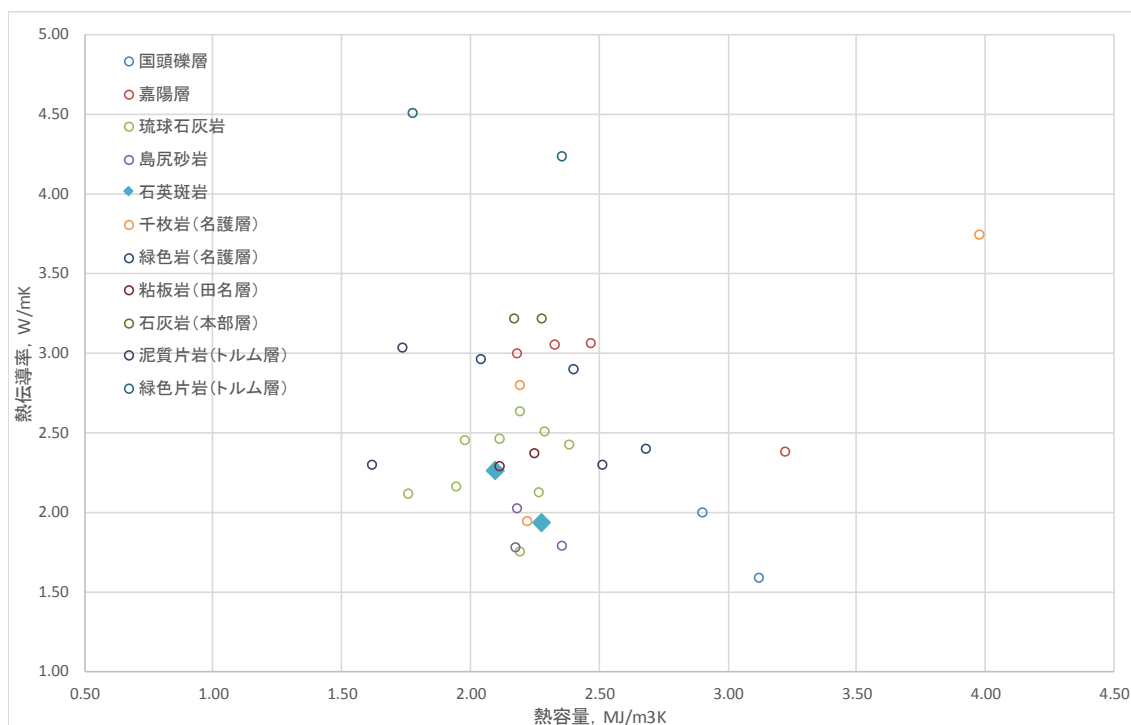


図 3. 2. 9 熱物性測定結果図 (石英斑岩)

(6) 千枚岩 (名護層)

① 測定面の状態



【17-C-20】



【17-C-21】



【17-C-22】



【17-C-23】

※17-C-23 は、片理構造が卓越しており測定用の試料整形が不可

② 熱物性値

識別No.	採取場所	採取深度(GL-m)		コア長 (m)	熱物性値		
		上端	下端		熱伝度率 W/mK	温度拡散率 mm ² /s	熱容量 MJ/m ³ K
17-C-20	国頭村与那	15.25	15.40	0.15	1.94	0.90	2.22
17-C-21	国頭村与那	9.60	9.80	0.20	3.74	0.94	3.98
17-C-22	大宜味村謝名城	14.70	14.90	0.20	2.79	1.28	2.19
17-C-23	恩納村谷茶	1.15	1.30	0.15	測定不可	測定不可	測定不可

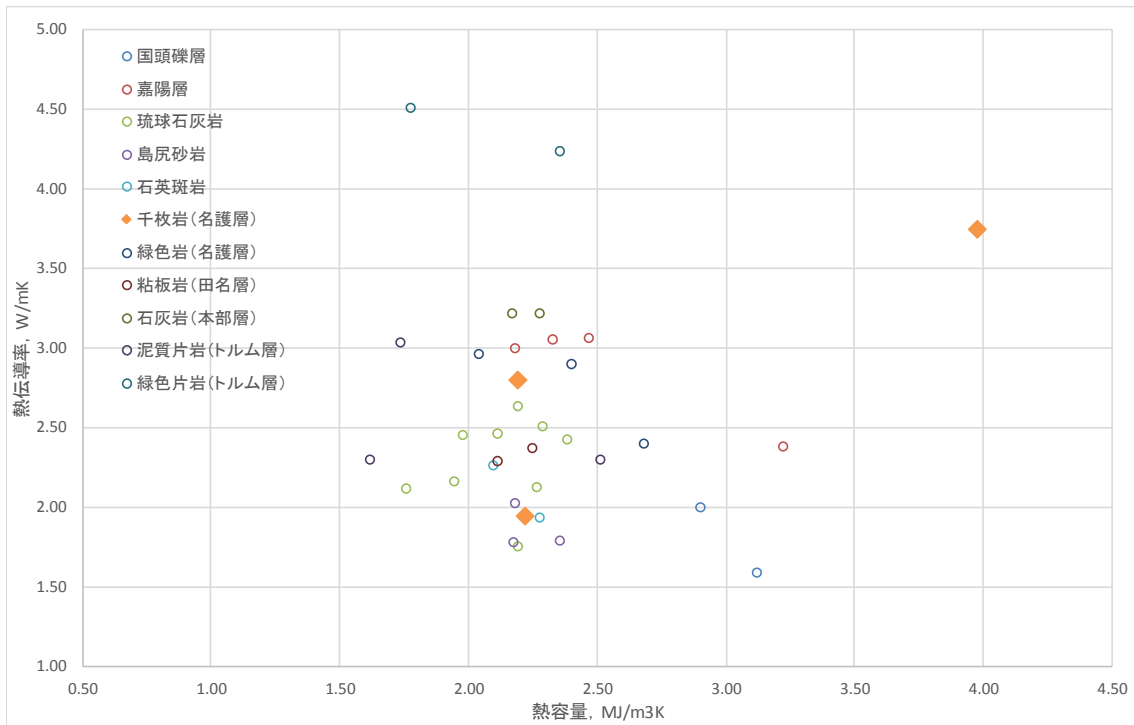


図 3.2.10 熱物性測定結果図 (千枚岩：名護層)

(7) 緑色岩（名護層）

①測定面の状態



【17-C-24】



【17-C-25】



【17-C-26】

②熱物性値

識別No.	採取場所	採取深度(GL-m)		コア長(m)	熱物性値		
		上端	下端		熱伝度率 W/mK	温度拡散率 mm ² /s	熱容量 MJ/m ³ K
17-C-24	名護市名護	7.60	7.70	0.10	2.89	1.21	2.40
17-C-25	名護市名護	8.60	8.70	0.10	2.95	1.47	2.04
17-C-26	恩納村恩納	5.00	5.25	0.25	2.40	0.89	2.68

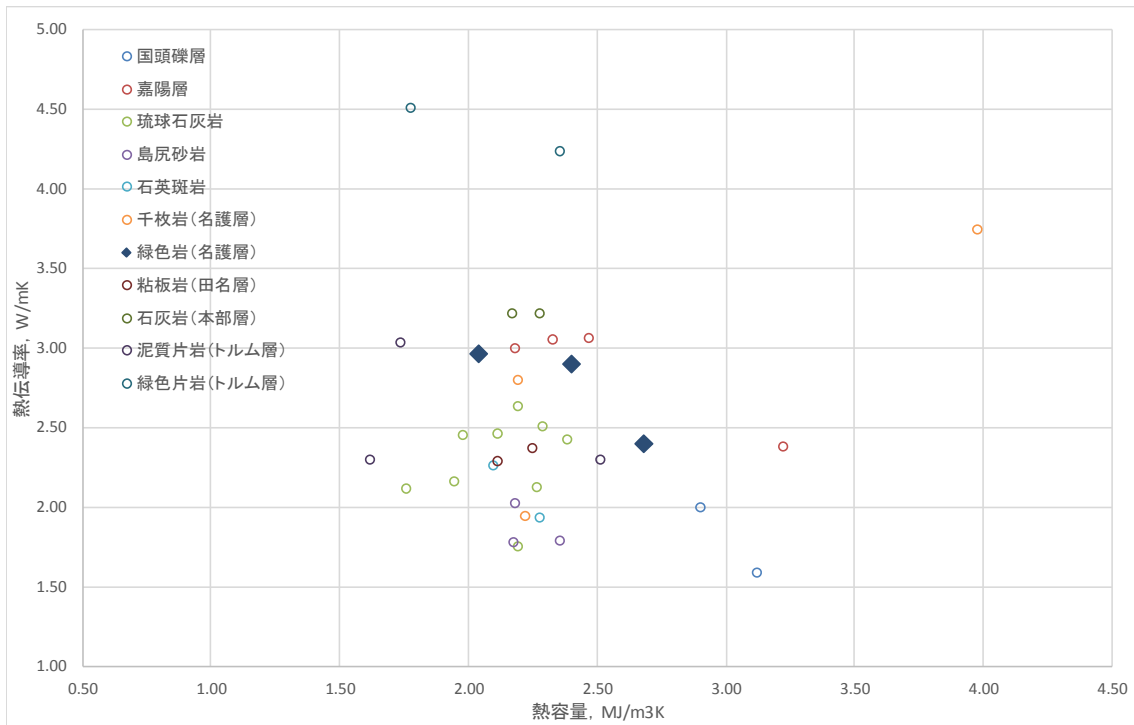


図 3.2.11 熱物性測定結果図 (綠色岩 : 名護層)

(8) 粘板岩 (田名層)

① 測定面の状態



【17-C-27】



【17-C-28】

② 熱物性値

識別No.	採取場所	採取深度(GL-m)		コア長 (m)	熱物性値		
		上端	下端		熱伝度率 W/mK	温度拡散率 mm ² /s	熱容量 MJ/m ³ K
17-C-27	伊平屋村田名野甫線	5.30	5.45	0.15	2.29	1.08	2.11
17-C-28	伊平屋村田名野甫線	6.50	6.70	0.20	2.36	1.05	2.25

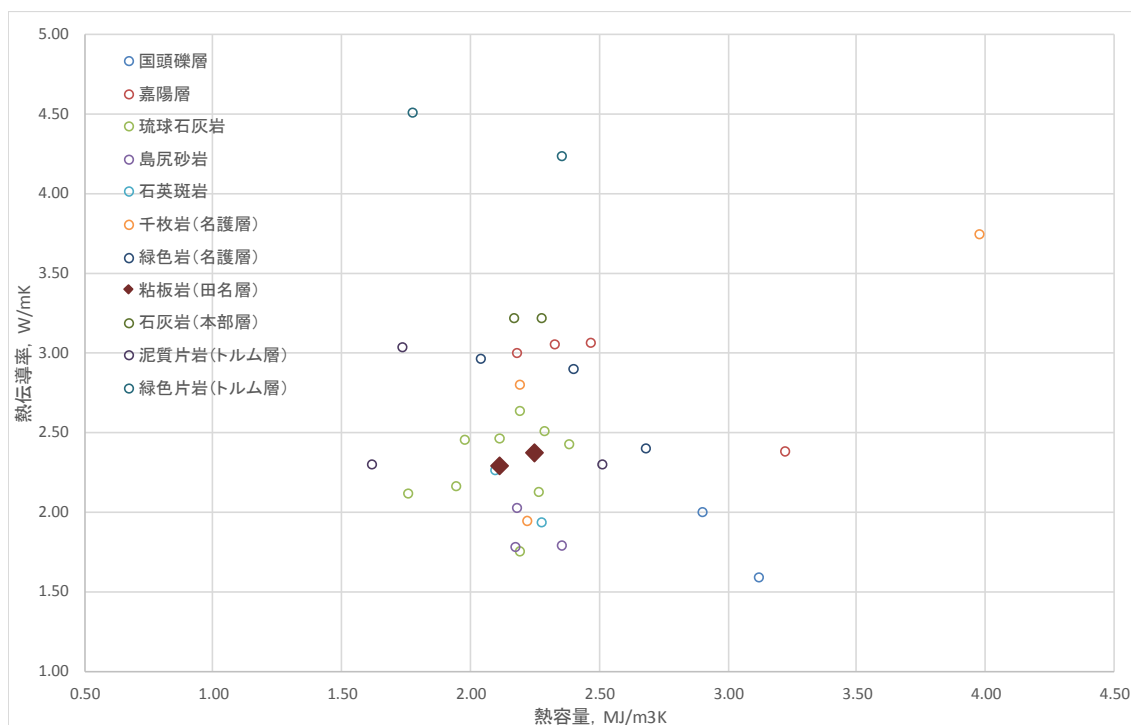


図 3. 2. 12 熱物性測定結果図 (粘板岩 : 田名層)

(9) 石灰岩（本部層）

①測定面の状態



【17-C-29】



【17-C-30】

②熱物性値

識別No.	採取場所	採取深度(GL-m)		コア長 (m)	熱物性値		
		上端	下端		熱伝度率 W/mK	温度拡散率 mm ² /s	熱容量 MJ/m ³ K
17-C-29	名護市安和	24.40	24.60	0.20	3.21	1.48	2.17
17-C-30	名護市安和	25.90	26.10	0.20	3.21	1.42	2.27

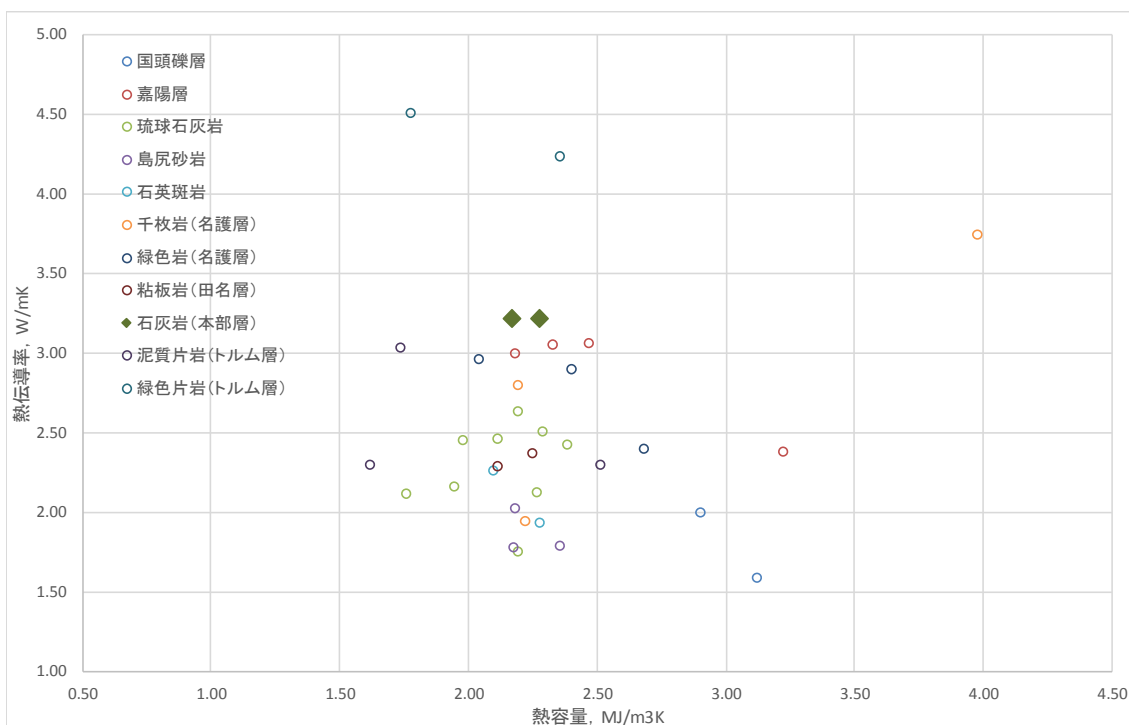


図 3. 2. 13 熱物性測定結果図（石灰岩：本部層）

(10) 緑色片岩・泥質片岩（トムル層）

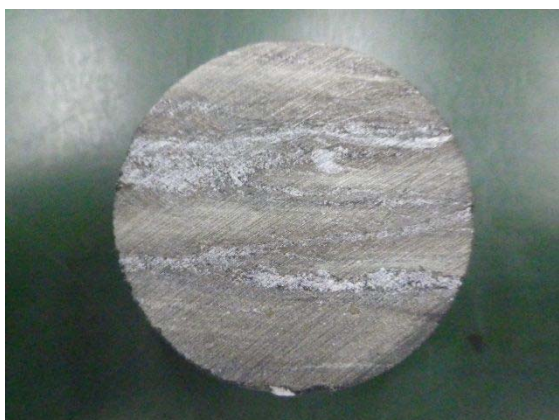
①測定面の状態



【17-C-31】



【17-C-32】



【17-C-33】



【17-C-34-1】



【17-C-34-2】

※17-C-34-2 試料では、優白質部分を対象に測定を実施したことから、結果を緑色片岩に区分した。

②熱物性値

識別No.	採取場所	採取深度(GL-m)		コア長 (m)	熱物性値		
		上端	下端		熱伝度率 W/mK	温度拡散率 mm ² /s	熱容量 MJ/m ³ K
17-C-31	旧石垣空港	9.60	9.70	0.10	3.03	1.75	1.73
17-C-32	旧石垣空港	8.45	8.60	0.15	4.24	1.80	2.35
17-C-33	新石垣空港カラ岳	42.25	42.50	0.25	2.29	0.91	2.51
17-C-34-1	新石垣空港航空基地	8.00	8.10	0.10	1.93	1.20	1.62
17-C-34-2					4.51	2.54	1.77

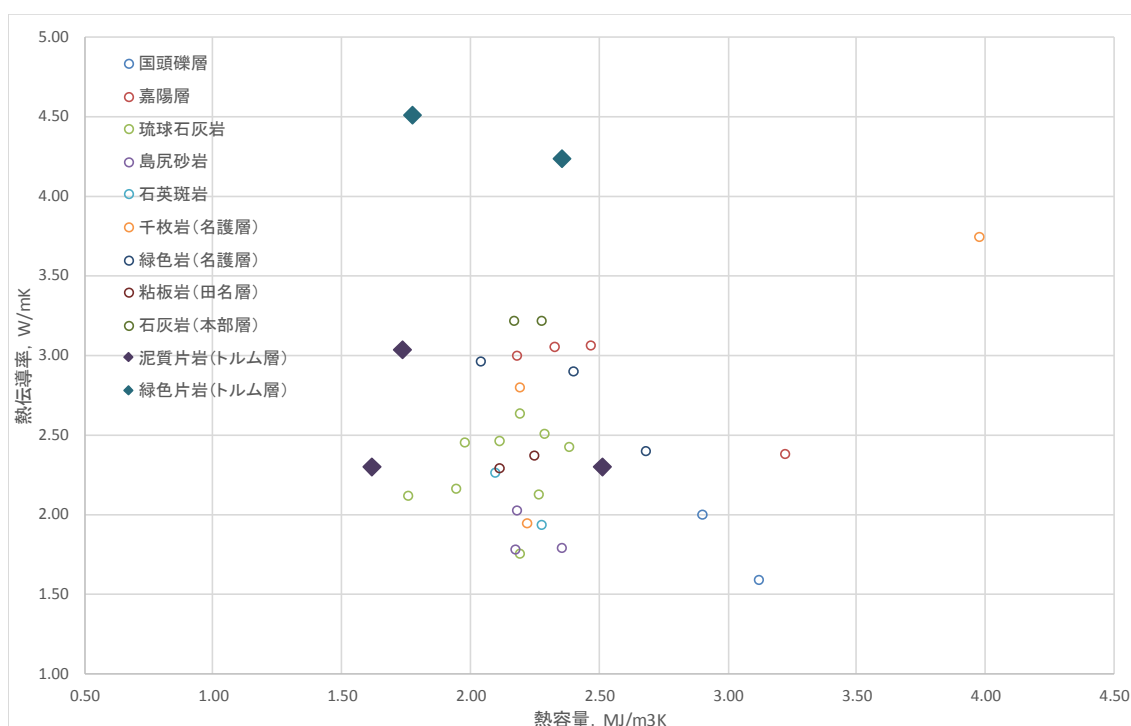


図 3. 2. 14 熱物性測定結果図 (綠色片岩・泥質片岩 : トウルム層)

5) 物理試験および超音波伝播速度試験

表 3.2.3 に物理試験および超音波伝播速度試験結果の一覧を示す。

表 3.2.3 物理試験・超音波伝播速度試験結果一覧

識別No.	採取場所	地質	採取深度 GL-m		コア長 m	熱物性試験			物理試験					超音波伝播速度試験					
			上端	下端		熱伝導率 W/mK	温度拡散率 mm ² /s	熱容量 MJ/m ³ K	粒子の密度 g/cm ³	見掛け湿潤 密度 g/cm ³	見掛け乾燥 密度 g/cm ³	有効間隙率 %	吸水率 %	有効間隙比	P波速度 km/sec	S波速度 km/sec	動せん断弾 性係数 N/mm ²	ポアソン比	動弾性係数 N/mm ²
17-C-1	金武町金武	赤土:国頭礫層	1.80	2.00	0.20	2.00	0.69	2.90	2.53	1.91	1.50	40.52	26.93	0.68	0.73	0.20	83	0.46	242
17-C-2	金武町金武	赤土:国頭礫層	2.60	2.80	0.20	1.58	0.51	3.12	2.37	1.79	1.37	42.13	30.68	0.73	1.01	0.28	147	0.46	430
17-C-3	金武町金武	砂岩優勢頁岩五層:嘉陽層	4.90	5.00	0.10	2.37	0.72	3.22	2.53	2.08	1.78	29.60	16.60	0.42	1.17	0.43	392	0.42	1116
17-C-4	金武町金武	砂岩優勢頁岩五層:嘉陽層	7.75	7.90	0.15	3.05	1.31	2.33	2.28	2.13	2.02	11.77	5.84	0.13	1.32	0.68	969	0.32	2559
17-C-5	金武町金武	砂岩優勢頁岩五層:嘉陽層	13.00	13.15	0.15	3.06	1.24	2.47	2.44	2.19	2.03	16.98	8.39	0.20	-	-	-	-	-
17-C-6	金武町金武	砂岩優勢頁岩五層:嘉陽層	18.70	18.85	0.15	3.00	1.38	2.18	2.53	2.41	2.33	7.83	3.36	0.08	2.81	1.88	8597	0.09	18828
17-C-7	糸満市座波	琉球石灰岩	1.50	1.60	0.10	2.50	1.09	2.29	2.49	2.39	2.33	6.23	2.67	0.07	5.25	2.33	12631	0.38	34784
17-C-8	糸満市座波	琉球石灰岩	1.30	1.45	0.15	1.75	0.80	2.19	2.46	2.19	2.00	18.51	9.25	0.23	3.96	1.64	5955	0.40	16631
17-C-9	糸満市真壁	琉球石灰岩	13.30	13.40	0.10	2.12	0.94	2.27	2.46	2.28	2.16	12.37	5.73	0.14	4.35	2.09	9900	0.35	26732
17-C-10	糸満市真壁	琉球石灰岩	14.70	14.80	0.10	2.11	1.20	1.76	2.42	2.30	2.22	8.07	3.63	0.09	4.49	2.42	13005	0.30	33705
17-C-11	糸満市真壁	琉球石灰岩	9.40	9.55	0.15	2.45	1.24	1.97	2.47	2.37	2.31	6.51	2.82	0.07	4.67	2.48	14758	0.30	38451
17-C-12	沖縄市登川	琉球石灰岩	5.60	5.75	0.15	2.63	1.20	2.19	2.59	2.45	2.36	9.00	3.81	0.10	-	-	-	-	-
17-C-13	糸満市与座	琉球石灰岩	4.30	4.50	0.20	2.43	1.02	2.38	2.41	2.28	2.19	9.14	4.17	0.10	4.82	2.02	9524	0.39	26547
17-C-14	旧石垣空港	琉球石灰岩	3.60	3.70	0.10	2.16	1.12	1.94	2.52	2.36	2.26	10.21	4.52	0.11	4.93	1.81	7527	0.42	21412
17-C-15	旧石垣空港	琉球石灰岩	4.60	4.70	0.10	2.46	1.17	2.11	2.51	2.32	2.20	12.36	5.62	0.14	5.15	2.32	12659	0.37	34753
17-C-16-1	那覇空港	鳥尻砂岩	5.60	5.80	0.20	1.78	0.82	2.17	2.48	1.99	1.65	33.27	20.11	0.50	0.35	0.23	101	0.14	229
17-C-16-2						1.78	0.76	2.36	2.49	2.01	1.69	32.36	19.20	0.48	0.24	0.10	19	0.40	54
17-C-17	那覇市小禄	鳥尻砂岩	3.70	3.90	0.20	2.03	0.94	2.18	2.49	2.13	1.89	24.27	12.87	0.32	0.86	0.52	561	0.22	1372
17-C-18	名護市真喜屋	石英斑岩	10.65	10.90	0.25	2.26	1.08	2.10	2.49	2.34	2.24	10.26	4.59	0.11	2.74	1.43	4937	0.31	12981
17-C-19	名護市真喜屋	石英斑岩	14.35	14.50	0.15	1.93	0.85	2.28	2.50	2.26	2.10	16.22	7.73	0.19	1.33	0.68	1102	0.32	2908
17-C-20	国頭村与那	千枚岩:名護層	15.25	15.40	0.15	1.94	0.90	2.22	2.62	2.45	2.34	10.48	4.48	0.12	1.64	0.77	1450	0.36	3942
17-C-21	国頭村与那	千枚岩:名護層	9.60	9.80	0.20	3.74	0.94	3.98	2.61	2.43	2.32	11.37	4.91	0.13	3.32	2.09	10903	0.17	25494
17-C-22	大宜味村謝名城	千枚岩:名護層	14.70	14.90	0.20	2.79	1.28	2.19	2.64	2.55	2.50	5.46	2.18	0.06	2.83	1.77	8150	0.18	19225
17-C-23	恩納村谷茶	千枚岩:名護層	1.15	1.30	0.15	測定不可	測定不可	測定不可	-	-	-	-	-	-	測定不可	測定不可	-	-	-
17-C-24	名護市名護	緑色岩:名護層	7.60	7.70	0.10	2.89	1.21	2.40	2.95	2.92	2.91	1.48	0.51	0.02	4.62	2.98	26283	0.14	60041
17-C-25	名護市名護	緑色岩:名護層	8.60	8.70	0.10	2.95	1.47	2.04	2.94	2.90	2.88	2.24	0.78	0.02	4.26	2.11	12941	0.34	34594
17-C-26	恩納村恩納	緑色岩:名護層	5.00	5.25	0.25	2.40	0.89	2.68	2.89	2.68	2.57	10.89	4.23	0.12	3.67	1.69	7900	0.36	21555
17-C-27	伊平屋村田名野甫線	粘板岩:田名層	5.30	5.45	0.15	2.29	1.08	2.11	2.69	2.51	2.40	10.74	4.47	0.12	2.57	1.14	3284	0.38	9053
17-C-28	伊平屋村田名野甫線	粘板岩:田名層	6.50	6.70	0.20	2.36	1.05	2.25	2.67	2.56	2.50	6.46	2.59	0.07	3.29	1.26	4036	0.41	11418
17-C-29	名護市安和	石灰岩:本部層	24.40	24.60	0.20	3.21	1.48	2.17	2.66	2.64	2.63	1.27	0.48	0.01	5.46	2.98	23366	0.29	60202
17-C-30	名護市安和	石灰岩:本部層	25.90	26.10	0.20	3.21	1.42	2.27	2.67	2.65	2.64	0.81	0.31	0.01	4.91	3.05	24942	0.18	59069
17-C-31	旧石垣空港	泥質片岩:トムル層	9.60	9.70	0.10	3.03	1.75	1.73	2.62	2.51	2.44	7.01	2.88	0.08	2.85	1.52	5822	0.30	15131
17-C-32	旧石垣空港	緑色片岩:トムル層	8.45	8.60	0.15	4.24	1.80	2.35	2.89	2.85	2.83	2.01	0.71	0.02	5.60	2.64	20242	0.36	54906
17-C-33	新石垣空港力	泥質片岩:トムラ岳	42.25	42.50	0.25	2.29	0.91	2.51	2.91	2.84	2.81	3.54	1.26	0.04	4.74	2.79	22436	0.24	55473
17-C-34-1	新石垣空港航空基地	泥質片岩:トムル層	8.00	8.10	0.10	1.93	1.20	1.62	2.66	2.62	2.61	1.92	0.74	0.02	4.14	1.90	9407	0.37	25723
17-C-34-2						4.51	2.54	1.77	2.54	2.50	2.48	2.45	0.99	0.03	4.40	2.71	18325	0.20	43805

6) 熱物性試験の総括

(1) 熱物性値

図 3.2.15 に、熱伝導率と熱容量との関係を示す。本測定結果において特徴的な傾向は認められない。

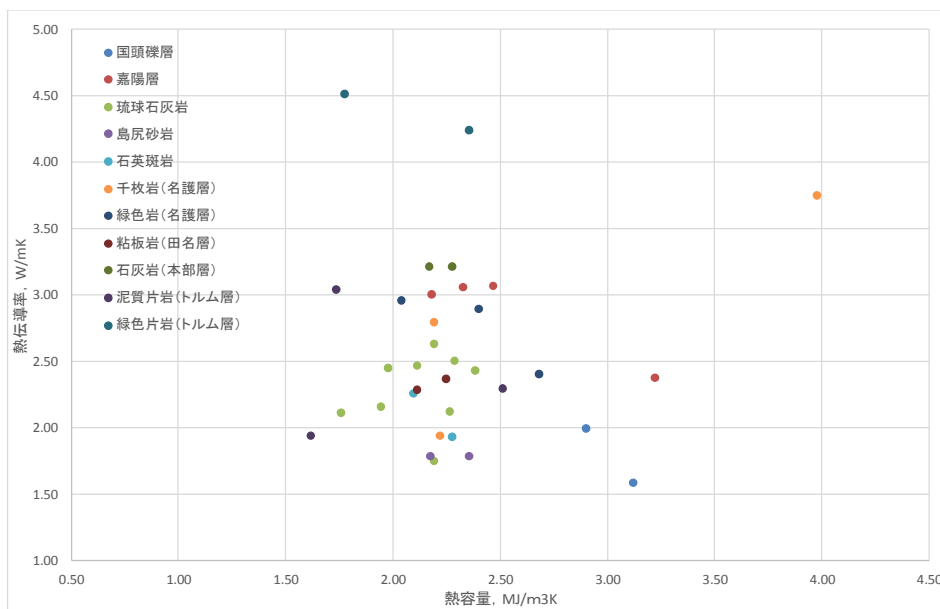


図 3.2.15 熱伝導率と熱容量の関係

図 3.2.16 に、熱伝導率と密度の関係を示す。概ね密度の増加に応じて熱伝導率も増加する傾向が認められる。測定データ数の多い琉球石灰岩では、以下の関係が認められる。

・ 熱伝導率 $\lambda = 2.95 \times \text{密度 } \rho - 4.57$

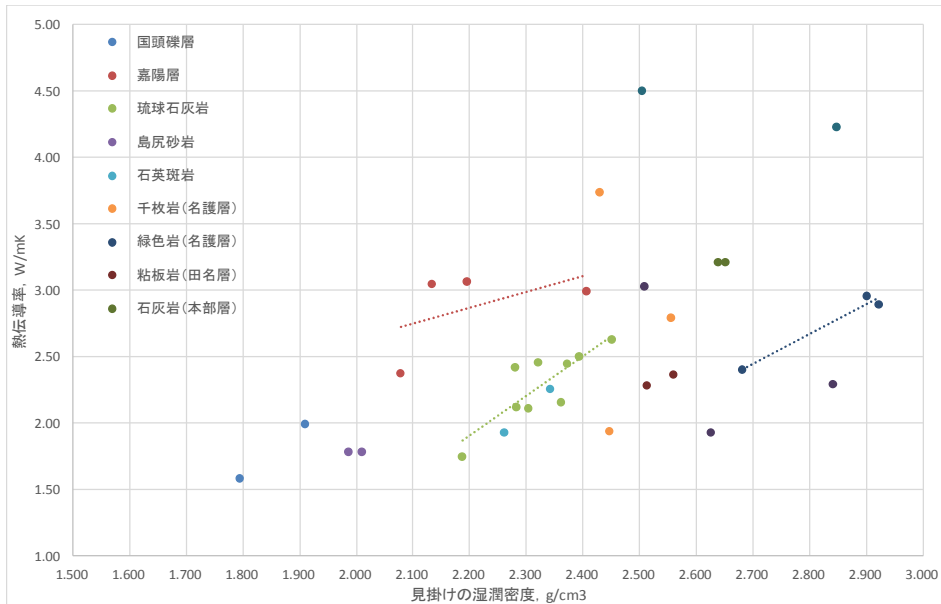


図 3.2.16 熱伝導率と密度の関係

図 3.2.17 に示すように、全体的に有効間隙率の増加に伴って、熱伝導率は低下する。砂岩優勢頁岩互層（嘉陽層）、琉球石灰岩、緑色岩（名護層）などでは、データ数が少ないがその傾向が顕著である。

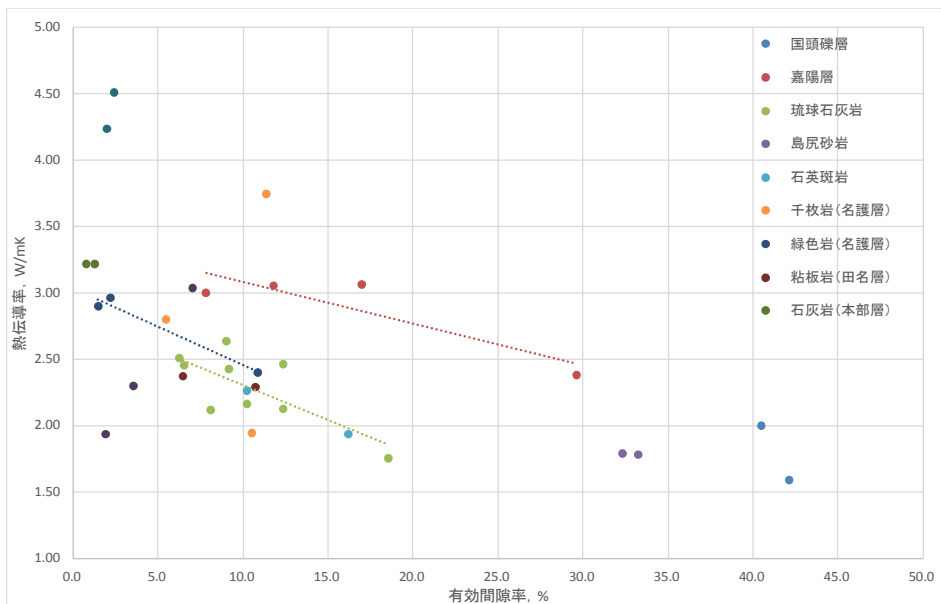


図 3.2.17 熱伝導率と有効間隙率の関係

図 3.2.18 および図 3.2.19 に、熱伝導率と弾性波伝播速度との関係を示す。

地質による違いがあるものの、全体的に P 波および S 波ともに速度の増加に伴って、熱伝導率は高くなる。砂岩優勢頁岩互層（嘉陽層）、琉球石灰岩、千枚岩（名護層）、緑色岩（名護層）などでは、データ数が少ないがその傾向が顕著である。

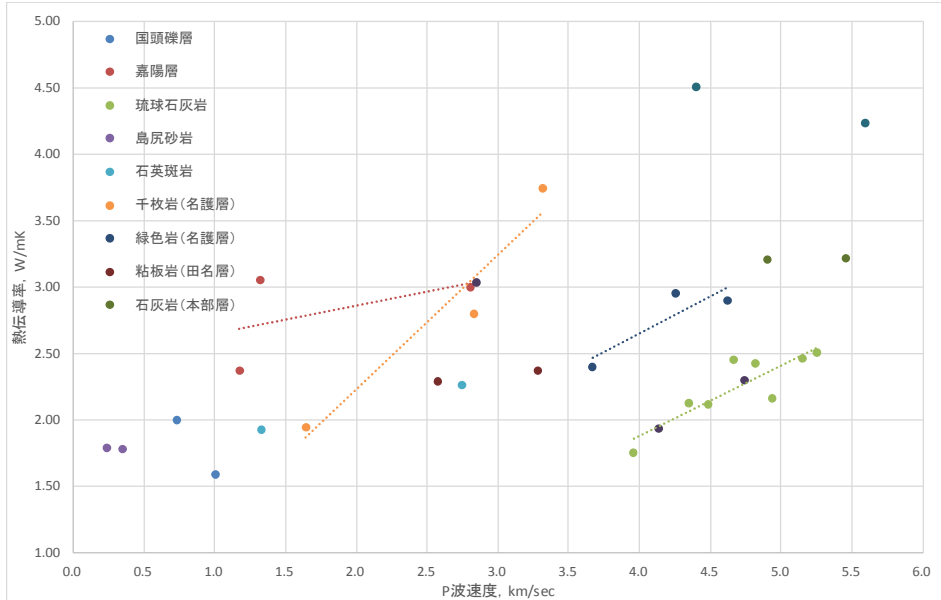


図 3.2.18 熱伝導率と P 波速度の関係

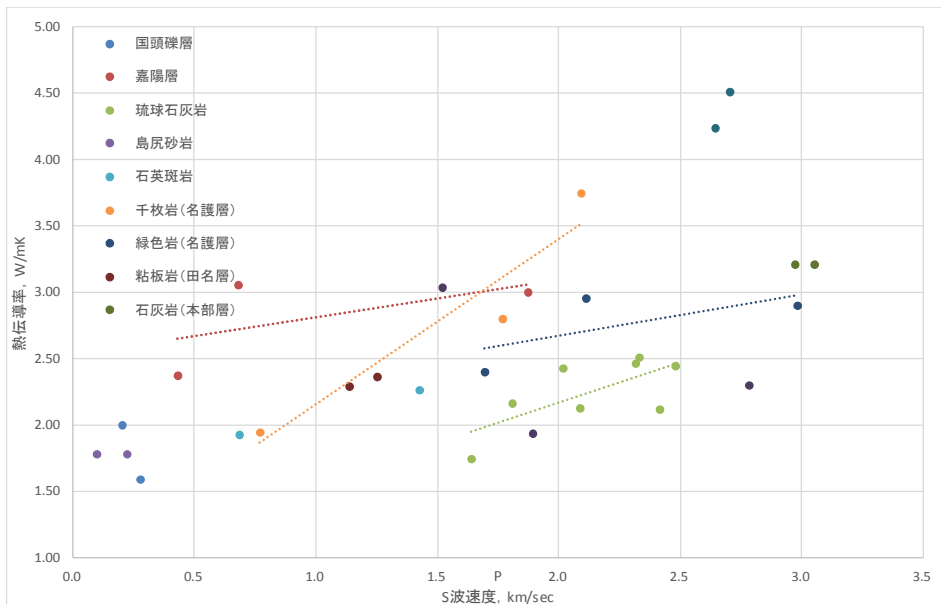


図 3.2.19 熱伝導率と S 波速度の関係

表 3.2.4 に平成 28 年度の成果も踏まえ、熱物性値の提案値を示す。

本業務において測定を行った結果の内、3 試料以上実施したものについては中央値を採用し、2 試料のものについては平均値とした。

平成 28 年度の成果と比較すると、琉球石灰岩について熱伝導率が高い値を示したが、密度や有効間隙率に表されるように風化の程度の違いによるものと判断される。島尻砂岩については、熱伝導率が同程度であったが、密度や有効間隙率を見ると、僅かではあるが緻密であると言える。

表 3.2.4 熱物性試験結果の提案値

区分	地質区分	有効熱伝導率 W/mK	熱容量 MJ/m ³ K	温度伝導率 mm ² /s	密度 g/cm ³	有効間隙率 %	P波速度 km/sec	S波速度 km/sec	備考
本年度成果	赤土(国頭礫層)	1.8	3.0	0.60	1.85	41.33	0.87	0.24	平均値
	砂岩優勢頁岩互層(嘉陽層)	3.0	1.3	2.40	2.16	14.38	1.32	0.68	中央値
	琉球石灰岩	2.4	1.1	2.19	2.32	9.14	4.74	2.20	中央値
	島尻砂岩	1.8	0.8	2.18	2.01	32.36	0.35	0.23	中央値
	石英斑岩	2.1	1.0	2.19	2.30	13.24	2.04	1.06	平均値
	千枚岩(名護層)	2.8	0.9	2.22	2.45	10.48	2.83	1.77	中央値
	緑色岩(名護層)	2.9	1.2	2.40	2.90	2.24	4.26	2.11	中央値
	粘板岩(田名層)	2.3	1.1	2.18	2.54	8.60	2.93	1.20	平均値
	石灰岩(本部層)	3.2	1.4	2.22	2.64	1.04	5.18	3.01	平均値
	泥質片岩(トムル層)	2.3	1.2	1.73	2.62	3.54	4.14	1.90	中央値
緑色片岩(トムル層)	4.4	2.2	2.06	2.68	2.23	5.00	2.67	平均値	
平成28年度成果	珊瑚礁岩	0.8	1.6	0.53	2.08	32.54	-	-	
	琉球石灰岩(風化部)	1.0	1.5	0.71	1.88	42.36	-	-	
	島尻砂岩	1.8	2.0	0.90	1.88	38.59	-	-	
	島尻泥岩	1.5	2.3	0.60	1.88	36.54	-	-	
参考値	表土(有機質土) [*]	0.7	2.28	0.31	1.34	-	-	-	
	粘土 ^{**}	1.2	3.06	0.39	1.70	-	-	-	
	砂 ^{**}	1.1	1.66	0.66	1.51	-	-	-	
	砂礫 ^{**}	2.4	1.99	1.22	2.65	-	-	-	
	花崗岩 ^{**}	4.3	2.92	1.48	2.65	-	-	-	

※小熊正人, 一般住宅向け地中熱利用システムとその設計手法, 福島大学, 2016