

## 5. 地中熱採熱期待値マップの更新

「地中熱採熱期待値マップ」とは設備設計者が個人住宅の設計など小規模な建築物において、その見積りに使用できるよう、利用し易いマップを目指したものである。

本業務の地中熱採熱期待値マップは、図 5.1 の地中熱採熱期待値マップの作成フローに従い、平成 28 年度 地中熱を活用した省エネ技術の開発・普及事業委託業務（以下「平成 28 年度業務」とする）で作成したものを参考に更新した。

地中熱利用の普及促進という観点では、地中熱採熱期待値マップシステムの精度向上とエリア拡大が不可欠であり、そのためにはボーリング柱状図と地層毎の熱物性値のデータ補充が必須となる。

そこで、まず、ボーリングデータの収集・電子化を行い、地盤ボーリングデータベースを更新した。本業務では、離島を含む沖縄県全域のうち、地中熱の需要の期待される都市部を中心にボーリング柱状図のデータ収集を行った。次に、平成 29 年度業務で実施した熱物性試験（ホットディスク法）の結果をシステムに追加登録した。それらの追加登録したボーリングデータと熱物性値を用いて、採熱能力計算用に地層のモデリングを行い、最後に 1 次元の採熱能力計算を実施し、地中熱採熱期待値マップを作成した。以降に、各項目の詳細について記載する。

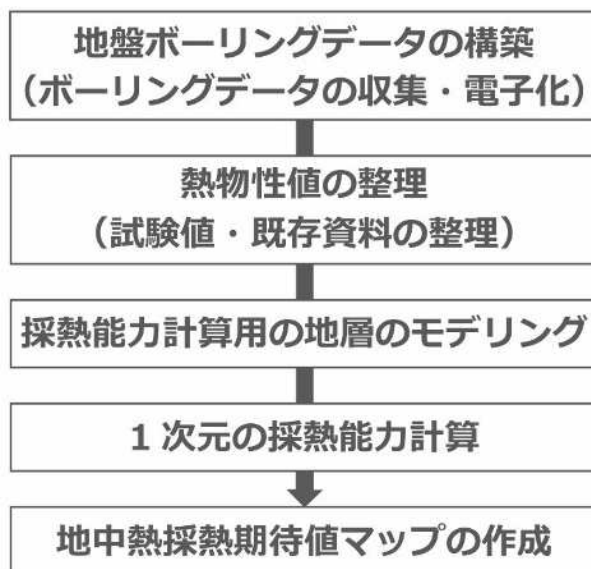


図 5.1 地中熱採熱期待値マップの作成フロー

## 5.1. 地盤ボーリングデータベースの構築

ボーリングデータの収集・電子化を行い、地盤ボーリングデータベースを更新した。本業務では離島を含む沖縄県全域のうち、地中熱の需要の期待される都市部を中心にボーリング柱状図のデータ収集を行った。以下にボーリングデータの収集方法を示す。

①沖縄県内の地質コンサルタント会社（受注者含む）が所有しているボーリングデータの収集「沖縄県地質調査業協会」を通じて、沖縄県内の地質コンサルタント会社を実施した沖縄県内で使用可能なボーリングデータの提供を依頼し、ボーリングデータの収集を行った。

②浦添市井戸台帳のボーリングデータ

浦添市に提供頂いた浦添市井戸台帳のボーリングデータ（約 600 本）を収集した。

表 5.1.1 に本業務で収集したボーリングデータを示す。沖縄県の地盤ボーリングデータベースは平成 28 年度業務で既に構築している。平成 28 年度業務では、那覇市が所有するボーリングデータ、沖縄県が所有するボーリングデータ及び「国土地盤情報検索サイト」<sup>1)</sup>で公開されているボーリングデータを対象にデータベースを構築した。ただし、海上もしくは海岸付近で実施しているボーリングデータおよび、同一箇所でも複数実施しているボーリングデータについては除外している。図 5.1.1～図 5.1.10 に本業務で追加したボーリング位置図と平成 28 年度業務および本業務で追加したボーリング位置図を示す。

表 5.1.1 沖縄県の地盤ボーリングデータ諸元

収集年度	ボーリング本数
平成 28 年度業務	3,360 本
平成 30 年度業務（本業務追加分）	1,053 本
合計 [本]	4,413 本

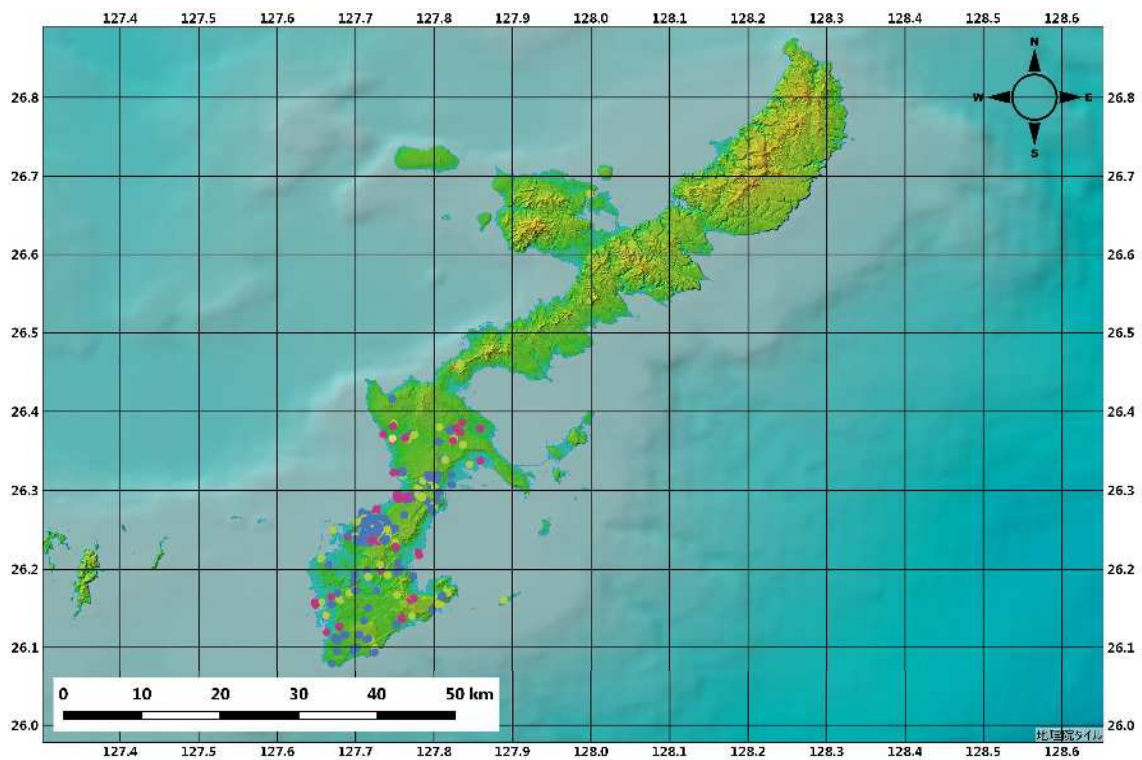


図 5. 1. 1 沖縄本島の地盤ボーリング位置図（平成 30 年度業務）

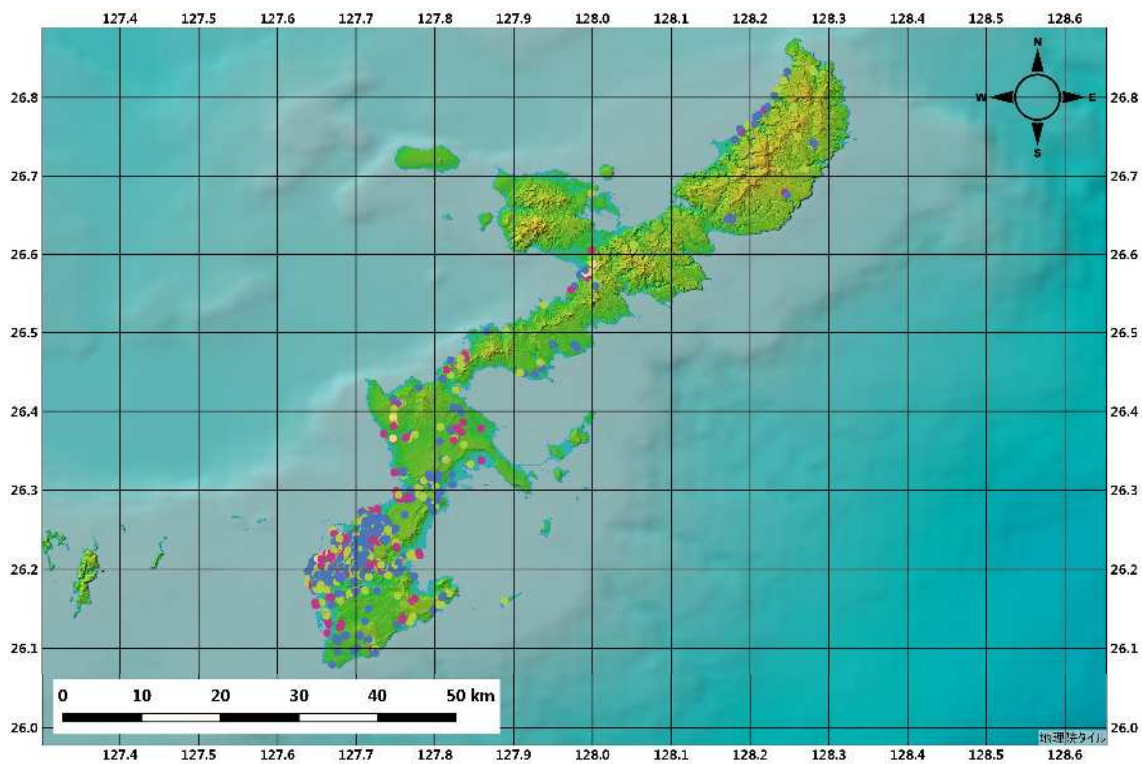


図 5. 1. 2 沖縄本島の地盤ボーリング位置図（平成 28 年度業務＋平成 30 年度業務）

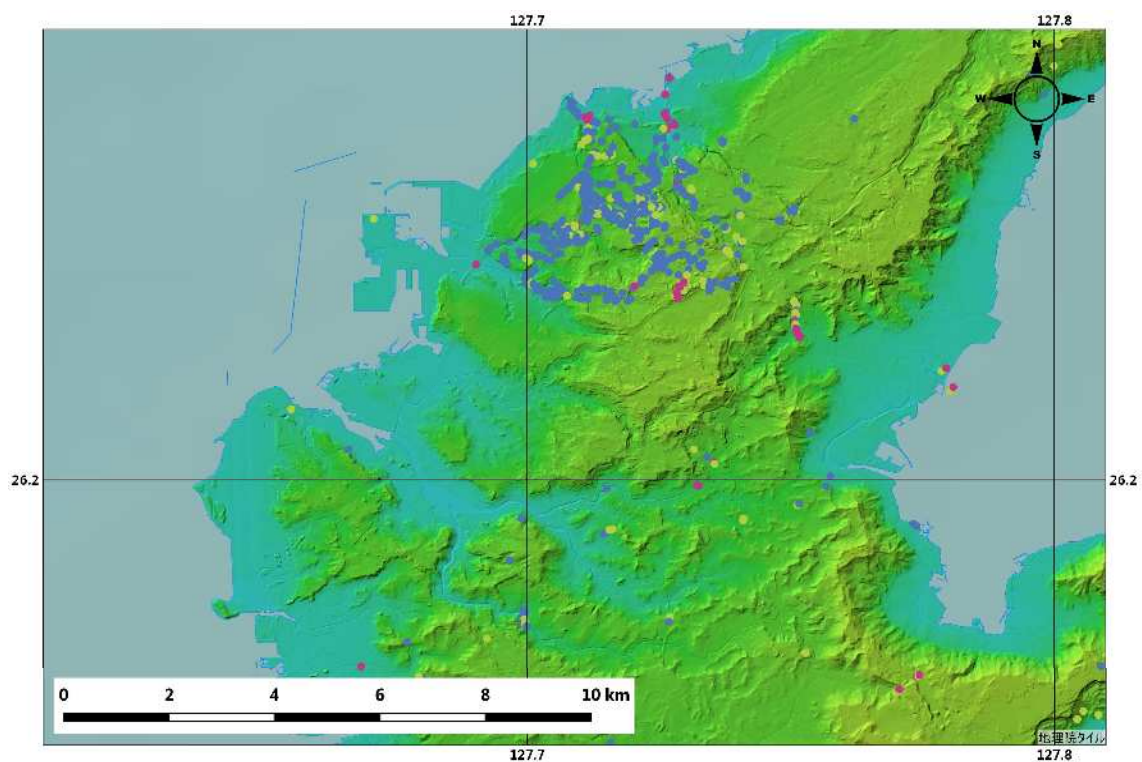


図 5.1.3 那覇市・浦添市周辺の地盤ボーリング位置図（平成 30 年度業務）

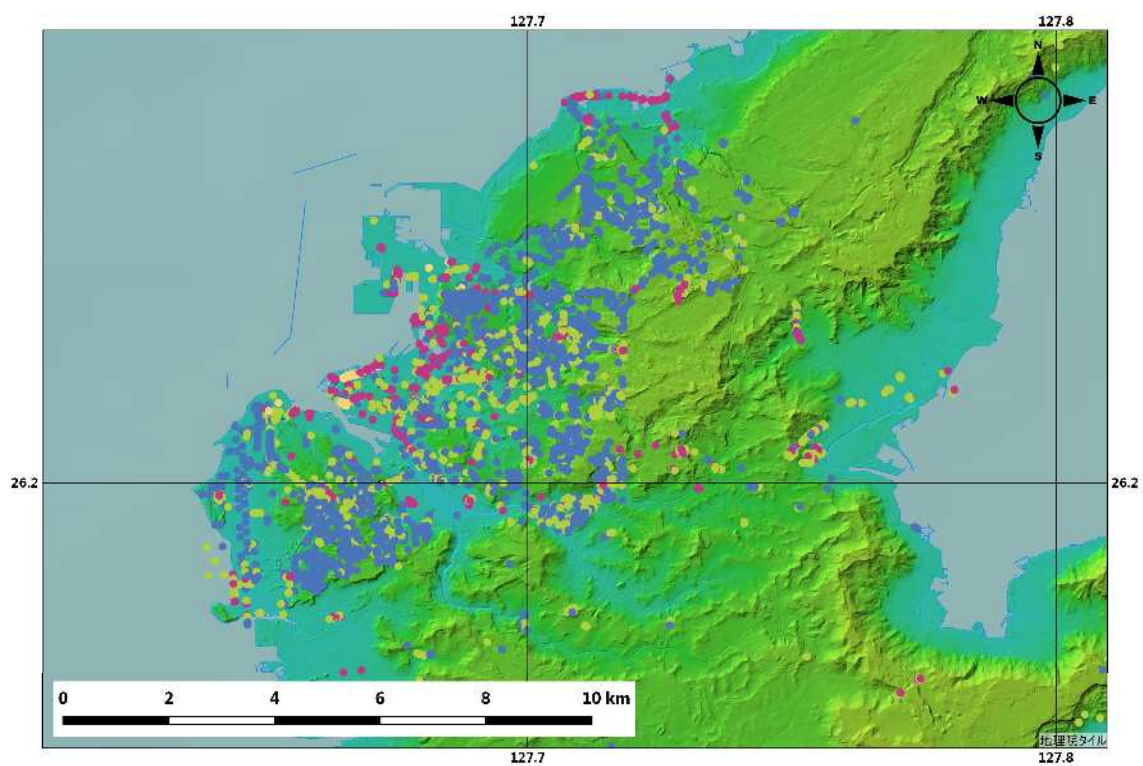


図 5.1.4 那覇市・浦添市周辺の地盤ボーリング位置図（平成 28 年度業務＋平成 30 年度業務）

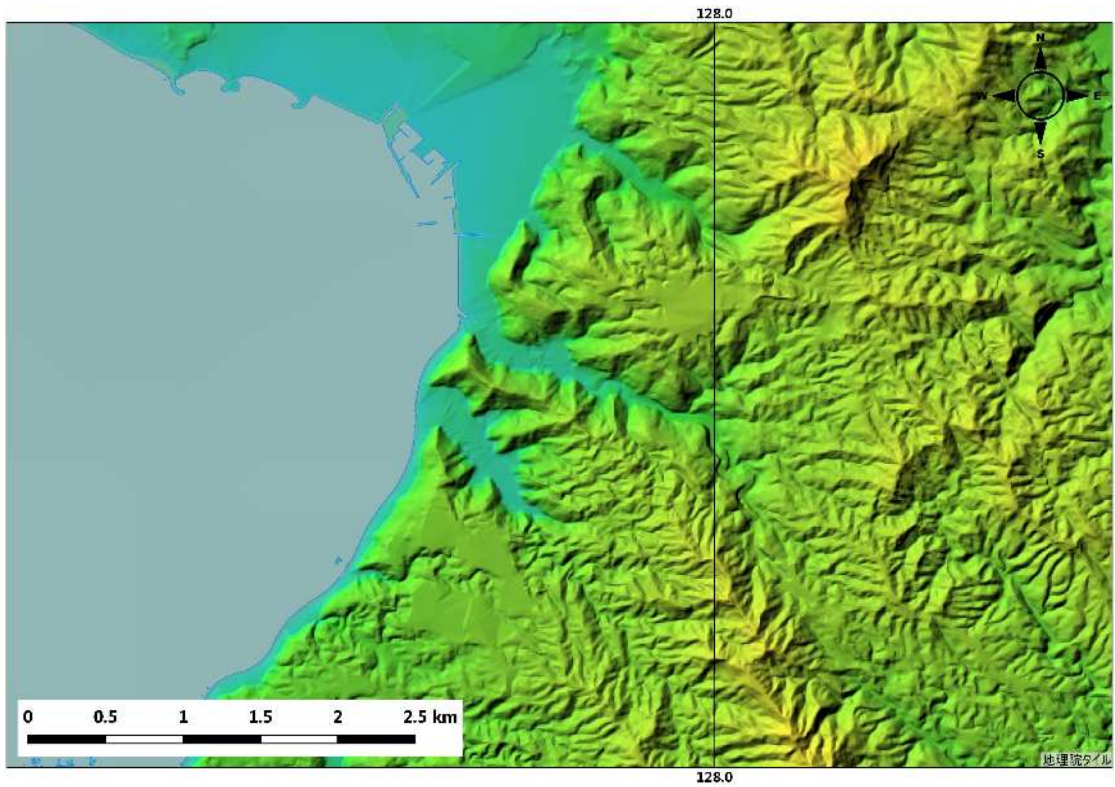


図 5.1.5 名護市の地盤ボーリング位置図（平成 30 年度業務）

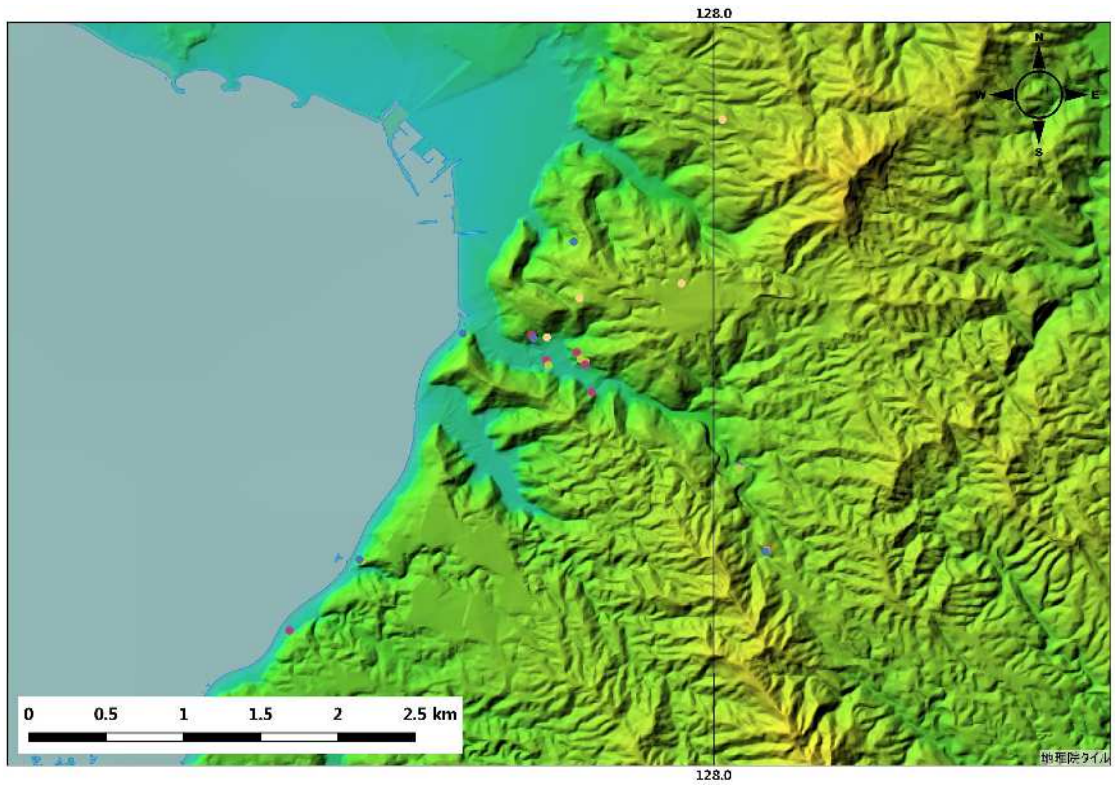


図 5.1.6 名護市の地盤ボーリング位置図（平成 28 年度業務＋平成 30 年度業務）

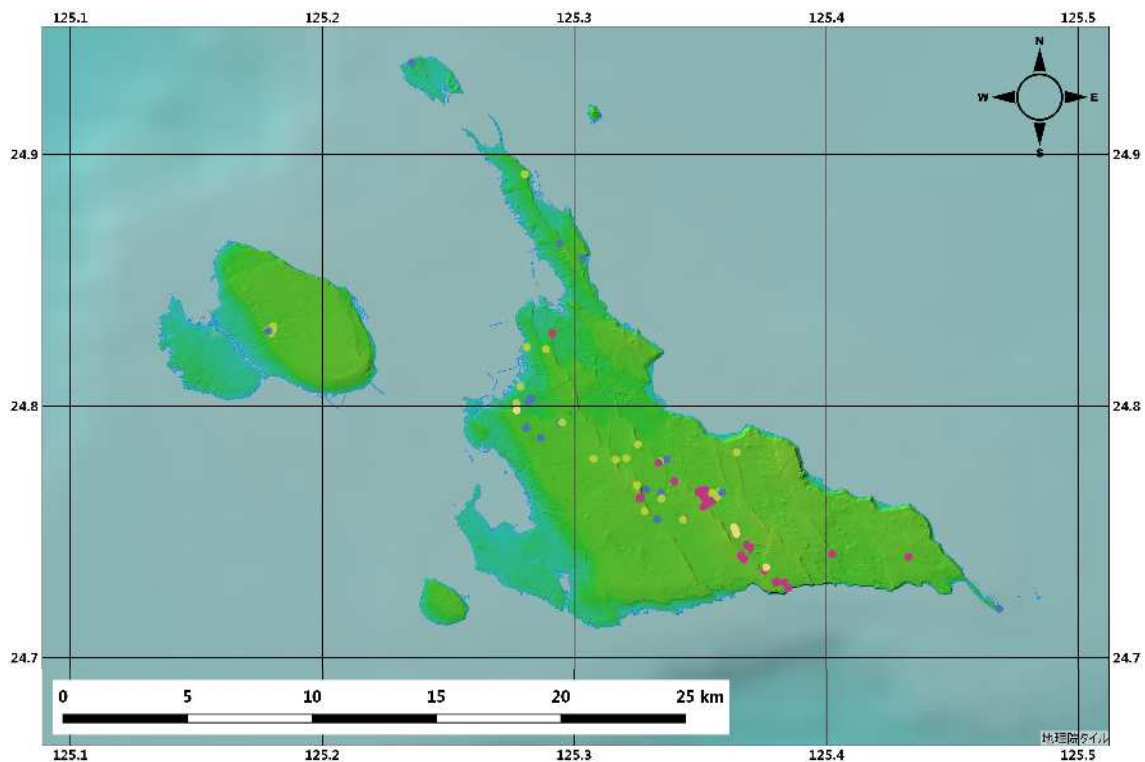


図 5.1.7 宮古島・伊良部島の地盤ボーリング位置図（平成 30 年度業務）

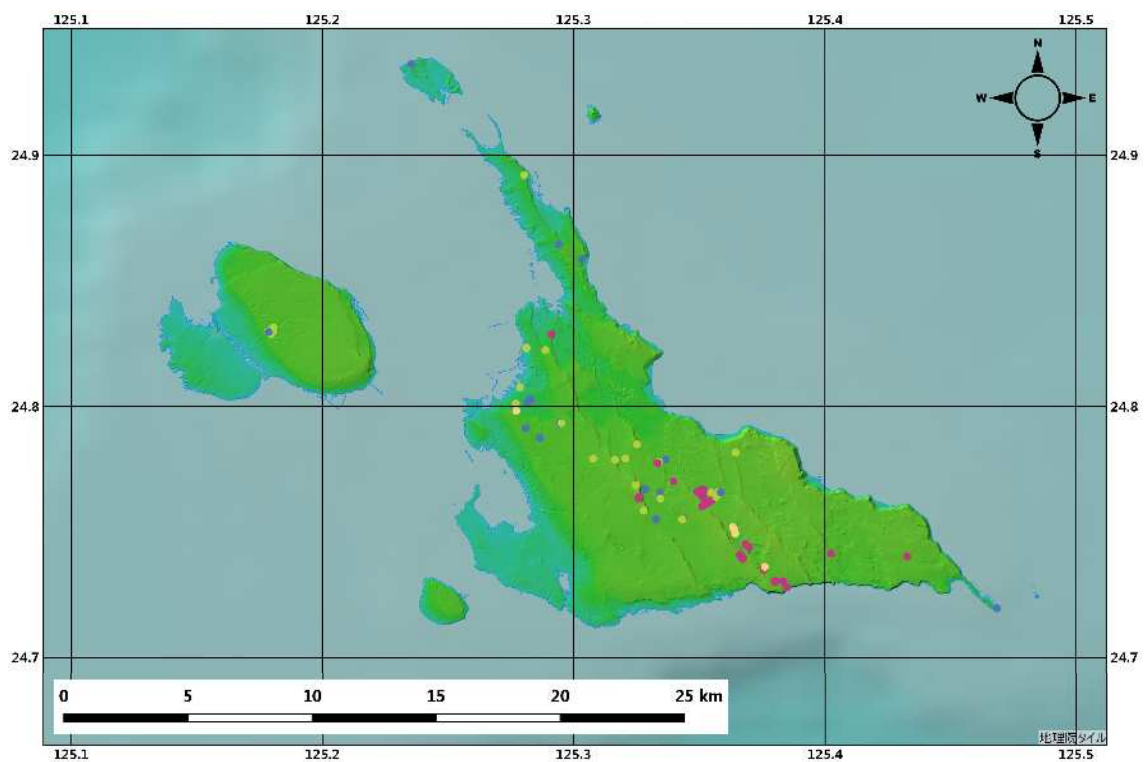


図 5.1.8 宮古島・伊良部島の地盤ボーリング位置図（平成 28 年度業務+平成 30 年度業務）

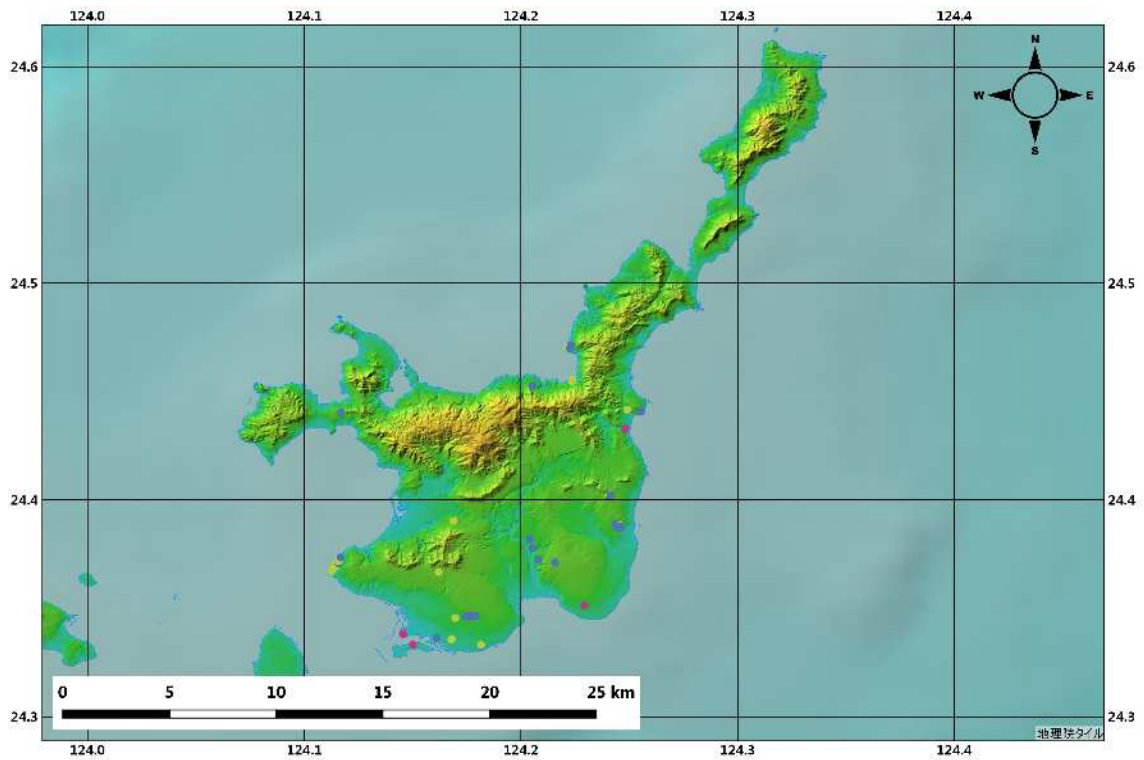


図 5.1.9 石垣島の地盤ボーリング位置図（平成 30 年度業務）

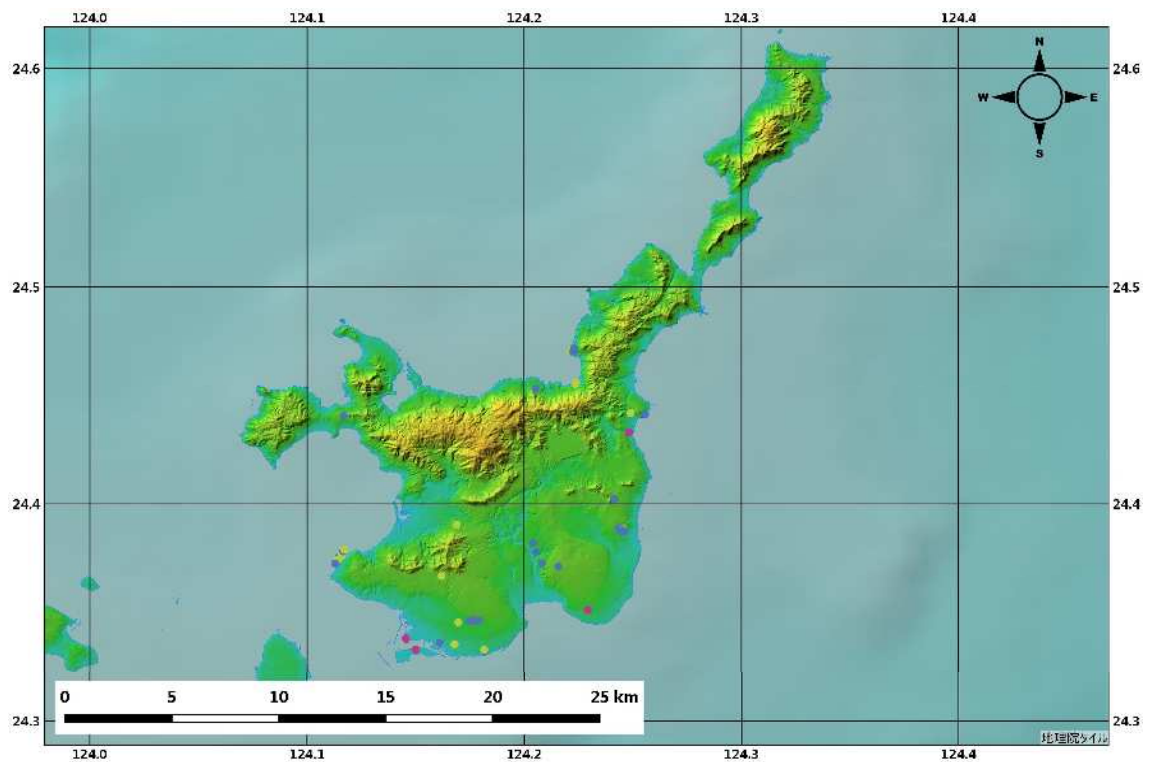


図 5.1.10 石垣島の地盤ボーリング位置図（平成 28 年度業務+平成 30 年度業務）

## 5.2. 熱物性値の整理

採熱能力計算に使用する熱物性値（密度 [kg/m<sup>3</sup>], 比熱 [J/kgK], 熱伝導率 [W/mK]）は、平成28年度業務で整理した内容に新たに平成29年度業務で実施した熱物性試験（ホットディスク法）の整理結果を追加した。以下に、沖縄県の熱物性値の整理結果を記載する。

一般的に岩石の比熱 [J/kgK]は、空隙率にはあまり依存せず、二酸化ケイ素 (SiO<sub>2</sub>) の比熱に依存する。沖縄県では特殊土壌として石灰岩が含まれ、石灰岩の比熱は主に炭酸カルシウム (CaCO<sub>3</sub>) の比熱により決まる。また、熱伝導率 [W/mK]は材質及び分子構造（結合力）により異なり、一般的に地層の比熱 [J/kgK]は粘土の方が礫よりも大きく、熱伝導率 [W/mK]は礫の方が粘土より大きくなる。設計採熱能力は密度 [kg/m<sup>3</sup>], 比熱 [J/kgK], 熱伝導率 [W/mK]の熱物性値によって求まるが、熱伝導率 [W/mK]の影響が最も大きく、熱物性値が大きくなるほど大きく算出される。

採熱能力はその地域の地質の違いに依存するため、沖縄県に分布する代表的な地質に対して熱物性値を整理した。表 5.2-1 に沖縄県の熱物性値の一覧を載せる。また、表 5.2-1 の備考に示す識別 No. は平成29年度業において熱物性測定試験を行った供試体の識別番号である（表 5.2-2 参照）。礫質土・砂質土など区分に「質」がつくものは、『日本総一土質分類の定義と工学的分類体系』<sup>6)</sup>より、細粒分が15%以上、50%未満という定義が存在する。この状態では礫や砂の粒子同士が接触しておらず、マトリクスによって粒子が互いに分断されている可能性が高い。従来区分（礫、堆積岩、凝灰岩などの単一な土質区分）を用いると採熱量を過大評価してしまう可能性があるため、新たに「砂質土」や「シルト質礫」の土壌区分を設けた。



表 5.2.1 沖縄県の熱物性値の一覧

No	モデリング 区分名	区分基準	熱物性値			備考
			密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 (J/kgK)	熱伝導率 (W/mK)	
1	人工物 表土	アスファルト、コンクリート、埋(立)土(○)、レンガ、モルタル、改良土、路盤(材)、床材、(道路)盛土(層)、塗装工、表土、埋戻しO、舗装(土)	1,340	1,700	0.70	参考文献(2)
2	泥炭	耕土、有機質土、高有機質土、腐植土	1,300	3,230	0.60	参考文献(3)
3	粘土	(○)粘(性)土、(○)シルト、○混り粘(性)土、○混りシルト、○質粘土、○質シルト、ヘトロ	1,700	1,800	1.20	参考文献(2)
4	シルト	シルト、○混りシルト、○質シルト	1,409	2,406	0.77	高知平野の成果を使用
5	砂	砂、○混り砂、○砂	1,510	1,100	1.10	参考文献(2)
6	砂礫	礫、細礫、○混り礫、○礫、五石、○混り五石、砂礫、○混り砂礫、砂質土五層、砂利、コーラル、サンゴ岩、サンゴ質砂礫、サンゴ礁(岩)、ビーチロック、活サンゴ	2,648	750	2.43	サンゴ礁岩の試験値
7	堆積岩	固結シルト、軟岩、○砂岩、泥岩、頁岩、硬岩、○硬岩、岩盤、○島尻O、洪積層、○千枚岩、小礫砂岩、第三紀層、第四紀洪積世、粘板岩	1,200	2,790	0.87	島尻泥岩の試験値
8	凝灰岩	凝灰岩、○凝灰岩、凝灰角礫岩、緑色岩、緑色片岩	1,400	1,700	0.80	参考文献(4)
9	風化岩	風化岩、風化O、○風化O	2,650	772	1.38	参考文献(5)
10	空洞	空洞	1.26	1,000	0.02	参考文献(2)
11	琉球石灰岩	琉球石灰岩	2,301	843	2.16	識別No.17-C-14 (H29業務の識別Noと同じ)
12	石灰岩	石灰岩、O石灰岩	2,677	849	2.27	識別No.17-C-30 (H29業務の識別Noと同じ)
13	頁岩	頁岩	2,360	824	2.20	流紋岩として評価
14	斑岩	石英斑岩	2,350	969	1.93	識別No.17-C-19 (H29業務の識別Noと同じ)
15	未固結(琉球)石灰岩	未固結(琉球)石灰岩	2,210	991	1.75	識別No.17-C-8 (H29業務の識別Noと同じ)
16	赤土	島尻マーヅ	1,913	1,631	1.58	識別No.17-C-2 (H29業務の識別Noと同じ)
17	島尻砂岩	島尻(層)砂岩	1,982	1,189	1.78	識別No.17-C-16-2 (H29業務の識別Noと同じ)
18	砂岩層砂質岩五層	砂岩泥岩五層	2,115	1,522	2.37	識別No.17-C-3 (H29業務の識別Noと同じ)
19	千枚岩	(黒色)千枚岩、○質千枚岩	2,604	841	2.79	識別No.17-C-22 (H29業務の識別Noと同じ)
20	緑色岩	緑色(片)岩	2,751	975	2.40	識別No.17-C-26 (H29業務の識別Noと同じ)
21	粘板岩	粘板岩	2,532	835	2.29	識別No.17-C-27 (H29業務の識別Noと同じ)
22	砂質土	○質砂、砂質土	1,461	1,717	1.00	砂51%、シルト49%の平均値
23	シルト質礫	礫質土、○質礫、○質○混り(角)礫	2,042	1,324	1.10	風化岩51%、シルト49%の平均値

表 5.2.2 熱物性試験試料 (H29 年度業務)

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			29B-1	1.80	2.00	0.20	赤土: 国頭礫層	若干、細砂を含む
17-C-2	今年度 事業 採取分	金武町金武	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				糸満市座波	B-2	1.50	1.60	0.10
17-C-8		糸満市座波	B-3	1.30	1.45	0.15	琉球石灰岩	砂質砕屑性、多孔質
17-C-9		糸満市真壁	B-1	13.30	13.40	0.10	琉球石灰岩	砕屑性
17-C-10			B-1	14.70	14.80	0.10	琉球石灰岩	砕屑性
17-C-11			B-3	9.40	9.55	0.15	琉球石灰岩	含サンゴ礫、砕屑性
17-C-12		沖繩市登川	B-1	5.60	5.75	0.15	琉球石灰岩	再結晶して緻密
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
17-C-15		旧石垣空港	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	既存試料	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-6	8.00	8.10	0.10	泥質片岩: トムル層	

※ 赤色は本業務の熱物性値を決める際に、使用した熱物性試験の試料。

### 5.3. 採熱能力計算用の地層のモデリング

次に、5.2 で熱物性値を整理した地層を各地域の地盤ボーリング柱状図の地層に当てはめた。以下に沖縄県の地質について記載する。

沖縄本島の地質については、「琉球弧の地質と岩石：沖縄島を例として」（新城，2014）<sup>7)</sup>を引用し、沖縄本島の地質に関する記載を抜粋する。まず、沖縄本島の地質は地層の性質から二つに大別され、分布域も北部と南部に分けられる（図 5.3.1 参照）。北部の地質は形成年代が古く、主に付加体に関連した堆積物である。南部地域は若い地層で構成され、主にその場で堆積した現地性堆積物の地層である。

#### 1) 沖縄本島北部の地質

沖縄本島北部の地質は、ペルム紀から始新世にかけての古い地層群からなり、主に付加体堆積物で構成されている。その地質は、西から東にかけて、伊平屋帯、今帰仁層、本部帯、名護層、嘉陽層から構成されており（図 5.3.2 参照）、各地層帯は逆断層で接すると推定されている。形成年代の古い地質帯が西側にあり、それが若い地質帯の上に乗上げたような構造をもつ。

付加体とは、プレートが沈み込むときに海洋底にたまっていた堆積物がはぎとられて陸側へ押し付けられ、海溝の陸側斜面の先端部に付け加えられた堆積物である（図 5.3.3 参照）。以下に各地層帯について記載する。



図 5.3.1 沖縄本島の地質概略

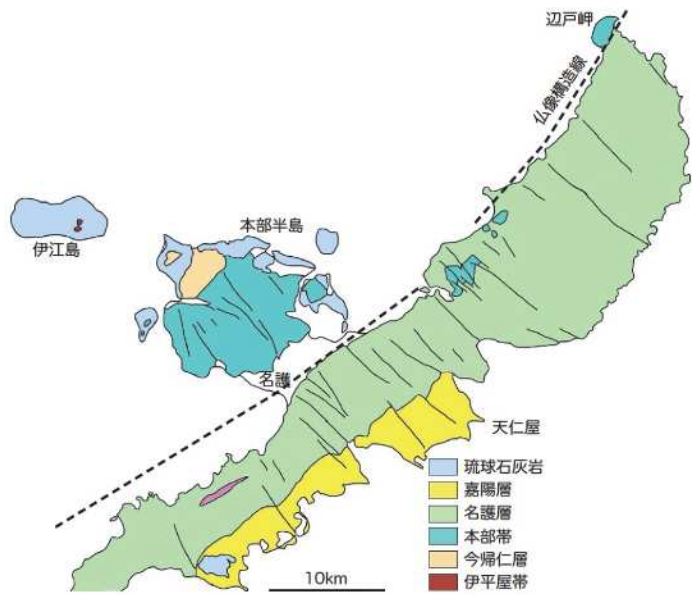


図 5.3.2 沖縄本島北部の地質帯の带状配列

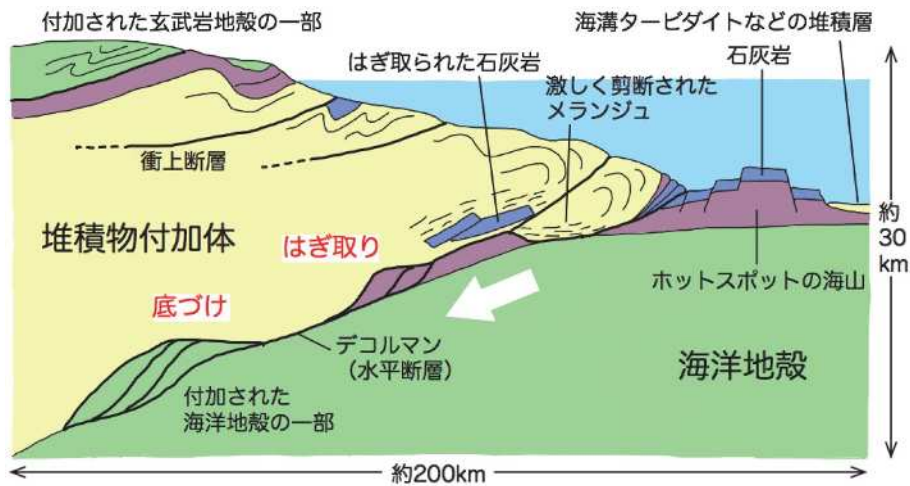


図 5.3.3 付加体の形成概念図

### (1) 伊平屋帯

伊平屋帯の岩石を代表するのはチャートである。ほかには砂岩泥岩互層もある。チャートは主成分が  $\text{SiO}_2$  で非常に緻密であり、ハンマーで叩くと火花がでるほど硬い岩石である。深海底でケイ酸の殻をもつ放射虫や珪藻が堆積して固まった岩石である。海洋博記念公園の正面入り口から眺望できる伊江島の中央部に突き出た「タッチュー」は、このチャートから構成されている（図 5.3.4 参照）。タッチューからは三畳紀～中期ジュラ紀の遠洋性の放射虫化石が見つまっている。伊平屋島や伊是名島ではペルム紀の放射虫も産出する。



図 5.3.4 伊平屋帯のチャートからなる伊江島のタッチュー

## (2) 今帰仁層

今帰仁層は、塊状で緻密な灰色の石灰岩よりなる。今帰仁城跡の城門や城壁は、この石灰岩でできている。石灰岩からは後期三畳紀のアンモナイト（図 5.3.5 参照）、コノドント、他には二枚貝の仲間のハロビア化石も見つかっている。



図 5.3.5 今帰仁帯の灰色結晶質石灰岩のアンモナイト化石

### (3) 本部帯

本部帯は、湧川層・本部層・与那嶺層からなる。湧川層は砂岩、本部層は石灰岩を主体としている（図 5.3.6 参照）。泥岩や礫岩層をはさみ、下部では緑色岩もある（図 5.3.7 参照）。与那嶺層はフズリナ、放散虫、コノドントなどの微小化石から、古生代末のペルム紀から中生代三畳紀にわたるチャート、石灰岩、緑色岩の岩塊や礫を含んだジュラ紀～前期白亜紀の泥質岩や砂岩からなる。このように、いろいろな時代の岩石や岩体が混じっており、フランス語で「ごちゃ混ぜ」を意味する「メランジェ」と呼ばれる地質体である。



図 5.3.6 本部帯の結晶質石灰岩の採石場



図 5.3.7 本部帯のチャート（上部）と緑色岩（下部）

#### (4) 名護帯（名護層）

名護帯（名護層）は黒色の泥岩（弱変成を受けて千枚岩となっている）を主体とした砂岩・泥岩互層と緑色岩から構成される。国道 58 号線添いを北へドライブすると、恩納村あたりから名護層の黒色千枚岩の露頭が見え始める（図 5.3.8 参照）。緑色岩は、本島主部と本部半島との付け根より北方の西海岸沿いに露出している。玄武岩の溶岩が緑色に変質したもので、海底に噴出した時の枕状溶岩の形態を残していることもある（図 5.3.9 参照）。名護層からは化石が未だに見つかっておらず、正確な堆積年代は不明であるが、白亜紀後期頃のものだと推定されている。



図 5.3.8 名護帯の千枚岩



図 5.3.9 名護帯の緑色岩（枕状溶岩）



#### (5) 嘉陽帯（嘉陽層）

嘉陽帯（嘉陽層）も砂岩と泥岩からなるが、砂岩層が優勢なところが多い。沖縄本島東側の天仁屋の海岸には見事な連続露頭がみられ、フィールド学習の絶好の場所となっている（図 5.3.10 参照）。大陸斜面で堆積した砂泥による海底地滑りの跡も認められ、当時の海溝を埋める堆積層である。地層は激しく褶曲し、堆積構造が上下逆転するなど、付加体の浅所での変形の様子が読みとれる。嘉陽層からは中期始新世の貨幣石が見つまっている。名護帯と嘉陽帯は、時代と岩相が西南日本の太平洋側沿いに広く分布している四万十帯によく似ており、それが中琉球まで連続していると考えられている。



図 5.3.10 天仁屋海岸に露出する嘉陽帯

## 2) 沖縄本島南部の地質

沖縄島南部の簡略化した地質図を図 5.3.11 に示す。沖縄島南部の地層は島尻層群と、主に琉球石灰岩から構成される琉球層群とに分けられる。

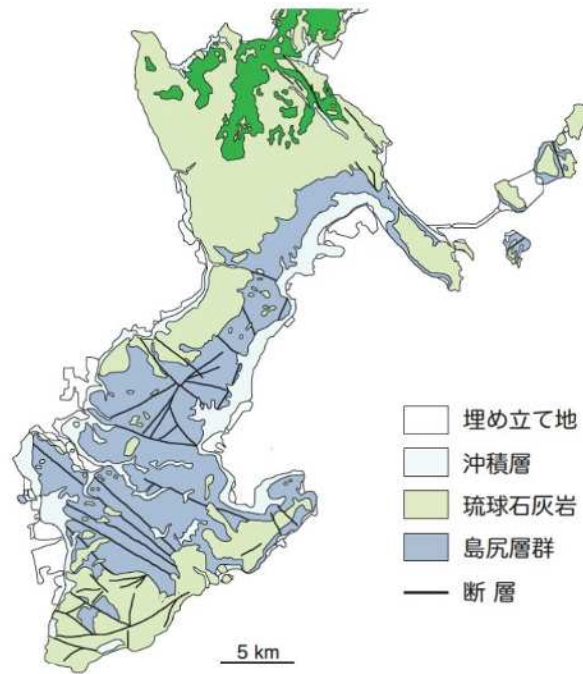


図 5.3.11 沖縄島南部の地質図

### (1) 島尻層群

島尻層群は、凝灰岩や細粒砂岩を含むおもに泥岩（正確にはシルト岩）からなる地層群である。下位が砂岩（豊見城層）、上位が泥岩層（与那原層と新里層）からなる（図 5.3.12 参照）。全体として東北東-西南西の走向をもち、南南東に緩やかに傾斜している。これらの全体の厚さは 2000m にも達する。中新世後期から鮮新世にかけて、中国大陸からの多量の砂や泥が海底に堆積してできた地層であり、島尻層群の堆積環境は半深海であったと推定されている。



図 5.3.12 琉球大学周辺に露出する島尻層群の泥岩

## (2) 琉球石灰岩

琉球石灰岩は形成年代に基づいて2つに大別できる。古いものが琉球石灰岩の主要な部分であり(図5.3.13参照),これが琉球弧の広範囲にわたって分布している。新しいものは,沖縄島南部の玉泉洞入り口付近の港川周辺に小規模に分布しているにすぎない。ここの石灰岩(港川層)は「栗石」あるいは「港川石」として有名で大規模に採石されてきた(図5.3.14参照)。見た目は大阪名物の「あわおこし」にそっくりで,ゴマ粒大の有孔虫の化石が密集している。他には石灰藻や巻貝,二枚貝などの生物遺骸片が埋まっており,現在の浜砂と似ている。加工しやすく,石垣や家の壁石灯籠などに使用されてきた。



図 5. 3. 13 沖縄島南部の琉球石灰岩の採石場



図 5. 3. 14 琉球石灰岩(港川層)の露頭

### 3) 宮古島・伊良部島の地質

宮古島の地質は、第三紀鮮新世から第四期下部更新世の泥岩、シルト岩、砂岩で構成される島尻層群と、それを不整合で覆う更新世琉球層群琉球石灰岩からなる。琉球石灰岩の表層は風化土壌であり、島尻マージや一部にジャーガル、沖積土壌が見られる（図 5.3.15 参照）。上記の土壌は弱アルカリ性または中性で粘土とロームを含み、石灰岩の破片が混入した石灰質粘土や、その他数種の粘土が広範囲に分布している。この3つの主な層のうち基盤となっている島尻層と琉球石灰岩層は宮古島に数条に走る断層の影響でブロック状に形成されている。

伊良部島の地質は、中新世～鮮新世の島尻層群、更新世の琉球層群、現世の白鳥崎石灰岩、耕地を形成する風化土壌ならびに新旧2つの砂丘堆積物によって構成されている。図 5.3.16 に宮古島・伊良部島の表層地質図を載せる。

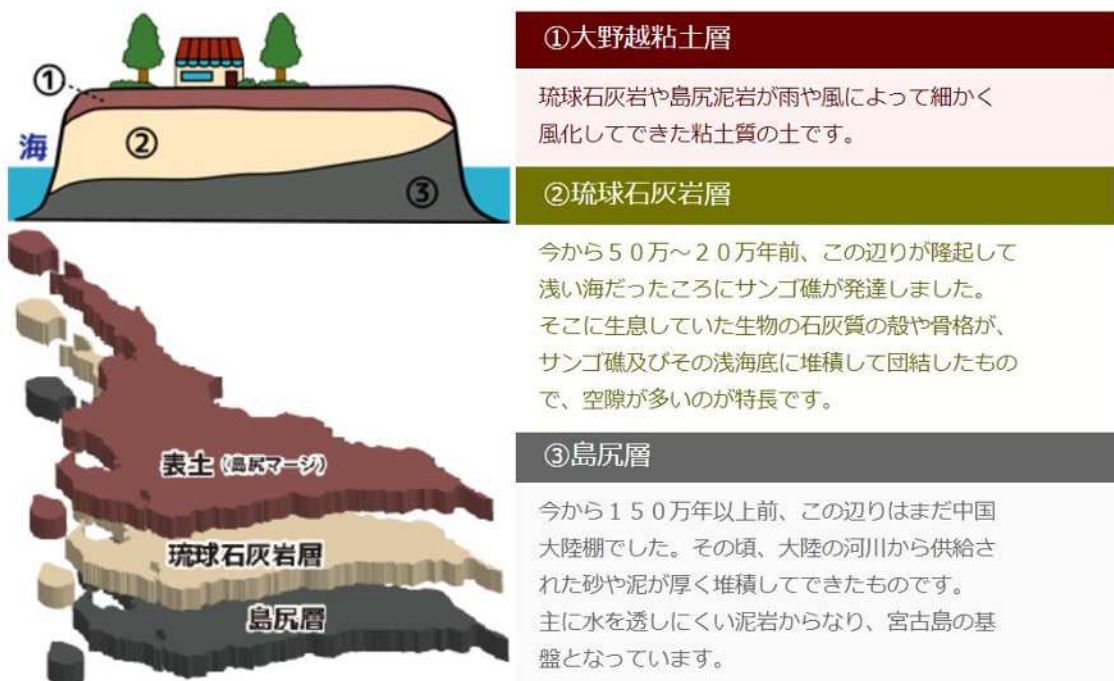


図 5.3.15 宮古島の地質（概略）

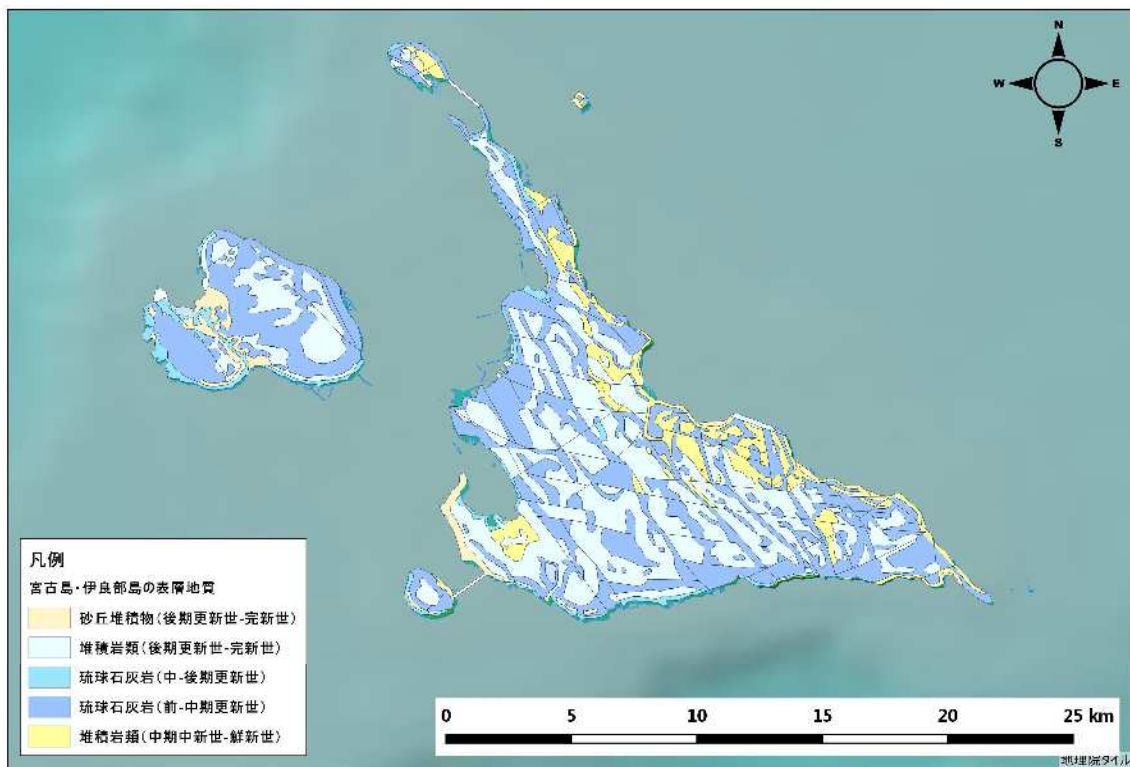


図 5. 3. 16 宮古島の・伊良部島の表層地質

#### 4) 石垣島の地質

石垣島は、県下最高峰の於茂登岳 (526ha) が島のほぼ中央部にそびえ、主要河川である名蔵川、宮良川、轟川の源流域となっている。北部は山地を中心とした地形となっており、於茂登岳から北東部の平久保半島までは、桴海於茂登岳、ほうら岳、野底岳、金武岳、はんな岳、トムル岳、久宇良岳、安良岳、山当山が連なっている。南部はバナナ岳 (230m)、前勢岳 (197m) 周辺を除き、海拔 80m 以下の低地と台地によって占められている。海岸線では、陸地からおおむね 500m~1km 程度の幅でサンゴ礁 (裾礁) が発達し、広い所では 2km 程度に及ぶ。また、川平湾や玉取崎を始め、入江と岬が複雑に入り組んだ地形となっている。地質は、沖縄県内で見られる地層で最も古いトムル層が平久保崎からはんな岳一帯にかけて分布している。トムル層は主に緑色片岩からなる地層であり、ホウラ岳周辺、屋良部半島東部にも見られる。また、於茂登岳からぶざま岳一帯は花崗岩の貫入岩、野底岳周辺と屋良部半島西部には主に凝灰岩からなる野底層、南部にはいわゆる琉球石灰岩からなる大浜層が見られるなど、極めて変化に富んだ複雑な地質構造を示している。図 5.3.17 に石垣島の表層地質図を示す。

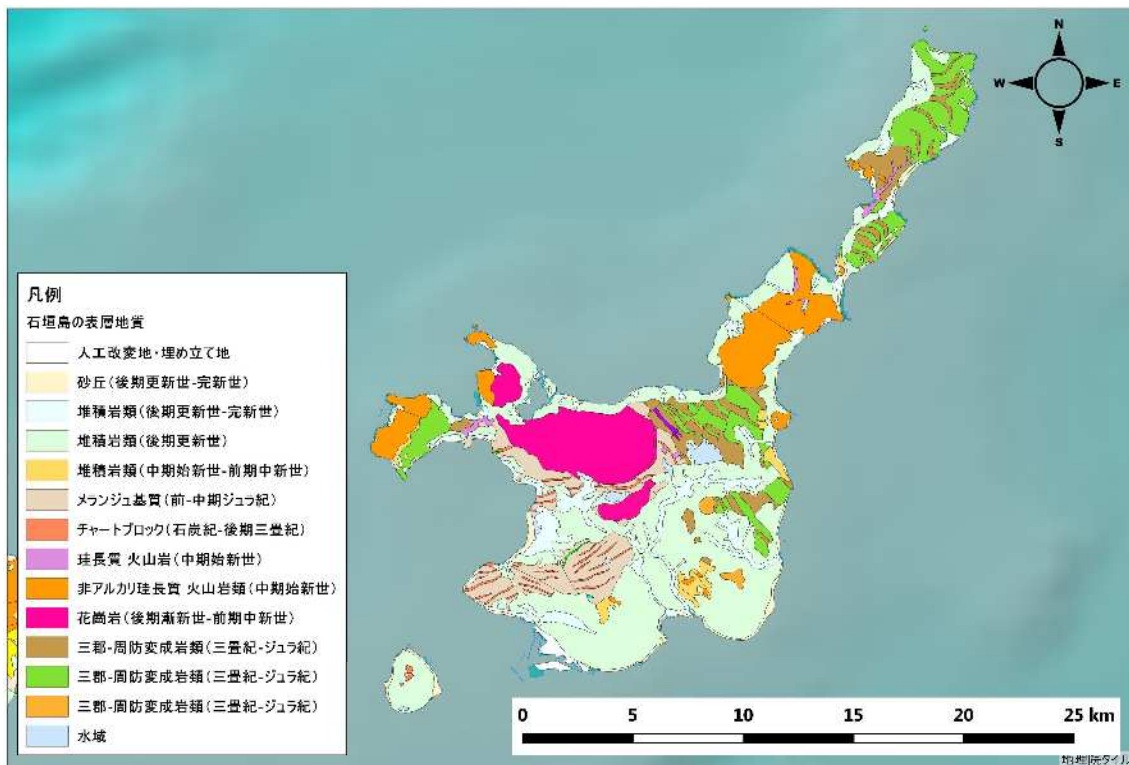


図 5.3.17 石垣島の表層地質

## 5.4. 設計採熱能力計算

採熱能力の計算はボーリング柱状図単位で以下の手法で実施する。

### 1) 計算手法

- ・採熱能力の計算方法：1次元非定常熱伝導方程式
- ・地盤モデルは地下水位またはその変動が明らかではないため、常に湿潤状態で計算する。
- ・設計者の使い易さを考慮し、明確でない地盤条件（地下水流速，不易層温度）は，安全側である「地下水流速＝ゼロ，不易層温度＝平均気温」で計算する。

### 2) 1次元非定常熱伝導方程式

①式で得られた温度分布から，暖房時に土壌から吸熱する採熱部外表面熱流量を②式から求める。冷房時には土壌に放熱するため，②式右辺の符号が逆転する。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} \quad \text{①}$$

$$dq(t) = 2\pi r_{GHX} k \frac{\partial T}{\partial r_{GHX}} \quad \text{②}$$

ここで， $dq$  は単位長さ当たりの採熱部外表面熱流量， $\rho$  は密度， $c$  は比熱， $k$  は熱伝導率， $r$  は半径方向位置， $t$  は時間， $T$  は温度， $r_{GHX}$  は採熱管の半径， $2\pi r_{GHX}$  は採熱管の周長である。

### 3) 計算条件

#### ボーリング柱状図の最下端が熱交換井深さに満たない場合

最下端層が岩（堆積岩，凝灰岩，風化岩，琉球石灰岩，石灰岩，デイサイト，斑岩，未固結琉球石灰岩，島尻砂岩，砂岩優勢頁岩互層，千枚岩，緑色岩，粘板岩）の場合のみ熱交換井深さまで延長する。最下端層が岩でない場合は，計算対象外として除外する。

#### 沖縄県の標準的な計算条件

本業務では，H28年度業務の計算条件を使用し，採熱能力を評価した。



- ・冷房期：5月～10月，暖房期：12月～3月
- ・1日の冷房運転時間：16時間/日（住宅），8時間/日（官庁），24時間/日（病院）
- ・1日の暖房運転時間：6時間/日（住宅），8時間/日（官庁），24時間/日（病院）
- ・運用年：5年
- ・地中温度（平均気温）：23.1℃
- ・熱交換井長さ：10m，20m，50m
- ・運転時の採熱管温度：冷房期 45℃，暖房期 10℃
- ・空洞の設計採熱能力（仮定）：0 [W/m]

#### 4) 計算結果（各地層の設計採熱能力 [W/m]）

計算結果として，設計採熱能力 [W/m]を出力する。設計採熱能力 [W/m]とは，ヒートポンプ運転後の採熱能力のことであり，ヒートポンプ運転期間の採熱量の最低値 [W/m]（設計に用いる採熱能力）を示す。図 5.4-1 は採熱量の時間変化を示しており，水色の部分はヒートポンプの運転期間である。

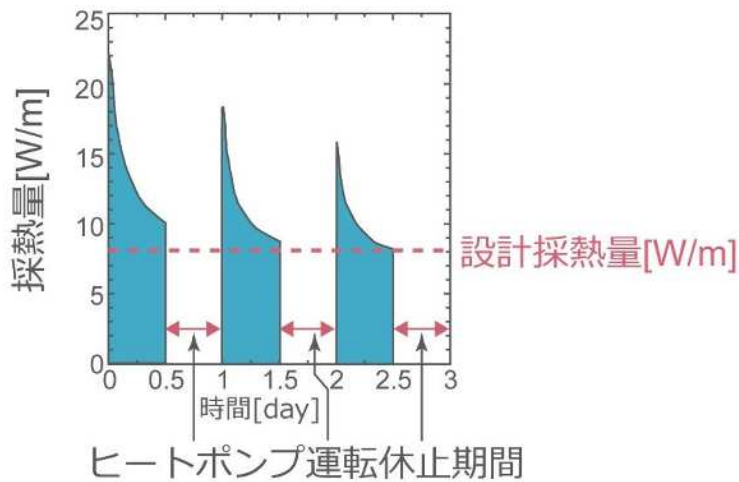


図 5.4.1 設計採熱能力 [W/m]について

表 5.4.1 に各地層の設計採熱能力 [W/m]の計算結果を記載する。ボーリング調査結果等から明らかになった地層構成より，地層厚×各地層の設計採熱能力 [W/m]でその場所の採熱能力を把握することができる。

表 5. 4. 1 沖縄県の各地層の設計採熱能力

No	ユーザー 定義コード	モデリング区分名	設計採熱能力 [W/m]_住宅	設計採熱能力 [W/m]_官庁	設計採熱能力 [W/m]_病院
1	1	人工物, 表土	11.1734	22.9245	10.8195
2	2	泥炭	12.7232	19.9906	11.3816
3	3	粘土	17.3160	29.1525	17.3139
4	4	シルト	14.1806	22.9245	13.2935
5	5	砂	12.6845	22.3777	13.3737
6	6	砂礫	20.3658	39.1963	21.0448
7	7	堆積岩	14.8746	24.2217	14.1069
8	8	凝灰岩	12.3083	20.4548	12.0595
9	9	風化岩	15.7834	27.8956	16.6571
10	10	空洞	0.0000	0.0000	0.0000
11	11	琉球石灰岩	19.1821	36.2329	20.0430
12	12	石灰岩	21.4499	39.7926	22.6058
13	13	デイサイト	19.3595	36.6871	16.6571
14	14	斑岩	19.8478	35.9832	21.0436
15	15	未固結琉球石灰岩	18.5160	33.3292	19.6351
16	16	赤土	20.4978	35.2873	21.1430
17	17	島尻砂岩	19.3576	34.6288	20.5130
18	18	砂岩優勢頁岩互層	26.0785	46.5179	27.6176
19	19	千枚岩	22.7809	44.2394	23.4024
20	20	緑色岩	24.0211	43.8585	25.4410
21	21	粘板岩	20.6537	38.8230	21.6361
22	22	砂質土	14.3312	24.1611	14.3600
23	23	シルト質礫	15.6298	26.3964	15.7025

### 採熱能力 (W/m) の使用例

地中熱交換器（暖房，冷房）の熱需要 [W] ÷ 採熱能力 [W/m] = 必要な掘削深度長 [m]

（暖房と冷房では地中熱交換器の熱需要が異なるため，暖房と冷房で必要な掘削深度長をそれぞれ計算した上で長い方の掘削深度長を採用する。）

#### 計算例

冷房熱需要 5kW，設計採熱能力 40W/m の場合，

$$5,000\text{W} \div 40\text{W/m} = 125\text{m}$$

暖房熱需要 4kW，設計採熱能力 35W/m の場合，

$$4,000\text{W} \div 35\text{W/m} = 114\text{m}$$

必要な掘削深度長：125m

## 5.5. 地中熱採熱期待値マップの作成

5.4 で算出したボーリング柱状図毎の設計採熱能力 [W/m]を、空間補間して地中熱採熱期待値マップを作成する。空間補間とは、限られた地点（ボーリング柱状図）において計算された空間的事象の値から、計算されていない任意地点（補間点）における値を推定することである。

空間補間を行う上での前提として、空間補間を行う対象の空間情報には、空間的自己相関が存在する（距離の近い点は、類似性が高い）ことが挙げられる。

### 逆距離加重平均法 (IDW: Inverse Distance Weighted Average)

補間点から観測点までの距離に関する重みを付けて、加重平均する方法である。観測点までの距離の逆数（逆距離）を重み付けした加重平均を用いることにより、近くの観測値を大きく評価した補間が可能である。図5.5-1に逆距離加重平均法のイメージ図を示す。ここで、A, B, C, Dは近隣標本点、 $d_a, d_b, d_c, d_d$ は近隣標本点から補間点までの距離、 $Z_a, Z_b, Z_c, Z_d$ は近隣標本点から補間点までの距離による重み関数である。

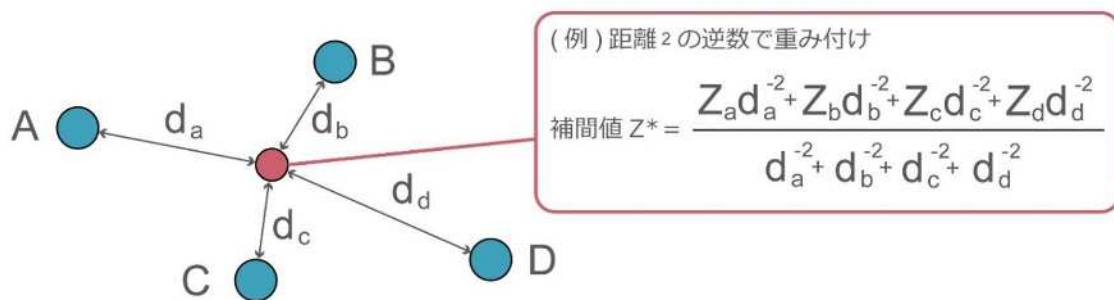


図 5.5.1 逆距離加重平均法のイメージ図

本業務では、ボーリングデータが存在する沖縄本島、宮古島・伊良部島、石垣島を対象範囲とした。さらに、対象範囲の中でボーリングが比較的揃っており、かつ比較的人が住んでいる地域について1次元の地中熱採熱期待値マップを作成した。以下に、ボーリングデータの豊富な那覇市・浦添市周辺について、各計算条件（住宅での使用を想定、官庁での使用を想定、病院での使用を想定）で作成した、設計採熱能力の結果および地中熱採熱期待値マップを図5.5.2～図5.5.10に示す。

### 1) 住宅での使用を想定した計算条件

住宅の計算条件で作成した地中熱採熱期待値マップを示す。

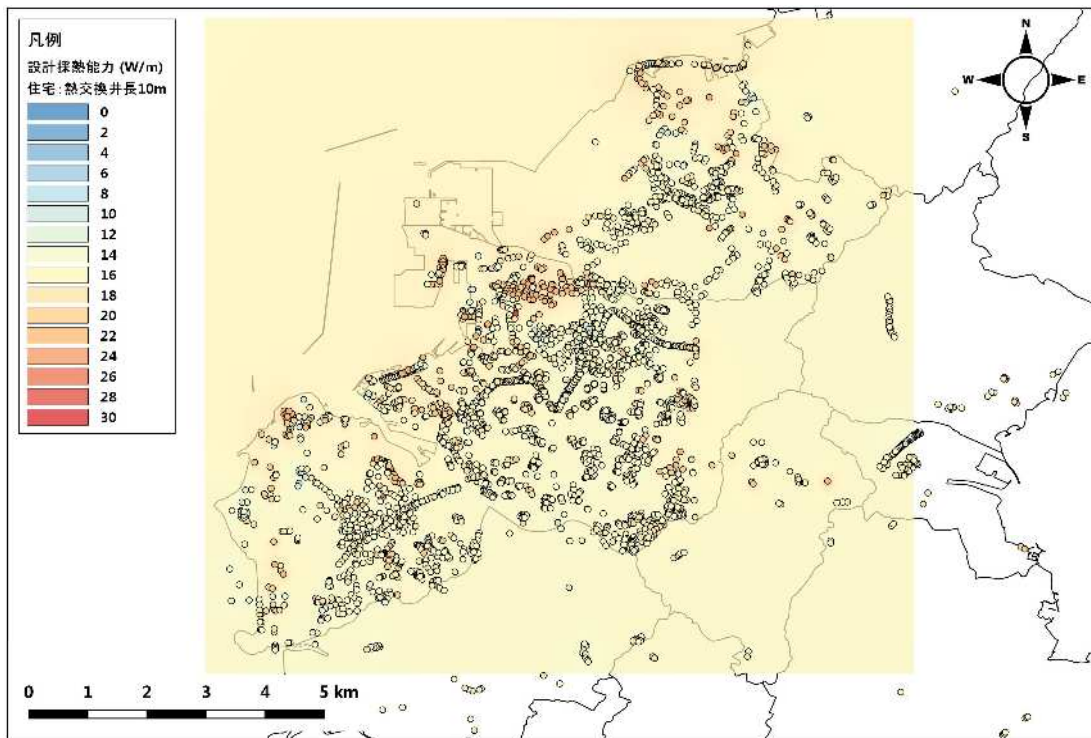


図 5.5.2 那覇市・浦添市周辺の設計採熱能力（熱交換井長 10m, 逆距離加重補間）

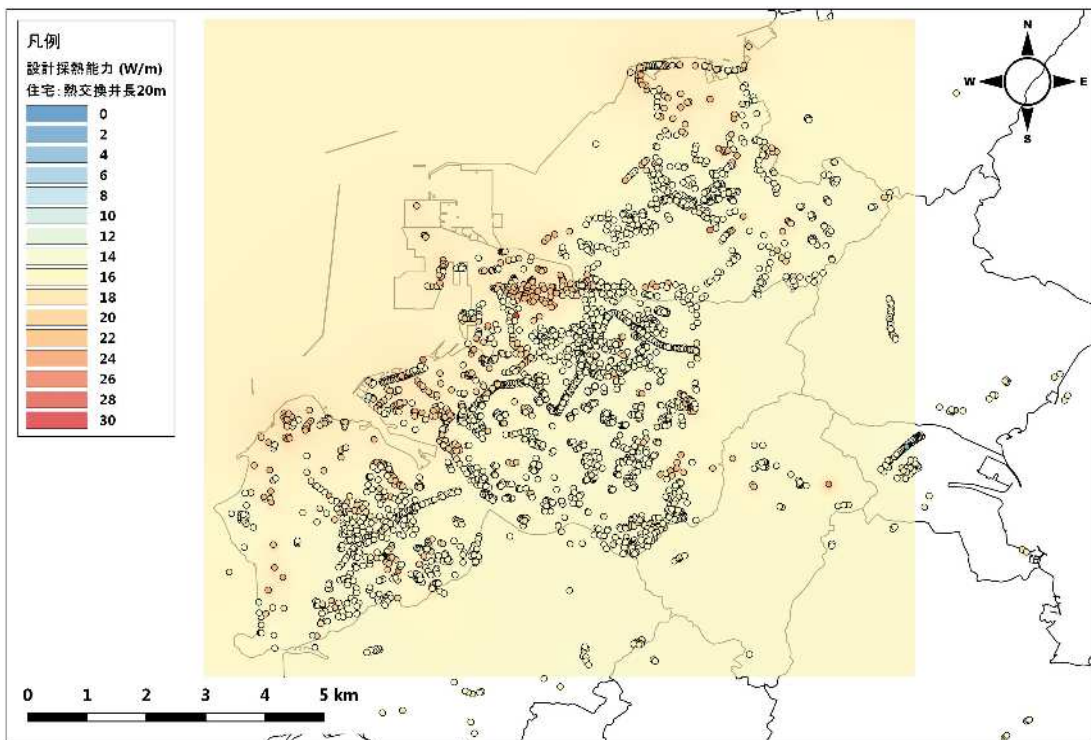


図 5.5.3 那覇市・浦添市周辺の設計採熱能力（熱交換井長 20m, 逆距離加重補間）

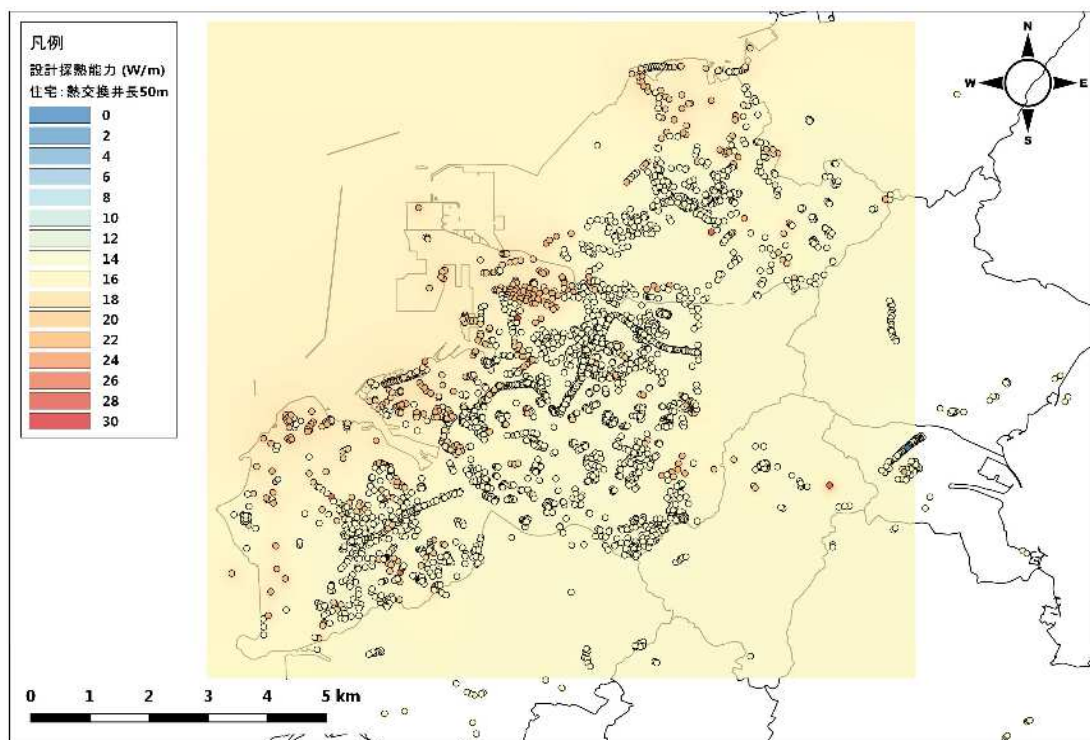


図 5.5.4 那覇市・浦添市周辺の設計採熱能力（熱交換井長 50m, 逆距離加重補間）

## 2) 官庁での使用を想定した計算条件

官庁の計算条件で作成した地中熱採熱期待値マップを示す。

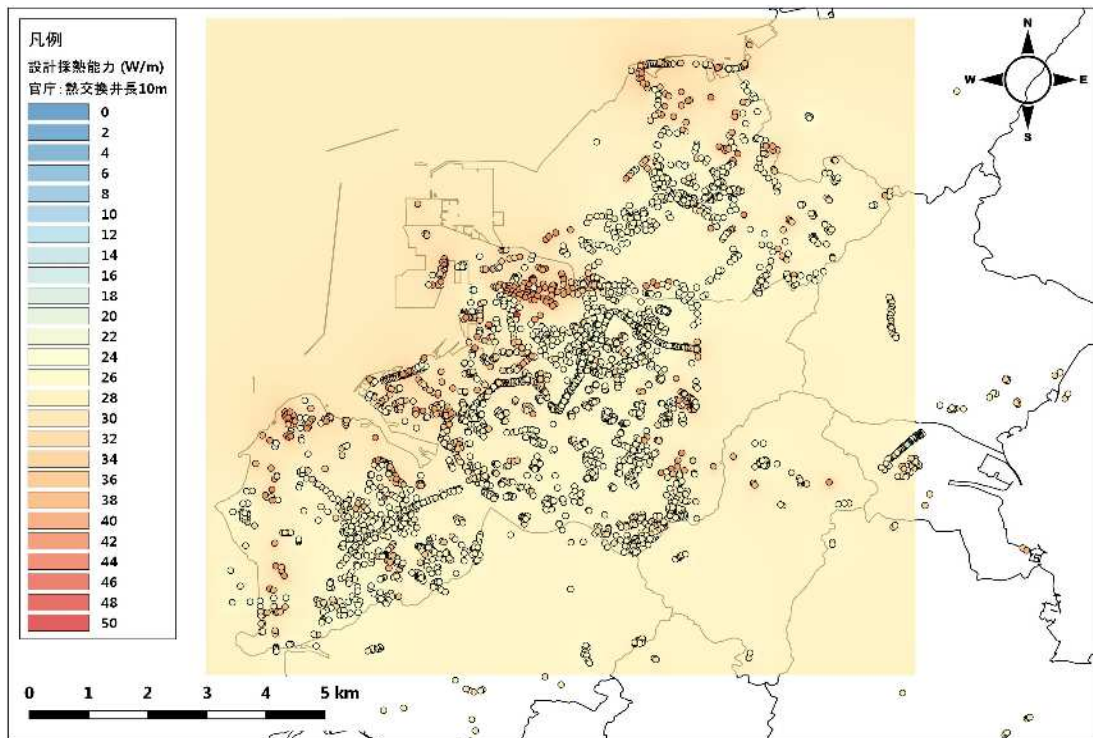


図 5.5.5 那覇市・浦添市周辺の設計採熱能力（熱交換井長 10m, 逆距離加重補間）

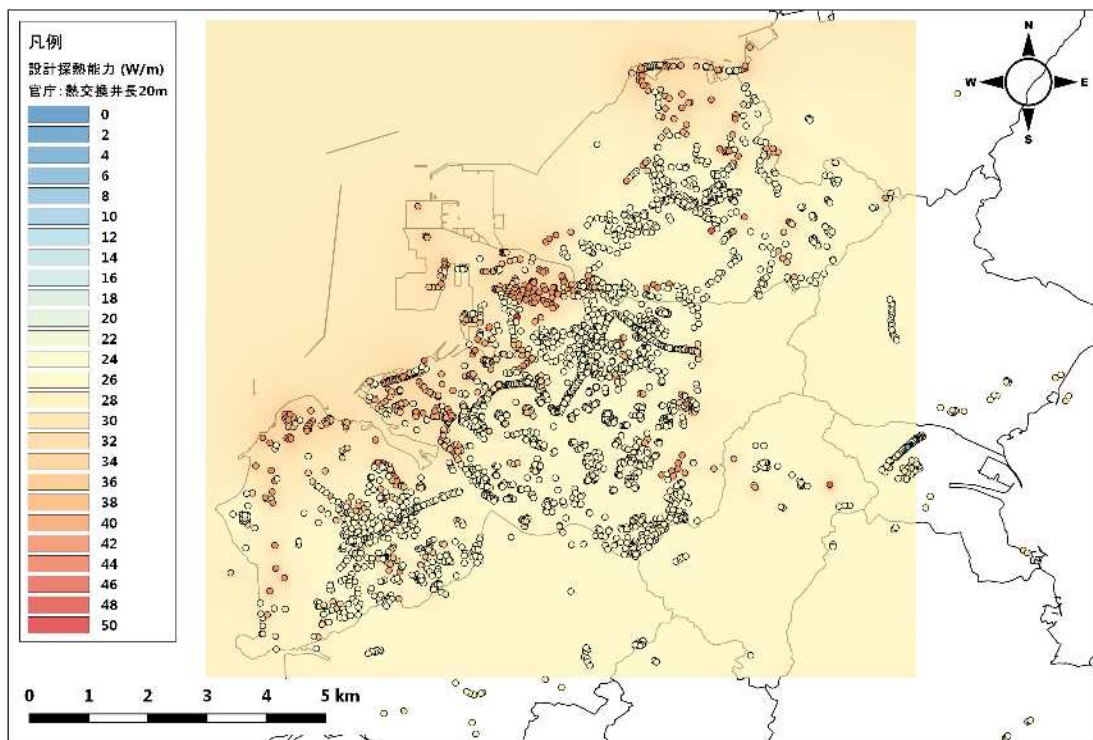


図 5.5.6 那覇市・浦添市周辺の設計採熱能力（熱交換井長 20m, 逆距離加重補間）

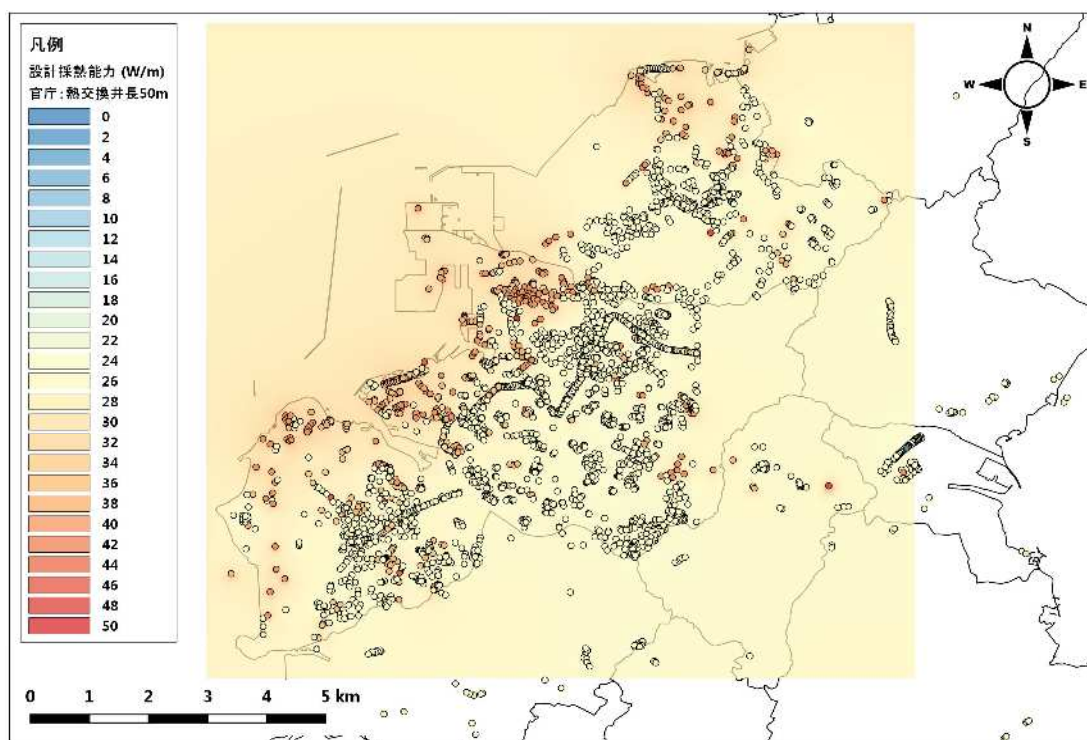


図 5.5.7 那覇市・浦添市周辺の設計採熱能力（熱交換井長 50m, 逆距離加重補間）

### 3) 病院での使用を想定した計算条件

病院の計算条件で作成した地中熱採熱期待値マップを示す。

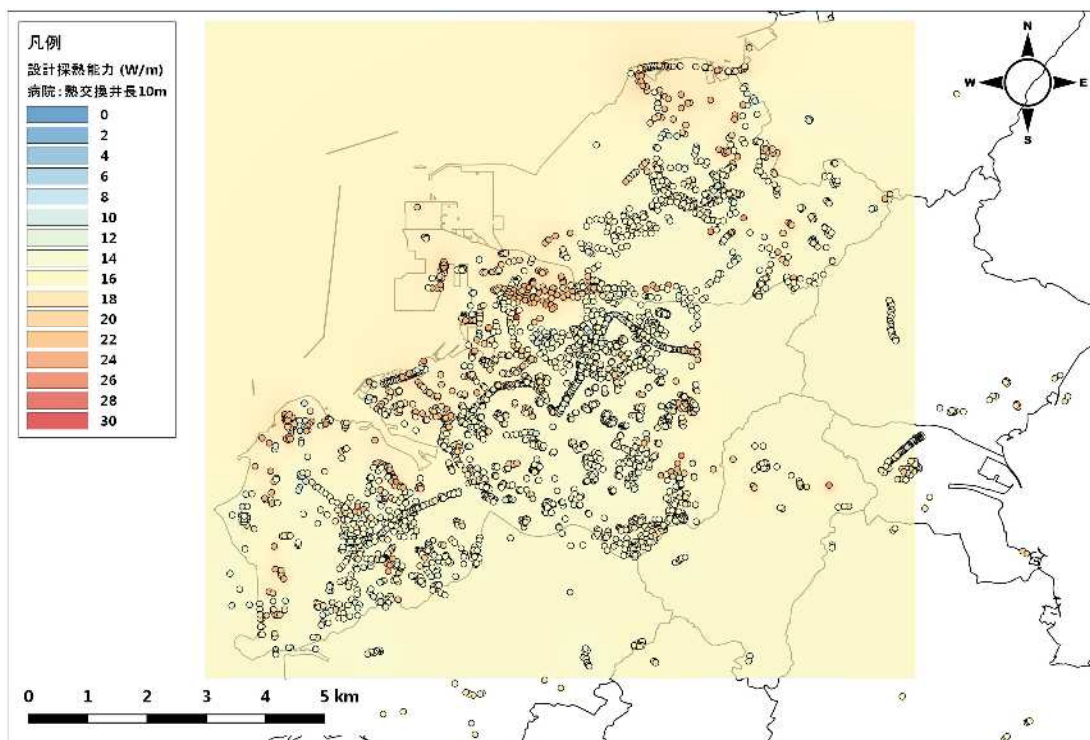


図 5.5.8 那覇市・浦添市周辺の設計採熱能力（熱交換井長 10m, 逆距離加重補間）

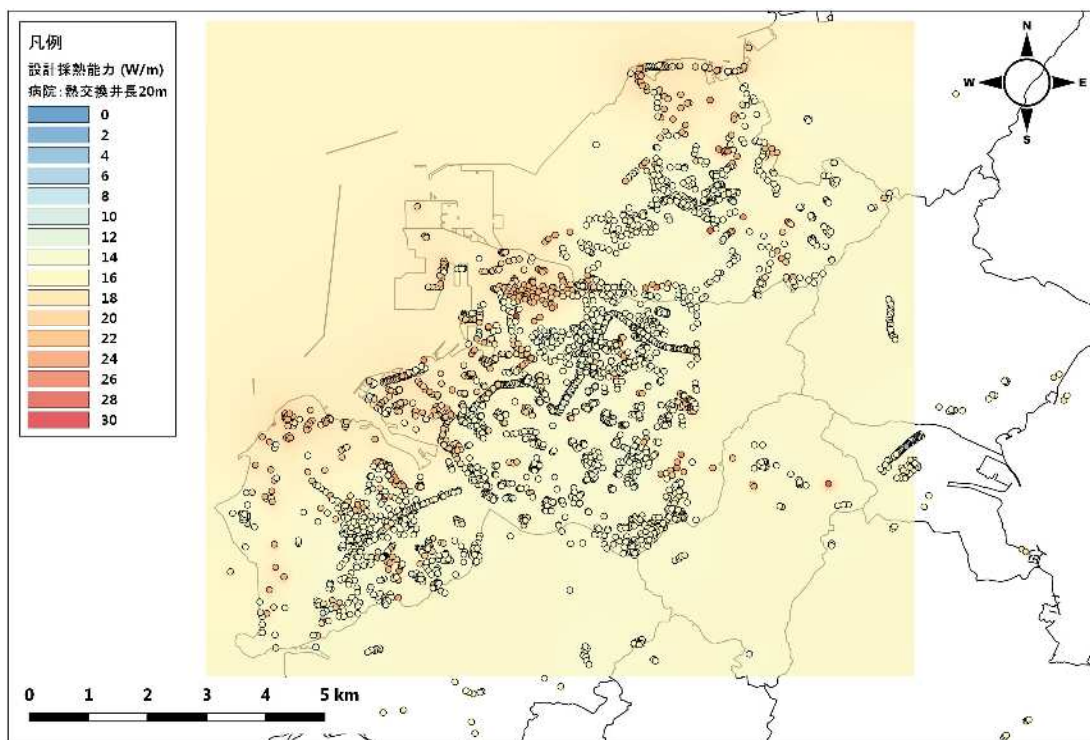


図 5.5.9 那覇市・浦添市周辺の設計採熱能力（熱交換井長 20m, 逆距離加重補間）



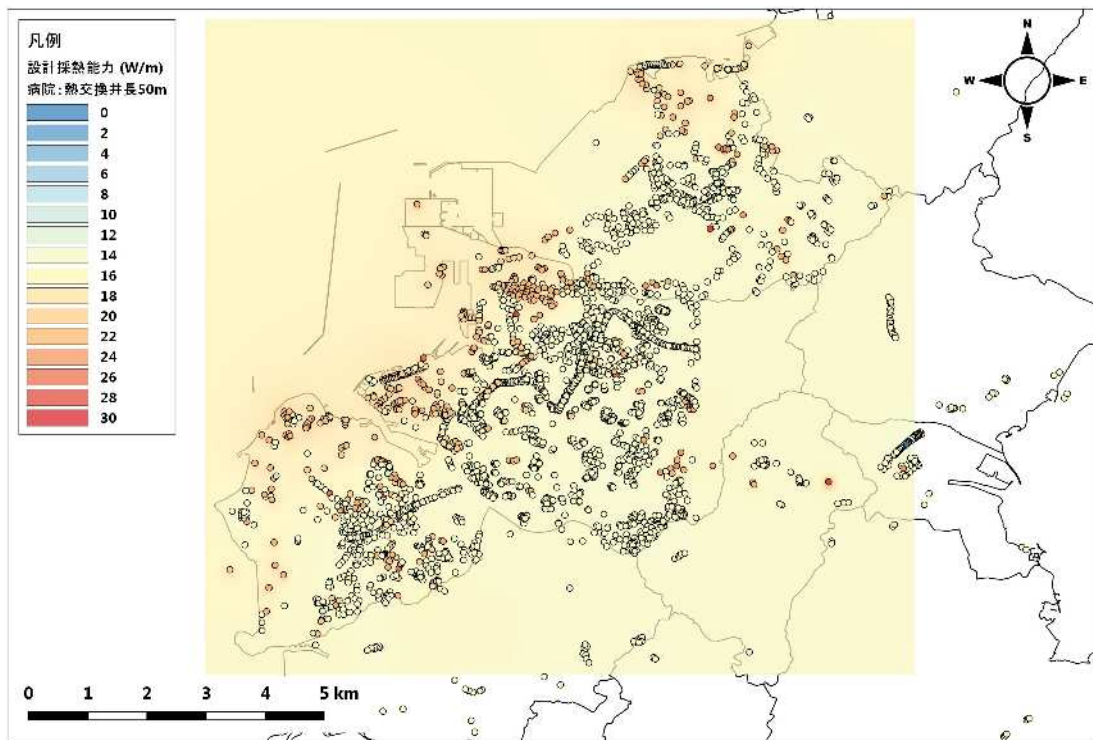


図 5.5.10 那覇市・浦添市周辺の設計採熱能力（熱交換井長 50m, 逆距離加重補間）

## 5.6. 地中熱採熱期待値マップシステムの更新

「地中熱採熱期待値マップシステム」とは設備設計者が個人住宅の設計など小規模な建築物において、その見積りに使用できるよう、利用し易いマップを目指して開発したシステムである。このシステムを利用すると、住宅や事業所、病院など、冷暖房の使い方を考慮した採熱能力をボーリング柱状図単位で計算することができる。「地中熱採熱期待値マップシステム」に収集したボーリングデータと熱物性データを追加登録した。以下に地中熱採熱期待値マップシステムを示す。

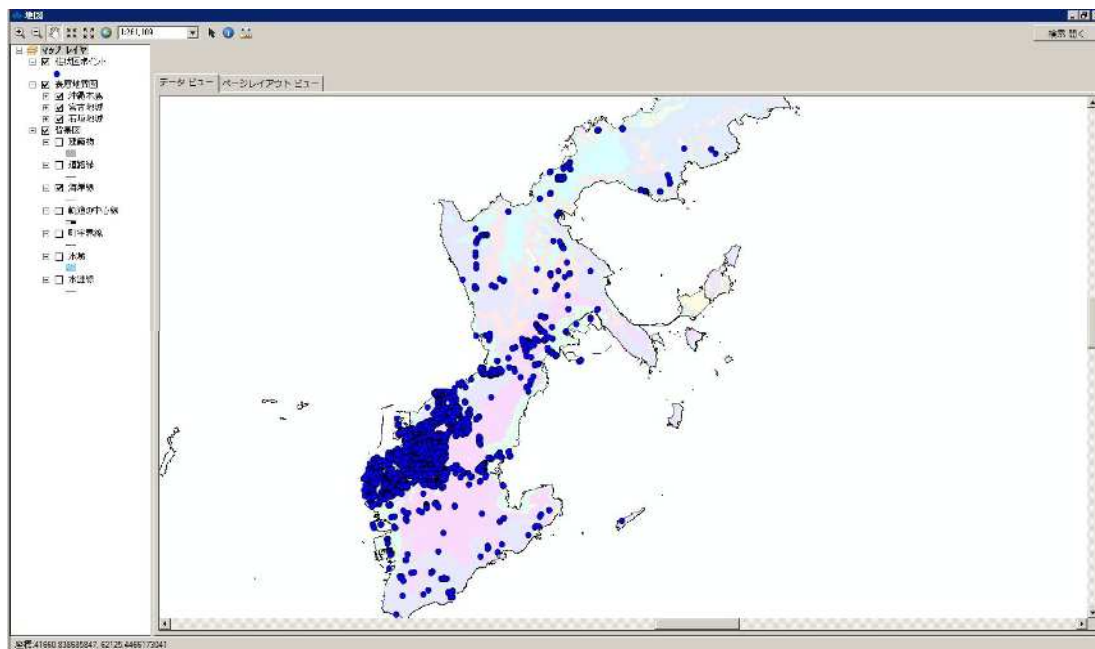


図 5.6.1 地中熱採熱期待値マップシステム（沖縄本島）

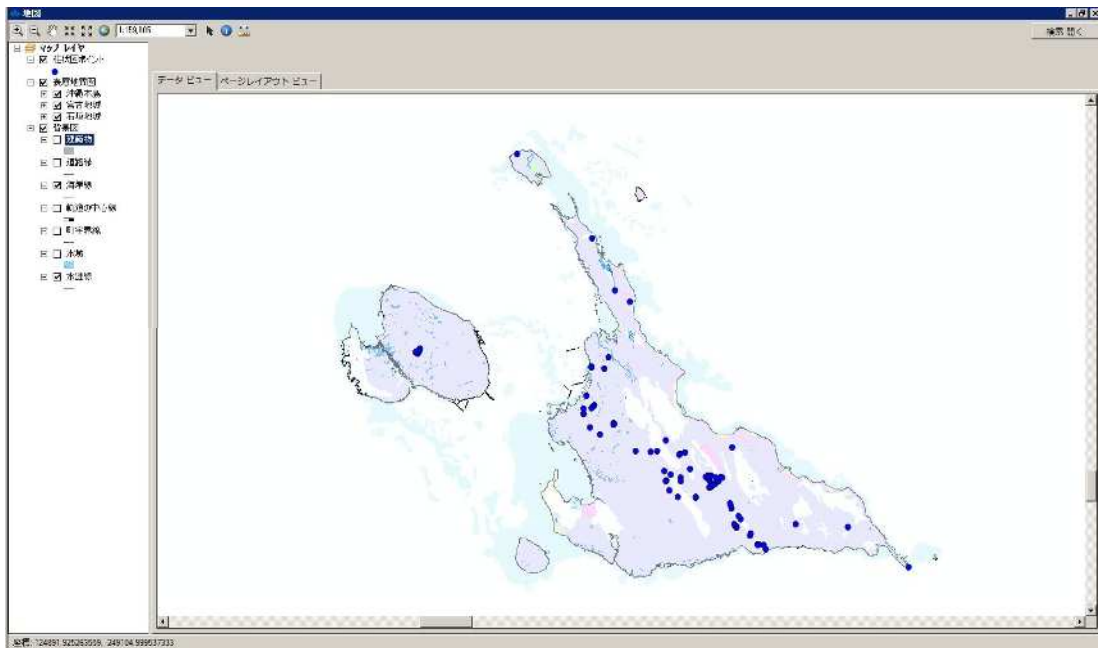


図 5.6.2 地中熱採熱期待値マップシステムの表示例（宮古島）

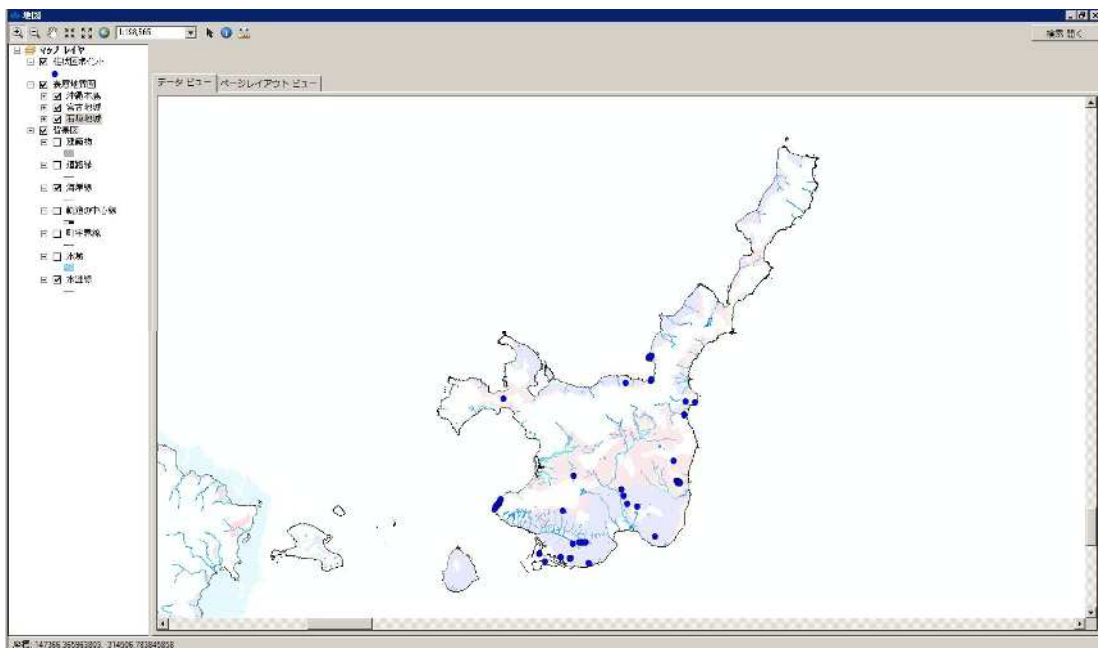


図 5.6.3 地中熱採熱期待値マップシステムの表示例（石垣島）

採熱能力を知りたい場所の周辺のボーリング柱状図を選択することで、その場所の採熱能力を計算する。ボーリング柱状図を選択する際は同じ表層地質でできるだけ近いボーリング柱状図を選択することが望ましい。

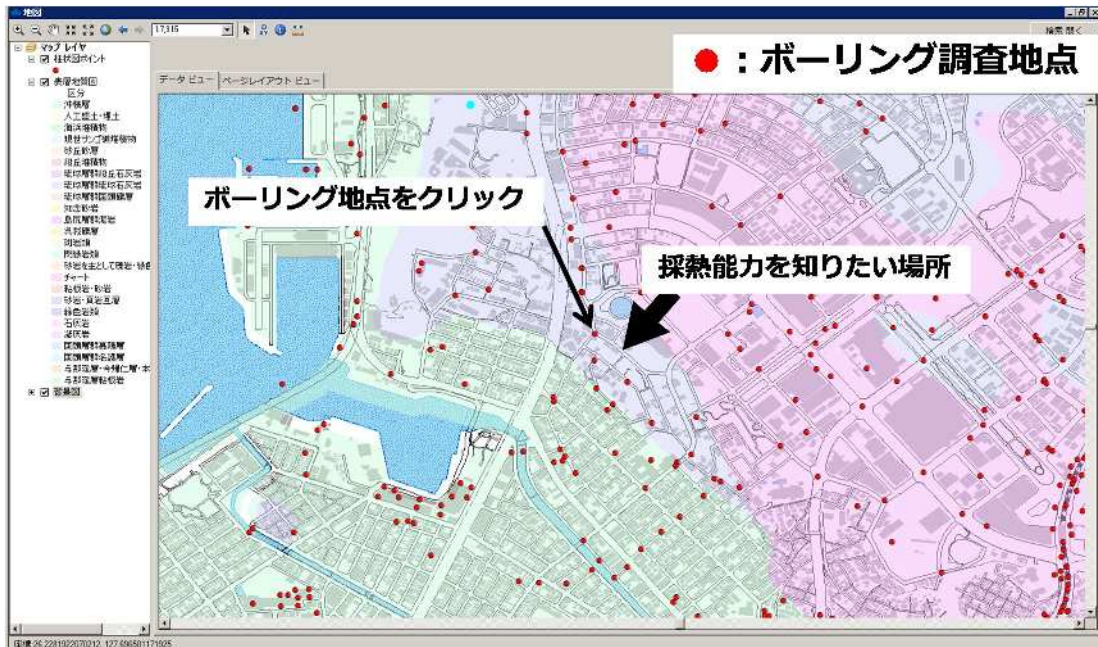


図 5.6.4 ボーリングデータの選択

## □ 採熱能力計算画面（暖房期）



図 5.6.5 採熱能力計算画面（暖房期）

## □ 採熱能力計算画面（冷房期）

必要事項を入力/設定後、[採熱計算]ボタンをクリックしてください

種別 冷房期

管壁温度 45℃

採熱期間  
カレンダーで指定  
開始 2017年 2月 19日  
終了 2017年 2月 19日

冷房期：運用時期を設定  
開始 5月  
終了 10月  
日換算 184日  
秒換算 1059840秒

詳細設定

計算熱交換井長さ 20 m  
地中温度 (平均気温) 23.1℃  
運用年 5年

計算R設定  
内半径 0.025  
外半径 3  
ΔR 0.1

運用パターン  
運転 16 時間  
停止 8 時間  
ΔT 300 秒

【沖縄県の標準パターン】

- 冷房期：5月～10月
- 運転時間：住宅16時間/日、官庁8時間/日、病院24時間/日
- 運用年：5年
- 地中温度（平均気温）：23.1℃
- 熱交換井長さ：10m、20m

図 5. 6. 6 採熱能力計算画面（冷房期）

「採熱計算」ボタンをクリックすると、採熱能力を算出する。

必要事項を入力/設定後、[採熱計算]ボタンをクリックしてください

種別 冷房期

管壁温度 45℃

採熱期間  
カレンダーで指定  
開始 2017年 2月 19日  
終了 2017年 2月 19日

冷房期：運用時期を設定  
開始 5月  
終了 10月  
日換算 184日  
秒換算 1059840秒

詳細設定

計算熱交換井長さ 20 m  
地中温度 (平均気温) 23.1℃  
運用年 5年

計算R設定  
内半径 0.025  
外半径 3  
ΔR 0.1

運用パターン  
運転 16 時間  
停止 8 時間  
ΔT 300 秒

項目	値	単位
日当運用時間	16	時間
運用時間	10598400	秒
熱交換井長さ	20.0	m
採熱量	4366.40	MJ
採熱流束	411.98	W
平均採熱能力	20.59	W/m
設計能力	18.17	W/m
採熱能力	363.49	W/本

□平均採熱能力(W/m)  
「運転期間中の採熱能力」（運転期間の全採熱量(J)を運転期間で割ることで平均した値）

□設計採熱能力(W/m)  
「運転後の採熱能力」（運転期間の採熱量の最低値(W/m)）（設計に用いる採熱能力）

図 5. 6. 7 採熱能力計算結果

### 採熱能力 [W/m]の使い方

地中熱交換器（暖房，冷房）の熱需要 [W] ÷ 採熱能力 [W/m] = 必要な掘削深度長 [m]

（暖房と冷房では地中熱交換器の熱需要が異なるため，暖房と冷房で必要な掘削深度長をそれぞれ計算した上で長い方の掘削深度長を採用する。）

## 5.7. 今後の課題

本業務では、H28年度業務で作成した「地中熱採熱期待値マップ」に対して、新たにボーリングデータを1000本程度追加し、それに応じて熱物性値や地層のモデリングを見直すことで更新した。以下に今後の課題を記載する。

### 採熱期待値マップの精度について

- ・本業務では、主に那覇市周辺の約4400本のボーリングデータを収集し電子化したが、沖縄県全域を網羅するためには、一部の地域を除いてデータ数が不足している。ボーリングデータは、地中熱利用の他にも支持層の把握など様々な用途があるため、ボーリングデータベースの整備が望まれる。
- ・採熱期待値マップの信頼性は、各地層の熱物性値の精度に大きく依存する。本業務ではH29年度業務で実施した熱物性試験の結果も使用しているが、地中熱利用の普及のためには、熱物性試験の数を増やすことが必要不可欠である。
- ・採熱期待値マップで示される設計採熱能力の精度を検証する。具体的には、沖縄県内で稼働中の地中熱システムの採熱結果と比較する。採熱結果との差異が認められる場合は、その原因を調査し、システムの改善について検討する。

### 採熱期待値マップシステムについて

- ・本業務では、日本大学工学部開発の「地中熱リファレンスマップ」システムを採用し、「沖縄県版の地中熱採熱期待値マップシステム」を構築した。本システムは、スタンドアローン形式のシステムであるため、多くの利用者に使って頂くということは難しい。そこで、将来的にインターネット上で稼働するWeb対応システムへ移行することが望ましい。

## 参考文献

- 1) 「国土地盤情報検索サイト」KuniJiban URL:<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html>
- 2) 日本機械学会編：伝熱ハンドブック，p375，丸善出版，1993.
- 3) 下岡謙司，石崎寛治郎，岡本雅道，熊田政弘，荒木邦夫，天野 恕：高レベル廃棄物の処分岩体および処分地層としての岩石の熱特性，日本原子力研究所JAERI-Mレポート，JMERI-M-9247，1980.
- 4) 稲田善紀・木下尚樹・関 正造・松尾 暁・成行 惇・越智健三：低温の影響を受けた空洞周辺岩盤の熱的挙動に関する一二の知見，土木学会論文集，No. 547/Ⅲ-36，211-220，1996.
- 5) 泉山寛明・堤 大三・藤田正治：風化基岩の凍結融解時における熱移動と水分移動（2011）京都大学防災研究所年報，第54号B，603-610，2011.
- 6) 国土技術研究センター：日本総一土質分類の定義と工学的分類体系
- 7) 新城竜一：国土技術研究センター：琉球弧の地質と岩石：沖縄島を例として，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.70，No.2（応用力学論文集Vol.17），I\_3-I\_11，2014.

## 6 計測施設の原状回復

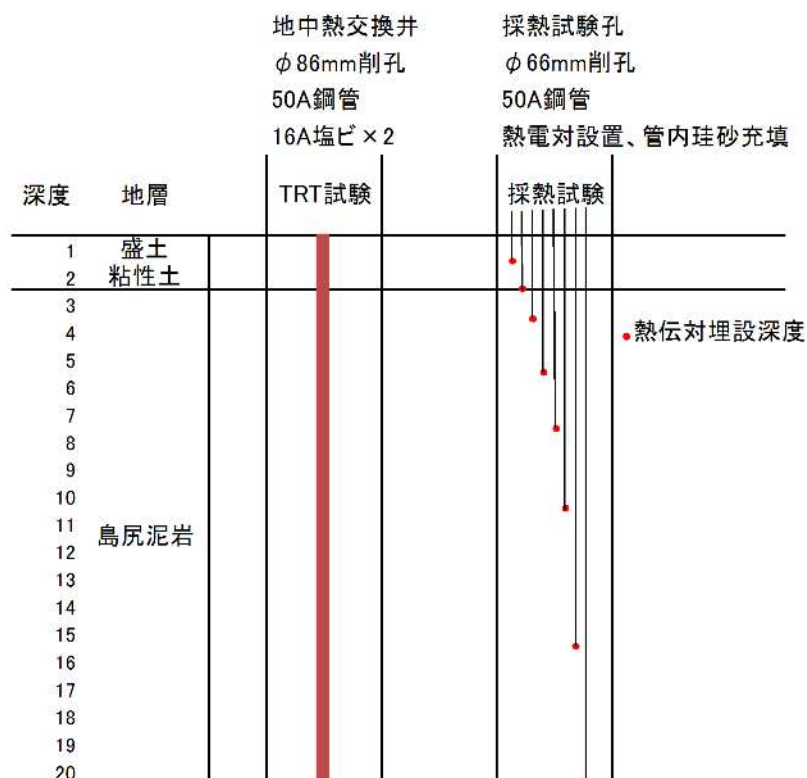
埋設管の撤去は、トラッククレーンによる引き抜きか、それが出来ない場合はロータリーボーリングマシンによるケーシング掘りで実施した。孔の閉塞は良質土（砂質土～礫混じり土等）で行った。地表部はφ400mm マンホール加工されているが、マンホール及び横引きのフレキ管を撤去して地面を整形した。

また、原状復旧に当たっては、地表面の整形、開口部の充填などに注意し、施設管理者の確認を得て作業を終了とした。

### 6.1 県立博物館美術館

県立博物館・美術館では、TRT試験のため平成28年度に設置し、29年度に地中温度計測に利用した埋設管等を撤去し、原状回復を図った。対象は次のとおりである。

番号	項目	計画数量	備考
1	埋設管:鋼管 50A:延長 20m 及び鋼管中に 16A 塩ビ管	2 本	
2	熱伝対付リード線 8 本	1 か所	
3	マンホール	2 か所	



	<p>撤去前</p>
	<p>撤去中</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼管 20m×2 本</li> <li>・塩ビ管</li> <li>・電熱線</li> <li>・マンホール</li> </ul>
	<p>撤去後</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・埋設物を撤去後，砂で充填後，芝張りを行い，砂で養生を行った。</li> </ul>

写真 6. 1. 1 博物館・美術館の作業状況



## 6.2 総合教育センター

県立総合教育センターの原状回復対象は次のとおりである。

番号	項目	計画数量	備考
1	地中熱ヒートポンプ	1台	撤去後保管
2	循環ポンプ	2台	〃
3	空気熱ヒートポンプ	1台	〃
4	室内機 (FCU)	2台	〃
5	計測システム	1式	〃
6	表示システム	1式	〃
7	地中熱交換器(埋設鋼管:20m)	6本	
8	地下水観測孔(埋設PVC管:20m)	1本	
9	採熱試験孔 (埋設鋼管:20m)	1本	
10	地表配管・配線材	1式	

		<p><b>撤去前</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・屋外と室内</li> </ul>
		<p><b>撤去中</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・地中熱ヒートポンプ</li> <li>・循環ポンプ</li> <li>・空気熱ヒートポンプ</li> <li>・室内機（FCU）</li> <li>・計測システム</li> <li>・表示システム</li> <li>・鋼管：20m×6本</li> <li>・地下水観測孔（埋設PVC管：20m）</li> <li>・地表配管・配線材</li> </ul>
		<p><b>撤去後</b></p> <p><b>【屋外】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・埋設物を撤去後、砂で充填後、芝張りを行い、砂で養生を行った。</li> </ul> <p><b>【室内】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・機械撤去後、既存の壁との補修塗り分けが目立つため、全面的に塗装を塗りなおした。</li> </ul>
		

写真 6.1.2 県立総合教育センターの作業状況