

沖縄県における 地中熱採熱期待値マップの作成事例

西村 修一^{1*}・前田 真済¹・王寺 秀介¹・千村 次生¹・
船引 彩子²・安藤 広一²・小熊 正人²

¹中央開発株式会社（〒169-8612 東京都新宿区西早稲田3-13-5）

²日本大学工学部機械工学科再生可能エネルギーシステム研究室

（〒963-8642 福島県郡山市田村町特定字中河原1番地）

* E-mail: nishimura@ccknet.co.jp

地中熱利用技術など省エネ技術の導入は、CO₂削減に有効である。とりわけ、沖縄県など普及が進んでいない温暖地域では、その導入効果が大きく期待できる。一方、普及に向けた課題には、導入コスト等の低減のほか、「沖縄県など温暖地における活用技術の具体的な検討」「地域固有の特殊土について地盤の熱特性の把握」「利用形態に応じた設備設計の手法確立」「普及が進んでいない地域での専門技術者不足」「気候風土に応じた機械設備の開発」などが挙げられる。こうした課題の解決に向け沖縄県では3カ年の計画で省エネ技術の開発・普及事業を実施している。本論文では、これらの課題の内、特殊土の熱物性の測定結果や専門技術者が利用しやすい地中熱採熱期待値マップシステムの開発事例について紹介する。

Key Words : *Underground heat, Ground database, Thermophysical property*

1. はじめに

沖縄県では、「沖縄21世紀ビジョン基本計画」に謳われている「低炭素島しょ社会の実現」に向け、既存技術を活用した排出削減対策や環境教育を通じた地球温暖化防止対策等を推進するとともに、クリーンエネルギーに係る技術革新を進めている。こうした方策の一つとして、沖縄県で普及が進んでいない地中熱の活用を挙げており、省エネ技術の実証試験や県内企業の育成等を通して、経済的メリットのある地球温暖化対策を県内に普及させる取り組みが行われている。この事業では、平成28年度から3カ年の計画で、地中熱を活用した省エネ技術の開発・普及に係る検討を行うとしており、平成28年度は、「①地中熱利用に係る基礎情報の整備」「②地質調査・室内試験等による地中情報の収集・整理」「③地中熱利用ヒートポンプ設置に係る検討」「④県内企業の育成」「⑤地中熱利用に係る情報収集・整理」を実施している。本論文では、①及び②に関連する沖縄県における地中熱利用システムの設計に役立つ「地中熱採熱期待値マップシステム」の開発事例を紹介するとともに、設計の基

本となる沖縄固有の地盤の熱物性値の調査・測定結果の概要について報告する。

2. 地中熱採熱期待値マップとは

地中熱利用システムは、地盤を熱源として利用し、建物等に対して熱供給を行うものである。このシステムは、空気熱利用システム（いわゆるエアコン）と比較して、熱性能が高く、冷熱と温熱を同時に供給できるという点で熱工学的にも魅力あるシステムである。

この分野に関連して、地中熱ポテンシャルマップが検討されている。このマップは、地中熱利用の適地選定を目的に作成され、地下水流速が速い地域を採熱能力が高い地域として評価している。しかし、地下水流動を正確に評価することは困難であり、採熱能力を過大に評価してしまう場合もある。一方、日本大学工学部他が開発したマップ²⁾は、地下水流動の影響を考慮しないとされ、実際の能力を過小評価する点はあるが、建築設備設計者が地中熱システムの最低性能保証を評価する場合や、見積を行う場合に非常に有効であり、地中熱利用を促すも

のと考えている。そこで本論文では、当該マップに基づいて構築した地中熱採熱期待値マップの作成事例を報告する。

3. 地中熱採熱期待値マップの作成手順

今回の地中熱採熱期待値マップの作成フローを、図-1に示し、マップの作成手順を紹介する。

(1) データ収集・電子化

マップ構築に必要な地盤データとして、今回、対象地点で実施しているボーリング調査結果およびKuniJiban³⁾等で公開されている約3450本のボーリングデータを使用した(図-2)。ボーリングデータの孔口標高は、基準点不明なものや地形面と大きくずれるものが多数存在したため、国土地理院の「基盤地図情報 数値標高モデル 5mメッシュ」に一致させる処理を施した。

(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/m³), 比熱(J/kgK), 熱伝導率(W/mK))は、今回代表的な地点で実施したボーリング孔での熱応答試験や室内での熱物性試験(ホットディスク法)の結果に加え、既往の文献⁴⁾等を整理し設定した。採熱能力は、地層の違いに依存するため、対象地区の代表的な地層に対して上記の熱物性値データを割り付けた。

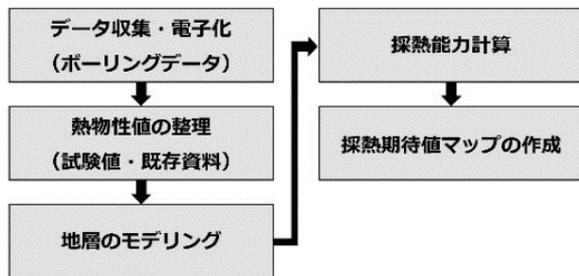


図-1 地中熱採熱期待値マップの作成フロー

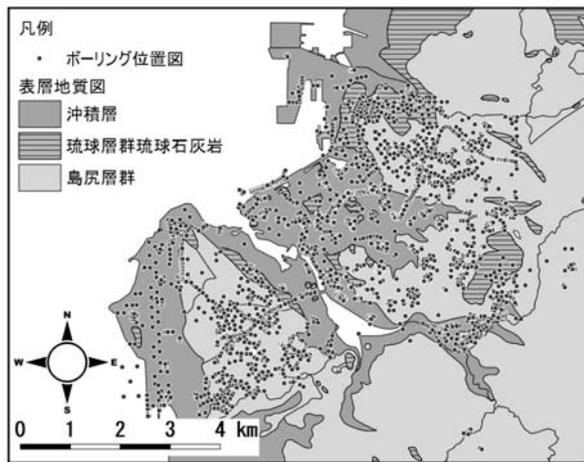


図-2 既往のボーリング位置図

(3) 地層のモデリング

次に、熱物性値を整理した地層を、ボーリング柱状図の地層に割り付ける作業を行った。対象地域の地質は、一般的に新第三紀島尻層群が基盤をなし、その上位に琉球石灰岩、赤褐色粘土層、沖積層等が分布する。一般的に、比熱(J/kgK)は物質の分子構造(結合力)、熱伝導率(W/mK)は材質や密度に応じて異なる。地層の比熱(J/kgK)は粘土の方が礫より大きく、熱伝導率(W/mK)は礫の方が粘土より大きくなる。ただし、サンゴ礁岩、沖積層砂礫、琉球石灰岩の礫質部は、ボーリング柱状図によっては明確に区分されていないため、熱物性値が最も小さいサンゴ礁岩の値を割り付けて採熱性能を過大評価しないよう配慮した。設計採熱能力は、上記3つの熱物性値によって求まり、熱物性値が大きいほど大きく算出される。

(4) 熱物性の把握

設計採熱能力の計算に必要な地中情報は、大きくは「①地盤構成」「②地盤の熱物性」「③地下水情報」の3点に集約される。このうち、「②地盤の熱物性」に関する沖縄県内特有の岩盤等に関する情報は乏しく、実際に熱応答試験を実施した結果を用いたり、類似した地質(岩質や密度)から類推する方法が選択される。しかし、沖縄固有の琉球石灰岩やサンゴ礁岩など、一般的な値との対比が困難であるローカルソイルも存在することから、ボーリングコアを用いた熱物性試験を実施し、比熱、熱伝導率、密度を測定した。

室内における固体物質の熱伝導率測定には、いくつかの方法があるが、一般的に用いられているのは非定常細線加熱法(熱線法)である。本業務で用いたホットディスク法も、これを応用したものであり、琉球石灰岩、サンゴ礁岩、島尻層群(泥岩・砂岩)等のボーリングコア(外径50mm程度)を用い、20mm程度の厚さに整形した後に、図-3に示す要領で熱物性値を測定した。

また、従来の地中熱利用では、熱伝導率が重視されてきたが、設計においては、長期的な地中熱利用システム運用による採熱能力の変化(熱涸れ等)を考慮することが重要と言える。本測定法では、上記の検討に必須となる熱容量(比熱×密度)が把握できる長所を有している。

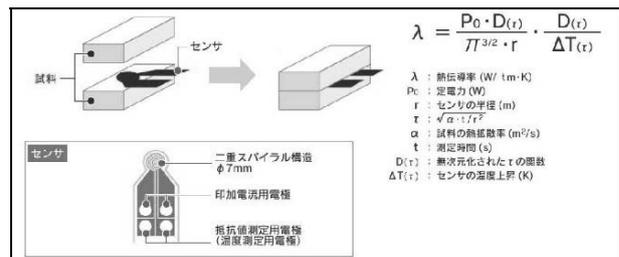


図-3 ホットディスク法による熱物性値の測定方法

測定結果は、本論文作成段階ではデータ数が少ないこともあり、図4に那覇市沿岸部の代表的な層序とともに概要のみを紹介する。

熱伝導率は、間隙率の高いサンゴ礁岩（一部砂礫状を呈する）で、一般的な砂礫等の値と比較して小さい値を示すものの、琉球石灰岩や島尻層群（泥岩）では、本州の同様の地質と比較して同程度もしくはやや高い値が得られた。

時代	柱状図	地層名	密度 (kg/m ³)	比熱 (J/kgK)	熱伝導率 (W/mK)
第四紀	[柱状図]	沖積層粘土	●	●	●
		砂	●	●	●
		砂礫 (サンゴ礁岩)	●	●	●
更新世	[柱状図]	安謝粘土層	●	●	●
		琉球石灰岩	●	●	●
第三紀	鮮新世	島尻層群泥岩	●	●	●

図4 地質層序と熱物性値

(5) 採熱能力計算

今回の採熱能力の計算は、ボーリング孔単位で、次に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて実施した。ボーリング柱状図の最下端が熱交換井長さ(10m)に満たない場合は、最下端層が岩盤もしくは石灰岩の場合のみ熱交換井深さまで同じ地層が続くと想定して延長した。一方、最下端層が岩盤もしくは石灰岩でない場合は計算対象外とした。地盤モデルは、地下水の影響は考慮せず常に湿潤状態とし、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」で計算した。式(1a)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(W/m)を式(1b)から求める。冷房時には土壌に放熱するため、式(1b)の符号が逆転する。

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

$$dq(t) = 2\pi r_{GHX} k \frac{\partial T}{\partial r_{GHX}} \quad (1b)$$

ここで、dqは単位長さ当たりの採熱部外表面熱流量(W/m)、ρ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、2πr_{GHX}は採熱管の周長である。

設計採熱能力(W/m)を計算する場合、その地域の生活

パターンを考慮した運用パターンを設定する必要がある。今回は、冷房期を5～10月、暖房期を12～3月に設定した。また、官庁と病院で利用する場合を想定し、1日の冷房運転期間は、官庁8時間/日、病院24時間/日、1日の暖房運転期間は、官庁8時間/日、病院24時間/日とした。地中温度（平均温度）を23.1℃、熱交換井の長さは10mとした。管壁面温度は、冷房期が45℃、暖房期が10℃としている。

上記の設定を用いて算出した設計採熱能力(W/m)とは、システムの運用が終った時点での採熱能力(W/m)のことである。今回はシステムの運用期間を5年とし、5年後の冷房・暖房の採熱能力のうち、より値の低い方を設計採熱能力として採用した(表-1)。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、地層の層厚(m)×設計採熱能力(W/m)で各ボーリング地点の採熱能力を把握することができる。

表-1 各地層の設計採熱能力

地層名	設計採熱能力 [W/m]	
	官庁利用	病院利用
人工物，表土	14.00	8.28
粘土	22.17	13.25
砂	17.05	10.27
砂礫	23.96	14.38
琉球石灰岩	27.93	16.72
島尻層群	22.80	12.81
凝灰岩	15.55	9.23
風化岩	21.46	12.91
デイサイト	28.09	15.67
斑岩	48.93	24.78

50 50

(6) 採熱期待値マップシステム及びマップの作成

(5)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した。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。今回使用した逆距離加重平均法は、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および図-6に、作成した地中熱採熱期待値マップを示す。

対象地域における設計採熱能力は、官庁で利用する場合は15～25(W/m)、病院で利用する場合は15(W/m)以下である。病院のように1日の地中熱システムの運用時間が長く、連続的な運用を行う場合は5年後の設計採熱能力

が、かなり小さくなるのがわかる。建物規模等から決まる地中熱交換器(暖房、冷房)の採熱(もしくは放熱)要求量(W)÷設計採熱能力(W/m)で地中熱システム運用時に必要な掘削深度長(m)を求めることができる。

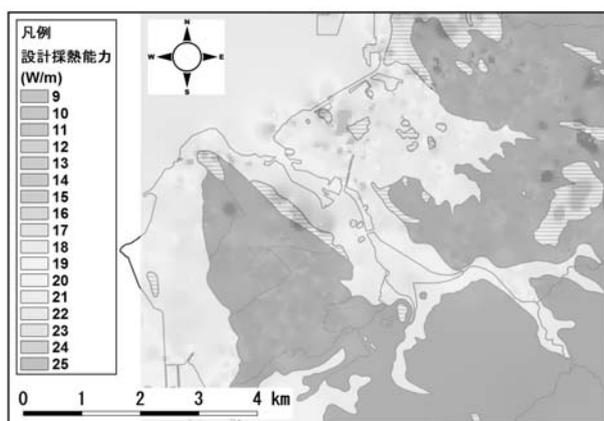


図-5 地中熱採熱期待値マップ (官庁利用)

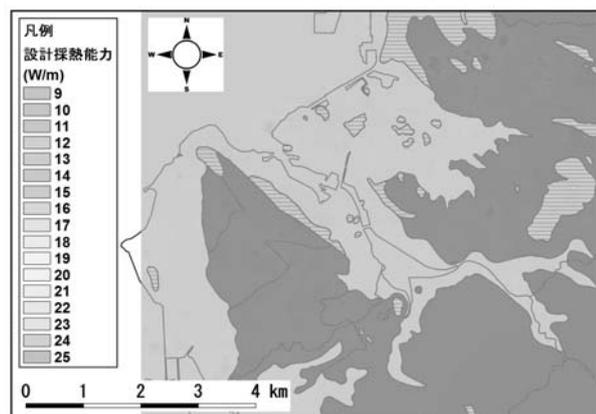


図-6 地中熱採熱期待値マップ (病院利用)

4. おわりに

本論文では、温暖地での地中熱利用技術の開発・普及の第一歩として、熱物性の把握や地中熱建築設備設計者が、地中熱システムの最低性能保証や見積を行うことを

可能にするための「地中熱採熱期待値マップ」を開発した事例について紹介した。しかし、より高精度のマップを作成するためには、ボーリングデータや熱応答試験・熱物性試験のサンプル数が不足していることから、平成29年度以降の課題とした。

なお、本事業3カ年の計画の内、2カ年目に当たる平成29年度では、業務の実施方針として以下の項目を掲げており、ここに紹介する。

- ・温暖地向けに開発した試験機材を実証サイトに導入し、省エネ性能を把握する。
- ・地中熱利用技術の魅力を実証試験や設計技術者に向けた講習等を通じて発信し、事業者の意欲を醸成する。
- ・エンドユーザの意識を社会的、統計的に確実に把握する。

平成29年度は、沖縄県における地中熱利用技術の普及に向けたソフト面の課題に着手する年度でもあり、事業者の意欲を醸成するとともに、一般ユーザのマインドを探り、事業戦略の構築に取りかかる年度と位置づけている。

また、事業の区切りとして考慮している平成30年度末には、沖縄における地中熱利活用の基礎技術が完成していること、また、その技術に支えられた事業戦略が見通せることを到達目標としている。

参考文献

- 1) 産業技術総合研究所地中熱ポテンシャルマップ評価とシステム最適化技術：<http://www.aist.go.jp/fukushima/ja/unit/SGHT.html>
- 2) 船引彩子，安藤広一ら：地中熱リファレンスマップの開発，日本機械学会熱工学コンファレンス 2016 講演論文集，pp.22-23, 2016.
- 3) KuniJiban：<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html>
- 4) 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.