

31. 地中熱を利用したヒートアイランド対策技術の地盤環境への影響評価

Impact assessment of ground environment of the anti-heat island measure technology that used underground heat

藤塚哲朗^{*}（正会員）、佐藤郁太郎^{*}、坪谷剛^{**}

Tetsuro FUJITSUKA, Ikutaro SATO, Takeshi TSUBOYA

ABSTRACT; Recently, Heat Island Phenomenon had more and more influence not only on the city environment but also on the global environment.

As a variety of measures (frameworks) have been taken, we now come to the stage to implement a practical project on HIP

However, the lack of scientific information on the effectiveness of technologies using geothermal heat and on its environmental impact assessment on the ground environment prevent the best use of the technologies.

This article reports on the result of the experimental project investigation on geothermal heat pump system in Fukuoka-city(, Fukuoka-ken) and the result of quantitative assessment on the effectiveness of the technology and on its impact on the environment and its influence in the ground environment

I hope this article will contribute to the Heat Island Phenomenon and Climate Change.

KEYWORDS; Global warming, Heat island, Ground environment

1. はじめに

近年、ヒートアイランド現象が大都市をはじめとして中小都市でも現れている。この現象により、熱帯夜の増加などによる健康被害やエネルギー消費の増大をもたらすなど、都市環境だけではなく地球環境にも悪影響を及ぼしている。

平成 16 年 3 月のヒートアイランド対策大綱や平成 17 年 4 月の京都議定書目標達成計画において枠組みの整備が進み、具体的な対策事業を実施する段階に達した。

ヒートアイランド対策の1つとして、地中熱の利用についてはこれまで様々な施設で採用されているところであるが、その効果や地盤環境への影響に対する評価手法が科学的に確立しているとは言い難い。

このため、環境省では 18 年度よりクールシティ推進事業として、地下水等活用型と地中熱利用型について、民間や大学の研究者の協力を得て様々な実証調査を行い、学識者からなる検討会により、その内容を評価している。

地下水等活用型については、水源として地下水等を利用し、散水や空中噴霧などによるヒートアイランド対策である。地中熱利用型の体系は図-1示す。主にヒートポンプの熱源を地中に求め、大気への排熱を地中に放熱するヒートアイランド対策であり、これは CO₂ 排出抑制にも寄与するものである。

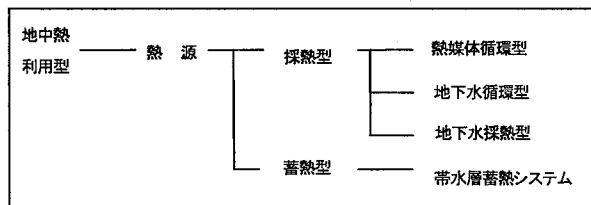


図-1 地中熱利用技術の体系

^{*} 環境省 水・大気環境局 地下水・地盤環境室 Ground Environment Division, Environmental Management Bureau, Ministry of the Environment

^{**} 国土交通省 利根川上流河川事務所 Tonegawa-jyoryu River Office, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

本論文は、環境省がクールシティ推進事業として公募により選定し、九州大学の江原教授らが福岡県福岡市において実証調査を行い、対策の効果、環境への負荷及び地盤環境への影響を定量的に評価したものである。

本調査の対象は、熱媒体(不凍液)を使用して循環させるヒートポンプシステムであり、直接的な影響は地中温度と考えるが、地下水流動を加味したモデル構築及び検証を行うため、地下水位の変化についても併せて測定した。

2. 調査方法

調査は、対象施設の運転による人工排熱量削減の効果、環境への負荷及び地盤環境への影響について、実測の結果から評価するとともに、構築したモデルによるシミュレーションにより短期運転での経年累積影響の予測評価を行った。地中熱利用冷暖房システムの運転期間は、冷房運転を6月～9月(夏期)、暖房運転を11月～3月(冬季)である。

2.1 調査対象施設

対象施設は、福岡市東区アイランドシティ地区で九州大学により設置されている実験用住宅(レンガ造2階建て面積約140m²)の地中熱利用住宅用冷暖房システムである。機器の構成は、室外システムとして60m深の同軸型熱交換井、ヒートポンプ2基等で構成され、室内システムは冷暖房用室内機(4.0kw×2台、2.2kw×3台、計5台)を設置している。

2.2 観測井戸

観測井は、地中熱利用冷暖房システムの稼働に伴う熱交換が、周辺地盤の温度場に与える影響を測定することを目的として、熱交換井から水平距離3m(No.1)、5m(No.2)、10m(No.3)の位置に掘削長60mの観測井を掘削した。また、広域の地下水位を把握するため、熱交換井から約60mの地点(No.4)と約110mの地点(No.5)に、掘削長5mの観測井を掘削した。これら5本の観測井の水平的な位置関係を図2-1に、各観測井の掘削の仕上げを図2-2に示す。

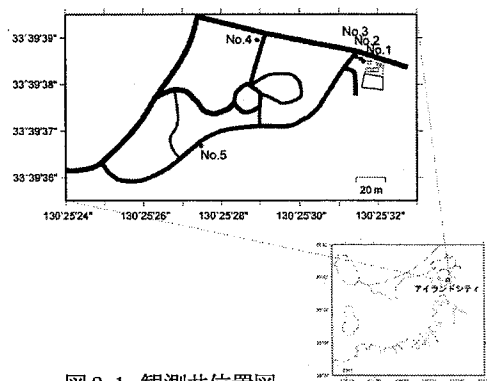


図2-1 観測井位置図

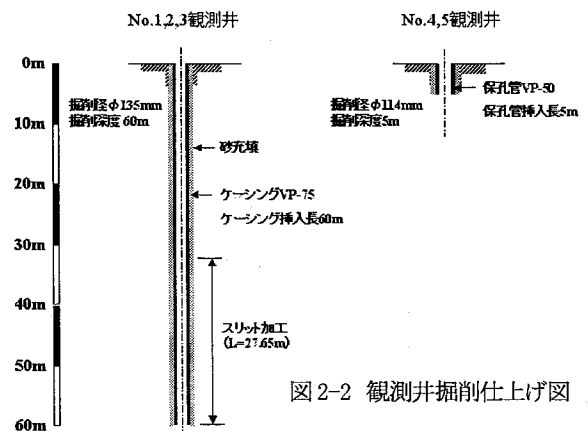


図2-2 観測井掘削仕上げ図

2.3 測定及び評価方法

- (A) 対策の効果は、熱交換井入口・出口の温度をサーミスタ温度計により計測、循環流量は電磁流量計により測定を行い、循環液の流量と熱交換井入口あるいは出口の温度との積により、冷暖房システム稼働による地中への排熱量あるいは採熱量により評価した。
- (B) 環境への負荷は、冷暖房システム稼働に伴うヒートポンプ及び循環ポンプの消費電力量を電力計により測定し、消費電力量と得られた熱量の比(成績係数またはCOP)より冷暖房効率を求め、定量的に評価した。
- (C) 地盤環境への影響は、地中温度変化の測定、地下水位の測定結果と、3次元地下水流動・熱移動シミュレーションによりそれぞれ評価した。

温度分布の測定は、新たに設置した地中温観測井(60m 井3箇所)内に配置した光ファイバー温度分布計測

システムにより、地表から 60m までの地温プロファイルを測定した。また、各水位観測井において水位を測定し、地下水面の面的な広がり把握し導水勾配を求め、地盤の透水係数と導水勾配より地下水の流速を算出した。

さらに、事前に実施したサーマルレスポンステストにより求めた地盤の熱容量、熱伝導率を用いて、地下を 5 層に分けて解析を行った。

このような条件下でシステム稼働による周辺地盤の温度変化について有限要素法を用いてシミュレートを行い、(B)により測定した実測値との整合を確認した上で、地中熱利用冷暖房システム稼働に伴う影響範囲を評価した。

3. 測定結果

3.1 熱交換温度、流量測定

熱交換井入口及び出口温度および循環流量を、2分間隔で測定したデータの例は、以下のとおりである。

システムの COP を求めるため、熱交換井の入口・出口温度、循環流量及び循環ポンプの消費電力、ヒートポンプの消費電力を2分間隔でモニターしている。このうち、熱交換井の入口出口の温度差、循環流量とブラインの熱物性より、冷暖房システムから地中への排熱(採熱)を求めることができる。

図 3-1 に、冷房運転時における熱交換井入口・出口温度の時間変化の例を、図 3-2 に、暖房運転時における温度の時間変化の例をそれぞれ示した、また、図 3-3 に暖房運転時におけるブラインの循環流量の実測例を示す。これを見ると瞬時値としては逆転しているデータが見られるが、冷房時には熱交換によって暖められたブラインが地中で冷却され、暖房時にはブラインが地中で暖められて戻ってきている様子が見て取れる。

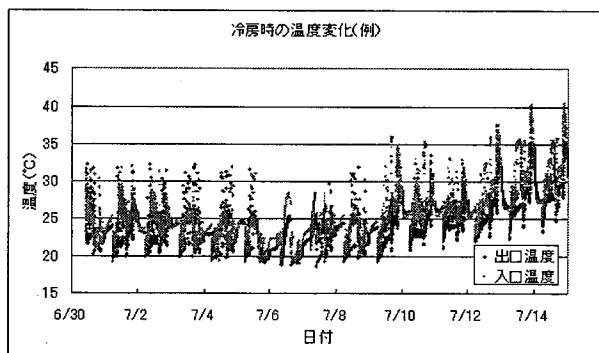


図 3-1 冷房運転時の熱交換井入口・出口温度の変化(例)

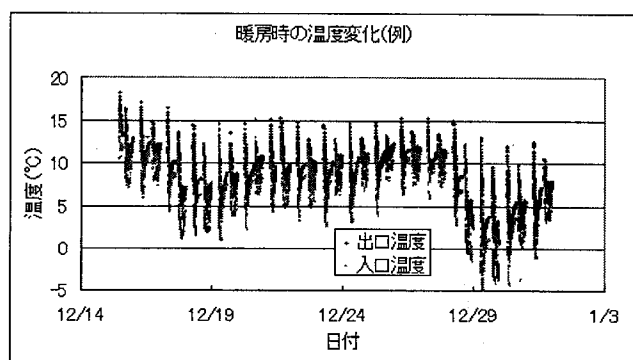


図 3-2 暖房運転時の熱交換井入口・出口温度の変化(例)

これらのデータから求めた地中との熱交換量は、冷房運転期間では、地中への排熱量は 6932(MJ)であった。また、暖房期間の地中からの採熱量は、12 月 15 日から 1 月 17 日までに 5270(MJ)であった。比較する期間の長さの違いはあるが、冷房期間における地中への排熱量と暖房期間における地中からの採熱量は同じオーダーであり、ほぼバランスしていることがわかる。

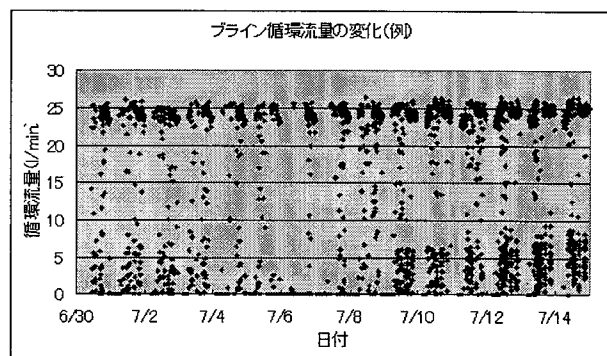


図 3-3 ブライン循環流量の変化 (例)

3.2 成績係数(COP)

ヒートポンプおよび循環ポンプの消費電力量を、電力量計を用いて測定した結果は以下の通りである。

表 3-1 システム消費電力のまとめ

項目	単位	暖房 1 期目	暖房 2 期目	冷房 1 期目	冷房 2 期目
平均ヒートポンプ消費電力	kWe	1.20	1.26	0.65	0.46
平均循環ポンプ消費電力	kWe	0.20	0.21	0.20	0.17
平均システム電力消費	kWe	1.41	1.47	0.85	0.62
平均システム熱出力	kWe	4.76	4.18	2.97	2.79

表 3-2 システムCOPのまとめ

	暖房 1 期目	冷房 1 期目	暖房 2 期目	冷房 2 期目
期間	2005/2/2-4/5	2005/6/24-8/24	2005/12/8-2006/4/25	2006/6/23-9/5
システム COP	3.98	3.53	2.84	4.51

システム消費電力量と、排出(採出)熱量の比(成績係数または COP)を求めた結果、冷房運転期間の成績係数は、ヒートポンプ COP が平均 6.1、システム COP が平均 4.51 という非常に高い値であった。暖房運転期間の成績係数は、暫定値でヒートポンプ COP が平均 4.19、システム COP が平均 3.40 であった。

3.3 温度プロファイル

図 3-4 に光ファイバー温度分布計測システム(DTS)による No.1～No.3 観測井の温度プロファイル測定例を示す。図中には、夏期の測定温度と、冬期の測定温度を併せて示した。いずれの観測井の温度も深度約 10m 以深ではほぼ一定の値を示し、それより浅い部分では季節変化による地表温度の影響を受けたプロファイルになっている。夏期と冬期では、深度 10m 以深の温度に差が見られるが、これは冷房時と暖房時の測定開始時のキャリブレーションの違いに起因する誤差である。この誤差を水位計内蔵温度計により補正した。

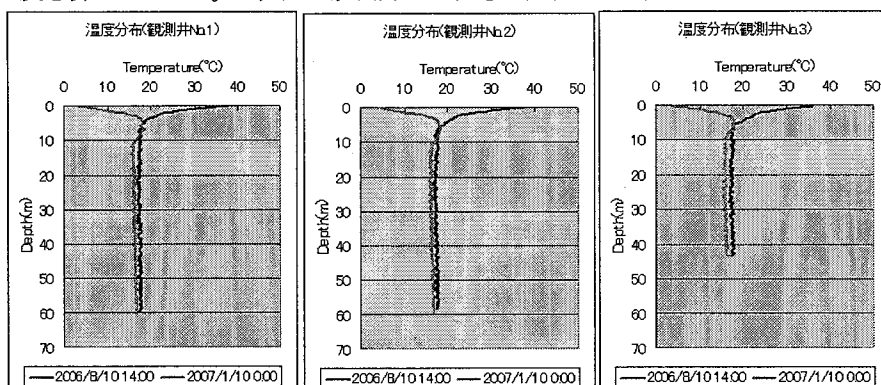


図 3-4 DTS による各観測井の温度プロファイル(夏と冬の比較)

3.4 地下水調査

図 3-5 に、各観測井での全観測期間を通じた標高水位の変化を示す。降雨開始直後には各井戸の特性の違いが現れるが、相対的な水位差は全期間を通じてほぼ一定であった。(標高水位のグラフがほぼ平行になる)

地下水の流動方向は図 3-6 に示す方向であり、福岡市東区の広域的な地形から予想した流動方向とは逆向きで No.4 観測井からはほぼ東南方向を向いている。したがって、地中温度の観測のために掘削した No.1～No.3 観測井は、熱交換井から見て地下水流動の上流側に位置していることになる。これは測定対象地域近傍のわずかな地表の起伏に起因しているものと考えられる。

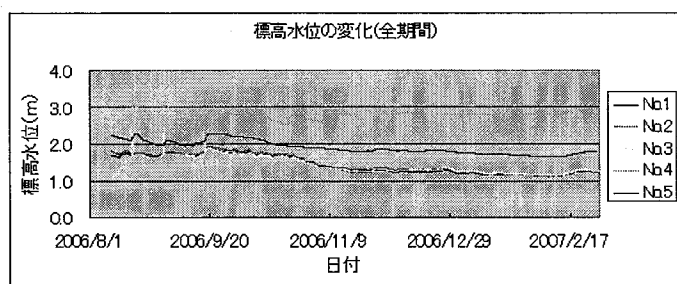


図 3-5 各観測井における標高水位の時間変化(全期間)

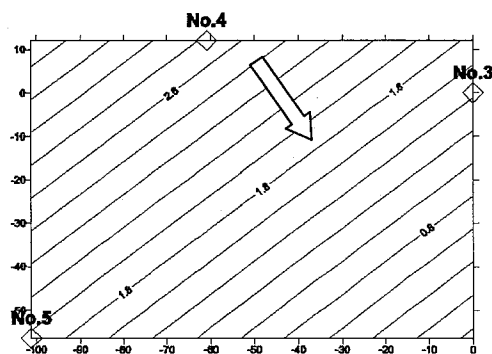


図 3-6 熱交換井周辺の地下水流動方向

4. シミュレーション結果

下図にシミュレーションの結果と DTS による観測井温度の実測値との比較を示す。図 4-1 及び図 4-2 より、冷房シミュレーション結果、暖房シミュレーション結果のいずれも実測値とよく整合しており、地中熱利用冷暖房システムの運転が地中の温度環境に与える影響を表現する数値モデルを構築できたことがわかる。

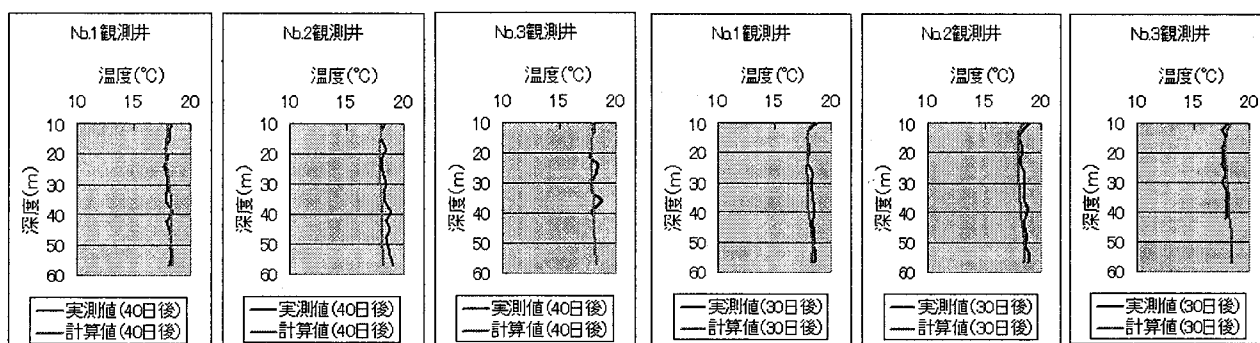


図 4-1 冷房運転シミュレーション結果と実測値の比較

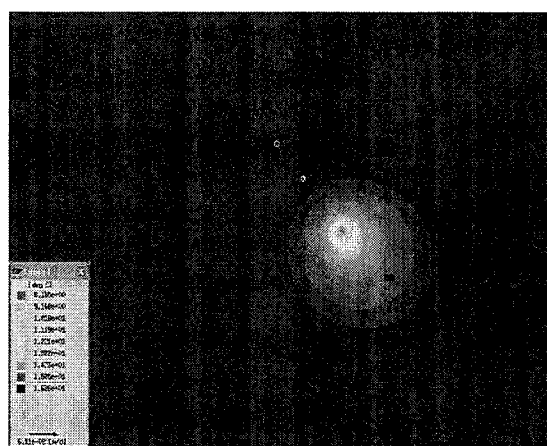
図 4-2 暖房運転シミュレーション結果と実測値の比較

4.1 地下水流動の影響

地下水観測の結果から、当初の予測に反し観測井がすべて地下水流動の上流側に位置していることがわかったため、地下水流動の下流側に観測井があった場合の温度変化の影響を予測した。

観測点を熱交換井の上流側と下流側に配置した場合の計算結果を、図 4-3 に示す。図中の丸印で示した観測点で暖房に伴う地中冷却の影響を受けた等温線が下流側に延びており、下流側の方が地中との熱交換の影響が大きいことがわかる。

地下水流の地中温度に与える影響は、上流側では熱交換井から 3m 離れた地点で最大 0.5℃程度の温度上昇であり、下流側 3m で 2℃、5m で 1.5℃、10m で 1℃以下の影響しか出ないことが明らかとなった。



5. 結果と今後の課題

5.1 対策の効果

地中との熱交換量は、冷房運転期間では地中への排熱量が 6932(MJ)で、大気への放出される熱量を約 7000(MJ)削減したことになる。また、暖房期間の地中からの採熱量は、1 月間ではあるが 5270(MJ)で大きな効果と考えられる。

5.2 環境への負荷

冷房運転期間の成績係数は、ヒートポンプ COP が平均 6.1、システム COP が平均 4.51 という非常に高い値であり、暖房運転期間の成績係数は、暫定値でヒートポンプ COP が平均 4.19、システム COP が平均 3.40 であった。

システムの冷房運転時の環境負荷は、空気熱源エアコンのトップランナー目標基準 COP3.30 と比較すると 34%改善され、同じ量の排熱を行うとすると、空気熱源エアコンに比べて 26%低い環境負荷で運転を行ったことになる。

5.3 地盤環境への影響

地中熱利用においては、「冷房による蓄熱効果と暖房による採熱効果がバランスする。」「地下水流動があると熱交換性能が飛躍的に向上する。」ことが広く認められている。今回行った検討の結果、必ずしも並立しないことがわかった。

まず、地下水流動により熱交換井の性能は向上するが、冷房による温度上昇と暖房による温度低下の位相がずれ、それぞれの影響が地下水流動により周辺に拡散するため、地下水流動の下流域では温度変化の及ぶ領域が広がる。

次に、地中熱利用に起因する温度変化は、熱交換井からの距離が遠くなるにつれて振幅が小さくなり、位相が遅れて周辺に伝播していく。本検討ケースでは、熱交換井から下流側 10m の地点で、熱交換停止から 75 日程度遅れて温度変化のピークが現れると予測された。

このことから、以下のような知見が導かれる。

- ・下流側での温度変化の影響は 10m 離れると 1℃以下になり、しかも位相がずれており、この効果は年間を通じて打ち消しあい、累積効果はほとんどない。
- ・熱源温度が 1℃変化することによる熱交換性能の低下はそれほど問題ではない。
- ・位相の遅れによって、変化の極性が完全に逆転する地点では、熱利用にとって好条件となる場所もある
- ・複数の熱交換井を近接して掘削すると、干渉を起こして熱交換性能の低下に繋がる。

地中熱ヒートポンプの地盤への影響を評価する上で、地下水流動の情報は非常に重要であり、地中熱利用ではこれらのことを念頭においた設計を行う必要がある。

6. おわりに

このクールシティ推進事業は、平成18年度より開始した事業であり、地中熱ヒートポンプについては、大阪府においても同様な実証事業を実施している。

地中熱ヒートポンプはヒートアイランド対策だけでなくCO₂の削減にも効果があり、地球温暖化対策としても有効な対策であるが、欧米諸国に比べその導入は著しく遅れている。その原因としては、コストが高いことと地中熱ヒートポンプのメリットや地盤環境への影響などに対する認知不足にある。

このため、環境省では、クールシティ推進事業による実証調査を実施して、地中熱ヒートポンプに関する効果や地盤環境への影響に関する知見を集積し、ガイドライン等にとりまとめ普及促進を図っていく考えである。

最後に、クールシティ推進事業検討会の委員の皆様と九州大学の江原教授をはじめ関係の皆様にご協力をいただいたことをここに記して感謝の意を表する。