

気候変動と地中熱利用技術

— 温暖化の進行と地中熱の有効利用に関する考察 —

千葉工業大学創造工学部建築学科教授 若山 尚之

1. はじめに

近年、挨拶の枕詞として「暑いですね。」と話すことが日常の風景である。それも、夏季の酷暑を表現するだけではなく、季節外れの「暑さ」について話題にすることが多いように感じる。例えば、「3月なのに25℃を超えた」や、「5月のゴールデンウィークに30℃を超えた」など、1年を通して多くの人が感じているのではないだろうか。その暑さの原因は「地球温暖化」だけではなく、都市部では人工排熱や建築物などによるヒートアイランド現象による影響も加わり複合的な要因といわれている。

本報ではこのような気候変動による外気温の変化を実感として感じられる今日において、再生可能エネルギーの一つである「地中熱利用技術」に焦点を当て、このような気候での性能や特性について検証するとともに、効率向上するための方法など今後のよりよい運用につながる方向性などについて論考する。

2. 地中熱利用技術の概要

自然状態における地中の温度は、地表に近い浅い層は季節での温度変動があるものの、深くなるに従って温度変動幅が小さくなる。図-1に関東の気象条件、平均的な土壌構成における自然地中温度変動を数値解析で検証した結果を示す。この図からは、2mより地表までは10℃を超えて変動しているものの、8mでは年間を通してほぼ一定であることがわかる。地中熱利用技術はこの温度安定性の高い地中熱に着目した技術である。その地中熱を利用する方法としては図-2の地中熱ヒートポンプ（以降GSHPと表記）システムがあるが、このシステムでは冷却・加熱は水冷ヒートポンプが行い、そのヒートポンプの熱源水は地中に埋設した地中熱交換パイプ内を熱源水が循環することで地中との熱交換を行い、冷却運転の場合は地中に放熱、加熱運転の場合は地中から採熱する運転が行われる。GSHPシステムはヒートポンプの特性より、夏季に熱源水還水温が低く冬季に高めれば高効率での運転が可能となるが、前述したとおり地中の温度は安定してい

るため、熱源水の温度条件が良好な状態を維持できれば高効率運転が可能となるシステムである。

3. 地中熱利用技術の特徴

地中熱を利用するシステムは文字通り地表面下の地中で熱交換を行うため、地下を構成する地盤の特性がシステムの性能に影響を与える。熱源システムとしては熱源水の熱交換が効率的に行うことができればシステムの効率は高くなる関係のため、地盤を熱が伝わりやすければ高効率につながるが、実質的な地盤の熱の伝わりやすさは有効熱伝導率を指標として用いられており、この値が高いほど熱交換が効率的に機能しやすいといえる。この有効熱伝導率は地盤を構成する土壌や地下水位、更には地下水の流れなどの多様な要因により決まってくるが、本報では地中熱利用の特性として地表面からの影響を受けにくい、すなわち外気温度は地中熱利用に直接影響を与えにくい、という点に特化して論述する。

地中熱利用技術の普及促進を考えた場合、プラス面に着目すると同時にマイナス面についても正しく理解する必要がある。

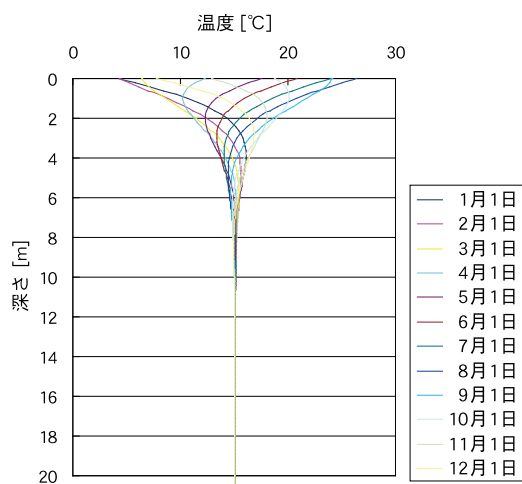


図-1 地中の各月温度分布

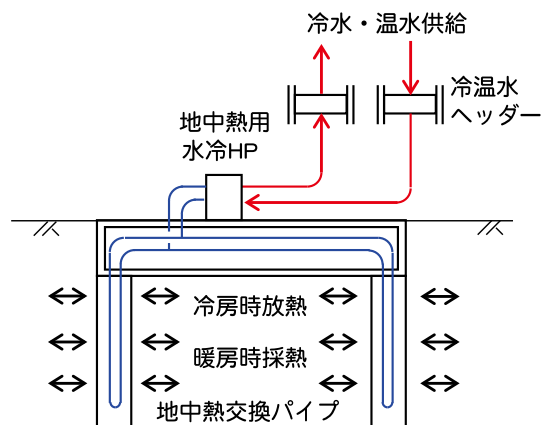


図-2 地中熱ヒートポンプシステム概要

ある。表－１に代表的なメリット・デメリットを示したが、まずメリットについて考えると、地中熱利用の最大のメリットはシステム効率の向上であり、その根拠が１）採熱温度の安定性、ということになる。また、この後に詳述するが、２）排熱を大気中に放熱しない、という点は気候変動が進行している現代においては極めて注目すべきポイントであろう。そして、メリット、デメリット双方の４）に示された「地盤の蓄熱性」はシステムの優劣や運用の適切性などにより、メリットにもデメリットにもなり得る特性ともいえるだろう。

4. 日本の気候の現状

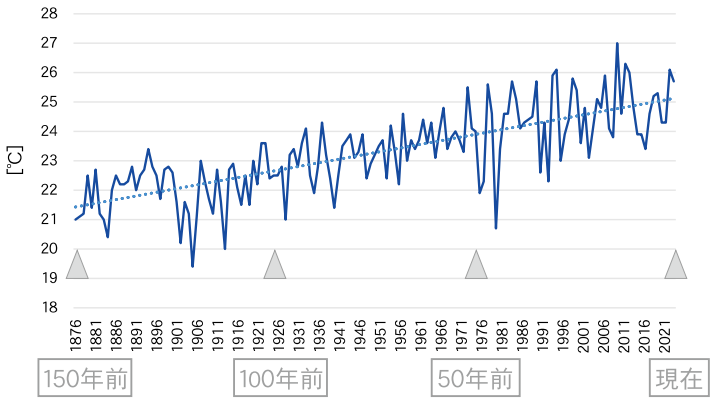
図－３に東京における８月の日最低気温平均値を示したが、150年前から確実に上昇傾向であることは明白である。ここで年平均気温のトレンドではなく８月の最低気温を示した意味は、建築の省エネルギー化のための考え方として夏の暑い時期に自然換気を行って冷房運転を回避する、という方法があるが、このグラフを見ると100年前であれば８月でも最低気温は22℃程度であり、夜や朝方に外気を取り入れれば快適であることが予想できるが、2000年を超えると平均で25℃程度あり、年によっては平均で25℃を超過している状況は、冷房運転なしで夜間を過ごすことが難しいといわざるを得ない。

5. 外気温度上昇と地中熱利用技術

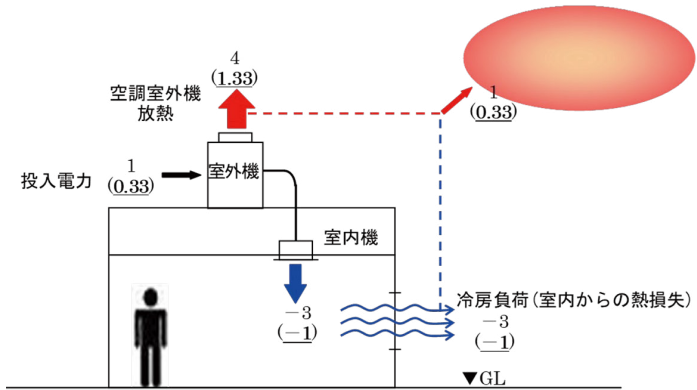
東京をはじめとする都市部では地球温暖化の影響だけではなく、ヒートアイランド現象の影響も重なって特に夏季の暑さは重篤であるが、ヒートアイランド現象の大きな要因と言われている空調排熱のメカニズムを考えてみる。図－４に空冷ヒートポンプの冷房運転時における熱収支概念図を示したが、一般的には「屋外機の排熱が都市を加熱させている」と言われているものの、どの程度の加熱度合いかを考えてみるとこの収支にあるとおり、あくまでも周辺環境を温めているのは空調システムに投入した電力のみである。これに対して GSHP システムでは図－５にあるように、排熱は地中に放熱するため周辺環境への排熱は一切無く、熱の収支を考えると実質的には周辺環境を冷やしている、ともいえる。但し、地中へ放熱した温熱は周辺地盤を温めて時

表－１ 地中熱利用システムのメリット・デメリット

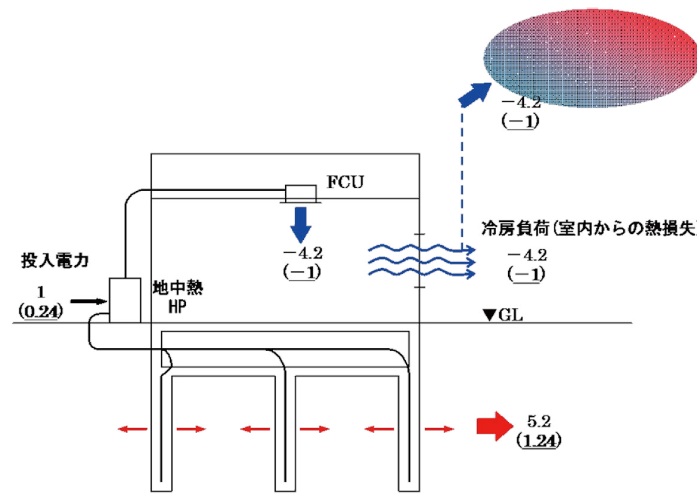
メリット	デメリット
1)採熱温度の安定性	1)地中熱交換器施工費の高さ
2)排熱を大気中に放熱しない	2)HP機種の選択枝が少ない
3)維持管理が容易	3)システムの普及度が低い
4)地盤の蓄熱性が活用可能	4)地盤の蓄熱性による性能低下
他	他



図－３ ８月日最低気温平均値(東京)



図－４ 空冷ヒートポンプ冷房運転熱収支概念図



図－５ GSHPシステム冷房運転熱収支概念図

間遅れで地上に放熱することは認識しておく必要がある。もちろんその仕組みであれば夏季の暑い時期に周辺を加熱させることは回避可能である。そう考えると、地中熱利用技術は気候変動だけではなく都市問題の一つであるヒートアイランド現象の影響についても緩和する手段の一つとして活用することが可能かもしれない。

6. 気候変動に伴う 10 年後の空調システム性能について

(1) 地中熱利用システム

地中では年間を通して温度変化がはなくなる深さを不易層と呼ぶが、図-1 の例だと 8 m の深さ以下では温度変動していない。不易層以下の温度は一般的にその地域の年間平均外気温とほぼ一致しており、東京では現在、16.5℃程度と推測される。本章では 10 年後の年間

平均温度を予測する必要があるが、ここでは簡易のため、直近 50 年の傾向が今後も継続すると仮定する。その前提で単純計算すると東京の年間平均気温は 10 年で 0.24℃ 程度上昇することが予想される。

GSHP システムの性能は直接的には熱源水の温度で決まるが、夏季の冷房運転を考えた場合、熱源水の還水温度が上昇すると GSHP の COP は低下する関係にある。そのため、数値解析を用いて GSHP システムの傾向を見るために、GSHP システムのシミュレーションソフトであるグランドクラブを用いて初期地中温度を 1℃ 刻みで変化させて 10 年間継続して運転したと設定してパフォーマンスを見たところ、冷房運転時の熱源水還水温度の最高値は概ね 1℃ 差となっており、やはり地中温度に連れて熱源水還水温度は変化する傾向があった。

この結果を前提にすると 10 年後に

0.24℃ 地中温度が上昇した場合、熱源水還水温度も最高値が同程度上昇すると推定される。GSHP システムのヒートポンプ側の性能も機種により差があるが、熱源水の温度帯によっても異なるものの、熱源水温度が 1℃ 異なると COP は 0.2 程度変動しており、0.24℃ だと COP は 0.05 変化する。以上をまとめると、気候変動を考慮した 10 年後の GSHP システム夏季冷房運転時パフォーマンスは 1% 以下の低下にとどまると推定される。

(2) 空気熱源システム

日本で最も一般的な熱源は空気熱源システムであろう。個別型はほとんど全てが空気熱源であり、中央型でも空気熱源が主流である。さて、その空気熱源型の性能特性であるが、個別型熱源であるパッケージ空調機の外気温補正表を図-6 に示す。これは国土交通省の建築設備設計基準に掲載されているが、外気温が 34℃ を超えると能力補正が必要となっている。これはすなわち能力が低下するということであるが、図-7 に示した 2025 年 8 月の東京における外気温変動を見ると、8 月の半数以上の日で 34℃ を超えている。つまり 8 月では大半の日で能力低下が発生していることになる。また、外気温のデータは気象庁の露場での測定であり、実際の室外機設置箇所は大半がビルの屋上と推察され、日射を受けコンクリート躯体は蓄熱している状況であり、気象庁の数値よりも過酷な条件で運用されていることから、更に能力が低下してしまうとともに長時間にわたり影響を受けていると推察される。まとめると、空気熱源型は夏季の冷房運転で 5% を超える能力低下が発生していると推定される。

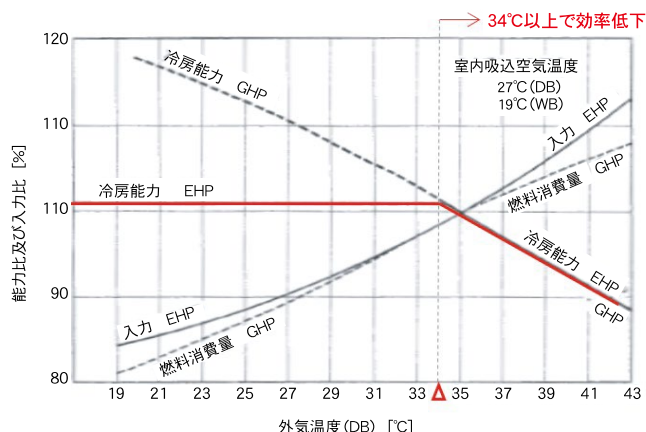


図-6 パッケージ空調機の外気温補正表

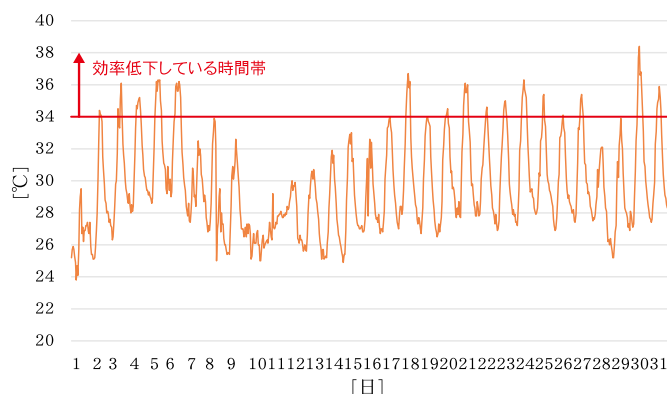


図-7 2025年8月の外気温変動(東京)

7. 気候変動の時代における地中熱利用システムの針路

GSHP システムの適合する建物用途を考えてみると、表-1 のメリット 4) 「地盤の蓄熱性が活用可能」が使える条件として、夏季に温熱負荷が発生する施設であるホテルであれば冷房負荷が過多となる夏季に給湯などの温熱負荷があった場合に地中に放熱した冷房排熱を給湯加熱に適用可能となる。その条件でグランドクラブを用いて解析を行った。計算条件は(公社)空気調和・衛生工学会で公開している平均的な負荷特性を利用して 10 年

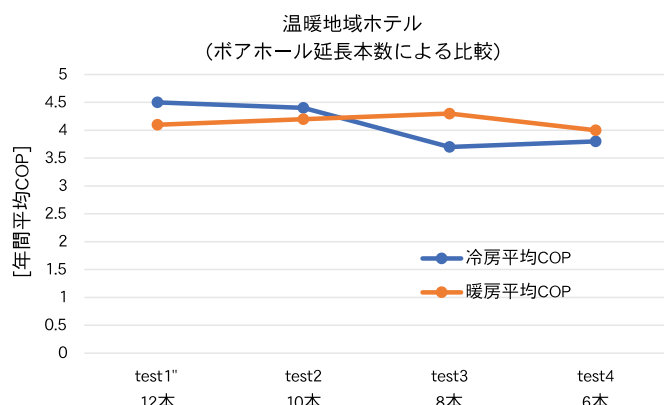


図-8 GSHPシステム10年稼働後の性能予測 (ホテル用途)

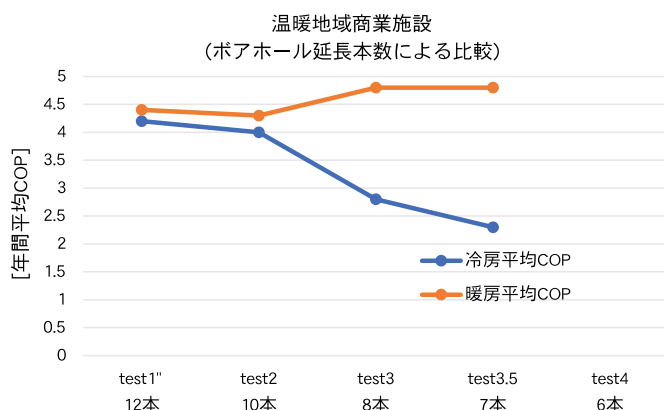


図-9 GSHPシステム10年稼働後の性能予測 (商業用途)

間運用した際のGSHPシステムのCOPとして検証した。図-8に結果を示す。このグラフは冷房時、暖房時それぞれの結果を、ボアホール本数、即ち地中熱交換パイプの距離を変えて比較している。この図からは冷房時の結果としてボアホール本数が6本まで減ったとしても大幅な性能低下はしない予測となった。これは、温暖地域で夏季に温熱負荷である給湯にもGSHPシステムを利用している効果が出たといえる。つまり、地中への冷房の温排熱が一方的ではなく、給湯加熱の熱源としても利用する前提になっているため、本章冒頭での「地中蓄熱性」が性能改善に寄与したためである。更に、夏季の冷房負荷だけではなく冬季の暖房負荷も宿泊施設の特性から運転時間が長く、その結果として夏季の放熱による地中蓄熱、冬季の地中からの採熱それぞれの熱のやりとりが性能改善に寄与していた。これは季節間蓄熱の効果といえる。

これらの結果からは夏季、冬季それぞれで性能が大幅に低下しない、という特性だけではなく、地中熱交換パイプの施工本数が12本と6本で大幅な低下に繋

がっていない、という点が極めて大きな示唆となっている。つまり、地中熱利用システムの普及を阻む要因である導入コストを施工的な要素ではなく計画的な手法から削減の手がかりとなり得るということである。

一方で地中熱利用システムの適合しない建物用途とは何だろうか。ここでは建物の用途と捉えずに運用手法として考えるが、夏季、冬季とも冷房負荷が発生する商業用途の場合にどのような特性を示すかシミュレーションを試みた。結果を図-9に示すが、この結果から分かるのは地中熱交換パイプの施工本数が直接的に性能に影響している点である。今回の試行では6本の場合、冷房時の熱源水温度の機器上限温度を超過してしまったため最後まで計算することが不可能であった。このことから、温暖地域における冷房負荷過多用途である商業施設では性能向上が図れないとともに、十分すぎる地中熱交換パイプの長さを確保しない限り高効率運用が不可能である、という結果となった。この原因としては地中の蓄熱性が負の要因として性能低下に直接影

響を与えた結果である。このように、地中の蓄熱性は地中熱利用システムの性能に直接影響を与えるため、十分な検証を行った上で計画策定を行う必要があるといえるであろう。

8. おわりに

地中熱利用システムは導入数がなかなか上向かず普及が広がっていないが、多くの設計者、技術者が地中熱利用システムを「優れた技術」という認識である一方で、「コストが高い」という現実によって最終的に選択枝から除外されてしまっているのだろう。コスト面では掘削に関する施工方法の開発など専門業者に委ねざるを得ない分野以外にも、本報で述べたように建物用途などから負荷特性を見極めることで施工費用を縮減できる可能性もある。そして、現在我々が直面している気候変動に対する耐性があるという点、更には都市部で大きな問題となっているヒートアイランド現象を緩和する効果も期待できるという点は、導入を促進すべき判断材料となり得るのではないだろうか。地中熱利用技術の今後の発展を願ってやまない。