

地中熱ヒートポンプの杭周辺の熱伝導に関する研究

Study on Heat Conduction around Stakes of Ground Source Heat Pump

竹内 淨
財原 宏一
松尾 清孝

Jo TAKEUCHI
Koichi SAIHARA
Kiyotaka MATSUO

要旨

地中熱利用空調システムに関する冷房期間の実証試験で観測していない杭中心から 0.5m 以内の地中温度を検討するために、深さ 25m を対象として、非定常 1 次元の熱伝導解析を行った。その結果、計算値は実測値の変動傾向と一致しており、本研究の計算方法により杭周辺の地中温度を評価できると考えられた。システム稼働日には、杭からの熱が時間をかけて外側へ伝わると考えられたが、1 週間の稼働状況では、0.5m 地点以内の地中温度は、土及び日曜日のシステム休止を経て、システム稼働の第 1 日目の初期温度と同程度まで低下した。

キーワード： 熱伝導、地中熱ヒートポンプ

Key words : Heat conduction, Ground source heat pump

1 はじめに

本研究所は、本市環境技術情報センターが推進する環境技術産学公民連携公募型共同研究事業において¹⁾、JFE 鋼管株式会社及び JFE スチール株式会社が提案した地中熱利用空調システムに関する共同研究に参画している。地中温度は年間を通じて 15~20℃程度であり、冬は気温より高く、夏は気温より低くなる。本システムは、地中熱ヒートポンプとして、上記の地中温度の特徴を空調設備の熱交換に利用しており、設備の省エネルギー化、CO₂ 排出量の削減及びヒートアイランド対策に貢献することを目的としている。

地中熱交換器は、図 1 に示すように、地中に回転貫入した採熱用鋼管杭に、水を充填し（充填水）、その中に循環水パイプを挿入した構成となっている。そのため、地中への排熱は、冷房期間の場合、温められた循環水の熱が充填水を介して地中へと伝わる。2009 年の実証試験では、杭中心から 0.5m 離れた地点において、システム稼働時の地中温度の変動がわずかであり、1 年経過後の地中温度においても変化がみられないため³⁾、本システムが地中へ与える熱の影響は小さいと考えられた。本研究では、冷房期間の実証試験で観測していない杭中心から 0.5m 以内の地中温度を検討するために、非定常 1 次元の熱伝導解析を行ったので報告する。

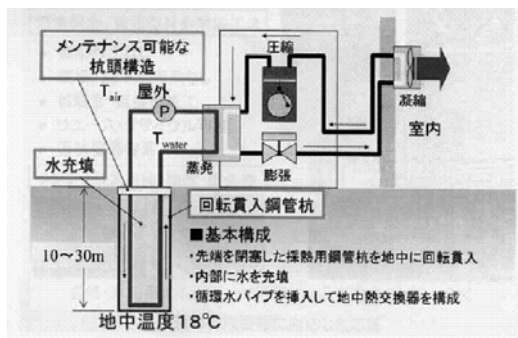


図 1 地中熱利用空調システム概念図

2008 年には南河原こども文化センター（幸区都町 74-2）に実験施設を設置し、実証試験を行ってきた。その結果、環境省の平成 21 年度環境技術実証事業（ETV: Environmental Technology Verification）において、冷房期間の平均システムエネルギー効率（COP、6~7 程度）が業務用空冷式の空調システムと比較して高いこと、並びに、排熱が地中で行われることによって、ヒートアイランドの抑制効果を示すことが実証され、ETV の対象技術として承認されている²⁾。

2 方法

2.1 計算方法

物性値が一定の 1 次元空間では、熱伝導方程式は、温度 T 、時間 t 、空間座標 x 、熱拡散率 κ として、式(1)のように示される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad \text{式(1)}$$

計算を容易にするため、代表長さ L 、基準温度 T_0 として変数を式(2)のように示す。

$$x' = x/L, \quad T' = T/T_0, \quad t' = \kappa t/L^2 \quad \text{式(2)}$$

式(2)を式(1)に代入し、プライム(') をとり、無次元化すると、式(3)で示される。

$$\frac{\partial T'}{\partial t'} = \frac{\partial^2 T'}{\partial x'^2} \quad \text{式(3)}$$

式(3)を、座標を図 2 として有限体積法による陰解法で離散化する。1 次元熱伝導方程式は、時間 t (t から $t + \Delta t$) と空間 x (w から e) の 2 重積分で式(4)のように表される。

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad \text{式(4)}$$

式(4)右辺の時間 $t, t + \Delta t$ の重み付けをそれぞれ $f, 1-f$

として、陰解法で離散化すると式(5)となる。

$$(T_p - T_p^0) \Delta x / \Delta t = f[(T_e - T_p) / (\delta x)_e - (T_p - T_w) / (\delta x)_w] + (1-f)[(T_e^0 - T_p^0) / (\delta x)_e - (T_p^0 - T_w^0) / (\delta x)_w] \quad \text{式(5)}$$

式(5)の上添え字0は時間tのときの値であることを示す。時間tのときの値が既知であると、式(5)は、3つの未知数 (T_e , T_p , T_w) を含む。複数の地点では3重対角行列で表現され、連立1次の代数方程式として解くことができる。この計算には、荒川⁴⁾が作成したFORTRAN95によるプログラムを一部修正して利用した。また、式(5)右辺の重み付け f は時間進行前後の平均として0.5とし、地中の熱拡散率 κ は $7.228 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$ ⁵⁾ とした。

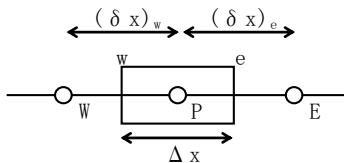


図2 1次熱伝導方程式の有限体積法による座標

2.2 計算条件

座標設定は、杭の直径が0.165mのため、杭中心から0.08mを杭の壁面と考え、0.08~0.5mを0.01m幅の43の等間隔格子点とした。時間幅は10分とした。本システムは、平日5日間9:30~18:00に稼動し、土及び日曜日に休止している。計算対象時間は、2009年の冷房期間の実証試験のうち、1週間の稼動負荷が高かった8月17日(月)9:30のシステム稼動後から24日(月)9:30の稼動前までとした。地中深さは、充填水温度の変動が最も大きい25mとした。8月15~16日はシステムが休止しており、17日9:30の0.5m地点の地中温度は17.2℃であったため、0.09~0.49m地点の初期条件は17.2℃とした。

境界条件として、杭中心から0.5m地点の地中温度及び0.08m地点の地中温度(充填水温度)に実測値を用い、10分毎に更新して計算を行った。8月20日14:00の実測値に欠測があり、13:50と同じ値を用いたが、それ以外のデータは完備していた。

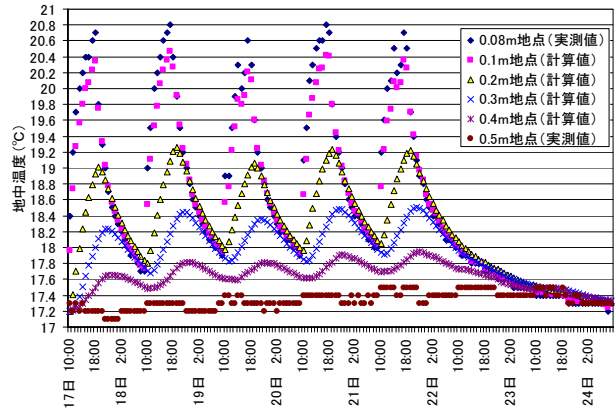


図3 深さ25mにおける地中温度の実測値及び0.1m毎の計算値

3 結果及び考察

図3及び4に、17日10時~24日9時の正時における深さ25mの地中温度の実測値及び計算値を示した。

3.1 実測値と計算値の関係

図3より、システム稼動日である17~21日では、0.1~0.4m地点の計算値は、0.08m地点の実測値の変動を反映して、システムの稼動に伴う上昇及び下降傾向を示した。また、0.4m地点の地中温度は、システム稼動による変動とともに、0.5m地点の実測値が緩やかに上昇することを反映して、17~21日の長時間での上昇傾向を示した。これらの結果から、地中温度の計算値は、0.08m及び0.5m

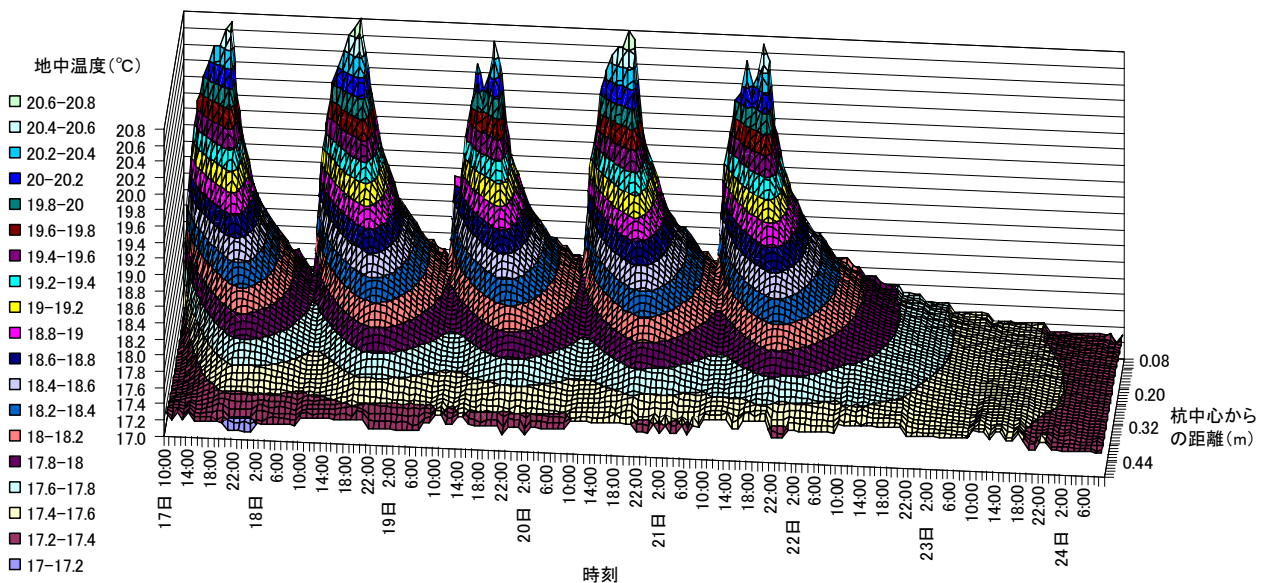


図4 深さ25mにおける地中温度の0.08m及び0.5m地点の実測値、0.01m毎の計算値

地点の実測値の変動傾向と一致しており、本研究における熱伝導計算方法により 0.09~0.49m 地点の地中温度を評価できると考えられた。

3.2 システムの稼働及び休止時の熱伝導

図3より、システム稼働日である 17~21 日では、0.1~0.4m 地点の地中温度は、杭中心からの距離が遠いほど最高温度を示す時刻が遅かった。また、3.1 節で示した図3の 0.4m 地点の傾向と同様に、図4より、17~21 日において、0.5m 地点に近い地点の地中温度は、時間の経過とともに徐々に上昇する傾向が面的にみられた。これらの結果から、杭からの熱が時間をかけて外側へ伝わると考えられた。

図3及び4より、システムが休止した 22 日以降には、地中温度は下降し続けた。24 日 9 時には、全地点の地中温度が 17.2 以上 17.4°C 未満となり、17 日の初期条件である 17.2°C と同程度に低下していた。1 週間の単位で見ると、0.5m 地点以内の地中温度は、土及び日曜日（ここでは 22 及び 23 日）のシステム休止を経て十分に低下すると考えられた。

4 まとめ

冷房期間の実証試験で観測していない杭中心から 0.5m 以内の地中温度を検討するために、深さ 25m を対象として、非定常 1 次元の熱伝導解析を行った。その結果、以下のことが示唆された。

- (1) 計算値は、実測値の変動傾向と一致しており、本研究における熱伝導計算方法によって、杭周辺の地中温度を評価できると考えられた。
- (2) システム稼働日には、杭中心からの距離が遠いほど最高温度を示す時刻が遅れる傾向、並びに、0.5m 地点近くの地中温度は緩やかに上昇する傾向がみられるため、杭からの熱が時間をかけて外側へ伝わると考えられた。
- (3) 1 週間の稼働状況では、0.5m 地点以内の地中温度は、土及び日曜日のシステム休止を経て、システム稼働の第 1 日目の初期温度と同程度まで低下した。

謝辞

本研究は、環境技術産学公民連携公募型共同研究事業の一環として行った。本事業を推進する川崎市環境技術情報センターの村上静夫係長、遠藤亜紀氏、並びに、地中熱利用空調システムの開発及び実証実験を行った JFE 鋼管株式会社の君塚哲顧問、橋爪茂利雄部長、小間憲彦部長、JFE スチール株式会社の坂本義仁課長、林正宏課長に深く感謝します。

文献

- 1) 川崎市環境技術情報センター：環境技術産学公民連携公募型共同研究事業、
<http://www.city.kawasaki.jp/30/30kangic/home/h>

ome/collaboration.html

- 2) 環境省：平成 21 年度環境技術実証事業 ヒートアイランド対策技術分野 地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システムにおける実証試験結果報告書について、(平成 22 年 6 月 29 日報道発表資料)
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=12663>
- 3) 川崎市環境技術情報センター：平成 21 年度環境技術産学公民連携公募型共同研究事業 地中熱利用空調システムの開発報告書、26~28(2010)
- 4) 荒川忠一：数値流体工学、初版第 5 刷、東京大学出版会、7~28(2000)
- 5) 川崎市環境技術情報センター：平成 20 年度環境技術産学公民連携公募型共同研究事業 地中熱利用空調システムの開発報告書、III-3(2009)