

Study on Simplified Estimate of Thermophysical Properties in Shallow Ground
Evaluation of Thermal Diffusivities of Ground by Periodic Heating Method using
Solar Energy as Heat Source

浅層における地中熱物性の簡易推定に
関する研究
太陽エネルギーを熱源とした周期加熱法による
地中熱拡散率の評価

Saburo TANAKA¹ Sho FUKUTOMI² Hideki YAMADA³ Kosuke ITO⁴ Naoe SASAKI⁵
田中 三郎¹ 福富 翔² 山田 英樹³ 伊藤 耕祐⁴ 佐々木 直栄⁵

Abstract

Effective thermal diffusivities of the ground to a depth of 10 m in a field was investigated by periodic heating method using solar energy as heat source from 2015 to 2018. Measurement point was within College of Engineering, Nihon University located in Koriyama city, Fukushima prefecture. The effective thermal diffusivities in depth from 1 to 6 m was from 0.42 to 1.07 mm²/s and average value was 0.67 mm²/s, in depth from 7 to 10 m was from 0.58 to 2.72 mm²/s and average value was 1.49 mm²/s. The ground temperature distribution at the measurement point was obtained by a Computational Fluid Dynamics analysis tool, and thermophysical property value was used the value obtained by experiment. The relative errors between the calculated value and the experimental value were from -0.20 to 0.39.

Keywords: Ground source, Effective thermal diffusivity, Shallow ground, Field, Periodic heating method, Solar energy

キーワード：地中熱，有効熱拡散率，浅層，フィールド，周期加熱法，太陽エネルギー

1. はじめに

地下 10～数 100 m 程度の地中熱は，太陽エネルギーからの熱エネルギーを受け，通年ほぼ一定温度の膨大な熱容量を有する再生可能エネルギーの一つとして注目されている。しかしながら，温度レベルがその土地の平均気温程度の質の低いエネルギーになるため，発電などに用いられるほどの高いエネルギーレベルでは無い。したがって，発電用熱源としてではなく，快適な住環境設計に必要な不可欠な空気調和機器（エアコ

ン）や給湯などの熱源として用いることが有用と考えられる。この地中熱を利用したシステムの一つに地中熱ヒートポンプがあり，日本国内では 2001 年以降に普及し始め⁽¹⁾，地中熱ヒートポンプの導入事例のほとんどが北海道および東北地区や積雪の多い日本海側の地区である。一般的なエアコンは室外ユニット設置場所の温度が -15℃以下の環境になると使用できないことや寒冷地では除霜運転による性能低下が起こることに対して，通年ほぼ一定温度の地中熱を利用する地中熱ヒートポンプシステムは外気温の影響を受けないことがその導入理由として考えられる。

*1 Assistant Professor, College of Engineering, Nihon University, 1 Nakagawara, Tokusada, Tamuramachi, Koriyama, Fukushima, 963-8642, Japan

†e-mail: tanaka.saburo@nihon-u.ac.jp

*2 Graduate School of Engineering, Nihon University

*3 TEKKEN CORPORATION

*4 Associate Professor, College of Engineering, Nihon University

*5 Professor, College of Engineering, Nihon University

Received: 10 July 2019, Accepted: 04 October 2019

*1 日本大学工学部 専任講師（〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原 1）

†e-mail: tanaka.saburo@nihon-u.ac.jp

*2 日本大学大学院工学研究科

*3 鉄建建設株式会社

*4 日本大学工学部 准教授

*5 日本大学工学部 教授

（原稿受付：2019 年 7 月 10 日，受理日：2019 年 10 月 4 日）

地中熱利用システムの導入件数は海外において非常に多く、その設置件数は、米国、中国およびスウェーデンで非常に多いことが報告されており、続いて、ドイツ、フランスおよびスイスなどのヨーロッパ諸国での導入件数が多い⁽²⁾。一方、日本国内の導入件数は、米国の 100 万件以上に対して、2200 件程度⁽¹⁾となっている。地中熱ヒートポンプは空気熱源式ヒートポンプと異なり、大気中に排熱しないことによるヒートアイランド現象の緩和や安定した地中熱源を利用することによる性能の向上など、非常に多くのメリットを有しているにもかかわらず、普及状況は非常に少ないのが現状である。この要因としては、地中熱ヒートポンプシステムの導入コストが考えられる。地中熱ヒートポンプシステムを導入するためには、気候風土、敷地条件、法的規制および地中条件などの現地調査が必須となり、その中でも、地中条件の調査項目は、地中の熱物性をはじめとする地質、地中温度、地下水位、地下水流速および帯水層厚さなどがあり、掘削作業を伴うため、これらが導入コストを高くする原因となっている。これらの課題に対して、地中熱利用による地下環境の評価モデル⁽³⁾や地中熱利用システムを導入するために適地の選定方法を提案する報告がなされている⁽⁴⁾。

地中熱利用ガイドライン⁽⁵⁾より、地中の有効熱伝導率の評価方法に用いられている熱応答試験 (Thermal Response Test, 以下 TRT) は線熱源理論を応用しているため、一次元非定常温度 T [K] の厳密解として次式が与えられる⁽⁶⁾。

$$T - T_0 = -\frac{Q}{4\pi\lambda} X \left(-\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \quad (1)$$

$$-X \left(-r^2 / 4\alpha t \right) = \int_{r^2/4\alpha t}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2)$$

ここで、 T_0 は初期温度 [K]、 Q は単位長さ辺りの加熱量 [W/m]、 λ は熱伝導率 [W/(m·K)]、 r は線熱源からの半径 [m]、 α は熱拡散率 [m²/s]、 t は経過時間 [s] を表しており、 X は指数積分関数である。 $r^2/4\alpha t$ が十分に小さいとき (TRT は、 $r^2/4\alpha t \leq 0.05$ の条件で誤差 2.5 % 以下) 式 (1) が次式として近似される。

$$T - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r^2} - 0.5772 \right) \quad (3)$$

よって、式 (3) を時間 t で微分することで式 (4) を得ることができ、温度の時間変化 $dT/d\ln t$ と単位長さ辺りの加熱量 Q を求めることで地中の有効熱伝導率を求めることができる。

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi} \frac{1}{\frac{dT}{d\ln t}} \quad (4)$$

TRT では、ボアホール内に挿入されたチューブ内の熱媒体の温度変化から有効熱伝導率を計測するため、ボアホール内部の加熱量を無視することができるように加熱時間を標準 60 時間程度実施することで線熱源理論の理論解に近似させる工夫を行っている。また、線熱源理論で計測可能な熱伝導率は、熱線の半径方向および熱線長さの領域における平均値である。そのため、地層を多数有する地下数 100 m の任意の深度の地中熱物性を評価するために深度数メートルごとに TRT の温度変化を計測し、深度毎の有効熱伝導率を推定する方法 (Thermal Conductivity Profiling, 以下 TCP) が推奨されている。

本グループでは、地中熱ヒートポンプをはじめとする地中熱利用システムの普及を目的の一つとして導入コスト削減に着目した。その中でも掘削コストを抑えるために、長期にわたって浅層 (深度 10 m 程度) における地中熱の利用について研究を進めてきた⁽⁷⁻¹⁵⁾。

浅層における地中熱利用には、掘削をはじめとする導入コストの削減は見込まれるが、深度 10 m 以浅の場合は太陽エネルギーや降雨などの地表の影響を受けて地中温度が季節変動するため、一般的な地中熱利用のメリットである温度一定 (不易層) の熱源として用いることが不可能である。さらに、地中温度が一定でないことや深度が浅いことなどにより、線熱源理論を用いた既存の TRT および TCP などの方法では、式 (1) の単位長さ辺りの加熱量 Q 以外の熱流が起こることによって浅層における地中の熱物性を評価することが困難であり、浅層における地中の熱物性評価および特性については明らかにされていない。地中表層の土砂のような多孔質体の物性^(16,17)やその多孔質体が水分を含んだ場合の熱および水分輸送⁽¹⁸⁻²¹⁾などの研究は多く行われており、含水率および温度に依存する報告がなされている。しかしながら、実際のフィールドにおける浅層域の地中の物性値は、日射、降雨および帯水層などの環境の影響によって非定常になるため、定量的な評価が困難であり、それらの影響を考慮した熱物性の簡易的な評価方法は確立していないのが現状である。

本研究では、太陽エネルギーを熱源とした周期加熱法により、フィールドにおける地中の有効熱拡散率を各深度において算出した。また、その結果から、各深度における有効熱拡散率の温度依存性を算出し、汎用熱流体解析ソフトウェアにより計算した値と実測値との地中温度を比較した結果について報告する。

2. 実験装置, 方法および期間

2.1 実験場所, 装置および方法

実験場所および装置概略図を Fig. 1 (a) および (b) にそれぞれ示す. 実験場所は日本大学工学部構内の日中建物の陰にならない場所 (経度緯度: 北緯 37 度 21 分 34 秒, 東緯 140 度 22 分 51 秒) を選定した [Fig. 1 (a)] .

実験装置は, 長さ 10000 mm, 外径 48 mm, 肉厚 3.6 mm の配管 (塩化ビニル製) の外壁 1 m ごとに温度センサー (T 型, ϕ : 0.32 mm) を設置し, 配管内には充填物を封入しない状態で地中に埋設した [Fig. 1 (b)] . また, 配管の地表部は, 配管から伝わる日射や降雨などを遮断するために被覆した. 各深度の温度はデータロガー (GRAPHTEC 社製, GL820) を用いて 60 s 間隔で収録した. 本報で使用した温度データは, 計測した実測値を日平均したものを用いた. 深度 9 m の温度は 10 m の温度と同等であったため本報からは除いた.

2.2 実験期間

実験期間は 2015 年 9 月 1 日から 2018 年 5 月 31 日である. 浅層における地中温度は外気温と同様に通年で変動するため, 不易層温度よりも高い温度と低い温度とに大別することができる. 本報では, 不易層温度よりも高い場合を夏場, 低い場合を冬場とした.

3. 有効熱拡散率の算出方法

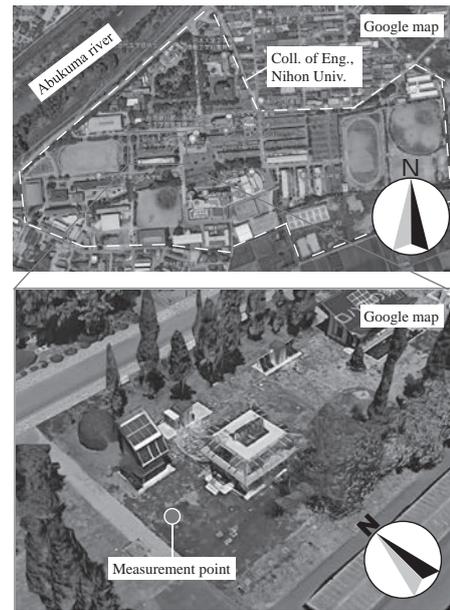
非定常熱伝導方程式に対し, 太陽エネルギーで加熱された大気により地表面が周期加熱されたと仮定して, 周期加熱境界条件を与えると, 任意の位置 x [m] における温度変動 $T^*(x)$ は式 (5) の解が得られる⁽²²⁾.

$$T^*(x) = A \exp \left[-x \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \right] \sin \left[\omega t - x \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \right] \quad (5)$$

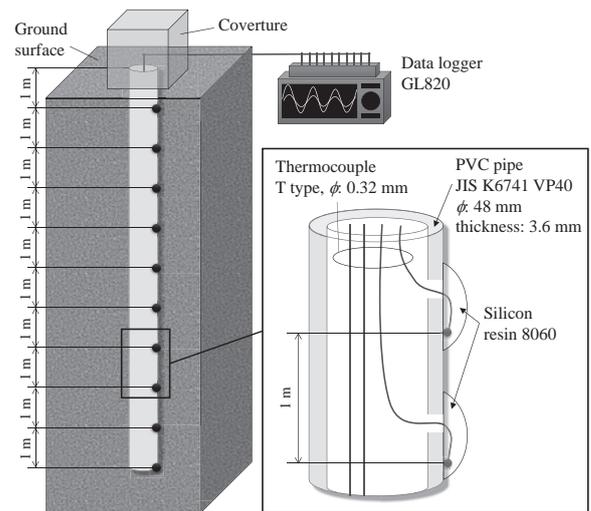
ここで, A は振幅 [°C], ω は角周波数 [rad/s], α は有効熱拡散率 [m^2/s], t は時間 [s] である. したがって, 地表面から任意の深度 D [m] における温度を計測することで, 地表面から与えられた温度波に対して, 振幅および位相がそれぞれ減衰および遅れた温度波になり, それらを求めることで有効熱拡散率 α を算出することができる. 本報では, 位相差時間 τ [s] を求め, 式 (6) により有効熱拡散率を算出した⁽²²⁾.

$$\alpha = \frac{t_p}{4\pi} \left(\frac{\Delta L}{\tau} \right)^2 \quad (6)$$

ここで, t_p は周期 [s], ΔL は温度センサー間距離



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Measurement point in College of Engineering, Nihon University. (b) Schematic of temperature measurement apparatus.

[m] である. 位相差時間 τ [s] の算出例を Fig. 2 に示す. 実測データと式 (7) の温度 T [°C] の周期関数とのフィッティングにより各深度の温度波のピークを求め, 位相差時間 τ [s] を算出した.

$$T(t) = A_D \sin(\omega t - \phi) + B_D \quad (7)$$

ここで, A は振幅 [°C], ω は各周波数 [rad/s], t は時間 [s], ϕ は位相 [rad], B は温度 [°C], 添え字 D は深度 D [m] である.

本報では, 各深度における夏場および冬場の地中温度の有効熱拡散率をそれぞれ算出した.

4. 数値計算

3次元モデリングツール Rhinoceros 5.0 (Robert McNeel & Associates 社製) を用いて作成した計算モデルを Fig. 3 に示す. 計算モデルは x , y および z 軸方向の長さをそれぞれ 5000 mm, 5000 mm および 10000 mm の直方体とした. 熱流体解析には, 非構造格子系熱流体解析システム SCRYU-Tetra V14 (ソフトウェアクレイドル社製) を用いた. 温度の計算はエネルギー保存式を用いた. 浅層における地中の熱物性は土砂のような多孔質体であり先行研究によって含水率および温度に依存する報告がなされている⁽²¹⁾が, フィールドの地中の含水率を計測することは困難であるため, 本報では, Fig. 4 に示す方法により, 実験で得られた深度 1 m 毎の有効熱拡散率の温度依存性の式 (8) を作成し, それを物性値として用いた.

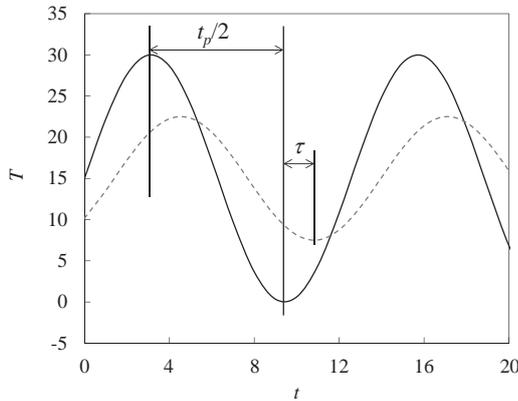


Fig. 2 Schematic for calculating the thermal diffusivity.

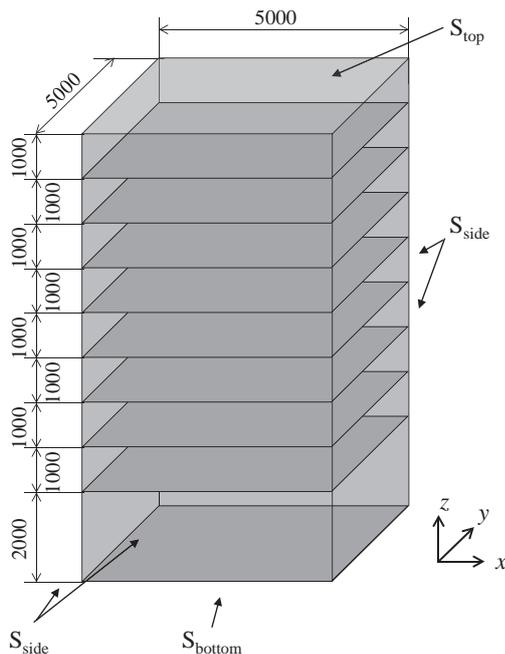


Fig. 3 Model of analysis (unit: mm).

$$\alpha_D = F_D T + G_D \tag{8}$$

ここで, F および G は任意の深度 D [m] ($0 \leq D \leq 1, 1 < D \leq 2, \dots$) における係数である. 境界条件は, Fig. 3 に示す S_{top} の地表面領域には実験と同期間の気象庁のデータベース⁽²³⁾の外気温を用い, S_{side} の側面および S_{bottom} の底面は断熱面とした. 初期条件の z 軸方向の温度は, 実験開始時 (2015 年 9 月 1 日) の実測値を与え, 実測できていない熱電対間の空間の温度は実測値を線形補間した値を用いた. x, y 軸方向の温度は, z 軸方向に与えた温度と同じ値とした.

5. 結果および考察

5.1 各深度における地中温度の経時変化

各深度における地中温度および外気温 T_{out} ⁽²³⁾の経時変化を Fig. 5 に示す. 図中には, 実験場所付近にある一級河川阿武隈川 (Fig. 1 (a) 参照) の国土交通省水管理・国土保全局が所管する観測所における水位流量 h_w [m] (観測所: 御代田, 経度緯度: 北緯 37 度 20 分 47 秒, 東経 140 度 22 分 25 秒)⁽²⁴⁾, 実験期間における平均水位流量 $h_{w,ave}$ [m] (一点鎖線) および気象庁の降水量 P_r [mm] を併記した. また, 水位流量 h_w [m] および平均水位流量 $h_{w,ave}$ [m] は他のデータとスケールを合わせるために 10 倍の値をプロットした.

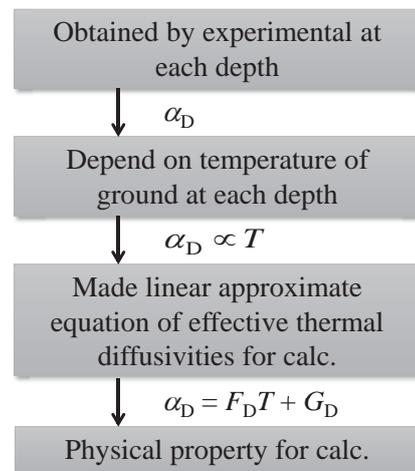


Fig. 4 Flow chart for determining effective thermal diffusivities used in numerical calculation.

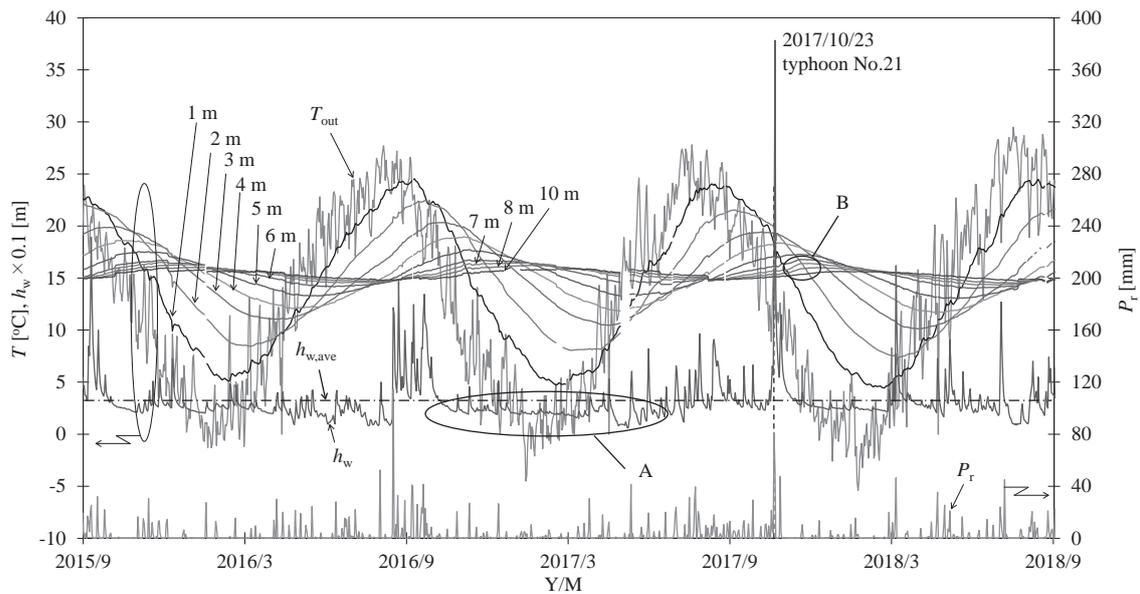


Fig. 5 Temperature of ground obtained by experiment. Outside temperature (T_{out})⁽²³⁾, precipitation (P_r)⁽²³⁾ and water height (h_w)⁽²⁴⁾.

Fig. 5 より、外気温度 T_{out} の変動に伴って地中温度が変動し、それは深度が深くなるとともに温度のピークがシフト（位相遅れ）し、振幅が小さくなる傾向を示した。このことから、夏場は地表面から地中に、冬場は地中から地表面に、熱流があることがわかる。深度 10 m における最大と最小との温度差 ΔT は 2 K 以下であり、平均温度 T_{ave} は約 15°C であった。この結果から、本計測場所の不易層は深度 10 m 以下、温度は 15°C であることを確認した。

5.2 温度の実験値と計算値とのフィッティング

温度波ピークの位相差時間 τ [s] を求めるために用いた実験値と計算値とのフィッティング結果の一例として、2016 年冬場の深度 4 から 5 m のものを Fig. 6 に示す。実験値のみでは温度波のピークを判断することは困難であるが、フィッティングすることによりピークを判断することが可能となった。他の深度における実測値も同様の方法で温度波のピークを求めた。

5.3 有効熱拡散率と深度との関係

有効熱拡散率と深度との関係を Fig. 7 に示す。深度 1~6 m の有効熱拡散率は、0.42~1.07 mm²/s の範囲にあり、平均値は 0.67 mm²/s であった。この平均値は文献値 0.68 mm²/s⁽²⁵⁾ と同程度の値であった。

深度 7~10 m の有効熱拡散率は、0.58~2.72 mm²/s であった。これは、事前調査によって、実験場所付近の深度 7 m 程度に帯水層があることが確認されており、それにより有効熱拡散率が高くなったものと考えられる。

深度 7 および 8 m の 2017 年冬場の有効熱拡散率が低くなる傾向を示した。これは、Fig. 5 中の A より、阿武隈川の水位流量が平均水位流量よりも低く、それに伴って帯水層水位が低くなり有効熱拡散率が低くな

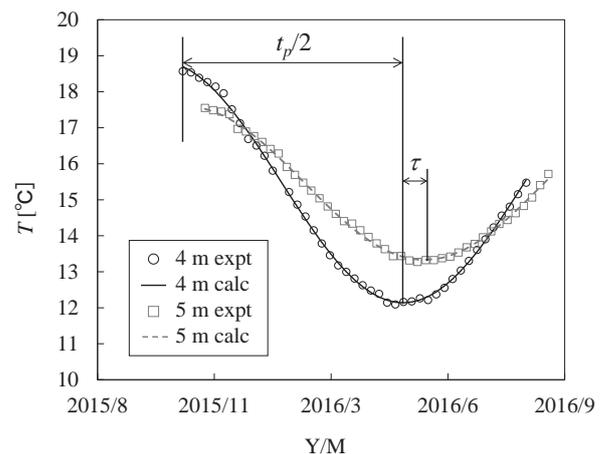


Fig. 6 Comparison of experimental value and calculation value at depth of 4 m and 5 m in winter 2016.

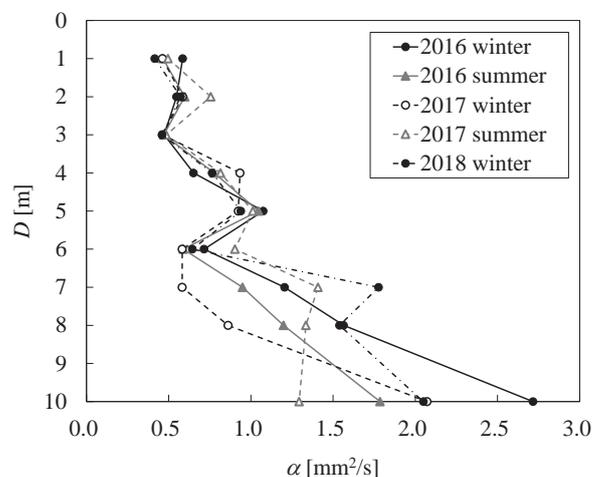


Fig. 7 Relationship between effective thermal diffusivity and depth.

ったものと考えられる。また，国土交通省国土地理院の標高データ⁽²⁶⁾より，実験場所（経度緯度：北緯 37 度 21 分 34 秒，東緯 140 度 22 分 51 秒）および計測地点付近の阿武隈川（経度緯度：北緯 37 度 21 分 40 秒，東緯 140 度 22 分 44 秒）の標高は，それぞれ 228 m および 221 m であり，それらの標高差は 7 m 程度であることから帯水層（深度 7 m）と阿武隈川との水位は連動しているものと考えられる。

深度 6～8 m の 2017 年夏場の有効熱拡散率が同深度の 2016 年夏場と比べて高くなる傾向を示した。これは，Fig. 5 より，2017 年 10 月 23 日に上陸した台風 21 号の影響で阿武隈川の水位流量の急激な上昇に伴って帯水層水位が上昇し，温度波ピーク（Fig. 5 図中 B）がシフトしたことで有効熱拡散率が高くなったものと考えられる。

5.4 有効熱拡散率と地中温度との関係

有効熱拡散率と温度波ピークの地中温度との関係を Fig. 8 に示す。図中には不易層温度 15°C を併記した。各深度における有効熱拡散率と地中温度との関係から求めた，式 (8) の係数 F_D および G_D を Table 1 に示す。Fig. 8 および Table 1 より，深度 0～6 m の有効熱拡散率はほぼ一定の値を示し，深度 7～10 m の場合は負の傾向を示していることがわかる。この結果から，有効熱拡散率と地中温度との関連性は，各深度によって大きく異なることがわかる。さらに，式 (8) の係数 F_D から本実験場所の有効熱拡散率は，地中温度以外の影響を大きく受けているものと考えられる。

5.5 数値計算値と実験値との比較

式 (8) および Table 1 より，各深度における有効熱拡散率の温度依存性を α_D として計算した温度 $T_{tcalc,D,t}$ と実験値の温度 $T_{expt,D,t}$ との相対誤差 $E_{tl,D,t}$ を式 (9) により求めた。

Table 1 Coefficients of the eq. (8) for effective thermal diffusivity α_D [mm²/s].

Depth range m	Coefficient	
	F_D [mm ² /(s·K)]	G_D [mm ² /s]
0 ≤ D ≤ 1	-1.4501×10 ⁻⁴	4.8671×10 ⁻¹
1 < D ≤ 2	7.4105×10 ⁻³	5.1137×10 ⁻¹
2 < D ≤ 3	1.3329×10 ⁻³	4.5092×10 ⁻¹
3 < D ≤ 4	1.5891×10 ⁻³	7.6502×10 ⁻¹
4 < D ≤ 5	1.2541×10 ⁻²	8.1198×10 ⁻¹
5 < D ≤ 6	3.8630×10 ⁻²	9.7688×10 ⁻²
6 < D ≤ 7	-5.0123×10 ⁻²	1.9491
7 < D ≤ 8	-7.8089×10 ⁻²	2.4887
8 < D ≤ 10	-8.0833×10 ⁻¹	1.4254×10

$$E_{tl,D,t} = \frac{T_{tcalc,D,t} - T_{expt,D,t}}{T_{expt,D,t}} \quad (9)$$

ここで，添え字 t は任意の時間 [s] である。

また，事前に実験場所付近の深度 5 m までの有効熱拡散率 α_{hm} をヒストリーマッチング法により計測した値 (2.3 mm²/s)⁽¹⁴⁾ を用いて計算した温度 $T_{hmcac,D,t}$ と実験値の温度 $T_{expt,D,t}$ との相対誤差 $E_{hm,D,t}$ を式 (10) により求めた。

$$E_{hm,D,t} = \frac{T_{hmcac,D,t} - T_{expt,D,t}}{T_{expt,D,t}} \quad (10)$$

式 (9) および (10) により求めた相対誤差 $E_{tl,D,t}$ および $E_{hm,D,t}$ の結果をそれぞれ Fig. 9 (a) および (b) に示す。Fig. 9 のプロットは週ごとの値を示している。

Fig. 9 (a) より，相対誤差 $E_{tl,D,t}$ は，深度 1 m が最も大きく 0.39 であり，深度 2 m 以深では ±0.2 以下となり，深度の増加に伴って減少する傾向を示した。Fig. 9 (b) より，相対誤差 $E_{hm,D,t}$ は，深度 1 m が最も大きく -0.66 であり， $E_{tl,D,t}$ とは異なり深度 2 m 以深の各深度において -0.5～0.06 の範囲であった。したがって，Fig. 9 (a) に示した本報の手法の方が地中温度分布の再現性が高いことがわかり，浅層における有効熱拡散率は深度および地中温度によって異なり，浅層における地中熱利用システムの熱設計にはそれらを考慮することが重要と考えられる。

6. おわりに

フィールドにおける浅層の各深度の地中の有効熱拡散率を算出した結果，深度 1～6 m の有効熱拡散率 α は 0.42～1.07 mm²/s の範囲にあり，深度 7～10 m の場合は 0.58～2.72 mm²/s であった。また，同深度における有効熱拡散率は夏場と冬場とで異なる値を示す場合があった。各深度の有効熱拡散率の温度依存性の物性を用いて計算した地中温度と実測値との比較を行った結果，深度 1 m の最大相対誤差 E_{tl} は 0.39 であり，深度 2 m 以深の場合は 0.2 以内で一致することがわかった。以上の結論より，浅層における地中熱ヒートポンプシステムを熱設計する際は，深度毎の有効熱拡散率を用いることが有用と考えられる。

今後の展望として，地中の有効熱拡散率の温度依存性だけでなく，帯水層による移流および地表面からの熱流をはじめとするエネルギーなどをパラメータとしたフィールドデータを考慮することで，地中温熱環境を正確に予測することが可能になると考えられる。

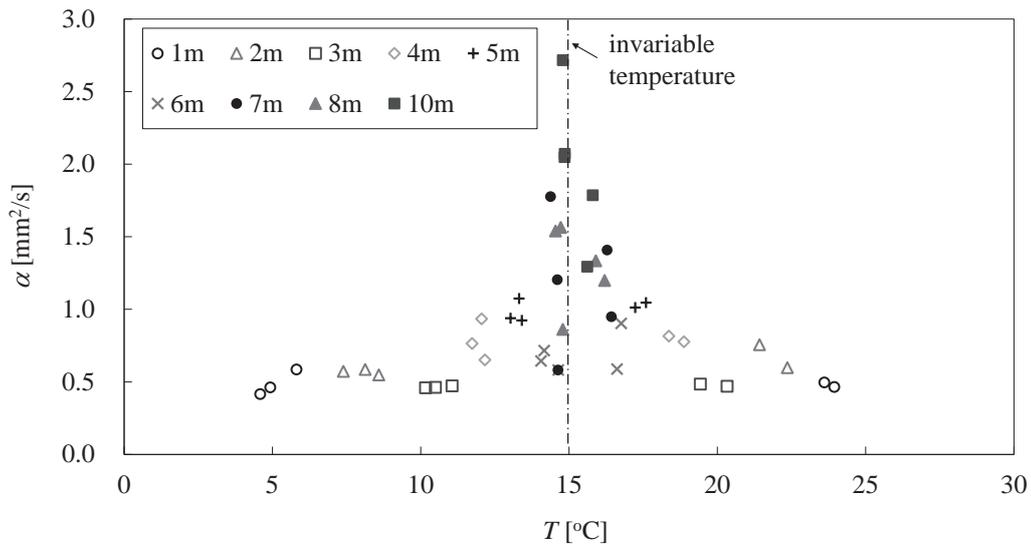


Fig. 8 Relationship between effective thermal diffusivity and ground temperature.

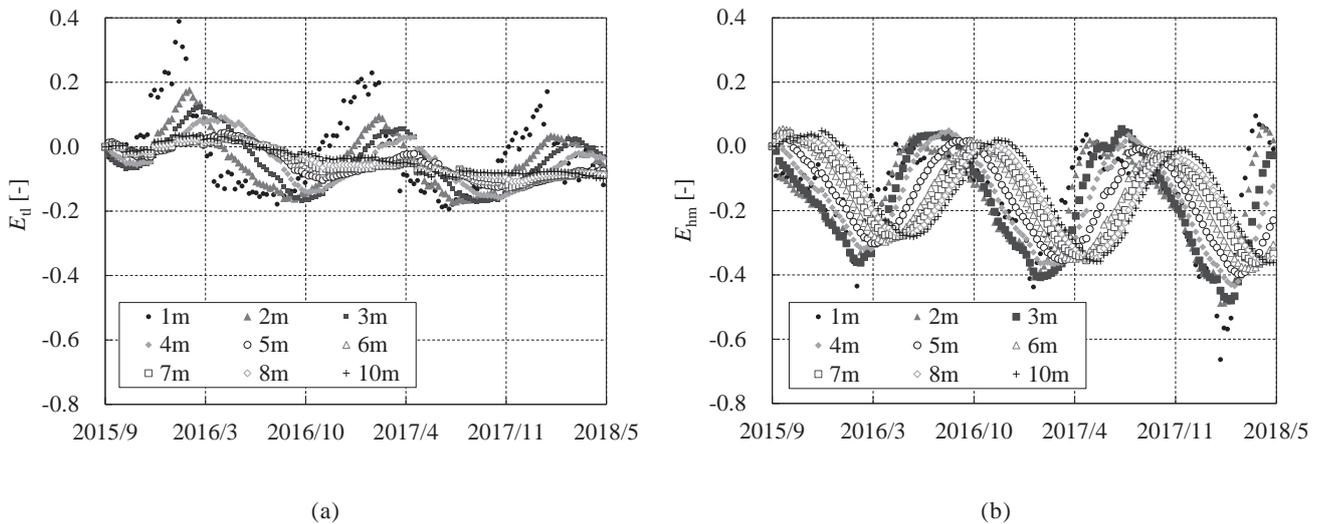


Fig. 9 Relative errors calculated by (a) eq.(9) and (b) eq. (10).

謝辞

本研究に用いた地中温度計測装置は平成 22 年度工学部研究費によって製作された。装置の設置は日本大学工学部機械工学科創成学研究室の学生により行われた。地中熱物性計測にはミサワ環境技術株式会社殿にご協力いただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境省水・大気環境局, 平成 28 年度地中熱利用状況調査の集計結果 (Mar. 2019), https://www.env.go.jp/press/files/jp/103827/besshi_h28result.pdf
- 2) J. W. Lund and T. L. Boyd, Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review, Proceedings World Geothermal Congress 2015, (Apr.

2015), 31, Melbourne, Australia.

- 3) Y. Uchida, On the Shallow Subsurface Thermal Regime and Groundwater Flow (1) Shallow Subsurface Thermal Structure, Journal Geothermal Research, **28** (3), 299-306 (2006).
- 4) Y. Uchida, U. Yoda, H. Fujii, S. Miyamoto, M. Yoshioka, Adoption of Suitability Area for Ground-coupled Heat Pump Systems 1st paper Development of Suitability Maps for Ground-coupled Heat Pump Systems Using Groundwater Flow/Heat Transport Modeling and Geographic Information System, Journal Geothermal Research, **32** (4), 229-239 (2010).
- 5) 環境省水・大気環境局, 地中熱利用にあたってのガイドライン 改訂増補版, 24-36 (Mar. 2019), <https://www.env.go.jp/press/files/jp/108674.pdf>
- 6) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, Second edition, 258-263, (1959), Oxford

- university press, London.
- 7) 下司大弥, 伊藤耕祐, 武樋孝幸, 加藤康司, 福島県郡山市における浅部地中温度特性の研究, 第55回日本大学工学部学術研究報告会講演要旨集 (Dec. 2012), 2, 郡山.
 - 8) 原田大輔, 伊藤耕祐, 日本大学工学部地中熱センサー東における冬季採熱の持続可能性, 第56回日本大学工学部学術研究報告会講演要旨集 (Dec. 2013), 2, 郡山.
 - 9) 橋本諒, 泉栄人, 矢代光, 宮岡大, 伊藤耕祐, 第57回日本大学工学部学術研究報告会講演要旨集 (Dec. 2014), 2, 郡山.
 - 10) S. Tanaka, K. Ito, F. Miyaoka, M. Oguma, G. Peng, A. Shindo, T. Kakizaki, N. Sasaki, Evaluation of Soil Thermophysical Properties with Thermal Response Test, Thermal Engineering Conference 2015, (Oct. 2015), 2, Osaka.
 - 11) H. Kashiwagi, S. Tanaka, N. Sasaki, Study on Soil Thermophysical Properties Utilizing Ground Source, 53rd National Heat Transfer Symposium of Japan, (May 2016), 4, Osaka.
 - 12) S. Tanaka, N. Sasaki, Effect Prediction of Factors on Shallow Ground Thermal Environment, Japan Society of Refrigerating and AirConditioning Engineers 2016 Conference, (Sep. 2016), 5, Kobe.
 - 13) H. Yamada, S. Tanaka, K. Ito, N. Sasaki, Influence of Outside Air Condition on Ground Thermal Environment, 54th National Heat Transfer Symposium of Japan, (May 2017), 4, Omiya.
 - 14) S. Tanaka, H. Yamada, K. Ito, N. Sasaki, Evaluation of Thermophysical Properties of Shallow Ground, Japan Society of Refrigerating and AirConditioning Engineers 2017 Conference, (Sep. 2017), 6, Machida.
 - 15) H. Yamada, S. Mitsuyama, K. Ito, S. Tanaka, N. Sasaki, Study on Thermophysical Properties of Shallow Ground -Influence of Ground Temperature on Thermal Diffusivities-, Japan Society of Refrigerating and AirConditioning Engineers 2018 Conference, (Sep. 2018), 4, Koriyama.
 - 16) K. L. Bristow, G. J. Kluitenberg, and R. Horton, Measurement of Soil Thermal Properties with a Dual-probe Heat-pulse Technique, Soil Science Society of America Journal, **58**, 1288-1294 (1994).
 - 17) R. J. Parikh, J. A. Havens, H. D. Scott, Thermal Diffusivity and Conductivity of Moist Porous Media, Soil Science Society of America Journal, **43**, 1050-1052 (1979).
 - 18) J. R. Philip, D. A. De Vries, Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients, Transactions of the American Geophysical Union, **38** (2), 222-232 (1957).
 - 19) H. L. Penman, Gas and Vapor Movement in the Soil : I. The Diffusion of Vapors Through Porous Solids, Journal of Agricultural Science, **30**, 437-462 (1940).
 - 20) C. G. Gurr, T. J. Marshall, and J. T. Hutton, Movement of Water in Soil Due to a Temperature Gradient. Soil Science, **74**, 335-345, (1952).
 - 21) Y. Hiraiwa, T. Kasubuchi, Temperature Dependence of Thermal Conductivity of Soil Over a Wide Range of Temperature (5-75 °C), European Journal Soil Science, **51**, 211-218, (2000).
 - 22) 川下研介, 熱伝導論, 72-77 (1966), オーム社, 東京.
 - 23) 国土交通省気象庁, 気象データ (Mar. 2019), <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
 - 24) 国土交通省水管理・国土保全局, 水位流量データ (Mar. 2019), <http://www1.river.go.jp/contents.html>
 - 25) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 改訂第5版, 289 (2009), 丸善, 東京.
 - 26) 国土交通省国土地理院, 標高データ (May. 2019), <http://maps.gsi.go.jp/#5/36.104611/140.084556/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1>