

熱伝導を利用した原位置地盤熱伝導率探査法 および含水比推定の検討

学生氏名 石垣拓也
指導教員 末政直晃

近年、二酸化炭素排出量の削減や、地球温暖化やヒートアイランド現象の抑制につながるとして再生可能エネルギーの一つである地中熱利用が注目されている。地盤の熱的利用には、事前に地下の熱伝導率を把握し適正な設計・評価を行うことが重要である。地盤の熱伝導率などの諸熱物性は地盤含水率などの地質環境特性と密接な関係があるため原位置における計測が望ましいと考えられる。そこで、本研究では宅地地盤の主な地盤調査法であるスウェーデン式サウンディング試験（以下 SWS 試験）を利用した簡易地盤熱伝導率探査装置を作製し試験を実施した。本研究で作製した装置は、SWS 試験による掘削孔に挿入することで地盤内にて加熱・計測を同時に行うことができ、この装置を用いて地盤の熱伝導率の算定を行った。また、地盤の熱伝導率はその含水率や含水比に依存することからその関係性について調査し、熱伝導率と含水比の実験式から、本試験における含水比推定法を提案した。

Key Words: Geothermal, thermal response test, thermal conductivity, Swedish weight sounding test, water content

1. はじめに

近年、産業の発展や生活水準の向上に伴うエネルギーの大量消費などにより、地球温暖化やヒートアイランド現象など、多くの環境問題に直面している。このような問題を解決するために、二酸化炭素排出量の削減や省エネルギー化促進など、様々な対策が行われている。その中でも、二酸化炭素排出量の削減、地球温暖化やヒートアイランド現象の抑制につながるとして、再生可能エネルギーの一つである地中熱利用が注目されている¹⁾。

しかし、地中熱など地盤の熱的利用をするにあたり、有効熱伝導率などの地盤情報を事前に把握する必要がある。その調査方法としてサーマルレスポンス試験（以下 TRT と略す）が挙げられる。地中熱利用システムにおける適正な熱交換器の本数・長さを決定するために必要不可欠な試験であるが、従来の計測方法では地上に循環水を流すシステムを設置することが必須のため、ボーリング掘削や設備設置のコストが嵩むこと、また余分な施工時間を要するなどの点で問題となっている。地中熱利用の事前調査を行うにあたり、より安価で簡易な地中の有効熱伝導率計測方法が求められている。

本研究では、地中の熱的利用時に必要な情報である地盤熱伝導率を計測する方法について、従来のものよりも安価かつ簡易な試験方法を検討した。簡易な試験方法として、スウェーデン式サウンディング試験（以下 SWS 試

験と略す）の試験孔を利用した地盤の熱伝導率探査試験装置を開発し、実際の地盤にて試験を実施した。SWS 試験は宅地地盤調査ではほぼ主流の調査であり、スクリーポイントを用いて地盤に貫入することで、土の硬軟又はしまり具合などの静的貫入抵抗を求める試験であるが、試験方法や装置自体が低コストかつ簡易に行えるものである。また、この試験による掘削径は直径 33mm と細径であるため、狭い調査スペースでも計測ポイントを確実に得られるという利点がある。

また、熱伝導率は地盤の体積含水率に依存することが既往の研究から知られており、地盤の物性値の中でも重要な指標となる含水比も推定することができると考えられる²⁾。体積含水率 θ (%) は水分が占める容積を土の全容積に対する百分率で示した値であり、含水比 w (%) は含水質量と乾燥重量の比である。体積含水率と含水比の関係を以下の式に示す。

$$\begin{aligned}\theta &= (\text{含水比}) \times (\text{乾燥密度}) \\ &= \left(\frac{m_w}{m_s}\right) \times \left(\frac{m_s}{V}\right) \times 100 \quad (1)\end{aligned}$$

地盤の含水比は現場の土をボーリング調査などで採取して一日炉乾燥させる必要がある。地中深い位置における含水比の測定といった原位置で行える含水比測定技術は確立されていない。そこで、本装置を用いて地盤の含水比について、熱伝導率などの物性値から含水比を推定できる方法についても検討を行った。

2. 既往の研究

本研究では、地盤の熱伝導率の算定と含水比推定について検討を行う。現在、原位置計測において、この2つの物性値を同時計測する方法は無い。そのため、従来の熱伝導率計測方法と、熱特性から土の含水比や体積含水率の予測に関する文献や既往の研究について調査した。

(1) 原位置における熱伝導率探査試験について

従来の地層熱伝導率計測法としては、TRT が一般に行われるが熱交換井の掘削や設備設置費用など高コストであることや計測時間の長さなど地中熱利用の導入の障壁となる課題点がある。それらの課題に対し、TRT 以外の計測方法を検討した既往の研究として、神宮司ら³⁾が地盤調査で用いられる標準貫入試験装置を利用した熱伝導率探査法の開発を行っている。計測システムは、貫入試験装置および計測用の中空貫入ロッド、光ファイバー温度センサーおよびケーブルヒーターで構成され、地盤内で加熱・計測を行う。非定常熱伝導解析を用いることで地盤の熱伝導率を測定している。

(2) 地盤の熱特性と体積含水率について

地盤の熱特性と含水量に関する既往の研究では、粕淵²⁾が土壌の熱伝導率に及ぼす水分の影響について、わが国の畑土壌の代表的なものである火山灰土壌、沖積土壌および洪積土壌を、プローブ法を用いて室内試験にて、土壌の熱伝導率に対する水分率(体積含水率)の影響を調査した。その結果、熱伝導率と体積含水率の間には一次の相関関係があることを示した。熱伝導率と体積含水率の回帰直線は土壌によって勾配が異なり、固相率が高いほど勾配が大きくなる傾向が確認されている。

また、長谷川ら⁴⁾は、サーマルプローブを用いた一点法により、砂や火山灰質土(ローム)などを対象に、熱伝導率を測定し、求めた熱伝導率と土壌の含水比の関係について調査している。含水比と熱伝導率の関係は、1次の相関が得られることがわかった。土の熱伝導率と含水比・体積含水率の関係については、農業土木の分野で調査が広く行われているが、主に採取した試料に対して試験を行うもので、地中の深い位置での原位置計測は行われていない。

3. 簡易な原位置地盤熱伝導率探査法の検討

(1) SWS 試験孔を利用した試験方法

従来の試験では、ボーリングによる掘削などで比較的大きい孔径の掘削孔に試験装置や熱交換器などを挿入して熱伝導率の計測を行っていた。本試験では、掘削孔径と

しては非常に細い SWS 試験による掘削孔を利用した装置を作製し、計測を行った。

(2) 試験装置概要

SWS 試験による掘削孔に挿入でき、加熱と計測を同時に行える装置として伝熱プローブを作製した。作製した伝熱プローブを写真-1 に示す。伝熱プローブはステンレスパイプ、熱電対、ヒーターから構成されている。長さ250mm、幅20mmの四角柱のステンレス部分(SUS304)にヒーターと熱電対が内蔵されており、この部分で加熱を行うことができる。熱電対は温度を調整するためにヒーターより少し先端側の中心に取り付けられており、簡易温度調節器を用いることによって設定した温度を保つように電力が自動で調整される仕組みになっている。また、そのときの消費した電力量を電力計によって計測し、ヒーターから流れ出る熱量を測定することができる。測定に用いる簡易温度調節器と電力計を写真-2 に示す。いずれの装置も小型であり、現場計測に適したものとなっている。伝熱プローブはSWS 試験孔に挿入できる中空ロッド(ステンレス)の先端に取り付けることができる。SWS 試験孔を利用した原位置熱伝導率探査法の概念図を図-1 に示す。

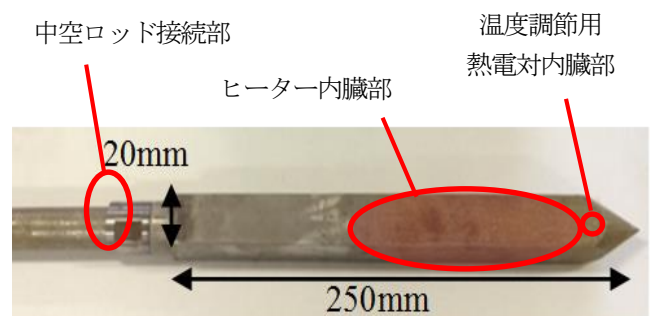


写真-1 伝熱プローブ

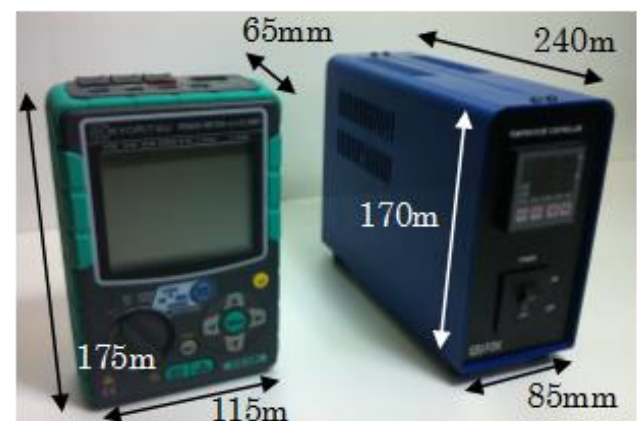


写真-2 電力計(左)、簡易温度調節器(右)

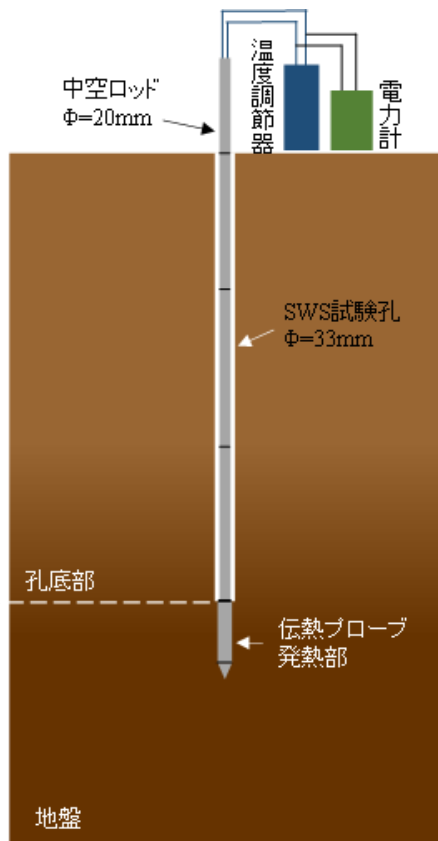


図-1 伝熱プローブによる SWS 試験孔を利用した
原位置熱伝導率探査試験 概念図

計測を行う際、ヒーターと熱電対が内蔵されている伝熱プローブ本体と、簡易温度調節器、電力計をつなぐ必要がある。接続する時の配線図を図-2 に示す。

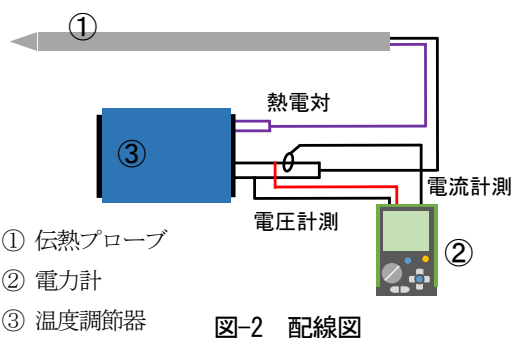


図-2 配線図

(3) 試験方法

本試験の試験手順は以下の通りである。まず、SWS 試験に使われるスクリーポイントを用いて、計測をする目標深度まで SWS 試験方法に準じて掘削を行う。掘削終了後、試験孔に伝熱プローブを挿入し、伝熱プローブの先端（加熱部）が地盤と密着するように、試験孔の底部から更に装置を押し込む。押し込む際、地表面に出ている中空ロッド部分にクランプなどで重りを取り付けて、伝熱プローブ先端部である 25cm 分を沈ませる。伝熱プローブの打ち込み完了後、装置の熱電対の示す温度を測り地盤の

初期温度を確認する。その際、ヒーターの電源は接続しない。このとき熱電対の温度が一定にならない場合は、装置と周囲の地盤の温度が安定するまで 30 分ほど放置時間を設ける。熱電対の示す温度が安定し、初期温度が確認できたらヒーターの電源を接続して、電力計により消費電力を計測する。

(4) 実地盤による試験の実施

伝熱プローブ装置を用いて、実地盤において試験を実施した。計測は東京都世田谷区玉堤 1 丁目地内にて行った。試験を実施した場所を図-3 に示す。また、試験現場及び計測を行った箇所について図-4 に示す。

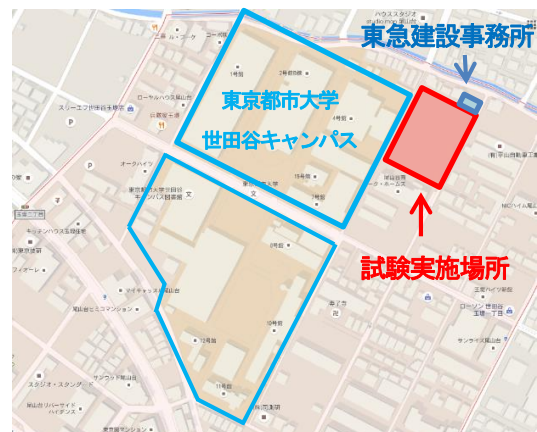


図-3 試験実施場所

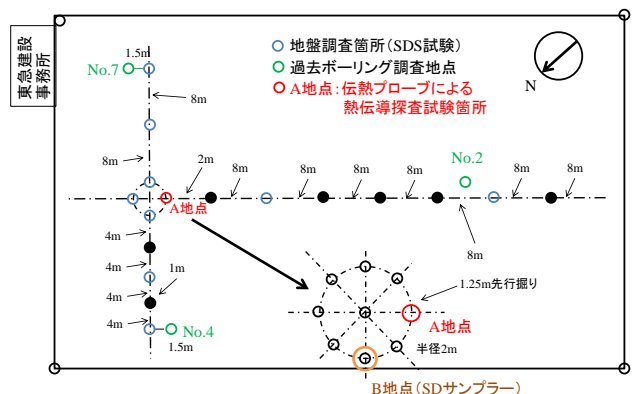


図-4 試験現場と計測箇所について

本試験では、試験現場敷地内で伝熱プローブを用いた計測を行った。計測する目標深度は 3m から 5m の間として、掘削は SWS 試験によりそれぞれの計測箇所まで目標深度まで行き、その掘削孔に伝熱プローブを挿入して試験を実施した。本試験場所は地盤表面から深さ約 50cm までアスファルトで舗装されているため、スクリーポイントを用いた掘削を行う前に、はつり機などの機械で表面を掘削した。アスファルト除去後、さらに SWS 試験装置にて掘削し、伝熱プローブを試験孔に挿入した。伝熱プローブ挿入後の様子を写真-3 に示す。



写真-3 伝熱プローブ挿入後の様子

試験地は、過去のボーリング調査から以下のような地層であることが判明している。

- ① 深度 1~2m
ローム主体の埋土、礫や腐植土などが混入した地盤
- ② 深度 3~5m
腐植物や有機物が多く混入した粘土質土
- ③ 深度 5~9m
火山灰と腐植物が混じった粘土質シルト

試験現場における計測箇所は A 地点で深度 1m, 3m, 5m の 3 箇所とした。それぞれの計測箇所での測定条件を表-1 に示す。熱源となるヒーターの温度は、周囲の地盤環境に影響を及ぼさない程度の温度として 40℃とした。計測は冬季に行ったため、外気温と地表面温度は低い温度を示している。地中温度は、大気中の温度に左右されにくいいため、すべてのケースで外気温や地表面より高く、ほぼ同じ 20℃前後の温度を示した。

表-1 各ケース 測定条件

日付	11/26	11/26	11/27
ケース No.	1	2	3
測定地点	A	A	A
掘削深度 m	1.5	3	5
地表面温度 °C	13.0	12.5	15.6
外気温 °C	12.5	11.6	14.6
初期地中温度 °C	20.0	20.0	18.0
熱源設定温度 °C	40.0	40.0	40.0
計測時間 h	1	1	1

伝熱プローブを試験孔に挿入し、熱電対の示す温度が安定した後、ヒーターの電源を接続し地盤内にて加熱・計測を開始した。熱量の計測は加熱と同時に電力計により行う。計測は 1Hz サンプルング周期で 1 時間行った。A

地点にて計測した各深度における積算熱量 (kWs=kJ) の経時変化結果をまとめて図-5 に示す。

各ケースとも、測定開始から 120 秒後までに積算熱量が急激に上昇する傾向が見られた。これは、ヒーターが設定温度に達するまでの急激な電力消費が原因と考えられる。その後、積算熱量はそれぞれのケースで差はあるが、緩やかに増加した。深度 5m での計測結果は他の深度に比べ、積算熱量の増加が大きく、計測終了時点での値も大きい。1m, 3m の深度の計測結果は急激な積算熱量増加の後は、ほぼ一定で小さい増加率となった。

ケース 2 (深度 3m) と 3 (深度 5m) は積算熱量の増加傾向が近く、計測深度の付近の過去のボーリング調査によると、どちらの地層も腐植物や有機物が多く含まれた粘土質土、およびシルトである。文献⁹⁾などの値を見ると、シルトと粘土は熱伝導率が近い値を示す傾向があるため、熱量増加に関しても近い傾向を示したと考えられる。

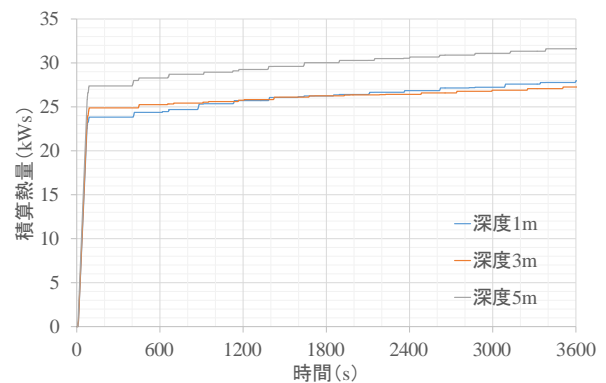


図-5 積算熱量経時変化 まとめ

4. 熱伝導率算出の試み

従来の TRT では地層熱伝導率を算出する数値解析手法として、非定常熱線法や線状熱源法がある。非定常熱線法は、無限媒質中に無限長の線状熱源が存在する場合、線状熱源近傍の熱伝導率は線状熱源近傍の温度変化から求めることができる。以下に示す近似式を使う。

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi\lambda} (\ln t + A) \quad (2)$$

$$A = \ln \frac{4k_s}{r^2\gamma} + \frac{\lambda_s}{2\lambda_w} + \dots \quad (3)$$

ここで、Q は線状熱源の単位長さあたりの熱量、r は熱線の半径、 γ はオイラー定数 (1.782) である。添え字 S, W はそれぞれ媒質と線状熱源を示す。式(1)を $\ln t$ で微分すると以下の式が導出される。

$$\lambda_s = \frac{Q}{4\pi} \frac{d\Delta T}{d \ln t} \quad (4)$$

このように線状熱源の単位時間・単位長さあたりに印加

する熱量 $Q[W/m]$ と温度上昇速度 $d\Delta T/d \ln t$ を測定することで熱伝導率を求めることができる。また、他の文献等においても、上記の式を基本とした解析手法が採られていることから、正確な熱伝導率を算出するのに適した理論式と考えられる。

本試験では上記の式を利用して、伝熱プローブによる熱伝導率算出を検討した。非定常熱線法を用いるに当たり、必要なパラメータを測定結果、条件から求める必要がある。熱伝導率を求めるために必要となるパラメータは、単位時間・単位長さあたりに印加した熱量 $Q[W/m]$ 、温度上昇速度 $d\Delta T/d \ln t$ である。しかし、本試験では、設定温度を保つため出力される熱量が自動的に調整される装置となっており、実時間における温度上昇データは得られていない。そのため、温度上昇速度のパラメータに必要な ΔT (°C) について検討する必要がある。

本装置における熱量の出力自動調整は、以下のような仕組みになっている。設定温度を保つ際に温調用の熱電対が示す温度が 1°C 下がった時に、その 1°C を上げるために電力が消費される。そこで、計測時間内に温度が下がった回数を熱量変化のデータから読み取り、その合計を計測時間あたりの上昇した温度 (パラメータ ΔT) とした。

熱量変化のデータから昇温パラメータを決定する際、積算熱量が一定ではなく上昇した点を読み取ることにした。また、上昇した温度を読み取る計測時間内における範囲について、計測開始直後の急激な熱量増加部分は、熱源となるステンレス部分の温度も上昇させるのに必要な熱量が計測されている可能性があるため、ステンレス部分が温まり熱源とみなされるまでの時間を見積もる必要がある。ここでは、計測開始から 600 秒が経過した時点から計測終了までの温度上昇回数を読み取った。各ケースで算定したパラメータと算出した熱伝導率の結果を表-2 に示す。

表-2 算定したパラメータ

ケース	1	2	3
計測深度 (m)	1.5	3	5
熱量 $Q(W/m)$	62.1	62.2	71
上昇温度 (°C)	13	12	12
温度上昇速度 $d\Delta T/d \ln t$	7.255	6.697	6.697
熱伝導率 $\lambda (W/mK)$	0.68	0.74	0.84

算出された熱伝導率は、1m 深度であるケース 1 及び、3m 深度であるケース 2 は共に約 0.7[W/(mK)] となった。深度が 5m の計測地点での熱伝導率は 0.84[W/(mK)] となった。計測を行った深度 3m (ケース 2) と 5m (ケース 3) の地盤構成は、腐植物や有機物を多く含んだ粘土質土とシルトであり熱伝導率も近い値になると考えられる。実際に、算出された熱伝導率は 0.1[W/(mK)] 程度の差が生じ

たがほぼ同じ熱伝導率であった。生じた差については、伝熱プローブの周囲の土の有機物含有率や、含水比の差が影響していると考えられる。過去のボーリング調査から測定されている含水比については、数値が非常に高く、ボーリング地点によってばらつきがあった。今後、検証するにあたり、計測地点周辺の土をサンプリングして含水比の測定、有機物含有率などの調査を行う必要がある。

5. 簡易恒温槽を用いた熱伝導特性把握試験

伝熱プローブによる熱伝導率探査試験によって算出した、熱伝導率について検証を行う必要がある。そこで、現場の土を本研究室で開発したスクリードライブサンプラー (以下 SD サンプラーと略す) を用いてサンプリングし、採取した試料を用いて室内試験を行った。室内試験として、既往の研究⁹⁾にて確立されている簡易恒温槽を用いた熱伝導特性把握試験を行い、熱物性値を推定した。

(1) SD サンプラーを用いた実地盤における試料採取

本研究室では、試験を行った現場で試料を採取するため、SWS 試験に使用されるロッドの先端に装着可能なサンプラーである SD サンプラーを開発した。SD サンプラーを写真-4 に、概要図を図-6 に示す。サンプラーの全長は 440mm あり、土を取り込むステンレスの円筒部分 (サンプリングチューブ) は長さ 310mm、内径 29mm、先端部の刃先は内径が 28mm となっている。サンプリングを行う目標深度まで SWS 試験孔を掘削し、その後サンプラーをロッドにつなげて地盤内に挿入する。サンプラーが孔底部に達したら、ロッドにクランプとハンドルを取り付けて重り載せてロッドが上下に動かないように固定し、その後正回転させる。これにより、試料を中に取り込むサンプリングチューブを孔底部よりさらに下の地中に押し込み、土試料が採取できる仕組みになっている。80 回転で 200mm 貫入することができる。

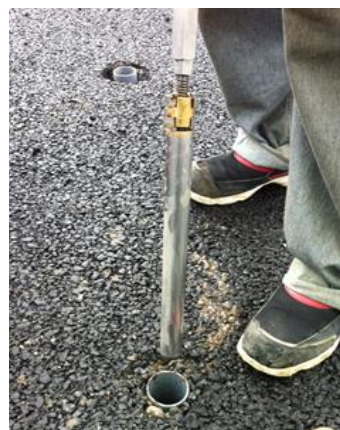


写真-4 SD サンプラー

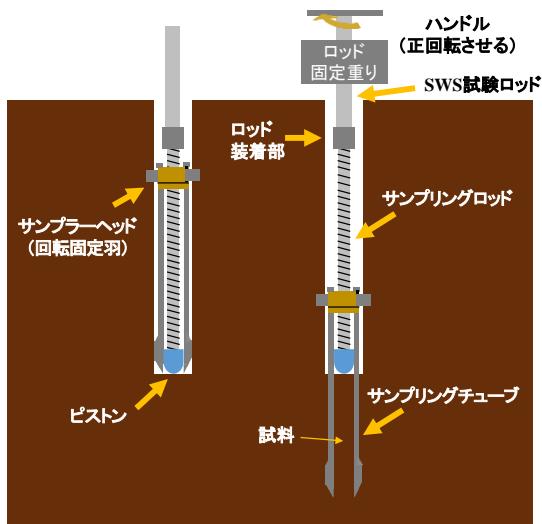


図-6 SD サンプラー概要図

(2) 簡易恒温槽による熱伝導特性試験

採取した試料を用いて、簡易恒温槽による熱伝導特性試験を行った。試料は、図-4 に示す B 地点の地盤における深度が 2m, 3m, 5m の地点から SD サンプラーにより採取した。それぞれ採取した試料を用いて、熱伝導特性試験を実施した。ここでは、代表例として深度 3m から採取した試料の試験について述べる。

a. 試験装置の概要

試験装置は、供試体（採取試料）、真空断熱容器から構成されている。供試体はサンプリングチューブの中の試料を乱さず、そのまま使用した。寸法は長さ 150mm、直径 28mm である。また、真空断熱容器の内側の寸法は高さ 300mm、内径 150mm となっている。さらに、試験体の周辺の熱環境を調整するため、試験体の外部に高さ 500mm、内径 315mm の簡易恒温槽を設置した。ヒーターにより、約 45°C に設定した温水を温水槽内に張り、さらに上部を断熱シートで覆った。図-7 に簡易恒温槽の概要図を示す。

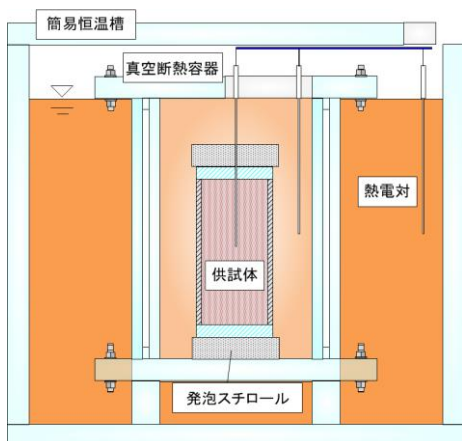


図-7 簡易恒温槽 概要図

供試体概要として、測温抵抗体を感知部である先端が供試体の中心になるように深度方向に 75mm 挿入した。また、発泡スチロールを用いて、供試体の上下に密着させることで断熱を図った。

b. 試験条件と試験方法

温度測定には測温抵抗体を使用しており、これを供試体作製時に上部から中心に挿入するとともに、その他に熱源である温水、外気温、恒温槽内水温の計 4 箇所に設置して温度変化の測定を行った。

試験手順は、まず供試体の温度が室温程度で一定となるまで放置する。約 45°C の温水を真空断熱容器内に 3000g 移し、温度が室温で一定となった供試体を測定開始と同時に真空断熱容器内の熱源である温水に浸す。その後、真空断熱容器の上部蓋を設置し、真空断熱容器を簡易恒温槽内に設置する。最後に断熱シート（ウレタンフォーム等）で恒温槽上部を覆い、熱源温水と供試体等の温度が一定となるまで 1 時間放置する。

c. 試験結果

試験結果の代表例として、3m 深度の地盤から採取した試料の熱伝導特性試験の結果を図-8 に示す。測定開始と同時に真空断熱容器内の約 45°C の温水に供試体を浸すことで熱源の水温が低下し、同時に供試体の中心に取り付けた測温抵抗体の示す温度が上昇するのを確認できた。また、熱平衡後は、熱源温水の温度と供試体の温度はほぼ水平に推移していく様子から、熱漏れ等がほとんど無く、温水と供試体との間で十分に熱交換ができていと考えられる。

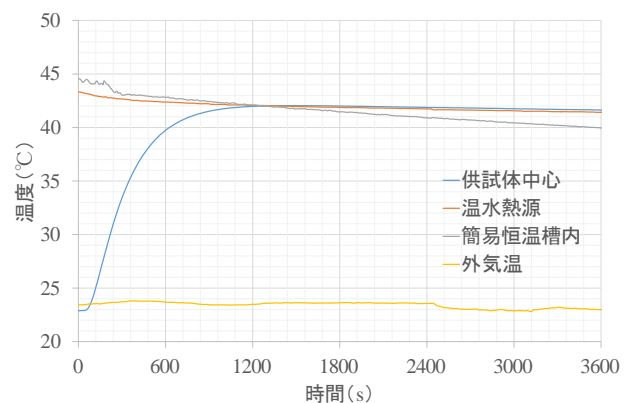


図-8 深度 3m 地盤の採取試料 温度経時変化

d. 熱物性値の算出

熱平衡までの温度分布から熱伝導率を算出する。ここでは、深度 3m 地盤の採取試料の温度経時変化の結果から熱伝導率の算出方法について説明する。

ある高温の物体 A と低温の物体 B を接触させたとき、熱が外部に逃げなければ、A が失う熱量と B が得た熱量は等しくなる。A, B 全体としての熱量の増減は無い。こ

れを熱量保存の法則という。

実験結果より、初期温度 T_1 、熱平衡温度 T_2 を読み取り、これらの温度差 $\Delta T (=T_2-T_1)$ を算出し、以下の式に代入する。

$$m_A \cdot c_A \cdot \Delta T_A = m_B \cdot c_B \cdot \Delta T_B \quad (5)$$

(水の失った熱量) = (試料が得た熱量)

深度 3m 地盤の試料では、供試体の重量が 134.554g である。初期温度は、温水が $T_{A1}=43.33^\circ\text{C}$ 、試料が $T_{B1}=22.88^\circ\text{C}$ となる。熱平衡温度は、温水が $T_{A2}=42.08^\circ\text{C}$ 、試料が $T_{B2}=41.98^\circ\text{C}$ となった。これらの値を(4)式に代入することで試料の比熱 c_B を算出することができる。計算の結果、試料の比熱は $6.04[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ となった。

次に熱伝導率 λ の算出について説明する。以下の式を用いることで算出できる。

$$\lambda = (W \cdot r) / (A_f \cdot \Delta T) \quad (6)$$

ここで、 W は仕事率であり、熱容量を熱平衡に達するまでの時間で除した値である。また、 r は試料の半径で、 $r=1.4\text{cm}$ である。 A_f は試料の周面積であり $A_f=2\pi rh$ で求めることができる。以上のような計算を深度 3m 地盤試料の結果から計算すると、仕事率は、

$$W = \frac{15.52[\text{kJ}] \times 1000}{1200} = 12.93[\text{J} / \text{s}] \quad (7)$$

となり、この値を(5)式に代入すると、

$$\lambda = \frac{12.93 \times 0.014}{2\pi \times 0.014 \times 0.15 \times (41.98 - 22.88)} = 0.718[\text{W} / (\text{mK})] \quad (8)$$

となり、試料の熱伝導率を算出することができる。

(3) 伝熱プローブ試験結果との比較

簡易恒温槽による熱伝導特性試験により、採取した地盤の熱伝導率を求めることができた。深度 3m の地盤から採取した試料の熱伝導率は $0.718[\text{W}/(\text{mK})]$ であった。伝熱プローブによる原位置熱伝導率探査試験の結果から、深度が同じケース 2 の結果と比較した。伝熱プローブ試験の結果では熱伝導率は $0.74[\text{W}/(\text{mK})]$ となっており、ほぼ一致した。また、採取した深度 3m の地盤は有機物を多く含む粘土質地盤であり、一般的な地盤の熱伝導率⁹⁾から実測値は $0.7\sim 1.5[\text{W}/(\text{mK})]$ の範囲になると推測される。伝熱プローブによる試験、および簡易恒温槽熱伝導特性試験から得られた熱伝導率がこの範囲内であることから、妥当な熱伝導率を算出できていることが期待される。

異なる深度から採取した試料に関しても、簡易恒温槽による熱伝導特性試験を実施した。簡易恒温槽の熱伝導特性試験の結果から得られた熱物性値について、深度 2m、3m、5m の採取試料の結果をまとめて表-3 に示す。

深度 5m における採取試料の熱伝導率は $0.841[\text{W}/(\text{mK})]$ となった。ここでも、伝熱プローブによる実地盤試験の結

果と比較すると、同じ深度 5m におけるケース 3 の熱伝導率算定結果は $0.84[\text{W}/(\text{mK})]$ であり、ほぼ一致することがわかった。深度 3m の地盤と同様に、深度 5m 地盤は有機物を多く含む地盤である。深度 5m 地盤試料の熱伝導率算出結果も、一般値である $0.7\sim 1.5[\text{W}/(\text{mK})]$ の範囲内となった。また、深度 2m の採取した試料の熱伝導率は $0.76[\text{W}/(\text{mK})]$ となった。伝熱プローブによる実地盤計測では、近い深度であるケース 1 (計測深度 1.5m) の算出した熱伝導率は $0.68[\text{W}/(\text{mK})]$ であり、この値と比較すると、 $0.1[\text{W}/(\text{mK})]$ 程度の差が生じた。試料を採取した深度 2m 地点は 2 種類の地盤の境目であり、含水比についても、過去のボーリング調査データを見ると、深度 1.5m では 70%前後、深度 2m では 90%と差がある。このように、試料の採取地点 (深度 2m) と伝熱プローブ装置による計測地点 (深度 1.5m) が非常に近い位置でも、熱伝導率に差が生じることがあると考えられる。

表-3 各深度における採取試料 熱物性値

	比熱 [kJ/(kg · K)]	温度差 ΔT [°C]	熱量 Q[kJ]	熱伝導率 λ [W/(m · K)]
深度2m試料	10.896	17.1	25.423	0.759
深度3m試料	6.04	19.1	15.522	0.718
深度5m試料	12.710	18.7	12.059	0.841

原位置計測である伝熱プローブ試験と、室内試験である簡易恒温槽熱伝導特性試験の結果より、それぞれで算出した熱伝導率の値は、ほぼ一致した。

ただし、深度 3m と 5m の地盤は、どちらの地盤も腐植物が多く混じっており、含水比が約 130% と非常に高い数値を示している。熱伝導率や、比熱に差が生じている理由としては、それらの深度分布の違いが影響していると考えられることから、試験の妥当性の判断を兼ねて熱伝導解析を行う必要がある。

6. 3次元非定常熱伝導解析による検証

伝熱プローブによる原位置熱伝導率探査試験と室内試験から求めた地盤のそれぞれの深度の熱伝導率は良く一致した。ただし、試験を行った地盤、特に深度 3m と 5m における地盤は腐植物や有機物が多く、含水比も 130% と高い数値であり、それらの深度分布の違いが熱物性に影響を及ぼしている可能性が考えられる。また、深度 1.5m における試験結果についても、2種類の地層の境目に近いことから、周辺の地盤環境 (初期温度、含水比等) の影響も考慮する必要があり、熱伝導解析による検証を行った。

本解析では有限要素法を用いた 3 次元非定常熱伝導解析を行える解析ソフトとして、株式会社地層科学研究所

製の G-HEAT/3D を使用した。

(1) 解析モデルの作成

熱伝導解析を行うにあたり、解析モデルを作成した。伝熱プローブによる原位置熱伝導率探査試験で行ったケース 1, 2, 3 の全てに対して解析モデルをそれぞれ作成し、解析を行った。基本として、深さ 8m×半径 2m の円筒の地盤モデルの中心に、伝熱プローブ装置を各ケースの掘削深度まで挿入したモデルを作成した。伝熱プローブの材質はステンレスとし、地盤構成は過去のボーリング調査のデータと今回サンプリングした試料を基に、地質の種類を深度ごとで決定した。各材料の物性値を表-4 に示す。熱伝導率は伝熱プローブ試験にて得られた結果を基に設定した。比熱と密度に関しては、サンプリングした試料の室内試験データを参考値として設定することとした。作成したモデルの代表例として、ここではケース 2 の深度 3m での計測についてモデル化したものを図-9 に示す。

表-4 材料物性値

材料	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (kJ/kgK)	密度 (kg/m ³)
ステンレス (伝熱プローブ装置)	15	0.5	7900
アスファルト (地表面～深度0.5m)	1.10	0.89	2350
ローム・埋土 (深度0.5～2m)	0.68	10.896	1710
粘土質土 (深度2～4m)	0.74	6.04	1450
粘土質シルト (深度4～8m)	0.84	12.710	1350

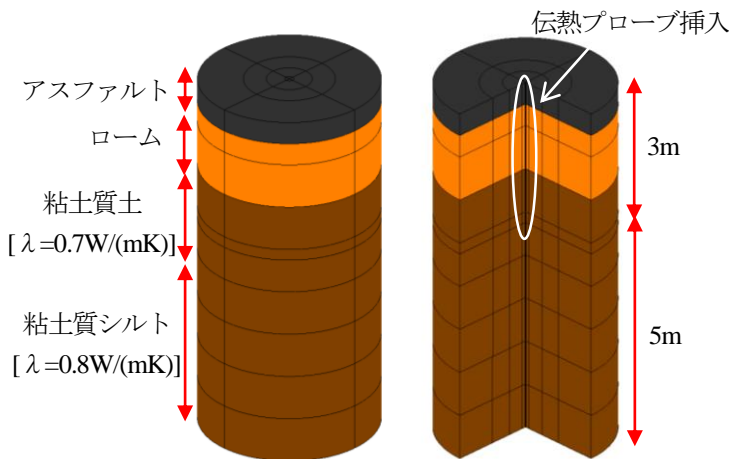


図-9 ケース 2 の解析モデル

本解析では、非定常解析を行う前に、定常解析により地盤の初期状態を決定する必要がある。そのため、伝熱プローブを地盤に挿入したモデルに、装置に発熱条件を与えないで定常解析を行った。各ケースにおいて境界条件として、地盤に装置を挿入した各深度のモデル外側面と、底面、地表面部を固定温度境界に設定した。設定する温度は

表-1 の各ケースにおける測定条件を参考とした。定常解析により初期値を決定した後、伝熱プローブを発熱する温度境界に設定し、非定常解析により熱量や温度の時間変化を追った。非定常解析時の温度境界条件は、地表面を各ケースの地表面温度で固定境界とし、伝熱プローブのヒーター部分を初期温度から、約 20 秒で設定温度である 40°C に達する固定変温境界に設定した。ケース 1, 2, 3, における解析結果を図-10~12 に示す。

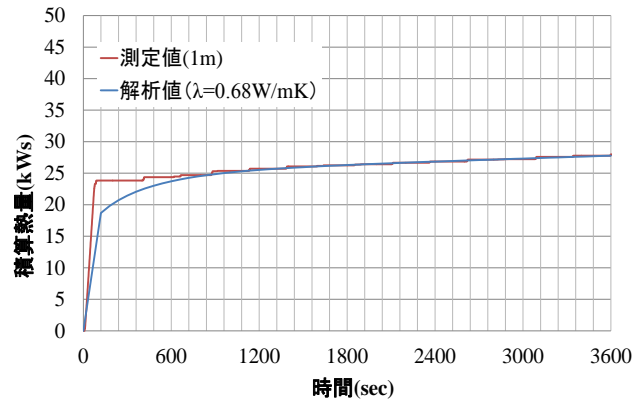


図-10 ケース 1 解析結果

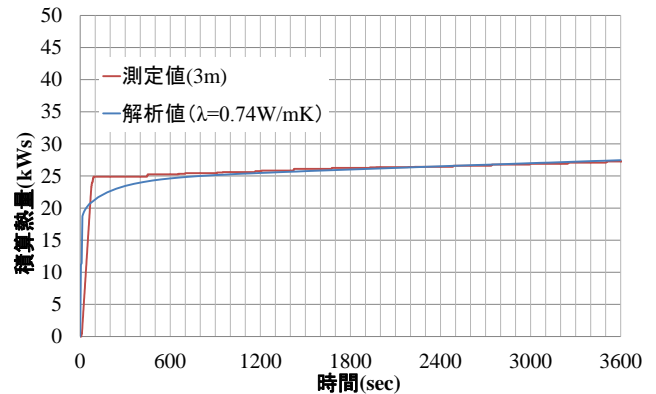


図-11 ケース 2 解析結果

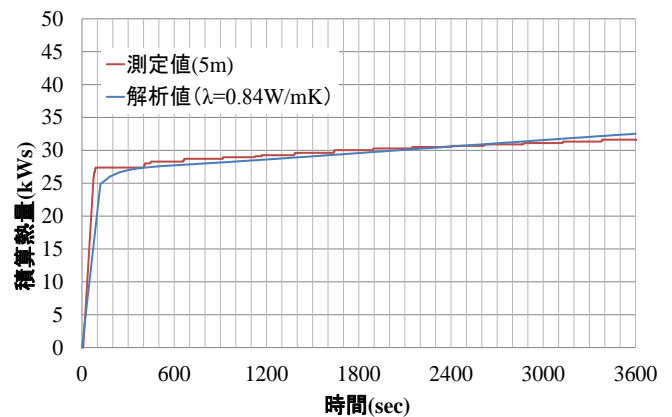


図-12 ケース 3 解析結果

解析値と測定値はほぼ一致した。計測開始直後の積算熱量の急激な増加は、熱源である伝熱プローブ装置の発熱条件を設定温度に達するまでに時間が必要となる変温固定温度境界条件としたことで表現できた。有限要素法による3次元非定常熱伝導解析の結果から、伝熱プローブによる試験の妥当性と、算出した熱伝導率は正確な値に近く、精度が高いことが示唆された。

7. 熱伝導率と含水比推定に関する考察

伝熱プローブによる原位置熱伝導率探査試験と、簡易恒温槽による熱伝導特性試験などの結果から、熱伝導率のパラメータは含水比の影響を受けやすいことがわかった。既往の研究において、熱伝導率と含水比の影響についてその関係を実験式により示したものがある。長谷川ら⁴⁾は、砂とロームの熱伝導率と含水比について以下のような実験式を導き出した。

$$\text{砂} : \lambda = 3.08w + 0.71 \quad (9)$$

$$\text{ローム} : \lambda = 0.70w + 0.07 \quad (10)$$

また、片根⁷⁾は地中熱利用のための地盤材料の熱伝導特性試験を行い、ロームと細砂における熱伝導率と含水比における関係について以下に示す実験式を導き出した。

$$\text{細砂} : \lambda = 3.82w + 0.242 \quad (11)$$

$$\text{ローム} : \lambda = 0.75w + 0.093 \quad (12)$$

それぞれの式を比較すると、ロームはほぼ同様の式となっており、砂については長谷川らが得た実験式よりも片根が得た実験式の方が、やや勾配が大きいものの非常に近い結果となった。

ここで、長谷川らと片根が得た実験式の関係と、今回サンプリングした試料から求めた含水比、熱伝導率のデータを、それぞれグラフ上にプロットした。グラフ上にまとめた熱伝導率と含水比の関係を図-13に示す。

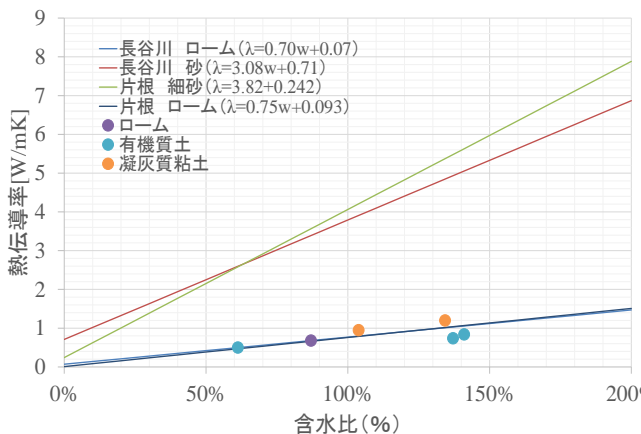


図-13 熱伝導率と含水比の関係
〈長谷川ら、片根の実験式と本試験のデータ〉

サンプリングを行い、熱伝導特性試験を行った試料は、ローム、有機質土、凝灰質粘土であり、測定した熱伝導率と含水比の結果をグラフ上にプロットしたところ、長谷川らや片根が示したロームにおける実験式と一致する傾向が見られた。また、実験式とプロットの傾向を見ると、砂などの粗粒土は(8)式に、粘土・ローム(火山灰質土)・有機質土などの細粒土は(9)式に近く、2種類に大きく分けられると考えられる。

伝熱プローブによる熱伝導率探査試験の結果から含水比の推定を試みる場合、先に地盤の種類の調査が必要となる。本試験では試験孔を掘削するにあたり、SWS試験やスクリードライバースOUNDING試験(以下SDS試験と略す)などの地盤調査試験と併用するため、大まかな土質判別をすることが可能である。具体的には、SWS試験では掘削時の音により砂質土、粘性土、礫質土に大別することができ、SDS試験では周面摩擦などの計測によりSWS試験よりも土質判別の精度が高い。このように土質が砂質土か、粘性土かが判明すれば、実験式に適用が可能になると考えられる。ただし、粘土が多く含まれる砂質土などではこの2つの実験式の間分布する可能性があるため、それらの試料や地盤においても試験を行い、熱伝導率と含水比の関係を明らかにする必要がある。

8. 結論

本論では、地中の熱的利用時に必要な情報である地盤熱伝導率を計測と、熱伝導率と密接な関わりにある地盤含水比の推定について検討した。伝熱プローブによる原位置地盤熱伝導率探査により以下の知見を得られた。

- (1) 伝熱プローブを用いて、東京都世田谷区内において実地盤試験を行い、積算熱量の計測から非定常熱線法を参考に以下の熱伝導率を算出した。
 - ① 深度1.5mの地盤で0.68[W/(mK)]
 - ② 深度3mの地盤で0.74[W/(mK)]
 - ③ 深度5mの地盤で0.84[W/(mK)]
- (2) 伝熱プローブの結果から得た値の妥当性について、試験を行った地盤で試料を採取し、既往の研究にて確立されている簡易恒温槽による熱伝導特性試験を行い確認した。結果として、以下の熱伝導率を算出できた。
 - ① 深度2m地盤の採取試料は0.76[W/(mK)]
 - ② 深度3m地盤の採取試料は0.72[W/(mK)]
 - ③ 深度5m地盤の採取試料は0.84[W/(mK)]
 以上のように、伝熱プローブによって算出した結果と概ね一致した。

(3) 解析ソフトを用いて 3次元非定常熱伝導解析を行い、伝熱プローブによる試験の妥当性を検証した結果、試験の計測結果と解析結果は良く一致した。過去のボーリング調査から、伝熱プローブによる試験を行った地盤の土質を調べると有機物の多い粘土であり、文献値を参考にすると熱伝導率は 0.7~1.5[W/mK]の範囲内になると推測される。実際に算定した熱伝導率も一致していることから、本試験の妥当性を確認できた。

(4) 地盤の熱伝導率は、含水率や含水比と密接な関わりがあることから、熱伝導率から含水比を推定する方法についても検討を行った。本論で得られた熱伝導率と含水比のデータをグラフ上に示すと、ロームの実験式の近くに分布した。また、砂などの粗粒土と、ロームや粘土などの細粒土で、2つの実験式に大きく分けられることがわかった。伝熱プローブ装置を用いて含水比を推定する場合、SWS 試験や SDS 試験との併用により、土質をある程度判別し、実験式に適用することで含水比の推定が可能になると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、末政直晃教授、伊藤和也准教授、田中技士には多岐に渡りご指導、ご鞭撻を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 藤井光ら：地下熱利用技術 7.サーマルレスポンス試

験の原理と解析法, 調査事例, 地下水学会誌 第 53 巻 第 4 号 p.391-400 (2011)

2) 粕淵辰昭：土壌の熱伝導率におよぼす水分の影響 火山灰土壌, 沖積土壌, 洪積土壌について, 日本土壌肥科学雑誌 第 43 巻 第 12 号 p.437-441 (1972)

3) 神宮司元治ら：貫入試験装置を用いた原位置地盤熱伝導率探査法, 日本地熱学会誌 第 24 巻 第 4 号 349-356 項 (2002)

4) 長谷川寿保ら：サーマルプローブを用いた一点法による土壌含水率測定値の誤差, Grassland Science 46 (3・4) p309-312 (2000)

5) 秋葉将太：地盤材料の熱伝導特性試験の検討, 東京都市大学修士論文 (2013)

6) 環境省 平成 22 年度環境事業実証事業 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) 実証結果報告書, <https://www.env.go.jp/policy/etv/pdf/list/h22/052-1007b.pdf> , 2015/8/26 参照

7) 片根弘人：地中熱利用のための地盤材料における熱伝導特性試験の検討, 東京都市大学修士論文 (2011)

8) 坪川将丈ら：空港アスファルト舗装の夜間施工時の降温時間に関する解析的検討, 国土技術政策総合研究所研究試料 第 653 号 (2011)

9) 植村杏太ら：「世田谷区における地下地盤情報に基づく再生可能エネルギーとしての地中熱のポテンシャル評価」, 都市社会研究 2015, http://www.city.setagaya.lg.jp/kurashi/107/157/742/d00137966_d/fil/013.pdf, 2015/1/19 参照

THERMAL CONDUCTIVITY EXPLORATION METHOD OF FORMATION USING THERMAL CONDUCTION AND STUDY OF ESTIMATED WATER CONTENT RATIO

Takuya ISHIGAKI

In recent years, since global warming and the heat island phenomenon became big problems, there has been a growing interest in geothermal heat, which is one of renewable energies. In order to make good use of geothermal heat, it is essential to understand the thermal properties of the ground and perform appropriate design and evaluation. Moreover, in-situ experimentation is suitable for the evaluation because geothermal heat is closely related to the volumetric water content of the environment. Therefore, in this study, we examined a simple ground thermal conductivity exploration method using a Swedish Weight Sounding test. The Swedish Weight Sounding test, hereinafter referred to as the SWS, is a main ground survey method in residential areas. The device manufactured in this study can perform heat transfer and measurement simultaneously in the hole bored by the SWS test. In this study, the calculations of the thermal conductivity of soil were carried out using this apparatus. In addition, since the thermal conductivity of the soil, sand and unconsolidated sediment depends on the volumetric water content and water content, the relationship among them was investigated. As a result, the empirical formula using the thermal conductivity and the water content ratio was obtained and the estimation method of water content was confirmed using the formula.