

鉤さいたい積場の水輸送調査を目的とした地表部近傍の熱伝導特性評価

岡山大学大学院	学生会員	岩崎 佳介
岡山大学大学院	正会員	○木本 和志
岡山大学大学院	正会員	大久保 賢治
岡山大学環境理工学部	非会員	栗井 聡平
(独) 日本原子力研究開発機構	非会員	坂尾 亮太
(独) 日本原子力研究開発機構	非会員	瀧 富弘

1. はじめに

(独) 日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センターでは、ウラン鉤山開発の事業終了に伴う鉤山施設の跡措置に取り組んでいる。本研究では跡措置後の地盤中の水分移動に関するモニタリング手法の開発を目的として人形峠環境技術センター内の鉤さいたい積場(鉤山保安法に定める鉤さい及び沈殿物を集積する「集積場」として認可を受けた施設)における地盤中の地温計測及びデータ解析を実施した。

水は熱容量が大きく、温度勾配がある地盤中を水分が移動する場合、同時に熱輸送を伴う。また、地表部近傍では、水分の蒸発や凝結も地盤 - 大気の間を含め熱輸送に貢献するため、水分の移動は多くの場合熱輸送と連動している。したがって、熱輸送状況を調べることで水輸送に関する情報も得ることが期待できる。また地盤中の物質移行は水分浸透挙動に影響されるため、地盤中の水輸送状況を把握することは物質移行解析の点からも重要である。温度の計測は水分量や浸透速度の計測より簡単であるため、地温計測から水分の挙動を推定することができれば、地盤中の水分移動に関する簡易なモニタリング手法の開発につながる。データ解析では以上の点に着目し、現地計測によって得られた地盤中の地温計測データから、一次元熱伝導方程式に基づいて気温変動に伴う地温変化の程度を特定した結果、水分の移動に起因する地温変化が積雪期に顕著に表れることが分かった。以下では現地計測の概要、データ解析方法及び結果と考察について述べる。

2. 現地計測の概要

地温計測は、人形峠環境技術センター内の鉤さいたい積場の4地点において、2012年8月8日から実施し、温度計を交換しながら、現在も計測を継続している。鉤さいたい積場は、上流側から廃砂たい積場、廃泥たい積場、かん止堤から成り、図1に模式的に示すように、かん止堤付近は常時湛水している。地温計測には自記温度計⁽¹⁾を用い、廃泥たい積場の地表部から深さ2mの範囲に50cm間隔で設置した。なお、温度計を目標とする深度に定置するために、観測井として内径5cmの塩化ビニール管を鉛直に設置し、予め支持棒に等間隔で取り付けられた温度計を支持棒とともに塩ビ管内部に挿入した。また、塩ビ管には、直径8mm程度の穴を多数開けており(開口率6%程度)、周辺地盤からの水が自由に出入りできる状態にしているため、周辺地盤中の地温を水を介して計測していることになる。なお、観測井の設置位置は図1に示したように、かん止堤から50m, 80m, 110mおよび140mとしたが、140m地点では、地表部から0.5m, 1mの2層のみ温度計を設置した。サンプリング間隔は1時間とし、半年程度で温度計の交換、データ回収を行った。具体的には、以下で使用するデータは、2012年12月19日、2013年9月27日の温度計交換のタイミングで回収したものである。

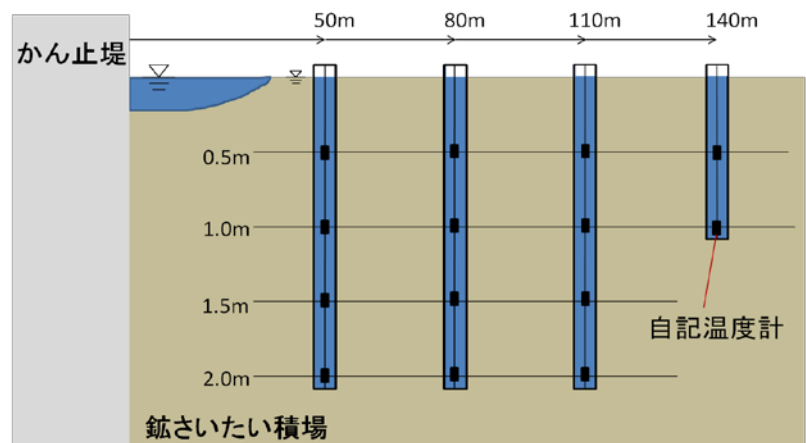


図1 鉤さいたい積場内の観測井と温度計の設置位置

3. 計測結果

地温計測結果の一例として、かん止堤から 50m の地点で計測された地温データを図 2 に示す。この地点では、地表部から 25cm の深さに電気伝導度計を設置しているため、電気伝導度計に内蔵された温度センサーによって得られた地温データも併せ、計 5 つのグラフを深度順に示してある。ここに示される通り、1m 以深の測定点では、地温は正弦波的に変動しているが、地表部から 0.5m までの範囲では季節毎に直線的な変化を示すことがわかる。特に、9 月から 12 月半ばまでは直線的に温度が下降した後、温度低下は底を打ち、3 月頃までは激しい温度変動があるものの平均的には温度があまり変わらない期間が続く。この期間は、積雪のある期間とほぼ一致しており、温度変動にも積雪の影響があると思われる。3 月の雪解け後は、地温は単調に上昇し 8 月後半にピークを迎える。なお、12 月後半に全ての深度で下向きのスパイク状の温度変化がみられるが、これは 2012 年 12 月 19 日に行った温度計交換作業に伴う人為的な影響と考えられる。

4. データ解析方法

1 次元熱伝導方程式の解析解を用いて、地盤中の熱拡散率 K_T と以下に述べる制動深さ d の推定を行う方法を述べる。地盤中の熱伝導が鉛直方向にのみ起き、熱の移流（対流）は無視できると仮定すると、地温変化は、熱伝導方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_T \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

に従う。ここに、 T は地温、 z は地表部からの深さ、 K_T は熱拡散率を表し、 K_T は熱伝導率 λ_e と熱容量 C_{soil} を用いて、 $K_T = \lambda_e / C_{soil}$ と表わされる。地表部における温度が、

$$T(0, t) = T_A + A_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

と与えられたとする。ただし、 T_A は年平均温度、 A_0 は地表部温度の振幅、 ϕ は位相定数、 ω は角周波数である。一方、地盤中の十分深いところでは、地温は平均温度 T_A に近づく、すなわち、 $\lim_{z \rightarrow \infty} T(z, t) = T_A$ より式(2)を満たす熱伝導方程式(1)の解は、

$$T(z, t) = T_A + A_0 \exp\left(-\frac{z}{d}\right) \sin\left(\omega t + \phi - \frac{z}{d}\right), \quad (0 \leq z < \infty) \quad (3)$$

と与えられる⁽²⁾。なお、 $d = \sqrt{2K_T / \omega} = \sqrt{K_T \tau / \pi}$ [m] は制動深さと呼ばれる。また、 τ は周期である。

深さ z における温度振幅を $A(z)$ とすれば、

$$\frac{d \ln A}{dz} = -\frac{1}{d} \quad (4)$$

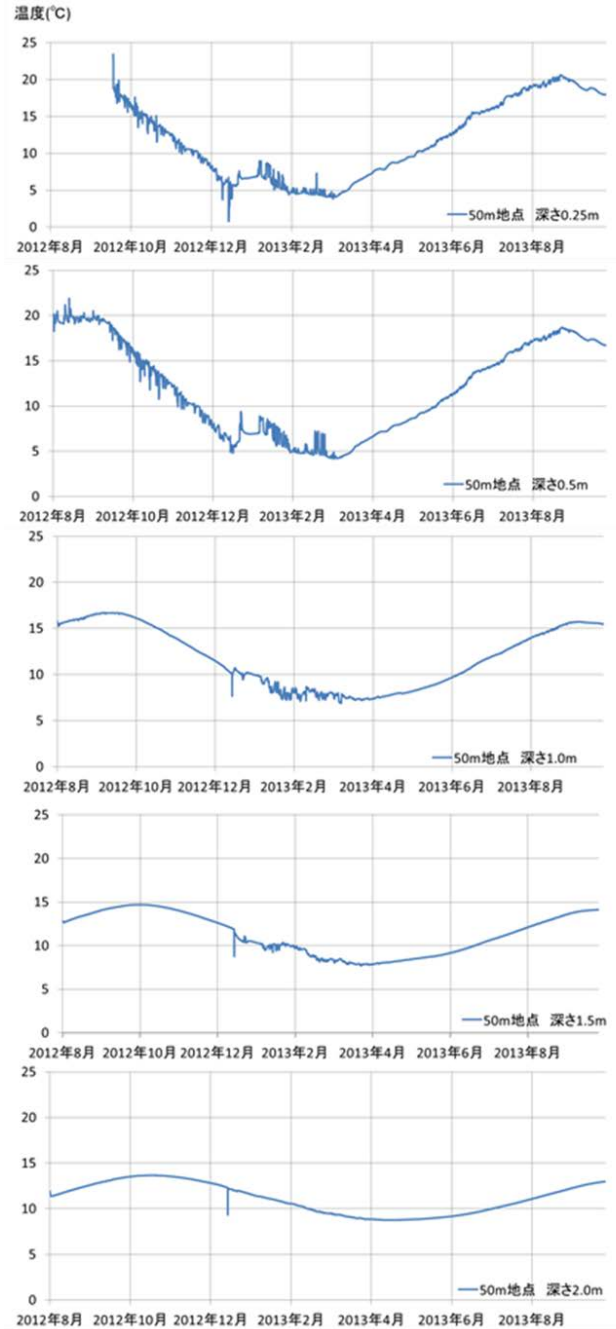


図 2 50m 地点の観測井で得られた地温の時系列

と書けることから、制動深さ d は、温度振幅と z の片対数表示から決定できる。また、 $K_T = \omega d^2 / 2$ の関係があり、熱拡散率は周波数によらないので、 K_T が決まれば任意の周波数に対する制動深さが求められる。

5. 熱拡散率および制動深さの推定値

各計測点における地温の時系列データから読み取った温度振幅から、最小二乗法を用いて推定した制動深さと熱拡散率を表 1 に示す。この表には、比較のために水と、飽和した豊浦砂の熱拡散率、制動深さも示してある。推定された熱拡散率は、水と飽和砂の中間の値となっており、現地の地盤が、ほぼ砂と腐植土からなり、常時飽和に近い状態にあることを考慮すれば妥当な結果であると言える。ただし、熱拡散率は場所ごとにことなり、熱媒体としてみたときの水平方向に不均質性があることもわかる。

表 1 地点別の制動深さおよび熱拡散率

計測地点		50m	80m	110m	140m	水 ⁽³⁾	飽和砂 ⁽⁴⁾
制動深さ d (m)	温度波の 周期 1年	1.27	1.75	1.42	2.49	1.19	2.94
	周期 1日	0.07	0.09	0.07	0.13	0.06	0.15
熱拡散率 K_T ($10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$)		1.60	3.04	2.02	6.19	1.40	8.59

6. 地温の短周期変動に関する検討

図 3 に示した温度波には、年周期変動だけでなく、日から月単位の短周期変動成分も含んでおり、その傾向は地表部付近で顕著である。短周期変動では、熱伝導によって周囲にその影響が伝わる際、振幅の減少率が長周期変動に比べて大きく、その程度は制動深さ $d(\omega)$ で決まる。例えば、制動深さの距離だけ温度変動源から離れると、連動しておきる温度変化の振幅は $1/e$ 倍に、 $3d$ だけ離れると $e^{-3} \approx 1/20$ 倍程度と急速に減少する。このことを踏まえれば、地表部における温度の変動について、変動周期毎にどの程度地下深くまで影響が現れるかについて、簡単に予測をすることができる。

ここで、人形峠環境技術センター内の気象観測所で得られた、気温の年変動データを見ると、図 3-(a) のようである。このグラフに示されるように、通年でみたときの気温が、平均的には正弦波的な挙動をしているものの、日変動程度の激しい変化も常時起こっていることが分かる。そこで、気温データをフーリエ変換し、短周期(〜2 日)、中間周期(2〜14 日)、長周期(14 日〜1 年)の変動成分に分離すると、順に同図の(b), (c), (d) になる。このうち(b)の温度波形は、年間の正弦波的変動をよく表しており、従って、平均的挙動からの偏差成分はほとんど 14 日程度までの周期成分で説明できることが分かる。また、これらの周期に対応する制動深さは、地点毎に異なるものの、周期 2 日の場合 $d=0.1\sim0.2\text{m}$ 、周期 14 日の場合 $d=0.25\sim0.5\text{m}$ である。よって、地下 1m における温度振幅は、地表部におけるそれに比べて、周期 2 日までの成分は $4.5\times10^{-5}\sim7\times10^{-3}$ 倍に、周期 14 日までの成分は 0.018〜0.14 倍程度になる。これらの周期成分の気温変動幅は $\pm10^{\circ}\text{C}$ 程度であるため、地下 1m では保守的に見積もっても $\pm0.14^{\circ}\text{C}$ 程度にしかならないことがわかる。しかしながら、図 2 のグラフによれば、地下 1m および 1.5m では、12 月から 3 月の間に周期 1 日程度、振幅が 0.5°C 程度の変動が継続的にみられる。したがって、これらの温度変動は、気温に連動したものでなく、他の要因によると判断できる。現地の地盤中には熱源と考えられるものはないことから、これらの温度変動は、水分移動に伴う熱移流と予想され、さらに、短周期温度変動の継続期間が積雪期と一致することから、積雪、融雪が原因となっておこる、水分浸透を反映した地温の変化であると結論できる。

7. まとめ

本研究では、通年計測によって得られた地温データを、一次元熱伝導方程式に基づくモデルによって解析し、廃泥たい積場地表部近傍の熱拡散率を推定した。また、推定した熱拡散率を用いて年周期の変動成分とより短周期の変動成分に地温データを分解し、短周期成分の発生原因について検討した。その結果から得られた知見は以下のようなものである。

- 積雪期には細かな温度変動が1m以深の計測点でみられる地点があり、これは積雪による水分浸透に起因すると考えられる。
- 地温解析によって推定した制動深さは、周期1年で1~2m程度、1日の場合は10cm程度である。従って、数日程度の周期をもつ温度変動が地下1m以深において計測される場合は、水分の移動が関与していると判断できる。

今後の課題として、地温の計測点における熱容量を推定し熱伝導率を求めること、その結果を用いて熱フラックスを求め現地の熱収支を解析することが挙げられる。また、温度変化から水分浸透に関する定量的な情報を抽出する方法を検討することも今後の重要な課題である。

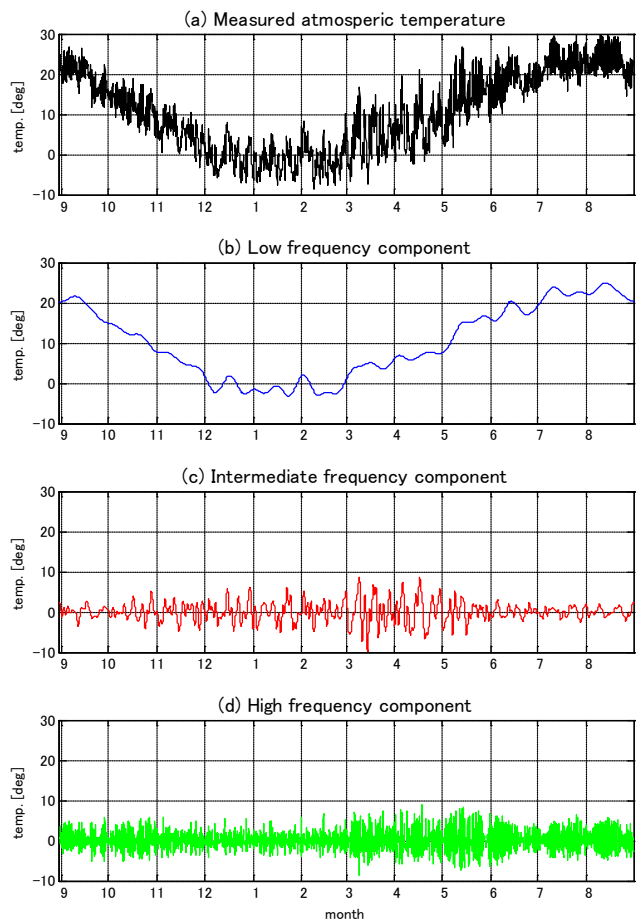


図3 計測サイトの気象観測所で得られた温度波形(a)と、その変動周期成分による分割(b)-(d)。

参考文献

- 1) CLIMATEC 社 HP：自記温度計 <http://www.weather.co.jp/>
- 2) ウィリアム ジュリー, ロバート ホートン, “土壌物理学 土中の水・ガス・化学物質移動の基礎と応用”, 築地書簡 (2006).
- 3) 国立天文台編, “平成 20 年 理科年表”, 丸善株式会社 (2008).
- 4) 岩崎佳介, “含水した多孔質体の熱応答特性に関する実験及び数値解析”, 岡山大学大学院環境生命学研究科 修士論文 (2014).