半地下試験家屋の敷地内における土壌の熱的特性に関する実測 MEASUREMENTS OF SOIL THERMAL PROPERTIES AROUND A SEMI- UNDERGROUND TEST HOUSE

松本真一*, 吉野 博**, 長友宗重***

Shin-ichi MATSUMOTO, Hiroshi YOSHINO and Muneshige NAGATOMO

Since several years ago, we had conducted measurements of thermal performance for a semi-underground room as well as computer simulations. It is very important for comparing measurement results with computational results to make detail thermal model of the soil around the test house. To obtain fundamental information for the modelling, the following measurements and analysis for the soil thermal properties were done:

- 1) Measurement of the properties for soil test pieces sampled from the site,
- 2) Long-term on-site measurement of thermal conductivity and voluminal heat capacity,
- 3) Long-term measurement of soil temperatures and their spectral analysis by techniques of a maximum entropy method,
- 4) Estimation of average thermal diffusivity from the data obtained by the spectral analysis.

As the result, the average diffusivity was estimated as $0.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ but it was also found that the actual diffusivity depended on time and distributed along depth from ground surface. Additionally, a simple calculation model for soil temperature having constant thermal diffusivity was compared with the temperature measurement and the prediction error was illustrated.

Keywords : soil, soil temperature, thermal characteristics, on-site measurement, spectral analysis, basement

土壌, 地中温度, 熱物性値, 現場測定, スペクトル解析, 地下室

1. 序

筆者らは、半地下居室の熱的性能に関する研究の一環として、実大試験家屋を用いた熱環境の実測^{1)~3)}のほか、地中断熱方法をはじめとする各種の因子が自然室温や熱負荷に及ぼす影響を調べる数値シミュレーションを行ってきた⁴⁾。今後、実測結果との照合に基づく計算方法の改良や、数値シミュレーションの援用による実測結果の詳細な分析を行う予定である。

熱物性値の実態や温度の変動性状など、試験家屋周囲の土壌の熱的特性を明らかにしておくことは、こうした研究を進める際に必要な「土壌のモデル化」に関わる基礎資料として極めて重要である。

そこで、試験家屋の敷地内の土壌に対して、(i)様々な深さから採取した試料に基づく各種の熱物性値の測定、(ii)現場に埋設した自作の棒状プローブによる熱伝導率と容積比熱の経時変化の測定、(iii)地中温度の長期測定とそのスペクトル解析、ならびに(iv)スペクトル解析結

果に基づく熱拡散率の推定を行うことにした。

土壌の熱物性値や地中温度の測定は、筆者らのほかにも多くの研究者によってなされている^{7)~17)}。これらの既往の研究と比べた場合、本研究は、①自作のプローブを用いて熱物性値を現場で直接測定し、その経時変化を明らかにしようとしている点(上記ii)、②丸2年間にわたり地中温度を欠測なく測定し、その変動性状をスペクトル解析の手法を用いて分析しようとしている点(上記iii)に特徴があり、価値のある知見が得られたので、ここに一連の測定・分析(i~iv)の結果を報告する¹⁸⁾。

なお、土壌のような湿り材料の熱伝導率に関しては、熱・水分同時移動方程式に基づいた定義を明確にした上で、それに対応した測定法の提案が従来までになされているが^{18),19)}、本研究で扱う土壌の熱伝導率の測定値とは、純熱伝導方程式を前提として得られる、対流・ふく射・水分及び水蒸気移動による影響を含んだ有効熱伝導率¹³⁾であることを最初に明記しておく。

* 東北大学工学部建築学科 講師・博士(工学)

** 東北大学工学部建築学科 教授・工博

*** 鹿島建設(株) 専務・工博

Lecturer, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

Senior Managing Director, Kajima Corp., Dr. Eng.

2. 現場採取試料に対する熱物性値の測定

2.1 測定の概要

東北大学工学部構内に1984(昭59)年9月に建設した半地下居室の実大試験家屋¹⁾周りの土壌について、熱物性値の深さ方向の分布を明らかにすることを目的として、試験家屋の西側妻壁より真西に10m離れた位置に深さ約3mの堅穴を掘り、土壌試料を採取した。採取した深さは、地表面から0.15m, 0.3m, 0.6m, 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5mの7ヶ所である。採土器には、内径84mmの塩化ビニル管を加工したもの(高さ100mm, 容積 $5.542 \times 10^{-4} \text{ m}^3$)を用いた。採取した試料は、各深さについて4個、総計28個である。採取試料を現場状態のまま実験室内に持ち込み、次節に示す方法により各種の熱物性値を測定した。試料採取日は、1986(昭61)年5月28日である。

2.2 測定方法

2.2.1 密度および絶乾時密度(仮比重)

いわゆる実容積法²⁰⁾に基づき、容積 $V[\text{m}^3]$ の採土器に採取した試料の質量 $M[\text{kg}]$ と、これを熱乾した後の乾土試料の質量 $M'[\text{kg}]$ を測定し、密度 $\rho[\text{kg/m}^3]$ と絶乾時密度(仮比重) $\rho'[\text{kg/m}^3]$ を次式より求める。

$$\rho = \frac{M}{V}, \quad \rho' = \frac{M'}{V} \quad (1)$$

2.2.2 含水比(重量含水率), 含水率, および体積含水率

前項で求めた密度 ρ , 絶乾時密度(仮比重) ρ' を用いて、含水比(重量含水率) $\phi[-, \%]$, 含水率 $\phi'[-, \%]$, および体積含水率 $\psi[-, \%]$ をそれぞれ(2), (3), (4)式より求める。

$$\phi = \frac{M - M'}{M'} \times 100 = \frac{\rho - \rho'}{\rho'} \times 100 \quad (2)$$

$$\phi' = \frac{M - M'}{M} \times 100 = \frac{\rho - \rho'}{\rho} \times 100 \quad (3)$$

$$\psi = \frac{M - M'}{\rho_w V} \times 100 = \frac{\rho - \rho'}{\rho_w} \times 100 \quad (4)$$

但し、 ρ_w : 水の密度 ($= 1000 \text{ kg/m}^3$)

2.2.3 比熱および容積比熱

魔法びんを加工して作成した熱量計²⁰⁾を用いて、絶乾時密度(仮比重) ρ' の測定に際して熱乾した試料について比熱 $c'[\text{J/kgK}]$ を混合法²⁰⁾により測定し、次式^{7), 20)}より熱乾前の比熱 $c'[\text{J/kgK}]$ を推定する。含水率 ϕ' には、前項で求めた値を用いるものとする。

$$c = c' \left(1 - \frac{\phi'}{100} \right) + c_w \frac{\phi'}{100} = c' + (c_w - c') \frac{\phi'}{100} \quad (5)$$

但し、 c_w : 水の比熱 ($= 4186 \text{ J/kgK}$)

(3)式より $\rho = 100\rho' / (100 - \phi')$ であるから、容積比熱 $c\rho$ は c', ρ', ϕ' を用いて次式のように表わせる。

$$c\rho = \left\{ c' + (c_w - c') \frac{\phi'}{100} \right\} \frac{\rho'}{1 - \frac{\phi'}{100}} \quad (6)$$

また、容積比熱 $c\rho$ は上式とは別に、 c', ρ', ψ を用いて(7)式で表わすこともできる²⁰⁾。

$$c\rho = c'\rho' + c_w\rho_w \frac{\psi}{100} \quad (7)$$

2.2.4 熱伝導率

熱伝導率 $\lambda[\text{W/mK}]$ の測定にはQTM型迅速熱伝導率計²¹⁾を使用する。この装置のプロブは平面型であるため、試料測定面との密着度に注意が必要である。そこで、採取試料を採土器ごと縦に切断し、平坦な断面を形成した上で測定を行うことにした。ひとつの試料につき5回測定を行い、その平均を代表値とする。

2.2.5 熱拡散率

熱拡散率 $a[\text{m}^2/\text{s}]$ は直接測定せず、熱伝導率 λ の測定値

図1 現場採取試料に対する熱物性値の測定結果(1986年5月測定)

を容積比熱 $c\rho$ の推定値、すなわち(6)式または(7)式から求まる値で除して求める。

2.3 測定結果

各種の物性値の測定結果を土質の柱状図と合わせて、図1に示す。土質柱状図は、現場より試料を採取する際の観察結果に基づいて作成した。

密度 ρ と絶乾時密度(仮比重) ρ' は、深さ約0.4mから1.8mにかけて層をなす粘土質ロームの部分や礫(れき)混じりロームよりなる深さ2.5mの部分で比較的小さく、含水比(重量含水率) ϕ 、含水率 ϕ' 、比熱 c は、逆にこの部分で大きかった。水分の保有量は土壌が緻密なほど小さいはずであるから、これらの結果は妥当な傾向を示しているものと推定される。

容積比熱 $c\rho$ は、(6)式、(7)式それぞれから算定したが、大きな違いは認められなかった。(7)式からも推察されるように、容積比熱 $c\rho$ の分布は、体積含水率 ψ の分布と同様の傾向にある。

熱伝導率 λ 及び熱拡散率 a の分布はほぼ同様で、深い部分ほど大きな値をとる傾向にある。深さ1.5mの値は深さ1.0mの値よりも小さい。深さ1.5m付近の土壌には腐植物が混入しており、これが影響しているものと推察される。

なお、熱伝導率 λ ならびに容積比熱 $c\rho$ の測定値はいずれも、中島・大橋らによるローム土に対する多数の測定値^{7),8)}の範囲内にあることが確認された。

3. 線熱源法による熱伝導率・容積比熱の経時変化の測定

3.1 測定の概要

試験家屋敷地内から採取した試料に対する熱物性値の測定のために掘った堅穴を埋め戻す際に、新たに作成した棒状プローブを設置し、土壌の熱伝導率と容積比熱を線熱源法²²⁾によって定期的に測定し、その経時変化を調べることにした。埋設位置は、地表からの深さが0.3m, 0.6m, 1.0mの3ヶ所である。

堅穴の埋め戻し作業から約3ヶ月経過した1986(昭61)年11月4日から1987(昭62)年7月25日までの期間、ほぼ1ヶ月おきに熱伝導率と容積比熱を現場測定し、その推移を調べた。また、それに先立つ1986(昭61)年9月29日から10月24日にかけては、数日間隔で集中的に測定し、経時変動をやや詳細に調べた。さらに測定された容積比熱に基づいて含水比を推定し、熱伝導率との関係を調べた。

3.2 測定原理および測定方法

熱伝導率 λ [W/mK]、熱拡散率 a [m²/s]なる熱物性値を持つ固体の中に半径 r [m]の棒状(円筒状)発熱体を挿入し、時刻 $t=0$ [s]より単位時間に発熱体単位長さあたり一定の熱量 q_0 [W/m]を発生させ続けることを想定する。発熱体を半径 r に比べて十分長い完全導体と見なし、発熱開始

図2 棒状プローブの形状と計測システム

時点 $t=0$ における発熱体表面温度を $\theta_s(0)$ [°C]とおけば、表面温度 $\theta_s(t)$ [°C]は、1次元極座標系の熱伝導方程式のひとつの初期値・境界値問題として解析的に求めることができる^{22),23)}。さらに発熱開始後、十分な時間が経過したものとして解を漸近展開すれば、表面温度 $\theta_s(t)$ [°C]は近似的に次式で表わされることが知られている²³⁾。

$$\theta_s(t) = \alpha \ln(t) + \beta + \theta_s(0) \quad (8)$$

右辺の係数 α , β は、(9)式および(10)式で与えられる。

$$\alpha = \frac{q_0}{4\pi\lambda} \quad (9)$$

$$\beta = \alpha \ln\left(\frac{4a}{\Gamma r^2}\right) \quad (10)$$

但し、 $\Gamma: \exp(\gamma)$, γ はEuler定数

棒状発熱体の半径 r 及び発熱量 q_0 が既知ならば、発熱体の表面温度 $\theta_s(t)$ の時間変化を測定すれば、(8)式により係数 α , β を図式的に定めることができる。このとき、(9)式および(10)式により熱伝導率 λ と容積比熱 $c\rho$ は、

$$\lambda = \frac{q_0}{4\pi\alpha} \quad (11)$$

$$c\rho = \frac{\lambda}{a} = \frac{q_0}{\alpha\Gamma\pi r^2} \exp\left(-\frac{\beta}{\alpha}\right) \quad (12)$$

と求められる。

以上の原理に基づいて熱伝導率と容積比熱を測定するためのプローブを作成した。図2にプローブの形状と計測システムの概略を示す。プローブには4.8mmφのシースヒーターを用いる。ヒーターへの供給電力を定電力発生装置(精度±3%)によって制御し、発熱量 q_0 が一定になるようにする。表面温度の測定にはシースヒーター中央部分に接着した0.18mmφのCC熱電対(JIS規格品)を用い、その熱起電力が0.1mVのオーダーまで読み取れるようにペン式オシログラフに記録する。読み取った熱起電力は、JIS熱電対起電力表²¹⁾に基づいて温度に変換される。

作成したプローブと計測システムにより妥当な精度の測定結果が得られることは、既知の物性値を持つ試料を対象とする予備測定により確認済みである²²⁾。

実際の測定では水分及び水蒸気移動の影響を小さく抑えるため、測定時間を120秒以内とし、プローブの表面温度上昇 $\theta_s(t) - \theta_s(0)$ が約3°C以内となるように発熱量 q_0 を19~23W/mの範囲に調整した。

図3 棒状プローブによる熱伝導率・容積比熱の測定結果

3.3 測定結果

埋設した棒状プローブを用いて、熱伝導率と容積比熱を測定した結果を図3(b),(d)に示す。なお、測定期間中の日積算降水量、外気温湿度、およびプローブを埋設した深度の地中温度の日平均値は、図3(a),(c)の通りである。

図3(c)、すなわち集中的に測定を行った1986(昭61)年9月末から10月下旬にかけてのデータに注目すると、測定日が数日異なるだけでも、各深度の熱伝導率と容積比熱が、急激に変化していることが判る。これらの物性値の変動は、地表に近い深さ0.3mにおいて相対的に大きく、変動幅は熱伝導率の場合に約0.3W/mK、容積比熱では1MJ/m³K程度となっている。集中実測を行った期間は比較的降水量の多かった時期であり、地中の含水状態の変化が測定値の変動に影響しているものと推察される。

図3(d)における測定データは、測定間隔の疎らな瞬時値である。従って、上述のように一時的な地中の含水状態の影響が各測定値に現れている可能性があり、熱伝導率と容積比熱の年変動性状について定量的に論じることが難しい。しかしながら測定結果を全般的に見ると、熱伝導率と容積比熱はともに、冬期に低め、夏期に高めの値となる傾向があり、地中の温度や降水量の季節変化との対応が考えられる。

なお、全ての測定データについて熱拡散率を計算したところ、 $0.217 \times 10^{-6} \sim 0.371 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲に分布することが判った。

図4 熱伝導率の実測値と含水比の推定値の関係

3.4 測定結果に基づく含水比(重量含水率)の推定

土壌の絶乾時の比熱 c' と密度(仮比重) ρ' が既知ならば、(7)式により、棒状プローブによる容積比熱の測定結果に基づいて土壌の体積含水率 ψ を逆算することができる。さらに、(4)式により密度 ρ を算定し、(2)式で示される含水比(重量含水率) ϕ を求めることもできる。

そこで、絶乾時の比熱 c' ならびに密度(仮比重) ρ' として、棒状プローブを埋設した深さにおける現場採取試料の測定値(図1参照)を仮定することにより、含水比(重量含水率) ϕ を推定し、棒状プローブによって実測した熱伝導率との関係を調べることにした。

図4に、推定した含水比(重量含水率) ϕ と測定した熱伝導率 λ の対応をプロットした結果を示す。図中には、2章

で述べた現場採取試料に対する測定値も含めた。図によれば、全体として含水比(重量含水率)と熱伝導率の間には正の相関があり、熱伝導率は含水比(重量含水率)に強く依存していることが推定される。深さ0.6mや1.0mのデータを見ると、それぞれ含水比が約70%, 60%を越えるあたりでプロットが大きくばらついており、熱伝導率が頭打ちになる傾向が認められる。測定箇所、すなわち土壌の組成の違いによって、含水比(重量含水率)が熱伝導率に及ぼす影響の傾向が異なることや、含水比(重量含水率)と熱伝導率は必ずしも直線的な関係にはないことが推察される。

4. 地中温度変動の長期測定

4.1 測定の概要

地中温度変動の定性的な特徴として、①地中深くなるに従い、年変動および日変動の振幅が指数関数的に縮小し、通常地表面から約0.5mの内外では日変動がなくなり、その約20倍の10m内外で年変動もなくなること、②地中温度の日変動・年変動のピーク(最高値あるいは最低値)と外気温や地表面温度の日変動・年変動のピークの間の時間的なずれ(以下「時間遅れ」と記す)が、地表面からの深さにほぼ比例して大きくなることがよく知られている¹⁰⁾。半地下試験家屋周りの土壌において、こうした性状を実地に定量的に把握することを目的として、地中温度の長期実測を行った。

4.2 測定方法

測定位置は、試験家屋の西側妻壁より真西に約8m離れた位置、2章で述べた土壌試料を採取した場所から約2m試験家屋寄りである。測定深さは0.03m(地表面)^{注3)}、0.15m, 0.3m, 0.6m, 1.0m, 1.5m, 2.0m, 3.0m, 4.0mの9ヶ所で、地表面は雑草がまばらに生えた裸地である。

浅い部分(0.03m~1.5m)の温度は、感熱部をシリコンで被覆した0.3mmφのCC熱電対を内径4mm、肉厚1mm、長さ0.3mのアルミニウムパイプに挿入し、管内の空隙をシリコンで充填して作成したプローブを水平に埋設して測定する。但し、深さ0.03mの場合は水平に埋設した。深い部分(2.0m~4.0m)の温度については、Kusudaが考案したプローブ¹⁵⁾を改良したものを用いて測定する。これは、内径26mmφ、肉厚2mm、長さ5mの塩化ビニルパイプ中の所定の位置に、ノイズ対策のためのシールド材で被覆された0.3mmφのCC熱電対を固定し、管内の隙間を現場発泡ウレタン材で充填して作成したものである。オーガー(ドリル状の掘削機)により、直径40mmφ、深さ5mの穴をあけ、地表面から垂直にプローブを挿入する。

データ収録は、深さ0.6mを除く浅い部分(0.03m~1.5m)の測定点については1985(昭60)年7月上旬より、深い部分(2.0m~4.0m)および深さ0.6mについては1986(昭61)年7月下旬より開始し、現在も継続している。20分間隔の瞬時値がパーソナルコンピュータで自動収録されている。

4.3 測定結果

図5(a),(b)に、欠測なくデータの得られた1986(昭61)年

図5 地中温度の年変動の測定結果(1986年9月1日~1988年8月31日)

9月から1988(昭63)年9月までの2年間(731日間)の地中温度変動を示す。なお、温度は日平均値で表わしている。

図によれば、外気温、地表面温度、地中温度はいずれも、大局的に見ると概ね年周期を持つ正弦波と見なせる変動をしているのが判る。外気温変動は、この年周期を持つ正弦波変動に数日周期の細かな変動が重なり合ったものと捉えることができる。この数日周期の変動は、地表面温度のほか、地中温度にも現れている。しかしながら、数日周期の変動は地中深くなるほど小さくなり、深さ3.0mや4.0mの位置に至るとほとんど認められない。地中温度の年周期変動は、地中深い部分ほど外気温変動に対する時間遅れが大きくなる。4.0mの深さでは、外気温が最高となる時期(7月下旬から8月上旬にかけて)から約4ヶ月経過した時期(11月下旬から12月上旬にかけて)に最高となっており、外気温に対する時間遅れがほぼ4ヶ月に達していることが判る。

図6に、1986(昭61)年9月から1988(昭63)年8月までの3年間(1096日間)の欠測部分を除く^{註4)}地中温度と外気温の全データから、各部深度の平均温度を求めた結果を示す。

深さ1.0m~3.0mの平均値はほとんど等しく、約13°Cと見ることができる。一方、外気温の平均値は11.3°Cであり、地中温度の平均値の方が1~2°C高いことが判る。この差は、日射、夜間ふく射、水分の蒸発などの因子の影響によって生じるものと考えられ、いわゆる相当外気温の平均値の方が、外気温のそれよりも地中温度の平均値に近いものと推察される。しかしながら、地表面温度や深さ0.15m~0.6mの地中温度の平均値は、11.7°Cから12.4°Cの範囲にばらつき、深層部の地中温度の年平均値よりも低い。年平均地中温度に深さ方向の分布が生じることは、既往の研究^{14),17)}にも示されている。原因としては水分移動に伴う熱移送の影響などが考えられ、地盤という伝熱系に何らかの非線形性があることも推察されるが、現在のところ十分納得のいく解釈は得られていない。Sobotkaが論じているように¹⁷⁾、この点は土壌のモデル化に際して重要と考えられるので、今後原因を追求したい。

5. 地中温度のスペクトル解析

5.1 解析の概要

図5に示した地中温度の測定結果から、地表面からの深さが増すにつれて1日周期や数日周期の変動成分が消え、年周期成分の変動が卓越することや、地表面温度変動に対する地中温度変動の時間遅れが認められたが、観察に止まらず分析的・定量的にこれらを確認することを目的として、地中温度のMEM(Maximum Entropy Method)²⁶⁾によるスペクトル解析ならびに地表面温度と地中温度

図6 地中温度の平均値の垂直分布

の間の相互相関係数²⁶⁾の分析を行うことにした。

スペクトル解析により、ある深さの地中温度変動の卓越周期をスペクトル密度のピークから分析できることは言うまでもない。さらに、特定の周波数に対するMEMスペクトル密度は、その周波数を持つ変動の振幅の2乗に比例するから²⁶⁾、ある深さの地中温度について年周期変動や日周期変動に対応する周波数のMEMスペクトル密度を地表面温度に対するMEMスペクトル密度で除して平方根をとれば、地表面温度の年変動・日変動の振幅に対する比(以下「振幅比」と記す)を算定することができる。また、地表面温度とある深さの地中温度の相互相関係数がピークをとる周期を時間遅れと解釈することができるから、相互相関係数の分析により、その深さの地中温度の時間遅れを定量的に求めることができる。

一般にスペクトル解析には、FFT(高速フーリエ変換)の手法が用いられることが多い。本研究でも当初、パワースペクトルの分析をFFTによって試みたが、spectral shift²⁶⁾や使用可能なデータ数に依存した分解能の低さのために妥当な結果が得られず、本章で目的とする分析は不可能であった。一方、MEMはFFTに比べて、①比較的短いデータからスペクトルを計算できる、②スペクトルの分解能が比較的よいという長所があることが知られている²⁶⁾。そこで、この方法を用いたところ、5.3節に示す通り、妥当な結果が得られることが判った。

5.2 解析方法

5.2.1 MEMスペクトル密度

計算アルゴリズムとしてBurg法²⁶⁾を用いて作成したプログラムを用いる。解析に用いるデータは、1986(昭61)年9月から1989(平1)年8月までの8時間刻みの実測結果(3288データ)である。解析の周波数刻みは $3.80 \times 10^{-5} \text{h}^{-1}$ である。1988(昭63)年9月以降に生じた欠測部分^{註4)}には、スプライン補間によりデータを補充する。MEMスペクトルの計算に用いる予測誤差フィルターの打ち切り項数は、全てのデータ系列に対して平均的にFPE(final predic-

図7 地中温度のMEMスペクトル密度の例

tion error)²⁶⁾が最小となるような値を赤池の情報基準²⁶⁾の範囲内で試行錯誤的に探し出し、それを採用する。

5.2.2 相互相関係数

相互相関係数は、定義そのものに従った計算方法によって求める。数日間程度までの時間遅れ、すなわち日変動における時間遅れの分析には、1986(昭61)年9月の1ヶ月分のデータ(20分間隔)を用い、年変動における時間遅れの分析には、1986(昭61)年9月から2年間の日平均値を用いる。

5.3 解析結果

5.3.1 MEMスペクトル密度

MEMスペクトル密度の例として、地表面温度、深さ0.3m、0.6m、4.0mの地中温度に対して計算した結果を図7(a),(b)に示す。最適な予測誤差フィルターの項数は116項であった。

地表面温度と深さ0.3mの地中温度の場合、日周期変動に該当する周波数に鋭いピークが生じるが、深さ0.6mと4.0mの地中温度には、これが見られないことが判る。試験家屋敷地内の土壌において地中温度の日変動が消滅するのは、深さ0.3mと0.6mの間であると言える。

図8 地表面温度と地中温度の間の相互相関係数

表1 地表面温度に対する振幅比と時間遅れ

地表からの 深さ, m	0.03	0.15	0.3	0.6	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
日変動成分の 振幅比, —	1.000	0.161	0.046	—	—	—	—	—	—
年変動成分の 振幅比, —	1.000	0.832	0.907	0.788	0.679	0.453	0.400	0.202	0.141
時間遅れ, day	0.000	0.333	0.667	13.0	32.0	48.0	65.0	88.0	117.0

ハッチ部分: 熱拡散率の推定に用いたデータ

深さ0.6mと4.0mの地中温度のスペクトル密度は、高周波域における細かな変動を無視すれば、その波形は正弦波にホワイトノイズが重なる場合の波形²⁶⁾に類似であり、地中深い位置の温度変動は、年周期成分が支配的になると解釈してよいものと考えられる。

5.3.2 相互相関係数

図8(a),(b)に、地表面温度と地中温度の相互相関係数の計算結果を示す。図8(a)は日変動レベルの相互相関係数、図8(b)は年変動レベルの相互相関係数である。深さ1.0m~4.0mの地中温度の日変動には、周期性の時間遅れが認められなかったため、図8(a)には含めなかった。同様に深さ0.15mと0.3mの場合には、年変動に周期性の時間遅れが認められなかったため、図8(b)から除外した。

図8(a)には深さ0.6mの地中温度の場合を含めたが、相互相関係数の周期性は明確に現れていない。スペクトル密度から明らかになったように、深さ0.6mの地中温度には日周期変動成分がほとんどないためと推察される。これを除けば、図中の相互相関係数の曲線はいずれも、強い周期性を持つことが判る。

5.3.3 地中温度の地表面温度に対する振幅比と時間遅れ

表1に、MEMスペクトル密度から求めた地中温度の地表面温度に対する振幅比と、相互相関係数から求めた地

中温度の地表面温度に対する時間遅れをまとめて示す。

振幅比は概略、深さの増大に伴って指数関数的に小さくなっていくことが読みとれる。但し、深さ0.15mおよび0.3mの地中温度の年変動成分の振幅比は、大小関係が逆転しており、この傾向に合致しない。MEMスペクトル密度の計算誤差によるものと推察される。

また時間遅れは、地表面からの深さにほぼ比例して大きくなるが見えてとれる。

6. スペクトル解析結果に基づく熱拡散率の推定とそれによる地中温度の計算

6.1 推定と計算の概要

4章において、3年間にわたる地中温度の平均値には深さ方向に分布が生じ、系の非線形性を考慮した伝熱モデルを考究する必要があるとの示唆を得たが、純熱伝導方程式を前提として、土壌の熱拡散率が時間的にも空間的にも一定の値をとるものとしてモデル化することは、極く一般的に行われている。年平均地中温度の垂直分布などを説明し得る、より詳細な土壌の伝熱モデルを検討する以前に、一定の熱拡散率を仮定して純熱伝導を前提とする計算を行った場合に、地中温度がどの程度の精度で予測できるかを確かめておくことは意義のあることである。そこで第一に、前章のスペクトル解析から得られた地中温度の振幅比と時間遅れのデータに基づき、試験家屋周りの土壌の平均的な熱拡散率を推定し、第二に、その推定値を用いた地中温度の計算結果を実測結果と比較することにした。

6.2 熱拡散率の推定方法

地表面温度が周期 T [s]で正弦変動し、土壌が一様の熱拡散率を持つ半無限固体であると仮定すれば、地表面温度に対する深さ x [m]の地中温度の振幅比 θ/θ_s [-]あるいは時間遅れ τ [s]が既知ならば、熱拡散率 a [m²/s]を(13)式あるいは(14)式により推定することができる^{16),20)}。

$$\sqrt{\frac{T}{\pi}} \ln \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right) = \frac{x}{\sqrt{a}} \equiv \kappa x \quad (13)$$

$$2\tau \sqrt{\frac{\pi}{T}} = \frac{x}{\sqrt{a}} \equiv \nu x \quad (14)$$

5章で分析した振幅比あるいは時間遅れ(表1)のデータを基に、深さ x と(13)式左辺あるいは(14)式左辺の相関をとり、最小2乗法を適用することにより原点を通る回帰直線を求める。勾配 κ あるいは ν から、

$$a = \frac{1}{\kappa^2} \quad (15)$$

$$a = \frac{1}{\nu^2} \quad (16)$$

として熱拡散率 a を推定できる。

6.3 熱拡散率の推定結果

推定結果を図9(a),(b)に示す。

図9 スペクトル解析から得た振幅比・時間遅れに基づく熱拡散率の推定結果

熱拡散率の推定値は、(a)の深さと振幅比の相関より、 $0.404 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ となった。また(b)の深さと時間遅れの相関より、 $0.376 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ を得た。これらの値は3.3節で述べた深さ0.3m, 0.6m, 1.0mにおける熱拡散率の経時変化の変動範囲をやや越えるが、2章に示した熱拡散率の測定結果(図1)の平均値と極めて近い。図9(a),(b)から得られた値の平均である $0.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ を試験家屋周りの土壌の熱拡散率の代表値と考えることができる。

6.4 地中温度の計算方法

表面温度が任意の項数のフーリエ級数で与えられる場合の半無限固体の周期的熱伝導の解析解¹⁶⁾に基づいて地中温度を計算する。外乱には、図5(a)に示した深さ0.03mの地中温度(地表面温度)を24ヶ月分の月平均値に統計処理し、これを調和解析して得たフーリエ級数を用いる。フーリエ級数は、定常値(地表面温度の2年間の平均値)のほか、基本波(2年周期の項)から、第12高調波(2ヶ月周期の項)までの12項を用いるものとする。土壌の熱拡散率は、前節で推定された $0.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ を設定する。温度を求める深さを0.3m, 1.0m, 2.0m, 3.0m, 4.0mとし、対応する深さの実測結果の月平均値と比較する。

図10 地中温度の年変動の計算結果と実測結果の比較

6.5 地中温度の計算結果

計算結果を図10(a),(b)に示す。図中にプロットした記号は、実測結果を示す。

計算結果を実測結果と比較すると、最高・最低温度を記録する時期など、温度変動の特徴がよく照合することが判る。実際には土壤の熱物性値は、時間的にも空間的にもかなり変化することを先に示したが(2章, 3章)、地中温度の年変動程度の時間スケールの現象を扱う場合には、熱拡散率を一定としても定性的には大きな間違いはないと推察される。しかしながら、地中温度そのものは全般に計算値の方が低めであり、実測値と最大で4°Cの差が生じている。その理由のひとつは、5.2節で示した通り、地中温度の平均値の垂直分布(地中温度は概して、地表面温度よりも1°C程度高温である)が、本章で扱っているような単純なモデルでは考慮できないことにある。従って、定量的な分析を目的として数値シミュレーションを行う場合、必要とされる精度に見合った土壤のモデルを検討することが重要と思われる。

7. まとめ

- (1) 東北大学構内にある半地下居室の実大試験家屋周りの土壤は、深さによって土質に相違が認められる。それに対応して、熱伝導率や容積比熱などの各種の熱物性値も深さによって値が異なる。例えば熱拡散率は、深さが増すほど大きな値となる傾向がある。
- (2) 含水状態などの変化により、土壤の熱伝導率と容積比熱は時間的にも変動することが、現場測定から明らかになった。

- (3) 地中温度の変動性状に関して、深さに応じて地中温度変動の振幅が指数関数的に減衰するという性質、ならびに地表面温度に対する地中温度の時間遅れが深さにほぼ比例して生じるという性質がよく知られている。試験家屋周りの地中温度も、このような性質を持つことが観察された。
- (4) 地中温度の3年間にわたる平均値を求めたところ、深さ方向に分布が生じることが明らかになった。
- (5) 地中温度の測定データをスペクトル解析することにより、(3)に述べた温度変動の特徴を分析的・定量的に明らかにした。
- (6) スペクトル解析結果に基づいて、半無限固体の周期的定常解による熱拡散率の推定を行い、概略値として $0.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ を得た。
- (7) (6)で推定された熱拡散率を用いて、地中温度変動を半無限固体の周期的定常解に基づいて計算し、これを実測値と比較したところ、年変動程度の時間スケールの現象は、熱拡散率を時間的・空間的に一定としてモデル化しても、定性的には妥当な結果を与えることが推察された。しかしながら、計算結果は実測値を最大で4°C下回っており、数値シミュレーションの目的によっては、より詳細なモデル化が必要であることも推察された。

謝辞

土壤の熱物性値の測定法に関し、工学院大学 中島康孝教授より種々のご教示を賜りました。採取試料に対する熱伝導率の測定に際し、国土館大学 斎藤忠義教授より測定装置をお借りしました。また、線熱源法による土壤の熱物性値の測定に際し、棒状プローブ及び定電力発生装置の作成に関して、東北大学工学部 柳澤栄司教授ならびに幾世橋広助教授よりご指導いただきました。ここに記して謝意を表します。

注

- 1) 本報は、日本建築学会 東北支部研究報告集に発表した内容⁵⁾および日本建築学会 大会学術講演梗概集に発表した内容⁶⁾に、新たな分析を加えて修正・加筆したものである。
- 2) 熱物性値が既知であるグリセリンを試料とする測定を、初期温度7~11°Cの範囲で3本のプローブについてそれぞれ4回行い、測定精度を検討した。測定結果の一例を付図に示す。横対数軸は加熱開始後の経過時間 t 、縦軸は表面温度 $\theta_s(t)$ を示す。
図によれば、温度変化の曲線は、加熱開始後、約2分経過したあたりからほとんど直線となり、(8)式が適用できることが判る。総計12回の測定の結果、熱伝導率の平均値として 0.297 W/mK (標準誤差: 0.007, 90%の信頼区間: 0.284~0.309)、また、容積比熱の平均値として $2.913 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ (標準誤差: 0.043×10^6 , 90%の信頼区間: $2.793 \times 10^6 \sim 2.992 \times 10^6$)を得た。文献によれば、グリセリンの熱伝導率と容積比熱は、温度9°Cのとき、それぞれ 0.289 W/mK , $2.938 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ とされており²⁴⁾、作成したプローブは実用に耐え得ると考えられる。

付図 棒状プロブによるグリセリンの測定例

- 3) 地表の凍上や積雪を考えると、地表面の定義は難しい。文献によれば、地表面温度は浅く地中に埋めた状態で測定するとされている²⁵⁾。深さ0.03mの測定点は、この測定方法にならって地表面温度の測定のために設置したものである。
- 4) 1988(昭63)年9月1日から1989(平1)年8月31日までの期間、最大で50時間連続した欠測部分が数ヶ所あり、欠測なく測定された場合の全サンプル数の4%を占めている。

参考文献

- 1) 長谷川房雄, 吉野 博, 松本真一: 半地下試験家屋における透過日射を阻止した状態での熱環境性能に関する長期実測, 日本建築学会計画系論文報告集, 第374号, pp.33~43, 1987.4.
- 2) 長谷川房雄, 長友宗重, 吉野 博, 松本真一: 半地下試験家屋における透過日射がある状態での熱環境性能に関する長期実測, 日本建築学会計画系論文報告集, 第387号, pp.23~32, 1988.5.
- 3) 長谷川房雄, 長友宗重, 吉野 博, 松本真一, 坂西 勉: 半地下試験家屋における暖房状態での熱環境性能に関する長期実測, 日本建築学会計画系論文報告集, 第435号, pp.1~10, 1992.5.
- 4) 長谷川房雄, 長友宗重, 吉野 博, 松本真一: 半地下居室の自然室温・負荷に及ぼす地中斷熱方法の影響に関する数値実験, 日本建築学会計画系論文報告集, 第386号, pp.18~27, 1988.4.
- 5) 松本真一, 長友宗重, 吉野 博: 半地下居室の熱的性能に関する研究 その18 試験家屋周りの土壌の熱的特性に関する実測, 日本建築学会東北支部研究報告集, 第55号, pp.117~124, 1992.6.
- 6) 松本真一, 長友宗重, 吉野 博: 半地下試験家屋周りの土壌に対する熱物性値の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D環境工学), pp.775~776, 1992.8.
- 7) 中島康孝, 大橋一正, 伊藤宏之: 蓄熱材料における土壌の熱的特性に関する研究(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(計画系), pp.543~544, 1981.9.
- 8) 中島康孝, 大橋一正, 渡辺荘児: 蓄熱材料における土壌の熱的特性に関する研究(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(計画系), pp.755~756, 1983.10.
- 9) 三浦昌生, 尾島俊雄: 東京における地中温度分布に関する実測調査研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第348号, pp.11~18, 1985.2.
- 10) 塩月義隆, 片山忠久, 林 徹夫, 堤純一郎, 張 晴原, 薛 虹, 吉水久雄: 地表面の温度および熱収支の長期観測 その1 観測概要と結果の一例, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D環境工学), pp.461~462, 1988.10.
- 11) 塩月義隆, 片山忠久, 林 徹夫, 堤純一郎, 津々見伸広, 原田寛史: 地表面の温度および熱収支の長期観測 その2 地表面および地中温度の年間変動, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D環境工学), pp.829~830, 1989.10.
- 12) 落藤 澄, 長野克則, 伊藤 剛, 山田健一: 凍結・融解を伴う土壌蓄熱の基礎実験と解析 第1報 土壌の熱物性と基礎実験, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.573~576, 1989.10.
- 13) 長野克則, 落藤 澄: 凍結・融解による土壌の熱物性の変化と熱伝導モデル, 空気調和・衛生工学会論文集, No.52, pp.91~102, 1993.6.
- 14) 下田吉之, 水野 稔, 内藤和夫: 都市化による地中温度の上昇に関する研究 第2報—異なる地表面下における地中温度の実測とモデル化, 空気調和・衛生工学会論文集, No.41, pp.85~94, 1989.10.
- 15) Kusuda, T.: Earth Temperatures beneath Five Different Surfaces, NBS Report, No.10373, 1971.
- 16) Givoni, B. and Katz, L.: Earth Temperature and Underground Buildings, Energy and Buildings, Vol.8, No.1, pp.15~25, 1985.1.
- 17) Sobotka, P.: Climatic Model for Prediction of Below-grade Heat Loss: Influence of Elevation, International Journal of Energy Research, 1993 (in print).
- 18) 鈴井修一, 池田哲朗, 堀江悟郎: 多孔質建築材料の湿潤時熱伝導率について, 日本建築学会計画系論文報告集, 第354号, pp.11~21, 1985.8.
- 19) 鈴井修一, 池田哲朗, 堀江悟郎: 周期法による湿潤時熱伝導率の測定, 日本建築学会計画系論文報告集, 第354号, pp.22~31, 1985.8.
- 20) 土壌物理性測定法委員会編: 土壌物理性測定法, 養賢堂, 1972.
- 21) 例えば, 炭竈貞男: 熱センサ入門 原理・構造と使い方, 啓学出版, 1984.
- 22) Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C.: Conduction of Heat in Solids (Second Ed.), Oxford Press, pp.344~345, 1959.
- 23) 岡垣 理: 熱伝導率、熱侵透率、温度伝播率および比熱の同時測定法について, 衛生工業協会誌, 第33巻, 第7号, pp.20~29, 1959.7.
- 24) Welty, J.R., Wicks, C.E. and Wilson, R.E.: Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer (Third Ed.), John Wiley & Sons, p.776, 1984.
- 25) 中央気象台編: 地上気象観測法, 1950(文献17による).
- 26) 例えば, 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1977.

(1993年7月10日原稿受理, 1994年5月30日採用決定)