

## 地中温度の計算

初版の刊行以来、EA 気象データは環境設計の現場などで活用されるようであるが、DVD に収録された気象要素（いわゆる「1次データ」の「基本8要素」）以外にも、比較的ニーズの高い基礎的な気象データがいくつかある。地中温度は、そうしたデータのひとつである。例えば、有名な米国の熱負荷シミュレーションプログラム DOE-2 の入力気象データには、月別の地中温度データが含まれている[1]

改めていうまでもなく、地温（地表面温度・地中温度）の形成機構は極めて複雑で、その推定には高度な数理モデルが必要である。しかし、環境設計用の基礎データとして瑕疵とならない程度の誤差を認めるならば、外界気象データの他、いくつかの条件を適切に設定することによって、実用的な地温推定は可能であり、そのようにして生成される地温データを気象データの一要素として加える意義は大きい。

このような背景から、EA 気象データを入力データとすることを前提として、なるべく簡易な条件設定と計算方法を用いて任意の深さの地中温度データを生成する方法が、松本らによって検討された[2]

その結果開発されたのが、オプションプログラムとして供給される GTWin である。このプログラムによれば、EA 気象データを読み込み、それと同じ書式のバイナリファイル、あるいは独自のテキストファイルとして、1時間刻みの地中温度データを1年分生成することができる<sup>注1</sup>。

この pdf ファイルでは、地中温度計算プログラム GTWin に適用されている計算理論について、計算例を交えて紹介する。

### 1 計算理論

#### 1.1 数理モデル

林らは、地中における水分移動を考慮したモデルと無視したモデルを構成し、これを差分で解いて実測地中温度との照合を行っているが、その結果によれば、水分移動を無視し、地表面における蒸発潜熱を地表面温度及び蒸発比から求めるモデルでも、予測される地中温度が実測値から大きく外れることはなく、地表面温度の日変動の応答性などを除いた長期的な地温変動を予測するには精度的に十分であるという[3]。そこで、実用的推定の立場から、同じ方法を適用することにした。

すなわち、地盤内熱移動の基礎式は式(1)~(4)である。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\lambda}{C_e} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\infty} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_s = 273.15 & (\text{積雪時}) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_c (\Theta_o - T_s) & (\text{非積雪時}) \end{cases} \quad (3)$$

<sup>注1</sup> 拡張アメダス気象データ プログラム DVD の拡張セット2を購入し、GTWin を所有しているユーザーは、pdf 版操作マニュアル「GTWin マニュアル.pdf」で使い方を知ることができる。

$$\Theta_o = T_o + \frac{aI + \varepsilon L^\downarrow - \varepsilon \sigma_b T_s^4}{\alpha_c} + \frac{kH}{C_o} (x_o - X_s) \quad (4)$$

ここに,

- $z$  : 地表面下方の距離 (深さ) [m],  $T$  : 深さ  $z$  の地温 [K],  $t$  : 時刻 [s]  
 $C_e$  : 深さ  $z$  における土壌の容積比熱 [J/(m<sup>3</sup>K)]  
 $\lambda$  : 深さ  $z$  における土壌の熱伝導率 [W/(mK)]  
 $T_s$  : 地表面温度 (=  $T|_{z=0}$ ) [K]  
 $T_o$  : 気温 [K]  
 $\Theta_o$  : 相当外気温 [K]  
 $x_o$  : 外気の絶対湿度 [g/kg]  
 $X_s$  : 地表面温度  $T_s$  に対する飽和絶対湿度 [g/kg]  
 $I$  : 水平面全天日射量 [W/m<sup>2</sup>]  
 $L^\downarrow$  : 下向き大気放射量 [W/m<sup>2</sup>]  
 $a$  : 地表面の日射吸収率 [-]  
 $\varepsilon$  : 地表面の放射率 [-]  
 $\alpha_c$  : 地表面の対流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>K)]  
 $\sigma_b$  : Stefan-Boltzmann 定数 ( $5.67 \times 10^{-8}$ ) [W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)]  
 $H$  : 水の蒸発潜熱 ( $1996.04664 + 1.846T_s$ ) [J/g]  
 $C_o$  : 外気の湿り比熱 ( $1004.6 + 1.846x_o$ ) [J/kg]  
 $k$  : 蒸発比 [-]

である。

式 (4) 右辺の外界気象要素に関する変数は全て, EA 気象データに含まれる時別値である。また,  $H, C_o, \alpha_c$  も時変数である。林らは  $a, \varepsilon$  も時変数としてモデル化しているが[3], そのようなデータは今のところ整備されていないため, ここでは定数と考える。

## 1.2 境界条件の考え方と数値解析手法

上述の数理モデルは, 差分法, 有限・境界要素法などの手法で解くのが適切であり, ここでは1次元2次要素による有限要素解析の手法を適用する。その際, 境界条件は以下のように考える。

### 1.2.1 地表面境界条件

式 (4) は非線型で, 数値解析には収束演算が必要となる。しかし, 式を適用する計算プログラムは, 設計実務における使用が想定されるものであるため, 右辺の  $T_s$  を1計算時刻前の値で代用して既知とする。ただし,  $\alpha_c$  は風速  $v$ [m/s] の関数 (文献 4) とし, Cauchy 境界条件の有限要素式への組み込みは, 計算時刻ごとに行う。

積雪時の伝熱現象は, 複雑な移動境界問題であるため, ここで扱うべき数理モデルの範疇を越える。また, 諸物性値も整備されていない。しかし, 文献 5]によれば, 積雪下の地表面温度  $T_s$  は概ね 273.15K(0°C) と考えてよいとされているので, 計算時間刻みごとに積雪の有無を推定して, 境界条件の種類を Dirichlet 境界条件に変更するものとする<sup>注2</sup>。積雪の有無の判定には, 二宮・赤坂らの推定法 (文献 6 参照) を用いる。

<sup>注2</sup> プログラム GTWin では, 積雪を考慮する/しないが, ラジオボタンで選択できる。デフォルトは「積雪を考慮しない」方であるため, デフォルトのままだと, 式 (3) 第2段のみを地表面の境界条件としていることになり, この部分の記述は適用されない。

## 1.2.2 無限遠方の断熱境界条件

Neumann 境界条件 (断熱境界条件) は、数値解析上、ある深さより先の領域に無限要素 [7] を適用して表現することにした。適用手法を以下に示す。

1次元2次要素の基準要素 (基準座標系:  $-1 \leq \zeta \leq 1$ ) における温度の内挿は、3つの節点の温度を  $T_1(\zeta = -1)$ ,  $T_2(\zeta = 0)$ ,  $T_3(\zeta = 1)$  とするとき、

$$T(\zeta) = \left\langle \frac{-\zeta(1-\zeta)}{2}; (1-\zeta)(1+\zeta); \frac{\zeta(1+\zeta)}{2} \right\rangle \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

と表されるが、 $dT/d\zeta|_{\zeta=1} = 0$  なる条件を課して  $T_3$  を消去すると

$$T(\zeta) = \left\langle \frac{-\zeta(2-\zeta)}{3}; \frac{(3-\zeta)(1+\zeta)}{3} \right\rangle \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

となり、2つの内挿関数で無限要素の節点1 ( $\zeta = -1$ )、節点3 ( $\zeta = 1$ ) の間の温度を内挿できる。

節点1の実座標を  $z_1$  とするとき、

$$z = \frac{2z_1}{1-\zeta} \quad (7)$$

の (特異) 写像関数は、無限要素の実座標・基準座標系相互の座標変換に適したもののひとつである。この場合、節点2 ( $\zeta = 0$ ) の実座標は  $z = 2z_1$  に、 $\zeta = 1$  のときの実座標は  $z \rightarrow \infty$  に設定していることになる。

無限要素の写像関数は、式 (7) 以外にも考えられるが [7]、プログラム GTWin では式 (7) の写像関数のみを扱うこととし、デフォルトで  $z_1 = 10\text{m}$  としている<sup>注3</sup>。

## 2 計算理論のプログラム化の概要

### 2.1 ユーザインタフェース等の作成

前章 (1) で述べた計算理論からも分かるように、地中温度を計算するには、様々な条件を予め設定しなければならない。具体的には、

- ① 計算対象のアメダス観測点と計算対象年の設定
- ② 地中温度を計算する深さ (複数) の設定
- ③ 地表面の熱物性値 (対流熱伝達率  $\alpha_c$ , 日射吸収率  $a$ , 放射率  $\varepsilon$ , 蒸発比  $k$ ) の設定
- ④ 地盤の土質構成のジオメトリと熱物性値 (熱伝導率  $\lambda$ , 容積比熱  $C_e$ ) の設定

が必要となる。さらに、ここでは有限要素法の適用を考えているため、要素分割という煩わしい設定作業が付きまとう可能性がある。計算条件をできるだけ迅速に、間違いなく設定できるように配慮することは、計算理論をプログラム化する上で極めて重要なことといえる。実用的なプログラム開発の成否は、

<sup>注3</sup> 有限要素法においては、無限遠方の断熱境界条件は、原点から十分離れた距離における断熱境界条件に置き換えて表現するのが普通である。しかし、無限遠方の代用である十分離れた距離をどのくらいに設定するのが適当かは、ある程度の解析経験を積まないと判断できないものである。このような無限要素の導入は、ユーザが手動で要素分割する手間を省くと同時に、誤まったメッシュモデルの入力を防ぐ上で好ましいと考えられ、作成された計算プログラム GTWin の特徴のひとつになっている。

計算理論のプログラムコード化 (インプリメント) におけるアルゴリズムの工夫以上に、計算条件の入力・設定に関する工夫、すなわちユーザインタフェースの部分にかかっているといても過言ではない。

そこで、①～④の設定は全て、グラフィカルユーザインタフェース (Graphical User Interface: GUI) を介して直感的に行えるように配慮した。

GUIの作成全般にわたって、以下の方針が適用されている。

#### GUI作成方針 1

ユーザが入力する部分には必ずデフォルト設定があり、何も入力しなくとも一応の計算が行えるように配慮すること。

#### GUI作成方針 2

不正入力を未然に防ぐとともに、ユーザ入力は必ず評価して、不正ならば警告を発して先に進めないように配慮すること。

#### GUI作成方針 3

研究者による利用を想定し、デフォルト設定とは別の独自の設定条件を用いて高度な利用が可能ないように配慮すること<sup>注4</sup>。

また、有限要素分割の煩雑さを解消するため、簡単な自動要素分割ルーチンを備えることにした。要素分割数は、深さ 10m までの要素数が疎 (50 個)/密 (100 個, デフォルト)/ユーザー指定の 3 つのオプションから選択できる。このオプション設定結果と地盤の層構成情報を参照して、有限要素式の全体マトリクスが自動的に構成できるようにした。

さらに、地盤の層構成情報として重要な熱物性値の設定作業を容易にするため、土壤熱物性値のデータベース (文献値) を準備し、ユーザーが地盤の土質構成 (層構成) をモデル入力する際、データベースの値をボタンひとつで設定できるようにした。なお、データベースの内容については、4 章で解説する。

自動要素分割ルーチンと土壤熱物性値データベースを持つことは、作成されたプログラム GTWin の大きな特徴である。

## 2.2 プログラムのフロー

計算理論をプログラムコードとしてインプリメントするのに用いたフローチャートを図 1 に示す。プログラムは、1 年間の地中温度データを 1 時間刻みで生成することを前提として記述されているが、計算理論そのものにはかなり大胆な仮定を設けているため、プログラム開発に当たっては、「日平均地中温度が妥当な精度で計算できる」ことを目標とした。計算開始は計算対象年の 1 月 1 日午前 1 時とし、2 年分の計算を行い、2 年目の計算値を結果として採用することになっている<sup>注5</sup>。

先述の通り、積雪の有無、対流熱伝達率の変化により境界条件が変化するため、全体系マトリクス式は計算ステップごとに作成しなくてはならない。そこで、逐次計算ループでは、メモリ空間効率よりも演算回数を減らすようなスピード優先のコーディングの工夫が凝らされている。

<sup>注4</sup> 具体的には、1 章の記述と異なり、対流熱伝達率  $\alpha_c$  を定数として設定したり、日射吸収率  $a$ 、放射率  $\varepsilon$ 、蒸発比  $k$  を時変数として、ユーザーファイルから読み込んで時別に設定できるようになっている。

<sup>注5</sup> すなわち、助走期間を 1 年間設定している。この仕様は、GTWin Ver.4.1 で初めて採用されたもので、以前のバージョンでは、計算開始を計算対象前年の 9 月 1 日午前 1 時として、助走期間を 4 ヶ月設定していた。したがって、同じ条件で計算を実行しても、GTWin のバージョンによって、計算結果が若干異なる場合もあり得ることに留意されたい。

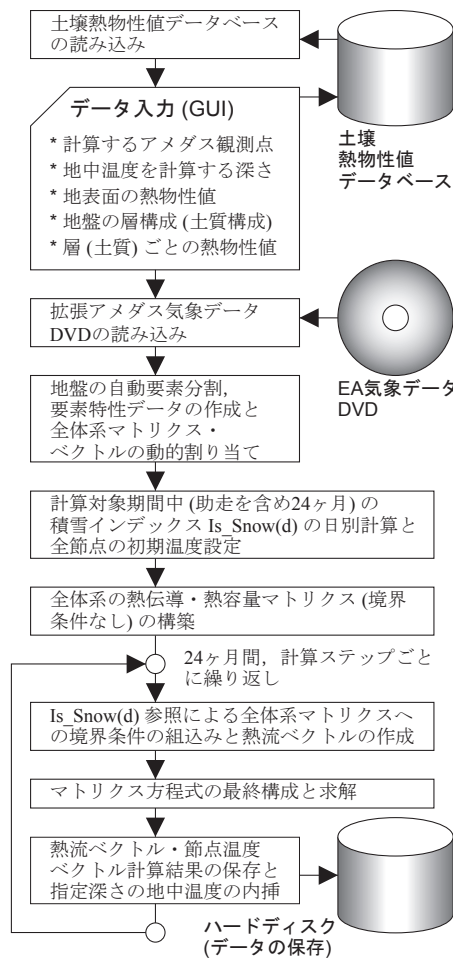


図1 地中温度計算プログラム GTWin における計算の流れ

### 3 計算精度の検討

作成したプログラムの妥当性を確認するため、1987年に仙台で実測されたデータ[8]との照合を行った。設定した熱物性値は表1の通りである。土壌の熱物性は、文献[8]で論じられている手法をもとに土質ごとに推定した値、地表面の日射吸収率と放射率は、裸地に対する常識的な値、蒸発比は、文献値[3]である。また、地盤は深さ10mまでを100要素に分割し、深さ10m以降に無限要素を適用した。外乱は実測値ではなく、当該年(1987年)の仙台におけるEA気象データとし、積雪の影響を考慮した。

表1 計算精度の検討に用いた熱物性値

地表面の ふく射定数	日射吸収率 $a[-]$	放射率 $\varepsilon[-]$	蒸発比 $k[-]$
	0.7*	0.9*	0.6*
地盤内熱物性 深さ [m]	熱拡散率 $\lambda/C_e$ $\times 10^{-6}[\text{m}^2/\text{s}]$	熱伝導率 $\lambda$ [W/(mK)]	容積比熱 $C_e$ [MJ/(m <sup>3</sup> K)]
0.00-0.70	0.187	0.62	3.32
0.70-1.30	0.444	0.67	1.51
1.30-1.80	0.328	0.80	2.44
1.80-2.50	0.291	0.71	2.44
2.50-3.50	0.635	1.12	1.76
3.50-9.99	0.400	1.16	2.90

(\* : 仮定した値)

図2は、地表面、深さ1m、3mの特別データを日平均値に処理して、年間の経時変化として表示したものである。

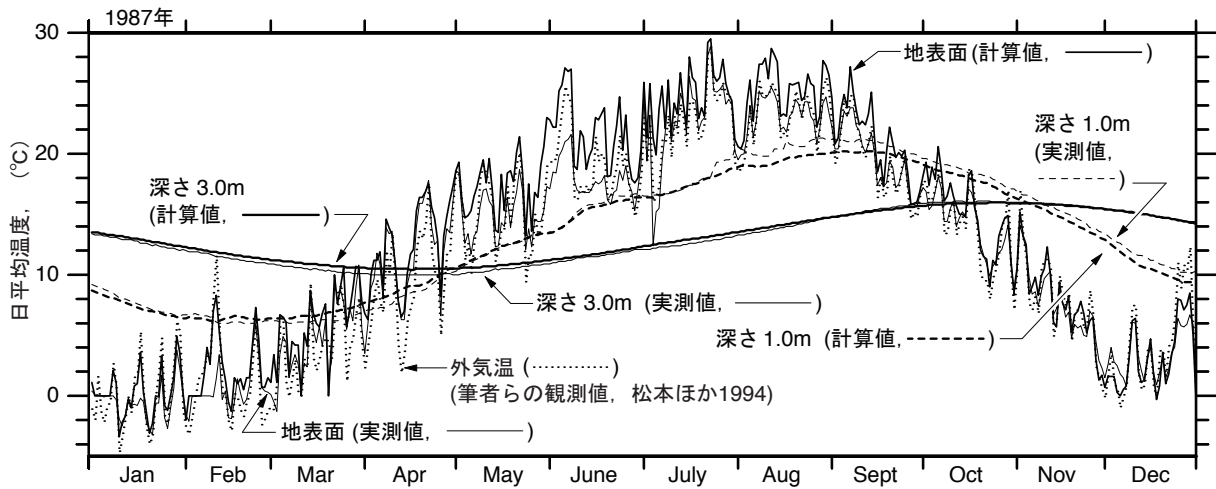


図2 生成した日平均地中温度と実測値の比較(1987年1月1日～12月31日の日平均値, 仙台)

2章の2.2節で述べたように、計算プログラムは日平均値レベルの妥当性の確保を目標に作成されたものであって、特別の計算結果の妥当性には最初からあまり期待していない。実測結果とプログラムによる推定結果を比較すると、1章で述べた林らの知見[3]から予想されたことではあるが、やはり地表面温度の照合が相対的に悪く、実測値と推定値の差は最大で6Kに達する。しかし、積雪の影響で0°C付近の地表面温度が記録されている1月から2月前半の地表面温度変動は予想以上の照合を示している。このことは、二宮・赤坂らの積雪の推定法[6]の妥当性の傍証となる結果といえよう。

日平均データにおける推定誤差(RMSE)は、地表面、深さ1m、3mの順に、2.2、0.6、0.3Kである。浅い部分ほど照合精度が劣るのは、地表面の日射吸収率 $a$ 、放射率 $\varepsilon$ 、蒸発比 $k$ を定数扱いしていることや、式(4)における $T_s^4$ の項の扱い方から考えて当然の結果であろう。しかし、実用的なデータ生成という目標から考えて、作成したプログラム GTWin は十分な精度の日平均データを与える妥当なものと思われる。

この結果から、「プログラム GTWin は、地盤の土質構成や地表面温度が適切ならば、日平均地中温度を±1K程度の精度で推定できるが、浅い部分の地中温度の推定結果にはもっと大きな誤差が含まれるため、深さ1m程度よりも浅い部分の推定には適用すべきではない」とまとめることができよう。

#### 4 土壌熱物性値データベースの作成とデフォルト値の検討

前章では、計算精度を検討した結果について述べたが、できる限り精度のよいデータを生成するために、地盤の土質構成を詳細に設定していた(表1参照)。このことが示唆するように、精度のよい地中温度データを生成するには、土壌の熱物性値を適切に設定することが肝要である。

そこで、信頼できる文献値をデータベースとして整備し、プログラムとリンクさせることにした。一方、十分なデータベースがあっても、計算対象地点の土質に関する情報なしでは、データベースからの設定値の選択そのものが困難となる。そこで、ある値で計算しておけば、大きな間違いは生じないであろうと考えられる、デフォルト値についても検討することにした。設計目的でプログラム GTWin を使用する場合、土質分布に応じた熱物性値を詳細に設定することはまれで、代表的な土質をひとつ選んで、

対応する物性値を与える場面が多いかも知れない。推奨設定値をプログラム内部に準備してデフォルトにしておけば、より便利であろう。

#### 4.1 文献調査に基づくデータベースの作成

データ収集の対象とした文献とデータ件数を表 2 に示す。

表 2 調査対象文献とデータベースの収録データ数

調査の対象とした文献		
(1)	ASHRAE: 1982 ASHRAE Fundamentals handbook, 1982.	
(2)	ASHRAE: 1985 ASHRAE Fundamentals handbook, 1985.	
(3)	ASHRAE: 1993 ASHRAE Fundamentals handbook, 1993.	
(4)	ISO: Thermal Performance of Buildings – Heat Transfer via the Ground – Calculation Methods (ISO 13370), 1998.	
(5)	J.E. Bose et al: Design/Data Manual for Closed-Loop Ground Coupled Heat Pump Systems, ASHRAE, 1985.	
(6)	H.S. Carslaw and J.C. Jaeger: Conduction of Heat in Solids, 2nd Ed., Oxford at the Clarendon Press, 1959.	
(7)	J.R. Wily et al.: Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer, 3rd Ed., John Wily and Sons, 1984.	
(8)	渡辺荘児, 中島康孝, 大橋一正ほか: 蓄熱材料における土壌の熱的特性に関する研究 (3)/(4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.581-582/pp.755-756, 1982/1983.	
(9)	空気調和・衛生工学会編: 空気調和・衛生工学便覧, II, 1981.	
(10)	日本建築学会編: 建築設計資料集成, 2, 1960.	
(11)	渡辺要編: 建築計画原論, II, 1965.	
(12)	土壌物理制性測定法委員会編: 土壌物理性測定法, 養賢堂.	
データ件数 (総数 142 件)		
普通土: 16 件	シルト質土: 11 件	ローム土: 26 件
砂・石: 33 件	粘土: 17 件	砂質土: 22 件

データ総数は 142 件である。データは、①整理番号、②土質、③熱伝導率、④容積比熱、⑤出典・注釈 (含水率などの細かな情報も含む) をレコード項目として、ひとつのデータベースファイルとして整備した。これらのレコードはライトプロテクトされ、ユーザが変更することはできないが、143 件目以降には逐次、ユーザ定義のデータを追加登録することができる。

データベースエンジンは Microsoft<sup>®</sup> Access Database Engine であり、プログラム GTWin から呼び出して引用したり、ユーザ定義のデータならば、GTWin 上で編集することができる。

なお、収集データの熱拡散率は概ね  $0.20 \sim 0.80 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  の範囲の値であった。

#### 4.2 土壌熱物性デフォルト設定値の検討

デフォルトの推奨値を得るため、熱拡散率を  $0.20 \sim 0.80 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  の範囲で 0.05 ごとに变化させた計算を 15ヶ年分を行い、観測地中温度の平年月別統計値 [9] の明らかな 9 都市に当てはめて、月別地中温度と年平均地中温度の差の RMSE が最小となる熱拡散率を調べた<sup>注6</sup>。

<sup>注6</sup> 文献 [9] には、旭川、札幌、仙台、東京、大阪、徳島、広島、福岡、熊本の 9 都市の他、名古屋、新潟のデータが記載されているが、データの信頼性に疑問があるため、検討対象から除外した。

なお、9 都市のデータは 1941 年以前に気象台で観測された、地表面、深さ 0.5m, 1.0m, 2.0m, 3.0m の温度を月別平年値と年平均値に統計処理したものである。計算では 1981 年から 15ヶ年の気象データに基づいて対応する深さの地中

図 3 に RMSE と熱拡散率の関係を示す。

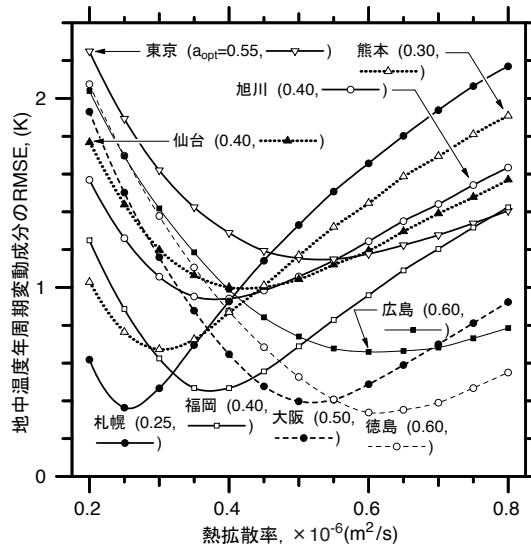


図 3 地中温度実測値を用いた土壌熱物性値の同定結果

都市によって RMSE の最小値は様々であるが、最大でも 1.2K 程度である。RMSE が最小となる熱拡散率は、 $0.25 \sim 0.60 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  の範囲に分布し、別途、文献調査より予測した通りであった。全国共通のデフォルトとしては、 $0.45 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  (例えば、 $\lambda = 1.45 \text{W}/(\text{mK})$ ,  $C_e = 3.22 \text{MJ}/(\text{m}^3\text{K})$ ) が妥当であろう。松尾らはかつて、本節で述べた計算理論よりも単純な伝熱モデルを用いて同様の検討を行ったが [10]、この値はそこで得られた値と概略一致している。また、表 2 に記した文献 (4) に掲載された Silt/Clay(シルト質/粘土質) の物性値にも近い。

国際的な動向として、表 2 の文献 (4) は、地下室の簡易熱負荷計算法のデファクトスタンダードと考えられつつあり、そこで述べられている物性値がオーソライズされることは大いにあり得る。そこで、文献 (4) の値をデフォルトとすることにした。

すなわち、「熱伝導率  $\lambda = 1.5 \text{W}/(\text{mK})$ 、容積比熱  $C_e = 3.0 \text{MJ}/(\text{m}^3\text{K})$ 」がデフォルト値である。

## 5 計算プログラム GTWin の感度解析

### 5.1 解析の目的と評価指標の設定

地中温度計算プログラム GTWin には、土壌の熱物性に関して設定すべき計算条件が多い。そこで、これをユーザが変更した場合、どの程度、地中温度の計算結果に影響を及ぼすのか、すなわち、計算パラメータの感度について検討することにした。

GTWin は、任意の深さの地中温度データを時刻別に 1 年分生成できるプログラムであるため、感度解析の目的変数となる指標には様々なものが考えられる。ここでは、どの計算パラメータを操作すれば、地中温度の年変動性状がどのように変化するかについて注目し、GTWin の一般ユーザの助けになるような情報として整理することを感度解析の目的としている。そのため、深さ 1m の地中温度の①年平均値、②年変動の振幅、③地表面温度の年変動に対する時間遅れ(タイムラグ)を評価指標として取り上げる。

温度を推定している。都市のヒートアイランド化、ひいては地球温暖化の影響から、比較する気象自体にトレンドがあるはずである。これを多少なりとも基準化する意味で、年平均値を差し引いた値を分析することにした。

計算には GTWin を用い、計算条件は、地盤の熱物性値を除いて 3 章における設定と同様である。



## 5.2 計算パラメータの設定

GTWin でユーザがオプション設定できるパラメータである，①土壌の熱物性値（熱拡散率），②地表面の日射吸収率，③地表面の放射率，④地表面の蒸発比を検討の対象とする。

GTWin では，②～④を時変数として設定することも可能であるが，ここでは定数としての設定値のみを扱う。また，積雪の考慮の有無に関する設定については，5.5 で検討するので，ここでは取り上げない。

## 5.3 評価方法

対象地点を東京とし，EA 標準年気象データ（1995 年版）を用いた計算を行う。地盤モデルは，土質が 10m にわたって一様とし，これを 100 要素に分割する（GTWin のデフォルト設定）。また，地中 10m より下方も同様の土質を想定し，無限要素を適用する。

5.2 節で述べた計算パラメータの設定条件を表 3 に示す。

表 3 感度解析に用いる計算パラメータの設定

パラメータ	水準 1	水準 2	水準 3
熱拡散率 $\kappa$ ( $\times 10^{-6}$ m/s)	0.2	<b>0.5*</b>	0.8
日射吸収率 $a$ (-)	0.4	<b>0.7*</b>	0.9
放射率 $\varepsilon$ (-)	0.3	0.6	<b>0.9*</b>
蒸発比 $k$ (-)	0.3	<b>0.6*</b>	0.9

\* 太字は標準設定を表す。

4 種類のパラメータに対してそれぞれ 3 つの水準を設定し，そのうち 1 つを標準と考える。感度を調べるために 1 つの種類のパラメータを変更するときは，他の種類のパラメータは標準設定を取るものとする。すなわち，実験計画法でいう交互作用を調べるような設定はここでは行わない。なお，標準設定は GTWin のデフォルト設定値そのものである。表中，熱拡散率の欄には，具体的な土壌の名称を挙げていない。これは，GTWin の持つデータベースファイルから想定された地盤の熱物性値として取り得る下限と上限であって，特定の土壌を表すものではない。GTWin では，土壌の熱物性値は，熱伝導率と容積比熱の組として与えるが，容積比熱を  $3.0 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s に固定し，熱拡散率に見合った熱伝導率を設定するものとする。簡単な数理モデルによれば，5.1 節で述べた評価指標②と③は，熱拡散率の関数で表されることが想定されるため，熱伝導率と容積比熱の組み合わせは任意で構わないはずである。

評価指標①の年平均地中温度は計算結果に基づき，簡単に得られる。②の振幅の算出は，地中 1m ではほとんど日周期変動成分がなくなり，年変動の経時曲線が概ね正弦波と見なせるはずであるため，日平均温度の年間最高・最低値の差の半分に相当すると考える。また，参考のため，MEM スペクトルを計算し，その年周期成分のパワー[ 8 ]も計算する。③の地表面温度に対する時間遅れは，相互相関係数を計算し，その最大値から判定する[ 8 ]。

## 5.4 評価結果と考察

表 3 の計算パラメータを変化させた場合の各評価指標の値を表 4 にまとめて示す。表中，年周期パワーの欄は，MEM スペクトルの計算結果に基づくものである。但し，深さ 1m の地中温度変動自体が，正弦波に極めて近く，サンプルとしたデータも 1 年分に限ったため，スペクトルの推定精度は十分とは言えず，参考値と理解されたい。また，土壌熱物性値の影響の欄における変動比とは，地表面温度の年周

期成分のパワーに対する地中温度のパワーの比の平方根であり，両者の振幅の比に相当するが，この値もまた参考値である。

表 4 パラメータに対する感度の評価結果

評価項目	水準 1	水準 2	水準 3
土壤熱物性の影響	$0.2 \times 10^{-6} \text{m/s}$	$0.5 \times 10^{-6} \text{m/s}$	$0.8 \times 10^{-6} \text{m/s}$
年平均値 (°C)	16.0	16.1	16.2
年周期パワー (°C <sup>2</sup> h)	11.9	33.0	67.5
変動比 (-)	0.06	0.12	0.17
年変動の振幅 (°C)	8.5	9.6	10.4
時間遅れ (day)	29.0	23.7	20.5
日射吸収率の影響	0.3	0.7	0.9
年平均値 (°C)	14.1	16.1	17.9
年周期パワー (°C <sup>2</sup> h)	3.1	33.0	355.9
年変動の振幅 (°C)	9.9	9.6	9.8
時間遅れ (day)	21.7	23.7	24.6
放射率の影響	0.3	0.6	0.9
年平均値 (°C)	18.4	17.2	16.1
年周期パワー (°C <sup>2</sup> h)	5.2	16.7	33.0
年変動の振幅 (°C)	8.8	9.4	9.6
時間遅れ (day)	23.7	23.7	23.7
蒸発比の影響	0.3	0.6	0.9
年平均値 (°C)	17.4	16.1	15.3
年周期パワー (°C <sup>2</sup> h)	95.0	33.0	1.8
年変動の振幅 (°C)	10.3	9.6	9.7
時間遅れ (day)	23.7	23.7	23.6

#### 5.4.1 年平均温度

表 4 によれば，土壤の熱物性値はほとんど年平均地中温度に影響しない。一方，日射吸収率，放射率，蒸発比は大きく影響する。日射吸収率が高い，放射率が小さい，あるいは蒸発比が小さいと年平均地中温度が高くなる。図 4(a) によれば，日射吸収率による変化が比較的大きく，設定次第で 3~4°C 変化することが判る。

#### 5.4.2 年変動の振幅

表 4 によれば，地中温度の年変動の振幅に及ぼす日射吸収率の影響は明確ではない。しかし，図 4(b) に示す通り，土壤熱物性値，放射率，蒸発比が及ぼす影響は，明確である。特に，土壤熱物性値の及ぼす影響は相対的に大きく，設定したパラメータの範囲で約 2.0°C の差に至る。

地中温度の年変動を単一の正弦波と考える簡単な数理モデルによれば，地盤の熱拡散率を  $D$  とするとき，地表面温度の振幅  $A_0$  に対するある深さの地中温度の振幅  $A$  の比  $A/A_0$  の対数は， $-1/\sqrt{D}$  に比例する。図 4(c) は  $-1/\sqrt{D}$  と  $\ln(A/A_0)$  の関係を示したものであるが，ほぼ直線関係にあり，土壤の熱物性値による地中温度年変動の振幅の相違は，数式である程度予測可能なことが判る。

### 5.4.3 時間遅れ

表 4 より、地表面温度変動に対する地中温度変動の時間遅れが土壤の熱拡散率に依存することは言うまでもないが、他のパラメータの中では唯一、日射吸収率が時間遅れに多少影響を及ぼしている。但し、日射吸収率による時間遅れの差異は 3 日程度であり、熱拡散率による差異よりは小さい。

先の数理モデルによれば、時間遅れは  $1/\sqrt{D}$  に比例するはずである。図 4(d) は時間遅れと  $1/\sqrt{D}$  の関係をプロットしたものである。この場合も、数理モデルとの対応が取れており、土壤の熱物性値による地中温度の時間遅れの相違もまた、数式である程度予測可能と言える。

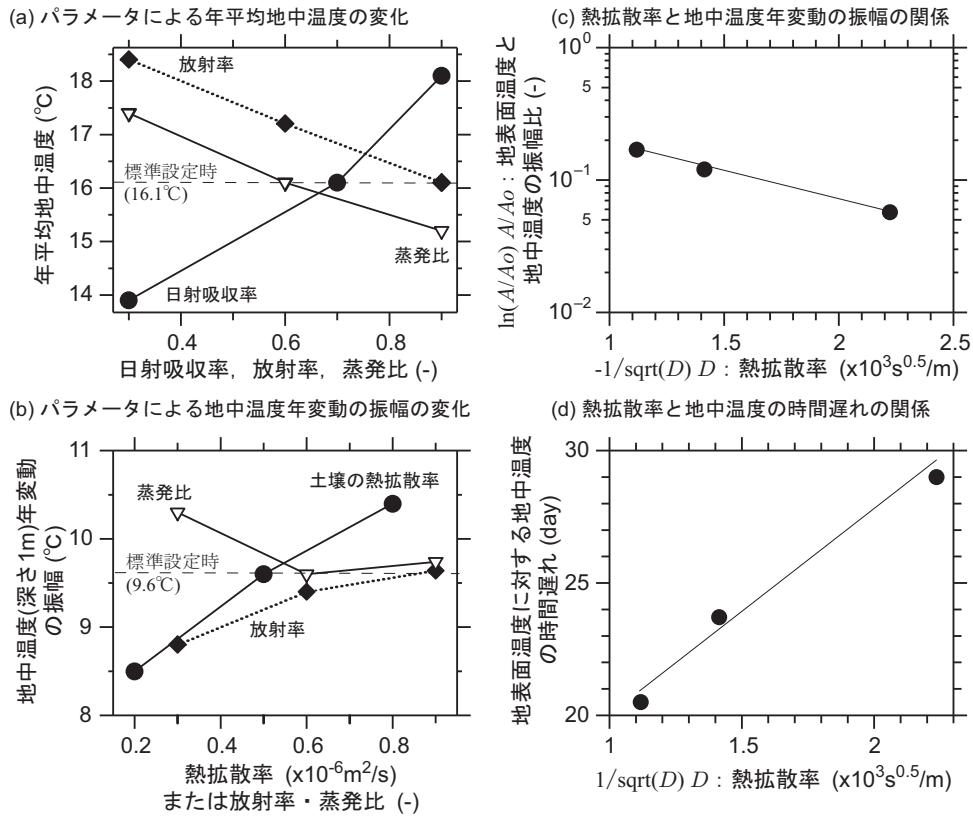


図 4 パラメータによる地中温度計算値の変化

### 5.5 評価結果のまとめ

以上で明らかとなった計算パラメータと評価指標との関係を表 5 にまとめて示す。この表が GTWin を使用する際の計算条件設定の参考になれば幸いである。

表 5 計算パラメータが GTWin による地中温度データ生成に及ぼす影響

深さ 1m の地中温度の...	年平均値	年変動の振幅	時間遅れ
熱拡散率	—	1°C 上昇 0.2 × 10 <sup>-6</sup> m/s の増分につき	9 日分短縮 0.4 × 10 <sup>-6</sup> m/s の増分につき
日射吸収率	2°C 上昇 0.3 増分につき 1°C 低下	—	1 日分伸長 0.2 増分につき
放射率	0.3 増分につき 1°C 低下	1°C 上昇 0.6 増分につき 0.5°C 低下	—
蒸発比	0.3 増分につき	0.6 増分につき	—

## 6 計算例-I 積雪の有無による計算結果の相違について

1章(計算理論)の中で、地表面における積雪をある程度考慮できるような簡単な境界条件を示し、また、GTWinでは、積雪を考慮しないのがデフォルトではあるが、これを考慮するようにオプション設定できることを述べた。積雪を考慮するとしないとは、生成される地中温度データにどのような違いがあるのかは興味深い点なので、本章ではこのことに関する計算例を紹介する。

青森(1987年)のEA気象データを用いてGTWinを実行した。要素分割は密(深さ10mあたり100分割)で無限要素を適用した。また、土壌、地表面の熱物性値の設定条件は、後掲の図5の中に記した通りである。

計算結果を図5,図6に示す。前者は代表的な深さの地中温度の経時変化、後者は月別地中温度分布である。図5によれば、積雪の考慮の有無は深さ3mの温度にはあまり影響しないが、深さ1mにおける冬季の変動には比較的大きく影響しているのが判る。

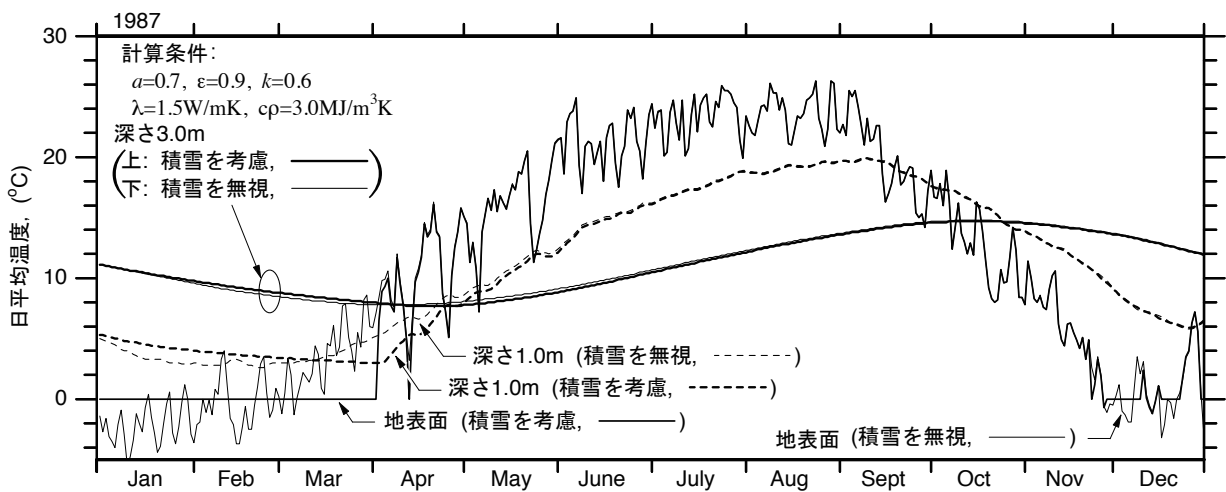


図5 積雪のモデル化の有無による地中温度データ生成結果の相違(1987年,青森)

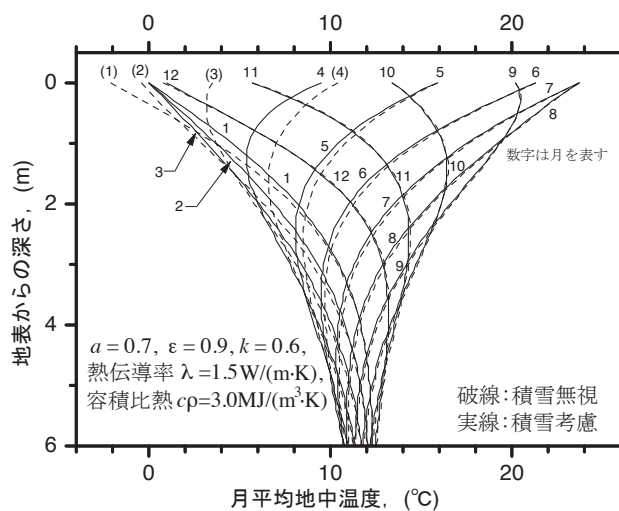


図6 積雪のモデル化の有無による月別地中温度分布の相違

また、図 6 によれば、積雪モデルの有無は、特に 1 月～4 月における深さ 3m 以浅の温度分布に顕著な差となって現れている。積雪寒冷地における地表面付近の温度の推定は、積雪を考慮するのとしないのとでは大きく異なることが判明した。筆者は、この場合、積雪を考慮した計算の方が現実をよりよく再現しているはずと考えるが、積雪下の地表温度が氷点下をかなり下回ることが知られている地域において、凍結深度の検討のためにデータを生成するような場合には、積雪を考慮する設定は、むしろ好ましくないと考えられる。これが、積雪の影響を考慮しない方をプログラム GTWin におけるデフォルト設定とした理由である。

## 7 計算例-II 地中温度の経年変化について

EA 気象データは、既に 20 年以上の特別値が入手可能であるが、GTWin は単年の計算を前提にしているため、一般ユーザーは残念ながら、数年以上連続する地中温度データを生成することができない。

筆者らが独自に分析した範囲でも、例えば、1981 年から 2005 年までの 25 カ年の EA 気象データは様々な点で地球温暖化傾向（あるいは広域的な気候変動）を反映している。したがって、その影響は地中温度にも及ぶはずである。

そこで本章では、特別計算を 1981 年から 2005 年まで東京（地番 3630）について実施し、1m, 2m, 4m の地中温度の年平均値のトレンドを年平均外気温のそれと比較した結果を紹介し、締めくくりとする。

使用したプログラムは、GTWin をその開発者の責任において改造したものであり、計算条件（パラメーター）は GTWin と共通している。それらの設定は、表 6 の通りである。

表 6 計算例-II における計算条件の設定

計算条件の種類	設定項目	設定値など
地盤モデル (ローム土を想定)	層の厚さ	単層 10m+ 無限要素
	熱伝導率 ( $\lambda$ )	1.5W/(m·K)
	容積比熱 ( $c\rho$ )	3.0MJ/(m·K)
FEM の要素	分割数	100 要素/10m (要素長 0.1m 一定)
地表面モデル	対流熱伝達率 ( $\alpha_c$ )	時変 (風速の関数)
	日射吸収率 ( $a$ )	0.7 (裸地想定, 時不変)
	放射率 ( $\varepsilon$ )	0.9 (裸地想定, 時不変)
	蒸発比 ( $k$ )	0.6 (仮定値, 時不変)
	積雪の考慮	あり
その他	気象データ	EA 気象データ (東京, 1981-2005)
	初期値の設定	全節点一定 (1981 年の年平均気温)
	助走計算	1981 年 9 月～12 月

特別の地中温度データを月平均値処理した計算結果を図 7 に示す。経時曲線には、地中温度の年周期性状の特徴である、1) 深さに伴う振幅の圧縮、2) 深さに伴う時間遅れの増加が明確に現れているが、深さ 4m に至っても年周期成分よりも短周期の成分が含まれており、単純な正弦波状ではないところが興味深い。

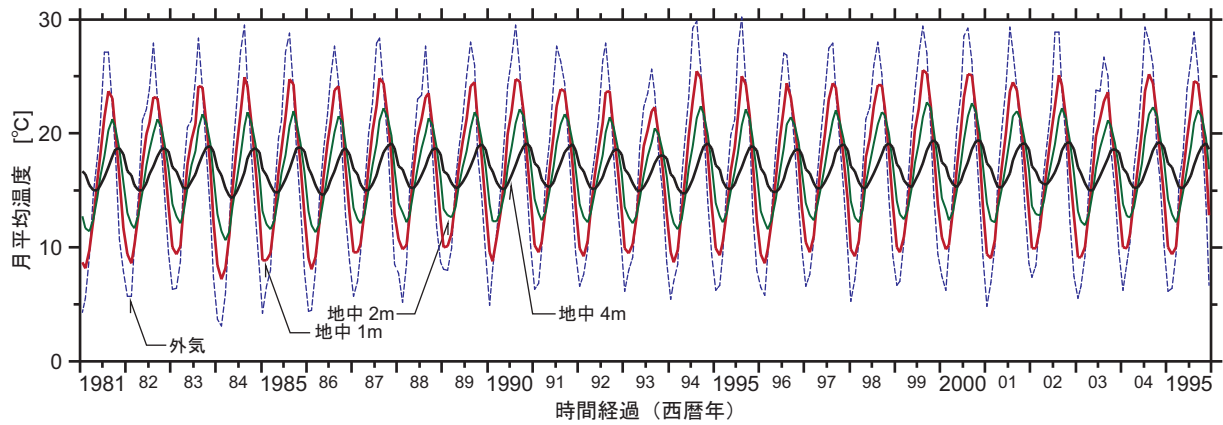


図7 月平均地中温度の長期変動 (1981年～2005年, 東京)

図8は、特別地中温度を単純に年平均値にまとめ、年別にプロットしたものである。特段、周期成分のフィルタリングや移動平均化の分析手法を適用したものではないが、時間との相関は低いものの、外気温と同様の上昇傾向が認められる。その傾向は、地表面からの深さとともに小さくはなるが、深さ4mでも約2 /100年の上昇という結果となった<sup>注7</sup>。

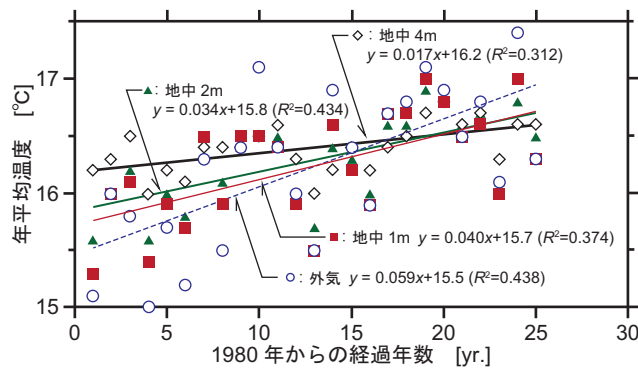


図8 東京における年平均地中温度のトレンド

<sup>注7</sup> 25年間のデータの回帰直線の外挿であるため、学術的には論外であることを承知で、判り易さのために敢えて100年をベースにした。

なお、東京以外に、札幌、秋田、仙台、大阪、鹿児島を対象に同様の計算を行い、こうした分析を行ったところ、上昇程度は、土地々々で異なり、ここに示した東京の例はむしろ小さい方で、鹿児島などの場合には、4 を超えるという結果を得ている[12]。

## 参考文献

- [ 1 ] D. B. Crawley, J. W. Hand and L. K. Lawrie: Improving the Weather Data Information Available to Simulation Programs, Proc. of Building Simulation '99, Vol.II, pp.529-536, The 6th Int'l IBPSA Conf.(BS99, Kyoto), Sept., 1999.
- [ 2 ] S. Matsumoto, H. Yoshino and H. Akasaka: A Program for Ground Temperature Data Generation Based on the Expanded AMeDAS Weather Data CD-ROMs, Proc. of Building Simulation '99, Vol.II, pp.869-876, The 6th Int'l IBPSA Conf.(BS99, Kyoto), Sept., 1999.
- [ 3 ] 林 徹夫: 水分移動を考慮した地表面・地盤内の伝熱解析に関する実験的研究, 文部省科研費研究成果報告書, 1990.3. 及び, 林 徹夫, 片山忠久, 塩月義隆, 堤純一郎, 張 晴原, 薛 虹: 地盤冷熱と自然換気を利用した住宅のパッシブクーリングに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.899-900, 1987.10.
- [ 4 ] K. Kimura: Scientific Basis of Air Conditioning, Applied Science Publishers, pp.93-94, 1977.
- [ 5 ] 近藤正純: 身近な気象の科学 - 熱エネルギーの流れ, pp.153-158, 東京大学出版会, 1987.
- [ 6 ] 二宮秀與, 赤坂 裕, 須貝 高, 黒木荘一郎: AMeDAS のデータを用いた時刻別日射量の推定法, 空気調和・衛生工学会論文集, 第 39 号, pp.13-23, 1989.2.
- [ 7 ] 例えば, G. Dhatt and G. Touzat: The Finite Element Displayed, John Wiley & Sons, 1984.
- [ 8 ] 松本真一, 吉野 博, 長友宗重: 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, 日本建築学会計画系論文集, 第 462 号, pp.22-31, 1994.8.
- [ 9 ] 渡辺 要編: 建築計画原論, III, 8 章 (気候と気候), p.125, 丸善, 1965.
- [ 10 ] 松尾 陽, 金 成完: 標準気象データを用いた地中温度の推定法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.709-710, 1986.8.
- [ 11 ] 松本真一: 25 年間の拡張アメダス気象データに基づく浅層地中温度の計算, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, (5), pp.121-124, 2014.9.
- [ 12 ] 松本真一: 25 年間の拡張アメダス気象データと付属プログラム GTWin による地中温度の計算例, 日本建築学会東北支部研究報告集 (計画系), 第 78 号, pp.17-20, 2015.6.