

# 地中温度の計算

EADatavnavi が計算対象とする地中温度は地表から深さが 10m 程度の不易層<sup>1)</sup>までの温度である。この深さまでの地中温度を形成する最大の要因は外界気象条件である。地中温度は、建築物の地下空間の温熱環境の形成に影響する<sup>2)</sup>から、外界気象データと同様に、地下空間の室温や暖冷房負荷の予測 [1]に必要な条件である。地盤面からの深さが増すにしたがって、地中温度の年間変動の振幅は小さくなり、外気温との位相のずれも大きくなるが、このような地中温度の変動特性を利用して、地中冷熱をパッシブクーリング<sup>3)</sup>の熱源として利用したりしている [3]。地中温度は建築環境に限らず農業生産物や植物の生育にも影響する。地盤は半無限個体であって熱抵抗、熱容量共に大きいので、周期定常に達するまでの地中温度の計算には、年間気象データを繰り返し用いる必要がある [4][7][8]。

地中温度は、地表面の対流熱伝達、日射熱・大気放射熱の吸収、放射熱の発散、蒸発・凝縮、及び土の熱物性<sup>4)</sup>、土の含水率、地下空間の使われ方、地下水流等の影響を受けて形成される。これらのうち、対流熱伝達には外気温と風速が、日射熱・大気放射熱の吸収には日射・大気放射が、放射熱の発散には地表面温度が、蒸発・凝縮には絶対湿度が関係する。外界気象データに関しては、EADatavnavi では、拡張アメダス気象データ (EA 気象データ) に収録されている年間気象データを用いている。EADatavnavi においてユーザーが設定できる計算条件は、土の熱物性値 (熱伝導率及び容積比熱)、地表面の日射吸収率、放射率、及び蒸発比<sup>5)</sup>である。土の熱物性値は深さ方向に異なる値を選べるように、日射吸収率、放射率、蒸発比は月別に与えることができるようにしている。以上において、ユーザーは、任意の値を入力してもよいし、デフォルト値 (推奨値) を使用してもよい。EADatavnavi では、地表面の対流熱伝達率は風速の関数 [2]として表し、時変係数の扱をしている。地表面は、草地、裸地のような自然状態だけではなく、アスファルトのような人工物に覆われていたり、雪に覆われていたりする<sup>6)</sup>こともあるので、これらの影響も評価できるようにしている。

## 1. 相当外気温<sup>7)</sup>と地表面温度の関係式 (地表面の境界条件を表す式)

- 1) 外界気象条件の影響が及ばず、温度が年間一定となる地表面からの深さをいう。
- 2) 地中温度は地下空間の温熱環境に影響を与えるが地下空間での人間活動も地中温度に影響する。地下空間での人間活動を考慮するには地下空間の形状を考慮した 2, 3 次元問題を解かなければならず、複雑な数値シミュレーションが必要となる。EADatavnavi は地下空間での人間活動は扱わず、地中温度を 1 次元伝熱問題として解いている。
- 3) 地中にクールチューブを通して冷気を導入したり、床下空間の冷気を利用したりすることをいう。
- 4) 土の物性値は色々な資料に掲載されているが、資料によって値はまちまちである。その理由は土の熱物性値が土の種類、比重、含水率等によって異なるからである。長期的に土の熱物性値を現場測定した研究事例 [6]もある。
- 5) 蒸発比とは、完全湿潤面を仮定するルイスの法則で算定される水分蒸発量を補正する係数。日射吸収率と放射率を標準的な値に設定したシミュレーションによると、蒸発比は 0.6 程度の値になるという [3]。
- 6) 拡張アメダス気象データには積雪深のデータは含まれていない。そのため、文献 [5]の方法により計算した日積雪深を用いている。雪の日射吸収率は小さく、その熱抵抗、熱容量は、地表面を外界から保護し防寒の役割を果たすため、地表面温度は雪がない場合に比べると高くなることが多い。
- 7) 日射、上向き及び下向き放射、地表面の潜熱移動 (蒸発凝縮による熱移動) を考慮し外気温を修正した温度と同じ次元を持つ値。

地表面が外界から受け取る  $p$  時の熱量  $q^p$  は次式で表すことができる。

$$q^p = \alpha_c^p (\theta_i^p - \theta_{si}^p) + aI^p + \varepsilon L_{\downarrow}^p - \varepsilon \sigma_b (T_{si}^{p-1})^4 + \frac{k\alpha_c^p H}{C_o} (x_o^p - x_{si}^{p-1}) \quad \dots(1)$$

式(1)において、右辺第 1 項は外気と地表面との対流伝達熱量、第 2 項は地表面が受ける日射熱取得、第 3 項は地表面が受け取る大気放射量、第 4 項は地表面が放散する（上向き）放射量、第 5 項は地表面が受ける潜熱量を表す。第 5 項ではルイスの関係式[物質伝達率=対流熱伝達率/湿り比熱]、及びこの関係式の補正係数としての蒸発比が導入されている。

熱量  $q^p$  はまた、 $p$  時の相当外気温度  $\theta_{sat}^p$  を用いて次式で表すこともできる。

$$q^p = \alpha_c^p (\theta_{sat}^p - \theta_{si}^p) \quad \dots(2)$$

式(1)、式(2)より、 $p$  時の相当外気温度  $\theta_{sat}^p$  を次式で表わす。

$$\theta_{sat}^p = \theta_i^p + \frac{aI^p + \varepsilon L_{\downarrow}^p - \varepsilon \sigma_b (T_{si}^{p-1})^4}{\alpha_c^p} + \frac{kH}{C_o} (x_o^p - x_{si}^{p-1}) \quad \dots(3)$$

ここに、

- $\theta_{sat}^p$  :  $p$  時の相当外気温度 (°C)
- $\theta_i^p$  :  $p$  時の外気温度 (°C)
- $a$  : 地表面の日射吸収率(-)
- $I^p$  :  $p$  時の水平面全天日射量(W/m<sup>2</sup>)
- $\varepsilon$  : 地表面の放射率 (=地表面の長波長放射吸収率) (-)
- $L_{\downarrow}^p$  :  $p$  時の下向き長波長放射量 (大気放射量) (W/m<sup>2</sup>)
- $\sigma_b$  : シュテファン・ボルツマン定数 (5.67×10<sup>-8</sup>) (W/(m<sup>2</sup>K))
- $\theta_{si}^p$  :  $p$  時の地表面温度 (°C)
- $T_{si}^{p-1}$  : ( $p-1$ ) 時の地表面温度 (K)
- $\alpha_c^p$  :  $p$  時の地表面の対流熱伝達率(W/m<sup>2</sup>K)
- $k$  : 蒸発比(-)
- $H$  : 水の蒸発潜熱 (J/kg)
- $C_o$  : 外気の湿り比熱 (J/kg<sup>2</sup>)
- $x_o^p$  :  $p$  時の外気の絶対湿度(g/kg<sup>2</sup>)
- $x_{si}^{p-1}$  : ( $p-1$ ) 時の地表面温度に対する飽和絶対湿度(k/kg<sup>2</sup>)

水の蒸発潜熱  $H$  は式(4)に、外気の湿り比熱  $C_o$  は式(5)による。

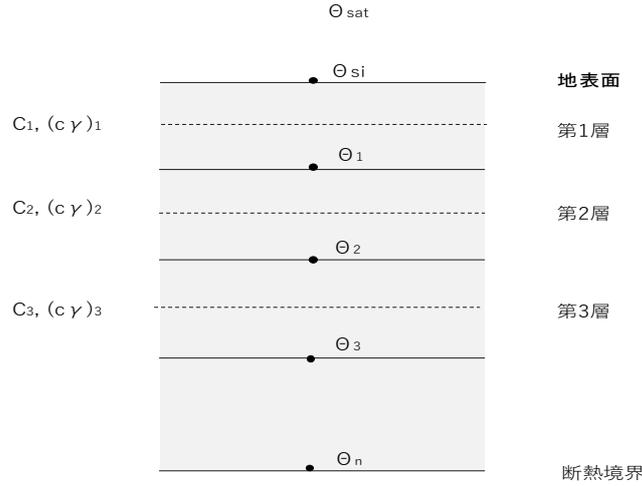
$$H=1996.04664+1.846T_{si}^{p-1} \quad \dots(4)$$

$$C_o=1004.6+1.846x_o^p \quad \dots(5)$$

式(1)において、 $p$  時の外気温度、 $p$  時の水平面全天日射量、 $p$  時の大気放射量、 $p$  時の絶対湿度は、外界気象データとして与えられる。しかし、 $p$  時の時点では地表面温度及び地表面温度に対する飽和絶対湿度は未知数のため、 $p$  時の 1 ステップ前 ( $p-1$ ) 時の値を用いている。

式(3)により、 $p$  時の相当外気温度を求めれば、地表面が  $p$  時に外部から受け取る熱の総量を、式(2)によって得ることができる。

## 2. 相当外気温度, 地表面温度及び地中温度の熱平衡式



$C_1$ と $(c\gamma)_1$ は, 第1層の熱コンダクタンス( $W/m^2K$ )と熱容量( $J/m^2K$ )で, 第1層の土の熱伝導率を $\lambda$  ( $W/mK$ ), 容積比熱を $c \times \gamma$  ( $J/m^3K$ ), 厚さを $\ell_1$ (m)とすると,  $C_1 = \lambda / \ell_1$ ,  $(c\gamma)_1 = c \times \gamma \times \ell_1$ で表される。第2層以下も同様である。

図1 相当外気温度, 地表面温度, 及び各層の地中温度及び熱物性値(熱コンダクタンス, 熱容量)の定義

図1において,  $p$ 時の地表面温度 $\theta_{si}^p$ の熱平衡式は次式となる ( $\tau$ は計算時間間隔( $\tau = 3600s$ ))。

$$\tau\{\alpha_c^p(\theta_{sat}^p - \theta_{si}^p) - C_1(\theta_{si}^p - \theta_1^p)\} = (c\gamma)_{si}(\theta_{si}^p - \theta_{si}^{p-1}) \quad \dots(6)$$

$$-\{\tau(\alpha_c^p + C_1) + (c\gamma)_{si}\}\theta_{si}^p + \tau C_1 \theta_1^p = -\tau \alpha_c^p \theta_{sat}^p - (c\gamma)_{si} \theta_{si}^{p-1} \quad \dots(7)$$

$$\text{ただし, } (c\gamma)_{si} = (c\gamma)_1 / 2 \quad \dots(8)$$

第1層の温度 $\theta_1$ の熱平衡式は次式となる。

$$\tau\{C_1(\theta_{si}^p - \theta_1^p) - C_2(\theta_1^p - \theta_2^p)\} = (c\gamma)_{12}(\theta_1^p - \theta_1^{p-1}) \quad \dots(9)$$

$$\tau C_1 \theta_{si}^p - \{\tau(C_1 + C_2) + (c\gamma)_{12}\}\theta_1^p + \tau C_2 \theta_2^p = -(c\gamma)_{12} \theta_1^{p-1} \quad \dots(10)$$

$$\text{ただし, } (c\gamma)_{12} = (c\gamma)_1 / 2 + (c\gamma)_2 / 2 \quad \dots(11)$$

第2層～第 $(n-1)$ 層の温度についても, 同様に熱平衡式を定義することができる。

断熱境界の温度に関しては以下が成立する。

$$C_n(\theta_{n-1}^p - \theta_n^p) = 0 \quad \dots(12)$$

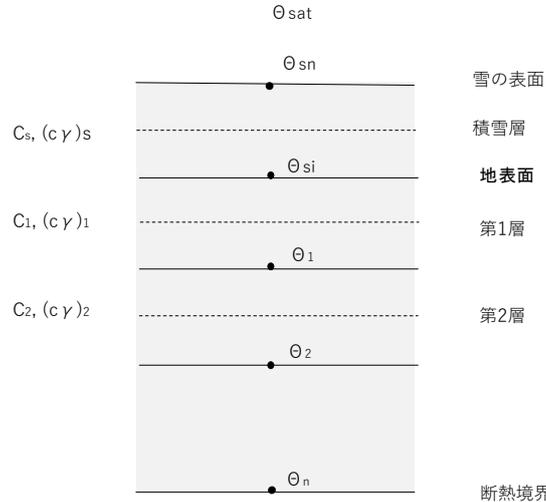
以上を行列式で表すと式(11)となる。

$$\begin{bmatrix} -\tau(\alpha_c^p + C_1) - 0.5(c\gamma)_1 & \tau C_1 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \tau C_1 & -\tau(C_1 + C_2) - (c\gamma)_{12} & \tau C_2 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \tau C_2 & -\tau(C_2 + C_3) - (c\gamma)_{23} & \tau C_3 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_{si}^p \\ \theta_1^p \\ \theta_2^p \\ \cdot \\ \theta_{n-1}^p \\ \theta_n^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tau \alpha_c^p \theta_{sat}^p - 0.5(c\gamma)_1 \theta_{si}^{p-1} \\ -(c\gamma)_{12} \theta_1^{p-1} \\ -(c\gamma)_{23} \theta_2^{p-1} \\ \cdot \\ -(c\gamma)_{n-1,n} \theta_{n-1}^{p-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots(13)$$

式(13)の連立方程式を逐次解くことにより, 地表面温度と任意深さの地中温度を求めることができる。

### 3. 積雪の扱い<sup>8)</sup>

図1の地表面の上に雪が積もっている場合は、雪の日射吸収率や雪の熱抵抗を考慮すべきである。図1に対して、地表面の上に雪が積もった状態を図2に示す。



$C_s$  と  $(c\gamma)_s$  は、積雪層の熱コンダクタンス ( $W/m^2K$ ) と熱容量 ( $J/m^2K$ ) で、雪の熱伝導率を  $\lambda_s (W/mK)$ 、容積比熱を  $c_s \times \gamma_s (J/m^3K)$ 、厚さを  $\ell_s (m)$  とすると、 $C_s = \lambda_s / \ell_s$ 、 $(c\gamma)_s = c_s \times \gamma_s \times \ell_s$  で表される。

図2 地表面に積雪がある場合

図2において、積雪層の表面温度  $\theta_{sn}^p$  の熱平衡式は次式で表わされる。

$$\tau \{ \alpha_c^p (\theta_{sat}^p - \theta_{sn}^p) - C_s (\theta_{sn}^p - \theta_{si}^p) \} = (c\gamma)_s (\theta_{sn}^p - \theta_{sn}^{p-1}) / 2 \quad \dots(14)$$

式(12)で積雪の熱容量を無視する ( $(c\gamma)_s = 0$  とおく) と、

$$\tau \{ \alpha_c^p (\theta_{sat}^p - \theta_{sn}^p) - C_s (\theta_{sn}^p - \theta_{si}^p) \} = 0 \quad \dots(15)$$

8) 雪の日射反射率は新雪か古雪か等、地表面に積もった雪の表面の状態異なる。いずれにせよ、積雪がある場合は地表面の日射反射率を雪の日射反射率に切り替えるべきである。EADDataNaviでは積雪有無を判定し、積雪がある場合は日射反射率を雪の値に切り替えている。なお雪の日射吸収率は積雪がない場合に比べるとかなり小さくなるが、その放射率は殆ど変わらない。雪の熱物性値（ここでは熱伝導率と容積比熱のことをいう）は文献によって大きく異なっている。その理由は雪のかさ比重（粉体の比重）が雪の熱物性値に強く影響するからで、一般にかさ比重が大きいほど熱伝導率は小さく、容積比熱は大きくなる。

地中温度の計算において、積雪の影響を考慮する方法はいくつか考えられる。その一つは積雪深にかかわらず積雪の場合は地表面温度を  $0^\circ C$  とする方法である。このような方法は、冬季中ずっと雪に覆われるような豪雪地域で用いることができるかもしれない。しかし積雪といっても量がそれほど多くなかったり、時々雪が降ったり消えたりするような地域では、積雪深に応じた熱抵抗と熱容量を地表面に付加するのが妥当であろう。EADDataNaviでは、積雪の熱抵抗のみを考慮し熱容量を無視した計算を行っている。その理由は、式(14)~(16)のように、熱容量を無視すれば図2の雪の表面温度  $\theta_{sn}$  を消去することができ、未知の温度が雪がない場合と同じになるからである。熱容量を考慮すると  $\theta_{sn}$  も連立して解かなければならなくなり、未知数が一つ増えて扱いが複雑になることを避けたことによる。積雪深は[5]の方法で計算している。その方法の具体例は本ホームページの「EA/EPW 技術解説」を参照のこと。

$$\theta_{sn}^p = \frac{1}{\alpha_c^p + C_s} (C_s \theta_{si}^p + \alpha_c^p \theta_{sat}^p) \quad \dots(16)$$

地表面温度 $\theta_{si}$ の熱平衡式は次式で表わされる。

$$\tau \{ C_s (\theta_{sn}^p - \theta_{si}^p) - C_1 (\theta_{si}^p - \theta_1^p) \} = \{ (c\gamma)_s + (c\gamma)_1 \} (\theta_{si}^p - \theta_{si}^{p-1}) / 2 \quad \dots(17)$$

式(17)でも式(14)と同じく、積雪の熱容量を無視する ( $(c\gamma)_s = 0$ とおく) と、

第1層以降の式は図1の場合と同じである。

式(16)を式(17)に代入して整理すると、次式が得られる。

$$\left[ \frac{\tau C_s^2}{\alpha_c^p + C_s} - \{ \tau C_s + \tau C_1 + (c\gamma)_1 / 2 \} \right] \theta_{si}^p + \tau C_1 \theta_1^p = - \frac{\tau C_s \alpha_c^p}{\alpha_c^p + C_s} \theta_{sat}^p - (c\gamma)_1 \theta_{si}^{p-1} / 2 \quad \dots(18)$$

さらに整理すると

$$- \{ \tau \left( \frac{C_s \alpha_c^p}{\alpha_c^p + C_s} + C_1 \right) + (c\gamma)_1 / 2 \} \theta_{si}^p + \tau C_1 \theta_1^p = - \frac{\tau C_s \alpha_c^p}{\alpha_c^p + C_s} \theta_{sat}^p - (c\gamma)_1 \theta_{si}^{p-1} / 2 \quad \dots(19)$$

積雪がある場合は、式(7)に代えて式(19)を用いればよい。式(13)の行列式でいえば、第1行を式(18)に置き換えればよく、それ以外は変わらない。

積雪が少なくなると雪の熱コンダクタンス  $C_s$  は大きくなる。式(19)において、 $C_s$  が大きくなるにしたがって式(19)は式(7)に近づくことがわかる。

## 4. EaDataNavi に組み込んだ地中温度計算プログラム GTWinx について

### 4. 1 GTWinx のユーザー・インターフェースの方針

- (1) 土・地盤、表面被覆の熱物性値のデフォルト値を設定する。土・地盤の熱物性値（熱伝導率 [W/(m・K)] と容積比熱 [MJ/(m<sup>3</sup>・K)]）は ISO13370[9] を引用し、そのなかの一つをデフォルト値として使用する。（表 1 参照）。ユーザーはデフォルト値をそのまま使用してもよいし、表 1 を参考にして、自ら値を入力してもよい。土・地盤の熱物性値は、地層の変化を考慮して深さ方向に数通りの値を入力できるようにする。
- (2) 地表面が人工物によって被覆されている場合も考慮し、それらの熱物性値（表 1 参照）を選べるようにする。ユーザーはこの中から選択してもよいし、もちろん、土・地盤の値のままとしてもよい。
- (3) 地表面の境界条件（地表面日射吸収率、地表面放射率、蒸発比）のデフォルト値（表 2 参照）を設定する。ユーザーはデフォルト値を使用してもよいし、それ以外の値を選択または入力してもよいようにする。
- (4) 地中温度を出力する地中深さは固定するが、ユーザーが、地中温度の計算結果の一覧から容易に、必要な深さの地中温度を残し、他を消去できるようにする。

### 4. 2 GTWinx のプログラム作成の方針

- (1) 数値計算法は非定常後退差分法（1次元）とする。
- (2) 深さ方向のメッシュ（格子点）は深さ 1.0m までは 0.1m 間隔。深さ 1.0m 以上は 0.25m 間隔とし、計算深さは 10m までとする。格子点の総数は、地表面 + 10 + 4×9 = 47 となる。
- (3) 地盤の熱物性値は 1m までは 0.1m 間隔、1.0m 以上は 1m 間隔で変えることができるように

する。

- (4) 積雪有無の判定及び積雪深の計算プログラムを組み込み、積雪のある場合は、積雪深に応じて雪の熱抵抗を表面熱伝達抵抗に加え、日射吸収率、放射率、蒸発比は、雪の値に置き換えることができるようにする<sup>9)</sup>。
- (5) 地表面の対流熱伝達率は時変係数とし、時間ステップ（1時間）毎に計算する。
- (5) 地中の境界条件として、深さ 10m に断熱境界を設定する。
- (6) 地盤温度の初期値として年間平均気温を与える。年間平均計算はプログラムで自動計算する。
- (7) 計算は地盤伝熱の非定常性を考慮して 2 年間実行し、2 年目の計算結果は収束しているとみなし（このことを確認した結果を図 3a,b に示した）、2 年目の計算結果を採択する。
- (8) 地表面温度、深さ 0.1m, 0.3m, 0.5m, 0.7m, 1~10m 深さの地中温度を出力する（深さ方向に 15）。温度の出力は、年間毎時刻値と日平均値とする。

表 1 地盤、及び地表面を覆う人工物の熱伝導率と容積比熱

カテゴリー	番号	名称	熱伝導率 W/(m・K)	容積比熱 MJ/(m <sup>3</sup> ・K)
地盤	1 <sup>*1</sup>	粘土またはシルト（沈泥）	1.5 <sup>*2</sup>	3.0 <sup>*2</sup>
	2 <sup>*1</sup>	砂または砂礫（されぎ）	2.0	2.0
	3 <sup>*1</sup>	岩盤	3.5	2.0
地表面を覆う人工物	4 <sup>*3</sup>	コンクリート	1.1	1.9
	5 <sup>*4</sup>	レンガまたは砂利	0.6	1.5
雪	6 <sup>*5</sup>	雪	0.598	—

\*1: ISO 13370<sup>2007</sup>[9]。

\*2: デフォルトとして使用する値。

\*3: 浦野, 中村, 建築環境工学（森北）の普通コンクリートより計算した概算値。

\*4: レンガ: 建築環境工学（森北）の赤レンガ

砂利: (社) 日本建築学会, 建築設計資料集成2, 丸善, 昭和42年5月, の砂利の概算値。

\*5: 1997 ASHRAE Fundamentals Handbook(SI) 36.4

表 2 地表面の日射吸収率, 放射率, 蒸発比

番号	地表面被覆	日射吸収率	放射率	蒸発比
1	草原、田園地、アスファルト舗装	0.9	0.9 <sup>*2</sup>	0.6 <sup>*3</sup>
2	砂利、コンクリート、舗石	0.7 <sup>*1</sup>		
3	雪	0.35 <sup>*4</sup>		

\*1: 0.7は日射吸収率のデフォルトとして使用する値。

\*2: 0.9は放射率のデフォルトとして使用する値。

\*3: 0.6は蒸発比のデフォルトとして使用する値。

\*4: (社) 日本建築学会, 建築設計資料集成1, 丸善, 昭和53年6月

9) 積雪時の日射吸収率は積雪がない場合より小さくなり、放射率は積雪の有無にあまり影響されない。一方、蒸発比に関しては積雪時、非積雪時のデータがないので何ともいえない。そのため、積雪時の放射率、蒸発比のデフォルト値は積雪がない場合と同じに設定しているが、プログラム上は、放射率、蒸発比についても積雪の有無によって異なる値を入力できるようにした。

## 5. GTWinx による計算例

図3, 図4に, GTWinx による計算例を示した。どちらも, 外界気象データとしては, 2010年魚津の拡張アメダス気象データ (EA 気象データ) 実在年を用いた。

図3 a,b では GTWinx による地中温度計算の収束状況を調べた。地中 10m までの計算を行うと, 地盤の熱伝導, 熱容量により, 外界条件の影響が地中 10m まで及ぶのに長期間を要するが, 図3によれば, 1年目の計算を助走期間とし, 2年目の計算結果を採択すれば, ほぼ収束した (周期的定常の) 結果が得られると見なして良いであろう。

図4 a~d では, 相当外気温度, 地表面温度, 及び深さ 0.1~0.7m までの地中温度の計算結果を示した。地表に近いほど温度の変動が大きい, 深さが増すにしたがって, 温度の振幅が小さくなり時間遅れが大きくなることわかる。

なお, 図3, 図4の計算に用いた条件は以下の通りである。

地表面の日射吸収率, 放射率, 蒸発比は, それぞれ, 0.7, 0.9, 0.6。積雪がある場合の日射吸収率は 0.35, 雪の熱伝導率は 0.598[W/mK]とした。

土の熱伝導率[W/mK], 容積比熱[MJ/m<sup>3</sup>]は, 深さ 0.5 まで 0.62, 3.32。0.5~1m は 0.67, 1.51。1~2 m は 0.76, 2.44。2~3m は 1.12, 1.76, 3~10m は 1.16, 2.90 とした。

### 【参考文献】

- [1] 赤坂裕, 床面および地下壁面の暖房負荷計算法, 空気調和・衛生工学会論文集, No.7, 1978年6月
- [2] 林徹夫, 浦野良美, 都市の地表面熱収支に関する研究 一土地被覆状況を考慮した福岡市における解析一, 九大工学集報, 第59巻第4号, 昭和61年8月
- [3] 林徹夫, 片山忠久, 塩月義隆, 張晴源, 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手法の検討, 九州大学総合理工学研究科報告, 第9巻第1号, 昭和62年
- [4] 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年8月
- [5] 二宮秀典, 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年2月
- [6] 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年8月
- [7] S. Matsumoto, H. Yoshino, 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 6<sup>th</sup> Int'l IBPSA Conf. (BS99, Kyoto), Sept., 1999
- [8] 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年9月
- [9] ISO 13370 : 2007, Thermal performance of building – Heat transfer via the ground – Calculation method



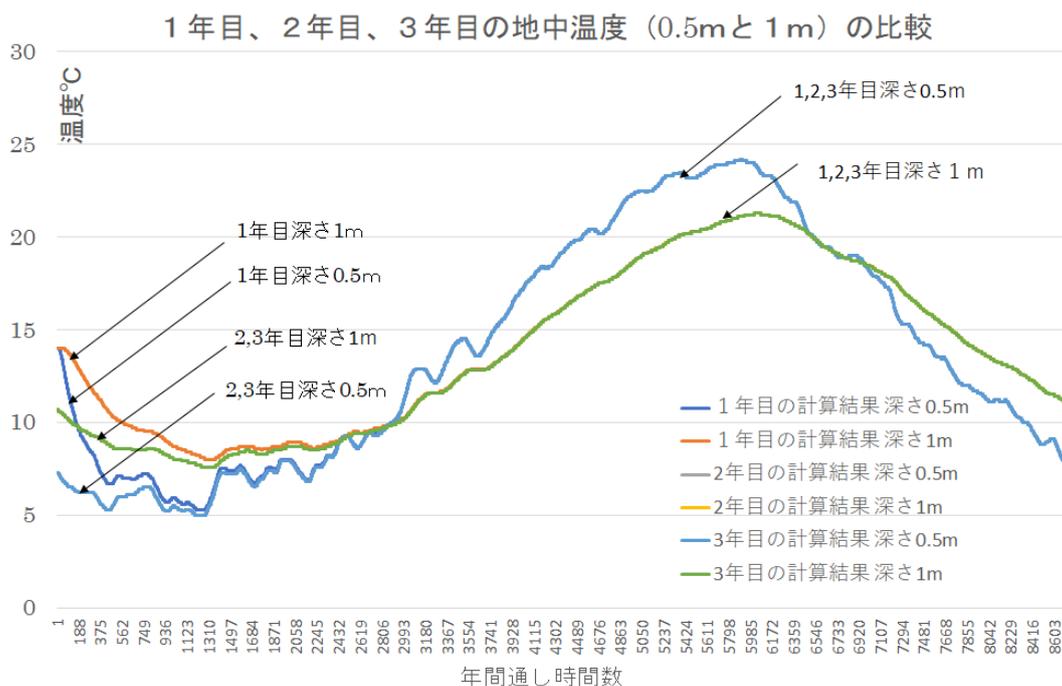


図3a 深さ0.5と1mの地中温度の収束状況（2010年魚津EA実在年による）

地中温度の初期値は年平均外気温としており、2010年魚津実在年では14.0°C。深さ0.5mでは1年目の3月頃まで、深さ1mでは1年目の4か月頃までの温度が2、3年目と外れているが、それ以降はほぼ重なっている。

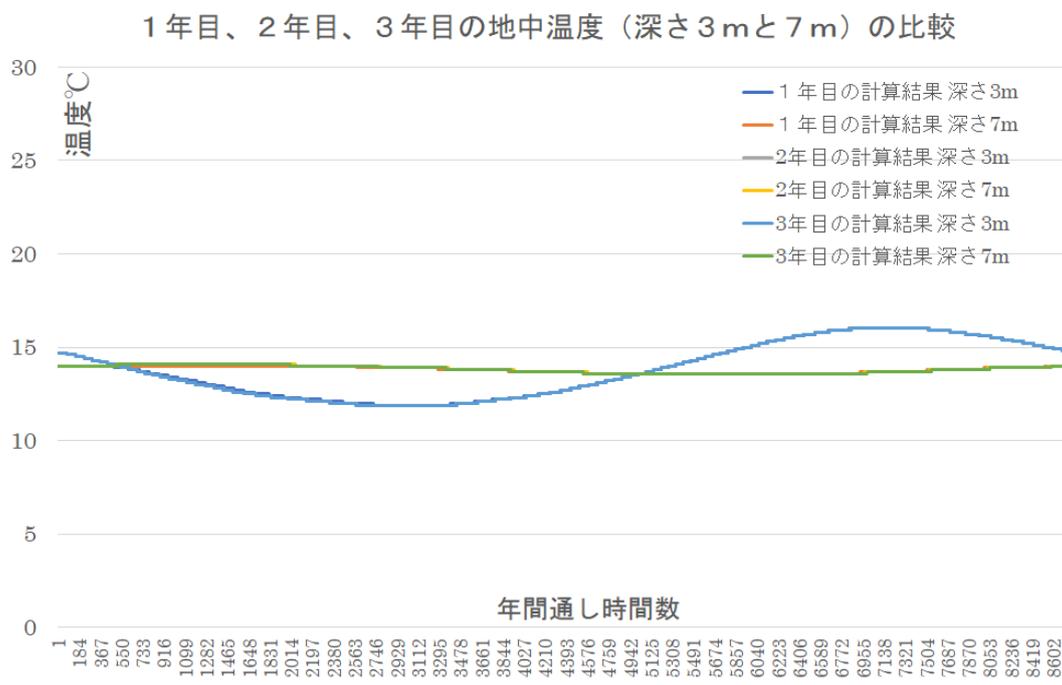


図3b 深さ3mと7mの地中温度の収束状況（2010年魚津EA実在年による）

1年目、2年目、3年目の深さ3mと7m地中温度はほぼ重なっている。

図3a, bより、2年目の地中温度は収束しているみなしてよいであろう。本計算による不易層の温度は13.7°Cで、地中温度の初期値とした年平均気温の14.0°Cとほぼ同じであった。地中温度の収束状況は初期値の取り方に影響さ

れるが、この計算からは、初期値として年間平均気温を与えるのは妥当であるという結果が得られた。

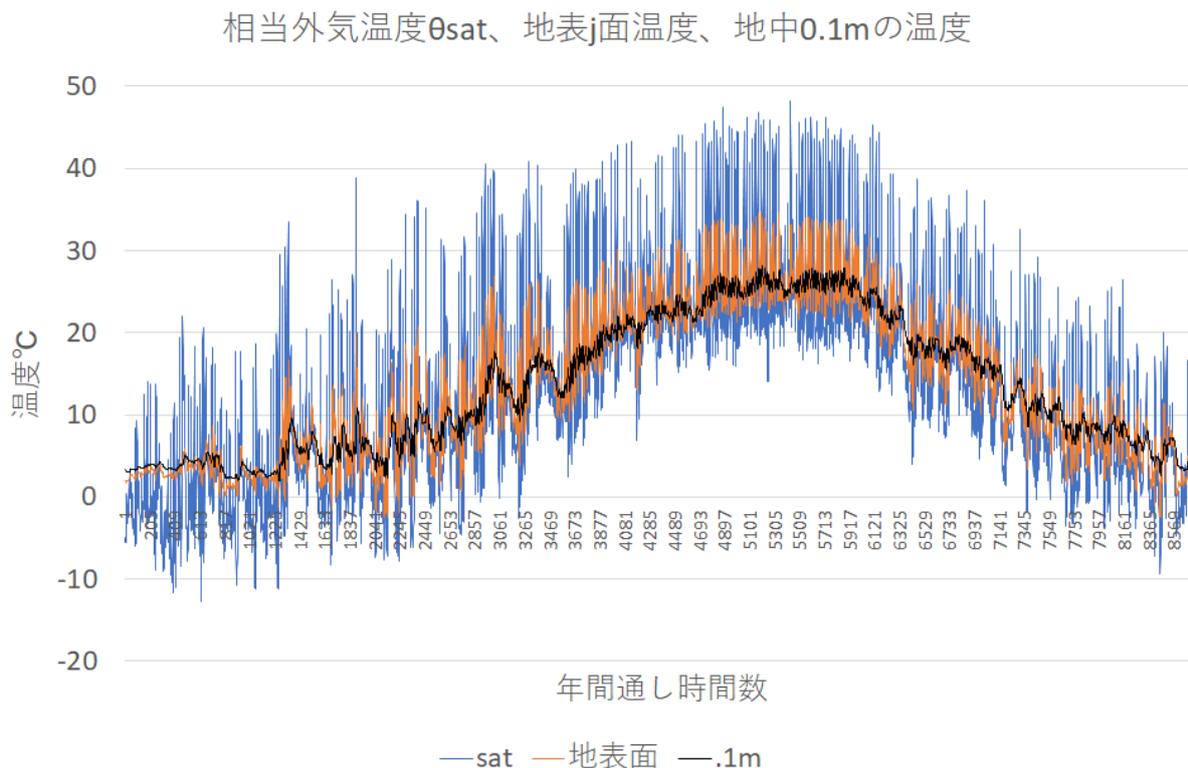


図 4 a 相当外気温度，地表面温度，深さ 0.1mの地中温度（2010 年魚津 EA 実在年による）

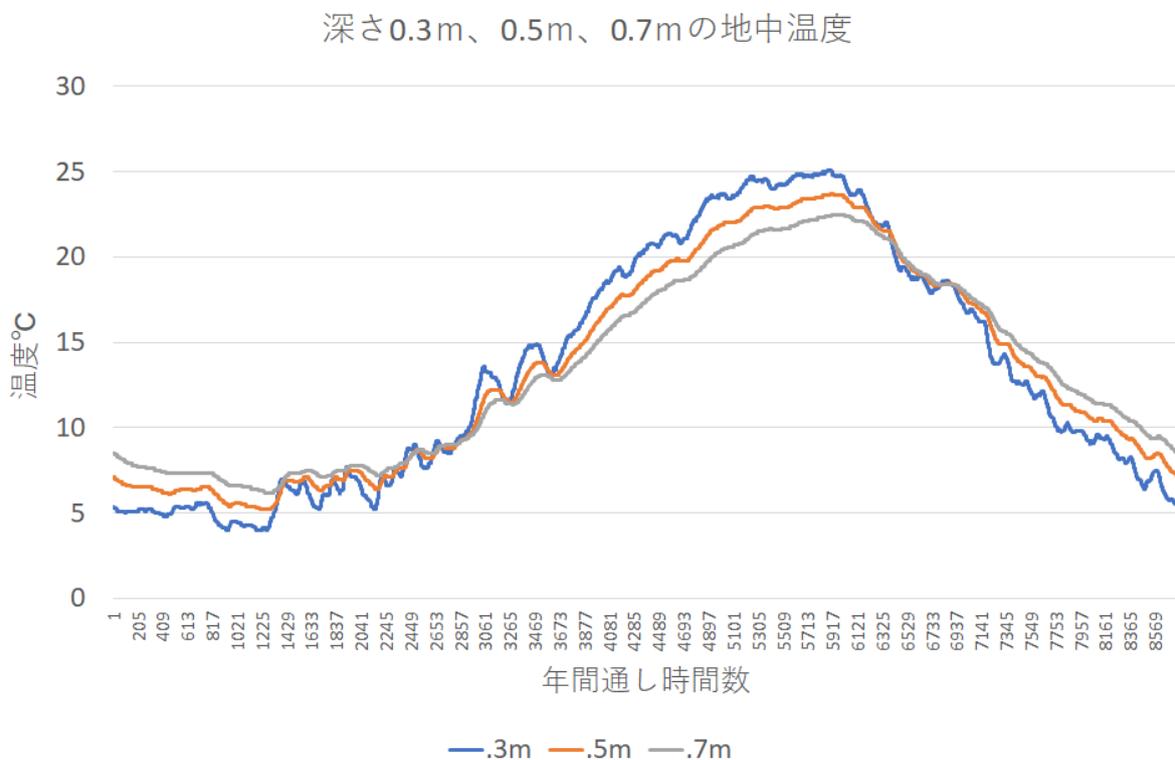


図 4 b 深さ 0.3m，0.5m，0.7mの地中温度（2010 年魚津 EA 実在年による）

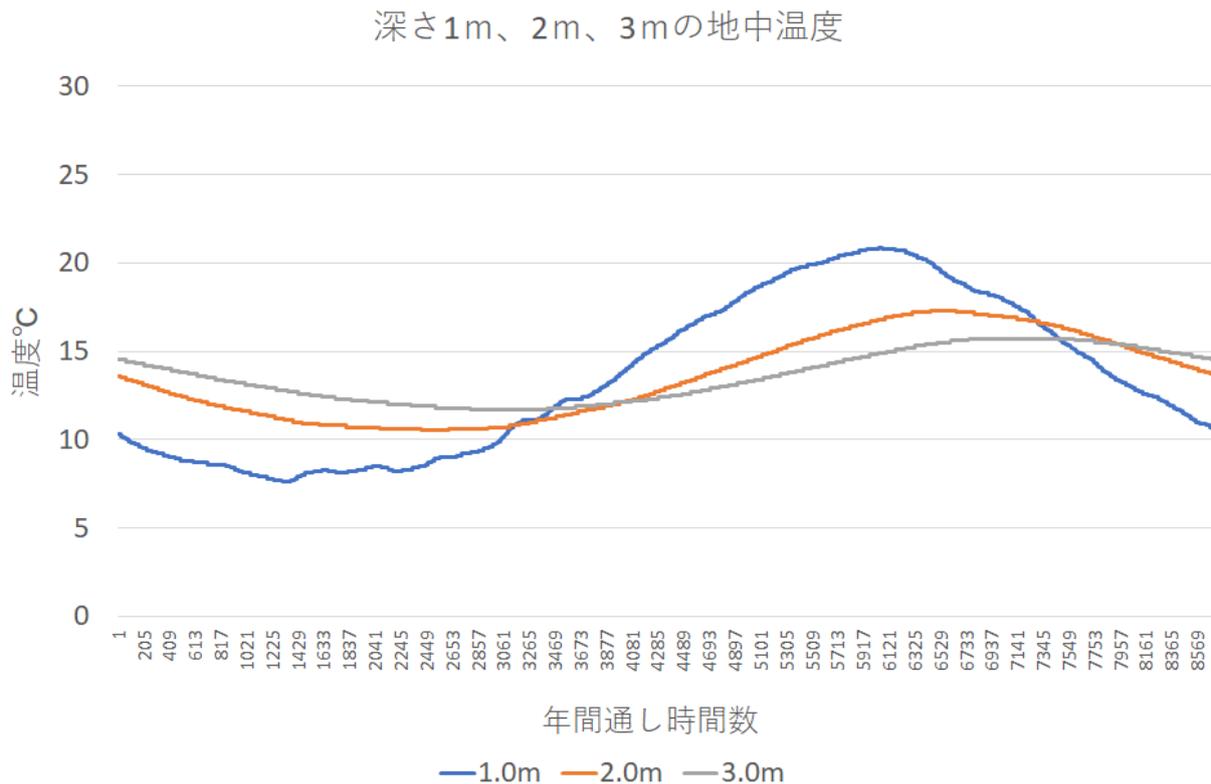


図4c 深さ1m, 2m, 3mの地中温度 (2010年魚津EA実在年による)

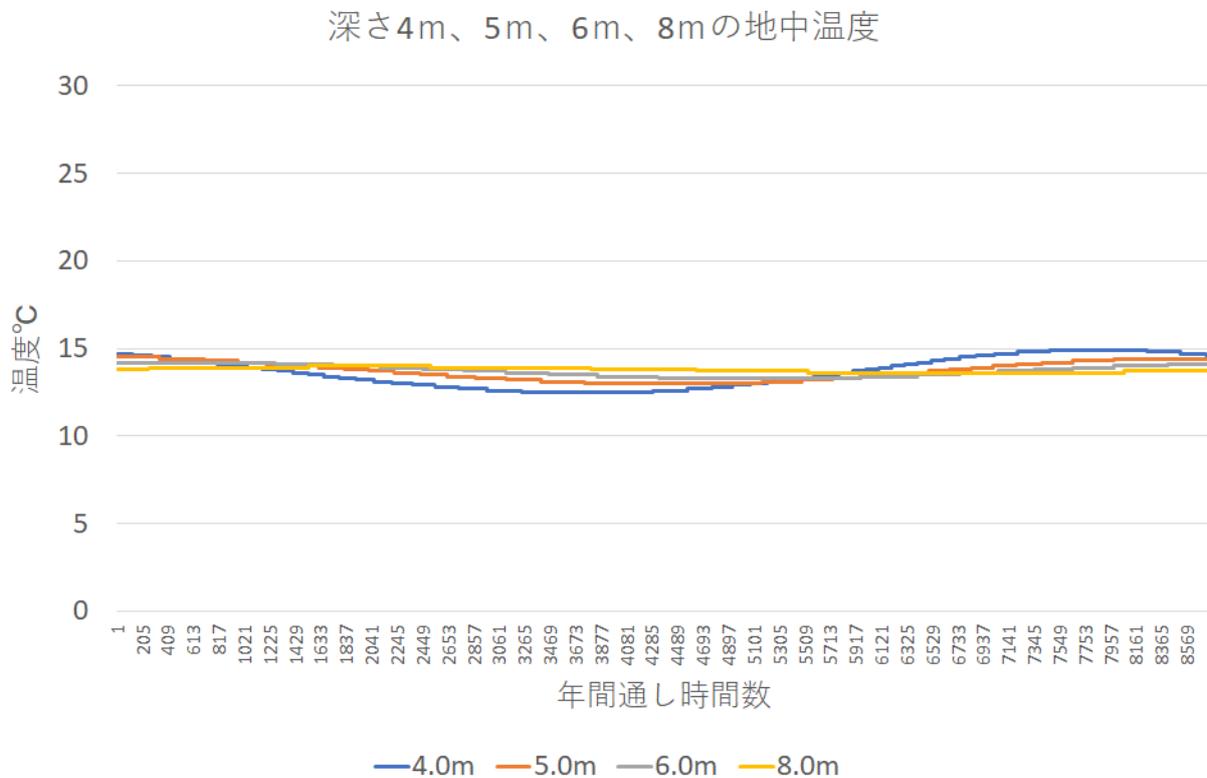


図4d 深さ4m, 5m, 6m, 8mの地中温度 (2010年魚津EA実在年による)