

Ⅲ-B 424

地中温度制御システム実用化に関する研究(2) — 境界条件の決定 —

中央大学 学生員 須磨 桂一
中央大学 学生員 井上 崇
中央大学 正会員 川原 陸人

1 はじめに

地中温度制御システムの実用化に伴い、いくつかの問題点が残されている。制御装置などのハード面での問題や解析モデルなどのソフト面での問題などが挙げられる。本研究ではソフト面での問題点である制御計算における境界条件を決定するために有限要素法を用いた非定常熱伝導解析を行なった。

制御計算における地表面側の境界条件は -3cm の温度と規定しているが実際にシステムの運営が始まると地上では競技が行なわれるため地表面付近で直接温度を観測することは困難である。従って観測可能な範囲で得られるデータを用いて地表面温度を推定しなければならない。そのためには地表面境界での未知パラメーターである熱伝達係数と日射吸収率を同定する必要がある。そして、観測可能な範囲で得られるデータと同定されたパラメーターを用いて直接観測が困難である地表面温度を推定した。さらに、リアルタイム制御に対応するために推定された地表面温度の未来における状態の予測を行なった。

有限要素解析を行なう際、同定では拡張カルマンフィルタ、推定・予測に関してはカルマンフィルタとARモデルを適用した。

2 解析モデル

2.1 有限要素法

2次元平面モデル解析での地盤内の温度分布を表現するために、以下のような2次元非定常熱伝導方程式を適用する。

$$\rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - \beta \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) = Q \quad (1)$$

ここに、 ρ は密度、 C_p は比熱、 β は地盤熱伝導率、 θ は温度、 Q は内部発熱量を表す。

$$\text{Dirichlet 境界条件} \quad \theta = \theta \quad \text{on} \quad S_1 \quad (2)$$

$$\text{Neumann 境界条件} \quad q = \hat{q} \quad \text{on} \quad S_2 \quad (3)$$

$$\text{初期条件} \quad \theta|_{t=t_0} = \hat{\theta}_0 \quad \text{in} \quad V \quad (4)$$

ここに、 S_1 は温度が規定される境界、 S_2 は温度勾配が規定される境界、 q は熱流束、 V は解析領域、 $\hat{\theta}_0$ は既知量を表す。熱流束 q は熱伝達係数 α 、日射量 g 、日射吸収率 γ 、外気温 θ_c を用いて以下のように記述できる。

$$\hat{q} = \hat{q}_\alpha + \hat{q}_\gamma \quad (5)$$

$$\hat{q}_\alpha = \alpha (\theta - \theta_c) \quad (6)$$

$$\hat{q}_\gamma = -\gamma g \quad (7)$$

以上のような境界条件と初期条件のもとで空間方向の離散化に有限要素法、時間方向の離散化にクランク・ニコルソン法を適用し以下の有限要素方程式を得る。

$$([M] + \frac{\Delta t}{2}[S])\{\theta_{k+1}\} = ([M] - \frac{\Delta t}{2}[S])\{\theta_k\} + \Delta t\{Q_k\} \quad (8)$$

ここで、 Δt は時間増分量、 k は離散時間ステップ、 M 、 S はそれぞれ係数行列である。

2.2 カルマンフィルタ

カルマンフィルタの基礎方程式は以下の式により構成される。

$$\text{システム方程式} \quad x_{k+1} = F_k x_k + G u_k \quad (9)$$

$$\text{観測方程式} \quad y_k = H_k x_k + v_k \quad (10)$$

ここで、 x は直接観測できない状態ベクトル、 y は観測ベクトル、 F は状態遷移行列、 G は駆動行列、 H は観測行列、 u はシステムノイズ、 v は観測ノイズである。

2.3 拡張カルマンフィルタ

拡張カルマンフィルタの基礎方程式は状態ベクトルに未知パラメーターを含んだ非線形方程式となる。

$$\text{システム方程式} \quad x_{k+1} = f_k(x_k) + G u_k \quad (11)$$

$$\text{観測方程式} \quad y_k = h_k(x_k) + v_k \quad (12)$$

$$\text{状態ベクトル} \quad x_k = (\theta \quad \alpha \quad \gamma)^T \quad (13)$$

ここで、 f_k は未知パラメーターを含んだ状態遷移関数、 h_k は観測行列である。

3 数値解析例

本システムの問題点である境界条件を以下のようなプロセスで決定する。

<1> 熱伝達係数 α と日射吸収率 γ の同定

<2> 境界条件の推定・予測

図1の観測点配置で観測した気温、 -3 、 -5 、 -10 、 -15 、 -30cm における温度、パイプ温度、日射量のデータの一例を図2に示す。<1>に関しては本システムの稼働前に、<2>に関しては本システムが稼働したもとで行われるon-lineの計算になる。従って<2>では地上での競技等に支障のないような観測を行わなければならないため、図1における -3 、 -5 、 -10 、 -15cm の観測点における観測データは得られないという条件での解析となる。 Δt は15[min]とする。

キーワード：地中温度制御システム、境界条件、カルマンフィルタ、拡張カルマンフィルタ、有限要素法

中央大学大学院理工学研究科(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, TEL 03-3817-1814, FAX 03-3817-1803)

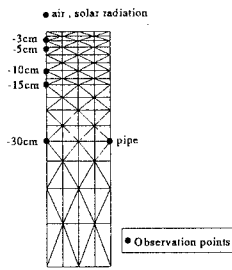


図1: 有限要素分割図と観測点配置

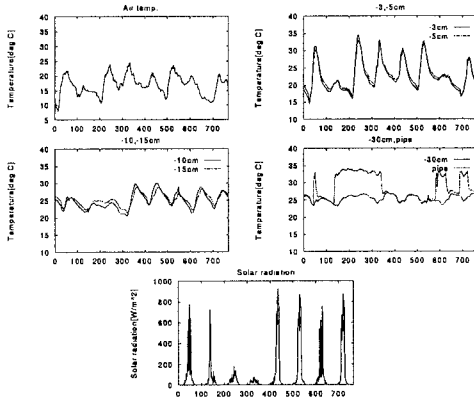


図2: 観測データ

3.1 熱伝達係数と日射吸収率の同定

一般に熱伝達係数 α は風速に影響を受けるということが報告されている。[4] 本研究ではさらにこれらのパラメータの特性を知るために、図2の観測データの他に降雨量（図3）を併せて観測し雨量との関係を調べた。解析ケースは（表1）に示すように晴期間と雨期間の計4ケースに分けて同定を行った。（表1）の同定結果に示すように雨期間における熱伝達係数は晴期間のものよりも1割程度低い値となった。一方、日射吸収率に関しては雨の影響をほとんど受けないという結果となった。

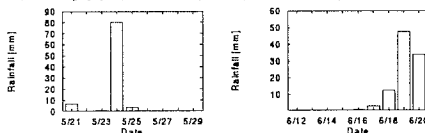


図3: 降雨量

表1 同定結果

Terms	熱伝達係数 [W/m^2]	日射吸収率 [%]
5/21-5/25 (雨)	21.3	0.57
5/26-5/29 (晴)	23.2	0.57
6/12-6/16 (晴)	23.4	0.59
6/17-6/20 (雨)	21.0	0.58

3.2 境界条件の推定・予測

ここではシステム稼働後の計算となるので、気温、-30cmの温度、パイプ温度、日射量のみを観測データとし、同定された熱伝達係数と日射吸収率を用いて直接観測が困難であるとされる-3cmの温度を推定する。

さらに、リアルタイム制御を行なうために制御解析における境界条件（-3cmの温度）を予測する。解析ケース

は12, 24, 48, 96期先（3, 6, 12, 24時間先）を予測する計4ケースでありARモデルにおける最大自由度は288とした。最大自由度とは1回の予測につき必要とするデータ数のことでありAICを用いて最適な使用するデータ数を決定した。[5] 図4に本手法によって予測された-3cmの温度と比較のため観測した-3cmの温度を示す。ここで、最大自由度が288であるため予測は289stepから始まっている。12, 24, 48期先までの予測に関しては実測値に良く追従しているが96期先予測では昼夜の温度変化を追うことができなかった。しかし本システムの運営上、48期先（12時間先）までの予測が可能であれば制御解析においてパイプ内に流す操作量の決定は十分行なえる。[3]

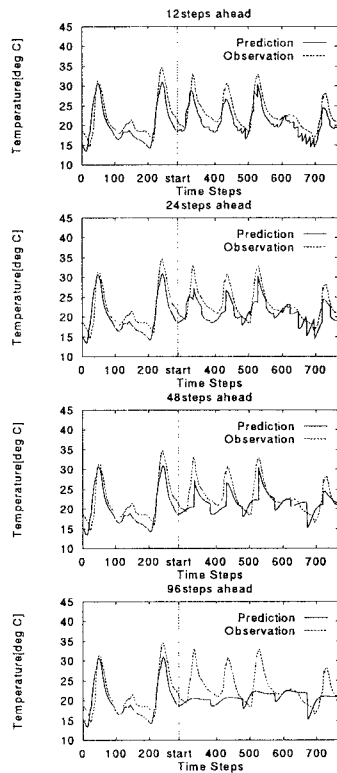


図4: 推定・予測結果

4 おわりに

本研究では地中温度制御システム実用化での問題点である境界条件の決定について拡張カルマンフィルタを用いた同定、カルマンフィルタを用いた推定・予測を行い、本手法がシステム実用化において有効であることを示した。

参考文献

- [1] 片山 徹: "応用カルマンフィルタ" 朝倉書店, 1983.
- [2] 新美 勝之ほか: "拡張カルマンフィルタを用いた熱伝導問題の境界条件の逆解析" 第52回土木学会年次学術講演会講演概要集I-A, pp.206-209.
- [3] 須磨 桂一ほか: "カルマンフィルタを用いた地中温度の最適推定" 第52回土木学会年次学術講演会講演概要集I-A, pp.96-97.
- [4] 井上 崇ほか: "地中温度制御システム実用化に関する研究(1)-最適制御-" 第53回土木学会年次学術講演会講演概要集I-A.
- [5] 近久 博志ほか: "逆解析手法によるマスコンクリートの熱伝達係数の評価" 土木学会論文集, No.451/V-17, pp39-47, 1992.
- [6] 北川 源四郎: "時系列プログラミング" 岩波書店, 1993.