

Ⅲ - B347

地中温度のリアルタイム制御実験

○ 佐藤工業(株) 正会員 黒田 千歳
 佐藤工業(株) 織茂 俊泰
 佐藤工業(株) 畝尾 昭利

1. はじめに

筆者らは、サッカー場などの芝の生育を管理する目的で横浜市東戸塚の横浜フリューゲルス・トレーニングセンターにおいて地中温度の制御実験を行なっている。これまでも最適制御理論を応用して地盤の温度を制御する試みが報告された例がある([1],[2])が、今回は実験室レベルにとどまらず野外の自然環境のもとの現実地盤に適用した結果について報告する。

2. 実験の概要

東戸塚における実験設備は図-1の通りで、蓄熱槽で一定温度(36℃)に保たれた温水が循環しており、三方弁を開くと芝フィールドの地下30cmのところに埋設されたパイプに通水されるようになっている。フィールドの中央部にはウェザーステーション(気象観測塔)を設置し、気温や日照などの気象条件をリアルタイムで自動計測する。

計測データは計算機に蓄積され、後述する方法により計算された制御計画にもとづいて、電磁式の三方弁を計算機から制御盤を通して開閉することにより通水し、人手を介さずに地温制御を行なう。芝フィールドの地下には深度別に温度センサーや土壌水分計を埋設しており、地温の変動を観測する。

3. 解析手法

地中の温度分布は次の熱伝導方程式に従うものとする。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \quad (1)$$

ここで

T : 温度

ρ : 地盤材料の密度

C : 定圧比熱

λ : 熱伝導率

$\dot{Q}$: 単位体積あたりの熱の発生項(発熱率)

境界条件として境界 s_1 における温度の規定 $T = \bar{T}$ 、境界 s_2 の熱流束 $q = q_0$ 、境界 s_3 の熱伝達 $q = \alpha_c(T - T_c)$ α_c : 熱伝達係数、 T_c : 外部温度を考える。

式(1)から導かれる有限要素方程式を

$$[S]\{T\} + [M]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\} = \{F\} \quad (2)$$

とする。ここで、 S : 熱伝導マトリクス、 T : 節点の温度ベクトル、 F : 熱流束ベクトル、 M : 熱容量マトリクスである。

図-2に気象観測値からこれらの境界条件を与えて地下5cmの地温を計算した結果を示す。図からわかるように計算値は観測値をよく近似している。

4. 制御計算手法

通水によるヒーティング効果をパイプ位置の節点に熱が発生することと考え、また、通水は三方弁の開閉によるon/offのみの動作と考えると、制御は熱の発生率 $\dot{Q}$ が0(非通水時)または $\dot{Q}_0$ (通水時)のどちらかの値をとるbang-bang制御となる。また、芝生の植生にとって重要な、地表面から5cmの深さの点の温度を15℃以上にすることを制御の目的とした。

式(2)の制御対象節点の発熱率に関する項を分離して

$$\dot{T} = AT + Bu + C \quad (3)$$

のように変形する。 $t \in [t_0, t_f]$ (t_0 : 制御の開始時刻、 t_f : 終了時刻)において式(3)に従い、次の評価関数

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \{[T^* - T(t)]^T [Q] [T^* - T(t)] + \{u(t)\}^T [R] \{u(t)\}\} dt \quad (4)$$

T^* : 着目点における目標温度

$T(t)$: 数値計算によって求まる温度

$u(t)$: 制御熱量

を最小にする制御 $u(t)$ を求める問題を、最適レギュレータ問題として解く。適当な制御変数の初期値から出発し、評価関数値を改善して行くアルゴリズムにはSakawa-Shindo法を用いる。

ただし、温度制御の目的は注目点の温度を一定以上の値にすることなので、式(4)において重みを表す対角行列 $[Q]$ を通常のように一定値でなく次のように定め、節点温度が目標値を下回るときに評価関数がより大きな値をとるように $Q_{\text{lower}} \gg Q_{\text{upper}}$ とする。

$$Q = \begin{cases} Q_{\text{upper}} & (T(t) \geq T^*) \\ Q_{\text{lower}} & (T(t) < T^*) \end{cases}$$

図-3には地温変動のデータ（破線）に対して制御計算を行なった結果（実線）を示した。ほぼ15℃以上の温度となって、目的が達せられていることがわかる。

5. リアルタイム制御

現実には制御計画を立てるときには、将来の気象条件を予測しながら制御計算を行なう必要がある。実験で

は毎日夕方5時に、一日後の気象条件を予測し、通水計画を求めている。このような制御方法による目的点の温度の変動は図-4のようになった。気象条件を完全に予測することは不可能なので制御の精度が低下することは避けられないが、この結果をみるかぎり実用上は十分目的を達していると考えられる。

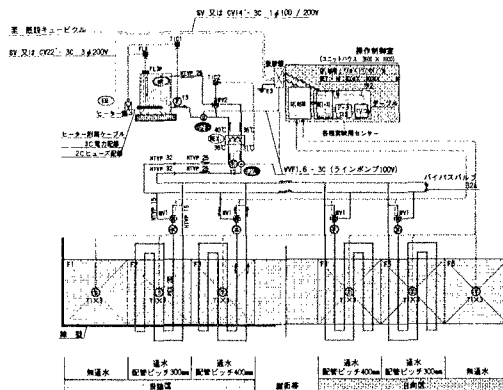


図-1: 実験設備概要

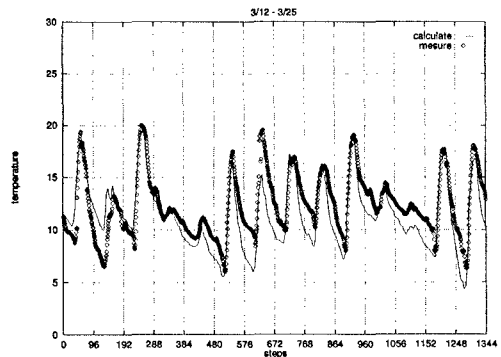


図-2: 地下5cmの地温の計算値と観測値の比較

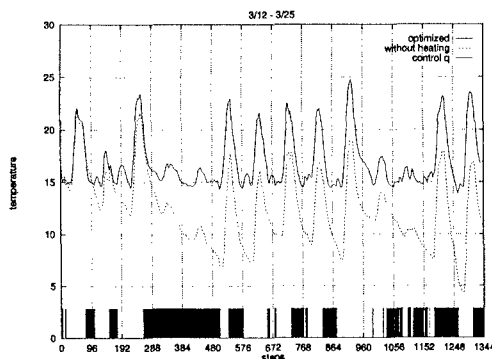


図-3: 既知の境界条件に対する制御計算結果

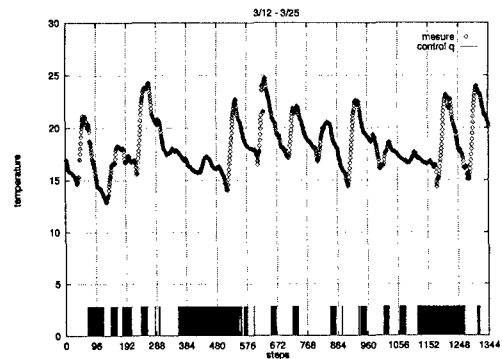


図-4: リアルタイム制御結果（観測値）

6. おわりに

自然環境下での地中温度に最適制御理論を応用した制御を試み、その有効性を示した。今後は、よりの確な気象条件の予測手法によってさらに制御温度の精度を上げることを検討中である。

参考文献

[1] 坂本, 鈴木, 川原: 現実問題への適用を考えた地中

温度の Bang-Bang 制御, 第50回土木学会年講 (1995)

[2] 小嶋, 鈴木, 川原: 地盤の熱伝導問題におけるパラメータの同定および地温度制御に関する研究, 土木学会論文集 (1995)

[3] 坂和愛幸: 最適化と最適制御, 森北出版 (1980)