

Ⅲ-376 現実問題への適用を考えた地中温度の Bang-Bang 制御

○中央大学 学員 坂本 修一
中央大学 学員 鈴木 誠一
中央大学 正員 川原 睦人

1 はじめに

現在、制御解析はいろいろな分野やいろいろな所で盛んに研究が進められている。最適制御システムを現実問題へ適用するには、制御解析の信用性を制御実験において確かめておく必要がある。本論文では、地中温度の制御が必要とされている問題について数値解析と実験の二方面から比較、検討し、現実問題への適用について考える。

2 通常の最適制御と Bang-Bang 制御

地中温度の制御が必要とされている問題の一例として、天然芝の温度制御についてとり挙げてみる。ゴルフ場のグリーンなどの芝生は、常に美しい緑色であることが望ましいのだが、季節や昼夜の激しい温度変化や害虫の被害などにより、芝生の育成が妨げられる。その防止策として大量の農薬が散布されている。これは周囲の河川や地下水への農薬の混入という環境汚染を招く原因となる。これらのことを考慮した解決策として、地中内にパイプを埋設し、パイプ内に温水や冷水を流すことで、地中温度を芝生の育成に適した温度に調節する地中温度の制御が考えられる（図-1 参照）。図-2 は、千葉県農業試験場の施設の一部を借り、行った地中温度の最適制御結果である。この結果を見ると、目的点の温度が目標とする温度に十分制御されていることが分かる。しかし、ここでの制御システムでは、連続的な操作温度を再現することは不可能であり、また、与えられる操作温度が5度から35度という制限がある。そのため数値解析結果を実際に再現することは不可能である。このような状況は、現実にはよく現れてくる。そこで本論文では、解析結果を再現することを主とした Bang-Bang 制御を行う。Bang-Bang 制御の利点としては、機械のスイッチの切り替えのみで制御が可能で、人の手間やコストがかからないことが挙げられる。図-3 は Bang-Bang 制御結果である。

3 地中温度の制御実験

図-4 に示すような実験装置を作成し、制御解析結果に基づいて制御実験を行う。この制御では、外部境界としてアルミ缶内の水温を温度調節器により作り出し、任意の目的点の土の温度を土中に埋設したパイプ内に温水や冷水を流し、土の温度を操作することで任意の目標温度にすることを目的としている。実験装置の作製の際には、温度調節器、断熱性、センサーの精度、土の粒土などを十分チェックし、それぞれの能力の限界を確かめている。

4 地中温度の制御解析

数値解析モデルの温度計算値 $\{\theta\}$ を得るために、次に示すような軸対称非定常熱伝導方程式を基礎方程式として適用する。

$$\rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - \beta \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right\} = 0 \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度、 C_p 比熱、 β は熱伝導率、 θ は温度の計算値、 t は時間、 r は中心からの距離、 z は高さ方向の距離を表す。(1) 式は、空間方向に有限要素法、時間方向にクランク・ニコルソン法により離散化して解くことになる。制御問題における評価関数を次のように定義する。

$$J = \frac{1}{2} \sum_{t=t_0}^{t_f} \left((\{\theta\} - \{\theta^*\})^T Q (\{\theta\} - \{\theta^*\}) + \{R\}^T \{u\} - \{u^*\} \right) \quad (2)$$

ここで、 θ と θ^* は目的点での状態量の計算値と目標値、 u と u^* は操作点での操作量の計算値と理想値、 Q と R は重み関数、 t_0 と t_f は制御開始時刻と終了時刻を表す。

Bang-Bang 制御における操作量の拘束条件は次に示すものとする。

$$\{b\} \leq \{u\} \leq \{a\} \quad (3)$$

ここで、 $\{a\}$ と $\{b\}$ は操作点での操作量の上限値と下限値を表わす。(2) 式の最小化手法として Sakawa-Shindo 法を用い、評価関数 J を最小にするような操作量 u を繰り返し計算により探索する。

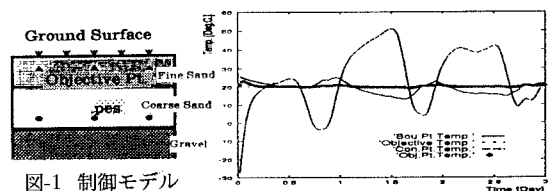


図-1 制御モデル

図-2 通常の最適制御結果

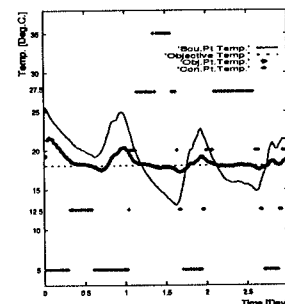


図-3 Bang-Bang 制御結果

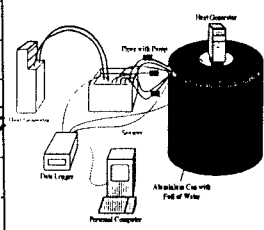


図-4 実験装置の概要

5 制御解析結果と制御実験結果の比較

制御解析の際に使用する有限要素分割図は図-5である。ここで、境界 AB はディクレ境界条件、境界 BC、CD、DA はノイマン境界条件で与えるものとする。また、比熱*密度は 2.0×10^6 [kg/K・m・s²]、熱伝導率は土の部分で 0.7430[W/m・K]、パイプの部分で 1.8620[W/m・K]、時間増分は 30 分として計算している。図-6 は Bang-Bang 制御解析結果に制御実験結果を重ねたものを表わしている。制御実験は 1994 年 11 月 1 日から 11 月 5 日にかけて行なったものである。

6 現実問題への適用を考えた制御

図-6 を見ると、十分制御できているため、今回行なった制御解析の信用性が高いことがうかがえる。しかし、制御実験を行なっていて、操作量を与える機械を制御期間中絶えず稼働させ続けなければならないという問題が浮かび上がってきた。このような機械の酷使は、機械の寿命を縮める原因となる。実際の制御問題である天然芝の温度制御では、目的点の目標温度つまり天然芝の育成に適した地中温度は一定値としなくても、ある程度の幅を持った範囲内に収められれば十分である。こうすることにより、与える操作量の値をより小さくでき、制御をしなくても良い期間を作り出すことができると思われる。この制御解析を今回のモデルで行なうと次のようになる。図-7 は目的点の目標温度を 25 度一定としたときの Bang-Bang 制御結果、図-8 は目的点の目標温度の幅を 22.5 度から 27.5 度としたときの Bang-Bang 制御結果、図-9 は目的点の目標温度の幅を 21 度から 29 度としたときの Bang-Bang 制御結果である。このことを千葉県農業試験場での制御に応用すると図-10 のようになる。

7 おわりに

今回のような条件のもとでは、十分な制御結果が得られたと言える。現実には、温度の他に地下水の流れや地盤内の応力のつり合いなどを考慮する必要がある。今後は、これらのことを考慮した地中温度の制御解析が望まれる。こうすることで、現実的に地中温度の制御が必要とされる問題である天然芝の温度制御、寒冷地での路面の凍結防止のための温度制御、地下水の凍結による LNG 地下タンクの破損防止のための温度制御などに、より役立つと思われる。

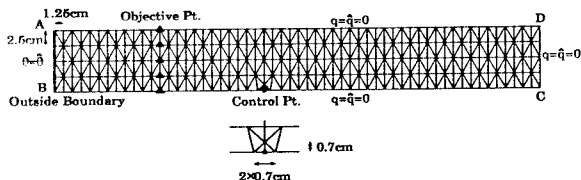


図-5 有限要素分割図

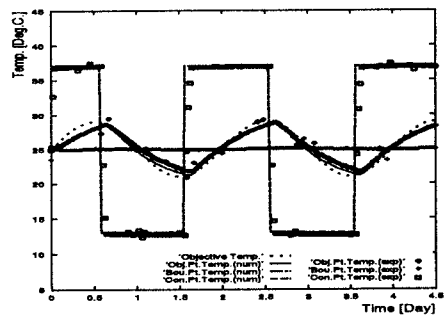


図-6 解析結果と実験結果の比較

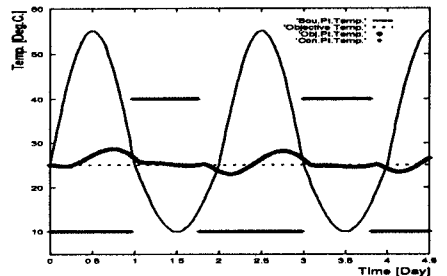


図-7 目的点の目標温度を 25 度一定としたときの制御結果

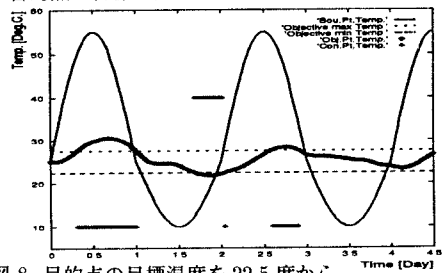


図-8 目的点の目標温度を 22.5 度から 27.5 度としたときの制御結果

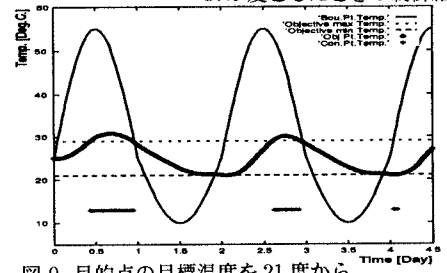


図-9 目的点の目標温度を 21 度から 29 度としたときの制御結果

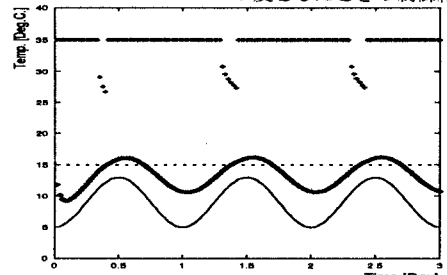


図-10 千葉県農業試験場での制御結果