（Ⅱ－57）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、数値解析による制御は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際には、数値解析による制御の信用性を実験による制御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。

最初に地中温度の制御が必要とされてい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。最近では一年中スポーツイベントが盛んに行なわれていることもあり、天然芝の需要が高まってきている。スポーツ競技場やゴルフ場のグリーンの芝生は、常に美しい緑色であることが望ましいのだが、これらの芝生は季節や昼夜の激しい温度変化や害虫の被害などにより、芝生の育成に適さない影響を受けてしまう。この防止策としてゴルフ場では大量に農薬を散布している。しかし、この方法で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いてしまう。このことも考慮した解決策として、地中温度の制御が考えられる。ここで、千葉県農業試験場の施設の一部を借り、行なった地中温度の最適制御結果を図-1に示す。この結果を見ると、

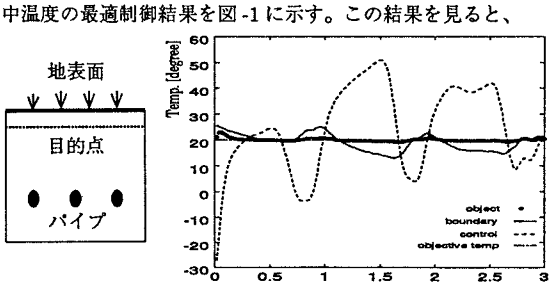

図-1　制御モデルと通常の最適制御結果

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、千葉県農業試験場の制御システムでは、数値解析で得られた操作量の値を再現することは不可能である。ここでは、与えられる操作量に5度から35度という制限があるためである。このような制限は、現実には必ずと言っていいほど現われてくるので、本論文では操作量に拘束条件をつけたBang-Bang 制御により制御を行なう。

2　数値解析による地中温度の制御

2.1　基礎方程式

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。

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

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（半径）、z は高さ方向の距離を表す。(1)式は、空間方向のに有限要素法、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。

2.2　評価関数

制御問題における評価関数を次のように定義する。

$$J = \frac{1}{2}\sum_{t=t_0}^{t_f}\Big((\{\theta\}-\{\theta^*\})^T[Q](\{\theta\}-\{\theta^*\}) + \{R\}^T|\{u\}-\{u^*\}| \Big) \qquad (2)$$

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。

$$\{b\} \le \{u\} \le \{a\} \qquad (3)$$

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。

3　実験による地中温度の制御

図-2に示すような実験装置を作製し、2節で行なった数値解析に基づいて制御実験を行なうものとする。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、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が目的である。実験装置の作製の際には、温度調節器、断熱性、センサー、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。

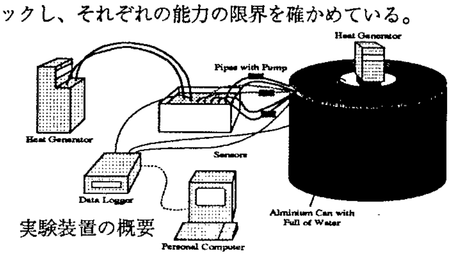

図-2　実験装置の概要

4　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-3である。ここで、境界ABはデリクレ境界条件、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・s^2]、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-4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11月1日から11月5日にかけて行なったものである。

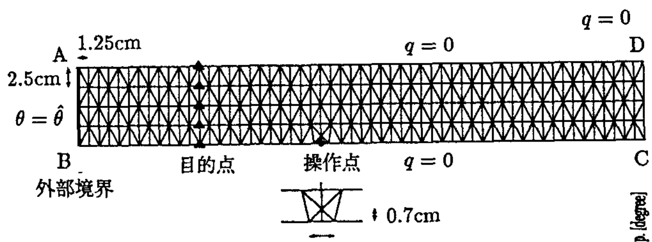

図-3　有限要素分割図

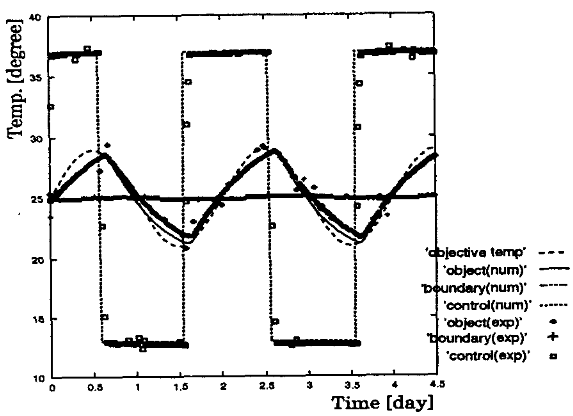

図-4　Bang-Bang制御解析結果と制御実験結果の比較

5　現実問題への適用を考えた制御

図-4を見ると、十分制御できているため、今回行なった数値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浮かび上がってきた問題点もある。それは、操作量を与える機械を制御を行なっている期間絶えず稼働させ続けなければならないという問題である。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-5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-6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-7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。

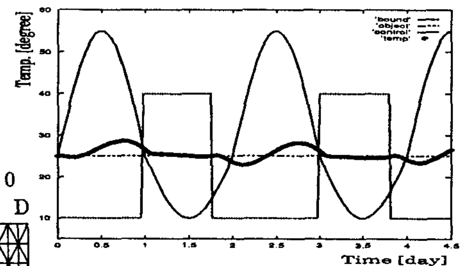

図-5　目的点の目標温度を25度一定としたときのBang-Bang制御結果

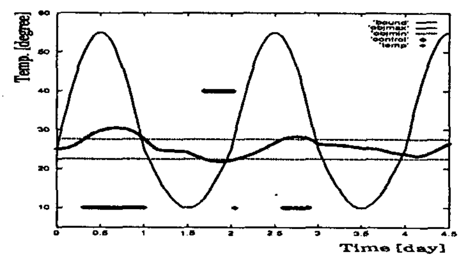

図-6　目的点の目標温度を22.5度から27.5度としたときのBang-Bang制御結果

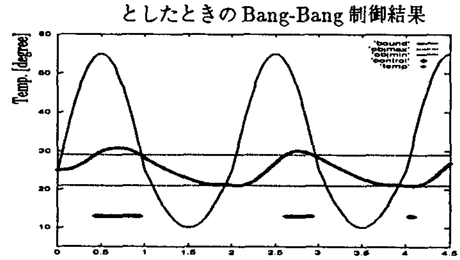

図-7　目的点の目標温度を21度から29度としたときのBang-Bang制御結果

6　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出てくる。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、寒い地方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。

参考文献

[1] 嘉納 秀明．システムの最適理論と最適化．コロナ社，1987