

熱回路網の状態方程式モデルによる最適制御理論

その3:最適レギュレータの多変数入力系での適用例

正会員 ○ 奥山 博康*

熱回路網 最適レギュレータ制御 多変数系

1 はじめに

現代制御理論を建築物の冷暖房システムの最適制御に適用するためには制御対象の伝熱系を状態方程式モデルで扱わなければならないが、本研究での熱回路網モデルによって、一般的かつシステムティックに状態方程式に表現できる。既報 [1] では最適レギュレータの基本理論を展開し、既報 [2] でその一般化を行った。しかし、既報 [2] であげた数値例は室温に関する単一入出力の制御系についてのもので、本来は多変数系において立てられている当理論の長所を真に発揮したものではない。本報では1つの制御量(仮想体内中心温度)に対して複数の操作量(対流式暖房と輻射式暖房)がある場合の数値例をあげることによって、本手法の有用性を示す。

2 例題の設定

図1に一つの例題を示す。これは対流式と床輻射式の複合暖房システムを表している。本研究では熱湿気同時移動系まで含めて総合的に状態方程式モデル化する方法 [3][4] を示しているが、本報では例題の単純化のため、人体と環境の熱授受は顕熱だけを考慮する。さて人体内では代謝と作業量に応じたある程度の発熱がされるが、一方では人体内の生化学的反応の適温があるため、発熱量によらずに一定温を保とうとする体温調節機能が働く。この調節機能は、人体中心から外表面に向かう血流量増減、体組織の収縮弛緩や発汗量の増減等から成っているから、自ずとこれらの負担の最も小さい状態(温熱生理的な中立状態: physiological thermal neutrality) が存在する。さらに着衣にしても軽装の状態が楽である。そこで人体を伝熱系としてとらえた場合に、系の伝熱パラメータをこうした負担の最も小さい状態に設定し、人体内部の発熱量を作業量に応じて与えるものとする。そして室内の熱環境を操作することによって適切な体温に維持してやると考える。この操作は対流式暖房と床輻射式暖房の各々への投入エネルギーを調節することによって行うものとする。こうした制御を最適レギュレータで行うので、評

価関数は制御を実行していくコストと、制御量と目標値との偏差の、各々の二乗和(既報 [1] の式 (3)) となる。この場合、さらにコストは対流式と輻射式の2つから成っている。仮に両方式で同じ熱量を消費するにしても、輻射式は比較的低温の温水で十分であるから、地球環境の観点から輻射式のコストは小さくなる。従って評価関数において、各々の方式による消費熱量に係ってくる重み係数を異なった値にすることができる。さらにコストと目標値からの偏差の各々に対する重み係数も政治的判断から与えるものとする。以上の評価関数を最小化するような各々の暖房方式への投入熱流を最適化問題として求める。実際には制御の伝熱系が離散時間システムによる動的モデル(既報 [2] の式 (5)) で扱われるので、最適解は投入熱流の時系列で求められるが、本例題では過渡状況よりも定常に達した状態が重要である。

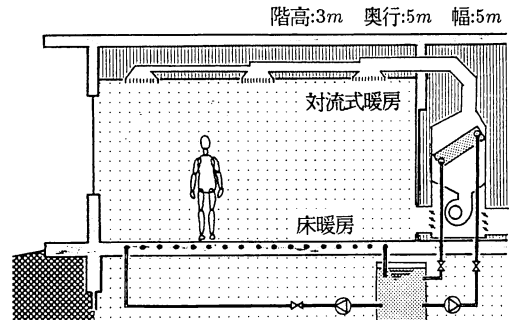


図1 人体を含んだ対流式と輻射式の複合暖房システム

3 モデル化

本熱回路網は、空間差分法や有限要素法のモデルを包括する一般構造 [4] を持つが、ここでの工学的目的によく適合する検査(有限)体積法を集中定数化法として用いてモデル化する。まず人体については Gagge らの2節点モデル [6] を拡張し、図2に示すように4節点モデルとした。節点1はコア、節点2は肺、節点3は皮膚、節点4は衣服の温度を表す。ダイオード記号によって流体による一方通行の熱流を表すが、室温の節点5と節点2の間には呼吸による熱流がある。その他、

体内では血流による熱流がある。発熱量は節点1,2,3に与えた。これらの人体に関わる一般化熱コンダクタンス c_{ij} や熱容量 m_{ij} の値は Gagge ら [6][7] のモデルを参考にして決めた。スラブはコンクリート(厚150)とし4節点で離散化した。床暖房スラブにおいては節点12が温水チューブを表す。室空気は節点5で、外気は節点15で表される。輻射暖房を含む系であるから、室内表面や人体表面の相互間の輻射伝達と対流伝達は分けてモデル化した。輻射の一般化熱コンダクタンス c_{ij} は常温で線形近似化したものを用いた。モデル上、床暖房は温水チューブの節点の、対流式暖房は室空気の節点の発熱量が制御操作量となる。また制御量は節点1の人体コア温度であり 36.5°C に近づける。制御開始時の初期温度について、人体系は 36.5°C 、建物は 10.0°C とした。また外気温度は 0°C で終始一定とした。なお最適制御則の解法としては、問題を既報 [2] の拡大系にしたあと既報 [1] の基本理論を適用したものである。

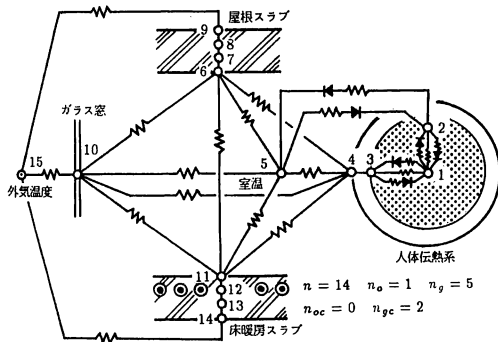


図2 制御系の熱回路網モデル

4 数値計算結果

図3には評価関数の最小値を与える、対流式と床暖房の各々への最適操作熱流の時間変化を示す。対流式への投入熱流は輻射式のそれに較べて3倍近いが、これは温水チューブの下部の断熱が無いからである。図4には熱回路網の各節点の温度変化の最適軌道を示す。初期温度によって定常状態は影響されないことが確認できている。人体コア温度は目標に限りなく一致し、その他の温度も良好な整定状況を示している。興味深いのは、こうして最適化された室温が、経験的に知られている適温に近く 21.4°C になっていることである。このことは十分に精緻な人体モデルを用いれば、今まで被験者を使って実験的に求めていた諸環境要素が演繹的に解ける可能性も示している。また以上の例によって、複合暖房の各々の容量設計等を快適性と省エネ性の両者を同時に考慮して最適化できる可能性があること等も示された。

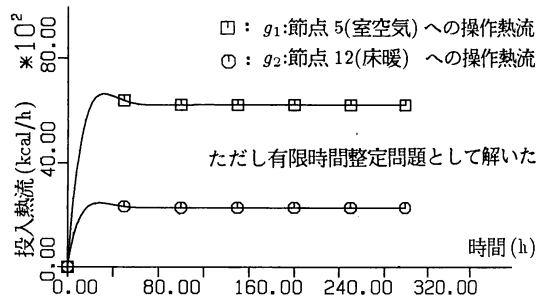


図3 両暖房方式への投入熱流変化

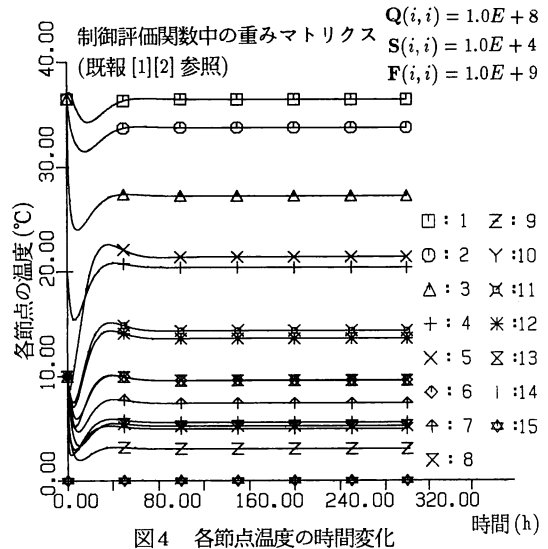


図4 各節点温度の時間変化

5 まとめ

熱回路網の状態方程式モデルを用い、複数の操作量を持つ多変数制御系に対して最適レギュレータ制御理論の数値実験を行い、本手法の有用性を示した。本報の例では、最適レギュレータ理論によって、過渡状況よりも定常状態での最適制御則を得ることに重要な意味があったのであり、このことは本理論が最適設計の1つの手法となりうる可能性も示すものと考えられる。

(参考文献) [1] 奥山博康: "熱回路網の状態方程式モデルによる最適制御理論, その1: 最適レギュレータ制御の基本的理論と数値実験," 建築学会大会学術講演梗概集(計画系), 1989年10月, p.767 [2] 奥山博康: "熱回路網の状態方程式モデルによる最適制御理論, その2: 拡大系による基本理論の一般化と数値実験," 建築学会大会学術講演梗概集(計画系), 1990年10月, p.745 [3] 奥山博康: "熱水分同時移動の解析法について," 建築学会大会学術講演梗概集(計画系), 1982年10月, p.761 [4] 奥山博康: "熱回路網の概念による各種の集中定数化法の統一," 空気調和衛生工学会学術文集, 1986年10月, p.277 [5] 奥山博康: "建築物の熱回路網モデルに関する理論的研究," 早稲田大学・建築環境工学学位論文, 1987年12月(清水建設研究報告別冊第26号'89年6月) [6] Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Nishi, Y. (1971) An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Trans., 77, 247-262 [7] 中山昭雄: 編: "温熱生理学" (第2章, 西安信・著), 理工学社, 1985年第1版第3刷

*清水建設(株)技術研究所・主任研究員・工博