

電気式温度調節器の設計技術研究

Research on Electric Room Temperature Controller Design Technology

株式会社 山武

ビルシステムカンパニー

末武 雅俊

Masatoshi Suetake

株式会社 山武

ビルシステムカンパニー

石塚 保夫

Yasuo Ishizuka

東京電機大学

藤田 壽憲

Toshinori Fujita

キーワード

電気式温度調節器, ダイアフラム, マイクロスイッチ, ANSYS, 非線形弾性解析

電気式温度調節器(以降、温度調節器と略す)は空調機や操作器と接続するだけで簡易な計装制御を行うことが可能だが、構成要素の持つ非線形性の特性によりその計算、予測が難しい事が設計、品質向上への課題となっている。本稿では当社製 ON-OFF 型電気式温度調節器「ネオスタット™ TY600XZ」の構成要素である、感温ダイアフラムとマイクロスイッチについて有限要素法による特性シミュレーションを行い、評価を行った結果、温度調節器の設計への有効性を確認したので報告する。

Electric room temperature controllers enable easy instrumentation and control simply by connecting them with air conditioners and a control box. However, difficulty in calculation or prediction of characteristics of components due to their nonlinearity remains an obstacle to design and quality improvement. We have implemented characteristics simulation of the temperature-sensitive diaphragms and microswitches which are components of Neostat™ TY600XZ, an ON/OFF type electric room temperature controller, by means of the finite element method, and found that such simulation is useful for the design of electric room temperature controllers. This paper describes the result of the study.

1. はじめに

電気式温度調節器は、検出部にダイアフラムやバイメタルを用い、その温度変化による膨張や変位によって駆動し、調節部もマイクロスイッチやポテンショメータで構成されていることから、調節器自体としては電気的エネルギー消費をしないものである。

今日、白金抵抗体などの電子式センサとマイコンの組み合わせによる高精度・広計測範囲の電子式計装があるが、電気式温度調節器は簡易な空調計装による温調市場(ビル空調含む)に用いられている。

電気式温度調節器の設計においては、検出部における大変形問題、出力部(マイクロスイッチ)における可動ばねの飛移り座屈問題など、構成要素が非線形性の特性を有することから、特性の計算、予測が難しいという問題がある。従来、これらの特性計算の式が導出されているが、単純形状やある特定の用途、条件に限定され

ており、組付け時にかかる力なども考慮できないため、実際の設計にそのまま適用しても誤差が大きく、結果として、目的とする特性を得るために試行、微調整などが多くなることを余儀なくされており、調節器の設計、品質向上への課題となっている。

一方、数値計算の発達に伴い、有限要素法(Finite Element Method, 以下FEM)によるダイアフラムやスイッチ単体での特性解析は常態化している^{(1)~(4)}。しかしながら、本電気式温度調節器のように両者を組み合わせた場合については前例がなく、明確な計算方法も確立されていない。加えて、感温ダイアフラムの変形は圧力センサ用のダイアフラムなどに比べ変形量が大きく、また、使用しているマイクロスイッチについても、今回使用するセンターメンバを有するタイプについての特性解析は調べた限り報告されていない。

本報告では、当社製 ON-OFF 型電気式温度調節器「ネオスタット TY600XZ」(図1)について、ANSYS Mechanical (ANSYS, Inc.) を用いて、その構成要素である温度検出部、出力部の特性について、まずは個別にシミュレーションし、最終的に両者を連成させることによって電気式温度調節器の特性予測を行い、今後の設計への有効性を検討する。



図1. ネオスタット TY600XZ

2. 構造と原理

図2に TY600XZ の構造と動作原理を示す。この温度調節器は感温ダイアフラムを検出部とし、マイクロスイッチを制御出力部とするものである。

感温ダイアフラムは2枚のダイアフラムの周端部を溶接で接合し、その空間にボタンを封入したものである。ボタンは気液二相の平衡状態にあり、温度に応じて蒸発し、ダイアフラム内の蒸気圧力と変位を変化させる。両ダイアフラムの中心には支柱が設けられ、この一端を固定し、他端をマイクロスイッチに押し当てる。すると図のように、温度が上昇するとダイアフラムが膨張、変位しマイクロスイッチを押すので、ある温度 T_1 でマイクロスイッチが切り換わり、オン状態となって空調機が作動する(この場合は冷房制御)。その後、温度が低下していくと、ダイアフラムが今度は収縮していき、ある温度 T_2 でマイクロスイッチはオフ状態に復帰し、空調機は停止する。この動きにより、調節器は周囲温度を一定の温度範囲($T_1 \sim T_2$)に保とうとする。これが ON-OFF 型電気式温度調節器の原理である。

2.1 感温ダイアフラムとマイクロスイッチ

感温ダイアフラムの概観を図3に示す。ダイアフラムは円形であり、所定の板厚と外径を有し、材質はステンレスである。ダイアフラムの波形状は円弧近似で製作される。この円弧半径と波ピッチは外周になるほど大きい。また2枚のダイアフラムの波形状は相似形である。

本調節器に用いられるスイッチはZ型マイクロスイッチである。スイッチは図4に示すようなセンターメンバを有する可動ばねを用い、材質はベリリウム銅である。可動ばねはセンターメンバ付近から曲げ加工が施され

ている。この曲げられた面の上下に接点を取り付けられている。マイクロスイッチの構成を図5に示す。可動ばねは1本のリベットで固定され、メンバは圧縮され、その先端は支持部のV溝に引掛けられている。図に示した位置で感温ダイアフラムからの荷重を受ける。この荷重により可動接点は上側または下側の接点と接触状態が変化する。また図には示さなかったが、マイクロスイッチの動作を微調整できるように上側接点の位置と回転支点の位置はねじによって調節できる構造となっている。

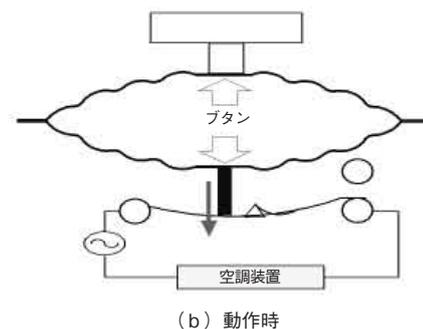
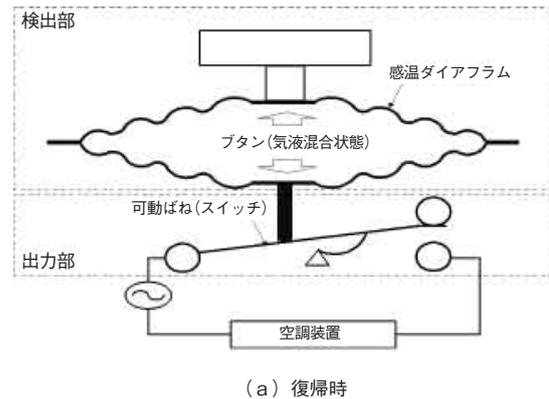


図2. TY600XZの構造と原理



図3. 感温ダイアフラムの概観



図4. 可動ばねの形状

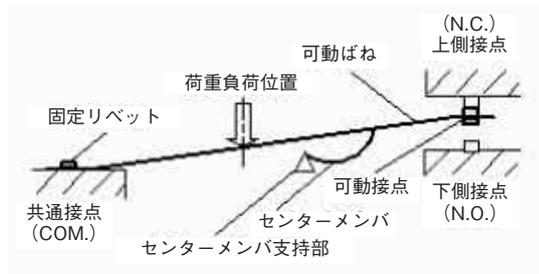


図5. マイクロスイッチの構成

3. 感温ダイアフラムの解析

3.1 解析モデルと方法

感温ダイアフラムの解析モデルを図6に示す。

上側及び下側ダイアフラムに分けて解析を行った。それぞれの結果を加え合わせるによりダイアフラム変位を得た。上下のダイアフラムとも軸対称の二次元ソリッドモデルとして取り扱った。解析モデルの周端は溶接部までとし、その境界条件は固定端と定めた。荷重条件としてダイアフラムとボタンガスとが接する部分に圧力（ゲージ圧）と、中心部にマイクロスイッチからの反力荷重を与えた。材料定数は使用しているばね用ステンレス鋼の特性データ（製品仕様）から定義した。

解析を行うにあたり、適切なメッシュ分割方法を調べるために数通りの条件で解析を行った。その結果、テトラメッシュ、サイズはメッシュ外形線長さを0.06 [mm]にして自動分割した場合に、図6のように断面方向には4～5分割程度となり、円弧形状も滑らかに近似できることがわかった。総節点数は、およそ32000点である。また大変形解析時に一部の要素が極端に変形するなどのエラーを生ずることもなく、これ以上メッシュ粗さを密にしても解析結果に差がほとんど見られない（収束している）ことから、この条件で解析を行い、評価を行うこととした。

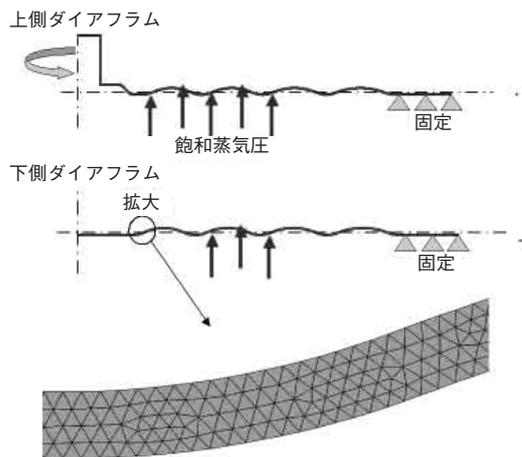


図6. 感温ダイアフラムの解析モデル

3.2 解析結果

解析において入力する条件は圧力荷重だが、実験で与える条件は温度であり、評価を行うには圧力荷重を温度へ変換する必要がある。温度と圧力の関係は前述のようにボタンの飽和蒸気圧で決まる。そこで飽和蒸気圧線図を表す Wagner-Pruss の式⁽⁵⁾を用いて、解析結果の圧力を温度に変換して実験と比較した。参考として図7に温度制御器の使用範囲において飽和蒸気圧線図を計算した結果を示す。図8には実験時同様に、組付け時に4.5[N]の荷重を中心部に受ける場合の感温ダイアフラムの解析と実験結果の比較を示す。

センサは常温で既に膨らんでおり、実験の場合は解析の様に平坦な状態から変位を測定することは困難である。そこで実験を行う下限の温度である7[°C]のときの変位を基準として、そこからのセンサ変位をダイヤルゲージにより測定した。測定は温度が安定するように水中で行った。3個の感温ダイアフラムを測定し、その平均値を示した。器差は最大でおよそ3.7%であった。FEMによる解析結果と実験結果との差異は6%以内に収まっており、十分な精度で解析できることがわかった。差異の要因として、プレス後の残留応力あるいは溶接部を固定端とした境界条件の与え方などが考えられる。

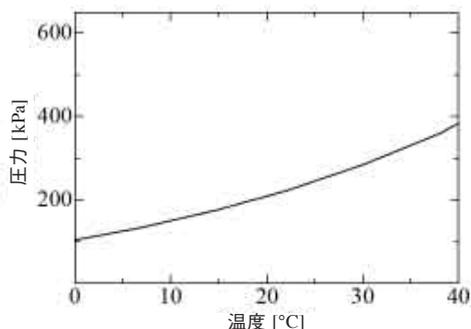


図7. nボタンの飽和蒸気圧線図

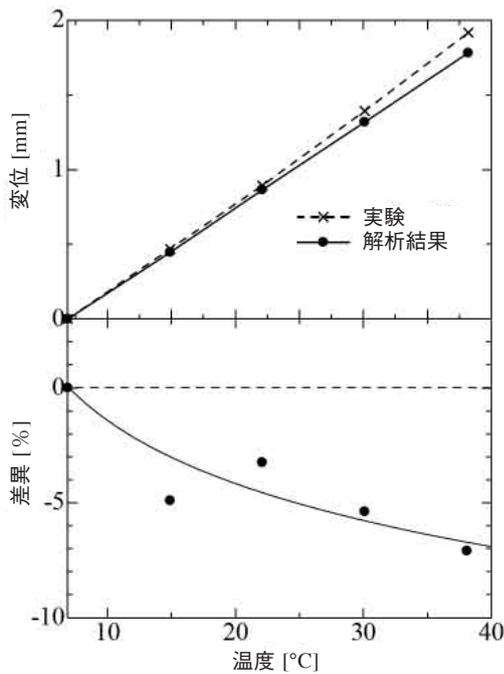


図8. 感温ダイヤフラムの特性解析結果

4. マイクロスイッチの解析

4.1 解析モデルと方法

マイクロスイッチは2章で述べたように可動ばねが歪んだ状態で取り付けられ、常に応力がかかっている。その状態で温度センサの変形による力が加えられることによって、可動ばねのスナップアクションによる瞬間的な接点の切り換わりが成り立っている。解析上も同様な考え方が必要であり、まず可動ばねを応力などの印加がないフリー状態から取り付け状態まで変形させる解析を行い、応力のかかった状態にする。その後、感温ダイヤフラムからの変形荷重による座屈解析を行うという、2ステップでの解析を行う必要がある。

図9に取り付け状態となっていない解析モデルを示す。解析モデルは、可動ばね部分をシェルモデル、可動接点、上下側接点は3次元ソリッドモデルで作成した。リベットで留められている部分を固定端として扱い、リベットを円柱で簡易的に表現している。メッシュサイズは自動分割機能を用いて自動分割を行い、荷重がかかる、変形の度合いが大きいと予測される部分についてはメッシュの細分化を行った。節点数は約2500点である。材料定数は可動接点、上下側接点を銀として、可動ばねを一般的なベリリウム銅として定義した。

まず、この解析モデルを用いて取り付け状態の変形解析を行い、可動接点と上側接点とが接触した、図10に示す取り付け状態を作り出す。この状態から感温ダイヤフラムとの接触位置に集中荷重を定義し座屈解析を行った。

4.2 解析結果

図11にマイクロスイッチの解析結果を実験結果とともに示す。横軸は集中荷重が掛かる場所での変位を表す。変位は集中荷重がない場合を原点に取っている。図においてグラフが不連続となっている部分で座屈が生じスイッチが切り換わる。縦軸はスイッチが切り換わる設計上の中心荷重を1とし、無次元化した。2章で述べたように上側接点と下側接点はねじによって位置が微調整される。この位置によりスイッチの切り換わる加重を調整し、一定の荷重範囲に収まる様にしている。この荷重範囲の上限と下限を破線で示した。実験においてねじはスイッチが動作する範囲のほぼ中央となるように調節した。解析においては設計図面上での調整範囲の中央に上下接点が位置するよう条件を与えた。

実験結果が示すように同様な調整を行ってもマイクロスイッチの各部品の個体差により切り換わる点は完全には一致しないことがわかる。解析結果と比較するとスイッチが切り換わる変位は2つの実験の間にある。また、マイクロスイッチのばね特性を表す変位-荷重の傾きも実験とほぼ一致している。切り換わる荷重については示した実験結果よりは低めの値をとるものの、上下限範囲内であり、かつそれらの中央値に近い。マイクロスイッチの動作と復帰の変位の差（ON-OFF制御時の動作すきま）も実験値とよく一致している。データとしては示さないが、解析上で上下接点の微調整を行ったところ、下側接点の位置を上側に移動させると荷重幅が、上側接点も上側とすると変位幅が実験値に近づいた。以上のことから、FEMによる解析結果は実際のマイクロスイッチの挙動をよく表しており、設計への有効性がうかがえる。実験との差異の要因として、実物の接点位置が、個体差や組付け調整などにより解析モデルと差が生じてしまったことや、可動ばねの曲げ加工部の残留応力などが考えられる。

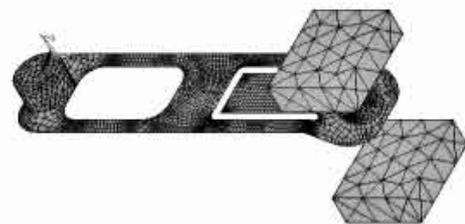


図9. マイクロスイッチの解析モデル



図10. 取り付け状態への変形解析結果

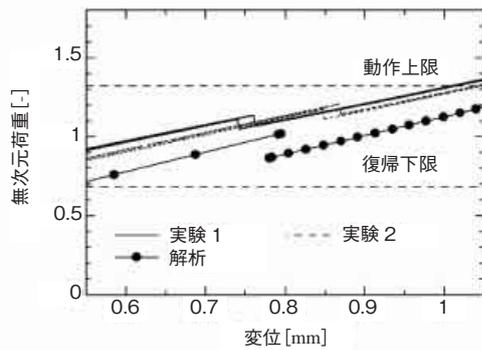


図 11. マイクロスイッチの特性解析結果

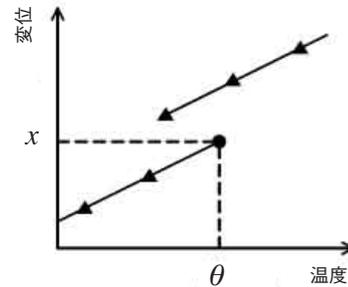
5. 温度調節器の解析

温度調節器を設計する際に必要となる特性は図 12 (a) のようなマイクロスイッチのオンオフ動作と温度の関係である。3 章と 4 章の解析を同時に行うことは、2 次元モデルと 3 次元モデルの混在や解析の収束性などの問題から現状では困難である。そこで別々に解析し、結果を解析者側でやり取りさせることによって双方向連成解析を行うことを考える。3 章の解析により図 12 (b) のように温度と感温ダイアフラム変位の関係が求まる。ただし、図中の $f' \sim f''$ のようにスイッチから受ける荷重により変位の特性は変化するので、荷重が決まらなると変位は求められない。一方、マイクロスイッチの座屈解析を行うと、図 12 (c) に示した通りスイッチに掛かる荷重とスイッチ変位の関係は一意に定まる。感温ダイアフラムの支持体は剛体とみなせるためスイッチ変位はダイアフラム変位に等しい。今、最終的に得たい図 12 (a) を (c) と見比べると、横軸が荷重から温度になっており、対応する荷重から温度を求めていけばよいことがわかる。そこで荷重を次の手順で温度に変換する。

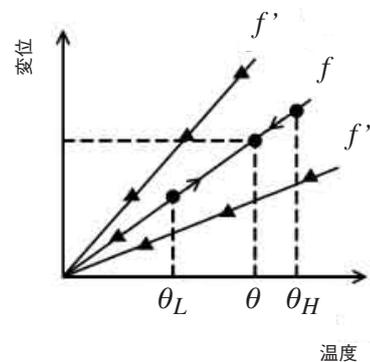
- 1) 図 12 (c) において変換したい荷重 f と変位 x を選ぶ。
- 2) 荷重、言い換えればスイッチ反力 f がわかっているので、図 12 (b) から、その変位 x に対応する温度が求められる。
- 3) 実際には図 12 (b) は連続的ではなく、解析を行う点でのみで得られる。そこで数値解析を利用して求める。具体的には変位 x 以上となる温度 θ_H と、以下となる温度 θ_L を適当に決め、これらを初期値として二分法⁽⁶⁾により温度 θ を得る。
- 4) これをいくつかの点で行えば図 12 (a) の特性が得られる。

解析結果を図 13 に示す。二分法の繰り返しは温度と変位の関係がほぼ直線であることから数回で 1% 以下の誤差に収束した。4 章で述べたようにマイクロスイッチの特性は固体差により異なり、そのためマイクロスイッチが動作してから復帰するまでの温度幅も違う。実験により得られている温度幅を破線で示した。また温度幅の中心値を取り、その値を 1 とし、マイクロスイッチが復帰したときの温度を 0 とし、温度は無次元化して表示

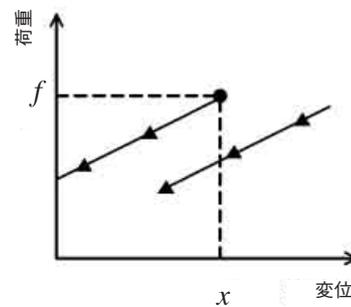
した。図より、解析結果は中心値よりは小さくなるものの実際に得られる動作範囲に収まっている。上下の接点位置を調整すれば、温度幅も実験値に近づくことが予想される。以上のことから、今回提案した解析方法により、温度調節器の特性を予測できることがわかった。



(a) 温度調節器の特性



(b) 感温ダイアフラムの特性



(c) マイクロスイッチの特性

図 12. 温度調節器の特性解析手法

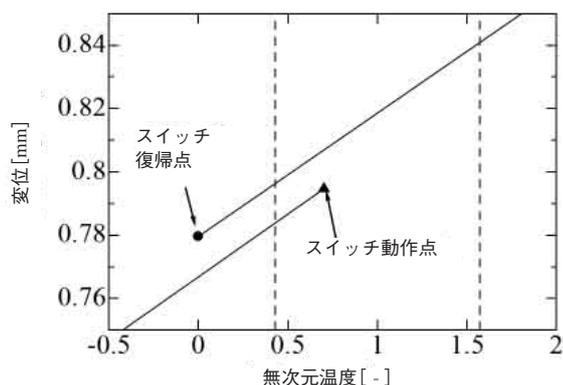


図 13. 温度調節器の特性解析結果

<著者所属>

末武 雅俊	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部
石塚 保夫	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部
藤田 壽憲	東京電機大学 教授 工学部機械工学科

6. おわりに

本研究では、電気式温度調節器に用いられる感温ダイアフラムとマイクロスイッチの特性についてFEMによる解析を行った。得られた特性は、実際の特性とほぼ一致しており、特性解析の有用性を確認することができた。これにより、今後の後継機の設計開発時には精度のよい特性予測が可能となり、最適な特性設計と試作設計回数の削減が見込まれる。

<参考文献>

- (1) 浜田, 瀬口, 山河: 一般軸対称かくのたわみ問題 (第2報, 波形ダイアフラムとペローズの解析) (1967), 33-250, pp.871-880, 日本機械学会
- (2) 原田: 小形圧力センサ用バリアダイアフラムの設計とその成形技術, Savemation Review (1998), pp.84-89, 株式会社 山武
- (3) 道田, 山口, 栗丘, 各務: 複合アーチばねの研究 (第1報, 単一アーチばねとZ型マイクロスイッチ用可動ばねの静的動作特性) (1977), 43-369, pp.1716-1726, 日本機械学会
- (4) 宇野: 皿ばね(クリック板)の開発に適した応力解析手法の開発(2006), 29, CD-ROM
- (5) 日本化学会編: 化学便覧基礎編改定5版(2004), pp177-183, 丸善
- (6) 平田, 須田, 竹本: パソコンによる数値計算法 (1982), pp.61-62, 朝倉書店

<商標>

ANSYS 及び ANSYS Mechanical は、ANSYS, Inc. または米国及び他の国にある ANSYS, Inc. の子会社の登録商標です。

ネオスタットは、株式会社 山武の商標です。