

客車暖房のカスケード制御装置

沢井善三郎・横田和丸・川瀬太郎

客車の暖房装置を車内の温度に応じて自動的に開閉し、常に快適な車室温度を維持する自動制御装置。カスケード制御方式を採用し、主ループ（マスタ）の検出端は車室温度を、副ループ（サブマスタ）の検出端は熱源付近の温度を検出する。回路はシリコン・トランジスタ6石と最小限の部品で構成し、車両に既設の電源を使う。車内積載を考えて小型軽量、しかも堅牢で安価なことを目標にした。問題は熱源付近の温度の脈動を最小にとどめ、同時に外気温の変動に対する室温のオフセットを少なくすることで、これはマスタ、サブマスタの感温抵抗によって調節できる。実験箱と車両による実験から、この抵抗比を決定した。

1. 緒言

一般に、冷暖房の自動制御は一見、簡単なようで、その実、なかなかの難問題である。それは制御の性能が直接に人間の生理的感覚と結びついているからである。したがって、自動制御系としてもっとも普通の単一ループ・フィードバック・コントロールでは満足な結果の得られないことが多く、自然、二つ以上のフィードバック・ループの組み合わせられた結合制御系に頼ることになる。

カスケード制御系は、結合制御系の一種で、その構成が比較的簡単ながら、単一ループ制御にはみられない多くの特徴をもっている。ことにサイクリングを起こしているオン・オフ制御系とこのカスケード制御系を結び合わせると興味ある属性を発揮する。

さて、空気調和の自動制御系の多くはオン・オフの2位置動作によって、その操作量である電気や蒸気が全開全閉される。したがってこれにカスケード制御を適用すればたいへん面白い結果が期待できる。それは一般の建造物の冷暖房の制御において有効であることはもちろんであるが、客車暖房の自動制御のように多くの制約を伴う場合にはなお一層効果がある。なぜなら、客車暖房では保守とコストの観点から、できるだけ簡単な制御系によって、室温を精密に制御することが要求されるからである。

沢井研究室では、最近、社団法人・車両電気協会の「冷暖房の自動開閉の研究」委員会に協力して、客車暖房のカスケード制御装置の試作を行ない、若干の成果が得られたので、以下に報告する。

2. 客車暖房とカスケード制御

(1) 客車暖房とカスケード制御

現在、国鉄の客車に装置されている冷暖房装置の調整は、固定編成車両およびその他の冷房付車両等を除いては、大部分の車両は乗務員が常に客室内そなえつけの寒暖計をみて、室内温度の変化に注意しながら手動により調整を行なっている。このため乗務員の労務が繁忙な場合には、往々にして操作が適切を欠き、乗客に対して迷

惑をかける結果となっていた。

そこで、これらの開閉操作を車室温度の変化にしたがって自動的に行ない、車室温度が適当に保たれるならば、直接に旅客に対するサービスが向上されることはもちろん、同時に乗務員の苦悩も一掃され、乗務員本来の業務に専念できる結果となり、間接的にはこの面からも業務の改善とサービスの向上が期待される。

当局においても、すでにこの点に着目し、過去数回にわたって、客車の冷暖房の調整を自動化するための試験、試作等も試みられたが、その時にはすぐれた性能のものが得られなかった。再度行なわれた列車試験もついに決定的な良案を見いだすことができず、一部試験的程度で中止となり、現在実用されているものはない。

しかし、このような現状が満足すべきものではないことは明らかである。現に、客車の冷暖房の不調は周知の事実であり、これに関する旅客の苦情は枚挙にいとまがない。

この問題はたしかに多くの困難を含んではいるが、これを新しい観点から見なおし、日進月歩の自動制御技術を駆使すれば、必ず解が与えられ、経済性とも両立する自動制御装置が生みだせるはずである。それでは、客車の冷暖房の自動制御にはどんな困難があるのか、それらを列挙しよう。

1) 一般的に「暖かさ」、「すずしさ」の本質が不明である。単に温度や湿度だけを操作すればよいというものではない。かりにこれが温度のみによると仮定しても、それが温度の絶対値によるのか、あるいはその微分値を加味しているのかははっきりしない。われわれはしばしば、冬、温度の2位置制御をした部屋にいて、その室温の絶対値は人間に暖かさを感じさせずにはおかないような20°C以上の値であるにもかかわらず、その2位置動作がオフ状態のとき、むしろ多少の寒さを感じることもさへ経験する。また、風の影響も無視できない要因である。

2) 室内で温度や風はひろい分布をしめす。とくに天

井のベンチレータをもちいて換気をする場合、空気の補給はほとんど窓からのすきま風によって行なわれている。このためいっそう分布に開きを生じ、床・天井・出入口など同一車室内でもかなりの差を生じる。

3) 大きな熱時定数. 車両内部に含まれている空気、および車体は大きな熱容量をもつため、熱的平衡に達するのに長時間を要する。このことは検出端と操作端の配置に重要な意味をもち、もしこれが適当でないと、両者の間のおくれが過大となって、制御がうまくゆかず、極端なオーバーシュートを起こしてしまう。

4) 激しい外乱. 外乱の大きさが大きいこと、およびその種類が多いことも、客車暖房の自動制御を困難にしている大きな理由である。これらの外乱としては;

a) 乗客数の変化, b) 窓および出入口の開閉, c) 検出端に対する妨害, d) 日射, e) 外気温の変化, f) 乗客の着物の具合, g) 乗客の発熱量の変化等が考えられる。

5) その他の悪条件. たとえば蒸気暖房の場合、蒸気供給の不均一と蒸気のコントロールのむずかしさが問題であるし、寒冷地ではドレンの凍結も考慮しなければならない。

6) 経済的制約. 現在のわが国の自動制御の技術水準はかなり高く、したがって本文中で述べているような客車暖房の自動制御という難問題の解決のために動員できる高級技術は相当程度そなわっているが、旅客運賃に帰する経済的制約のため、1台が数十万円もする工業計装用の調節計は採用できない。このためけっきよく客車暖房の自動制御も上のような高級技術を十分に駆使できず、「安価でよいもの」を別途に考案する必要にせまられる。

このように客車暖房の自動制御には多くの困難があり、しかも終局の目標が人間の生理的感覚の満足にあるため、制御方式の選定は慎重にしなければならない。

まず、操作量であるが、これは蒸気暖房の場合は蒸気を、電気暖房の場合は電気をオン・オフの2位置動作で開閉するのが、経済的観点からも、ほとんど決定的である。

したがって、熱源はオンかオフかのいずれか一つの状態にあり、ヒータから室内に供給される毎時熱量は最大か、あるいは零である。室温を一定にたもつ制御を行なう場合、その室から外へ失われる熱量とまったく等しい熱量をつねにおぎなってやれば室温は変化しないが、これを2位置動作でやるには、熱源を断続して、オン・オフを繰り返させるよりほかにはない。

それではどのような方式で熱源のオン・オフをコントロールしたらよいか。

簡単な特性の制御対象を制御するには、単一ループの制御系で十分効果があがるが、客車暖房の自動制御のよ

うに複雑で高度の制御成績をあげなければならない場合には、結合制御系にしなければ良い結果はえられない。

結合制御系にも多くの方式があるが、特にそのうちのカスケード制御が本件のように熱源をオン・オフ動作で開閉し、しかも外気温の大幅な変動に対しても室温を一定にたもちたい場合に適している。

カスケード制御とはフィードバック制御系において1次調節器の出力信号によって2次調節器の設定値を動かして行なう制御である。

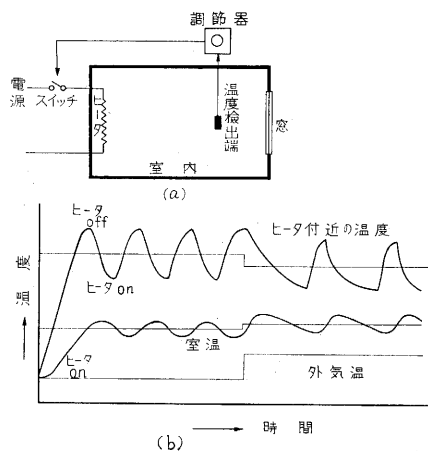
これを室温制御系にほどこしたのが第2図(a)である。1次調節器(これは主調節器、あるいはマスタ調節器とも呼ばれる)で室温を検出し、これによって2次調節器(副調節器あるいはサブマスタ調節器とも呼ばれる)の設定値を変更する。2次調節器は熱源付近の温度を検出してヒータのオン・オフを行ない、それ自体としてもフィードバック・ループを成している。

(2) 単一ループ制御とカスケード制御の比較

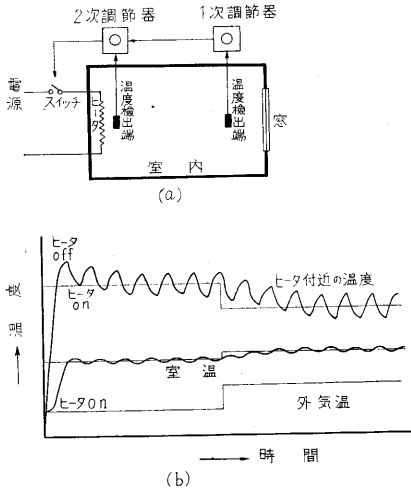
第1図(a)は通常の単一ループ・フィードバック・コントロールによりヒータの電源をオン・オフして室内の温度を一定にする室温制御系の構成である。温度の検出端は実際に人間のいる場所、つまりヒータからの熱量を受け、しかも窓から外気温や日射の影響もおよぶ個所に設置される。客車の場合、この検出端の設置は保安その他の条件から、ほとんど、車体の妻の、床から1.5m以上の高さの所に限られる。

前述したように車体および車内の空気には大きな熱容量がある。したがって、妻に温度の検出端を置くと、検出端とヒータの間に大きな遅れの存在することになる。これは第1図のような不連続制御系においては非常に好ましくない制御結果をまねく。

つまり、ヒータをオン・オフ制御しているから、室温には持続振動——サイクリングともいう——が起こる。これが図のような単一ループの場合には、ヒータと温度



第1図 単一ループによる室温制御



第2図 カスケード制御による室温制御

検出端との間にある大きな遅れから、いわゆるオーバーシュートを引き起こし、その周期も振動もたいへんに大きくなる。第1図(b)にしめたように、このサイクリングは室温の脈動であり、これはヒータに近づくほどはなはだしい。

客車では乗客は温度検出端のそばにのみいるのではない。熱源付近すなわちヒータのすぐ近くに座席をしめている乗客もいる。したがって、もし第1図(b)のように室温に大きなサイクリングがあると乗客は暖められたり冷やされたりして、たいへん不愉快である。いくら温度の平均値が外気温の変動等に対して一定に近いたもたれているとしても、これでは良い制御とは言えない。

そこで、第2図(a)のカスケード制御を採用する。

カスケード制御ではヒータのすぐ近くに温度検出端がおかれ、この信号によって2次調節器がヒータのオン・オフを行なうので室温のサイクリングがたいへん小さくなる。第2図(b)はその状態をしめたものである。これはヒータと温度検出端の間の遅れが単一ループのときにくらべてずっと小さくなっているからである。室温の脈動はヒータから離れるにしたがって、熱容量により平均化され、ほとんど人体には感じられないほどに減衰する。

しかし、もし第2図(a)のカスケード制御系において、1次調節器がなく、2次調節器のみでフィードバック・コントロールがなされているとしたら、ヒータ付近の温度は一定になるかもしれないが、温度検出端があまりにもヒータに接近しすぎていて、窓から入りこむ外気温や日射の影響をほとんど感受しない。したがって、ヒータから離れた所の温度は無制御に等しい状態におかれ、外乱による変動は修正されなくなってしまう。

1次調節器の役割は、したがって、ヒータから離れた場所で外乱の影響を強く受ける点の温度を検出して、こ

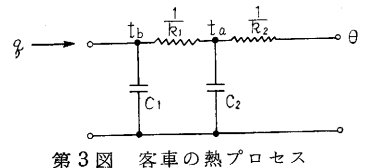
れの修正を行なうことである。それは、温度検出端を単一ループの時と同じく妻の上に置き(前述のようにここはヒータから遠く、外気温と日射の影響を受けやすい)、その温度によって2次調節器の設定値を変えてやる。その変え方は1次調節器の検出端の温度が上がれば、2次調節器の設定値を下げて室温を低くするようにし、1次調節器の検出端の温度が下がれば、2次調節器の設定値を上げて室温を上げるようにする。

こうすると、2次調節器によってヒータのオン・オフが速くなって室温の脈動が小さく押えられ、しかも、1次調節器によって外乱の影響も修正されるので、単一ループでは達成できない良好な制御結果を実現することができる。

(3) カスケード制御の特性

客車暖房にカスケード制御をほどこすとして、ヒータ付近に2次調節器用の検出端(以下これをサブマスタと呼ぶ)を置き、妻に1次調節器用の検出端(以下これをマスタと呼ぶ)を置くとする。

熱源の毎時発熱量、マスタの温度、サブマスタの温度、外気温等の間には、もっとも単純に考えて、式(1)、(2)の関係が考えられる。これは第3図のような電気的等価回路でも表わすことができる。つまり客車の熱プロセス



第3図 客車の熱プロセス

まり客車の熱負荷は相互干渉のある2容量プロセスである。

$$C_1 \frac{dt_b}{dt} = q - k_1(t_b - t_a) \quad (1)$$

$$C_2 \frac{dt_a}{dt} = k_1(t_b - t_a) - k_2(t_a - \theta) \quad (2)$$

ここに、

q = 熱源の毎時発熱量

θ = 外気温

t_a = マスタの温度

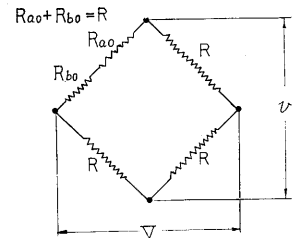
t_b = サブマスタの温度

k_1, k_2 = 熱伝達係数

C_1, C_2 = 熱容量

t = 時間

t_a, t_b は第4図のよう



第4図 感温ブリッジ

な感温ブリッジで検出される。これはホイートストンブリッジの一種であって、3辺は温度による抵抗変化の少ないマンガニン線抵抗 R で構成され、残りの1辺にマスタ用感温抵抗 R_{a0} とサブマスタ用感温抵抗 R_{b0} が直列に入れてある。 R_{a0} と R_{b0} は温度によって抵抗の変化する線を使い、その抵抗温度係数を α とする。そして、 R_{a0}, R_{b0} はそれぞれ $t_a = t_{a0}, t_b = t_{b0}$ の時の抵

抗値とし、 $R_{a0}+R_{b0}=R$ に設計してあるから、マスタ温度が t_{a0} 、サブマスタ温度が t_{b0} の時にブリッジは平衡する。

マスタ温度 t_a 、サブマスタ温度 t_b がそれぞれ t_{a0} 、 t_{b0} から離れるにしたがって、感温ブリッジには不平衡電圧 v が発生する。今ブリッジに供給する電圧を V とすると、

$$v = \frac{\alpha V}{4R} (R_{a0} \Delta t_a + R_{b0} \Delta t_b) \quad (3)$$

ただし、

$$\Delta t_a = t_a - t_{a0}$$

$$\Delta t_b = t_b - t_{b0}$$

この不平衡電圧 v を動作信号とし、熱源の毎時発熱量 q を操作量として、御制系を構成すると第 5 図のブロック線図を得る。このブロック線図の右半分は第 3 図に示した客車の熱プロセスであり、左半分は制御装置である。図中の G は v の大きさにしたがって熱源の発熱量 q を変える伝達要素である（後述するように、この G は実際の装置ではヒステリシスのある 2 位置動作である）。

このブロック線図を見ると、内側に $A \cdot v \cdot q \cdot t_b \cdot B \cdot A$ というフィードバック・ループがある。図では太線で示されている。このループは A の差引き点において、 Δt_b がその設定値と比較される形になっている。この設定値はマスタ温度の偏差分 Δt_a によって与えられる。つまり、 A 点で得られる偏差を ε とすると、

$$\varepsilon = K(-\Delta t_a) - \Delta t_b \quad (4)$$

ただし、

$$K = \frac{R_{a0}}{R_{b0}}$$

(4) から明らかに、設定値の変化は Δt_a の前号により、マスタ温度が t_{a0} 以上に上昇すれば Δt_b の設定値を下げ、逆にマスタ温度が t_{a0} より下降すれば Δt_b の設定値を上げてその偏差を補償するというように行なわれる。すなわち、内側のループは第 2 図の 2 次調節器

に相当し、その設定値がマスタ温度の偏差分によって補償効果のあるように変えられている。つまり、これはカスケード制御系を構成しているのである。

さて、内側のループのゲインが十分高ければ、 ε はほとんど零に近く制御される。その時は (4) から、

$$\Delta t_a = -\frac{1}{K} \Delta t_b = -\frac{R_{b0}}{R_{a0}} \Delta t_b \quad (5)$$

この式はカスケード制御におけるマスタ温度の偏差分とサブマスタ温度の偏差分の関係をしめしている。そして、この関係はマスタ感温抵抗 R_{a0} とサブマスタ感温抵抗 R_{b0} の比に結びついていることがわかる。

ところで、客車暖房の自動制御において、室温の偏差を招く最大の原因は外気温の変動である。これは第 5 図のブロック線図では θ の変化である。それでは、この θ に $\Delta \theta$ の変化が生じたとき、第 5 図のカスケード制御系はこれをどう処理するだろうか。

基本の微分方程式 (2) において、微分項を零とし、定常偏差のみに着目すると、

$$(k_1 + k_2) \Delta t_a - k_1 \Delta t_b = k_2 \Delta \theta \quad (6)$$

(5), (6) より

$$\Delta t_a = \frac{k_2}{k_1 + k_2 + k_1 K} \Delta \theta \quad (7)$$

$$\Delta t_b = \frac{-k_2 K}{k_1 + k_2 - k_1 K} \Delta \theta \quad (8)$$

すなわち、これは外気温の変化とマスタ温度、サブマスタ温度の変化との関係を表わしている。外気温が単位温度だけ変化した場合のマスタ温度、サブマスタ温度の偏差を知るために η_a, η_b をつぎのように定めると、

$$\eta_a = \frac{\Delta t_a}{\Delta \theta} = \frac{k_2}{k_1 + k_2 + k_1 K} \quad (9)$$

$$\eta_b = \frac{\Delta t_b}{\Delta \theta} = \frac{-k_2 K}{k_1 + k_2 + k_1 K} \quad (10)$$

ここで、 K のかわりにつぎの γ を採用する。

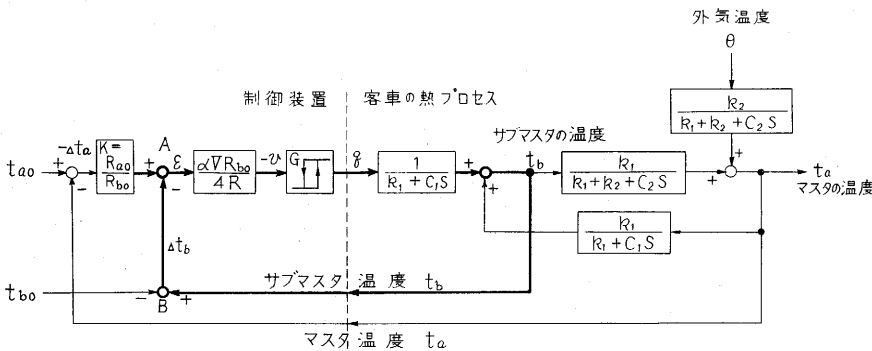
$$\gamma = \frac{R_{b0}}{R_{a0} + R_{b0}} \times 100 = \frac{100}{1 + K}$$

この γ は感温ブリッジの一辺に含まれるサブマスタ感温抵抗 R_{b0} の % である。この γ で (9), (10) の K を置き換えると、

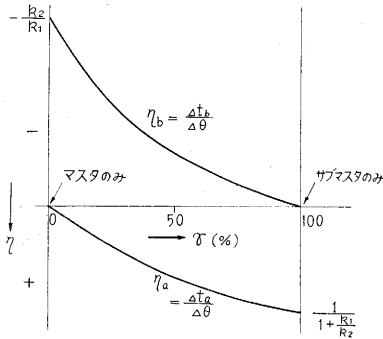
$$\eta_a = \frac{1}{1 + \frac{100 k_1}{\gamma k_2}} \quad (11)$$

$$\eta_b = \frac{1 - \frac{100}{\gamma}}{1 - \frac{100 k_1}{\gamma k_2}} \quad (12)$$

式 (11), (12) は外気温によるマスタ温度、サブマスタ温度の変動と、感温ブリッジの一辺に含まれるサブマスタ感温抵抗 R_{b0} の割合の関係をしめしている。



第 5 図 客車暖房のカスケード制御のブロック線図



第6図 η_a, η_b と γ の関係

この η_a, η_b を γ についてプロットしたのが第6図である。

第6図をみれば、客車暖房のカスケード制御を感温ブリッジによって行なう場合に、マスタ感温抵抗とサブマスタ感温抵抗をどんな値にすれば良いかの目安が与えられる。

第6図の横軸の左端、つまり $\gamma=0\%$ とは、感温ブリッジの一边の抵抗をすべてマスタに割り当てた場合である。すなわち、マスタのみで制御することで、このとき η_a は零、 η_b は最大である。これはマスタ温度に外気温変動によるオフセットがなく、 $\Delta\theta$ の補償はすべてサブマスタ温度の偏差によって負担されていることを意味している。

また、第6図の横軸の右端は $\gamma=100\%$ で、これは感温ブリッジの一边の抵抗を全部サブマスタにしたケースである。つまり、サブマスタのみでコントロールすることで、このとき $\eta_b=0$ 、 η_a は最大である。これはサブマスタが外気温とは無関係に動作し、一方マスタ温度には外気温の影響が強く現われることを意味する。

上の二つの例はカスケード制御における両極端である。 $\gamma=0\%$ から、感温ブリッジの一边に徐々にサブマスタを入れてゆくにしたがって、マスタ温度、つまり室温のオフセットは増し、逆にサブマスタ温度の偏差は減少する。

さて、第6図だけを見ていると、室温を外気温の変動に対してオフセットなく一定にたもつには、 $\eta_a=0$ の γ 、すなわちマスタのみで制御するのがもっとも良いという

結論になる。しかし、ここで考慮しなければならないのは、第6図のしめす議論がすべて温度の平均値について行なわれていることである。実際には制御装置のオン・オフにしたがって各部の温度は持続振動をしている。オン・オフ動作の制御装置を使うかぎり、この持続振動はさげられないが、これによる室温の脈動はできるだけ小さいことがのぞましい。前節に述べたように、これがカスケード制御を採用した大きな理由である。

ところが、この室温の脈動はサブマスタの%を大きくするほど小さくなる。つまり、このことはカスケード制御において、2次調節器のゲインを上げてゆくことに相当するからである。したがって、第6図で言えば、この脈動は η_a とまったく反対の傾向をしめすことになる。室温のサイクリングは $\gamma=0\%$ で最大で、 $\gamma=100\%$ で最小である。

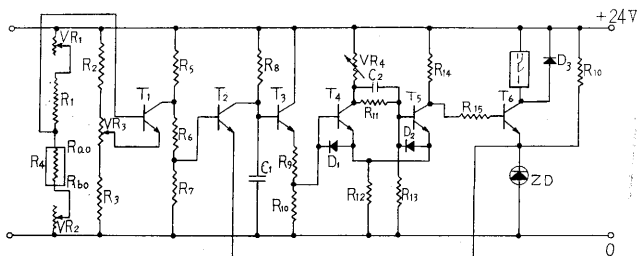
そこで、 γ の選定が微妙な問題になってくる。外気温に対して室温をオフセットなく一定にたもち、しかも室温の脈動はできるだけ小さくしたい。しかし、 γ の調節でこの二つの要求を同時に満たすことは不可能で、けっきよどこかで妥協するほかない。つまり、マスタとサブマスタとしてどの程度の抵抗値を選べば、快適な車内環境が実現できるかという問題で、これは実際に室温制御の実験を行なって決定した。

3. 制御装置の設計

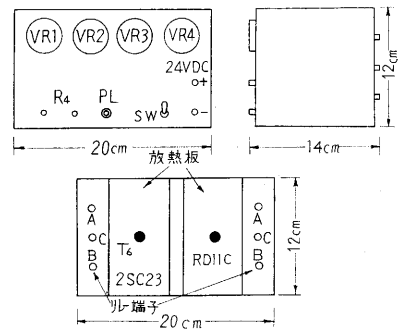
前節までの検討を土台として、客車暖房のカスケード制御の試作を行なった。第7図がその回路図である。また、第8図に寸法をしめす。写真1、写真2は装置の外観である。本装置の設計に考慮した点を以下に要約する。

(1) 感温ブリッジ

第7図左端の部分は、基本的には第4図のホイートストン・ブリッジと同じものである。 R_1, R_2, R_3 は 800Ω のマンガニン抵抗、 R_4 は端子としてパネル上に出ており、ここへマスタ感温抵抗 R_{a0} とサブマスタ感温抵抗 R_{b0} を直列につなぐ。ボリューム VR_3 は設定値調整用、またボリューム VR_1, VR_2 は任意の周囲温度において装置の試験を容易に行なうためのボリュームである。



第7図 制御装置の回路



第8図 制御装置の寸法



写真 1 制御装置 (表側)

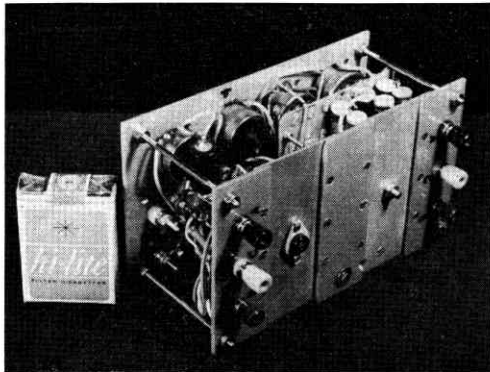
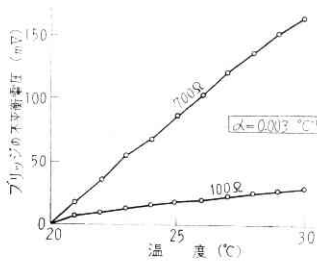


写真 2 制御装置 (裏側)

感温抵抗として Ni-Fe パルコ合金〔線径 0.081 mm (仕上外径), 1m 当たりの抵抗値 20°C で 63Ω〕を用



第 9 図 感温ブリッジに生じる不平衡電圧 ($R_1=700\Omega+100\Omega$)

合金を採用した。

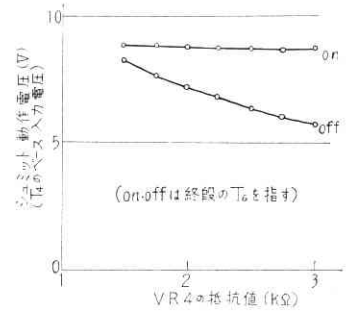
(2) トランジスタ回路

トランジスタは全部で 6 石使用し, これらは高温でも使える丈夫なシリコン・トランジスタを採用した。回路のバイアス電源としては客車の照明や扇風機用として設備されている DC 24V を共用する。電源が種類しかないので回路の設計がやや困難であったが, 定電圧ダイオード等の使用により解決した。ブリッジの不平衡電圧は初段トランジスタ T_1 のエミッタとベース間に直接加えられる。ブリッジの電源とトランジスタ回路の電源は共通である。ブリッジの不平衡電圧は T_1, T_2, T_3 で増

いたとき, ブリッジに生じる不平衡電圧を実測したのが第 9 図である。純 Ni 線を使う案もあったが, Ni 線は一定した特性のものが製造しにくいとの理由で, 最近 JIS より除去されたので Ni-Fe

幅され, つぎの T_4 と T_5 で構成されているシュミット回路に加えられる。室温制御のように現象変化の非常に緩慢な場合, 増幅器出力の変化は極めてゆっくりしたものである。

したがって, もしシュミット回路がないと, 終段のリレーのコイルには, オン・オフの切換え付近で, 感動値に近い徐々に変化する電流が流れ, 接点の寿命をいちじるしく短くする結果になる。そこで, リレーに Quick Action をさせるため, ここにシュミット回路を挿入したのである。VR₄ はシュミット回路のオン・オフのヒステリシス調整用である。



第 10 図 VR₄ とヒステリシスの関係

る。第 10 図に VR₄ とヒステリシスの関係をしめす。

(3) リレー

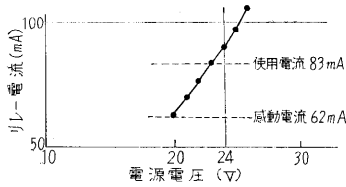
リレーは信頼度をあげる観点より特急「はつかり」にも採用されている富士通信機製造 KK 製フジ 34 号継電器 F. Bv. 34 a 31/1 (12V 使用, 145Ω, 感動電流 62 mA, 使用電流 83 mA) を使用した。本リレーは 1~8 A の中電流開閉に適し, 小型なプラグインタイプの継電器で, 電磁弁と制御装置の中介として最適とされている。2 組の A, B 接点を内蔵し, その端子を第 8 図のようにパネル上に出した。後述するように, この接点でスキナ弁 (DC 24V, 200Ω, 120 mA) および電磁弁 (DC 24V, 310Ω, 77 mA) の開閉を行ない, 蒸気または電熱の操作を実施したのである。また, このリレーは透明ポリカーボネイトでカバーされた完全防塵型であるから, 塵埃の多い現車でも使用に耐える。

(4) 保護回路等

ツェナー・ダイオードはリレーに 12V の電圧を確保するためのものであり, 同時に T_2 にバイアス電圧を供給する。ダイオード D_3 はリレーのコイルに生じる過渡電圧からトランジスタを保護する。また D_1, D_2 はシュミット回路の逆バイアス緩和用である。トランジスタ T_2 のコレクタとアース間に入っているコンデンサはノイズ除去用である。これによってノイズによる誤動作とリレーのチャタリングを防止する。

さて, 本制御装置はトランジスタを使用し, しかも信号は直流的に増幅されている。したがって, 零レベルのドリフトが問題になる。しかし, 安価で簡単というたてまえから高級な回路を採用するわけにはゆかない。ドリフトを生じる原因としては第一に温度によるトランジスタ特性の変動が考えられる。しかし, これは制御装置を

ヒータからできるだけ離れた車室内に設置するようにすれば、温度条件は比較的ゆるやかであり、本来、ヒータのオン・オフのみを制御する目的のものであるから、第7図の回路で十分で、実験でも問題は生じなかった。つぎに電源電圧の変動が問題である。客車の24V DC電源は蓄電池から供給されるが、これはかなり変動する。



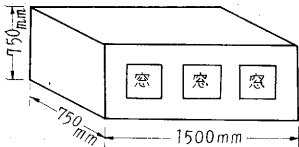
第11図 電源電圧とリレー電流の関係

そこで、制御装置に供給する電圧とリレーのコイルに流れる電流との関係をプロットしたのが第11図である。これから、本制御装置のリレーは電源電圧が20Vから25Vまで確実に動作することが知れる。現車試験でもこの点からのトラブルは生じなかった。

装置全体はできるだけ小型軽量になるように組み立て、使用部品の選定も信頼性と経済性の観点から行なった。また、終段のトランジスタとツエナー・ダイオードには放熱板を取り付けて過熱を防いだ。そして、ヒータのオン・オフに対応するパイロット・ランプをつけた。ヒータのオンの時に、終段のトランジスタはオフであるように位相を決めて、予熱時の長時間のヒータのオン状態からトランジスタを保護した。

4. 簡易木箱による実験

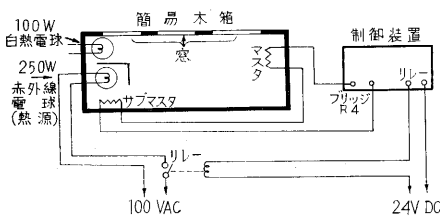
客車暖房のカスケード制御の予備実験として、まず、簡易木箱による温度制御の実験を行なった。



第12図 簡易木箱

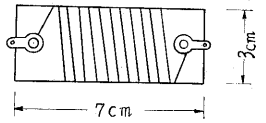
実験に使用したのは第12図のような3個の窓をもつ木製の箱で、この中にマスタ、サブマスタに相当する感温抵抗を配置し、前節で説明した制御装置と連結して、熱源の250W赤外線電球をオン・オフし、箱内の温度をカスケード制御した。第13図がこの実験の系統図である。

図中の100Wの白熱電球は外乱を加えるためのものである。第14図は使用した感温抵抗である。実験と同時にマスタ付近、およびサブマスタ付近の温度を測定



第13図 実験系統図

し、連続記録した。いうまでもなく、この簡易木箱は本物の客車とは熱的特性においてかなり違ったものである。しかし、われわれの

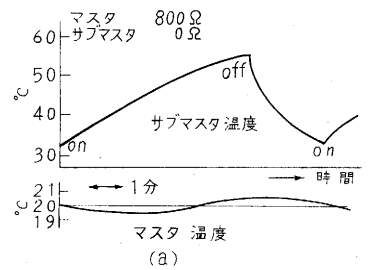


第14図 感温抵抗

実験目的は試作した制御装置が、ゆっくりと変化する熱プロセスをループの内に含んで、果たしてオン・オフ動作をするか、またマスタとサブマスタによってカスケード制御を行なうかを確認することにあつたので、この簡易な木箱でも十分であった。

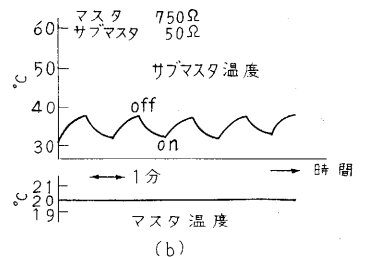
(1) マスタのみによる制御 (マスタ 800Ω, サブマスタ 0Ω)

まず、比較のため、感温ブリッジの一边 R4 をすべてマスタに当て、マスタ感温抵抗を800Ωとして、これのみによる単一ループの温度制御を行なった。ただし、窓は閉じ、100W白熱電球はつけない。木箱の置かれた部屋の温度は17°C、木箱内の温度設定値は20°C、ヒステリシスは最大にとつた。マスタの位置は熱源と反対側のすみとした。



このとき、定常に達してからの、温度のサイクリングをマスタ温度、サブマスタ温度について記録したのが第15図(a)である。この図からつぎの諸点が観測される。

1) 熱プロセスのゆっくりした温度変化を、Ni-Fe合金の感温抵抗は確実に



とらえてフィードバックし、制御装置は熱源をオン・オフした。最初、心配したリレーのチャタリングやノイズによる誤動作は生じなかった。

2) 単一ループのため、2・(2)で推論したように、温度の大幅なサイクリングを生じた。熱源はオンが7分、オフが3分の時間で開閉を繰り返す。その間、サブマスタ温度は20°Cの幅で上下に脈動した。サブマスタ温度の観測点は熱源に近いので、熱源のオン・オフと温度の上下の間に遅れは見られなかった。つまり、熱源のオンと同時にサブマスタ温度は上がりだし、オフと同時に下がりだす。一方、マスタ温度も、サブマスタ温度の大幅な変動に対応して、やはり上下し、その幅は2°Cであった。そして、マスタ、サブマスタ間の熱容量による遅れ

から、マスタ温度の上下は熱源のオン・オフよりかなり位相がずれ、その差は 180°C に近かった。

(2) サブマスタの効果の確認 (マスタ 750Ω, サブマスタ 50Ω)

つぎに、R₄の一部を 50Ω のサブマスタに当て、これを熱源の近傍に置き、残りの 750Ω をマスタとして木箱の他方のすみへ置いて実験した。残りの条件は 4・(1) と同一である。このときの温度の変化の状態を第 15 図 (b) にしめた。この図からサブマスタの効果がはっきり観取できる。それは、

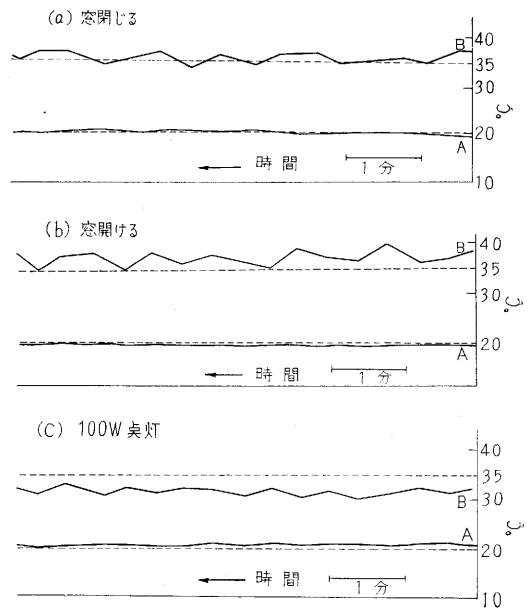
- 1) 熱源のオン・オフが一分ごとに行なわれ、(a) よりも早くなった。
- 2) このため熱源付近のサブマスタ温度の上下の幅もせばまり、7°C の幅である。
- 3) サブマスタ温度の脈動が幅せまく、そして早くなったのに対応して、マスタ温度の変動も小さくなり、ほとんどマスタ温度は一定となった。

(3) 外乱の影響

サブマスタの添加によるサイクリングの減少はカスケード制御の一面である。カスケード制御のもう一つの重要な特性として、マスタ温度によるサブマスタ温度の設定値の移動がある。そこで、これを調べるため、外乱を加えて、強制的にマスタ温度を変えてみた。外乱を加える手段は二つあり、一つは窓をあけること、一つは内部に入れてある 100W の白熱電球を点灯する。前者はマスタ温度を一時強制的に下げ、後者はマスタ温度を一時的に上げる。

マスタ 770Ω, サブマスタ 30Ω としてこの実験を行なったときの温度記録が第 16 図である。(a) は窓をしめたまま、100W 電球もつけない標準の状態では、マスタ温度は 20°C で一定、サブマスタは 35°C の上下にふれている。つぎに窓をあけ放ってマスタを一時強制的に下げた後、定常に達したのが (b) 図である。このとき、マスタ温度の低下によって、サブマスタの設定値は上げられ、これによって外乱の影響を修正しようとする。したがって、しだいにマスタ温度は元の 20°C に帰るが、1°C 以下のオフセットを残し、サブマスタ温度はそのレベルが上がる。

(b) にこの点ははっきりとでている。(c) 図は (a) の状態から、内部の 100W 電球をつけて、マスタ温度を一時強制的に上げた後、定常に達した状態である。(b) とは反対に、こんどはサブマスタの設定値が下げられて外乱の影響を修正する。そして、マスタ



実験 A —— マスタ温度
 実験 B —— サブマスタ温度
 (マスタ: 770Ω, サブマスタ: 30Ω)
 第 16 図 外乱の影響

温度には 1°C 以下のオフセットが残り、サブマスタ温度のレベルはそれだけ低下している。

第 16 図によって、カスケード制御におけるサブマスタの設定値の変化とマスタのオフセットの関係が推論通りに実現していることを確認した。

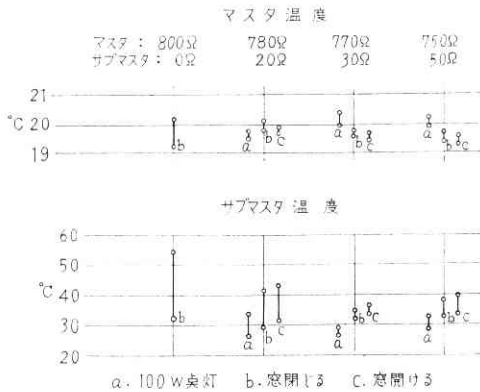
(4) まとめ

以上、サブマスタの特定の値について実験したが、サブマスタ 0Ω, 20Ω, 30Ω, 50Ω について、それぞれ外乱を加えて実験した結果をまとめたのが第 1 表である。

また、第 1 表を図表化したのが第 17 図である。第 1 表において、マスタとサブマスタの温度の変化範囲をしめたが、これは第 17 図において、縦の線分として表わされている。長い線分は大きな温度変動を表わし、短い線分はせまい温度変化をしめす。三つの線分が一組に

第 1 表 簡易木箱による実験結果

		マスタ 800Ω サブマスタ 0Ω	780Ω 20Ω	770Ω 30Ω	750Ω 50Ω
100W 点灯	マスタ(°C)		19.6~19.8	20~20.4	20.0~20.2
	サブマスタ(°C)		26~34	27~29	29~33
	周期(分)		on 1/off 3	on 0.5/off 1	on 0.5/off 1
窓 閉 じ る	マスタ(°C)	19.3~20.2	19.9~20.1	19.6~19.8	19.4~19.7
	サブマスタ(°C)	32~55	29~41	33~35	33~39
	周期(分)	on 7/off 2	on 4/off 2	on 0.5/off 0.5	on 0.7/off 0.7
窓 開 け る	マスタ(°C)		19.8~19.9	19.5~19.9	19.3~19.6
	サブマスタ(°C)		31~44	34~35	34~40
	周期(分)		on 3/off 1	on 1/off 0.5	on 1/off 0.5



第 17 図 簡易木箱による実験結果の図表化

なっているのは、標準の状態と「100W 点灯」および「窓をあけた場合」の 3 ケースをまとめたからである。第 17 図からつぎの結論がでる。

- 1) サブマスタの抵抗値を増すと、マスタ温度とサブマスタ温度の変化範囲がせばまる。
- 2) サブマスタの抵抗値を増すと、外乱によるマスタ温度のオフセットが大きくなる。

この二つの結論は 2・(3) で推測したカスケード制御の特性を正しく裏書きするものである。1) と 2) の傾向はサブマスタの抵抗値に関して、まったく相反する性質をしめすので、オフセットを小さくし脈動も少なくするにはけっきよどこかで妥協点をみいださなければならない。しかし、それには実際の客車を使って決定するのが早道である。簡易木箱による実験としては、これで十分の目的を果たしたので、この経験を持って現車試験に臨んだ。

5. 現車試験

前章の簡易木箱による実験で所期の結果が得られたので、この経験を土台にして現車試験を行なうことになった。

(1) 現車試験の準備

1) 温度検出端

現車試験のため新たに、マスタ用およびサブマスタ用

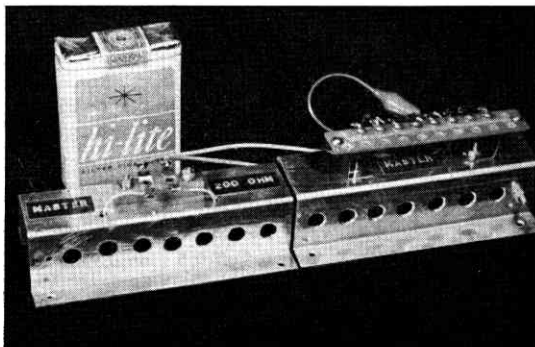


写真 3 マスタ温度検出器

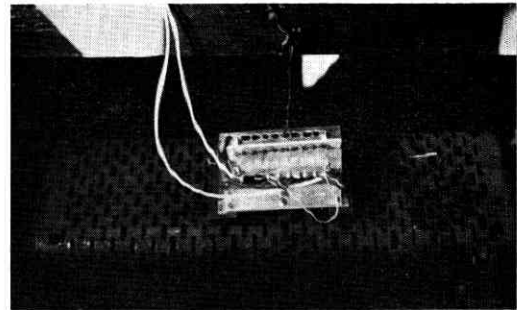


写真 4 サブマスタ温度検出器(電気暖房用)

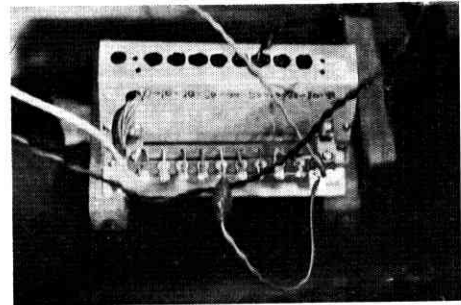


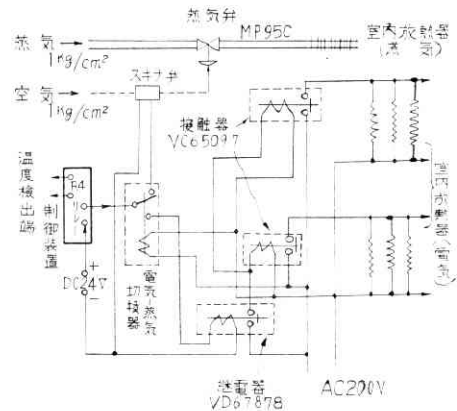
写真 5 サブマスタ温度検出器(蒸気暖房用)

の温度検出器を設計し、試作した。現車では電気暖房と蒸気暖房が使われるので、サブマスタは電気暖房用と蒸気暖房用の 2 種類を作り、また、マスタはこれを分割配置することも考えて多数個を用意した。写真 3, 写真 4, 写真 5 にこれらをしめす。

温度検出端の設計に際して特に考慮した点は、時定数をできるだけ小さくすること、感温抵抗が直接に輻射を受けないこと、空気の流通のよいこと、ごみのたまりぬこと等の諸点である。抵抗線は第 9 図の線と同じものを巻いた。

2) 操作部

操作部は委員会において選定されたものを使用した。蒸気暖房に対しては山武ハネウエル MP953C ダイナラム弁をスキナ弁 (DC 25 V, 200Ω, 120 mA) を介し



第 18 図 現車試験の接続図

て操作した。

電気暖房に対しては接触器 VC65097 (AC 200V, 10 kVA) で操作した。ただし、継電器 VD 67878 (DC 24 V, 3 A) を中介にした。

これらの操作部と制御装置との連結は、電化区間と非電化区間の境において自動的に電気暖房と蒸気暖房の切換えが行なわれるように第 18 図の接続図に従った。

(2) 試験結果

現車試験はまず定置試験を昭和 38 年 2 月 4 日より 9 日まで尾久客車区でスハフ 422060 車両について行ない、つぎに走行試験を昭和 38 年 2 月 20 日より 23 日まで上野一青森間 1 往復して同一車両について行なった。

その主要結果を要約する。

1) 電気暖房に関しては、とくに問題はなく、非常に良好な制御ができ、快適な室温条件が得られた。

2) 蒸気暖房の場合は、放熱管に放熱翼がないため、かなり大きなおくれを生じた。定置試験の場合 (サブマスタは放熱管から数 cm 離して配置してあった) には、制御弁が閉になって蒸気流入が止まっても、すでに入った蒸気が潜熱を放出するため相当の室温の行過ぎを生じた。そこで、サブマスタ温度検出用抵抗を放熱管に直接巻き付ける方法や、ごく放熱管に接近して配置する手段を講じて走行試験に臨んだところ、こんどはサブマスタ

が早く動作しすぎてオンの時間がオフの時間に比して極めて短くなり、よい制御が行なわれなかった。これは極端にサブマスタを接近させすぎたからだと考えられる。

3) マスタ取付位置と電気暖房用サブマスタ取付位置については結論が出たが、蒸気暖房用サブマスタの取付位置および構造についてはさらに研究する必要がある。

4) マスタ感温抵抗 R_{a0} とサブマスタ感温抵抗 R_{b0} の比は約 20 対 1 すなわち、 $R_{a0}/R_{b0}=20/1$ 程度が適当である。

6. 結言

以上、客車暖房のカスケード制御について、その特性を理論的に検討し、制御装置の試作とその試験結果について述べた。

今後、客車暖房のカスケード制御が実用化されるまでには、なお解決すべき多くの困難がある。しかし、われわれの試作した制御装置は将来の実施について具体的なビジョンを与えたのであるから、開発段階におけるその役割は十分に果たしたと思う。

終わりに、本研究を行なう機会を与えられた国鉄本社と、車両電気協会の方々、ならびに研究遂行にあたりご助言をいただいた東京大学生産技術研究所第 3 部山口助教、鉄道技術研究所 長谷川 康氏、その他の方々に感謝する次第である。
(1963 年 6 月 1 日受理)

次号予告 (10月号)

研究解説

光の可干渉性 (Coherency) とその応用	久保田 広
圧力計工業界の現況	小川 正義
鉄鉱石流動還元機構	原 善 四 郎
東京の道路交通	星 登 和
—オリンピック開催に寄せて—	

研究速報

近距離音場の近似計算	鳥 飼 安 生
------------------	---------

生研ニュース