

自動車用空気調和装置の全自動制御

Automatic Temperature Control for Automobile Air Conditioning System

The authors have developed a mechanical type automatic control system for automotive air conditioning. It employs a bi-metallic temperature sensor and makes a dexterous use of vacuum throughout its mechanism. Thanks to its favorable performance and controlability in actual application on a car this new control system is engaging attention from the automotive industry.

高橋礼次郎* *Reijirô Takahashi*
 伊藤敏勝* *Toshikatu Ito*
 天野松男** *Matsuo Amano*

1 緒言

近年、モータリゼーションの発展は著しいものがあり、輸送手段の時代から快適な室内環境の要求へと質的な変化をきたしている。この快適な室内環境を作り出す装置としてヒータ、クーラおよびファンなどの機能を一つのユニットに有機的に結合した空気調和装置が出現した。

しかし、総合機能である空気調和装置も温度調節機構の操作は人間が手動で行なっているのが普通である。そのため車室内温度を快適に保つために運転中外気温度、走行条件などにより数種類のレバーを操作しなければならず、ドライバーにかなりの負担をかけるばかりではなく、その性能を十分に発揮させることもむずかしいと言える。このため、いかなる外気条件、車両状態においても希望する設定温度に車室内を維持できるように空気調和装置各機器の操作を自動化する要求が高まっている。

本報告は現在開発および実用化が一部なされている電気機械式温度制御とは別に、温度検出部にバイメタルを用い、負圧流体を使用した機械式温度制御を開発し、実用性が見通しがついたのでその理論と実験結果について述べる。

2 記号の説明

本論文の数式中における記号を下記に述べる。

- T_r, T_a, T_d : 車室内, 外気およびダクト温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- α : 温度設定ダイヤルの角度 ($^{\circ}$)
- h : 熱貫流係数 ($\text{kcal/deg}^{\circ}\text{C h}$)
- W : 風量 (kg)
- C_p : 比熱
- K_0 : 温度設定ばねのゲイン (kg/°)
- K_1, K_2, K_3 : 車室内, 外気, ダクトセンサゲイン (kg/m^2)
- K_4 : 温度調節器負圧変換ゲイン (mmHg/kg)
- K_5 : アクチュエータゲイン (m^2/mmHg)
- K_6 : リンク比 ($^{\circ}/\text{m}$)
- K_7 : エアミックスドアの角度による冷暖房ゲイン (kcal/°)
- K_D : バイメタルの湾曲定数 ($1/^{\circ}\text{C}$)
- b, H : バイメタルの幅と厚み (m)
- $A_t, A_s \dots A_x$: ダイアフラム有効面積 (m^2)
- P_r, P_a, P_d : 車室内, 外気およびダクトセンサの変換負圧 (mmHg)
- P_s : 負圧源負圧量 (mmHg)

3 自動車用空気調和装置の概要

空気調和装置とは「ある場所の温度、湿度、空気の清浄度およびそれらの分布」などを、その使用目的に従った快適な環境を作り出す装置である。一般の建造物と自動車用のそれとは本質的な違いはないが、自動車用の空気調和装置の場合、その使用条件、たとえば、室内空間に占める人間の割合、断熱構造、あるいは車両は走行しているので外的環境条件が違って来る。したがって建造物の空気調和装置に比較して各機器の構成あるいは設定にあたってはよりむずかしい条件を持っていると言える。

自動車用空気調和装置はヒータ、クーラおよびベンチレーションなどの単独機能を持ったものがそれぞれ独立した形で普及しているが、ここでは四季を通じて常に快適な環境を作り出す装置として、これらが総合的に組み合わせられ自動的に快適環境を作り出す全自動空気調和装置を検討することにした。この装置は単独機能を有する、空気調和装置の機器を有機的に組み合わせたものであり、空気調和を行なうためのシステムとして機器の配列を分類してみると、リヒート・エアミックス形、フル・リヒート形、パラレル・エアミックス形の三つの方式があげられる。これらの方式はそれぞれの特徴を備えているが、今回の検討に取り上げたシステムとしては

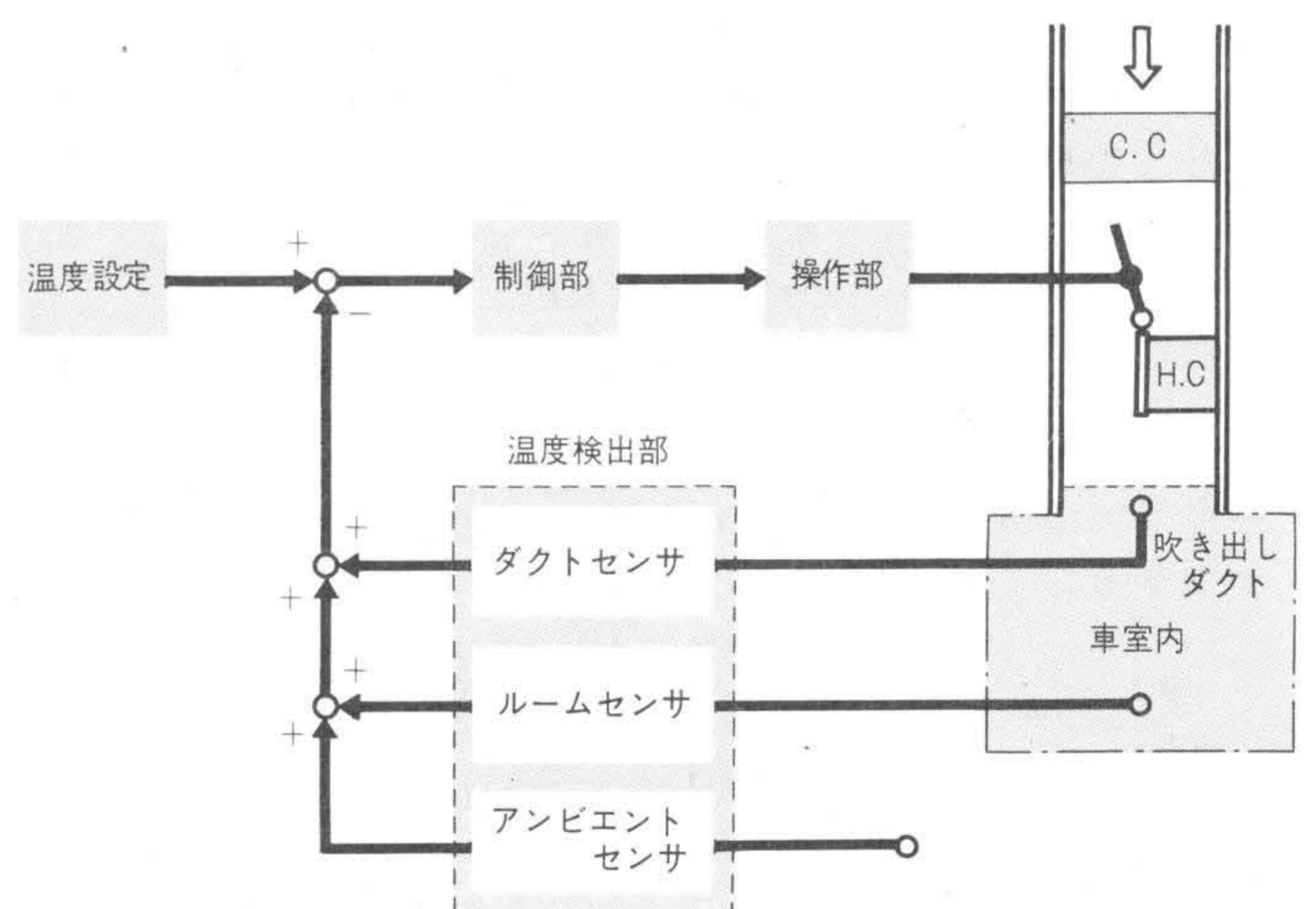
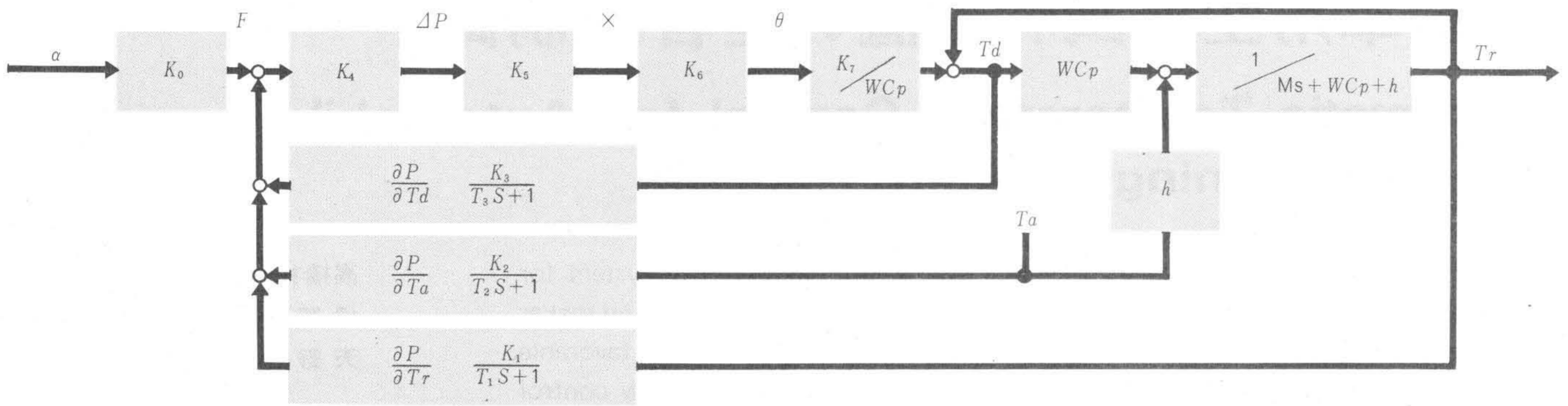


図1 温度制御装置のブロック線図 温度制御プロセスにおいて機器構成と温度センサの配置および制御ルーチンの概要である。

Fig. 1 Block Schematic of Temperature Control System

*日立製作所佐和工場 **日立製作所日立研究所



温度制御が比較的安定して行なえらと考えられるリヒート・エアミックスの方式について検討を進めることにした。以下このシステムの温度制御についての検討結果を記述する。

4 リヒート・エアミックス形の温度制御

空気調和装置の温度制御システムは温度検出部、制御部、操作部から成り立っている。これをリヒート・エアミックス形の空気調和装置に組み込んだ場合のブロック線図は図1のように表わすことができる。

現在、自動車用空気調和装置の温度制御の方法としては電気式、電気機械式および機械式などの方式で種々のシステムが開発され、実用化が進んでいる。今回、筆者らは自動車の持っている負圧源を利用し、価格的に有利と考えられる機械式温度制御について、次のような方針のもとに検討を進めることにした。

- (1) 温度検出をバイメタルで行ない、直接負圧変換の出力を制御部に導入する。
- (2) 操作部には大きな力が必要となるため負圧式のパワーボを利用する。

このような方針に基づいたリヒート・エアミックス形の空気調和装置の概略図および熱伝達関数のブロック線図は図2に示すとおりである。

図2に示すシステムの熱的、機械的要素の伝達を取り扱うにあたり、安定した状態での伝達要素を解析するためすべて一次遅れとして取り扱うことにした。

このブロック線図を定常状態、すなわち $t \rightarrow \infty$ ($S \rightarrow 0$) として整理すると、(1)式が成立する。

$$Tr = \frac{\alpha K_0 + \left\{ \frac{h}{K_4 K_5 K_6 K_7} + \frac{h}{WCp} K_3 \frac{\partial P}{\partial Td} - K_2 \frac{\partial P}{\partial Ta} \right\} Ta}{\frac{h}{K_4 K_5 K_6 K_7} + \left(1 + \frac{h}{WCp} \right) K_3 \frac{\partial P}{\partial Td} + K_1 \frac{\partial P}{\partial Tr}} \dots (1)$$

(1)式から、外気温度および車両の放熱係数を変化させた場合の車室内温度の定常偏差は、それぞれ(2)、(3)式で表わすことができる。

$$\frac{\partial Tr}{\partial Ta} = \frac{\frac{h}{K_4 K_5 K_6 K_7} + \frac{h}{WCp} K_3 \frac{\partial P}{\partial Td} - K_2 \frac{\partial P}{\partial Ta}}{\frac{h}{K_4 K_5 K_6 K_7} + \left(1 + \frac{h}{WCp} \right) K_3 \frac{\partial P}{\partial Ta} + K_1 \frac{\partial P}{\partial Tr}} \dots (2)$$

$$\frac{\partial Tr}{\partial h} = \frac{\left(\frac{1}{K_4 K_5 K_6 K_7} + \frac{1}{WCp} K_3 \frac{\partial P}{\partial Ta} \right) (Ta - Tr)}{\frac{h}{K_4 K_5 K_6 K_7} + \left(1 + \frac{h}{WCp} \right) K_3 \frac{\partial P}{\partial Td} + K_1 \frac{\partial P}{\partial Tr}} \dots (3)$$

また、車室内の制御温度の設定値を変化した場合の定常偏差は(1)式から(4)式が成立する。

$$\frac{\partial Tr}{\partial \alpha} = \frac{K_0}{\frac{h}{K_4 K_5 K_6 K_7} + \left(1 + \frac{h}{WCp} \right) K_3 \frac{\partial P}{\partial Td} + K_1 \frac{\partial P}{\partial Tr}} \dots (4)$$

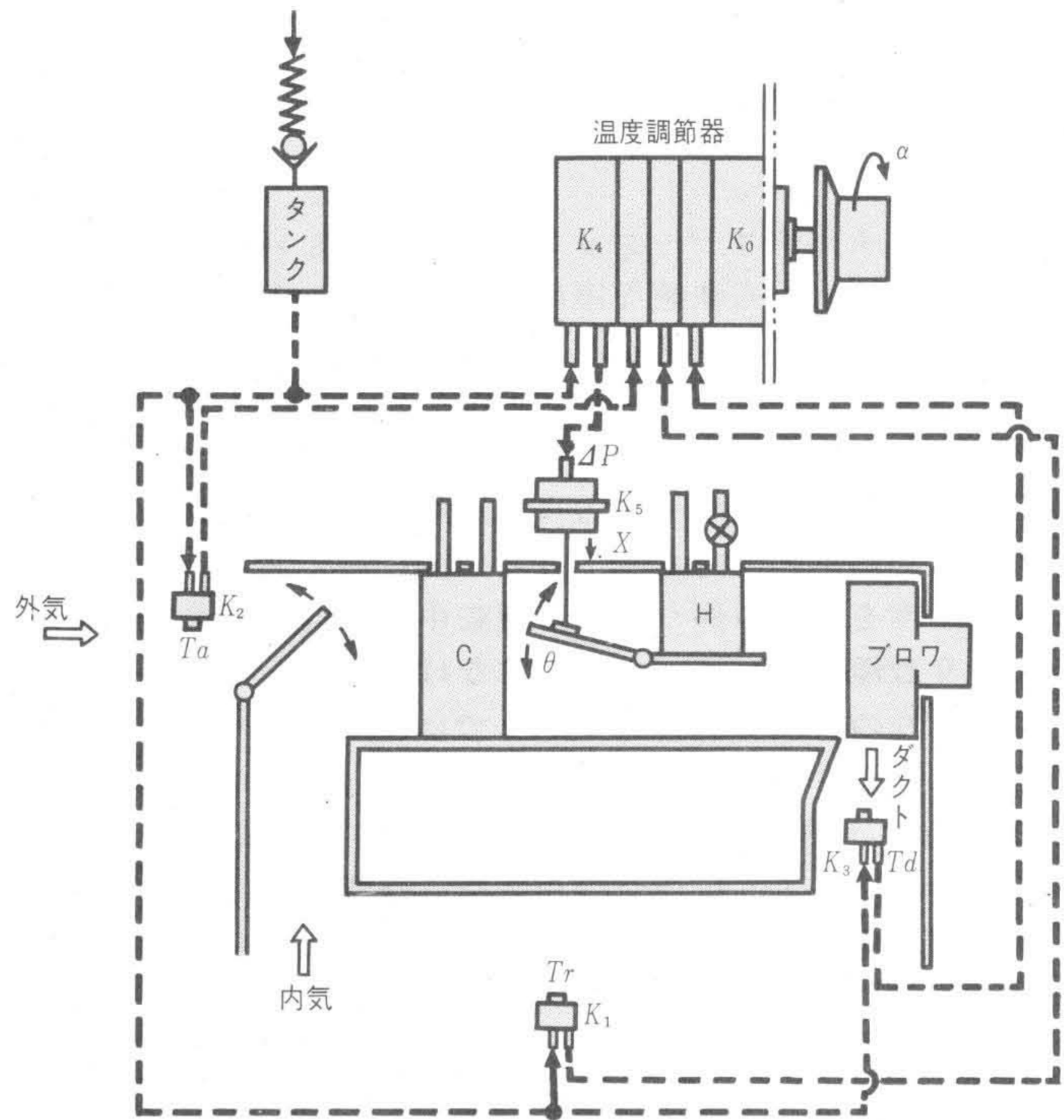


図2 空気調和装置とその熱伝達 エアコンディショナの実車搭載(とうさい)図において自動制御手順を一次遅れの伝達関数として表わした。
Fig. 2 Air Conditioning System and Thermal Transmission

これらの式より外気温度の変化に対して車室内温度の定常偏差を小さくするためには(2)式からわかるようにアンビエントセンサ感度をダクトセンサ感度よりも良くしておきダクトセンサのおくれをアンビエントセンサで補正する必要がある。また、日射および車速などの環境条件の変化に対しては、(3)式で示すようにルームセンサおよびダクトセンサの感度を上げておくことが車室内温度の定常偏差を小さくすることになる。

これら3種類のセンサの機能について考えて見ると、ルームセンサは車室内温度を希望する設定温度に保つためのフィードバック制御における主センサである。そして、定常運転での温度範囲は狭いが、感度をいちばん高くすることが望まれる。ダクトセンサはダクト吹出し温度が操作部と温度調節ドアのヒステリシスにより設定温度に偏差を生じないように迅速に補正し、制御系の過渡特性を改善するものである。アンビエントセンサは外気条件が車室内温度に与える影響を打ち消すように作用するフィードフォワードセンサである。ダクトセンサおよびアンビエントセンサは広い温度範囲に対し感度を一定とする必要がある。

5 温度センサの構造と原理

温度検出部にはバイメタルを用い温度変化に対する出力を負圧に変換して取り出すようにしてある。その作動原理は図3に示すとおりである。

すなわち、温度センサは温度検出部としてのバイメタルと負圧変換部の力平衡式アクチュエータ部より構成されている。温度検出部のバイメタルは温度変化によって湾曲する変位を力平衡式アクチュエータの負圧制御弁を開閉しダイヤフラムにかかる負圧量を変化させバイメタルの偏位を元にもどすように作動する構造となっており、温度と負圧の間に一定の対応関係を持たせようとするものである。つまり、温度変化によってバイメタルに発生する力とダイヤフラムにかかる変換負圧による力が常に平衡状態に保つようにしたものである。

ここでバイメタルの温度変化による偏位を D_T とし、荷重 F によるバイメタルのたわみを D_F とすると、温度と荷重による偏位が平衡つりあい状態では(5)式が成立する。

$$\pm D_T - D_F = 0 \dots\dots\dots(5)$$

ここで偏位 D_T の正符号は温度が上昇したとき、バイメタルのU字形が広がる方向を示し、負符号はせばまる方向を示すものとする。

また、 D_T および D_F は(6)、(7)式で与えられる。

$$D_T = K_D(t - t_0) \cdot f_1(l_x \cdot r) / H \dots\dots\dots(6)$$

$$D_F = 4 F f_2(l_x \cdot r) / E b H \dots\dots\dots(7)$$

一方、荷重 F と変換負圧 P_t との間には(8)式が成立する。

$$F = -\{(A_t - A_s) P_t + A_s P_s\} / 738 + k_s \delta_s + K_t \delta_t \dots\dots(8)$$

以上(5)、(6)、(7)および(8)式より温度 t と変換負圧 P_t との関係から(9)式を導くことができる。

$$P_t = \frac{-738}{(A_t - A_s)} \left[\pm \frac{K_D E b H^2 f_1(l_x \cdot r)}{4 f_2(l_x \cdot r)} (t - t_0) + \frac{P_s A_s}{738} + k_s \delta_s + K_t \delta_t \right] \dots\dots(9)$$

(9)式より温度に対するセンサの感度は(10)式で与えられる。

$$\frac{\partial P_t}{\partial t} = \frac{-738}{(A_t - A_s)} \left[\pm \frac{K_D E b H^2 f_1(l_x \cdot r)}{4 f_2(l_x \cdot r)} \right] \dots\dots\dots(10)$$

ここで各種の作動温度範囲をルームセンサは18~28°C、アンビエントセンサは-20~40°C、ダクトセンサは0~60°Cに設定し定常偏差を小さくするように感度配分を先に述べた伝達関数で考慮したように決定するため、各センサの諸元を決定した。この諸元に基づき各センサの温度と変換負圧の関係は(9)式よりそれぞれ(11)、(12)および(13)式を導くことができる。

ルームセンサ：

$$P_r = -14.2(t_r - t_0) - 0.008 P_s - 73.7 \dots\dots\dots(11)$$

ダクトセンサ：

$$P_d = 5.1(t_d - t_0) - 0.008 P_s - 180.7 \dots\dots\dots(12)$$

アンビエントセンサ：

$$P_a = 5.1(t_a - t_0) - 0.008 P_s - 95.7 \dots\dots\dots(13)$$

6 温度調節器の構造と原理

温度調節器は図1のブロック線図で示される制御部と温度設定部によって構成されるものである。また、その構造は図4に示すように温度設定部と温度センサ変換負圧導入部および出力負圧変換部より成り立っており、この三者の間には温度センサと同じように力平衡が保たれるようにしたものである。

温度センサの変換負圧は4枚のダイヤフラムで形成された室に独立して導がかれ、それぞれのダイヤフラムに発生する力の合成を入力信号として最終端のダイヤフラムを偏位させ、これを平衡状態にもどすよう、負圧を変化させるよう働かしている。また温度設定部は温度設定ダイヤルを回転することによりばねに変位を与え、これによる力により平衡状態の変

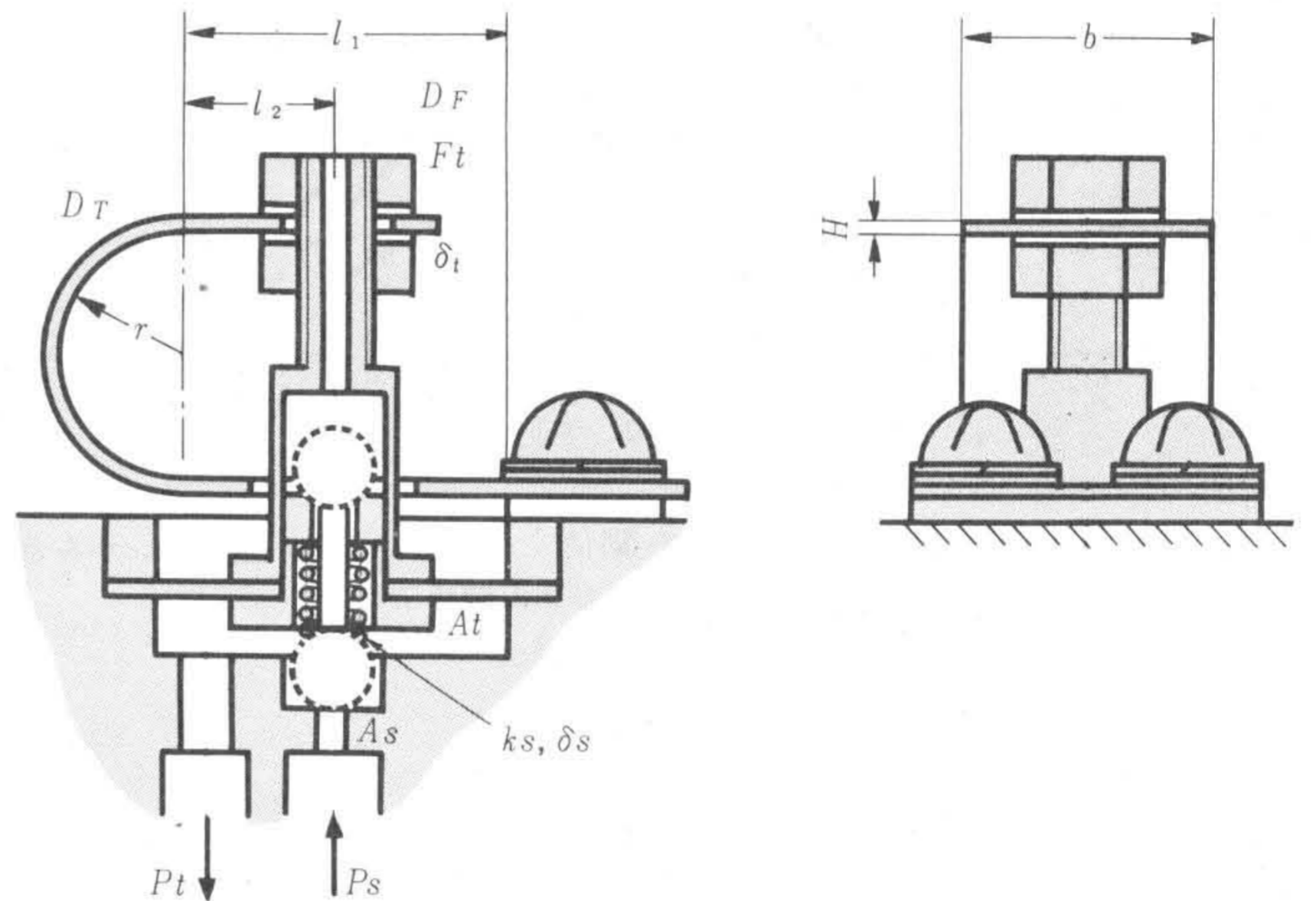


図3 温度センサの原理図 温度センサの構成要素であるバイメタル、弁体、ダイヤフラムの配列を断面したものである。

Fig. 3 Principle Construction of Temperature Sensor

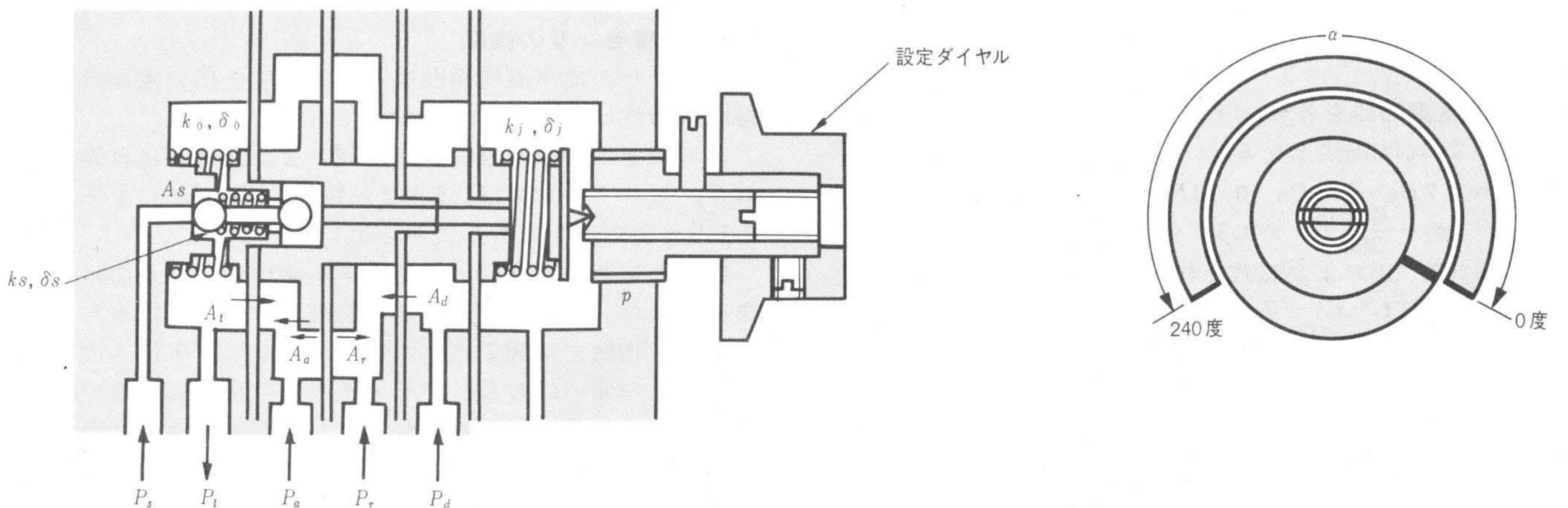


図4 温度調節器の原理図 各温度センサの入力部と温度設定用ダイヤルおよび出力変換部の構成要素の断面である。

Fig. 4 Principle Construction of Temperature Regulator

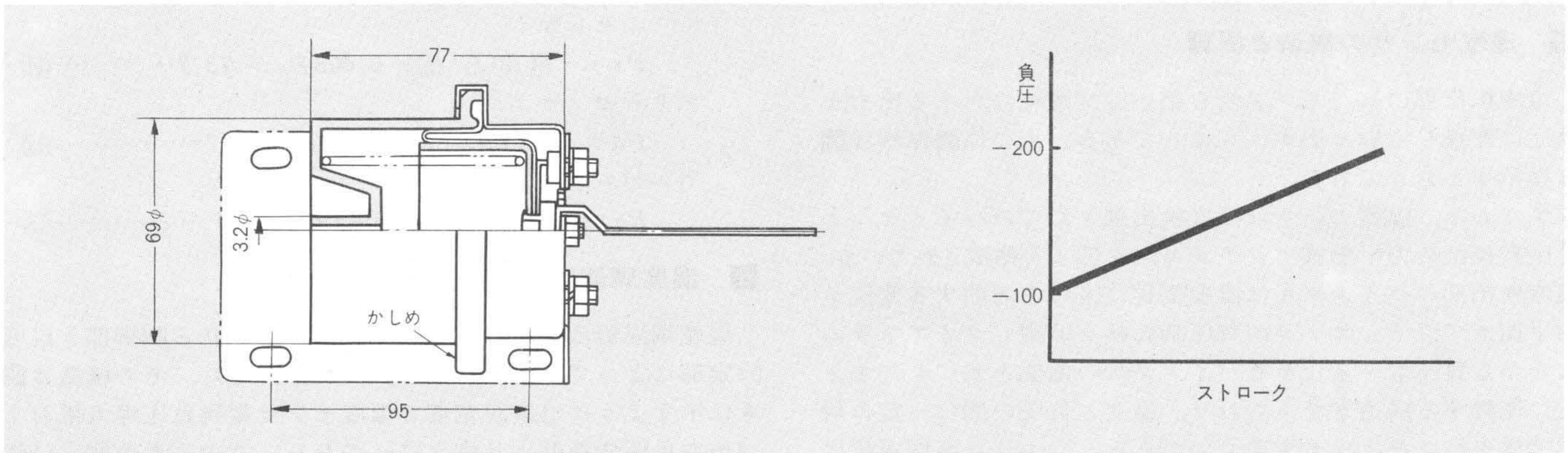


図5 パワースーボ外観図 負圧差100mmHg, ストローク30mmの負圧式パワースーボを示す。

Fig. 5 Powerservo

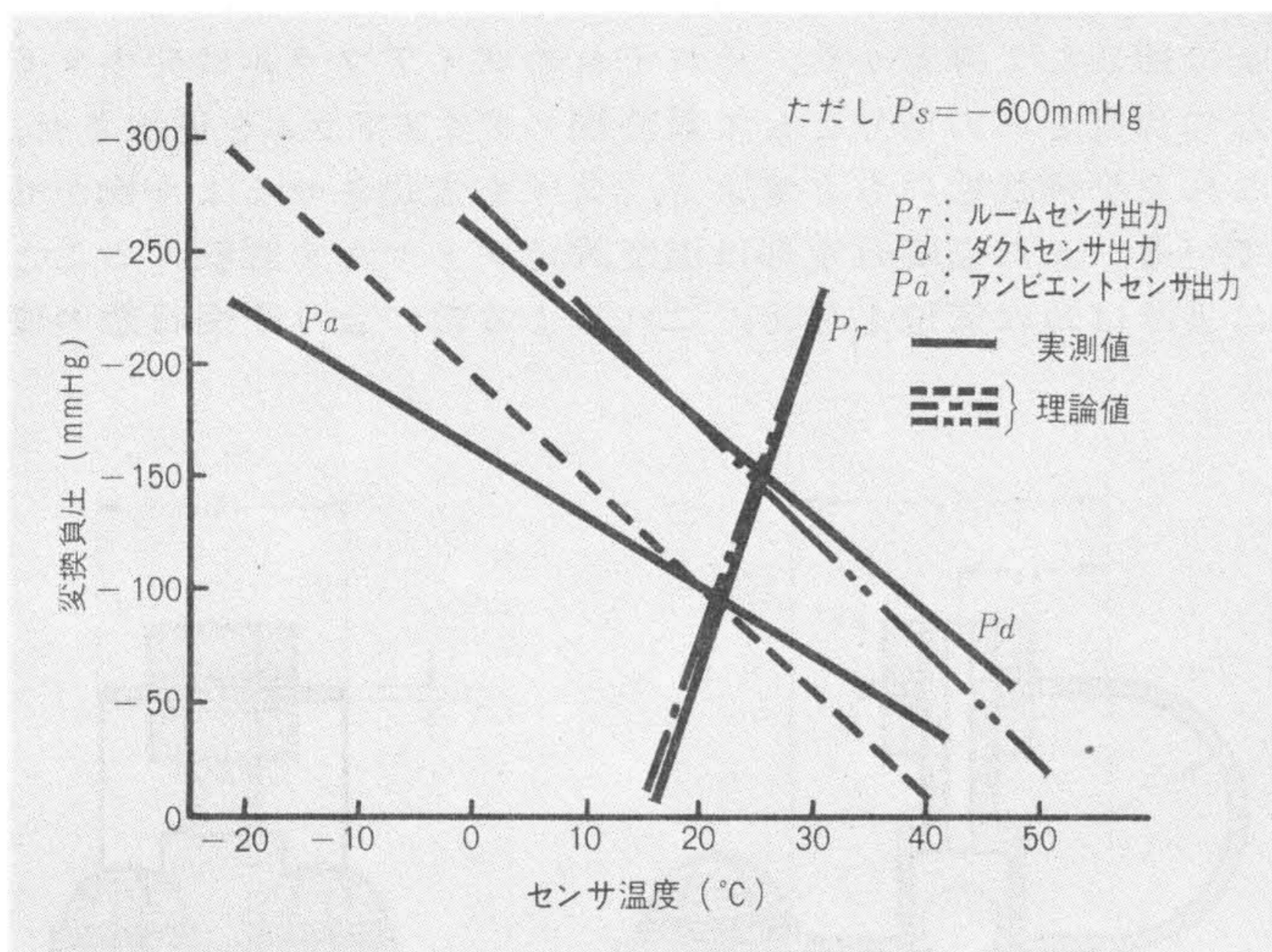


図6 センサの温度と変換負圧の関係 図3に示す温度センサを使用個所別に設定した温度変化による変換出力との関係である。

Fig. 6 Performance Curve of a Sensor

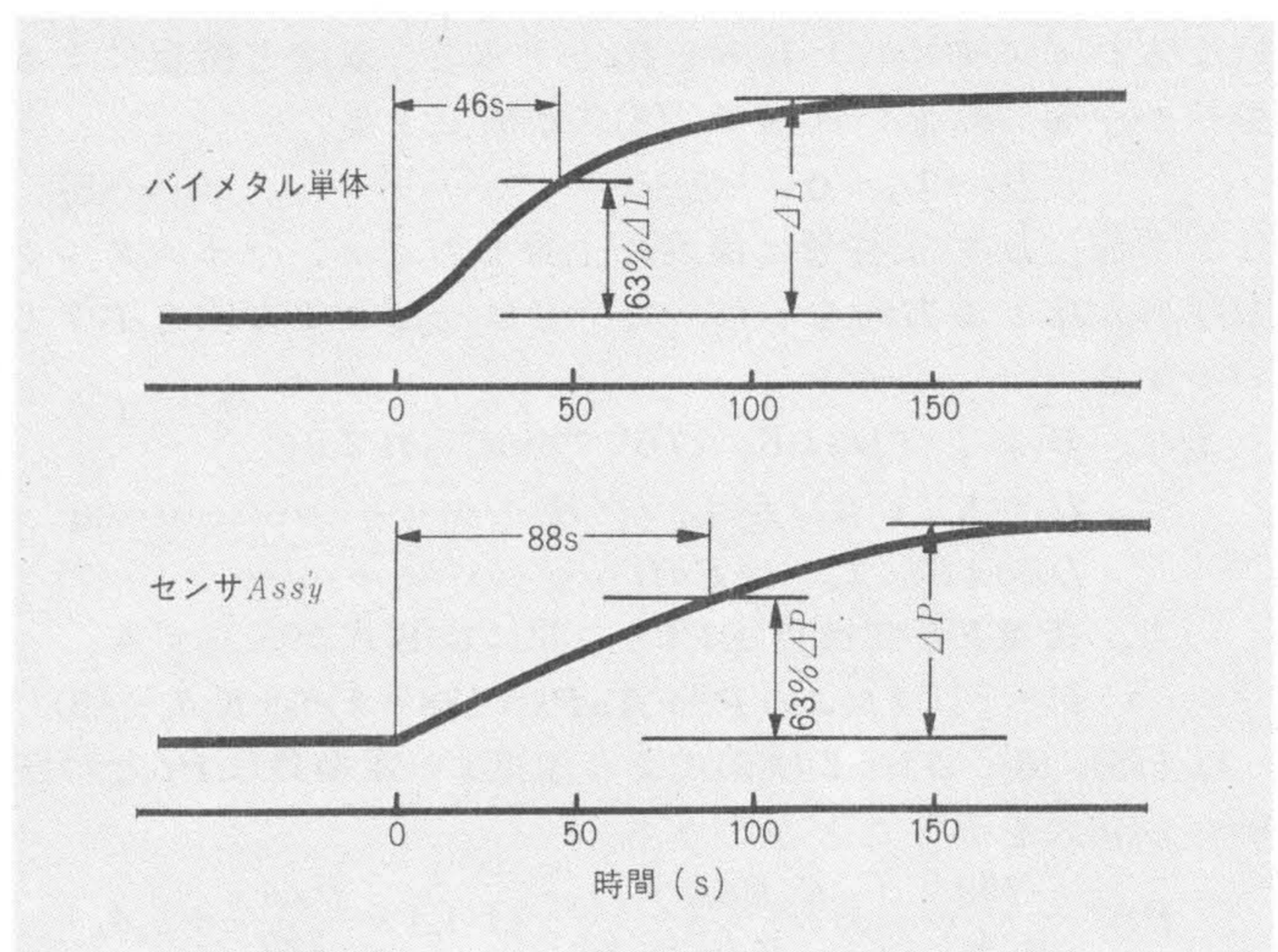


図7 熱応答特性 温度センサの感熱部のバイメタルの熱応答速度とアセンブリの場合の熱応答速度の代表例(ルームセンサ)を示す。

Fig. 7 Performance Curve of Thermal Transmission

換出力負圧を移動させるようにしたものである。このように力のつりあいによって出力負圧 P_0 を変換させるものであり、力の平衡状態では(14)式が成立する。

$$P_0 = \frac{1}{A_t - A_s} (P_r \cdot A_r - P_a \cdot A_a - P_d \cdot A_d - P_s A_s) - \frac{738}{A_t - A_s}$$

$$\left\{ k_0 \delta_0 + k_s \delta_s - k_j \left(\delta_0 - \frac{\alpha}{360} p \right) \right\} \dots \dots \dots (14)$$

この温度調節器を各センサ出力に見合うように諸元を与えた場合、(14)式は(15)式となる。

$$P_0 = 1.7 P_r - 1.4 P_a - 0.33 P_d - 0.008 P_s - 637 + 3438 \left(\delta_j - \frac{0.125}{360} \alpha - 0.5 \right) \dots \dots \dots (15)$$

(15)式に(11), (12)および(13)式を代入すると(16)式となる。

$$P_0 = -24(t_r - t_0) - 7(t_a - t_0) - 1.7(t_d - t_0) - 0.008 P_s + 3438 \left(\delta_j - \frac{0.12}{360} \alpha - 0.5 \right) \dots \dots \dots (16)$$

ここでわかるように各センサの感度はルームセンサで24mmHg/°C, アンビエントセンサで7mmHg/°Cおよびダクトセンサで1.7mmHg/°Cということになっている。

7 パワースーボアクチュエータ

空調装置の冷暖房能力をコントロールする主要部であるエアミックスドアを操作するのがこのアクチュエータで

あり、リンク部を介して作動させるため、かなりのロスが考えられる。このため受圧面積が大きく、ストロークによる有効面積の変化の少ないペローフラムを使用したアクチュエータを製作した。この外観および特性は図5に示すとおりである。

8 実験結果と検討

7.1 温度センサの性能

各センサの使用温度範囲における温度と出力変換負圧の定常時の特性は図6に示すとおりである。

この測定の結果は理論式(11), (12)および(13)式をほぼ満足しており、ヒステリシスは1.5~2%程度、くり返しによる再現性も1.5~2%程度であることを示している。

次にセンサの感熱部にバイメタルを用いているため応答性を測定した。バイメタル単体の特性および複合体として変換部までの状態では図7に示す特性であった。単体と複合体との応答性の違いはおもにバイメタルかけ止め部材料の熱容量によるものと考えられ、複合体としての温度センサの応答性は50秒が限界値と言える。この応答性は電気式の場合のサーミスタとではかなり大きな差があるといわねばならないが、後述の実車テストの結果から判断すると、全体性能に与える影響はなく、むしろ装置の安定性を増加する一因ともなっている。

7.2 温度調節器の特性

温度調節器の出力負圧 P_0 と各温度センサの変換負圧 P_r, P_a および P_d を入力として測定した結果が図8である。ここで $P_r'-P_0$ 特性はルームセンサの変換負圧 P_r を入力とするものであり、 $P_a'-P_0$ 特性、 $P_d'-P_0$ 特性はそれぞれアンビエントセンサおよびダクトセンサの変換負圧を入力とした場合の出力負圧 P_0 の関係を示したものである。

次に設定温度を変える場合、つまり設定ダイヤルを回転した場合の測定結果は図9に示すとおりである。

図8および図9の結果から温度調節器のヒステリシスは±21%以内であり、再現性も±1%以内にあることを示している。

さらに主センサであるルームセンサと設定ダイヤル角度 α をパラメータにした場合のルームセンサの温度と出力負圧の関係は測定結果より図10に示すとおりである。また同図において駆動操作部に使用するパワサーボアクチュエータの作動線図を設定ダイヤル回転角度と仕様負圧の間で-200mmHg時17°C、-100mmHg時29°Cに制御するものとしてスケールアウトした。

7.3 実車組込み台上性能

実車に搭載する空気調和装置の熱交換器の標準性能仕様として冷房用および暖房用の熱交換量として3,000kcal/hのものを使用した。各温度センサは外気をヘンダー部、ルームを車室中央に配置し、日立製作所の台上試験室においてテストした。通常車室内温度を評価する場合は少なくとも9点以上の平均値を用いるのであるが、今回のテストでは、数回の予備テストにより温度評価の代表点をあらかじめ求めておいた。この点は車室内空間の中央部、高さは運転者が座席に正常にすわった場合の胸部の位置である。

テストは外気温度を22°Cより20分間で40°C(実験室の制御性により制約される時間)に変えた場合の車室内温度変化がどのように現われるかを設定ダイヤル角度60度、120度および180度の3点について測定した。この結果の記録は図11に示すとおりである。

この台上試験の結果、外気温度変化を20°Cと大きく与えた場合、その温度偏差は±1.5°C以内であり、先に述べた温度センサ、温度調節器、パワサーボの単体性能のもので温度偏差を±1.5°Cにすることができたと言える。

9 結 言

バイメタルを感熱部に利用し、温度に比例した負圧を発生する温度センサとその変換負圧を入力とする温度調節器の組合せにおける自動温度制御装置について、それぞれの理論検討および単体実験、台上実車積載などの総合実験の結果、自動車用空気調

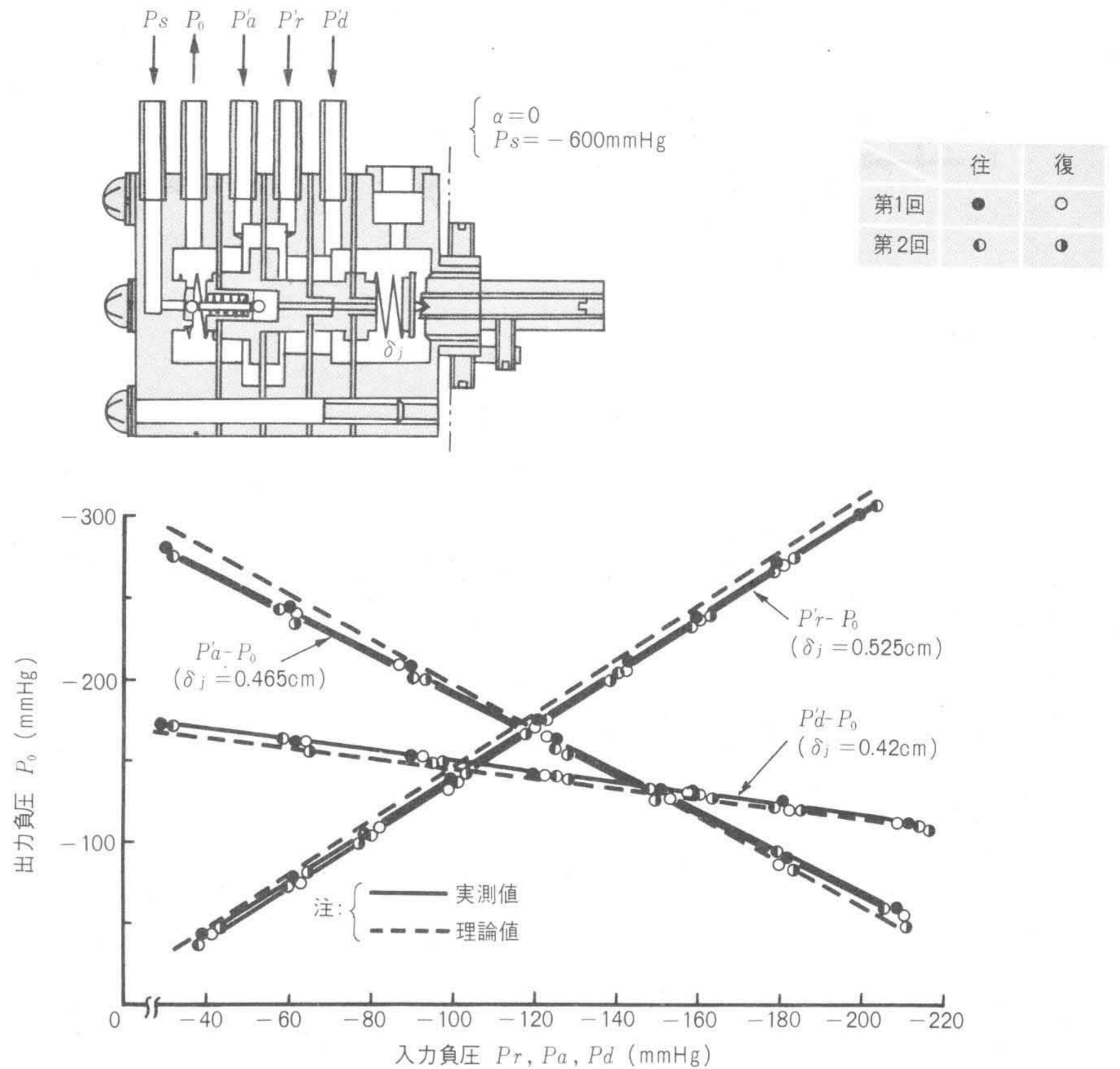


図8 温度調節器の入力-出力特性 設定温度に対し単独にセンサ出力が変化した場合の操作部への出力負圧の変化特性である。
Fig. 8 Performance Curve of Temperature Regulator

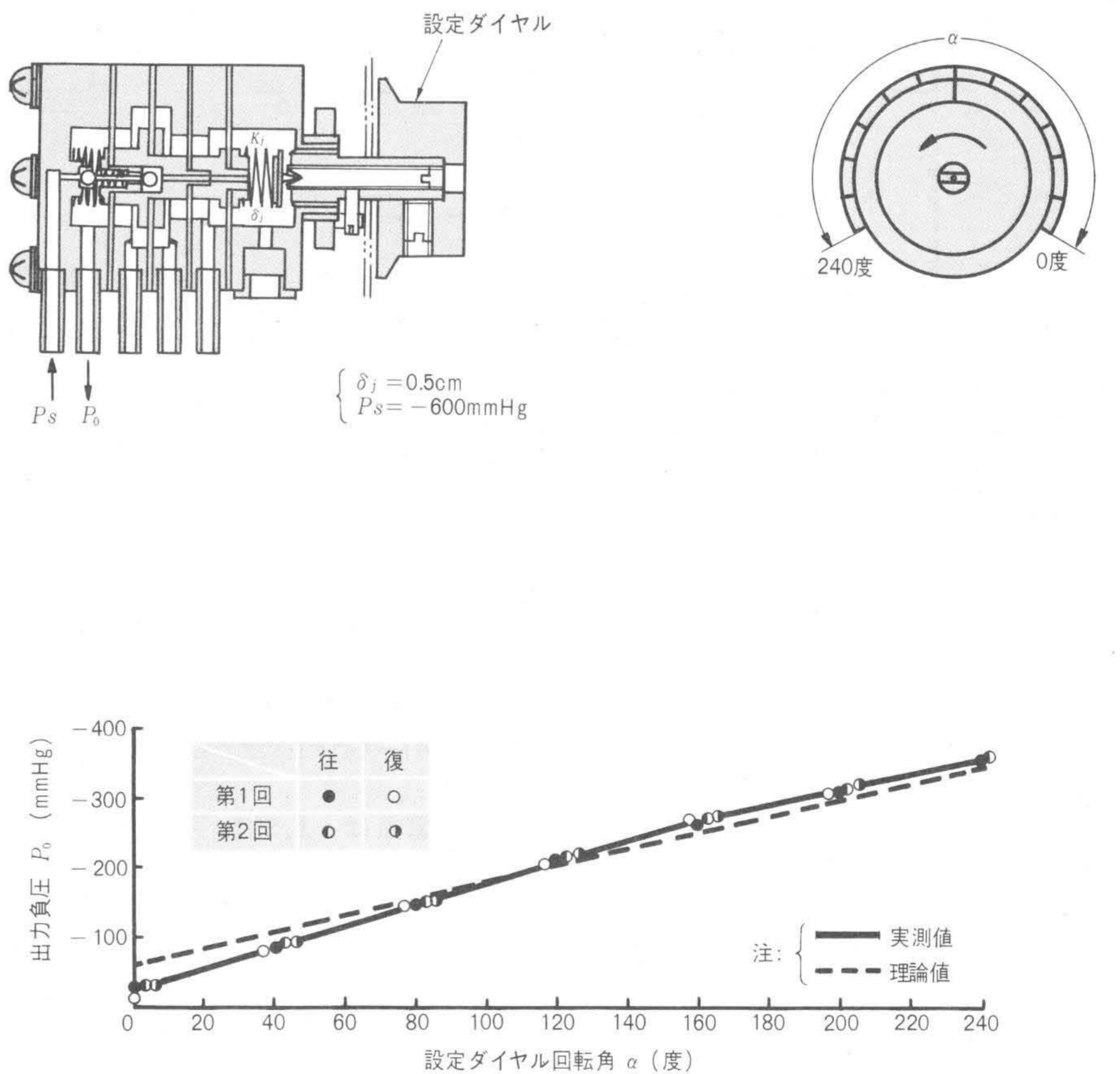


図9 設定ダイヤル回転角と出力負圧の関係 センサ入力負圧を一定とした場合、設定ダイヤルの変化に対し操作部への出力負圧の変化特性である。
Fig. 9 Performance Curve of Temperature Control Dial

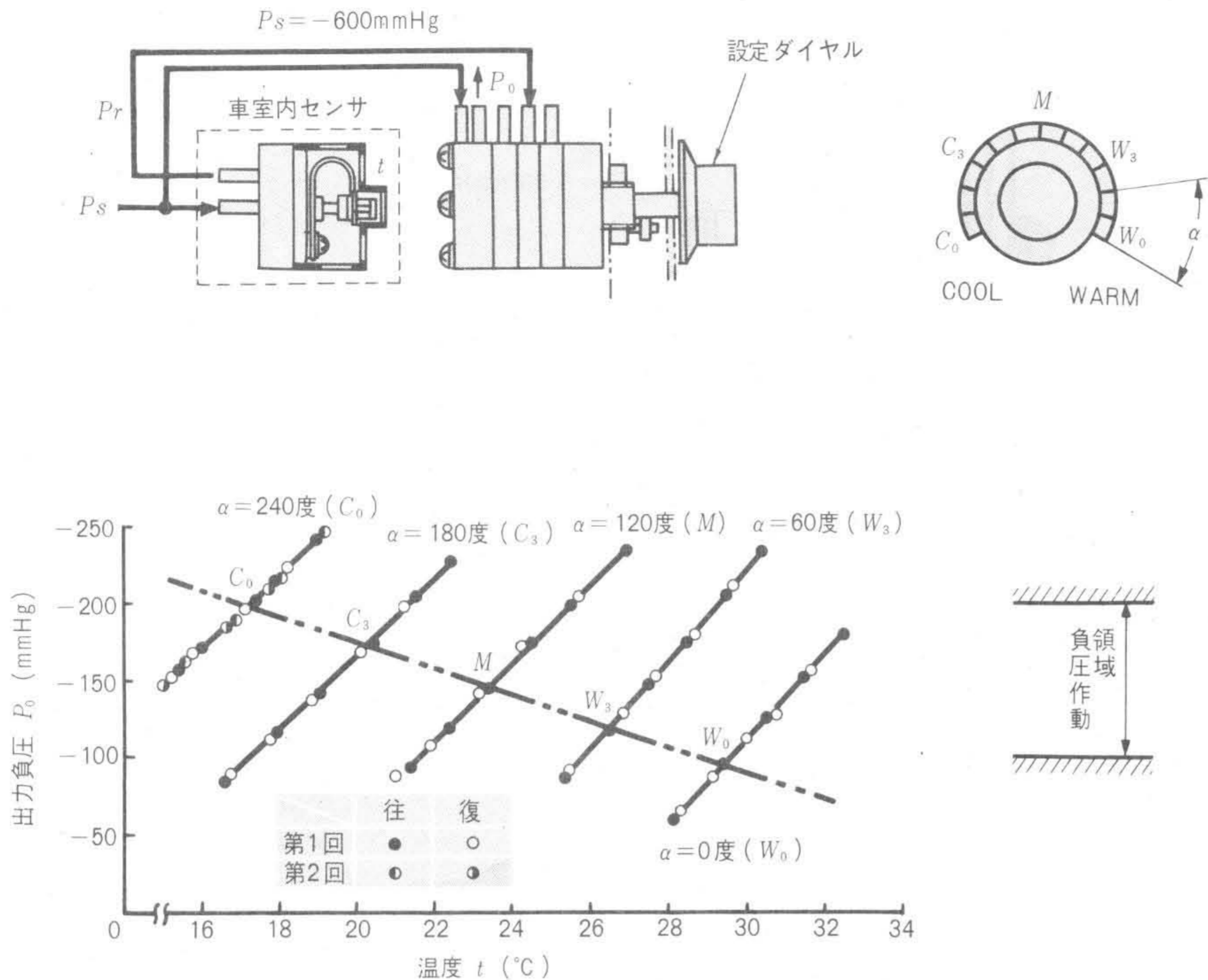


図10 各設定点における車室内センサの温度と出力の関係 温度設定を変化させた場合、主センサである車室内センサの温度変化が出力負圧に与える影響を測定したものである。

Fig.10 Performance Curve of Room Sensor at Set Position

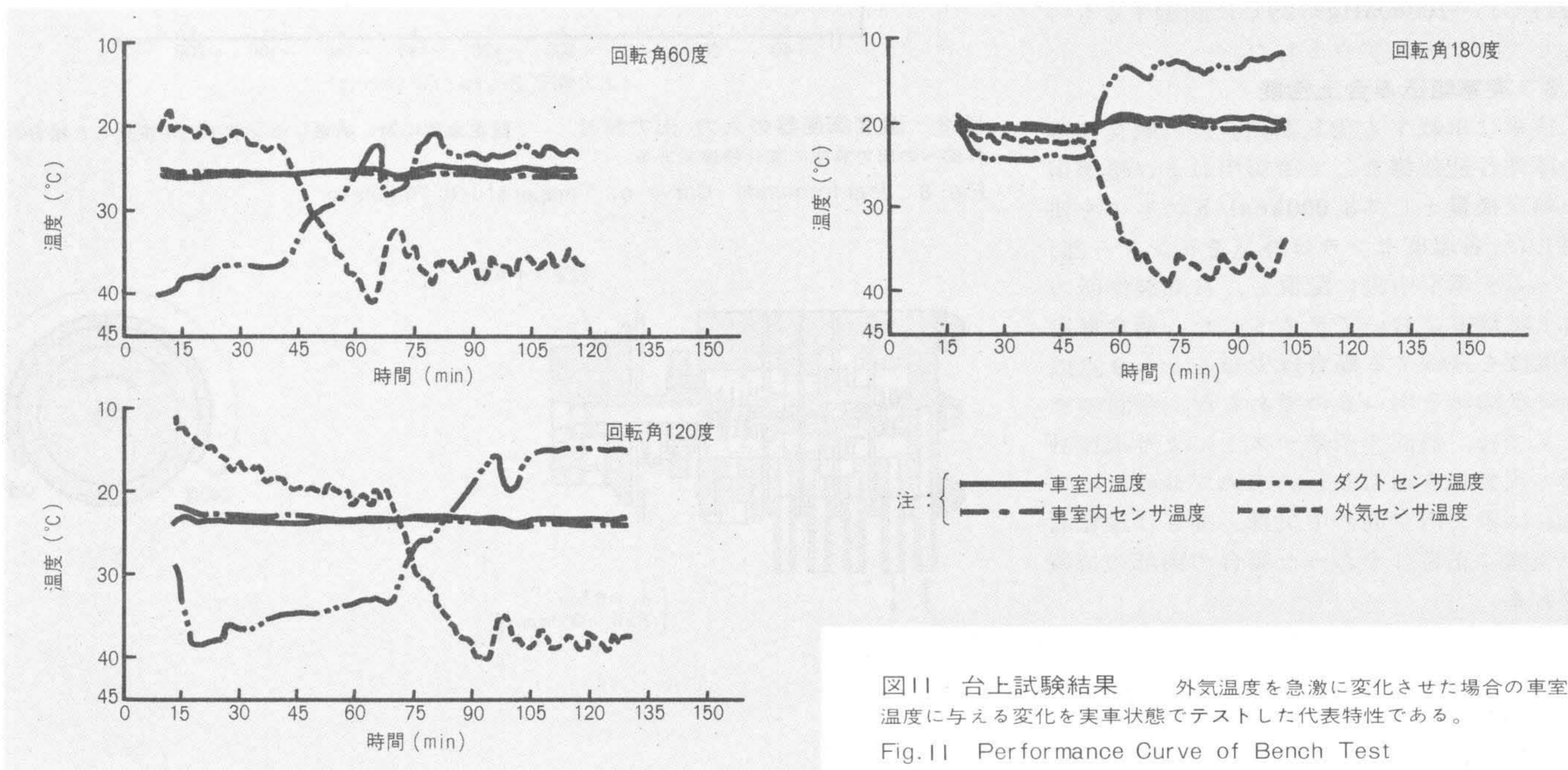


図11 台上試験結果 外気温度を急激に変化させた場合の車室内温度に与える変化を実車状態でテストした代表特性である。

Fig.11 Performance Curve of Bench Test

和装置が温度制御装置として使用できることおよび理論と実験がよく一致していることが確かめられた。以上を要約すると下記のとおりである。

- (1) 温度制御装置の実車台上試験の結果、温度偏差は $\pm 1.5^\circ\text{C}$ にすることができた。
- (2) 温度センサのヒステリシスおよび再現性はいずれも2%以内である。
- (3) 温度センサの感熱部にバイメタルを用いたため時定数は約100秒であるが、車室内温度の制御性には影響はなかった。
- (4) 各温度センサの感度はルームセンサで $-24\text{mmHg}/^\circ\text{C}$ 、アンビエントセンサで $-7\text{mmHg}/^\circ\text{C}$ 、ダクトセンサで $-1.7\text{mmHg}/^\circ\text{C}$ の設定は制御性において良好であった。

参考文献

- (1) 高橋ほか2名：カーエアコンディショナの温度制御の研究④ 研報65号
- (2) 天野ほか2名：自動車用自動空気調和装置の温度制御日研研報9839号
- (3) 稲生：空気調和工学 東明社
- (4) 油井：自動制御
- (5) 尾木：自動制御 電気学会
- (6) カタログ：日立バイメタル(AT, No. A.-901D)
- (7) 小島：ゴムダイアフラムの設計法 藤倉ゴム工業株式会社 技術資料BFSL-311(昭38-11)