

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-474

可変静翼制御用高応答圧縮機入口温度センサの開発研究

臼井 弘 ・ 坂田 公夫 ・ 松本 正勝

DP-55

1982年9月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

可変静翼制御用高応答圧縮機入口温度センサの開発研究*

臼 井 弘** 坂 田 公 夫** 松 木 正 勝***

1. ま え が き

FJ R710 の様な高バイパス比ターボファンエンジンでは大きな出力とより高い経済性を得るためにタービン入口温度の高温化と共に圧縮機の高圧力比化が進められており、従って高性能な多段軸流圧縮機を採用することが多い。

固定された静翼を持つ多段軸流高圧圧縮機では、圧力比の増加と共に、設計修正回転数から大きく外れた領域で、圧縮機の前段又は後段にストールや、サージングが発生しやすく、エンジン作動範囲が大巾に狭くなってくる。こうした問題を解決する方法として、圧縮機の間段で抽気したり高圧圧縮機の入口案内翼から数段にわたって可変静翼を採用することが有効である。この静翼取付角を変化させる可変静翼の制御には、高圧圧縮機の修正回転数の情報が必要であり、圧縮機入口、即ちファン出口に取付けられた温度センサを用いて圧縮機入口空気温度を測定し、又別に計測する回転数と共に修正回転数を算出する。

ターボファンエンジンでは、高圧圧縮機入口空気温度 T_3 はファン回転数及び高度によって変化し、アイドルから最高出力の間の急加減速時にはこの変化速度が数秒と言う高速になる。従って正確な燃料制御及び静翼制御を行なわせるためには、空気温度計測用の T_3 温度センサに高い応答性と信頼性が共に要求される。FJ R710 シリーズのターボファンエンジンの研究開発においてはこれを満足させるため、この T_3 温度センサ（以後 T_3 センサと呼ぶ）としてファンダクト外径側の内面に取りつける型式の細い円管を用いた液体封入温度センサの開発を計画し、これに関する実験的及び理論的研究を行ない、実機に供するセンサの設計法を検討した。

本報告はこの高応答 T_3 センサを開発するために、行なった気流速度 100m/sec で時定数 2 秒以下と言う極めて高い応答性を有する細い円管型の三種類の供試センサの設計製作および、風洞による応答性実験の結果、ならびにこれを実用化した実機 FJ Rエンジン内の T_3 センサの概要について述べるものである。

この研究の結果、ファンエンジン FJ R710/20 及び 710/600 に対して、トルエン封入の T_3 センサを設計製作して適用することにより、十分な応答性と信頼性のある可変静翼制御装置を完成した。このうち FJ R710/600 は航空宇宙技術研究所で行なっている STOL 実験機に搭載される FJ R710/600 S として実用化され、 T_3 センサ技術の実用化に関する成果を得た。

なお、本研究は、通商産業省工業技術院の、大型工業技術研究開発制度「航空機用ジェットエンジンの研究開発」の一環として行なったものである。

記 号

D	: センサ感温部円管外径 (mm)
d	: センサ感温部円管内径 (mm)
N_f	: ファン回転数 (rpm)
N_g	: 高圧系回転数 (rpm)
T_3	: 圧縮機入口空気温度 (°C)
T_∞	: 気流全温 (°C)
t	: 時刻 (sec)
ΔT	: 気流前後温度差 (°C)
U_∞	: 気流流入速度 (m/sec)
VSV	: 可変静翼
VSVC	: 可変静翼制御装置
X	: 無次元変位
x	: 変位 (mm)
τ	: 時定数 (sec)

* 昭和57年 8 月 9 日受付

** 原動機部

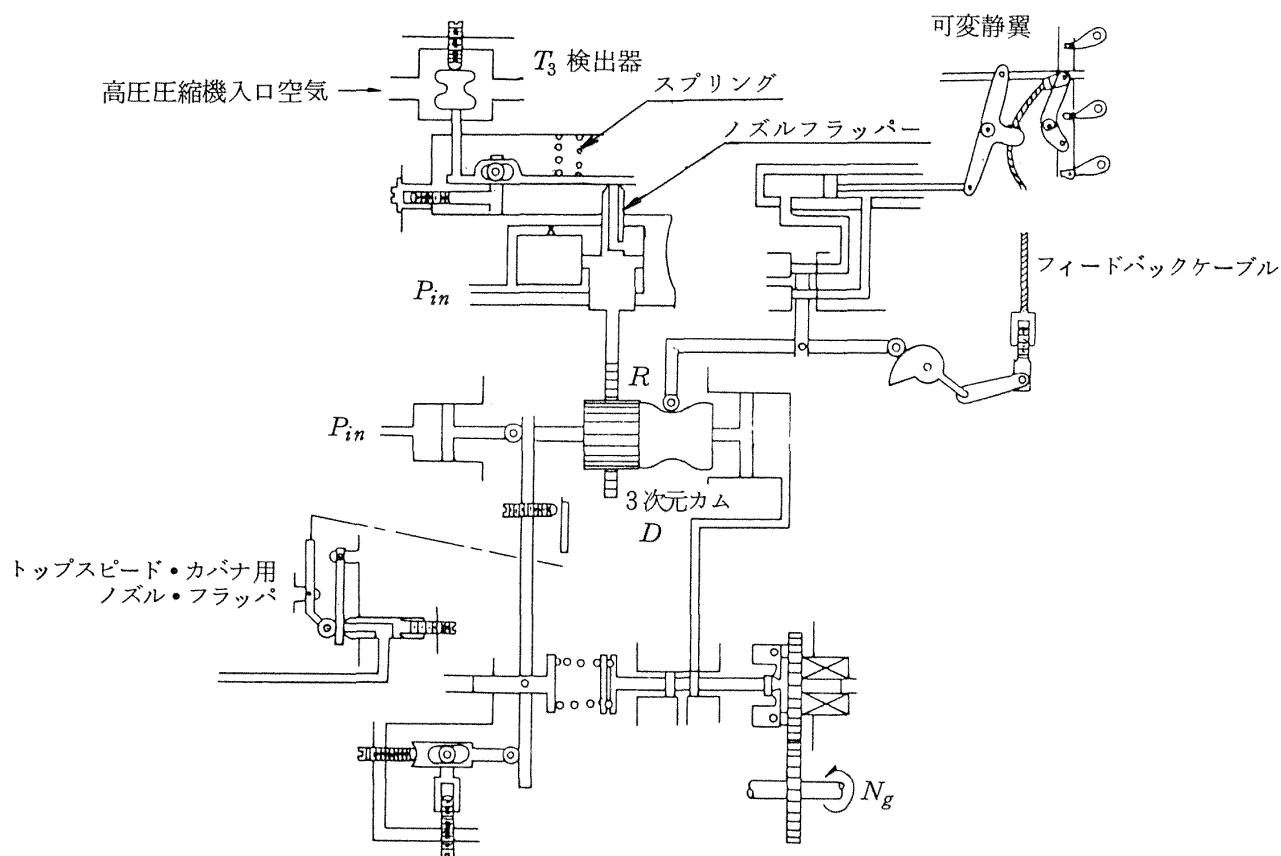
*** 科学研究所

2. 制御系の概論及び在来型センサ

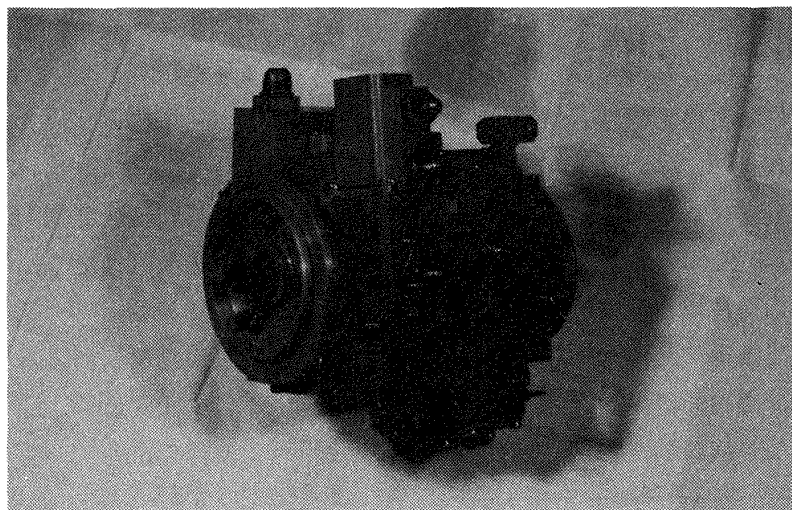
2.1 圧縮機可変静翼制御系の概論⁽¹⁾⁽²⁾

代表的な高バイパス比ターボファンエンジンの型式である FJR-710 エンジンの可変静翼制御系 (VS VC) の概略は図 1 に示す。図中の T_3 検出器は、可変静翼制御用の T_3 センサであるがこの図中では在

来のベローズ型センサが示されている。新開発による高応答 T_3 センサは、在来型センサ部とはほぼ同様な位置にセンサの変位出力端を置き、センサ本体である感温部をファンダクトの内壁面に設置する露出型の計画とし、スペース上の制約を小さくし、応答性の向上を計っている。露出型の T_3 センサ感温部の設置位置を図 2 に示す。

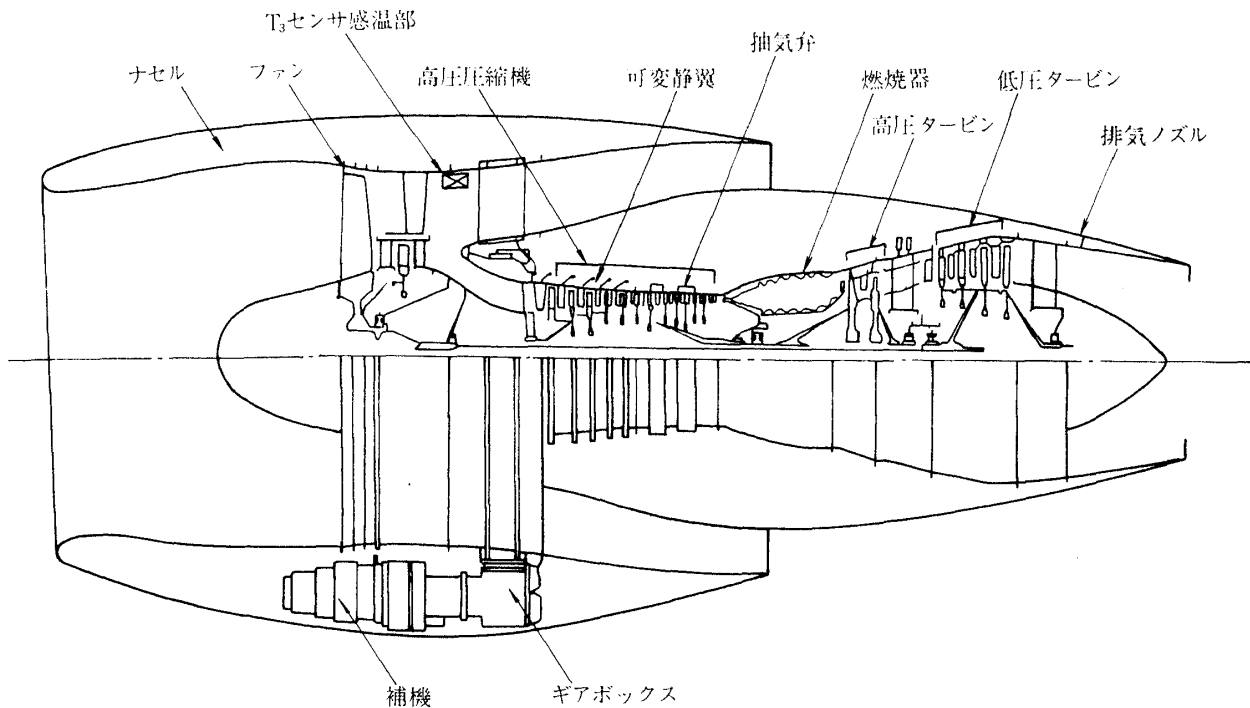


a) V.S.V.C. 構成図



b) V.S.V.C. 外観

図 1 FJR710 可変静翼制御装置 (V.S.V.C.)

図2 T_3 センサ感温部取付位置

気流温度変化は、センサ内の感温液体の膨張・収縮のエネルギーに変換され、さらに断面積不変のペローズによって変位に変換されて、リンク機構を介して三次元カムに伝えられる。これによって圧縮機軸回転数と連動して一つの関数を燃料圧として発生し、可変静翼 (VSV) 駆動リンクに伝導し、静翼取付角度が設定される。

2.2 在来の T_3 センサ

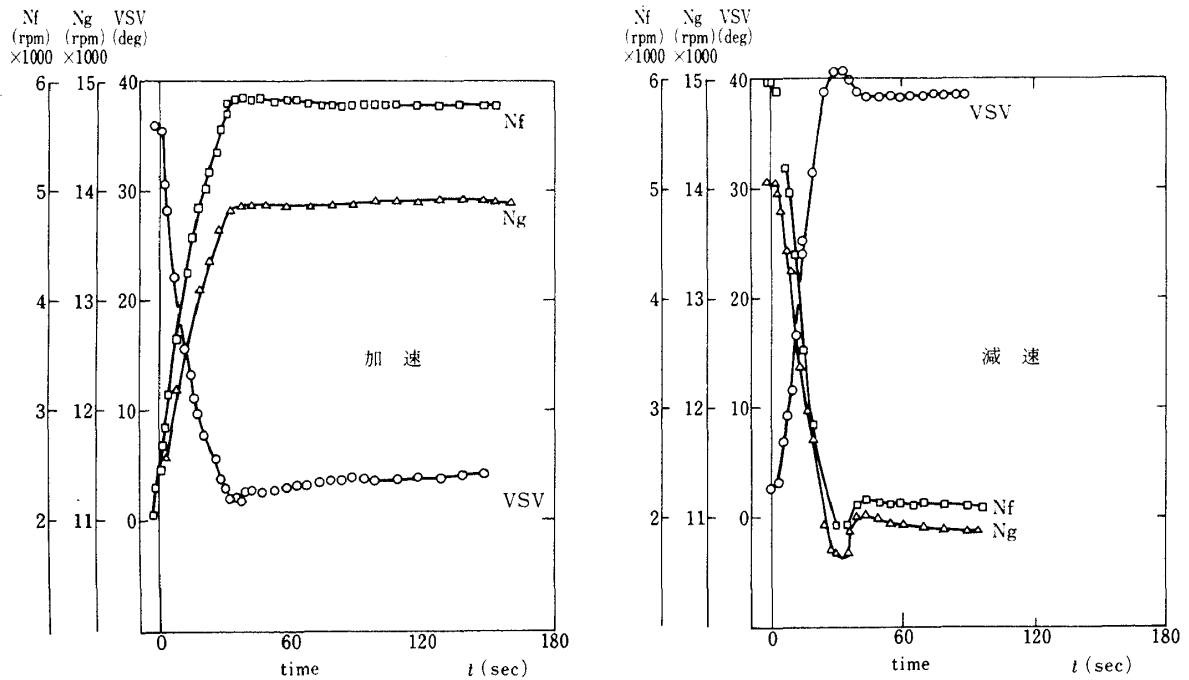
FJR710 実用センサの開発までの間、ペローズ型の在来型センサを用いたが、これは、圧縮機入口空気を 18mm 径のパイプで制御機内に設置した T_3 センサに導く型式のペローズ内液体膨張温度計である。図3にこのセンサを用いた場合のFJRエンジンの加減速時における回転数 N_f , N_g の応答性に関する運転データ例を示す。可変静翼制御の応答遅れがあるため、加(減)速度を小さくしているが、減速時に可変静翼の閉り過ぎなどの現象が起っているため、回転数 N_f , N_g の不安定性が見られる。図4にこのセンサの管内気流速度による温度検出時定数の測定結果を示したが、気流速度 100m/sec 時に $\tau =$

20 sec 程度にとどまっている。これは膨張液体の体積に比べて、気流にさらされる伝熱面積及び、表面熱伝達率が小さいことに起因している。

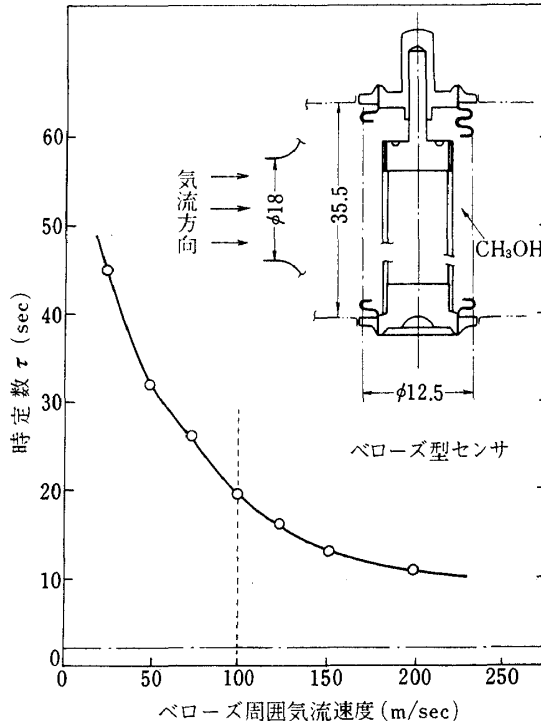
この様に、在来の T_3 センサの応答性が遅いことから、増速時の VSV の開き過ぎや減速時の閉り過ぎなどが起るため、エンジンの急加減速試験が行えず応答性の高い T_3 センサの開発が急務であった。

3. 供試センサ

試作温度センサには高応答性及び表1に示すような性能が要求される。これらの諸元を満足し、かつ高い信頼性をもった形態として、液体封入型や気体封入型などの各種形態を検討した。その結果を表2に示すが、総合的な評価として、信頼性、安定性、部品点数の少ないこと、代替品への交換性などの利点を生かし液体封入型の温度センサを選択した。応答性を実験的に求める供試センサとしては、細い円管に感温液体を封入し、管端出力部にペローズを有する形態とした。これにより、在来の制御装置を大きく変更することなく、高応答センサに置き換えたシステムが得られることになる。センサの具体的形

図3 ベローズ型 T_3 センサを用いたFJR710加減速応答表1 T_3 センサ設計仕様

形 式	露出型液体封入温度計 ベローズ変位変換
作 動 条 件	空気温度 $-54(^{\circ}\text{C}) \sim 100(^{\circ}\text{C})$ 空気圧力 $0.14 \sim 1.75$ ($\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ Abs}$) ($0.0137 \sim 0.172$ MPa Abs)
	気流速度 $0 \sim 200(\text{m}/\text{sec})$
出力係数	$0.022(\text{mm}/^{\circ}\text{C})$
目標時定数	$2(\text{sec})$ at $100(\text{m}/\text{sec})$

図4 ベローズ型 T_3 センサの応答性能

状・寸法は基礎解析⁽³⁾⁺から予想された応答性を基にして設計し、供試センサとして三種類製作した。感温部の基本形状は図5に示すが、これは、(1)コイル状の感温部細管、(2)リードチューブ、(3)ベローズ

により構成されている。これら温度センサは表3に示すように感温部の管径により、TST-11(外径2.0mm)、TST-12(外径1.4mm)、TST-13(外径1.0mm)と名づけ、各センサ共内径は外径の1/2であり、内部に感温液体としてメタノール(CH_3OH)を内圧 $5.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ で封入した。又各センサ共、図6に示すように感温部のコイルを気流に対し平行に設置したA型、及び直角に設置したB型の両形態を可能とする構造である。各センサの詳細な形状及び寸法を図7に示す。このセンサに、(1)検出コイル補償部、(2)変位検出部、を加えて温度検出装置とした。本温度センサの原理は、気流中におかれた感温コイル

表 2 各種形態の温度センサの特徴比較

センサ形態	応答性	利 点	欠 点
液体封入型	高くなりにくい	1) 安定性, 信頼性が高い。 2) 従来の制御機を殆んどそのまま使える。 3) 部品点数が少ない。 4) 交換性良好	1) 応答性に限界がある。 2) 比較的大型の感温部となる。
気体封入型	高い	1) 応答性が比較的高い。 2) 他に使用例があり, データがある。 3) 温度特性がリニア	1) ノズルフラップ等, 出力をストロークと力に変換する部分が必要となる。 2) 不安定性がある。 3) 気体漏れなど信頼性に問題あり。
電氣的センサ • 熱電対 など • 抵抗線	非常に高い	1) 応答性が高い。 2) 全電子デジタル制御 (FADEC) へは理想的 3) コンパクト	1) 現用の機械油圧式の制御機に適用するには, 電力-力 / 変位変換のアクチュエータが必要となる。 2) 信頼性, アイシング対策など検討すべき事項多い。

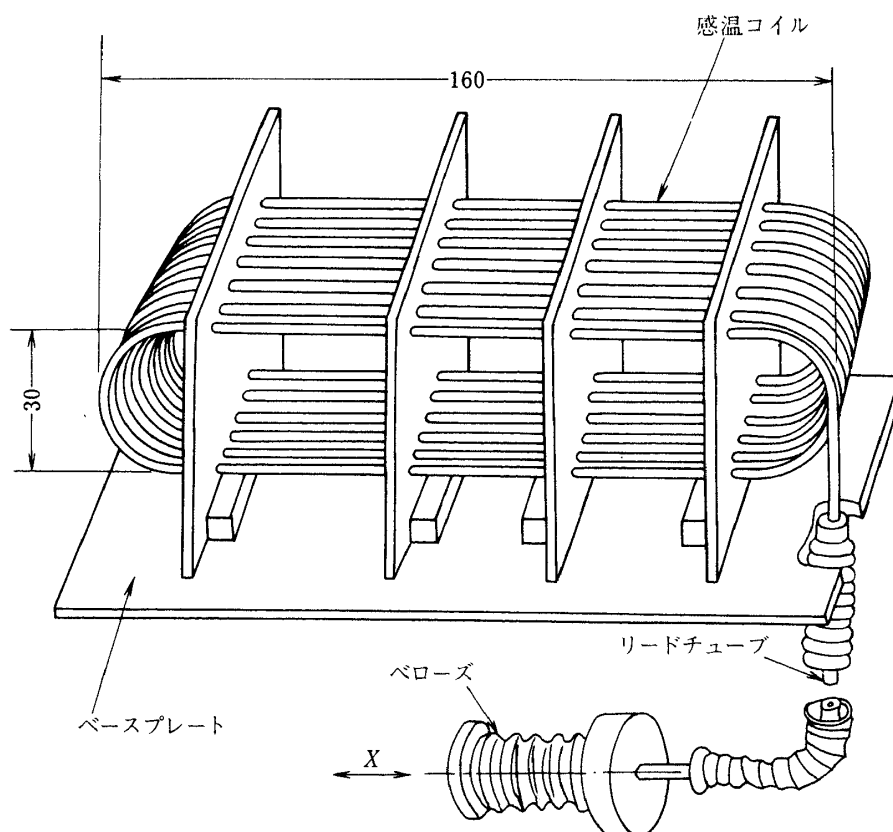
図 5 供試 T_3 センサの構造

表 3 供試 T_3 センサ諸元

供試センサ名	TST-11	TST-12	TST-13
管外径 D (mm)	2.0	1.4	1.0
内径 d (mm)	1.0	0.7	0.5
管 長 (感温部) (mm)	2,525	5,153	10,099
巻 数	7.00	14.37	14.13×2
巻ピッチ (mm)	4.0	2.8	2.0
共 通 要 目	封入液体 メタノール (CH_3OH) 比 熱 $0.59 \text{ (kcal/kg } ^\circ\text{C) (2.470 KJ/kgK)}$ 比 重 $790 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 熱伝導率 $0.182 \text{ (kcal/mhr } ^\circ\text{C) (0.212W/mk)}$ 膨張率 $1.20 \text{ (1/} ^\circ\text{C)}$ 液体内圧 $5.5 \text{ (kg/cm}^2\text{, } 0.539\text{MPa)}$ リードチューブ 外径 1.8 (mm), 内径 0.6 (mm) SUS 304 製, フレキ保護管付, 長さ 1000mm ベローズ 外径 14.5 (mm), 自然長 30 (mm) 材料 SUS 304 細管材料 SUS 304		

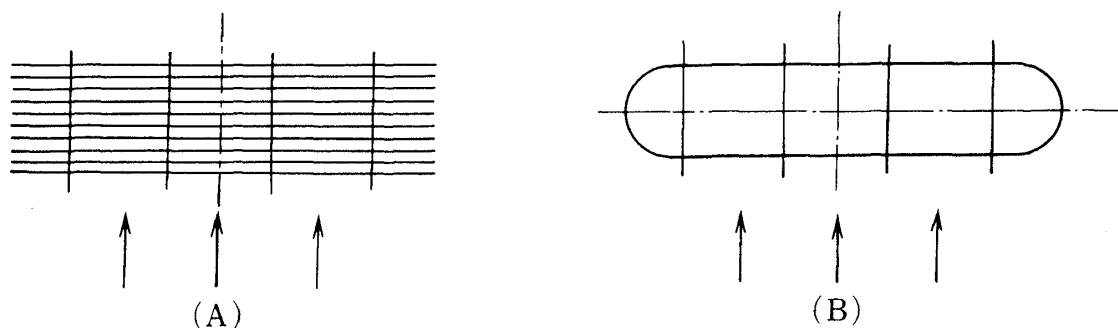
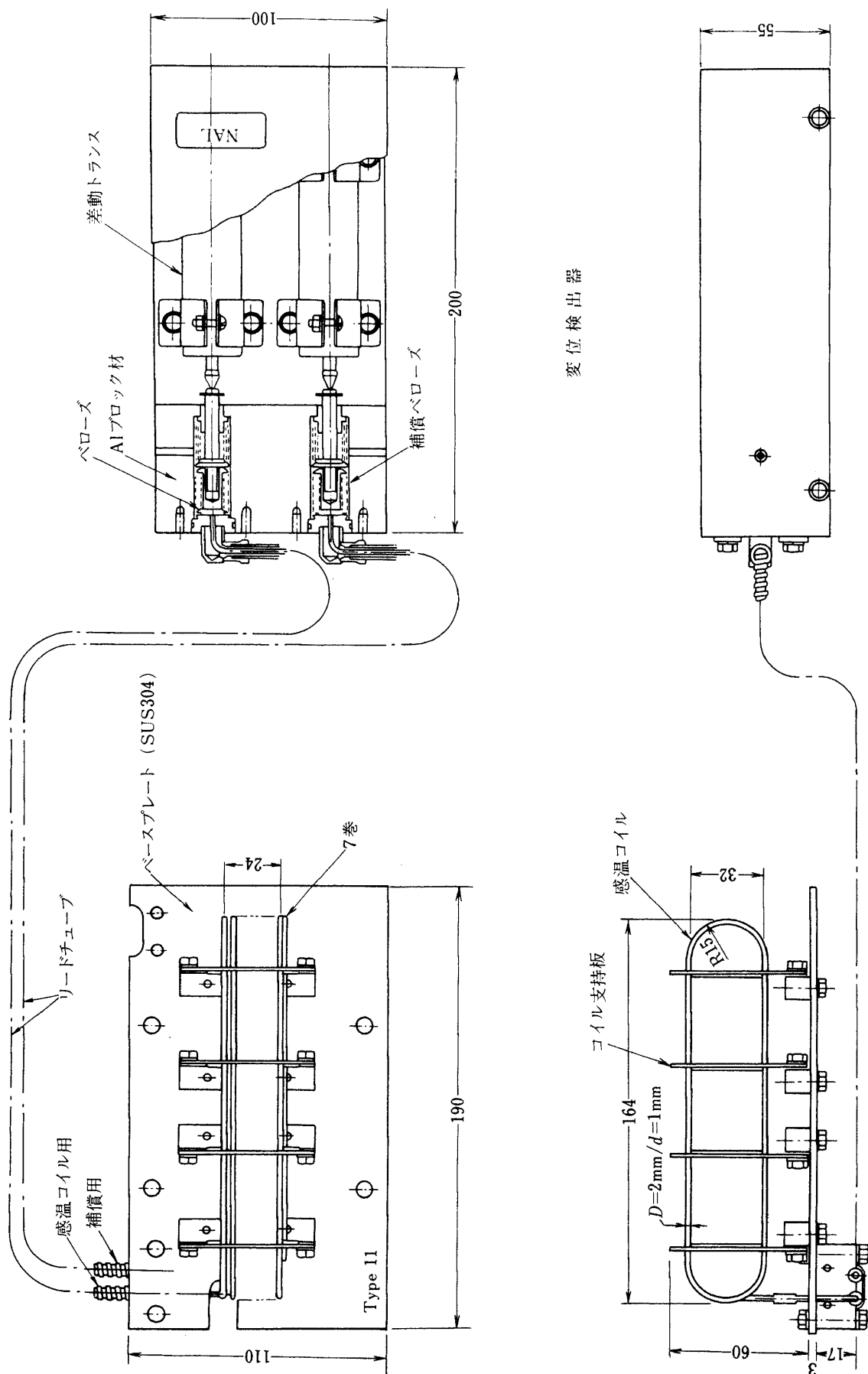


図 6 気流に対するセンサ供試体設置方法 A, B

ルの温度変化により、内部に封入されたメタノールが膨張・収縮し、末端のベローズを伸縮させて長さを変化させ、温度変化を長さの変化に変換するものである。変位検出部ではこのベローズに差動トランスを接続し、ベローズ端の変位を検出した。供試センサは表 1 の設計要目に示す様に出力としての変位係数 $0.02\text{mm/}^\circ\text{C}$ を満足するため、ベローズ断面積とセンサ感温部の液体体積との関係を一定に保つ設計とした(表 3)。

感温部は図示するように、コイル状の細管を、4枚の支持板に固定しており、曲り細管の曲率などの寸法は、加工性や細管の強度等を考慮し、実用性を

基準に選定した。又センサ本体の材料は SUS 304 を用い、実機装着の場合の実用材料に対する熱的な相似則を考慮した。図 8 に本供試センサ感温部の写真を示す。又供試センサにあるリードチューブの温度変化による指示誤差を補償するため、このリードチューブと平行に補償用リードチューブ及びベローズを設けた。



a) TST-11 (Type-A)

図 7 a 供試センサ

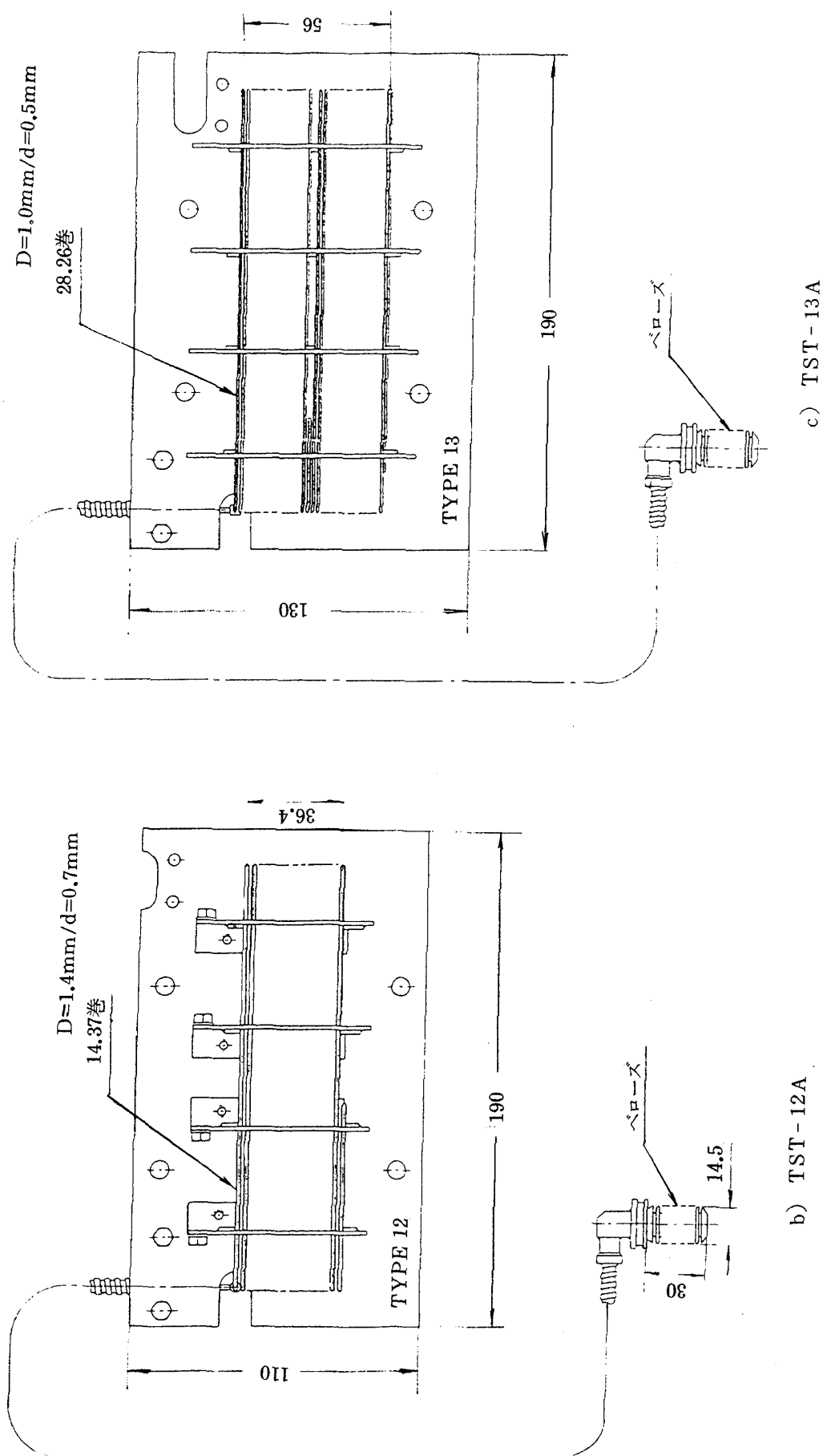
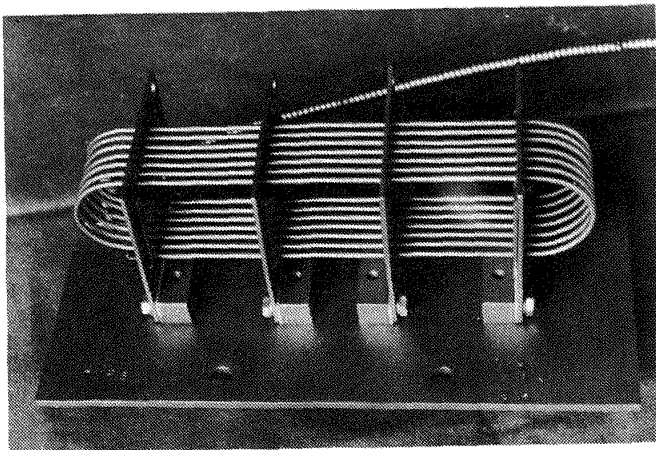
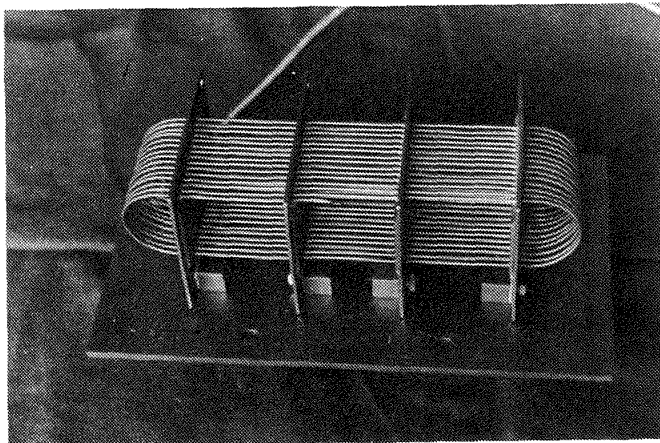


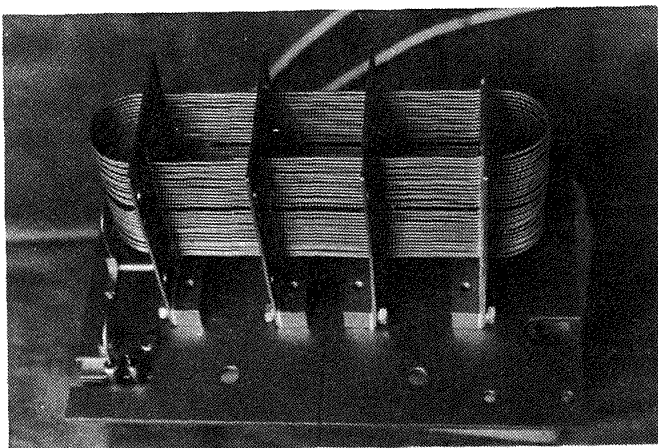
図 7 b, c 供試センサー



a) TST-11A



b) TST-12A



c) TST-13B

図8 T_3 センサの感温部

4. 実験装置、方法及び予備試験

4.1 風洞及び計測装置

応答性を求める実験では、最大風速 70m/sec の常温吹出式多目的風洞を用いて行った。測定部には温度をステップ状に変化させるために図9に示すよ

うな試験箱を設け、この試験箱内に供試センサ感温部（コイル）を設置した。この試験箱は、気流を遮ぎってセンサ感温部（コイル）を一定の初期温度に保持した後、気流の入口出口の二面ある扉を急速に開けることによって、センサをステップ状の気流にさらし、その応答性を見るために、風洞試験部に設置したものである。図10に風洞試験部に設置した試験箱と試験箱内に固定したセンサ感温部を示す。感温部初期温度は小型のブロアー出口に電気ヒータを接続し、サイリスタによって供給二次空気の温度を制御して設定した。実験系統を図11に示す。又供試センサの出力は先端に取付けられているベローズの端面変位を差動トランスにより直流電圧に変換し、高応答リニアコーダで記録した。変位検出部は図12に示す様に温度補償器と共に箱に収められている。本実験に用いた差動トランスは図12aに示すようにコイルの一次側に直流数ボルトを加え、中のコア位置を変化させることにより、変位量に比例した出力電圧が得られるもので、印加電圧 5.19 (V) に対し出力は 0.3 (V/mm) が得られた。実験は、センサ初期温度と気流の温度差及び、気流速度をパラメータとして行った。図12bは変位検出部の外観図である。

4.2 静特性試験

供試温度センサの感温機能を確認するために、ケロシンを充満させた恒温液槽を使用して静特性試験を行った。試験は図13に示すような恒温液槽に温度センサ感温部を投入し、十分静定した後ベローズ及び補償ベローズ変位の絶対値をダイヤルゲージで測定すると共に、差動トランスを使った位置検出器により電圧に変換し、その出力をペンレコーダに記録する方法で行った。図14にそれぞれのセンサの静特性の結果を示した。この結果、センサの中には目標値の 0.02mm/°C に対し多少大き目に出ているものがある。この原因として、(1)封入液体メタノールの熱膨張率がカタログ値と異なっている。(2)細管内容積（感温液体体積）が厳密に目標値でないこと。(3)ベローズやバネの弾性率及び感温部細管の熱的、機械的膨張、変形が影響していることなどが考えられる。

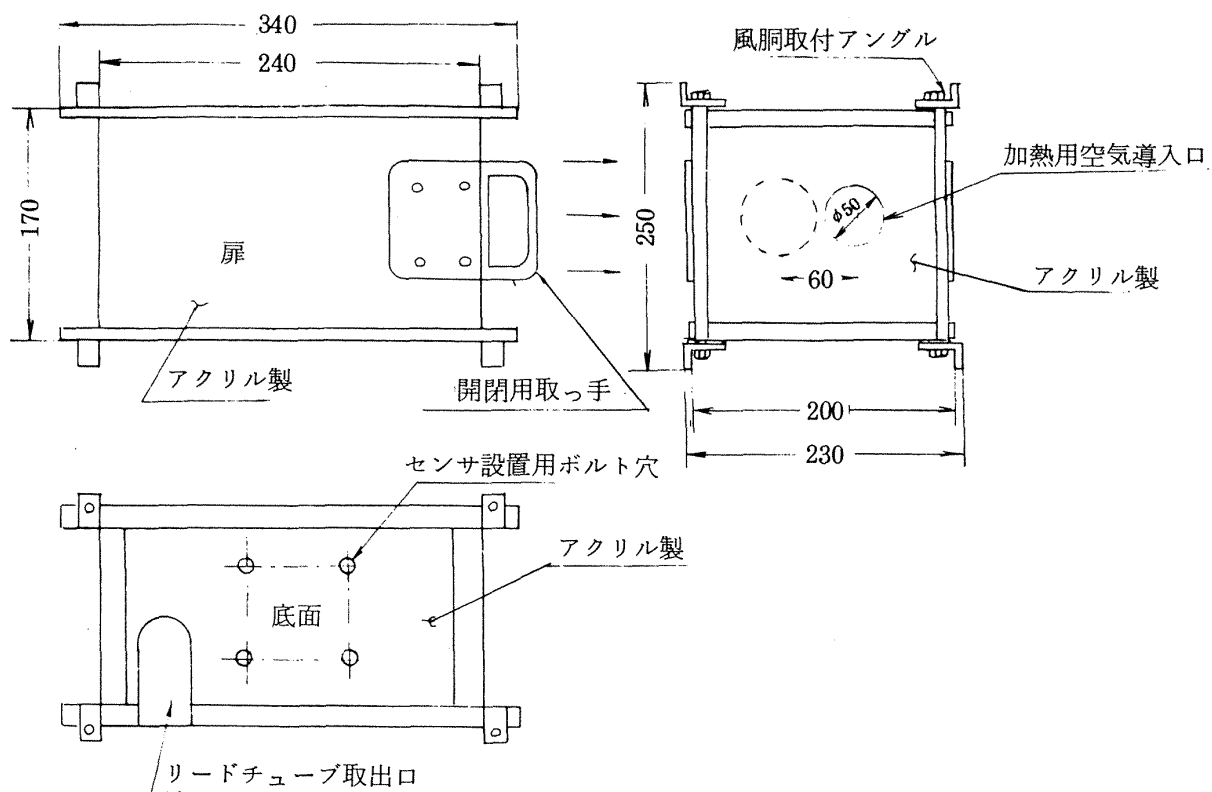
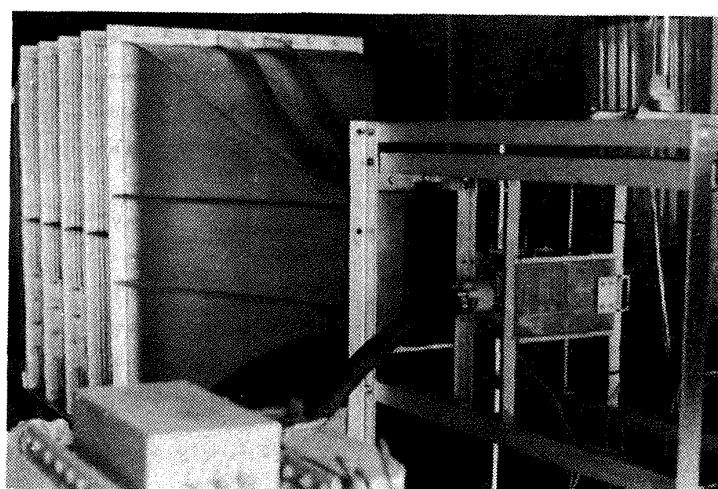
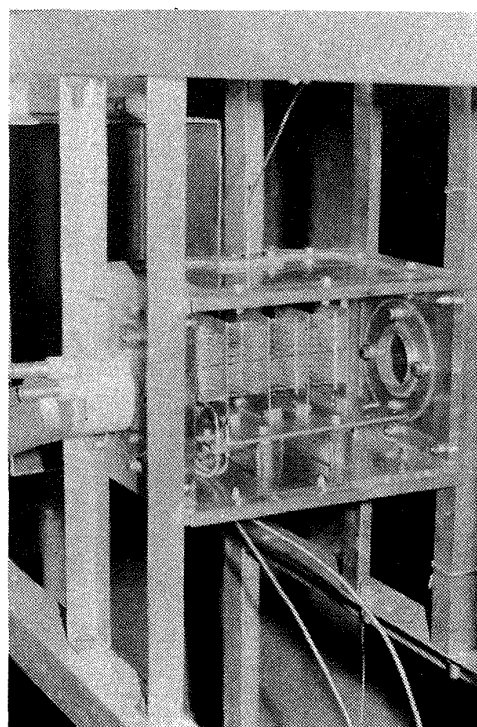


図9 試験箱



a) 風胴吹出口及び取付けられた試験箱



b) 試験箱内のセンサ取付状態

図10 風胴及び試験箱

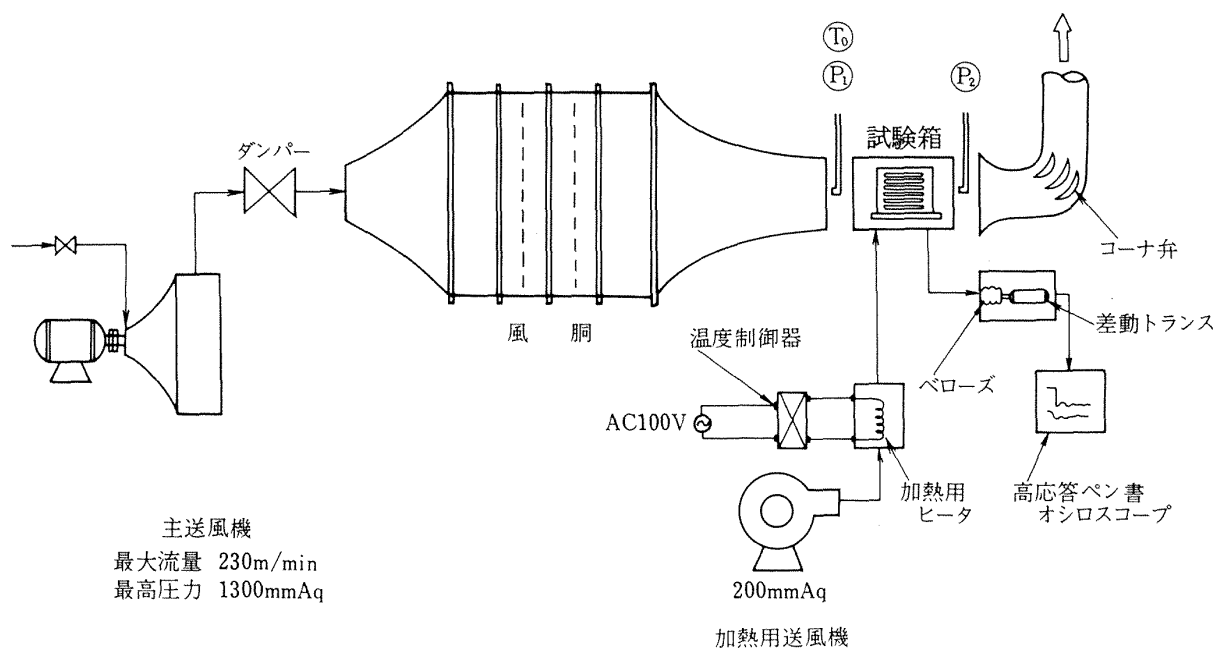
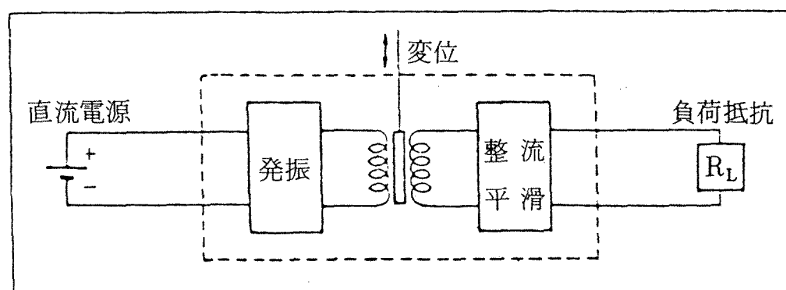
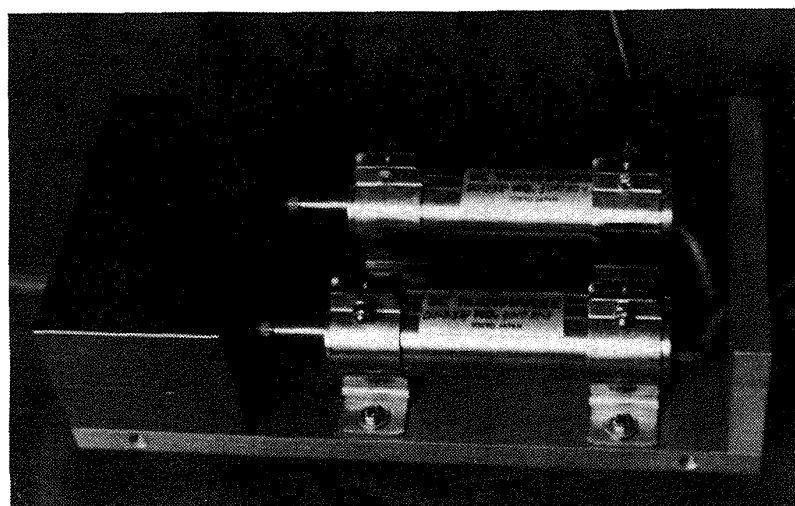


図 11 実験装置系統図



a) 変位検出用差動トランスのブロック図



b) 外観図

図 12 変位検出部

補償用差動トランス

測定用差動トランス

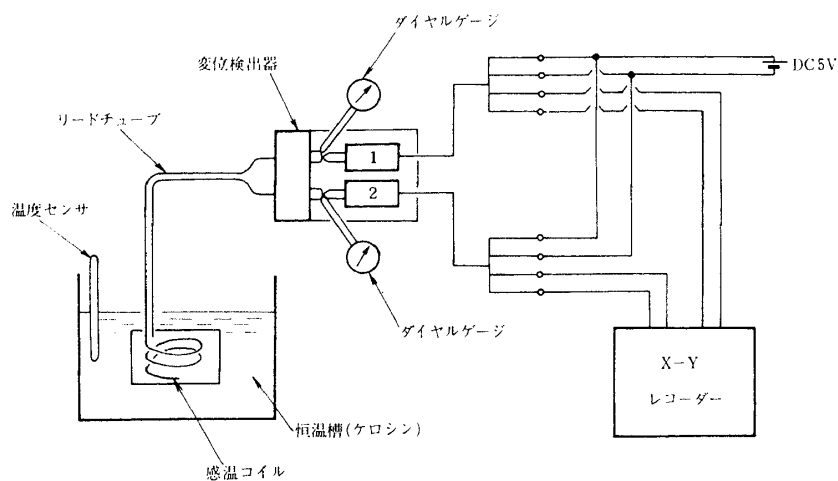
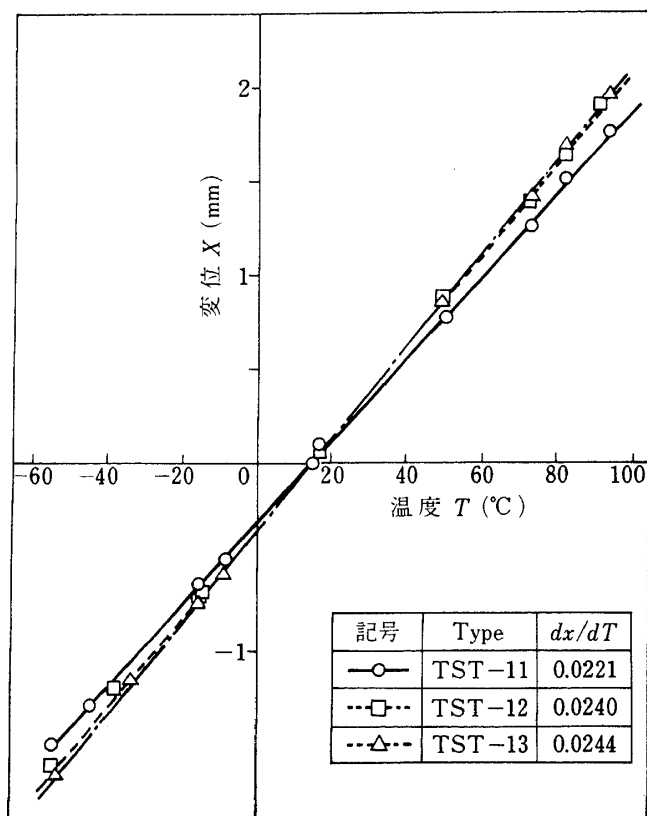


図 13 予備試験用ブロック図

図 14 T_3 センサの静特性

4.3 液槽投入応答試験

センサ感温部の管径による相違を簡便に明白に調べるため、前に述べた恒温液槽を十分攪拌して -54°C から 100°C の間の一定温度に安定させた後、大気中におかれた温度センサを瞬間的に投入し、温度センサの変位が 63.2% に達する時間を時定数として測定した。この結果を応答曲線として図 15, 図 16,

図 17 に示した。これらの結果を温度差と応答性についてみると、図 18 に示すように管径が細い程応答性は良くその関係はほぼ直線的である。又温度差による応答性の影響は見られないが、温度範囲が 0°C 以下を含む場合に、TST-11, TST-12 については明らかに悪く、逆に最も径の小さい TST-13 については多少応答性の良い結果が得られた。

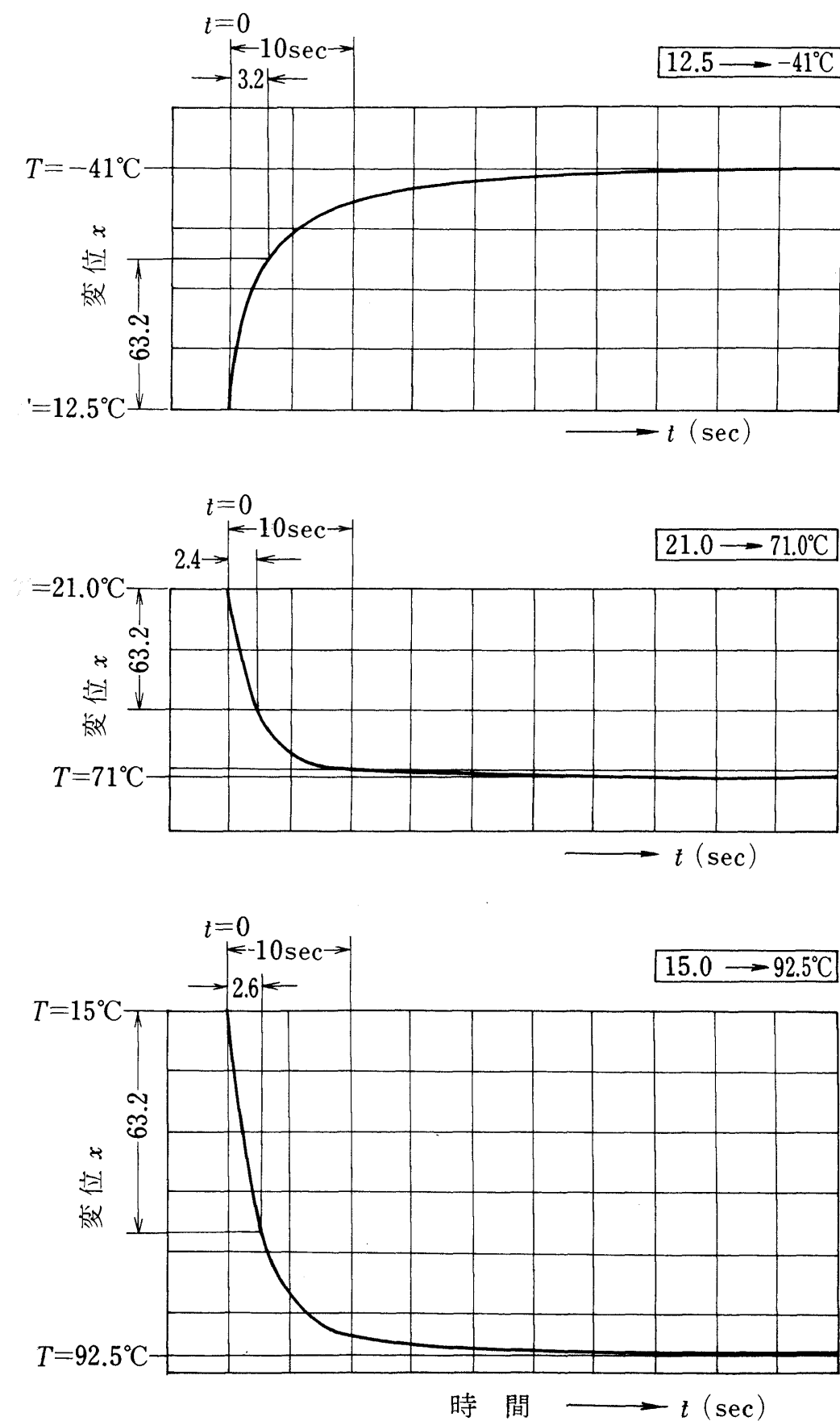


図 15 動特性 (TST-11)

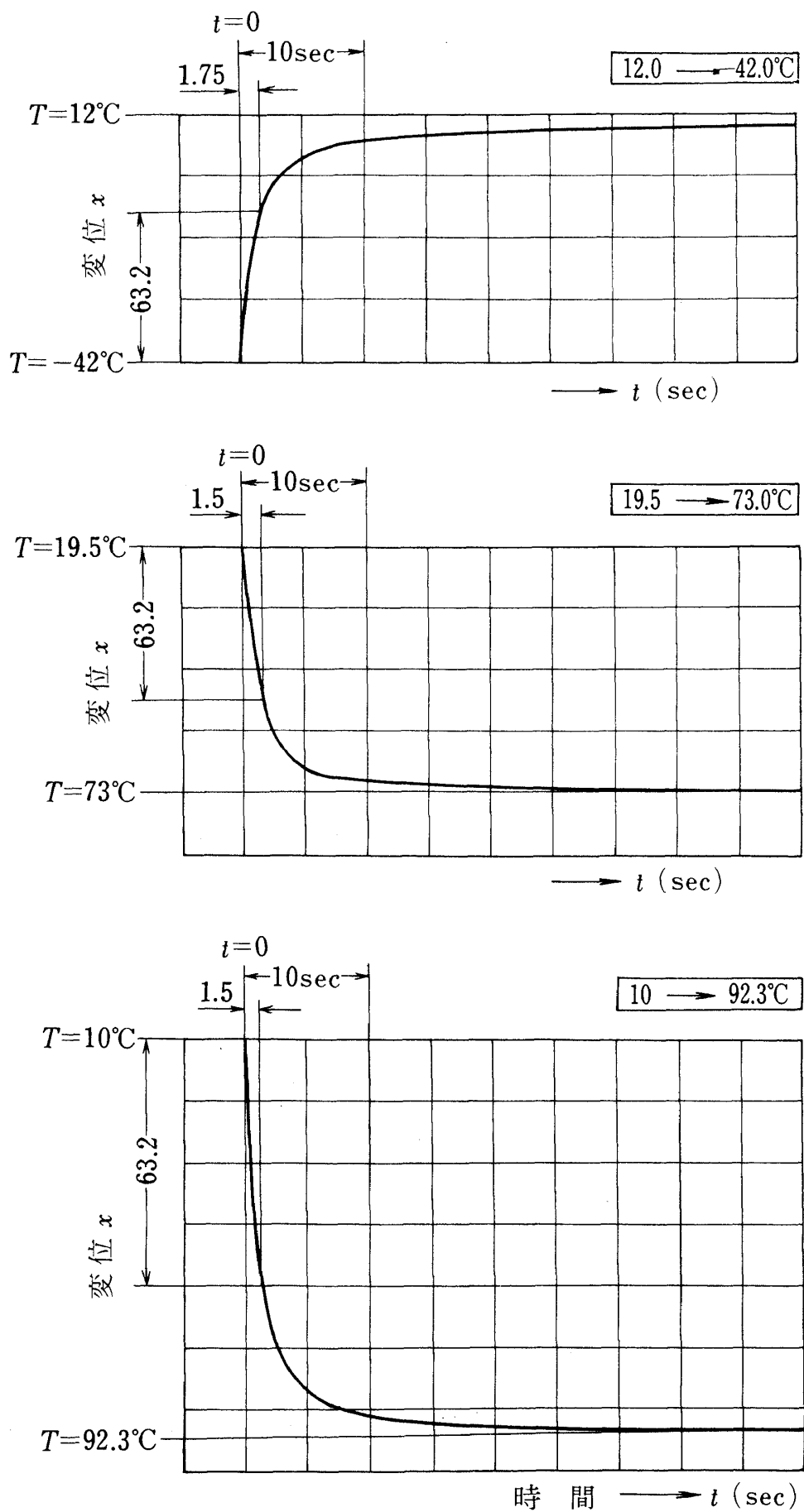


図 16 動特性 (TST-12)

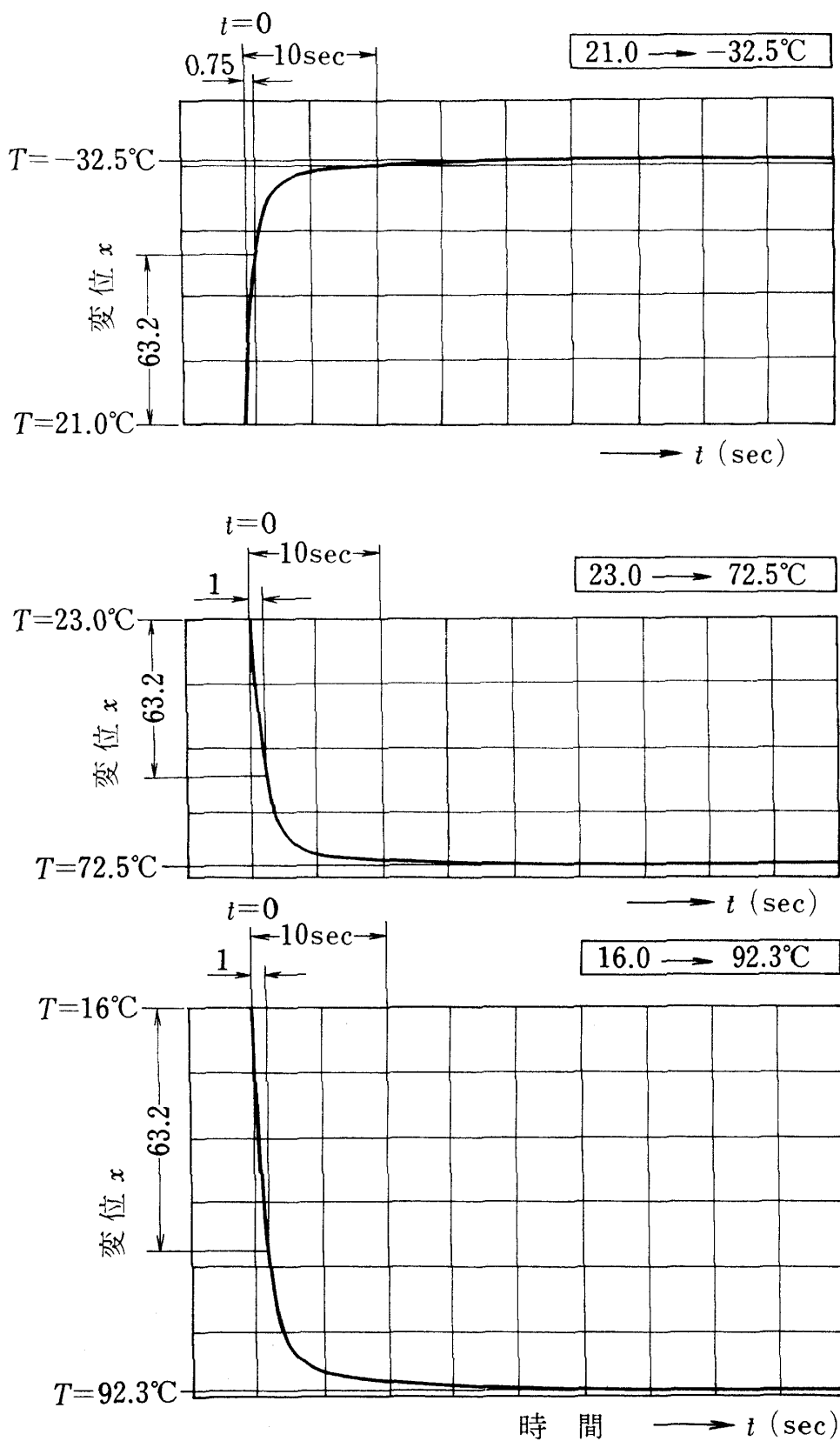


図 17 動特性 (TST-13)

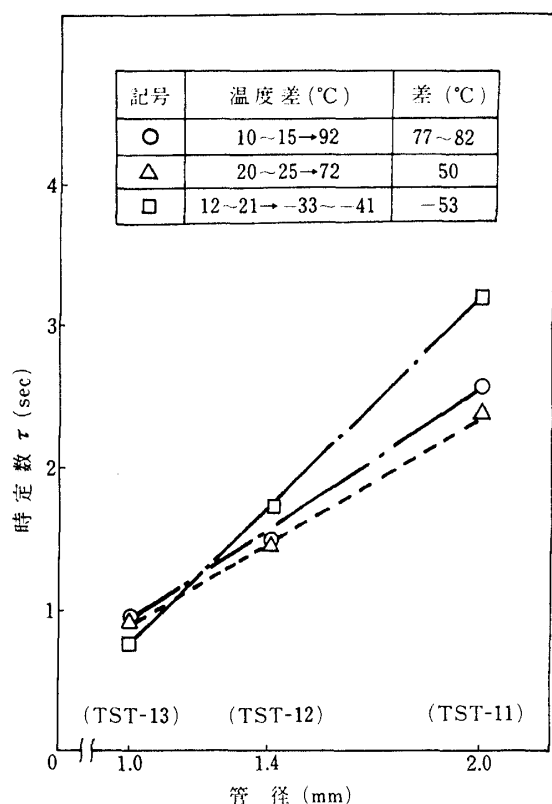


図 18 液槽投入による応答性

5. 実験結果

5.1 応答曲線

図 19(a)~(f)は、代表気流速度 $U = 40 \sim 46 \text{ m/sec}$ 、変化前後の温度差 $\Delta T = 30^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ における各センサ各形態の応答曲線である。この曲線は前記高速ペンレコーダによる記録をスケージングしたものである。ペンレコーダによる記録は後の付録に示す。

このような出力グラフから、図中に示す様に変位開始を時刻 $t = 0$ として出力 63.2% に対応する時刻を読み取って時定数 τ として定義し、応答性を表現する性能値として論ずる。また、図中に示すように、一次遅れ系の $[1 - e^{-t/\tau}]$ の曲線との比較では、時刻 0.1τ までの初期段階で、立上りの遅れがあり、 $t > \tau$ の領域で高次の遅れが見られる。初期立上り遅れは、液体に気流からの熱が伝導する際に外皮の SUS 管部への熱吸収があるためであり、このことは管径が細く、従って SUS の管壁の薄い (0.25 mm) TST-13 の場合にこの遅れが極めて小さくなって

いることから分かる。高次の遅れは、ベースプレートや支持板などの熱容量の大きな構造材への熱移動に起因するものと考えられる。

(2) 時定数

図 20 は、気流速度を変化させた場合の各センサの時定数を示すグラフである。 T_∞ は $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ の範囲であり、センサ初期温度を大気温度より高め、 $\Delta T = 30^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ に温度降下させた場合の結果である。

各センサ共、気流速度が大きくなると共に時定数が小さくなっており、その関係が両対数グラフで直線上に乗ることから時定数が気流に関する指数関数的な変化であることを示している。又速度の増加に伴い各センサ間の時定数の差は小さくなっている。気流風向に対する設置法では B の方が時定数が小さくなっており、その差は管径の小さい方が大きい。速度と共に差が縮まり、風速 60 m/sec の近くでは差が殆どなくなっている。

図 21 は図 20 の結果から、気流速度の 25, 45, 60 m/sec について補間した値をプロットしたもので、管径に対する時定数の変化を示している。管径の増加に伴い時定数が増加しているが、特に設置方法 B についてはその増加率が大きくなっており、主流風速の小さい場合程その傾向が顕著に現われている。この結果は、概略的には、どの風速においても、管径が 2 倍になると時定数もほぼ 2 倍になるという比例の傾向を示しており、これは、文献(3)に示した簡単な理論解析による予測に一致している。これらの結果から、気流速度 100 m/sec の場合を予想すると、図中破線で示す様に、管径 1.4 mm 以下で、A, B どちらの設置法でも $\tau < 2$ 秒を達成しうると予想できる。

5.2 気流に対するセンサ方向の影響

これまでの実験結果で示した様に、センサ方向は気流に対して円管列が平行に並ぶ A 型よりも、円管列が垂直になる B 型の方がどのセンサでも高い応答性を示している。特に、その傾向は管径の小さい程顕著である。これを応答曲線比較すると図 22 に示すようになる。この場合の気流速度 U_∞ は $40 \sim 46 \text{ m/sec}$ 、温度差 ΔT は $31^\circ\text{C} \sim 66^\circ\text{C}$ である。この図が

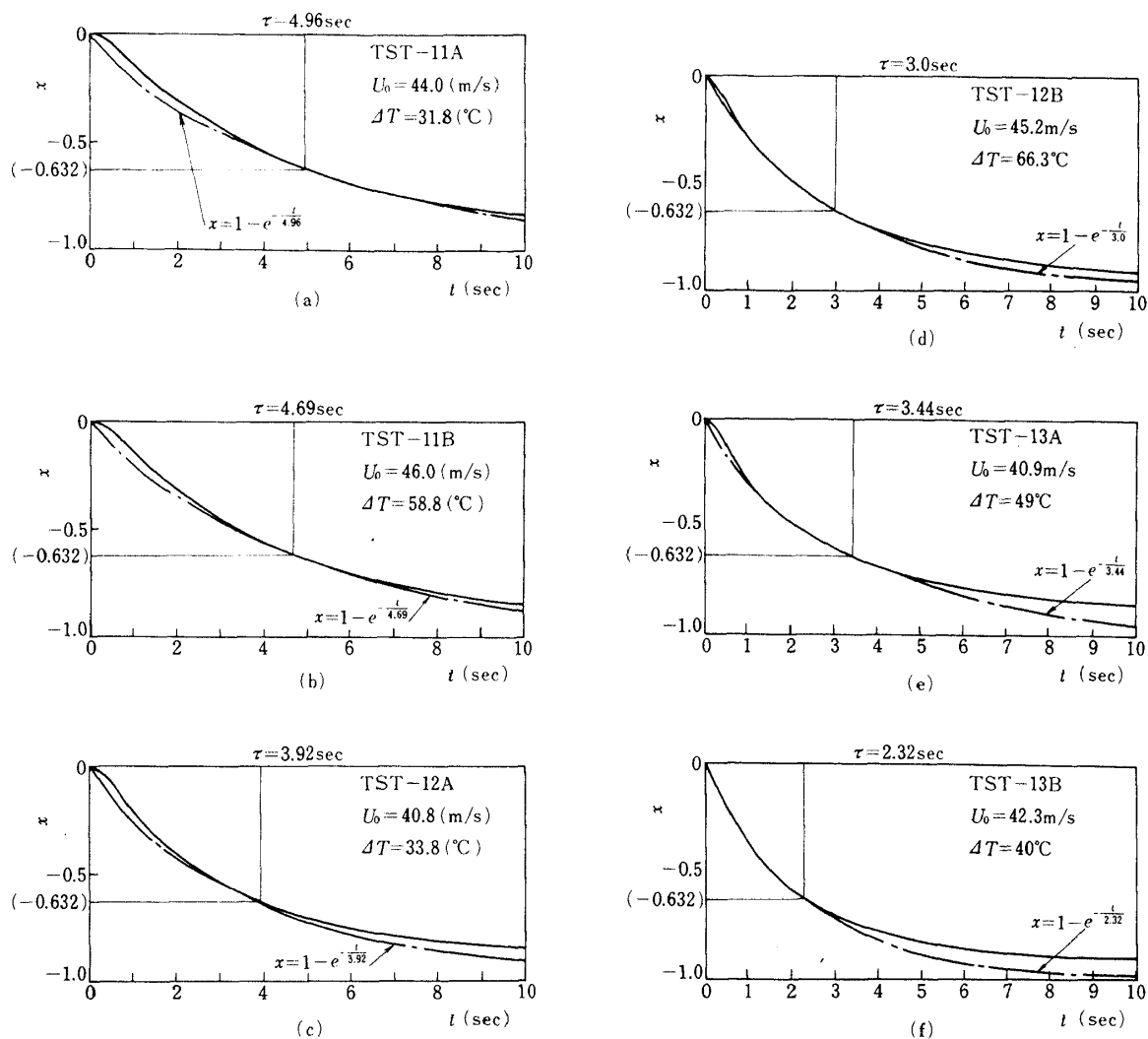


図 19 応答曲線

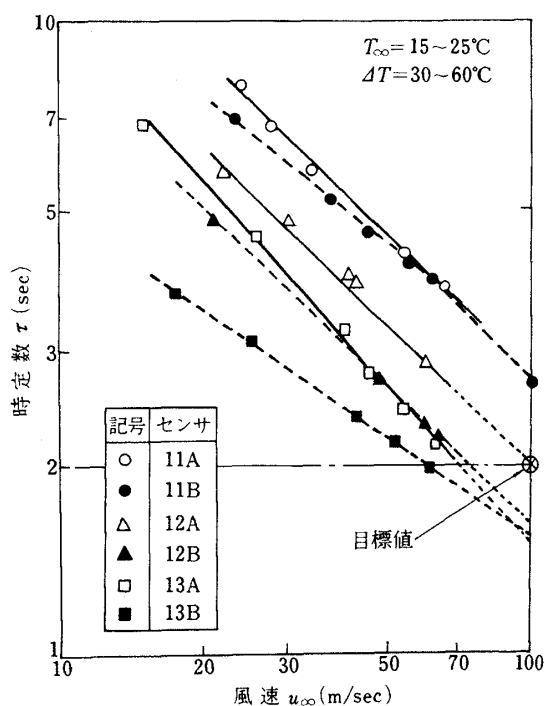


図 20 風速と時定数の関係

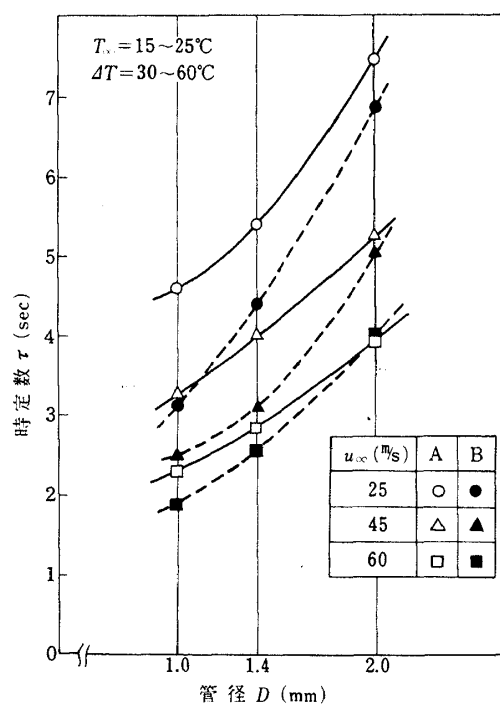


図 21 管径と時定数の関係

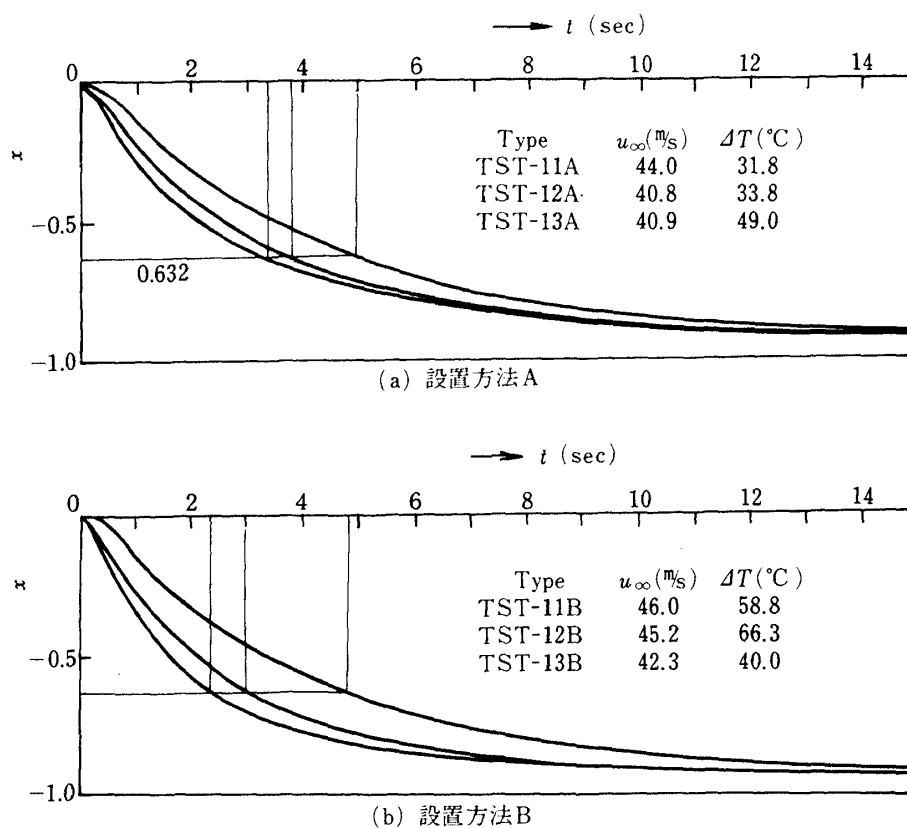
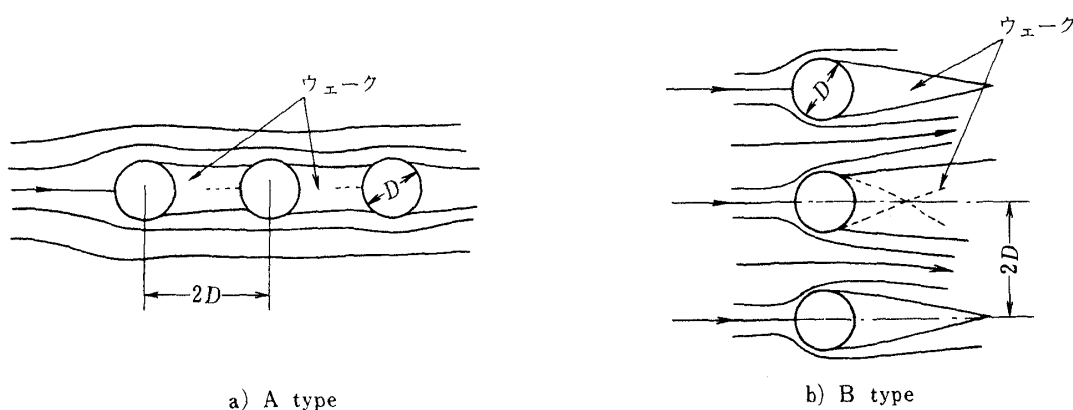
図 22 T_3 センサ設置方向と応答曲線

図 23 センサ設置方法と流れ模様

らも明らかな様に、管径の小さなTYPE-13及びTYPE-12のセンサで、B型の設置の方が早い応答を示し、特に、初期の曲線形状に立上りの遅れが小さくなっているのが見られる。これは設置方法による外面熱伝達の相違に起因することであり、本実験範囲では、円管列が気流に垂直に並び、円管表面の流れが、単独円柱に近い様相を呈するBの方が、気

流に円管列が平行で、In-line tube bankの流れに近似しうるAの場合よりも高い外面熱伝達率を与えるためと考えられる⁽⁴⁾(図 23)。

5.3 温度差の影響

実験の結果から、センサの初期温度と気流温度との温度差が及ぼす応答性への影響は、管径の最も小

さな TST-13 センサにのみ顕著に現われた。図 24 は気流速度 60 m/sec における供試センサ TST-13 (管径 1 mm) の温度差による時定数の変化である。図から明らかな様にいずれの設置法の場合にも、温度差の小さい方が時定数は小さくなっている。このことは、実用上ではステップ的な大きな温度変化が

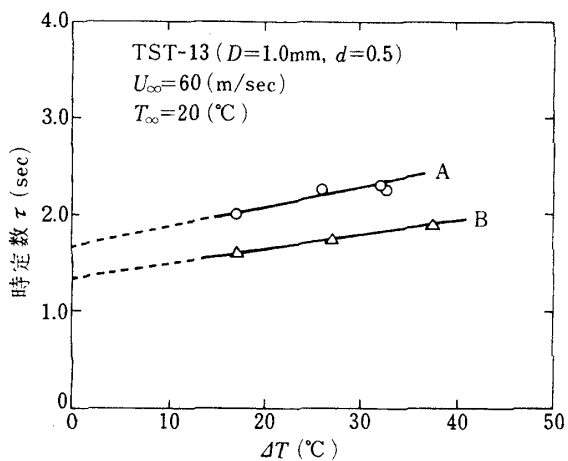


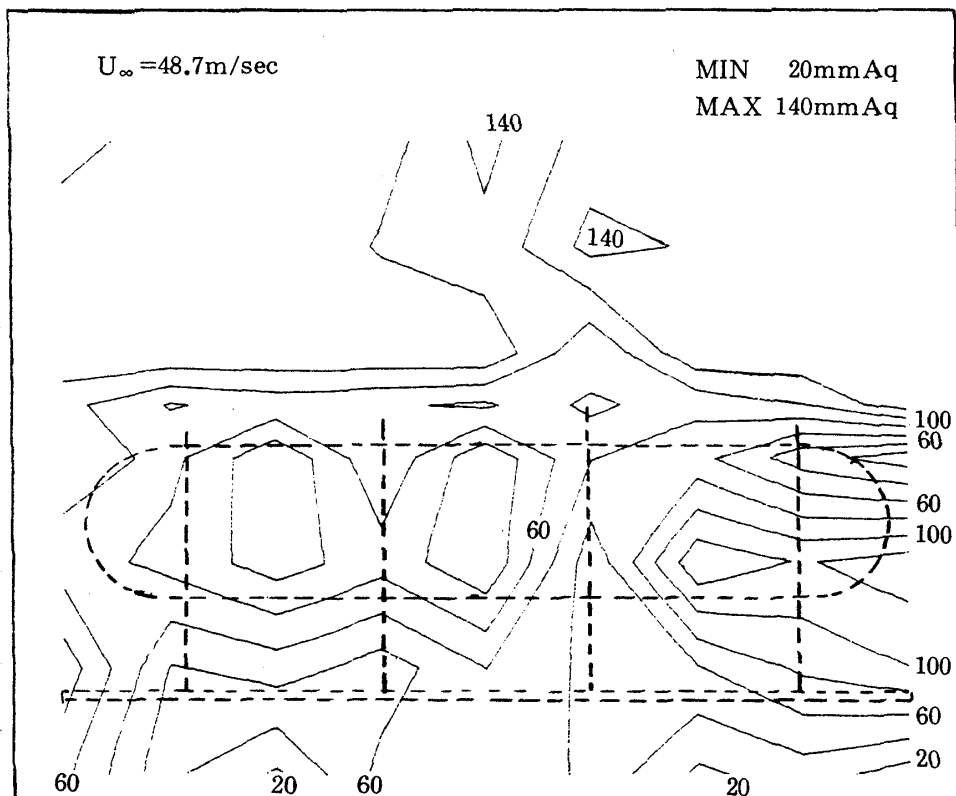
図 24 T_3 センサ (TST-13) における温度差の影響

生じる恐れのないことから、好ましい特性とも言える。温度差の応答性に対する影響を次の様に考えることが出来る。

大きな温度差では、感温液体の膨張・収縮の体積が大きいため、ベローズへ流入又は流出する液体速度が大きい。従って感温液体の内部流動に伴う内部圧力損失が大きくなり、応答性が低く現われると考えることが出来る。これを考慮すると、図 21 で見られた、管径の小さなセンサの応答性が、管径に対して直線性からはずれ、多少、大きい時定数が現われていることが、内部流動損失に起因するものと予想できる。

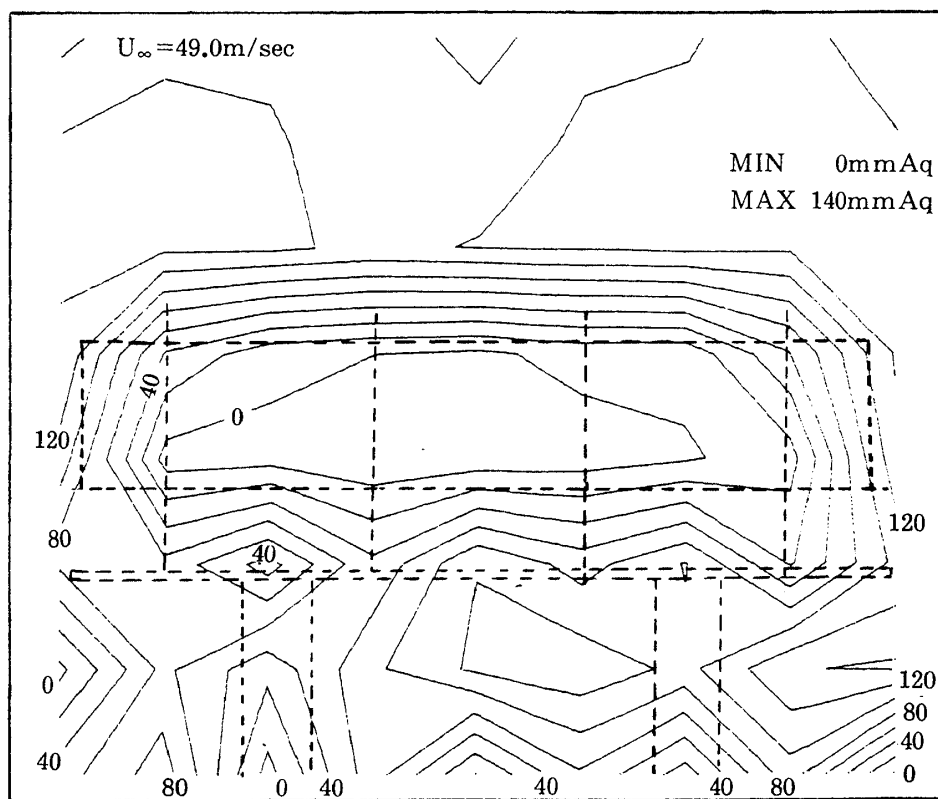
5.4 センサによる気流圧力損失

T_3 センサを実機エンジンに装着することにより起こるファンダクト内の圧力損失を見積ると共に、センサ外面の熱伝達特性を予測し、理論解析のデータとするため供試センサ感温部後流を全圧管でトラバース測定し、後流全圧分布を求めた。測定はセンサ感温部下流 50 mm で行った。図 25 は、TST-11

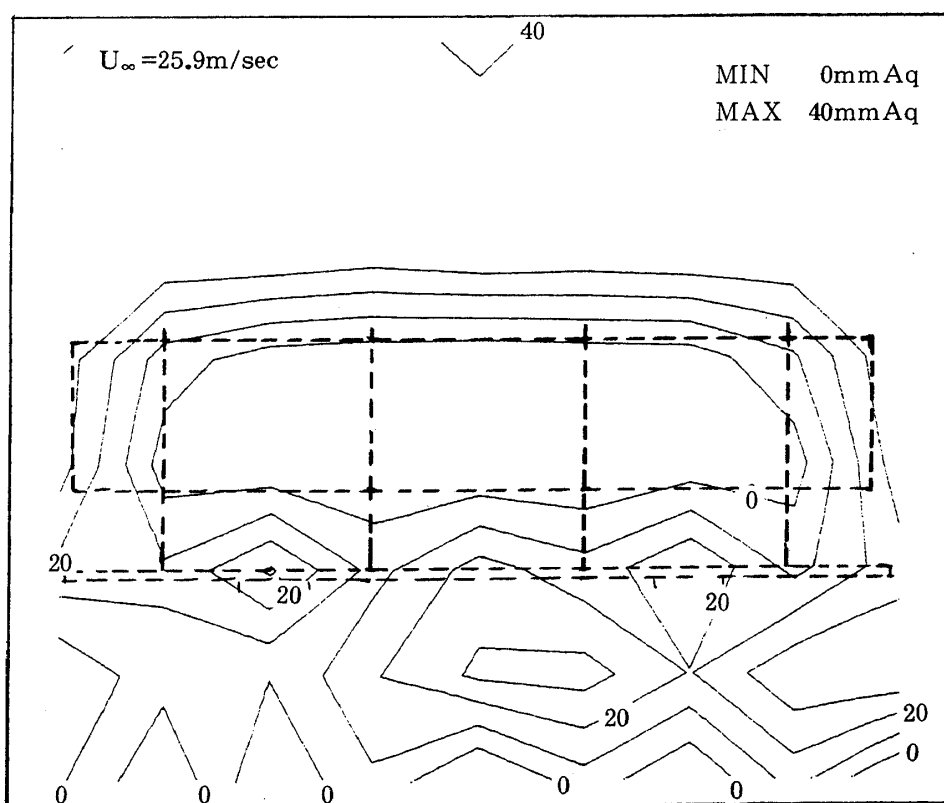


(a) TST-11A

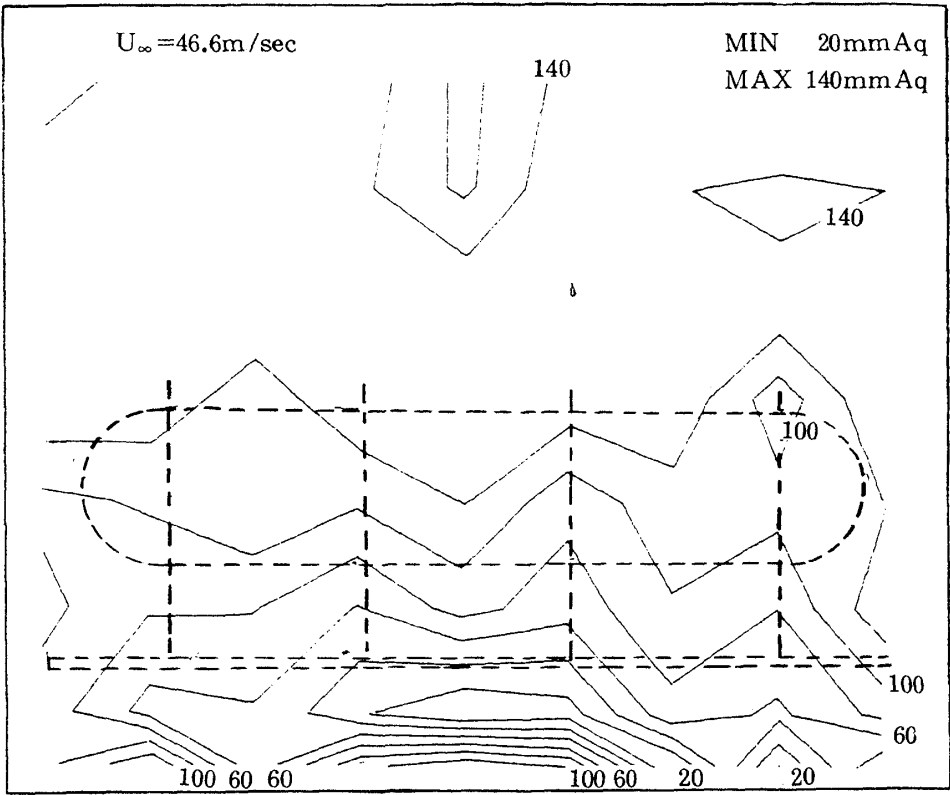
図 25 T_3 センサ後方の等圧線



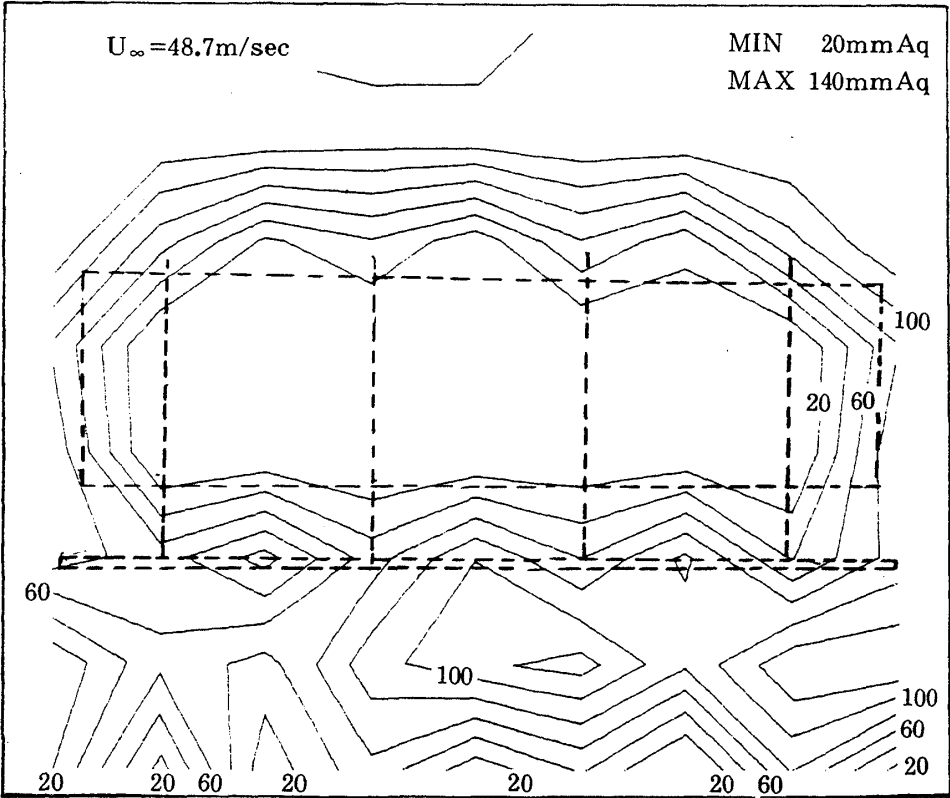
(b) TST-11 B



(c) TST-11 B



(d) TST-12A



(e) TST-12B

及び TST-12 の測定結果であり測定した全圧分布を、電子計算機による図形処理を行なって等全圧線として描かせたものである。図中の数字は動圧を (mmH_2O) の単位で示している。各センサ共、タイプ A の損失は小さく、下流の全圧も強い分布は出ていないが、タイプ B は気流を強くブロックしており、下流に大きな圧力損失のウェークが生じていることが分かる。このことはセンサ感温部外面熱伝達率がタイプ B の方が高いことも説明している。

6. FJR エンジンへの実用化ートルエン封入センサ

これまで述べてきたセンサ供試体に関する実験的結果をもととして、FJR710 ターボファンエンジンの可変静翼制御装置に適用する実用型の高圧圧縮機入口温度センサ (T_3 センサ) の設計製作を行ない、高応答制御システムを実現した。この実用型センサは、センサ内部に封入する感温液体としてトルエン

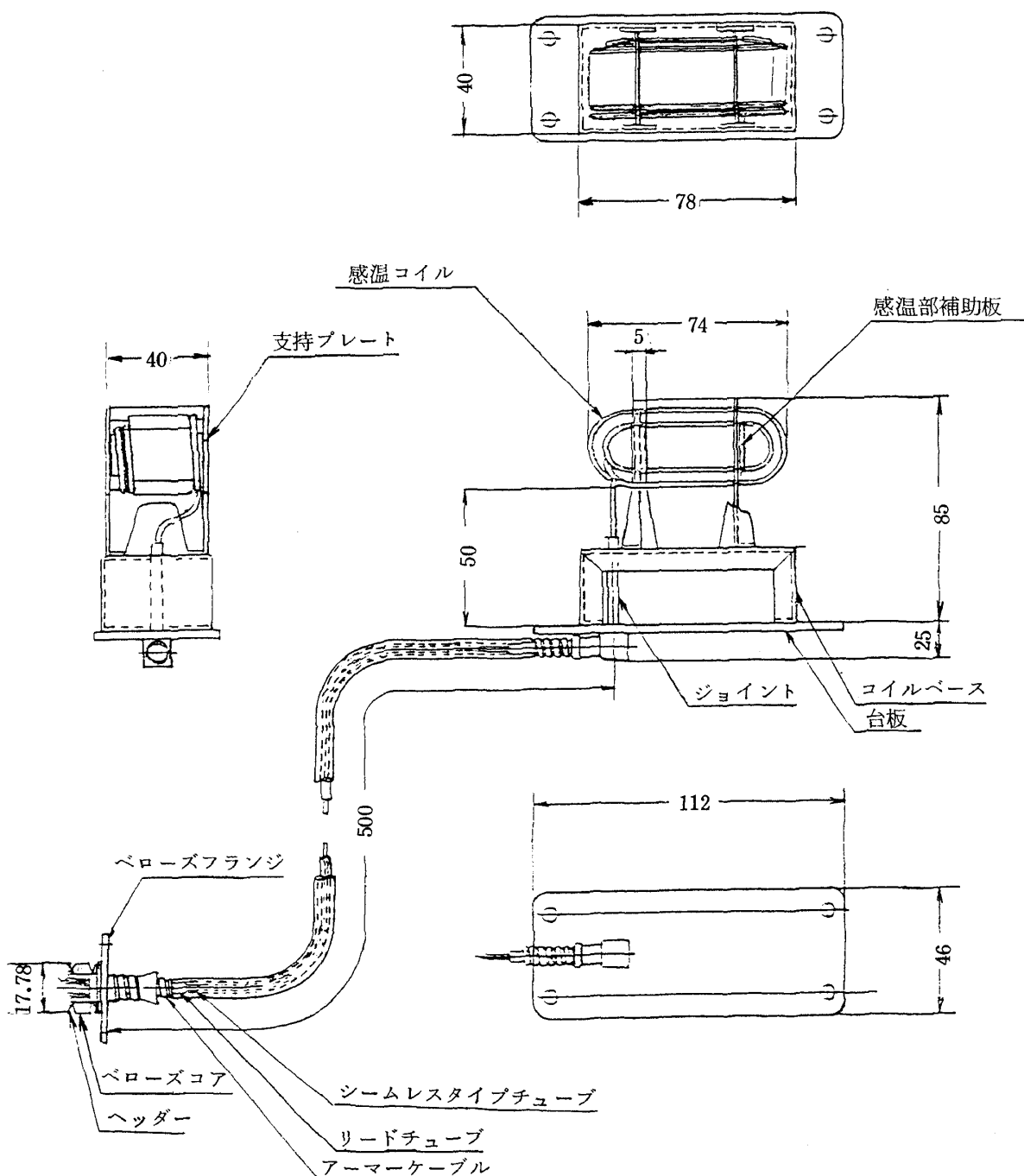
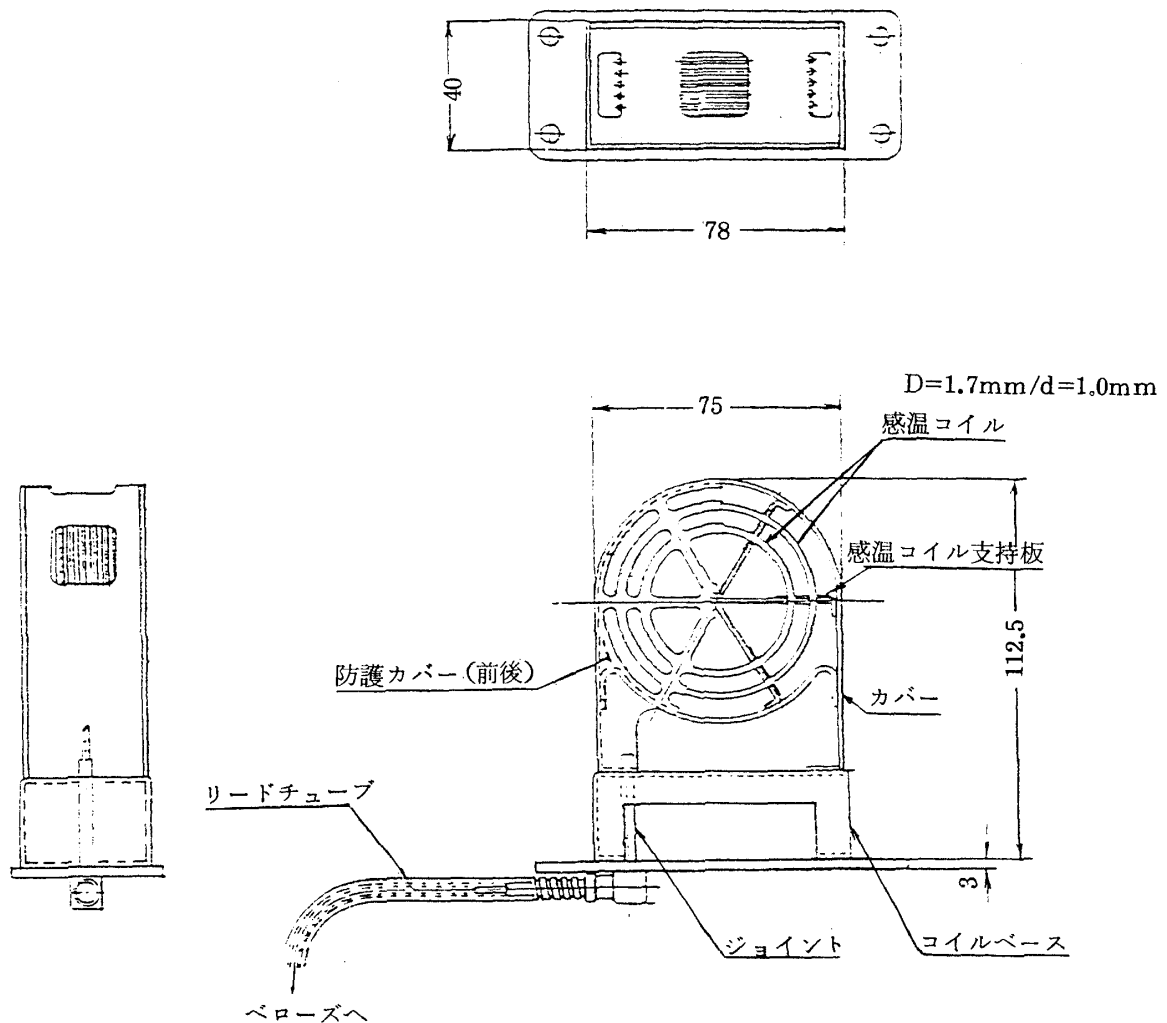


図 26 a FJR710/600 の T_3 センサ (防護カバーなし)

図 26 b FJR710/600 の T_3 センサ (防護カバー付)表 4 FJR710/20 及び FJR710/600 の実用 T_3 センサ要目

形 式	液体封入 細管コイル 感温部, ベローズ出力
感温コイル寸法	外径 1.7 (mm) 内径 1 (mm) 長さ 2,641 (mm)
封入液体	トルエン $C_6H_5CH_3$
	比 熱 0.401 kcal/kg $^{\circ}C$ (1.679 KJ/kgK)
	比 重 878 kg/m 3
	熱伝導率 0.130 kcal/mhr $^{\circ}C$ (0.151W/mk)
	膨 張 率 1.11 1/ $^{\circ}C$
作 動 内 圧	7.26 kg (71.2N) ; -55 $^{\circ}C$ 9.98 kg (97.8N) ; 120 $^{\circ}C$
ベローズ変位	-55 $^{\circ}C$ →120 $^{\circ}C$ にて 2.845mm
出力部バネ定数	130.4 kg/mm (1278N/mm)
ベローズ寿命	50,000 Cycle ; -34.4→54.4→-34.4 $^{\circ}C$ 10,000 Cycle ; -55→120→-55 $^{\circ}C$
センサ材料	SUS 304 及び 304C

を選び、メタノールを用いた場合に懸念される高温域での性能劣化に対処し、信頼性を高めた。表 4 に実用設計の T_3 センサの諸元を示し、図 26 にその形状・寸法を示す。ここに示す様に、感温コイル管の外径を 1.7mm、内径を 1mm とし、管材は供試センサと同じ SUS 304 を用いた。基本形は、気流の圧力損失を抑えるため、A 型の設置方法を採用し、熱伝達率の改善を計って二重コイル巻とすると共に、センサ細管の外 / 内径比を供試センサよりも小さくとして ($D/d = 1.7$)、センサの応答性の向上を計った。これらの対策からメタノール封入の供試センサによる実験結果により、この実用センサの気流速度 100m/sec における応答時定数は 2 秒以下になると予測できる。

実際に T_3 センサを用いた数多くのエンジン運転試験、起動、加速試験において、良好な運転特性を示している。さらに実際には、航行中のエンジン前面への結氷 (Icing) などの対策としてセンサ前面にリンク状の防護カバーを設けたが、応答性への大きな影響は見られず、充分良好なエンジン運転を実現している。図 27 にこの防護カバーのついた実用センサ及び可変静翼制御装置の写真を示す。

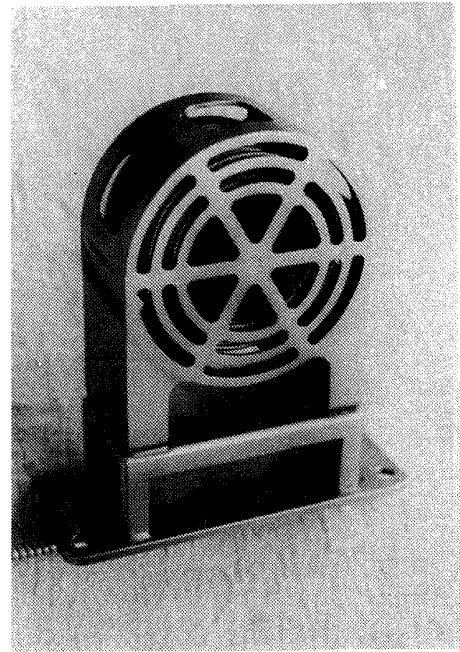
7. あとがき

ターボファンエンジンの高圧圧縮機可変静翼制御機構の入口温度検出に使われる極めて応答性の高い T_3 センサを開発することを目的として、感温コイルの径の異なった三種類の液体封入型供試センサを設計製作し、風洞を用いて応答実験を行った。

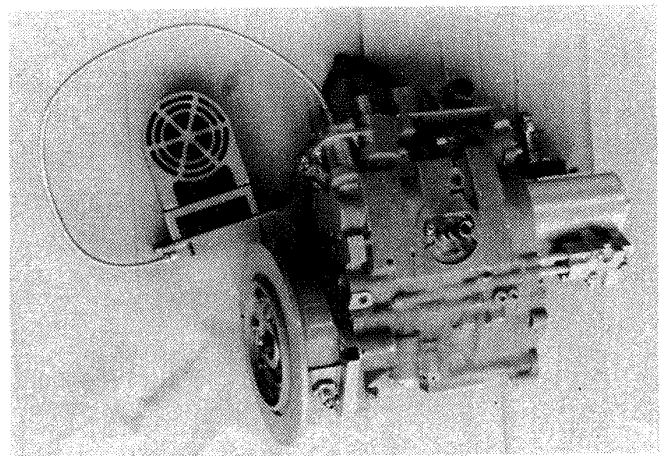
その結果は以下の通りである。

(1) 表 5 に本実験に使用した三種の供試センサの応答性を示したが、どの供試センサについても在来のベローズ型に比べ、大巾な応答性の改善を得た。これは主にセンサ感温部を気流に露出させると共に細管で構成して表面熱伝達率を上げ、気流に対する感温部の熱容量を小さくしたことなど、熱伝達形態の改善によることが明らかである。

(2) 管径にはほぼ比例する時定数が得られ、設計目標である $U_\infty = 100\text{m/sec}$ では、供試センサの形態で管径 1.4mm 以下の細管を用いることによって 2 秒以下の時定数を達成できることが明らかになった。



T_3 センサ (防護カバー付)



T_3 センサと V.S.V.C

図 27 T_3 センサと V.S.V.C. の外観図

表 5 供試センサ時定数
($U_\infty = 60\text{m/s}$ の場合)
($\Delta T \approx 20 \sim 30^\circ\text{C}$)

センサ	設置方法	$U_\infty = 60\text{m/s}$ の時定数(sec)
TST-11	A	4.0
	B	4.05
TST-12	A	2.80
	B	2.57
TST-13	A	2.28
	B	1.90

(3) 設置方法は気流に対し垂直に設置した方（B型）が応答性は良いが、気流速度の向上と共にA、B型両者の差は小さくなる。

(4) 温度差による応答性への影響は管径の小さなセンサに現われ、大きな温度差は応答性を遅らせる効果がある。

(5) これらの結果をもとにFJR710/20, 710/600ターボファンエンジン用にトルエンを封入した、管径1.7mm、設置方法Aの二重巻コイル形状の T_3 センサを設計製作し、充分高いエンジン高速加減速性能を実現した。この T_3 センサを用いたFJR 710/20及び、710/600は鳥吸込、氷打込などの異物吸込試験に充分耐え、さらに高空飛行シミュレーション試験において所期のエンジン応答性能を実現した。又本センサは航技研STOL機搭載用のFJR710/600-S用の T_3 センサとして実用化されることになった。

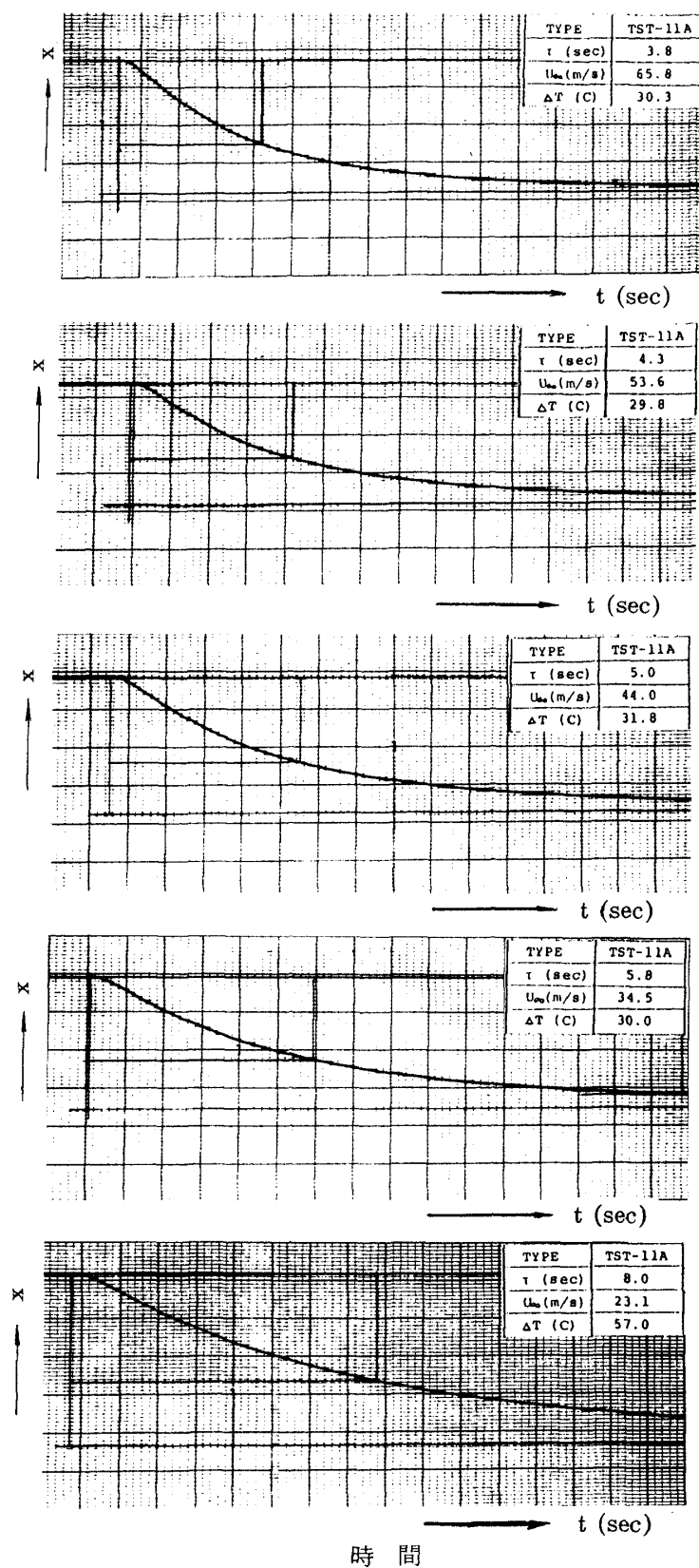
最後に本供試センサ及び実用センサの設計・製作に当り、石川島播磨重工業株式会社航空宇宙事業本部の渡辺康之氏に多大なる協力をいただいた。末尾ながら感謝の意を表する。

付 録

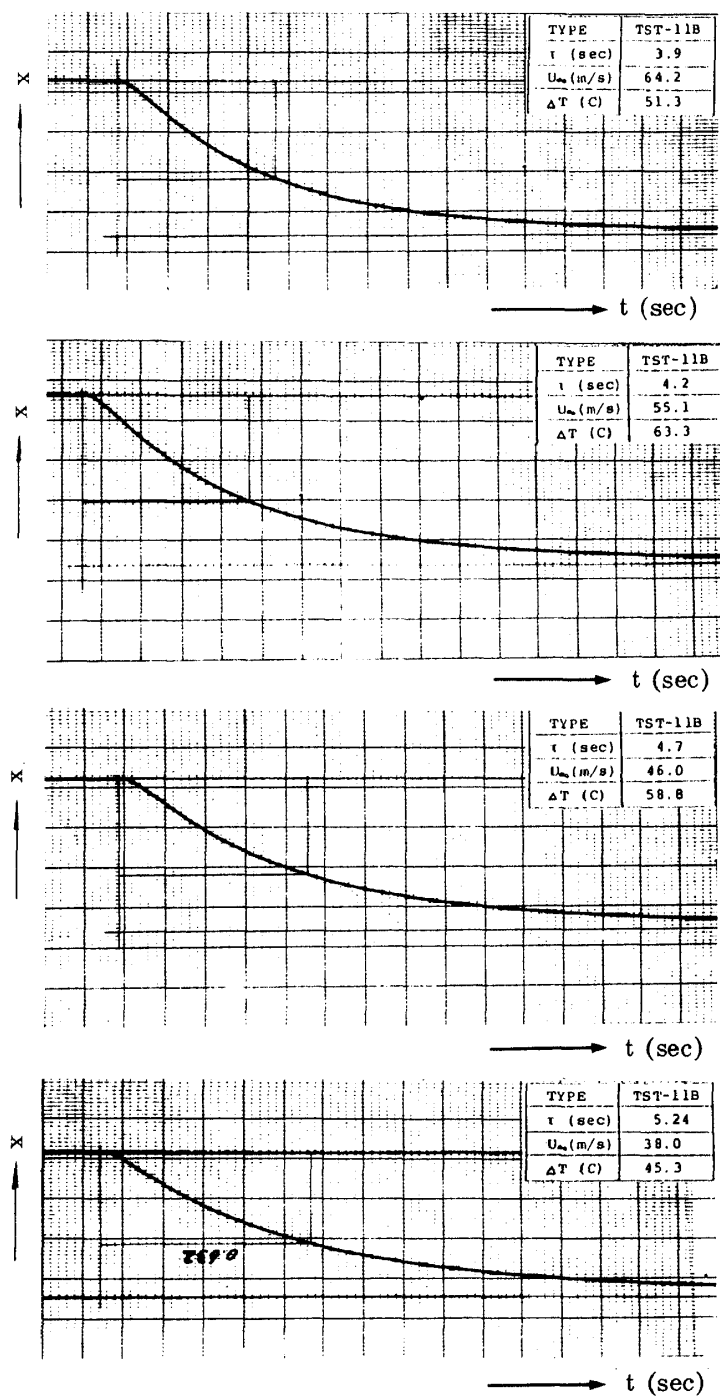
以下に参考のため各実験の生データとしてペンレコーダに記録したセンサの応答曲線を付図1から6に示す。

参 考 文 献

- (1) 航技研原動機部；航空機用ジェットエンジンの研究開発，航技研報告，TR-482.
- (2) 西尾，遠藤，松田；フロントファンエンジンの制御，航技研報告，TM-428.
- (3) 坂田，臼井；「液体封入気流温度センサの研究」第14回日本伝熱シンポジウム講演論文（1977）.
- (4) A. Zukauskas；"Heat Transfer from Tubes in Cross flow", Advances in Heat Transfer Vol.8, pp.93 (1972).

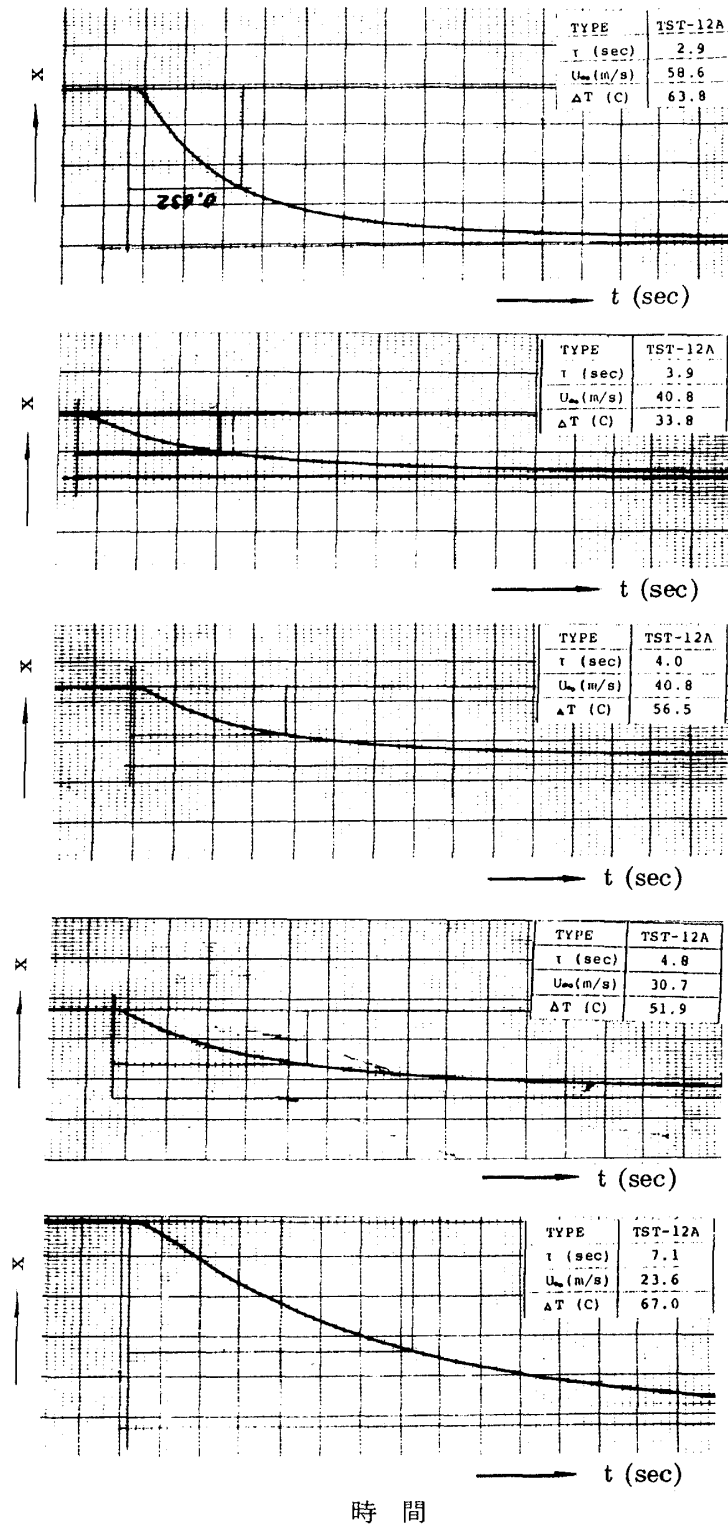


付図1 応答曲線 (TST-11A)

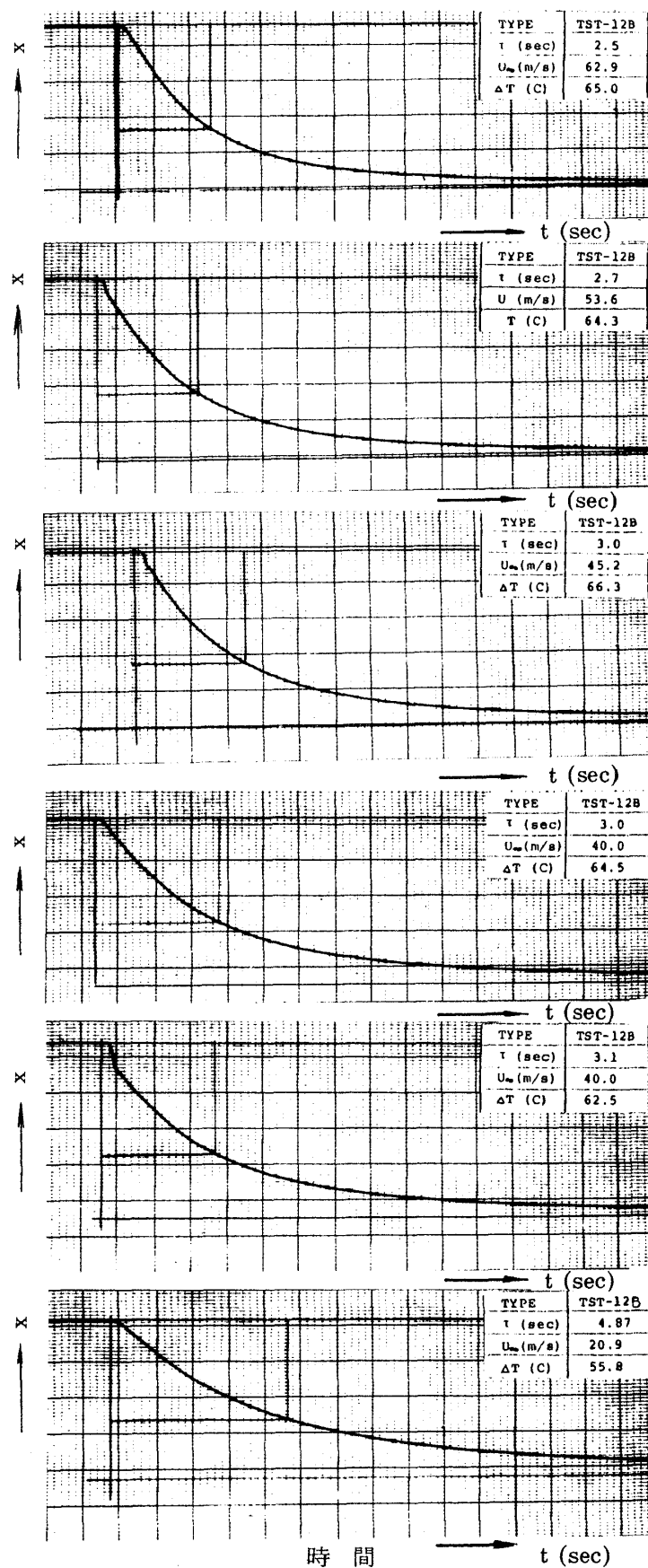


時 間

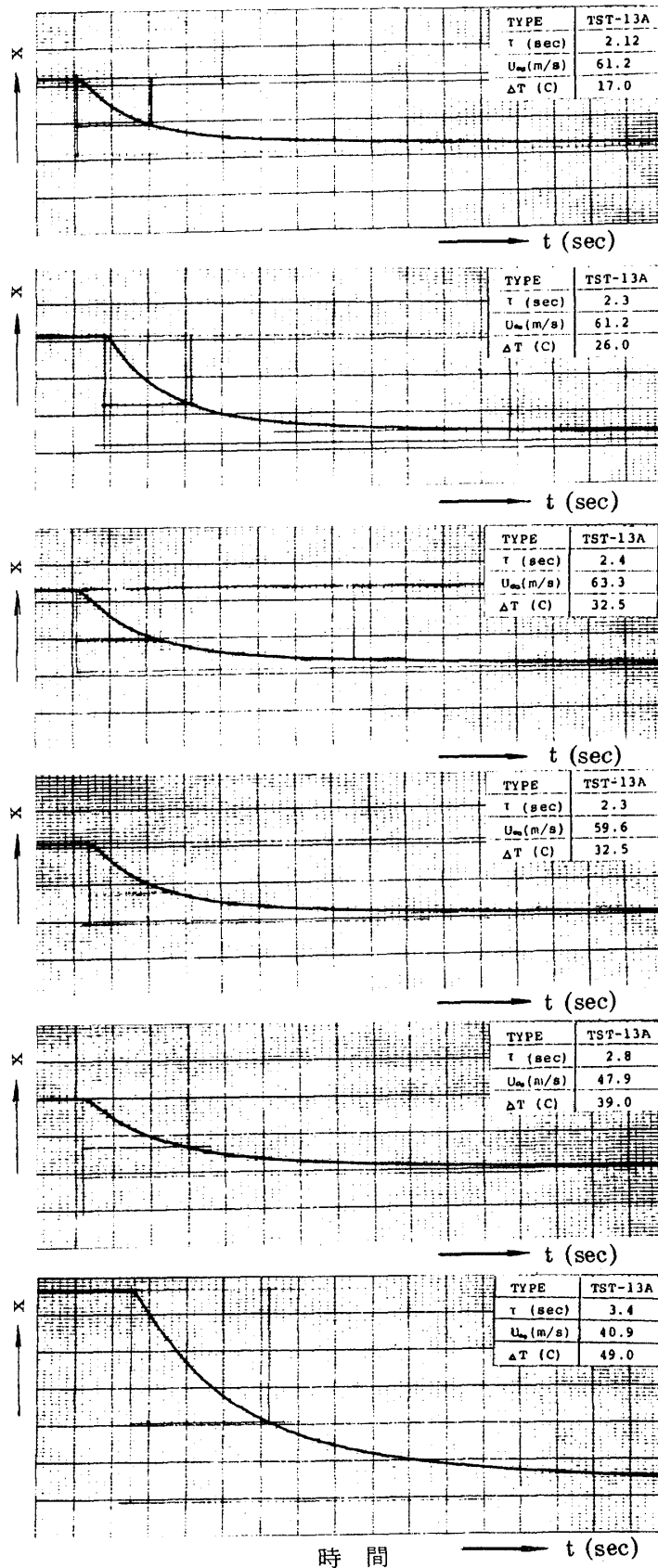
付図 2 応答曲線 (TST-11B)



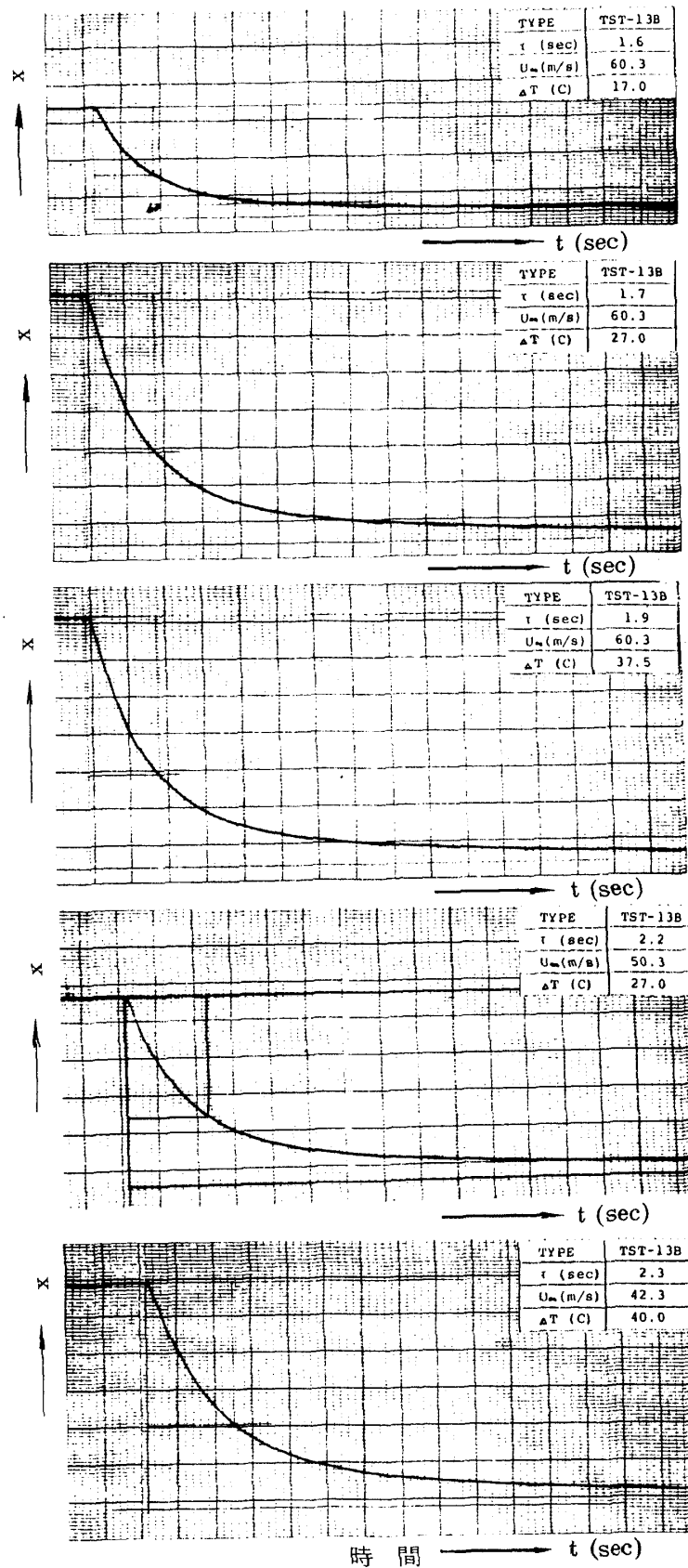
付図3 応答曲線 (TST-12A)



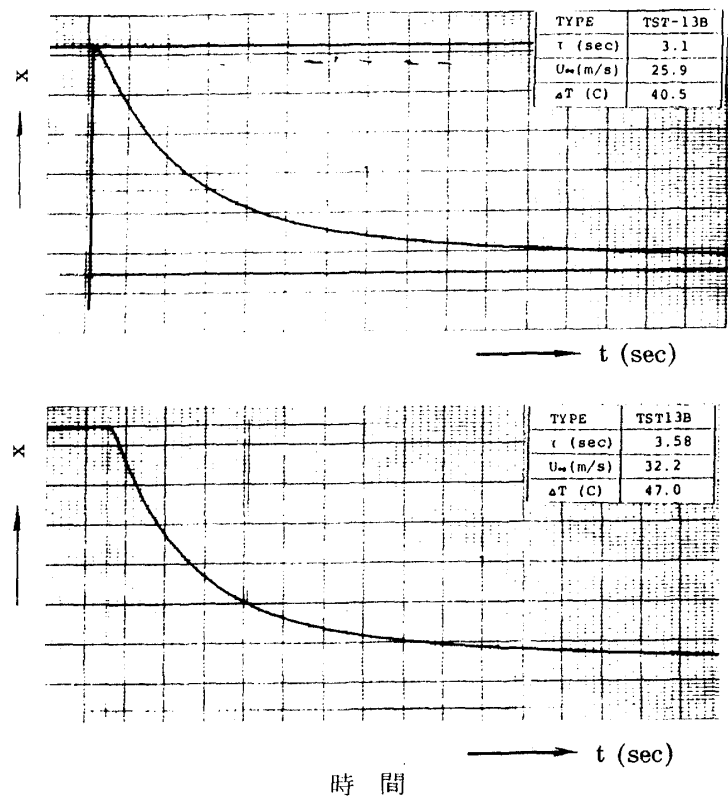
付図4 応答曲線 (TST-12B)



付図 5 応答曲線 (TST-13A)



付図6 応答曲線 (TST-13B)



付図 6 応答曲線 (TST - 13 B)

航空宇宙技術研究所資料474号

昭和57年9月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区信濃町12 三河ビル

Printed in Japan