

24インチ超音波流量計ナトリウム中静的試験



1982年7月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	N941 82-153
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

24インチ超音波流量計ナトリウム中静的試験

荒木 等^{*} 宇野 修^{**} 久門 靖尚^{*}
青木 忠雄^{*} 津沢 泰行^{*} 山本 研^{*}

要 旨

ナトリウム用超音波流量計は原型炉「もんじゅ」用大口径配管流量計として設置すべく、これまで研究開発が実施されてきており、すでに12B口径についてはナトリウム流速測定試験が完了している。

しかし流量計設置予定の原型炉2次系コールドレグ側配管径は22B(1次系24B)であるため、1次系も考慮した実機への応用の可能性を実証することを目的として、24Bナトリウム用超音波流量計を試作し、まず第1ステップとして静止ナトリウム中での諸特性を調査し、次の結果を得た。

- (1) ナトリウム温度200~550℃において、超音波流量計電子回路に要求される十分な超音波受信波高が得られ、長期間の動作特性も安定していた。
- (2) 超音波伝播時間を測定することにより、流速出力信号の温度依存性を0.2%以下(200~550℃)で補正出来る回路定数の決定が出来た。
- (3) 流速零出力信号の時間変化をナトリウム温度一定時及び適度変化時について測定し、変動幅±0.2%(F.S.6m/s)以下の安定性が得られた。

以上の結果により24インチ超音波流量計も充分高精度で実用化出来る可能性があることがわかったので、今後ナトリウム実流試験により流速変換係数の温度補償精度等を確認し、「もんじゅ」実機の設計へ反映させてゆく必要がある。

* 大洗工学センター ナトリウム技術部 ナトリウム機器構造試験室

** FBR開発本部 計測制御グループ (現在)

In-Sodium Test of 24-inches Ultrasonic Flowmeter

Hitoshi ARAKI*, Osamu UNO**, Yasunao KUMON*,
Tadao AOKI*, Yasuyuki TSUZAWA*, Ken Yamamoto*

Abstract

Research and development of the Ultrasonic Flowmeter (USFM) for the large pipe sodium loop in the Prototype LMFBR "MONJU" have been conducted so far, and sodium flow measurement test using 12-inches USFM was already finished.

But cold leg pipe of secondary loop of "MONJU" is 22B (primary loop; 24B), in which USFM is to be installed, so 24-inches USFM was made and some performance were measured in still sodium as the first step of some tests, and following results were obtained.

- (1) The ultrasonic pulse height enough for the operation of the USFM electronic circuit and long term stability was obtained in 200~550°C sodium temperature.
- (2) The electronic circuit parameters which could collect temperature dependency of USFM output within $\pm 0.2\%$ (200~550°C) by the measurement of ultrasonic transmission time.
- (3) The zero point drift of USFM output was measured in the constant and transient sodium temperature, and the stability more than $\pm 0.2\%$ (FS 6 m/s) was obtained.

From these results, 24-inches USFM is found to have the possibility of utilization, so temperature collection accuracy of USFM Scale Factor and other performance must be confirmed by the sodium flow test for the application in "MONJU".

* Sodium Components Test Section, Sodium Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC.

** I&C Group, FBR Development Project (Present address).

目 次

1. 緒 言	1
2. 超音波流量計測定原理	2
3. 超音波流量計構成機器	3
3.1 ダクト部	3
3.2 主回路部	3
4. 試験方法	5
4.1 受信波高の測定	5
4.2 伝播時間の測定	5
4.3 流速変換係数の測定	5
4.4 最終段出力信号の測定	6
5. 試験結果及び評価	7
5.1 受信波高の測定	7
5.1.1 受信波高の温度依存性	7
5.1.2 受信波高の周波数依存性	8
5.1.3 第2・第3波目受信波高の測定	8
5.1.4 受信波高の長時間安定性	8
5.2 伝播時間の測定	9
5.2.1 伝播時間の温度依存性測定	9
5.2.2 伝播時間の温度依存性計算	9
5.3 流速変換係数の測定	10
5.3.1 流速変換係数の決定	10
5.3.2 流速変換係数の計算値と測定値の比較	10
5.4 最終段出力信号の測定	11
5.4.1 静止ナトリウム中での伝播時間差の調整	11
5.4.2 静止ナトリウム中での零点ドリフトの測定	11
5.4.3 零点ドリフトに与えるバックグラウンドの影響	12
5.4.4 零点ドリフトに対するキャンセル回路の動作特性	12
6. 結 言	14
7. 謝 辞	15
8. 参考文献	16

List of Figures

Fig. 1	Schematic Diagram of the Ultrasonic Flowmeter.....	17
Fig. 2	Block Diagram of the Alternating Type Ultrasonic Flowmeter.....	18
Fig. 3	Ultrasonic Flowmeter (Guide Rod Type).....	19
Fig. 4	Time Chart of Ultrasonic Flowmeter.....	20
Fig. 5	Instruments Calibration Loop.....	21
Fig. 6	Transmission Pulse Pattern through the Sodium Tube.....	22
Fig. 7	Temperature Dependence of Ultrasonic Transmission.....	23
Fig. 8	Frequency Dependence of Ultrasonic Transmission.....	24
Fig. 9	Defference between 2nd and 3rd Wave Pulse Height.....	25
Fig. 10	The Stability of the Ultrasonic Transmission Pulse Height (1).....	26
Fig. 11	The Stability of the Ultrasonic Transmission Pulse Height (2).....	27
Fig. 12	The Stability of the Ultrasonic Transmission Pulse Height (3).....	28
Fig. 13	The Stability of the Ultrasonic Transmission Pulse Height (4).....	29
Fig. 14	Ultrasonic Transmission Time vs. Sodium Temperature (1).....	30
Fig. 15	Ultrasonic Transmission Time vs. Sodium Temperature (2).....	31
Fig. 16	Temperature Distribution in Guide Rods.....	32
Fig. 17	$\sqrt{2d/\tan\theta \cdot C_N^2}$ vs. Sodium Temperature.....	33
Fig. 18	$\sqrt{2d/\tan\theta \cdot C_N^2}$ vs. Ultrasonic Transmission Time.....	34
Fig. 19	Temperature Dependence of Scale Factor of Ultrasonic Flowmeter....	35
Fig. 20	The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Constant Temperature (1).....	36
Fig. 21	The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Transitional Temperature (1).....	37
Fig. 22	The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Transitional Temperature (2) (After Background Reduction).....	38
Fig. 23	The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Constant Temperature (2) (After Large Temperature Change).....	39
Fig. 24	The Stability of the Transmission Time Diference.....	40
Fig. 25	Operational State of the Zero Point Drift Cancellation Circuit....	41
Fig. 26	The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Transitional Temperature (3) (After Electronic Circuit Modification).....	42
Fig. 27	The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Transitional Temperature (4) (After Electronic Circuit Modification).....	43
Fig. 28	The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Constant Temperature (3) (After Electronic Circuit Modification).....	44

1. 緒 言

超音波流量計は、大口径流量計として軽量で直線性が良いという点で電磁流量計より優れているため、これまで研究開発が実施されてきた^(1~9)

特に 12 B 超音波流量計についてはナトリウム実流量試験⁽⁶⁾が終了し、ナトリウム温度 200～400℃、流速 0～5 m/s、上流直管長比 $L/D = 5 \sim 25$ (L ; 上流直管長, D ; 管径) について精度良く測定されることが実証されている。

しかし、「もんじゅ」1次、2次主配管径は 24 B 及び 22 B であるため、配管径が大きくなることによる種々の影響を調べるため 24 B 超音波流量計を試作した。

そしてまずナトリウム実流試験に先立って静止ナトリウム中での諸特性を評価するために、以下のような試験を行った。

- (1) 伝播距離が長いことによる超音波受信波高の減衰が考えられるため、ナトリウム温度 200～550℃にわたって受信波高を測定し、長時間の安定性を調べた。
- (2) ナトリウム流動試験に必要な電子回路定数を決定するために超音波伝播時間の温度依存性を測定し、計算値との比較を行った。また、これにより流速変換係数を決定した。
- (3) 静止ナトリウム中での超音波流量計出力値の零点ドリフトをナトリウム一定温度及び過渡変化時について測定し、零点ドリフトに及ぼすバックグラウンドや回路特性の影響を調べた。

次章より試験方法、結果等について詳述する。

2. 超音波流量計測定原理

本超音波流量計の測定原理は、これまでの一連の報告書^(5~8)で説明されているので詳述はさけるが、Fig.1を用いて基本的な原理だけを説明する。

A_1 , A_2 , B_1 , B_2 は各々発信受信共に可能な超音波振動子であり、 B_1 , B_2 から同時に発信された超音波は流体の流れがあると下流方向 A_1 では静止ナトリウム中よりは早く、上流方向 A_2 では遅く受信され、その時間差 Δt が流速 v に比例し、次の関係式で表わされる。

$$v = \frac{\tan \theta \cdot C^2}{2d} \Delta t \quad (1)$$

ただし、 C ; ナトリウム中音速

従って時間差 Δt を電子回路で測定し、流速変換係数 $\tan \theta \cdot C^2 / 2d$ を表わす増幅回路を通して流速 v を求めることが出来る。

ただし、入射角 θ 、音速 C 、内径 d はナトリウム温度に影響されるため温度に依存した流速変換係数の設定が必要となり、実際の回路では(1)式を(2)式に変形し、更にこれを近似した(3)式に従って動作させている。

$$v = \frac{d}{\sin 2\theta \cdot (t - \tau)^2} \Delta t \quad (2)$$

$$v \approx \frac{k}{(t - \tau_c)^2} \Delta t \quad (3)$$

ただし、 t ; 送信から受信までの全伝播時間

τ ; ナトリウム中以外の主にガイド棒中での伝播時間

k ; $d / \sin 2\theta$ に近い定数

τ_c ; τ に近い定数

従って、 t と Δt は常に測定されているので定数 k 、 τ_c をあらかじめ定めておくことが必要となる。

更に本方式では送受信子を高温から保護するためガイド棒を用いており、4本のガイド棒の温度アンバランスの変化による Δt のドリフトを小さくする必要があり、このため送信方向は B_1 、 B_2 と A_1 、 A_2 の両方向から交互に切換えて Δt の平均値をとる交互切換方式を採用している。

3. 超音波流量計構成機器

本超音波流量計（三菱電機製作）は、Fig.2に示すようにダクト部、プリアンプ、主回路部より構成され、ダクト部とプリアンプはナトリウム機器構造試験室内の計器構成装置の現場に、また主回路部は中央制御室に各々設置されており、その間は同軸シールド信号線（3C2V）により結線されている。

3.1 ダクト部

流量計ダクト部は、24B SUS 304 配管外壁に4本のSUS 304 ガイド棒（550 mm L， 30 mm ϕ ）が33°の角度で溶接されており、ガイド棒先端に各々超音波送受信子がグリースを介して圧着され、ガイド棒表面には反射音を減らすために溝が切っており、熱電対が各々3本設置されている。ダクト部外観をFig.3に示す。これはまだヒータ及び保温材が設置されていない状態である。

3.2 主回路部

主回路部はピン電源に11台のモジュールが挿入されており、各々のモジュールの名称（Fig.2参照）と機能は次の通りである。

- (1) 「発振回路（OSC）」；すべての動作の基準となるトリガー信号を発生させる回路で「高圧回路」への送信信号，「リニアゲート回路」へのゲート信号，「弁別回路」へのゲート信号，「時間変換回路2」へのスタート信号を発生させる。
- (2) 「高圧回路（PG）」；「発振回路」に従ってプリアンプを通り，送信子 A_1 ， A_2 ，または B_1 ， B_2 に交互に高圧パルスを送信する。
- (3) 「リニアゲート回路（LGATE）」；「発振回路」からのゲート信号に従って所定の方向（ A_1 ， A_2 ，または B_1 ， B_2 ）からのプリアンプ信号を選択する回路で，各々独立に減衰器と遅延時間調整器を有している。
- (4) 「受信回路1（REC1）」；下流方向 A_1 ， B_1 信号の増幅を行う。
- (5) 「受信回路2（REC2）」；上流方向 A_2 ， B_2 信号の増幅を行う。
- (6) 「弁別回路1（DISCRI1）」；下流方向信号のうちディスクリレベル以上の信号波のみをバックグラウンド等から分離して矩形パルスに変えるもので，波高変動によって影響を受けないようにゼロクロス法が用いられている。また遅延回路（DL-1）が組込まれている。
- (7) 「弁別回路2（DISCRI2）」；上流方向信号について「弁別回路1」と同様な働きをする。また遅延回路（DL-2）が組込まれている。
- (8) 「時間変換回路1（THC1）」；上下流方向伝播時間差 Δt （ μsec ）を直流電圧 ΔV （volt）

に変えるもので、次式で与えられる。

$$\Delta V = -6.743 \times \Delta t (\mu \text{ sec}) - 0.048 \quad (4)$$

なお回路動作の安定化のためOR回路、AND回路及びサンプルホールド回路が含まれている。

- (9) 「時間変換回路2 (THC2)」；全伝播時間 $t (\mu \text{ sec})$ を直流電圧 $V (\text{ volt})$ に変換するもので、次式で与えられる。

$$V = -9.044 \times 10^{-3} \times t (\mu \text{ sec}) - 0.143 \quad (5)$$

なお回路動作の安定化のため、AND回路とサンプルホールド回路が含まれている。

- (10) 「増幅回路1, 2 (AMP1, 2)」；「時間変換回路1, 2」からの信号 ΔV , V を用いて流速値 v を算出するために配管内径、ナトリウム中音速、入射角に相当する増幅 (Gain1, Gain2) を行い、かつガイド棒中伝播時間 (TAU) 及び零点 (ZERO) を調整するもので、各々の出力 (A_1 , A_2) は次式で与えられる。

$$A_1 = \text{Gain 1} \times (\Delta V - \text{ZERO}) \quad (6)$$

$$A_2 = \text{Gain 2} \times (V - \text{TAU}) \quad (7)$$

なお出力信号のゆらぎを少なくするために、切り換え可能なフィルターが含まれている。

- (11) 「演算回路 (SQ-DIV)」；配管内径、ナトリウム中音速、入射角、ガイド棒中伝播時間の温度依存性を補正するために、二乗回路と割算回路を用いて最終段流速出力値 v を次式のように表わす。

$$v = \frac{100 \times A_1}{(A_2)^2} \quad (8)$$

なお上式は、前章の(3)式に相当するものである。

動作状況を示すタイムチャートをFig.4に示す。詳細な説明は文献(6)にあるので省略する。

4. 試験方法

24 B 超音波流量計ダクト部は、Fig. 5 に示すように計器校正装置に設置されており、ナトリウムは弁 V 1-9 を通してダンプタンクから真空チャージされるようになっている。ダンプタンクのナトリウム純度は、運転温度 150℃ のコールドトラップにより一定に管理されている。しかし、計器校正装置には純化系がないため正確な純度は不明である。

24 B 超音波流量計ダクト部内のナトリウムは循環出来るようになってはいるが、出入口配管が小さく (1B)、一様な流速分布が得られないため、流速測定は出来ず、静止ナトリウム中での静的試験を行う構造となっている。

4.1 受信波高の測定

「受信回路 1, 2」からの出力信号の波高をオシロスコープ (岩通製 SS-6100) により測定し、波形をポラロイドカメラにより記録した。

信号の種類は A₁, B₁, A₂, B₂ であり、送受信子の共振周波数は 1MHz, 2MHz, 3MHz, ナトリウム温度は 200~550℃ について行った。

4.2 伝播時間の測定

送信子により発信された超音波がガイド棒中、ナトリウム中を通り受信子に到達するまでの時間を「時間変換回路 2」を用いて測定した。この「時間変換回路 2」は発信信号により起動され、受信信号により停止されるまでの所要時間を直流電圧に変換するようになっており、この出力電圧をデジタルボルトメータ (タケダ理研製 TR-6855) で読み、(5) 式の時間電圧換算式から伝播時間を求めた。

なお、ダクト外壁面及び各ガイド棒の表面 3ヶ所に設けられた CA 熱電対により超音波伝播径路の温度を測定し、伝播時間に関する計算値と測定値の比較を行った。ナトリウム温度変化範囲は 200~550℃ であった。

4.3 流速変換係数の測定

流速変換係数とは (3) 式で述べたように $k / (t - \tau_c)^2$ であり、各温度での伝播時間 t を測定して定数 k , τ_c を求める必要がある。

この方法として、まず (1) 式と (3) 式の係数を等しいとおいて、次式のように変形する。

$$\sqrt{\frac{2d}{\tan \theta \cdot C^2}} = \frac{1}{\sqrt{k}} (t - \tau_c) \quad (9)$$

伝播時間 t を 4.2 節で説明した方法で測定して、横軸にとり、縦軸に $\sqrt{2d / \tan \theta \cdot C^2}$ を計算で求めて、グラフ上にプロットして得られる直線の勾配と切片とから k と τ_0 を決定した。

4.4 最終段出力信号の測定

主回路部の最終段流速出力信号の長時間変化をナトリウム温度、室温、その他回路の各部の信号と共に記録計（理科電機製 KB-681SS）により連続記録し、また、STSTEM 45（ヒューレットパッカード製 9845B、横河電機製 3873）により不定期に測定した。

最終段流速出力信号は、零点ドリフトをみるために「リニアゲート回路」内の遅延時間調整ダイヤルと「増幅回路 1」内の零点調整ダイヤルとを用いて、最初零ボルトに設定した。そしてナトリウム温度の影響をみるために、ナトリウム温度を 200～550℃ の間で変化させ、定常温度及び過渡変化時の零点ドリフトの様子を調べた。

5. 試験結果及び評価

5.1. 受信波高の測定

5.1.1 受信波高の温度依存性

受信波形の1例をFig. 6に示す。この波形はナトリウム温度250℃のとき、2 MHz 振動子A₁から送信し、B₂で受信されたものである。この写真にはオシロスコープの1チャンネル(振動波)と2チャンネル(矩形波)を同時に示しており、矩形波は振動波の第3波目にディスクリをかけた後、ゼロクロス点で得られたもので、後の信号処理は全てこの矩形波を用いて行われる。なお、3波目にディスクリレベルをかけた理由は2波目と3波目の間隔が最も間隔が大きいためである。

Fig. 7はFig. 6で示したような第3波にあたるピーク波高をオシロスコープで読んで横軸にナトリウム温度をとってプロットしたものである。

送受信子A₁, A₂, B₁, B₂によって差があるが、全体的に温度が高くなると波高は減少する傾向を示している。なお、プリアンプを入れた全増幅度はすべて700倍に統一してある。

前回の12 B超音波流量計での試験⁽⁶⁾では、ナトリウム温度が高くなると受信波高は大きくなる傾向を示しており、今回の試験とは逆の結果になっている。

この原因の1つとして、ナトリウム中の不純物の影響が考えられる。すなわち前回の12 B流量計試験でのコールドトラップの運転温度は250℃であり、初期チャージ後のナトリウム中透過波はナトリウム温度を400℃以上にあげてナトリウムの濡れを良くしなければ仲々得られなかったことから、不純物が今回より多かったと考えられる。

今回は初期ナトリウムチャージ(ナトリウム温度200℃)20分後から良好な透過波高が得られており、コールドトラップ運転温度も150℃であるため不純物の影響は少なかったと考えられる。

ただ前章でふれたように計器校正装置には直接純化系はついていないため、不純物のコントロールは必ずしも完全ではないと思われる。その証拠には受信波高の測定中にポンプを起動して、ナトリウムを攪拌すると不純物の影響と思われる受信波高の減衰(約1~2%)がみられた。従って、受信波高の温度依存性の傾向に差が出た理由は次のように考えられる。すなわち、前回の試験では純度の悪いナトリウムが流動によって攪拌され沈澱している不純物がナトリウム中に析出したため低温側での超音波伝播減衰が大きく、一方今回は不純物が少く、かつ静止ナトリウム中で測定したため低温での透過性が良くなったものと考えられる。

なお、ナトリウムの濡れの差によると思われる初期チャージ後の受信波高のちがいについては、実用化に際して今後も更に確認する必要がある。

5.1.2 受信波高の周波数依存性

Fig. 8 は 2 波目の受信波高の温度依存性を送受信子共振周波数を 2 MHz のものから 1 MHz と 3 MHz のものに取り替えて測定し、プロットしたものである。

1 MHz と 3 MHz の場合はほぼ同程度であり、2 MHz の場合はそれらより 3～4 倍大きいことがわかる。なお、 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 は Fig. 1 における送受信子によって各々得られたものである。グリスを介した接着の程度や送受信子の感度の差、製作誤差によっていくらか異っている。

前回の 12 B 流量計試験と比較すると周波数による差の傾向は今回と同じであり、24 B においても 2 MHz が流量計用送受信子としては適していることがわかる。ただ周波数による差は前回よりやや小さくなっている。

5.1.3 第 2・第 3 波目受信波高の測定

Fig. 9 は Fig. 6 における第 2 波目、第 3 波目の受信波高の温度依存性を示したものであり、各送受信子の波高がほぼ同じになるようにゲインを調整してある。また、実線は各受信波に対するディスクリレベルの設定値を示したものであり、ナトリウム温度 200～550℃ において各送受信子とも第 2 波と第 3 波は分離出来ていることがわかる。なお、このことはナトリウム温度によらずディスクリレベルを固定にする方式の場合には安定した回路の動作のために必要なことである。

なお、ディスクリレベルの設定にとって問題となる受信波高の変動としては、不純物による影響及びナトリウム流動による影響が考えられる。

今回の試験では前節でもふれたようにナトリウムポンプを起動し、ナトリウムを攪拌した後受信波高を測定したところ不純物の影響とみられる波高の減少（約 1～2%）がみられた。

また前回の試験によるとナトリウム流動による波高変動は最大 15% 程度であり、第 2、第 3 波の分離はこの場合でも可能であることがわかる。なお、各送受信子による波高はアンブゲインによりもっと同じレベルに調整する方が望ましい。

5.1.4 受信波高の長時間安定性

Fig. 10～13 は、第 2 波目と第 3 波目の受信波高の経時変化について測定した結果をプロットしたものである。

ナトリウム温度変化 200～550℃ によって差はあるが、同一温度においては各々の送受信子についてそれ程大きな波高の減少はみられず、ディスクリレベルを一定に設定してもよいことがわかる。

なお、これらの測定は静止ナトリウム中で行われたものであり、前節で説明したようにナトリウム中不純物やナトリウム流動によっても変動するが、これらの影響があっても充分長期にわたって一定ディスクリレベルで第 2、第 3 波は分離出来ると思われる。

5.2 伝播時間の測定

5.2.1 伝播時間の温度依存性測定

Fig.14は発信してから受信されるまでの全伝播時間（ガイド棒中，ナトリウム中及び電子回路中の和）の測定結果を横軸にナトリウム温度をとってプロットしたものである。この図では，まだ縦軸は「時間変換回路2」の出力である直流電圧になっており，(5)式を用いて時間に変換したものがFig.15である。

温度の上昇と共に直線的に増加しており，直線からのばらつきは±0.1%以下である。なお，Fig.14からFig.15に変換する時は電子回路内の遅れ時間18.3 μsecを差引いてある。使用した送受信子の共振周波数は2 MHzであった。

5.2.2 伝播時間の温度依存性計算

伝播時間の測定結果の妥当性を評価するために，(10)式で表わされる計算式によって伝播時間 t を求めた。

$$t = \frac{d}{C_N \sqrt{C_{G0} - C_N^2 \sin^2(90 - \alpha)}} + \frac{2e}{C_{G0} \cos(90 - \alpha)} + 2 \sum_{i=1}^{11} \frac{\Delta \ell_i}{C_{G1}} - \frac{\{d \tan \theta - U + 2e \tan(90 - \alpha)\} \cos \alpha}{C_{G1}} \quad (10)$$

ここで各記号の意味は次の通りである。

d ; 管内径 C_N ; Na 中音速 C_G ; ガイド棒中音速
 α ; ガイド棒取付角度 e ; 配管厚み θ ; 入射角
 $\Delta \ell_i$; ガイド棒分割長 U ; ガイド棒取付間隔

計算に用いたナトリウム中音速 C_N ，SUS 304 ガイド棒中音速 C_G ，及び SUS 304 熱膨張係数 ϵ は，各々文献(10)，(5)，(11)のデータを温度 T に関する1次式へのフィッティングによって次式のように求めた。

$$C_N = -0.5238 \times 10^2 T + 2577 \times 10^2 \quad (11)$$

$$C_G = -0.8064 \times 10^2 T + 5697 \times 10^2 \quad (12)$$

$$\epsilon = 3.7455 \times 10^{-9} T + 1.6490 \times 10^{-5} \quad (13)$$

一方，室温でのダクト内径 d は 5.88 mm，ダクト厚み e は 10.4 mm，ガイド棒取付角度 α は 33°，ガイド棒取付間隔 U は 265 mm，ガイド棒分割単位長さ $\Delta \ell$ は 50 mm（全長 550 mm）の値を各々用いた。

ナトリウム中の温度は一様と考えられるが，ガイド棒中温度は長さ方向にそってナトリウ

μ温度から室温までの範囲で分布しているため、各ガイド棒については各々3ヶ所で温度を測定し、その測定点間の温度 $T(x)$ は次式に示す近似式にフィッティングすることによって外挿した。

$$T(x) = Ae^{-Bx^3} - Cx^2 - Dx + G, \quad (0 < x \leq 250 \text{ mm}) \quad (14)$$

$$T(x) = Ee^{-Fx} + G, \quad (250 < x \leq 550 \text{ mm}) \quad (15)$$

ここで、 $A \sim G$; 定数 x ; ガイド棒位置

測定結果及び近似式による外挿結果をFig. 16に示す。これらの温度分布を用いてガイド棒中各点での音速及び熱膨張量を計算した。

Fig. 15には測定結果と共にこのようにして求めたナトリウム中、ガイド棒中及びそれらの和の全伝播時間の計算結果を示す。測定結果と計算結果は温度範囲200～550℃において0.7%以内で一致しており、この伝播時間の温度依存性を用いて次節で示すように流速出力値の温度補正係数の決定を行った。

5.3 流速変換係数の測定

5.3.1 流速変換係数の決定

流速変換係数 $k / (t - \tau_c)^2$ は4.3節で説明したように横軸に全伝播時間 t をとって縦軸に $\sqrt{2d / \tan \theta \cdot C_N^2}$ をプロットして得られる直線の勾配と切片とから決定される。

Fig. 17は縦軸に計算値 $\sqrt{2d / \tan \theta \cdot C_N^2}$ を、横軸にナトリウム温度をとってプロットしたものであり、 $\sqrt{2d / \tan \theta \cdot C_N^2}$ を計算するために必要な配管内径 d 、及びその熱膨張係数 ϵ 、ナトリウム中音速 C_N 、入射角 θ を出すために必要なSUSガイド棒中音速 C_G 及びそれらの温度依存性は前節で示した値を用いた。

Fig. 18は前節で測定された全伝播時間 t (Fig. 15)とFig. 17からの $\sqrt{2d / \tan \theta \cdot C_N^2}$ を用いて温度変数を消去することにより得られたものである。なお、伝播時間 t は温度に関して2次式にフィッティングした平均値を用いた。

この図から最小二乗法で直線(9)式にフィッティングすることにより定数 k 、 τ_c を次のとおり求めた。

$$k = 1.6497 \times 10^{10} \quad (16)$$

$$\tau_c = 7.6408 \times 10^{-1} \text{ volt} \quad (17)$$

実際の回路では、これらの値を満足するように電子回路モジュールのうちの「増幅回路1及び2」のゲインダイアルで設定される。

5.3.2 流速変換係数の計算値と測定値の比較

Fig. 19は横軸にナトリウム温度を、縦軸に流速変換係数をプロットしたものであり、実

線は(1)式で示した近似なしの真の流速変換係数 $\tan \theta \cdot C_N^2 / 2d$ であり (θ , C_N , d には温度に依存した真の値を代入する), 点線はここで得られた近似式 $k / (t - \tau)^2$ を示す (k , τ は一定と近似する)。ただし, t は生の測定値ではなく, 測定値を2次式でフィッティングした値を用いている。両線は殆んど一致しており, この近似方式で流速変換係数を正確に表わせることがわかる。黒点は $k / (t - \tau_c)^2$ に全伝播時間 t の生のデータを代入してプロットしたものであり, 再現性も入れて0.4%以下で真の変換係数に一致していることがわかる。

一方, 一点鎖線は配管径, 入射角, ガイド棒中伝播時間を300℃の時の固定した値を用いて求めたものであるが, この変換係数は2%/100℃の誤差を生ずることになり, ここで導出した近似方式が必要であることがわかる。

5.4 最終段出力信号の測定

5.4.1 静止ナトリウム中での伝播時間差の調整

受信子 A_1 , A_2 による受信信号の伝播時間差は, もし流速が0ならば本来は0のはずである。しかし, 上下流方向での配管寸法のちがい, 振動子の設定位置の差, その他製作誤差やガイド棒温度分布の差などで実際には0にならない場合が多い。特にガイド棒方式の場合にはガイド棒の長さ, 温度分布のちがいなどで上下流方向での伝播時間に差が出やすいものと考えられる。

今回ナトリウム温度400℃で測定すると, A_1 と A_2 の差が $0.68 \mu\text{sec}$, B_1 と B_2 の差が $-0.66 \mu\text{sec}$ であった。これはガイド棒の長さにすると約2mm, 温度差にすると約20℃のアンバランスに相当する。おそらくこの伝播時間差は製作誤差を含むすべてのこれらのアンバランス効果の集積と考えられる。

これによって生ずる零点シフトは増幅回路部の零調ダイヤルで補正出来るが, ナトリウムの温度変化, 室温変化等によってアンバランスの状況が刻々と変化する伝播時間差にはその都度変化が生ずる。そこで信号処理回路では2章で説明したように交互に送信方向を変える交互切換方式を採用して温度アンバランスによる効果をキャンセル出来るようになっている。

しかし, 流速零での伝播時間差があまり大きいままで回路を動作させると測定レンジでの減少や応答性の不足からくるキャンセル効果の不要などが考えられるので, 「リニアゲート回路」内の遅延時間調整ダイヤル ($0.5 \mu\text{sec}$ 最大可変) と追加 delay line (最大 $1 \mu\text{sec}$) によって流速零での伝播時間差が $A_1 - A_2$ と $B_1 - B_2$ とともに零に近くなるように調整した。

5.4.2 静止ナトリウム中での零点ドリフトの測定

Fig. 20 にナトリウム温度400℃一定での「演算回路」の最終段流速出力信号の零点ドリフトを示す。±0.5% (FS 6 m/s) 以上の変化幅がみられる。

Fig. 21 はナトリウム温度を400℃から300℃へ変化させた時の途中の零点ドリフトの変

化の様子を示す。

一定温度の時と同様に±0.8%の変化幅があり、ナトリウム中及びガイド棒中での伝播時間に各送信方向でのアンバランスが出ていることが予想される。

これらの原因を見つけるために、バックグラウンドの影響と切換方式での伝播時間アンバランスのキャンセル状況を調べた。

5.4.3 零点ドリフトに与えるバックグラウンドの影響

まず零点ドリフトの原因としてバックグラウンドが考えられたので、バックグラウンドを減らすために送信周期を900 μsec から4.5 msec に延ばした。これはバックグラウンドの発生原因のうち1つは前の送信パルスの残響音がガイド棒中などに残っているためであり、あと1つは配管壁中をまわりこんでくる到達波があるためである。従って、前者の残響音は送信周期を長くすることによって減らすことが出来る。

なお、バックグラウンドによって零点ドリフトが生ずる理由は受信信号が歪んで零クロス位置が変化するためである。

周期を延ばすことによってバックグラウンドを1桁小さくすることが出来、S/N比は約1%となった。

Fig. 22 は周期を長くしてバックグラウンドを減らした時の零点ドリフトの様子を示す。温度が400℃から350℃に変化する途中においても±0.2% (FS 6 m/s) 以下になっている。

しかし、温度を200℃に降温したところ、Fig. 23 に示すように1%の零点ドリフトの変化が生じた。従ってバックグラウンドだけでなく、何か別の影響もあると考えられたのでまず回路の特性を調べた。

5.4.4 零点ドリフトに与えるキャンセル回路の動作特性

伝播時間差の変化は送信方向を切換えて平均することによりキャンセルする交互切換方式をとっていることはすでに説明してきた。

Fig. 24 は各送信方向での伝播時間差とキャンセルに必要な時間差の平均を示す。

伝播時間差 $A_1 - A_2$ (・) と $B_1 - B_2$ (○) は最大±0.04 μsec 変化しており、特にナトリウム温度変化が大きいとその変化幅も大きい。これを流速に換算すると±8% (FS 6 m/s) となる。しかし、キャンセルのための伝播時間差の和の $1/2$ (x) の最大ずれはバックグラウンドが大きい時は±0.005 μsec であり、流速測定誤差に換算すると±1% (FS 6 m/s) となる。バックグラウンドを小さくした場合には±0.001 μs (これには測定誤差があり、実際はもっと小さいかもしれない) となり、流速に換算すると0.2%となる。

従って、キャンセル回路が正常に動作しておれば零点ドリフトは0.2%となるはずである。

Fig. 25 はキャンセル回路の動作特性を示す。横軸は伝播時間差 $A_1 - A_2$ と $B_1 - B_2$ を遅延回路を用いて変化させたものであり、縦軸はその時の「時間変換回路1」の出力値を示

す。

(●)は回路改良前の動作状況であり、出力が伝播時間差のアンバランスに依存しない平坦部は±0.026 μsec しかなく、Fig. 24 からわかるように伝播時間差の変化はこれ以上であるため充分な変動をカバー出来ないことがわかった。従って「時間変換回路1」の回路変更を行い、(○)で示すような特性を得た。これにより0.05 μsecの変動幅までキャンセル可能となった。

しかし、伝播時間差にこの程度の大きさの変化が出ることから、たとえキャンセル回路により零点ドリフトはおさえられるとしても、測定スパン長をこの分だけ大きくとっておく必要がある。

Fig. 26～28 は周期を長くして、バックグラウンドを減らし、かつ回路素子の変更によるキャンセル幅の拡大を行って得られた零点ドリフトの様子を示す。

Fig. 26 は400℃から450℃へ、Fig. 27 は400℃から300℃へナトリウム温度変化を与えた場合であり、いずれも±0.2% (FS 6 m/s) 以下で安定していることがわかる。

Fig. 28 はナトリウム温度500℃一定の場合であるが、ヒータのON, OFFに従って零点が変化することがわかる。

しかし、これも0.2% (FS 6 m/s) 程度であり、実用上全く問題ないと思われる。

6. 結 言

以上の試験結果により、次のような結論が得られた。

- (1) 超音波受信波高は送信周波数 2 MHz の場合が、1 MHz や 3 MHz よりも大きく、またナトリウム温度 200 °C の場合がそれ以上の温度よりも大きかった。一方、長期運転においても安定した波高が得られた。
- (2) ナトリウム中及びガイド棒中の伝播時間の測定結果は計算値と 0.7 % 以内で一致し、これを用いてナトリウム温度 200 ~ 550 °C の範囲において流速出力値の温度依存性を 0.2 % 以下におさえうると予想される温度補正係数が決定出来た。
- (3) 受信波のバックグラウンドを減らし、伝播時間差のアンバランス変化のキャンセル幅を拡大することにより、流速出力値の零点ドリフトをナトリウム温度一定及び変化時においても 0.2 % (FS 6 m/s) 以下におさえることが出来た。

今後はナトリウム実流試験によってこれらの有効性を実証してゆく必要がある。

7. 謝 辞

試験計画，準備，評価等全試験を通じて御指導いただいた高速増殖炉開発本部の浅川直記氏，亀井満氏，堀越繁氏，高速実験炉部の関口信忠氏，ナトリウム技術部三本保秀部長の各位に対して，また試験ループの運転をしていただいた直の方々に，有益な助言をいただいた三菱電機の小田稔，尾崎禎彦の両氏に，その他ナトリウム機器構造試験室はじめ多くの御協力いただいた関係者の方々にここであらためて謝意を表します。

8. 参 考 文 献

- (1) 荒木, 飯田他 ; S J 206 72 - 35 “超音波流量計特性試験”
- (2) 荒木, 松永他 ; S J 206 74 - 10 “超音波流量計の試作ならびに試験 (II)”
- (3) 荒木, 松永他 ; S J 223 75 - 02 “超音波流量計の試作ならびに試験 (III)”
- (4) 荒木, 土肥他 ; S J 223 76 - 02 “超音波流量計の試作ならびに試験 (IV)”
- (5) 荒木, 尾崎他 ; S J 223 77 - 101 “超音波流量計の試作ならびに試験 (V)”
- (6) 宇野, 荒木他 ; S N 241 77 - 26 “超音波流量計ナトリウム実流試験”
- (7) 宇野, 青木他 ; S N 941 81 - 76 “ガイド棒方式超音波流量計の耐久試験”
- (8) 宇野, 青木他 ; S N 941 81 - 98 “ガイド棒クランプ方式超音波流量計校正試験”
- (9) 山田, 土井他 ; S N 941 81 - 120 “超音波流量計による「常陽」2次主冷却系電磁流量計の校正”
- (10) M. E. Durham ; R D / B / M - 2479 (C E G B 1974)
“ The thermodynamic and transport properties of liquid sodium ”
- (11) J I S B - 8243 (1977) “圧力容器の工業規格”

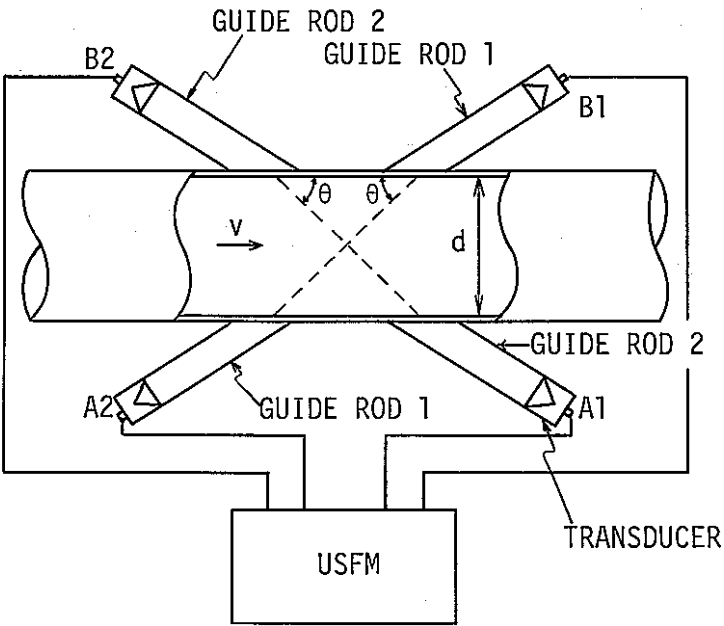


Fig. 1 Schematic Diagram of the Ultrasonic Flowmeter

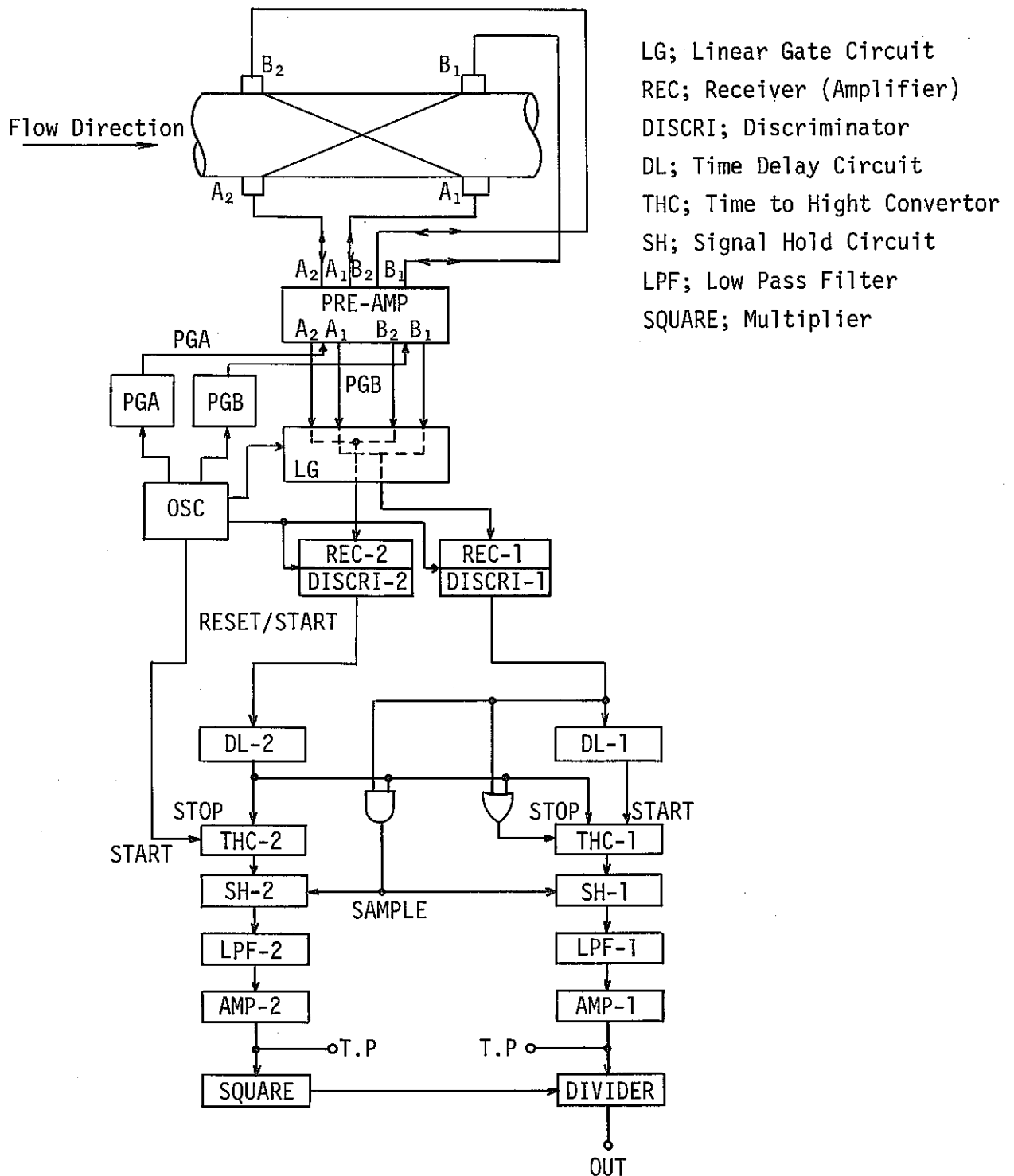


Fig. 2 Block Diagram of Alternating Type Ultrasonic Flowmeter

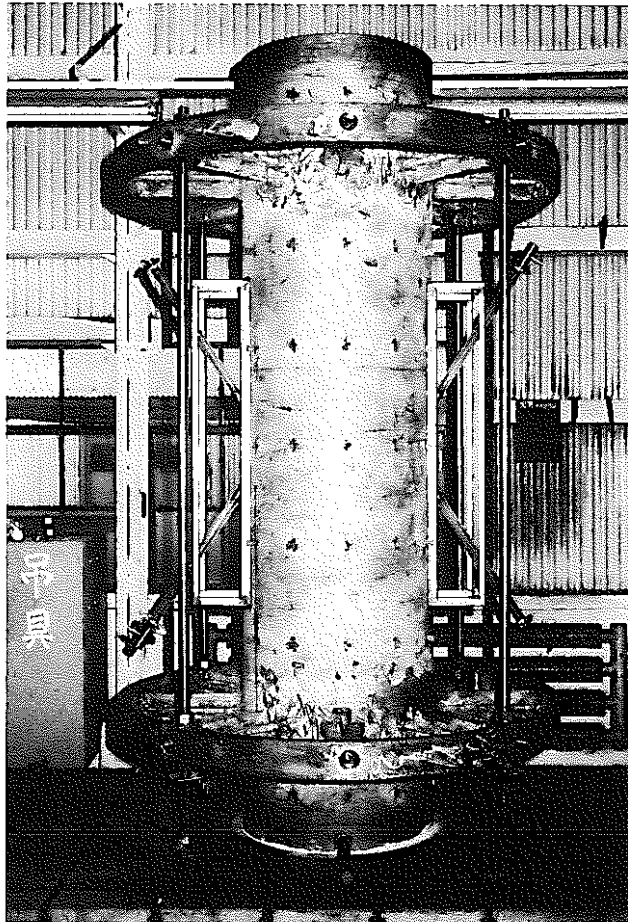


Fig. 3 Ultrasonic Flowmeter (Guide Rod Type)

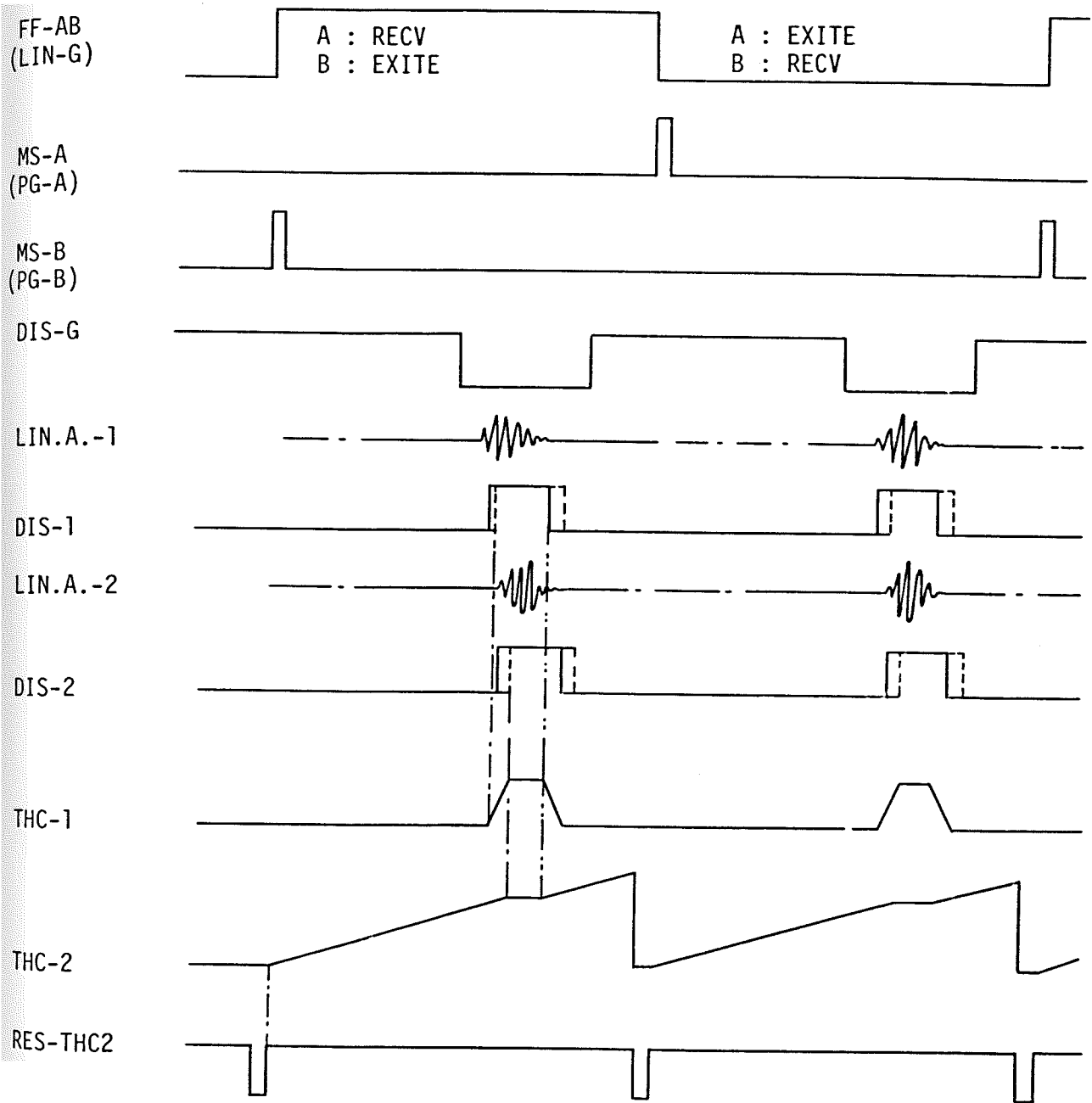


Fig. 4 Time Chart of Ultrasonic Flowmeter

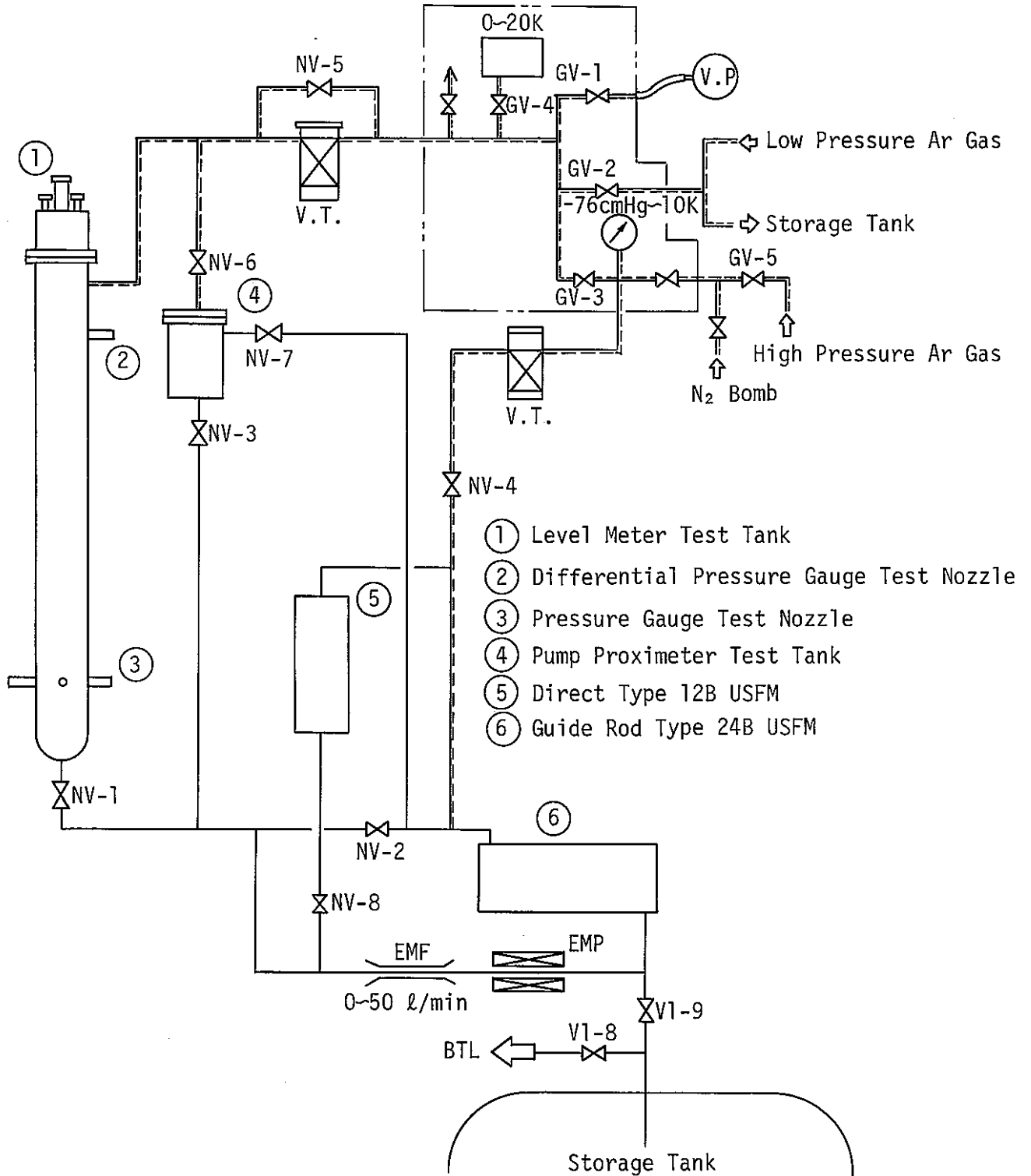
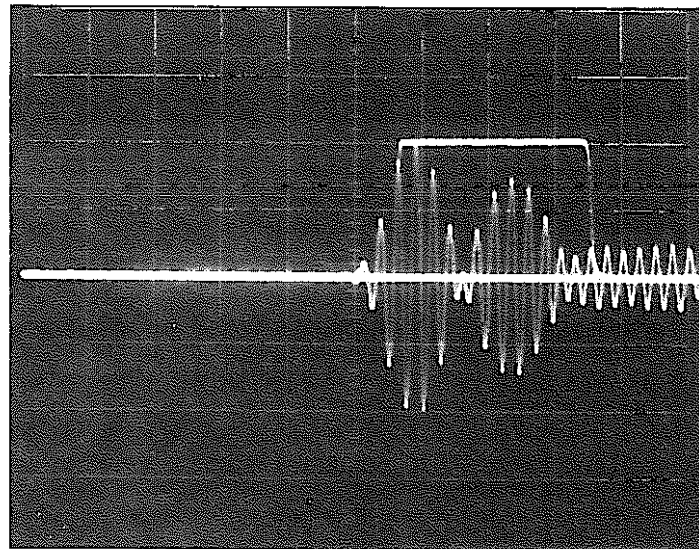


Fig. 5 Instruments Calibration Loop

Sodium Temperature ; 250°C
Frequency ; 2MHz
Transmitter ; A₁
Receiver ; B₂
Amp Gain ; ≈1000



2 volt/UNIT
2 μsec/UNIT

↑ NO.3
↑ NO.2
↑ NO.1

Fig. 6 Transmission Pulse Pattern through the Sodium Tube

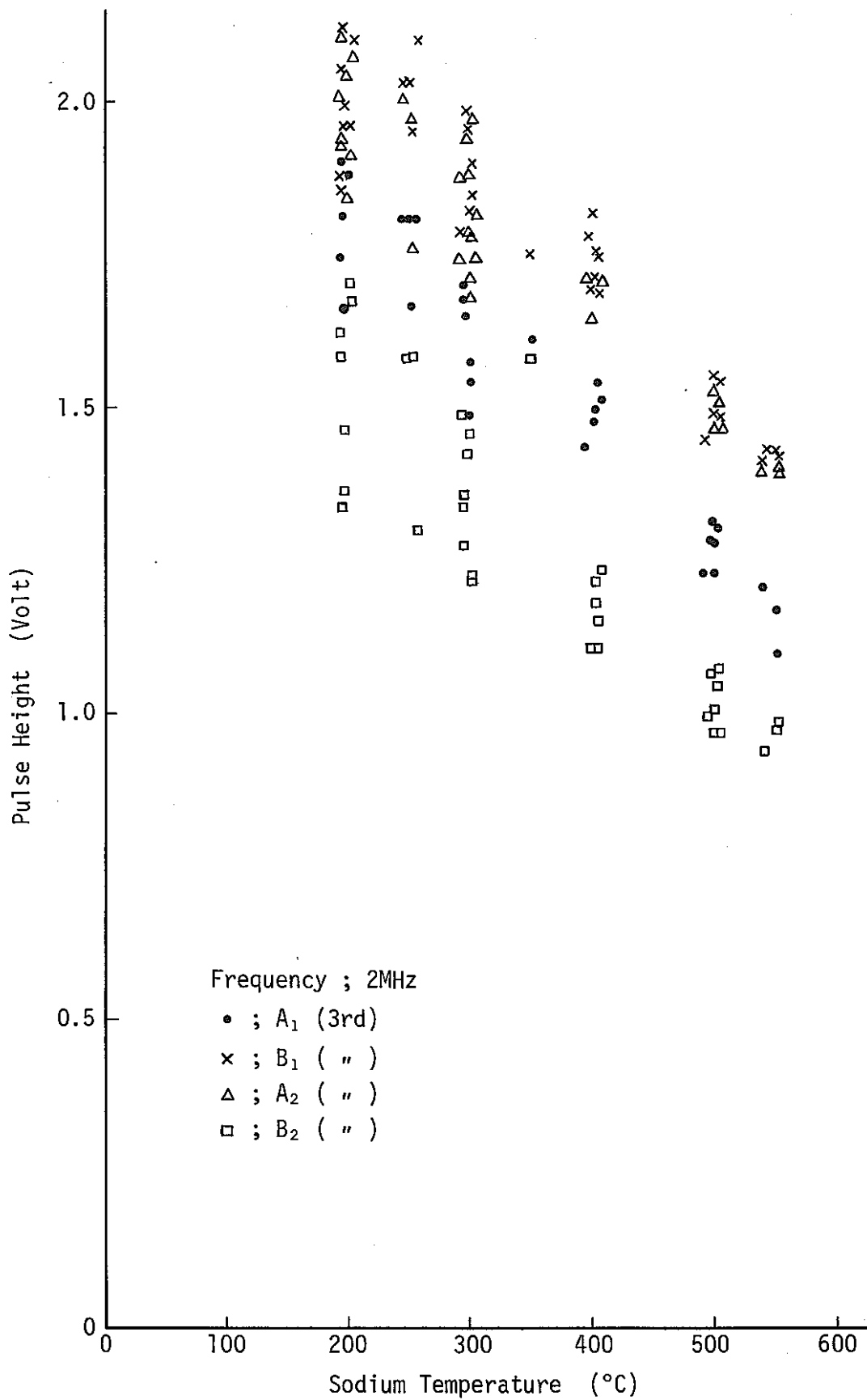


Fig. 7 Temperature Dependence of Ultrasonic Transmission

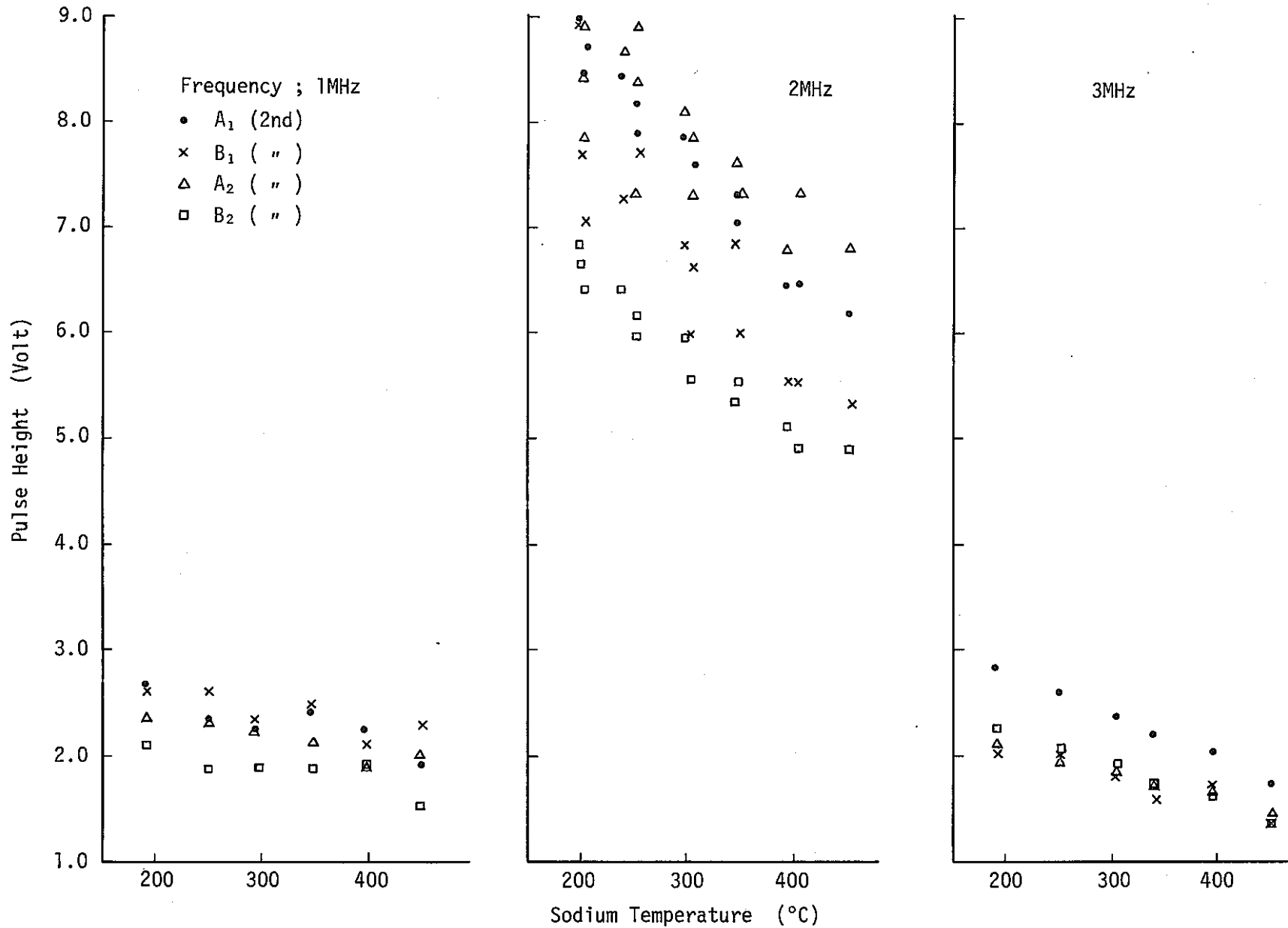


Fig. 8 Frequency Dependence of Ultrasonic Transmission

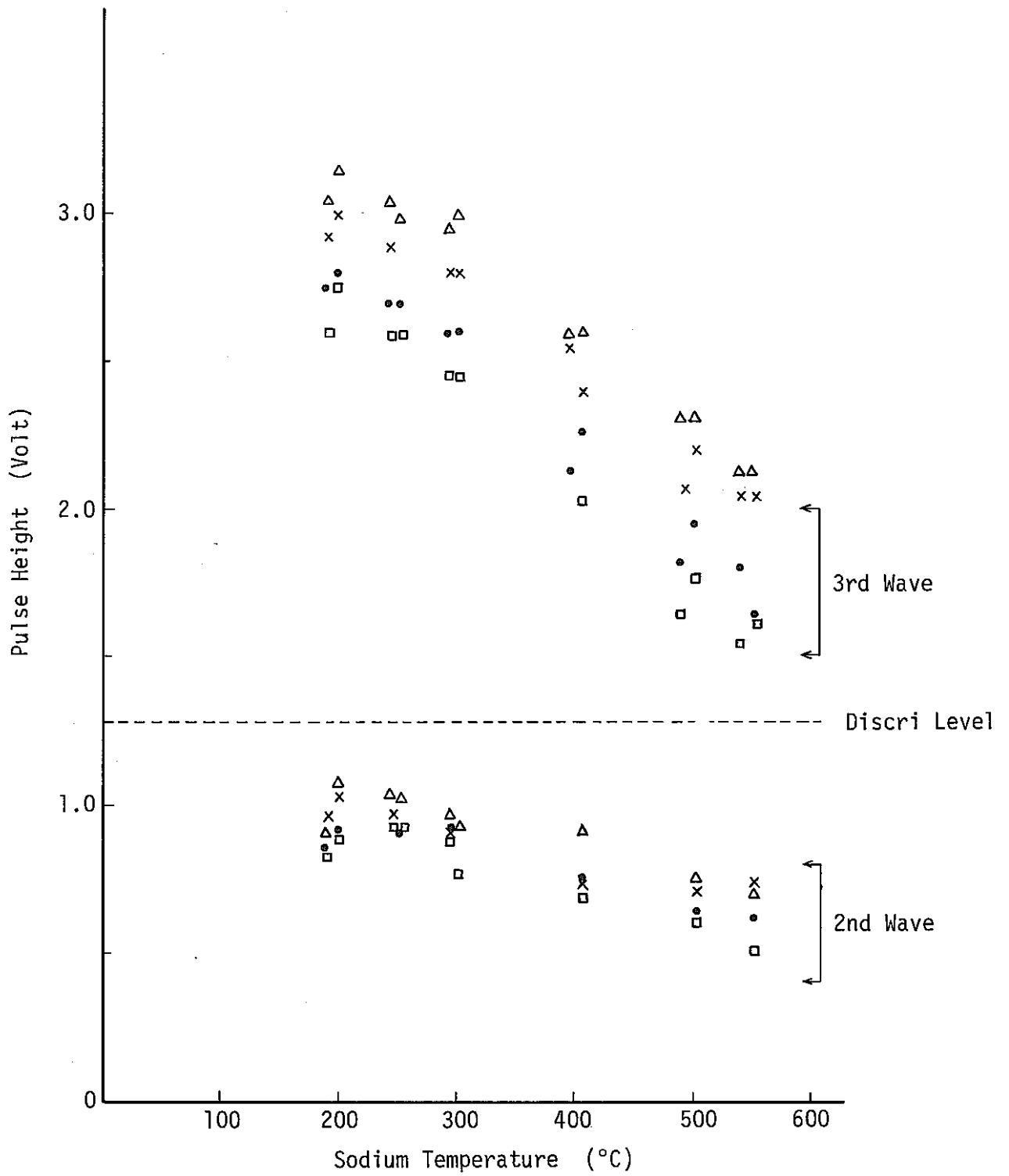


Fig. 9 Difference between 2nd and 3rd Wave Pulse Height

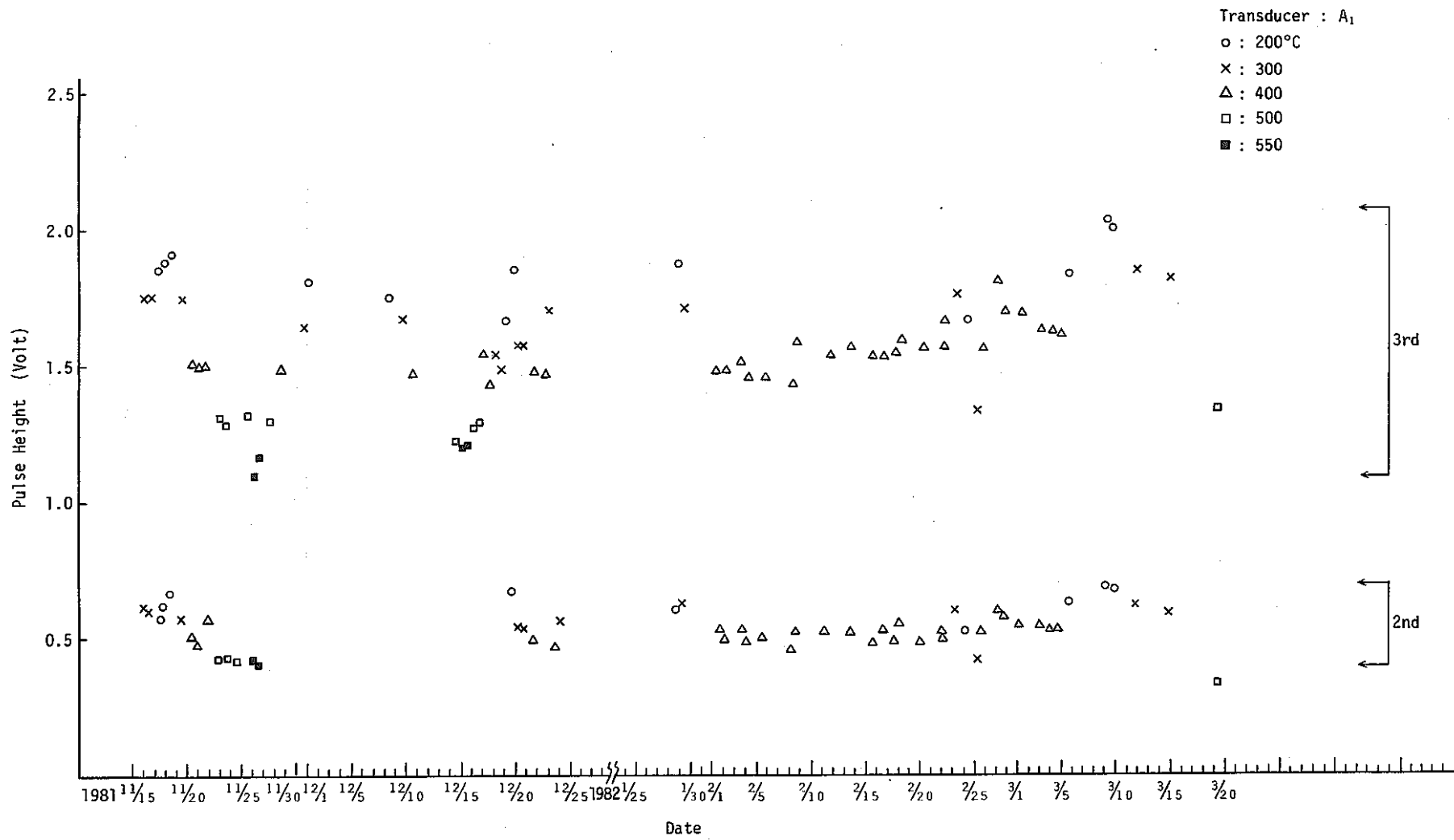


Fig. 10 The Stability of the Ultrasonic Transmission Pulse Height (1)

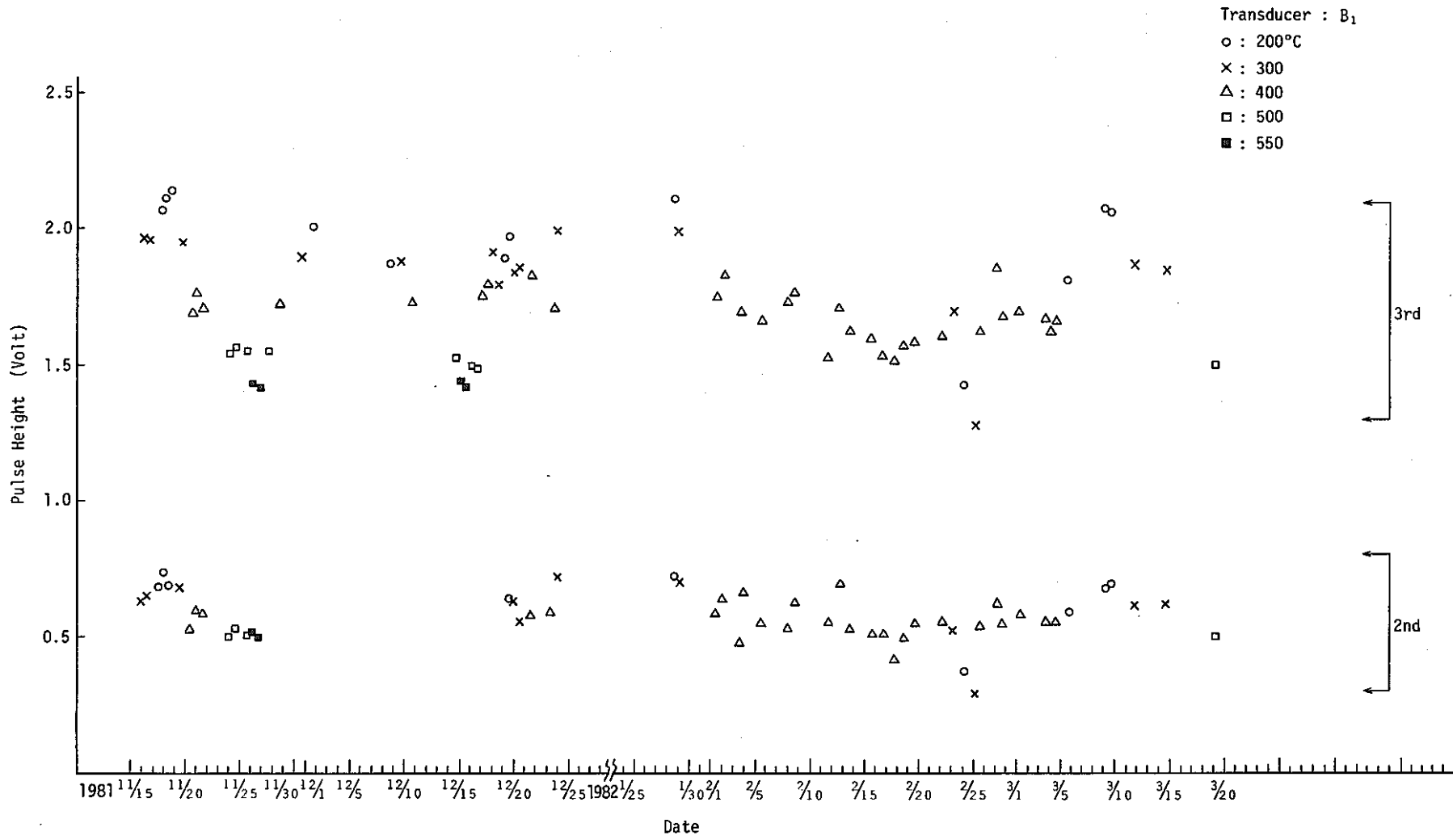


Fig. 11 The Stability of the Ultrasonic Transmission Pulse Height (2)

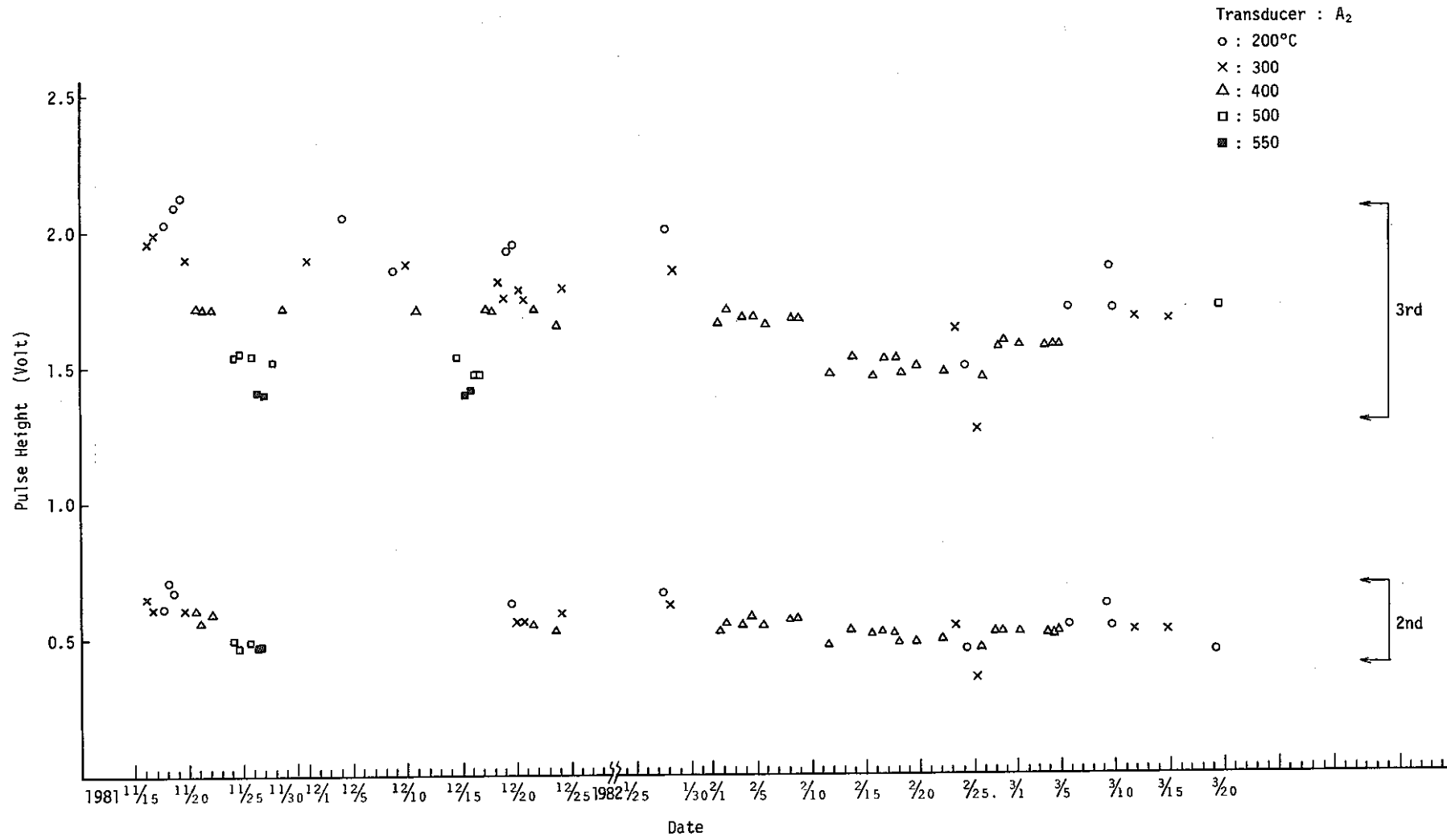


Fig. 12 The Stability of the Ultrasonic Transmission Pulse Height (3)

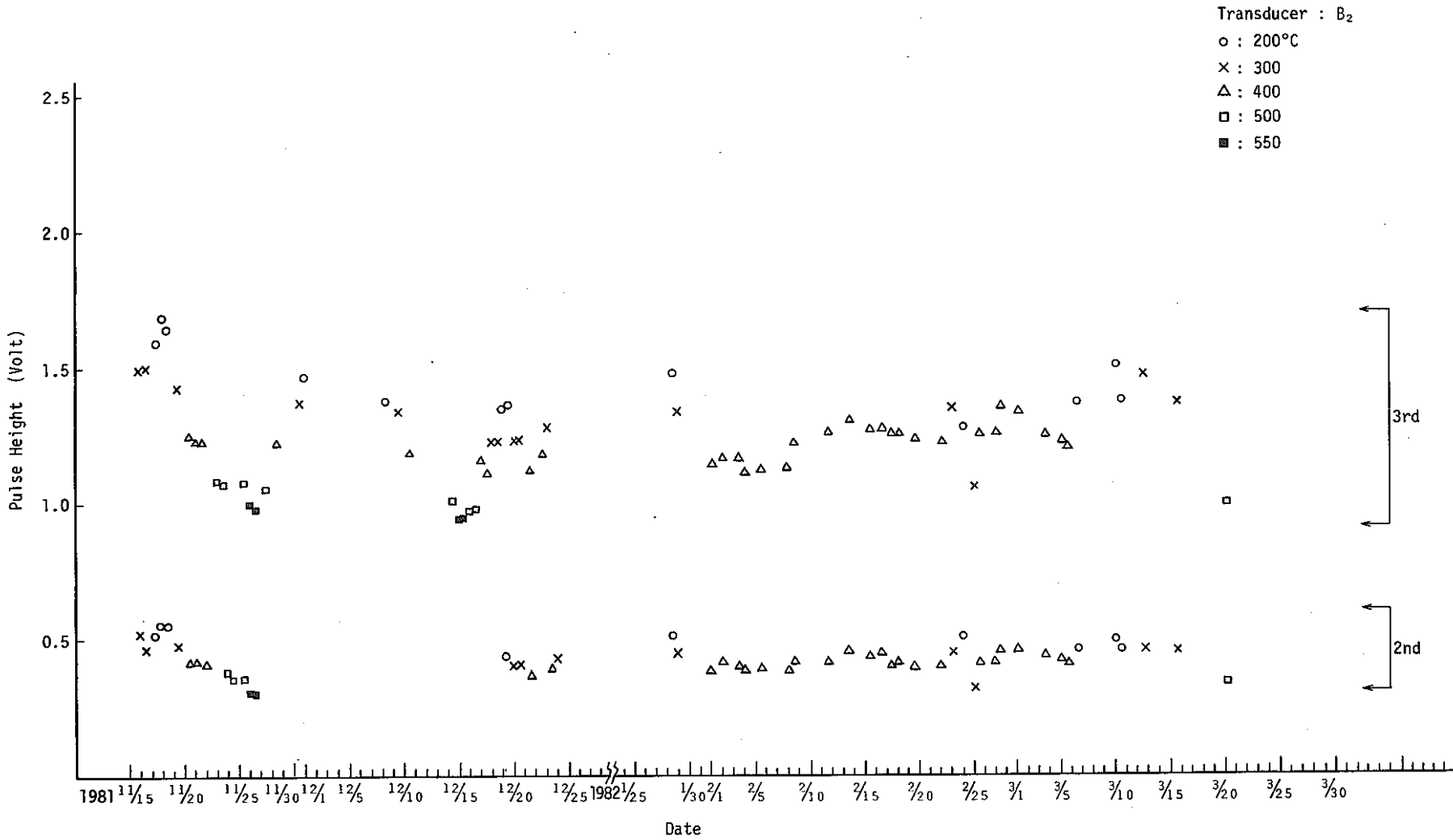


Fig. 13 The Stability of the Ultrasonic Transmission Pulse Height (4)

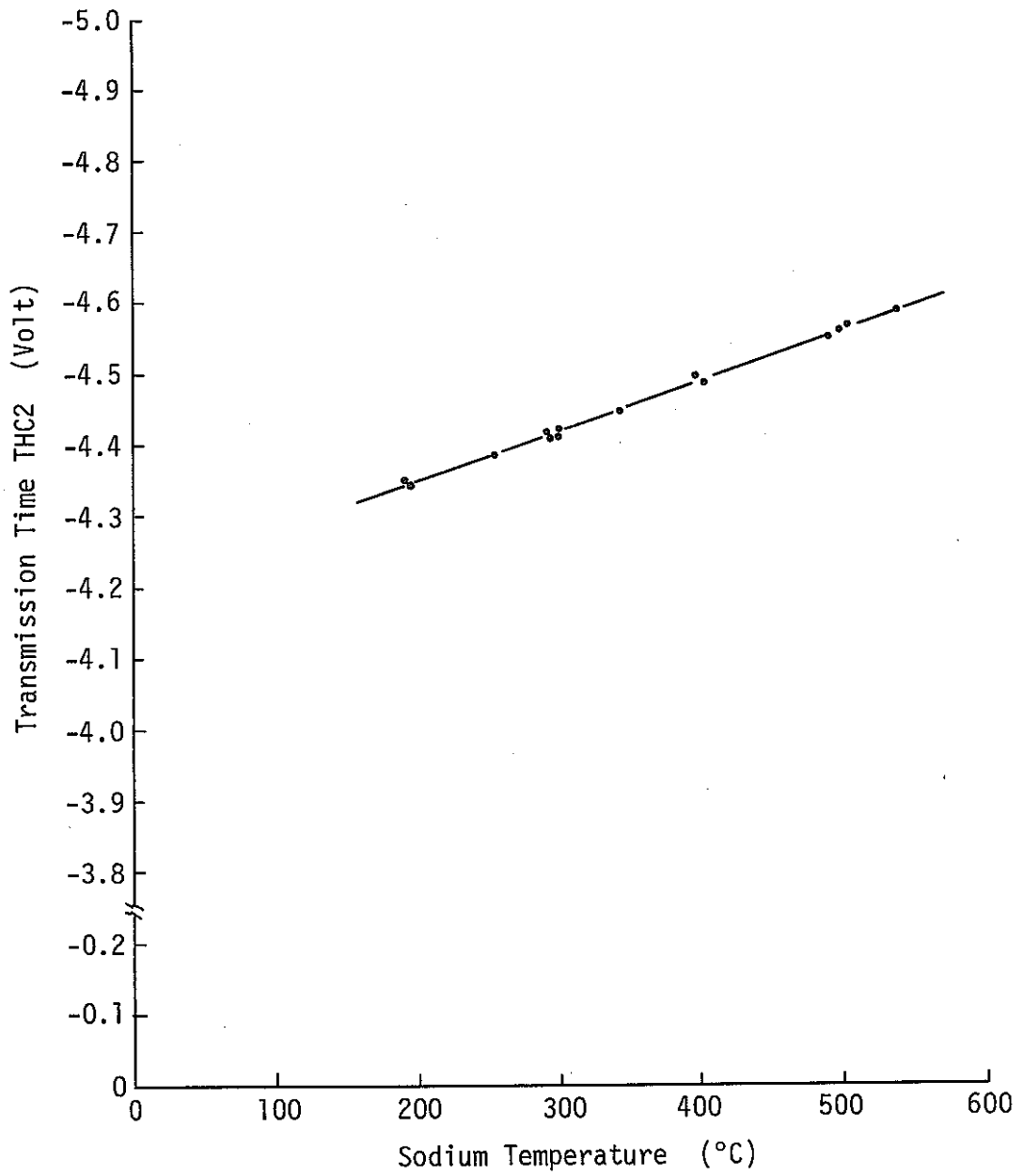


Fig. 14 Ultrasonic Transmission Time vs. Sodium Temperature (1)

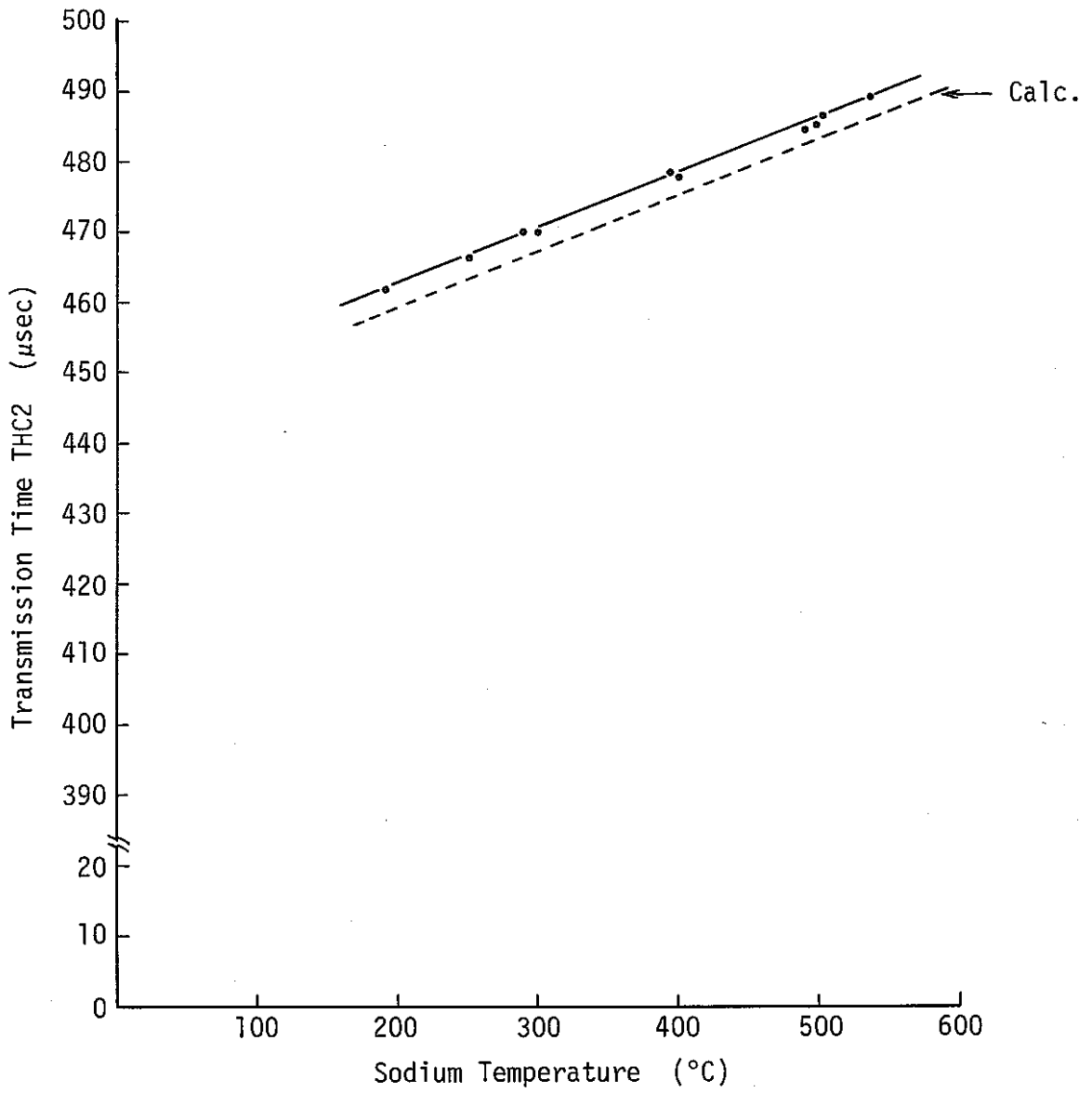


Fig. 15 Ultrasonic Transmission Time vs. Sodium Temperature (2)

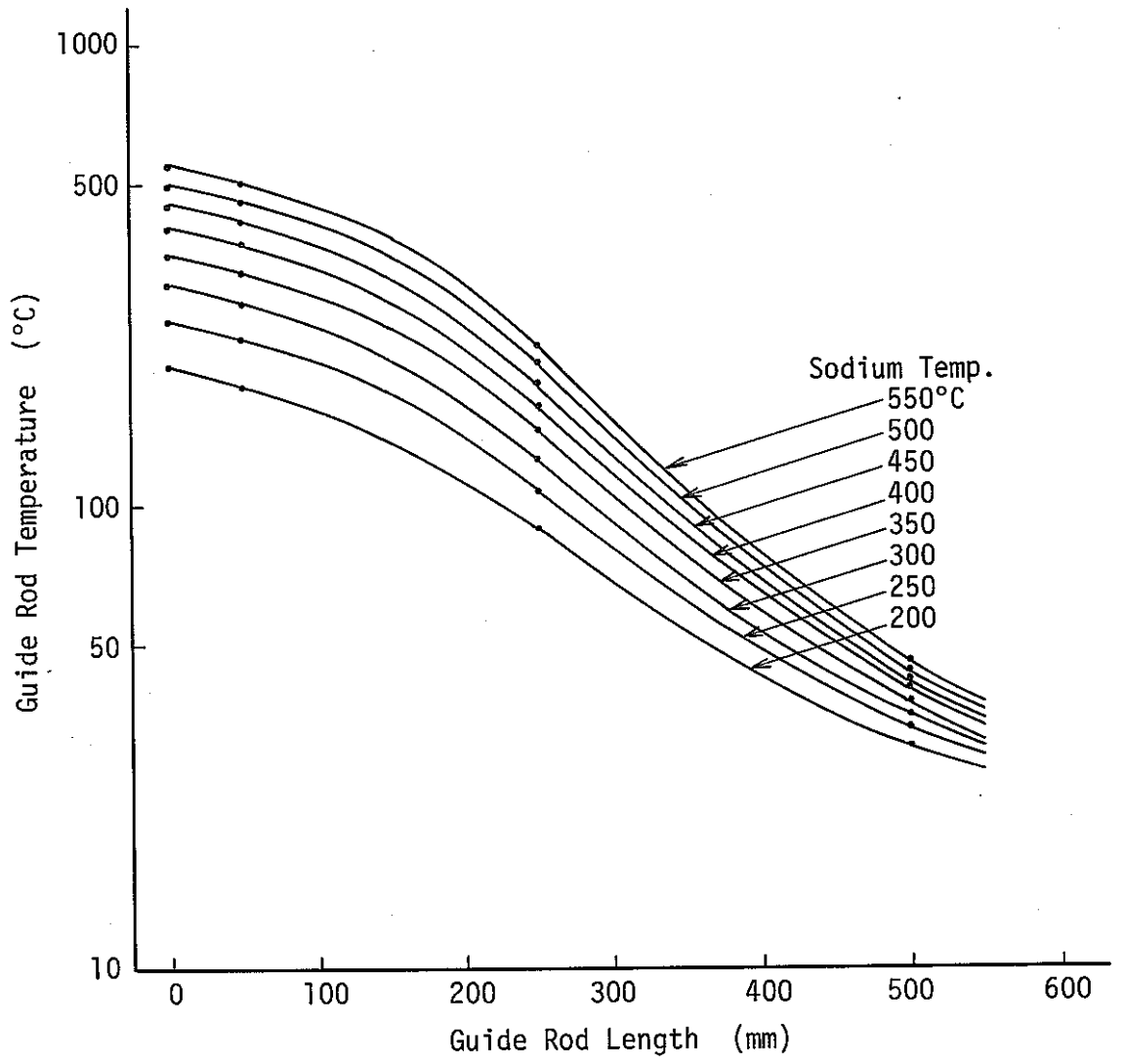


Fig. 16 Temperature Distribution in Guide Rod

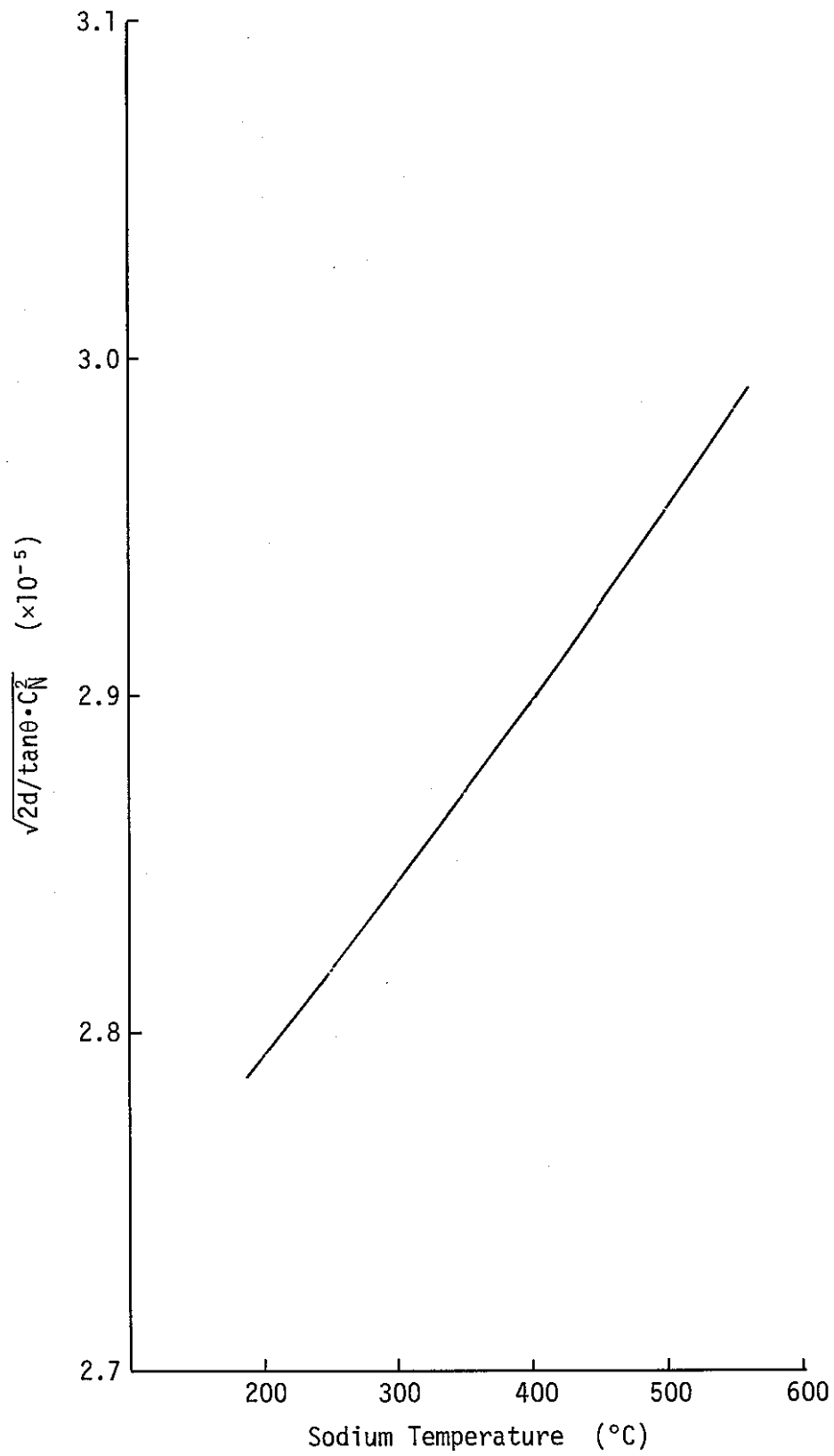


Fig. 17 $\sqrt{2d/\tan\theta \cdot C_N^2}$ vs. Sodium Temperature

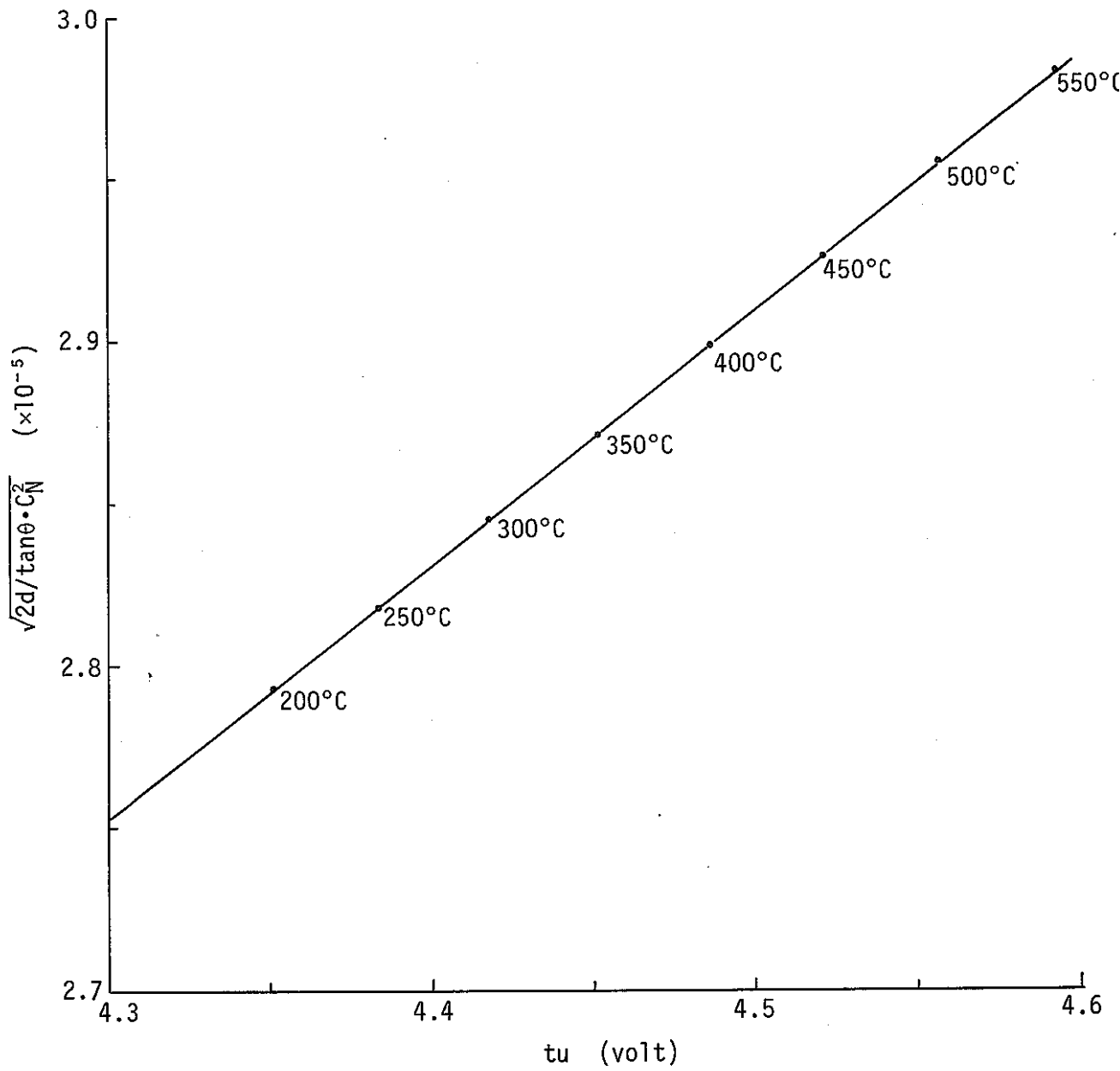


Fig. 18 $\sqrt{2d/\tan\theta \cdot C_N^2}$ vs. Ultrasonic Transmission Time

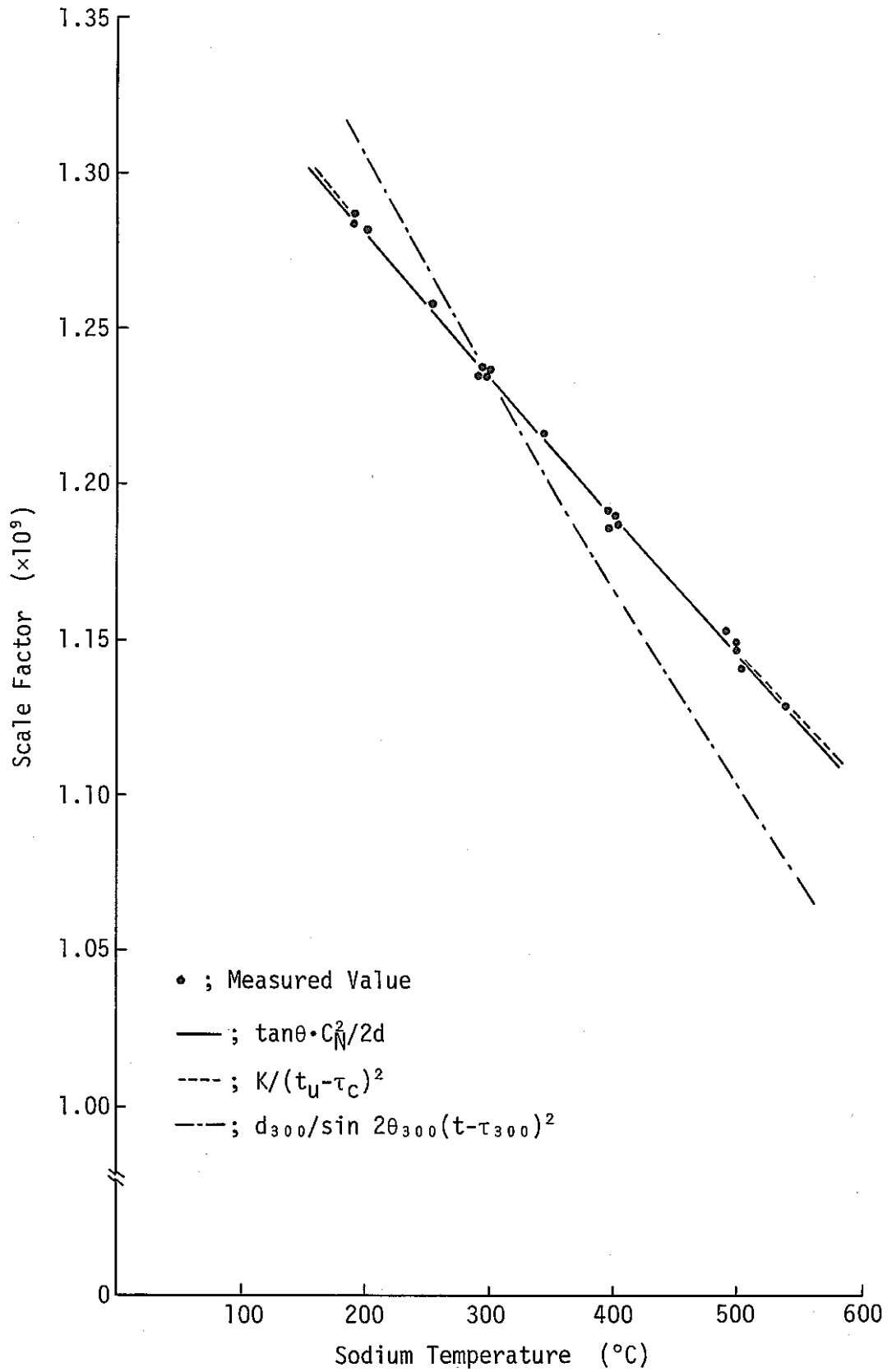


Fig. 19 Temperature Dependence of Scale Factor of Ultrasonic Flowmeter

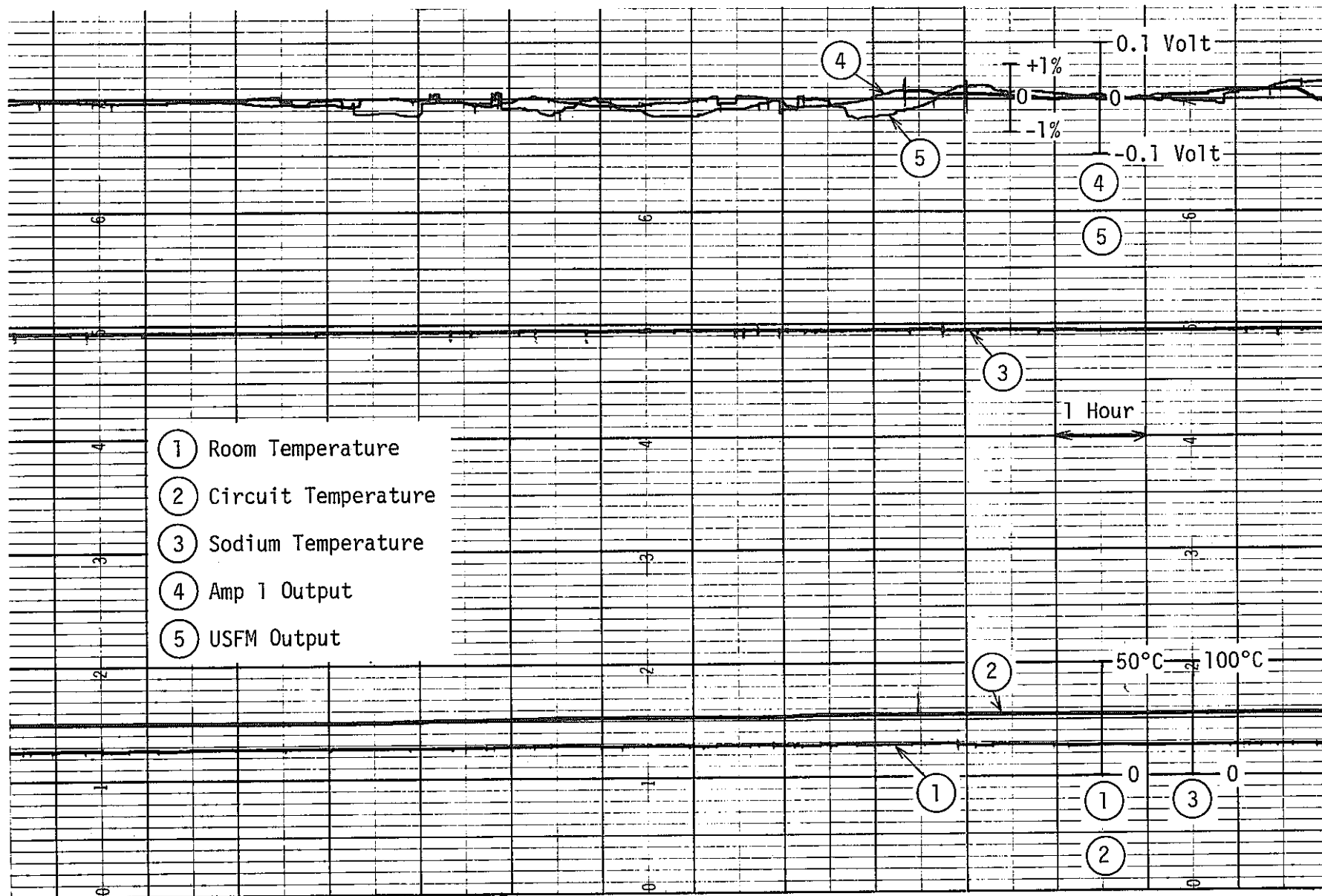


Fig. 20 The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Constant Temperature (1)

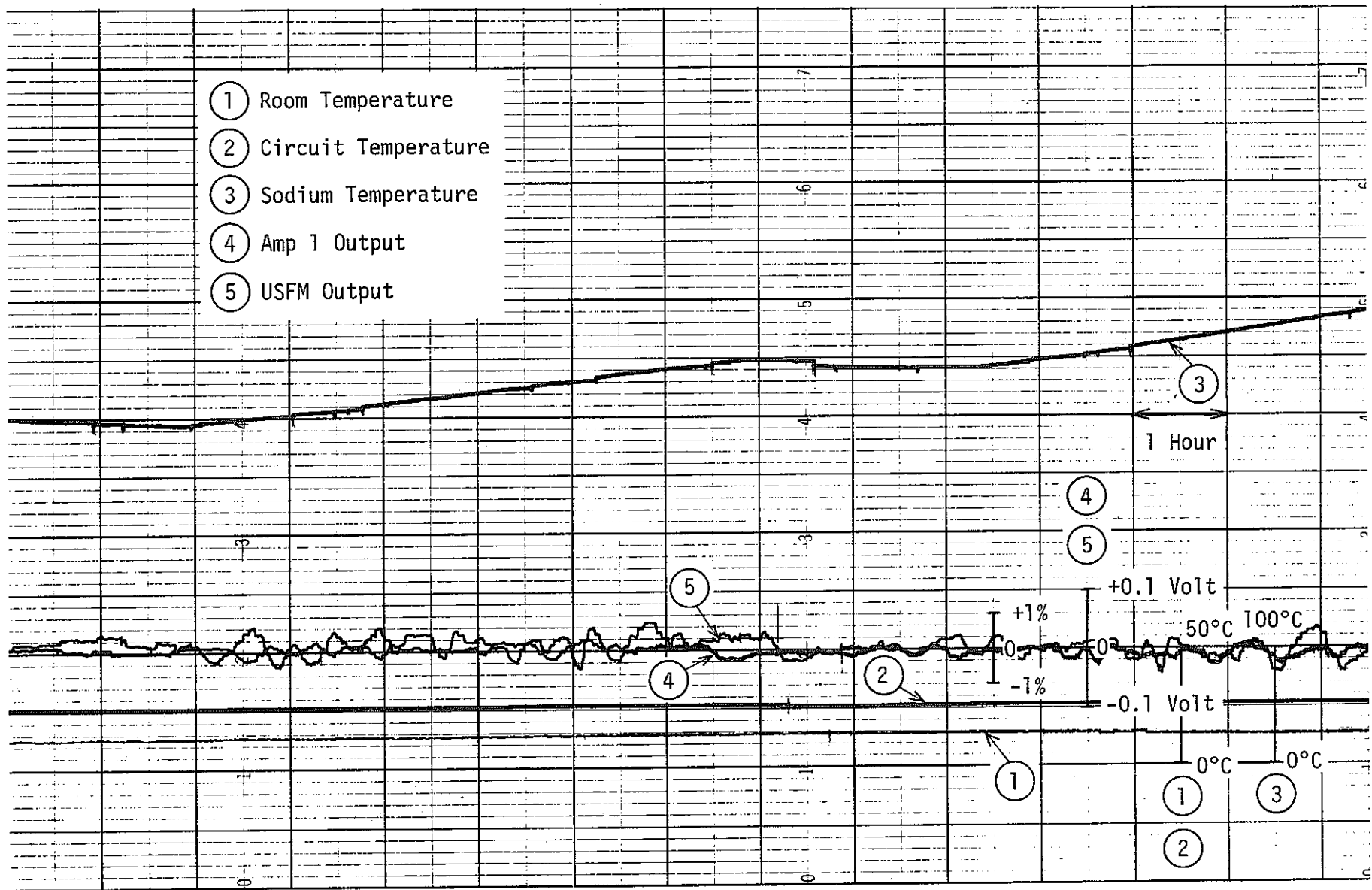


Fig. 21 The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Transitional Temperature (1)

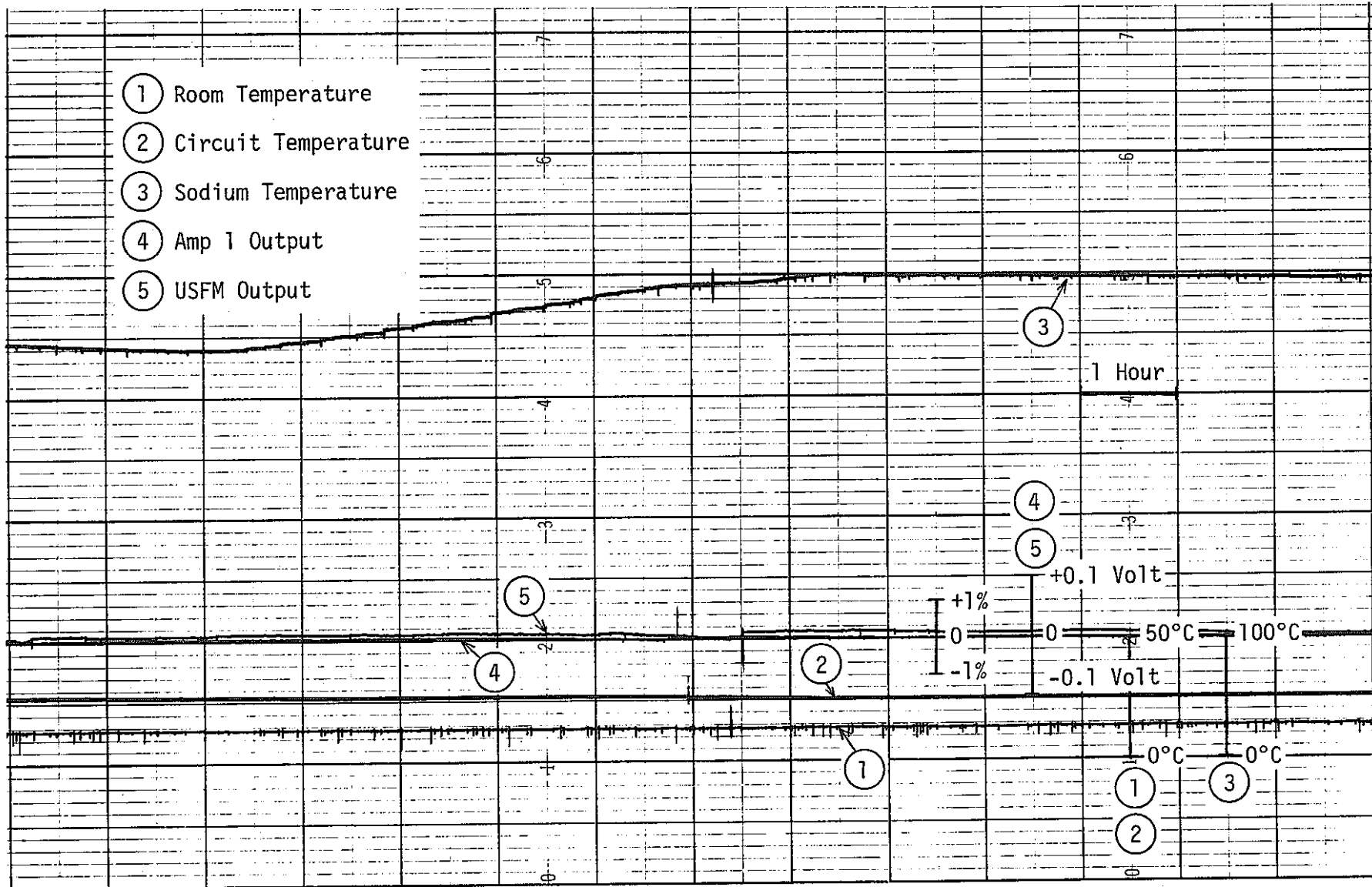


Fig. 22 The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Transitional Temperature (2)
(After Background Reduction)

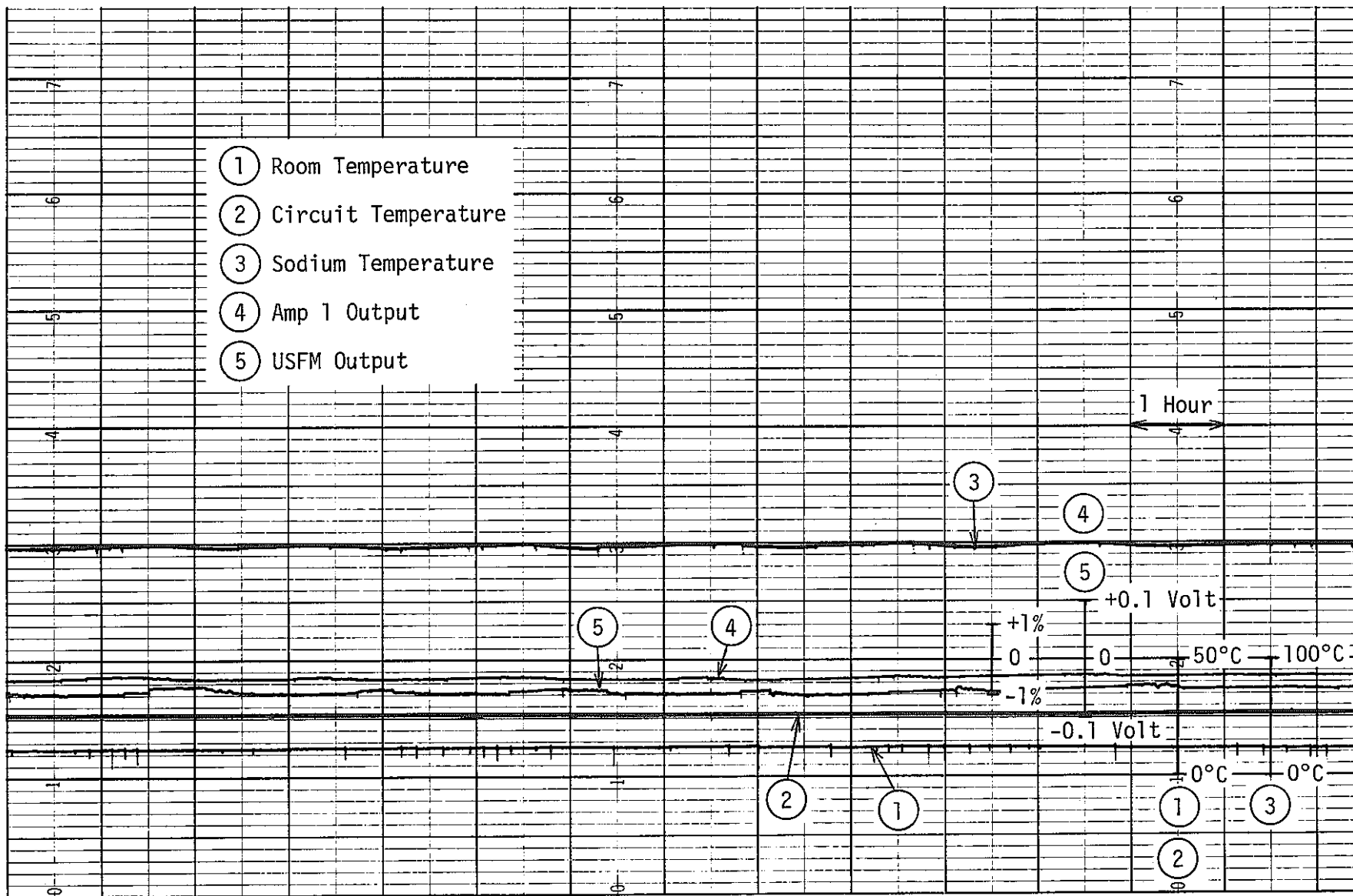


Fig. 23 The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Constant Temperature (2)
(After Large Temperature Change)

- 0 7 -

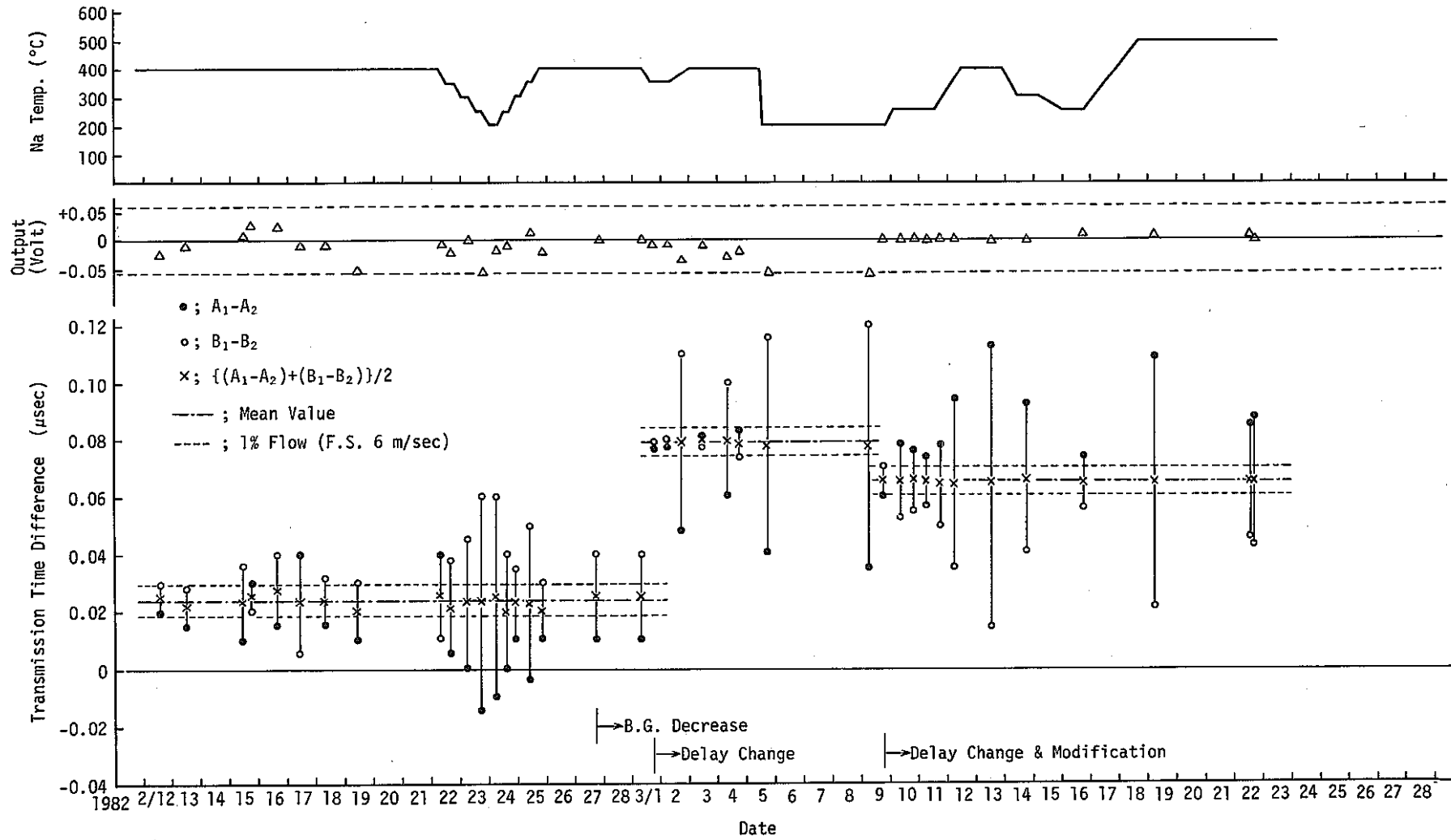


Fig. 24 The Stability of the Transmission Time Difference.

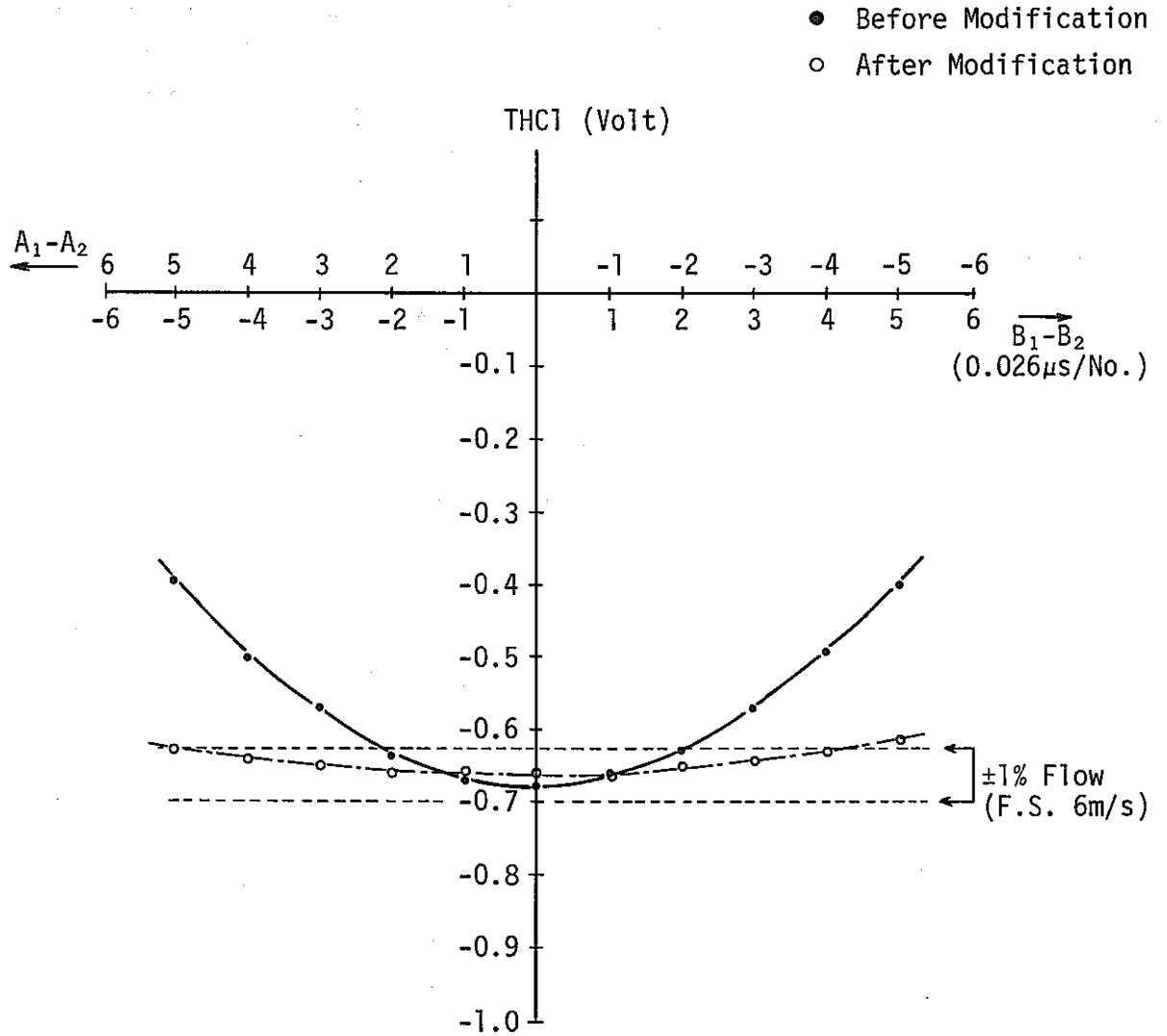


Fig. 25 Operational State of the Zero Point Drift Cancellation Circuit

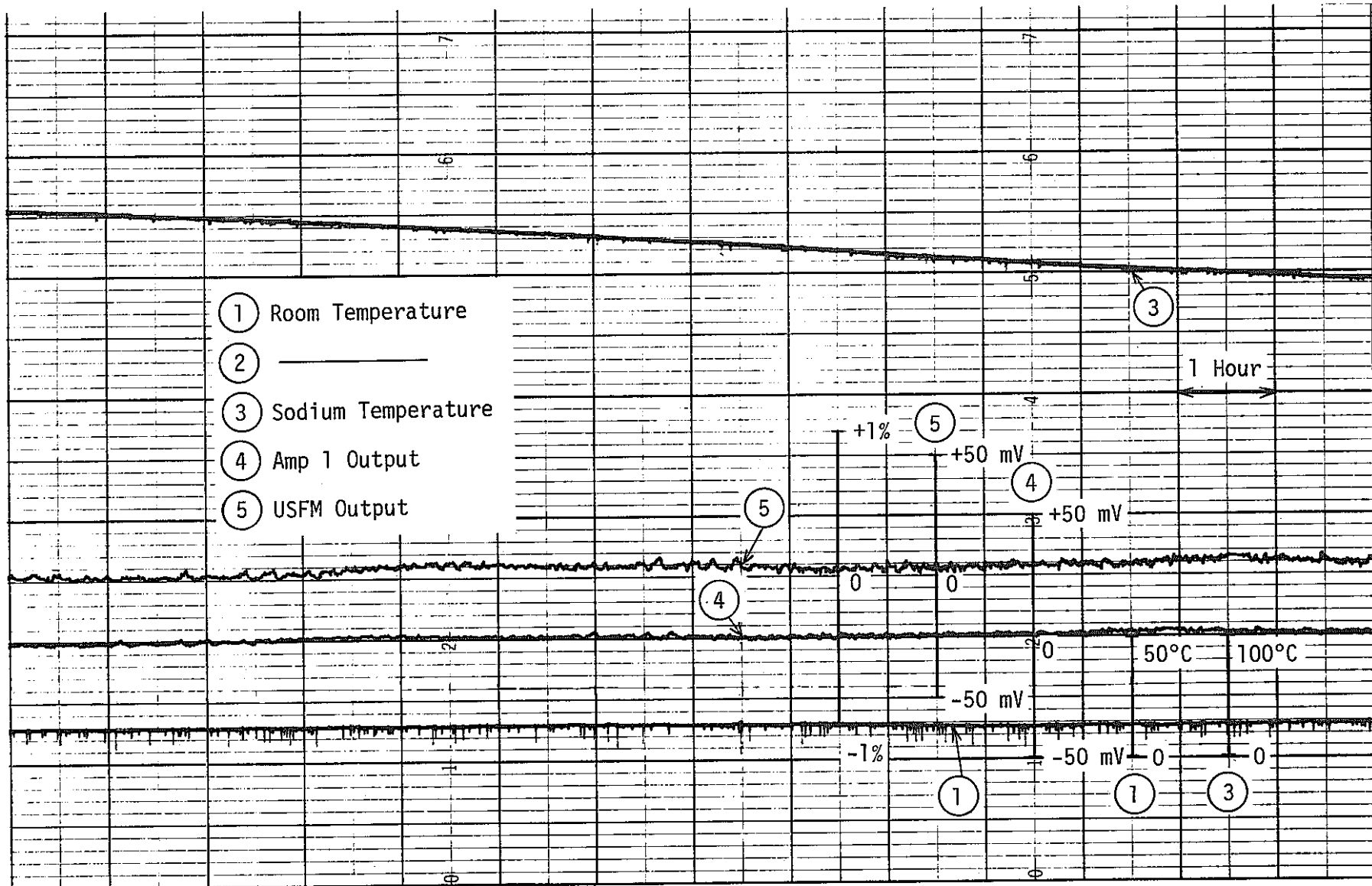


Fig. 26 The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Transitional Temperature (3)
(After Electronic Circuit Modification)

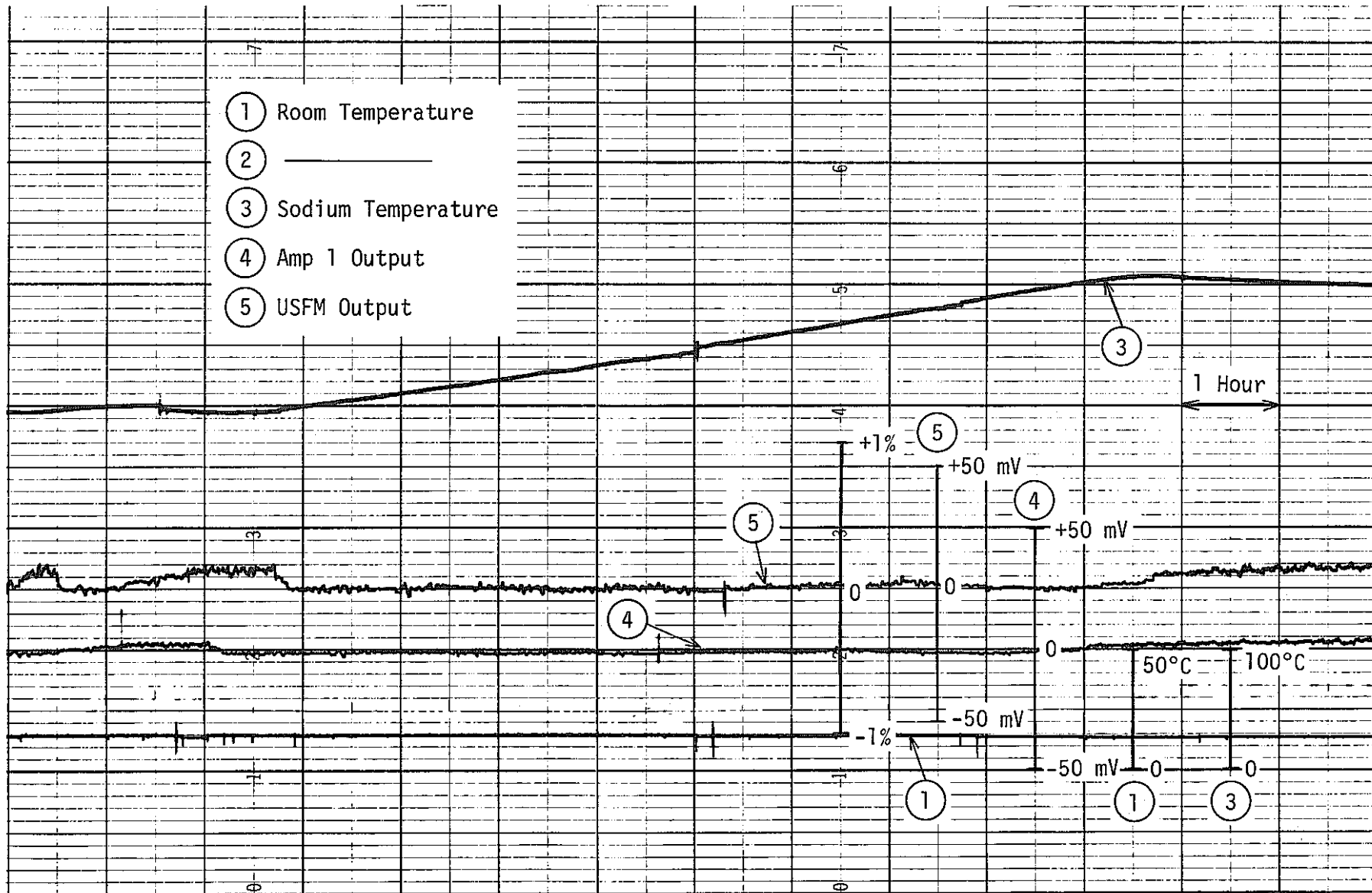


Fig. 27 The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Transitional Temperature (4)
 (After Electronic Circuit Modification)

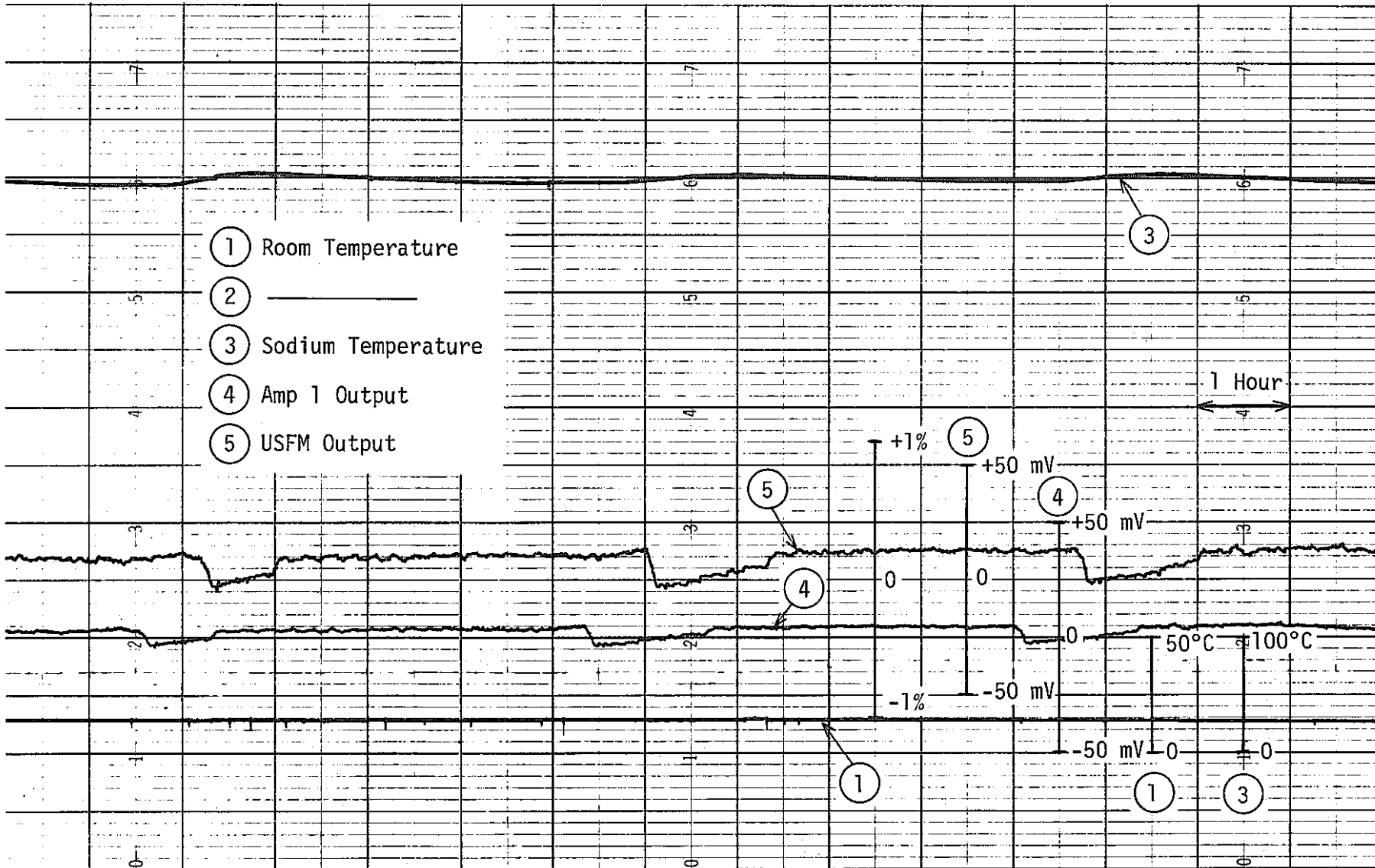


Fig. 28 The Stability of the Ultrasonic Flowmeter Output at Constant Temperature (3)
 (After Electronic Circuit Modification)