

## 渦電流式温度流速計の特性試験(Ⅱ)

試作Ⅱのナトリウム中単体性能試験と実用化検討

1977年3月

動力炉・核燃料開発事業団

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下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor  
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-  
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

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

頁	行	誤	正
Abstract	最終行	LM <u>G</u> BR	LM <u>F</u> BR
1	上15	flow-through-type	flow-through-type <sup>(9)-(11)</sup>
2	上13	感度とその依存性	感度とその <u>温度</u> 依存性
20	図4.1	弁名称記入もれ	V202の右の弁にV203と記入
22	図4.3	Type Cの案内管の底の 角度記入もれ	120° と記入
29	上10	1/10 <u>な</u> って	1/10 <u>に</u> って
35	下6	<u><math>\sigma_{Na}</math></u>	<u><math>\delta_{Na}</math></u>
38	図5.1	Cromel-Alumel	<u>C</u> hromel-Alumel
49	図5.11(b)	<u>v</u>	<u>v</u>
58	図5.20(a)	Magneic Core, MK-I	Magnetic Core, MK-I
62	上7	流速 <u>検出</u> 信号検出特性	流速信号検出特性
66	真中の図	< 20 $\mu$ V (0.4)	< 20 $\mu$ V (0.4 <u>%</u> )
67	図6.3	○印データ記入もれ	別紙の通り
73	上12	<u>RMS</u>	<u>rms</u>
84	下2	Frequen <u>ly</u>	Frequen <u>cy</u>
94	上6	測定 <u>係</u>	測定系
98	上5	fl <u>o</u> ux	flux
99	図8.1	<u>C</u> romel-Alumel Thermoc <u>o</u> uple	<u>C</u> hromel-Alumel Thermoc <u>o</u> uple
103	図8.5	<u>8</u> %	<u>10</u> %

頁	行	誤	正
105	図 8.7	C <u>r</u> omel-Alumel Eddy-Current Flow <u>s</u> nd Temperature	<u>C</u> hromel-Alumel Eddy-Current Flow <u>a</u> nd Temperature
114	上 8	<u>す</u> るであろうから,	<u>れ</u> るであろうから,
115	下 15	高 <u>周</u> 波成分	高 <u>調</u> 波成分
117	下 13	平衡	平行
118	図 9.1 (a)	<u>c</u> onductor	<u>C</u> onductor
	図 9.1 (b)	I <u>r</u> solator	I <u>n</u> solator
121	下 3	0.1~ <u>7</u> Hz	0.1~ <u>3</u> Hz
125	Ref. (9)	Trans- ....., <u>1</u>	Trans....., <u>№</u> 1
〃	Ref. (12)	Vol. 42 の前に右記の もの追加	Rev. Sci. Instrum.
126	Ref. (24)	<u>C</u> Hanges ..... <u>T</u> echnique	<u>C</u> hanges..... <u>T</u> echnique
〃	Ref. (26)	導体上に.....有限ソレノ イド p 162	" 導体上に.....有限長ソ レノイド p. 162
〃	Ref. (31)	<u>T</u> HERO <u>N</u> O <u>N</u> E <u>T</u> R <u>Y</u>	<u>T</u> HER <u>M</u> O <u>M</u> E <u>T</u> R <u>Y</u>
〃	〃	<u>№</u> 1, 793	<u>№</u> 1, p. 793
〃	Ref. (32)	<u>健</u> 設報告書	<u>建</u> 設報告書
〃	Ref. (33)	電磁氣的液体量測法	" 電磁氣的液体 <u>流</u> 量測 <u>定</u> 法
〃	Ref. (34)	Bound <u>a</u> vy	Bound <u>a</u> ry
〃	〃	Sm <u>o</u> th	Sm <u>o</u> th
〃	〃	DEC. (1967)	(Dec. 1967)
127	Ref. (37)	15 p. 441	1 <u>5</u> , p. 441
〃	Ref. (38)	(1976 年一月)	(1976 年 7 月)

頁	行	誤	正
127	Ref. (42)	Plan.	Plan
"	Ref. (43)	SEMR	LMFBR
151	図 B. 1 1	Nov. 27, <u>1970</u>	Nov. 27, <u>1975</u>
"	"	Dec. 2, <u>1970</u>	Dec. 2, <u>1975</u>
152	図 B. 1 2	Nov. 27 ~ Dec. 1, <u>1970</u>	Nov. 27 ~ Dec. 1, <u>1975</u>
155	図 B. 15 (a)	縦軸左側に記入	PM Flowmeter FM-2 Output, (mV)
"	"	縦軸右側に記入	Flow Sensor Output, $E_F$ (mV)
"	図 B. 15 (b)	流速計 2 次コイル信号の	流速計 2 次コイル信号間 の
156	図 B. 1 6	$V \underline{\underline{=}} 3.1 \text{ m/s}$	$V \underline{\underline{=}} 3.1 \text{ m/s}$
160	図 B. 2 0	Nov. 29, <u>1970</u>	Nov. 29, <u>1975</u>

## 渦電流式温度流速計の特性試験(Ⅱ)

## 試作-Ⅱのナトリウム中単体性能試験と実用化検討

報告者 中本香一郎※  
 大山信美※  
 池見元祥※※  
 河野耕司※  
 厚母栄夫※

期間 1975年5月～1977年3月

目的 高速原型炉「もんじゅ」を対象に、炉心監視計装として研究開発を進めてきた渦電流式温度流速計(試作-Ⅱ)のナトリウム中試験を行ない、単体としての性能を把握するとともに、実用化上の問題も検討する。

要旨 プローブ型の渦電流式温度流速計を主として直線性、感度、S/N比の面で改善した試作-Ⅱ(MK-Ⅱ, 11.0 mm O.D.×130 mm L)をナトリウム中で性能試験し、次の結果を得た。

- (1) 流量計としての性能：感度がほぼ最大で温度依存性が最少となる最適励磁周波数 $f_{0p}$ は約75 Hzとなり、この時の感度は検出器入力換算で $1.34\text{mV/m/s}$ (400℃)を得、MK-Iと較べて約20倍感度が大きくなった。流速検出の非直線性は1%FS以下で、特に0.5 m/s以下の低流速域での直線性が大巾に改善された。温度補償をかければ、400～500℃でフルスケールの1%以内に温度依存性をおさえることができた。以上から本試作品は流速計として十分実用になることが確かめられた。
- (2) 温度計としての性能：流速計と同じ励磁周波数(75 Hz)を使用した場合、検出器入力換算で $48.5\mu\text{V}/\text{C}$ を得、MK-Iより約13倍大きくなっており、直線性も良好である。温度計としても実用性は十分であると判断された。
- (3) ボイド計としての性能：ボイド計としての有用性も確認されたが、これについて

※ 大洗工学センター，ナトリウム技術部，ナトリウム技術開発室

※※ 現 崎 横河電機製作所

は今後なお詳細な実験が必要である。ボイドに対して流速信号のみならず温度信号にも有意の変化が生じ興味深い。

- (4) プローブを挿入した案内管の先端形状の効果：これは流速信号に対して支配的因子でないことがわかった。

以上の単体としての性能に加えて、原子炉の炉内計装に適用していく上での問題点（流量低下の検出限界、装荷確認法、オンサイト校正法など）についても今後を見通すために簡単な検討を試みた。

March, 1977

Performance Test of a Probe-Type Eddy-Current  
Flow and Temperature Sensor (II)

In-Sodium Tests of MK-II Sensor

Koichiro NAKAMOTO\*, Nobumi OHYAMA\*,  
Motoyoshi IKEMI\*, Koji KAWANO\*,  
and Hideo ATSUMO

Abstract

Probe-type eddy-current flow and temperature sensors have been developed for in-core monitors of prototype fast breeder reactor "MONJU".

The MK-II sensor (11.0mm O.D. × 130mm long, magnetic core) has a central primary coil and two identical coils placed symmetrically about the primary, and is installed in a stainless-steel guide tube.

It is capable of monitoring sodium flow and temperature at a time by means of vector differencing and vector summing of secondary coil signals respectively.

In-sodium tests were carried out under conditions in the Sodium Instrument Test Loop.

Sodium temperature : 300 ~ 550 °C

Sodium flow velocity : 0 ~ 3 m/s

Exciting frequency : 20 ~ 1000 HZ

Test results are as follows.

- (1) The performance as a flow sensor : The output/flow characteristic was linear up to 3 m/s, and has high sensitivity as much as 1.34 mV/m/s at 75 Hz. The temperature dependency of flow output signal were reduced to 1% (400~500 °C) with a temperature compensation circuit.
- (2) The performance as a temperature sensor : Temperature detecting sensitivity

---

\* Sodium Technology Section, Sodium Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC.



was  $48.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  at 75 Hz, and linearity was fairly well in the Temperature range, 300 ~ 500 °C.

- (3) It was shown that both flow and temperature outputs are useful for detecting gas bubbles in sodium.
- (4) It became clear that the top shape of a guide tube has not an important effect on the flow output signal, after testing conic, spherical, ellipsoidal, cylindrical guide tubes and spherical one with fins.

Some basic problems, such as the potential of detecting subassembly flow blockage and/or gas bubbles in sodium, were discussed in order to apply this sensor to in-core instrumentation of LMGBR.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 原 理 .....	3
2.1 流速測定 .....	3
2.2 温度測定 .....	3
3. 検 出 器 .....	5
3.1 検出コイル部 .....	5
3.2 検出回路部 .....	6
4. 試 験 装 置 .....	15
4.1 試験ループ .....	15
4.2 単体性能試験部 .....	16
4.3 7集合体試験部 .....	18
4.4 ボイド検出試験部 .....	19
5. 流速検出特性 .....	25
5.1 試験方法 .....	25
5.2 試験結果 .....	26
5.3 検 討 .....	31
6. 温度検出特性 .....	62
6.1 試験方法 .....	62
6.2 試験結果 .....	62
6.3 検 討 .....	63
7. 案内管先端形状の流速信号に及ぼす効果 .....	68
7.1 試験方法 .....	68
7.2 試験結果 .....	68
7.3 検 討 .....	71
8. 燃料チャネル閉塞検出の可能性 .....	90
8.1 流量低下検出の可能性 .....	90
8.2 ボイド検出の可能性 .....	92
9. 考 察 .....	112
9.1 流速計としての性能 .....	112
9.2 温度計としての性能 .....	113
9.3 ボイド検出器としての性能 .....	114

9.4 今後の課題と原子炉への応用 .....	114
10. 結 言 .....	121
11. 謝 辞 .....	124
12. 参 考 文 献 .....	125
付録A 渦電流式速応性温度流速計(MK-II)の受入れ検査と故障経験 .....	128
付録B 補足データ .....	135
付録C 流速検出と温度検出に関する現象論的定性的解釈 .....	165
付録D 渦電流式温度流速計の試験履歴 .....	170

## 表 目 次

### 第 3 章

表 3.1 渦電流式温度流速計の主要仕様 .....	7
----------------------------	---

### 第 5 章

表 5.1 流速検出感度 .....	37
表 5.2 最大感度を与える励磁周波数と導電率の関係 .....	37

### 第 8 章

表 8.1 時定数と流量低下識別限界の目安 .....	97
表 8.2 FFTF 燃料チャネル流量計目標仕様 .....	98

### 付録 A

表 A.1 渦電流式温度流速計 (MK-II) の寸法測定結果 .....	130
表 A.2 渦電流式温度流速計 (MK-II) のコイル絶縁特性受入検査 .....	131
表 A.3 渦電流式温度流速計 (MK-II) のコイル導通受入検査 .....	132
表 A.4 渦電流式温度流速計 (MK-II) の故障履歴 .....	133

## 目 次

第 2 章	
図 2.1	渦電流式流速計原理図および炉心への装荷概念図 ..... 4
第 3 章	
図 3.1	検出コイル部 (プローブ) ..... 8
図 3.2	コイル抵抗値の温度変化 ..... 9
図 3.3	検出回路部外観図 ..... 10
図 3.4	検出回路部構成ブロック図 ..... 11
図 3.5	ドライバ回路の一次コイル定電流特性 ..... 12
第 4 章	
図 4.1	計測機器試験ループフローシート ..... 20
図 4.2	渦電流式温度流速計単体性能試験部 F S - 2 ..... 21
図 4.3	渦電流式温度流速計単体性能試験部 F S - 3 と各種案内管 ..... 22
図 4.4	7 集合体試験部 ..... 23
図 4.5	ガス吹込部 ..... 24
第 5 章	
図 5.1	渦電流式温度流速計単体性能試験における測定系ブロック図 ..... 38
図 5.2 (a)	流速信号出力の励磁周波数依存性 - ダイオード整流の場合 - ..... 39
図 5.2 (b)	“ “ “ - 同期整流位相つまみを固定した場合 - ..... 40
図 5.3	流速信号の直線性 - 同期整流位相を最適にしたとき - ..... 41
図 5.4	“ ( 300℃ ) ..... 42
図 5.5	“ ( 400℃ ) ..... 43
図 5.6	“ ( 500℃ ) ..... 44
図 5.7	“ - 回帰直線からの偏差 - ..... 45
図 5.8	整流方式と直線性 ..... 46
図 5.9	流速検出感度の温度依存性 ..... 47
図 5.10	流速検出信号の温度依存性と温度補償特性 ..... 48
図 5.11	2 次コイル信号の位相振幅特性ベクトル図 ..... 49
図 5.12	位相特性 ..... 50
図 5.13	2 次コイル信号間の位相差の励磁周波数依存性 ..... 51
図 5.14	“ “ の位相差の流速依存性 ..... 52
図 5.15	“ “ の位相差感度 ..... 53
図 5.16	2 次コイル信号振幅差の励磁周波数依存性 ..... 54

図 5.17	2次コイル信号振幅差の流速依存性	55
図 5.18	単位流速当りの振幅差	56
図 5.19	流速信号の位相変化	57
図 5.20(a)	センサーの種類による違い (500℃)	58
図 5.20(b)	励磁周波数依存性のパターン (500℃)	59
図 5.21	各種センサーの流速検出感度(検出器入力換算値)と直線性の比較	60
図 5.22	検出感度の再現性 — 同期位相つまみ固定時 —	61

## 第6章

図 6.1	温度検出信号出力と感度の励磁周波数依存性	65
図 6.2	温度検出信号への流速の影響	66
図 6.3	温度検出信号の直線性と感度	67

## 第7章

図 7.1	流速信号ゆらぎの測定系ブロック図	74
図 7.2	流速検出信号レベルへの案内管先端形状の影響 — 向流 —	75
図 7.3	"          "          "          — 並流 —	76
図 7.4	案内管先端形状の直線性への影響 $l = 0mm$	77
図 7.5	"          "          " ( $l = 100mm$ )	78
図 7.6	"          "          " ( $l = 300mm$ )	79
図 7.7	"          "          " 回帰直線からの偏差	80
図 7.8	流速信号ゆらぎへの案内管先端形状の影響	81
図 7.9	流速指示値とゆらぎの軸方向プローブ位置依存性	82
図 7.10	流速信号ゆらぎの流速依存性	83
図 7.11	流速信号のパワースペクトル — 円柱型案内管先端の場合 —	84
図 7.12	"          "          — 球型案内管先端の場合 —	85
図 7.13	"          "          — 円錐型案内管先端の場合 —	86
図 7.14	"          "          — フィン付案内管の場合 —	87
図 7.15	"          "          — 回転楕円体型案内管先端の場合 —	88
図 7.16	2重管における流れのモデル	89

## 第8章

図 8.1	流量低下検出限界試験測定系ブロック図	99
-------	--------------------	----

図 8.2	流量低下識別と時定数の関係 ( $\tau=0.02 \text{ sec}$ )	100
図 8.3	" " ( $\tau=0.22 \text{ sec}$ )	101
図 8.4	" " ( $\tau=0.62 \text{ sec}$ )	102
図 8.5	" " ( $\tau=4.42 \text{ sec}$ )	103
図 8.6	サブアセンブリ流路閉塞率と流量低下率	104
図 8.7	ボイド検出試験測定系ブロック図	105
図 8.8	単発吹込みボイドに対する応答性	106
図 8.9	単発吹込みボイドの識別—交流成分—	107
図 8.10	連続吹込みボイドに対する応答性	108
図 8.11	連続吹込みボイドの識別—交流成分—	109
図 8.12	ボイドのナトリウム中移行速度	110
図 8.13	円管内における単一気ほうの上昇速度 (水道水)	111

## 第9章

図 9.1	プローブ装荷確認法	118
図 9.2	流速検出感度と不平衡電圧の温度補償案	119
図 9.3	流速計における零点確認の一案	120

## 付録 A

図 A.1	プローブの出し入れ時の熱衝撃の例	134
-------	------------------	-----

## 付録 B

図 B.1	流速信号出力の励磁周波数依存性 (プローブ No. 2)	141
図 B.2	" " (プローブ No. 5)	142
図 B.3	流速信号の直線性 (300℃, プローブ No. 2)	143
図 B.4	" " (400℃, " )	144
図 B.5	" " (500℃, " )	145
図 B.6	" " (300℃, プローブ No. 5)	146
図 B.7	" " (400℃, " )	147
図 B.8	" " (500℃, " )	148
図 B.9	流速検出感度の温度依存性 (プローブ No. 2)	149
図 B.10	" " (プローブ No. 5)	150

図 B.11	流速計試験部による差	151
図 B.12	流速計のプローブおよび回路による個差	152
図 B.13	流速信号の安定性	153
図 B.14	流速検出におけるヒステリシス	154
図 B.15	流速信号生データの一例	155
図 B.16	温度信号出力の励磁周波数依存性 (プローブ No.2)	156
図 B.17	"                  "                  (プローブ No.5)	157
図 B.18	温度信号の直線性 (プローブ No.2)	158
図 B.19	"                  (プローブ No.5)	159
図 B.20	温度信号とナトリウム流速との関係	160
図 B.21	磁場浸透の目安	161
図 B.22	浸透深さ (計算値)	162
図 B.23	温度信号の時間応答性	163
図 B.24	純鉄の初期透磁率の温度依存性	164
付録 C		
図 C.1	流速検出感度におけるスカラ差とベクトル差の比較	169
付録 D		
図 D.1	渦電流式温度流速計関係試験経過	173

## 写 真 目 次

写真 3.1	検出部 (プローブ No.1)	13
写真 3.2	検出回路部	14



# 1. 緒 言

ナトリウム冷却型高速炉においては、炉心冷却材流量喪失事故や反応度事故の炉心異常を早期に検出し、炉の安全性をはかるとともに、炉心熱水力特性をより良く把握するためには、燃料集合体毎に燃料チャネル流量計や燃料出口温度計を設置し、冷却材流量および冷却材温度を計測監視する方法が有効である。

この目的に使用する検出器として、導電性流体中に生じる渦電流と流速との相互作用に着目した渦電流式流速計が各国で研究開発されてきている。例えばイギリスではPFRに3本の流速計を炉内流量計として使用する他、タンク型炉容器のため一次冷却系流量モニターにも使用する<sup>(1)(2)(4)</sup>。また将来のLMFBR用としても研究開発を進めている<sup>(3)</sup>。アメリカはFFTF用に精力を傾けており、炉心全サブアセンブリ計装を計画している<sup>(5)~(7)</sup>。また西独でもSNRを対象に炉心に4本だけ渦電流式流速計を取り付ける計画を持っており、信頼性試験の段階にまで到達している旨報告されている<sup>(8)</sup>。

一般に渦電流式流速計はセンサーが小型、軽量で比較的健ろうな構造を有し、また流体と直接接する必要がないという特色を有する。これらは形状から2種に大別される。すなわち流体を包含するように1次側励磁コイルと、2次側検出コイルをソレノイド状に巻いたflow-through-typeと、流体中に流れと平行に配置した案内管(あるいは保護管)内にコイルを挿入したprobe-type<sup>(1)~(8), (12)</sup>とがあり、それぞれについて研究開発が進められている。しかしながら炉内流量計(流速計)として使用する場合はセンサーの小型化と交換性が強調されるので、probe-typeが好まれる。

我国でもナトリウム冷却型高速炉を対象に研究開発がこれまでなされてきた<sup>(13)~(22)</sup>が、その基本方針は(Ⅰ)炉内流量計として、できれば全炉心サブアセンブリに装着する、(Ⅱ)プローブ型とし、(Ⅲ)炉内構造との関連から各サブアセンブリの上方に設置し、検出を容易にするために整流管構造を設ける、(Ⅳ)コイルシステムを取めたプローブは交換容易とするために、案内管の中にプローブを挿入する、(Ⅴ)燃料出口温度計など他種の計装との共存をはかるの5点であった。開発にあたっては上記条件の他に特にプローブの小型化がはかられた。

また渦電流式流速計とは別個に、導体の導電率と渦電流の関係に着目した誘導型酸化物計<sup>(23)</sup>、探傷法あるいはそれに類するものへの応用やソレノイドコイルの解析が行なわれている。<sup>(24)~(26)</sup>これらから必然的に方向づけられるものとして、渦電流を利用した導電性物体の温度測定も研究されている。<sup>(27)~(30)</sup>

1つの検出器で上記の2種の情報、すなわち流速と温度を得るために、「渦電流式温度流速計」が試作試験<sup>(18)</sup>され<sup>(注)</sup>、ナトリウム中単体特性試験が実施された<sup>(19)</sup>。その結果2次コイル間の不平衡

(注) 試作-I(MK-I)と呼ぶことにする。

残留電圧を最小にする最適周波数，流速に対する直線性，温度検出の実用性と応答性，温度信号による流速信号の温度依存性補償の可能性等について数々の基本知見が得られた。しかし，なお低流速域での非直線性，センサーに使用されているコイルの高温における絶縁特性およびセンサー自体での不平衡の低減化に関して解決すべき問題が残されていた。

このために，コイルボビンやコイルの材質，コイル巻数や配置の最適化，コイル自体で生じる不平衡電圧の低減化の工夫等の基礎的事項に立ち帰って検討が加えられるとともに，検出回路においても位相補償回路や同期整流回路の導入により性能の向上がはかられた。<sup>(21)</sup>

その結果検出器としての構造ならびに信号処理について一応の知見が得られ，これに従って設計製作されたセンサーと検出回路がアルミニウムによる模擬実験の後当室に納入された。

本報告では上記渦電流式温度流速計<sup>(注)</sup>を大洗工学センターの計測機器試験ループでナトリウム中性能試験した結果について述べる。

本検出器は流速信号と温度信号を同時に出力することができるが，前者については (i) 励磁周波数依存性，(ii) 直線性，(iii) 感度とその依存性および温度補償特性，(iv) 位相特性について調べた。また後者については，(i) 励磁周波数依存性，(ii) 直線性，(iii) 感度について調べた。

さらに流速信号については，検出部（プローブ）を挿入する案内管の先端形状による流れのみだれの効果を調べるとともに，炉内計装として本検出器を使用する場合の燃料チャンネル閉塞検出の可能性についても基礎的検討をした。

---

(注) 試作-II (MK-II) と呼ぶことにする。

## 2. 原 理

本検出器は導電性流体中に生じる渦電流を利用した計測器で、1つのプローブで温度と流速が同時に検出できる。以下それぞれについてその原理を紹介する。

### 2.1 流速測定

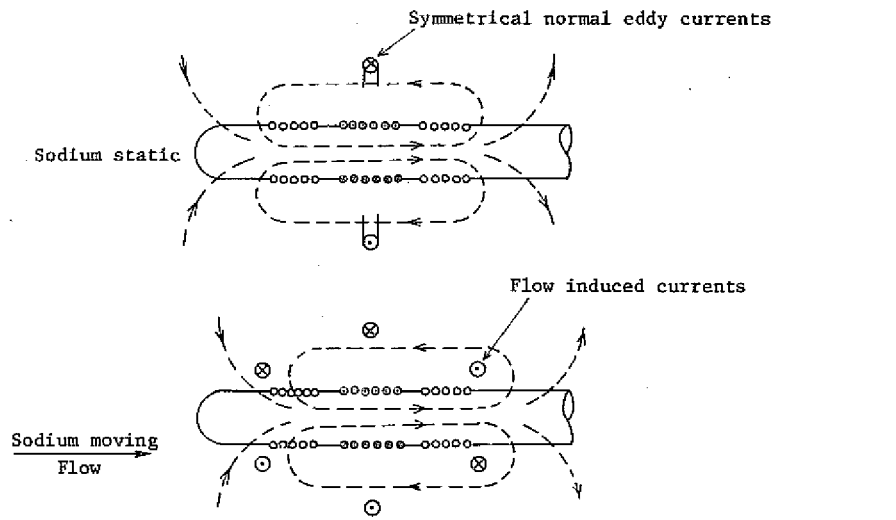
渦電流式流速計の原理は良く知られているように、導電性流体の流速とそれに直交する交流磁界によって生じた渦電流が、もとの磁界に及ぼす影響（歪み）を、1次コイル（励磁コイル）に対して対称な位置に配置した2個の2次コイルで検出するものであり、この観点から flux distortion flowmeterとも呼ばれ2個の2次コイル信号の差（すなわち差信号）は励磁条件（電流の大きさと周波数）が一定でかつ導電性流体の導電率と透磁率が一定という条件の下では、流速に比例する。

図2.1(a)に原理図を示す。流体が静止している場合は1次コイルによって生ずる渦電流は上流側と下流側で対称となり、2次コイル信号の差は互いに打ち消し合って零となる。次に流体が左から右に流れている場合は、1次コイルによって流体中につくり出される磁場のうち半径方向成分  $B_r$  と流速  $v$  は直交するので、それらいずれの方向にも直角な方向に電界が生じ渦電流が流れる。この渦電流の大きさは流速に比例するが、上流側と下流側で  $B_r$  の向きが逆であるから渦電流も逆向きに流れる。その結果磁場は図2.1(a)に示すように下流側に歪むことになる。したがって流速によって生じる非対称な渦電流によって、上流側2次コイル出力は低下し、下流側2次コイル出力は上昇する。前述したように、1次コイルに対して対称な成分は2次コイル信号間の差をとることによって相殺されるから流速依存の出力のみが得られる。

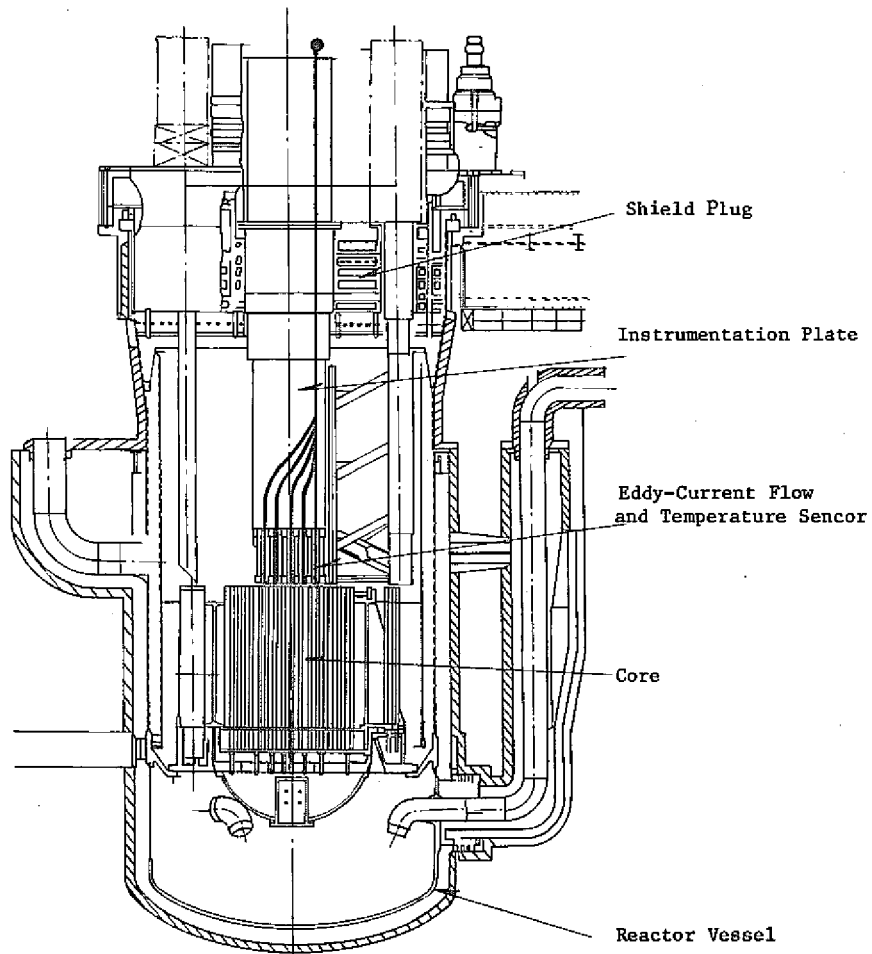
図2.1(b)に渦電流式温度流速計を炉心監視計装として使用する場合の装荷例を概念的に示す。

### 2.2 温度測定

渦電流式温度計は1次コイルによって導体中に流れる渦電流の大きさがほぼ導体の導電率によって決まり、導電率は温度とともに変化するので、2個の2次コイルの信号の和（すなわち和信号）をとれば、導体の温度に応じた出力が得られるという原理を利用している。原理的に熱電対などのような熱容量にもなり時間遅れ効果がないので、導体の温度変化に対して応答性が良い<sup>(18)(29)</sup>と言われ和信号をとることによって流速  $v$  によって生ずる非対称な渦電流は相殺される。



(a) 原理図



(b) 渦電流式温度流速計の炉心への装荷例

図 2.1 渦電流式流速計原理図および炉心への装荷概念図

### 3. 検 出 器

渦電流式温度流速計(MK-II)は検出コイル部と検出回路部より構成されている。表3.1に本検出器の主要仕様を前回の試作品(MK-I)と比較して示す。

以下特に断わらないかぎり、検出器はMK-IIについて述べる。

#### 3.1 検出コイル部

図3.1に検出コイル部の外観と内部構造を、写真3.1にナトリウム中試験前の検出部外観写真を示す。

本検出コイル部はプローブ型で、励磁用1次コイル(1個)と検出用2次コイル(2個)を収納したプローブを先端の閉じた案内管内に挿入して、その外をナトリウムが流れる仕組みになっている。

プローブは純鉄製ボビンに1次コイルと2次コイルを巻きつけた構造で、コイルは1次、2次ともにステンレス・スチールの芯線を有するMIケーブル(外径0.5mm $\phi$ )が使用されている。1次コイルと2次コイルの巻きつけは、2次コイル信号間に不平衡が生じにくいように配慮されている。

高速炉内への装荷法と同じく、先端の閉じた案内管の中に挿入されたプローブは引出し線を界して後述の検出回路部と接続される。引出し線は高温に耐えられるように設計製作された部分と常温用の部分に分けられる。

前者は2芯のニッケル芯線MIケーブルをフレキシブル・コンジットに収めた部分で検出端よりアダプタまで約5mある。一方後者は検出回路までの有機絶縁ケーブルでアダプタから回路用コネクタまでの長さは約3mである。

本検出器は流速のみならず温度計測も可能であるが、そのために電子回路にて2つの2次コイル信号の和と差をとる必要があり、2次コイルはそれぞれ独立に引き出し線が用意されている。

またプローブには基準温度計として3.2mm $\phi$ のシース型3素線式熱電対<sup>(3)</sup>(クロメル・アルメル・SUS316)がボビン中心を貫通して挿入されている。熱電対先端はコイル部より約20mm突き出しており、その先端は案内管の底に圧着される。

本検出器は燃料集合体出口部における冷却材流動試験に供されるため、検出部(プローブ)は8本(内予備1本)、検出回路部(電子回路)は7台納入された。

付録Aに、納入時の受入れ検査結果を示す。当初はプローブと電子回路を全数使用する予定であったが、トラブルが幾つか発生したため結果的には熱衝撃特性を改善した特定のプローブ(No.1)を主として試験対象に選んだ<sup>(注)</sup>

(注) 試験項目が多く、プローブの出し入れ頻度も多いので、耐熱衝撃特性に優れているとプローブの出し入れ時間が短くてすむからである。

さて、図 3.2 にプローブ No.1 について、各コイルのリード線を含めた抵抗値をプローブ温度に対して表わした測定結果を示す。これから 1 次コイルの抵抗変化は、300~500℃で 741~812Ω の変化を示すことがわかる。常温における他のプローブの抵抗値は付録 A を参照されたい。

### 3.2 検出回路部

検出回路部の外観を写真 3.2、図 3.3 に、回路構成ブロック図を図 3.4 に示す。

検出回路部は、流速検出と温度検出に共通な回路と、それぞれ独立に用意されている回路とがあり、その構成は次の通りである。

- (i) 駆動回路 (ドライバ) : 流速検出, 温度検出 共通
- (ii) 増幅回路 : 初段は共通, 第 2 段は各々独立
- (iii) 整流・平滑回路 : 各々独立
- (iv) 位相補償回路 : 流速検出のみ
- (v) 温度補償回路 : 流速検出のみ

駆動回路は外部発振器からの信号を受けて、1 次コイルに定電流を流すための回路で、発振器からのサイン波信号が 5 Vrms のとき 1 次コイルには約 50 mA の電流が流れる。

増幅回路は 2 段の差動増幅器より成る。2 個の 2 次コイルからの信号は初段の増幅器で各々増幅後、第 2 段で流速信号取り出しのため差動増幅が、一方温度信号取り出しのために和動増幅がなされる。流速信号については、2 個の 2 次コイル間の振幅バランスと位相バランスが行なわれるが、温度信号の場合は 2 次コイル間の不平衡という問題が生じないので、バランス回路は省略されている。

整流回路は流速信号の場合は信号が大きいので (S/N 比が良いので) 自動追従同期整流<sup>(2)</sup>される。流速信号の場合、一般に信号が小さく S/N 比が良くないので、励磁信号に同期した有意の信号のみ取り出す同期整流回路は有効である。同期整流のための同期信号は外部発振器からの信号を受けて制御回路でつくられる。整流後の交流信号は、平滑回路で直流化される。

流速信号と温度信号はいずれも出力指示メータとレコーダ用出力端子が用意されている。

検出回路は、入力からレコーダ出力までの減衰器を含めた総合利得が、スパン最大るとき流速信号では同期整流のとき 17.9 倍、ダイオード整流のとき 8.83 倍<sup>(注)</sup>、温度信号では 0.194 である。

増巾回路における 2 次コイル間の位相の不平衡は、外部発振器からの信号をもとに、移位相

(注) 同期整流もダイオード整流も全波整流であるが、上記の利得の差は主として出力アテネータの定数の違いによる。

回路によって補償される。

さらに流速信号の温度依存性を低減させるために、温度信号出力の一部を流速信号平滑回路の入力に帰還させる温度補償回路も用意される。

図 3.5 に、プローブの 1 次コイルとドライバ間に可変抵抗器を直列に入れ、前後の電位差と抵抗値から回路の定電流特性を求めた結果を示す。1 次コイルの抵抗はリード線抵抗も含めて 300~500℃では 741~812Ωの変化を示す(図 3.2)が、図 3.5 に示すようにそれより巾広い抵抗変化(650~950Ω)に対しても電流変化は±0.3%以内におさまる。

表 3.1 渦電流式温度流速計の主要仕様

構成	項 目	MK - I	MK - II
検 出 コ イ ル 部	型 式	渦電流式プローブ型 5コイル式, 熱電対付	渦電流式プローブ型 3コイル式, 熱電対付
	寸 法	プローブ 6.5 mm O.D. × 67 mm L	プローブ 11.0 mm O.D. × 130 mm L
	材 質 ① コイルボビン材 ② コイル巻線材  ③ 引出し線	純鉄 JIS SUYB2 ガラス絶縁 Pt 線 (0.2 φ)  MIケーブル(フレキシブルコン ジットおよびコネクタ付) 芯線 ニクロム(単芯)	純鉄 JIS SUYB2 MIケーブル(0.5 φ) 芯線 SUS316 単心(0.13 φ) 絶縁材 MgO シース SUS316 MIケーブル(フレキシブルコン ジットおよびコネクタ付) 芯線 Ni(2芯) 絶縁材 MgO シース SUS316
	熱電対(ボビン中心に設置)	1 mm φ シース熱電対 2本 素線 クロメル・アルメル	3.2 mm φ シース熱電対 1本 素線 クロメル・アルメル SUS316 先端 接地型
	使用条件 ① 温 度 ② 圧 力	最 高 700℃ (目標値) -1 ~ +2 Kg/cm <sup>2</sup> G	最 高 600℃ -1 ~ +2 Kg/cm <sup>2</sup> G
	定格電流	50 mA rms	50 mA rms
	検出回路部	上記検出回路に接続して、下 記のナトリウム温度・流速を 検出できる。 測定範囲 ① ナトリウム温度 ② ナトリウム流速	100~700℃ 0~3 m/s

但し MK-II 使用条件と測定範囲は筆者が設定した

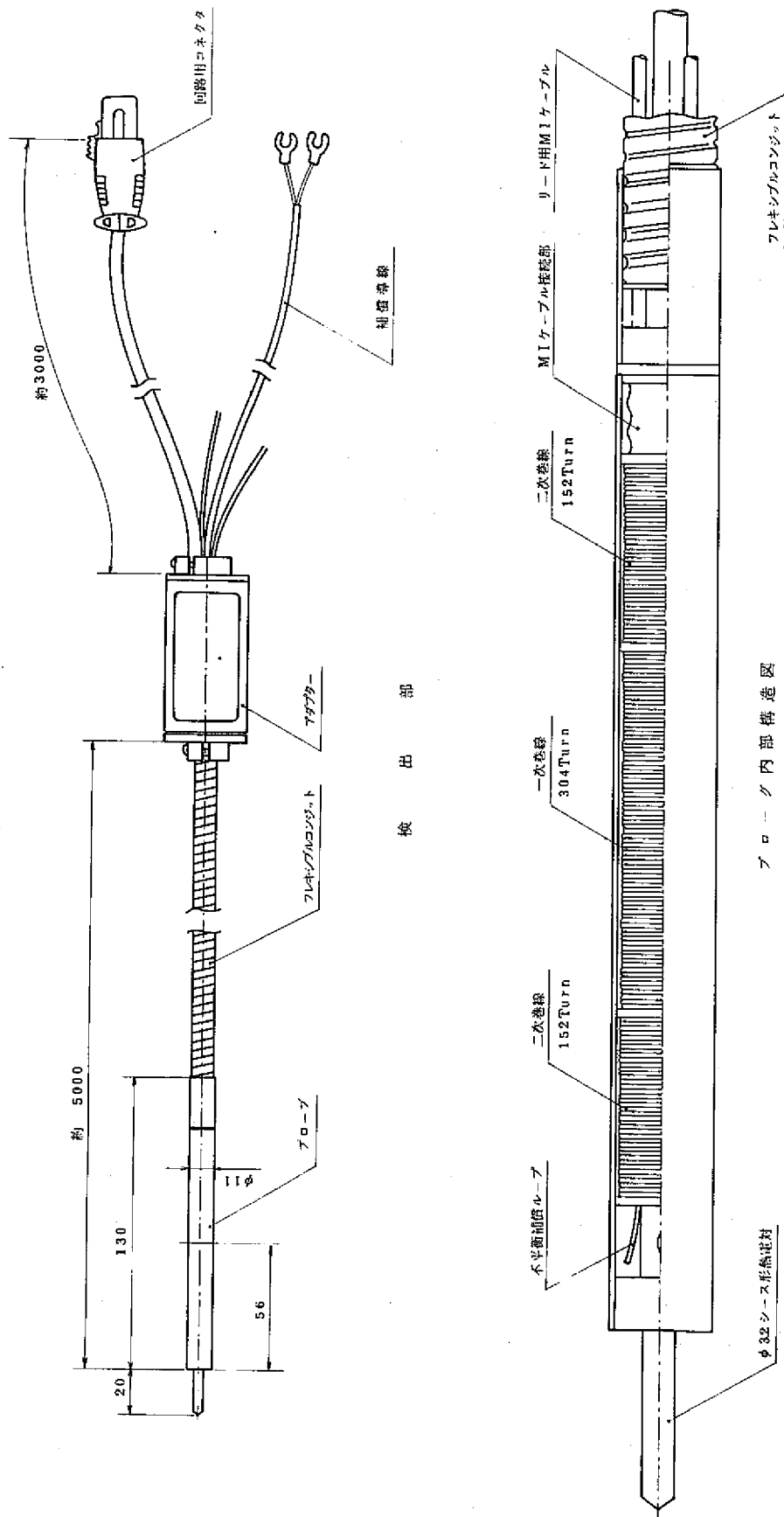


図 3.1 検出コイル部 (プローブ)



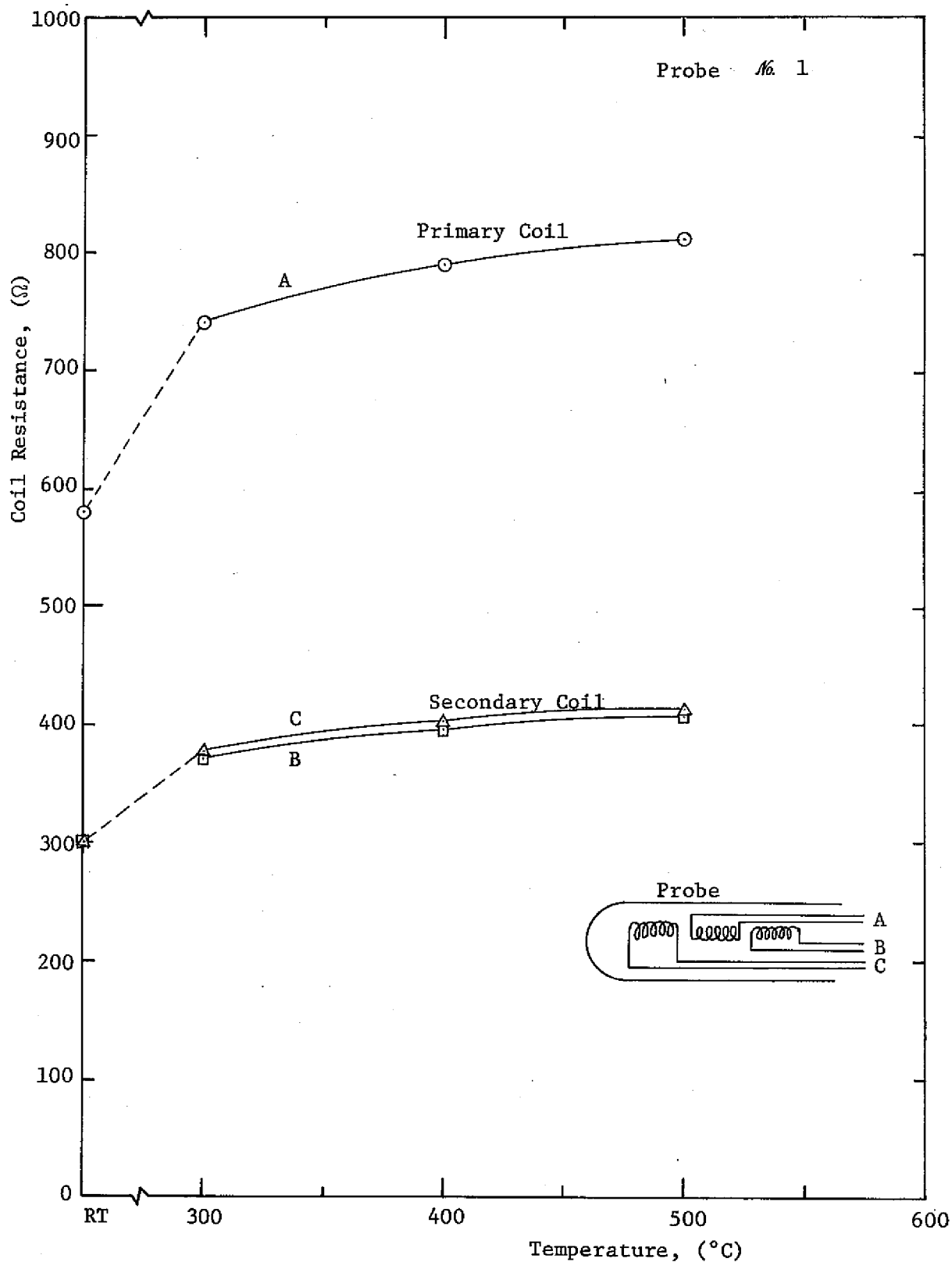


図 3.2 コイル抵抗値の温度変化

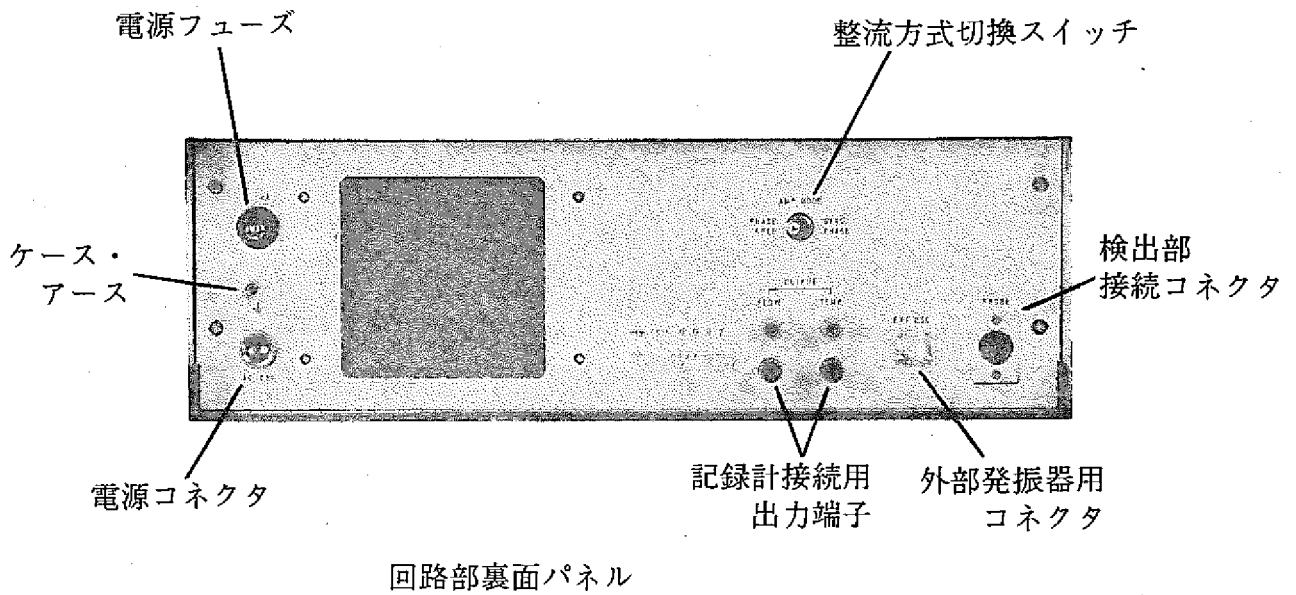
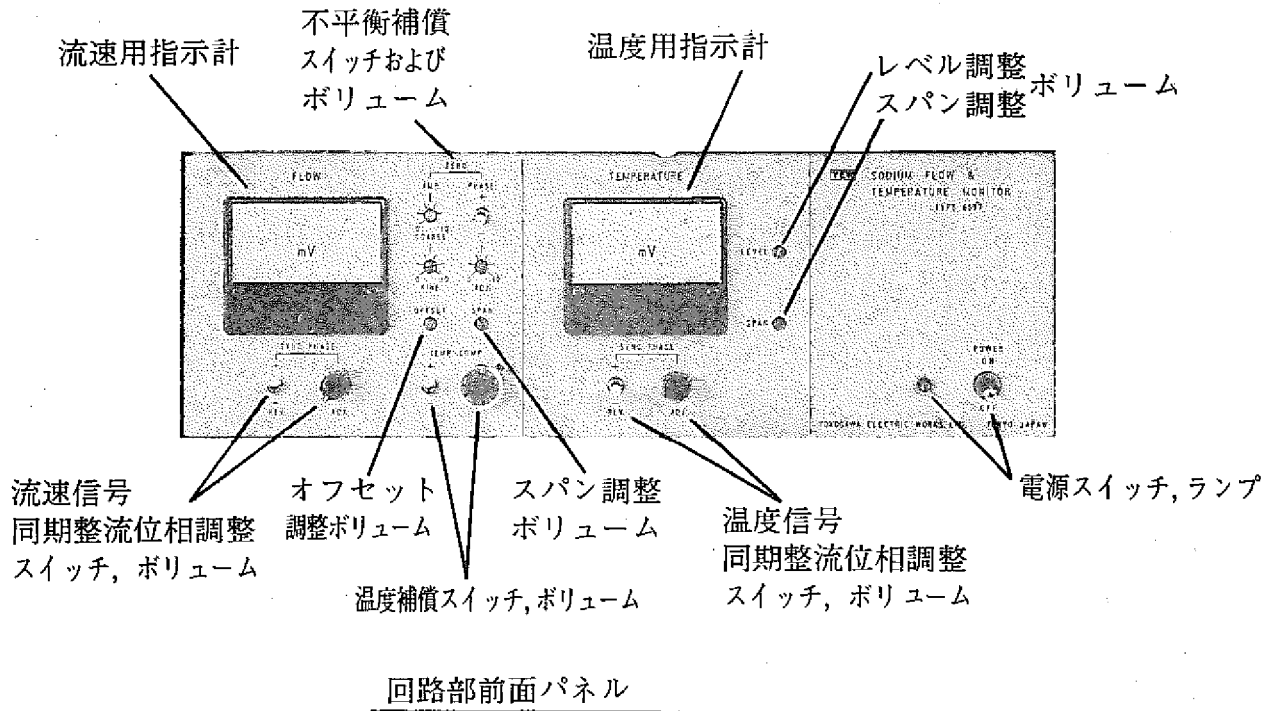


図 3.3 検出回路部外観図

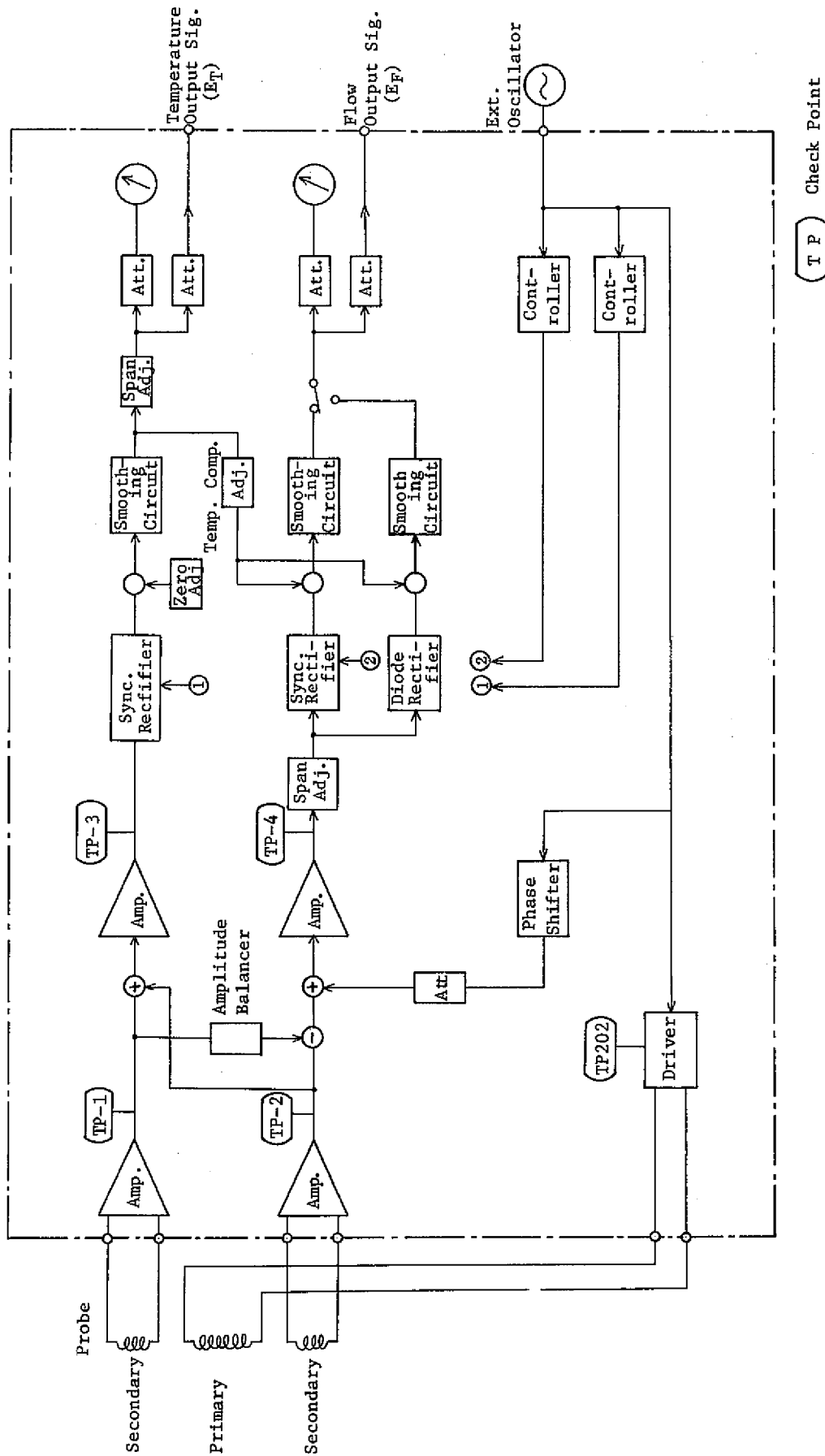


図 3.4 検出回路部構成ブロック図

TP Check Point

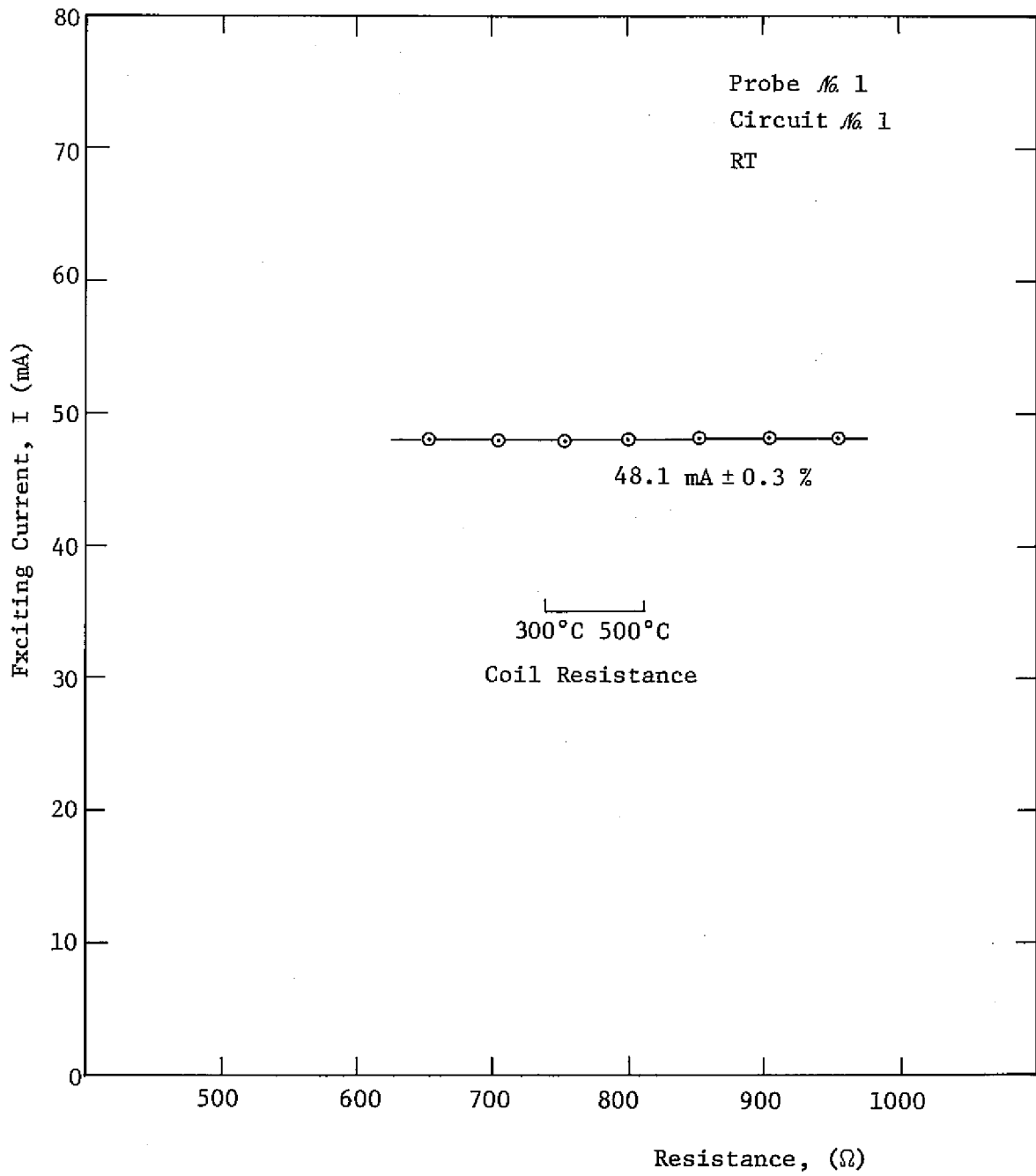


図 3.5 ドライバ回路の一次コイル定電流特性

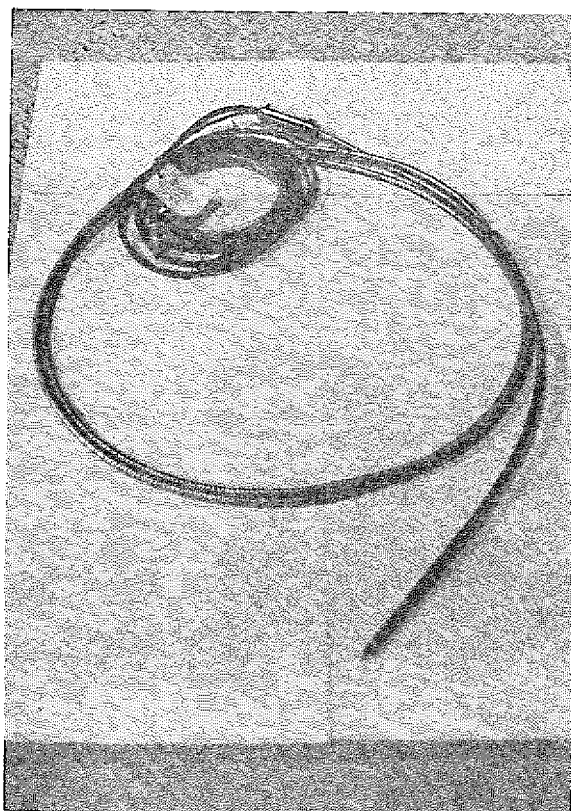
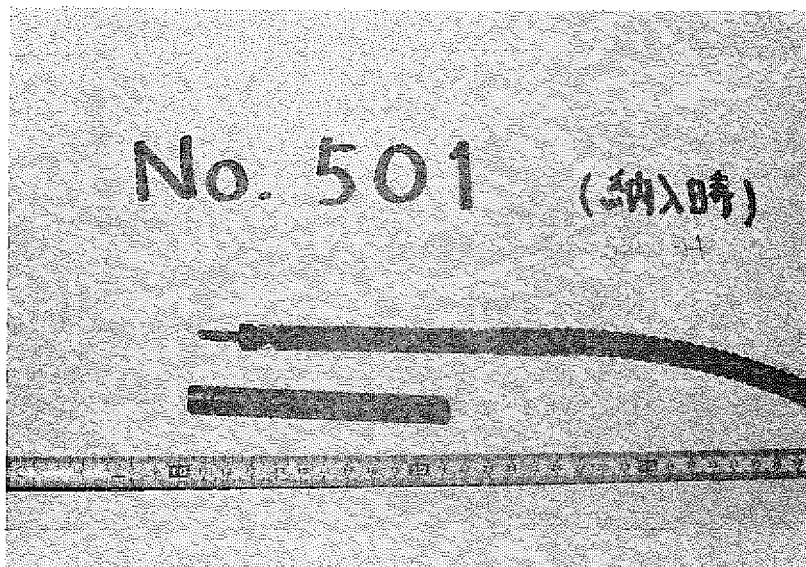


写真 3.1 検出部 (プローブ No. 1)

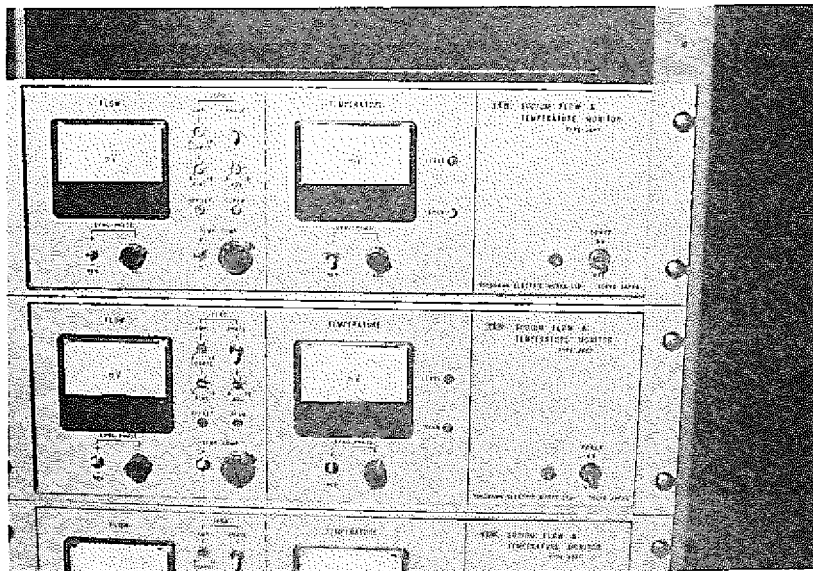
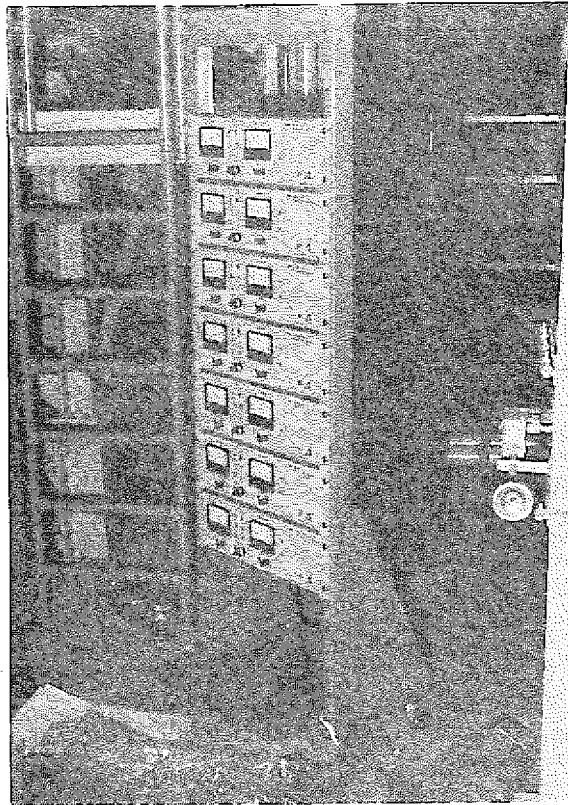


写真 3.2 検出回路部

## 4. 試 験 装 置

### 4.1 試験ループ

渦電流式温度流速計(MK-II)は大洗工学センター、ナトリウム技術開発室の計測機器ループでナトリウム中試験された。

図4.1に同ループのフローシートを示す。ループの主要仕様は次の通りであるが詳細は文献③参照のこと。

流 体	液体金属ナトリウム
カバーガス	アルゴン
ナトリウム保有量	約 2,900 Kg
最高ナトリウム温度	600℃
定格ナトリウム流量	[主循環系] 1,000 l/min
	[補助循環系] 1,000 l/min
	[試験部] 2,000 l/min
最高使用圧力	5 Kg/cm <sup>2</sup> G (常用 2Kg/cm <sup>2</sup> G以下)
主要材質	[ナトリウム系] SUS 304
	[ガス真空系] SUS 304およびSS 41
ナトリウム系配管	[主循環系主配管] 3B(89.1mm O.D. × 4.0)
	[補助系主配管] 3B( " " )
	[精製系配管] 3/4B(27.2mm O.D. × 2.5mm)

ナトリウム循環系は、(i)主循環系、(ii)補助循環系(補助系と略す)、(iii)精製系の3系統より構成されている。主循環系は、循環ナトリウムの温度を制御できる加熱器と冷却器を有するが、主循環系と補助系のナトリウムは試験容器内で合流するので、補助系のナトリウム温度も制御できる。精製系は主循環系よりバイパスした系統で、全循環ナトリウムの純度を制御する。

図4.1に示すように、主循環系には渦電流式速応性温度流速計を単体で特性試験できる試験部FS-1、および2が配管エルボ部に取り付けられており、基準流量計(永久磁石式電磁流量計)FM-1又はFM-4とシリーズにナトリウムを流すことができる。この試験部は初期のもので、主として参考データ採取に用いられた。

一方補助系に設置した温度流速計単体試験部FS-3は前記の試験部FS-1、2を改良したもので、本試験の主要な測定はFS-3を用いて行なわれた。FS-3の場合もそれとシリーズに接続された永久磁石式の基準流量計FM-2で流量がモニタされた。なお、補助電磁ポンプEMP-2は、正方向と逆方向いずれの方向にもナトリウムを容易に駆動できるので、流速計に

対して向流と並流<sup>註</sup>いずれをも実現できること、および試験部にフリーズシールを適用したことにより、種々の温度流速計用案内管に対してそれを比較的容易に交換ならびに試験できることが特徴である。

試験容器内には高速原型炉「もんじゅ」の炉心上部を模擬した7集合体試験部が設置されており、7本の模擬燃料集合体には主循環系と補助循環系のナトリウム（定格2000ℓ/min,最大2800ℓ/min）を流すことができる。7集合体試験部の燃料頂部の上方に渦電流式温度流速計を装着することができ、中央1集合体に模擬的に流量低下をおこさせ、燃料チャネル破損検出器としての実用性が試験できるようになっている。また中央1集合体に連結された中央チャネルライン（試験容器下部）にガスを吹込むことのできる設備も用意されているので、燃料ピン破損にともなう放出FPガスの検出可能性についても模擬試験ができる。

これら各試験部の詳細は次項で述べる。

以下に述べる各種試験は一部の例外を除いていずれもコールドトラップを200℃以下で運転しており、十分精製時間をおいている（原則として20時間以上）ので、循環ナトリウム中酸素濃度は約11ppm以下である。

#### 4.2 単体性能試験部

前述したように、試験部FS-2, 3を用いて渦電流式速応性温度流速計は単体として、次の特性が把握される。

##### (1) 流速検出特性

出力の励磁周波数依存性、出力対流速の直線性、検出感度の温度依存性、温度補償特性、位相特性など

##### (2) 温度検出特性

出力の励磁周波数依存性、出力対温度の直線性感度など

##### (3) 案内管先端形状の流速信号に及ぼす効果

信号の大きさへの寄与、直線性への寄与、流れのみだれへの寄与、周波数スペクトルへの寄与など

図4.2, 4.3に単体性能試験用の試験部FS-2, 3をそれぞれ示す。基準流量計FM-1, 2, 4の校正は文献(4)参照のこと。同流量計の校正精度は±2%以内である。

註 温度流速計が流れの中を突き進む方向の流れを向流、その反対向きの流れ（並進流れ）を並流と呼ぶことにする。詳細は図4.2, 4.3参照。



## 4.2.1 試験部FS-2

FS-2は初期の段階のもので、温度流速計プローブを挿入する案内管(13.8mm O.D.×1.2mm t)は主配管(89.1mm O.D.×4.0mm t)エルボ部に溶接固定されており、またウエル先端形状は加工上の制限<sup>(註)</sup>から小さな段差がある。

流れは図4.2に示すように、向流のみが可能である。これは主電磁ポンプが正方向にしかナトリウムを駆動できないためである。ナトリウムを貯蔵タンク(ST)に落下させれば並流も可能であるが、パラメトリックに多数の測定を行なうためにはこの方法は現実的でない。案内管はエルボ貫通部より配管中心軸上に沿って約500mm挿入されており、流れを極力みださないように、案内管はあえて途中での支持を行なわなかった。案内管先端に至るまでの上流部の直管長は約27D(Dは3インチ管内径、81.1mm)ある。一方基準流量計FM-4の上流長さは約12Dある。プローブ部を通過するナトリウムは、配管内径と案内管外径のつくる円環状流路を流れるが、流量1,000ℓ/minのとき約3.2m/sの平均流速となる。

## 4.2.2 試験部FS-3

FS-3はFS-2を次の点で改良したものである。

- (1) 案内管先端形状の流速信号への影響が調べられるように案内管を交換可能とした。これはまた、将来の「もんじゅ」設計の進展(例えば流速計プローブ径の変更など)にも応じられることを意味する。
- (2) ナトリウムを正逆いずれにも容易に流すことができる補助系に試験部を設置したこと。このために、向流だけでなく並流の試験も行なえる。
- (3) 案内管と配管の軸が製作上一致しやすいようにエルボ部をT字管にした。
- (4) 上記(1)を実現するために、案内管は配管と直接溶接せず、スリーブを配管と溶接し、スリーブと案内管根元のギャップを狭くしてナトリウムをフリーズさせてシールした。

FS-3もその基本的寸法はFS-2と全く同じで、案内管は13.8mm O.D.×1.2mm t、配管は89.1mm O.D.×4.0mm tであり、エルボ部より約500mm内部に挿入されている。案内管根元部とスリーブ間のギャップでのナトリウムフリーズを効果的にするために円板状フィンを取り付け自然空冷した。流れは向流と並流が可能で、案内管と配管がつくる円環部を流れるナトリウム流速はFS-2と同じく、1,000ℓ/minのとき約3.2m/sである。FS-3での単体試験時は永久磁石式流量計FM-2にて流量がモニタされる。

向流における上流部配管長は図4.3に示すように、約32Dある。永久磁石式流量計FM-2

<sup>(註)</sup> 先端部溶接による内部へのたれ込みをさけるためと熱電対の応管性を良くするためであったが、FS-3ではたれ込みを最小にしてかつ突き合わせ溶接できた。

のつくり出す磁場は中心で約 240 ガウスなのでその効果は無視できる。従って、温度流速計案内管に至ったナトリウム流れは約 20  $l/min$  以上では充分発達した乱流とみなせる。

並流の場合はエルボの影響を大きく受けるが、案内管部での代表長さを  $D'$  ( $D'=D-D_w$ ,  $D$  は配管内径,  $D_w$  は案内管外径) とすると、エルボ部から温度流速計プローブ中心まで約  $6D'$  ある。

なお向流の場合はポンプ吸込側、並流の場合はポンプ吐出側に試験部が位置することになるが、1,000  $l/min$  (約 3.2  $m/s$ ) においてもポンプはなお十分余裕を持っているので、キャピテーション等による大巾な流量変動(圧力変動)はない。

図 4.3 には、案内管先端形状の効果を調べるために試験に供した 5 種の案内管も示してある。案内管先端形状と選定理由は次の通りである。

- (1) A 型(円柱状)：製作上最もシンプルな形状である。
- (2) B 型(半球状)：流れの中に置かれる物体形状として代表的なもの。
- (3) C 型(円錐状)：流れの抵抗が小さく、また流れの中に置かれる物体として代表的なもの。
- (4) D 型(半球状+フィン)：先端形状は B 型と同じだが、細径の案内管の横振動に対する補強効果と、一種の整流板としての効果を調べるため。
- (5) E 型(回転楕円体)：はく離をおこしにくいもの。(流線型に近い型で、円柱部分との接続が滑らかにつながる。)

なお、案内管根元は強度上とフリーズシールのため太くしてあり、スリーブ(28  $mm$  I.D.)とのギャップは両側で約 2  $mm$  である。この部分はまた案内管の位置決め役目もしており、エルボ部を先に製作し、案内管と配管の軸を正しく合わせた。案内管先端における 3 インチ配管軸からのずれは ±2  $mm$  以内である。

#### 4.3 7 集合体試験部

試験容器内には「もんじゅ」炉心上部の燃料頂部、整流管、バッフル板などの構造を模擬した 7 集合体試験部が収納されている。図 4.4 に 7 集合体試験部の概要を示す。頂部のみ実寸で模擬した 7 本の模擬燃料集合体の上方には冷却材温度と流量を監視するために炉心監視計装(すなわち今の場合渦電流式温度流速計)が各々設置できるように先端の閉じた案内管が装着されている。案内管の形状寸法は製作時期が同じである FS-2 のそれと同一である。

燃料集合体を出たナトリウムの流れを効率よく集めその温度や流速を検出するために円筒状の整流管(80  $mm$  I.D. × 200  $mm$   $l$ )が案内管と同軸に取り付けられており、その上方にはバッフル板がある。ここで流れは横方向に変流される。

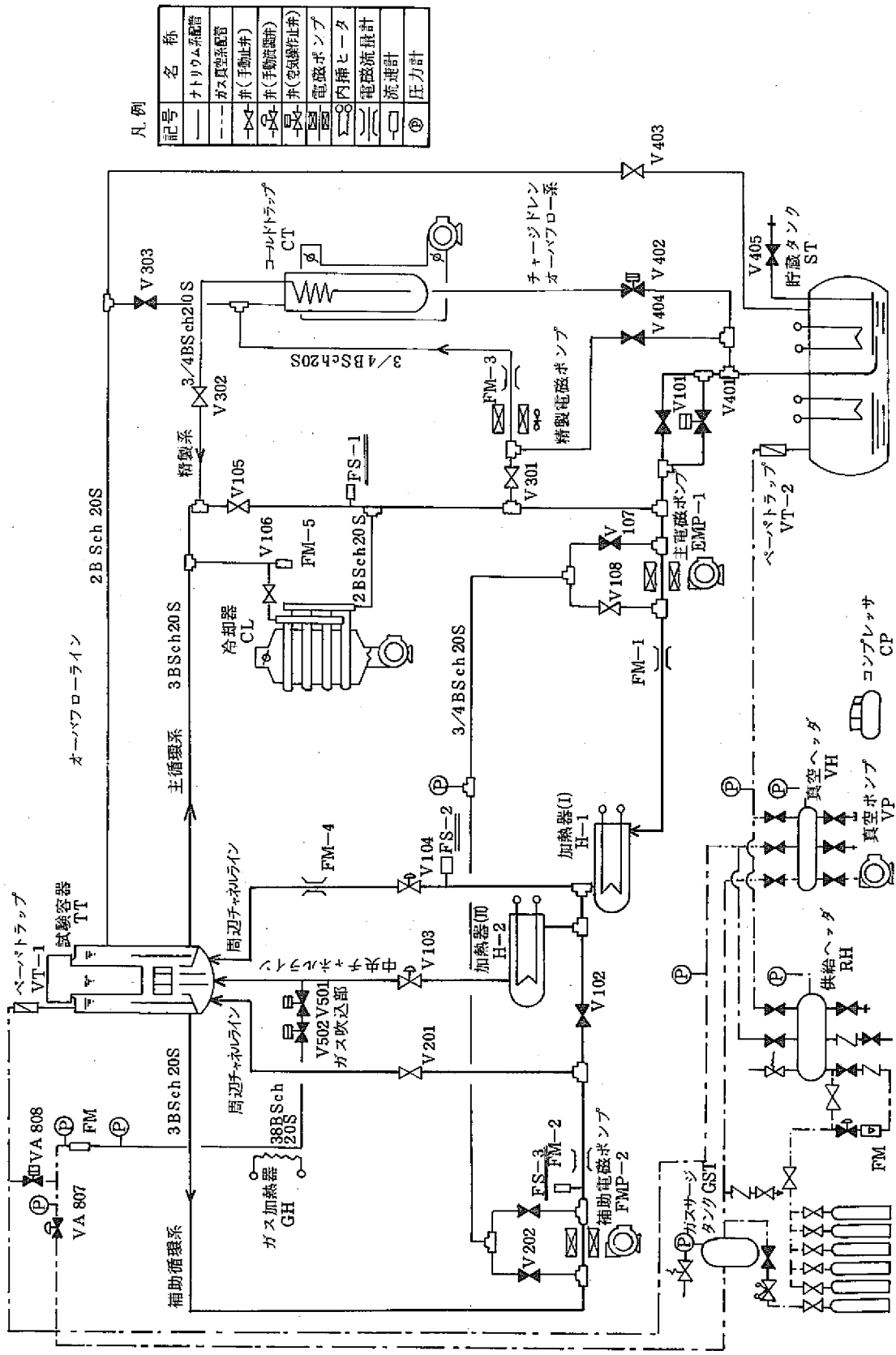
燃料頂部や整流管などの寸法は「もんじゅ」第 2 次概念設計値を使用している。

7本の模擬燃料集合体のうち、中央の1本は周辺6本と流路が隔てられているため、周辺とは異なった流量を流すことができる。すなわち周辺6集合体を正常流量が流れているときに、中央1集合体のみ燃料チャンネル閉塞等にもなり流量低下を模擬的に起こさせることができる。7集合体に合計2,800  $\ell/\text{min}$  (最大)まで流すことができ、中央集合体の流量低下率は0~100%まで可能である。この7集合体試験部を用いた冷却材流動試験については別途報告の予定であるので、ここでは以上の簡単な説明にとどめる。

#### 4.4 ボイド検出試験部

基本的に、7集合体中央チャンネルへのアルゴンガス吹込み部と、それを燃料集合体上方で検出するための7集合体試験部(前述)から成る。図4.1のフローシートにおいて、定圧用アルゴンガスサージタンク(GST)で加圧されたアルゴンガスは流量調節弁VA807により流量調節後、伝送器付のロータメータにて流量をモニタされる。このガス流量計の出力は、ガス温度の他ガス圧力にも依存するので流量計を通過するガス圧力はブルドン管式圧力計で測定される。その後ガス加熱器GHでナトリウム温度まで昇温された後、空気操作弁V502、V501を経て中央チャンネルラインのナトリウム中にノズル先端(2mm $\phi$ ×6個の穴を有する)から吹き込まれる。ガス吹込部の詳細を図4.5に示す。連続的にガスを吹き込む場合はV502、V501は両方とも開いたままであるが、単発的にガスを吹き込む場合はまずV502のみを開け、所定の温度圧力になるまで時間を置き、次にV502を閉めてからV501を開ける。ノズル先端はナトリウムの流れに対向する方向に開孔部を有しているが、これは流体中にボイドを吹き込む場合の一般的手法であり、ガスボイドに初速を与えないためでもある。

中央チャンネルに吹き込まれたガスボイドはナトリウムの流れに乗って7集合体の中央集合体頂部より出ていき上方に設置した温度流速計にて検出される。



凡例

記号	名称
—	ナトリウム系配管
---	ガス質量流量計
⊗	弁(手動止弁)
⊗	弁(変換流量計)
⊗	電磁ポンプ
⊗	内挿ヒータ
⊗	電流量計
⊗	流速計
⊗	圧力計

図 4-1 計測機器試験ループフローシート



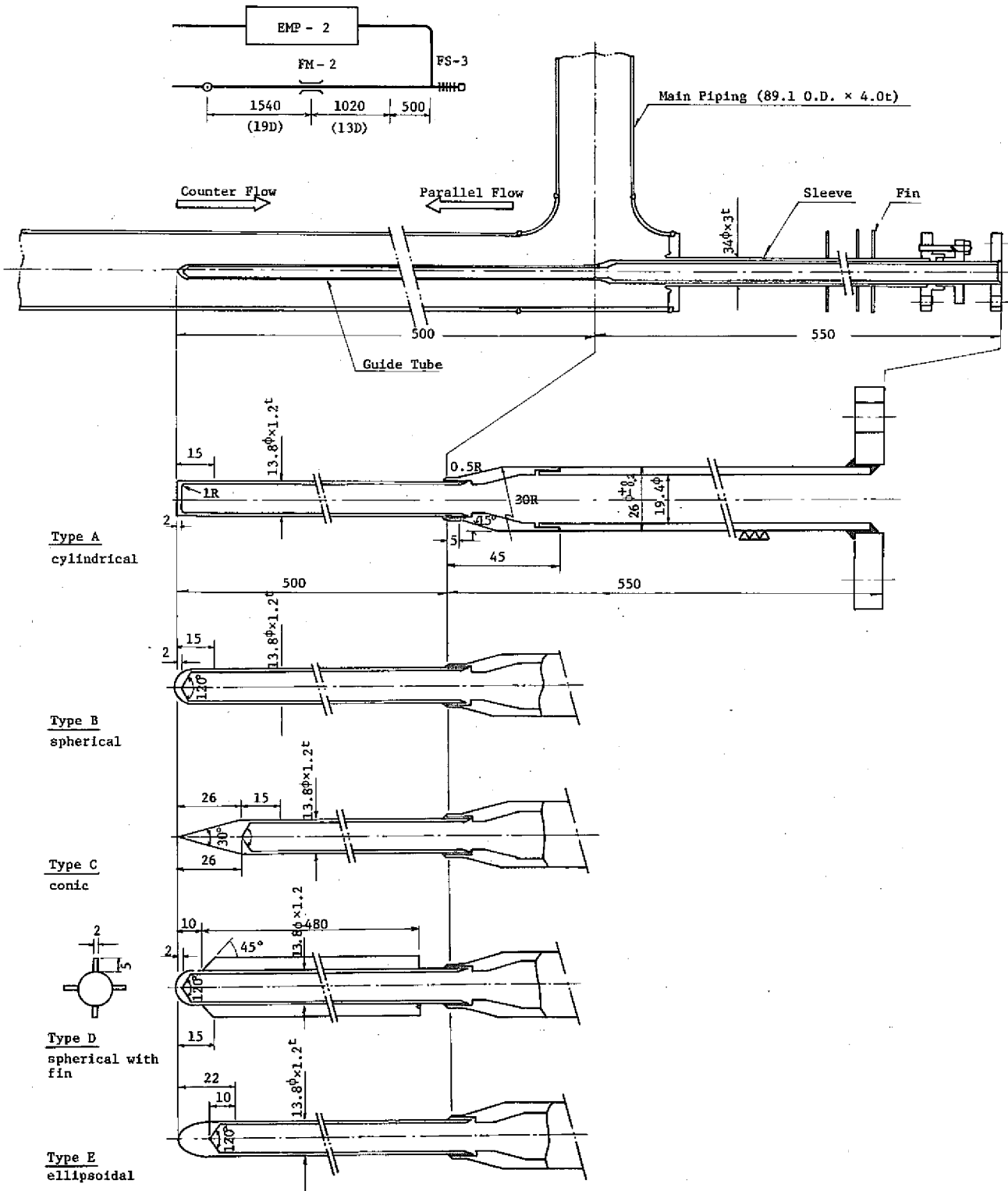
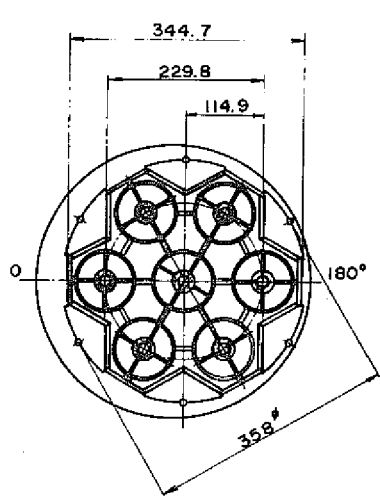
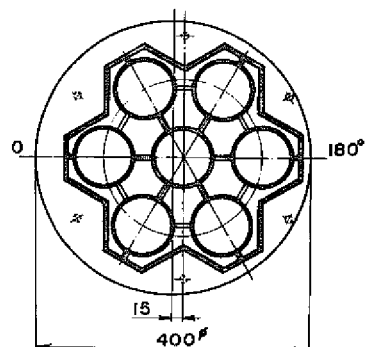


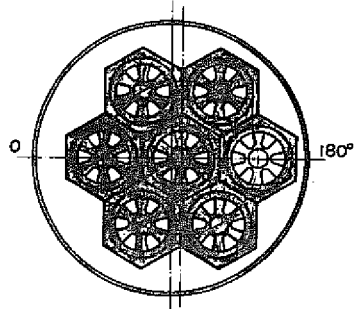
図 4.3 渦電流式温度流速計単体性能試験部 FS-3 と各種案内管



A-A'断面



B-B'断面



C-C'断面

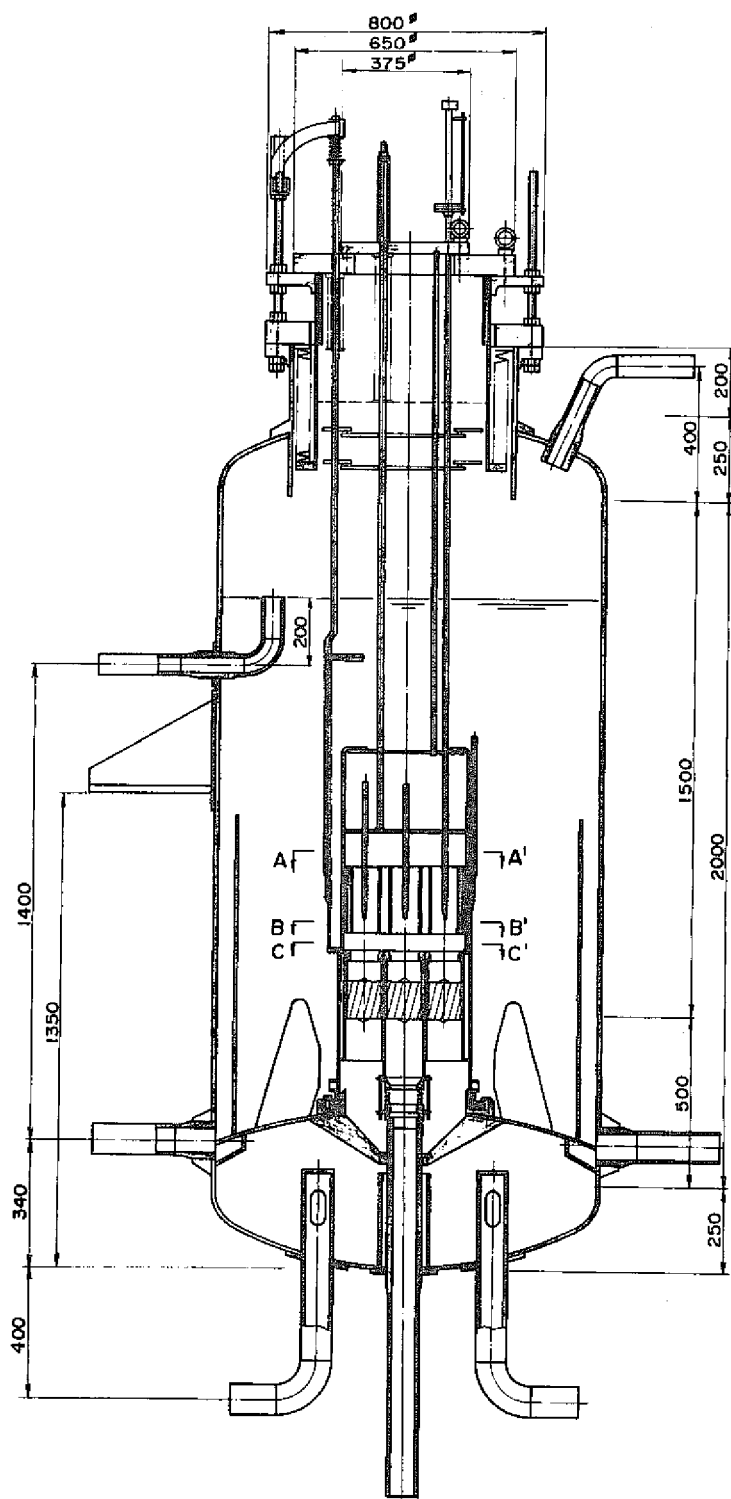
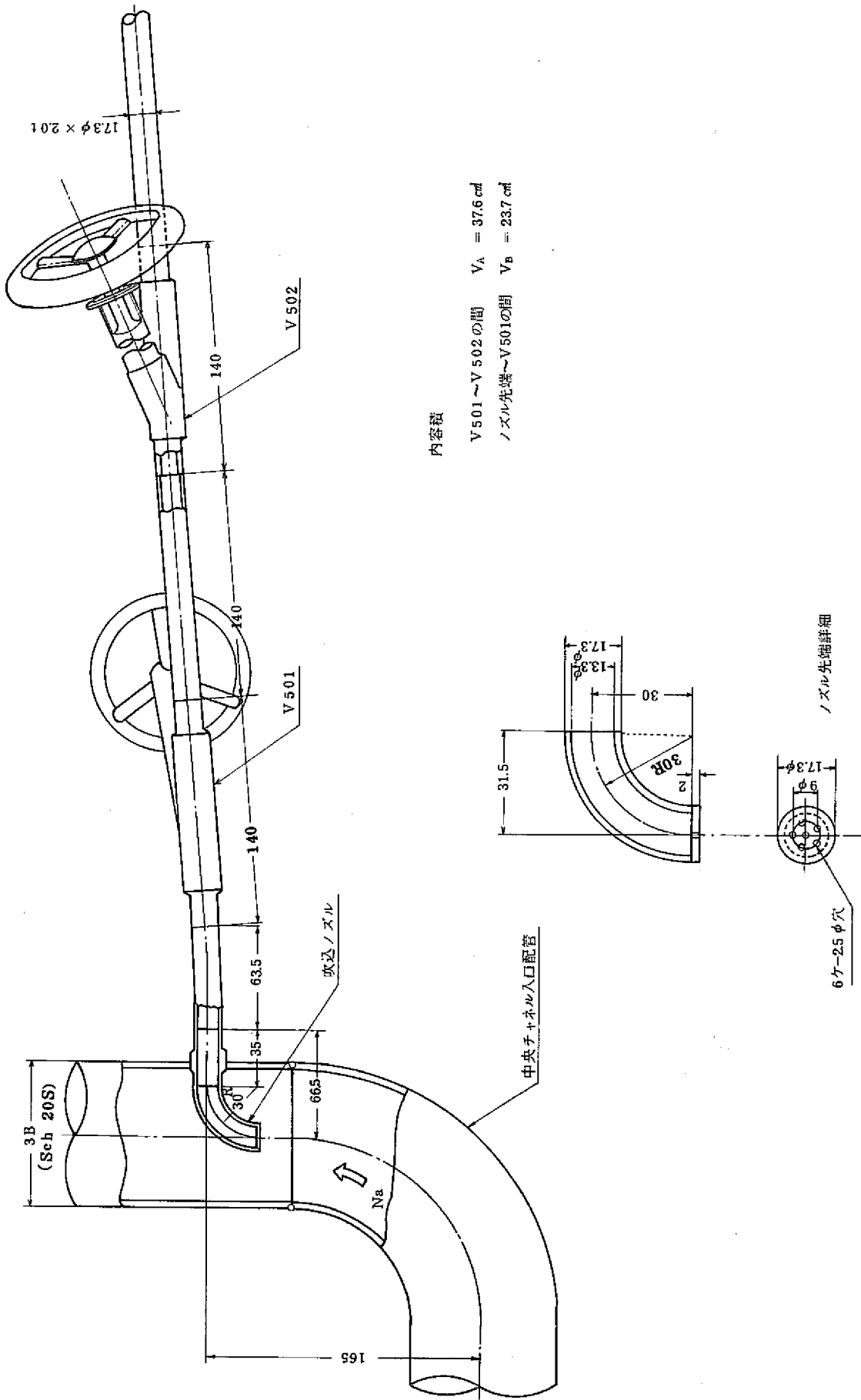


图 4.4 7 集合体試驗部



内容積  
 V501~V502の間  $V_A = 37.6 \text{ cm}^3$   
 ノズル先端~V501の間  $V_B = 23.7 \text{ cm}^3$

図 4.5 ガス吹込部



## 5. 流速検出特性

### 5.1 試験方法

渦電流式温度流速計MK-IIの流速検出特性は試験部FS-3を用いて実施された。<sup>(注1)</sup> 流量条件は補助電磁ポンプによって調節され、その時の流量は図4.3に示したように永久磁石式流量計FM-2(校正精度2%)でモニタされた。ナトリウムの流れの方向はポンプ電源の位相を切り換えることによって行なった。

プローブを挿入した案内管は流れの抵抗の少ない回転楕円体の先端形状を有するE型を用いた。プローブはそれに取り付けた熱電対の先端が案内管の底に密着するまで挿入され、プローブ温度(ナトリウム温度)はその熱電対により測定された。

測定系ブロック図を図5.1に示す。出力電圧と周波数をモニタされた外部発振器からの正弦波信号は検出回路部に送られ、ドライバ回路により定電流が1次コイル(励磁コイル)に送られる。外部発振器出力は $5V_{rms}$ に定められ、このとき1次コイルには48.1mAの電流が流れる。検出回路部からの流速出力信号 $E_F$ 、温度出力信号 $E_T$ 、基準流量計FM-2出力、プローブ内感熱電対出力が記録された。また、ドライバ回路出力電圧および差動増幅後の出力電圧(TP-4での電圧)、が常時シンクロスコープでモニタされた。一方、各2次コイル出力と差動増幅後の出力の各位相も励磁電流(TP-202での電圧)を基準にして測定された。

流速検出特性を把握するためには、ナトリウム温度と励磁周波数をパラメータとして、各ナトリウム流速に対する流速検出特性を把握する必要がある。ここでは、下記の条件にてパラメトリックに測定を行ない、励磁周波数特性、直線性、感度の温度依存性等を求めた。

ナトリウム温度	300, 400, 500℃
	(但し、温度補償特性は400~550℃)
ナトリウム流量	0, 250, 500, 750, 1000 $l/min$
	(0~約3.2 $m/s$ )
励磁周波数	25, 75, 125, 225, 325, 525, 1025 Hz <sup>(注2)</sup>
	(但し、一部、20, 60 Hz有り)
流れの方向	向流のみ

なお、特に断わらないかぎり、検出回路の流速信号用スパンは感度の絶対値算出と、再現性から最大に設定した。また励磁周波数の設定誤差は1 Hz以下であった。

<sup>(注1)</sup> 試験部の説明のところでも述べたように、主要な測定は改良型試験部FS-3の方で実施された。当初実施したFS-2での測定結果は参考として付録Bに示す。また本報告で記載した試験は付録Dに示した経過で行なわれた。

<sup>(注2)</sup> 励磁周波数は、商用周波数(50 Hz)の高調波の影響を少なくするように選んだ。

## 5.2 試験結果

### (1) 励磁周波数依存性

図 5.2 (a) に各ナトリウム温度における流速検出感度の励磁周波数依存性を示す。整流方式はダイオード整流としたが、この値は外乱ノイズによるオフセットの変化を除けば、同期整流で同期位相を最適（整流出力最大）となるように設定したことと同等である。

一般に流速信号出力  $E_F$  は次式で表わされる。

$$E_F = \varepsilon_F(f, T) \times v + \varepsilon_{OF}(f, T) \quad (5.1)$$

但し、  
 $\varepsilon_F$  ; 真の流速検出感度  
 $v$  ; ナトリウムの平均流速  
 $\varepsilon_{OF}$  ; 不平衡残留電圧

真の検出感度  $\varepsilon_F$  と不平衡残留電圧  $\varepsilon_{OF}$  はそれぞれ励磁周波数  $f$  と温度  $T$  の関数である。したがって図 5.2 (a) の各曲線は、(5.1) 式において  $\varepsilon_{OF}(f, T)$  をゼロになるように設定したわけであるから (5.1) 式の右辺第 1 項の  $\varepsilon_F(f, T)$  そのものになる。縦軸の感度  $\varepsilon_F$  は後述する出力/流速の直線性の勾配より求めた。

さて定まったナトリウム温度においては、流速信号出力が最大となる励磁周波数  $f_{max}$  が存在し、その値は 300℃ で約 60 Hz、400℃ で約 72 Hz、500℃ で約 82 Hz となった。ナトリウム温度の上昇とともに  $f_{max}$  が高周波数側に移行する傾向はこれまでのブローブと同様である。

以上は差動増幅後の交流信号をダイオード整流（あるいは最適同期整流）した場合であるが、比較的規模の大きいナトリウム施設が密集している当室の環境ではダイオード整流を使用することは外乱を考慮すると望ましくない。したがってデータ採取にあたっては同期整流を主として使用したが、流速信号用の同期整流回路は信号レベルが小さいであろうことを考慮して同期位相を自動追従させなかつたために、マニュアルで最適位相をさがす必要があつた。最適位相をマニュアルで選択することは、特に今回のようにパラメトリックな測定をする場合はかなりの手間を要し、かつ人為的要素が強いために再現性がやや不良であつた。したがって、同期整流の位相調節つまみを固定し、<sup>(注)</sup>最適位相時との差を把握しておいた。

図 5.2 (b) は同期位相つまみを固定した場合で、 $f_{max}$  は 300、400、500℃ でそれぞれ約 50、60、70 Hz であつた。

実際に使用する場合は流速検出感度がほぼ最大の励磁周波数が選択されるが、300~500℃ ではダイオード整流（同期位相最適）時と同期位相つまみ固定時とでは図 5.2 (b) に見る如く 50~80 Hz では大差ないので、以下特に断わらないかぎり同期位相つまみ固定時のデータを中心に示していく。

(注) この場合の同期位相は付録 B に示す通りである。

## (2) 直線性

流速検出感度  $\epsilon_f(f, T)$  は励磁周波数  $f$  とナトリウム温度  $T$  に依存するが、 $f$  と  $T$  が定まれば  $\epsilon_f$  は一定となる。

図 5.3 に同期整流位相を最適にしたときの流速信号の直線性を 300, 400, 500°C について示す。横軸は円環状流路における平均流速（以下同じ）、縦軸は流速信号出力である。

また図 5.4～5.6 に同期整流位相つまみを固定したときの直線性をそれぞれ 300, 400, 500°C について示す。

なお、流速ゼロにおける不平衡残留電圧を最少にするいわゆるゼロ調整が完全でない場合もあり、この時は回路出力値で最大 0.3 mV ( $f=75$  Hz で約  $1.3$  cm/s に相当) ずれてしまった。しかしこれはマニュアル調整にもなり人為的偏差であるから、図 5.3～5.6 ではこれをゼロになるように全体をシフトさせてある。

さて流速検出時の直線性は図 5.3～5.6 に示すように、励磁周波数やナトリウム温度に依存せず良好である。低流速域まで直線性を確認したのが図 5.4 の  $f=75$  Hz のデータであり、前回の試作品 MK-I より大巾に改善されている。図 5.7 は図 5.3～5.6 の直線性をより定量的に整理した図である。縦軸は回帰直線からの偏差をフルスケール値 ( $v=5$  m/s に相当する出力電圧で、各周波数、各温度で異なる) に対して % 表示したものである。同図から今回の測定範囲では  $\pm 1$  % 以内の良好な直線性を示している。低周波数 ( $f \lesssim 25$  Hz) および高周波数 ( $f \gtrsim 525$  Hz) では直線性がやや悪いが、実用的励磁周波数 ( $f=75 \sim 225$  Hz) では非直線性は  $\pm 0.3$  % 以内と極めて良好である。なお、本試作品 MK-II はフルスケールを  $5$  m/s と設定したが、実験結果から感度が想像以上に大きく、約  $3.5$  m/s 以上では増幅回路が飽和してしまった。しかしこれは増巾回路のゲイン変更のみの問題であるからフルスケール  $5$  m/s はそのままとしてある。したがって図 5.7 で得られた非直線性は約  $3.5$  m/s までのデータに対するものであるから多少過小評価している。

図 5.8 は整流方式と直線性との関係を示したものであるが、図に見る如く同期整流（位相調節つまみ固定）とダイオード整流とでは両者に差はなく、いずれも低流速域から高流速域に至るまで良好な直線性を有している。なお、図中の「◎」印は規格化点を表わしている。これは同期整流時とダイオード整流時とで回路定数が異なりゲインに差があるためである。ダイオード整流方式ではサイリスタなどによるノイズのため流速ゼロのときでも流速信号出力を完全にゼロにすることができなかった。したがって、図 5.8 ではノイズ分（約  $3.6$  cm/s に相当し、図では縦軸目盛で約 0.01 分）を下にシフトさせて表示してある。

## (3) 検出感度とその温度依存性

(5.1) 式における流速検出感度  $\epsilon_f(f, T)$  は図 5.3～5.6 において各直線の勾配から求

められる。

図 5.9 はそのようにして求めた検出感度をナトリウム温度依存性の形で整理したものである。同図で「○」印は同期整流位相調整つまみを固定した場合であり、「●」印は同期整流位相最適のとき、「×」印はダイオード整流時のものである。

これから感度は  $f = 75 \text{ Hz}$  前後で最大となり、そのとき温度依存性も最小になることがわかる。

このことは、図 5.2 において温度上昇とともに感度曲線のパターンは高周波数側に移行していくので、励磁周波数を固定してながめると、必ず検出感度に関して上に凸の山形曲線を示し、ピークすなわち検出感度の温度依存性が最も少ない部分が存在すると言える。図 5.9 で、 $f < 75 \text{ Hz}$  では温度依存性が負で、 $f > 75 \text{ Hz}$  では正となっている。したがって  $300 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$  の温度範囲では“感度が最大”でかつ“感度の温度依存性が最少”となる最適励磁周波数  $f_{OP}$  を  $75 \text{ Hz}$ <sup>(注)</sup>と定めることができる。

このようにして選んだ励磁周波数  $75 \text{ Hz}$  では、ナトリウム温度  $300 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$  のとき感度は検出回路入力換算値でそれぞれ表 5.1 に示すようになった。

本回路構成では同期整流の位相はマニュアル調節により行なうので、温度が変化するたびに最適位相をさがすのは非現実的である。しかし、本プローブのように検出感度が十分あれば位相を自動追従させることも可能であるので、「●」印のデータはそのように回路変更がなされた場合のデータと見ることができる。当然ながら「●」印と「×」印は良く一致している。

同期整流位相固定時と、ダイオード整流時とは感度の値だけでなくその温度依存性も異っている。これは後述するように流速信号ベクトルが励磁電流に対して温度上昇とともに時計方向に回転する結果、位相固定した同期整流時の出力は常に流速ベクトルの位相に無関係なダイオード整流時の出力とは違ってくるからである。ダイオード整流では  $f = 75 \text{ Hz}$  のとき  $305, 404, 498 \text{ }^\circ\text{C}$  でそれぞれ感度  $1.34, 1.34, 1.30 \text{ mV/m/s}$  となった。

実際にはナトリウム温度が変化すると、感度ばかりでなく不平衡残留電圧（(5.1)式第2項）も変化するので、流速信号出力  $E_p$  の変化はもっと大きくなる。流速信号出力の温度依存性とその温度補償特性は次項で述べる。

#### (4) 温度補償特性

前述したように、本検出回路構成では(5.1)式の  $\epsilon_{OP}(f, T)$  のみが温度補償の対象となる。

図 5.10 に  $f = 75 \text{ Hz}$ 、 $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  で不平衡残留電圧がゼロになるように調整し、後述の温度検出信号にて温度補償をかけた時の流速検出信号出力  $E_p$  (図 5.10(a)) と不平衡残留電圧

$\epsilon_{OP}$  (図 5.10(b)) を示す。図中の「○」印は温度補償をかけないときの値、「●」印は温度

(注)  $f = 50 \sim 80 \text{ Hz}$  で選定すれば良いが、商用周波数 ( $50 \text{ Hz}$ ) の高周波の影響も考慮に入れて  $f = 75 \text{ Hz}$  とした。

補償をかけたときの値で、「△」印は温度補償操作が容易になるようにゼロ点を移動させた温度検出信号  $E_T$  である。ナトリウムを一定流速  $1.7 \text{ m/s}$  ( $\approx 500 \text{ l/min}$ ) で流し、ナトリウム温度を  $300 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$  の間で変化させ、流量(流速)は永久磁石式流量計 FM-2 出力からその温度補正をした上で求めた。また流速信号への温度補償量の最大値が回路上小さな値になっており、補償量が不十分であったので、回路定数を  $1/10$  に変え、流速検出感度も  $1/10$  (すなわちスパンを  $1/10$ ) に変更した。

図 5.10(b) は  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  から  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  に下降させたとき、不平衡残留電圧  $\varepsilon_{OP}$  がほぼゼロの値から  $-3.8 \text{ mV}$  まで単調に減少しているのに対し、温度補償(補償値はダイヤル設定  $5.00$ , 温度信号  $E_T$  の約  $10\%$  をフィードバック)をかけたときは、 $500 \text{ }^\circ\text{C}$  から  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  で高々  $-0.03 \text{ mV}$  しか変化していない。フルスケールを  $5 \text{ m/s}$  とし、スパンが  $1/10$  になっていることを考慮すれば、この変化はフルスケールの約  $0.25\%$  に相当する。一方  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  から  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  の範囲では補償がききすぎて、フルスケールのほぼ  $1\%$  に達しているが、これは補償設定値を  $5.00$  より小さくすれば、 $400 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$  で約  $0.5\%$  におさえることは可能と判断される。

図 5.10(a) は不平衡残留電圧を含んだ流速検出信号の値を示しているが、 $400 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$  では流速検出感度の温度依存性も含めて約  $2.5 \text{ cm/s}$  (フルスケールの  $0.5\%$ ) の変化におさまっており、温度補償をかけないときの変化約  $1\%$  より良くなっている。 $500 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$  ではやはり温度補償のかけすぎのため、不平衡補償変化分(図 5.10(b) で  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  に対して約  $-0.08 \text{ mV}$  すなわちフルスケールの約  $0.7\%$ ) だけ  $E_T$  に出力低下がみられる。これは温度補償量をもっと小さい値に選べば解決される問題であるが、試行錯誤的に補償量の設定とナトリウム温度変化を繰り返さなければならないので、今回は日程上の制限からこれ以上の操作はあきらめた。

なお図 5.10(a) において  $T \approx 353 \text{ }^\circ\text{C}$  で流速信号出力  $E'_p$  ( ' はスパン変更を意味する。 ) に小さな不連続が生じている。この温度はニッケルのキュリー点に相当するが、本プローブではニッケルは引出し線にしか使われておらずその寄与は小さいと考えられるので今後の検討が必要である。

##### (5) 位相振幅特性

2 個の 2 次コイル出力の位相振幅特性を観測しておくことは、流速信号および温度信号の基本的特性を把握する上で重要である。

図 5.11 に 2 次コイル信号<sup>(注)</sup>の位相振幅特性を励磁信号 (TP-202 での値) を基準(実軸)にしてベクトル表示した結果を示す。図 5.11(a) は  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  を例として下流側の 2 次コイル信号 ( $S_2$ ) と、上流側の 2 次コイル信号 ( $S_1$ ) のベクトル差として流速信号 ( $E_p$ ) が表わされることを示している。図中の一点鎖線は流速ゼロの時のベクトルを示すが、 $\psi = 0$  のとき

(注) 図 3.4 検出回路部構成ブロック図の観測点 TP-1 および TP-2 における値である。したがってこの位置では両信号のバランスは完全にはとられていない。

$S_1$ と $S_2$ は原理的には全く重なり一点鎖線で表わしたベクトルに一致するはずである。しかし実際には2つの2次コイル間の不平衡が存在し、その値は温度や周波数に依存するが、本検出器の場合位相差( $\Delta\phi$ )で高々 $1.7^\circ$ 、振幅差( $\Delta A=|S_2|-|S_1|$ )で高々5%である。不平衡度は $f=125\sim 225\text{Hz}$ で位相、振巾ともに最少となる。図5.11(a)ではこれら不平衡度は十分小さいので無視して表わした。3.2節で述べたように、 $S_1$ と $S_2$ の不平衡は電子回路でバランスがとられる。

さてベクトル $S_1$ は流速の増加とともに位相は進み、振巾は小さくなる。一方ベクトル $S_2$ は位相が遅れ、振幅は増加する。図5.2(b)、および図5.4~5.6で示したデータは平たく言えば2次コイル信号のベクトル差 $E_F$ を実軸に投影した量にほぼ相当し、一方図5.2(a)および図5.3で示したダイオード整流(または同期整流位相をその都度調節し $E_F$ と同位相にして求めた)結果は $E_F$ の絶対値そのものに相当する。

温度一定では、基本的に図5.11(a)の $S_1$ 、 $S_2$ 、 $E_F$ で示される三角形の形状は保たれ、さらに励磁周波数一定なら流速が変化しても $E_F$ の位相はほとんど変化しない。このことから、 $S_1$ と $S_2$ の位相差 $\Delta\phi$ も、2次コイル信号のスカラー差も $E_F$ と同様流速 $v$ に比例することが推測される。

また $S_1$ と $S_2$ のベクトル和で表わされる $E_T$ は温度信号として利用されるが、平行四辺形の定理より、 $E_T$ は流速に依存しないことが図5.11(a)からわかる。

図5.11(b)は同様のベクトル図を温度依存性としてまとめたものである。図から温度変化とともにベクトル $E_F$ はその大きさだけでなく位相も変化していることがわかる。

図5.12は検出回路部の観測点TP-3とTP-4における位相を示したもので、TP-3はベクトル和 $E_T$ の位相を、TP-4はベクトル差 $E_F$ の位相に概当する。但し、TP-4はベクトル差の他に、不平衡補償信号を加えた後のものであり、図5.11(a),(b)で示した不平衡補償前の結果とは若干異なる。これから流速信号の位相は励磁周波数の増加とともに単調に減少していることがわかる。また図5.19に示すように、 $f=75\text{Hz}$ 、 $225\text{Hz}$ では流速の増加により $2.5\text{m/s}$ を越えるとTP-4での信号の位相が約10度変化することが観測され、非直線性が表われる前兆ではないかとも推測されるが、これ以上の流速では増幅回路が飽和してしまったので、確認できなかった。

図5.12から言えることは、温度が一定なら励磁周波数の増加とともにTP-4での位相は進み状態から遅れ状態へと移行し、位相がゼロすなわち励磁電流と同相となる周波数 $f$ は最大感度を示す周波数 $f_{max}$ とほぼ等しい値をもつ。また温度の上昇とともに、 $f$ も高周波側に移行し、図5.2の周波数特性が温度上昇とともに高周波側に移行する様子に対応してい

る。一方TP-3での位相がゼロとなる励磁周波数は次章で述べるように温度信号出力 $E_T$ が最大になる周波数にほぼ対応している。

さて、2つの2次コイル信号間の位相差 $\Delta\phi$ は、図5.13に示すように、 $f \approx 125\text{Hz}$ で流速依存が最大となり、2次コイル信号間の位相の不均衡がほぼゼロとなった周波数( $f = 225\text{Hz}$ )でも流速依存性は大きい。位相差 $\Delta\phi$ は図5.14から明らかのように、流速 $v$ に直接比例し、この直線性はナトリウム温度や励磁周波数に影響されない。

図5.15から流速対位相差の勾配(=位相差感度) $\epsilon_\phi$ は励磁周波数とナトリウム温度に依存し、前者については $f \approx 225\text{Hz}$ で $\epsilon_\phi$ が最大となり、後者については温度上昇とともに $\epsilon_\phi$ は逆に小さくなっている。 $\epsilon_\phi$ が最大となる周波数が温度信号 $E_T$ (TP-3)の位相が励磁電流と同相になる周波数に対応している点は興味深い。

さらに2次コイル信号のスカラー差(ベクトル $S_1$ ,  $S_2$ の振幅の差,  $\Delta A$ )は図5.16に示すように、ベクトル差(図5.2)と同様の励磁周波数依存性を示しているが、感度はやや低くなっている。振巾差 $\Delta A$ も流速 $v$ に比例し図5.17に示すようにその直線性はナトリウム温度や励磁周波数に依存しない。振巾差対流速の勾配 $\epsilon_A$ は図5.18に示すように $f = 75\text{Hz}$ 近傍で温度変化に対して平坦になっている。

### 5.3 検 討

#### (1) 励磁周波数依存性

流速検出感度は1次コイルに流れる電流だけでなく、その周波数にも依存する。相互誘導においては2次コイルに生ずる誘起電圧は1次コイルを流れる電流の時間変化(すなわち時間微分)に比例するので、角周波数 $\omega$ ( $\omega = 2\pi f$ )の励磁電流の場合、検出感度は $\omega$ に比例する。一方流速検出は流体中に浸透した交流磁場と速度ベクトルとの外積によってもたらされる誘導電流(渦電流)に依存するので、浸透深さ $\delta$ ( $=\sqrt{2/\mu\sigma\omega}$ )をもう1つの目安とすることができる。ここで $\mu$ は透磁率、 $\sigma$ は導電率である。

前者は $\omega$ の単調増加関数であるが、後者の効果は単調減少関数であり、結局ある角周波数のところで最大値をもつ。(30)

さらにボビン材に強磁体を使用した場合はボビン材への磁場の侵入の程度によって出力の大きさは変化する。この磁気抵抗の変化はボビン材の比透磁率、導電率および角周波数に依存し、 $\omega$ が大きくなると磁気抵抗が増加する。したがって磁性体ボビンを用いた流速計では感度が大きくなる反面、最大感度を示す周波数 $f_{max}$ が低周波数側に移行することになる。

## (2) 直線性

ナトリウム温度 500℃, 流速 3m/s のとき代表長さ  $d$  を案内管外径 1.38 mm とすると, <sup>(注)</sup> 磁気レイノズル数  $R_m$  は流体の導電率  $\sigma$  と透磁率  $\mu$  を用いて次式で表わされる。

$$\begin{aligned} R_m &= \mu \sigma v d && (5.2) \\ &= 0.194 \end{aligned}$$

$R_m < 1$  なので, 導電性流体中を流れる渦電流によってもとの磁場が歪められる程度は十分小さいことがわかる。<sup>(33)</sup> このことは直線性に関しては重要で, 付録 O で示したように, 2 次コイルに誘導される電圧の振幅と位相は流速によってわずかしか変化しないことが基本となる。

また直線性のもう 1 つの基本は 2 つの 2 次コイル信号間の振幅と位相のバランスをとることである。本電子回路の場合, 振幅と位相ともにバランスをとるための回路が用意されており, 直線性は良好である。

なお励磁周波数によつては流速信号ベクトル  $E_r$  の位相が, 流速が大きくなると変化が大きくなる場合もあり (図 5.19), この程度がひどくなるとやはり直線性が悪くなりうることも考えられる。しかし約 3.4 m/s を越える流速では増幅回路での飽和現象により, 現段階では断定できなかった。

## (3) 検出感度とその温度依存性

流速検出感度  $\varepsilon_r(f, T)$  は励磁周波数  $f = 50 \sim 80 \text{ Hz}$  (300~500℃) で最大となり,  $f = 75 \text{ Hz}$ , 400℃ で  $1.34 \text{ mV/m/s}$  の回路入力換算検出感度を得た。これは単位電流当りの検出感度になおすと  $27.9 \text{ mV/A/m/s}$  となる。

検出感度は, 付録 O で示したように, 温度とともに単調減少する項 (位相差感度) と温度とともに単調に増加する項 (振幅差感度) を含む。したがって温度依存性を最少にするには, 励磁周波数を選択する必要がある。この最適周波数は比較的容易に求めることができるが, 数 100℃ の広い温度範囲をカバーするには最適周波数の選定だけでは不十分である。

## (4) 温度補償特性

最大感度を与える励磁周波数  $f_{max}$  は, 温度依存性が比較的小さい最適周波数  $f_{op}$  と一致するので, 400~500℃ においては  $f_{op} (\approx f_{max}) = 75 \text{ Hz}$  としておけば温度変化の影響は感度に対してほとんど影響を及ぼさない。上記のように比較的狭い温度範囲においては, 検出感度の温度依存性は十分低くおさえることができるが, 不平衡残留電圧 ((5.1) 式第 2 項) が大巾に変化するので, 温度検出信号により温度補償をかけた。その結果は 400~550℃

<sup>(注)</sup> 交流磁場では半径方向の磁束密度はほぼ指数的に減少するので, 代表長さは案内管のみ考慮に入れた。



で、出力変化をフルスケールの1%以下におさえることができる確信を得た。

市広い温度範囲にわたって検出感度を一定に保つには今後の改善が必要である。例えば励磁周波数をわざと $f_{0p}$ よりずらし、使用温度範囲内で感度が単調増加（あるいは単調減少）するようにして、後述の温度信号を利用して、不平衡残留電圧のみならず感度そのものにも温度補償をかけることも考えられる。あるいは導電率の変化に応じて励磁周波数を変化させる方法も考えられる。

#### (5) 位相・振幅特性

基礎的特性を把握するために2個の2次コイル信号の位相ならびに振幅特性を調べ、定性的検討を付録Cで行なった。

これらの結果から次のことが言える。

- ① 流速信号 $E_p$ の非直線性は、高流速域では磁場歪の非線型化、低流速域では上流側と下流側の2次コイル信号間の振幅と位相のアンバランスによって生じる。ここでの試験範囲（0～約3.4m/s）では後者による非直線性が重要になり、本検出器ではプローブの製作時にバランスを十分考慮した上に、電子回路的にも振幅と位相のバランスをとったので、低流速域での直線性の大巾な改善がなされた。
- ② 導電性流体中を流れる渦電流はまわりの磁場分布を歪ませるが、2次コイル信号に表われる誘起電圧で言えば、その位相と振幅の相方が変化する。すなわち流速 $v$ により下流側2次コイル信号は振幅が増加し、位相は遅れるのに対し、上流側2次コイル信号は振幅が減少し、位相は進む。この様子は図5.11に簡単に示されている。
- ③ 流速 $v$ によって生じる2次コイル信号間の振幅差と位相差はともに $v$ と直線関係にある。したがって本検出回路のように2次コイルからの交流信号同志を直接引算する（ベクトル差をとる）以外に、直流化してから差をとる（スカラー差をとる）方法もある。付録Cで検討したようにスカラー差をとると直線性の面では2次コイル信号間の位相バランスにまつわる問題が除外されるので利点があるが、励磁周波数が高い場合は検出感度がベクトル差よりかなり小さくなる欠点がある。
- ④ 流速信号の情報の1つとして2次コイル信号間の位相差を直接測定することもできる。単位流速当りの位相差感度がやや小さいことと温度依存性が大きいのが難点であるが、付録図B-15に示すように特にS/N比が良い（流れの乱れ等による流速信号の時間的変動分が小さい）のが特長である。これは図5.12において、流速信号ベクトル $E_p$ は流速変動以外に導電率の変化をもたらす原因（たとえば温度変動やボイド通過）によって2次信号ベクトル $S_1$ や $S_2$ の振幅が変化しても影響を受けるが、位相差 $\Delta\phi$ には $S_1$ 、 $S_2$ の振幅変化は影響を及ぼさないからである。

## (6) 非磁性ボビン型流速計との比較

本報告はコイルボビン材として磁性体を用いた検出器の特性を調べることに主眼であるが、参考のため、非磁性ボビン（ステンレス鋼）を使用した非磁性ボビン型流速計との比較を簡単に述べる。

プローブ寸法形状と構成はこれまで述べてきた磁性ボビン型流速計と基本的に同じであるが次の4点で異なる。

- (i) コイル寸法が1次コイル20mm、2次コイル各々15mmと大巾に短くなっていること。
- (ii) ボビン中心に熱電対を装着していないこと。
- (iii) コイル寸法を縮めたかわりに励磁電流を約3倍（150mA）と大きくしていること。
- (iv) 検出信号レベルが小さいので、検出回路の増巾率を約4.5倍さらに大きくしていること。

図5.20(a)に500℃における磁性ボビンの場合<sup>(併)</sup>と非磁性ボビンの場合の励磁周波数特性の比較を示す。なお、縦軸の値は最大値で規格化している。すでに述べたように磁性ボビンの場合は最大感度を示す周波数 $f_{max} \cong 82\text{Hz}$ であるのに対して、非磁性ボビンでは $f_{max} \cong 1.25\text{kHz}$ と高くなっている。これは磁性ボビン（鉄心）の有効断面積がその透磁率と導電率と周波数によって左右されるためと考えられる。すなわち既に述べたように周波数が高くなるにつれて磁性体に浸透できる磁界の有効距離が減少し、磁気抵抗率が大きくなり、 $f_{max}$ が結果的に低周波数側に移行するものと考えられる。プローブの材質や寸法等によって流速信号の励磁周波数のパターンは異なるが、これまでの測定結果から正規分布を参考にした次式

$$y = \exp \left[ - \frac{(\ln f / f_{max})^2}{2n^2} \right] \quad (5.3)$$

を当てはめると、図5.20(b)のように、(5.3)式の形で整理できることがわかる。なお縦軸はピーク値で規格化してある。

図5.21は非磁性ボビンの場合と、磁性ボビンの場合について500℃における検出感度と直線性の比較を行なったものである。いずれも $f \cong f_{max}$ に設定している。非磁性の場合も直線性は一応良好であるが、低流速域（ $\leq 0.8\text{m/s}$ ）で直線性がやや悪くなっている。両者の検出感度を直線性が保たれている範囲で比較すると、非磁性ボビンでは $\epsilon_p = 27.5\mu\text{V}/\text{m/s}$ であるのに対して、磁性ボビンでは $1.32\text{mV}/\text{m/s}$ （いずれも同期位相最適時）となる。両者は励磁電流値が異なるので、単位電流当りの検出感度になおすと、それぞれ $0.183\text{mV}/\text{A}\cdot\text{m/s}$ 、 $27.4\text{mV}/\text{A}\cdot\text{m/s}$ となり、磁性ボビンを採用することによって、コイル寸法に違いはあるが感度が約150倍大きくなっている。

(併) 他との比較のため、ダイオード整流した図5.2(a)を使用した。

## (7) MK-I 温度流速計との比較

MK-I も MK-II もボビンに磁性体（純鉄）を用いているが、図 5.20(a)に示すように最大感度を示す励磁周波数  $f_{max}$  は各々 1450 Hz, 82 Hz と大巾にかけ離れている。

なお MK-I は不平衡残留電圧が大きいので、ここではその値を差し引いて示した。 $f_{max}$  が MK-II では MK-I に較べて小さくなったのは主としてコイル径が大きくなったためである。

次に直線性についてみると、図 5.21 から明らかなように、MK-II は低流速域で直線性が改善されている。

コイル構成とコイル径が異なるが、感度は MK-I の  $1.42 \text{ mV/A} \cdot \text{m/s}$  に対して、MK-II では  $27.4 \text{ mV/A} \cdot \text{m/s}$  となり約 19 倍改善されている。これは両者の単位長さ当りのコイル巻数がほぼ等しいので、主にプローブの径（コイル径とボビン径）が大きくなったことによる。

## (8) ナトリウム中不純物の影響

ナトリウム中の不純物特に酸素の影響については、本試験ではほとんどの場合 200°C 以下でコールドトラップを働かせており、實際上影響を及ぼさないことは文献 (36) で検討した通りである。

## (9) 導体の導電率の最大感度周波数との関係

表 5.2 に温度変化によって変化した導電率  $\sigma$  と最大感度を与える励磁周波数  $f_{max}$  との関係を示す。

表 5.2 から  $f_{max}$  の変化はナトリウムの導電率  $\sigma_{Na}$  の逆比に大略一致していることがわかる。しかし厳密には  $f_{max}$  の比は  $\sigma_{Na}$  の逆比よりやや小さくなっている。これはコイルとナトリウムの中にステンレス製 (SUS304) の案内管が存在する結果と考えられる。表 5.2 の ( ) で示したステンレスの導電率の比を考慮すると、 $f_{max}$  の比は  $\sigma_{Na}$  の逆比と  $\sigma_{sus}$  の逆比の中間の値になっていることがわかる。

ナトリウム中への磁場の浸透深さ  $\delta_{Na}$  を次式で定義すると、

$$\begin{aligned} \delta_{Na} &= \sqrt{\frac{2}{\mu_{Na} \sigma_{Na} \omega_{max}}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_{Na} \sigma_{Na} f_{max}}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

300~500°C で  $\sigma_{Na} = 2.7 \sim 2.9 \text{ cm}^{-1}$  なる。

## (10) 再現性

流速検出におけるデータの再現に関しては不平衡残留電圧に由来するものと検出感度に由来するものが考えられる。

不平衡残留電圧のドリフトは温度によるものと回路上のものに分けられる。前者は当計測機器試験ループにおいて流速ゼロでのゼロ調整（不平衡除去操作）をすると、どうしてもナトリ

ウム温度が下がってしまうことも影響している。経験を積んでこの操作時間を最少にした結果ナトリウム温度は流動試験時より2℃程度しか下がらず、結果的に回路のドリフトも含めた再現性は出力電圧で0.5mV以内となったが、この値はフルスケール値の約0.4%に相当する。しかし、一度ゼロ調整した後長期間のドリフトはナトリウム施設でなくても実施できること、また試験時間の都合上測定しなかった。短時間(半日)の総合的安定性は付録図B.13に示した通り良好であった。

検出感度の再現性に寄与する因子としては、励磁電流、励磁周波数、基準流量計の感度はその主なものである。励磁周波数は±1Hz以内で設定できその影響は無視できる。基準流量計FM-2は安定した出力を示し、また別の基準流量計(絶対校正済み)と常に比較されており、±2%以内で平均流速を算出できる。励磁電流については回路構成上常にモニタできなかったが、そのかわりに、ドライバ回路への外部発振器入力電圧がモニタされた。この電圧と励磁電流との間には比例関係がある。

図5.2.2に検出感度の再現性を示す。「○」印は1976年10月(第6回試験)に測定したもので、「△」印は同年7月(第5回試験)に測定したデータである。第5回試験と第6回試験の間ではナトリウムは一旦ドレンされており、<sup>(注)</sup>測定系も接続をはなし解体している。 $f=75\text{Hz}$ と $125\text{Hz}$ における値がやや再現性悪く最大3%ずれている。差の主な原因は、外部発振器電圧が不平衡除去操作にともなう負荷変動により変化するが、これを正しい値に再調整する際に生じたものと考えられる。回路の若干の改良によりこれは容易に防ぐことができよう。なお励磁周波数依存性の再現性は図5.2(b)に示した通りである。

(注) 付録D参照

表 5.1 流速検出感度

$I=48.1\text{mA}$ ,  $f=75\text{Hz}$ ,  $\epsilon_F : \text{mV/m/s}$

ナトリウム温度 \ 整流方式	ダイオード整流	同期整流 (位相最適)	同期整流 (位相つまみ固定)
300℃	1.34 (305℃)	1.35 (305℃)	1.29 (301℃)
400℃	1.34 (404℃)	1.35 (404℃)	1.34 (404℃)
500℃	1.30 (498℃)	1.32 (498℃)	1.31 (501℃)

表 5.2 最大感度を与える励磁周波数と導電率の関係

$T_1 > T_2$

Temperature	$f_{max}$	$\frac{f_{max}(T_1)}{f_{max}(T_2)}$	$\frac{\sigma_{Na}(T_2)}{\sigma_{Na}(T_1)}, \left(\frac{\sigma_{SUS}(T_2)}{\sigma_{SUS}(T_1)}\right)$
300℃	60Hz	} $\frac{72}{60} = 1.20$	$\frac{5.87}{4.64} = 1.27$
400℃	72Hz		$\left(\frac{1.09}{1.02} = 1.07\right)$
500℃	82Hz	} $\frac{82}{72} = 1.14$	$\frac{4.64}{3.74} = 1.24$
			$\left(\frac{1.02}{0.97} = 1.05\right)$

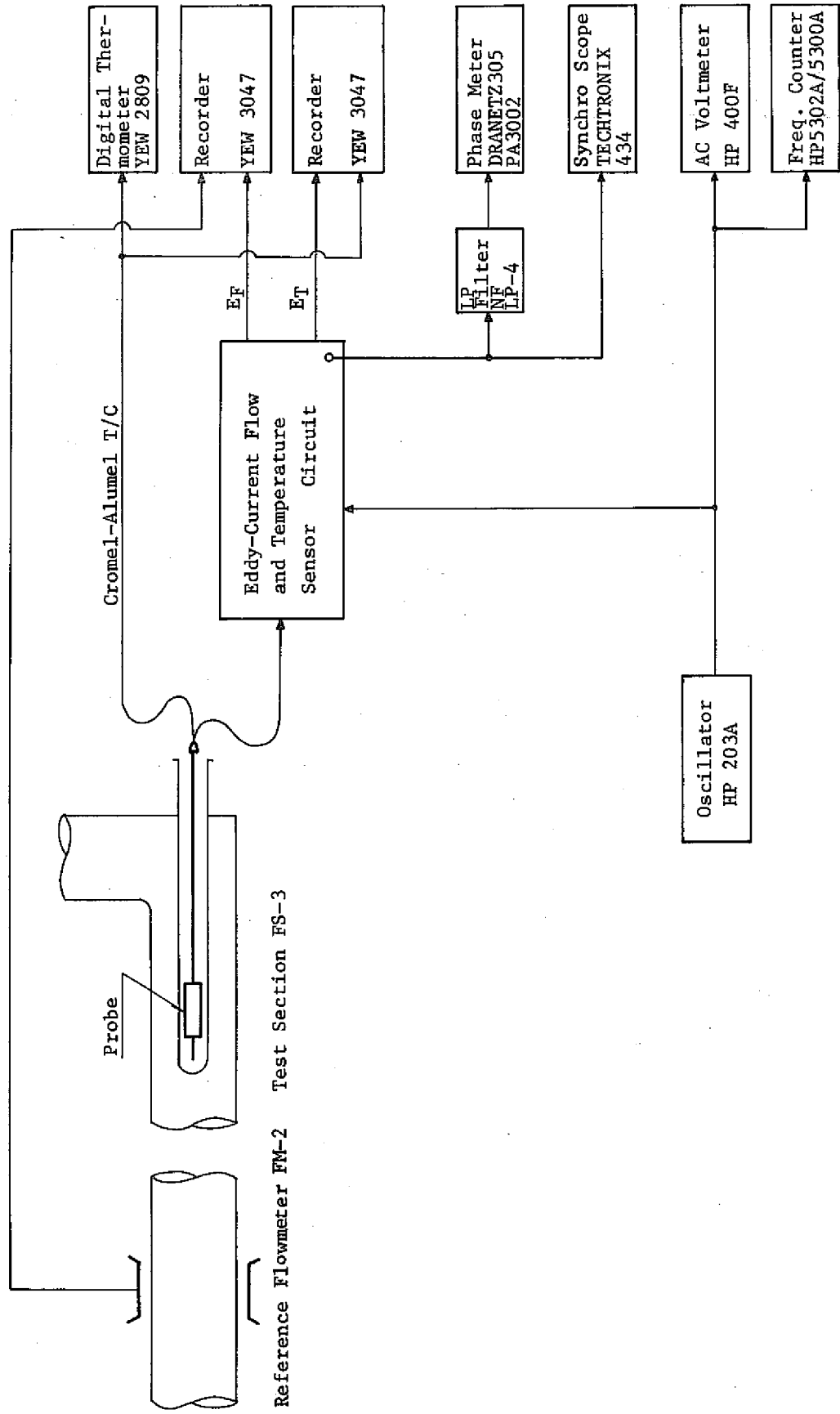


図 5.1 渦電流式温度流速計単体試験における測定系ブロック図

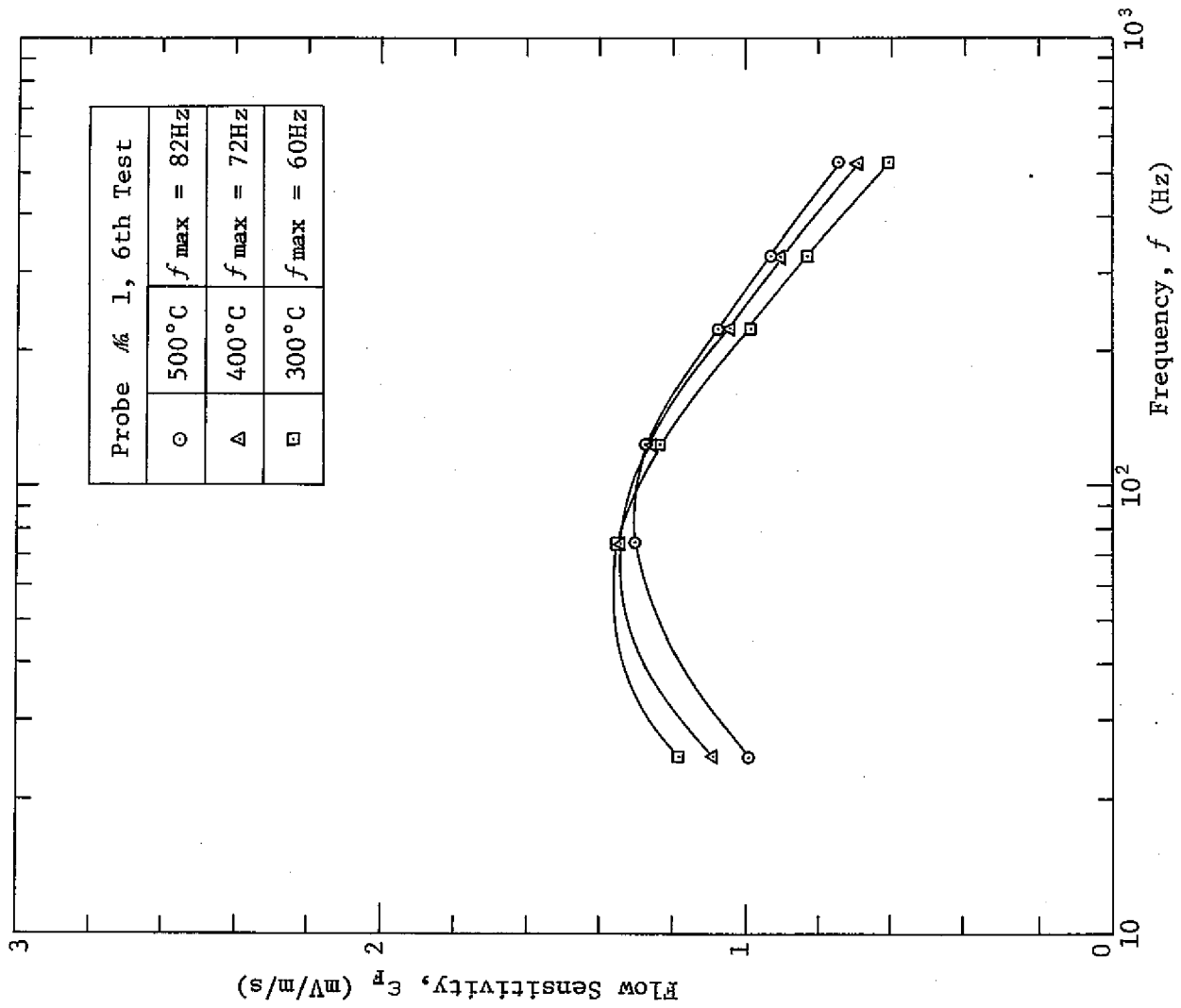


図 5.2 (a) 流速信号出力の励磁周波数依存性 — ダイオード整流の場合 —

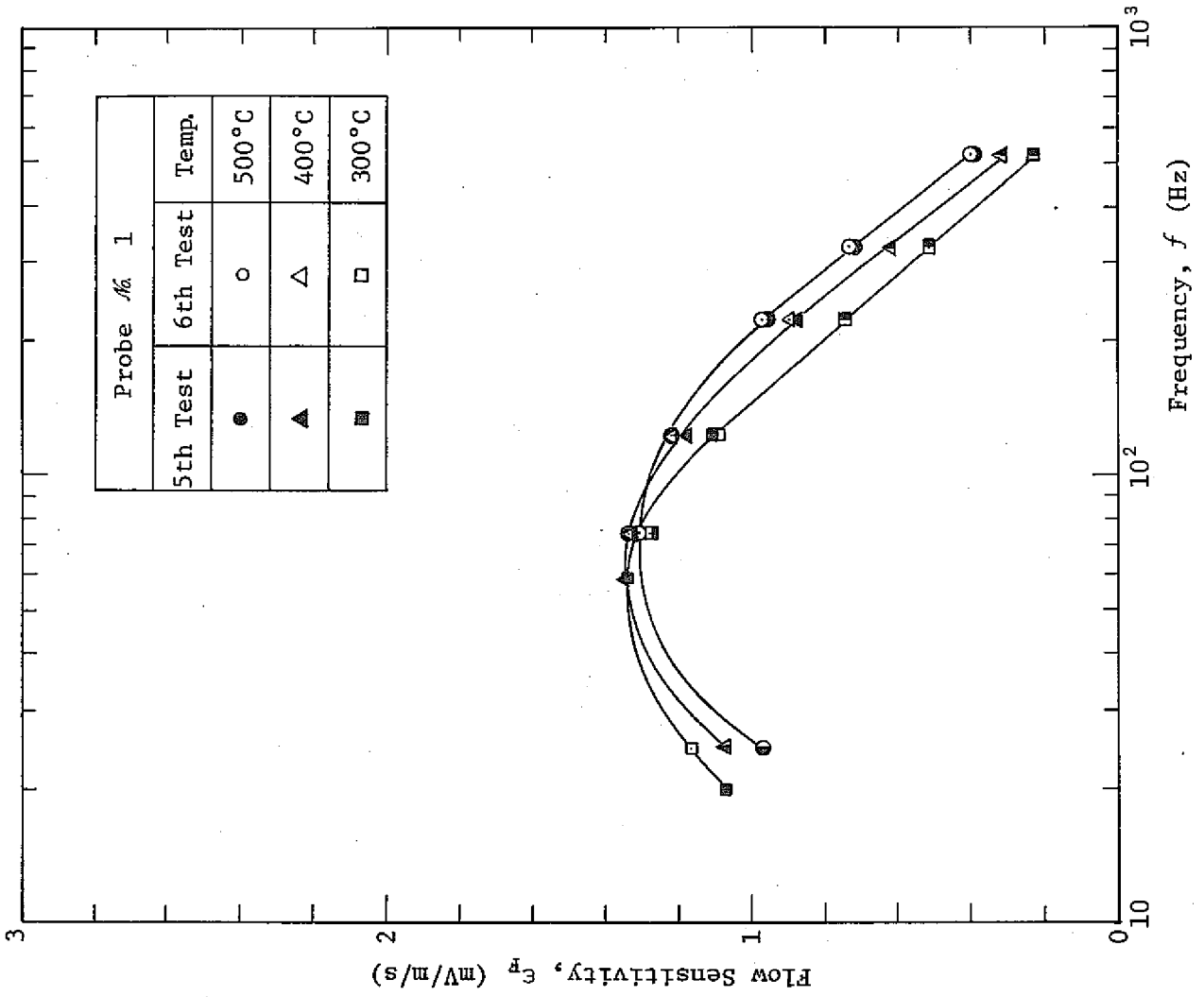


図 5.2 (b) 流速信号の励磁周波数依存性—同期整流位相つまみ固定した場合—



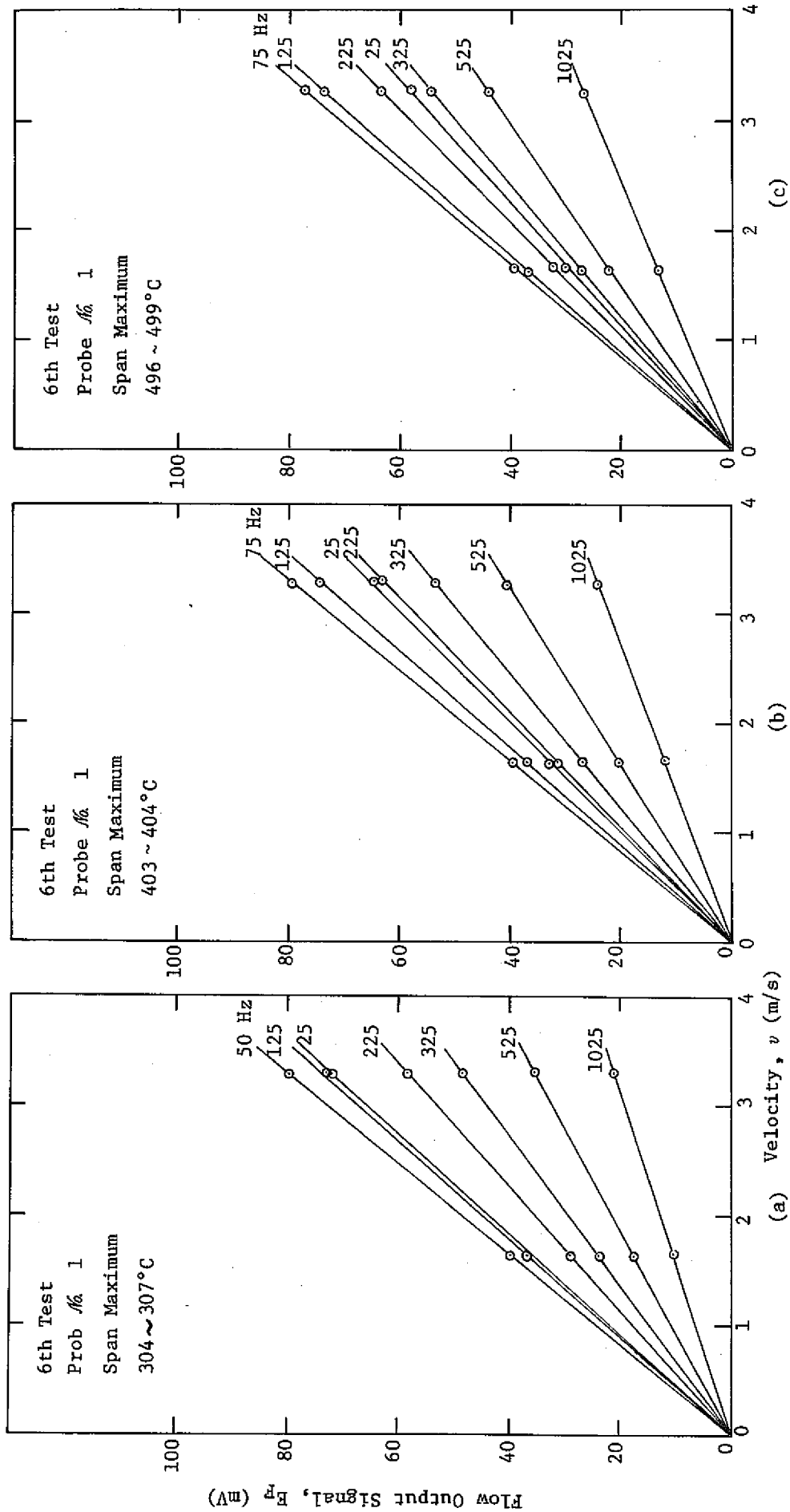


図 5.3 流速信号の直線性—同期整流位相を最適にしたとき—

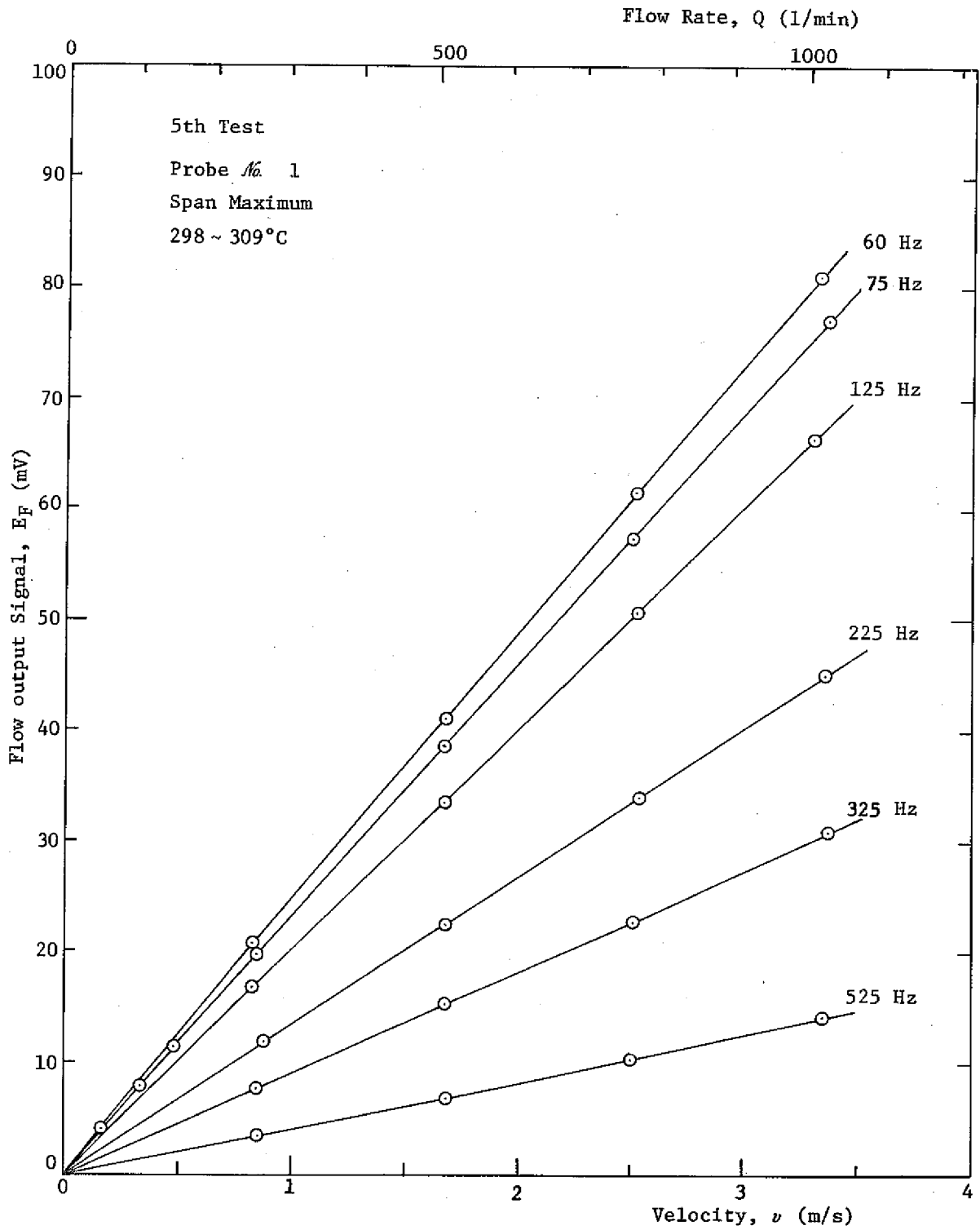


図 5.4 流速信号の直線性 ( 300°C )

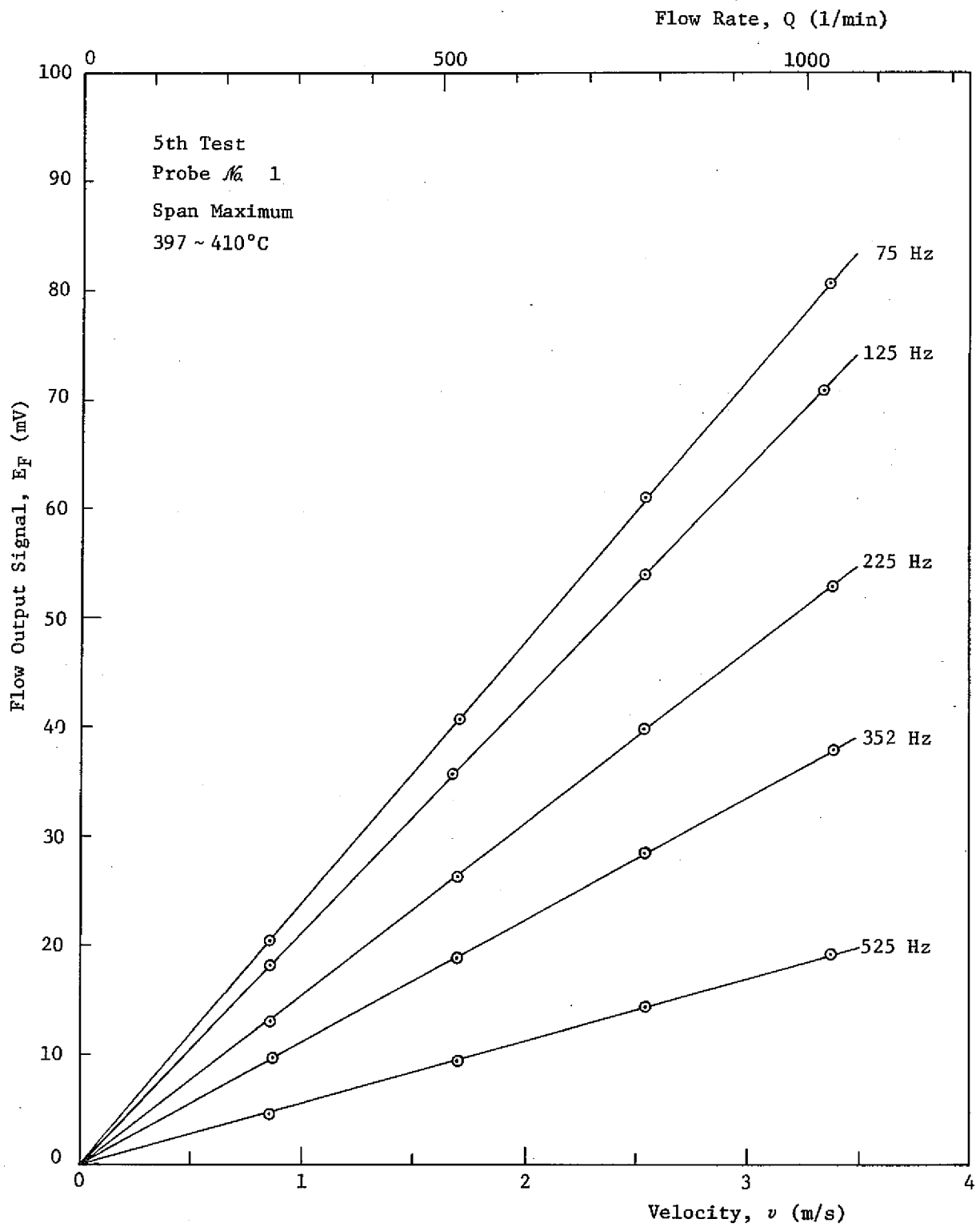


図 5.5 流速信号の直線性 (400°C)

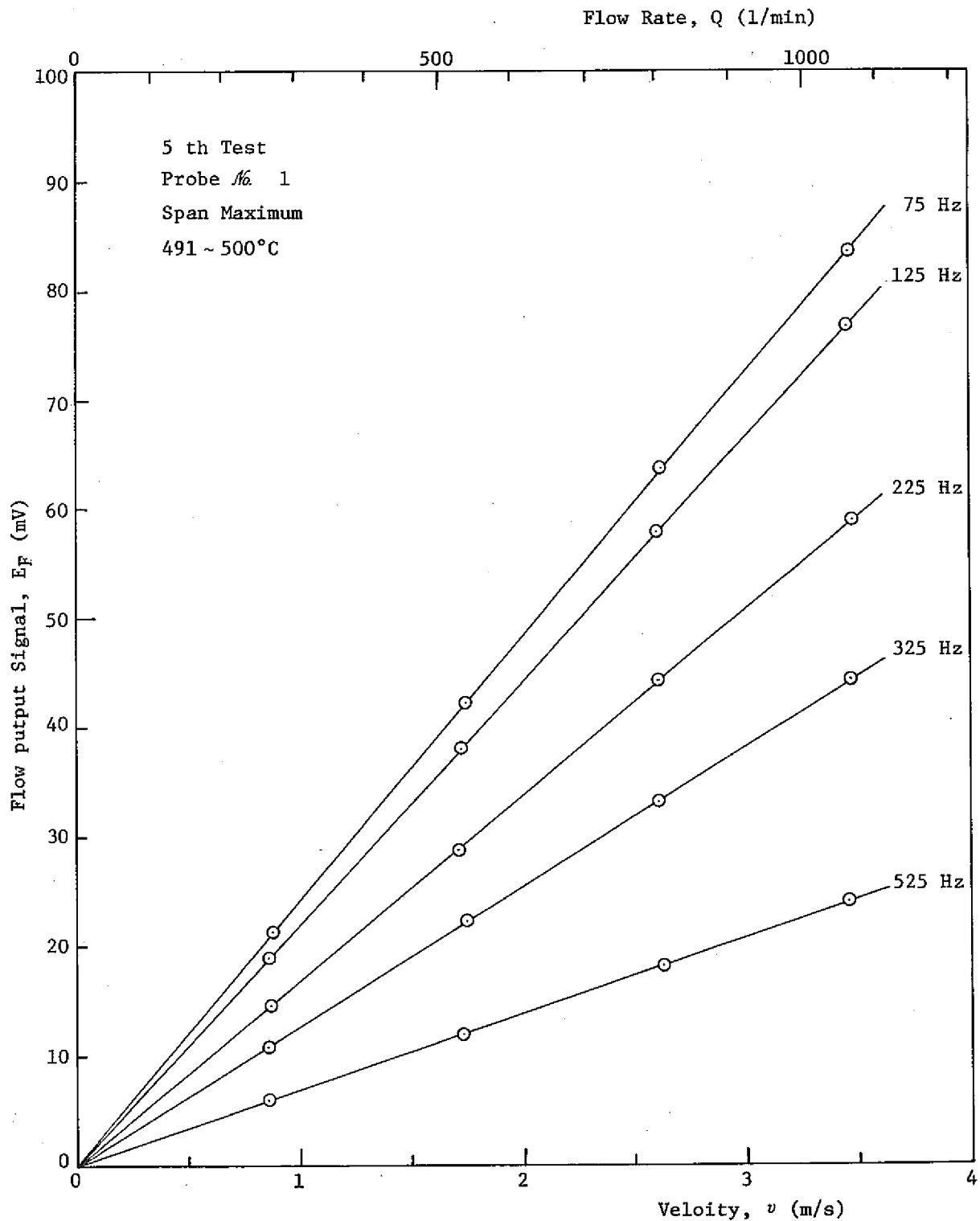


図 5.6 流速信号の直線性 (500°C)

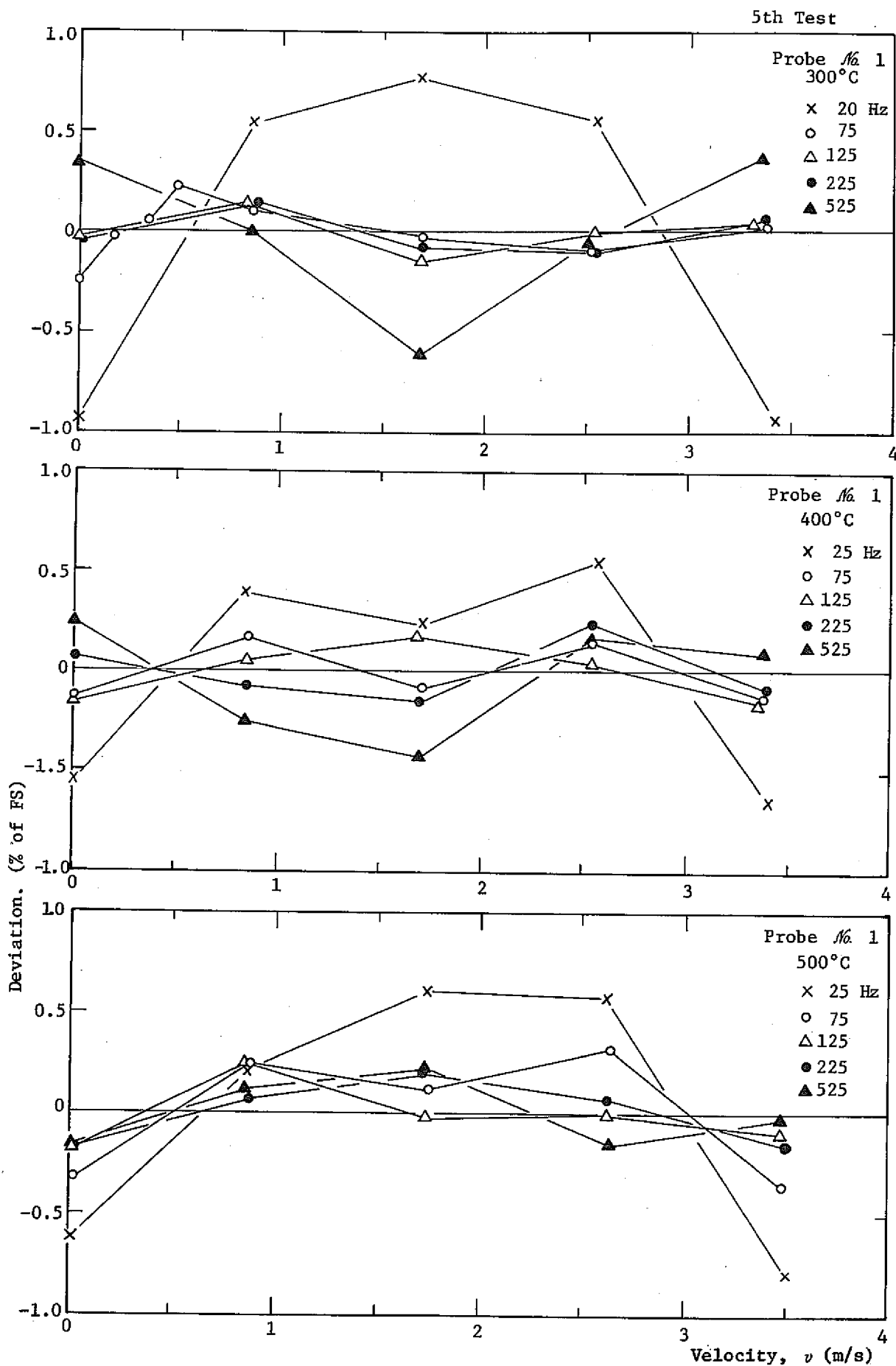
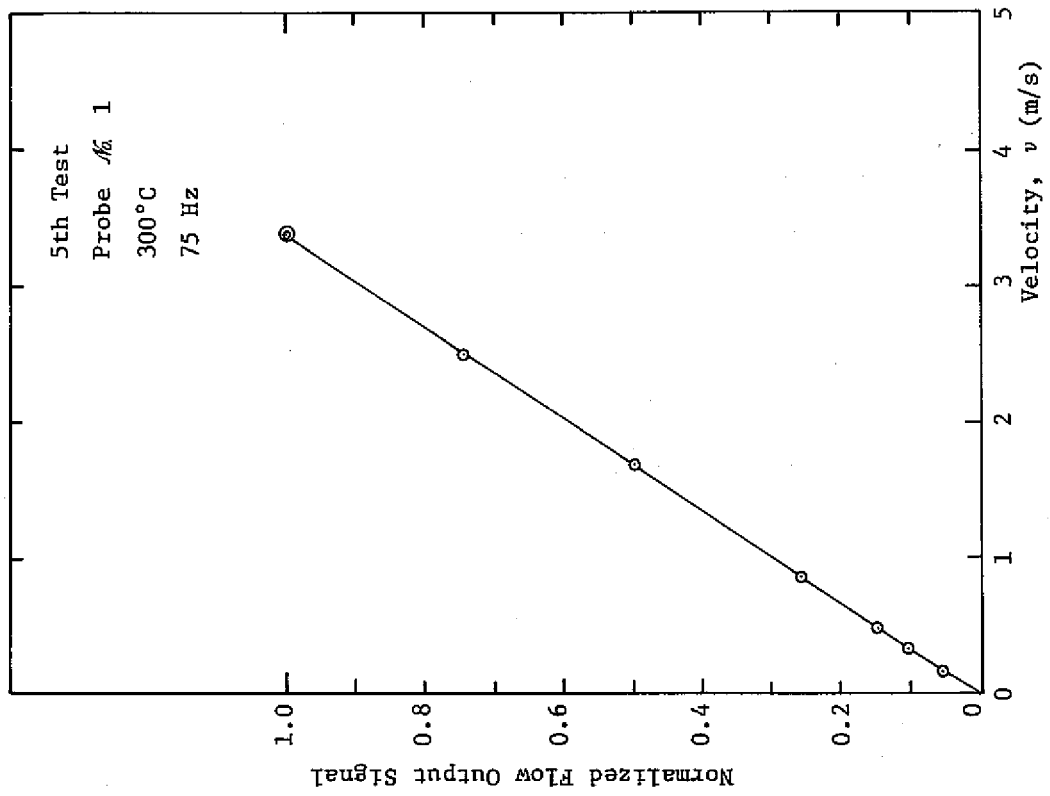
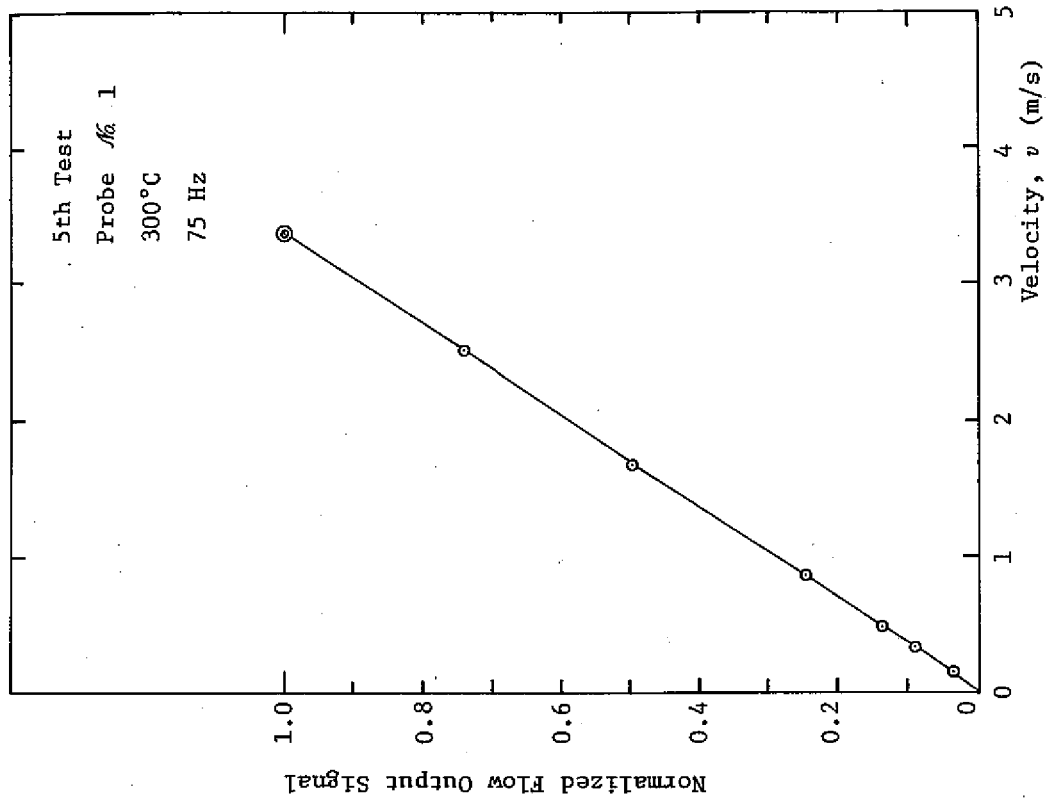


図 5.7 流速信号出力の直線性一回帰直線からの偏差



(a)同期整流の場合

(b)ダイオード整流の場合

図 5.8 整流方式と直線性

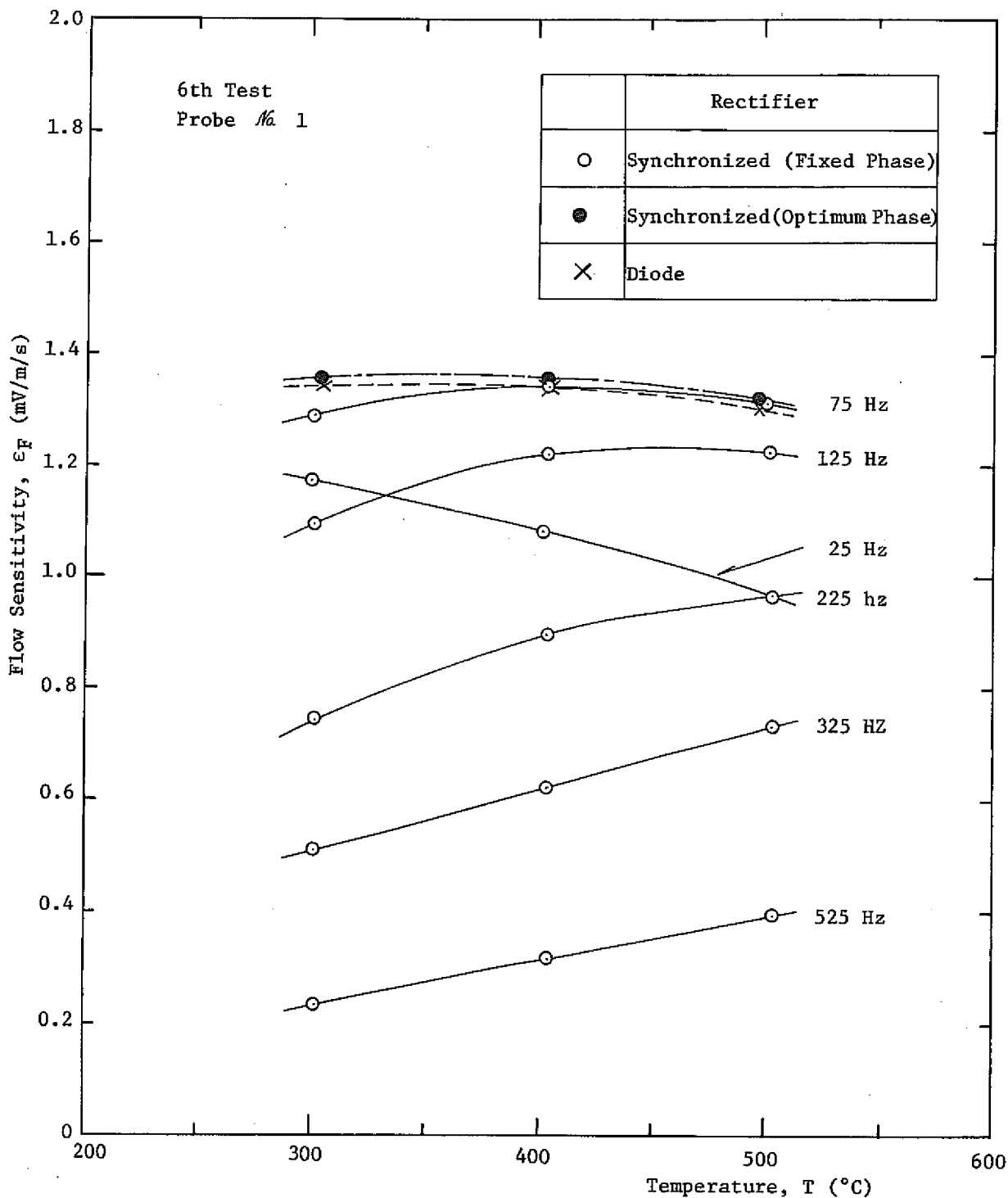
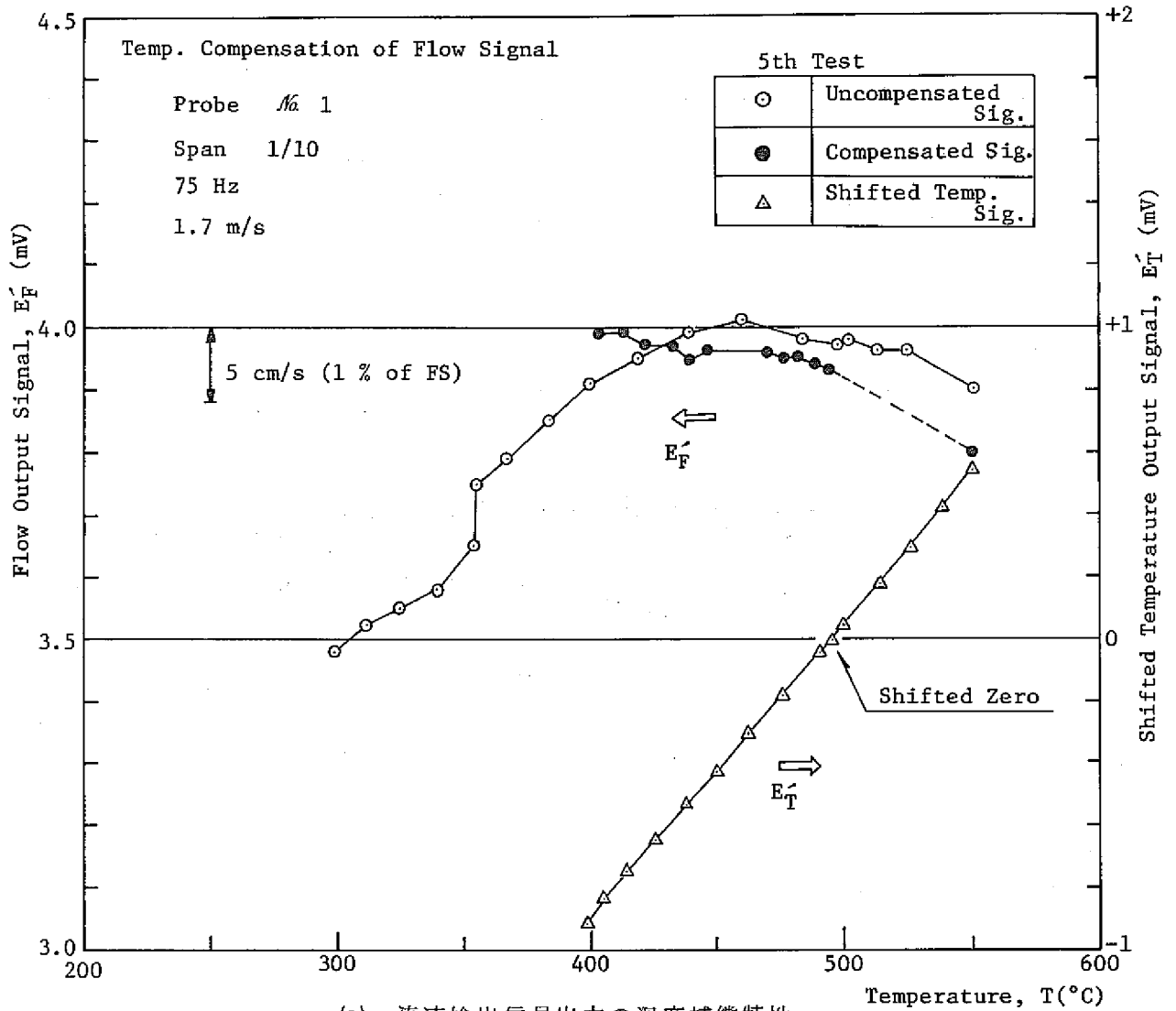
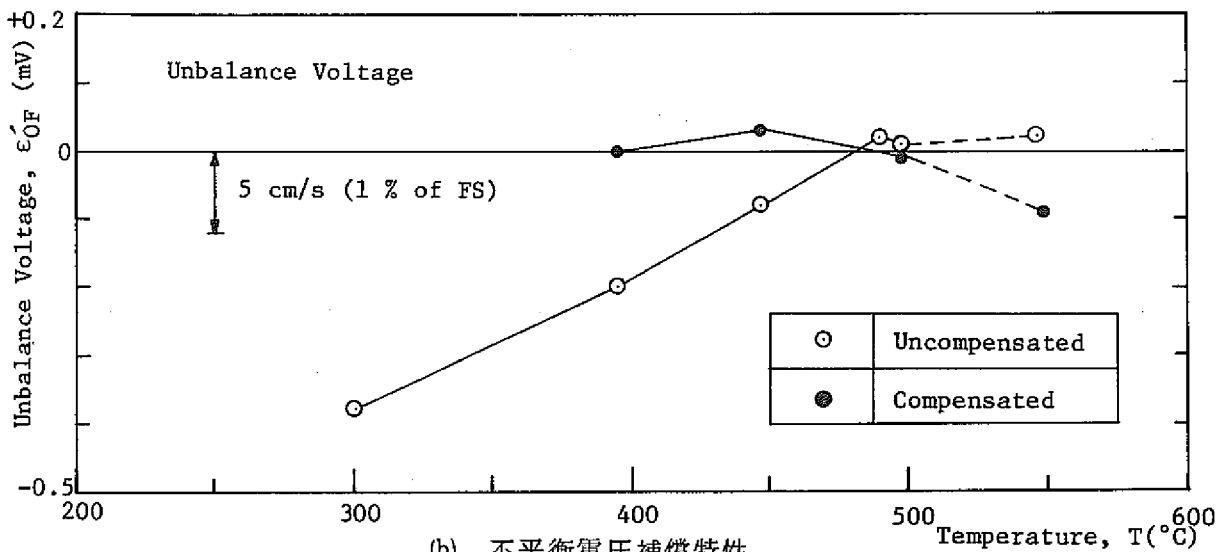


図 5.9 流速検出感度の温度依存性



(a) 流速検出信号出力の温度補償特性



(b) 不平衡電圧補償特性

図 5.10 流速検出信号の温度依存性と温度補償特性



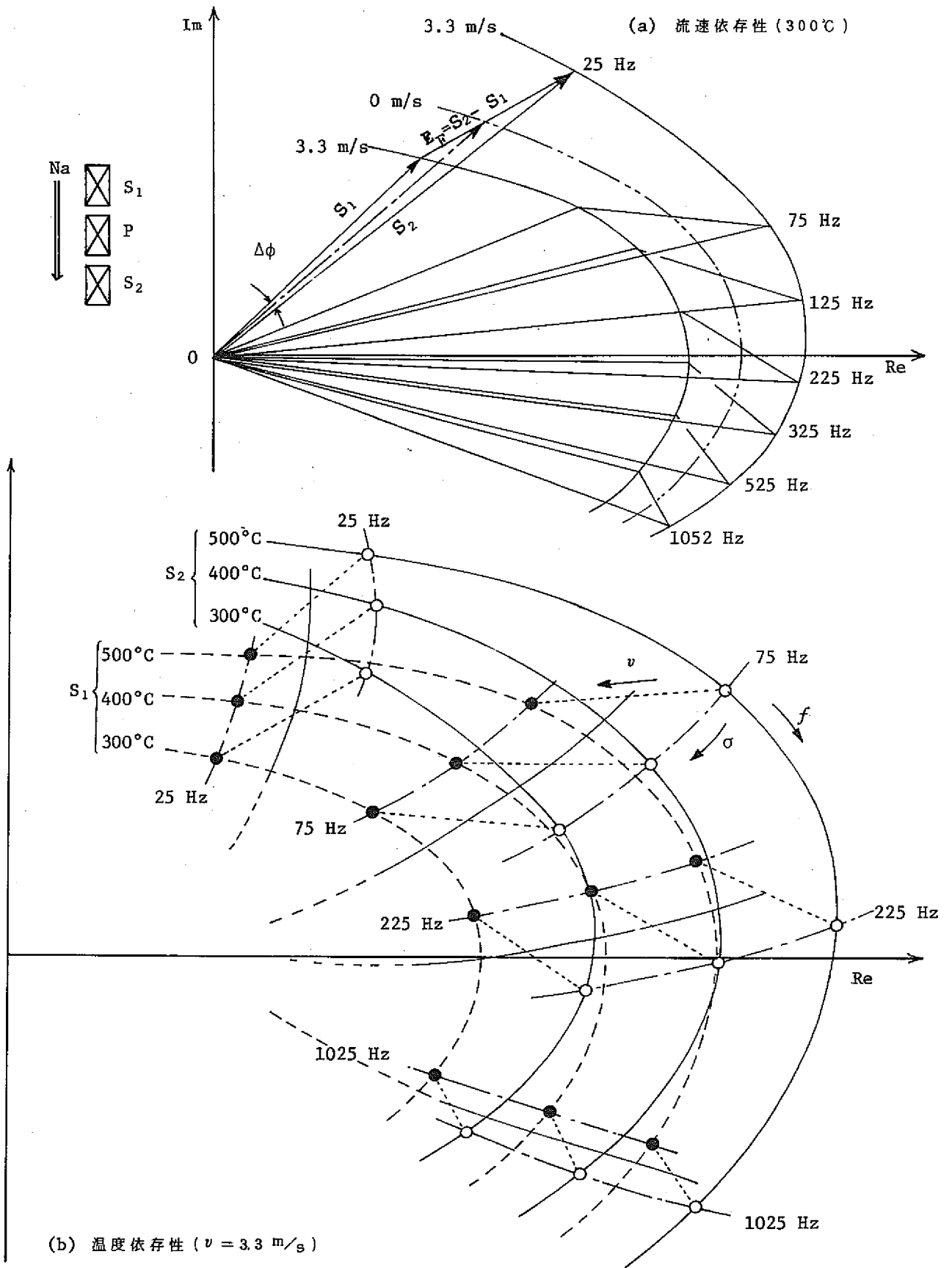


図 5.1 1 2次コイル信号の位相振幅特性ベクトル図

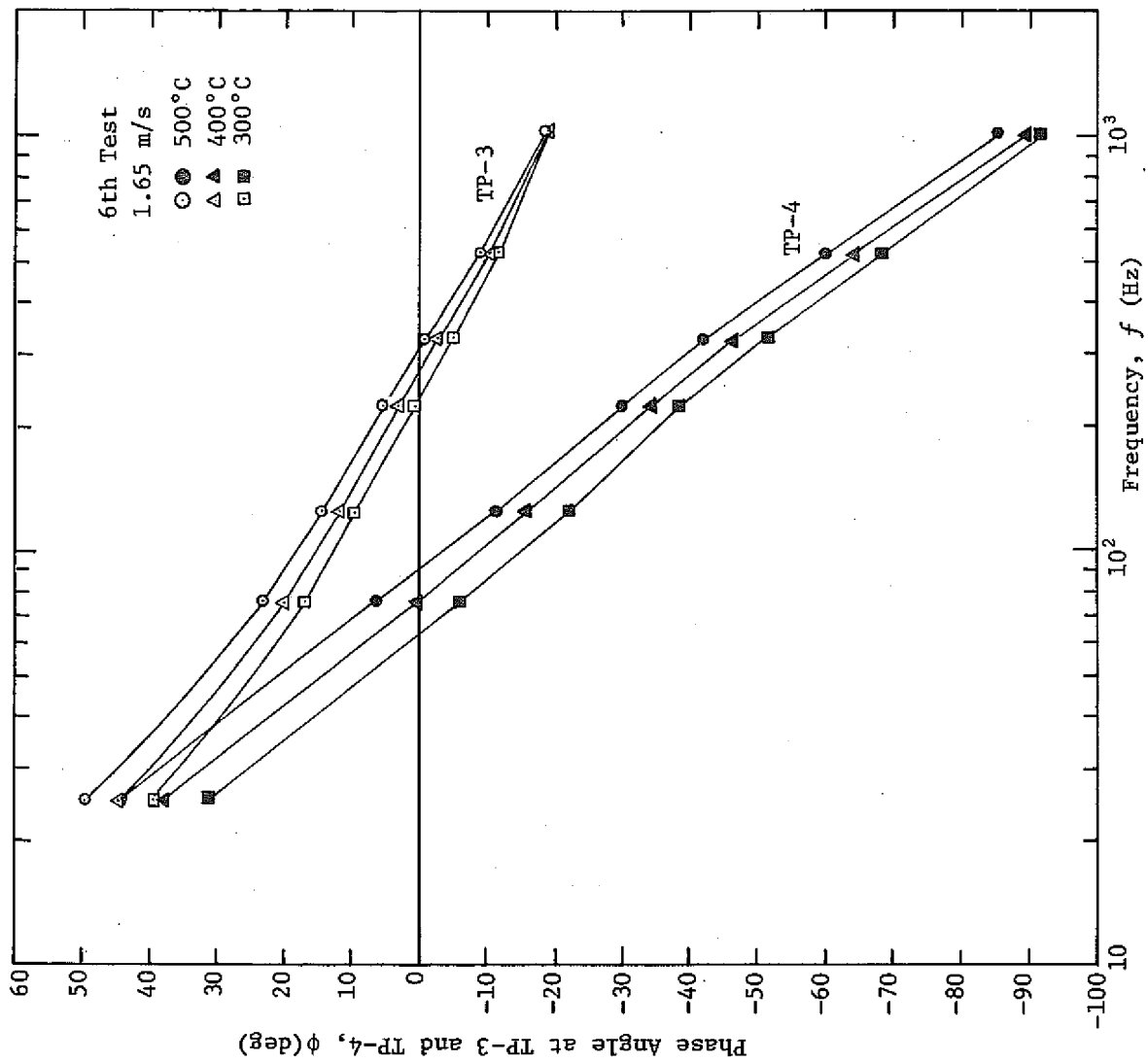


图 5.1.2 位相特性

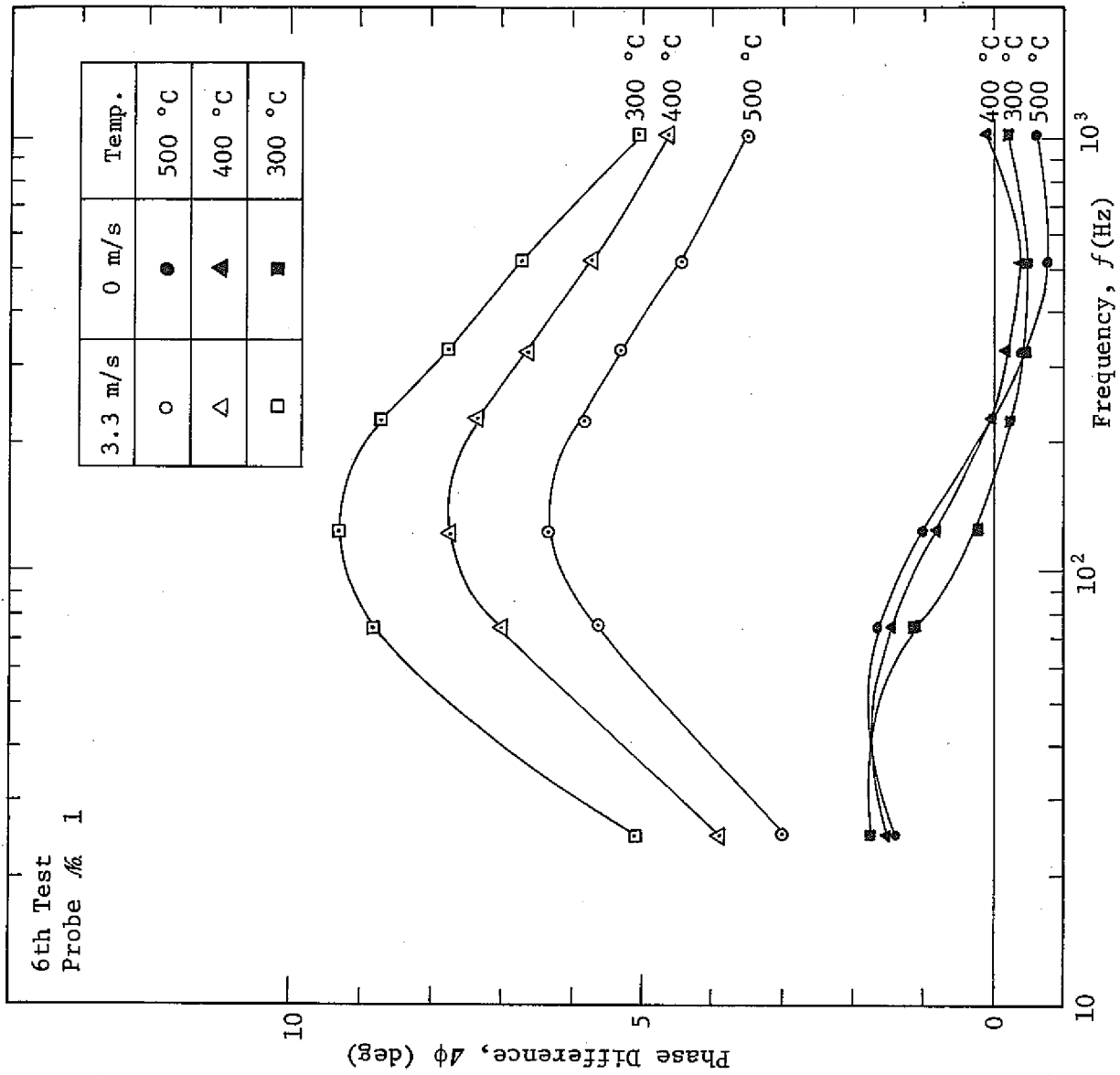


図 5.13 2次コイル信号間の位相差の励磁周波数依存性

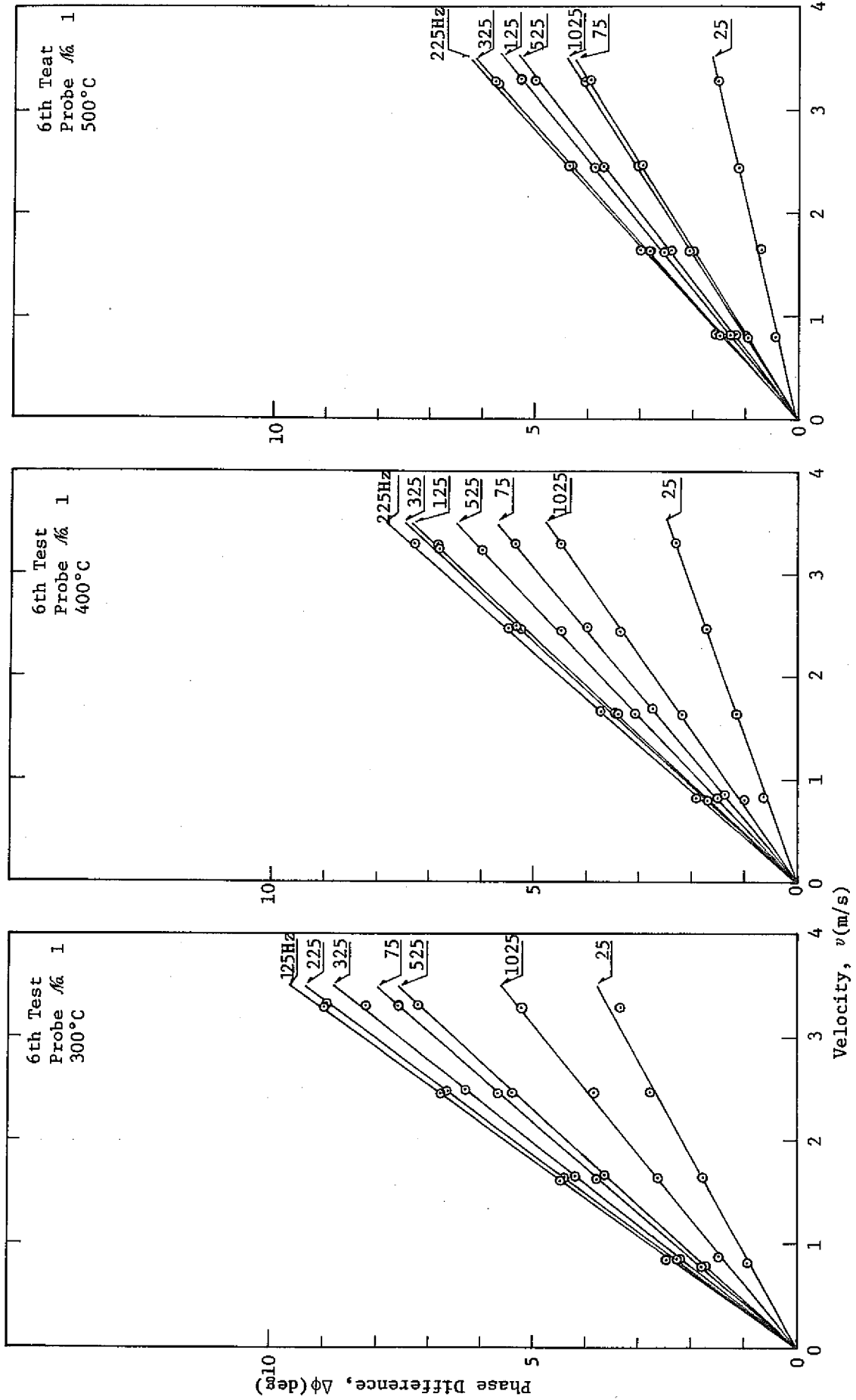


図 5.14 2次コイル信号間の位相差の流速依存性

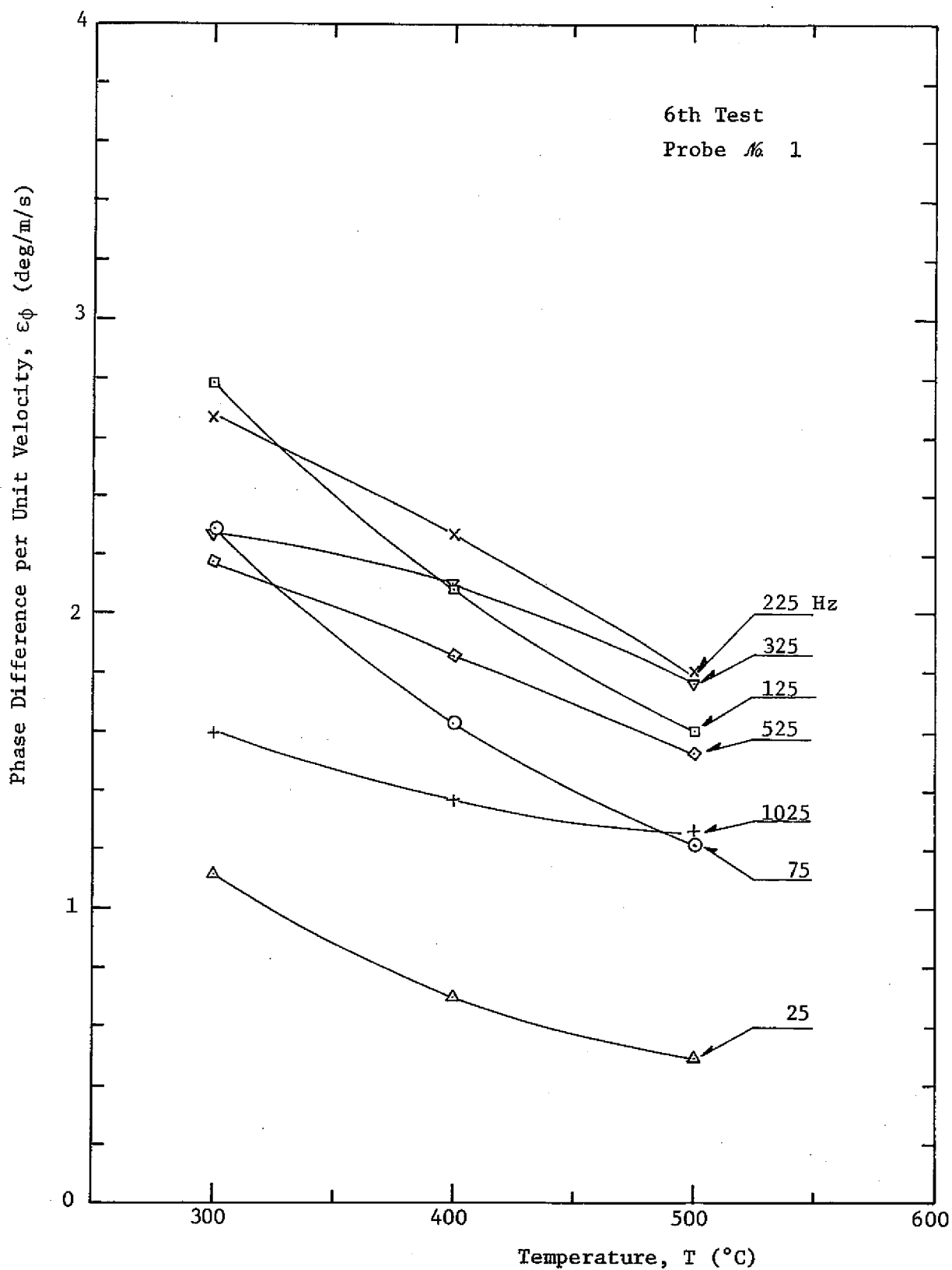


図 5.15 2次コイル信号間の位相差感度

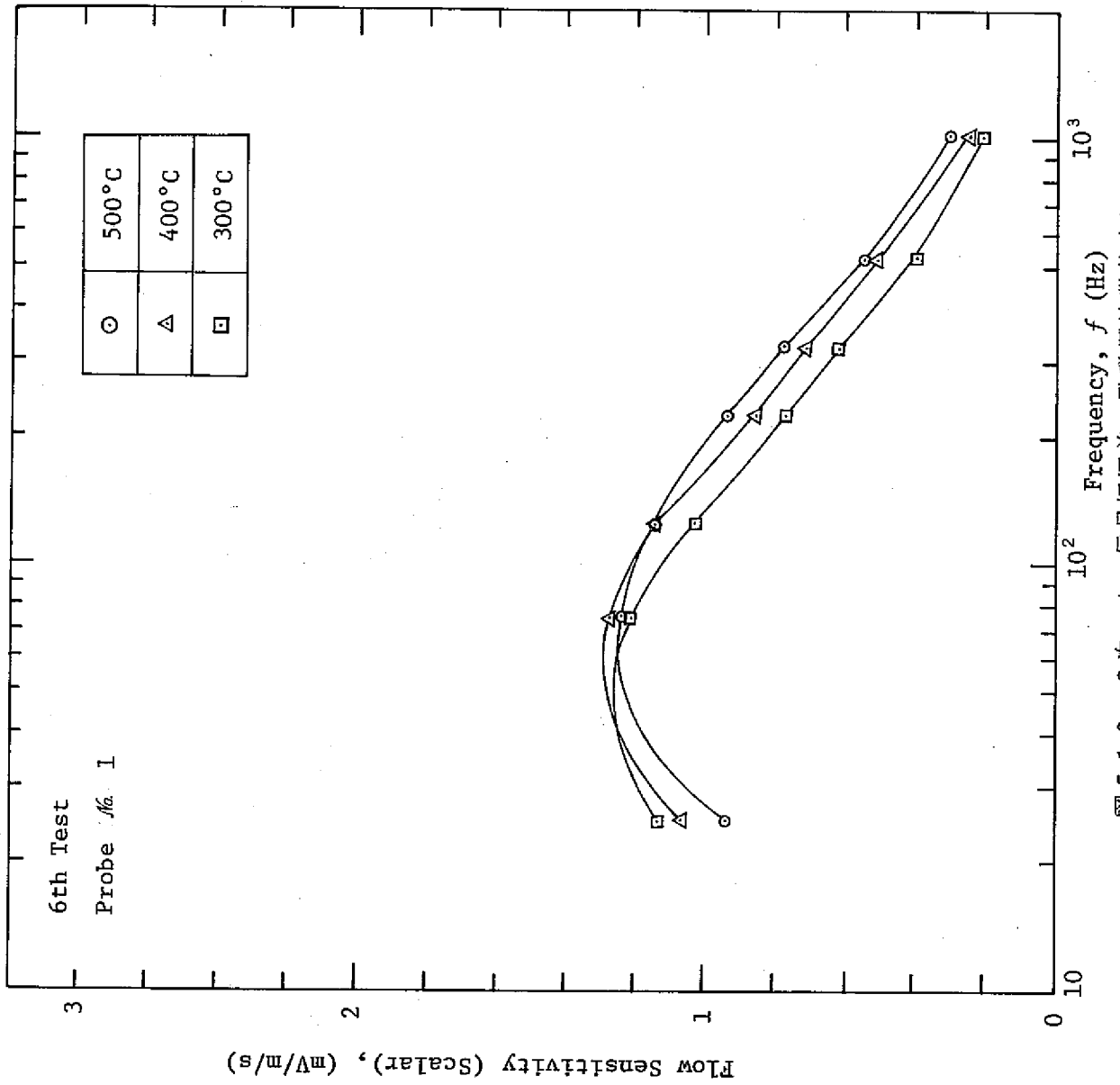


図 5.16 2次コイル信号振幅差の励磁周波数依存性

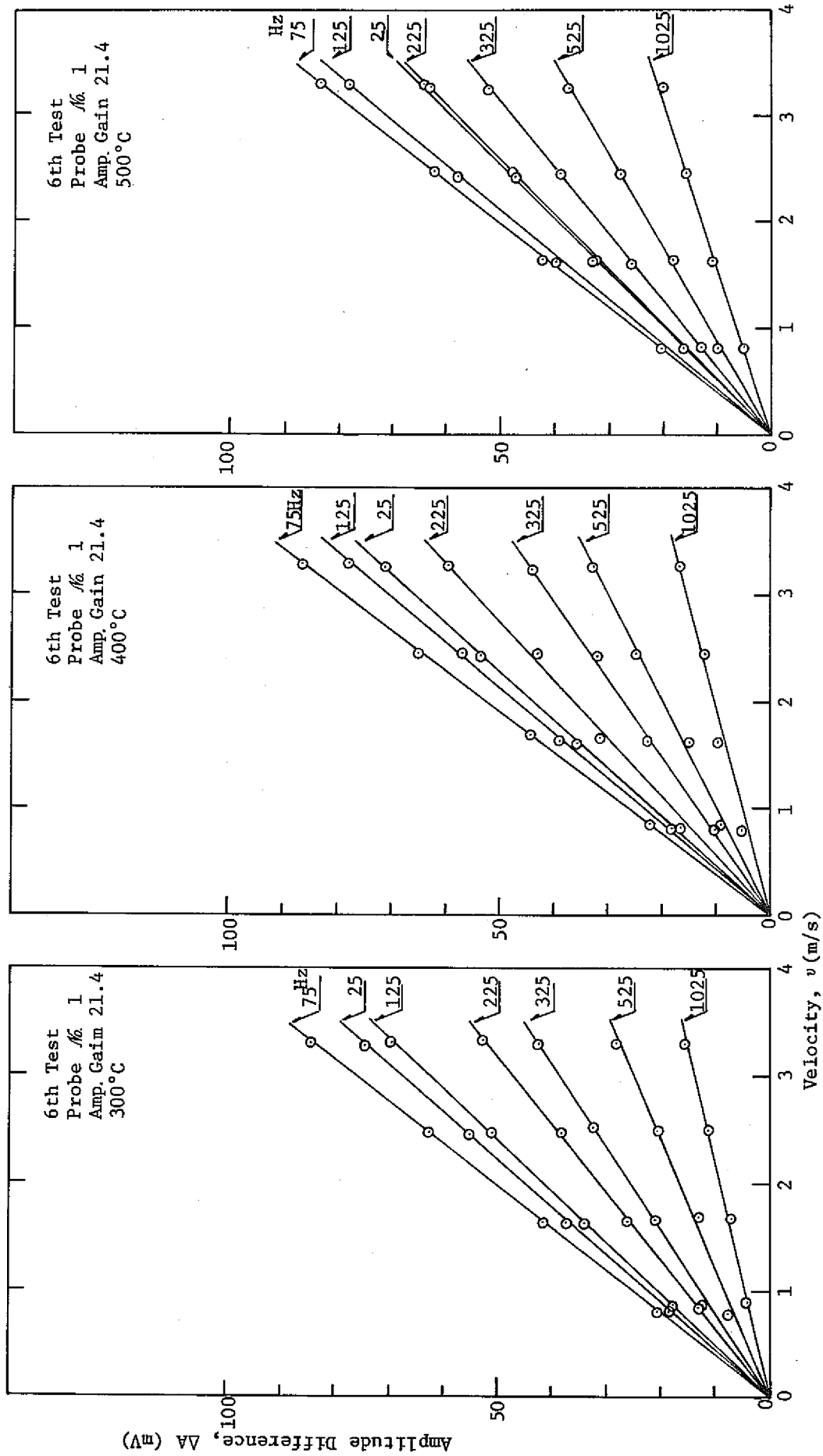


図 5.17 2次コイル信号振幅差の流速依存性

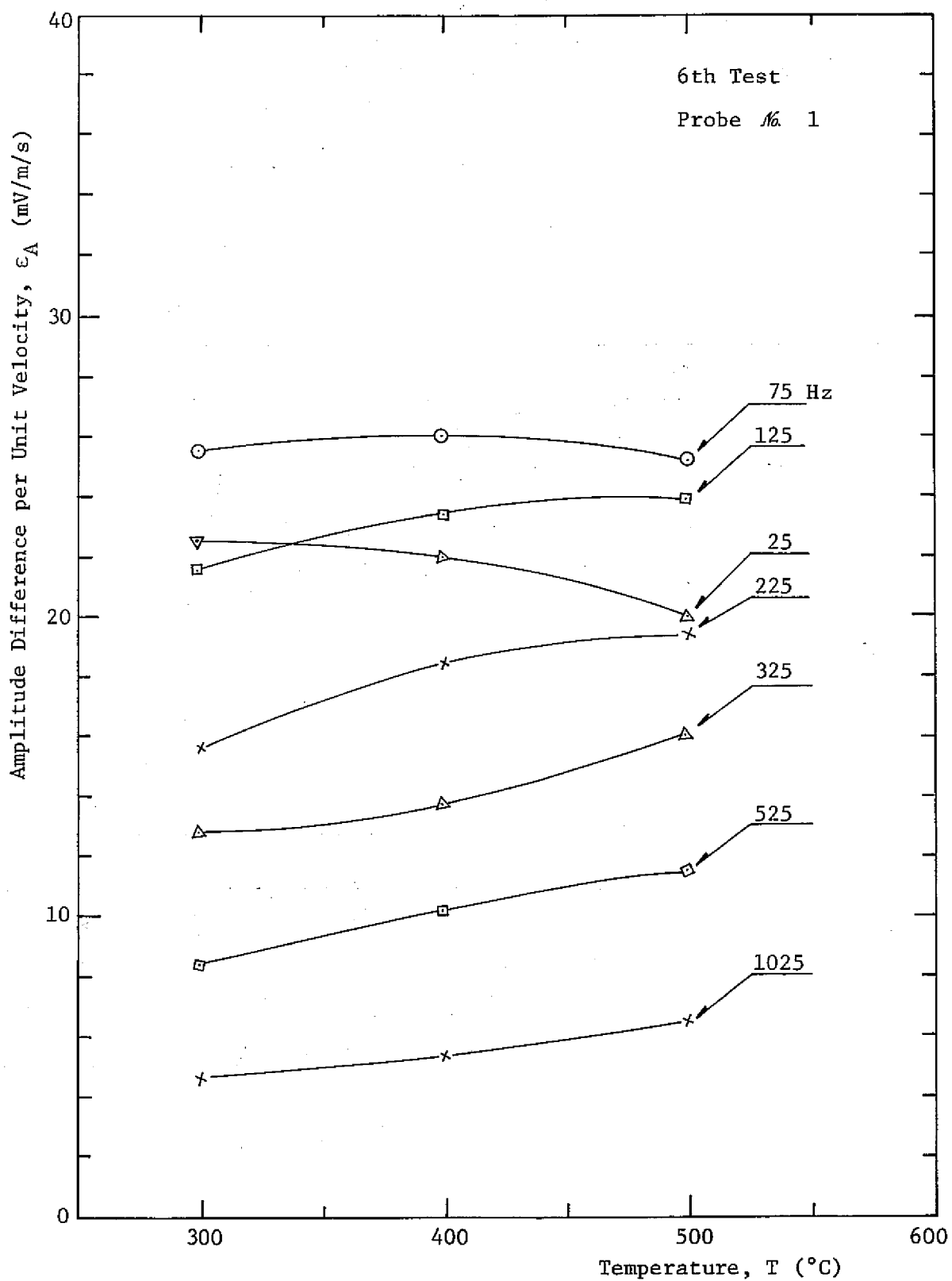


图 5.18 单位流速当りの振幅差



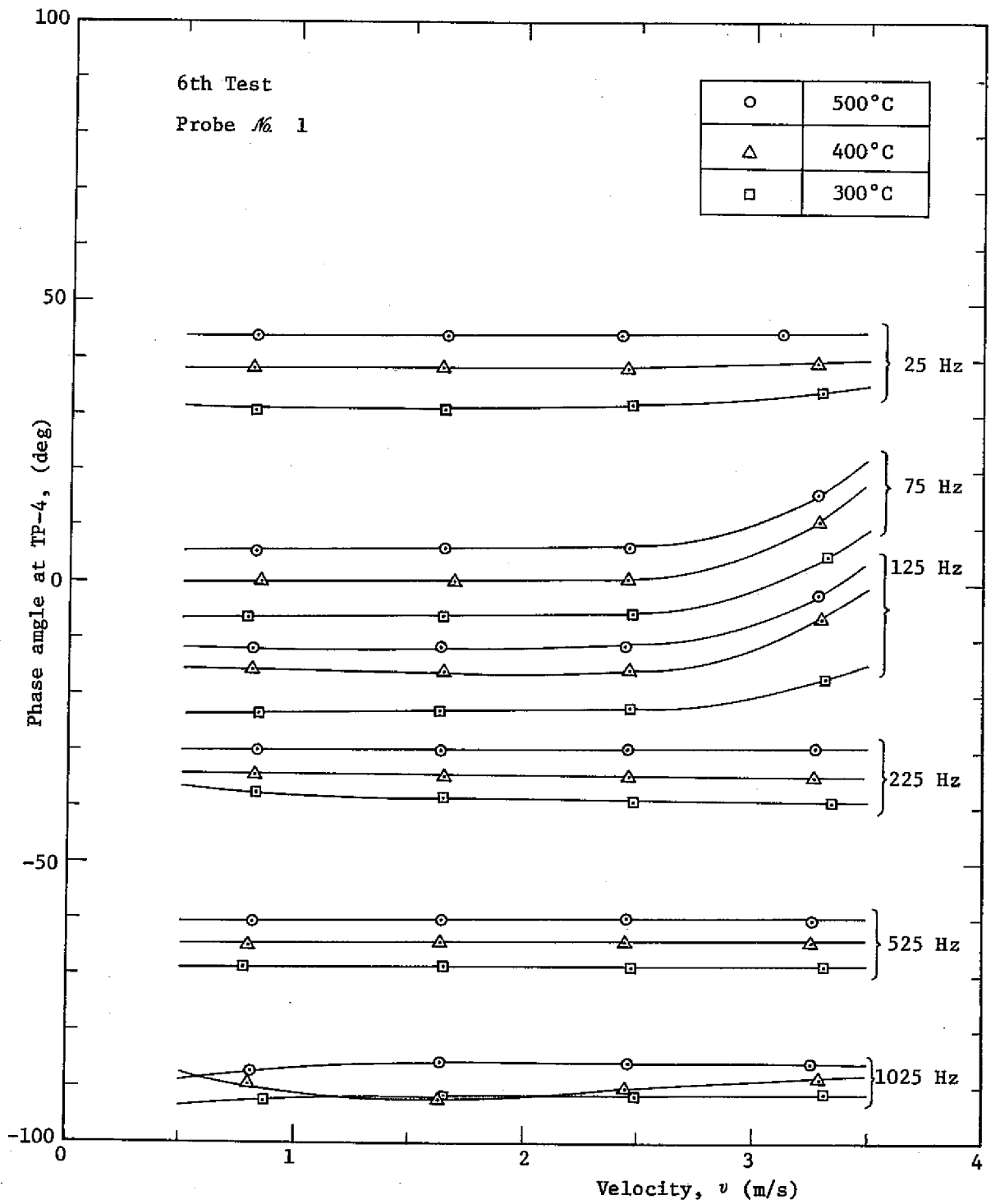


図 5.19 流速信号の位相変化

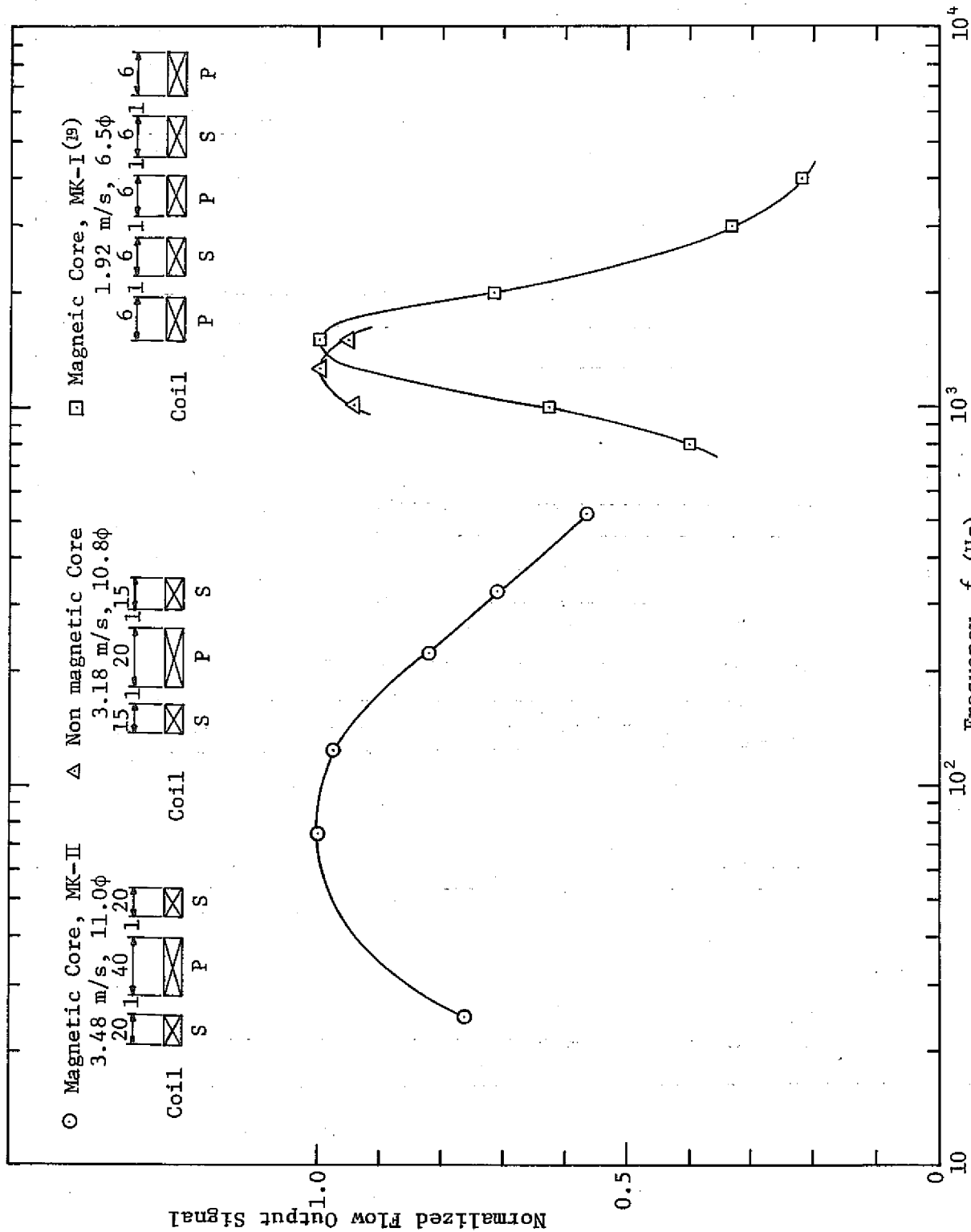


図 5.20 (a) センサーの種類による違い (500°C)

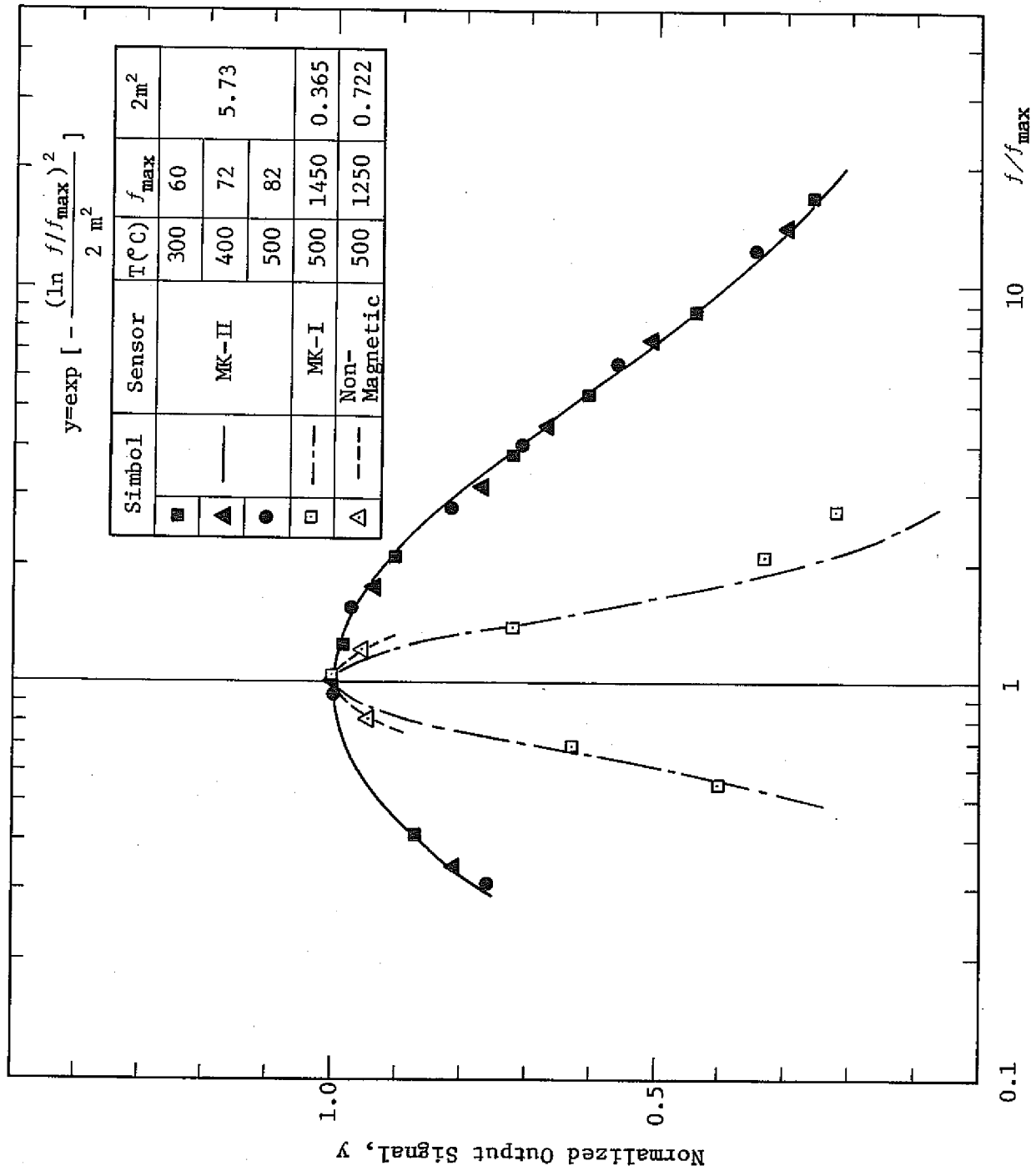


図 5.20(b) 励磁周波数依在性のパターン

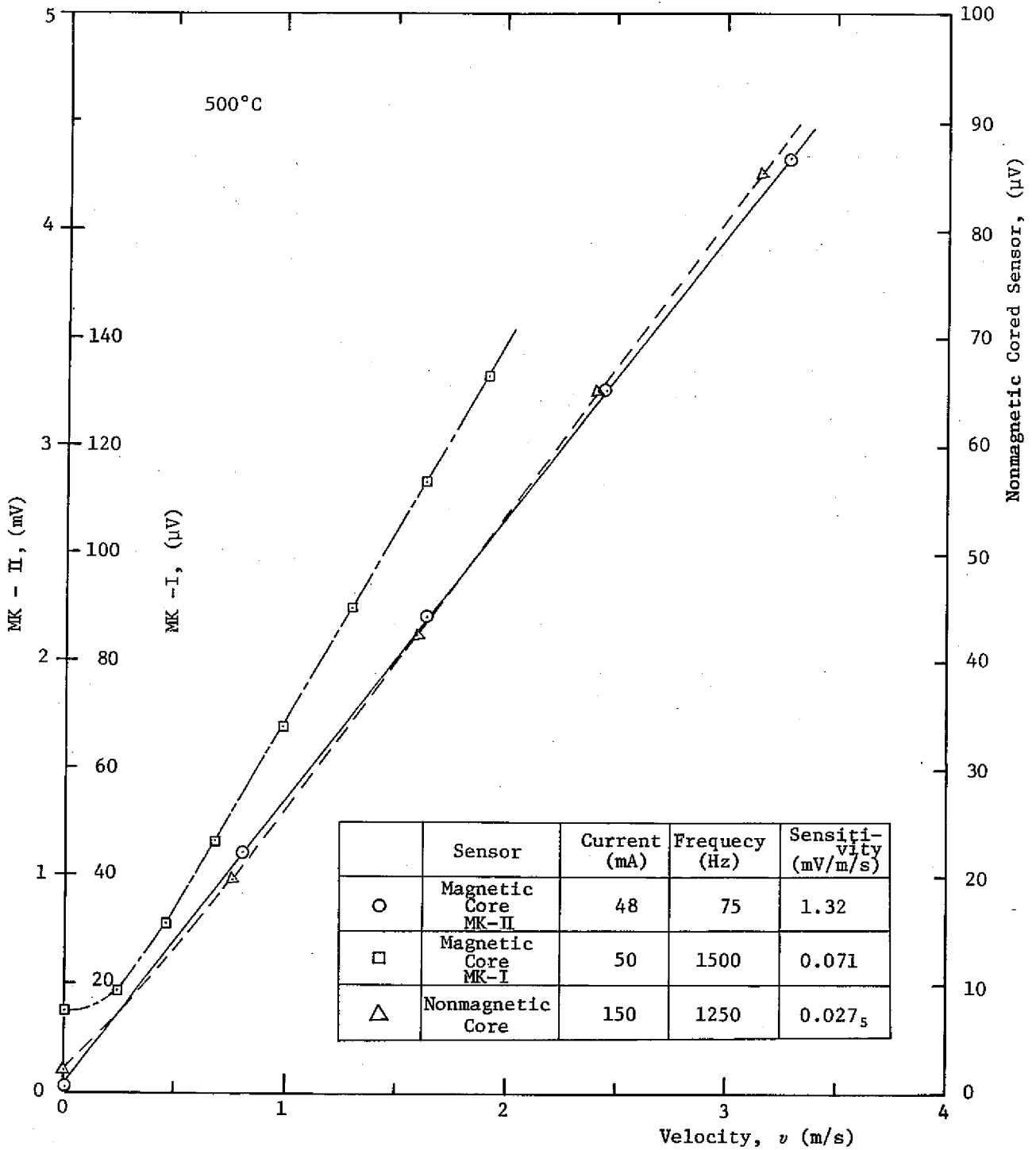


図 5.21 各種センサの流速検出感度（検出器入力換算値）と直線性の比較

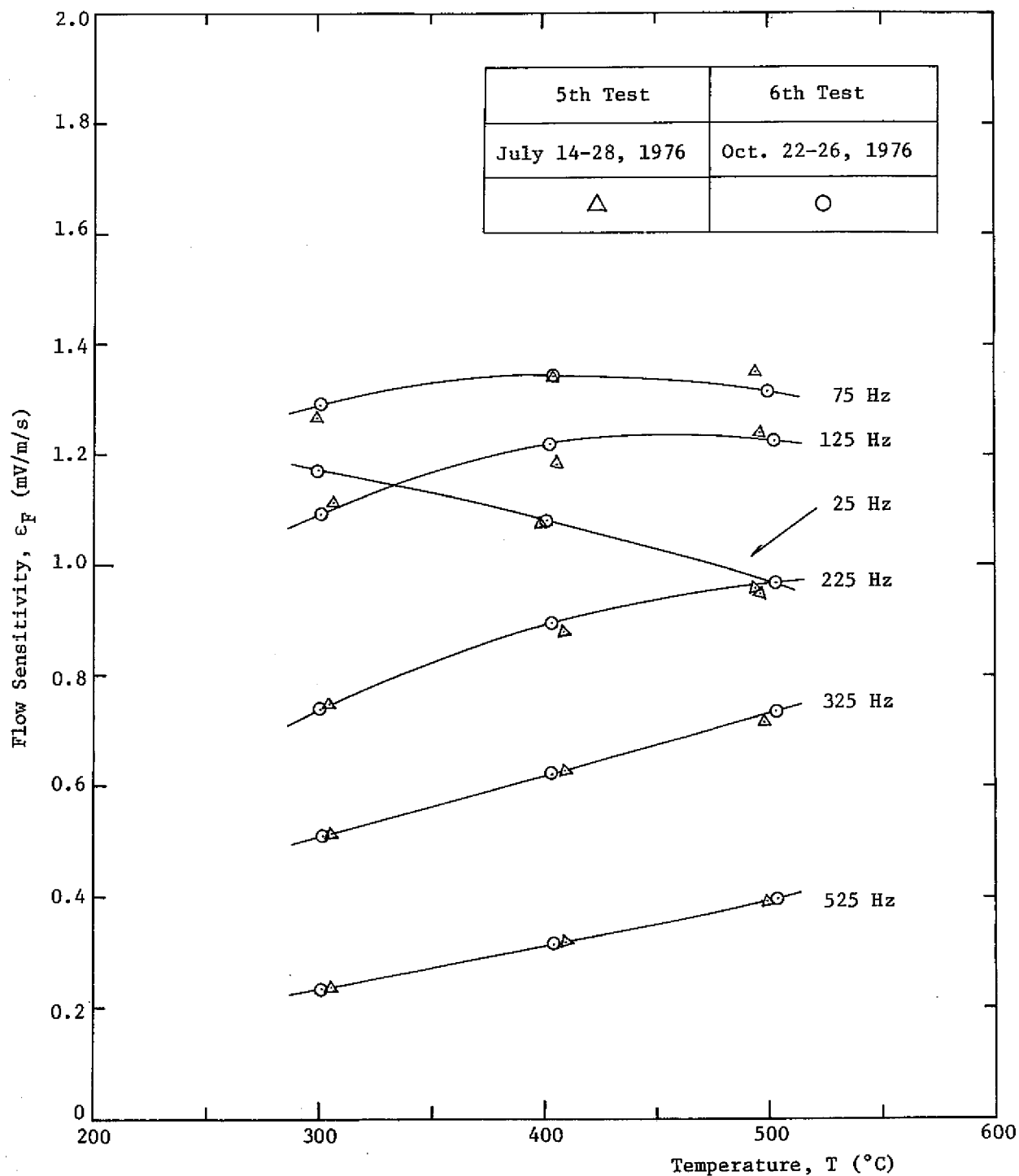


図 5.2 2 検出感度の再現性—同期位相つまり固定時—

## 6. 温度検出特性

### 6.1 試験方法

温度検出信号測定の場合も基本的には流速検出信号測定方法と同じであり、測定系ブロック図(図 5.1)に示す通りである。ナトリウム温度はプローブに内蔵したクロメル・アルメル熱電対(JIS 0.75級)によりモニタした。測定は温度補償特性測定時を除いて定常状態で行なっており、プローブの温度もほぼナトリウム温度に等しいとみなせる。

試験条件もまた流速検出信号検出特性の場合と全く同じである。

特に断わらないかぎり、検出回路の温度信号用スパンは最大に、直流レベルは励磁信号がゼロボルトの時ゼロになるように設定した。

### 6.2 試験結果

#### (1) 励磁周波数依存性

図 6.1 に各ナトリウム温度における温度信号出力  $E_T$  の励磁周波数依存性を示す。(注)

温度信号出力  $E_T$  は  $f = 225 \sim 325 \text{ Hz}$  で最大となり、最大となる周波数は温度上昇とともにやや高周波側に移行している(300から500℃で  $f_{\text{max}}$  は約225から約325 Hz に)。

また温度検出信号レベルは温度上昇とともに大きくなっている。

温度検出感度  $s_T$  は励磁周波数  $f$  とともに単調増加する。500~1000 Hz で最大になるのかも知れないが、より高周波数でのデータがないので断定できない。

#### (2) 温度信号へのナトリウム流速の影響

原理的に温度信号にはナトリウム流速  $v$  は影響を及ぼさないが、流速の影響を調べた結果を示したのが図 6.2 である。流速は  $v = 0.85 \sim 3.50 \text{ m/s}$  の範囲で変化させたが、流速の影響は温度信号に高々指示値の1%(約  $60 \mu\text{V}$ )以下の変化を与えるのみである。測定時の温度変化は1℃以下であり、後述するようにこれはほぼ  $50 \mu\text{V}$  に相当する。測定系の分解能(±  $10 \mu\text{V}$ )を考慮すると流速の効果は十分小さいと言える。

なお  $v = 0 \text{ m/s}$  の時の値を図示しなかったのは、 $v = 0 \text{ m/s}$  では予熱ヒータ電源を投入していても測定中にナトリウム温度が徐々に低下していくので、流速の効果を区別できなくなってしまうからである。温度信号が流速に依存しない様子を生データとして付録図 B.20 に示す。

(注) 第6回試験での  $E_T$  は、第5回試験での流速信号温度補償試験時の回路操作にもなって  $0.43 \text{ mV}$  出力が大きくなっていたので、図 6.1 ではその分を補正してある。

## (3) 直線性

図 6.3 に温度信号出力対ナトリウム温度の関係を検出器 No.1 について示す。300~500℃の温度範囲では、 $f = 75, 225 \text{ Hz}$ いずれの場合も直線性は良好である。流速信号における最適周波数  $f_{op}$  ( $\approx 75 \text{ Hz}$ )での直線性が最も良い。 $f = 75 \text{ Hz}$ での直線性は、300~500℃において最小自乗であてはめた直線からの最大偏差は指示値の 0.5%であった。

## (4) 感 度

図 6.3 において勾配から検出感度が求まるが、図 6.1 に示したように温度検出感度  $\epsilon_T$  は励磁周波数の増加とともに単調増加する。流速検出における最適周波数  $f_{op} = 75 \text{ Hz}$ を用いると、300~500℃で感度は安定しており  $48.5 \mu\text{V}/\text{C}$  (検出器入力換算値)を得た。

## 6.3 検 討

## (1) 励磁周波数依存性

最大感度を与える励磁周波数はここでの測定周波数範囲では存在せず、周波数の増加とともに感度は単調に増加した。したがって温度検出のみでは励磁周波数をできるだけ高くすることが有利なように思われる。しかし周波数を高くしすぎると感度は高くなるが、かんじんのナトリウムそのものの温度を測定しなくなる。

また実際に炉やその他の施設に应用する場合は、簡素化のため温度検出と流速検出は同じ励磁周波数を用いることが望まれる。温度検出においては感度から言えば流速検出側で要求する最適周波数  $f_{max}$  に合わせても約 24%の感度低下 ( $f = 525 \text{ Hz}$ での値に対して)であるから、上記の希望は達成される。

## (2) 温度信号へのナトリウム流速の影響

$T = 300 \sim 500 \text{ C}$ ,  $f = 75 \sim 525 \text{ Hz}$ でのデータ (図 6.2) から流速の温度検出に及ぼす影響は、測定時の温度変化分 (約  $50 \mu\text{V}$ ) と、測定系の分解能 ( $\pm 10 \mu\text{V}$ ) を差し引いた有意の値で見ると、 $0.85 \sim 3.50 \text{ m/s}$  で約  $10 \mu\text{V/m/s}$  以下となる。流速検出の分解能がフルスケールの 1% ( $5 \text{ cm/s}$ ) は十分あるので、流速信号と合わせて評価すれば、温度検出記号の流速への影響は無視できる。

## (3) 直線性

温度検出信号は流速検出における最適周波数  $f_{op}$  ( $\approx 75 \text{ Hz}$ )での直線性が最も良く、十分実用性に富むが、プローブによっては必ずしも  $f_{max}$  で直線性が良いわけではないので、実用上はどちらの信号を優先するかによって励磁周波数を決定しなければならない。しかし何度

も述べてきたように、最適周波数決定の根拠は感度の大きさもさることながら、流速検出感度の温度依存性が最少という条件によって定められている。したがって流速検出における温度補償法の改善が今後なされるならば、むしろ励磁周波数を温度検出信号の直線性が最も良くなるように定める可能性もある。

#### (4) 感 度

温度検出感度は、検出器入力換算で  $f=75\text{Hz}$  のとき  $\varepsilon_T=48.5\mu\text{V}/\text{C}$  となったが、この値はクロメル・アルメル熱電対の熱起電力  $42.6\mu\text{V}/\text{C}$  ( $500\text{C}$ ) と較べても十分満足のいく大きさをもっていると言える。温度検出においては、信号にともなわれるゆらぎ(変動)は指示値の約  $0.2\%$  ( $20\mu\text{V}$ ) 以下であり、検出感度からこれは約  $0.5\text{C}$  以下に相当する。流速の効果は十分小さいので、温度検出における分解能は  $0.5\text{C}$  より良いと見積ることができる。



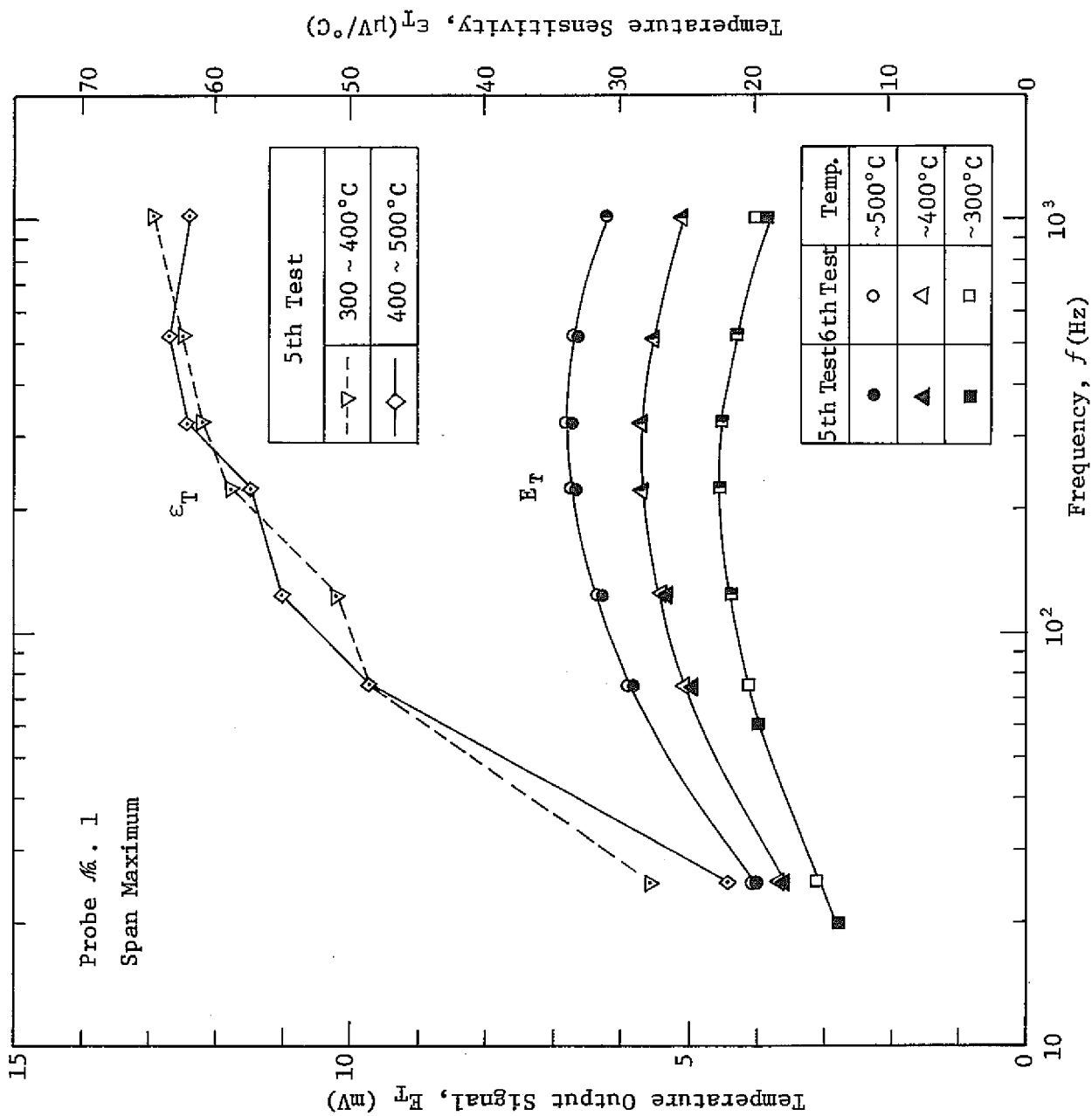


図 6.1 温度検出信号出力と感度の励磁周波数依存性

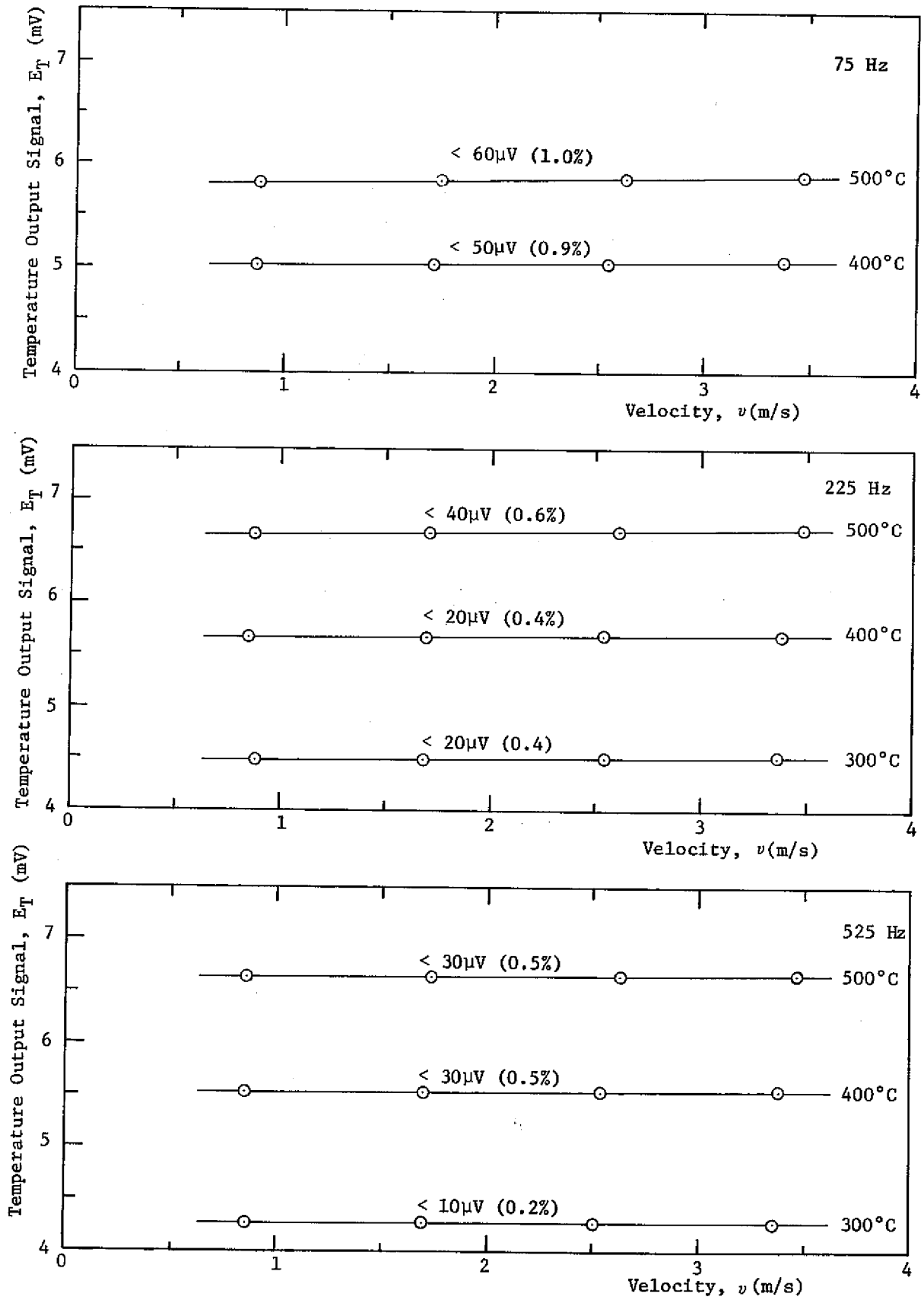


図 6.2 温度検出信号への流速の影響

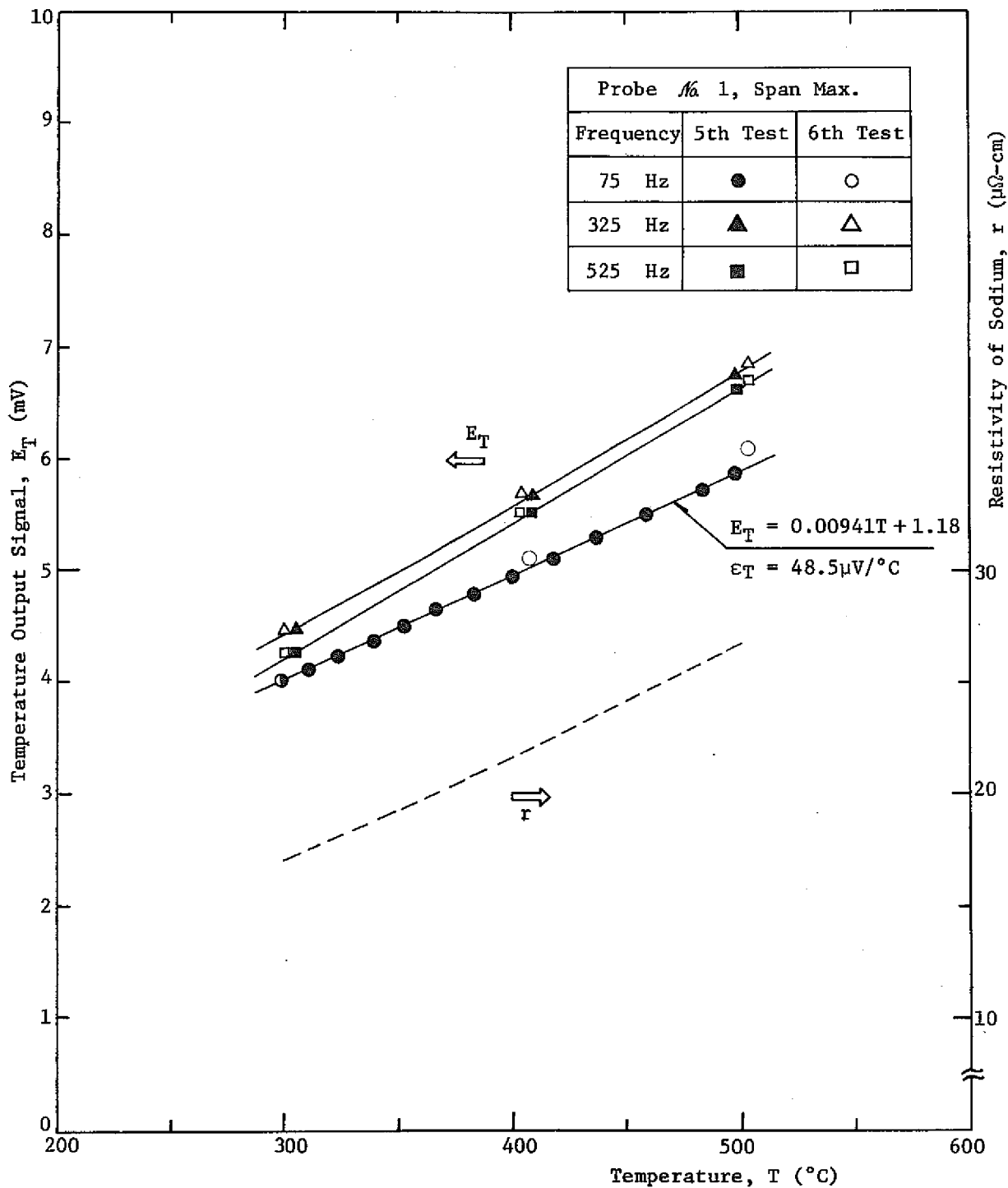


図 6.3 温度検出信号の直線性と感度

## 7. 案内管先端形状の流速信号に及ぼす効果

### 7.1 試験方法

プローブ型流速計はプローブを挿入した案内管の外側に流れるナトリウムの流速を計測するので、案内管を挿入したことによる流れの変化が問題となる。測定する側からだけ言えば、外管（炉上部での計装では整流管）と案内管の間の環状流路を流れるナトリウムが安定した流れになった位置に1次コイルと2次コイルを設置すればよいが、実用上はこの要求は必ずしも完全に満たされるわけではない。したがって、案内管挿入による流れのみだけが流速信号に及ぼす効果を案内管の先端形状と関連づけて評価しておく必要がある。

案内管の形状と寸法は図4.3に示す5種類である。各案内管はフリーズシール部を通して3インチのナトリウム配管にエルボ部より挿入され、案内管の交換はナトリウムドレン後フリーズシール部を予熱しナトリウムを溶解した後に行なった。したがって、短期間に効率よく5種の案内管について試験を行なうために、試験ナトリウム温度は300℃とした。試験条件は以下に記す通りである。

ナトリウム温度	300℃
ナトリウム流量	0, 250, 750, 1,000 $l/min$ (向流) 0, -1,000 $l/min$ (並流)
励磁周波数	75 Hz
プローブ位置	(注) $l = 0, 20, 40, 60, 80, 100, 140, 180, 220, 260,$ $300, 340, 380, 420, 460, 500 mm$

なお、案内管先端形状の流動のみだれ（ゆらぎ）への影響を調べるために、ゆらぎの大きさや周波数スペクトルを測定したが、その測定方法は図7.1に示す通りである。図7.1において図5.1と重複する部分は省いてある。

### 7.2 試験結果

#### (1) 感度への影響

図7.2に向流における各案内管での流速信号出力の変化を案内管先端からプローブ中心位置（1次コイルの中心）までの距離  $x$  を横軸にとって示す。ナトリウム温度は301~311℃、ナトリウム流速は約3.31  $m/s$ （約1,000  $l/min$ ）である。縦軸は楕円型（E型）案内管にプローブを先端の熱電対が案内管の底に達するまで挿入した時の出力（「◎」印、75.2 mV）を基準にして規格化している。案内管によって曲線の左端の位置（開始点）が異なるの

(注)  $l$  は案内管底とプローブ内蔵熱電対先端との間隔  
 $l = 0 mm$  はプローブの熱電対が案内管底に圧着された状態を意味する。

は、案内管の形状によって、その頂点から案内管底までの肉厚が異なるためである。

さて、案内管を固定したままプローブを引き出して  $x$  を増加させていくと、楕円型 (E型) と円錐型 (C型) の案内管の場合は互いによく似た傾向すなわち単調減少を示し、 $x \geq 220$  mm でやや安定のきざしが見られる。球形 (B型) の場合は出力がやや前者より小さいが大略同様の傾向を示している。一方、円柱型 (A型) の場合は、楕円型に較べて 2~7% 出力が小さくなるが、 $x \geq 120$  mm ではかなり良い安定傾向を示す。球形のものに補強用フィンを付けた型 (D型) の場合は出力変化はいつまでも単調減少を示し安定しない上に、出力の大きさも楕円型に較べて約 15% 小さくなっている。

なお図 7.2 に 400 mm 以上の  $x$  について図示しなかったのは、案内管の長さが 500 mm しかなく、下流のエルボの影響が強くなり、データとして意味がなくなるからである。

参考までに図 7.3 に逆流 (並流) の場合の同様の結果を示す。縦軸は向流時の規格化条件と同じ値で規格化されている。フィン付のものを除いた他の 4 種の案内管での傾向はほぼ同じで、上流側エルボの影響により、 $x = 80$  mm でもまだ出力は安定しない。一方、フィン付き案内管の場合は、出力の大きさが他のものより大巾に小さいのは前と同様であるが、フィンの整流効果により、他のものより早く一定値に漸近していくようである。

## (2) 直線性への影響

図 7.4~7.6 に  $l = 0, 100, 300$  mm における流速検出の直線性を示す。これらから直線性はいずれの形状の案内管の場合も満足のいくものと言えよう。

なおデータ採取時間の短縮化のために、流量を一定してプローブを移動しながら測定し、次にまた流量を変えて……という方式をとっている。このために、各データ間で  $l = 100$  mm あるいは  $l = 300$  mm は必ずしも正確に位置設定できているとは言いがたく、 $l = 0$  mm (圧着状態) に較べてデータの再現性はやや悪い。

図 7.4 に回帰直線よりの偏差で表わした直線性を示す。この場合もフルスケールを 5 m/s としその時の出力値に対する偏差の比 (%) で整理した。

## (3) 流量ゆらぎへの影響

図 7.8 に流量指示値に対する流量出力信号のゆらぎ (変動分) の観測値を rms (自乗平均値の平方根) 値で示す。白抜印は向流で、黒くぬりつぶしたものは並流を示す。ナトリウム温度は 300°C、流速は 3.3 m/s である。

向流の場合、案内管先端からプローブ中心までの距離  $x$  が変化しても、また案内管の形状が変わっても、流量ゆらぎの大きさは約 0.6~0.8% (rms) である。

一方、並流では、流量ゆらぎの大きさは約 2% (rms) を越え、また、プローブの位置や

案内管の形状によってもかなり違った値となる。なお興味深いのは並流におけるフィン付案内管の場合で、上流部 ( $x \approx 380 \text{ mm}$ ) では他の案内管と同様大きな値を示しているが、下流側 ( $x$  が小さくなる方向) に行くにつれてゆらぎの大きさはどんどん小さくなり、ついには  $x=80 \sim 100 \text{ mm}$  では向流の場合と大差ない値にまで落ちついていることである。これはフィンによる整流効果をあますところなく示した例と言えよう。

図 7.9 に流量指示値とその時の流量出力信号のゆらぎを同時に図示した結果を示す。流量指示値は前と同様に楕円型で  $l=0 \text{ mm}$  の時の値に規格化されており、流量ゆらぎは誤差棒的表示とした。

いずれにせよ、向流においては流量ゆらぎの大きさは案内管の形状や観測点の位置によらずほぼ一定である。

次に上記の流量 (流速) ゆらぎが、流量そのものに起因しており、他の外乱等によるものではないことを示したのが図 7.10 である。いずれの型式の案内管においても、流量ゆらぎの大きさ (絶対値) が平均流速に直接比例する点は興味深い。流量ゆらぎの絶対値の大きさが流量に比例するということは、流量ゆらぎの相対値 (流量ゆらぎ指示値 / 流量指示値) が一定であることを意味し、前述の図 7.7 の傾向すなわち “向流において案内管形状やプローブ位置によらず流量ゆらぎの相対値がほぼ一定 (約 0.6 ~ 0.8 %) ” という事実は流速変化に対してもそのまま適用できる。

#### (4) 流速信号ゆらぎのパワースペクトル

これまで流速信号の変動 (ゆらぎ) について、周波数的にはマクロに rms 値として見てきたが、ここでは流速信号ゆらぎの周波数成分について記述する。共通する条件はナトリウム温度  $300^\circ\text{C}$ 、流速  $3.3 \text{ m/s}$ 、励磁周波数  $75 \text{ Hz}$  である。周波数分析器のサンプリング間隔  $\Delta\tau$  は  $30 \text{ ms}$  なので、分析可能周波数の上限は  $1/2\Delta\tau$  から  $16.7 \text{ Hz}$  であり、分解能は  $0.13 \text{ Hz}$  である。測定時間はいずれもスペクトル当り 20 分である。以下に示すパワースペクトルの図はいずれもその周波数の前後を含む 3 点で平均した結果を示している。

図 7.11 ~ 7.15 に、向流における流速信号出力より求めたパワースペクトル密度と、基準流量計として使用した永久磁石式流量計 (FM-2) より求めたパワースペクトル密度を各案内管について示す。流速信号の場合はプローブ位置  $l=0, 140, 300 \text{ mm}$  に対して図示してある。図の縦軸は任意単位ではあるが相対的強度は規格化されている。

さて図 7.11 は案内管が円柱型 (A 型) の場合である。流速信号出力の周波数成分は  $3.5 \sim 4.0 \text{ Hz}$  (3 dB 低下周波数) までのびており、プローブの位置によって周波数成分はほとんど変わらない。一方、流量計信号出力の周波数成分は周波数が高くなるとともにスペクトル強度がほぼ単調減少している。また流速信号パワースペクトル強度は流量信号 (EMF) の

それより3~10倍大きく、ゆらぎの大きさは ( rms ) で言えばほぼ1.7~3倍大きい。  
図7.12~7.15も図7.11とほぼ同様の傾向を示している。

### 7.3 検 討

#### (1) 感度への影響

本試験で明らかになったことは、案内管の先端形状によって流速信号値はあまり影響されないことである。

しかしながら円管内を走ってきた十分発達した流れが案内管先端に当り、案内管壁に境界層を成長させながら下流に流れ去るので、案内管の先端形状が比較的滑らかに変化する(球形、楕円型、円錐型)のか、急激に変化するのかによって幾分差異が生じる。

案内管の先端形状が滑らかな場合は、先端部ではく離が起こりにくく、下流にいくに従って速度境界層が厚くなりついには一定に近づく。この結果、案内管外近傍の流速を主として検出する渦電流式流速計の出力は、下流にプローブを移動するにつれて図7.2に示したように低下しながら安定していく。

一方、案内管の先端形状が急激に変化する円柱型の場合は、先端部ではく離より、案内管外壁部で流速が負の領域が生じ、このために流速計出力の大きさは先端形状が滑らかな場合よりも小さくなる。しかし、下流にいくにつれて壁面への再付着により安定した流れに漸近すると考えられるので、流速信号の出力は、下流にプローブを移動するにつれて図7.2のようにだんだん大きくなり一定値に漸近する。

これらの結果を、2重管における流速分布の実験値<sup>(34)</sup>(空気,  $Re=122000$ と $142000$ )から、圧縮性と非圧縮性の違いはあるが、大局的特性をつかむためにプローブ型流速計の場合の流速分布を類推し、モデル化して示したのが図7.16である。(但し、入口における流速分布は実験値が文献<sup>(34)</sup>に示されていないので、筆者らが書き加えた。)

なお、図7.2において、フィン付案内管を除いて $x \geq 220 \text{ mm}$ でほぼ安定化のきざしがみえる。この長さは環状流路の水力直径 $6.73 \text{ mm}$ の約3倍である。これらの結果および他の計算結果を考慮すると、案内管の存在によって外管内壁近傍の速度分布が影響を受けるのはもつと下流においてであり、ここで問題としている長さ(0~約 $400 \text{ mm}$ )程度では主として案内管のみによってその近傍の速度分布が支配されるように思われる。したがってこの領域では代表長さ $D$ として案内管外径( $13.8 \text{ mm}$ )をとるべきかもしれない。この場合、前記の $x = 220 \text{ mm}$ は約 $16D$ となる。

円柱型の場合は流れを強制的にみだし、流れの中に置かれる物体形状としては不適當と当初は考えられたが、プローブの軸方向位置によって出力があまり変化しないという特性を重視すれば、案内管形状として案外有望かもしれない。

なお、フィン付きの案内管の場合は、(i)フィンにより流速ゼロの部分が案内管壁近傍で増

えること、(ii)ステンレス製フィンの導電率がナトリウムに較べてかなり小さいため、ナトリウム中を円環状に流れる渦電流が相対的に小さくなるため、流速信号出力がフィンなしの場合に較べて小さくなるものと考えられる。

#### (2) 直線性への影響

厳密には案内管の先端形状効果は下流に影響を及ぼし、非直線性が表われるはずであるが今回の実験でのレイルス数の範囲 ( $Re=138000\sim569000$ ) では目立った非直線性は観測されていない。またプローブの位置も直線性には悪影響を及ぼしていないので、こと直線性に関するかぎり、案内管の先端形状は支配的因子ではない。しかし、直線性からあえて案内管先端形状に優劣をつけるとすれば図 7.7 から楕円型がやや優れているといえる。

#### (3) 流量ゆらぎへの影響

本流速計で観測される流量指示の時間的変動(流量ゆらぎ)は向流の場合、案内管先端形状およびプローブ位置によって若干差異が認められるが、大局的にみてゆらぎの大きさへの案内管先端形状の影響は小さいと言える。

フィン付き案内管の場合はたとえ上流部でみだれが大きくとも、フィンによる整流効果により急激に流れのゆらぎの大きさを低下・安定させているので、特に旋回流を含む流れの場合に有効と考えられる。

またゆらぎの大きさ(rms値)が流速に比例している点、言いかえれば流速の時間平均値に対する流速のゆらぎの大きさ(乱れ度)が一定である点は注目に値する。円管内乱流においては、半径方向位置によって差異があるが大略0.8~2%のゆらぎが存在<sup>(35)</sup>すると言われるが、本測定では0.6~0.8%ある。この差は主として測定系の周波数帯域が後述のように狭かったため、流れが持っていたより高周波の成分を切り捨てたためであると考えられる。

#### (4) 流量ゆらぎのスペクトル

時間平均流速指示値に対して、rms表示で約0.6~0.8%の流速の乱れ(ゆらぎ)が観測されたが、このゆらぎに含まれる周波数成分は低域から約4Hzまで一様に存在する。ところで周波数スペクトル測定に使用した測定系は図 7.1 に示すように、直流分と高周波成分を除去するためにフィルターが使用されている。低域カットのフィルタは、微少なゆらぎ信号を拡大観測するために、じやまな直流分を取り除くためであり、高域カットのフィルタは

(注) 縦軸がパワースペクトル表示なので、フィルタの周波数特性も自乗してある。またフィルタの特性は流速計や流量計の信号から求めたパワースペクトルとの相対強度には特に意味はない。



特に50 Hz等のノイズを除去し、直流増幅器で信号が飽和してしまわないために使用された。その結果測定系の周波数特性は図7.11～7.15において破線で示すようになり、測定系の帯域は約0.1～10 Hz (3 dB 低下)である。しかし流速信号の場合は流速検出回路に平滑回路が内蔵されており、その時定数から広い意味での測定系の周波数特性を示すと点線の曲線となり、帯域は約0.1～3 Hzとなる。従って先に述べた流速のゆらぎの上限約4 Hzは実は測定系の周波数特性によるもので、ゆらぎそのものはもっと高い周波数成分をも持っていることを意味している。

いずれにせよ観測範囲の周波数領域においては案内管先端形状は流速のゆらぎの周波数スペクトルにもほとんど影響を及ぼさないことが明らかになった。

測定系の帯域を越えたより高い周波数成分がどうなっているかは商用周波数ノイズが大きく観測できなかったが、同時に測定した電磁流量計による観測値に対してゆらぎの大きさがRMS値に換算して2～3倍大きく、両者の差は周波数が高くなるほど大きくなるという傾向は次の事を示している。すなわち流路断面内で流速の平均を求める電磁流量計に対して、渦電流式流速計は案内管先端で生じたはく離を場合によっては含む案内管近傍の流れ(境界層を含む)を検出しており、渦電流式流速計の速応性(広帯域性)とも相まって流量信号のゆらぎが大きいものと考えられる。

#### (5) 案内管の振動について

案内管の先端形状によっては流れを大巾に乱す結果、流れの中で案内管が振動しその結果流速信号にゆらぎが生じるのではないかと当初考えられた。

しかし、300℃における本試験に用いた案内管の場合、気中で片持ち支持のとき基本固有振動は縦振動で2.32 KHz、横振動で1.45 Hzと計算された。したがってもし流れの中でこの振動が許されたとしてもここでの観測領域外の周波数である。また実験にはナトリウムによってこの振動は阻害され、減衰振動となりついに流れがもともと持っている乱れにもなされる振動のみしか残らないと考えることができる。図7.10～7.14のパワースペクトルにおいても案内管の振動と思われるような共振点(ピーク)は見られず、前述した“ゆらぎ信号が平均流速に比例する”事実とも合わせて、少なくとも数Hzまでの周波数で言えば案内管の振動による影響は考えなくて良いと結論できる。

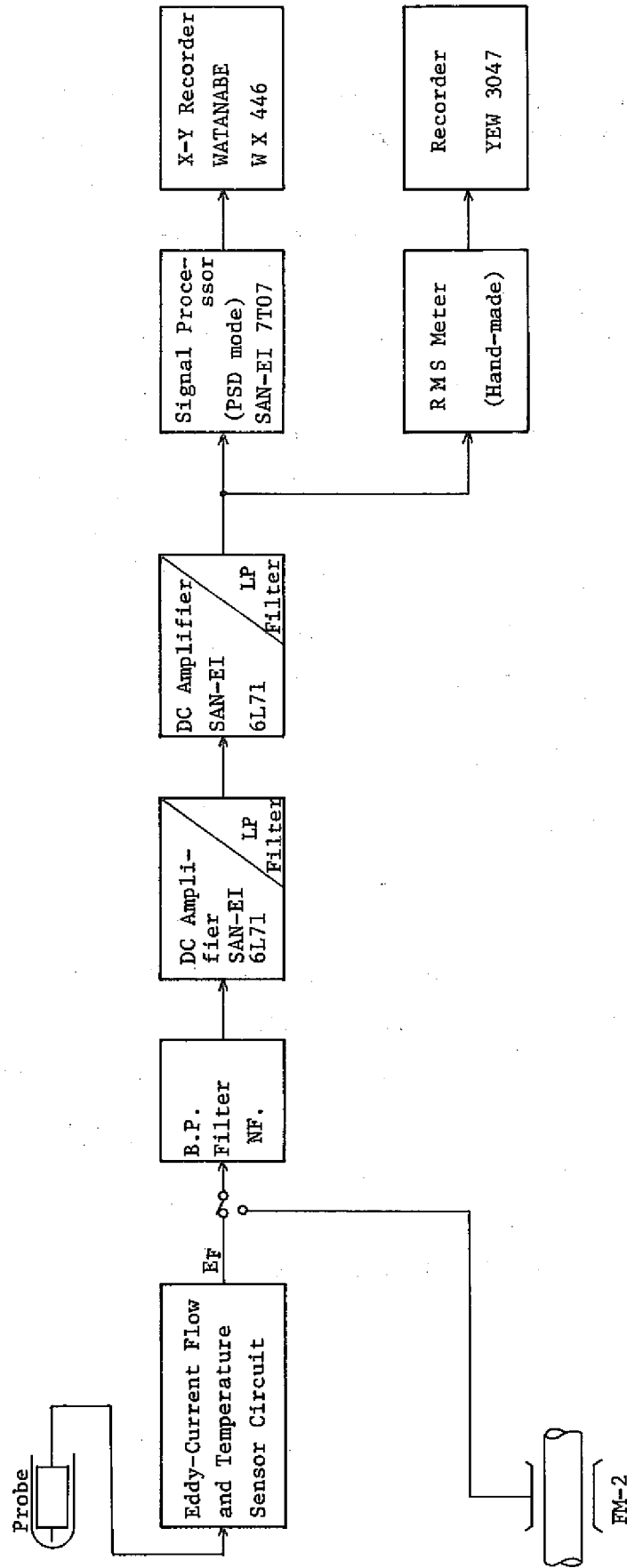


図 7.1 流速信号ゆらぎの測定示ブロック図

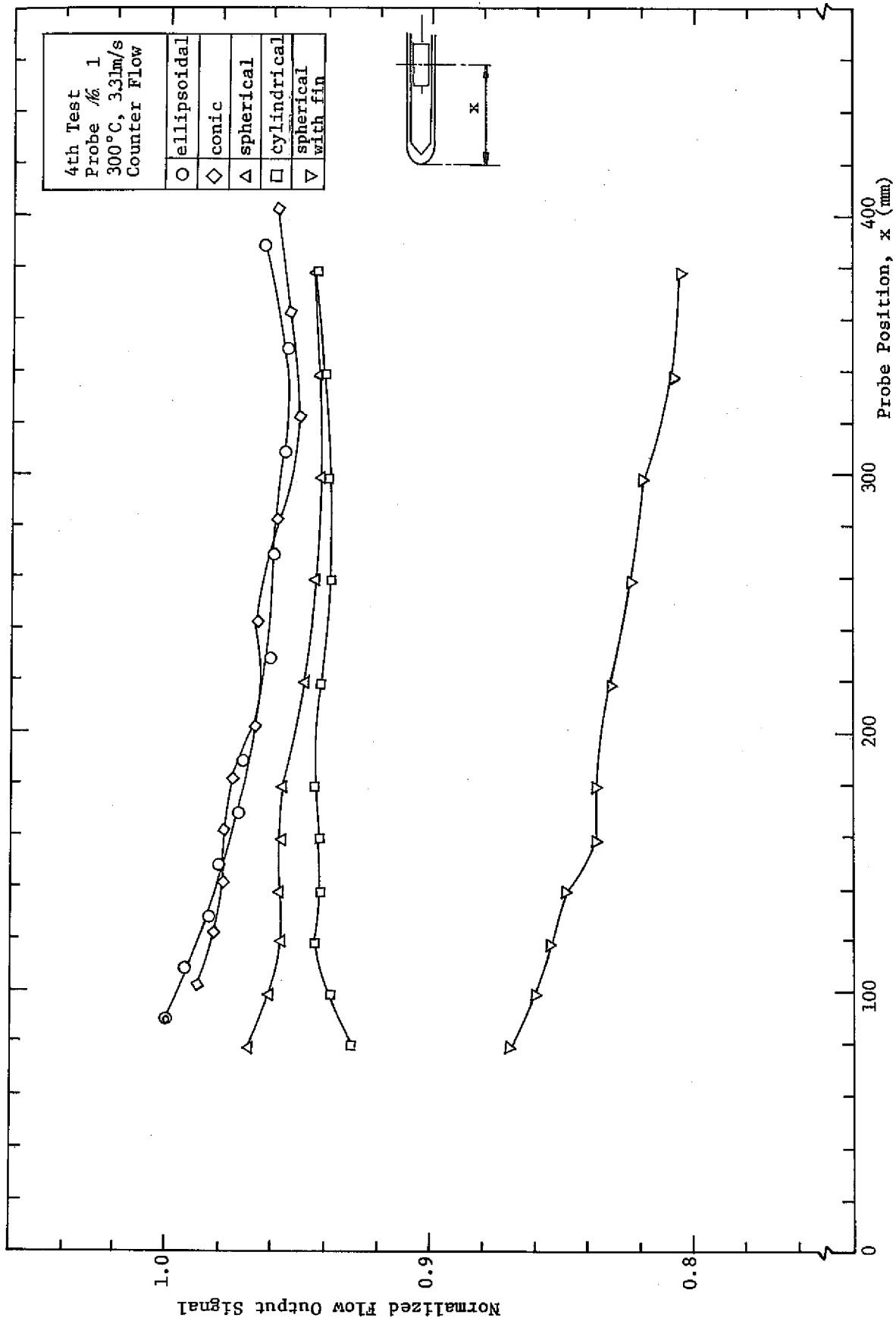


図 7.2 流速検出信号レベルへの案内管先端形状の影響一向流

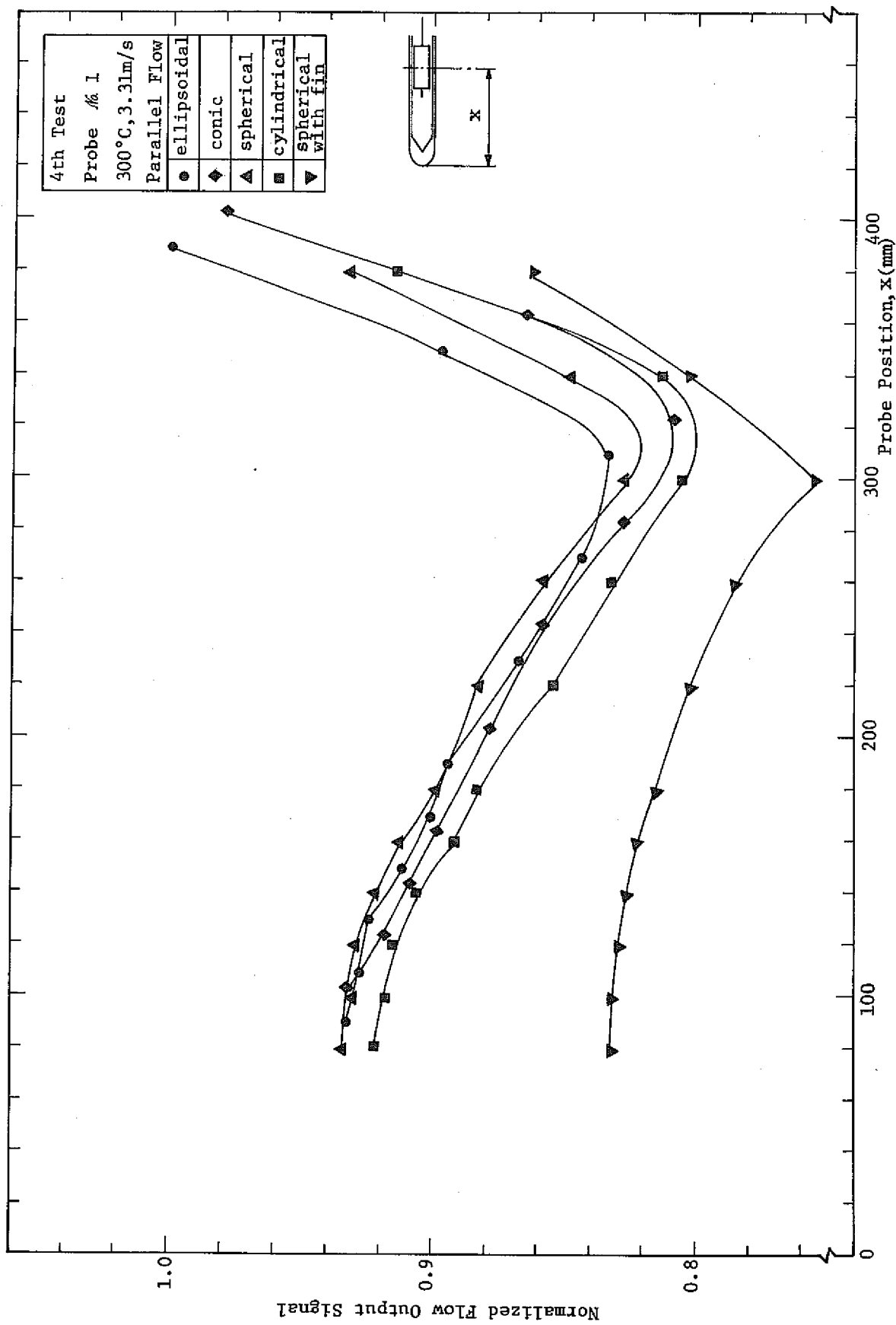


図 7.3 流出検出信号レベルへの案内管先端形状依存性 - 並流 -

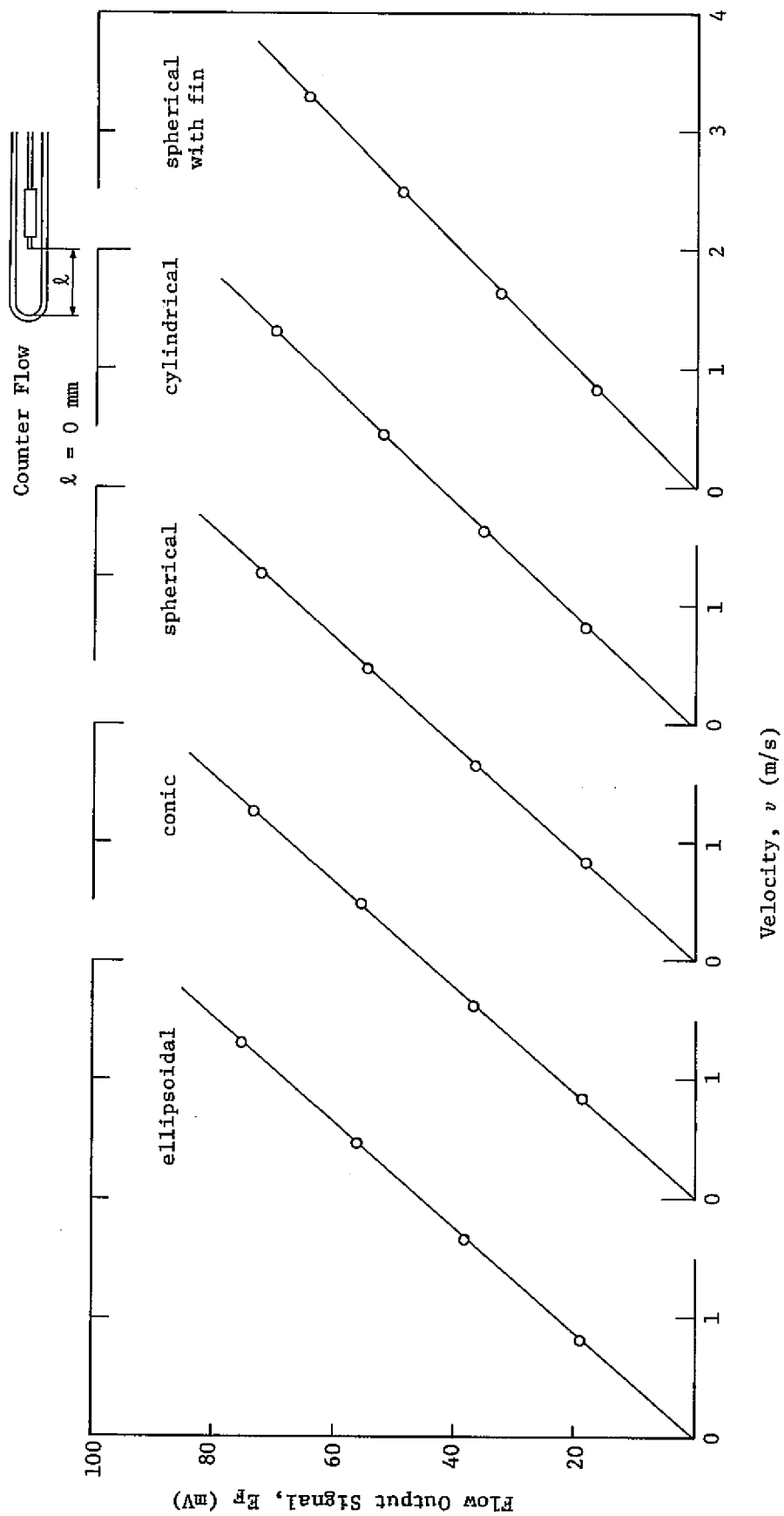


图 7.4 案内管先端形状の直線性への影響 ( $l = 0 \text{ mm}$ )

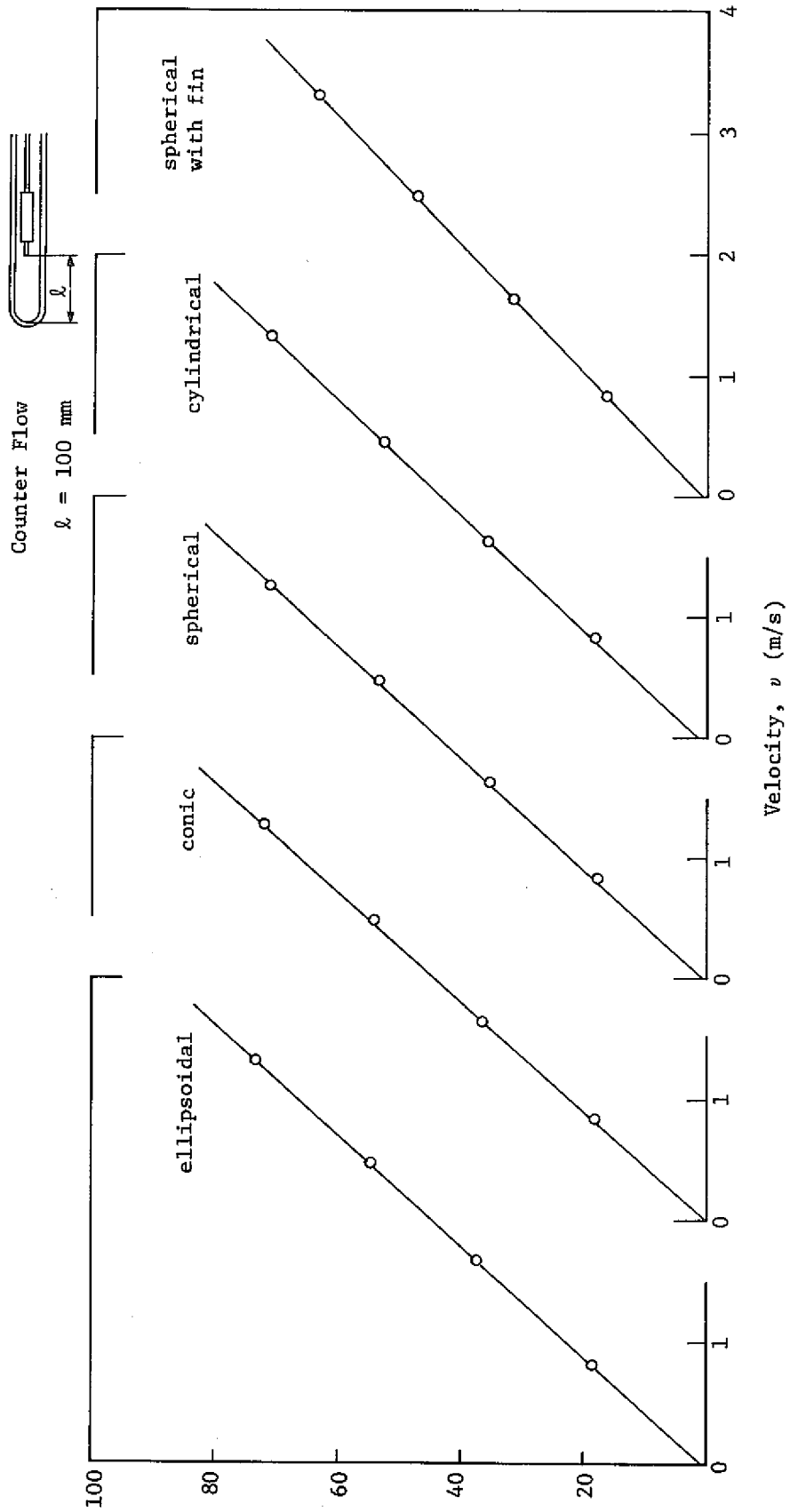


図 7.5 案内管先端形状の直線性への影響 ( $l = 100 \text{ mm}$ )

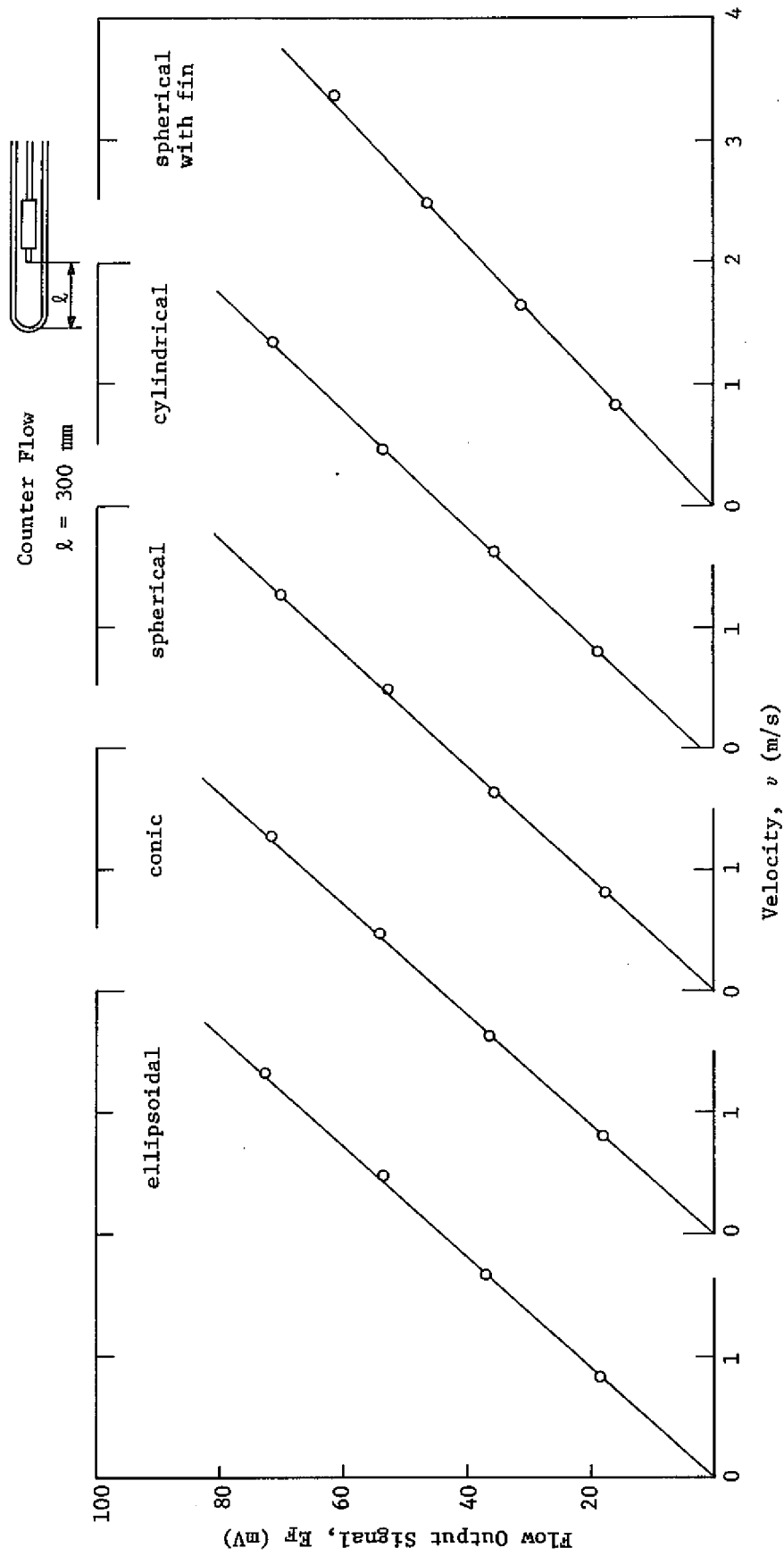


図 7.6 案内管先端形状の直線性への影響 ( $l = 300 \text{ mm}$ )

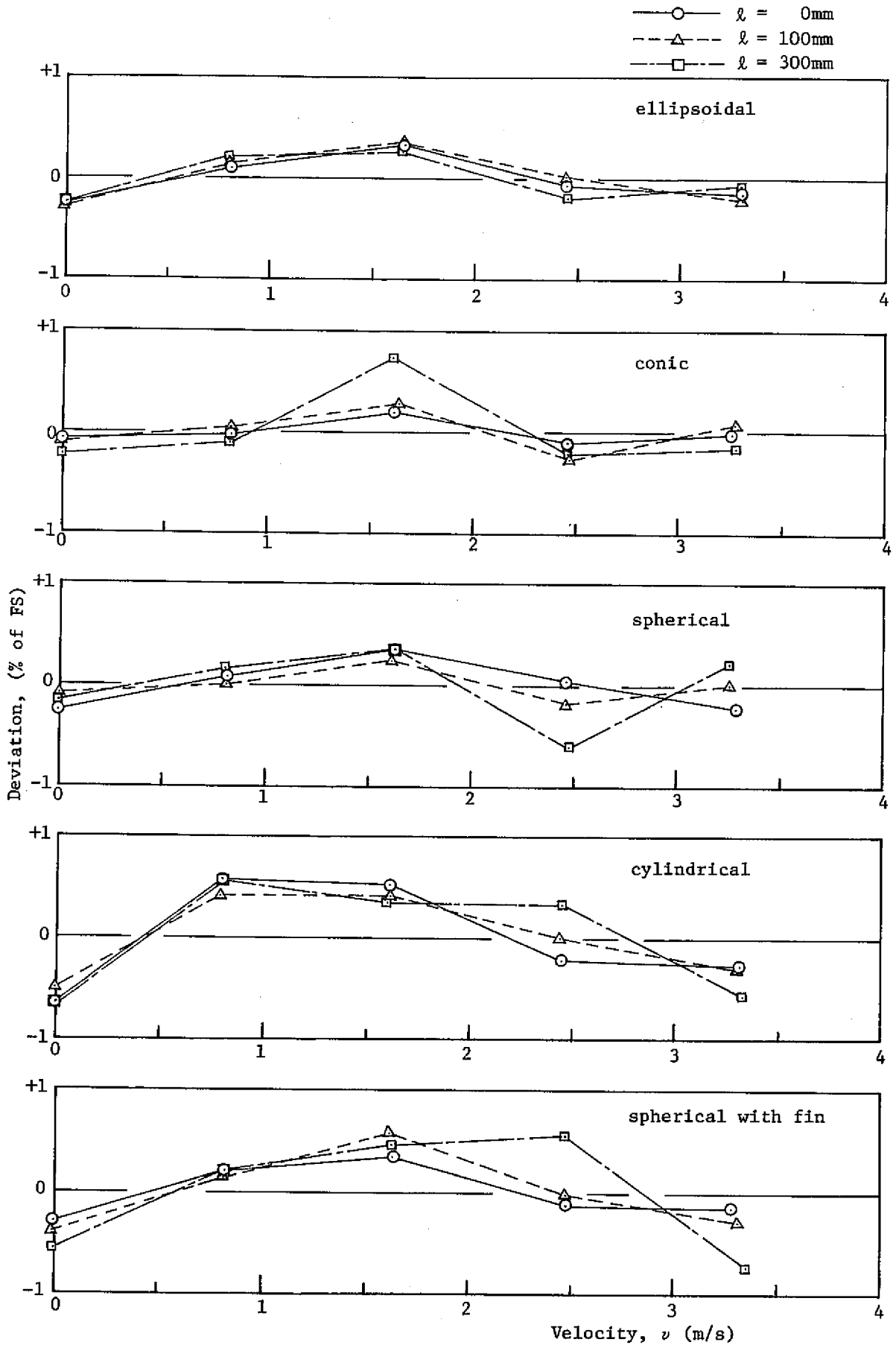


図 7.7 案内管先端形状の直線性への影響—回帰直線からの偏差—



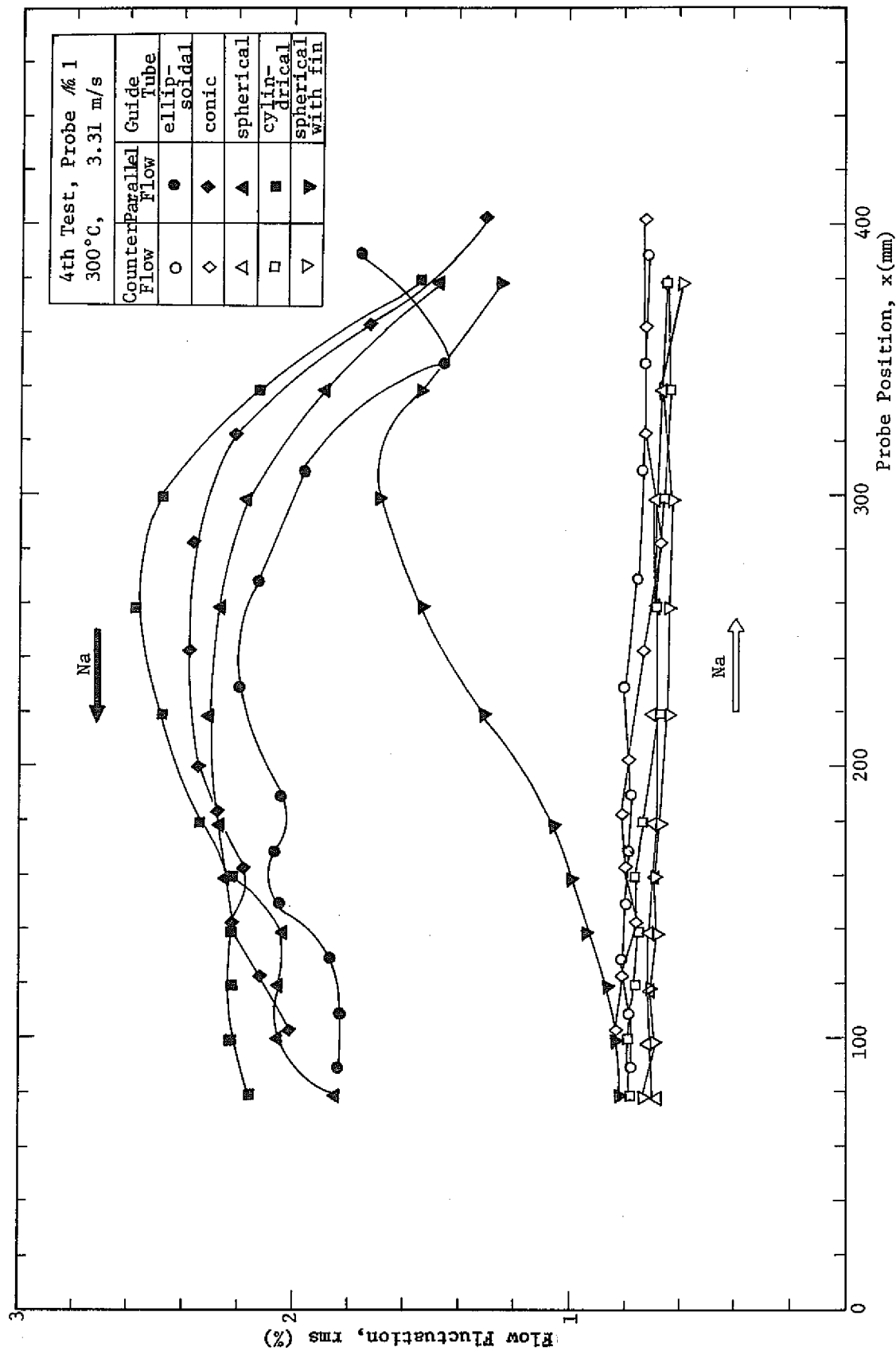


図 7.8 流速信号ゆらぎへの案内管先端形状の影響

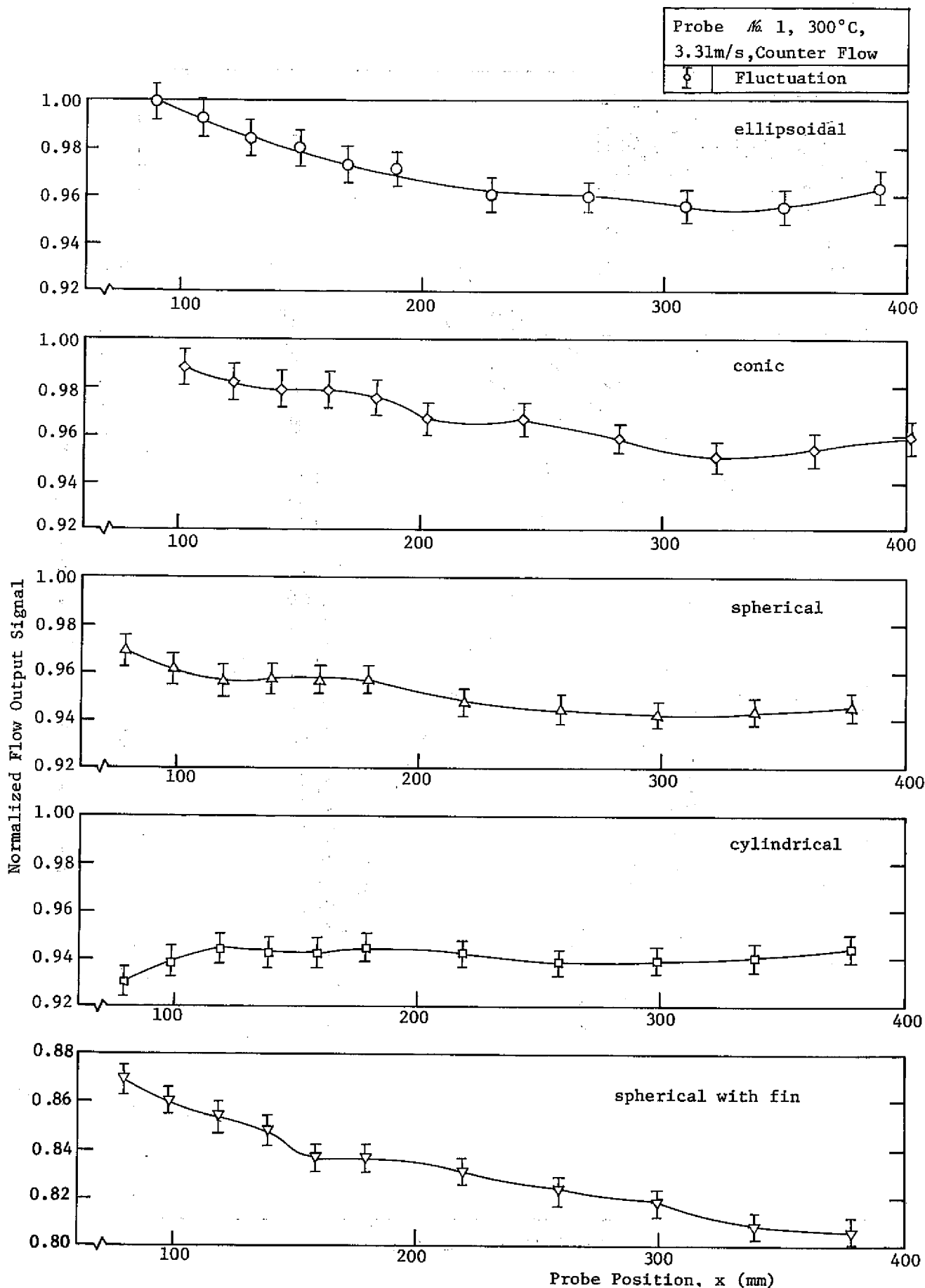


図 7.9 流速指示値とゆらぎの軸方向プローブ位置依存性

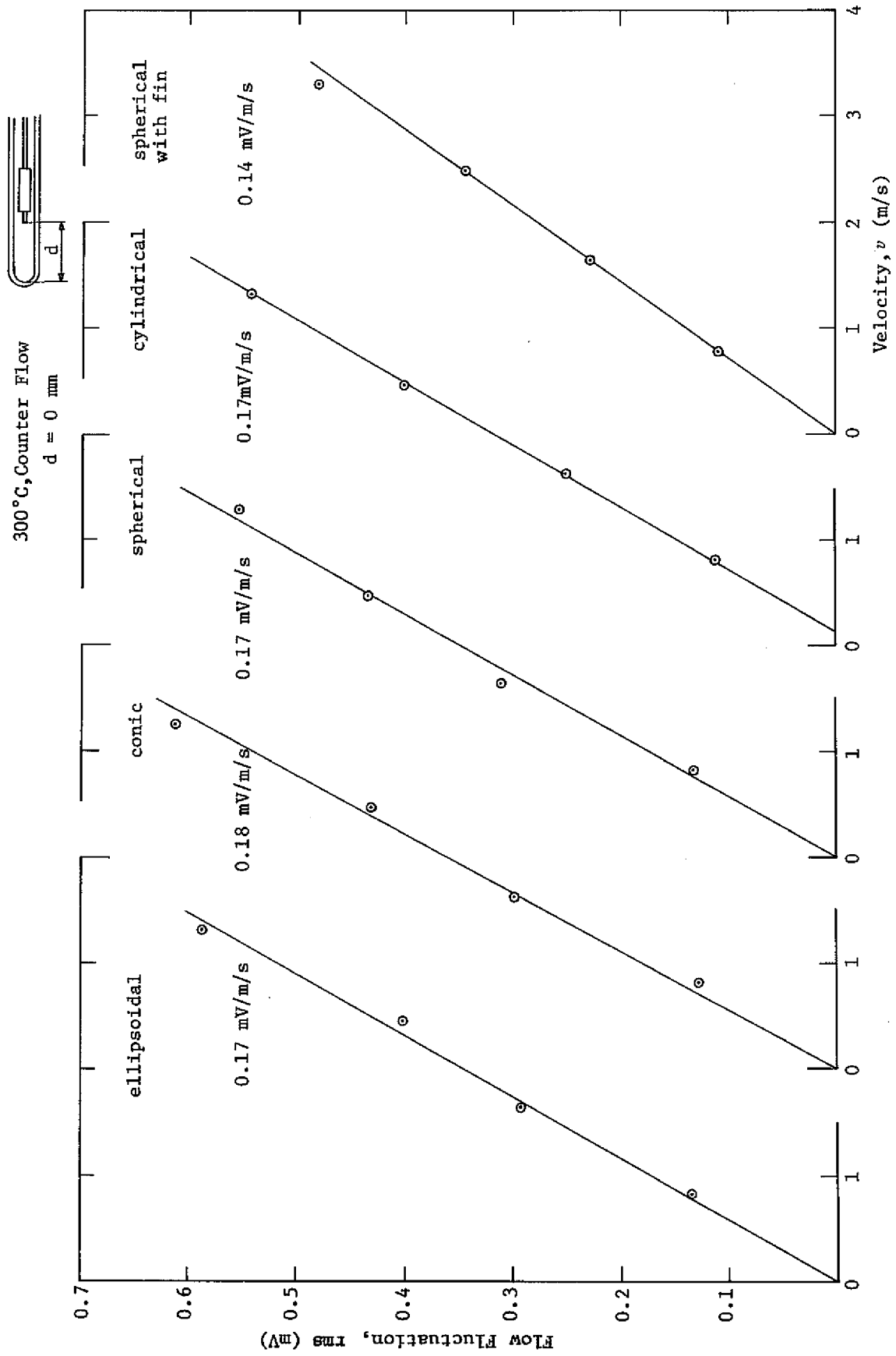


図 7.10 流速信号ゆらぎの流速依存性

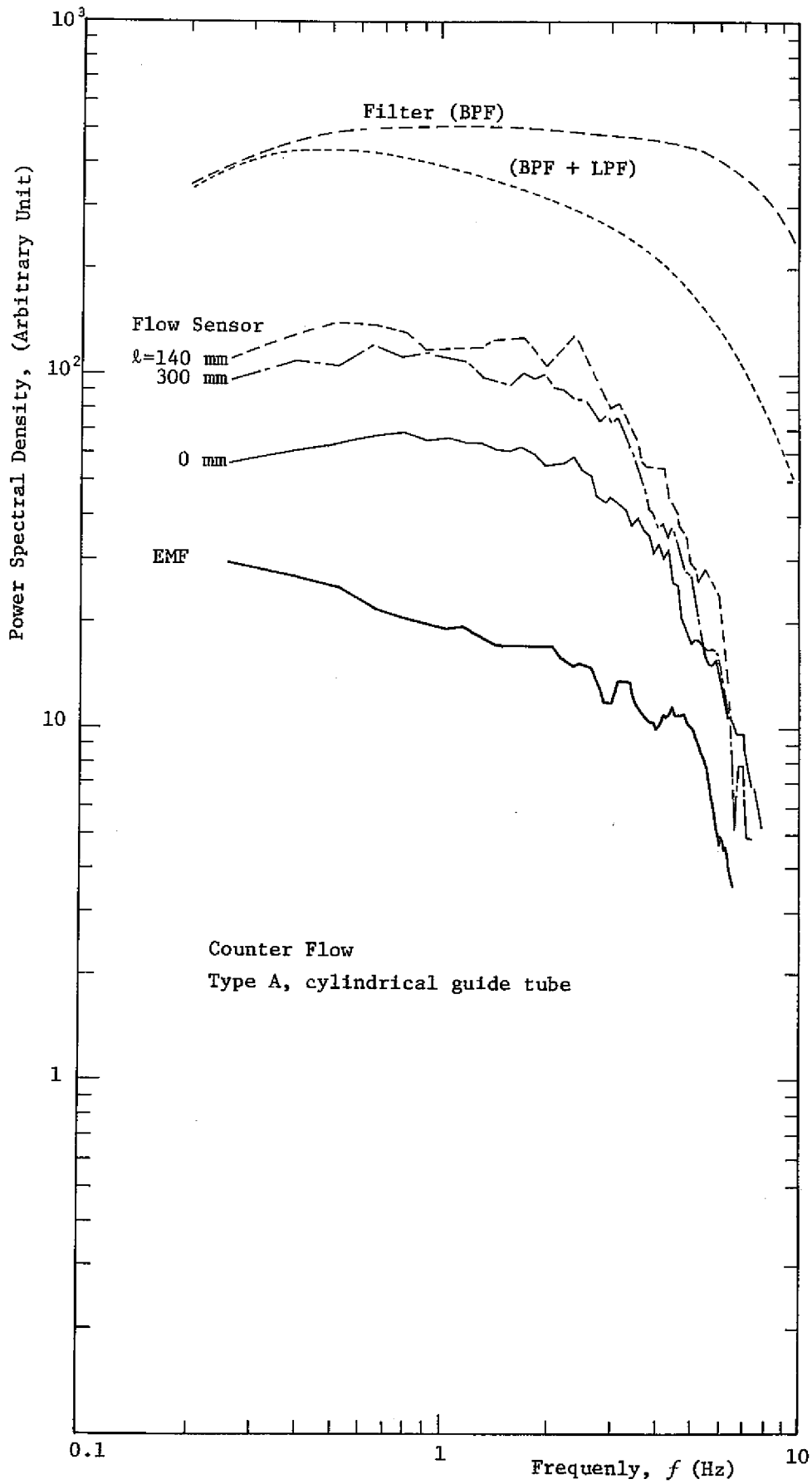


図 7.1 1 流速信号のパワースペクトル—円柱型案内管先端の場合—

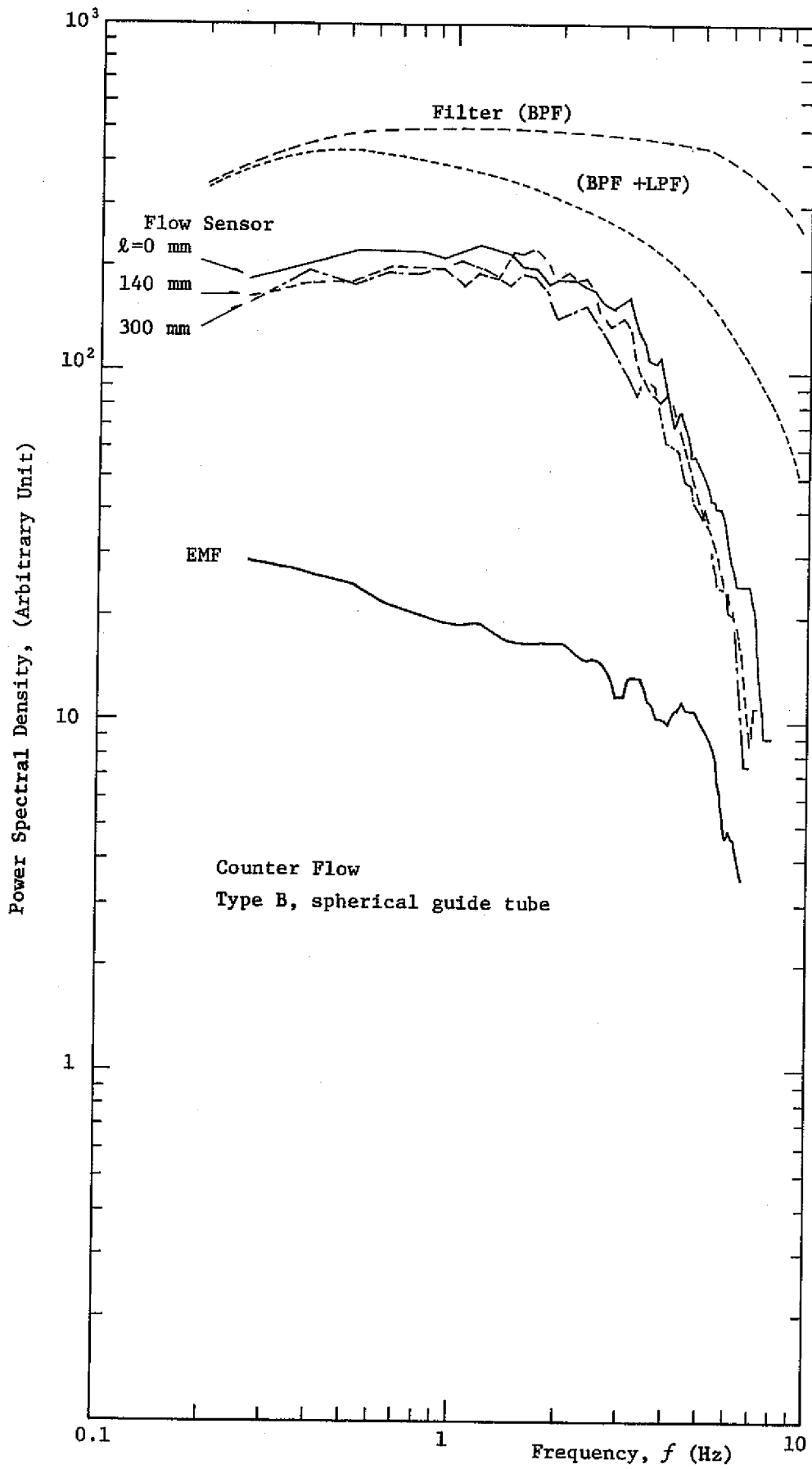


図 7.1 2 流速信号のワスペクトル—球型案内管先端の場合—

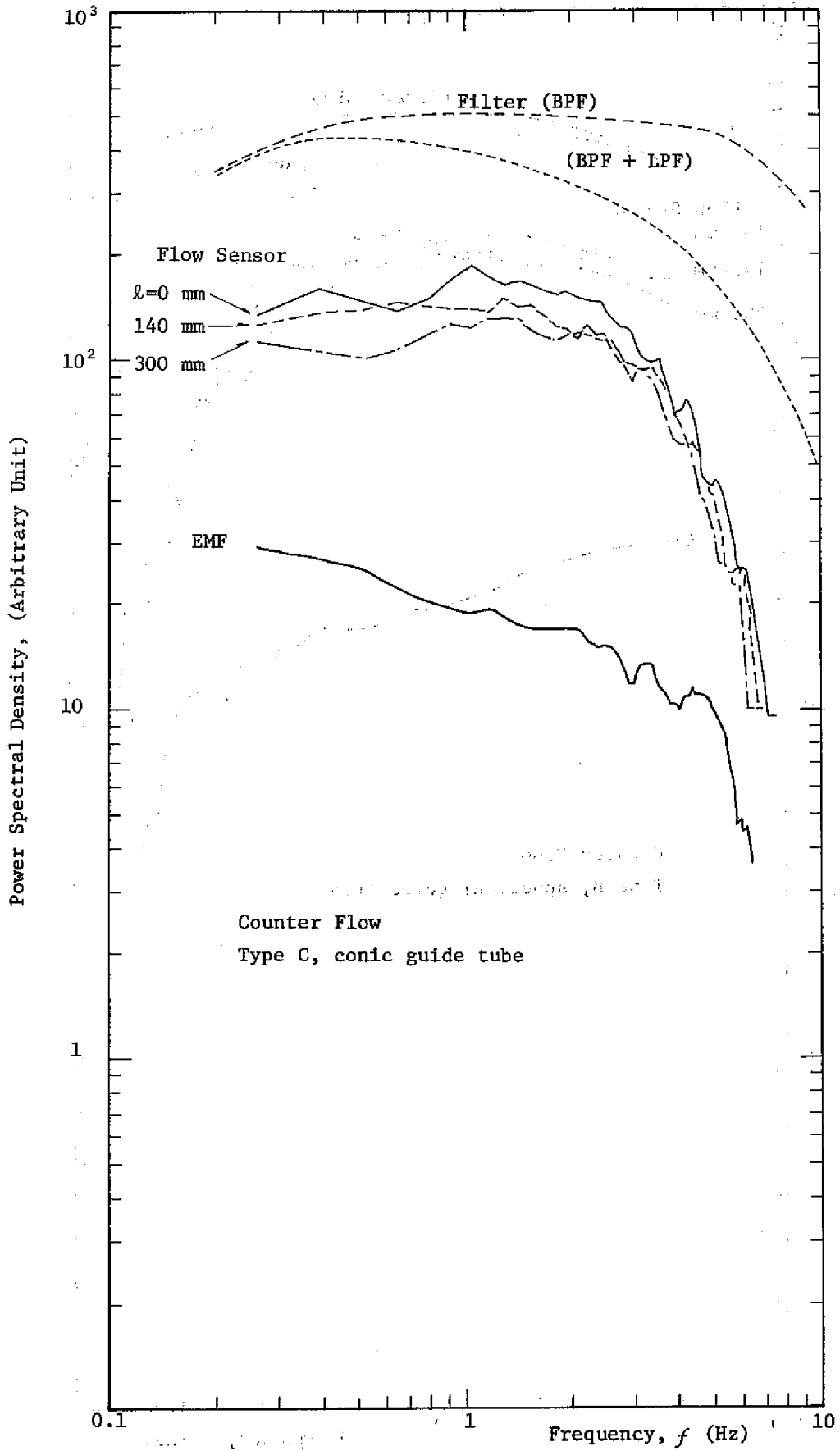


図 7.1-3 流速信号のパワースペクトル—円錐型案内管先端の場合—

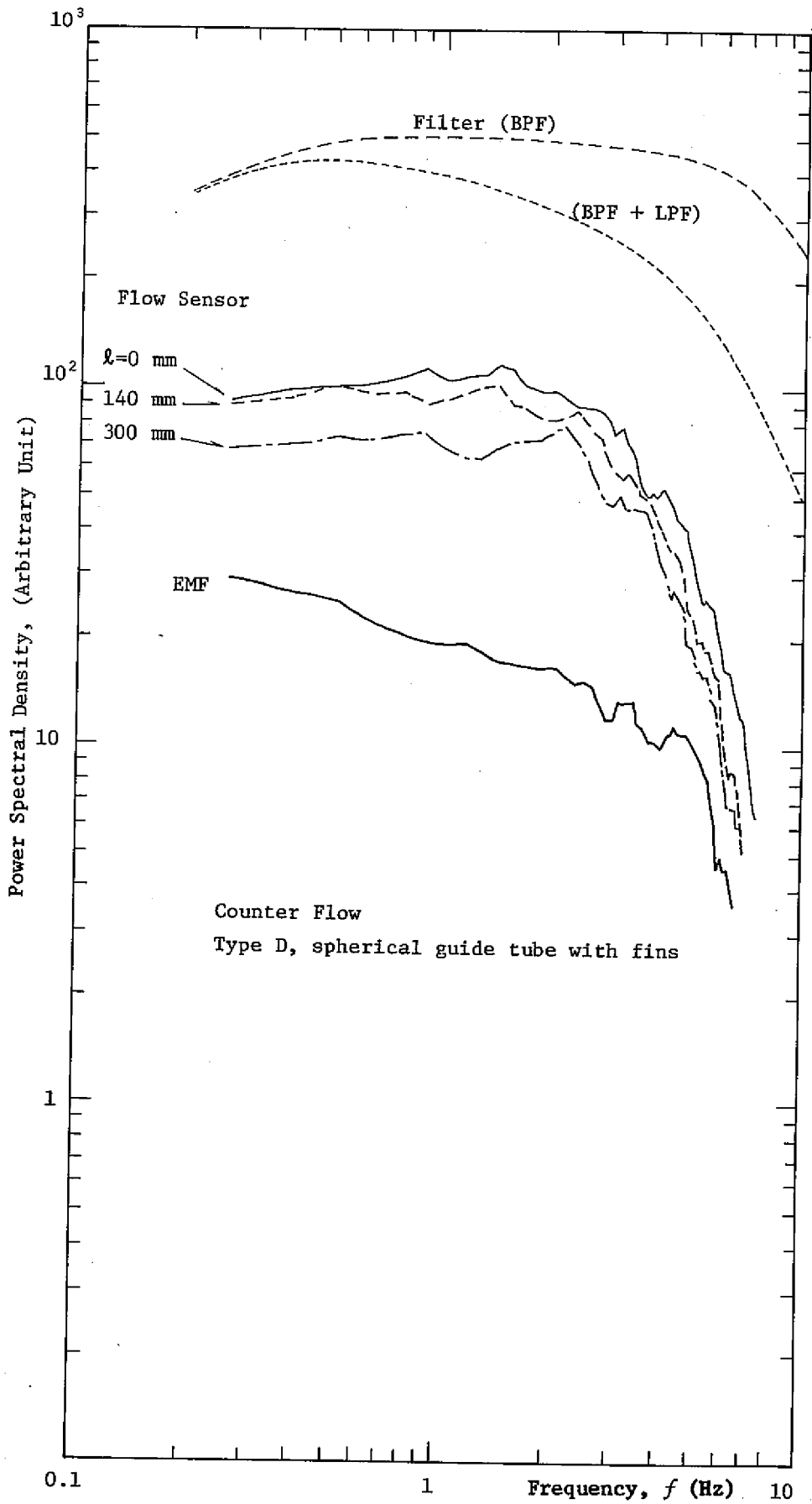


図 7.1 4 流速信号のワスペクトル—フィン付案内管の場合—

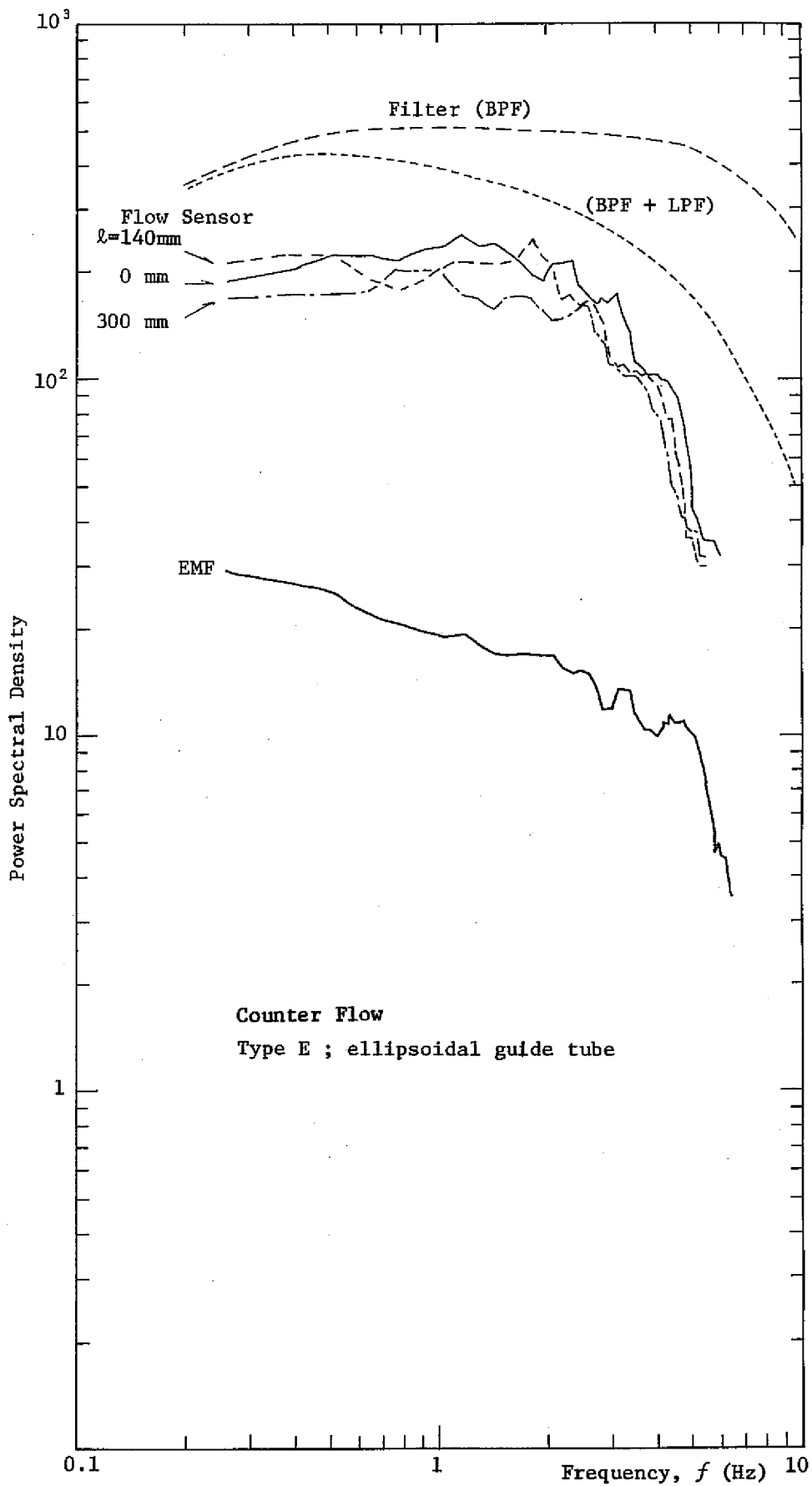
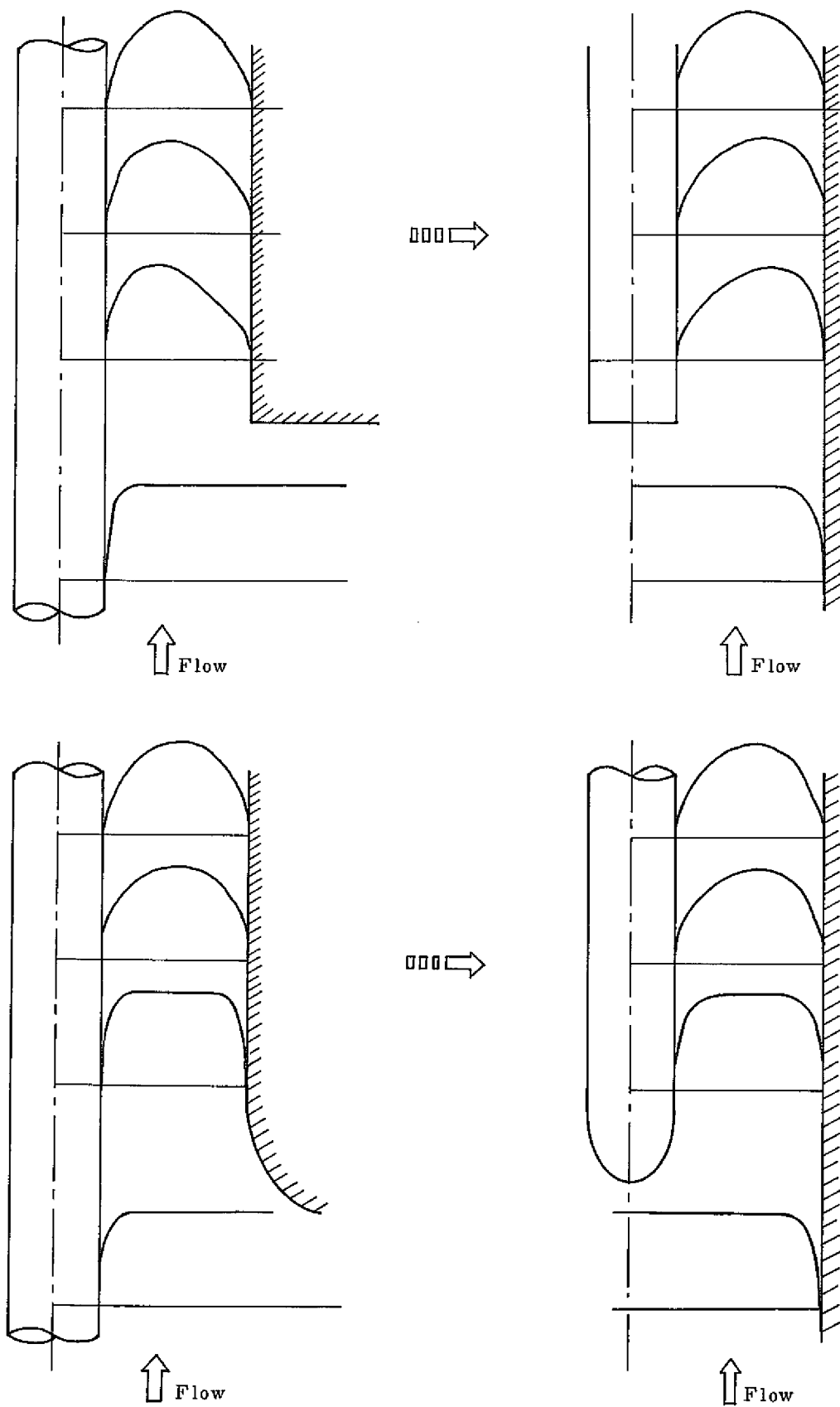


図 7.1 5 流速信号のパワースペクトル—回転楕円体案内管先端の場合—





(a) 実験値<sup>(84)</sup>

(b) 流速計への適用

図 7.16 2重管における流れのモデル

## 8. 燃料チャネル閉塞検出の可能性

### 8.1 流量低下検出の可能性

炉心監視計装として各燃料集合体毎にその上方に流速計を設置する場合、燃料集合体内に生じた流路閉塞による流量低下をどこまで識別できるかが1つの決め手になる。ここでは流量低下検出の限界について、「もんじゅ」炉心上部構造を模擬した7集合体試験部で、見通しを得ることとした。詳細は別途報告の予定なので、ここでは簡単に試験方法と結果を述べることにする。

#### (1) 試験方法

図4.4に示す7集合体試験部において、中央の1集合体と、それと独立した流路を有する周辺6集合体に同じ流量を流し、整流管中心に設置してある案内管内に流速計プローブを挿入してそこでの流速を観測した。

この時の流量指示値は正常状態(すなわち流量低下のない100%流量)のものである。次に、中央集合体への流量を低下していき、各段階における指示値を2ペンレコーダに記録した(図8.1)。なお、流量の設定は主電磁ポンプ(EMP-1)および補助電磁ポンプ(EMP-2)の各供給電圧調整と弁V103, 104の開度調節により行なった。実際の炉の場合、たとえ1集合体に閉塞が生じても炉心燃料集合体は約200本と多数なので、周辺の燃料集合体を流れる冷却材流量は変化しないと見て良い。

したがって、本試験においても周辺6集合体の流量は変化させないで、中央1集合体のみ流量を低下させた。

主な試験条件は次の通りである。

ナトリウム温度; 約500℃

ナトリウム流量; 2800 l/min(max.)

360~400 l/min(中央集合体)

400 l/min(一定, 周辺集合体)

中央/周辺流量比; 100~90%

(流量低下率) (0~10%)

整流管と燃料集合体間のギャップ; 50 mm

整流管とバックル板間のギャップ; 100 mm

渦電流式温度流速計; プロープNo.1, 検出回路No.1, 励磁周波数75 Hz, スパンmax.  
プローブは案内管底に圧着し, 案内管先端は整流管下端より42 mm上に位置する。

同上時定数;  $\tau=0.02, 0.22, 0.62, 4.42$  sec

なお、流量低下率を0%（正常）～10%としたのは、検出限界を知る必要があったことと、あまり大きい流量低下率は現実性に乏しいからである。

ナトリウムの流れはフローシート図4.1からわかるように、V102を閉じ、主電磁ポンプ（EMP-1）によって中央1集合体と周辺集合体に流れ、補助電磁ポンプ（EMP-2）により周辺集合体に流れる。主循環系および補助循環系の周辺チャンネルラインを径て試験容器に流れ込むナトリウムは試験容器下部プレナムで合流する。周辺6集合体は同一形状寸法なので各集合体には同じ流量が流れる。

流量モニターには永久磁石式流量計を用いた。周辺6集合体に流れ込むナトリウムはFM-2とFM-4によりモニターされ、中央1集合体に流れるナトリウムはFM-1で測定した流量からFM-4で測定した流量を差し引いて求めた。ナトリウム流量を $Q$ で表わし、FM-1, 2, 4で測定した流量を $Q_1, Q_2, Q_4$ とすると、各模擬燃料集合体に流れる流量は次式で表わされる。

中央集合体Na流量： $Q_{\text{central}} = Q_1 - Q_4$ （1サブアセンブリ当り）

周辺集合体Na流量： $Q_{\text{adjacent}} = \{ Q_2 + Q_4 \} / 6$ （ " " ）

## (2) 試験結果

流速検出信号には前章で述べたように、時間平均値まわりの流量変動（ゆらぎ）信号が含まれる。したがって、時間応答性を良くすることと、流量変化識別の分解能を上げるということは相反する要求となる。つまり応答性を良くするために測定系の周波数帯域を広げるとゆらぎの大きさは大きくなり、流量変化の識別は困難になる。一方流量変化検出の分解能を上げるには平滑の時定数を大きくすれば良いが、そうすると時間応答性は悪化する。

ここでは流速計に内蔵した平滑回路の時定数を変えることによって、応答性と分解能の妥協点を求めてみた結果を示す。

図8.2～8.5は順に、時定数 $\tau = 0.02, 0.22, 0.62, 4.42$  secでの測定生データを示している。 $\tau = 0.02$  secは励磁周波数75 Hzの約1/10のカットオフ周波数に相当し、本流速計に標準的に取り付けられているR, Cの値による。一方 $\tau = 4.42$ は極端な例で、手持ちのタンタルコンデンサの上限容量から決めた。

流量低下率は0～10%としたが、これは燃料集合体内での流路閉塞断面積で言えば閉塞率0～約55%となる（図8.6）。なお図8.6において、流量比0.8～1.0の間の分割線は筆者が書き加えた。

さて、図8.2～8.5を順に見ていくと、 $\tau = 0.02$  secの場合応答性は良いが、約16% p-pの変動<sup>(注)</sup>があり、図8.2から少なくとも5～8%の流量低下が必要である。同様に、 $\tau = 0.22$

(注) 試験部FS-3のように上流条件の良い場合は、500ℓ/minでも流速指示値の変動は $\tau = 0.02$  secで、2～3% p-pである。したがって上記の値が大きいのは、整流管端部と燃料集合体頂部構造等によるものと考えられる。

secの場合は4~5%、 $\tau = 0.62$  secの場合は約3%、 $\tau = 4.42$  secでは約1%が本検出器の場合流量低下の検出限界の目安と言える。以上の結果をまとめて表8.1に示す。

### (8) 検 討

サブアセンブリ上部に取り付ける安全計装は時間応答性が良いにこしたことはないが、環境条件（冷却材の流れや電気的外乱など）をも考慮して現実的な値に設定しなければならない。信号生データの図と、時間応答性、分解能など総合的に評価すると、本検出器をそのまま炉心上部に設置すると仮定し、最適周波数75 Hzで使用すると考えた場合、妥当と思われる時定数は $\tau = 0.62$  secの前後となろう。この $\tau = 0.62$  secという値は、FFTFの仕様（表8.2）に示された値 $\tau \leq 1/2$  secと同等であり、この辺が現実的な値と考えてさしつかえないと思う。この場合前述したように、1集合体当たり400 l/minの流量を正常流量として実験した本試験について言うかぎり、流量低下検出の限界は約3%と目安値を定めることができる。しかし、ここで定めた目安値は生データを直接評価したもので、流速信号の変動の大きさについて定量化していないので、今後の詳細な実験が必要である。いずれにせよ、試験部FS-3の如き流れの条件の良い場合は流速信号のゆらぎは比較的小さいが、同じ周波数特性でもって測定しても炉心上部においては燃料集合体上部の遮蔽体やハンドリングヘッドさらには整流管構造など流れを複雑にする要素が多いので必然的に流速信号の変動は大きくなり、それだけ流量低下などの変化を識別することが困難になっている。

## 8.2 ボイド検出の可能性

渦電流式流速計のボイド検出についてはこれまで幾つか報告がなされている<sup>(39)</sup>。導電性流体の一部が導電率がほぼゼロのガスボイドで置き換えられた場合比較的局所的流速を検出していると考えられる渦電流式流速計はボイドに対して極めて敏感に反応するであろうことは容易に想像がつく。燃料被覆管が破損した場合の放出FPガスや、ナトリウム沸騰にともなうボイドを検知できるかどうか調べるために、本検出器を7集合体試験部に設置して、アルゴンガスを吹き込んで試験した。

### (1) 試験方法

試験には試験容器内の7集合体試験部と、アルゴンガス吹込部から成るボイド検出試験部を用いた。（詳細は4.4参照）

図8.7に示すように、中央1集合体に連結している中央チャンネルラインの途中に設けたガス吹込みノズルよりアルゴンガスを吹き込み、燃料集合体頂部や整流管を経て約1.9 m下流にある渦電流式温度流速計（整流管内にそれと同軸に設置）にて、ボイドに対する応答性を調べた。

主な試験条件は次の通りである。

ナトリウム温度； 約 310℃

ナトリウム流量； 0～1000  $l/min$  (0～3.3  $m/s$ )

ボイド量； 0～約 60  $cm^3$  (単発吹込)

ボイド率 (Ar 流量 / Na 流量)； 0～約 4% (連続吹込)

渦電流式温度流速計； プローブ No. 4, 検出回路 No. 4

励磁周波数 100 Hz

模擬炉上部機構条件；

	整流管と燃料頂部 管のギャップ $Z_1$	バップル板と整流 管の間のギャップ $Z_2$	温度流速計案内管 の先端と整流管下 端の距離 $Z_3$
ケース A	50 mm	100 mm	42 mm
ケース B	0 mm	100 mm	42 mm

なおボイド検出信号としては、流速検出信号と温度検出信号の両方を採用した。また、  
No. 4 のプローブを用いたのは基準としていたプローブ No. 1 が故障したためであり、励磁周  
波数を 100 Hz としたのは当初の実験において 100 Hz を最適周波数に近いきりのいい値  
として使用していたためである。

吹き込むアルゴンガスはナトリウム温度にできるだけ近い温度にした。

吹き込んだガスボイドの量またはボイド率は次のように算出した。

(i) 単発吹込みの場合

弁 V501 と V502 の間の体積は工場製作の段階で水にて実測しておいた。V501 閉、V502 開の状態がガス圧力が平衡するまで待ち、その時の圧力をブルドン管式圧力計で測定した。次に V502 を閉じ、V501 を開いてナトリウム中にアルゴンガスを解放するが、V501 からノズル先端までの残留ガスは放出前と放出後とで同じであるから結局吹き込まれたアルゴンガスの量 (ナトリウム温度に換算した値)  $V$  は、

$$V = V_A \times (P_0 - P_{Na}) \times K \quad (8.1)$$

但し、 $V_A$ ； V501～V502 の間の体積

$P_0$ ； 吹き込み前のガス圧力

$P_{Na}$ ； ナトリウム側の圧力

$K$ ； 温度補正係数

(注) 付録 A に示すように、この後 No. 1 検出器は No. 7 検出器とともに熱衝撃特性に優れたプローブに改められた。改良後の No. 1 検出器は第 5 章～第 8 章 8.1 項までの試験に供された。

より求められる。この $V$ の値はさらに温度流速計位置での体積に補正された。

### (ii) 連続吹き込みの場合

レコーダに記録したガス流量計出力(常温値)と、その点での圧力から、プローブ位置でのナトリウム温度と圧力における流量にメーカー校正データをもとに換算して、ボイド流量を求めた。

図 8.7 に測定係ブロック図を示す。渦電流式温度流速計からの出力は 12 ペンレコーダと電磁オシログラフに記録した。

## (2) 試験結果

### (i) 単発吹き込みの場合

単発的にアルゴンガスをナトリウム中に吹込んだ時の温度流速計の流速信号および温度信号の生データ例を経過時間 $t$ とともに示したのが図 8.8 である。同図はボイド信号を明らかに示し、かつボイドの浮力による移行速度をつかむため、 $V103$ を閉じナトリウム流速をほぼゼロ( $V \leq 1 \text{ cm/s}$ )にして測定した。吹込んだボイドの体積はナトリウム温度に換算して約  $2.1 \text{ cm}^3$ であった。

温度信号では出力変化が正方向に、単純な山形を示すのに対し、流速信号では温度信号を時間微分し符号を逆にした如き形状を呈する。また流速信号の場合、ボイド検出のピークが現われる前に前駆的に直流レベルが上昇している。

図 8.8 の傾向は吹込むボイドの量やナトリウム流速によらず同様であるが、ナトリウムが流れているときはボイド検出信号の大きさが小さくなる。実際の炉条件では数  $\text{m/s}$  のナトリウムが流れるので、ナトリウム流速がある場合( $V = 0.33 \sim 3.3 \text{ m/s}$ )について単発吹き込みボイドの識別状況を示したのが図 8.9 である。縦軸は流速信号と温度信号それぞれについてボイドの有りの場合と無しの場合の交流成分(peak-to-peak)の比をとっている。横軸はナトリウム流量に対するボイド体積をとっている。<sup>(注)<sub>2</sub></sup>7 集合体の周辺 6 集合体にもナトリウム流れがある場合(Case A)も、中央 1 集合体へのみナトリウムを流した場合(Case B)も、流速信号の場合 1 つの曲線上に乗っており、当然ながらボイド量が増せば交流成分が大きくなっている。しかしながら温度信号の場合は有意の傾向が見出されなかった。

(注)<sub>1</sub> レコーダチャートにおけるペン先の位置のずれは補正してあるので、図 8.8 の流速信号  $E_F$  と温度信号  $E_T$  は同時データである。図 8.10 についても同じ。

(注)<sub>2</sub> 種々の方式で整理したが結果的に有意の傾向が示されたのは上記の場合のみであった。単に体積のみでは、ナトリウムが流れている場合は不適当であった。すなわちパルスの的にガスボイドを投入しても、単位体積当りのボイド量はナトリウム流速に依存する。

## (ii) 連続吹込みの場合

連続的にアルゴンガスをナトリウム中に吹込んだ時の流速信号および温度信号の時間的変化の生データ例を図 8.10 に示す。ナトリウム流速は  $33.4\text{ cm/s}$ 、ポイド率は 3.5% である。流速信号、温度信号ともに単発吹込みの応答 (図 8.8) の重ね合わせとして現われている。

連続吹込みポイドの識別状況は図 8.11 に示す通りである。同図の場合も交流成分 (peak-to-peak) の変化の割合を縦軸にとっているが、横軸はナトリウム流量に対するガス流量の比すなわちポイド率をとっている。流速信号の場合も、温度信号の場合も Case A, B で差はなく、1つの曲線上に乗っており、ポイド率の増加とともに信号の交流成分も増加することがわかる。

なお連続吹込みの場合、ガス吹込み開始時のデータはさけ、定常になった時のデータを使用した。

## (3) 検 討

## (i) 単発吹込みポイドの識別

流速信号の場合は図 8.9 に示すように、ナトリウムの流れの中のポイド量が増加するに従って、信号の交流成分は増加する。今仮りにバックグラウンドレベル (ポイドのないときの交流信号の大きさ、peak-to-peak) の 2 倍を識別可能な下限とすると、約  $0.07\text{ cm}^3/\text{l}/\text{min}$  を 1つの基準として選びえる。かなり乱暴ではあるが、この傾向がそのまま保たれるとした場合、「もんじゅ」条件に適用し、ナトリウム流量を  $1200\text{ l}/\text{min}$  とすると、検出に必要なポイドの体積はナトリウム温度換算で  $84\text{ cm}^3$  と推定される。しかし本測定では励磁周波数を  $100\text{ Hz}$  としていること、ナトリウム温度が  $310\text{ }^\circ\text{C}$  (ガス加熱器の発熱量不足のため) とせざるを得なかったため、今後はより実際に近い条件で試験を行う予定である。またポイド検出における励磁周波数依存性も今後の課題である。

また今回の測定では失敗に終わったが、単発ポイドに対する温度信号についても再検討すべきである。

さらにナトリウムの流れの中でのポイドの挙動も不明な点が多く今後の検討項目である。

## (ii) 連続吹込みポイドの識別

図 8.11 から明らかなように、連続吹込みの場合は流速信号の交流成分、温度信号の交流成分ともにポイド率に対して妥当な傾向を示している。ここでも仮りにバックグラウンドレベルの 2 倍を識別可能な下限とすると、流速信号、温度信号ともにポイド率 1% が検出限界と言えよう。しかしデータにバラツキが多いので、この値はあくまで目安値として考えるべきである。炉条件にあえて適用してみると、 $1200\text{ l}/\text{min}$  のナトリウム流量時、識

別可能なボイドは  $12\ell/\text{mm}$  となり、ボイド検出感度は決して良くない。本測定に関する問題は単発ボイドの項で述べた通りである。

なお、ボイドの吹込みによる直流成分の変化についてはボイド率等でうまく整理ができず割愛した。今後交流成分だけでなく直流成分の変化についてもより精確なデータ採取が必要である。

ボイド吹込み時の直流成分について考えてみると、連続吹込みによって導電性ナトリウムがガスボイドに一部置き換わるることによって温度信号の直流成分が増加することは容易にうなづける。一方流速信号の場合の直流成分の増加は実効的導電率の変化の他に図 8.8 の単発ボイドにおける前駆的直流成分の増加の影響も受けているのではないかと考えられる。すなわち、ナトリウムの流れの中に余分にガスを吹き込むことによるナトリウムの実質的加速に由来すると考えることができる。しかし今のところ、これを断定するにはデータの定量性が不十分である。

#### (ii) ボイド応答性の解釈

参考までに、2次コイル信号のベクトル図(図 5.11)でボイド検出について議論する。前述したようにボイドの存在は導電性ナトリウムのガスボイドによる置換ということから必然的に導電率  $\sigma$  を低下させる。図 5.11 において  $\sigma$  の低下はその局在性を除けばナトリウム温度の上昇に対応する。図 5.11 (b)には  $f=100\text{Hz}$  が記入されていないので  $f=75\text{Hz}$  で話を進める。

単発ボイドの場合、まず上流側の2次コイル信号( $S_1$ , 「●」印)が上昇し、流速ベクトル  $E_F$  は時計方向に回転し、ベクトルの大きさが減少するがボイド通過後はもとの値にもどる。次にボイドが下流側の2次コイルに達するとその信号( $S_2$ , 「○」印)が上昇し、流速ベクトル  $E_F$  は反時計方向に回転し、ベクトルの大きさも大きくなる。これが図 8.8 の流速信号の時間応答性の説明である。

一方、温度信号の場合は、 $S_1, S_2$ によって与えられる合ベクトルは当然ボイドの通過時出力は増加するだけで減少はしない。この様子は図 8.8 に示した通りである。

次に連続的にボイドが通過する場合は、ボイド間の干渉がなければ基本的に単発ボイドの重ね合わせであり、ベクトル  $S_1, S_2$ 相方ともボイド率に応じて大きくなり、流速ベクトル  $E_F (=S_2 - S_1)$ 、温度ベクトル  $E_T (S_1 + S_2)$ とも平均値(直流成分)が大きくなる。しかしながら本検出器の場合、図 5.11 に示すベクトル特性から、流速検出のために要求される最適周波数( $f \approx 75\text{Hz}$ )ではボイドの効果( $\sigma$ の効果)はそれ程大きいものとは考えられず、ボイド検出だけに話をしほれば、ベクトル  $S_1, S_2$ と  $E_F$  が直交に近い  $f=1025\text{Hz}$ の方が信号の変化分(ボイドによる交流成分の増加)が大きいと考えられる。これらについては別途報告する予定である。



(V) ボイドの移行速度

図 8.8, 8.10 に示すように, ボイドを吹込んでから下流に設置した渦電流式温度流速計にボイド信号が現われるまで時間遅れがある。この遅れ時間と距離からボイドがナトリウムにはこばれているときの速度 (ボイドの移行速度と呼ぶことにする) を求めると図 8.12 のようになる。弁 V103 を閉じナトリウム流速ゼロの状態ですべてボイドを吹込んだ結果は 30 cm/s となり, これが静止ナトリウム中のボイドの浮力による上昇速度に相当する。

静水中のボイドの上昇速度は, ボイドの形状や球相当直径  $d_0$ , 管径  $D$  に依存し, 物性値にもよるが, 水道水では図 8.13 に示すように管内径 5.0 mm のときバブル径  $d_0$  が 2~8 mm では上昇速度が一定値 (約 2.3 mm/s) を示す。ナトリウムの場合, 管内径 8.0 mm, ノズル穴径 2 mm, 動粘性係数が水とオーダ的に同じであることを考慮に入れると, 前記の 30 cm/s はさほど大きな間違いをしていないように思われる。

とにかく図 8.11 から, ボイドの移行速度は実線ですす直線上に整理され, 破線で示したナトリウム流速より約 34% 速くなっている。<sup>(注)1</sup> 炉条件としてナトリウム流速を 5 m/s とし, 燃料ビンやスペーサワイヤ等の構造物で移行特性が変わらないとした場合, 炉心中心で発生またはナトリウム中に解放されたガスボイドは約 2.4 m 上部にある検出器位置まで約 0.3 秒かかると推定される。

表 8.1 時定数と流量低下識別限界の目安

第 5 回試験

時定数 $\tau$ (sec)	流速信号のゆらぎの大きさ (% p-p)	識別可能な 流量低下率 (%)	閉塞率 (%)	
			文献 <sup>(注)1</sup>	文献 <sup>(注)2</sup>
0.02	~16	5~8	42~50	50~57
0.22	~10	4~5	38~42	47~50
0.62	~6	~3	~33	~43
4.42	~2	~1	~20	~28

(注)1: 移行時間をレコーダチャートから求めたこと, およびボイド吹込位置より検出器位置までの流路断面積が必ずしも一定でないことから, この値は目安値である。

(注)2: 文献<sup>(注)1</sup> Fig. 16, 正常流路における圧力損失がすべて摩擦損失による場合を採用した。

表 8.2 FFTF 燃料チャンネル流量計目標仕様<sup>(42)</sup>

- (1) Flow rate range coverage of 0-150 and 0-600 gpm for a driver fuel assembly and 0-10 and 0-150 gpm for a test fuel assembly ;
- (2) Operation in sodium to 1400 °F ;
- (3) Operation in a fast-neutron flux to  $5 \times 10^{14}$  nv ; and
- (4) Operation in a gamma flux to  $2 \times 10^8$  R/hr.

The target requirements are :

- (1) Maximum nonrecoverable pressure loss not to exceed 1 psi ;
- (2) Accuracy of  $\pm 5$  % full range ;
- (3) Sensitivity of 1 % of full range ;
- (4) A time constant ( $t$ ) of 1/2 sec or less ; and
- (5) The ability to withstand repeated thermal shocks of 100 °F per sec for 3 sec.

Other desirable characteristics to be considered are :

- (1) Failure of a sensor should not result in a mandatory shutdown of the reactor for any reason other than loss of signal ;
- (2) The sensor should not be integral with the assembly so that fuel-handling is not inhibited ; and
- (3) The entrained gas sensitivity should be sufficient to detect a gas injected from a fuel assembly at one standard cu cm/sec.

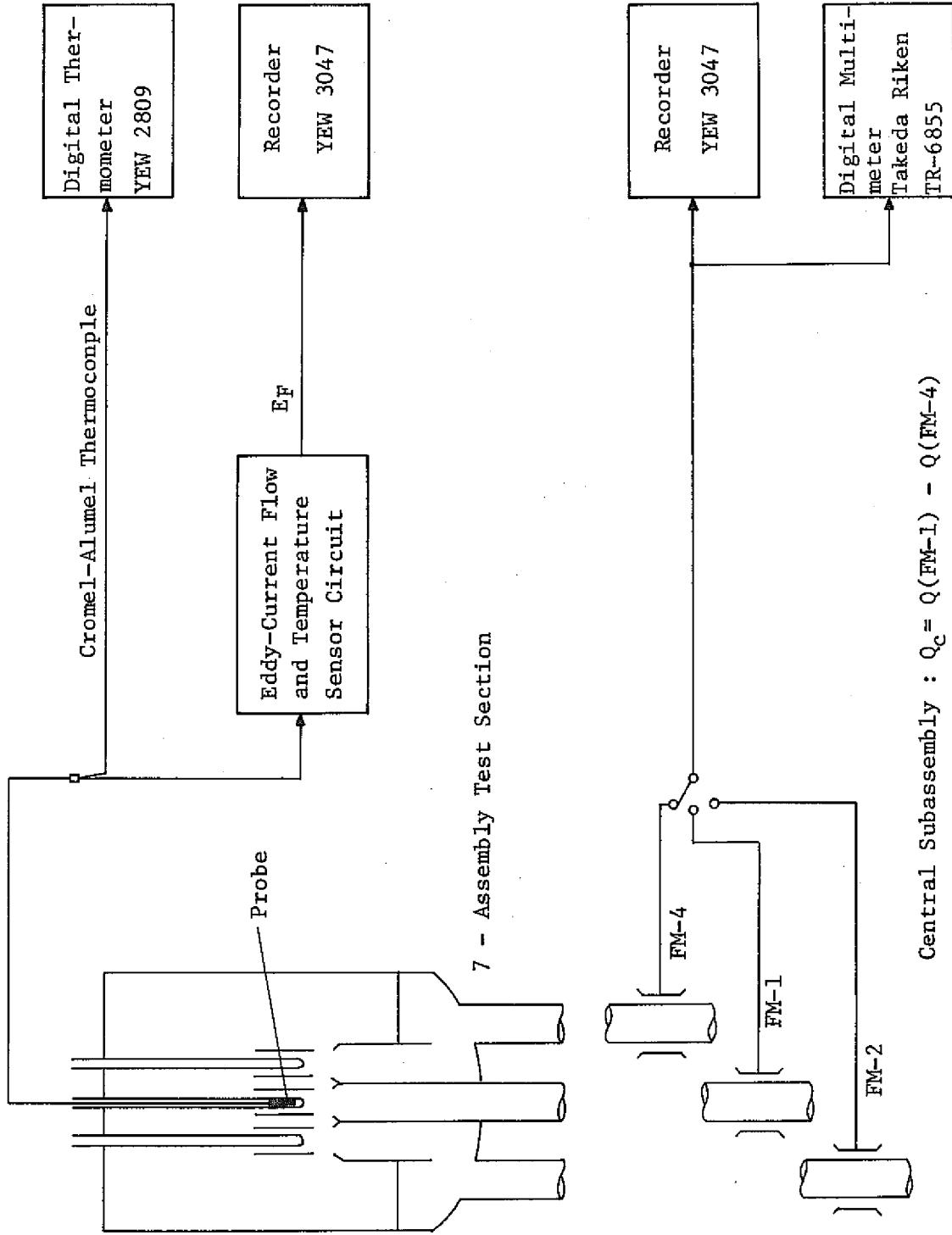


図 8.1 流量低下検出限界試験測定系ブロック図

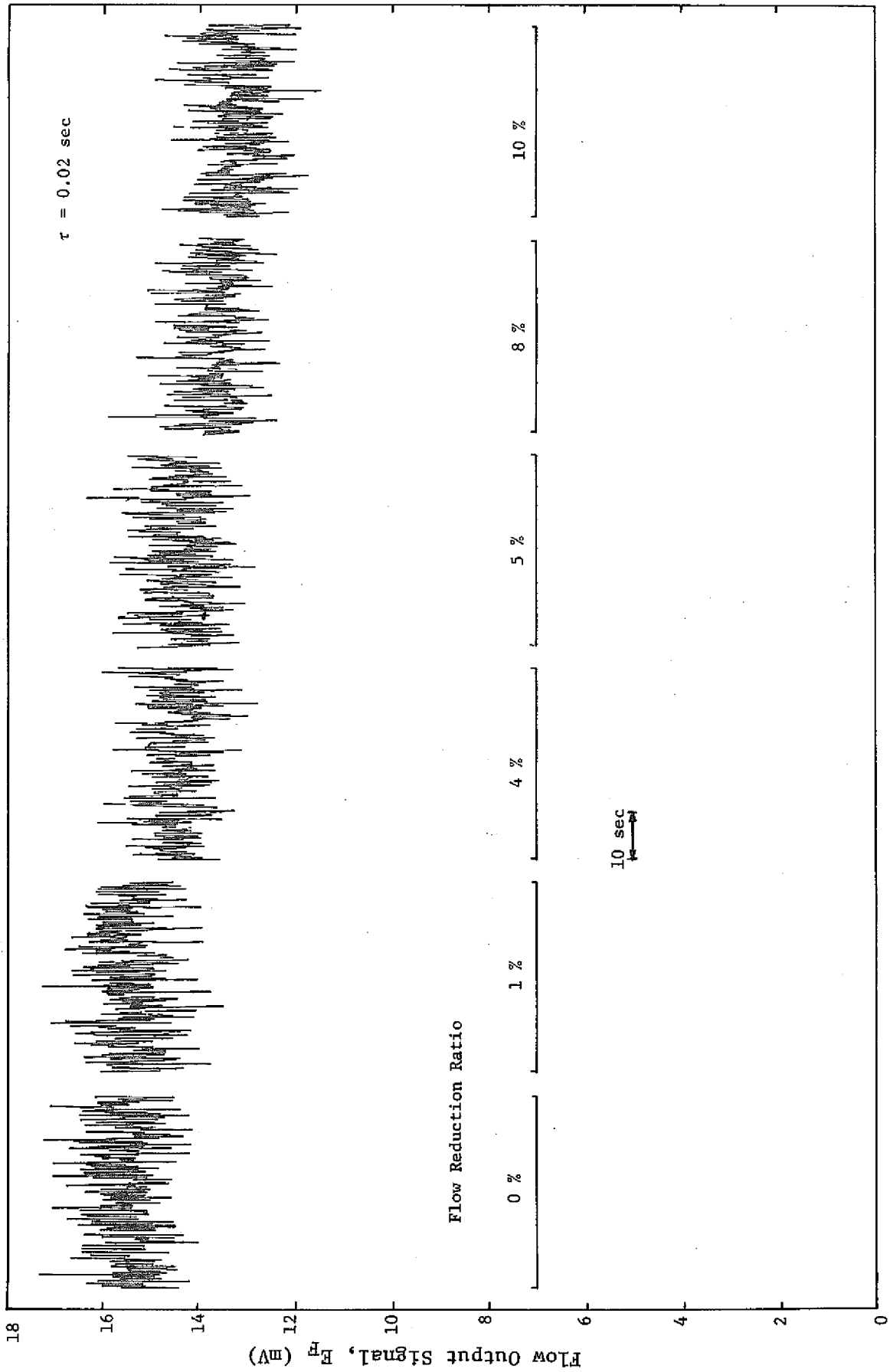


図 8.2 流量低下識別と時定数の関係 ( $\tau = 0.02 \text{ sec}$ )

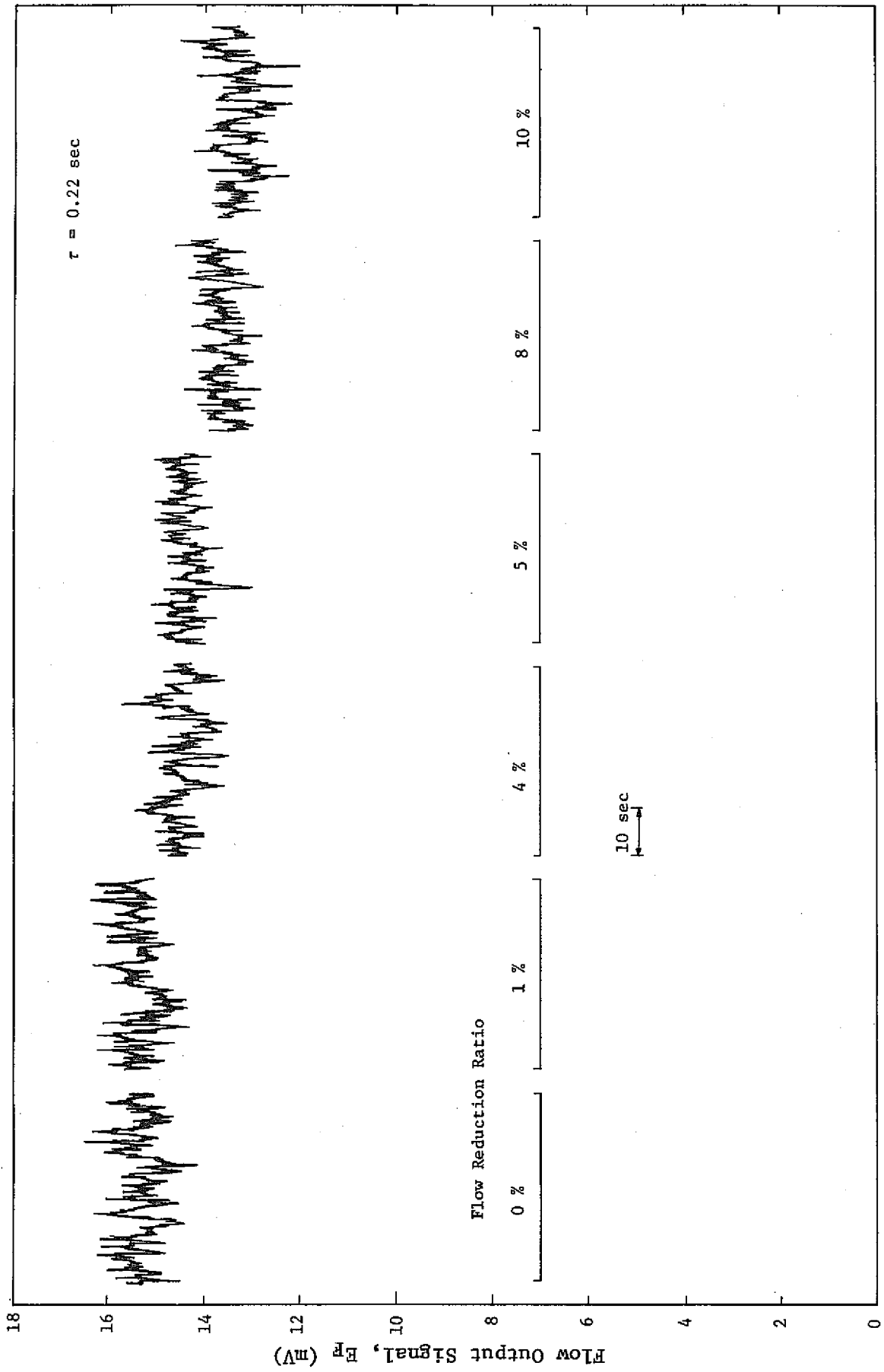


図 8.3 流量低下識別と時定数の関係 ( $\tau=0.22 \text{ sec}$ )

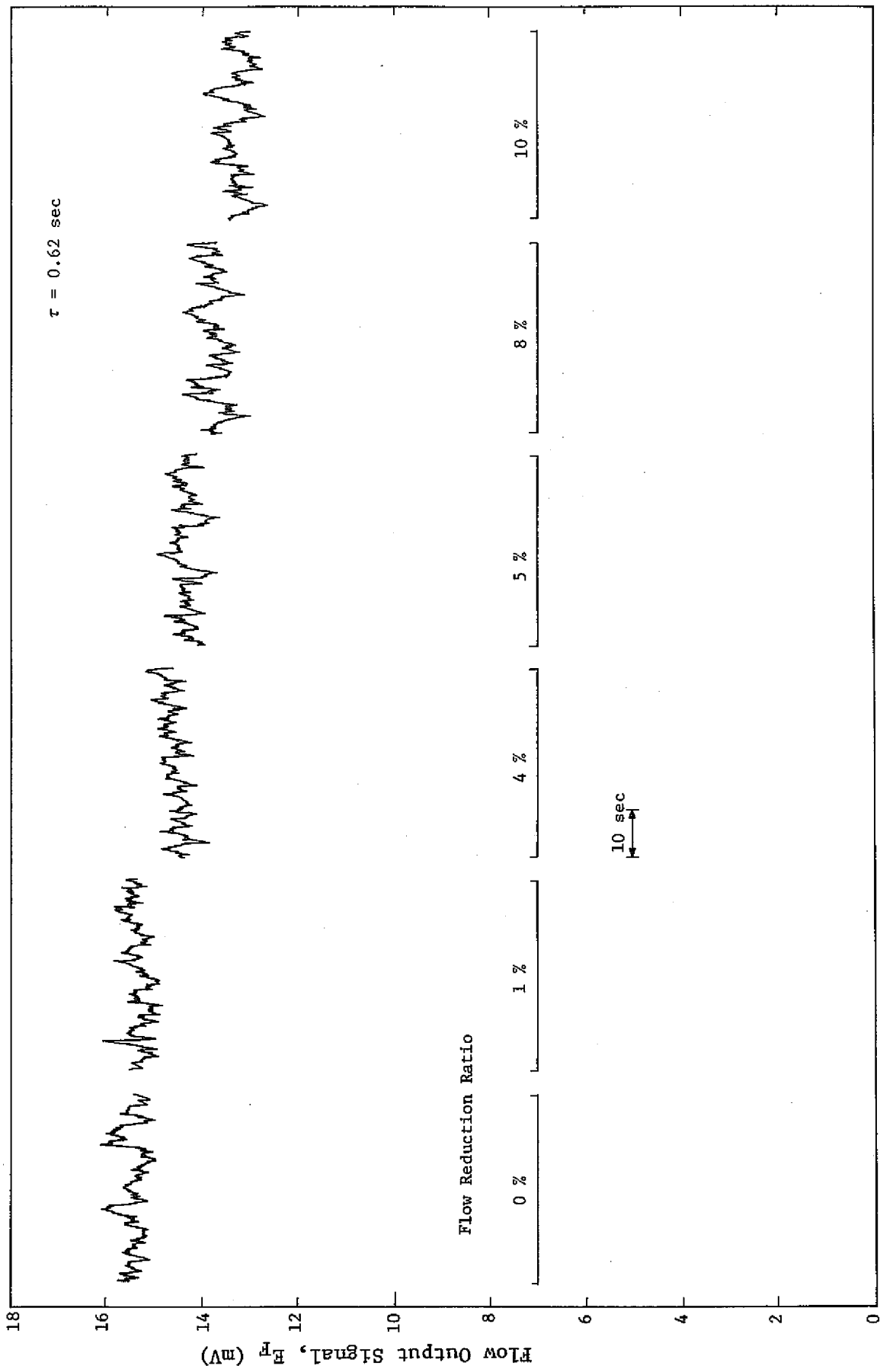


図 8.4 流量低下識別と時定数の関係 ( $\tau = 0.62 \text{ sec}$ )

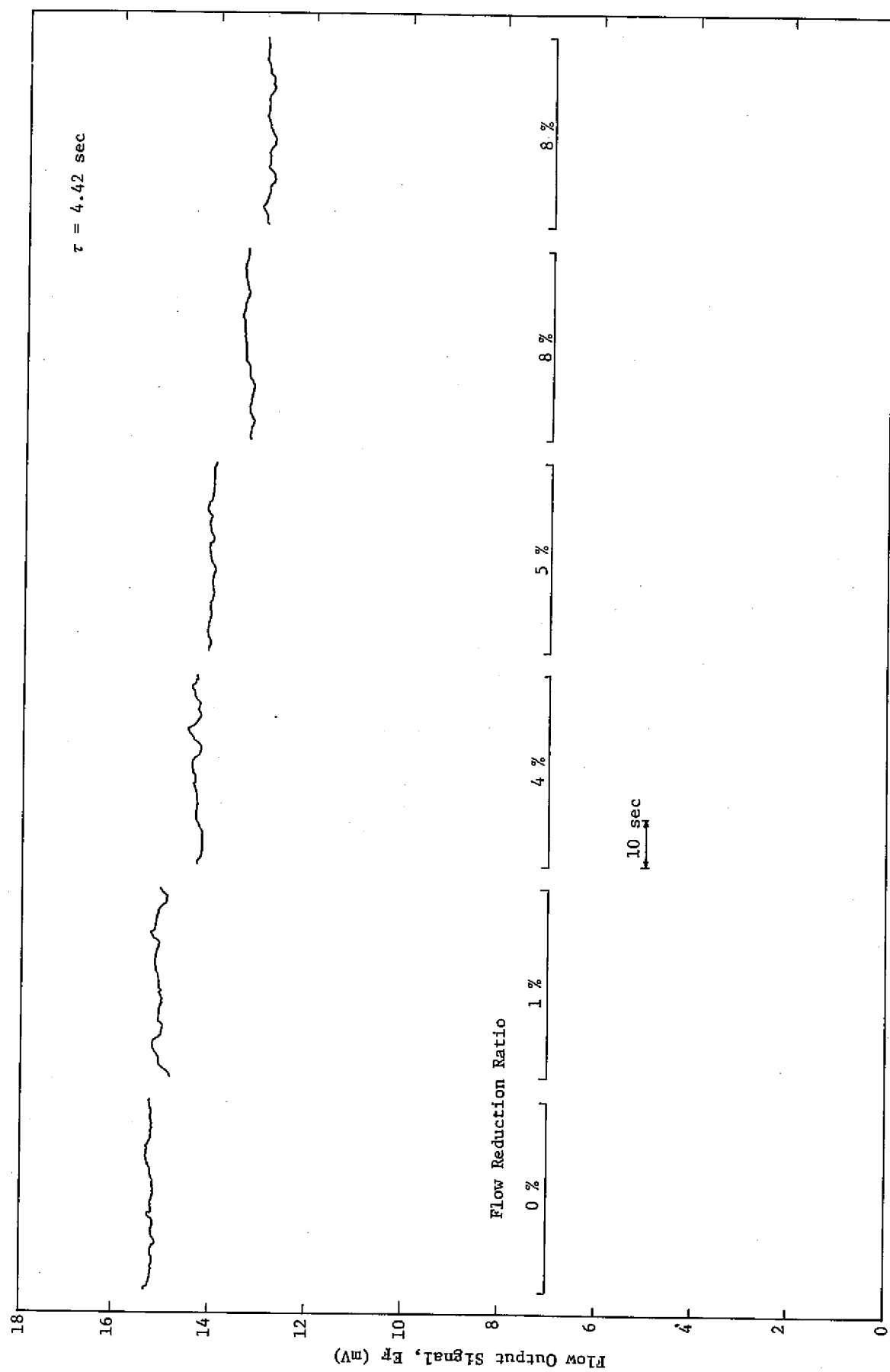
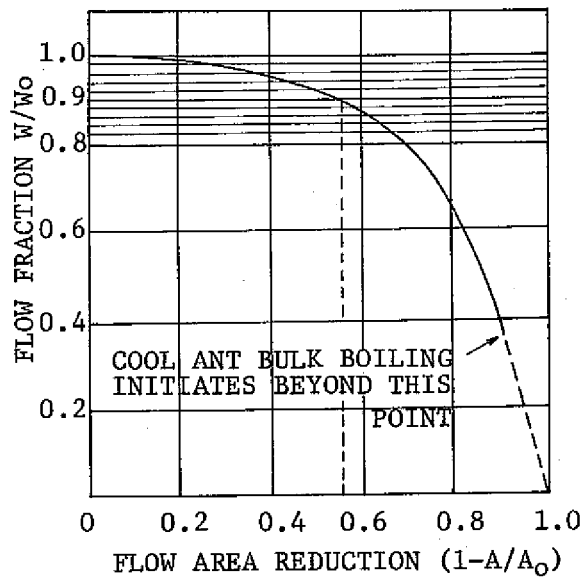


図 8.5 流量低下識別と時定数の関係 ( $\tau = 4.42$  sec)



Subassembly flow reaction as a function of flow area reduction for orifice-type restrictions

図 8.6 サブアセンブリ流路閉塞率と流量低下率 (37)



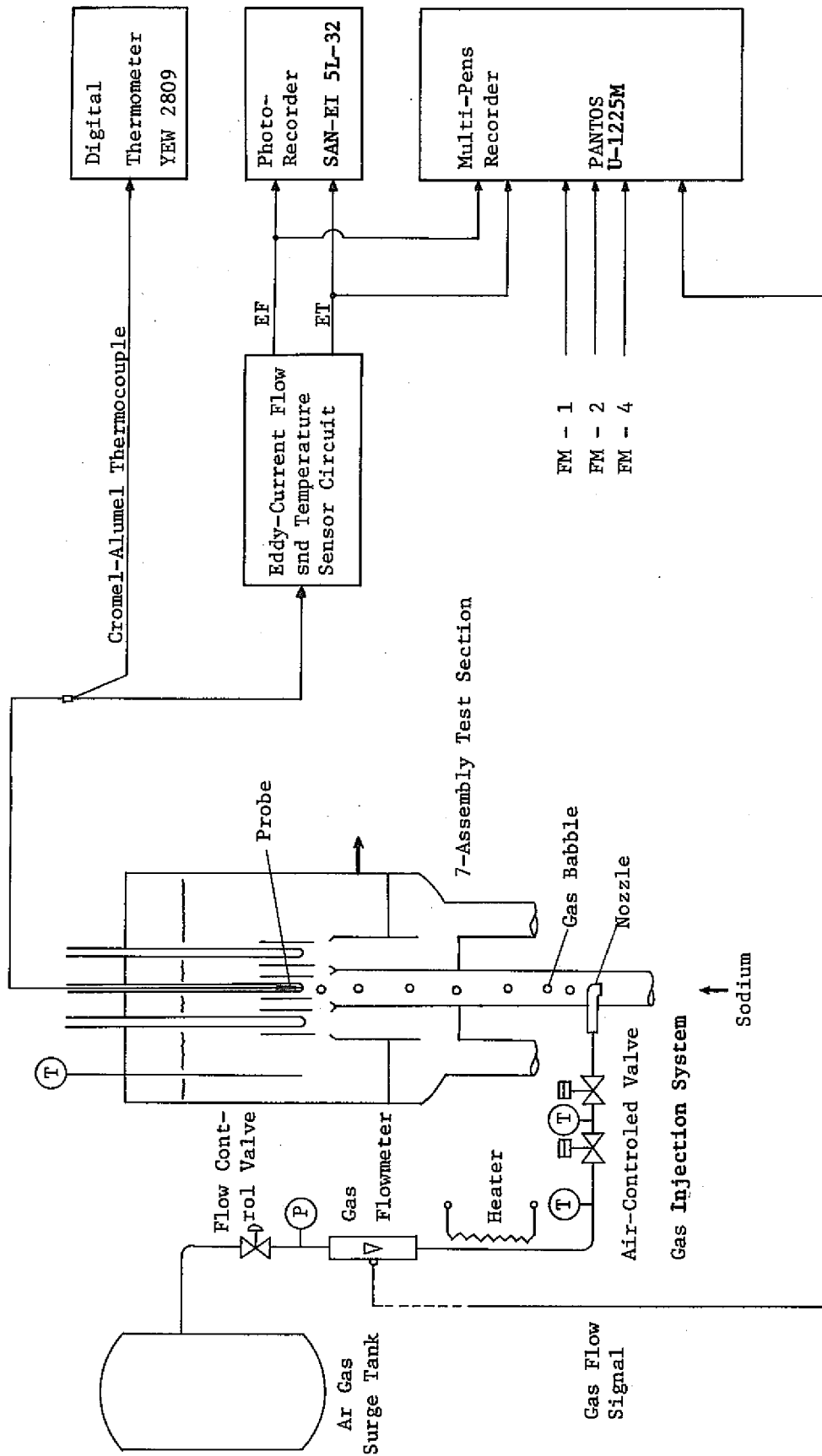


図 8.7 ボイド検出試験測定系ブロック図

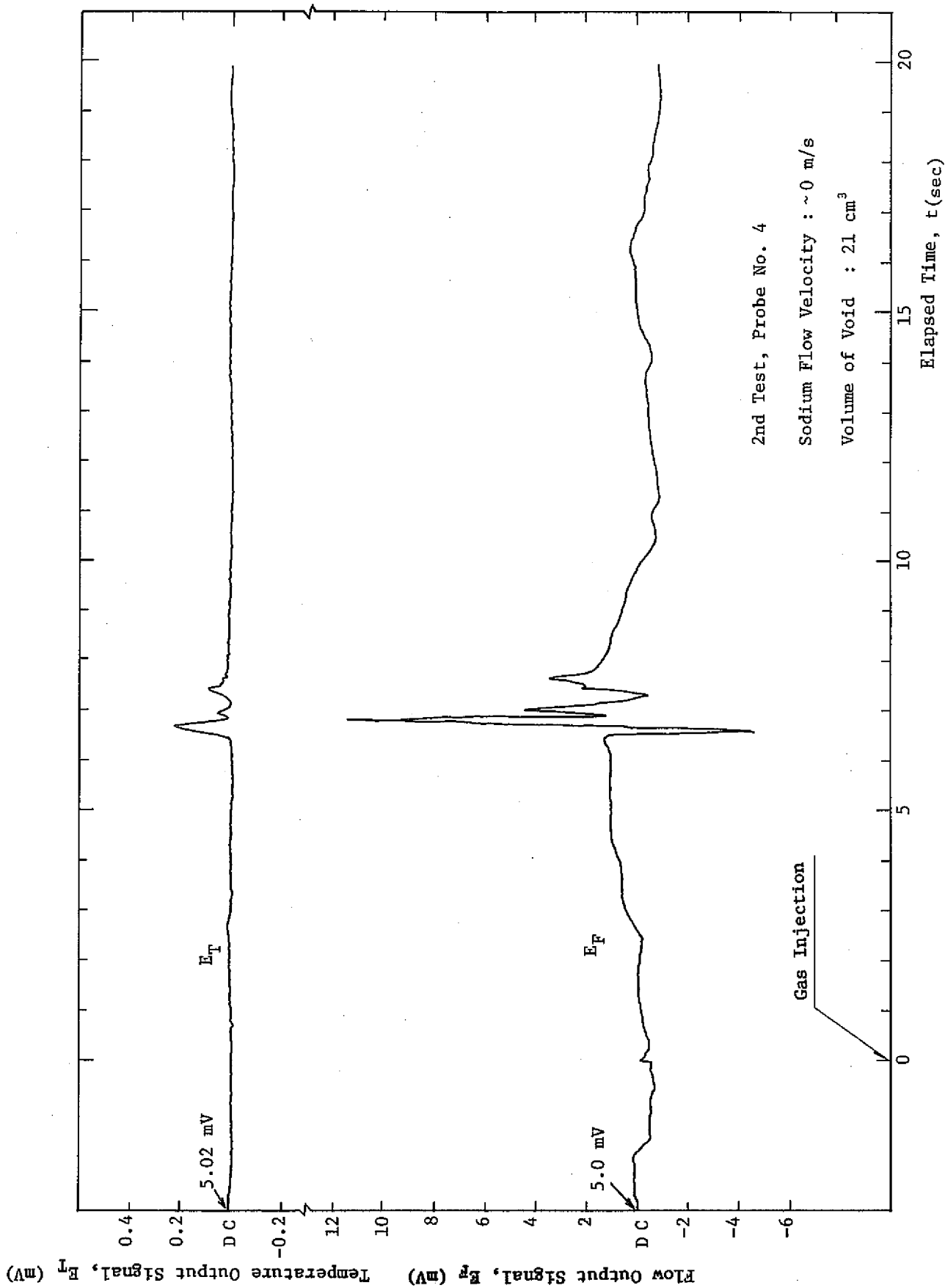


図 8.8 単発吹込みポイドに対する応答性

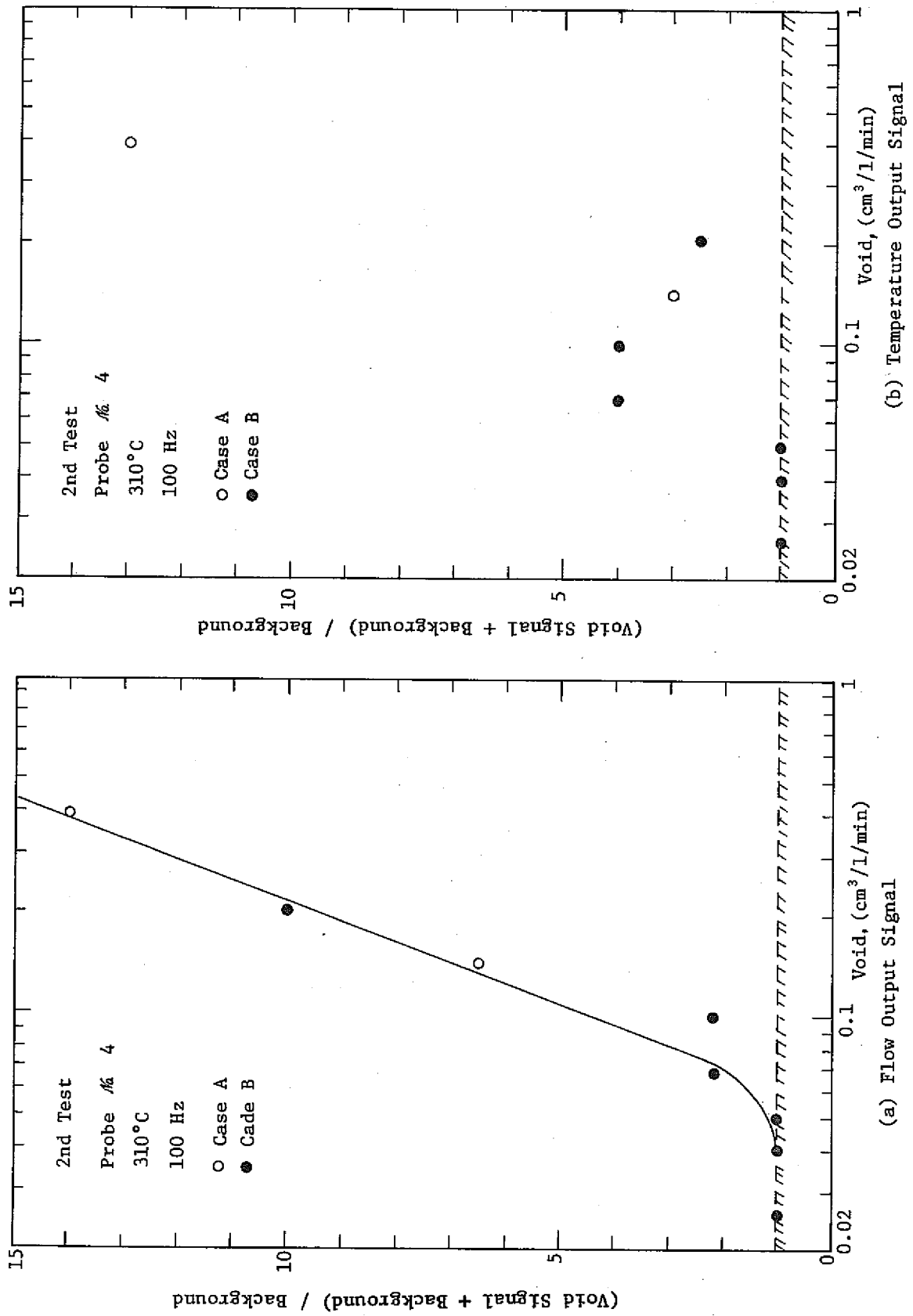


図 8.9 単発吹込ポイドの職別一交流成分一

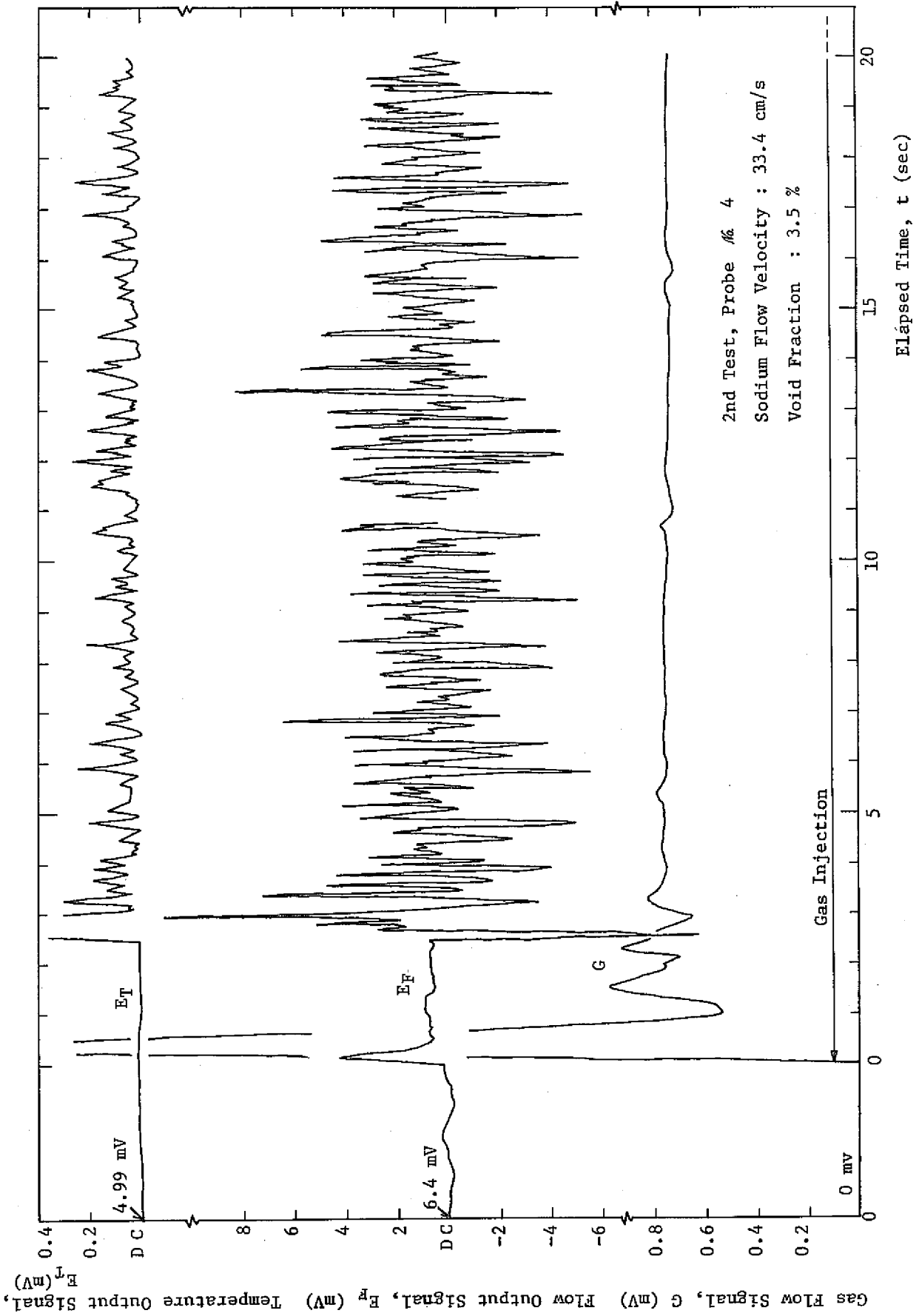


図 8.10 連続吹込みポイントに対する応答性

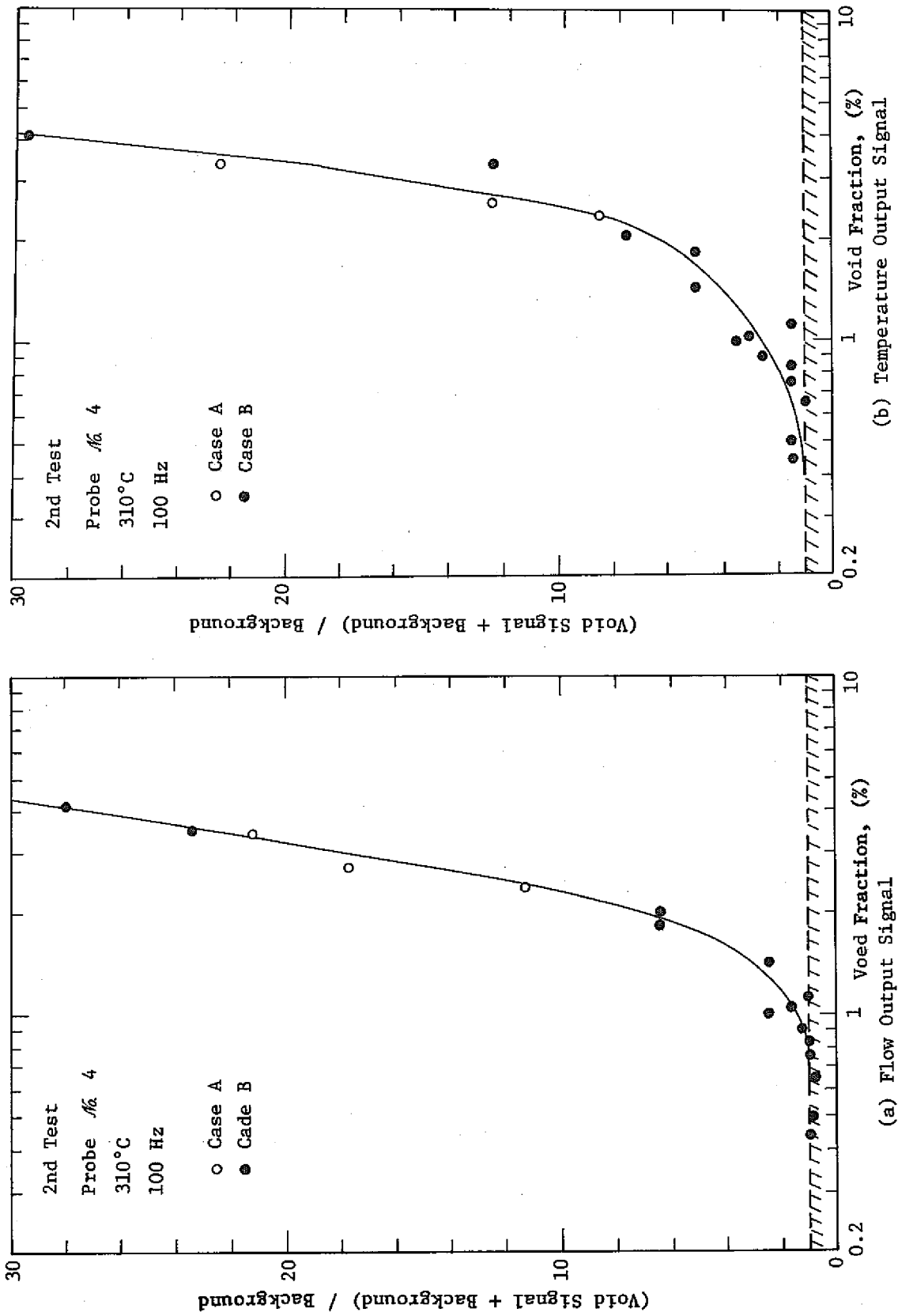


図 8.1.1 連続吹込ポイドの識別—交流成分—

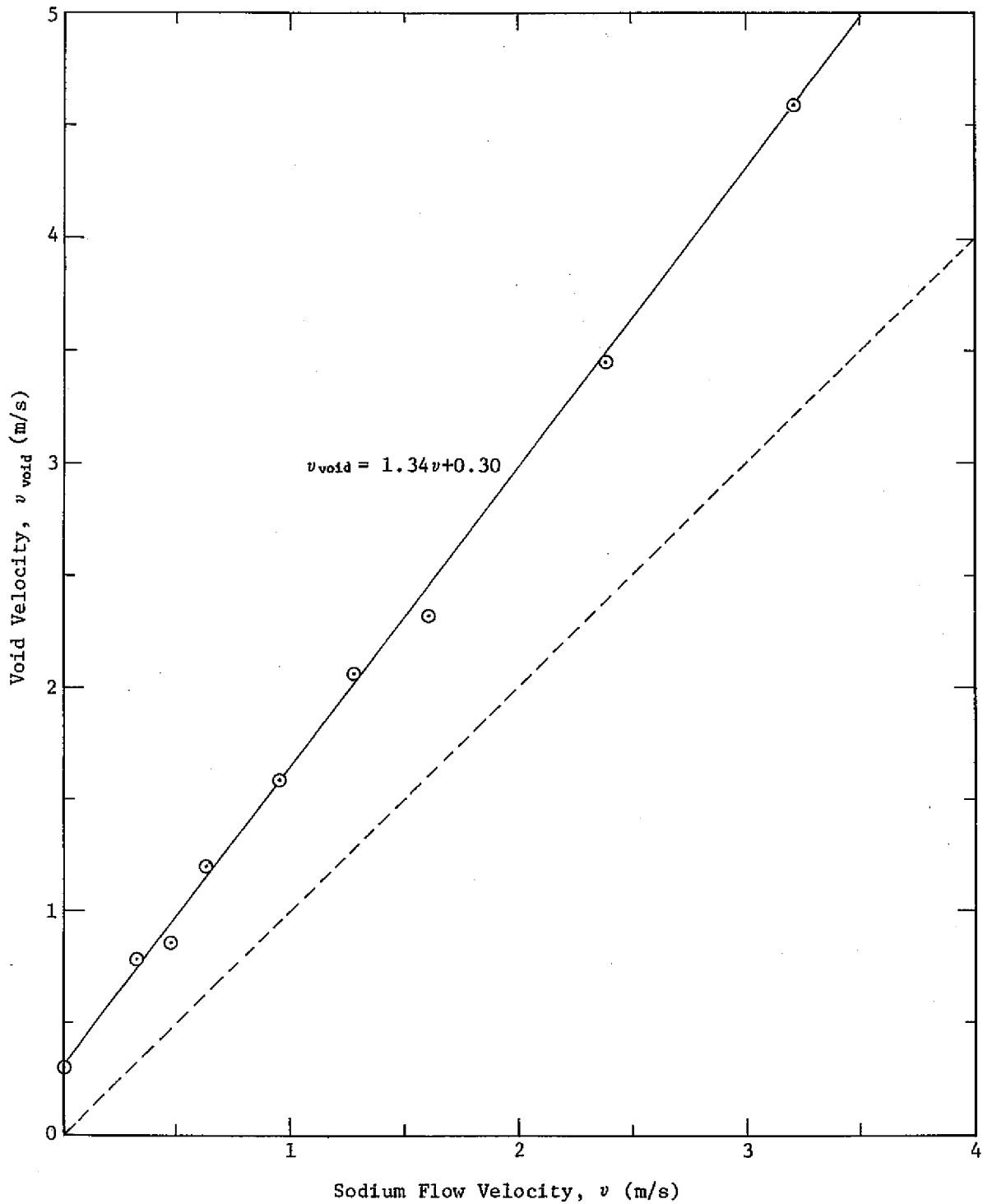


図 8.12 ボイドのナトリウム中移行速度

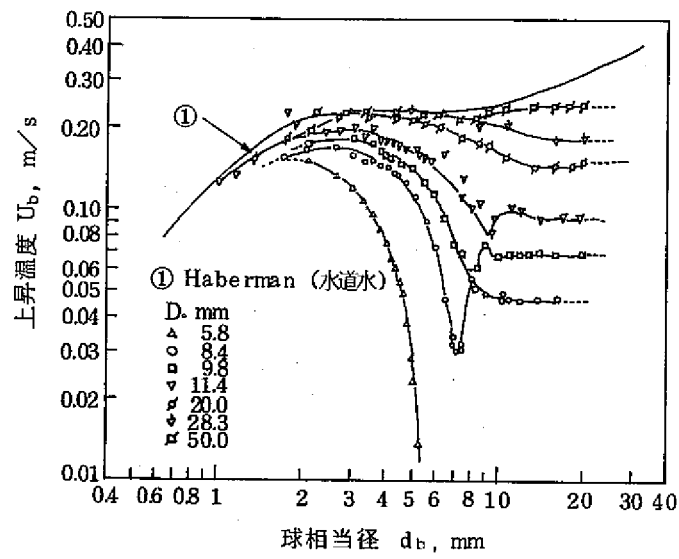


図 8.13 円管内における単一気泡の上昇速度 (水道水)<sup>(4)</sup>

## 9. 考 察

### 9.1 流速計としての性能

- (1) ナトリウム温度 300~550℃ における単体性能試験の結果、流速検出信号が最大感度を示す励磁周波数  $f_{max}$  は感度の温度依存性が最少となる最適周波数  $f_{op}$  にほぼ等しいので、実用上は励磁周波数の選定は比較的容易である。本検出器の場合、商用周波数の高周波ノイズを少なくする配慮も含めて  $f_{op} = 75\text{Hz}$  とした。このとき流速検出感度は検出回路入力換算で  $1.34\text{mV}/\text{m}/\text{s}$  (400℃) となった。
- (2) 検出感度は最適周波数を採用してもナトリウム温度により幾分変化し、400~500℃ では 1% 以下であるが、300~400℃ では約 4% と感度変化がやや大きい。本検出回路の場合、温度補償回路が用意されているが、この回路はあくまで 2 次コイル間の不平衡電圧を補償するものであり、流速に依存するいわゆる厳密な意味での流速検出感度の温度依存性までは補償できない。したがって、図 5.10 でも示したように比較的狭い温度範囲（例えば 400~550℃）で使用する場合はここで使用した温度検出信号による単なる不平衡分の補償により温度変化をフルスケールの 1%（約  $5\text{cm}/\text{s}$ ）以下におさえることができる。しかし、測定温度範囲を広く（例えば数 100℃）とりたい場合には、第 5.3 節で検討したように、たとえ最適周波数ではあっても、程度の差はあれ 2 次曲線的傾向を示し感度が一定でなくなるということが十分予想されるので、別途その対策が必要となる。
- (3) 各 2 次コイル出力の振幅・位相特性は図 5.11~19 に示した通りであり、これにより流速計・温度計としての基本的特性がより良く把握された。この中で特に 2 次コイル信号間の位相差  $\Delta\phi$  が流速  $v$  に直接比例し、信号のゆらぎ（交流成分）も少ないので今後の利用価値も多いと思われる。流速信号を得る際本検出回路のようにベクトル差をとる方法の他にスカラー差から求める方法がある。励磁周波数が今回のように低ければ、両者に感度の大きさとしての差はあまりなく、付録 C でも検討したように感度の温度依存性という意味ではスカラー差の方がより良いとも言える。
- (4) 本検出器を炉心監視計装として用いる場合、その使用上限温度をいくりにするかは今後の実用流速計の開発に直接影響を及ぼす。550℃ までは本試験によりその実用性が確認されたが、ポピンに使用した純鉄は図 B.24 に示したように 600℃ を越える高温雰囲気では透磁率が大幅に変化するので、使用上限温度によっては非磁性ポピンあるいはキュリー点のより高い高透磁率材料の選択が必要となる。



- (5) また本検出器で最適周波数とした  $f_{op} = 75 \text{ Hz}$  は、実用上決定的欠点ではないが低すぎるきらいがある。付録Bでも検討しているように、今回試験部として使用した内径  $81.1 \text{ mm}$  のナトリウム流路（これはまた、原型炉「もんじゅ」の炉心上部に設置される予定の炉内流量計用整流管の内径にほぼ相当しているのであるが）に対してこの励磁周波数では外部に磁束が幾分もれ出てしまう。ポピン材やコイル寸法の再検討も含めて、最適励磁周波数を高くする試みが次段階の課題の1つである。
- (6) 前回の試作品MK-Iと較べて、検出器入力換算で約19倍（ $500^\circ\text{C}$ ）感度が大きくなった。また低流速域での直線性が大巾に改善されたが、これは2次コイル信号間の振巾と位相のバランスがプローブと電子回路の両方で完全にとられたからである。すなわちコイル寸法（特に外径）に対する制限をゆるめた結果、2次コイル信号のバランスが良くなり感度と直線性も向上した。
- (7) プローブの個差は付録Bに示したように、励磁周波数依存性や直線性には基本的に差がない。しかし検出感度や温度依存性は差が大きい。検出感度の大きさそのものは増幅回路のゲイン調整を行えばすむ問題であるが、温度依存性については問題は簡単でない。将来の実用化において励磁回路の共通化が望まれた場合、現状のままでは温度補償が不十分となる。
- (8) プローブの信頼性はサンプル数と測定時間が短かく、むしろ今後の問題として残された。付録Aに示したように主としてプローブのコイル部とリード部の接続部の断線や絶縁不良に由来する故障が当初相ついでが、改良後は無故障である。付録Dに示したように改良後プローブNo.1を $500^\circ\text{C}$ のナトリウム中で約1,700時間使用したが、故障なく現在に至っており、特性も当初と顕著な差を生じていない。

## 9.2 温度計としての性能

- (1) 図6.1に示したように温度検出信号は感度上からは励磁周波数が高い方が望ましいが、ナトリウムそのものの温度検出という立場と流速計と併合し同じ励磁周波数を使用する必要性から、 $f = 75 \text{ Hz}$ が望ましい。この周波数はまた本検出器の場合直線性が比較的良好な特性を示す周波数でもある。
- (2)  $f = 75 \text{ Hz}$ のとき、検出回路入力換算値で約  $48.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  の感度を得た。温度信号の直線性もこの周波数で良好な特性を示しているが、流速計の方で要求する最適周波数で、いつも温度検出信号の直線性がどのプローブについても良好である保証は今のところないので、励磁周波数

の共通化が必要な場合は、温度信号の方は感度と直線性をやや犠牲にしなければならない場合もある。

- (3) とにかく上記の問題はあるにしても、温度検出信号の場合、信号の変動（交流成分）が十分小さく（300℃のとき検出回路入力換算で $50\mu\text{Vp-p}$ 、振幅では $25\mu\text{V}$ ）、この値は約 $\pm 0.5\text{℃}$ に相当するので、速応性<sup>48</sup>も含めて、炉心監視計装としては非常に有用ではないかと考えられる。

なお応答性は付録Bでも示したように今回の実験では失敗したが、ナトリウムの温度変化→案内管の温度変化→プローブの温度変化の過程を考えると、比較的時定数の長い応答性も含まれるであろうから、今後の研究課題である。

### 9.3 ボイド検出器としての性能

- (1) 今回の試験データにバラツキが多く、またナトリウム中のボイドそのものが定量化できないためかなりラフなまとめ方になったが、ボイドに対する応答感度の目安は得られた。しかしながら1%以上のボイド率でなければ検出困難という結果は、ボイド計としては感度不十分である。

「もんじゅ」の場合燃料ピン中のガスブレナム有効容積は約 $27.6\text{cm}^3$ 、300日運転後の内圧は約 $30\text{kg/cm}^2$ となる。この状態で燃料ピンが破損し内部のガスがすべて1秒間で放出されたとしても約2%のボイド率であり、ボイド検出効率を良くするための改善が必要である。

- (2) ボイドの検出特性と、ボイドのナトリウム中移行特性を今後十分追求していかなければならないが、ボイド検出においては“異常データの再確認が困難”である点に十分留意しなければならない。したがって、実用的には連続的ガス放出か、あるいはナトリウム沸騰によるボイドが検出対象となる。

いずれにせよボイドの場合、かなり高い周波数成分を持ちうるはずであるから、流速検出と同じ励磁周波数を用いることは必ずしも得策であるとは言えない。

### 9.4 今後の課題と原子炉への応用

- (1) 最適周波数について

純鉄ボビン用いた本検出器の場合、非磁性ボビンに較べて検出感度の大幅な増加（100倍以上）を得た反面、(i)最適周波数の低下（約1/10）と(ii)使用上限温度の低下というマイナス面も生じた。前者は特に応答性の劣化と商用周波数（50Hz）ノイズの増加をまねき、後者は磁性体を高温でかつ高放射線場で使用するという懸念を生じさせる。

ナトリウムループ等の600℃以下でしかも放射線場ではなく、また経時変化に対しては比較的校正も容易な使用環境においては本検出器はなお改善の余地は残すとしても一応完成の域に達していると思わせる。しかしながら炉内での使用については現段階で基本的な設計条件について洗い直す必要がある。すなわち、使用上限温度に余裕をもたせ、かつ最適周波数を高くするためにボビンの非磁性化やキュリー点のより高い磁性材料の選択と渦電流損失の低下などを再検討する必要がある。

## (2) ノイズレベルについて

今回試験に使用したナトリウムループおよび隣接する他のナトリウム施設においてはサイリスタ(SCR)が多用され、その制御は専ら点弧角(位相角)制御方式によるため、高周波ノイズレベルが極めて高くなる。サイリスタによるパルス状ノイズは約10KHz成分が最も多く、それより低周波成分はほとんどシンクロスコープで観測できない程小さい。サイリスタノイズレベルは検出回路のTP-4での観測値から入力換算になおすと、約250 $\mu$ Vp-p(フルスケールの3~4%に相当)となり、かなり大きいですが、同期整流すればこのノイズは除去できるし、またダイオード整流でも、ノイズのパルス間隔がかなり広いので、結果的にはフルスケールの約1%程度しかきかなかつた。

また外来ノイズではないが、2つの2次コイル信号間のバランスをとり、不平衡補償を行なっても観測点TP-4では完全にキャンセルされない高周波成分が残る。この不平衡残留電圧は検出回路入力換算で約100 $\mu$ Vp-p(フルスケールの約1.5%)あるが、同期整流をすればこれらのノイズもかなり除去できる。

## (3) プローブおよび検出回路の改良ならびに問題点について

### (i) プローブに関するもの

#### ① ボビン材、コイル寸法等の最適化

磁性ボビンを用いた本検出器の特性は実験室規模では完成の域に達したいといつて良い。したがって現段階にて、炉に適用していく上での実用化を見通した上で、もう一度プローブの最適化と再設計をすべきではないかと思われる。

#### ② リード線間の誘導の低減化

現在のリード線は1次コイル、2次コイルともにリード線は2芯のMIケーブルが使用されている。炉に適用する場合10m以上の長さを必要とするので、少くとも1次コイル用リード線はより合わせて2次コイルへの直接的誘導を少なくすべきである。リード線のより合わせは例は文献(1)にある。簡単には1次コイルを単心にする案が考えられる。リード線の数が1本増えるという欠点はあるが、誘導の低下(2次コイル信号間の不平

衡の低減化)と実質的芯線径の増加(リード部での抵抗減少)という利点は大きい。あるいは芯線を内部でねじったMIケーブルも考えられる。また、10mにおよぶ長尺のリード線を挿入する場合、フレキシブルコンジットだけでなくリード線もある程度強度的に強いものが望ましい。これは現在のプローブでの経験に基づく。

### ③ フレキシブルコンジットの改良

特に良い対策があるわけではないが、現用のものは挿入時フレキシブルコンジットの径が増加し案内管の内壁との摩擦により、7集合体試験部の案内管(長さ約2.5m)の中に完全挿入するのに苦労した。原子炉では本試験部のように直管ではなく3次元的曲りをもつ10m以上の案内管となるであろうから、単に案内管内壁とフレキシブルコンジット外径の間のギャップの問題としてではなく、挿入拔出し構造の再検討が必要である。

### ④ プローブの先端確認法について

現用のプローブ構造では、プローブの案内管先端への装入完了を伸び縮みするリード線コンジットで感覚的にしか知ることができない。したがって、図9.1の如き代案を提示する。なお図9.1(a)は西独インタトム社<sup>(43)</sup>の案であり、図9.1(b)は筆者の案である。

### ⑤ プローブの信頼性の向上

ここで試験したプローブは当初主としてコイル部とリード部の接続部の断線という故障を多く出したが、その後接続部を強化したプローブ(例えば $\#1$ )では500℃において約1,700時間の間正常に動作した。しかし、熱サイクル等も含めてさらに信頼性向上と信頼性試験が必要である。

## (ii) 検出回路に関するもの

### ① S/N比と整流方式

今回の試作品では流速検出回路には手動設定の同期整流が使用された。しかし実験結果に示すように本プローブは十分大きい感度を有するので、位相追従型の同期整流にした方が、回路調整の繁雑さの低減と再現性への人為的影響減少の点で望ましい。

また外来ノイズのうち励磁周波数と大きく異なる周波数成分については、差動増巾器での飽和をも考慮して、むしろ初段増巾後すぐに励磁周波数に対応したバンドパスフィルタを入れた方が良い。こうすれば本試作品に関するかぎり、あえて複雑な同期整流を用いなくとも十分なS/N比が得られると思われる。

### ② 流速検出における温度補償

温度補償は2次コイル信号間の不平衡によって生じたもののうち主として流速に依存しない部分(不平衡残留電圧)を対象に温度信号を利用して直流的に補償された。これで400~500℃では流速信号出力の温度依存性をフルスケールの1%以下におさえることができた。しかし使用温度範囲がもっと広い場合は、感度の温度依存性も無視でき

なくなるので、感度に対しても温度補償する必要が生じよう。(図 9.2)

### ③ 励磁回路

励磁電流モニタができるように改良することと、発振器を内蔵とすることが望ましい。また励磁電流が、位相補償回路等の調整(負荷変動)により変化しないように改善しなければならない。

## (III) プローブおよび検出回路を含めたシステム全体の問題点について

### ① 回路の簡素化と信頼性の向上

本試験で残された問題は決して少なくないし、将来も研究開発を進め性能の向上が望まれる。しかし、“実用化”と“研究開発”を区分すべき段階に達したと判断される。

前述したように本試作品は一般ナトリウム温度流速計として十分使用できる見込みを得たので、現段階での情報をもとに最少限の要求を満たす検出器を炉条件に合致するよう設計し、プローブの最適化と回路の簡素化および検出器としての信頼性の確立を図る必要がある。この場合問題にされるのは放射線の効果と装荷法、保守点検法である。

回路の簡素化では励磁回路の共通化、補度補償や整流方式の簡略化および回路の小型化が考えられる。回路の共通化実現にはプローブの特性が良くそろうことが不可欠で、このためには製作時の品質管理が重要となる。

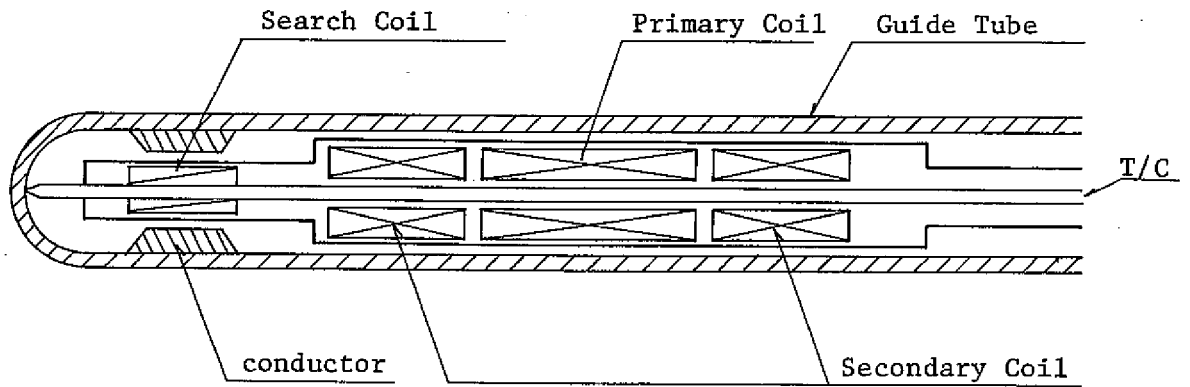
この他に回路およびプローブの健全性をチェックする自己診断回路やロジック回路構成のための冗長系も次の段階では必要とされよう。

これらの実用化努力と平衡して、温度補償法の改善やボイド検出能力の向上を図る必要がある。

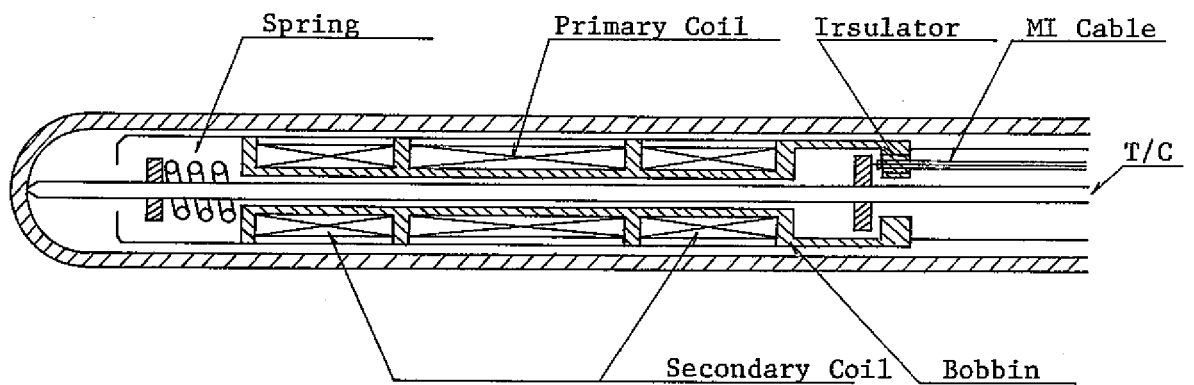
### ② 現場取付後の問題

渦電流式温度流速計を原子炉に設置した場合、前述したプローブの装着確認の他に、現場調整と校正が必要になる。温度信号の場合は内蔵の熱電対により比較校正が行なえるが、流速信号の場合は簡単ではない。すなわち2次コイル信号間のバランスをとることが必要であり、そのためには外部流体は静止していなければならない。炉内に装荷して放射化したプローブをそのために取出すことは困難であり、またナトリウムの流速をゼロにすることは炉心崩壊熱除去を考えると難しい。現在のところ良案はないが、しいてあげれば図 9.3 のようになる。あるいはナトリウム流量を数点変えて内挿により流速ゼロでの不平衡電圧を求め、これをゼロによるように再調整する方法も考えられる。

一方、流速検出感度の現場校正は極めて困難であり、流量相関法も含めて今後の研究が待たれる。



(a) サグリコイル式



(b) リミットスイッチ式

図 9.1 プローブ装荷確認法

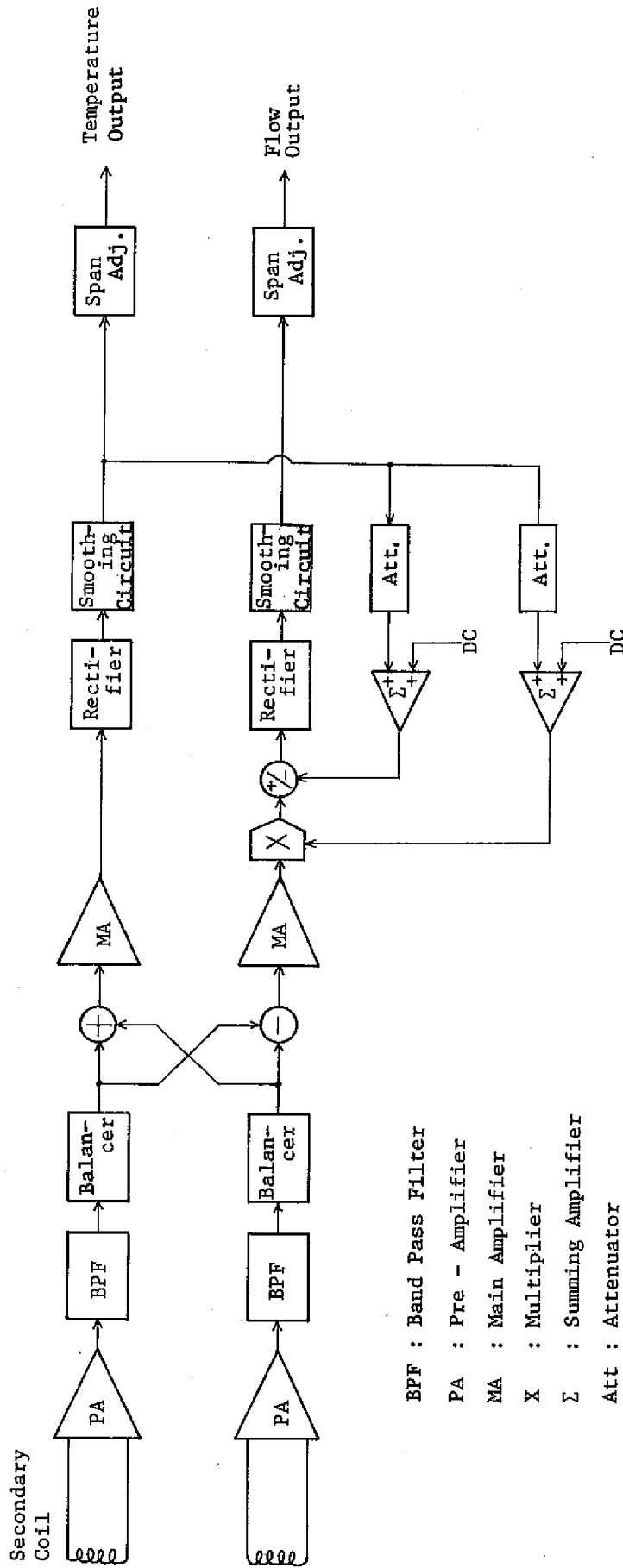


図 9.2 流速検出感度と不平衡電圧の温度補償案

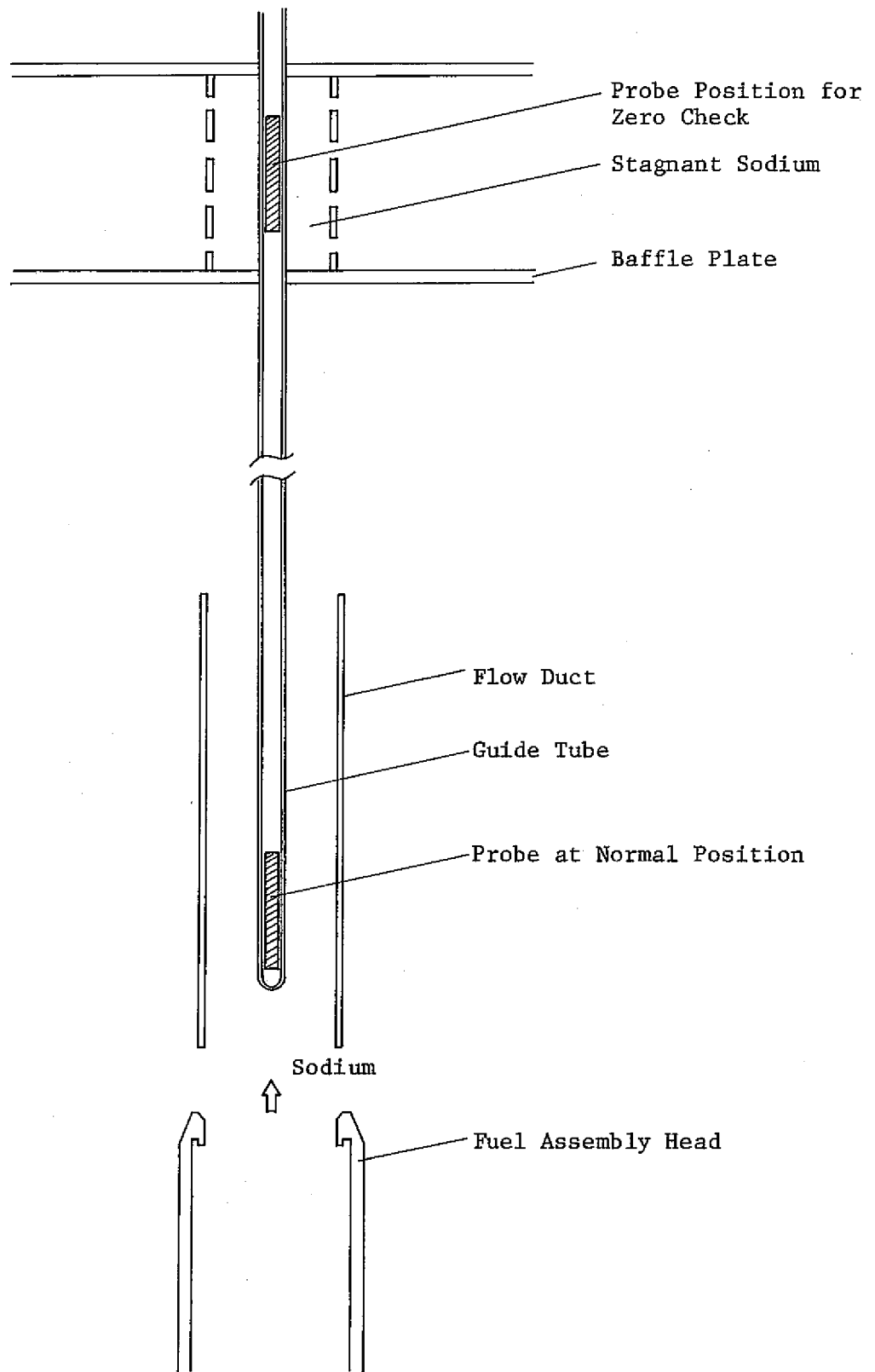


図 9.3 流速計における零点確認の一案



## 10. 結 言

渦電流式速応性温度流速計 (MK-II) をナトリウム中単体性能試験した結果次の結論が得られた。

- (1) 流速計として使用する場合、検出感度がほぼ最大で、検出感度の温度依存性が最小となる最適励磁周波数  $f_{op}$  が存在する。300～500℃の特性結果から  $f_{op} = 75 \text{ Hz}$  と定めた。
- (2) 流速検出感度は検出器入力換算で  $1.34 \text{ mV/m/s}$  (400℃) が得られたが、この値は信号レベルとしては十分な大きさを有する。MK-I とそれぞれの最適周波数での値と比較すると、検出器入力換算で約20倍感度が大きくなっている。
- (3) 流速検出における直線性は十分満足のいくものであった。0～3.4 m/s の範囲で非直線性は、励磁周波数やナトリウム温度によらず十分小さく、1%以下であった。
- (4) 流速検出信号はナトリウム温度  $T$  に依存して変化するが、その効果としては (i) 2次コイル間の不平衡残留電圧の変化、(ii) 流速検出感度の変化の2種類ある。本検出器の場合、(i) を温度検出信号により補償し、(ii) は励磁周波数  $f$  を検出感度の温度依存性が最小になるように選ぶことで全体として温度依存性を最小にすることができた。 $f = 75 \text{ Hz}$ ,  $T = 400 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$  で出力変化をフルスケールの1%以下におさえることができた。しかし、数100℃の温度範囲にわたって温度補償を行なうには、不平衡残留電圧の補償以外に感度そのものも補償の対象にしなければならない。
- (5) 2次コイル間の位相差を測定した結果、位相差は流速に比例し、その最大感度は  $f = 225 \text{ Hz}$  となることがわかった。この周波数は温度検出信号が最大となる周波数でもあり、今後応用が期待される。
- (6) 流速信号にはかなり顕著な平均値まわりの時間的変動 (ゆらぎ) が存在する。プローブ型流速計出力信号への案内管先端形状が及ぼす効果を調べた結果、
  - (i) 流速信号の直線性は案内管先端形状の影響をほとんど受けない。
  - (ii) 案内管先端で流れが乱される結果、下流に行くに従って直流出力の変化が生じる。直線性をも含めた総合的評価では先端形状が滑らかな楕円型がやや優れている。案内管内でプローブの軸方向位置をある程度任意に選べるのであれば、案内管先端形状は支配的因子ではない。
  - (iii) 流速信号に現われる出力変動は、平均流速に比例することが確認された。また案内管の固有振動数の評価をも含めて、出力変動は流れの乱れそのものに起因すると考えられる。この流速変動 (ゆらぎ) の大きさは測定系の周波数帯域にも依存するが  $0.1 \sim 7 \text{ Hz}$  では指示値の  $0.6 \sim 0.8 \% \text{ rms}$  であった。またこの値は案内管の先端形状によってあまり大きく変わらない。

流れの乱れを早く安定させるにはフィンなどの整流構造が有効なことが確認された。しかし、出力の低下が生じるので実用にあたっては十分な検討が必要である。

- (iv) 流れの乱れが持つ周波数成分は本検出器を用いた観測結果では測定帯域いっぱいまでほぼ平坦な周波数スペクトルを有することがわかった。同時に測定した電磁流量計の出力変動に較べてrms値で約1.5～3倍大きく、その差は周波数が高くなるとともに大きくなる。これは案内管により流れの乱れが生成されている他に渦電流式流速計が比較的局所的な流速を測定していることを裏付けており、かつ比較的高い周波数成分まで十分応答可能であることがわかる。
- (7) 温度計として使用する場合、温度検出感度は励磁周波数とともに少くとも500Hzまでは単調増加する。しかし実用上は流速信号と温度信号を同時に測定することが必要となるから、励磁条件は流速信号の最適周波数( $f=75\text{ Hz}$ )に合わせることにする。
- (8) 温度検出感度は $f=75\text{ Hz}$ の時、検出回路入力換算で $48.5\ \mu\text{V}/\text{C}$ を有する。流速信号の最適周波数である $f=75\text{ Hz}$ はまた温度検出の直線性が良好な周波数でもあった。
- ただし温度検出の直線性についてはプローブに個差があり、プローブNo.1で示された直線からの最大偏差が指示値の0.5%とという性能は他のプローブにおいても $f=75\text{ Hz}$ で必ずしも保証されるわけではない。
- (9) 温度信号への流速の影響は、 $3.5\text{ m/s}$ までの流速について言うかぎり無視できる程小さい。
- (10) 炉心監視計装への応用を見通すために、「もんじゅ」燃料集合体頂部と炉上部構造を模擬した7集合体試験部を用いて、流路閉塞等にもなり流量低下検出を試みた。その結果、本試験条件内では実用的な時定数( $\tau=0.62\text{ sec}$ )の時、約3%の流量低下なら何とか識別しうる見通しが得られた。

識別を困難にしている原因は流れの乱れによる出力変動である。サブアセンブリ上部では燃料集合体頂部の構造や整流管端部によって大きく流れが乱されるので、燃料頂部や整流管構造を再検討することにより識別限界を向上させる可能性は残されている。

なおサブアセンブリ出口における冷却材流動と流速計による検出については別途報告する。

- (11) 渦電流式温度流速計は、流速信号、温度信号ともにボイドに敏感である。単発的および連続的にナトリウム中にアルゴンガスボイドを吹き込んで試験した結果、本検出器でもボイド率の増加とともに、出力の交流成分の大半を増加が観測され、ボイド検出器としての有用性は確認された。今後検出感度の改善とボイドの定量化が望まれるとともに、原子炉に適用する場合はボイドの収集や再確認などの問題点も検討していかなければならない。
- (12) 今後本検出器を原子炉に適用して上での数々の問題点と2,3の改良案を示した。
- 最後に、以上をまとめると、ここで試作した渦電流式温度流速計(MK-II)は、流速計としても温度計としても今後若干の改良は必要とされるにしても、十分実用になりうるものであると

結論される。

しかしながら本検出器を一般のナトリウム施設で使用する場合はともかく、炉内計装として使用する場合は装荷法，オンサイト校正法，耐放射線性，信頼性と冗表回路等解決すべき問題も多い。したがって現段階で炉条件への適合という観点から再検討を行ない，炉心監視計装として必要最少限の性能を有する検出器の実用化と，それと平行して性能の向上や検出対象の追加，新しい方式の採用等の研究を進めるべきであろう。

## 11. 謝 辞

本報告をまとめるにあたって、計画の段階から終始御指導御鞭撻頂いたナトリウム技術部齊藤良平部長，高速増殖炉開発本部計測制御グループ三本保秀主任研究員，足立清研究員，現在三菱電機松宮正幸氏，当室関口信忠副主任研究員（現在高速増殖炉開発本部）に感謝の意を表します。

また本検出器の開発を担当され，技術的御援助を頂いた横河電機製作所各位に感謝します。

なお，本検出器のナトリウムループでの試験は当室中筋孝室長代理以下室員各位，常陽産業各位の御協力に負うところが大きく，ここに謝意を表します。

## 1 2. 参 考 文 献

- (1) Dean, S.A. et al., "Sodium flow monitoring", Nuclear Engineering International, p 1003 (Dec. 1970).
- (2) Thatcher, G., "Electromagnetic Flowmeters for Liquid Metals",
- (3) Thatcher, G. et al., "Flux Distortion Flowmeter Development", IAEA Specialist Meeting on The In-core and Primary Circuit Instrumentation of LMFB Reactors, No. 2-5 (Jan. 27 ~ 29, 1976)
- (4) Walford, J.G. et al., "Experience of the PFR Primary Circuit Instrumentation", Ref. (3), № 1 - 6
- (5) Brewer, J. and Jaross, R.A., "Eddy-Current Probe-Type Sodium Flowsensor for FFTF Reactor Fuel Channel Flow Monitoring",
- (6) Costello, T.J. et al., "FFTF Probe-Type Eddy-Current Flowmeter Wet vs Dry Performance Evaluation in Sodium", Trans. Amer. Nucl. Soc. (Oct. 1972)
- (7) Clifford, K.D., "FFTF Core and Primary Circuit Instrumentation", Ref. (3) № 1 - 8
- (8) Hans, R. et al., "In-core Instrumentation for LMFBR's-Proven Instrumentation and Test of New Measuring Systems", Ref. (3), № 1 - 5
- (9) Wiegand, D.E. and Michels, C.E., "Performance Tests on an Eddy-Current Flowmeter", IEEE Trans- Nucl. Sci. Vol. NS-16, 1 (Feb. 1969)
- (10) Wiegand, D.E., "The Eddy-Current Flowmeter: An Analysis Giving Performance Characteristics and Preferred Operating Conditions", ANL-7554 (Aug.1969)
- (11) Feng, C.C. et al., "Analysis of Eddy-Current Flowmeters", J. Appl. Phys., Vol. 46, № 7, p. 2935 (July 1975)
- (12) Bandelet, C., "Two Theoretical Analyses of the Output Signal from an Eddy Current Sensor", Vol. 42, № 4, p. 458 (Apr. 1971)
- (13) 中野, 安部他, "高速炉用燃料チャンネル破損検出器の試験研究, その1 炉内流量計の研究" PNC資料, SJ203 71-04 (1971年3月)
- (14) 中野, 大串他, "同上, そのII 小型差動コイル式流速計試験", PNC資料 SJ203 72-23 (1972年12月)
- (15) 中野, 大串他, "同上, そのIII 1000ℓ/min 燃料チャンネル流量計組込試験", PNC資料, SJ203 72-24 (1972年12月)
- (16) Sekiguchi, A. and Mimito, Y., "DEVELOPMENT STATUS OF IN-CORE MEASURING INSTRUMENTS AT PNC, JAPAN", Ref. (3), № 2-1.
- (17) 徳永, 太田他, "超小型差動コイル式流速計, A型およびB型試験成績書"(1973年1月)
- (18) 徳永, 太田他, "渦電流式即応性温度流速計の試作研究", PNC資料, SJ 248 73-01 (1973年7月)

- (19) 三本, 松宮他, “渦電流式速応性温度流速計の特性試験 — 高温ナトリウム中特性試験 —”, PNC資料, SN241 73-58 (1973年12月)
- (20) 徳永, 太田他, “小型差動式流速計の試験研究 — 高温用渦電流型ナトリウム温度流速計 —”, PNC資料, SJ248 74-01 (1974年4月)
- (21) 徳永, 桑原, 他, “渦電流式速応性温度流速計 — 検出器の構造および材料に関する研究 —”, PNC資料, SJ248 75-01 (1975年2月)
- (22) 徳永, 桑原, “渦電流式速応性温度流速計 — 検出器の加熱温度試験 —”, PNC資料, SJ248 76-01 (1976)
- (23) Foust, O.J., "Liquid Metals Handbook, Sodium NaK Supplement", Chap. 16 Instrumentation, LMEC (June 1967)
- (24) Dodd, C.V. and Simpson, W.A., "Measurement of Small Magnetic Permeability CHanges by Eddy Current Techique", Mat. Evaluation, p. 217 (Oct. 1971)
- (25) 土門, 川島, “磁性導体上に置かれた有限長ソレノイドコイルによる渦流探傷法の解析”, 非破磁検査, 第23巻, 第3号, p 139 (1974)
- (26) 尾上守夫, 導体上に近接した有限ソレノイドコイルの解析”, 電気学会雑誌, Vol. 88-10, №961, p 162 (1968)
- (27) Hughes, G., "Detection of rapid electrical conductivity fluctuations in high temperature liquid metals", J. Phys. E : Sci. Instrum. Vol. 5, p. 349 (1972)
- (28) Hughes, G. and Farrington, B.J., "The In-Sodium Performance of an Electro-magnetic Temperature Sensor", Ref. (3), № 2-3
- (29) McCann, J.D., "Versatile Fast Response Temperature Sensor for Use in Liquid Sodium", Ref. (3) № 2-4
- (30) Hans, R. and Schmidt, K., "Test Results and Still Existing Problems of the Sodium Instrumentation for LMFBR's", International Conference on Liquid Metal Technology in Energy Production, (May, 1976)
- (31) Kuwabara, J., "A NEW THERONOMETRY FOR LIQUID SODIUM", IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. NS-19, № 1, 793 (1972)
- (32) 中本, 大山他, “計測機器試験ループ建設報告書”, PNC資料, N944 76-01 (1976)
- (33) 林敏和, 電磁氣的液体量測法の理論と応用”, JAERI - memo 3536 (公開) (1969)
- (34) OKIISHI, T.H. and SEROVY, G.K., "An Experimental Study of the Turbulent-Flow Boundavy-Layer Development in Smoth Annuli", J. Basic Eng. p. 823-836, DEC. (1967)
- (35) 西山哲男, “流体力学(Ⅲ)”, p 50, 図 6.6, 日刊工業
- (36) 池見, 中本他, “渦電流式流速計の感度計算 — 非磁性ボピンの場合 —”, PNC資料, SN941 76-131 (1976)

- (37) VAN ERP, J.B., "PROTECTION AGAINST LOCAL CORE ACCIDENTS IN LIQUID METAL FAST BREEDER REACTORS", Nucl. Eng. Design. 15 p. 441 (1971)
- (38) 菊地, 大後他, "局所流路閉塞試験-1, 7本ピンバンドルにおける中心6サブチャンネル閉塞の場合", PNC資料, SN941 76-79 (1976年一月)
- (39) 例えば文献(13), (14), (15)
- (40) 松野, 奥田他, "溶液中を上昇する単一気泡に関する研究——界面活性剤の影響——", 九州工業大学研究報告(工学) №29 (1974)
- (41) 佐藤, 猿渡, "垂直な円管内および平行平板間の静止液中を上昇する気泡の速度", 熊本大学工学部研究報告, 第23巻, 第3号 (昭和49年)
- (42) "LMFBR Program Plan., Element 4 Instrumentation & Control" WASH - 1104 2nd Edition, p. 73 (1972)
- (43) Barbonus, P. et al., "Criteria for the design and selectoin of instruments for SEMR-primary circuits", Ref. (3), № 1-2
- (44) 中本, 大山他, "計測器試験ループの機能試験", PNC資料, SN941 76-96 (1976年8月)
- (45) 日本金属学会編, "金属便覧", 改訂第3版, p 1019, 丸善 (1971)

## 付録A 渦電流式温度流速計（MK-Ⅱ）の受入 検査と故障経験

### A.1 受入れ検査

プローブ8本と検出回路7式の納入後プローブについて実施された受入れ検査は、外観寸法検査、コイル絶縁特性、コイル導通検査である。

#### (1) 外観・寸法検査

外観上特に欠陥は見出されなかった。寸法検査結果は表A.1に示す通りであった。問題点としてはプローブ外径が仕様値で10.8mmφであったのに対し、部分的に11mmを越えるものがあり、7集合体試験部に取り付けた案内管に挿入することが困難であった。このために外径寸法の大きな部分はヤスリで削り細くした。公称外径を11mmと改めた。

#### (2) コイル絶縁検査

メーカーでの測定値は常温、500℃、600℃と3種類提出されていたので、受入れ時は常温での値を測定した。結果を表A.2に示すが、プローブNo.4に絶縁低下が、No.6に絶縁不良が出た。これらについてはメーカーにてすみやかに修理がなされた。

#### (3) コイル導通検査

8本のプローブのうちNo.3に断線が発見されたが、他はいずれも正常であった。断線の原因はコイル部とリード部の接続部が溶接不良で断線したためで、再度スポット溶接がおこなわれた。コイル導通検査結果を表A.3に示す。

### A.2 故障経験

納入後のプローブについて表A.4に故障経歴をまとめて示す。

故障あるいはトラブルは下記の4つにまとめることができる。

#### (1) 断線

コイル部とリード部の接続部はそれぞれのMIケーブル芯線同志の溶接が行なわれているところで、強度的に最も弱い部分である。プローブの出し入れには特に注意を払い、50℃/min以下の熱衝撃（図A.1）におさえたが、数本のプローブに断線が生じた。これは後に瞬時にプローブの出し入れ（常温⇔500℃）ができるプローブに改善された。

#### (2) 絶縁抵抗の劣化

MIケーブル部分では絶縁劣化はおこらず、この場合もコイル部とリード部の接続部の絶縁不良であった。No.6のプローブは新品と交換した。

#### (3) フレキシブル・コンジットの故障

ら旋状のフレキシブル・コンジットは曲りを持つ案内管にプローブを挿入する場合は適し



ているが、本検出器の場合案内管内径とのギャップが小さいため次のトラブルが生じた。

(i)プローブ挿入時フレキシブル・コンジットの外径が少し大きくなるので、案内管内壁との摩擦のためプローブの円滑な挿入が困難になった。(ii)そのためフレキシブル・コンジットをできるだけ細くなるようにねじりを加えるとコンジットの破損が生じ、もとにもどせなくなってしまった。本質的問題ではないが、今後のプローブ製作時には一考を要する部分である。

(4) 電子回路に関するトラブル

電子回路については、ほとんどトラブルらしきものは生じなかったが、ドライバ回路の過電流により出力エミッタ抵抗が破損したと思われるものがあった。マージンを大きくするよう改善されたのでその後異常は生じていない。

測定日 50年3月13日

No.	製品名	センサー部分 (mm)										フレキシブルコンジット部分 (mm)					一般リード線部分 (mm)							
		x	ℓ	ℓ'	a	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>					
1	509EZ 501	214	130	107	32	110	109	109	110	109	109	110	110	5000	110	110	109	110	110	77	3005	3005	3005	
2	"	199	130	108	32	109	109	109	110	109	109	110	5200	110	110	110	110	110	765	3000	3000	3000	3000	
3	"	203	130	107	32	110	109	109	110	109	109	111	5200	111	111	111	111	111	763	3000	3000	3000	3000	
4	"	216	130	107	315	110	109	109	110	109	109	112	5100	110	110	112	110	110	770	3100	3100	3100	3100	
5	"	204	130	107	32	109	109	109	110	109	109	112	5000	110	110	110	110	110	760	3000	3000	3000	3000	
6	"	2065	130	107	32	108	109	109	109	109	109	109	4900	110	109	109	109	109	760	3600	3600	3600	3600	
7	"	66	130	107	31	108	109	109	110	109	109	110	5170	109	110	108	108	108	765	4000	4000	4000	4000	
8	"	123	130	107	32	109	109	109	110	109	109	110	4900	110	110	110	110	110	766	3000	3000	3000	3000	
基準値		20	130		32	108	108	108	108	108	108	108	~4870								~3000			

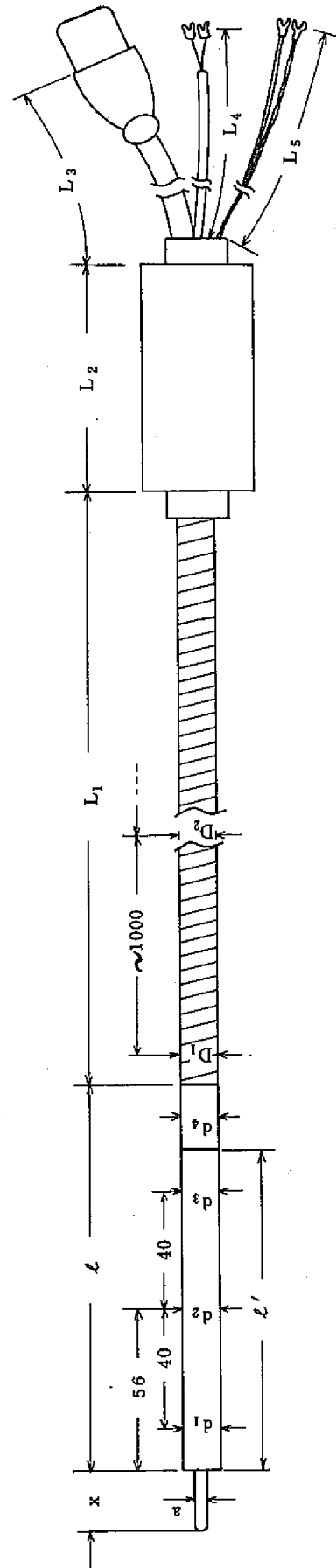


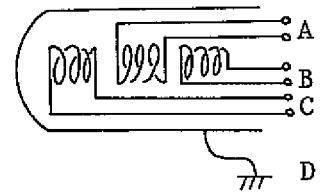
表 A. I 渦電流式温度流速計 (MK-II) の寸法測定結果

表 A.2 渦電流式温度流速計 (MK-II) のコイル絶縁特性受入検査

No.	製品 No.	温度 測定者 測定点	室 温		500℃	600℃
			YEW	PNC*	YEW	YEW
1	509EZ501	A - D	>50MΩ	20MΩ	20MΩ	8MΩ
		B - D	"	23	18	6
		C - D	"	22	30	10
2	509EZ502	A - D	"	9	4	2.5
		B - D	"	20	7	5
		C - D	"	15	25	8
3	509EZ503	A - D	"	20	>50	12
		B - D	"	13	"	"
		C - D	"	20	40	9
4	509EZ504	A - D	2	0.8(12)	2.5	4
		B - D	5	0.4(0.39)	1.5	1.5
		C - D	1.5	1.0(343)	1	1.3
5	509EZ505	A - D	>50MΩ	20	40	10
		B - D	"	20	>50	13
		C - D	"	21	"	14
6	509EZ506	A - D	"	30	"	9
		B - D	"	0	20	7
		C - D	"	6	"	"
7	509EZ507	A - D	"	10	35	"
		B - D	"	10	40	9
		C - D	"	12	"	8
8	509EZ508	A - D	"	25	>50	12
		B - D	"	30	30	8
		C - D	"	13	>50	12

\* PNC受入検査

(注1)



(注2)

測定器: YEW Type3213

電池式絶縁抵抗計  
(250V/50MΩ)

測定日: S50-3-13(PNC)

但し、( )内の値は再測定値

測定器: YEW Type2807

デジタルボルトメータ

測定日: S50-3-14(PNC)

表A.3 渦電流式温度流速計 (MK-II) のコイル導通受入検査

No.	製品 No.	温度 測定者 測定点	室 温	
			YEW	PNC*
1	509EZ501	A		580Ω
		B		300
		C		300
2	509EZ502	A		580
		B		300
		C		300
3	509EZ503	A		585
		B		導通なし
		C		294
4	509EZ504	A		580
		B		300
		C		300
5	509EZ505	A		570
		B		290
		C		290
6	509EZ506	A		580
		B		300
		C		300
7	509EZ507	A		580
		B		290
		C		290
8	509EZ508	A		580
		B		300
		C		290

\* PNC受入検査

(注1)



(注2)

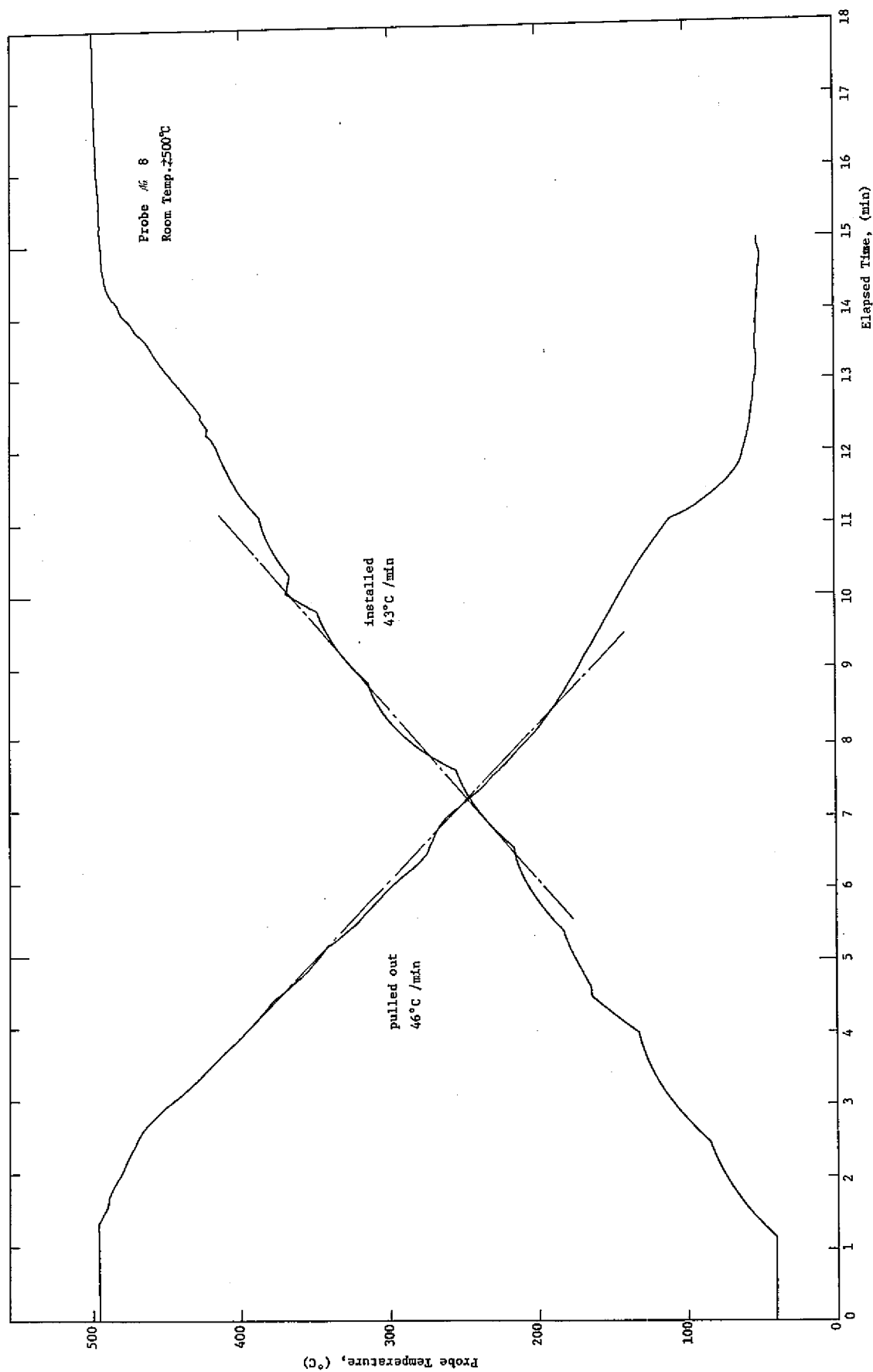
測定器：YEW Type 2807

デジタルボルトメータ

測定日：S50-3-13

表 A.4 渦電流式温度流速計 (MK-II) の故障経緯

項目 プロ ブ 回路%	受 入 検 査	メーカでの修理	実験中に故障	メーカでの修理	その後の使用頻度
	昭和50年3月13日	昭和50年4月2日	昭和50年6~7月	昭和50年9月20日	昭和50年9月 ~51年12月
1	良	—	2次コイル断線 (コイルとリード部 の接続部)	熱衝撃によい改良 型に交換	多
2	良	—	電子回路動作不良?	正 常	少
3	2次コイルのうち1 本断線	原因はコイルとリー ド部の接続部断線→ 再度スポット溶接	電子回路故障	同期整流のFET故 障していたので交換	"
4	コイル絶縁抵抗少 (常温で0.4~ 1.0MΩ)	問題あるも一応この まま使用する。	フレキシブルコンジ ット故障 2次コイル断線 電子回路不良	フレキシブルコンジ ットは修理不能 コイル断線部はスポ ット溶接, 回路は改善	"
5	良	—	—	—	"
6	2次コイルのうち1 本絶縁抵抗がゼロ	原因はコイル部とリ ード部の接続部で MI線のシースと芯 線が接触→新品プロ ーブと交換	—	—	"
7	良	—	2次コイル断線	4.1と同じ改良型に 交換	多
8	良	—	—	—	少



図A. 1 プローブの出し入れ時の熱衝撃の例

## 付録 B 補足データ

本文中では主としてプローブ No.1 についての特性を示したが、同じ仕様で製作した他のプローブと回路に関する特性を参考のために記す。また生データなどその他のデータも補足として記す。

## B.1 流速信号出力の励磁周波数依存性 (図 5.2 (b) に相当)

図 B.1 プローブ No.2, 試験部 FS-2

図 B.2 プローブ No.5, " "

最適励磁周波数  $f_{op}$  は 300~500℃ では 50~100Hz の間で選択されるし、温度上昇とともに周波数が高周波数側に移行する傾向もプローブ No.1 と同様である。なお図 B.1 と B.2 の縦軸は出力電圧をそのまま記載している点が図 5.2 (b) と異なる。

## B.2 流速信号の直線性 (図 5.4 ~ 5.6 に相当)

図 B.3 300℃, プローブ No.2, 試験部 FS-2

図 B.4 400℃, " , "

図 B.5 500℃, " , "

図 B.6 300℃, プローブ No.5, "

図 B.7 400℃, " , "

図 B.8 500℃, " , "

流速信号出力の直線性はナトリウム温度や励磁周波数に依存しないことはプローブ No.1 と同様である。

## B.3 流速検出感度の温度依存性 (図 5.9 に相当)

図 B.9 プローブ No.2, 試験部 FS-2

図 B.10 プローブ No.5, "

励磁周波数が 50~100Hz の間で最適周波数を有することはプローブ No.1 と同様である。

## B.4 流速計試験部による差

図 B.11 500℃, プローブ No.1, 試験部 FS-2 および FS-3

先端部の形状によって出力感度が約 2% 異なるが、直線性は両者とも良好である。

## B.5 流速計の個差

図 B.12 500℃, プローブ No.1 ~ No.8, 試験部 FS-2

表B.1 300～500℃，プローブ№1～№8，試験部FS-2

プローブと回路を図B.12のように組み合わせた結果，それぞれ出力電圧 $E_r$ の大きさに差はあるが，直線性はいずれも良好であり，感度は回路的にスパン調整可能である。

## B.6 流速信号の安定性

図B.13 500℃，プローブ№1，試験部FS-2

永久磁石式流量計FM-4を基準に約12時間連続して記録し，測定開始時のFM-4出力電圧に対する流速信号電圧の比を基準(100%)とし，その後の変化を図B.13に示した。この間の変化は高々±0.6%であり，これは測定誤差±0.8%(最大)の中に含まれてしまう大きさであって，安定性は良好である。

## B.7 流速信号のヒステリシス

図B.14 500℃，プローブ№1～№8，試験部FS-2

個々の流速計について，0 m/s → 3.3 m/s → 0 m/s と変化させたときのヒステリシス曲線は，すべてフルスケールの±0.5%以内に入っている。測定時の温度変化(最大7℃)を考慮すると，ヒステリシスは十分小さいと言える。

## B.8 流速信号の生データ

図B.15 300℃，プローブ№1，試験部FS-3

流速検出信号 $E_r$ とともに，2次コイル信号間の位相差 $\Delta\phi$ も生データの一例を示す。

## B.9 流速信号の同期整流位相

表B.2 回路№1

同期整流位相つまみを固定した場合の，励磁信号(TP-202)に対する同期位相を表B.2に示す。

## B.10 温度信号出力および感度の励磁周波数依存性(図6.1に相当)

図B.16 プローブ№2，試験部FS-2

図B.17 プローブ№5 //

温度信号出力 $E_r$ が $f=200\sim300\text{Hz}$ で最大となり，検出感度も励磁周波数とともに500 Hzまでほぼ単調増加する傾向はプローブ№1と同様である。なお検出感度算出時の増巾器ゲインは便宜上回路№1と同じとした。



## B.11 温度信号の直線性(図 6.3 に相当)

図 B.18 プローブ №2, 試験部 FS-2

図 B.19 プローブ №5, //

直線性はプローブにより差がある。図 6.3 も含めて温度検出の直線性は周波数を固定して温度を上下しないと測定誤差が大きくなる。したがって図 6.3 の  $f=75\text{ Hz}$  のデータ以外は参考としてみた方がよい。

## B.12 温度信号と流速との関係(図 6.2 と対応)

図 B.20  $500^\circ\text{C}$ , プローブ №1, 試験部 FS-2

$v=0.33\sim 1.76\text{ m/s}$  と変化させても温度信号  $E_T$  に変化がない状況を生データとして示す。

## B.13 流体中への磁場浸透の目安

図 B.21 常温, プローブ №1, アルミニウムによる模擬

プローブのまわりに案内管(SUS 304), アルミニウムの円筒を次々とかぶせていったときの温度信号出力を常温で測定し, 案内管のみをかぶせたときの値で規格化したのが図 B.21 である。 $f=75\text{ Hz}$  のとき,  $r\approx 20\text{ mm}$  (アルミニウムの肉厚  $13\text{ mm}$ ) あればそれ以上浸透していないことがわかる。常温でのアルミニウムの導電率は  $37.5\times 10^6\ \Omega/\text{m}$  であり,  $500^\circ\text{C}$  のナトリウムの値に対して約 10 倍大きいので, ナトリウムの場合は流路外径の影響が出なくなるのは少くとも  $r\approx 50\text{ mm}$  と推定される。したがって, この観点から言えば  $8.11\text{ mm I.D.}$  の本試験部(FS-2, FS-3)は  $f=75\text{ Hz}$  程度の低周波数では寸法的にやや不足と言える。

参考までに, ナトリウムとアルミニウムについて温度をパラメータとして, 浸透深さを図 B.22 に記した。

## B.14 温度信号の時間応答性

図 B.23  $500^\circ\text{C}$ , プローブ №1, 7 集合体試験部

渦電流式温度流速計の応答性測定はその速応性故に困難である。成功はしなかったが参考までに温度信号  $E_T$  の時間応答性を図 B.23 に示す。図 4.1 のフローシートにおいて, 中央チャネルの流量調節弁 V103 を全閉にした後加熱器(II)で滞留ナトリウムを昇温した。次に, 瞬時に V103 を開いて昇温したナトリウムを上方に導き 7 集合体の中央集合体に設置した温度流速計でナトリウム温度変化を測定した。図 B.23 の実線は温度流速計案内管の外側に取りつけた  $1.6\text{ mm}\phi$  のシーラ熱電対の出力を, 破線は温度信号出力  $E_T$  を示す。縦軸はそれぞれの出力変化を最大変化量で割って規格化してある。温度検出信号  $E_T$  は  $1.6\phi$  の熱電対(非接地型,  $\tau=150\text{ msec}$ )と同様の時間変化を示したが, 入力として加えた温度変化がステップ状にならなかったため速

応性の確認はできなかった。しかし同図の第一のランプ応答から少なくとも1秒以下の応答性が期待できる。応答性の問題点はむしろ数秒以上のゆっくりした第2のモードの応答である。これは案内管やプローブ構成要素の熱容量等に依存する。しかしながら図B.23のデータは(i)入力の温度変化速度が小さい、(ii)温度変化の大きさが小さく、また記録計のアナログ量から再構成したため精度が悪いので、今後より正確な測定が必要である。

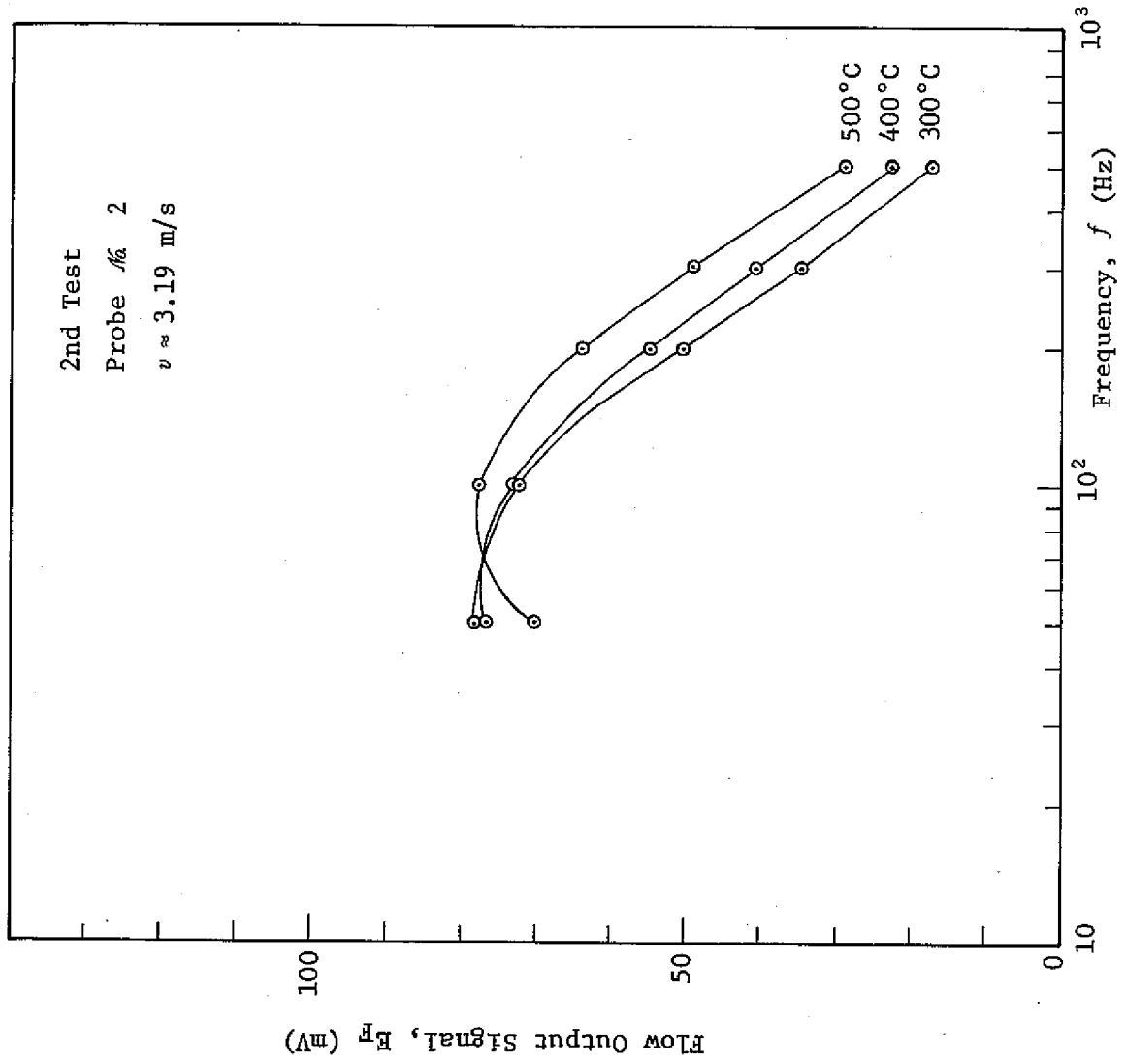
表B.1 温度流速計の個差と再現性

$f = 7.5 \text{ Hz}$

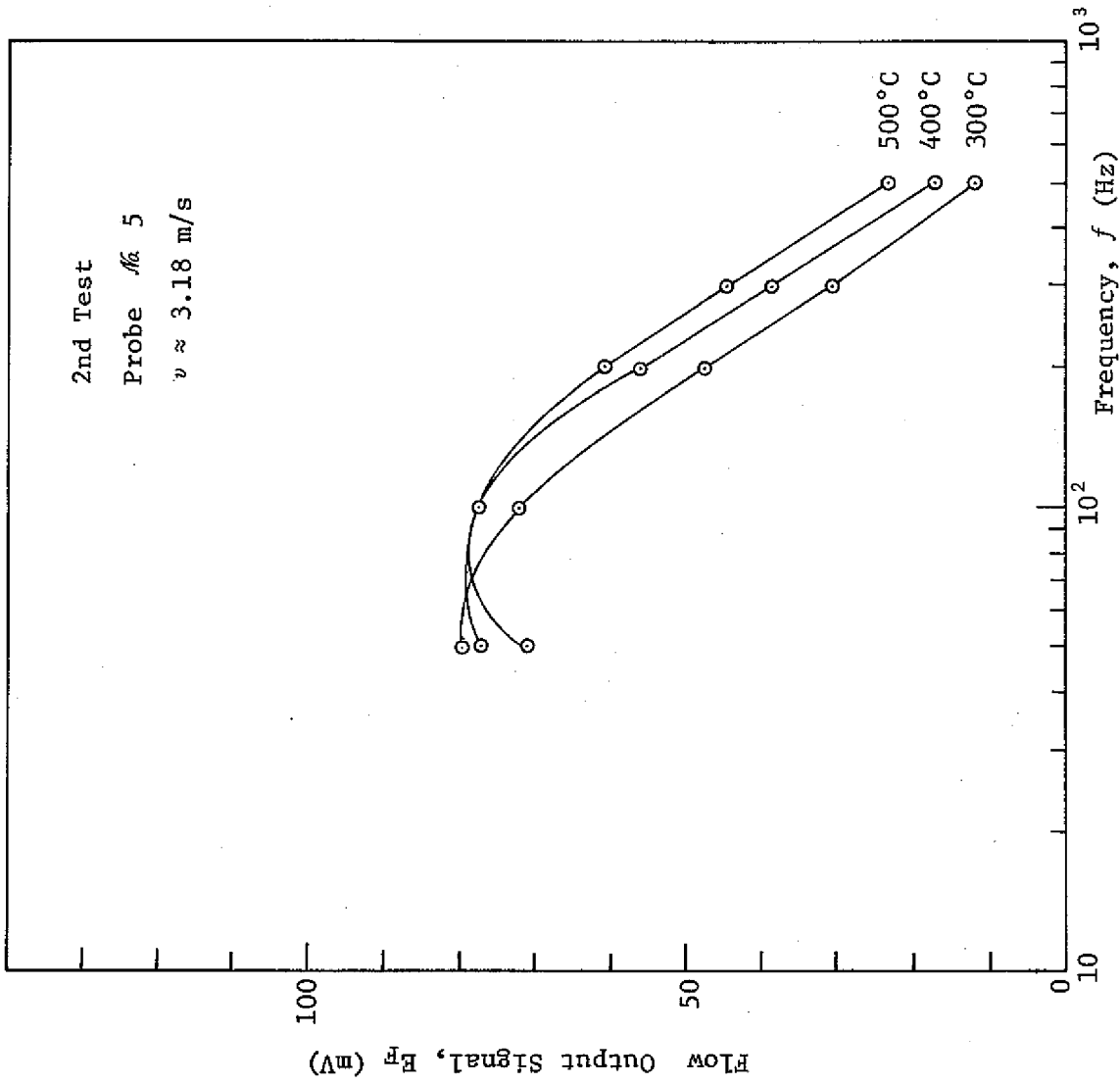
Probe	Circuit	Flow Output (mv/m/s)			Temperature Output ( $\mu\text{V}/\text{C}$ )		Test Section (Guide Tube)	Test %	Date	Rectifier for $E_f$
		300°C	400°C	500°C	300~400°C	400~500°C				
No. 1	No. 7	-	-	21.9 (498~502°C)	-	-	FS-2	3 rd	Dec. 1, 1975	Synchro. (Fixed)
"	No. 1	22.7 (301°C)	-	-	-	-	FS-3 (E)	4 th	Feb. 19, 1976	"
"	"	22.7 (300°C)	24.0 (404°C)	24.2 (494°C)	48.5	48.5	"	5 th	July 15-18, 1976	"
"	"	23.1 (301°C)	24.0 (404°C)	23.5 (501°C)	49.5	46.8	"	6 th	Oct. 22-26, 1976	"
"	"	24.2 (305°C)	24.2 (404°C)	23.6 (498°C)	-	-	"	"	Nov. 29-Dec. 6, 1976	Synchro. (Optimum)
"	"	11.9 (305°C)	11.9 (404°C)	11.5 (498°C)	-	-	"	"	"	Diode
No. 2	No. 2	-	-	24.0 (496~500°C)	-	-	FS-2	3 rd	Nov. 28, 1975	Synchro. (Fixed)
No. 3	No. 3	-	-	24.5 (496~500°C)	-	-	"	"	"	"
No. 4	No. 4	-	-	24.0 (497~502°C)	-	-	"	"	"	"
No. 5	No. 5	-	-	22.6 (498~504°C)	-	-	"	"	Nov. 29, 1975	"
No. 6	No. 6	-	-	21.8 (498~504°C)	-	-	"	"	Dec. 1, 1975	"
No. 7	No. 1	-	-	22.5 (494~500°C)	-	-	"	"	Nov. 27, 1975	"
No. 7	No. 1	-	-	23.0 (491~500°C)	-	-	FS-3 (E)	"	Dec. 2, 1975	"
No. 8	No. 5	-	-	22.4 (499~505°C)	-	-	FS-2	"	Dec. 4, 1975	"
No. 8	No. 7	-	-	21.3 (496~503°C)	-	-	"	"	Dec. 1, 1975	"

表 B.2 流速信号用同期整流の位相 (位相調整つまみ固定時)

Frequency, $f$ (Hz)	phase, $\phi$ (deg)
2.5	26.0
7.5	8.4
12.5	4.4
22.5	1.4
32.5	0.2
52.5	-0.1
102.5	-0.1



図B.1 流速信号出力の励磁周波数依存性(プローブ#2)



図B. 2 流速信号出力の励磁周波数依存性 (プローブNo. 5)

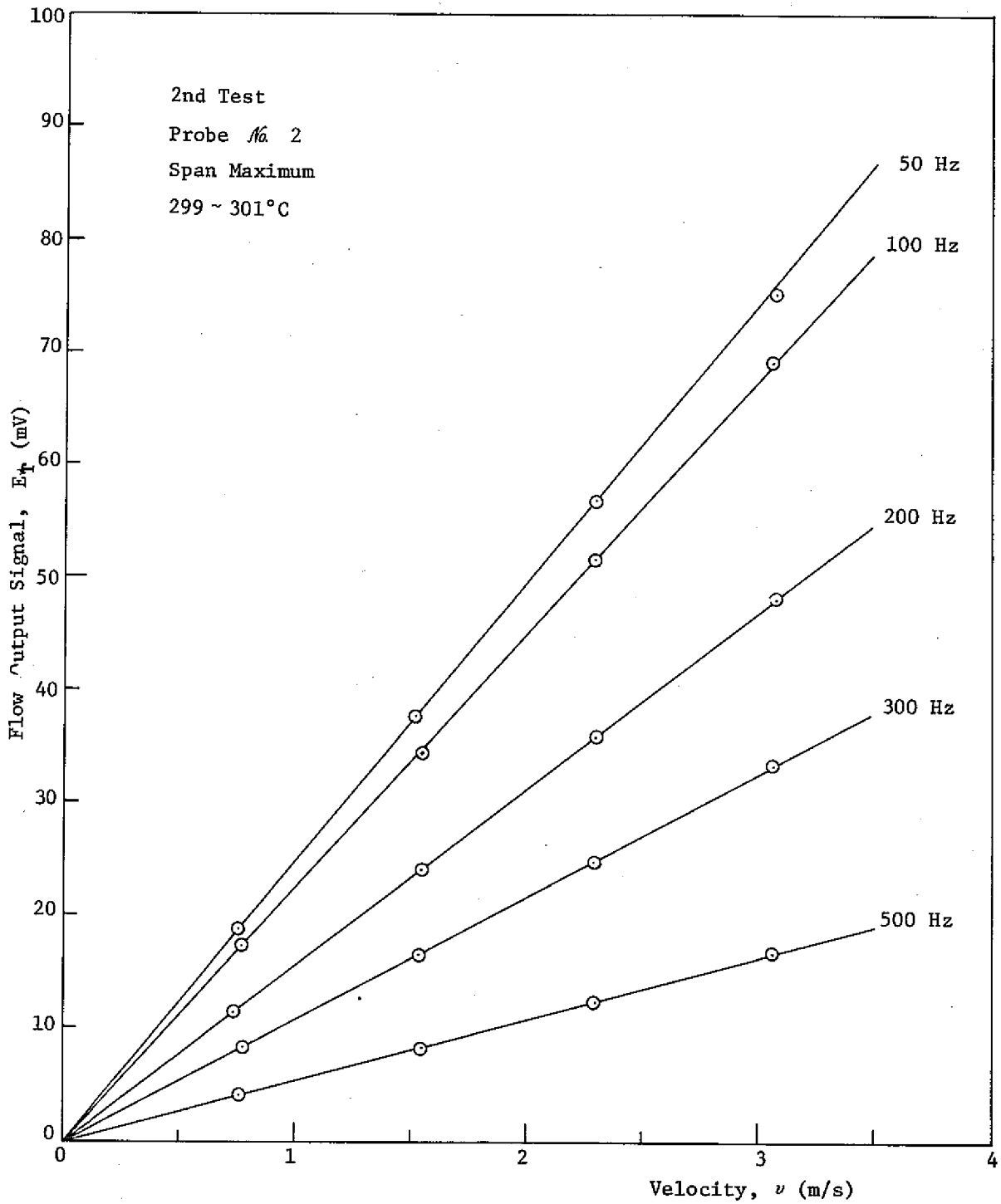


図 B. 3 流速信号の直線性 (300°C, プロブ No. 2)

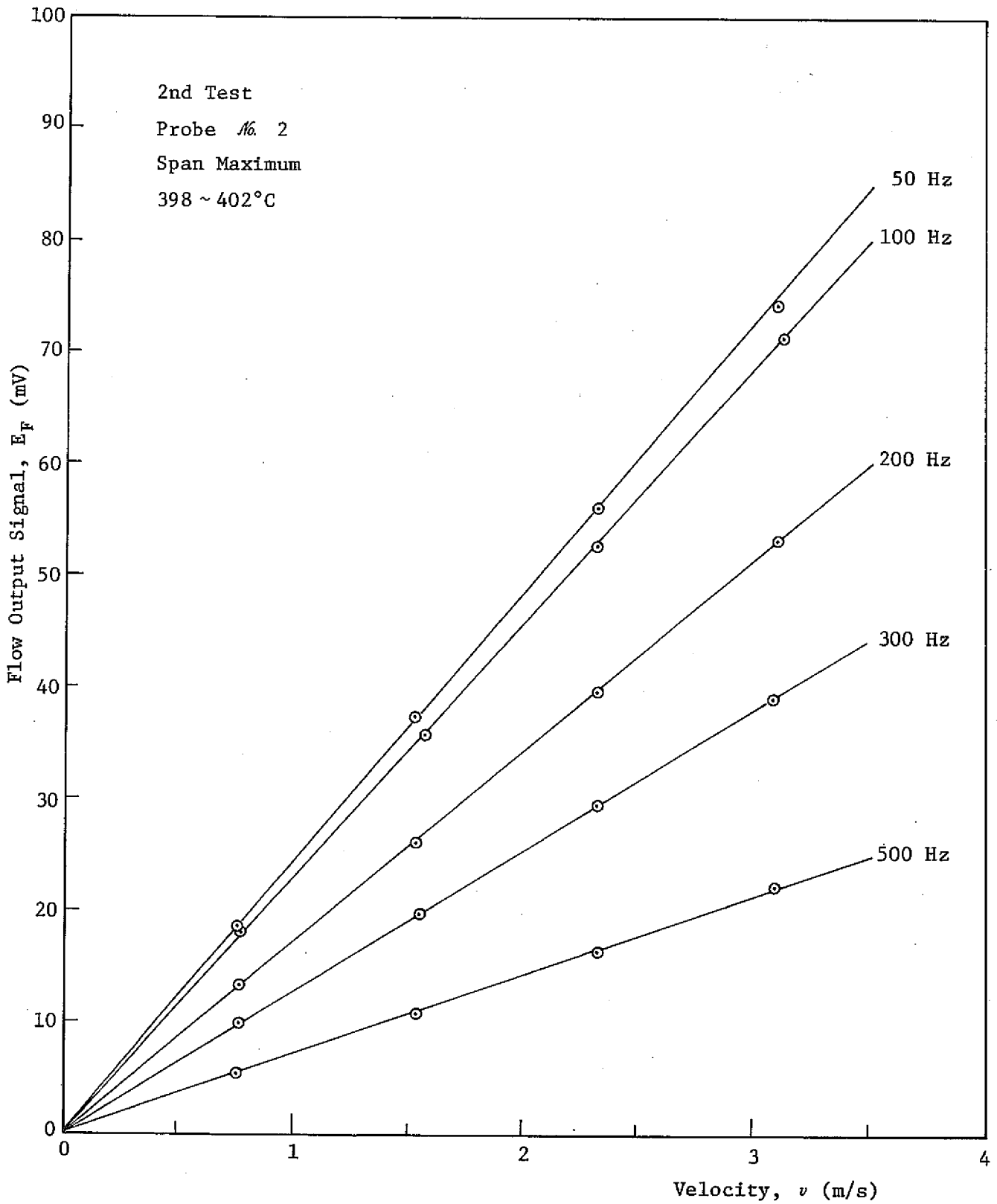


図 B. 4 流速信号の直線性 ( 400°C, プロブ No. 2 )



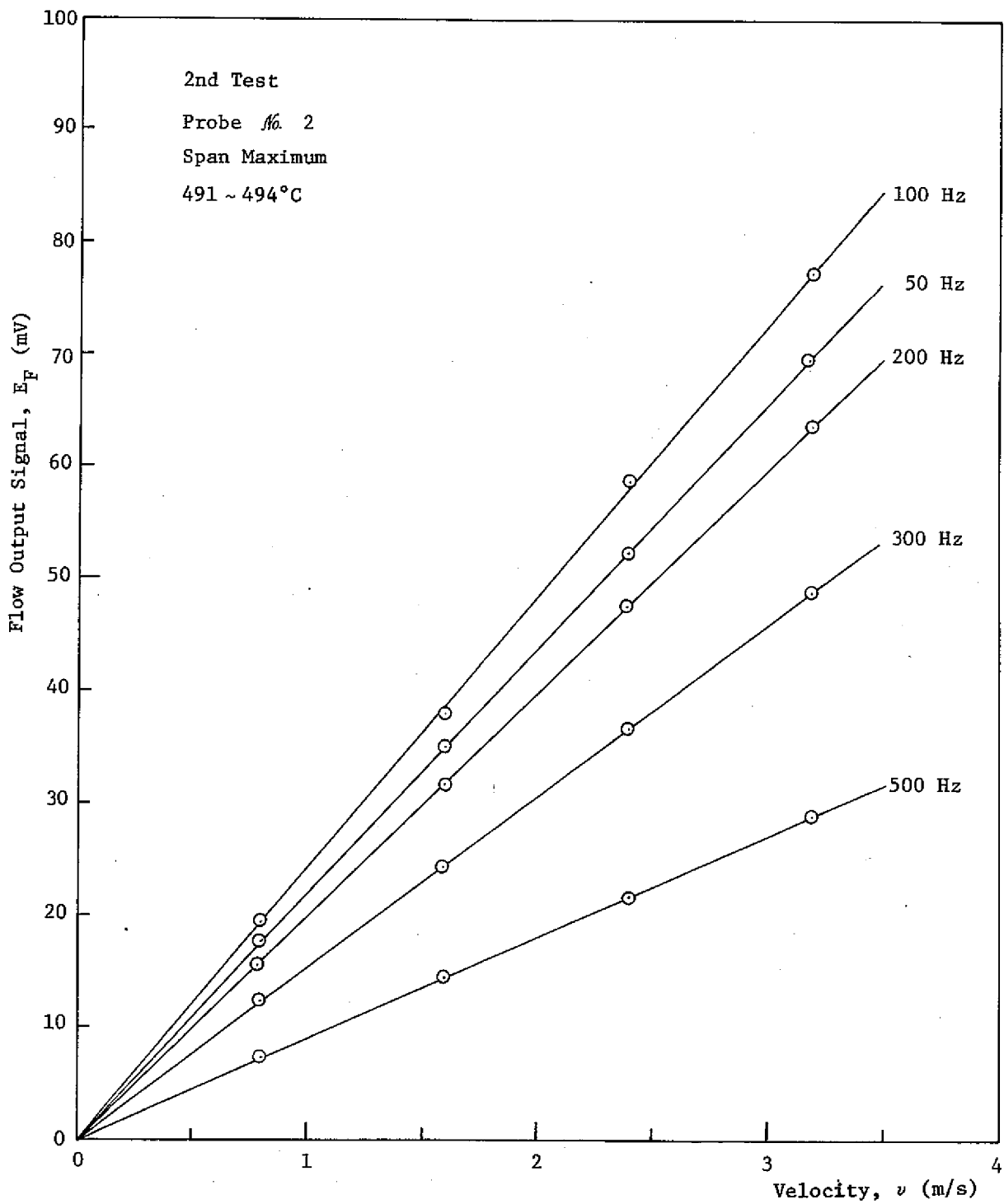


図 B. 5 流速信号の直線性 ( 500 °C , プロブ No. 2 )

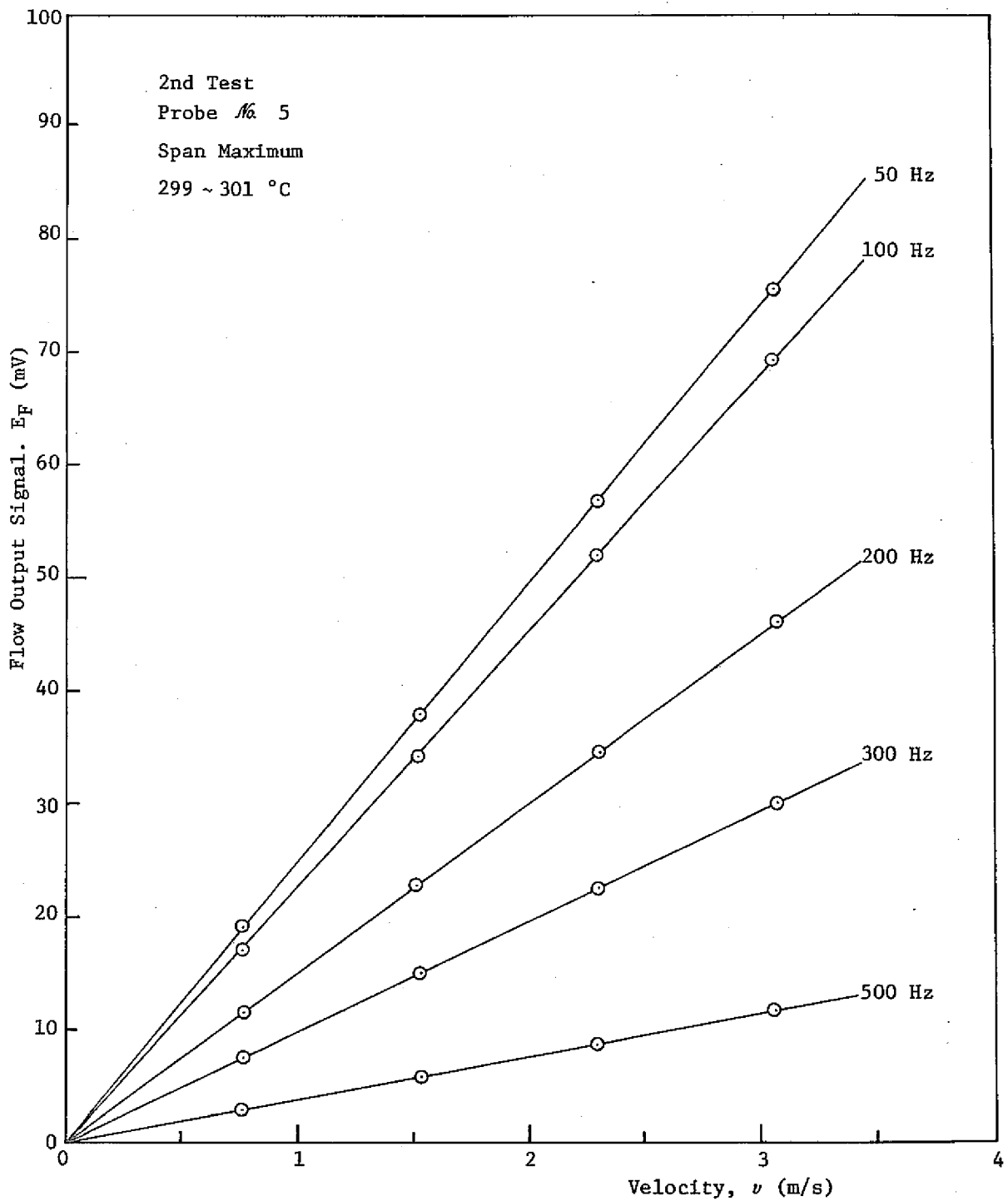
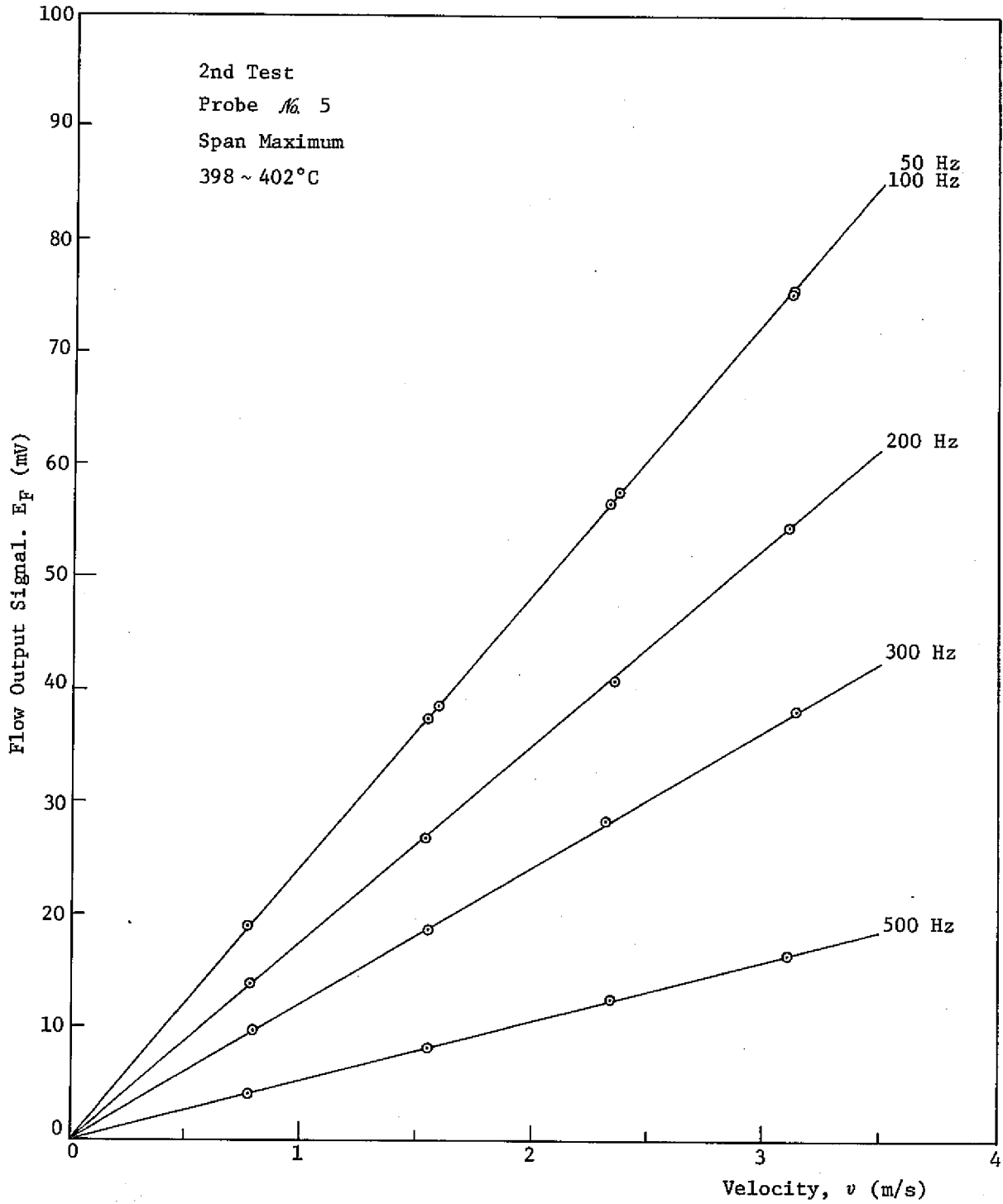


図 B. 6 流速信号の直線性 ( 300 °C, プロブ No. 5 )



図B. 7 流速信号の直線性 ( 400°C, プローブ No. 5 )

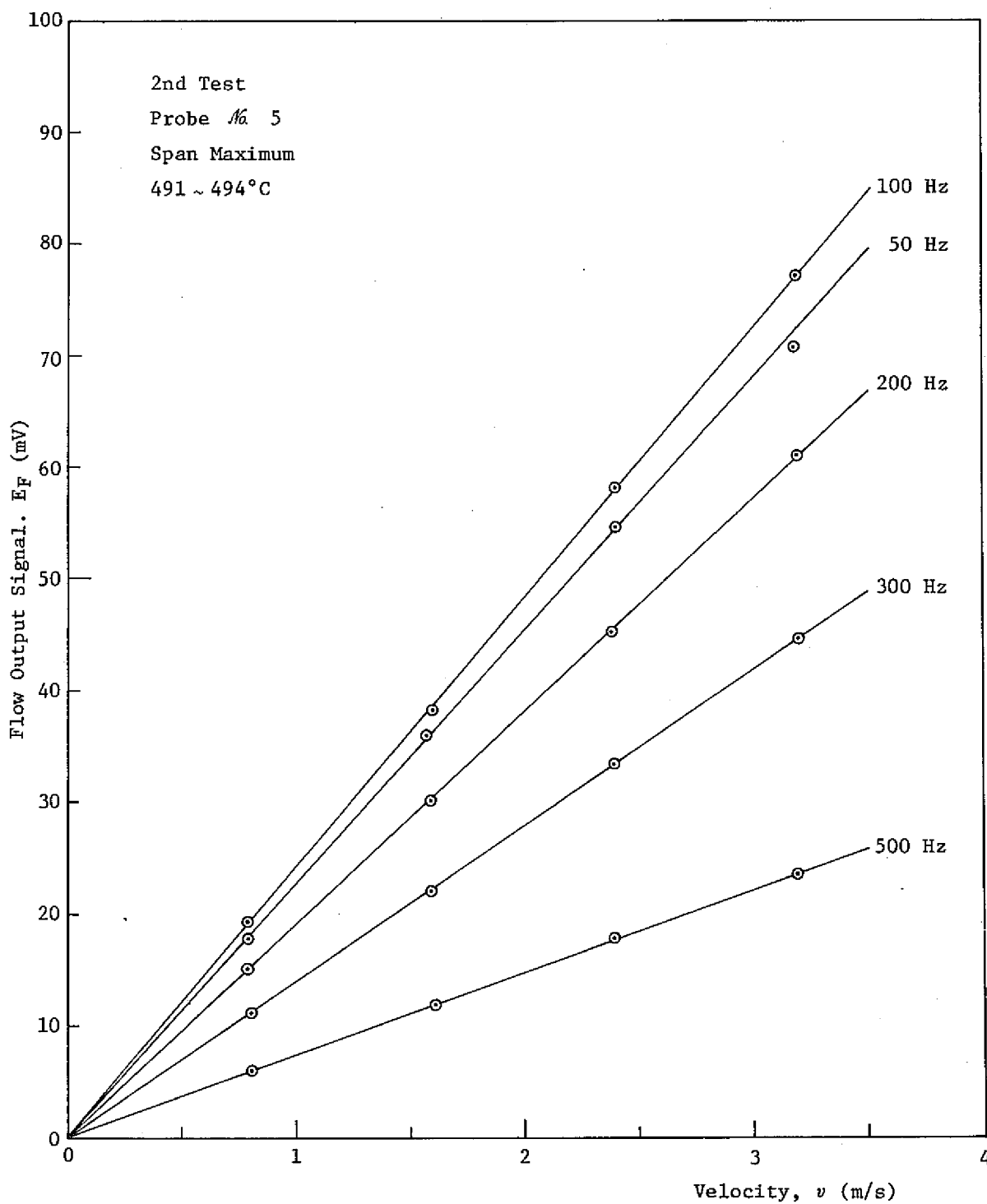


図 B. 8 流速信号の直線性 ( 500°C, プロブ No. 5 )

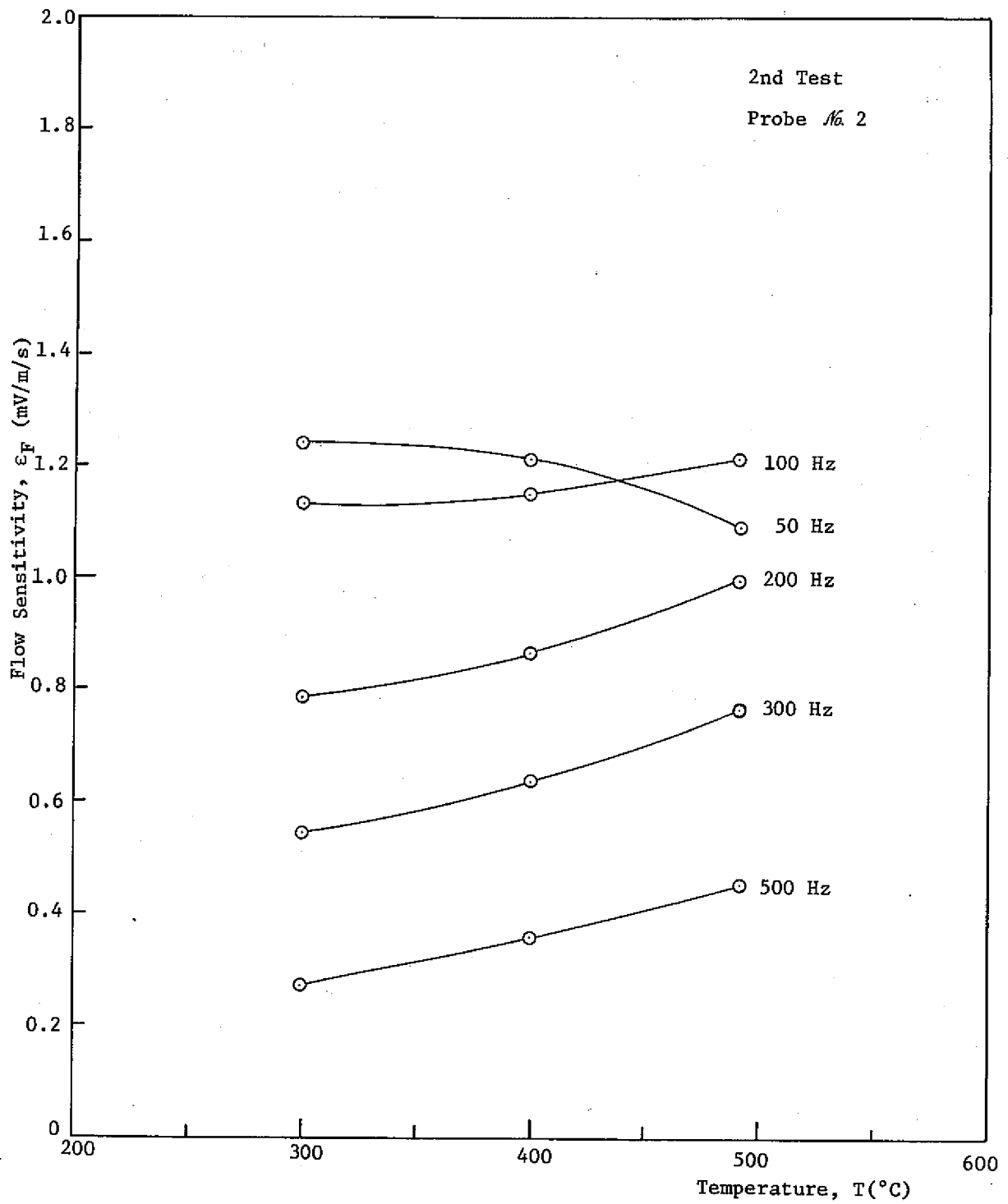


図 B. 9 流速検出感度の温度依存性 (プローブ No. 2)

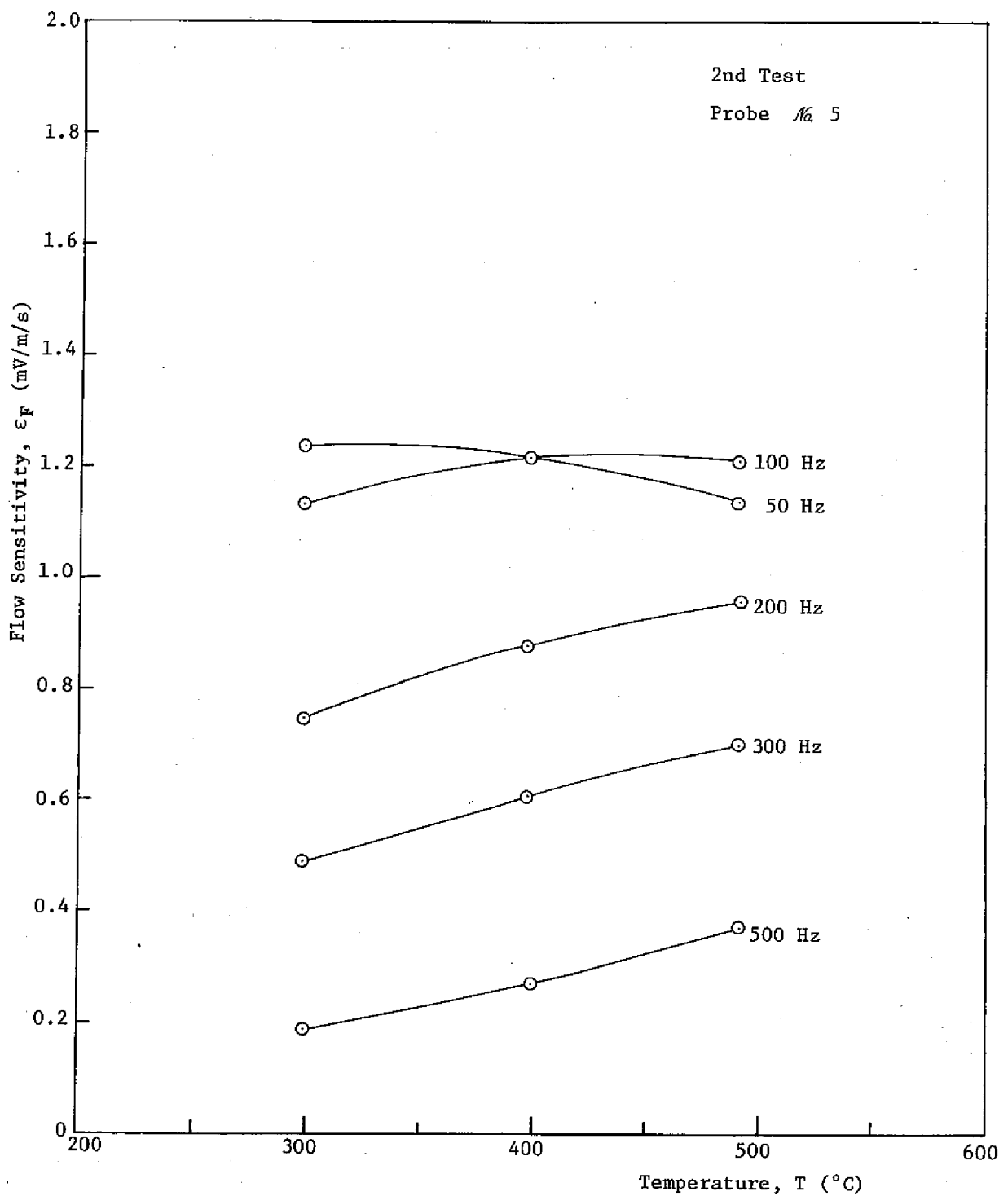


図 B. 10 流速検出感度の温度依存性 (プローブ No. 5)

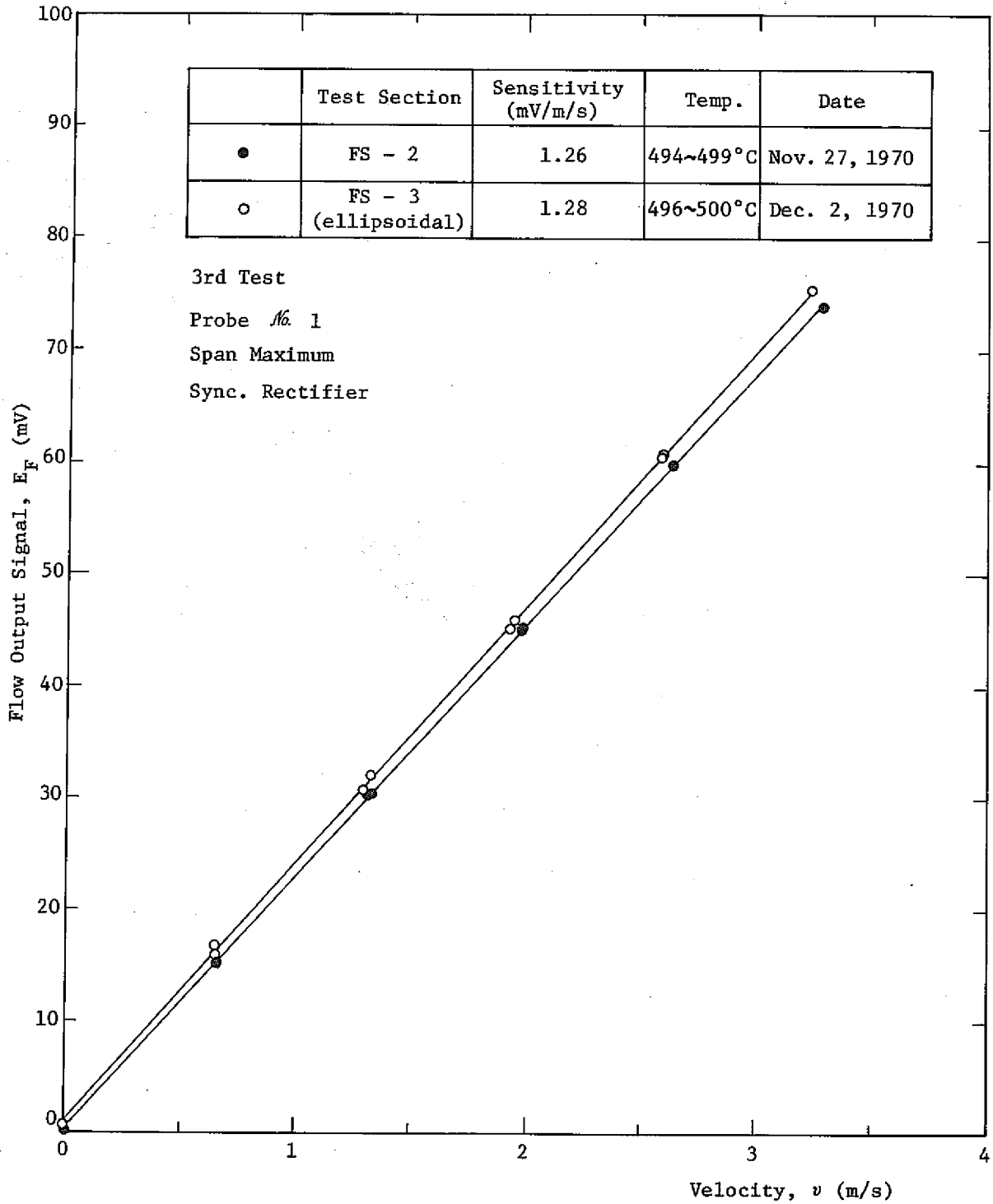


図 B. 1 1 流速計試験部による差

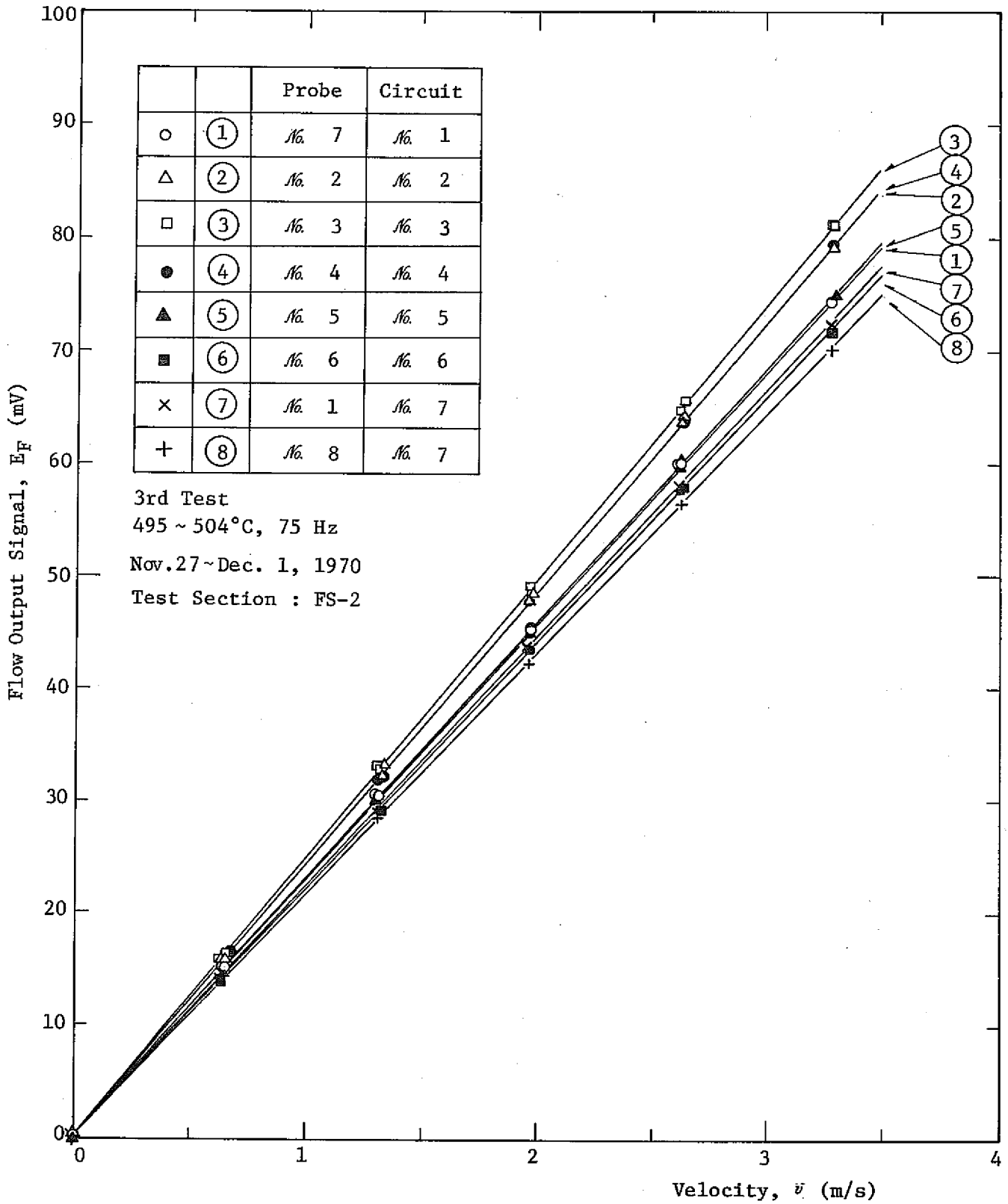
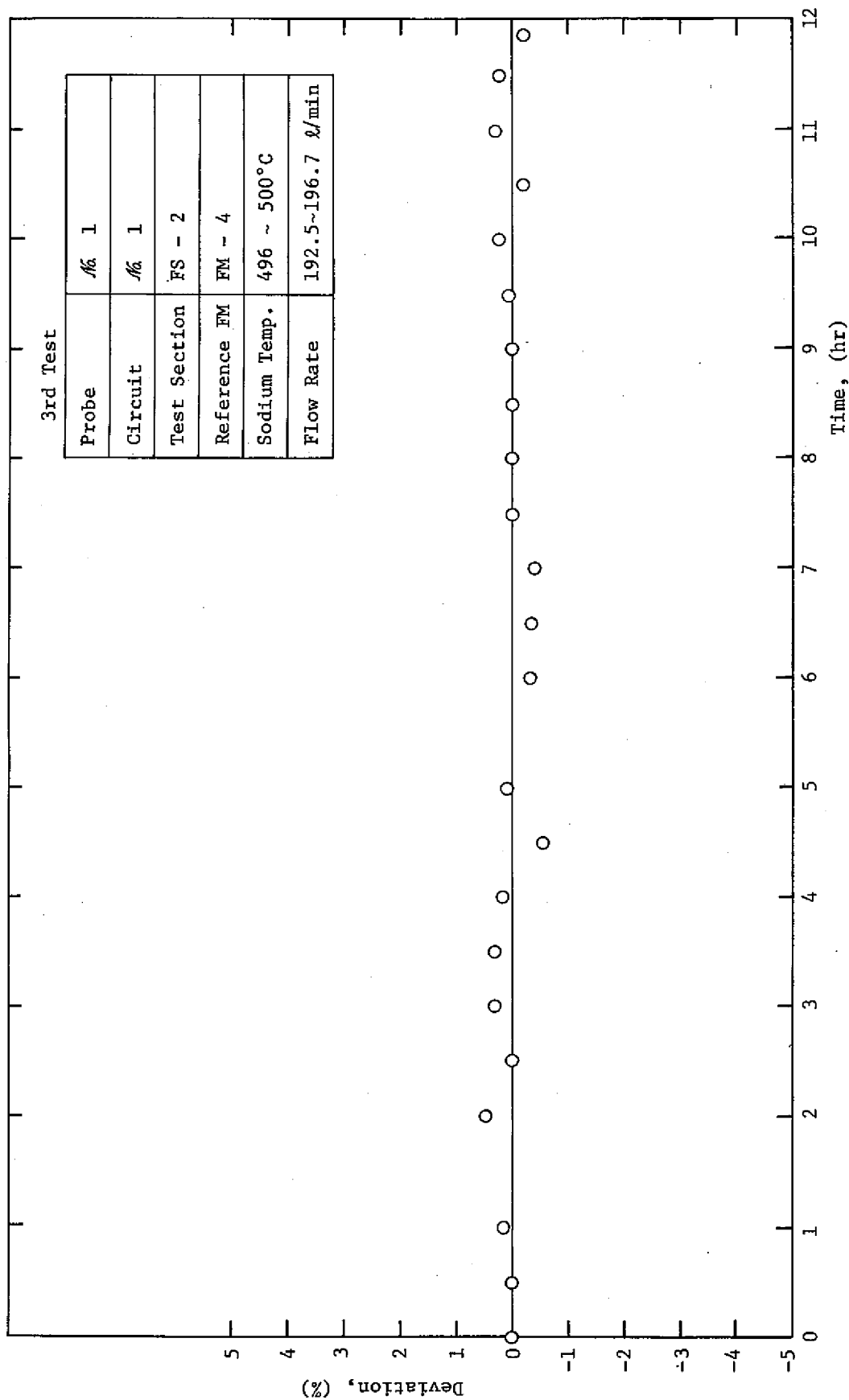


図 B.12 流速計のプロブおよび回路による個差





図B.13 流速信号の安定性

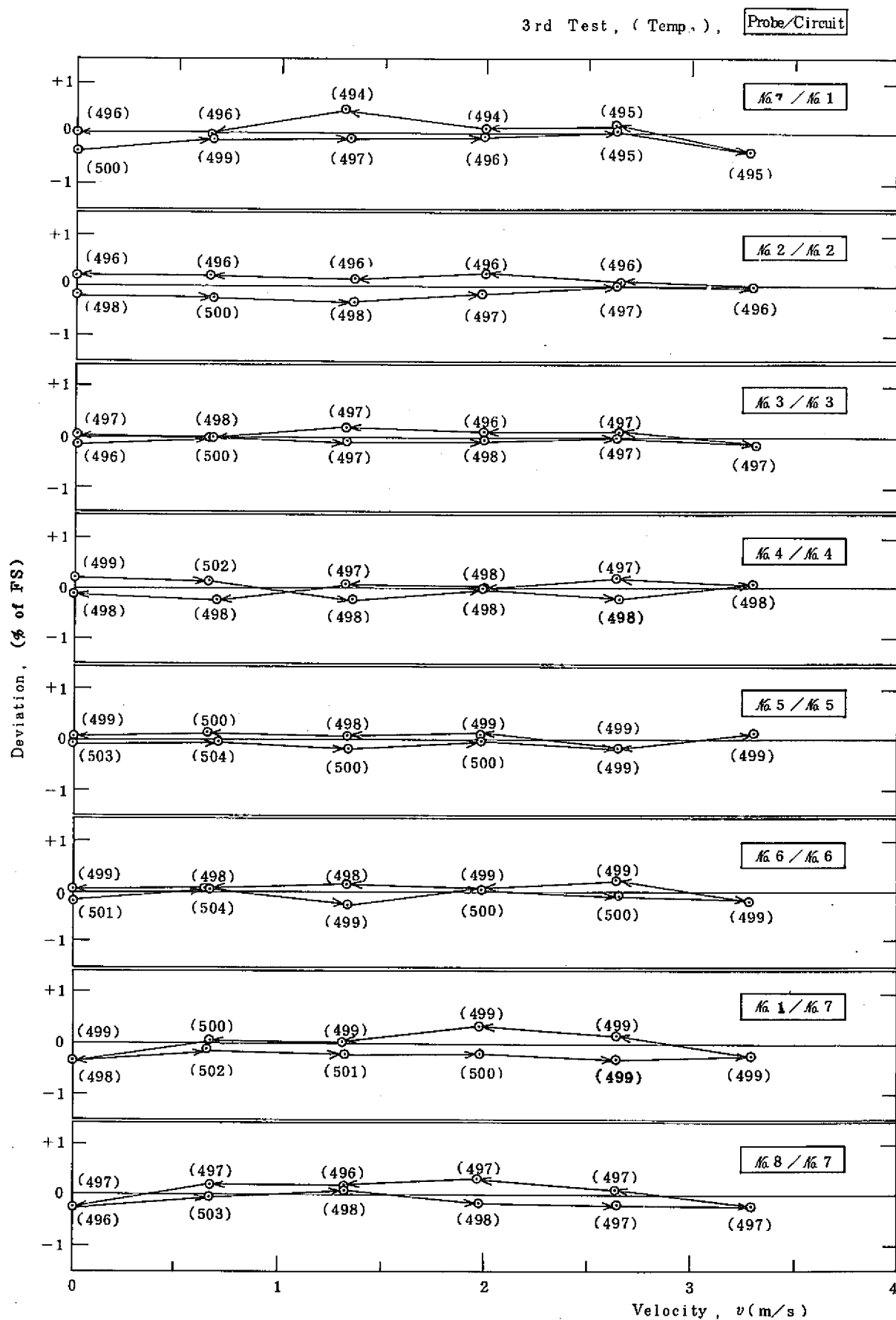
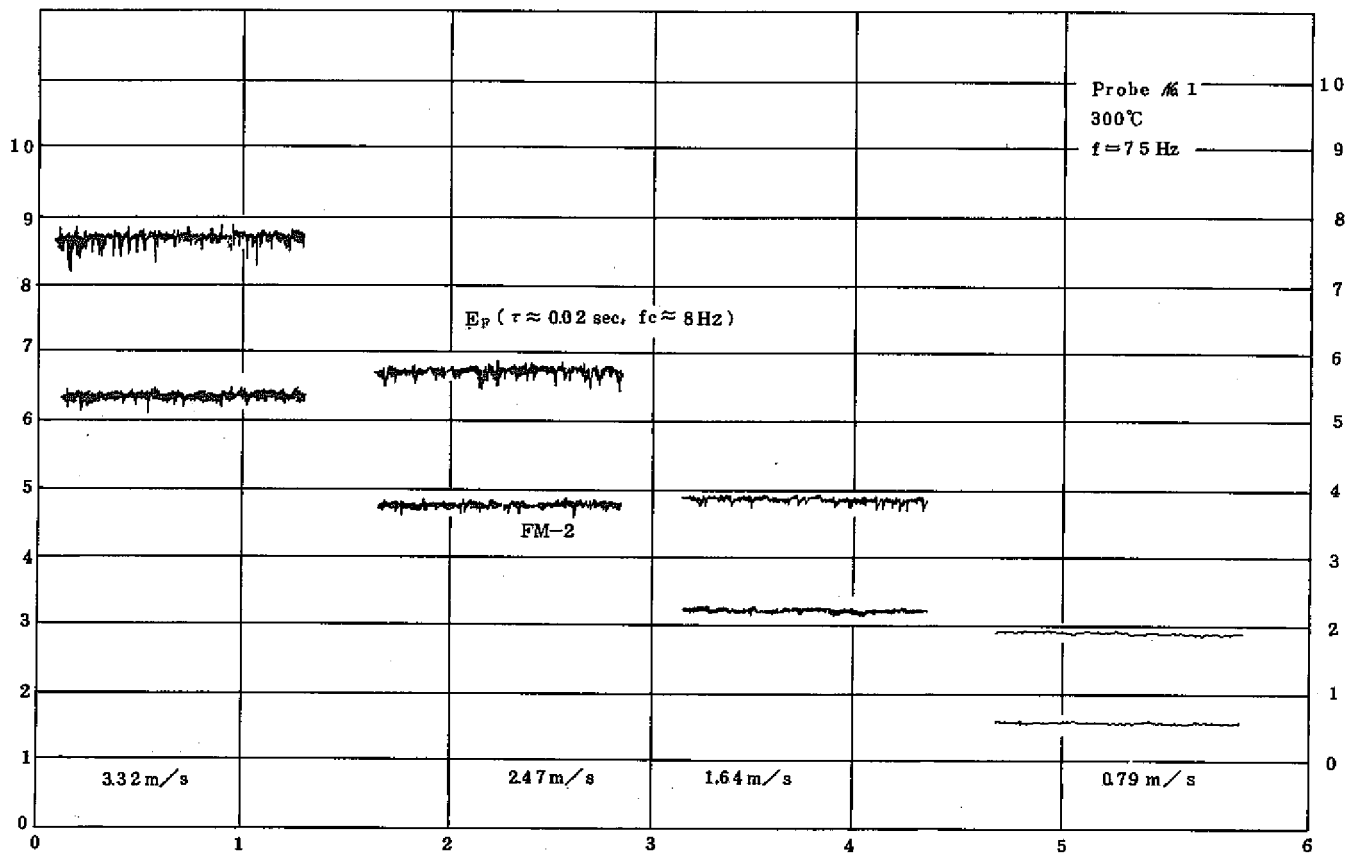
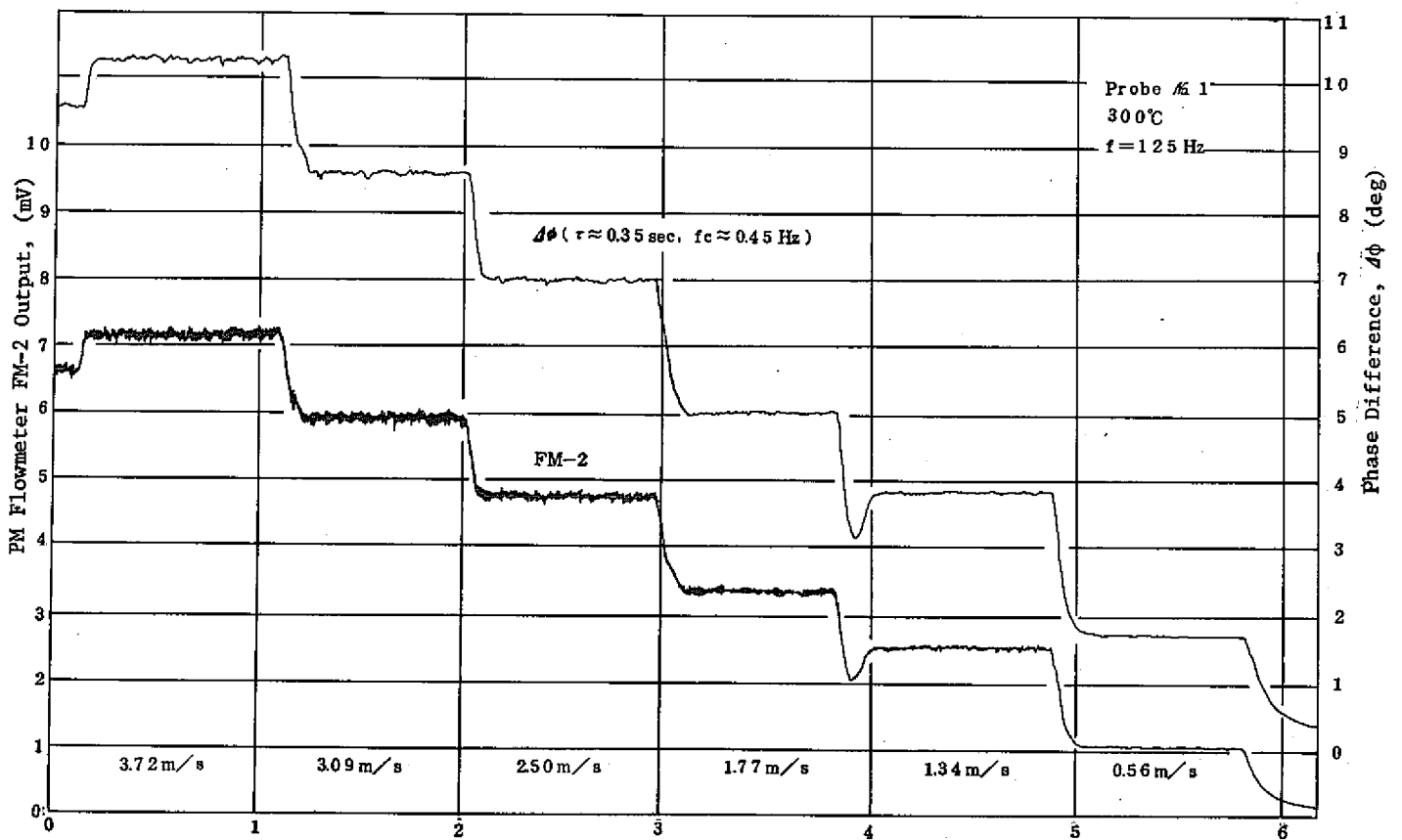


図 B. 14 流速検出におけるヒステリシス



(a) 流速信号  $E_P$



(b) 流速計2次コイル信号の位相差  $\Delta\phi$

図 B. 15 流速信号生データの一例

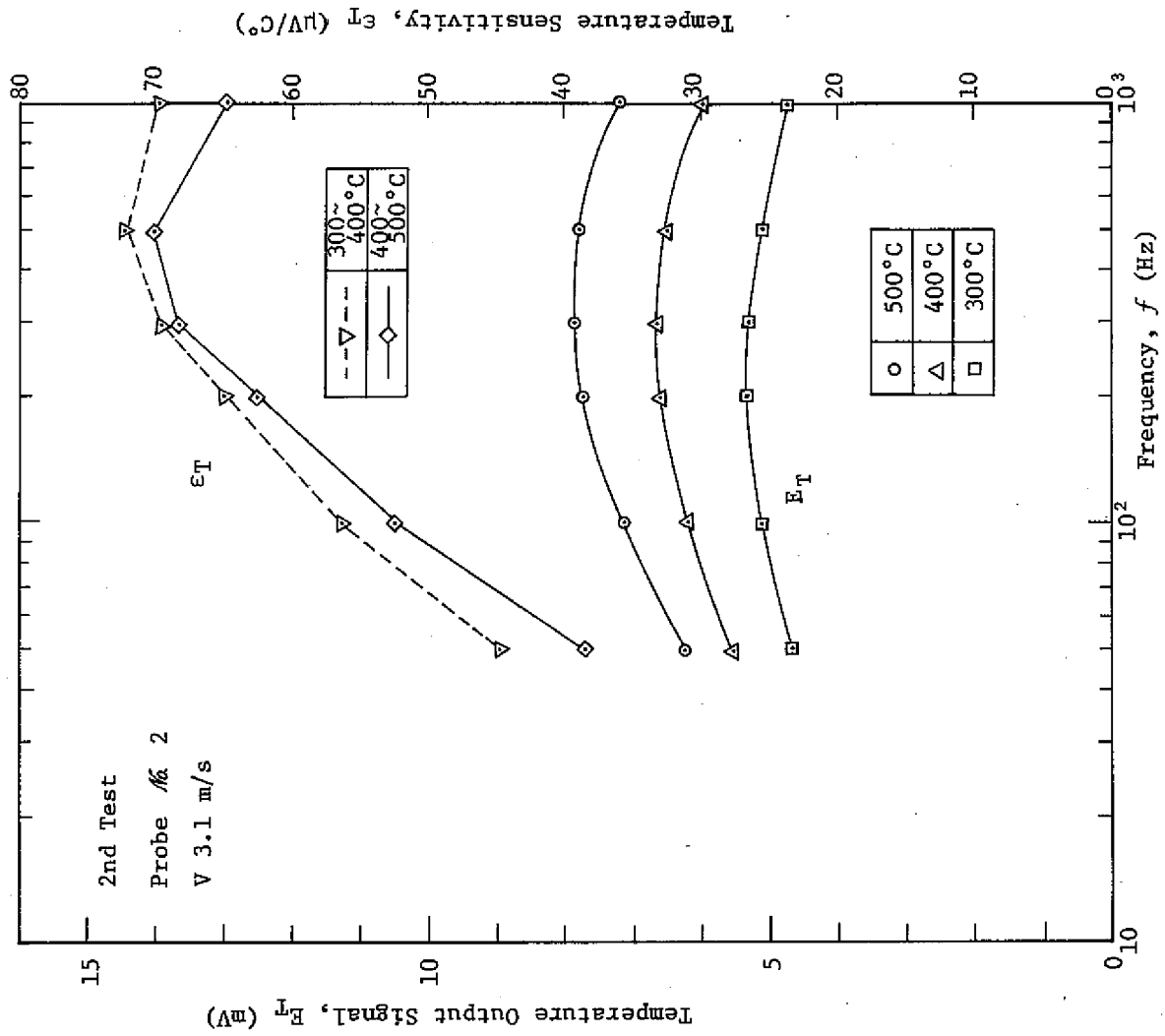
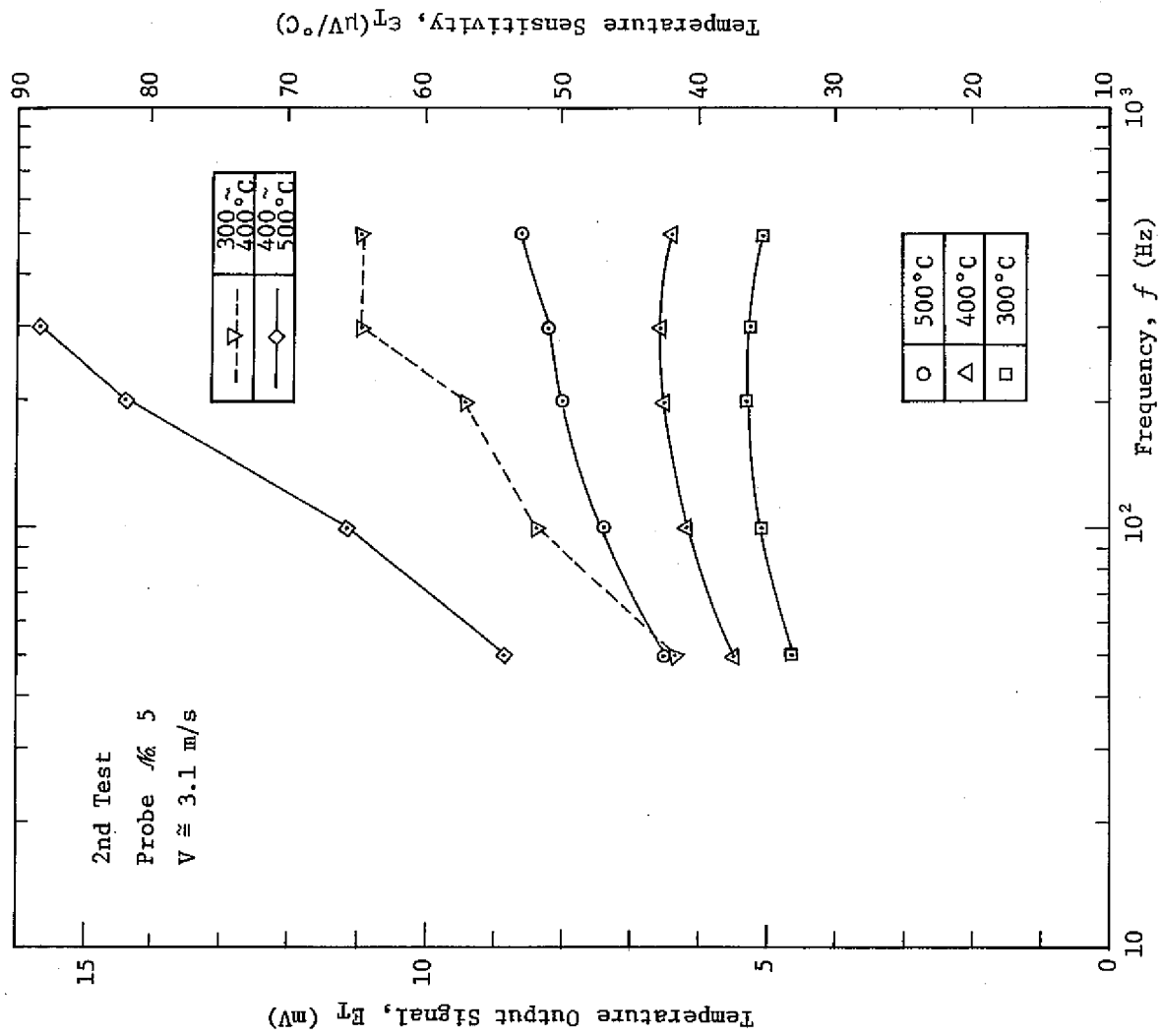


図 B. 16 温度信号出力の励磁周波数依存性 (プローブ No. 2)



図B. 17 温度信号出力の励磁周波数依存性 (プローブ No. 5)

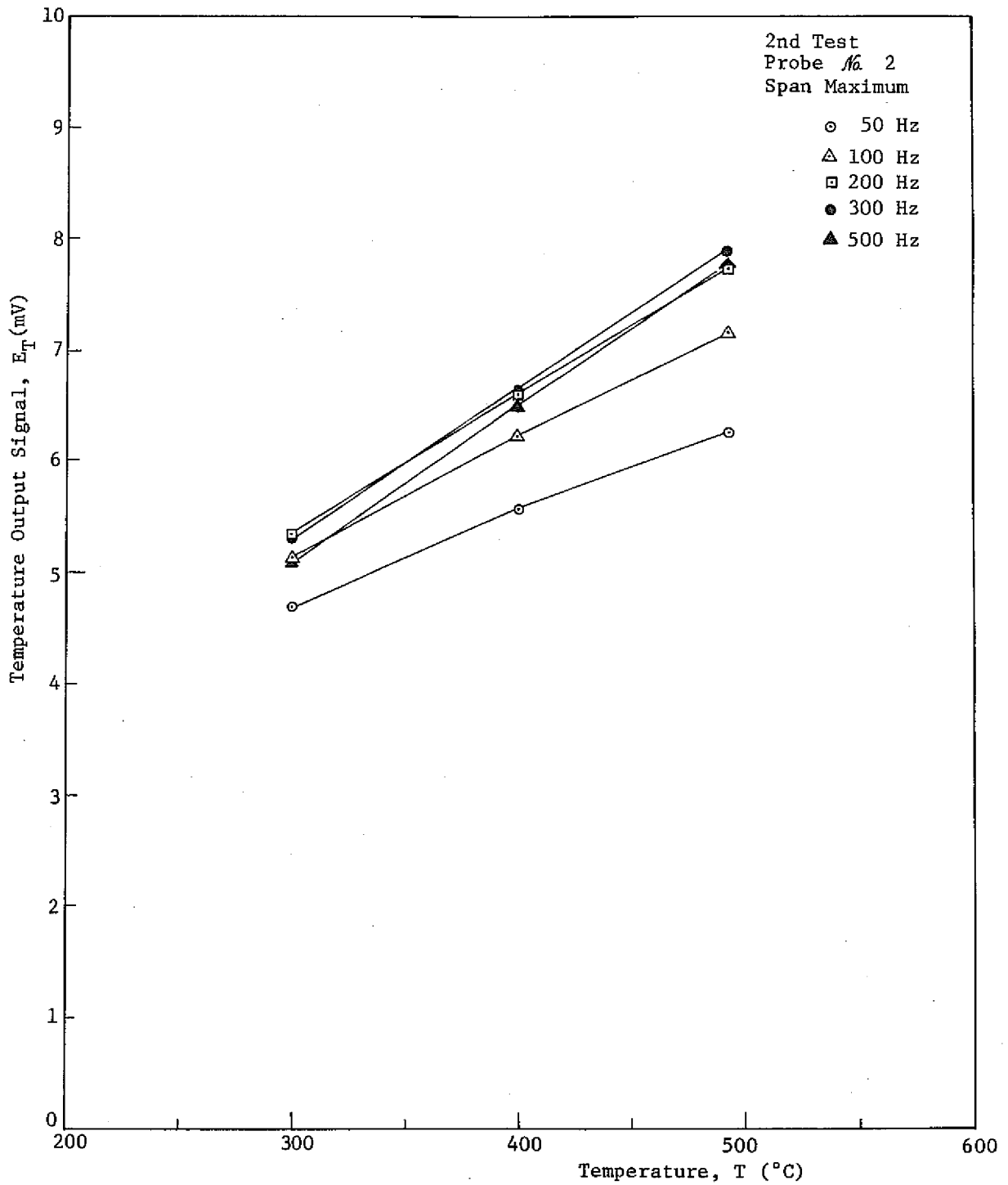
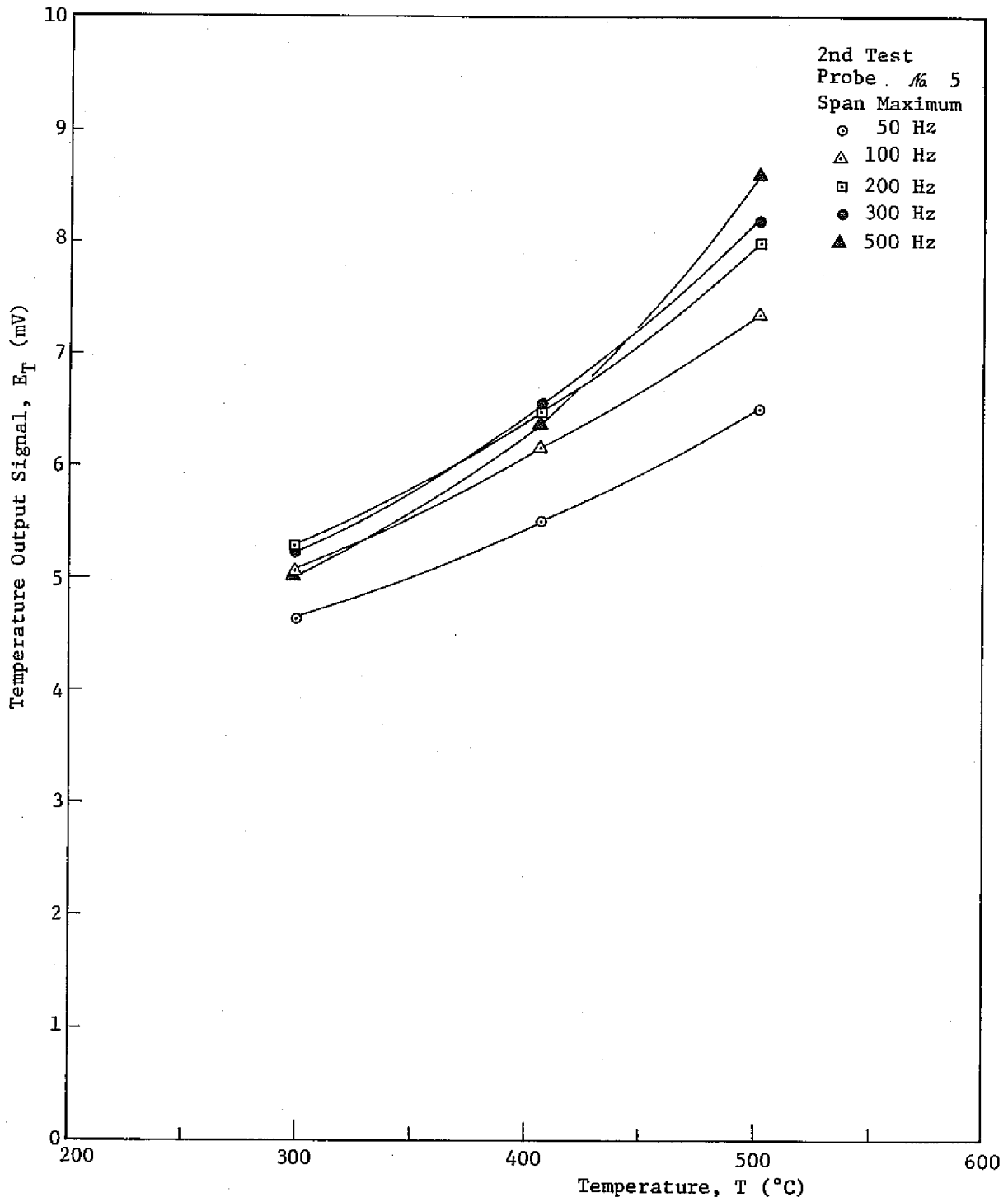
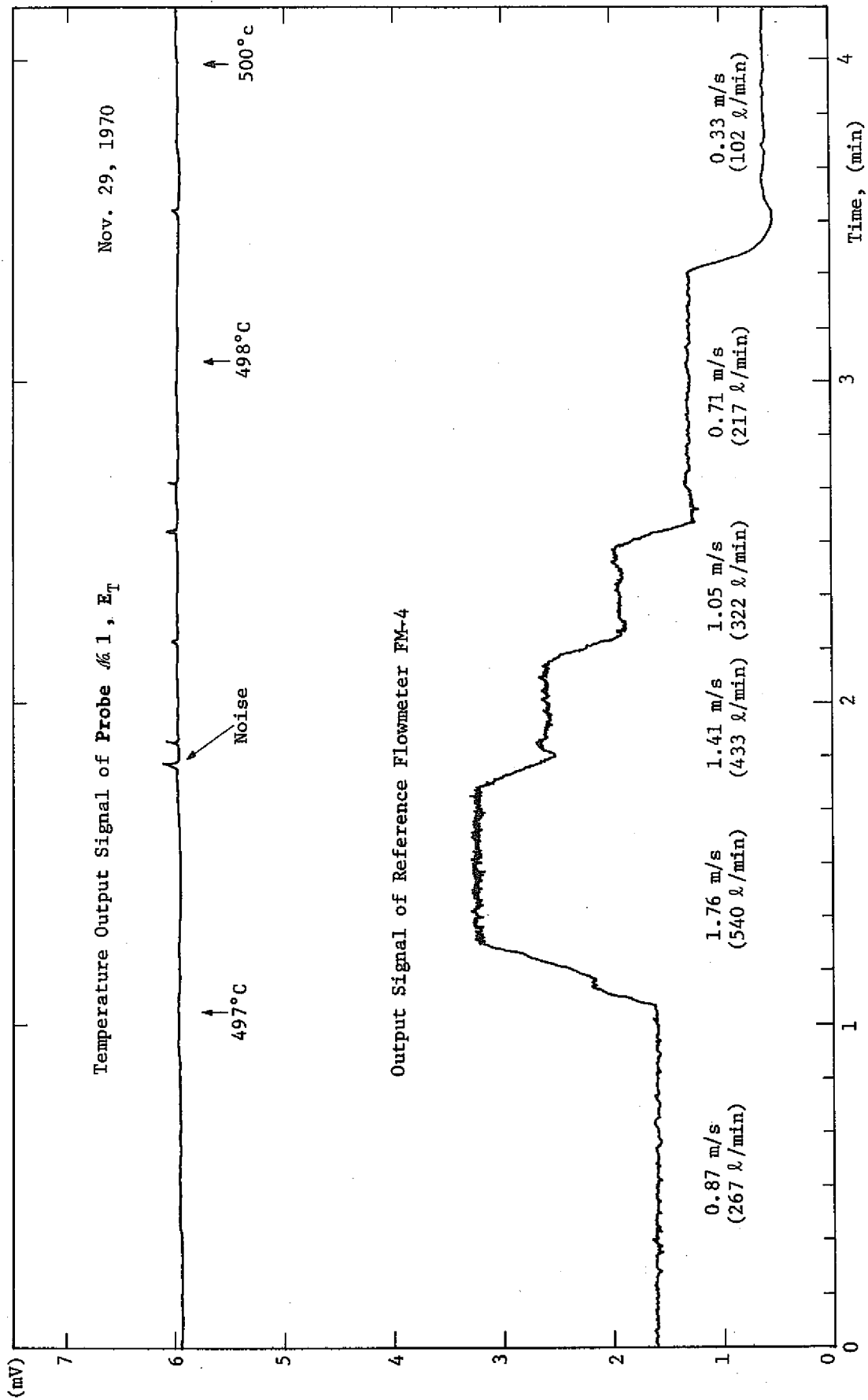


図 B. 18 温度信号の直線性 (プローブ #2)

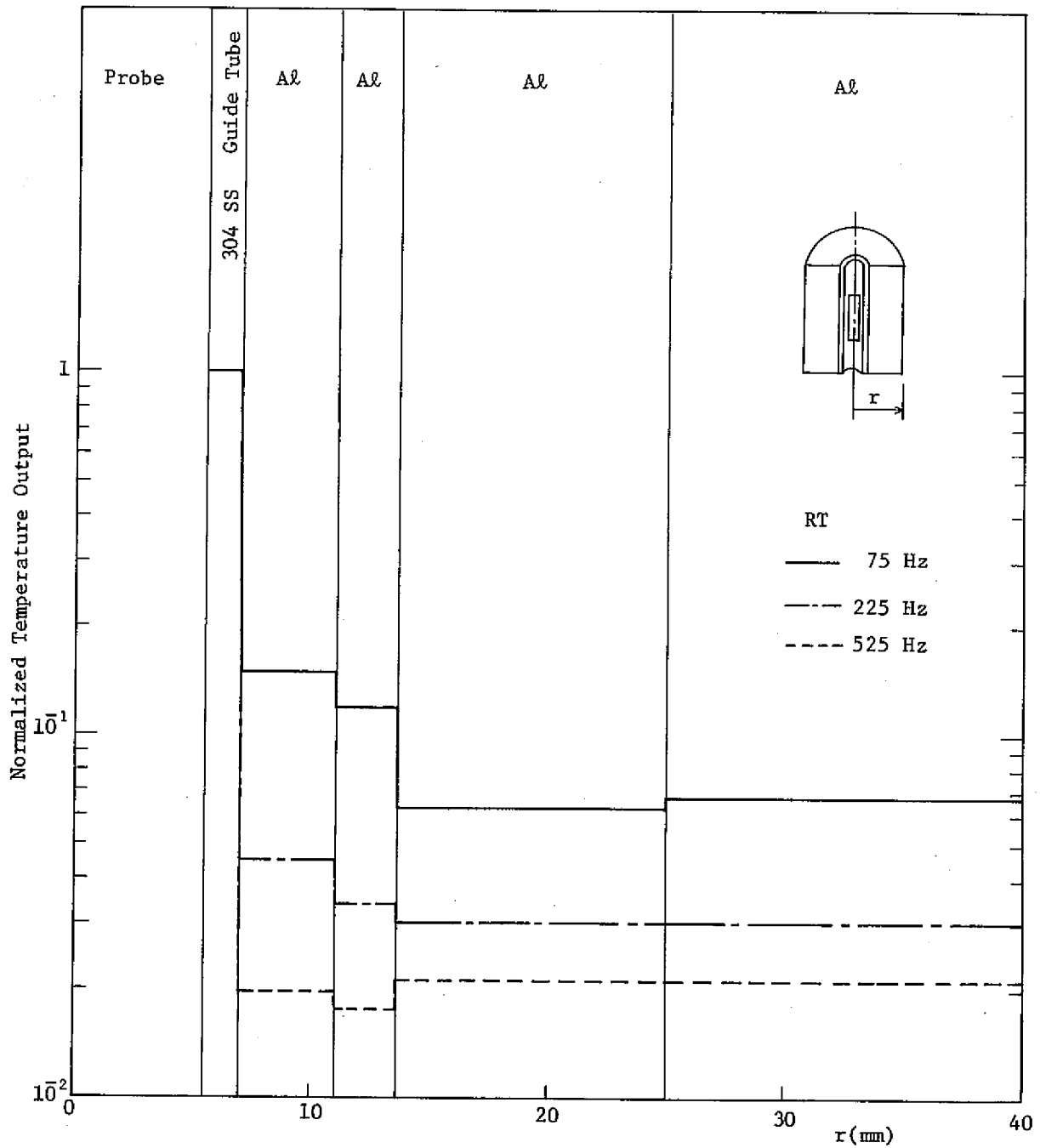


図B.19 温度信号の直線性(プローブ№5)



図B.20 温度信号とナトリウム流速との関係





図B.21 磁場浸透の目安

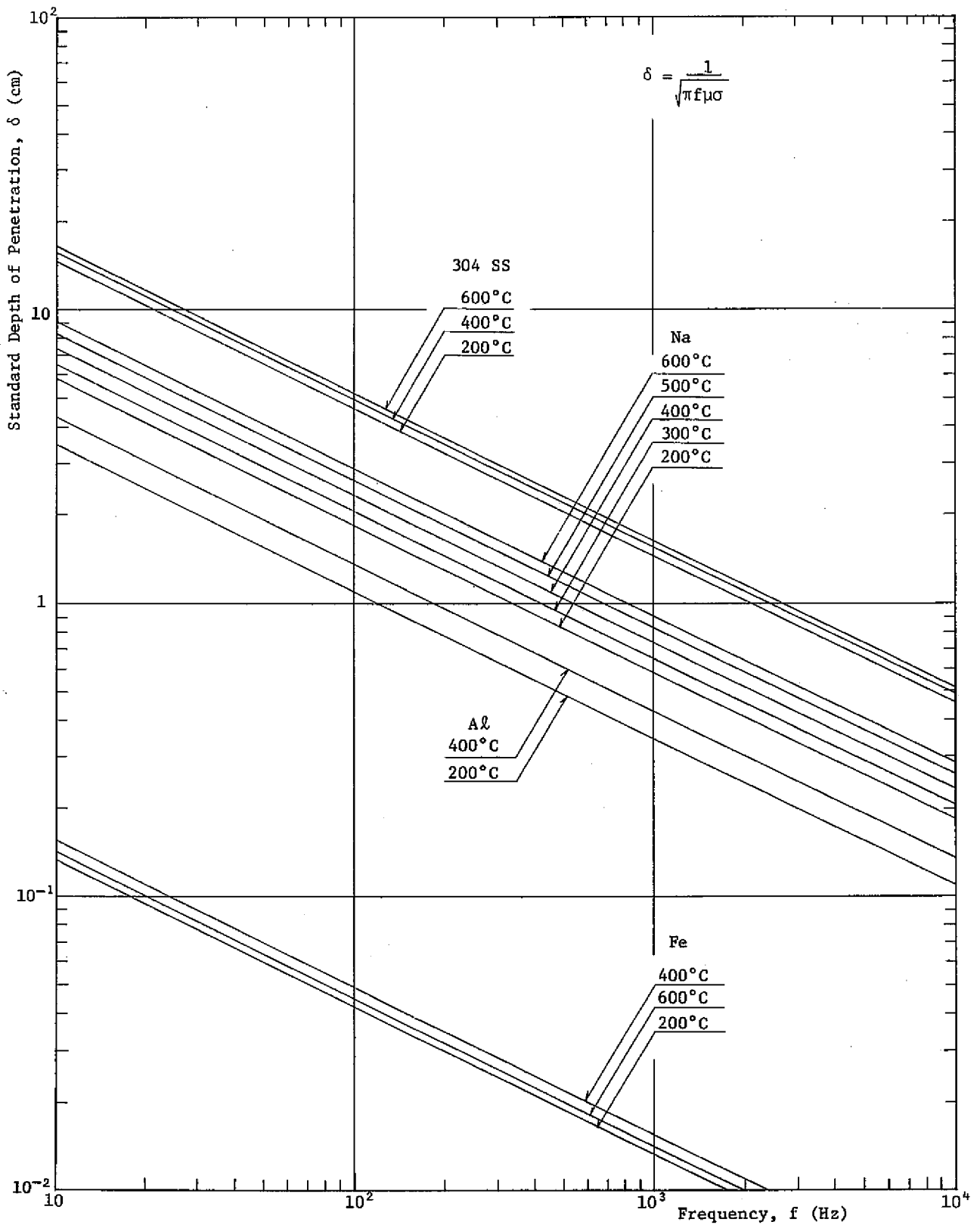
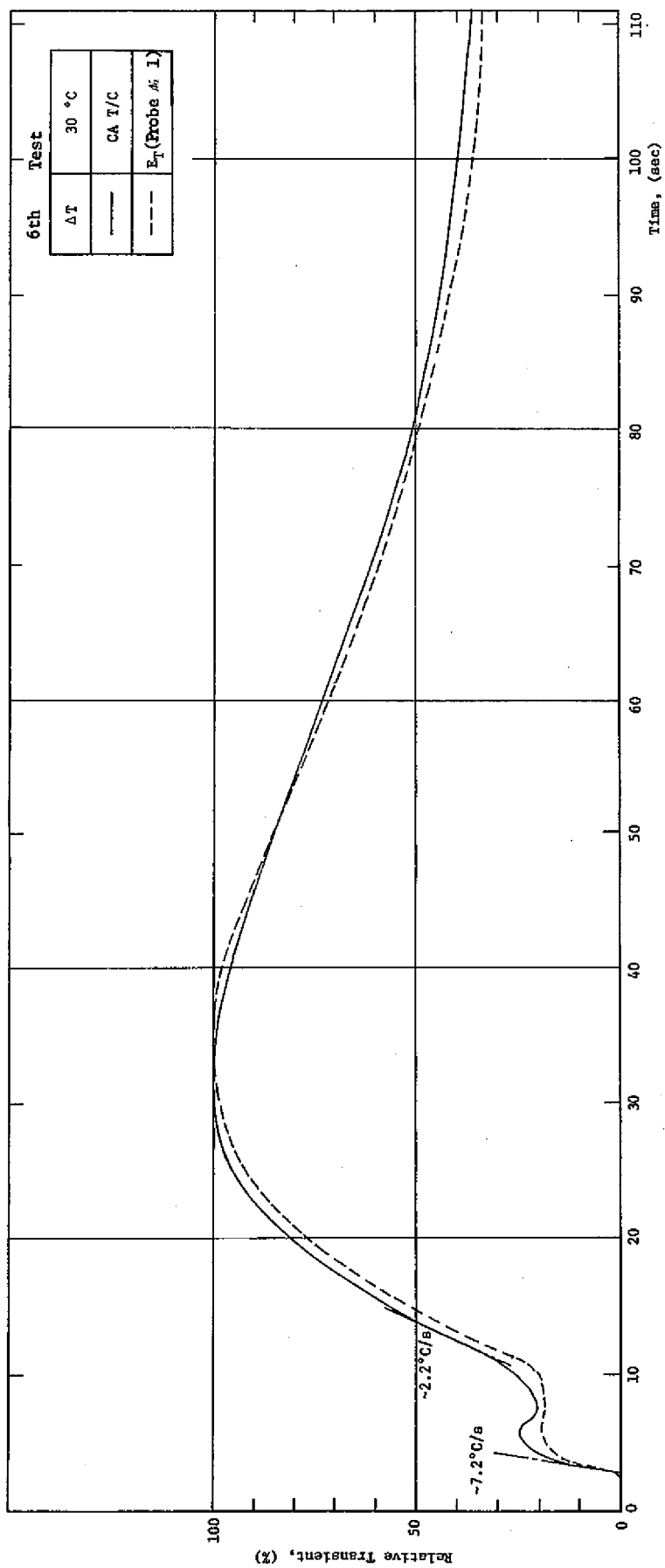


図 B. 22 浸透深さ



図B.2.3 温度信号の時間応答性

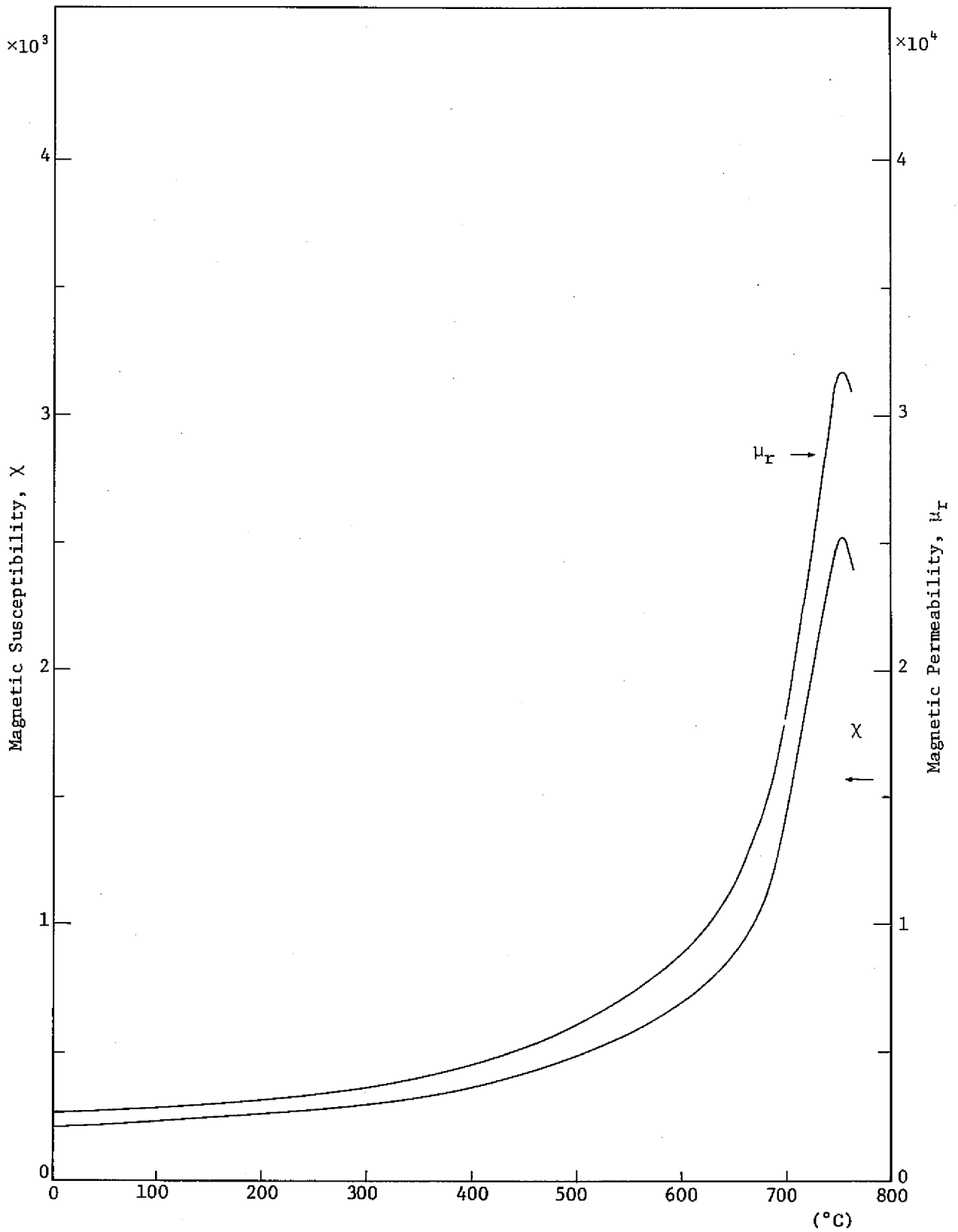


図 B. 24 純鉄の初期透磁率の温度依存性<sup>(45)</sup>  
 (但し,  $\mu_r$ は筆者が記入)

## 付録C 流速検出と温度検出の特性に関する現象論的解釈

## C.1 流速信号の場合

2次コイルに表われる信号をそれぞれ $S_1$ 、 $S_2$ とし、その差をとったいわゆる流速信号を $E_F$ とすると、

$$E_F = S_2 - S_1 \\ = A_2 \sin(\omega t + \phi_2) - A_1 \sin(\omega t + \phi_1) \quad (C.1)$$

但し、

A : 振 幅

$\omega$  : 励磁角周波数 ( $= 2\pi f$ )

t : 時 刻

$\phi$  : 励磁電流に対する位相差

添字1 : 上流側2次コイル

添字2 : 下流側2次コイル

と表わすことができる。(C.1)式を変形して(C.2)式を得る。

$$E_F = \sqrt{(A_2 - A_1)^2 + 2A_1A_2(1 - \cos \Delta\phi)} \sin(\omega t + \theta) \quad (C.2)$$

但し、

$\Delta\phi$  : 2次コイル信号間の位相差 ( $= \phi_1 - \phi_2$ )

$\theta$  : 流速信号の励磁電流に対する位相差

$$\theta = \tan^{-1} \frac{A_2 \sin \phi_2 - A_1 \sin \phi_1}{A_2 \cos \phi_2 - A_1 \cos \phi_1}$$

ところで、図5.14に示したように、流速変化とともに振幅差と位相差も変化するが、その変化量は小さいことを考慮して、

$$E_F \approx A \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + (\Delta\phi)^2} \sin(\omega t + \theta) \quad (C.3) \\ = E \sin(\omega t + \theta)$$

但し、

A : 流速ゼロのときの振巾

$$A_1 = A - \frac{\Delta A}{2}$$

$$A_2 = A + \frac{\Delta A}{2}$$

$$\Delta A = A_2 - A_1$$

E :  $E_F$ の振幅項

実際の測定値は(C.3)式を整流後平滑して使用するので、 $E_F$ の大きさとしては振幅項Eの

み考えれば良い。

位相差  $\Delta\phi$  と振幅差  $\Delta A$  はそれぞれ図 5.1 4, 図 5.1 7 に示すように流速  $v$  に比例するので次式を定義する。

$$\Delta A = \alpha_0 + \alpha v \quad (C. 4)$$

$$\Delta\phi = \beta_0 + \beta v$$

これを (C. 3) 式に代入すれば

$$E = \sqrt{(\alpha_0 + \alpha v)^2 + (\beta_0 + \beta v)^2} A^2 \quad (C. 5)$$

$v$  が十分大きくなると, 2 次コイル信号間の不平衡分  $\alpha_0, \beta_0$  があっても  $E$  は

$$E = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} A^2 \cdot v \quad (C. 6)$$

式に漸近し, (C. 4) 式が保たれる流速範囲では直線性が保証される。しかし低流速では非直線性が生じるので, これを改善するためには, (C. 5) 式において不平衡分  $\alpha_0$  と  $\beta_0$  をゼロにする必要がある。これが 2 次コイル信号間の不平衡補償の意味である。このとき (C. 6) 式はいつも成り立ち直線関係が得られる。

なお, 2 次コイル信号間のベクトル差をとらずスカラー差 (それぞれ直流化したあとで差をとったもの) をとる場合は, (C. 5) 式あるいは (C. 6) 式で位相情報  $\beta_0, \beta$  をゼロにすれば良く,

$$E = \alpha_0 + \alpha v \quad (C. 7)$$

となり, 位相バランスが不要なだけ問題は簡単になる。しかし図 5.1 1 のベクトル図で示したように, 励磁周波数が高くなると 2 次コイル信号の振幅差 ( $\Delta A$ ) は減少し, 相対的に位相の項 ( $\Delta\phi$ ) の寄与が大きくなるので, スカラー差ではベクトル差より信号レベルが小さくなる。

本検出器について, ベクトル差とスカラー差の検出感度の比 (実測値) を図 C. 1 に示す。また, 流速検出感度の温度依存性については,  $f=75$  Hz 近傍では (C. 6) 式の平方根の中の第 2 項は第 1 項に比べ 1 桁近く小さいので, ベクトル差とスカラー差は図 5.9 と図 5.1 8 に示すようにかなり類似する。しかし励磁周波数が高くなってくると, 第 2 項中の  $\beta$  (温度について単調減少関数) と  $A$  (温度について単調増加関数) の積の効果が大きくなりベクトル差とスカラー差では違いが大きくなる。

(C. 6) 式において  $\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} A^2$  は (5.1) 式の流速検出感度  $\epsilon(f, T)$  に相当する。上述したように  $\alpha, \beta, A$  がそれぞれ温度とともに変化するので, 巾広い温度範囲でもって  $\epsilon(f, T)$  をほぼ一定に保つことは困難であることがわかる。

さて, 流速検出信号  $E_F$  の位相は (C. 2) 式で与えられているが,

$$\left. \begin{aligned} \Delta\phi &\ll 1, \\ \alpha_0 = \beta_0 &= 0, \\ \bar{\phi} &= \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (C. 8)$$

を考慮し、(C. 4)式を用いると、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\alpha \tan \bar{\phi} - A \cdot \beta}{\alpha + A \cdot \beta \tan \bar{\phi}} \quad (C. 9)$$

となり、流速信号の位相  $\theta$  は流速  $v$  に依存しない。

位相  $\bar{\phi}$  は後述する温度信号  $E_T$  の位相に相当し、図 5.12 に示すように  $\bar{\phi}$  すなわち TP-3 での位相は  $f \approx 300 \text{ Hz}$  でゼロになるので、(C. 9)式で  $\bar{\phi} = 0$  とおき  $f = 325 \text{ Hz}$  における  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $A$  を求めると、 $\theta \approx -30^\circ$  となり図 5.12 のデータ (TP-3 での位相) に一致する。また  $\theta = 0$  となる周波数は

$$\tan \bar{\phi} = \frac{A \cdot \beta}{\alpha} \quad (C. 10)$$

なる条件から求められ、流速信号位相  $\theta$  がゼロとなる周波数は  $f \approx 75 \sim 125 \text{ Hz}$  となり、温度信号位相がゼロとなる周波数より低い値となり図 5.12 の特性を裏付けている。

### C.2 温度信号の場合

温度信号  $E_T$  の場合も流速信号の場合と同様に

$$\begin{aligned} E_T &= S_2 + S_1 \\ &= A_2 \sin(\omega t + \phi_2) + A_1 \sin(\omega t + \phi_1) \end{aligned} \quad (C. 11)$$

から求められる。

$$E_T = \sqrt{(A_1 + A_2)^2 - 2A_1A_2(1 - \cos 4\phi)} \sin(\omega t + \theta') \quad (C. 12)$$

但し、

$$\theta' = \tan^{-1} \frac{A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2}{A_1 \cos \phi_1 + A_2 \cos \phi_2}$$

ここで、 $\Delta A / A$  と  $\Delta \phi$  が 1 に較べて小さいことを考慮すると、

$$\begin{aligned} E_T &\approx 2A \sin(\omega t + \theta') \\ \theta' &\approx \tan^{-1} \frac{4 \tan \bar{\phi} + \left(\frac{\Delta A}{A}\right) \Delta \phi}{4 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right) \Delta \phi \tan \bar{\phi}} \end{aligned} \quad (C. 13)$$

となり、温度信号出力  $E_T$  は流速  $v$  に依存しない。温度信号の位相  $\theta'$  は  $\tan \bar{\phi}$  が  $\left(\frac{\Delta A}{A}\right) \cdot \Delta \phi$

に較べてかなり大きいときは

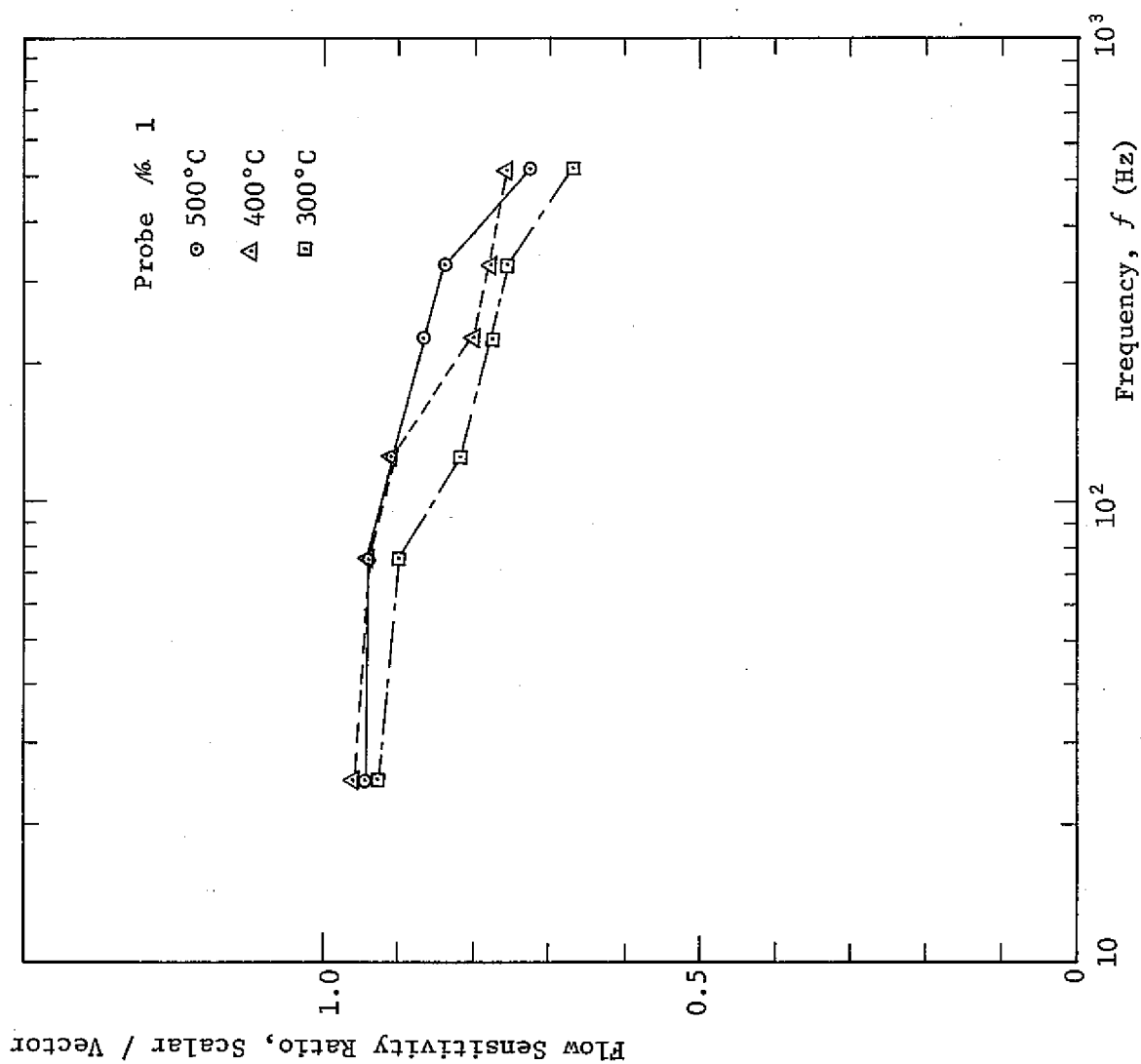
$$\theta \approx \bar{\phi} \quad (\text{C. 14})$$

となる。一方  $\tan \bar{\phi}$  が  $(\frac{\Delta A}{A}) \cdot \Delta \phi$  に較べて無視できるとき ( $f \approx 225 \sim 325 \text{ Hz}$ ) は

$$\theta' \approx \tan \left\{ \frac{\Delta \phi}{4} \left( \frac{\Delta A}{A} \right) \right\} \quad (\text{C. 15})$$

となる。





図C. 1 流速検出感度におけるスカラー差とベクトル差の比較

## 付録D 渦電流式温度流速計試験履歴

試作された渦電流式温度流速計(MK-II)は図D.1に示す経過でナトリウム中試験された。図中の▨は、本報告で記載した試験を表わしており、□は当温度流速計に関する試験ではあるが別途報告される試験を示している。なお温度流速計に直接関係のない試験(たとえば基準流量計の校正試験、熱電対応答性試験、ポンプ試験、ナトリウム圧力計試験、ナトリウム液位計試験、コールドトラップ試験など)は記載を省略してある。

### D.1 第2回試験

(注)  
1975年3月13日に受入れ試験を実施してから最初のナトリウム中単体特性試験が行なわれた。プローブ8本(内1本予備)と電子回路7台について500℃のナトリウム中で校正試験が行なわれた。一部は300℃と400℃でも行なわれた。これらは7集合体試験部を利用したサブアセンブリ出口冷却材流動試験にすべて供される予定であったが、表A.4でも示したように一部に故障が出たため残りのもので対処した。

またポイドに対する応答も試験した。

### D.2 第3回試験

サブアセンブリ出口冷却材流動試験が主目的であったが、第2回試験で生じた故障の修理がなされたので、改めて500℃で校正試験をした。

この他に、試験部による差、温度流速計の個差、安定性、ヒステリシス、ポイド検出、流速信号の温度補償特性が調べられた。本試験から被試験体は熱衝撃特性を改善したプローブ№1を主として使用することにした。

### D.3 第4回試験

温度流速計の案内管先端形状が流速信号に及ぼす効果が調べられた。

### D.4 第5回試験

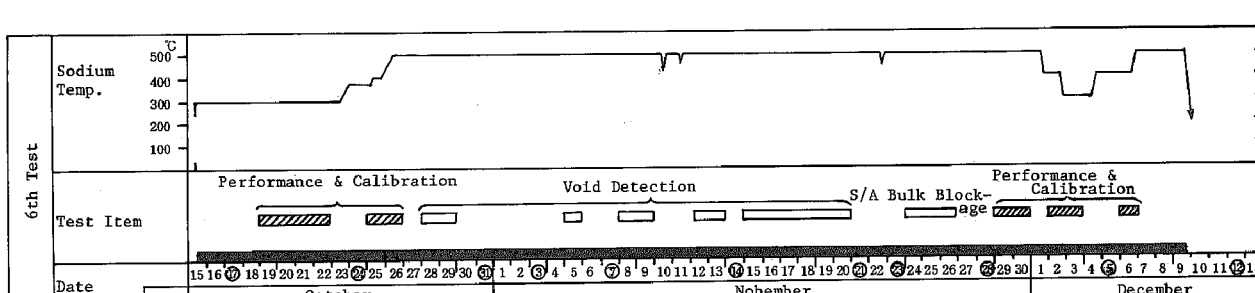
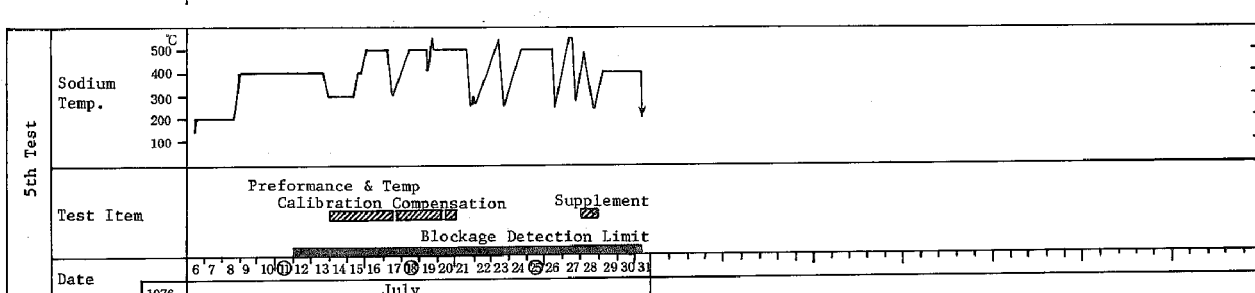
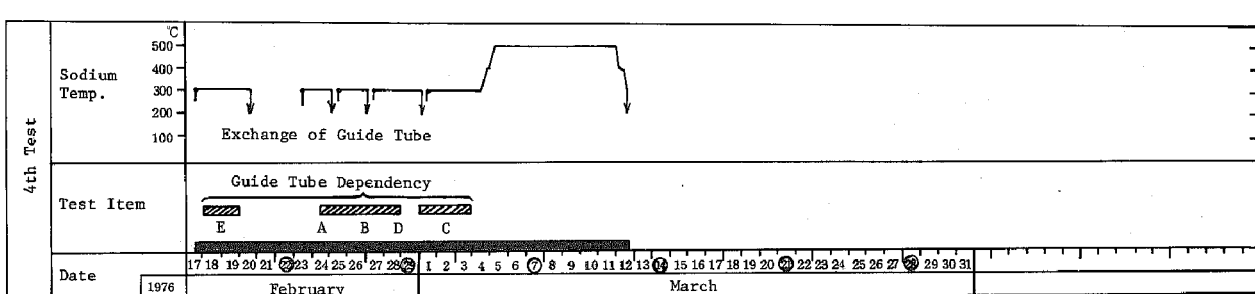
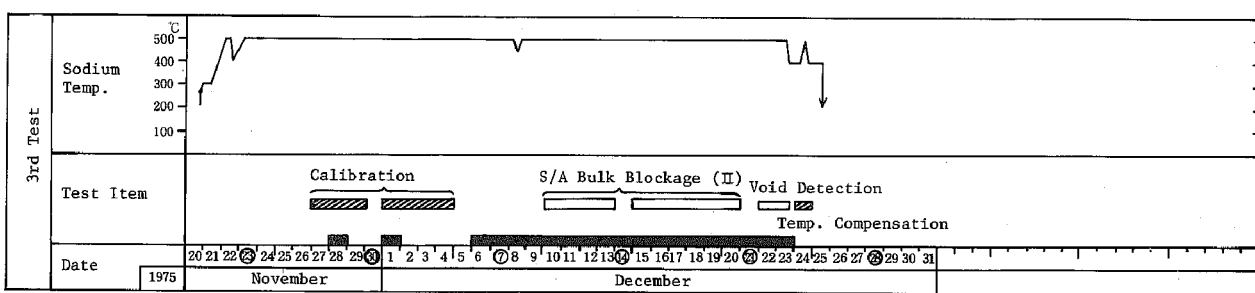
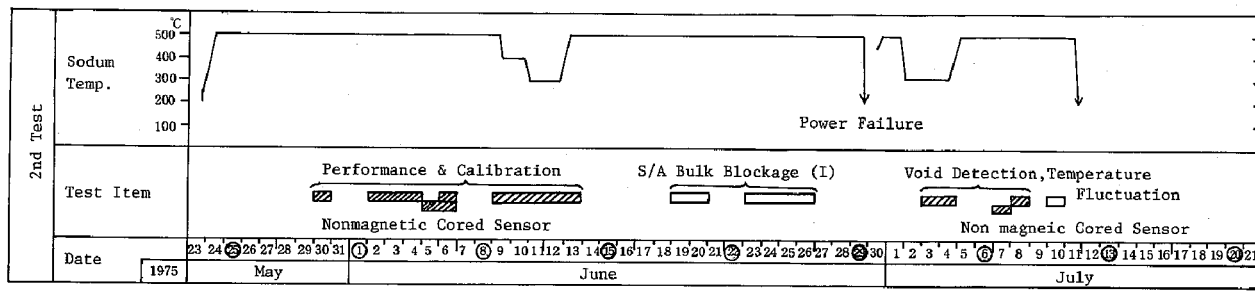
プローブ№1について熱衝撃特性改善後の特性試験が300, 400, 500℃で実施された。また第3回試験で成功しなかった温度補償特性試験を実施した。また2次コイル信号を直接観測し、振幅位相特性予備データを採取した。さらに7集合体試験部を用いて閉塞等にもなるサブアセンブリ冷却材流量減少の検出限界を見通した。

(注) 300, 400, 500℃における直線性、感度を励磁周波数をパラメータとして測定

#### D.5 第6回試験

同じプローブ№1を用いて、第5回試験と同様の特性試験を実施し、励磁周波数依存性、直線性、感度の温度依存性等の再現性を確認した。第6回試験を含めて案内管に取められた改善後のプローブ№1は約1700時間500℃のナトリウム雰囲気におかれたが、正常に動作し現在に致っている。

第6回試験で実施したボイド検出試験の結果は別途報告される。



This Report  
 Next Report  
 Probe No. 1 Use After Repair  
 500°C ~ 1700 hr  
 400°C ~ 240 hr  
 300°C ~ 670 hr

図 D.1 渦電流式温度流速計関係試験経過