

# 電磁流量計オンサイト校正法試験

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N941 84-19

この資料は 図書室保存資料です  
閲覧には技術資料閲覧票が必要です

動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室

1984年2月



動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

## 電磁流量計オンサイト校正法試験

荒木 等\*, 大山信美\*, 荒 邦章\*

中本香一郎\*, 山本 研\*

### 要 旨

電磁流量計のオンサイト校正法としての相互相関法を確立するために、6インチ永久磁石型電磁流量計についてナトリウム実流試験を実施し流速1～5m/sの範囲において、測定精度±4%で校正出来ることを確認した。

なお、このために必要な電極の設置位置や信号処理、流量補正等についての最適な方法を確立した。

更に6インチ以上の大口径配管での本方式の有効性を確認することより、「もんじゅ」実機の主配管流量計のオンサイト校正方法として、本方式は有効な手段となり得ると考えられる。

---

\* 高速炉機器開発部機器開発室

Development of In-Situ Calibration Method  
on Electromagnetic Flowmeter

Hitoshi ARAKI\*, Nobumi OYAMA\*, Kuniaki ARA\*,  
Koichiro NAKAMOTO\* and Ken YAMAMOTO\*

Abstract

In order to establish the cross correlation method as the in-situ calibration of the electromagnetic flowmeter, sodium flow rate measurement using the 6 inches permanent magnet type electromagnetic flowmeter was conducted.

And it was found that the calibration was possible within the accuracy of  $\pm 4\%$ .

And useful method about the electrode positioning, signal processing and flow pattern correction were obtained for this purpose.

This method will be applicable as the in-situ calibration method of "MONJU" main pipe flowmeter by the confirmation of this method on the larger pipe than this 6 inches' pipe.

---

\* Components Development Section, FBR Systems and Components Division, O-arai Engineering Center, PNC.

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 試験装置及び方法 .....	2
2.1 ナトリウム試験ループ .....	2
2.2 流量測定装置 .....	2
2.3 測定方法 .....	3
3. 試験結果及び検討 .....	4
3.1 電極間距離依存性 .....	4
(1) 電極設置位置 ( $0^\circ$ , $180^\circ$ ) の場合 .....	4
(2) 電極設置位置 ( $+45^\circ$ , $+135^\circ$ ) の場合 .....	4
(3) 電極設置位置 ( $-45^\circ$ , $-135^\circ$ ) の場合 .....	6
(4) 電極取付角度の差による起電力の変化 .....	7
(5) 対称位置電極同志の相関 .....	7
(6) 流動ゆらぎ成分の周波数スペクトル解析 .....	7
3.2 上流直管長依存性 .....	8
(1) 起電力の上流直管長依存性 .....	8
(2) 中央位置電極による流速測定の上流直管長依存性 .....	8
(3) 流速測定のナトリウム温度による変化 .....	9
3.3 そ の 他 .....	10
4. 結 論 .....	11
5. 謝 辞 .....	12
6. 参考文献 .....	13

## List of Figures

- Fig. 1 「もんじゅ」フルモックアップポンプ試験ループ  
Flow Diagram of 「MONJU」 Full-mockup Pump Test Loop
- Fig. 2 電磁流量計概略図  
Outline of Permanent Magnet Type EMF
- Fig. 3 永久磁石電磁流量計磁速分布  
Magnetic Flux Distribution of Permanent Magnet Type EMF
- Fig. 4 信号処理系ブロックダイアグラム  
Block Diagram of Signal Processing System
- Fig. 5 フィルター特性(1)  
Band Pass Filter Performance (1)
- Fig. 6 フィルター特性(2)  
Band Pass Filter Performance (2)
- Fig. 7 フィルター特性(3)  
Band Pass Filter Performance (3)
- Fig. 8 フィルター特性(4)  
Band Pass Filter Performance (4)
- Fig. 9 鞍型電磁流量計校正曲線  
Saddle Coil Type EMF Calibration Curve
- Fig. 10 相互相関法による流速測定 (1)  
Flow Measurement by Cross Correlation Method (1)
- Fig. 11 相互相関法による流速測定 (2)  
Flow Measurement by Cross Correlation Method (2)
- Fig. 12 流速計出力の周波数依存性 (1)  
Frequency Dependence of Flowmeter Output (1)
- Fig. 13 相互相関法による流速測定 (3)  
Flow Measurement by Cross Correlation Method (3)
- Fig. 14 相互相関法による流速測定 (4)  
Flow Measurement by Cross Correlation Method (4)

Fig.15 相互相関法による流速測定 (5)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (5)

Fig.16 流速計出力の周波数依存性 (2)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (2)

Fig.17 流速計出力の周波数依存性 (3)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (3)

Fig.18 流速計出力の周波数依存性 (4)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (4)

Fig.19 流速計出力の周波数依存性 (5)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (5)

Fig.20 相互相関法による流速測定 (6)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (6)

Fig.21 相互相関曲線 (1)

Cross Correlation Curve (1)

Fig.22 相互相関曲線 (2)

Cross Correlation Curve (2)

Fig.23 相互相関曲線 (3)

Cross Correlation Curve (3)

Fig.24 相互相関曲線 (4)

Cross Correlation Curve (4)

Fig.25 相互相関曲線 (5)

Cross Correlation Curve (5)

Fig.26 相互相関曲線 (6)

Cross Correlation Curve (6)

Fig.27 相互相関法による流速測定 (7)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (7)

Fig.28 流速計出力電極間距離依存性

Dependence of Flowmeter Output on Electrode Distance

Fig.29 相互相関法による流速測定 (8)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (8)

Fig.30 流速計出力の周波数依存性 (6)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (6)

Fig.31 相互相関法による流速測定 (9)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (9)

Fig.32 電磁流量計起電力直流成分左右対称性 (1)

Symmetry of EMF DC Output (1)

Fig.33 電磁流量計起電力直流成分左右対称性 (2)

Symmetry of EMF DC Output (2)

Fig.34 電磁流量計起電力交流成分左右対称性 (1)

Symmetry of EMF AC Output (1)

Fig.35 電磁流量計起電力交流成分左右対称性 (2)

Symmetry of EMF AC Output (2)

Fig.36 相互相関曲線 (7)

Cross Correlation Curve (7)

Fig.37 電磁流量計起電力交流成分周波数スペクトル

Frequency Spectrum of EMF AC Output

Fig.38 電磁流量計起電力直流成分の上流直管長依存性 (1)

Dependence of EMF DC Output on Upper Straight Pipe (1)

Fig.39 電磁流量計起電力交流成分の上流直管長依存性 (1)

Dependence of EMF AC Output on Upper Straight Pipe (1)

Fig.40 相互相関法による流速測定 (10)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (10)

Fig.41 相互相関法による流速測定 (11)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (11)

Fig.42 流速計出力の周波数依存性 (7)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (7)

Fig.43 流速計出力の周波数依存性 (8)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (8)

Fig.44 流速計出力の周波数依存性 (9)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (9)

Fig.45 相互相関法による流速測定 (1)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (1)

Fig.46 流速計出力の上流長管長依存性

Dependence of Flowmeter Output on Upper Straight Pipe

Fig.47 相互相関法による流速測定 (2)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (2)

Fig.48 電磁流量計起電力直流成分の上流直管長依存性 (2)

Dependence of EMF DC Output on Upper Straight Pipe (2)

Fig.49 電磁流量計起電力交流成分の上流直管長依存性 (2)

Dependence of EMF AC Output on Upper Straight Pipe (2)

Fig.50 12B超音波流量計出力

12B Ultrasonic Flowmeter Output

Fig.51 超音波流量計受信波高のポンプ回転数・時間経過依存性

Pump Speed and Time Dependence of Ultrasonic Flowmeter

Pulse Height

**List of Photo**

Photo. 1 電磁流量計外観写真

Outer View of Permanent Magnet Type EMF

List of Table

Table. 1 測定計器一覧表

List of Measurement Instruments

## 1. 序 論

電磁流量計はナトリウム配管用流量計として一般の試験ループや高速炉プラントにおいてこれまで広く用いられており、他の流量計にくらべて信頼性が最も認められているものである。

これは構造が配管外壁に永久磁石または電磁石をだかせ、配管に電極を溶接設置しただけの単純な構成によるため故障が少く、また密封構造であるため安全性にも優れていることなどによるものと思われる。

しかし、この電磁流量計にも幾つかの欠点がある。まず電磁流量計の出力である起電力は配管をよぎる磁束密度に比例するため、この磁束密度の変化すなわち磁石の劣化に影響される。

またナトリウムの汚れによる配管内壁への異物の付着によっても起電力が減少する。

これらの現象はこれまでいくつかのナトリウムループにおいて観測されており、定期的に校正することが望ましい。しかし、ナトリウムループの場合流量計はすべて溶接構造となっており、また高速炉プラントの場合配管を切断して取り出し炉外校正することは不可能に近い。そこでループに設置したままでオンサイト校正する方法を開発するための試験がこれまでいくつか実施されてきている。

これは電磁流量計に更にもう1対の電極を設置し、2対間の信号のゆらぎの伝播時間から流速を求めるといふいわゆるゆらぎ信号相関法とよばれるものである。  
(1~5)

この方法では起電力の大きさを求めるものではないため磁石の強さや配管内面の汚れによる起電力の変化には影響されず、従って経時変化を受けないことになる。

しかし、このゆらぎ信号相関法に関するこれまでの試験では、高流速域において直線性が非常に悪くなることが観測されている。

従って本報告書においてはこれらの疑問点を解決して、ゆらぎ信号相関法によるオンサイト校正法を実用化すべく、いくつかの試験を行ったのでその結果を報告するものである。

## 2. 試験装置及び方法

### 2.1 ナトリウム試験ループ

試験に用いたナトリウム試験ループは「もんじゅ」フルモックアップポンプ試験ループとよばれるものでありフローシートをFig.1に示す。試験された電磁流量計はこのうちバイパスループとよばれる6B配管に設置されている。

本試験ループにはナトリウム最大流量 $20\text{ m}^3/\text{min}$ を流せる「もんじゅ」1次系機械フルモックアップポンプがあり、ナトリウムの温度を $200\sim400^\circ\text{C}$ にわたって調整する加熱器及び冷却器がある。その他計測器として基準流量をモニターする12インチ鞍型電磁流量計、ナトリウム純度をモニターするプラギング計、またバイパスループには試験された電磁流量計の他に耐久性を調べるために用いられた12インチ超音波流量計などが設置されている。

### 2.2 流量測定装置

オンサイト校正試験はPhoto. 1に示す永久磁石式電磁流量計を用いて行われた。本電磁流量計は6B配管上を別々に移動出来る2台の磁石部と配管外壁面に $100\text{ mm}$ 及び $50\text{ mm}$ の間隔で溶接設置された23対の電極から構成されている。Fig. 2に磁石部及び電極の設置位置を示す。各磁石部では2個の永久磁石がヨーク材を介してボルト締めされており、材料は永久磁石がYCM-8B(日立金属製、JIS MO B500H相当、アルニコ系)、ボールピース及びヨーク材がSS-41である。磁石の中心における磁束密度は約 $160\text{ Gau}\cdot\text{s}$ である。Fig. 3は磁束分布の測定結果を示す。これは2台の磁石を $550\text{ mm}$ 離して設置した場合であり両方の磁界が影響しあって中間部でやや高くなっている。

6B配管(外径 $\phi 165.2\text{ mm}$ 、内径 $\phi 155.2\text{ mm}$ )の材料はSUS304であり、外径 $\phi 3.2\text{ mm}$ の電極には熱起電力による誤差を少くするため材料が似かよったSUS308L(溶接棒)が用いられている。

2台の磁石部の移動可能範囲は配管曲り部を起点として下流側 $550\text{ mm}$ の位置から $1550\text{ mm}$ の位置まで $1000\text{ mm}$ あり、ナトリウム流量ゆらぎ信号に与える配管曲り部の効果や電極間距離の影響を調べる事が出来るようになっている。電極の取付位置は配管外壁面上下対称( $0^\circ, 180^\circ$ )の位置(中央位置電極とよぶ)だけでなく磁石側へ寄った $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 135^\circ$ の位置にも設置されている。これは配管内部における

るナトリウム流れのゆらぎをより細かく調べるためにある。

Fig. 4 に信号処理のための測定系のプロックダイアグラムを示す。これらの測定系は現場から約 50 m 離れた中央制御室に設置されており、直流成分及び高周波ノイズを除去するためのバンドパスフィルター、ゆらぎ成分のみを増幅する差動増幅器、一旦データを記録するデータレコーダ、データレコーダの再生信号の相関をとる信号処理器などから構成されている。フィルター特性を Fig. 5~8 に示す。

基準流量計は 12 インチ鞍型電磁流量計であり、中心磁束は 19.2 ガウス、アスペクト比は 0.79 である。これに対する測定系は直流増幅器及びデジタル電圧計からなっている。基準流量計の校正曲線を Fig. 9 に示す。これらの測定計器を Table 1 に一覧表としてまとめた。

### 2.3 測定方法

試験はフルモックアップポンプの回転数を 10 % ~ 50 % (85~425 rpm) の間で段階的に変化させることによりナトリウム流量を約 0.9 ~ 4.8 m<sup>3</sup>/min に変化させ各ステップにおける一定流量下で永久磁石式電磁流量計における 2 対の電極からの流動ゆらぎの信号をデータレコーダに記録した。なお基準流量の測定には 12 B クラ型電磁流量計を用いた。データレコーダの記録スピードは 1 7/8 ips (FM 記録、周波数帯域 DC~625 Hz) で、各回の記録時間は約 8 分である。

信号を取出す 2 対の電極の組合せは、電極間隔を一定にしたままで Fig. 2 に示す電極への信号線の接続位置を配管曲り部から下流方向にずらさせていった場合、電極間隔を変化させた場合、電極の取付角度を変化させた場合などである。具体的には電極間隔一定の場合は電極間隔 100 mm, 移動範囲 900 mm, 電極間隔変化の場合には変化範囲 50 ~ 1000 mm である。その他に電極取付方向 45° については電極間隔を 50 ~ 200 mm に変化させた。一方磁石は電極間隔が 200 mm 以下の場合は 1 台の磁石を取り出す 2 つの電極の中間点に設置し（他の 1 台の磁石は影響がないよう他端によせておく）、400 mm 以上では 2 台の磁石を各々の電極の中心に設置した。

これらの試験は電極間隔や配管曲り部からの距離が相互相関法による測定結果にどのような影響を及ぼすかを調べるために行ったものである。

なお流速のゆらぎ成分の他に、直流成分についてもデジタルボルトメータで同時に測定し、直流成分の大きさの配管曲り部からの距離の依存性等について評価した。

### 3. 試験結果及び検討

#### 3.1 電極間距離依存性

##### (1) 電極設置位置 ( $0^\circ$ , $180^\circ$ ) の場合

電極番号  $9\pm-13\pm$ ,  $10\pm-13\pm$ ,  $11\pm-13\pm$ ,  $12\pm-13\pm$ についての相関法による流速測定結果を Fig. 10, 11 に示す。なお Fig. 10 は商用周波数の高周波をカットした Fig. 6 のフィルターを, Fig. 11 は配管振動など低周波側をカットした Fig. 7 のフィルターをも通して信号処理器に入れ, 相互相関をとったものである。

フィルター周波数が  $0.1\sim30\text{Hz}$  のときよりも,  $20\sim30\text{Hz}$  の方がより鞍型電磁流量計による基準流速値に近づいてはいるがまだ大幅にくいちがっている。なお, 電極間距離についていえばより短い方が基準値に近いことがわかる。

次にこの基準値からのずれの原因を調べるために, 電極番号  $11\pm-13\pm$  についてより細かく相関時間の周波数依存性を調べてみた。その結果 Fig. 12 に示す。横軸の中心周波数とはバンドバスフィルターの下限と上限の中心点を示す。なおフィルターは Fig. 8 に示すものと同じものを用いた。

これにより高流速域(ポンプ回転数 50%)においては, フィルター周波数を上げる程基準値に接近することがわかる。しかし, 低流速域(ポンプ回転数 20%)においては, 周波数を上げると相関が消滅してしまうため, 全流速範囲にわたって同一周波数のフィルターを用いることが出来ないことがわかる。

フィルター周波数  $25\sim30\text{Hz}$  について, 再度電極番号  $10\pm-13\pm$ ,  $11\pm-13\pm$ ,  $12\pm-13\pm$  に対する校正曲線を求めた結果を Fig. 13 に示す。いずれも基準流速値に非常に近づいてはいるが, 低流速域での測定が不可能なこと, 基準流速よりまだ 20% 程度高めであること, ばらつきが大きいことなどが問題点として残る。

##### (2) 電極設置位置 ( $+45^\circ$ , $+135^\circ$ ) の場合

この場合の角度は Fig. 2 において配管上面より S 極側を + にとっている。

電極番号  $9\frac{1}{2}\pm-13\frac{1}{2}\pm$ ,  $10\frac{1}{2}\pm-13\frac{1}{2}\pm$ ,  $11\frac{1}{2}\pm-13\frac{1}{2}\pm$ ,  $12\frac{1}{2}\pm-13\frac{1}{2}\pm$  についての相関法による流速測定結果を Fig. 14, 15 に示す。

フィルター周波数  $0.1\sim30\text{Hz}$ ,  $20\sim30\text{Hz}$  ともに前節の電極位置 ( $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ) の場合にくらべて大幅に基準流速に近づいており, 特にフィルター周波数  $20\sim30\text{Hz}$  の場合(NF Passive フィルター)には, ポンプ回転数 40% (流速約  $4\text{m}/\text{s}$ ) まではほど基準値と一致している。

ただポンプ回転数50%（流速約5m/S）の場合には電極番号 $9\frac{1}{2}\pm -13\frac{1}{2}\pm$ を除いてまだ8~15%高めになっている。これらの状況を更に詳わしく調べるために前節同様フィルター周波数を細かく分けて周波数依存性をプロットした。これらの結果をFig.16~19に示す。

ポンプ回転数50%において電極番号 $9\frac{1}{2}\pm -13\frac{1}{2}\pm$ ,  $10\frac{1}{2}\pm -13\frac{1}{2}\pm$ ,  $11\frac{1}{2}\pm -13\frac{1}{2}\pm$ ,  $12\frac{1}{2}\pm -13\frac{1}{2}\pm$ , の場合 20Hz以上において周波数に依存しない一定な部分がある。しかし、電極番号 $12\frac{1}{2}\pm -13\frac{1}{2}\pm$ の場合には一定の部分がなく周波数の増大と共に流速は減少している。最も周波数に依存しない一定部分が広い電極は $10\frac{1}{2}\pm -13\frac{1}{2}\pm$ である。一方ポンプ回転数20%（流速約2m/S）の低流速になるとすべての電極において周波数には依存せずほど一定となっている。

電極位置(0°, 180°)と(45°, 135°)の差をFig.12とFig.18を用いて比較すると、電極位置(0°, 180°), 電極番号11±-13±の場合、回転数50%においては周波数40Hz以上になると基準流速にならないのにくらべて電極位置(45°, 135°), 電極番号 $11\frac{1}{2}\pm -13\frac{1}{2}\pm$ の場合20Hzから基準流速に近づいている。

また低流速においても電極11±-13±の場合25Hz以上では相関がとれないにくらべて電極 $11\frac{1}{2}\pm -13\frac{1}{2}\pm$ では35Hz付近まで一定となっている。

Fig.20にこれらの斜め位置設置電極の場合のフィルター周波数25~30Hzについての相互相関法による流速測定結果を示す。同図からわかるように電極 $12\frac{1}{2}\pm -13\frac{1}{2}\pm$ を除いてほど直線上にのっており、その傾きは基準流速より2%低めである。これは配管の周辺部分の低流速域をより重きをおいて測定しているためと、かつ配管周辺部からのゆらぎの大きさが中心付近より大きいためと考えられる。また直線からのはらつきも±2%以内である。

次に電極番号 $10\frac{1}{2}\pm -13\frac{1}{2}\pm$ , フィルター周波数25~30Hzの場合の相関曲線をFig.21~25に示す。ポンプ回転数は50%~10%である。横軸は相関時間を示す時間軸で単位目盛は20 msec (サンプリング間隔2msec)である。

ポンプ回転数50% (Fig.21)~20% (Fig.24)においては2つの電極の信号間の遅れ時間を明確に示すきれいなピークが得られているが、10% (Fig.25)においては明確なピークが得られていない。これはフィルター周波数が25~30Hzと高いために低流速での流動ゆらぎが充分に得られていないためと考えられる。

そこでフィルター周波数を15~20Hzにおいて回転数10%の場合の相関曲線を求めたものがFig.26である。この場合相関ピークが160msecのところにあることがわかる。従ってフィルター周波数を一定に保ったままでポンプ回転数10%（流速約1m/S）から50%（流速約5m/S）までをカバーして流速を測定するためにはフィルター周波数を15~20Hz程度におとす必要がある。Fig.27は電極番号 $10\frac{1}{2}^{\pm}-13\frac{1}{2}^{\pm}$ についてフィルター周波数15~20Hzに固定した場合の測定結果を示す。流速約1~5m/Sにわたってばらつき士2%以内においてほぼ直線になっていることがわかる。

Fig.28は横軸に電極間隔をとり、縦軸に流速計出力をとて相関法による流速出力の電極間距離依存性をプロットしたものである。電極位置（0°, 180°）の場合はばらつきが大きく傾向は不明であるが電極位置（+45°, +135°）の場合はこの図からみるかぎりあまり大きな差はみられない。ただ電極間距離50mmの場合は100~200mmにくらべてやゝ高流速域で大きめに出る傾向がみられる。最適電極間距離は流動渦の大きさ、減衰などが影響してくるため本試験における6B配管では150mm程度が最適であるが、もっと大きい24B配管ではそれに従って更に大きくなることも予想される。なお本方式による総合精度としては基準流速計の誤差士2%，相関法の再現性士2%，その他の誤差士2%を考慮すると士4%程度になるものと思われる。

### (3) 電極設置位置（-45°, -135°）の場合

電極番号 $11\frac{1}{2}^{\pm}-13\frac{1}{2}^{\pm}$ と対称の位置にある $11\frac{3}{4}^{\pm}-13\frac{3}{4}^{\pm}$ についてその対称性を確認するために同様に相関法による流速出力を求めた。その結果をFig.29に示すが、Fig.14, 15における $11\frac{1}{2}^{\pm}-13\frac{1}{2}^{\pm}$ にくらべて非常に基準流速に近く直線性もよい。そこでこのちがいを見るために同様に流速計出力の周波数依存性を調べた。結果をFig.30に示す。これによるとFig.18にくらべて全く逆の傾向を示していることがわかる。すなわちポンプ回転数50%においては $11\frac{1}{2}^{\pm}-13\frac{1}{2}^{\pm}$ の場合低流速側で流速計出力が高めにでているのに対して $11\frac{3}{4}^{\pm}-13\frac{3}{4}^{\pm}$ では逆に低めにでている。このためにフィルター周波数が0.1~30Hzの場合にもあまり基準値からはずれていなくなる。Fig.31はフィルター周波数25~30Hzについての流速測定結果である。電極番号 $11\frac{1}{2}^{\pm}-13\frac{1}{2}^{\pm}$ と同じ結果になっている。

## (4) 電極取付角度の差による起電力の変化

電極番号  $11\frac{1}{2}\pm - 13\frac{1}{2}\pm$  (取付角度  $+45^\circ, +135^\circ$ ) と  $11\frac{1}{2}\pm - 13\frac{1}{2}\pm (-45^\circ, -135^\circ)$  とはその相関時間の周波数依存性に差があった。このため流速分布の非軸対称性が考えられるためその確認をする目的で起電力の直流成分と交流成分の大きさを測定した。

直流成分についての結果を Fig. 32, 33 に示す。Fig. 32 は電極番号  $11\frac{1}{2}\pm, 11\frac{1}{2}\pm$  についてであり、Fig. 33 は電極番号  $13\frac{1}{2}\pm, 13\frac{1}{2}\pm$  についてである。斜めに設置した電極は中央位置より約 40 % 程小さめになるが左右対称性は全く差がみられない。たゞ電極番号 11 士は電極 13 士にくらべて約 10 % 低く、かつ零失がずれている。

次に Fig. 34, 35 に交流成分についての測定結果を示す。交流成分の場合も直流成分の場合とちがって斜め設置の電極の場合が中央位置より逆に約 30 % 程高めに出ている。ゆらぎを用いた相関法にとって斜め設置の電極の方がこの点でもより適しているといえる。なお左右対称性については交流成分の場合、低周波領域においてやや差がみられる。

## (5) 対称位置電極同志の相関

Fig. 36 は斜め位置電極番号  $11\frac{1}{2}\pm - 11\frac{1}{2}\pm, 13\frac{1}{2}\pm - 13\frac{1}{2}\pm$  同志についての相互相関曲線である。いずれも相時間 0 の付近においてマイナスの相関関係があり、これは流動ゆらぎが時間的に電極位置  $+45^\circ$  と  $-45^\circ$  及び  $+135^\circ$  と  $-135^\circ$  に対して各々の逆の影響を及ぼしていることがわかる。

このことから中心電極である 11 士や 13 士でとらえたゆらぎ成分の大きさは互いに打消されて斜め位置電極より小さめになることが推測される。また相関関係もその分だけ悪くなり前節までの斜め位置電極による流速測定が中心位置電極よりも優れていることの 1 つの理由と考えられる。

## (6) 流動ゆらぎ成分の周波数スペクトル解析

電極番号 11 士と  $11\frac{1}{2}\pm$  における起動力交流成分の周波数スペクトルを Fig. 37 に示す。これによると大部分の周波数成分は 10 Hz 以下であり、それ以上は非常に小さい。これはバンドパスフィルターによる減衰以上である。従って 15 Hz 以上を用いる相互相関法による流速測定はこの非常にわずかなゆらぎ成分を用いていくことになる。

また電極番号 11 ± のゆらぎ周波数成分は電極 11 ± のそれにくらべてポンプ回転数 50 %, 20 % 共に低周波側で高く、高周波で低くなっている。これは配管の中心ではゆらぎ周波数が低く、配管壁に近い程周波数が高くなつてゆく傾向を示しているものと考えられる。

### 3.2 上流直管長依存性

#### (1) 起電力の上流直管長依存性

Fig. 38 は中央位置電極(0°, 180°) 1± - 2±, ~11± - 13± によって測定された起電力の直流成分の大きさをプロットしたものである。これによると配管曲り部から約 700mm ( $L/D = 4.5$ ) 以後においてほど一定値に近づいているように見える。なお、2台の磁石の距離が 750mm 以下になると互いに磁界が影響し合って磁束密度が変化するためその分補正をしてある。また両磁石の磁束密度の差による効果も補正した。

Fig. 39 は同様に交流成分についてプロットしたものであり、2つの電極による信号の平均値をとっている。交流成分については更に配管曲り部の影響が長く残り約 1300mm ( $L/D = 8.3$ ) 以後でも減少がみられる。

#### (2) 中央位置電極による流速測定の上流直管長依存性

配管曲り部から下流 470mm から 1170mm までは 100mm 間隔で配管中央(0°, 180°)の位置にしか電極は設置されていない。従って斜め設置電極のような精度よい測定が出来なかつた。

Fig. 40 はフィルター周波数 0.1~30Hz の場合の電極番号 1± - 2± (配管曲り部から 520mm,  $L/D = 3.3$ ) ~ 9± - 11± (1320mm,  $L/D = 8.5$ ) における流速測定結果をプロットしたものである。電極 5± - 6± の場合が最も基準流速に近く、その上流、下流いずれが大きくなっている。Fig. 41 はバンドバスフィルタ - 20~30Hz の場合であるが、全体的に基準値に近づいてはいるが、傾向としては Fig. 40 の場合と同じである。

そこで同様に流速計出力の周波数依存性を更にくわしく調べたのが Fig. 42 ~ 44 である。ポンプ回転数 50 % の場合には電極番号 5± - 6± (Fig. 43) がやはり最も周波数に依存しない平坦な部分が長く、その前後 (Fig. 42, 44) では低周波領域の所で変化が大きい。逆にポンプ回転数 20 % の場合には下流にゆくに従

って高周波領域での精度が悪くなっている。

高流速域から低流速域まで一定フィルター周波数を用いる場合に最も適した周波数領域である 25~30 Hz についてプロットしたものが Fig. 45 である。また横軸に配管曲り部からの距離を取り整理しなおしたもののが Fig. 46 である。フィルター周波数をこの領域にかけると配管曲り部からの距離にはあまり大きくは依存せず中央位置電極でも約 3~10 % 高めの位置で測定出来ることがわかる。

なお、斜め位置電極をこの領域に設置した場合、電極番号  $10\frac{1}{2} \pm -13\frac{1}{2} \pm$  と同じ程度の精度で測定出来るかどうかについては電極番号 1 ± 2 ±, 5 ± 6 ±, 9 ± 11 ± についての測定結果から判断してほぼ可能であると考えられる。

### (3) 流速測定のナトリウム温度による変化

Fig. 47 はナトリウム温度差による流速出力の変化を評価するために測定した結果をプロットしたものである。ポンプ回転数 50 %において 400°C の場合が 200°C よりやや高めにでているようであるが、測定誤差が大きく定量的に評価するのは困難である。

Fig. 48 及び 49 はナトリウム温度 400°C における流速計起電力の直流成分及び交流成分の上流直管長依存性をプロットしたものである。Fig. 38, 39 における 200°C の結果とくらべて、大きな差はみられない。

### 3.3 その他の

12 B 超音波流量計が試験装置の説明においてふれたように当試験ループに設置されているので、基準流量計の参考用として本試験期間中において同時に出力と超音波受信波高をモニターした。

基準流量計との比較を Fig. 50 に示す。ナトリウム温度 200°C, 400°C とともに基準流量計より約 5 % 程度も低めに出ている。これは 6 B 配管の曲り部から、12 B 配管に拡大しており、かつ拡大部から 2.1 m のところに本超音波流量計が設置されているため流速分布の影響が出ているものと考えられる。

Fig. 51 は超音波流量計の受信波高の変化を示したものであり、ポンプ回転数の変化によって著しく変化し、また時間が経過すると、回復していくことがわかる。これはポンプの運転がオーバーフロー タイプになってしまっており、オーバーフロータンクのナトリウムレベル変化などによってボイドの混入に変化が生ずるためと考えられる。

いずれにしても、超音波流量計がボイド混入に弱いことを示しており、受信波高の自動調節機能性などが測定回路に要求される。

#### 4. 結 論

以上の試験結果により電磁流量計のゆらぎ信号の相互相関を用いれば精度よい流速測定が可能であることがわかった。特長的な結果を列挙すると以下の通りである。

- (1) 流速 1~5m/S の範囲において測定精度は士 4 % 以下である。
- (2) 電極は中央位置より磁石側へ 45°かたよった位置に設置する必要がある。
- (3) 利用する流動ゆらぎ成分の周波数は流速 1~5m/S をカバーするには 15~20Hz が適している。
- (4) 2 対の電極間距離は 6 B 配管の場合 150mm が最適である。
- (5) 以上の方針によって測定された流速計出力値には補正係数として 1.02 をかける。
- (6) 配管曲り部からの距離が配管直徑の 5 倍以上あれば、ほぼ同じ精度で測定可能と思われる。

本試験は 6 B 配管について実施したが「もんじゅ」実機主配管 24 B に適用するためには、更に 6 B より口径の大きな配管についても最適電極間距離などを確認しておくことが必要である。

## 5. 謝 辞

本試験を実施するにあたり，F B R開発本部機器ブロックリーダ深田富啓主任研究員，宇野修研究員，機器開発部厚母栄夫部長，高荷智部長代理，亀井満主任研究員，その他多くの方々に御指導御助言をいただきました。

また常陽産業交替勤務の方々には試験ループの運転等において非常に御協力をいただきました。

ここに合わせて感謝の意を表します。

## 6. 参考文献

(1) 二瓶哲雄 他 ; SN 243 74-01

出力脈動信号の相関法による電磁流量計現場校正法の開発(I)－12B電磁流量計による予備試験－

(2) 二瓶哲雄 他 ; SN 241 76-23

出力脈動信号の相関法による電磁流量計現場校正法の開発(II)－ポンプ試験装置での試験－

(3) 遠藤 昭 他 ; SN 941 77-156

出力電圧のゆらぎの相関を利用した電磁流量計の校正法の検討－管内流速分布を考慮する立場からの検討－

(4) 中本香一郎他 ; SN 941 77-186

流量相関法によるナトリウム流速測定－3B永久磁石式電磁流量計による基礎試験－

(5) 宇野 修 他 ; SN 941 82-50

出力脈動信号の相関法による電磁流量計現場校正法の開発(III)－ $L/D$ の測定精度に与える影響－

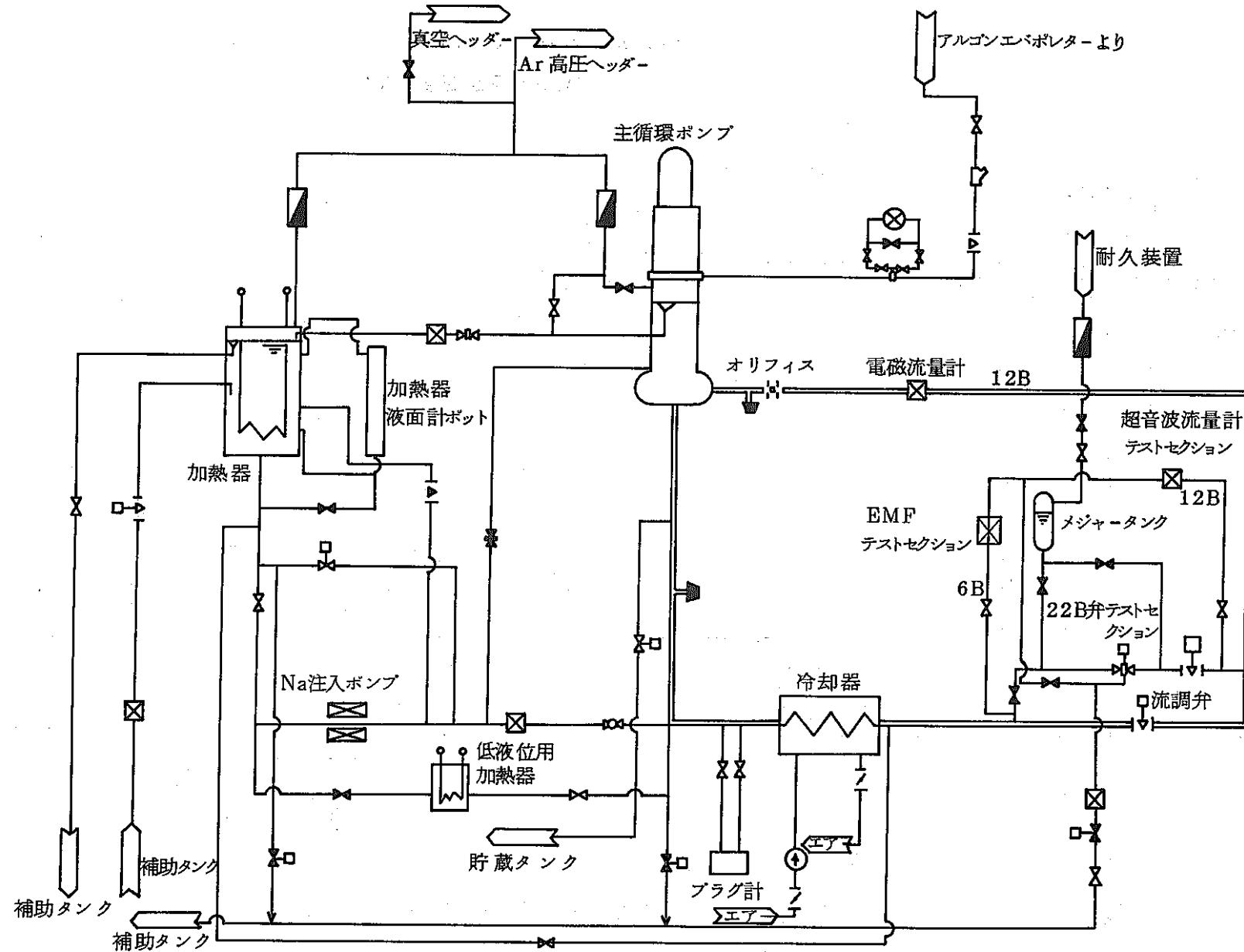


Fig. 1 「もんじゅ」フルモックアップポンプ試験ループ

Flow Diagram of 「MONJU」 Full Mockup Test Loop

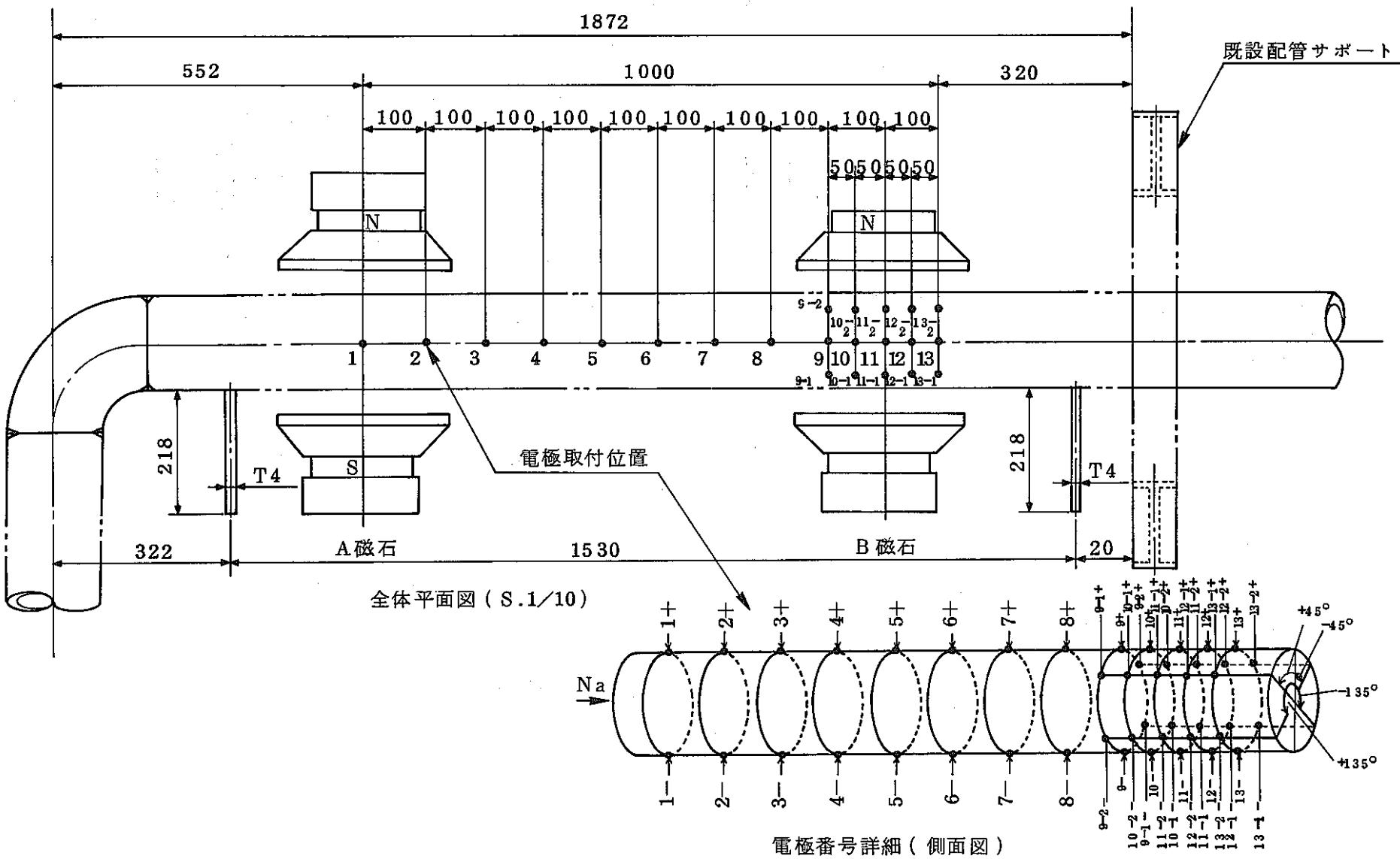


Fig. 2 電磁流量計概略図

Outline of Permanent Magnet Type EMF

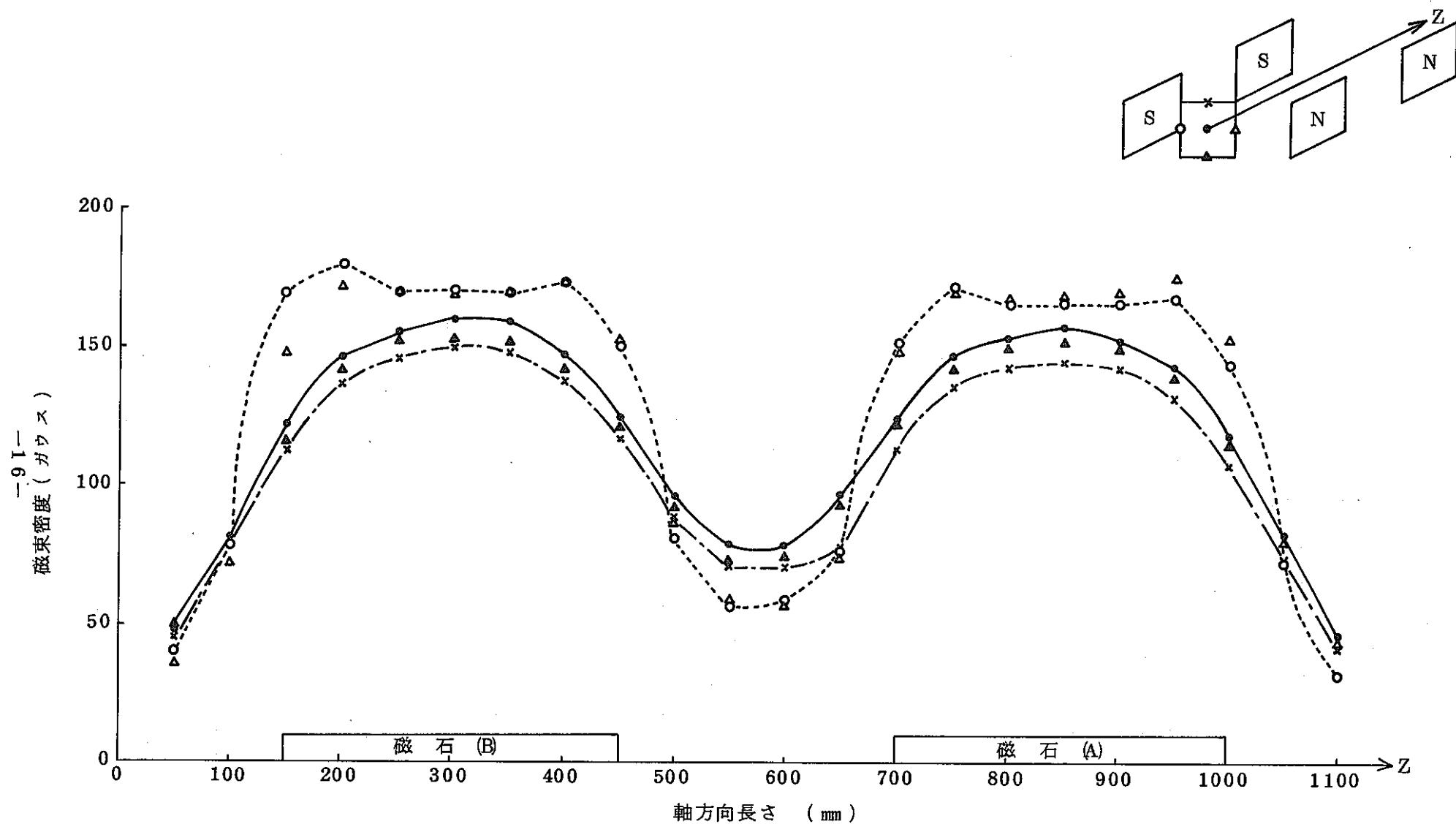


Fig. 3 永久磁石電磁流量計磁束分布

Magnetic Flux Distribution of Permanent Magnet Type EMF

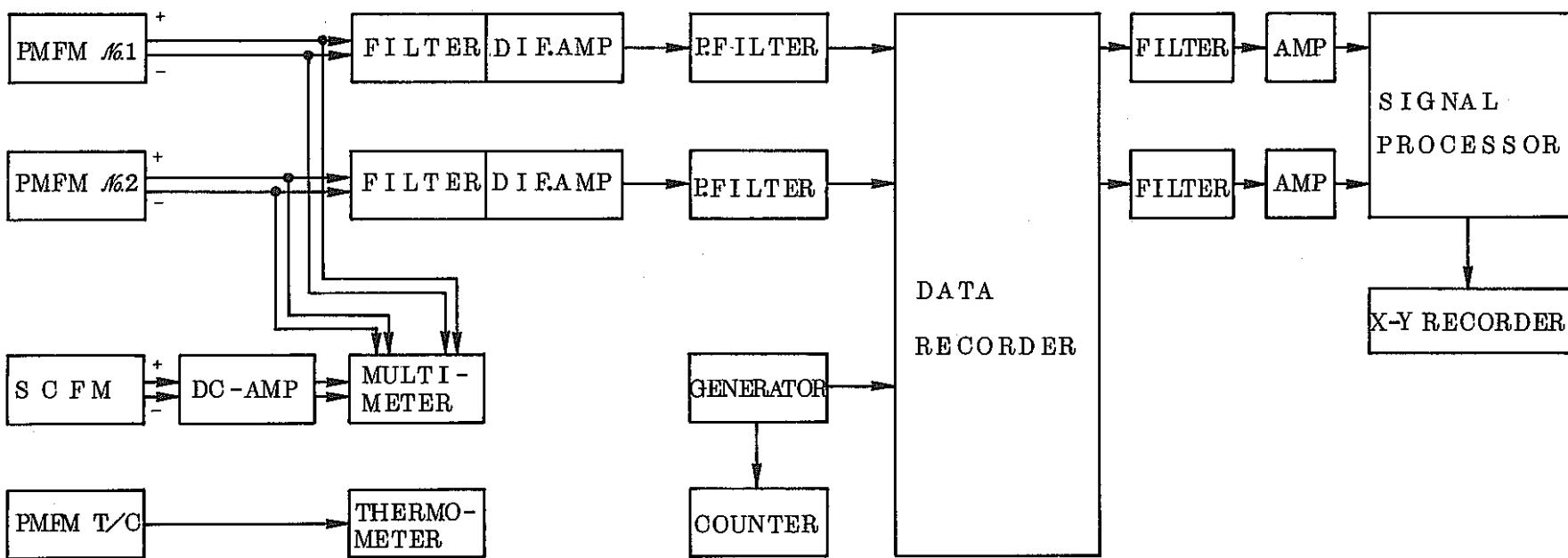


Fig. 4 信号処理系ブロックダイアグラム

Block Diagram of Signal Processing System

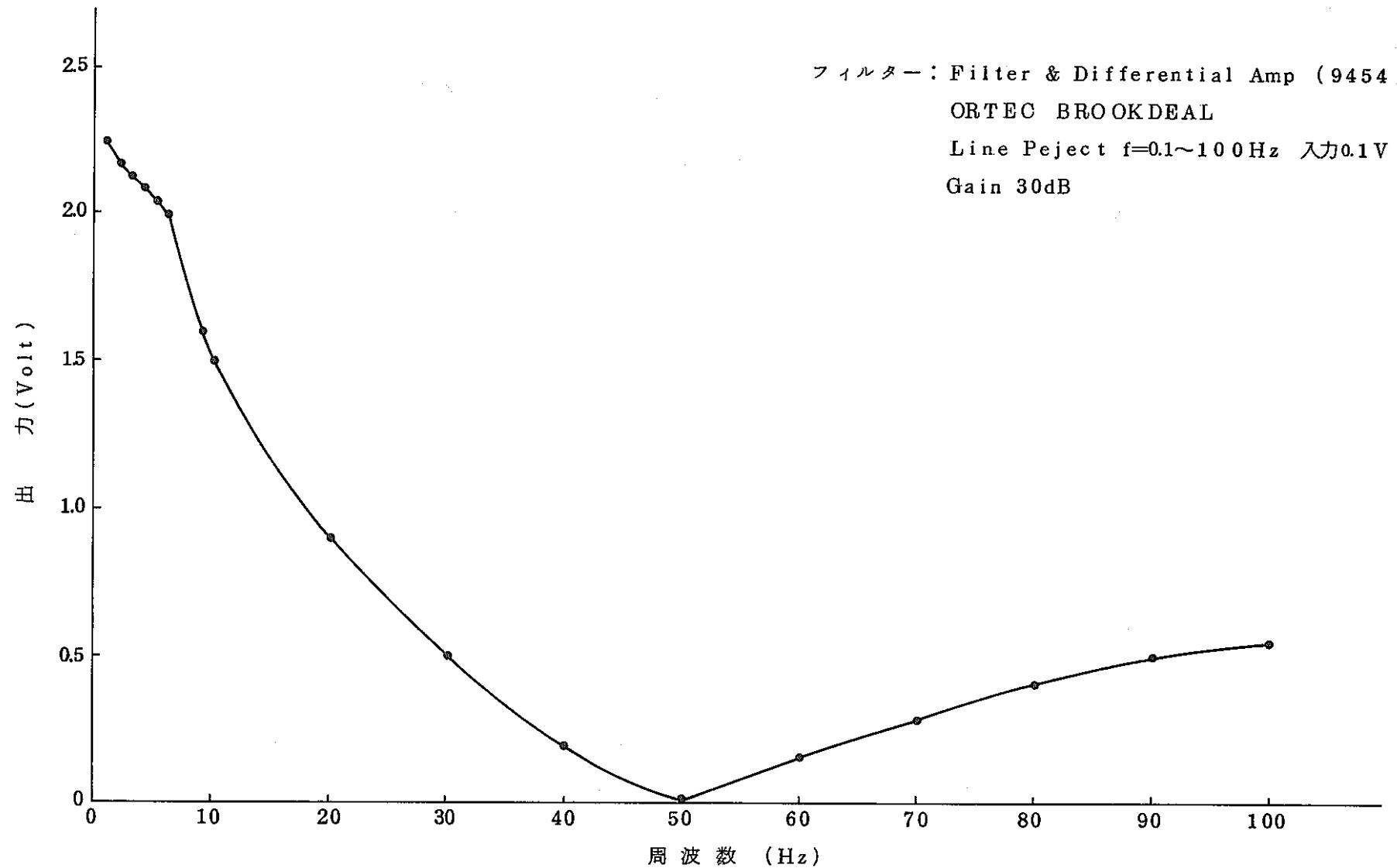


Fig. 5 フィルター特性(1)  
Band Pass Filter Performance (1)

フィルター: Band Pass Filter

NF CIRCUIT DESIGN BLOCK CO.LTD

バンド幅 0.1~30Hz 入力1 Volt

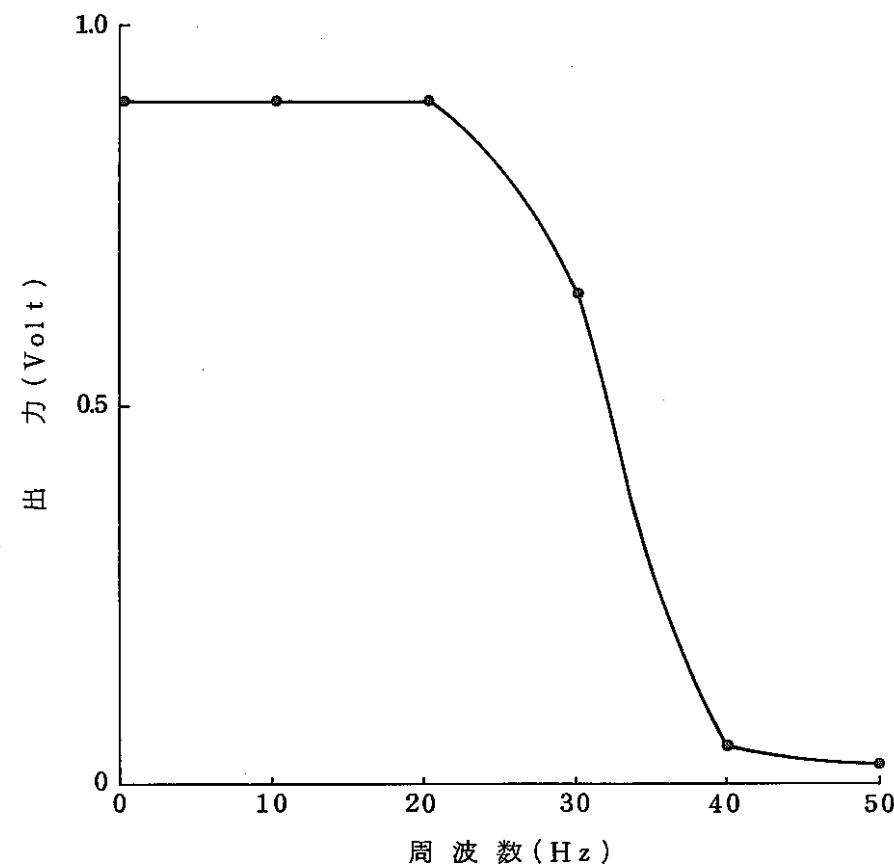


Fig. 6 フィルター特性(2)

Band Pass Filter Performance (2)

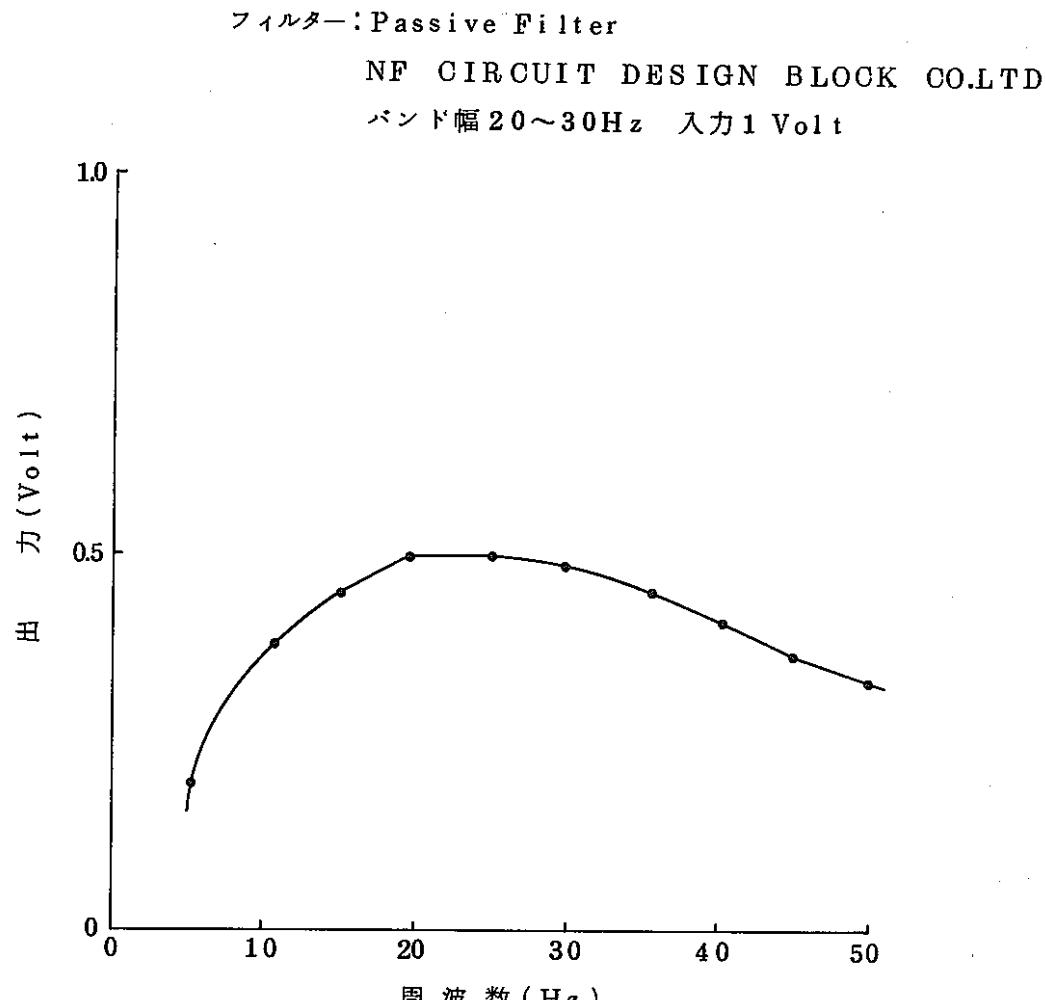


Fig. 7 フィルター特性(3)  
Band Pass Filter Performance (3)

フィルター: Band Pass Filter (FV625A)  
NF CIRCUIT DESIGN BLOCK CO.,LTD  
バンド幅 25~30Hz 入力 1 Volt

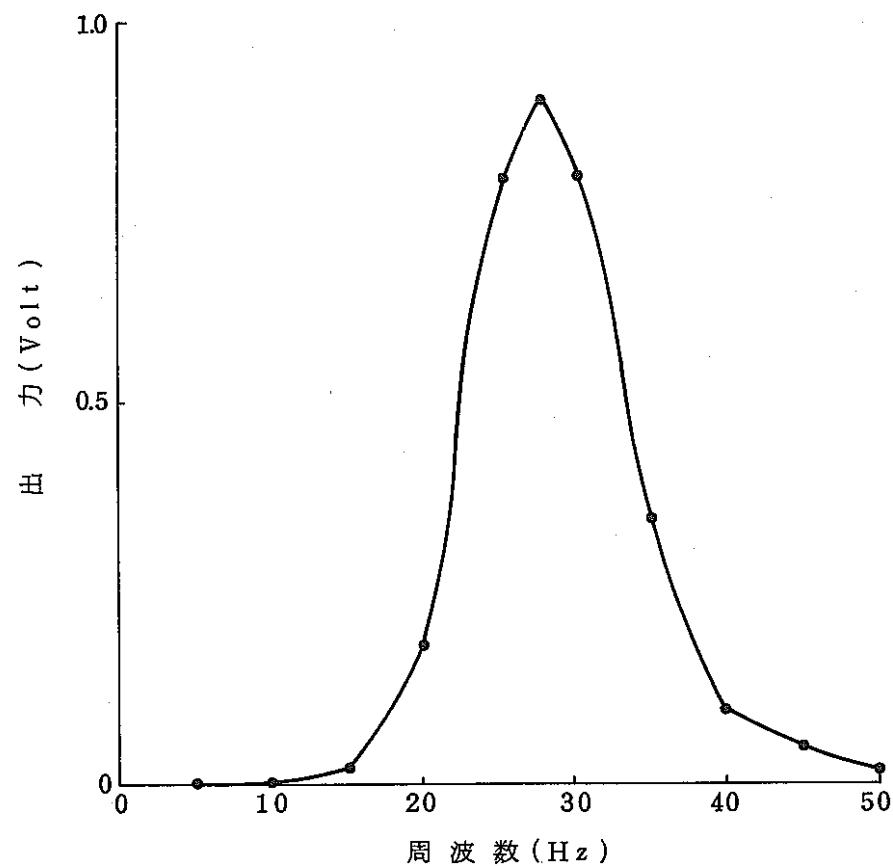


Fig. 8 フィルター特性(4)  
Band Pass Filter Performance (4)

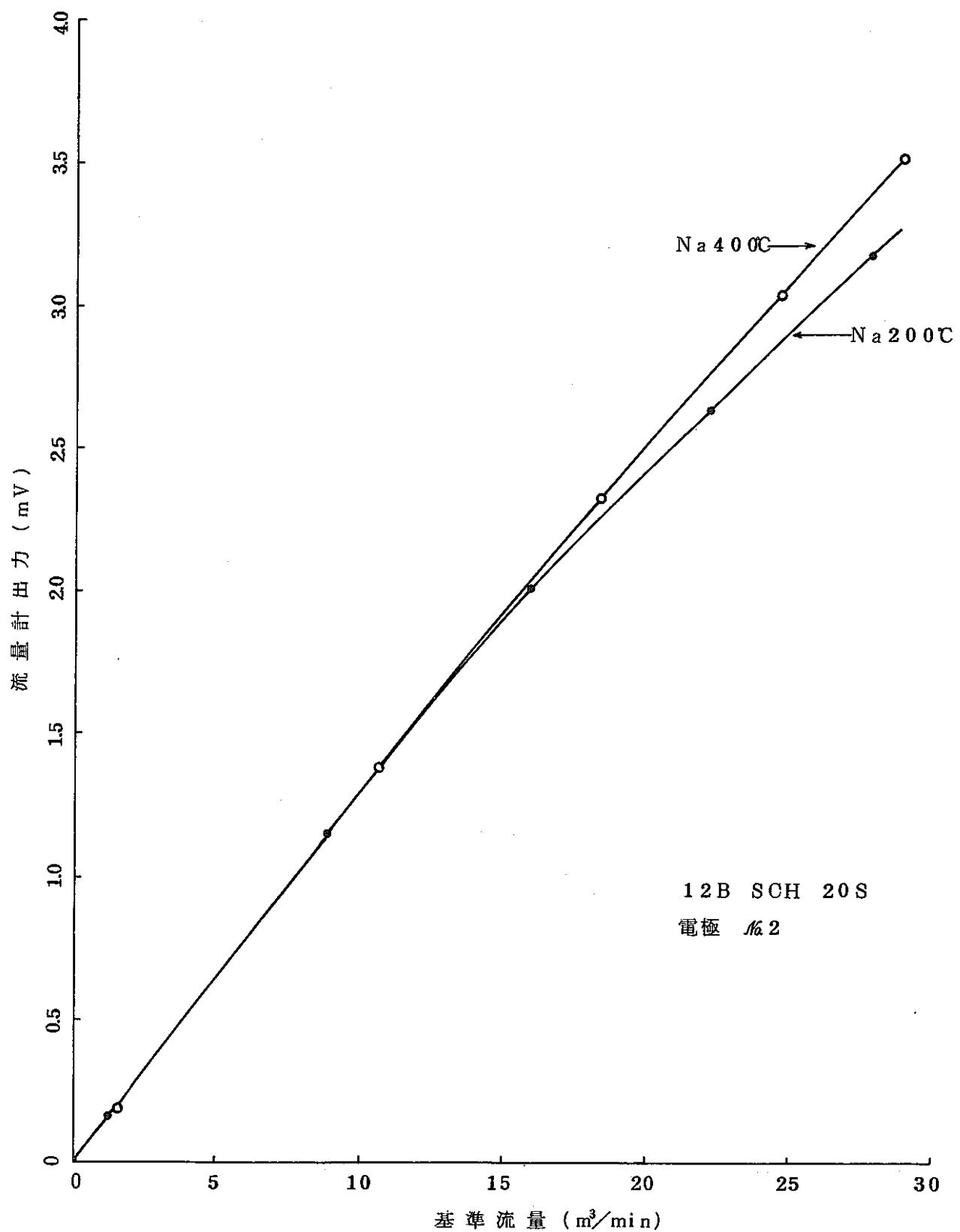


Fig. 9 鞍型電磁流量計校正曲線

Saddle Coil Type EMF Calibration Curve

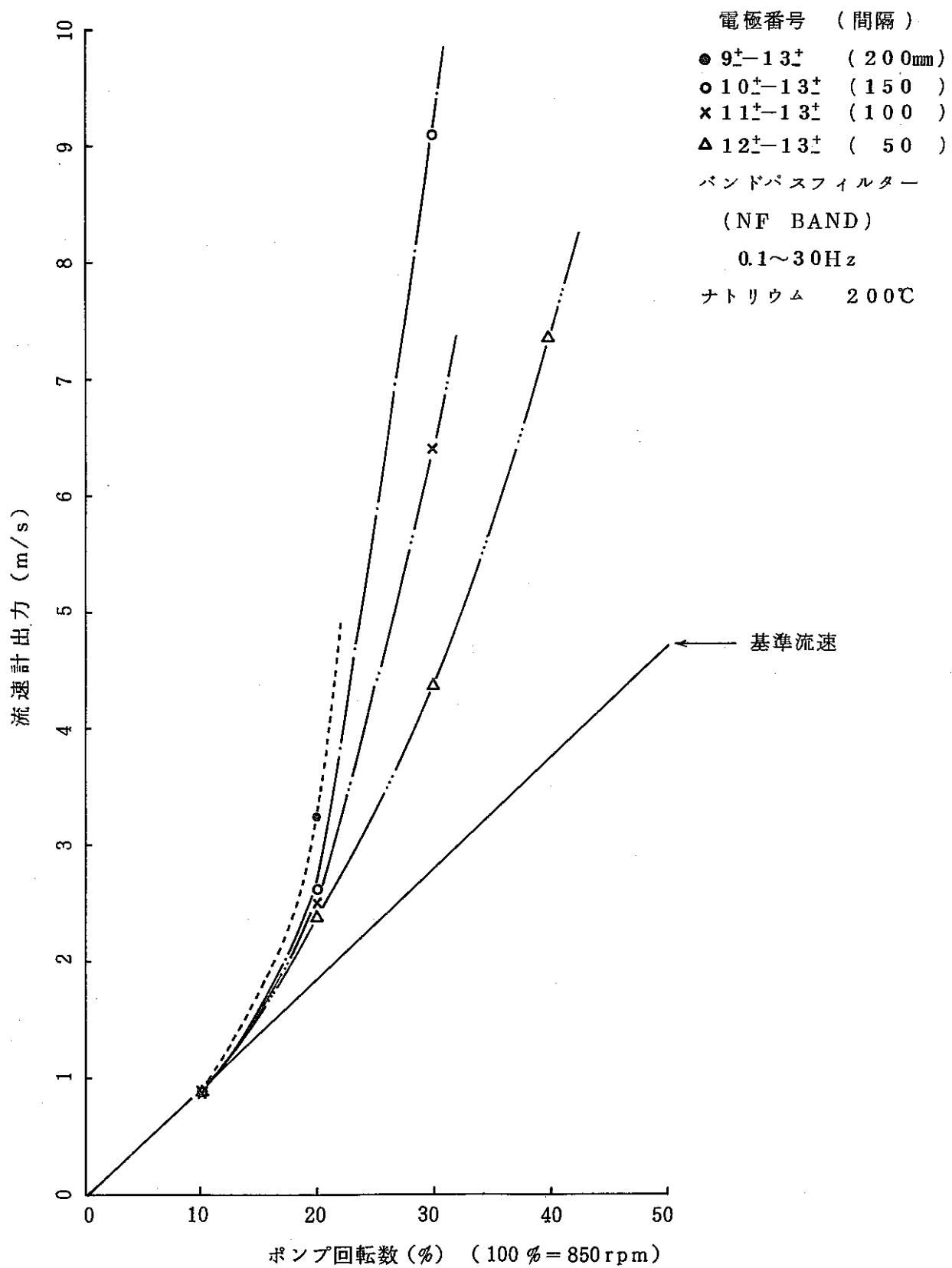


Fig.10 相互相関法による流速測定(1)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (1)

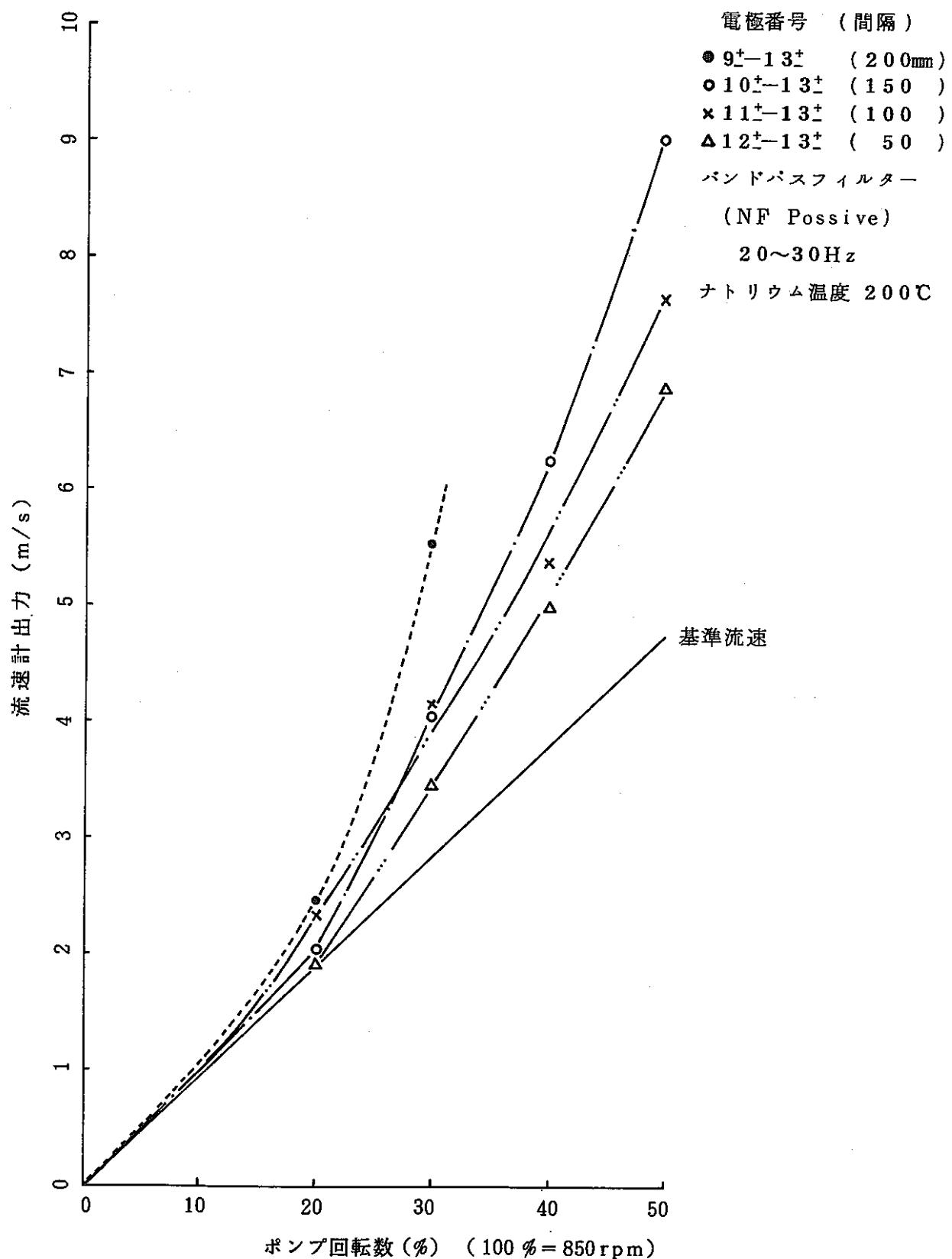


Fig.11 相互相関法による流速測定(2)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (2)

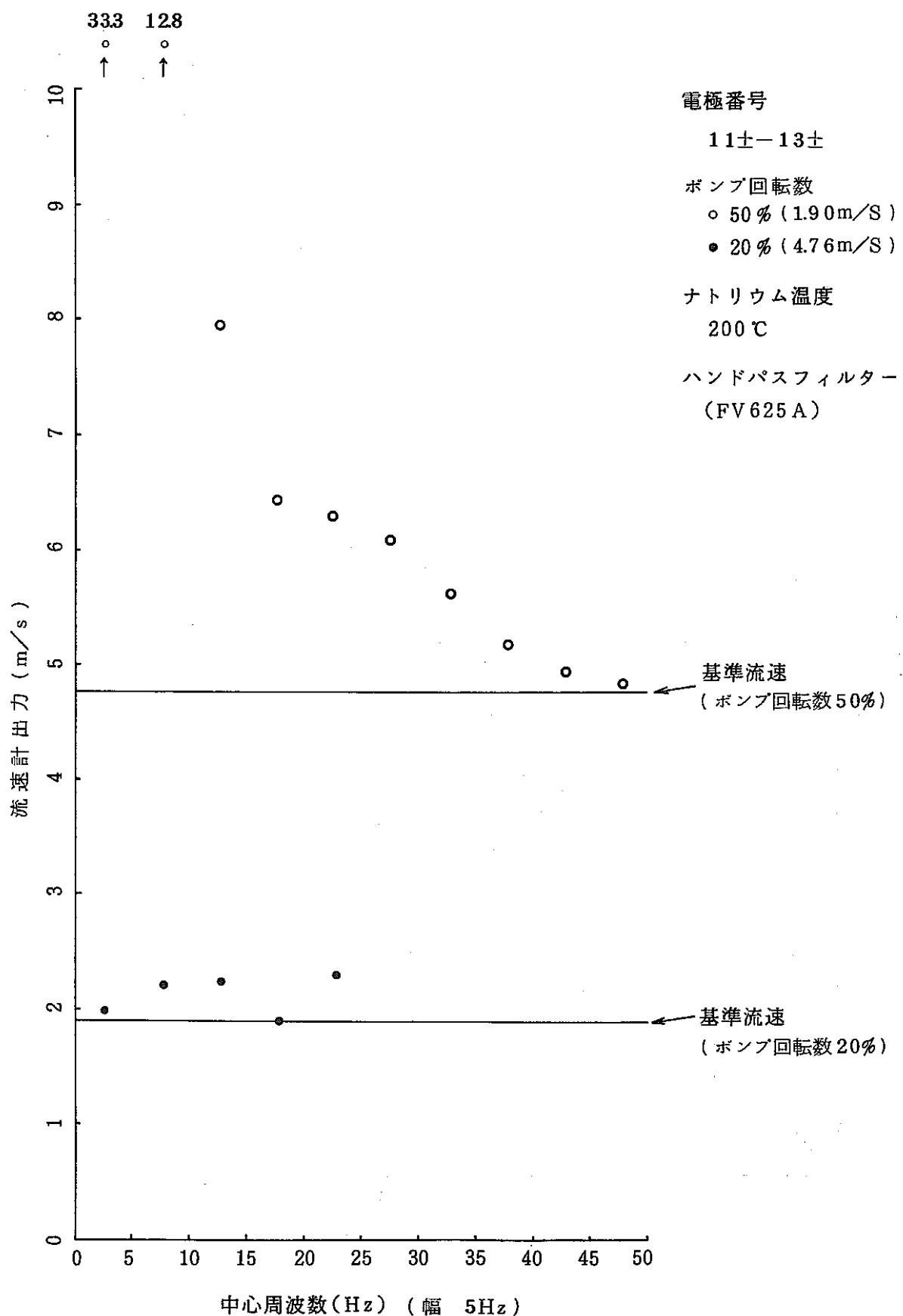


Fig. 12 流速計出力の周波数依存性(1)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (1)

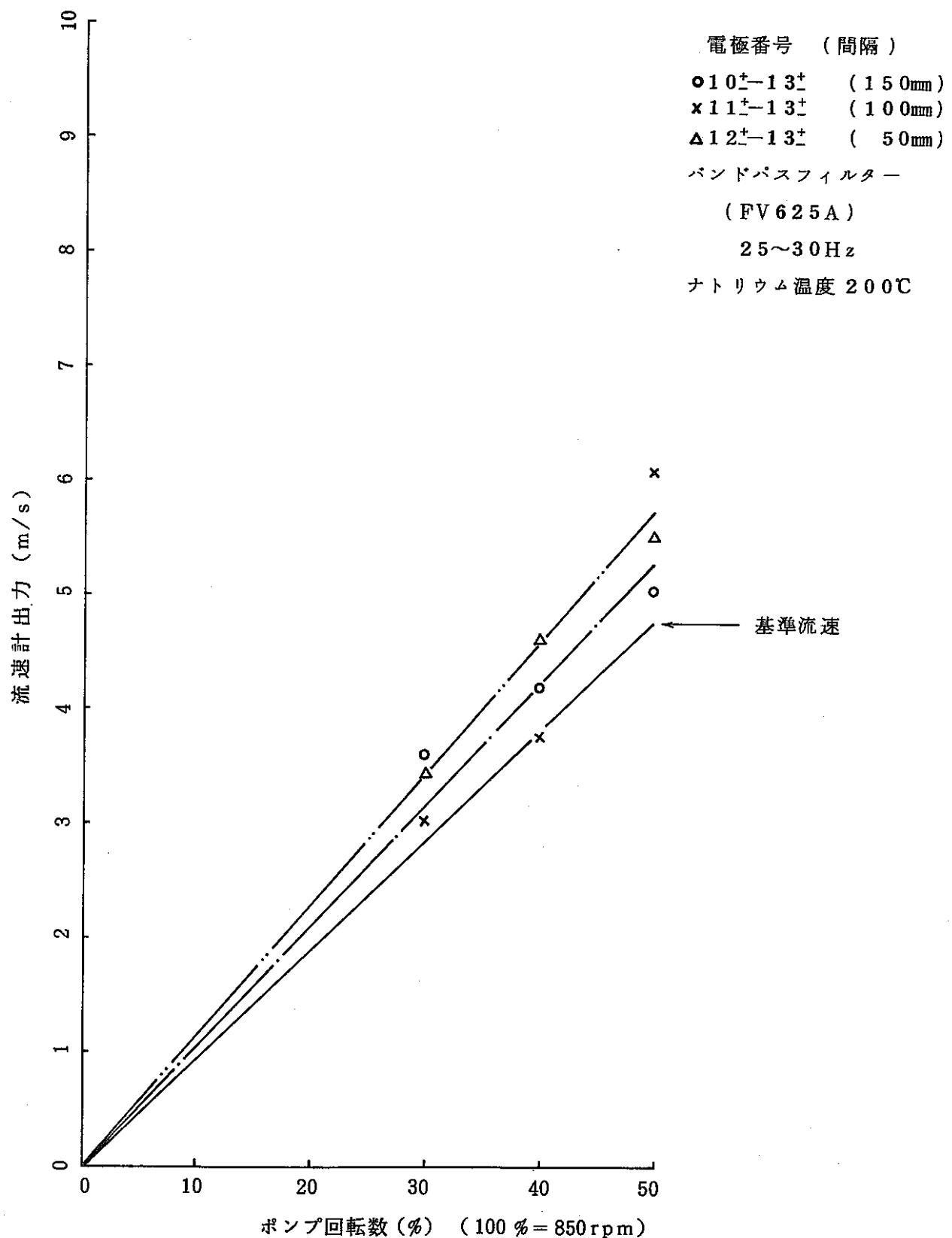


Fig.13 相互相関法による流速測定(3)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (3)

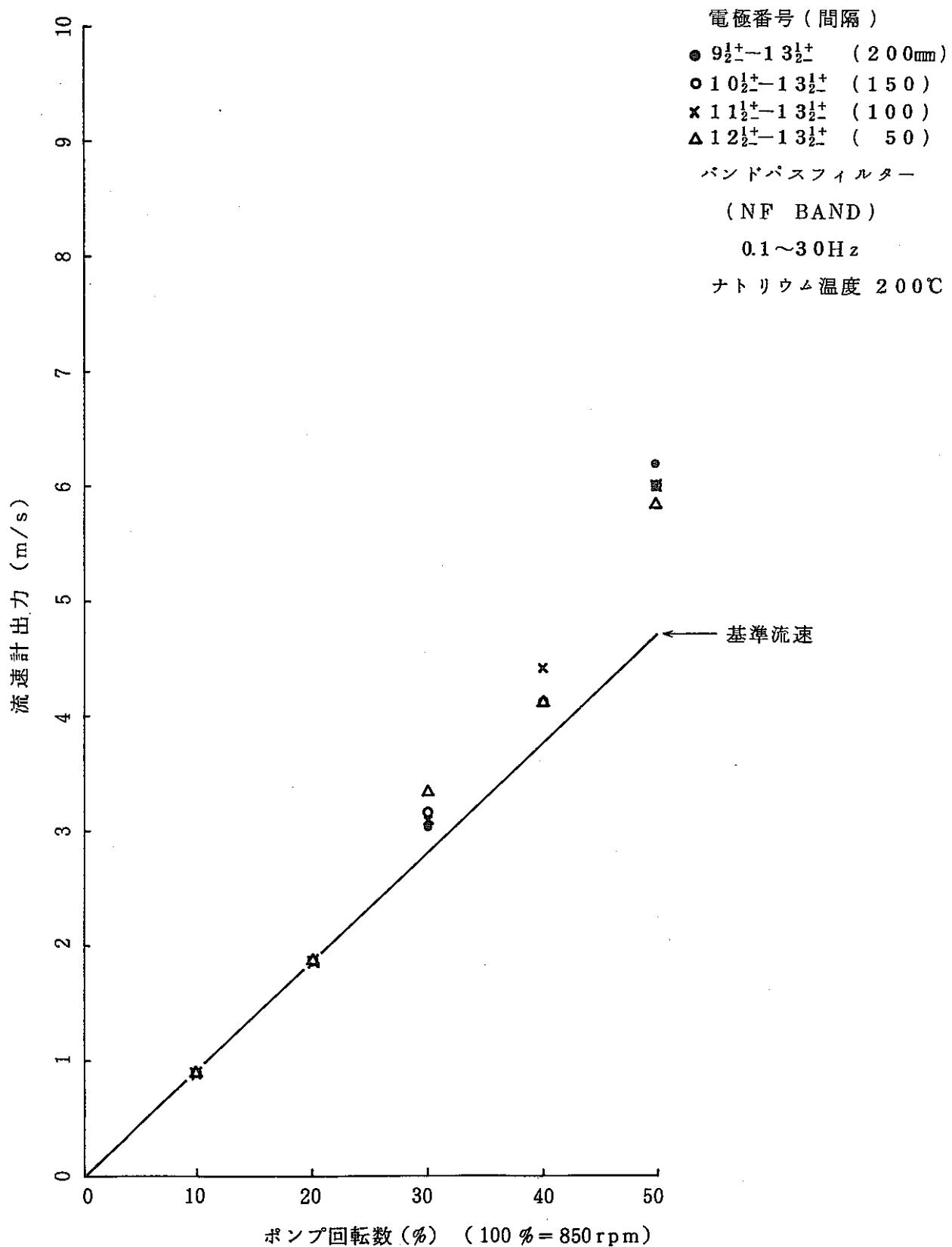


Fig.14 相互相関法による流速測定(4)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (4)

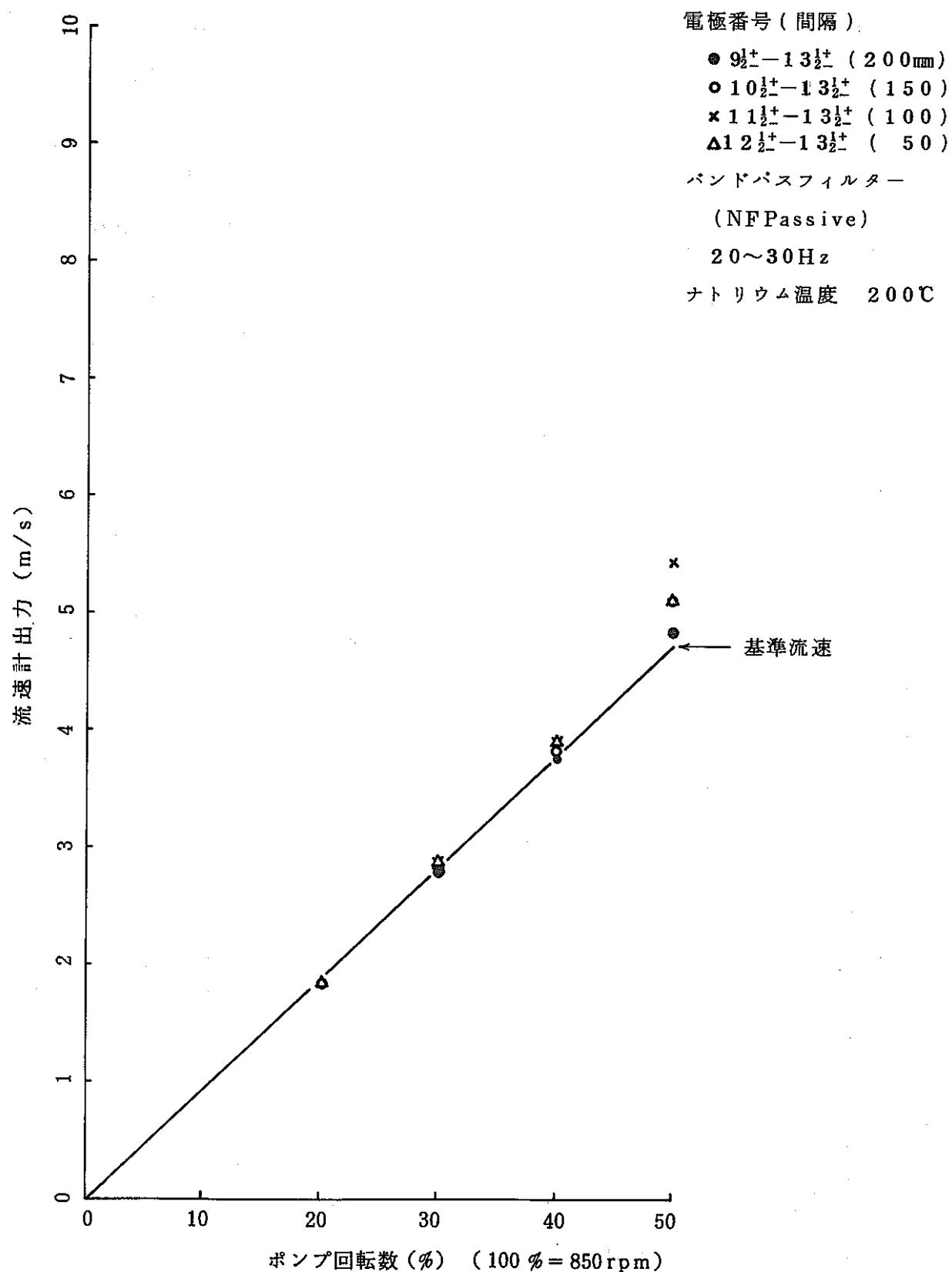


Fig. 15 相互相関法による流速測定(5)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (5)

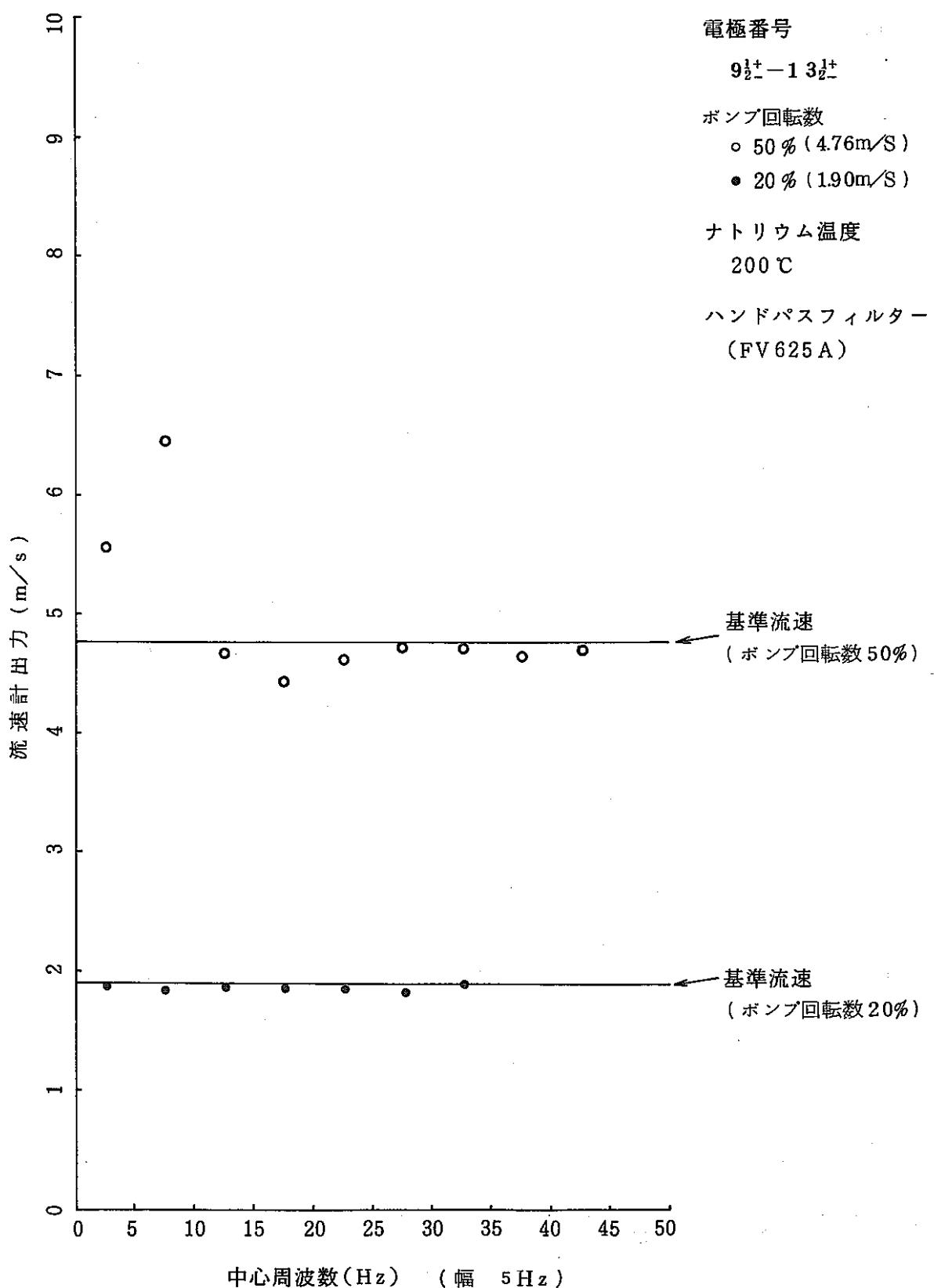


Fig. 16 流速計出力の周波数依存性(2)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (2)

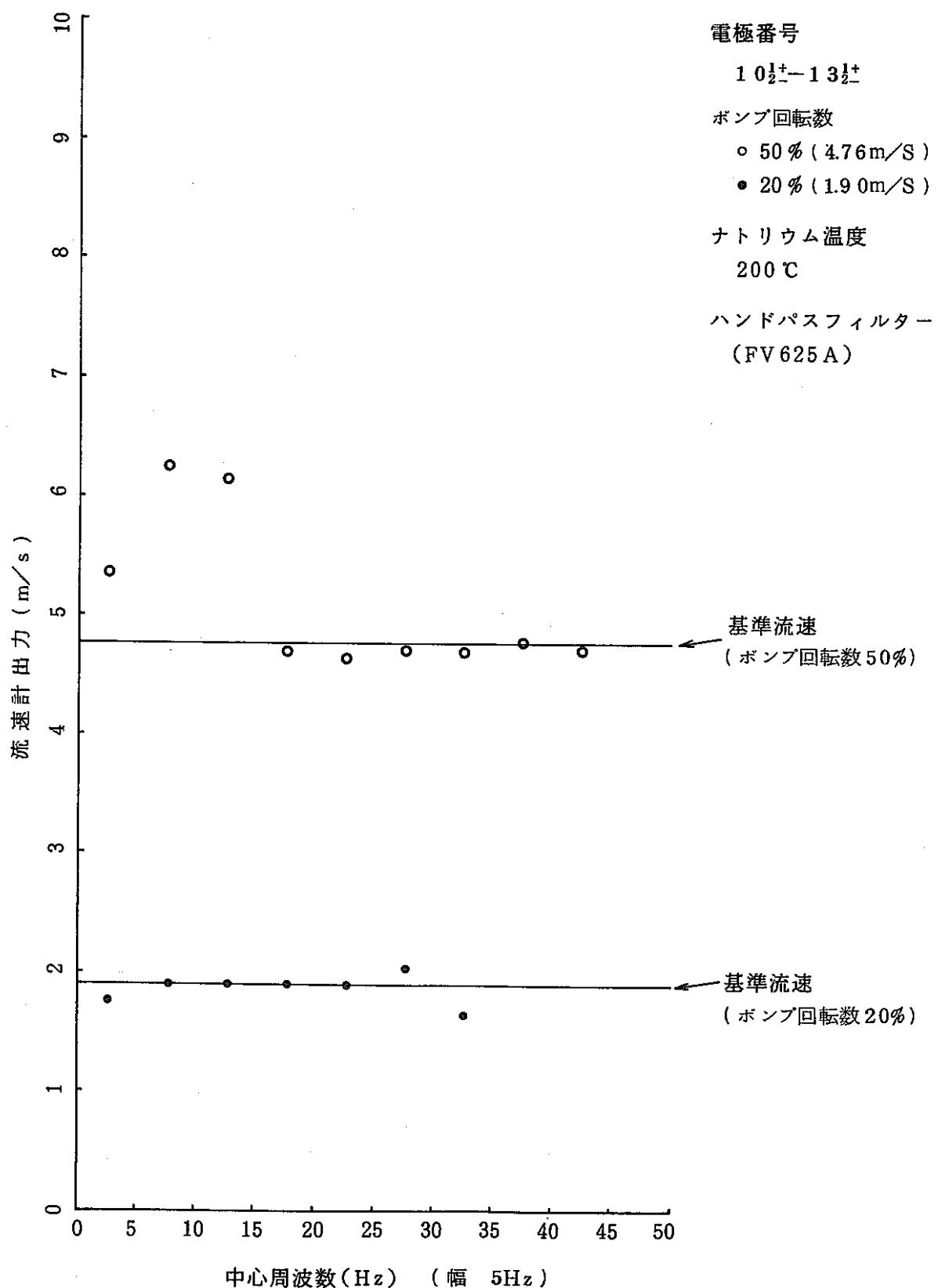


Fig. 17 流速計出力の周波数依存性 (3)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (3)

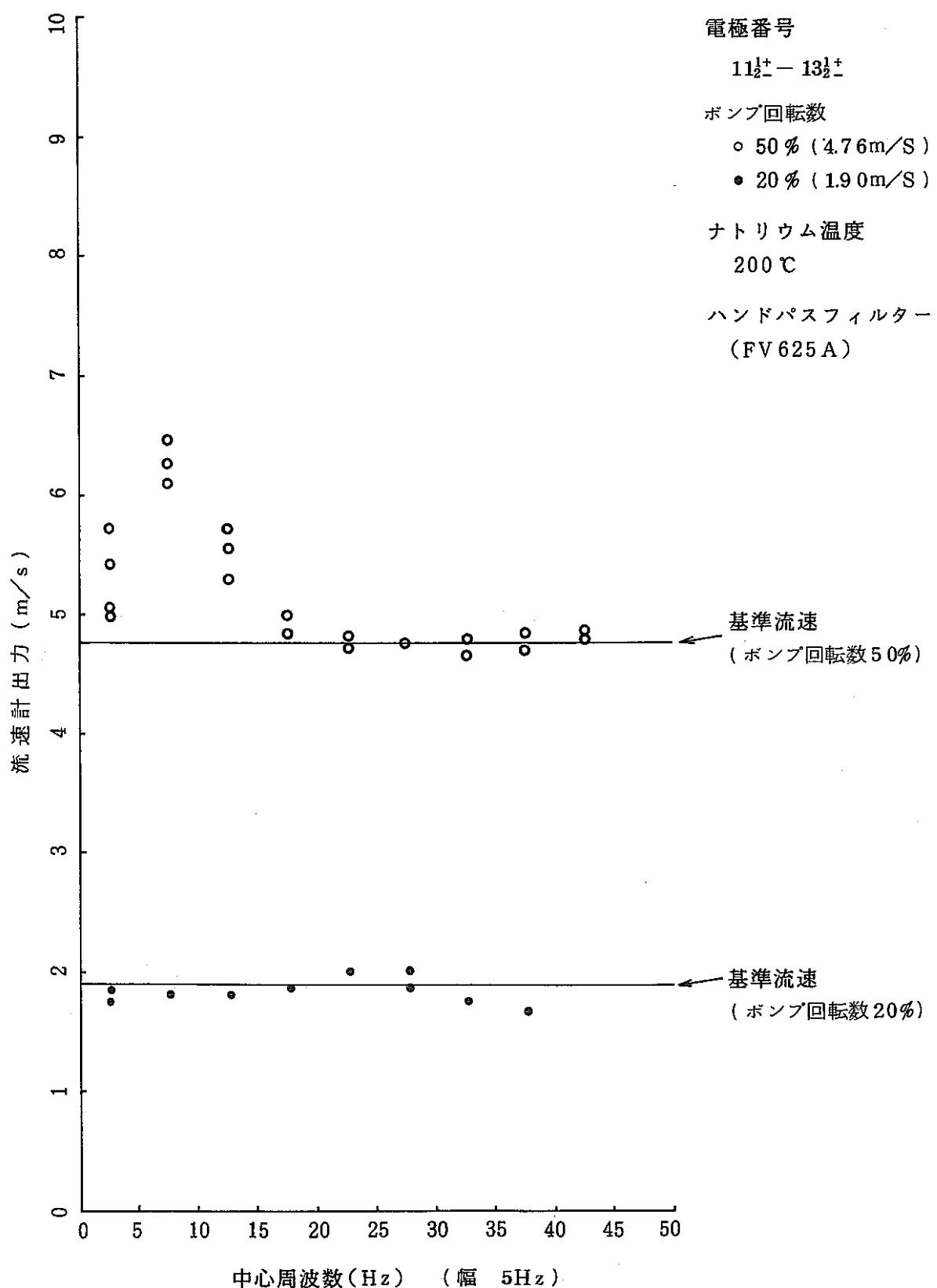


Fig.18 流速計出力の周波数依存性 (4)

Frequency Dependence of Flowneter Output (4)

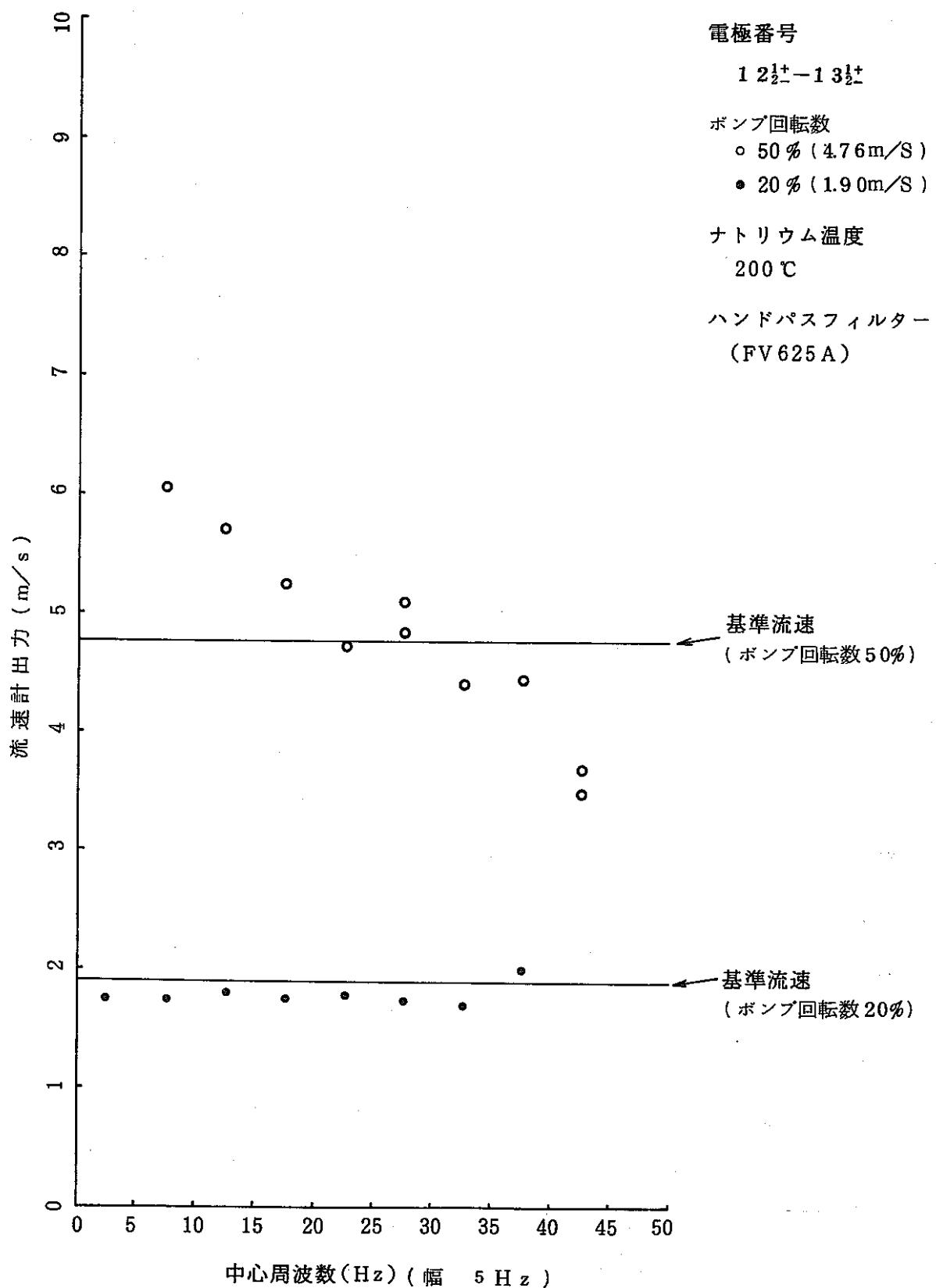


Fig.19 流速計出力の周波数依存性 (5)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (5)

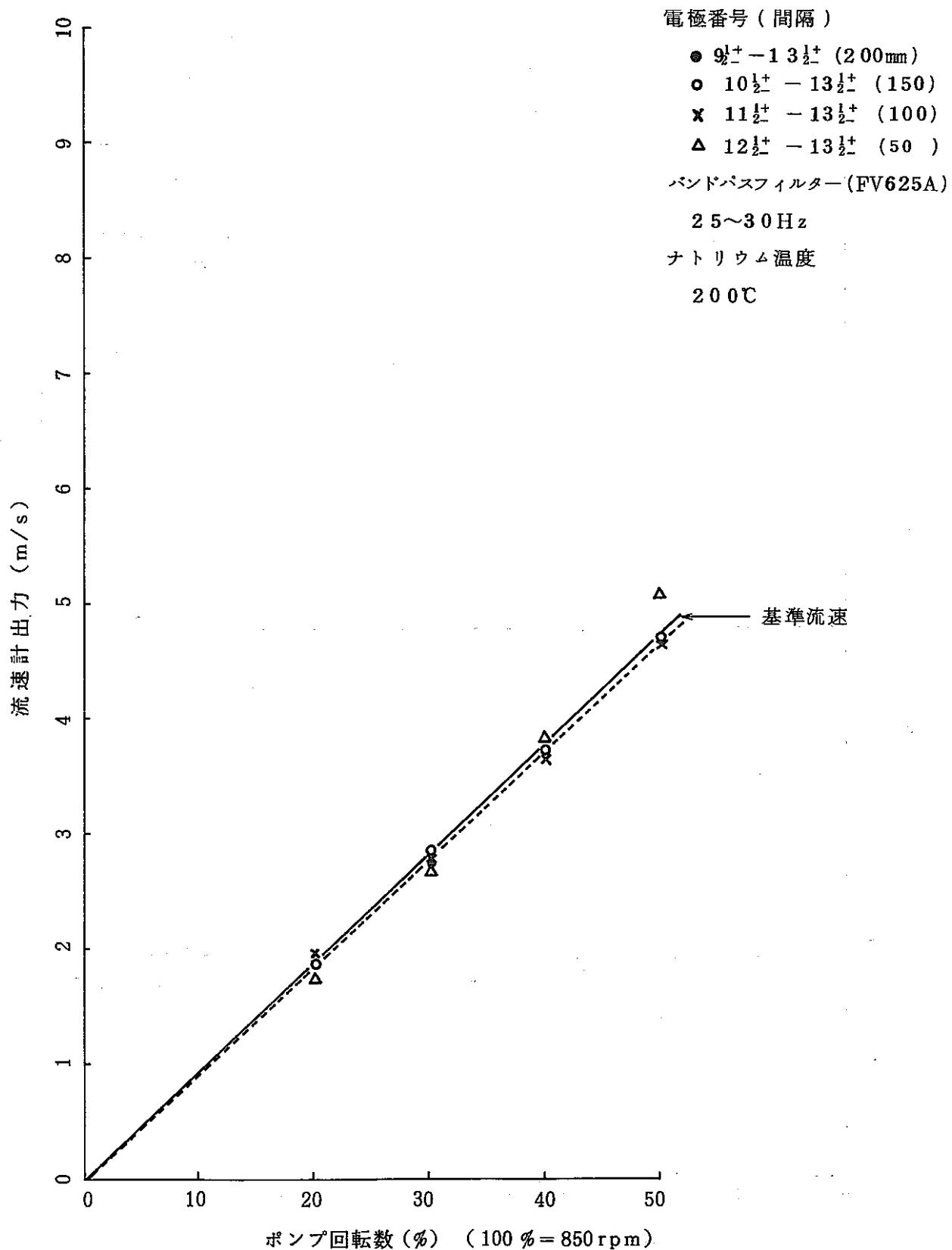
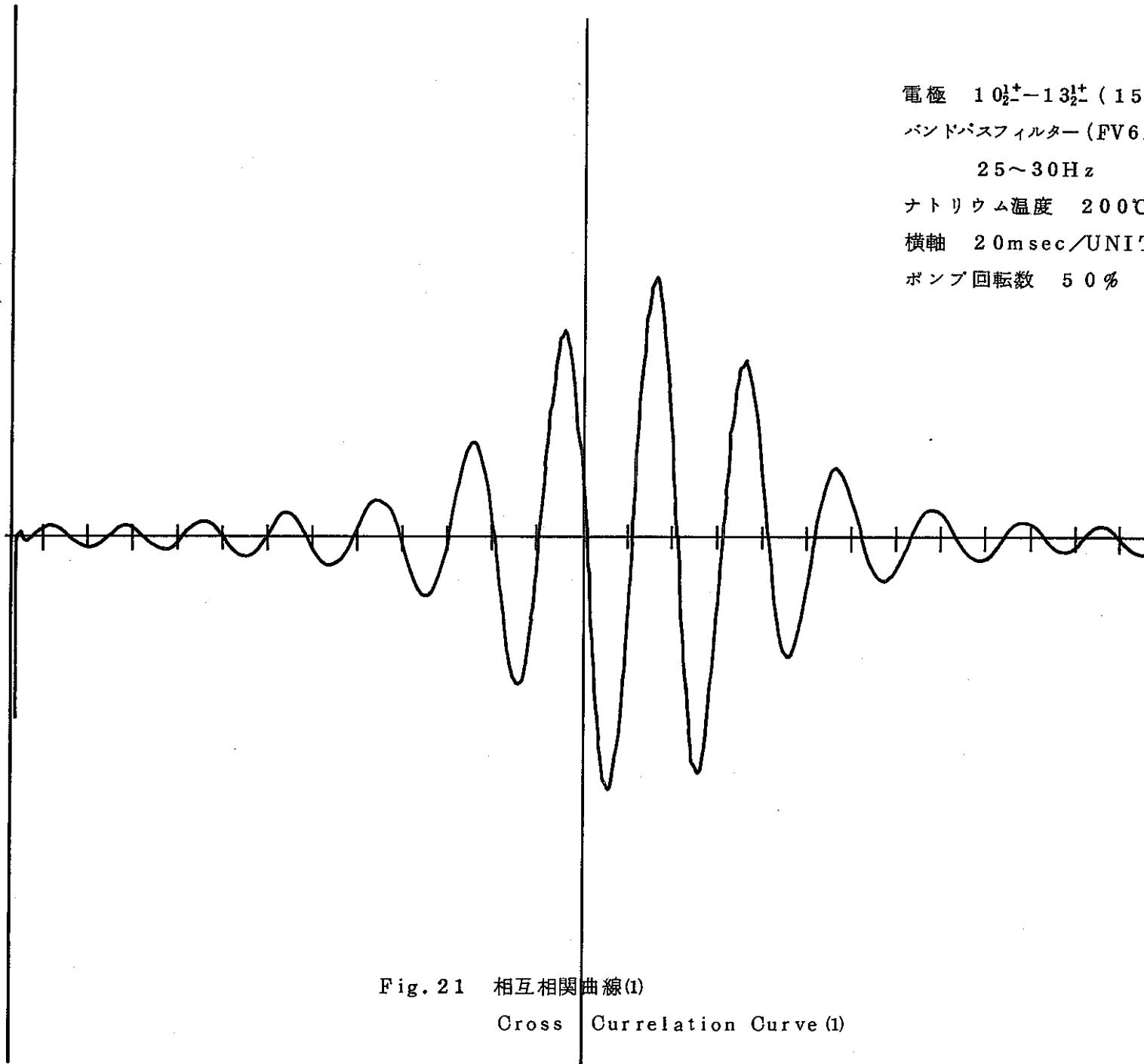


Fig 20 相互相関法による流速測定(6)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (6)



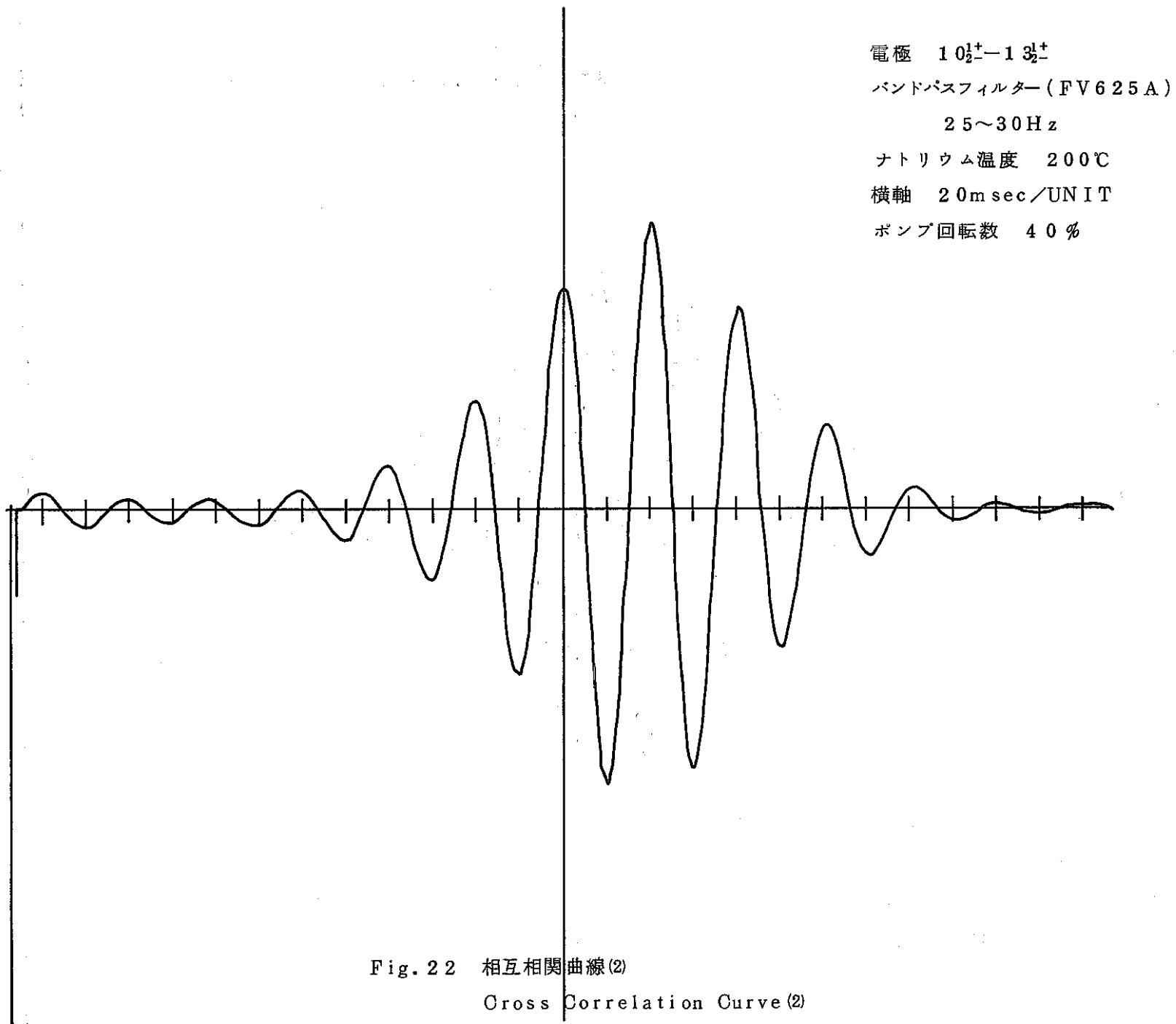
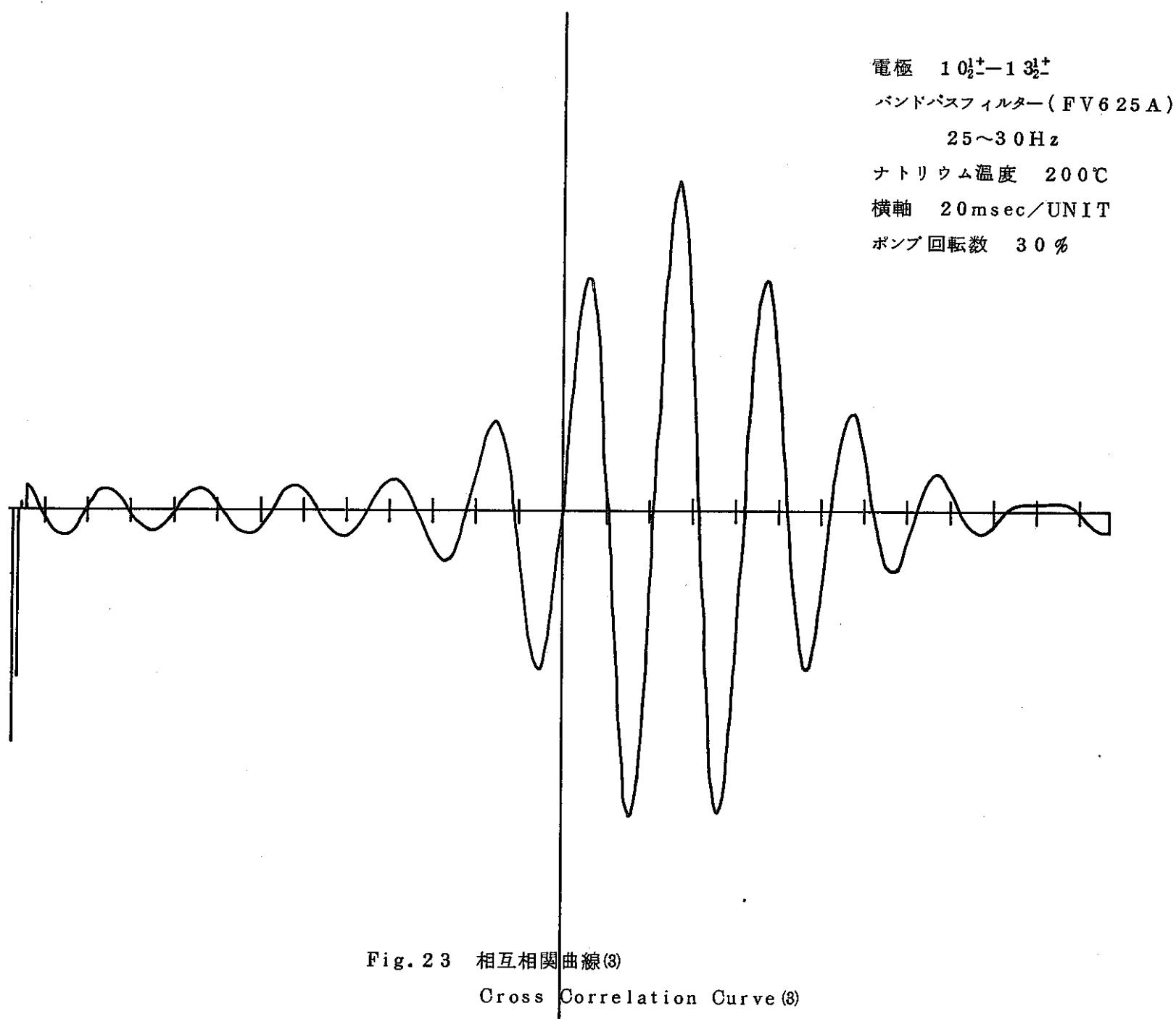
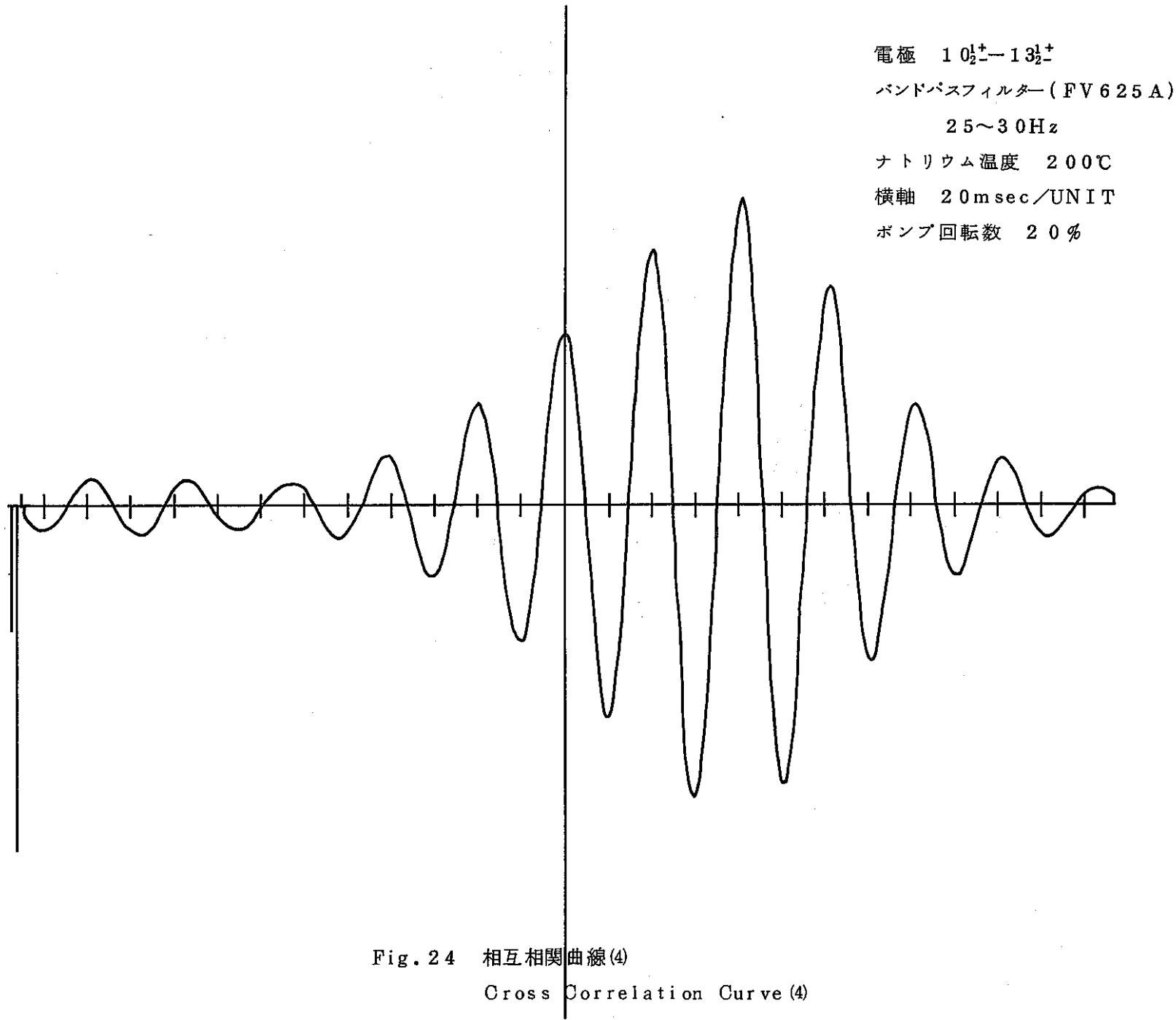
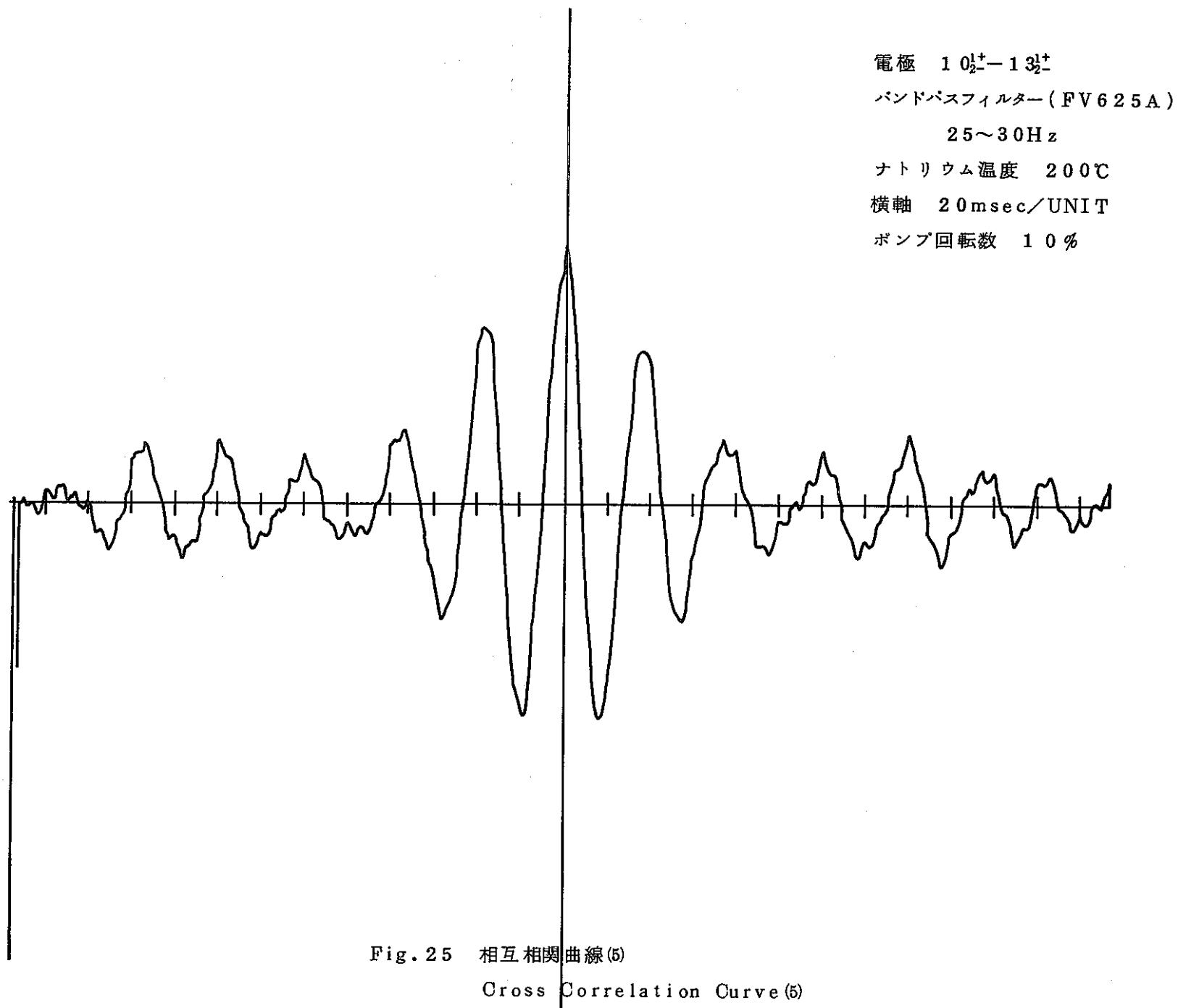


Fig. 22 相互相関曲線(2)

Cross Correlation Curve (2)







電極  $10_2^{1+} - 13_2^{1+}$   
バンドパスフィルター (FV 625A)  
15~20 Hz  
ナトリウム温度 200°C  
横軸 20 msec/UNIT  
ポンプ回転数 10%

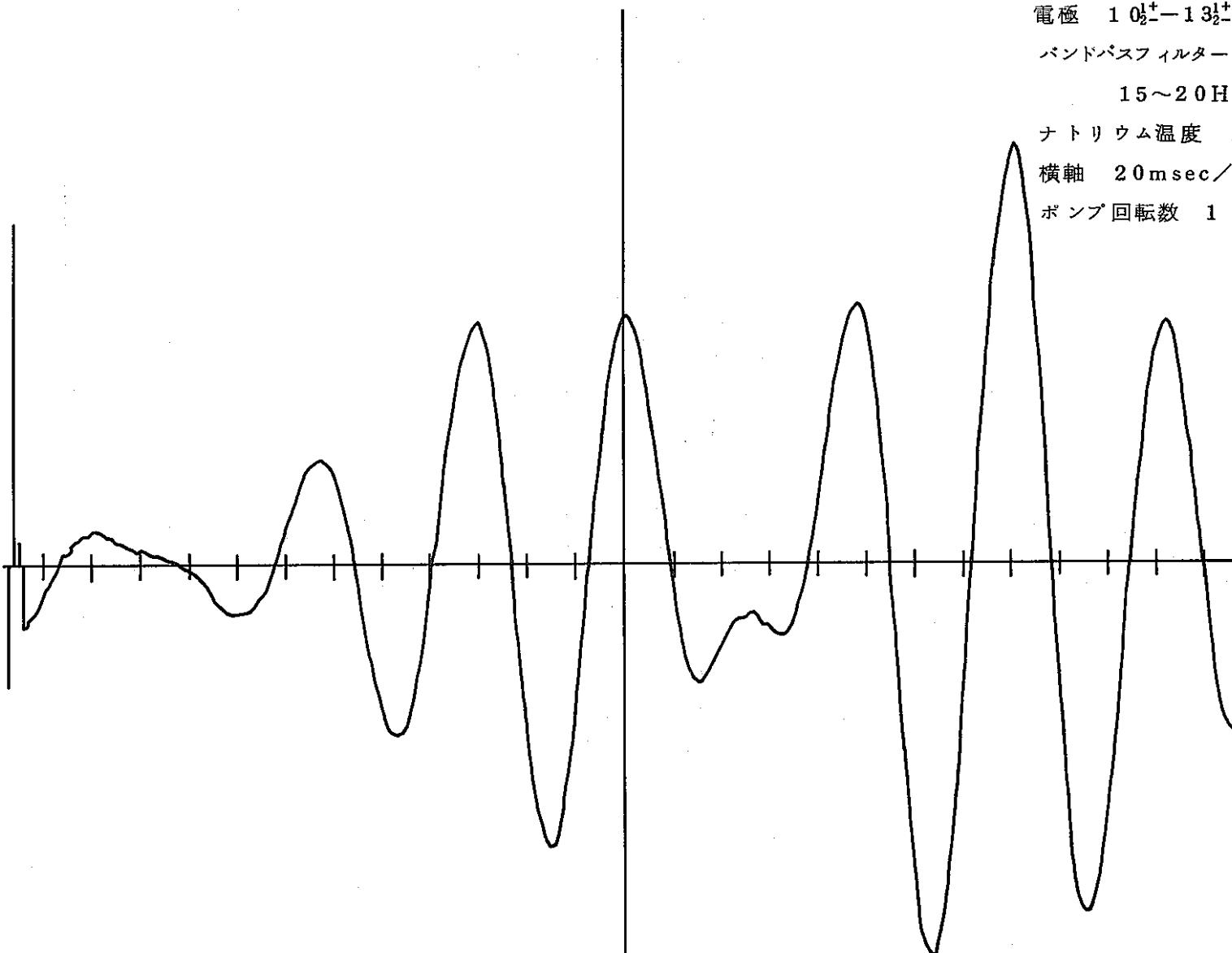


Fig. 26 相互相関曲線(6)

Cross Correlation Curve (6)

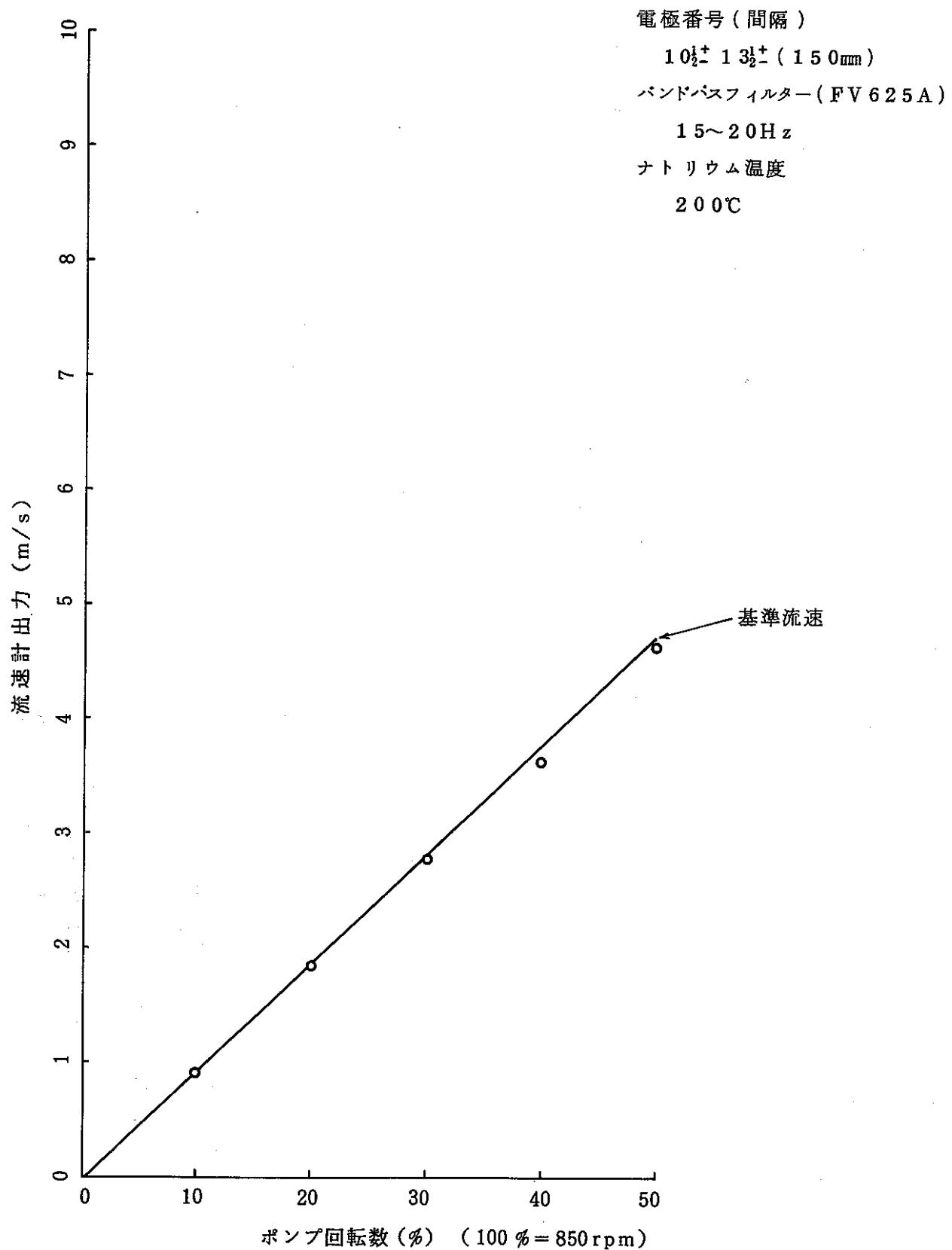


Fig. 27 相互相関法による流速測定(7)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (7)

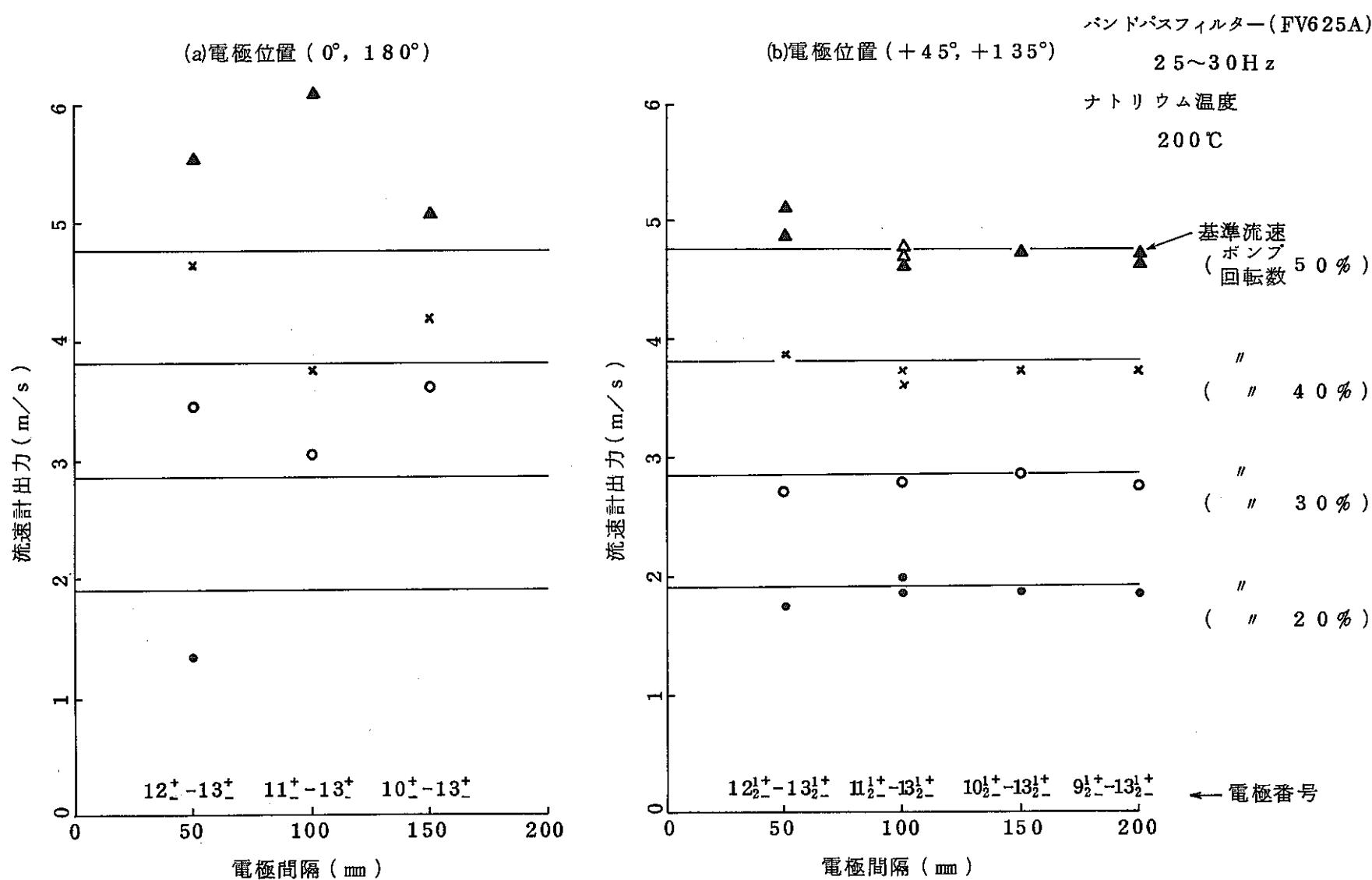


Fig. 28 流速出力の電極間距離依存性

Dependence of Flowmeter Output on Electrode Distance

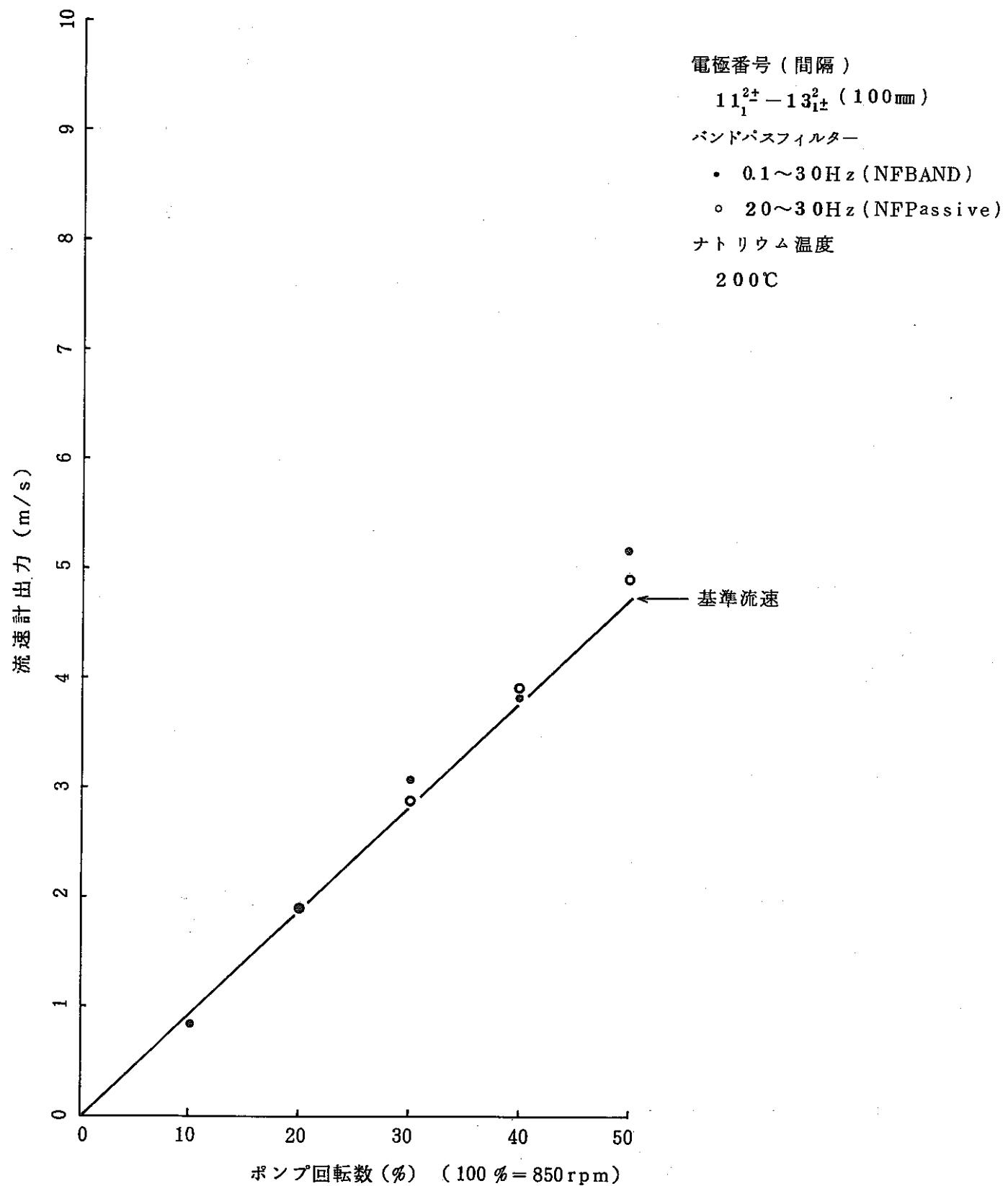


Fig 29 相互相関法による流速測定(8)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (8)

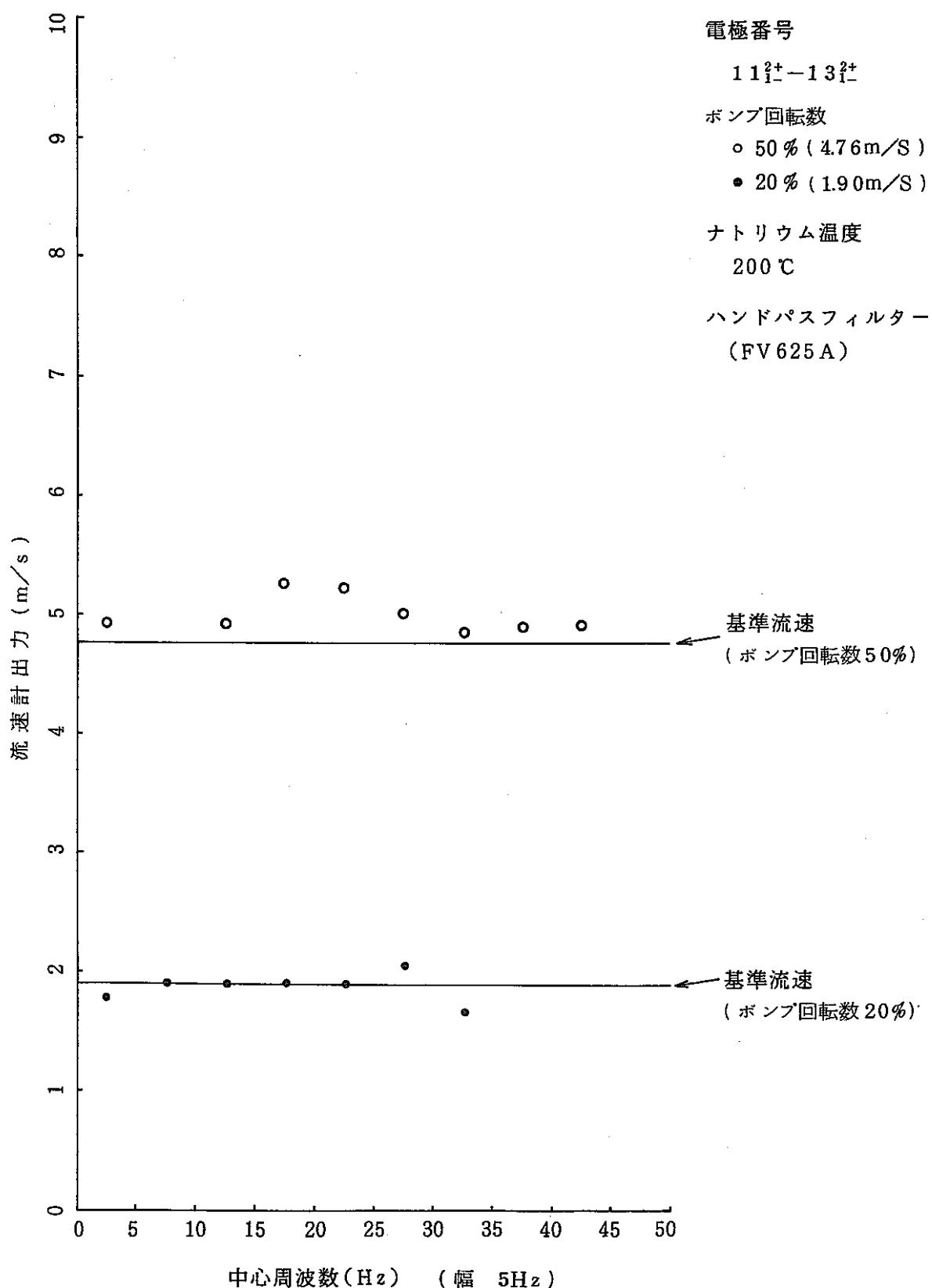


Fig. 30 流速計出力の周波数依存性(6)

Frequency Dependence of Flow meter Output (6)

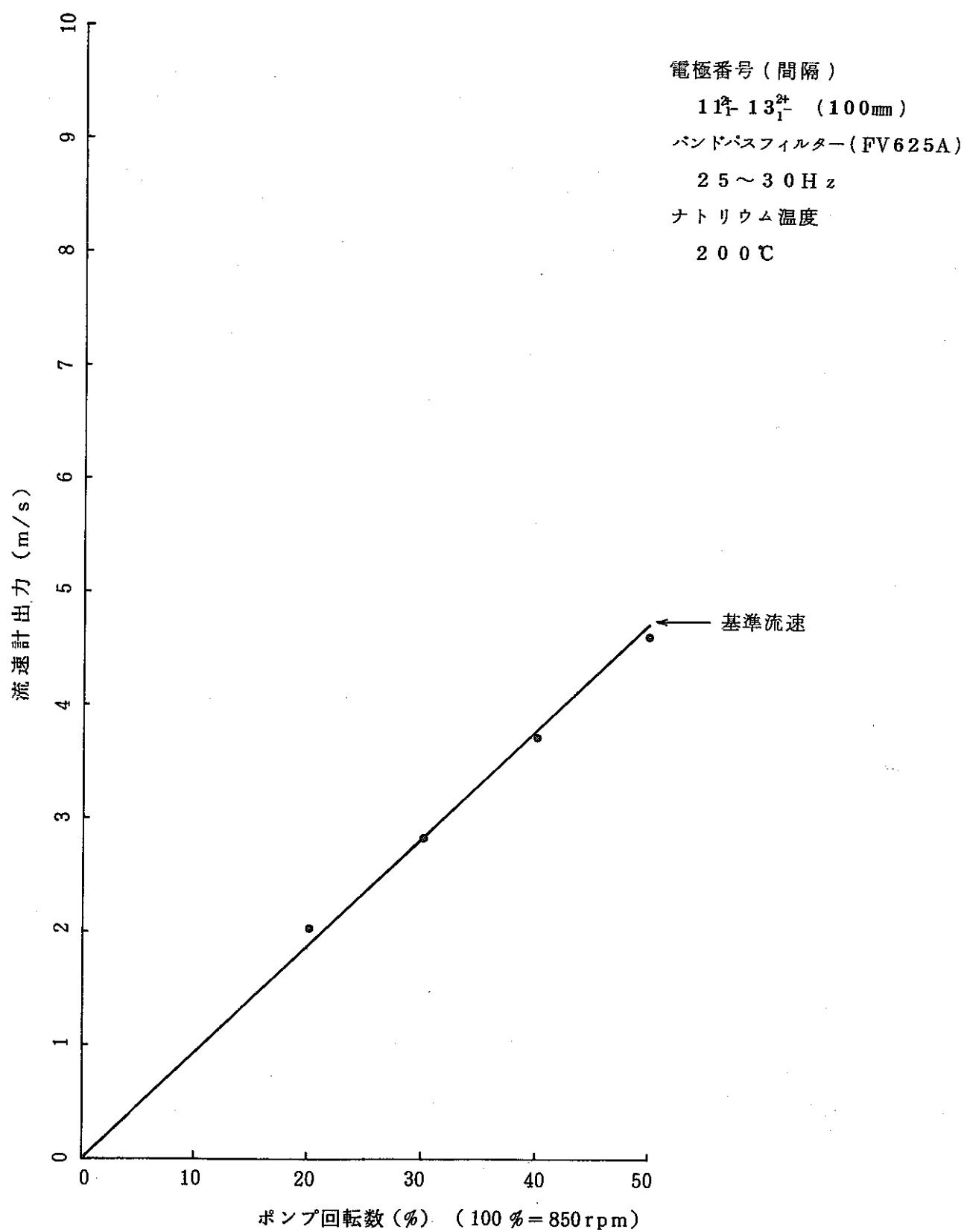


Fig. 31 相互相関法による流速測定(9)

Flow Measurement by Cross Correlation Method (9)

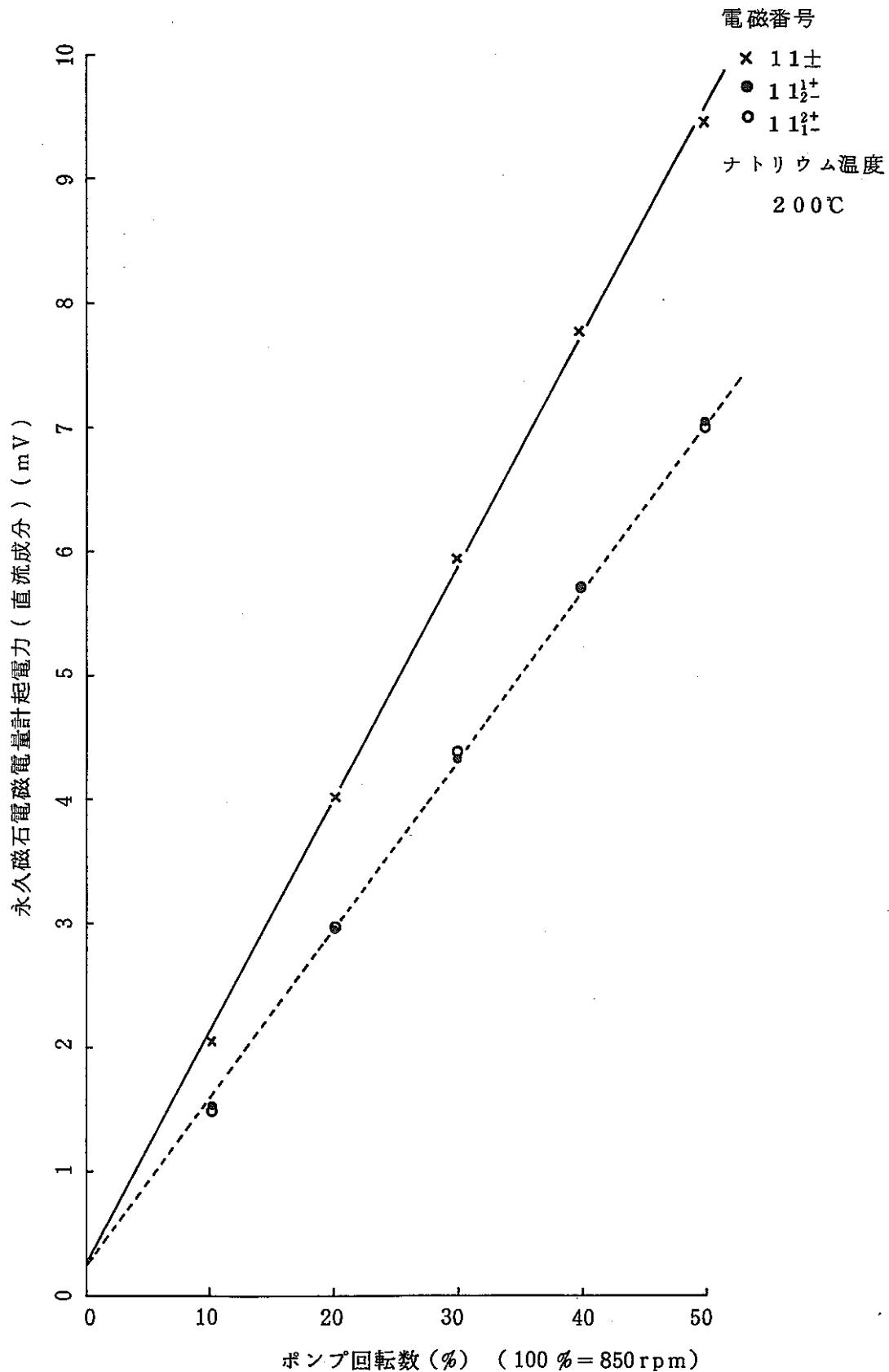


Fig. 32 電磁流量計起電力直流成分左右対称性(1)  
Symmetry of EMF DC Output (1)

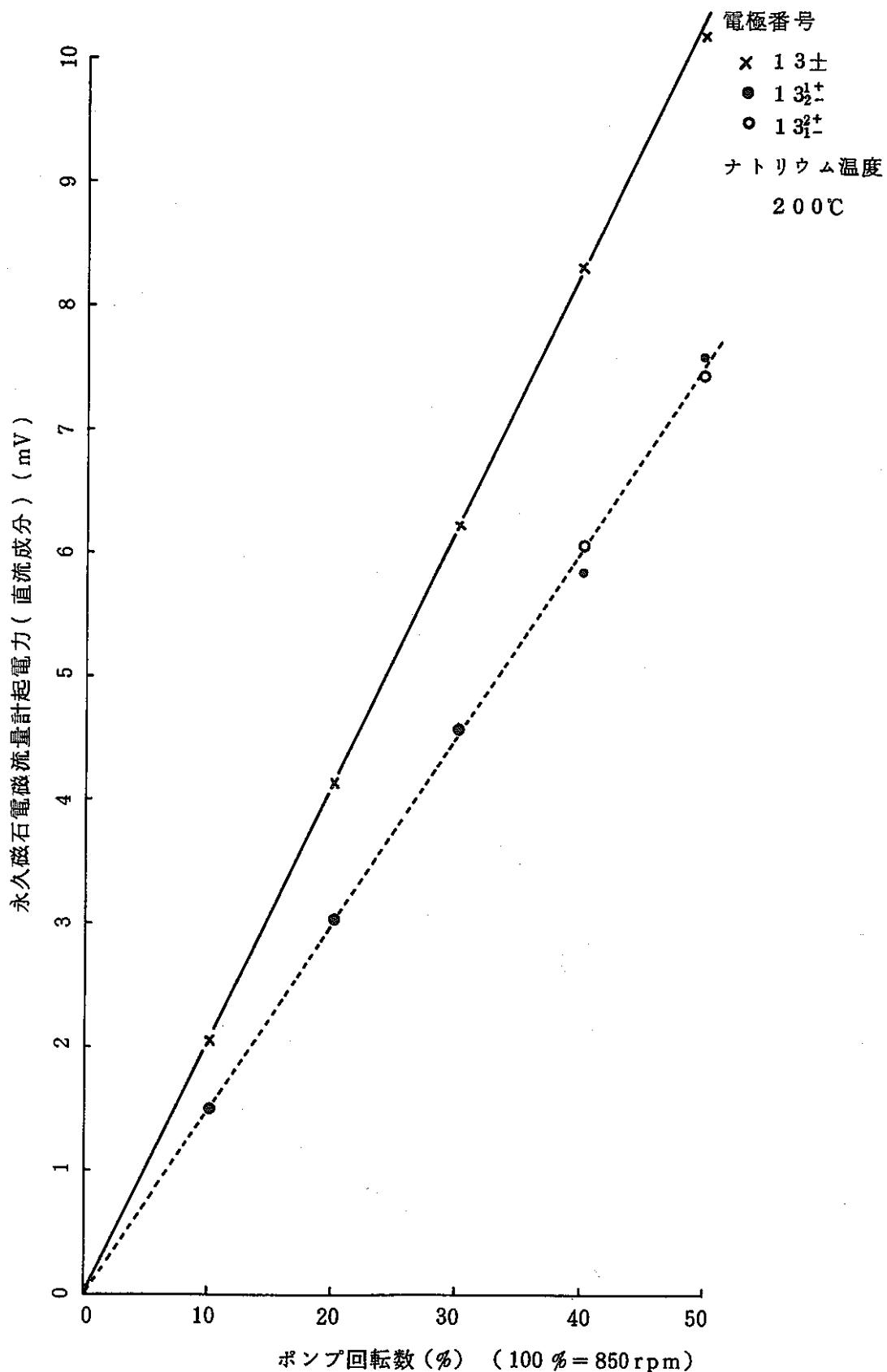


Fig. 33 電磁流量計起電力直流成分左右対称性(2)  
 Symmetry of EMF DC Output (2)

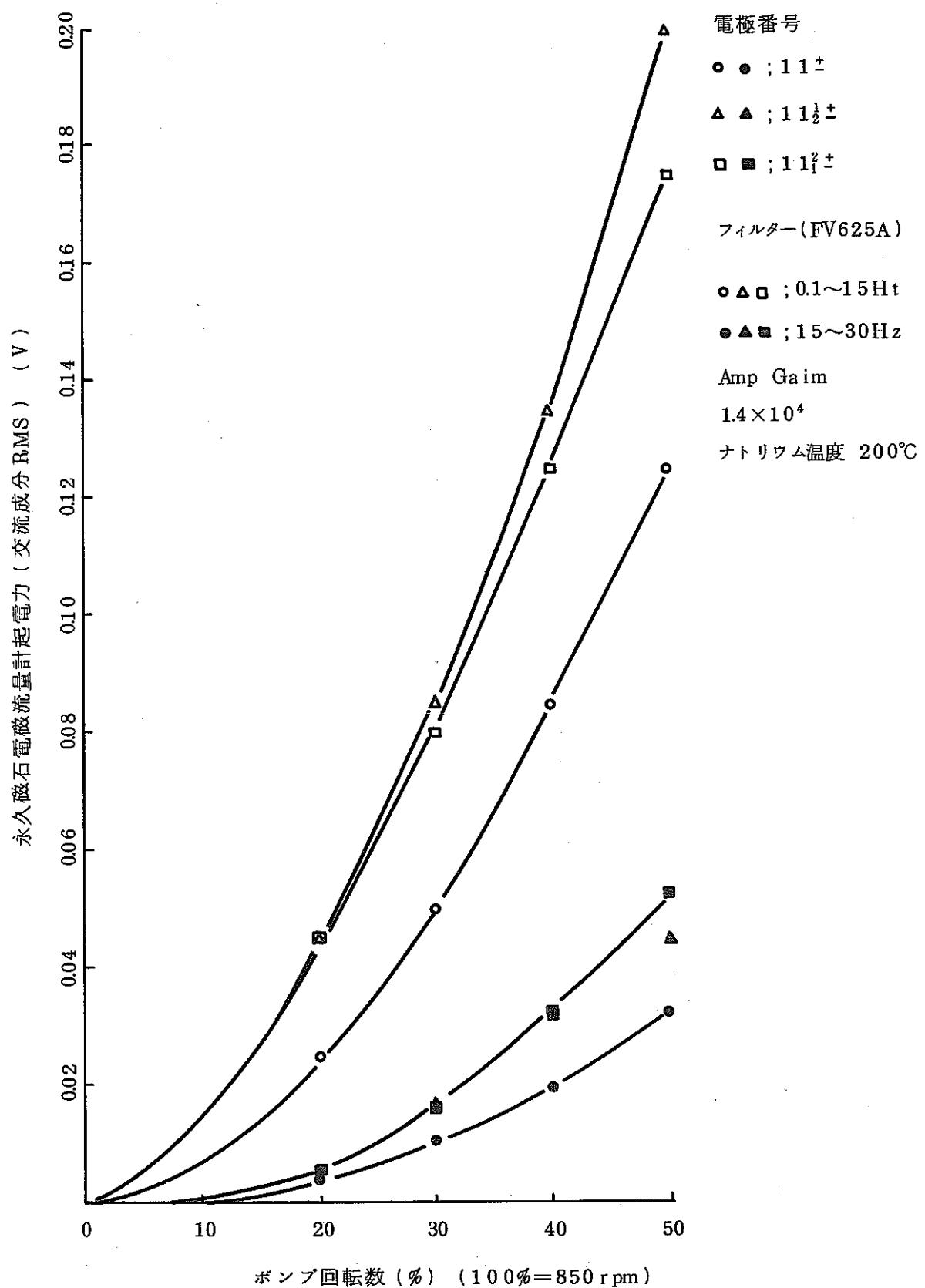


Fig.34 電磁流量計起電力交流成分左右対称性 (1)

Symmetry of EMF AC Output (1)

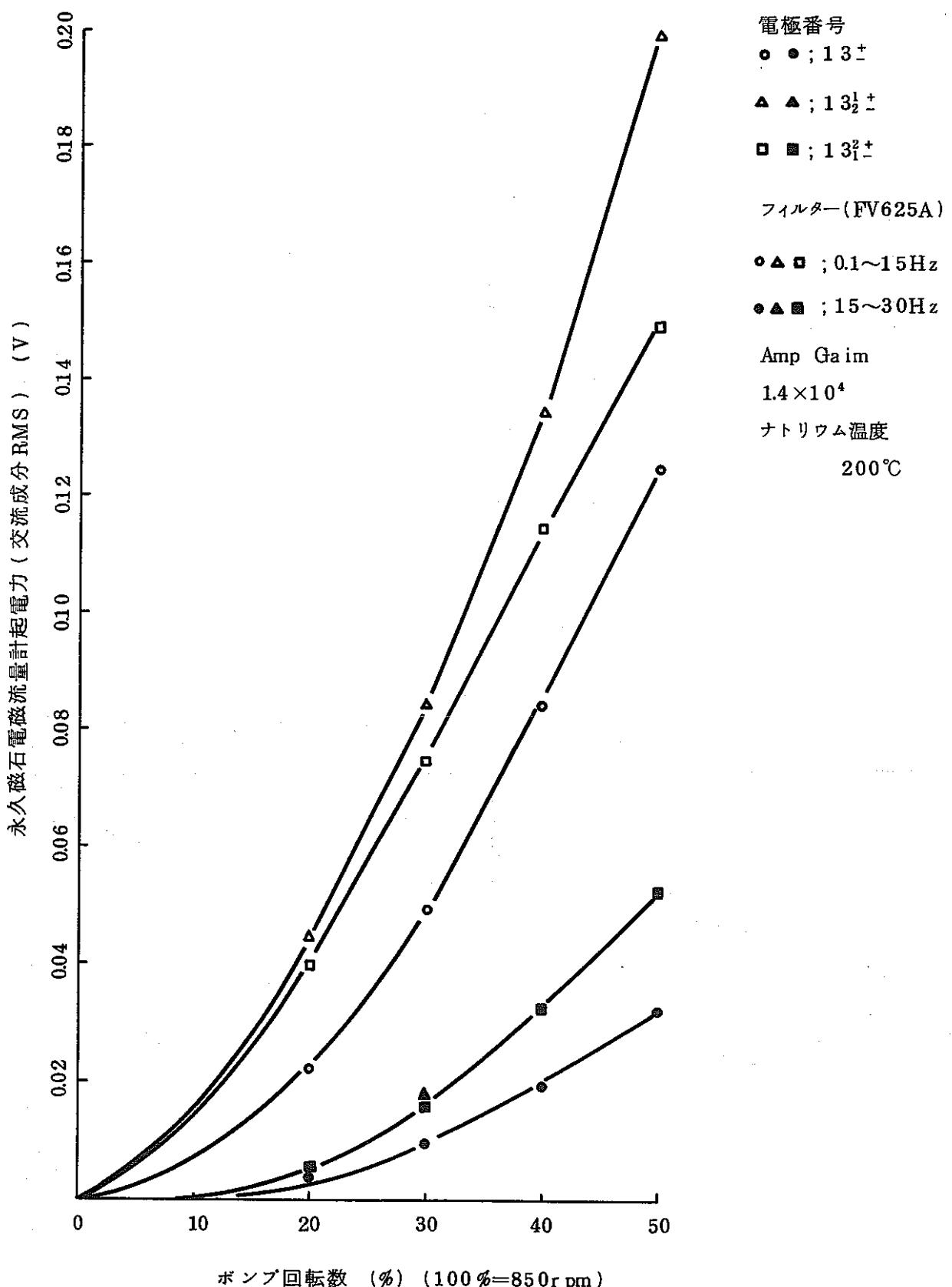
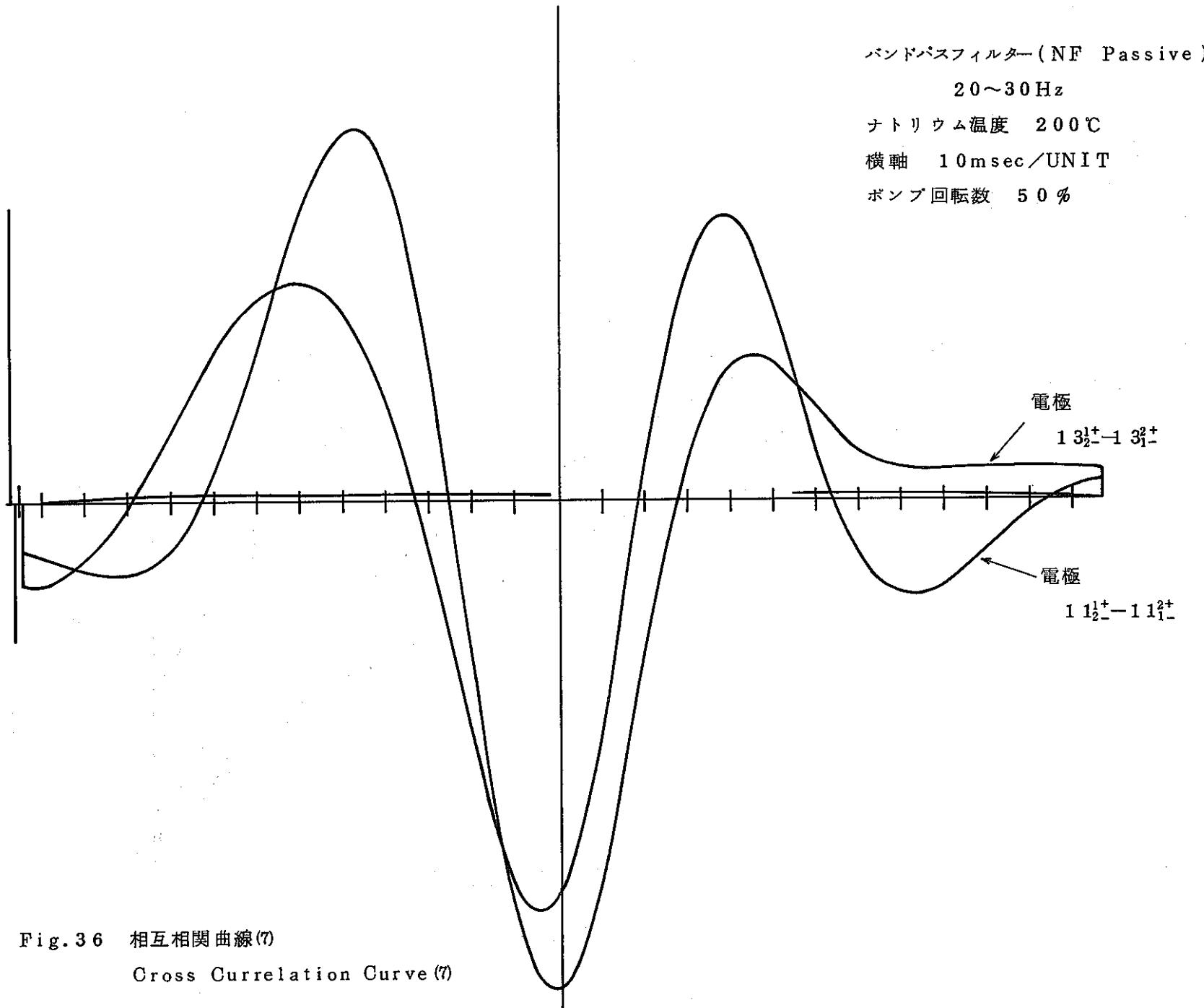


Fig.35 電磁流量計起動電力交流成分左右対称性 (2)

Symmetry of EMF AC Output (2)



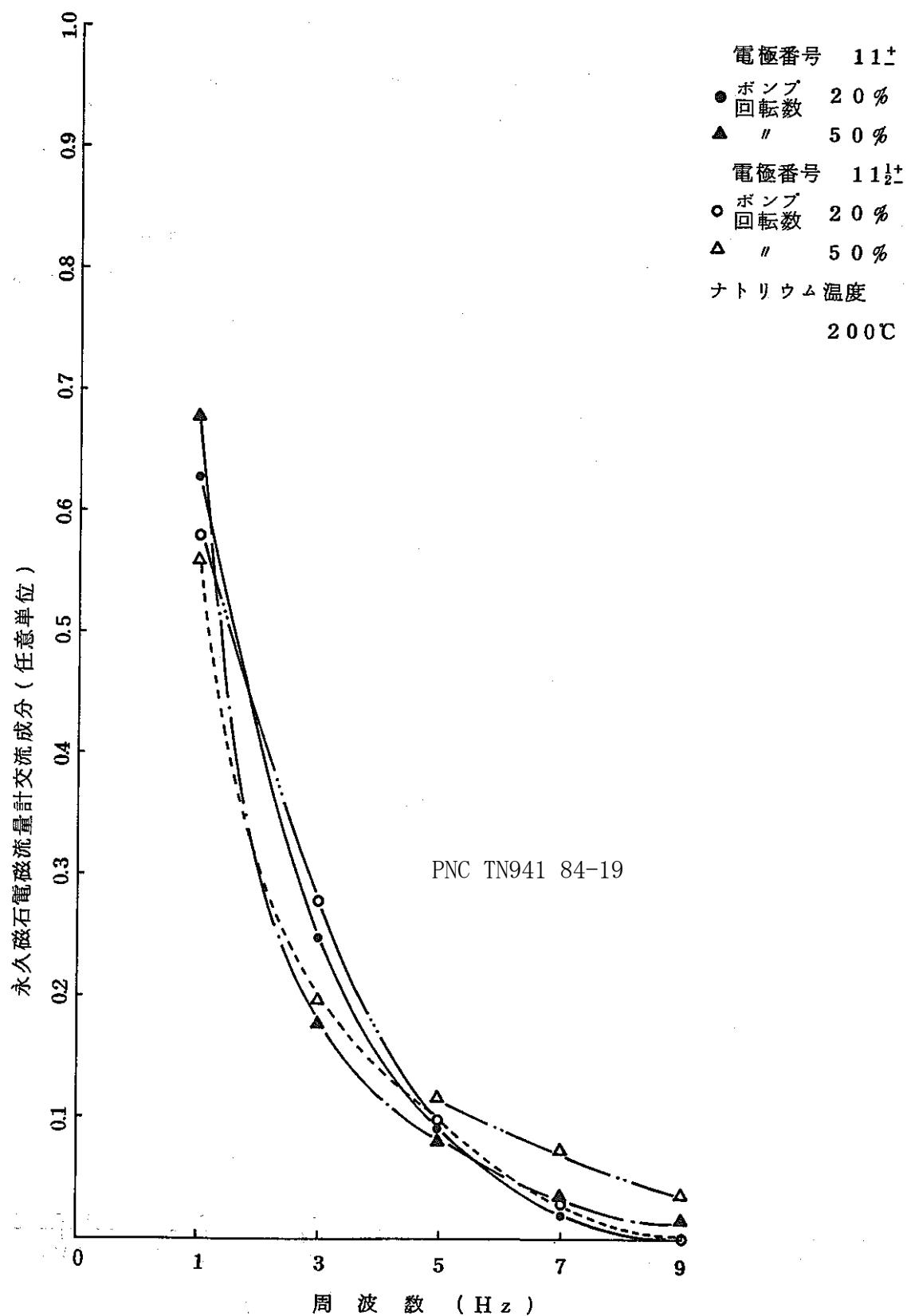


Fig. 37 電磁流量計起電力交流成分周波数スペクトル  
Frequency Spectrum of EMF AC Output

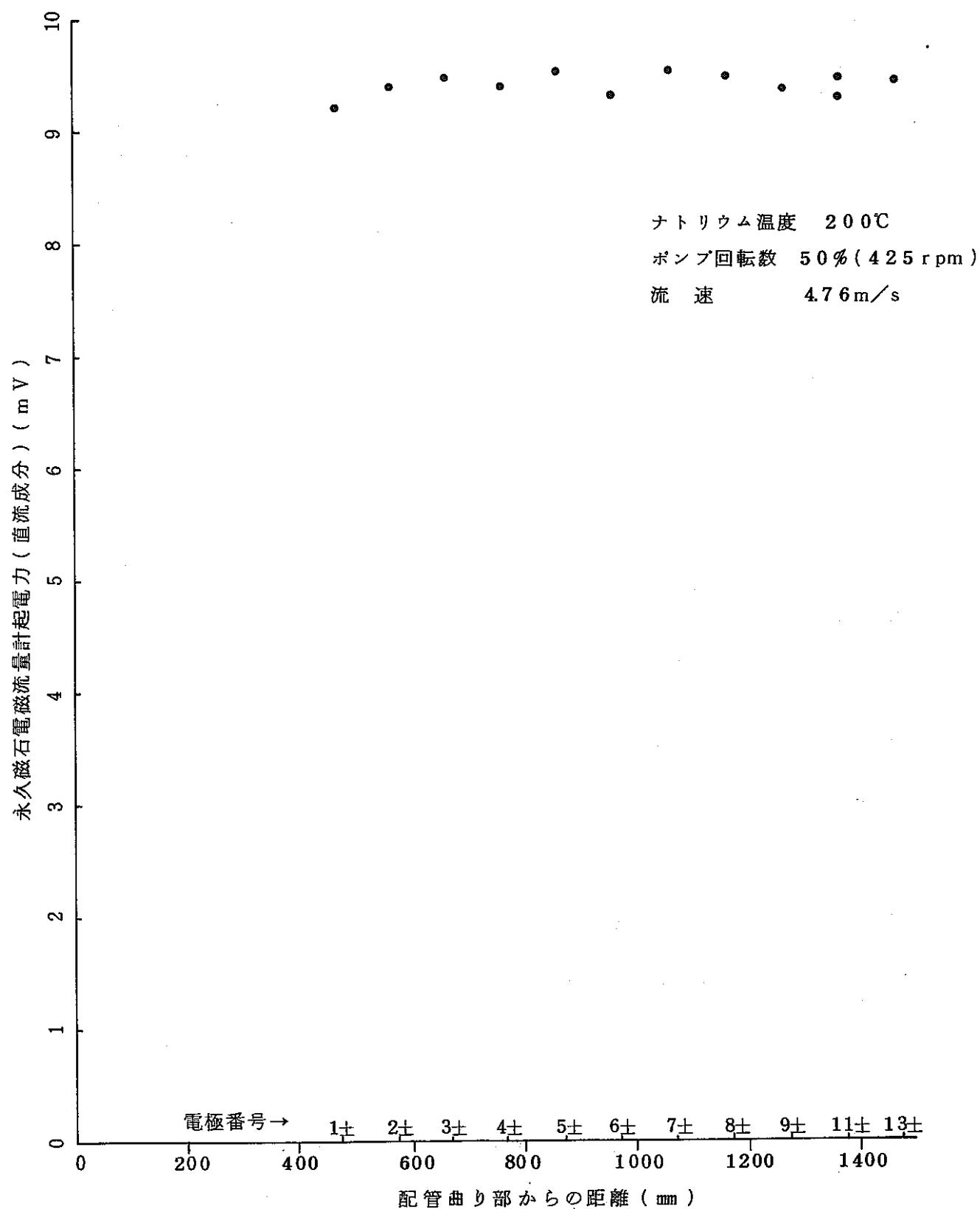


Fig. 38 電磁流量計起電力直流成分の上流直管長依存性(1)

Dependence of EMF DC Output on Upper  
Straight Pipe (1)

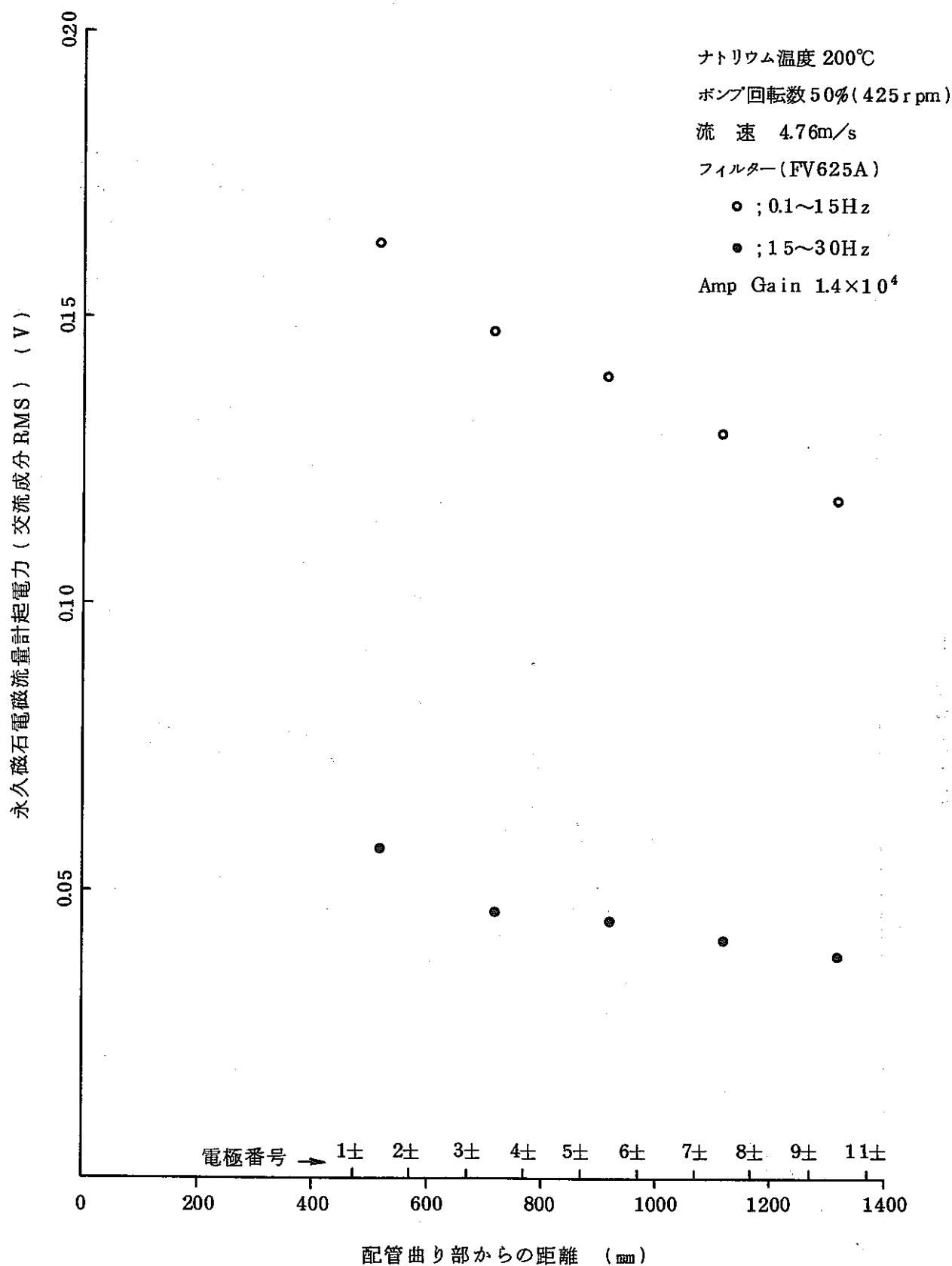


Fig. 39 電磁流量計起電力交流成分の上流直管長依存性 (1)

Dependence of EMF AC Output on Upper Straight Pipe (1)

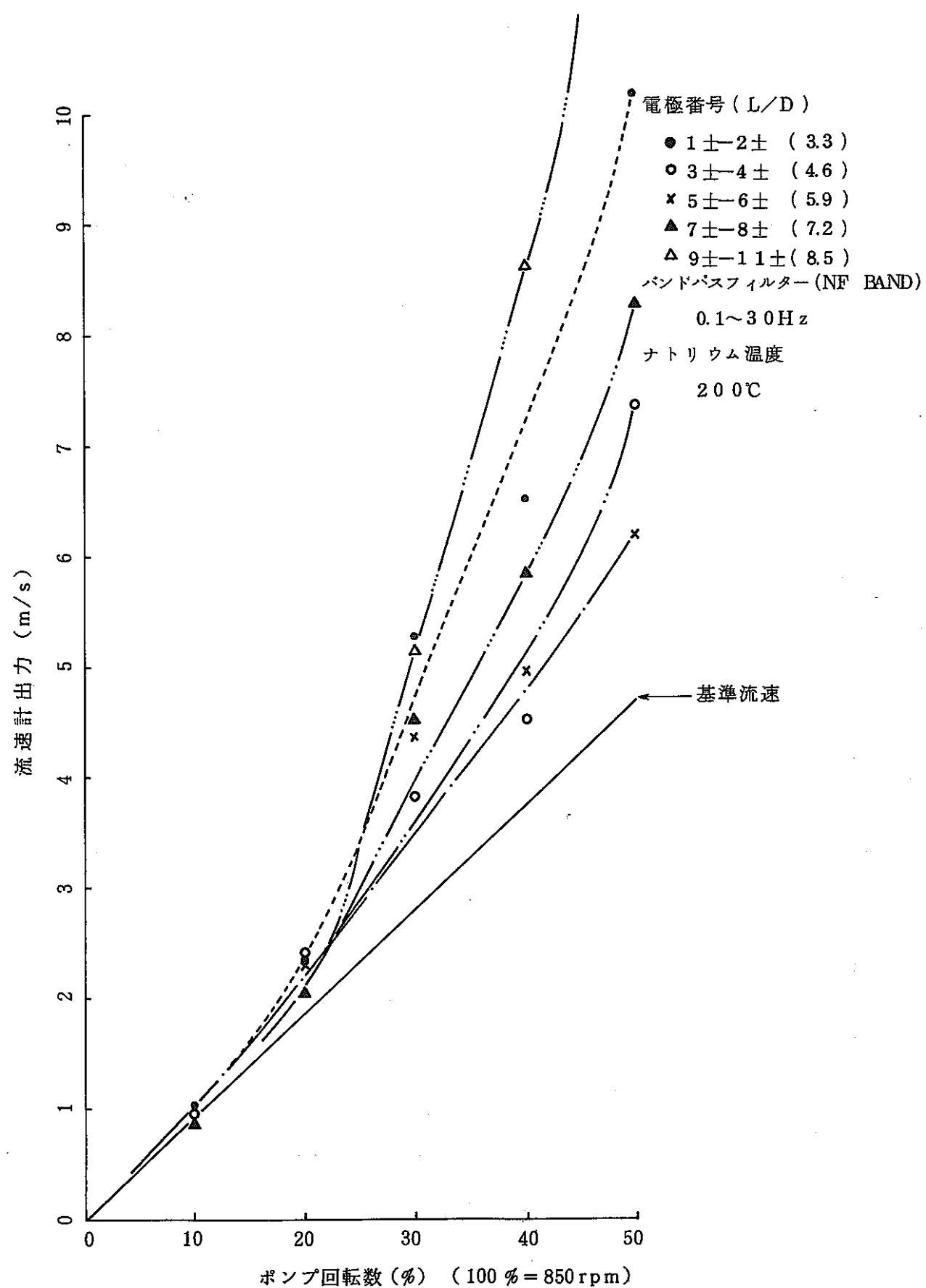


Fig. 40 相互相関法による流速測定⑩

Flow Measurement by Cross Correlation Method ⑩

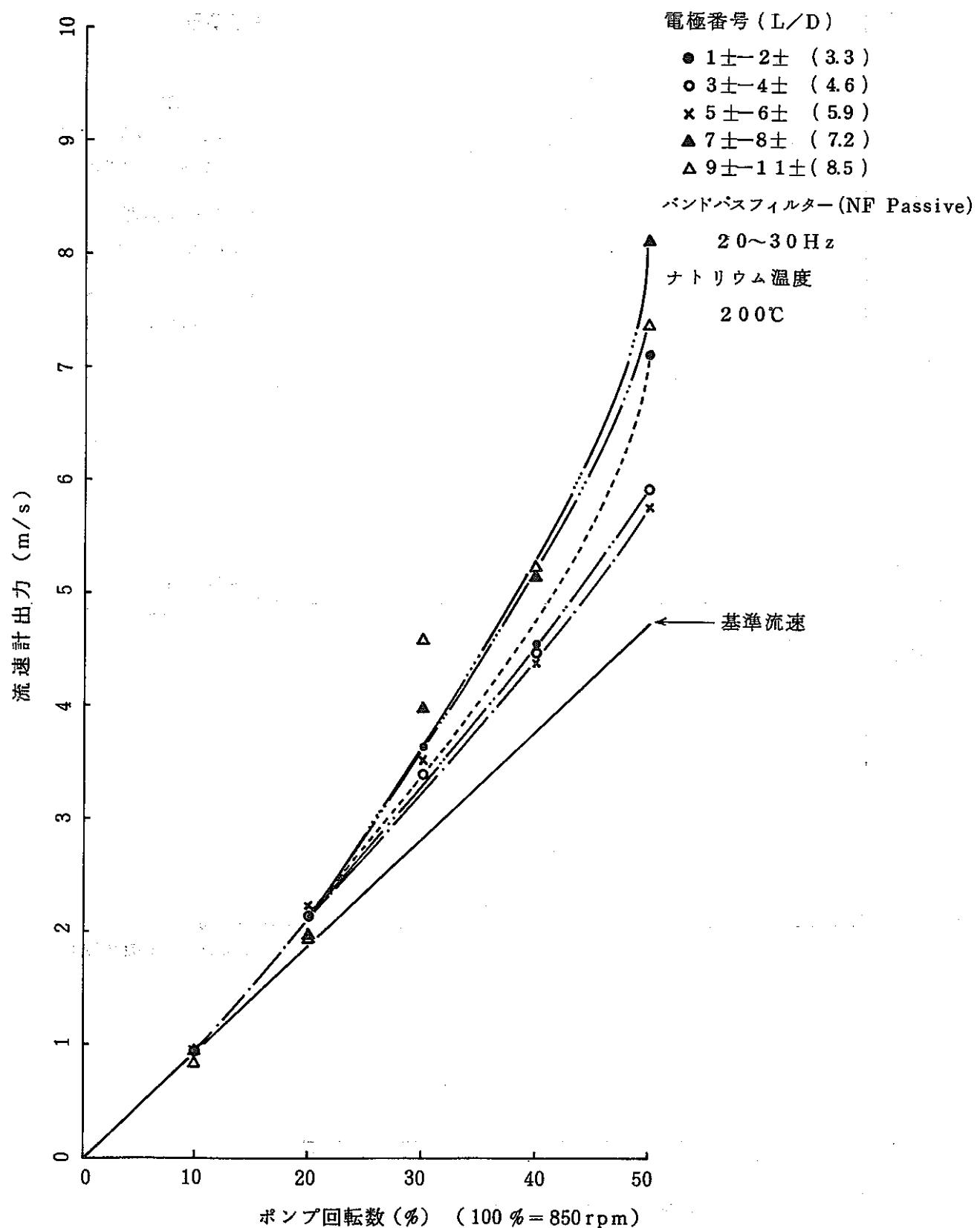


Fig. 41 相互相関法による流速測定①

Flow Measurement by Cross Correlation Method (I)

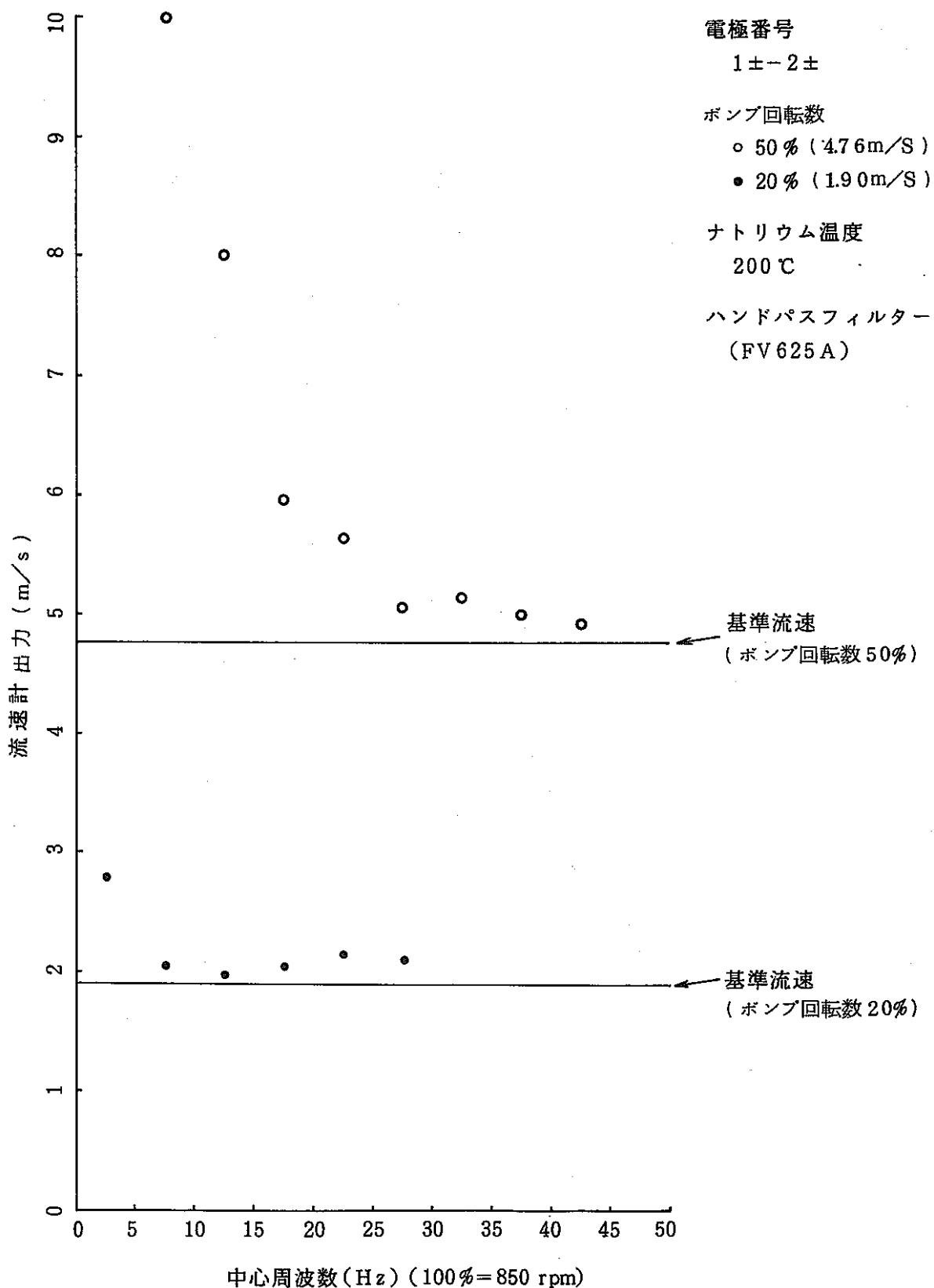


Fig. 42 流速計出力の周波数依存性(7)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (7)

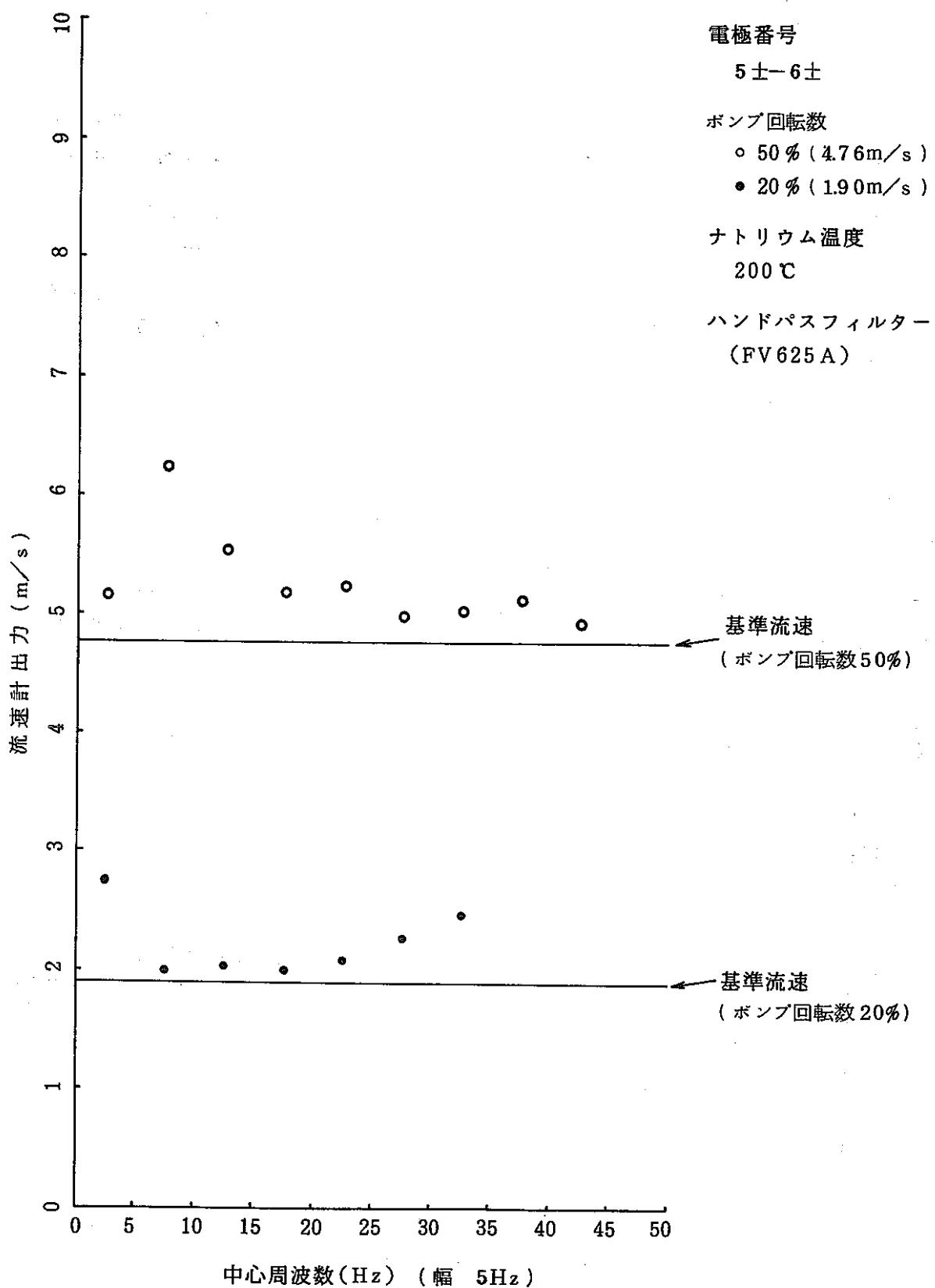


Fig. 43 流速計出力の周波数依存性(8)

Frequency Dependence of Flowneter Output (8)

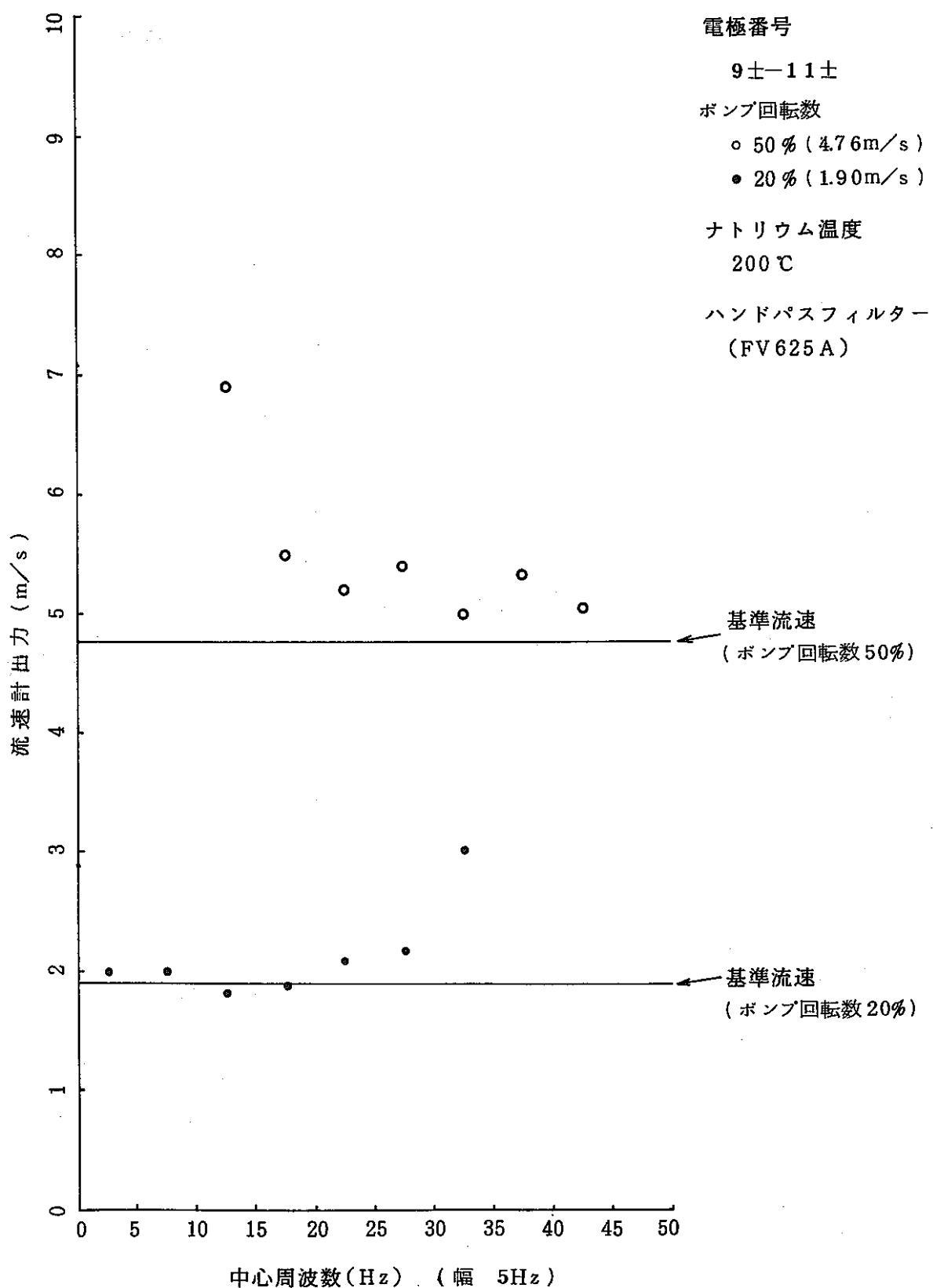


Fig. 44 流速計出力の周波数依存性(9)

Frequency Dependence of Flowmeter Output (9)

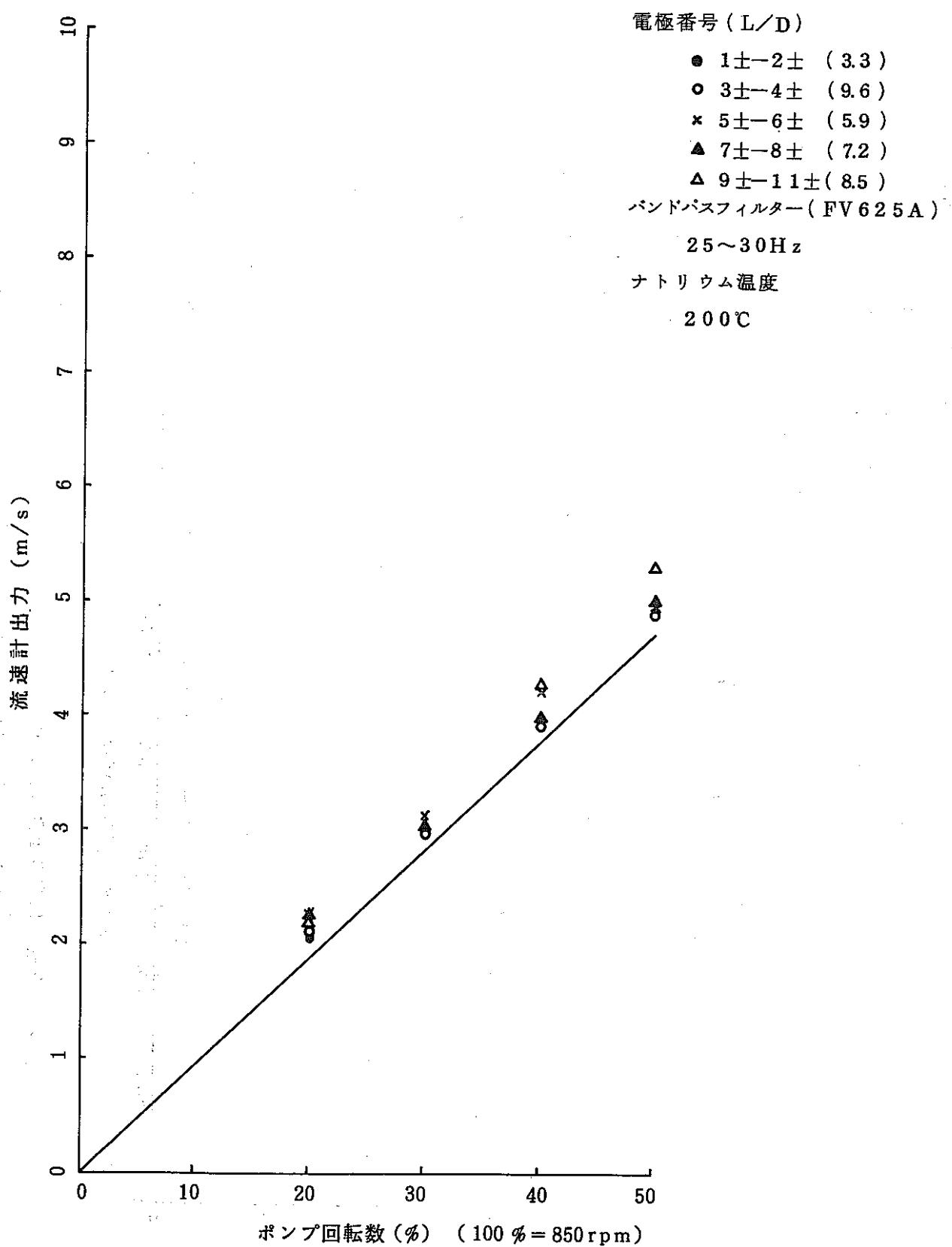


Fig. 4.5 相互相関法による流速測定⑩

Flow Measurement by Cross Correlation Method ⑩

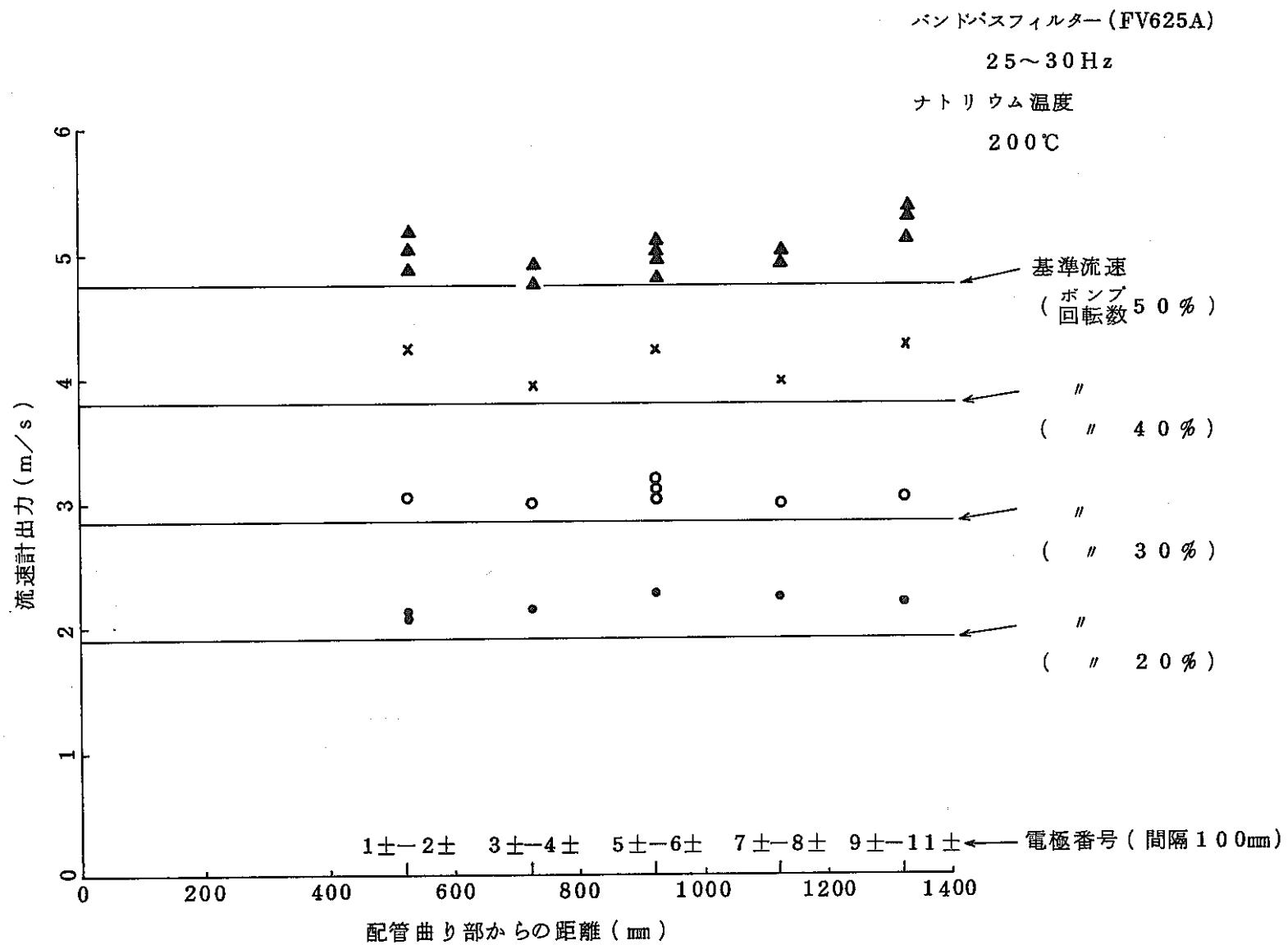


Fig. 46 流速計出力の上流直管長依存性

Dependence of Flowmeter Output on Upper Straight Pipe

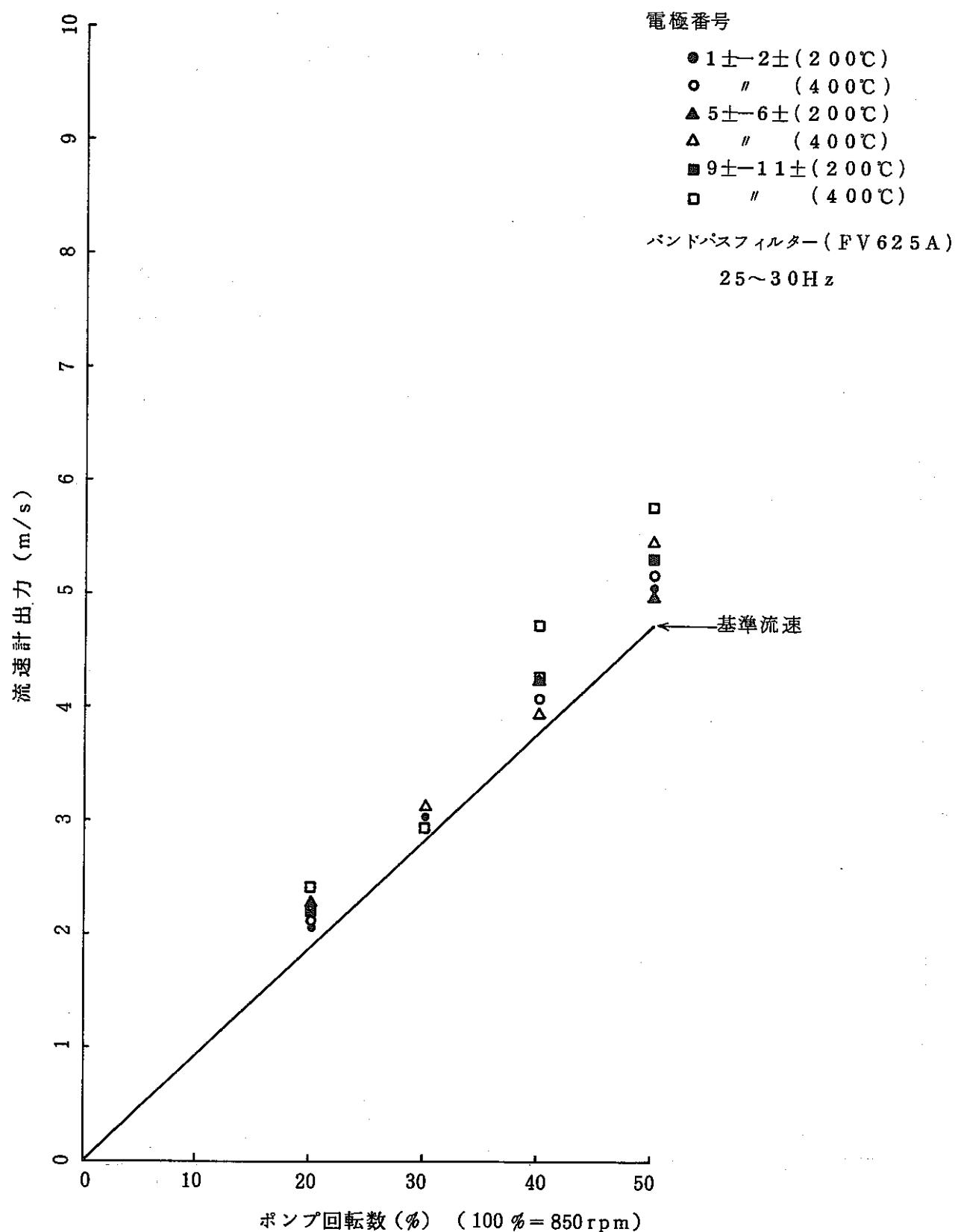


Fig. 4.7 相互相関法による流速測定②

Flow Measurement by Cross Correlation Method ②

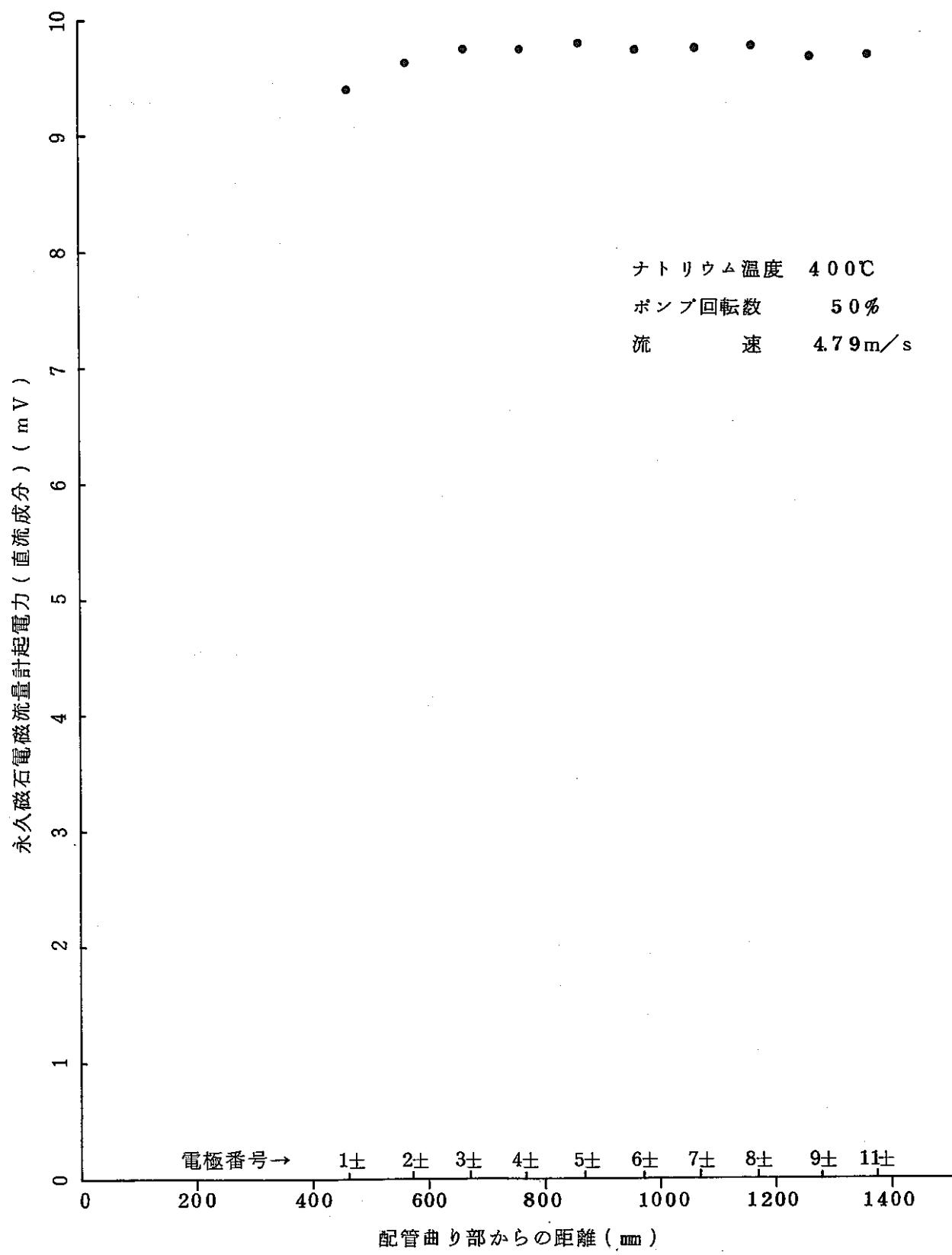


Fig. 48 電磁流量計起電力直流成分の上流直管長依存性 (2)

Dependence of EMF DC Output on Upper Straight Pipe (2)

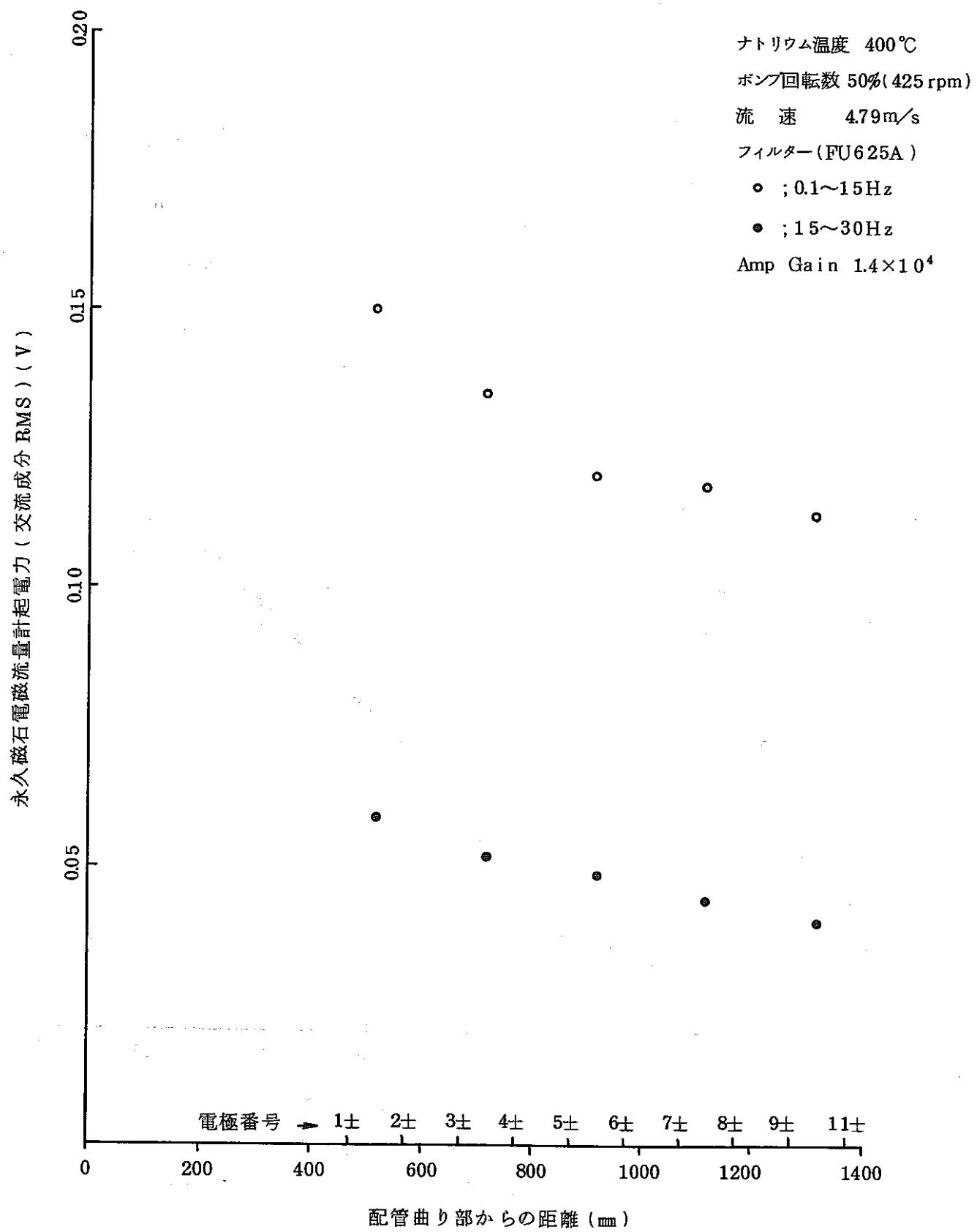


Fig. 49 電磁流量計起電力交流成分の上流直管長依存性 (2)

Dependence of EMF AC Output on Upper Straight Pipe (2)

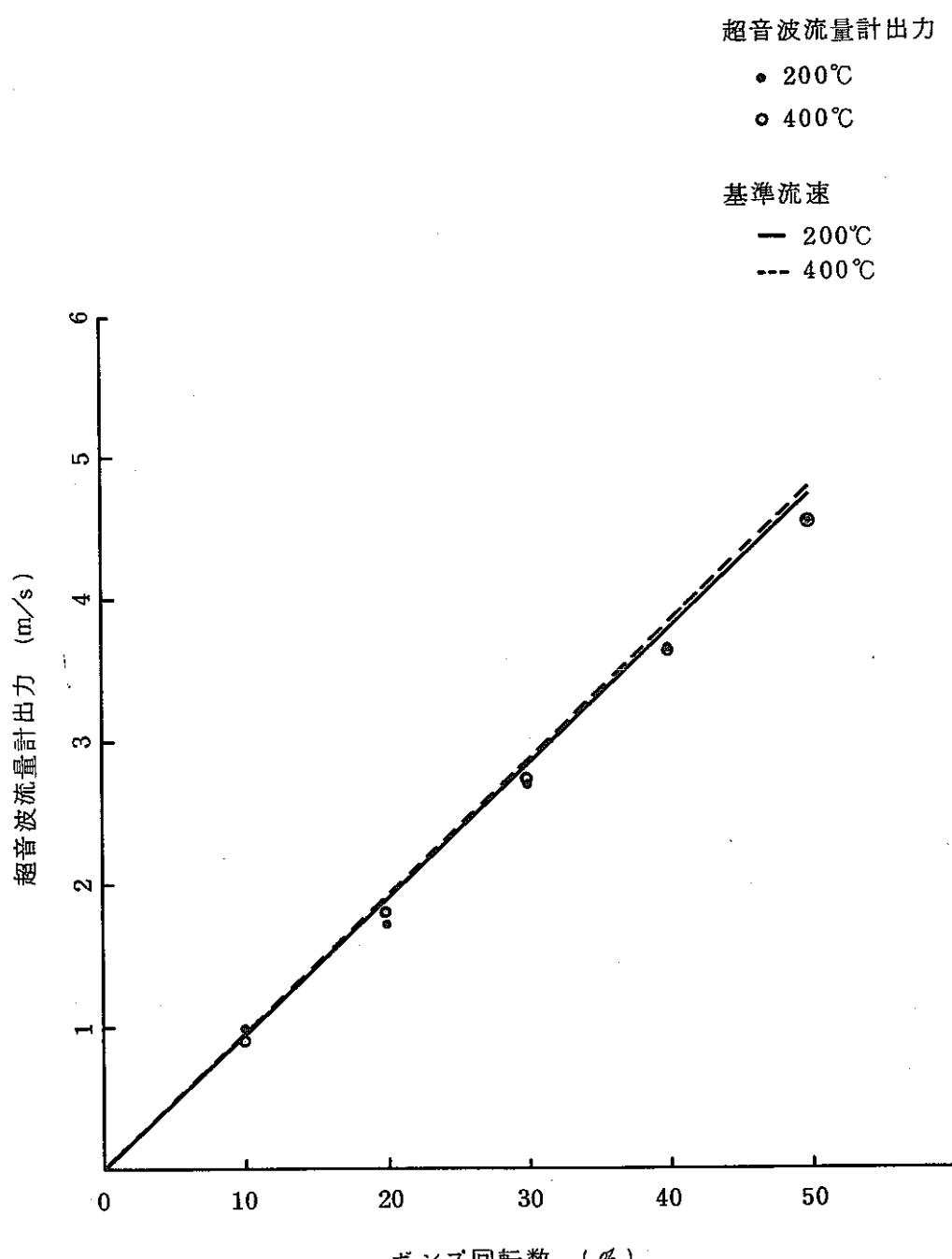


Fig. 50 12B 超音波流量計出力

12B Ultrasonic Flowmeter Output

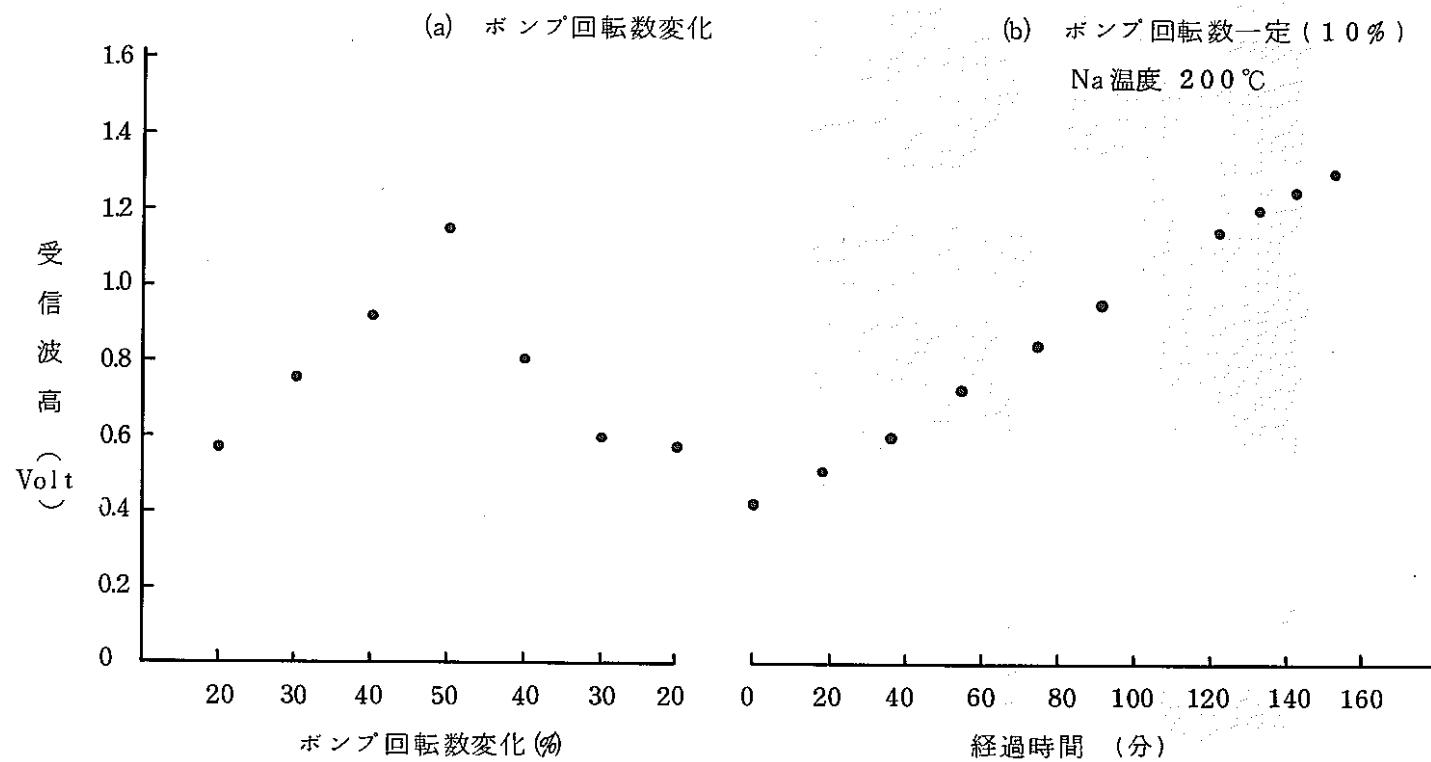


Fig. 51 超音波流量計受信波高のポンプ回転数・時間経過依存性

Pump Speed and Time Dependence of Ultrasonic Flowmeter Pulse Height

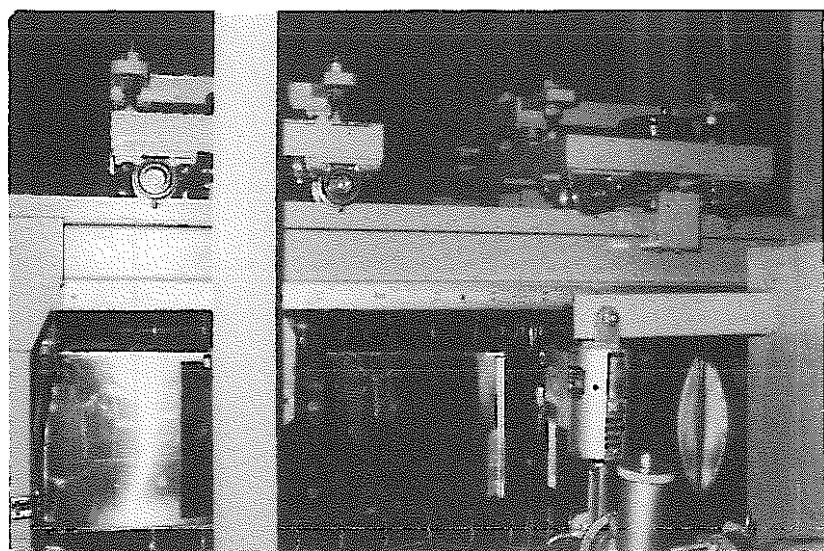


Photo 1. 電磁流量計外觀寫真

Outer View of Permanent Magnet Type EMF

計器記号	製品名	タイプ	メー カ
FILTER & DIF. AMP	DIFFERENTIAL AC AMPLIFIER	9454	ORTEC BROOKDEAL
P. FILTER	PASSIVE FILTER		NF CIRCUIT DESIGN BLOCK CO. LTD
DATA RECORDER	DATA RECORDER	R510	TEAC
FILTER	BAND PASS FILTER		NF CIRCUIT DESIGN BLOCK CO. LTD
SIGNL PROCESSOR	SIGNAL PROCESSOR	7T07	SANEI INSTRUMENT CO. LTD
X-Y RECORDER	X-Y RECORDER	WX 446	WATANABE
DC-AMP	DC AMPLIFIER	3131	YEW
MULTIMETER	DIGITAL MULTIMETER	6855	TAKEDA RIKEN
THERMOMETER	DIGITAL THERMOMETER	2575	YEW
GENERATOR	WIDE BAND FUNCTION GENERATOR	FG-141	NF CIRCUIT DESIGN BLOCK CO. LTD
COUNTER	UNIVERSAL COUNTER	5104G	TAKEDA RIKEN
FILTER	DUAL DECADE FILTER	FV-625A	NF CIRCUIT DESIGN CO. LTD
AMP	DIFFERENTIAL AMPL	AM502	TEKTRONIX

Table 1. 測定計器一覧表

List of Measurement Instruments