

流量相関法によるナトリウム流速測定(Ⅰ)

3 B 永久磁石式電磁流量計による基礎試験

1977年10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)

正義表

1977年10月

流量相関法によるナトリウム流速測定（I）

3 B永久磁石式電磁流量計による基礎試験

中本香一郎※、河野耕司※
大山信美※、中筋孝※

要旨

流量計の校正法の1つとして注目されている流動ノイズを利用した相関式流量計のナトリウム中予備試験を実施した。

本試験の目的は電磁流量計を用いて、流れに沿って配置した1対の電極に生じる“ゆらぎ”信号の相互相関を求ることにより、流れの移行速度を知る流量相関式流速計の基本原理の確認と、基本的性質の把握であった。試験に供した流量計は口径3Bの永久磁石式電磁流量計で、流れの方向に5対の電極が等間隔に取り付けられている。これらの電極を種々組合せて、上流側電極出力と下流側電極出力の相互相関をデジタル演算器で求め、2つの信号間の移行遅れ時間から2点間の移行流速を求めた。

主な試験条件は次の通りである。

ナトリウム温度T : ~500°C

ナトリウム平均流速v : 0~4 m/s

電極間隔L : 4, 8, 12 cm

試験の結果、次のことが明らかになった。

- (1) 電極間隔によらず基準流速に対するノイズ移行速度の直線性は良好であり、流量相関による流速測定の有効性が確認された。しかし、 $L=4\text{ cm}$ では $v \geq 3\text{ m/s}$ の時、非直線性が大きくなつた。
- (2) 移行速度と基準流速は $L=12\text{ cm}$ の時は基準流量計の精度内で良い一致を示したが、 $L=4\text{ cm}$, 8 cm では一致せず、電極位置も含めて今後の検討が必要である。
- (3) 流れの基本的特性を調べた結果、ゆらぎのパワースペクトルは数Hzまで存在し、流速の増加と

とともに上限周波数とスペクトル強度は大きくなつた。

- (4) 流速測定における非直線性と移行速度の絶対値は流れそのものと測定系の特性の両面から検討していく必要がある。

Oct., 1977

Transit Time Flowmeter Using Flow-Induced Noise in Sodium (I)

—Preliminary Test for 3B PM Flowmeter—

Koichiro NAKAMOTO*, Koji KAWANO*,
Nobumi OHYAMA* and Takashi NAKASUJI*

Abstract

A preliminary test was carried out in sodium, to confirm the principle of a transit time flowmeter employing cross-correlation technique of flow-induced noise.

The tested permanent magnetic flowmeter (81.1mm I.D) has five pairs of electrodes arranged at equal distances along the flow direction. The transit time between electrodes was measured under conditions, and was transformed into a transit velocity using distance between electrodes(L)/transit time (τ^*):

Sodium temperature	: ~500 °C
Average flow velocity	: 0~4 m/s
Distance between electrodes	: 4, 8, 12 cm .

Conclusions are as follows :

- (1) The characteristic of transit velocity vs reference velocity was linear up to 4m/s except $L=4\text{cm}$.
- (2) In case of $L=12\text{cm}$, the obtained transit velocity agreed with a reference velocity within the accuracy of a reference flowmeter, but there was disagreements in both velocities in other cases.
- (3) It was clarified that power spectrum of fluctuation signal of PM flowmeter has relatively low frequency range (<10Hz), and that the break frequency and spectral density become higher and greater respectively as increase of flow velocity.

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

- (4) The non-linearity of transit velocity when $L=4cm$ and $v>3m/s$, should be further investigated from both view points of flow characteristics itself and instrumentation technique.

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験方法	2
2.1 試験装置	2
2.2 測定装置	2
2.3 試験方法と試験条件	3
2.4 基礎事項	4
3. 試験結果	6
3.1 相互相関関数	6
3.2 流速測定	6
3.3 流動ゆらぎの特性	7
4. 検 討	8
4.1 流量相関による流速測定	8
4.2 流動ゆらぎの特性	8
4.3 流量相関法による流速測定上の問題点	9
5. 結 言	12
6. 謝 辞	13
7. 参考文献	14
付 錄	30

LIST OF FIGURES AND TABLES

- Fig. 1 Sodium Instrument Test Loop
Fig. 2 Schematic Diagram of Flow Circuit
Fig. 3 PM Flowneter, FM-4
Fig. 4 Block Diagram of Measuring System
Fig. 5(a) Relation between Transfer Function and Cross-Spectrum
Fig. 5(b) Noise Signals and Their Cross-Correlation Function
Fig. 6 Cross-Correlation Function
Fig. 7(a) Transit Velocity Calculated from Measured Transit Time ($\lambda_2 - \lambda_5$)
Fig. 7(b) " " " ($\lambda_2 - \lambda_4$)
Fig. 7(c) " " " ($\lambda_2 - \lambda_3$)
Fig. 7(d) " " " ($\lambda_4 - \lambda_5$)
Fig. 7(e) " " " ($\lambda_1 - \lambda_2$)
Fig. 8 Power Spectral Density of Flow Fluctuation
Fig. 9 Mean Square Value of Flow Fluctuation
Fig. 10 Peak Value of Cross-Correlation Function vs Transit Time
Fig. 11 Peak Value of Cross-Correlation Function vs Velocity
Fig. 12 Deviation of Measured Transit Velocity

Fig. A1 Characteristics of Filters

Table A1 Test Conditions
Table A2 Normalized Sensitivity of FM-4

1. 緒 言

流量計の現場校正は特に大型プラントで重要視され、その一手法として雑音解析法（相関法）が提案されている。

相関式流量計（Transit Time Flowmeter）は流体中に存在するノイズ（平均値まわりの時間変動、ゆらぎ）が流体とともに移行することに着目し、流れに沿った2点間をノイズが移行する時間を測定して流速を求める方法である。ノイズ源としては、濃度ゆらぎ、温度ゆらぎ、流動ゆらぎ（流速の変動）等が考えられるが、ここでは特にノイズ源を外部から与える必要がないこととゆらぎの大きさが十分大きいことから、流動ゆらぎを利用した流量相関式流量計について予備試験を実施した。

電磁流量計の出力に流体中の渦により生成されると考えられるノイズ信号が存在する。流れ方向に配置した1対の電極出力の相互相関関数から流速（流量）を算出し、流量計の現場校正に役立てるとの提案が米国でなされ⁽¹⁾、国内でも二瓶ら⁽²⁾によって12Bサドルコイル式電磁流量計でナトリウム中予備試験が行なわれている。ここでは流量相関式流量計の原理確認を追試し、また基礎的特性を把握して今後の方向を明らかにするために、3B永久磁石式電磁流量計を用いて各種測定を実施したものである。

なお本実験終了後、二瓶ら⁽³⁾によるポンプ試験装置での試験と、佐野ら⁽⁴⁾による実験炉「常陽」での試験が報告されたので、本報告をまとめるにあたって参考にしたことを付記する。

2. 試験方法

2.1 試験装置

本試験は大洗工学センター、ナトリウム技術開発室の計測機器試験ループで行われた。同ループのナトリウム系フローシートと系統概念図をそれぞれFig. 1, 2に示す。試験は永久磁石式電磁流量計FM-4で実施され、ナトリウム流量は主電磁ポンプEMP-1と流量調節弁V104で設定された（但し、弁開度は100%）。配管口径は3B（81.1 mm I.D.）で流量計ダクト部も同一口径である。直管条件はFig. 2に示すように上流側、下流側ともに約12D（Dは管内径）ある。またナトリウム温度は加熱器H-1により常時一定に保たれた。

流量計FM-4の構造はFig. 3に示す通りで、3組の永久磁石（住友特殊金属製、NKS-6）を並べ磁束と直角な位置に5対の電極が流れ方向に等間隔（40mm）に取り付けられている。電極は上流から下流に向って順に#1から#5まで番号がつけられているが、電極#2は流量計中心に位置する。この流量計自体の詳細な特性は参考文献(5)に示されている。流量相関はこれら電極の信号を用いて行なわれたが、基準となるナトリウム流量は中心電極#2の出力（直流分）から得た。通常の電磁流量計としての検出感度は別途校正済みであり、その精度は±2%である。

2.2 測定装置

Fig. 4に流量相関式流量計の測定系ブロック図を示す。上流側電極出力はチャネルAに、下流側電極出力はチャネルBにそれぞれ接続される。チャネルA, Bは全く同じ構成、同じ特性を有する。

電極からの流量信号の内、交流成分のみがフィルタにより選択され、増幅器により約50,000倍に増幅され、最終的にシグナル・プロセッサで雑音解析がデジタル演算される。

さてフィルタの内、初段のBPFはバンドパスフィルタ（カット・オフ周波数は低域0.3 Hz、高域30 Hz）であり、直流分の除去と商用周波数（50 Hz）ノイズの除去を行なうためのものである。特にフィルタ・ノイズによって後続の増幅器が飽和しないようにパッシブ型を採用した。LPF, HPFはそれぞれロー・パス・フィルタ、ハイ・パス・フィルタであり、カット・オフ周波数はそれぞれ30 Hzと0.1 Hzにセットした。^(注) いずれもアクティブ型で減衰特性-48 dB/octを有する。なおHPFは当初の測定においては使用されなかつたが、シグナルプロセッサへの増幅器オフセットの影響をさけるためにRun 21以降で使用することにした。

増幅器は初段のみではゲイン不足であったことと、商用周波数を効果的に除去するために2段

(注) フィルタはチャネルA, Bでその特性がそろっていることが必要である。またカット・オフの選定は、時間応答性から低域の値を、また商用周波数除去から高域の値を決めた。さらにカット・オフの値が相関関数に与える影響⁽⁴⁾⁽⁶⁾も重要である。

直列に接続し、間にロー・パス・フィルタを入れた。直流増幅器を使用したが、低域が 0.1 Hz 程度まで伸びているなら交流増幅器でも良い。

Fig. 4 のシグナル・プロセッサ (7 T 0 7) は 10 KW のメモリを有するデジタル処理回路である。処理プログラムをカセット・テープで供給できるので、カセット・テープを交換すれば相関関数やパワースペクトルの他、伝達関数、平均化演算等種々の解析が行なえる特色を有する。分析点数は相関関数の時 ± 128 ライン、パワースペクトルの時 128 ラインである。入力モードは A C と D C の 2 種あるが、D C モードを使用した。

2.3 試験方法と試験条件

試験は一定ナトリウム温度条件の下で、基準流量計出力 (FM-4 #2 電極の直流成分) をモニタしながらナトリウム流量を 0, 250, 500, 750, 1000, 1200 ℓ/min と変えて、その時の 1 組の電極信号間の相関を Fig. 4 に示した測定回路で測定し、解析結果を X-Y レコーダーに出力させた。シグナル・プロセッサは前述したようにかなりの演算が可能であるが、本実験実施時は相関関数演算プログラムとパワースペクトル演算プログラムしかプログラムが用意されていなかった。

主な試験条件は次の通りである。

ナトリウム温度	約 500 °C
ナトリウム流量	0 ~ 約 1200 ℓ/min
ナトリウム平均流速	0 ~ 約 4 m/s

また試験項目は以下の通り。

相互相関関数測定 (移行時間を測定し、流速を求める)

電極 #2 - #5 ,	電極間距離 L = 12 cm
" #2 - #4	" L = 8 cm
" #2 - #3	" L = 4 cm
" #1 - #2	" L = 4 cm
" #4 - #5	" L = 4 cm

自己相関関数測定 (流量ゆらぎの大きさを求める)

電極 #2

自己パワースペクトル測定 (流量ゆらぎの周波数特性を求める)

電極 #2

試験条件をまとめて付録 Table A1 に示す。

2つの信号 $x(t)$, $y(t)$ の自己相関関数を次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} R_x(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \\ R_y(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)y(t+\tau) dt \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで

t : 時刻

T : 観測時間

τ : 遅れ時間

$x(t)$ と $y(t)$ の相互相関関数は次の通り。

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (2)$$

$x(t)$, $y(t)$ のパワースペクトルをそれぞれ $G_x(\omega)$, $G_y(\omega)$ とし, $x(t)$ と $y(t)$ の相互スペクトルを $G_{xy}(\omega)$ とすると, Wiener-Khintchine の定理から

$$\left. \begin{aligned} R_x(\tau) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_x(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \\ R_y(\tau) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_y(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \\ R_{xy}(\tau) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{xy}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで, ω : 角周波数

が得られる。

ノイズ信号 $x(t)$ が白色雑音の場合,

$$G_x(\omega) = a \quad (\omega \geq 0) \quad (4)$$

とおけるから, (3)式を用いて

$$R_x(\tau) = a \delta(\tau) \quad (5)$$

となる。

さて, Fig. 5(a)の如き系において, 入力のパワースペクトル $G_x(\omega)$ と, 入出力間の相互スペクトル $G_{xy}(\omega)$ の間には, 系の周波数伝達関数 $H(\omega)$ を用

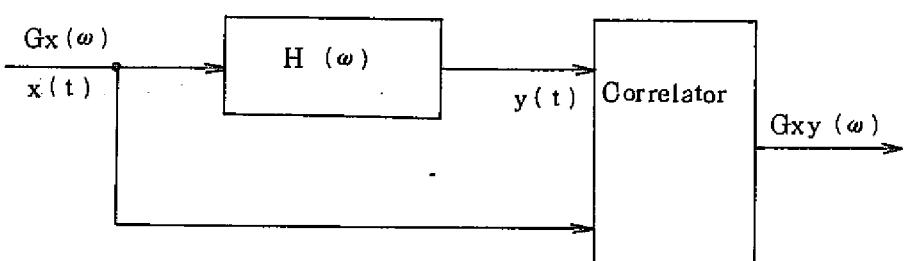


Fig. 5 (a) Relation between Transfer Function and Cross-Spectrum

いると次の関係がある。

$$G_{xy}(\omega) = H(\omega) \cdot G_x(\omega) \quad (6)$$

簡単のため、入力を再び白色雑音とすると、

$$G_{xy}(\omega) = a \cdot H(\omega) \quad (7)$$

となる。

系として、ノイズが流れに乗ってそのまま移行するという系を考え、途中での減衰等を無視すると、伝達関数 $H(\omega)$ はむだ時間要素

$$H(\omega) = e^{-j\omega\tau^*} \quad (8)$$

で表わすことができる。(3), (6), (8)式から相互相関関数 $R_{xy}(\tau)$ は

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) G_x(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_x(\omega) e^{j\omega(\tau - \tau^*)} d\omega \\ &= R_x(\tau - \tau^*) \end{aligned} \quad (9)$$

となり、相互相関関数 $R_{xy}(\tau)$ は、入力（上流側信号）の自己相関関数 $R_x(\tau)$ を、移行時間 τ^* だけずらした関数であることがわかる。

実際には上流側から下流側にノイズが移行する間に、拡散等によりスペクトルが変化し、伝達関数は $H'(\omega) \times e^{-j\omega\tau^*}$ ($H'(\omega)$ は伝達中の変化を表わす) となる。したがって、 $R_{xy}(\tau)$ の波形は一般に $R_x(\tau)$ の波形よりなる。しかし、分解能はともかくとして、自己相関関数が $\tau = 0$ で最大値を有する偶関数であり、Fig. 5(b) のように2点の信号の相互相関関数は2点間の移行時間の分だけ自己相関関数をずらしたパターンを有する。したがって、逆に相互相関関数のピーク値から移行時間 τ^* を得ることができる。ノイズの移行速度 V は

$$V = L/\tau^* \quad (10)$$

より求められる。

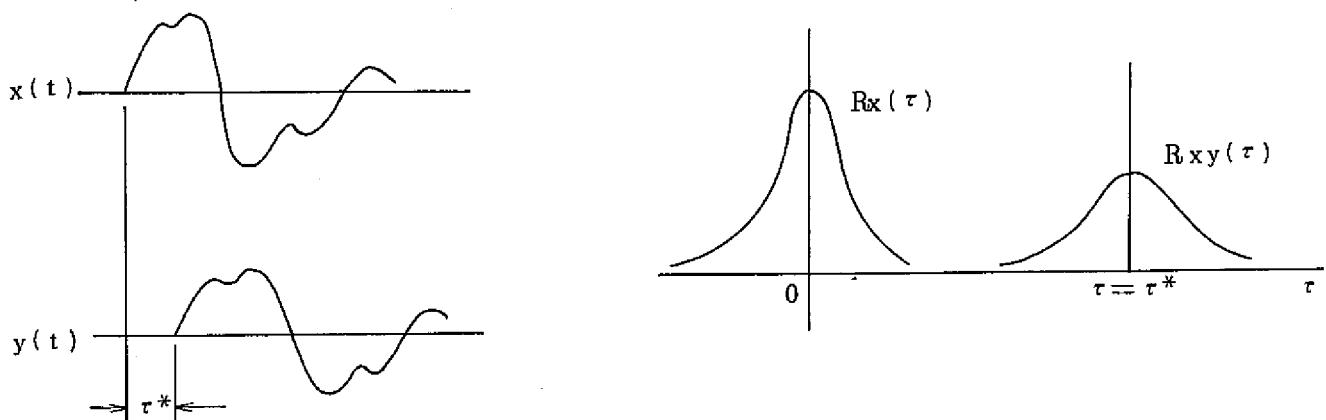


Fig. 5(b) Noise Signals and Their Cross-Correlation Function

3. 試験結果

3.1 相互相関関数

Fig. 6(a)(b)(c) に同一条件 (Run 71~85, 但し Run 83 のみ $\Delta\tau = 2 \text{ ms}$) で測定した相互相関関数 $R_{xy}(\tau)$ を、流路断面で平均流速 v をパラメータとして示す。

Fig. 6(a) は電極 #2 - #5 の組合せで、電極間距離 L は 12 cm である。2.4 節で説明したように、相互相関関数のピーク値から流量ゆらぎの移行時間 τ^* が求まり、(10) 式を用いて移行速度 V が得られる。

図から流速が遅くなるに従って τ^* が大きくなり、また相互相関関数のピーク値は小さくなることがわかる。

Fig. 5(b) は電極 #2 - #4 ($L = 8 \text{ cm}$) の場合、Fig. 6(c) は電極 #2 - #3 ($L = 4 \text{ cm}$) の場合であるが、傾向は Fig. 6(a) と同様である。しかしながら電極間隔が順に短くなっているので、みかけ上ピーク値の減衰は早くなっている。

なお Fig. 6(a)(b)(c) において注意すべきことは、流量計の磁束密度の大きさが電極位置によって異なるために、出力感度も電極位置により付録 Table A 2 のように値が違っていることである。

また相互相関関数のピーク値から移行時間 τ^* を求める際精度を上げるため Fig. 6(d) のようにシグナル・プロセッサの Y 軸（縦軸）レンジを変え、拡大した。

3.2 流速測定

上流側流量信号と下流側流量信号の相互相関関数のピーク値から求めた移行時間 τ^* は移行速度 V に反比例する。Fig. 7(a) に電極 #2 - #5 ($L = 12 \text{ cm}$) の場合の移行速度 V と平均ナトリウム流速 v の関係を示す。図中で○印は、Run 71~85 のデータで同一測定条件を表わしている（但し前述したように Run 83 のデータのみサンプリング時間 $\Delta\tau$ が少し異なる）。●印はそれ以外のデータである。○印と●印とでは特に差異が認められず、本測定範囲では増幅器ゲインやサンプリング時間および測定時間には依らないことがわかる。

また同図から測定された移行流速はナトリウムの平均流速によく対応しており、最小自乗計算結果から直線性も良好である。なお図中の破線は $V = v$ 即ち移行速度がナトリウム平均流速に一致した時とるべき値を示している。

Fig. 7(b) は電極 #2 - #4 ($L = 8 \text{ cm}$) の時のデータである。この場合も直線性は良好であるが、勾配は 1 より小さくなっている。

Fig. 7(c)(d)(e) は $L = 4 \text{ cm}$ の時のデータで、それぞれ電極 #2 - #3, #4 - #5, #1 - #2 に対応する。データ数の少ない Fig. 7(d)(e) は別としても、Fig. 7(c) に示すように電極間距離 L が短くなると、特に高流速域で直線から大きくはずれ、またパラツキも大きくなっている。従つ

て直線あてはめは 3 m/s 以下のデータに対してのみ行なった。 $v < 3 \text{ m/s}$ の範囲では一応直線性は保たれているものの勾配は 1 より少し大きい。

3.3 流動ゆらぎの特性

電極 #2 における流動ゆらぎのパワースペクトル密度をナトリウム流速をパラメータとして表わしたのが Fig.8 である。Run 56~58 は増幅器ゲイン 5×10^4 倍、Run 59, 60 はゲイン 10^5 倍である他は測定条件は同じである。Fig.8 の縦軸は相対値が規格化されている。なおサンプリング時間はスペクトル分析上限周波数がサンプリング定理より

$$f_{\max} = \frac{1}{2 \Delta \tau} \quad (11)$$

で与えられることと、シグナル・プロセッサの分解能が 128 ラインであることから決めた。このとき周波数分解能 Δf は

$$\Delta f = f_{\max}/128 \quad (12)$$

となる。以上から $\Delta \tau = 20 \text{ ms}$ に選んだ。このとき f_{\max} は 25 Hz 、周波数分解能 Δf は約 0.2 Hz となり、測定系のフィルタ特性 ($0.1 \sim 1.5 \text{ Hz}$) をほぼカバーしている。なお図示するにあたって、スペクトル密度は該当周波数とその前後の 3 点の値を平均した。

さて Fig.8 から次のことが言える。流量ゆらぎの周波数成分はナトリウム流速により変わるが大略 Hz まで伸びている。またナトリウム流速が大きくなるにつれて、より高い周波数成分が観測され、なおかつスペクトル強度も強くなっている。但し流速が 2 m/s を越えるとこの傾向は著しく鈍化している。

Fig.9 は(1)式で与えられる自己相関関数において、遅れ時間 τ をゼロにおいた時の値 $R_{xx}(0)$ を縦軸に表示したものである。横軸は平均流速の逆数 ($1/v$) で表わしている。 $R_{xx}(0)$ はいわゆるゆらぎの rms 値の自乗値(自乗平均値)に相当する量であり、この値が $1/v$ の指數関数として、流速が増加すると $R_{xx}(0)$ も急激に増加していることがわかる。

Fig.10 は、Fig.6(a)~(d) で示した相互相関関数のピーク値 $R_{xy}(\tau^*)$ を各電極出力感度の違いを補正した上で、各電極組合せ毎に整理した図である。縦軸は任意単位であるが、測定条件は同じなので相対関係は意味がある。 $R_{xy}(\tau^*)$ は移行時間 τ^* の関数として表わされ、図に示すように指数的に減少する。Fig.10 は電極間隔によって特性が異っているが、横軸をナトリウム流速の逆数で整理しなおすと、Fig.11 のようにほぼ 1 つの曲線にまとめることができる。

4. 檢 討

4.1 流量相関による流速測定

電極 #2 - #5 ($L = 12 \text{ cm}$) の組合せについて、サンプリング時間 Δt を 1 ms とした時の結果は Fig. 7(a) に示したように、測定した最大流速(約 4 m/s)まで良好な直線性を有し、また流量相関から求めた移行速度 V と通常の電磁流量計から得られたナトリウム平均流速 v は基準流量計の校正精度(±2%)以内で妥当な一致をみた。

しかしながら電極 #2 - #4 ($L = 8 \text{ cm}$), #2 - #3 ($L = 4 \text{ cm}$) では直線性は一応満足できるものの移行速度と平均流速の対応はあまり良くない。電極 #2 - #4 の組合せでは移行速度は小さ目に出、電極 #4 - #5 の組合せでは逆に大き目に出ていることから電極 #4 の取付位置がやや電極 #5 寄りになっていたのではないかと推定されるが、なお今後の検討を要する。

電極間隔が短い場合 ($L = 4 \text{ cm}$) は、流速が約 3 m/s 以上になると直線から大きくはずれてしまう。流速が速くなり電極間隔がせまいと測定誤差は大きくなるが、直線性からのずれは系統的とみてよいので、流れの乱れの特性そのものと、測定系の問題点を見直す必要がある。 3 m/s 以上での非直線性については上下流の直管条件との関連が報告されている⁽⁸⁾が、今回の試験では比較的直管条件も良く、弁も全開にしたので、十分説明できない。

4.2 流動ゆらぎの特性

電磁流量計 FM-4 を界して得た流動ゆらぎの信号のパワースペクトル (Fig. 8) は数 Hz までの周波数成分を有し、流速の増加とともに高周波数成分が増加し、また全体のスペクトル強度も大きくなる傾向は前章で述べた通りである。

測定系の周波数特性は付録 Fig. A1 に示すように、チャネル A (○印), チャネル B (□印) で特性は良くそろっていて、 $0.13 \sim 1.6 \text{ Hz}$ (-3 dB 値) である。また両チャネルのフィルタは位相差が最少になるようにしてある。

Fig. 8 の流動ゆらぎはパワーで表示されているので、フィルタ特性も自乗して示すと、Fig. A1 の△印のような測定系帯域を示す。したがってこの測定系周波数帯域は流動ゆらぎのスペクトルをほぼカバーできていると言えるが、流速が大きくなると、フィルタの上限周波数の影響を受けやすくなる。

Fig. 9 から流量計出力信号に表われるゆらぎは流速に直接依存していることがわかる。すなわち上流部や下流部における弁やエルボなどにより流体中に大きな乱れが発生し、それが流量指示値の変動という形で生ずるものと考えられる。しかし、今回の予備試験では弁開度の影響等を調べられなかったので今後の課題である。

Fig.11 で示したように、相互相関関数のピーク値 $R_{xy}(\tau^*)$ が、Fig.9 で示した自己相関関数のピーク値 $R_x(0)$ と同様な $1/\nu$ 依存性を示し、なおかつ電極の組合せにそれ程依存していないことは、今後詳細な測定と再確認が必要ではあるが、流速に応じて生成された流れの乱れが電極間をあまり減衰しないで移行していることを意味する。流れの中の流動ノイズの軸方向伝播特性を明確に把握するために、流路断面内で磁束密度が一様な長尺の流量計の製作と伝達関数やコヒーレンス関数用プログラムの整備を進めている。

4.3 流量相関法による流速測定上の問題点

相互相関関数からノイズの移行速度を求める上での問題点としては、(i)直線性、(ii)平均流速との対応、(iii)精度、(iv)測定技術上の問題の4点が主なものである。しかしながら、(i)、(ii)は付録Aでの検討からわかるように、流速分布と移行速度の関係から同じ問題点に帰着される。

4.3.1 流速分布と移行速度

移行時間から求められる移行速度と真の平均流速との関係は付録で議論したように、流路断面における流れの乱れの大きさ $u(x, y)$ 、磁束密度分布 $B(x, y)$ 、電極への起電力の寄与の大きさ $w(x, y)$ に依存する。流路断面内で等速であれば、これらの寄与には無関係になり、移行速度 V は平均流速 \bar{v} に一致する。しかし一般にはある速度分布を有するので、 V は \bar{v} に一致しなくなる。したがって、これまでの種々の報告に見られるように、 V は \bar{v} にある係数をかけた値となっている。例えば、文献(3)によるとこの値は $1.1 \sim 1.27$ である。本実験では電極位置に若干の問題を残しているものの、 $V \approx \bar{v}$ ($L = 1.2\text{cm}$) となった。本実験では上流および下流での直管条件は比較的良好だが、流路断面における磁束密度は一様でなく、電極を通る y 軸上の磁束密度 B_x は下に凸の分布をしている。したがって、管壁近くの流速の遅い部分の寄与が大きくなり、 $V/\bar{v} \approx 1$ となったものと考えられる。

しかしながら、直管条件が悪い場合は、速度分布が流速とともに変化し、またパターンも軸対称でなくなると考えられ、重み $u(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 、 $w(x, y)$ はそれぞれ自乗できくので、相関式流量測定においては、非直線性が大きく出やすいと言える。

4.3.2 精 度

相関式流速測定における精度に寄与する因子は、電極間距離 L 、と移行時間 τ^* である。電極取付精度は比較的小型の流量計の場合は $\pm 1\text{mm}$ が期待出来る。したがって電極間隔 1.20mm の時、 L の精度は $\pm 1\text{~\%}$ 以下となる。一方移行時間 τ^* を求めるためには、相互相関関数 $R_{xy}(\tau)$ のピーク値を正確に求める必要がある。Fig.12 に $R_{xy}(\tau)$ のグラフから読みとった値から算出した移行流速が、最小自乗によりあてはめた直線からどれくらいずれているかを示した。

Fig.12(a)の1.56 m/s のデータの内1点だけ偏差の大きいものを除いて、他は Fig.12(a)(b)いずれも土5%以内にほぼ入っている。

一般に電極間隔Lは、取付精度の向上と移行時間 τ^* 決定精度向上のためにできるだけ大きい方が良い。しかし、あまりLが大きくなると、その間におけるノイズ信号の減衰が大きくなり、相互相関関数のパターンはなまった形になるので精度が悪くなる。両者の妥協点を見出すためには流れの乱れの伝播特性（減衰特性）を十分把握しておく必要がある。

4.3.3 測定技術上の問題

相互相関関数 $R_{xy}(\tau)$ から遅れ時間を正確に求めるためには、 $R_{xy}(\tau)$ ができるだけシャープな山となることが望ましい。簡単のため入力信号がたとえ白色雑音であるとしても、測定系の帯域により $R_{xy}(\tau)$ は次式のようになる。⁽⁸⁾

$$R_{xy}(\tau) = a \cdot B \cdot \frac{\sin \pi B (\tau - \tau^*)}{\pi B (\tau - \tau^*)} \cdot \cos 2\pi f_0 (\tau - \tau^*) \quad (13)$$

ここで

a : 測定帯域内でのパワースペクトル強度

B : 測定系帯域幅

f_0 : 測定系帯域の中心周波数

したがって、 $R_{xy}(\tau)$ がシャープな山を形成するためには、帯域幅Bを広げ、中心周波数を高くするのが良い。

平たく言えば、バンドパス・フィルタの上限周波数をできるだけ上げれば良い。なおノイズ源が白色で測定系の帯域も無限に広ければ、δ関数になる。この上限周波数の目安は、ノイズ信号の上限周波数を十分カバーし、かつ商用周波数(50 Hz)の影響を最小にすることにより決定される。本実験の結果から、ノイズ信号は高々 20 Hz であり、48 dB/oct のローパス・フィルタのカット・オフ周波数を 30 Hz に設定するとこの目的は達せられる。

付録での議論をもとに考えると、流路断面内で流れの乱れが同じ大きさ、同じ周波数成分を持っているれば問題ないが、実際には乱れに由来する重み関数 $u(x, y)$ は一様でない。周波数スペクトルは同じでもその大きさが半径方向位置によって異なった場合は、乱れの大きな位置での流速が強調される。また、強度は同じでもスペクトルが位置によって異なれば、測定系の帯域（例えばローパス・フィルタのカット・オフ周波数の値）によって遅れ時間が異なってくる。⁽⁹⁾ これらの結果として、移行速度 V と平均流速 v は必ずしも一致せず、また測定条件によって違ってくるので、流れとその乱れについて空間的特性をより良く知らねばならない。

(注) 文献(4)の指摘によれば、管軸付近には比較的周波数の低い大きな渦が集まり、逆に管壁付近には比較的周波数の高い小さな渦が集まる。したがって、フィルタの高域を下げるとき、低

周波数成分の多い管軸付近（ここでの流速は平均流速より大きい）の重みが大きくなる故移行速度は少し大きくなっている。

一方文献(6)は、ピンバンドル内の温度ゆらぎを利用した相関式流速測定であるのでノイズ源と装置が大いに異なるが、フィルタの高域を下げるとき移行速度は小さい値を示し、逆に低域を上げると、移行速度は大きい値を示している。両者の違いはノイズ源および流路形状の特性上の差かも知れないので今後の確認が必要である。

5. 結 言

流動ノイズを利用した流量相関法のナトリウム中試験を3B永久磁石式流量計で行ない、以下の結論を得た。

- (1)流れ方向に配置した5対の電極を種々組合せて使用した結果、電極間距離が 12 cm （約 1.5 D ）、 8 cm （約 1 D ）の時は測定最大平均流速（約 4 m/s ）まで直線性が良好であり、原理確認の目的を達した。
- (2)しかし電極間距離が 4 cm （約 0.5 D ）と短かくなると、約 3 m/s 以上で直線性が極端に悪くなつた。
- (3)移行速度と基準流速は $L=12\text{ cm}$ の時、基準流量計の精度内で良い一致を示したが、 $L=4\text{ cm}$ 、 8 cm では一致しなかつた。電極位置を含め今後の検討が必要であるが、現段階として両者の速度は一般に必ずしも一致しないことを示し、移行速度が平均流速より大き目に出るのが通常見られる実験結果であるにもかかわらず、本実験結果では $L=12\text{ cm}$ のとき両者がほぼ一致したのは、流路断面における磁束密度分布が一様でなく流速の小さい電極付近で高い値を示していた故であろうと推論した。
- (4)流動ノイズの基本的特性を調べた結果、そのパワースペクトルは数Hzまで存在し、流速の増加とともに上限周波数とスペクトル強度は大きくなつた。
- (5)流速測定における非直線性と絶対値は流れそのものと測定系の特性の両面から検討していく必要がある。

今後下記の項目について研究開発を進める必要がある。

- (1)流れの乱れの特性と伝播特性
- (2)流れの乱れと流動環境（弁、エルボ、直管長など）との関係
- (3)最適電極間隔
- (4)直線性と精度の向上
- (5)測定系の最適化

6. 謝 辞

本試験実施にあたって、終始御指導頂いたナトリウム技術部斎藤良平部長にらびに厚母栄夫前室長に感謝します。またデータ採取に池見元祥氏（現在横河電機製作所）に協力して頂いた。ここに謝意を表します。

7. 参考文献

- (1) "LMFBR Program Plan , Element 4 Instrumentation & Control", WASH-1104 2nd Edition, p.85 (1972)
- (2)二瓶, 三本他 “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電流流量計による予備試験”, PNC SN243 74-01 (1974)
- (3)二瓶, 三本他 “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”, PNC SN241 76-23 (1976)
- (4)遠藤, 佐野他, “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”, PNC SN941 77-156 (1977)
- (5)中本, 大山他, “計測機器試験ループの機能試験”, PNC SN941 76-96 (1976)
- (6)Mika, C. et al "Investigation on Tempereture Noise In Liguid Sodium Flowing Through An Electrically Heated 4-Pin Bundle" RCN-195, June (1973)
- (7)Shercliff, J.A., "Relation between the Velocity Profile and the Sensitivity of Electro magnetic Flowmeters", J.Appl.Phys. 25, 817 (1954)
- (8)Bendat, J.S. et al, "Measurement and Analysis of Random Data" John Wiley & Sons, Inc., p 86 の自己相関関数より求めた。

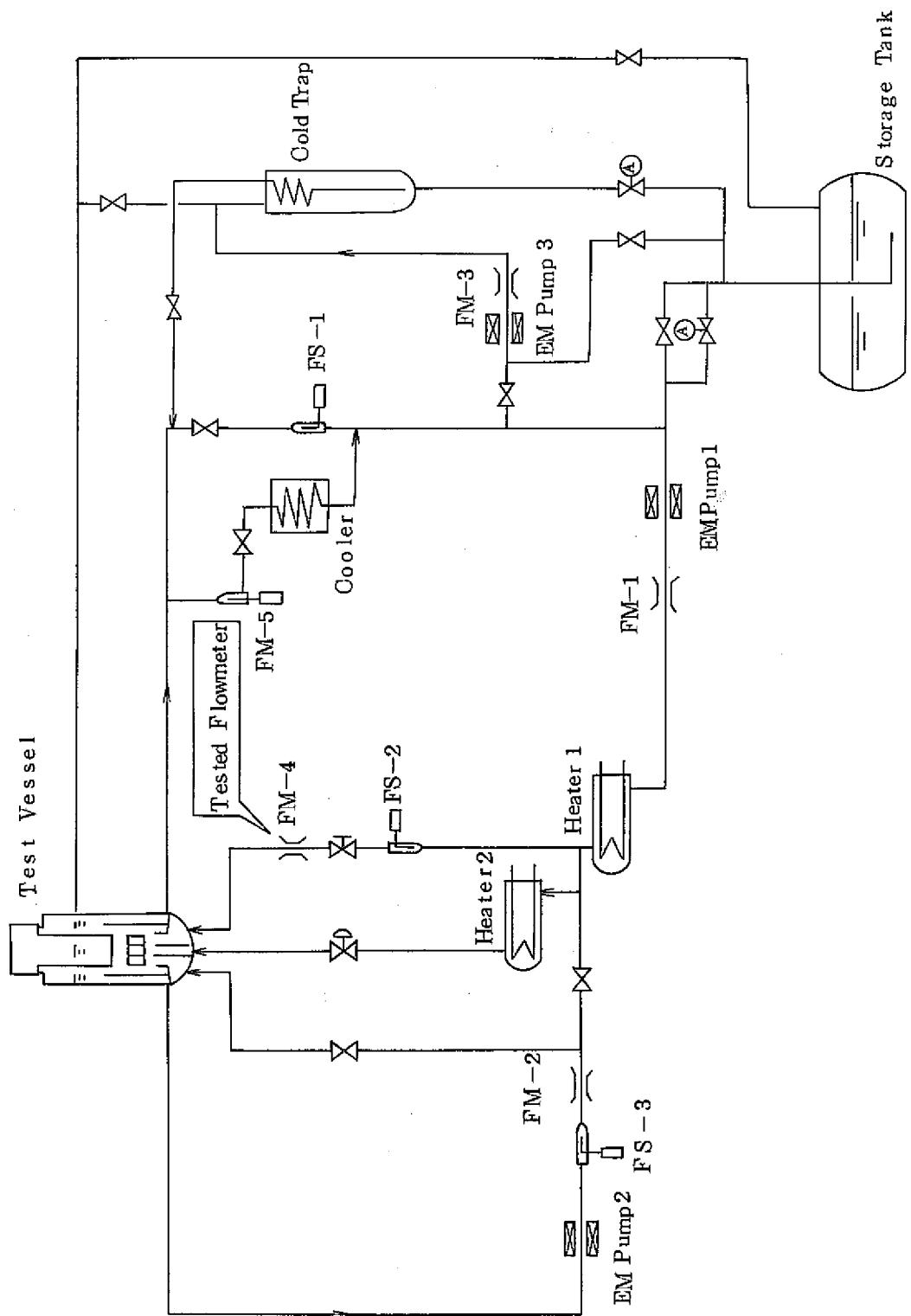


Fig. 1 Sodium Instrument Test Loop

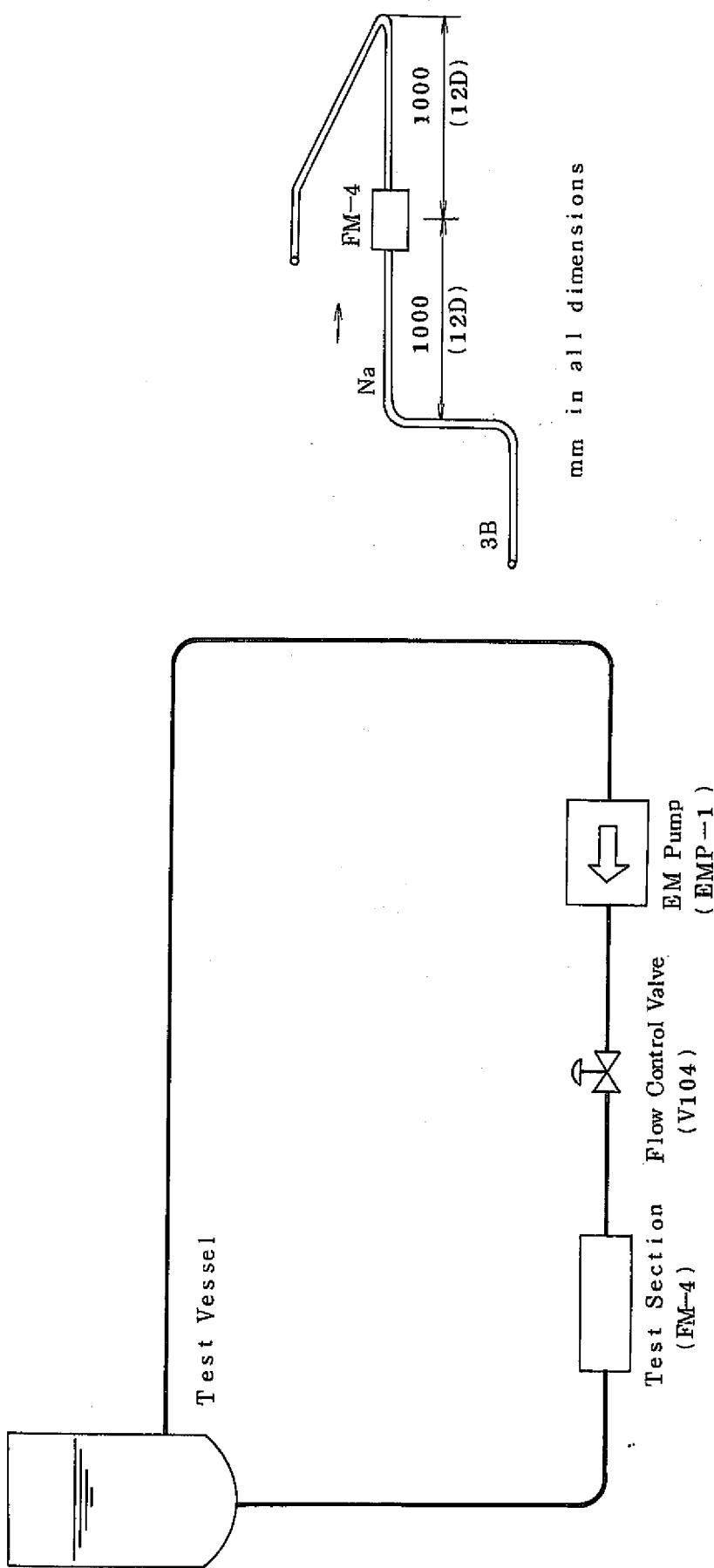


Fig.2 Schematic Diagram of Flow Circuit

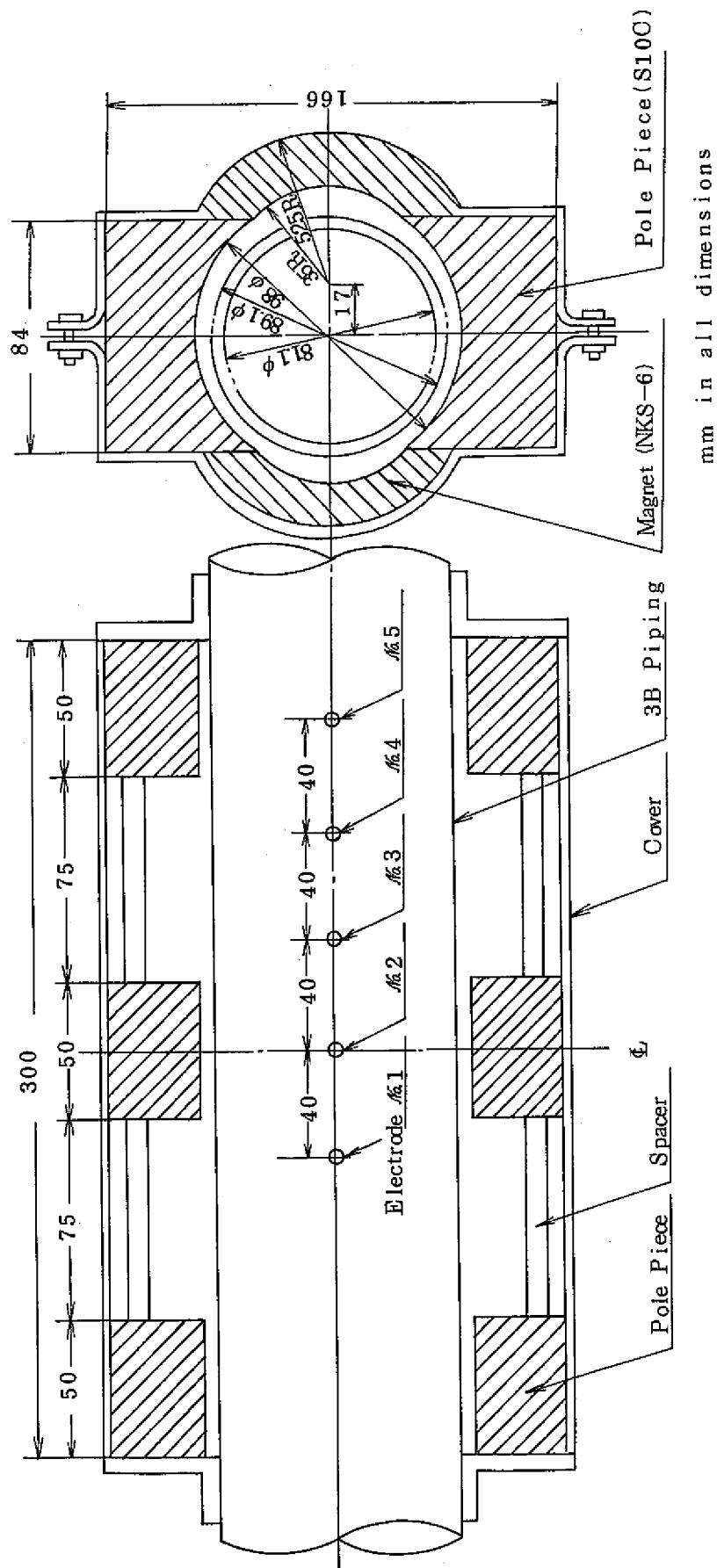
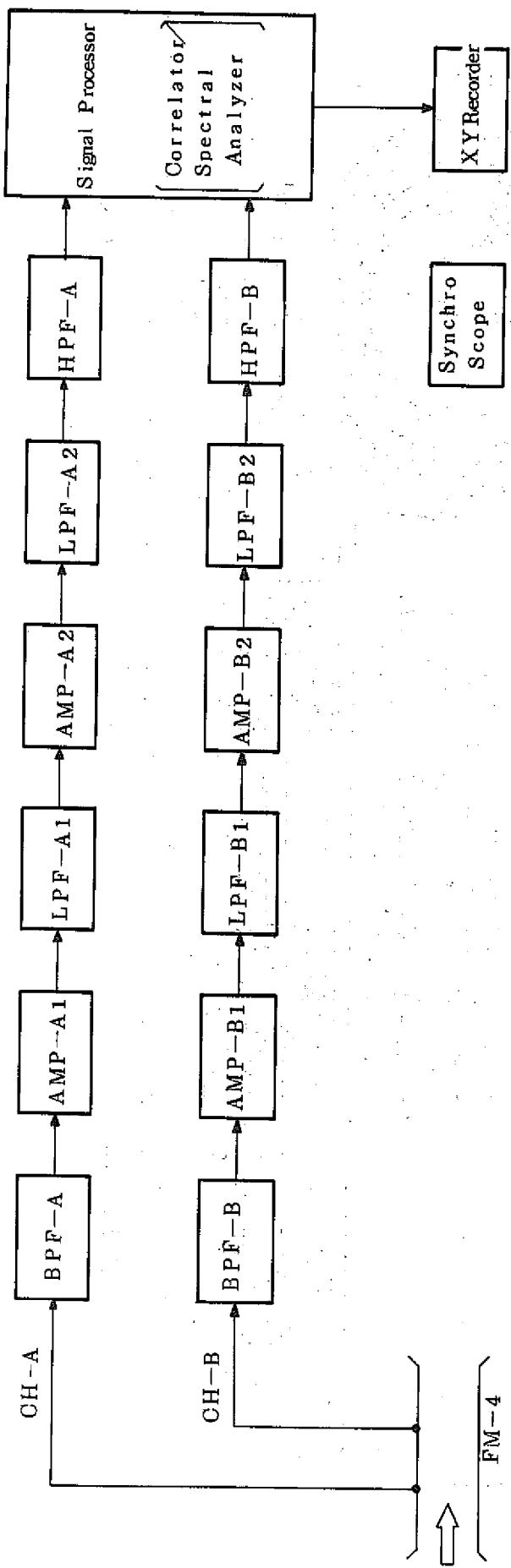


Fig. 3 PM Flowmeter, FM-4



BPF	Passive Band-Pass Filter ,	NF Circuit Block
LPPF	Active Low-Pass Filter ,	NF Circuit Block LP-4
HPPF	Active High-Pass Filter ,	NF Circuit Block HP-4
AMP	DC Amplifier ,	SAN-EI 6L71
Signal Processor	,	SAN-EI 7T07
XY Recorder	,	WATANABE WX-446

Fig.4 Block Diagram of Measuring System

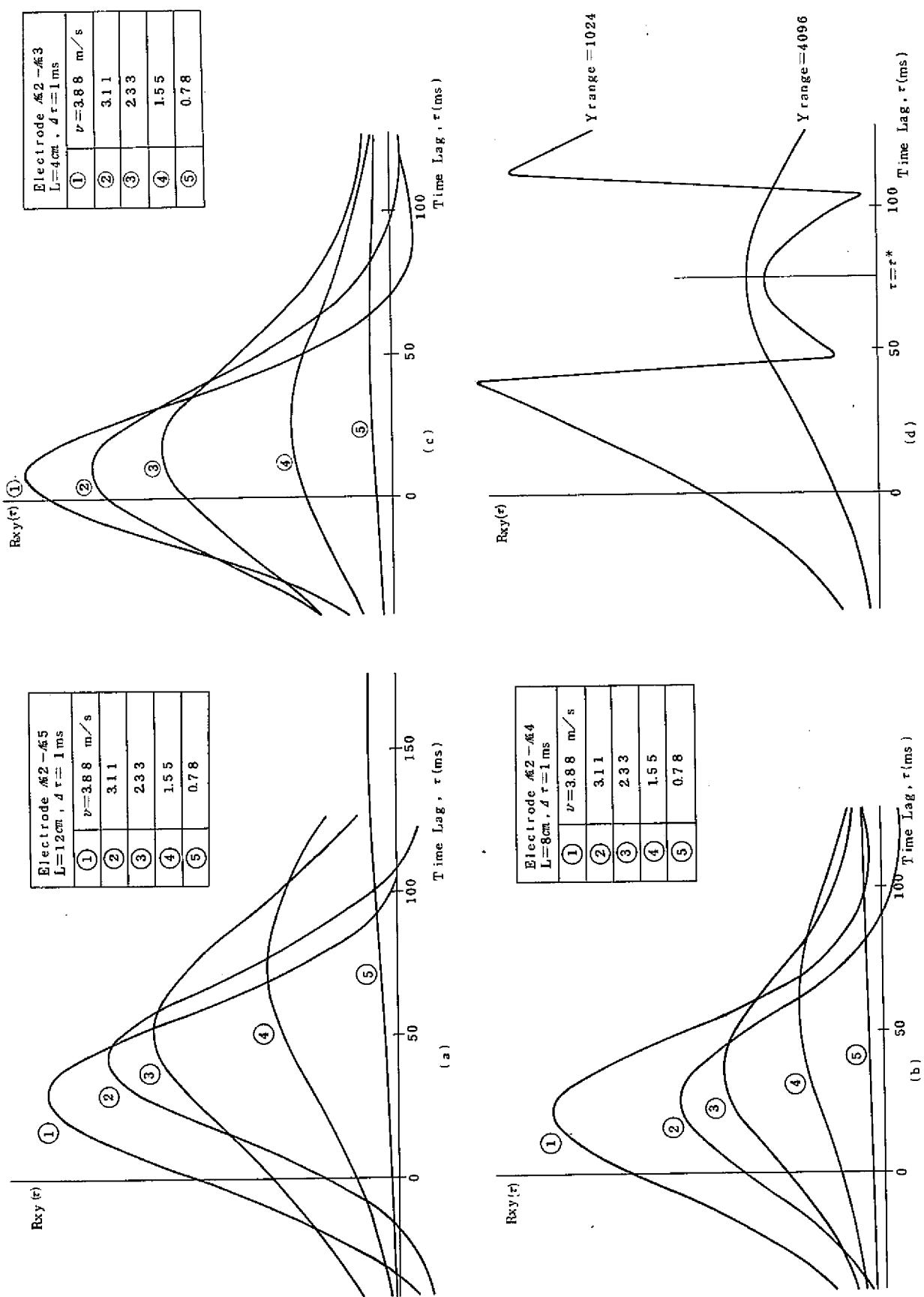


Fig. 6 Cross-Correlation Function

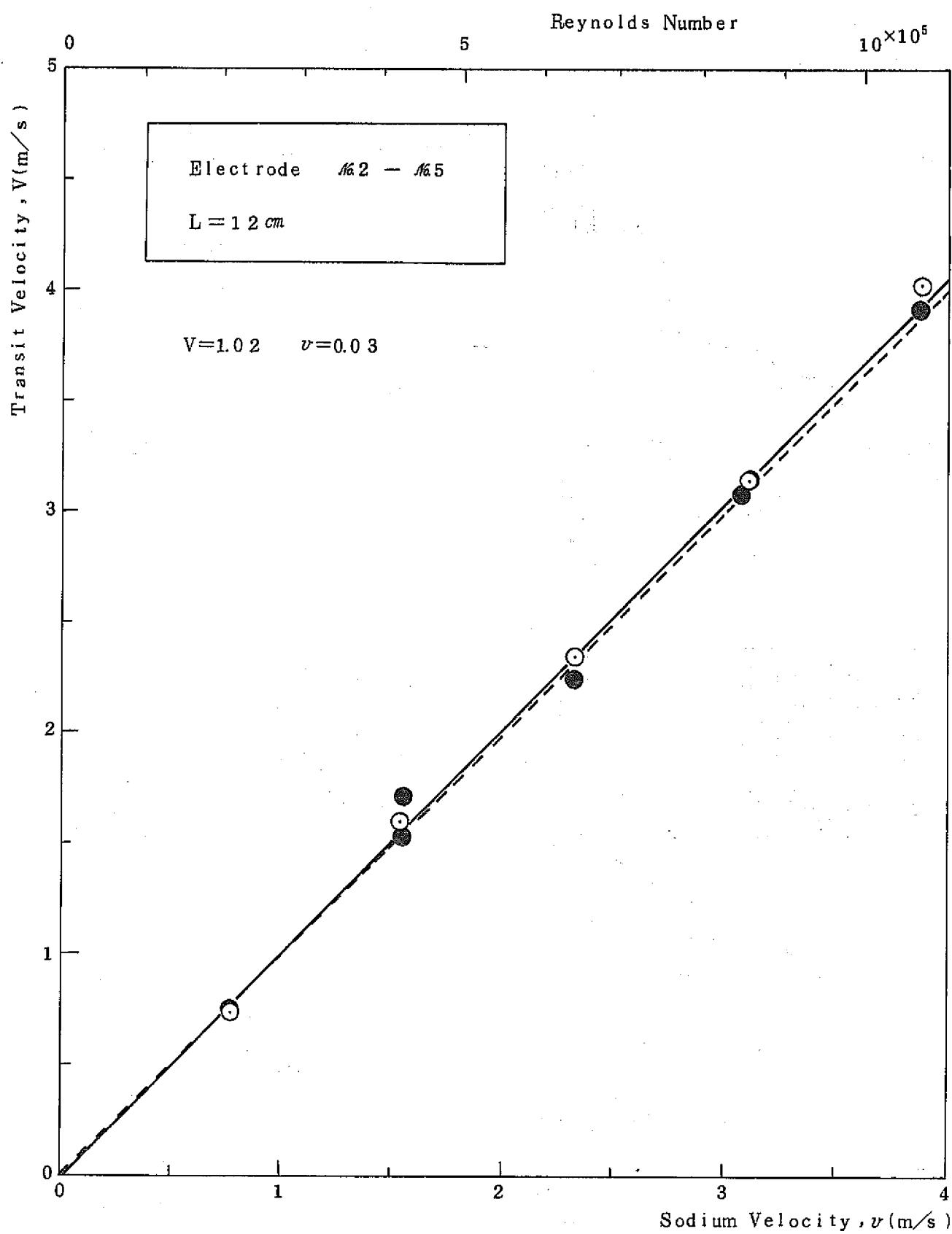


Fig. 7(a) Transit Velocity Calculated from Measured Transit Time (#2-#5)

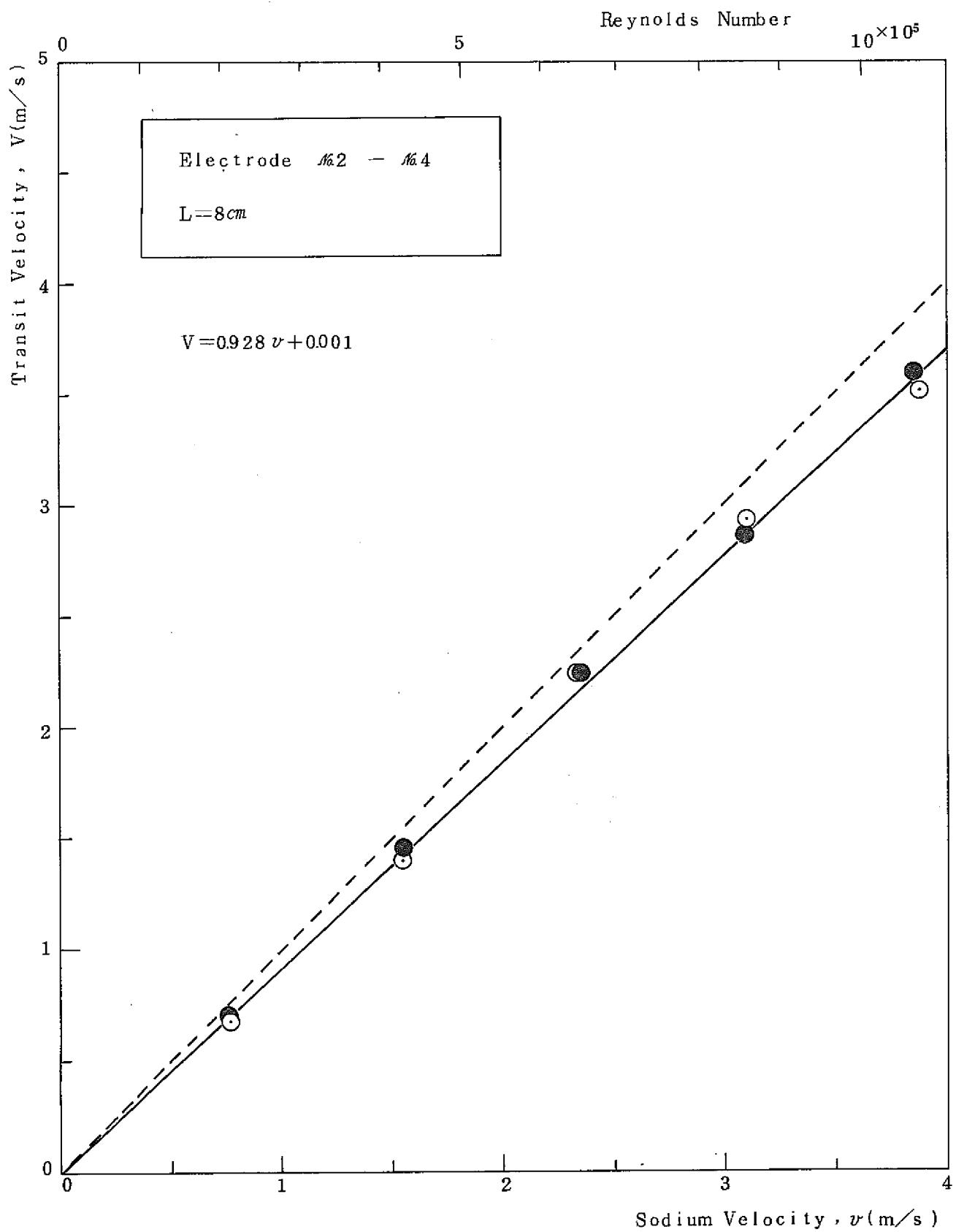


Fig.7(b) Transit Velocity Calculated from Measured Transit Time (#2-#4)

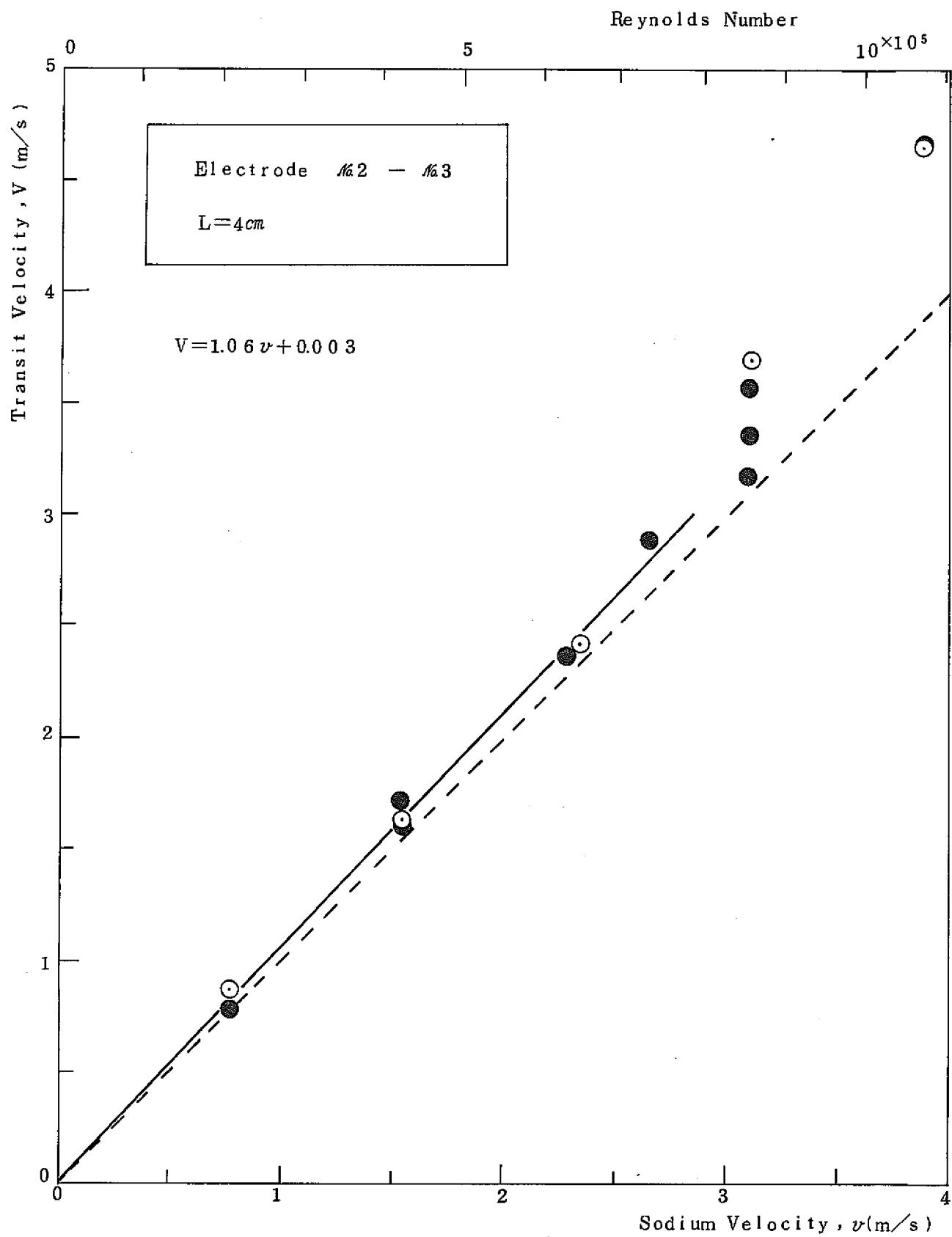


Fig. 7(c) Transit Velocity Calculated from Measured Transit Time (No. 2—No. 3)

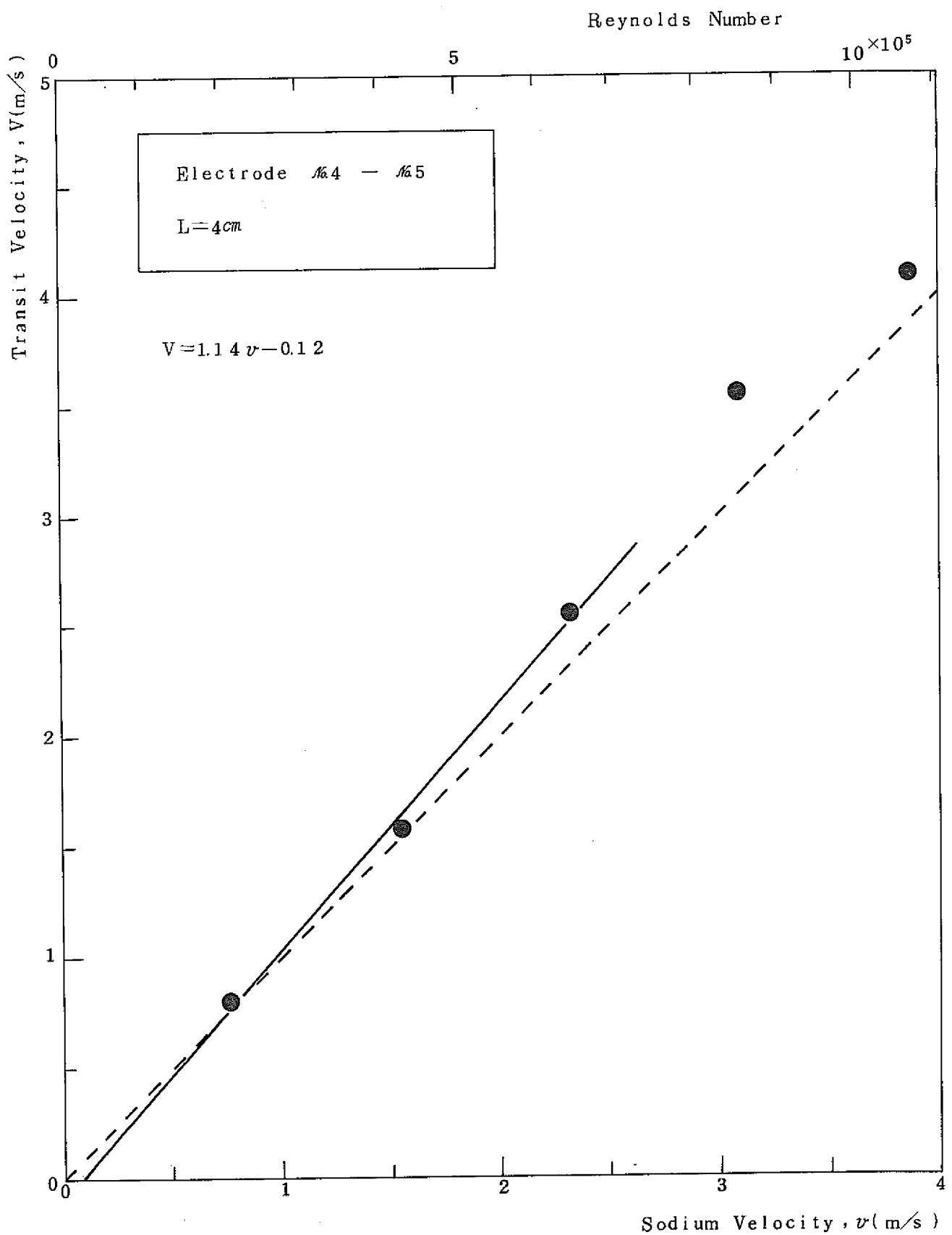


Fig. 7(d) Transit Velocity Calculated from Measured Transit Time (#4-#5)

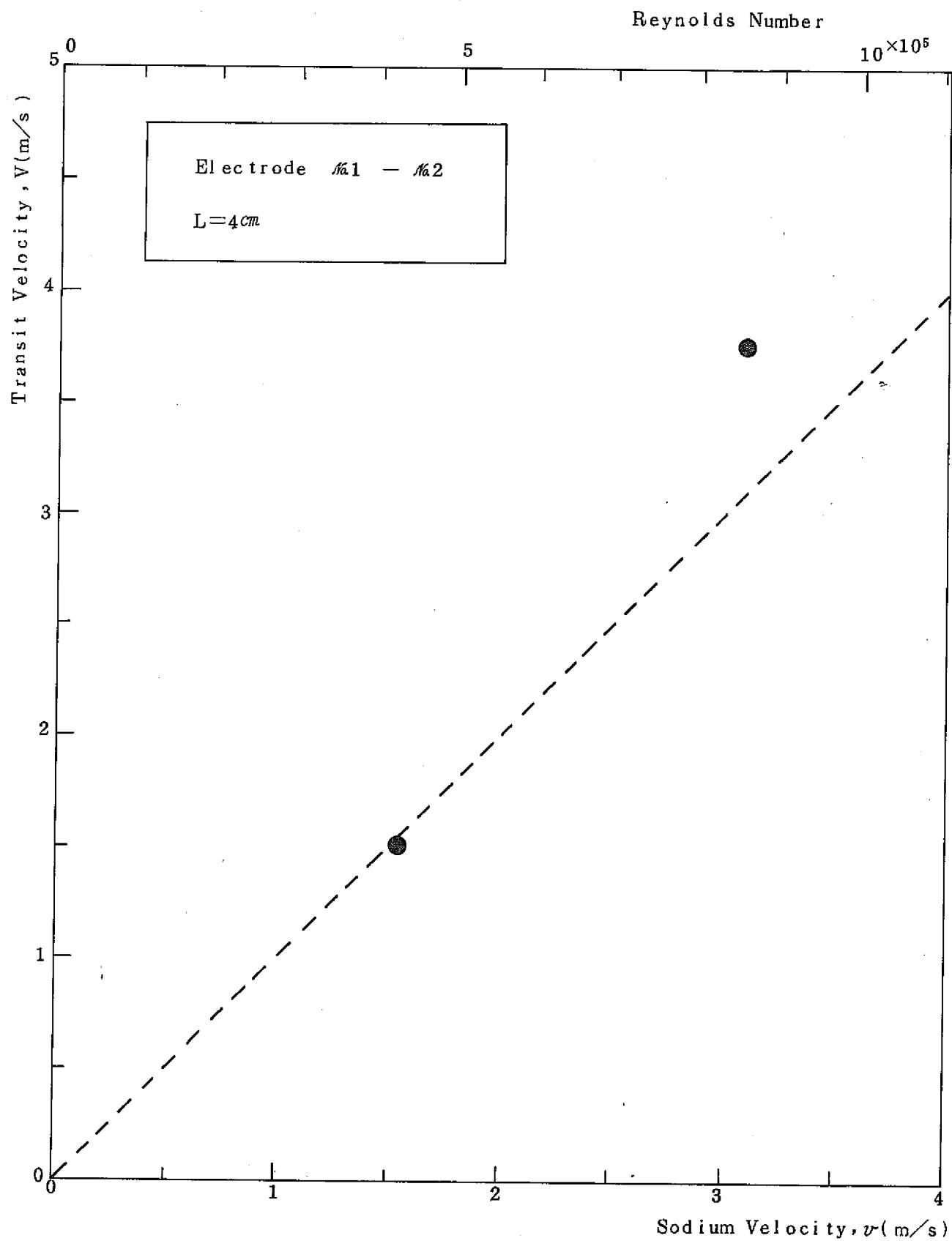


Fig. 7(e) Transit Velocity Calculated from Measured Transit Time ($\mathcal{M}_1 - \mathcal{M}_2$)

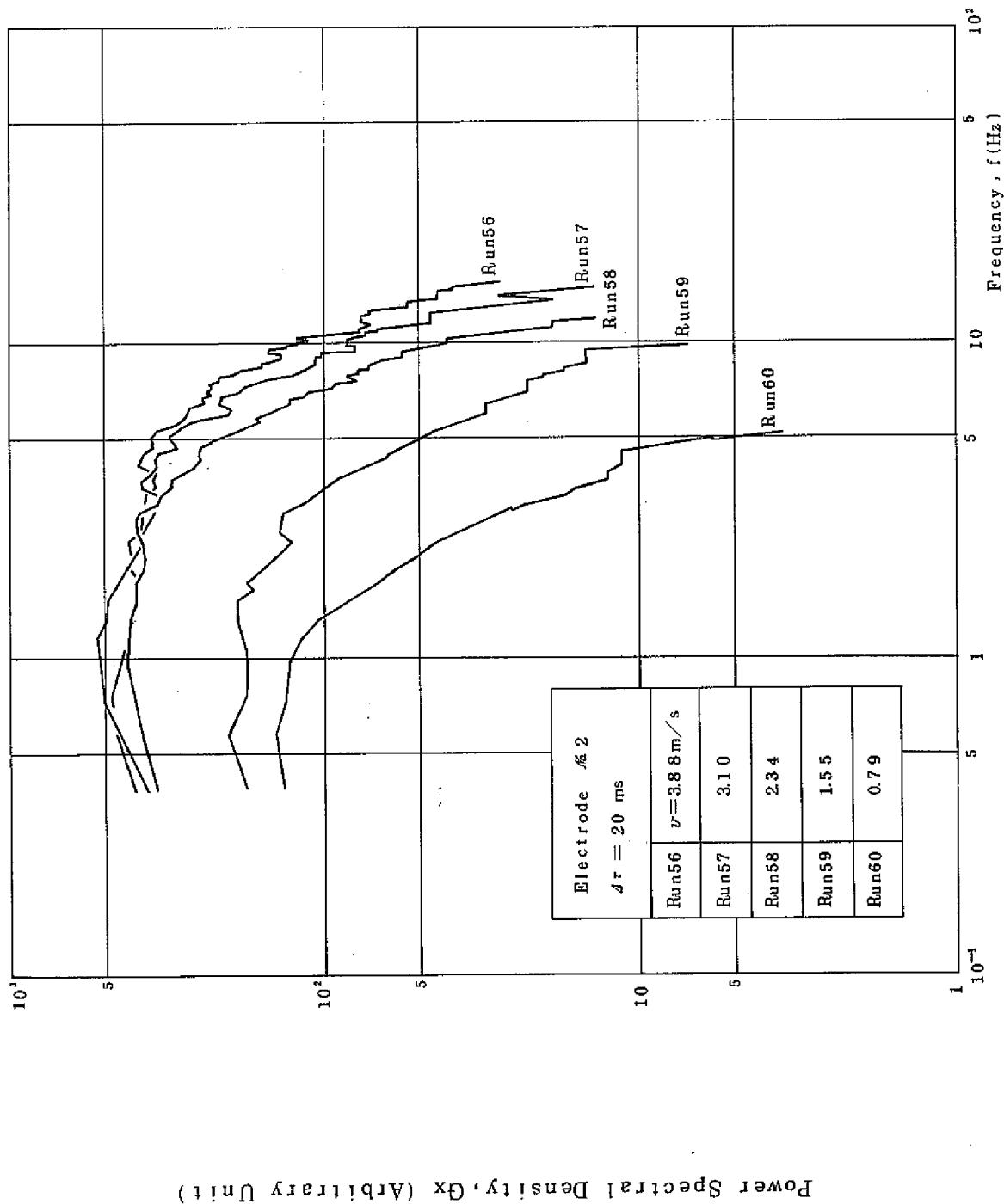


Fig. 8 Power Spectral Density of Flow Fluctuation

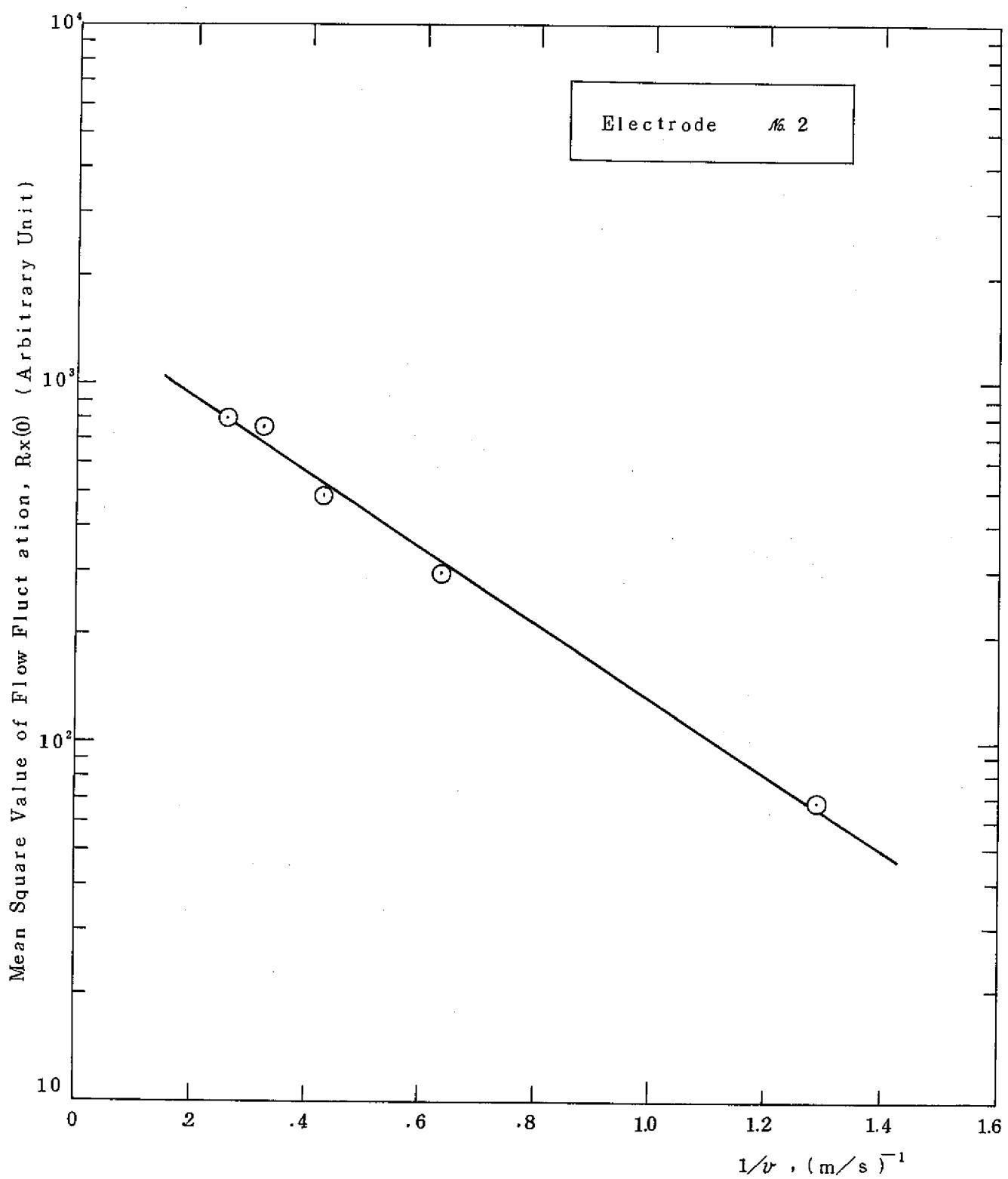


Fig.9 Mean Square Value of Flow Fluctuation

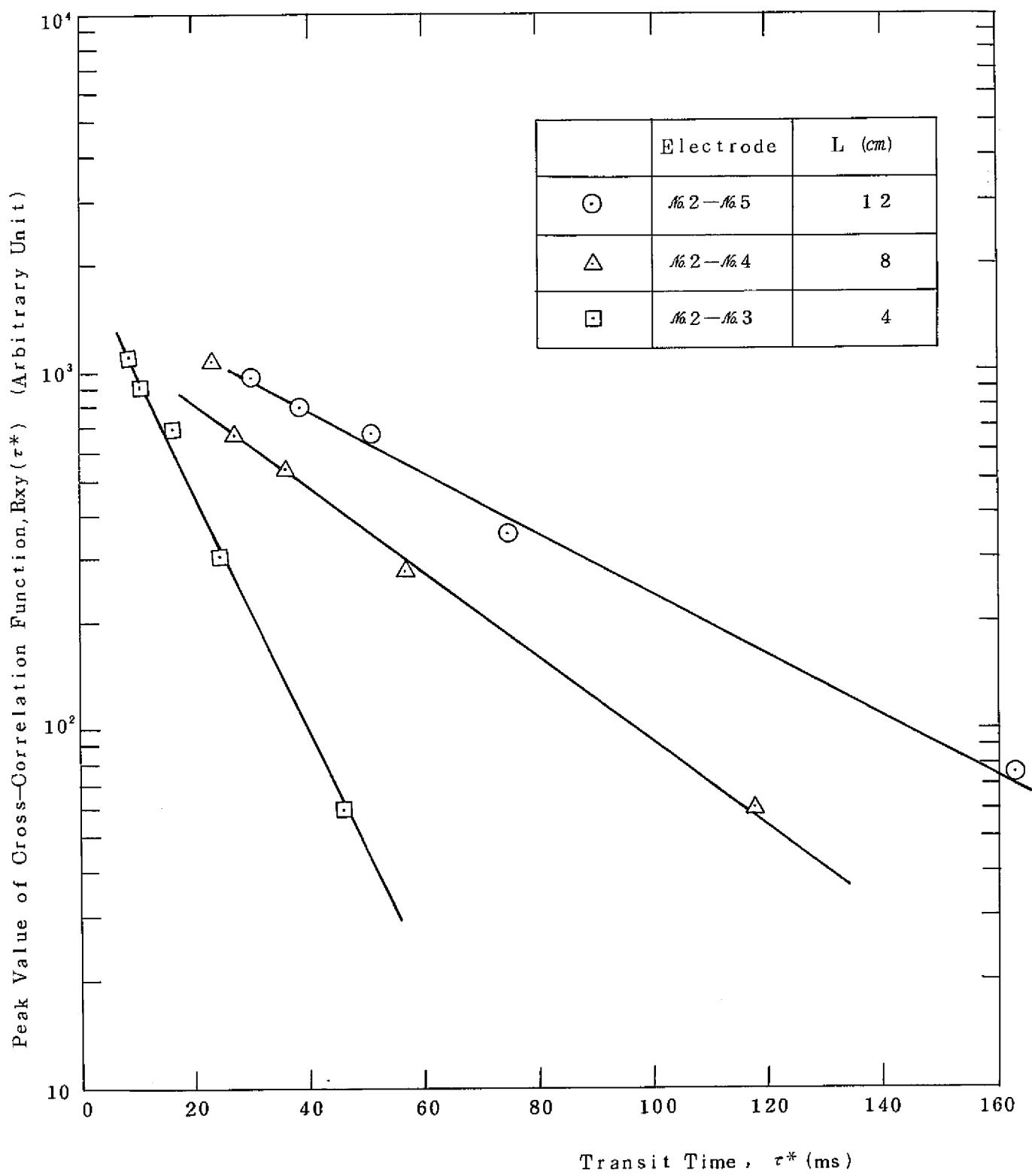


Fig.10 Peak Value of Cross-Correlation Function vs Transit Time

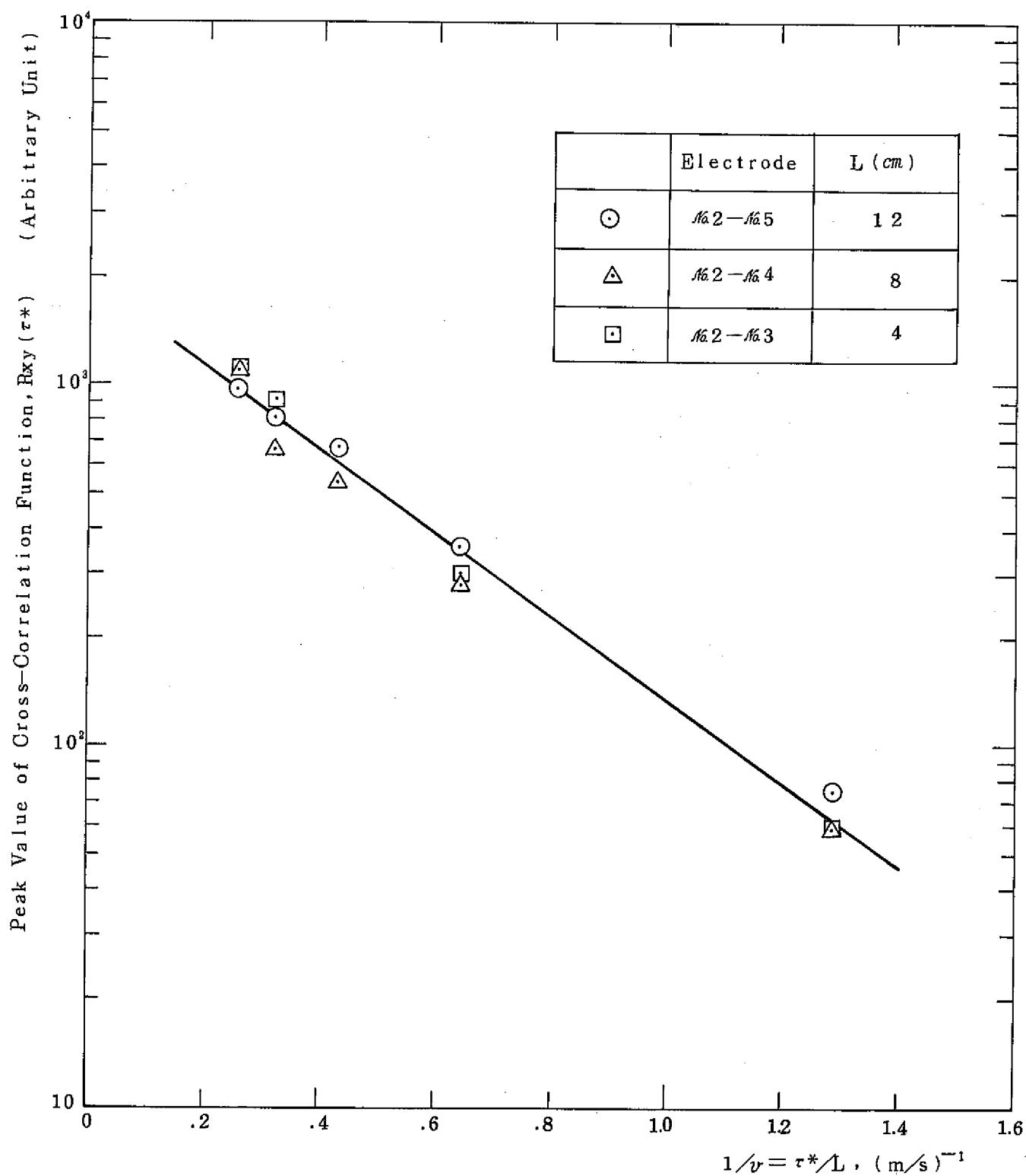


Fig.11 Peak Value of Cross-Correlation Function vs Velocity

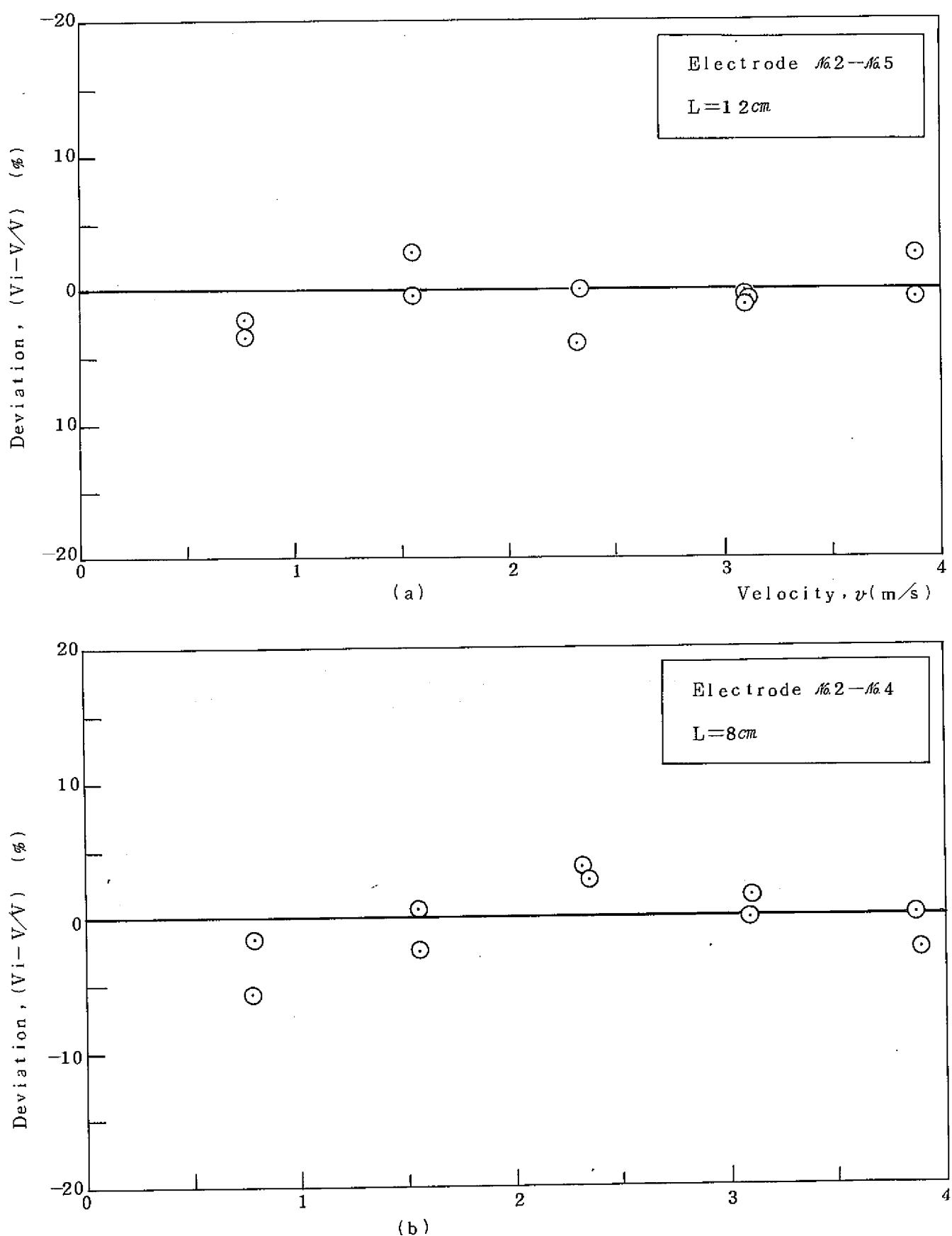


Fig. 12 Deviation of Measured Transit Velocity Velocity, $v \text{ (m/s)}$

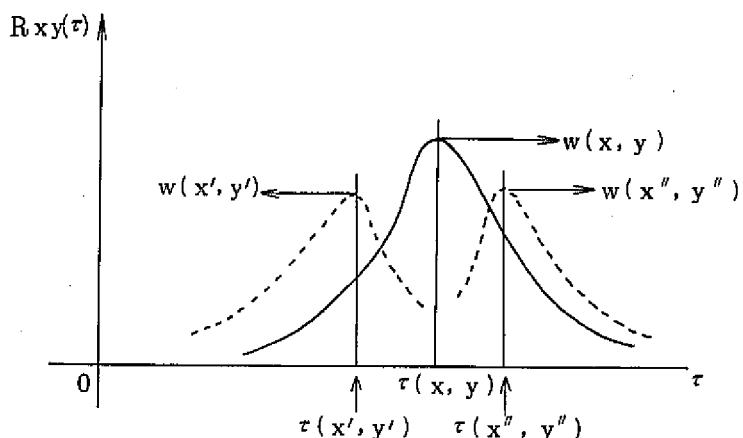
付 錄

流路断面内の要素 $\Delta x \cdot \Delta y$ における速度に乗って、乱れがそのまま下流に移動したとすると、流れに沿った 2 点の信号から求めた相互相関関数は下図に示すように、断面内の位置によって移行速度が異なる。実測して得られる移行時間 τ^* はこれらの重み平均である。即ち相互相関関数のピーク値を与える遅れ時間 τ^* は、点 (x, y) での流速から求めた遅れ時間 $\tau(x, y)$ に重み関数 $W(x, y)$ をかけた量として表わされる。

$$\tau^* = \iint_{xy} \tau(x, y) \cdot W(x, y) dx dy \quad (A1)$$

但し、規格化条件として、

$$\iint W(x, y) dx dy = 1 \quad (A2)$$



さて、重み関数 $W(x, y)$ は点 (x, y) での起電力に基づく電極出力 $\Delta E(x, y)$ を用いると次式のようになる。

$$W(x, y) = \Delta E_A(x, y) \cdot \Delta E_B(x, y) \quad (A3)$$

ここで、そえ字 A, B はそれぞれ上流側電極、下流側電極を表わす。簡単のため上流での特性と下流での特性を同じとする。

$$W(x, y) = \Delta E^2(x, y) \quad (A3')$$

となる。

さて、電極に表われる起電力 $\Delta E(x, y)$ は次のようになる。

$$\Delta E(x, y) = k \cdot u(x, y) \cdot B(x, y) \cdot w(x, y) \quad (A4)$$

但し、

$u(x, y)$: 点 (x, y) での乱れの大きさ

$B(x, y)$: 点 (x, y) での磁束密度

$w(x, y)$: 点 (x, y) で生じた起電力の電極に及ぼす寄与の大きさ^(注)

k : 規格化定数

(A2), (A4)式から

$$k^2 = \frac{1}{\iint u^2(x, y) \cdot B^2(x, y) \cdot w^2(x, y) dx dy} \quad (A5)$$

参考までに、 $u^2(x, y)$ は乱れのパワであり、厳密には周波数の関数である。

(A1)式は、点 (x, y) での流速 $v(x, y)$ を用いて、

$$\tau(x, y) = \frac{L}{v(x, y)} \quad (A6)$$

$$\tau^* = \frac{L \times \iint \frac{u^2(x, y) \cdot B^2(x, y) \cdot w^2(x, y)}{v(x, y)} dx dy}{\iint u^2(x, y) \cdot B^2(x, y) \cdot w^2(x, y) dx dy} \quad (A7)$$

となる。したがって、移行速度 V は

$$V = \frac{L}{\tau^*} = \frac{\iint u^2(x, y) \cdot B^2(x, y) \cdot w^2(x, y) dx dy}{\iint \frac{u^2(x, y) \cdot B^2(x, y) \cdot w^2(x, y)}{v(x, y)} dx dy} \quad (A8)$$

もし、 u , B , w が流路断面(断面積 S)で一定なら、 (A8)式は

$$V = \frac{S}{\iint \frac{dx dy}{v(x, y)}} \quad (A9)$$

(注) 文献(7)によると、

$$w(x, y) = \frac{a^4 + a^2 r^2 \cos 2\theta}{a^4 + 2 a^2 r^2 \cos 2\theta + r^4}$$

$$x^2 + y^2 = r^2$$

$$x = r \cos \theta$$

と表わされる。

となる。 v を流路断面における平均流速とすると、一般に

$$\frac{1}{S} \iint \frac{dx dy}{v(x, y)} \asymp \frac{1}{v} \quad (\text{A10})$$

となるので、

$$V = v$$

は必ずしも成り立たないことがわかる。実際には、 u 、 B 、 w は流路断面で一定でないのが普通であるので、流速分布と移行時間（あるいは移行速度）との関係はより複雑となる。

なお流速 $v(x, y)$ が流路断面で一様である場合は、(A8)式から

$$V = v \quad (\text{A11})$$

が成り立つ。

Table A1 Test Conditions (March 5~10, 1976)

Run #	Electrode	Tempera-ture (°C)	Flow Rate (ℓ/min)	Average Velocity (cm/s)	Amplifier Gain		Sampl-ing Time $\Delta\tau$ (ms)	Measur-ing Time T(min)	Transit Time τ^* (ms)	Dis-tan-se (cm)	Comment
					1st	2nd					
1	M2-M4	508	245.9	78.1	500	500	2	3	112.4	8	Cross-Corr.*
2	"	"	488.6	155.1	"	200	1	"	55.2	"	"
3	"	"	739.4	234.8	"	"	1	"	35.8	"	"
4	"	"	975.6	309.8	"	CH-A100 CH-B200	1	"	27.9	"	"
5	"	"	1216.6	386.3	"	CH-A100 CH-B200	1	"	22.3	"	"
6	M2-M5	"	491.9	156.2	200	500	2	"	70.2	12	"
7	"	"	973.9	309.2	500	100	1	"	38.9	"	"
8	M1-M2	509	488.6	155.1	"	200	1	"	26.6	4	"
9	"	"	977.2	310.2	"	100	0.5	"	10.7	"	"
10	M2-M3	508	487.0	154.6	"	200	1	"	23.3	"	"
11	"	"	973.9	309.2	"	100	0.5	"	12.6	"	"
21	M2-M4	500	—	—	"	"	1	"	—	—	Filter Check
31	M2	"	982.9	312.1	500	100	20	10	—	—	PSD
32	Sine Wave 0.3 Hz	—	—	—	20	5	30	3	—	—	Phase Check of System
33	1 Hz	—	—	—	"	"	5	"	—	—	"
34	3 Hz	—	—	—	"	"	2	"	—	—	"
35	10 Hz	—	—	—	"	"	0.5	"	—	—	"
36	30 Hz	—	—	—	"	"	0.2	"	—	—	"
41	M2-M3	503	717.4	227.8	500	200	1	"	16.9	4	Cross-Corr.
42	"	"	245.1	77.8	"	500	2	"	51.2	"	"
43	"	"	488.6	155.1	"	200	1	"	24.9	"	"
44	"	"	975.6	309.8	"	"	0.8	"	11.2	"	"
45	"	"	1221.5	387.8	"	100	0.5	"	8.6	"	"
46	"	"	837.1	265.8	"	(200)	1	"	13.9	"	"
47	"	"	980.5	311.3	"	100	1	"	11.9	"	DC Cancel without BPF
51	M2-M5	482	244.3	77.6	"	"	3	"	161.0	12	Cross-Corr.& Auto Corr.
52	"	"	490.2	155.6	"	200	"	"	78.3	"	Cross-Corr.
53	"	"	732.9	232.7	"	100	2	"	53.3	"	Cross-Corr.& Auto Corr.
54	"	"	983.7	312.3	"	"	1	"	38.3	"	"

* without HPF

Table A1 Test Conditions (Continued)

Run No	Electrode	Tempera- ture (°C)	Flow - Rate (l/min)	Average Velocity (cm/s)	Amplifier Gain		Sampl- ing Time Δt (ms)	Measur- ing Time T(ms)	Transit Time τ^* (ms)	Dis- tance (cm)	Comm cut
					1st	2nd					
5 5	M2-M5	482	1221.5	387.8	500	100	0.8	3	30.7	12	Cross-Corr.
5 5'	"	"	"	"	"	"	3	1	-	-	Auto Corr
5 6	M2	"	"	"	"	"	20	20	-	-	PSD
5 7	"	"	977.2	310.3	"	"	20	"	-	-	"
5 8	"	"	736.2	233.7	"	"	20	"	-	-	"
5 9	"	"	488.6	155.1	"	200	20	"	-	-	"
6 0	"	"	247.6	78.6	"	"	20	"	-	-	"
6 1	M4-M5	494	242.7	77.1	"	"	1	3	50.2	4	Cross-Corr.
6 2	"	"	492.7	156.4	"	"	1	"	25.3	"	"
6 3	"	"	732.9	232.7	"	"	1	"	15.6	"	"
6 4	"	"	977.2	310.3	"	"	1	"	11.3	"	"
6 5	"	"	1219.9	387.8	"	"	1	"	9.8	"	"
7 1	M2-M5	"	1221.5	387.8	"	100	1	"	29.8	12	"
7 2	M2-M4	"	"	"	"	"	1	"	22.8	8	"
7 3	M2-M3	"	"	"	"	"	1	"	8.6	4	"
7 4	M2-M5	"	980.5	311.3	"	"	1	"	38.3	12	"
75(75')	M2-M4	"	"	"	"	"	1	"	27.3	8	"
7 6	M2-M3	"	"	"	"	"	1	"	10.8	4	"
7 7	M2-M5	"	734.5	233.2	"	"	1	"	51.2	12	"
7 8	M2-M4	"	"	"	"	"	1	"	35.7	8	"
7 9	M2-M3	"	"	"	"	"	1	"	16.5	4	"
8 0	M2-M5	"	488.6	155.1	"	"	1	"	75.1	12	"
8 1	M2-M4	"	"	"	"	"	1	"	57.0	8	"
8 2	M2-M3	"	"	"	"	"	1	"	24.6	4	"
8 3	M2-M5	"	244.3	77.6	"	"	2	"	163.1	12	"
8 4	M2-M4	"	"	"	"	"	1	"	117.6	8	"
8 5	M2-M3	"	"	"	"	"	1	"	45.9	4	"
91~104	-	-	-	-	-	-	0.5~5	"	-	-	Calibration of 7T07
7T07		-	Input	DCmode,	Gain	1.00,	Average	Constant	32		

Table A2 Normalized Sensitivity of FM-4

Electrode	Normalized Sensitivity
No 1	0.83
No 2	1.00
No 3	0.86
No 4	0.78
No 5	0.93

