

最近の流量計測

Recent Aspects of Flow Measurement

最近、上下水道での流量計測は、水需給の逼迫と設備の近代化に伴いよりいっそうの精度向上と使いやすさが切望され、下水道では暗渠開水路での簡単な流量計測が望まれている。

本論文は、最新の主要流量計3種を取り上げ、これらの要望にこたえた内容を中心に記述する。

- (1) 電磁流量計の励磁方式を方形低周波式とし、電極の汚れに対して零点を安定化した。
- (2) 超音波流量計は、基本測定周期の短縮と水温影響補正を行なって実用精度を向上させた。
- (3) 超音波を用いた流速—水位測定法により開水路流量計測を簡素化し、水路壁の粗さや水路の動水勾配の影響を少なくした。

植松 誠* *Makoto Uematsu*
 主藤 剛* *Tsuyoshi Shudō*
 福永正雄* *Masao Fukunaga*
 平山 健** *Takeshi Hirayama*
 井上儀和*** *Yoshikazu Inoue*

1 緒 言

最近、上下水道での流量計測は一つの転換期を迎えつつある。その一つは、電磁流量計の零点の無調整化と電極の汚れに対する零点の安定性向上であり、他の一つは既設配管に容易に取り付けられる超音波流量計の実用精度の向上である。また、新分野として、下水道の流入下水や流域下水など開水路の流量計測が、従来の堰式やフリューム式のような大掛りな水路工事を伴わずに実用化されるようになってきた。

この論文では、方形波励磁による電磁流量計の零点の安定性向上、超音波流量計の水温補正などによる実用精度の向上及び取り付けが簡単で水路の流れを妨げない超音波を用いた流速—水位測定式の開水路流量計測について述べる。

2 方形波励磁電磁流量計

2.1 測定原理

電磁流量計は、図1に示すように流量検出器の一部である測定管の内壁に一对の電極を相對して設け、両電極間を結ぶ直線と流体の流れ方向に対し直角に磁界を与えると、電極間に管内平均流速、磁束密度及び管内径に比例した電圧が発生するという電磁誘導の法則を利用している。

そして、電極間に発生した電圧は変換器により流量に比例した直流の4～20mAの統一信号に変換される。

2.2 方形波励磁と雑音除去

電磁流量計に用いる磁界は、交流、直流にかかわらず有効なことは電磁誘導の法則が示すとおりである。したがって、従来の交流励磁のために生ずる誘導雑音問題は直流励磁により解決される。しかし、直流では電極面と流体との境界で生ずる分極現象や微小流量信号の安定な取り扱いが困難である。

方形波励磁は、基本的には直流的な扱いであるが、直流式がもつ不安定性を、方形の交番磁界という形で解決し、更に交番であることを利用して誘導雑音のより効果的除去をねらっている。以下にこれについて具体的に述べる。

図2に励磁電流の切換タイミングを起点に流量信号取り出しまでの状態を示す。まず、検出器の励磁コイルに(a)に示すように商用交流電源を整流、安定化した低周波の方形波電

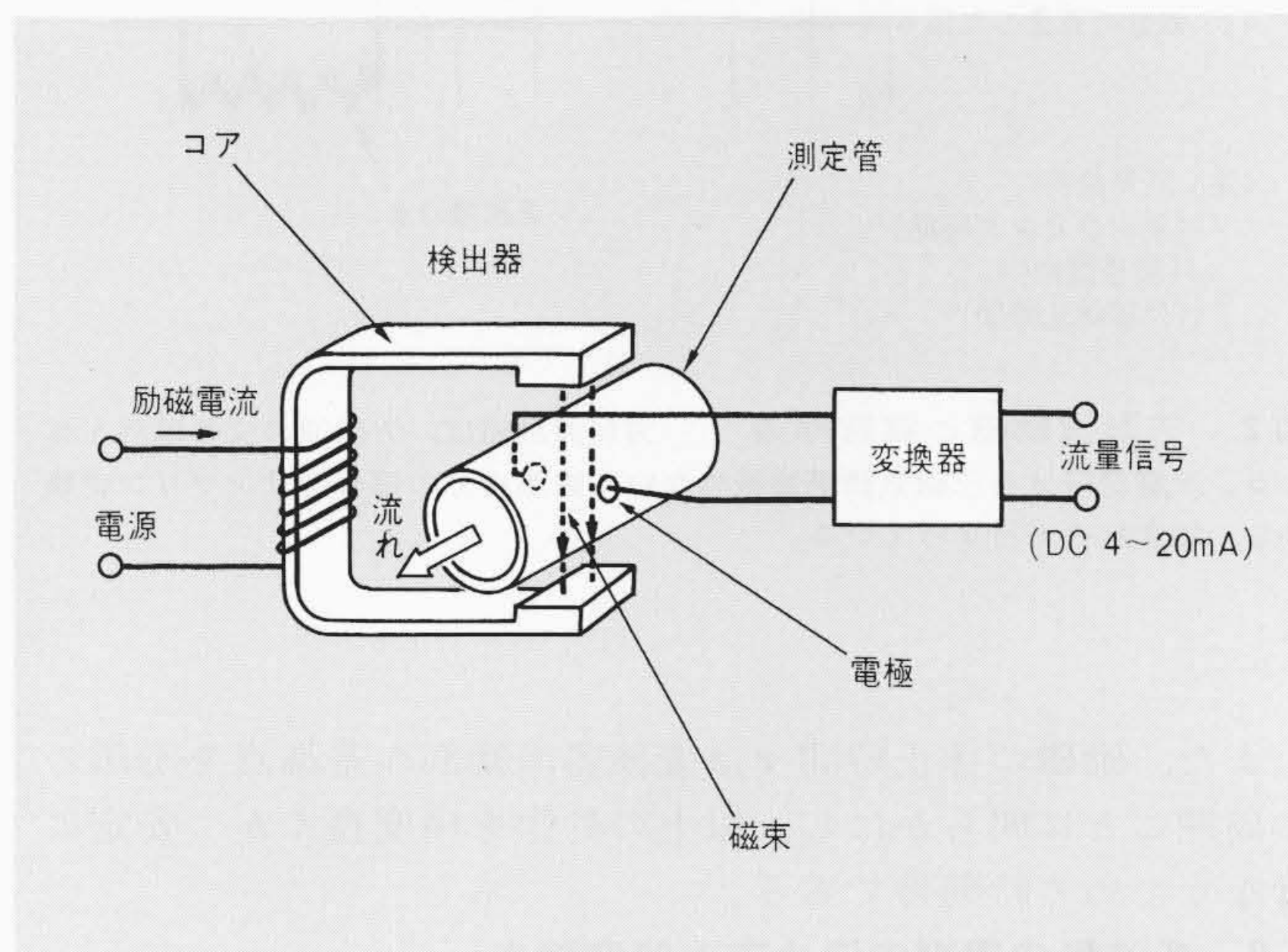


図1 電磁流量計の測定原理 測定管内の流体に磁界を与え、流体の流れで発生する電圧を一对の電極で検出し、変換器で流量に比例した電流出力信号に変換する。

流を流し、(b)に示す磁界を測定管内の流体に与える。この磁界は交番磁界であるから、各々の過渡時点では静止流体中にも磁気誘導によるわずかな電流が発生する。そして、測定管内の磁束分布は電極に対しわずかに非対称のため電極間には(c)に示す形の雑音が誘起する。これが自己磁気誘導雑音である。一方、流体が流れをもつと、流量信号が方形波の平坦部で発生し、(c)の雑音と重なって(d)に示すように検出される。

信号波(d)は変換器内でサンプリング処理され、(e)に示すように、雑音を除いた純信号の平坦部だけが取り出される。一方、サンプリング時間 t は商用交流電源周期の整数倍に設定し、サンプリング信号(e)を時間 t だけ積分する。この結果、(f)に示すように信号に重なった電源周波数と同一又はその整数倍の交流雑音は消去され、結局取り出される信号は、(e)と同じになる。

* 日立製作所那珂工場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所計測器事業部

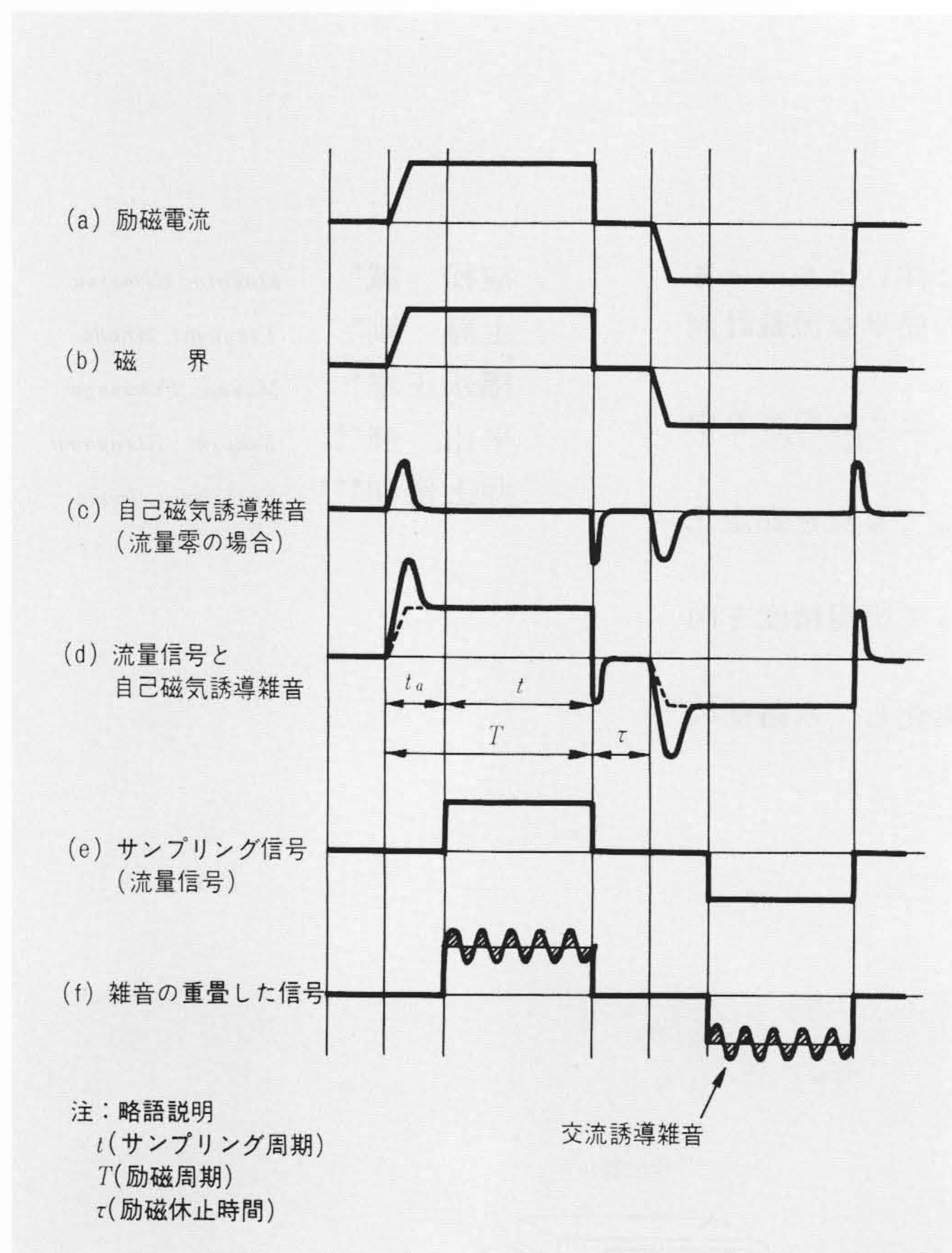


図2 方形波励磁と雑音除去 方形波励磁は、方形波の交番磁界を与える。流量信号は自己磁気誘導雑音のない、直流成分の部分でサンプリング積分し、雑音除去を行なっている。

また、励磁の休止時間 τ は変換器増幅部の基準点を励磁の半周期ごとに明らかにし、以上の動作を精度良くかつ安定に行なうための時間帯である。

2.3 各波形の周期の決め方と雑音除去

主な外部誘導雑音は、設置場所の主商用電源に起因すると考えられるが、その周波数は一定とは限らない。このため、サンプリング時間を固定すると、雑音の周波数変化で消去できない雑音が残る。この問題を解消するため、流量計の電源が一般に主商用電源から供給されるとして、サンプリング時間 t をその電源周期に同期させている。

しかし、この方法は、外部誘導雑音が他の電源に起因していたり、反対に流量計電源として雑音を誘起している電源以外のものを使用している場合には、必ずしも適切ではない。本器ではサンプリング時間 t として電源周期の数倍を採り、このような場合に対しても零点変化の低減を図っている。

また、図2で、時間 t_a は自己磁気誘導雑音がサンプリング信号に重ならない時間に余裕時間を加えて設定している。そして励磁時間 T はこの時間 t_a にサンプリング時間 t を加えた時間としている。

2.4 電極汚れと零点の安定性

電極が汚れると電極間インピーダンスが上昇し、地電流などにより流体に誘起している外部誘導雑音をより大きく拾うようになる。また一般に電極の汚れ方には対称性がないため、自己磁気誘導雑音による電極間誘起雑音も増大する。

従来の正弦波交流励磁式では、図3の点線に示すように、外部誘導雑音の周波数が電源と同一又はそれに近いと信号波

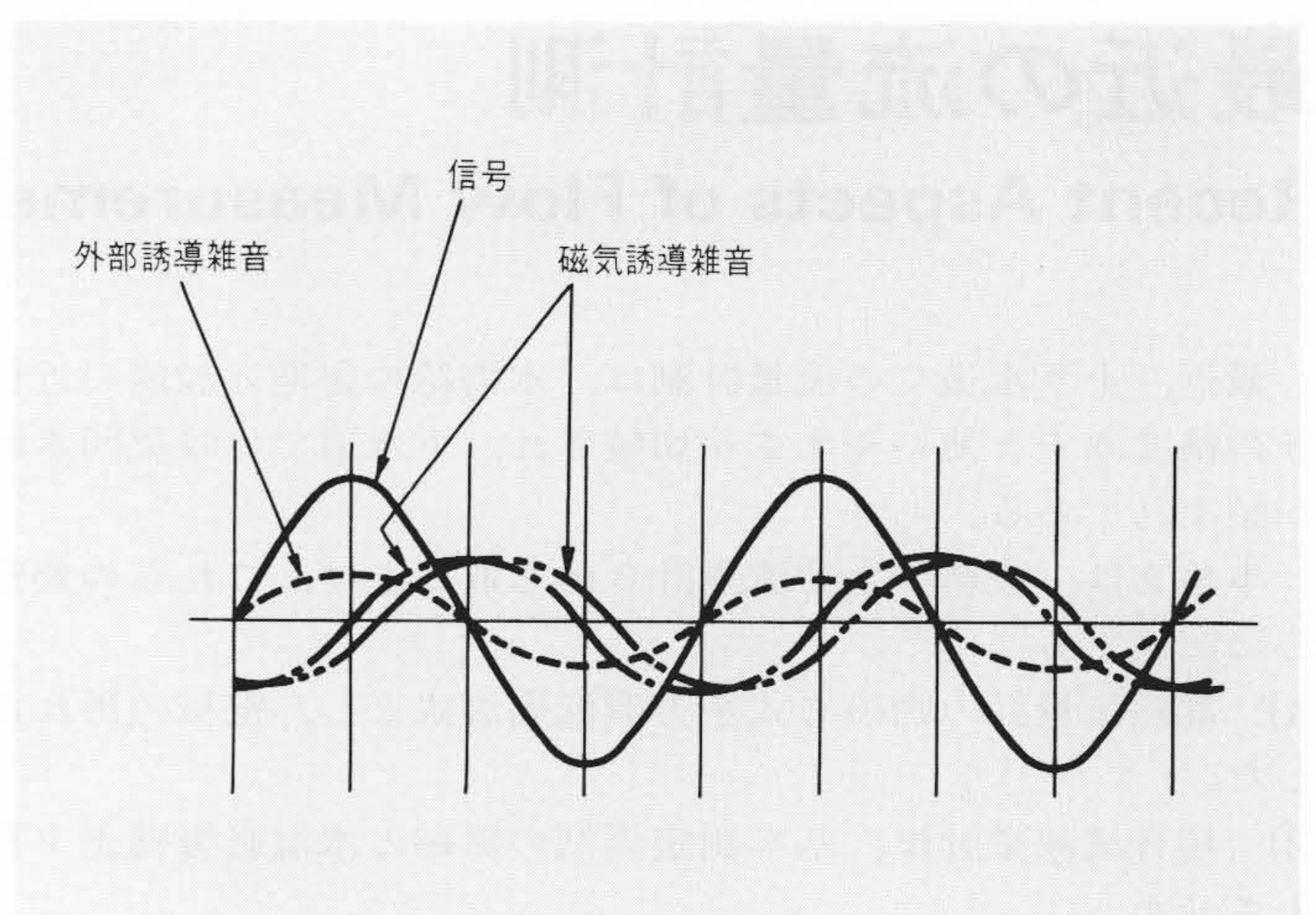


図3 正弦波交流励磁式の信号と雑音 正弦波交流励磁式では、信号と同成分の誘導雑音は弁別できない。磁気誘導雑音は信号位相に対し90度より多少ずれ、同相成分をもつ。したがって、零点変動の要因となる。

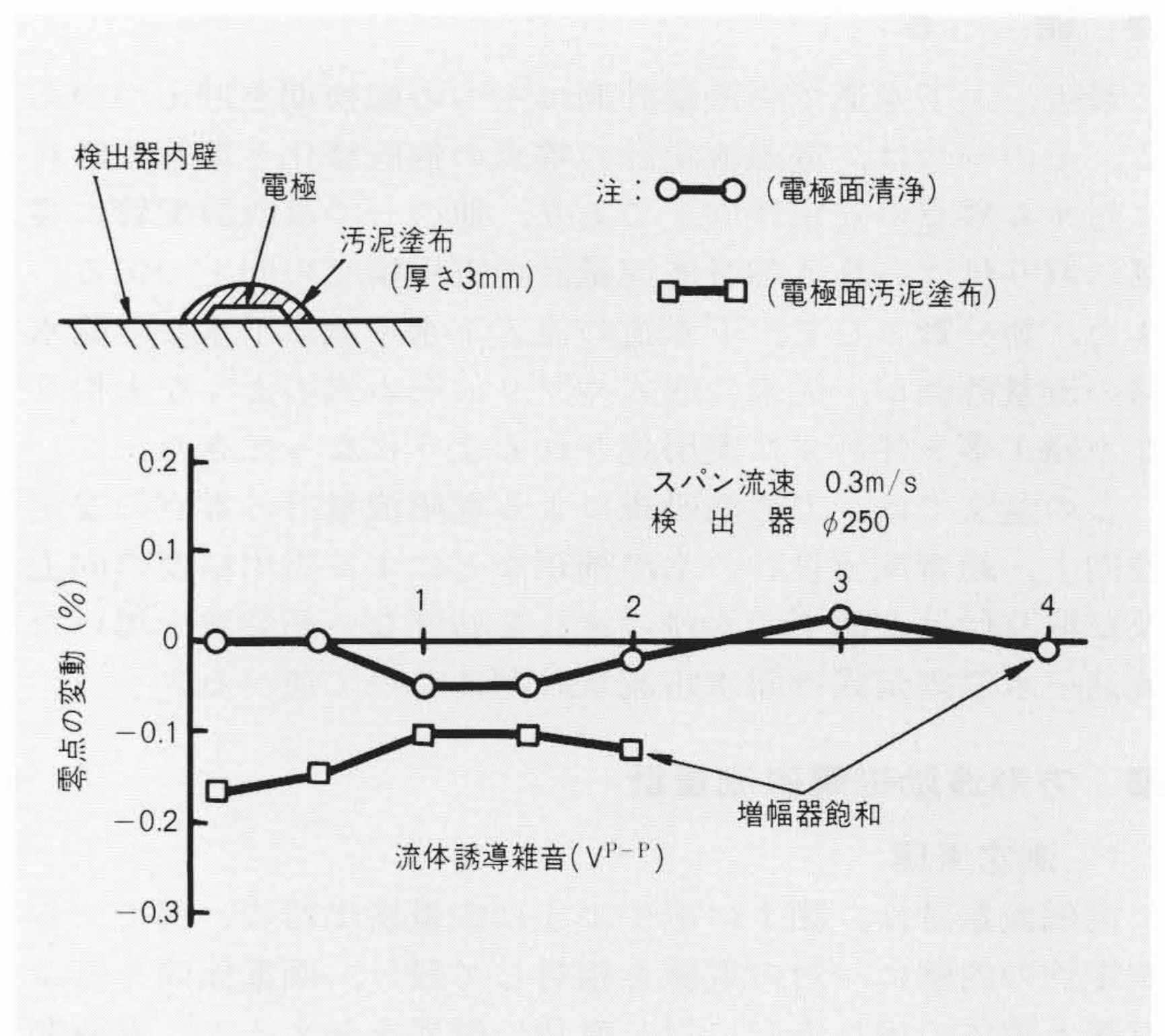


図4 電極汚れによる零点変化 口径250mmの検出器を用いてモデル的に電極を汚したときの零点変化を示す。流体誘導雑音は、検出器両端から流量計電源と同一周波数の正弦波電圧を加えた。電極間雑音電圧は約0.4mV/Vである。

と区別できない。また、自己磁気誘導雑音は理想的には一点鎖線で示すように、信号波と90度の位相差を生じ積分により消去される。しかし、検出器の構造上その位相差は正確に90度ではなく、二点鎖線で示すようにわずかにずれるため、その分だけ雑音として残留する。これらの雑音は零点の変化として現われ、初めには零点調整で見掛け上の消去を行なうが、電極の汚れ方や外部誘導雑音が大きく変化すると再び零点が変化する。このため、交流励磁式では定期的な零点調整を必要とする場合が多い。

日立製作所の方形波励磁方式は、これらの雑音を信号から大きく分離又は本質的に消去しているから、通常の設置条件下では初期の零点調整は不要であり、電極が汚れても変換器増幅部が飽和しない限りわずかな零点変化に抑えられる。図4に口径250mmの検出器を用い、電極表面を土で厚さ約3mm塗布して行なった一実測例を示す。また、図5に口径150mm

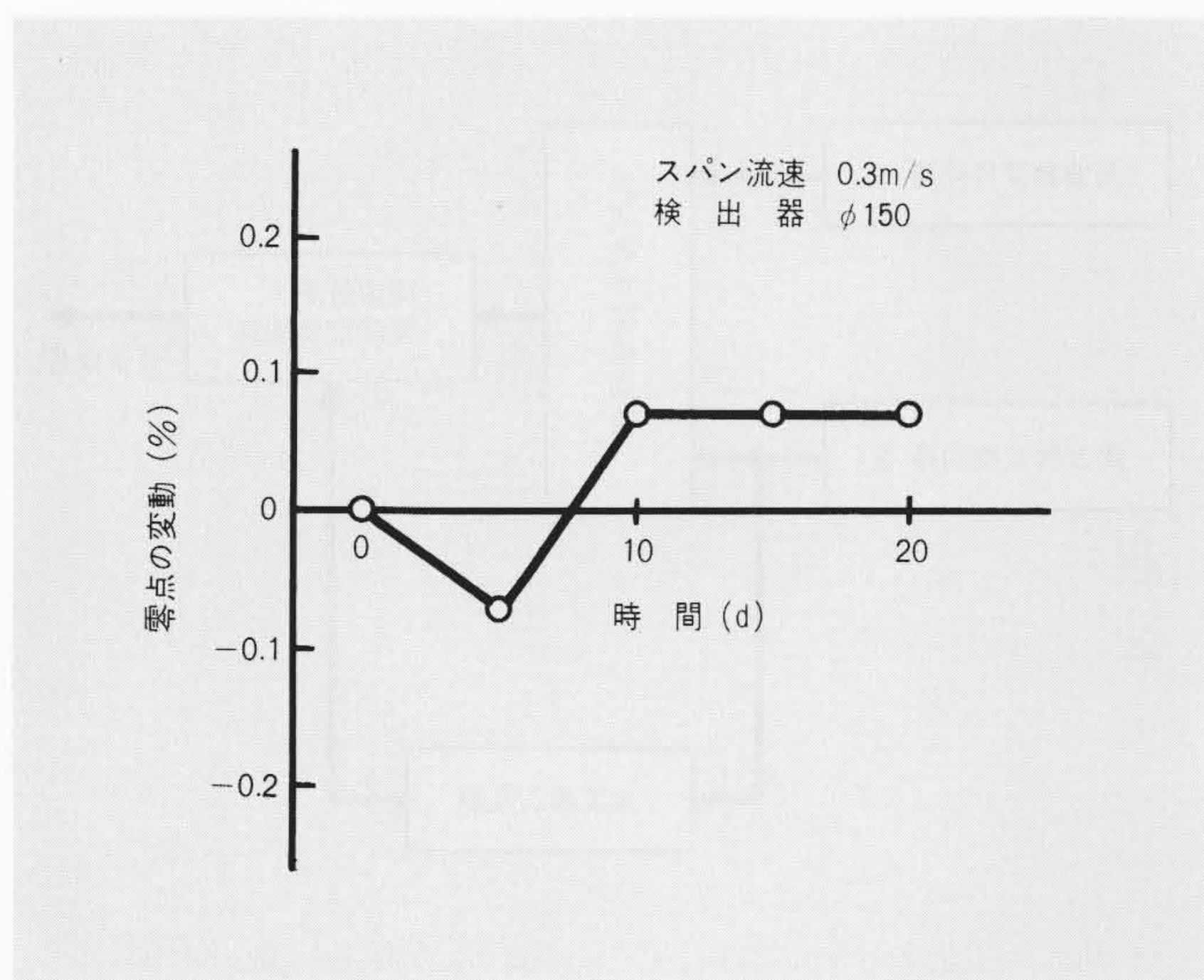


図5 濃縮汚泥による零点変化 口径150mm検出器に下水の濃縮汚泥を入れ、静止水の状態で長時間の零点変動を測定したものである。

の検出器を用い、濃縮汚泥を検出器の測定管内に充填して長期間放置した場合の零点の変化を示す。

なお、零点の変化量は口径が大きいほど、また流体の導電率が小さいほど大きくなる傾向をもつ。

2.5 消去不可能な雑音

雑音の消去方法から明らかなように、周期性のない雑音、周期性があっても上下非対称及びサンプリング時間に対して整数分の一以外の周期をもつ雑音に対しては除去効果が十分でない。したがって、強電機器や継電器などから流体に誘導するパルス状の雑音、魚や大きな固形物などが電極付近を通過するときに発生する雑音、及び流体の導電率不均一による指示の乱点などに対しては、従来の交流励磁の場合と同様に消去作用がない。またサンプリング時間以上の長い周期をもつ低周波雑音や大きさが緩やかに変化する直流雑音に対しては、交流励磁よりも悪い結果を生ずる。

2.6 その他の機能、性能

以上述べたように、方形波励磁により下水に対して優れた電磁流量計を開発することができたが、更に副次的な効果として、励磁コイルのインダクタンスによる皮相電力分の減少で力率改善コンデンサが不要となり、検出器出力信号の伝送に市販シールドケーブルの使用が可能となった。

また、口径や流速に無関係に所望のスパン変更をデジタルで直接設定できるようにした。更に、変換器は入力信号レベルに応じて自動ゲイン切換えを行なってレンジアビリティを拡大し、流速10m/s以下の範囲で30倍の流量変化に追従できるようにした。

3 超音波流量計

3.1 原理とPLL方式¹⁾

超音波を用いた流速検出方式には直接時間差法、位相差法、周波数差法など各種あるが、安定かつ精度の高い計測を容易に実現するための一方式として周波数差法が広く利用される。

周波数差法の基本測定原理を図6に示す。同図で、管の外壁に相対して設けた超音波検出器は、交互に超音波の送信と受信を繰り返す。超音波は各検出器間を伝搬媒体と流速で決まる時間で伝搬するが、伝搬媒体は一定であるからその時間は流速だけに依存する。したがって、この伝搬時間は、流体

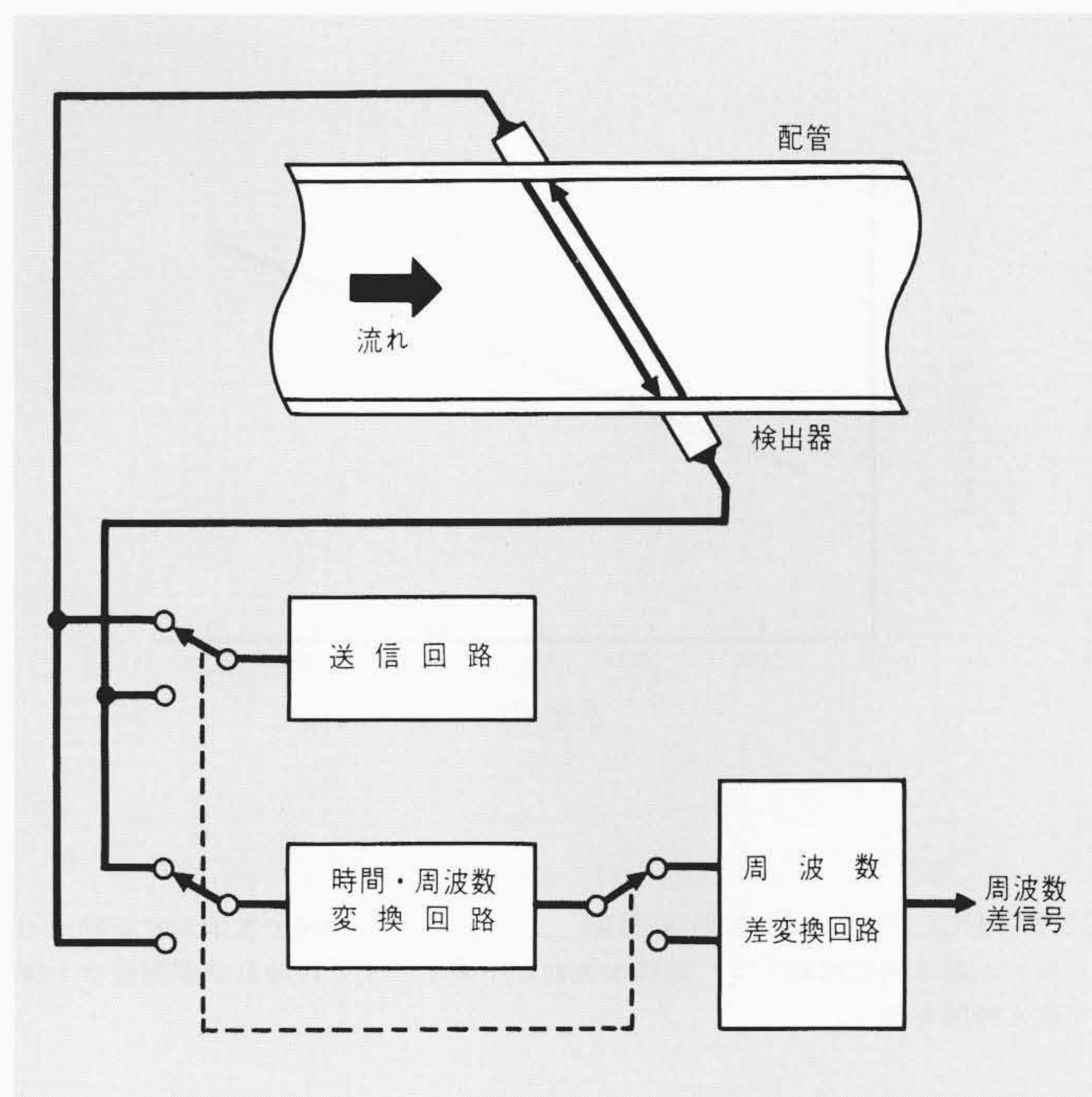


図6 超音波流量計の原理 配管に取り付けた一組みの検出器間で超音波の送受信を交互に行ない、その伝搬時間を周波数に変換することによって、流速に比例した周波数差信号を得る。

静止時に対し、上流側送信時には流速の分だけ短く、下流側送信時には流速の分だけ長くなる。そして、これらの伝搬時間をそれぞれ周波数に変換し、その差を取り出すと、その周波数差は検出器間の平均流速に比例し、管内径及び超音波の水中入射角の関数となる。

PLL (Phase Locked Loop) 方式は、超音波の伝搬時間を周波数に変換する一方式である。これは基本的には1回の超音波送受信で変換周波数が平衡するから、基本測定周期^{※1)}は検出器間の超音波伝搬時間の2倍で済み、流量情報を細かくとらえることができる特長をもっている。実際にはPLL回路の安定化のため数回の送受信後に変換周波数を平衡させている。図7に配管口径と測定周期の関係を示す。この測定周期は他の測定方式に対し約1/5である。

3.2 水温影響とその補正^{1), 2)}

従来、上下流相互送受信方式であれば、水温影響は相殺され、精度に及ぼす影響はないとされてきた。しかし、日立製作所での新しい考察結果では、流速一周波数差変換式に含まれる超音波の水中入射角が水温で変化し、流量測定値に与える影響が20℃変化で2～3%/フルスケールもあり、無視できないことが分かった。

そして、水温影響に関しモデルによる理論的解析と実験を行なった結果、変換周波数がもつ水温依存性を利用することにより、内径300～2,500mmの管路に対して0.3%/20℃程度に補正できることが分かった。図8にこの補正回路をブロック線図で示す。また内径300mmで実測した結果を図9に示す。同図から水温影響は極めて良く補正されていることが分かる。

ここで、水温補正に際して特別の温度検出器を用いず、流量信号を得るために必然的に得られる超音波伝搬時間の変換

※1) 基本測定周期とは、変換周波数が平衡するまでに超音波が送受信を繰り返す時間をいう。

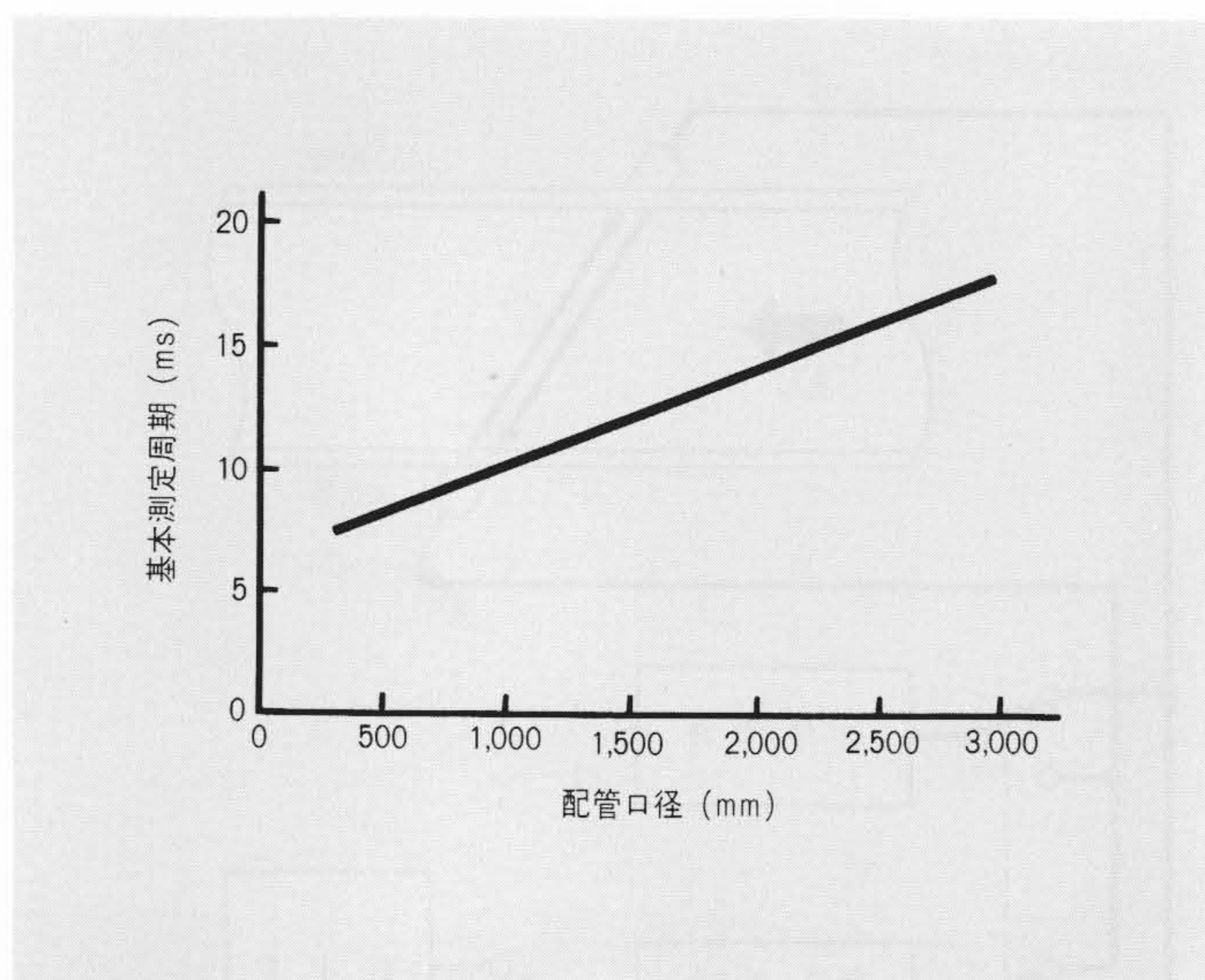


図7 PLL方式の基本測定周期 PLL方式の採用で基本測定周期は短くなる。基本測定周期とは、変換周波数が平衡するまでに超音波が送受信を繰り返す時間を言う。

周波数を利用し、しかも高い精度で水温補正を実現したことは大きな特長と言える。

3.3 その他の機能・性能

受信波は流体中の挟雑物や気泡などで振幅にゆらぎを生じ、時間検出が不安定になることを考慮し、常に一定の振幅を保つよう制御している。また流体中に気泡などの異種媒体が多量に混入すると、超音波は散乱、吸収により消滅し測定不能となる。この状態を測定回路でとらえ、異常発生時直前の流量値を保持するとともに、受信波の正常復帰で自動的に計測を再開できるようにしている。しかし、このような異種媒体が連続的に混入すると測定は永久に不能となるから、例えば気泡を発生しやすいポンプやバルブの下流側で測定する場合には注意を要する。

4 超音波式開水路^{※2)}流量計

4.1 測定方式³⁾

この流量計は、水路の一部分の流速と水位から平均流速を求め、これに水位で決まる水路断面積を乗じて流量を計測する。図10に管渠開水路の場合の測定原理を示す。同図で、水路の一部に相對して設けた超音波流速検出器はP-Q間の平均流速を検出し、流速変換器を介して演算器に転送する。一方、水路の上方に設けた超音波水位検出器を用いて水位を検出し、水位変換器を介して演算器に転送する。

水路の断面に関する平均流速は、P-Q間平均流速と水位の関数で、演算器ではこの関数に従った演算を行ない、水路の平均流速を算出する。同時に水位と水路内径で決まる水路断面積を算出し、この値に前記水路平均流速値を乗じて流量信号を得る。

4.2 水路特性と計測方法

水路の一部分の流速と水位を検出して計測する開水路の流量計測では、水位、部分流速及び平均流速の三者の間の関係が明らかであることが必要である。

これらの間を結ぶ基本関係式として、Plantleの理論^{3),4)}が

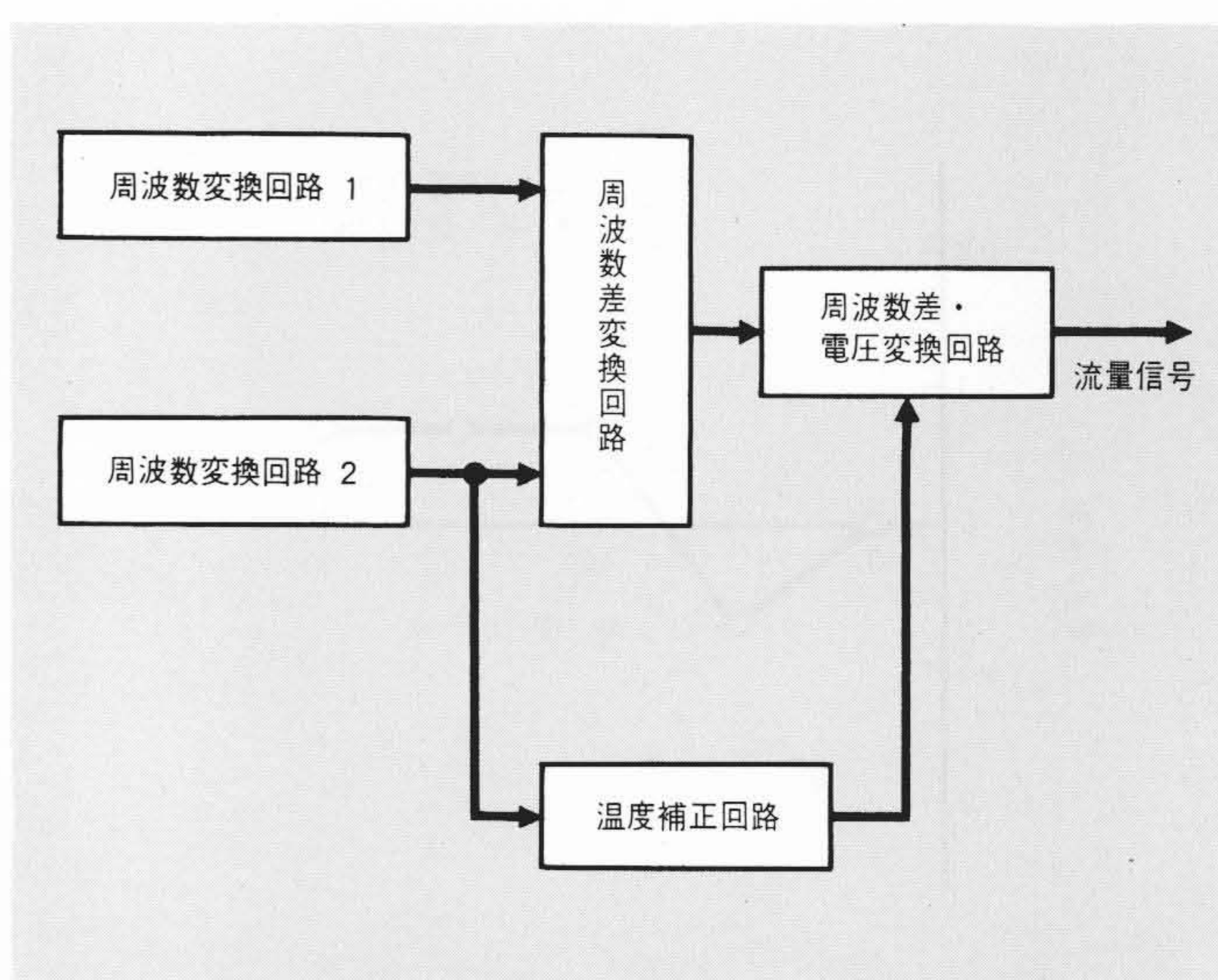


図8 水温影響の補正回路 周波数変換回路1の周波数が水温によって変化することを利用して、周波数差・電圧変換回路を補正する。周波数変換回路1は下流側受信の場合に、周波数変換回路2は上流側受信の場合に、それぞれ対応する。

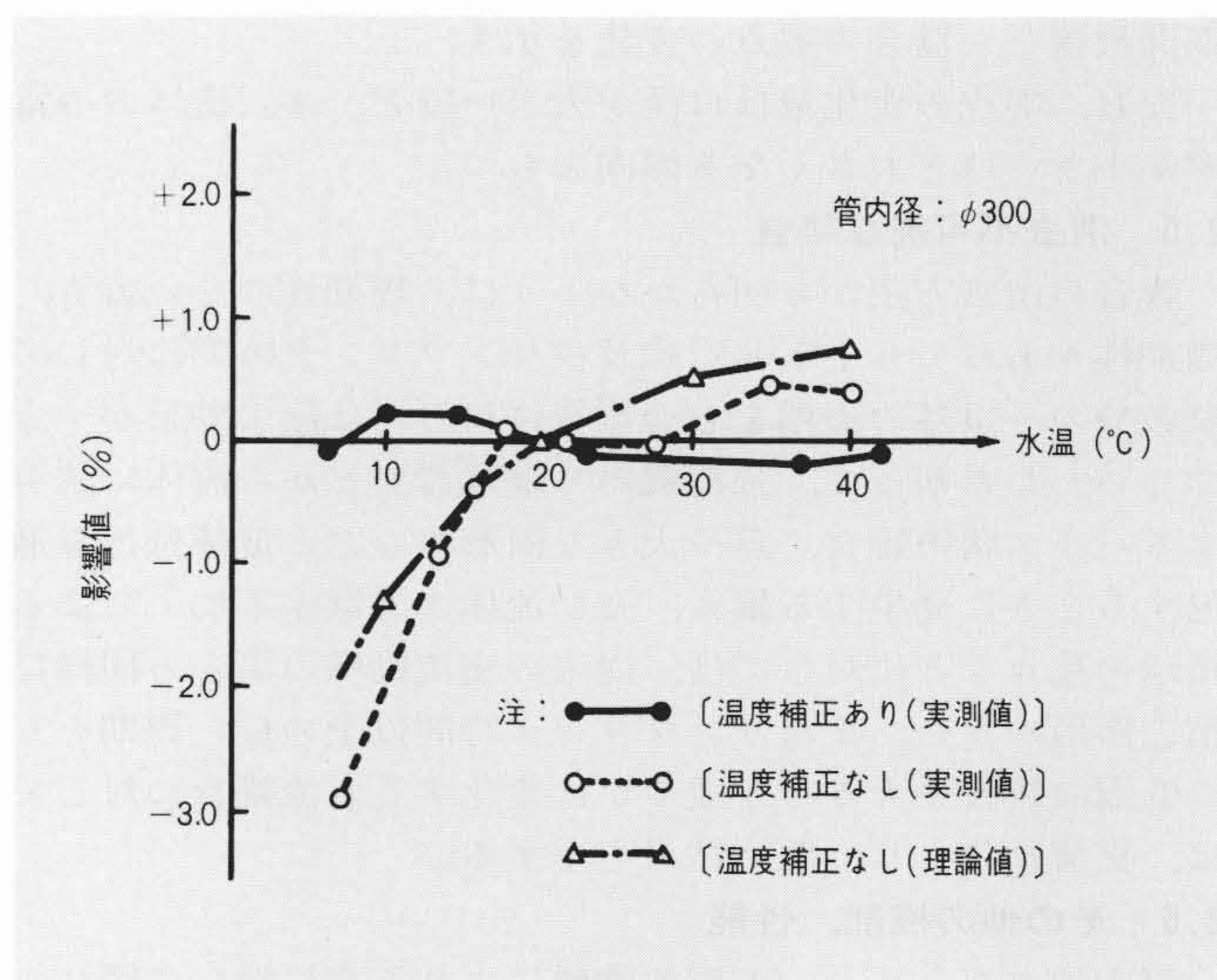


図9 水温補正結果と補正有無の比較 水温補正を行なわない場合、低温部で影響が著しく、10℃以下では2%以上に達することもあるが、水温補正によって影響値を0.3%以下に改善できる。

ら求めた部分流速と水位の関係を表わす式、及びManningの公式^{2),3)}と言われている水位と水路の平均流速との関係を表わす式を用いる。

前者の関係式には、水路固有の定数ではあるが一般に計測困難でしかも経時変化をもつ水路勾配と水路壁の粗さの項を含み、更に水路の断面形状、したがって、水位にも関係する幾何学的定数を含んでいる。一方、後者には水路勾配及び前者とは物理的内容が異なる水路壁の粗さを示す項を含んでいる。

本器では、これらの関係式を基本に、流れが等流^{※3)}であることを前提に数理的な検討を行ない、水路の平均流速を部分流速と水位で表わす一意的な関係式³⁾を導き出した。この関係式では、水路勾配の項が消去されている。また、円形断面水

※2) 開水路とは、自由表面をもった水路をいう。

※3) 等流とは、水面勾配と水路底勾配が等しい流れをいう。

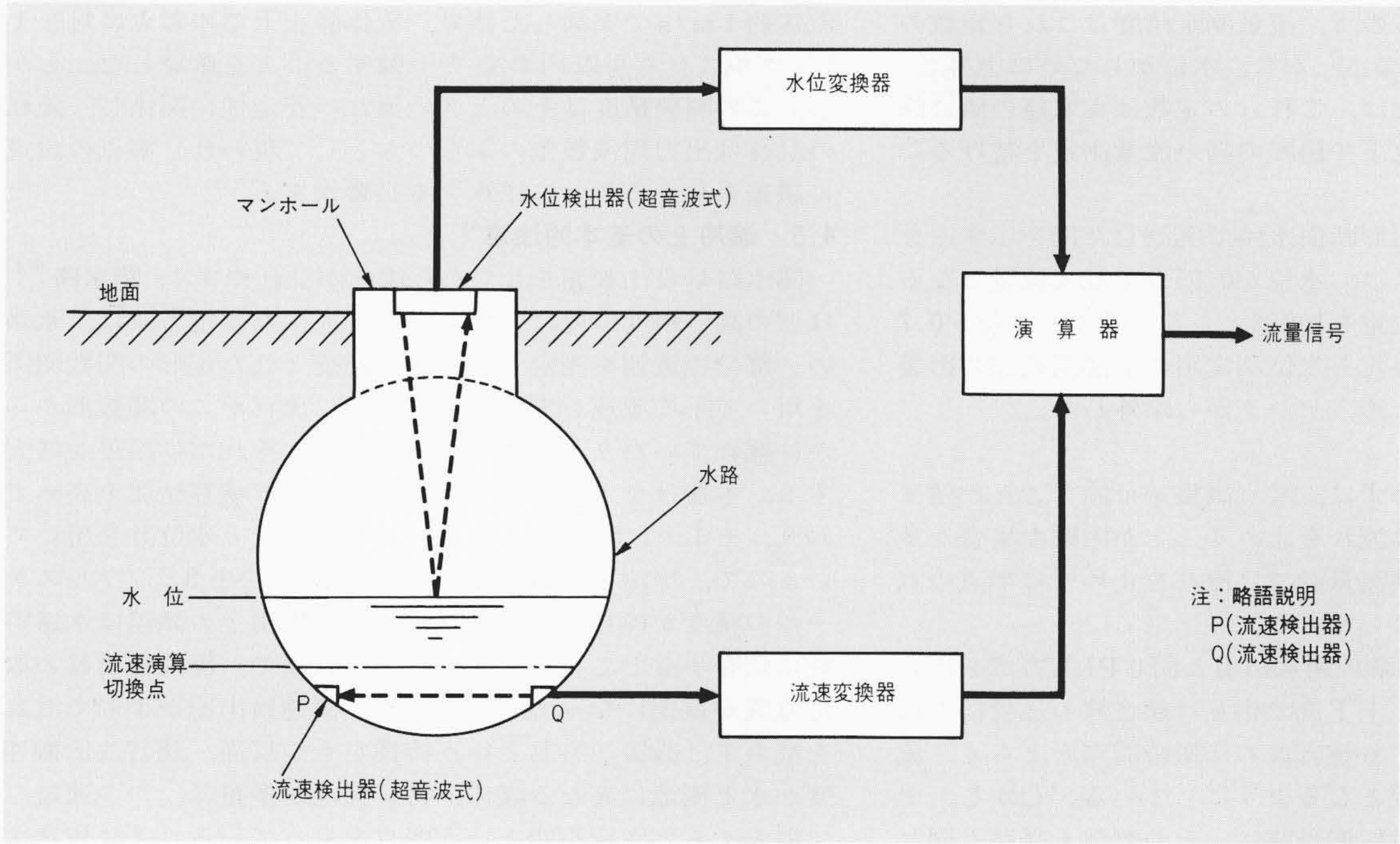


図10 開水路用超音波流量計の原理・構成
流速検出器，流速変換器で得られるP～Q間の流速から平均流速を，水位検出器，水位変換器で得られる水位から断面積をそれぞれ演算し，両者の積から流量を得る。

路で流速検出器を水路底より約 $0.2D$ (D : 水路内径)に置くと，水路壁の凹凸の高さが $0.1\sim 1\text{mm}$ ，内径が $1\sim 10\text{m}$ の範囲では水路壁の粗さの影響は 1% /フルスケール以下であった。方形断面水路では多少展開の方法が異なり，数値計算によっているが，結果はほぼ同じであった。ただし，いずれの場合も水位は水路内径又は水路幅の 30% 以上の場合である。

すなわち，本器で用いている平均流速演算は，流れが等流であれば，計測困難でかつ地盤変化などで経時的に変化する水路勾配の影響がなく，流速検出器取付位置の適正化により水路内径，水路幅及び水路壁の粗さの影響を極小化できる特長をもっている。

4.3 全水位での測定³⁾

以上述べた測定方式では，水位が流速検出器以下になると測定不能である。本器では，このような場合でも測定が可能のように配慮している。図11に全水位での流量測定フローチャートを示す。

図11は，水位が流速検出器に対しどの位置にあるかを判定し，流量変換演算方式を選択するようにしている。水位が流

速検出器以上であれば，前記した流速－水位測定による流量変換演算を行なう。

水位がしだいに低下して流速検出器以下になる場合には，水面が流速検出器を横切る直前で，そのときの平均流速と水位（実際には設定値を用いる。）を回路上でホールドする。そして，平均流速がホールドされていることを確認して，この流速ホールド値とそれ以下の水位測定値を用いて流量変換を行なう。このときの流量変換の基本式は，水位－平均流速公式であるManningの公式であるが，流速－水位測定による平均流速ホールド値を用いることによって，Manningの公式中の水路固有の定数である水路の勾配，及び水路壁の粗さを消去することができる。したがって，一度水位が流速検出器以上に達すれば，Manningの公式中の確度の低い水路固有の定数が消去され，本公式に従った流れの場合には低水位下でも精度の高い流量測定が可能となる。

また，水位が最初から流速検出器以下の場合にも，Manningの公式を用い，水位測定だけで流量変換を行なうことができる。このときは，本公式中の水路固有の定数として水路の設

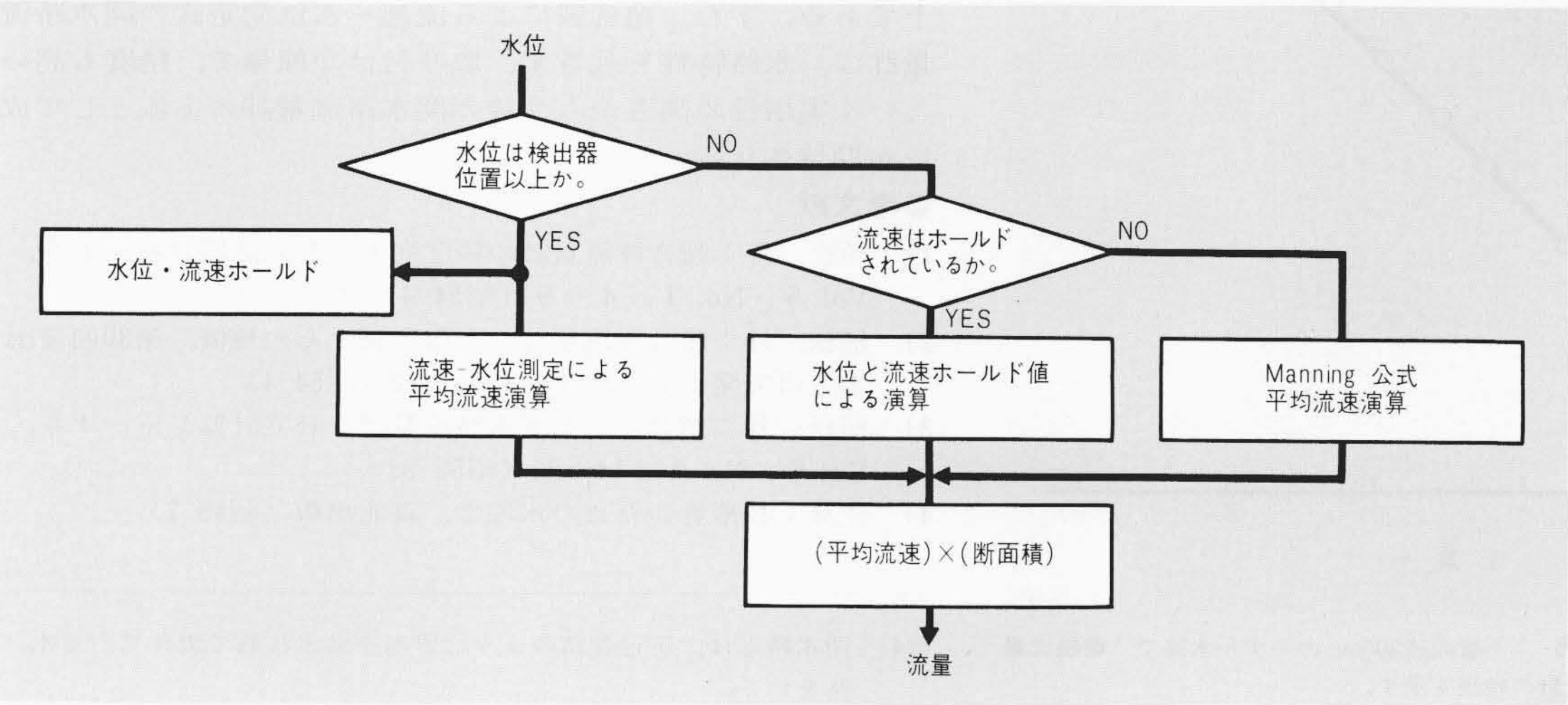


図11 流速－流量変換フローチャート
流速演算は水位に応じて3種類の演算式を使い分ける。これによって，零水位から満水までの全水位で測定が可能である。

計値又は施工値を用いるので、流量測定精度はこれら定数の決め方で大きく左右される。しかし、水位がしだいに上昇し、流速検出器以上に達すれば、これらの定数は実水路の値に修正され、その後は全水位下で精度の高い流量測定を続けることができる。

図12に内径 300mm の円形断面水路で実測した例を示す。なお、流れが等流の場合には、水位が $0.95D$ で最大流量となるから、このときの理論流量を100%とした。また、水位が $0.7D$ 以上では空隙部の狭小化と水位測定用の上部開孔部の影響で流れの乱れが激しいため、データから除外した。

4.4 零点調整

流量計では流れを止めずに、零点調整が可能なことが望まれる。特に、開水路では流れを止めることが困難な場合が多い。このため、本開水路流量計では流れを止めずに零点の点検・調整ができるようにしてある。

本器の流速測定法も3章の開水路用と同じPLL方式を用いている。PLL方式では、上下流で相互に超音波の送受信を行なって流速によって生ずる超音波の伝搬時間差をとらえ、流速が零でその時間差が零となるようにしている。しかし、上下流両検出器間の超音波伝搬径路は、その媒体も径路も同じであり、両伝送ケーブルによる伝搬時間遅れも極めて少ない上に特性も同じであるから、流体静止下ではいずれの伝搬時間もほとんど同じである。したがって、零点の変化は時間一周波数変換回路以降の回路内の変化に依存し、これを調整すれば零点は定まることになる。

このことは、図6で、送信回路のスイッチを一方に固定し、一方向送受信を行なわせ、時間一周波数変換回路と周波数差変換回路の入力スイッチを交互に切り換えて、そのときの周波数差を測定し、この値が零となるよう回路調整を行なうことと同じである。そして流体に流れがあっても、その流れが一定であれば、時間一周波数変換回路で受信する伝搬時間は常に一定であるから零点調整は可能である。

本器にこの機能を付加し、口径300mmの実験用管路を用い、

流速約 1 m/s で実験した結果、流体静止下での零点に対し 1% /フルスケール以内の差で一致することを確認した。しかし、この調整精度はそのときの流れの安定性に関係し、流れの乱れは出力周波数差のふらつきとして現われ、零点の設定に誤差を与えることに注意する必要がある。

4.5 適用上の基本的注意³⁾

開水路は自由表面をもつから流れが乱れやすく、閉水路^{※4)}ほどの高い精度は得にくい。以上で述べた測定方法は、水路の一部分の流速を測定し、等流を前提とした定形の関数関係を用いて平均流速を求めているから、流れがこの関数形からかけ離れていたり、定まらない場合にはそれだけ誤差が増大する。本器はマイクロプロセッサを用いて演算精度を高めており、 $\pm 1 \sim 1.5\%$ /フルスケールの流速計と水位計を用いているので、等流下であれば二乗平均誤差で $\pm 3\%$ /フルスケールの精度が得られる。したがって、実用上の誤差は水路特性に依存するところが大きい。その意味で、流速検出器の取付位置が重要になってくる。また、流速検出器が小形で流れを乱さず、設置が容易という特長をもつ反面、超音波伝搬速度が水と極端に異なる媒体、特に気泡が多量に、かつ連続して混入すると測定不能という弱点をもっていることに留意する必要がある。

したがって、流速検出器の取付位置付近には、流れを乱すポンプ、ゲート、堰、段差などが無いことが望ましく、特に下水では気泡の多発を招くので注意を要する。

また、水路底には土砂やヘドロなどが堆積し、水理学的な水路形状が変化する。これは不等流を生ずる原因となる上、水路断面形状変化に伴う流速関数の変化にもつながり、また水深変化や断面積変化を生じて誤差が増大する。したがって、土砂などの堆積しにくい場所を選ぶか、定期的に堆積物を除去することが必要である。しかし、本器では、流速として $P-Q$ 間を結ぶ線上の平均流速を検出しているから、中心の一点の流速を検出する方式に比べ、最適流速検出位置が約2倍高い。したがって、流速検出器の土砂かぶりを生じにくく、堆積物による流速の乱れの影響も少ないという利点がある。

5 結 言

以上、上下水道での新しい流量計として3機種を挙げて述べたが、これらは今後共上下水道に限らず他の水処理分野をも含めて主要流量計になると考えられる。

それは、電磁流量計の方形波励磁による零点の安定性向上という下水対応性の向上であり、超音波流量計ではPLL方式の採用と水温補正による高精度化、及び既設配管適用性の向上である。また、超音波による流速-水位測定式の開水路流量計は、水路特性を乱さず、取り付けが簡単で、精度も高いという実用性の高さから今後の開水路流量計の主流として成長が期待される。

参考文献

- 1) 植松, 外: 超音波流量計の精度向上, 日立計器ジャーナル, Vol. 5, No. 1, 4~9 (昭54-4)
- 2) 植松, 外: 超音波流量計の水温影響とその補償, 第30回全国水道研究発表会講演集, 420~422 (昭54-4)
- 3) 植松, 外: 超音波管渠開水路流量計, 日立計器ジャーナル, Vol. 6, No. 1, 14~20 (昭55-3)
- 4) 佐藤: 技術者のための水理学, 森北出版 (昭48-7)

※4) 閉水路とは、圧送管路のように管内を満水状態で流れている水路をいう。

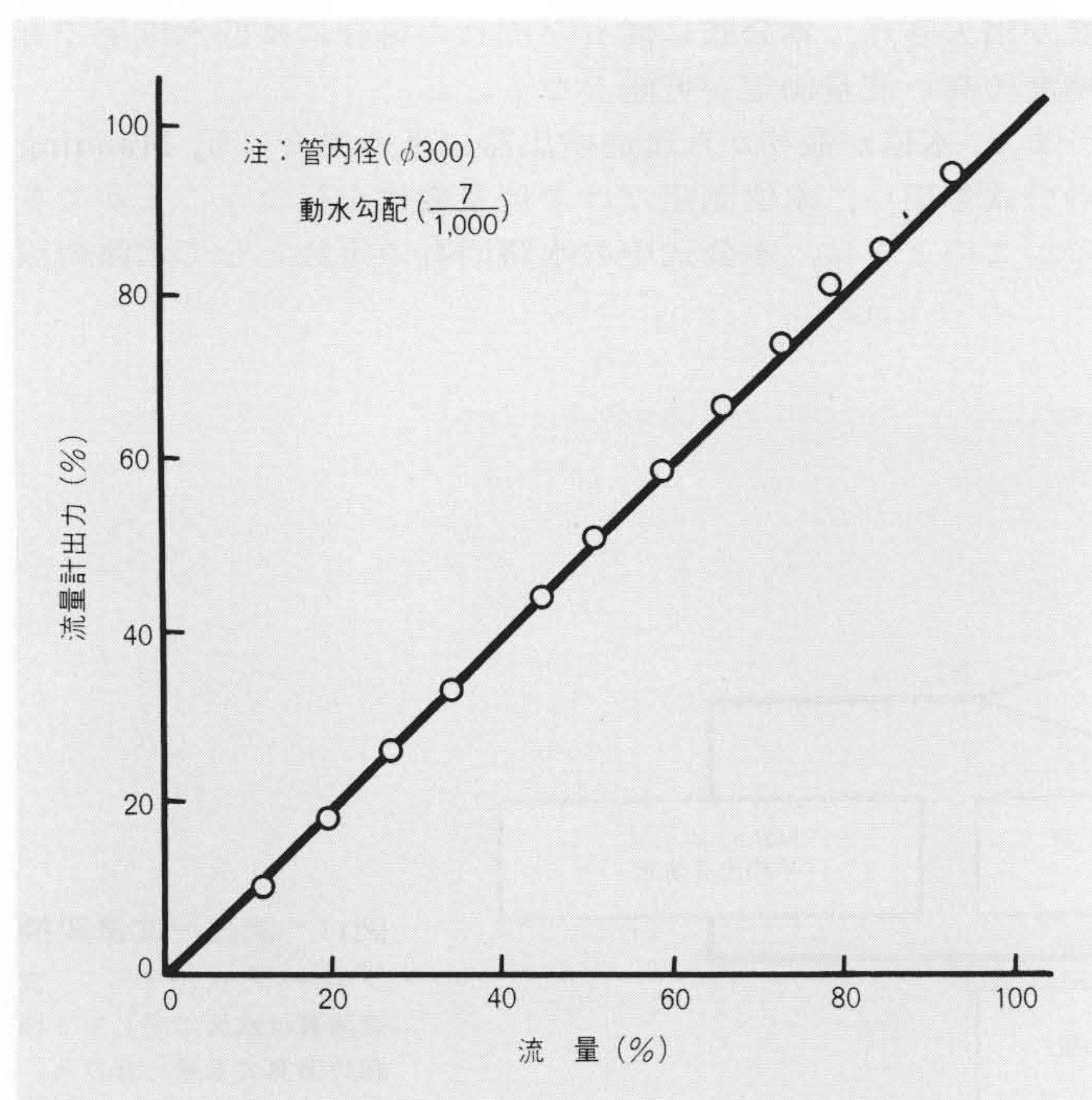


図12 開渠流量計の実測例 管内径300mmのモデル水路で、電磁流量計を基準にした場合の開渠流量計の特性を示す。