

試作電磁式流量計の特性

齋藤良平*

Reports on the Trially Manufactured Electromagnetic Flow Meter

By Ryohei Saitō

Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract

For the purpose of helping forward the study of the circulation of boiler water the writer trially designed and built an electromagnetic flow meter. This meter is featured by the ability in giving linear calibration curve without respect to velocity, viscosity, density and temperature of the flow. It can also be used advantageously for the measurement of instantaneous velocity of rapidly pulsating flows, because of the absence of time lag.

With the above features and advantages this type of flow meter is finding a wider field of application.

The writer describes in this article the theory, construction, as well as the characteristics of the meter determined in the course of experiments on the boiler.

〔I〕 緒 言

電磁式流量計とは「磁場に対して直角の方向に導電性液体を流す場合流速に比例した起電力が液体自身に誘起する」という Faraday の法則を応用したもので、1936 年以来 A. Kolin⁽¹⁾ その他の研究者⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ によつて研究され、微小流量、脈動流の測定、特に動物の血液の瞬間的流れ状態の研究に実用され生物学会に大なる貢献をしているが、増幅器、不要電圧の除去、電極等に就いて未だ多くの問題が残されているようである。この電磁式流量計は計器としては全く新らしく又原理的にも興味あるものでこの特長とする所は機械的可動部分がなく指示が流量に完全に比例することであり、さらに液体の粘性や流れ状態に無関係なこと、オリフイス等の如く流れに障害を与えないこと、遠隔測定の出来ることなどが挙げられる。

外国は勿論のこと本邦に於てもこの研究並びに応用が最近盛んになりつゝある。日立製作所に於ても昭和 26 年以来この流量計の試作研究を進め、数箇の試作品を完

* 日立製作所日立研究所

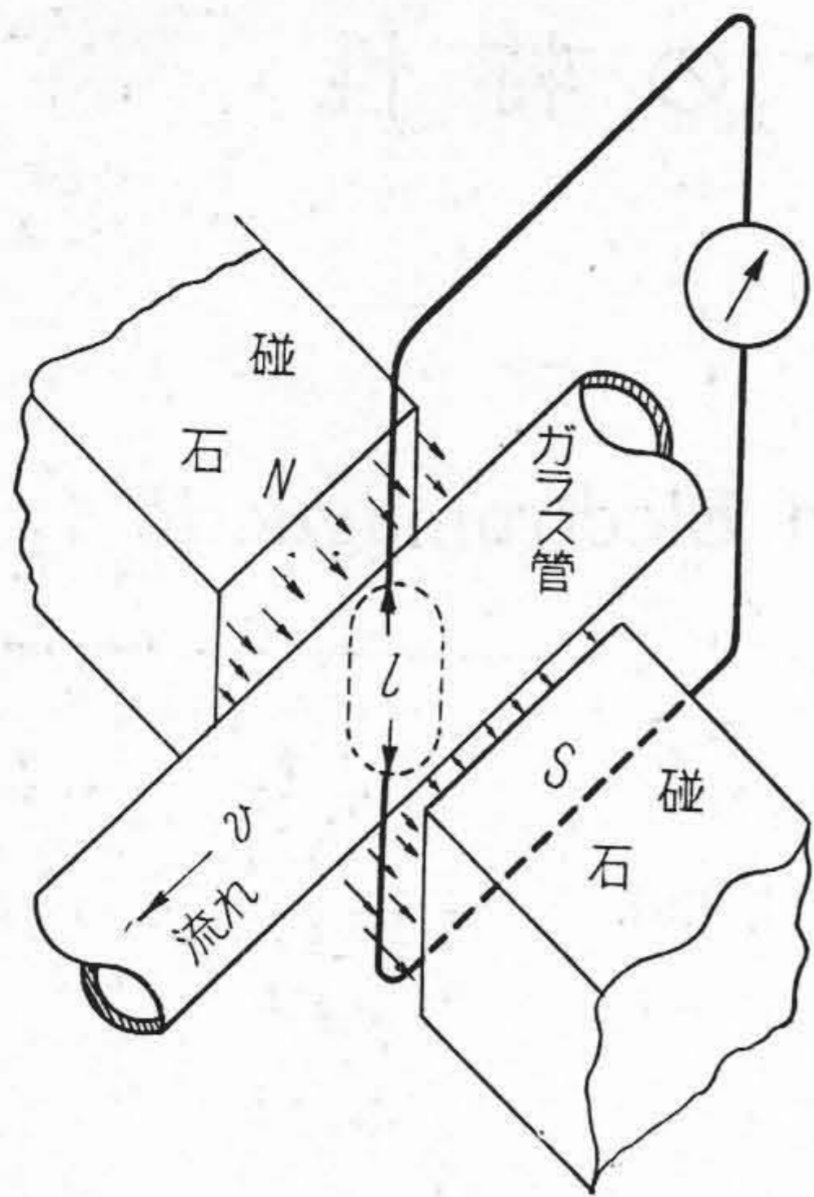
成して罐水循環の研究に応用して循環量の変化、脈動流現象等を探求し日立水管汽罐の性能向上に活用するまでになつているが計器として製品化するためにはなお現在研究を続けている。本文では本流量計の原理並びに現在実用している作品に対して行つた実験結果の概略に就いて述べる。

〔II〕 原 理

磁場の中で導体を動かすと Faraday の法則によつて誘導起電力が発生する。導体は固体に限らず液体でも良いことは勿論である。今第 1 図(次頁参照)の如く導電性液体が流れる電気的には不導体の材質の導管に垂直に磁場を与え、磁場に垂直に管に電極を挿込んでおくと電極には流量に比例する起電力が発生するからこれを増幅器に導きメータにつないでよみとれば流量が電氣的に測定されるわけである。即ち Faraday の法則によれば (1) 式の如く、誘起電圧 e_r は磁場に直角なる導体の速度、磁束密度、管直径に比例する。

$$e_r = -Blv \times 10^{-8} \dots \dots \dots (1)$$

e_r = 誘起電圧 (Volt)



第1図 電磁式流量計の原理
Fig. 1. Basic Components of the Electro-magnetic Flow Meter

- B = 磁束密度 (gauss)
- l = 電極間距離 (cm)
- v = 導体の磁場に対する速度こゝでは液体の平均流速 (cm/sec)

今、 Q = 流量 (cm³/sec) r = 管半径 (cm)

とすれば平均流速 v を $\frac{Q}{\pi r^2}$ に置換えることが出来る故 (1) 式からわかる如く磁場を一定に維持しておけば、流量は起電力に比例する。即ち起電力と流量は直線的関係にある故起電力から流量を測定出来る。

最初は直流磁場を利用することが考えられたのであるが直流磁場を用いると電極の成極作用や誘起電圧の増幅に難がある。このためその後交流磁場を利用したものが作られたが交流磁場を用いることによつて不要電圧の発生即ち、液体の如何なる運動状態に於ても入力回路に不必要な交番起電力が誘起されるということが起る。

この不要電圧は、電極とその導線により単相変圧器の二次側を形成することによつて生ずるものである。これに就いて考えてみよう。

(1) 式の磁束密度が正弦波的变化するとすればその瞬時値は

$$B = B_m \cos 2\pi ft \dots\dots\dots(2)$$

B_m = 最大磁束密度 [gauss]

f = 周波数 c.p.s.

となる。導体が静止状態にあるとき即ち流速が0に於ける誘起電圧 e_s は次の如くなる。

$$e_s = -\left(\frac{d\Phi}{dt}\right) \times 10^{-8} \dots\dots\dots(3)$$

こゝに Φ は導管に挿入せる電極と導線によつて形成せる環内の全貫通磁束であつて交流磁場に於ては上記の如

く正弦波的变化をするものとする。即ち電極と導線の外部負荷回路を接続することによつて生ずる面積を S とすれば

$$\frac{d\Phi}{dt} = S \frac{dB}{dt} \dots\dots\dots(3')$$

但し面積 S は磁場内に構成されている実効面積である

$$\therefore e_s = SB_m \sin 2\pi ft \times 10^{-8} \dots\dots\dots(4)$$

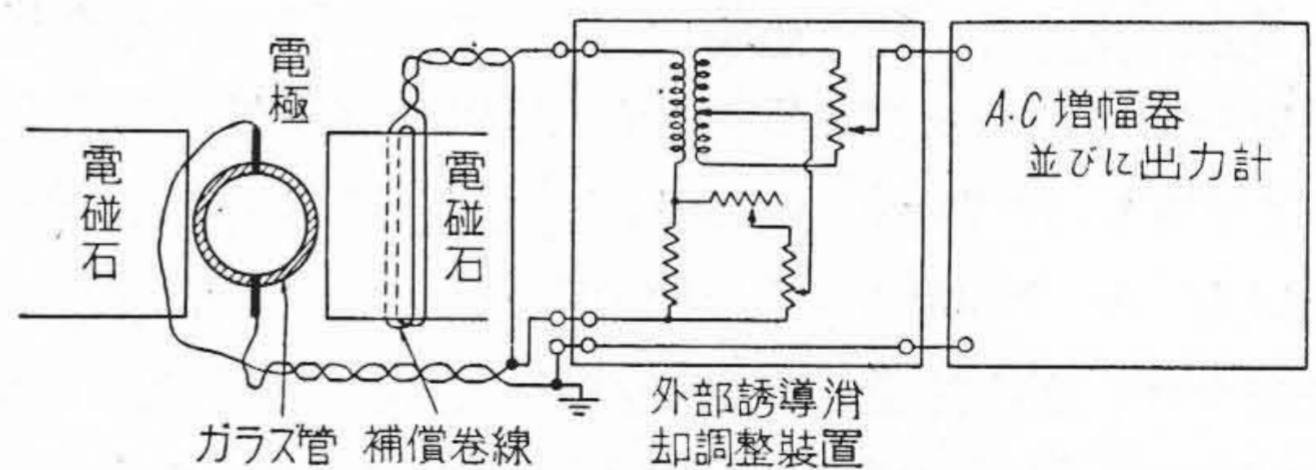
となり $v=0$ に於ても e_s は変化するのである。さて全誘起電力 e は e_v と e_s との和であるから (1) 及び (4) 式から

$$e = e_v + e_s = -B_m lv \cos 2\pi ft \times 10^{-8} + SB_m \sin 2\pi ft \times 10^{-8} \dots\dots\dots(5)$$

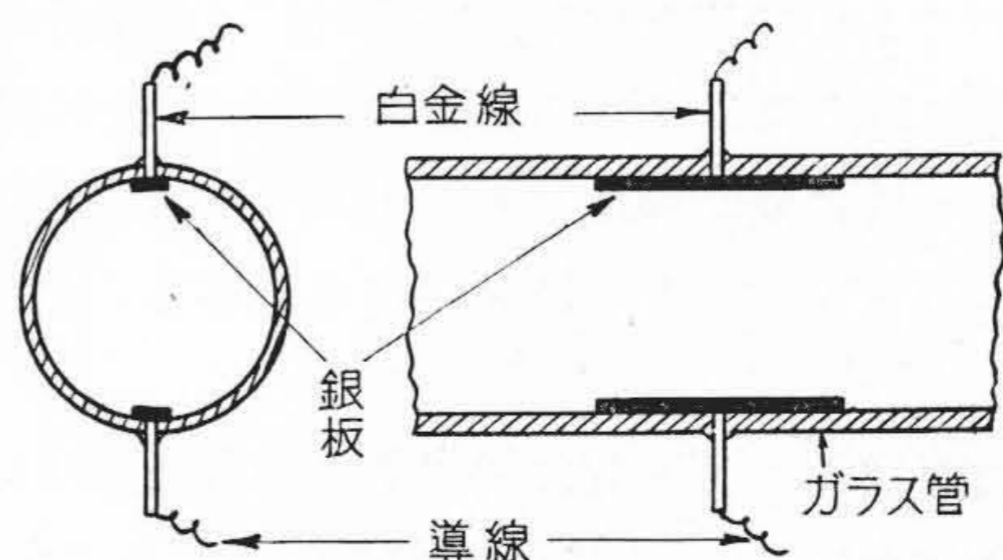
で表わされることになる。(5) 式は二つの項より成立つており第一項は直流磁場の場合と類似の交流の電極端子電圧であり、第二項は外部負荷回路を接続することによつて生ずる面積を交流磁場が貫くことにより生ずる電圧である。この第二項で表わされる電圧は v 、即ち液体の流れに無関係であり測定には役立たないものであるからこれを消去しなければならない。この不要電圧を如何にして消去するかが大きな問題ではあるが完全に除いて流れに比例した誘起電圧のみを増幅器に導き出力計から流量を知ろうというのが電磁流量計の原理である。

〔III〕 試作実験用電磁式流量計

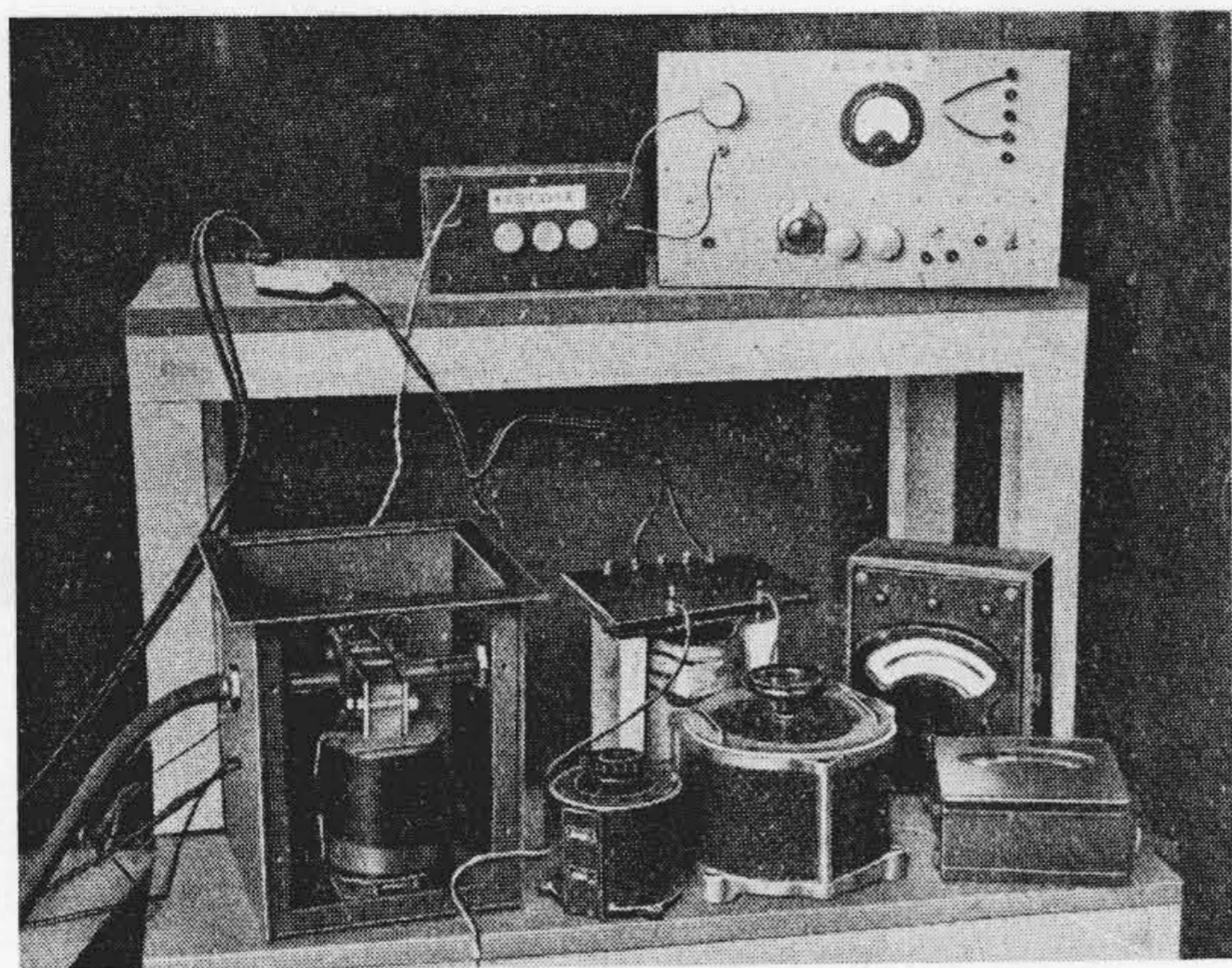
罐水循環の実験用に試作した交流磁場を用いた電磁式流量計を第2, 3図並びに第4図に示した。流量計は電磁石と導管、外部誘導消却調整装置並びに A.C. 増幅器、出力計の4つの部分から成立つもので、外部誘導消



第2図 電磁式流量計装置の骨子図
Fig. 2. Basic Diagram of the Electro-magnetic Flow Meter



第3図 導管
Fig. 3. Flow Meter Pipe



第4図 電磁式流量計装置
Fig. 4. Electromagnetic Flow Meter Set

却調整装置と磁石に巻かれている補償巻線は不要電圧 e_s を補償するためのものである。試作に際して特に計測の安定度をはかるため細心の注意をはらった。

以下試作品の各部について説明する。

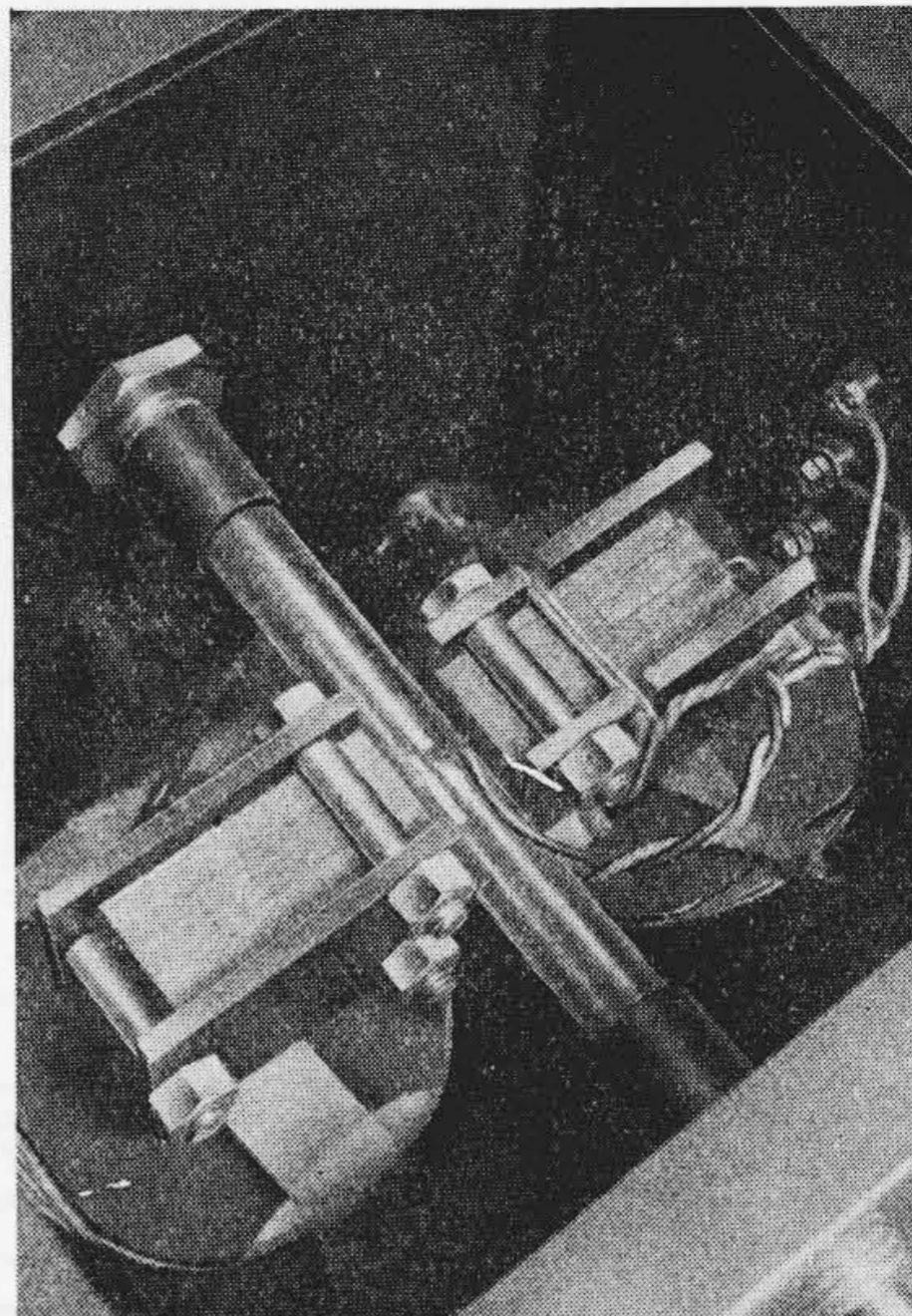
(1) 電磁石と導管

第5図に電磁石と導管の詳細を示した。交流電磁石は幅 30mm の矩冊型 T 級硅素鋼板を厚さ 30mm に積み重ね、極間隔 22mm のものでコイルは 2φ D.C.C. 線 500 回巻いたものを 2 箇並列にし、50 サイクル、5 アンペアで励磁した。この間に導管が置かれてある。

導管は電気的不導体、且つ非磁性のものでなければならないので 内径 17.26φ (外径 20φ) のガラス管を用い第4図の如く電極は 3×20 (厚さ 1mm) の銀板を相対し、ガラス内壁に密着させ取出線には 1φ の白金線を用いたものである。銀板を用いた理由は、液体による腐蝕のないようにと思つたからである。厳密な計測の結果、電極間距離、断面積はそれぞれ 15.5mm, 2.28cm² であつた。以上の電磁石と導管は鉄板箱内に固定させ、外部からの磁束の影響を避けるようにし計測の安定をはかつた。又測定部導管 (ガラス管) の前後に導電性導管 (真鍮管) を用いこの導管と接地用電極とを一点に於て接地し液体を通じて、外部から導かれる電氣的雑音を避けるようにした。

(2) 外部誘導消却調整装置

如何にして流量に無関係な前記の不要誘起電圧を除去するかが最も大きな問題で計測の安定度も一つにこゝにかゝつていと思われ

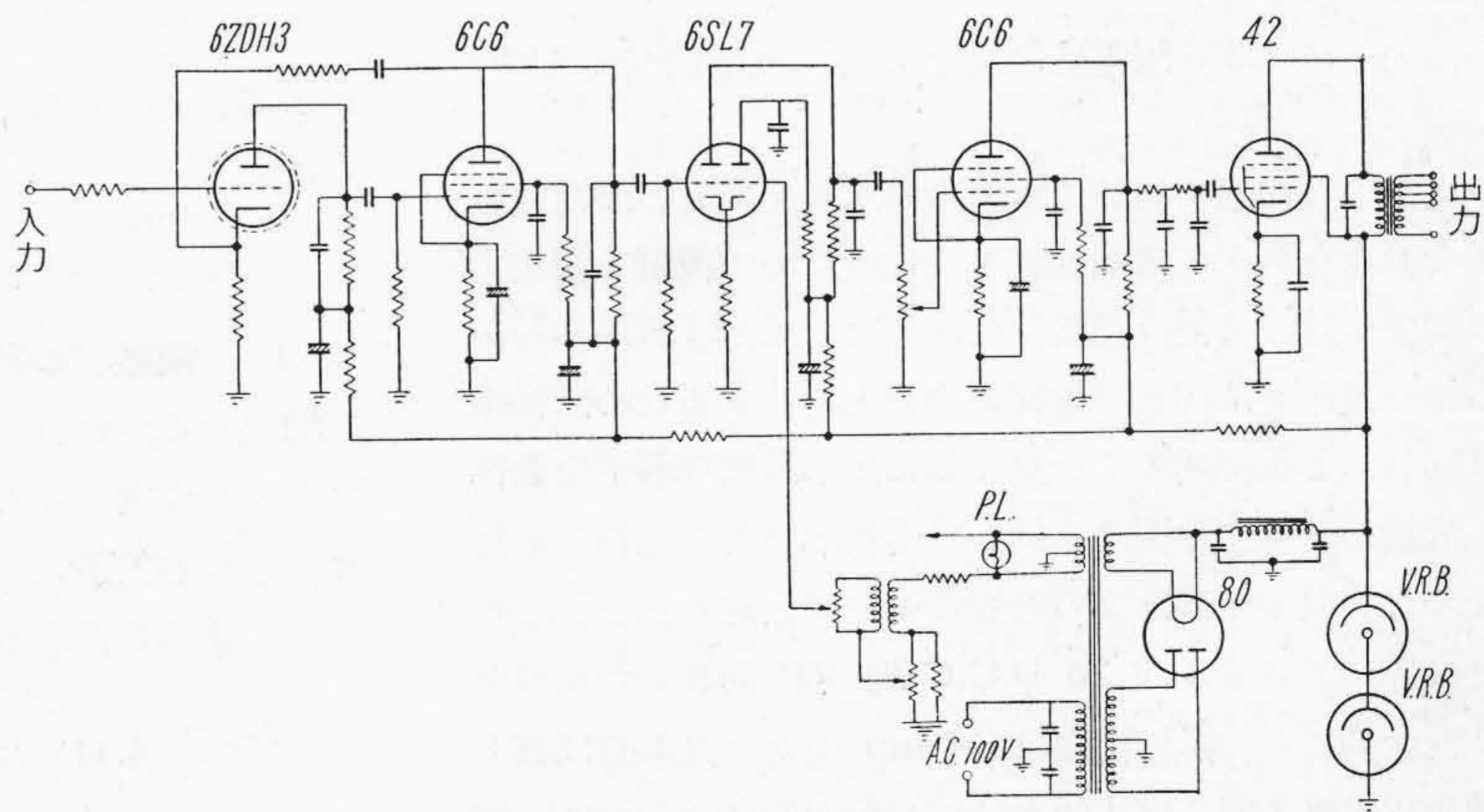


第5図 導管と磁石
Fig. 5. Flow Meter Pipe and Magnet

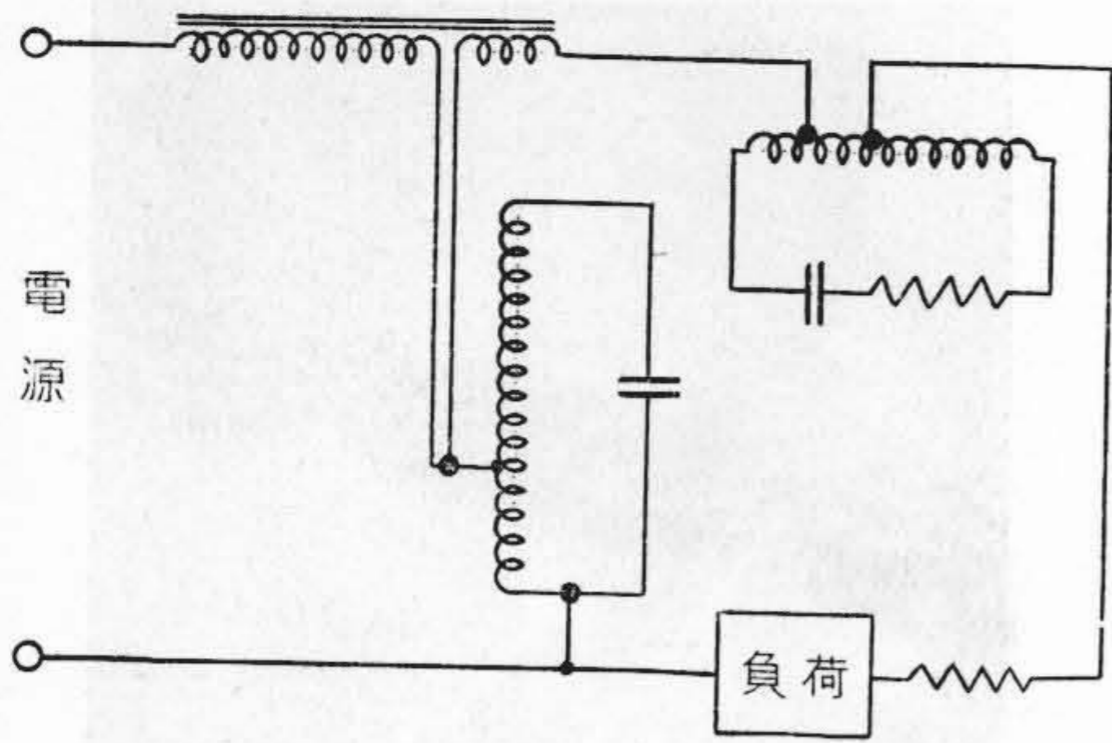
る。種々検討をした結果、第2図に示す如く磁石上に補助単巻コイルを巻き不要電圧と逆位相で等しい大きさの補償電圧を加えることとした。そのためには単に補償電圧の大きさのみを調節しても駄目であるから第2図のように抵抗と相互誘導 (変圧器) によつて交流電位差計を形成しこれによつて打消すようにした。

(3) A.C. 増幅器

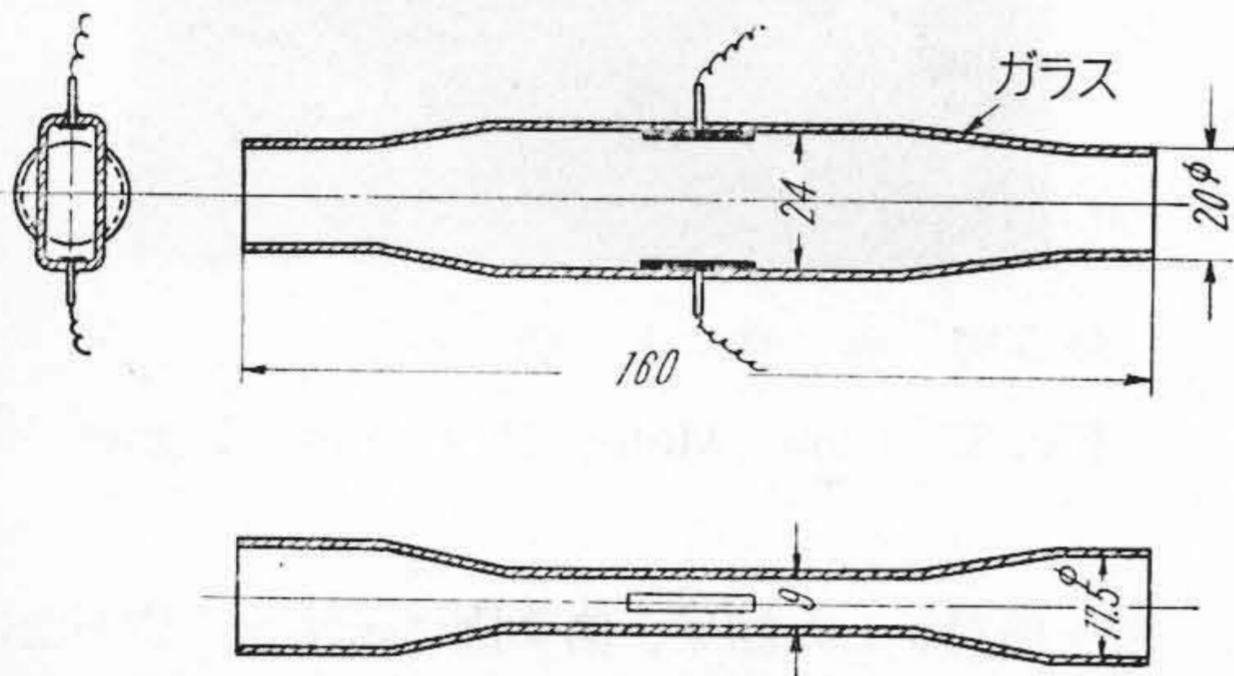
試作品に用いた増幅器は一般的な 50 サイクル 5 段 AC 増幅器でその配線図は第6図に示す如く 6ZDH3, UZ-6C6, 6SL7-GT, UZ-6C6, UZ-42 真空管を用いたもので、プレート電圧には交流電源を用いるため定電圧放電管 2 箇を用い電源の変動を避けるためには第7図



第6図 A.C. 増幅器配線図
Fig. 6. A.C. Amplifier Circuit Diagram



第 7 図 定電圧装置配線図
Fig. 7. Stabilizer Circuit

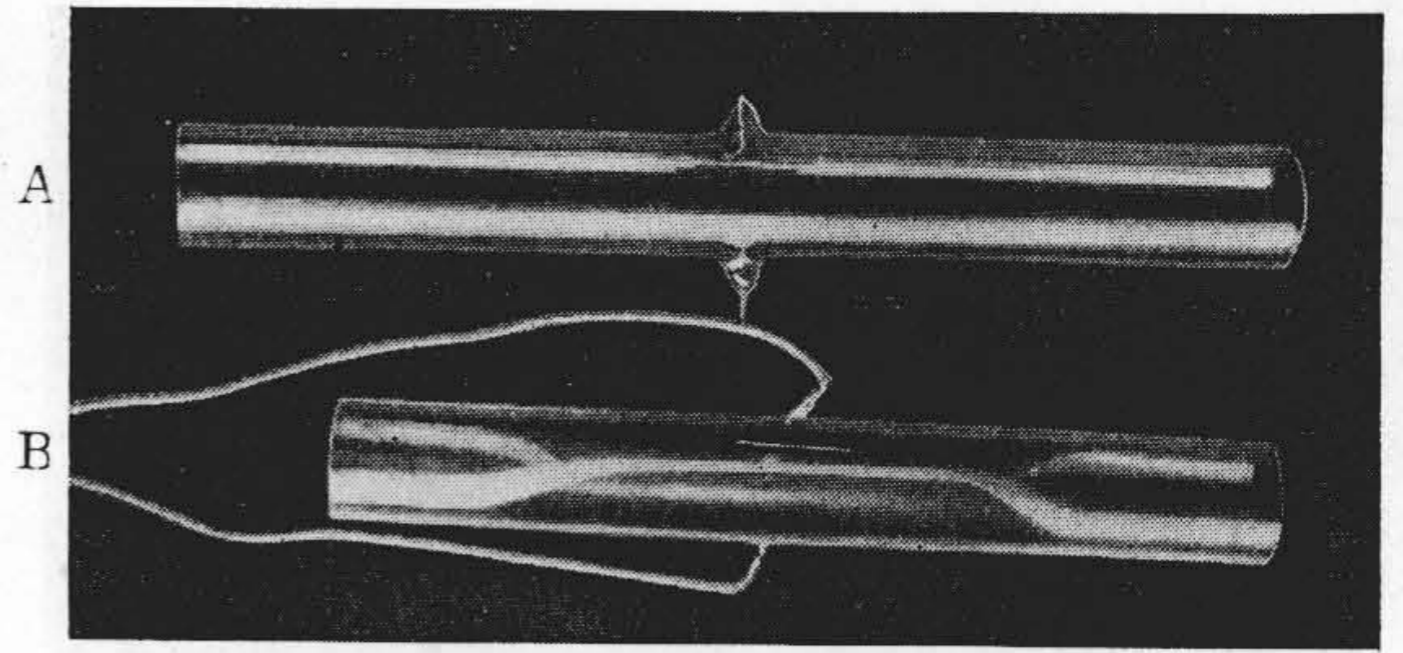


第 8 図 矩 形 型 導 管
Fig. 8. Rectangular Type Flow Meter Pipe

に示す如き定電圧装置を設けた。増幅器の増幅度の変化及び雑音による誤差を避けるために負饋還をほどこし、又増幅器のみならず測定装置全般にわたつて発生する歪みは測定の精度を害するので増幅器内に抵抗及び蓄電器による低域濾波器を設け、更に出力変圧器を 50 サイクル電源周波数に同調せしめて歪み即ち高調波を除去するようにした。特にシールドには安全を期すよう細心の注意を払つて組立てた。又増幅度は可変抵抗器をもつて変えるようにした。

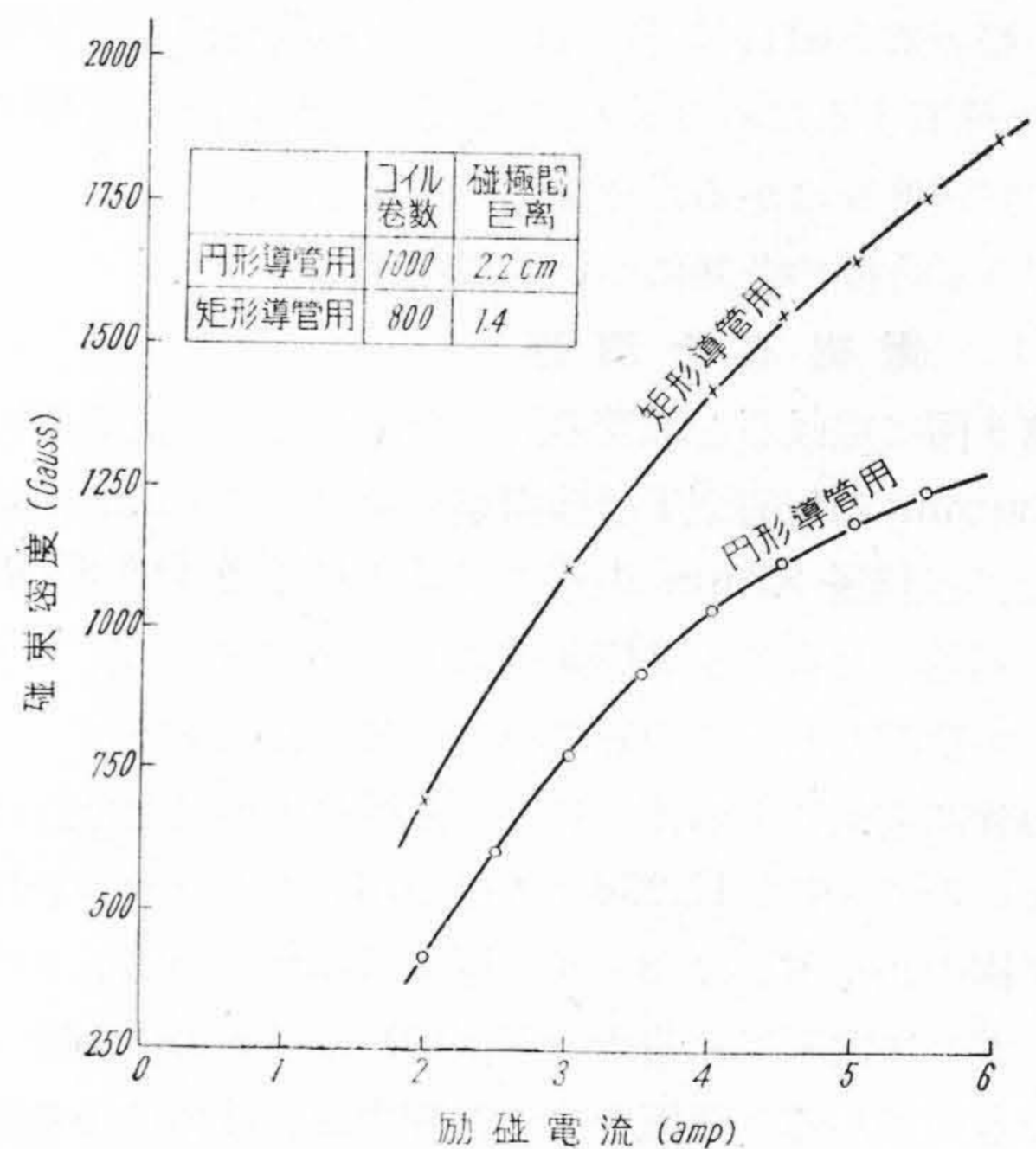
出力計には 3V 配電盤用交流電圧計 (内部抵抗 3kΩ) を用いた。

以上の試作品を用いて水道水の水温を変え、また食塩水で濃度を変えて電気抵抗を変化せしめて流量と起電力の関係に就いて種々実験を行なつた。又 (1) 式からわかる如く流速 v は同じでも起電力を大きくするため断面積は同じにし電極間隙 l を長くした矩形断面の導管を製作し流量と起電力の関係に就いて円形導管との比較をも行なつた。但し矩形断面の導管の場合は前述の磁石、導管とは違つてコイルは 2φ D.C.C 線 400 回巻いたものを 2 箇並列にし、磁極間隔は 14mm であり又導管は第 8 図並びに第 9 図に示す如き寸法で断面積は 2.15cm²、電極間距離は 21.4mm であつた。以上の実験の結果本流量計は満足な特性を有することを確かめ、罐水循環の研究



第 9 図 (円形、矩形) 導管の比較
A 円形
B 矩形

Fig. 9. Comparison of Flow Meter Pipe with Circular and Rectangular Section
A Circular Type
B Rectangular Type



第 10 図 電磁石空隙に於ける磁束密度
Fig. 10. The Magnetic Flux Density in the Gap of the Electric Magnet Poles

に活用しているのが、これらに就いては次章に述べる。

[IV] 実 験 結 果

(1) 電磁石の磁極空隙に於ける磁束密度

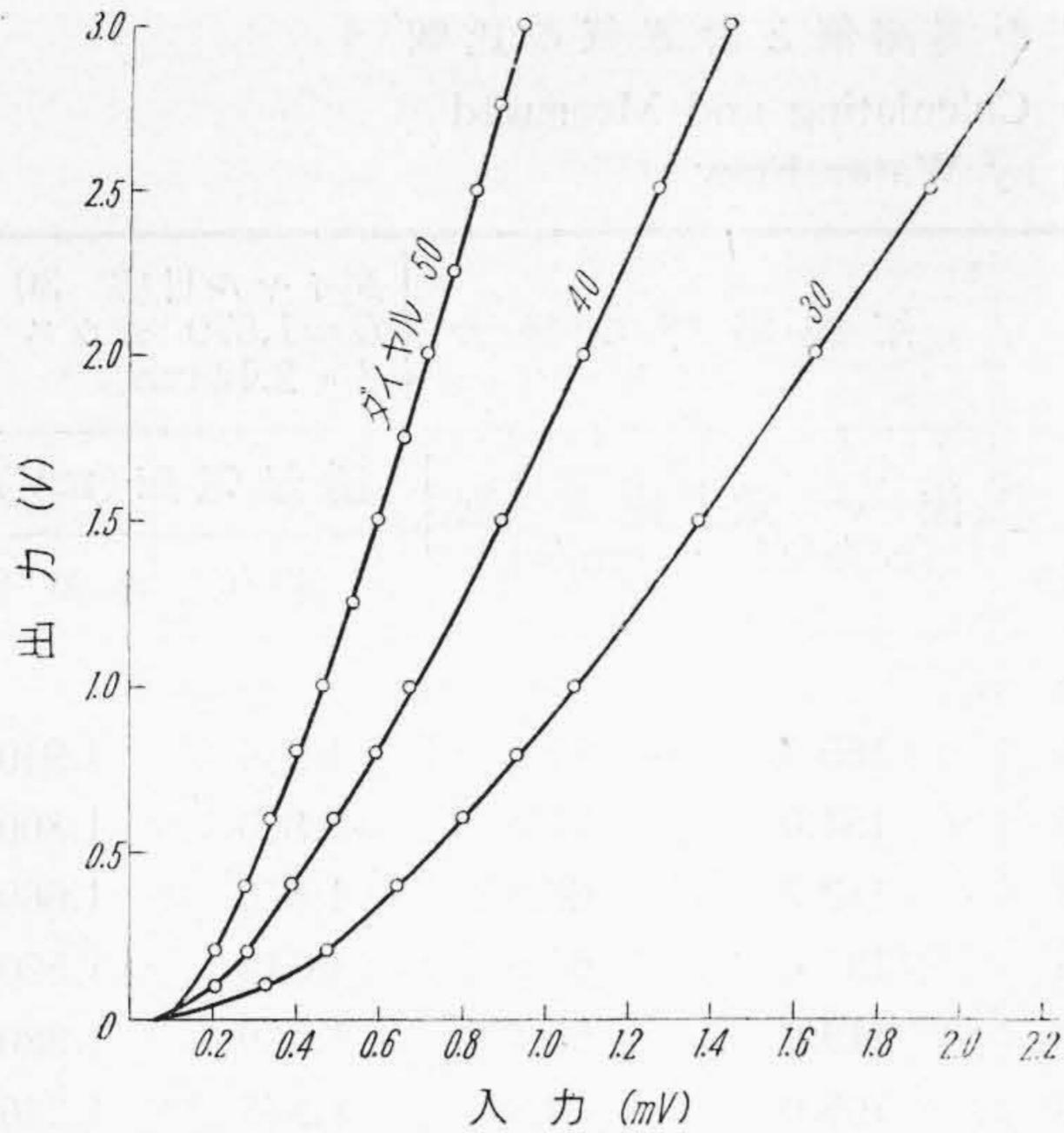
励磁せる電磁石の空隙に巻数、有効面積既知のサーチコイルを直角に挿入することによつてコイルに起電力が誘起される故磁束密度 B_m を次の式によつて算出することができるのである。

$$B_m = \frac{e \times 10^8}{4.44 \times j \times n \times A} \dots\dots\dots (6)$$

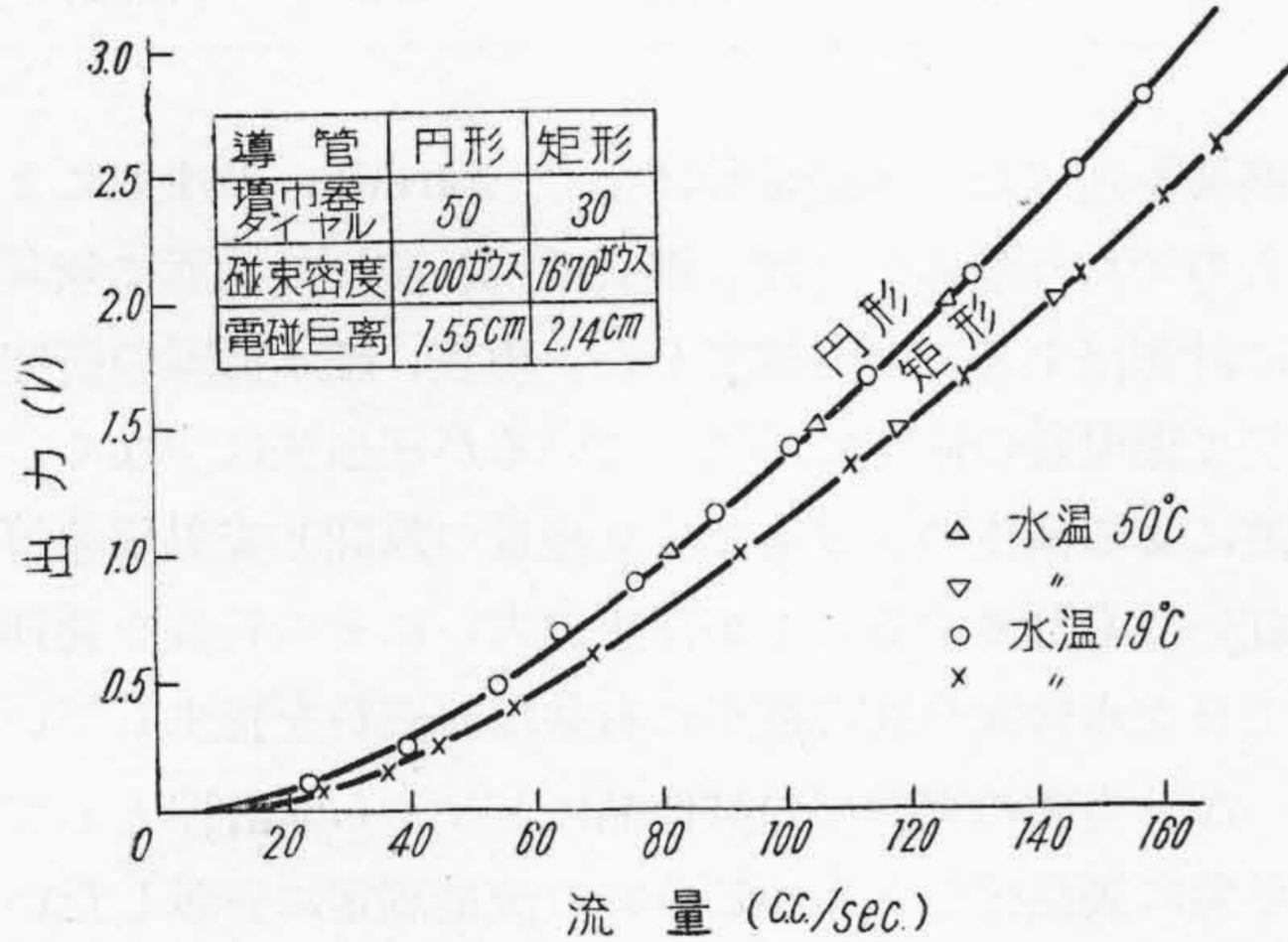
e = 誘起電圧 (Volt)

n = サーチコイルの巻数

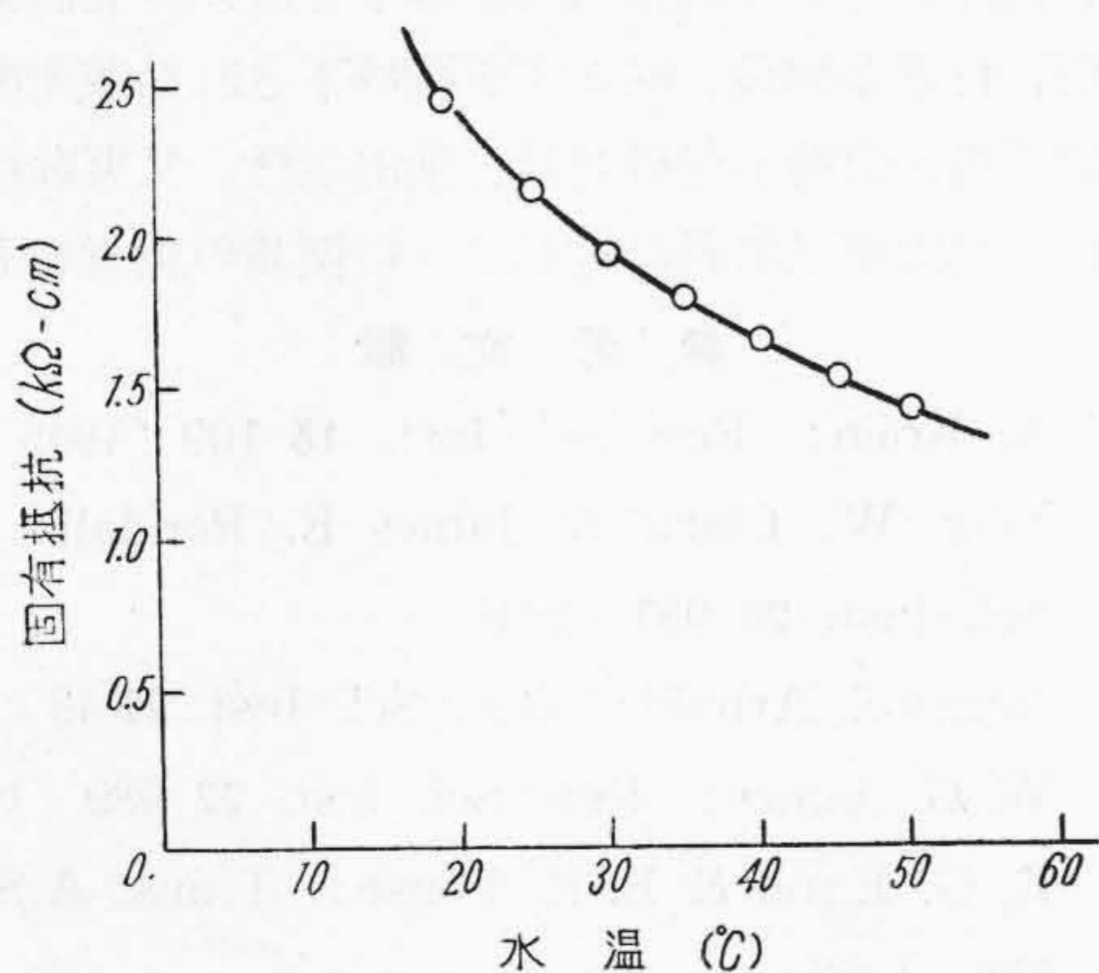
A = サーチコイルの有効面積 (cm²)



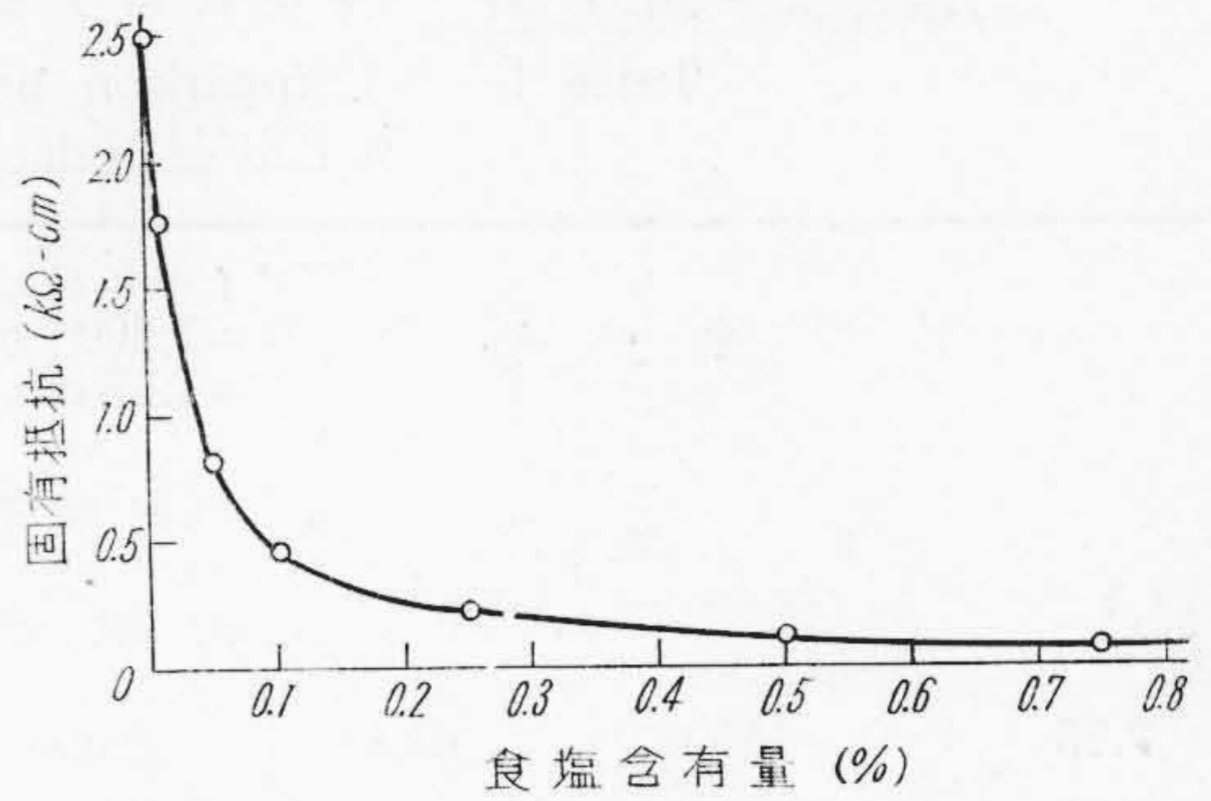
第11図 増幅器の入力—出力特性
Fig. 11. Output vs. Input Characteristics of Amplifier



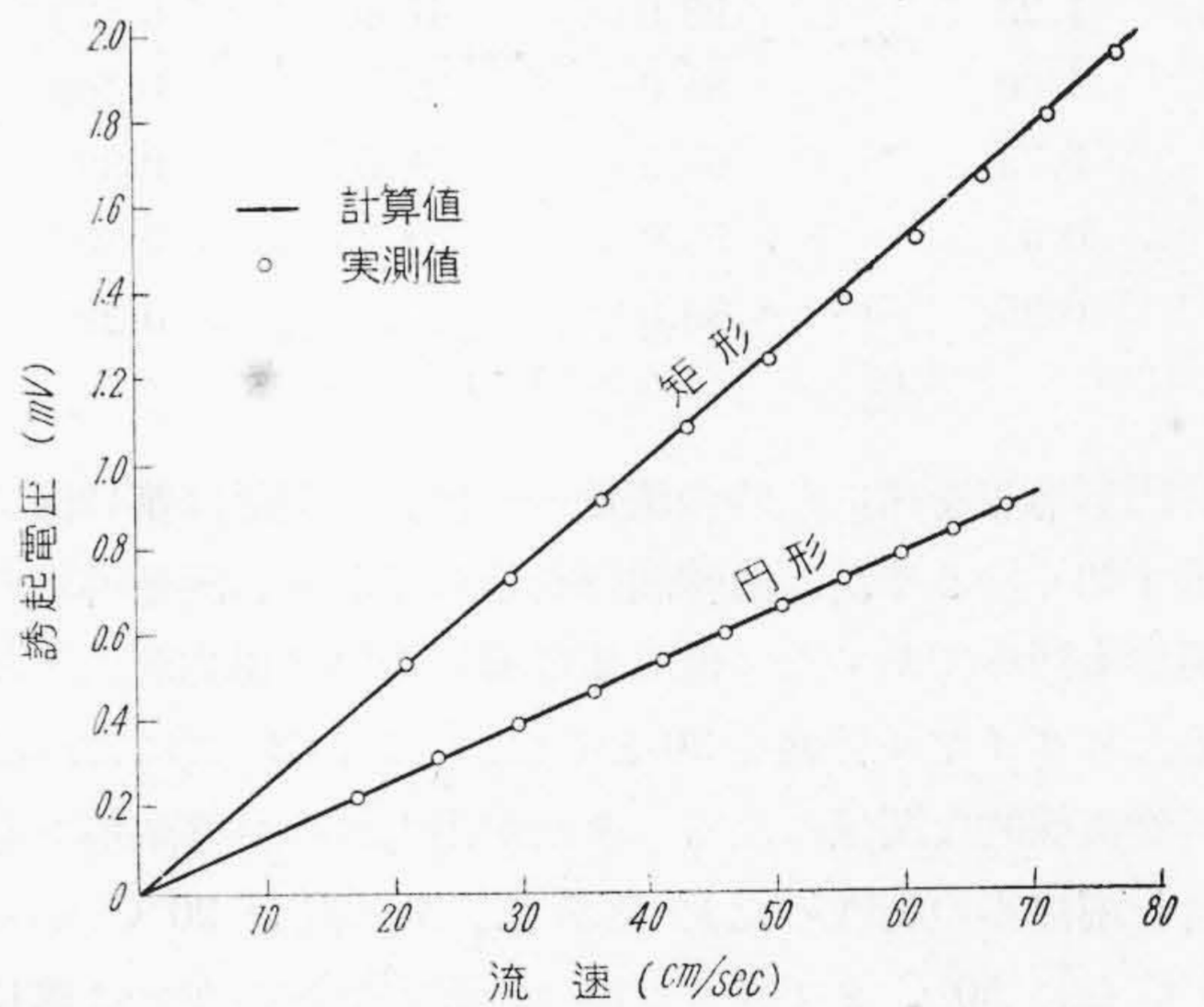
第12図 流量—出力の関係
Fig. 12. The Relation between the Flow and the Amp. Output



第13図 水温による固有抵抗変化
Fig. 13. Specific Resistance as the Function of Water Temperature



第14図 食塩含有量による固有抵抗変化
Fig. 14. Change of Specific Resistance as the Function of Salt Concentration



第15図 流速に対する誘起電圧の計算値と実測値
Fig. 15. Comparison between the Calculating and Measured Value of Induced Voltage by Water Flow

即ち励磁電流に対する磁束密度は e, f をそれぞれ $V, P.A$ 型真空管電圧計、周波数計で計測することによって求めることができる故、かゝる方法で試作電磁石に就いて実験を行つた結果を第10図に示す。同じ励磁電流の場合、円形と矩形導管用の場合内の磁石の磁束密度が異なるのはコイルの巻数も若干違うことにもよるが磁極間隔の差が大きく影響している。

(2) 増幅器の特性

入力—出力の測定結果は第11図に示す如き曲線となつている。当然直線的関係となるべきであるが出力計の目盛の誤差によるものをも含んでこれがこの試作増幅器の特性である。

(3) 流量—出力の関係

水道水の水温 19°C 一定にし、電磁石の励磁電流5アムペア、増幅器の増幅度を変えるダイヤル目盛50の場

第 1 表 流速に対する誘起電圧の実測値と計算値の比較
Table 1. Comparison between the Calculating and Measured Value of Induced Voltage by Water Flow

円型導管の場合 { ダイヤル目盛 50 B=1,200 ガウス l=1.55 cm					矩型導管の場合 { ダイヤル目盛 30 B=1,670 ガウス l=2.14 cm			
出力 (V)	流量 (cc/sec)	流速 (cm/sec)	誘起電圧 (mV)		流量 (cc/sec)	流速 (cm/sec)	誘起電圧 (mV)	
			計算値	実測値			計算値	実測値
2.75	155.0	68.0	0.898	0.898	—	—	—	—
2.50	145.5	63.8	0.842	0.843	165.5	77.0	1.946	1.940
2.25	136.0	59.6	0.785	0.785	154.0	71.6	1.810	1.800
2.00	126.0	55.3	0.730	0.728	142.5	66.3	1.675	1.660
1.75	115.0	50.4	0.665	0.665	131.0	61.0	1.542	1.520
1.50	104.5	45.8	0.605	0.603	119.0	55.4	1.400	1.380
1.25	93.0	40.8	0.539	0.540	106.0	49.3	1.246	1.240
1.00	81.0	35.5	0.469	0.465	92.5	43.0	1.087	1.080
0.75	67.5	29.6	0.391	0.390	78.0	36.3	0.917	0.916
0.5	53.0	23.25	0.307	0.310	62.0	28.9	0.730	0.730
0.25	38.0	16.7	0.221	0.221	44.5	20.7	0.523	0.527

合円形導管を用いた時の流量——出力の関係は第12図に示す如くゆるやかな曲線関係を示しており、矩形導管の場合も同様であつた。(但し矩形導管の場合出力が大となるためダイヤル目盛を30とした。) (1), (2) 式によれば当然直線的な関係になるべきだが出力計の目盛誤差をも含む増幅器の特性のためである。又水温を 20°C から 5°C 毎に 50°C まで変えた場合の固有抵抗の変化は第13図の如く温度上昇に反比例して小さくなり又食塩水溶液の濃度の変化による固有抵抗は第14図の如く濃度が大となればなるほど固有抵抗が小さくなる双曲線関係があるが流量——出力の関係は第12図に△印で示せる如くいづれも水温一定の場合と全く同じであつた。然し不要電力除去のための調整位置は変つている。

以上の実験から求められた流量——出力の関係と増幅器の入力——出力の関係から流れによつて生ずる誘起電圧を求めこれを (5) 式より求めた誘起電圧と比較すると、第1表並びに第15図に示すようになる。実測値と計算値とは殆ど同じ値になつていて流れによる誘起電圧は (5) 式を満足することが明らかに認められる。又同じ流量、同じ流速に於ても矩形導管にして電極間の距離を長くすることにより誘起電圧が大となるため増幅器の増幅度も小さくて良いことがわかる。

[V] 結 言

電磁式流量計の原理並びに試作品に就いての実験結果

の概要を述べた。本流量計は全く Faraday の法則によるものであり液体の温度、電気抵抗、流れの状態に無関係に計測出来ることを確認した。現在、罐水循環の研究に於て循環量の測定に活用しているが圧損失は少なく、温度による補正の必要もなく又流量の瞬間的変動現象等に就いても計測することが出来、大いにその特長を發揮して日立水管式汽罐の進歩に有益なる資料を提供している。なお当面の実験用の試作品にとゞまらず計器としても早急に製品化しあらゆる分野の流量測定に貢献したいと考えている次第である。

終りに本研究に対して有益なる御助言を賜つた東京大学磯部教授、茨城大学本多教授、通産省機械試験所研野技官、試作に対して御指示御指導下された日立研究所小林主任、杉浦企画員、絶えず御鞭撻下された兼先所長、三浦副所長、山崎主任研究員、前田主任、又実験に協力下された村山喜三郎君に対しこゝに深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) A. Kolin: Rev. Sci. Inst. 16 109 (1945)
- (2) John W. Clark & James E. Randall: Rev. Sci. Inst. 20 951 (1949)
- (3) James S. Arnold: Rev. Sci. Inst. 22 43 (1951)
- (4) W. G. James: Rev. Sci. Inst. 22 989 (1951)
- (5) H. G. Elrod & R. R. Fouse: Trans. A.S.M.E 589 (1952)