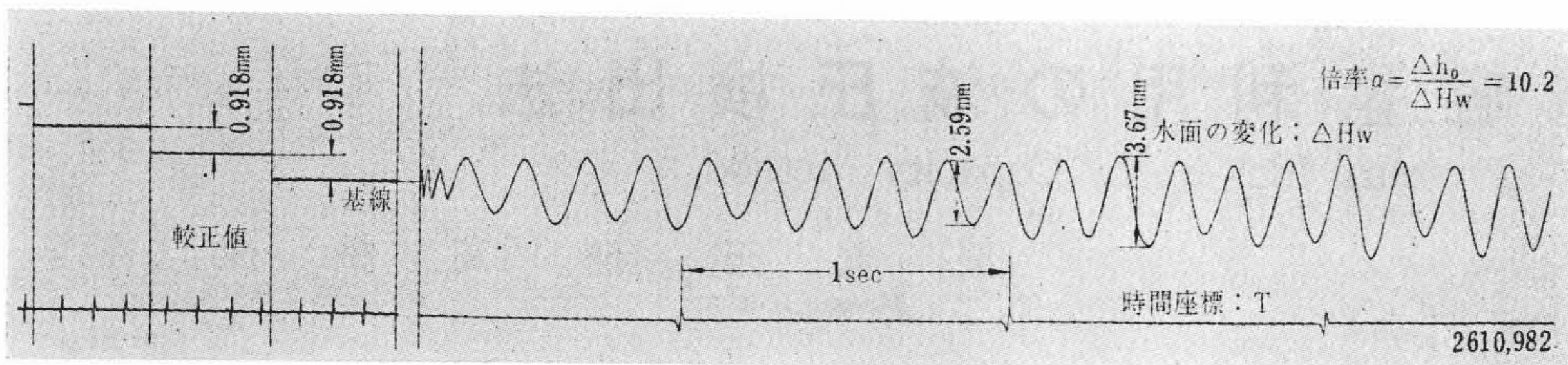




第 4 図 ビーカ内の水面変動の記録例

れる。筆者らは、6φ黄銅棒電極を使用して、その特性を調べた。

第 2 図は、この実験で使った検出系統のブロック図で、両極間に生ずる微小電圧は第 3 図に示すブリッジ回路を介して、ストレインメータに導かれ、ここで電流増幅し、さらに、電磁オシロへ入れられる。

すなわち、電源は 3V、5,000 c/s で、これをブリッジの AB 端に加え、AD 間の可変抵抗 (8.5 kΩ) を調整すれば、DE 端では、(交流ブリッジとして厳密には平衡しないが) 同相分だけが近似的に平衡するから、一度調整を終えた後で水面が変化すれば、両極間の容量および抵抗がともに変化し、DE なる出力端子電圧は水位に応動した変化をする。第 4 図はビーカ (2,000 cc) 内の水位変動を記録させた例を示し、オシログラム上の立軸方向に記録された水位変化を示す寸法を Δh_0 とし、実際の水位変化量を ΔH_w で表わし、両者の比を倍率 α で示すことにすれば、この例では、 $\alpha = \Delta h_0 / \Delta H_w = 10.2$ となる。すなわち、0~4 mm ぐらいのわずかな水位変化をオシログラム上で約 10 倍に拡大して検出できることがわかる。ここでは $\alpha \div 10$ であるが、ストレインメータの感度を上げれば、変動する現象を時間的に遅れなく倍率を 30 ぐらいまでは容易に上げられる。また、ストレインメータとの組み合わせにより、微小圧力の測定も可能となる。以上の説明で、平行棒電極は構造が簡単ですぐれた検出部といえるが、実用に当たって次の二つの測定技術上の問題がある。

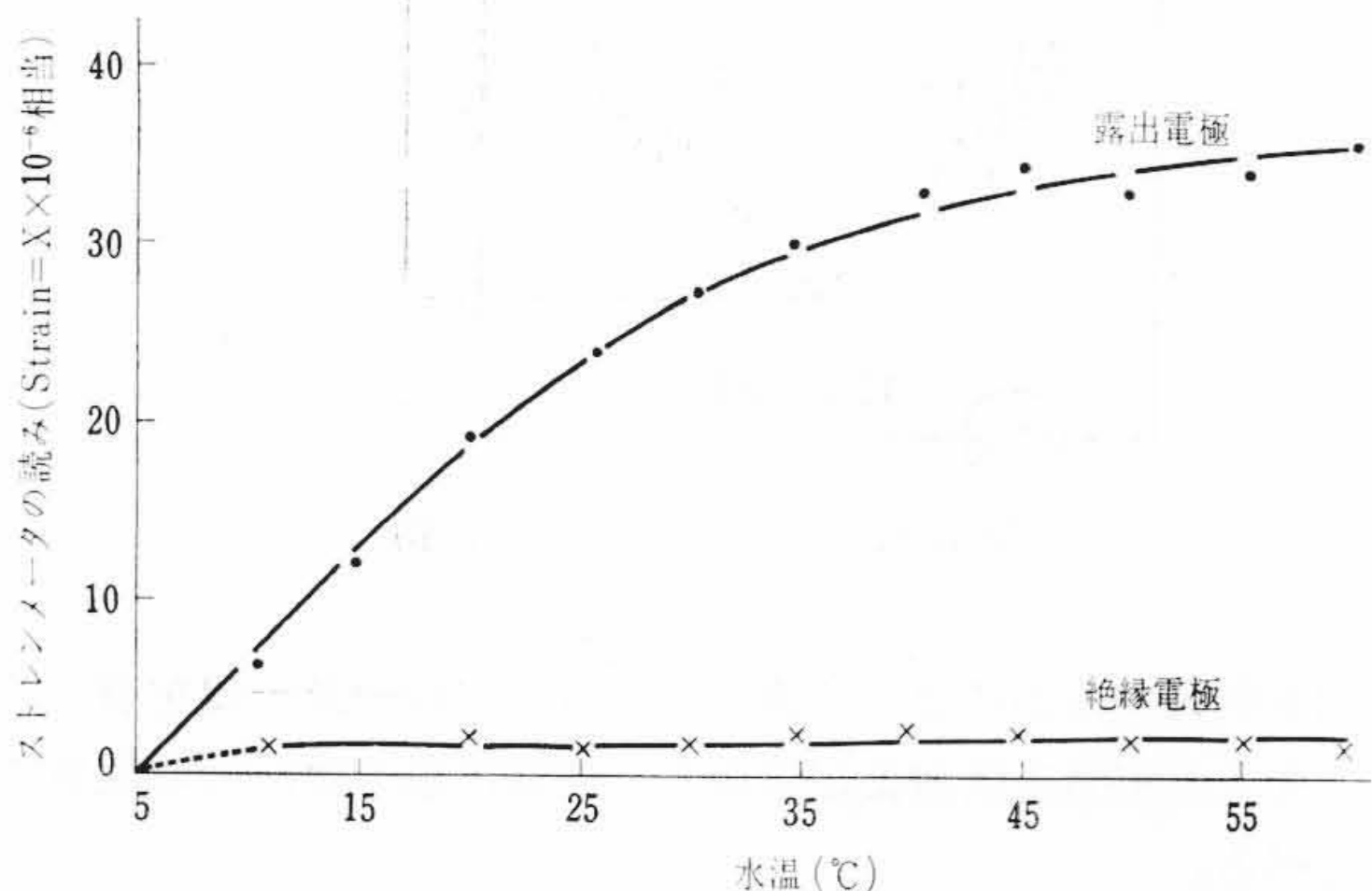
すなわち、

- (i) 水温により水の電離度が異なるため、両極間の抵抗が変わる。
- (ii) 流れている水流の水面や圧力を測定する場合には、配管系に連なる全流水を絶縁することが実際上困難である。

以下、これら二つの問題を解決するために行なった二、三の実験と測定法の改良点につき述べる。

3. 静電容量法における液温変化の影響排除策

前に述べたビーカ内の水位の測定において水温が変化すれば、これによっても両極間の抵抗が変わるので、水温変化は誤差の原因となる。いま、水温変化の影響を知るため、水面を一定に保ったまま水温を 5~60°C の範囲に変えて実験し、第 5 図に示すようにストレインメータの読みが 0~35 の範囲で大幅に異なることがわかった。



第 5 図 露出電極と絶縁電極の湿度特性

したがって、この構造の電極は部分的に温度変化のある流水面の検出には不向きである。しかし、一面、この構造の検出法では、水面の変化に対して両極間では容量 C の変化のほかに、さらに、抵抗 R の変化が加わったものが検出できるので、後述するように容量 C だけの変化によるもの

のより感度がよいという捨てがたい利点を持っている。第 6 図は流水路の水面測定にこの構造の検出法を実施した例を示した。図よりわかるとおり、直接流水を電極間に導かず絶縁油を介して水圧変化を検出すれば、検出部分さえ、温度を一定に保持するよう留意すれば、温度変化に伴う誤差も絶縁の問題もともに解決された高感度の利点のみ生かされた測定ができる。

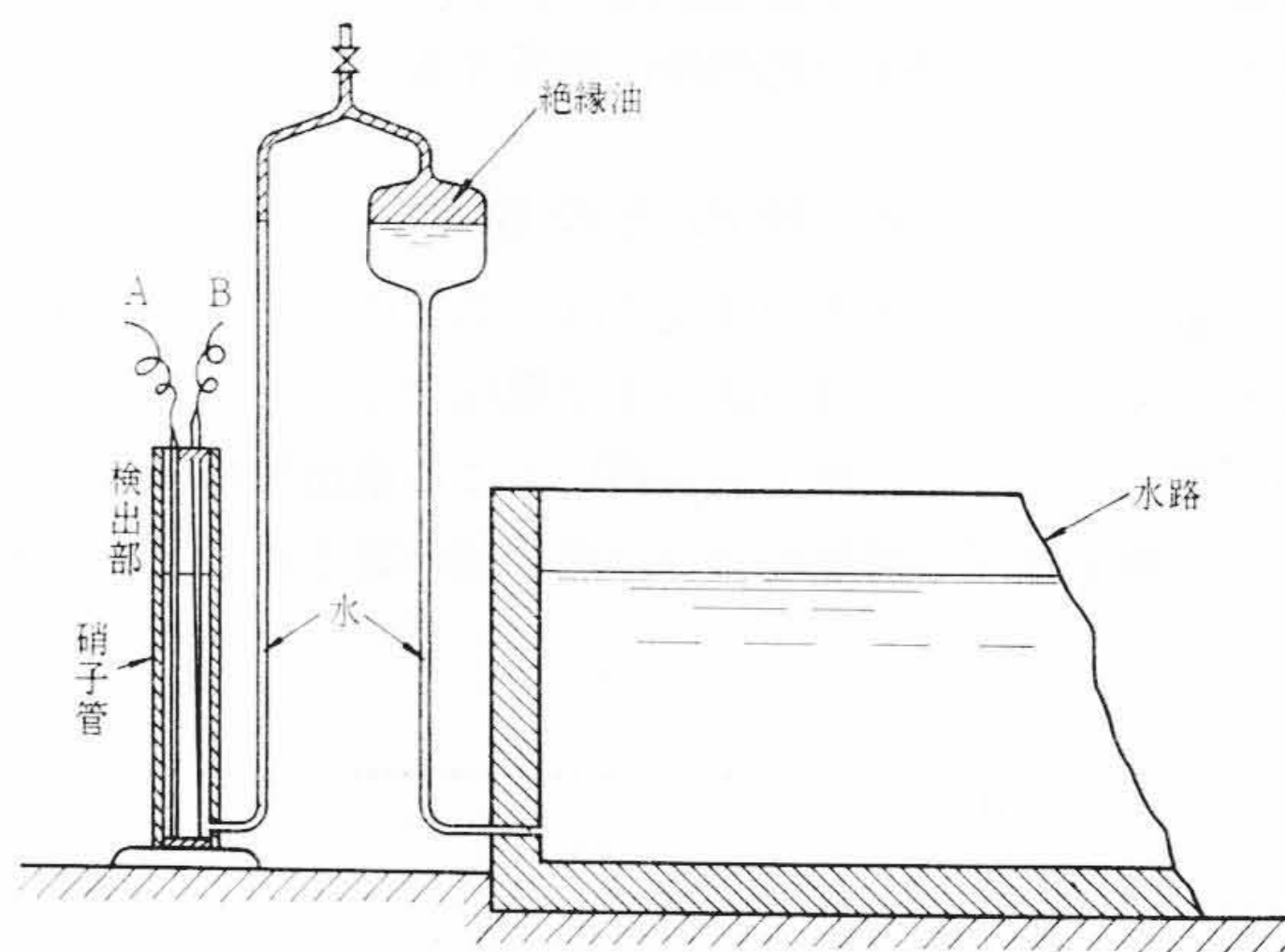
一方、中間に絶縁油を置くことから、検出の動的応答特性の若干の低下は避けられない。また、第 2 図に示した平行棒電極は露出のままでは温度特性が悪いので、電極にポリエステル系の絶縁材で絶縁を施した構造として水温を変えた実験の結果を第 5 図に合わせて示した。これより、5°C 付近を除き温度変化に伴う誤差の介入しない好特性を得ることに成功した。この結果はさらに、水の誘電率も実験の温度範囲内 (60°C 以下) では一定であると見てさしつかえないことを意味し、静電容量法では電極を絶縁すれば、温度誤差の介入は克服され、水位変動の検出法として有力な方法であることが明らかになった。

4. 電極構造の吟味

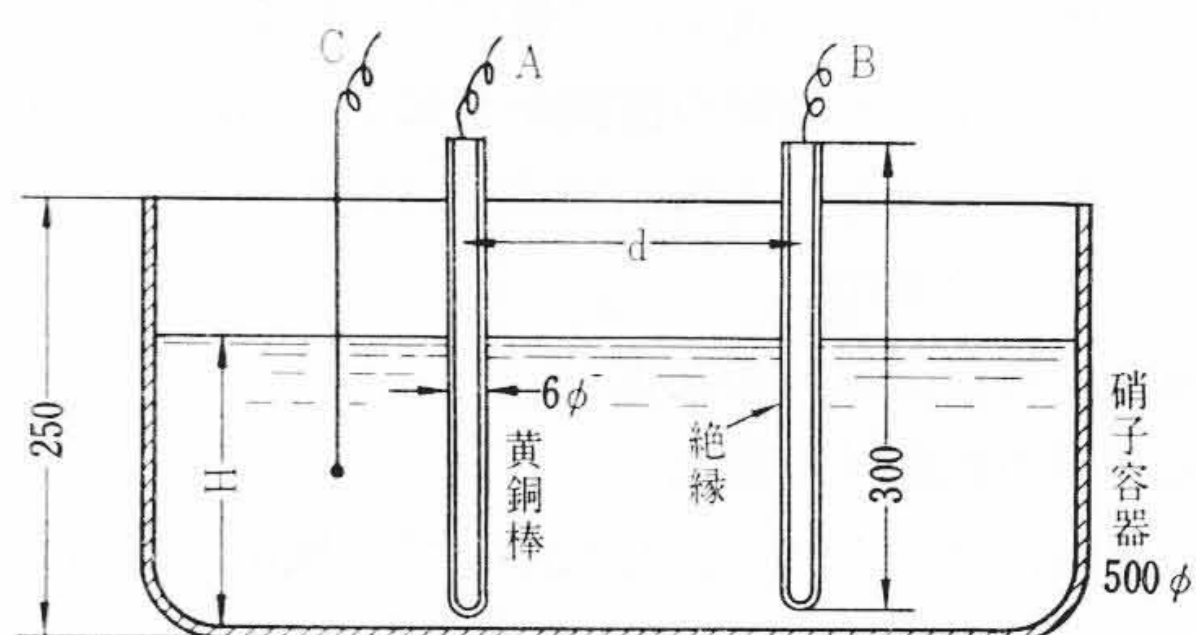
4.1 露出電極と絶縁電極における水の導電作用の相違

前述のとおり、露出電極より絶縁電極のほうがすぐれているが、ここで注目すべきは両者の場合における水の導電作用で、次のような実験を行なって、その作用を検討した。

すなわち、第 7 図に示すように、ポリエステル系絶縁材で絶縁した 6φ×300 mm の黄銅棒を両電極として、電極の水中に浸る長さが変わらないよう十分注意し、距離 d を変えてストレインメータの読



第 6 図 平行棒電極による流水圧検出の実施例



第 7 図 絶縁平行棒電極

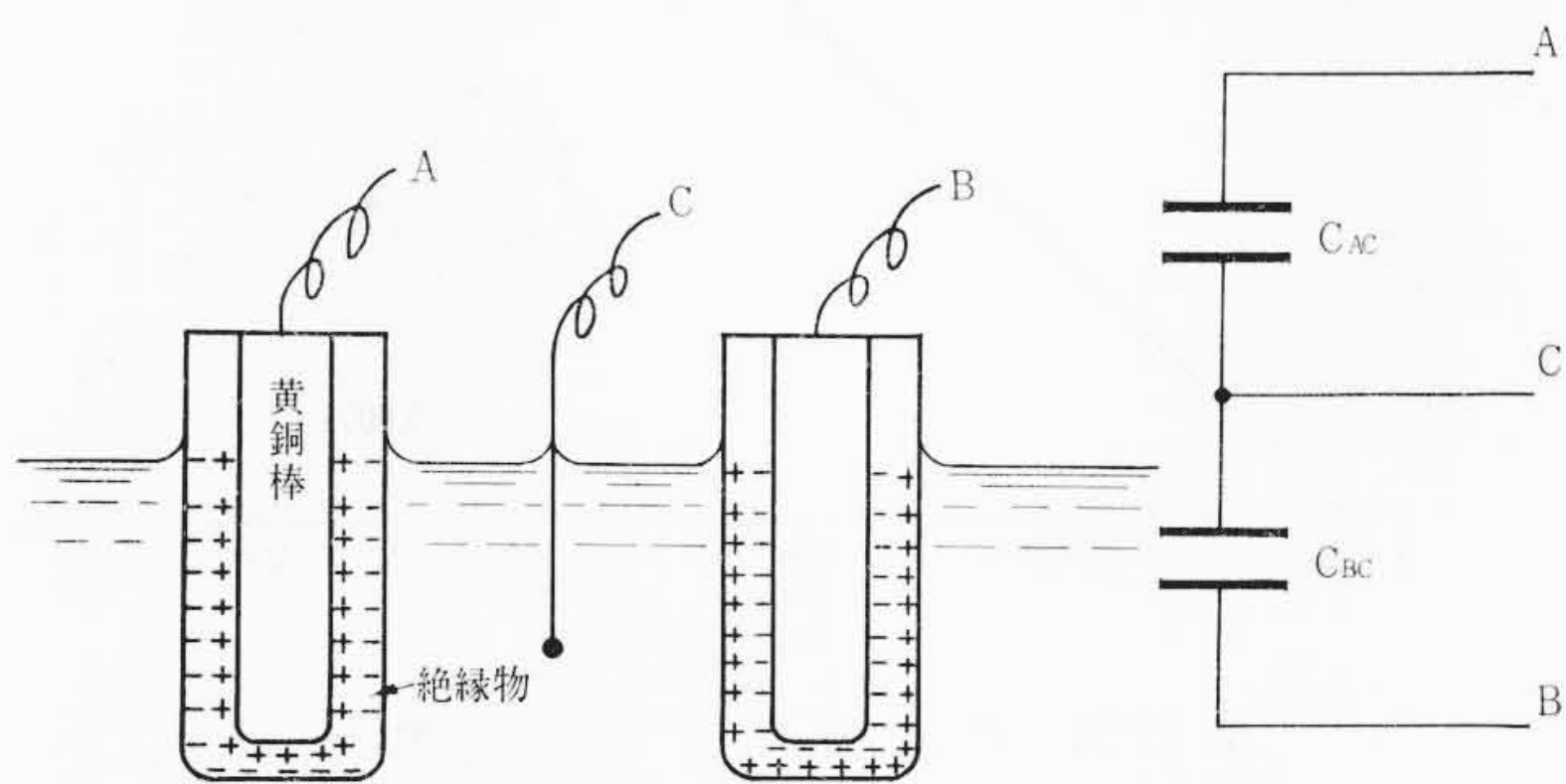
みの変化を見た。その結果はストレインメータを最大感度 ($\text{Strain} = X \times 10^{-6}$ 相当) に上げても電極間距離 d を変えた影響が検出できなかった。ここに、露出電極の場合には、水は3章で説明したように誘電体として作用し、ここに静電気をたくわえる。一方、絶縁電極では水は導体として作用するので、電極間距離 d を変えても、この間の容量が変化しない。すなわち、水は露出電極では誘電体として、また絶縁電極では導体として二様に使い分けられる。一般の工業用水はガラスや絶縁物に対しては導体と考えてよく、また、金属に対しては絶縁物に近い作用をする。

4.2 水中露出電極による検出感度の向上

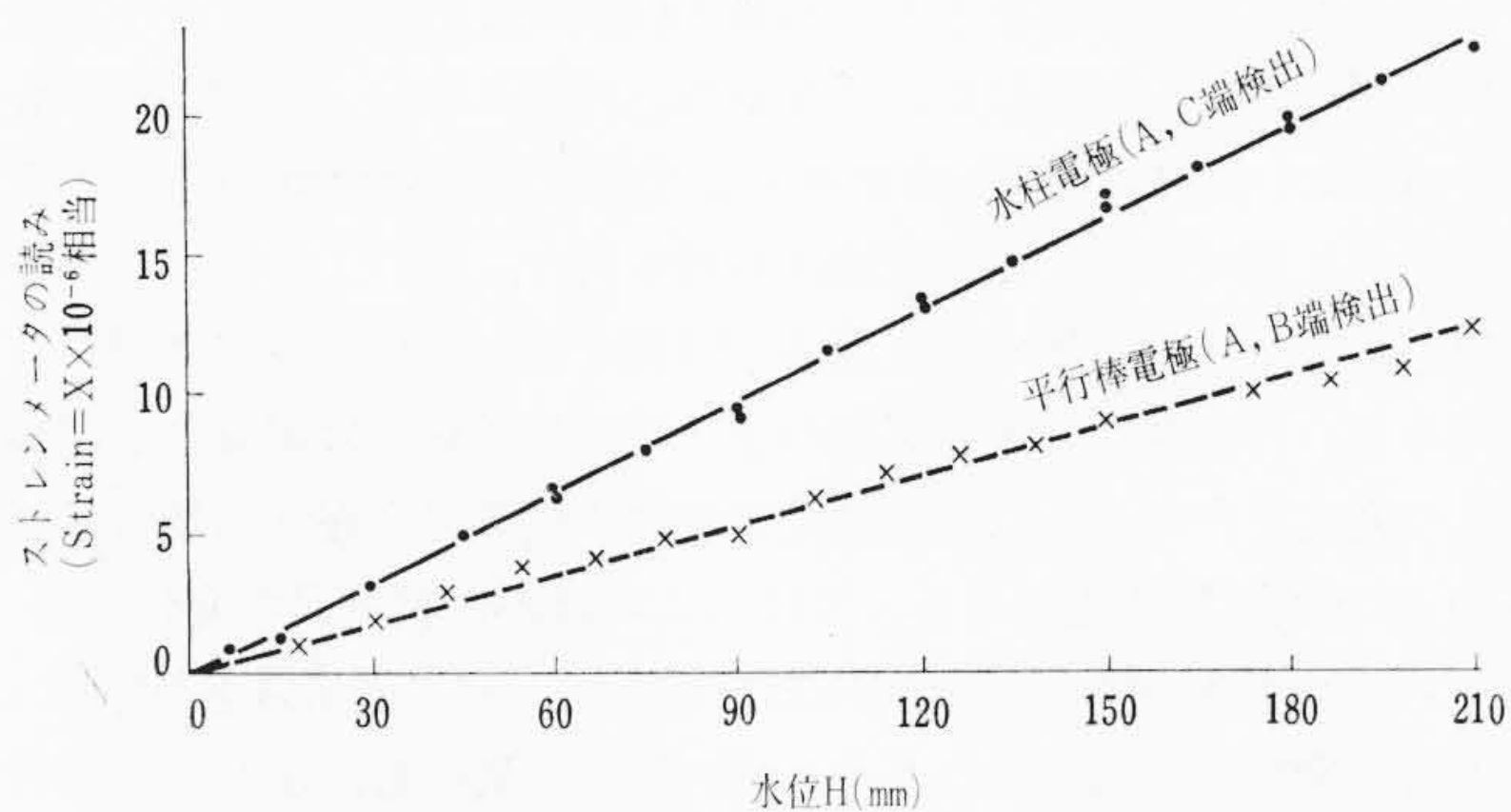
絶縁電極では第8図に示すように二個のコンデンサが水を導体として直列に結合されていると見ることができ、合成容量は個々の容量より減少し、それだけ検出感度が低下することになる。もし、両電極間で一個のコンデンサを形成させれば検出感度の向上が期待される。両電極のうち、いずれか一方を露出電極とし、ほかを絶縁電極とすれば、水は導体として作用するから電極上に塗付した絶縁物を介して両電極が相対向し、一個のコンデンサを形成する。第7図ではA、Bは二つの絶縁電極と、水中の露出電極Cをもうけ、この両者について水面Hを変えた場合の検出感度の比較を行なって、AB間の容量変化とAC間の変化を比較した。実験結果は第9図に示すように、AC間の感度はAB間の約2倍近く良いことが知れた。これより、水中電極の使用は測定液を直接電極として利用でき、検出のために中間に何物も作用しないので、それだけ誤差の導入される機会も減り、検出構造としてきわめて好ましいものといえる。

以上の考察より静電容量法について明らかになったことを要約すれば、次のことがいえる。

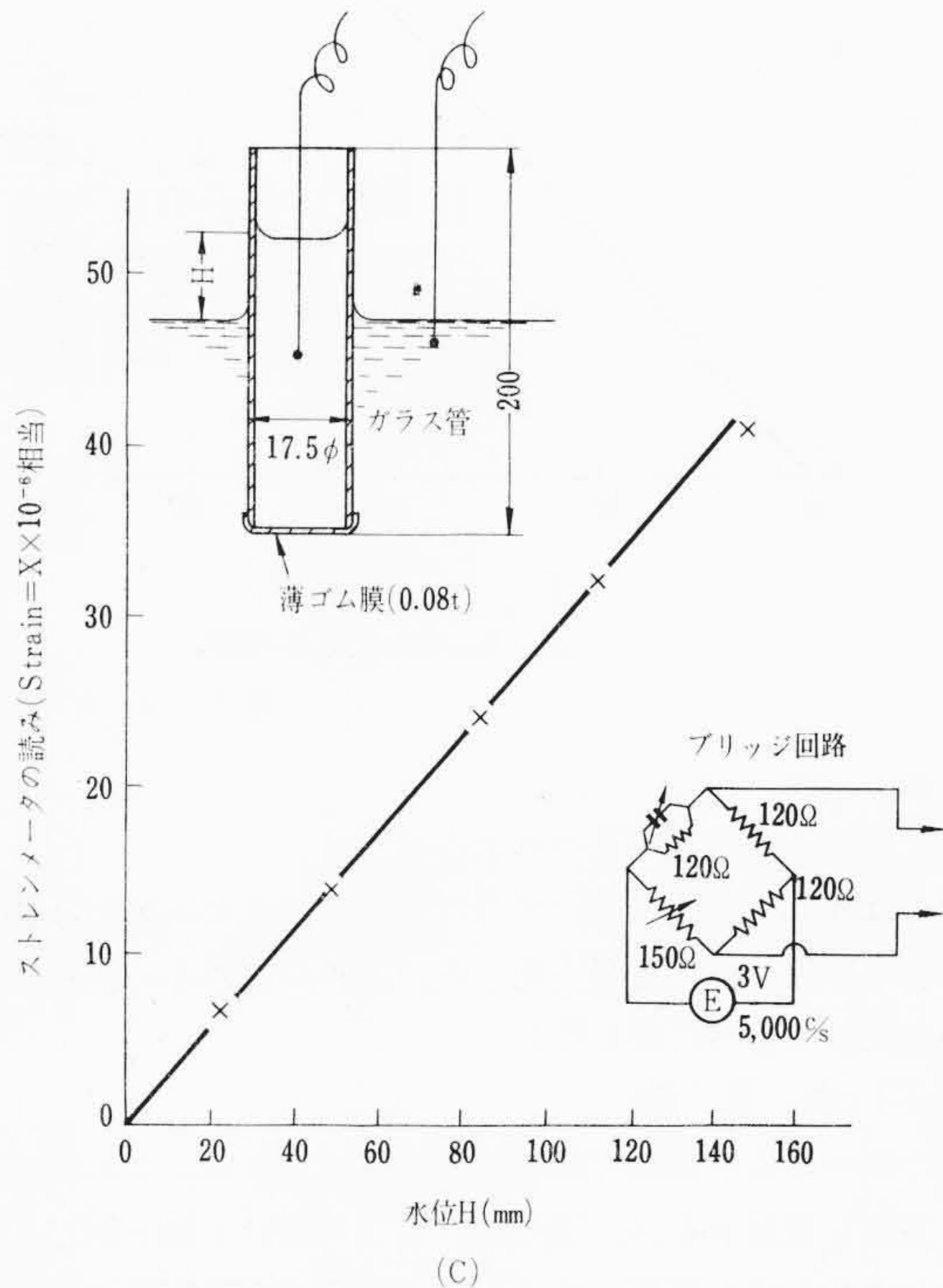
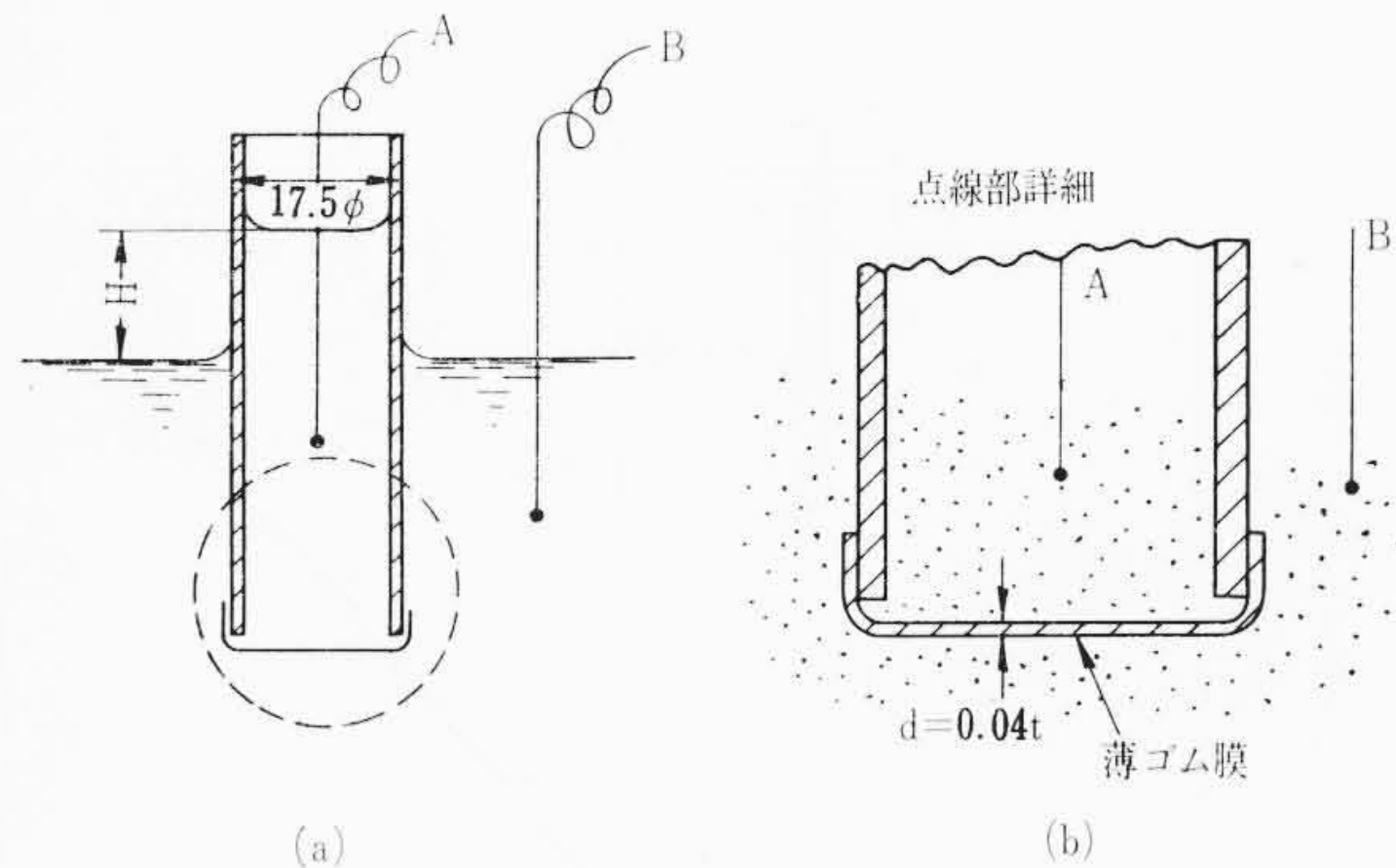
- (1) 絶縁電極が良い。
- (2) 絶縁電極の場合、水は導体として作用するものと考えて実用上さしつかえない。
- (3) 両電極のうち、一方は水中電極としたほうが良い。
- (4) 静電気は大部分電極の絶縁物にたくわえられる。
- (5) 検出電極の形状にはほとんど関係なく、電極の絶縁物が問題である。
- (6) 水位変化に対して直線性を有する電極構造としては、絶縁



第8図 等価回路



第9図 水中電極と絶縁電極の検出比較



第10図 ガラス管の下端に薄ゴム膜を張った電極とその検出特性

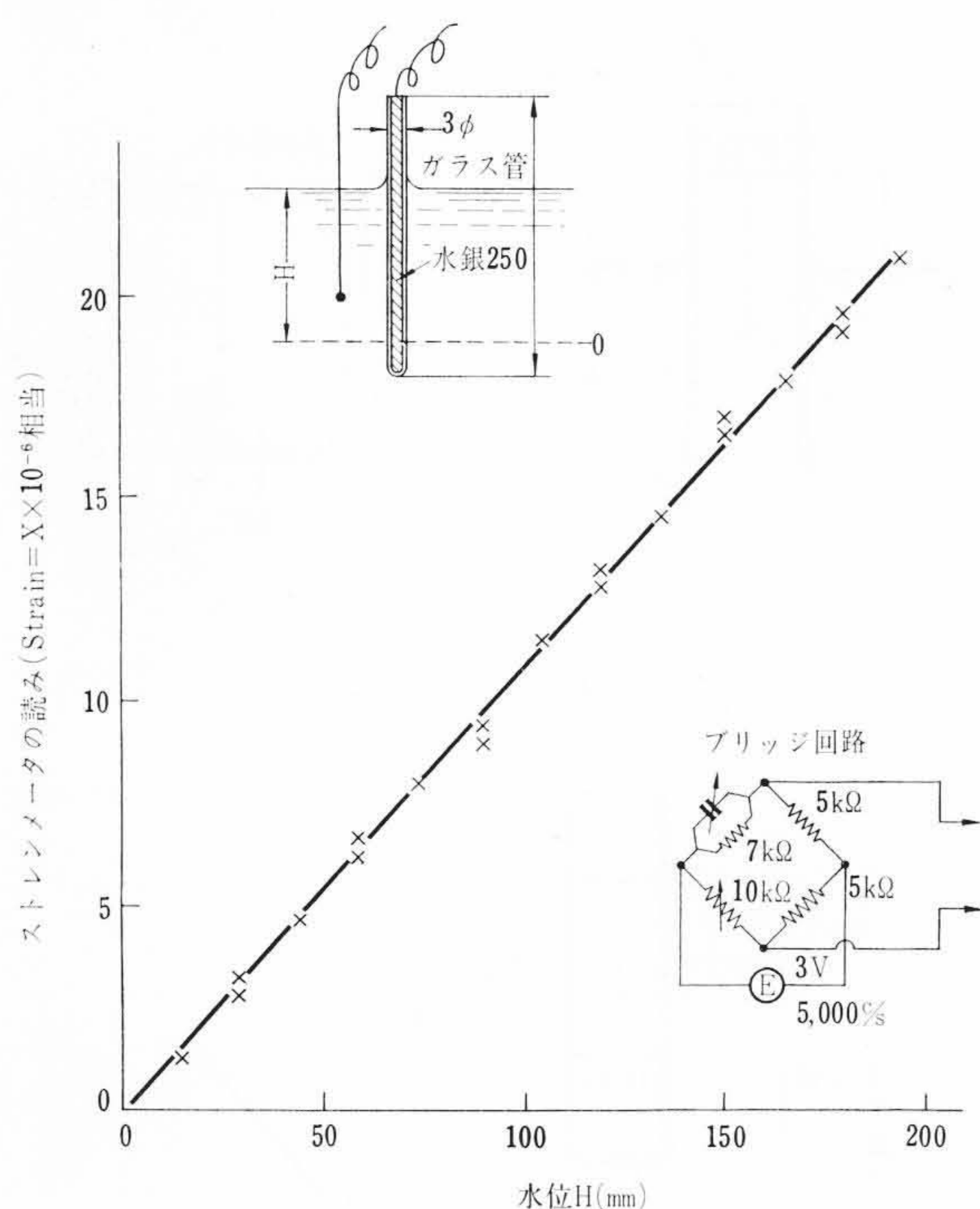
部の断面積が一樣なものでなければならない。

4.3 シリコンゴム膜張り水中露出電極利用の差圧検出器

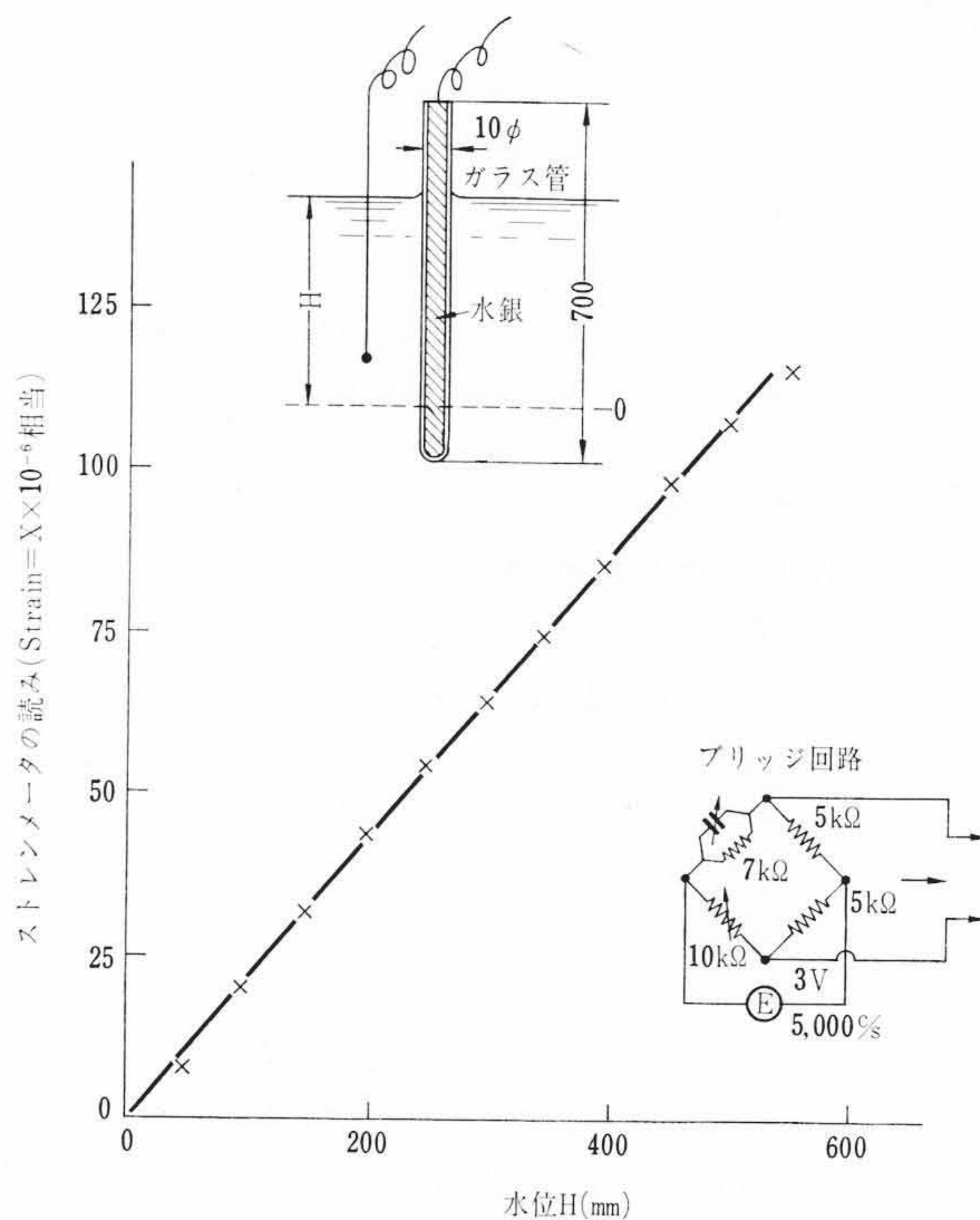
流体工学では、2点間の差圧を検出する要求ははなはだ多い。筆者らはシリコンゴムの薄膜を介して両面に作用する液体を両電極として前述の水中露出電極法を使用した新しい差圧検出器を開発した。第10図(a)、(b)のように、外径17.5φのガラス管の下端に厚さ0.04mmのゴム膜(シリコンゴム)を張れば、ゴム膜に接する両水面はそれぞれ直接液体電極となり、ゴム膜に静電気がたくわえられることになって、ゴム膜に作用する差圧が変化すれば、これにつれてゴム膜が伸び膜厚が変わり、したがって、両極間の d と電極液浸面積 A とが変化するので容量が変わることになる。ここで、液面が直接両電極となるので、膜面の変化が自由に応動し、固体電極では期待できないすぐれた特長を有する。これに差圧 H を加えて容量変化を見た。同図(c)はこの差圧検出器の検出特性を示し、薄ゴム膜が弾力的に耐久し得るような小さい差圧に対しては、直線性が保たれ、十分われわれの目的を満たすものであることが知れた。

5. 実用性の高い電極構造の吟味

すでに報告されている文献⁽¹⁾⁽²⁾によれば、電極としては先に述べた平行棒電極のほかに、円筒状電極、円板電極ならびに半円筒状電極など、その形状は種々さまざまであるが、いずれの電極も良好な結果が得られて目的を達したことが報告されており、電極の形状は



(A) 3φ 円柱電極とその特性



(B) 10φ 円柱電極とその特性

第11図 円柱電極とその特性

本質的な意味を持たないもののようである。

筆者らは静電容量法を用いて行なった二、三の実験の経験から実用に便利な数種の構造を見いだした。次に、これらの構造とその検出特性を記して参考に供したい。

5.1 円柱電極

構造の簡単なものとして円柱電極があげられる。これには、金属丸棒の表面を絶縁するか、または、ガラス管の下端を閉じ、これに水銀を入れたものを電極とする方法がある。第11図(a)に3φガラス管に水銀を入れた水銀棒電極の特性を、また第11図(b)に10φガラス管を用いた水銀棒電極の検出特性をそれぞれ示した。いずれも、水位変化とストレンメータの読みが直線関係を示し、すぐれた特性を示している。3φガラス管を用いた水銀棒電極は、模型水路などにそう入しても寸法的に小さいので、流れを阻害することが少なく任意の点の水面検出ができて便利である。

5.2 帯状電極

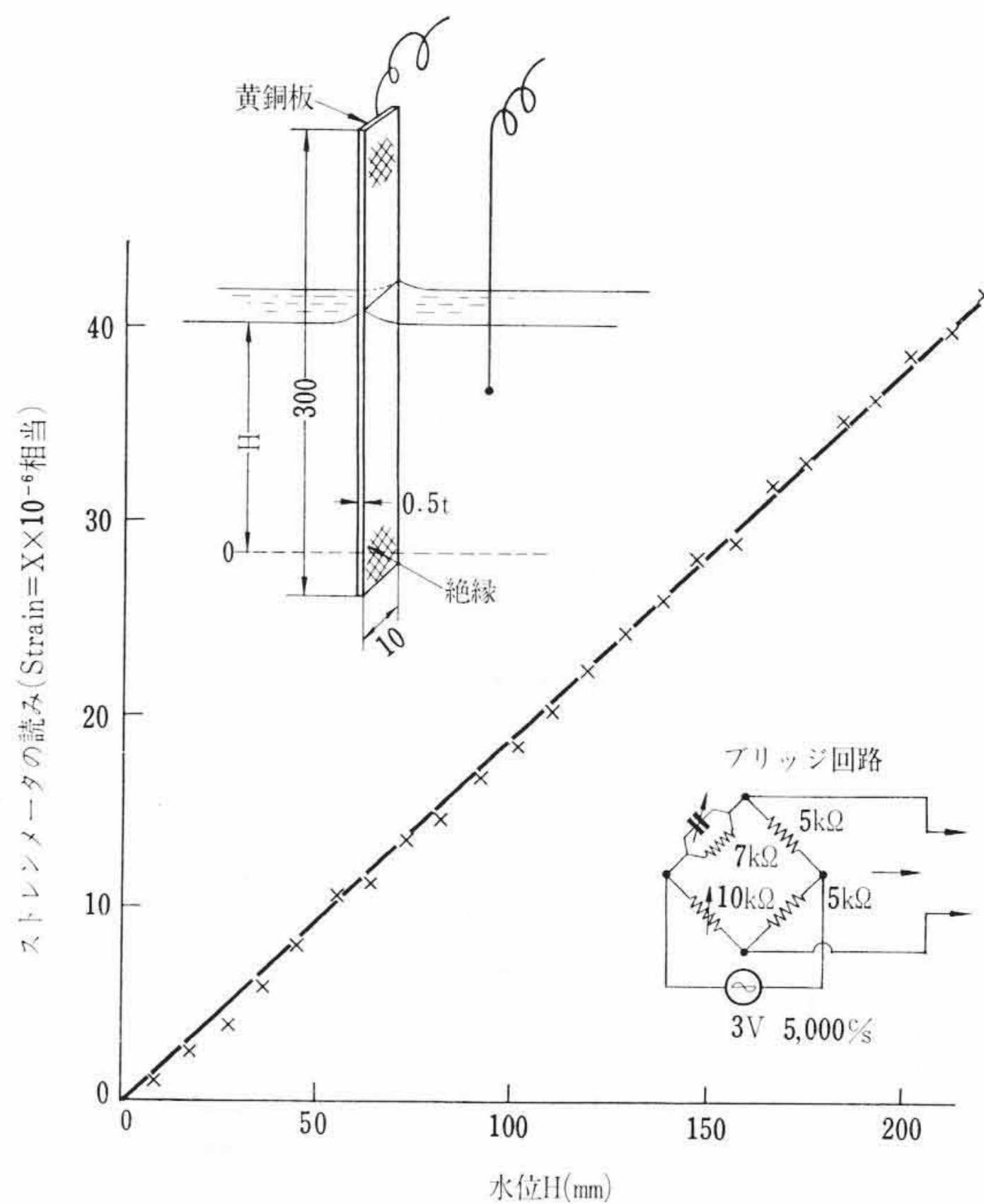
第12図に帯状電極の特性を示した。この電極は厚さ0.5mmの黄銅板を用い、幅10mm、長さ300mmの薄帯板を作り、その全面を絶縁したもので、その検出特性はよい直線性を示す。この構造の電極は、水路の壁面にはり付けたり、また、流れの方向に入れても抵抗がきわめて小さいなど実用にはなほ便利な電極である。

5.3 2重液柱電極

第13図に2重液柱電極の構造と検出特性を示した。すなわち、第13図(a)には水銀マンオメータを応用した液柱電極、(b)には水柱マンオメータを応用した液柱電極の特性を、(c)には、水と油（ここではタービン油90番（比重=0.872, 15℃））の比重差を利用した微圧マンオメータを応用した液柱電極の例を示した。第13図(a)、(b)、(c)からわかるように、2重ガラス管構造とすると、水柱30mm以下の微圧から、20~30m（実施例では17m）までの広範囲の水位差を測定することができる。

5.4 薄ゴム膜利用の微差圧検出用液柱電極

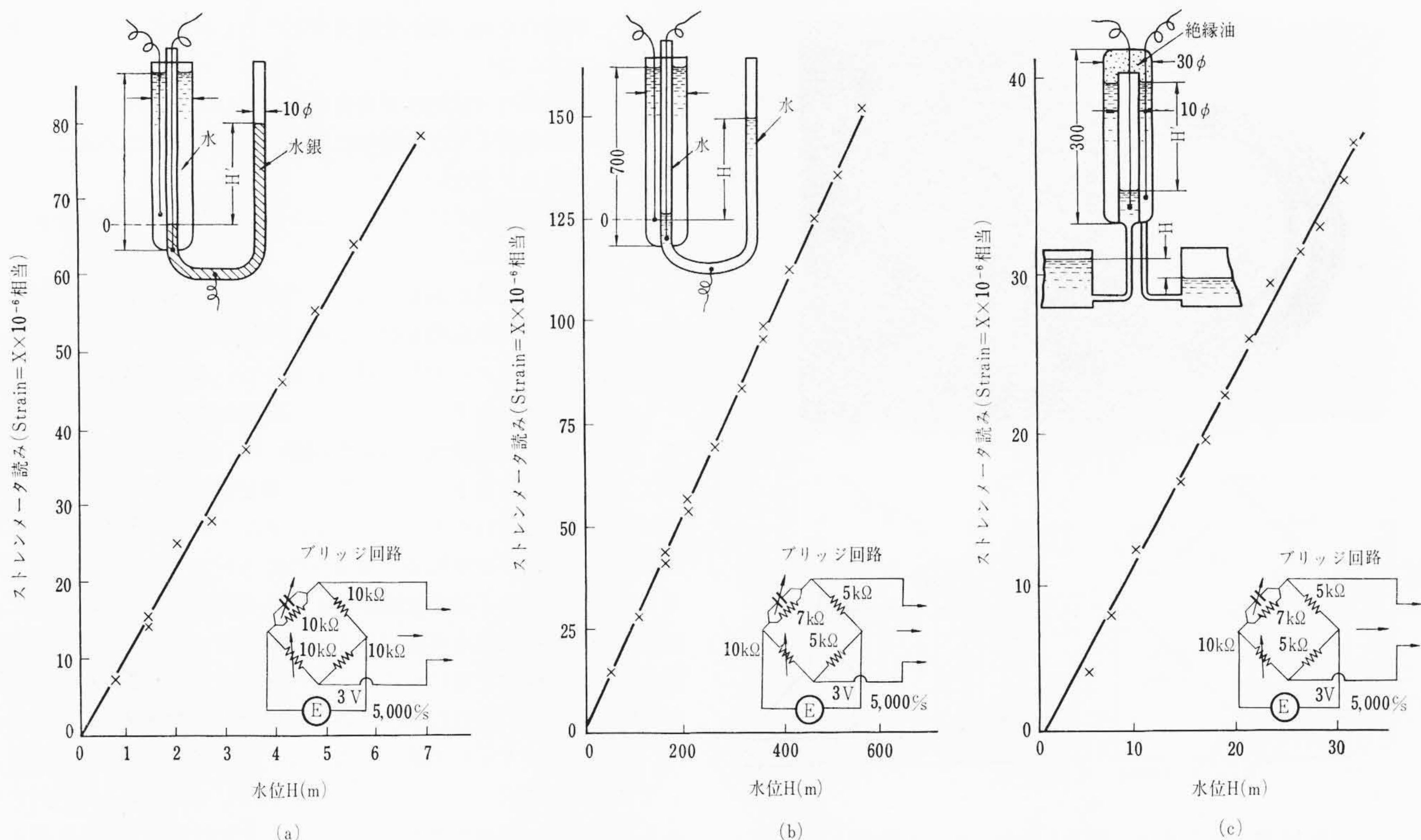
静電容量法は水中露出電極と絶縁電極との組み合わせによって優秀な検出特性を示すことを先に述べたが、さらに、4.3で述べた薄



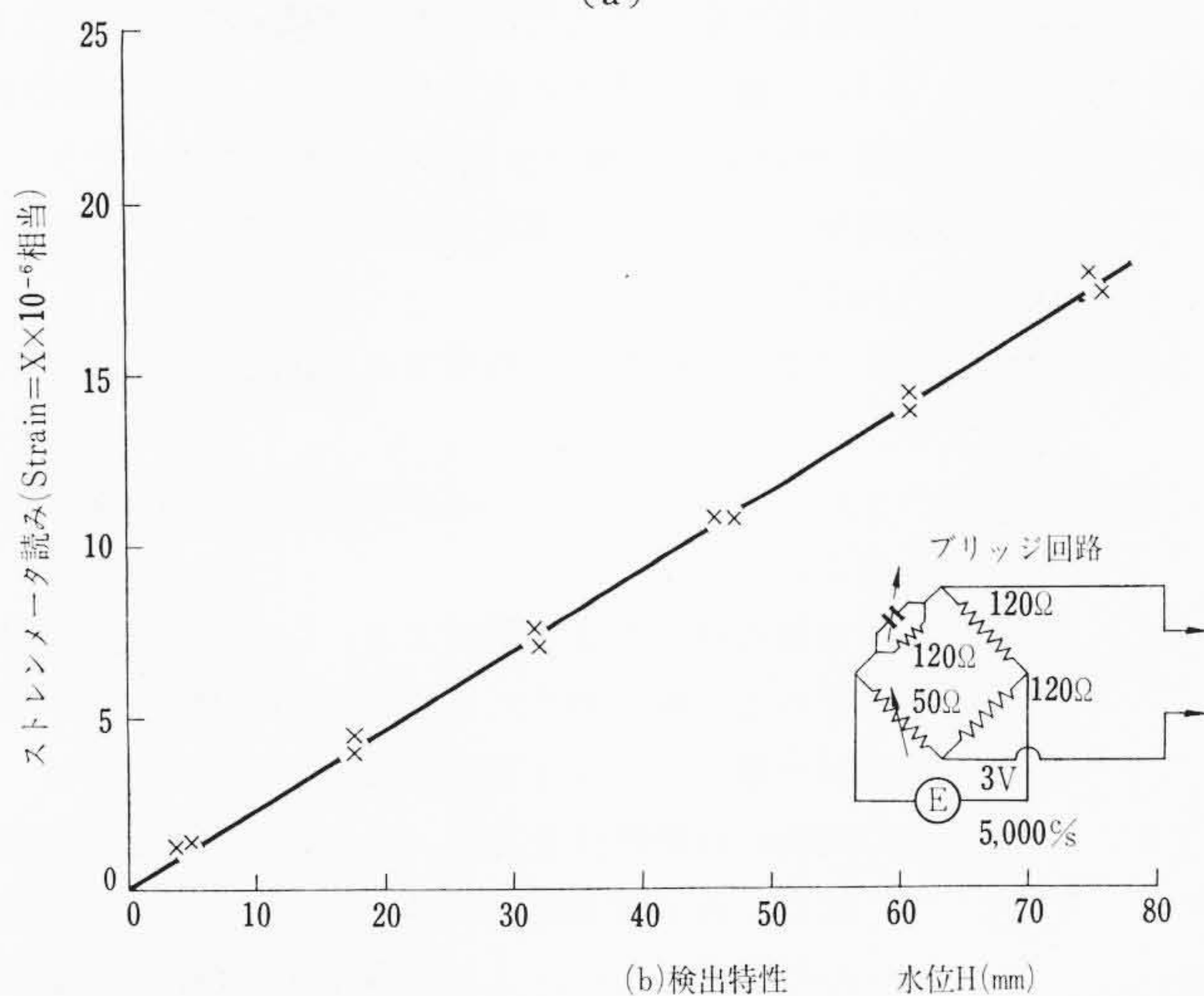
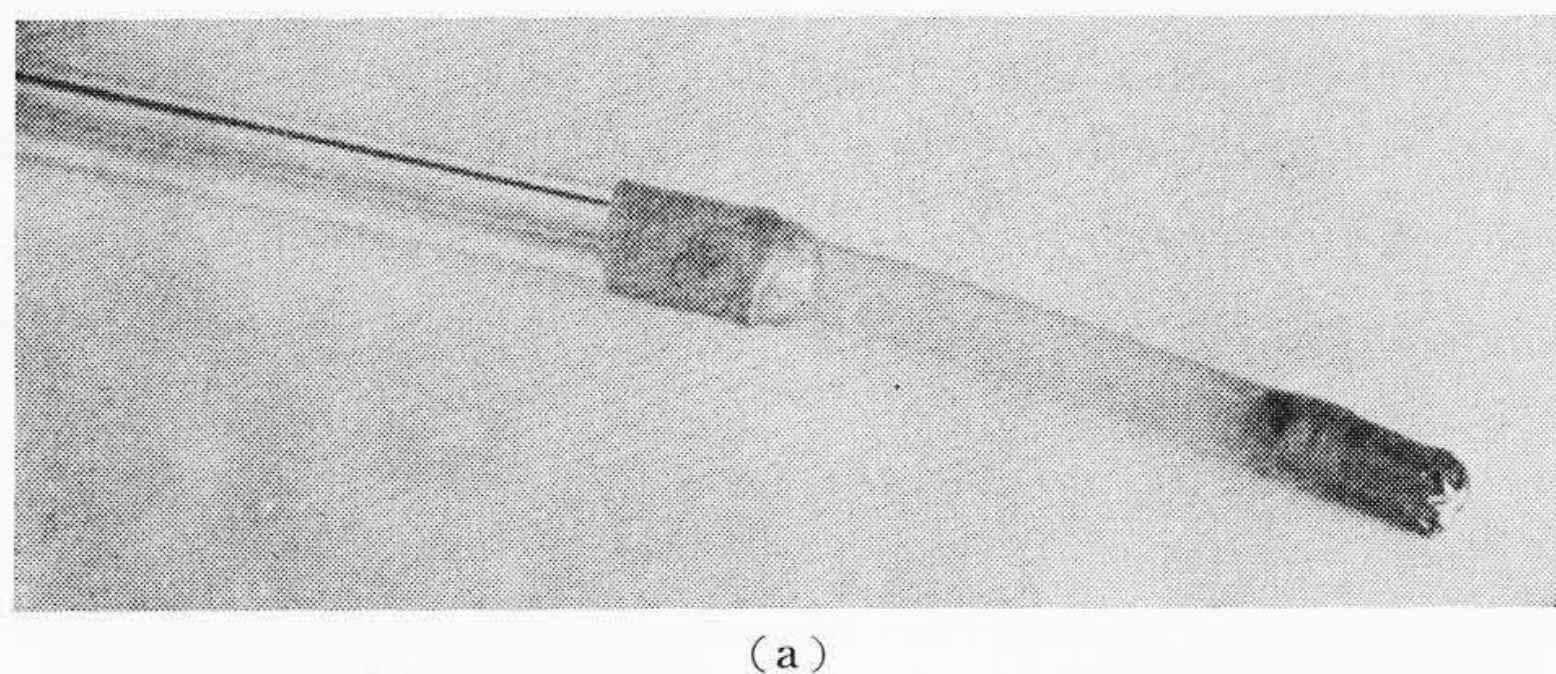
第12図 帯状電極とその特性

ゴム膜のすぐれた特性をとり入れ第14図(a)、(b)に示すような微圧検出用の電極を開発した。すなわち、外径3.4φ、厚さ0.08mm、長さ35mmの薄ゴム管を検出部として使用し、80mm以下の小水压差に対し図に示すような好検出特性を得た。

以上に述べてきた種々の電極は(1)式で示した検出原理に照らして見ると、円柱電極や帯状電極のような固体電極では電極の液浸面積 A の変化を利用し、二重液柱電極では電極間に介在する物質の誘電率 ϵ の変化（露出電極にあっては、このほかに抵抗 R の変化）を、また、ゴム膜利用の微圧検出用液柱電極では液浸面積 A と誘電率 ϵ の両者の変化を活用するなどそれぞれ原理を異にし、また、おのおのすぐれた利点を備えている。すなわち、固体電極は構造が簡単で

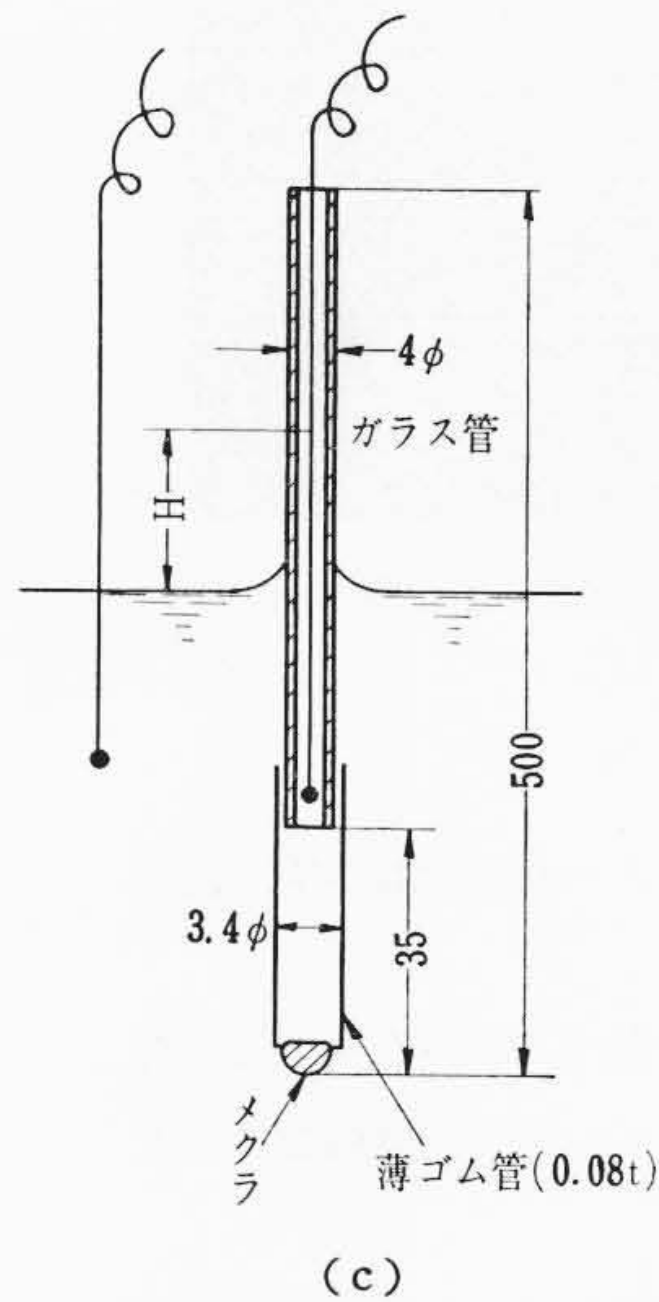


第13図 2重液柱電極とその特性



第14図 薄ゴム管利用の液柱電極の構造、外観と検出特性

良好な検出特性が容易に得られる。二重液柱電極では各電極点の水圧が変動すれば、U字管内の水銀または水などが応動し、これに伴って二重管部のコンデンサ容量が変化することになる。しかも外側には水を使用するため、内部の液体の動きが外部より観察でき都合である。また、これらの電極では液体の動きに対して検出のためには何らの機械的の抵抗がなく、そのうえ、電気的検出であるため液体の動きに対して時間的に遅れのない検出ができる。さらに、ゴム膜利用の微圧検出用電極では電極間の距離 d を小さくすれば、容



量が加速度的に増大するのでゴム膜を薄くすることにより、大幅に小形化される。現在、市販の容易に入手できる 0.04 mm の厚さのゴム膜でも十分に利用の道が多い。

6. 実用例と今後の応用性

以上、静電容量法の使用上の注意点ならびに実用性の高い数種の電極構造について述べたが、ここで、筆者らの行なった実験の中から、二、三の実施例について述べる。

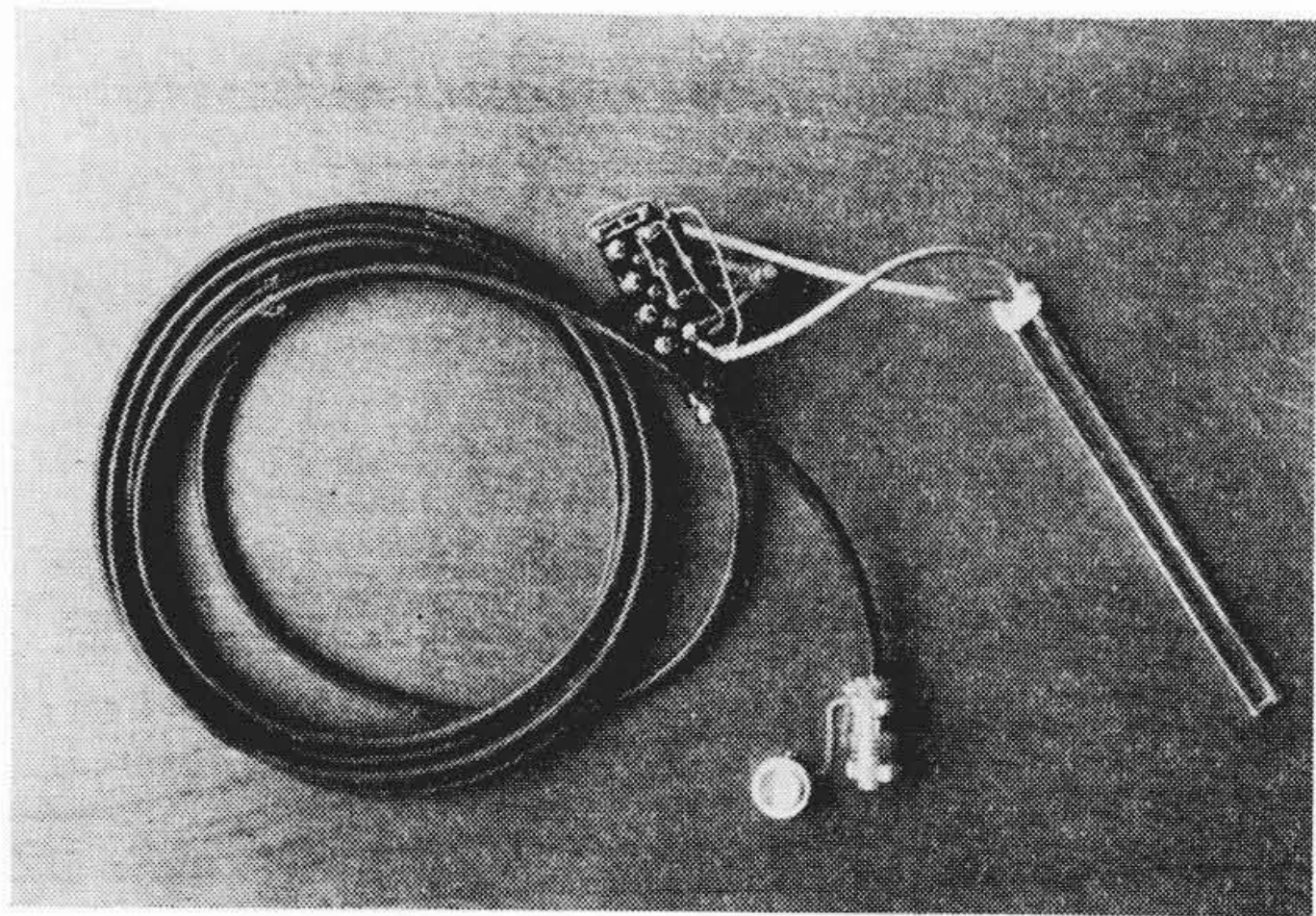
平行棒電極は絶縁に留意すれば十分実用できる検出部であることはすでに述べたが、この構造の電極を火力タービン復

水器のスクリーンウェルの水位検出に適用した。第15図(a)は使用した電極の写真で、また、(b)には電極の構造と検出ブリッジを示した。これらよりわかるごとく、電極は5φガラス管に水銀を入れただけの簡単なものであるが、使用した結果は100 mm程度の水位変動を動的に検出できた。

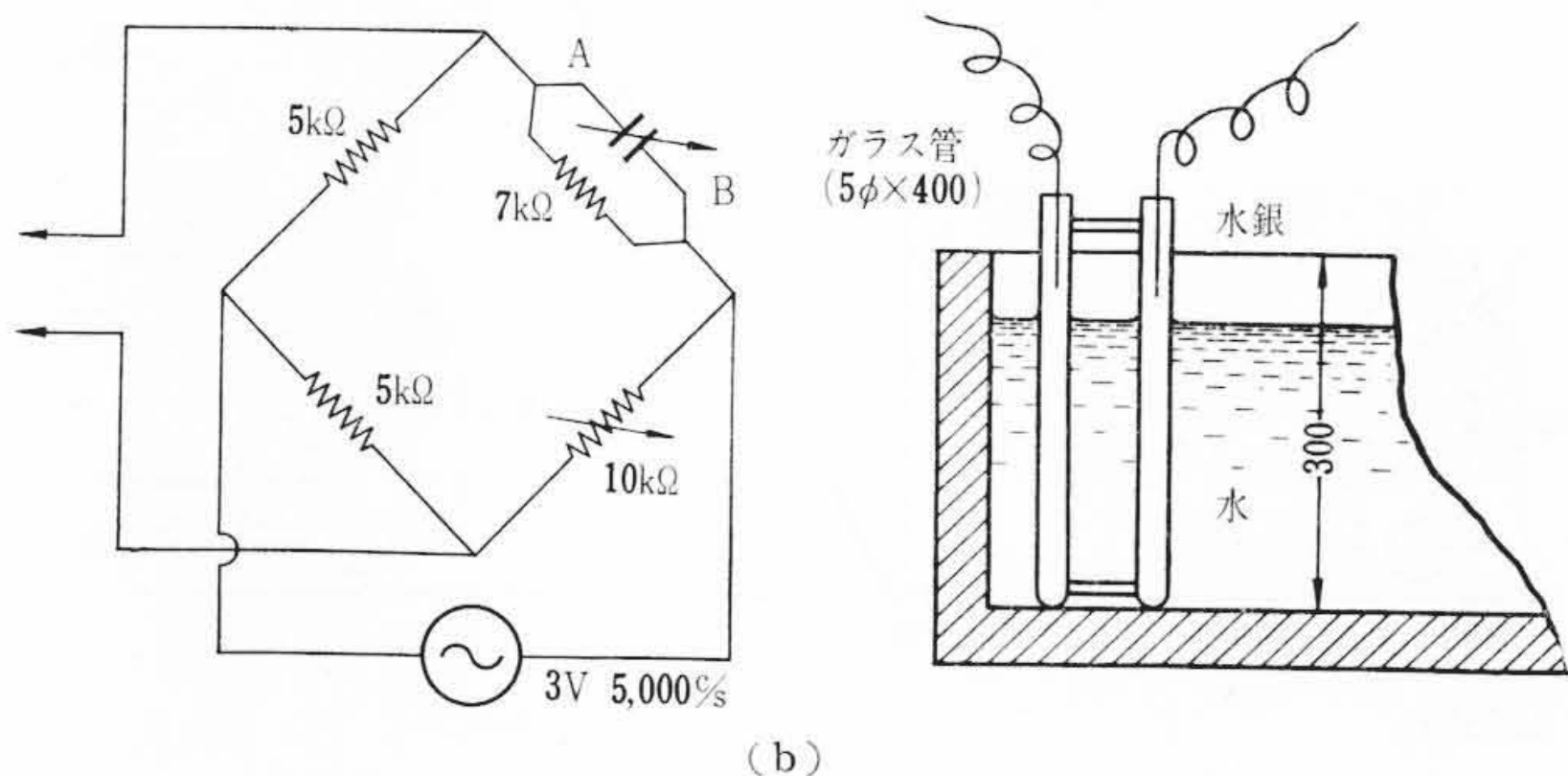
次の応用例として、ギブソン量水法において、変動する上昇圧力を記録させるに第13図(a)に示した2重ガラス管形水銀マンオメータを応用した二重液柱電極の使用を試みた。周知のとおり、ギブソン量水法は送水管の末端近くに設けた流量加減弁を閉鎖する過程において、管路に生ずる圧力上昇から流量を求める量水法である。第16図はこの電極を用いて得られた圧力対時間曲線の一例で、水銀柱の動きが正確に記録され、従来のギブソン法には見られなかった正しい水圧検出に成功し、所期の研究目的を達することができた。

次の応用実施例としてゴム膜利用の微圧検出用電極を組み込んだ新しい構造の10φピトー管を第17図に示す。一般に、ピトー管を用いた流速の測定に際しては、

(i) 小流速の場合はマンオメータの示す差圧が小となり、読み取

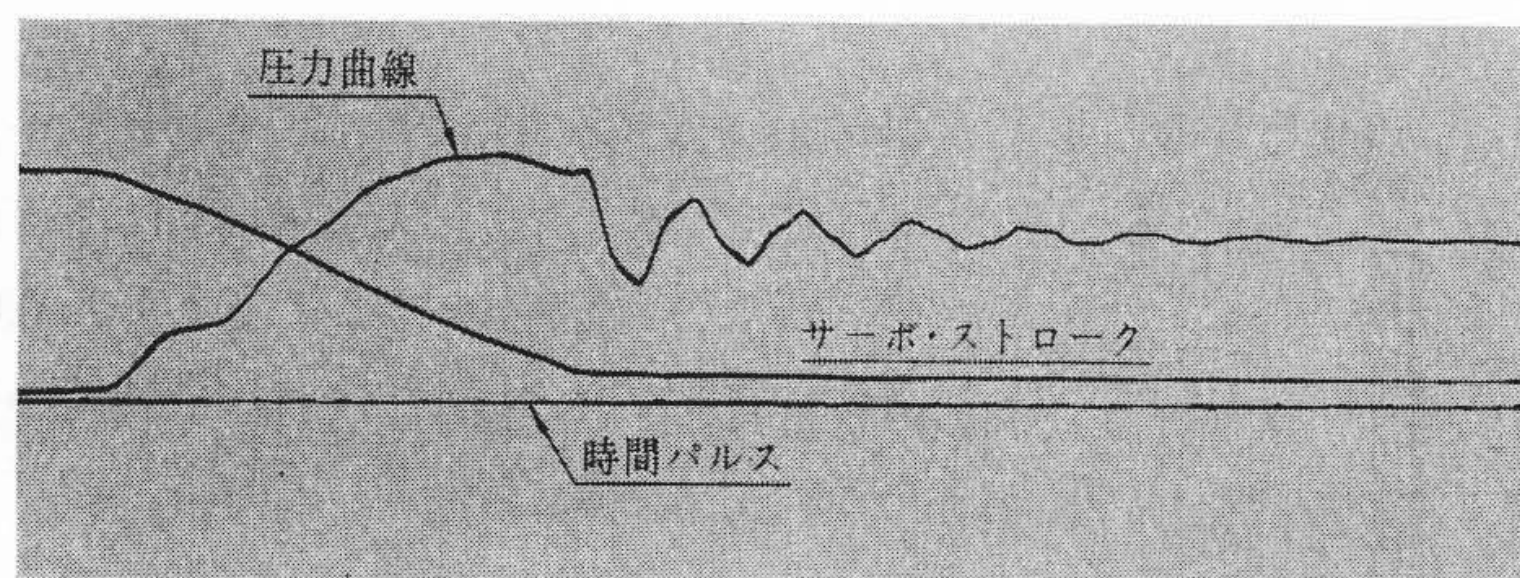


(a) 平行棒電極の実用例



(b)

第15図 検出電極の構造と検出ブリッジ回路



第16図 静電容量法によるギブソン法の圧力対時間線の一例

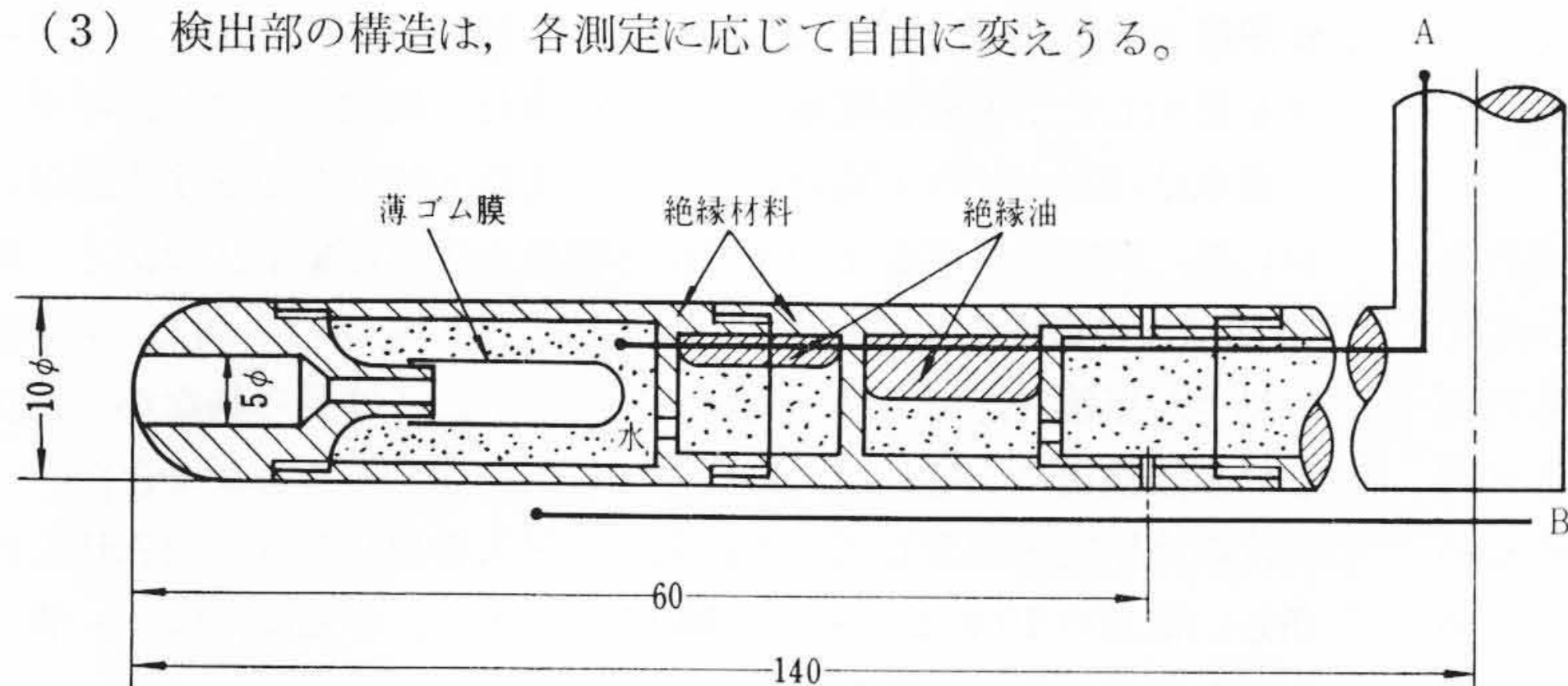
り誤差が大となる。

- (ii) 液圧を細管を通して外部のマノメータへ機械的に導く構造上の不便さがある。

これら二つのピトー管測定法につきまとう障害は第15図にあげた静電容量式のピトー管によって解消され、ピトー管測定法に寄与するところが大きい。

以上のごとく、静電容量法は液圧検出に利用して、すぐれた性能をもつことがわかったが、この検出法の特長とするところを要約すれば次のようである。

- (1) 検出の動的特性、すなわち、時間的に遅れの無い検出が可能である。
- (2) 電極構造を吟味すると、広範囲にわたる圧力の測定が可能である。
- (3) 検出部の構造は、各測定に応じて自由に変えうる。



第17図 薄ゴム膜利用の液柱電極を組み込んだピトー管

- (4) 検出のため、流れを阻害することが皆無か、または、きわめて少ない。
- (5) 検出部は寸法的に小形化し得る。
- (6) 検出端近くで、ただちに電気量に変換するため誤差のはいる機会が少ない。
- (7) 機械的検出に比べ、検出端より読み取り部への引き出しが簡単となる。

以上の多くの特長があるため、応用分野はきわめて広い。特に、水路などの微小水位変動を動的に検出可能な点においては、ほかの追従を許さないほどの大きい利点を有している。検出端が小形化しうることと読み取り部への引き出しが構造的に簡単なことを利用して、たとえば、流体機械の回転面細部の圧力測定などのように、従来は寸法および構造上の制約を受けて測定困難であったような場所の測圧に適用しきわめて有効である。また、この検出法の研究は現段階では水面および水圧差の検出への応用が主であるが、ここで開発した薄ゴム膜など弾性絶縁膜の圧縮性を利用することによって、圧力の絶対値の検出も可能である。この報告では、主として流体計測者としての経験を基にして述べたので、電気および材料などほかの専門分野からの検討に欠けている点が多いと思われる。たとえば、検出端のブリッジ回路として、ストレインゲージ計測を対象として作られた抵抗ブリッジをそのまま利用しているが、専門的立場から見ればコンデンサブリッジのほうがより効果的であると言えよう。また、電極の絶縁材料も簡単に入手できるものに限定してあるが、これも静電的に見た専門分野から誘電率の高いものを選べば、さらに検出感度の増大が望まれよう。また、ピトー管などに使用したゴム膜も市販の入手容易なものを利用しているに過ぎず、格別深い検討は行っていない。ゴム膜の弾性の時効作用など詳細な検討を要する問題があるが、これらは、この測定法を発展させるため残された問題であろう。

7. 結 言

静電容量法を圧力検出に応用するための基礎実験から二、三の改良点を見だし、さらに、種々の構造の電極を開発し、その検出特性を求めた。その結果、次のような事項を明らかにすることができた。

- (1) 実用に便利な二、三の検出部電極構造と、これらの検出特性を明らかにした。
- (2) 静電容量法では、絶縁電極を採用すれば測定精度が著しく向上する。
- (3) 両電極のうち、少なくとも一つは水中電極（液体電極）としたほうがよい。
- (4) 検出特性は電極の材料および形状より、むしろ絶縁性能に大きく左右される。検出特性に直線性を持たせるには、絶縁部断面積が一樣になるよう留意しなければならない。
- (5) 薄ゴム膜の両面に直接液圧を加え、かつ、これら膜面を境

にした両液体自身を液体電極とした検出部を新たに開発したが、これは微小圧の検出が可能ならうに、検出端が著しく小形化できるので、流体計測上の技術に活路が広い。

終わりにのぞみ、本研究については、山崎卓爾博士よりご指導を賜わったことと、日立研究所水力実験所各位の懇切なるご協力があったため遂行し得たことを記して謝辞に代える。

参 考 文 献

- (1) J. A. Sandover: An Experimental Wave Recorder, Water Power, June, 1957
- (2) 小宮: オートメーション 7 (昭 37-7)