



Title	静電容量法による液膜波形測定装置の開発
Author(s)	村井, 郁夫; 石黒, 亮二
Citation	北海道大學工學部研究報告, 134, 33-38
Issue Date	1987-01-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42023
Type	departmental bulletin paper
File Information	134_33-38.pdf



静電容量法による液膜波形測定装置の開発

村井 郁夫 石黒 亮二

(昭和 61 年 9 月 30 日受理)

Development of a Capacitance Method Measuring Wave Configuration on Liquid Film Surfaces

Ikuo MURAI and Ryoji ISHIGURO

(Received September 30, 1986)

Abstract

Studies on flow characteristics of liquid film falling down along flat surfaces have many fields of engineering application. Exact measurements of wave configurations which are formed on the film surface and those changing process are the most important to understand the nature of the liquid film kinetics. Among the measuring techniques of the wave configuration the capacitance method has some advantages, because the change in capacitance between the film surface and the probe is picked up without contact to the film itself. However, some problems, which should be improved, are still left. They are, for example, the non-linearity of the probe output with film thickness or drifting outputs due to temperature variations of the system.

In the present report a development of new system is described. The capacitance is measured by the frequency modulation method. A logarithmic circuit is utilized to improve the non-linear character. The data are processed with A-D converter. As a result of much effort, the surface area of the probe, important to the high resolution of wave shape, can be $1/4 \sim 1/10$ times smaller and the responding speed which is important in observing the changing process, becomes $10 \sim 100$ times larger as compared with older systems. We finally succeed in parallel running of two systems with high sensitivity and wider band.

1. 緒 言

平滑面を流下する液膜流動現象は、原子炉の緊急冷却系を始め、発電プラントの復水器や化学工業における反応塔等広範な工学分野で解明が待たれている問題である。液膜波形の測定は、この現象を解明し工業的解析手法を確立するために要求される重要な測定の一つであり、このため高精度で簡便な測定法の開発が望まれている。

液膜波形の測定には触針法¹⁾、静電容量法^{2,3)}、抵抗法⁴⁾等の他種々の方法が報告されている⁵⁾。静電容量法、抵抗法は膜厚変化を電氣的信号へ変換することにより波形を実時間で測定することができる。しかし抵抗法では液膜抵抗を検出するため流路に絶縁された電極を設けなければならない、これが流れに影響を与えないための工夫が必要である。また構造上測定位置の変更は困難であり、検出区間での膜厚算定や測定系の校正が難しく液体の純度の変化等による導電率への影響には注

意を払う必要がある。

静電容量法では、流下壁とプローブ間の静電容量が液膜の厚さによって変化することを利用する。このため流路の加工は必要なく非接触な検出が可能であり、液体の粘性や表面張力等の性質に左右されることなく測定が行え抵抗法に比べて有利である。しかしセンサーの非直線性や測定回路の温度ドリフト等改善の余地のある問題が残されている。

これまで静電容量法を用いた測定例としては Dukler ら²⁾ および高浜ら^{1),3)} によるもの等が報告されている。Dukler らは CRT とドラムカメラを用いて液膜波形の変化分について測定している。藤田らは³⁾ 容量検出プローブには MDG643 (直径 6 mm), 電圧への変換には MD31 (いずれも岩崎通信機製) を用い電磁オシログラフ (周波数帯域 300 Hz) により波形を記録している。いずれの場合も膜厚と出力電圧との関係は直線的とはならず歪んで記録されるため、これを補正して膜厚へ変換することが必要である。

筆者らは静電容量法に注目し、水膜流の測定のため周波数変調による容量検出, Log 演算回路による分解能の改善, 及び A-D 変換によるデータ処理等により高感度, 広帯域で 2 系統の同時測定が可能なシステムの開発を目指した。また複数のセンサーを設けた場合に起きるビート障害は基準周波数をオフセットし, 広帯域な検波回路とローパスフィルタにより除去した。

この結果従来の静電容量法による測定^{2),3)} に比べプローブ面積を 1/4~1/10, 応答速度を 10~100 倍程度改善することができ, 高精度な液膜波形測定システムが開発できた。

2. 測定法

静電容量法では、導電性の壁面に沿って流れる流体の膜厚の変化を検出するため、プローブ先端とその対向する壁面間の静電容量が膜厚によって変化することを利用する。

静電容量は液膜と空気層部分の直列に合成されたものとなり, 電極間隙を d [m], 膜厚を δ [m], プローブの直径を D [m], 液体の比誘電率を ϵ_{ws} , 空気の比誘電率を ϵ_{as} とすれば, $d \ll D$ の場合での液膜部分の容量 C_w は周知のように $C_w = (\epsilon_{ws}) (\pi D^2/4) / \delta$ [F] となり, 空気層部分の容量 C_a は $C_a = (\epsilon_{as}) (\pi D^2/4) / (d - \delta)$ [F] となる。従って合成される容量 C_t は $1/C_t = 1/C_w + 1/C_a$ [F] となる。

得られる容量変化の割合は液膜を形成する液体の比誘電率によって異なる。液体の比誘電率が空気に比べて非常に大きい場合は, 空気層部分の容量のみで決定される。電極面積が小さい場合容量変化の割合は極めて微小である。この微小な容量変化を高速で検出するために LC 発振による周波数変調回路を用いた。タンク回路の同調容量の一部として C_t を用いこれを発振周波数の変化に変換している。発振周波数と前述の容量 C_t との関係はタンク回路のインダクタンスを L_o [H], タンク回路のキャパシタンスを C_o [F] とすれば発振周波数 f_o [Hz] は $f_o = 1/2\pi (L_o (C_t + C_o))^{1/2}$ となる。

実際には空間分解能を上げるために電極面積を小さくしなければならず $d \ll D$ は成立しない。このため端効果による電界分布の乱れや, 電極面積による波形の平均化によって歪みを生じる可能性があるので実測による校正が必要である。

3. 装置の構成

容量検出のための回路としては高周波ブリッジ回路³⁾, 周波数変調回路²⁾, シュミットトリガ回路⁴⁾等が用いられているがここでは高い検出感度が得られ, 応答速度の速い周波数変調回路を用いた。

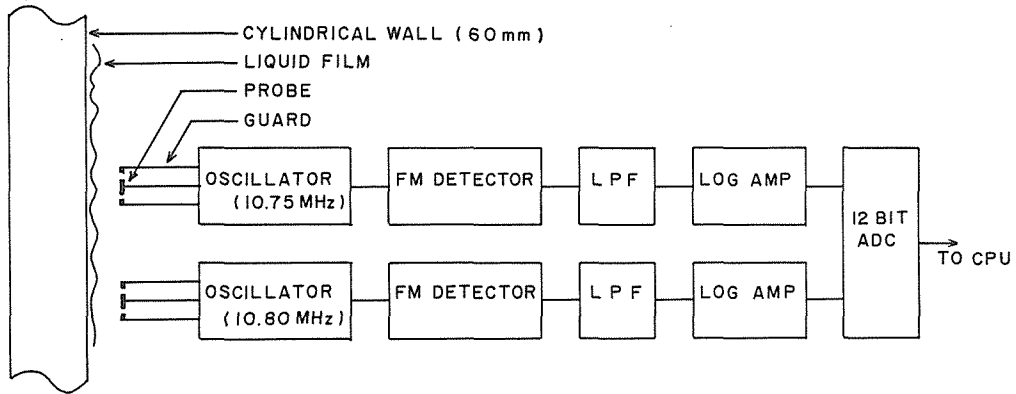


Fig. 1 測定系ブロック図

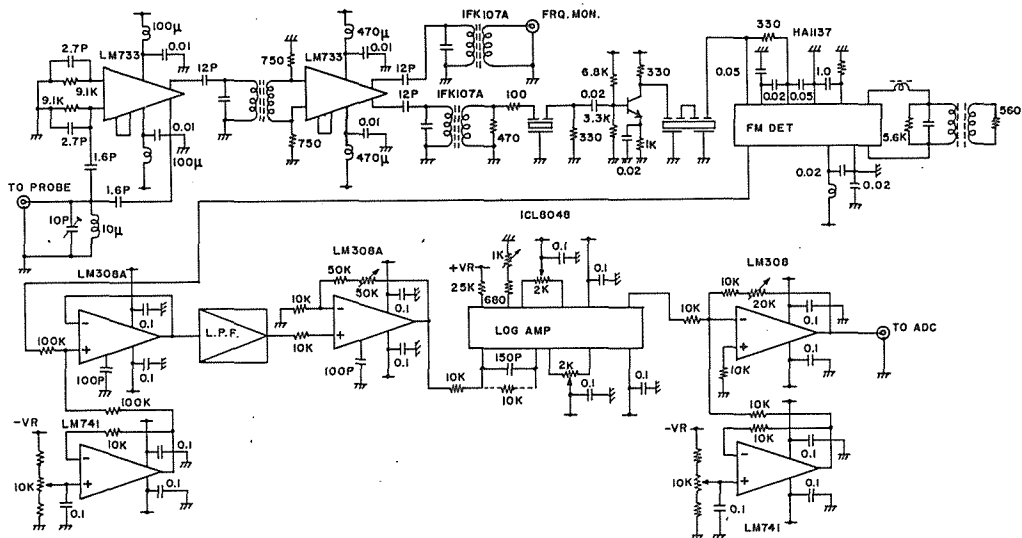


Fig. 2 主要部分回路図

測定系のブロック図を Fig. 1 に、主要部分の回路図を Fig. 2 に示す。

(1) 容量検出プローブ

容量検出プローブは、空間分解能の点からは出来るだけ小さく、検出感度の点からは大きいことが望ましいがここでは直径 2.0 mm とした。この場合算定される容量は約 0.01 pF~0.1 pF と極めて小さい。

(2) 発振部

発振部は、膜厚の変化を発振周波数偏移に変換する部分で、周囲温度や機械的振動に対して発振周波数を安定に保つ工夫が必要である。発振周波数の安定化を図るためフランクリン型の発振回路⁷⁾を用いタンク回路と発振回路は 1.6 pF と微小容量で結合し、負荷効果によるタンク回路の Q の低下を防いだ。タンク回路は、10 μ H のコイルと 10 pF のシリンダートリマコンデンサで構成し、基準となる発振周波数の設定はトリマコンデンサによって行った。

発振周波数を高く設定することによって検出感度を上げることができるが回路の安定性、検出容量の範囲、部品の入手の容易さ等を考慮して決めた。さらに 2 系統の同時測定を行った場合に障害となる干渉波の成分が液膜波形の信号波の周波数帯域に重ならないように基準周波数をそれ

ぞれ 10.75 MHz, 10.80 MHz とオフセットした。後述するように検波可能な周波数偏移の幅を広くとっているので、基準となる発振周波数をオフセットさせた場合でも同一の回路を 2 系統分用意すればよい。このことによって回路の調整や、測定データの校正等が容易となる。得られる最大周波数偏移は、前述の容量変化の範囲から約 30 KHz であり、室温付近における周波数ドリフトは $-900 \text{ Hz}/^{\circ}\text{C}$ 程度で中心周波数に対して約 -0.009% である。

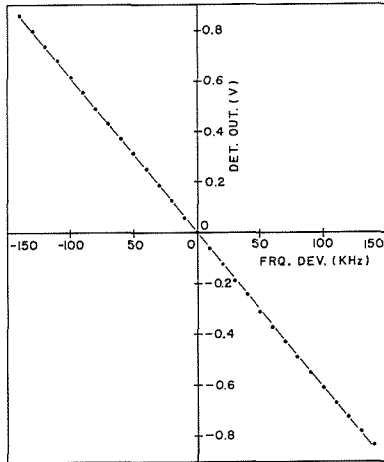


Fig. 3 検波回路の周波数偏移と出力電圧の関係

(3) 検波回路

検波回路は周波数偏移を電圧に変換する部分で、クアドラチュア回路を用いた。検波可能な最大周波数偏移は Fig. 3 に示されるように約 280 KHz であり、また膜厚変化に対する回路の最大応答速度は検波回路でほぼ決定される。検波回路の周波数特性を Fig. 4 に示す。DC~100 KHz 程度までの膜厚変化に対して応答することが分かる。複数のセンサーにより同時測定を行う場合には、検波回路の比直線部分でヘテロダイン検波が行われビート障害が発生する事がある。この場合それぞれの発振周波数の差の周波数の干渉波が検波成分に

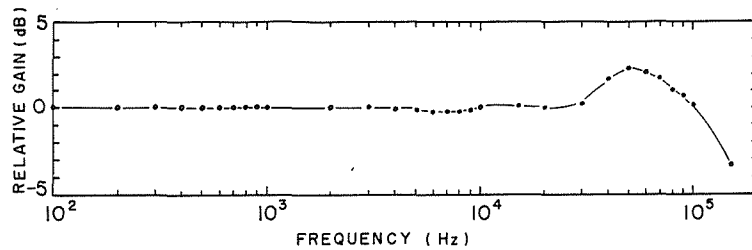


Fig. 4 検波回路の周波数特性

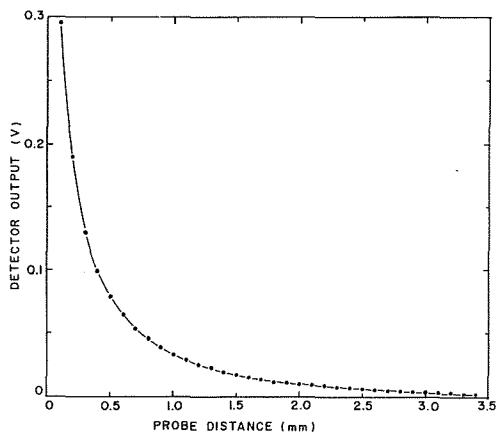


Fig. 5 電極間距離と検波出力電圧の関係

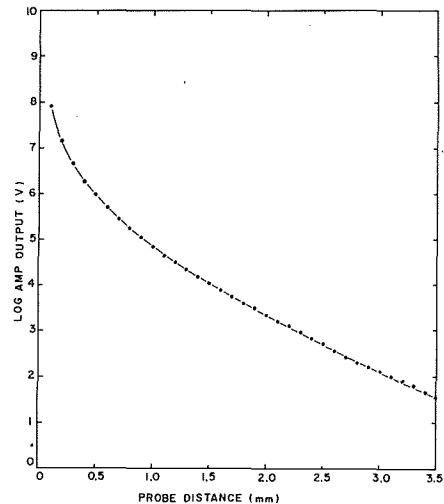


Fig. 6 電極間距離と Log アンプ出力電圧の関係

含まれるので、ローパスフィルタ等によってこれを取り除く必要がある。

(4) Log 演算回路

本回路の電極間距離と検波出力との関係を Fig. 5 に示す。膜厚の小さな部分では、膜厚の変化に対して出力電圧が小さく分解能が悪化する。これを改善するため Log アンプにより対数変換を行い膜厚の変化に対して分解能が一様となるようにした。電極間距離と Log アンプ出力電圧の関係を Fig. 6 に示す。これによって膜厚が 0~2.5 mm の間では出力電圧と膜厚の関係は、ほぼ直線となる。このことは液膜波形を観測した場合の歪みがかなり軽減されることを示しており、オシロスコープ等を用いて概略の波形を直視することができる。

(5) A-D 変換回路

A-D 変換器は分解能 12 bit, 入力 8 チャンネルで、同時サンプリングが可能なものを用いているので波形の時間比較等が容易に行える。

4. 測 定

本装置を用い垂直に支持された外径 60 mm, 流路区間 2 m のステンレス磨き管表面を流下する水膜流について測定を行った。管とプローブの距離は 3.5 mm にセットした。2 つのプローブを 2 cm 離して設置し、干渉波成分は検波後 20 KHz のローパスフィルタによって取り除いた。

静電容量法では、プローブの端効果による電界分布の乱れや、電極面積による平均化によって歪みを生じる可能性がある。このような歪みを補正するために触針法によって校正を行った。触針法では波形情報が確率分布として得られる。そこで静電容量法で得られたデータを波高分布で分割し、時間方向の積算値を求め確率分布の形として触針法で校正した。得られた結果を Fig. 7 に示す。振幅が小さく変化の速い成分に対しても十分な応答を示していることがわかる。

従来の触針法では、接触検出に 10 KHz 程度の交流信号を用いこれを直接触針を通じて流路へ加えている。このため液膜と触針との間に生じる、微少な静電容量によるインピーダンスの低下によって測定誤差が生じたり、交流信号が流れるループが大きくなるために動作が不安定になる場合があった。

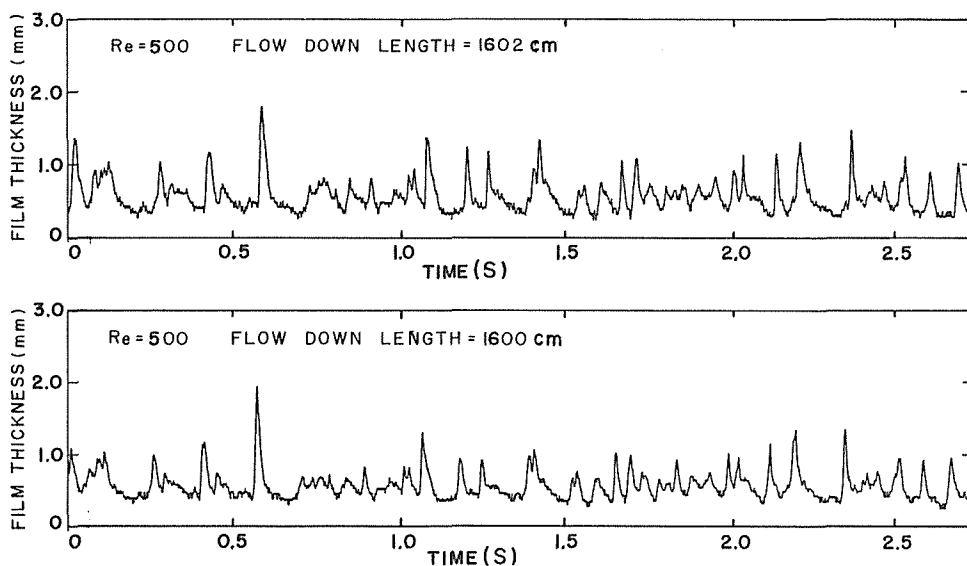


Fig. 7 液膜波形測定例

ここでは、触針法での測定の場合にも静電容量法で用いた A-D 変換以降の測定系を兼用した。このため信号源として直流電源を用い水膜抵抗による電位降下により接触状態を検出し、接触時間は A-D 変換器のサンプリングを高速で行うことで計測している。これによって安定に高い時間分解能を得ることができるとともに触針法の場合においてもデータの解析が容易になった。

5. 結 言

静電容量の検出に周波数変調回路を用い、高い空間分解能と高速応答可能な液膜測定装置を開発した。これによって基底膜厚を含む液膜波形を実時間で観測、測定し、短時間で解析することが可能となった。独立した 2 系統の同時測定により、これまで困難であった個々の波形の流下方向のデータを取得することができ、平均膜厚、流下距離に対する波形の変化、波高と波速の関係などより詳細な解析を短時間で行うことが可能となった。またこれまで目視では鏡面と見なされるような振幅が小さく比較的高周波成分を含む波形に対しても測定が可能であると思われる。

発振部の周波数安定度は、LC 発振器としては満足すべき特性ではあるが、測定に当たっては室温の変化によるドリフトの影響を考慮しなければならず、この点については回路の温度補償等改善の余地がある。なお応答が速く電極間隙が小さい部分で感度が高くなることから、この手法を高速微小変位計等へ応用することも可能である。

本装置の開発に当たっては、液膜の特性について深く御研究されている苫小牧高専の関根郁平助教授、原子力安全講座の熊田俊明助教授の御指導を頂きました。また関根郁平助教授からは各種の測定データの提供を頂きました。種々の御助言を頂いた原子力安全工学講座の杉山憲一郎助手、基礎原子核工学講座の沢村晃子助手、特性測定のため御協力を頂いたバンデグラフ加速器室の鳥海郁夫技官の諸氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高浜平七郎, 加藤征三, 木内龍彦, 機械学会論文集 44-386(昭 53 年 10 月)p. 3514
- 2) Dukkler, A. E. and Bergeline, O. P., Chem. Engng. Progr., Symp. Ser., 48-11 (1952-11), p. 557.
- 3) 藤田秀臣, 加藤健司, 高浜平七郎, 機械学会論文集 50-459(昭 59-11)p. 2553
- 4) 深野徹, 池田政義, 栗脇哲祥, 伊藤昭彦, 高松康生, 機械学会講演論文集 No. 804-10(80-11, 関西支部第 1 回シンポジウム)
- 5) Hewitt, G. F., Measurement of Two Phase Flow Parameters, (1978), 176, Academic Press.
- 6) C. Pfender, J. Daubert und K. Stephan, Stuttgart Wärmeund Stoffübertragung. Vol. 16, No. 1 1982, p. 45.
- 7) 横井与次郎, リニア IC 実用回路マニュアル (昭 50) p. 237 ラジオ技術社
- 8) 高浜平七郎, 加藤征三, 前田直起, 機械学会論文集 47-418(昭 56 年 6 月)p. 1044
- 9) 高浜平七郎, 加藤征三, 前田直起, 機械学会論文集 49-437(昭 58 年 1 月)p. 62
- 10) 関根郁平, 村井郁夫, 石黒亮二, 熊田俊明, 機械学会北海道支部第 27 期講演会 (昭 61 年 3 月)
- 11) 関根郁平, 村井郁夫, 石黒亮二, 熊田俊明, 第 23 回日本伝熱シンポジウム (昭 61 年 5 月), p. 485