ソレノイ ド形ボイ ドメータ

Solenoid Type Void Meter

遊佐英夫*

Hideo Yusa

内 容 梗 概

コイルのインピーダンスがボイド量(蒸気体積率)によって変化することを利用したソレノイド形ボイドメ ータを開発した。測定器は主として高周波発振部,検出コイルを含む検出部,交流ブリッジ部,増幅および指 示部から成り立っている。検討の結果,ボイドによりコイルの分布容量と実効抵抗がおもに変化することを知 った。本ボイドメータは時間遅れが少なく1ms以下である。感度は非常によく,1%以下のボイド量測定が 可能である。またボイド分布形状の影響をあまり受けず最大誤差15%で局所ボイドの測定ができる。

1. 緒 言

沸騰水形原子炉の動特性を解析するうえにおいて熱,水力学系の 特性,特に過渡沸騰現象を知ることはきわめて重要である。しかし ながら,従来のベータ線あるいはガンマ線を用いたボイドメータで は時間遅れが非常に大きいので,沸騰ボイドの過渡応答を測定する ことが困難であり,この分野における実験的考察が遅れぎみであっ

た。



最近,X線形とか容量形など高感度で時間遅れの少ないボイドメ ータを用いてこの方面の実験が行なわれだしている⁽²⁾⁽³⁾。この中で 容量形は比較的手軽な測定回路により測定できるが,ただボイドの 分布形状によりその検出信号がかなり影響を受けるという欠点のあ ることが報告されている⁽³⁾。

上記欠陥を取り除く方法として,コイルのインピーダンスがボイ ドによって変化する点に着目し,種々の検討を加えた結果,ボイド 分布形状の影響が少ない高感度のボイドメータを開発することがで きた⁽¹⁾ので以下に報告する。

2. 測定器の概略と測定原理

第1図に測定器のブロックダイヤグラムを示す。検出用コイルは 絶縁物製のボビンに巻かれ、このボビンの中を水一蒸気系の2相流 が流れるようにする。検出コイルは交流ブリッジの一辺に組み込ま れ、ボイドによるコイルのインピーダンス変化をブリッジのバラン スのくずれとして取り出し、これを増幅、指示させている。電源に は高周波の定電流電源を使用しコイルのインピーダンス変化分を大 きくしている。電源周波数は9Mcに選んだ。

第2図に検出部の概略を示す。検出コイルはボビンの上に巻かれ 2相流はボビンの中を流れる。コイルの線の太さ,直経および長さ はコイルのQ値が大きくなるように選ばれる。コイルの外側にはシ ールドパイプを置き外部電磁場の遮へいを完全にしている。また, コイルの内側には上下2個のガードパイプを置くことにより局所ボ イドの測定を可能にしている。このとき,ほぼ上下ガードパイプ間 に局所的な電磁場が与えられ,この部分がボイド感応部になってそ の他の場所にあるボイドは検出にかからなくなる。



第1表	物質によ	るコイル	のインセ	ニーダン	ス変化
-----	------	------	------	------	-----

物	重	Í	比誘電率	電導度 (Ω ⁻¹ cm ⁻¹)	分布容量 (pF)	実効インダク タンス (µH)	実効抵抗 (Ω)
水	道	水	80	6×10-5	22.33	3.07	3.83
蒸	留	水	80	1.5×10-6	22.33	3.07	3.13
エチノ	ルアルコ	- 1L	21	1.1×10-6	21.2	3.07	2.92
~	ンゼ	2	2.3	5.3×10^{-7}	20.33	3.07	2.78
空		汳	1		20.33	3.07	2.78
ドビ ブボ	ンの中 イド量	に第 100	1表に示 %に相当	したような液 する空気の場	夜体がはい 湯合につい	、っていると 、て, コイル	き,およ のインピ
ドビ ドボ ーダ	ンの中 イド量 ンスを	に 第 100 測定	1表に示 %に相当 した。測	したような液 する空気の場 定は Qメー ク	夜体がはい 易合につい タを用い	、っていると 、て, コイル て行なった。	き,およ のインピ 表中の物
ドビ ゾボ ーダ の	ンの中 イド量 ンスを 比誘電	に 第 100 測定 率は	1 表 に示 % に相当 した。測 便覧から	したような液 する空気の壊 定は Q メージ 求めたもの,	夜体がはい 易合につい タを用い 電導度い	、っていると 、て, コイル て行なった。 は電導度メー	:き,およ のインピ 表中の物 ·タで実測

3. コイルのインピーダンスの測定

ボイド量と検出信号の間の関係を知るには、まず、コイルのイン ピーダンスがボイドによってどのように変化するかを知らねばなら ない。このため、コイルインピーダンスの構成要素である実効イン ダクタンス、実効抵抗および分布容量⁽⁴⁾がボイドによってどのよう に変化するかを各要素を分離して実験的に調べてみた。すなわち、 * 日立製作所日立研究所



なお,比透磁率はすべて1である。コイルのインピーダンスは検 出部の構造によりかなり違った値を有するが,第1表に示した測定 結果は4.1に後述する検出部によるものである。分布容量は誘電率 の大きい物質ほど大きくなっており、誘電率のだいたい等しい物質 では分布容量も等しくなっている。実効インダクタンスは物質のい かんにかかわらずほぼ一定で 3.07 µH であった。実効抵抗は、電導 度の大きい物質ほど物質内に生ずるうず電流損が増すため、大きく なっている。ここで注目すべきことは,第1表に示したような物質 では,インダクタンスがほとんど異ならないということである。た だし, 電導度が 10⁻² (Ω⁻¹ cm⁻¹) 程度のかなり大きい食塩水では, イ ンダクタンスが若干減少した。これは食塩水の中に生じたうず電流 により,コイル内に逆磁場が生じ磁束が減少したためと考えられる。 このことから表に示したような液体では、 Qメータによりインダク タンスの変化が検出できるほど電導度は大きくないといえる。以上 の結果から,液体の中に誘電率と電導度の小さいボイドが混入する と、コイルの分布容量と実効抗抗が減少し、このことによるコイル のインピーダンスの変化分が,検出信号として取り出されている。 第1表からもわかるように、ベンゼンなどのような誘電率と電導度 が小さく,ボイドのそれとあまり違わない液体では,その中にボイ ドが混入してもコイルのインピーダンスは変化しないので、ボイド は検出できない。なお、コイルのインピーダンス変化と検出信号の 間の関係は付録において考察する。



第4図 ボイドの半径方向の位置による検出信号の変化 (容量形)

4.2 ボイドの位置による検出信号の変化

ソレノイド形において、ボビンの中に蒸留水を入れた状態で測定器のブリッジのバランスをとっておき、次にこの中に直径 10 mm,

4. ボイド分布形状の影響および容量形との比較

実際のボイド(気体)では任意のボイド分布形状を与えることが 困難であるので,誘電率と電導度がボイドのそれとほとんど等しい 固体の模擬ボイドを用いて,ボイド分布形状の検出信号に対する影 響を調べた。また,容量形についても同様の影響を調べた。容量形 検出器の測定回路は第1図とほぼ同じものを用い,検出部と交流ブ リッジの一部に若干の変更を加えた。すなわち,検出コイルとガー ドパイプを取り去り,代わりに2枚の平板電極をボビンの外側に取 り付けた。

同時に、この平板電極の容量と同調のとれるようなコイルを、電 極と並列にブリッジの中に組み込んだ。

4.1 検出部の寸法

1

ソレノイド形の検出部の寸法は次のようである。検出コイルは太さ 0.5 mmのエナメル被覆の銅線を線間隔 8 mm, 巻数 9 で外径 50

長さ 500 mm のベークライト棒を入れ,これを半径方向に移動した ときの検出信号の変化を調べた。その結果,検出信号は棒の半径方 向の位置いかんにかかわらず一定であった。ただし,ボビンの肉厚 を 2 mm 程度にうすくして棒をコイルに極端に接近させると信号は やや大きくなった。

次に軸方向のいかなる範囲がボイド感応部になっているかを知る ため,直径 20 mm,厚さ 10 mm のベークライト製円板を,軸方向 に移動したときの検出信号の変化を調べた。第3 図は実験結果を示 したものである。縦軸は真空管電圧計で測定した検出信号,横軸は ベークライト板の先端をボビン上端から測った距離であり,コイル, ガードパイプおよび模擬ボイドの軸方向の位置も同図中に示してあ る。ベークライト板を軸方向に動かすとその位置により検出信号は 実線のように変化した。第3 図 からボイド感応部は,32.5 cm から 38.5 cm の 6 cm の範囲であることがわかる。

検出信号は 32.5 cm から 39.5 cm の 7 cm の範囲で変化している が感応長さはこの範囲から模擬ボイドの厚さ 1 cm を差引いたもの に等しい。理想的には同図中の点線のように,ボイド感応部では指 示が一定であることが望ましいが,実際には電磁場に不均一があっ て,実線のようになった。検出信号の変化が点線のようであれば, ボイド量としては次式で表現されるものが検出されるはずである。

ボイド量= ボイド感応部に含まれるボイドの体積和 ボイド感応部の体積=流路断面積×ボイド感応長さ

しかしながら,実際には実線のようになるので,これがソレノイド 形ボイドメータの誤差の主因になるものと考えられる。すなわち, 小さな気泡が密に集っているときは,大きな気泡が粗に集っている ときよりも,同一ボイド量で検出信号はやや低めの値を示す。この 誤差の大きさは 5.1 で求める。 4.3 容量形との比較 ソレノイド形の場合と同様に,ボビンの中に蒸留水を入れた状態 で測定器のブリッジのバランスをとっておき,次にこの中に直径 10 mmのベークライト棒を入れ,半径方向に移動したときの検出信号 の変化を調べた。第4 図に測定結果を示す。ボビン,平板電極およ び模擬ボイドの半径方向の位置も同図中に示してある。第4 図から

mm, 内径 30 mm のアクリル製ボビンに巻いた。ボビンの内側には 厚さ 0.5 mm の Al 製ガードパイプをそう入し, 上下ガードパイプ間 の距離を 50 mm にした。また,容量形の平板電極は厚さ 0.5 mm で一辺 50 mm の正方形の 2 枚の Al 板を用い,電極間隔を 50 mm にした。

なお,検出コイルとガードパイプの軸方向の位置および平板電極の半径方向の位置はそれぞれ第3図と第4図に示してある。

日

評

論



第5図 ボイド量と検出信号との関係

平板電極の容量形では、ボイドの半径方向の位置により検出信号は 著しい差異を示すことがわかり、このような不都合がない点で、ソ レノイド形は容量形に比較してすぐれているといえる。次に軸方向 のボイド感応長さを求めるため、ソレノイド形の場合と同様に、直 径 20 mm、厚さ 10 mm のベークライト円板を軸方向(流路断面の 中心軸上)に動かしたときの検出信号の変化を調べた。実測結果は 第3図の実線と同様の傾向を示し、ボイド感応長さは 9 cm であっ た。したがって、容量形においてもソレノイド形と同程度の 4.2 で 述べた誤差が生ずる。

イド量の変動が大きいので、固体を模擬ボイドとして用いた。この 模擬ボイドにより種々の分布形状を与え,ボイド量と検出信号との 関係および分布形状による誤差について調べた。ただし、この場合 ボイド量とは、(1)式から求めたものである。第5図は模擬ボイド として直径が 7.8 mm と 11.8 mm のアクリル製球を, 0 および 20 mm 間隔で全長が 100 mm 以上になるようにジュズ状に連結し,種 々組み合わせて数本検出部に入れた場合のボイド量と検出信号の関 係を示している(検出部は第2図に示したものを用いた)。検出信号 はボイド量の2乗に近い形で増加している。実験に用いた模擬ボイ ドの分布形状には、かなりの相違があるが検出信号に対するその影 響はあまりなく,図の実線をボイド量と検出信号の間の較正曲線と すれば、各点は相対誤差15%以内で較正曲線と一致している。な お、念のため、空気一水素の2相流実験装置を用い、ボイド量を2 個の閉め切り弁で測定して,検出信号と実際のボイド量との関係を 求めてみた。その結果は模擬ボイドで求めた関係と非常によく一致 した。以上ソレノイド形ボイドメータではコイル、ガードパイプな ど検出部の構造が決まれば、まずボイド感応長さを板状模擬ボイド により求める。次に適当な模擬ボイドを用いてボイド量と検出信号 の間の較正曲線を求めると、ボイド感応部の局所ボイドを誤差15% 以内で測定することができる。なお、ソレノイド形ボイドメータは 電源に高周波を用いた電気式のものであり、そのボイド検出の時間 遅れは測定回路の時定数で決まる。現在使用している測定器の時間 遅れは1ms以内になるようにした。また、沸騰ボイドの測定に際 してボイド以外に検出コイルのインピーダンスに影響する因子とし て温度が考えられる。すなわち、温度上昇による液体の誘電率の減 少、コイル線の抗抗の上昇がある。このため、温度上昇によるコイ ルのインピーダンスの変化分を交流ブリッジにより補償してボイド を測定した。

5. ボイド量と検出信号との関係

ンレノイド形ボイドメータの検出信号とボイド量との関係を実験 的に検討した結果を以下に述べる。

5.1 模擬ボイドによる較正

ボイド,検出信号の較正を行なうためにはボビンの中に任意の量 のボイドを与えねばならない。しかしこれを気体によって作るとボ

5.2 過渡沸騰ボイドの実測例

ソレノイド形ボイドメータにより,常圧沸騰ループ⁽⁵⁾における過 渡沸騰ボイドの測定を行なった。測定結果の詳細は後日に譲り**第6** 図にその一例を示す。同図は熱入力がステップ状に投入され一定時 間後に遮断されたときのボイド量(内径 29 mm,長さ 400 mm の加



熱沸騰チャンネルのほぼ中央の位置)加熱体(外径 10 mm の SuS 管)壁面温度および沸騰部入口流速をペン書きオシログラムに同時 記録したものである。熱入力投入前の実験条件は入口流速 0.5 m/s, 入口温度 94℃ で投入熱入力は 7 kW であった。同図でオシログラ ムの変位 10 mm に対しボイド量は約 5% である。図からもわかる ように本ボイドメータの感度, SN比および安定度はかなりよく 1%以下のボイド量も十分検出可能であった。なお,図では熱入力 を投入した瞬間その信号が雑音としてボイドメータに検出されてい る。

6. 結 言

以上を要約すると次のとおりである。

- (1) ソレノイド形ボイドメータはボイド混入によりコイルの分 布容量と実効抵抗が減少したことによるコイルのインピー ダンスの変化分を検出信号として取り出している。
- (2) 容量形ではボイドの半径方向の位置により検出信号が著し く変化しボイド分布形状による誤差がきわめて大きい。ソレノイド形ではこの誤差はほとんどない。
- (3) ソレノイド形におけるボイド量一検出信号の較正をするに は次のようにする。すなわち、検出コイル、ガードパイプ など検出部の構造が決まれば、まずボイド感応長さを求め、 次に適当な模擬ボイドを用いてボイド量は本文(1)式より 算出しボイド量一検出信号の関係を求めれば、ボイド感応 部のボイドは誤差15%以内で測定することができる。



ここで ω は電源の角周波数である。ボイド量が零のときのRの値 を \bar{R} , C_2 の値を \bar{C}_2 としこのとき C_1 , C_2 により回路の同調をとれば、 一般に $R \ll \omega L$ だから共振条件は

 $\omega^{2}L(C_{1}+\overline{C}_{2})=1$ (3) となり、また、(2)式は次のように簡単な形になる。

ここで $\omega L/\bar{R}$ はコイルのQ値とよばれる。第1図の下側の同調 回路により(4)式で表わされる大きさだけの逆位相の電圧を与える ことによりブリッジのバランスがとれる。

次にボイドが混入するとコイルの分布容量と実効抵抗が減少する からその減少分をそれぞれ ΔC , ΔR とすると $C_2 = \overline{C}_2 - \Delta C$, $R = \overline{R} - \Delta R$ および(3)式を(2)式に代入し, また, $R \ll \omega L$, $\Delta C \ll C_1 + \overline{C}_2$ だ から信号は

(4) ボイド検出の時間遅れは1ms以内であり、また、1%以下のボイド量も十分検出可能な感度を有する。

なお,検出部はかなり小形にできているので,これを原 子炉にそう入することによって炉内ボイドの測定も可能で

あり,今後この点について開発も進める予定である。 終わりに以上の研究を行なうに当たり種々ご指導くださった日立 製作所日立研究所西掘博士はじめ同所および那珂工場の関係各位に 深謝する。

参考文献

(1) 遊佐, 桜間: 昭和 39 年日本原子力学会年会予稿集

1

- (2) H. A. Johson ほか: I. E. R. Report Series 163, SAN-1001
 ~1009
- (3) 宇律呂, 桜井: 日本原子力学会誌, 5, 6 (1963)
- (4) V.G. Welsby: "The Theory and Design of Inductance Coils", 31 (1960 John Wiley and Sons, Inc.)
- (5) 大木, 杉野, 桜間: 日本機械学会誌, 64, 56 (1961)

付 録

ソレノイド形ボイドメータの検出信号をボイドによる検出コイル の分布容量と実効抵抗の変化を考慮して数式で表現してみる。第1 図の交流ブリッジにおいてダミーコイルを含む下側の同調回路は零 点調整の目的にだけ用いられるから第7図に示したように上側の同 調回路だけについてそのインピーダンス変化を考慮すればよい。図 に示したように検出コイルの実効インダクタンスをL,実効抵抗を R,分布容量は C_2 の中に含ませて考えると、V/Eは次式のように なる。

$$\left|\frac{V'}{E}\right| = \frac{\omega L \cdot C_1}{\sqrt{(\bar{R} - \Delta R)^2 (C_1 + \bar{C}_2)^2 + (\omega L \Delta C)^2}} \dots (5)$$

$$E t_{R} b \left|\frac{V}{E}\right| - \left|\frac{V'}{E}\right| \vec{n} \cdot \vec{n} \cdot \vec{r} \cdot \vec{$$

となる。液体に蒸留水を用いこの中に 100% のボイド量が混入した 場合を考えて 第1表の実測結果を参考にすると, (6)式における $\frac{dR}{R}$ と $Q \cdot \frac{dC}{C+\bar{C}_2}$ とはそれぞれ約 0.1,5 という値になる。したがっ て,電導度の小さい水を用いた場合にはボイド混入によるコイルの 実効抵抗と分布容量の減少分 dR, dC の中で dC の変化が $\left|\frac{V'}{E}\right|$ に 顕著に影響し dR の変化による項は無視できるほど小さいものであ るといえる。また,この場合にはコイルのQ値が大きく, $C_1+\bar{C}_2$ は 小さいほど検出感度はよくなり,これは電源の周波数を数 Mc に選 ぶことによって容易に達成することができる。なお,dC は LC 同 調回路の同調をくずし,dRはコイルのQ値を増大するように作用す る。dC, dR とボイド量の関係を理論的に求めることができれば検 出信号はボイド量の関数として表現でき実用上非常に便利になる が,かなり困難であるので今後の研究課題とし今回は実験的に検討 することだけにとどめた。

