



## 泡（ボイド）の測定、

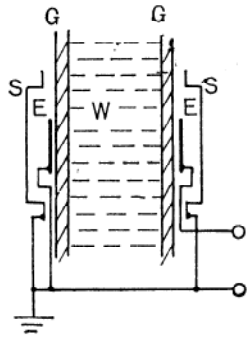
桜井良文

私の研究室で泡の測定をはじめてからすでに7年になった。最初は私が電気工学科から原子力工学科に席をうつした当時、何を研究しようかと思案していたら沸騰水型原子炉（BWR）で泡のために異常現象が出て、本当に泡をくっっているということをしき、泡もいよいよ大切になったか、それならこれを定量的にしらべる方法を考えようと思ったからであった。というのも昔、寅彦（寺田）の随筆を読んでいたとき、朝起きて顔を洗おうとして洗面器に水を満したら洗面器に泡がついたのでそれを不思議に思って顔を洗うのも忘れてそれを見つめている寅彦の姿に自然科学者としての理想像を描いたことを思い出したからである。われわれが泡にお目にかかるのはそんなに珍しいことではない。ビールを乾杯しようとジョッキをかかげたときも、お湯をわかしてまだ沸かないかとイライラしてやかんの蓋をとるときも何の疑いもいれずに見過している。しかし、これが原子炉において非常に大切だということになると急に問題にしようである。そしていろいろ文献をしらべてゆくうちに案外システムテックに研究されていないことをして吃驚する。私がここに泡（あわ）という言葉を用いたが、これも少しくわしく考えると定義が怪しくなってくる。ふつうサイダーに見られるのは英語の Bubble である。しかし沸騰水の場合の泡は Void とよばれる。これは英和辞典では「空の」とか「欠けている」とか訳されていて水中で水のない部分のことである。原子炉の場合はふつうボイドを用い、その測定器は「ボイドメータ」（Void-meter）と呼ばれている。このようなボイドをくわしく観察することは機械工学の方で熱学の一部に存在し、最新のボイラーなどで大切な問題になってきており、いわゆる「2相流の研究」なるものが最近しばしばその方面でとりあげられている。

さて、はじめにもどって私が泡の測定に興味をもった当時、どんな方法でこれが測られているかをしらべてみた。先づ、同じような気液混合流（以下2相流とよぼう）の状態がパイプの相当長い部分にわたって一定であるとすれば（この仮定は実は良くないのだが）、そして垂直管だとすればコック法というのが簡単でよい。しかしこの方法はパイプの2カ所にコックをつけて同時にこれを

しめて気体（泡）が水とわかれてからその容積割合をしらべるため、一時、2相流を堰き止めなければならないという欠点をもっている上に定常状態しかしらべられない。次に用いられたのはガラス管における写真撮影法で、これは透明なものにしか使えないので、原子炉などではガンマ線を使用することになるが、これも動的振舞いをしらべようとする連続撮影の必要が出てきて大へん不便である。そこで私が考えたのは水と空気の誘電率の差を利用する静電容量法が使えないかということであった。このアイデアはすでに紙の中の水分測定などに存在しており、完全ではないが連続水分測定の方法として知られていた。研究室の者と大学からの帰途、歩きながらの議論をしたのがはじまりで、とにかくやってみようというので研究室の一隅にガラス管を立てて実験をはじめた。初期の頃には大して期待していなかったが、さてやってみると仲々快調で思ったよりはトントン拍子にデータが出てきた。それでもいろいろ困難さはあった。はじめから心配していた水の誘電率の温度変化はやはり致命的のようにも思われたが、これはサーミスタによる補償という方法でどうやら解決できた。原子力学会の講演会に発表しようという気になったのは昭和36年頃であったろうか、ここでは当時運輸技研（現在は東工大教授）の寺野さんに大分酷い質問をうけた。彼の口ぶりではうまくゆかない筈だといわんばかりであったが、それから1年後の同じ学会では寺野さん自身も私の方法を使って実験しはじめたので大変嬉しかったことを記憶している。そのうちにアメリカから原研へ交換研究員で来ていた、Dr.

Fleck が見に来て関心をもち、また国内でもあちらこちらで使おうという気運が起きてきた。そこで学会誌にでも投稿しようかと思っていた矢先一寸困ったことが起った。東芝から手紙で質問してきたのであるが、その中にこの方法の原理が本当に静電容量であるのかという疑問があったのである。ここでその測定装置について若干説明を試みる。図1は実験に用いた最も簡単な装置で、二相流の流れるガラス管の外側に向い合わせて1対の電極を貼りつけ、その間の静電容量を高感度のキャパタンソ測定回路（筆者らは井上氏回路を用いた）により測定する。図2は井上氏回路の回路図で、これで $10^{-12}$



E:電柱 S:しゃへい  
G:ガス管 W:水

図 1

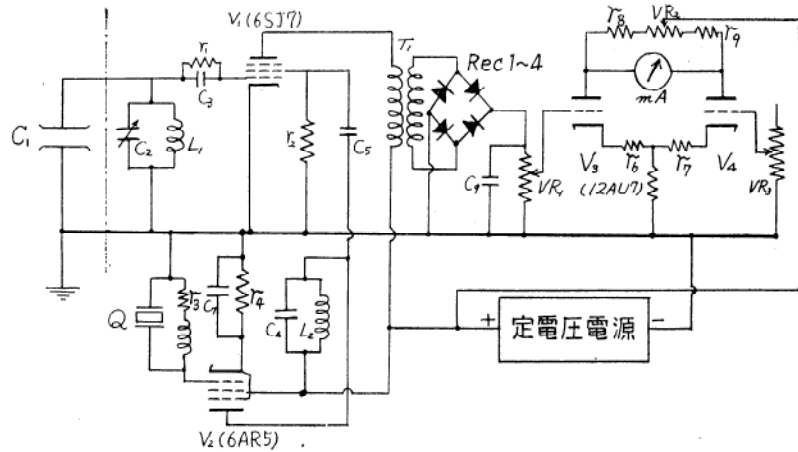


図 2 計測装置電気回路

F程度の静電容量を検出することは容易にできる。図3は測定中の写真である。実際には上述のサーミスタを用いた温度補償回路をこれに付けて用いるので図4のような構成になる。図5は井上氏回路の特性で、図6がボイド比（気体が全体の何パーセントかという値）とボイドメータ出力電圧との関係を示す。

私たちのボイドメータがボイドの形状や大きさによって変りはしないかという質問に対しては実験により答えることができたが、本当にキャパシティによるのかという質問に対しては仲々ハッキリさせるのが難しく、色々の実験が進められた。そのうちに原研の原子炉計装の専門家である三井田氏からノルウエーのHalden 炉で抵抗式ボイドメータが開発中だというニュースが入ってきて、われわれのところのものとの比較が云々され出した。しかしやがて、抵抗分の影響も少しはあるけれども主たるものはキャパシティによるということが明かになってホッと、学会誌にも投稿する自信があった。ところが、また問題がもち上がった。それは原研のJPDR（動力炉）でボイド測定をする希望がおきたが、日立がインダクタンス型ボイドメータなるものを開発してこれにもちこんだというニュースが入ったのである。その頃には私たちはボイドメータの電極の形状についての実験をいろいろやっていたので、針状電極やコイル状電極の実験もしていたのだが、このコイル状電極がたまたま日立のも

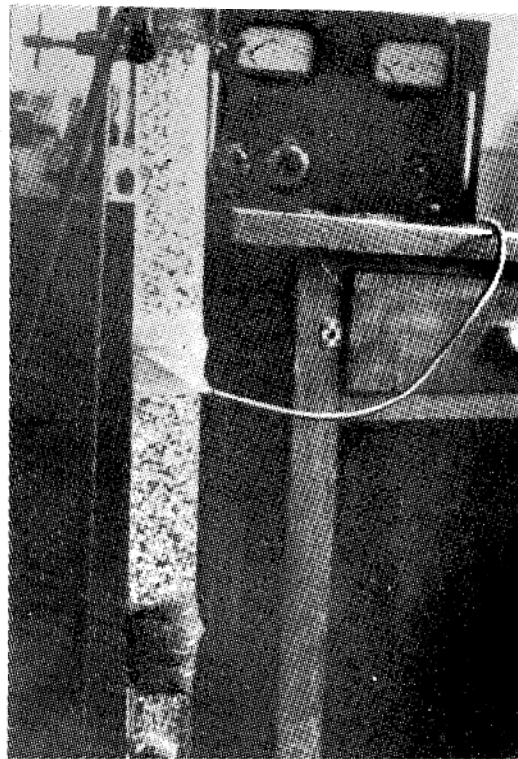
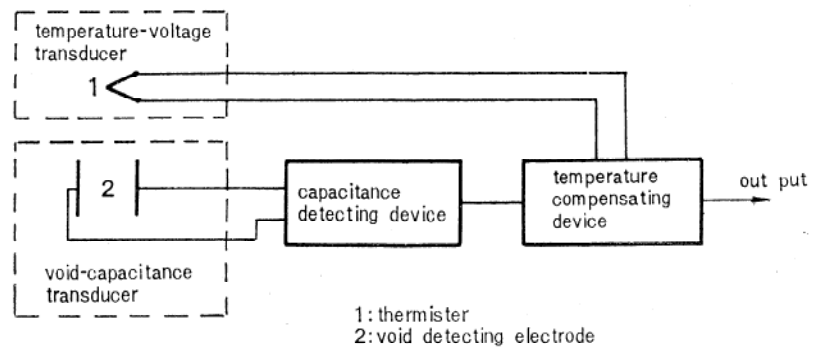


図 3



1: thermister  
2: void detecting electrode

図 4

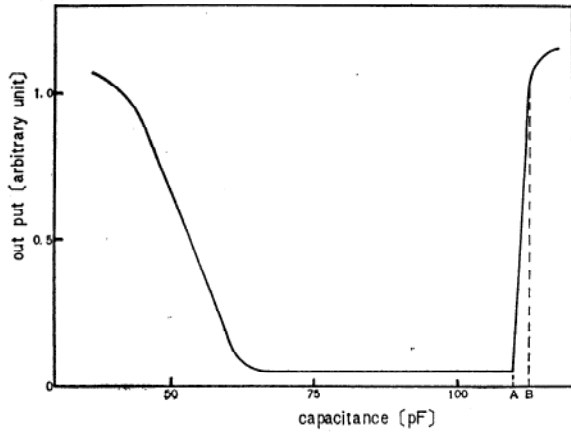


図 5

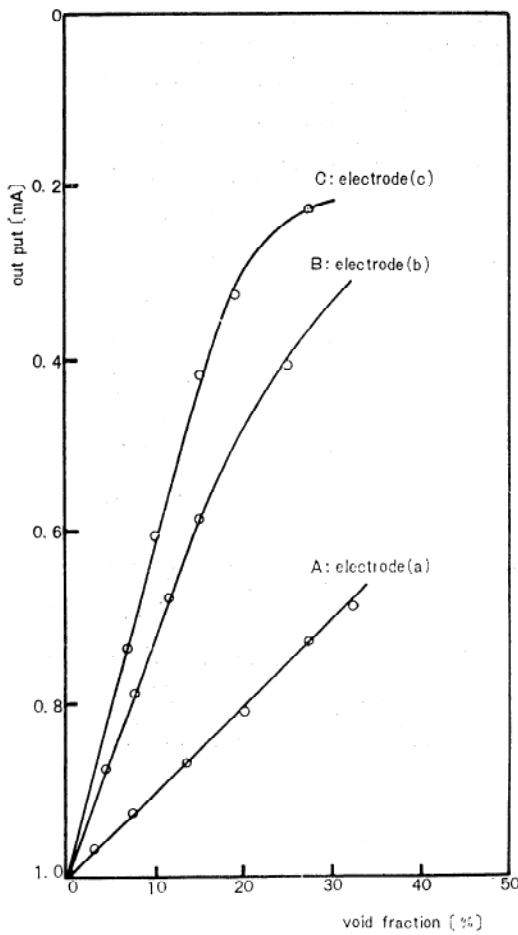


図 6

のと同じだったのである。そこで学会などでその動作原理をめぐって論争を行ない、1年以上もたってやっと目立のものもやっぱりわれわれのものと同じ原理によるものということになった。この頃になるとこの方式のボイド計は相当国内に広く知れわたるようになり、京大をはじめ各社で用いられるようになって、製作依頼も出てくるようになった。この頃から泡というものに困ってい

る会社も相当あるんだな—ということがわれわれにもわかってきた。そして液体関係ではまだまだ測定の問題が沢山あるということも再認識されるようになった。そこで従来のような水の中に空気の泡のある場合だけでなく水分が少なくなったミスト（霧）の測定にまでり出し、いま99.9%というようなボイド比のところを実験している。このようになるとむしろ気体中の水分測定あるいは湿度測定といっても良いくらいで、ボイラーをはじめいろんな方面に役立ってきている。読者の中にもこのような分野の測定に興味をもたれている方々もあろうかと思うが、筆者まで連絡下されば有難い。

筆者がいま在籍している制御工学の分野には相当前から統計的手法を用いて系の動特性をしらべようという傾向がある。泡の発生や移動について少ししらべると泡の振舞いには多分に統計的なところがあるのに気付く。それゆえ、泡の性質についての研究には統計的手法が役立つだろうとは誰しも容易に気付くところであって、筆者らも現在これにとりくんでいるが、いざやってみると最初思ったように簡単にはゆかない。ボイラー内での沸騰現象などにおけるボイドの様子は加熱に応じて (1) Bubble 流 (2) Slug 流 (3) Annular 流 (4) Mist の4種にわけられているが、(図7参照) このうちの Slug 流などでは泡の寸法、泡の間隔あるいはその速度などが一点で測定されたボイド比の時間的変化  $f(t)$  を用いて求めることができる。すなわち、自己相関々数を

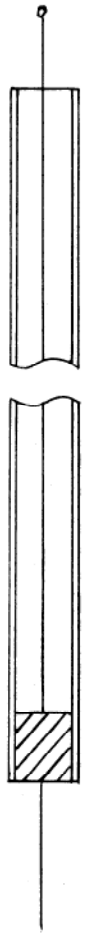


図 8

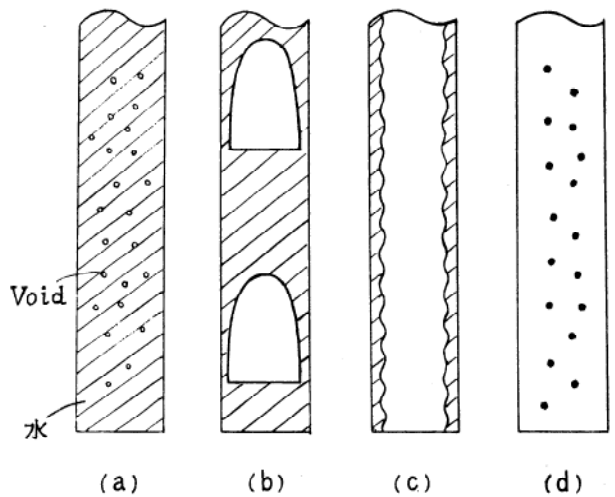


図 7

$R(\tau)$  とすると

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t+\tau) dt$$

であるが、この  $R(\tau)$  の周期性から上述のような値が容易に求められる。しかし他の流動様式については今のところ問題は解決されていない。泡の発生や Bubble 流における泡の移動の問題などはこの手法により新しい局面が展開されそうに筆者は考えているのだが、このような問題をしらべる場合には先にのべた針状電極が仲々役に立つ。これはボールペンの先端のような構造をしており（図8参照）、泡がこの先端にふれるとメータの指示が変化する。JPDRの実験では現在このような電極を用いて原子炉内の泡の模様を観測しており、キャリー・アンダ（原子炉の中で冷却水が循環する際、泡を下方へもって下りる現象）などで新しいデータを出している。この針状電極は泡の水中での分布をしらべたり、1つの泡の動的振舞いを追かけたりするには大へん便利な武器で、今後ともいろんな分野で役立つであろう。しかし、いままでの工業界からの要求は平均ボイド比を測ることで満足しているようであり、これはこれまで平均ボイド比すら測定されていなかったことを示している。今後いかなる方面から要求があるか、筆者は興味をもって待っている。

いままでに行なったボイドに関する実験で面白いのは二相流における安定問題である。閉じた管路の一部に加熱部をもうけるとそこでボイドが発生して水は管路を循環するが、条件によっては振動現象が生じ、不安定となる。あるいは加熱部の代りにボイドを外から吹込んでやっても同様な不安定状態が生じるが、実際のボイラーなどではポンプによる強制循環がこれに加わるので現象は複雑になる。このような問題では加熱量とボイドの関係、さらに流量との関係を連続記録として求めておくことと相関々数の手法を利用して系の周波数応答を求めることができる。しかしいまのところ加熱によって生ずる泡とそうでない泡との振舞いの違いについてはくわしいことは解っていない。

以上われわれが何の気なしにはじめた泡の測定が各方面で予想以上の反響をよんでいるいろいろな夢を与えてくれ

ることをのべたが、自然科学というものの面白さがこういところにある。最近の宇宙科学や原子力工学などの進歩をみているとそのスピーディなことに目をうばわれそうであるが、実際にはまだわからないことで何かの機会に陽の目をみるかもしれない現象がわれわれのまわりをうろうろしている。計測屋の目からみれば計測できないことが多すぎる。いわく味だ、いわく匂だ。極言すれば人間はわかり易いものだけ研究しているのにすぎない。私が20年前から研究している Nonlinear magnetics（非線形磁気応用）の分野にしてもそうである。磁性体の理論は大へんな進歩をとげたが、その最も一般的な材料である鉄についての磁性理論はまだ出来ていない。こういうと大へん驚かれる方もあろうと思われるが、実際のもの改良に直接役立つという意味で不十分なのである。鉄といえば磁気のはじまりであるから紀元前からわかってきたことであり、もっと早く片付いたと思っている方もおられるだろうが、難しいので仲々片付かない。一方実用の面では鉄の磁性は衆知のように最も良く使われていて、いろいろ新しい磁性材料も発見されている。もし、半導体の分野で理論がわかってきて、実用性からも大へんすぐれたトランジスタのようなものが出現したように磁性の分野でも理論と実際との橋わたしができたら、きっと良いものがあらわれるにちがいない。

泡の話が大分横道にそれたようだが、その時に華々しく見える、そして大へんお金をかけなくてはならない研究だけをやってるのではなくて、一寸変わったことをやってみるのも面白いではないかというのが筆者のいいたい処なのである。

（追記） 上記のボイドメータの電極としてはいろんな形状を試みたが、いずれも手造りによって簡単にできることをいっておこう。昨年インドのボンベイで Nuclear Instrumentation に関する国際会議があり、そこでこれに関する発表を行なったところ、早速外国から電極部を入手したいから送ってくれとの申し出があった。私共の作ったものは甚だお粗末で外国人にお目にかかるのもはずかしいので、図面だけを送ってそちらで作って下さいとお願いした。（大阪大学基礎工学部、制御工学科教授）