

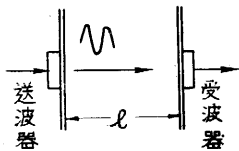
# 超 音 波 濃 度 計

石 橋 泰 雄・市 川 初 男

1. 緒 言 近年化学工場のオートメーション化が進むにつれ、製造過程中の溶液の濃度を連続的に知りたい要求が起っているが、従来は溶液の一部を取り出してコールラウシュ・ブリッジを用いて間接的に測定したり、また直接比重計を使用したりしていたが、前者は被測定溶液の種類によっては測定できぬものもある。またこれらは測定に時間を要するばかりでなく生産の速度をおとすことになるのでこれが改善を望まれていた。そこで電極が直接溶液に触れず輸送パイプまたは水槽中の溶液の濃度を検出する超音波濃度計を試作検討した結果、多くの溶液についても測定可能なことが推定された。

ここでは本濃度計の原理および基本となるべき回路につき述べ、試作器を用いた食塩水溶液につき実験結果を示し、測定器として使用する際の確度、安定度につき筆者らの得た結果につき報告する。

2. 測定原理 いま第 1 図のごとく液体中  $l$  なる距離



第 1 図

を超音波が通過するとき、溶液中の音速を  $c$  とすれば、これを通過するに要する時間は  $t=l/c$  となる。

一般に水溶液を通過することにより原信号との間に位相

の遅れを生じ

$$\phi = \omega t = 2\pi f \cdot \frac{l}{c} \quad (1) \text{ となる.}$$

ここに  $\omega$  は電気角速度、 $f$  は音波の周波数。

いま  $f$  なる周波数の超音波が水を通過するときを要する時間を  $t_1$ 、またある濃度の水溶液を通過するときを要する時間を  $t_2$  とすれば、水および水溶液中を超音波が通過する際の位相遅れ  $\alpha$  および  $\beta$  は (1) 式同様次のごとくなる。

$$\alpha = \omega t_1 = \omega \frac{l}{c_w} = 2\pi f \cdot \frac{l}{c_w}$$

$$\beta = \omega t_2 = \omega \frac{l}{c_s} = 2\pi f \cdot \frac{l}{c_s}$$

ただし  $\omega$  は電気角速度、 $c_w$ 、 $c_s$  はそれぞれある同温度における水および水溶液中の音の伝播速度。

よって水による位相差を  $\alpha$  とすれば水溶液の濃度は位相差  $\phi = \alpha - \beta$  で表わすことができる。すなわち

$$\phi = \alpha - \beta = \omega \left( \frac{l}{c_w} - \frac{l}{c_s} \right) = 2\pi f \cdot l \left( \frac{1}{c_w} - \frac{1}{c_s} \right) \quad (2)$$

いま簡単のため食塩水溶液をもって 1 数値例を示せば

$$f = 10 \text{kc} \quad l = 10 \text{cm}$$

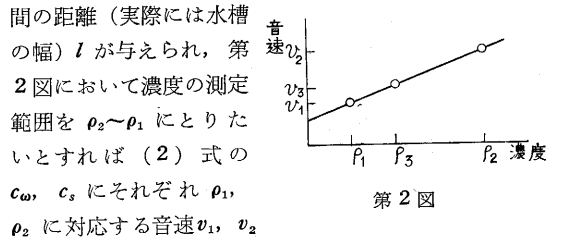
17°C における水および食塩水 (比重約 1.02) の音速をそれぞれ  $c_w = 1,430 \text{m}$   $c_s = 1,510 \text{m}$  とすれば

$$\alpha = 1.4\pi = 252^\circ \quad \beta = 1.32\pi = 237^\circ$$

$$\therefore \alpha - \beta = 15^\circ$$

そこで第 4 図の測定回路に移相器を挿入し、原信号に対し、 $\alpha$  なる位相差を  $180^\circ$  になるよう移相させておけば  $\alpha - \beta$  は  $0 \sim |\pi|$  ラジアンまでの変化を位相検波により検出できる。

いま使用する超音波の周波数の選定にあたり、共振子



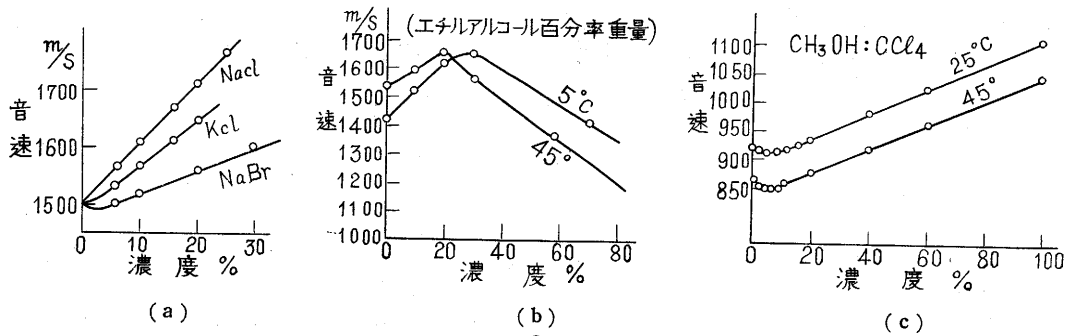
第 2 図

間の距離 (実際には水槽の幅)  $l$  が与えられ、第 2 図において濃度の測定範囲を  $\rho_2 \sim \rho_1$  にとりた

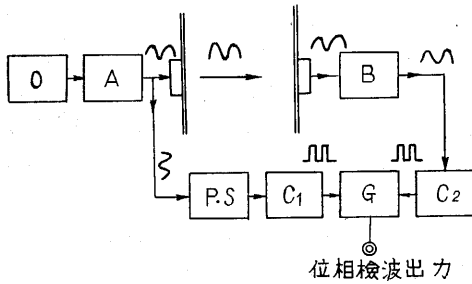
いとすれば (2) 式の  $c_w$ 、 $c_s$  にそれぞれ  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  に対応する音速  $v_1$ 、 $v_2$  を代入し (2) 式の右辺を  $\pi$  となるごとく周波数  $f$  を定めれば位相検波を行う上から最も感度がよいわけである。一般にある濃度値  $\rho_3$  の前後の小範囲をとくに感度よく検出したいときはもちろん、 $\rho_3$  前後の希望範囲を  $\pi$  になるように決めればよいが普通には実験結果から判るように、さほど検出感度を上げる要はない。

また濃度の差により非常に広範囲に音速の変化のある被測定溶液にあつては信号の周波数を非常に低くとりたい。このときはある高い周波数  $f_h$  を持った共振子に  $f_h$  を希望の周波数  $f_l$  (信号) で変調した変調波を印加し、第 5 図に示すように  $f_l$  を検波後、溶液を通過した  $f_l$  と原信号の  $f_l$  との位相差を検波する。この変調可能範囲は当然共振子の  $Q$  によって決まるが一般に水晶共振子を使用したとき共振子は holder に保持され、また片面水槽壁に密着しているため実際の  $Q$  は非常に低く 10 位であるので相当の範囲にわたって変調可能である。第 4、第 5 図はそれぞれ本計器の原理構成図であり、第 3 図 (a)\*<sup>1</sup>、(b)\*<sup>2</sup>、(c)\*<sup>3</sup>、に示すように濃度-音速の関係の知れた溶液は濃度または混合比率も知り得る (実際に第 3 図 b のように全般にわたって直線関係でないものは測定が困難で直線部分につき測定した方がよく、また生産過程では濃度全域にわたって知る要はない)。

3. 測定装置および測定方法 第 4 図につき説明すれ



第 3 図



A, B: 増幅器 C<sub>1</sub>C<sub>2</sub>: クリップ回路  
G: 位相検波回路 P.S.: 位相器

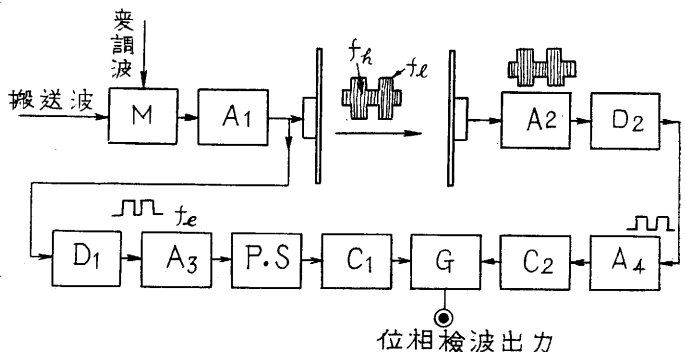
第 4 図

ば発振器 0 より出た信号は適当な大きさに増幅器 A で増幅し、送波用共振子に加えると共に移相器 P.S およびクリップ C<sub>1</sub> (ゲルマニウム・ダイオード使用) を経て位相検波管 (6BN6) の第 3 グリッド G<sub>3</sub> に接続され、一方水槽内の溶液を通過した超音波は受波用共振子で受け必要な大きさに増幅器 B で増幅し、クリップ C<sub>2</sub> (C<sub>1</sub> と同じ) を経て同じく位相検波管の第 1 グリッド G<sub>1</sub> に接続する。いま増幅器 A より出た正弦波信号は移相器 P.S を経て、クリップ C<sub>1</sub> で矩形波にして第 3 グリッド G<sub>3</sub> に一定の電圧を加えるが移相器 P.S は一般に溶液が水 のとき、水槽を通過した信号が原信号に対し遅相差が 180° になるように移相 (一般には移相器で進相させて、水の遅相時差が 180° になるようにとる。前述の数値例で  $\alpha=252^\circ$  の遅相分が 180° になるように  $72^\circ$  進相させる。) しておけば、以後第 3 図 (a) のような特性を有する溶液では濃度の増大と共に同相に近づく。また水槽を出た信号は増幅器 B で増幅後クリップ C<sub>2</sub> で矩形波とし、検波管の第 1 グリッド G<sub>1</sub> に一定の矩形波電圧を加えれば濃度の増大と共にこの信号電圧は位相のみ変化し、その結果が G<sub>1</sub> と G<sub>3</sub> の電圧が同相のとき最大、逆相の時最小の陽極電流が流れるが、陽極回路の負荷抵抗より取り出せば電圧として検出でき、濃度は電圧値をもって表わされる。

第 5 図は前述の変調の理を利用したもので、変調器 M で変調した振幅変調波 {搬送周波数  $f_h$ , 変調周波数  $f_i$  (被変調波は正弦波でもよいが、より完全な矩形波としたいため初めより矩形波を使用した。このときクリップ C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> は電圧を一定にする働きのみをする。)} は増幅器 A<sub>1</sub> で増幅後原信号は検波器 D<sub>1</sub> を通して検波後、増幅器 A<sub>3</sub> にて増幅し、移相器 P.S, クリップ C<sub>1</sub> を経て位相検波管の第 3 グリッド G<sub>3</sub> に  $f_i$  なる周波数の矩形波を加える。一方溶液を通過した振幅変調波は増幅器 A<sub>2</sub> にて増幅後、検波器 D<sub>2</sub> にて検波し、増幅器 A<sub>4</sub>, クリップ C<sub>2</sub> を経て位相検波管の第 1 グリッド G<sub>1</sub> に周波数  $f_i$  なる矩形波を加え、それぞれ位相検波管 G の、第 1, 第 3, グリッドに加わった信号の位相差を第 4 図におけると同様電圧として取り出す。

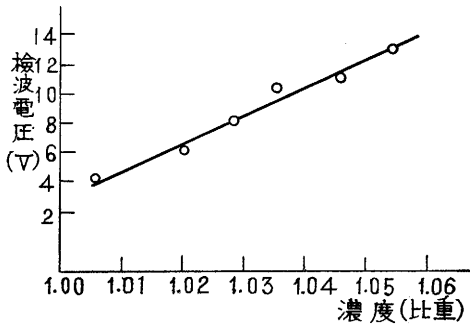
4. 測定結果 上の方法により測定した結果を第 6, 第 7 図に示したが、これらは試料入手および実験室で容易に濃度を調節できる食塩水溶液を使用した第 3 図 (a), (b), (c), において示されるような特性のわかってるもの、とくに濃度—音速が直線関係にあるものには容易に使用できると思う。

第 6 図は第 4 図の回路で約 50kc 正弦波を信号とし、位相検波管の第 1 グリッド G<sub>1</sub> に原信号を、第 3 グリッド G<sub>3</sub> に溶液を通過した信号を加え、共振子 (ランジュ

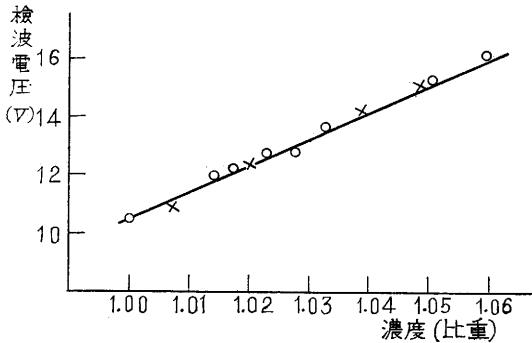


M: 変調器  
A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>: 増幅器  
C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>: クリップ回路  
D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>: 検波器  
G: 位相検波器  
P.S.: 移相器

第 5 図

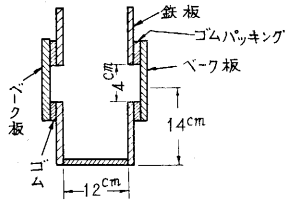


第 6 図



第 7 図

板型チタバリ)は水槽に直接グリス(グリスは損失大きいが粘着力を必要としたため用いた)をもって密着させ、温度 25~26°C の状態で測定した値である。



第 8 図

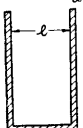
また第 7 図は第 5 図の回路で搬送波として 400kc, 被変調波(信号)としては 10kc の矩形波を、共振子は水晶結晶体を使用した。また水槽壁を伝播する音波の影響を考へ試作当初第 8 図のように製作した水槽を用い、24~25°C の温度において濃度の濃淡を一往復測定した結果である。

5. 測定精度

a) 温度の変化 溶液の温度が変化すれば当然超音波の伝播速度も変る。たとえば温度  $t^{\circ}\text{C}$  における水の温度と音速との実験式は

$$v_t = 1557 - 0.0245(74 - t)^2 m \quad (3)^{*1}$$

たとえば水の 25°C 付近における温度変化は約 25m/°C であり伝播速度は約 1,500m/sec であるから(2)式より数°C の温度変化ではさしたる影響はないと思う。



第 9 図

b) 外壁厚みの影響 第 9 図のように水槽外壁の厚みを  $d$ , 水槽幅を  $l$  とすれば(1)式の位相遅れは

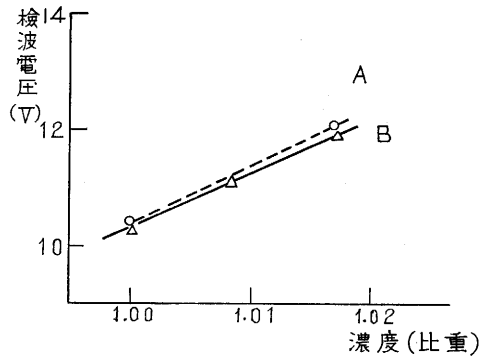
$$\phi = 2\pi f \left( \frac{l}{C} + \frac{2d}{C'} \right) \quad (4)$$

$C'$  は水槽材質中の音の伝播速度

実際に測定している位相差は溶液濃度に加うるに水槽外壁分によるものであるが、外壁分の位相遅れは初め水を水槽に入れたとき(2)式中の  $\alpha$  のなかすでに算入され、移相器で補償されているので問題はない。

c) 周波数の変動の影響 (2)式に示すように濃度を表わす位相差  $\phi$  は周波数  $f$  に比例するため発振器の精度に左右されるが、発振器は  $10^{-3}$  の精度は十分確保されるので問題はない。

d) 電源電圧変動の影響 本計器を実際生産工場等で長時間にわたって連続使用するときさけられぬことは電



第 10 図

源電圧の変動である。本計器の電子回路の B 電源は電源安定回路になっているので、B 電圧は交流の電源電圧の変動にある影響はほとんどないが、A 電圧は直接影響をうけ、これがため第 4, 第 5 図における各増幅回路の増幅度も変動するが、クリッパ・回路を通して位相検波管の各グリッドに加わる電圧は変動しない。結局回路各部のうち影響をうけるのは位相検波管回路で、たとえば交流の電源電圧 100V より 90V になったとすれば第 10 図のようになり、本計器の誤差のうち大きい割合を占める(第 10 図中 A は第 6 図の値、B は電源電圧が 100V より 90V になった時の値で A, B を比較すると約 3~5% 低くなっている)。

結言 以上は超音波濃度計として研究室で諸種の条件をできる限り最良にととのえ、一応初期の目的を達したが、計測器として使用するにはさらに回路各部の改良をするはもちろん、さらに諸種の溶液につき検討し、さらに一步を進めて実用に近い状態で計測器として開発したいと思っている。終りに本研究にご指導いただいた当所高木昇教授、東大航研・丹羽登助教授・佐下橋市太郎氏に感謝する。(1958. 9. 20)

文 献

- \* 1) L. Bergmann: Der Ultraschall p. 302
- \* 2) P. Vigoureux: Ultrasonics p. 116
- \* 3) 同 上 p. 113
- \* 4) L. Bergmann: Der Ultraschall p. 252