

簡易自動採水器の試作について（その2）

—— ボーリング孔用深度別採水器 ——

奥西 一夫・横山 康二・奥田 節夫

ON THE DESIGN OF AUTOMATIC WATER SAMPLERS

Part 2. A Simple Sampler for the Sampling from Different Depths of Boreholes

By Kazuo OKUNISHI, Koji YOKOYAMA and Setsuo OKUDA

Synopsis

A new type of water sampler was designed for the sampling of groundwater from different depths in slender boreholes. It is of cylindrical shape with a diameter slightly smaller than that of the borehole. When the sampler is going down in a borehole, water comes into it through a ball bulb at the lower end and leaves it through a slit near the upper end. The ball bulb is kept open by a float connected to it due to the buoyancy and the drag force of the flowing water. But when the sampler is going up, the ball bulb is shut by the drag force of water acting in the reverse direction. The float is installed at the upper end of the sampler so that it also control the effect of the slit. The result of the laboratory test is compared with a theoretical solution and then the parameters representing the performance of the sampler was determined. Accordingly, the length of the sampling range is 40 cm when the sampler of a diameter of 3 cm is used in a borehole of a diameter of 3.5 cm, but becomes 95 cm when the diameter of the borehole is 10 cm. It is revealed that the contribution of the water 10–15 cm above the maximum depth attained by the sampler is maximum in the sampled water. Discussion is also directed to increased hydrological information which can be expected when this type of sampler is used.

1. はじめに

地下水の水質の空間的分布および時間的変化は、帯水層内での物理的、化学的な過程の研究において貴重な情報である。最近の水質源の開発や保全、災害対策、土木工事計画などに関連して、調査用のボーリング孔が掘られることが多くなったので、そのような情報を得る機会は多くなって来ている。しかし、小口径の調査用ボーリングでは、一般に河川や湖沼で使われているような採水器が使えないので、円筒型容器に重りをつけただけの簡単な採水器で地下水面近くの水を取るだけの場合が多い。そこでボーリング孔内からの水質の情報をフルに生かすための自動採水器の開発を計画した。本報ではそのうち、任意の深さの地下水を自動的に採水するための採水器の試作結果について述べる。これとは別に任意の時刻に自動的に採水するものを開発しているが、これについては続報で紹介する予定である。

2. 設計

設計にあたって考慮しなければならない条件は、希望する深さの水を間違いなく汲み上げるという性能上の条件の他に、野外使用に耐え、かつボーリング孔内のせまい空間の中で安定して作動すること、採水された水に水質的な擾乱 (contamination) をもたらさないことなどが必要である。そのためには、採水器は形態

的にも力学的にも単純化されていることが要求される。

従来の深度別採水器のほとんどは口の部分にバルブを付け、中をからにしてバルブを閉じて所定深度に沈め、そこでバルブを開いて中の空気を周囲の水と置き換え、再びバルブを閉じて引き上げる方式を採用している。バルブの開閉はメッセンジャーなどによる機械的なものと、ソレノイドなどによる電気的なものがあるが、前者はボーリング孔中では孔壁との間のまさつのため動作が不安定となり、後者では部品点数が多く

なったり、防水構造を必要としたり、トラブルの種が多い。ボーリング孔用として設計されたものとしては、上下端にボールバルブを付け、所定の深度で激しく上下動させることによって、ボールバルブを間欠的に開き、周囲の水を採り入れるようなものがある¹⁾が、性能の安定性についてはかなり疑問がある。

そこで、ボーリング孔の狭さを逆に利用し、方向性のあるバルブを使うことによって、採水器をおろして行く時は水の力でバルブが開いて器内へ水が貫流し、引き上げる時にはバルブが閉じるようにすれば、採水器を入れた最も深い層の水が採水できることになる。このようなアイデアで Fig. 1 のような採水器を設計した。バルブとしてはボールバルブを採用した。原理はラムネのびんと同じであるが、開く時は器内へ貫流する力を利用するため、抵抗体を兼ねたフロートを器内上部に設け、細い丸棒でボールと結合した。採水器の上部のフロートの横にスリットを設け、貫流した水の流出口とした。これは採水器が下降する時は開くが、それ以外の時はボールバルブが閉じるのと同時にフロートによってふさがれる。採水器の上端面には数個の小孔を設けたが、これによって、採水器を引き上げる時には、フロートの上面に水圧がかかり、下に押しつけられる。採水器が水面上に出ると、採水器上端部の水はスリットから流出するので、フロートはこんどはおもりとして働き、ボールを下に押しつける。ボール・フロート系の中重量は経験的に 1~2g と定めた。重すぎるとバルブが開きにくいし、軽すぎると、引き上げる時、チャタリングを起しやすい。Fig. 1 に示したものは外径 3cm、採水量 80ml のものであるが、この他に同じ形で外径 5cm、採水量 250ml のものも試作した。

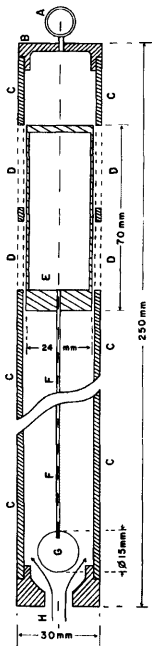


Fig. 1. A cross section of the water sampler.

3. 採水された水の水質と原位置の水質の関係

ボーリング孔の中の水の特性を表わす量を C とする。 C は混合に際して保存性があると仮定する。例えば、溶解物の濃度は保存性があるが、pH は保存性がない。

採水器（の底）をボーリング孔の底から z の高さまでおろして採水した時、採水された水の水質を C_s とすると、形式的に次の式が成立する（Fig. 2 参照）。

$$aAC_s = \int_0^{\infty} AC(z+z')f(z')dz' \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに $f(z')$ は、採水位置 z よりも z' だけ高い位置にあった $C(z+z')$ の水が最終的に採水器内にどれだけ入っていたかを表わす重み関数で、無次元量である。 a と A はそれぞれ採水器の有効長さおよび内部断面積で、 $aA=V$ は採水容量をあらわす。 $C(z+z')$ は水面より上では定義されないものであるが、(1) 式が成立するためには、そこでは水面直下と同じ値を取るものと考えなければならない。実際には z' が十分大きく

なると、 $f(z') \doteq 0$ となるので、水面近くの水を採水する場合の他は、水面より上で C にどんな値を与えても (1) 式から計算される C_s の値にはほとんど影響がない。(1) 式を整理すると、

$$C_s(z) = \frac{1}{a} \int_0^{\infty} C(z+z') f(z') dz' \quad \cdots \cdots (2)$$

C が場所によらず一定の ($C=C_0$) の場合は $C_s=C_0$ となるはずである。このことから次式が導びかれる。

$$\int_0^{\infty} f(z') dz' = a \quad \cdots \cdots (3)$$

$f(z_s)$ を理論的または実験的に求めておき、採水された水を分析して $C'(z)$ を得れば、(2) 式は $C(z)$ に関する Volterra の第 1 種積分方程式であるから、適当な方法でこれを解くことにより、 $C(z)$ が得られる。

今、 $f(z')$ が z' と共に急速に減少し、 $z' > L$ で事実上ゼロになる場合、(2) 式は、

$$\left. \begin{aligned} C_s(z) &\doteq \frac{1}{a} \int_0^L C(z+z') f(z') dz' = \bar{C}(z; L) \\ \int_L^{\infty} C(z+z') f(z') dz' &\doteq 0 \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (4)$$

と書ける。ここに $\bar{C}(z; L)$ は高さ z から $z+L$ までの C の重み平均をあらわす。すなわち $C_s(z)$ は z から $z+L$ までの高さの平均的な C の値を代表すむ。 L があまり大きくなければ、近似的に $C(z) = C_s(z)$ と考えることができる。一応の目安として、例えば、

$$\int_0^L f(z') dz' = \left(1 - \frac{1}{e}\right) a, \quad e \text{ は自然対数の底数} \quad \cdots \cdots (5)$$

の時、(4) 式が成立するものとみなし、(5) 式を満足する L を採水範囲として定義することができる。

一般には $C_s(z) \neq C(z)$ であるが、別の深さ z_e に対して $C_s(z) = C(z_e)$ であるとき、 z_e を採水中心として定義することができる。しかし (2) 式からわかるように z_e は $f(z')$ だけでなく、 $C(z)$ にも依存するので採水器の定数とはならない。そこで便宜的に $C_s(z)$ に対して最も寄与の大きい深さとして $f(z')$ が最大になる z' の値 (z'_m) または、その深さより深の水と浅の水が半分ずつ採水されるという意味で、

$$\int_0^{z'_h} f(z') dz' = 1/2 \quad \cdots \cdots (6)$$

を満足する z'_h を以て採水中心を定義するのも 1 つの方法であろう。

4. 採水器の性能評価

採水器の性能は $f(z')$ によって表わされる。 $f(z')$ の関数形を理論的に求めるためには、採水器の内外の水の流れを知らなければならないが、ここでは単純化された仮定の下に、 $f(z')$ を簡単な解析関数で近似することを試みる。ボーリング孔内の水質分布については、次のように仮定する*。

$$\left. \begin{aligned} z > z_0 &\text{ で } C = 0 \\ z > z_0 &\text{ で } C = C_0 \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (7)$$

* $z > z_0$ で $C = C_1 \neq 0$ の場合でも $C - C_1$ および $C_s - C_1$ を改めてそれぞれ C および C_s と書くようにすれば、以下同様となる。

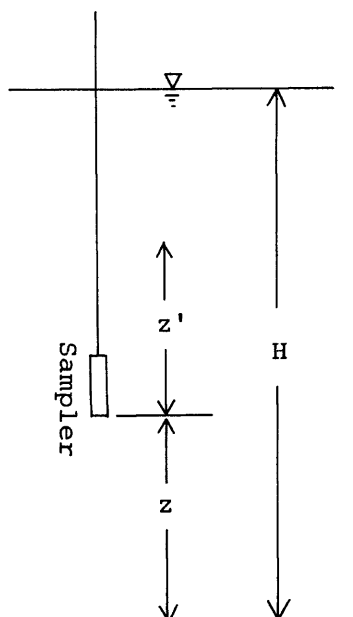


Fig. 2. Geometrical relation between the sampler and the water in the borehole.

$f(z')$ は採水器内外の水の流れに依存するが、水質分布には依存しないと考えられるので、このような特殊な水質分布を考えても一般性は失われぬ。以下では採水器の到達深度を界面 ($z=z_0$) からの深さ x で表わし、 C_s を x の関数として表示する。この時、 $x=z_0-z$ であるから、(2)式は

$$C_s(x) = -\frac{C_0}{a} \int_0^x f(z') dz' \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。

採水器を一定速度で降下させて行くと、水面から界面までは $C_s=0$ である。界面を越えると採水器の下端から下層の水が流入し、器内の水が上部のスリットから流出する。流出水の水質 (C_d と記す) は初めは上層水のそれに近いので、器内は下層水の割合が増え、 C_s は C_0 に近づいて行く。

C_s の時間的変化は次式で表わされる。

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{QC_0 - QC_d}{V} \quad \dots\dots\dots (9)$$

流入口の有効断面積を B 、採水器の下降速度を U とすると、流量 Q は、

$$Q = UB$$

また、

$$U = \frac{dx}{dt}$$

であるから、(9)式は、

$$\frac{dC_s}{dx} = \frac{B(C_0 - C_d)}{V} \quad \dots\dots\dots (10)$$

採水器が界面を通過して間もなく、すなわち x が小さい領域では、下層の水は器内に入ったばかりで、流出スリットまでは到達できない。したがって、

$$C_d = 0$$

この場合、(10)式は簡単に積分できて、

$$C_s(x) = BC_0x/V \quad \dots\dots\dots (11)$$

これと(8)式を比較すると、

$$f(x) = aB/V = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。

x の値が大きくなると、流入口から入って来た下層の水が、もとから器内にあった水と混合しながら流出スリットに達する。したがって C_d はもはや一定ではなくなる。このような場合については、普通は、

$$C_d = kC_s \quad \dots\dots\dots (13)$$

という仮定が採用される場合が多い。しかし k の値は C_s と共に変化する。もし k を一定として計算すると、 x が無限大の時、 $C_s = C_0/k$ となり、 $k=1$ の場合の他は明らかに正しくない²⁾。そこで C_d が C_s と C_0 の中間の値、すなわち

$$C_d = mC_s + nC_0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

と仮定する。ここに m と n は定数で、

$$m+n=1$$

そうすると(10)式は、

$$\frac{dC_s}{dx} = \frac{mB}{V}(C_0 - C_s) \quad \dots\dots\dots (15)$$

となり、これを解くと、

$$C_0 - C_s(x) = C_0 \exp\left(-\frac{mB}{V}x\right) \quad \dots\dots\dots (16)$$

したがって、

$$f(x) = -\frac{maB}{V} \exp\left(-\frac{mB}{V}x\right) \dots\dots\dots(17)$$

が得られる。

5. 室内実験

試作した2種類の大きさの採水器のうち、外径30mmのもの（Fig. 1）を用いて、前節と同じ条件で室内実験をおこなった。すなわち、内径35mmおよび100mmの2種類のパイプを直立させてボーリング孔の模型とし、水の中に底面から1.5mまでは約10g/lの食塩水、1.5mから2mまでは水道水を入れて2層構造を作った。採水器の降下速度は野外における経験にもとづいて20cm/secとした。採水器の到達深度をいろいろ変えて採水し、採水された水の電気伝導度を測定して、器内の水の中で下層水の占める割合、すなわち C_s/C_0 を計算した。パイプの中の水は1回採水することに更新した。

パイプ中の水の密度成層は採水器内外の水の流れに何らかの影響を与える可能性がある。しかし観察によると、採水器を入れる時に乱れが発生し、淡塩水が混合して界面がぼやけるので、密度成層の影響はきわめて小さいと考えられる。

実験によって得られた C_s/C_0 の値を Fig. 3 に示す。

(8)式を x について微分すると、

$$f(x) = \frac{a}{C_0} \frac{dC_s}{dx}$$

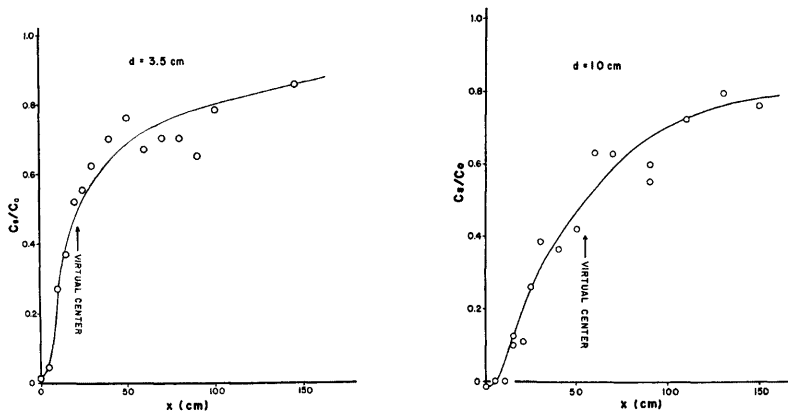


Fig. 3. The result of the laboratory experiment using two-layered fluids with a sharp interface. The ordinate represents the share of the water below the interface in the sampled water. The abscissa represents the depth below the interface attained by the sampler.

となる。Fig. 3 の曲線を数値微分して得た $f(x)$ の値を Fig. 4 に示す。 $f(x)$ の値は3.5cmのパイプでは $x \approx 10$ cmで、10cmのパイプでは $x \approx 15$ cmで極大となる。(6)式で定義されるような採水中心（の到達深度からの高さ）はFig. 3 に矢印で示されているが、 $f(x)$ が極大となる位置とはかなり離れた位置となり、またパイプの径により大きく変化している。(5)式で定義される採水範囲は3.5cmのパイプで40cm、10cmのパイプで95cmである。

実験結果から $(C_0 - C_s)/C_0$ の値を計算して片対数グラフにプロットすると Fig. 5 のようになり、ばらつきは大きいが直線的になる。これに(16)式を当てはめると mB/V の値が得られる。 x が小さい範囲では

直線範囲から外れるが、この領域では Fig. 3 に見られるように(11)式から予測される C_0 は x に比例している。この部分の直線の勾配から B/V の値が得られる。

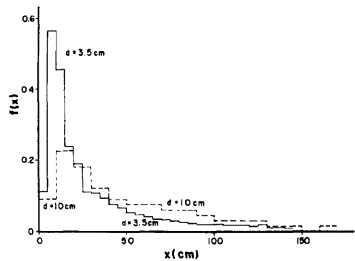


Fig. 4. The function $f(x)$ as derived from the experimental result.

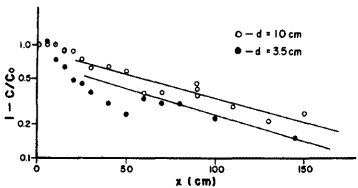


Fig. 5. The result of the laboratory experiment rearranged for the comparison with Eq. (16).

Table 1. Constants of the water sampler according to the laboratory experiment.

Diameter of the model borehole	3.5 cm	10 cm
z_m'	10 cm	15 cm
z_h'	22 cm	45 cm
L	40 cm	95 cm
B/V	0.027 cm^{-1}	0.012 cm^{-1}
mB/V	0.014 cm^{-1}	0.007 cm^{-1}
B	2.16 cm^2	0.57 cm^2
m	0.52	0.59

このようにして得られた実験値と、それらを用いて計算した B および m の値を Table 1 に示す。流入口水口の有効断面積 B は 3.5 cm のパイプの中では良好な値で流入口の実際の断面積よりもはるかに大きく、採水器自身の有効断面積 A の約40%になっている。これに反して10cmのパイプの中では B の値は非常に小さい。 m の値はパイプの径にはあまり依存しないはずで、実際両方とも 0.5 の近い値になっている。このことは、流入口から入った水のうち半分ほどは器内の水と完全に混合してから器外へ流出するが、残り半分ほどは器内の水と混合することなく器外へ流出することを意味する。(16)式および(17)式は m の値が大きいほど採水器の性能が良いことを示しているが、器内での水の混合がもっと盛んに起るように改良すればさらに性能が向上する可能性がある。

6. 野外使用についての考察

前節の室内実験で、外径 3 cm の採水器を内径 10 cm のパイプの中で使用した場合でも、1 m 程度の分解能で水質の鉛直分布を識別できることがわかった。これは実用的には十分な性能であり、地すべり地などで掘られる調査用ボーリングのケーシングの内径のほとんどが 3~10 cm の範囲であるから、3 cm 程度の外径を持つ採水器を万能的に使うことができる。ただしこの場合、採水容量が 80 ml しかないので、水質分析用には不十分であり、大きい径のボーリング孔ではより大型のものを使用するのが望ましい。

採水器が通過した層の水は別の層の水との混合によって、水質的な擾乱を受けるので、層別に採水する場合には、浅い層から順次採水して行く必要がある。採水器の容量が小さいために同じ深度で何回も採水する場合にも同様の注意が必要である。

野外テストの結果、特別な問題点はなかった。場合によっては、採水器の使用にともなうボーリング孔内の水の流れのために、ストレーナーから砂粒が浮遊し、それがボールバルブにはさまって水漏れを起すことがある。この問題はボールバルブを面接触ではなく、線接触となるように製作することによってかなり軽減できた。

吉岡らはこの採水器を用いて、六甲山地の地下水の水質の鉛直分布を調査した³⁾。ここでは外径5cmの採水器が使用された。採水間隔は2mであるが、鉛直方向にかなりの水質変化があることが明らかにされた。これはこの地域の地下水が花崗岩の中の破碎された部分に裂か水（fissure water）の形で存在し、ボーリング孔をいろいろな深度で横切るいろいろな裂かが、それぞれ異なる水質の水をボーリング孔内にもたらすためであると考えられる³⁾。このような場合の他にも、ボーリング孔が不透水層で区切られた何層かの帯水層に貫入している場合や、地下水が密度成層している場合や、地下水と岩石との化学反応が深さによって異なっている場合などは、ボーリング孔内の水質分布が一様でないことが期待され、本採水器を使用するメリットがあると考えられる。

参 考 文 献

- 1) F. H. Rainwater and L. L. Thatcher: Methods for collection and analysis of water samples, Geological Survey Water Supply Paper, No. 1454, 1960.
- 2) 奥田節夫：児島湾締切後における湖水塩水濃度の低下について、農業気象、第14巻、第4号、1959, pp. 25-30.
- 3) 吉岡龍馬・奥田節夫・沖村 孝・田中 茂：豪雨時における六甲山系鶴甲山の地下水位、地下水流出力と溶存化学成分との関係、京大防災研年報、第19号 B, 1976, pp. 409-420.