

噴水の高さについて

綾 部 重 雄

Height of Water-Jet

Shigeo AYABE

I 緒 言

水道からホースで撒水する際に、水の噴出孔をせばめると水は強く噴出する。すなわち水道の水圧は増加しなくても、噴出口が細くなれば水の噴出速度は著しく増大する。

併し噴出口を限りなく細くしていくと、遂には噴出速度は小さくなる。消火用ホースに生じた針尖大の孔からの噴出水は高さ数 cm にも達しないことはよく見られることである。

小学校学習指導要領理科にも、

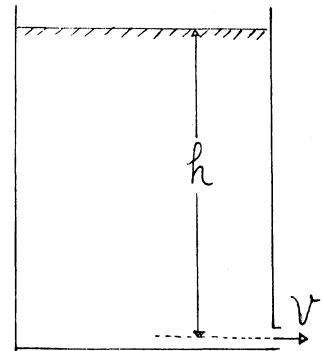
ウ 噴水の水の上がり方を調べる。

(ア) 身近にある細い管を使って噴水遊びをし、噴水の上がり方は、水源の高さや水の出口の太さなどによって違うことに気づく。

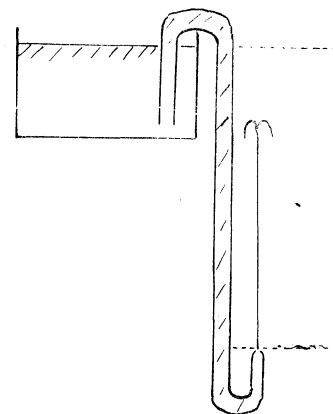
とある。水の出口の太さによって噴水の高さの違うことは単純ではない。出口の太さをだんだん細くすれば漸次噴水は高くなるが、或太さに達すると、噴出口を細くするにしたがって噴水の高さは急に低くなる。

Toricelli の定理では、第 1 図のように細口から噴出する水の速度 v は、 $v = \sqrt{2gh}$ で表わされる。

これを上方に噴出させれば、水の高さは水槽の水面の高さまで達する理になる。併し第 2 図のように、直径 6 mm 程度の管をサイホンに使い、噴出口の内径を 0.5 mm ~ 1.5 mm 程度にすれば噴水の高さは計算値の約 75% ~ 80% の高さになる。これより噴出口を太くしても、細くしても噴水は低くなる。この高さの減少は空気の抵抗のみの影響ではないと思われる。



第 1 図



第 2 図

II 予 備 調 査

水流についての研究の現段階は次のようである。

- (1) 等速流の研究は進んでいる。
- (2) 等断面不定流については、流速（流量）の変化が余り著しくない場合は或程度理論的に解ける。

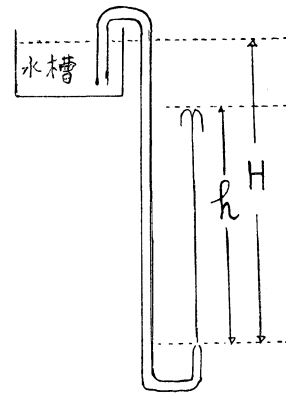
(3) 不等断面，不定流の場合は，甚だ複雑で理論的には非常に困難がともなう。近似的に，数値解析を行なう外はない。

そこで本研究においては，主に実験を基礎に考察を進めることにした。

Ⅲ 実 験

実験Ⅰ 予備的実験

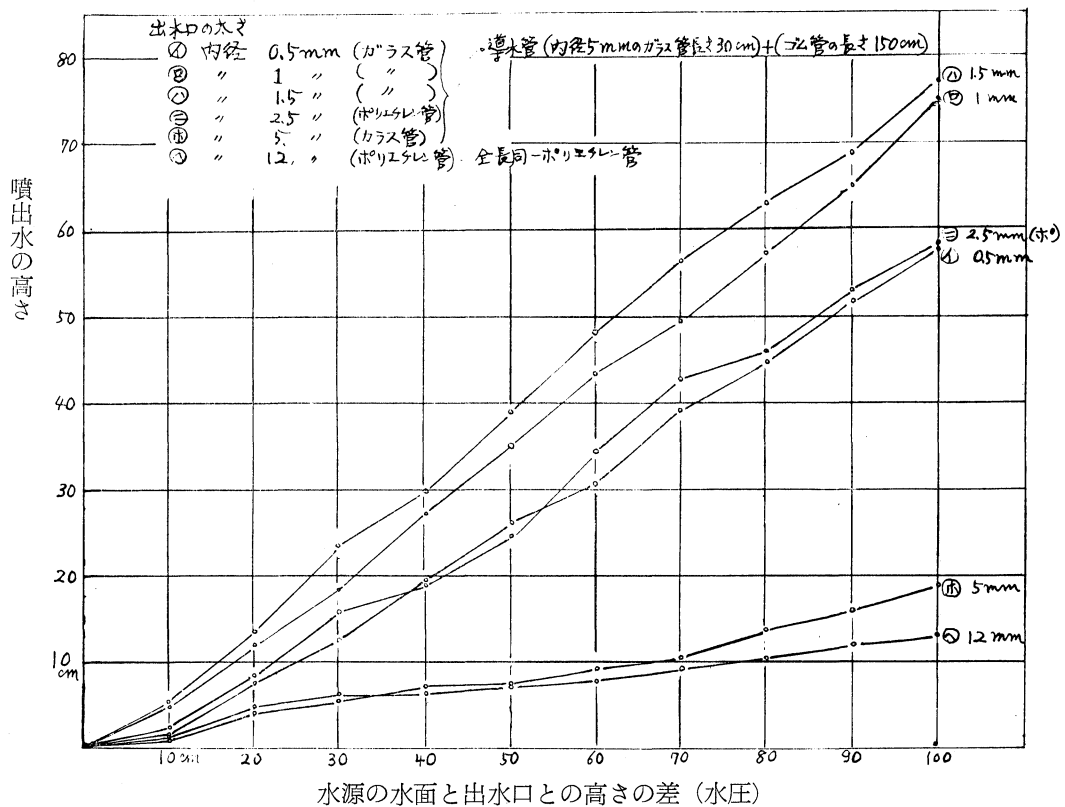
- (1) 目的 鉛直に噴出する水の高さと，水圧（水源の高さ），噴出口内径との関係の概観的測定。
- (2) 方法 次の6種の噴出口を用いて，それについて，水圧を10cm~100cmまで変化して噴水の高さを測定した。
- (3) 装置 (第3図)
- (4) 測定結果 図表1のようになる。



第3図

測定に際して噴水は最初に高く上がり，やや低くなって

図表1 鉛直に噴出する水の高さ（噴出の太さ及び水圧との関係）



安定する。図表1の値はこの安定した後の高さをとったものである。

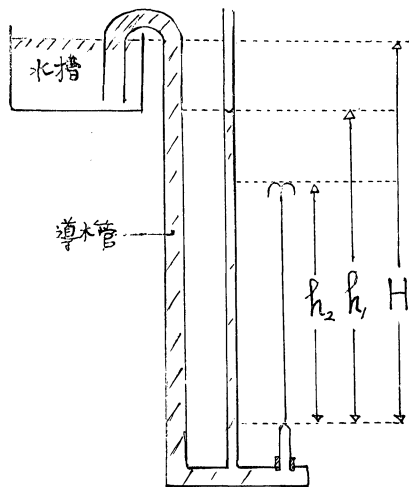
- ① 噴水の高さ（全一噴出口）は大體水圧に比例する。
- ② i) 内径 1.5mm，全 1mm 大體等しく最高で水圧（H）の約75%~80%となる。
ii) 0.5mmと2.5mmで約50~60%

- iii) 5 mm \oplus 12mm \ominus は (全長同一太きの管) 5 mmで20%内外
12mmで12%内外

これでまえがきに述べた現象の存在を確認した。

実験Ⅱ 噴出口の太さと、噴水の高さとの関係を測定する。

- (1) 目的 噴出口の太さを変化することによる噴水の高さが次第に大きくなり、最高に達し、次第に小さくなる。その転移の様子を明らかにし、噴水機構究明の資料を求める。
- (2) 装置及び方法



第4図

噴出口をガラス管で作製した。(内径別表1の通り)
導水管として内径6mmのビニール管長さ150cmを用いた。
各噴出口について h_1 , h_2 , H , を測定した。測定結果について $h_1/H \times 100$, $\frac{h_2}{H} \times 100$ を求め、(表1)

- (3) 測定値 (表1, (1)) について。

H の値が各場合について異なる値となるので、各場合の比較のために、百分率 $h_1/H \times 100$, $h_2/H \times 100$ を求めた。

① $\frac{h_2}{H} \times 100$ は、

① 最大 No. 6 (1.2mm. diam.)

- ② i) No. 5 (0.79mm) No. 4 (0.58mm) ~ No. 1

$\frac{h_2}{H} \times 100$ (噴水) は漸減するが、

- ii) $\frac{h_1}{H} \times 100$ は 増加する。 h_1 は次第に H に接近する。

表1 Glass-Nozzle.

(1) Nozzle Dia. (mm) $D_1=6\text{mm}$

	d.	D_1/d	d^2	$d^2/D_1^2(a/A)$	$h_1/H \times 100$	$h_2/H \times 100$
1	0.38	15.8	0.1444	0.0040	99.7	62.8
2	0.47	12.76	0.2209	0.0061	99.9	72.8
3	0.53	11.3	0.2809	0.0078	99.7	65.0
4	0.58	10.3	0.3364	0.0093	99.5	77.1
5	0.79	7.6	0.6241	0.0173	98.8	80.3
6	1.20	5.0	1.4400	0.0400	97.3	80.8
7	1.47	4.1	2.1609	0.0600	93.6	79.4
8	1.65	3.6	2.7225	0.0756	89.2	59.7
9	2.19	2.8	4.7961	0.1332	82.5	50.0
10	2.83	2.1	8.0089	0.2222	69.7	39.3

(2) $D_2 = 13\text{mm}$

	D_2/d	d^2/D_2^2	$h_1/H \times 100$	$h_2/H \times 100$
1	34.1	0.00085	99.4	55.1
2	27.6	0.0013	99.4	71.2
3	24.5	0.0016	99.5	64.4
4	22.4	0.00199	99.3	75.6
5	16.5	0.0037	99.3	80.7
6	10.8	0.0085	98.7	83.3
7	8.9	0.0128	97.4	83.3
8	7.9	0.0161	95.4	77.2
9	5.9	0.0283	92.5	67.9
10	4.6	0.0474	85.7	49.3

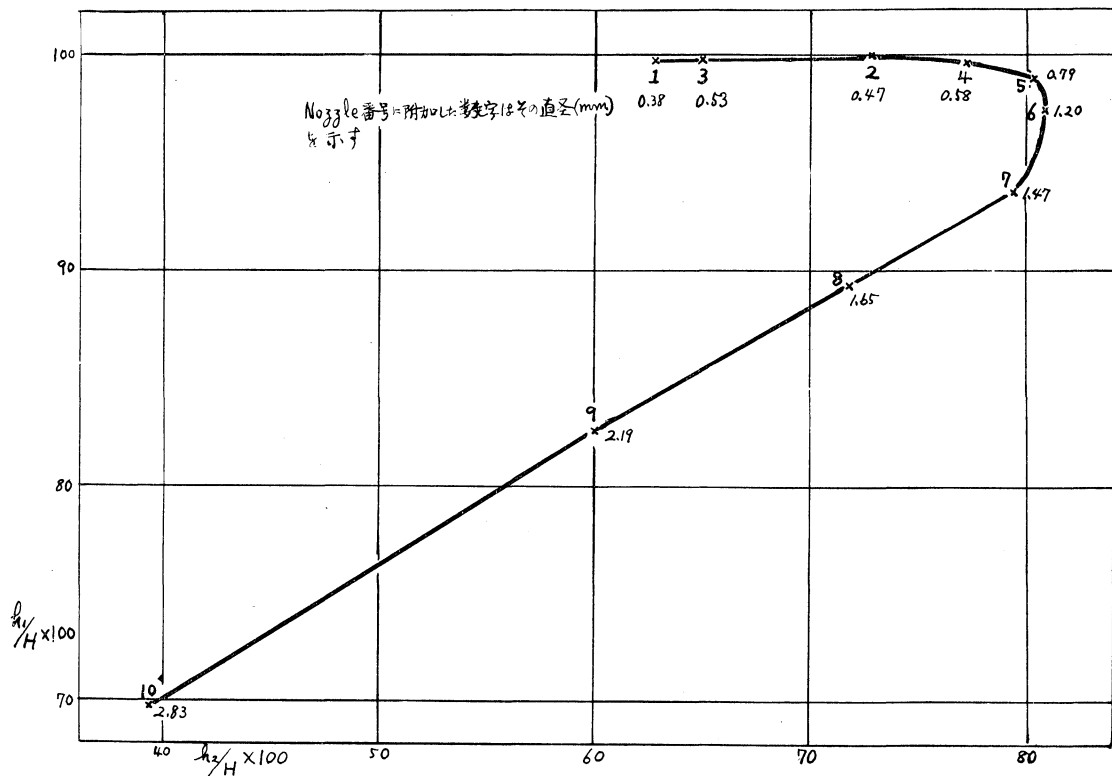
① No. 6より口径の大なる領域

No. 7 ~ No. 10

$\frac{h_2}{H} \times 100$ は $\frac{h_1}{H} \times 100$ にほぼ比例して減少する。

各噴出口の $\frac{h_1}{H} \times 100$, $\frac{h_2}{H} \times 100$ の関係は図表2, となる。

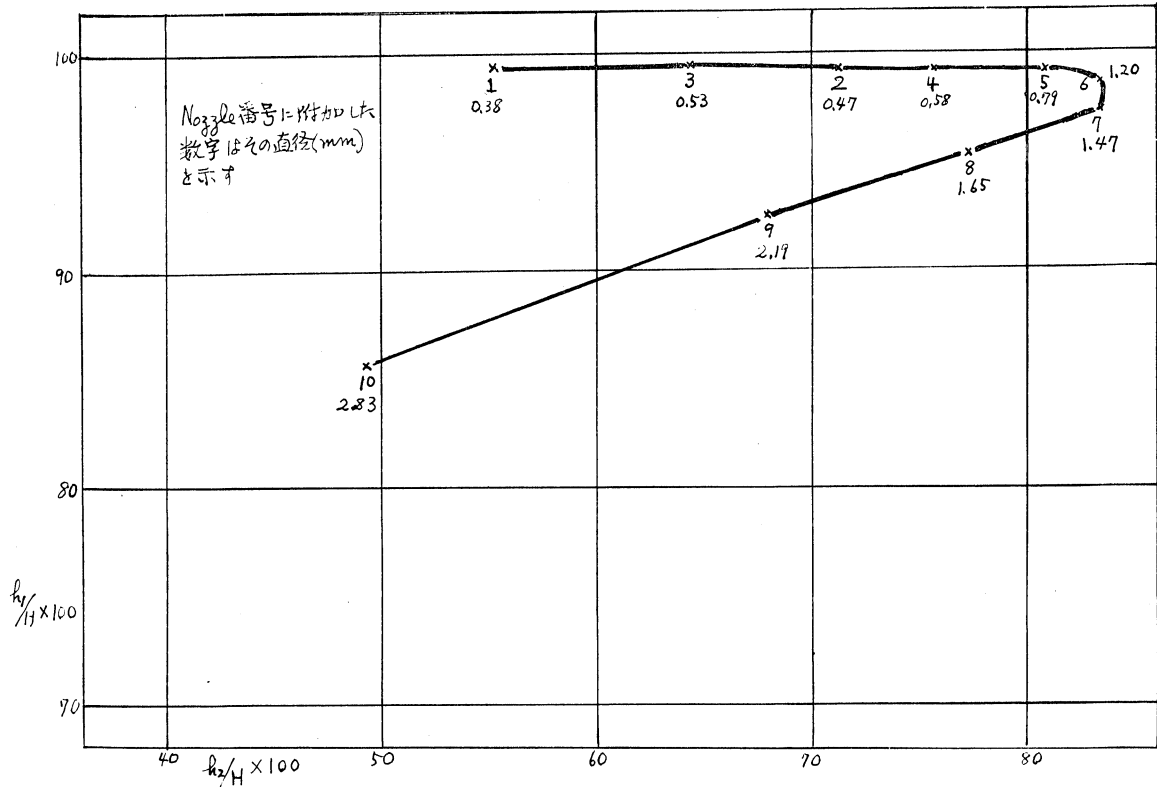
図表2 Glass-Nozzle 導水管の直径6mm



実験Ⅲ 噴出口を実験Ⅱのものを用い、導水管を口径13mmに換えて実験Ⅱと同様にする。

- (1) 目的 導水管の噴水に対する影響の考察
- (2) 測定結果 表1の(2)
- (3) この場合の $\frac{h_1}{H} \times 100$ と $\frac{h_2}{H} \times 100$ の関係は図表3。

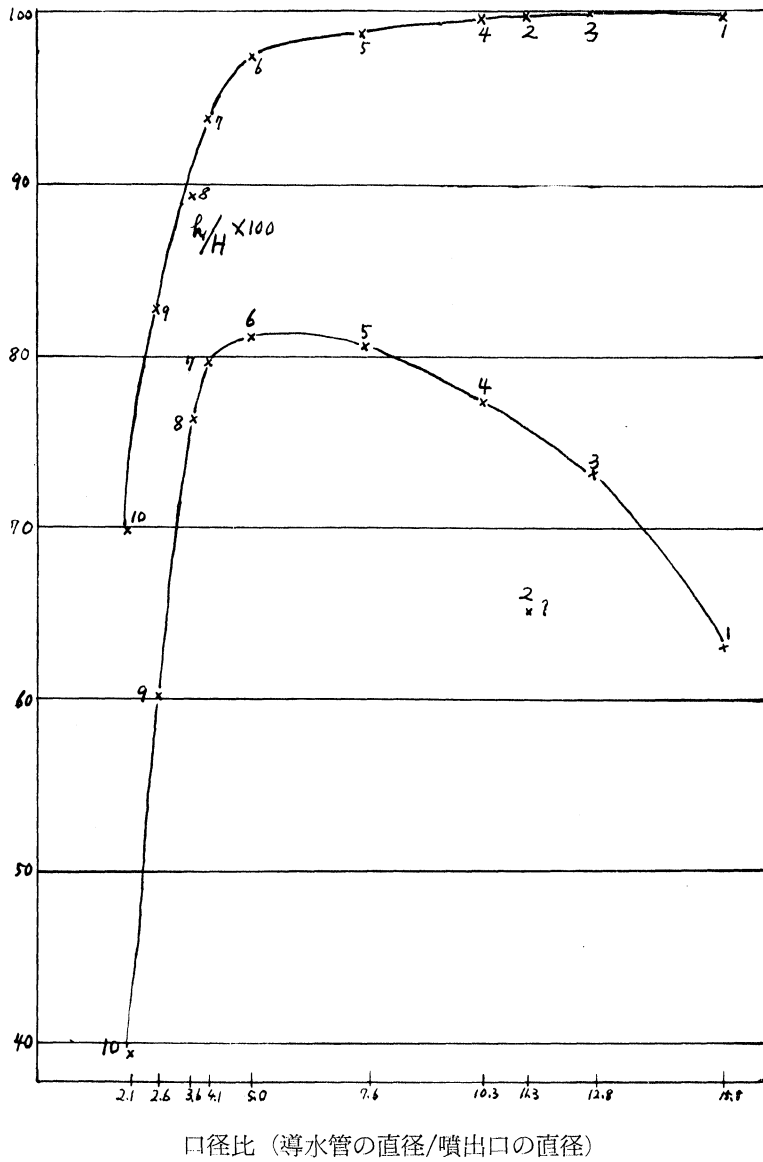
図表3 Glass-Nozzle 導水管の直径13mm



(4) 考察

- ① i) 噴水の最高は No. 6, 実験Ⅱの最高。導水管の内径を約2倍, したがって断面積を4倍にしても最高噴水をする噴水口は変わらない。
ii) No. 7 噴水口は実験Ⅱより高い噴水を出し, No. 6 に等しくなる。
 $\frac{h_1}{H} \times 100, \frac{h_2}{H} \times 100$ ともに増加す。
(導水管の影響認めらる)
iii) 導水管と噴出口の口径比と, 噴水の高さは図表4, 図表5のようになる。
- ② 口径の小なる領域 No. 5 ~ No. 1
 h_1 は次第にHに近づき, 95%以上。
 h_2 は次第に減少す。通減率実験Ⅱより大
- ③ i) 口径大なる領域 No. 7 ~ No. 10
何れも実験Ⅱに比し $\frac{h_1}{H} \times 100, \frac{h_2}{H} \times 100$ ともに大なり。

図表4 導水管と噴出口の口径比と噴水の高さ (導水管口径6mm)



上の曲線は $h_1/H \times 100$ および $h_2/H \times 100$ を表わす。

ii) No.10—No. 9—No. 8—No. 7 $\frac{h_1}{H} \times 100$ と $\frac{h_2}{H} \times 100$ は殆んど直線関係にあり，直線傾

斜を実験Ⅱの場合を θ_1 ，Ⅲの場合 θ_2 とすれば概略次の如くなる。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{3}{5}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{1}{3}$$

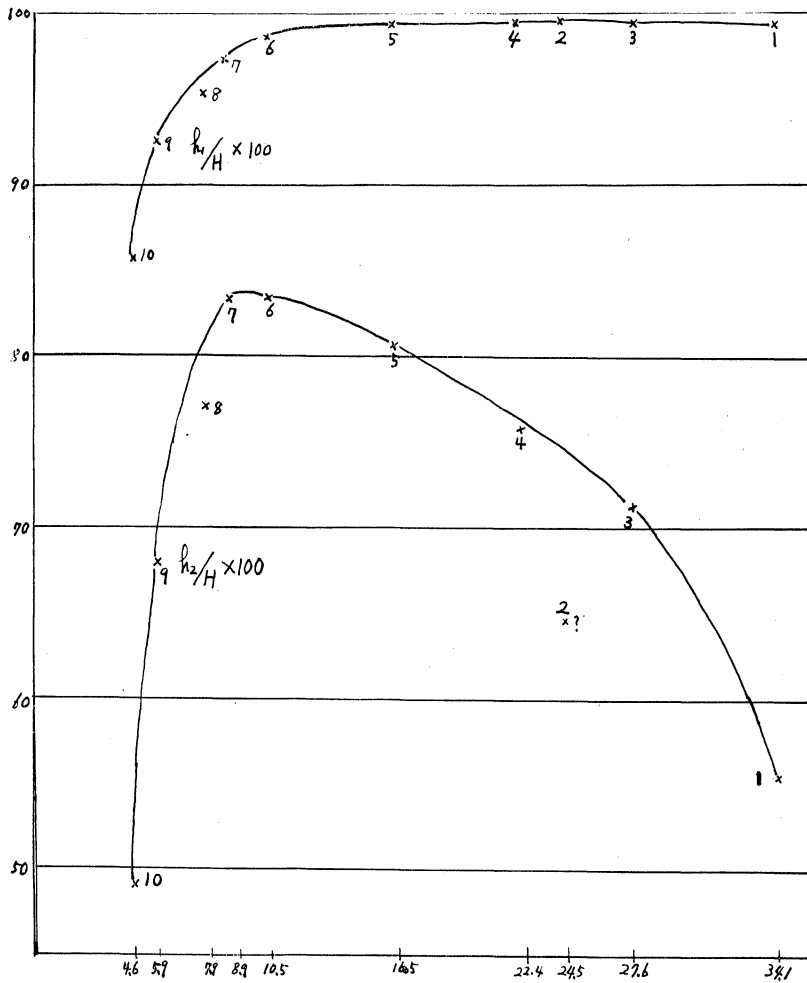
Ⅳ 考 察

(1) No. 7～No.10の領域

水圧分布について。

この際の導水管の水流に対する抵抗を F とし，噴出口における水路急縮その他，および噴出流水の

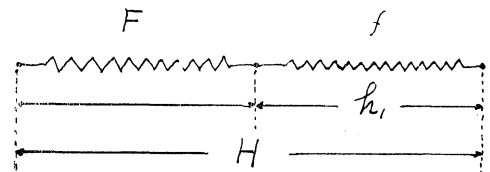
図表5 導水管と噴出口の口径比と噴水の高さ (導水管口径13mm)



口径比 (導水管の直径/噴出口の直径)

反作用等を含む抵抗 f とすれば次の如くなる。電路式に表現すれば次図のようになる。

したがって f が減少すれば、 h_1 が減少する。この際流速の変化のために、 F もまた変化すると思われるが、 H の中 f による消耗率の比率が減少するものと考えられる。



$$h_1/H = f/F + f$$

第5図

f については、噴出口自体については、

- ① 孔口の周壁における摩擦
 - ② 内部摩擦
 - ③ 速度の急激な変化によるエネルギーの消耗
- などに関係する。したがって
- ④ 孔口の大きさ
 - ⑤ 孔口の形状
 - ⑥ H の大きさ

などが考えられ

噴出流水の反作用については

- ① 噴出の方向
- ② 噴出速度（空気の抵抗をも含めて）

などが考えられる。

No. 7～No.10の領域で、噴出孔の口径が大きくなるにしたがって、 h_1 が小さくなるのはこのためと考える。またその場合、導水管として、6mm口径のものの方が、13mm口径のものより、 h_1 の値が小さいのはFの持つ比率が前者が大きいものとする。尚 f の比率が高く、 h_1 が大きくなる16mm口径を用いた方が h_2 も高くなる道理である。

また噴出口の大きさは当然 $F : f$ に影響を及ぼすために、 h_1 と h_2 に変化を与える。

さらにまた、実験Ⅱの導水管のFは大きく実験Ⅲの場合は之に比し小さい。したがって No. 7～No.10の口径の変化が圧力分布に及ぼす影響は実験Ⅲの方が小さい筈である。

すなわち $\theta_2 < \theta_1$ となる。

この区間では噴出口の変化が導水管内の水流の流速を変化し、水流による抵抗に有意義なる関係にありと考えられる。

(2) No. 5～No. 1 噴出口口径の極めて小なる領域について。

噴出口の影響が導水管の抵抗に比し、極めて大きく、この範囲で導水管の抵抗は殆んど無視できる範囲にあり、この領域における噴水の高さは、噴出口の抵抗及び噴出後の空気の抵抗に関するものであろう。

なお噴出口について、断面の急収縮による圧力損失について、（永井荘七郎：水理学. P.75）

$$h_c = f_c \frac{v^2}{2g} \quad f_c ; \text{急縮損失係数}$$

$$f_c = \frac{1}{C_a^2} \{0.02 + (1 - C_a)^2\}$$

C_a ; 収縮係数

C_a の値については、Aがaに収縮する場合に

$a/A = 0.01 \sim 1.0$ の範囲で

$$C_a = 0.60 \sim 1.00$$

今 $a/A = 0.01$ なる場合 $C_a = 0.60$ とすれば

$$f_c = \frac{1}{0.6^2} \{0.02 + (1 - 0.6)^2\} = \frac{1}{2}$$

$$h_c = \frac{1}{2} \frac{v^2}{2g}$$

すつわち急縮のために、 $\frac{1}{2}$ のエネルギーは消耗され、空気の抵抗を無視しても噴水は $\frac{1}{2}$ の高さには上がらない計算値となる。実験Ⅱ及Ⅲでは75%程度の高さの噴水となっている。急縮の程度によって C_a の値がもっと小さくなるものと考えねばならない。

IV ま と め

以上のことから

- (1) 噴出口を細くするほど噴水の高くなるのは、噴出口の抵抗変化が、導水管の抵抗に対して有意義の量的範囲にあるときである。そして噴出口の抵抗が大きい時の方が水圧分布が噴出口に急傾斜となり、噴水は高くなる。
- (2) 噴出口の抵抗が極めて大きく、導水管の抵抗を無視できる範囲では、噴出口を細くするほど噴水は低くなる。噴出水量に対する摩擦の影響、水の表面張力、空気の抵抗等が水量の小なるほど大きく影響するものと考えられるが、更に測定実験の結果に待たねばならない。水圧変化より孔口の抵抗に関係することが大きい。
- (3) したがって噴出水の最高になるための噴出口の大きさは大体(1)と(2)の転移するところにある。本実験の場合、導水管として用いた口径6mmと13mmの範囲では噴出口の口径(0.38mm~2.83mm)の影響が大きく、導水管の影響は微小である。ただ同一噴出口の場合は導水管の大きい方が噴出水は明らかに高く上がる。同一導水管で最高の噴出を示すのはほぼ口径の絶対値によってきまる。只No. 7が最高に接近し、No. 5が最高から遠ざかる(6mmから13mmに換えた場合)傾向にあるのはさらに細かな検討を要する。

V 反 省

- (1) Nozzle の分布をもっと細かにしなければならない。
- (2) 測定回数をもっと多くしないと、風速等の影響を受けやすく誤差が大きくなる。
- (3) Nozzle の抵抗、要素が複雑で、更に要素間に相互作用があるので数多くの場合を実測する要がある。
- (4) 今後、流量、流速の測定とあわせ考察する要がある。
- (5) 噴出水の反作用を明らかにする一方策として鉛直方向上下、水平方向に噴出する場合の比較。
- (6) 溶液を用いて表面張力の影響の測定。
- (7) これらを通じて、噴出口における抵抗について本質的に究明しなければならない。

参 考

永井荘七郎著 水理学