

ノズル・ゼットの水平到達距離に関する研究

STUDY ON THE COMPUTATION OF HORIZONTAL DISTANCE OF JET ISSUED FROM NOZZLE

川上謙太郎*
By Kentaro Kawakami

1. まえがき

消火用のノズルやダムスキージャンプ式余水路の末端から射出する高速度のゼット・射出水の径路や水平到達距離を考究することは工学的に意義がある。

かかる高速度射出水の運動の径路に対する空気抵抗の影響は、その運動の規模によって大いに左右されるものと考えられる。一般的にはゼット水流はその射出口の構造により水流の拡散状態が異なり、この拡散状態により空気抵抗の影響も相違してくるものと考えられている¹⁾。

本文は空気抵抗係数を考慮してフリーマンの消防用ノズルによる高速度射出水の運動の実験結果を考察し、空気抵抗に関連する係数を決定する方法を示している。この空気抵抗に関連する係数 k はゼットの流速と射出口の断面形状によって決まる値であり、この係数を使用することにより、ごく簡単にゼットの水平到達距離を算定することができる。かかる手法は多少の実測データのあるすべての空気抵抗をうけるゼット流の問題に適用できると考えられる。

土木におけるゼット流の問題としてはダム余水吐の問題があるが、これらについては現在空気抵抗は影響しないものと考えられ、その軌道は放物線軌道にしたがうものと考えられている²⁾。

しかし水流の規模・構造などによって、空気抵抗を考慮すべきゼット流においては、その観測データを合理的にまとめ、簡単な計算式にまとめる方法として役立つものと考えたので計算例とともに報告する。

2. 射出水の運動の式

(1) 空気の抵抗を受ける運動の式

物体が空中を運動する場合はかならず空気の抵抗を受ける。これまでの実験によれば、速度が大きくなるとその抵抗は速度のおよそ2乗に比例する。いま運動の方向を水平と垂直方向に分け、距離は前者を x 、後者を y で表わせば、速度はそれぞれ dx/dt および dy/dt 、加速度は d^2x/dt^2 および d^2y/dt^2 で表わされる。よって抵抗係数を K とすれば2つの方向の抵抗力は $K(dx/dt)^2$ および $K(dy/dt)^2$ で表わされる。ここに K は物体の大小、形状に関する実験値である。この抵抗は物体の運動について速度を減らす力になるから負の力である。このことから射出水が斜めに飛び出した場合、水平に働く力は $-K(dx/dt)^2$ 、垂直方向には運動の方向と反対に重力と $-K(dy/dt)^2$ が同時に働くので、水平および垂直方向の運動は次式で表わされる。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -K \left(\frac{dx}{dt} \right)^2$$

$$M \frac{d^2y}{dt^2} = -Mg - K \left(\frac{dy}{dt} \right)^2$$

いま係数 k を用いて $K/M = gk^2$ と表わせば

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -gk^2 \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -g - gk^2 \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

を得る。ここで k は空気抵抗に関する係数である。

(2) 水平および垂直方向の運動の式 (図-1 参照)

まず水平方向の運動の式は式(1)を積分して得られる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) = -gk^2 \left(\frac{dx}{dt} \right)^2$$

* 正会員 工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科

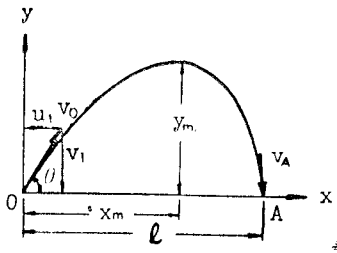


図-1 射出水の径路

水平速度 dx/dt を u とすれば、 $du/dt = -gk^2u^2$ より $du/u^2 = -gk^2 \cdot dt$ 、これを積分すれば

$$-\frac{1}{u} = -gk^2t + C_1$$

水平初速度を u_1 とすれば $t=0$ において $u=u_1$ であるから $C_1 = -1/u_1$ となり

$$u = \frac{1}{\frac{1}{u_1} + gk^2t} \dots\dots\dots (3)$$

をうる。さらに $u = dx/dt$ より

$$x = \frac{1}{gk^2} \ln\left(\frac{1}{u_1} + gk^2t\right) + C_2$$

$t=0$ のとき $x=0$ であるから

$$x = \frac{1}{gk^2} \ln \frac{\frac{1}{u_1} + gk^2t}{\frac{1}{u_1}}$$

あるいは

$$x = \frac{1}{gk^2} \ln(1 + gk^2u_1t) \dots\dots\dots (4)$$

これは水平方向における距離と時間の関係を表わす。

次に垂直方向の運動については式 (2) から

$$\frac{dv}{dt} = -g(1 + k^2v^2)$$

これを積分して

$$t = -\frac{1}{gk} \tan^{-1}(kv) + C_3$$

積分定数 C_3 は $t=0$ のとき $v=v_1$ より

$$C_3 = \frac{1}{gk} \tan^{-1}(kv_1)$$

とえられる。

ゆえに

$$t = \frac{1}{gk} \{ \tan^{-1}(kv_1) - \tan^{-1}(kv) \}$$

より

$$v = \frac{1}{k} \int \tan \{ \tan^{-1}(kv_1) - gkt \} \dots\dots\dots (5)$$

ここに $\tan^{-1}(kv_1) \equiv \alpha$ とすれば、 k と v_1 が与えられるとき α は一定の角度を表わす。よって式 (5) より

$$y = \frac{1}{k} \int \tan(\alpha - gkt) \cdot dt + C_4$$

$\alpha - gkt = z$ とおけば、 α は定数であるから $dt = -dz/gk$ より

$$\int \tan(\alpha - gkt) dt = \frac{1}{gk} \ln \cos(\alpha - gkt)$$

よって y の式は

$$y = \frac{1}{gk^2} \ln \cos(\alpha - gkt) + C_4$$

$t=0$ のとき $y=0$ であるから $C_4 = -\frac{1}{gk^2} \ln \cos \alpha$

ゆえに

$$y = \frac{1}{gk^2} \ln \frac{\cos(\alpha - gkt)}{\cos \alpha} \dots\dots\dots (6)$$

式 (6) は垂直方向の距離と時間との関係を表わす。

(3) 射出水の径路の式

射出水の水平距離 x とその高度 y の関係を表わす射出水の径路の式は、式 (4) と (6) から時間 t を消去して得られる。まず式 (4)

$$x = \frac{1}{gk^2} \ln(1 + gk^2u_1t) \text{ より } 1 + gk^2u_1t = e^{gk^2x}$$

ゆえに

$$t = \frac{1}{gk^2u_1} (e^{gk^2x} - 1) \equiv \beta$$

となる。

次に式 (6) において $\cos(\alpha - gkt)$ を展開して整理すれば、

$$y = \frac{1}{gk^2} \ln \frac{\cos(\alpha - gkt)}{\cos \alpha} = \frac{1}{gk^2} \ln(\cos gkt + \tan \alpha \cdot \sin gkt)$$

この式の t を β で置き換えて

$$y = \frac{1}{gk^2} \ln(\cos gk\beta + \tan \alpha \cdot \sin gk\beta) \dots\dots (7)$$

ここに、 y : 原点より x の水平距離 (m) にある射出水の高度 (m)

k : 空気の抵抗に関係ある係数

$$k = 0.00057 v_0 + \frac{0.000021}{m^{1.35}} \text{ (式 (19) 参照)}$$

$$m = \frac{A}{p}$$

A : 射出水始点の断面積 (m²)

p : 空気に接する A の周長 (m)

v_0 : 射出水の始点における速度 (m/sec)

$$\beta = \frac{e^{gk^2x} - 1}{gk^2u_1} \text{ (sec)}$$

$$\alpha = \tan^{-1}(kv_1) \text{ (rad)}$$

u_1 : v_0 の水平分速度 = $v_0 \cos \theta$ (m/sec)

v_1 : v_0 の垂直分速度 = $v_0 \sin \theta$ (m/sec)

θ : 原点において射出水が水平軸となす角度

g : 重力の加速度 = 9.8 (m/sec²)

\ln : 自然対数 (= 2.3 log₁₀)

(4) 射出水の達する水平距離

水平到達距離は式 (6) において $y=0$ とおく。

$$\ln \frac{\cos(\alpha - gkt)}{\cos \alpha} = 0 \text{ より } \alpha - gkt = \pm \alpha$$

ゆえに $t=0$ および $t=2\alpha/gk$ をうる。 $t=0$ は径路の始点で題意にそわない。ゆえに $t=2\alpha/gk$ の時間において、射出水は始点と同じ高さの位置に達する。

よって求める水平距離 l はこれを式 (4) に代入し

$$l = \frac{1}{gk^2} \ln(1 + 2k\alpha u_1) \dots\dots\dots(8)$$

とえられる。

(5) 射出水の最大高度 y_m とその水平距離 x_m

y_m を求めるには式 (6) を t について微分して 0 とおけばよい。 $\tan(\alpha - gkt) = 0$ より $\alpha - gkt = 0$, すなわち $t = \alpha/gk$, この値を式 (6) に代入して y_m をえる。

$$y_m = \frac{1}{gk^2} \ln \sec \alpha \dots\dots\dots(9)$$

ここに $\alpha = \tan^{-1}(kv_1)$ (rad)

次に x_m の式は次のようになる。

y_m は $t = \alpha/gk$ におこるので、この値を式 (4) に代入すれば

$$x_m = \frac{1}{gk^2} \ln \left(1 + gk^2 u_1 \frac{\alpha}{gk} \right)$$

すなわち

$$x_m = \frac{1}{gk^2} \ln(1 + kv_1 \alpha) \dots\dots\dots(10)$$

より計算される。

(6) 水平距離 l を最大にする射出角 θ

式 (8) に $\alpha = \tan^{-1}(kv_1)$, $v_1 = v_0 \sin \theta$, $u_1 = v_0 \cos \theta$ を代入し

$$l = \frac{1}{gk^2} \ln \{ 1 + 2k \cdot \tan^{-1}(kv_0 \sin \theta) \cdot v_0 \cos \theta \}$$

α, v_0 を定数とみなし、 $dl/d\theta = 0$ より式 (11) をえる。

$$\frac{kv_0}{1 + k^2 v_0^2 \sin^2 \theta} = \tan \theta \cdot \sec \theta \cdot \tan^{-1}(kv_0 \sin \theta) \dots\dots\dots(11)$$

この式を満足する θ が求める角度となる。 θ は空気の抵抗がない場合は 45° であるが、抵抗がある場合は k および v_0 によってかわる。たとえば $v_0 = 36.4 \text{ m/sec}$, $k = 0.02, 0.03, 0.04$ に対し $\theta = 42^\circ, 41^\circ, 39^\circ$ のようにかわる。

(7) 射出水の末端の速度

図一のA点における射出水の速度 v_A を求める。そのためにはA点における水平分速度 u_2 および垂直分速度 v_2 を合成すればよい。水平分速度は式 (3) で表わ

されるから、この式に射出水がA点に達するまでの時間 $t = 2\alpha/gk$ を代入して

$$u_2 = \frac{1}{\frac{1}{u_1} + gk^2 \frac{2\alpha}{gk}} = \frac{1}{\frac{1}{u_1} + 2k\alpha} \dots\dots\dots(12)$$

垂直分速度は式 (5) に $t = 2\alpha/gk$ を代入して

$$v_2 = \frac{1}{k} \tan \left(\alpha - gk \frac{2\alpha}{gk} \right) = -\frac{1}{k} \tan \alpha \dots\dots\dots(13)$$

ゆえに

$$v_A = \sqrt{u_2^2 + v_2^2} \dots\dots\dots(14)$$

式 (14) より射出水が x 軸と交わるA点における速度が計算される。しかし射出水の末端近くでは断面が若干拡散するので、実際の速度はこれより小さくなるであろう。

3. 係数 k の算定式

(1) k の考察と式形の選び方

k の性格は 2.(1) において $k^2 = K/Mg$ と定義して空気の抵抗係数と関連をもたせた。その値は実験の結果から定まるものであるが、直接に測定することはむずかしい。しかし射出水の水平到達距離の実験値があれば、これを l の式 (8) に適用して間接に k を算定することができる。本文では次のように k の算定式を考究した。その概要は次のとおりである。

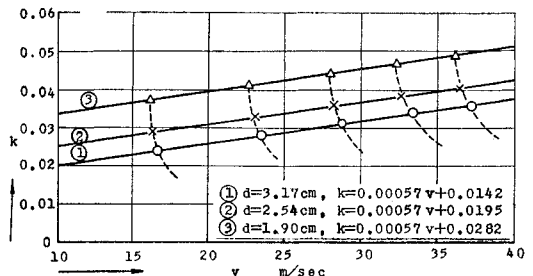
1) フリーマンの実験値³⁾ を式 (8) に代入して k を算定し、

2) この k とノズル出口の水の速度 $v^4)$ との関係を図一2 に示して $k = av + b$ の直線式をつくった。

3) 図一2 によれば、直線式の a の値は3種のノズルに共通した同じ値であるが、第2項 b の値はノズルの口径によって違っている。そこで直線式第1項は速度による影響項、第2項は射出水の断面の寸法、形状によってかわる項と考え、 k の式を式 (15) のように組みかえた。

$$k = k_v + k_m \dots\dots\dots(15)$$

ここに、 $k_v : v$ に相応する k ,



図一2 フリーマンの実験値 l_F より算定した k の図

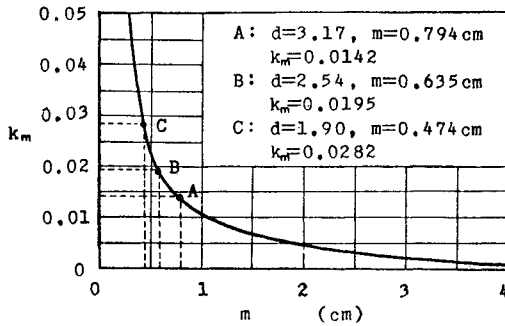


図-3 k_m と m の関係 (図-2 の式の定数より)

k_m : m に相応する k ,
 $m = A/p$, A : 射出水始点の断面積
 p : 断面の空気に接する周長

4) k_m に対する m の影響は 図-3 のように表わされる。

そこで

$$k_m = \frac{r}{m^n} \dots\dots\dots(16)$$

ここに r, n : 定数,
 の式を採用して, r と n を 図-3 の実験資料から算定した。

5) うえの k_v と k_m をあわせて式 (19) の k の式を決定した。この k の精度は 表-1 に示した。

(2) フリーマンの実験値 L_F を引用した k の式

フリーマン (J.R. Freeman, アメリカ) は消火用ノズルの放水試験において l の最大値³⁾ を測定した。この値を引用し, 放水試験の資料であるノズル口径 d , 水圧, 速度 v_0 , l の実測値 L_F は 表-2 に示した。この L_F を用いて式 (8) により計算した k_F の値は 表-1 に示したが, ノズル出口の水の速度 v_0 と k_F の関係を図示して 図-2 がえられる。これらはノズルの口径ごとに1つの直線となる。直線を $k = av + b$ として式をつくったが, v の係数 a をわずか修正して共通の値にして, 次の関係式をえた。

- ノズル口径 d k の 式
- 3.17 cm (1 1/4 in) $k = 0.00057 v + 0.0142 \dots(17 \cdot a)$
 - 2.54 cm (1 in) $k = 0.00057 v + 0.0195 \dots(17 \cdot b)$
 - 1.90 cm (3/4 in) $k = 0.00057 v + 0.0282 \dots(17 \cdot c)$

これら3つの式は口径の違った放水について k を v の関数として表わしているが, この中に m の影響も含んでいるものと考え, 式 (17) の第1項は v の影響する項, 第2項は m の影響する項と2つに分けて考えるものとした。すなわち k の式として式 (15) を考える。なお式 (17) の適用の範囲は $v=0$ まで延長することは適当でない。少なくとも $v=10$ m/sec 程度が限度であ

らう。

(3) $k_m = r/m^n$ の定数の決定

式 (15) のごとく k を k_v と k_m に分けた結果, k_m は式 (17) の第2項に対応する。この式 (17) の右辺第2項とノズルの m の関係を示すと 図-3 のようになる。すなわち k_m に対する m の影響はノズルの口径が小さいほど大きく, 口径が大きいほど小さくなる傾向を示している。このような m と k_m の関係を, $m=0, \infty$ の場合 k_m 値が $\infty, 0$ になるべきこともあわせ考慮して, 式 (16) の形を仮定した。図-3 の資料からこの式の r と n を最小自乗法の方法より算定して次の式をえた。

$$k_m = \frac{0.000021}{m^{1.35}} \dots\dots\dots(18)$$

この式は式 (17) の右辺第2項を m の関数として式化したものである。

(4) k の式の決定

式 (17) および (18) を一括して式 (15) に適用して式 (19) をえた。

$$k = 0.00057 v + \frac{0.000021}{m^{1.35}} \dots\dots\dots(19)$$

ただし, v : m/sec, $v > 10$ m/sec

これが射出水の始点の速度と断面, 形状を考慮した k の式になる。

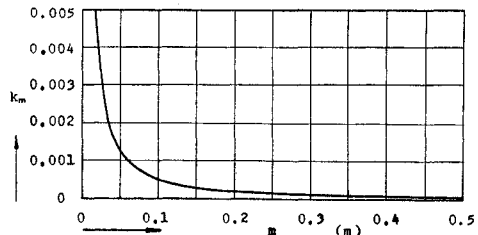


図-4 $k_m = \frac{0.000021}{m^{1.35}}, m = \frac{A}{p}$ (m)

なお式 (18) により k_m を計算する際には, 図-4 を利用すればよい。

(5) k 式の精度 (表-1 参照)

さきにフリーマンの L_F から計算した k を k_F とし, 式 (19) から計算した k を k_c として, 次の計算によってその精度を調べた。

$$\sigma_r = \left\{ \frac{N}{\sum_1^N [VV]/N} \right\}^{1/2}, V = \frac{k_F - k_c}{k_F}$$

ノズル口径 3.17, 2.54, 1.90 cm に対し σ_r はそれぞれ 3.3, 1.8, 1.7 (%) になり, 式 (19) の精度はかなり高いものと考えられる。

表-1 k_c の k_F に対する精度

ノズル口径	水圧 kg/cm^2	k_F	k_c	$k_F - k_c$	V	[VV] %
3.17 cm	1.4	0.0232	0.0240	-0.0008	-0.0354	12.5
	2.8	0.0262	0.0277	-0.0015	-0.0572	32.7
	4.2	0.0312	0.0308	+0.0004	+0.0128	1.6
	5.6	0.0339	0.0333	+0.0006	+0.0147	2.2
	7.0	0.0355	0.0364	-0.0009	-0.0253	6.4
N=5, $\sigma_p = (55.4/5)^{1/2} = 3.3\%$						55.4
2.54 cm	1.4	0.0290	0.0287	+0.0003	+0.0103	1.1
	2.8	0.0315	0.0325	-0.0010	-0.0317	10.0
	4.2	0.0356	0.0355	+0.0001	+0.0028	0.8
	5.6	0.0374	0.0380	-0.0006	-0.0160	2.6
	7.0	0.0405	0.0401	+0.0004	+0.0099	1.0
N=5, $\sigma_p = (15.5/5)^{1/2} = 1.8\%$						15.5
1.90 cm	(1.4)	0.0350	0.0379	-0.0029	-0.0828	(68.5)
	2.8	0.0422	0.0417	+0.0005	+0.0118	1.3
	4.2	0.0459	0.0447	+0.0012	+0.0026	6.8
	5.6	0.0478	0.0471	+0.0007	+0.0146	2.1
	7.0	0.0488	0.0493	-0.0005	-0.0102	1.0
N=4, $\sigma_p = (11.2/4)^{1/2} = 1.7\%$						11.2

表-2 l_F と l_c の比較

ノズル入口の水圧 (kg/cm^2)		1.4	2.8	4.2	5.6	7.0
口径 3.17 cm	v_0	16.6	23.4	28.7	33.2	37.1
	k	0.0240	0.0277	0.0308	0.0333	0.0355
	l_c	25.1	44.0	57.1	66.0	71.6
	l_F	25.3	45.1	56.6	64.9	71.9
口径 2.54 cm	v_0	16.3	23.0	28.2	32.6	36.4
	k	0.0287	0.0325	0.0355	0.0380	0.0401
	l_c	23.5	40.1	51.0	57.9	62.6
	l_F	23.5	40.5	50.9	57.6	62.5
口径 1.90 cm	v_0	16.1	22.8	28.0	32.3	36.1
	k	0.0379	0.0417	0.0447	0.0471	0.0493
	l_c	21.3	34.4	41.4	47.4	50.3
	l_F	21.9	34.1	41.5	46.6	50.9

注： v_0, l_F は Freeman の実験値を引用し、 k, l_c は上の実験値を基にして著者が本文において算出した値とする。

(6) 実験値 l_F と計算値 l_c の比較 (表-2, 表-3 参照)

本文の算式

$$l = \frac{2.30}{gk^2} \log(1 + 2k\alpha u_1)$$

$$k = 0.00057 v + \frac{0.000021}{m^{1.35}}$$

4. 射出水の径路計算の例解

(1) 放水ゼットの例

資料 フリーマンの放水試験

ノズル口径 $d=3.17$ cm, 水圧 $=7$ kg/cm^2

$v_0=37.1$ m/sec, $l_F=71.9$ m, $m = \frac{d}{4} = 0.00794$ m, $\theta=40^\circ$

表-3 l_c の l_F に対する精度

ノズル口径	水圧 kg/cm^2	l_F	l_c	$l_F - l_c$	V	[VV] %
3.17 cm	1.4	25.3	24.9	+0.4	+0.0158	2.49
	2.8	45.1	44.0	+1.1	+0.0244	5.95
	4.2	56.6	57.1	-0.5	-0.0088	0.77
	5.6	64.9	66.0	-1.1	-0.0169	0.28
	7.0	71.0	71.6	+0.3	+0.0041	0.17
N=5, $\sigma_p = (9.66/5)^{1/2} = 1.39\%$						9.66
2.54 cm	1.4	23.5	23.5	0	0	0
	2.8	40.5	40.1	+0.4	+0.0010	0.01
	4.2	50.9	51.0	-0.1	-0.0020	0.04
	5.6	57.6	57.9	-0.3	-0.0052	0.27
	7.0	62.5	62.6	-0.1	-0.0016	0.02
N=5, $\sigma_p = (0.34/5)^{1/2} = 0.26\%$						0.34
1.90 cm	1.4	21.9	21.3	+0.6	+0.0274	7.50
	2.8	34.1	34.4	-0.3	-0.0088	0.77
	4.2	41.5	41.4	+0.1	+0.0024	0.06
	5.6	46.6	47.4	-0.8	-0.0169	2.86
	7.0	50.9	50.3	+0.6	+0.0118	1.39
N=5, $\sigma_p = (12.58/5)^{1/2} = 1.59\%$						12.58

1) 空気の抵抗を考慮した場合

$$\cos \theta = 0.766, \sin \theta = 0.643, \tan \theta = 0.839,$$

$$u_1 = v_0 \cos \theta = 28.42 \text{ m/sec}, v_1 = v_0 \sin \theta = 23.85 \text{ m/sec},$$

$$\alpha = \tan^{-1} k v_1 = \tan^{-1} 0.8443 = 40^\circ 10.5', \sec \alpha = 1.3089,$$

$$k = 0.00057 \times 37.1 + \frac{0.000021}{0.00794^{1.35}} = 0.0355,$$

を用い

$$l = \frac{2.30}{gk^2} \log(1 + 2k\alpha u_1) = 71.6 \text{ m},$$

$$y_m = \frac{2.30}{gk^2} \log \sec \alpha = 21.9 \text{ m},$$

$$x_m = \frac{2.30}{gk^2} \log(1 + k\alpha u_1) = 43.4 \text{ m}$$

射出水の径路は

$$y = \frac{2.30}{gk^2} \log(\cos gk\beta + \tan \alpha \cdot \sin gk\beta)$$

表-4 放水ゼットの径路の計算例

空気の抵抗を考慮した場合			空気の抵抗を考慮しない場合		
x (m)	y (m)	位置	x (m)	y (m)	位置
0	0	始点	0	0	始点
10	7.78		10	7.78	
20	14.35		20	14.35	
30	19.15		30	19.71	
40	21.69		40	23.86	
43.4	21.89	最高点	50	26.79	
50	21.05		60	28.51	
55	19.12		69.2	29.03	最高点
60	15.76		70	29.01	
65	10.59		80	28.31	
70	3.01		90	26.39	
71.6	0	終点	100	23.26	
			110	18.52	
			120	13.36	
			130	6.59	
			138.4	0	終点

$$\beta = \frac{e^{0.01228x} - 1}{gk^2 u_1} = 0.349$$

より計算して表-4に示した。

2) 空気の抵抗を考慮しない場合

$$y = x \left\{ \tan \theta - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} x \right\}, \quad l = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta,$$

$$y_m = \frac{l}{4} \tan \theta, \quad x_m = \frac{l}{2},$$

より計算して表-4に示した。

3) 放水ゼットの径路の図示

表-4の結果を図-5に示し、空気の抵抗を考慮した場合と考慮しない場合の径路を比較した。

以上放水ゼットの初速度 v_0 が 37.1 m という比較的

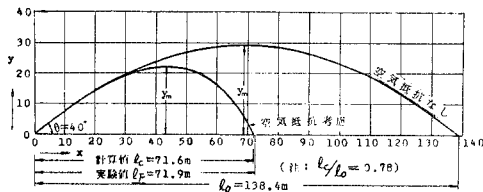


図-5 放水ゼットの径路の比較図

消火用ノズル口径 3.17 cm
 $v_0 = 37.1 \text{ m/sec}$, $k = 0.0355$

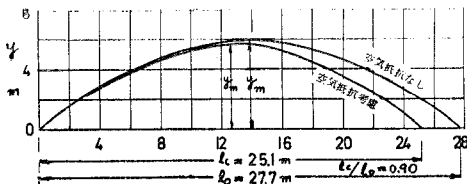


図-6 l_c/l_0 (表-5) の図法

表-5 射出水の初速度 v_0 と l_c/l_0

水圧 (kg/cm ²)	0.4	0.7	1.4	2.8	4.2	5.6	7.0
v_0 (m/sec)	8.6	11.4	16.6	23.4	28.7	33.2	37.1
k	0.0187	0.0210	0.0240	0.0277	0.0308	0.0333	0.0355
l_c (m)	7.3	12.6	25.1	44.0	57.1	66.0	71.6
l_0 (m)	7.4	13.1	27.7	55.0	82.8	110.8	138.3
l_c/l_0	0.99	0.96	0.90	0.80	0.69	0.60	0.52

注: l_c : 空気抵抗を考慮しない水平到達距離 (m)

l_0 : 空気抵抗を考慮しない水平到達距離 (m)

ノズル口径=3.17 cm

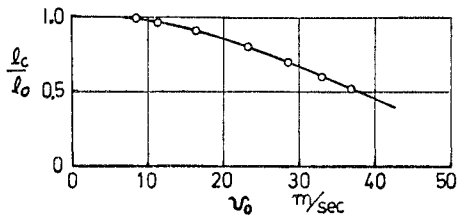


図-7 放水ゼットの径路の比較図

消火用ノズル口径 3.17 cm
 $v_0 = 16.6 \text{ m/sec}$, $k = 0.0240$

大きな場合についての計算を例示したが、同じ口径で初速度が小さい場合についての結果を示すと図-6のようになる。図-5と対比してわかるように v_0 が大きい場合には空気抵抗は大きい、 v_0 が小さくなると空気抵抗はさほど影響しなくなる。

初速度 v_0 の変化により空気の抵抗の有無による水平到達距離の比 l_c/l_0 がどのようにかわるかを示すと表-5および図-7のとおりである。

v_0 が大なる場合空気抵抗の影響は大きい、 v_0 が小なる場合空気抵抗の影響も小さくなることを示しており、 $v_0 = 8.5 \text{ m/sec}$ の時 $l_c/l_0 = 1$ で、この時放水軌道は放物線となる。

(2) 大型射出水の例

本文における空気の抵抗を考慮する係数 k を求めた式 (19) 中の数値は消防用ホースの放水試験の結果より求めたものである。これをスキージャンプ式余水吐のごとき大型射出水の例にそのまま適用することには多少の問題はあろう。しかしスキージャンプ式余水吐の実測例でもあって、この式 (19) の数値を修正することができれば、もちろん適用は可能となる。

式 (19) を直接適用できないのは、放水試験におけるゼットの拡散と余水吐における拡散とが多少とも異なり、それによる空気の抵抗の影響も異なるためであるが、いまここでは1つの例題として、放水試験におけるゼットの拡散と余水吐における拡散とが全く同様に生じ、したがって空気抵抗の影響も同じように作用すると仮定して式 (19) を拡張適用し、本文における計算式をもとにした多少の考察を行ないたい。

資料 スキージャンプ式余水路 (図-8 参照)

シュートの落差 $H = 80 \text{ m}$, 勾配 $= 40^\circ$, 長さ $= 103 \text{ m}$, 越流堤上の水深 $h = 6 \text{ m}$, 水門幅 $= 8 \text{ m}$

1) v_0 および h_0

まず堰流公式により v および q を計算し、ベルヌーイ式

$$H + h + \frac{v^2}{2g} = h_0 + \frac{v_0^2}{2g} + \left[f_r \cdot \frac{dl}{R} \cdot \frac{v_x^2}{2g} \right]$$

に適用して、 h_0 , v_0 を概算する。ただし v_x は v と v_0 の平均値を用いた。

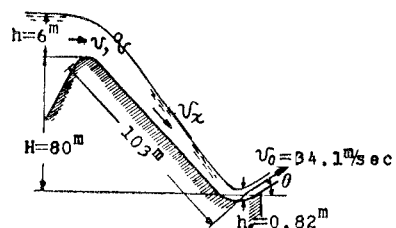


図-8 スキージャンプ式余水路

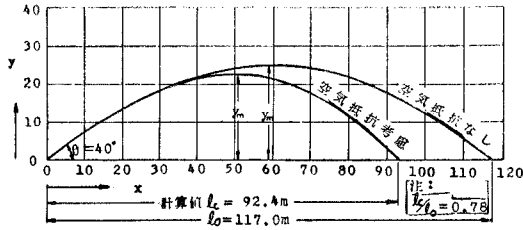


図-9 大型射出の径路の比較図

スキージャンプ式余水路

$H=80\text{ m}$, $h=6\text{ m}$, $v_0=34.1\text{ m/sec}$, $k=0.0195$

これより $h_0=0.82\text{ m}$, $v_0=34.1\text{ m/sec}$ をえた。

2) 空気の抵抗を考慮した場合

先の例題と同じ方法で計算する。

$$u_1 = 34.1 \times 0.766 = 26.12\text{ m/sec}$$

$$v_1 = 34.1 \times 0.643 = 21.93\text{ m/sec}$$

射出水始点の断面は水門幅と同じに 8 m とすれば

$$m = \frac{8 \times 0.82}{8 \times 2 + 0.82 \times 2} = 0.371\text{ m}$$

$$k = 0.00057 \times 34.1 + \frac{0.000021}{0.371^{1.35}} = 0.0195$$

$$\alpha = \tan^{-1}(0.0195 \times 21.93) = 0.404\text{ rad} = 23^\circ 9'$$

$$\sec \alpha = 1.08757$$

より

$$l = \frac{2.30}{9.8 \times 0.0195^2} \log(1 + 2 \times 0.0195 \times 0.404 \times 26.12) = 92.4\text{ m}$$

$$x_m = 50.2\text{ m}, y_m = 22.51\text{ m}$$

次に y は式 (7) より

$$y = \frac{2.30}{gk^2} \log(\cos gk^3 \beta + \tan \alpha \cdot \sin gk \beta)$$

$$\frac{2.30}{gk^2} = 617.2, \tan \alpha = \tan 23^\circ 9' = 0.42757,$$

$$\beta = \frac{e^{0.003726x} - 1}{0.09733}$$

表-6 大型射出水径路の計算例

空気の抵抗を考慮した場合			空気の抵抗を考慮しない場合		
x (m)	y (m)	位置	x (m)	y (m)	位置
0	0	始点	0	0	始点
10	7.67		10	7.67	
20	13.91		20	13.91	
30	18.72		30	18.72	
40	21.45		40	22.09	
50	22.50		50	24.03	
50.5	22.51	最高点	58.5	24.54	最高点
55	22.27		60	24.49	
60	21.45		70	23.59	
65	20.06		80	21.23	
70	17.43		90	18.33	
75	15.36		100	12.20	
80	10.25		110	5.53	
85	7.78		115	1.67	
90	2.73		117	0	終点
92.4	0	終点			

に x の値を入れて y を計算し、表-6 ならびに 図-9 に示した。

3) 空気の抵抗を考慮しない場合

この計算も先の例題と同じ方法で行ない、表-6 ならびに 図-9 に示した。

この場合の算式は

$$y = x(0.839 - 0.00717 x)$$

を用いた。

この計算例の場合 $l_c/l_0=0.78$ とかなり空気抵抗の影響が現われる。しかしさきの放水ゼットの例と同様初速度が小さくなる、規模の小さい射出水では l_c/l_0 は 1 に近づくものと考えてよい。

5. むすび

本文において考究した、空気の抵抗を考慮したゼットの運動の径路の計算式作成の手法は多少の実測データがあれば、各種のゼットならびに固体の運動の場合の実用計算式の作成に適用できる。

本文ではフリーマンの消火用ノズルの放水試験の結果を使用して計算式を作成し、その例題を 図-5 に示した。この放水試験の場合には、空気抵抗の影響はゼットの始点から最高点 y_m に達する少し手前までごくわずかであるが、 y_m でやや目立ち、この点を過ぎると径路は急に降下し始め抵抗の影響が大きくなることが示されている。

また空気の抵抗を考慮した到達距離 l_c と考慮しない l_0 の比率は、図-5 では 52%、図-6 では 90% となり初速度 v_0 に影響されている。

初速度 v_0 の l_c/l_0 に対する影響は 図-7 に示したごとく、初速度 v_0 が大きいと空気抵抗の影響は大きいが、初速度 v_0 が小さくなると空気抵抗の影響も小さくなり、放水軌道は放物線に一致してくる。消防用ゼットの場合、 $v_0=8.4\text{ m/sec}$ 以下で軌道は放物線に一致する。

このような傾向は土木における余水吐の跳水でも存在しようと考えられ、比較的規模の小さい射出水では現在のまま空気抵抗の影響を無視しても差し支えないが、スキージャンプのごとき大型射出水では空気抵抗の影響が多少とも入ってくるのではないかと推察される。現在確実なデータはないが、今後の問題点として指摘しておきたい。

参考文献

- 坂本竜雄：アーチダム越流の自由落下ナップの分散について、電力中央研究所報告 No. 65068, 1965.
- 土木学会：水理公式集 昭和 38 年度版 p. 232, 1963.
- Freeman: Treatise on Hydraulics, 10th Edition John. Wiley & Sons Inc., p. 199, 1916. p. 196~197.
- 同上