

参 考 资 料

水道の水理

1 水の重さ

水の重さは温度により違ってくる。純粋の水（蒸留水）で表わすと 4℃（3.98℃）のとき最も重く、これより高温、低温になると軽くなる。この重さの変化はごく僅かであるから特別の場合を除き一般には常温時の水の重さ（比重）は 1 として計算する。

表 1 水の温度変化による重量表（1 気圧）

温度（℃）	0	4	10	20	50	100
1 cm ³ の重さ（g）	0.9999	1.0000	0.9997	0.9982	0.9881	0.9584

一定の体積の水の重量は、前述したとおりその温度と状態によって異なり純粋の水（蒸留水）1 気圧のもとで 4℃において最大密度を有し、1 cm³の水の重さは 1g となる。

したがって、1 cm³の体積の重さを精密に知る必要のない給水工事の水理計算等は、すべて次のようにしても差し支えがない。

$$1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ cc} = 1 \text{ g} \cdots 1 \text{ g/cm}^3$$

$$1 \text{ l} = 1 \text{ kg} \cdots 1 \text{ kg/l}$$

$$1 \text{ m}^3 = 1,000 \text{ kg} = 1 \text{ t} \cdots 1,000 \text{ kg/m}^3 \text{ (1t/m}^3\text{)}$$

2 水の圧縮性

液体に圧力を加えると、いくらか体積が減少するが、その圧力を取り去れば再び元に戻る。水理学においては、その圧縮性がきわめて小さいので、水は普通、非圧縮性として取り扱っても差し支えがない。（圧縮比は 1 kgf/m²で $\frac{3\sim 5}{1,000,000}$ 程度）

しかし、特別の場合には、この圧縮性を考慮しなければならない。例えば、水力発電に用いられる水圧管が、急激に閉鎖されたときに起こる水撃作用（ウォーターハンマ）の計算等の場合である。

3 水の粘性

液体内で流れの方向に一つの面を考え、その面の両側の流れに速度（相対速度）の差がある場合には、流速の大きい部分は流速の小さい部分を前方にひくような作用をし、小さい部分は大きい部分を後方にひき戻すような作用をする。これは面に沿って摩擦抵抗（せん断応力）が生じるためであり、このような性質を液体の粘性という。

したがって、液体の粘性による摩擦応力は、液体が静止しているときは生じないもので、液体が運動しているときは、液体内部の面や、液体が接している物体表面の間に作用するものである。

4 水の圧力

4.1 圧力の伝達

水は非圧縮性のものであるから、全面的に圧力を伝達する。例えば、ある密閉した容器に水を満たし、その水面の一点に圧力を加えるときは、水はその圧力を変ずることなく、すべての方向に伝達する。すなわち、密閉した容器の全面が、同一の圧力がかかる。水道管等の水圧検査に使用する圧力ポンプなどは、これを応用したものの一つである。

4.2 水圧と水頭

(1) 単位面積の平面に対して、垂直に圧縮する方向に働く力を圧縮の強さ、あるいは圧力といい、水が及ぼす圧力のことを水圧という。また、静止した水中に働いている圧力を静水圧という。

水を器に入れると、器の底は、水全体の重量で押されている。すなわち、器の底が受けている圧力は、水全体の重量である。

ここに、

H : 水深

A : 底の面積

W : 単位体積あたりの水の重量

とすると、

$$\text{器の体積} = A \times H \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$\text{器の底全体の水圧} = W \cdot (A \times H)$$

となり、単位面積あたりの水圧 (g/cm²) を P とすると、

$$P = W \cdot \frac{A \times H}{A} = W \times H$$

すなわち、静止した水中の任意の点の水圧は、その水深に単位体積あたりの水の重量を乗算することで求められる。ここで、単位面積あたりの圧力を単に圧力といい、これに対し、器の底全体にかかる圧力を全体圧力という。

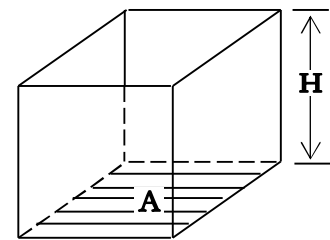


図 1

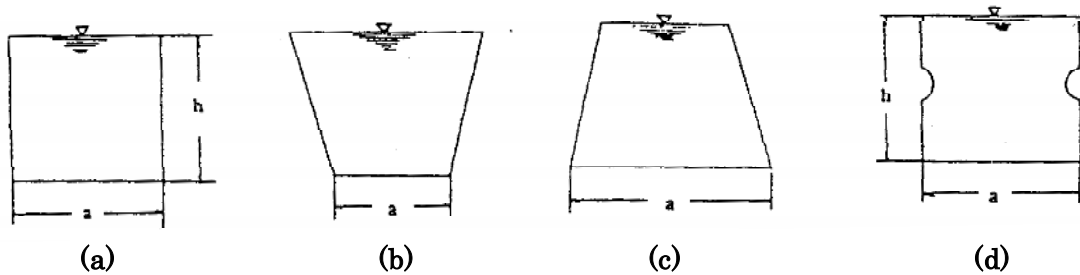


図 2

(a), (b), (c), (d)共に水深 h, 底面積 a が同じであるとき、全圧力 a×h はすべて同じになるが、水全体の重量はそれぞれ異なる。すなわち、水の重量と底面における全圧力とは同じではないことに注意すべきである。

(参考) 水深が 1,000cm=10m のとき圧力の強さは 1,000g=1 kg となる。

すなわち、10m の水柱の圧力は 1 kgf/cm² (0.098 MPa) である。

(2) 気圧と水の関係では、(図 3)のように水面 0~0' 上 10.33m以上の高さにパイプを立て、その上端に真空ポンプを取り付ける。まだポンプを働かせない時には、管の内外の水位は同一であるが、管内の空気が希薄となるにつれて、水位が次第に上昇し、その水面の高さ 10.33mになると止まる。

それ以上、ポンプを働かせても水位は上がらない。

この場合、管内は真空の状態と考えられ、上がった水柱は普通の気圧に相当する。

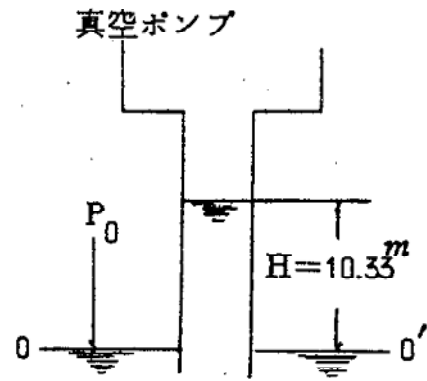


図 3

$$P_0 = W \times H = 1,000 \times 10.33 = 10,330 \text{ kgf/m}^2 = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 0.101 \text{ MPa}$$

ここに、

W : 水の単位重量 (=1,000 kgf/m³)

普通の 1 気圧は、水柱の 10.33m の高さの圧力、すなわち 1.033kgf/cm² (0.101 MPa) に等しい。実用的には、1 kgf/cm² (0.098 MPa) としても差し支えない。

(3) 水面下任意の箇所の水圧は $P=W \times H$ で表わされる。

この場合、 H は水圧 P を生じるのに必要な水の深さ (水柱の高さ) を表わし、これを水頭と呼ぶ。水頭と水圧は異なるが、長さの単位 (m) で水圧 [kgf/cm² (MPa)] が表現できるので、水道においてはよく用いられ、1kgf/cm² (0.098 MPa) の水圧は 10m の水頭があるということである。

(例題 1) 水面下 10m における水圧はいくらか。

$$(解答) \quad P = W \times H = 1,000 \times 10 = 10,000 \text{ kgf/m}^2 = \frac{10,000}{10,000} \text{ kgf/cm}^2 = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ MPa}$$

$P = W \times H$ は水圧と水頭の関係を示したもので、圧力の強さ P は、水頭の高さ H に比例することを示している。

5 水の運動

5.1 流速と流量

水路の水は、位置の高いところから低い方に流れ、管内の水は、圧力の高いところから低い方に流れる。このように水は運動し、その運動を流れという。この中で、水の流れの速さを流速といい、単位時間に流れる距離で示される。流速の単位は主として m/sec が使われる。

水の流れに直角な一つの横断面を考え、その断面を単位時間で通過する水の容積を流量といい、単位時間は 1 秒間とすることが多い。

流量は、流れの断面積と、その単位時間を進んだ距離の積である。すなわち、断面積と流速の積である。

したがって、流速と流量の関係は、次のようになる。

$$Q = V \times A \quad , \quad V = \frac{Q}{A} \quad , \quad A = \frac{Q}{V}$$

ここに、

Q : 流量

V : 平均流速

A : 断面積

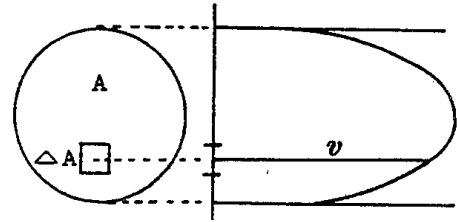


図 4

実際の水の流れは水路と壁と水との間、水と水との間に摩擦力が働き、断面の各部分の流速が異なる。なお、流速の分布が一様でなく、各々の層断面で流量を計算した場合、この流量を断面積で割った値を平均流速という。

5.2 連続の定理

(図 5)のように断面積が A, B, C とそれぞれ異なる場合、どの断面についても流量 Q は等しいはずである。もし、流量が等しくなければ、その部分で水が断絶するか、あるいは圧縮されていることになるが、水の性質から考えられないので、絶えず連続的に流れていると考えられる。これを、水の連続性という。

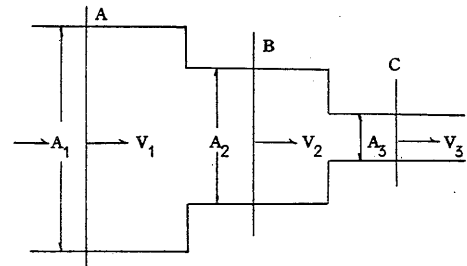


図 5

また、(図 5)の任意の断面積を A_1, A_2, A_3 、流速を V_1, V_2, V_3 とすると、

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 = A_3 \cdot V_3 = \text{一定}$$

の関係が成立する。このことより、流量は同じであるが、断面積の大きい場所では流速は小さくなり、断面積の小さい場所では流速は大きくなる。

(例題 2) 図 5 において、断面積 A_1 を 2 m^2 、断面積 A_2 を 1 m^2 、平均流速 V_1 を 1 m/sec とすると、平均流速 V_2 及び流量 Q はいくらになるか。

(解答) $Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$ より、

$$\text{平均流速 } V_2 = \frac{A_1 \cdot V_1}{A_2} = \frac{2 \times 1}{1} = 2 \text{ m/sec}$$

$$\text{流量 } Q = A_1 \cdot V_1 = 2 \times 1 = 2 \text{ m}^3/\text{sec}$$

6 管路の流れ

6.1 管路の定理

ここで管路とは断面の形状を問わず、水流が断面全体を満たして流れ、自由水面を持たない場合をいい、水道管のように圧力を持った水がその中に一杯になって流れているものを指している。この管で造られた水路が管路である。管の断面の形は、水圧による管の応力を小さくするために円形のものが多い。

ここで、内径 D の円形管において、断面積 A は、

$$A = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \pi = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$$

で表わされ、断面積 A より内径 D を求めるには、

$$D^2 = \frac{4}{\pi} \cdot A$$

$$D = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{A}$$

となり、断面積 A を流速と流量に置き換えると、

$$D = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{Q}{V}}$$

となる。

また、周辺の長さは、

$$S = \pi \cdot D$$

となり、動水半径（径深）は、

$$R = \frac{A}{S} = \frac{D}{4}$$

となる。

一般に水流に直角なある断面の水が接する水路壁の長さを潤辺という。又、その断面の流積を潤辺で除した値を径深という。

6.2 損失水頭

実際の管路の流れには水の粘性や運動の乱れによる摩擦抵抗がある。この抵抗に打ち勝って流れるために、水は持っているエネルギーを消費する。これは管路の全長にわたって存在するから、消費するエネルギーの量が大きな値となる。次に管路の流れの断面積の急激な変化によって渦を生じたり、かく乱を起こしてエネルギーを消費する。たとえば、管路の入口、出口途中にある弁、又は管路が屈曲し、わん曲する箇所はこの現象が現れる。

これらの消費エネルギーは熱となって管路の外に逃げてしまうから、再び利用することのできない損失エネルギーである。その大きさを水頭で表わし、これを損失水頭という。

(図7)で説明するとAよりBまで水が流れる間にエネルギーが損失して行く。これに相当する水頭をいい h_1 , h_2 となる。

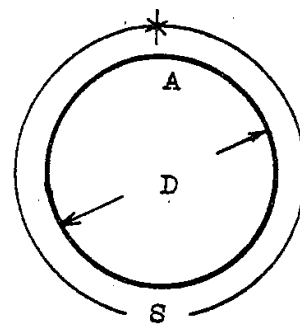


図6

ここで、(図 7)において、

P : 水圧

h : 水柱の高さ

W : 水の単位重量

とすると、

$$P = W \cdot H$$

$$H = \frac{P}{W}$$

となる。

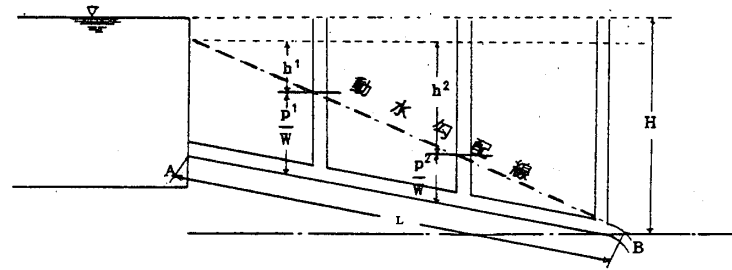


図 7

6.3 管の摩擦損失水頭

等流の管路におけるエネルギーの損失は、摩擦による損失だけである。その損失水頭の大きさ h は管路の長さ L に比例し、管の内径 D に反比例し、又、水の持つエネルギー（速度水頭 $\frac{V^2}{2g}$ ）に比例すると考えられ、次式で表わされる。

$$h = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

ここに、

h : 管の摩擦損失水頭

f : 摩擦損失係数（比例定数）

D : 管の内径

L : 長さ

g : 重力の加速度（9.8m/sec²）

f について、一般に管の内径 50 mm 以下の給水管の設計には、ウエストンの公式が用いられる。

$$f = 0.0126 + \frac{0.07139 - 0.1087D}{\sqrt{V}} \quad (\text{m-sec 単位})$$

また、管の内径 75 mm 以上の管にはヘーゼン・ウィリアムスの公式が用いられる。

$$f = \frac{10.08g}{C^{1.85} \cdot D^{0.167} \cdot V^{0.15}} \quad (\text{m-sec 単位})$$

ここに、

C : 流速係数

6.4 摩擦以外の損失水頭

管路には摩擦損失水頭のほかに、管の断面の変化、弁等の障害物、管路のわん曲、合流、分岐による損失水頭がある。これらは摩擦損失と異なり、管路の一局所にだけ発生する。

この損失水頭は一般に、

$$h = \frac{V^2}{2g}$$

と表わし、係数の f が理論的あるいは実験的に求められている。

6.5 水撃作用 (ウォーターハンマ)

流れている管内の水を弁等にて閉めて、急に停止させると、その上流側の水は急に速度が減少するため、水圧が上昇する。これを水撃作用、又はウォーターハンマという。これはポンプの急激な運転によっても起こり、管路中に封じこめられた空気的作用によっておこることもある。

6.6 動水勾配線と動水勾配

管路中に(図 8)のようにガラス管を立てたと仮定すれば、水位の状態は初め出口 B を閉塞して水の流出を止めると、ガラス管の各々の水面共水平であって a, b, c 線のようなになる。すなわち、静水圧を示す。次に出口 B を開放すると管内の水は流れ始めて流速 (V) を生じる。これと共にガラス管の水面は低下する。ここで、摩擦その他の損失水頭がないものと仮定すると、ガラス管の水面は、a, b₁, c₁ の線を示すこととなる。

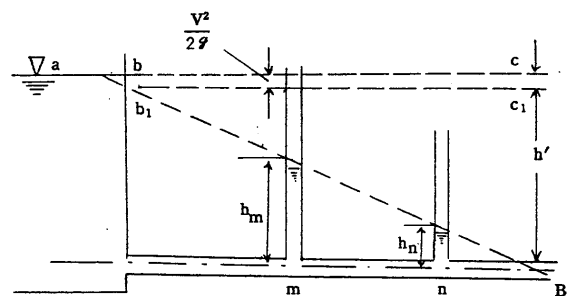


図 8

しかし管の入口、又は途中の管路中において、摩擦、その他の原因によって、エネルギーの損失を生じ、入口を過ぎるにつれて水面は漸次低下し、圧力水頭は m においては h_m となり、n においては h_n となる。もちろん出口 B においては、圧力水頭は 0 である。この場合、各々のガラス管内の水位を連ねて出来る線を圧力水頭線又は動水勾配線をいう。

この圧力水頭線 (動水勾配線) が水平線に対しての傾きを動水勾配 (I) といい、単位は千分率 (‰) で表わされる。

6.7 管路と損失水頭

(図 9)のように、水そう A から水そう B へ単一な管路 D を V という速度で水が流れたとすると、種々のエネルギーの損失が生じる。すなわち、 h_1 は管の流入口における損失水頭であり、 h_2

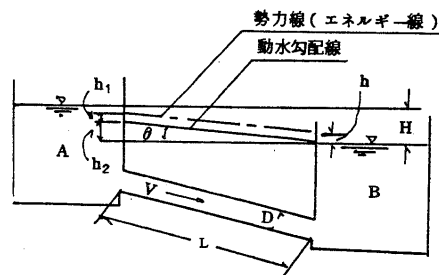


図 9

- H = 総水頭
- h_1 = 流入による損失水頭
- h_2 = 管内の摩擦損失水頭
- $h_1 + h_2$ = 総損失水頭
- h = 速度水頭 (流出損失)
- L = 距離

h_2 は管の摩擦による損失水頭であり、h は水そう B に流れ出る速度水頭である。

この時の動水勾配は、次式のように表わされる。

$$I = \frac{h}{L}$$

すなわち、動水勾配とは、水が流れるのに必要な水頭とその距離の比をいう。

(図 9)の場合の動水勾配は、次式のように表わされる。

$$I = \frac{h_2}{L}$$

6.8 管路の流量公式

水が管路を流れる場合、種々のエネルギー損失を生ずることは先に述べた通りであるが、中でも流水が管壁の粗度によって、その運動を妨げられるために生ずる摩擦損失水頭は、延長の長い管路にあつては、全損失水頭のほとんどを占めるものである。

したがって、管路の流量公式は、この摩擦損失に関する実験式が、そのほとんどである。

(1) 給水管の内径 50 mm 以下の場合

一般に水道では 50 mm 以下の小径管ではウエストンの公式が用いられる。

$$h = \left(0.0126 + \frac{0.01739 - 0.1087D}{\sqrt{V}} \right) \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$Q = \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot V = \frac{\pi D^2}{4} V$$

ここに、

h : 管の摩擦損失水頭 (m)

D : 管の内径 (m)

V : 平均流速 (m/sec)

g : 重力の加速度 (9.8m/sec²)

L : 管の延長 (m)

Q : 流量 (m³/sec)

この公式による計算は、繁雑であるので公式図表を利用するとよい。

(2) 給水管の内径 75 mm 以上の場合

この場合の公式としては次のようなものがある。

ダーシ公式

マニング公式 (クッター公式とはほとんど変わらない)

クッター公式 (大管や溝渠に適用)

パザン公式

ヘーゼン・ウィリアムス公式

これらの公式のうち、管の流量計算にも使用するが、かえって、溝渠や大口径管の計算に適用するもの、あるいは配水管のように大口径管でしかも布設延長の長いものの計算に適用するものなど、それぞれ特性を持っている。従って、公式を使うには、その公式を理解すると同時に、得た数値が実際と近似数であることが望ましい。

給水管の流量計算には容易かつ便利なヘーゼン・ウィリアムスの公式が用いられる。

$$V = 0.35464 \cdot C \cdot D^{0.63} \cdot I^{0.54}$$

$$Q = V \times A$$

ここに、

C : 流速係数

I : 動水勾配 $\left(= \frac{h}{L} \right)$

この公式についても公式図表を利用するとよい。

なお、この公式に使用する **C** の値は管内面の材質又は通水年数に応じて異なるものであるから、それに適応する **C** の値を選定することが必要である。

直管換算表

水栓類、メーター、管継手等による損失水頭と同口径の直管の摩擦損失水頭を比べ、器具等の損失水頭と損失水頭が等しくなる直管の長さを、器具等の直管換算長という。

直管換算長がわかれば、各器具の損失水頭は、管の摩擦損失水頭を求める式から計算できる。流量計算にあたっては、各種器具の損失水頭を図表から求めるよりも直管換算長を使うのが便利である。

表 1 器具類損失水頭の直管換算表

種別 \ 口径	13	20	25	30	40	50	75	100	150	200
給水栓	3.0	8.0	8.0	-	-	-	-	-	-	-
メーター	3.0 ~4.0	8.0 ~11.0	12.0 ~15.0	19.0 ~24.0	20.0 ~26.0	20.0 ~30.0	10.0 ~20.0	30.0 ~40.0	90.0 ~130.0	-
逆止弁付伸縮止水栓	3.8	5.5	6.0	-	-	-	-	-	-	-
単式逆止弁	2.6	4.6	4.8	6.2	7.7	9.3	-	-	-	-
スイング式逆止弁	1.2	1.6	2.0	2.5	3.1	4.0	5.7	7.6	12.0	15.0
ボール式伸縮止水栓	0.1	0.4	0.6	0.5	0.5	-	-	-	-	-
ボール式止水栓 青銅製仕切弁 仕切	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	1.2	1.4
止水栓	3.0	8.0	8.0 ~10.0	15.0 ~20.0	17.0 ~25.0	20.0 ~30.0	-	-	-	-
分水栓	1.5	2.0	3.0	-	-	-	-	-	-	-
分岐	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.8	4.0
ボールタップ	4.0	8.0	11.0	-	20.0	26.0	-	-	-	-
定水位弁	-	8.1	9.2	-	13.9	17.6	26.0	36.0	58.0	-
45° 曲管 (小曲)	-	-	-	-	-	-	1.5	2.0	3.0	4.0
90° 曲管 (小曲)	-	-	-	-	-	-	3.0	4.0	6.0	8.0
45° 曲管 (大曲)	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	1.0
90° 曲管 (大曲)	-	-	-	-	-	-	1.5	2.0	3.0	4.0
異径接合	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	-	-	-	-

種別 \ 口径	20×13	25×13	25×20
逆止弁付伸縮止水栓	3.3	2.6	4.5
ボール式伸縮止水栓	0.1	0.1	0.4

注 1) 表に示す値は、参考値であり、水力計算に当たっては実際に使用する器具の値を用いること。

注 2) 異なる口径の配管等を計算する場合には、(図 1)により、管算長を出す。

注 3) 器具の損失水頭は、製作上の良否、取付工事の良否等により、変化するのでさらに 10%程度の安全を見込むことが適当である。

表2
異径管換算表

換算口径 基準口径	13mm	20mm	25mm	40mm	50mm
13mm		7.0	19.0	158.2	430.2
20mm	0.143		2.7	22.4	61.7
25mm	0.053	0.367		8.2	22.6
40mm	0.008	0.045	0.122		2.8
50mm	0.002	0.016	0.044	0.364	

※ 異なった口径への換算は上表による係数倍とする。

表3
損失水頭換算表

口径 ℓ /分	13mm	20mm	25mm	30mm	40mm	50mm	75mm		100mm						
							C=100	C=130	C=100	C=130					
2,700	※ 13~50mmはウエストン公式による									0.50	0.31				
2,400														0.40	0.19
2,100														0.32	0.19
1,800							0.96	0.59	0.24	0.15					
1,500							0.69	0.42	0.17	0.10					
1,200							0.45	0.28	0.11	0.07					
900							0.27	0.16	0.07	0.04					
600							0.13	0.08	0.03	0.02					
540							0.10	0.06	0.03	0.02					
480							0.08	0.05							
420							0.06	0.04							
360						0.19	0.05	0.03							
300						0.13	0.03	0.02							
270						0.11									
240						0.09									
210					0.20	0.07									
180					0.15	0.05									
150					0.11	0.04									
120				0.29	0.07										
90				0.17	0.05										
60			0.19	0.08	0.02										
54			0.16	0.07	0.02										
48		0.37	0.13	0.06											
42		0.29	0.10	0.05											
36		0.22	0.08	0.03											
30	1.16	0.16	0.06	0.03											
27	0.98	0.13	0.05												
24	0.78	0.11	0.04												
21	0.61	0.09	0.03												
18	0.47	0.07	0.02												
15	0.34	0.05	0.01												
12	0.23	0.03	0.01												
9	0.14														
6	0.07														

※ 75~100mmはヘーゼン・ワイリアムス公式による
 鑄鉄 C=100 (旧)
 C=130 (新)
 鋼管 C=100

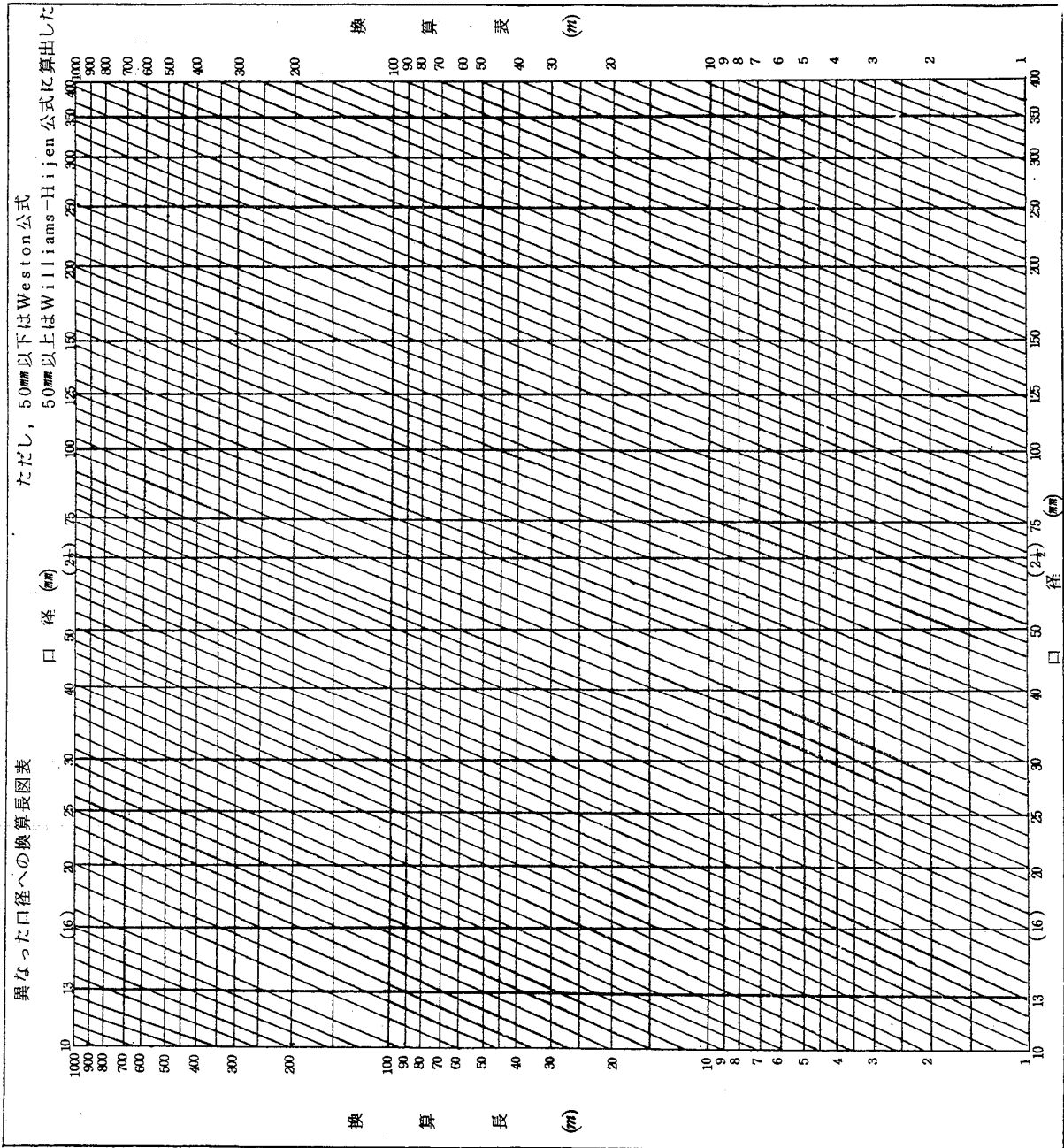


図 1