

## 豪雨時におけるマンホール内流況と損失係数(Ⅱ)

1. 緒言
2. 実験装置と方法
3. チャンバー内流況
4. 速度分布
5. チャンバーでの損失係数
6. チャンバー内水面振動と過渡的状態での影響
7. 結論

安川 浩\*  
宇井 正和\*

### 要 約

下水管渠が満管状態で流れている時のマンホール(チャンバー)での流況について、矩形チャンバーを用いて実験的に研究したものである。主たる目的は、円筒形チャンバーにおける流況との差異、損失水頭又は損失係数の特性、および流入時の流速分布と噴流モデルとの比較、さらに噴流理論より導かれる損失の適用性を検討することである。

全体的に、損失水頭は管内運動エネルギーと線形関係にあり、それ故流量が変化しても一定の損失係数が得られることがわかった。円筒形チャンバーでは損失水頭の急増をもたらす流況として、大きな流出渦が出現したが、矩形チャンバーでは渦は弱く、換って定常的な水面振動が発達した。チャンバー内水流の乱れが存在しても、上流管よりチャンバーへ流入する時の速度分布は噴流として扱えることが確認されたが、損失への適用範囲としては、管径の4倍までのチャンバーサイズであることが得られた。

### 1. 緒 言

筆者等は前報において、豪雨時のように満管状態で流れている下水管渠用マンホール内の流況と、そこでのエネルギー損失について報告した(安川他, 1986, 1987)。そこでは、円筒形マンホール(一般的にチャンバーと呼ぶことにする)を用い、3通りの段差(流入管と流出管との取付け高さ)における損失水頭と流れの特徴を検討した。

円筒形チャンバー内損失に関しては、そこでの損失水頭と管内エネルギーが線形関係にあり、段

差が増すとその勾配(損失係数)も増し、最大2.1にまで達する結果を得た。特に、段差が15cm(管径10cm)の場合には、ある流量範囲内でチャンバー内流況に大きな変化が生じ、強力な流出渦が発生すると共に、損失水頭も急増することが確認された。この流出渦に関しては、段差がその発生を促進する鉛直流を作るものと考えられたが、LindvallやHowarth(1984)が段差がないチャンバーで、しかも少流量の範囲でその発生を報告している。また、Howarth(1984)はチャンバー内の水位を上げていくと、一度消滅した渦が再び発生す

\*東京都立大学都市研究センター・工学部

るとしているが、筆者らの実験ではそれは見られなかった。しかし、水位調節範囲をさらに増す(2.5D以上) 必要があるのかも知れない。

チャンパー内水頭損失をもたらす流況には理論的解明の困難で複雑な運動が含まれており、交互に発生する渦や、巨大な流出渦はその代表的なものである。渦の発生については次元解析的な試みがなされているが、成功とは云えず、損失係数は未だ実験によって決めざるを得ない。筆者等は、チャンパーに流入する管内流体の運動量が、そのまま流出していく量と、拡散してチャンパー内の乱れになっていく量との関係に着目し、チャンパー内損失が運動量の交換によってもたらされるものと考え、噴流モデルの適用を試み、その詳細は前報(1986)に報告したとおりである。

実験では、円筒形以外のチャンパーとして、サイズが可変な矩形チャンパーを用い、そこでの流況と損失水頭の特質を見出すと共に、流入時の流速分布と噴流モデルを比較し、エネルギー損失のメカニズムとしての適用可能性を検討するものである。

## 2. 実験装置と方法

実験装置はチャンパーを除き、円筒形チャンパーの場合とほとんど同じもので、図2-1に示すように、直径10cm、長さ8mの亚克力製管路の中間部分にチャンパーを設置したものである。管路上流端は大型高架水槽と連結されており、一定流量を供給すると共に、下流端にはゲート付き整流水槽を設け、流量変化に伴うチャンパー内水位が必要な高さを維持できるように調節可能とした。

高架水槽からの流量は途中で直径が10cmから5cmへ縮小するベンチュリー管を設置し、その両端での水位差より求めた。流量に関しては、さらに、下流端にて計量枵を用いて実測し、ベンチュリー管による結果の校正値とした。壁面摩擦勾配を求めるために、チャンパー上流側の2箇所と下流側の5箇所にタップをたて、ビニールチューブでマンメータと差圧計へ導き、圧力水頭を測定した。各点の位置は図に示す通りである。

矩形チャンパーは図2-2に示すように、長さ70cm、幅50cm、高さ75cmである。チャンパーサイズを可変しうるように上、下流側管路の端部をチャンパー内部に陥入させ、その先端に隔壁を取り付けて、両隔壁間隔を変えられるようにした。それ故チャンパーサイズの変化としては、長さ方向のみであり、幅は一定のままである。隔壁間隔としては、10cm、20cm、40cm、56cmの4種類とし、段差としては円筒形チャンパーと同様に、同レベルの0cm段差、5cm段差、15cm段差の3種類を用いた。又、各々のチャンパー間隔に対して、3ℓ、5ℓ、7ℓ、9ℓの4種類の流量を流し、それぞれに対する流況の特徴を調べた。

流出管での圧力の測定では、5、6番コックがチャンパー内部に入ってしまうので、直径2mmの

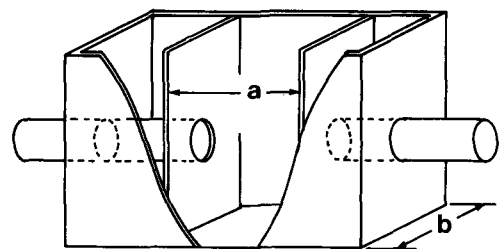


図2-2 矩形チャンパー

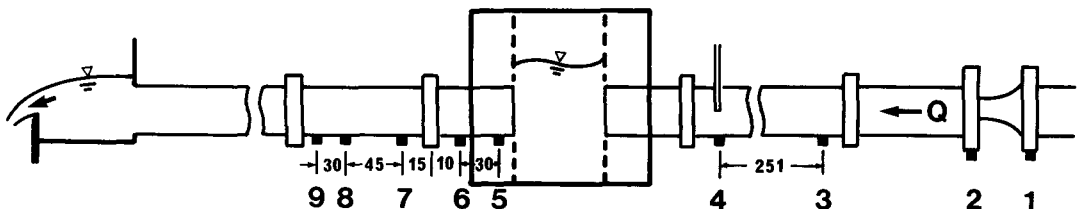


図2-1 実験用管路系

ステンレス管を管路内にはわせて取り付けである。

### 3. チャンバー内流況

チャンバー内流況として直接確認できるものは、上流側から注入する色素（トレーサー）の軌跡と、水面の動揺である。色素は圧力測定用の3番コックから直径2mmの細管を用い、管路の頂上部と中央、および管底部の3点から注入した。

写真-1は段差0、隔壁間隔10cmの場合に、流量を9ℓとした場合のものである。

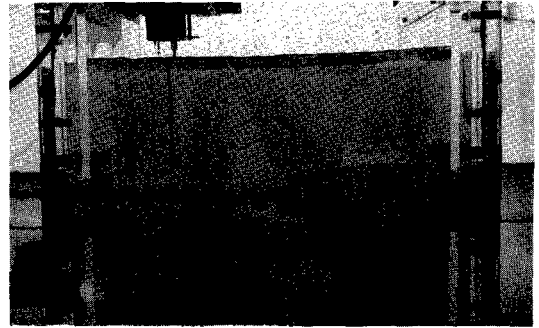
写真からわかるように、トレーサーは進むにつれて波をうつようになってくる。これは、管内の流れがチャンバーに流入した後の攪乱の発達を示すものと考えている。

流下距離が短いため、流体の拡散は小さいが、僅かに広がった部分が下流側壁面に衝たり、チャンバー上下部へ拡散していく様子が、写真からうかがえる。これによって、チャンバーが狭くても流れが次第に拡大することがわかる。流れの拡大はチャンバーの間隔が大きくなるにつれて顕著になり、下流側壁面に衝った後の上昇流は水面上に湧き上がると共に回流しながら乱れをつくるようになる。

水面上の乱れは、種々の波長を含んだ複雑な波状を呈しているが、適当なチャンバーサイズになると共振をはじめ、ある特定な振動数の波だけが卓越してくる。トレーサーも大きくゆれ、この振動がチャンバー全体の運動であることがわかる（写真-2(a)参照）。この振動は水深に大きく依存し、同じ状態でチャンバー水位を変えると、振



(a)



(b)

写真-2

動は激しくなったり、又逆に減衰して単なる水面上の乱れになったりする（写真-2(b)）。段差5cmのチャンバーでの流況を示したのが写真-3である。このケースの段差は、流入してきた流れの一部（上部）がチャンバー壁に遮られ、残りの部分が流出管へと直進していく事を想定したものであるが、トレーサーの軌跡からこれらの状況が実際に生じている様子が確認できる。この事は、段差0の場合以上に、チャンバー壁に当たる流量が増し、その結果、上昇流が激しくなり、回流や水面の乱れが強まってくることが予想される。実際、流量が増すと、上昇流と共に下降流も強まり、水面での泡がチャンバー内部まで引き込まれてくるのが写真-4からわかる。このように強い下降流の場合には、水面上での回流と相まって渦の発生が懸念されるが、このチャンバーでは横幅が一定なため、隔壁間隔を狭くしても、水平断面が細長い長方形となり、渦の発生には不適のようであった。

チャンバーサイズが広がってくると、下降流

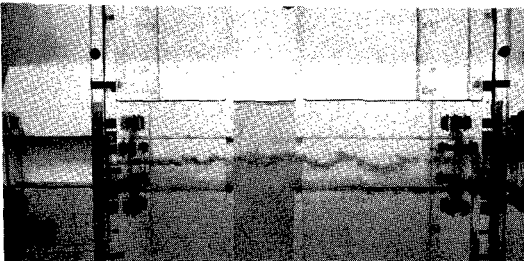
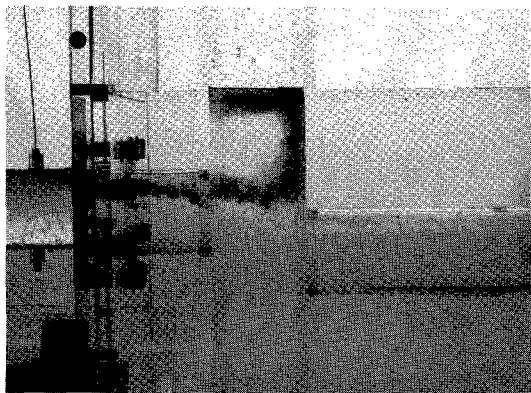


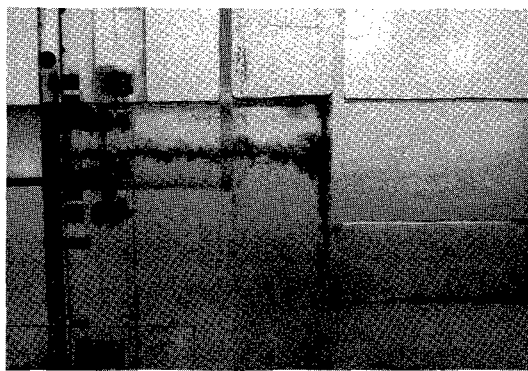
写真-1

の勢いも分散されるためか、激しい泡の引き込は見られなくなる。しかし、 $L=40\text{cm}$ 、あたりでは流量の増加に従い、上昇流によって盛り上がった

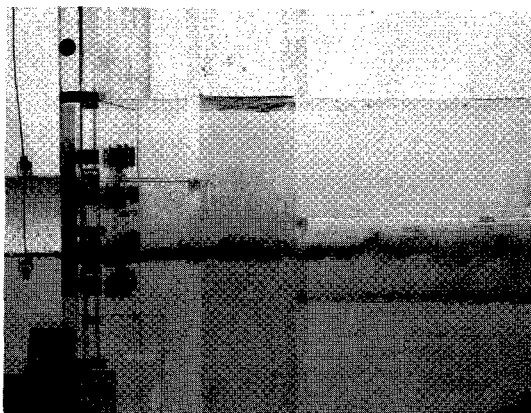
水面が落下するときの連行渦が見られる。水面振動が発生したのは $L=40\text{cm}$ 、流量 $3\text{ l}$ の場合である。トレーサーの軌跡はゆったりと脈うっており、



(a)

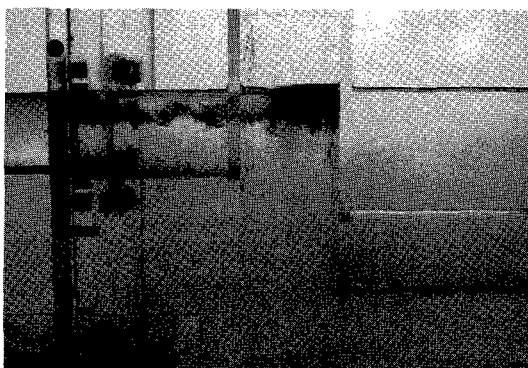


(a)



(b)

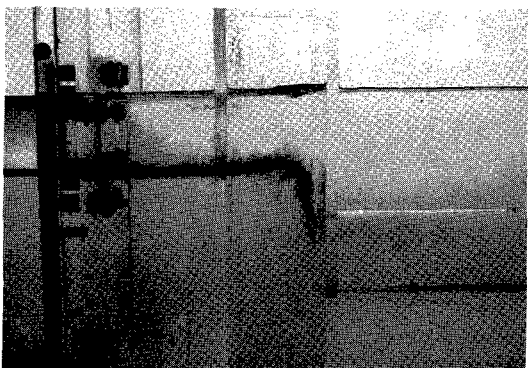
写真-3



(b)



写真-4



(c)

写真-5

それに合わせて水面が動き出す。

水面振動には必ずしも激しい乱れ（励起振動）は必要ではなく、そのサイズに合った微小振動でよいことが理解される。

写真-5は段差15cmのチャンバーを用いた場合のもので、管頂(a)、中央(b)および管底(c)からの流れが全てチャンバー下流壁に当たり、流入した運動量は直接流下して行かないことを明確に示している。又写真-6より、上昇流と下降流の激しさから水面の盛上がりや窪みも大きく、又連行泡も多くなり、チャンバー底部まで引き込まれるものがみられる。それ故、隔壁間隔が狭い場合には、下降流の強さが増すため、流出渦の可能性も考えられたが、水面の乱れが強過ぎ、渦の形にはなら

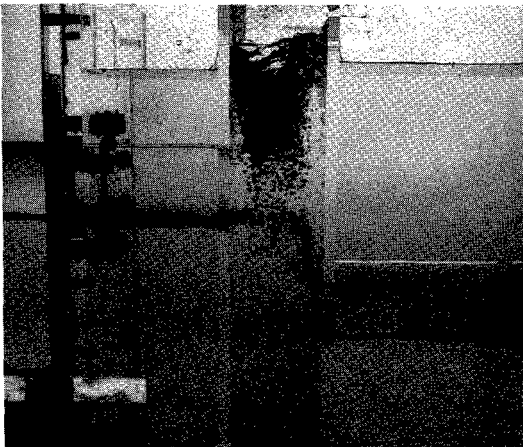
なかった。また下降流がチャンバーのどの部分を通るかというのは、円筒形チャンバーの場合と同様に興味のあるところである。実際このような幅の広い長方形チャンバーでは、下降流が特に強まる場所は特定できなかったが、時々、チャンバー上流側隅の近くで、泡が底部まで引き込まれて行くのが見うけられた。特に、写真上のトレーサーの軌跡が遮断されていないことより、チャンバー中心部を通過していないことは明白である。

この段差でのチャンバーでは、水面振動もかなり頻繁に発生すると予想されたが、実際の水面は段差の大きさによる激しい乱れが卓越し、水面振動に発展したのは1ケースのみであった。

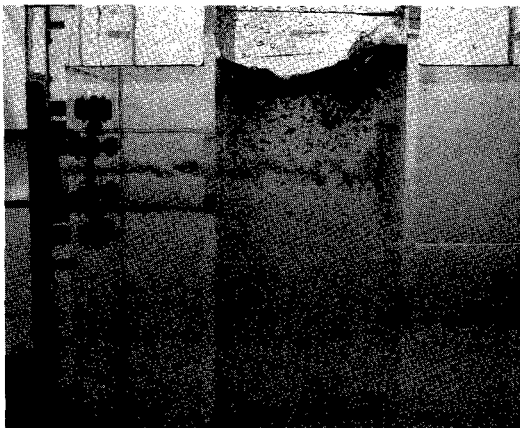
#### 4. 速度分布

チャンバー内のエネルギー損失の原因は種々考えられるが、運動量の拡散が最も重要な要因として上げられる。前報においてはこのような考えに基づき、運動量の拡散を算定するために噴流の考え方を提案した。しかし、噴流の中でも完全発達領域（fully developed region）ではなく、発達領域（development region）での噴流として扱うべきであることが明らかになった。しかし、チャンバー内の流れは、自由水面を有する有限な領域であり、複雑な回流や鉛直流が含まれるため、理想的な噴流理論の適用には限界があるが、噴流理論を用いた損失水頭の値が実測値に十分近い事は前報に示した。チャンバー内の流れの速度分布が噴流の速度分布とどのような関係にあるかを知ることが、その理論の適用は勿論、エネルギー損失の要因を決めるためにも重要な事である。

速度分布を測定したチャンバーは段差が5cmのもので、損失水頭の測定に用いた装置の一つである。計測はピトー管を用い、電氣的差圧変換器によりオシログラフに出力させた。流速の計測点も流入管口の中心を原点として鉛直下方と、水平方向に2.5cm刻みにとった（図4-1）。また、チャンバーの長さ方向に関しては、5cm、15cm、30cm、45cmの4点とし、それぞれのケースにおいて、3ℓ、6ℓ、10ℓと管内流量を変えて、管軸方向の速度



(B=10cm)



(B=20cm)

写真-6

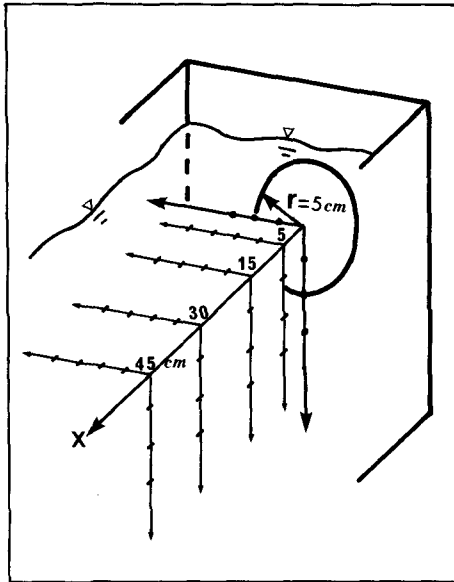


図4-1 流速測定位置

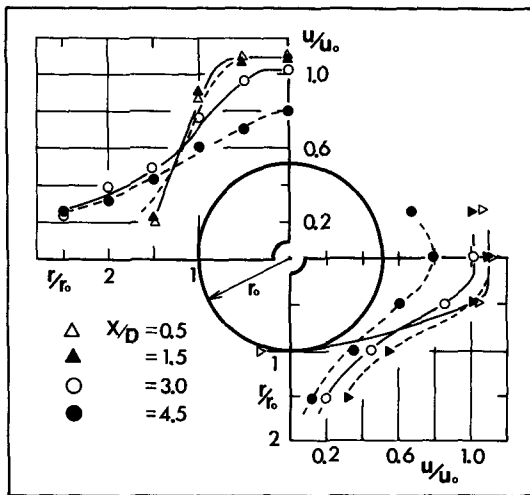


図4-2 速度分布 (Q=9.4ℓ)

分布を測定した。チャンバー内水深は約50cmあり、管頂より水かぶり高が10cmほどあるが、水流に対する水面の影響はある程度含まれるものと予想される。

図4-2は各測定点での速度を平均速度  $U_0$  を基準にして示したものであり、中央の円は管口を表わし、上部の曲線は水平方向の、又右側の曲線は鉛直方向での速度の分布図である。

グラフから解かるように中心部あたりでも

$U/U_0$  が約1.1と  $U_0$  より大きい値を示している。このことは上流管路の速度分布が十分に発達していないためか、約4m上流に流量測定用のベンチュリー管が設置されているが、その影響はいる可能性も考えられる。この分布図より、管口中心部で最大流速を有し、外側へ離れるにつれて流速が減少する様子がわかる。この減少の仕方は、管口より下流へ遠ざかるにつれて変化する。最短の5cm下流の鉛直平面内では中心から半径位まで一定の速度を有しているが、それより外側に行くにつれて急速に減少し、管から入ってきた流れが円筒状の管内流速分布のまま、未だ外側へ拡散していないことを示している。15cm~30cmの距離ではまわりの流体との接触が進み、管径の外部まで流速を有する領域が広がり、分布曲線も緩やかになるが、未だ管内流速分布の名残りを有し、最大流速を中心部に残している。45cm離れた場所では最大速度が2割程度減少し、噴流が発達領域を通過し完全領域へ入ったことを示している。前報において、発達領域の大きさは管径の6.3倍 (6.3d) と予想されたが、このチャンバーでは4倍あたりでその領域を越えていることはチャンバーの壁面や回流等が影響しているためと思われる。また、速度分布の最終値が  $0.2U_0$  あたりで漸近し、0にならないことに疑問を持つが、これはピトー管からの僅かな出力変動によるものと考えている。

水平方向と鉛直方向との速度分布の差は部分的には見られるが、平均的な意味では相違は見受けられない。また、管内流量による違いも、特別な差異は無く、チャンバー内の速度分布の形は流量には依存しないといえる。

さて、チャンバー内の流速分布は管口からの距離によって変化することがわかったが、噴流理論では適当なパラメータを用いると、これらの異なった分布が、一つの曲線として表わせる。チャンバー内の流速分布も噴流として扱えるとすれば、一つの曲線状に分布するかどうか重要な鍵となろう。発達領域の噴流の速度分布は一般に図4-3のように模式的に表わされるが、理論解が十分ではないので、流速分布式と各々の変数、 $r_1$ ,

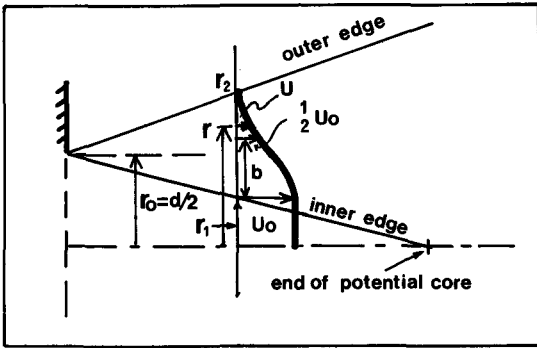
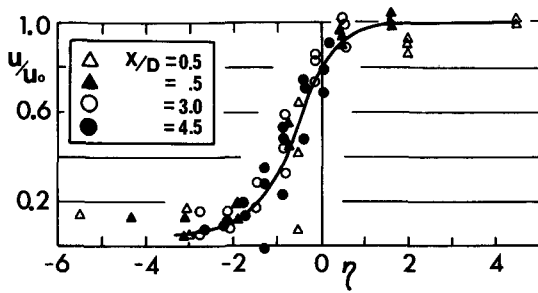
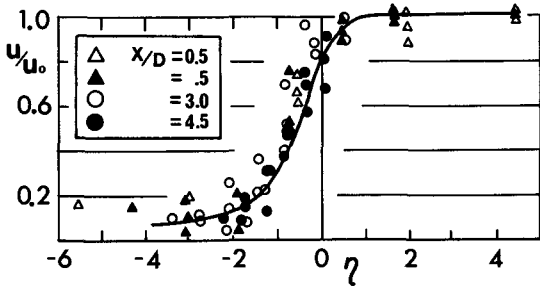


図4-3 発達領域での流速分布



(鉛直方向)



(水平方向)

図4-4 流速分布

$r_2$ ,  $b$  に関して下記のような実験式が適用されることが多い。

$$\frac{U}{U_0} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left( \frac{r - r_1}{r_2 - r_1} \right) \right\} \quad 4-1$$

$$\frac{r_1}{r_0} = 0.95 - 0.097 \frac{x}{r_0} \quad 4-2$$

$$\frac{r_2}{r_0} = 1.07 + 0.158 \frac{x}{r_0} \quad 4-3$$

$$\frac{b}{r_0} = 0.1 + 0.111 \frac{x}{r_0} \quad 4-4$$

以上の諸式を用い、横軸を  $\eta (= (r - r_1)/b)$  とし

て表わした流速分布図が図4-4である。ここでは最大流速を1と規格化してあるが、流速分布にわずかの分散はあるものの流入口からの距離には関係なく、一つの曲線上に分布していることが分かる。これは、チャンバー内の流速が、水面が湧上りや回流によって乱れていても、 $\eta$  の関数として一つの曲線で表わされるものであり、言換えれば、発達領域の噴流理論の適用が可能であることを示すものである。

### 5. チャンバーでの損失係数

チャンバーでのエネルギー損失が段差やチャンバーサイズに依存することは、他の研究者によっても指摘されているところであるが、段差との関係については円筒型チャンバーを用いた筆者らの実験によって、内部の流況とともにエネルギー損失の特徴が明らかにされてきている。そこでの損失係数は、段差が0, 0.5d, 1.5dの場合にそれぞれ、0.35, 0.78, 2.1になることが得られた。ただ、損失係数2.1の値は一般的には大分大きな値であり、マンホールでの損失に関するいくつかの実験的研究においても、0.15~0.35の範囲にあり、流量とチャンバー内水深の特別な組み合わせの場合にその値が1にまで急増するだけである。しかし、これらの結果は段差0のマンホールの実験から得られたものであり単純な比較は無理かもしれない。

図5-1は、段差が0のチャンバーの損失水頭と管内運動エネルギーとの関係である。それゆえ、他の研究者(Lindvall, Marsalek, 1984)による実験結果と、ある程度比較しうるものである。異なる点は、他の研究者の用いたチャンバーが完全にマンホールを想定しているために、チャンバー底部と接続管渠インバートが同レベルか、あるいは低いものであるが、筆者らの管路はチャンバーの底部より3.5dだけ高くなっていることである。

グラフ上のデータは、チャンバーサイズをパラメータとしたもので、実験では  $B/D = 1, 2, 4, 6$  と変化させている。ここで  $B$  はチャンバーの隔壁間隔であり、 $D$  は管径で10cmである。各チャ

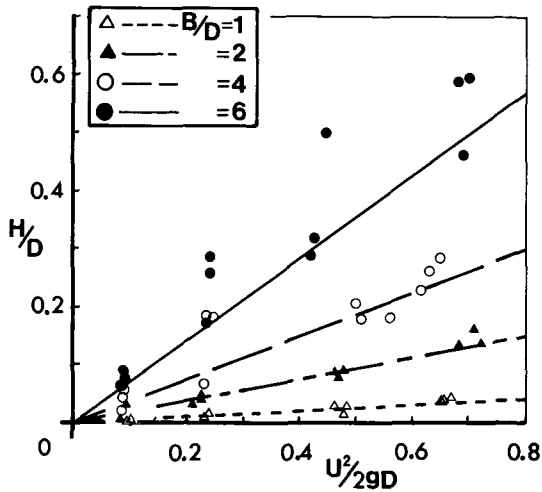


図5-1 損失水頭と運動エネルギー

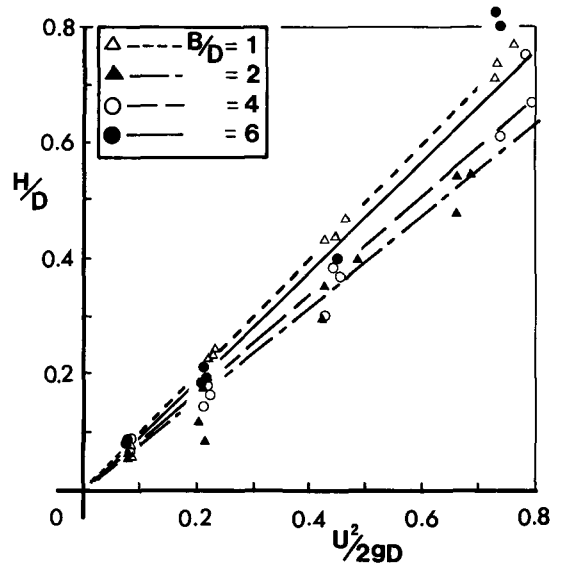


図5-2 損失水頭と運動エネルギー

ンバーサイズ  $B/D$  に対応して、データが直線状に分布しているため、この直線の傾きとして表わされる損失係数は一定の値を取ることがわかる。即ち、チャンバーのサイズが大きくなると損失係数も大きくなり、それぞれ 0.05, 0.185, 0.370, 0.701 を取る。しかし、これらのデータの中で、直線から大きく外れた点があくつか見られる。これらの点は測定値のバラツキではなく、チャンバー内の水深変化に伴う流況によるものである。即ち、一つのチャンバーサイズと流量の組み合わせにおいて、チャンバー水深が変化すると損失水頭が大きく変化するもので、同様の変化は円筒型チャンバーの場合には渦の発生を伴って生じたものである。しかし、チャンバーサイズ 40cm の場合に流量  $3 \text{ l} \sim 5 \text{ l}$  ( $v^2/2gD = 0.074 \sim 0.205$ ) あたりで、損失水頭も急増していることから水面振動が渦に対応すべき流況変動と考えられる。3章で説明したように、矩形チャンバーでも渦の発生が期待されたが、実際には定常波として発達することが確認された。波動は、ほとんど半波長であり、管軸に対して横（直角）方向に振動する場合が多かったが、チャンバーサイズによっては縦方向に振動する場合も生じた。Howarth によると、矩形チャンバー（正方形断面）は渦の発生を抑制はするが、中ぐらいな渦が発生することを報じている。しかし、筆者らのチャンバーでは、その断

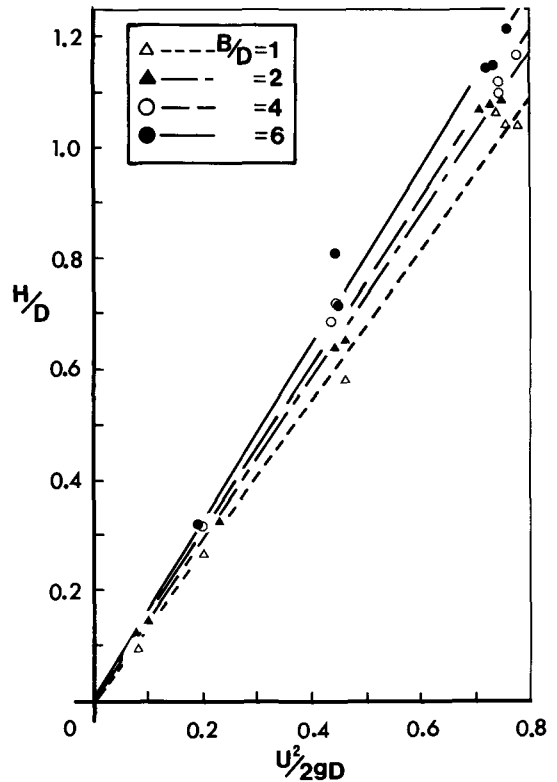


図5-3 損失水頭と運動エネルギー



面がほとんど正方形と見なせる場合でも、そのような渦は認められなかった。渦が発生しなかったのはチャンバー水深によるものか検討が必要である。

図5-2, 図5-3は段差が5cmと15cmの場合の損失水頭である。ここでも、データに多少のバラツキはあるものの直線上に分布し、損失係数 $f$ を一定と見なしうることがわかる。図から求めた損失係数の値は $B/D$ の1, 2, 4, 6に対して、段差5cmの時0.989, 0.786, 0.84, 0.94, また段差15cmの時1.36, 1.46, 1.5, 1.6と求められた。段差の影響は、それぞれ直線の勾配が急勾配になっていくことから明白であり、段差の大きさにしたがって損失係数が増加することを示している。また、チャンバーサイズが大きくなると損失係数も増加するものの、それぞれの直線群が、狭い範囲内に集まっており、チャンバーサイズの損失係数に対する影響が薄れているように見受けられる。

特に、段差5cmの場合では、チャンバーサイズが一番小さい( $B/D=1$ )の時に損失係数が最大の値をとっており、図5-1の場合のようにチャンバーサイズの増加に伴う損失係数の増加という形にはなっていない。このことは、段差が大きくなるとチャンバーサイズの効果よりも段差のもたらす影響が卓越してくる可能性を示している。さらに、注意すべき特徴は、直線群から大きくはずれる点が少ないことである。これは段差の存在によって、水流が安定していたわけではなく、逆に段差のために水面上の乱れが激しくなり、水面振動のような特別な流況ができにくく、その特性が消されたためと考えられる。実際水面上に定常波が発生したのは、段差5cm場合に数件しか確認されず、段差15cmのチャンバーでは1ケースのみであった。

図5-4は、段差0と5cmの場合のチャンバーサイズに対する損失水頭の割合(損失係数)を示したものである。実線は噴流理論を用いてエネルギー欠損を求めた結果であり、黒丸と白丸は段差に対応した実験結果をプロットしたもので、縦線でそれらの変動幅を示しているが、この変動は流

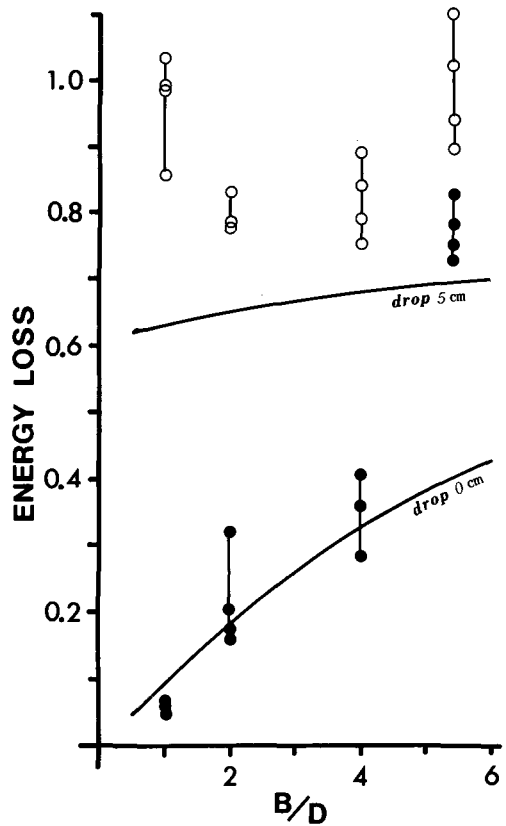


図5-4 エネルギー損失とチャンバーサイズ

量の違いによる影響も含まれている。段差が0の場合にはチャンバーサイズ $B/D=4$ あたりまで、理論曲線によくのっており、噴流理論が損失のメカニズムを説明しているものと考えられる。しかし、 $B/D=6$ になると、実験結果は急増し、理論曲線から大きく離れる。

又、段差が5cmの場合には、実測値は理論曲線と食い違い、約0.3程大きい結果をだし、不規則に見える。チャンバーサイズによる変化は小さく、この点に関しては理論曲線もフラットに近づいていることから同様の傾向を示すものといえよう。しかし、段差0でのサイズ $B/D$ が4以上と、段差が付いたチャンバーの場合には、単に噴流理論のみでは損失のメカニズムを説明しきれず、理論の限界を示すものかも知れない。

### 6. チャンバー内水面振動と過渡的状态での影響

Howarth, Lindvall 等 (1984) によると, swirling (流出渦) の発生が損失水頭の急増の原因であることを報じ, それは筆者らの結果と一致するところであるが, swirling が出現するまでの過程についてはなにも記していない。

筆者らの円筒型チャンバーの場合には, 段差 5 cm のチャンバー内水面上に, 管軸に関して両側に交互に発生する渦がこれからの巨大渦を暗示させる前兆であった。ただ, 段差 5 cm のチャンバーでは, この巨大な流出渦は出現せず, 段差 15 cm のチャンバーを待たねばならなかった。

以上のような交互に発生する渦と損失係数との関わりをみるため, 段差 5 cm の場合の損失水頭と運動エネルギーの関係を見ても, 直線的であり, データの分散も大きくはない。このことは, 交互渦が発生しても損失水頭にあまり影響を及ぼしていないことを意味し, 流出渦が生じ初めて, 損失水頭に影響が出るものと思われる。矩形チャンバーの場合, 円筒形チャンバーの流出渦に匹敵する流況として, 定常波の水面振動が出現しているが, まず, これらの水面振動が発生する実験ケースを見てみよう。

水面振動の発生したケースを列記すると, 表-1

表-1 水面振動の発生するケース

B/D \ 水深	1			2			4			6			
	低	中	高	低	中	高	低	中	高	低	中	高	
3 ℓ	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5 ℓ				0	5	5	0	0	0	0	5	5	5
7 ℓ							0				5	5	
9 ℓ											5		

0 : 段差 0 cm      5 : 段差 5 cm

のようになるが, 特に注意することは, 水面振動は段差の無いケースで一番多く発生し, 次に段差 5 cm の場合であり, 段差 15 cm のチャンバーでは水面振動が生じなかったことである。

段差の無い場合には, 全てのチャンバーサイズにおいて水面振動が見られるが, 特にチャンバーサイズ 40 cm (B/D=4) の場合には, 3 ℓ, 5 ℓ, 7 ℓ のほとんどの流量に対しても出現し, また, 最大の水面振動はサイズ B/D=4 と 6 において生じ, そのときの流量は 5 ℓ, と 7 ℓ であった。しかし, この結果を損失水頭と運動エネルギーのグラフ (図 5-1) と比較してみると, 損失水頭に明確に影響する水面振動は, 上記の最大水面振動を起こしたケースのみであり, その他は損失水頭までは影響が及んでおらず, ただ, わずかに損失水頭のデータの分散にそれを暗示させるものが含まれているだけである。

段差が 5 cm のチャンバーでは, 水面振動の発生するケースはかなり少なくなり, サイズ B/D=2 の時の流量 5 ℓ の場合と, 4 の時の 3 ℓ, および 6 の時の 3 ℓ と 5 ℓ の場合である。このうち, B/D=2 と 6 の流量 5 ℓ の時の水面振動が比較的大きなものであり, その他は, 特別激しいという程のものではない。この水面振動が損失水頭といかに関係しているかをグラフから求めても, 特別その影響を反映している部分は見出せない。即ち, 段差 5 cm のチャンバーでは, 水面振動の効果は損失水頭へは顕著に表われてこないと考えられる。

実際の水面振動は, 水面での乱れが比較的小さいほうが発生しやすく, 管からの流入が増し, チャンバーと壁との衝突で水面が激しく乱れる時は, 水面振動へは発展しえないことは前に述べた。その例として, チャンバーサイズが 10 cm の場合には, 水面振動は見られないが逆に, この段差での最も大きな損失係数を作り出している。

以上をまとめると, チャンバー内水流の激しさは, 流入してきた運動量の壁に当たる割合によるものであり, その割合がある範囲内の場合にはチャンバーサイズに従う固有振動を励起させ, そのときの損失係数の値に影響を与える。しかし, 運動量の割合がさらに増す, 段差が大きい場合や

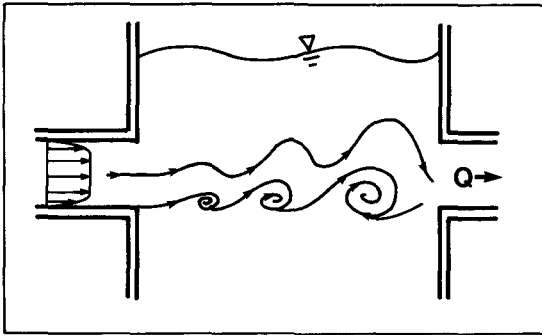


図6-1 トレーサーの軌跡

チャンバーサイズが小さい場合には、壁に当たって水流が湧上り水面に激しい乱れを作るため、特定の周期の水面振動は発達し得ず、チャンバーサイズの効果は拡散のみとなり、その結果損失係数  $f$  の値の分散が小さくなったものと思われる。

水面の乱れをトレーサーの軌跡により見てみよう。流入管路底部に沿ってチャンバー内に入ってきたトレーサーは図6-1のような軌跡を描く。これは流体が速度の異なる流体と接触し、渦層の不安定にもとづいて渦度を集中させていく過程と考えられる。この渦の集中は流れとともに半径が増していき、周りの流体もこれらの渦をなぞるような形で脈動しながら流れていく。

この結果、流入してきた流れは全体として振動することになるが、それが螺旋状を呈するのか、あるいは、ラップ状を呈するのかは明らかではない。ただ、トレーサーの動きから後者の可能性が強いようである。このように脈動化した流れがチャンバーの対壁にあたると、運動量の向きが変えられ、一部は水面へ湧上ってくる。

しかし、流れは脈動流であるためこの湧上りも脈動したものとなり、水面に周期的な盛上がりを与えることになる。チャンバー水面の乱れは、このような過程によるものと考えられ、この乱れが定常的な水面振動となるか、単なる乱れとなるかはチャンバーサイズと振動周期との関係に依存するものである。チャンバーサイズが狭く、湧上りが強いと、水面は周期的な運動とはなりえず、単なる激しい乱れにとどまるであろうし、またチャンバーの水かぶり大きいと湧上りは水面に達す

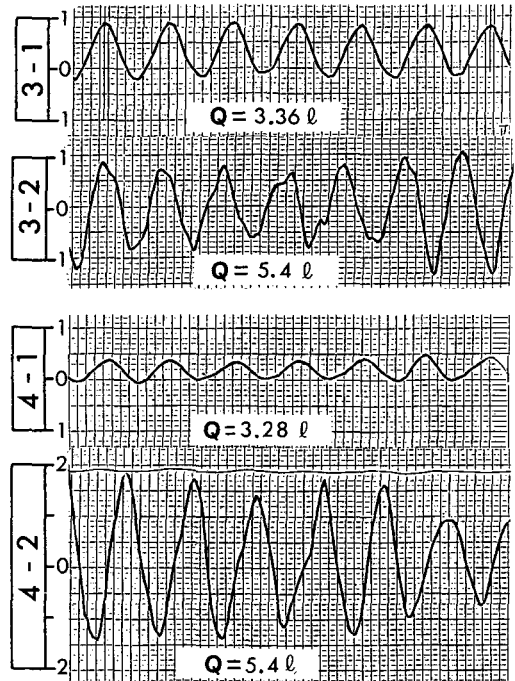


図6-2 水面振動の記録

るまゝに拡散し振動を起こすには弱すぎる結果になる。

図6-2は水位計による水面振動の記録を示したものである。図中、3-1、3-2は $B/D=4$ で流量が3.3 $l$ と5.4 $l$ の場合の振動であり、4-1、4-2は $B/D=6$ で流量が上記と同等のものである。この記録から、流量が3 $l$ の場合には $B/D$ が6になると振動は減衰するが、流量が5 $l$ においては逆に、水面振動が増幅されている。このことは、一つのチャンバーサイズの水面振動を増幅させる固有の流量、言換えればその流量に含まれる固有の脈動周期があることを示すものである。

脈動の周期に関するデータは存在しないが、水面振動がチャンバーサイズとどのような関係にあるかを示したものが表-2である。これを見ると、隔壁間隔が変化してもほとんど0.74~0.76の周期で振動しており、このチャンバーでは隔壁間隔とは別のチャンバーサイズによって水面振動が決まっていることを示している。そこで、チャンバーと同形の長方形水槽（長さ  $a$ 、幅  $b$ 、深さ  $h$ ）

表-2 水面振動の周期

ケース	2-1	2-1	3-1	3-2	3-2	4-1	4-2	4-2	4-3
隔壁間隔	20 cm	20	40	40	40	56	56	56	56
流量 $l/s$	3.17	3.2	3.36	5.4	5.4	3.3	5.4	5.4	7.1
周期	0.75	0.76	0.75	0.68	0.68	0.74	0.74	0.75	0.84

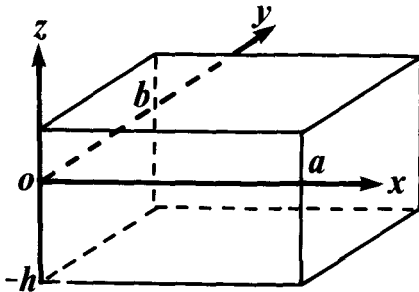


図6-3 水槽と座標系

での固有振動を求めて見よう。

図6-3のように座標系をとり、速度ポテンシャルを  $\phi$ 、水面形を  $\eta$  で表わすと、 $\phi$  に関する式と、境界条件は次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad 6-1$$

水面での境界条件

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta \quad \text{at } z=0 \quad 6-2$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{at } z=0 \quad 6-3$$

水底では

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z=-h \quad 6-4$$

壁面での境界条件

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x=0, a \quad 6-5$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{at } y=0, b \quad 6-6$$

上式を解くと、波動の周期は次式のように求められる

$$T = \frac{2\pi}{\left[ g\pi \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \times \tanh \left( \pi \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \times h \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad 6-7$$

実験結果より、振動周期が  $a$  には関係しなかったもので、無視して考えると、6-7式より次式が得られる。ここで  $n=1$  とする。

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\pi g}{b} \times \tanh \left( \frac{\pi h}{b} \right)}} \quad 6-8$$

ここで、 $b=40\text{cm}$ 、 $h=50\text{cm}$ を代入すると、振動周期  $T=0.768$ が得られる。この周期は実験から得られた  $T=0.75$ と非常に近い値であり、水面振動がチャンバーの幅  $b$  に依存していたことがわかる。又、水面が縦方向にも振動し、その時のチャンバーサイズが  $B/D=4$  の場合に多かったことは、水面振動を発生させる脈動の特性を解明する端緒を示すものと考えられる。

## 7. 結論

下水管渠接続用チャンバー内の流れの特性を調べるため矩形チャンバーを用い、流況と損失水頭について実験的に検討した。チャンバーは3種類の段差を用意し、チャンバーサイズを4通りづつ変え、圧力測定や写真撮影によって特性の変化を記録した。矩形チャンバーでの流況としては、円筒形チャンバーで見られた交互渦や大きな流出渦に変わって、水面振動が発達することがわかった。水面振動はチャンバー内水深によってその振幅の増減が顕著であるが、損失水頭への影響は振動が特に大きくなった時に見られ、微小振動の場合には極めて小さいといえる。水面の振動数はチャンバーの物理的な大きさに依存し、そこでの固有周期から求められるが、チャンバーのどのサイズ（幅、長さ、水深）によるかは噴流の乱れの特性に依存するものと考えられる。

損失水頭は、段差やチャンバーサイズが変化し

でも管内エネルギーに対して線形関係にあり、そのため損失係数は流量の変化に対して一定として扱えることを確認した。ただ、段差が0 cmの場合には、損失係数はチャンバーサイズに依存して大きく変わるが、段差が付くとその効果が卓越しサイズの影響は減少するようである。

チャンバーでのエネルギー損失のメカニズムとして噴流理論の適用を試みるため、チャンバーへ流入する時の流速分布を調べた。チャンバー内では回流や水面乱れがあるにも関わらず、鉛直方向や水平方向においても流速分布は明瞭であり、 $B/D < 4$ では発達領域での噴流理論の適用は可能である。しかし、理論から求めた損失係数は段差が0 cmの場合には、 $B/D < 4$ ではよく合致するが、 $B/D > 4$ の場合や段差が付いた場合には必ずしもよい結果は得られず、損失に関する他の要因の検討が必要である。

## 8. 謝辞

この研究を進めるに当たり、長岡技術科学大学の早川典生教授には貴重な御助言を頂き、又前年度卒業された村岡孝則君と修士2年の大橋幸男君には多大なる協力を頂いたことを記し、謝意を表

します。さらに、チャンバーの製作は本工学部機械工場の皆さんによるものであり、無理な注文にも関わらず丁寧な製作に対し御礼申し上げます。

## 文献一覧

- 安川 浩・宇井正和  
1986 「豪雨時におけるマンホール内流況と損失係数」『総合都市研究』第29号 pp 23~33
- 安川 浩・宇井正和  
1987 「管路接続用チャンバーによるエネルギー損失」『第31回水理講演会論文集』Vol. 31 pp 347~352
- J. Marsalek  
1984 "Head Losses at Sewer Junction Manholes"  
ASCE Vol. 110 No. 8
- D.A. Howarth, A. J. Saul  
1984 "Energy Loss Coefficients at Manholes"  
Proc. of the 3rd International Conference on Urban Storm Drainage
- G. Lindvall  
1984 "Head Losses at Surcharged Manholes with a Main Pipe and a 90° Lateral"  
Proc. of the 3rd International Conference on Urban Storm Drainage

## Key Words (キー・ワード)

Storm Sewer Manhole (豪雨時のマンホール), Energy Loss Coefficient (損失係数),  
Surcharged Flow (被圧流), Swirling (渦)