

### 3. 都市雨水対策システムの機能向上に関する調査

|        |       |       |
|--------|-------|-------|
| 下水道研究室 | 室長    | 森田 弘昭 |
|        | 主任研究官 | 松原 誠  |
|        | 主任研究官 | 那須 基  |
|        | 交流研究員 | 森 博昭  |

#### 1. はじめに

近年では、東海豪雨や地下室水死事故に代表される都市型水害、お台場オイルボールに端を発する合流式下水道問題の顕在化など、量・質の両面から都市雨水の問題がクローズアップされている。そこで本調査においては、これらの問題に対処するための方策として、政策支援および技術基準策定の観点から下水道施設の計画・設計手法について新たな考え方の導入を検討する。具体的には、質対策として①合流式下水道改善対策、量対策として②空気噴出を考慮した管路設計手法を調査の主たる対象とする。

①については、合流改善目標や雨天時放流水の管理指標の検討、ならびに雨天時汚濁負荷流出モデルの開発等に取り組む。新たな視点として放流先水域を考慮するとともに、公衆衛生の指標項目である大腸菌群数、糞便性大腸菌群数を検討の対象に加える。

②については、マンホール蓋の浮上・飛散を未然に防止することを目的に、管内に存在する（もしくは外部から持ち込まれる）空気を検討の対象に加え、かつ急激に雨水が流入するような非定常な現象を考慮することにより、豪雨時にも安全な管路設計手法の提案を目指す。水理模型実験と数値解析モデルによるシミュレーションを併用して検討を進める。

#### 2 合流式下水道における雨天時汚濁負荷流出モデル

##### 2. 1 研究の目的

わが国においては、全国192都市が合流式下水道を有しており、合流式下水道の整備面積は処理区域面積で全体の約1/5、処理区域内人口で全体の約1/3を占めている。しかし、合流改善対策を実施（計画）中の都市はこれらの約3割に過ぎず、残り7割の都市においては改善計画すらもっていないのが現状である。

こうした状況を踏まえ、国土交通省では、合流式下水道からの雨天時放流水の実態把握や改善目標、改善対策のあり方について検討することを目的として、平成13年6月に「合流式下水道改善対策検討委員会」を設置し、平成14年3月には委員会での審議結果を報告書としてとりまとめた。さらに、平成14年度には下水道法施行令の改正に向けた検討を開始し、また合流改善のためのモニタリング手法を取りまとめるなど、合流改善対策を強力に推進しているところである。

合流改善計画の策定には、雨天時汚濁負荷流出を精度よく予測できるシミュレーションモデルが必要であり、わが国ではいわゆる「山口・中村モデル（土研モデル）」が広く用いられてきた。しかし、これまで合流改善対策についてはBOD、COD、SSのいずれかを指標とする場合が大半であったため、山口・中村モデルにおいても栄養塩類（窒素・りん）や、委員会提言で新たな目標の1つとして位置づけられた公衆衛生項目（その指標としての大腸菌群数）については計算方法が確立されていない。また山口・中村モデルは集中型（lumped type model）であり、複雑な管網を有する排水区域への適用や、局所的な対策（オンサイト貯留浸透など）を評価することが困難である。

そこで本研究では、合流式下水道整備地区における水量水質実態調査を通じて集中型モデルである山口・

中村モデルを分布型モデル (distributed type model) に改良し、同時多地点で解析できることを実証するとともに、新たな水質項目として窒素・りん・大腸菌群数の計算方法を確立することを目的とする。なお、本研究の内容は、下水道研究室と国総研水害研究室、日本下水道事業団技術開発部との共同研究の一部である。

## 2. 2 合流式下水道整備地区における水量水質実態調査

### 2. 2. 1 調査方法

合流式下水道で整備された2都市の自然排水区(排水区A、排水区B)を調査対象とした。いずれの地域も商業地域、住宅地域を中心とした都市型の流出形態を持つと考えられる地域であった。

排水区Aは3つの幹線管渠により構成され、雨水吐きは下流端の1箇所のみである。モニタリング箇所として排水区下流端(No.A-1)および幹線の途中(No.A-2)の2箇所を設定した。排水区Bは、中央を幹線管渠が通り、途中で遮集管が2本接続している。遮集量は3Qであり、これを超える雨水を河川へ放流している。モニタリング箇所は下流部(No.B-1)と中流部(No.B-2)の2箇所を設定した。図1と表1にその概要を示す。

各モニタリング箇所の管底部にはデータロガー付き水位計を設置し、水位データを5分間隔で記録した。各モニタリング箇所において電磁流速計を用いた管内流速の実測データを基に水位流量曲線を作成し、これを用いて水位を流量に換算した。それぞれの排水区内の建物屋上にデータロガー付き雨量計を設置し、雨量データを5分間隔で記録した。

採水は晴天時、雨天時とも人力採水により行った。晴天時の採水は1ないし2時間間隔で24時間実施した。雨天時の採水は降雨初期に最短5分間隔で実施し、降雨の状況に応じて適宜間隔をのばした。採水終了後、採水されたサンプルの濁り具合や水位データ等を勘案して、分析するサンプルを選定した。水質分析項目は、晴天時、雨天時ともBOD、COD、SS、T-N、T-P、大腸菌群数(TC)である。TCの分析はデソキシコール酸塩培地法によった。調査日について表2に示す。

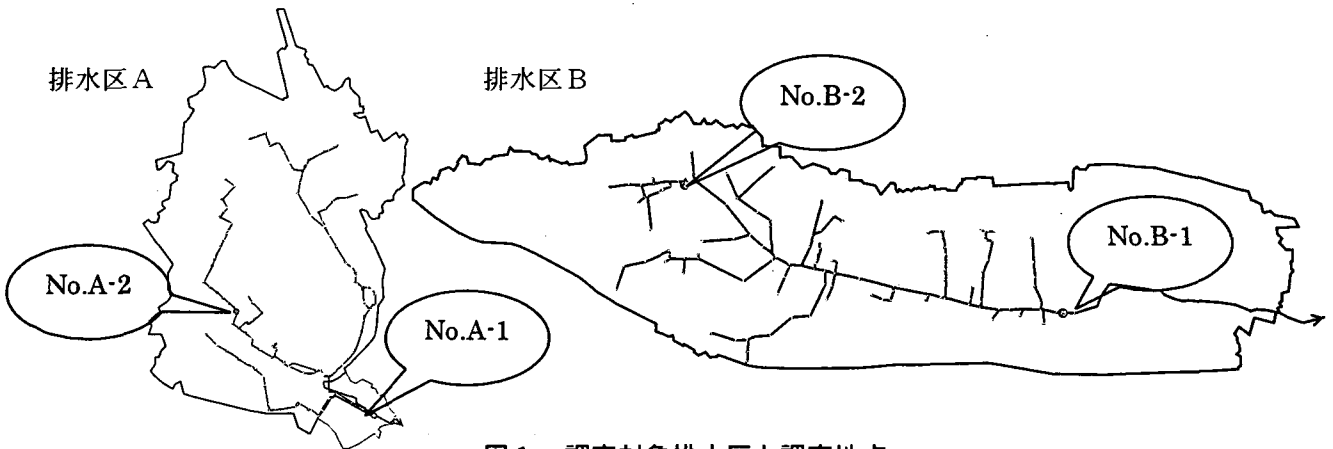


図1 調査対象排水区と調査地点

表1 調査地点の概要

| 調査地点 |     | 排水区域面積(ha) | 管径(mm)     | 勾配(%) | 人口(人)  |
|------|-----|------------|------------|-------|--------|
| 排水区A | A-1 | 170        | □2500×2000 | 0.38  | 13,000 |
|      | A-2 | 34         | φ1350      | 0.51  | 3,800  |
| 排水区B | B-1 | 454        | □3500×4900 | 0.32  | 69,000 |
|      | B-2 | 109        | □1950×2400 | 0.20  | 16,000 |

表2 調査日

|      |         | 調査開始日    |
|------|---------|----------|
| 排水区A | 晴天時 1回目 | 00/12/06 |
|      | 晴天時 2回目 | 01/01/17 |
|      | 雨天時     | 00/10/20 |
| 排水区B | 晴天時 1回目 | 01/12/11 |
|      | 晴天時 2回目 | 02/03/13 |
|      | 雨天時     | 01/12/13 |

### 2.2.2 晴天時調査結果

A-2地点、B-2地点における大腸菌群数についての晴天時調査結果を図2-1に示す。水質の経時変化は、午前中に大きなピークがあるが、夕方から深夜にかけては漸減傾向であった。この変動パターンは午前・午後2回のピークがあるBOD（図2-2）よりも、午後のピークが明瞭でないT-N（図2-3）やT-Pに近いものであった。大腸菌群数の量は全観測地点で概ね $10^4 \sim 10^5$ 個/mLの範囲での変動であった。対象となる排水面積の大きいA-1地点、B-1地点での観測結果も同様の傾向が見られた（図2-4～図2-6）。

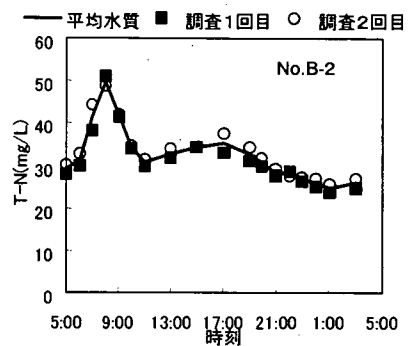
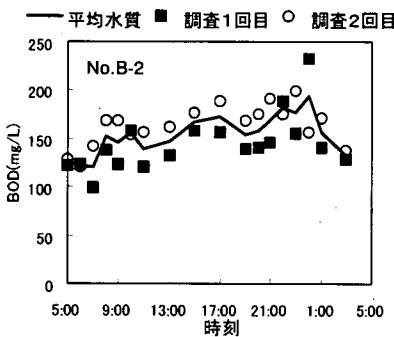
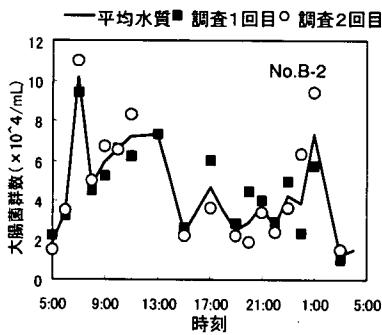
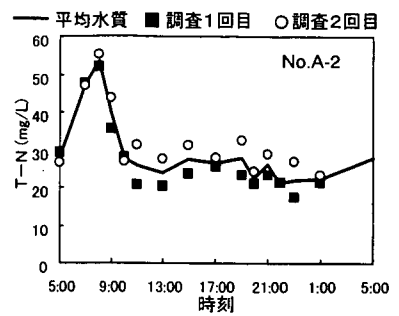
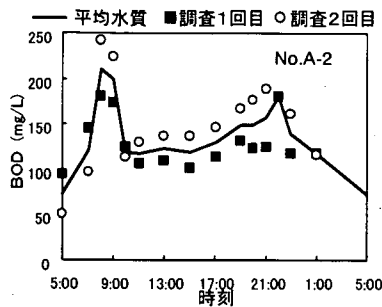
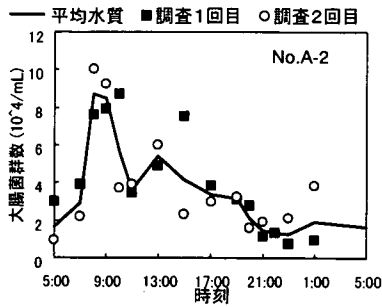


図 2-1 晴天時調査結果 (TC)

図 2-2 晴天時調査結果 (BOD)

図 2-3 晴天時調査結果 (T-N)

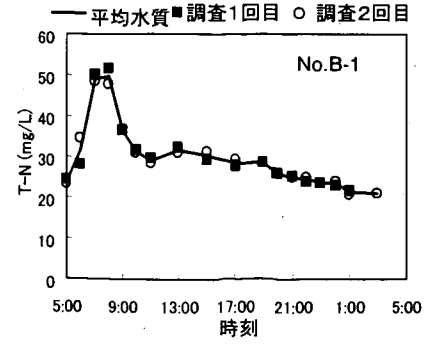
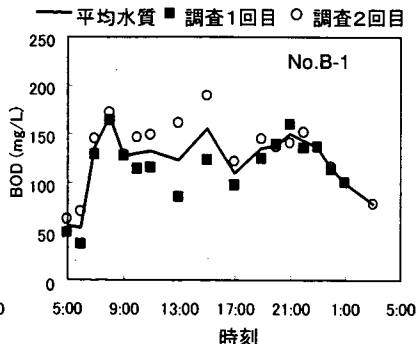
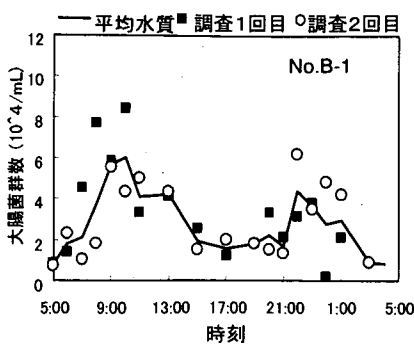
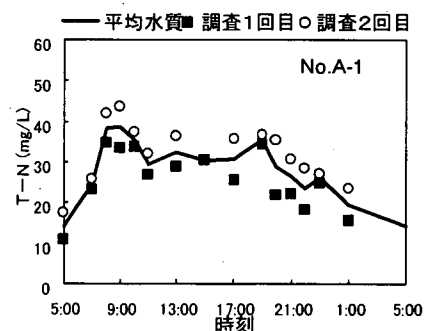
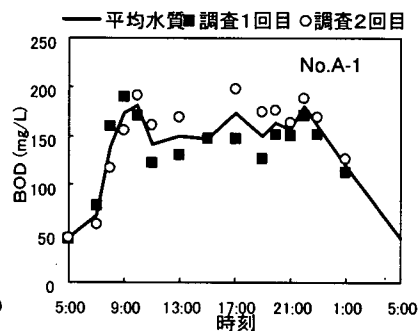
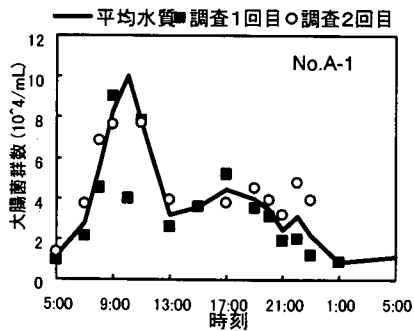


図 2-4 晴天時調査結果 (TC)

図 2-5 晴天時調査結果 (BOD)

図 2-6 晴天時調査結果 (T-N)

### 2.2.3 雨天時調査結果

大腸菌群数についての雨天時調査結果を図3に示す。他の水質項目と同様に明瞭なファーストフラッシュが観測された。雨天時負荷流出の特性を把握するため、全ての水質項目ごとに雨天時負荷流出の総量を求め、これと同じ時間における晴天時負荷流出の総量との比を計算した(表3)。大腸菌群数は雨天時において晴天時の最大で約5倍の負荷流出が観測され、この値を同じ降雨データで比較すると地表面からの負荷流出が無視できると考えられるBOD, T-N, T-Pの値より大きかった。他の観測データにおいても同様の傾向が見られ、大腸菌群数はCODやSSと同じく、地表面からの負荷流出を考慮する必要があるものと考えられる。

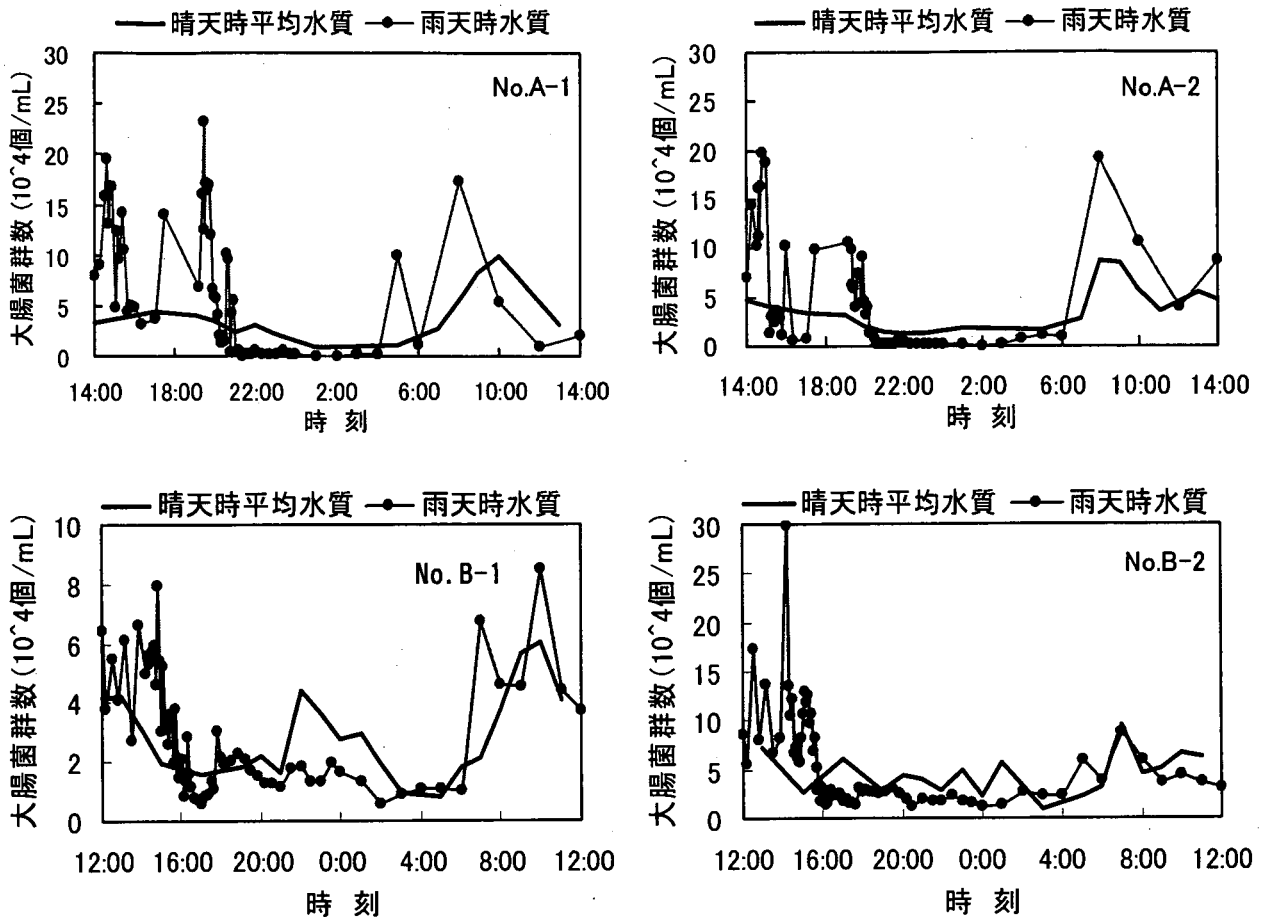


図3 実態調査結果

表3 汚濁負荷流出量の比較

| 調査地点 | 晴天時負荷流出量<br>(kg/day/haまたは $10^{12}$ 個/day/ha) |     |      |     | 雨天時負荷流出量と晴天時負荷流出量の比 (-) |      |      |      |
|------|---|-----|------|-----|-------------------------|------|------|------|
|      | A-1   | A-2 | B-1  | B-2 | A-1                     | A-2  | B-1  | B-2  |
| BOD  | 6.9   | 8.2 | 11.6 | 7.5 | 1.74                    | 1.43 | 1.03 | 1.29 |
| COD  | 3.8   | 4.5 | 6.7  | 4.7 | 1.90                    | 2.17 | 1.04 | 1.22 |
| SS   | 5.4   | 6.4 | 11.0 | 8.2 | 4.52                    | 3.89 | 1.28 | 1.42 |
| T-N  | 1.3   | 1.8 | 2.4  | 1.8 | 1.27                    | 1.23 | 0.90 | 1.32 |
| T-P  | 0.1   | 0.2 | 0.2  | 0.2 | 1.45                    | 1.30 | 0.98 | 1.34 |
| TC   | 1.7   | 2.2 | 3.7  | 1.8 | 2.23                    | 5.06 | 1.05 | 1.61 |

### 2. 3 分布型山口・中村モデルの検討

これまでの研究結果から、分布型山口・中村モデルによる再現計算では、集中型と同程度の精度が得られること、また、集中型モデルではBOD、COD、SS同様にT-P、T-Nも同様に計算できることが分かっている。ここでは、さらに①T-P、T-Nに対する分布型モデルが適用性 ②異なる流域での再現性の確認 ③大腸菌群数に対する再現性の評価 を目標として検討を行った。

#### 2. 3. 1 モデルの基本形

集中型山口・中村モデルの式を基本として、これを分布型モデルに改良した。ここでは、1) 集中型モデルでは流量が小さい場合に負荷流出が考慮されず管渠内水質がゼロになってしまうこと、2) 管渠内堆積負荷量を面的に分布させた場合、分布量(もしくは流域面積)に対応した流量により負荷流出を計算する必要があること、3) 管渠内堆積物は主として管径の小さい枝管や雨水ます等に起因し、流量の大きい幹線管渠には堆積物は少ないと考えられること、といった点を考慮し、分布型モデルの基本構成要素として、流域モデルと管路モデルの2つのモデルを組み合わせることとした(図4)。

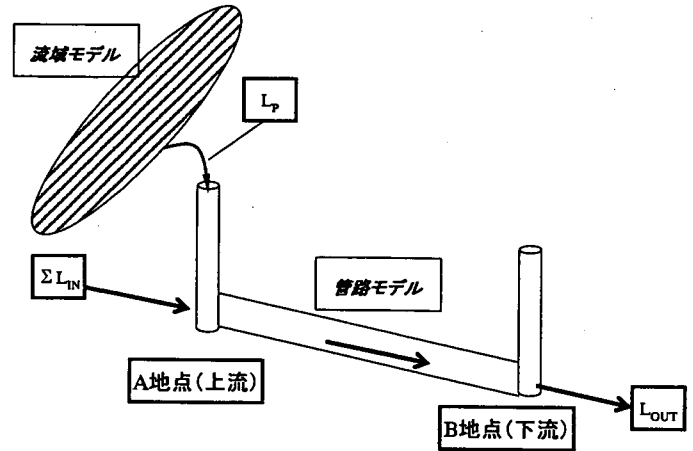


図4 分布型山口・中村モデルの基本ユニット

ここで、流域モデルは分割された小流域に対し従来の集中型山口・中村モデルを適用したものであり、管路モデルは幹線管渠における堆積物は無視できるとの仮定の下、各流域で発生した負荷量を完全混合モデルにより流下させるものである。これらのモデルは以下のように表現できる。

#### <流域モデル>

##### (運動式)

$$L_p = C \cdot P_p^m \cdot Q^n \cdot (Q - Q_c) \quad (1)$$

$$L_s = K \cdot P_s \cdot (r_e - r_c) \cdot A / 3.6 \quad (2)$$

(BOD の場合は  $m=2, n=0$ )

##### (連続式)

$$dP_p/dt = D_L + L_s - L_p \quad (3)$$

$$dP_s/dt = -K \cdot P_s \cdot (r_e - r_c) / 3600 \quad (4)$$

#### <管路モデル>

##### (運動式)

$$L_{OUT} = C_c \cdot Q_{(B)} \quad (5)$$

##### (連続式)

$$d(S \cdot C_c)/dt = \Sigma L_{IN} + L_p - L_{OUT} \quad (6)$$

各記号の定義については表4の通り。なお式(3)については集中型山口・中村モデルと式形が異なり、路面からの負荷流出が  $P_p$  に寄与している。

表4 分布型山口・中村モデルに使用する記号

|  |
|--|
| $L_p$ : 負荷流出量 (g/s)  |
| $L_s$ : 発生負荷量 (路面等) (g/s)                                      |
| $P_p$ : 堆積負荷量 (管渠内) (g)  |
| $P_s$ : 残存負荷量 (路面等) (kg/ha)                                    |
| $D_L$ : 晴天時発生負荷量 (污水) (g/s)                                    |
| $C$ : 負荷流出係数 (1/g/m <sup>3</sup> )                             |
| $K$ : 負荷流出係数 (1/mm)  |
| $Q$ : 流量 (m <sup>3</sup> /s)、 $Q_c$ : 限界流量 (m <sup>3</sup> /s) |
| $r_e$ : 有効降雨強度 (mm/hr)   |
| $r_c$ : 限界有効降雨強度 (mm/hr)                                       |
| $A$ : 負荷発生に関与する排水区域面積 (ha)                                     |
| $L_{OUT}$ : 負荷流出量 (管路モデル下流端) (g/s)                             |
| $\Sigma L_{IN}$ : 上流管渠からの負荷流入量 (g/s)                           |
| $C_c$ : 管渠内水質 (g/m <sup>3</sup> )                              |
| $S$ : 管渠内水量 (貯留量) (m <sup>3</sup> )                            |
| $Q_{(B)}$ : 管路モデル下流端流量 (m <sup>3</sup> /s)                     |

### 2. 3. 2 計算方法

分布型モデルの流量計算にはMOUSEを用いた。管網のモデル化は排水区Aで管径800mm以上、排水区Bで900mm以上とした。各小流域に対する情報(定数)の与え方は、原則として現地調査結果から求まる流域平均的な値を面積比により均等に割り振るという方法をとっている。具体的には晴天時の流量、管渠内堆積負荷量がこれにあたる。また晴天時の流量や水質の変動パターンはすべての地点において同一であると仮定している。小流域毎に情報が異なる(真の意味での分布情報が与えられている)のは、不浸透面積率と路面等の残存負荷量である。

流域モデルにおけるパラメータ $Pp$ と $C$ は、集中型モデルのキャリブレーション結果に基づき決定した。すなわち、集中型モデルで得られた $Pp$ を面積見合いで各小流域に割り振るとともに、各小流域における $C \cdot Pp^2$ の値が集中型モデルにおける $C \cdot Pp^2$ と同じになるように各小流域の $C$ を決定するというものである。なお負荷量計算の間隔は60secとした。

### 2. 4. 2 計算結果と考察

以上のような方法により、雨天時調査の再現計算を行った結果を図5に示す。ここでは、実測値との比較に加え、集中型モデルによる計算結果との比較も行っている。

計算の結果、分布型モデルにおいては、負荷量について集中型モデルと同程度の再現が可能であり、加えて全体的に集中型モデルよりも再現性が高いことが示された。また、BOD、COD、SSと同様にT-N、T-Pも再現できることが分かる。しかし、大腸菌群数については、管渠内の消長などの点で今後の課題が残っており、今後これらの点について検討、改良を加えていく必要がある。

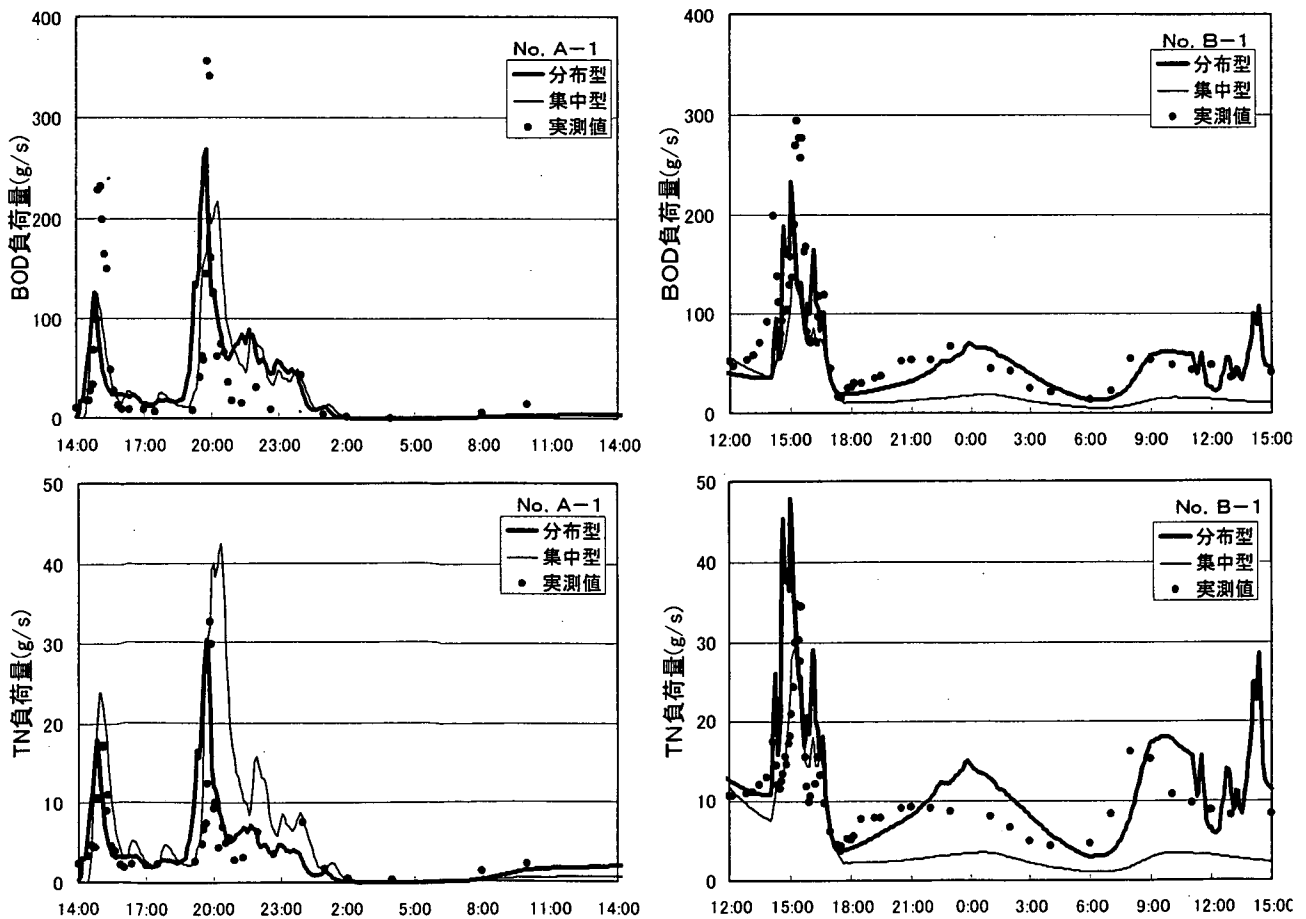


図5 分布型土研モデルによる計算結果 (BOD負荷量)

### 3 空気噴出を考慮した雨水管路設計手法

#### 3.1 研究の目的

本研究は、伏越し形状の貯留管でのマンホール蓋の浮上・飛散現象について、高落差流入により形成された空気と水の混相流の観点から水理模型実験および数値解析により検討を行い、安全性照査手法を開発するものである。ここでは、貯留管における空気混入・噴出現象に着目し、そのメカニズムの解明とマンホール蓋の浮上・飛散現象を考慮した定量的な設計手法の確立を目指すこととした。単純な伏越し形状の貯留管を模した水理模型実験により、水と空気の挙動を定量的に把握するとともに、水と空気の混合状態を適切に表現できる数値解析モデルを構築し、得られた知見を基にマンホール蓋の浮上・飛散に対する安全性照査手法について検討することとした。

なお、本研究は川崎市、横浜市、名古屋市、大阪市、福岡市、(財)下水道新技術推進機構、国土技術政策総合研究所との共同研究である。

#### 3.2 水理模型実験の概要

##### 3.2.1 水理実験模型

水理模型実験においては、単純伏越し形状を基本としたアクリル管路の実験模型を使用し、検討項目に応じて流入形式や接続形式等の変更を行うこととした。なお、縮尺効果の検討においては、同一形状で縮尺の異なる3

模型(本管径φ500mm(モデル1、M1)、250mm(モデル2、M2)、125mm(モデル3、M3))を使用した。各モデルの設定条件を表5に示す。水理実験模型の一例として、モデル1(本管径φ500mm、中間人孔なし、突入流式)の概要図を図6に示す。

表6に計測項目および計測機器について整理する。風速については、計測された風速に人孔上部の開口面積を乗じて算定することとした。なお、計測は1/10秒ピッチで行い、パソコンにて集中管理している。

突入流式とは、上流人孔流入口から直接人孔内水面もしくは壁面に水が流入する形式を指し、渦流入式とは、流入口に導入路を設置し、人孔内壁に沿って渦流を形成させて円滑に流入させる形式を指す。また、中間人孔を設置する実験では、本管径に対して3/5(モデル1で300mm)の人孔径の人孔を本管部の中央に接続して行った。

表5 モデルの設定条件

| モデル | スケール | 管径 (mm) | 管路延長 (m) | 人孔深 (m) | 人孔径 (mm) |
|-----|------|---------|----------|---------|----------|
| M1  | 1/1  | 500     | 24       | 2.50    | 750      |
| M2  | 1/2  | 250     | 12       | 1.25    | 375      |
| M3  | 1/4  | 125     | 6        | 0.625   | 187.5    |

表6 計測項目および計測機器

| 計測項目   | 計測機器                  | 設置位置                            | 備考                                |
|--------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 通水流量   | 電磁流量計                 | 上流側整流槽上流                        | φ300mm                            |
| 水位     | 圧力計                   | 本管5箇所、流入出管各1箇所、上下流人孔下部各1箇所、計9箇所 | 全圧(水圧+空気圧)で計測                     |
| 空気圧    | 圧力計(微圧計)              | 上下流人孔上部各1箇所                     | 負圧も計測可能                           |
| 風速(風量) | 微差圧計(ピトー管) 或いは 熱線式風速計 | 上下流人孔上部開口各1箇所                   | 原則として微差圧計を使用、風速3m/s以下の場合熱線式風速計を使用 |

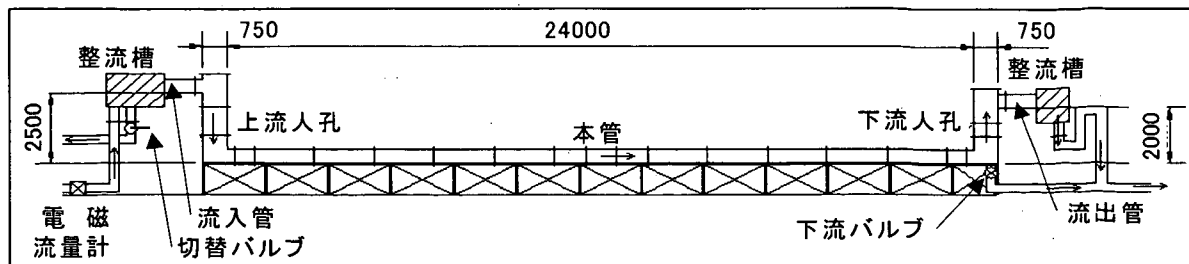


図6 水理実験模型例(モデル1、本管径φ500mm、中間人孔なし) (単位: mm)

### 3. 2. 2 水理模型実験結果

#### (1) 空気混入率の推定式

中間人孔のない場合の突入流式の伏越し形状貯留管における空気混入率 ( $\alpha = \text{空気混入量} / \text{通水流量} \times 100$ ) の変化を調べた。その結果、空気混入率は、落下高 ( $h$ )、人孔内平均流速の気泡平均浮上速度に対する比 ( $V_0/V_r$ )、水面と本管頂の距離 ( $h_s-d$ ) に影響を受け、式(1)に示す二次回帰式により推定できることが示された<sup>1)</sup>(図7)。

$$\alpha = -1.57X^2 + 15.27X + 2.19 \quad \text{--- 式(1)}$$

ここに、 $X = h \cdot (V_0/V_r) \cdot (1/(h_s-d))$ 、 $\alpha$ : 空気混入率 [%] ( $= Q_a/Q_w \times 100$ )、 $Q_a$ : 空気混入量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]、 $Q_w$ : 通水流量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]、 $h$ : 落下高 [m]、 $V_0$ : 人孔内平均流速 [m/s] ( $= Q_w/\text{人孔断面積}$ )、 $V_r$ : 気泡平均浮上速度 ( $= 0.20\text{m/s}^2$ )、 $h_s$ : 水深 [m]、 $d$ : 本管径 [m]。

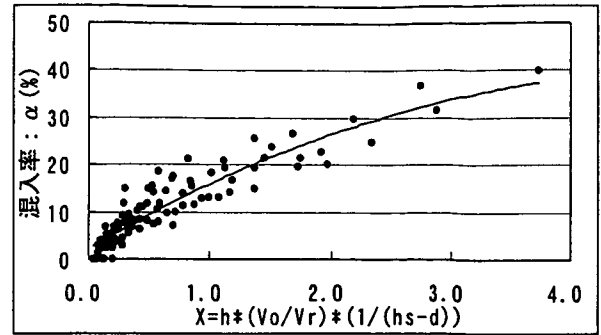


図7 混入率推定式の検討

#### (2) 流入形式の影響

中間人孔における流入形式の差異が空気の挙動に及ぼす影響を調べる実験を行った。結果の一例として、モデル2における突入流式および渦流入式の最大風量の比を図8に示す。上流側人孔から排出される風量の最大値は、突入流式と渦流入式で概ね等しいが、流入形式を変化させた中間人孔においては、流量の減少に伴い渦流入式の最大風量は突入流式の2割以下にまで減少する。

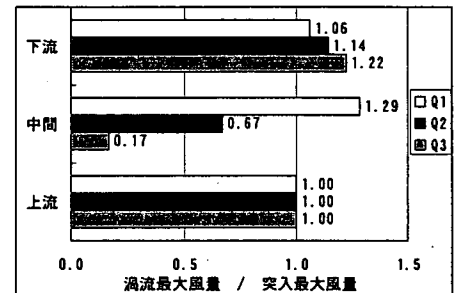


図8 流入形式の影響(M2)

これは、突入流式の場合、流量の減少に伴い、落水水脈による空気の遮蔽効果は失われるため、中間人孔からの排気が生じるが、渦流入式の場合は流量によらず遮蔽効果が持続するため、中間人孔からの排出が抑制されていると考えられる。

したがって、中間人孔からの流入量が少ない場合は渦流入式を採用することにより、中間人孔での風量抑制が期待できる。一方、下流人孔からの風量は突入流式に比べ2割程度増加するため留意が必要となる。

したがって、中間人孔からの流入量が少ない場合は渦流入式を採用することにより、中間人孔での風量抑制が期待できる。一方、下流人孔からの風量は突入流式に比べ2割程度増加するため留意が必要となる。

#### (3) 勾配変化の影響

勾配が急勾配から水平勾配へ変化する場合の空気の挙動を調べるため、中間人孔を設置しその上流の本管部分のみ、勾配を水平から10%に変えて通水実験を行った。結果の一例として、モデル2における、一様勾配(水平勾配)と勾配変化の最大風量の比を図9に示す。

勾配変化の場合は、中間人孔からの排気は極めて少なく、吸気が主体となっているが、上流人孔の最大風量は一様勾配管路に比べて1.5~2.0倍程度に増加している。これは、急勾配部の水位上昇時、管路内の空気は全て上流人孔から排出されることに起因すると考えられる。

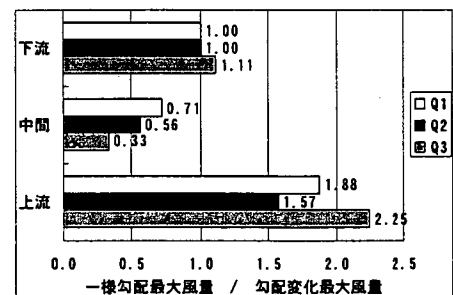


図9 勾配変化の影響(M2)

#### (4) 対策工の効果

マンホール蓋の浮上飛散防止を目的とした対策工として、表7に示す項目について検討を行った。対策工としては、蓋そのものの耐内圧力を高める手法の他、蓋の内側より作用する空気圧ピークを低減させる施設構造の採用が考えられる。前者については、その対策効果は蓋の種別により決定されるが、後者については



水理的検討が極めて困難であるため、その対策効果は水理模型実験により確認する必要がある。

本研究では、空気抜き排気管、渦流遮蔽制御施設、階段部越流制御施設の対策効果を定量的に把握するため、水理模型実験を行った。以下にその概要を示す。

### 1) 空気抜き排気管

空気抜き排気管（バイパス管）により本管の上流人孔直下流と上流人孔内上部を連絡し、混入した空気を速やかに上流人孔上部に排気させることにより、空気の連行および下流人孔での噴出を抑制する手法を検討した。結果の一例として、対策ありとなしの場合の最大風量の比を図10に示す。空気抜き排気管の設置により、本管開水路時に混入した空気が上流人孔から排気され、下流人孔からの排気量が約10%軽減されていることが確認できる。ただし、排気管径の違い（φ100mm、φ50mm）による差異は確認できなかった。

表7 蓋の浮上飛散防止を目的とした対策工

| 種別                | 基本的な考え方                |
|-------------------|------------------------|
| 圧力開放型浮上防止用鉄蓋、耐圧蓋等 | 耐内圧力の高いマンホール蓋の採用       |
| 排気口の設置            | 開口面積の拡大によりマンホール内空気圧を低減 |
| 空気抜き排気管（バイパス管）    | 排気管（バイパス管）により混入した空気を排出 |
| 渦流遮蔽制御施設          | 渦流による遮蔽を破り、混入した空気を排出   |
| 階段部越流制御施設         | 階段部から混入した空気を排出         |

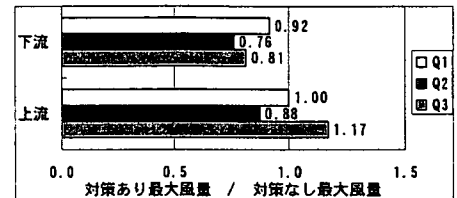


図10 空気抜き排気管（φ100）の効果

### 2) 渦流遮蔽制御施設

中間人孔での流入形式が渦流入式の場合、渦状の落下水脈がカーテン状となり本管から中間人孔への空気の流れが遮蔽され、下流人孔に排気が集まることが実験で明らかとなった。ここでは、渦流遮蔽制御施設として、中間人孔下部に突起等を設けカーテン状の水流を崩し、本管内の空気を中間人孔から排気させることにより、下流人孔における排気量のピークを低減させる手法を検討した。

結果の一例として、モデル1における、対策ありとなしの場合の最大風量の比を図11に示す。対策施設の設置により、各人孔における最大風量を低減する効果は明確ではなかったが、本管開水路時前半においては、中間人孔からの排気量が増加し、一定の効果があることが確認できた。

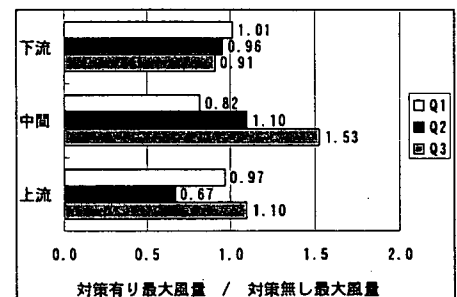


図11 遮蔽制御施設の効果

### 3) 階段部越流制御施設

実施において採用実績が多い階段式の流入人孔は、落下水脈に対する減勢効果は期待できるが、流入人孔からの空気排気は期待できないことが実験で明らかとなっている。そこで、各階段端部に越流を制御する突起を設置し、空気の通り道を確認することを検討した。

結果の一例として、モデル2における、対策ありとなしの場合の最大風量の比を図12に示す。対策施設の設置により、本管開水路時における下流人孔からの排気量のピークは20%程度軽減することが確認された。

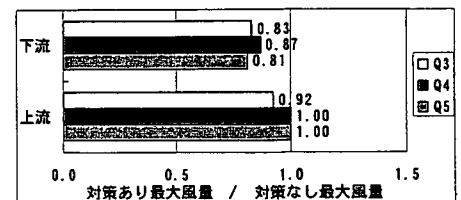


図12 階段部越流制御の効果

### 3.3 数値解析モデルの検討

現在、一般的に浸水対策用として用いられている管路非常解析モデルは、水のみを対象とした開水路流れと圧力流れの一次元数値解析モデルである。このため、本研究で対象とする貯留管施設において問題となる、高落差流入による空気混入や、再浮上、運搬、人孔での噴出等、すなわち、空気と水の混合状態につい

ては考慮することができない。そこで本研究では、水理模型実験結果より得られた知見を基に、管内における空気と水の混相流モデルを開発することとした。

### 3. 3. 1 数値解析モデルの開発

本研究では、貯留管施設を人孔部と48の管路部に区分し、各ブロック・各断面において解析要素を定義する。

水理模型実験の結果を踏まえ抽出した混相流モデルの主な解析要素を、図13に整理する。これらのうち、水密度、空気密度、流量、風量、水深、空気圧、気泡密度の7つが変数となる。

各要素の解析方法は、管路流れ方向に関する一次元解析法とし、離散化には差分法を適用した。水と空気を同時に取扱う場合、両者の密度には約1000倍の差異があることから計算が不安定になるため、基礎方程式における空間の離散化においては、圧力（水位）と流量の計算点を $\Delta x/2$ ずらすスタaggerド格子を適用し、また時間方向の離散化においては、連続式については後退差分、運動方程式については前進差分（ただし、空気圧については後退差分）の半陰解法を適用することにより、計算の安定化を図った。

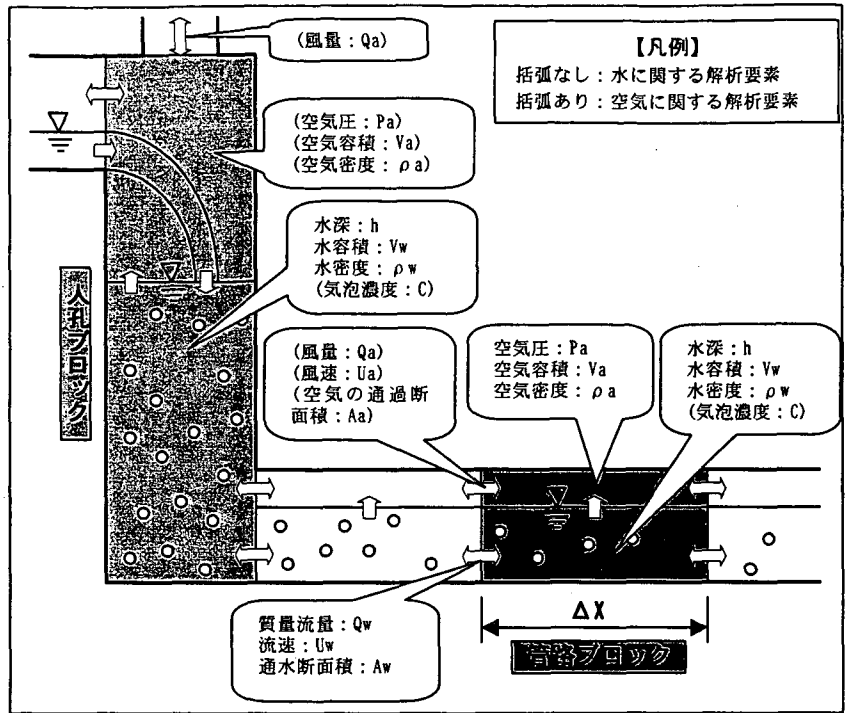


図13 数値解析モデルの主な解析要素

3. 3. 2 基礎方程式の立式

本研究で用いた基礎方程式を表8に示す。基礎方程式の係数、入力条件等のパラメータについては、既存研究における知見の活用や、水理模型実験と数値解析結果との同定検証により最適値を設定した。

また、貯留管施設における水理現象の特徴を適切に再現するため、水理模型実験から得られた知見を基に、サブモデルを構築し、基礎方程式に反映させることとした。以下に主なサブモデルの考え方を示す。

#### (1) 摩擦力

各摩擦力については Manning 則を適用し、水と壁面の摩擦力は  $\tau_{wf} = \rho_w \frac{gn^2 |U_w| U_w}{R_w^{1/3}}$ 、空気と壁面の摩擦力は  $\tau_{af} = f_{af} \rho_a \frac{|U_a| U_a}{2}$ 、水と空気の摩擦力は  $\tau_s = f_s \rho_a \frac{|U_w - U_a| (U_w - U_a)}{2}$  で表すこととした。ここに、 $n$ : 壁面の粗度係数、 $R_w$ : 水の径深、 $f_{af}$ : 空気と壁面の摩擦係数、 $f_s$ : 空気と水の摩擦係数。

#### (2) 気泡浮上量

人孔および管路の各ブロックで気泡の分布、気泡径、気泡浮上速度は一様と仮定し、人孔内の気泡浮上量を  $w_0 \cdot A_1 \cdot C_1$ 、管路内の気泡浮上量を  $w_0 \cdot B \cdot \Delta x \cdot C_j$  とした。ここに、人孔内の気泡濃度  $C_1$ 、気泡浮上速度  $w_0$ 、水面面積  $A_1$ 、管路ブロック内の気泡濃度  $C_j$ 、水面幅  $B$ 、ブロック長  $\Delta x$  (ブロック長は本管径相当に設定)。

表 8 混相流モデルの基礎方程式

| 対象 | 種別           | 基礎方程式  | 解析要素  |
|----|--------------|--|---|
| 水  | 連続式          | $\frac{\partial \rho_w A_w}{\partial t} + \frac{\partial \rho_w Q_w}{\partial x} = \rho_w q_w - w_0 \cdot B \cos \theta \cdot C + \frac{\rho_a q_e}{\Delta x}$   | $\rho_w$ : 水密度 (kg/m <sup>3</sup> )<br>$\rho_a$ : 空気密度 (kg/m <sup>3</sup> )<br>$\rho_l$ : 水だけの密度 (kg/m <sup>3</sup> )<br>$Q_w$ : 流量 (m <sup>3</sup> /s)<br>$Q_a$ : 風量 (m <sup>3</sup> /s)<br>$h$ : 水深 (m)<br>$P_a$ : 空気圧 (Pa)<br>$C$ : 気泡密度 (kg/m <sup>2</sup> )<br>$V_a$ : 空気容積 (m <sup>3</sup> )<br>$U_a$ : 風速 (m/s)<br>$A_a$ : 空気の通過断面積 (m <sup>2</sup> )<br>$V_w$ : 水容積 (m <sup>3</sup> )<br>$U_w$ : 流速 (m/s)<br>$A_w$ : 水の通過断面積 (m <sup>2</sup> )<br>$B$ : 水面幅 (m)<br>$S_w$ : 水の潤辺長 (m)<br>$S_a$ : 空気の潤辺長 (m)<br>$\tau_{wf}$ : 水と壁面の摩擦力 (kg・m/s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )<br>$\tau_s$ : 水と空気の界面摩擦力 (kg・m/s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )<br>$\tau_{af}$ : 空気と壁面の摩擦力 (kg・m/s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ) |
|    | 運動量方程式       | $\frac{\partial \rho_w Q_w}{\partial t} + \frac{\partial \rho_w U_w Q_w}{\partial x} = -g A_w \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \rho_w \left( h \cos \theta + Z + \frac{P_a}{\rho_w g} \right) \right\} - S_w \tau_{wf} - B \tau_s - f_{w1} \rho_w \frac{ U_w  Q_w}{2 \Delta x}$ |   |
| 空気 | 連続式          | $\frac{\partial \rho_a A_a}{\partial t} + \frac{\partial \rho_a Q_a}{\partial x} = \rho_a q_a + w_0 \cdot B \cos \theta \cdot C - \frac{\rho_a q_e}{\Delta x}$   | $\rho_w$ : 水密度 (kg/m <sup>3</sup> )<br>$\rho_a$ : 空気密度 (kg/m <sup>3</sup> )<br>$\rho_l$ : 水だけの密度 (kg/m <sup>3</sup> )<br>$Q_w$ : 流量 (m <sup>3</sup> /s)<br>$Q_a$ : 風量 (m <sup>3</sup> /s)<br>$h$ : 水深 (m)<br>$P_a$ : 空気圧 (Pa)<br>$C$ : 気泡密度 (kg/m <sup>2</sup> )<br>$V_a$ : 空気容積 (m <sup>3</sup> )<br>$U_a$ : 風速 (m/s)<br>$A_a$ : 空気の通過断面積 (m <sup>2</sup> )<br>$V_w$ : 水容積 (m <sup>3</sup> )<br>$U_w$ : 流速 (m/s)<br>$A_w$ : 水の通過断面積 (m <sup>2</sup> )<br>$B$ : 水面幅 (m)<br>$S_w$ : 水の潤辺長 (m)<br>$S_a$ : 空気の潤辺長 (m)<br>$\tau_{wf}$ : 水と壁面の摩擦力 (kg・m/s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )<br>$\tau_s$ : 水と空気の界面摩擦力 (kg・m/s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )<br>$\tau_{af}$ : 空気と壁面の摩擦力 (kg・m/s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ) |
|    | 運動量方程式       | $\frac{\partial \rho_a Q_a}{\partial t} + \frac{\partial \rho_a U_a Q_a}{\partial x} = -A_a \frac{\partial P_a}{\partial x} - S_a \tau_{af} + B \tau_s - f_{ap} \frac{\rho_a  U_a  Q_a}{2 \Delta x}$   |   |
|    | 状態方程式        | $P_a = P_0 \left( \frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^\gamma$  |   |
| 気泡 | 拡散方程式        | $\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial U_w C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{w_0 B \cos \theta}{A_w} C + \frac{\rho_a q_e}{\Delta x \cdot A_w}$  | $\rho_w$ : 水密度 (kg/m <sup>3</sup> )<br>$\rho_a$ : 空気密度 (kg/m <sup>3</sup> )<br>$\rho_l$ : 水だけの密度 (kg/m <sup>3</sup> )<br>$Q_w$ : 流量 (m <sup>3</sup> /s)<br>$Q_a$ : 風量 (m <sup>3</sup> /s)<br>$h$ : 水深 (m)<br>$P_a$ : 空気圧 (Pa)<br>$C$ : 気泡密度 (kg/m <sup>2</sup> )<br>$V_a$ : 空気容積 (m <sup>3</sup> )<br>$U_a$ : 風速 (m/s)<br>$A_a$ : 空気の通過断面積 (m <sup>2</sup> )<br>$V_w$ : 水容積 (m <sup>3</sup> )<br>$U_w$ : 流速 (m/s)<br>$A_w$ : 水の通過断面積 (m <sup>2</sup> )<br>$B$ : 水面幅 (m)<br>$S_w$ : 水の潤辺長 (m)<br>$S_a$ : 空気の潤辺長 (m)<br>$\tau_{wf}$ : 水と壁面の摩擦力 (kg・m/s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )<br>$\tau_s$ : 水と空気の界面摩擦力 (kg・m/s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )<br>$\tau_{af}$ : 空気と壁面の摩擦力 (kg・m/s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ) |
|    | 水の密度と気泡濃度の関係 | $\rho_w = \left( 1 - \frac{\rho_l}{\rho_a} \right) \cdot C + \rho_l$   |   |

【パラメータ】  
 $q_w$ : 通水流量、 $w_0$ : 気泡上浮速度、 $\theta$ : 管の勾配、 $q_e$ : 落水による空気連行量、 $g$ : 重力加速度、 $Z$ : 管底高、 $f_{w1}$ : 水の局所損失係数、 $q_a$ : 空気流入量、 $f_{ap}$ : 空気の局所損失係数、 $P_0$ : 標準状態での空気圧 (15℃、1 気圧)、 $\rho_0$ : 標準状態での空気密度 (15℃、1 気圧)、 $\gamma$ : 空気の比熱比 (=1.4)、 $K$ : 気泡拡散係数、 $x$ : 流れ方向の距離、 $t$ : 時間

### (3) 空気連行量

上流人孔における落水による空気連行量 ( $q_e$ ) を水理模型実験により直接計測することは極めて困難であるため、数値計算上不明なパラメータとなる。そこで、水理実験により得られた空気混入量  $q_m$  の実験式 (式 (1)) を用いて  $q_e$  を表現することを検討した。空気混入量 ( $q_m$ ) は、落水による連行量 ( $q_e$ ) から、人孔内での気泡の浮上量 ( $w_0 \cdot A_l \cdot C_l$ ) を控除した量、すなわち、 $\rho_{a0} q_m = \rho_{a1} q_e - w_0 \cdot A_l \cdot C_l$  で表現されると考えられる。また、人孔部から本管部への気泡の移流は  $q_w \cdot C_l = \rho_{a0} q_m$  であると仮定すると、 $\rho_{a1} q_e = (1 + w_0 A_l / q_w) \rho_{a0} q_m$  で表すことができる。なお、人孔内の気泡濃度は完全混合、また管路内の空気は上流へ逆流しないと仮定している。ここに、 $\rho_{a0}$ : 大気密度、 $\rho_{a1}$ : 人孔内空気密度、 $q_w$ : 通水流量。

### (4) 人孔上部からの空気排出量

人孔上部からの空気排出量は非定常状態におけるベルヌーイ式を用い、次式で計算することとした。なお、次式において定常状態 ( $\partial W_a / \partial t = 0$ ) を考えた場合、渡辺らの式<sup>3)</sup>に一致する。ここに、 $W_a$ : 開口部の風速。

$$\text{流出時: } \frac{\partial W_a}{\partial t} = -\frac{1}{\Delta z} \left\{ \left( \frac{W_a^2}{2} + \frac{\gamma P_0}{\gamma - 1 \rho_0} \right) - \frac{\gamma P_a}{\gamma - 1 \rho_a} \right\} \quad \text{流入時: } \frac{\partial W_a}{\partial t} = -\frac{1}{\Delta z} \left\{ \frac{\gamma P_0}{\gamma - 1 \rho_0} - \left( \frac{W_a^2}{2} + \frac{\gamma P_a}{\gamma - 1 \rho_a} \right) \right\}$$

### 3. 3. 3 同定検証の結果と考察

数値解析モデルによる計算結果と水理模型実験結果との比較により、数値解析モデルの精度、妥当性を検証した。数値解析モデルおよび水理模型実験による波形 (空気圧の経時変化) の一例を図 14 に示す。非定常

状態となる期間では、波形を完全に一致させることは困難であった。次に、ピーク空気圧について照査したところ、モデル1~3についてそれぞれ大小2通りの流量で同定検証を行った結果、両者の差(=|実験値-(計算値)|÷(実験値)×100)は、大きい流量(モデル1で150L/s相当)では9%~66%、小さい流量(モデル1で100L/s相当)では2%~209%となった。いずれもバラツキが大きい、ピーク空気圧がより大きくなると考えられる大きい流量の方が精度は比較的良好であると思われる。

現時点での数値解析モデルはまだ十分な精度を有しているとは言えず、今後精度向上に向けたモデルの改良を進める必要がある。また、空気の噴出を伴う極めて複雑な現象を取り扱っていることから、水理模型実験での計測値のばらつき(再現性)を把握し、同定検証の評価基準を検討することも今後の課題である。

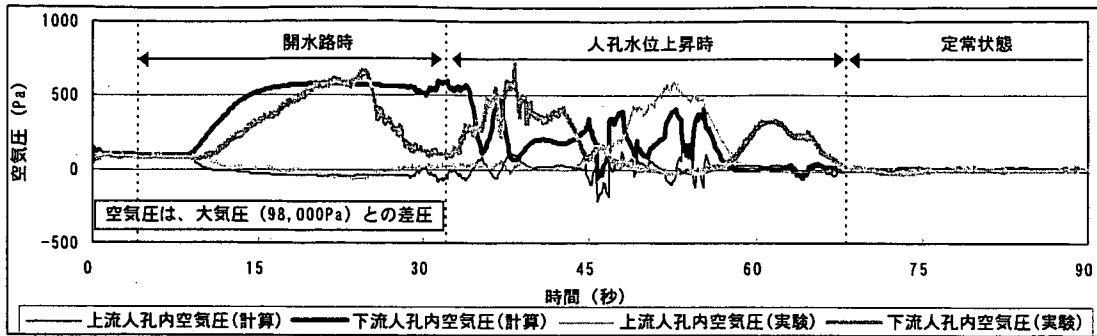


図 14 同定検証結果例(空気圧の経時変化、モデル1-Q1)

#### 4. まとめ

##### (1) 合流式下水道における雨天時汚濁負荷流出モデルについて

- 1) 合流式管きょ内における晴天時の大腸菌群数について調査を行った。午前中に大きなピークがあるが、夕方から深夜にかけては漸減傾向であり、概ね  $10^4 \sim 10^5$  個/mL の範囲での変動であった。
- 2) 分布型山口・中村モデルについて検討し、流域モデルと管路モデルの2つを組み合わせたモデルを検討した。シミュレーションを行った結果、負荷量について集中型モデルと同程度の再現が可能であり、加えて全体的に再現性が高いことが示された。また、栄養塩類についても集中型と同等程度の再現が可能であった。一方、大腸菌群数の再現については、パラメータの設定方法等の検討を行う必要がある。

##### (2) 空気噴出を考慮した雨水管路設計手法について

- 1) 水理模型実験により得られた知見を基に、伏越し形状の貯留管における水と空気の混相流現象を表現できる数値解析モデルを構築した。
- 2) 構築した数値解析モデルの精度は十分ではなく、今後は精度向上に向けた改良及び流入形式・接続形式の差異、中間人孔の有無を考慮したモデルへの改良により、より適用範囲の広いモデルとする必要がある。
- 3) 数値解析モデルにより、予め種々の条件でのピーク空気圧を計算し、それらをグラフ化した簡易判定図表として整理することができれば、マンホール蓋の浮上・飛散に対する安全性を簡易に判定できる。

#### 【参考文献】

- 1) 森博昭、那須基、森田弘昭：伏越し形状の貯留管における空気混入現象、第40回下水道研究発表会講演集、pp.322、2003
- 2) 建設省土木研究所河川部都市河川研究室：土木研究所資料、首都圏外郭放水路の流入立坑に関する水理模型実験、ISSN-0386-5878、第3243号、pp.84、平成6年2月
- 3) 渡辺政広、神田徹、岡田将人、神吉和夫：マンホール部に空気塊を封入する下水道管渠網の圧力流れ、水工学論文集、第44巻、pp.551-556、2000