

5. 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
交流研究員 尾崎 平

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、合流式下水道で整備されたエリア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「基本的な考え方」としてとりまとめた。平成 14 年度からは、この委員会提言に基づいて合流改善対策が強力に推進されることとなる。

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「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、土研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。また土研モデルは集中型 (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土研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自然排水区を調査対象とした。この排水区では既に晴天時3回、雨天時3回の調査を実施しているが、今回新たに晴天時2回、雨天時1回の調査を追加実施した。

対象排水区は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。土地利用は上流側が住宅・文教地区、下流側は商業地区が中心である。モニタリング箇所として排水区下流端(No.1)および幹線の途中(No.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(CTIS, C52F)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を行い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。モニタリング箇所 No.2 の近傍の建物屋上にデータロガー付き雨量計(ISCO, 675)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。調査日の降雨等に関する情報について表2に示す。

2. 2. 2 晴天時調査結果

大腸菌群数についての晴天時調査結果を図2に示す。2回の調査結果のばらつきは他の水質項目よりも大きかった。平均水質の経時変化は、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・午後に2回のピークがあるBOD(図3)よりも、午後のピークが明瞭でないT-N(図4)やT-Pに近いものであった。2地点とも概ね $10^4 \sim 10^5$ 個/mLの範囲での変動であった。

平均水質の最大値と最小値の比は、BODで3~4程度、T-N, T-Pで2~3程度であるのに対し、大腸菌群数では6~10程度であり、水質の日間変動が他の水質項目よりも大きかった。晴天時の単位面積当たり汚濁負荷流出量および単位面積当たり流出水量をまとめると表3、表4のようになる。

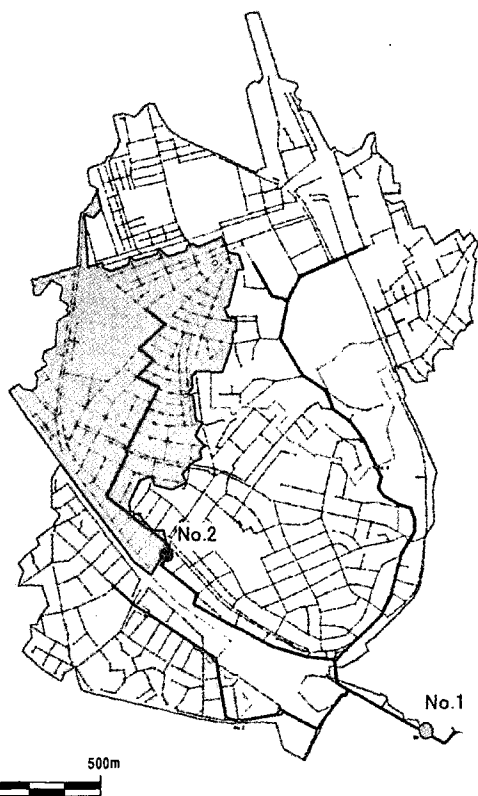


図1 調査対象排水区と調査地点

表1 調査地点の概要

調査地点	排水区域面積 (ha)	管径 (mm)	管勾配 (%)	人口 (人)
No.1	171.1	□2500×2000	3.8	13,000
No.2	33.5	φ1350	5.1	3,800

表2 調査日の降雨等に関する情報

	調査開始日	先行晴天日数 (日)	総降雨量 (mm)	水温 (°C)
晴天時1回目	00/12/06	5	—	15~17
晴天時2回目	01/01/17	7	—	11~16
雨天時	00/10/20	5	46.5	17~23

雨天時調査：降雨継続時間：11hr
最大5分間雨量：1.8mm/5min

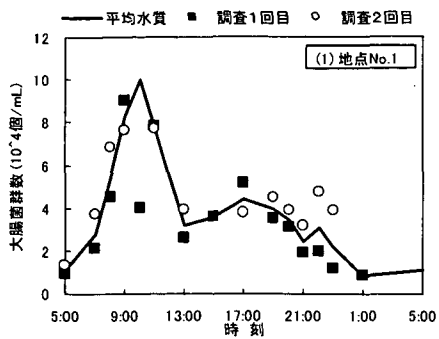


図2 晴天時調査結果 (TC)

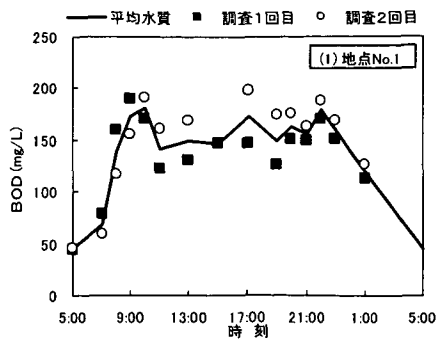


図3 晴天時調査結果 (BOD)

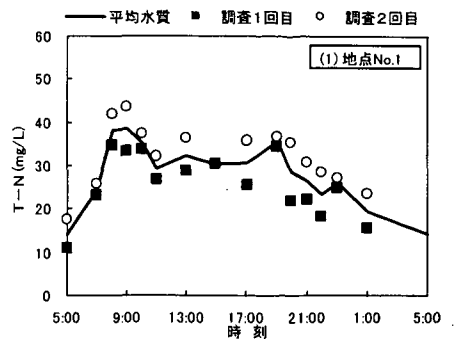


図4 晴天時調査結果 (T-N)

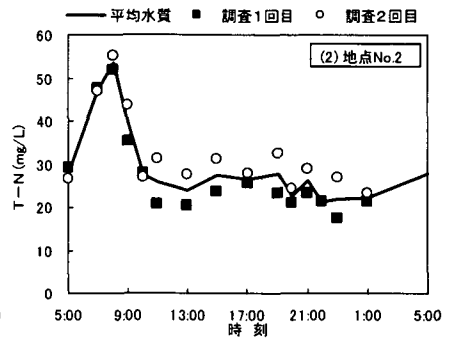
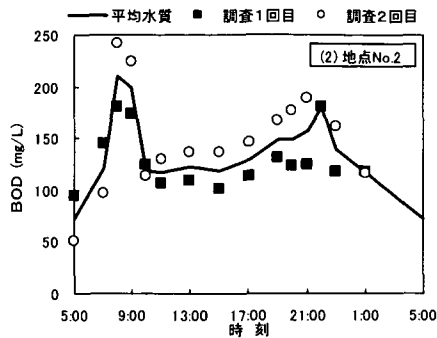
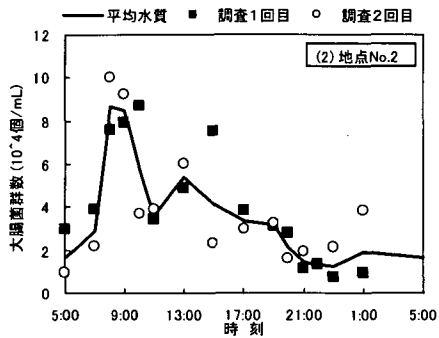


表3 汚濁負荷流出量の比較

調査地点	晴天時負荷流出量 (kg/day/ha) または (10 ¹² 個/day/ha)		雨天時負荷流出量 晴天時負荷流出量 (-)	
	No.1	No.2	No.1	No.2
BOD	11.7	9.41	1.24	2.48
COD	6.65	5.22	1.36	5.35
SS	9.95	8.53	3.30	9.64
T-N	2.19	2.08	0.92	2.05
T-P	0.24	0.21	1.35	2.50
TC	2.5	2.4	3.44	4.05

表4 流出水量の比較

晴天時汚水量 (m ³ /day/ha)		雨天時流出水量 晴天時流出水量 (-)	
No.1	No.2	No.1	No.2
62.4	62.9	5.92	8.84

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5に示す。他と同様に明瞭なファーストフラッシュが観測された。ファーストフラッシュ時(1回目)の雨天時水質を同じ時刻の晴天時水質と比較すると約5倍であった。この値はBOD(図6)とほぼ同等であり、SSよりは小さくT-N(図7)よりは大きかった。

大腸菌群数のファーストフラッシュのピークは他の項目と比べ20~30分程度早く現れる傾向が見られた。ピーク後は流量の増大とともに希釈され、流量のピーク付近では3,000個/mLを下回った。その後、6:00以降にはほぼ晴天時の水質まで回復したが、この時点で他の水質項目は晴天時レベルまで回復していなかった。

14:00から4:00までのデータにより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)。大腸菌群は雨天時において晴天時の約4倍の負荷流出があり、この値は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。よって大腸菌群数は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と考えられる。

図8に地点No.1における流量と大腸菌群負荷量との関係を示す。図は時計回りの履歴曲線(ループ)を描き、BODなどと同様に流量の増加・減少部において負荷量は流量の1乗に比例した。しかし、ループの大き

さが BOD と比べ大きく、またファーストフラッシュが早く生じることもあわせて考えると、これらは負荷流出に及ぼす管内堆積物の影響が BOD とは異なっていることを示すものと考えられる。すなわち、大腸菌群の場合は堆積物の表層のみが負荷流出に寄与し、下層部分の寄与は小さいことが推測される。

大腸菌群数と他の水質項目との相関はいずれも低かった。図 9 に BOD と大腸菌群数の関係を示す。ファーストフラッシュの時間的なずれを反映して、両者の関係は水質ピーク付近の領域とそれ以外の領域で傾向が異なっていた。

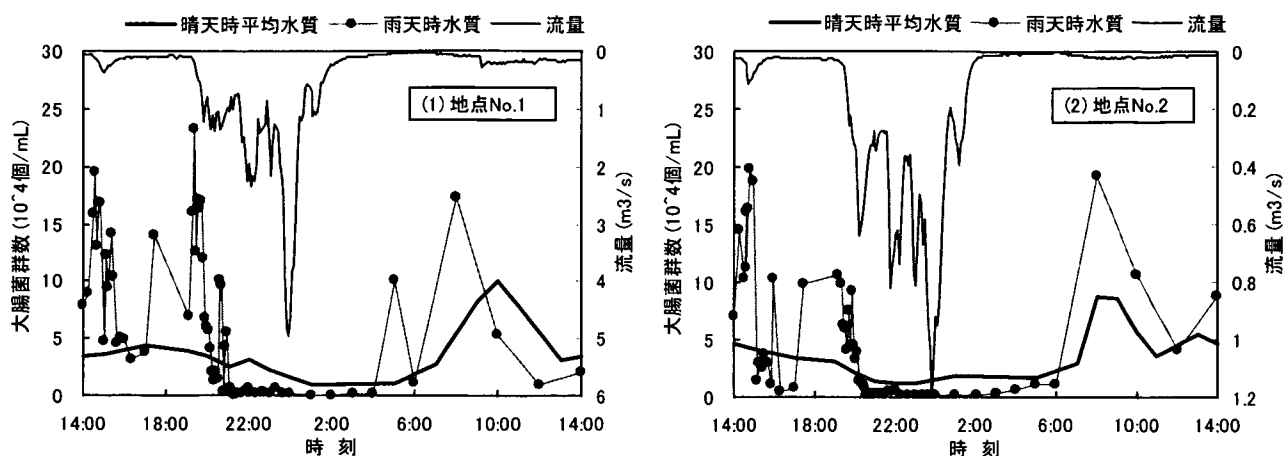


図 5 雨天時水質と流量 (大腸菌群数)

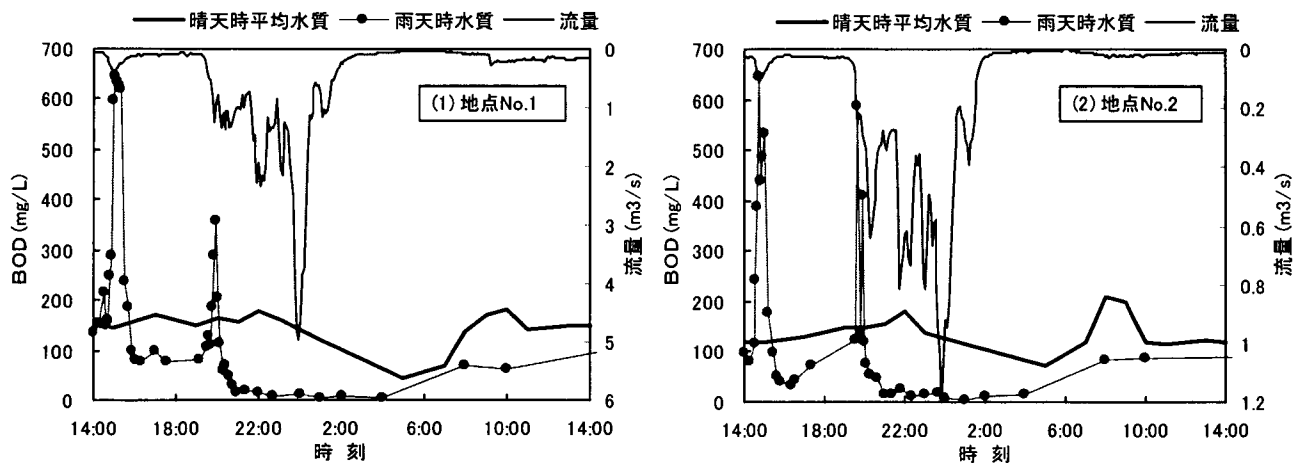


図 6 雨天時水質と流量 (BOD)

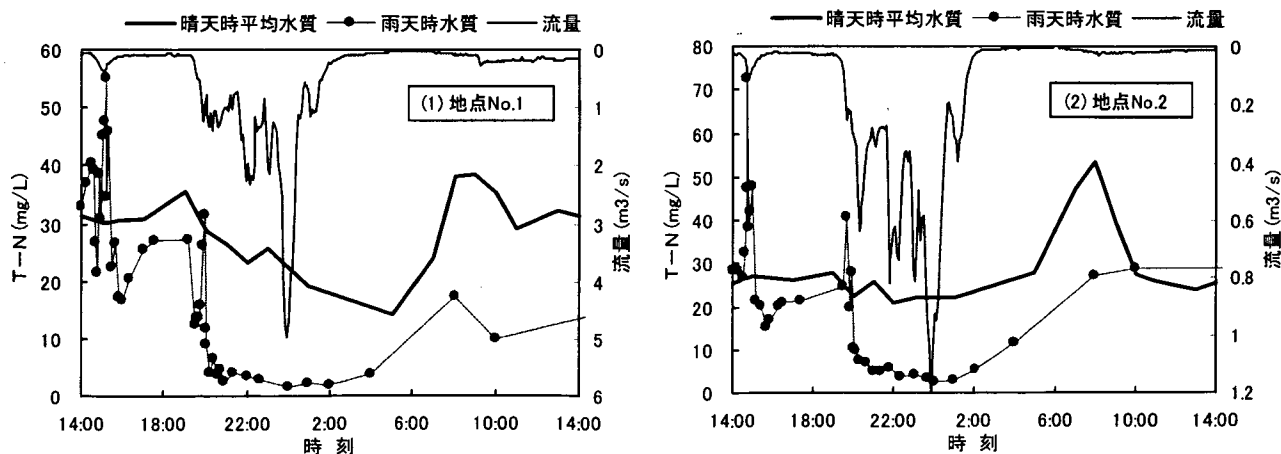


図 7 雨天時水質と流量 (T-N)

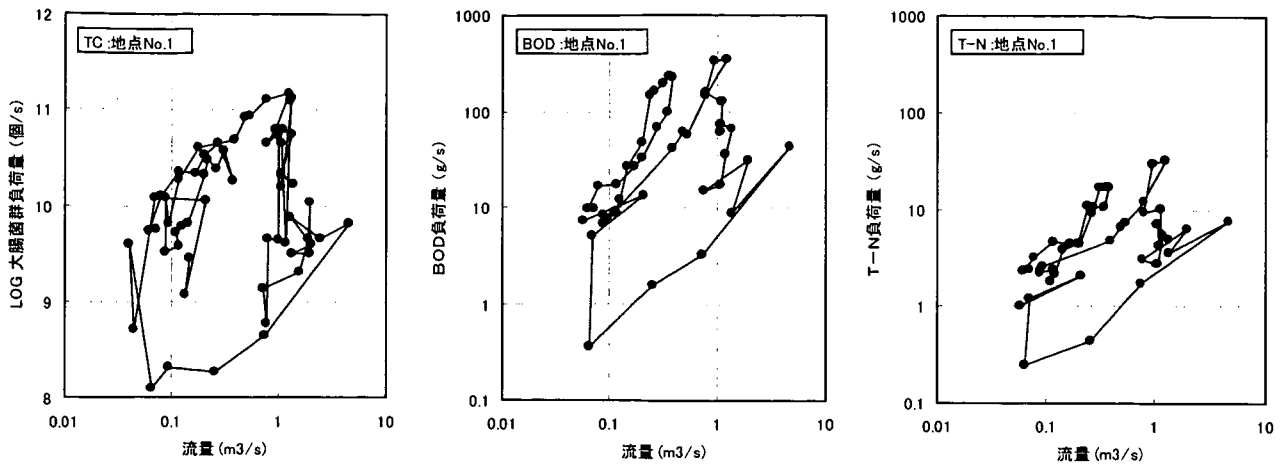


図8 流量と負荷流出量との関係

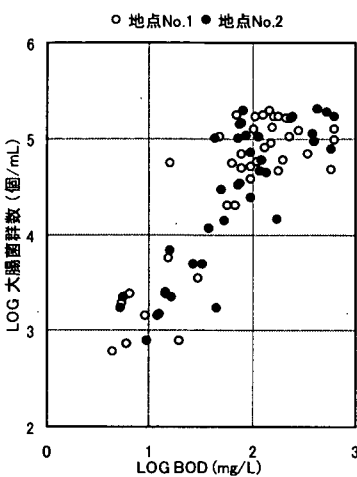


図9 BODと大腸菌群数の関係

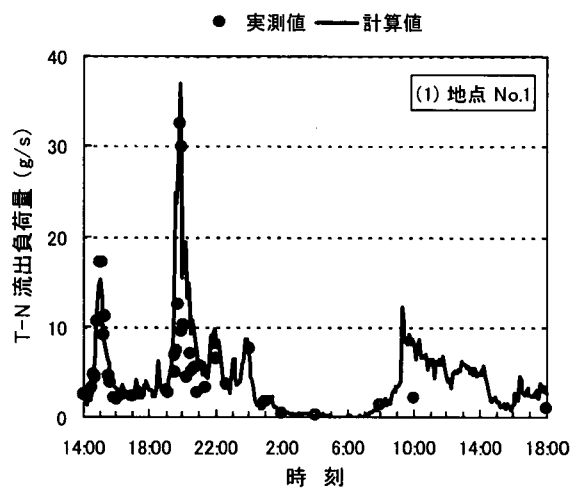


図10 集中型土研モデルによる計算結果

2. 3 集中型土研モデルの検討

これまでの検討結果からT-N, T-PについてもBODと同じ式形により計算できることが明らかとなっている。新たに実施した雨天時調査結果に対し集中型土研モデルを適用したところ、計算値と実測値はよく一致しており、上述の内容が改めて確認された。図10に計算結果の一例を示す。

モデル定数である管渠内初期堆積負荷量 P_{p0} の晴天時負荷流出量に対する比率を L_R と定義し、BOD, T-N, T-P について L_R を計算すると表5のようになる。 L_R の大きさは2地点とも $BOD > T-P > T-N$ となっており、T-N, T-P はBOD に比べて堆積しにくいことがわかる。これは各水質項目の溶解性成分の割合の違いによる影響と考えられる。また、前述の通りファーストフラッシュ時の水質を同じ時刻の晴天時水質と比較した場合、 $BOD > T-N$ の関係が見られたが、これも堆積物からの寄与（溶解性成分の割合）の違いが原因と考えられる。

L_R を地点別に見ると、いずれも No.2 の方が大きかった。No.1 と比較して No.2 は、面積当たりの発生負荷量が小さい、流出率が高い、排水区の上流側に位置する、等の特徴を有しているが、今回の調査内容からその原因を特定することはできなかった。同一排水区内におけるモデル定数の違いは、分布型モデルの定数決定に有用な情報となり得るため、今後、他の排水区の調査等を通じて検討していきたい。

表5 L_R の計算値

調査地点	LR (P_{p0} /晴天時負荷流出量) (-)	
	No.1	No.2
BOD	0.5	2.0
T-N	0.2	1.0
T-P	0.4	1.5

2. 4 分布型土研モデルの検討

2. 4. 1 モデルの基本形

集中型土研モデルの式形を基本として、これを分布型モデルに改良することを検討する。

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となってしまうこと、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11）。

ここで、流域モデルは分割された小流域に対し従来型の土研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6の通り。なお式(3)については集中型土研モデルと式形が異なり、路面からの負荷流出が P_p に寄与するとしている。

2. 4. 2 計算方法

分布型モデルの流量計算にはMOUSEを用いた。管網のモデル化は管径800mm以上の150路線とした。このような流域分割の場合、各小流域の面積の最大値は11.2ha、最小値は0.01haであり、両者には約 10^3 倍の開きがある。

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

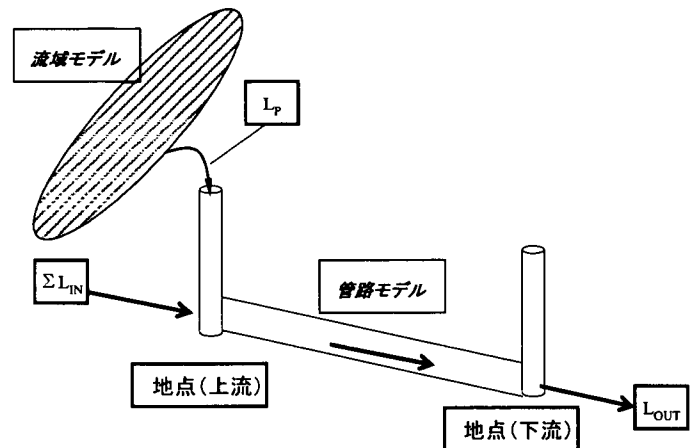


図11 分布型土研モデルの基本ユニット

表6 分布型土研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 (汚水) (g/s)
C	: 負荷流出係数 (1/g/m ³)
K	: 負荷流出係数 (1/mm)
Q	: 流量 (m ³ /s)、 Q_c : 限界流量 (m ³ /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)
ΣL_{IN}	: 上流管渠からの負荷流入量 (g/s)
C_c	: 管渠内水質 (g/m ³)
S	: 管渠内水量 (貯留量) (m ³)
$Q_{(B)}$: 管路モデル下流端流量 (m ³ /s)

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ー 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 計算結果と課題

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12, 13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、加えて集中型モデルでは再現が難しい水質の急激な上昇・下降の過程についても再現が可能であることがわかる。しかし、今回の構築した分布型モデルについては以下に挙げるような課題が残っており、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。

- 流域情報の分布のさせ方、流末の情報を流域の情報として与えるために生じる時間差の問題
- モデル定数の与え方（集中型モデルとの関係）と小流域分割の考え方（ランピング手法）
- 管路モデル（完全混合モデル）の妥当性の検証
- 計算時間間隔の妥当性の検証
- 他流域の調査結果への適用と検証

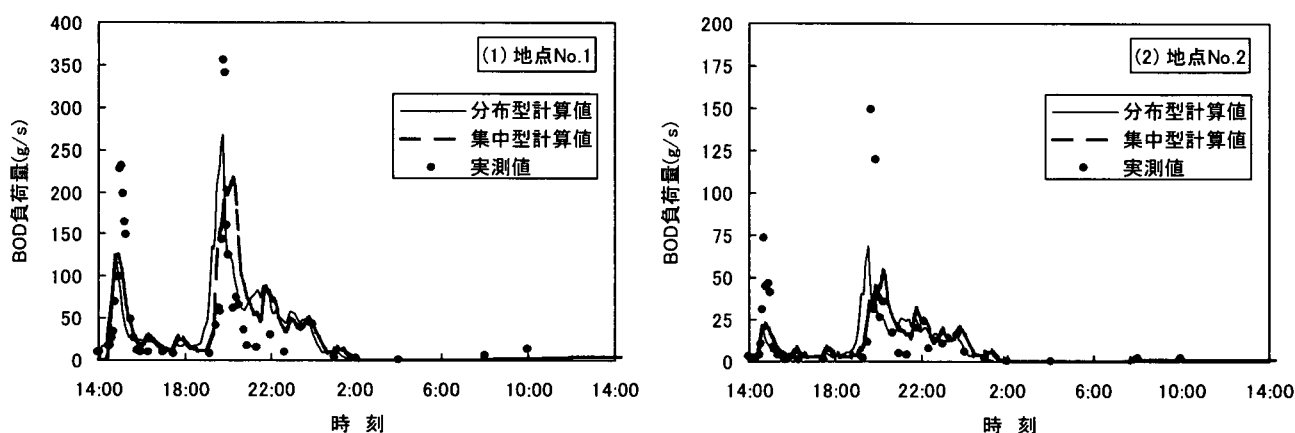


図12 分布型土研モデルによる計算結果（BOD負荷量）

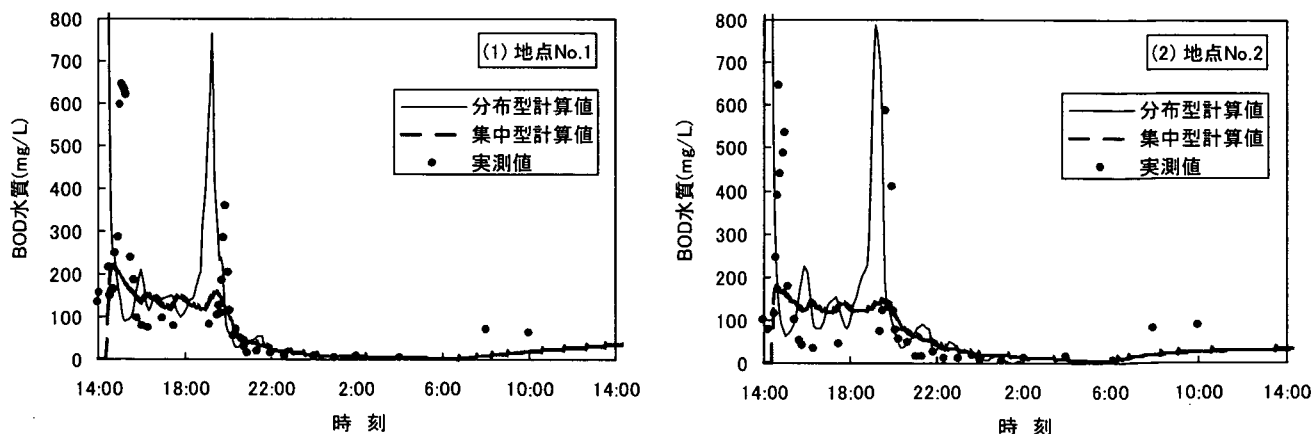


図13 分布型土研モデルによる計算結果（BOD水質）

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

近年、集中豪雨によりマンホール蓋が浮上・飛散する現象が顕在化し、これに伴う安全上の問題が指摘されている。しかし、従来より下水道管路の設計は開水路流を基本として行われてきており、空気噴出を伴うような圧力管路の設計手法、もしくは二相流を考慮した管路設計手法についてはこれまで十分な検討がなされていない。晴天時に空運用されるような雨水貯留管などにおいては、降雨時に満管状態へ移行する過程で必ず空気噴出を伴うが、このような場合においても、マンホール蓋が飛散するなどの急激かつ危険な現象が生じないように、設計段階で配慮する必要がある。

そこで本研究では、水理模型実験と数値解析モデルを用いたシミュレーションにより管内空気の挙動を明らかにし、空気噴出を考慮した管路設計のマニュアルをとりまとめることを目的とする。なお本研究の内容は、当研究室と（財）下水道新技術推進機構、および川崎市、横浜市、名古屋市、大阪市、福岡市との共同研究の一部である。

3.2 水理模型実験による空気混入・噴出現象に関する検討

3.2.1 実験方法

水理模型は単純伏越し管路形状とし、空気を含む水理挙動に対する相似則を把握するため、同一形状で縮尺の異なる3つの模型を製作した(図14、表7)。これらは実施設を管径5,000mmの雨水管とした場合に、それぞれ1/10、1/20、1/40の模型に相当する。なお、模型はアクリル製で、本管は水平に設置した。上流人孔は突入流式および減勢工を設置した階段式(図15)の2種類とし、流入形式の差異が水理挙動に及ぼす影響を把握することとした。

計測項目と計測方法について表8に示す。すべての項目について1/10秒間隔でサンプリングを行った。流量は、フルード則に基づき各模型において等価な流量となるよう、表9のように設定した。実際には、これらの値を目標にバルブ開度を調整して流量を設定するため、実験時の流量には数%程度の誤差が生じた。

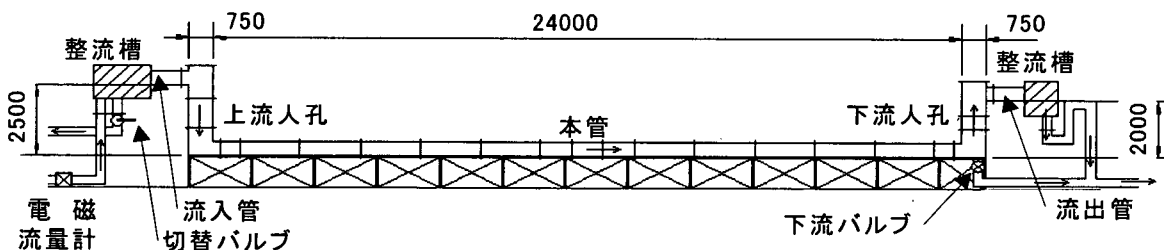


図14 水理模型の形状 (M1)

表7 水理模型の概要

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

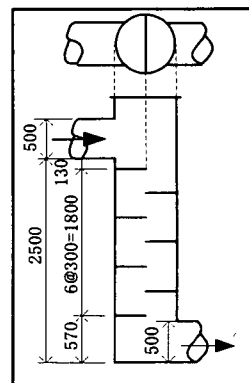


図15 階段式流入人孔の形状 (M1)

表8 計測項目と計測方法

計測項目	計測機器	設置位置	備考
通水流量	電磁流量計	整流槽上流	φ300
水位	圧力計	本管：5箇所、流入出管：各1箇所、 上下流入孔下部：各1箇所 計9箇所	圧力計は全圧(水圧+空気圧)となって計測される。
空気圧	圧力計(微圧計)	上下流入孔上部：各1箇所	負圧も計測可能
空気量	微差圧計(ピト-管式) 熱線式風速計	上下流入孔上部：各1箇所(微差圧計) 下流入孔上部(熱線式風速計)	原則として微差圧計を使用し、風速が3m/s以下となる場合は熱線式風速計を使用。

表9 流量ケース

単位：L/s

モデル	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
実施設	47,400	39,500	31,600	23,700	15,800
M1	150.0	125.0	100.0	75.0	50.0
M2	26.5	22.1	17.7	13.3	8.8
M3	4.7	3.9	3.1	2.3	1.6

表10 上流人孔水位の設定

	M1	M2	M3
h1	0.60m	0.30m	0.15m
h2	1.20m	0.60m	0.30m
h3	1.80m	0.90m	0.45m
H(人孔深)	2.50m	1.25m	0.625m

本実験に先立ち予備実験を行い、水の挙動がフルード則に従うことを確認した。また、空気量の計測について、計測機器の精度と適用範囲について確認し、計測方法のルール化を図った。

本実験では、管路における空気の挙動を定量的に明らかにするとともに、シミュレーションモデル構築に必要とされるデータを取得することを目的に、空気混入に関する実験、および空気噴出に関する実験を行った。前者については、下流バルブの開度を調整して上流人孔水位を一定に保ちつつ一定流量を通水し(定常状態)、流量、落差高、人孔水位と混入空気量との関係について検討するものである。また、後者については、下流バルブを全閉とし、模型内が空の状態から満水となるまで一定流量で通水し(非常定常状態)、上流人孔、下流人孔から流入、流出する空気量を計測し、流量と噴出する空気量との関係について検討するものである。

空気混入に関する実験では、実験条件として、水理模型について3通り、上流人孔について突入流式、階段式の2通り、通水流量についてQ1~Q5の5通り、上流人孔水位についてh1~h3の3通り(表10)を設定した。計測は1回につき約100秒間継続し、これを各ケース2回ずつ行ってその平均値をもって実験データとした。なお、混入空気量は、定常状態下で下流人孔上部から排出される風量をもって表されるものとした。

空気噴出に関する実験では、実験条件として、水理模型について3通り、上流人孔について突入流式のみ、通水流量についてQ1, Q3, Q5の3通りを設定した。計測は各ケース2回ずつ行い、各回の最大風量の平均値を用いて検討を行った。空気量は上流、下流各人孔において計測した。なお、外部から模型内への吸い込み(負の風量)については風量計測機器では計測不能であるため、人孔上部の圧力データから換算した。

3. 2. 2 空気混入に関する実験結果

計測された混入空気量について、無次元化を図るために混入率 α (混入空気量/通水流量)を定義した。上流人孔が突入流式の場合に、この α と、同じく無次元数である水没度 h/H (H :人孔深、 h :人孔水位)との関係を整理すると図16のようになる。各モデルとも人孔水位の増加(落差高の減少)に伴い、混入率 α は減少する傾向があり、この関係は h/H の一次式で表現することができた。また、 α の値から通水流量の数10%の空気量が混入していることがわかるが、これは無視し得ない量であると考えられる。さらに、同じ h/H に対して、模型縮尺が大きくなるほど α が大きくなることから、空気混入現象については縮尺効果が存在すると考えられる。

同様に、上流人孔が階段式の場合に、 α と h/H の関係を整理すると図17のようになる。突入流式の場合と同様に、各モデルとも人孔水位の増加に伴い α が減少し、また模型縮尺が大きいくほど α が大きくなる傾向が

見られた。突入流式の場合と比較して α の値が小さかったが、これは階段式の場合、落差高よりも階段1段の落差が空気混入に大きく影響するための考えられる。

また、 h/H が0.4以上では h/H や模型縮尺の影響が小さくなり、いずれの場合も α が5%程度以下となった。これは階段式の場合、水没している部分の階段の影響が大きく（減勢、ならびに行路長の増大）、人孔内に一旦混入した空気が人孔下部に達する前に上昇してしまい、管路内にほとんど流入しないためと考えられる。

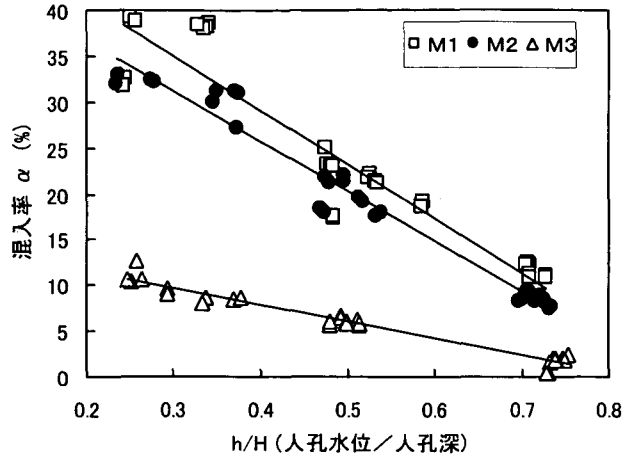


図16 空気混入実験結果（突入流式）

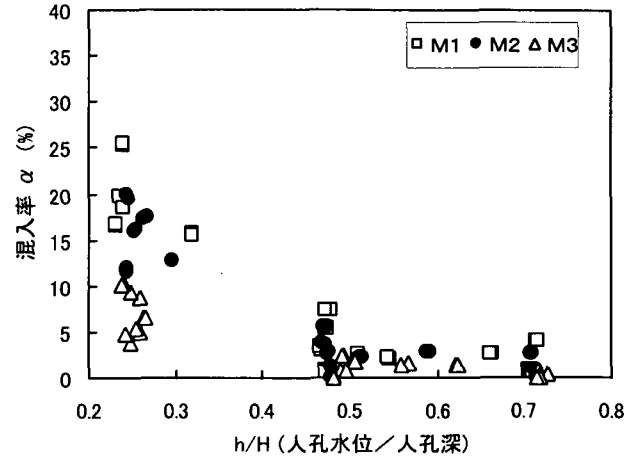


図17 空気混入実験結果（階段式）

3. 2. 3 空気噴出に関する実験結果

実験結果の1例として、模型 M1 に流量 Q_1 を通水した場合の上下流人孔風量について図18に示す。0 sec は模型への通水を開始した時点を示しており、整流槽を経て上流人孔から模型本管に流入し始めるのが、上流

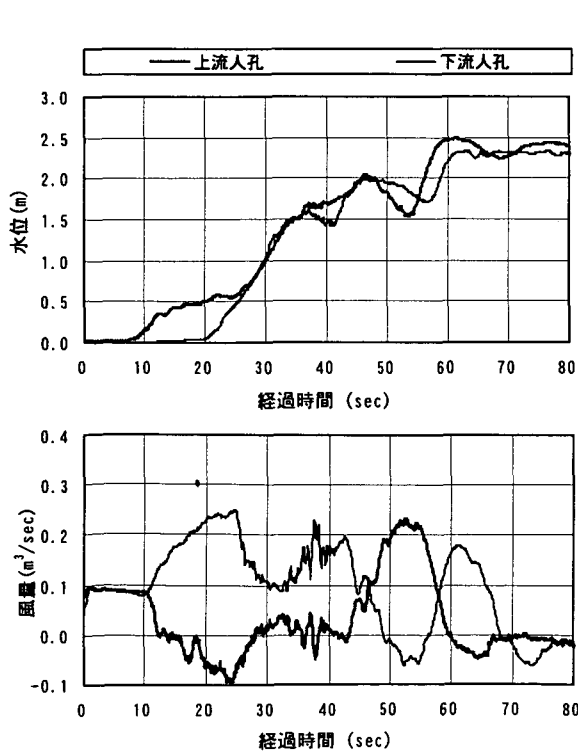


図18 空気噴出実験結果の例 (M1, Q1)

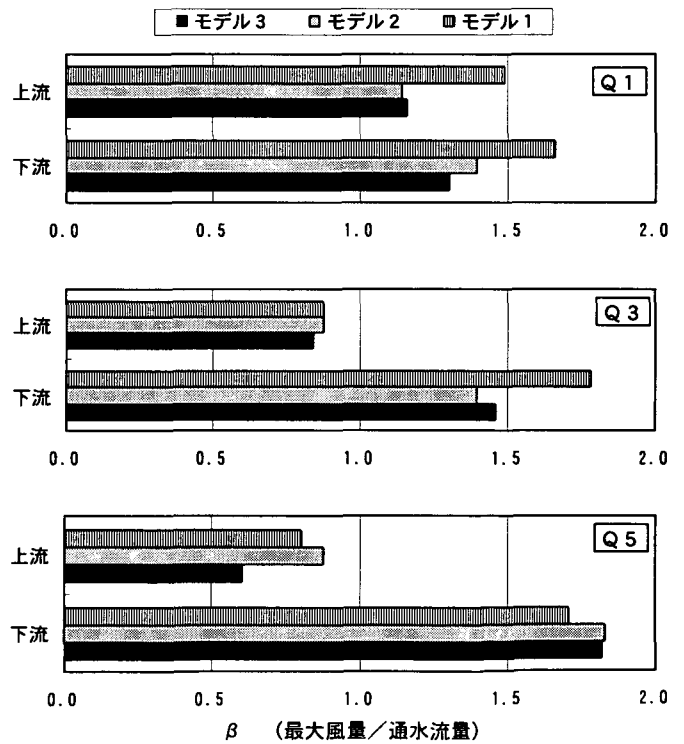


図19 上下流における排気率 β の比較

人孔からの吸い込みが始まる 10 sec あたりである。その後上流人孔から吸気、下流側から排気という状態が続くが、満管になる過程において段波が空気塊を上流側に押し上げることにより、上流側からも大きな排気が生じる (50 sec あたり)。

計測された排気量の最大値 (最大風量) について、無次元化を図るために排気率 β (最大風量/通水流量) を定義した。各実験条件における上下流人孔の排気率 β について図 19 に示す。下流側の β の値は 1.3~1.8 程度であり、単純な水と空気の置換 ($\beta=1$) ではなく、通水流量以上の排気量が生じることがわかる。また流量規模が小さい場合、 β は下流側で大きく上流側で小さいが、流量規模が大きい場合には両者が同程度になることから、空気噴出への対策は下流側人孔だけでなく上流側人孔にも必要となることが想定される。なお、各模型間で比較すると、模型縮尺が大きいほど β がわずかではあるが大きくなる傾向があるようだ。

3.3 縮尺効果の検討

空気混入ならびに空気噴出にかかる縮尺効果の大きさについて検討を行った。ここでは、各模型の幾何学的な縮尺比と混入率 α 、排気率 β との関係が次式のような形で表現されると仮定した。

$$(\alpha_p/\alpha_m) = (L_p/L_m)^X, \quad (\beta_p/\beta_m) = (L_p/L_m)^Y$$

L: 代表寸法、添え字 p: 実物、添え字 m: 模型、X および Y: 定数

仮に縮尺効果がなく、空気についてもフルード則に従うとした場合には、 $X=Y=0$ となる。

α については、まず図 16 の結果から各模型ごとに得られる α と h/H の関係を表す回帰直線より $h/H=0.2, 0.5, 0.8$ の場合の α の値を求め、模型 M3 を α_m 、模型 M1, M2 を α_p とした場合について計算し、これを両対数軸上にプロットした (図 20)。 β については、下流人孔の β に対象を限定し、同様に模型 M3 を β_m 、模型 M1, M2 を β_p とした場合について計算し、これを両対数軸上にプロットした (図 21)。これらの図の傾きが X, Y となるが、これを求めると $X=1.3, Y=0.08$ であった。これらの結果から空気混入現象に比べ空気噴出現象の縮尺効果は比較的小さいものであるということがわかった。

今後は、実験結果のより精緻な解析を行い、空気混入・噴出現象の定量的な評価を行うとともに、数値解析モデルにより、水と空気の流れを同時に解析する手法を確立していく必要がある。

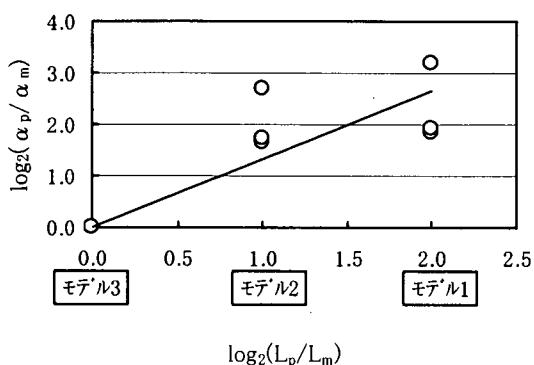


図 20 混入率 α (突入流式) の縮尺効果

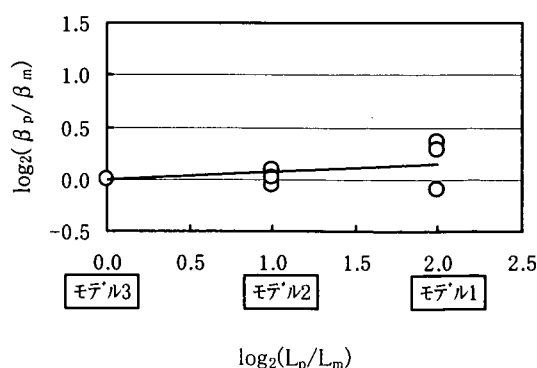


図 21 排気率 β (下流人孔) の縮尺効果

4. まとめ

本調査により得られた結果を以下に示す。

- (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合流式管きょ内における雨天時の大腸菌群数について調査を行った結果、次の3点が特徴的であった。
 - a) ファーストフラッシュのピークは他の項目と比べ 20~30 分程度早く現れる傾向が見られた。
 - b) 地表面からの負荷流出を考慮する必要がある。
 - c) 堆積物の表層のみが負荷流出に寄与し、下層部分の寄与は小さいことが推測される。
- ③集中型土研モデルにおける管渠内初期堆積負荷量 P_{p0} の晴天時負荷流出量に対する比率を L_R と定義した場合、 L_R の大きさは $BOD > T-P > T-N$ となる。
- ④分布型土研モデルの式形について検討し、流域モデルと管路モデルの2つを組み合わせるものとした。
- ⑤上記の分布型土研モデルにより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、加えて水質の急激な上昇・下降の過程についても再現が可能であった。

(2) 空気噴出を考慮した雨水管路設計手法について

- ①上流人孔が突入流式の場合、定常状態における空気混入量は人孔内水位に比例する。混入率は通水流量の数10%程度であり、無視できない量である。
- ②上流人孔が階段式の場合、突入流式の場合と比較して空気混入量が小さく、特に人孔内水位が高まると混入率が5%以下程度となる。
- ③空から満管に移行する過程において排出される空気量の最大値は、通水流量の1.3~1.8倍程度であった。
- ④上記のような非定常状態においては、下流人孔のみならず上流人孔からも相当の空気噴出が計測された。空気噴出対策を講ずる場合には、下流側のみならず上流側の人孔にも対策が必要である。
- ⑤混入率 α 、排気率 β について縮尺効果の検討を行った。 α 、 β とも縮尺効果が見られたが、検討の範囲においては、 α に比べ β の縮尺効果は比較的小さいものであった。