

分布型土研モデルによる 合流式下水道の雨天時汚濁負荷流出解析

A DISTRIBUTED RUNOFF SIMULATION MODEL OF WATER QUALITY IN COMBINED SEWER PIPE SYSTEMS

永吉光一¹・石田和広²・渡辺政広³・李 大民⁴
Koichi NAGAYOSHI, Kazuhiro ISHIDA, Masahiro WATANABE and Daimin LI

¹正会員 工修 日本上下水道設計㈱東京支社 関東事務所 (〒338-0012 さいたま市中央区大戸4-26-8)

²正会員 株式会社キノ コンクリート製品事業部 (〒790-0067 松山市大手町1-7-3)

³正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

⁴学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程 環境建設工学専攻 (〒790-8577 松山市文京町3)

Owing to overflows from combined sewer pipe systems, water quality of receiving waters, including urban rivers, in Japan, has been become worse year by year. Therefore, appropriate counter-measures that can mitigate the overflows must be developed promptly. In order to achieve this, a distributed simulation model of water quality and stormwater runoff is investigated, which can simulate precisely both open-channel and surcharged flows and a temporal and spatial variation of runoff-water quality in the pipe systems.

The model proposed here consists of two well-known models: one is PWRI (the Public Works Research Institute, the Ministry of Construction, Japan) Model for water quality simulations; the other is MOUSE Model for stormwater runoff simulations.

Key Words : distributed model, PWRI model, combined sewer pipe system, water quality, runoff simulation model

1. はじめに

各地の合流式下水道流域で、下水道管渠システムからの越流水（未処理放流水）を軽減・防止する対策の検討が進められてきているが、合理的で有効かつ実用的な対策を立案するためには、下水道流域における雨天時の汚濁負荷流出を精度高くシミュレートできる流出解析モデルが必要となってくる。

そうした解析モデルとして、近年、SWMM モデル、MOUSE モデル、InfoWorks モデルなどのいわゆる海外モデル¹⁾が広く利用されるようになってきている。これは、わが国で既に開発されている唯一の解析法である、土研モデルと修正RRL法を組み合わせた流出解析法では、所要の精度で雨水・汚濁負荷流出解析を遂行することが困難であるため、それら海外モデルが優れた汚濁負荷流出解析のサブ・モデルを備えているためだけではないと考えられる。

著者らは、わが国で 1980 年の頃に開発された土研モデル（集中型土研モデル）²⁾は実用性が極めて高く、優れた汚濁負荷流出解析モデルであることを実証的立場から明らかにしてきている^{3)~5)}が、ここでは、本モデルを、各種越流水対策の効果を正確に評価しうる精度の流出シミュレーションが可能なモデルへと改良した分布型土研モデルを提案するとともに、本モデルを低平市街地の一ポンプ排水区に適用し、シミュレーション結果と実測結果を対比して分布型土研モデルの実流域における適用性を検討している。

なお、集中型モデルから分布型モデルへと改良を図った主要な点は、以下の 3 つである。

①地表面上および下水管渠システム内の汚濁負荷流出は、従来、集中化して取り扱われていたが、これを、上流マンホール、1 本の下水管渠およびその集水域からなる小排水区の単位で取り扱えるよう改良を図った。

②汚濁の流出は、従来、掃流による（汚濁は粒子性である）として取り扱われていたが、浮遊による流出も存在している（溶解性の汚濁も存在している）筈で、掃流

と浮遊による流出を取り扱えるよう改良を図った。

③上の①により、組み合わせて用いられる雨水流出モデルとして、たとえば、上述した海外モデルが利用できるよう改良が図られたことになる。

2. 合流式下水道の雨天時汚濁負荷流出解析

モデル

提案している合流式下水道の雨天時汚濁負荷流出解析モデルは、図-1 に示すように、流域モデリング、雨水損失モデル、雨水流出モデル、汚濁負荷流出モデルの 4 つのサブ・モデルから構成されている。

(1) 流域モデリング

流域が多数の単位排水区からなるとしてモデリングする。ここに、単位排水区は、図-2 に示すように、上流マンホール、一本の下水管渠およびその直接集水域から構成されている。

なお、単位排水区の集水域面積、地表面における各種流出面（和風屋根面、ビル屋根面、道路・駐車場面、小規模な裸地面、大規模な裸地面）の諸量（面積、斜面長、こう配、粗度など）、また、上流マンホールおよび下水管渠の諸元（直径、こう配、管渠長、段差など）は、いずれも、基本的には、単位排水ごとに異なるとして取り扱う。

(2) 雨水損失（有効降雨）モデル

雨水損失の算定には、修正 RRL 法において用いられている算定法⁶⁾を採用している。

まず、前述した各種流出面を、雨水損失の無い不浸透流出面（和風屋根面）、凹地損失のある不浸透流出面（ビル屋根面、道路面）、凹地損失および浸透損失のある浸透流出面（小規模な裸地面、大規模な裸地面）の 3 種に分類する。次に、凹地損失は降雨が凹地を満たして後に雨水流出がはじまるとして、また浸透損失は最終浸透能を下回る強度分の降雨は全て浸透し、それを上回る強度分の降雨が凹地損失に充当されるとして取り扱う。

単位排水区内の平均有効降雨は、3 種の流出面の有効降雨をそれら流出面の占有面積率を重みとして加重平均して求められる。

(3) 雨水流出モデル

a) 地表面流出モデル

ここでは、上述した 3 種の流出面上の雨水（有効降雨）が単位排水区の上流マンホールに到達する時間（雨水伝播時間あるいは雨水流入時間）が、時間的、空間的

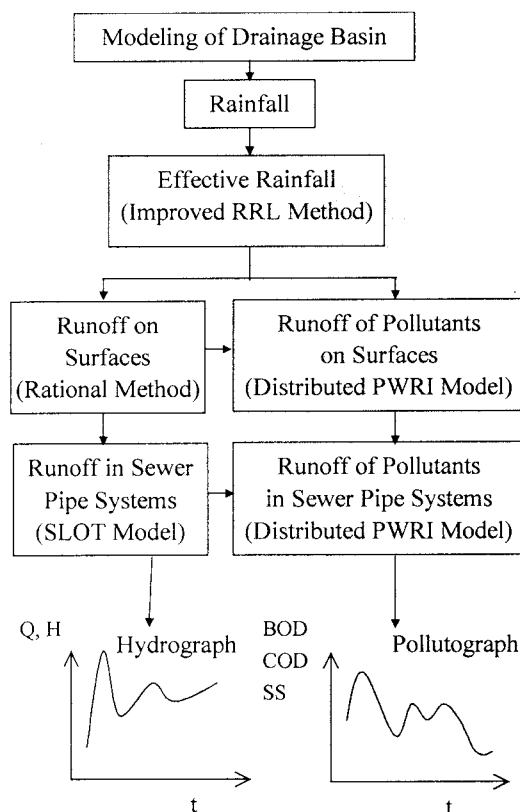


図-1 合流式下水道の雨天時汚濁負荷流出解析モデル

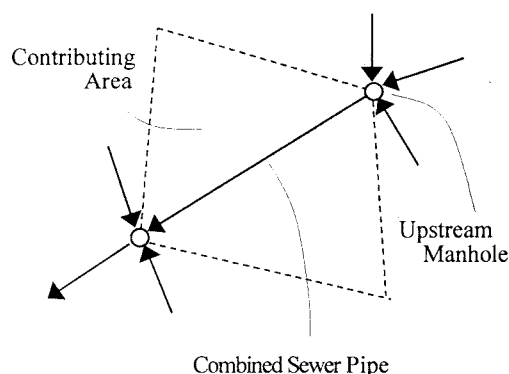


図-2 単位排水区

に一定（一様、5分）であるとし、合理式・合成法⁷⁾により、マンホールへの流入ハイドログラフを算定する。

b) 管渠流出モデル

近年、下水道流域の雨水流出解析において、SWMM モデル、MOUSE モデル、Info Works モデルの 3 つの海外モデルが広く用いられてきている。

ここでは、下水道管渠システムの雨水流出解析モデルとして、MOUSE モデルの中の管渠流出モデルをそのまま採用している。

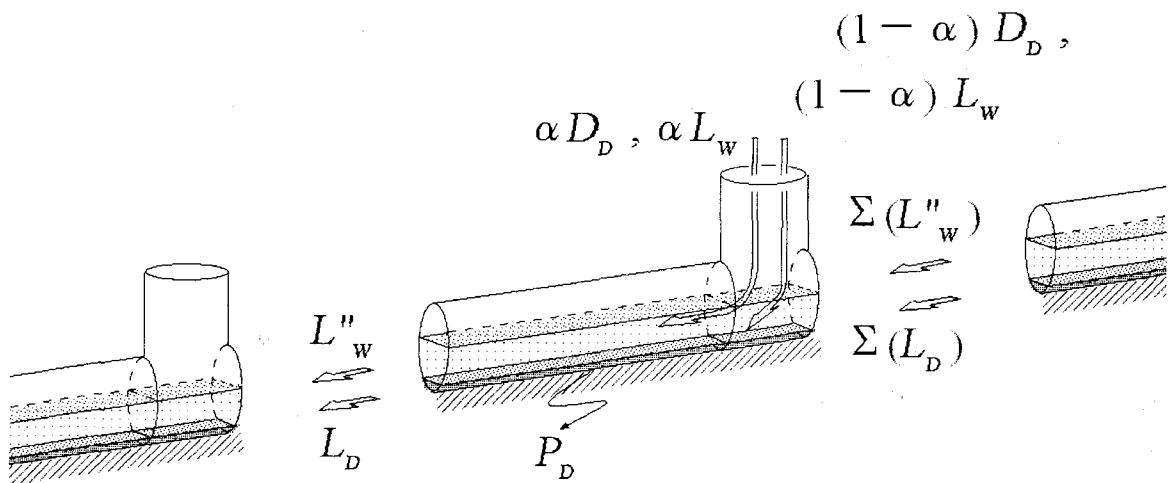


図-3 下水管渠における汚濁負荷の流入出

(4) 汚濁負荷流出モデル

本モデルについては、次章で詳細を述べることにする。

$$; D_{WC} = 1000 \times D'_{WC} A_W \quad (3)$$

$$; P_{WC} = 1000 \times P'_{WC} A_W \quad (4)$$

3. 汚濁負荷流出解析モデル（分布型土研

モデル）

SS

$$L_{WS} = (1/3.6) C_{WS} P'_{WS} (r_e - r_{ec}) A_W \quad (5)$$

$$dP_{WS}/dt = D_{WS} - L_{WS} \quad (6)$$

$$; D_{WS} = 1000 \times D'_{WS} A_W \quad (7)$$

$$; P_{WS} = 1000 \times P'_{WS} A_W \quad (8)$$

本モデルは、従来の土研モデル²⁾（集中型土研モデル）を分布型のモデルへと改良したもので、図-1 に示すように、地表面汚濁負荷流出解析モデルと下水道管渠汚濁負荷流出解析モデルからなる。

なお、解析対象の水質項目は、従来の土研モデルと同様に、SS、BOD、COD の 3 つである。また、汚濁負荷の発生場についても、従来の土研モデルと同様に、COD と SS は地表面上と下水管渠内であるとして、一方、BOD は下水管渠内のみであるとして取り扱う。

(1) 汚濁負荷流出の基礎式

a) 地表面上での汚濁負荷流出モデル

分布型土研モデルでは、集中型土研モデルにおいて流域の地表面全体を対象に一括して適用されていた汚濁負荷の流出の式と連続の式を採用し、これら基礎式を各単位排水区の各流出面に適用する。

これより、汚濁負荷の流出の式および連続の式は、それぞれ、次式のように表される。

COD

$$L_{WC} = (1/3.6) C_{WC} P'_{WC} (r_e - r_{ec}) A_W \quad (1)$$

$$dP_{WC}/dt = D_{WC} - L_{WC} \quad (2)$$

ここに、 L_{WC} 、 L_{WS} ：発生負荷量（gr/s）、 C_{WC} 、 C_{WS} ：負荷流出係数（1/mm）、 P_{WC} 、 P_{WS} ：滞積（残存）負荷量（gr）、 P'_{WC} 、 P'_{WS} ：単位面積当りの滞積負荷量（kg/ha）、 D_{WC} 、 D_{WS} ：補給負荷量（gr/s）、 D'_{WC} 、 D'_{WS} ：単位面積当りの補給負荷量（kg/s/ha）、 A_W ：降雨による汚濁負荷発生に関与する流出面の面積（ha）、 r_e ：有効降雨強度（mm/hr）、 r_{ec} ：限界有効降雨強度（mm/hr）、 t ：時間（s）、第 1 下添字 W は流出面上（雨天時）に関する諸量であること、第 2 下添字 C および S はそれぞれ COD および SS に関する諸量であることを示す。

b) 下水管渠内での汚濁負荷流出モデル

分布型土研モデルでは、集中型土研モデルにおいて流域の下水道管渠システム全体を対象に一括して適用されていた汚濁負荷の流出の式および連続の式を採用し、これら基礎式を各単位排水区の各下水管渠（図-3）に適用するとともに、汚濁は掃流成分（粒子性汚濁）と浮遊成分（溶解性汚濁）からなるとして取り扱う。

すなわち、図-3 に示すように、対象としている下水

管渠の上流マンホール地点には、上流に位置する下水管渠からの流出汚濁負荷、直接集水域の流出面からの流出汚濁負荷および補給汚濁負荷が流入することとなる。また、汚濁の中で浮遊成分（溶解性汚濁）の占める割合を α で表すこととする。

これより、下水管渠内における汚濁負荷の流出の式と連続の式は、それぞれ、次式のように表される。

BOD

$$L_B = L_{DB} + L_{WB}'' \quad (9)$$

$$(\text{掃流成分}) \quad ; L_{DB} = C_{DB} P_{DB}^2 (Q - Q_c) \quad (10)$$

$$(\text{浮遊成分}) \quad ; L_{WB}'' = Q \delta_{WB} \quad (11)$$

$$(\text{掃流成分}) \quad dP_{DB}/dt = (1 - \alpha_B) D_{DB} - L_{DB} + (1 - \alpha_B) L_{WB} + \sum (L_{DB}) \quad (12)$$

$$(\text{浮遊成分}) \quad d(\nabla \delta_{WB})/dt = \alpha_B \cdot D_{DB} + \alpha_B \cdot L_{WB} - Q \delta_{WB} + \sum (L_{WB}'') \quad (13)$$

COD

$$L_C = L_{DC} + L_{WC}'' \quad (14)$$

$$(\text{掃流成分}) \quad ; L_{DC} = C_{DC} P_{DC}^2 (Q - Q_c) \quad (15)$$

$$(\text{浮遊成分}) \quad ; L_{WC}'' = Q \delta_{WC} \quad (16)$$

$$(\text{掃流成分}) \quad dP_{DC}/dt = (1 - \alpha_C) D_{DC} - L_{DC} + (1 - \alpha_C) L_{WC} + \sum (L_{DC}) \quad (17)$$

$$(\text{浮遊成分}) \quad d(\nabla \delta_{WC})/dt = \alpha_C \cdot D_{DC} + \alpha_C \cdot L_{WC} - Q \delta_{WC} + \sum (L_{WC}'') \quad (18)$$

SS

$$L_S = L_{DS} + L_{WS}'' \quad (19)$$

$$(\text{掃流成分}) \quad ; L_{DS} = C_{DS} P_{DS} Q (Q - Q_c) \quad (20)$$

$$(\text{浮遊成分}) \quad ; L_{WS}'' = Q \delta_{WS} \quad (21)$$

$$(\text{掃流成分}) \quad dP_{DS}/dt = (1 - \alpha_S) D_{DS} - L_{DS} + (1 - \alpha_S) L_{WS} + \sum (L_{DS}) \quad (22)$$

$$(\text{浮遊成分}) \quad d(\nabla \delta_{WS})/dt = \alpha_S \cdot D_{DS} + \alpha_S \cdot L_{WS} - Q \delta_{WS} + \sum (L_{WS}'') \quad (23)$$

ここに、 α_B 、 α_C 、 α_S ：浮遊成分の存在割合を示す係数（ $0 \leq \alpha < 1$ ）、 L_B 、 L_C 、 L_S ：掃流成分と浮遊成分を合わせた発生汚濁負荷量（gr/s）、 L_{DB} 、 L_{DC} 、 L_{DS} ：掃流成分としての発生汚濁負荷量（gr/s）、 P_{DB} 、 P_{DC} 、 P_{DS} ：掃流成分としての滞積負荷量（gr）、 C_{DB} 、 C_{DC} 、 C_{DS} ：汚濁負荷流出係数（ $1/\text{gr} \cdot \text{m}^3$ 、 $1/\text{gr} \cdot \text{m}^3$ 、 s/m^6 ）、 D_{DB} 、 D_{DC} 、 D_{DS} ：補給汚濁負荷量（gr/s）、 $\sum (L_{DB})$ 、 $\sum (L_{DC})$ 、 $\sum (L_{DS})$ ：上流管渠よりの掃流成分としての流入汚濁負荷量の合計

（gr/s）、 L_{WB}'' 、 L_{WC}'' 、 L_{WS}'' ：浮遊成分としての発生汚濁負荷量（gr/s）、 $\sum (L_{DB}'')$ 、 $\sum (L_{DC}'')$ 、 $\sum (L_{DS}'')$ ：上流管渠よりの浮遊成分としての流入汚濁負荷量の合計、 δ_{WB} 、 δ_{WC} 、 δ_{WS} ：浮遊成分の下水管渠内における濃度（mg/l）、 Q ：計算流量（ m^3/s ）、 Q_c ：限界流量（ m^3/s ）、 ∇ ：下水管渠内の貯留水量（ m^3 ）、である。

(2) モデル・パラメータの算定法

各下水管渠に対する汚濁負荷流出係数 C_{DB} 、 C_{DC} 、 C_{DS} および初期滞積汚濁負荷量 $P_{DB,0}$ 、 $P_{DC,0}$ 、 $P_{DS,0}$ の算定法、ならびに各流出面に対する汚濁負荷流出係数 C_{WC} 、 C_{WS} および初期滞積負荷量 $P_{WC,0}$ 、 $P_{WS,0}$ の算定法は、いずれも、既に⁴⁾述べてきているので、ここでは省略する。

なお、浮遊成分の存在割合を示す係数 α の算定法については、現段階では、経験的に適値を見出すことになる。

4. 分布型土研モデルの実流域への適用性に関する検討

する検討

上述した汚濁負荷流出解析モデル（分布型土研モデル）を、低平市街地の一つの合流式ポンプ排水区に適用し、降雨時の雨水と水質の流出シミュレーション結果を実測結果と対比して、本解析法（分布型土研モデル）の実流域への適用性について検討した。

(1) 解析対象排水区の概要

解析対象排水区は、図-4 および図-5 に示すように、集水面積が 45.5 ha、不浸透域が排水区の 85 % を占める典型的な市街地域（商業地域）である。

下水道管渠システムは、直径が 300～1 800 mm、総延長がおよそ 10 km の下水管渠からなり、こう配は 4 0/00（平均）と全体に緩やかである。また、低平地であることに加え、下流端のポンプ場での吐出ポンプが間欠的に運転されているため、降雨時には、下水道管渠システム内で、せき上げ背水や低下背水現象が生じていると考えられ、さらに、強雨時には、圧力流れ（満管流れ）などを伴うサーチャージ現象も生じていると考えられる。

(1) 流出シミュレーション結果

提案した雨天時汚濁負荷流出解析モデル（土研モデル）を上述したポンプ排水区に適用し、本モデルによる雨水と汚濁負荷の流出シミュレーション結果を実測結果

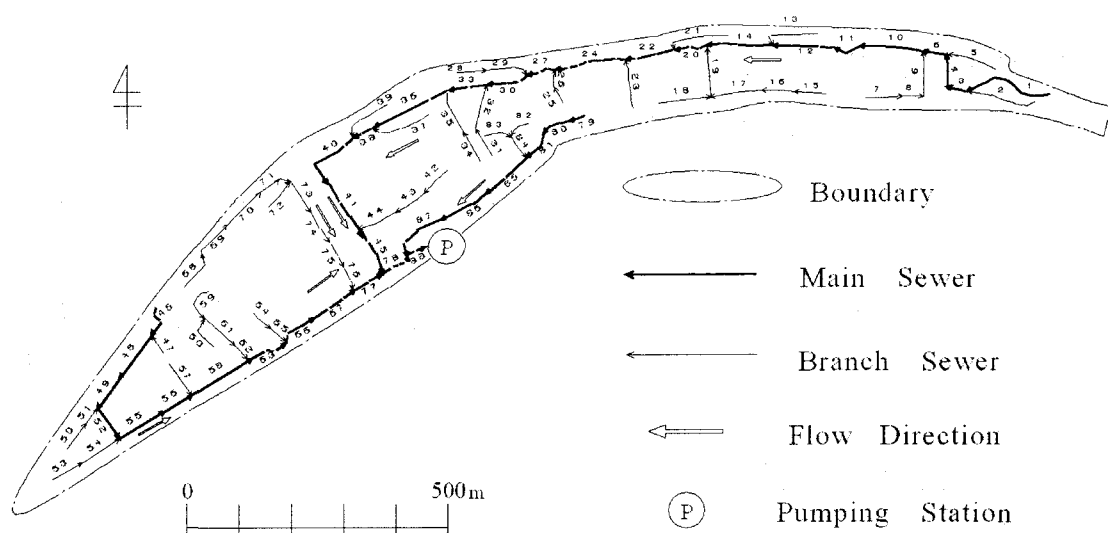


図-4 解析対象排水区とその下水管渠システム

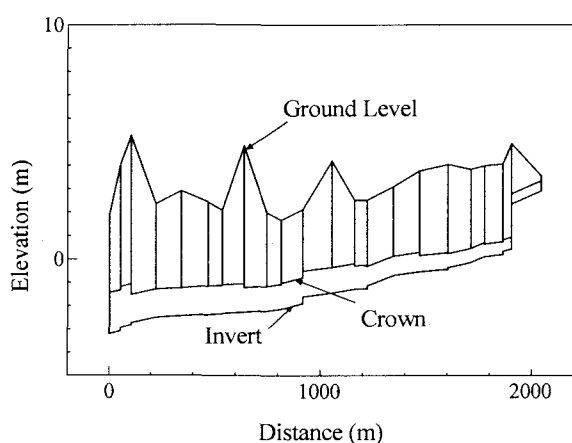


図-5 幹線下水管渠システムの縦断面図

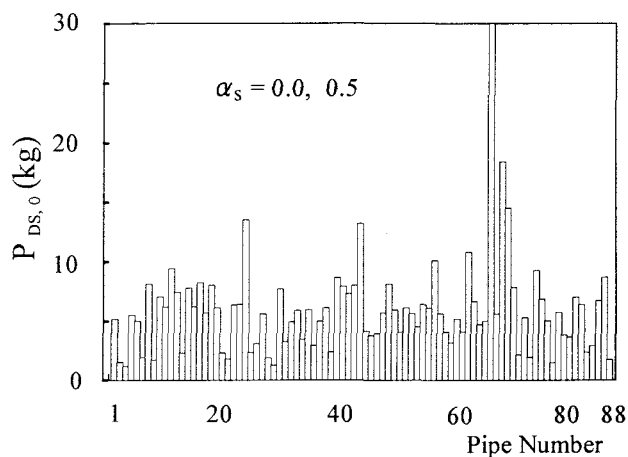


図-6 各下水管渠（88 本）における初期滞積負荷量

表-1 各下水管渠における SS に関するパラメータの適値

	$P_{DS,0}$ (kg)	C_{DS} (s/m ⁶)
$\alpha_s = 0.0$	1.5 ~ 15.0	0.02 ~ 100.0
$\alpha_s = 0.5$	1.5 ~ 15.0	0.15 ~ 55.0

と対比して、本モデルの実流域への適用性について検討した。検討結果の一例（SS-流出）を、表-1、図-6～10に示す。ここに、地表面における初期滞積負荷量は455 kg、下水管渠システム全体でのそれは628 kg である。

これらより、次の諸点が指摘される。① α_s 値の違いにより、汚濁負荷の流出特性はかなり異なっており（図-9 および -10）、 α_s が重要なパラメータであることが分かる。② 初期滞積負荷量は、下水管渠ごとに異なり、概ね、表-1 に示す範囲の値となっている。③ 汚濁負荷流出係数の適値は、下水管渠ごとに異なり、概ね、表-1 に示す範囲の値となっている。④ 分布型土研モデルによる汚濁負荷の流出シミュレーション結果（図-9、

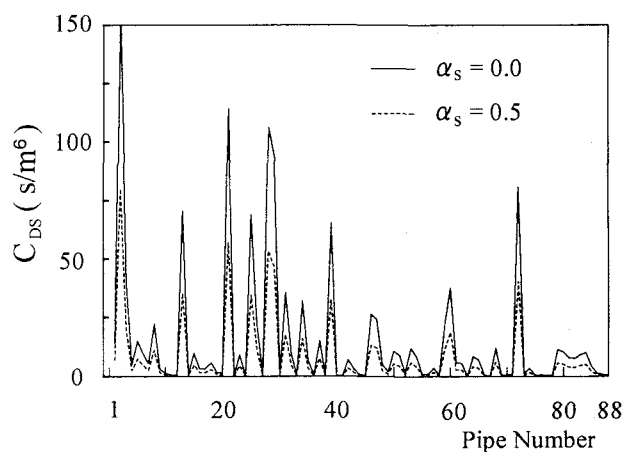
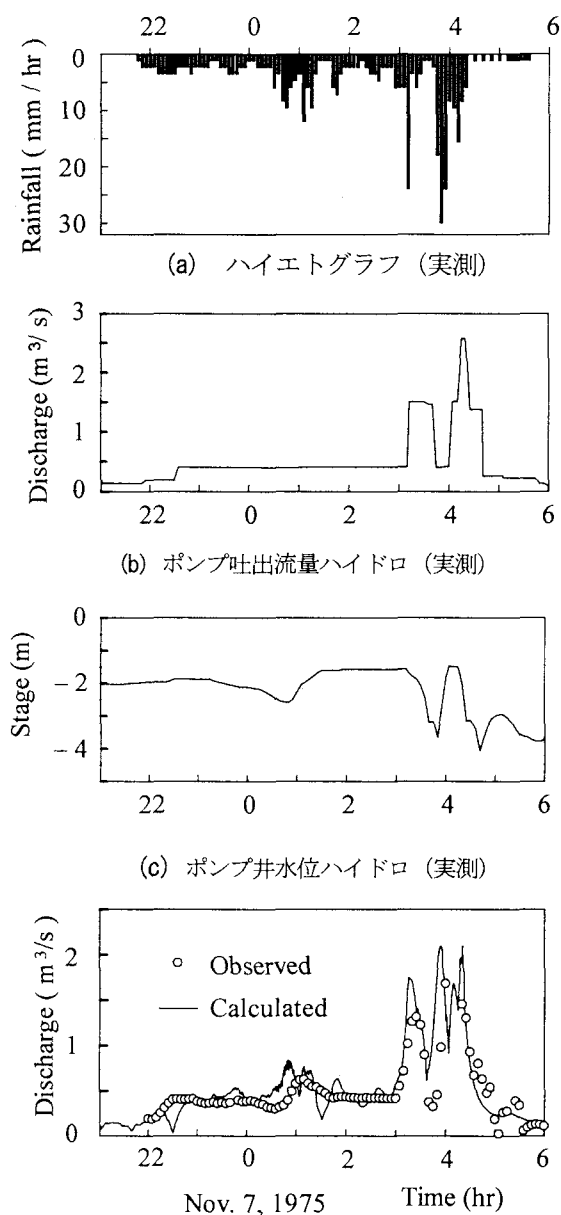


図-7 各下水管渠（88 本）における汚濁負荷流出係数の適値

-10) を見ると、流出の後半で、下水管渠内の残存負荷量が低下して汚濁負荷流出が小さくなり、かなりの精度低下を来しているが、全体的には、実用上の精度で実測結果を再現している結果の得られていることが分かる。



(d) 流量ハイドロの計算結果と実測結果の比較

図-8 流出シミュレーション結果

4. おわりに

本論文では、溶解性（浮遊型）と粒子性（掃流型）の汚濁を取り扱うことができる分布型土研モデルを提案するとともに、その実流域への適用性について実証的立場から検討を進めてきた。

その結果、本土研モデルを用いれば、合流式下水道の雨天時汚濁負荷流出を精度高くシミュレートしえるであろう見通しが得られた。

参考文献

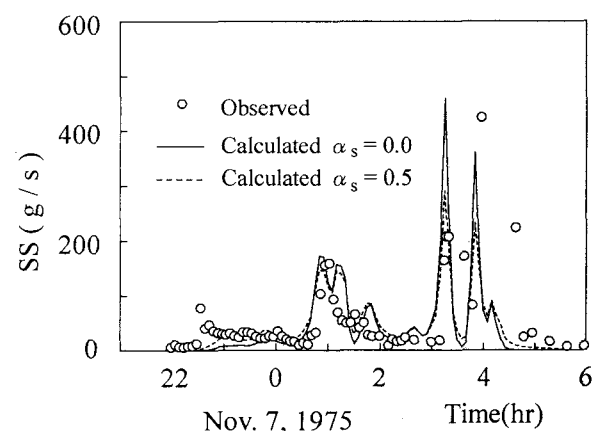


図-9 流出シミュレーション結果（SS-ロードグラフ）

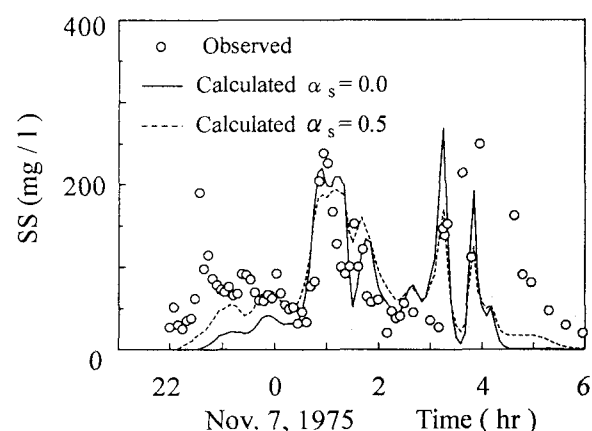


図-10 流出シミュレーション結果（SS-ポルレートグラフ）

- 1) (財)下水道新技術推進機構：流出解析モデル利活用マニュアル（雨水対策における流出解析モデルの運用手引き），pp. 2002年版，pp. 376～383，2002。
- 2) (社)日本下水道協会：合流式下水道改善対策指針と解説—2002年版—，pp. 376～383，2002。
- 3) 渡辺政広，永吉光一，岡田将人：合流式下水道流域における雨天時汚濁負荷流出の分布型非定常解析モデル，環境工学研究論文集，第35巻，pp. 73～84，1998。
- 4) 渡辺政広，永吉光一，右近雄大：土研モデルとSWMMを組み合わせた下水道流域の汚濁負荷流出モデル，水工学論文集，第42巻，pp. 199～204，1998。
- 5) 渡辺政広，西村文武，重田尚秀，小林康司：都市流域の不浸透流出面（屋根面，道路面）における雨水・汚濁負荷流出特性，水工学論文集，第45巻，pp. 55～60，2001。
- 6) 山口高志，松原重昭，山守 隆：都市における降雨流出調査第2報—修正RRL法による流出推定—，土木技術資料，第14巻第11号，pp. 34～39，1972。
- 7) (社)日本下水道協会：下水道雨水調整池技術基準(案)—解説と計算例—，pp. 8～18，1984。

(2004. 9. 30 受付)