

様式第11 別紙2

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1) 課 題 名：リアルタイム下水道水位・流量モニタリングに基づく内水氾濫危険度評価モデルの開発
- (2) 研 究 期 間：平成 29～30 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：二瓶 泰雄（東京理科大学・教授）
- (4) 研 究 代 表 者 名：二瓶 泰雄（東京理科大学・教授）
- (5) 共 同 研 究 者 名：仲吉 信人（東京理科大学・講師）
片岡 智哉（東京理科大学・助教）
小野村 史穂（東京理科大学・助教）
柏田 仁（パシフィックコンサルタンツ株式会社・主任技師）
尾ノ井 龍仁（パシフィックコンサルタンツ株式会社・技師）
赤羽 祐也（パシフィックコンサルタンツ株式会社・主任技師）
横山 博光（パシフィックコンサルタンツ株式会社・技師）
- (6) 補助金交付総額： 18,849,000 円
- (7) 技術研究開発の目的
増大する都市域の内水氾濫リスクに対応するために、未だ確立・一般化されていない「下水道流量観測システム」を構築するとともに、近年、整備が進みつつある下水道水位データを合理的に数値計算に取り込むことが可能な「水位データ同化手法を組み込んだ水位縦断分布推定モデル」を開発し、高精度・リアルタイム内水氾濫危険度評価の基盤構築を目指す。

(8) 技術研究開発の内容と成果

1. はじめに

気候変動に伴う降雨の局地集中化により、都市域の内水氾濫リスクが著しく上昇している。従来、内水氾濫の発生検知や被害状況把握は、通報・巡視に頼っており、いつ、どこで、どの規模の内水氾濫被害が発生したかを定量的かつ確実にモニタリングできておらず、錯綜する定性的な情報の中で避難判断や水防・排水活動が行われてきた。これらの課題を克服し、内水氾濫の予警報から発生・被害情報収集、それに基づく適切な避難判断や水防・排水活動を実現するために、本研究では、リアルタイム下水道水位・流量モニタリングに基づく内水氾濫危険度評価モデルを開発する。研究期間内の開発目標としては、(1) DIEX 法を管路流方向に改良し、リアルタイム下水道水位・流量観測システムを開発する。室内実験管路により基本的な計測性能・特性を検証し、高精度化を図る。現地実証試験により観測精度・適用範囲を明らかにする。(2) データ同化による水位縦断分布推定・内水氾濫危険度評価。管路系全体の内水氾濫危険度を評価可能とする。仮想管路流・現地観測データに本手法を適用し、有効性を検証する。

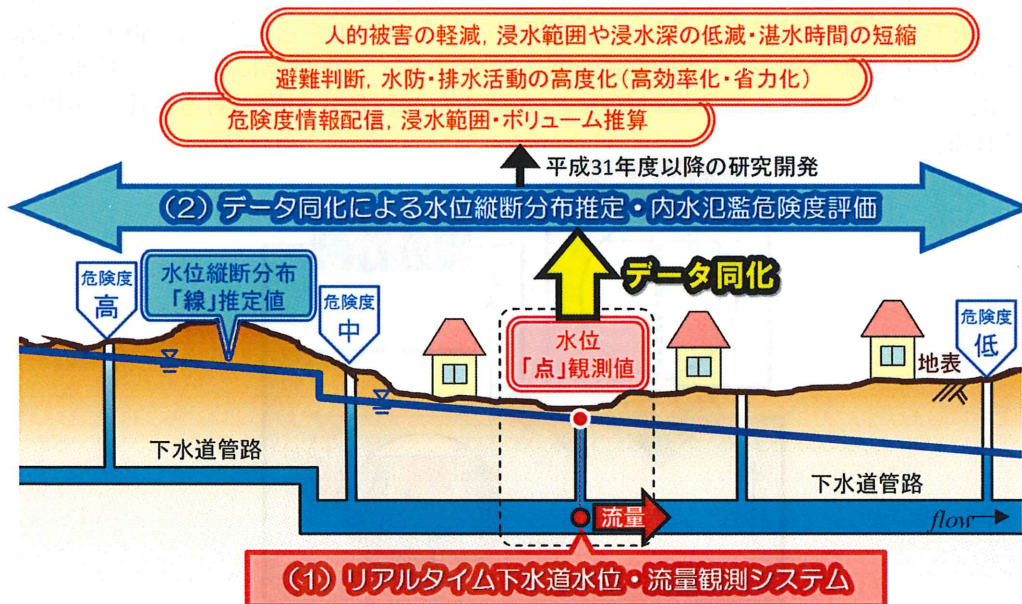


図 1 本研究開発の概念図

2. 流量用 DIEX 法の開発と検証

(1) 流量用 DIEX 法の概要と改良点

流量用 DIEX 法は横断面を対象とする数値計算手法であり、式(1)に示す簡略化した3次元運動方程式、式(1)を水深平均操作した式(2)を基礎式とし、同式には流速データ同化のために付加項 F_a を導入している。付加項 F_a は省略した非定常項、移流項、主流方向乱流拡散項や式中の各項の見積もり誤差、同化データの観測誤差を含んだものに相当し、同式の力学バランスを維持している。

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_a = 0 \quad (1)$$

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{A_H} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) - \frac{C_f}{D} \bar{u}^2 + \overline{F_a} = 0 \quad (2)$$

ここで、 y, z はそれぞれ横断、鉛直方向、 u は主流方向流速、 g は重力加速度、 I は水面勾配、 A_H は水平渦動粘性係数、 A_V は鉛直渦動粘性係数、 D は水深、 \bar{u} は水深平均された主流方向流速、 $\overline{A_H}$ と C_f は水深平均された水平、鉛直渦動粘性係数をそれぞれ表す。流量用 DIEX 法では、図 2 に示すように、流速観測データを同化することで付加項 F_a を求め、内外挿された付加項 F_a から流速横断面分布を求める。収束計算によって、数値計算の解が同化データと一致するように付加項 F_a が修正され、目的変数である流速が精度良く同化される。

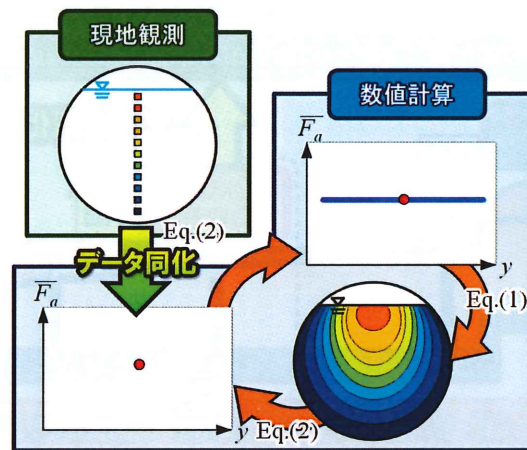


図 2 流量用 DIEX 法の概念図

本研究では、従来対象としてきた開水路状態に加えて、遷移状態や圧力状態を取り扱うことが可能な汎用モデルとするために、基礎方程式を変更せず、境界条件と乱流モデル、計算格子を修正した。境界条件については、河川モデルでは上部に自由水面境界条件、底部に壁面境界条件を想定していたが、管路モデルでは遷移・圧力状態を表現するために上部にも壁面境界条件を付与可能とした。乱流モデルには、計算負荷の小さい ϵ 方程式モデルを採用し、水面・底面からの距離の関数として渦動粘性係数を与えていたが、管路では周囲の壁面影響を考慮する必要があるため、渦動粘性係数を壁面を含む境界面からの距離の関数として再定義した。また、後述する流速計によって管路中央の流速鉛直分布を計測するため、流速データや同データから算定される付加項 F_a も管路中央に限定される。このため、付加項 F_a を横断面内に内外挿する必要があるが、本研究では、管路中央の F_a を横断面内に一様に与えた。座標系としてデカルト座標系を採用し、計算領域内に任意の境界条件を与えることで様々な断面形や水位での計算を可能とした (図 3)。

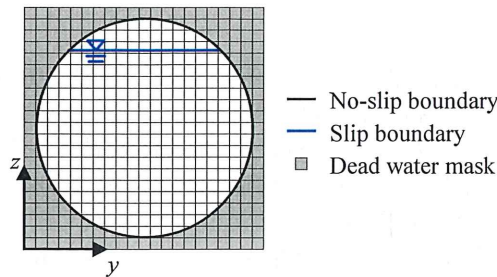


図 3 流量 DIEX 法における管路用座標系

(2) 室内実験の概要

流量用 DIEX 法による流速内外挿・流量算出精度を検証するために、室内実験を実施した。図 4 に示す管径 $D=0.49$ [m]、管路勾配 $i=1.0$ [‰]、長さ $L=13.0$ [m] の一様円管路を用いて、定常な上流端流量・下流端水位を与えて通水した。流量は 50 [L/s] と 110 [L/s] の 2 ケースとし、それぞれについて流速計測地点の水位 η を $0.50D$ 、 $0.63D$ 、 $0.75D$ 、 $0.88D$ 、 $1.00D$ に変化させて合計 10 ケースの水理条件を与えた。流速計測には、鉛直設置型 ADCP (V-ADCP、2400kHz、TeledyneRDI 製) を上流端から 8.5 m の管路壁面に設置した。この設置断面は、取り外して円周方向に回転できるようになっているため、V-ADCP を管路壁面に固定し、管路断面を回転させて、円管路全体の流速値を得た。この時の V-ADCP の設置角度 θ としては、 0 (鉛直上向き)、 22.5 、 45 、 90° (水平方向) とした。V-ADCP の計測モードとしては、ピング数 10、層厚 3cm、層数 20 に設定し、10 秒間隔で 5 分間計測した。また、上流端の流量や管路内水位はそれぞれ検定堰 (JIS 準拠)、マンメータの目視計測により実施した。

V-ADCP には超音波を送受信する 3 つの流速用トランスデューサーがあり、それぞれの音波 beam 方向流速成分を計測する (図 4)。一般には、3 つの beam 方向流速成分を合成して三次元流速の鉛直分布を計測する。また、主流方向の一次元流れであると仮定すれば、各 beam 方向流速成分から主流方向流速の算定も可能である。

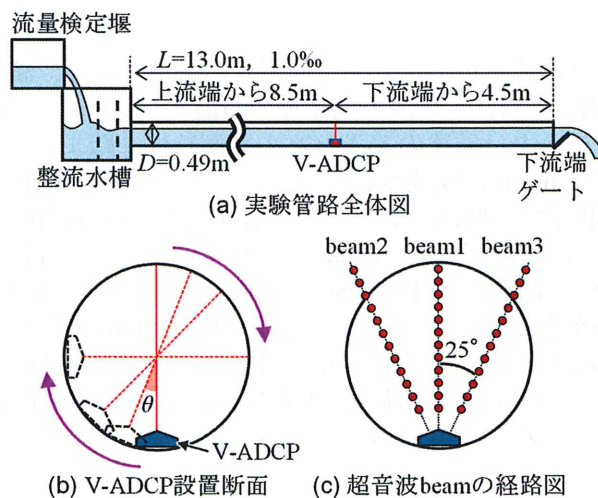


図 4 室内実験で用いた管路

(3) 実験結果と考察

まず、V-ADCP の流速計測特性を把握するために、流量 110L/s、満管時 ($\eta=1.00D$) における主流方向流速の鉛直分布を図 5 に示す。ここでは、一般的な全 beam の合成流速と beam1 のみから得られる主流方向流速（以下、beam1 流速）を対象とする。また、図中の色付線は 10 秒間隔での計測生データ、黒実線はそれらの平均値を表す。これより、全 beam 合成流速は管路中心 ($z=0.245$ [m]) より管頂に向けて徐々に流速が低下するが、 $z=0.41$ [m] 以上では流速が増加する等の不自然な結果となった。一方、beam1 流速では、管路全体にわたり良好に計測できていることが分かる。これは、全 beam 合成流速では、beam2、3 が横断方向にも傾斜した超音波 beam の経路となっており、管頂より低い位置で壁面に超音波が達し干渉を強く受けるが、beam1 流速では相対的に壁面の干渉を受けづらいため、管頂近傍まで良好な流速計測ができたものと考えられる。一方、流速計測値の偏差に着目すると、beam1 流速より全 beam 合成流速の方が全体的に小さくなっており、壁面の影響を受けない範囲では全 beam 合成流速を用いることが望ましい。このように V-ADCP は複数の傾斜した超音波により流速鉛直分布を計測する機器であるため、壁面境界の干渉を受けたデータを除く必要がある。具体的には、超音波 beam の経路と水面・壁面境界の接触判定及び、超音波反射強度分布から超音波減衰・干渉判定を行い、データ除去を行った。

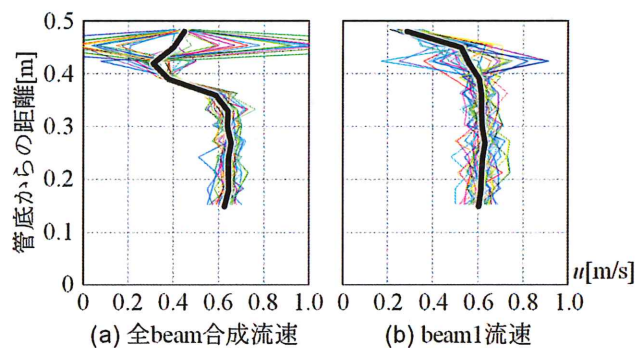
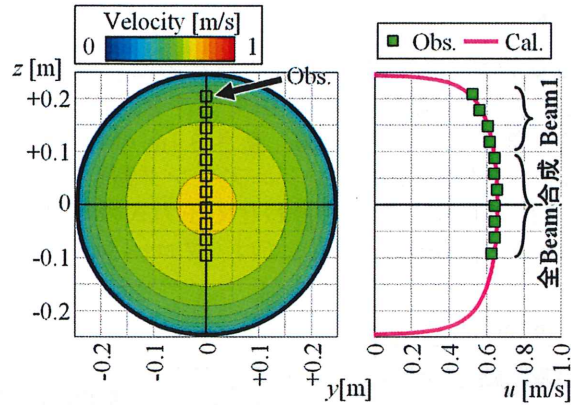
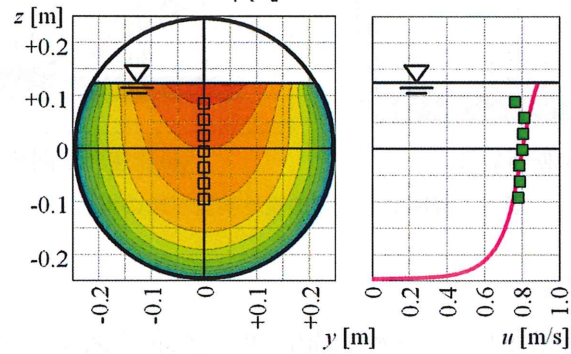


図 5 満管通水時における流速鉛直分布（設置角度 $\theta=0^\circ$ ）

V-ADCP 計測データに流量用 DIEX 法を適用した結果として、満管状態 ($\eta=1.00D$) と開水路状態 ($\eta=0.75D$) における主流方向流速の断面コンターと鉛直分布 ($y=0$ m) を図 6 に示す。なお、同化データは前述の V-ADCP の計測特性を踏まえて、beam2、3 が壁面の影響を受けるまでは全 beam 合成流速を、それ以遠では beam1 流速をそれぞれ用いた（図中□印）。まず、満管状態での断面コンターに着目すると、同心円状の流速分布が滑らかに得られている。次に、流速鉛直分布 ($y=0$ m) では、同化データを滑らかに内外挿する流速分布が推定されている。開水路状態の断面コンターでは、自由水面の流速が大きくなる形で滑らかな流速分布が得られている。流速鉛直分布 ($y=0$ m) では、最表層の流速観測値と解析値にやや乖離が見られ、水表面付近の流速計測特性や解析精度について検討する必要性が示唆された。このように、流量用 DIEX 法により遷移・圧力状態において円管路断面内流速分布を概ね再現できていることが伺える。



(a) $\eta=1.00D$



(b) $\eta=0.75D$

図 6 流量用 DIEX 法による流速分布推定結果

このような流速横断面分布から算定された流量は図 7 に示すとおりであり、参照値 110L/s に対してやや過小評価となった。流速が良好に同化されているにもかかわらず、流量がやや過小評価となっており、小径管での実験であるために V-ADCP が流況に影響を与えている可能性や、流量用 DIEX 法モデルが考慮していない 2 次流の効果が発生している可能性があり、今後の課題とする。

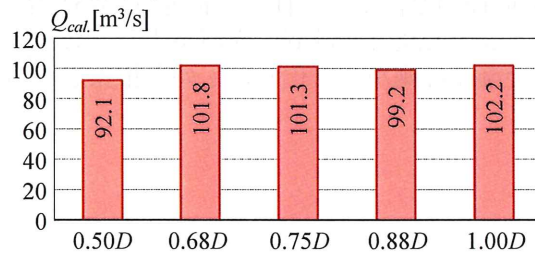


図 7 流量用 DIEX 法による水位ごとの流量算出結果

(4) 現地実証試験の概要

本手法による管路流量観測の有効性を検証するために、既存の管路流速観測データに対して前節までに構築した管路流量用 DIEX 法モデルを適用する。対象管路は、北海道札幌市を流れる琴似川暗渠部であり、幅 6.2m、高さ 3.1m の矩形管路である。流速計測は、超音波ドップラー流速計 KB47B (東建エンジニアリング製) を用いて 2006/5/17~12/21 の間に 10 分間隔で実施されており、これと合わせて圧力式の簡易水位計による水位計測も実施された。検証用の流速・流量データとしては、プロペラ式流速計による観測値を用いる。

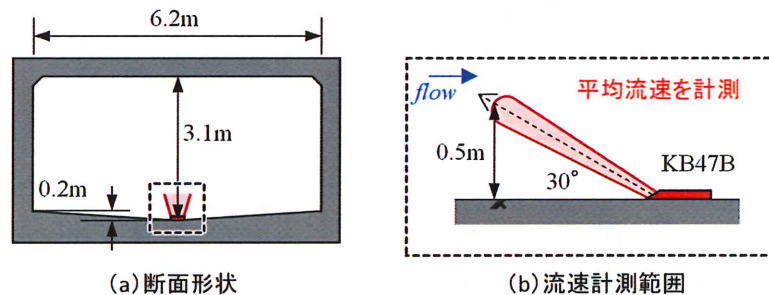


図 8 管路流量観測の現地実証試験の概要

(5) 現地実証試験の結果

水位・流速の計測結果として、観測期間中の時間変化を図 9 に示す。同図中の縦実線はプロペラ式流速計による検証用観測実施日を示している。水位の時間変化より、複数回の出水イベントが観測されていることが確認でき、同タイミングで流速が大きくなっている。また、検証用観測は平常時に限定されていることが分かる。また、図 10 には水位・流速の相関図を示しており、概ね水位に応答する形で流速が計測されているものと推察される。しかしながら、水位が概ね連続的に計測できているのに対し、流速データについては極端に小さい値を記録している期間も存在し、計測に何らかの不具合があったものと推察される。流速計測不具合前後のデータを図 11 に示すが、小規模の水位上昇の後に流速計測異常が現れ、その後の水位上昇に伴って流速計測が正常に戻っている。これより、土砂堆積やゴミ漂着等によって超音波計測に支障が生じ、水位・流速の増加に伴って、原因が取り除かれたことで流速計測が正常化したものと推察される。

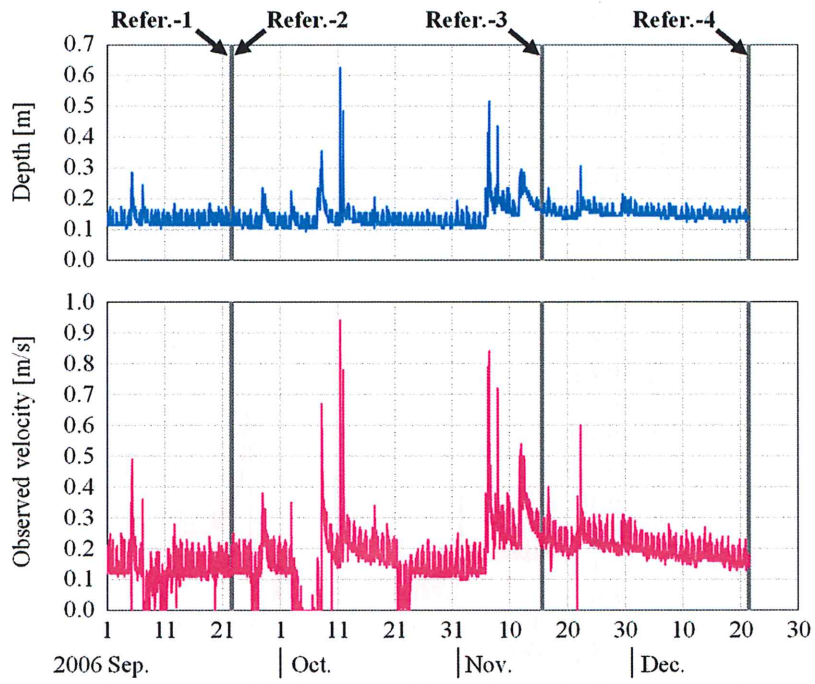


図 9 現地管路における水位・流速の計測結果

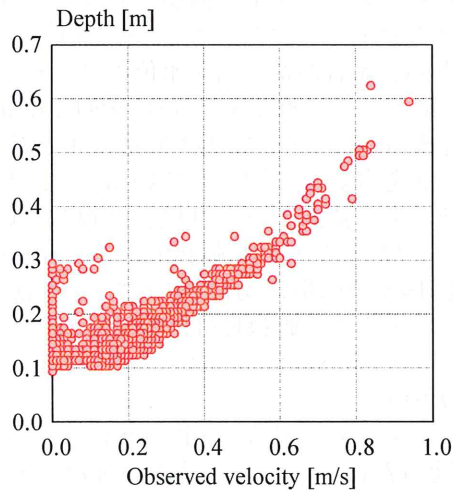


図 10 現地管路における水位・流速の相関図

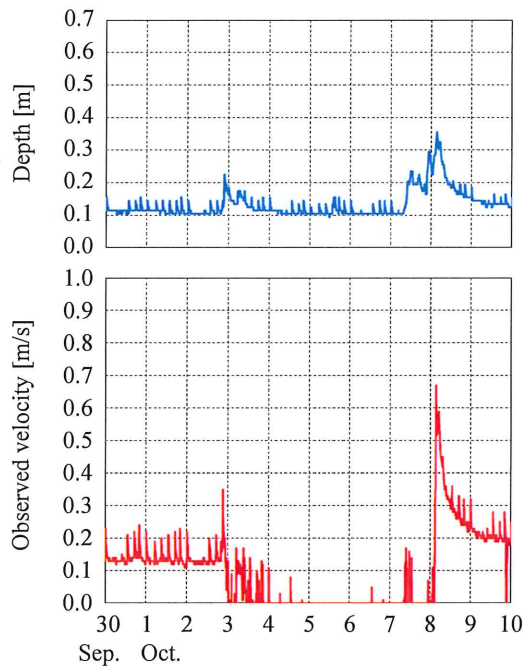


図 11 現地管路における流速計測不具合発生時付近の時系列データ

次に、検証用流速・流量データの存在する期間を対象に、DIEX 法による流速分布・流量推算を行った結果について示す。ここで、プロペラ式流速計を用いた検証用観測には 20～25 分を要していたことから、超音波流速計・水位は 3 データ (10 分間隔×3) の平均値を用いている。流速推算結果として、水深平均流速の横断分布図を図 12 に示す。同図中には、本手法における超音波流速計データ、DIEX 法による流速分布推算結果、プライス流速計による流速観測データを合わせて図示している。これより、管路中心における超音波流速計とプライス流速計による流速データは概ね一致している。また、DIEX 法により内外挿された流速分布データは、プライス流速計による流速横断分布と概ね良好に一致した。その結果として、図 14 の相関図に示すように、本手法の流量推算値は検証用データに対してやや過小評価しながらも、概ね良好に算定されていることが分かる。また、水位-流量の関係図を図 15 に示しているが、プライス流速計による検証用流量データより、本手法の方が H-Q 関係が明瞭である。

さらに、長期観測期間の連続流量算出結果を図 16 に示す。また、同期間の全データを用いた水位-流量関係図を図 17 に示す。増水時の検証用データがないため、精度の評価は困難ではあるが、本手法による複数イベントの水位-流量関係は概ね類似し、本手法により概ね安定的な流量モニタリングが可能であることが示された。

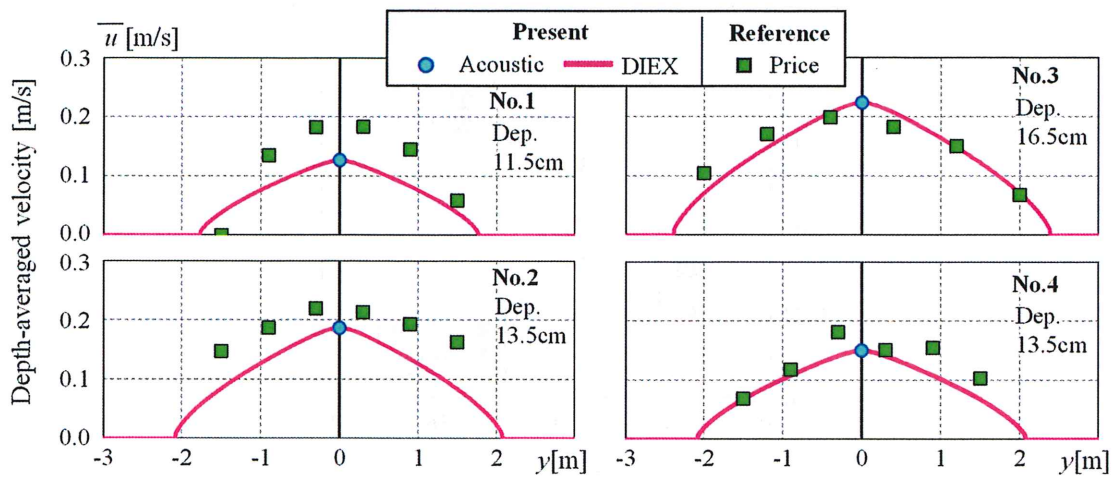


図 12 現地管路における水深平均流速横断分布図

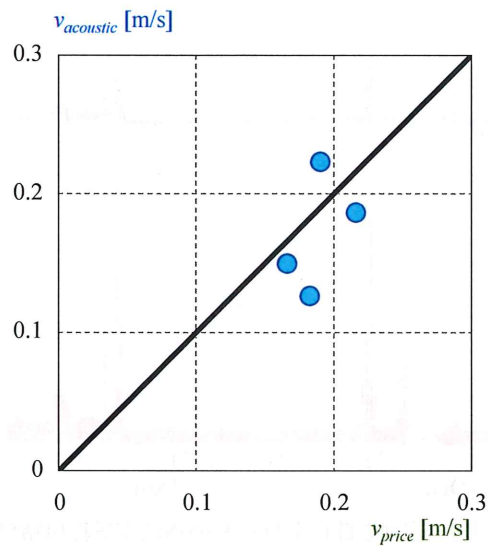


図 13 管路中心流速の相関図

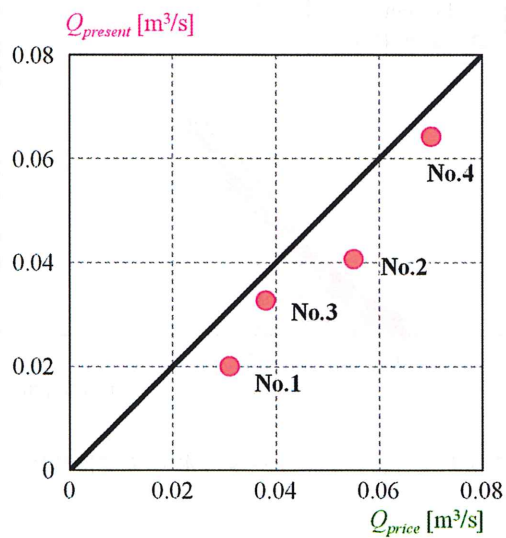


図 14 本手法と検証用観測の流量に関する相関図

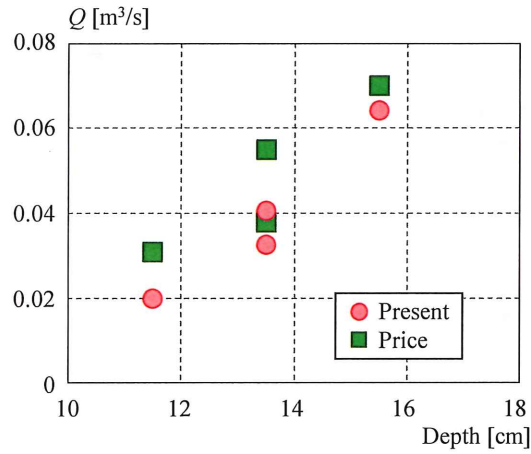


図 15 本手法および検証観測データの水位-流量関係図

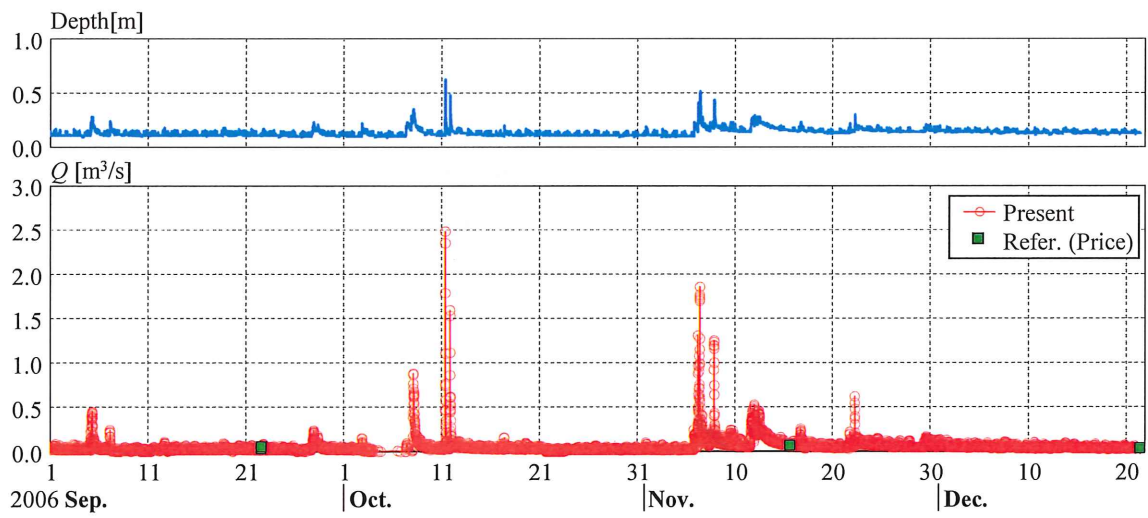


図 16 現地管路における長期連続流量算出結果

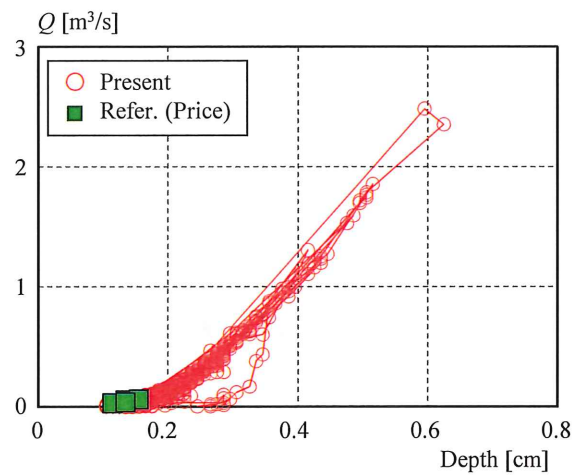


図 17 本手法および検証観測データの水位-流量関係図（長期間）

3. DIEX-Flood の改良

(1) 水位用 DIEX 法の概要と管路流用モデルへの改良

水位用 DIEX 法における基礎方程式（一次元不定流計算）である連続式と運動方程式は、時間を t 、流下（縦断）方向を x とすると、以下の通りである。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} + F_a = 0 \quad (4)$$

ここで、 A は断面積、 Q は流量、 g は重力加速度、 η は水位、 R は径深、 n はマンニングの粗度係数、 F_a は付加項である。水位用 DIEX 法 (DIEX-Flood) の基本的枠組みを図 18 に示す。まず、現地観測により、上流端の観測流量 Q_{obs} と複数地点の観測水位 η_{obs} を得る。観測水位 η_{obs} をデータ同化する形で一次元不定流計算を行い、観測流量 Q_{obs} は上流端の境界条件に用いる。水位観測データを同化する際には、運動方程式中に新たに組み込まれた付加項 F_a を介す。次に、付加項 F_a は水位の同化地点毎に得られるため、縦断方向に F_a を内外挿する。ここでは、 F_a をデータ同化地点下流側に一様分布として与える。さらに、得られた F_a の縦断分布を用いて式(3)、(4)を用いて水位と流量を求めると、これら付加項・水位・流量の解が収束するまで繰り返し計算を行う。

付加項 F_a は、水位観測値を合理的に数値計算に取り込むために加えた項である。付加項の物理的意味としては、湾曲や枝管の合流などの計算モデルで取り込んでいないモデル上の誤差や数値パラメータ設定に起因する誤差、水位・流量観測値の誤差を反映したものである。

水位用 DIEX 法の下水管路流への適用時の改良点を記述する。管路流れでは、水位が管頂を下回り自由水面が現れる開水路流れと、水位が管頂を上回り満管状態の流れがあり、後者は圧力変化を考慮する必要がある。本手法で用いている一次元不定流の基礎方程式（式(3)、(4)）は、自由水面を有する開水路流れへの適用性しか有していない。そこで、図 19 に示すように、圧力管状態でも解析できるようにするために、管上側に流量を無視できる程度の極細いスリット（プライスマンスロット）を導入し、流れ場を開水路流れとして扱うことが可能となる。これにより、開水路状態～遷移状態～圧力流状態を計算可能としている。

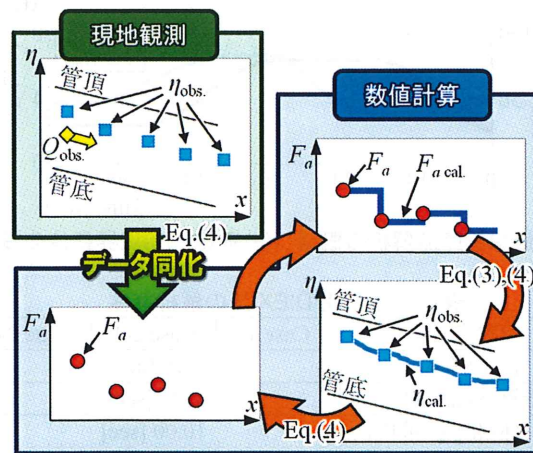


図 18 水位用 DIEX 法 (DIEX-Flood) の基本的枠組み

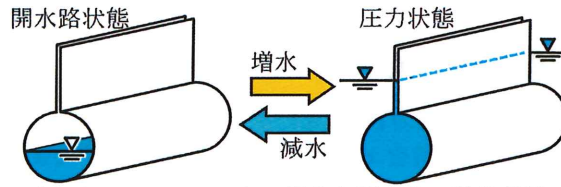


図 19 プライスマンスロットの導入と開水路・満管状態の様子

(2) 仮想管路流条件の概要

DIEX-Flood におけるデータ同化手法の有効性を検討するため、図 20 に示す一様断面（管径 5.0[m]）、一様勾配（ $=1.0 [‰]$ ）の仮想管路流（全長 4[km]）の解析を行う。ここでは、仮想的な管路流条件下にて一次元不定流解析を行い、得られた水位・流量縦断分布の計算結果（シミュレーションデータ η_{sim} ）を真値とする。 η_{sim} の作成に当たり、不規則な水面変化が生じるように疑似的に粗度係数 n を $0.01 \sim 0.02 \text{m}^{-1/3}\text{s}$ の範囲で乱数を与え、粗度係数の平均値 $n_{ave.} = 0.015 \text{m}^{-1/3}\text{s}$ となるよう設定した。また境界条件として上流端流量と下流端水位を図 20 の通り与えた。下流端では、計算開始 25 分頃から 45 分頃まで満管となり、圧力状態での計算を行っている。この流況に対して本手法を適用するには、一様粗度の管路流に η_{sim} の一部を同化データ $\eta_{obs.}$ として与え、本手法の水位縦断分布の推定精度を検証する。本手法の計算条件は表-1 に示すように、データ同化無（Case1）と、データ同化有で同化間隔 500m（Case2-1）、1000m（Case2-2）の 3 ケースを設定した。計算時間間隔 0.01sec に対し、データ同化は 10sec 間隔で行った。

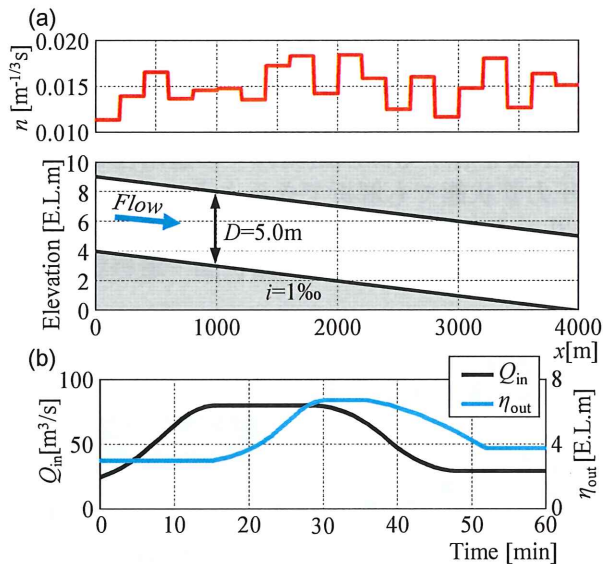


図 20 仮想管路流解析の概略 ((a)概要, (b)境界条件の設定)

表-1 水位用 DIEX 法の解析条件

実験条件	Case 1	Case 2-1	Case 2-2
格子間隔		10 [m]	
計算時間間隔		0.01 [sec]	
データ同化時間間隔		10.00 [sec]	
粗度係数 n		一様 $0.015 [\text{m}^{-1/3}\text{s}]$	
データ同化空間間隔	無	500 [m]	1000 [m]

(3) 仮想管路流の解析結果と考察

本手法による解析結果として、 $t = 15, 25$ [min]における水位縦断分布を図 21 に示す。これらの時刻はそれぞれ遷移状態、圧力状態であるが、いずれについても、Case 2-1、2-2 はシミュレーションデータ η_{sim} と良好に一致した。一方で、Case 1 では $x=2000$ [m]より上流での水位過小評価が顕著である。次に、水位計算精度の空間分布特性を把握するために、水位計算値 η_{cal} とシミュレーションデータ η_{sim} の差分 $\Delta\eta$ の RMS 値 $RMS_{\Delta\eta}$ の縦断分布を図 22 に示す。ここでは、10sec 間隔ですべての計算メッシュにおける $\Delta\eta$ を算定し、時間方向に平均する形で $RMS_{\Delta\eta}$ を求めた。これより、水位データ同化を行わない Case 1 では上流部において計算誤差が大きいが、データ同化を行う Case 2-1、2-2 では全区間で概ね高精度であり、データ同化間隔が小さいほど高精度であった。さらに、水位計算精度の時間変動特性を把握するために、図 23 に空間平均の $RMS_{\Delta\eta}$ の時間変化を示す。これより、開水路流れから圧力流れへの遷移により抵抗が増大し水位が大きく上昇するタイミングで Case 1 の誤差が大きくなっている。Case 2-1、2-2 では、水位データ同化によって、開水路、遷移、満管の状態が概ね適切に再現されることで精度が保持されている。時空間平均した $RMS_{\Delta\eta}$ は Case 1、2-1、2-2 それぞれについて、0.209m、0.054m、0.088m であり、水位データ同化によって、計算領域全体にわたって水位推定精度が大幅に向上し、水位モニタリングへの基本的な有効性が示された。

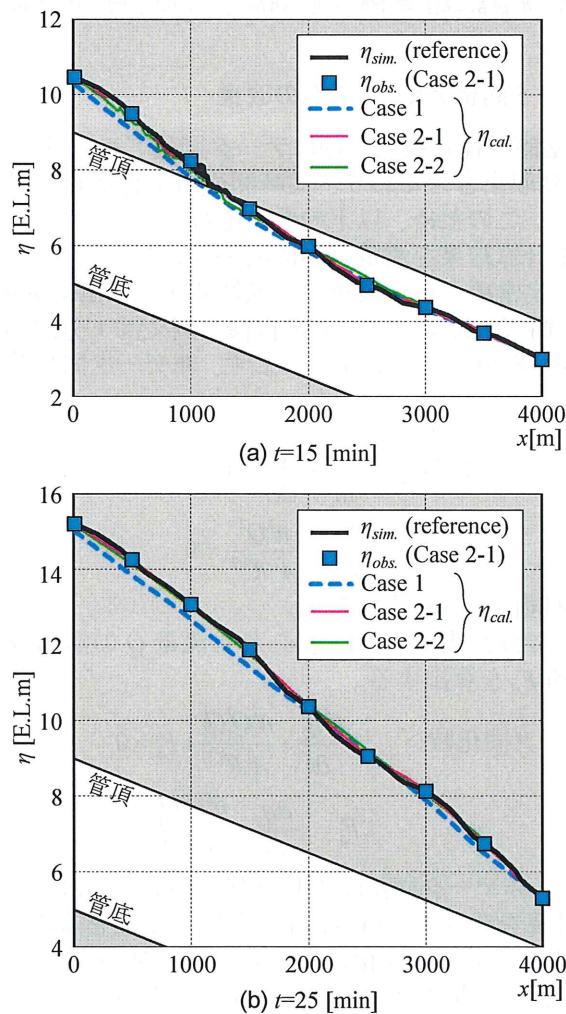


図 21 各時刻における水位縦断分布

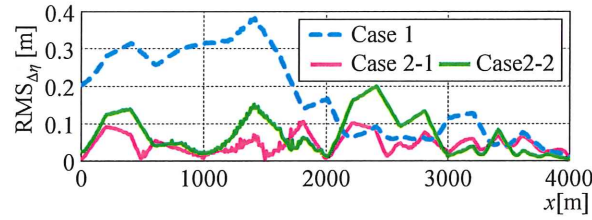


図 22 水位計算誤差 RMS 値 $RMS_{\Delta\eta}$ (時間平均) の縦断分布

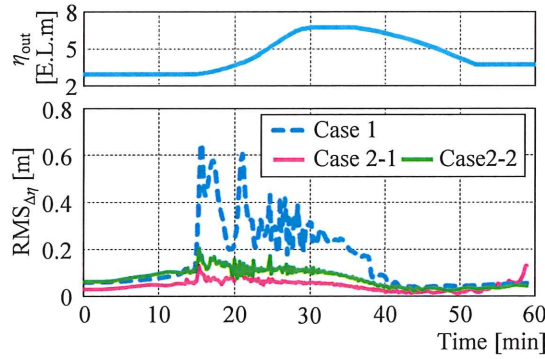


図 23 水位計算誤差 RMS 値 $RMS_{\Delta\eta}$ (空間平均) の時間変化

(4) 高速化のためのデータ同化アルゴリズムの改良

式(3), (4)に示した基礎方程式系ならびにデータ同化アルゴリズムでは、水位 η と流量 Q 、付加項 F_a を同時に収束させており、実時間運用を想定した場合には計算負荷が大きくなる可能性があった。このため、以下の改良を行った。

- ・水位データの同化計算結果を流量算出に反映させない。
- ・運動方程式から非定常項と移流項を除く拡散波法 (Diffusion wave) を用いる。

このため、データ同化時 (水位データの計測間隔、例えば 1 分間隔) と非データ同化時の計算 (毎計算ステップ) を分けて実施する。まず、非データ同化時では、一般の不定流計算を以下の式で行う。

$$\text{<①非データ同化時>} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} = 0 \quad (6)$$

ここで、 η_1 は非データ同化用の水位である。

次に、データ同化時では、式(5)、(6)で得られた流量 Q の空間分布を用いて、次式から同化用水位 η_2 と付加項 F_a を算出する。

$$\text{<②データ同化時>} \quad \frac{\partial \eta_2}{\partial x} + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} + F_a = 0 \quad (7)$$

$$F_a = -\frac{\partial \eta_2}{\partial x} - \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} \quad (8)$$

このように改良法では、非データ同化時の時々刻々の計算では一般の不定流計算を、データ同化時には不等流計算をそれぞれ行う。流量と同化水位を連成させないため、計算安定性が向上することに加え、データ同化に用いられる付加項を含む計算をデータ同化時のみに限定できるので、計算負荷を飛躍的に減らすことが可能となる。なお、式(8)により水位観測点で得られた F_a の内挿方法としては、観測点間で一様に与えている。

(5) 現地実証試験の概要

本手法による水位縦断分布推定の現地への適用性を検証するために、現地実証試験を行った。観測サイトは、図 24 に示す川和下雨水幹線（横浜市都筑区）であり、流末の都筑水再生センターからポンプアップにより鶴見川に放流される低段の幹線である。対象幹線の総延長は約 1.5km、集水面積は 120ha に亘り、大小含めて 9 の枝線流入が存在するが、上流端から約 900m の地点で鶴見川右岸側流域からの比較的大きな枝線流入（φ2400）がある。また、対象幹線は大きく 4 つの区分することができ、それぞれの勾配や断面形・延長は表-2 に示すとおりである。

境界条件・データ同化用、ならびに検証用のデータとして、幹線内の 9 地点の管路底部に自記式水位計（U20 Water Level Logger、Onset 社）を設置し、5 分間隔で計測した。これらの水位計設置地点は、断面形変化箇所や枝線流入により水面形に変化が生じやすい場所を選定した。

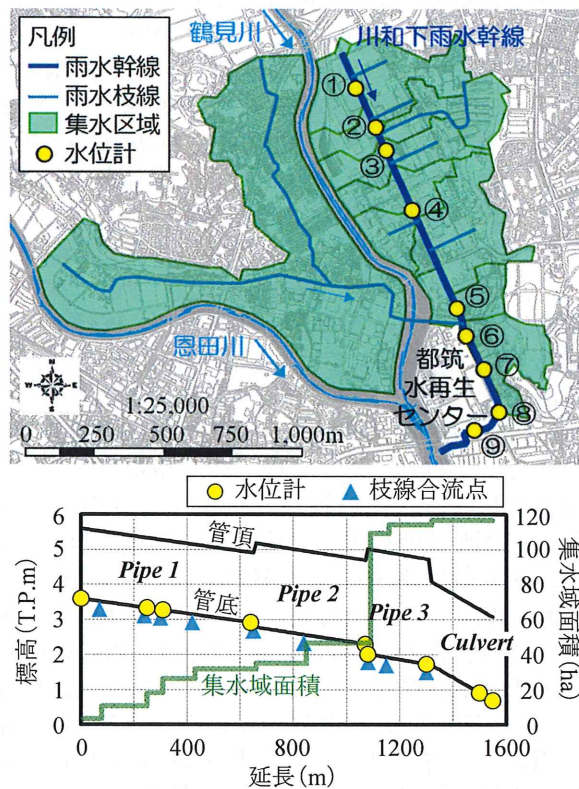


図 24 対象幹線の平面・縦断分布と観測機器の位置図

表-2 幹線の諸元

	Pipe 1	Pipe 2	Pipe 3	Culvert
底面勾配 (%)	1.1	1.2	1.3	4.4
断面形 (mm)	φ 2000	φ 2400	φ 3000	3400×2380
水路長 (m)	652	419	237	231
粗度係数	0.013m ^{-1/3} s			

(6) 観測結果及び計算条件

検証期間は、2018/9/12～11/21 の約 2 ヶ月間を対象とし、複数の降雨イベントを観測した。全観測期間における計測水位の時間変化を図 25 に示す。同図には、最寄りの都田雨量観測所（国土交通省、都筑水再生センターから 1.5km）の雨量データを合わせて表示している。これより、降雨が発生している時間帯において、各地点の水位が上昇し、降雨に対する明確な応答性を確認できる。なお、幹線の流末付近に位置する地点 8 及び地点 9 では、2～3 日程度の時間を掛けながら水位が緩やかに変動する期間が存在する（例えば、10/4～6、11/10～13 等）、これは、鶴見川へのポンプ排水における運転操作の影響であり、降雨イベントの有無に依らない。

本論文では、主要な出水イベントとして、2018/9/17 の水位データに着目して、分析・検証を行う。同イベントの流域平均雨量及び全観測地点の水位の時間変化を図 26 に示す。ここで、流域平均雨量は、国土交通省の X-RAIN 参照) による降雨データ (1 分間隔) を用いており、当該幹線の集水域に該当するメッシュ上の雨量データを単純平均している。総雨量は 50[mm]、降雨強度のピークは約 45[mm/h]に及ぶ。また、雨量波形と水位波形は明瞭に連動しており、また、降雨波形ピークから水位波形ピークまでの時間差は僅か 11 分である。対象幹線程度の規模の雨水幹線においては 10 分雨量データでは水位変動特性を説明困難であり、時空間解像度の高いレーダー雨量を用いる必要性が示唆された。さらに、個々の水位に着目すると、上流部（地点①・②）では、増水時には水位が同一となっており、ほぼ湛水状態と推察される。これより、上流からの流入が少ない一方、枝線からの流入が大きいことが推察され、枝線流入の適切な考慮の重要性が示唆される。一方、中流～下流部（地点④～⑦）では、水面勾配が概ね一定であるが、局所的に水面勾配が変動している時間が散見され、枝管流入タイミング等の影響と推察される。最下流部（地点⑧～⑨）では、管径が相対的に大きいにもかかわらず、1m 程度の水位上昇が確認でき、また、一時的に逆勾配も認められる。なお、観測期間内で 2 番目に規模が大きかった 11/6 出水時でも、同様の傾向が見られ、下流側の方が相対的に水位の上昇が大きいことが確認できた。以上の見解を踏まえ、再度観測期間全体における雨量と水位の関係を見ると、総雨量が 10mm 程度の出水であっても、雨水管内の水位が応答し、枝線が受け持つ集水域での流入量が漸増された下流部では、上流部より管径が大きいものの、相対的に水位の上昇が大きいことが確認できる。

このような現地管路・観測データを対象として、本手法による水位縦断分布推定を行う。まず、計算対象区間は、円管路区間である Pipe1～Pipe3（約 1.3km）とした。計算区間内には、①～⑦の水位計が位置する。下流側の Culvert 区間を計算対象から除いたのは、同区間ではポンプの運転の影響を強く受けることに加え、常に射流状態となったためである。計算に用いる境界条件や粗度係数・計算時間間隔等のパラメータは、表-3 に示す通りであり、境界条件は図 27 に示す時間変化を与えた。ここで、流入量は、合理式により幹線の集水区における流出量を算定するものし、雨量データとしては X-RAIN を使用した。なお、本来考慮すべき降雨の窪地貯留損失や土壌浸透損失を簡便に取り扱うために、これらの影響を含んだものとして流出率を 0.3 として与えた。また、下流端水位はモデルの下流端に位置する⑦地点の水位計観測値を使用した。マンニングの粗度係数 n は、 $n=0.013 [m^{-1/3}s]$ を一様に与えた。

データ同化の効果を検証するため、表-4 に示すようにデータ同化地点数および流出率を変化させた全 8 ケースの解析を行う。なお、データ同化はすべてのケースで 60 [sec] 間隔とし、現地観測の 5 分間隔の水位データを線形補間して与えた。

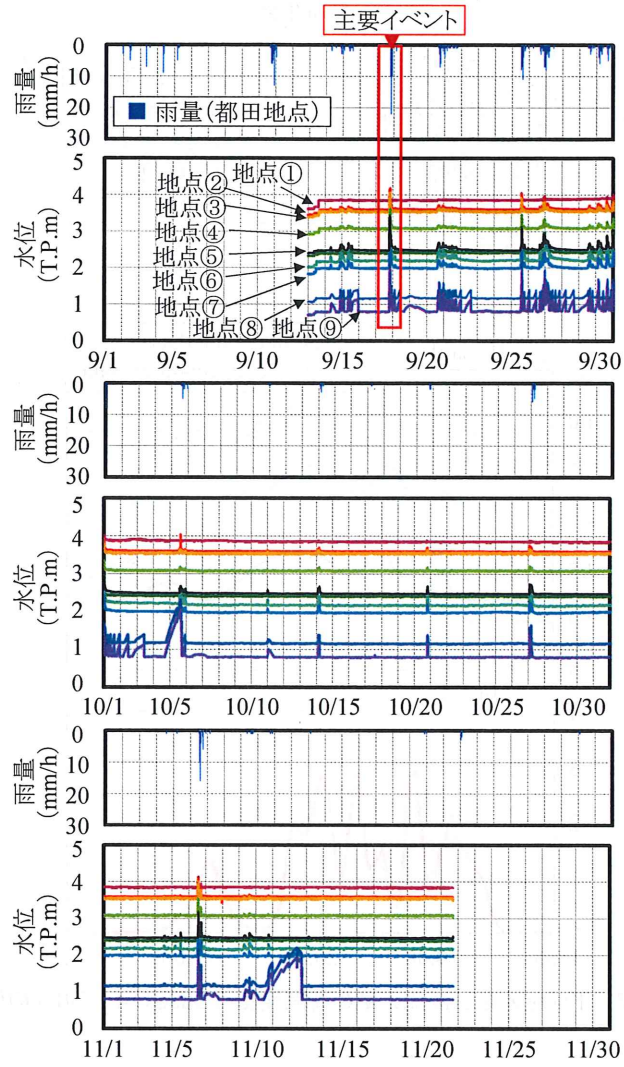


図 25 流域平均雨量及び観測水位の時間変化

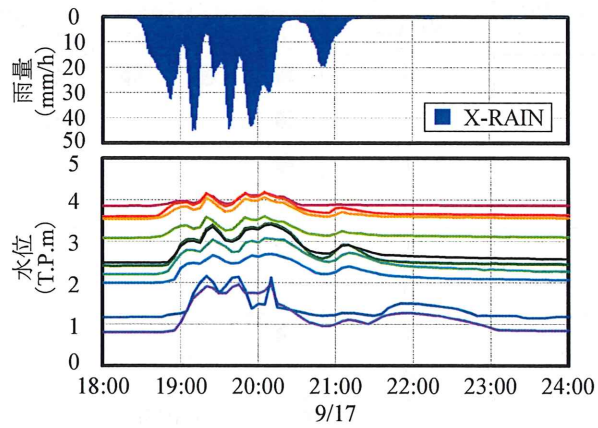


図 26 流域平均雨量及び観測水位の時間変化 (9/17)

表-3 解析条件一覧

境界条件	流入量	合理式より作成
	降雨データ	X-Rain 降雨強度[mm/h]
	下流端水位	下流端水位観測値[T.P.m]
粗度係数		一様 0.013 [m-1/3s]
格子間隔		10.0 [m]
計算時間間隔		0.1 [sec]
データ同化時間間隔		60.0 [sec]

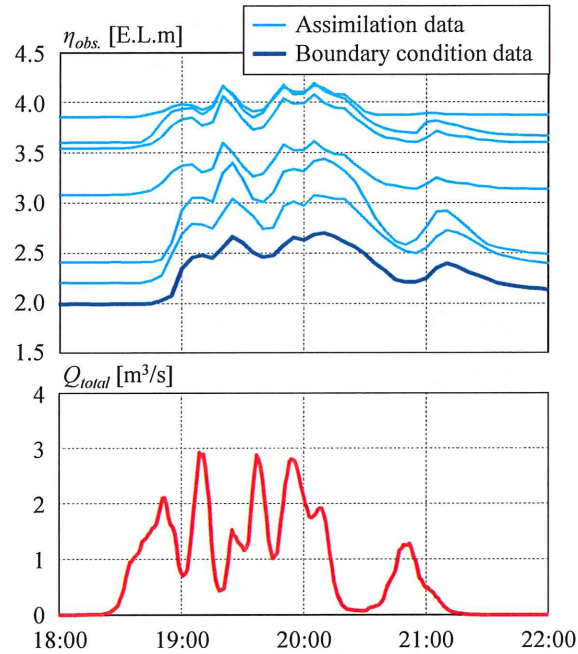


図 27 下流端水位と総流入量の時間変化 (Case1~4, f=0.3 の例)

表-4 解析ケース一覧 (データ同化の有無)

解析ケース	流出率	データ同化地点数	データ同化地点					
			①	②	③	④	⑤	⑥
Case1	0.3	6	●	●	●	●	●	●
Case2		4	●	-	-	●	●	●
Case3		1	●	-	-	-	-	-
Case4		0	-	-	-	-	-	-
Case5	0.4	1	●	-	-	-	-	-
Case6		0	-	-	-	-	-	-
Case7	0.2	1	●	-	-	-	-	-
Case8		0	-	-	-	-	-	-

● : データ同化有り, - : データ同化無し

(7) 計算結果

本手法による解析結果として、増水～ピーク付近に相当する 9/21 19:00～20:00 (10 分間隔) における水位縦断分布および全データ同化 (Case1) との水位差分縦断図を図 28～図 34 に示す。図中には、水位計観測値と、本手法による水位・流量の縦断分布推定結果として Case1～4 の結果を表示している。これより、いずれのケースにおいても流量の流入・伝播により、連続的な水位縦断分布が推定されている。全地点でデータ同化を行っている Case1 では、実測値を通る形で縦断分布が推定されているのに対し、データ同化を行わない Case4 では乖離が認められる。特に、主要枝線が流入する $x=1090$ [m] の地点付近の再現精度が低い。次に、データ同化地点数を間引いた Case2、Case3 に着目すると、上流端 1 点 (地点①) のみを同化するだけでもモデル全域で水位縦断分布推定精度の向上する傾向が確認された。これらの Case では、同一の境界条件・モデルを用いており、同様な降雨観測誤差や流出モデル誤差、合流損失等の見積誤差が含まれているが、水位データ同化により付加項 F_a を介して各種誤差をモデルに合理的に反映できていることが示された。

次に、データ同化の空間解像度と水位縦断分布推定精度の関係を定量的に把握するために、Case1～4 における水位推定値 $\eta_{cal.}$ と観測値 η_{obs} および誤差 $\Delta\eta$ ($=\eta_{cal.}-\eta_{obs}$) の時間変化を図 35、図 36 に示す。ここでは、地点②、④を例示している。表示地点を同化している Case では、観測値 (同化データ) と計算値が良好に一致し、精度よく同化されていることが分かる。さらに、データ同化間隔の大きい Case2、3 でも水位推定精度は Case4 より良好であり、データ同化によって当該地点のみならず上下流に水位推定精度向上効果が波及することが示された。

さらに、水位データ同化による境界条件依存性の緩和効果を把握するために、各枝管からの流入量を増減させた場合の水位推定結果として、地点②の水位時間変化を図 37 に示す。同図には、地点①の同化有無、流出率を 0.3, 0.4, 0.2 にそれぞれ変化させ、これらを組み合わせた Case3～8 の結果を示している。ここで、図中の赤実線と青破線はそれぞれ、Case3, 5, 7 (地点①同化有り) と Case4, 6, 8 (データ同化無し) の最大値・最小値を表している。これより、水位データ同化を行わない Case4, 6, 8 では境界条件誤差の影響をダイレクトに受け、水位算定精度が変動している。一方、上流地点で水位データ同化を行っている Case3, 5, 7 では、境界条件誤差が付加項 F_a によってカバーされることで、水位推定誤差が抑制されている。このように、本手法では、水位縦断分布推定における降雨観測・予測誤差や流出モデル誤差への依存性を低減できていることが示された。

以上の検証結果により、水位データ同化によって、現地への適用性が示され、水位推定精度が大幅に向上し、実用的な水位モニタリングへの有効性が示された。

本研究で実施した観測では、対象雨水管内が満管となる出水イベントは発生しなかったため、圧力状態での適用性を検証することはできなかった。また、下水管内はポンプ排水の影響を考慮することが不可欠であり、幹線下流側への拡張が今後の課題である。

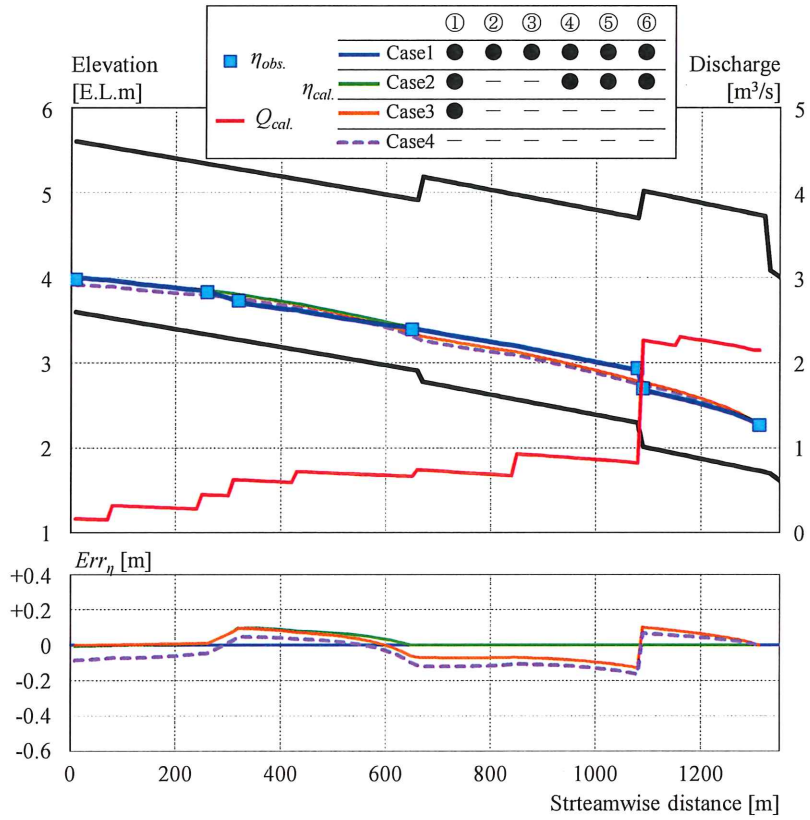


図 28 現地管路における水位縦断分布推定結果 (2018/9/17 19:00)

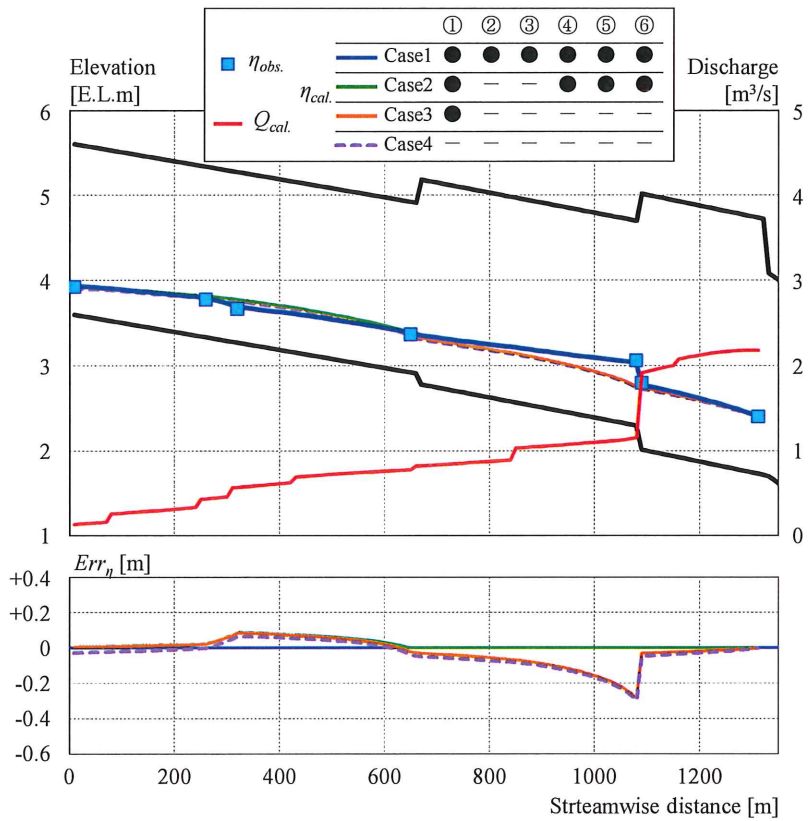


図 29 現地管路における水位縦断分布推定結果 (2018/9/17 19:10)

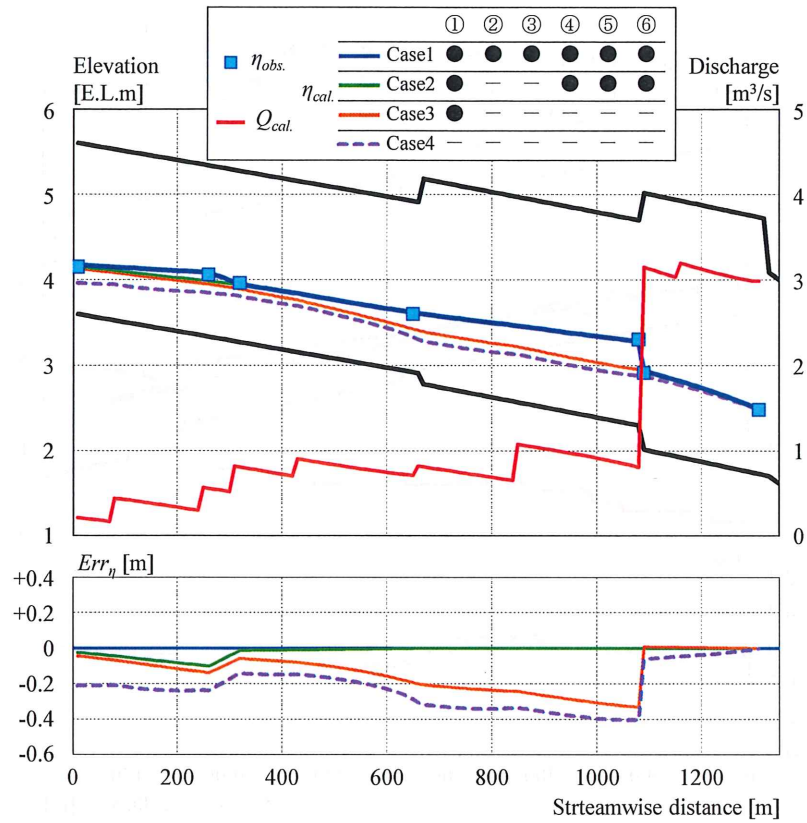


図 30 現地管路における水位縦断分布推定結果 (2018/9/17 19:20)

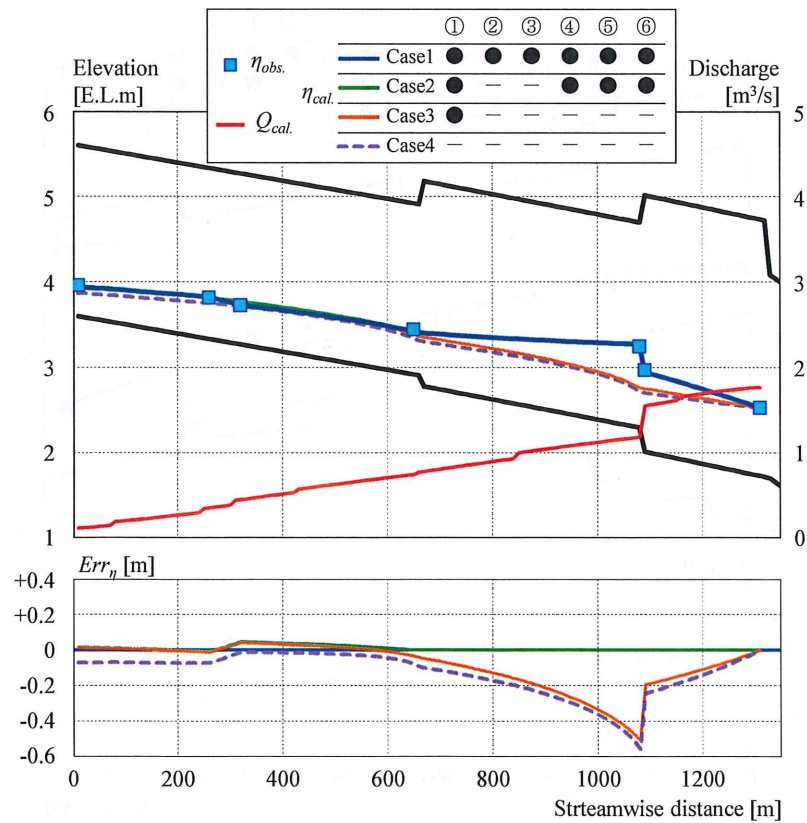


図 31 現地管路における水位縦断分布推定結果 (2018/9/17 19:30)

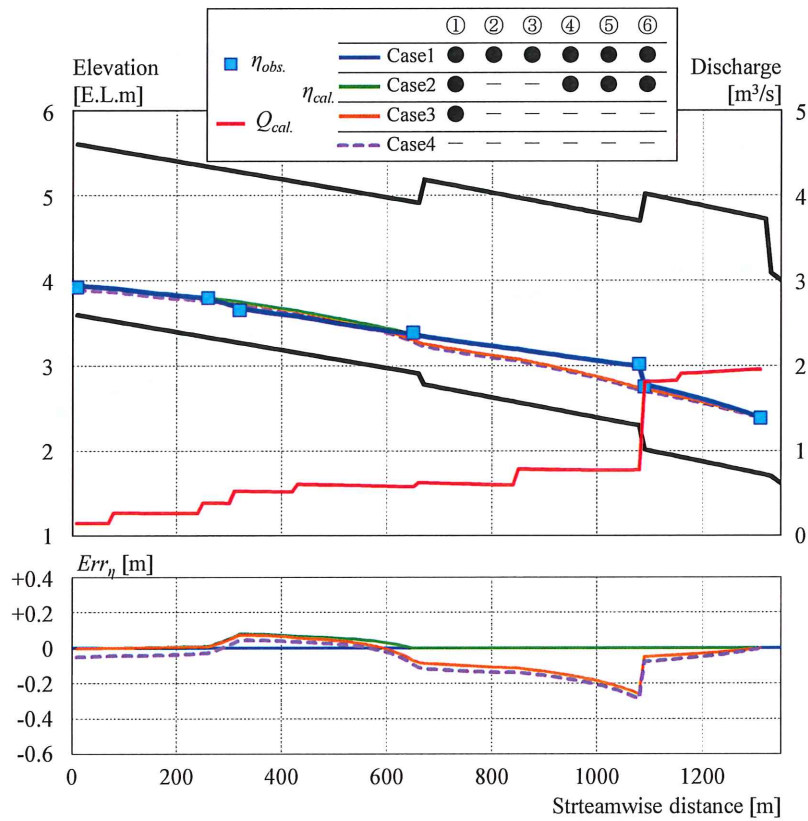


図 32 現地管路における水位縦断分布推定結果 (2018/9/17 19:40)

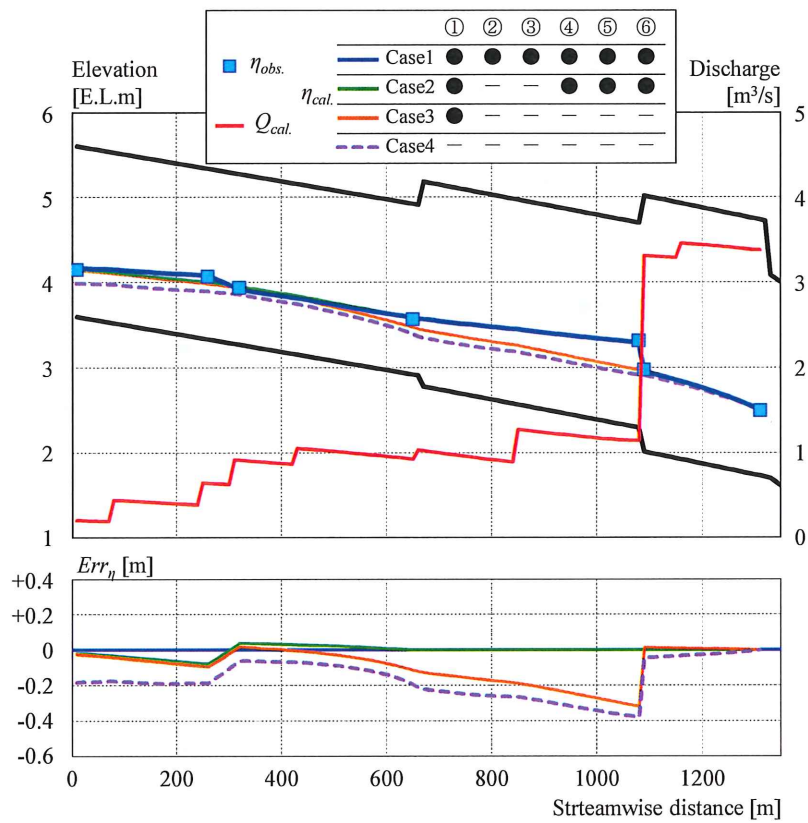


図 33 現地管路における水位縦断分布推定結果 (2018/9/17 19:50)

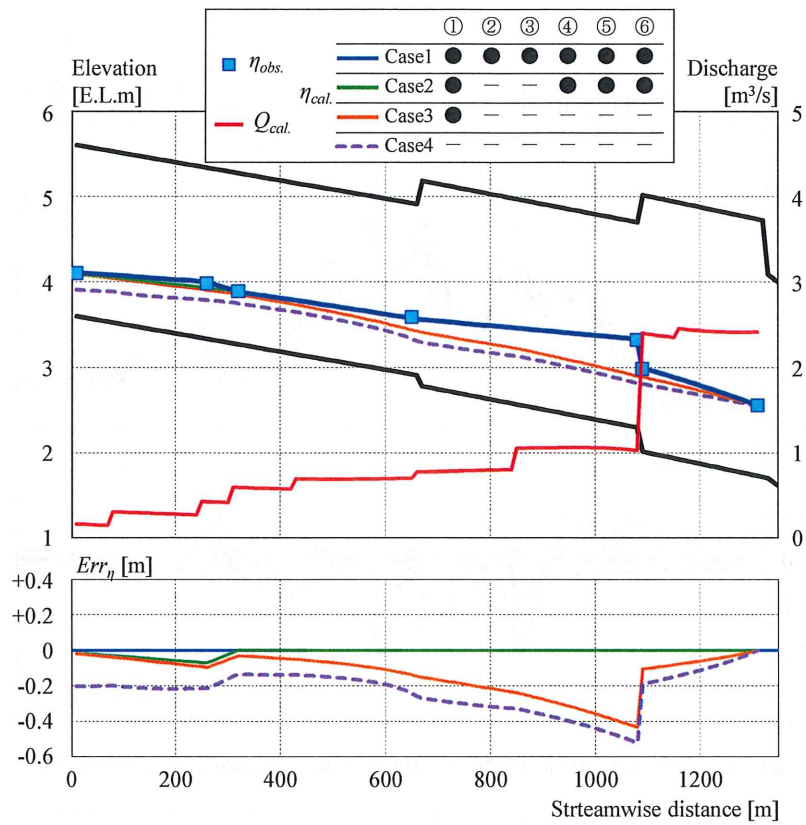


図 34 現地管路における水位縦断分布推定結果 (2018/9/17 20:00)

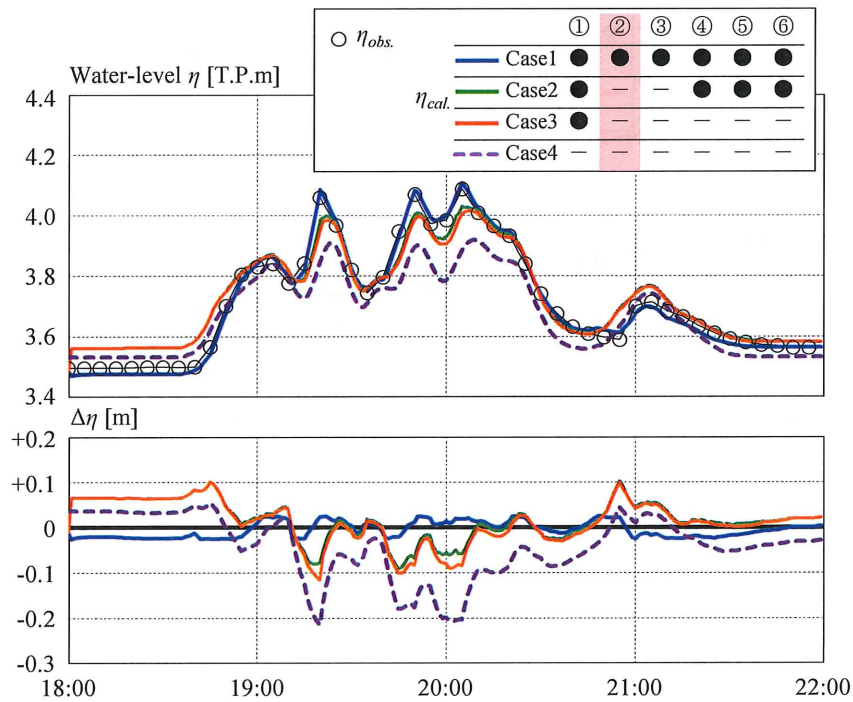


図 35 様々なデータ同化間隔における計算水位の時間変化 (地点②)

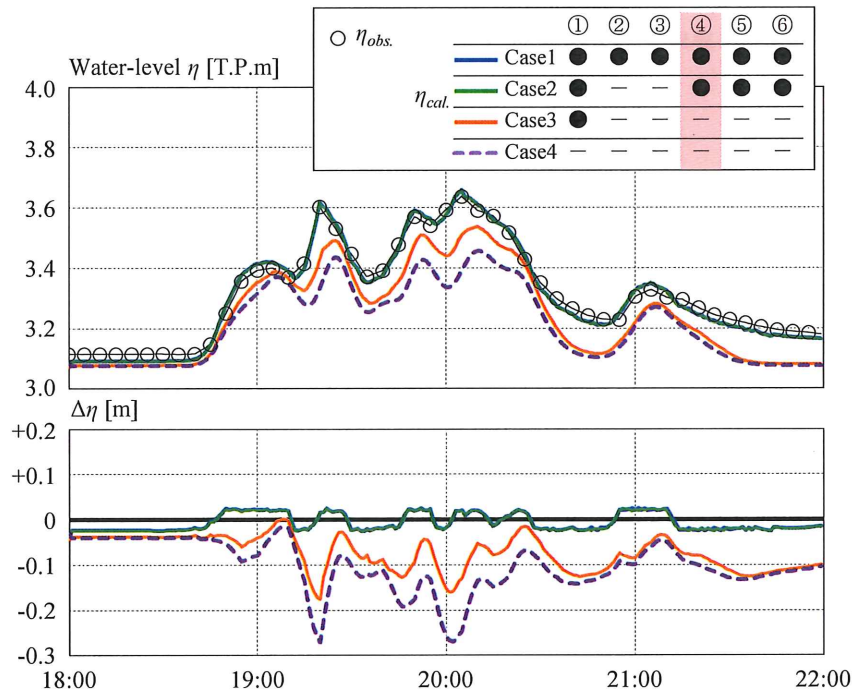


図 36 様々なデータ同化間隔における計算水位の時間変化 (地点④)

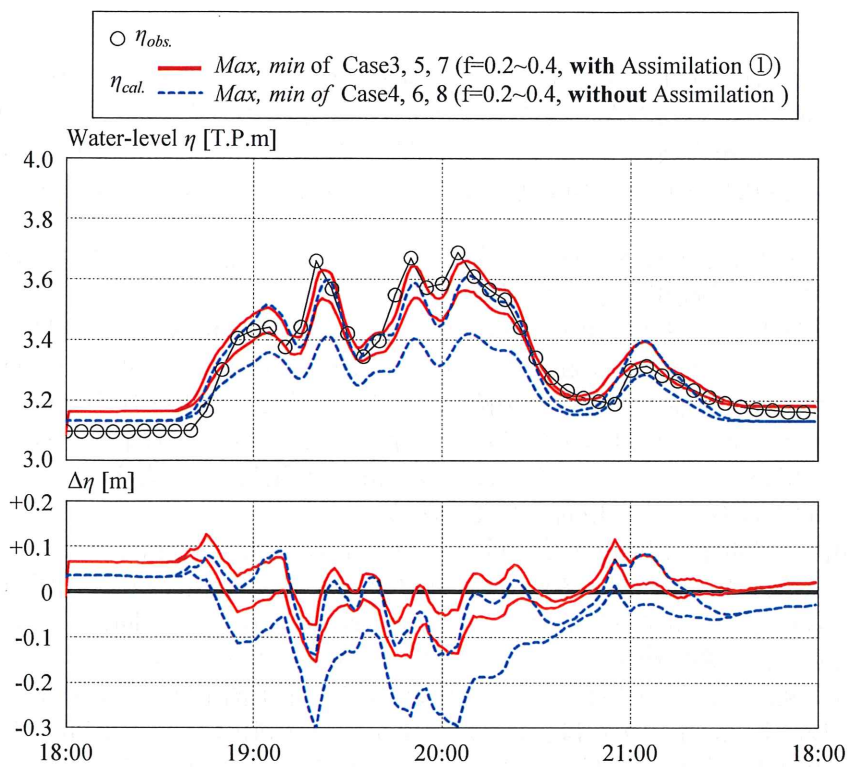


図 37 流量誤差を付与したケースにおける観測水位とデータ同化結果の時間変化 (地点②)

4. まとめ

本研究では、従来下水道分野では検討事例のないデータ同化技術を用いた流量観測手法および水位縦断分布（内水氾濫危険度分布）の推定手法の開発を行った。平成 29 年度には室内実験と数値実験により基本的な有効性を確認し、平成 30 年度には現地に適用することで、課題の抽出・モデルの改良を行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

- ・ 流量用 DIEX 法の境界条件・乱流モデルを改良し、開水路・遷移・圧力状態のいずれにおいても流速内外挿・流量算出を可能とした。
- ・ 室内実験および現地観測データに基づいて、流量用 DIEX 法の有効性を検証した。検証用データの得られた範囲内では、有人観測と同等精度での観測を自動連続・リアルタイムで可能であることが確認された。ただし、遷移・圧力状態となるような出水イベントでの検証は十分でなく、今後の課題である。なお、遷移・圧力状態の検証に用いることできるような高精度の流量計測技術・手法そのものがなく、本手法の有効性評価方法も検討の必要がある。
- ・ 河川向け洪水予測用 DIEX 法を改良し、内水氾濫危険度評価用 DIEX 法を開発した。具体には、プライスマンスロットを導入することで開水路・遷移・圧力状態のいずれにも対応できるようにしたことに加え、高速・高精度での同化が可能となるように基礎方程式系の修正、データ同化アルゴリズムの改良を施した。
- ・ 数値実験および現地観測データに基づいて、内水氾濫危険度評価用 DIEX 法の有効性を検証した。本モデルは、高精度の水位データ同化によって精緻な水位縦断分布を算出可能であることが示された。また、水位データ同化による水位計算精度向上効果は、データ同化地点の上下流にも波及し、さらに、降雨観測・予測誤差やモデル誤差等の影響を低減させて安定的な水位予測が可能であることが示唆された。

(3) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
土木学会論文集 B1 (水工学) (Vol.75, No.4, 下水道管内の水位・流量のリアルタイム観測手法への DIEX モデルの適用, pp.I_1495-I_1500)	H30.11.25	土木学会水工学委員会	鈴木佑弥、 柏田仁、二 瓶泰雄、片 岡智哉、尾 ノ井龍仁
土木学会論文集 B1 (水工学) (Vol.76, No.4, 現地雨水幹線における洪水予測への DIEX-Flood の適用, 投稿予定)	R1.11	土木学会水工学委員会	尾ノ井龍 仁、柏田仁、 鈴木佑弥、 伊藤毅彦・ 片岡智哉・ 二瓶泰雄

(4) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
なし				

(5) 成果の実用化*の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

流量算出用 DIEX 法については、河川用モデル・システムが既に市販・普及しており、本補助金により開発した管路用モデルを追加機能として搭載することを予定している。内水氾濫危険度評価用 DIEX 法 (DIEX-Flood) については、構築中の河川用システムを基盤として、本研究成果を取り込んだモデル・システムの構築・公開を検討中である。

(6) その他

なし