

〈論文〉

光ファイバー流速計の開発

原田 敏郎¹⁾, 嘉本 健治²⁾, 阿部 久太郎³⁾

東京都下水道サービス株式会社 技術部

(〒100-8699 東京都千代田区大手町 2-6-2 E-mail:to-harada@tgs-sw.co.jp)¹⁾

古河電気工業株式会社 ファイタル製品部 アクセスシステム部

(〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通り 6 E-mail:kamoto@ch.furukawa.co.jp)²⁾

古河電気工業株式会社 第一生産技術開発センター

(〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通り 6 E-mail:qta@ch.furukawa.co.jp)³⁾

概要

本研究では下水道管渠内に布設され、情報通信網として利用されている光ファイバーを有効活用し、管渠内流速をリアルタイムに計測できるように、光ファイバー素子を用いた流速計を開発、実フィールドにて実証試験を行った。光ファイバー流速計は、無電源で長距離通信が可能で、その特徴を生かした多点接続長距離伝送可能なシステム構成としている。また実証試験所は東京都下水道局内のポンプ所管渠内及び汚水調整池にて行い、下水道の劣悪な環境下での使用も可能なセンサとして現在も実証試験中である。

キーワード: 下水道, 光ファイバー, 無電源, 長距離伝送, 流量演算

1. はじめに

近年の異常気象により、一時的な豪雨による大量の雨水が下水道へ流入することで引き起こる浸水被害が、年々増加¹⁾している。その対策として下水道管渠内の流量をリアルタイムで把握し、それを揚水ポンプなどにフィードバックさせ効率的に運転させる、大都市浸水対策システムの構築が急務とされている。

そこで本研究においては、その対策システムに利用すべく、下水道管渠内の流速を計測し、既に実用化されている光ファイバー水位計²⁾(以下、光水位計)と組み合わせることで流量をリアルタイムでモニタリングする光ファイバー流速計(以下、光流速計)の開発及び実用化を目的とする。

光流速計はセンサヘッドが無電源で構成されているため、厳しい防爆性能が必要な下水道管渠内などへの設置が可能である。また FBG³⁾歪みセンサ(以下、FBG)を利用しているので、検出部(以下、センサ部)と変換器(以下、センサ装置)間の通信には既設下水道ファイバー網を利用できるため、線路システムの構築が容易であり、その特徴である多点接続による長距離伝送システムの構築が可能である。さらに光水位計と測定原理が同じであるFBGを利用しているため、センサ装置を共有化できる。

2. 測定原理と構成

2.1 測定原理

光流速計のセンサ部の構成を Fig.1 に示す。本研究

におけるセンサの測定原理は、Fig.1 に示すように上流側受圧板が流れにより受ける力を FBG に伝達し、FBG に伸び歪みが付加されることで光の反射波長がシフトする性質を利用する。代表的な特性は半値幅 0.2nm、反射率が 90%以上である。また FBG は歪みだけでなく温度変化でも波長シフトするため、力のかからない温度補正用 FBG を組み込むことで補正を行う。水圧による力の影響を補正するために下流側受圧板を設け、荷重伝達機構に水圧による力を打ち消す構成としている。センサの主な構成要素の機能を Table.1 に示す。

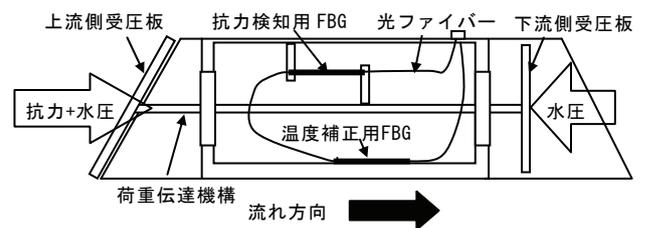


Fig.1: Composition of optical fiber flow velocity sensor

Table.1: Function of component

主な構成要素	機能
上流側受圧板	抗力と水圧を受け、その力を伝える。
下流側受圧板	水圧のみを受け、その力を伝える。
荷重伝達機構	上流側と下流側の受圧板を連動させて水圧を相殺するために受圧板間に設置する。
抗力検知用 FBG	片端は荷重伝達機構に固定し、片端を筐体に固定し、抗力検知を行う。
温度補正用 FBG	流れの影響を受けない筐体部に固定され、温度変化による波長シフトを補正する。

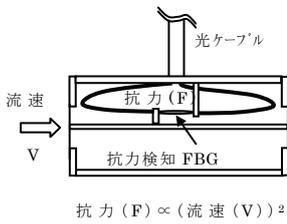
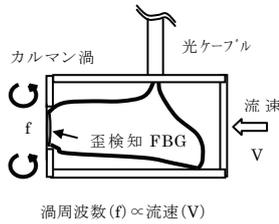
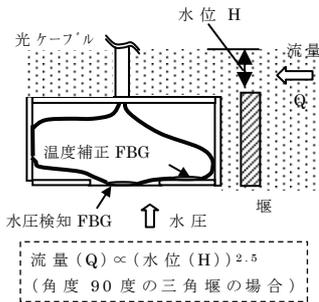
2.2 流速計測方式

大流量の流速計測方式には電磁式、超音波式など、電気出力方式のものが主流であるが、本開発は光出力式である。そのため無電源で防爆性が高く、通信には既存光ファイバー網を有効活用できることで、より経済性に優れている。流速測定方式を検討するにあたり、FBG に伸び歪みを与えるための機械的な

方式を考え、それらについての比較を行った。結果を Table.2 に示す。

比較結果から、「抗力検知部とFBG歪センサを利用した方式」が、下水道環境での利用に適していることから本方式を選定し、前項に示した Fig.1 の形状とした。

Table.2: Comparison of Optical measurement method

	抗力検知部 + FBG歪センサ	渦検知部 + FBG歪センサ	堰利用検知部 + FBG歪センサ
原理	水圧影響を補正するために上流側と下流側の力差をFBGに伝達させる構造とし、流れによる抗力をFBGの伸び歪に変換し、FBGの歪量から流速に換算する。  $抗力(F) \propto (流速(V))^2$	流れにより発生するカルマン渦による圧力を、ダイヤフラムにて歪に変換し、FBGにて歪み変化の周波数を測定し、流速に換算する。  $渦周波数(f) \propto 流速(V)$	堰部の水位と流量に相関があるため、堰部の水位をFBG水位計にて測定し、流量に換算する。  $流量(Q) \propto (水位(H))^{2.5}$ (角度90度の三角堰の場合)
精度	○	○	△ 堰部への汚泥堆積あり
信頼性	△ 部品点数が多い	△ 汚泥影響が懸念	△ 堰部への汚泥堆積あり
汚水への適用	○	△ 汚泥影響が懸念	× 堰部への汚泥堆積あり
難易度	△ センサ高感度化が必要 強度保証が必要	× センサ高感度化が必要 高速応答計測器が必要	○ 小型化・高精度化が必要
総合評価	○	△	△

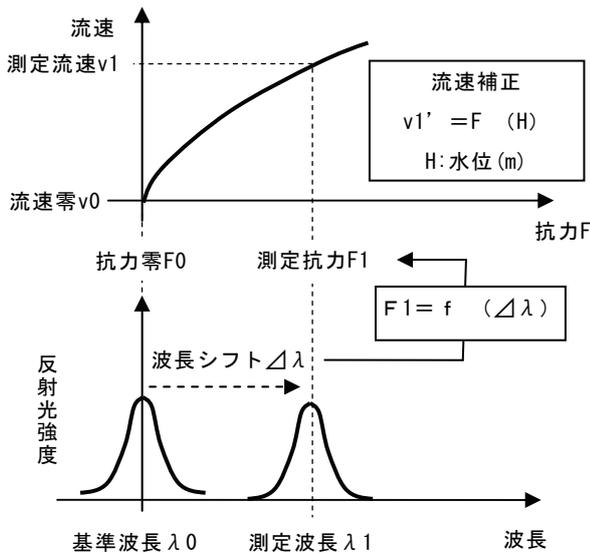


Fig.2: Wavelength shift and flow velocity

FBG 波長シフト量から流速を求めるフローを Fig.2 に示す。無負荷状態の基準波長 λ_0 から力を受けたときの波長 λ_1 の差を波長シフト量とし、予め求めた抗力と波長シフトの関係式を用い、受圧板が受けている抗力 F_1 を算出する。次に抗力 F_1 から予め対応付けた抗力と流速の関係式を用いて流速 v_1 を算出する。ところで、本方式では異物の衝突や汚泥等による、抗力変化の影響を切り分けることができないため、誤った流速値を示す場合が考えられる。そこで、流路内の水位と流速の関係³⁾を予め求めておき、上記で求めた流速 v_1 を参照し判定を行い、差が大きい場合には、水位より求めた流速値 v_1' を流速値として補正を行う。

2.3 システム構成

本研究にて用いた光流速計システムを Fig.3 に示す。光の流れは、光波長測定部の光源より出力された光が基準波長 FBG を通過し、基準波長 FBG にて反射された光はサーキュレータを通り、光波長測定装置に入り、データ処理装置により基準波長 λ_0 が取得

される。一方、基準波長 FBG を透過した光は成端箱を経由し、光流速計センサ内に入る。光流速計センサ内において抗力検知用 FBG と温度補正用 FBG それぞれで反射された光は同様にサーキュレータを経由して光波長測定装置に入り、抗力検知用 FBG での反射波 λ_1 と温度補正用 FBG での反射波 λ_t がそれぞれデータ処理装置に取得される。また、抗力検知用 FBG と温度補正用 FBG を透過した光はセンサ外に設けた無反射端に入る。以上より、取得した波長はデータ処理にて 2.2 流速計測方式に述べている通り流速に変換され、流速値の出力表示、及びデータ保存される。

なお、前述の通りデータ処理装置のプログラムを変更すれば、光流速計センサを光水位計センサに置き換えて使用することができる。さらに無反射端に入れる前に光流速計センサや光水位計センサを直列につないで、それぞれの流速値、水位値を求めることもできる。その際は反射波長帯が重ならない様に波長帯を 5 ナノメートル以上ずらした FBG を使用することが必要である。

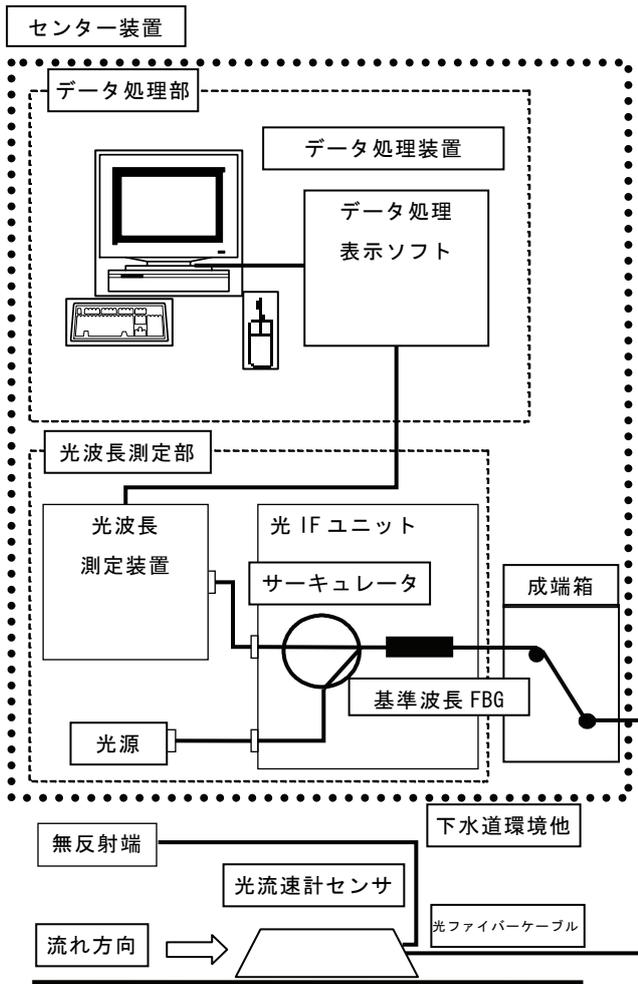


Fig.3: Optical fiber flow velocity System

2.4 基本仕様(目標値)

光ファイバーをセンサとして用いた場合、測定できる物理量として主に歪、温度がある。これを流速計として用いた前例が無いため、光流速計の目標仕様として、下水道で広く一般的に利用されている超音波流速計を比較対象として参考にした。Table.3 にそれぞれの仕様を示す。

Table.3: Basic specification

項目	光流速計(目標値)	超音波流速計
測定範囲	0.5~3.0m/s (点流速)	0~5.0m/s (平均流速)
測定精度	±2%FS (点流速)	±2%FS (平均流速)
伝送距離	最大 15km	30m
センサ接続台数	最大 5 台	1 台
供給電源	センサ部 無電源 変換器 AC100V	センサ部 DC24V 変換器 AC100V
信号周期	5 秒以下*	1 秒
センサ外形寸法	W80*H80*L480mm	W34.5*H32*L203mm
測定温度	5~30℃	不明
センサ重量	約 7.5kg	約 1.0kg

*サンプリング周期:80ms、平均時間:1 秒

2.5 流速換算方式

光流速計は上流側受圧板が力を受ける部分のみの点流速を測定するものであり、目標としている流量を求めるには点流速のみでは困難である。点流速から平均流速を換算する方法としては、種々の方式があるが、本検討においては下水道環境を考慮した換算式である実利式を利用した。換算式を以下に示す。

点流速と平均流速の関係式⁴⁾

$$V_m = K_p \cdot V_p \quad (1)$$

V_m : 平均流速 (m/s)

V_p : 点流速 (m/s)

K_p : 補正係数

補正係数の算出式

$$K_p = 1 / (n \cdot g^{0.5} \cdot R_m^{-1/6} \cdot (8.5 + 5.75 \cdot \log(y / \kappa)) \quad (2)$$

n : 粗度係数

g : 重力加速度 (m/s²)

R_m : 最大流速位置を水面と仮定した時の径深 (m)

y : 点流速測定水深 (m)

κ : 粗度高さ (m)

Table.4 にパラメータ入力値を示し、Fig.4 にパラメータ R_m と y の位置を図示する。

Table.4: Parameter

パラメータ	入力値(例)	備考
粗度係数 n	0.015	コンクリート相当の値 ⁵⁾
重力加速度 g	9.8m/s ²	物理定数
最大流速位置を水面と仮定した時の径深 R_m	水位 m	管底から水面までの距離
点流速測定水深 y	0.04m	光流速計設置位置
粗度高さ κ	0.000637 m	引用 ⁶⁾

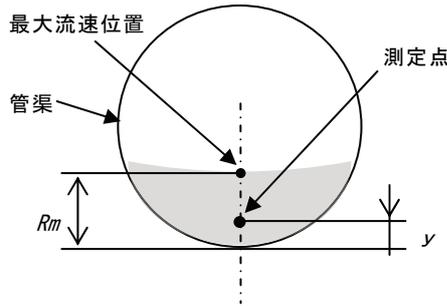


Fig.4: Position of R_m and y

3. 光流速計機能評価及び実証試験結果

3.1 光流速計機能評価

Table.5 に光流速計の機能評価結果を示す。図中の最大誤差とはプロットされた点とその近似曲線からの最大差をフルスケール(付加荷重 2kgfのときの波長差の値)で割って%表示したものである。本センサは1次測定量が荷重(抗力)であるため、実証試験前のセンサ機能評価においては電気式ロードセル性能試験方法の規格⁷⁾に準拠させた。また、流速試験設備を利用した評価については、電磁流量計の規格⁸⁾を参考として評価を実施した。

Table.5: Evaluation result of sensor function

項目	仕様	結果
測定範囲	0.5~3.0m/s	仕様範囲にて測定可能
測定精度	±2%FS (FS: 3m/s)	精度±2%FS 以内
耐水性	IPx8	浸水なし
耐強度	最大荷重 50kgf	変形・破損なし
設置条件	設置角度±3°にて 精度±2%FS 以内	精度±2%FS 以内
使用温度	5~30 °Cにおける 荷重誤差±1.5%以内	荷重誤差±1.5%以内

Fig.5 に荷重—波長シフト特性の結果を示す。図より、付加荷重が増すごとに波長シフト量が増していることが確認できる。各温度について付加荷重に対する波長シフト量が異なっているが、これは温度により波

長がシフトすることで起こる現象である。温度による波長シフト量に関しては抗力、温度 FBG 問わず、値はほぼ同じであることから、補正については単純に温度補正用 FBG の反射波を λ_t として、抗力検知用 FBG での反射波 λ_1 との差をとる。

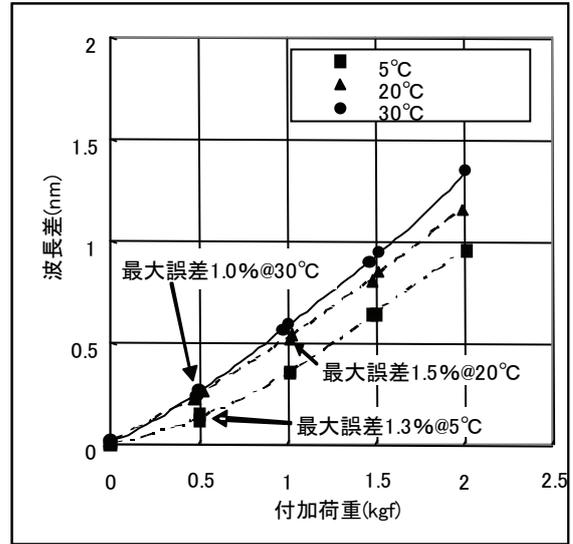


Fig.5: Load vs. Wavelength shifting characteristic

Fig.6 に流速試験設備の概略図を、Fig.7 に試験時の光流速計取り付け状況写真を示す。Fig.6 の通り、試験は台車底部にセンサを取付け、水路内を走査させる。設定流速は台車の走査速度とし、そのときのセンサ出力値を読み取り、比較を行う。本方式については旧通商産業省が定める発電水力流量測定規則に則して実施した。なお流速試験設備については、株式会社セレス(東京都狛江市)の実水路(全長 150m、幅 2m、深さ 2m)を利用した。

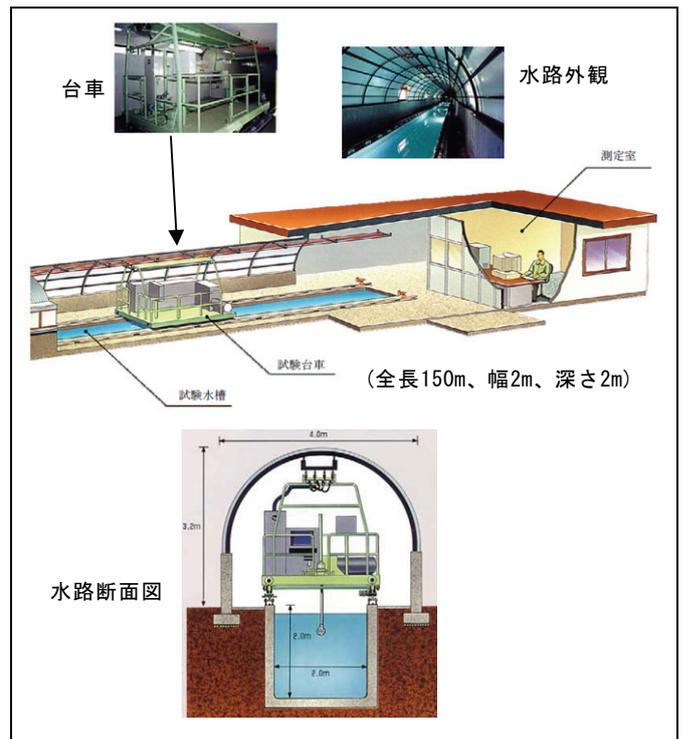


Fig.6: Outline of flow velocity test facility

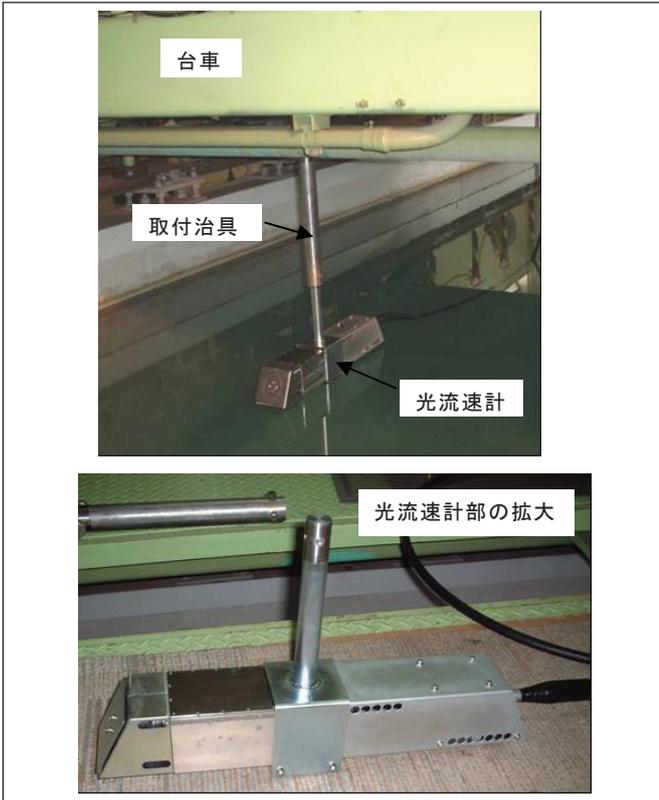


Fig.7: Installation situation photograph of sensor

Fig.8～9 に流速試験設備での評価結果を示す。Fig.8 は基準水深(200mm)における設定流速(台車走査速度)とFBGの波長シフト量との関係であり、それを2.2 流速計測方式の通り、抗力に変換し、流速に換算したものが Fig.9 である。Fig.9 より設定速度に対する実測値の誤差は流速測定範囲 0.5～3.0m/s において最大で 0.044m/s(1.47%FS)と目標仕様の±2%FS以内であることが確認された。また Fig.9 は水深 100～300mm の異なる水深条件も含んでおり、下流側受圧板を設けることによりFBGにかかる水圧の影響を打ち消す、水圧補正機能が有効であったと考えられる。

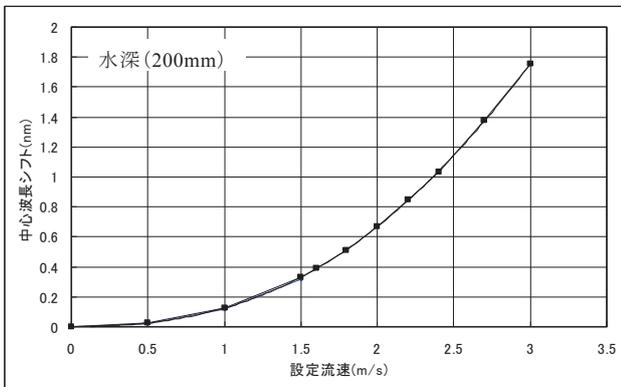


Fig.8: Flow velocity vs. Wavelength shifting characteristic

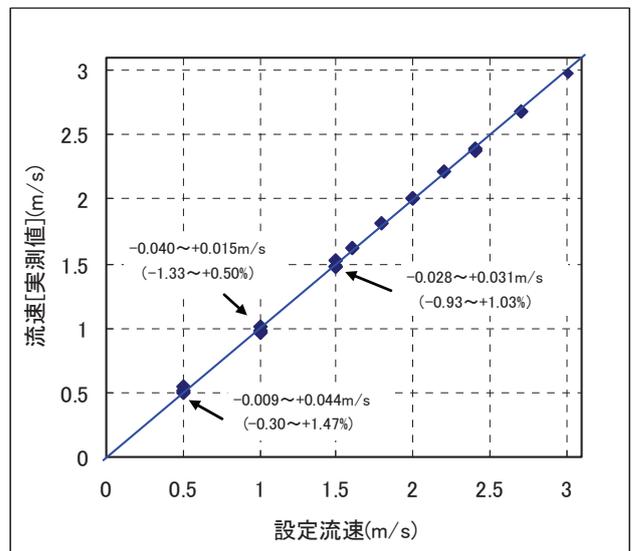


Fig.9: Set flow velocity vs. sensor output

3.2 実証試験結果

実際の下水道施設を利用し、その有効性、実運用時の維持管理上の利点と問題点を把握するため、東京都下水道局との共同研究により、実際の下水道管渠内にて試験を行った。Fig.10にセンサ部及びセンター装置の設置地図を示す。また、本実証試験における光ファイバルート図を Fig.11 に示す。



Fig.10: Arrangement map of sensor and center device

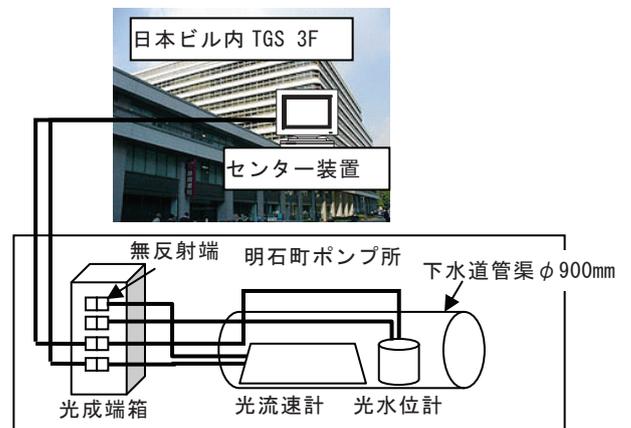


Fig.11: Optical fiber route

設置距離について、Fig.10 より直線距離では約 2.8km だが、既設光ファイバーを経由させることで約 8.5km の伝送距離にて実証試験を行うことができる。

センサ部の管渠内での固定状況の写真を Fig.12 に示す。図のように金属バンドを用いて、センサ管底に固定した。

以上の設置環境にて実証試験を行った。



Fig.12: Sensor fixed situation

光流速計設置以降、管渠内における汚水流速測定結果を Fig.13 に示す。但し、定常水位(約 200mm)での流速は約 0.4m/s 一定であるが、試験中に定常水位での流速変動が見られたため、2.2 流速計測方式に述べている通り、流速値の補正を行った。

Fig.13 より、汚水流速をリアルタイムで測定できている。また、雨天時と思われる水位変動に反応して流速も上昇する傾向を捕らえており、下水道の状況を把握することができた。

3.3 流量比較結果

次に補正した光流速計の流速値(1時間平均値)を流量に換算し、既設の超音波式流量計の1時間毎総流量データを比較した。ここで光流速計による流量は、光流速計の点流速値から換算(2.5 流速換算方式)した平均流速に、光水位計の水位情報から

得られる断面積を乗じて算出した。流量の計算式は次の通り。

$$Q = V_m \cdot S \tag{3}$$

Q: 1秒あたりの流量 (m³/s)

V_m: 平均流速 (m/s)

S: 断面積 (m²)

ある一日の流量変化の結果を Fig.14、15 に示す。但し、超音波式流量計のログデータが1時間平均値であるため、光式のデータは1時間の総流量として比較を行った。Fig.14、15 より光流速計のデータから算出した流量値は、超音波流量計とほぼ同様な傾向で流量変動を捕らえており、十分に適応できていると考えられる。

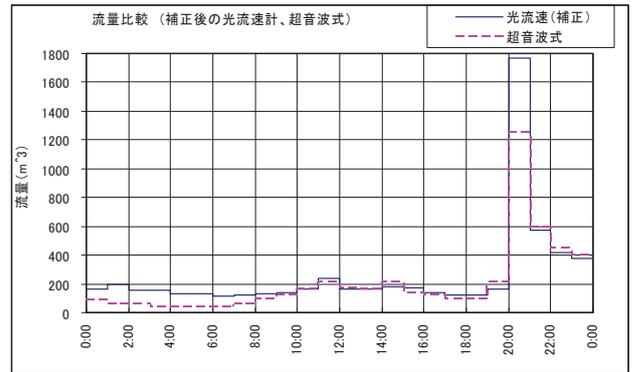


Fig.14: Flow rate comparison

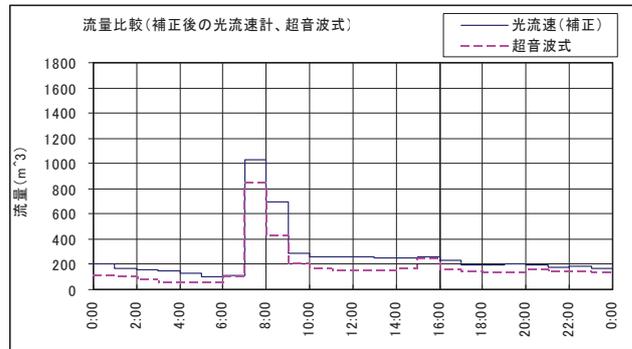


Fig.15: Flow rate comparison

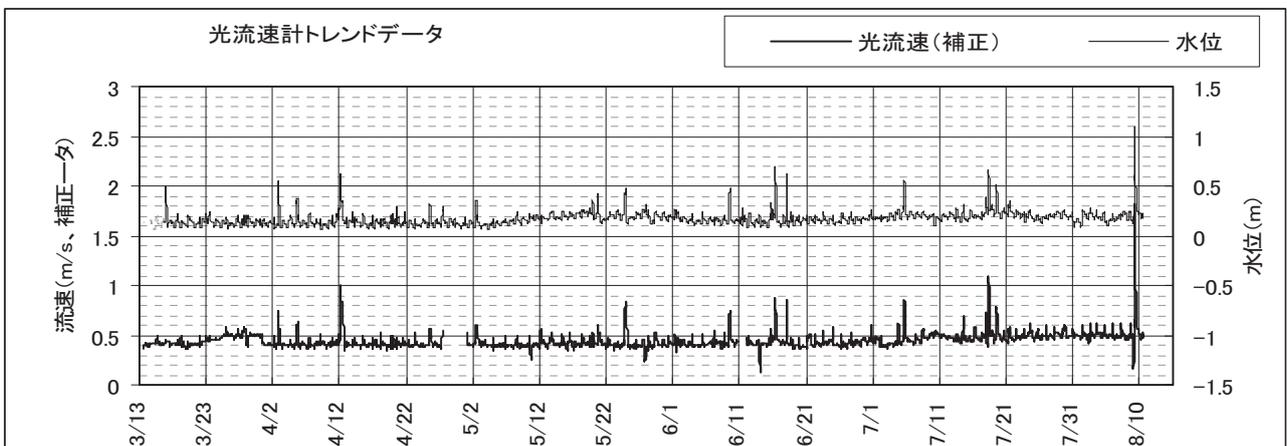


Fig.13: Flow velocity trend data after adjustment

3.4 センサの耐環境性

センサ部の耐環境性について調査を行った。設置当初の状態を Fig.16、設置 6 ヶ月後の状態を Fig.17 に示す。図に示す通り、汚泥堆積について定期的な目視点検を行ったが、流れを阻害するような汚泥堆積は見られず、センサ前面等に堆積された汚泥については、大きな流れにより除去されることを確認した。これより、本センサは十分に下水道管渠内にて使用できると考えられる。

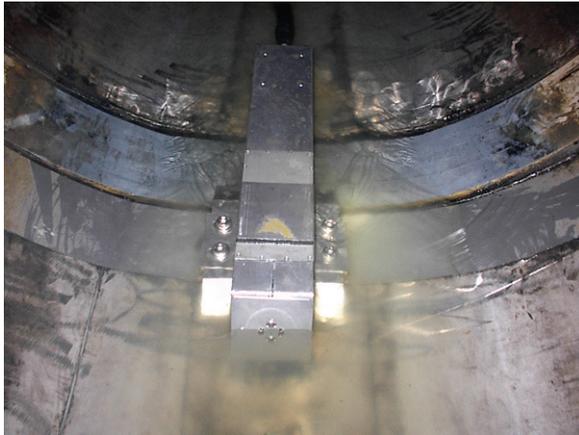


Fig.16: Initialization state



Fig.17: In Six months

4. まとめ

本研究では下水道管渠内の既設光ファイバー網を利用し、長距離伝送にて長期汚水環境での流速計測が可能であることを確認した。また、既設超音波式流量計とのトレンド比較においては、その有効性を確認できた。得られた成果の詳細については次の通り。

①流速値について

実証試験のデータ解析を行った結果、管渠内水位の変動に応じて流速も変化しており、下水道の流速状況を捉えることができた。また、目標測定間隔5秒が実現されており、豪雨時の急峻な流速立ち上がりを

リアルタイムに捉えたといえる。以上から、光ファイバー素子を用いた流速検出方式がリアルタイムモニタリングに有効であることが確認された。

②超音波式流量計との流量比較

光流速計の得られるデータは点流速であるが、流量の計算式を用いて流量を求め、既存超音波式流量計との比較においては同様の傾向を得ることができた。

③耐環境性

約 6 ヶ月間の長期実証試験を実施した結果、特に部品の交換や汚泥除去の必要性はなく、メンテナンス性及び現地適応性としても有効であることが確認できた。

今後の展開について、多様性のある下水道環境では各種のフィールドが存在し、適用範囲を広げるためにも、新たな環境下での実証試験が必要である。現在は、本実証試験にて得られた知見を基にセンサを改良し、下水道管渠内とは異なる新たなフィールドにて平成 19 年 12 月より実証試験を行っている。

[参考文献]

- 1) 東京都:東京都豪雨対策基本方針,平成 19 年 7 月
- 2) 出雲正樹,松田和彦:FBG を利用した光水位計システム,電子情報通信学会誌,Vol.104,No.700,pp43-46(2005)
- 3) 日本特許,32029921(2001)
- 4) 田中修司:下水道管渠学,環境新聞社,pp226
- 5) 森田泰司,角政之:流体力学と流体機械の基礎,啓学出版,pp96
- 6) 田中修司:下水道管渠学,環境新聞社,pp227
- 7) JISB7602,日本工業規格
- 8) JISB7554,日本工業規格

注) FBG (Fiber Bragg Grating) とはシングルモード光ファイバーコア部分の長手方向に連続した屈折率変化をもたせることで、周期に合致した波長のみが反射し、他の波長はこの周期的屈折率変動を感知せず通過する方式を採用した素子。

Development of the Optical Fiber Flow Velocity Sensor

Toshio Harada¹⁾, Kenji Kamoto²⁾, Kyutaro Abe³⁾

¹⁾ Engineering Department, Tokyo Metropolitan Sewerage Service Co. Ltd.

²⁾ Access System Division, Fitel Products Department, Furukawa Electric Co. Ltd.

³⁾ Production Technology Development Center, Furukawa Electric Co. Ltd.

Abstract

A new optical fiber flow velocity sensor is developed by utilizing optical fiber information network system in sewer drainage pipe. The optical fiber flow velocity sensor can operate without electric power, and the signals from the sensor can be transferred a long distance through the telecommunication system in the optical fiber network. Field test was conducted to check performance of the sensor in the pump jurisdiction ditch and sewage pondage of Tokyo Metropolitan Government. It is concluded that the velocity sensor can be used for more than six month without any trouble even in sewer drainage pipe.

Key words:

Drainage, optical fiber, non-electric source, long distance transmission, flow rate operation