

国土技術政策総合研究所資料 共同研究報告書

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.119

August 2003

小口径下水管きよの不陸蛇行計測機器の開発 に関する共同研究報告書

Report on joint research on development of the system for measuring
on inclination and meander of small diameter sewer

国土交通省 国土技術政策総合研究所
応用地質株式会社

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan
OYO Corporation

小口径下水管きよの不陸蛇行計測機器の開発 に関する共同研究報告書

森 一夫*・行方 馨**・森田 弘昭***・藤生 和也****
佐々木 誠*****・飯沼 博幸*****・大橋 武一郎*****

Report on joint research on development of the system for
measuring of inclination and meander of small diameter sewer

Kazuo MORI*, Kaoru NAMEKATA**, Hiroaki MORITA***, Kazuya FUJII****
Makoto SASAKI*****, Hiroyuki IINUMA*****, Takeichiro OHHASHI*****

概要

下水管きよの維持管理について重要性がいわれている今日、管きよの劣化状況についてTVカメラで調査しているものの、不陸蛇行について定量的に測定することは、これまで困難であった。

本研究では、水圧センサを装着した自走式TVカメラを、地上設置の水タンクとホースで接続し、水圧の変動から管きよの不陸を測定する装置、ならびに管きよ内を一定間隔ごとに曲がり測定できるセントライザを装着した連結プローブを用いて、管きよの3次元的不陸蛇行を測定する装置を開発した。

キーワード：下水道、小口径管きよ、不陸蛇行

Synopsis

Today, the importance of sewer maintenance has been reconsidered. However, we could only monitor the condition inside of sewer with TV camera, it has still difficult to acquire the deformation quantitatively.

In this research we have developed the devices. One is self-running TV camera system in which hydraulic pressure sensor is built. Pressure sensor is connected by hose with water tank on ground to measure inclination from the change of water pressure. The other one is flexible joint probes system to measure the shape of sewer, 3 dimensionally, at a certain interval using the centralizer which is able to keep probes center of sewer pipe

Key Words : sewer, small diameter pipe, inclination, meander

- * 大阪府北部流域下水道事務所建設課主査 (前 国土技術政策総合研究所下水道研究室研究官)
- ** 下水道研究部下水道研究室研究官
- *** 都市・地域整備局下水道部下水道事業課町村下水道対策官 (前 国土技術政策総合研究所下水道研究室長)
- **** 下水道研究部下水道研究室長
- ***** 応用地質株式会社つくば技術開発センター製造部
- ***** 応用地質株式会社つくば技術開発センター製品技術部長
- ***** 応用地質株式会社つくば技術開発センター機器事業センター所長

- * Senior Staff, Construction Division, Osaka Prefectural North Sewerage Office
- ** Researcher, Wastewater System Division, Water Quality Control Department, NILIM
- *** Director for Rural Sewerage System, Sewerage Works Division, Sewerage and Wastewater Management Department City and Regional Development Bureau
- **** Head, Wastewater System Division, Water Quality Control Department, NILIM
- ***** Engineer, Manufacturing Dept., Instruments Division, Tsukuba Technical Research and Development Center OYO Corporation
- ***** Director, Engineering Dept., Instruments Division, Tsukuba Technical Research and Development Center OYO Corporation
- ***** General Manager, Instruments Division, Tsukuba Technical Research and Development Center, OYO Corporation

目 次

1. 開発の目的	1
2. 概要	1
3. 概念設計	1
3. 1. 不陸を精度良く測定する方式(水圧方式による不陸測定装置)	1
3. 2. 不陸と蛇行を同時に測る方法(連結プローブによる不陸・蛇行測定装置)	2
4. 基本検討・基礎実験	2
4. 1. 検討項目	2
4. 2. 水圧方式による不陸測定に関する基礎実験	8
4. 3. 実験結果	11
5. 装置の設計・試作	26
5. 1. 不陸測定装置の設計・試作	26
5. 2. 蛇行測定装置の設計・試作	29
6. 装置の試験	38
6. 1. 地上管路試験	38
6. 2. 実下水管きょ試験	43
7. まとめ	46
8. 参考資料	47

1. 開発の目的

小口径下水管きよの維持管理のために、自走式TVカメラによる管の破損状況や管壁の腐食や亀裂の状況などの監視が行われている。しかし、適切な管理を行うには、沈下やたるみなど、管の変形状況を定量的に把握することが求められる。

本研究の目的は、このような要請に応えるために管内カメラによる管の破損状況の把握と同時に下水管の沈下やたるみも把握できる技術を構築することにある。具体的には、管内カメラ調査装置に装着もしくは牽引して、カメラ撮影と同時に不陸もしくは不陸と蛇行を測定できる装置を開発することにある。

2. 概要

下水管を維持管理する上では、蛇行状況の把握も有用であるが、自然流下に直接影響する不陸を把握することがより重要である。一方、技術的には不陸よりも蛇行を計測することが難しい状況にある。そこで、不陸を精度良く測定することを最優先課題とし、さらに不陸と蛇行の両方を一度に計測できる装置についても検討する方針とした。以下に着手時に設定した目標仕様を示す。

測定項目：不陸、または、不陸と蛇行

適用管径：管路の直径が内径150mm～800mm未満を対象とする。

下水管の埋設深度：下水管の地表からの深さが、1.5m～5m程度を想定する。

目標測定精度：不陸のみを精度良く測定する方式（水圧方式）：不陸・各点±1cm以内

不陸と蛇行を同時に測る方式：不陸・5cm/100m、蛇行・20cm/100m程度

ただし、精度は管路の状態に依存するが、上記は、内部に障害物がなく明らかな段差や極端な屈曲などがない場合を想定している。

3. 概念設計

不陸のみを精度良く測定する方式と不陸と蛇行を同時に測定する方式の2通りについて検討した。

3. 1. 不陸を精度良く測定する方式（水圧方式による不陸測定装置）：図3. 1 参照

地上に設置した水タンクと管内を走行する装置に装着した圧力センサをホースで接続して、不陸を水位変化として検出するシステムについて検討した。すなわち、基準タンク内水面からの水圧を測定して地上との高低差を検出する方法である。下水管路内を移動させて移動距離と各位置における水圧を測定することにより下水管の沈下形状を把握することができる。

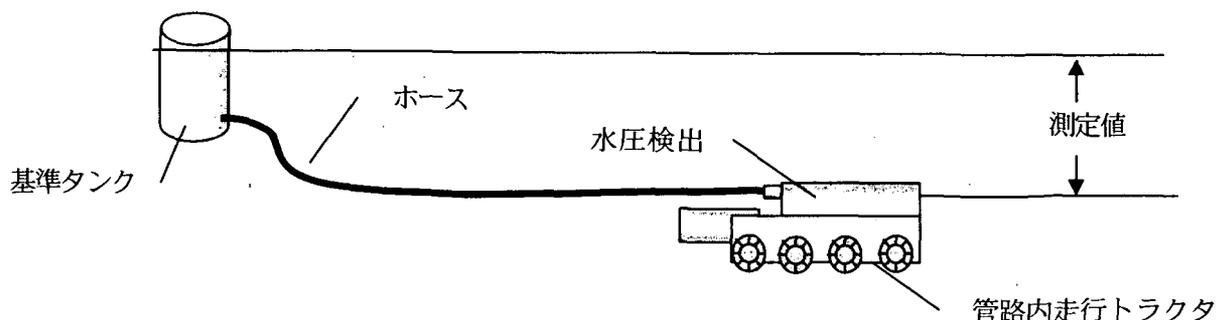


図3. 1 水圧方式による不陸測定装置

3. 2. 不陸と蛇行を同時に測る方式 (連結プローブによる不陸・蛇行測定装置): 図3. 2参照

セントライザを装備した2本のプローブを自在ジョイントで接続し、前後2つのブロックの相対変位を測定して管路の曲がりを測定する方法について検討した。シーブの距離カウントにより一定距離間隔ごとにプローブを停止して計測する。各測定点で、管路と直交する2軸(水平軸・Xおよび鉛直軸・Y)方向の曲がりとプローブの回転を検出して3次元的な相対変位を求める。各点で算出した、X、Y方向の変位量を累積することにより管路形状が求められる。

本方法については、ジョイント機構、変位検出機構、測定値から不陸・蛇行を求める演算などについての検討から始めた。

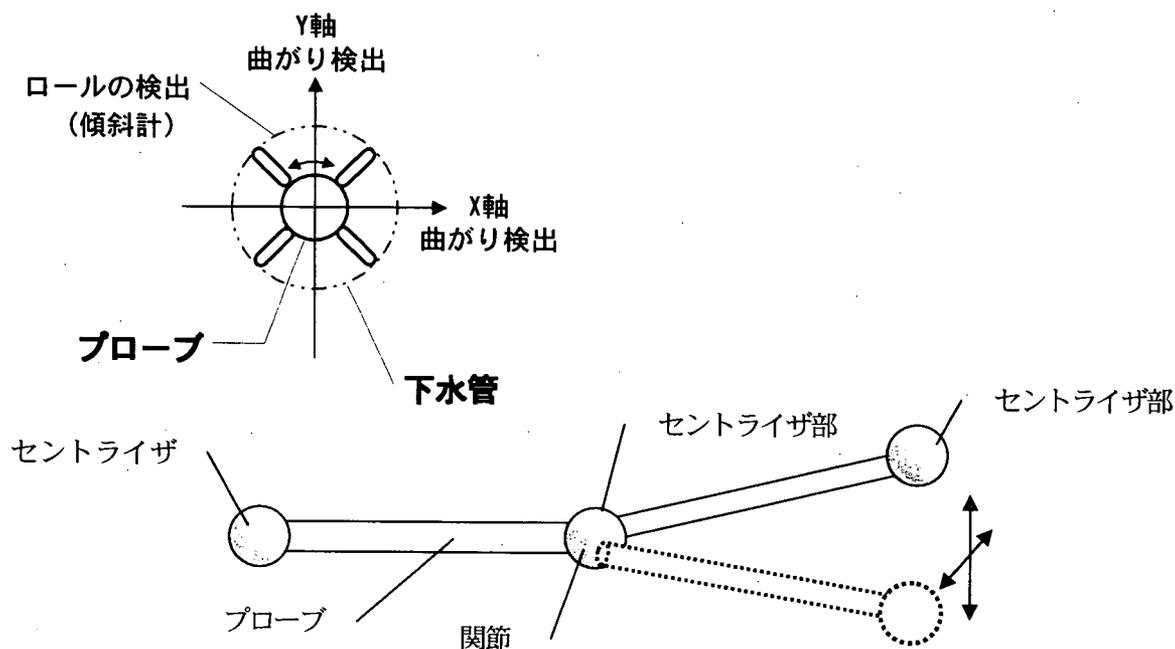


図3. 2 連結プローブによる不陸・蛇行測定装置

4. 基本検討・基礎実験

前述の概念を具現化するためには、いくつかの課題が予想される。すなわち、性能に影響を与えそうなくいくつかの要因が考えられるので、予めこれらの影響を把握して適切な対応策を考える必要があった。そこで、重要と思われる事項を抽出し、その影響を把握するための予備検討を行った。特に、水圧方式による不陸測定については、基礎実験を行って設計に必要な基礎資料を得ることとした。

4. 1. 検討項目

4. 1. 1. 水圧方式による不陸測定装置

重要と思われる以下の事項について検討した。

1) 送水ホース選定のための検討

ホースの断面積や長さの違いによる影響を調べるために以下のような実験を行った。

- a. 測定値そのものへの影響: 圧力センサの高さをわずかに変えて測定し、分解能に差が生じるかなどについて調べた。

- b. 急激な圧力変化に対する追従性：圧力センサの高さを急激に変えて、安定するまでの時間、安定した値、等について調べた。

送水ホースは、孔内載荷試験などに使われている堅ろうなものを選定した。このホースには内径4mmおよび、内径約6mmの2種類があるので、それぞれについて長さが、10m、50m、100m程度の3通りについて実験した。

2) 基準タンクの必要容量についての検討

基準タンクは、送水ホースに水を供給するだけでなく、基準となる水位を一定に保持する機能が要求される。したがって、計測中に何らかの原因で水がタンクからホースに供給されたり、タンクに逆流して戻されるようなことが生じて、それが無視できるだけの容量を持っていることが必要である。基本的には、一旦、水が送水ホースに供給されればホースの長さが変わるか、ホースが基準タンク内の水位以上の高さに持ち上げられない限り、基準タンクからの出入りはないはずである。しかし、ホースが屈曲したときに内容積がわずかに変化したり、温度変化に伴う熱膨張や収縮などによる影響が考えられる。

そこで、通常考え得る利用範囲で、そのような水の出入りがどの程度あるのか把握するために次のようにした。

- a. 基準タンクの代わりに、わずかな水の出入りが分かるようにナイロンホースに目盛を付けて、マノメータとして用い測定した。試験ホースは、内容積が最も大きい直径6mm、長さ100mのものを使用して下記のような実験を行った。
- b. ホース部分に温度変化を与えて、水位変化を観測する。
- c. ホースを巻いた状態から伸ばした状態に変化させて水位変化を観測する。
- d. 上記の観測結果から水が出入りする量を求め、設計する上での参考値とする。この測定値に安全率、および簡便に取り扱える大きさなどを考慮してタンクの容量と断面積を決めることにした。

3) 走行と測定タイミングの決定のための検討

水圧測定では、走行に伴って水の流動が生じて測定値が安定しない可能性がある。そこで、走行しながら測定することが可能か、あるいは、一旦停止して測定しなければならないか実験により確認することにした。

4) 圧力測定装置の機構およびデータ収録装置の設計のための検討

上記の実験結果を基に、圧力系の応答特性などに適したデータ収録を行うための緩衝機能の効果に関する実験を行った。センサと走行トラクタの間に緩衝スポンジやゴム等の緩衝材を取り付けた時の効果について確認した。

4. 1. 2. 連結プローブによる不陸・蛇行測定装置

1) 連結部の曲がり角検出方式の検討

以下の a, b, c, の条件を満たす機構について、実現可能性の高い3案を考えた。

- a. 測定プローブは、地上部よりマンホールを通過して下水管に挿入する。このため、測定プローブは、折れ曲がり部が90度近くまでの曲げを可能とする。また、長さもマンホールから下水管に挿入可能な長さ以下にする。

- b. 曲がりの測定範囲を±10度以上確保する。
- c. 検出精度は、1mで±0.5mm以上の精度とする。

(案一1) : カム機構方式

プローブには、直交2軸方向の曲がりを検出するセンサと、プローブの回転(ロール)を検出するセンサとして傾斜計を搭載。測定は、下水管に挿入した初期位置より1mごとに下水管の曲がり測定する。管の曲がりとして、測定されたデータを各測定間隔ごとの変化量に換算し、この変化量を累積して初期位置からの先端位置を求める。

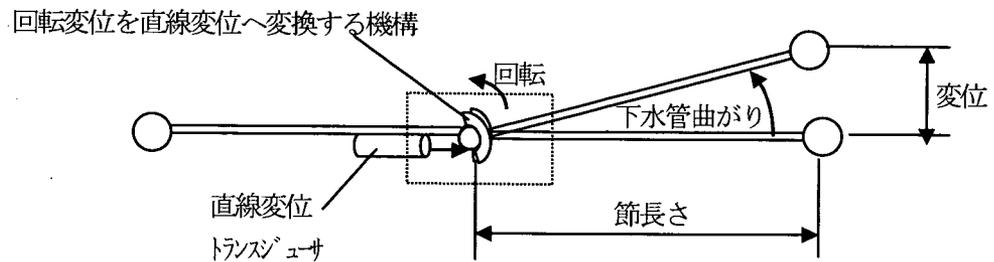


図4. 1 カム機構方式

(案一2) : CCD方式

連結プローブの一方にCCDカメラを、他方に変位検出用のターゲットを配置する。CCD画像上においたターゲット位置を検出して、ターゲットの移動量によりX軸方向、Y軸方向の曲がりを検出する。CCDの画素数は、おおむね768×494である。したがって、CCDに撮影できる管の内径の分解能は、管の内径を494に分解した値となる。例えば、この管の直径を100mmとすると、分解能は $(100/494=0.20)$ 約0.2mmとなる。また、ターゲット位置が節長さの1/2の位置に配置すると先端位置での分解能は、約0.4mmとなる。

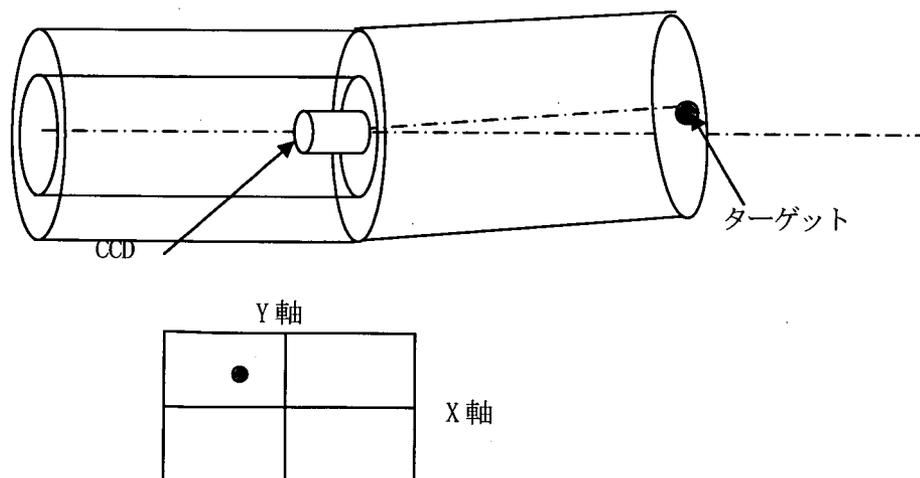


図4. 2 CCD方式

(案一3)：変位検出方式

関節で連結した2つのプローブの軸が角度をなすことを利用して、一端で軸先端の開き（変位）を測定する方式である。プローブの関節を通る真直ぐな部材を一方のプローブ軸に沿って配置し、この部材先端と相対的に動く方のプローブ軸先端の隙間を測定する。

この方法は、変位の検出をプローブ先端近くで検出するため分解能の高い測定が可能となる。しかし、直線上を移動する変位ではなく、軸からのずれを含む2次元平面上での移動となるため検出器は非接触変位センサとなる。

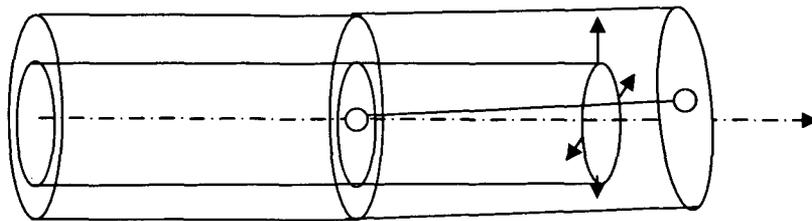


図4. 3 変位検出方式

2) 連結測定装置の基準

プローブを管路沿いに走行させる方式として、ソリ方式と車輪方式が考えられる。さらに、これらソリ方式と車輪方式において、次の2通りの測定基準が考えられる。

- ①片面を固定ソリまたは、固定車輪とし測定管の一面一般に（下面）に沿って管内の一ラインを測定する方式
- ②ソリまたは車輪を周3方向に配置し、測定装置を常に管中心に位置するようにして管中心の軌跡を測定する方式

以下に両方式について述べるが、片面を基準とする方式は管路内で蛇行する可能性が考えられたので、中心軸の軌跡を測定する方式を採用した。

(1) 片面を基準とする方式

a. ソリ方式

稼動ソリによりプローブを片面の固定ソリ側に押し付ける構造とする。プローブ位置は固定ソリ側の管壁面から一定位置に保つ方式である。

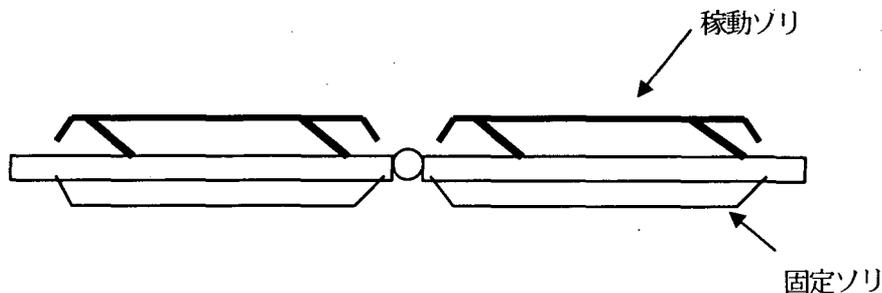


図4. 4 片面基準のソリ方式

b. 車輪方式

ソリ方式と基本的には同じ考え方になるが、車輪とするため測定位置が管内壁面の一点を計測する構造となる。

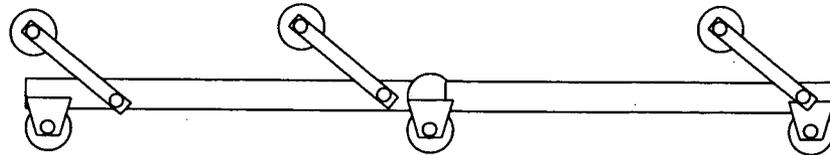


図4.5 車輪方式

(2) 管中心の測定方式

セントライズ機構は、プローブの周方向に複数配置したアームを連動させて動かし、各アームの開き量が等しく開くようにする。この連動アームによりプローブは常に管の中心に位置するようにできる。アームの数としては3方向程度が現実的と考えられる。

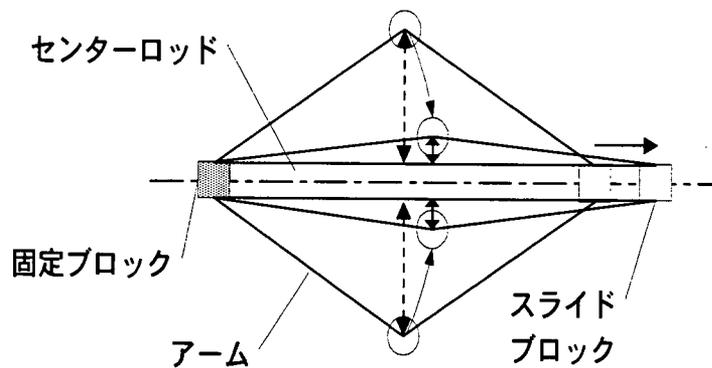


図4.6 セントライズ機構

a. ソリ方式

ソリ方式では、装置の周囲3方向にソリを設ける。この3つのソリは、連動して測定装置に平行に開閉し、さらに周3つのソリが装置から等しい距離に位置するようにする。これにより測定装置は、管の中心に位置する。この方式は、プローブの傾斜、ロールおよび連結部の曲がり量を測定するのでソリの連動・平行開閉機構が複雑になる。さらに、この機構のガタが直接測定精度に影響するので、精度の高い製作が要求される。

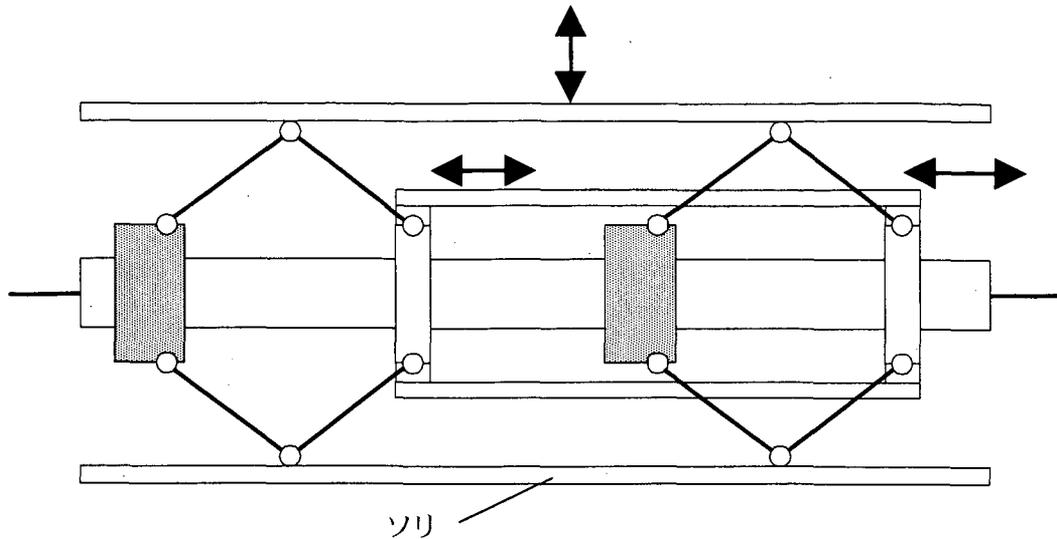


図4. 7 ソリ方式のセントライザ

b. 車輪方式

基本的な動作は、ソリ方式と同じである。車輪は、プローブを管中心に配置するため、周3方向に等しく開かなくてはならない。車輪方式は管内壁面と車輪が点接触となるため平行機構を必要としない。しかし、プローブを管中心に配置するため連動機構は必要である。ソリ方式同様に連動機構には高い精度が必要である。車輪方式の場合は、車輪の設置点を基準とした測定となる。このため、管内壁面に凹凸がある場合は、測定点（車輪位置）が特異点となったような場合に不陸の累積測定の精度に大きく影響する可能性もある。

そこで、測定対象とする管は、塩ビ管、コンクリート管（ヒューム管）など管内側が平滑で凹凸が無い管とする。また、測定は、管内洗浄後に行う。

・管内におけるプローブの動作

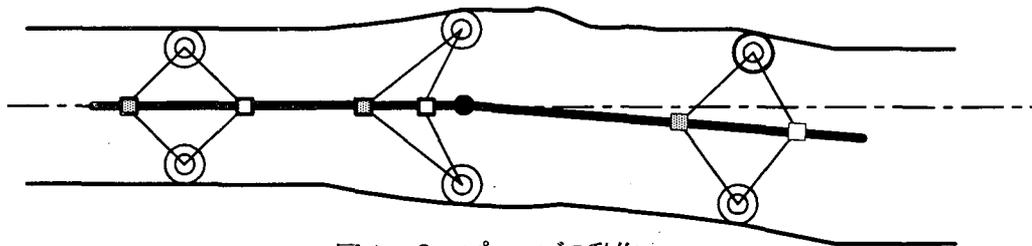


図4. 8 プローブの動作

セントライザ機構により、プローブが各車輪位置の断面において、管の中心位置に配置位置される。

4. 2. 水圧方式による不陸測定に関する基礎実験

図4. 9に実験システムの基本構成を示す。この測定系を用いてセンサの高さを微小に変えたり、走行装置に搭載して測定するなどの実験を行った。以下に各項目ごとに採用した方法について述べる。

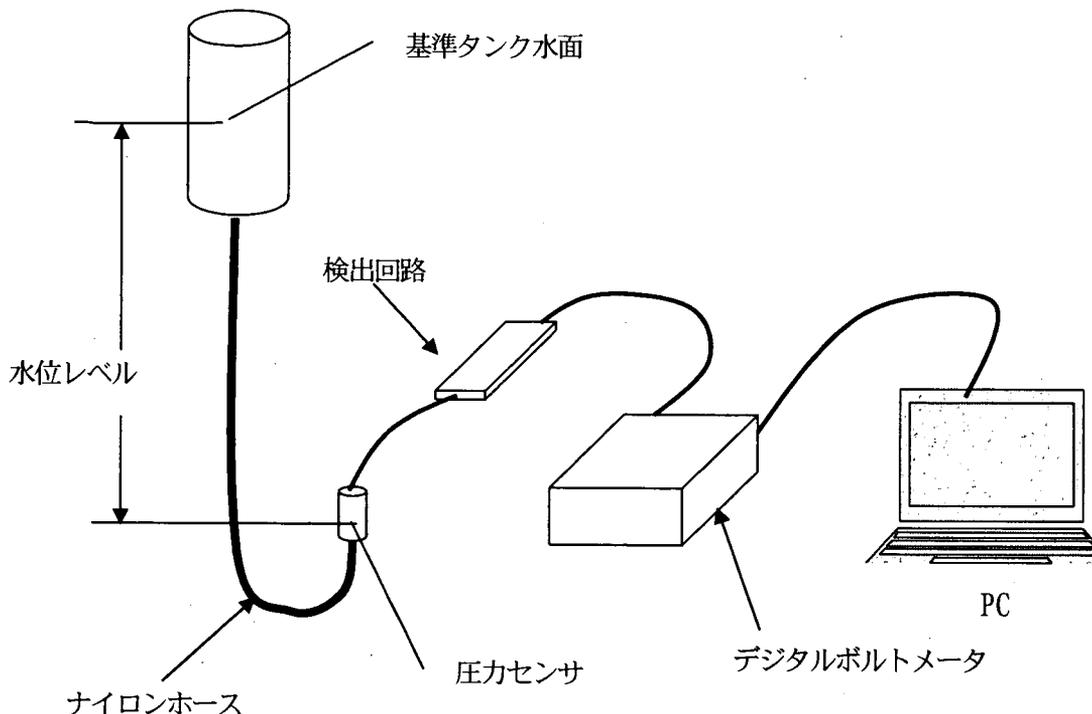


図4. 9 実験システムの基本構成

4. 2. 1. 圧力測定系の特性確認のための実験

図4. 10に圧力測定系の基本特性を把握するための試験システムの構成を示す。試験システムは、水の入ったタンクと圧力センサがナイロンホースで接続された構成となっている。圧力センサはハイトゲージに取り付けられ、高さが調整できるようになっている。タンクは圧力センサより高所に配置されている。

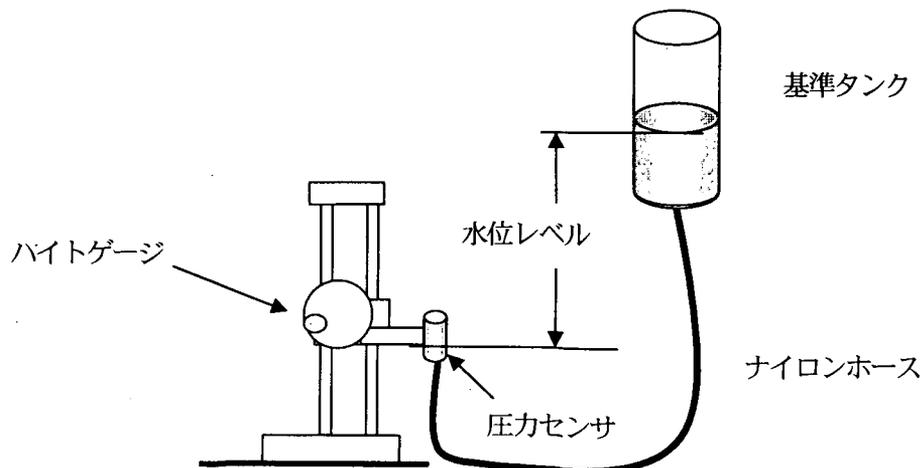


図4. 10 圧力センサの分解能確認試験の構成図

1) 送水ホース選定のための試験

断面積が異なる2種類の送水ホースについて、長さを3段階に変えて以下のように評価した。

(1) ホース径と長さの違いが測定値に与える影響

異なる長さのナイロンホースについて、圧力センサの高さを1mmずつ変えて測定し、2種類のホース径により分解能に差が生じるか調べた。

(2) 急激な圧力変化に対する追従性

圧力センサをハイトゲージから外しておき、高さを急激に1m程度変え、その後、安定するまでの時間や出力値について調べた。

2) センサ選定のための試験

以下の2種類のセンサについて、測定範囲と分解能に関して比較して採用すべきセンサを決定する。

a. 測定範囲が5m未満の高分解能センサ

b. aと同形式のもので、仕様上の分解能は落ちるが測定範囲が10mまでのセンサ

圧力センサの高さをわずかに変えて測定し、分解能に差が生じるか調べた。

3) 周囲温度が送水ホース内水位に与える影響を調べる試験

図4. 11のように試験器具を構成し、試験を行った。内径6mm 外径8mm、長さ100mのナイロンホースの片側の端部を塞ぎ、他側を開放の状態にして、開放側のホースに内径4mm 外径6mmのホースを継ぎ足した。周囲温度に対する水位レベルの変動は内径4mm ホース内で観測し、記録した。

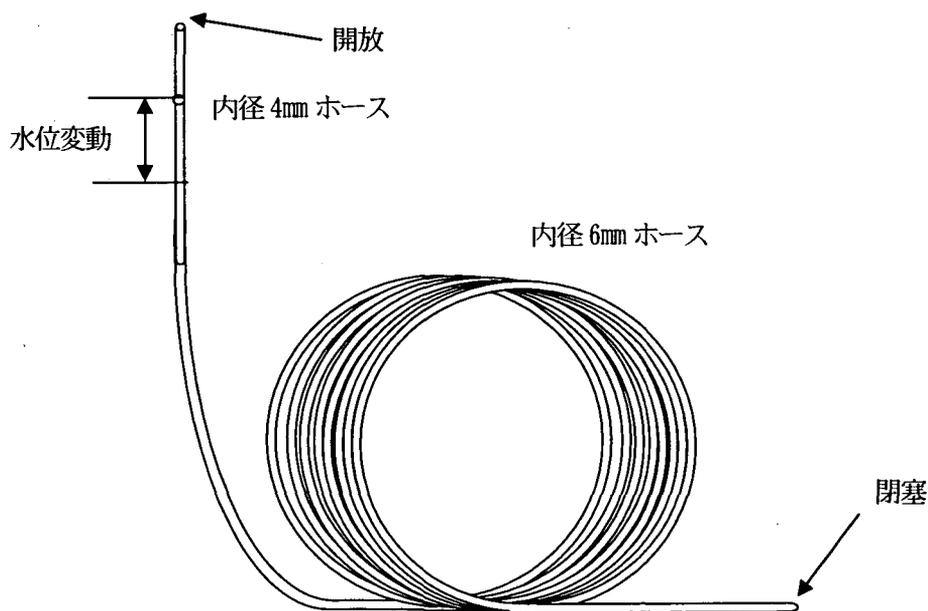


図4. 11 周囲温度に対するホース内の水位変動—器具構成図

4) ホース形状の状態変化に伴う水位変動を調べる試験

圧力センサとタンク間に接続されるナイロンホースは、リールに巻かれた状態から測定が進むにつれてリールからほぐされ、徐々に伸ばされていく。あるいはこの逆もある。そこで、そのようなホースの形状変化があったときに水位データにどの程度の変化があるか確認した。

4. 2. 2. 走行の影響について検討するための試験

図4. 12に走行試験の模式図を示す。圧力センサ部をトラクタに搭載して実験した。トラクタが走行中の圧力を測定して走行に伴う変化状況について調べた。平坦な場合と段差がある場合について実験したが、段差がある場合には走行中だけではなく、一旦停止させた場合についても測定した。

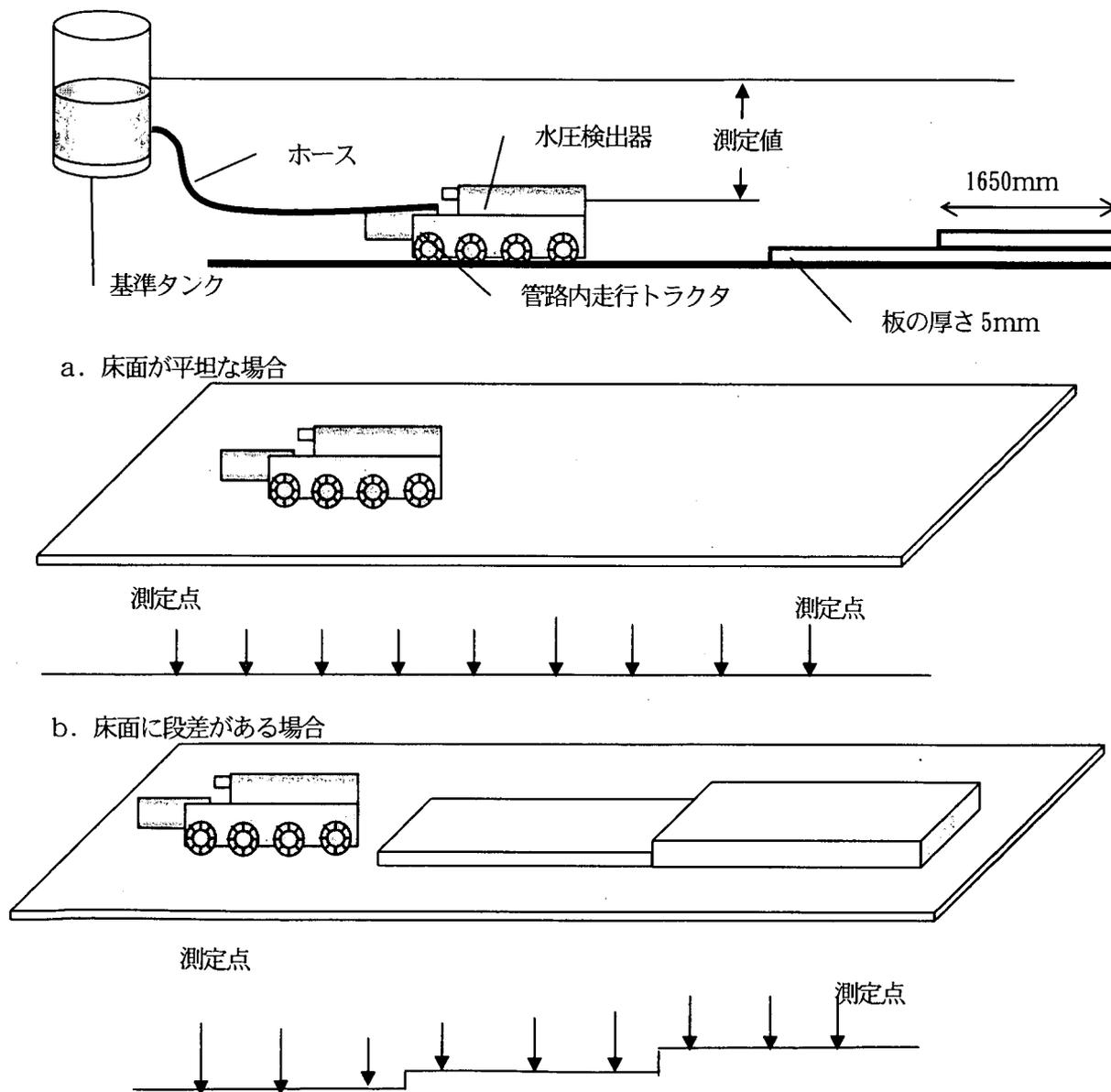


図4. 12 不陸装置の走行試験—装置構成図

4. 3. 実験結果

4. 3. 1. 圧力測定系の特性確認のための実験結果

1) 送水ホース選定のための試験

(1) 送水ホース径と長さの違いが測定値に与える影響

内径4mm外径6mmのナイロンホースを用いて実験した。測定範囲が 1 kg/cm^2 の圧力センサについて、センサの高さを1mmピッチで下げながらセンサの位置変化に伴う圧力変化を測定した。各高さでの測定は約1分間隔で行った。ホース長が10m、50m、100m、の3通りについて実験したが、それらの結果を図4. 13～図4. 15に示す。これらの図では圧力を水位換算して表示している。

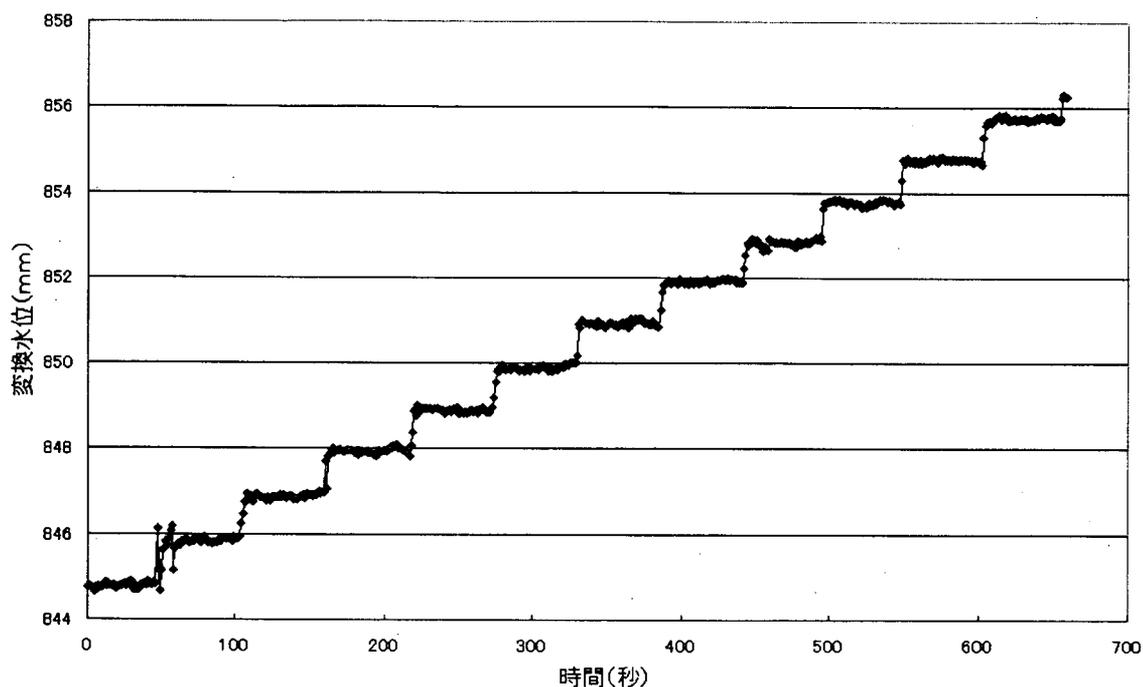


図4. 13 ホース長10mの場合の圧力変化 (センサ: 1.0 kg/cm^2 ホース内径4mm)

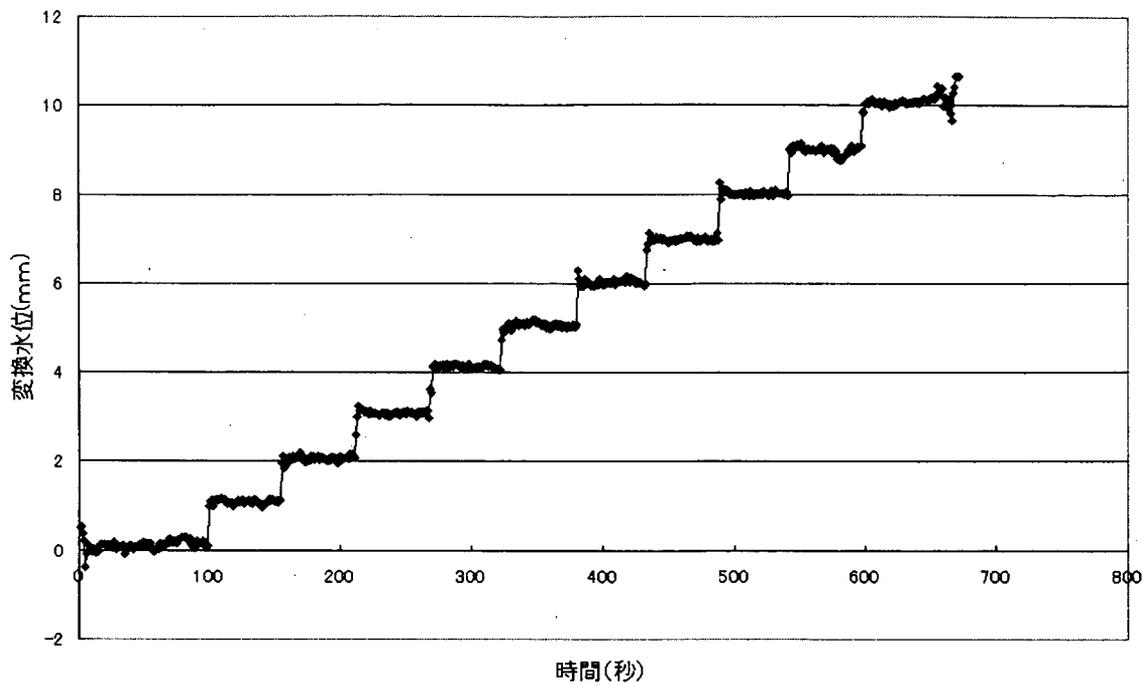


図4. 14 ホース長 50m の場合の圧力変化 (センサ:1.0kg/cm² ホース内径 4mm)

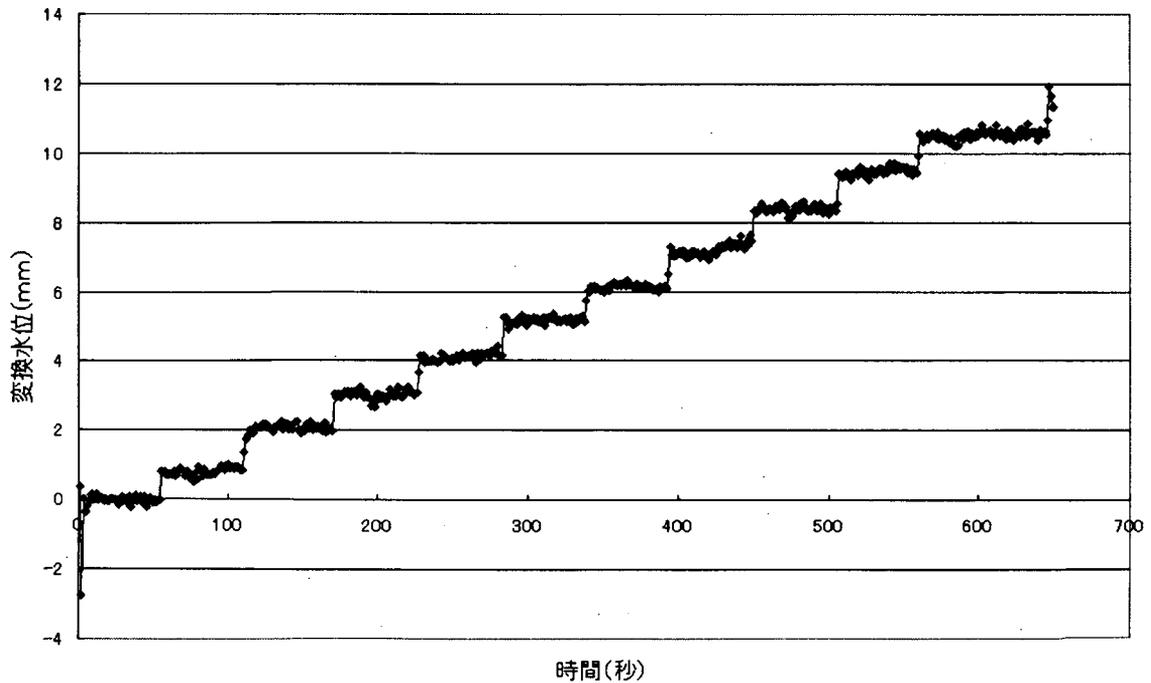


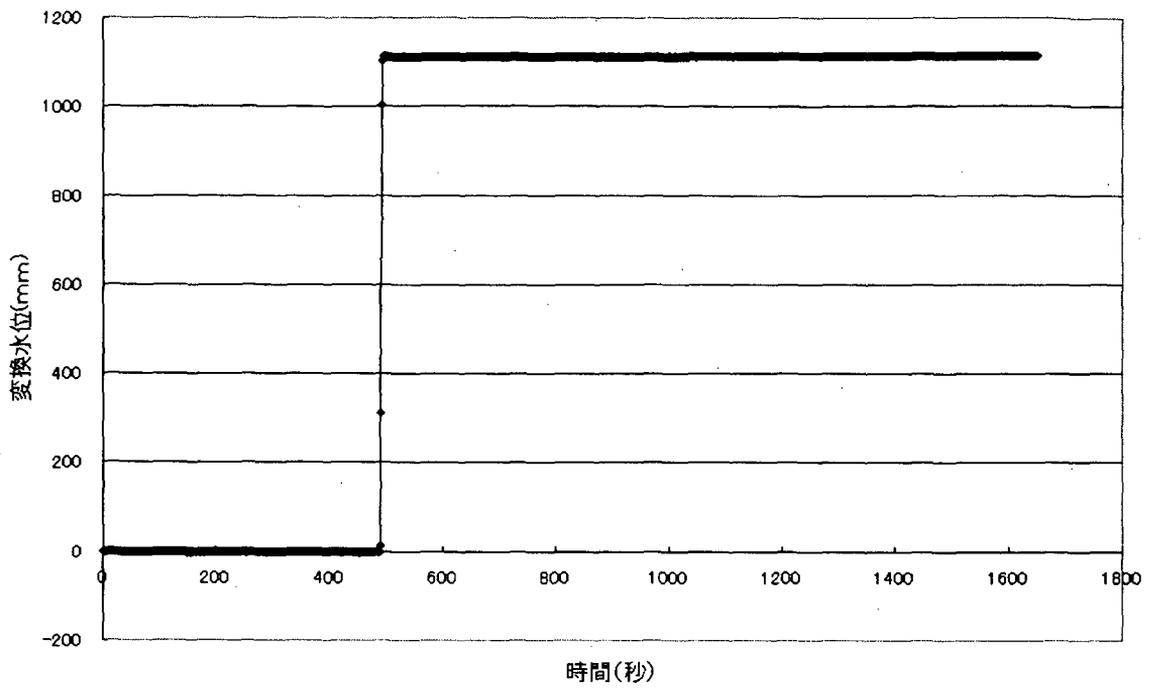
図4. 15 ホース長 100m の場合の圧力変化 (センサ:1.0kg/cm² ホース内径 4mm)

上記の結果から、ホース長の違いにより、特に測定精度に差異は見られないことがわかった。ただし、ホースが長くなるほど、ホース内の水分が含有する空気量が増え易いことを考慮すると、必

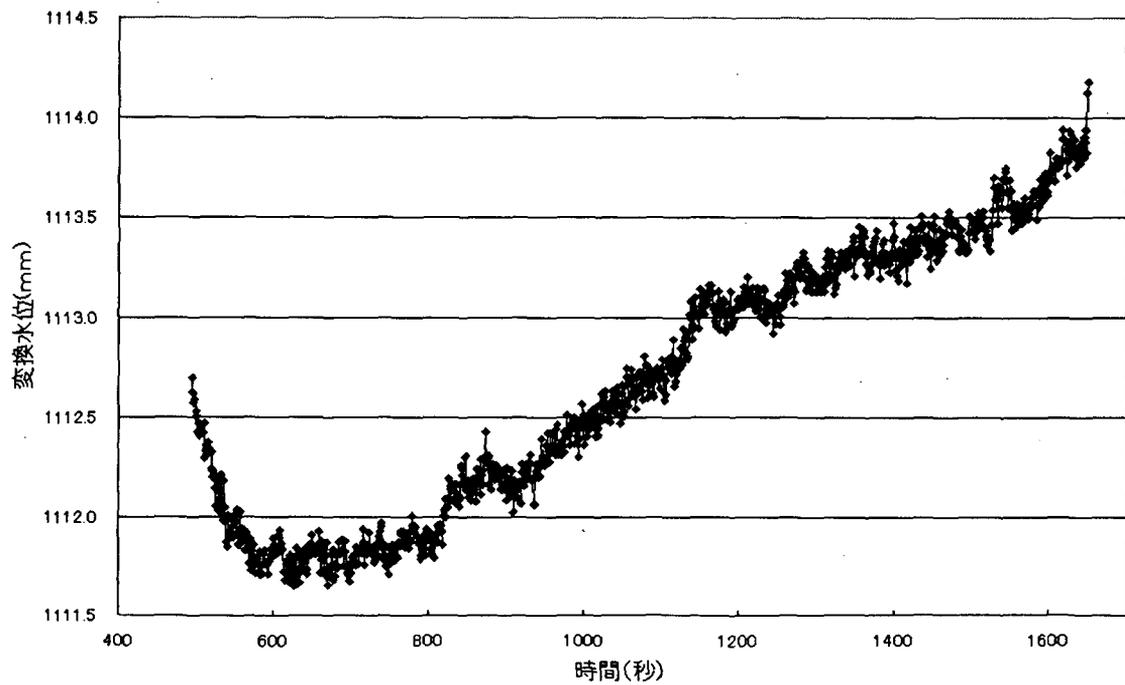
要以上にホース長を長くすることは誤差を大きくする要因となりうるので、可能な限り短い方が好ましいと言える。

(2) 急激な圧力変化に対する追従性

圧力センサの高さをおよそ1m急激に変化させた後に、安定までに要する時間や安定後の測定値がホース長によって違いがあるか調べた。測定範囲 1.0kg/cm^2 のセンサを用い、ホースは内径4mm 外径6mm のものを使用した。ホース長は10m、50m、100m の3通りである。図4.16～図4.18に、それぞれのホース長についての実験結果を示す。これらの図では圧力センサの出力を水位レベルに変換して表示している。

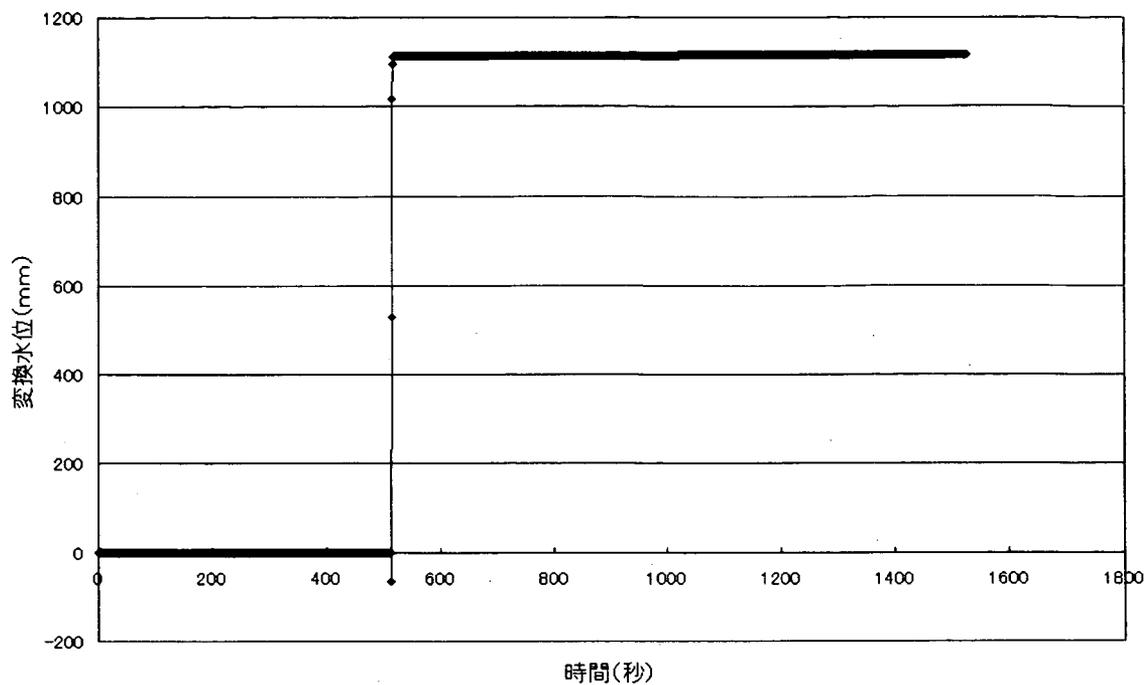


ステップ状の圧力変化

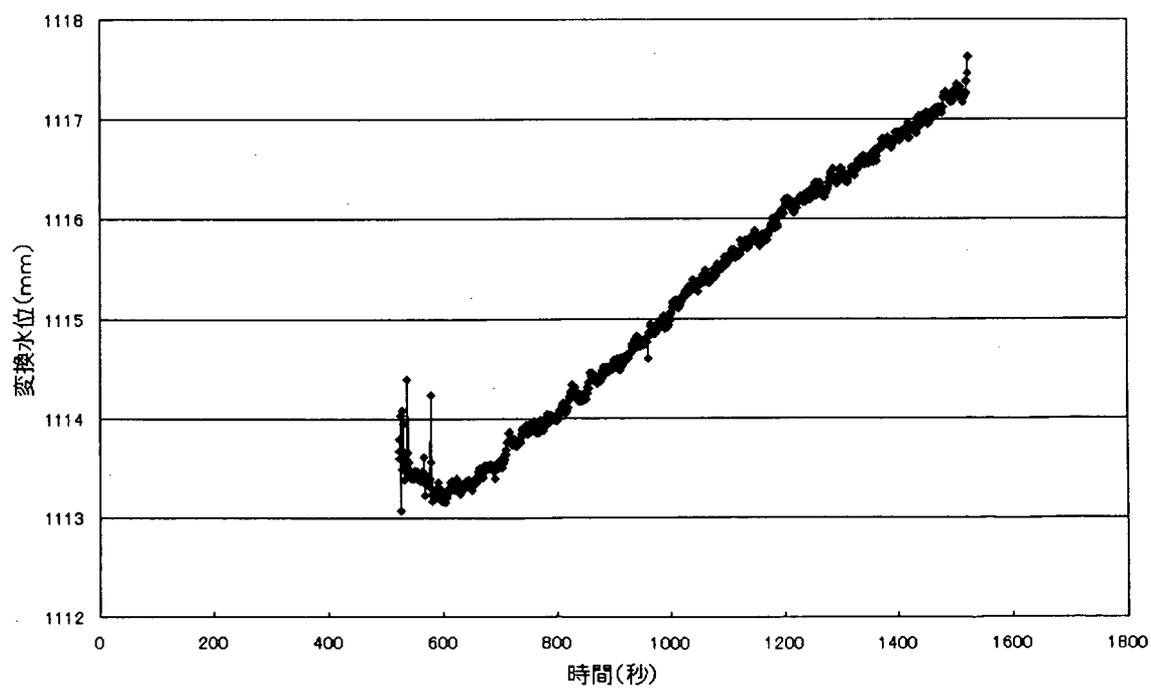


安定するまでの変化状況

図4. 16 10m ホースにおける圧力変化 (センサ:1.0kg/cm² ホース内径 4mm 外径 6mm)

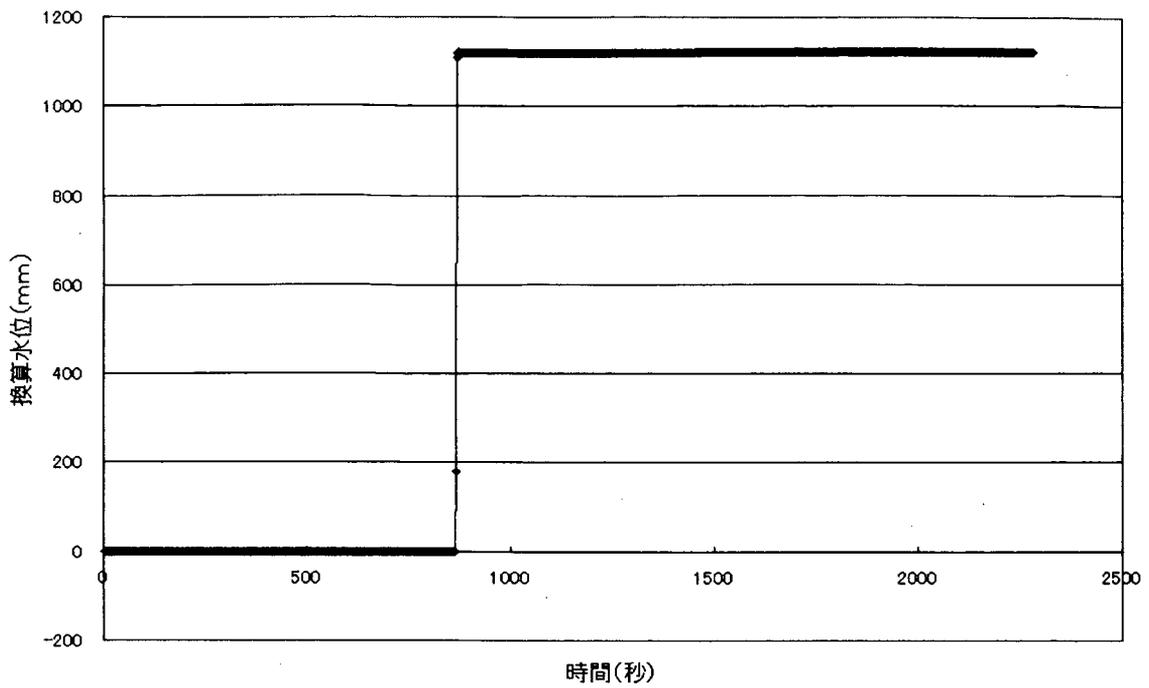


ステップ状の圧力変化

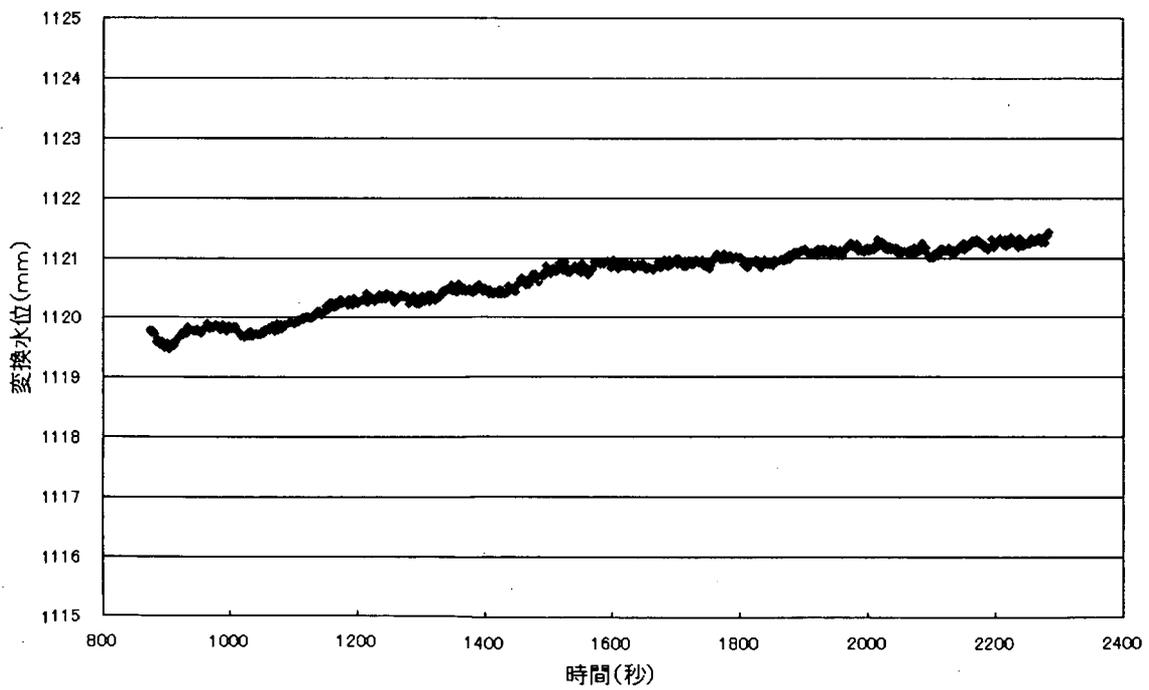


安定するまでの変化状況

図4. 17 50m ホースにおける圧力変化 (センサ:1.0kg/cm² ホース内径4mm 外径6mm)



ステップ状の圧力変化



安定するまでの変化状況

図4. 18 100m ホースにおける圧力変化 (センサ:1.0kg/cm² ホース内径 4mm 外径 6mm)

これらの結果から、圧力センサの高さを1m程度、急激に変化させたときのセンサ応答にはホース長の違いによる差異は特に見られないことがわかる。安定までに要する時間についても特に顕著な差はみられず、変動幅としては30分間で3mm程度である。

4. 3. 2. センサ選定のための試験

フルスケールが5mのセンサ ($0.5\text{kg}/\text{cm}^2$) と10mのセンサ ($1.0\text{kg}/\text{cm}^2$) について1mmステップで高さを変えたときの圧力変化について調べた。送水ホースは内径6mm 外径8mmで、長さが100mのものを用いた。図4. 19および図4. 20に試験結果を示す。

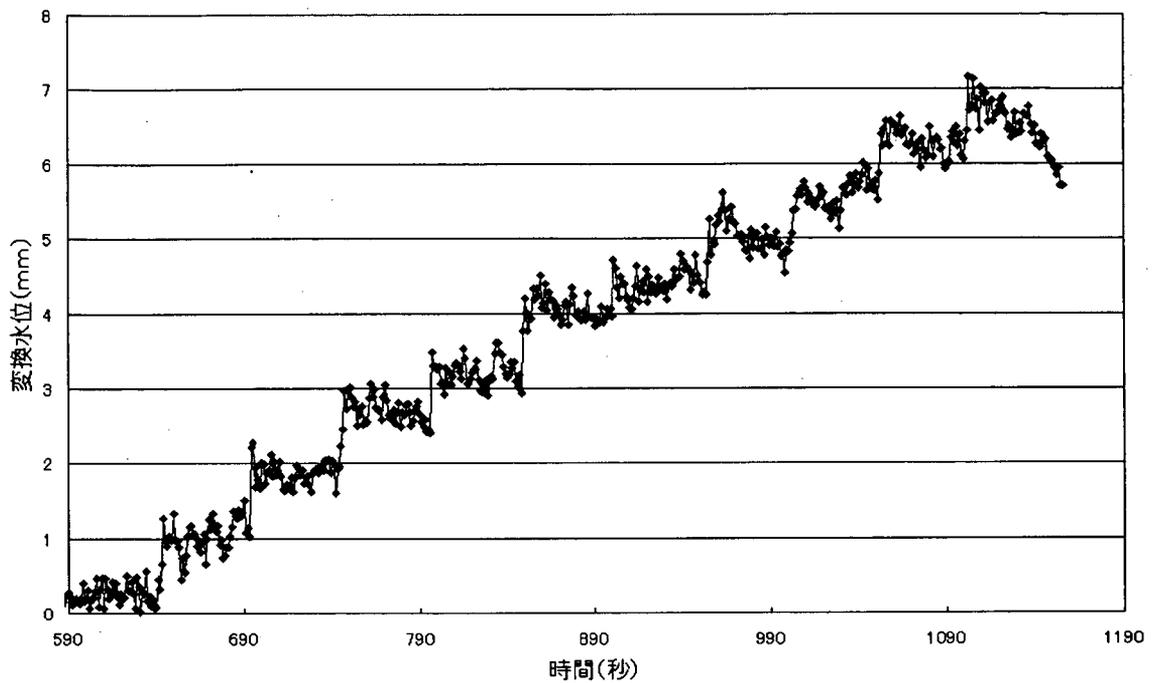


図4. 19 フルスケール5mのセンサ ($0.5\text{kg}/\text{cm}^2$) の測定結果 (ホース:8×6、100m)

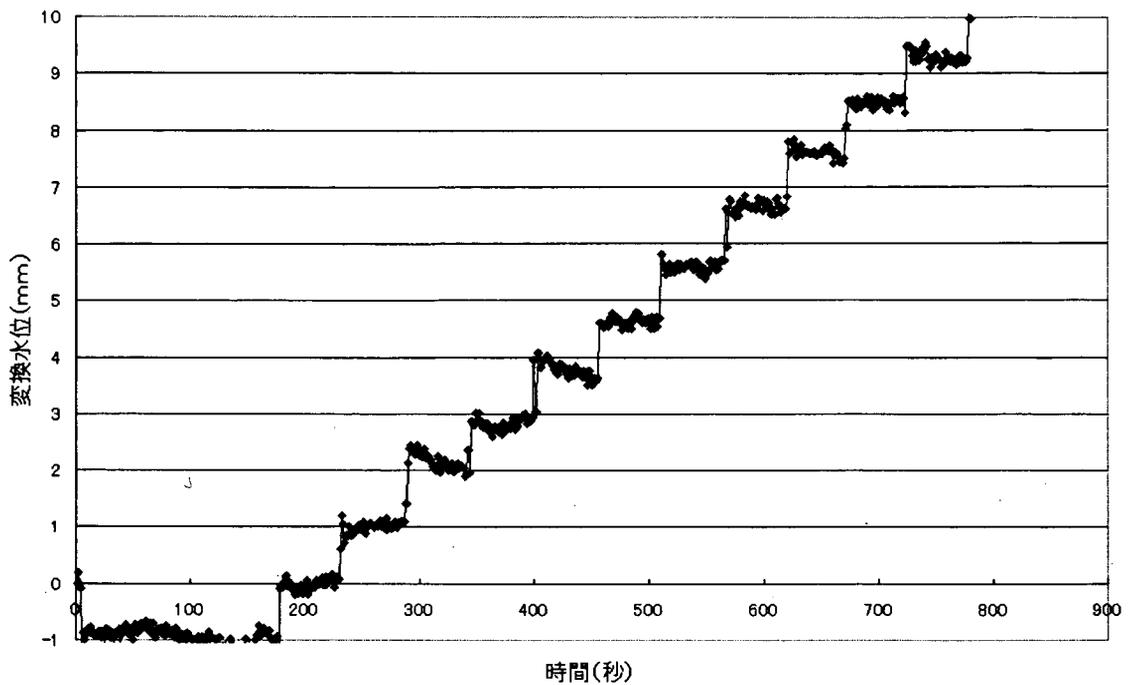


図4. 20 フルスケール10mのセンサ (1.0kg/cm²) の測定結果 (ホース:8×6、100m)

この試験結果では、分解能が高いはずのフルスケール5mのセンサよりも10mのセンサの方が、変化した後に比較的早く安定しており、むしろノイズが少なく良いデータが得られている。フルスケール5mのセンサは追従性がよくない傾向がみられる。これは実験に用いたセンサ固有の特性である可能性もあるものの、センサ単体としては、少なくとも10mのセンサで十分な分解能が得られており、測定レンジの広さを考えると10m用を採用する方が有利と考えられる。

4. 3. 3. 周囲温度が送水ホース内水位に与える影響を調べる試験

図4. 21に試験結果を示す。約10℃の温度変化に対してホース内の水位は約800mm変化している。これは、約10cm³の体積変化に相当する。温度変化の速さなどの影響は明確ではないが、温度の変化幅が大きければ水位変化も大きく、矛盾しない結果になっている。温度が10℃変化しても、断面積が100cm²の水槽を用いれば水位変化は1mmしか生じないことになるので、水槽の断面積を十分に大きいとみなせる適切な設計を行えば、温度変化の影響は十分に抑えられることがわかる。

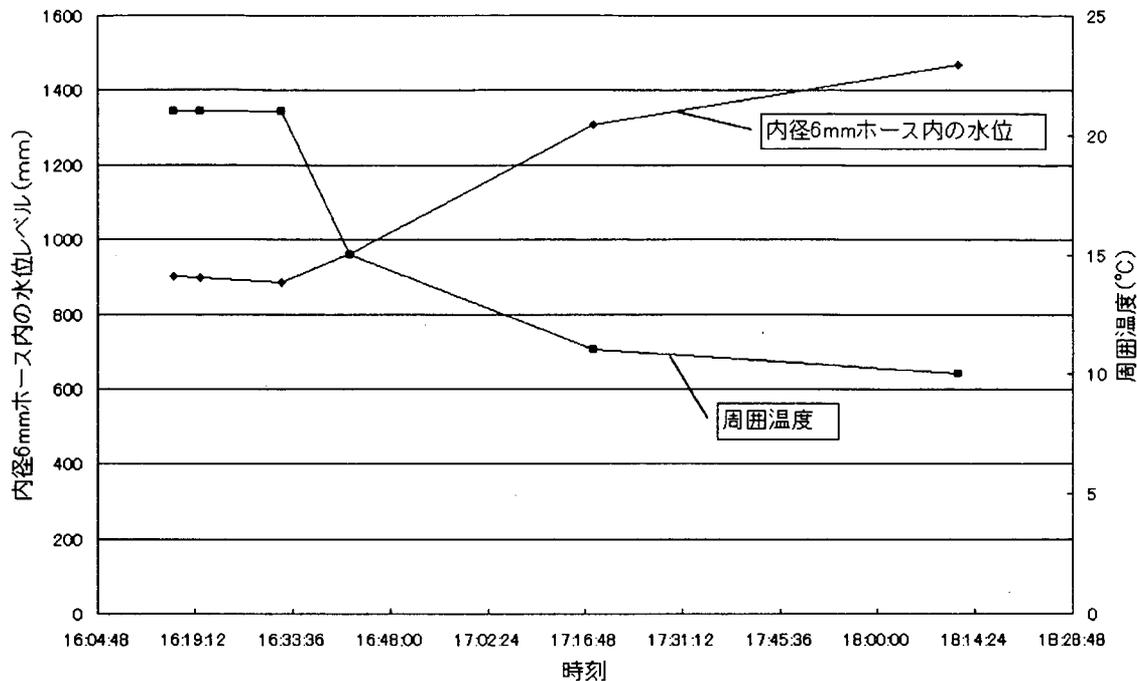


図4. 21 周囲温度変化と水位変化の関係 (ホース巻き状態、8×6、100m)

4. 3. 5. 走行の影響について検討するための試験

1) 平坦な床面での走行試験

図4. 23に段差のない平坦な床面を走行させながら測定した結果を示す。走行しながら測定すると平坦にもかかわらず、走行時の振動などの影響を受けて測定値にスパイク状の変動が現われ、安定しないことが分る。

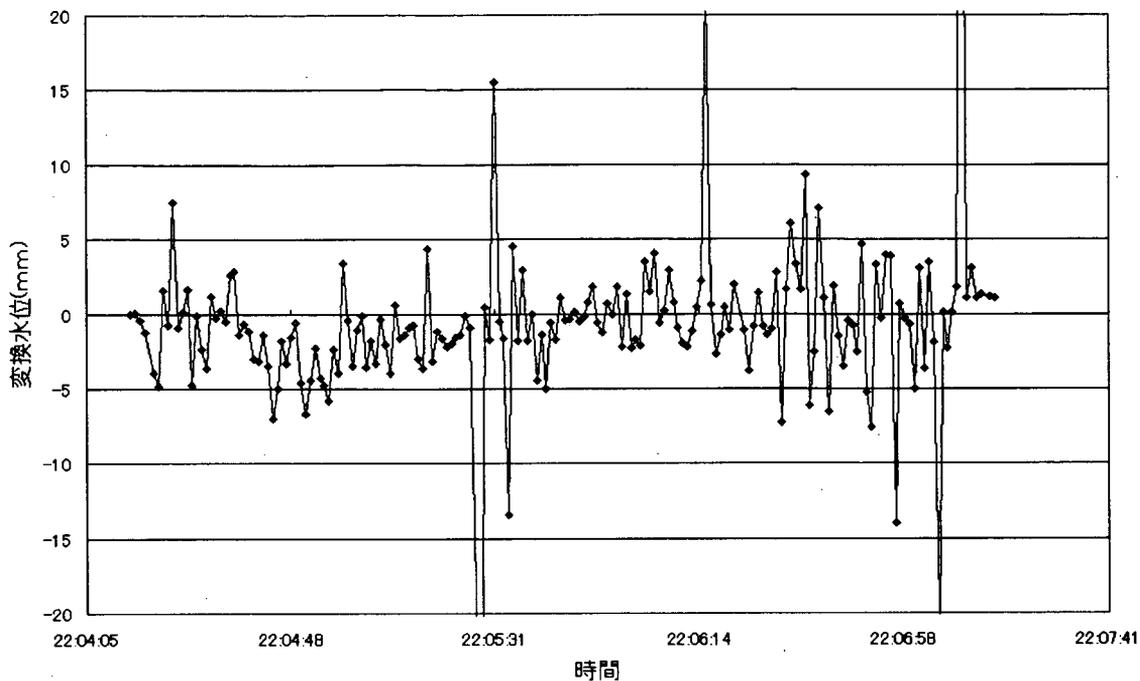


図4. 23 平坦な床面を走行中に測定した水圧(水位変換値)

2) 段差のある床面の走行試験

図4. 24は段差がある床面を走行しながら測定した結果である。平坦でも触れ幅が大きいことから予測されるように、変動が大きく、安定した測定は望めないが変動幅の中心をとると板の厚さ5mmの段差に応じた値になっていることがわかる。

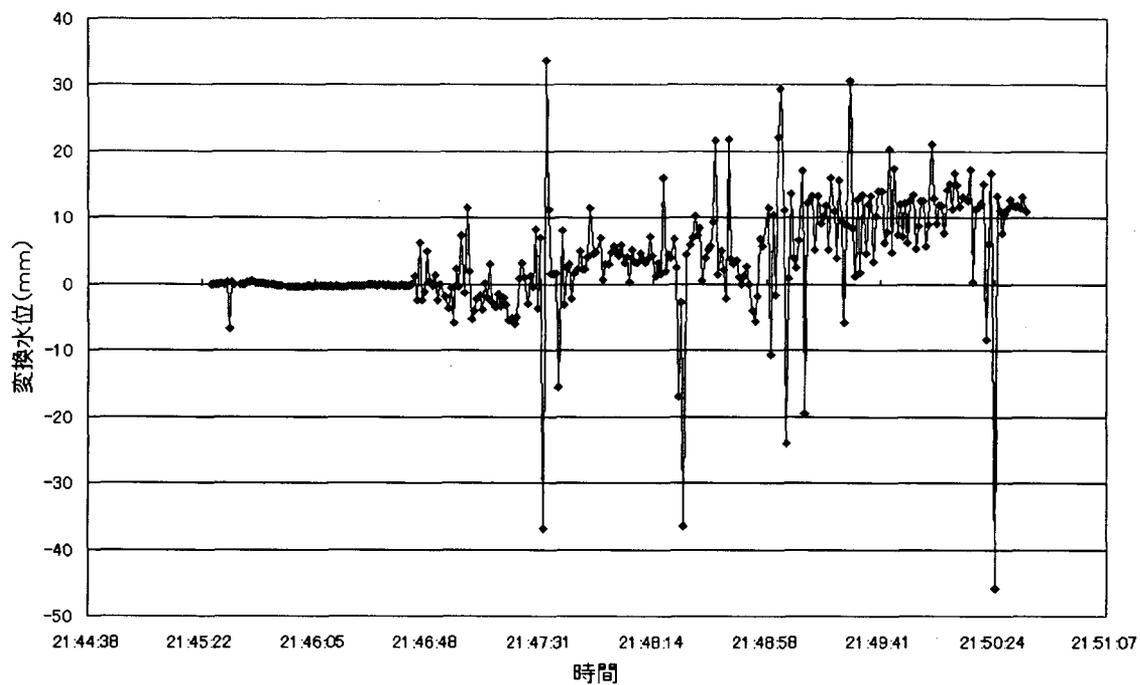


図4. 24 段差のある床面を走行中に測定した水圧(水位変換値)

3) 緩衝材による防振効果についての実験

図4. 25および図4. 26はスポンジやゴムなどの緩衝材を走行台車と圧力センサの間に入れて段差のある床面を走行させながら測定した結果である。緩衝材が適切でないのか、あるいは、取り付け方法が適切でないのか、原因は不明であるが少なくともこれらの材料では効果は見られなかった。

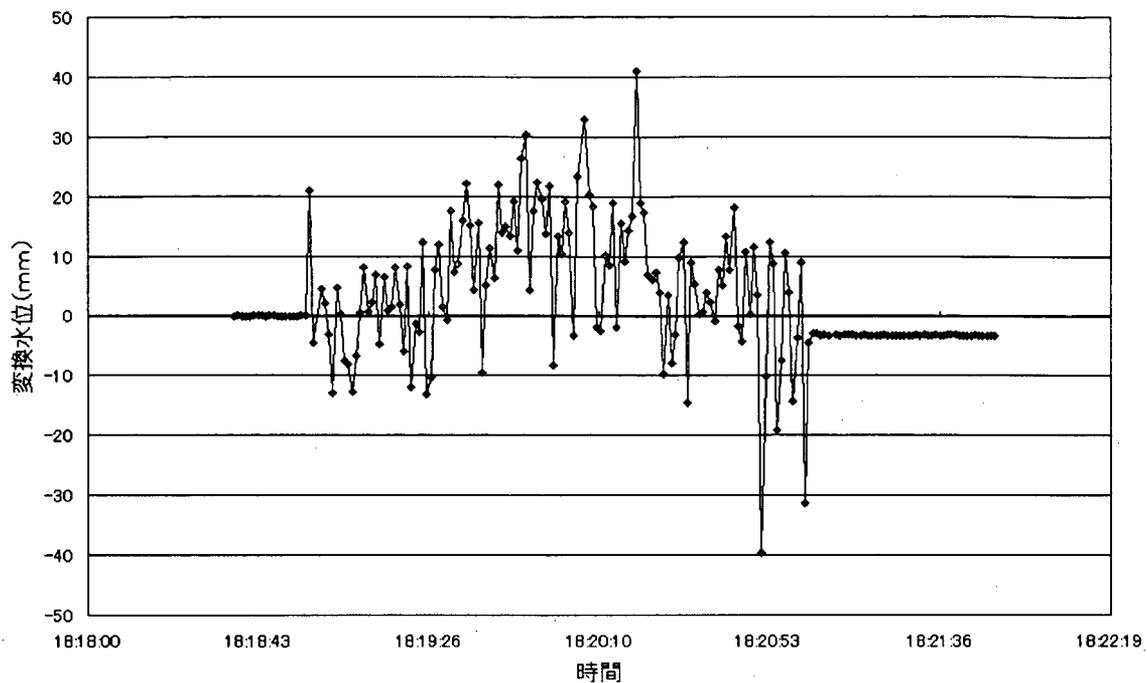


図4. 25 スポンジによる緩衝を行った場合の水圧測定値

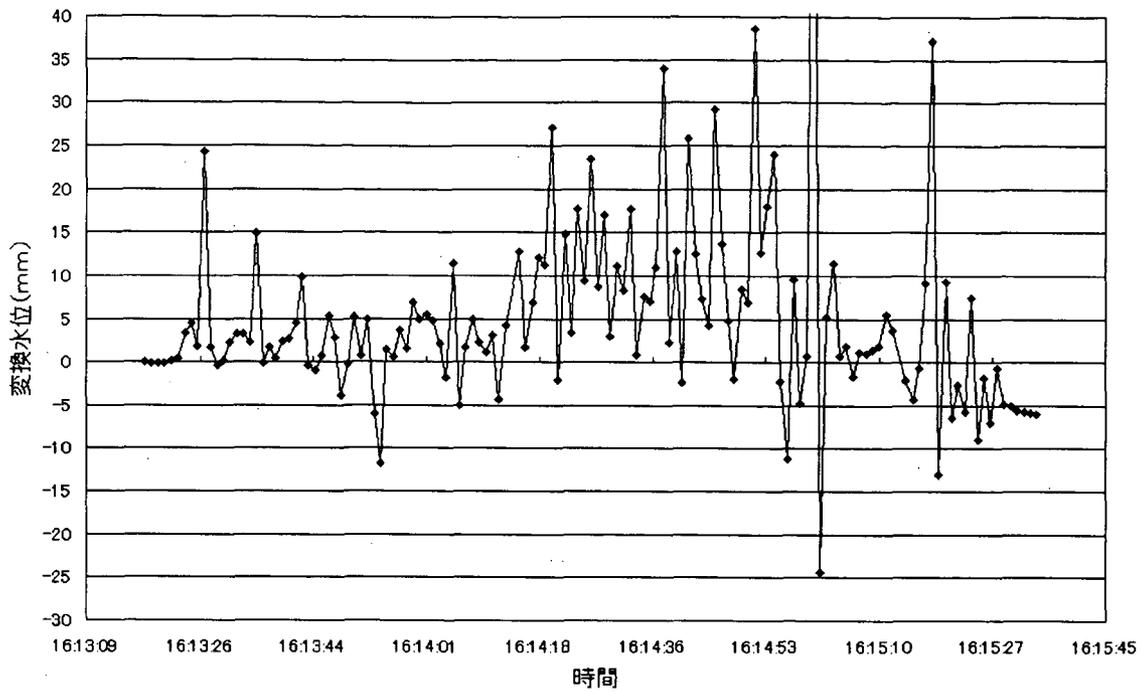


図4. 26 リングゴムによる緩衝を行った場合の水圧測定値

4) 段差のある床面を一定間隔ごとに停止して測定する実験

緩衝材による効果があまり期待できそうもないので、一定距離ごとに停止させてから測定する方法を試みた。測定結果を図4. 27および図4. 28に示す。この結果を見ると、走行時は変動が激しいものの、停止後は比較的早く安定し、段差に相当した測定値が得られているようである。ただし、同じ高さの板上の測定値で2mm程度異なった値が測定される場合があり、誤差要因となり得る。2つの図は異なる走行速度で得られたものであるが、結果的に生じている誤差は現実的な速度範囲では走行速度によってあまり変わらないようである。

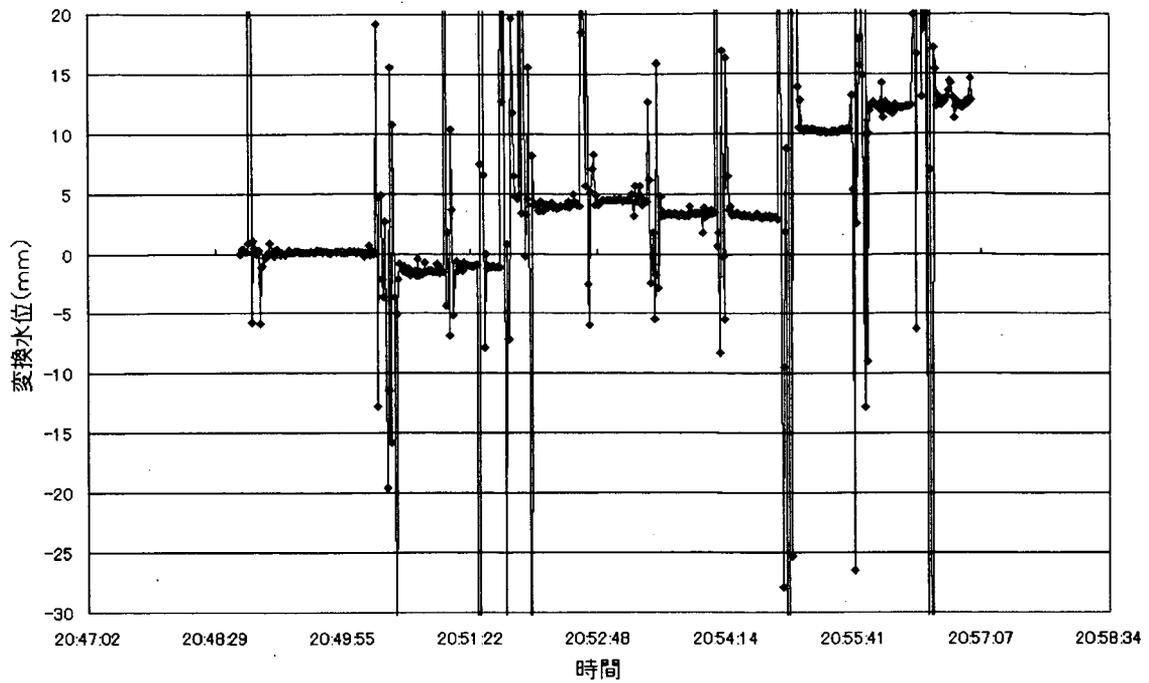


図4. 27 段差のある床面で一旦停止して測定した結果 (走行速度約5m/min)

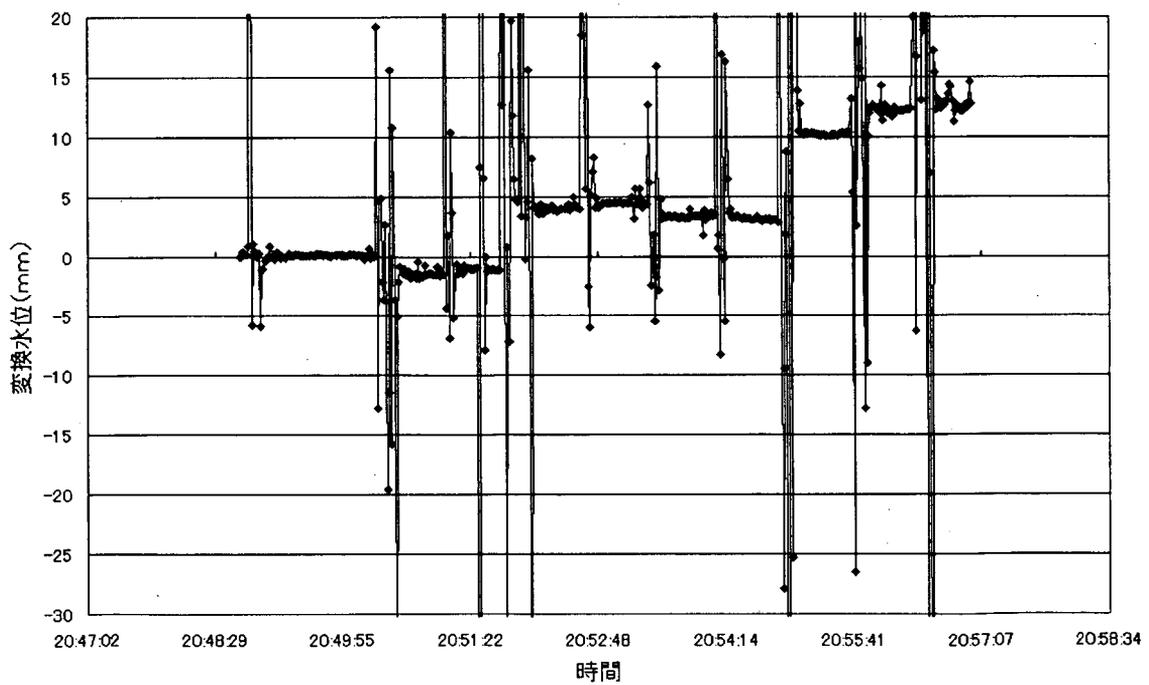


図4. 28 段差のある床面で一旦停止して測定した結果 (走行速度約1m/min)

5. 装置の設計・試作

5. 1. 不陸測定装置の設計・試作

5. 1. 1. 水圧方式による不陸測定装置の構成

測定システムは、図3. 1に示すように、地上に設置した基準タンクと管内を走行する装置に装着した水位センサをホースで接続した構成となっている。基準タンク内水面からの水圧を測定して地上との高低差を検出する方法である。

5. 1. 2. 設計仕様

- a. 不陸測定 : 基準タンク水面からの最大深度10m (圧力センサ: $1\text{kg}/\text{cm}^2$)
- b. 測定形態 : 下水管内カメラプローブに接続しトラクタに搭載して管内を移動し、一定間隔で停止して測定する。
- c. 測定分解能 : 1mm
- d. 測定精度 : $\pm 10\text{mm}$
- e. 送水ホース : ナイロンホース $\phi 6 \times 4\text{mm}$
- f. 使用温度範囲 : 0~40度 (凍結しない範囲)

5. 1. 3. 測定装置

1) 測定方法

測定開始位置において下水管深度を測定して測定基準を求めておく。この最初の測定装置の位置からの相対変位を算出して管路の不陸を求める。この最初の位置(測定基準)は、メジャーなどにより地表面からの深度を計測して決定する。あるいは、海拔などのデータを用いて海拔データとして記録する。

2) 不陸測定手順

測定装置を管内に挿入し、測定の初期位置にプローブを置き、測定を開始する。

トラクタを進め次の測定位置で停止し、測定する。順次これをくり返し終点まで行う。

3) システム構成

図5.1にシステム構成図を示す。

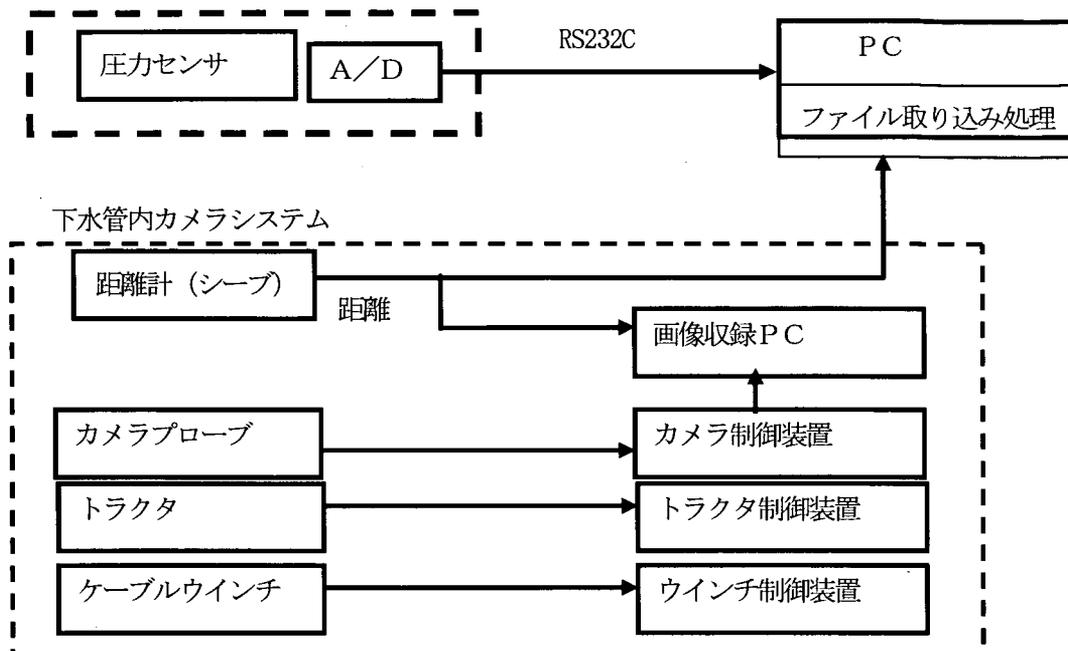


図5.1 システム構成図

5.1.4. PCの測定ソフト

測定は収録画面を見ながらデータを収録するソフトウェアを用いて行う。

1) 測定手順

距離データ、水圧データは表示される距離データを見ながらプローブを移動させ、所定の位置で停止させてから測定する。

2) PCのデータ収録画面構成例

図5.2に画面の一例を示す。

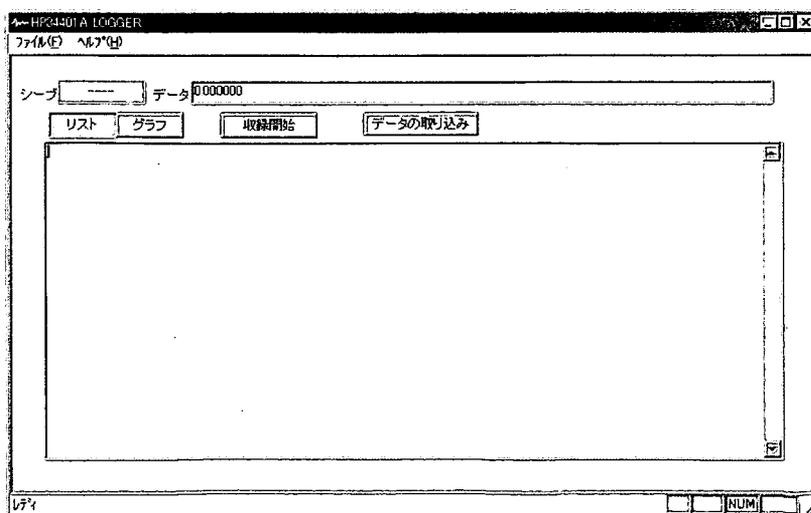


図5.2 測定画面

5. 1. 5. 圧力センサの校正

圧力センサは、圧力センサとタンク水面との水位差を数段階に設定して校正する。

タンクを高い台の上に置き圧力センサの高さを変え水位の基準面とそれぞれのセンサ間の高さをメジャー等で測定して出力の関係を求める。センサの出力値と実測値のグラフから変換係数を求める。

5. 1. 6. 不陸データの保存及びデータ処理

収録した距離データと水圧データはCSV形式で保存し、PCで処理する。

5. 1. 7. 圧力センサの取り付け

測定精度を向上する上では、緩衝材の効果はあまり見られなかったものの、トラクタの走行振動や衝撃よりセンサを保護するために、防振機構を設けた。ただし、やわらかいスポンジでは、衝撃を吸欠するには厚さを必要とするため形状が大きくなり、スポンジの変形に伴うセンサの変位量が大きくなる。このため、緩衝材の厚さを薄くできる特殊防振ゴム(ソルボセンイ)を使用した。また、 $\phi 150$ mmの下水管に入るように小さなスペースでカメラプローブと圧力センサを組み合わせる必要があるため、防振機構を小さくするためにもソルボセンイが有利である。トラクタにカメラプローブを搭載した場合 $\phi 150$ mmの下水管との隙間は約40mmとなる。この隙間内に直径25 mmの圧力センサを取り付けなければならない。確実に固定され緩衝機能を備える方法として、緩衝材の肉厚を5 mmとしてリングホルダ内に配置して、その内側に圧力センサを搭載した。(図5. 3) また、圧力センサ部は、カメラプローブと一緒に固定バンドでトラクタに固定する構造とした。(図5. 4)

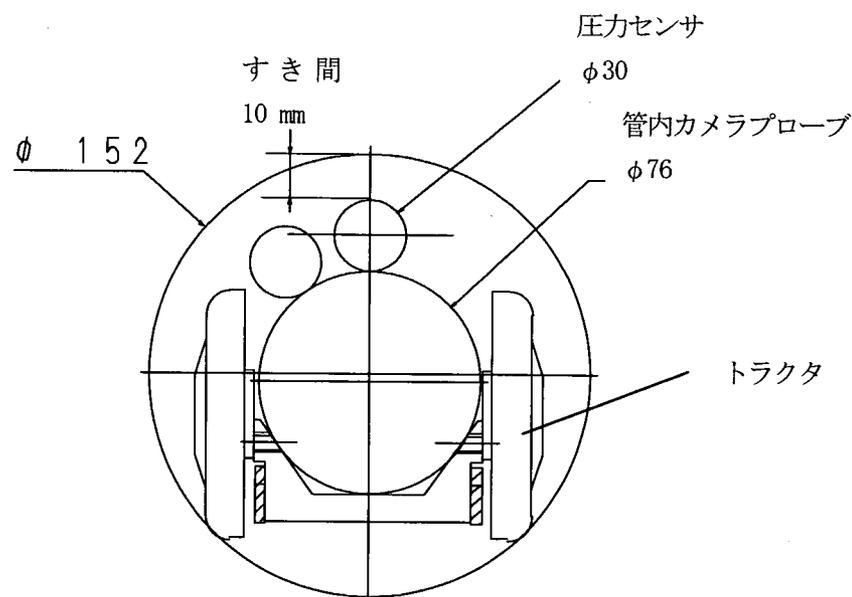


図5. 3 管内のトラクタ寸法

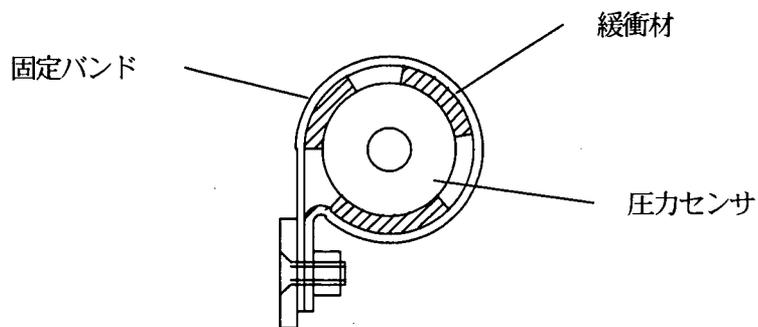


図5. 4 圧力センサを固める構造（断面図）

5. 1. 8. タンク的设计

長さ100mのナイロンホースでは、温度変化に伴う水量変化は、約 $0.63\text{cm}^3/\text{°C}$ であった。また、ホース伸ばした状態と巻いた状態での水量の変化量は約 2.5cm^3 であった。これらの結果から、 30°C の温度変化とナイロンホースの伸縮が複合した場合の水量の最大変化量は次のようになる。

$$0.63 \times 30 + 2.5 = 21.4\text{cm}^3$$

したがって断面積が 214cm^2 以上のタンクを用いれば、水位変化は1mm以内の誤差範囲となる。ここで、タンク直径を170mmとすると、このときのタンク水位変化は、

$$21.4 / (8.5^2 \times \pi) = 0.09\text{cm}$$

と計算でき、約0.9mmの水位変化に留まることになる。上記の想定変化量は現実では考えられない程度まで大きく見積ったものであり、タンクの直径は170mmあれば十分であるといえよう。

5. 1. 9. ホース巻取りドラム

ナイロンホースに水を満たすにあたり、できる限りエア溜りができないように注入できる構造であること、また、ホース内の水に溶解しているエアが分離して発生する気泡が一箇所に集まりエア溜りにならないような構造でもあることが望ましい。そこで、ホースドラムを水平巻きする構造とした。また、タンクとドラム巻きのホースとの接続はスィベルを通じて接続することによりタンクと接続したままドラムを回転させてホースを送り出せるようにした。

5. 2. 蛇行測定装置の設計・試作

5. 2. 1. 蛇行測定方式

1) カム機構による検出方式

連結された前後のプロープの折れ曲がり量は、前方プロープに取り付けた軸と直交するターゲット板と後方プロープに取り付けた変位センサの固定点との距離変化量として検出する（図5. 5）。

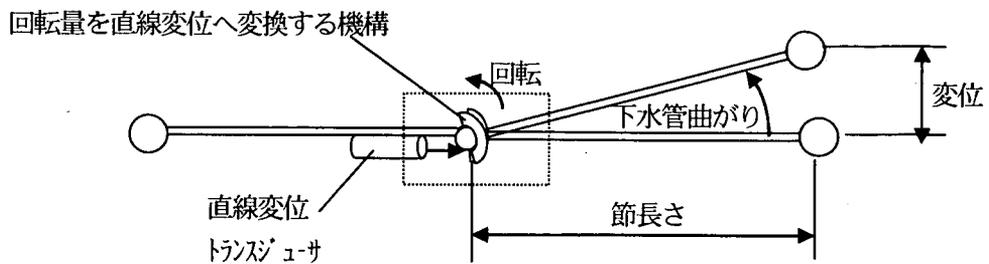


図5.5 カム機構による検出方式

2) プロブのセントライズ機構 (車輪方式)

連結プローブ方式では、変位の検出機構と同程度にセントライズ機能が重要である。測定されるのはプローブの変位形状であるが、その変位形状が管路の形状を忠実に反映したものでない限り、測定される形状は異なった結果をもたらすことになる。移動過程における2つのプローブの中心からのずれやそのずれ方の相対的な差異などが影響する。この部分は、実際に試作して評価しない限り、見通しを得ることは難しい。

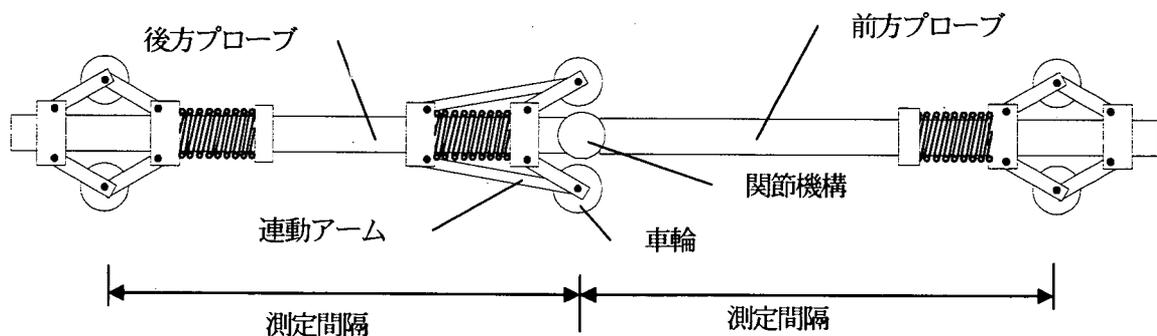


図5.6 プロブセントライズ機構概念図

セントライズは図5.6に示すように周3方向に車輪を配置し、この車輪の開き量が等しく開くようにすることにより、プローブが常に測定管の中心に位置するようにできる。

3) 測定範囲

- ・蛇行測定 : ±10度/測定間隔 (1m間隔測定で一箇所での曲がりの最大値)
- ・ロール : ±45度 (水平より)
- ・ピッチ : ±30度 (水平より)
- ・適合管径 : 目標仕様は内径150mm~800mmであるが、この範囲をひとつのセントライズでカバーするのは困難であるので、管径により、セントライズを付け替えて使用するものとする。そこで、初期の試験装置としては、測定管径をφ200mmで試作する。

5. 2. 2. 測定系

1) 初期値

測定開始位置において測定装置の姿勢（方向、向き）を測定して測定基準（初期値）を求めておく必要がある。この最初の測定装置の方向、向きからの相対変位の累積により管路の不陸蛇行を算出する。具体的な手順は次のとおりである。

測定装置を管内に挿入し、測定の初期位置にプローブを置く。プローブの向き（管の向き）を確定するために装置の水平からの傾斜（ロールとピッチの2成分）を測定する。

ただし、ピッチについては別な方法で測定して手入力とすることも可能である。

2) システム構成

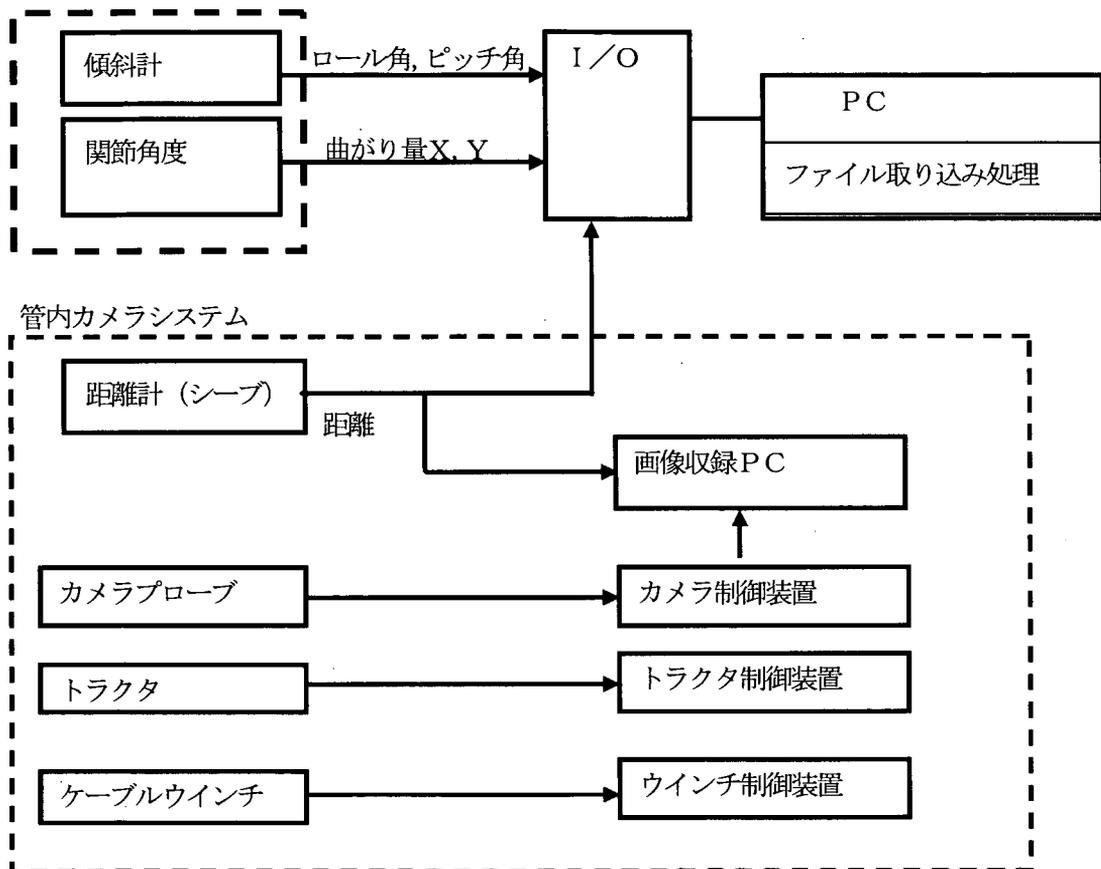


図5. 7 システム構成図

5. 2. 4. データの取り込み

距離データ、関節の曲がり角度、ロール角などのデータの取り込みはシーブの距離データを見ながらプローブを移動させ一定間隔ごとに停止して測定する。

1) PCのデータ収録画面構成

距離 (mm)	蛇行 X軸	蛇行 Y軸	ロール角(度)	ピッチ角(度)
---	---	---	---	---

距離	蛇行 X	蛇行 Y	ロール角	ピッチ角
----	------	------	------	------

図5. 8 測定画面

5. 2. 5. センサデータの内容

ロール角はプローブの軸まわりの回転角であり、傾斜センサで計測するが、関節の変位検出するX軸が水平面にある状態を基準として、そこからの相対角度として出力するようにした。

5. 2. 6. 校正システム

1) ピッチ基準（水平）の校正

プローブをトラクタの牽引によって移動し、測定位置ごとに停止してプローブ内に取り付けられた傾斜計でロールとピッチを測定し、併せて関節の曲がり量も測定する。傾斜計のロールとピッチはプローブの姿勢を所定の位置に設定してゼロ値とするか、初期値として記録しておいて測定値との差を求める方法をとる。ピッチのゼロ値の校正は、図5. 9にしめす校正測定システムによりプローブ基準面を上に向け、水準器によりプローブを水平にしたときの出力値を基準値とする。

2) ロール基準の校正

測定系（プローブ）の水平基準を校正台により、水平基準状態でロール角の出力をゼロに合わせる。

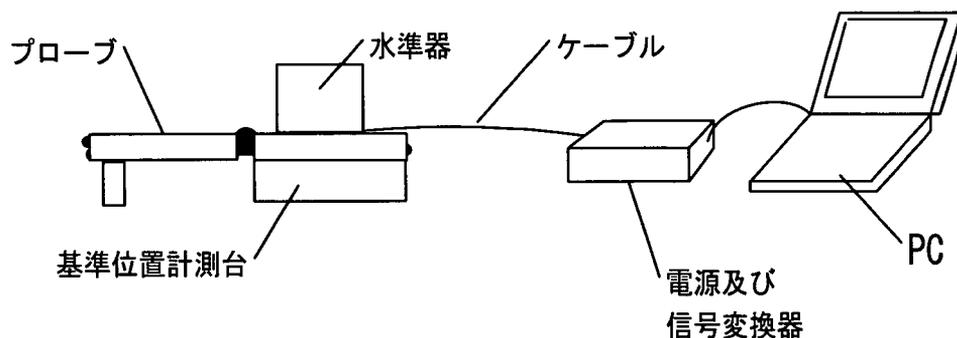


図5. 9 校正測定システム

5. 2. 7. 蛇行データの処理

各測定位置でデータを複数回サンプルして平均処理し、それをその位置での測定値とする。データのサンプル数は、任意に設定可能とする。不陸および蛇行は次式で求められる測定間隔 dL と直交2軸の変位量 hz 、 hy より算出する。

$$dL = (\text{測定位置の距離データ}) - (\text{1個前の測定位置の距離データ})$$

不陸、蛇行の計算方法を図5. 10に示す。

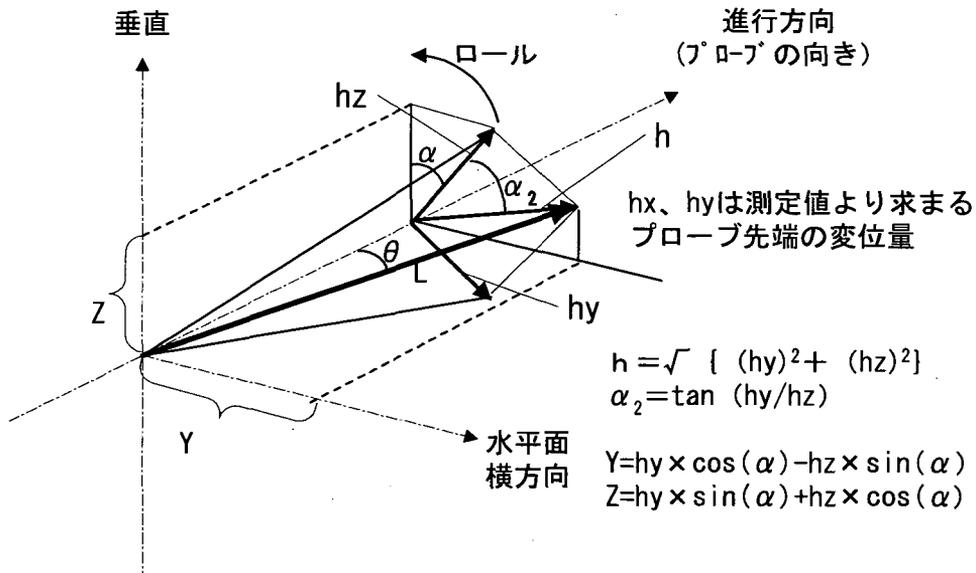
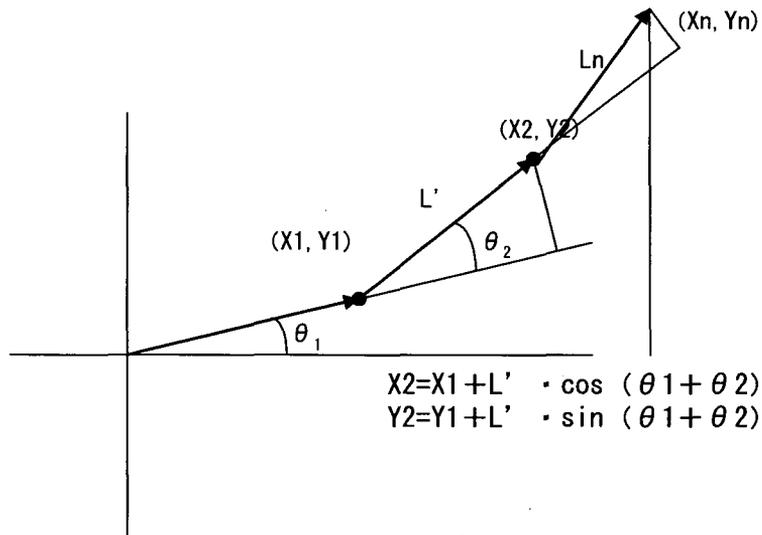


図5. 10 水平、垂直変位置量の算出方法

不陸蛇行の軌跡は累積計算によりもめる。まず、始点のプローブ先端位置を (X_1, Y_1) とし、次にプローブを1ステップ移動したときの測定値を X_1, X_2 に加算すると図5. 11に示すように先端位置 X_2, Y_2 が求まる。同様にすれば n 番目の測定点の位置は図中に示す式で求められる。



n 番目の測定位置は、

$$X_n = X_{(n-1)} + L_n \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n)$$

$$Y_n = Y_{(n-1)} + L_n \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n)$$

図5. 11 不陸蛇行の累積計算

5. 2. 8. プローブ回路構成ブロック図

プローブの回路構成を図5.12に示す。

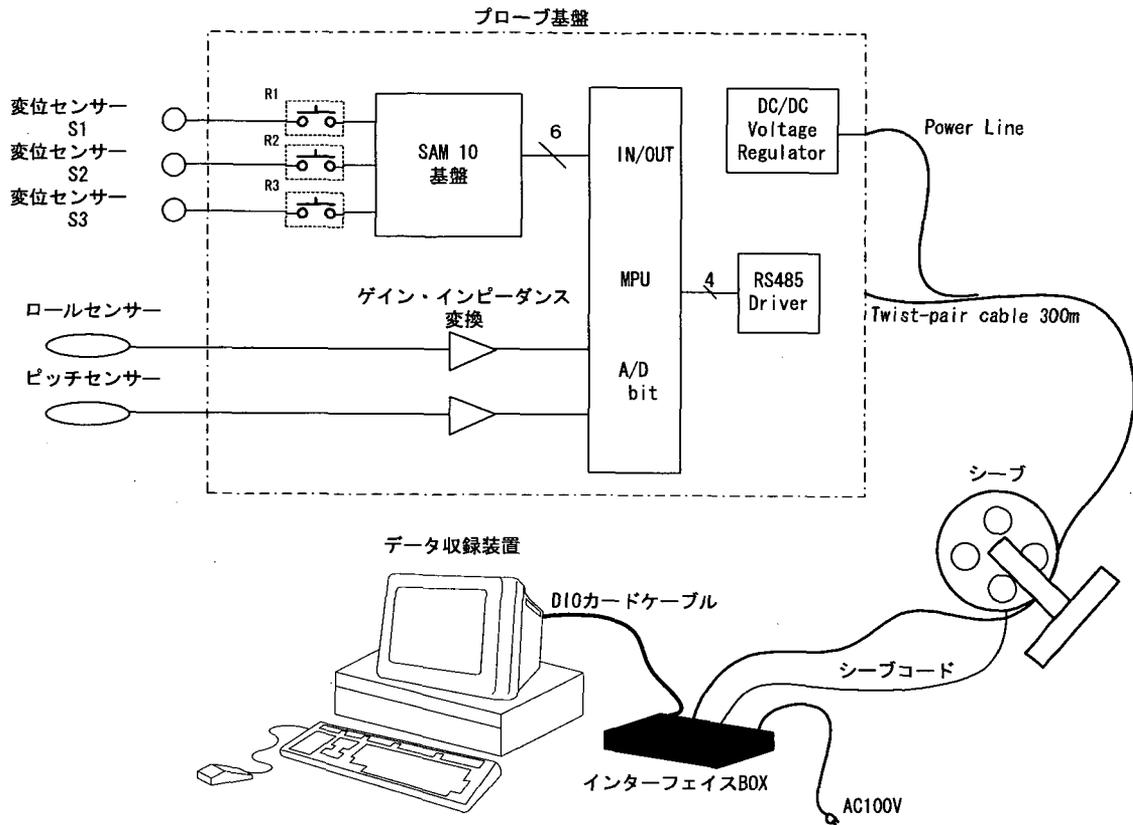


図5.12 プローブ回路構成図

5. 2. 9. 蛇行測定プローブの構造

蛇行測定プローブの構造を図5. 13～図5. 15に示す。

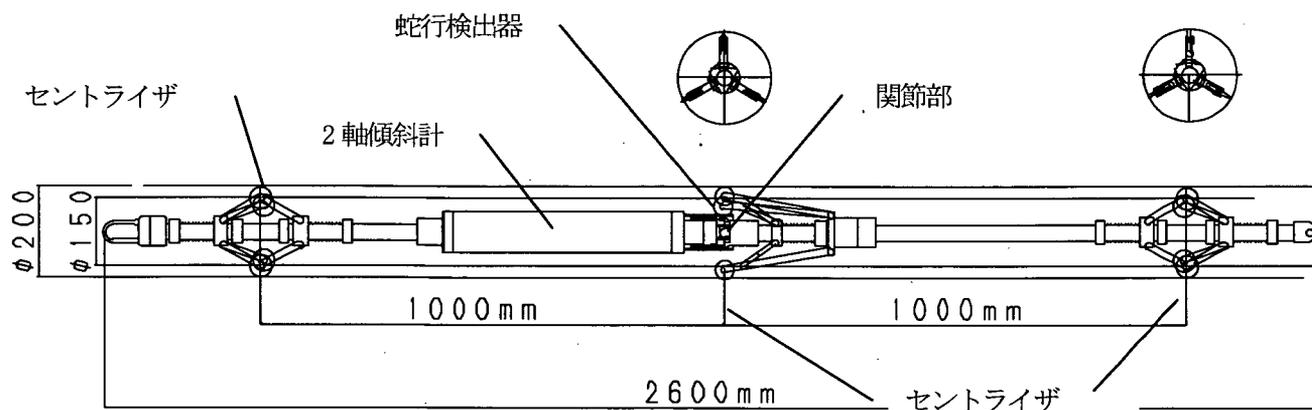


図5. 13 プローブ全体図

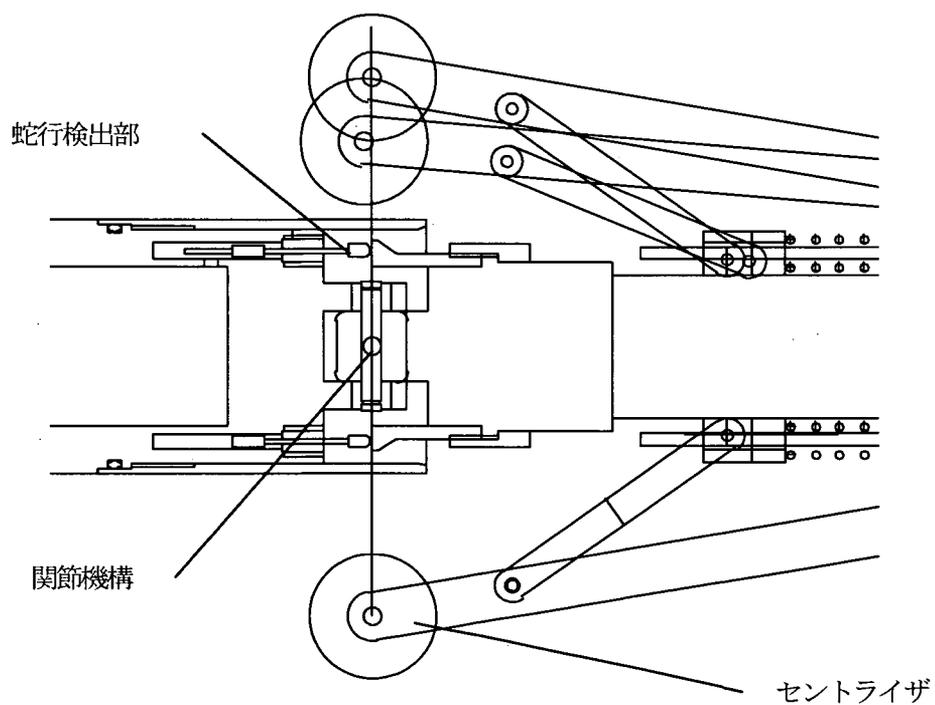
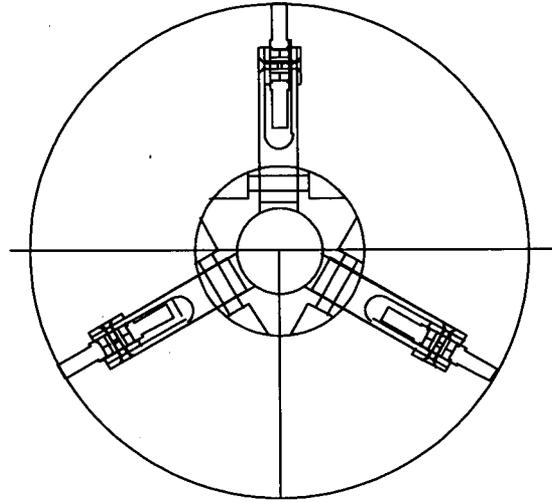


図5. 14 プローブ関節部の構造



3本のアームが連動して開閉する。

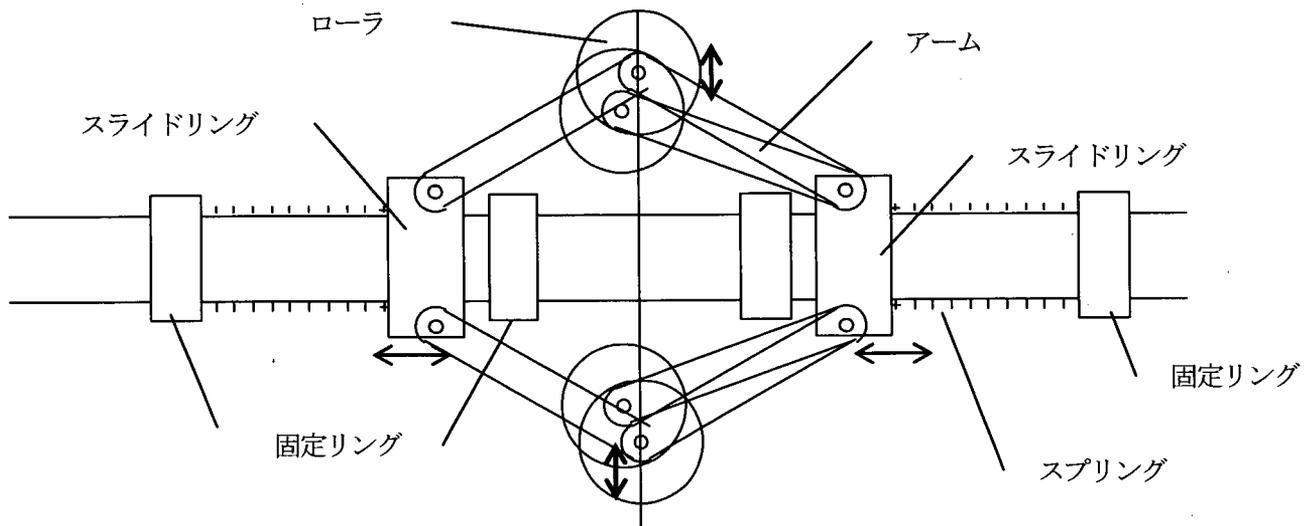


図5. 15 セントライザの構造図

6. 試作装置の評価試験

試作した不陸蛇行システムを使用して、応用地質株式会社フィールド内に設置されている模擬下水管路(地上試験)とつくば市蓮沼地区にある供用中の実際の下水管路(実下水管きょ試験)で評価試験を行った。測定は、水圧方式、連結プローブ方式共に1m毎に装置を停止させ、数データ取得し平均化する方法を採用した。

6. 1. 地上試験

6. 1. 1. 試験フィールド

図6. 1は、模擬下水管路の全体写真で、試験には左側のφ200のものを使用した。この管の全長は30mで、前半の15mがヒューム管、後半の15mが陶管となっている。試験結果を評価するために、管路形状をトータルステーションで測定した。測定に使用したトータルステーションTCA1100(ライカ製)を図6. 2に示す。この装置は測角精度3秒、測距精度2mm+2ppmの精度を有している。



図6. 1 走行試験用下水管

測定は写真の手前側を基準点とし管の繋ぎ目付近を測定ポイントとして行った。

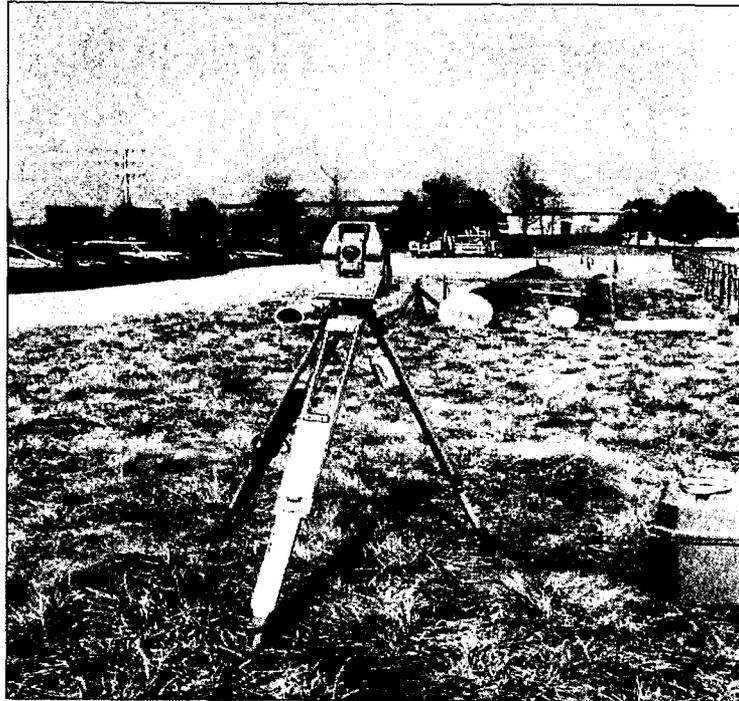


図6. 2 測量機器 TCA1100

図6. 3は測量から求められた不陸のデータである。設置された下水管は、5m から7.5m にかけて一度上り、28m 付近まで緩やかに下っている。また最後の区間は急激に上っていることが分かる。

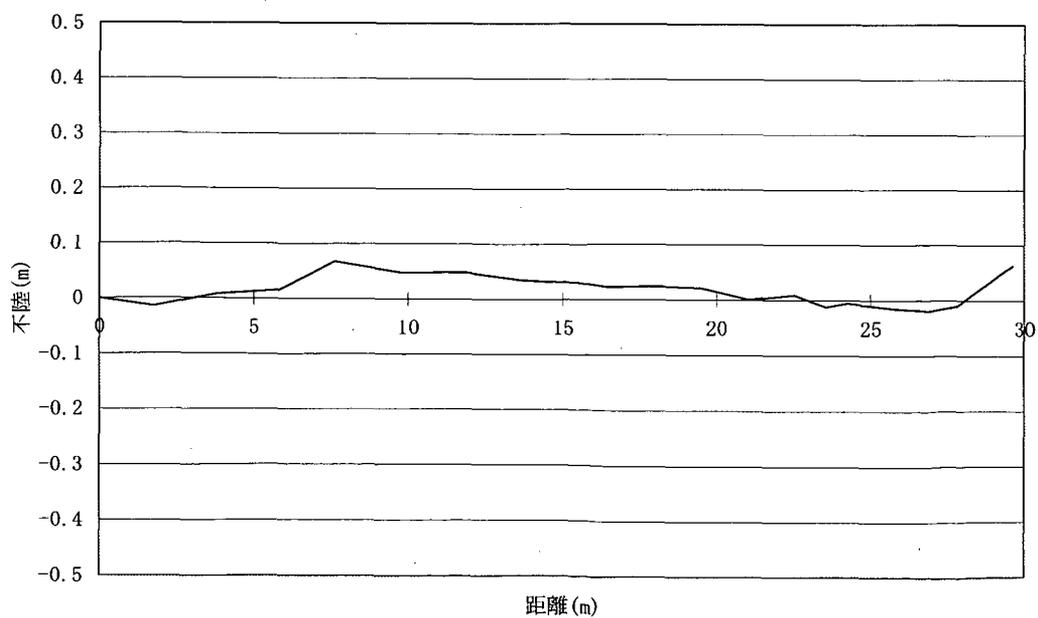


図6. 3 模擬下水管測量データ (不陸)

同様に蛇行データを図6. 4に示す。入り口と出口を結んだ直線を基準ラインとし、変位が+の場合には進行方向に向かって右側に、-の場合には左側に位置していることを表している。測量結果では、4m付近と18m付近で一度右へ曲がるが再びすぐに左へ曲がり、全体として25m付近まで左へ変位している。そして、25m付近を頂点として大きな弧を描きながら急に基準ラインへ戻ることが分かる。

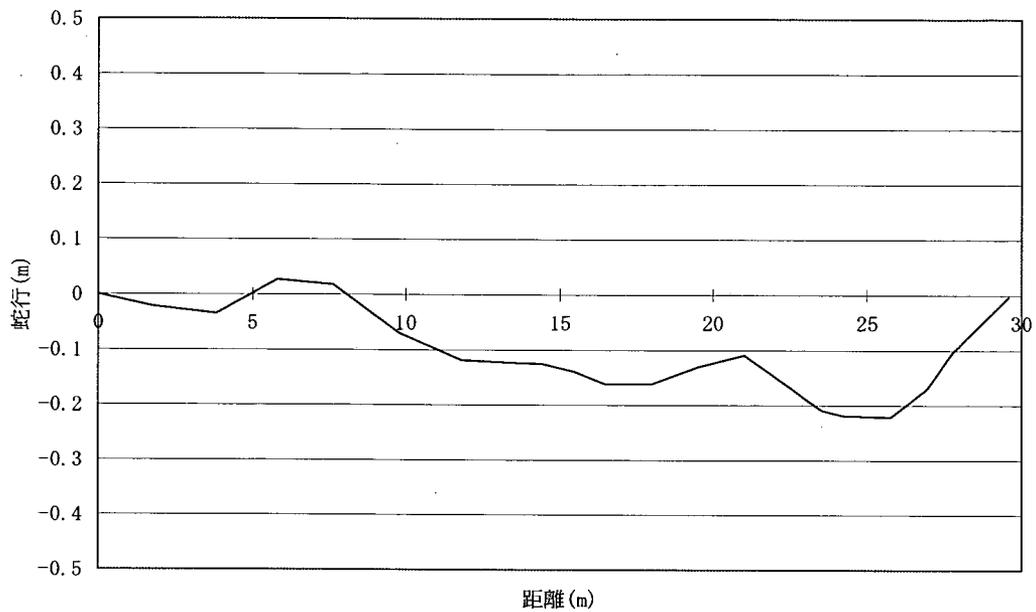


図6. 4 試験用下水管測量データ (蛇行)

6. 1. 2. 試験結果

地上試験の不陸データを表6. 1と図6. 5に示す。

表6. 1では、トータルステーションにより求めた値と、水圧方式の測定値より演算処理して求めた値、および両者の差を示す。

図6. 5では、細い実線が水圧方式を、太い実線が連結プローブ方式を表している。点線で示したものが測量データである。

水圧方式と測量データを比較してみると、ほとんど一致した結果が得られている。

連結プローブ方式では、4m付近から差異が生じ、平均として10cm程度の違いがみられ、あまり十分な結果を得ることができなかったが、変化傾向は類似していることが確認された。

表6. 1 地上試験の値より求めた不陸の数値データ

距離 (mm)	測量データ (mm)	水圧データ演算 処理結果(mm)	誤差(mm)
0	0	0.000	0.00
1748	-14	-12.685	-1.32
3816	8	8.974	-0.97
5809	16	20.732	-4.73
7630	68	66.797	1.20
9808	48	47.363	0.64
11826	49	52.471	-3.47
13662	35	36.747	-1.75
14417	33	34.208	-1.21
15436	31	35.173	-4.17
16473	23	31.193	-8.19
17993	25	27.628	-2.63
19509	21	22.963	-1.96
21032	1	7.997	-7.00
22530	9	2.655	6.35
23538	-12	-3.716	-8.28
24250	-5	-7.777	2.78
25764	-15	-13.299	-1.70
26916	-19	-19.655	0.66
27783	-11	-9.867	-1.13
29599	63		

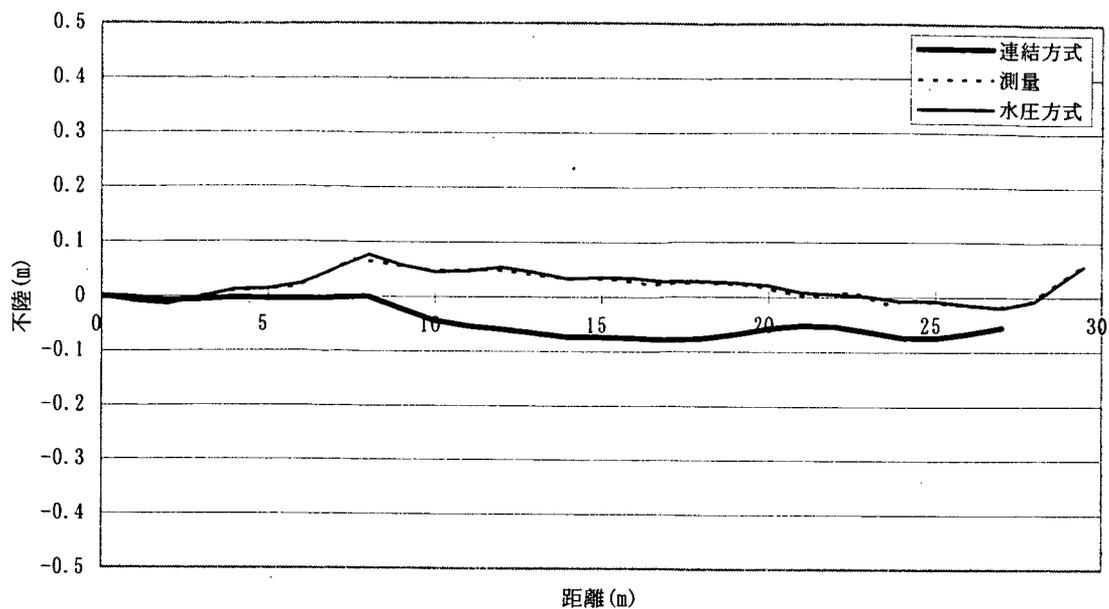


図6. 5 地上試験不陸データ

地上試験の蛇行データを図6. 6に示す。太い実線が連結プローブ方式、点線で示したのは測量データである。蛇行データについても十分といえる結果を得ることはできなかった。測量結果をみると、5m間で10cm程度の蛇行が数箇所で見られていることがわかる。これは通常の下水管路に比べると変化が大きいと考えられ、比較的条件的によくない管路を模擬しているといえよう。

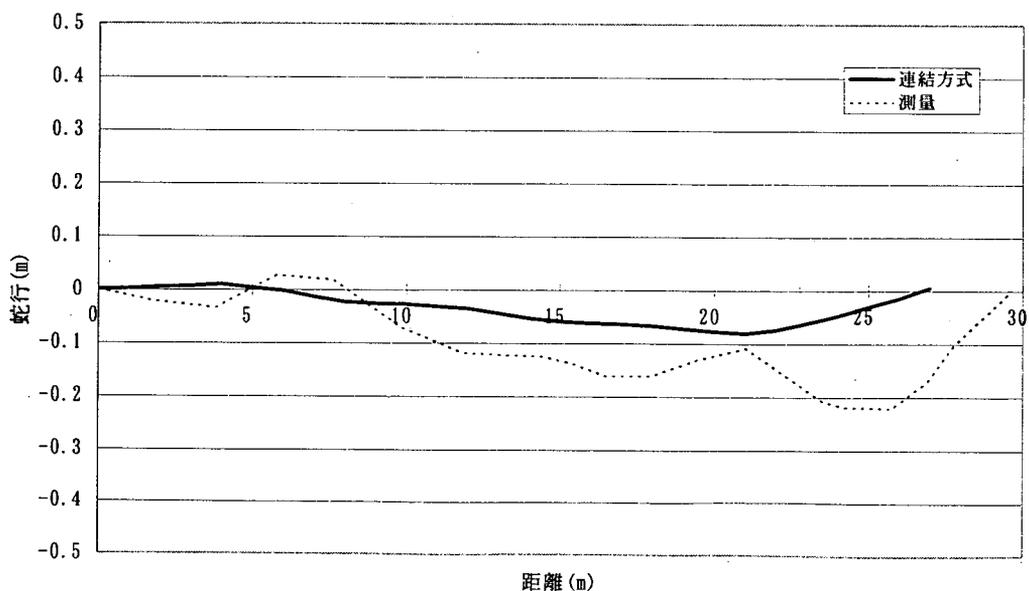


図6. 6 地上試験蛇行データ

以上の結果より、水圧方式は実際の測定に十分使用可能な性能が得られた。また連結プローブ方式では変位の大きい管路の測定は難しいと考えられる。

6. 2. 実下水管きょ試験

6. 2. 1. 試験フィールド

図6. 7に試験を行った現場の地図を、図6. 8に現場風景を示す。現場はつくば市蓮沼地区にあり、使用した下水管は路線番号112の上流から5番目と6番目の人孔の間である。

下水管の詳細は以下の通りである。

- a. 全長 48.85m
- b. 孔径 $\phi 200$ VU孔
- c. 勾配 2.3‰

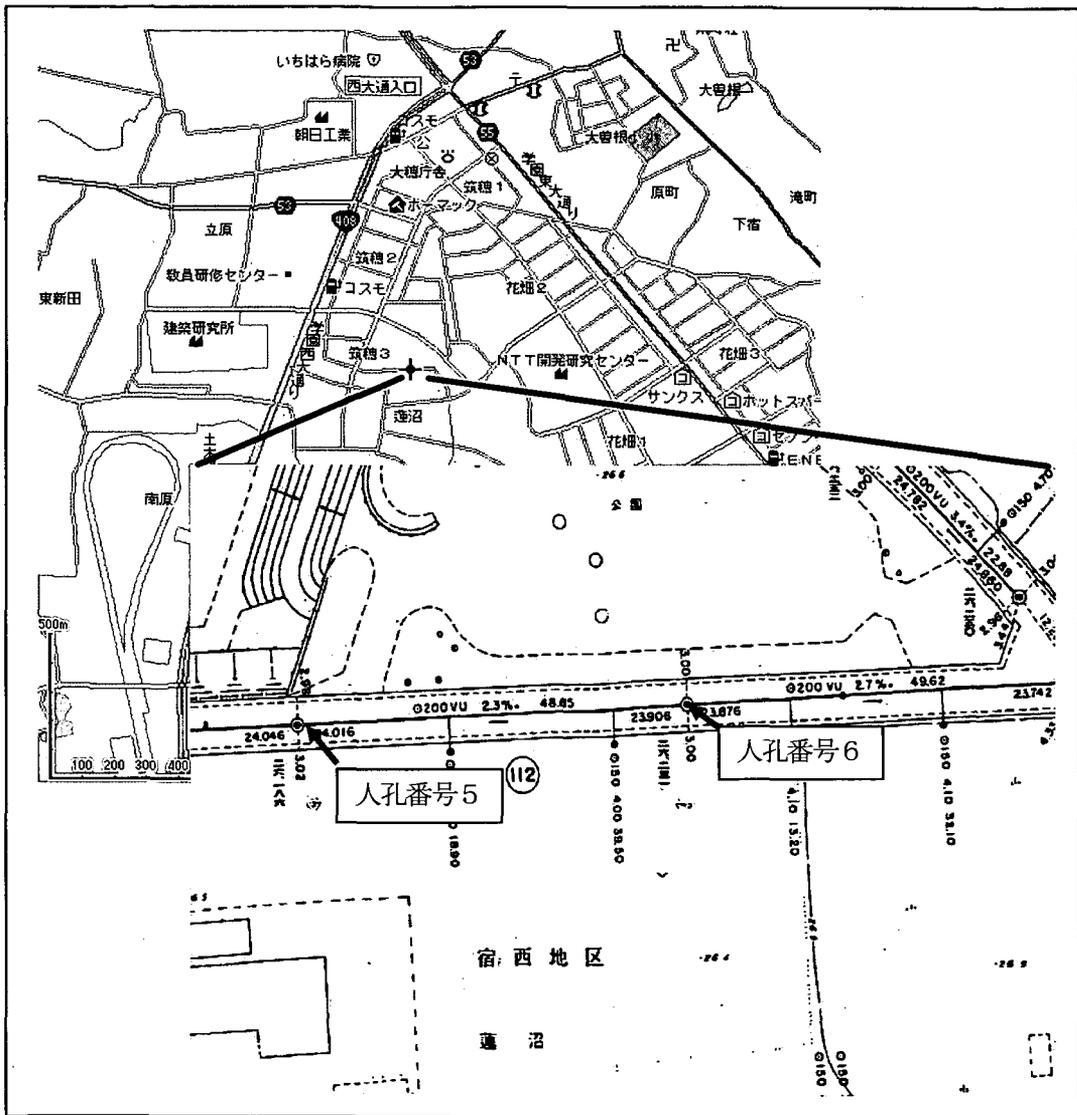


図6. 7 下水管試験現場地図

測定は上流側の人孔5番から人孔6番の方向へ行った。図6. 8の中に見られる人孔は上流側の5番である。地上試験の結果から、水圧方式の場合には十分にエージングを行ってから測定を開始した。

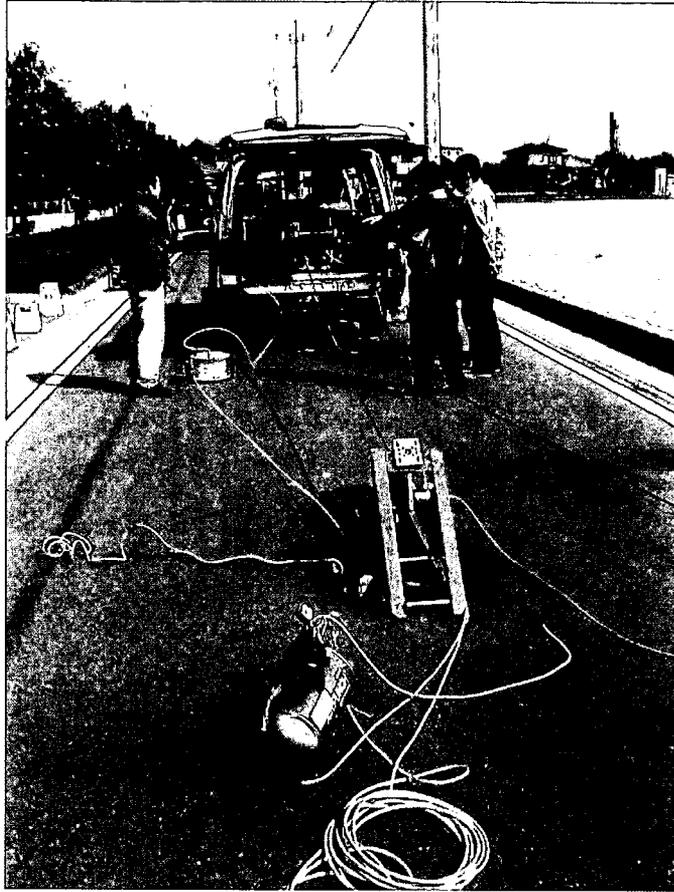


図6. 8 実下水管きょ試験の現場状況

6. 2. 2. 試験結果

実下水管きょ試験の不陸データを図6. 9に示す。細い実線が水圧方式を、太い実線が連結プローブ方式を表している。点線で示したものは水圧方式のデータを最小二乗法により1次式に変換したものである。試験を行った下水管きょの設計勾配は2.3‰であるが、水圧方式で得られた勾配は2.0‰で、実際の勾配との差は0.3‰とわずかであった。測定値には局所的な不陸変化も含まれており、最小二乗法で求めた平均勾配が必ずしも設計値と一致するとは限らない。両端の人孔付近では勾配がやや大きく変化しているが、実際の状況としては十分にありうると考えられる。これらも含めて求めた平均勾配と考えると、測定結果は設計値とかなり整合的であると判断できよう。

連結プローブ方式で行った測定は、セントライザの車輪が枝管に引っかかってしまい、17m以上進むことができなかったが、セントライザの構造上の改良点を見出すことができた。また、短い区間ではあるが、水圧方式による測定結果とも整合的であり、地上試験のような局所的な変形が多い場合は難しいが、比較的变化が小さな場合は精度はやや落ちても適用可能なレベルにあると考えられる。

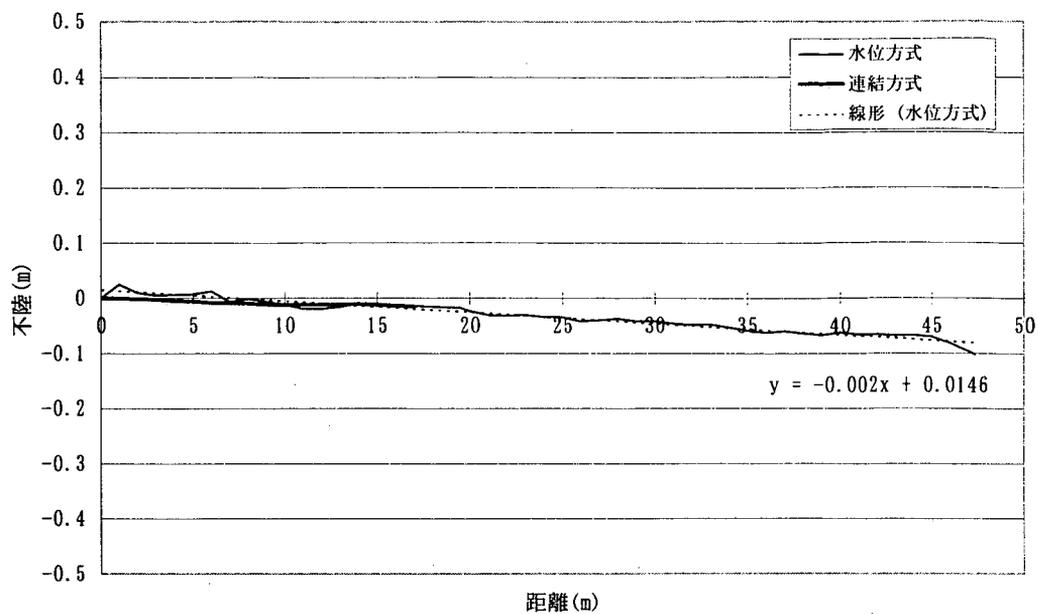


図6. 9 実下水管きよの不陸データ

実下水管きよ試験の蛇行データを図6. 10に示す。データは連結プローブ方式のみだけである。比較できるデータはないが、大きく蛇行している地上試験と違い、下水管のようにまっすぐな管路であれば、実用的な精度を有したデータが得られると考えられる。

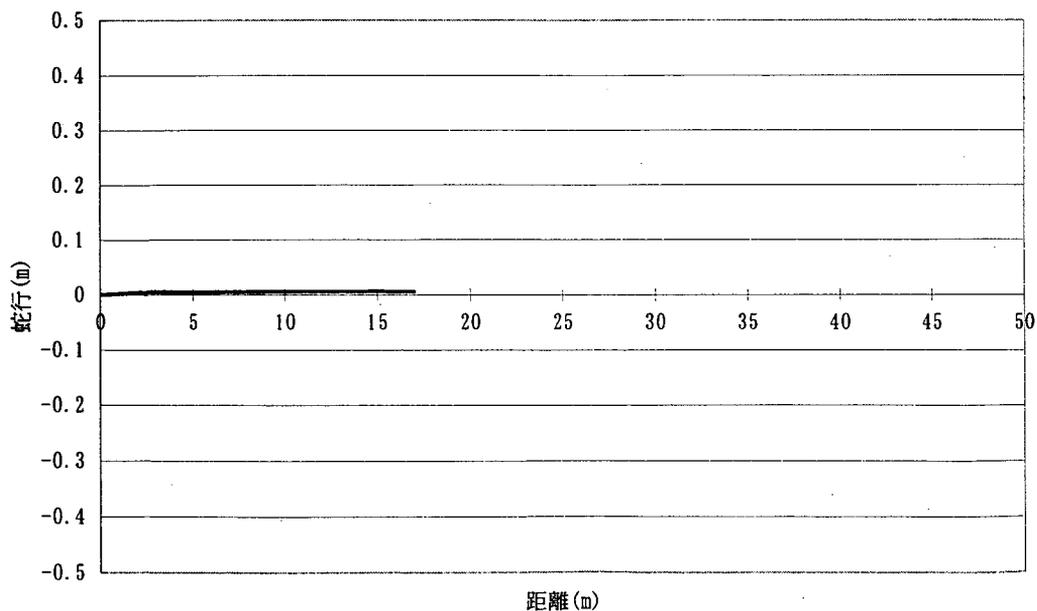


図6. 10 実下水管きよの蛇行データ

図

7. まとめ

1) 開発内容の概要

下水管きよの不陸や蛇行を精度良く測定するシステムを開発した。不陸のみを精度良く測る方式として、送水管に接続したセンサで水圧を測る方式(水圧方式)と、不陸と蛇行を同時に測る相対変位計測方式(連結プローブ方式)を試作した。

2) 実施事項の概要

設計に当たっては、事前の予備実験により影響要因の分析を行い、多くの情報を得ることによって効率的に進めることができた。試作した2種類のシステムを模擬下水管路と実際に供用中の下水管きよで動作試験を行って評価した。

3) 水圧方式の評価結果の概要

地上に設置した模擬下水管の不陸を、トータルステーションによる測定値と水圧式不陸測定装置による測定値の比較を行った。その結果、トータルステーションの測定値との差は最大で8.28mmであった。これは、最も長い100mのホースを使用した結果であり、総合精度として目標とした誤差±10mm以内を満足していると判断する。

上記のように、測定精度確認を目的とした地上試験においては目標とした±1cm以内の誤差に収まっており十分に実用化できる性能が示されたといえる。また、実際に供用中の下水管きよで測定を行った結果、下水管内のカメラ撮影と同時に不陸測定が行え、現場測定作業上においても問題のないことを確認できた。以上のように、まだ改善の余地はあるものの、水圧方式では不陸を精度良く測定できることが確認された。

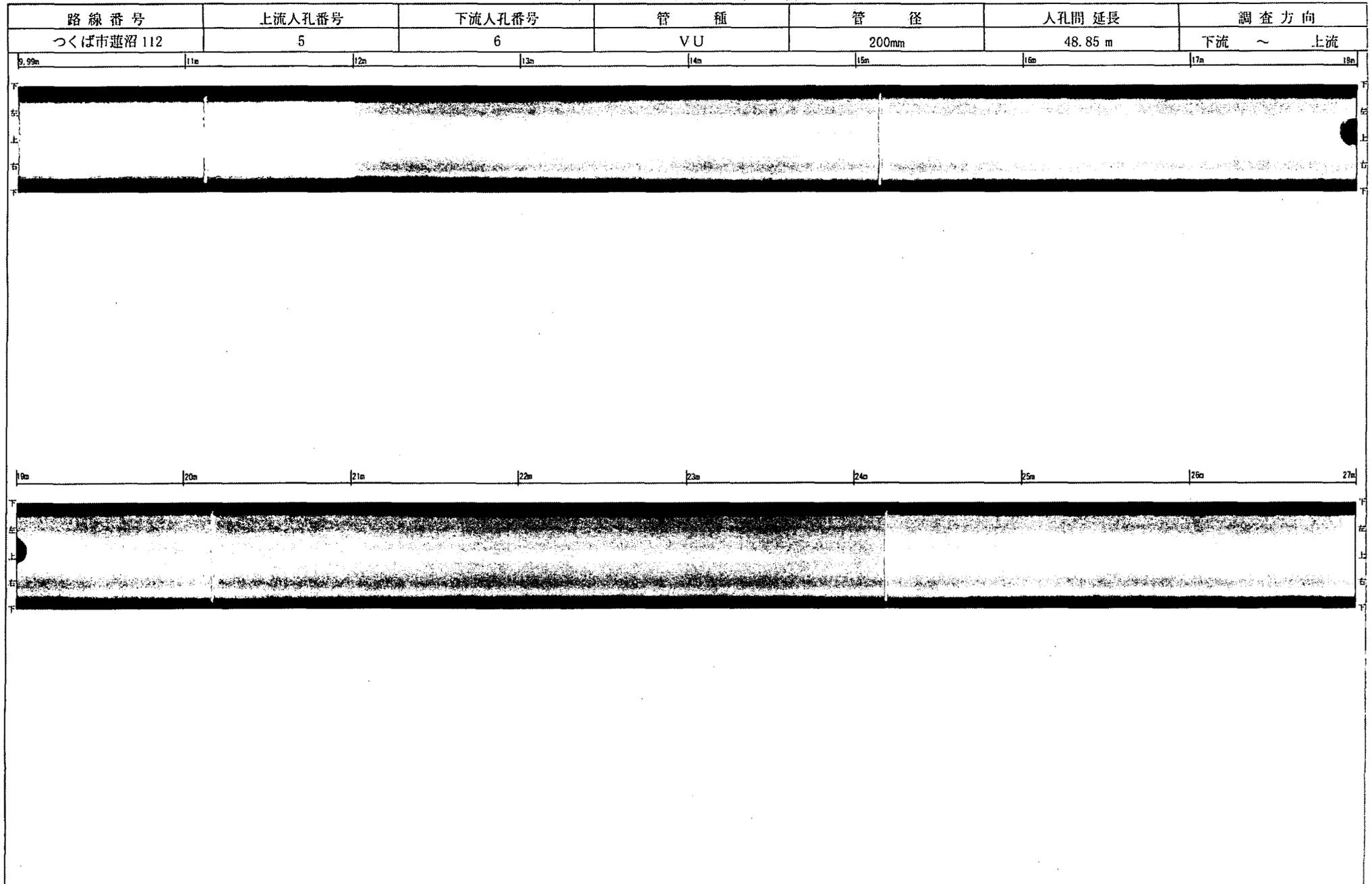
4) 相対変位測定方式の評価結果の概要

相対変位を測る方式についても、精度はやや落ちるものの基本的には設計原理に従った測定ができるシステムであることが確認できた。ただし、相対変位方式については、条件の悪い管路での適用性には疑問があり、まだ多くの改善すべき事項が残されている。

8. 参考資料

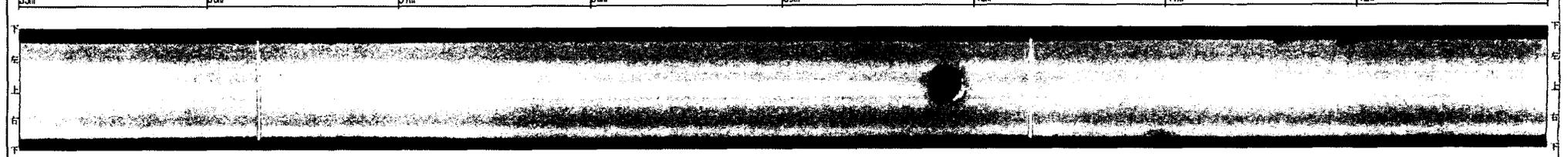
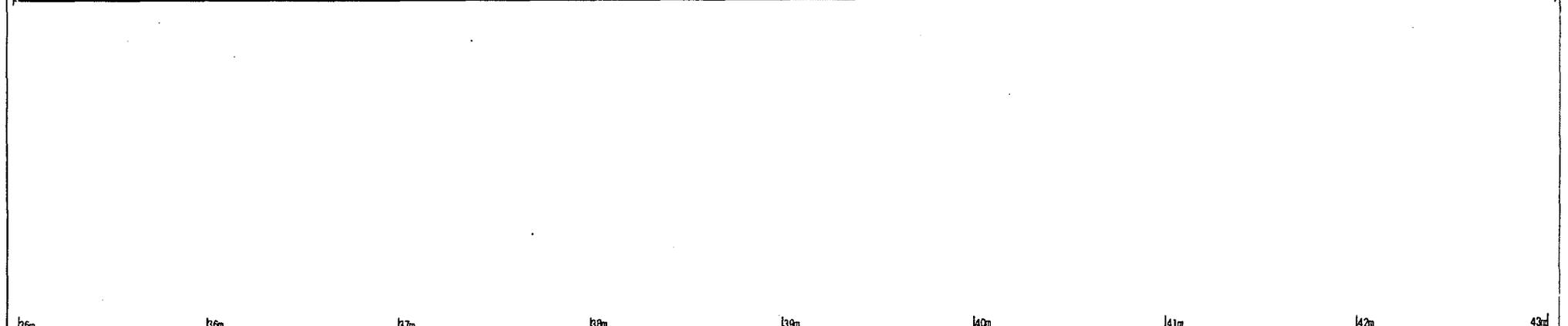
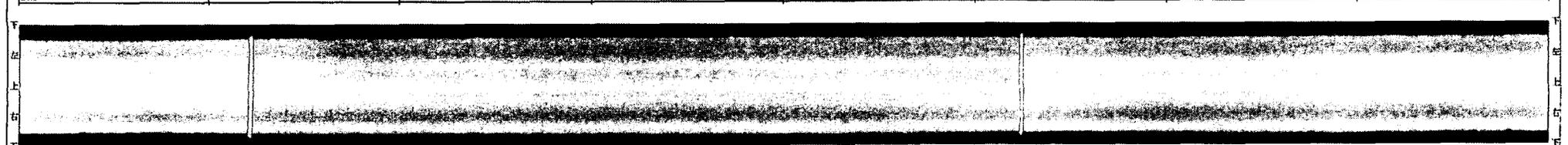
不陸とともに収録された画像データを資料-1に示す。

管内展開画像



管内展開画像

路線番号	上流人孔番号	下流人孔番号	管種	管径	人孔間延長	調査方向
つくば市遊沼 112	5	6	VU	200mm	48.85 m	下流 ~ 上流



管内展開画像

路線番号	上流人孔番号	下流人孔番号	管種	管径	人孔間延長	調査方向
つくば市遊沼 112	5	6	VU	200mm	48.85 m	上流 ~ 下流

43m	44m	45m	46m	47m	48m
-----	-----	-----	-----	-----	-----



国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM
No.119 August 2003

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所
(住所) 茨城県つくば市旭一番地

本資料の転載・複写の問い合わせは
(企画部研究評価・推進課) 029-864-2211