

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：管径の直径が内径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。

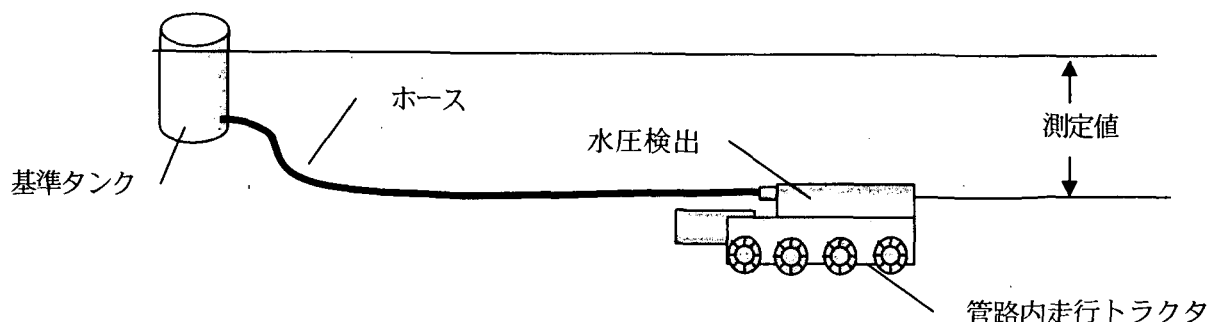


図3. 1 水圧方式による不陸測定装置

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や不陸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)方向の曲がりや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。

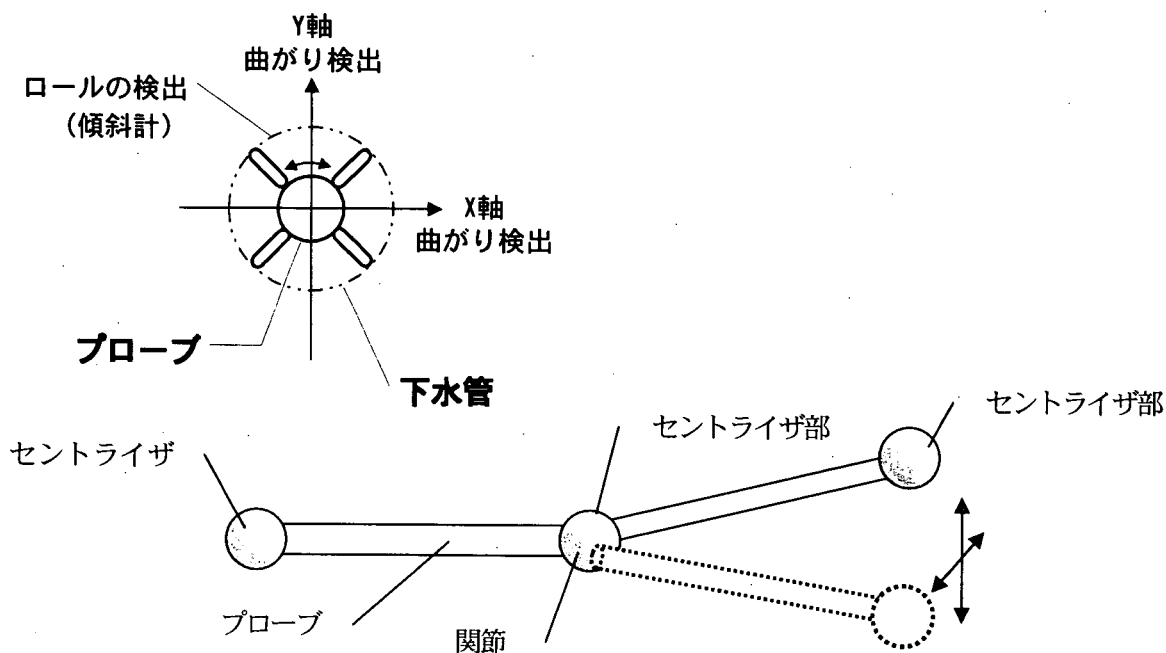


図3. 2 連結プローブによる不陸・蛇行測定装置

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。

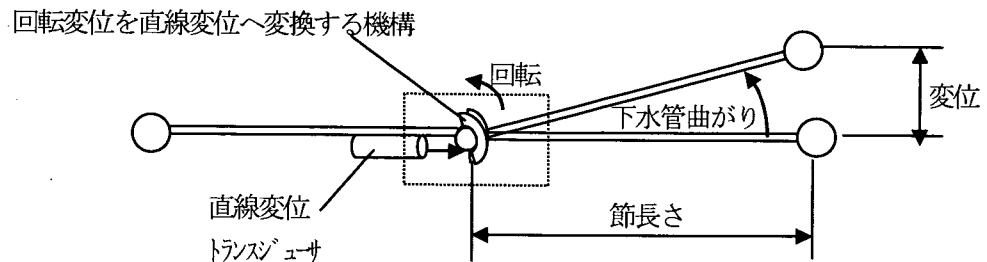


図4. 1 カム機構方式

(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画像上において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。

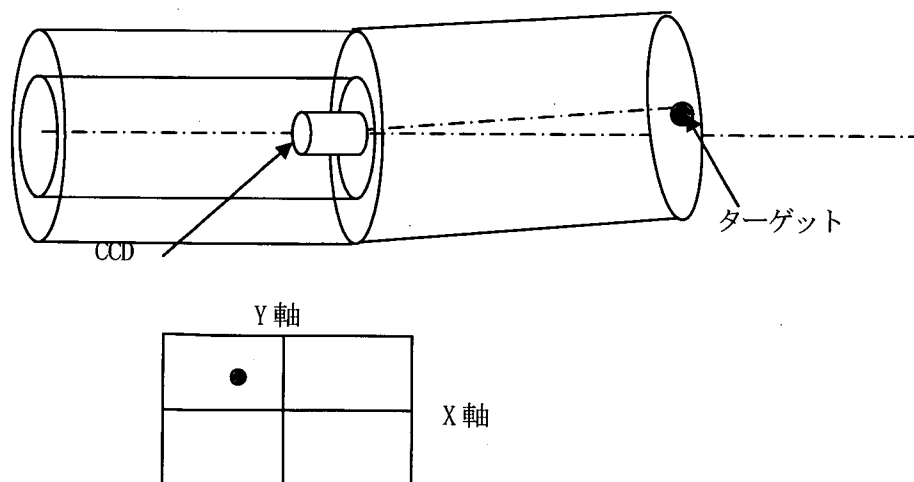


図4. 2 CCD方式

(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。

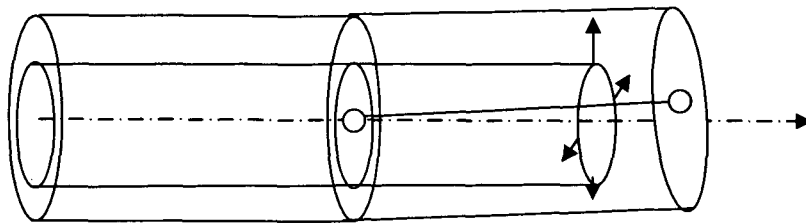


図4. 3 変位検出方式

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。

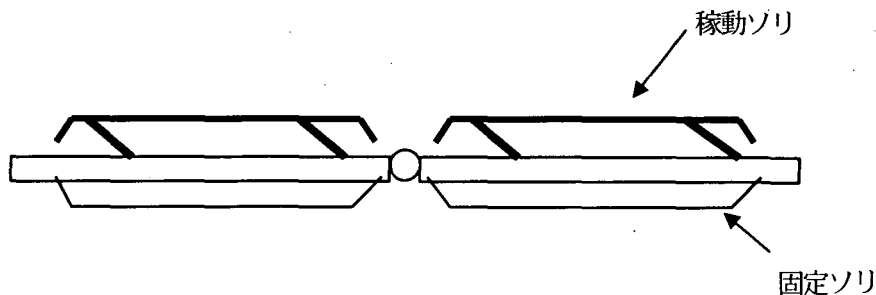


図4. 4 片面基準のソリ方式

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。

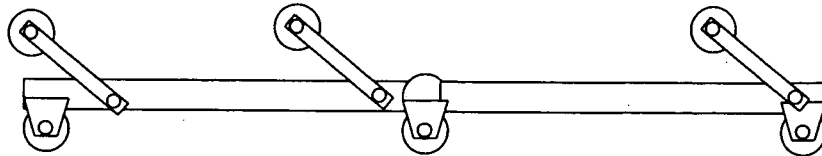


図4.5 車輪方式

(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。

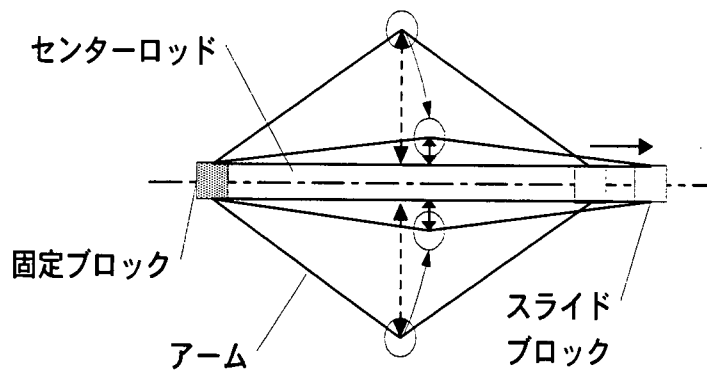


図4.6 セントライズ機構

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。

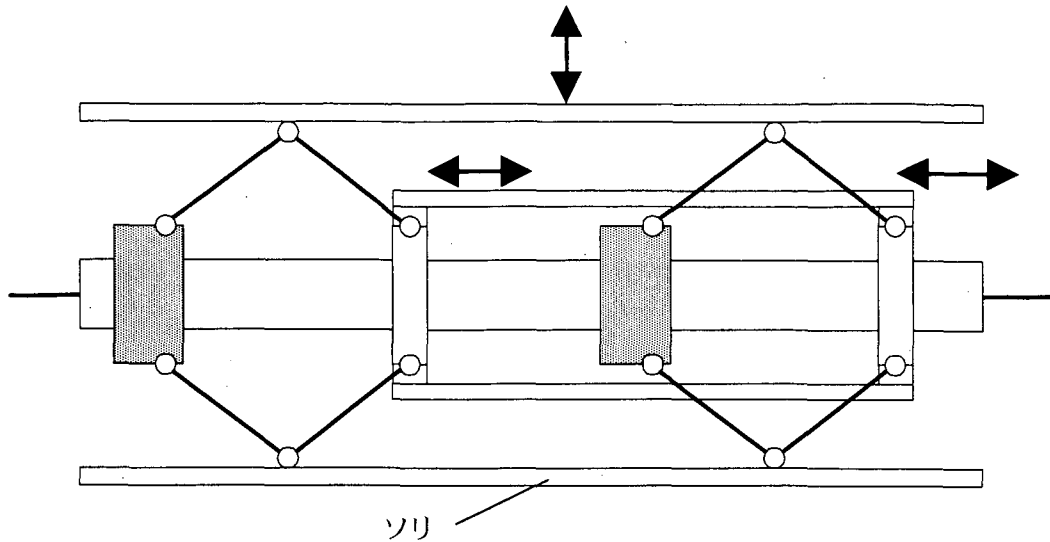


図4. 7 ソリ方式のセントライザ

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

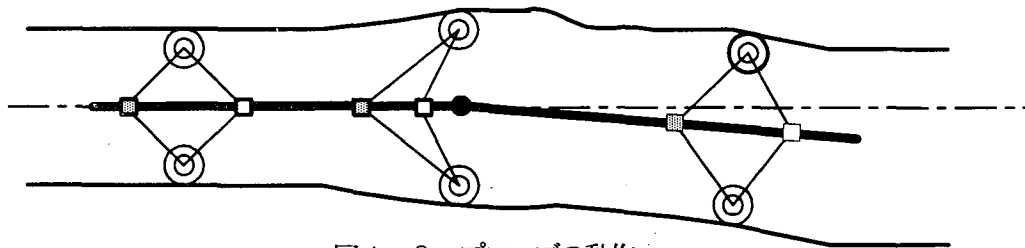


図4. 8 プローブの動作

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。

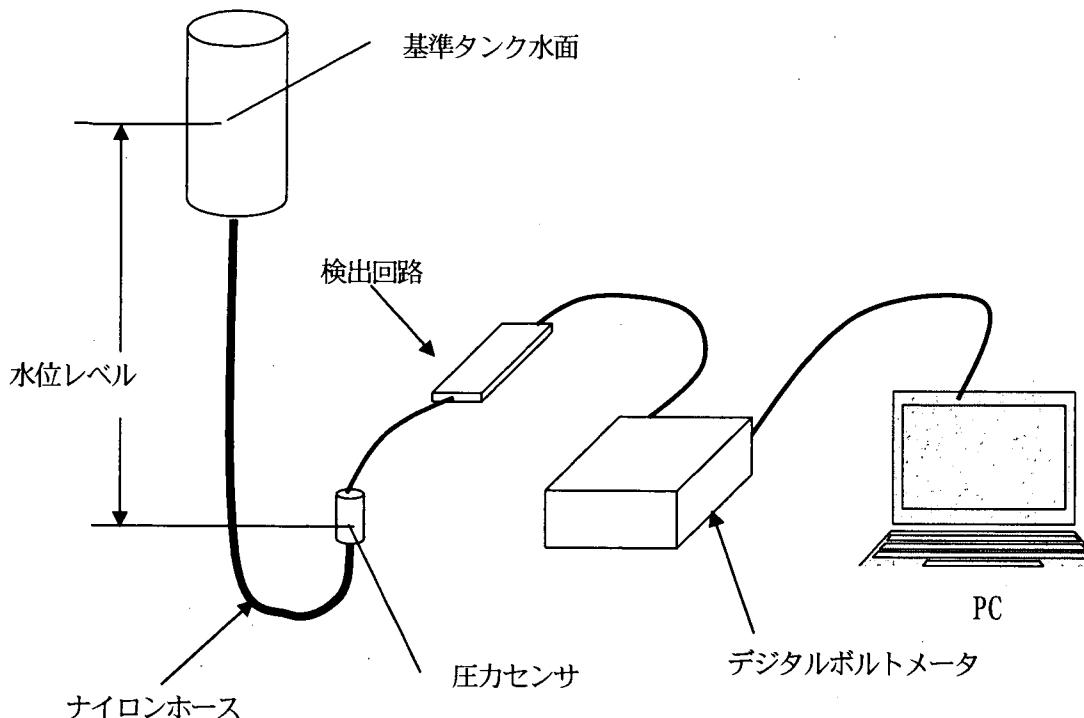


図4. 9 実験システムの基本構成

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。

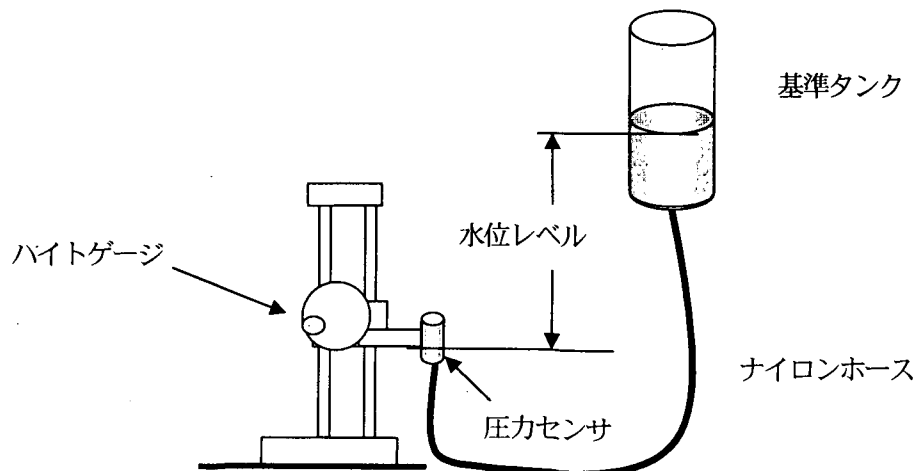


図4. 10 圧力センサの分解能確認試験の構成図

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。

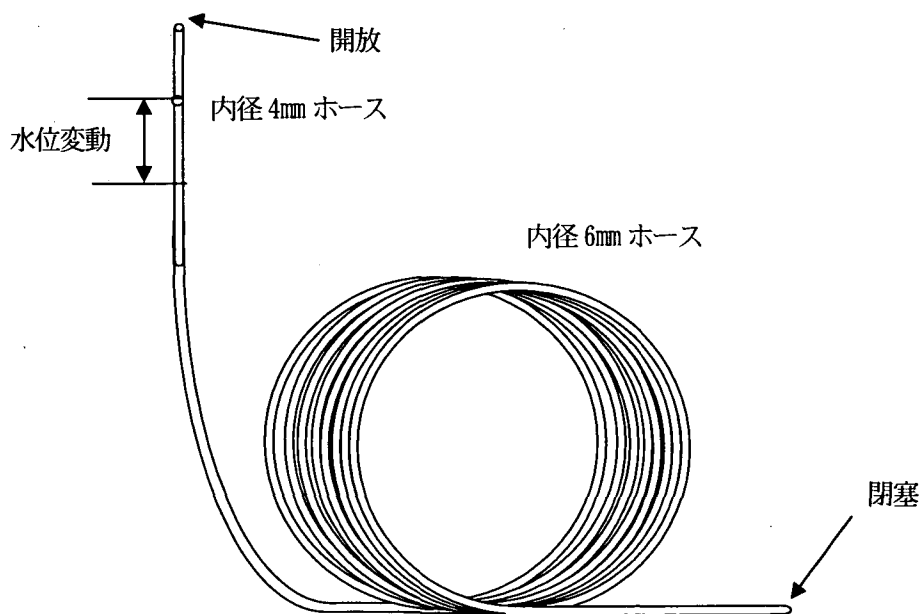


図4. 11 周囲温度に対するホース内の水位変動—器具構成図

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。

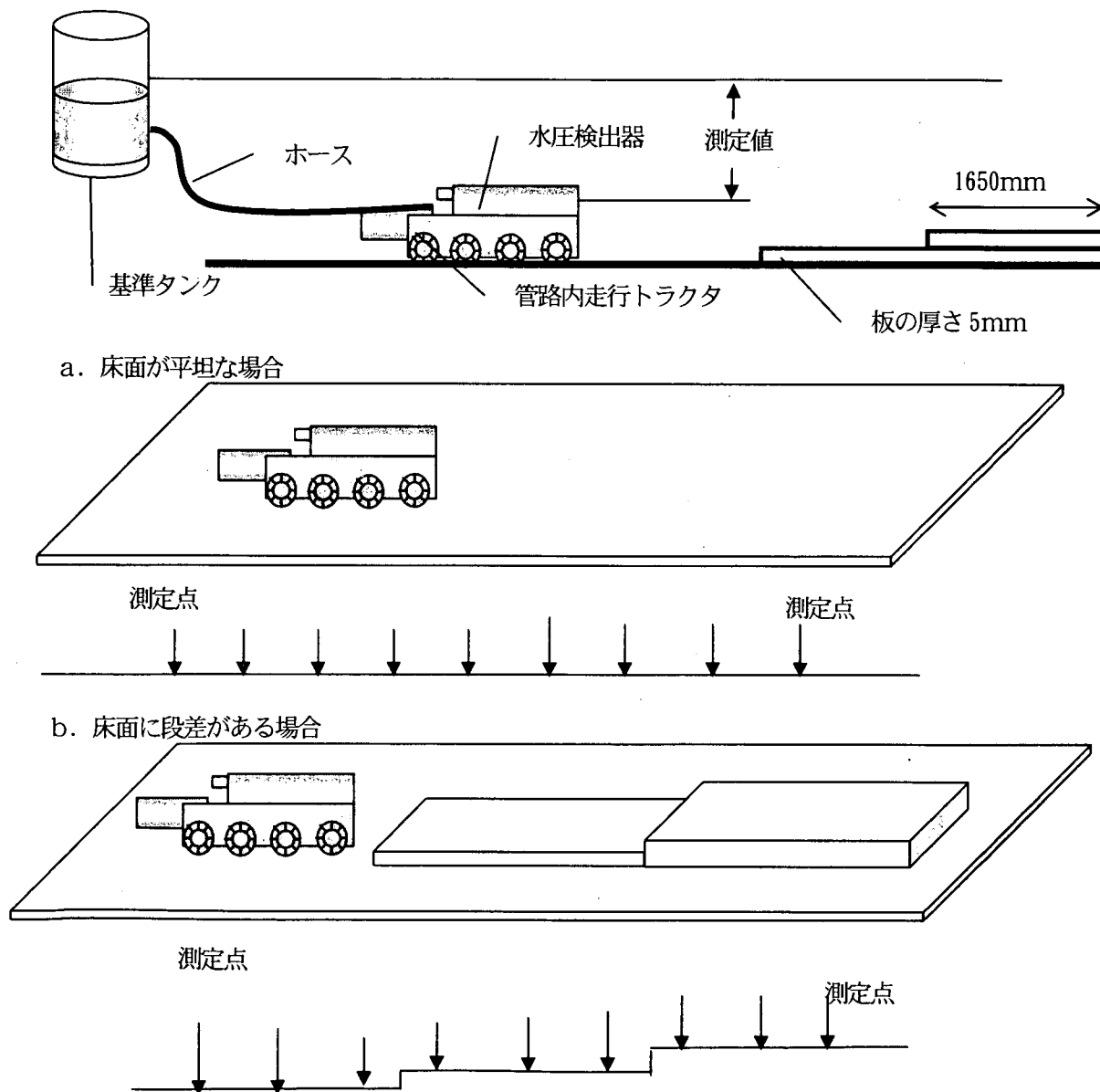


図4. 12 不陸装置の走行試験—装置構成図

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。

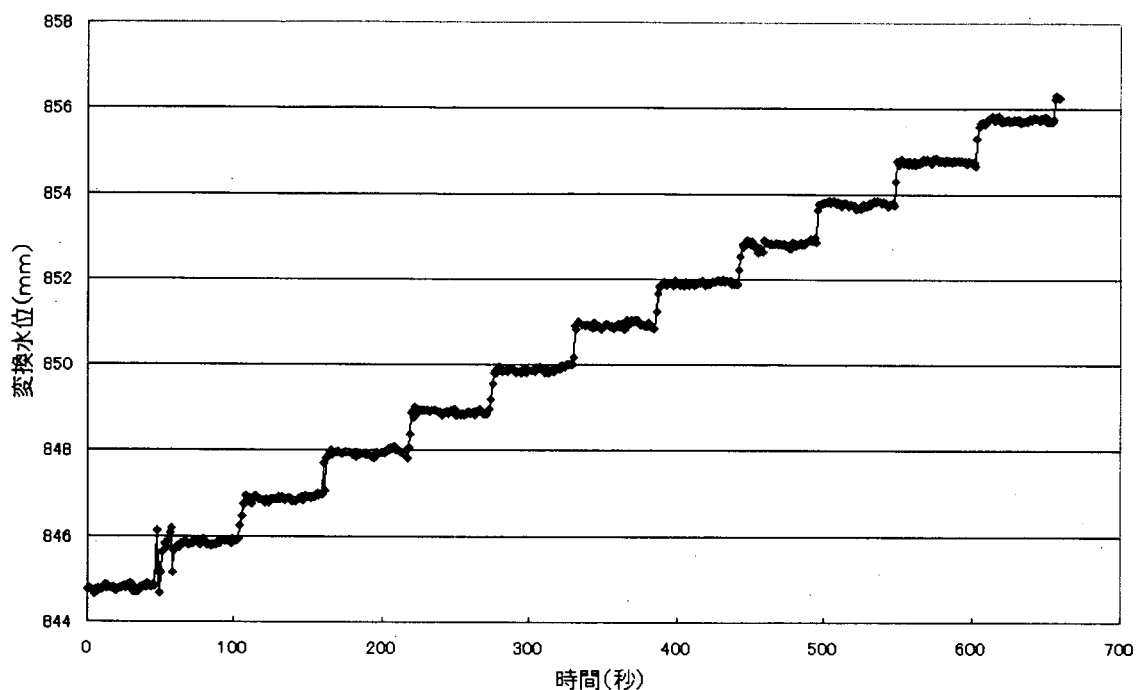


図4. 13 ホース長10mの場合の圧力変化 (センサ: 1.0 kg/cm^2 ホース内径4mm)

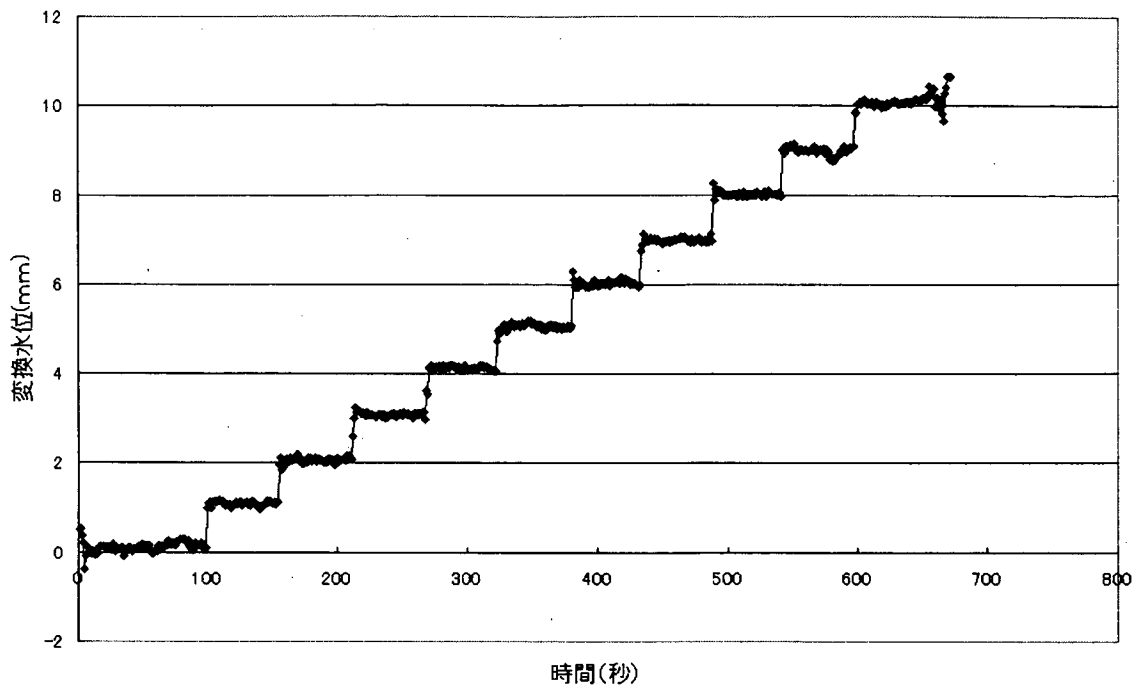


図4. 14 ホース長 50m の場合の圧力変化 (センサ:1.0kg/cm² ホース内径 4mm)

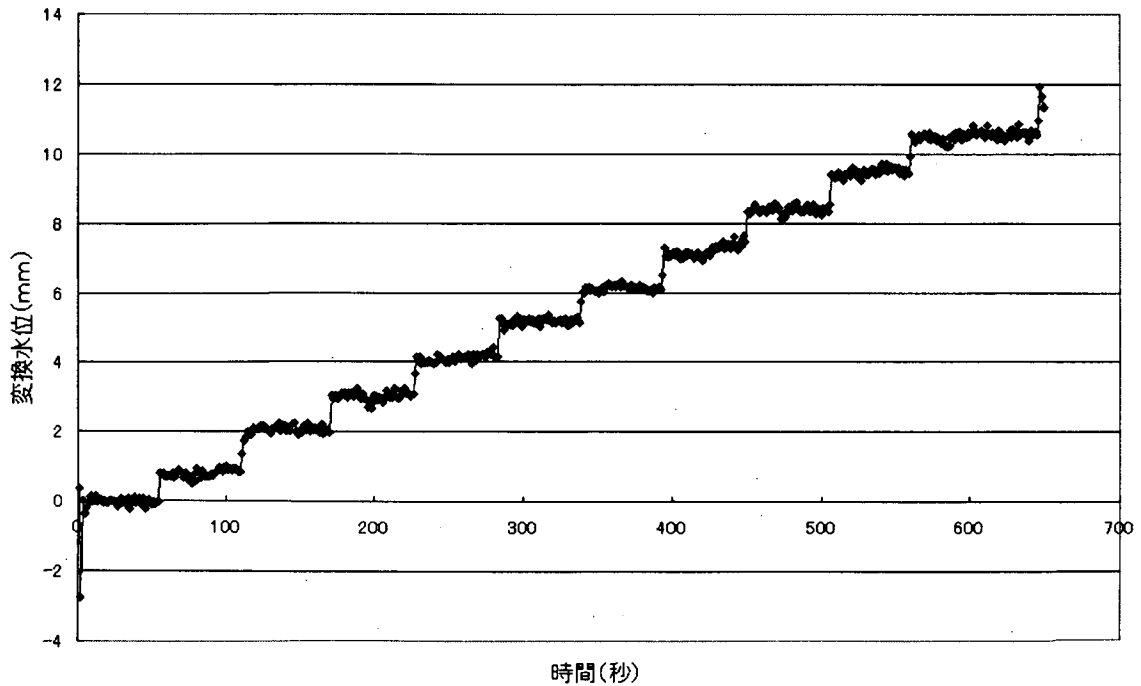


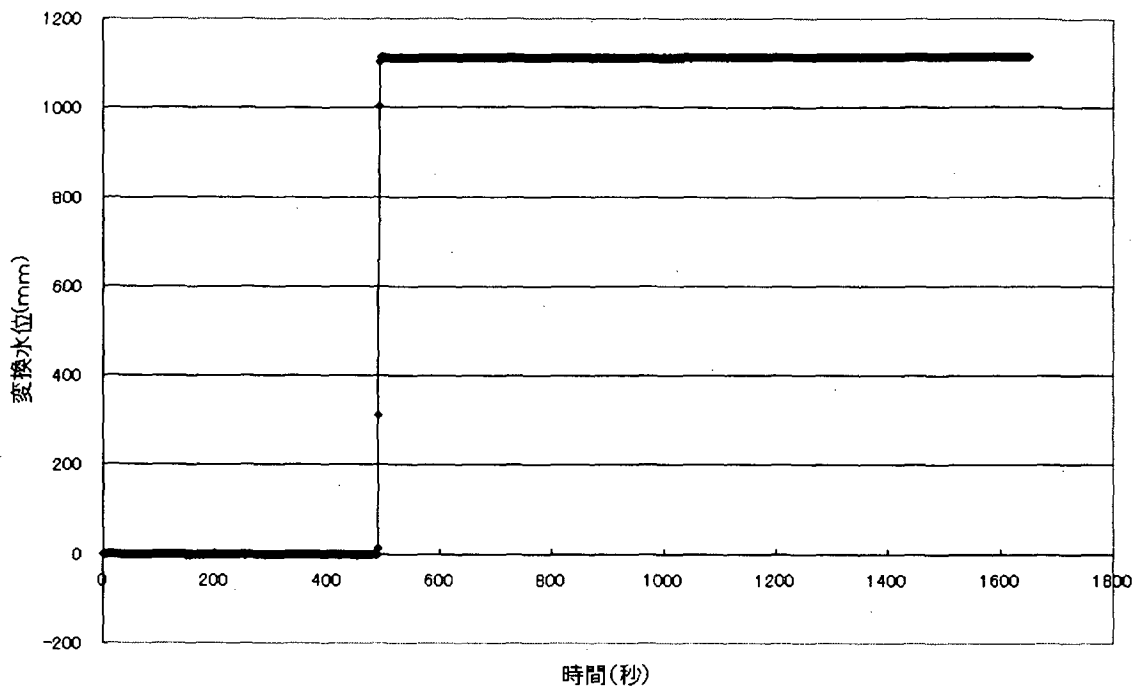
図4. 15 ホース長 100m の場合の圧力変化 (センサ:1.0kg/cm² ホース内径 4mm)

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

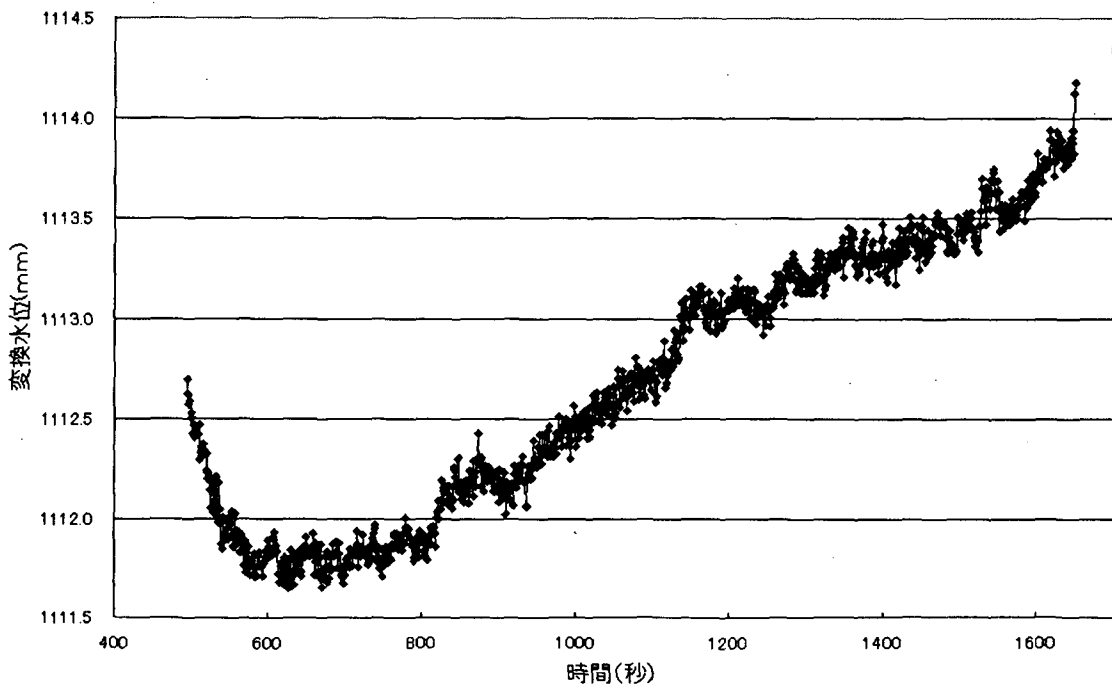
要以上にホース長を長くすることは誤差を大きくする要因となりうるので、可能な限り短い方が好ましいと言える。

(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 $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 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。

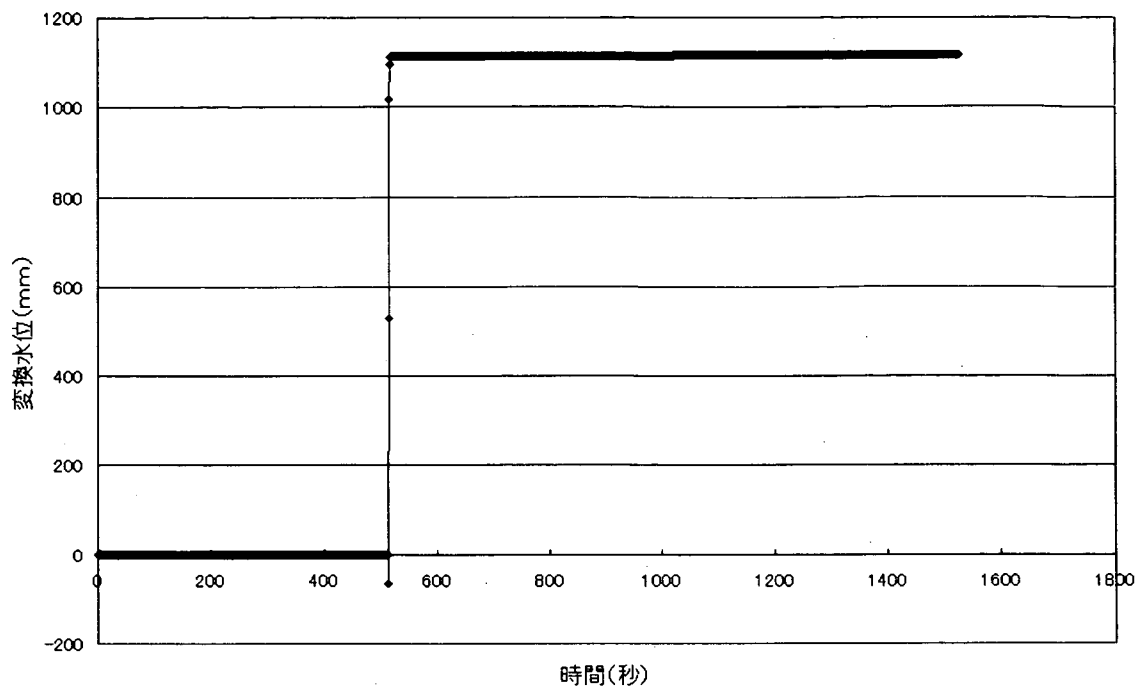


ステップ状の圧力変化

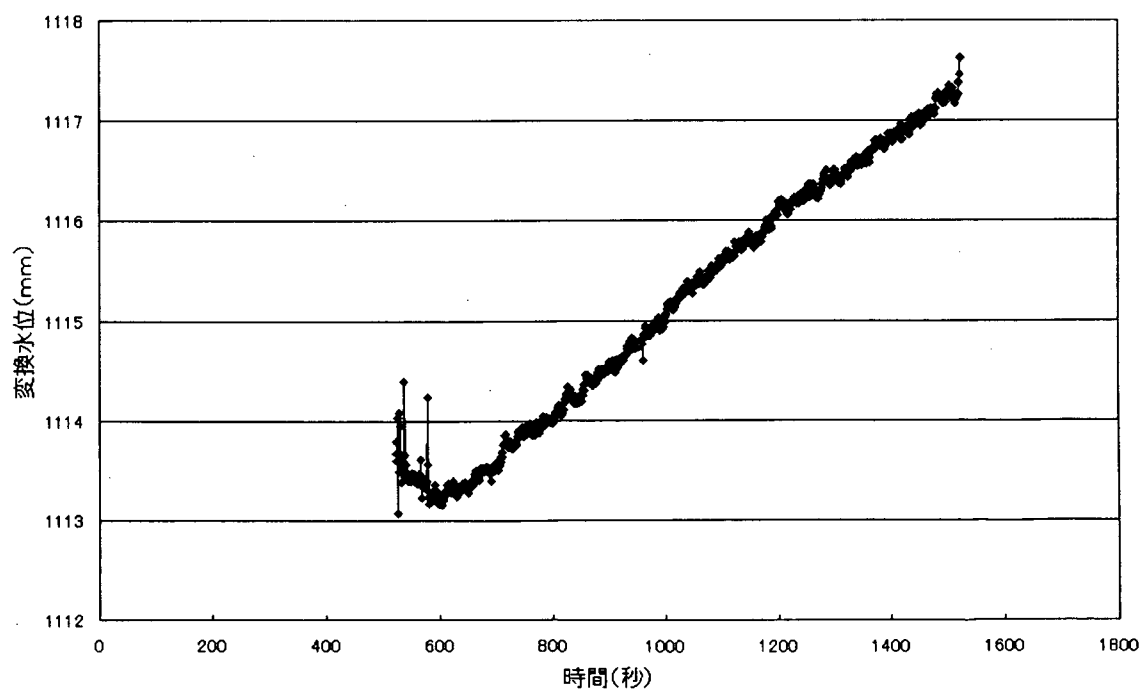


安定するまでの変化状況

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)

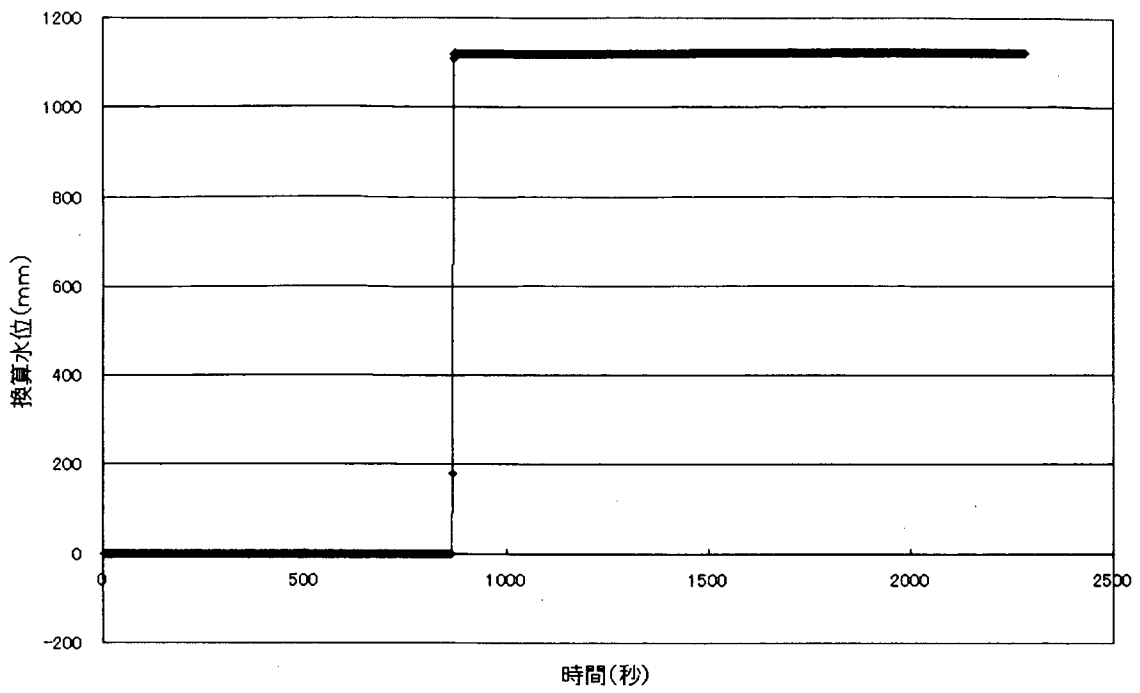


ステップ状の圧力変化

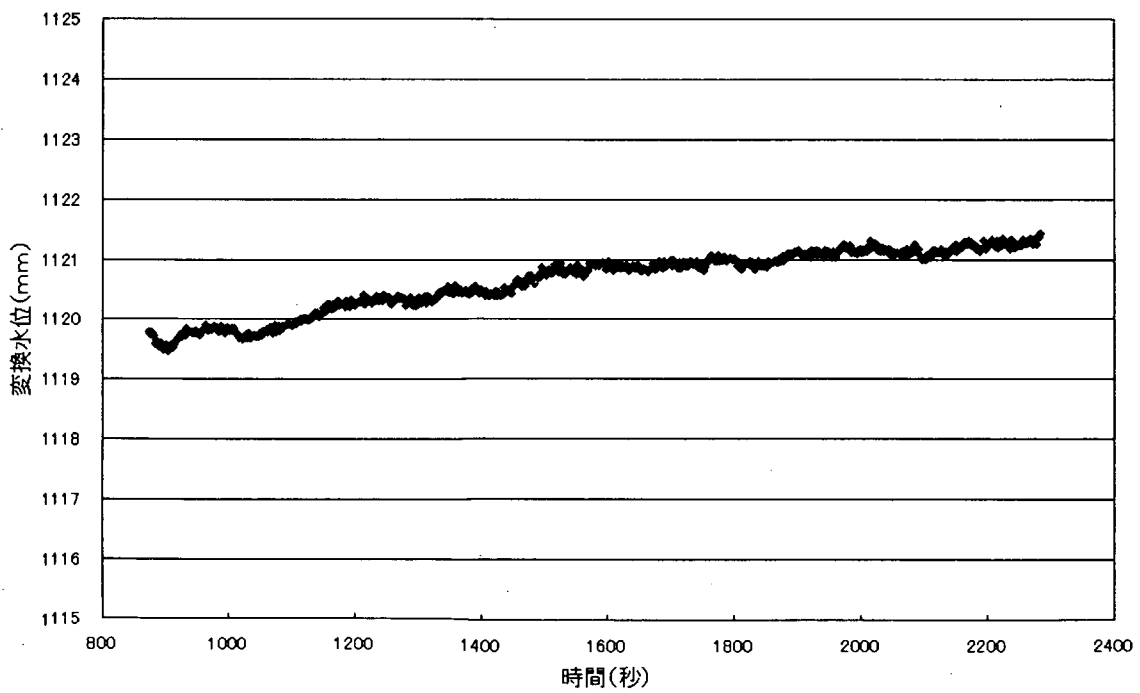


安定するまでの変化状況

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。

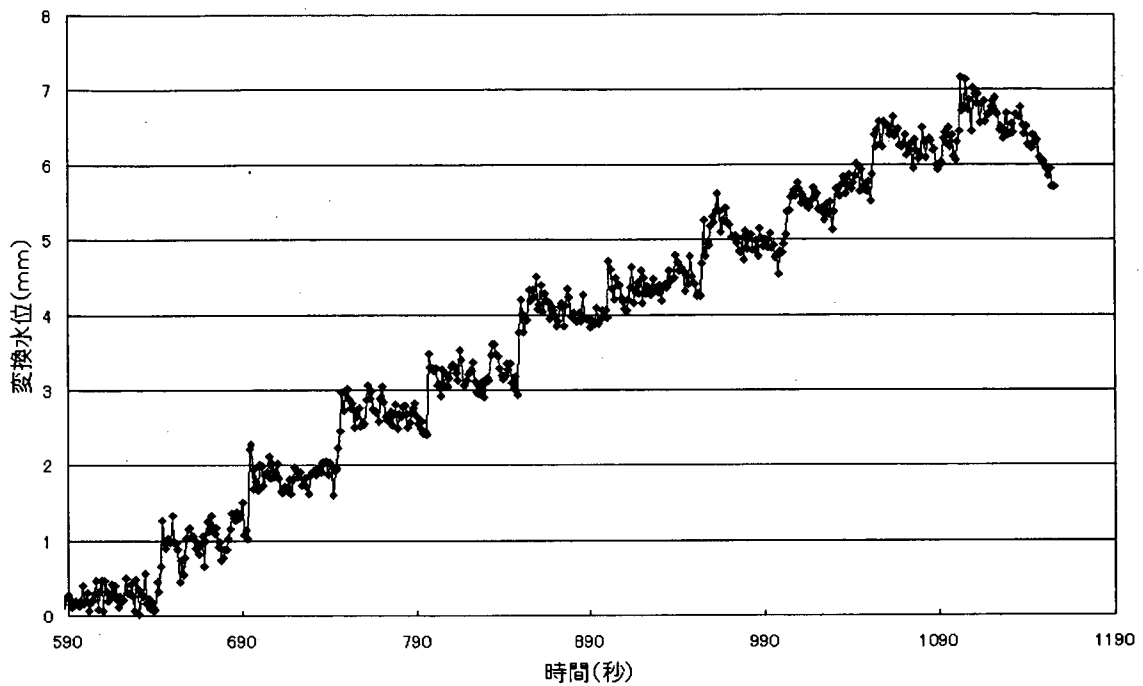


図4. 19 フルスケール5mのセンサ ($0.5\text{kg}/\text{cm}^2$) の測定結果 (ホース:8×6、100m)

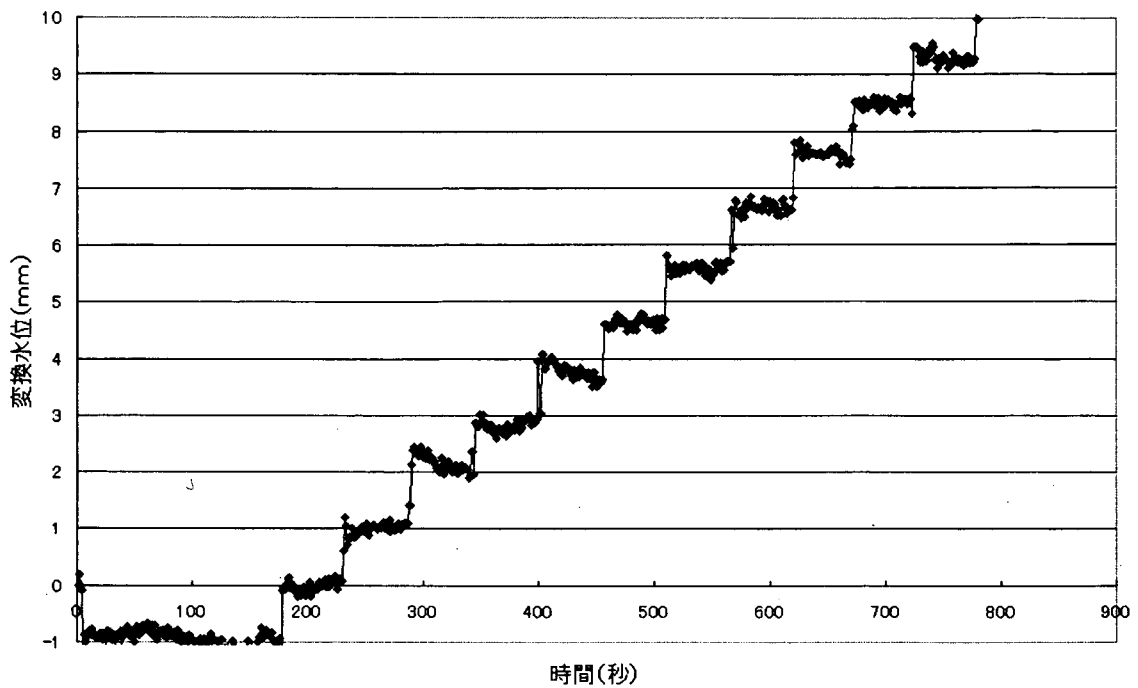


図4. 20 フルスケール10mのセンサ (1.0kg/cm²) の測定結果 (ホース:8×6、100m)

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。

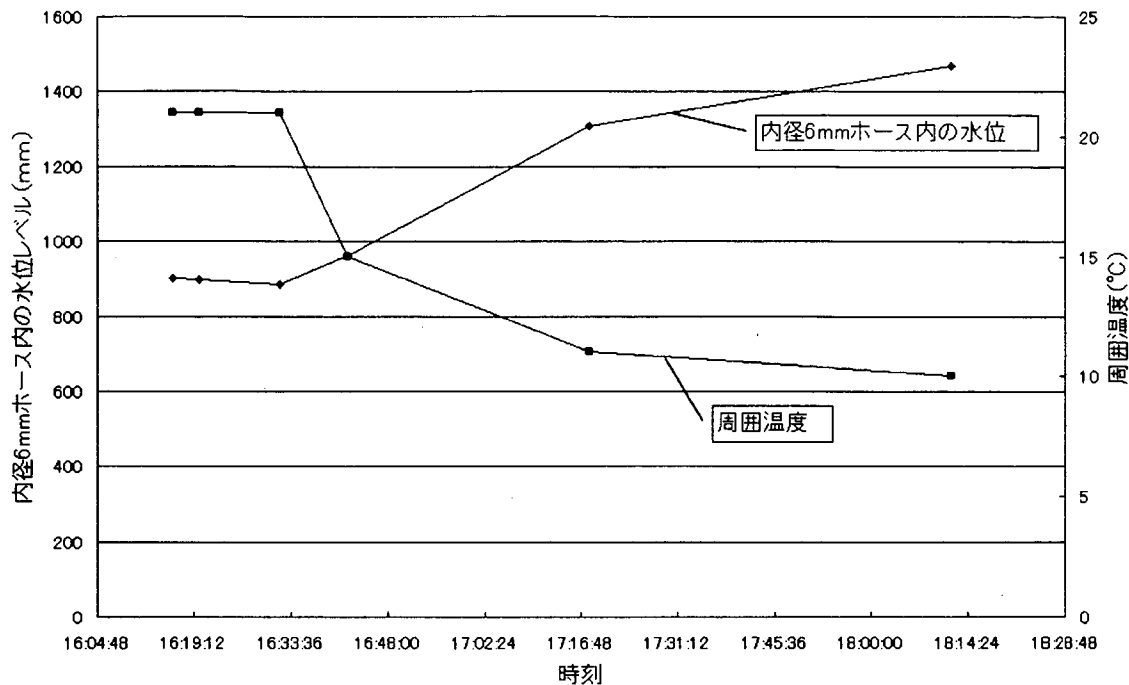


図4. 21 周囲温度変化と水位変化の関係 (ホース巻き状態、8×6、100m)

4. 3. 4. ホース形状の状態変化に伴う水位変動を調べる試験

図4. 2 2はホースを巻いてある状態から伸ばした状態に変化させたとき、およびその逆に巻き取ったときの水位変化を測定した結果を示したものである。ホースを巻いてあるドラムは室内にあり、伸ばすときにはホースを屋外に引き出しているため、温度が3度程度変化している。この温度変化の影響も含めて、ホースの伸展による水位変化は体積にして最大でも3cm³程度である。これは先の温度試験での変化量の1/3以下の値となっており、実質上の影響はないようにシステムを設計できることがわかる。

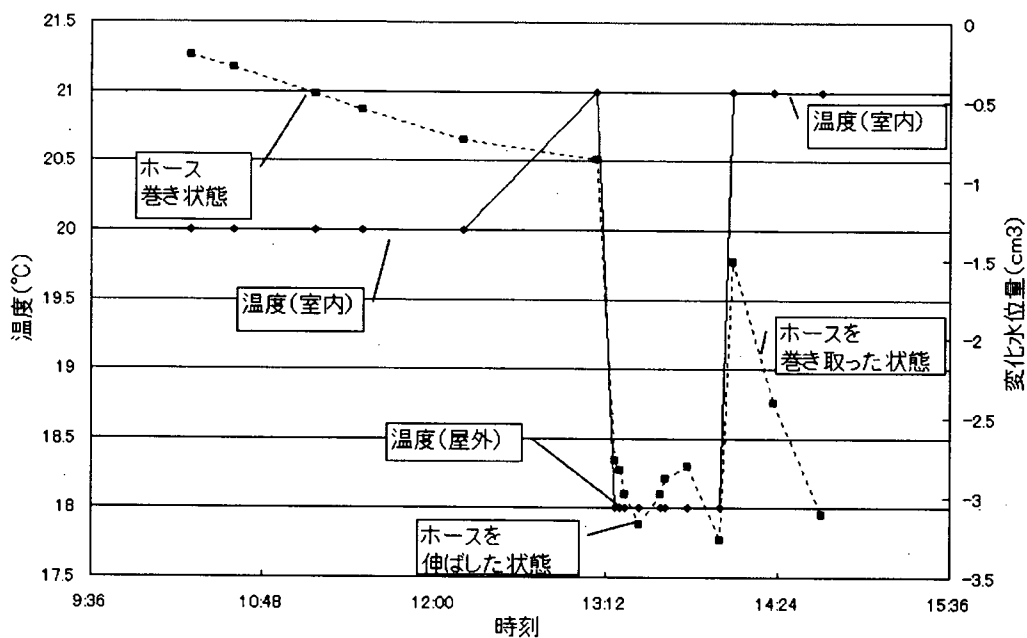


図4. 2 2 送水ホースの伸展に伴う水位変化

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。

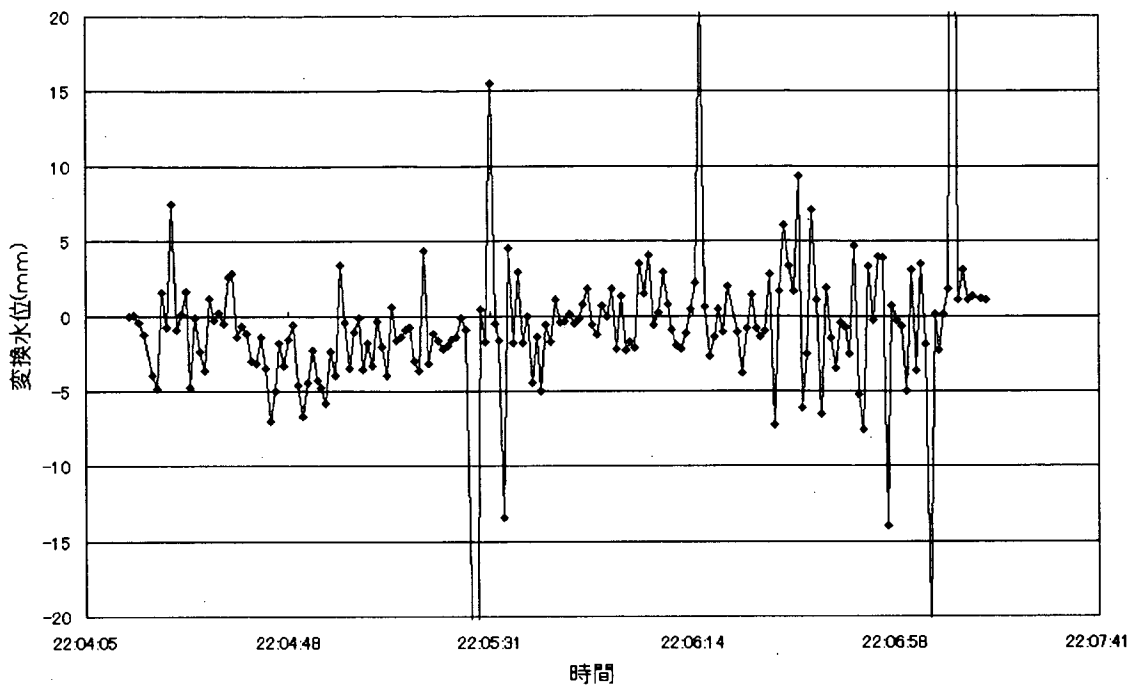


図4. 23 平坦な床面を走行中に測定した水圧(水位変換値)

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。

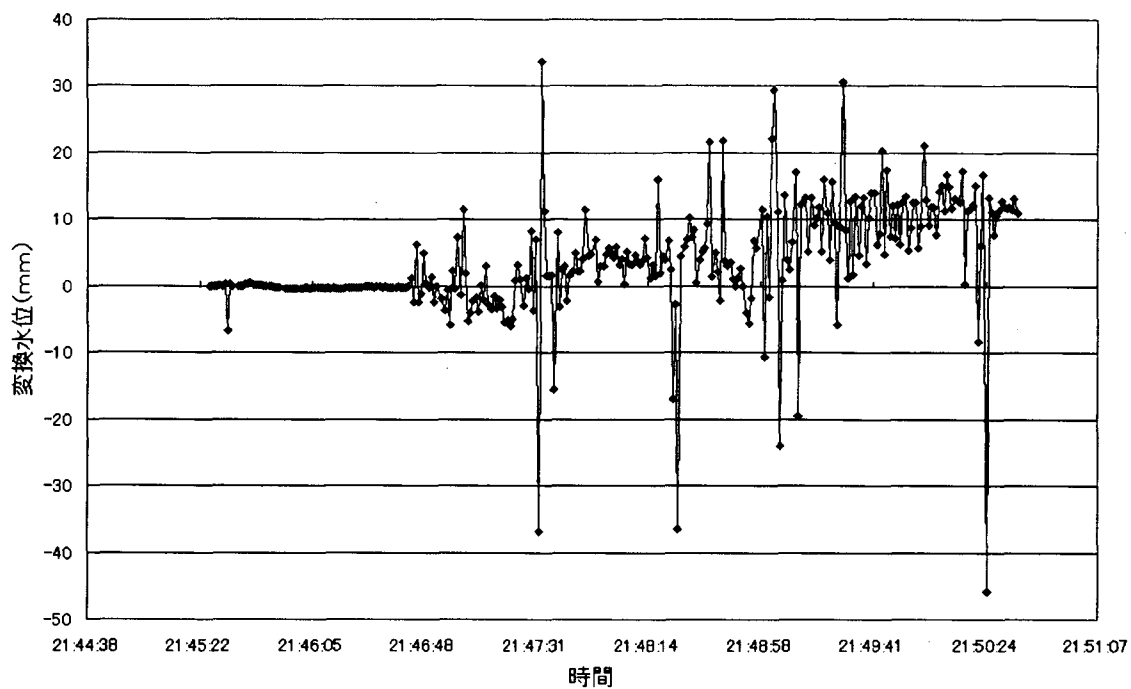


図4. 24 段差のある床面を走行中に測定した水圧(水位変換値)

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。

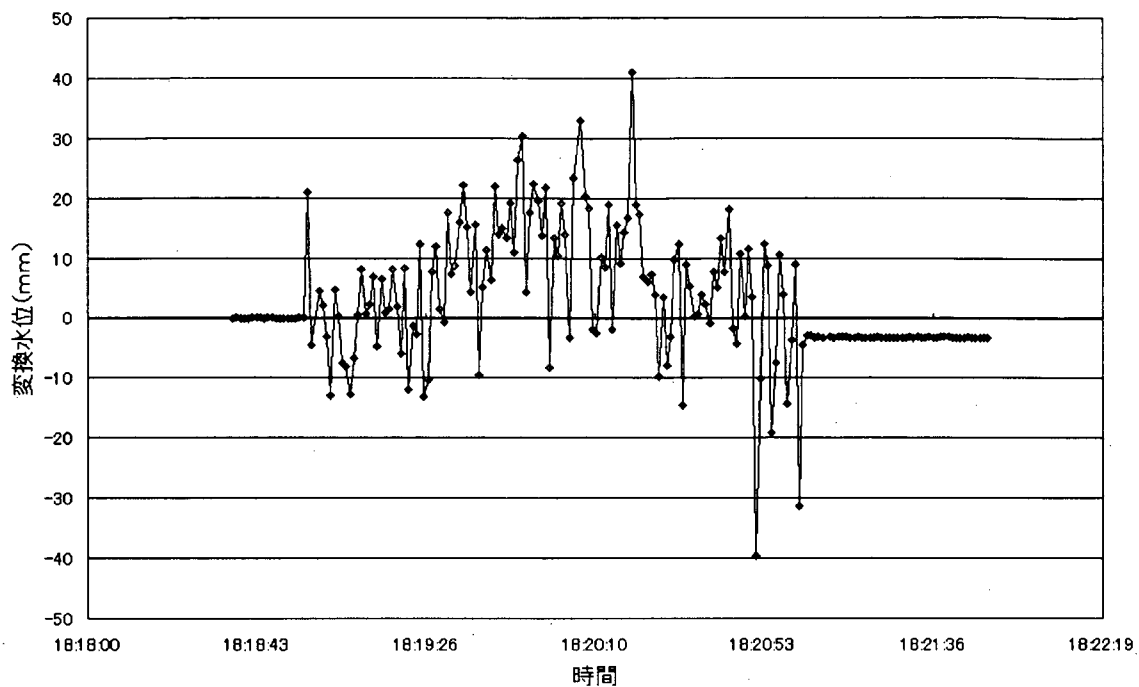


図4. 25 スポンジによる緩衝を行った場合の水圧測定値

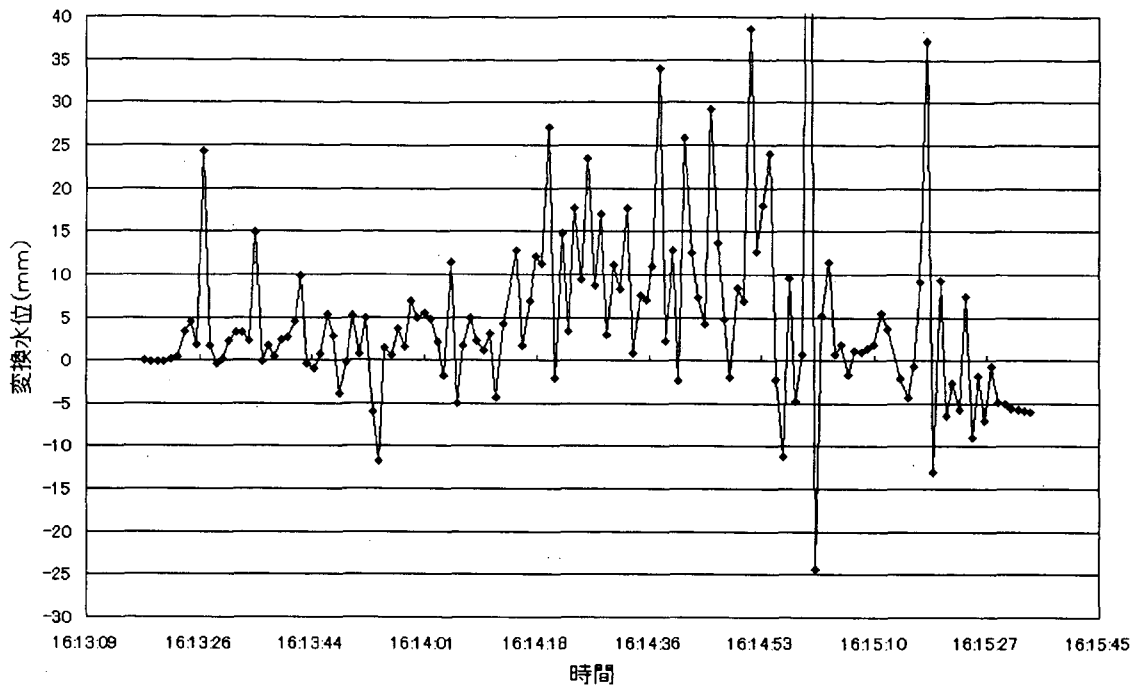


図4. 26 リングゴムによる緩衝を行った場合の水圧測定値

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。

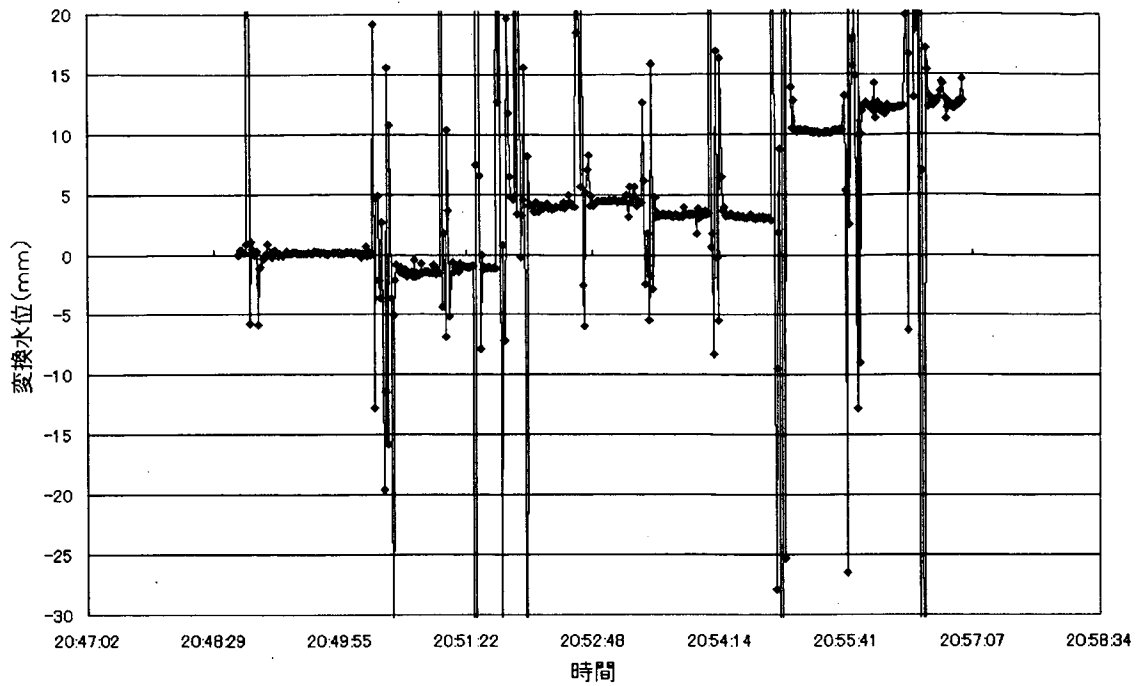


図4. 27 段差のある床面で一旦停止して測定した結果 (走行速度約5m/min)

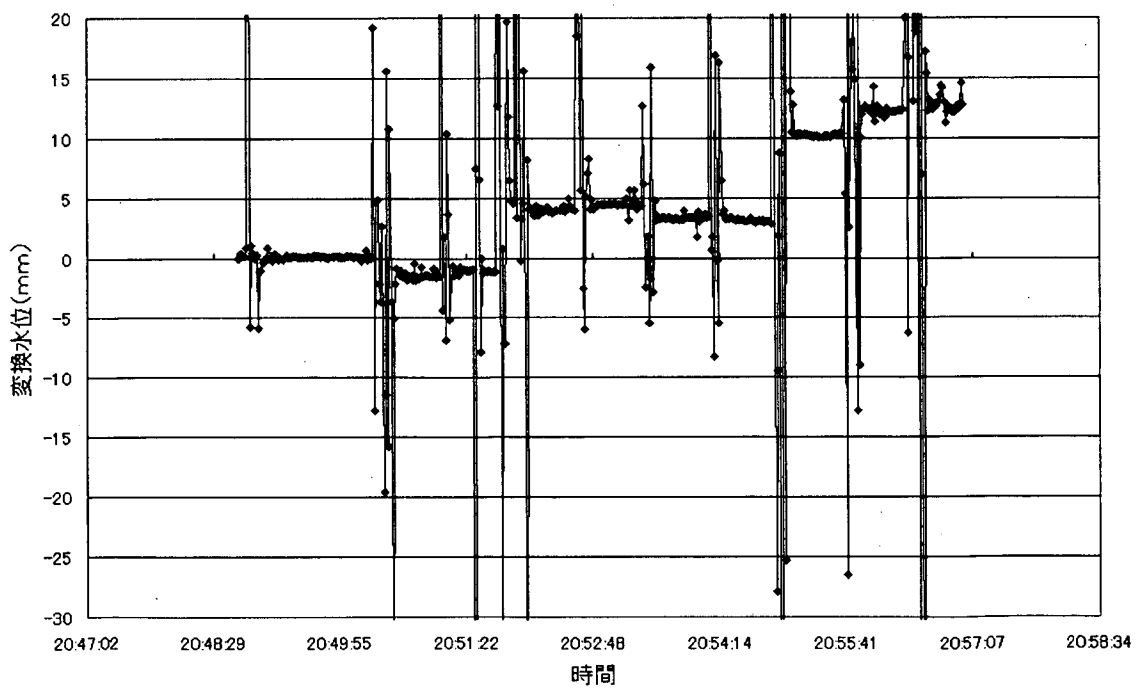


図4. 28 段差のある床面で一旦停止して測定した結果 (走行速度約1m/min)