

## 計測マニュアルについて

User's Manual for Field Measurements

要素技術ワーキンググループ 伊東 良浩 (佐藤工業㈱)

by Yoshihiro Ito

工事の複雑化にともない、現場計測が盛んに実施されるようになってきている。同時に、これらを支える計測機器などのハードウェアや、計測管理技術などのソフトウェアも、より高度なものになりつつある。しかし、一方では、これらにより構成されたシステムから、きれいに整理された形で出力されるデータを鵜呑みにしてしまい、そのデータが本当に正しいものであるか、また、どの程度信頼できるものであるかといった、基本的なことがなおざりにされる傾向も見受けられる。

本論文で紹介する計測マニュアルは、このような観点から、現場技術者が計測管理を行なう際に、必要なデータを十分な精度で得ることができるよう、計測技術に関する情報を提供することを第一の目的としている。ここでは、計測マニュアルの紹介を兼ねて、その目次にしたがって各章ごとに概要を述べる。

### 1. はじめに

土木工事における現場計測は、これまで様々な論文や工事報告に発表されているように、盛んに行なわれるようになってきている。これは、工事を取り巻く環境条件が次第に複雑となり、これまでの経験と勘による管理方法に代わって客観的なデータを用いる科学的な管理方法が重視されるようになってきたことが大きな要因として考えられる。

特に最近では、電子技術の進歩に伴う計測機器の精度の向上とコストダウン、FEMなどのコンピュータを利用した数値解析技術の発展、ファジイ理論やカルマン理論などを応用した統計的管理手法の開発などにより、計測管理技術は著しく発展する傾向がみられる。

要素技術分科会では、現場で実際に計測機器やコンピュータを操作してデータ処理を行なう技術者のために、有用かつ容易に理解できる計測マニュアルを作成することを目的として、過去約2年にわたり

調査、研究を実施し、今年度中に発刊できる予定となった。

本論文では、計測マニュアルの内容について若干紹介し、計測とマネジメントの関連を考えていただくとともに、不十分な点について御批判、御指導を戴きたいと考えている。

### 2. 計測関連用語

一般に、我々土木分野の者が計測関係の業務に携わる場合、文献やカタログなどで用いられている専門用語に戸惑うことが多い。また、知っていると思っている用語についても、その意味が間違っていたり、用語の意味する範囲が適切でなかったりすることもあり、誤解を生じる原因となる。

本章では、このようなことから、計測機器に関する文献やカタログ等に用いられている用語の中で、重要と思われるものを主にJIS規格(C1002及びZ8103)より引用して解説するものである。

### 3. センサ

センサは、人間の体で言えば五感に相当する部分で、物体の性質や動きなどの情報をなんらかの信号に変換する装置である。JIS規格によると、「対象の状態に関する測定量を信号に変換する系の最初の要素」とあり、これは、我々がセンサと聞いてイメージする範囲よりも、若干狭義である。土木計測でよく用いられている土圧計を例にとると、土圧計は、外力によって変形を生じる機械的な部分と、その変形や変形により生じるひずみを電気信号に変換する検出部分に、大きく分けることができる。この検出部分には、通常、差動トランスやひずみゲージが採用されているが、本章では、この検出部分をセンサと定義し、また機械的部分を含めた全体を変換器と定義する。

土木計測では、他の一般的な工業計測と異なり、その使用環境が極めて多様であり、また、劣悪な条件での計測を余儀なくされることが多い。そこで、各種センサには単に精度だけでなく耐久性や安定性が要求される。このため、計測機器選定は、その使用環境とセンサの特徴を十分に考慮する必要がある。

本章では、このような観点から、いくつかのセンサの原理、構造、特徴について紹介するものである。ここでは、まず、土木計測で主に使用されているひずみゲージ型センサ、差動トランス型センサ、ポテンショメータ型センサ、カールソン型センサについて詳しく述べたあと、次に、その他一般の工業計測で用いられている種々のセンサについて、その概要を紹介している。なお、ここでは本章で解説しているセンサの概要を挙げておく。

#### ① ひずみゲージ型センサ

ひずみゲージは材料に直接接着することにより、ひずみそのものを電氣量に変換するため、変位の測定よりも、ひずみまたはひずみを媒介とした変換器として有効である。ひずみを媒介とした変換器としては、土圧計、水圧計、荷重計、傾斜計など多くのものがある。

#### ② 差動トランス型センサ

差動トランス型センサの測定範囲は、通常± 0.05 mm程度のものから±200mm 程度の広い範囲のもの

があるが、測定を行う際には、実際の変位がどの程度になるのか予測をたて、適切な測定範囲を持ったものを選択することが、良い精度を確保するためには重要である。また、差動トランス型センサは、ひずみゲージ型センサ、ポテンショメータ型センサ、カールソン型センサなどと比べて、その原理から交流回路を必要としているために他の測定器の回路が異なり、通常独自の測定器を必要とする。このために、センサ内に小型発振器と整流器を取り付けて、直流電圧により作動させる直流変換方式のものが多くなっている。

#### ③ ポテンショメータ型センサ

ポテンショメータ型センサは、変位、角度の変換器として用いられることが多い。変位変換器としては、ストロークが10mm～1000mm程度のものがあり、他のセンサに比べ、測定範囲をかなり大きく取れることから、大変位の測定に対して有効である。また、巻線型のものでは、一般に長ストロークのものの方が良い精度になる傾向がある。

#### ④ カールソン型センサ

カールソン型センサを変位変換器として用いた場合、測定範囲は、通常± 5μm ～±10mmの比較的小さい範囲である。最近では、ひずみゲージ型センサの開発により、その取り扱いの容易さから、カールソン型センサが適用されることが少なくなっている。しかし、ひずみゲージ型センサのように接着剤などを使わず、構成材料が無機質であるために、長期的な安定性をもっていることに大きな特徴がある。

#### ⑤ その他のセンサ

その他のセンサでは、主に欧米において使用されている振動弦型センサや、シールド掘進機の方角制御などの目的で使用されているジャイロなど、工業用計測を含めた幅広い分野において使用されているセンサを紹介している。

### 4. 変換器

一般に変換器は、測定する物理量を他の物理量に変換するもので、その前後の関係が比例関係にあるものをいい、目的に応じて種々の変換器がある。現在用いられている変換器は、変換原理により大きく、電氣系のものと機械系のものに分類されている。こ

のうち、計測された物理量を電氣量に変換する電氣系のものが多く利用され、電子技術の進歩に伴って高性能・高精度のものが得られるようになっている。

電氣系の変換器のほとんどは図-4.1に示すように、ひずみや圧力を変位に変換する一次変換部と変位を電圧または電流に変換する二次変換部で構成されている。

一次変換部は、測定したい項目である圧力や応力を二次変換部へ伝えるためのものであり、土圧計であれば土圧を、鉄筋応力計であれば鉄筋応力を伝えやすい構造になっている。

一方、二次変換部は、一次変換部から伝達された変位を電圧または電流に変換する部分で、その変換方式によりひずみゲージ型・カールソン型・ポテンシオメータ型・差動トランス型・振動弦型などに分類されている。

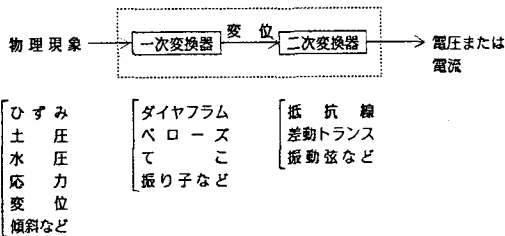


図-4.1 変換器の構造

#### (1) ひずみの測定

ひずみの測定は、2個の固定脚をコンクリートや鋼材の表面に固定し、標点間の距離の変化を測定し、機械的にひずみを求めたり、ひずみ量の変化を電氣抵抗・静電容量・インダクタンスの変化に変換して検出するもので、ひずみゲージ型の場合は図-4.2に示す構造となっている。

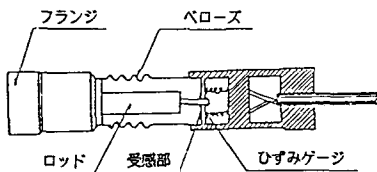


図-4.2 ひずみゲージ型ひずみ計の構造

#### (2) 力の測定

土圧計、間隙水圧計、荷重計などは、受圧面からの圧力をダイヤフラム、ベローズなどの受感部で受け、ダイヤフラムのたわみを検出したり（図-4.3）、ダイヤフラムのたわみを流体圧に変換し、別のダイヤフラムで電氣量に変換する構造となっている。

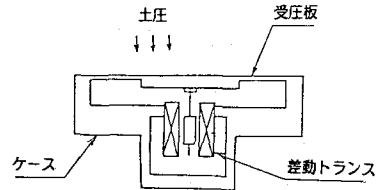


図-4.3 差動トランス型土圧計の構造

#### (3) 変位の測定

変位の測定は、変位伝達シャフトの動きを各種タイプの検出器で検出する構造となっている。

#### (4) 角度の測定

傾斜角を測定する傾斜計は、図-4.4のように、傾斜計本体が鉛直の位置から傾くと、内部の振子の相対位置が変動し、この相対角変位を電氣信号へ変換し検出する構造となっている。

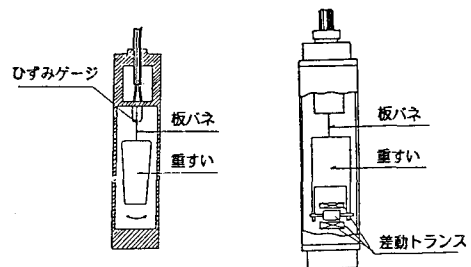


図-4.4 傾斜計の構造

#### (5) 温度の測定

温度の測定は、2種の異なった金属片の両端をたがいに関接して閉回路を構成すると、この閉回路には温度差に応じた熱起電力が発生し電流が流れることを利用した熱電対と、金属や半導体の電氣抵抗は温度によって変化することから電氣抵抗を測定することにより温度を検出する方法がある。

## (6) 変換器メーカー

各種変換器の構造を述べたが、各変換器メーカーで市販されている変換器の特性を調査したものが表4-1である。

## 5. 測定装置

現場計測で用いる測定装置の範囲は、その機能や表示方法によりさまざまな分類方法があるため一口に言い表わすことは困難であるが、ここでは図-5.1に示すように手動式の指示計から演算処理の可能な自動測定器までを含み、変換器からの信号を受けて測定データとして表示・記録し、コンピュータにつなぐことのできる装置としてとらえることが現実的であると考えている。

### (1) 回路の基本的性質

現場計測システムは特殊な場合を除き、測定装置を中心とした電気的回路が用いられており、その伝送方法はケーブル方式が大部分を占めている。主な変換器は測定装置から電気エネルギーを与えられ、対象とする物理量の変化に対応した電気信号を送り

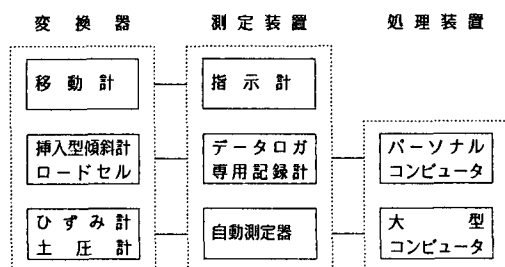


図-5.1 測定装置の範囲

返すものであり、供給エネルギーの安定は不可欠な要因である。

安定供給方式には定電圧方式と定電流方式があり、前者は測定装置の電源電圧を一定に保つ方式である。しかし、測定装置から変換器までのケーブル長が長くなると電圧降下が発生するのでケーブル長はできるだけ短くすることが望ましい。後者は変換器端子での供給電圧を一定にする方式で、ケーブルラインの電気抵抗に対応して電源電圧を自動的に昇降させ、ケーブルの電流を一定にするものであり、ケーブル長が長くなる土木計測に適している。

また、変換器から送られてくる電気信号は電圧変

表-4.1 市販変換器特性一覧表（抜粋）

全社名：〇〇〇〇

| 測定項目    | 形式                             | センサの種類  | 測定範囲                                | 分解能、非直線性、精度                                      | 特徴                                                                                                                                       | 適用工種 |
|---------|--------------------------------|---------|-------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ひずみ(応力) | ひずみゲージ<br>Fシリーズ<br>Pシリーズ<br>など | ひずみゲージ  | 0～+30000、<br>-10000×10 <sup>4</sup> | (分)1×10 <sup>4</sup><br>(精)約1～10%<br>(条件により変動大)  | 鉄筋、コンクリートなどに直接接着し<br>表面ひずみを測定する。<br>ゲージ長 0.2～120mm<br>ゲージ長、使用温度、受感部配置など<br>により種類が多い。<br>施工方法(接着剤、コーティング剤、<br>リード線の選択、ブリッジ構成など)<br>に各種あり。 |      |
| ひずみ(応力) | 埋込型<br>ひずみ計                    | ひずみゲージ式 | 0～±5000×10 <sup>4</sup>             | (分)1×10 <sup>4</sup><br>(非)1%R0<br>(精)約1～2%      | コンクリートに埋込んで内部ひずみの<br>測定可能、長期安定性良、測温機能<br>付のものあり。                                                                                         |      |
| 鉄筋応力    | 鉄筋計 KS                         | ひずみゲージ式 | 0～2400kgf/cm <sup>2</sup>           | (分)0.5kgf/cm <sup>2</sup><br>(非)1%R0<br>(精)約1～2% | 配筋の一部を切断して取り付ける。<br>D10～D32までに対応。<br>測温機能付                                                                                               |      |
| 荷重      | センターホール<br>型荷重計<br>KC          | ひずみゲージ式 | 0～5 ないし<br>0～300tf                  | (分)0.03～0.05% FS<br>(非)1～2%R0<br>(精)約1～3%        | プレストレス荷重、アースアンカ引張<br>荷重、切欠軸力荷重などの測定に使用。<br>圧縮型であるが、センターホール型の<br>ため鋼棒引張荷重の測定も可能。                                                          |      |

化や電気抵抗変化であり、目で見ることができない。これを表示、記録するのが測定装置であり、その時の回路方式は零位法と偏位法に分類される。零位法は変換器からの電気信号に対し、測定装置のバランス抵抗を調節して回路に電流が流れないようにする方法である。機構が複雑でコスト高であるが長期安定性にすぐれており、静的な現場計測には最適である。これに対し偏位法は変換部からの信号を検流計でそのまま指示するものであり、最も一般的な方法である。機構は簡単でコストも安い回路の電圧や抵抗の変化があれば指示値に影響があらわれる欠点がある。

測定装置の表示や記録の方法にはアナログ式とデジタル式があるが、測定データのコンピュータ処理を考えた場合、コンピュータへの入力に適しているデジタル式が使い勝手がよい。

以上のことを総合すると土木計測の測定装置は、定電流方式の電源を持ち、零位法—デジタル記録の組合せが最適といえる。

## (2) 自動測定装置

現在の現場計測システムで主流をなしている自動測定装置は、ポータブルで半自動計測に適したデータログと呼ばれる機種と単独でも自動測定を行えるがコンピュータと組み合わせて大規模なデータ処理装置としても機能する汎用型あるいは全自動測定器と呼ばれる機種がある。

データログは電源のない現場や長いトンネルや道路盛土、あるいは挿入型傾斜計の測定のように直接コンピュータとつなぎにくい場合などに適しており、現場でデータの一時記憶を行い、事務所に持ち帰っ

てコンピュータにデータを転送する使い方が効率的である。

全自動測定器は測定、物流量への変換、プリンタ出力等の機能があり、単独でも計測システムを構築することが可能である。しかし、コンピュータにデータを伝送したり、コンピュータからの制御もできるため、コンピュータと直接結びつけデータの演算、図化等のデータ処理はもちろんのこと電話回線を利用して遠距離にあるホストコンピュータへデータを送り、解析処理を行うことも可能である。

ただし、このように現場計測は自動化が進んでいるが、現場観察という基本的作業を怠らないように心したいものである。

## 6. 伝送方法

### (1) データ通信システムの基本構成

データの伝送方法を理解するには、データ通信の概念を大まかに捉えておくことが必要である。その構成要素は、

- ① 通信回線
- ② 回線終端装置（モデム）
- ③ 通信制御装置

に大別でき、①～③が各々、役割を分担して通信システムが成り立っている。

### (2) 制御方法

データ通信システムを運用するために、伝送方式、伝送制御、誤り制御といったルールが考えられている。また、各構成要素を結ぶために、RS-232C、GP-IBといったインターフェースが考えられている。

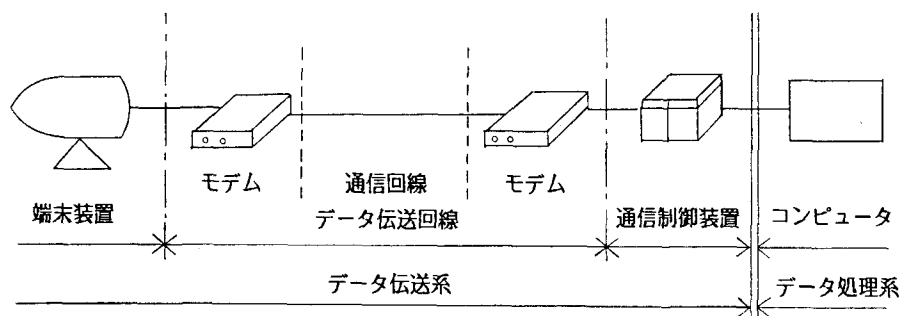


図-6.1 データ通信システムの基本構成

### (3) テレメータ

土木計測で用いられる、テレメータリング（遠隔測定）は、図-6.1データ通信システムの応用と考えることができる。

### (4) 伝送媒体

伝送媒体としては、ケーブル、電波、光が考えられる。以下に、その概要を述べる。

#### ① ケーブル

土木計測に用いられる伝送媒体の主たるもので、心線、絶縁体、シースといった構造が一般的である。

#### ② 電波

ケーブルの布設が困難な場合、又は事実上不可能な場合、電波の利用が有効になることが多い。これには、免許の不要な微弱電波によるものと、免許の必要な簡易無線によるものがある。

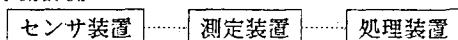
#### ③ 光

最近、ケーブルに代って光ファイバを用いた伝送が多くなってきている。光を伝送に用いる場合、発光素子、受光素子、光ファイバ本体についての知識が必要である。計測マニュアルでは、この知識について詳しく解説している。光ファイバケーブルの外装と布設条件を表-6.1に示す。

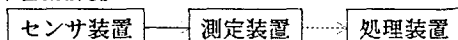
## 7. 計測システム

計測システムは、センサ装置（センサ、変換器）、測定装置、処理装置で構成され、それぞれ相互間のデータ伝送のON-LINE, OFF-LINEによって次の3つに大別される。

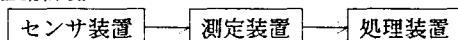
#### ① 手動計測



#### ② 半自動計測



#### ③ 自動計測



—— ON-LINE

..... OFF-LINE

手動計測は、センサ装置からのひずみ、傾斜、変位等の物理量を指示計により読み取るあるいはプリントさせるものであり、測定からデータ処理装置への入力のすべてが人手で行われる計測である。

半自動計測は、センサ装置と測定装置とがON-LINEで結ばれており、データの取り込みは測定器で行うものの、処理装置への入力は、人の手で行う計測である。トンネル工事、大規模土工事、海洋工事など、通信ケーブルが施工上の障害になったり、ケーブル敷設あるいは測定装置への常時電源の供給が困

表-6.1 光ファイバケーブルの外装と布設条件

| シース種別 |          | ポリエチレン | ビニル | ラミネート<br>シース | 外装            |          |         |        |
|-------|----------|--------|-----|--------------|---------------|----------|---------|--------|
| 項目    |          |        |     |              | 鋼コルゲート<br>シース | 鋼帯<br>外装 | 鉄外<br>装 | 線<br>装 |
| 湿度    | 耐水性      | ◎      | ○   | ◎            | ◎             | ◎        | ◎       | ◎      |
|       | 耐透湿性     | ○      | △   | ◎            | ◎             | ○        | ○       | ○      |
| 塩害耐食性 |          | ◎      | ◎   | ◎            | ◎             | ◎        | ◎       | ◎      |
| 鳥虫害   |          | △      | △   | ○            | ◎             | ◎        | ◎       | ◎      |
| 耐油性   |          | ◎      | ○   | ◎            | —             | —        | —       | —      |
| 振動    |          | ◎      | ◎   | △            | △             | ○        | ○       | ○      |
| 海洋    | 耐水性      | ◎      | ○   | ◎            | ◎             | ◎        | ◎       | ◎      |
|       | 耐食性      | ◎      | ◎   | ◎            | ◎             | ◎        | ◎       | ◎      |
|       | 潮流・漁労具・錨 | ×      | ×   | ×            | △             | ○        | ◎       | ◎      |
| 外圧    |          | △      | △   | ○            | ◎             | ◎        | ○       | ○      |

◎たいへん良好 ○良好 △使用法を誤ると問題が生じる ×適さない

難な場合に用いられる。測定器からの処理装置へのデータ伝送は、プリント出力を処理装置のキーボードから手入力する方法とハンドヘルドパソコンのRAMやフロッピーディスクなどに記憶させ処理装置に直接入力する方法がある。

自動計測は、センサ装置、測定装置、処理装置のすべてがON-LINEで結ばれており、現場における地盤、構造物の挙動がリアルタイムで把握できる最も望まれる計測である。

これら計測方法は、電源確保・ケーブル敷設・計測室設置の不可・処理装置設置場所の温湿度などの環境条件、計測対象物の重要性、計測内容・項目・頻度・点数、要求精度、計測費用などの諸条件により選定される。

一方、半自動および自動計測は、センサ装置と処

理装置との距離によっても分類される。現場における計測箇所が集中し、センサ装置と処理装置離隔距離が200m～300m以下で、処理装置が現場近くにおけるような条件の整った場所では、測定装置と処理装置を計測室に設置し、一ヶ所でシステムの管理をする方法が適している。(図-7.1)。しかし、処理装置設置に適した場所がセンサ装置から遠く200m～300mをこえると、多芯ケーブルの延長が長くなり、得られるデータの精度、信頼性が低くなるだけでなく、設置費用もかさんでくる。このような場合、測定装置を処理装置から離し、現場近くに設置する方法(図-7.2)が適している。この方法は、測定装置と処理装置間をモデム(変復調装置)を介して直列伝送(serial transfer)するもので、多芯ケーブルのような並列伝送(parallel transfer)

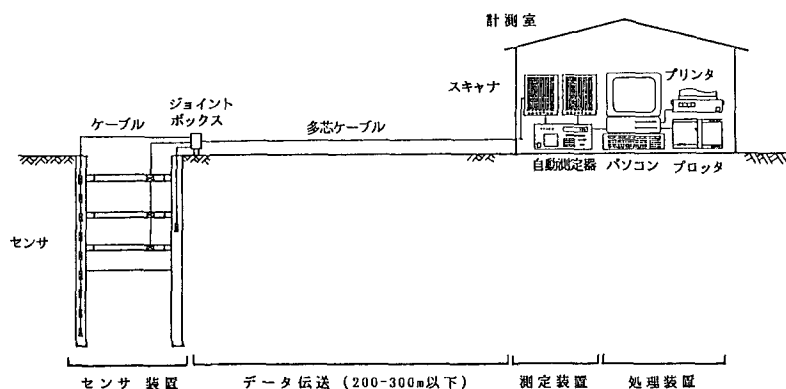


図-7.1 センサ装置～処理装置間が200～300m以下の場合

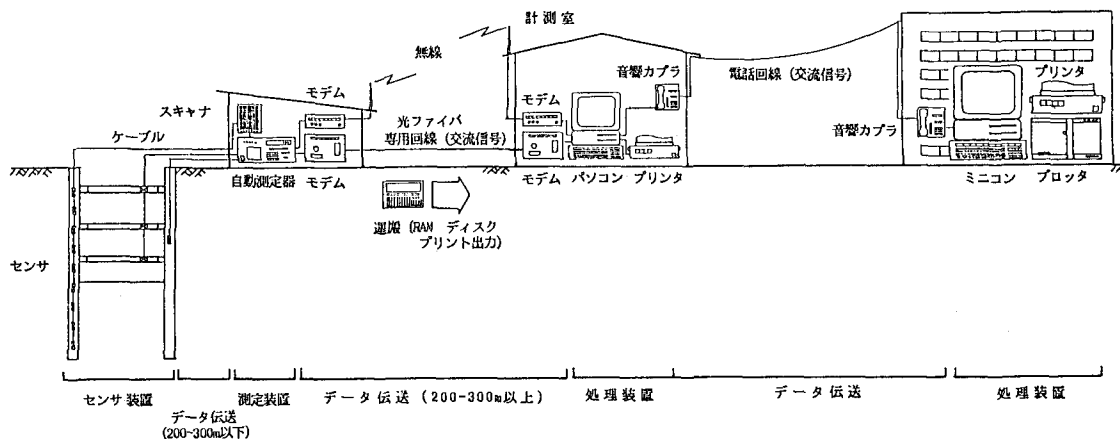


図-7.2 センサ装置～処理装置間が200～300m以上の場合

に比べてケーブルは細く、敷設が簡単のみならず電話や光による伝送など応用範囲も広い。

本章では、後者の分類に従い、山留め、トンネル、護岸等の工事における計測システムの事例を挙げて解説する。

## 8. 現場計測機器の使用上の留意点

土木工事や建築工事の現場における計測は、実験室や室内のように良好な環境条件で行なわれることは少なく、重機が走り回り、発電機が稼働し、高圧、低圧のケーブルが散在するなど、物理的な損傷や電氣的なトラブルの生じやすい悪条件下で実施されることが多い。

このような苛酷な環境下においても、現場計測は工事の管理基準を満足する測定精度を、最小限の誤差範囲内で実現しなければならない。この点から、計測機器使用上の基本概念は以下の項目を満足することが重要である。

- ① 計測システム全体の精度のバランスを重視する。精度の差の大きい機器を組み合わせると、システムの総合精度は、精度の低い機器以上には改善されない。
- ② 直線性や分解能などの測定値の正確さに関する機能も重要であるが、測定期間が半年以上にわたる中～長期計測では、長期の安定性が得られる機器を選択すべきである。
- ③ 測定データの読取り範囲内に入ってくるノイズを、無視するまでに除去するか、あるいは適切な補正が可能な機器を使用する。

現場で実際に測定する場合、計測担当者が測定時に計器設置場所まで出向いて測定することは、施工の妨げや人件費の増加に通じる可能性があるため、最近ではある程度集約化、自動化されたシステムを設置するようになってきており、機器の選定に当たっては、前述の3項目に注意することが重要である。

現在使われている一般的なセンサや変換器は、数年にわたる長期の測定を行なうと、抵抗変化や電圧変化、その他の原因による基準点の移動（ドリフト）を起こすことが知られている。また、ケーブルなどの伝送系は、温度変化、物理的な膨張・収縮、回路の温度特性、電氣的ノイズなどによる誤差を発生す

ることが多く、計測システム全体の信頼性に大きく影響する可能性が高い。

本章では、図-8.1に示す自動計測システムを例に、各部の機器選択の際に重要な事項について述べる。

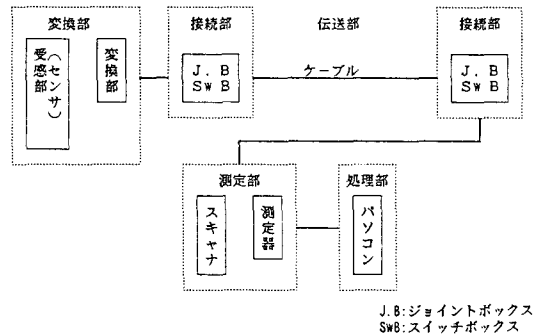


図-8.1 自動計測システム

## 9. おわりに

今回発表したマニュアルは計測のハードウェアについてであるが、今後、具体的な工事についての計器の配置や設置方法など、ソフトウェアも関連した計測マニュアルについても検討して行く予定である。

計測機器のハードウェアの開発、改良は日進月歩であり、次々と新しい機器が発売されると考えられるが、現場技術者の方々がここで紹介した計測マニュアルを参考として、さらに新しい展開を計って戴ければ幸いである。

最後に計測マニュアル作成にあたり御協力いただいた各計測会社の技術者の方々に感謝する次第である。

執筆者 福島 晴 夫（佐藤工業㈱、主査）  
伊 東 良 浩（佐藤工業㈱）  
岡 野 幹 雄（フジタ工業㈱）  
指 田 健 次（日本国土開発㈱）  
比留間敏員（前田建設工業㈱）  
藤 井 義 文（東電設計㈱）