

高性能SDL水位計の開発

五江 通

Development of a New SDL Water-Level Meter

Toru Goebuchi

Abstract

A new water level meter with high accuracy and long term stability has been developed. Structurally, this newly developed instrument is composed of a pressure transducer probe unit and a battery unit. The probe unit contains both a pressure transducer and a data logger. The battery unit is equipped with an RS-232C connector for data acquisition. The probe unit is connected to the battery unit through four conductor cable that also houses a vent tube. Additionally, to obtain miniaturized dimensions and to be lower power consumption, a hybrid integrated circuit (Hybrid IC) for the data logger unit was designed.

The result of our efforts is a newly developed water-level meter with unprecedented features. It is very easy to install, not requiring any weather proof housing for a data logger. The data logger is housed in the same unit as the pressure sensor and this unit is submerged into the borehole. Because the temperature of borehole water is expected constant during any season, the accuracy of the collected data may be stable. Calibration of a pressure transducer is carried out before hand in our calibration well. The error coefficients of the pressure sensor are written into an EEPROM so measured data is easily corrected and high accuracy obtained. It is also capable of displaying the under ground level (GL) and the elevation of water table and so forth.

要 旨

地下水位を高い精度で、かつ長期間安定に測定可能な水圧式のデジタル水位計を開発した。構造的には、圧力センサとデータロガーを一体化した水位計プローブ部と、観測井の頭部に設置する電池ケース部から構成され、その双方をペントチューブ内蔵のケーブルで接続している。電池ケース部は、データロガーを動作させるための電池の他、データ回収のためのRS232Cコネクタを有する。小型・低消費電力化を実現するために、その中枢を成すデータロガー部は、混成集積回路化（ハイブリッドIC）した。

開発した水位計は、据付に伴う特別な工事を必要としないため設置が容易なこと、圧力センサとデータロガーを一体化した水位計プローブは、温度変化の殆どない水中に設置されるため安定性に優れること、圧力センサ固有の非直線性誤差を製造検査時にROMに書込み、CPUで補正できるようにしたこと、基準海面からの高さや設置深度を入力可能にしたことで地表面水位や標高水位を直接表示可能にしたこと等、インテリジェント機能を内蔵した地下水位計を実現できた。

1 まえがき

地下水位の測定は、地下水位の空間的分布および経時変化を把握し、地下水の賦存・流動機構を明らかにするために実施されるものであるが、その測定には、種々の方法が実用されている。古くは、ロープに重りを取り付けて底面まで降下させ、再び引き上げて水深と水位面を測る簡単な方法から、テスターを用いてその一端を大地に差し込み、他方を電線に接続して水面を測る導通式、さらにはフロートと時計式の自記紙送りドラムを組み合わせた機械式自記水位計などである。

一方、今日最も多用されている地下水位計は水圧式と呼ばれるもので、孔内の一定深度に圧力センサを内蔵した水位計を設置し、水位の変化を受圧面のひずみ量として捉え、これを電気信号に変換して測定するものである。装置としては簡単なものであるが、信頼性が高く、現場での作業性を追求すると、工夫すべきことは多い。例えば、データロガーの周囲温度に起因する誤差、同様にその設置に伴う付帯設備や工事の問題、圧力センサからの微弱な信号を長距離伝送することによって生ずるノイズやケーブル抵抗に起因する誤差、水位が電流やひずみ量で表示されるため、水圧から水位を算出しなければならない煩わしさである。

本報文では、地下水位計を新たに開発するに際して、これらの課題を解決するために講じた具体的な手段やシステムを構成する上での考え方について述べ、今後の地下水位計測技術を検討していくための一助としたい。

2 地下水位計の概要

2・1 地下水位計の種類

地下水位計には、その目的や観測規模に応じて様々な方式がある。これまで実用に供されてきた代表的な地下水位計を方式別にみると、大きくは次のように分類できる。

- 1) 水位の変化を圧力センサにより電気信号に変換して測定する水圧式
- 2) 水面に設けたフロートの変化をワイヤとプーリで検出するフロート式
- 3) 超音波を発して、水面から反射波を捉えてその伝播時間を利用する超音波式
- 4) 水位の変化を2本の触針とモータにより追跡する機構の触針式
- 5) 地下水面下深くに送気管を設置し、これに圧力ガスを送る気泡式

これらの水位計も社会環境の変化に伴い、時と共に大

きく変遷している。すなわち、電子技術の発展と高性能な圧力センサの普及によって、従来多く利用されていたフロート式や触針式といった高価で保守を必要とする機構的な水位計から、安価で高性能を実現できる電気的な水圧式に移行しつつある。

2・2 水圧式水位計の現状

小孔径の観測井に適用できる水位計には、使用する圧力センサの形式によって、1) 水晶振動子式、2) ひずみゲージ式、3) 拡散型半導体式の3種が実用されている。以下にその概要を述べるが、今日の大多数の水位計においては、精度、長期安定性及びコストといった観点から拡散型半導体圧力センサが使用されている。

2・2・1 水晶振動子式水位計

圧力センサに水晶振動子を使用するもので、構造的には図-1に示すように、圧力の変化をペローズ機構を介して、水晶振動子を保持するピボットに伝達させ、圧力の変化に比例した振動数を発生させる仕組みである。水晶振動子は絶対真空中に封入し、その内部温度を同様に水晶温度計で測定することにより、温度補正している。本方式による水位計は、最も高い精度 ($\pm 0.01\%FS \sim \pm 0.05\%FS$) を実現できるが、高価であるため特殊な用途を除いて利用頻度は少ない。

2・2・2 ひずみゲージ式水位計

受圧面である金属ダイヤフラムにひずみゲージを貼り付けて、水圧によって生じるダイヤフラムの変形量に比

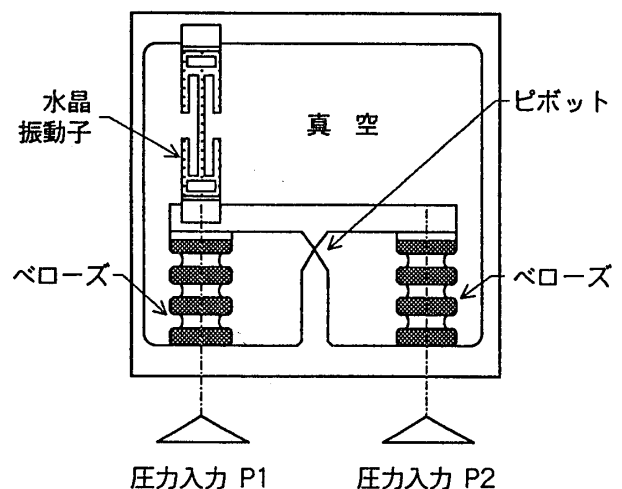


図-1 水晶振動子式圧力センサの構造

Fig. 1 Structure of a quartz crystal pressure sensor

例して、その抵抗値が変化するピエゾ抵抗効果を利用した水位計である。

安価に製作できるが、ひずみゲージの接着が難しく、信頼性や長期安定性に課題が残るため、今日では次に述べる拡散型半導体圧力センサが主流になっている。

2・2・3 拡散型半導体式水位計

拡散型圧力センサは、シリコン単結晶上にエッチング技術により半導体ストレインゲージを形成するものである。そのチップ構造は図-2に示すように、数mm角のn型シリコンを用い、エッチング技術によりその中央部の厚さを数十 μm に仕上げ、この部分をダイヤフラムとして使用する。その表面には、ホウ素を拡散することにより、P型抵抗体層を形成し、これをストレインゲージとして使用する。ストレインゲージとダイヤフラムのn型シリコンとは、Pn接合で絶縁される構造である。

常温におけるその抵抗値は約5K Ω 、温度係数は約3,000ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 、抵抗の圧力による変化は約2,500ppm/FSである。これはストレインゲージが圧力よりも温度により敏感であることを示しているが、これをブリッジ接続した場合、理想的には温度依存性が相殺され、圧力に対する感度は4倍になる。現実には、4個の抵抗値の僅かな違いのために温度依存性は残存する。これを除去

するために、ブリッジ接続した一辺に補正抵抗を付加している。ブリッジ接続した入力側を定電流もしくは定電圧駆動することで、水圧に比例した電圧出力を得ることができる。

拡散型半導体圧力センサを用いることで、長期安定性に優れた小型で高精度($\pm 0.05\% \text{FS} \sim \pm 0.5\% \text{FS}$)な水位計を安価に実現できる。

3 新しい水圧式水位計の開発

3・1 開発する上での課題

水圧式水位計を新たに開発するに際し、現状の問題を整理した上で、次のような具体的課題を策定した。

- 1) 温度変化に起因するデータロガーの測定誤差を排除できること。
データロガーが設置される環境は寒冷地から炎天下に及び、年間を通しての温度差は60 $^{\circ}\text{C}$ を超えることもある。このため、データロガーを構成する電子部品の温度依存性が測定値に影響を与えないこと。
- 2) 高精度を実現すること。
水位計の精度は、基本的には使用する圧力センサの特性で決まる。したがって、圧力センサの固有誤差を補正できる設計を講ずること。
- 3) 表示水位の基準レベルを適時、設定できること。
これまでの水位計は、水位をメートル表示ではなく使用する圧力センサの形式により電圧や電流、歪量で表されていた。本来、地下水位は地表面を基準としたり、標高を基準としたりして表示されるべきであり、これを可能にすること。
- 4) データロガーを収納するための百葉箱等、特別な設備や工事を必要とせず、据付が容易であること。
- 5) データ回収が容易であること。
必要に応じて、モデム等を利用したデータ通信システムを構築できること。
- 6) 電池交換が容易であること。
電池交換が容易で、かつ動作温度範囲が広いこと。
- 7) 大気圧の補正を必要としないこと。
圧力センサとデータロガー及び電池を完全一体化した水位計の場合には、大気圧も同時に測定し、水位を補正しなければならないが、このような煩わしさは排除できること。
- 8) 多様な水質環境に適用できること。
地下水位の測定は主に陸水を対象に行われていたが、最近では海性、酸性やアルカリ性、腐食性ガスを伴う温泉等、多様な水質環境に適用できることも強く求められている。

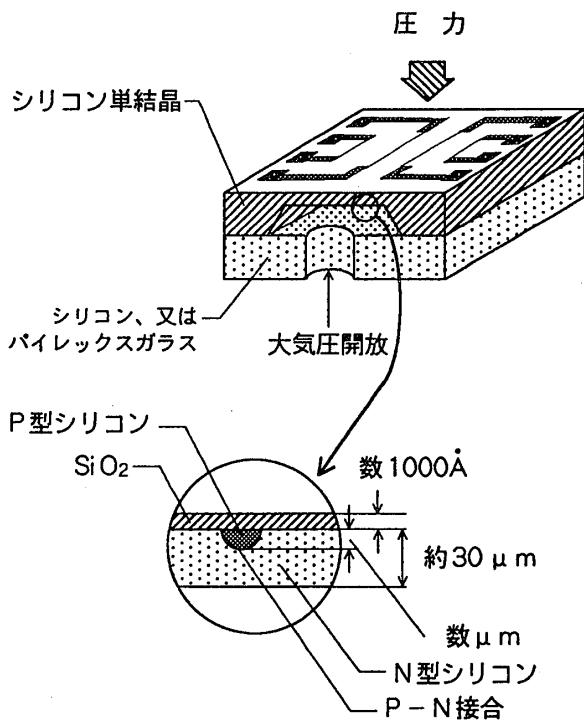


図-2 拡散型半導体圧力センサの構造
Fig. 2 Structure of a defused pressure sensor

3・2 開発課題を解決するための手段

ここでは、前章の開発課題をどのように解決したか、

その考え方や手段を具体的に述べることにするが、要点は、1) システム構成上の工夫、2) 回路設計上の工夫、

	圧力センサとデータロガー 分離型	圧力センサ・データロガー・電池 完全一体型	SDL水位計
設置概念図			
受圧面の圧力	$P = \rho \cdot H$ ここで P: 受圧面の圧力 ρ : 水の比重 H: 水深	$P = \rho \cdot H + P_0$ ここで P: 受圧面の圧力 ρ : 水の比重 H: 水深 P_0 : 大気圧	$P = \rho \cdot H$ ここで P: 受圧面の圧力 ρ : 水の比重 H: 水深
気圧の変化に対して	問題なし ベントチューブで補正済	要補正 大気圧を測定し、 補正を要する。	問題なし ベントチューブで補正済
気温が変化した場合	影響を受ける	問題なし	-30~60°Cの間で問題なし
水温が変化した場合	影響を受ける	影響を受ける	影響を受ける
微弱な信号伝送に対して	弱い	問題なし	問題なし
ケーブル抵抗に対して	影響を受けやすい	問題なし	問題なし
データ回収	容易	困難 その都度、水位計を引き上げるため設置条件や水深が一定しないことがある。	容易
電池交換	容易	困難 (同上)	容易
データ通信	モデムや衛星通信を用いたシステム構築可能	不可能	モデムや衛星通信を用いたシステム構築可能
耐雷性	弱い サージ対策を要する	強い	弱い アレスタとパリスの併用で対処済
データロガー収納箱、観測小屋	必要	不要 但し大気圧補正用には必要	不要
据付工事	必要	不要 但し大気圧補正用には必要	不要

図-3 各種水位計の性能比較

Fig. 3 Comparison of water level meters

3) 水位計を構成する材質の検討である。

3・2・1 システム構成

水圧式地下水位計は、水位計と地上に設置するデータロガーより構成されている。また、一部ではあるが、水位計にデータロガーと電池及びRS232Cを内蔵させた完全一体型も利用されている。ここでは、前者を分離型、後者を完全一体型と呼ぶことにするが、この両者間には図-3に示す長所短所が認められることから、両者の長所を抽出できるシステム構成とした。すなわち、水中に設置する水位計にデータロガー機能を内蔵させ、温度誤差を最小にした。次に、水位計を動作させるための電池とデータ回収のためのRS232Cポートは、観測井の頭部に設置する構造とした。この結果、周囲温度やノイズの影響を受けにくく、かつデータ回収や電池交換も容易になった。据付に際しても、特別な設備や工事を必要としない。その概念を図-4に示す。

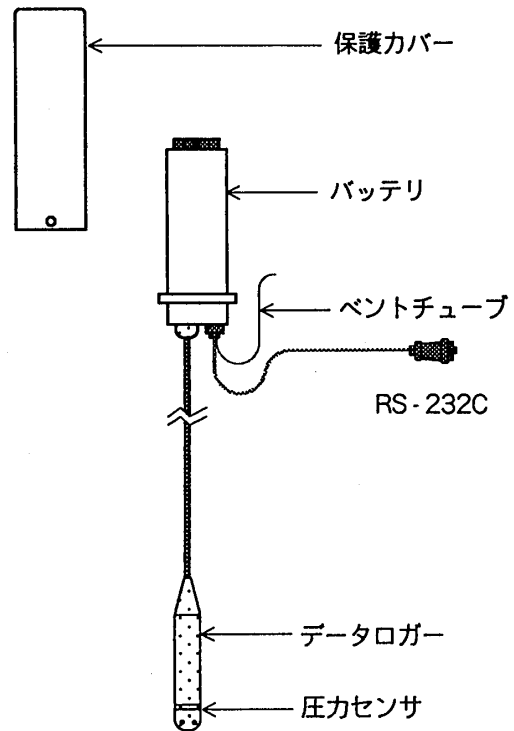


図-4 SDL水位計の構造概念
Fig. 4 Schematic of the SDL water level meter



写真-1 SDL水位計の外観
Photo 1 SDL water level meter

3・2・2 回路設計に関して

CPUを制御するための読み出し専用メモリとして、紫外線消去型ではなく、電気的に書込・消去が可能なEEPROMを採用したことで、適時パソコンやハンディターミナルを介して必要な情報を入力できるようにした。EEPROMの具体的な活用は次のとおりである。

1) 水位計を現場に据え付けるに際して、地表面からの

設置深度や基準海面からの高さを入力しておくことで、地表面からの水位（GL水位）や標高水位を表示可能にした。

2) 圧力センサ固有の誤差要因であるゼロオフセット、スパンエラー、非直線性を組立検査の段階でメモリに書込み、測定時に補正することで高精度を実現した。

	普及型	海水用	水位導電率一体型	高耐腐食型	低温温泉用	高温温泉用
外観・構造						
圧力センサの材質	チタン	チタン	チタン	セラミック	セラミック	セラミック
プローブの材質	SUS-316L	チタン	塩ビ	セラミック	セラミック	セラミック
ケーブル被覆材質	特殊ゴム	特殊ゴム	特殊ゴム	テフロン	テフロン	テフロン
測定項目	水位、電池電圧	水位、電池電圧	水位、導電率、温度	水位、電池電圧	水位、温度、電池電圧	水位、温度、電池電圧
プローブ外径	φ 25×280	φ 25×280	φ 34×460	φ 32×330	φ 32×330	φ 32×330
水位測定範囲		5m用(WL-05) 10m用(WL-10) 20m用(WL-20) 35m用(WL-35)		10m用(WL-10C) 20m用(WL-20C)	10m用(WL-10H) 20m用(WL-20H) 50m用(WL-50H) 100m用(WL-100H)	
導電率測定範囲	-	-	0.02~40mS/cm	-	-	-
水位測定精度	±0.2%FS			±0.3%FS		
圧力センサ温度ゼロドリフト	±0.015%FS/°C			±0.04%FS/°C		
A/D分解能	24ビット					
メモリ容量	128KB(10240ワード)		128KB(6550)	128KB(10240)	128KB(6550)	128KB(6550)
測定間隔	1分~10日(1分単位で設定可能)					
インターフェイス	RS-232C(9600~1200BPS)					
動作電圧	2.4~9V(6Vリチウム電池標準)					
プローブ動作温度(センサ温度補償)	-10~50°C	-10~50°C	-10~50°C	-10~50°C	-10~70°C	-10~120°C
電池部動作温度	-30~60°C	-30~60°C	-30~60°C	-30~60°C	-10~50°C	-10~50°C
特徴・用途	●一般(陸水)用	●総チタン製 ●陸水から海水	●陸水から海水 ●水位・導電率一体化	●陸水から海水 ●耐アルカリ、耐酸性 ●耐腐食性ガス	●耐アルカリ、耐酸性 ●耐腐食性ガス	●左に同じ ●120°C対応

図-5 SDL水位計のラインアップと仕様

Fig. 5 Varieties and specifications of the SDL water level meter

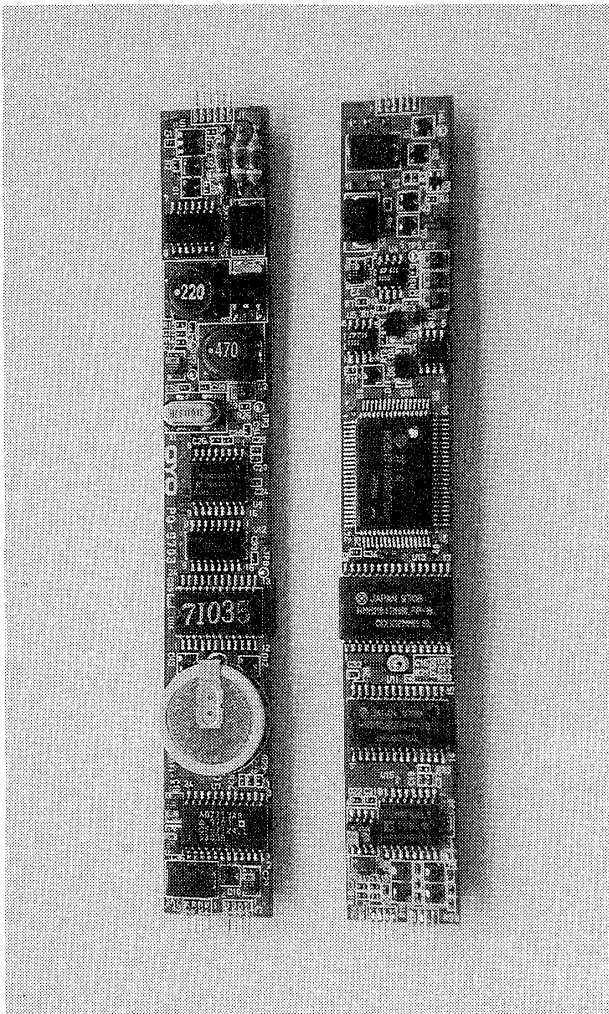


写真-2 ハイブリッドIC
Photo 2 Hybrid IC

3) プログラムのバージョンアップに際しても、据付済みの水位計を回収することなく、容易に対応できるようにした。

3・2・3 水位計の材質

多様な水環境に適用できるようにするために、材質の異なる3種の水位計を開発した。陸水を対象としたSUS316製、汽水や海水を対象としたチタン製、温泉や環境調査等、特に耐食性を要求されるセラミック製である。

開発課題に対する具体的な解決手段は上記のとおりであるが、SDL水位計はそのような考え方に基ずいて開発された小孔径用のデジタル水位計である。その性能緒言を図-3に示す。図-3には、先に述べた分離型と完全一体型についても併記した。同図から、システムの信頼性と現場据付に伴う作業性の両側面で、SDL水位計の優位性を確認できる。SDL水位計の外観を写真-1に示す。同写真の左上にあるのは、専用のハンディター

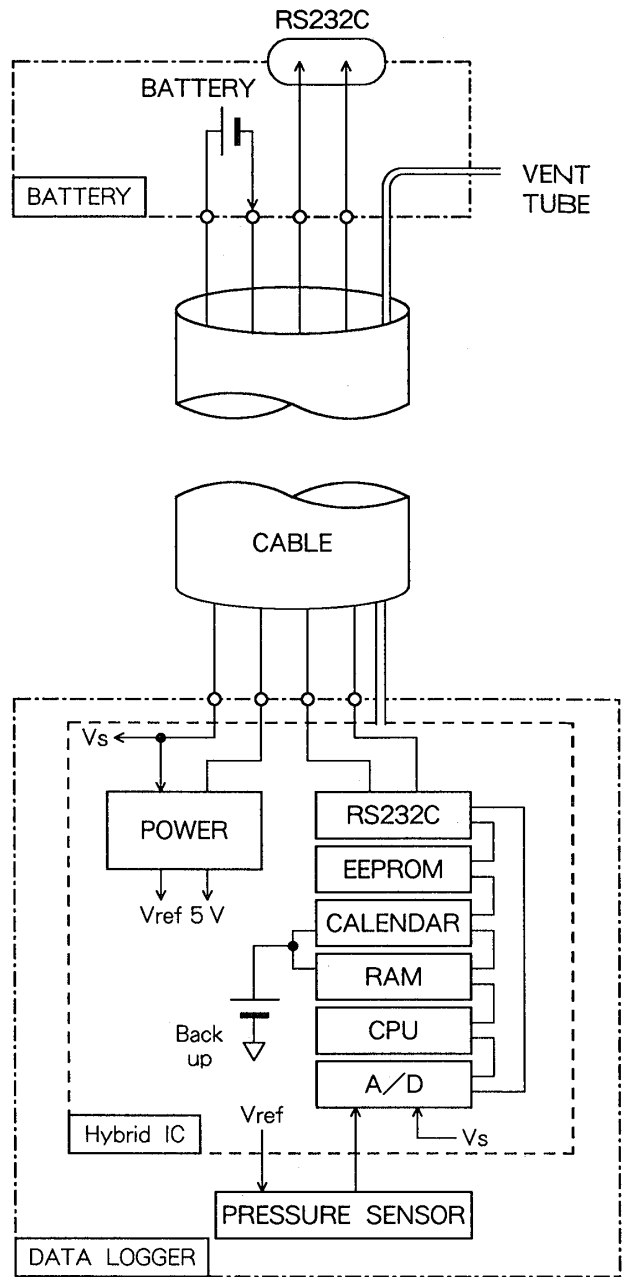


図-6 SDL水位計の回路構成

Fig. 6 Block diagram of the circuit in the SDL water level meter

ミナルである。

3・3 SDL水位計のラインアップとその仕様

開発したSDL水位計のラインアップとその仕様を図-5に要約する。

3・4 回路構成

ここでは、SDL水位計及び水位計と導電率計（電気伝導度計）の機能を一体化したSDL水位・導電率計について、回路構成上の考え方や特徴を述べる。

3・4・1 SDL水位計の回路構成

今回開発したSDL水位計の回路構成を図-6に示す。この水位計は、水中に設置される水位プローブ部と観測井の頭部に設けるバッテリーユニットより構成され、その双方はベントチューブを内蔵したケーブルで接続されている。

水位プローブにおいて、点線で囲んだデータロガー部を混成集積回路（ハイブリッドIC）化した。その外観を写真-2に示すが、ハイブリッドICの表裏面共に、表面実装部品を採用して、小型化（幅20×長さ145mm）・低消費電力化を図った。

図-6において、圧力センサの出力は、直接A/Dコンバータに接続している。通常であれば、A/Dコンバータの前段に増幅回路やフィルタ（積分回路）を設けるのが一般的であるが、ここでは先端技術であるプログラマブルアンプ内蔵型の24ビットデルタシグマA/Dコンバータを採用したことで、先の回路を省略すると共に、高性能化を図った。デルタシグマA/Dコンバータは、オーバーサンプリングとデジタルフィルタ処理によって、高分解能・高性能を実現できるが、ここでは10Hzの出力レート（A/D変換速度）で、図-7に示すデジタルフィルタ特性を内蔵した。同図から、50Hzや60Hzの商用周

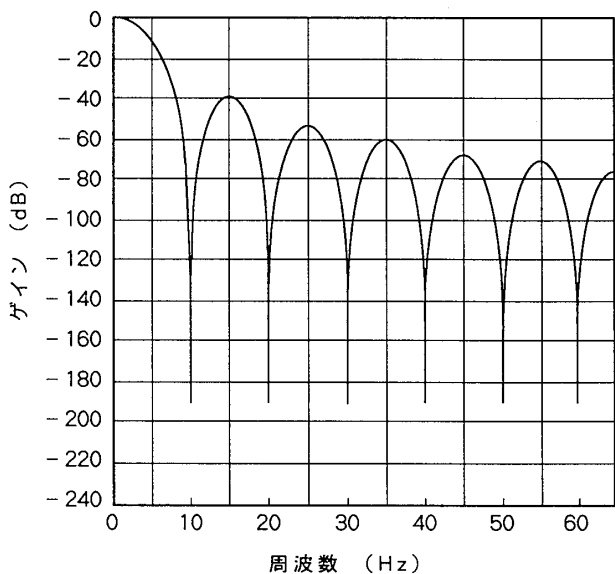


図-7 デジタルフィルタ特性
Fig. 7 Characteristics of digital filter

波数ノイズが仮に混入したとしても、それを10万分の1（100dB以上）以下に除去できることが明らかである。また、このA/Dコンバータは2成分の入力が可能であり、水位のみならず、測定時の電池電圧もメモリすることで電池の残容量把握やシステムチェックに役立つ。

次に、特徴的なことは、CPUを制御するための読み出し専用メモリとして、電氣的に消去・書込が可能なEEPROMを採用したことである。この結果、パソコンや専用のハンディターミナルを用いて、必要な情報を個々の水位計に書き込み可能にした。具体的な活用については、先に述べたとおりであるのでここでは省略する。次に、バッテリーユニットは、水位計を動作させるための電池とデータ回収のためのRS232Cから構成される。ここで使用できる電池は1.5Vの単2型×2個、または写真-3に示す専用のリチウム電池である。このリチウム電池は、単2型のリチウム電池を2個直列にした組電池で-30~60°Cの広い温度範囲に適用できる。本水位計においては、通常15秒の予熱を行った後、6回水位を測定し、その最大最小値を捨てた残り4データの平均値をメモリすることで信頼性を高めているが、リチウム電池を使用した場合、1時間に1回の測定で約3年間測定を継続できる。リチウム電池の仕様を表-1に、またこの電池を用いて常温で1分間隔で測定した場合の測定

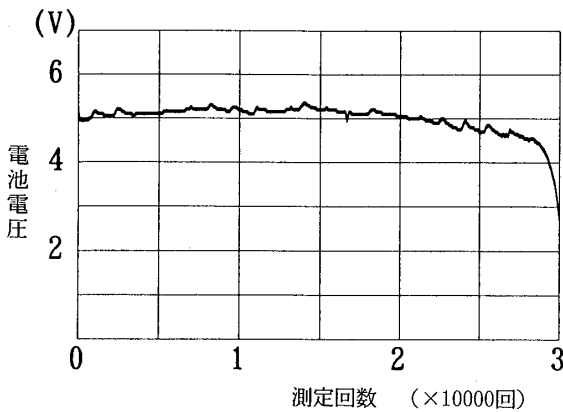


写真-3 リチウム電池
Photo 3 Lithium battery

表一 1 リチウム電池の仕様

Table 1 Specifications of the lithium battery

項目	6 Vリチウム電池	9 Vリチウム電池
公称電圧 (V)	6	9
公称容量 (mAh)	5,000	5,000
動作温度 (°C)	-30 ~ 60	-30 ~ 60
外径寸法 (mm)	φ27 × 101	φ27 × 152
重量 (g)	85	130



図一 8 電池の放電特性

Fig. 8 Discharge characteristics of the lithium battery

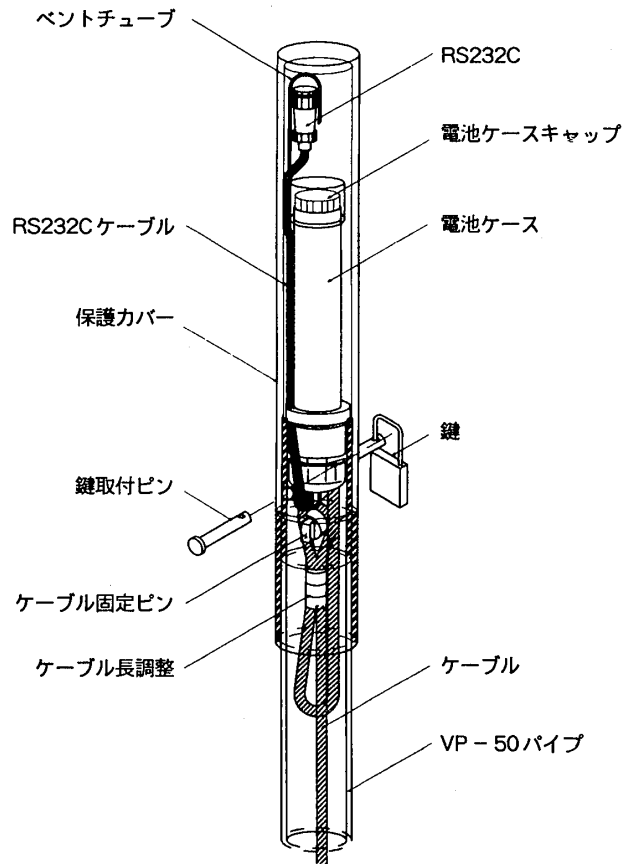
回数と放電電圧特性を図一 8 に示す。

3・4・2 SDL水位・導電率計

これは水位計と導電率計（電気伝導度計）および水温計の機能を一体化したモデルである。

水位の測定に関しては、先に述べたとおりであるので、ここでは説明を省く。導電率は、断面積 1 cm²、距離 1 cmの相対する電極間にある溶液の持つ電気抵抗率の逆数で定義されるが、その試験方法に関しては、日本工業規格JIS-K0102 ‘工業用水試験方法’ に規定されている。

その測定は、直流を用いると分極や電解の生じるので、通常は500~5000Hzのパルスで定電流もしくは定電圧で通電する。本装置では、1000Hzのパルスを定電圧通電し、その時の電流を通電波形に同期して整流（直流化）し、これをA/D変換して測定している。その断面積と長さから、溶液の抵抗率（比抵抗）を算出し、その逆数に電極係数を乗じて導電率を求めている。導電率は水温に依存し、その値は1°C水温が上昇すると約2.2%増加する。このため、一般には25°Cを基準にした導電率とし



図一 9 SDL水位計の現場据付

Fig. 9 Site installation

て扱われている。本装置では、水温も同時に測定し、次式を用いて25°Cにおける導電率として表現する。

$$K_{25} = K \{1 + 0.022 (25 - T)\}$$

ここで、K₂₅は25°Cにおける導電率

Tは測定時の水温 (°C)

KはT (°C) における導電率

4 地下水位の観測

4・1 SDL水位計の現場据付

観測井への設置は、図一 9 に示すようにケーシングパイプの頭部にバッテリーユニットを据付け、その上に保護カバーを付けて施錠する構造であるため、特別な設備や設置工事を必要としない。また、同図に示すように、余分なケーブルはビニールテープで処理し、ケーシングパー

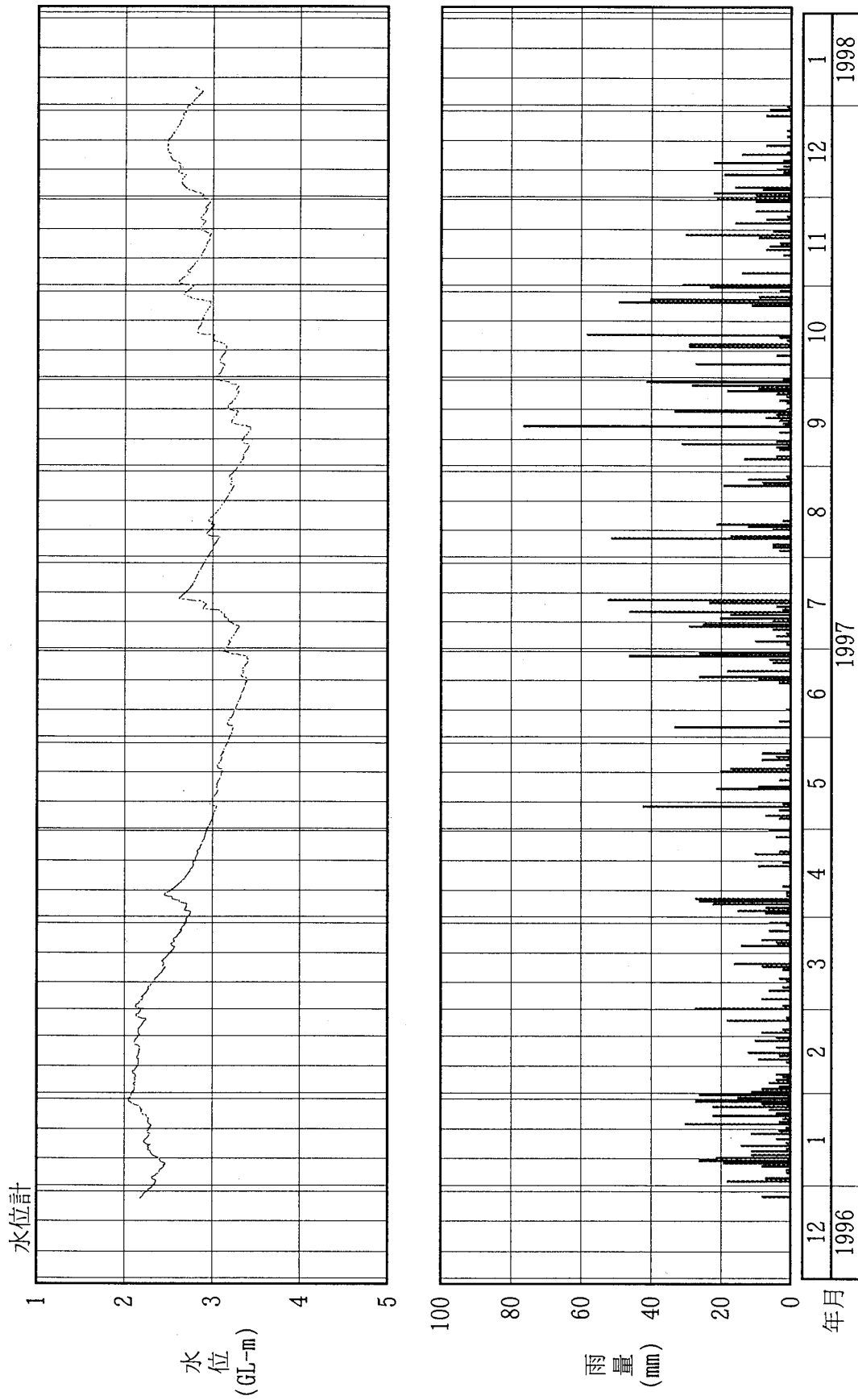


図-10 測定結果例

Fig. 10 Results of a ground water level measurement

プ内に収納しているのでネズミに噛まれることもない。

4・2 観測結果

SDL水位計を観測井に設置し、1年間に亘る水位の観測結果例を図-10に示す。同図の下段には、日雨量の観測結果を併記した。ここで使用した水位計の圧力レンジは1 Kgf/cm²で、地表面からの深度10m、水深7.8mに設置して4時間毎に1日6回測定した。データの回収は月1回の頻度で行ったが、この間電池交換はしていない。同図から、日雨量と地下水位の関係は明瞭ではないが、数日から10日間の実効雨量とは良い相関があると想定される。

5 あとがき

水位計は水位を測る単純なものではあるが、‘安定性・信頼性・操作性・経済性’を追求すると、工夫すべきことは意外と多い。

本報文では、地下水位計を新たに開発するに際して、現在抱えている問題を分析すると共に、どのような考え方・どのような手段を持ってこれを解決したか、具体的事例を含めて述べた。

参 考 文 献

- 新井 正 (1994年) : 水環境調査の基礎 古今書院 p73
~75.
- 地下水調査および観測指針 (案) 建設省河川局監修, (財)
国土開発技術研究センター編集 山海堂 p121
~123.
- 日本規格協会 : 日本工業規格 JIS・K0101工業用水試
験方法.
- CQ出版社 (1983年) : センサ・インターフェーシング
p105~108.

