温度補償型超音波式液面レベル計の開発

非会員 小 川 茂 樹 (NTT)

正 員 桑 野 博 喜 (NTT)

Development of a Temperature-Compensated Ultrasonic Liquid-Level Meter

Shigeki Ogawa, Non-member (NTT)

Hiroki Kuwano, Member (NTT)

Methods to remotely monitor and check underground fuel tanks are strongly needed from the viewpoint of environmental protection. This paper presents our temperature-compensated ultrasonic liquid-level meter. By connecting the meter to a telecommunications network, the liquid level in a remotely located tank can be continuously monitored. In our ultrasonic liquid-level meter, we use a reflection ring at the reference position to compensate for measurement error caused by changes of atmospheric temperature. The maximum measurement error is within ± 5 mm from -10°C to $+20^{\circ}\text{C}$ at a measurement distance of 2000 mm. With regard to long-range measurement accuracy, the maximum error has remained within ± 2 mm over 1.5 years at a measurement distance of 2200 mm.

In this paper, the structure of the meter, the reflection ring, the configuration of the detection circuit, the superposed signal of transmission and reception, and experimental results are shown.

キーワード：液面レベル計、温度補償型、超音波、地下タンク、遠隔監視

Keywords: liquid-level meter, temperature-compensated, ultrasonic, underground tank, monitoring

1. まえがき

防災、環境保全の観点から、監視が義務づけられている地下燃料タンクの効率的で確実な保守のために、高精度で、経済的な防爆構造の温度補償型超音波式液面レベル計を開発した。本レベル計は、電話回線を用いた遠隔監視が可能で、燃料の漏れを未然に防止したり、燃料の残量を常時モニタするのに極めて有効であり、既に NTT 関連の施設の全国520箇所に設置され、運用されている。このような液面レベル計は、本質安全防爆構造であるとともに、広い温度範囲に亘って、高い測定精度が要求され、さらに小型で安価であることが望ましい。

以上の条件を満足させるため、超音波導波管を用い、基準位置の反射波と液面からの反射波との反射時間比をとることによって、温度変動等によって生じる超音波伝送時間の誤差を自動的に補償する方式の液面レベル計を実用化した。(表1参照)

本稿では、本方式を実用化する上で不可欠な基準波の二次反射波を生じさせないための反射板の構造、実用的な反射板の取り付け方法、基準反射時間と液面反射時間の簡易な検出方法、および防爆上不可欠なツェナーバリアの数を減らすための信号伝送方法について述べる。

また、温度変動に対する性能を評価するために大型恒温室を用いて行った精度測定の実験結果、および一年半の長期間にわたる連続モニタ時の出力変動の結果を示す。

表1. 本液面レベル計の主な仕様

Table 1. Specifications of the liquid-level meter.

測定範囲	1000mm～3000mm
測定精度	$\pm 0.5\%$ 以下
分解能	± 1 mm
外形寸法	検出部： $\phi 60\text{mm} \times 100\text{mm}$ 管： $\phi 25.4\text{mm} \times 3000\text{mm}$ 制御部： $48\text{mm} \times 300\text{mm} \times 88\text{mm}$
使用温度範囲	$-10^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$
防爆構造	本質安全防爆構造 (Exia)

図1. 測定原理

Fig. 1. Measurement principle.

2. 反射時間比較方式の原理と問題点

比較的安価で、小形化が期待できるものとして、超音波の反射を利用した液面レベル計があるが、音速が環境条件で変化するため、その補正が必要である。温度等を測定して補正するものは、高価で大型になり、要求条件を満たすのは難しい。そこで、音速の変化に左右されない反射時間比較方式を用いた。測定の原理は、以下のとおりである。図1に示すように、超音波素子から一定距離 d だけ隔てた管内部の断面の一部に、位置の基準となる反射板を設置する。超音波が反射板で反射されて戻ってくるまでの時間を $T1$ 、超音波が液面で反射されて戻ってくるまでの時間を $T2$ 、音速を C とすると、液面までの距離 X は、

$$2d = CT1, \quad 2X = CT2 \quad \text{の関係より}$$

$$X = d (T2 / T1)$$

となり、 d は既知であるから、 $T1$ と $T2$ の比を測定することにより、 X が求まる。上式に音速 C が含まれていないから、気温や気圧等の環境条件に影響されない。

反射時間比較方式の課題は、基準反射板からの二次反射をいかにしてなくすかということである。すなわち、超音波は超音波素子の表面から垂直に送信され、管内をほぼ平面波として伝播する。このため、図1に示すように、反射板が中心部を通る棒状または板状のものであると、反射板で反射して超音波素子に戻ってきた基準反射波は、超音波素子の表面で反射して再び反射板にあたり、基準反射波の二次反射波が発生する。二次反射波は液面反射波と区別がつかないため、これを液面反射波として検出すると誤動作が生ずる。

また、送信した超音波の一部が反射板に遮られるため、液面に達する超音波が減少し、液面反射波の強度が低下するため、測定可能な距離が短くなるという問題も生じる。反射板の面積を小さくすれば、二次反射波の強度を小さくすることはできるが、基準反射波の強度も小さくなるため基準反射波の検出が不安定となり、距離の検出精度が著しく劣化する。

また、製造上の問題点としては、長い管の中間位置の内部に微小な反射板を設定することは、実構造として専用工具を使用しても、作業に困難を伴う。このほか、完成した液面レベル計は長尺であるが故に、精密測定器としての保管や運搬上の取扱が面倒である。

3. 液面レベル計の構造

2項で述べた問題点の解決を図るため、図2に示すような液面レベル計¹⁾の構造を考案した。

すなわち、超音波素子を、管の一端に挿入した超音波ホーンで管の断面の中心に保持し、超音波素子から一定の距離を隔てた管内部の壁に接して一個のリング形状の反射板を設けた構造である。微小なリング形状の反射板で反射した超音波は管壁に沿って進み、超音波ホーンに導かれて超音波素子表面の中心から外れた位置に達するため、超音波

図2. 液面レベル計の構造

Fig. 2. Structure of the developed liquid-level meter.

図3. 反射板の構造

Fig. 3. Structure of the reflection board.

表2. 超音波素子の仕様

Table 2. Specifications of the ultrasonic sensor.

特 長	防滴形
公称周波数	40KHz
感 度	-74dB 以上
感度帯域幅	2KHz 以上 (-80dB)
音 圧	106dB 以上
音圧帯域幅	1.5KHz 以上 (100dB)
静 電 容 量	2200pF
外形寸法図	

素子の表面で再び反射する超音波の進行方向は、リング形状の反射板からは外れた方向となる。したがって、二次反射波はほとんど生じない。また、リング形状の反射板は、管壁からわずかに出っ張る程度 (0.5mm) であり、送信した超音波はほとんど遮られることなく液面に達するので、

液面反射波の強度が小さくなって、検出可能な距離が短くなるという問題は生じない。

一方、製造上の問題点に対しては、図3に示すように、反射板を設けるべき位置で管を切断し、この切断部を反射板が内部に構成されている継ぎ手で接続する構造⁽²⁾とした。すなわち、内部に雌ねじとリング状反射突起を一体成形加工して、継ぎ手を製作し、この雌ねじと管の切断部に形成された雄ねじとを勘合させて管を接続する。

なお、ここで用いている超音波素子は表2に示すような特性を持つ圧電セラミックの素子であり、金属ケースで密封された防滴構造のものである。超音波素子と超音波ホーンの間には、Oリングを設け、超音波素子の振動が直接ホーンに伝わって共振しないようにしている。また、測定範囲よりも短い位置に液面レベルが変化したときに内部の空気が出入りするための通気孔が設けられている。さらに、検出部（機構部）から制御部までの信号線が長くなると、その容量などの影響で波形が鈍ったり、信号レベルが低下したりするので、検出部に発振回路、増幅回路を内蔵した。

4. 検出回路構成

<4.1>検出回路の動作

図4に検出回路の動作波形を、図5に検出回路の構成を示す。低周波発振器は、図4(a)に示すように、パルス幅が ΔT で周期が T のパルス状の送信信号を発生する。高周波発振器は ΔT の間だけ、超音波素子の共振周波数で発振し、図4(b)に示す電圧が超音波素子の端子間に加わる。従って、 ΔT の間、超音波を送信し、その後は受信状態となる。このような送信、受信は T 秒の周期で繰り返される。受信時には図4(c)に示すような受信信号が超音波素子の端子に発生する。この受信信号で最初の振動波形は超音波素子の送信時の残留振動によるもの（残留波形）である。また、2番目の振動波形は基準反射波によるもの（基準波波形）であり、その最初の振動までの時間が T_1 である。同様に、3番目の振動波形は液面反射波によるもの（液面波波形）であり、その最初の振動までの時間が T_2 である。次に受信信号を単電源の増幅器で増幅するが、0V近傍では十分な増幅度が得られないため、バイアスをかけた状態で増幅し、微分回路でバイアス分をカットすると、図4(d)のような信号が得られる。この信号をダイオードを介して送信信号と加算すると、図4(e)に示すような重畳信号が得られる。この重畳信号を近似微分すると、図4(f)のような信号が得られ、これをコンパレータで基準電圧と比較すると、その出力は図4(g)となる。次に単安定マルチで、図4(h), (i)に示すようなパルス幅が t_1 , t_2 のパルスを作り、これらと、コンパレータの出力をそれぞれNORゲートに入れると、それぞれ、図4(j), (k)の信号となる。ここで、 t_1 は、その立下がり残留波形と基準波波形との中間になるように設定しておく、図4(j)の信号の最初の立ち上がりまでの時間が T_1 となるので、RSフリップフロップを送信信号の立ち上がりでセットした後、

図4. 検出回路の動作波形

Fig. 4. Waveform of the detection circuit.

図4(j)の信号でリセットすれば、図4(l)に示すようなパルス幅が T_1 の信号が得られる。同様に、 t_2 は、その立下がり残留波形の少し後ろになるように設定しておく、図4(k)の信号の最初の立ち上がりまでの時間が T_2 となるので、この信号でRSフリップフロップをリセットすれば、図4(m)に示すようなパルス幅が T_2 の信号が得られる。パルス幅 T_1 , T_2 に比例した電圧を得るために、RCローパスフィルタを用いて平滑化する。RCの時定数を小さくすると応答性はよいが、リップルが大きくなるので、両者の兼ね合いで適切な値を選ぶ。一例として、時定数は0.05~0.1に設定している。送信の繰り返し周期は T であるので、平滑化した信号のリップルは $1/T$ (Hz)の周波数成分をもつ。このため、 $1/T$ (Hz)のノッチフィルタ

図5. 検出回路の構成
Fig. 5. Configuration of the detection circuit.

を用いて、リップルを除去している。なお、送信の周期 T は、測定範囲における液面反射時間を考慮して決めるが、実際には液面からの二次反射波の影響があるので、必要な周期の2倍程度に設定している。但し、あまり大きくし過ぎると、平滑化された信号のリップルが大きくなる。

以上のようにして求めた $T1$ 、 $T2$ の値を除算器に入力すると、 $T2/T1$ の値が求まる。なお、反射波が発生してからそれを検出するまでに、1波長分程度の遅れが生ずる。このため、 $T1$ 、 $T2$ の値は実際よりも長くなる。これを補正するために、遅延回路を用いて、遅れ時間 $\Delta t1$ 、 $\Delta t2$ の分だけ、RS フリップフロップの set 時間も遅らせる。

<4.2>送・受信信号重畳方式

防爆上の規定により、危険場所に設置する検出部と非危険場所に設置する制御部の間には、ツェナーバリアを挿入することが必要であるが、ツェナーバリアの数を減らし、コストを低減させるには、信号線の本数を極力、減らさねばならない。通常、信号線は電源、GND (グラウンド) の他に、送信信号と受信信号の4本が必要であるが、上記の目的のため、送信信号と受信信号を多重化し、1本の線で伝送する方式を構成した。図6に送・受信信号重畳方式を示す。低周波発振器からのパルスは送信時間と送信周期を規定する送信信号である。検出部で得られる受信信号は、ダイオードを介してこの送信信号と重畳される。ここで、受信信号の最大値が送信信号の最大値よりも小さくなるように設定し、それぞれの最大値の中間の値を持つ基準電圧 E_{ref} と、この重畳信号をコンパレータで比較すると、検出部にもとの送信信号が再生できる。一方、制御部では、重畳信号のままで基準反射時間 $T1$ と液面反射時間 $T2$ を検出できるので、特に送信信号と受信信号を分離する必要はない。

5. 実験結果

図6. 送・受信信号重畳方式
Fig. 6. Superposed signal of transmission and reception.

図7は、外気温度をパラメータとして、液面までの距離を変えて、出力の誤差を測定したものである。具体的には、検出部、超音波導波管、および制御部のすべてを大型恒温室に入れ、内部の温度を $+40^{\circ}\text{C}$ 、 $+20^{\circ}\text{C}$ 、 -13°C 、 -22°C に設定して測定した。また、超音波導波管内に反射板を挿入し、その位置を変えることにより、等価的に液面までの距離を変化させた。

測定の結果、 $+20^{\circ}\text{C}$ では、 $\pm 1\text{mm}$ 以内の精度が得られた。また、 $-10^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$ の温度範囲では、 $\pm 5\text{mm}$ (0.5%) 以内の精度が確保されていることを確認した。なお、 -22°C で誤差が大きくなっている原因は、検出回路の制御部で $T2/T1$ の値を求める動作がすべて、アナログ的に行われており、アンプや除算器の温度ドリフト等の影響を受けているためである。

図8は、制御部のみを恒温室から出して $+15^{\circ}\text{C}$ に保ち、検出部と超音波導波管の外気温度を、 -10°C と -20°C に設定して、誤差を測定したものである。この結果、回路の温度ドリフトの影響が除かれており、機構部では、温度に依存しない測定がなされていることがわかる。

図9は、室温において、液面までの距離を2200mmに設定し、1年半に渡って、連続的に運用し、長期的な出力の変動を測定したものである。この結果、全体では $\pm 2\text{mm}$ 程度のばらつきはあるものの、測定開始時の値が保たれていることがわかる。

図10に開発した液面レベル計の外観を示す。

6. むすび

地下燃料タンクの油量の遠隔監視を目的として、超音波式の液面レベル計を開発した。基準位置からの反射時間と液面からの反射時間の比をとる方式を採用し、二次反射波の影響を受けず、また基準反射板の設置が容易な構造を考案した。また、防爆として必要なツェナーバリアの数を減らすため送信信号と受信信号を重畳させる方式を考案した。外気の温度をパラメータとした実験の結果、温度に影響されない高精度な測定が確認された。測定精度は、 $-10^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$ の範囲では、 $\pm 0.5\%$ 以内、分解能は $\pm 1\text{mm}$ 、また、長期的な変動も $\pm 2\text{mm}$ （測定距離2200mm）以内であった。

（平成14年2月6日受付、平成14年5月13日再受付）

図7. 測定精度(温度パラメータ)

Fig. 7. Measurement accuracy with atmospheric temperature as a parameter.

図8. 測定精度(制御部が $+15^{\circ}\text{C}$ の場合)

Fig. 8. Measurement accuracy when the temperature of controller is $+15^{\circ}\text{C}$.

図9. 測定精度(長期的変動)

Fig. 9. Long-range measurement accuracy.

図10. 開発した液面レベル計

Fig. 10. Outside view of the developed liquid-level meter.

文献

- (1) 小川茂樹・桑野博喜:「超音波式液面レベル計」、特許番号第2962535号
- (2) 小川茂樹:「超音波式液面レベル計の超音波導波管」、特許番号第3135193号

小川 茂樹

(非会員)1975年 電気通信大学電子工学科卒業。同年、日本電信電話公社(現NTT)電気通信研究所入所。主として、アクチュエータの駆動制御、変位検出法の研究を経て、環境センシングシステムの研究実用化に従事。現在、NTT環境エネルギー研究所主任研究員。電子情報通信学会、精密工学会、計測自動制御学会の会員。

桑野 博喜

(会員)1977年 東北大学大学院機械工学科第二専攻修士課程終了。同年、日本電信電話公社(現NTT)電気通信研究所入所。工博。主として、集束イオンビーム、高速原子線などを用いた微細加工、薄膜形成、センシングシステム、マイクロマシン、医療および環境情報流通ネットワークの研究開発に従事。現在、NTTサイバーソリューション研究所担当部長。電子情報通信学会、IEEEの会員。