

光伝送水晶式水位計の開発

Development of a Crystal-oscillator Type Water Level Meter with Optical Fibers to Secure Data Transmission and Power Supply

鈴木 高男^{*1} 後藤 剛芳^{*2} 西 真志^{*2}
Takao Suzuki Takeyoshi Gotou Masashi Nishi

近年の異常気象に対する防災の観点から、ダム、河川における水位測定の重要度は高くなってきている。ダム、河川向け水位計の発信器（リモートセンサ部）と局舎は、1 km 以上離れる場合もあり、メタルラインへの落雷や外部ノイズの影響が問題となっていた。このような過酷な運用環境下でも高信頼な通信と電力供給を実現するため、メタルラインを排除し光ファイバのみを使った光伝送水晶式の水位計を開発した。本稿では、新方式の水位計の特長と構造について紹介する。

Measuring water levels at dams and rivers is becoming crucial for preventing disasters caused by recent abnormal weather. Some transmitters are installed more than 1 km away from an observation station, and metal communication lines are vulnerable to lightning and noise. Yokogawa has developed a crystal-oscillator type water level meter only with optical fibers, eliminating copper wiring, to secure data transmission and power supply even under severe operating conditions. This paper introduces the structure and features of this new type of water level meter.

1. はじめに

横河電子機器では、ダムや河川に設置する水位計 WW4455/56 水晶式水位計を一昨年度リリースした。WW4455/56 は、インテリジェントタイプのリモートセンサを搭載した高精度かつ高安定な第 2 世代の水位計で、国土交通省電気通信仕様第 54 号に準拠した BCD (Binary-Coded Decimal) 出力機能や USB メモリ保存機能を標準装備し、オプションで内蔵プリンタを搭載できる点などが好評である。

しかしながら WW4455/56 では、発信器（リモートセンサ部）から変換器（レコーダ）まで敷設されるメタルケーブルの影響により、近年の異常気象で多発する落雷の影響を受けやすいという問題があった。

以上の様な背景から、機器間の接続を、従来のメタルケーブルから、耐雷性の高い光ファイバに置き換えることが求められていた。

今回の開発では、既存製品 WW4455/56 をベースに、横河電機と横河電子機器でお互いの強みを生かして協業することで、WW4501/02 光伝送水晶式水位計（図 1、表 1）のスピーディな開発に成功した。



図 1 WW4501 発信器 と WW4502 変換器

表 1 WW4501 発信器と WW4502 変換器の主な仕様

WW4501 発信器	
検出方式	水晶振動子による水圧検出方式
測定範囲	0m ~ 10m, 0m ~ 20m 0m ~ 50m, 0m ~ 100m
精度	フルスケールの ±0.05% 以内 または ±0.02% 以内
WW4502 変換器	
適合発信器	WW4501 形水晶式水位計発信器
表示内容	日付, 時刻, 現在水位, 記録水位, 水位変化傾向, 機器状態
水位処理	瞬間/移動平均/区間平均 (ただし, 平均処理は発信器側で実施) 大気圧補正, 密度補正, 重力加速補正およびゼロ点補正
外部出力	BCD 出力, アナログ出力, プリンタ 出力
データ回収	USB2.0 対応メモリ
光源波長	1.48um(給電), 1.55um(通信)
光出力パワー	200mW(給電), 2mW(通信)
レーザークラス	3B(給電), 1M(通信)

*1 横河電子機器株式会社 秦野事業所 第 2 技術部

*2 MK 本部 イノベーションセンター インキュベーション部

2. 全体構成

光伝送水晶式水位計は、水位測定箇所の水中に設置された水位測定とデータ送信を行う発信器、陸上の観測舎内に設置されたデータ処理/表示と外部の通信を行う変換器、及び発信器と変換器間を接続する光ファイバケーブルによって構成される(図2)。

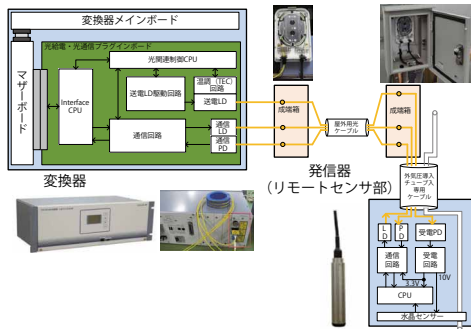


図2 全体構成図

光伝送水晶式水位計の開発においては、既存製品 WW4455/56 をベースとして、変更箇所を給電方法および、4-20 mA 信号の光通信化に限定することで短期間の開発を実現した。また、外気圧導入チューブ入りの専用ケーブルは、メタル線を完全に排除し光ファイバ化した。

3. 発信器

発信器は、水位測定箇所の水中に設置され、水位の測定と、そこで得られた情報等を変換器と通信する機能を有した、図3に示す構成となっている。

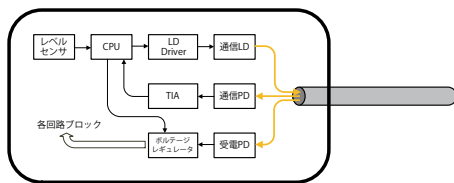


図3 発信器構成図

今回の製品設計に際しては、電源部を光給電化し、4-20 mA 回路部(銅線接続)を、光通信化する設計変更を行った。

センサ部、信号処理を行う CPU 部については既存製品のリソースを活用し、開発期間の短縮を図った。

3.1 受電部

受電部は、給電光の光-電変換用フォトダイオード(PD)、所定の電圧に制御するボルテージレギュレータによって構成される。ボルテージレギュレータは、2.5 V ~ 4 V の入力電圧に対し、水圧センサ用の 10 V と、電気回路用の 3.3 V の 2 出力を実現するため、昇圧コンバータ

と昇降圧コンバータをそれぞれに設けている。受電 PD は図4に示すように、最大出力電圧の約 70% 付近で最大変換効率を示す。給電系の効率を高めるためこのポイントに PD の出力電圧を制御する MPPC (Maximum Power Point Control) 機能を使った。また、起動時の突入電流、PD の高効率領域での使用によるピーク電流低減として、以下の対策を加えた。

- 1) ソフトスタート
- 2) DCDC コンバータの順次起動
- 3) MPPC

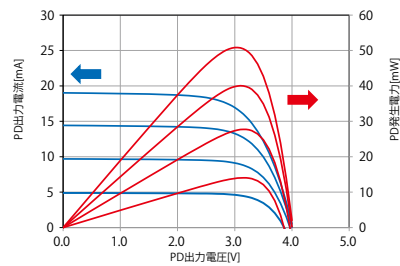


図4 フォトダイオードの特性例

3.2 通信部

WW4455 から採用された発信器では、水位測定値情報を変換器へ送信するだけでなく、設定情報、アラーム等を相互に通信するため、WW4501 においても光通信は双方向としている。LD (Laser Diode) の消費電流は発光時には数十 mA 程度が必要であり、光給電能力に対して無視できない大きさの電流値となっている。そこで、発光時間低減のため、低デューティ比の RZ (Return to Zero) 変調をソフトウェアで実現し、低電力化に貢献している。

4. 変換器

変換器は、発信器で得られた水位情報を受信し、記録するレコーダとしての機能と、上位システムとの情報の受け渡し機能を有するものである(図5)。

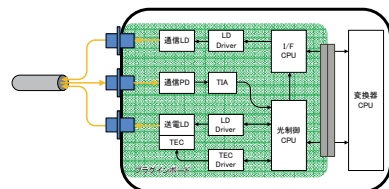


図5 変換器構成図

また開発のベースとした既存の変換器は、各種センサを取り換えて使用できる自由度の高いハードウェア構成であり、入出力部の構成がプラグインボード方式となっている。今回の光伝送水晶式水位計の開発では、既存製品の

晶式水位入力用プラグインボードを踏襲することで、開発期間を短縮した。構成は送電部と、通信部に大別され、前者では光給電用の高出力 LD とその駆動回路を新たに追加して既存のメタル線による電力供給回路を置き換え、後者では E/O (LD Driver)、O/E (TIA) 変換を既存の通信部分に追加する設計とした。また、追加した光給電部と光通信部の制御を行うため、新たに光制御用に専用の CPU を追加した。

4.1 送電部

送電部は、高出力 LD と、LD を発光させるための駆動回路と、LD を冷却するための温調回路によって構成した。

LD の駆動には LD の光出力パワーを一定に保つ APC (Auto Power Control) 回路を使用し、光給電パワーを安定化している。

また、LD の信頼性を保つために、モジュールに内蔵されている TEC (ThermoElectric Cooler) を動作させて LD を冷却し、温度を一定に制御している。

LD の出力パワーは、発信器内部で消費する電力によって決まり、今回の発信器では 200mW の出力で十分であると判断した。

レーザーを使用する製品は、JIS 等で安全基準が規定されており、今回使用した 200 mW の LD はクラス 3B に分類され、各種の安全対策を施すことが推奨されている。

光伝送水晶式水位計では上記したクラス 3B レーザーの安全基準に適合するため、各種安全機構を搭載した。

4.2 通信部

通信部においては、既存の水晶式水位計の通信フォーマットを継承し、従来の電気信号をそのまま光信号に変換して通信を行っている。

ただし、発信器の通信部においてレーザーの消費電力を抑えるために光信号を RZ に変調しているため、新規追加した CPU において NRZ (Non Return to Zero) 信号への復調 (低デューティ化されたパルスの伸長) を行い、既存の通信部へ接続している。

4.3 安全機構

光伝送水晶式水位計では高出力の LD を使用したことにより、各種レーザー安全の基準に対応することが望まれたため、本製品において必要と判断した以下の項目について対策を行っている。

- 1) 放出口に不意の光放出を避けるシャッター
- 2) キー SW によるレーザーの停止機構
- 3) 放出口とレーザークラスの表示
- 4) レーザー動作時の警告表示
- 5) 異常時のレーザー放出自動停止機構

異常時のレーザー放出自動停止機構においては、ファイバ断線時や、レーザー発光中の不意なコネクタ着脱が

発生した場合に対応するため、通信信号を使用した断線検知を行うことで、異常発生時にレーザーの出力を強制的に停止させる機能を有している。

4.4 ソフトウェアプラットフォーム化

光関連部を制御するために追加した CPU には、既存製品の WW4456 標準変換器で使用しているマイコンと同じものを採用し、プラグインボード用ソフトウェアの雛形となる標準プログラムの適応を可能とした。

この標準プログラムは、ボード間通信や設定値の冗長化などの共通機能を標準化しており、各プラグインボードの開発期間の短縮とソフトウェア品質の向上に寄与する (図 6)。

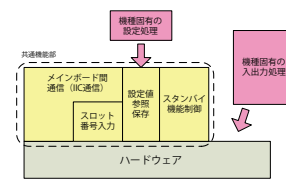


図 6 標準プログラムの共通機能部

また、水位測定などの既存機能と、光制御部などの新規追加機能とを個々のマイコンに分離することにより、既存機能のソフトウェアリソースの流用化を図り、新規機能の追加に伴う既存機能への影響を排除した (図 7)。

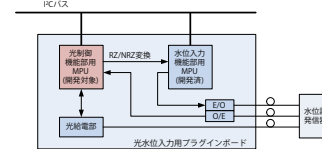


図 7 光水位入力用プラグインボードの MPU 機能分離

本設計方針により、新規機能のプログラム開発にリソースを集中させ、品質を維持した形で開発期間の短縮を実現した。

5. 専用ケーブル

発信器は水位測定のため水中に設置されることから、発信器内部を大気圧に開放し、外気圧の影響による測定誤差を補正する必要がある。このため、専用ケーブルには光ファイバケーブル以外に外気圧を導入するチューブを内蔵する構成としている (図 8)。

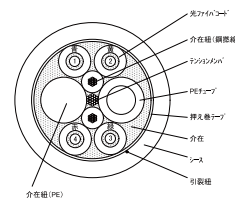


図 8 専用ケーブル断面構造

従来のメタルケーブルと異なりシールドが無くなることで引張破断強度が下がり、テンションメンバが必要となるが、真円を保つ目的の介在紐に鋼撚線を採用することによって従来と同じ強度を維持することができた。

また、ケーブル外形を従来の WW4455 で使用しているものと同じにするように、介在物やシース厚を調整しながら真円に近づけるよう設計することで、フランジ部の共通化による横河電子機器における開発工数の短縮や部品の共通化を可能とした。

6. 機構設計

発信器サイズは現場での設置性に大きく影響することから、小型化が強く望まれている。光受電部の内製化、ファイバケーブル余長処理の最適化によって、光給電化によるサイズ増を最小限にとどめ、第1世代(WW4455の先代機種)の発信器より小型化を実現した。

余長処理に関しては、光ファイバの最小曲げ半径が、断線(ファイバ破断)に対する信頼性に影響するが、使用条件に左右されるため個別に判断する必要がある。累積破断確率 F は式 (1)⁽¹⁾ で算出され、

$$F = 1 - (1 - F_1)(1 - F_2)$$

$$= 1 - \exp\left\{-\frac{C_{b1}L}{L_0} \left[\left(\frac{\sigma_a^n t_a + \sigma_p^n t_p}{\beta_1} \right)^{\frac{m_1}{n_1}} - \left(\frac{\sigma_p^n t_p}{\beta_1} \right)^{\frac{m_1}{n_1}} \right] - \frac{L}{L_s} \left[\left(\frac{\sigma_a^n t_a}{\beta_s} \right)^{\frac{m_2}{n_2}} \right] \right\}$$

$$\sigma_a = E \frac{d}{2R} \left(1 + \frac{9}{4} \cdot \frac{d}{2R} \right)$$

・・・(1)

20年後の累積破断確率を算出したところ、 1.49×10^{-6} という結果となり、破断の信頼性としては十分な結果が得られた(図9)。

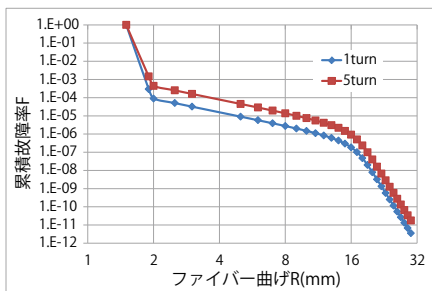


図9 ファイバ曲げと累積破断確率の関係

実際の発信器光給電機構部分の光ファイバ取り回しや部品の配置は図10に示すとおりである。

また、基板交換等のメンテナンスが容易となるようすべての光接続部をコネクタ化した。ただし、製造時や設置時の誤接続を防止するため、すべて異なる種類のコネクタを使用している。

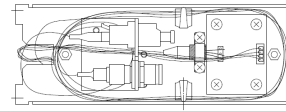


図10 光給電機構部分の光ファイバ取り回しと部品配置

7. 共同開発

横河電機と横河電子機器でお互いの強みを生かす共同開発をすることで以下の効果があった。

1) 品質確保

横河電機が光給電技術や光通信技術の要素研究を行ったことで、横河電子機器はそれらの技術をそのまま導入することで新規機能にも関わらず、短期間で製品化を実現できた。

また横河電子機器では既存製品で採用していた標準変換器や標準プログラム、機構部品の共通化により、新規設計する箇所を最小限に留めることができた。

2) リードタイム短縮

本開発に必要な要素研究を横河電機で行う時点で、横河電子機器で在庫している全社汎用部品のリストを事前に横河電機に開示することで、選定部品の調達リードタイムの短縮と、横河電子機器での新規部品棚の増加を抑制することが可能となった。

3) 習熟作業の先行

横河電機で保有している光関連の設備を横河電子機器が借用することで、融着などの熟練作業を先行して習熟することができ、横河電子機器でも同様の設備を購入することで試作製作時に短時間で作業できるようにした。

8. おわりに

本製品は、お客様の要求に応えるために、極めて短期間で開発しリリースする必要があった。

前述のとおり、横河電機と横河電子機器との共同開発においては、お互いの強みを生かすことにより、横河電機は獲得した要素技術の採用事例を社内に水平展開できるようになり、横河電子機器は新製品の早期リリースが可能となった。

今後も部署間や会社間の垣根を超えたスピード感のある製品開発をすることで、顧客満足度の高い製品をタイムリーに提供していきたい。

また、こうした組織間の垣根を超えた取り組みが、YOKOGAWA グループ内で活発に展開されることで、更なるシナジー効果が生まれることを期待したい。

参考文献

- (1) 立蔵正男, 河井昌道, “厳しい環境条件での光ファイバ曲がり部信頼性の推定法”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 78, No. 794, 2012, p. 1485-1489