

耐水・耐薬品性を向上させた環境強化型近接センサーの開発

Development of an Environment-Resistant Proximity Sensor with Improved Water and Chemical Resistance

上田義人 Y. UEDA

We developed a proximity sensor that can withstand harsh environments exposed to water and cleaning agents. Based on the expected usage conditions, we organized test requirements—such as water resistance and chemical resistance—and defined the criteria for acceptable performance. After clarifying the necessary specifications, we proceeded step-by-step through structural component and resin material selection, various analyses, and functional evaluations. As a result, we established specifications that ensure stable operation even under severe conditions and successfully commercialized the product. Moving forward, we will continue designing in accordance with environmental requirements, aiming to expand applications—including compliance with IP69K—and further improve reliability.

Key Words: proximity sensor, chemical resistance, harsh environments, polybutylene terephthalate

1. はじめに

洗浄剤や腐食性薬液に常時さらされる環境では、近接センサーの劣化や故障が生じやすく、その結果、生産停止や品質悪化のリスクが高まる。本研究では、食品・化学プラントや半導体製造ラインなどに代表される水・薬品曝露環境に共通する課題を対象として、近接センサーの耐環境性向上に取り組んだ。

従来、近接センサーの耐薬品性の向上には、金属ケースへのふっ素コーティングや、オールふっ素樹脂ケースが用いられてきた。しかし、これらの従来手法には以下の課題がある。第1に、ふっ素コーティングは物理的摩耗に弱く、ピンホールからの薬液浸透による内部腐食を完全には防止できない。第2に、樹脂ケースは材料自体の耐薬品性には優れるが、ケーブル引き出し部や接合部

を完全に密封できない。特に洗浄工程で急激な温度変化が生じると充填樹脂材とケース樹脂材の線膨張係数の差によって接着界面にクラックや隙間が生じ、薬液が内部へ浸入する。

本報では、これらの課題のうち、後者の密封構造に起因する薬液浸入に着目し、環境強化型近接センサー（図1）の開発内容および特長について述べる。

2. 従来技術の課題

2.1 オールふっ素樹脂ケースの課題

オールふっ素樹脂であるポリテトラフルオロエチレン（PTFE）やパーフルオロアルコキシ（PFA）などで作製されたケースは、材料単体としての耐薬品性は高い。しかし、内部の電子回路を保護するには強固な密閉構造が求められ、材料の難接着性が課題となる。ふっ素樹脂は表面自由エネルギーが低い¹⁾ため、接着剤が材料になじみにくく、一般的なエポキシ樹脂やウレタン樹脂などの充填材および接着剤との密着性が低い。そのため、長期間の薬液曝露や急激な温度変化によって接着界面で剥離が生じやすく、薬液浸入の起点となる。本メカニズムについては次節で述べる。



図1 環境強化型近接センサー
Environment-resistant proximity sensors

2.2 呼吸作用の発生と従来の対応

食品・化学プラントや半導体製造の洗浄工程では急激な温度変化が生じやすく、外装の樹脂ケースと内部の充填材・ケーブル被覆材とのシール部、ケーブル引き出し部で剥離やマイクロクラックが生じる。温度低下時にはセンサー内部の空気が収縮し、これらの隙間から外部の薬液が浸入する。この現象は呼吸作用と呼ばれ²⁾、Oリングの採用や特殊なプライマー処理により、接着性向上が図られてきた。しかし、熱衝撃の繰り返し（ヒートサイクル）に対して長期間にわたる密閉性の維持は困難であり、構造的な課題が残されている。

3. 高耐久封止構造の設計と材料選定

3.1 設計方針

これらの課題を解決するため、本研究では、ふっ素樹脂に依存しないケース材料および封止構造を検討した。ケース材料には、エンジニアリングプラスチックの一種であるポリブチレンテレフタレート（PBT）樹脂を選定した。PBT樹脂は、酸・アルカリや有機溶剤に対して優れた耐薬品性を有し、寸法安定性および充填材・接着剤との親和性も高い³⁾。さらに、ガラス繊維（Glass Fiber：GF）などの添加によって線膨張係数を調整でき、内部充填材の線膨張係数との差を低減できる。しかし、PBT樹脂ケースを採用した場合でも過酷なヒートサイクル下では、ケース、充填材およびケーブル材の界面で応力が集中する。このため、従来の単純な樹脂封止では呼吸作用を抑制できない。

そこで本研究では、PBT樹脂製のケースを採用するとともに、ケース、充填材およびケーブル周辺部材を含む構造全体で線膨張の最適化（以下、熱膨張マッチング）を図った。これにより、繰り返し温度変化を受ける環境においても、クラックの発生および呼吸作用による水や薬液の浸入を抑制する構造を実現した。

具体的には、以下の3点を設計方針とした。

- ① PBT樹脂とガラス繊維の配合を最適化し、ケースの線膨張係数を内部充填樹脂と一致させることで温度変化に起因する内部応力を低減する
- ② 応力集中が生じやすいケーブル引き出し部に対して、最適なブッシング材料を選定する
- ③ ブッシングとPBTケースを接着剤で一体化する

3.2 ケースおよび充填樹脂の選定

ヒートサイクル下において熱応力による内部破壊を防止し、呼吸作用を抑制するため、センサー内部を保護する充填樹脂から材料選定を開始した。

3.2.1 充填樹脂の選定

まず、センサー内部の電子回路を封止する充填樹脂について検討した。温度変化が大きい環境では、材料の線膨張係数が小さいほど熱膨張・収縮に伴う寸法変化が小さくなる。その結果、内部回路や外部ケースとの界面に生じる熱応力を低減でき、温度変化に対する耐性が向上する。

本研究では、線膨張が小さく長期安定性に優れたエポキシ系ポッティング樹脂（ソマール社製：K-8876）を選定した。同材料のガラス転移温度（T_g）以下における線膨張係数は約 $5.7 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ であり、温度変化に対して安定した特性を示す。

3.2.2 ケース樹脂の選定

つぎに、界面の剥離およびクラックを防止するため、充填樹脂の線膨張係数に近い材料をケース樹脂として選定した。表1に、ふっ素樹脂（PFAなど）とポリブチレンテレフタレート（PBT）の特性を示す。従来のふっ素樹脂は線膨張係数が約 $12 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ⁴⁾ である。これに対し、本研究では、PBT樹脂にガラス繊維を

表1 ケース材料の特性比較表

Properties of enclosure materials

	ふっ素樹脂 (PFA など)	PBT 樹脂 (+ GF15%)
線膨張係数	約 $12 [\times 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}]$	約 $5.5 [\times 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}]$
接着性	× 低い、表面加工必須	◎ 高い、接着剤で 強固に固定
耐薬品性	◎ ほとんどの薬液に 侵されない	○ 酸・アルカリ・油な どに対して実用上、 十分な耐性
総合評価	× 熱応力によるクラック と接着不良が致命的	○ 実用上十分な 強度と柔軟性

◎：優 ○：良 △：可 ×：不可

15% 添加した複合材料 (PBT + GF15%) を採用した。本材料の線膨張係数は $5.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ であった。

図2に各材料の線膨張係数の比較を示す。従来のふっ素樹脂と比較して、本研究で選定した充填樹脂およびケース樹脂の線膨張係数はほぼ一致した。これにより、急激な温度変化に伴う熱応力を低減し、ヒートサイクルによる隙間の発生を抑制し、水や薬液の浸入を防止できると考えられる。

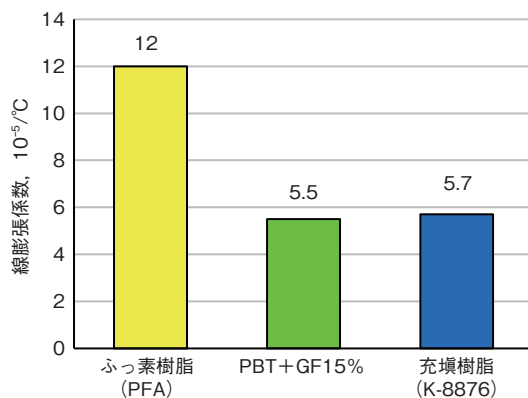


図2 各材料の線膨張係数の比較

Linear thermal expansion coefficients of the three materials

3.3 ブッシングおよび接着封止構造の設計

ケーブルの屈曲応力を緩和するとともにケースとの隙間を封止するため、適度な弾性を有するゴム製ブッシングを適用した。しかし、薬液およびヒートサイクル下においては、ゴム材料自体の膨潤や収縮により、接着界面が破壊される可能性がある。そのため、本研究では、ブッシング材料候補としてクロロプレンゴム (CR) およびニトリルゴム (NBR) を比較した (表2)。最終的な材料は、第4章の環境試験結果に基づいて選定した。

さらに、封止工程ではPBT ケースおよびゴム材料の接着親和性を利用した。一方、従来のふっ素樹脂ケースでは、表面改質処理が必要であったのに対し、本開発ではシアノアクリレート系瞬間接着剤(スリーボンド社製: TB1783) により、ケース・ブッシング・ケーブル被覆の一体構造を形成した。

表2 ブッシング候補材料の特性比較表

Bushing candidate characteristics comparison

	CR (クロロプレンゴム)	NBR (ニトリルゴム)
耐薬品性・ 耐油性	○ 一部の薬品・油で 劣化の懸念	◎ 各種薬液・油類に 対して強い
接着性	○ 一般的な接着性は 良好	◎ エポキシ等と 強固に結合
耐候性	◎ 屋外環境での劣化 に強い	△ 紫外線やオゾンに やや弱い
機械的強 度・屈曲性	◎ ケーブル保護剤 として実績多数	○ 実用上十分な 強度と柔軟性

◎: 優 ○: 良 △: 可 ×: 不可

4. 環境試験

第3章で設計した封止構造の妥当性を検証するため、液槽熱衝撃試験および薬液浸せき試験を実施した。まず、液槽熱衝撃試験では熱膨張マッチングによる熱応力抑制効果 (設計方針①の検証) を評価した。そして、薬液浸せき試験ではブッシング材料および接着封止の耐薬品性 (設計方針②、③の検証) を評価した。

4.1 液槽熱衝撃試験

本試験では、温度変化に伴う熱応力および呼吸作用に対する耐性を評価した。

近接センサーを 60°C の高温水槽に 30 分間浸せきした後、速やかに常温水槽へ移動してさらに 30 分間浸せきした。この操作を 1 サイクルとし、100 サイクル繰り返した。試験後、製品仕様を判定基準として外観寸法、動作距離、電気特性および絶縁抵抗値を測定し、内部への水の浸入有無を確認した。

表3に示すとおり、各試験項目の結果はすべて合格であった。

表3 液槽熱衝撃試験の結果

Results of liquid bath thermal shock tests

試験項目	判定基準	結果
外観	外観寸法仕様による	合格
動作距離測定	製品仕様による	合格
電気特性測定	製品仕様による	合格
絶縁抵抗試験	製品仕様による	合格

一般に、液中での急激な温度変化によって界面にクラックが生じ、呼吸作用が発生する。しかし、本開発品ではケースと充填材の線膨張係数差を $0.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ まで低減したことにより、界面に作用する熱応力が抑制され、クラックの発生を防止できたと考えられる。さらに、NBR 製ブッシングとシアノアクリレート系接着剤による封止構造が密閉性を維持し、水の浸入を防止したと考えられる。

4.2 薬品浸せき試験

本試験では、長時間の薬液曝露に対するケース材料、ブッシング材料、接着剤の耐性および密閉性維持を評価した。

まず、近接センサーを 14 種類の洗剤系薬液に 80°C 、500 時間連続で浸せきした。試験後、外観変化および絶縁抵抗値を測定し、材料劣化と内部への薬液浸入の有無を確認した。

開発初期段階では、ブッシング材料に一般的なクロロプレンゴム (CR) を用いた。その結果、長時間の浸せきによりブッシングが膨潤・劣化し、接着界面に微小な剥離が生じた (図3)。この剥離部から呼吸作用により、薬液が内部へ浸入した。

一方、耐薬品性に優れる NBR に変更したブッシングでは、500 時間経過後も膨潤、劣化および接着部の剥離は認められず、密閉性が維持されていた (図4)。

試験後の絶縁抵抗試験結果を表4に示す。NBR 製ブッシングを適用した試料は、500 時間の薬液浸せき後も、すべての試料で製品仕様である判定基準 50 MΩ 以上を満足した。この結果から、NBR ブッシングおよび接着封止構造は高い耐薬品性を有することを確認した。

以上より、ブッシング材料には NBR を最終選定した。

5. おわりに

本研究では、薬液洗浄環境下でも長期間安定して動作する耐久性の高い近接センサーを開発した。従来のふっ素樹脂ケースで課題となっていたヒートサイクルに起因する呼吸作用を防止するため、ケース樹脂、充填樹脂およびブッシングの材料を選定するとともに接着剤を用いた独自の封止構造を設計した。

その結果、本研究で開発した環境強化型近接センサーは、温度変化と薬液曝露が繰り返される環境においても密閉性と耐久性が維持されることを確認した。本技術の



図3 CR 製ブッシング 薬品浸せき試験結果
Results of chemical immersion test for CR bushing

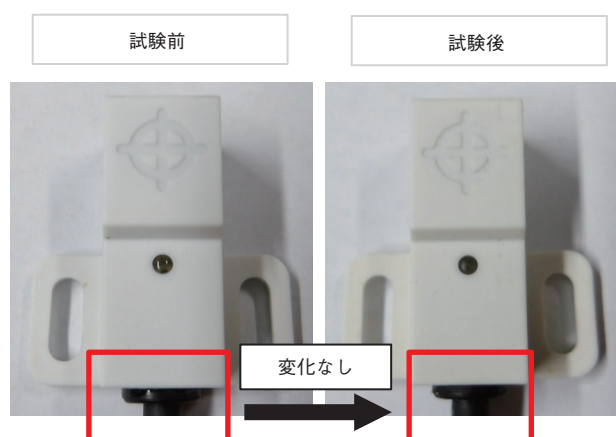


図4 NBR 製ブッシング 薬品浸せき試験結果
Results of chemical immersion test for NBR bushing

表4 絶縁抵抗試験結果
Results of insulation resistance test

	CR	NBR
判定基準		
OK : 50 MΩ以上	OK : 18 台	OK : 84 台
NG : 50 MΩ未満	NG : 10 台	NG : 0 台

確立により、生産現場におけるセンサーの突発的な故障リスクを低減し、生産ラインの安定化が期待される。

今後は、食品・機械プラントなどで要求が高まる高温・高圧水洗浄 (IP69K) への対応を目指す。本開発で得られた線膨張係数マッチングの知見を基に高温・高圧水流に耐えるケーブル被覆材料の選定と構造設計を進め、次世代センシング技術の開発に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 柳原栄一：フッ素樹脂の接着と表面処理，日本接着学会誌，Vol. 33, No. 10(1997)386-393.
- 2) 越部 茂：実務に役立つ接着剤・接着技術，工業調査会(2005)150-155.
- 3) 本間精一：設計者のためのプラスチックの強度特性，日刊工業新聞社(2001)112-118.
- 4) 日本弗素樹脂工業会：ふっ素樹脂製品取扱マニュアル改訂 11 版，日本弗素樹脂工業会(2021)6.

筆 者



上田義人^{*}
Y. UEDA

^{*} 株式会社ジェイテクトエレクトロニクス 開発部