

ST4X形 UPROX 近接スイッチの開発

田門立身*1) 下川孝弘*2)

1. はじめに

CIM化が進められるに従って、それを支える検出のニーズもますます多様化、高度化している。一方でほとんど成熟化したと思われる近接スイッチ分野においてもこれらの要求に応えるべく地道な研究開発が続けられている。そのような視点から今回は「ST4X形UPROX近接スイッチ(以下UPROX)」という新しい動作原理にもとづく近接スイッチを紹介する。

従来の高周波発振形の近接スイッチでは、耐磁気ノイ

ズ性や非鉄金属材質の検出の場合に著しく検出距離が低下する問題などの不具合が指摘されていた。今回、新たに発売を開始したUPROX(表1参照)は、従来の高周波発振形近接スイッチの動作原理とは異なった方式によって近接スイッチの問題点の改善と多くの機能付加を実現した新しい近接スイッチである。このUPROXが近接スイッチの革命的なマイル・ストーンとなり得ることを確信するものである。

表1 UPROXの仕様

項目	M12		M18		M30		□40コネクタ式		□40端子台式		
	埋込形	非埋込形	埋込形	非埋込形	埋込形	非埋込形	埋込形	非埋込形	埋込形	非埋込形	
動作距離(注1)	2mm±10%	8mm±10%	5mm±10%	12mm±10%	10mm±10%	20mm±10%	15mm±10%	25mm±10%	15mm±10%	40mm±10%	
設定距離(注1)	0~1.4mm	0~5.5mm	0~3.5mm	0~8.5mm	0~7.0mm	0~14mm	0~12mm	0~20mm	0~12mm	0~32mm	
検出体	磁性金属および非磁性金属										
標準検出体	厚さ1mmの鉄板										
サイズ	□12mm	□24mm	□18mm	□36mm	□30mm	□60mm	□45mm	□75mm	□45mm	□120mm	
応差(ヒステリシス)	3~15%										
電源電圧	DC12~24V(使用電圧範囲: DC10~65V)、許容リップル: 10%以下										
消費電流	13mA以下										
制御出力	NPNまたはPNPトランジスタ 電圧電流出力(出力抵抗47kΩ)、DC65V・200mAmax、電圧降下1.8V以下										
保護回路	逆接保護、短絡保護										
出力動作	ノーマルオープン										
応答周波数	3000Hz	2000Hz	2500Hz	2000Hz	2000Hz	1500Hz	2000Hz	1500Hz	2000Hz	1500Hz	
表示灯	動作表示: 黄色LED(但し、M12コネクタ式は赤色LED) 動作表示: 黄色LED 電源表示: 緑色LED										
温度による動作距離の変動率	-25~+70℃の温度範囲で+25℃における動作距離の±20%以下										
電圧による動作距離の変動率	定格電源電圧±10%の範囲で、定格電源電圧時の動作距離の±2.5%以下										
絶縁抵抗	20MΩ以上(DC500Vメガにて)										
耐電圧	1000V 1分間(充電部-非充電部間)										
耐振動	10~55Hz 片振幅1mm 3軸方向各々30分(計90分)										
衝撃	294m/s ² 11ms 3軸方向に各々3回(計18回)										
使用周囲温度	-25~+70℃(ただし、氷結しないこと)										
使用周囲湿度	35~85%RH(ただし、結露しないこと)										
保存温度	-30~+80℃(ただし、氷結しないこと)										
保護構造	IP67(IEC Pub.529)										
ケース	黄銅・クロームメッキまたは黄銅・テフロンコートまたはステンレス										
検出面	ポリアミドまたはポリアミド・テフロンコート										
エンドキャップ	ポリウレタン										
接続方式	ケーブル式(3芯ビニルキャプタイヤケーブル2m、0.34mm ² 、φ5.2mm)またはコネクタ式							コネクタ式		端子台式(適合ケーブルは3芯または4芯のビニルキャプタイヤケーブル、0.75mm ² 、φ9~12mm)	
質量	ケーブル式または端子台式(ケーブル2mを含む)		約100g		約130g(ケーブル2mを含む)		約220g(ケーブル2mを含む)		約225g(本体のみ)		
コネクタ	本体		約30g		約50g		約120g		約190g		
付属品	取付ナット							検出ヘッドの方向変更用六角レンチ		コンジット(PG13.5ねじ)	

(注1) 動作距離、設定距離は標準検出体における値。

*1) センサプロジェクト

*2) マーケティング企画推進部

2. 従来の高周波発振形近接スイッチの検出方式

従来の高周波発振形近接スイッチの検出方式の動作原理、およびその問題点について述べる。

2.1 動作原理

図1に従来の高周波発振形近接スイッチの検出ヘッドの構成を示す。検出コイルが単一コイルで、フェライトコアに巻かれていおり、現在最も多く利用されている方式である。図2に示すようにLC発振回路のインダクタンスが検出コイルとなっている。

図3に示すように、検出コイルから発生する高周波磁界中に金属物体が接近すると、近接金属中に電磁誘導現象

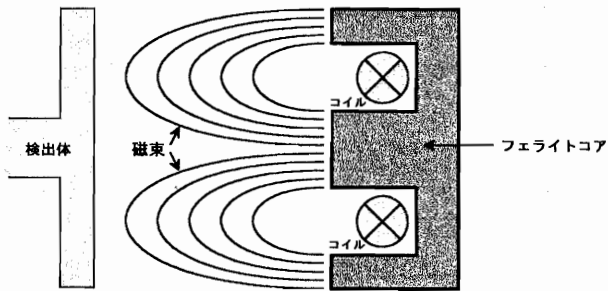


図1 従来の検出ヘッドの構造

象による誘導電流（渦電流）が発振磁界とは逆方向に磁界を発生させる方向に流れる。渦電流とは、金属体表面の磁束密度Bが角周波数 ω をもって振動しているとき、外部の磁束密度Bを遮蔽するように流れる誘導電流のことである¹⁾。金属体内部へ向かって（x方向とする）電磁界は

$$\exp(-x/\delta) \tag{2-1}$$

の形で減少する。ここで渦電流の侵入深さに相当する δ は、

$$\delta \equiv \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \tag{2-2}$$

- δ : 渦電流の侵入深さ
- ω : 角周波数
- μ : 金属物体の透磁率
- σ : 金属物体の導電率

で与えられ、表皮厚と呼ばれる。この渦電流により金属内に熱損失が発生し、そのため発振が減衰または停止し、発振の振幅レベルを図2に示すようにレベル検出器で検知し、出力信号を出す。

以上が単一コイル検出方式の動作原理である。次に発振回路と検出体を図4に示す等価回路で表し、この動作を発振回路のインピーダンスZの変化でみると、

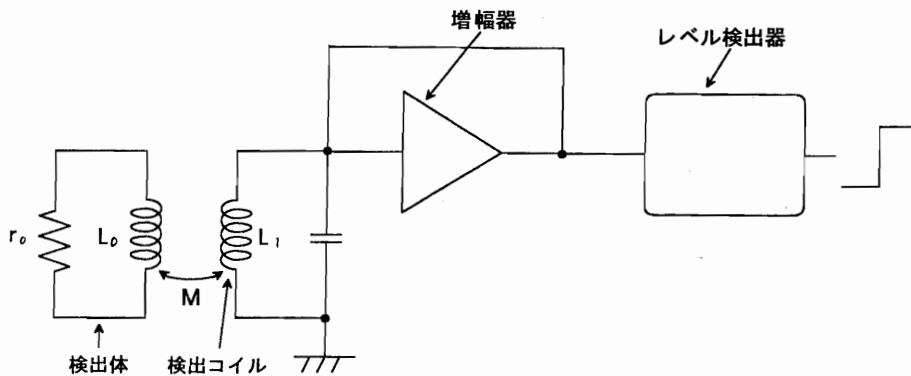


図2 従来の発振回路概略図

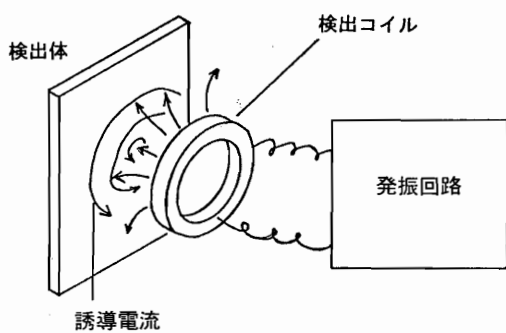


図3 誘導電流（渦電流）の発生

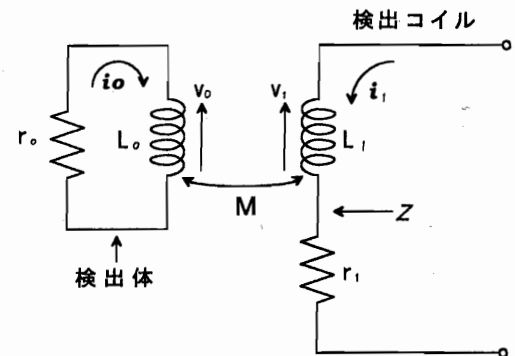


図4 検出体と検出コイルの等価回路

$$v_1 = i_1(j\omega L_1 + r_1) + j\omega M i_0 \quad (2-3)$$

$$v_0 = j\omega L_0 i_0 + j\omega M i_1 = -r_0 i_0 \quad (2-4)$$

$$i_0 = \frac{-j\omega M}{r_0 + j\omega L_0} i_1 \quad (2-5)$$

したがってインピーダンスZは、

$$Z = \frac{v_1}{i_1} \\ = r_1 + \frac{\omega^2 M^2}{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} r_0 + j\omega \left(L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} L_0 \right) \quad (2-6)$$

となり、検出体の近接は損失抵抗の増加とインダクタンスの減少を与えることがわかる。単一コイル検出方式では、検出体の損失抵抗の増加を主な検出要素としており、これは発振回路のQ (Quality factor) 値

$$Q = \frac{\omega L}{r} \quad (2-7)$$

の減少を検出要素としていることに起因している。

2.2 問題点

従来の高周波発振形近接スイッチの検出方式の問題点について述べる。

2.2.1 金属材料による動作距離の違い

式(2-2)における透磁率 μ と導電率 σ は、金属固有のもので、鉄などの磁性金属では透磁率 μ が非磁性金属に比べ充分大きいので表皮厚が薄くなり、アルミニウムなどの非磁性金属ではこれに比べて厚くなる。金属の種類によって渦電流の損失の大きさが変わってくる。

つまり、金属体表面に流れる渦電流の表皮厚と導電率の関係により、磁性金属では渦電流の損失抵抗が大きいため動作距離が長くなり、非磁性金属では損失抵抗が小さいため動作距離が短くなる。

従って、図5に示すように損失の大きい磁性金属は動作距離が長くなり、損失抵抗の小さい非磁性金属は動作距離が短くなる。

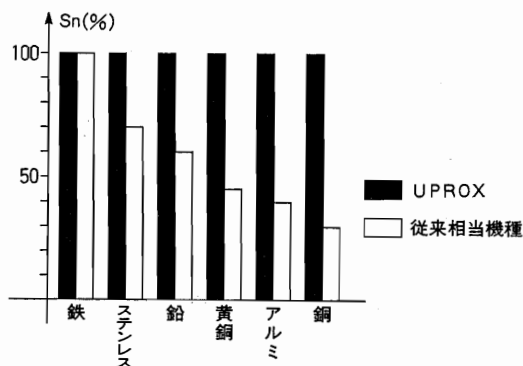


図5 従来機種との動作距離比較

2.2.2 磁気ノイズによる誤動作

外部からの磁気ノイズにより、発振回路には二つの問題が発生する。

- 交流磁界ノイズによりコイルに誘導電圧が発生し、誤動作する。
- 高磁場（交流、直流ともに）の中では、フェライトコアが磁気飽和により、発振回路のQ値が変化し、誤動作する。

これらの問題に対して次のような解決策があるが、完全な解決策ではなく、それぞれ欠点をもっている。

- 発振回路の誤動作による出力の変化（変化の周期）を検出する。

ただし、この方法は交流磁気ノイズに対してのみ有効であり、誤動作による出力の変化を検出するために時間がかかり、応答速度が遅いという欠点がある。

- 高い磁気飽和特性をもった磁気材質のコアを使用する。

ただし、この方法では検出距離が長くとれないという欠点がある。

2.2.3 遅い応答速度

長距離検出（少ないエネルギー損失を検出）を行い、広い温度範囲において安定した動作距離を得るには、発振回路に高いQ値が必要である。

フェライトコアを使用することにより、高いQ値が得られ、コイルより後ろにある物体に磁束が漏れなくなる。しかし、Q値を高くするにはL成分を大きくしなければならぬ為、応答速度が遅くなってしまふ。

2.2.4 従来特殊タイプの近接スイッチの問題点

既に市場には、従来検出方式の特殊なタイプである、メタルフリーセンサ、非鉄金属センサ、鉄専用センサなどが登場している。これらの検出方式では、検出体の各材質（磁性体か非磁性体）による発振周波数の変化を検出、あるいは、発振周波数の増加（インダクタンスの減少）およびQ値の減少（損失抵抗の増加）を同時に検出している。

しかし、これらの検出方式では、複雑な回路技術が必要なため、製品のバリエーションに限界がある。また、広い温度範囲での安定した検出が不可能であり、応答速度も遅いといった問題点がある。

3. UPROXの検出方式

UPROX近接スイッチの検出方式の動作原理およびその特長について述べる。

3.1 UPROXの動作原理

図6にUPROX検出ヘッドの構造を示す。一つの送信コイル L_3 と二つの検出コイル L_1 、 L_2 があるが、フェライトコアは無く、コイルはプラスチックボビンに巻かれている。

図7にUPROX発振器の概略図を示す。

送信コイル L_3 により励起された磁束により検出コイル L_1 と L_2 に誘導電圧が発生する。検出コイル L_1 および L_2 は、誘導電圧 v_1 、 v_2 が逆位相になるように直列に接続されているので、 v_1 と v_2 の合成電圧(差動電圧) v_3 は、容易に取り出し可能である。検出コイル L_1 、 L_2 は、それら相互の空間位置およびそれぞれの巻数によって、所望の動作距離において差動電圧 $v_3=0$ になるように構成配置されている。また、直列接続された検出コイル L_1 、 L_2 は、差動電圧 $v_3=0$ のとき、発振器(送信コイル L_3)の振幅レベルが跳躍的に変化するように増幅器の入力側に接続されている。

検出体が近接すると、従来の高周波発振形近接スイッチのように、送信コイルから発生する磁束は、検出体の渦電流により発生する磁束によって弱められる。検出コイル L_1 と L_2 とでは、検出体との距離が異なるため、コイルに発生する誘導電圧が異なる。この L_1 、 L_2 の

誘導電圧の差は、それぞれのコイル部の磁束の勾配に比例している。したがって、検出体の近接による磁束の勾配の変化に比例して差動電圧も変化する。

検出体が動作距離に達すると、検出コイル L_1 と L_2 の誘導電圧 v_1 と v_2 の差が無くなって、差動電圧 $v_3=0$ となり、発振器は発振モードから非発振モードに変わり、 L_3 の発振の振幅レベルが跳躍的に低下し、レベル検出器のしきい値を下回って、出力信号を出す。

送信コイルの直径に比べて大きい検出体の近接に対して、勾配の変化は検出金属の種類にほとんど無関係であるので、差動電圧 v_3 も検出金属の種類に無関係であり、これにより近接スイッチの動作距離は広範な領域において検出金属の種類に影響されない。

3.2 UPROX検出方式の特長

UPROXは従来の高周波発振形近接スイッチ(単一コイル)に比べ次のような特長がある。

- 検出体の渦電流から発生する磁束による検出コイル L_1 、 L_2 に対する磁束の差が検出要素であり、この磁束の勾配は、磁性体、非磁性体でほとんど同じである。したがって、金属の種類に拘らずほとんど同じ動作距離が得られる。
- 動作距離は検出コイルの空間的位置にのみ依存するため、電気的な部材の温度特性には影響されない。
従って動作距離の温度特性がよく、動作距離を長くできる。
- 高感度な検出方式なので、発振回路のQ値を高くする必要がなく、またフェライトコアを使用していないため、コアの磁気飽和が無い。したがって磁気ノイズに対して本質的に(電気的な対策をしなくても)耐磁界機能を有しているため、AC磁気ノイズのみならず、DC磁気ノイズにも強い。
- フェライトコアがないため、発振回路のL成分が小さく、また発振周波数が高いため応答速度が速い。

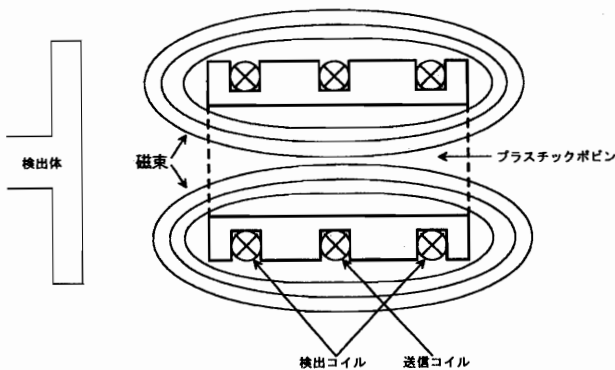


図6 UPROX検出ヘッドの構造

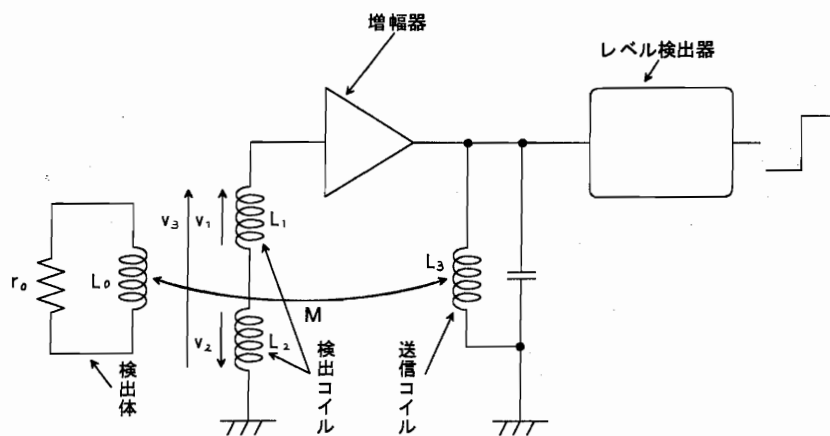


図7 UPROXの発振器概略図

4. アプリケーション例

UPROXの様々な特長により、次のようなアプリケーションが可能である。

4.1 等距離検出

UPROXは磁性、非磁性を問わず全ての金属を同一距離で検出可能なフリーメタルタイプの近接スイッチである。図5に示すように、従来機種ではアルミ、銅などの非磁性金属に対して動作距離が短かったのに対し、UPROXは全ての金属に対して等距離検出が可能である。

したがって、図8、9に示すスチール缶、アルミ缶の混在ラインでのワーク検知や非鉄金属の検出に有利である。

4.2 長距離検出

UPROXの非埋込形は、従来機種に比べ、磁性金属検出の場合最大2倍（M12タイプ、当社比）の動作距離アップを実現している。また、銅、アルミなどの非磁性金属に対しても磁性金属と同じ動作距離が可能になったため、結果的に従来の同形機種に比べ、約5倍（M12タイプ）の動作距離が実現した。

したがって、図8、9に示すようなアプリケーションで長距離検出を行う場合に有効である。

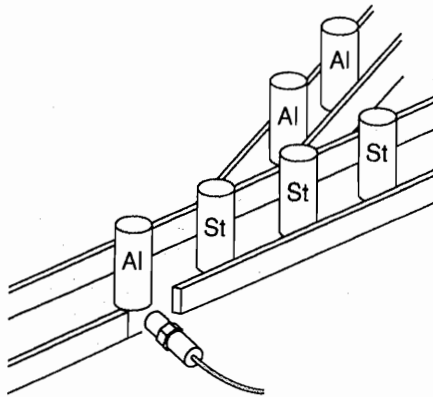


図8 スチール缶、アルミ缶の混在ライン

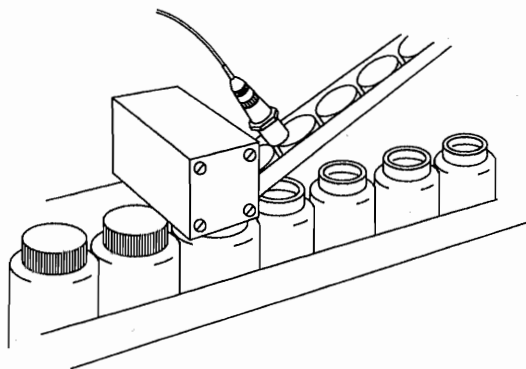


図9 非鉄金属の検出

4.3 耐磁界機能

UPROXは、従来の近接スイッチの誤動作原因となっていた、溶接機のように大電流を使用する際に発生する磁界ノイズに対し本質的に（ACだけでなくDCノイズに対しても）耐磁界機能を有している。また、本体表面をテフロンコートすることで溶接によるスパッタ対策も行い、図10のような悪環境下で安定動作が要求される自動車製造ラインなどに威力を発揮する。

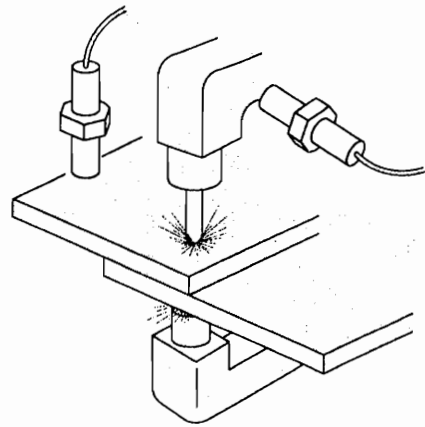


図10 溶接ロボットのアームおよびワークの検出

4.4 高速応答性

UPROXは従来の近接スイッチに比べ格段に高い応答周波数を実現している。特にコイル径が40mmの角柱形の場合、当社従来機種より10倍以上高い応答周波数となっている。

したがって、図11に示す高速回転の歯車検知や、長距離で高速応答が要求される各種製造、物流ラインに最適である。

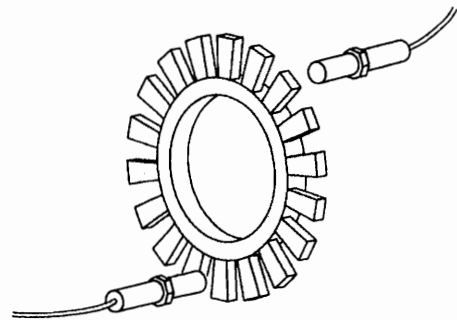


図11 高速回転の歯車検知

4.5 豊富なバリエーション

UPROXは、表2に示すように豊富なバリエーションをもっている。サイズについては、円柱形のM12、M18、M30および角柱形（□40mm）がある。角柱形には立方形のコネクタタイプとリミットスイッチ形状の端子台タイ

表2 UPROXのバリエーション

サイズ	ケース	接続	外形	形状	出力方式 出力形態
M	金	ケーブル式		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
			埋込形	NPN	
			非埋込形	PNP	
	属	コネクタ式		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
			埋込形	NPN	
			非埋込形	PNP	
	12	金属テフロンコート		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
			埋込形	NPN	
			非埋込形	PNP	
ステンレス	ケーブル式		埋込形	NPN	
			非埋込形	PNP	
		埋込形	NPN		
		非埋込形	PNP		
M	金	ケーブル式		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
		埋込形	NPN		
		非埋込形	PNP		
18	属	コネクタ式		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
		埋込形	NPN		
		非埋込形	PNP		

サイズ	ケース	接続	外形	形状	出力方式 出力形態
M	金属テフロンコート	コネクタ式		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
			埋込形	NPN	
			非埋込形	PNP	
	ステンレス	ケーブル式		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
			埋込形	NPN	
			非埋込形	PNP	
	金	ケーブル式		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
			埋込形	NPN	
			非埋込形	PNP	
M	属	コネクタ式		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
		埋込形	NPN		
		非埋込形	PNP		
30	金属テフロンコート	コネクタ式		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
		埋込形	NPN		
		非埋込形	PNP		
□	プラスチック	□40コネクタ式		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
		埋込形	NPN		
		非埋込形	PNP		
40	プラスチック	□40端子台式		埋込形	NPN
				非埋込形	PNP
		埋込形	NPN		
		非埋込形	PNP		

プがある。ケース材質については、前述のテフロンコートタイプの他に、食品機械に最適な耐腐食性と強度を備えたステンスタイプも揃えている。

5. おわりに

日本電子機械工業会の統計によれば、近接スイッチを含む検出スイッチの国内市場は平成2年前後のバブル期の需要ピークを境に設備投資需要の停滞から市場の縮小が続いていたが、平成6年度下期以降に持ち直すとの明るい予測が発表されている。景気の好転に伴い今後ますます加速するであろう生産設備や製造機械の自動化に対して、知覚器官としての入力用センサがますます重要な構成部品となるであろうことは容易に想像され、その性能と信頼性がシステムのパフォーマンスに大きく影響を与えることは疑う余地がない。そのような状況のなかで今後、近接スイッチに要求される機能は：

1. 機械やシステムとのハード的接続性や出力仕様などのソフト的親和性
2. 長期にわたりフリーメンテナンスで安定して動作する耐久性や予防診断を可能とするインテリジェント性

3. 大量に使用してもコスト負担の少ない低価格化や交換コストの低い配線性
4. 緊急の需要にも対応できる短納期性
5. 外部機器に影響を与えないEMI, EMC、その他の環境対策

などであろう。しかし、最も重要なことは使って頂くお客様に対し「最大の効用を提供する」ことに尽き、それはセンサの使用に際しその問題解決を提案するという「ソリューション志向」ではないか、と考える。

UPROXは、従来の近接スイッチが抱える機能的な問題に対し、いくつかの解決の方向を与える「ソリューション製品」である。我々の標榜するこの製品戦略が1社でも多くの当社顧客に対し貢献し得るものであることを切に願う。

参考文献

- (1) メカトロニクス編集部：メカトロボックス8 最先端のFAセンサ，技術調査会，1990年