

平成28年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「高精度厚膜・高安定接合を確立した
高性能低コスト圧カトランスミッターの開発」

研究開発成果等報告書

平成29年 3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人長野県テクノ財団

目 次

第 1 章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	6
1-3 成果概要	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8
第 2 章 本論	9
(1) 高精度厚膜センサ素子の開発	9
(2) 厚膜センサ素子と一体型継手の高安定接合技術の開発	13
(3) 高性能低コスト圧カトランスミッターの開発	17
最終章 全体総括	20

第 1 章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

<研究開発の背景>

近年、自動車業界では、燃費の向上と排ガスのクリーン化を求めて、より微細な霧状燃料を得るために燃料噴射圧力の高圧化を図ってきた。現在、クリーンディーゼルエンジン車に至っては、0～300 MPa に対応する超高圧力計測を求めている。一方、建設機械業界では、屋外作業時に曝露する雷などの高電圧にも耐え得る圧力制御機器を求めている。

さらに、自動車及び建設機械のシステムメーカーでは、燃費及び安全性を向上させたシステムを新興国含めた市場にも拡販させるために、圧カトランスミッターの低コスト化をも望んでいる。(図 1 参照)



図 1. 圧力計測分野

従来の圧カトランスミッターは、センサ素子と継手が溶接構造によって接合されており、この部分の強度不足から、200MPa 以上の圧力計測に適応できなかった。また、従来のセンサ素子は薄膜で構成されているため、ブリッジ回路を構成している歪みゲージ部と起歪部（ステンレス）との間に堅牢な絶縁膜の形成が困難であり、高耐電圧化を実現できなかった。さらに、このような薄膜センサ素子は、半導体製造工程と同様に、製造工程が多い・製造装置が高額・クリーンルーム施設が必須、といった理由

で低コスト化を実現し得なかった。

これらの課題を解決するため、継手と起歪体を一体化し溶接構造をなくすことで高耐圧化を図り、さらに、セラミックス基板に厚膜でパターン形成を行ったセンサ素子を新規に開発し低融点ガラスを用いて接合することで高耐電圧化を図ったトランスミッターを開発することにした。（図2参照。）

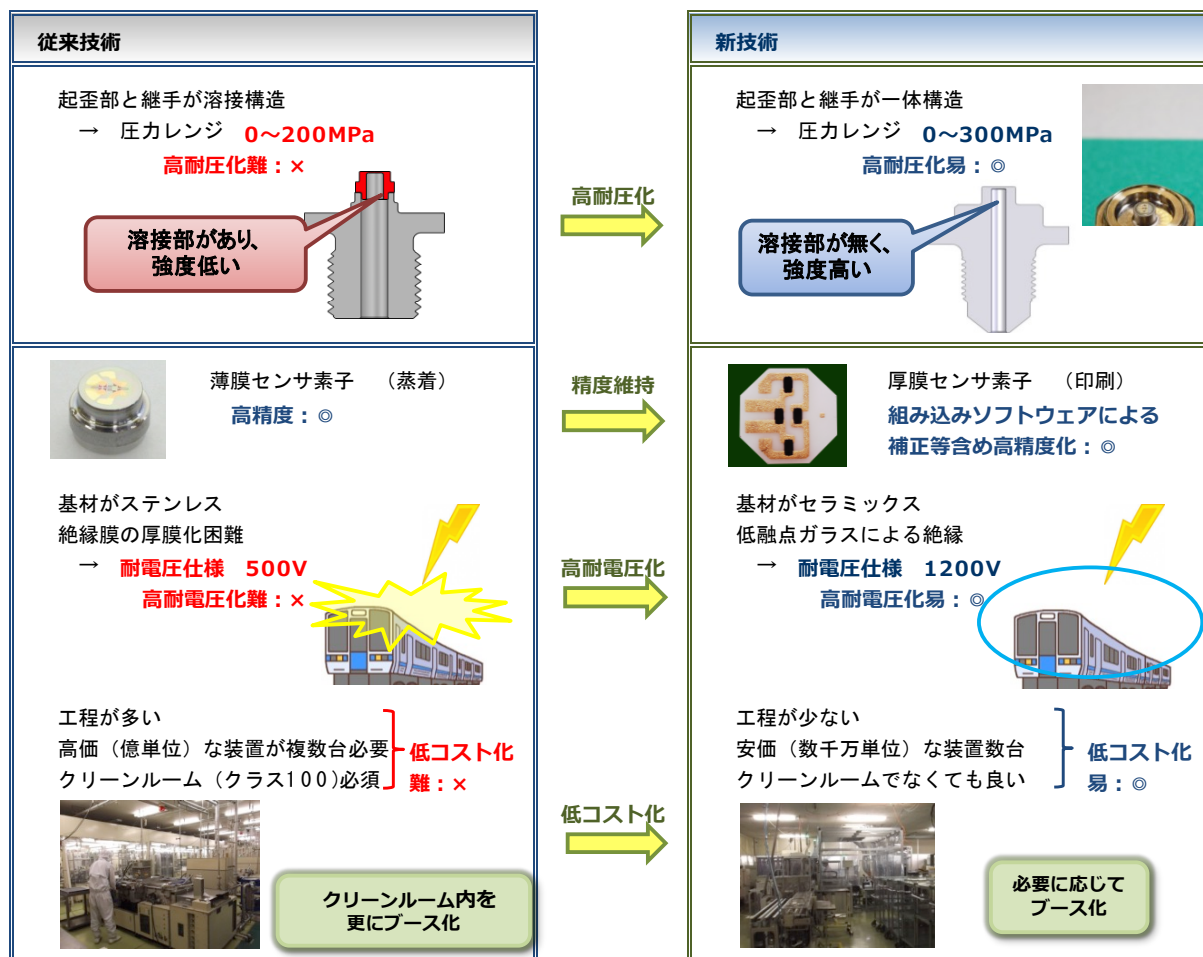


図2. 従来技術と新技術の比較

<研究目的及び目標.>

本研究の目的は、従来より高い圧力や電圧環境に耐え得る性能（高耐圧・高耐電圧）を実現した上で、競争力を維持するために精度を維持しながら製造コストを削減させた圧カトランスミッターを開発することであり、主要な研究内容は以下の通りである。

- （１）高精度厚膜センサ素子の開発
- （２）厚膜センサ素子と一体型継手の高安定接合技術の開発
- （３）高性能低コスト圧カトランスミッターの開発

開発する圧カトランスミッターの目標は、以下の通りである。

- ・計測可能範囲 0～300MPa
- ・耐電圧（雷サージ） 1200V
- ・使用温度範囲-40～140℃において精度±1.5%F.S.以内
- ・従来品と比較して30%のコストダウン

以下の図３に開発品の製造プロセスの概要を示す。

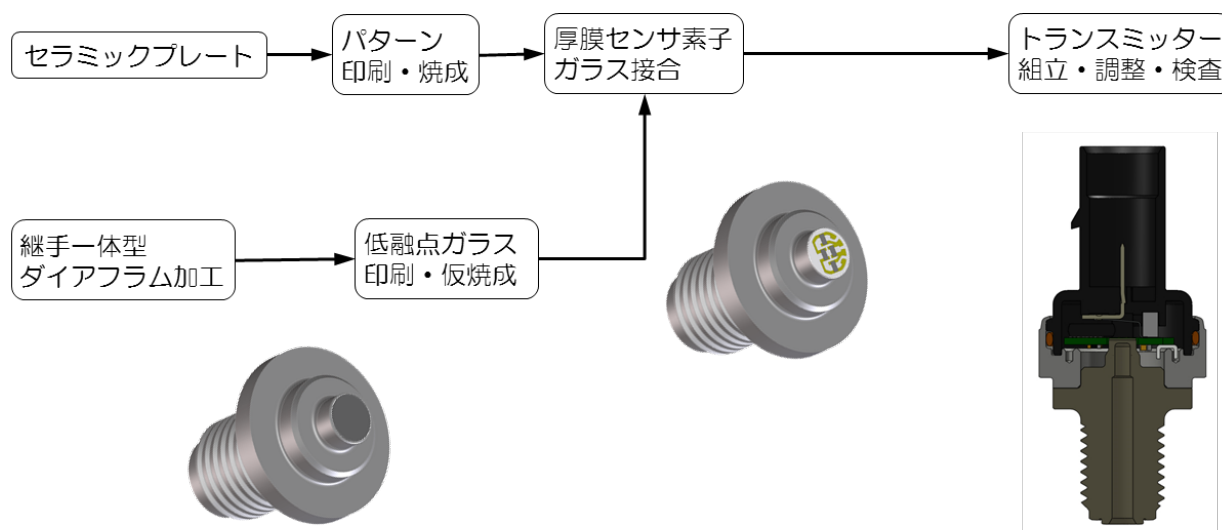
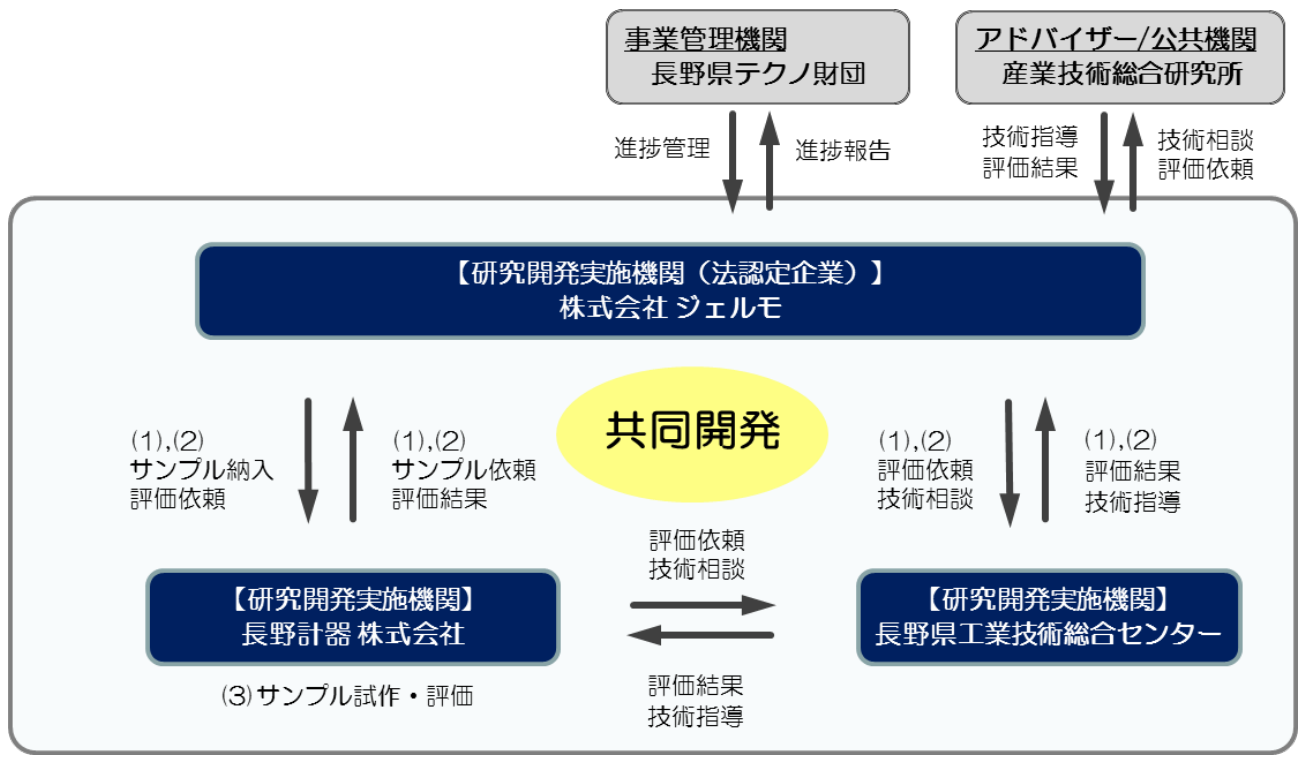


図3. 製造プロセス概要

1－2 研究体制

<研究組織・管理体制>



<研究者氏名> *28 年度の担当・役職にて記載

【事業管理機関】 公益財団法人 長野県テクノ財団

氏名	所属・役職	実施内容
湯浅 正樹	コーディネーター	管理業務

【研究実施機関】 株式会社 シェルモ

氏名	所属・役職	実施内容
小池 克志	技術課 課次長	(1)、(2)
井口 誠	技術課 課員	(1)、(2)
田口 正則	製造一課 課次長	(1)、(2)
滝沢 勉	製造一課 課員	(1)、(2)

【研究実施機関】 長野計器株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
吉田 直樹	技術本部 センサ素子技術部 次長	(1)、(2)、(3)
小玉 博志	技術本部 センサ素子技術部 センサ素子技術課 課長	(1)、(2)
羽田 幸彦	技術本部 センサ応用技術部 生産設計課 課長	(1)、(2)
宮下 香織	技術本部 センサ素子技術部 センサ素子技術課 主任	(1)、(2)
武田 英嗣	技術本部 センサ素子技術部 センサ素子技術課 エキスパート	(1)、(2)
松村 伸弥	技術本部 センサ素子技術部 センサ素子技術課	(1)、(2)
小林 弘典	技術本部 量産センサ技術部 車載・量産品開発課 主任	(3)
山岸 信貴	技術本部 量産センサ技術部 車載・量産品開発課 主任	(3)
阿部 裕佑	技術本部 量産センサ技術部 車載・量産品開発課 エキスパート	(3)
山下 直樹	技術本部 量産センサ技術部 車載・量産品開発課 スペシャリスト	(3)

【研究実施機関】 長野県工業技術総合センター

氏名	所属・役職	実施内容
垣内 健児	電子部 部長	(1)、(2)
高根 直人	電子部 研究員	(1)、(2)
山本 潤一	金属材料部 部長	(1)、(2)
古畑 肇	金属材料部 主任研究員	(1)、(2)

【アドバイザー】 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容
牛島 洋史	フレキシブルエレクトロニクス 研究センター 副研究センター長	総合的なアドバイス

1－3 成果概要

本事業の目的である、-40～140℃において精度±1.5%F.S.以内、耐電圧（雷サージ）1200Vを満たす厚膜センサ素子を用いた圧力トランスミッターを開発することができた。

厚膜センサ素子を使用することで、クリーンルームや各種真空装置などを使用することなく素子が製造でき、初期投資やランニングコストを抑えることが可能となった。また、印刷形状を改善することにより、トリミング工程がなくてもASICで調整可能な範囲に収まるセンサ素子を安定して生産できる目途もついた。

但し、高耐圧を実現する継手一体型の起歪体を安価に量産する手法が確立できていない。今後は一体型継手の低コスト量産化に取り組み、早期事業化を実現する。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

<事業管理機関>

公益財団法人 長野県テクノ財団

〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1 信州大学繊維学部内総合研究棟 3F

浅間テクノポリス地域センター コーディネータ 湯浅 正樹

TEL：0268-23-6788 FAX：0268-23-6673

E-mail：ma-yuasa@tech.or.jp

<研究実施機関>

長野計器株式会社 丸子電子機器工場

〒386-0412 長野県上田市御岳堂 2480

技術本部 センサ素子技術部 吉田直樹

TEL：0268-41-1131 FAX：0268-41-1123

E-mail：n_yoshida-m@naganokeiki.co.jp

第2章 本論

(1) 高精度厚膜センサ素子の開発

本開発における第一の課題は厚膜センサ素子を開発することである。

厚膜センサ素子を開発するに当たり、素子用印刷材料として、導体・抵抗体・オーバーコートそれぞれのペースト選定を行った。抵抗体ペーストに求められる特性としては以下が挙げられる。

- ・歪感度を持ち、且つ感度が高いこと
- ・十分な抵抗率を有していること
- ・-40～140℃の範囲で安定していること
- ・導体及びオーバーコート材に対して安定であること
- ・セラミックス基板から剥離しないこと

数社から数種類のペーストを入手し、比較検討を行った。実際に想定される導体・抵抗体の組合せにて比較評価を行った結果の一例を表 1 に示す。

表 1. 導体・抵抗体の組合せパターンと特性

導体+抵抗体	①	②	③	④	⑤
導体	Au 系	Ag 系	Ag 系	Au 系	Ag 系
□1.0mm 抵抗値 [Ω]	12,500	6,850	21,500	25,300	12,000
スパン (カタログ値)	大	中	小	大	小
温特 [ppm/℃]	±100	±100	±100	±125	±100
ノイズ	中	中	小	大	小
高温安定性 140℃、100Hrs	○	○	○	△	◎
耐湿性	○	-	○	-	○
価格	高	中	低	高	低
RoHS 適合性	適	適	不適	適	適

評価を行う中で感度と安定性はトレードオフの関係にあることが判明した。出力が小さくなると増幅率を高くする必要があり、抵抗体の持つノイズ成分の影響が無視できなくなる。ノイズの小さい抵抗体は安定性に優れる傾向があり、組み合わせる導体や焼成の強弱によってもノイズの大きさが左右されることなども確認した。今回は高精度を目指していることもあり、感度よりも安定性を優先させて抵抗体の選択を行っている。

①と⑤組合せについて、特性の違いの一例を以下の図 4～5 に示す。

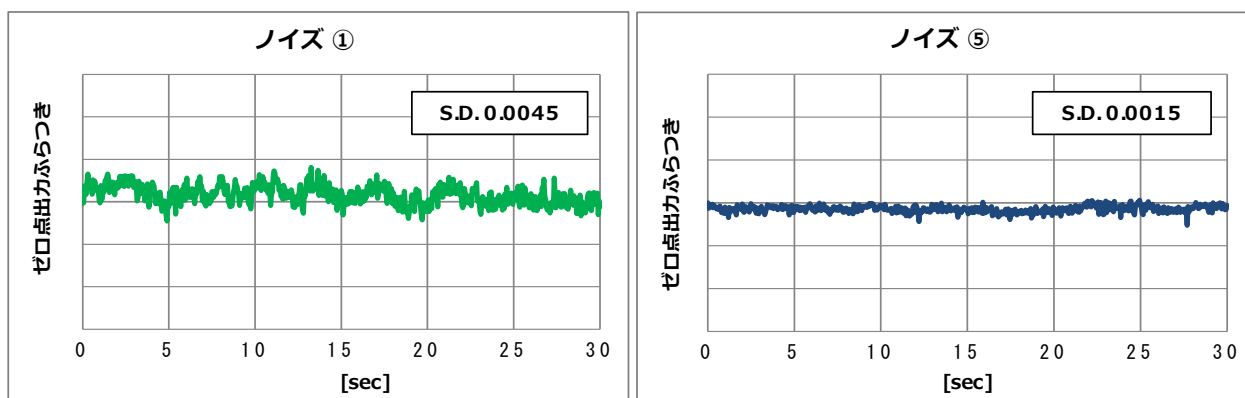


図 4：ゼロ点出力の安定性（ノイズ成分）

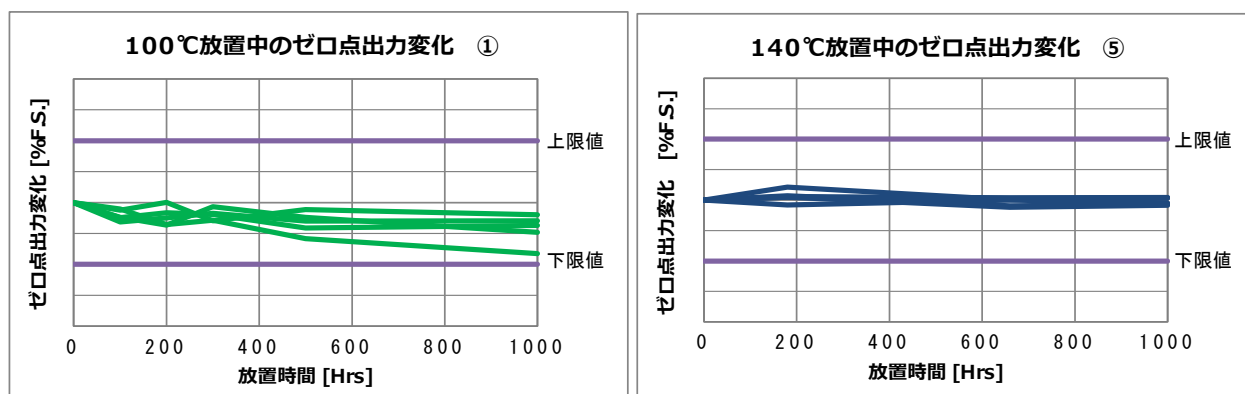


図 5：高温放置によるゼロ点出力変化

⑤の抵抗体は Ag 系導体と組み合わせてもゼロ点出力のふらつきが①の組合せの 1/3 以下である。さらに、①より高い温度で放置してもゼロ点出力の変化が小さい。感度は、①の 7～8 割程度に留まるものの高い安定性及びコストパフォーマンスをもつ組合せが得られた。

完成した厚膜センサ素子の外観を写真 1 に示す。
保護膜はガラスを採用した。樹脂よりガラスを選択した方が高温高湿耐性に優れることも確認したからである。
(図 6 参照)

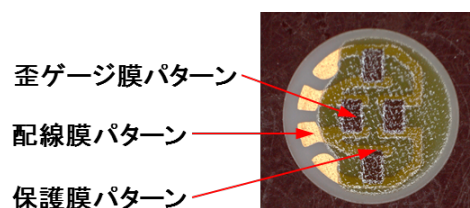


写真 1. 開発した厚膜センサ素子

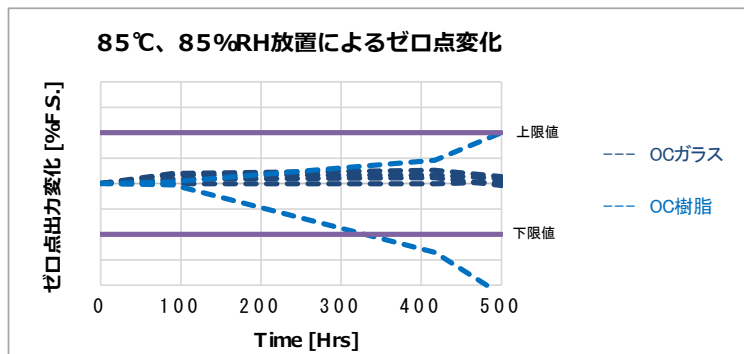


図 6：高温高湿中のゼロ点出力変化

厚膜センサ素子に求められる要求としては、さらに、

- ・トリミング無しでゼロ点出力を許容範囲内に収めること

があり、これを満たすためには、4つの抵抗体の形状を揃えることが重要となる。厚膜印刷では通常抵抗値のバラツキが20%近くにも及ぶためトリミングを用いて調整しているが、印刷方法を見直して、抵抗値のバラツキを数%程度に抑えることを目指した。トリミングを排除することで抵抗体の不安定要素が減り、設備導入コストを削減できる。

パターン形状の最適化や印刷条件の見直しにより抵抗体形状は写真2の様に改善した。

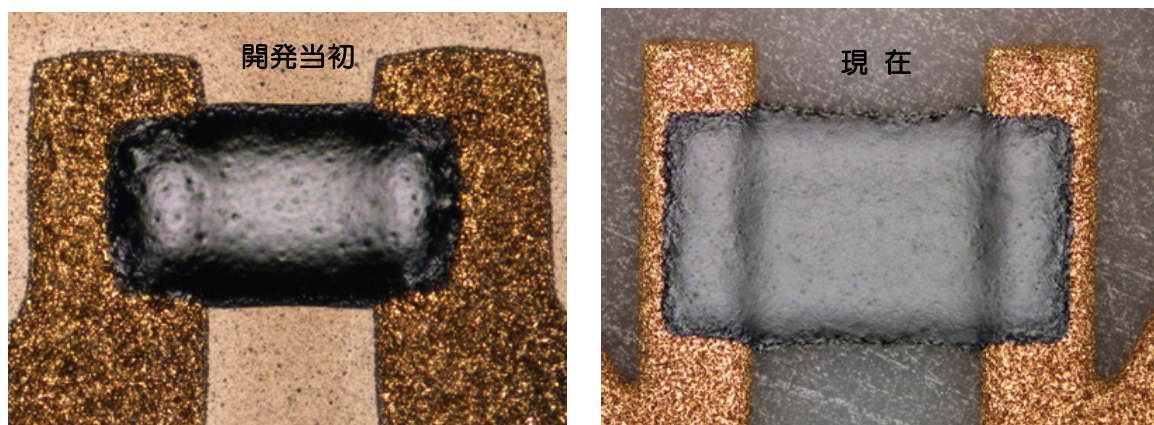


写真 2. 開発当初と現在の抵抗体形状

これにより、抵抗体のサイズで差はあるもののゼロ点出力の分布が改善し、十分に仕様を満たすことができた。ゼロ点出力の分布の改善例を図7に示す。

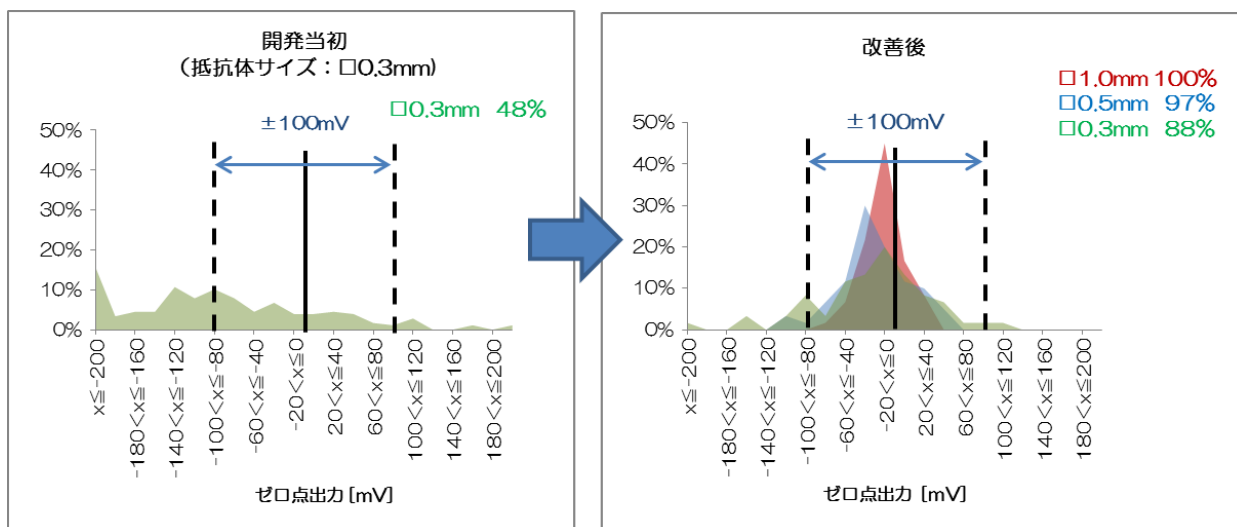


図 7. ゼロ点出力分布の改善

スクリーン印刷で形成される厚膜抵抗体の形状は、印刷条件（厚膜ペーストの粘度、版のメッシュサイズ、印圧、スキージ速度・角度など）に大きく依存する。焼成後に後加工（レーザートリミング）による補正を行わない今回の抵抗体においては、均一で再現性の良い印刷条件の確保が必須である。印刷条件の再現性を確認し、ロット間の差異も要求仕様範囲内に十分収まることを確認した。図 8 に示す。

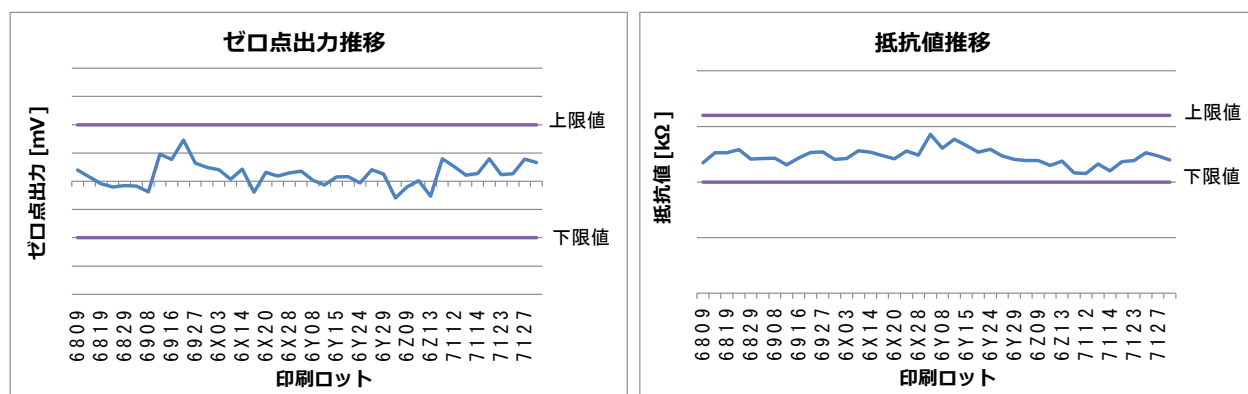


図 8. ゼロ点出力および抵抗値の推移

ゼロ点出力及び抵抗値共に規格値を超えることなく推移しており、十分な再現性を示している。このことは、トリミング工程がなくても安定してトランスミッターが生産できることを意味しており、コストダウンに大いに貢献すると共に調整回路（ASIC）の選択肢を広げることをも可能とする。

（２）厚膜センサ素子と一体型継手の高安定接合技術の開発

今回の開発における第二の課題は、厚膜センサ素子と起歪体であるステンレスとを接合し、十分な接合強度（剥離耐圧）を得ることと、接合して成るセンサ素子が要求仕様を満たすことである。接合材としては、接合温度をステンレスの強度に影響を与えない領域に抑えられ、接合材自体の強度が比較的高い低融点ガラスを選択した。

接合温度が同程度の低融点ガラスを選択しても、成分違い・線膨張係数違いで何種類かのガラスが存在するため、数社から数種類のガラスを線膨張係数違いで入手し、適性を確認した。以下の表 2 に線膨張係数の近い異なる主成分のガラスについて特性を示す。

表 2. 接合ガラスの特性一覧 （カタログ値）

	A 社	B 社	C 社①	C 社②	D 社
主成分	ビスマス系	バナジウム系	ビスマス系	テルライト系	鉛系
CTE [ppm/°C]	10.7	10.5	10.8	10.5	10.5
Ts [°C]	385	345	394	369	394
Tc [°C]	420	430	488	-	-
接合温度 [°C]	420	380	430	400	420
接合荷重 [gf/cm ²]	1000	50	100~200	100~200	推奨なし
コスト	○	×	◎	◎	△

カタログ上では接合温度がほぼ同じであっても、ガラスの軟化の程度には差があり、それぞれのガラスに対して接合条件の最適化が必要であることが判明した。

接合温度におけるガラスの軟化が比較的小さいガラスを用いた場合は、接合前のガラスの形状を整えることも重要であった。印刷・焼成後のガラス表面の凹凸（サドルやメッシュ痕）が十分に潰し切れない場合、未接合部として残るからである。一例を表 3 に示す。

表3. 接合前のガラス表面形状と接合結果

	表面凹凸無	サドルあり	メッシュ痕深い
接合前のガラス形状			
接合結果			

印刷後、乾燥後、脱バイ後、仮焼成後、接合後、と順を追って形状測定や観察を繰り返すことで、表面の凹凸が発生するタイミングや与える影響の大小を評価することができた。

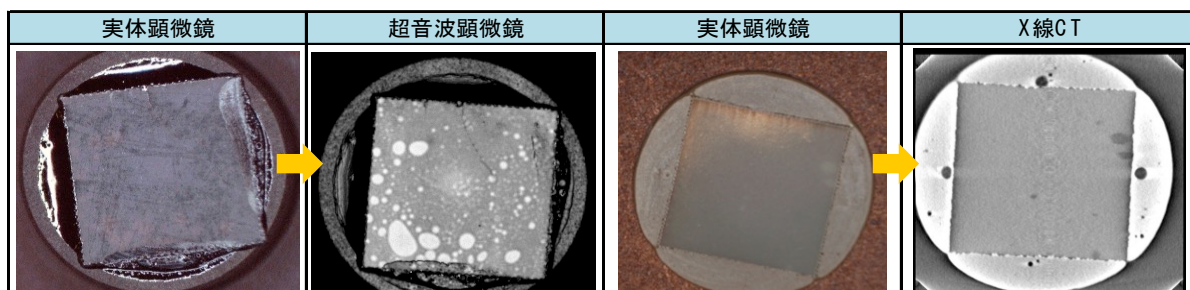
表 4 には、脱バイ後までは残っていたメッシュ痕が仮焼成で消失し、代わりにサドルが若干生じた例を示す。この場合のサドルは接合には影響を与えていないことも確認できる。

表4. 焼成後のガラス形状測定結果と接合状態

	表面形状			断面形状		
	1層塗り	2層塗り	3層塗り	1層塗り	2層塗り	3層塗り
脱バイ後						
仮焼成後						
接合後						

メッシュ痕やサドルに由来する未接合部以外にも、脱ガスが原因と考えられるボイドの影響が大きいガラスも見受けられた。接合後のボイドを含めた未接合部観察は、X線や超音波を用いて行っている。一例を表5に示す。

表5. ボイド観察結果



以上の様な評価を行いながら接合状態を改善した結果、定格圧力の数倍まで剥離しない接合強度を得られるようになった。最良の接合を得られた低融点ガラスを用いて作製した貼付け型厚膜センサ素子の過大圧試験結果を図9に示す。また、温度特性や安定性の評価結果を、図10、11に示す。

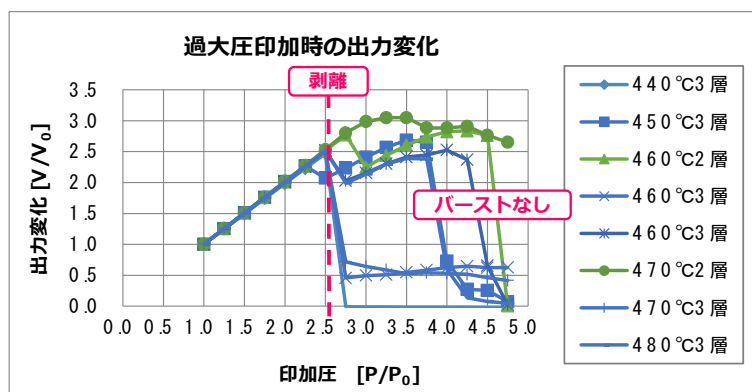


図9. 過大圧試験結果

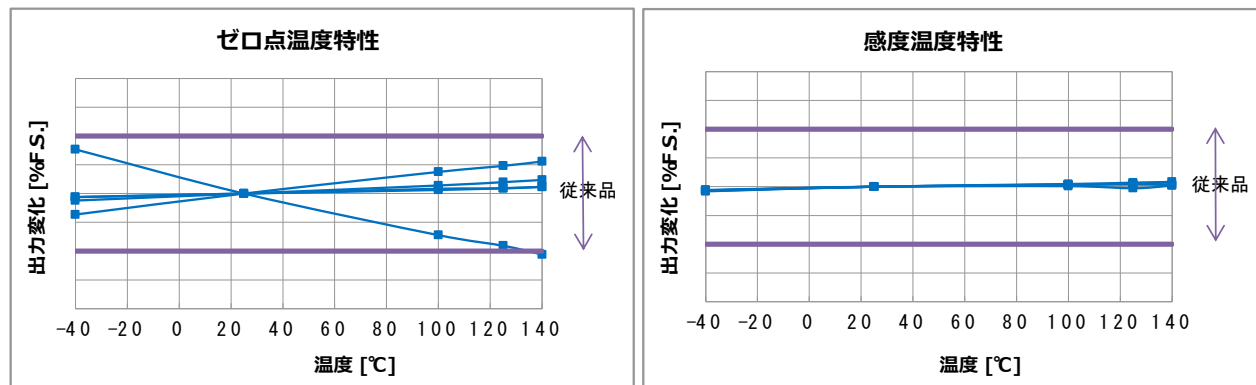


図10. 貼付け型厚膜センサ素子の温度特性

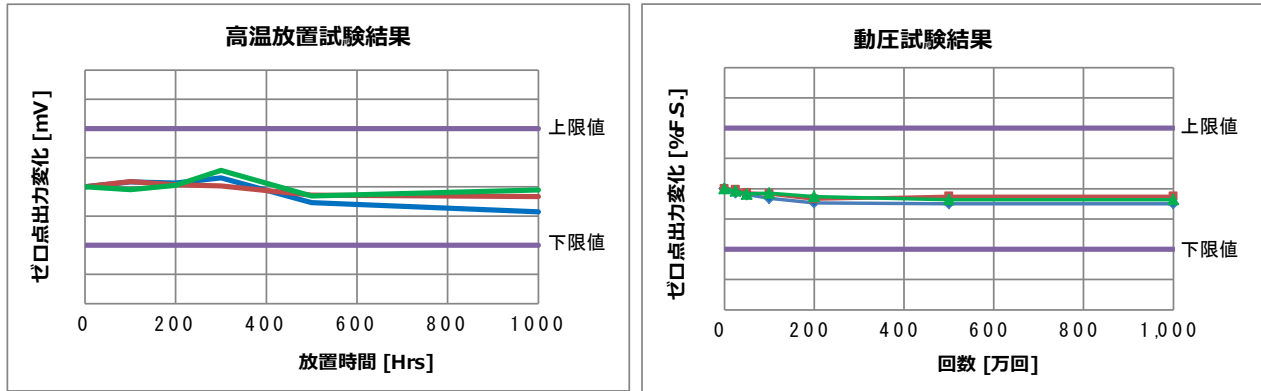


図 11. 貼付型厚膜センサ素子の安定性評価結果

剥離に至るまでの印加圧力と出力変化の関係はほぼ正比例を保っている。センサ素子が剥離する領域を超えても起歪体はバーストせず、圧力容器としての安全性を十分確保している。

センサ素子のゼロ点温度特性はゼロではないものの直線性に優れるため、補正は容易と考えられる。感度の温度特性は非常に小さい値に収まった。

安定性評価試験の結果も仕様を満たすものであり、特に動圧耐久 1,000 万回をクリアしたことは大きな自信となった。

(3) 高性能低コスト圧カトランスミッターの開発

本開発における第三の課題は、厚膜センサ素子を用いて高精度でありながら低コストな圧カトランスミッターを開発することである。

トランスミッターへの要求事項を解決する手段として以下数点の評価を行った。

- ・厚膜センサ素子の特性にマッチした ASIC の選択と回路レイアウト・補正プログラムの開発
- ・高温環境でも安定した接続を維持する実装方法の採用
- ・300MPa の圧力に耐えうる圧力容器の実現

以下、順に結果を述べる。

厚膜センサ素子は、従来の薄膜センサ素子と比較して歪感度が小さく圧力に対する大きな出力変化は望めないため、従来の ASIC を適用することができない。厚膜センサ素子の特性に合うと思われる ASIC を数点選定し、比較評価を行った。一例を表 6 に示す。

表 6. ASIC 仕様比較

	現行	A 社	B 社
パッケージ	○	◎	○
電源電圧	○	○	○
消費電流	○	○	○
供給電圧（過電圧保護）	○	◎	◎
動作温度範囲	○	○	○
保存温度範囲	○	◎	○
シグナルパス	-	-	-
補正方法	-	-	-
オフセット調整	◎	△	○
スパン調整	×	○	○
オフセット温度係数補正	○	◎	◎
スパン温度係数補正	○	◎	◎
ゲイン温度係数補正	△	○	○
直線性補正	○	○	◎
クリップ電圧補正	○	◎	○

出力電流	○	○	○
メモリ (EEPROM)	×	○	◎
総合評価	×	○	◎
備考	素子の出力が小さい場合、ゲインが足りない	オフセット調整範囲が狭い	オフセット、ゲインの調整範囲が厚膜センサ素子に適している

選定した ASIC を組み込んだトランスミッターを作製し、出力の補正を行う中で、補正のプログラムも従来通りでは十分でないことを確認した。厚膜センサ素子は薄膜センサ素子と比較して出力が小さいだけでなく、ノイズが大きいという特性を有しているからである。ノイズによる出力のバラツキが補正に与える影響を最小化し、かつタクトを満たすべく最適化を行っている。

使用温度範囲が $-40\sim 140^{\circ}\text{C}$ であることから、高温環境下における実装信頼性を高める目的で、採用するはんだの再評価を行った。評価の一例を以下の図 12 に示す。

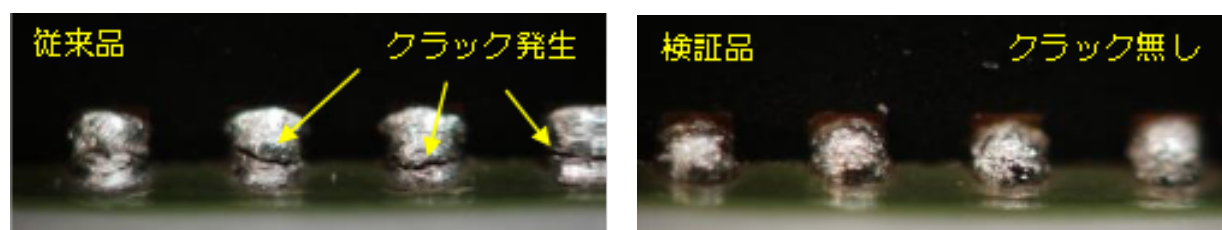


図 12. 熱衝撃 500 サイクル印加後のはんだ接続部比較

従来品は、熱衝撃 500 サイクル印加後にはんだ接続部にクラックの発生が観察されるが、検証品では観察されない。従来品より耐熱衝撃性に優れるはんだを選択することができた。

以上の結果を盛り込んで作製した圧力トランスミッターの外観を写真 3 に示す。

また、このトランスミッターの精度を $-40\sim 140^{\circ}\text{C}$ の使用温度範囲で評価した結果を図 13 に示す。



写真 3. トランスミッタ外観

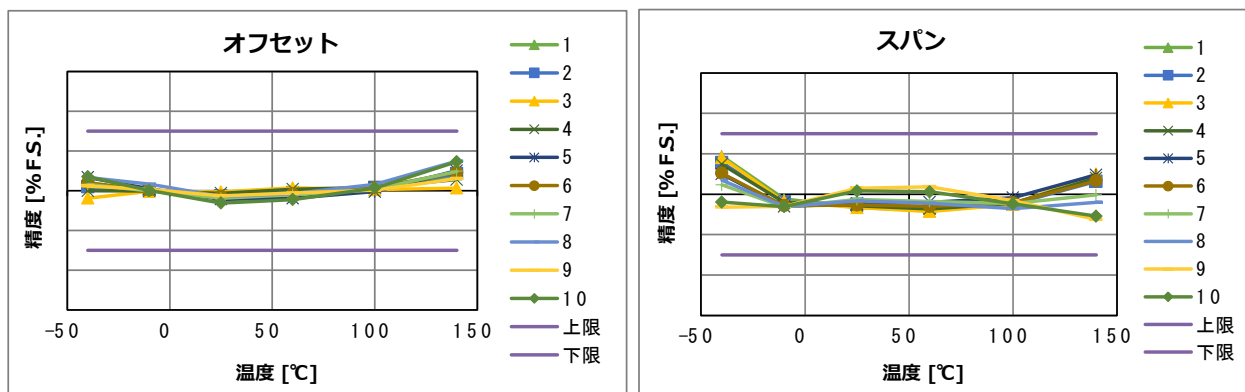


図 13. 使用温度範囲におけるトランスミッターの精度

使用温度範囲内で目標の精度 $\pm 1.5\%$ F.S.以内を十分満足する結果が得られた。今後は更なる高精度化を目指す。

圧力トランスミッターの常温および高温放置試験結果を以下の図 14 に示す。

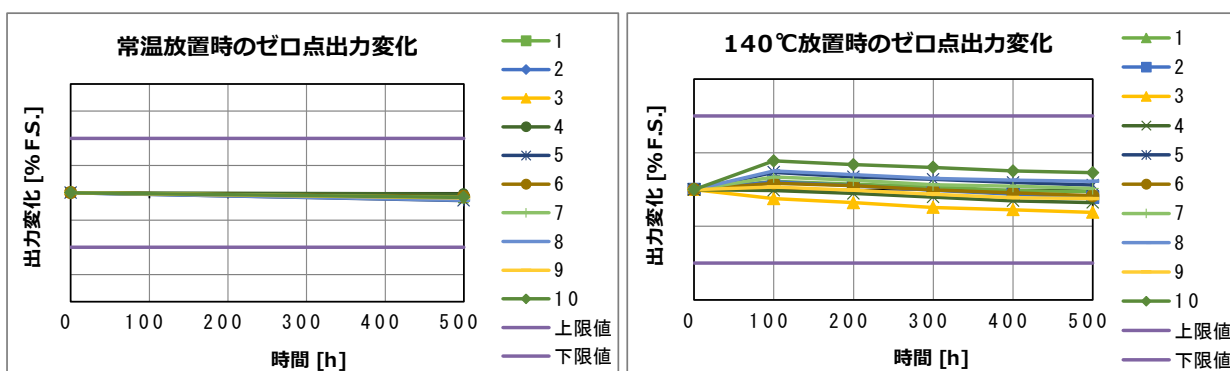


図 14. 常温放置および高温放置時のゼロ点出力変化

常温放置においては、ゼロ点出力変化がほぼゼロであった。140℃の高温放置においては、規格値内ではあるもののゼロ点が徐々にマイナスする傾向が確認されている。

耐電圧の評価も行い、1200V の仕様を満足できることを確認した。

最終章 全体総括

（１）H26 年度～H28 年度の研究開発成果

H26 年度および H27 年度の研究開発において、「高精度厚膜センサ素子の開発」に係わる、「厚膜センサ素子用印刷材料の調査・検証」、「高精度スクリーン印刷方法の確立」に取り組み、圧力センサ素子の要求仕様を満たした厚膜印刷材料を見出し、併せてその材料を用いた高精細な印刷技術を開発した。これらにより従来の後工程（レーザトリミング工程など）を併用することなく、圧力センサ素子のブリッジ出力のバラツキを従来の半導体歪ゲージを用いた圧力センサ素子と同等レベルに抑えることに成功した。これは高精度かつ高価な半導体製造設備を用いずにそれと同等の特性バラツキを実現出来ることから、圧力センサ素子に限定せず、厚膜印刷抵抗を応用するデバイスに対して、設備投資や工程数・リードタイムを削減できるため、要素技術としても応用範囲が広い。H28 年度には、高精細印刷技術について今後の量産時の安定稼働を視野に入れ、プロセスパラメータによる変動要素を調査し、管理ポイント等の検討も行った。

また、「厚膜センサ素子と継手の高安定接合技術の開発」においても、上記と同様に、「厚膜センサ素子と継手の接合材料（低融点ガラス）の調査・検証」と「厚膜センサ素子と継手の接合方法の確立」のテーマにより、材料開発とプロセス開発を行い、その結果として信頼性の高い接合技術を確立してきた。ここで接合技術に求められることは、セラミックセンサ素子が金属起歪体に対して亀裂や剥離が生じない接合強度と、圧力で発生した起歪体の歪みをセラミックセンサ素子に外乱なく伝達することである。H27 年度および H28 年度は、接合品質の信頼性向上を目的に様々なパラメータに関する影響度調査について重点的に取り組むことで接合技術に対する多くのバックデータや知見が得られ、信頼性向上や量産時のバラツキ低減のノウハウを獲得した。

そして、最終的な開発テーマである「高性能低コスト圧カトランスミッターの開発」については、先に開発した厚膜印刷による歪ゲージの特性に最適化した補正回路（専用 IC ならびに周辺回路）の開発と、併せてそれらに組み込む補償プログラムのアルゴリズム開発を行い、圧カトランスミッターの試作評価の結果、到達目標として設定した圧カトランスミッターの開発仕様に対して、それらを満足する結果が得られた。

また開発した圧カトランスミッターは、一部の部品を既存製品と共通化することで部品コストの量産効果を取り入れつつ、センサ素子は印刷・焼成技術で製造することが可能となり、高コストな半導体蒸着ラインを必要としなくなるため、製品コストの低減の見込みが得られた。

（２）研究開発後の課題・事業化展開

従来ヨーロッパの自動車業界において、ディーゼルエンジン用コモンレールシステムの需要は年間 400 万台であり、同システムの自動車への搭載率は年々上昇傾向にあり、H30 年に向けて 5 年間で 20% の増加が見込まれており、これに使用する圧カトランスミッターも同様の増加が見込まれている。なお、現時点では競合他社の製品がこのうちの約 60% を占めているが、長野計器(株)は本開発製品である高性

能低コスト圧カトランスミッターにより巻き返しを図っている。

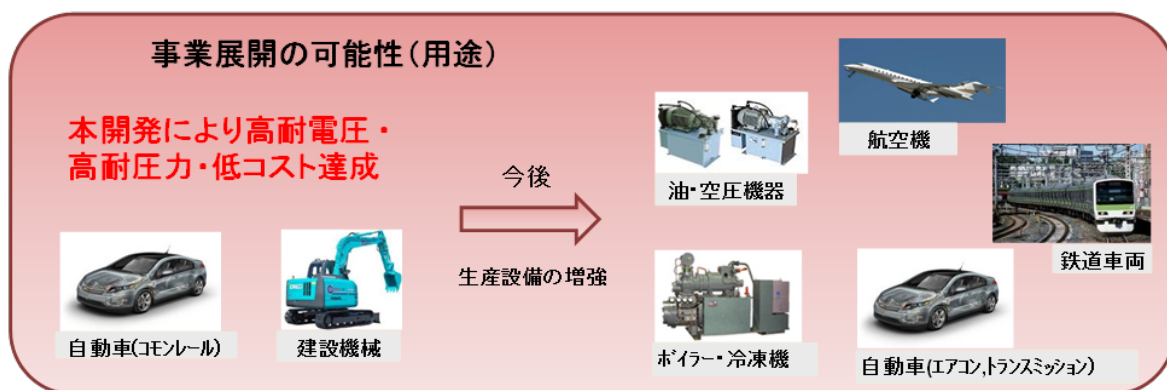
既存顧客であるヨーロッパの車載用システムメーカーからは初期検証用サンプルの要望が入っており、本研究開発の期間中にサンプル品の出荷を予定していた。現時点では、この様な状況について、ハイブリッド車の普及やその他の諸事情から、業界の動きも若干計画が延びている部分もあるが、次世代コモンレールシステムの開発は留まることはなく、それに伴う超高压圧力センサへの要求は続いている。車載用途については、その性格上、他の分野に比べて一層の品質確保と低コストが求められ、量産実車搭載までには多くの品質検証ステップが必要となるが、最終顧客である自動車メーカーの承認を得て受注獲得を目指す。さらに、最初の自動車モデル（車種）に採用実績を得た後には、順次他車種への採用あるいは他メーカーに対しても受注が得られる様に営業活動を進める。

建設機械業界においては、H30年に100万台の国内需要が見込まれており、この大半が高耐電圧仕様と推定される。また、海外においては新興国を中心として国内需要の約3倍が見込まれている。

長野計器(株)は金属ダイアフラムを用いた蒸着型圧力センサにおいて、主要建設機械メーカーと取引があるが、今回の研究開発のきっかけの一つでもある高耐電圧・低コストの要求に対して、開発品について大きな関心を寄せるとともに、顧客の次期モデルへの採用選定に向けて情報交換を行っている。建設機械用途についても、製品開発～顧客評価を経て受注獲得および国内外への拡販を図る。

なお、上記2つの業界に留まらず、一般産業分野、鉄道車両・航空機分野でも様々な油空圧機器があり、圧力センサが用いられている。これらの分野では、省エネ目的のインバータ制御や海外での厳しい仕様・環境で利用されることが多くなっており、それに伴い圧力センサに対する電氣的要求仕様も厳しくなっている。また海外を含めた競合メーカーが多数存在し、コスト面でも厳しい対応を迫られている。長野計器(株)は圧力計測機器の専門メーカーとして、これらの市場においても多くの既存顧客を獲得しているが、グローバル競争の進む中で競争力を確保していく上で、今回の研究開発で得られた成果は極めて有効である。

当面の具体的なターゲットとしては、油圧ポンプの制御用圧力センサ・圧力スイッチの製品開発を検討している。さらには「厚膜印刷による歪ゲージ形成技術」や「セラミック基板を用いた厚膜センサ素子の接合技術」の確立により、従来対応出来なかった製品形状・形態に対して圧力センサ素子を形成することや、その他の要素技術や構造を組み合わせることで、新たな製品開発や用途開拓などの展開が期待出来る。



以上