

平成31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

「航空機用燃料非接触防爆型油量計システムの研究開発」

研究開発成果等報告書

令和2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	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	5
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章 本論	
2-1 航空機に搭載可能な光学式油量計の原理確立	8
2-2 ARP4754 信頼性設計手法の確立	13
2-3 DO-178 ソフトウェア認証手順の確立	14
2-4 システム構築と地上試験	15
第3章 全体総括	
3-1 研究開発成果	16
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	16

# 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

我が国では、民間航空機の国際共同開発を通じて Boeing 等の完成機メーカーの受注契約を獲得し、民間航空機市場を拡大してきた。しかし、図 1-1 に示すように、こうした市場参入は、航空機の構成部位のうち、機体・構造、エンジンが主な対象であり、構成部品の約 40%を占める装備品の市場獲得が不十分であることから、国策として航空機装備品産業の育成が進められている。(基幹産業化に向けた航空ビジネス戦略に関する関係省庁会議「戦略的次世代航空機研究開発ビジョン」(H26.8)等)



一般的な航空機の価格配分 米国の航空機産業売上高(2012) 日本の航空機産業売上高(H27)

図 1-1 航空機の構成部位毎の価格配分と日米の航空機産業の比較

航空装備品分野は、図 1-2 のとおり欧米企業が上位を独占している。これは、欧米の装備品メーカーの多くが、システムやサブシステム(例えばパイロット・コントロール・システム、航空電子システム、飛行制御システム等)を製造する巨大なシステム・インテグレータとしてビジネス展開しているのに対し、我が国のメーカーは、コンポーネントレベルの製造に止まっていることが原因である。そのため、我が国では、コンポーネント部品を組み合わせ、システム製品とする開発力を強化することで、航空装備品市場に食い込む方針を立てている。

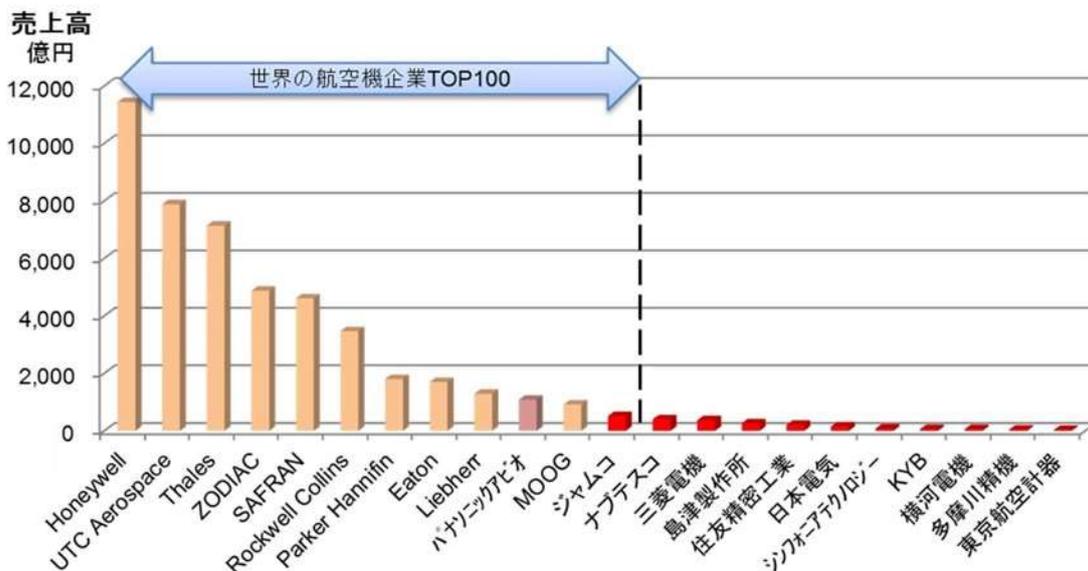


図 1-2 世界の航空装備品メーカー (出典:Flight International 18-24 Sep.2012 「Aerospace Top 100」及びSJAC 調査)

こうした背景から、多摩川精機及び信州大学は、装備品システムの一つである補助燃料タンクシステム（Auxiliary Fuel Tank System、以下AFTS）の開発を目指し、平成28年度に、経済産業省「地域中核企業創出・支援事業」の支援を受け、「民間航空機に搭載可能な補助燃料タンクシステムの開発可能性に関する調査研究」を実施した。

AFTSは、航空機の航続距離を延ばすために、追加でタンクを搭載し、燃料量を増加させるシステムである。燃料を貯蔵する構造体、防爆性に優れた油量表、燃料を移送する制御系、それらを本体と接続するコンピュータシステムとソフトウェアなど、小振りではあるが一通りの民間航空機の装備品コンポーネントを揃えたシステムであることから、AFTSの開発は、装備品のシステム技術を確立する最初のステップとして、適切な対象であると考え、上記の調査研究を行った。その結果、「我が国における補助燃料タンクシステムの開発は十分に可能であり、その開発に向け、ライバル製品に対する優位技術として、防爆性に優れた非接触式油量表の研究開発を行うことが適切」、との結論が出された。

○ 従来技術の問題点

航空機用油量表は燃料タンクに設置し、搭載されている燃料高さを計測する装置であり現在、静電容量方式が大多数を占める。静電容量方式は中心電極と外電極の2つの電極より構成され、電極間の静電容量を検出する。空気と燃料では静電容量が異なり、燃料量に比例した静電容量を検出することにより液面高さを検出する。しかし、航空機の燃料系システムは、1996年の爆発事故が発生したことをきっかけに、2008年よりFAA（米国連邦航空局）の爆発性に関する安全レギュレーションが厳しくなり、航空機メーカーでは電気回路部が燃料に非接触で検出する油量表のニーズが高い。

○ 新技術の開発

提案する補助燃料タンクシステムでは、図1-4のとおり、油量表の電気系統を燃料と非接触とすることにより、爆発の点火源となり得ないようにするとともに、従来の空気圧送方式を窒素圧送方式とし、2重の安全性を実現する。

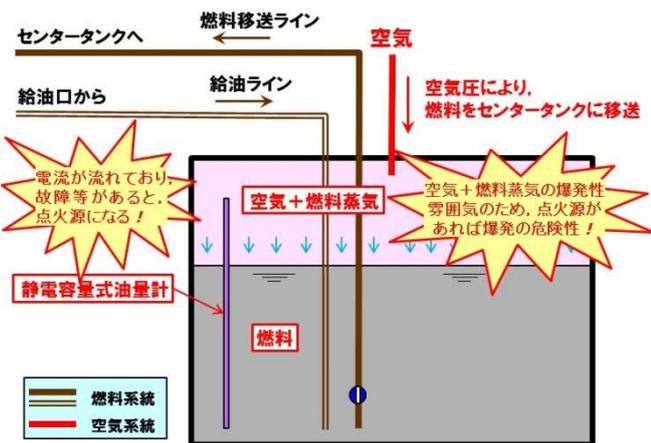


図 1-3 従来の補助燃料タンクシステム

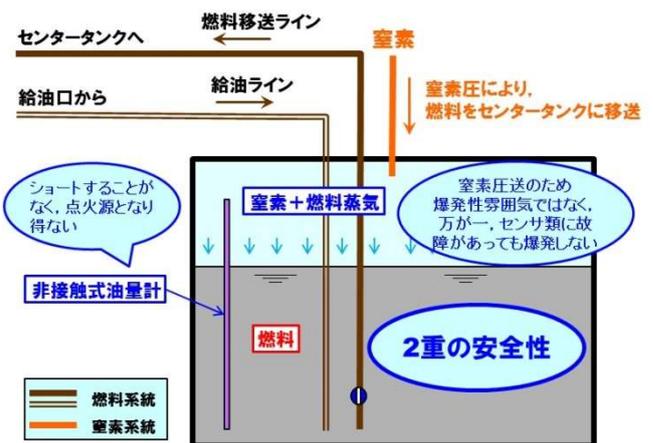
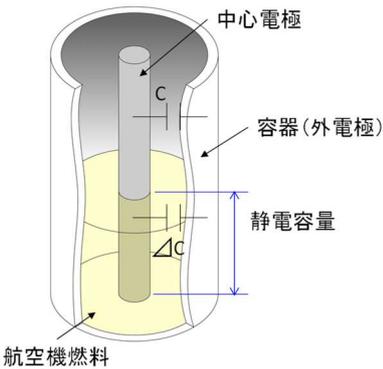
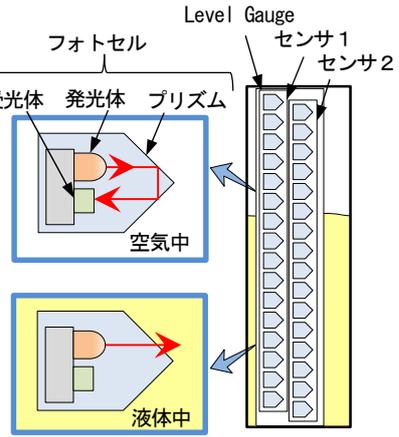


図 1-4 提案する補助燃料タンクシステム

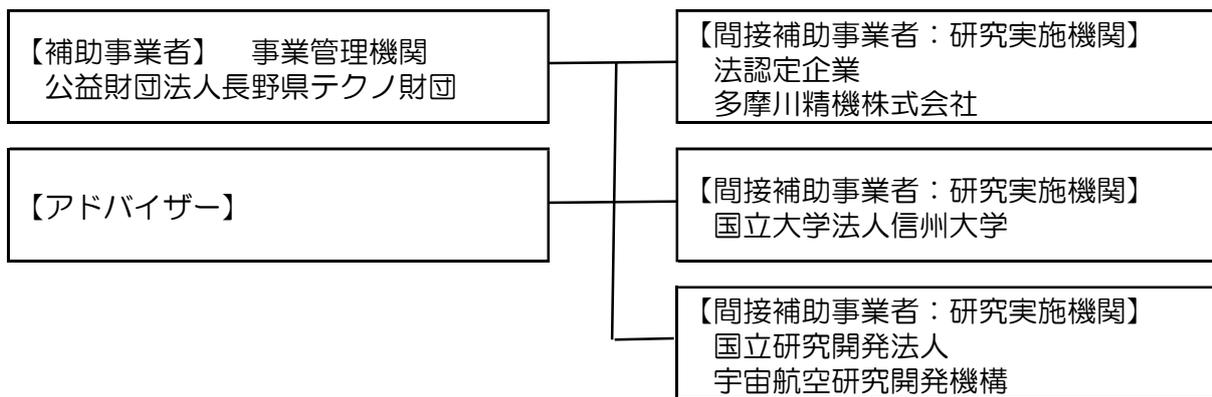
このような、世界に例を見ない高い安全性を持つ補助燃料タンクシステムの開発には、電気系統が燃料非接触で燃料量を検出できる航空機に搭載可能な光学式の油量表の開発が技術課題となる。

表 1-1 従来技術と新技術の検出方法

項目	従来技術	新技術
検出方法	<p>静電容量式油量計 中心電極と外電極の間に電界をかけると、その間に静電容量が生じる。中心と容器の間に何らかの物質が存在すると、物質特有の比誘電率に比例した静電容量が生じる。その差で液面の高さを検出する。</p> 	<p>光学式油量計 光学式レベルスイッチを並べる。空気中では、光はレンズに反射されるが、レンズが液体で濡れていると光はレンズを透過する。スイッチが ON/OFF する位置で液面高さを検出する。</p> 
従来技術の課題及び新技術による課題解決方法	電極間が燃料と接触しているため、ショートすると発火する恐れがある。	光検出とすることで、電気系統が燃料に非接触となり、安全である。

1-2 研究体制

1-2-1 実施体制・管理体制



※航空機関連メーカーよりアドバイザーを招き、研究開発計画全般における助言を受けた。

1-2-2 研究者等氏名

【研究実施機関】 多摩川精機株式会社

氏名	所属・役職	実施項目	備考
熊谷 秀夫	専務取締役	総括研究代表者	PL
嶽野 雄二	スペースエレクトロニクス研究所 理事（所長）	【1-3】	
熊谷 隆志	技術品質統括部 理事	【1-1】 【1-2】 【1-4】 【2-1】 【4-2】 管理全般	
安藤 箇浦	スペースエレクトロニクス研究所 特機技術課 課長	【1-4】 【4-1】 【4-2】 【4-3】	
北原 和仁	スペースエレクトロニクス研究所 特機技術課 主任	【1-3】 【3-1】 【3-2】 【3-4】 【4-2】	
池上 幸紀	スペースエレクトロニクス研究所 特機技術課 主任	【1-1】 【1-2】 【1-3】 【1-4】 【2-1】 【2-2】 【2-3】 【3-1】 【3-2】 【3-4】 【4-1】 【4-2】 【4-3】	

【研究実施機関】 国立大学法人信州大学

氏名	所属・役職	実施項目	備考
菊池 良巳	工学部 教授	副総括研究代表者 【1-1】 【2-1】 【2-2】 【2-3】 【3-1】 【3-4】 【4-1】 【4-2】 【4-3】	SL
柳原 正明	工学部 教授	【2-1】 【2-2】 【2-3】 【3-1】 【3-4】	
篠崎 厚志	研究員	【1-1】 【1-2】 【1-3】 【1-4】	
佐藤 敏郎	工学部 教授	管理全般	
半田 志郎	副学長	管理全般	
曾根原 誠	工学部 准教授	管理全般	

【研究実施機関】 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

氏名	所属・役職	実施項目	備考
伊藤 健	航空技術部門 次世代航空イノベーションハ ブ 副ハブ長	管理全般	
跡部 隆	航空技術部門 次世代航空イノベーションハ ブ 主幹研究開発員	【2-1】 【2-2】 【2-3】 【3-1】 【3-2】 【3-3】 【3-4】	
田頭 剛	航空技術部門 次世代航空イノベーションハ ブ 主任研究開発員	【2-1】 【2-2】 【2-3】 【3-1】 【3-2】 【3-3】 【3-4】	
藤原 健	航空技術部門 次世代航空イノベーションハ ブ 主任研究開発員	【2-1】 【2-2】 【2-3】 【3-1】 【3-2】 【3-3】 【3-4】	

### 1-3 成果概要

航空機搭載用の実機モデル試作品を製作し、既存静電容量型の油量計の精度±2%以下より精度の高い±1%以下の精度を実現した。また、Qualification Test にて航空機搭載環境下における機能性能を評価し、さらに上位システムの補助燃料タンク模擬システムへ接続してシステム検証した。油量計構造に一部改良が必要であるものの、航空機に搭載可能な光学式油量計システムが完成できた。

信頼性設計では、ARP4754 信頼性設計を学習し、本油量計システムにて実践し、ARP4754 が定めるチェックリストに基づくレビューを実施した。レビュー時の指摘事項を取りまとめ、その結果を情報共有することで ARP4754 信頼性設計手法を確立した。

ソフトウェア設計では、DO-178 に基づいたソフトウェア設計を実践し、DER による模擬レビューを通じて DO-178 に係る全ての認証プロセスの理解が得られたことで、航空機用備品のソフトウェア認証のノウハウを蓄積できた。

### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

池上 幸紀

多摩川精機株式会社

電話：0265-21-1985

FAX：0265-21-1881

Email：yukinori-ikegami@tamagawa-seiki.co.jp

## 第2章 本論

### 2-1 航空機に搭載可能な光学式油量計の原理確立

燃料タンクの燃料量を電気系統と非接触で検知でき、耐空性（耐振性、耐衝撃性、耐温度性、耐湿性、耐カビ性、耐腐食性）、冗長性、信頼性、安全性を有し、航空機に搭載可能な防爆型非接触式油量計システムを開発する。

#### 【1-1】検出構造検討

振動・衝撃環境下、高度変化（周囲気圧変化）環境下におけるタンク内燃料量の光学式検出構造の確立。静電容量方式より高精度な $\pm 1\%/F.S.$ の実現。

#### 【1-2】レンズ材質選定

耐燃料性、光透過性、強度、耐温度性、耐腐食性、耐カビ性、経年劣化を考慮したプリズム材質の選定並びに評価試験手順の確立。

#### 【1-3】検出回路設計

燃料量検出回路設計、冗長系回路、長寿命化の技術、EMI 回路設計。

#### 【1-4】評価

実機搭載品を製作し、精度測定、航空機搭載環境下での機能性能を評価する。

リージョナルジェットの補助燃料タンクシステムに搭載される『光学式油量計システム』を設計コンセプトとし、仕様を設計した。

検出原理は、プリズム、発光体及び受光体にて構成されたフォトセルを使用し、空気中では、発光体からの光はプリズムで全反射され、受光体に光が入射されるが、燃料中では光はプリズムを透過する。フォトセルを縦に並べ、燃料の液面高さによる受光体の信号数をモニタして液面高さを検出するものである。

2列配列によりA列とB列を互いに監視し合うことで、ビルトインテストによる発光・受光回路の故障を検出できるようにした。また、片列が故障しても片列にて液面検出できるよう2重冗長系となる回路とした。さらに、100個以上の発光体受光体を5芯で制御し、発光体の点灯時間を最小化することで、省電力化及び発光体の寿命を延ばすことができる制御回路にすることで高信頼性を実現した。

燃料のスロッシング対策として信号出力を遅延させる機能により液面高さ出力を平滑する機能を搭載し、スプラッシュの飛散による誤検出を無くすため、プリズム面を覆うためのカバーを設置した。また、霜がプリズム表面に付着しても誤作動することなく、燃料の液面高さを測定できる構造を考案した。

Processor Unit には、CPU が搭載され、Level Gauge と密度センサからの出力信号からタンク内部の液体の搭載質量を計算し、ARINC429 のシリアル通信にて燃料量データを機体アビオニクスに送信することができる。また、EMI ノイズを低減させるフィルタを搭載し、Level Gauge を保護する。

実機搭載品を製作し、評価した結果、静電容量方式の精度はフルスケールの $\pm 2\%$ 以下に対して、本油量計は $\pm 1\%$ 以下の精度を実現できた。また、ヒステリシスもなく、温度変化による精度変化もほとんどないことを確認した。

高低温高度試験、湿度試験、振動・衝撃試験、汚染燃料試験、防爆試験、EMI 試験、燃焼性試験、力

ビ試験等の Qualification Test を実施し、油量計構造に一部改良が必要であるものの、航空機に搭載可能な光学式油量計システムが完成できた。

Optical fuel gauging system

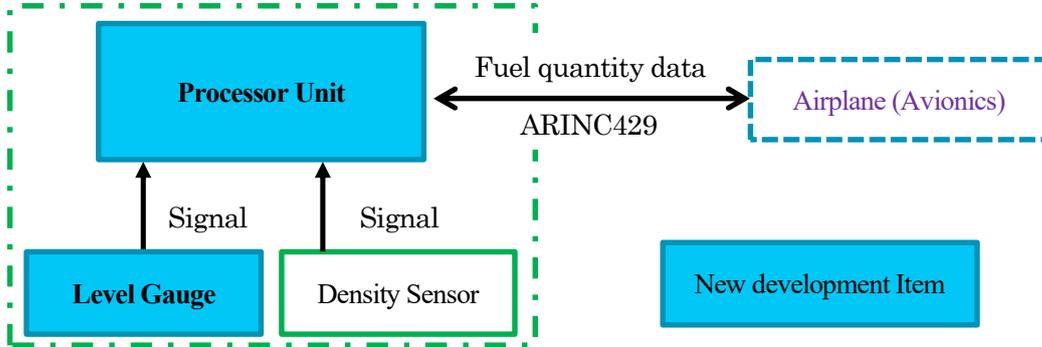


図 2-1 光学式油量計システムブロック図



Level Gauge (LG)



Processor Unit (PU)



Level Gauge にて検出した液面の高さに対応するタンク内の燃料量を、Processor Unit にて計算して上位システムへデータを送信

タンク内燃料測定状況

図 2-2 光学式油量計システム開発品

表 2-1 Qualification Test 結果

No.	Qualification	Summary	Level Gauge	Proceesr Unit
1	Individual Test			
1.1	Product Inspection	appearance, dimensions, mass, etc.	良好	良好
1.2	Scale Error	AS405D Paragraph 6.1	良好	良好
1.3	Leak Test	AS405D Paragraph 6.3	良好	N/A
1.4	Position Error	AS405D Paragraph 6.4	良好	良好
1.5	Power Variation Test	AS405D Paragraph 6.5	良好	良好
1.6	Maximum Operating Temperatures	AS405D Paragraph 6.7	良好	N/A
1.7	Hysteresis Error	TSO-C55a APPENDIX 1. Paragraph 3	良好	良好
1.8	Speed of Response	TSO-C55a APPENDIX 1. Paragraph 3	良好	良好
2	Roll/Pitch Test	Scale Error of tilting the level gauge	良好	良好
3	Low Temperature	AS405D Paragraph 7.1.1	解決済み	良好
4	High Altitude-Low Temperature	AS405D Paragraph 7.1.2	解決済み	良好
5	Water Immersion Test	AS405D Paragraph 7.2	良好	良好
6	Vibration	RTCA/DO-160G, Section 8	良好	良好
6.1	Resonance	AS405D Paragraph 7.3.1	良好	良好
6.2	Cycling	AS405D Paragraph 7.3.2	良好	良好
7	Humidity	AS405D Paragraph 7.4	良好	良好
8	Operational Shock Test	RTCA/DO-160G, Section 7	良好	良好
9	Explosion Proof Test	RTCA/DO-160G, Section 9	良好	良好
10	Contamination Fuel	Operation verification in the contamination of the level gauge.	良好	良好
11	Power Input Test	RTCA/DO-160G, Section 16	良好	良好
12	Voltage Spike Test	RTCA/DO-160G, Section 17	良好	良好
13	Audio Frequency Conducted Susceptibility Test	RTCA/DO-160G, Section 18	良好	良好
14	Induced Signal Susceptibility Test	RTCA/DO-160G, Section 19	良好	良好
15	Radio Frequency Susceptibility Test	RTCA/DO-160G, Section 20	良好	良好
16	Emission of Radio Frequency Energy Test	RTCA/DO-160G, Section 21	良好	良好
17	Lightning Induced Transient Susceptibility	RTCA/DO-160G, Section 22	良好	良好
18	Electrostatic Discharge Test	RTCA/DO-160G, Section 25	良好	良好
19	Flammability	RTCA/DO-160G, Section 26	良好	N/A
20	Fungus Resistance	RTCA/DO-160G, Section 13	保留	N/A

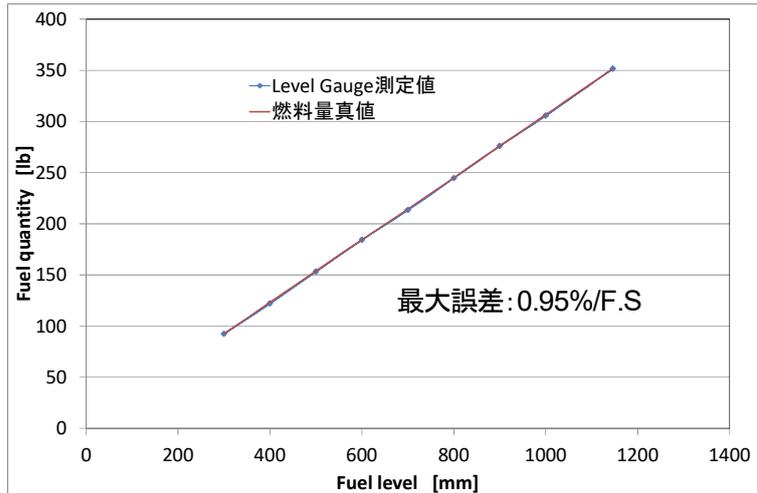


図 2-3 精度測定結果

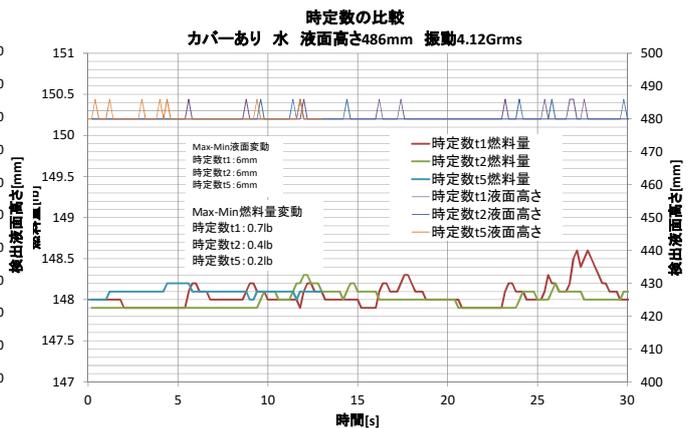
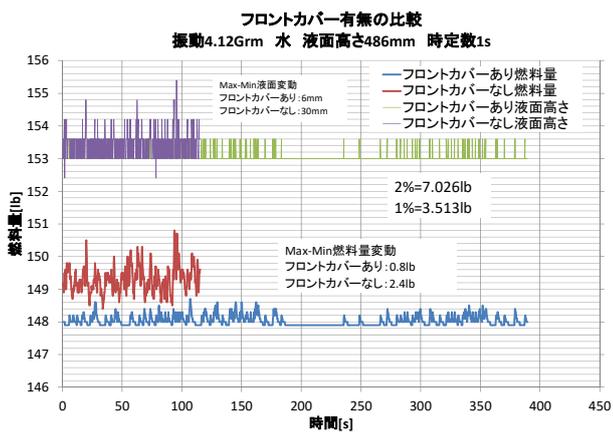


図 2-4 液面揺れ検証試験結果

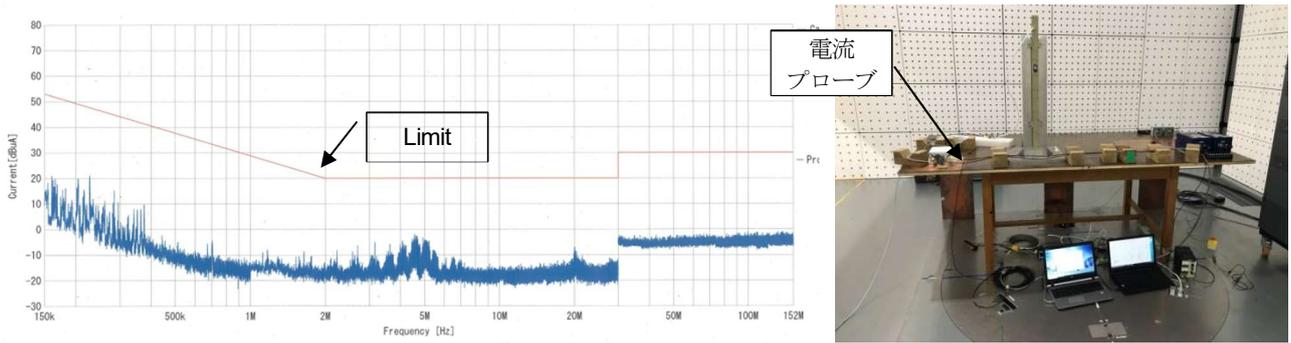


図 2-5 Conducted RF emission (CE) 150k~152MHz Power

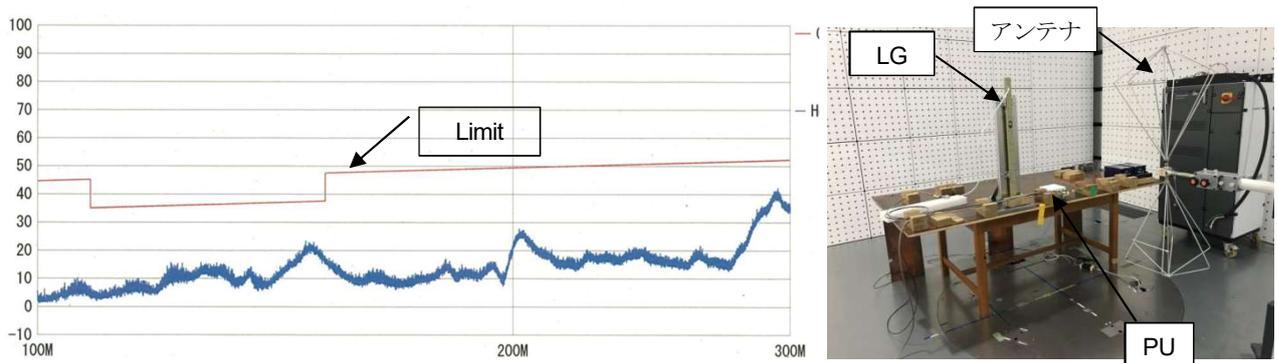


図 2-6 Radiated RF emission (RE) 100MHz~300MHz

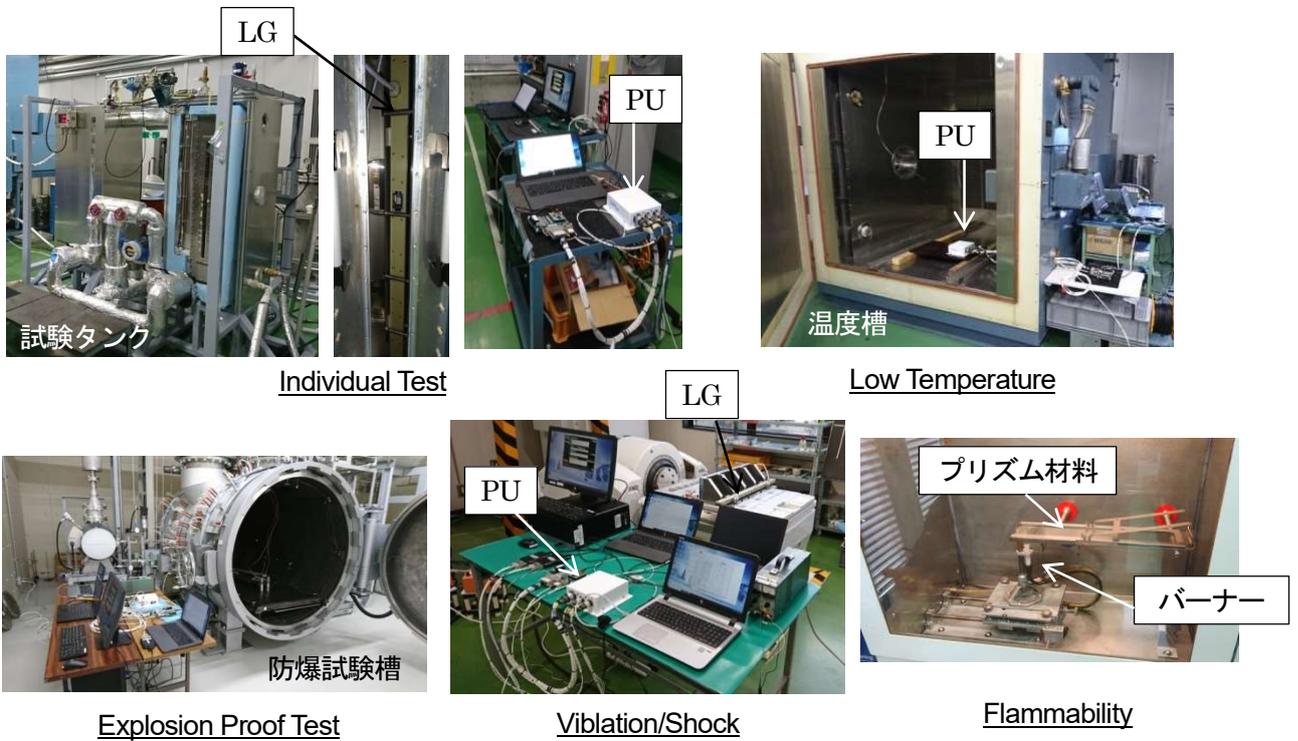


図 2-7 Qualification Test 風景

## 2-2 ARP4754 信頼性設計手法の確立

民間航空機に搭載する装備品システムは、高い信頼性を確保するため、ARP4754 規格に沿った開発を行わなければ機体に搭載することが許可されないが、我が国では、信頼性設計手法が確立されていない。JAXA のイノベーションハブの航空機認証プログラムと連携し、光学式油量計の設計を通じて ARP4754 信頼性設計手法を確立する。

### 【2-1】信頼性設計手法学習

ARP4754 信頼性設計手法を習得する。

### 【2-2】油量計システムの信頼性設計

信頼性設計手法を油量計システムの設計にて実践する。

### 【2-3】JAXA によるレビュー

ARP4754 が定めるチェックリストに基づくレビューを実施し、ARP4754 信頼性設計手法を確立する。

ARP4754 を学習し、CERTIFICATION PLAN を計画し、光学式油量計の設計にて実践した内容をレビューした。レビュー時の指摘事項を取りまとめ、その結果を情報共有することで ARP4754 信頼性設計手法を確立した。

また、安全性解析においては、System Functional Hazard Assessment (SFHA) / Preliminary System Safety Assessment (PSSA) より設計保証レベル (DAL) を設定し、Fault Tree Analysis (FTA) の結果より PSSA にて設定した DAL を満足するシステムであることを確認した。これにより油量計システムの安全目標設定、設計評価から検証までの一連のプロセスを実践した。

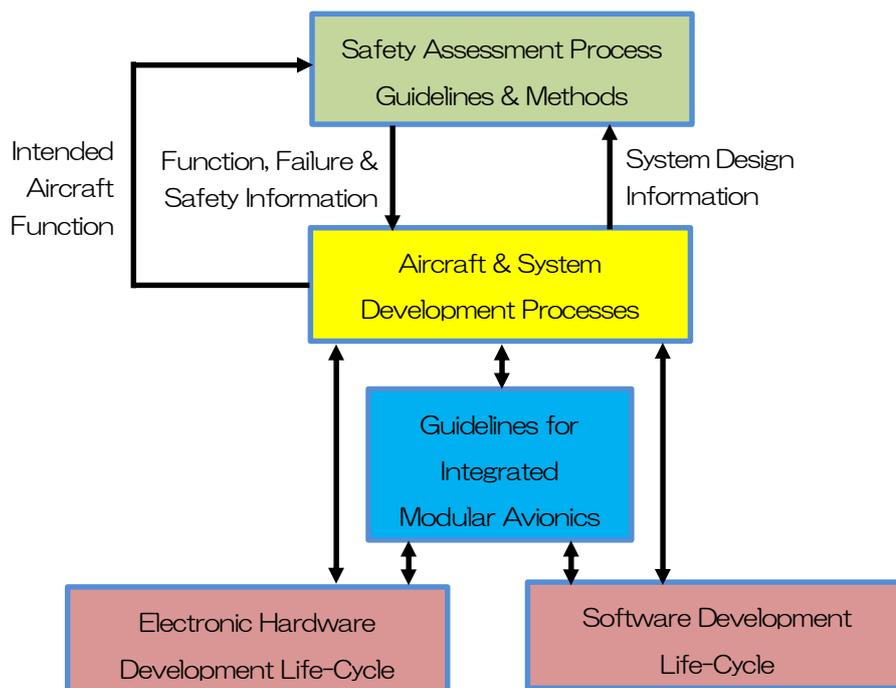


図 2-8 ARP4754 安全・開発保証に関するガイドライン

## 2-3 DO-178 ソフトウェア認証手順の確立

JAXA のイノベーションハブの航空機認証プログラムと連携し、DO-178 ソフトウェア認証手法を習得する。

### 【3-1】ソフトウェア認証手法の習得

DO-178 ソフトウェア認証手法を習得する。

### 【3-2】燃料量計算プログラム及び ARINC429 通信プログラム仕様作成

機体姿勢に対応した燃料量計算アルゴリズム及び機器間の通信仕様を確立する。

### 【3-3】油量計システムのソフトウェア設計

光学式油量計システムのソフトウェア設計を DO-178 認証手順に沿って実践する。

### 【3-4】DER によるレビュー

実践した DO-178 ソフトウェア設計について DER の模擬レビューを受ける。

接続機器との通信仕様を設計し、Processor Unit のソフトウェア仕様及びメンテナンス仕様を設計した。また、タンク搭載燃料量を計算するには、Level Gauge の液面高さ信号より搭載燃料体積を求めるが、航空機は機体姿勢によって検出する液面高さが変動するため、機体姿勢に対応した燃料量を計算するアルゴリズムを開発した。

上記仕様に基づき DO-178C ガイドラインに則って油量計システムのソフトウェアを開発し、DER による一連の模擬レビューを実施した。細かい指摘はあったものの概ね了解を得られ、これにより DO-178 に係る認証プロセスが確認された。

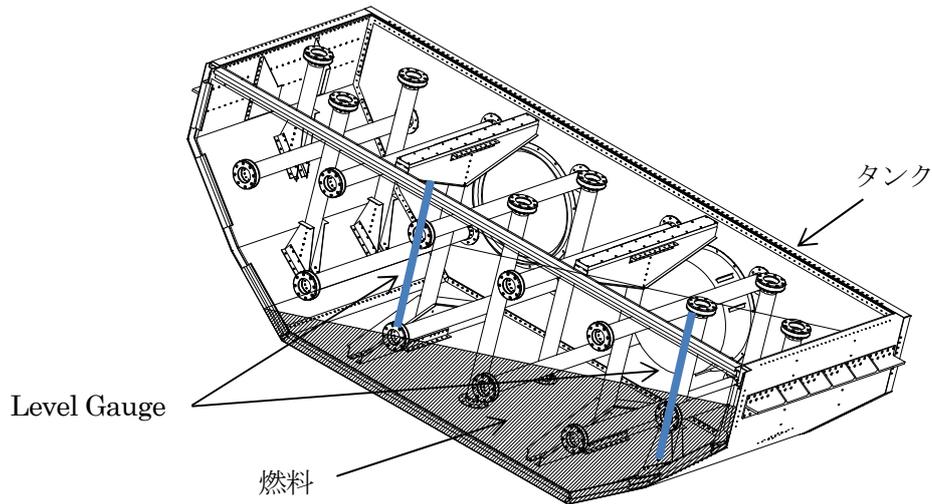


図 2-9 タンクが傾いた時の液面のイメージ

## 2-4 システム構築と地上試験

上位システムである補助燃料タンクシステムに油量計システムを接続した時に、誤作動を起こさないよう、正しく統合する技術を確立する。

### 【4-1】システム構築

上位システムの補助燃料タンクシステム模擬システムの仕様設計及び関連機器を製作し、システムを構築する。

### 【4-2】油量計システム 地上システム試験

DO-160 環境試験等を実施し、航空機環境下における光学式油量計システムの機能性能を評価する。

### 【4-3】補助燃料タンクシステム搭載 地上システム試験

補助燃料タンクシステムに光学式油量計システムを接続し、補助燃料タンクシステムの機能に統合できるレベルであるかを評価する。

補助燃料タンク模擬システムの関連機器を設計製作した。また、関連機器を接続して、機能シーケンスを実行/検証することでシステム仕様をブラッシュアップし、システムを構築した。

完成した油量計を上位システムの補助燃料タンク模擬システムに接続させ、AIR モード時の補助燃料タンクから機体タンクへの燃料移送機能、アラート機能、GROUND モード時の給油機能などの補助燃料タンクシステムの一連の機能に統合することができた。

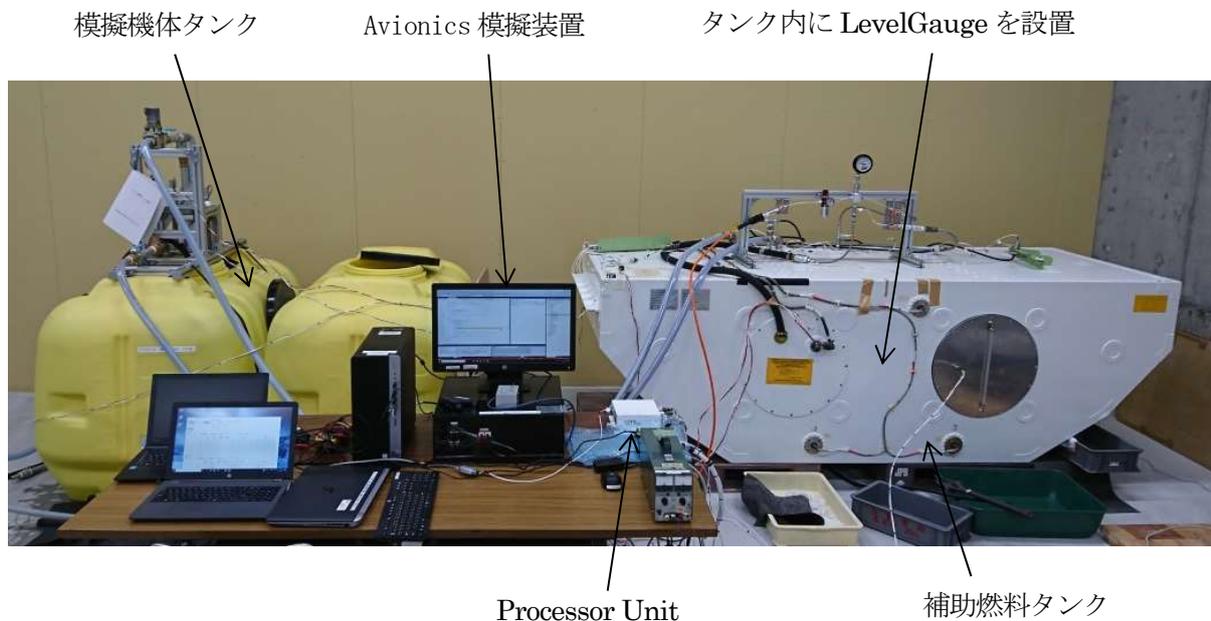


図 2-10 補助燃料タンク模擬システム統合試験

## 第3章 全体総括

### 3-1 研究開発成果

本補助事業にて以下の研究開発成果を得られた。

- 精度がフルスケールの±1%以下で航空機に搭載可能な光学式油量計の製造に目途が付けることができた。
- ARP4754 信頼性設計及び DO-178 ソフトウェア認証設計を实践、レビューしたことで認証設計手法を確立することができた。
- 光学式油量計システムの上位システムである補助燃料タンクの模擬システムを設計することで補助燃料タンクシステムのシステム仕様を構築することができた。
- 静電容量方式に比べ、以下の特徴を有する光学式油量計を開発することができた。

#### ■ 光学式油量計の特徴

##### (1) 低コストで設置可能

光学式油量計は、温度依存性がないため、静電容量方式に必要な補正器の設置が不要

##### (2) 校正が簡単

光学式油量計は、温度による測定誤差がなく、静電容量方式に必要な温度校正の必要がない。

##### (3) 電源投入後すぐ計測可能

光学式油量計は、静電容量方式に必要なウォームアップ時間がなく、電源投入後に瞬時に正確な計測ができる。

##### (4) 容易なメンテナンス

光学式油量計は、液面高さそのものを計測するため、静電容量方式にて発生しやすい経年による精度変化がない。

また、ビルトインテストにより、故障箇所をすばやく特定できる。これにより、故障したセンサーのトラブルシューティングと交換に関連するメンテナンスとサポートのコストが削減できる。



量産モデルデザイン

### 3-2 研究開発後の課題・事業化展開

本事業の油量計システム試作品の情報提供や航空機関係の展示会への出展・調査を通して事業化に向けた協業メーカーとのつながりができてきた。航空機業界では搭載実績が重要視されることから、今後の事業化に向けては実績のある海外メーカーとの協業を目指し、海外有力メーカーとのコンタクトを継続する。また、本油量計に興味を示している国内機体メーカーとは、これまで何度も情報交換を行ってきており、継続して取組みを進めていく。

また、航空機分野以外の業種について油量計の市場動向を調査し、活用できる産業を開拓する。