

航空機用先進システム基盤技術開発 (航空機システム革新技術開発) 「デジタル通信システム」の概要について

平成27年3月26日
日本無線株式会社 ソリューション技術部
レーダシステムグループ

目次

1. プロジェクトの概要
2. 目的・政策的位置付け
3. 目標
4. 成果、目標の達成度
5. 事業化、波及効果
6. 研究開発マネジメント・体制等
7. 事前〔中間〕評価結果

1. プロジェクトの概要

概要	ATM(Air Traffic Managementの略、航空交通管理のこと)の近代化計画である、欧州のSESARや米国のNextGenおよび我が国のCARATS計画における、通信・航法・監視分野にて共通して必要となる航空機と地上間の情報伝達のためのデジタル通信技術の一つとされているL-band デジタル通信システムの開発を行う。
実施期間	平成23年9月～平成25年3月
予算総額	平成23年度 約0.3億円 平成24年度 約0.4億円
実施者	日本無線株式会社
プロジェクトリーダー	(旧)電波応用技術部 高周波応用技術グループ 桐山 勉(課長) (現)ソリューション技術部 レーダシステムグループ ※H24年6月に組織変更あり

SESAR: Single European Sky ATM Research の略、EUROCONTROLによる単一欧州航空交通管理プログラムのこと。

NextGen : Next Generation Air Transportation System の略、FAAによる次世代航空輸送プログラムのこと。

CARATS : Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic System の略、国土交通省による将来の航空交通システムに関する研究会のこと。

L-band :1 GHz 帯の周波数

2. 目的・政策的位置付け(1/4)

現在の運行管理通信は？

・航空機運航管理通信は従来、音声による通信が主力であったが、定型的な通信については極力データに置き換えて通信するようになった。しかし、将来の航空機運航管理システムに対しては、更なる高速データ通信が求められている。

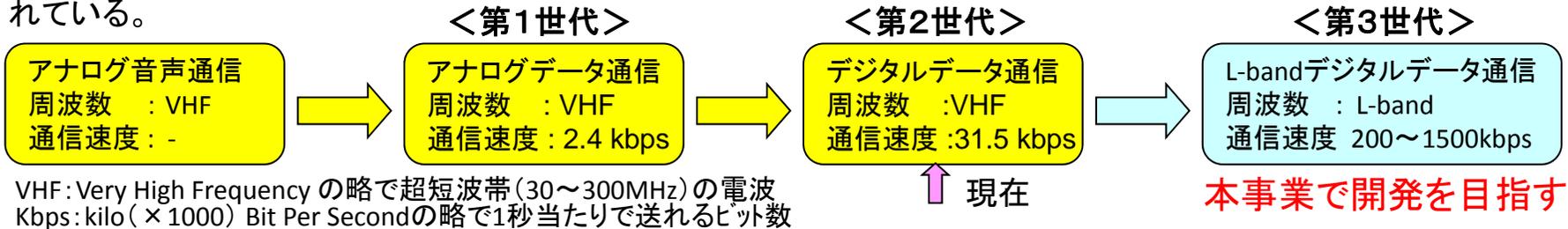


図1 高速移動体通信技術戦略のイメージ図

L-band デジタル通信システムの開発による効果は？

本事業が実用化に至れば、データ通信速度の向上および通信データの品質が向上することにより、ATMシステムの大幅な改善が見込める。例えば、正確な航空機の位置監視、航行交通の状況、気象状況、目的地の空港の混雑状況等の情報を地上の管制官等と航空機で共有化することにより、該当の航空機に最適でかつ安全安心な飛行経路の指示(飛行計画の適宜更新)が行え、消費燃料削減によるCO2排出量の削減、飛行時間の短縮、空中及び地上での待ち時間の減少による経済効果が期待できる。

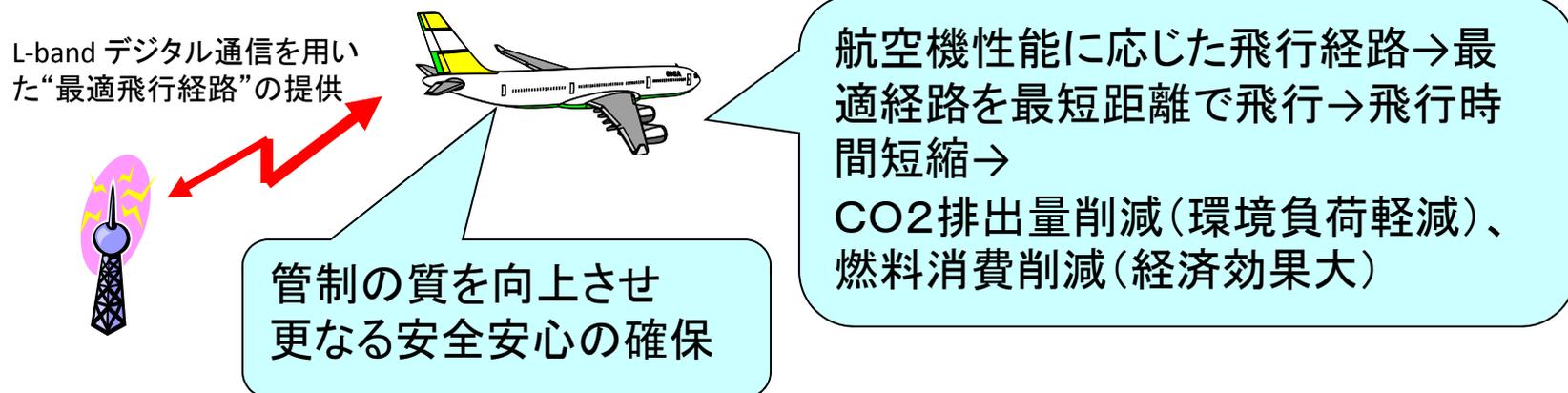
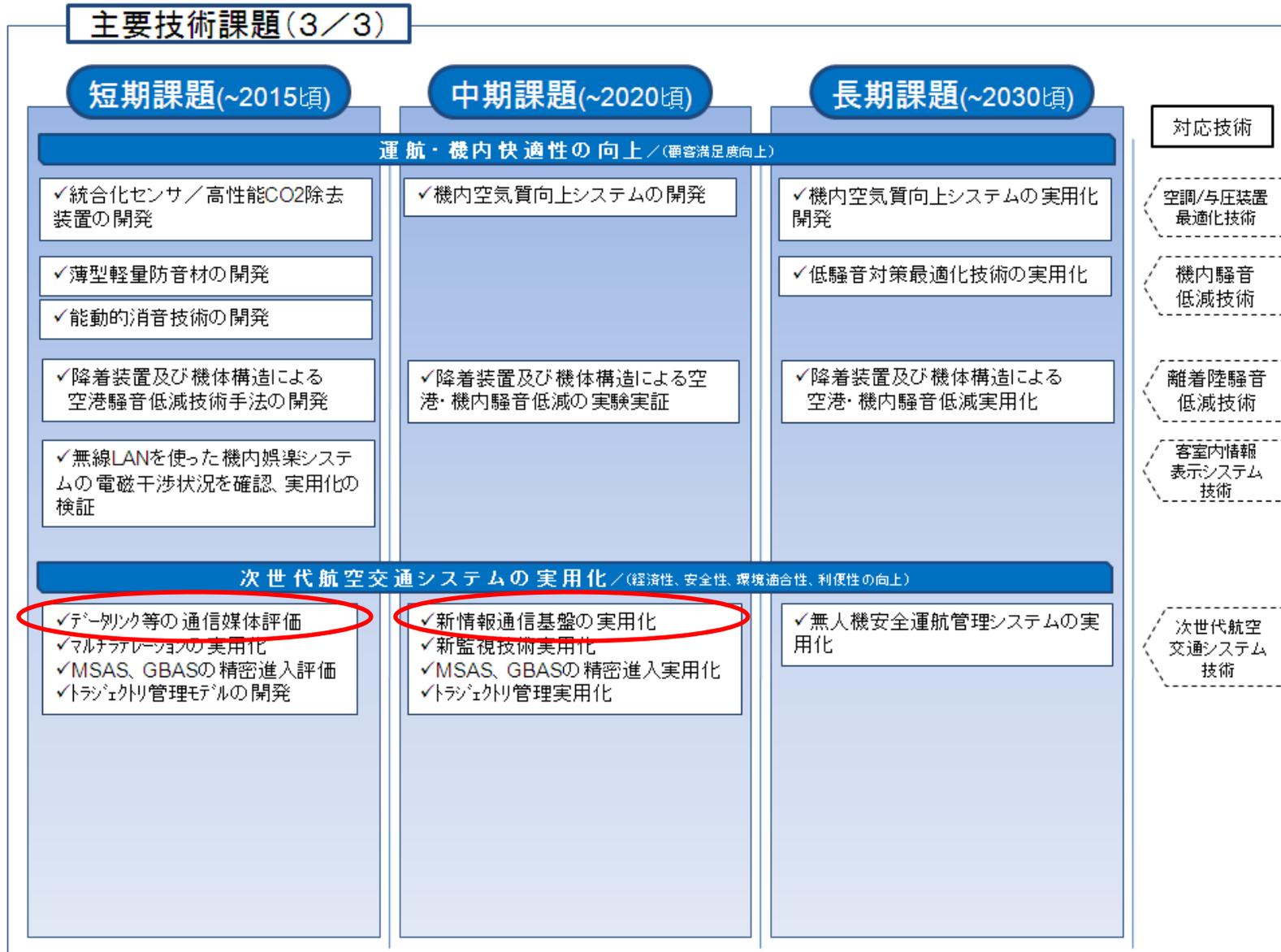


図2 安全安心の確保、CO2削減、経済効果

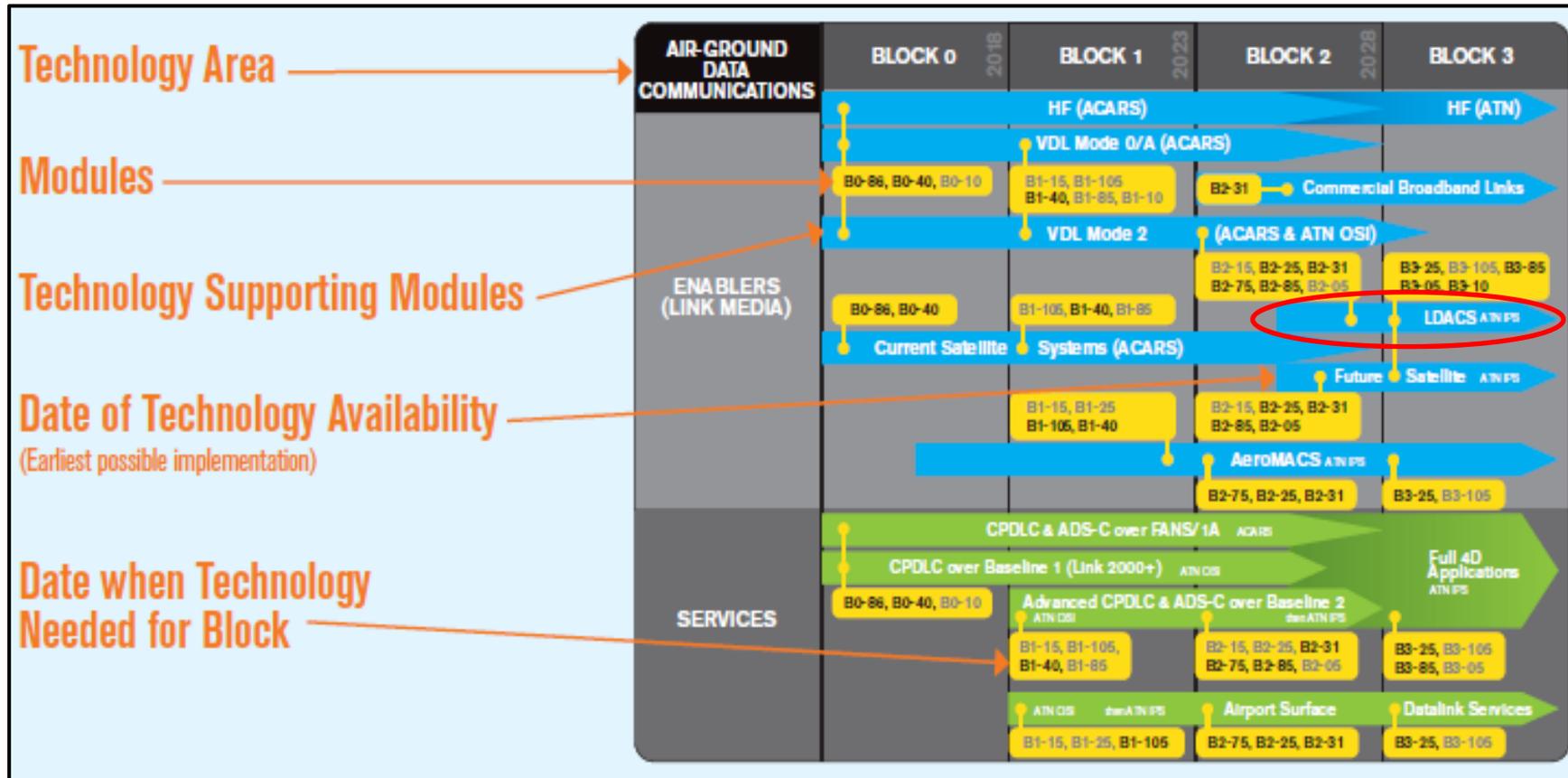
2. 目的・政策的な位置付け(2/4)

航空機産業施策の短期課題および中期課題に位置づけて、事業を推進している。



2. 目的・政策的位置付け(3/4)

ICAOによるデータリンクの将来への方向性を示すGlobal Air Navigation Plan Technology Road Map にて、将来の通信技術としてLDACSは示されている。



ICAOホームページより

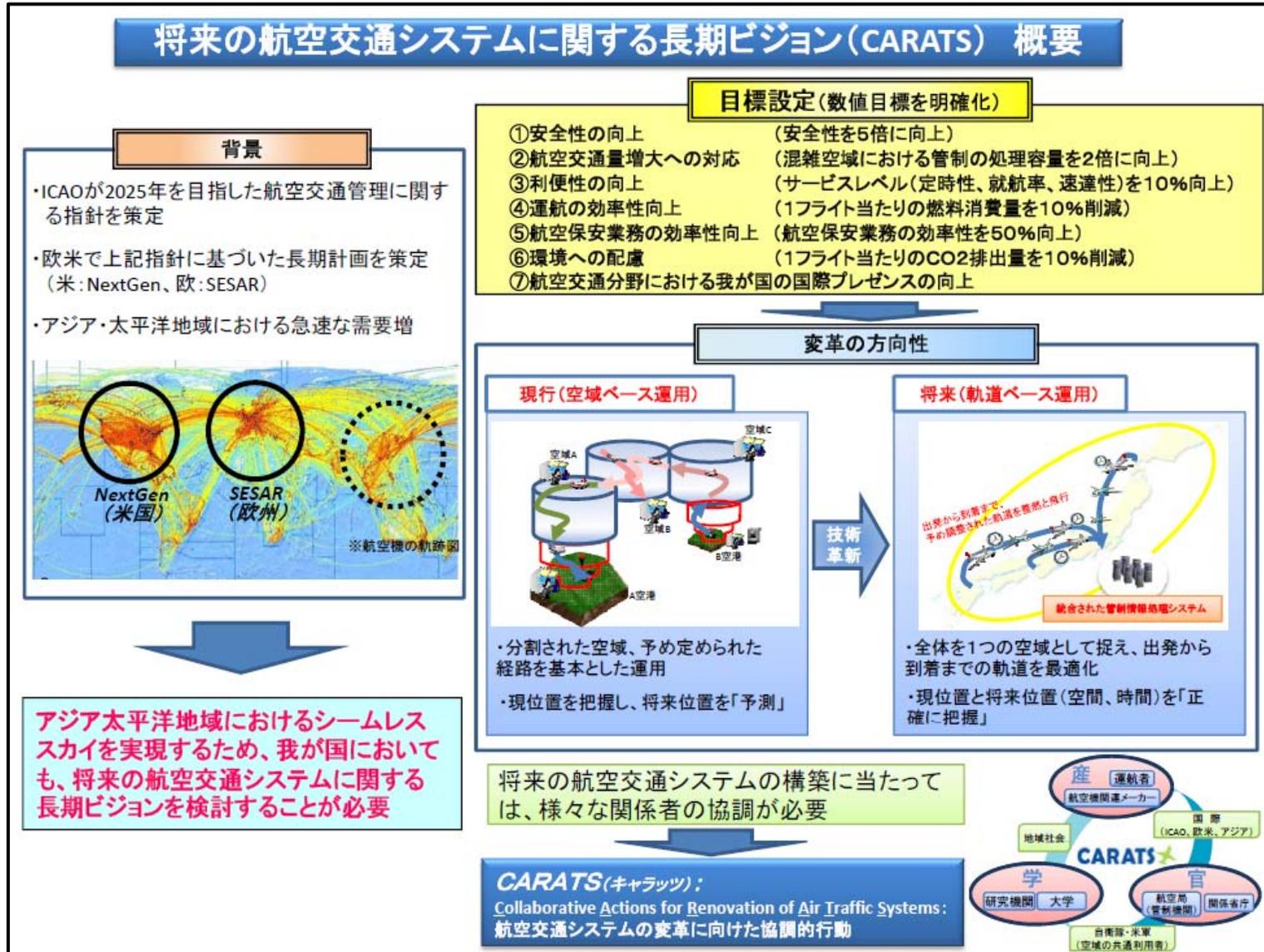
図3 ICAOロードマップ

ICAO: International Civil Aviation Organization の略、国際民間航空機関のこと

LDACS: L-Band Digital Aeronautical Communication Systemの略、1GHz帯の周波数を使用した航空機用デジタル通信システムのこと

2. 目的・政策的位置付け(4/4)

CARATSの長期ビジョンにて示される将来(軌道ベース運用)を実現するためには、高速データリンクが必要とされている。これに適応するL-bandデジタル通信システムを開発する必要がある。



3. 目標

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
<p>EUROCONTROL策定のL-DACS1仕様(案)に準じたデジタル通信を実現するための各要素技術の確認。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・OFDM送受通信技術 ・与干渉低減技術 ・被干渉低減技術 ・PAPR低減技術 ・TDMA技術 ・適応変調技術 ・通信手順 	<p>(1) OFDM変復調や誤り訂正のシミュレーションモデルを構築し伝送特性を確認。</p> <p>(2) シミュレーションモデルから得られた性能を元に回線設計を行い通信可能距離を確認。 BER=1×10^{-6}を通信品質の判断基準とする。(*1)</p> <p>(3) 通信を確保するために仕様(案)にて提示された各要素技術および通信手順をシミュレーションモデルにより確認。</p>	<p><u>従来の技術では、高速で移動する航空機と地上とのOFDM技術を用いた高速デジタル通信は、困難であった。</u></p> <p>本事業では、この課題を解決するための技術を設計、検証する。</p> <p>このために、L-DACS1評価用シミュレーションモデルを構築する。</p>

*1 : 1×10^{-6} は、SESAR Updated LDACS1 System Specificationの5.3.1 項で規定されている。百万回に一回の誤り率を示す。
(参考情報: 地上波デジタル放送では 2×10^{-4} 以下であれば画質劣化がほとんど見られない良好受信とされている。)

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing の略、直交周波数分割多重方式

Peak Average Power Rate の略、最大電力と平均電力の比のこと。

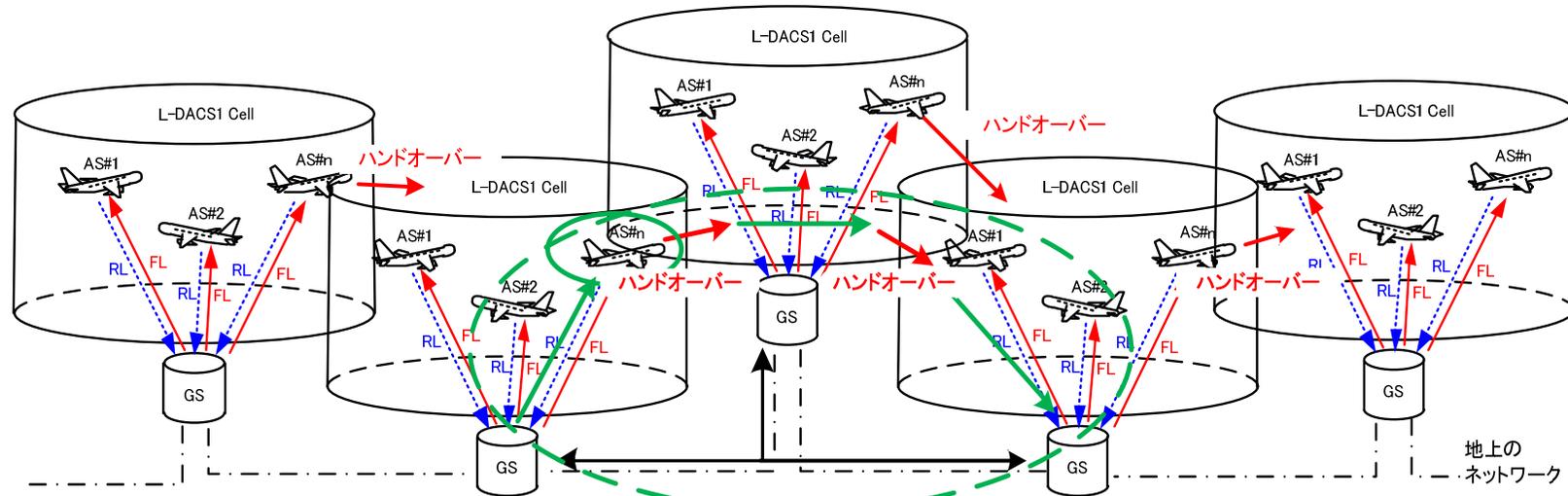
TDMA: Time Division Multiple Access の略、同一の周波数を複数の発信者が共有できるように割り当てられた短時間に交互に通信する方式

BER: Bite Error Rate の略、ビット誤り率のこと。

4. 成果、目標の達成度(1/7)

今回ターゲットとしたL-bandデジタル通信システム(L-DACS1)はどのようなシステムか？

- ・”L-Band Digital Aeronautical Communication System1”の略称でLバンドの周波数(1GHz帯)を利用した航空機用デジタル通信システム案の1つである。
- ・航空機(Aircraft Station以下AS)が空港から空港まで移動する区間をデータリンクで地上無線局(Grand Station以下GS)と結ぶデータリンク通信である。
この時、送信周波数と受信周波数は異なる周波数を利用して同時に通信を行います。1GSに対して複数のASが存在することになるので、GSからASへはブロードキャスト、ASからGSへは時分割のユニキャスト通信となる。
- ・電波の到達上、データリンクができる距離には限りがあるので、ASの飛行位置に応じて地上系ネットワークで接続されたGSを自動的にハンドオーバーし出発空港から到着空港に至るまでシームレスな通信を確保する。



FL: Forward Linkの略でGSからASに向けたデータ通信、RL: Reverse Linkの略でASからGSに向けたデータ通信

図5 L-DACS1 トポロジー

4. 成果、目標の達成度(2/7)

無線により通信を行うためには、音声などの情報を自由空間を通し易くするために、より高い周波数(電波)に変換してあげる必要がある。送り側でこの処理を行うことを変調と言い、受け側で元に戻すことを復調と言う。音声などのアナログ信号をそのまま送受信周波数に変換するものをアナログ変調と言い、サンプリングしてアナログ/デジタル変換し“1”または“0”のビット列にしてから送受信周波数に変換するものをデジタル変調と言う。アナログ変調で代表的なものがFMやAMで、デジタル変調で代表的なものがQPSKやQAM(シングルキャリア方式)、OFDM(マルチキャリア方式)などである。

変調された電波は、伝搬路(自由空間)で様々な雑音や妨害があり、受信側で復調処理を行いデータを再生する際に正常に再生出来ず通信品質の劣化を招く。

FM: Frequency Modulation の略、周波数変調
 AM: Amplitude Modulation の略、振幅変調
 QAM: Quadrature Amplitude Modulation の略、直交振幅変調



図6 伝送路による影響

通信エリアが特に広い	→ 自由空間伝搬路損失が大きく、変動分も大きい。 電波の遅延が大きい。
飛行位置により電波到達状態が変わる	→ 電波伝搬特性が複雑となる。
移動速度が特に速い	→ ドップラーシフトによる周波数変動が大きい。
既存装置との使用周波数が近い。	→ 混信の恐れがある。
航空機と地上の通信	→ 評価が難しい。



**要求仕様に対して、シミュレーションによる仕様の最適化や評価が不可欠である。
 (OFDM技術の有用性を確認する)**

4. 成果、目標の達成度(3/7)

L-DACS1では、地上波デジタルテレビ放送や固定WiMAX等でも採用されているOFDM 変調方式が選定されている。

OFDMの主な原理を図7に示す。送信信号(ビット列)を一次変調し、複素平面(横軸を実数、縦軸を虚数)上にマッピングした後に、IFFT(逆フーリエ変換)を行った後に、D/A(デジタル/アナログ変換)し、所望の周波数に変換しアンテナを通して伝搬路に送信する。受信ではその逆の処理を行い復調するものである。キャリアが複数となるために同時に多くの情報を送ることができ、1キャリア当たりの速度は低速にすることが出来る特徴をもつ。

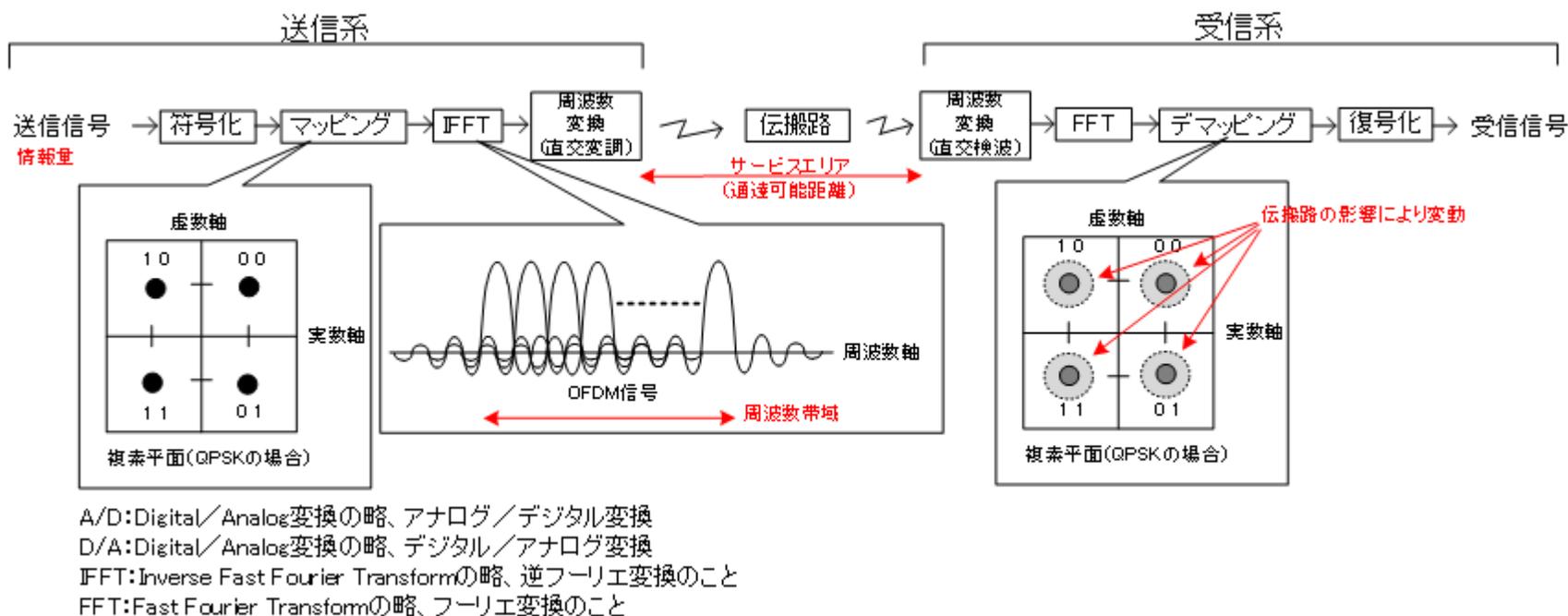


図7 OFDM通信方式の概要

4. 成果、目標の達成度(4/7)

高速移動体通信において、狭い周波数帯域で高速通信と広域通信を両立させることを可能とする。

参考のために、既存の一般的地上通信システムとの仕様比較を示す。

	モバイル WiMAX	地上波 デジタル放送	L-DACS1
周波数帯	6GHz以下	0.6GHz帯	1GHz帯
周波数帯域	1.25～20MHz (可変)	6MHz	～0.625MHz (可変)
一次変調方式	QPSK 16QAM 64QAM	DQPSK QPSK 16QAM 64QAM	QPSK 16QAM 64QAM
二次変調方式	OFDMA	OFDM	OFDM
複信方式	TDMA,FDD	(broadcast)	TDMA,FDD
情報量	最大75Mbps	最大24Mbps	最大1.5Mbps
サービスエリア 注1	～3km	～40km	～370km

利用する周波数帯域(幅)は
モバイルWiMAXの 1/32
地デジの 約1/10

※数値が大きいほど多くの
データを送りやすい

通信可能な情報量は
モバイルWiMAXの 1/50
地デジの 1/16

※情報量は大きいほど多くの
データを送れる

サービスエリアは
モバイルWiMAXの 約123倍
地デジの 約9倍

※距離が遠いほど送受信局
設置数を減らせる

注1: 設備の仕様等により変わるので目安とする。

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing の略、直交周波数分割多重方式

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access の略、直交周波数分割多元接続方式

BPSK: Binary Phase Shift Keying の略、位相偏移変調のうち、一度に2通りの値を送ることが出来る変調方式

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying の略、位相偏移変調のうち、一度に4通りの値を送ることが出来る変調方式

16QAM: 16 Quadrature Amplitude Modulation の略、直交位相振幅変調のうち、一度に16通りの値を送ることが出来る変調方式

64QAM: 64 Quadrature Amplitude Modulation の略、直交位相振幅変調のうち、一度に64通りの値を送ることが出来る変調方式

TDMA: Time Division Multiple Access の略、同一の周波数を複数の発信者が共有できるように割り当てられた短時間に交互に通信する方式

FDD: Frequency Division Duplex: 二つの異なる周波数を送信と受信に割り当て同時に通信する方式

4. 成果、目標の達成度(5/7)

H23年度の総合成果を下表にまとめる。

要素技術	目標・指標	成果	達成度
EUROCONTROL 策定の L-DACS1 仕様(案)に準じたデジタル通信を実現するための各要素技術の確認。	シミュレーションモデルを構築し、L-DACS1 仕様(案)を忠実に再現することにより、この中で提案されている技術の有用性を確認する。	<ul style="list-style-type: none"> ○ シミュレーションモデルを確立した。 ○ L-DACS1仕様(案)を忠実に再現することが出来た。 ○ L-DACS1仕様(案)による提案技術の有用性を確認することが出来た。 	目標達成

H24年度の総合成果を下表にまとめる。

要素技術	目標・指標	成果	達成度
EUROCONTROL策定の L-DACS1仕様(案)性能向上	OFDM変復調部（誤り訂正含む）シミュレーションモデル作成による伝送特性の確認。	LDPC方式に変更したシミュレーションモデルを作成、性能向上を図った	目標達成
	シミュレーションモデルから得られた性能を元に回線設計を行い通信可能距離を確認。	370kmの最大伝送距離を確認した。	目標達成

4. 成果、目標の達成度(6/7)

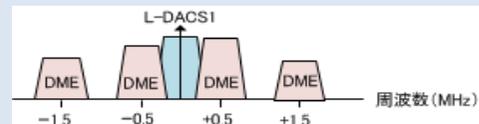
評価シミュレーションを確立することにより、最適な変復調アルゴリズムの検討を可能とした。

L-DACS1で採用しているOFDM変調方式は、複数あるキャリアを同時に伝送することにより高効率な伝送方式ではあるものの、複数あるキャリアを直交させて配列している関係上、キャリア間隔が狭くなっているために、送受信機間の発振周波数にズレや変動があるとキャリア間干渉が生じて特性を劣化させる。劣化軽減の為に、受信機では高精度の自動周波数制御(AFC: Automatic Frequency Control)が必要になるとともに、伝搬路の影響に対してチャンネルの推定と等化を行わなければ安定的な通信を行うことが出来ない。このアルゴリズムがノウハウとなる。

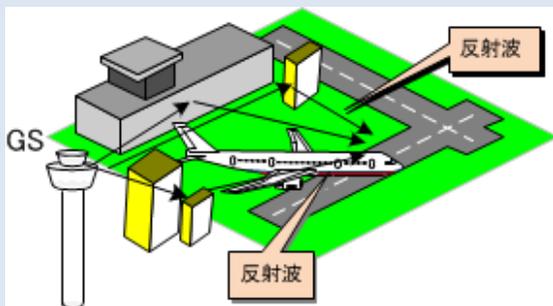


L-DACS1で採用しているOFDM変調方式を、シミュレーション上で実現が可能。

干渉波をシミュレーション上で実現

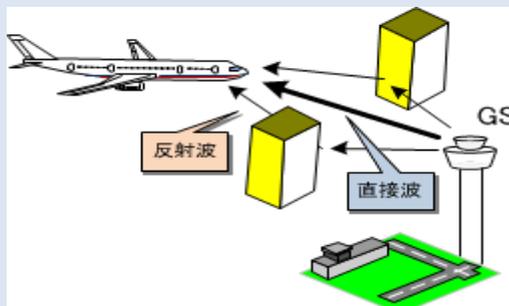


伝送路モデルをシミュレーション上で実現



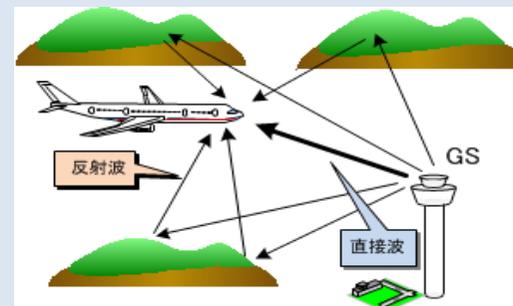
飛行場(APT)モデル

航空機の直近には障害物が多くあり、直接波はほとんど届かず、大部分が反射波となるモデル。



飛行場入出域(TMA)モデル:

障害物が直接波寄りであるために、直接波に加え、直接波と経路長が似た反射波の合成モデルとなる。



航空路(ENR)モデル:

障害物が直接波から離れたところに有るために、直接波に加え、直接波より経路長が長い反射波の合成モデルとなる。

図8 シミュレーションモデル基本系統

4. 成果、目標の達成度(7/7)

平成23年度ならびに平成24年度の成果の詳細を下表にまとめる。

要素技術	目標・指標	成果	達成度
OFDM送受通信技術	OFDM変復調や誤り訂正処理に関しシミュレーションモデルを確立することにより伝送特性の確認をする。具体的な数値(開発目標)が一次変調方式QPSK1/2で示される。	シミュレーションモデルを確立した。 各一次変調方式によるBER特性を取得、一次変調方式QPSK1/2においてBER=1×10 ⁻⁶ 時の所要C/N値が目標に達した。	一次目標達成 改善目標達成 ※平成24年度分
	シミュレーションモデルから得られた性能を元に回線設計を行い通信可能距離の確認をする。目標距離370km(200NM)が示されている。	目標である370kmの最大伝送距離を確認した。	一次目標達成 改善目標達成 ※平成24年度分
与干渉低減技術	シミュレーションモデルの作成とL-DACS1で提案されている窓関数による低減効果を確認する。	シミュレーションモデルを確立した。 窓関数により帯域外にて15dB以上の低減を確認した。 窓関数の有効性が確認できた。	目標達成
被干渉低減技術	シミュレーションモデルの作成とL-DACS1で提案されている下記3方式による低減効果を確認する。 ・オーバーサンプリング ・パルスブランキング ・イレージャーコーディング	シミュレーションモデルを確立した。 提案された3方式について低減効果を確認した。APT、TMA、ENRそれぞれの環境下において、効果の度合いが異なり特徴が明らかとなった。3方式の組み合わせにより改善が図れることを確認した。	目標達成
PAPR低減技術	シミュレーションモデルの作成とL-DACS1で提案されている低減効果を確認する。	シミュレーションモデルを確立した。 PAPRシンボル挿入で1.5dB改善した。改善分、高周波回路のアンプ回路動作点を上げることが出来る。	目標達成
TDMA技術	シミュレーションモデルの作成とL-DACS1で提案されている同期信号を用いてFLに対してRLが同期可能なことを確認する。	シミュレーションモデルを確立した。 TDMA動作のための時間同期検出が可能なことを確認した。TDMA動作するための基準信号を得ることができた。	目標達成
適応変調技術	シミュレーションモデルの作成とL-DACS1で提案されている適応変調動作について確認する。	シミュレーションモデルを確立した。 GS基準ASの相対位置に応じて一次変調方式を変更することにより状況に応じた通信量が確保できることを確認した。	目標達成
通信手順(通信制御コマンドの確認)	机上検討とL-DACS1で提案されている通信制御コマンドの確認を行う。	要求仕様が示す通信制御コマンドによる通信手順を確認した。特に、GSとAS間のリンク維持の為の補正值がGSから指定されることを確認した。 ・送信出力補正值 ・周波数補正值 ・時間軸補正值	目標達成

5. 事業化、波及効果

(1) 事業化

本技術の開発・製品化後は、機体メーカーへ供給を行うことによって航空機搭載品の事業化が図れる。

(2) 波及効果

L-DACS1が規格として採用されれば、世界の航空管制の安全性や経済性の向上に役立つことができる。

L-DACS1における通信環境条件は、他の地上系通信システムと比べても厳しい条件下にある。ここで、作成したシミュレーションモデル(アルゴリズム)は、他の移動体通信への応用が可能である。

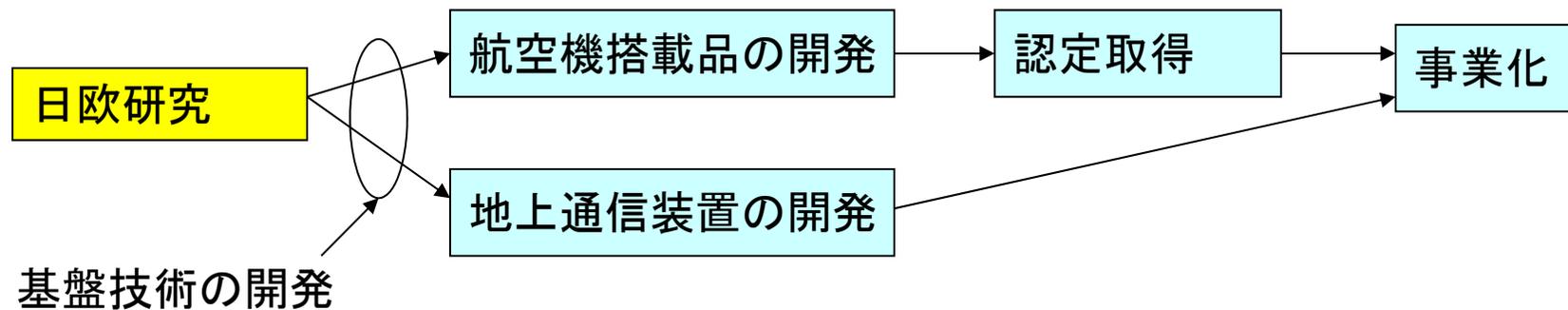


図9 事業化のイメージ図

6. 研究開発マネジメント、体制等

日本無線株式会社の高周波応用技術グループ、研究所、技術開発センターにて開発を実施した。取りまとめは、高周波応用技術グループが行った。

電子航法研究所では、部分的な開発と、日本無線株式会社が開発した内容の評価をおこなった。

※平成24年度に、電波応用技術部はソリューション技術部に改名、高周波応用技術グループはレーダシステムグループに改名。

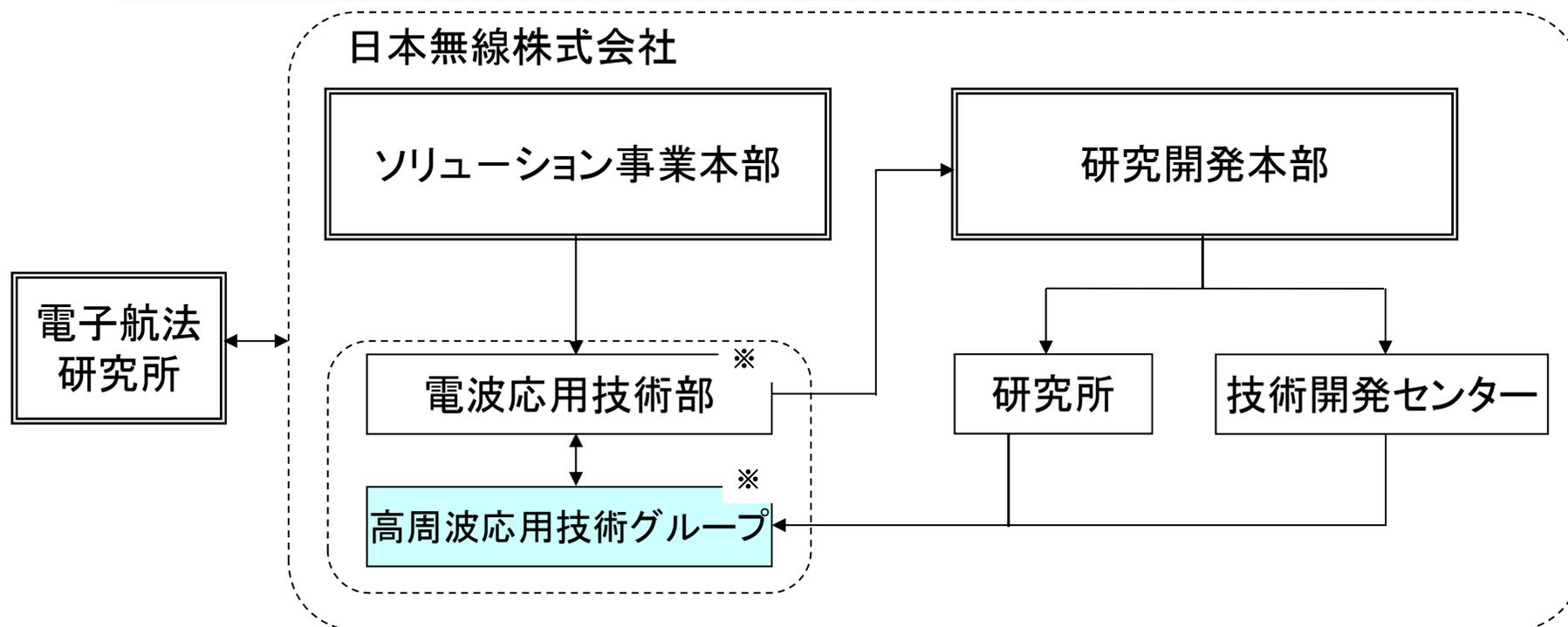


図10 開発体制

7. 中間評価結果

提 言	対 処 方 針
<p>今後とも各技術に関する開発事業を推進する必要があるが、それに加えて新しい技術の調査と取り込みは、諸外国の後塵を拝さないためにも必要である。独自の技術として早期確立が望まれる技術については、事業化及び認証取得に向け、産学官の連携によるスピード感を持った取り組みが必要である。</p> <p>また、国の施策として行うべきか、企業の研究開発として行うべきかを整理する必要がある。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○引き続き、最先端の研究成果が得られるよう、取組みを強化するとともに、諸外国の動向把握にも取り組んでまいりたい。 ○事業化及び認証取得を加速するため、産学官の連携等、適切な体制構築に努めてまいりたい。 ○事業毎に国で行うべきかどうかを精査してまいりたい。

評価小委員会のコメント	対 処 方 針
<p>9つある課題について、最終的な目標である日本の航空機産業の中でどのように位置づけ、ウエイトを置くのか整理し、それらの相関関係を考慮して事業を進捗させることが望ましい。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○技術開発を進めるにあたって、日本の航空機産業の中での位置づけ、ウエイトの置き方について整理し、相関関係を考慮して事業を進めて参りたい。