

デジタル時代における 航空通信インフラの需要分析

2021年 11月

茨城大学 理工学研究科 都市シ
ステム工学専攻

本江 信夫





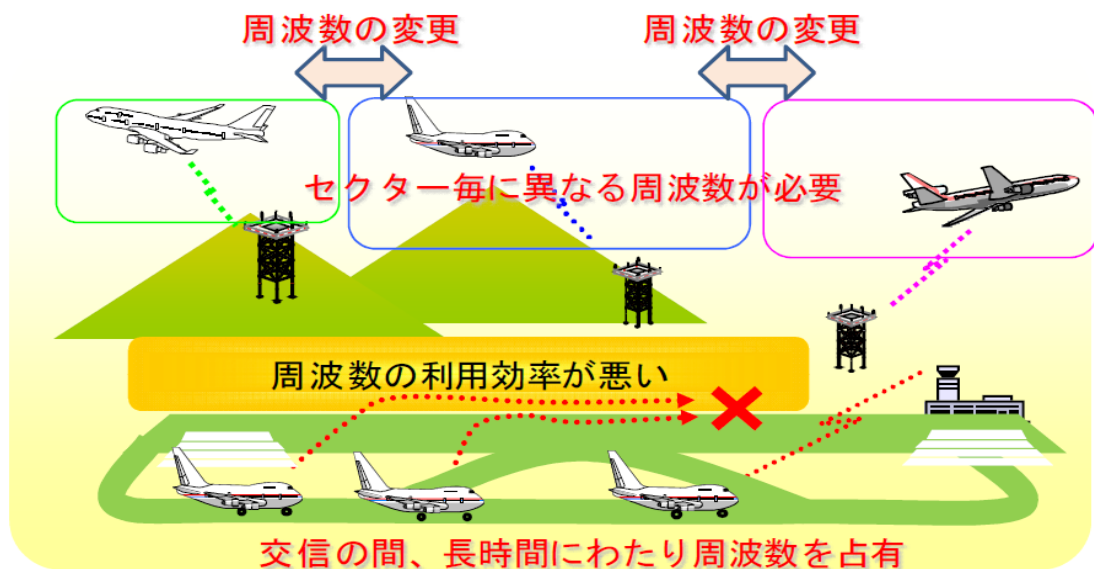
Quasi-Zenith Satellite-1 "MICHIBIKI"
To be launched in summer 2010!



1. 背景・目的 現在の航空交通の情報伝達の仕組み

✈️パイロットと管制官の主たる通信手段は無線電話
(音声通信) →1対1の通信

- ①非効率な情報共有
- ②1人のパイロットと交信している間、
その他のパイロットは待機
(周波数の利用効率が悪い)



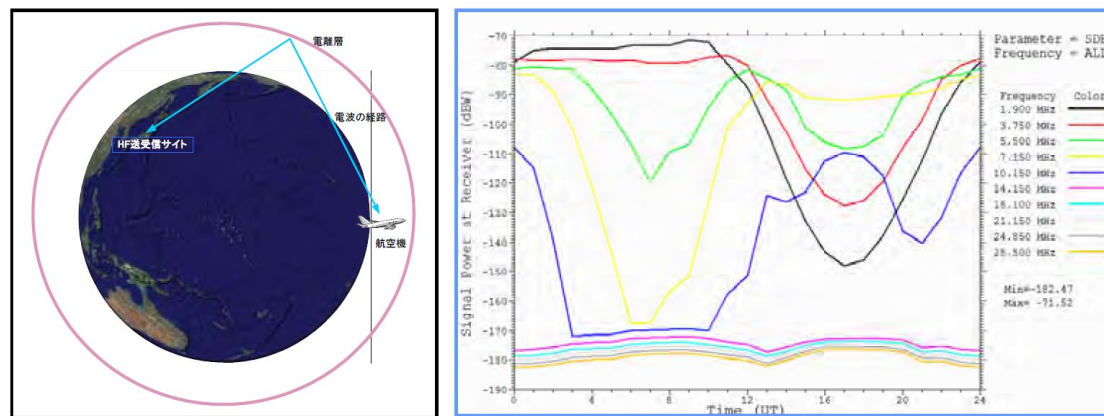
地上一機上間の音声通信の課題

出典：将来の航空交通システムに関する長期ビジョン～戦略的な航空交通システム
への変革～URL:<https://www.mlit.go.jp/common/000123890.データf>

✈️洋上での通信手段 (HF音声通信)

上空の電離層による反射を利用して遠隔地と通信

- ①電離層の状態変化に伴い昼と夜、季節によって最適な周波数が変化
- ②音声レベルの変化や雑音が含まれる等の理由により、
聞き取りに技能を要する



HF通信の伝搬の仕組み (左) とHFによる周波数別受信レベルの変化

出典:次世代航空保安システムの構築

URL:<https://www.mlit.go.jp/common/000043254.pdf>

2.既存研究と本研究の位置づけ

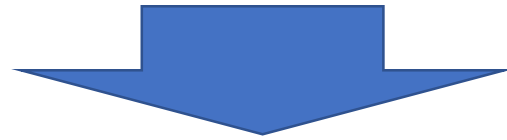
- ①洋上の航空衛星データ通信トラヒックの解析とシミュレーション予測
洋上通信における静止衛星を利用したデータ通信システムの交通情報の統計分析結果に基づく、伝送遅延時間及び伝送遅延時間の予測解析
- ②航空移動無線のデジタル伝送特性の評価
航空移動無線のデジタル伝送特性について、要求性能設計に必要な基礎技術であるBERの評価手法
- ③5GHz帯を用いた航空機用デジタルデータ通信に関する研究
飛行実験による5GHz帯の電波伝搬特性の基礎データの取得手法
- ④空地衛星データ通信の特性
衛星回線を用いた空地データリンクでの通信チャネルの特性（時分割多重通信）
- ⑤Capacity Dimensioning for Air Traffic Management (ATM) Services in a Spot Beam Satellite System
マルチ衛星スポットビームを用いた航空交通管理の実現検証

以上に加え、今後陸域に導入予定のVHF帯を用いた航空移動通信用データ通信に係る基盤・基礎技術の研究がこれまでなされており、キャラクタ指向時代の通信技術の分析手法は明らかにされているが、ビット指向のデジタル化された通信基盤の導入には、運用要件及び技術要件が検討段階にある上、我が国の航空交通流の特性や、通信容量の需要手法について未分析である。よって、本研究では現状システムの課題を整理し、デジタル化した通信基盤を想定し、航空交通流の特性分析した上で将来の通信容量の需要分析を行う。

3. 航空管制通信システムの現状と課題 ①情報のデジタル化

情報のデジタル化による恩恵

- ①情報の可視化
- ②定量化



導入効果

- ① 管制官のワークロード軽減により処理能力の向上
- ② 言い間違い、聞き間違い等のヒューマンエラー対策

現行のサービス

- DCL(Departure Clearance)
データリンクによる出発管制承認伝達

検討中のサービス

- 陸域CPDLC(Controller Pilot Data Link Communication)

提供されるサービス(例)

- ①初期(2021試行開始)
 - ・通信移管指示
 - ・DBC指定(SSRコードの指定)
 - ・マイクロフォンチェック
- ②中長期
 - ・継続的な上昇・下降指示(CDO/CCO)
 - ・CFDTによる時間管理
 - ・合流地点における時刻ベースの順序付け、間隔設定(メタリング)
 - ・経路・高度変更指示
 - ・高々度でのフリールーティング

航空交通においてもようやくデジタル化

但し、

- ①ショートメール(テキストベース)
- ②未だ1対1の通信
- ③通信速度は2400-30kbps
(テキスト伝送に特化)

参考：アナログモデム 56kbps
TDM(SDN) 64-512kbps

陸域CPDLCのカバレッジの検討

約200NM

●既存DSPのサービス・エリア
○設備の追加要請を行うエリア

Initial phase (from 2021)
>Service Area:
High altitude air space
>Pre-fixed messages:
-Contact/Hand off
-DBC assign
-Microphone check

Cockpit with CPDLC capable

TEPS: 統合管制情報処理システム(航空路)

※出典URL：将来の航空交通システムに関する推進協議会
https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr13_000006.html

3. 現在の航空通信システムの課題 その② 情報共有

✈️ インターネット技術の導入による恩恵

① n対n通信

(一意に同じ確度で情報共有)

② 1ch (周波数) で様々な情報

(コンテンツ) を異なる者に伝達が可能



2024年からようやく、地上でインターネット技術の導入開始



- 出発から到着までの詳細な経路情報
- 気象情報や空港面の滑走路の視覚・イメージ的な情報

→ いわゆるブロードバンドレベルの通信インフラが必要不可欠

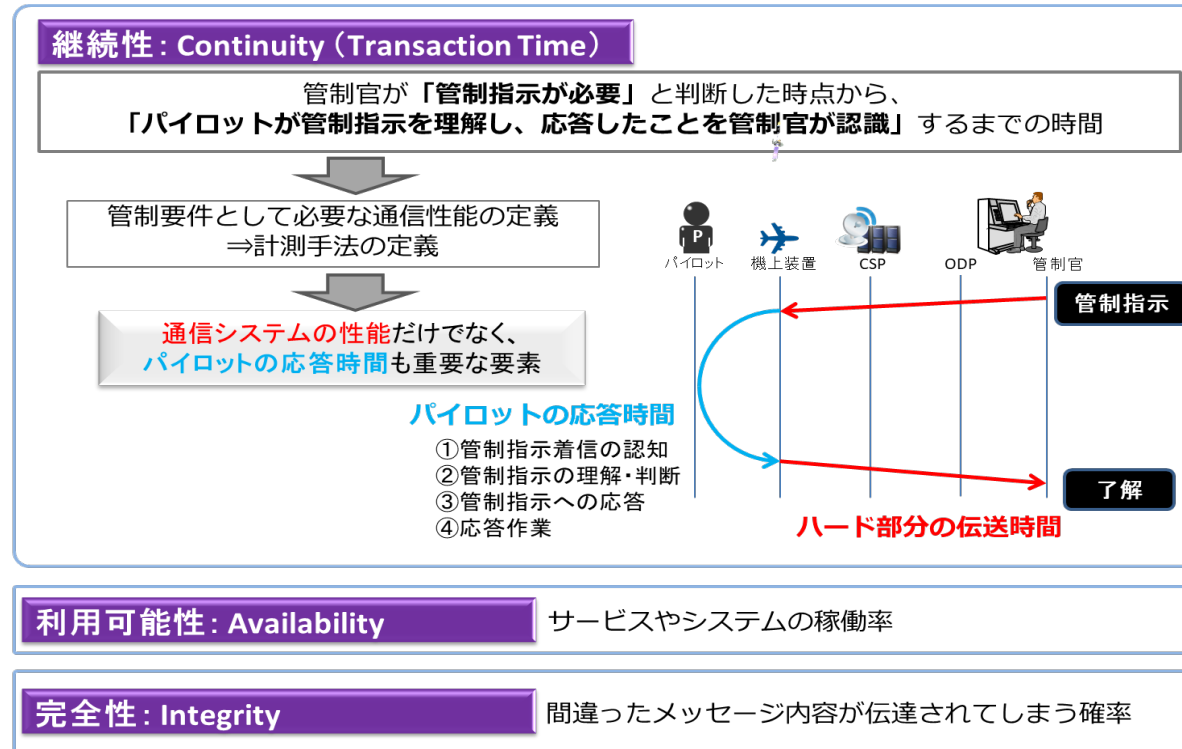


※出典URL：将来の航空交通システムに関する推進協議会
https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr13_000006.html

3. 現在の航空通信システムの課題 その③ 性能準拠型運用

・性能準拠型運用とは

グローバルな航空交通の観点から、運航者（航空機）、衛星（通信）インフラプロバイダ、データリンクプロバイダ、管制機関の各々がインターフェース仕様書やサービスレベル合意書を結び、包括的に通信システムを性能レベルで管理する手法。



通信性能要件のイメージ
提供:国土交通省航空局

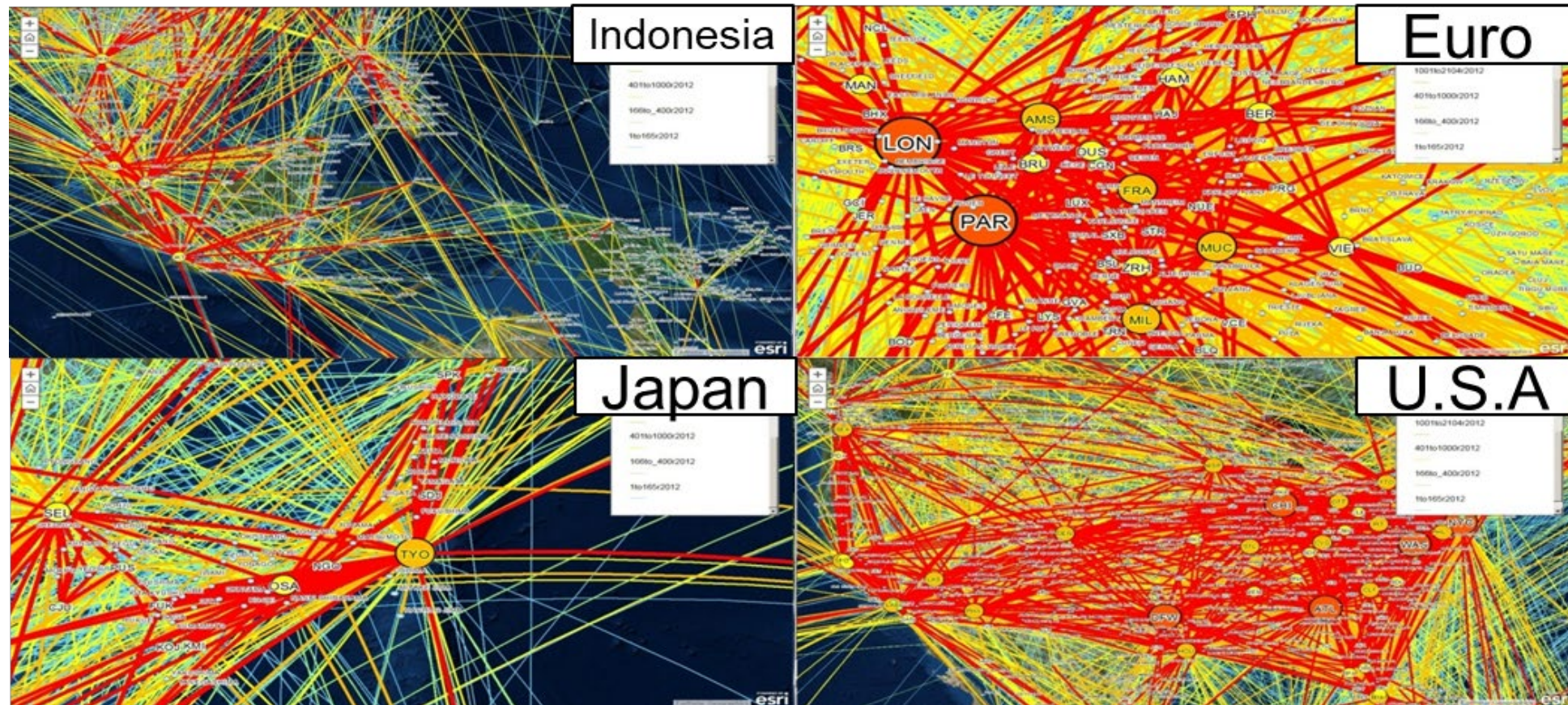
利点→通信性能要求の明確化（需要設計に活用）

課題→多様な方式が乱立し、相互運用性が欠如し、ユーザに負担を強いる可能性あり

標準化団体等利害関係者の調和が必要不可欠

4. 通信需要の算定 我が国の航空交通の特徴

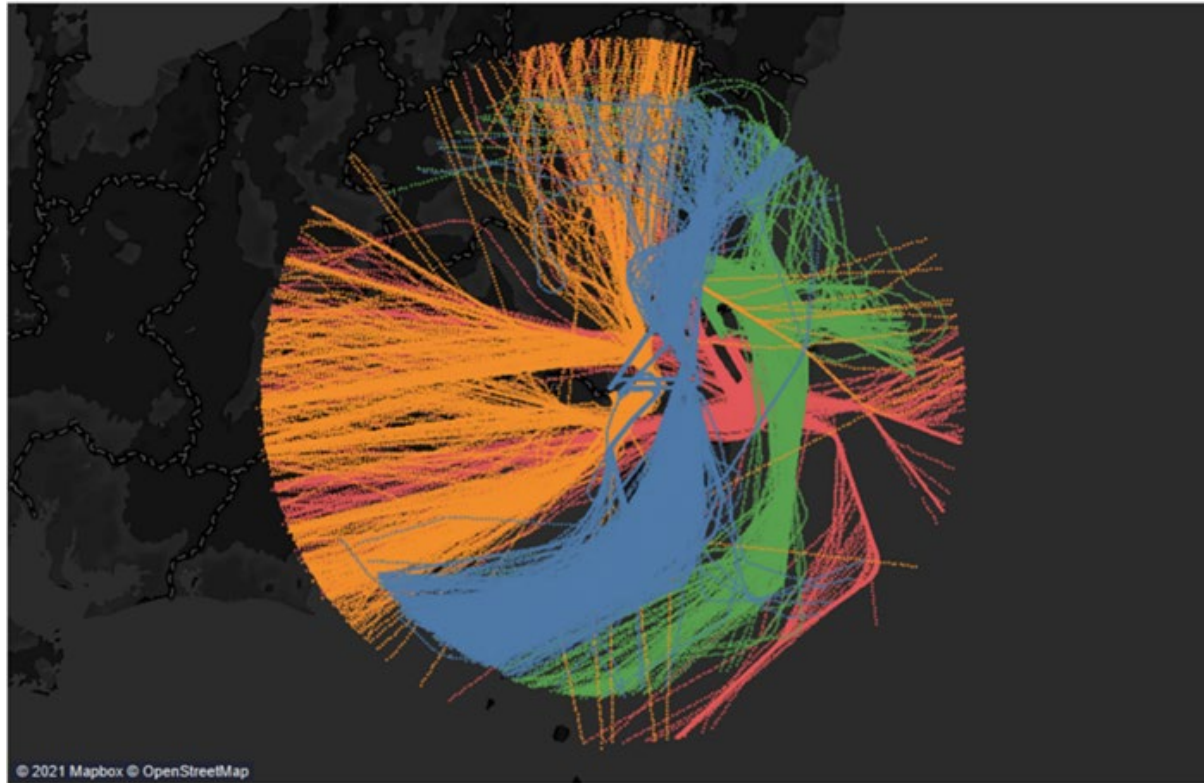
- ・ 主要都市分散型：欧米
- ・ 一局集中型：日本、インドネシア



世界の交通流
出典：ICAO Public Maps 2012年版
URL:<http://gis.icao.int/gallery>

4. 我が国の航空交通の特徴 我が国の航空交通の特徴
CARATSオープンデータを用いた関東近辺（成田・羽田）の出発・到着機の航跡

航跡[20170713]

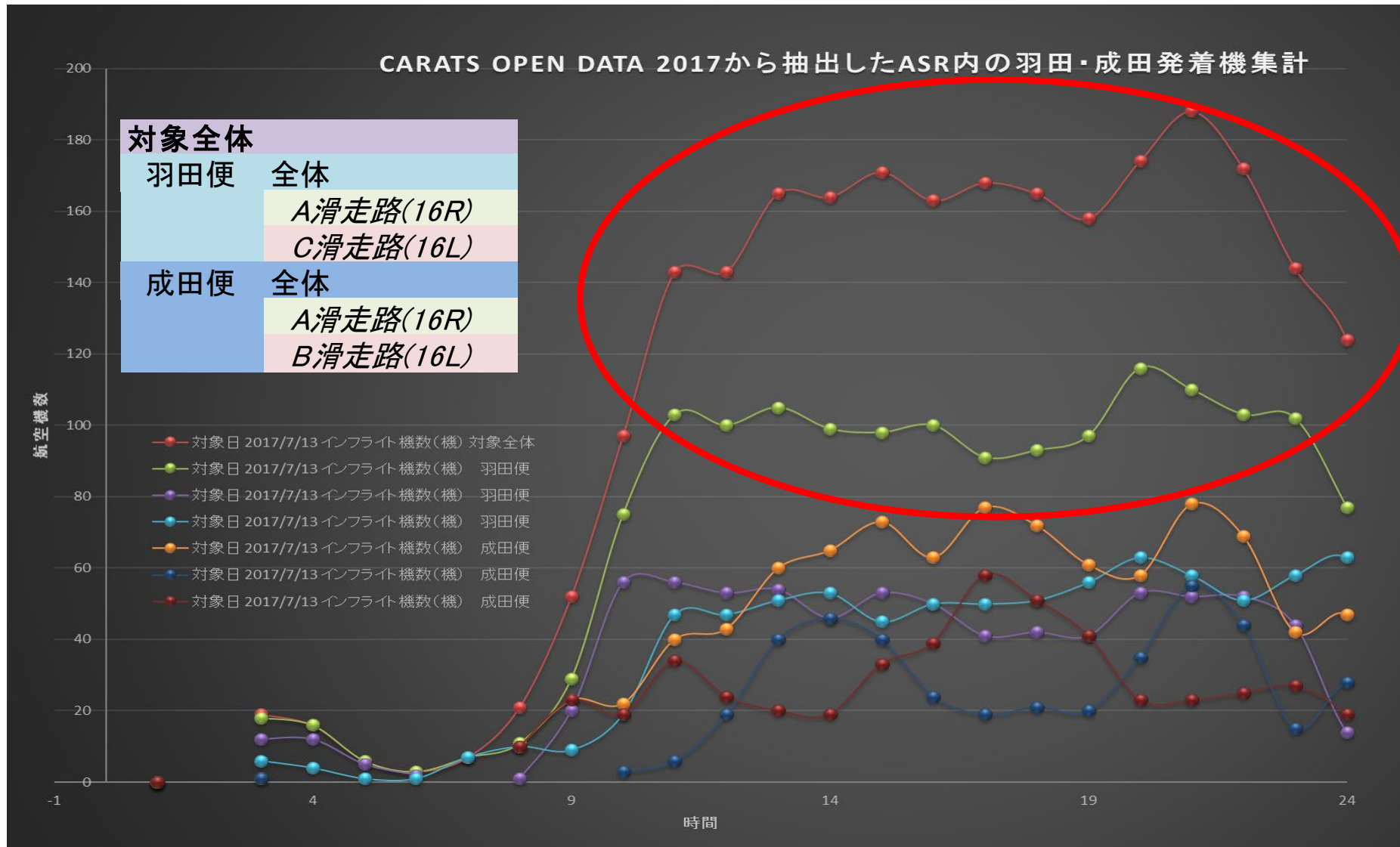


航空機の年間飛行回数約 1 3 0 万回

首都圏空港（羽田・成田空港）へ航空交通流が集中

- ・ 年間約1億人の国内航空旅客の内、約6割が羽田空港を利用

4. 我が国の航空交通の特徴 我が国の航空交通の特徴
 CARATSオープンデータを用いた関東近辺（成田・羽田）の出発・到着機の累計



- ・朝7時台から急激に増加し、朝の8時台で150機程度に到達し、夕刻の18時台で最大、その後減少
- ・1時間あたり最大200機程度の通信を確保できれば、輻輳が回避できることが想定

5. 通信ポテンシャルの算定 その①インターネット技術を実装できる通信メディア

航空管制用通信メディア（データ通信用）

通信メディア	VHF データリンク/デジタルリンク		インマルサット第3世代		イリジウム	イリジウム ネクスト	インマルサット第4世代 SBB
	VHF ACARS (VDL MODE0/1)	VDL MODE2	Aero-L	Aero-H	Aero	イリジウム CERTUS	SBB:Swift Broad Band
変調方式	AM-MSK	D8PSK	BPSK	QPSK	BPSK	QPSK, 16APSK	QPSK, 64QAM
伝送速度	2400[bps]	31.5k[bps]	600[bps]	10.5k[BPS]	2400[bps]	2400[bps]/256k[bps]	10.5k[bps]/128k[bps]
伝送情報単位	キャラクタ	キャラクタ/ビット	キャラクタ/ビット	キャラクタ/ビット	キャラクタ/ビット	キャラクタ/ビット	キャラクタ/ビット
誤り訂正機能	なし	あり	あり	あり	あり	あり	あり
アクセス方式	CSMA	CSMA	TDMA	TDMA	FDMA/TDD	Slotted ALOHA (IP)	Slotted ALOHA (IP)
対応プロトコル	ACARAS	ACARS/ATN※1	ACARS/ATN※1	ACARS/ATN※1	ACARAS	ACARS/IP ※2	ACARS/IP ※2

※1 ATN：X.25/75準拠の packets 交換機能を具備

※2 航空管制通信用のIPは標準化作業中

※3 IPについてはリアルタイム性の確保の観点からstreaming serviceを選択

AM-MSK(Amplitude Modulation-Minimum Shift Keying)

D8PSK(Differential 8-Phase Shift Keying)

BPSK(Binary Phase Shift keying)

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

APSK(Amplitude Phase Shift Keying)

QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

- ・ IP化及び**100kbps**を超える通信は**2種類**
- ・ これら**2つ**の通信インフラが予測した交通需要を支えることが出来るかが鍵

5. 通信ポテンシャル算定 ② 性能準拠型通信性能を活用した算定方法

- ICAO PBCSマニュアルの性能要件を基に、通信時間からポテンシャルを算定
陸域性能要件として提案されているRCP130を採用

ED228/DO350 (ATN-B2)				
RCP Specification	RCP130		RCP400/A2	
Parameter	ET	TT _{95%}	ET	TT _{95%}
Transaction Time (Sec)	130	67	400	350
Continuity (C)	0.999	0.95	0.999	0.95
Availability (A)	0.999		0.999	
Integrity (I)	1E-5/FH		1E-5/FH	
Defined Allocations				
	RCP 130		RCP 400/A2	
Parameter	ET	TT _{95%}	23	TT _{95%}
Transaction Time (Sec)				
Initiator	30	13	30	13
RCMP (TRN)	120	60	0.999	174
Responder	100	44	371	161
RCTP	32	20	32	20
RCTP _{ATSP} (Combined ATSU & CSPISSP)	23	14	23	14
RCTP _{Aircraft}	23	10	23	10
Continuity (C)				
C _{ATSP} , C _{CSPISSP} , and C _{Aircraft}	0.999	0.95		0.95
Availability (A)				
A _{PROV}	0.999		0.999	
A _{Aircraft}	0.99		0.99	
Integrity				
I _{ATSP}	1E-5/FH		1E-5/FH	
I _{CSPISSP}	not specified		not specified	
I _{Aircraft}	1E-5/FH		1E-5/FH	

- 通信時間（空地：32秒）と接続率（95%）が設定されている。
- 航空機はランダムにアクセスし、分布している。
- 呼接続失敗時は再度接続を許容
- 通信プロトコルもランダムアクセス方式
→待ち行列として、アーラン式を用いて算定

図25:RCP130性能（案）

出典: 2015 ICAO NAT/EUR PBCS Workshop-2より

URL:<https://www.bing.com/search?q=PBCS+RCP130+95%25&go=%E6%A4%9C%E7%B4%A2&q=ds&form=QBRE>

5. 通信ポテンシャル算定 ② 性能準拠型通信性能を活用した算定方法

①性能準拠型通信性能を活用した算定方法

- ・日本の関東空域のデータ通信状況を鑑み、150機のいずれかの航空機が10分に1回、通信を試みると仮定

航空機数C[機]が一定時間T[秒]の間に、S[時間]かけてデータ通信を行った場合、発生する呼量[呼量A：アーラン]は、 $A = C \times S / T$ で表されることから、S=32 [秒]とした場合

$$A = (150 \times 32) / 10 \times 60 = 8.0 \text{となる}$$

これをもとに、発生する呼量に対して、幾つchを用意すれば、呼ぶ不接続が発生しないかを算出
n回線を用意し、呼量Aがあった場合に呼が接続されない確率Bは、

$$B = (a^n/n!) / (1 + a/1! + a^2/2! + a^3/3! + \dots + a^n/n!)$$

で表され、5%（接続率（95%））を満たすには、

B = 13のとき、3.066 [%]となる。

よって、性能要求上の輻輳を回避するには、13回線必要となる。

また、200機の場合は

A = 10.6666 B=16で、3.275 [%]となり、この場合は、16回線必要となる。

5. 通信ポテンシャル算定方法 ③データ通信量としての需要算出方法

データ量と需要を算出する場合は、slottedアロハ方式を採用しているため、最大利用率は50%程度

- ・イリジウム ネット

$$256\text{k[bps]} \times 0.36 = 92.16\text{k[bps]}$$

- ・インマルサット第4世代 SBB

$$128\text{k [bps]} \times 0.36 = 40.08\text{k [bps]}$$

仮に、150航空機が、10分1回に50[kbits]の通信が行われると仮定した場合

$$150[\text{機}] \times 50[\text{kbits}] / 600[\text{s}] = \underline{12.5\text{kbits}}$$

200機の場合では、

$$200[\text{機}] \times 50[\text{kbits}] / 600[\text{s}] = \underline{16.6\text{kbits}}$$

の通信容量があれば事足りる。

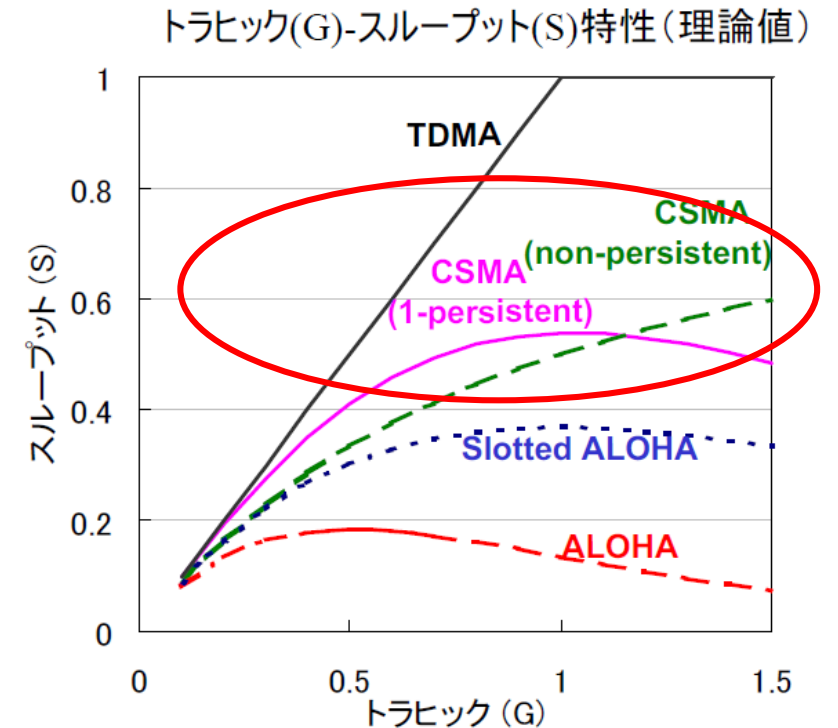


図24：通信方式にスロットアロハ等を用いた場合のスループット向上について

URL:https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/denpa_riyou/pdf/070419_1_s4.pdf

6. 実装にあたっての分析

- ・機上計算としては、デジタル時代における最適な航空通信インフラとして、イリジウムネクストやインマルサット第4世代**SBB**等のインターネット技術に対応した衛星の活用が期待できることを確認
- ・一方、性能準拠型運用に示される性能要求を基に接続回線数を算出した接続需要算出では、10回線以上の回線数が必要とされるところ、航空交通に至っては、いわゆる細かい回線を多く所有することが効率的である。
- ・多くの回線数を準備することはインフラ整備としては、コスト負担を懸念せざるを得ないため、同一ch（周波数）で複数のログイン要求を処理する仕組みなどの導入が適当
- ・インターネット技術を用いた将来の航空交通システムの構築は未だ検討段階であり、上昇、降下といった管制指示だけでなく、飛行計画に加え、気象や飛行場面の画像情報を取り扱う場合は、大容量の通信が必要となることが想定されることから、引き続き技術動向を把握しつつ、実装状況に応じた需要分析が求められる。
- ・今後の社会実装に当たっては、交通においても、通信においても双方ランダムかつ動的なものであることから、航跡データ等を活用して、実際の航空交通流に即して、通信の接続を行うシミュレーション解析を行い、更なる通信需要設計の妥当性を検証することが有益

10. 最後に

- 航空のデータ通信は未だ黎明期であり、普及が進んでいるとは言えない状況であり、まずは関係者が優位性を認め、普及に努める事、また、普及に際しては過度な投資とならないように、予め関係者間で選択する技術について合意することが必要不可欠であり、本研究が航空へのデータ通信の導入の呼び水、並びに普及への理解に繋がれば幸い

- 本論文の作成にあたり、交通分野においては、茨城大学 平田 輝満先生に、通信分野においては、羽瀧 裕真先生にご指導いただき、航空交通流の分析については、株式会社NTTデータ 成岡 毅さま、航空通信については、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 住谷 泰人さまにご教示、ご協力頂いたこと、この場を借りてお礼申し上げます

以上

H-IIAロケット44号機の打ち上げ成功
準天頂衛星「みちびき初号機後継機」搭載



ご清聴ありがとうございました