

2020年度(第20回)電子航法研究所発表会

GNSS代替のためのDME地上局の インテグリティ保証

○毛塚 敦 齊藤 真二

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
電子航法研究所 航法システム領域

2020年9月30日 15:25～15:45



本発表の流れ

- APNTとは
- 短期的APNTとしてのDME/DME測位
- DME/DME測位のRNAV利用での課題
- DMEのインテグリティ保証によるRNP経路への適用
- 欧州標準化
- 国内導入における検討課題
- 今後の研究方針

APNTとは

Alternate Position Navigation and Timing

GNSS障害時の代替航法 (GNSSバックアップ)

(電波バースト) GPS:高度 2万km **衛星不具合**



- ⑥ 2019 ガリレオ全システムダウン
- ⑦ 2016 GPS (SVN23)時刻オフセット
- ⑧ 2014 グローナス11時間送信中断

③ 2016年 マニラでGNSS
使用不能

④ 短期的な障害報告多数



ジャミング、スプーフィング

- ① 2019 IATAがICAO総会でGNSS脆弱性対策を要求
(ベングリオン空港で**数週間**GNSSジャミング)
- ② 2011,2012 韓国で2度に渡る大規模なGNSSジャミング
→ 航空機252機で使用不能

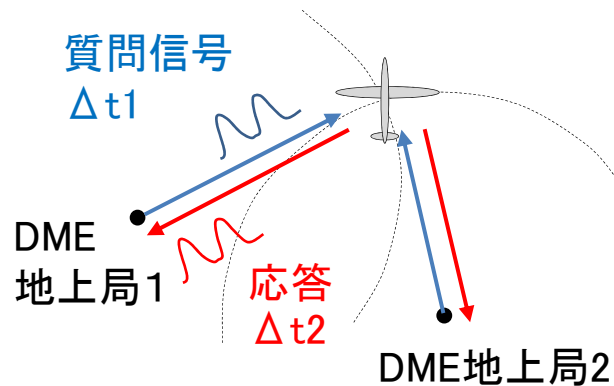
GPS リピータ

- ⑤ 2010ハノーファ空港で
GPSリピータにより
GNSS障害

短期APNTとしてのDME/DME測位

短期的APNT候補：DMEによる測位

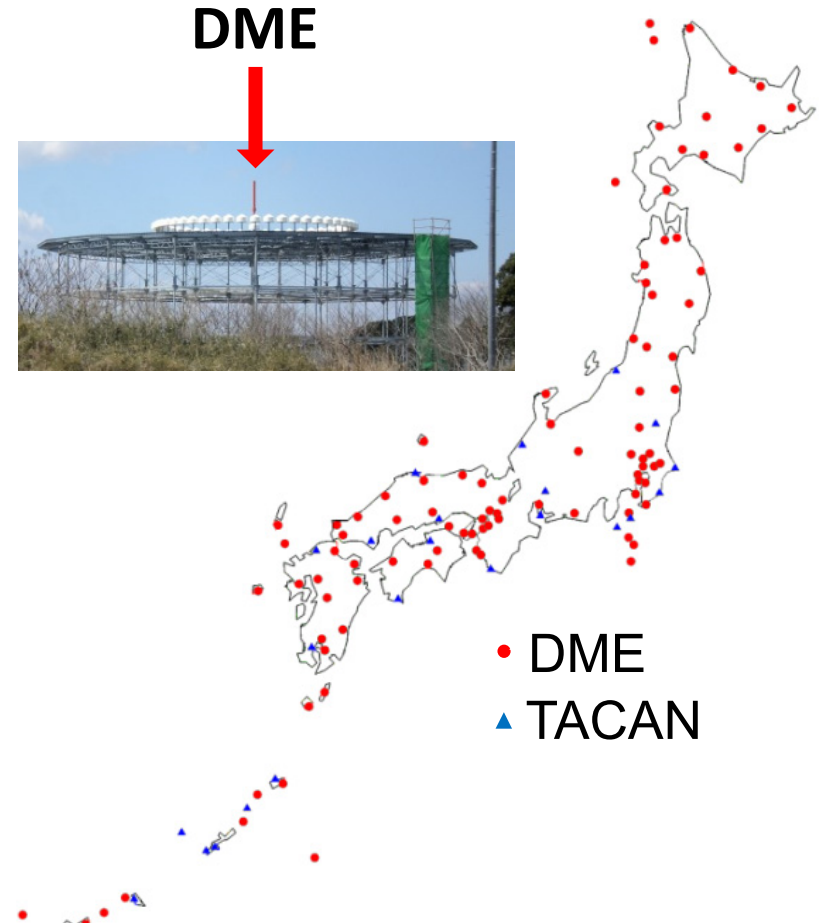
(DME: Distance Measuring Equipment)



DMEによる測距(Xチャンネル)

$$= Cvel \times \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 - 50\mu sec}{2}$$

2局との測距によりGNSSと同様に測位が可能となる ⇒ DME/DME



日本国内にもDMEが多数配置

DME/DME測位のRNAV利用の現状

RNAV航法 (広義のRNAV)

OPMA : Onboard Performance Monitor and Alert

RNAV仕様 (狭義のRNAV)

RNP仕様

機上の性能監視警報機能(OPMA)が**不要**
自機経路の逸脱を**監視できない**
(管制官によるレーダ監視が必要)

機上の性能監視警報機能(OPMA)が**必要**
自機の経路逸脱を**監視できる**
管制官によるレーダ監視が**不要**

洋上

エンルート

SID/STAR

洋上

SID/STAR

進入

RNAV10

RNAV5

RNAV1

RNP4

RNP1

RNP APCH
RNP AR APCH



GNSS利用可能
DME/DME/IRU**利用可能**

GNSSのみ利用可能
DME/DME/IRU**利用不可**

欧州の動向

2017 2018 2019 2020 2021 2022

EUROCAE
WG-107



2022 Q2



MASPS for DME Infrastructure supporting PBN Positioning
MOPS for DME (DME/N and DME/P (Ground Equipment) ED-57)

短期的APNTとしてのDME/DME測位によるRNPサポート

2022 Q2



EUROCAE WG-85
/ RTCA SC-227

MASPS for Minimum Aviation System Performance
Standards: Required Navigation Performance for
Area Navigation (ED-75/DO-236)

GNSS停止に対するロバストネス向上を含めて
ナビゲーション要件を改訂

国内PBN計画(CARATS)

PBN導入展開計画(案)

RNAVロードマップ(2007年第2版)の改訂版として策定

【期間の設定と目標】

- 短期(～2020年度) : RNAV・RNP経路の全国展開
- 中期(2021～2024)年度 : 全飛行フェーズにおけるRNP化の推進
- 長期(2025年度以降) : 軌道ベース運用の実現

2019年 3月14日
第9回CARATS推進協議会

- 重点: 重点的取組施策
- ◆: 意思決定年度
- 2018: 2018 意思決定
- 2019: 今後、意思決定

別紙1-2

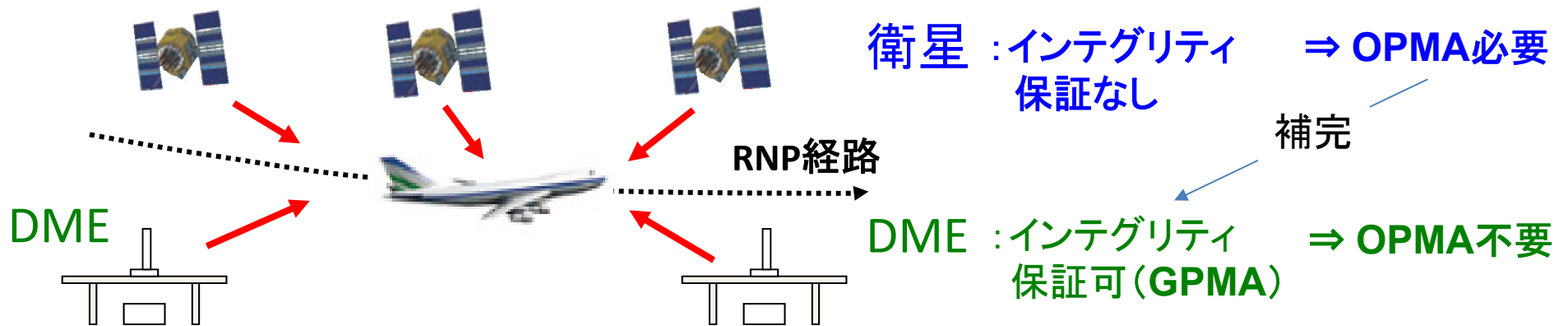
	現状(これまで)	短期(2020年度)	中期(2021～2024年度)	長期(2025年度～)
航空路	プロジェクト名 個別施策名 導入済み施策 1992年～ : 試行運用開始 (3本のRNAV経路を設定) 1995年～ : 評価運用開始 (暫定実施基準を策定) 2008年～ : RNAV5経路 正式運用開始(航法精度±5NM指定) RNAV5経路 : 254本 を設定(2018.7現在) スカイハイウェイ(2010年度～) 29,000ft以上の高度帯において、VOR経路飛行とRNAV5経路飛行を運用的に垂直分離し、RNAV経路を全国展開	RNAV・RNP経路の全国展開	全飛行フェーズにおけるRNP化の推進	軌道ベース運用の実現
	将来のTBO運航実現に向けて最終的に「Advanced RNP」への移行を目指す 高精度かつ時間軸を含むRNP(以降) (OI-10)	管制空域再編(2018～2024年度) 【新規】RNP2導入、RNAV5→RNP2移行(2018検討) RNAV5 → RNAV5 / RNP2 (オーバーレイ) → RNAV5→RNP2 (順次移行)	全飛行フェーズでの衛星航法サービスの提供(EN-7) RNP2 (OI-10: ◆2018予定)	将来のTBO運航実現に向けて最終的に「Advanced RNP」への移行を目指す 高精度かつ時間軸を含むRNP(以降) (OI-10)
ターミナル	1999年～ : 暫定運用開始(羽田空港の深夜時間帯の到着機を対象) 2004年～ : 暫定RNAV経路設定(5空港:函館、大阪、高松、福岡、鹿児島) 2007年～ : RNAV1 SID/STAR 正式運用開始(航法精度±1NM指定) RNAV1 : 34空港 336本 RNP1※ : 40空港 138本 を設定(2018.7現在)	精密かつ柔軟な出発及び到着・進入方式(OI-9) RNP1 の展開 RNP1 設定空港拡大(RNP進入方式の展開に合わせ、4～6空港/年)	【新規】RNAV1 → RNP1移行 RNAV1のRNP移行(4～6空港/年)	Advanced RNP (OI-10: ◆2020予定) エントランス → ターミナル → 進入 → 出発 RNP2 → RNP1 → RNP1 進入 → RNP1 出発 ・出発から到着までRTAを含む RTA: Required Time of Arrival
空港周辺	2005年～ : RNAV進入方式 運用開始(3空港:新千歳、那覇、函館) 2006年～ : Baro-VNAV進入方式 運用開始(3空港:新千歳、那覇、広島) 2012年～ : RNP AR進入方式 運用開始(5空港:羽田、大館能代、函館、高知、北九州) 非精密進入	RNP進入・RNP AR進入 の展開 RNP進入・RNP AR進入 設定空港拡大(4～6空港/年)	【新規】RNAV進入→RNP進入移行 RNAV進入のRNP移行(4～6空港/年)	* RNP進入方式は、全国の計器進入方式設定済み空港へ展開

ターミナル: RNAV1 ⇒ RNP1へ移行
 航空路: RNAV5 ⇒ RNP2へ移行
 (空域容量の拡大, RF レグの利用)

GNSS障害時の短期的APNTとして
 我が国でもDME/DMEによりRNP
 経路を飛行可能とすることが必要



DMEのインテグリティ保証によるRNP経路適用



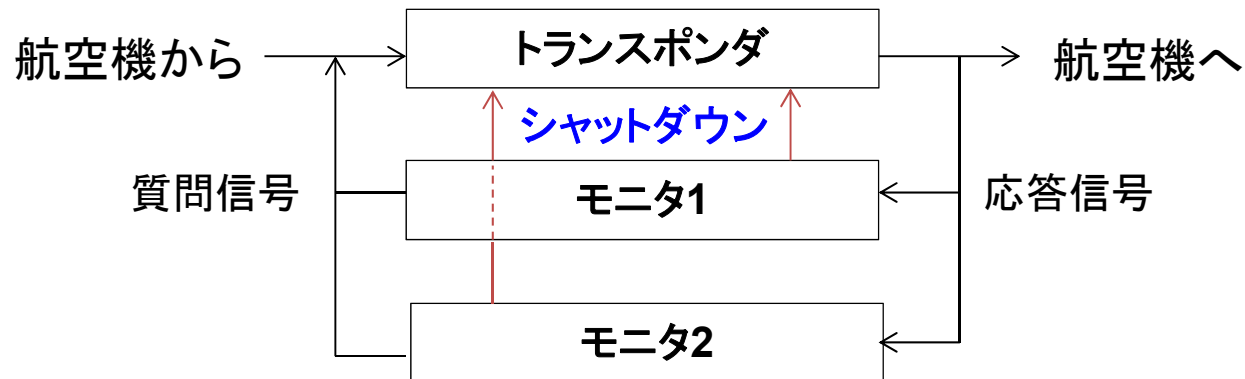
インテグリティ : システムが航法に使用すべきでないとき, ユーザにタイムリーに警報を発する能力

- RNP経路を飛行する航法装置にはOPMAが必要 ⇒ インテグリティの保証 (航法衛星は異常時にも電波を発出し続けるため)
- DMEの機上装置にOPMA機能を持たせるにはインパクト大
- 既存のDME地上局のインテグリティを保証するGPMAにより、OPMAを補完
- DME地上局のインテグリティ保証について、EUROCAE WG-107にて議論中

GPMA (Ground Performance Monitor and Alert)

インテグリティリスク : 地上のトランスポンダ装置が故障しているにも関わらず
運用状態になっている確率の推定値 $< 10^{-7} / \text{h}$ 目標 (TBD)

我が国における課題



地上DME局装置のデュアルモニタ

ORモニタ方式

- モニタ1またはモニタ2のどちらかが異常を検出した際にシャットダウン
- コンティニューイティ・アベイラビリティでは不利だが、インテグリティでは有利

ANDモニタ方式

- モニタ1およびモニタ2の双方が異常を検出した際にシャットダウン
- コンティニューイティ・アベイラビリティでは有利だが、インテグリティでは不利

諸外国の地上DME装置はANDとORの切替えが可能

国内の地上DME装置はANDでありORにするためには改修が必要

⇒ AND方式のままインテグリティ($<10^{-7}$)を満足することが課題

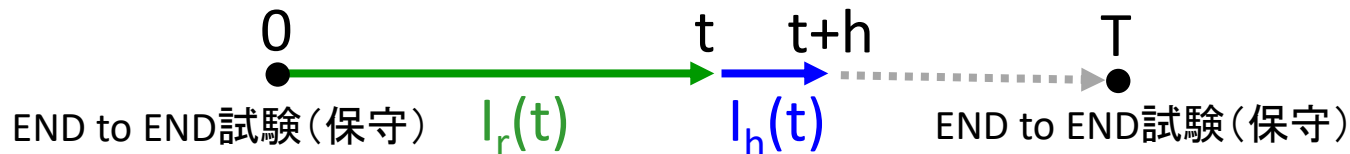
インテグリティ計算方法(1)

EUROCAE WG-107にて提案 (Luca Saini [6])

$$\text{インテグリティリスク} = I_r(t) + I_h(t)$$

$I_r(t)$: 時刻 t に存在するインテグリティリスク

$I_h(t)$: 期間 $[t \sim t + h]$ 内に発生するインテグリティリスク ($h=1$)



- ▶ t は $0 \sim T$ の任意の時刻 (T : End to End試験の周期)
- ▶ 累積インテグリティリスクはEND to END試験(保守)によりゼロにリセット
- ▶ トランスポンダ、モニタ×2、モニタチェック×2、制御回路、遮断経路を分割

本検討では、トランスポンダ、モニタ×2、モニタチェック×2
の5コンポーネントでANDロジックとORロジックを比較

インテグリティ計算方法(2)

$I_r(t)$: 時刻tにおいて存在するインテグリティリスクの計算

n個のコンポーネントが故障する場合において、i番目に故障するコンポーネントの故障率を λ_i とした場合、そのシーケンスの時刻tにおけるインテグリティリスク

$$I(t)_{1,2,\dots,n} = \prod_{j=1}^{n-1} \left\{ 1 / \left(\lambda_{j+1} \sum_{i=1}^{j+1} \frac{1}{\lambda_i} \right) \right\} \times t^n \times \prod_{j=1}^n \lambda_j$$

影響する故障シーケンスのみを抽出して積算

モニタチェック1 ⇒ モニタ1 ⇒ トランスポンダ (ANDのみ影響)

モニタチェック1 ⇒ モニタチェック2 ⇒ モニタ1 ⇒ モニタ2 ⇒ トランスポンダ
(AND,ORで影響)

5コンポーネントで325通りの故障シーケンス

7コンポーネントでは13,699通りの故障シーケンス

インテグリティ計算方法(3)

$I_h(t)$: 期間[t ~ t + h]内に発生するインテグリティリスクの計算
(単位時間あたりではh=1)

影響する状態変化のみを抽出して積算

時刻tにおける状態	時刻t+hにおける状態	発生確率
故障: モニタチェック1	故障: モニタチェック1 モニタ1 トランスポンダ	$\lambda_{TX}\lambda_{MON1}\lambda_{MIT1}th^2$ ANDのみで影響
故障: モニタチェック1 モニタチェック2	故障: モニタチェック1 モニタチェック2 モニタ1 モニタ2 トランスポンダ	$\lambda_{TX}\lambda_{MON1}\lambda_{MON2}\lambda_{MIT1}\lambda_{MIT2}t^2h^3$ AND,ORで影響

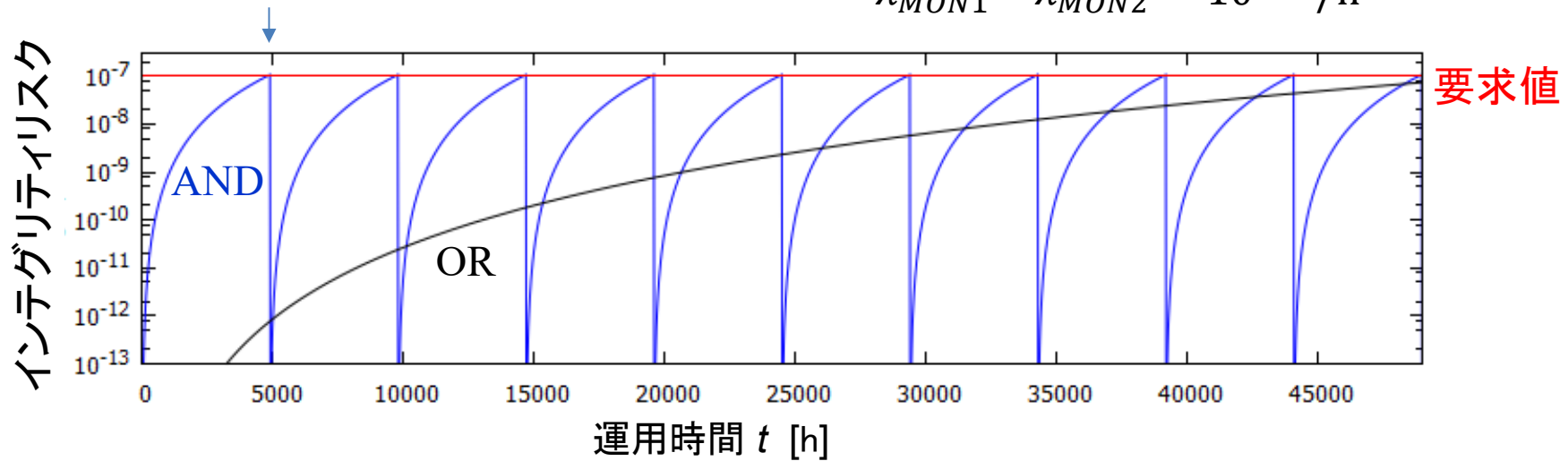
※ TX:トランスポンダ
MON: モニタ, MIT: モニタチェック

インテグリティ計算結果

$$\lambda_{TX} = \lambda_{MIT1} = \lambda_{MIT2} = 10^{-6} /h$$

$$\lambda_{MON1} = \lambda_{MON2} = 10^{-5} /h$$

END to END試験



END to END試験(メンテナンス)の周期

OR方式 50,000h (2083日)

AND方式 5,000h (208日) < 1年(目標)

$t = 10,000h$ におけるインテグリティリスク

OR方式 $2.56 \times 10^{-11} /h$

AND方式 $9.61 \times 10^{-7} /h$

- ORモニタは時刻 t に至るまで5コンポーネントすべてが故障する場合においてのみインテグリティリスクに寄与するが、ANDモニタは3コンポーネントから寄与する(3故障の同時確率が5故障よりも大きいのが差の要因)
- $t \sim t+h$ の状態変化によるインテグリティリスクよりも時刻 t に至るまでのインテグリティリスクが支配

本発表のまとめと課題

- 短期的APNT (GNSSバックアップ)としてDME/DME測位をRNP経路への適用が欧州で検討
- DME地上局装置のインテグリティ保証 (GPMA)により機上性能モニタ警報 (OPMA)を補完
- WG-107で提案されているインテグリティ計算方法により5コンポーネントを用いてANDとORのロジックの差を検証
 - ⇒ End to End試験 (メンテナンス) 周期はANDロジックはORに比べて1桁短い

今後の課題

- インテグリティリスクを低減する方法の検討 (ANDモニタでインテグリティ要求を満足)
- 現用機器でのインテグリティリスク計算