

15. 航空機動態情報の品質解析

監視通信領域 松永 圭左, 古賀 禎

航空交通管理領域 瀬之口 敦

平成24年度(第12回) 電子航法研究所研究発表会

平成24年6月7-8日

- 発表内容 -

1. SSRモードSによる動態情報ダウンリンクの概略
2. 航空機動態情報(DAPs)導入時の課題
3. DAPs評価試験内容
4. 収集データを用いた評価試験結果
5. まとめ

1. SSRモードSによる動態情報ダウンリンクの概略

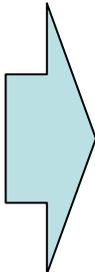
✓ SSR(二次監視レーダー)モードS

… 監視機能(3次元位置, 識別番号) + データリンク機能

✓ ダウンリンクした航空機の動態情報

- 意図情報(選択高度等)
- 状態情報(速度, 磁方位, ロール角, 等)

DAPs (Downlink Aircraft Parameters)

- 
- 管制官の状況認識の向上
 - 音声通信量の低減
 - 航空機の予測精度改善による交通量増大への対応および安全性の向上

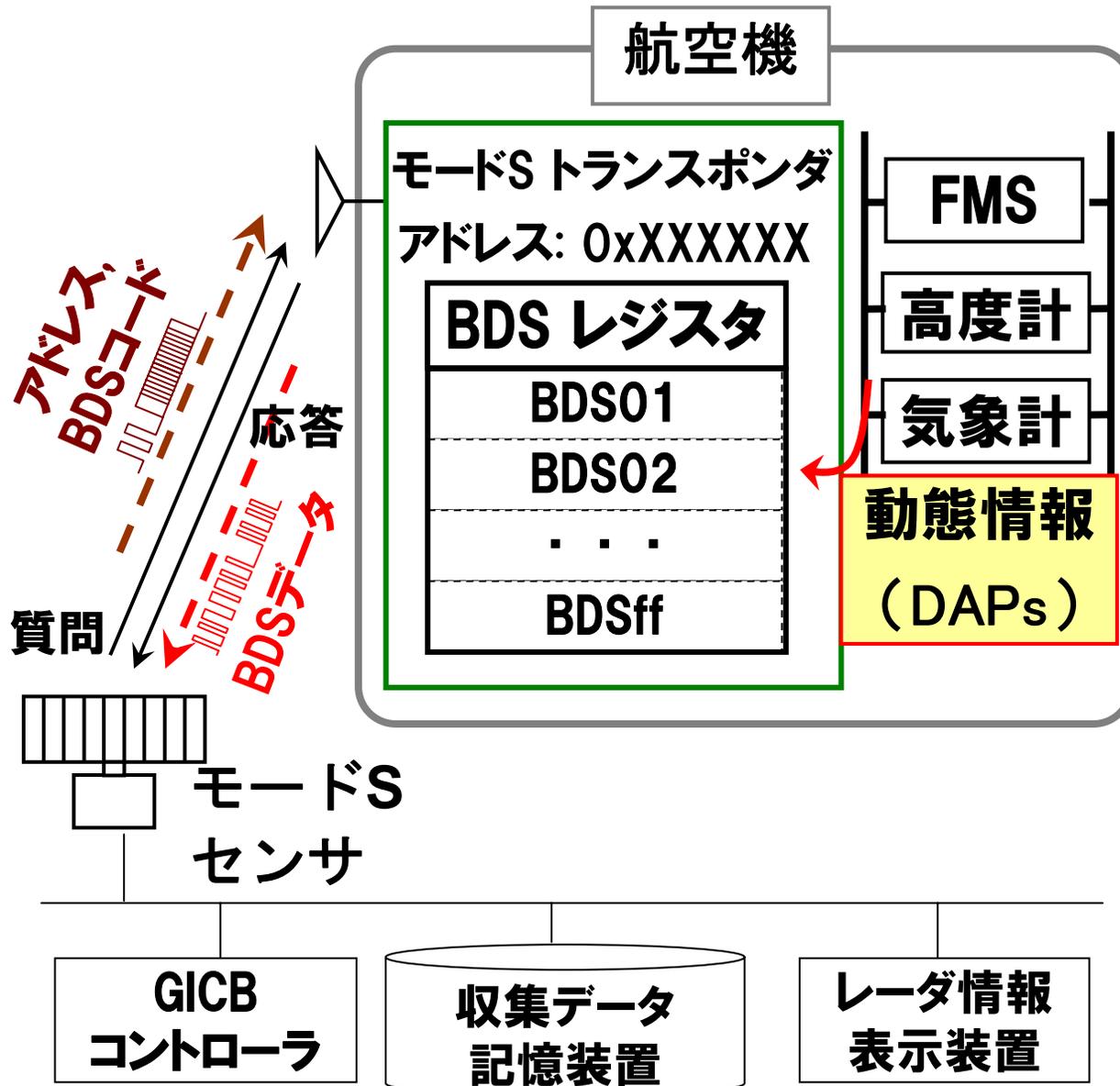
1.2 - モードS対応状況 -

モードS局 : 航空路監視レーダ10局 / 空港監視レーダ7空港



※ 航空機(羽田付近)の約8割がモードS対応(H24年3月時点)

1.3 SSRモードSによるDAPsの仕組み



- 255 個の記憶領域
(BDSレジスタ)
- … 接続された
機上装置の
動態情報を格納
- トランスポンダ毎
に固有のアドレス
→ 個別質問可能

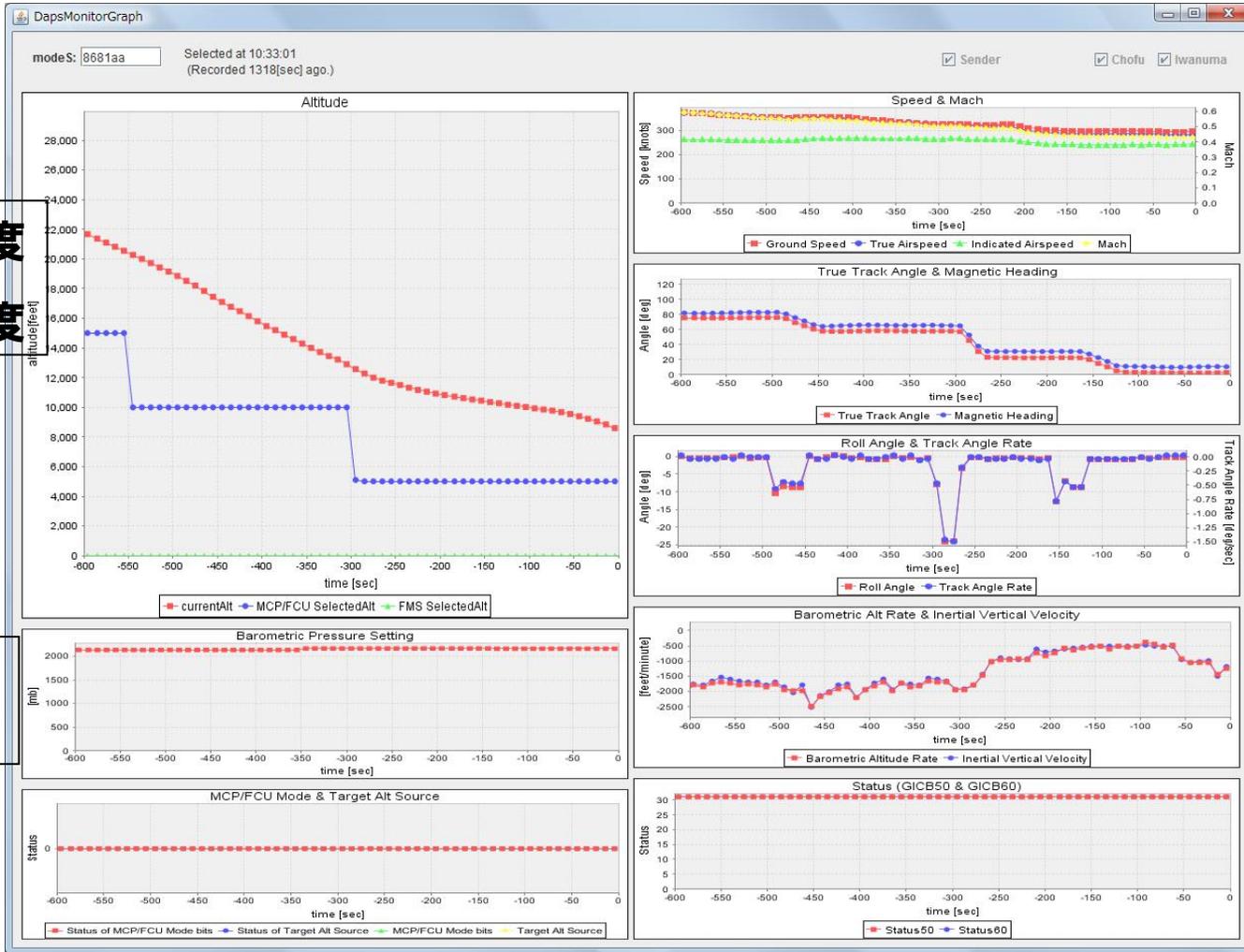
1.4 BDSレジスタ概要

BDSレジスタ(56bit×255)	
BDSコード (Hex)	データ内容
10/17/18 /19	データリンク能力通報
20	航空機ID(便名)
30	ACAS RA
40	航空機選択高度意図
50	トラック・転回通報 (ロール角, トラック角, 対地速度, トラック角変化率, 真対気速度)
60	磁方位・速度通報 (磁方位, 指示対気速度, MACH, 気圧高度変化率, 垂直慣性速度)

- ・装置構成
- ・能力情報

- ・航空機意図情報
- ・状態情報

1.5 DAPsデータ例(1航空機の時系列データ)



気圧高度
選択高度

QNH
設定値

速度
MACH

トラック角
ヘディング

ロール角
トラック角変化率

気圧高度変化率
慣性垂直速度

※ 異常データがあると、DAPs導入時に問題となる。

- 発表内容 -

1. SSRモードSによる動態情報ダウンリンクの概略
2. **航空機動態情報(DAPs)導入時の課題**
3. DAPs評価試験内容
4. 収集データを用いた試験結果
5. まとめ

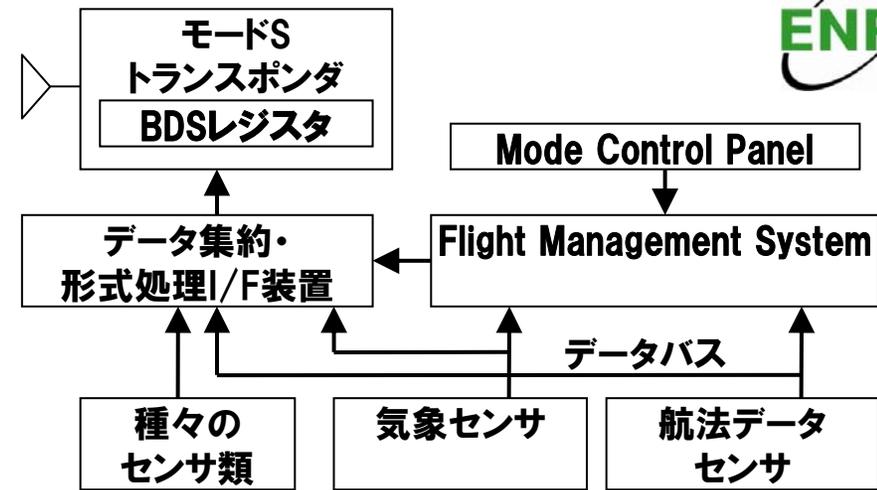
2.1 DAPs導入時の課題

航空管制にDAPsを導入するには、
データの信頼性が重要

… 従来の試験では、

- ✓ 多数の構成装置，データ間の相関等
→ テスト項目が膨大，試験項目抜けの恐れ
- ✓ 装置の構成毎に異なる手順／試験装置が必要
- ✓ 運用中の異常検出が不可能

⇒ 運用中の機体からのダウンリンクデータを用いて、
機上装置が規定要件に適合しているかの検証、
および異常検出するモニタリングシステムが必要



2.2 DAPs導入時の課題への対応

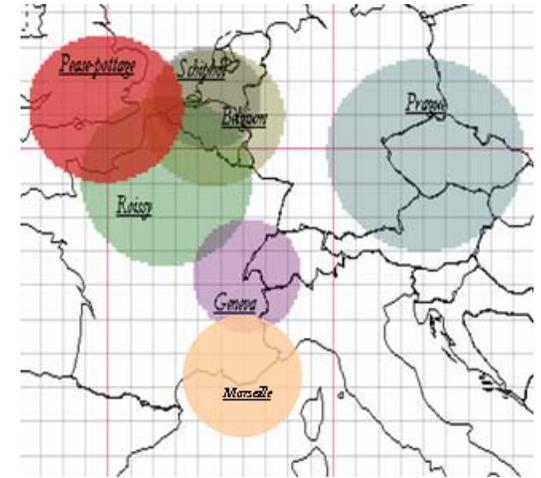
◆ 欧州

- DAPs対応が義務化
- EECにおいて、モニタリングを実施

◆ 米国

MITリンカーン研究所で、
モニタリングシステムを開発

EECでのMode-Sモニタ空域



Mode S Monitoring - Participating Ground Stations

http://www.eurocontrol.int/msa/public/standard_page/modes_amp.html

⇒ 日本での将来のDAPs導入に向けて、
当研究所で、モニタリングシステムを開発中。
MIT手法を適用し、ICAO要件への適合検証、
および異常値検出の評価試験を行った。

- 発表内容 -

1. SSRモードSによる動態情報ダウンリンクの概略
2. 航空機動態情報(DAPs)導入時の課題
3. DAPs評価試験内容
 - 3.1 静的情報試験の詳細
 - 3.2 動的情報試験の詳細
4. 収集データを用いた試験結果
5. まとめ

3. DAPs評価試験の内容

MITシステムでは、44項目の試験項目を実施。

➤ 静的情報試験 (29項目;うち23項目実装済み)

フライト中は変化しない情報に対する試験

- … 機上装置の構成や能力通報が、
ICAOの規定に適合していることの検証試験

➤ 動的情報試験 (15項目;うち10項目実装済み)

フライト中に変化する情報に対する試験

- … 速度、磁方位、ロール角、等の状態情報の異常値検出試験

3.1 静的情報試験の詳細 (1) – BDS10/17/18/19 –

BDSレジスタ10/17/18/19 (データリンク能力通報)

BDS10/17/18/19は

- ・ 装置構成情報
- ・ 能力情報

を含む。

DAPsに関連する情報のビット／フィールドが、ICAOの規程に適合しているかの試験

BDS コード (Hex)	ビット 番号	内容
10	17:23	モードSサブネットバージョン
	25	モードS特有サービス能力
17	09	BDS40／50／60 利用可能フラグ
	16	
	24	
18	34	BDS17／10 構成有効フラグ
	41	
19	17	BDS60／50／40 構成有効フラグ
	33	
	49	

3.1 静的情報試験の詳細 (2) – BDS40/50/60 –

BDS40/50/60は

- ・ 意図／状態情報
- ・ その有効状態フラグ
- ・ 予約領域

から成る。

ICAOの規程：

- 有効フラグのいずれかは‘1’値
- 有効でないデータ領域は‘0’値
- 予約領域は常に‘0’値

BDSレジスタ40(主要動態情報;選択高度意図)

BDSコード(hex)	ビット番号	内容	
40	01	有効フラグ	MCP/FCU 選択高度
	02:13	データ	
	14	有効フラグ	FMS 選択高度
	15:26	データ	
	27	有効フラグ	気圧設定値
	28:39	データ	
	40:47	予約	
	48	有効フラグ	MCP/FCU モード
	49:51	データ	
	52:53	予約	
	54	有効フラグ	選択高度 情報源
	55:56	データ	14

3.2 動的情報試験の詳細 (1)

DAPs異常値の検出:

- ・ DAPs値
- ・ レーダ測位値から計算された
動態情報値

の差を, 判定閾値と比較

→ 合格 / 不合格

◎ 判定閾値:

ターゲット位置のレーダ測位誤差に基づき算出。

← レーダセンサ誤差 (σ_R, σ_θ) から求まる。

例: 対地速度 (GS)

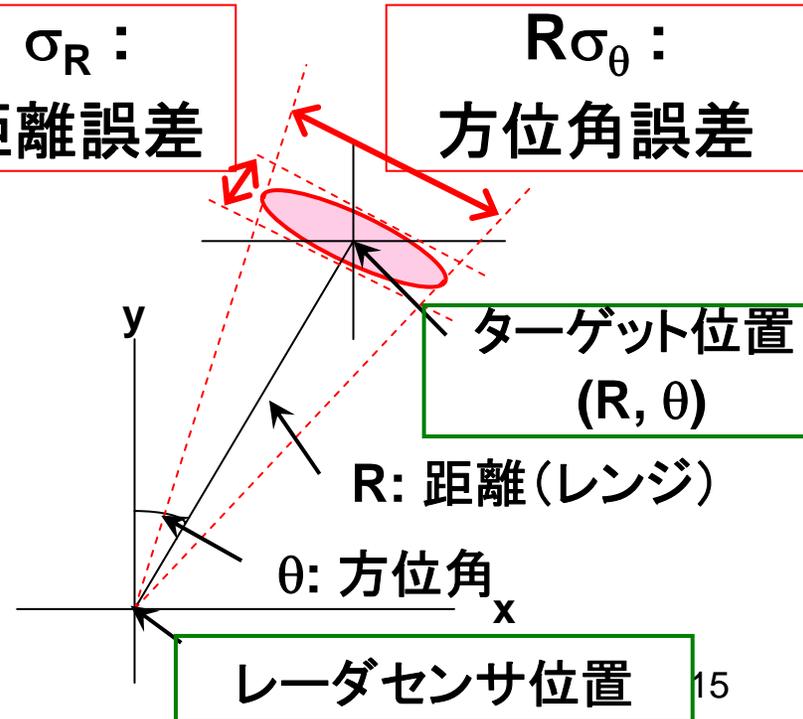
$$GS_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{t_i - t_{i-1}}$$

例: 真トラック角 (TTA)

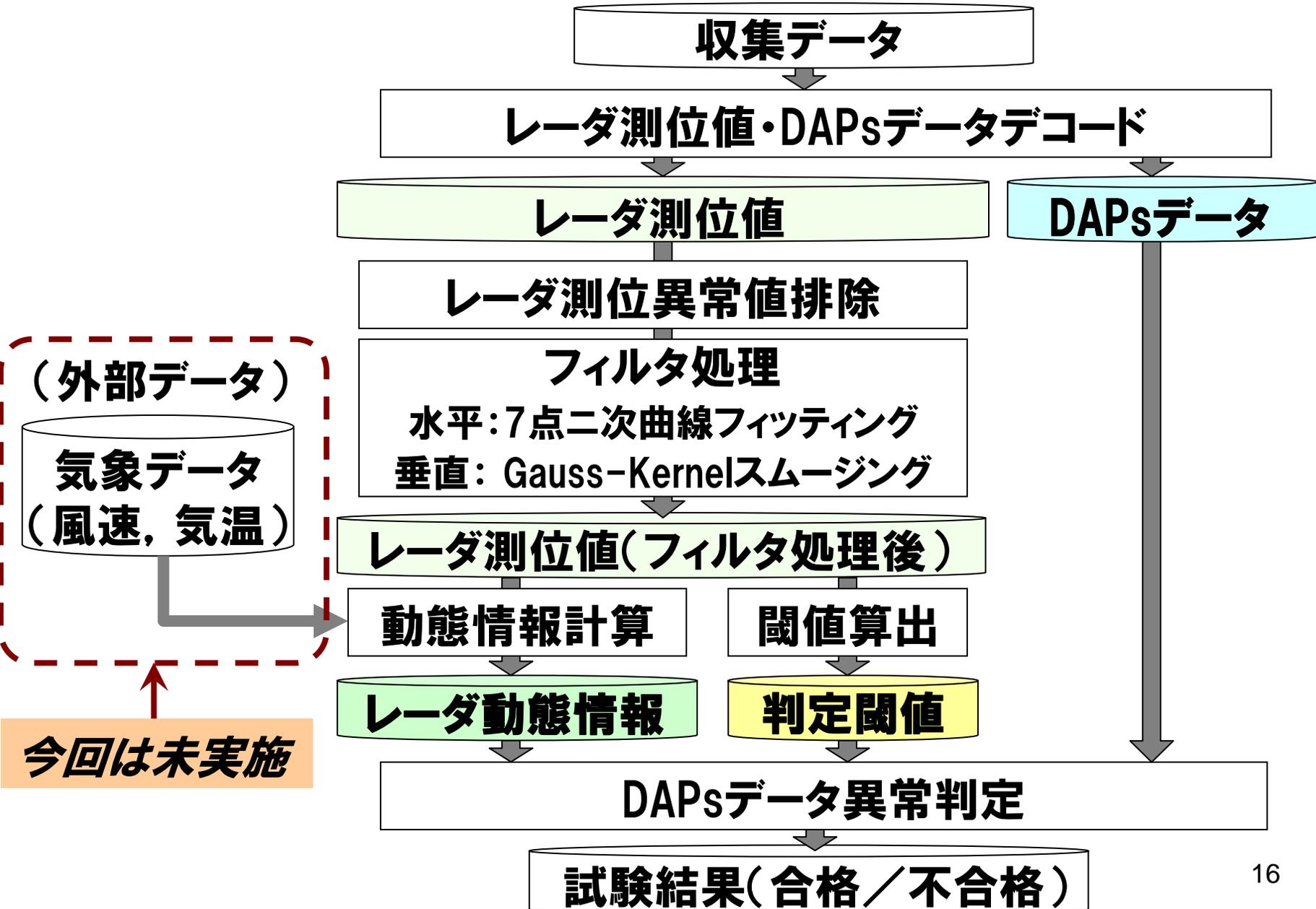
$$TTA_i = \tan^{-1} \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \right)$$

σ_R :
距離誤差

$R\sigma_\theta$:
方位角誤差



3.2 動的情報試験の詳細 (2) - 処理手順 -



3.2 動的情報試験の詳細 (3)

◆ 高度変化率に関する判定閾値

$$\frac{\text{高度分解能}}{\text{測定時間差}} \sim 125[\text{ft}/\text{min}]$$

◆ 気象データ(外部)の欠損による影響

➤ 磁方位(HDG; Magnetic Heading) : 未実施

➤ 真対気速度(TAS), 指示対気速度(IAS), マッハ数(Mach) :

- 3速度の整合性 ← 大気標準モデル・速度変換式を使用

◆ ロール角(RA; Roll Angle)

真対気速度(TAS)／トラック角変化率(TAR)が無効の場合,

— TAR とRAの符号の一致を確認

— TAR とRA双方の値が小さい場合は, 合格(PASS)

- 発表内容 -

1. SSRモードSによる動態情報ダウンリンクの概略
2. 航空機動態情報(DAPs)導入時の課題
3. DAPs評価試験内容
4. 収集データを用いた試験結果
 - 4.1 収集データ
 - 4.2 静的情報試験結果
 - 4.3 動的情報試験結果
5. まとめ

4.1 試験結果 — 収集データ —

■ 調布SSRモードS実験局

覆域：250 NM

周期：10 sec

筐体出力：最大 1.5 kW

□ 解析対象データ期間

静的情報試験：1ヶ月分

2011年6月1日～30日

動的情報試験：1日分

2011年6月1日



覆域

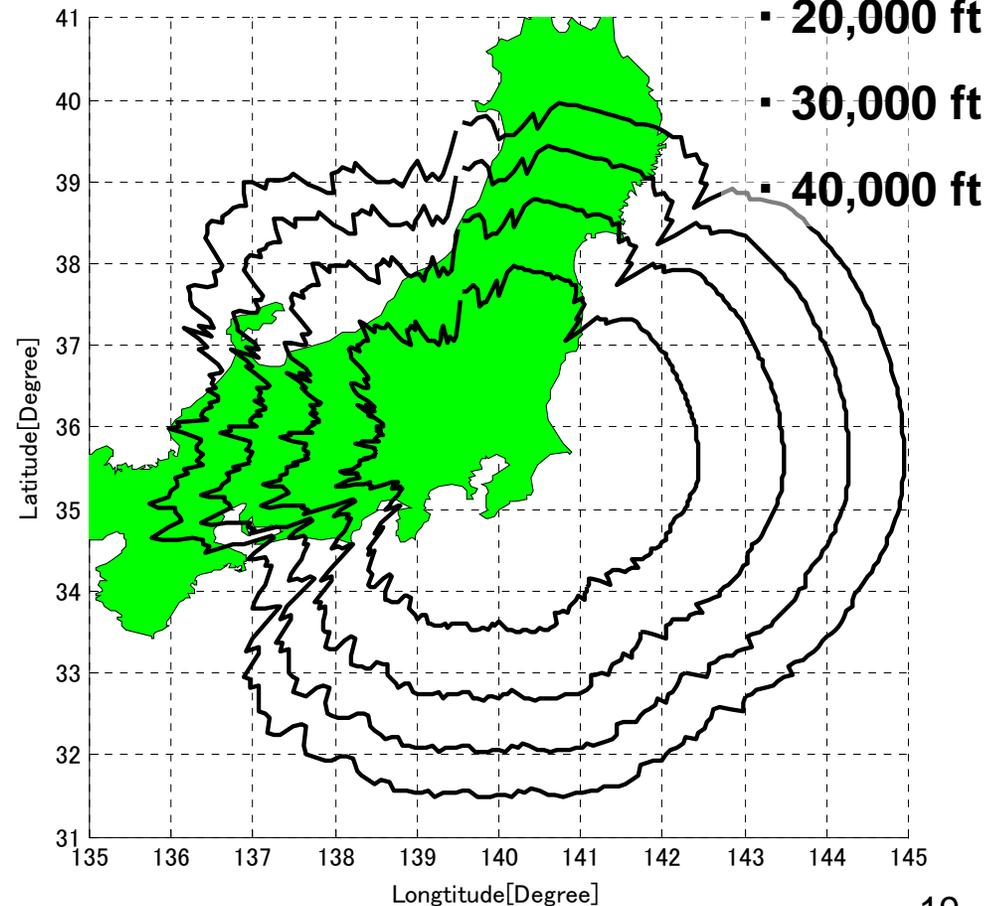
高度：

・ 10,000 ft

・ 20,000 ft

・ 30,000 ft

・ 40,000 ft



4.2 試験結果 — 静的情報試験(1) : BDS10/18/19 —

対象 BDS	試験 番号	試験内容	試験実施回数		機体数	
			総数	不合格	総数	不合格
10	14	モードSサブネットバージョン	21,427	18,561	1,519	1,272
	15	固有サービス能力		12		4
18	2	BDS10静的構成有効	17,930	1	1,512	1
	3	BDS17静的構成有効		1		1
19	6	BDS40静的構成有効	16,713	3	1,500	3
	7	BDS50静的構成有効		3		3
	8	BDS60静的構成有効		3		3

➤ モードSサブネットバージョンは、
8割以上の機体で適切に設定されていない

➤ 少数の機体において、不適切な設定を確認

➤ その他の試験項目では、低い頻度で偶発的エラー発生を検出

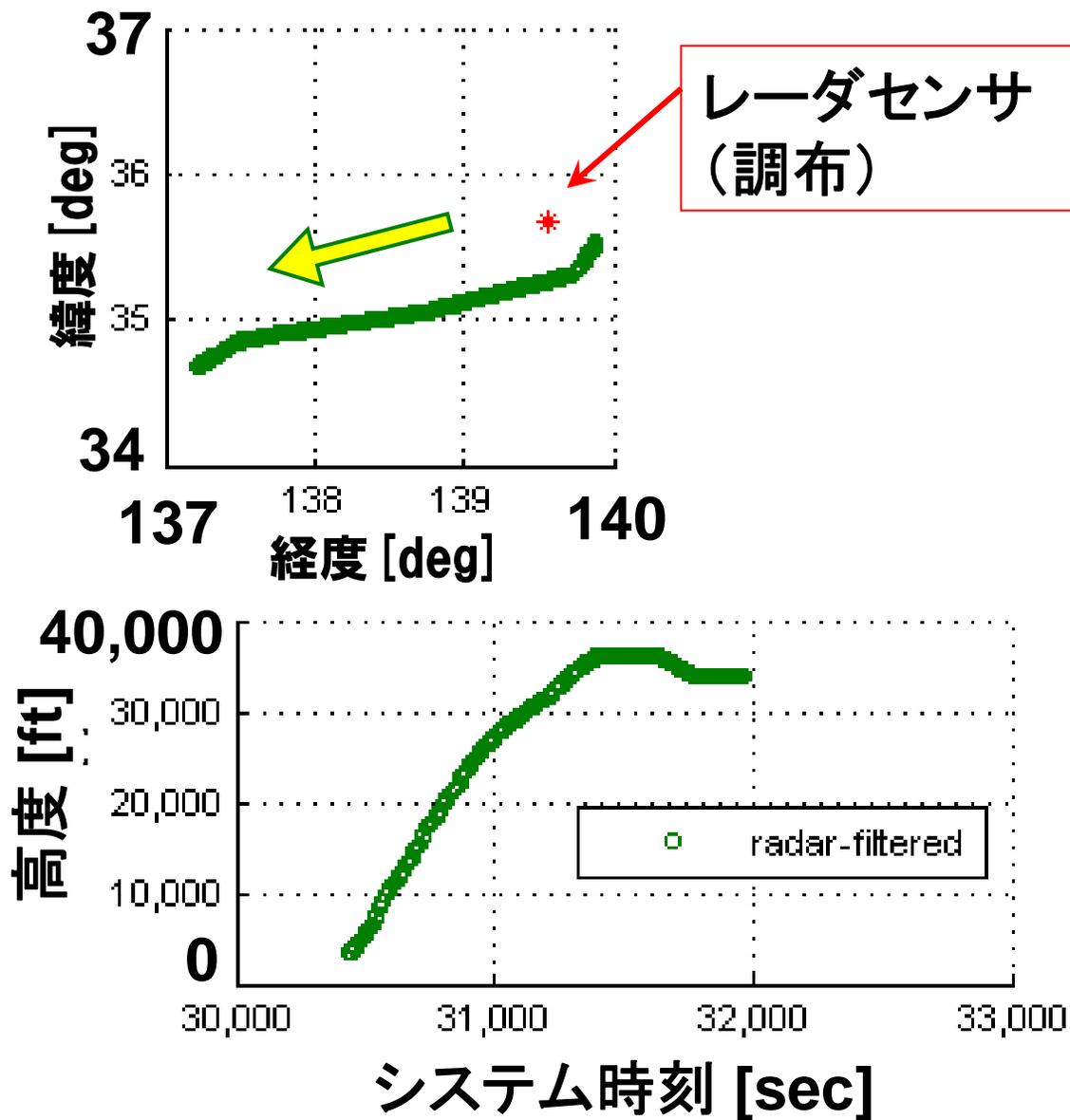
4.2 試験結果 — 静的情報試験(2) : BDS40/50/60 —

対象 BDS	試験 番号	試験内容	試験実施回数		機体	
			総数	不合格	総数	不合格
40	28	有効ビット='1'有り	2,877,354	8	1,519	8
	29	無効データフィールド='0'		416		1
	30	予約フィールド='0'		416		1
50	31	有効ビット='1'有り	2,877,947	8	1,519	8
	32	無効データフィールド='0'		0		0
60	38	有効ビット='1'有り	2,878,261	8	1,519	8
	39	無効データフィールド='0'		0		0

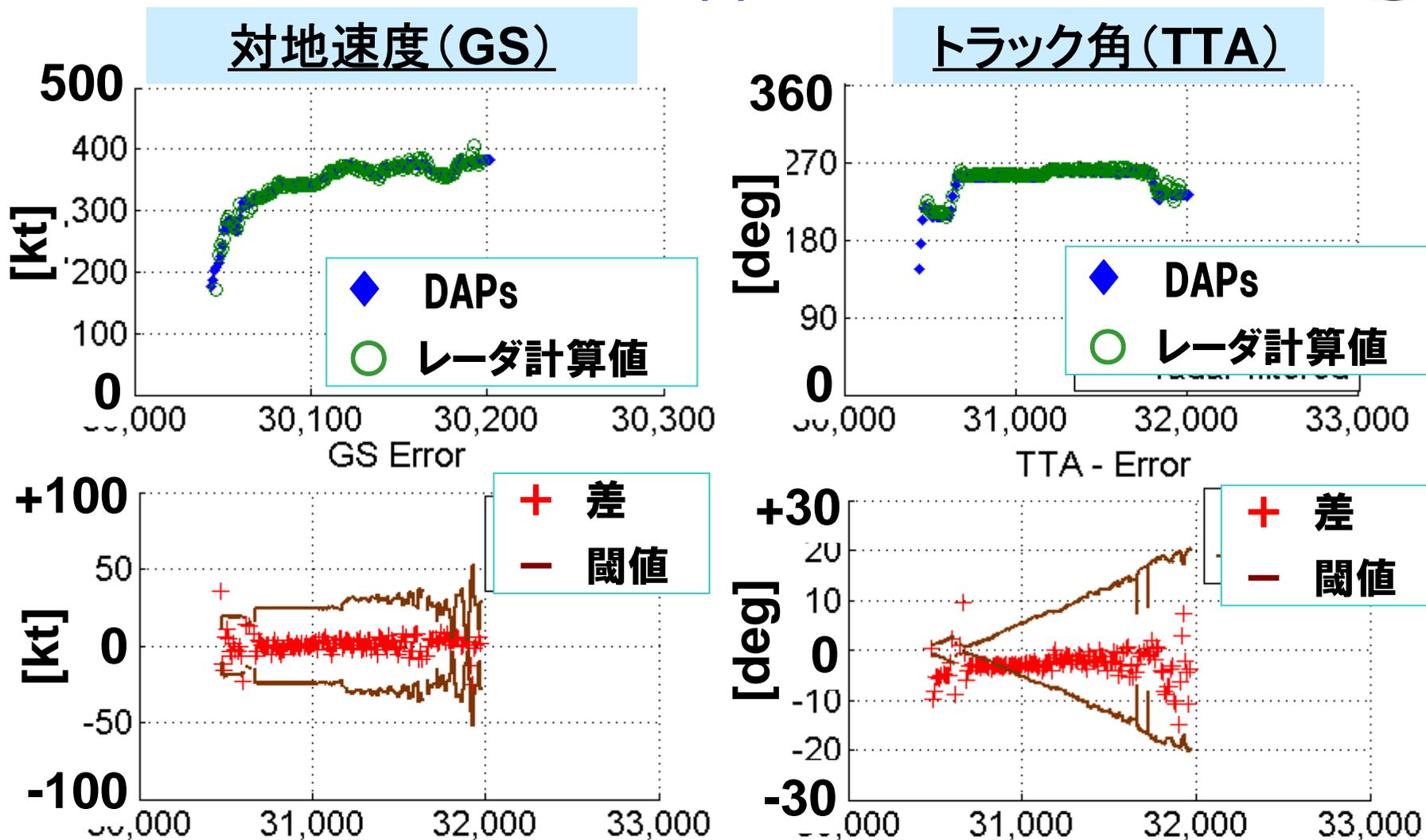
➤ 試験番号28,31,38に関して,
低い頻度で偶発的エラー発生を確認

➤ 試験番号29,30に関して,
装置の不具合によるものと推測

4.3 試験結果 — 動的情報試験 (1) : データ例 (航跡) —



4.3 試験結果 — 動的情報試験 (2) : データ例 (GS, TTA) —



- 閾値が、ターゲット位置／運動方向によって影響を受ける。
- 閾値が、過小または過大となっている場合がある。

4.3 試験結果 — 動的情報試験 (3) —

対象トランスポンダ数: 437

総航跡数: 965

総ターゲット数: 188,504

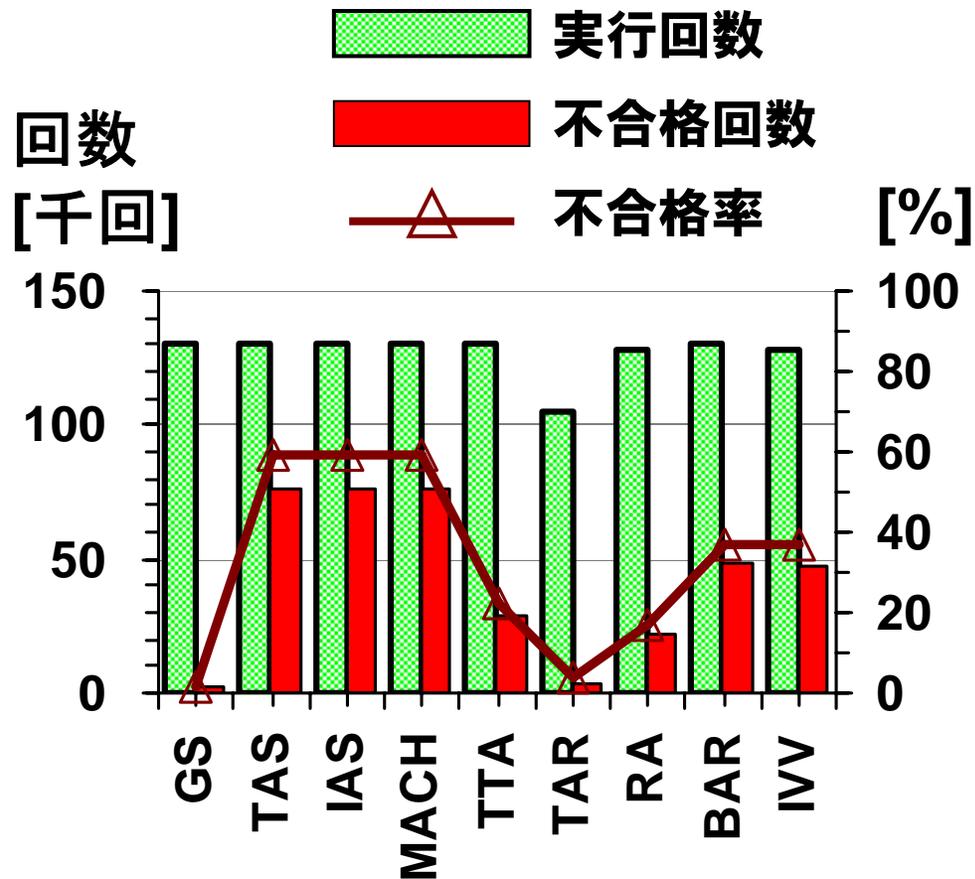
◆ レーダセンサ性能:

$$\sigma_R = 25 \text{ [ft]}$$

$$\sigma_\theta = 0.06 \text{ [deg]}$$

◆ 判定閾値 = $\alpha \sigma$

$$\alpha = 1.96 \text{ (95\%)}$$



◆ 対地速度 (GS) とトラック角変化率 (TAR) のみ、不合格率が5%以下。

◆ その他の動態情報に関しては、不合格率が想定以上に高い。

5. まとめ

MITリンカーン研究所が開発した手法を適用した航空機動態情報(DAPs)モニタリングシステムを開発し、評価試験を実施した。

➤ 静的情報試験

概ね有効に機能した

偶発的エラー発生および装置の不具合によるエラーを確認した。

➤ 動的情報試験

適切に機能しなかった

判定閾値が過小または過大になる場合がある。

□ 今後の課題:

✓ 閾値設定手法の検討

・・・ターゲット位置／運動状態, データ更新頻度

(Backup slides)

Annex10

Mode S interrogation pulse sequence

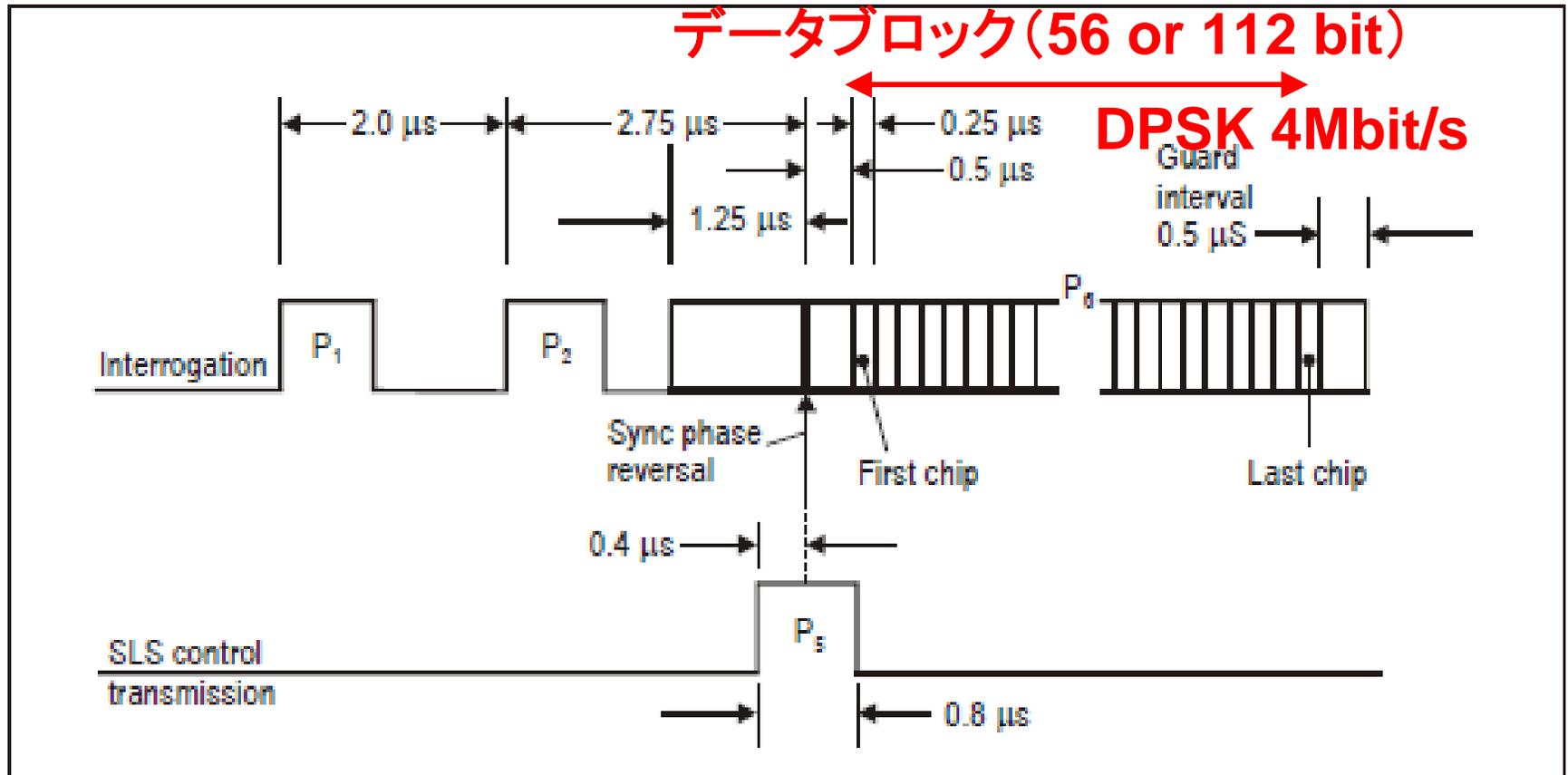


Figure 3-4. Mode S interrogation pulse sequence

Annex10

Mode S reply

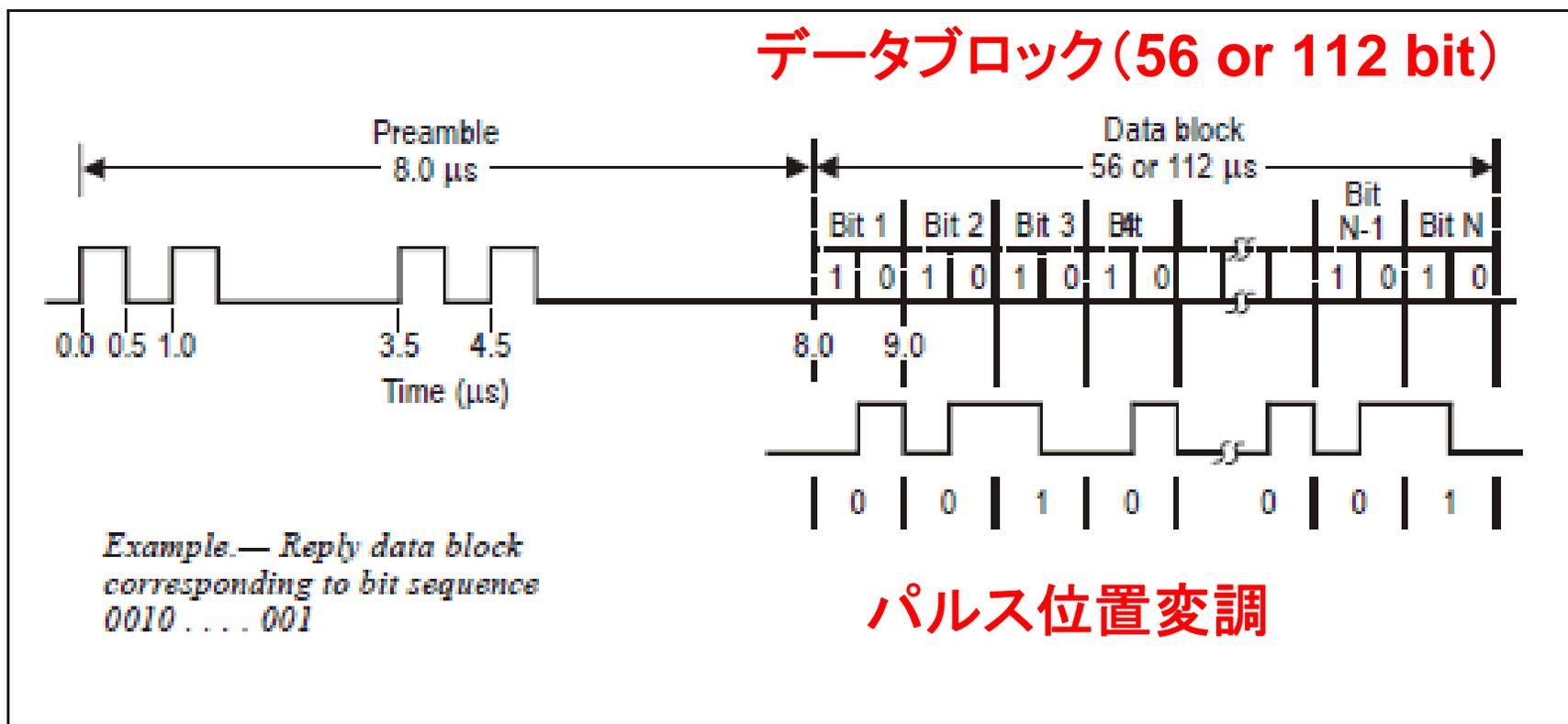


Figure 3-6. Mode S reply

Annex10

Mode S formats

interrogation or uplink formats

4	00100	PC:3	RR:5	DI:3	SD:16	AP:24	... Surveillance, altitude request
5	00101	PC:3	RR:5	DI:3	SD:16	AP:24	... Surveillance, identify request
11	01011	PR:4	IC:4	CL:3	16	AP:24	... Mode S only all-call

reply or downlink formats

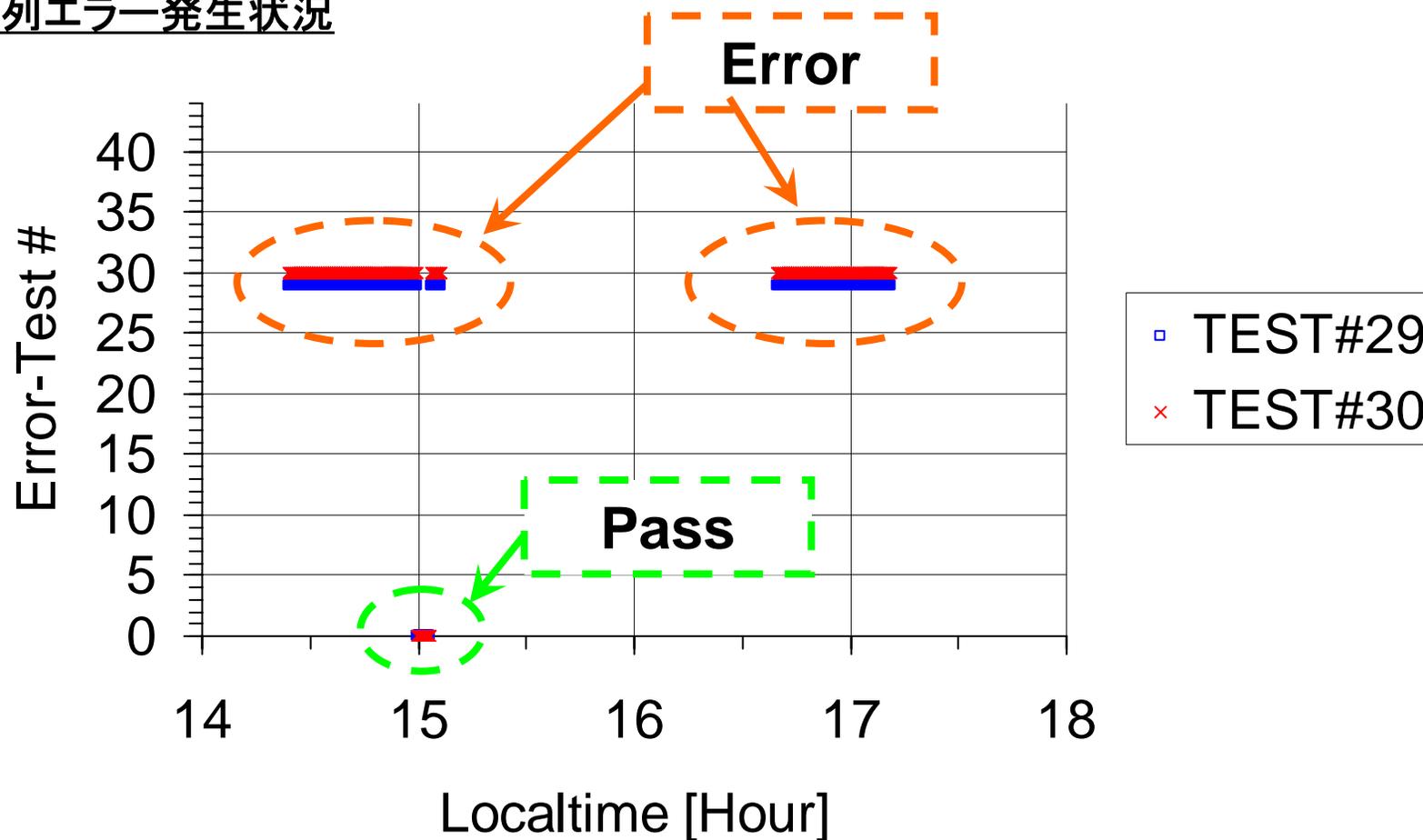
4	00100	FS:3	DR:5	UM:6	AC:13	AP:24	... Surveillance, altitude reply	
5	00101	FS:3	DR:5	UM:6	ID:13	AP:24	... Surveillance, identify reply	
11	01011	CA:3		AA:24		PI:24	... All-call reply	
20	10100	FS:3	DR:5	UM:6	AC:13	MB:56	AP:24	... Comm-B, altitude reply
21	10101	FS:3	DR:5	UM:6	ID:13	MB:56	AP:24	... Comm-B, identify reply

3.1.2.3.2.1.3 *AP: Address/parity.* This 24-bit (33-56 or 89-112) field shall appear in all uplink and currently defined downlink formats except the Mode S-only all-call reply, DF = 11. The field shall contain parity overlaid on the aircraft address according to 3.1.2.3.3.2.

6. 主要動態情報レジスタ評価結果(続き)

BDS40 TEST#29, #30 (無効/予約フィールド='0')

時系列エラー発生状況

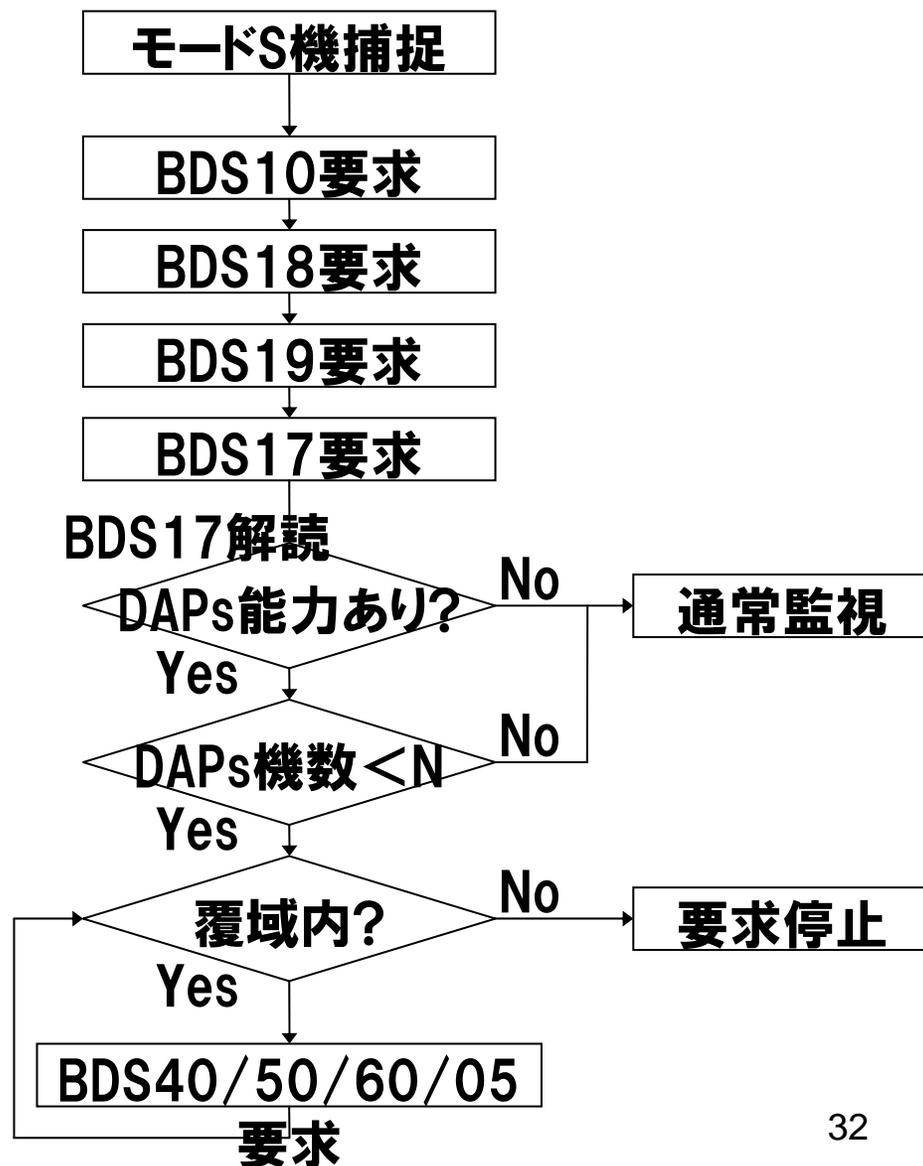


データ収集 – GICB質問フローチャート

モードS機捕捉後,
GICBコントローラが
BDS 10 → 18 → 19 → 17
の順に要求質問を行う。

BDS17に含まれる
BDS40/50/60/05の有効フラグ
が全て設定されている場合に,
BDS40/50/60/05の要求質問
を繰り返す。

BDS40/50/60/05の要求質問を
行う航空機数の最大値を設定し
ている。(20機程度)



3.2 動態情報計算式(1)

- 対地速度 (GS; Ground Speed)

$$GS_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} / (t_i - t_{i-1})$$

- 真対気速度 (TAS; True AirSpeed)

$$TAS = GS - W \quad W: \text{風速}$$

- 指示対気速度 (IAS; Indicated AirSpeed)

$$IAS = TAS \cdot \sqrt{\frac{p/T}{p_0/T_0}} \quad \begin{array}{l} p, T \quad : \quad \text{気圧, 気温} \\ p_0, T_0 : \quad \text{海面高度での気圧, 気温} \end{array}$$

- マッハ数 (M; Mach)

$$TAS = M \cdot a \quad a \quad : \quad \text{音速}$$

$$a[knots] = 661.5 \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

$$= 29.06 \sqrt{518.7 - 3.57 \cdot altitude[ft]} \quad : \quad \text{標準対気モデルの場合}$$

3.2 動態情報計算式(2)

- 真トラック角 (TTA; True Track Angle), トラック角変化率(TAR; Track Angle Rate)

$$TTA_i = \tan^{-1} \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \right)$$

$$TAR_i = (TTA_i - TTA_{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$$

- 磁方位 (HDG; Magnetic Heading)

$$HDG_i = \tan^{-1} \left(\frac{GSx_i - Wx_i}{GSy_i - Wy_i} \right) + \theta_\varepsilon$$

Wx, Wy : 風速

θ_ε : 磁北偏差

- ロール角 (RA; Roll Angle)

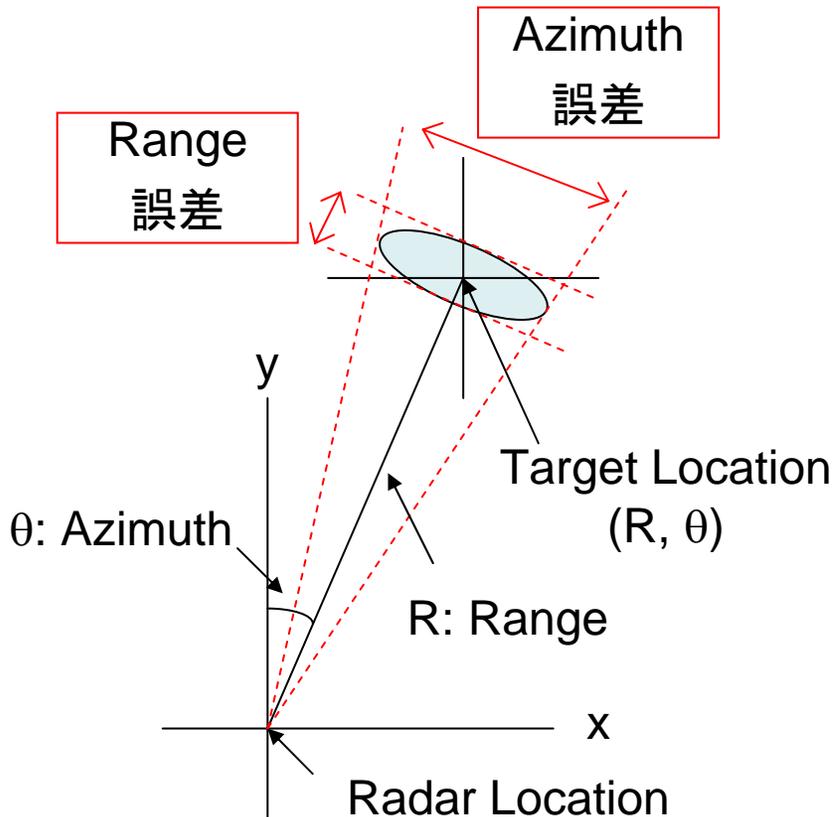
$$\phi_i = \tan^{-1} \left(\frac{TAS_i * TAR_i}{g} \right)$$

- 気圧高度変化率 (BAR; Barometric Altitude Rate),
垂直慣性速度 (IVV; Inertial Vertical Velocity)

$$Vz_i = (Z_i - Z_{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$$

3.3 ダウンリンクデータ異常判定閾値算出(1)

レーダの測位誤差をもとに算出



レーダー性能

Range誤差 : $\sigma_R = 25$ [ft]

Azimuth誤差 : $\sigma_\theta = 0.06$ [deg]

$$\sigma^2(f(x_1, \dots, x_n)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_{x_i x_j}^2$$

ターゲット位置誤差

$$\sigma_x^2 = \sigma_R^2 \sin^2 \theta + R^2 \sigma_\theta^2 \cos^2 \theta$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_R^2 \cos^2 \theta + R^2 \sigma_\theta^2 \sin^2 \theta$$

$$\sigma_{xy}^2 = (\sigma_R^2 - R^2 \sigma_\theta^2) \sin \theta \cos \theta$$

上記の値を用いて、速度、真トラック角、トラック角変化率、ロール角の誤差を算出する。

3.3 ダウンリンクデータ異常判定閾値算出(2)

$$\text{Speed : } \sigma_{Speed}^2 = \frac{\Delta x^2 (\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{x_{i-1}}^2) + 2\Delta x \Delta y (\sigma_{xy_i}^2 + \sigma_{xy_{i-1}}^2) + \Delta y^2 (\sigma_{y_i}^2 + \sigma_{y_{i-1}}^2)}{(\Delta x^2 + \Delta y^2) \Delta t^2}$$

$$\text{Heading : } \sigma_{HDG}^2 = \frac{\Delta x^2 (\sigma_{y_i}^2 + \sigma_{y_{i-1}}^2) - 2\Delta x \Delta y (\sigma_{xy_i}^2 + \sigma_{xy_{i-1}}^2) + \Delta y^2 (\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{x_{i-1}}^2)}{(\Delta x^2 + \Delta y^2)^2}$$

Heading

$$\text{-Rate : } \sigma_{HR}^2 = \frac{2\sigma_{HDG_i} \sigma_{HDG_{i-1}}}{\Delta t^2}$$

$$\text{Roll } \phi_{\max} = \tan^{-1} \left((V + \alpha * \sigma_{Speed}) * (w + \alpha * \sigma_{HR}) / g \right)$$

$$\text{Angle : } \phi_{\min} = \tan^{-1} \left((V - \alpha * \sigma_{Speed}) * (w - \alpha * \sigma_{HR}) / g \right)$$

$\Delta x = x_i - x_{i-1}$ V : 真対気速度

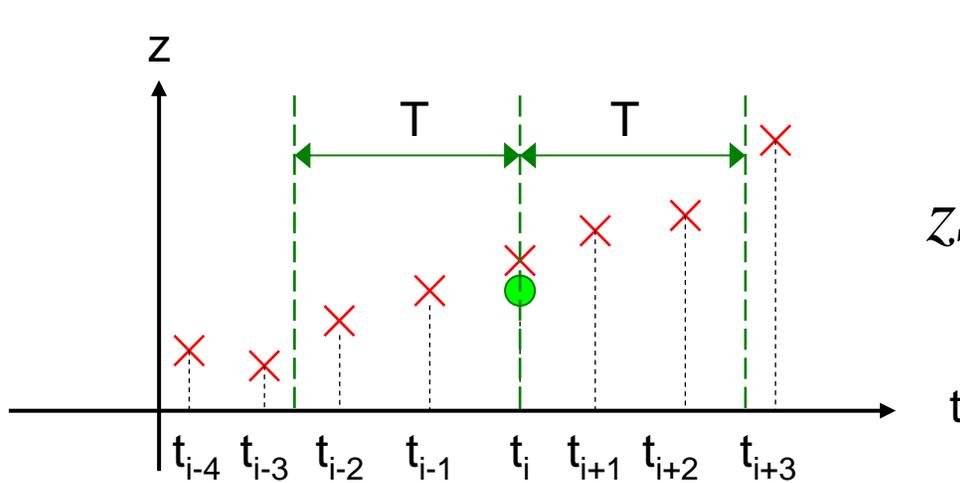
$\Delta y = y_i - y_{i-1}$ w : Heading-Rate

$\Delta t = t_i - t_{i-1}$ g : 重力加速度

α : 検定係数

$$\text{Vz : } \sigma_{Vz} = 125 \text{ [ft/min]}$$

3.1 Gauss-Kernelフィルタ



$$zsmooth_i = \frac{\sum_{|t_i - t_j| < T} \omega(t_i, t_j) z_j}{\sum_{|t_i - t_j| < T} \omega(t_i, t_j)}$$

重付けを、時間の正規分布とする。

$$\omega(t_i, t_j) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t_i - t_j)^2}{2\sigma_t^2}\right)$$

※ 解析には、

$$\sigma_t = 15 \text{ [sec]}$$

$$T = 3\sigma_t = 45 \text{ [sec]}$$

を用いた。

4.3 手順(3)

— 試験内容(1) : GS, TAS, IAS, MACH —

● 対地速度(GS)

レーダーデータから計算されたGSとDAPsデータとの差が
 $\alpha\sigma_{\text{Speed}}$ より大きい場合Fail。

● 真対気速度(TAS), 指示対気速度(IAS), マッハ数(MACH)

○ 気象データ有の場合

レーダーデータから計算された各速度と各DAPsデータとの差が
 $\alpha\sigma_{\text{Speed}}$ より大きい場合Fail。

○ 気象データ無しの場合

・標準大気モデルを用いて求めた $\text{MACH}(\text{IAS}_{\text{DAPs}}, z)$ と $\text{MACH}_{\text{DAPs}}$ との差

・標準大気モデルと用いて求めた $\text{TAS}(\text{MACH}_{\text{DAPs}}, z)$ と TAS_{DAPs} との差

の両方が $\alpha\sigma_{\text{Speed}}$ より小さい場合3データともPass。それ以外は3データともFail。

※ 3速度のDAPsデータが無い場合は実施しない。

4.3 手順(3)

一 試験内容(2) : TTA, HDG, TAR, RA 一

- 真トラック角(TTA), 磁方位(HDG)

レーダーデータから計算された各角度とDAPsデータとの差が $\alpha\sigma_{\text{HDG}}$ より大きい場合Fail。

- 気象データ無しの場合

HDGデータに関しては, 実施しない。

- トラック角変化率(TAR)

レーダーデータから計算されたTARとDAPsデータとの差が $\alpha\sigma_{\text{HR}}$ より大きい場合Fail。

- ロール角(RA)

$\phi_{\min} < \text{RA}_{\text{DAPs}} < \phi_{\max}$ であればPass。

※ TASとTARの試験のいずれかPassしていない場合,
レーダーデータから計算されたRAとDAPsデータの
正負が一致すればPass。

4.3 手順(3)

－ 試験内容(3) : BAR, IVV －

- 気圧高度変化率(BAR), 垂直慣性速度(IVV)

レーダーデータから計算された各角度とDAPsデータとの差が
125[feet/min]より大きい場合Fail。

＜－ 高度変化率の閾値は, 概算で

$$\frac{\text{高度分解能}}{\text{測定時間差}}$$

で求められる。

高度分解能が25feetでデータ更新周期が10秒の場合,

上式の値は150[ft/min]となるが,

判定基準としては, MIT推奨値である125[feet/min]を用いた。