

## 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

### 1. まえがき

SSR（二次監視レーダ； Secondary Surveillance Radar）モードSは、従来の監視機能の性能向上に加えて、データリンク機能を有する航空管制用レーダである。日本では2003年以降運用が段階的に開始され、整備が進められている[1]。

SSRモードSのデータリンク機能の活用は欧州を中心に進められている[2]。ダウンリンク機能を用いて地上で取得した機上の動態情報（DAPs; Downlink Aircraft Parameters）は、航空機の対気速度、対地速度、磁方位、ロール角等の状態情報、および選択高度等の意図情報から構成される。DAPsを航空管制に利用することにより、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航空交通の交通量増大への対応および安全性向上が期待されている。

DAPsを航空管制に利用するためには、その信頼性が重要になる。米国のマサチューセッツ工科大学（MIT）リンカーン研究所は、DAPsを利用する際に考慮すべき以下の課題を指摘している[3]。モードS対応の機上装置は、各種のセンサ類、トランスポンダ、インタフェース装置等、多数の機器から構成される。また、機体によって機器・構成が異なる。装置の複雑さにより、試験項目の組合せパターンが多岐にわたる。また、網羅することが困難である。あるいは地上試験では、実施可能な項目に限界がある。さらに、運用中の航空機で不具合が発生した場合に検出できない。

これらの課題に対応するため、運用中の航空機からダウンリンクしたデータをモニタすることによる DAPs 異常を検出するシステムの検討が進められている。欧州では、AMP(Airborne Monitoring Project)において評価が行われている[4]。米国では、MITがDAPsの有効性を検証するシステムの開発を実施している[3]。

日本での将来のDAPs導入に対応するため、電子航法研究所では、SSRモードS実験局を整備し、DAPsデータの収集を行っている。さらに、DAPsの有効性評価システムの開発を進めている。開発においては、上述のMITが開発したDAPs有効性評価手法の適用を検討している。今回、MITの44の試験項目のうち33項目を実装し、評価試験を行った。

本稿では、次項でSSRモードSによる動態情報ダウンリンクの概要を述べる。3項で実施した試験内容を説明し、4項にて試験結果を示す。最後に結果をまとめる。

### 2. SSRモードSによる動態情報ダウンリンクの概要

SSRモードSでは、地上のモードSセンサからの質問に応じて、機上のモードSトランスポンダが応答を返す。モードSトランスポンダには、固有のモードSアドレスが割り当てられており、地上のモードSセンサから特定の機体に対する個別質問が可能である。

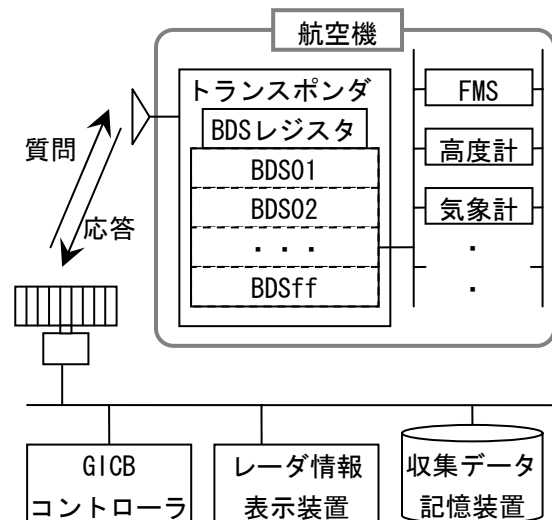


図1 モードSシステム構成

トランスポンダには、BDS (Comm-B Data Selector) レジスタと称される 255 個の記憶領域があり、モード S トランスポンダに接続された航法や気象に係るセンサの測定値や FMS からの指示値等が記録されている (図 1)。一般に、搭載されたトランスポンダの能力および機上装置の装備状況により、ダウンリンク可能なデータは異なる。

動態情報のダウンリンクには、GICB (地上喚起 Comm-B ; Ground Initiated Communication-B) プロトコルを使用し、地上からの特定の航空機に対する個別質問による要求に対応した BDS レジスタの 56 ビット長データが返信される [5][6]。

本稿での評価対象となる BDS レジスタの形式 (一部分) を表 1.1 (能力通報) および表 1.2 (主要動態情報) に示す。

表 1.1 の BDS10/17/18/19 は、主にデータリンク機能および各レジスタの動的/静的構成の利用可能情報を含んでいる。

表 1.2 の BDS40/50/60 は、主要な動態情報群である。各レジスタには動態情報データおよび各々のデータに対応する有効性フラグが含まれる。

表 1.1 BDS レジスタ (能力通報) 形式

BDS コード (hex)	ビット 番号	内容
10	データリンク能力通報	
	17:23	モード S サブネットバージョン
	25	モード S 固有サービス能力 (BDS40/50/60 を含む)
17	一般 BDS 動的能力通報	
	09	BDS40 動的利用可能フラグ
	16	BDS50 動的利用可能フラグ
	24	BDS60 動的利用可能フラグ
18	BDS01~38 静的能力通報	
	34	BDS17 静的構成有効フラグ
	41	BDS10 静的構成有効フラグ
19	BDS39~70 静的能力通報	
	17	BDS60 静的構成有効フラグ
	33	BDS50 静的構成有効フラグ
	49	BDS40 静的構成有効フラグ

### 3. DAPs有効性評価試験の内容

電子航法研究所では、モード S 実験局において

表 1.2. BDS レジスタ (主要動態情報) 形式

BDS コード (hex)	ビット 番号	内容	
40	航空機選択高度意図		
	01	有効フラグ	MCP/FCU
	02:13	データ	選択高度
	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
	49:51	データ	モード
	52:53	予約	
	54	有効フラグ	選択高度
55:56	データ	情報源	
50	航跡・転回情報		
	01	有効フラグ	ロール角
	02:11	データ	(RA)
	12	有効フラグ	トラック角
	13:23	データ	(TTA)
	24	有効フラグ	対地速度
	25:34	データ	(GS)
	35	有効フラグ	トラック角
	36:45	データ	変化率(TAR)
	46	有効フラグ	真対気速度
47:56	データ	(TAS)	
60	磁方位・速度情報		
	01	有効フラグ	磁方位
	02:12	データ	(HDG)
	13	有効フラグ	指示対気速度
	14:23	データ	(IAS)
	24	有効フラグ	MACH
	25:34	データ	
	35	有効フラグ	気圧高度
	36:45	データ	変化率(BAR)
	46	有効フラグ	垂直慣性速度
47:56	データ	(IVV)	

収集しているSSRモードSデータを用いDAPsの有効性を評価するシステムの開発を行っており、米国MITリンカーン研究所が開発した試験を実装している。本稿では、MITリンカーン研究所が開発した44項目の試験を2つのグループに分けた。装置の構成状況・稼動状態に係る29項目の試験を静的情報試験、動態情報の値および飛行状態を示す情報に対する15項目の試験を動的情報試験、とした。

現在、電子航法研究所において開発中の評価システムでは、23項目の静的情報試験および10項目の動的情報試験の実装が完了している。

### 3.1 静的情報試験の内容

静的情報試験は、能力通報レジスタ(BDS10/17/18/19) および主要動態情報レジスタ(BDS40/50/60)の各フラグおよびフィールドの値が、国際民間航空機関(ICAO)の規定に従っていることを検証する試験である。

能力通報レジスタ(BDS10/17/18/19)には、トランスポンダのモードSサブネットバージョン、モードS固有サービス能力、動態情報BDSの利用可能状態および構成状態、等の各種の状態を示す情報が含まれる(表1.1)。DAPs対応の場合は、BDS10のサブネットバージョンは、3または4である必要がある。モードS固有サービス能力は、BDS40/50/60を含む特定のサービスの有効性を示すため'1'である必要がある。BDS17は、一般的によく使用される各BDSの利用可能状態を示すフラグから構成され、BDS18/19は、各BDSが静的構成として有効であるかを示すフラグから成る。対応する有効な動態情報BDSのフラグは'1'とならなければならない。なお、これらの構成状態は、(機器の故障等で機上機器の構成が変わらない限り、)フライト中は変化しない。

主要動態情報レジスタ(BDS40/50/60)には、選択高度や速度等のデータと、それらの各データの有効性を示すフラグが含まれる(表1.2)。各レジスタでは、少なくとも1個の動態情報が有効である必要があり、有効でない動態情報データのフィールドは'0'値になること、および、予約フィールドは常に'0'値となることが規定されている。

静的情報試験では、上記の内容が満たされていることを確認する。

### 3.2 動的情報試験の内容

動的情報試験は、主要動態情報レジスタであるBDS50および60の動態情報の値を、レーダ測位値から計算された値と比較することにより、有効性を確認する試験である。有効性の判定には、レーダ測位値から算出される閾値を用いる。レーダ測位値から計算された動態情報値とDAPs値の差を判定閾値と比較し、判定閾値より大きい場合を不合格(エラー)とする。評価手順を図2に示す。

#### (1) レーダ測位動態情報の計算

レーダ測位値から動態情報を求めるために、最初に、異常なレーダデータを検出・除去する。検出手法としては、測位値の時間変化からターゲットの速さを求め、その水平方向の速さが50[kt]以

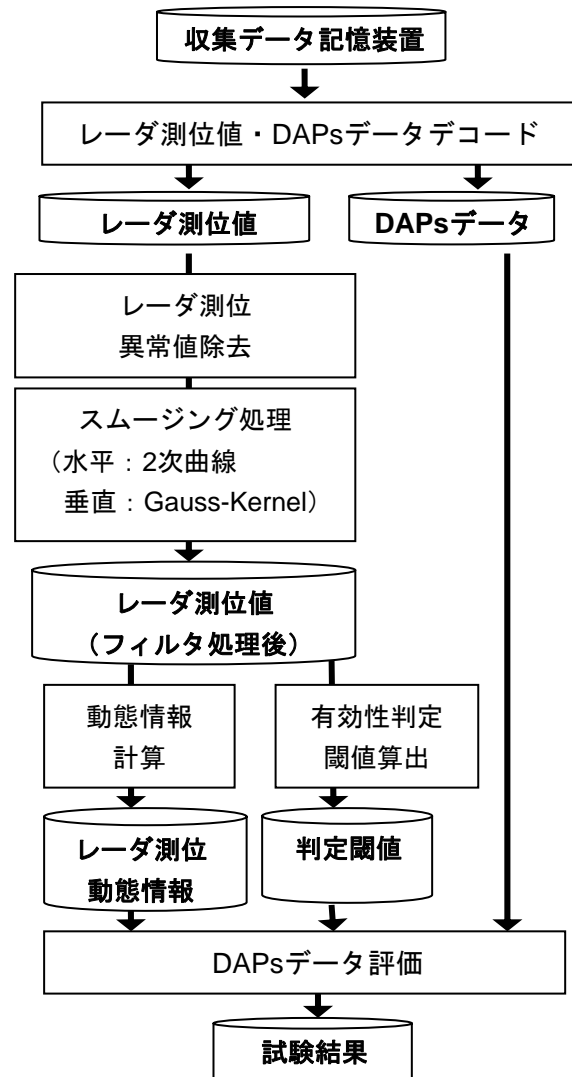


図2 動的情報試験フローチャート

下もしくは800[kt]以上、または垂直方向の速さが5,000[ft/min]以上であれば、異常データとして排除している。

異常データ排除後、水平位置は7点2次曲線フィッティング、高度はGauss-Kernelフィルタを用いて測位値を求め、差分計算により各動態情報を計算する。

## (2) 有効性判定閾値の算出

ダウンリンクした動態情報の評価に用いる判定閾値は、レーダ地上局からの距離(レンジ)  $R$ 、方位角  $\theta$  のターゲット位置におけるレーダ測位の誤差(図3)

$$\text{レンジ誤差: } \sigma_{\text{Range}}(R, \theta) = \sigma_R$$

$$\text{方位角誤差: } \sigma_{\text{azimuth}}(R, \theta) = R \sigma_{\theta}$$

をもとに算出される。ここで、 $\sigma_R$  および  $\sigma_{\theta}$  はレーダ地上局の装置性能である距離方向および方位角方向の精度の標準偏差である。

この測位誤差および差分計算に用いる時間差  $\Delta t$  を用いて、速さ(GS, TAS, IAS, MACH)の誤差  $\sigma_{\text{Speed}}$ 、方位角(TTA, HDG)の誤差  $\sigma_{\text{HDG}}$ 、トラック角変化率(TAR)の誤差  $\sigma_{\text{HR}}$  を算出する。[3]

閾値は、検定率に対応する係数  $\alpha$  を用い、

$$\text{Threshold} = \alpha \sigma$$

とする。

ロール角に対する閾値(最大値, 最小値)は、真対気速度(TAS)およびトラック角変化率(TAR)およびそれらの誤差から算出される。ただし、TAS または TAR が有効でない場合のロール角の評価は、レーダデータから計算された TAR とダウンリンクされたロール角の符号の一致を確認する試験を行う。

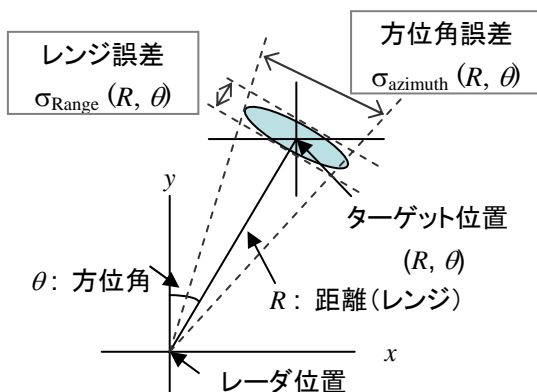


図3 レーダ測位精度

高度変化率(BAR, IVV)に対する閾値は、文献[3]に基づき、高度情報の分解能およびデータ更新周期をもとに、閾値を設定する。

## (3) 気象データ欠損時の判定手法

磁方位、真対気速度、指示対気速度、マッハ数の算出には、ターゲット位置での気象データ(風向風速および気温)を別途入手する必要がある。気象データが利用できない場合の評価手法は、以下の様に行う。

磁方位に関しては、試験は実施されない。

真対気速度、指示対気速度、マッハ数に関しては、DAPs データに当該3データが含まれている場合は、高度情報および大気標準モデル[8]、速度変換式[9]を用いて3速度間の整合性を評価する。DAPs データに当該3データが含まれていない場合は、これらの動態情報に対する試験は実施されない。

## 4. 有効性評価試験結果

調布の SSR モード S 地上局において収集されたデータを使用し、有効性評価試験を実施した結果を示す。以降の試験番号は、文献[3]に従う。

### 4.1 電子航法研究所実験局での収集データ

電子航法研究所では、調布本所に SSR モード S 地上局を整備し運用している。スキャン周期は10[sec]、覆域半径は最大250[NM]である。

SSR モード S 地上局は、航空機を初期捕捉すると、データリンク能力通報(BDS10)要求を行い、各 BDS レジスタの静的構成能力 BDS18, 19, および動的な能力通報 BDS17 を要求する。ダウンリンクした BDS17 の内容を解読し、主要な動態情報群である BDS40/50/60 の全てが有効である場合、以後スキャン毎に該当航空機に対する BDS40/50/60 要求質問を行う。

### 4.2 静的情報試験結果

静的情報試験では、調布の地上局において2011年6月1日から30日(うちデータ欠損約5日分)に収集されたデータを使用し、BDS40/50/60 の全てが有効であるトランスポンダのデータを対象とした。対象となった機体数は1,519機であった。

表 2.1 に BDS10/18/19 に対する動態情報ダウ

ンリンク機能に係る部分の試験結果を示す。

BDS10（データリンク能力通報）に関して、試験番号 14 は、モード S サブネットが DAPs 対応のバージョン（3 または 4）で製造されていることを確認するものであるが、8 割以上の機体で条件が満たされていなかった。バージョン情報が DAPs 運用に与える直接的な影響を考慮して、試験項目の必要性を検討する必要がある。

試験番号 15 はモード S 固有サービス能力フラグが設定されていることを確認する項目である。BDS40/50/60 情報が利用可能である場合は、このフラグが設定されている必要があるが、4 機体において試験期間中一貫してフラグが有効設定されていなかった。

BDS18 および 19（BDS 静的構成有効通報）に関しては、試験番号 2（BDS10 有効）および 3（BDS17 有効）でレジスタ静的構成有効フラグが設定されている必要があるが、同一機体で同時に不合格となる結果が 1 回発生した。試験番号 6

（BDS40 有効）、7（BDS50 有効）、8（BDS60 有効）で確認する有効フラグは、3 機体において同時に不合格となる結果が確認された。これら試験番号 2,3,6,7,8 で不合格判定となった機体に関しては、試験期間中の別のフライト時は合格判定となっているため、偶発的にエラーが発生したものと考えられる。

主要動態情報レジスタである BDS40/50/60 に対する有効フラグおよびデータフィールドの整合性評価を行った結果を表 2.2 に示す。

試験番号 28,31,39 は、BDS 毎に、動態情報データ有効フラグのうち少なくとも 1 フラグが有効設定されていることを確認する試験である。全てのデータフラグが無効になっていたのは各 8 回で、機体数も 8 機であったため、偶発的に生じたものと考えられる。

試験番号 29,30,32,39 は、フラグが無効である場合のデータフィールド、もしくは予約フィール

表 2.1 静的情報（能力通報レジスタ；BDS10/18/19）試験結果

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
10	14	モード S サブネットバージョン= 3,4	21,427	18,561	1,519	1,272
	15	固有サービス能力 (BDS40/50/60 含む)		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

表 2.2 静的情報（主要動態情報レジスタ；BDS40/50/60）試験結果

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	1 個以上有効データ有	2,877,354	8	1,519	8
	29	有効でないデータフィールド='0'		416		1
	30	予約フィールド='0'		416		1
50	31	1 個以上有効データ有	2,877,947	8	1,519	8
	32	有効でないデータフィールド='0'		0		0
60	38	1 個以上有効データ有	2,878,261	8	1,519	8
	39	有効でないデータフィールド='0'		0		0

ドが0'値になっていることの確認試験であるが、1機体で不合格となっていた。この解析期間中に当該機体の飛行は2回のみであり、1回目のフライトの捕捉期間では、251回のダウンリンクデータで228回の不合格、2回目のフライトでは188回のダウンリンクデータ全てで不合格であったことを確認した。機器の不具合が原因と推測される。

### 4.3 動的情報試験結果

動的情報試験には、調布のSSRモードS地上局において2011年6月1日に収集されたデータを用いた。DAPsデータを含み、捕捉期間が60秒以上の航跡を含む航空機のみを解析対象とした。

閾値の算出に使用するレーダの距離方向および方位角方向の精度の標準偏差は、地上局の装置性能である

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

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

を用いた。検定率係数は、正規分布の95%値である

$$\alpha = 1.96$$

として、閾値を求めた。

気象データは使用していないため、磁方位の試験は実施していない。また、真対気速度、指示対気速度、マッハ数に関しては、3速度間の整合性試験の結果が示されている。

解析データ例として、図4,5,6に、航空機の航跡、および対地速度、トラック角のデータを示す。

ターゲットは、羽田空港を離陸後、レーダ地上局を旋回するように飛行し、西方に離れて行っている(図4)。

図5および図6では、上段にフィルタ処理後のレーダ測位値から差分計算により求められた各動態情報(○印)およびDAPsデータ(◆印)、中段にレーダ値とDAPs値の差(+印)および判定閾値(-印)、下段にレーダ値とDAPs値の差の絶対値と閾値の比(□印)を、横軸をシステム時刻として示してある。

図5において、システム時刻が31,700~32,000[sec]にかけて、閾値が小さくなる事象が発生し、不合格判定が生じている。この期間、ター

ゲットがレーダ地上局からみてレンジ方向に飛行していた(方位角方向の速度が小さい)ため、判定閾値が小さくなったと考えられる。

図6のトラック角データに関しては、概して、判定閾値がレーダ地上局の近傍で小さく、離れるに従い大きくなっていることが分かる。30,700[sec]付近のターゲットがレーダ地上局をほぼ同一距離で旋回している部分では閾値が小さくなり、評価判定が不合格となっている。ターゲットが西方に離れていくに従い判定閾値が大きくなるため、評価判定は合格となっている。

動的情報試験のデータは、機体数は437機、レーダデータ総数は188,504であった。レーダデータの異常値を除去後、試験対象となるDAPsデータが含まれるターゲットデータに対して試験を実施した結果の、各動態情報毎の試験実施数、試験不合格数、不合格率を表3および図7に示す。

対地速度およびトラック角変化率の試験結果は、不合格率が5%以下となっており、判定閾値設定時の5%を満たす結果であった。

トラック角の不合格率は22.36%であった。前述のように、レーダ地上局近傍で閾値が小さくなることが原因と考えられる。

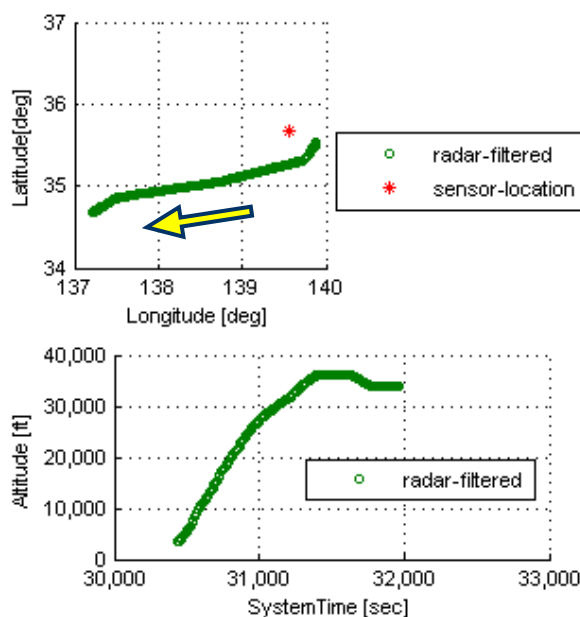


図4 ターゲット航跡(例)

上図はターゲットの緯度経度およびレーダ地上局の位置(\*印)、下図はターゲットの高度の時間変化

真対気速度，指示対気速度，マッハ数に関しては，気象データを使用していないため，3速度間の整合性試験の結果であり，不合格率が 58.91%と非常に悪い結果となった。データ分析の結果，DAPs 指示対気速度から変換式を用いて得られるマッハ数と，DAPs マッハ数の誤差が大きくなっていったことが原因となっていることが考えられる。

ロール角に関しては，不合格率が 16.70%と 5%を上回る試験結果となった。ロール角に関する試験では，3.2 項で述べたように，真対気速度またはトラック角変化率が有効でない場合は，レーダデータから計算されたトラック角変化率とダウンリンクされたロール角の符号の一致を確認することで，ロール角の有効判定を行った。両方の

値が非常に小さく符号判定に適さない場合は合格としている。今回の試験では，トラック角変化率とロール角が，それぞれ 0.1[deg/sec]および 1.0[deg]以下の場合に合格としたが，この判定値の大きさにより，試験結果の不合格率が大きく異なることが分析結果として分かっている。

気圧高度変化率，垂直慣性速度に対しては，高度情報の分解能 25[ft]およびデータ更新周期 10[sec]をもとに，判定閾値を 125[ft/min]として試験を実施した。不合格率は 37.21%および 37.26%であった。レーダ計算値と DAPs 値の誤差分布では，標準偏差が約 200[ft/min]となっていたため，判定閾値の設定に関する検討が必要と考えられる。

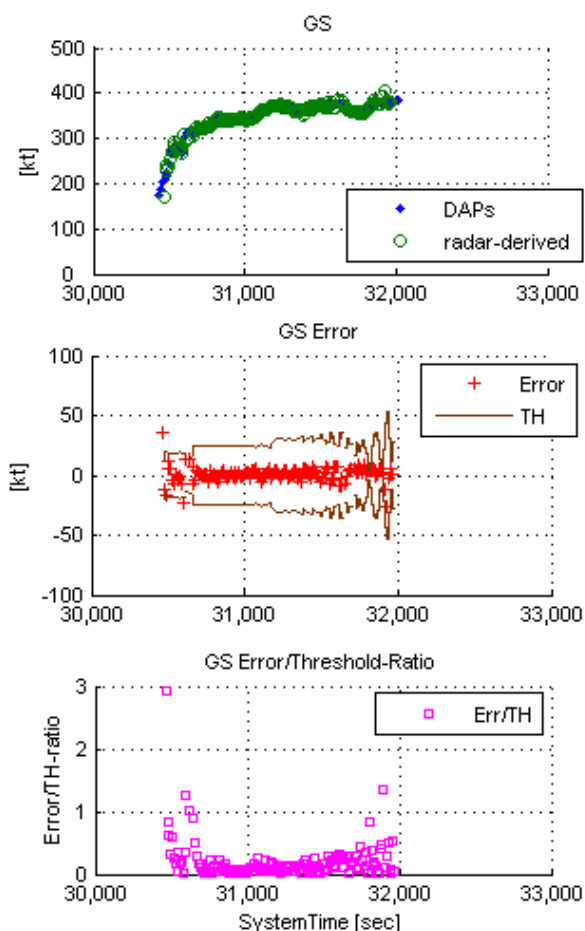


図5 対地速度データ (例)

上段：レーダ算出値 (○印) および DAPs 値 (◆印)  
 中段：レーダ算出値と DAPs 値の差 (+印)  
 および判定閾値 (—印)  
 下段：差と閾値の比 (□印)

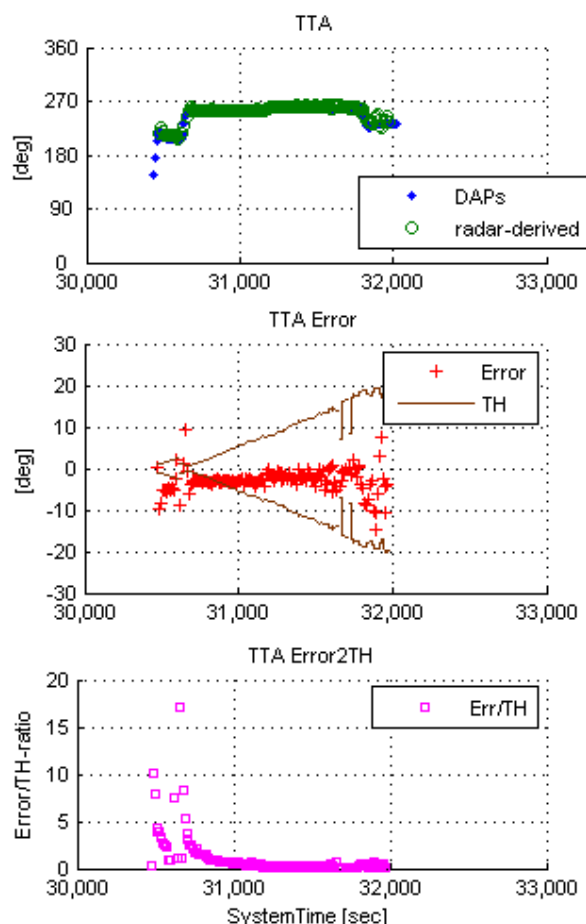


図6 トラック角データ (例)

上段：レーダ算出値 (○印) および DAPs 値 (◆印)  
 中段：レーダ算出値と DAPs 値の差 (+印)  
 および判定閾値 (—印)  
 下段：差と閾値の比 (□印)



## 5. まとめ

DAPsの有効性評価システムの開発にあたり、米国MITリンカーン研究所が開発した44の試験項目のうち33項目を評価システムに実装し、電子航法研究所のSSRモードS実験局で収集しているDAPsデータに対して有効性評価を行った。

装置の構成状況・稼動状態に関する静的情報試験は、概ね有効に機能した。試験結果で、8割以上の機体でBDS10のモードSサブネットバージョンが不適切な値となっていることが判明した。その他の静的情報試験に置いては、偶発的なエラー、および機器の不具合と思われるエラーが検出された。

表3 動的情報 (BDS50/60) 試験結果

試験対象 動態情報	試験 実施数	不合格 数	不合格 率[%]
GS	130,038	2,196	1.69
TAS	130,175	76,689	58.91
IAS	130,175	76,689	58.91
MACH	130,175	76,689	58.91
TTA	129,858	29,042	22.36
TAR	105,140	3,674	3.49
RA	128,556	21,463	16.70
BAR	130,571	48,587	37.21
IVV	127,799	47,623	37.26

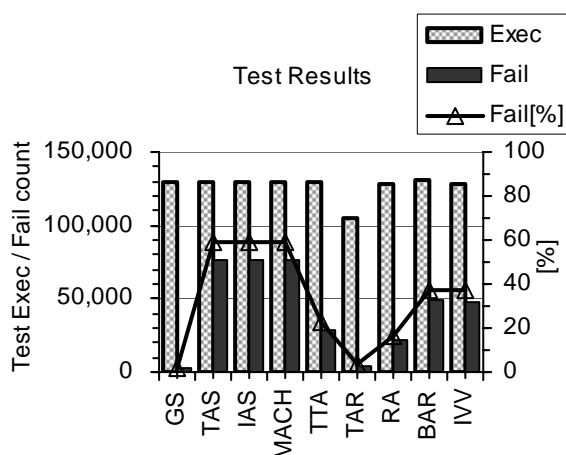


図7 動的情報 (BDS50/60) 試験結果

動態情報の値に対する動的情報試験の結果に関しては、対地速度およびトラック角変化率以外の試験結果は、不合格率が想定値より高く、適切に機能しなかった。今回は、文献[3]のMITの手法で算出した判定閾値を用いたが、閾値が過小または過大な値になっていることが考えられる。ターゲットのレーダからの位置や運動方向およびデータ更新周期を考慮し、閾値の算出方法を改善する必要がある。

### [参考文献]

- [1] [http://www.mlit.go.jp/koku/15\\_bf\\_000405.html](http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000405.html)
- [2] Eurocontrol “Mode S Harmonisation of the Transition Arrangements for State Aircraft, Process and Procedures for the Managing of the Mode S Compliance Status and the Exemptions Granted to State Aircraft”, Edition 1.1, August 22, 2005.
- [3] R.D. Grappel, G.S. Harris, M.J. Kozar, and R.T. Wiken, “Elementary Surveillance (ELS) and Enhanced Surveillance (EHS) Validation via Mode S Secondary Radar Surveillance”, FAA ATC Report 337, Lincoln Laboratory, 23 April 2008.
- [4] [http://www.eurocontrol.int/msa/public/standard\\_page/modes\\_amp.html](http://www.eurocontrol.int/msa/public/standard_page/modes_amp.html)
- [5] ICAO, “Aeronautical Telecommunications - Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems”, Annex 10, Vol. IV, Second edition, 1998.
- [6] ICAO, “Manual of the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems”, Doc 9684, Third edition, 2004.
- [7] ICAO, “Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter”, Doc 9871, First Edition, 2007
- [8] ICAO, “Manual of the ICAO Standard Atmosphere”, Doc 7488, Third edition, 1993
- [9] “Digital Avionics Handbook”, 2nd Edition, C.R. Spitzer editor, CRC Press, 2007, Chapter 20, Flight Management System, R. Walter.
- [10] 古賀, 瀬之口, 上島, 宮崎, “二次監視レーダ (SSR) モードSによる航空機の動態情報の取得技術について”, 第47回飛行機シンポジウム, 2B9, 2009