8. DAPs 利用のための有効性評価と課題

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. はじめに

DAPs (Downlink Aircraft Parameters)は，SSR（二次監視レーダ；Secondary Surveillance Radar）モードSのデータリンクを用いて，航空機の動態情報をダウンリンクする機能である。動態情報には，航空機の磁方位，指示対気速度，対地速度，ロール角等の状態情報，および選択高度等の意図情報が含まれる。DAPsを航空交通管制（ATC; Air Traffic Control）に利用することにより，航空機の動態情報を地上で自動的に取得できるため，管制官の状況認識の向上，音声通信量の低減，トラジェクトリ予測精度の改善が可能となり，ATCサービスの効率性の向上，管制容量増大，安全性向上に寄与する[1][2]。

DAPsのATCへの利用は,欧州を中心に進められている[3]。欧州では，主要な空域内を航行する航空機に対して, SSRモードS対応装置の搭載が義務化されている。日本では平成15年以降，SSRモードSの運用が開始されている[4]。平成24年時点では, DAPsの航空管制への導入検討が進められている。

DAPsを航空管制に利用するためには, その信頼性の確保が必要である。しかしながら，航空機からダウンリンクした実際のDAPsデータにおいて，異常データが存在することが報告されている[5]。また，国際民間航空機関（ICAO; International Civil Aviation Organization）の作業部会において, DAPs導入時の異常データの対処の必要性が指摘されている[6]。

これらの問題に対応するため，飛行中の航空機からダウンリンクしたデータをモニタし，異常データを検出するシステムの開発が進められている。欧州では，Eurocontrol のAMP (Airborne Monitoring Project)において評価が行われている[7]。米国では，マサチューセッツ工科大学（MIT; Massachusetts Institute of Technology）リンカーン研究所がDAPsの有効性を検証するシステムの開発を実施している[8]。

日本での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，導入時のDAPsの信頼性向上のために，DAPsの有効性評価システムの開発を進めている。

評価システムの開発にあたり，上述のMITが開発したDAPs有効性評価（MDV; MIT DAPs Validation）手法の利用を検討している。この手法は，従来の地上試験方式の問題を解消し，多数の航空機からダウンリンクされるDAPsデータの有効性を短時間に評価可能とするものである。有効性判定を即時に行うことも可能となる。

当所で開発中のDAPs有効性評価システムに，MIT手法に基づく異常判定試験を実装し，その改良を試みた。試験項目として，MDVシステムで使用されている44項目の試験のうちの36項目に加え，新たに開発した24項目を追加した。

実装した試験を用い, 当所のSSRモードS実験局で収集された航空機のダウンリンクデータに対して評価を行った。

各試験項目の結果を用いて最終的なDAPsデータの有効性判定を行う際に，考慮すべき事項ついて検討を行った。

本稿では，2節で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節でDAPs利用の利点を説明し，4節でDAPsの課題と対処手法について解説する。5節にて開発したDAPs評価システムの内容を説明し，6節において実施した試験結果を示す。7節では試験結果をDAPs有効性判定に適用する際の検討事項を記述する。最後にまとめを述べる。

2. SSRモードSによる動態情報ダウンリンクの概要

2.1 ダウンリンク機能

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。応答信号に航空機の動態情報を含めて返信することにより，地上でのデータ取得が可能となる。（図 1）

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。動態情報のダウンリンクには，GICB（地上喚起 Comm-B ； Ground Initiated Communication-B）プロトコルが使用される。

トランスポンダには，BDS（Comm-B Data Selector）レジスタと称される 255 個の記憶領域がある。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 の各データは，規定された BDS レジスタの領域に記録される。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り，これらの能力情報もレジスタに格納される。

モード S センサは，指定した BDS レジスタのダウンリンクを要求する個別質問を行う。トランスポンダは，要求された BDS レジスタのデータを応答信号に含めて返信する[5][6]。

なお，モード S センサの同一スキャン中に，1 ターゲット航空機から複数の BDS レジスタのデータをダウンリンクすることが可能である。

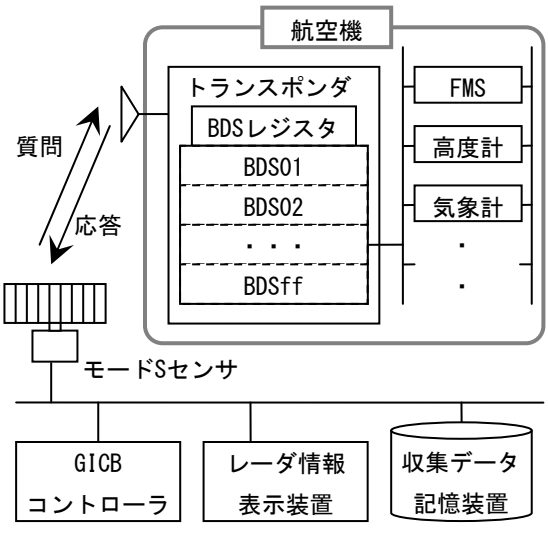

図 1. モード S システム構成

2.2 BDSレジスタ

255 個の各 BDS レジスタには，BDS コード番号（16 進数（hex）標記で 0x01 から 0xff；以下，BDS コード xx を用いて各レジスタを BDSxx と記す）が割り当てられている。各レジスタには 56 ビットのデータが格納される。

BDS レジスタのフォーマットは，ICAO の規定に記述されている[9]。2012 年時点で 51 個のレジスタのフォーマットが規定されている。

本稿での評価対象となる 12 個の BDS レジスタを表 1 に示す。

BDS10/17/18/19 は，データリンク機能に関する機上装置の構成状態やサービス能力を示す情報を含む。BDS20 には便名が含まれる。

BDS40/50/60 は，主要な航空機動態情報を含むレジスタである。BDS40 は，設定された選択高度に関する情報を含む。BDS50 は，ロール角，真トラック角，対地速度，トラック角変化率，および真対気速度を含む。BDS60 は，磁方位，指示対気速度，マッハ数，気圧高度変化率，および慣性垂直速度を含む。

欧州では，基本監視（ELS; Elementary Surveillance）および拡張監視（EHS; Enhanced Surveillance）と呼ばれるデータリンク機能への

表 1. BDS レジスタ

BDS コード (hex)	内容	EHS 対応
05	拡張スキッタ・位置（飛行中）	
10	データリンク能力通報	必須
17	GICB 能力通報	必須
18	GICB 稼働状態通報	必須
19	GICB 稼働状態通報	必須
20	便名	必須
30	ACAS RA (Resolution Advisory)	
40	選択高度意図	必須
44	気象情報（定期情報）	
50	トラック・転回通報	必須
60	針路・速度通報	必須
65	拡張スキッタ状態情報	

対応が段階的に義務化されており，2009 年には主要な空域での義務化が完了している。ELS では，BDS10/17/18/19 の能力通報，および BDS20 の便名が必要である。EHS には，ELS に必要なレジスタに加え BDS40/50/60 の動態情報が必要とされる。

BDS30（ACAS RA）は，航空機衝突防止システム（ACAS; Airborne Collision Avoidance System）に必要なレジスタである。

BDS05（拡張スキッタ・位置（飛行中）），BDS44（気象情報（定期情報）），および BDS65（拡張スキッタ状態情報）は，EHS では必要ではないが，自動従属監視（ADS-B; Automatic Dependent Surveillance），および将来の導入を検討されている機能に必要なレジスタである。

3. DAPsのATCへの利用

DAPsにより，機上の動態情報が地上で取得可能となる。

現状では，航空機の磁方位や指示対気速度／マッハ数などを地上側で把握するには，管制官とパイロット間の無線通信を用いている。DAPsを用いることにより，これらの情報取得が自動化され，作業負荷が低減される。

また，選択高度情報を地上で得ることにより，管制官が指示した高度に航空機が従っていることの確認作業の効率化，および衝突危険性の状況認識が容易になる。また，コンフリクト予測検出手法に用いることにより，安全性の向上にも寄与することになる[10]。

さらに，動態情報をトラジェクトリ予測に用いることにより予測精度が改善し，効率性の向上および空域容量の拡大が可能となる。

上記のように，取得した動態情報をATCに利用することは，効率性や処理容量の向上，および安全性の向上に寄与する[1][2]。

4. DAPsの問題点と対処手法

4.1 DAPsの問題点

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。しかしながら，欧州でのDAPs運用開始後，不正確または誤った情報データを送信する航空機が存在することが報告されている[5]。

現在，DAPs機能は認証されていない。このため，DAPsデータが正確であることが十分に保証されておらず，不正確なデータが発生することが課題として指摘されている。この課題に対処するために，欠陥のある機器を特定すべきことが提言されている[6]。

4.2 MITリンカーン研究所のDAPs評価手法

DAPsデータの信頼性を確保する手法として，従来の地上での機上装置の単体試験およびシステム全体の試験を適用する方式は，以下の要因による困難さが伴う。即ち，機上装置の複雑性，機上装置の多様性，試験項目の網羅性，飛行状態の実現性，即時性への対応が問題となる。

これらの問題に対処するために，米国のMITリンカーン研究所は，航空機からダウンリンクしたDAPsデータを分析し，異常データを検出する評価システム（MDV; MIT DAPs Validation）を開発している[8]。

MDVでは44項目の試験を実装している。本稿では，試験項目を静的情報試験と動的情報試験に分類した。

静的情報試験は，機器の故障等で機上装置の状態が変わらない限り，飛行中は変化しない値に対して実施する。静的情報試験は29項目あり，機上装置の構成状態，通報能力等の情報がICAOの規定[12]に従った値であることを確認する試験である。

動的情報試験は，飛行中に変化する値に対して実施される。動的試験項目は15項目あり，航空機の速度やロール角などの値（機上での計測値）が，レーダ測位値から算出される値と一致していることを確認する試験である。

この試験による評価手法を用いることにより，多数の航空機からダウンリンクされるDAPsデータの有効性を短時間に評価することが可能となる。さらにリアルタイム処理化して実装することにより，実運用中の航空機のDAPsデータの有効性を，即時に判定可能である等，前項で述べた従来手法の問題点に対処できる。

5. DAPs有効性評価システムの開発

当所で開発中のDAPs有効性評価システムの

開発にあたり，MDV手法に基づく異常判定試験を実装した。実装した試験内容には，MDVの試験36項目（静的情報試験27項目，動的情報試験9項目）に加え，新たに24項目を追加した。

追加試験項目は，MDV静的情報試験手法に基づく新たな静的情報試験22項目，および通信・データ処理エラーによる異常値を検出する試験2項目である。

本稿では，静的情報試験および通信・データ処理エラー検出試験の内容及び試験結果について記述する。

5.1 静的情報試験の内容

静的情報試験では，ダウンリンクしたBDSレジスタの情報（パラメータ）が，ICAO規定の値に整合していることを検証する。文献[9]には，各BDSレジスタのフォーマットおよびレジスタに格納されている個々の情報の内容が規定されている。

ダウンリンクしたBDSレジスタの内容が規定に従っている場合，試験結果は正常（合格）となり，規定に反している場合，試験結果は異常（不合格，エラー）となる。

5.1.1 静的情報試験の分類

静的情報試験の内容を，5種類のタイプに分類した。以下に，各タイプの内容と試験例を示す。

本稿では，MIT リンカーン研究所が開発した評価システムの試験項目の番号を TMxx，当所で開発した試験項目番号を TExx（xx は数字）と記す。

(i) 固定値の確認

特定の BDS レジスタのビット領域には，固定値が入力される。この場合，固定値が指定の値であることを確認する。

（例） 試験番号<TM13>

BDS10 の[1:8]ビット領域には，固定値である BDS コード'0x10'が入力されることが規定されている。このため，BDS10 の当該領域の値が'0x10'であることを確認する。

(ii) 規定された範囲内の値の確認

特定のビット領域は，その値がとり得る範囲が規定されている。この場合，値が規定の範囲内の値であることを確認する。

（例） 試験番号<TM24>

BDS20 に含まれる 8 文字の便名文字は，規定された文字コード値となる。（アルファベット（1 から 26），スペース（32），数字（48 から 57）のいずれか）。各文字が，規定された範囲内の値であること確認する。

(iii) 状態フラグの確認

パラメータには，特定の機能やデータの有効状態等を示すフラグが含まれる。対応する機能や情報が有効な場合，当該フラグが適切に設定されていることを確認する。

（例） 試験番号<TM15>

EHS 対応機は，モード S 固有サービスは有効である。このため，BDS10 のモード S 固有サービス能力フラグが'1'（能力有り）であることを確認する。

(iv) 有効データの存在確認

BDS17 は，各 BDS レジスタに有効な情報が書き込まれていることを示すフラグビットから成る。BDS17 中の有効フラグが'1'に設定されている BDS に有効なデータが実際に存在することを確認する。

（例） 試験番号<TM28>

BDS40 には，5 個のデータが含まれており，各データに対して有効フラグがある。BDS40 は，BDS17 中の BDS40 有効フラグが'1'（ 有効なデータが存在している）の場合にダウンリンクされる。このため，ダウンリンクされた BDS40 中の少なくとも 1 つのデータ有効フラグが'1'（有効）であることを確認する。

(v) 無効データ領域・予約領域の値の確認

BDS のデータ領域には，対応する有効フラグによって有効／無効状態が示されるデータ領域，または予約領域が存在する。無効データ領域（対応する有効フラグが'0'値になっているデータ領域）および予約領域が'0'値になっていることを確認する。

（例） 試験番号<TM30>

BDS40 中のデータ有効フラグが'0'（無効）となっているデータ領域は，'0'であることを確認する。

5.1.2　静的情報試験項目

当所で開発中のDAPs有効性評価システムに実装した静的情報試験は，下記の試験項目からなる。

(1) MDV 静的情報試験

MDV では，EHS に必要な BDS レジスタ（BDS10/17/18/19/20/40/50/60）および ACAS RA (BDS30) に対する静的情報試験を実施する。このうち27項目を実装した。

(2) 追加BDSレジスタ静的情報試験

MDV の静的情報試験手法に基づき，BDS10 に対する追加試験 1 項目，および将来の ATC での利用が検討されている BDS レジスタ（BDS05/44/65）に対する試験 4 項目を実装した。

(3) レジスタ間の相関事項に対する試験

異なる BDS 間の情報に相関がある場合がある。例として，BDS40 に関する有効状態フラグ（BDS17 中）と実装状態フラグ（BDS19 中）の値は一致するべきである。別の例としては，BDS40 が有効であるためには，BDS10 中のモード S 固有サービス能力フラグが「能力あり(='1')」である必要がある。

これらの試験項目として，17 項目を実装した。

相関のある BDS レジスタは，必ずしも同一のタイミングでダウンリンクされない。従って，航空機がレーダ覆域内で継続して捕捉されている期間（一航跡の期間），当該航空機からダウンリンクされた最新の BDS レジスタの値を保持するアルゴリズムを実装し，相関事項に対する試験を実施している。

5.2　通信・データ処理エラー検出試験

DAPs評価の初期解析結果において，通信・データ処理エラーによる下記の2種類の異常値の存在が確認された。

(1) ゼロ BDS

BDS レジスタの全 56 ビットが'0'値となる

(2)BDS スワップ

同一スキャンで同一機体から複数の BDS レジスタをダウンリンクした際に，全 56 ビットが異なる BDS レジスタで同じ値となる

BDSスワップの例を表2に示す。

これらの2種類の異常を検出するために，試験2項目を実装した。

6.　DAPs評価試験結果

6.1 DAPsデータ収集

電子航法研究所では，GICB 機能を持つ SSR モード S 地上局を整備し，運用している。

設置場所は調布本所であり，周期は 10 秒，覆域半径は最大 250NM である。覆域には，東京国

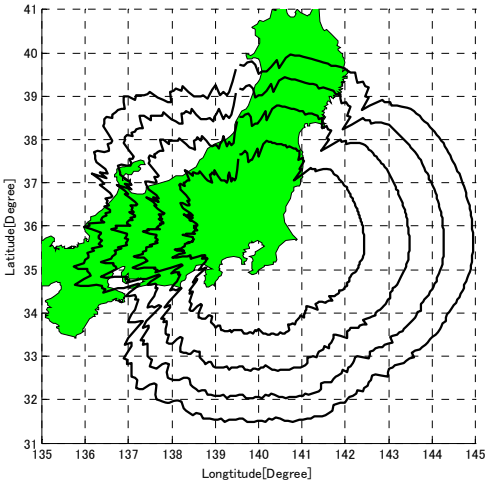

図 2　調布実験局の監視覆域

（内側から高度 1 万,2 万,3 万,4 万フィートの覆域）

表 2. BDS スワップ発生例

スキャン時刻	08:05:35	08:05:45	08:05:55
BDS05	605f80c056966f	a3280030a40000	605f845303ce8d
BDS40	a3280030a40000	a3280030a40000	a3280030a40000
BDS50	fff8cf1f800489	a3280030a40000	ffb8cf1f80048a
BDS60	cc299f1b7ffc00	cc399f1b600401	cc399f1ba00400

際空港（羽田空港）および新東京国際空港（成田空港）のターミナルエリアが含まれており，国内で最もトラフィックの多い空域をカバーしている（**図 2**）。

試験には，2011年6月から2012年10月（1年5ヶ月間）に収集されたデータを使用した。

6.2 試験結果

6.2.1 通信・データ処理エラー検出試験結果

通信・データ処理エラー検出試験の結果を表 3 に示す。全 56 ビット'0'値 BDS の存在は，0.01%弱の割合で発生していた。BDS スワップの発生頻度は，百万分の一程度（全期間中のデータで 27 回）であった。

表 3. 通信・データ処理エラー検出試験結果

試験番号	試験内容	試験回数	
		総回数	異常回数
TE62	ゼロ BDS	39,091,727	3,022
TE63	BDS スワップ	39,091,727	27

6.2.2 静的情報試験結果

通信・データ処理エラーが検出されたターゲットデータを除き，静的情報試験を実施した結果（代表例）を表4に示す。

試験結果には，

- 試験を実施した総回数・異常判定回数
- 試験を実施した機数・異常判定が 1 回以上発生した機数

を示す。

不合格となった結果に関して，特徴的な事項を以下に記述する。

(1) モードSサブネットバージョンの異常値

試験番号<TM14>は，BDS10中のモードSサブネットバージョンが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試験項目であるが，8割以上の機体で条件が満たされていなかった。

モードSサブネットバージョン情報が適切に設定されていない航空機が存在する問題は，既にICAOの作業部会でも報告されており[7]，今回の試験結果とも合致する。

(2) BDS20/BDS30の状態フラグの異常値

BDS20（便名情報）（<TM16>, <TE12>, <TE19>）およびBDS30（ACAS RA）（<TE23>, <TE24>）の状態フラグに関する異常値が，１％以上の機体で確認された。

機体で一貫して不合格となる場合は，当該機体におけるフラグの設定が不適切であると考えら

表 4 静的情報試験結果（抜粋）

試験番号	対象BDS	試験内容	試験回数		機数	
			総回数	異常回数	総機数	異常発生機数
TM14	10	モード S サブネットバージョン='3','4'	355,834	299,651	3,192	2,568
TM16	10	便名情報能力フラグ='1'	355,834	4,401	3,192	102
TE12	17,18	BDS20 データ有効フラグ = 実装済みフラグ	384,281	1,274	3,187	73
TE19	18	BDS20 実装済みフラグ='1'	372,161	44	3,161	15
TE23	18	BDS30 実装済みフラグ='1'	620	34	106	4
TE24	10	ACAS 稼動状態フラグ='1'	626	33	106	1
TM24	20	文字コード=便名文字規約コード	405,619	1,091	3,173	104
TM25	20	スペース埋め	405,619	12	3,173	3
TM29	40	予約領域＝'0'	37,657,551	416	3,192	1
TM30	40	無効データ領域＝'0'	37,657,551	416	3,192	1

れる。機体で正常値と異常値が検出される場合は，フラグ情報を含むBDSレジスタ（BDS10/18）と，BDS20/BDS30が異なるスキャンでダウンリンクされている場合があるため，フラグ設定のタイミングが不適切であることが原因である可能性がある。

(3) 文字コードの異常値

BDS20（便名情報）の文字情報に関して（<TM24>, <TM25>），規定されていない文字コードの使用や，規定に従ったスペース埋めがなされていないことによるエラーが検出された。

これらは，機上装置の不具合ではなく，便名情報の入力時に，不適切な文字コードを入力していることが原因である。

(4) 機上装置の故障による異常値

BDS40に関する試験（<TM29>および<TM30>）において， 1機体（2航跡）で異常結果が検出された。

当該航空機は，試験期間中に2航跡のみが記録されており，１回目の航跡の一部，および２回目の航跡の全部のBDS40のデータに，異常（'0’値であるべきビットが’1’になっている異常）が発生していた。１回目の航跡中に一部正常なデータが記録されていたため，機上装置の故障による異常値であると考えられる。

7. DAPsデータの有効性判定方法の検討

試験結果から，通信・データ処理エラー検出試験および静的情報試験により異常が確認された。本手法でDAPsデータの異常値検出が可能であることが検証された。

最終的にDAPsデータをATCサービスに利用するために，有効性判定に試験結果を適用する場合には，以下の事項の検討が必要となる。

7.1 判定対象となるデータ範囲・期間

(1) 判定対象データの範囲

静的情報試験では，BDSレジスタ中のビットまたはフィールド情報の値の整合性を確認している。有効性判定の対象としては，当該情報のみ，当該BDSレジスタ，当該情報が関連するデータ（他のBDSレジスタ），当該機体からの全DAPsデータ，等が考えられる。

(2) 判定対象データの期間

評価試験を実施したスキャン時のデータのみ，異常検出された以降のフライト中，機体の機上装置の信頼性が確認されるまで，等が考えられる。同一機体からのDAPsデータに対する試験の結果が変わった場合の判定方法も検討が必要である。

7.2 異常発生の原因

異常発生原因としては，

- 機上装置の故障
- 機上装置の不適切な設定
- データ通信時・処理時のエラー
- 機上センサの計測エラー

がある[11]。

異常発生の原因により，上記の判定の対象データ範囲・期間は異なる。例えば，偶発的な通信エラーの場合は，当該データのみを対象とすることが可能であるが，不適切な設定または故障が原因の場合は，不具合が解消されるまでは有効性は確保されない。

単一の評価試験結果のみでは，原因を特定することは困難である場合が多いため，原因を推定できる方式の検討，または統計的な解析を行う必要がある。

8. まとめ

DAPsを適切に運用することにより，将来の航空管制や航空機運航の効率性および安全性の向上が期待される。DAPs導入時に必要なデータの信頼性を確保するため，電子航法研究所において有効性評価システムの開発を進めている。開発にあたり，米国MITリンカーン研究所が開発した手法を適用した。

当該手法は，飛行中の航空機からダウンリンクされた動態情報の有効性を評価する。この手法を用いることにより，多数の航空機からダウンリンクされるDAPsデータの有効性を短時間に評価することが可能となる。

有効性評価システムには，MITが開発した静的情報試験に加え，将来利用されるDAPsデータに対する試験項目を追加した。さらに，通信・データ処理エラーを検出する試験項目を実装した。

開発したシステムの評価のため，電子航法研究所SSRモードS実験局で収集されたDAPsデータに対して，試験を実施した。

試験結果の分析から，BDSレジスタデータの全56ビットが‘0’になっている事例，および複数のレジスタ値が同一スキャン中の他のレジスタの値としてなっているBDSスワップの事例が確認された。

上記に加え，

- 機上装置の故障による異常
- 通信時・データ処理時のエラーによる異常
- 機上装置の不適切な設定による異常
- 不適切な入力データによる異常

を原因とする異常データが検出された。

今回開発したDAPs評価試験を用いることにより，異常データ検出が可能であることが確認された。

DAPsデータをATCサービスへの利用するためには，本試験を利用した有効性判定方法の検討を進める必要がある。

［参考文献］

[1] EUROCONTROL, 1996, "Concept of Operations Mode S in Europe (Mode S CONOPS)", edition 2.0.

[2] EUROCONTROL, 2001, "The Revised Case for Enhanced Surveillance in Europe".

[3] 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.

[4] http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000405.html

[5] E. Potier, "Mode S fleet monitoring status in Europe", ASP TSG WP08-20, ICAO ASP Technical Sub Group, Montreal, Canada, 23-27 April 2012.

[6] C. Giligen, "Operational use of parameters and data made available by Mode S Transponders", WP ASP12-20, ICAO ASP 12th WG Meeting, Montreal, Canada, 23-27 April 2012.

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

[8] 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.

[9] ICAO, "Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter", Doc 9871, First Edition, 2007

[10] 瀬之口，福田，“航空機の動態情報を利用するコンフリクト検出手法の研究”，電子航法研究所報告 No.122, 2009年10月.

[11] O. Baud, et al., "Use of Downlinked Aircraft Parameters in Enhanced Tracking Architecture", E-ISBN:1-4244-0525-4, Aerospace Conference, 2007 IEEE, Big Sky, MT, March 2007.