

## 4. 航空機性能データを用いた軌道モデル誤差推定

航空交通管理領域 ※白川 昌之、福田 豊、瀬之口 敦

### 1. はじめに

2003年9月に第11回の航空会議(ANC11)が開催され、現在の航空管制を発展させた新しい航空交通管理運用概念の方向性が示されとりまとめが勧告された。この概念は第10回航空会議における勧告と同様に今後20年以上の技術発展の枠組みになると期待される。

概念は「軌道に基づく航空交通管理」を中心とし、2025年を目指し漸進的に安全改善や効率性、容量の増加などを求め、交通同期や全体の流れ、需要・容量バランスなどの交通管理システムを構築していくことを目標としている。

概念を実現するためには、航空機の軌道をより早く、より正確に予測する必要があるため、このため電子航法研究所ではいくつかの型式の航空機について、機上の記録データをもとに分析することで位置予測の可能性を検討した[1]。しかし、機上データだけでは個々の航空機について分析はできるものの異なる航空会社や様々な機種が混在する環境での有効性については十分な検討ができない。

ここでは、より広範囲の航空機に対し的確な予測手段を得ることができかどうか明らかにするために、地上で観測した航空路レーダデータを用いて種々の航空機が混在する環境で航空機の軌道を解析した。また、これを基に予測精度と制御の可能性について考察した。

### 2. 解析方法の概要

#### 2.1 航空機性能モデルの概要

ここで軌道について具体的に述べる。軌道は緯度、経度、高度、速度、通過時刻という位置と時間に関する一連の情報を複数の通過点で定めることで定義される。これには航空管制上の制限が反映され、気象や空域の制限、効率的な飛行など軌道を設定する諸要素を考慮した上で記述される。軌道を管理するためには、安全間隔や管制官の作業負荷、空域・空港容量、航空

機の運動特性、気象条件の予測など多数の検討要素をふまえておこなわなければならない。実現には多数の航空機の軌道が各々前述の検討要素を満足する必要があるため、複数の航空機性能データや運航速度ルール、気象データなど膨大な情報量と計算が必要である。

軌道管理には、更に以下のような不確定要素が存在する。

- 1) 航空機の機種は多種類であり性能が一律でない。また細部の性能情報は非公開である。
- 2) 飛行計画はあるが当日決まる要素があり、またその場で決まる要素もある。
- 3) 同一航空機においても高度や気象、重量、フラップやランディングギアの利用などで飛行条件が変わる。
- 4) 航空機同士の安全間隔確保のため、管制官による高度変更や進路変更が行われる。これは事前に計画されるものではない。
- 5) 風や温度などの気象条件が不確定である。

軌道の予測には、これらの要素を考慮する必要がある。

#### 2.2 軌道管理と情報の共有

軌道管理においては、地上と機上とで軌道について合意し、情報を共有し、機上ではFMSが地上では軌道管理のためのシステムが飛行経路などについて管理を行う。その前提となる軌道の合意については現状でも飛行計画を提出し承認されることである程度行われているが、実際の状況では管制間隔をとるためのレーダベクタなどにより通過点での時刻は計画と異なることが多い。

「軌道管理」は「時刻管理」に基づいており、時刻が正確に守られることが必要である。しかし、このためには効率的な軌道の提案の前に軌

道相互間で安全間隔が得られるような総合的な計算が必要になる。この結果得られる軌道が機上の FMS(飛行管理システム)で得られる軌道と近いことが望ましい。

時刻が管理され逐次の修正により地上との同期がとられるためには通信が重要な働きをする。通信のメディアと送られる情報については以下のような関係が考えられている。

1) 軌道の全体情報の共有：全体の軌道については FMS(Flight Management System)が生成するフライトプランの形で、通過する一連の通過点についての緯度経度、高度、速度、予定時刻などが飛行前に送信される。送信メディアとしては ACARS( Aircraft Communication Addressing and Reporting System)や VDL(VHF Digital Link)が想定される。[4]

2) 実時間に於ける軌道の修正管理：ADS-B(Automatic Dependent Surveillance – Broadcast)により次の変節点での情報（パイロット・インテント）が送信されリアルタイムでの軌道の管理が行われる。短期情報には目標高度、目標機首方位、目標トラック角などが送信され、長期情報として軌道の変更点の緯度経度、変更時刻、変更点までのトラック、変更点からのトラックなどが送信される。[3]

3) 現在の位置や航空機パラメータ：現在の位置、速度情報や航空機の性能パラメータについては、ADS-Bと SSR(Secondary Surveillance Radar) モード S の DAPs (Downlink Aircraft Parameters)機能により逐次ダウンリンクされる。ヨーロッパでは Mode-S Enhanced Surveillance (EHS) として進められ、新規登録の航空機に対しイギリス、ドイツ、フランスで義務化されている。データには位置情報や計器指示速度 (CAS に相当する)、垂直速度、選択高度、対地速度、ロール角、トラック角などがあり、ルールベースの軌道予測を補足する情報がある。[3]

### 2.3 レーダ情報による軌道の推定

軌道を管理するためには時間を含めた正確な軌道の予測が必要であり、このため対地速度を予測する必要がある。対地速度は地上のレーダで測定された位置情報から推定されるので、例

えばコンフリクトの検出など数分程度の短期間の予測については観測値が主として用いられる。この範囲の予測トラックとしては $\alpha$   $\beta$ トラックやカルマンフィルタなどが用いられる。しかし航空交通管理を行う上で必要な10分から20分程度の中期の予測や、飛行計画段階など数時間のオーダーの長期の軌道予測をするためには、高度が変わったときの速度の変化やフラップの使用やギアダウンのタイミングなどに加えて、風の予報値など様々な要素を考慮しなければならない。このため、飛行計画に応じてどのように飛行方法が変わるかを含めてルールに基づいた予測方法が必要である。そこで複数の航空機について運航速度ルールや航空機性能を仮定して中・長期の予測を試みた。

運用においては、これらの情報を基に航空機の順序間隔付け、合流の管理などの可能性を探るのが課題になる。

### 2.4 レーダ情報による推定

上に述べたように軌道の予測には地上と機上との軌道の合意が必要である。現状ではそのようなものは存在しないため、実現した航跡を合意のもとに形成された軌道と仮定して、予測モデルで予測した場合に要する時間がどれだけ実態に近いものか比較する。ここでは単純に予測誤差についてだけ論ずる。合意の形成プロセスや行為が変更された場合の影響、プランを遵守するための航空機の制御などの問題には立ち入っていない。制御性については後で論ずるが、航空機の性能範囲を示したものであり、速度制御がどの程度できるかの目安を与えることになる。

### 3. 地上レーダデータによる予測モデル

航空機のモデルとしては質点系を用いる。また、航空機性能データや運航モデルについてはユーロコントロールで検討されているBADA(Base of Aircraft DATA)を参考とした[2]。予測計算に必要なが地上レーダデータで情報として持っていない部分については以下の仮定を置いた。

- 1) 航空機重量は参照重量値を用いた。
- 2) 高度や速度などの運航速度ルールは

BADA のデフォルト値を用いた。

- 3) 風や温度については気象庁の全球客観解析データを使用した。

### 3.1 運航速度モデル

将来の航空交通管理においても、異なる機種、異なる経路の航空機が合流などで混在する状況で安全且つ効率的な軌道を求めることが必要である。このためには、様々な飛行経路での経過時間、速度を正確に予測できなければならない。異なる航空機についての軌道を分析することにより以下を明らかにすることが必要である。

- 1) 機種や航空会社の違いにより誤差の傾向に違いがあるのかどうか。
- 2) 中期、長期的な予測精度がどれくらい見込まれるか

航空機は校正対気速度（Calibrated Air Speed 以下 CAS という）を一定に保って飛行することが効率的な運航に必要であり、このため運航速度ルールは CAS もしくはマック数で設定されている。CAS は、高度によって大きく変わることはない。

また、CAS は対空気の速度で対地速度はこれとは異なる。航空管制で使用する対地速度は風の影響を受けた結果である。風は一般的に高度が上がるほど強くなり上空では時には 100 ノットを超えるときもあり、対地速度を予測する際の主要な影響要因の一つである。

### 3.2 風の影響の除去

ある一日の日本の FIR (Flight Information Regions) 内のレーダデータを用いて、航空機の種類が異なることが、どの程度予測に不確実性をもたらすか概要を推定してみた。

図 1 に示すのは航空機の一機毎の速度プロファイルデータを連結して並べたものである。個々の航空機の飛行時間はバラバラであり、また機種もバラバラである。一つの山が一つの便の速度プロファイルに相当する。この図では約 60 便の速度プロファイルが示されている。

この図からも、航空機によって速度プロファイルはまちまちであることが分かる。これに気象庁の全球客観解析データにより風の影響を除去することで対地速度を真対気速度（True Air Speed 以下 TAS という）に変換すると図 2 に

示すように速度のでこぼこが平準化される。スパイク状の値はトラッキング開始時の不安定な値や途中の異常値によるものである。

これは、速度について風の影響を除去すれば個々の航空機の特性的違いを考慮したとしてもある程度は特性が平準化することを意味している。

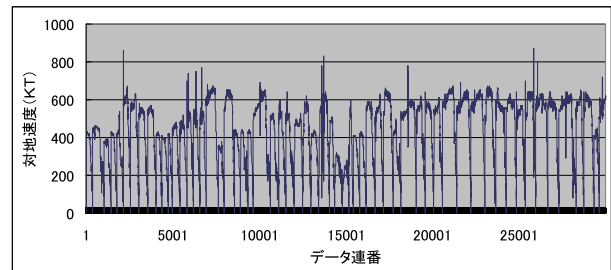


図 1. 航空機の対地速度のばらつき

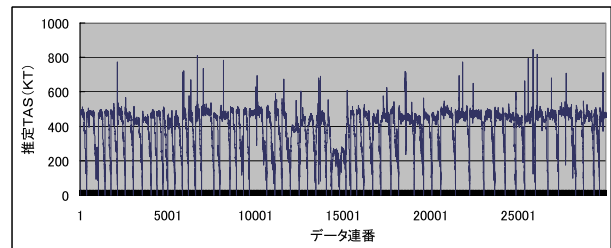


図 2 風の修正を行って TAS を求めた結果

### 3.3 航空路レーダによる解析

上に述べたように対地速度から風の影響を修正を行い気温や高度の修正を行って CAS を推定することができる。逆に運航速度ルールから求めた CAS から高度と気温を考慮した TAS を求め、風の修正を加えて対地速度が求められる。こうして得られる対地速度のモデル計算値と実測値を比較することで BADA で与えられる運航速度ルールを広く適用することの妥当性が求められる。

図 3 は求められたモデル計算値とレーダ実測値を比較したものである。赤色の部分はモデルから求めた対地速度を示し、紺色の部分は記録速度を示す。このように比較的良く一致していることが分かる。図 4 は風の影響を取り除いた TAS についてモデル値と比較したものである。図 5 はこれらのデータに使用した航空機の高度プロファイルである。ここで、TAS のモデル値は安定した値をとっているのにモデル値が変動しているのは風の修正方法が正確でないためである。この修正方法については改善の余地があ

ると考える。機上データの解析から風の推定精度がよいことは確認されているので、将来的に航空機の速度等の性能データが地上で取得できるようになると予測精度の向上が期待できる。

モデルの精度を求めるため、実際の経路データについてモデルから求めた対地速度による所要時間と実際の所要時間とを比べると、図6のようになる。これは、将来ルールベース、計画ベースで軌道が管理されると仮定したときに、気象などの不確定要素がどれだけ影響するかを示したものである。計画と一致しないパイロットや管制官の意図的な変更（たとえば荒天の回避や間隔付けのためのレーダベクタなど）は含んでいない。図のように相関係数は高く、実経過時間とモデル予測時間も全体としてみると2.5%程度を中心として分布している。

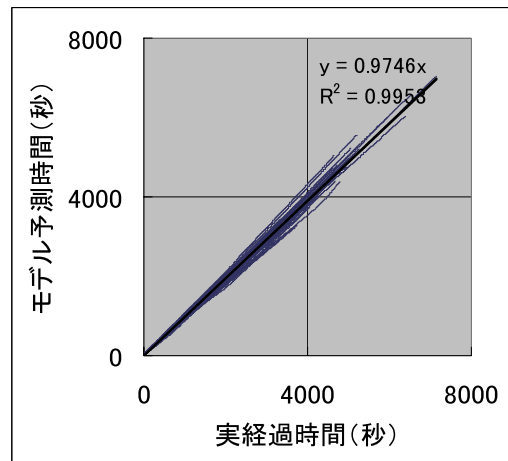


図6 実経過時間と予測時間の相関（混合）

更に詳しく解析する。図7は横軸が時間軸で単位は秒である。縦軸が誤差の割合で例えば中期の予測値として20分を想定し1100秒から1300秒までの間のデータを分類すると、平均値は-3.1%で約40秒バイアスしている。気象の予測値は午前0時のデータを24時間使っており、その影響であると考えられる。最大値は6.1%，最小値が-12%，標準偏差が3.5%であった。誤差が一方向にシフトしており、しかもおおむね同様であることからデータの補正による改善の可能性があるが、今回は十分な補正ができなかった。これについては今後の課題としたい。

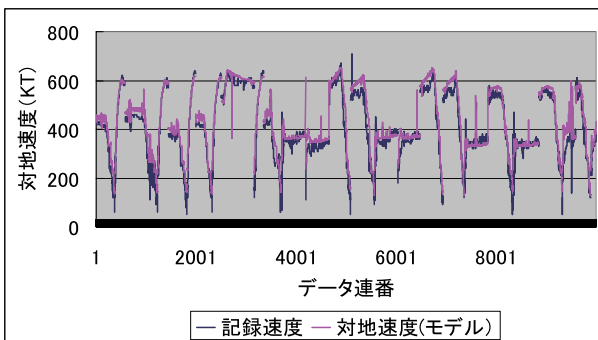


図3 対地速度とモデル値（混合データ）

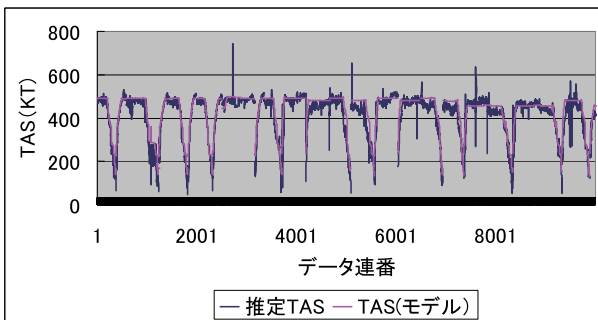


図4 TAS 推定値とモデル値（混合データ）

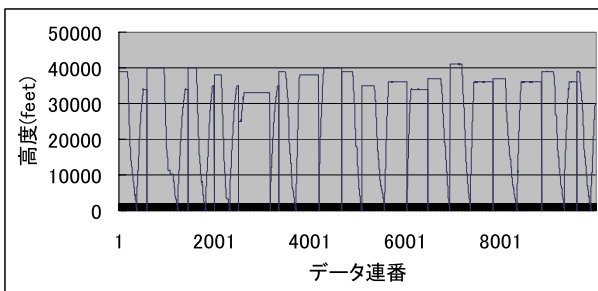


図5 高度プロファイル（混合データ）

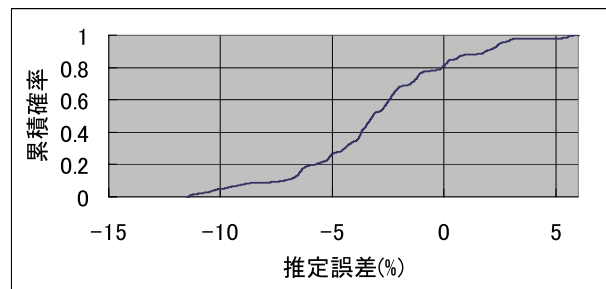


図7 推定誤差の経過時間に対する割合の累積分布（混合データ）

### 3.4 個々の航空機型式の場合

前項では雑多な航空機について全体的な観点から風の修正効果を見たが、ここでは個々の航空機型式について検討する。図8に同一機種(B777-300)の速度プロファイルを示す。スパイク状の値はトラッキングが確立されていない初期誤差などである。図には記録されている対地速度とモデルから求めた対地速度が表されている。

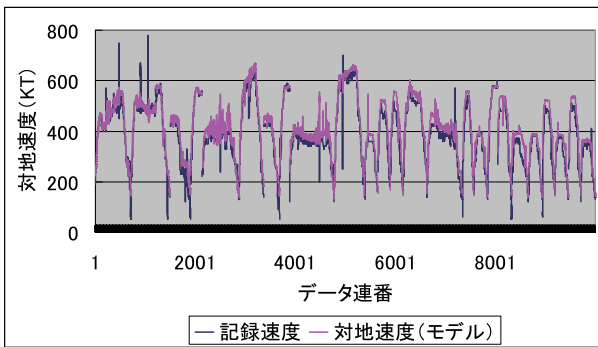


図8 航空路レーダデータによる対地速度の推定  
(B777-300 の場合)

図9に図6と同様、実際の経過時間に対し、モデルで予測される所要時間の相関を示す。図から、回帰直線の傾斜は相関1の直線から1.3%のずれとなり、全体についての回帰直線に比べてバイアス誤差が小さいことが分かる。図には示していないが同様の計算をB747-400に限定した航跡について求めると、 $y = 0.9938x$ 、 $R^2 = 0.9991$ 、となった。このように、機種によってバイアス値などに違いがあり、混合の場合良いモデル値と不適切なモデルが混在しているものと考えられる。

図10はB777-300についてこれらの差を求め累積させたものである。長期的な予測の可能性を調べるためには、例として3900秒から4100秒の記録データを集計することで4000秒の経過時間に対する予測誤差を求めた。その結果、最大で4.9%、最小で-9.1%、平均は-2.7%のバイアス誤差を持つ。標準偏差3.1%である。多くは数%の範囲内にある。データ数は約600である。

### 3.5 予測についての考察

以上の予測精度を見てみると、管制間隔と比較して中・長期的な予測誤差はかなり大きくなることが分かる。例えば4000秒前（約1時間強前）では、2分前後の誤差が存在することになる。従って、1時間以上前の予測軌道をそのまま間隔設定などに使うことは困難で、途中何らかの時間調整や予測修正手段が必要である。

予測軌道を求めたときに、どれだけ正確に予測できるかと言うことは、どれだけ正確に効率的経路を提案できるかと言うことである。

また、事前に正確に予測できるほど飛行中に戦略的なフライトプランからの修正が小さくて

すむので有効な管理ができるようになる。特に交通量が容量値に対して適切に予測されているかなど交通流・容量管理や航空機の順序間隔付けなどの支援ツールとして期待したい。

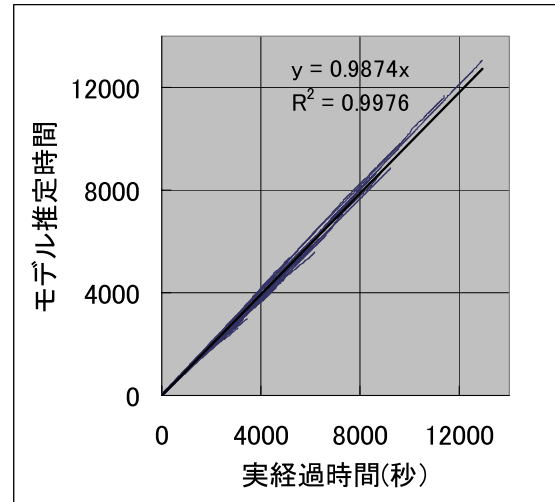


図9 実経過時間と予測時間の相関 (B777-300)

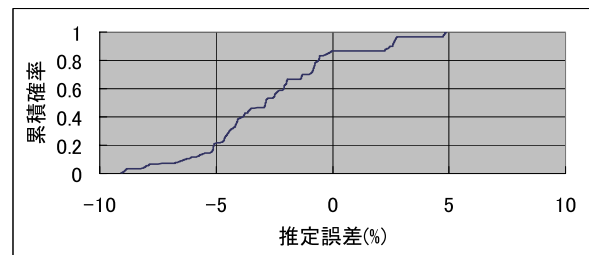


図10 推定誤差の経過時間に対する割合の累積分布  
(B777-300)

### 3.6 制御性についての考察

ターミナル空域への入り口などで水平の管制間隔を確保するためには、速度を変更したり、あるいはレーダベクタなどで意図的に遅れを作り出さなければならない。速度を変更する場合にはそのために、航空機の飛行できる速度幅を把握する必要がある。これはフライトエンベロープとして知られている。航空機の最大速度の概要について述べるとジェット旅客機だとマッハ数で0.84前後、ターボプロップだと0.44から0.66程度、ビジネスジェットは0.7から0.75程度、ピストンエンジンの航空機では0.2から0.4程度である。

図11に観測値と最大速度と最小速度を示す。最大速度と最小速度はBADAのデータベースから求め、温度と風で修正を加えた。最小速度

は失速速度を基準として 130%の値である。図から見る限り制御範囲が広くあるが、加速部分の余裕は少ない。減速については広いマージンがあるが燃料消費の効率や安全のためのマージンおよび定時性を考えると、この範囲をめいっぱい使うことはできないと考えられる。燃料効率性の観点からは最も経済的なあるいは最適な軌道からの速度やコースの修正は軽微であることが望ましい。

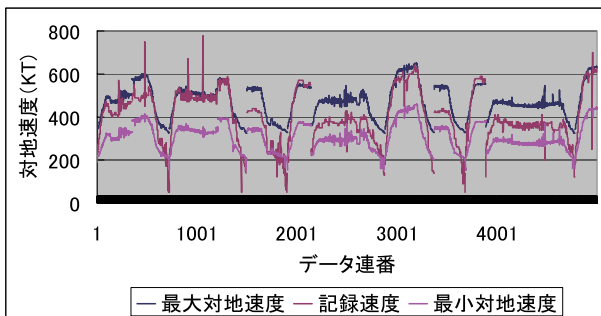


図 11 対地速度（記録値）とモデルから求めた最大、最小対地速度 (B777-300)

### 3.7 BADA が適用できる航空機

これまで BADA のデータベースを用いて対地速度など推定してきた。BADA で提供されている航空機性能データベースは 200 種類以上に上る。この中には類似機種で代用したものもある。

ある一日分のデータを見ると、日本の FIR で一日に約 3500 便の IFR 機があり、その内の約 3000 便(約 86%)について BADA の性能データを利用することが可能である。図 12 に BADA のデータを有する主要な航空機種の便数を示す。記録された機種は 56 種類であった。データがない場合についても風の修正を加えると機種によらず TAS がほぼ一定であるので、似たようなタイプの航空機のデータを用いることで予測が可能であるかも知れない。現在データがなくて日本に於ける便数が多いものは、DHC-8、MD81、MD90 などである。これらは、似たような性能を持つ航空機で置き換えることを今後の検討課題としたい。また、BADA のデータベースもごく最近バージョン 3.7 への更新が行われたが、今回の報告にはまだ反映していない。

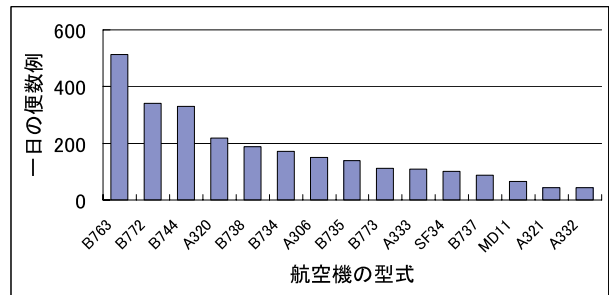


図 12 BADA に性能データがある航空機（主要なもの）

## 4. まとめ

レーダデータを中心として航空機の予測モデルについて検討した。様々な航空機が混在する中での軌道管理は予測や制御の困難を伴う。ここでは、それがどの程度なのか概要を予測する意味でレーダデータにモデルを適用した。

モデルの適用については航空機の重量や運航速度ルールなど情報が得られていない場合が多いが、ここでは重量については参照重量を、運航速度ルールについては BADA のデフォルト値を用いた。気象モデルは気象庁の全球客観解析データを用いた。

その結果、航空機の予測精度等を求めることができた。今後は新しい精度の高い気象データの利用など精度の向上を行いたい。

終わりに、本研究にご協力いただいた国土交通省航空局はじめとする関係各位に感謝の意を表します。

### 参考文献

- [1] 白川, 福田, 瀬之口: “航空機性能モデルを用いた航空機軌道予測”, 航行・宇宙エレクトロニクス研究会, 信学技報 IEICE Technical Report, SANE2008-99, 2009年1月
- [2] EUROCONTROL Experimental Center: “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA), revision 3.6”, EEC Note No. 10/04, ACE-C-E2, July, 2004
- [3] RTCA: “MASPS for ADS-B”, DO-242A, June 2002 RTCA
- [4] ARINC: “Advanced Flight Management Computer System”, ARINC Characteristic 702A-3, Dec. 2006