

飛行データ解析技術 (FDM/FOQA) の動向

1. はじめに

航空機が飛行中にデータを記録する飛行記録装置は、当初は、事故の原因究明を目的として搭載されましたが、現在では更に進んで、事故の芽を未然に摘み取るプログラムの中心的な役割を担っています。本稿では、航空業界におけるこういった技術の変化に関する解説を試みることにします。

2. 概要

航空機の事故が起こった場合、新聞には必ずと言って良い程「飛行記録装置が回収され・・・」という文章が登場し、事故調査が始まったことを伝えます。2009年6月1日に大西洋上空で消息を絶ったエアフランス 447 便の飛行記録装置は、2年後に機体の残骸と共に深海の中から発見され、事故発生の要因となったものを明らかにしました。このように最近では当たり前になった飛行記録装置あるいは FDR (Flight Data Recorder : フライトデータレコーダー) が今日のように普及するまでには長い年月がかかりました。また、記録されるデータの内容も、それを解析する技術もその間に大きく変わってきました。

かなり昔になりますが、1966年に BOAC (現在の British Airways) のボーイング 707 型機が羽田空港を離陸後、富士山に墜落したことがあります。この時には FDR は装備されていなかったと報道され、旅客が撮影した 8 ミリ撮影機のフィルムが調査の参考として使用されたと言われていました。それから 20 年以上も経ってから British Airways の担当者から聞いた話では、当時、紙に磁気コーティングした上にデジタルでデータを記録する FDR が搭載されていたそうですが、焼けてしまったので結局利用出来なかったとのことでした。この様なデジタル技術の先駆者的な航空会社は、当時まだ能力が十分では無かったコンピュータを駆使して、1960年代には記録されたデータを解析して運航のモニタリングを行う基礎を確立しました。1980年代に入り、エアバス A310 型機やボーイング 767 型機から、マイクロプロセッサの利用で航空機のシステムは本格的なデジタルの時代を迎えました。システムの中には解析に必要なほとんどのデータがデジタルデータとして存在するようになったため、何千という数のパラメータの中から記録したいものを選べるようになりました。レコーダーもテープ式からソリッドステート式の記録に変わり、記録容量が飛躍的に増えました。データを処理するコンピュータそしてその周辺機器も、1990年代以降、容量、速度、機能すべての面で飛躍的な発展を続けてきました。そのような状況下で、1990年代に航空業界は、「科学的な情報を基にもっと安全を追求しよう」という時代に入っていたのです。

今まで個々の航空会社が行っていた運航のモニタリングを国家レベルそして全世界レベルで標準的な航空安全を確保するための手段として採用するに至りました。「事故が起こる前にその要因を見つけて対策を採る」ことを目標に今後も様々なデータ解析技術を駆使した活動が行われていきます。

3. 飛行データの記録と解析の歴史

3. 1 黎明期

飛行データを記録して利用するのは、元々試験飛行の評価に使用するためのものでした。事故調査に利用するようになったのは第2次世界大戦後のことです。最初に登場したのは、写真技術を利用して波形として記録するものや、金属箔に傷を付けてデータを刻むタイプのものでした。いずれも所謂アナログ方式のデータ記録をするレコーダーです。金属箔に傷を付けてデータを記録するレコーダーは、その後改良を加えられ、ステンレススチールの箔にダイヤモンドの針でデータを刻む方式が出てきました。記録されたデータは、高度、速度、機首方位、垂直加速度、時刻のたったの5種類という少ないものでした。今から考えると、「それだけの情報で何が分かるのか？」という程度のものですが、当時としてはこれでも素晴らしい変化でした。事故調査以外でもこの記録されたデータを航空会社は利用しました。運航モニタリングの走りとも言えるべきものでしょう。このタイプのデータ記録は、顕微鏡で8倍に拡大して目視で点を繋いで線として見るのですが、航空機の降下・進入中の降下率を高度の変化から計測したり、接地時のショックを垂直加速度から計測したりしました。また、これはレコーダーのデータでは無いのですが、1960年代頃から行われていた着陸地点のモニター (Landing Monitor) についてお話ししましょう。当時は航行援助施設もまだ完全では無く、オペレーションに対する考え方も統一されたものではありませんでした。ある航空会社では、滑走路の手前に着陸するケースが何件か発生したために、実態はどのようになっているのかが議論になって着陸地点を実際に調べてみることになりました。その方法は、航空機の進入方向の滑走路端の横にカメラとその前に目盛にするための網を置き、滑走路端通過時と接地時にシャッターを切るものです。出来た写真から滑走路端通過高度と接地距離を読んでその便の記録にします。このモニターは羽田空港だけではなく、数としては少なかったのですが、伊丹空港、福岡空港、そして海外のホノルル、香港、アンカレッジの空港でも行われました。このような努力と経験の積み重ねが次のデータ解析へと繋がっていきました。

3. 2 デジタル記録の登場とその利用

1960年代にはトランジスタが実用化されたのに相俟ってデジタル技術が進歩し始めました。FDRもデジタル化の時代を迎えました。それまでのアナログ記録に代わってデジタルでデータを記録するDFDR (Digital Flight Data Recorder)が登場したのです。また、データを事故が発生した時だけに使うのはもったいない。もっと日常の運航の改善のために役立てたいと考える航空会社のために、データを記録した媒体 (当時はカセットテープ) だけを取りおろして使えるようなレコーダーQAR (Quick Access Recorder) も出来ました。これを真っ先に利用したのは、KLM オランダ航空、BOAC 英国海外航空、AF エアフランスといったヨーロッパの航空会社です。彼らは、現在世界標準として行われているFDM (Flight Data Monitoring : 後述) の原型とも言える、通常のオペレーションから逸脱したケースをモニターすべき事象 (Event) として検出して調査する、所謂「Event方式」というものを開発してデータの解析を行いました。アメリカにおいても、AA アメリカン航空、UA ユナイテッド航空、TWA トランスワールド航空が同様なモニタリングを試験的に行いましたが、TWA 以外は

止めてしまいました。1970年代に入り、ボーイング社の747型機、ロッキード社のL1011型機、ダグラス社のDC10型機の登場と共に、日本の航空会社も航空機にQARを装備してFDMの実用化試験を開始しました。しかし、IBMシステム370といった当時の大型のコンピュータでも現在のパソコンより能力や容量で劣るものだったため、十分な解析という意味ではコンピュータ技術の発展を待つ必要がありました。

3. 3 航空機システムの仕様統一

DFDRに記録するデータは、その時の法的な要請に従って航空機メーカーが決めます。しかし、QARに記録するデータには何ら法的な拘束が無いため、その航空機を使用する航空会社が自由に決めることが出来ます。このため、1960年代から1980年代の初めにかけては、航空機メーカーとそれぞれの航空会社が協議して、データ記録に必要なセンサーの装備やそれに伴う配線を独自に決めていました。この方式を止めて、航空機のデータシステムのセンサーや配線を標準化し、単なるデータ記録システムでは無く航空機の運航状況をモニターするシステムとして位置づけたのが、1980年代の後半にボーイング社が開発を行った747-400型機です。このシステムをACMS (Aircraft Condition Monitoring System) と名づけました。航空機の殆どのシステムがデジタル化されたため、必要なデータは殆どがシステムの中に含まれています。それぞれのシステムからデータベースをACMSに接続することによって、送られてくるデータを利用することが出来ます。この開発に当たりボーイング社は初めて航空会社を集めて意見を聞き、標準的なシステム構成と配線を作って提供したのです。現在では、どの航空機メーカーでもこのような標準システムとなっています。

3. 4 データ利用の普及と法制化

ヨーロッパにおいて1960年代からデータを使ったモニタリングが行われていたことは説明しました。アメリカにおいては、コストベネフィットの考えが強いことと、パイロットの組合がモニタリングに対する抵抗を持っていたためなかなかデータの利用は実現しませんでした。しかし、1990年代に入り、航空機事故が多発していた現状を打ち破ることを目標に「航空機事故発生をゼロにしよう」(Zero Accident)という構想が出てきました。この中にあらゆる面で事故防止対策を列挙したのですが、そこにFOQA (Flight Operational Quality Assurance) というものが1項目として登場しました。FAA (Federal Aviation Administration : 米国連邦航空局) はFSF (Flight Safety Foundation) に依頼して全世界でどのようにモニタリングが行われるかの調査を行いました。その調査報告書は1992年に発行されています。1995年にDOT (Department of Transport : 米国運輸省) は1,000人以上におよぶ航空関係者(政府、航空会社、乗員組合、メーカー等)を集めて航空安全に関する様々な項目についてのワークショップ形式の会議を開催し、航空安全実行計画(Aviation Safety Action Plan)を作成しました。その1項目としてFOQAの実施が決定され、その後FAAの主導で年4回のFOQA推進会議(Demo-Project Meeting)の場で各航空会社への啓蒙と指導が行われ、アメリカ国内のFOQAの立ち上げが行われました。現在では、アメリカにおいてFOQAは任意のプログラム(Voluntary Program)でありながら定着し、ASIAS (Aviation Safety Information Analysis & Sharing) という国家的

なプロジェクトを通じて FOQA 等で得られた情報の共有も図られており、有効な利用が進んでいます。

一方 ICAO (International Civil Aviation Organization : 国際民間航空機関) においてもデータによる運航のモニタリングを航空事故を減らすための最後の切り札と考え、これを世界標準として採用する検討を始めました。そして 2000 年に、検出された事象をもって懲罰を含む個人の評価の材料としないという非懲罰の原則やデータの情報源の保護を謳った FDAP (Flight Data Analysis Program : 飛行データ解析プログラム) を、27 トンを超える航空機を運航する事業者に対して 2002 年から「勧告」として、2005 年から「国際標準」として採用するよう ICAO Annex 6 (第 6 附属書 : 運航) の改定を提案し、各国にコメントを要求しました。Annex 6 の改定は小規模な航空会社への対応策を付け加えて 2001 年に発行されました。ICAO は更に 2005 年末、安全管理システム (Safety Management System) の一環として他の安全施策と共に FDAP を行う様に提案し、Annex 6 の改定を行いました。日本においては、2004 年から 2 年間、国土交通省航空局、国内の航空会社 5 社、航空輸送技術研究センターをメンバーとする「飛行データ解析プログラムに関する調査・研究委員会」で検討が行われ、2008 年に「飛行データ解析プログラムの導入について」の航空局技術部長通達ならびに「飛行データ解析プログラム実施に関する指針」、「安全管理体制の構築に係る一般指針の改定」が出されました。

4. 飛行データ記録システム

4. 1 フライトデータレコーダー (FDR)

フライトデータレコーダーシステムの簡単な原理と基本的な構成について説明しましょう。ひとつのデータ (パラメータ) を記録するためには、検出するセンサー、それを電気信号として送る配線、電気信号をデジタル化してレコーダーに送る変換器、そしてレコーダーの 4 つの部分が必要になります。例えば垂直加速度を例にとりますと、センサーである加速度計 (Accelerometer) が主脚 (Landing Gear) の根元付近に設置され、-3G から 6G までの加速度を最大 5V DC の電圧で出力し、配線を通して変換器 FDAU (Flight Data Acquisition Unit) に送っています。FDAU の AD コンバーターで無名数 12 ビットのデジタルデータに変換された垂直加速度のデータは、記録する順番に従ってレコーダーへ送られます。FDAU は、それぞれの接続されている信号をサンプリングスケジュールに従って入力し、上記の様にデジタル変換した後に記録の順番通りに並べてレコーダーに送ります。当初 64 Word/sec (1 秒間に 12 ビットで 64 のデータ記録を行う時間枠 (Slot) を持つ) であったデータ記録の能力は、現在では 1,024 Word/sec にまで増えました。A310 型機以降のデジタルシステムの航空機では、変換器は DFDAU (Digital Flight Data Acquisition Unit) と呼ばれています。

4. 2 ACMS (Aircraft Condition Monitoring System)

日常的に飛行のモニタリングを行うために FDR を使うのは不便ですから、記録した媒体だけを簡単に取りおろしができる QAR が通常使われています。QAR を含む機上のモニタリングシステムを古くは AIDS (Aircraft Integrated Data System) と呼

ばれましたが、ボーイング社は 747-400 以降 ACMS と読んでいます。QAR にどのようなデータを記録するかは航空会社が自由に決めることができます。(航空機メーカーによってはあまり自由度を認めていないところもあります) この自由な設定を可能とするために、飛行データ専用のコンピュータを搭載します。先に述べた DFDAU の中に二つのプロセッサを入れて、そのひとつを ACMS 用に使う形式のシステムもありますが、単独で搭載する機上コンピュータを DMU (Data Management Unit) と呼びます。DMU のソフトウェアは、QAR に記録するデータを決めるだけでなく、飛行中にデータ処理を行い、プログラムされたレポートを作成したり、空地のデータ通信を行う ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) に決められたレポートやデータを送ったりします。

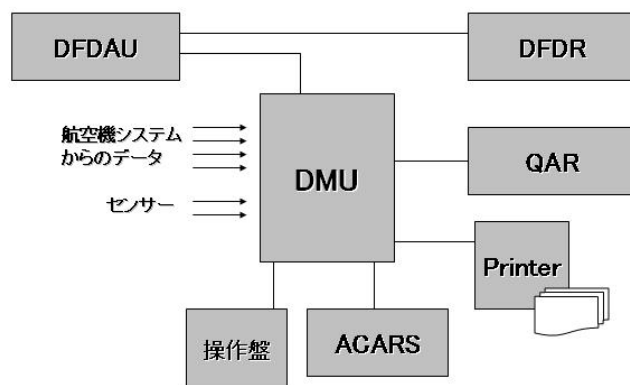


図 1 機上データシステムの構成

5. FDM/FOQA とは

FDM とは、航空機の飛行データを解析して、日常の運航の中から事故に繋がる可能性がある不安全要素 (運航のリスク) を見つけ出し、事故が起こる前に対策を講ずるプログラムです。FDM は、もともと各航空会社の中で育ってきた歴史的背景から、様々な名称で呼ばれています。そのいくつかを挙げてみると、今述べた、FDM、FDAP に加えて、アメリカで使われている FOQA、British Airways で使っていた SESMA (Specific Event Search and Master Analysis) 等があります。Event 方式では、ひとつの飛行の過程を、離陸、上昇、巡航、降下、進入、着陸といった飛行の段階 (Flight Phase) に分け、各飛行段階毎に見るべきモニター項目を設定して、検出された事象を解析します。以下にその例を示します。

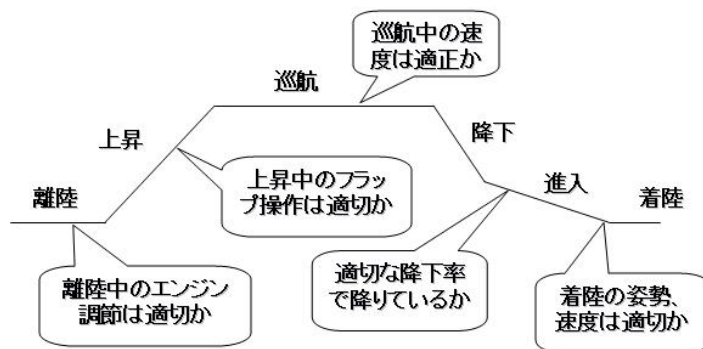


図 2 FDM Event の概念図

パイロットの立場からは交通違反の取締りのように見られ勝ちですが、本質は、もっと高い視点から日常の航空機の運航を見つめ、事故の要因を取り除いていくことにあるのです。このために、ひとつは、モニター事象の発生状況をその時の気象状態や航空管制がどのような指示を出していたか、そして当該便のパイロットがその状況をどの様に捉えていたのかも含めて詳細に解析します。またもうひとつは、空港によって何か不安全事故が発生しやすい傾向がないのか、あるいは季節的に特徴的な変動がないのか等、モニター事象の発生傾向を統計的な手法を通して眺めることが必要です。その過程で運航上のリスクがどこにあるかを把握して行きます。FDMを取り巻く環境は、2000年以降随分変化してきました。古くは1960年代にヨーロッパの航空会社で始まった、DFDRのデータを解析して運航の改善に役立てるというプロジェクトは、ICAOがFDAPを世界標準として義務化することを決定するに至り、全世界的な航空安全を確保するためのプログラムになってきたのです。

6. 解析技術の発展

当初のデータ解析は、幅広のコンピュータ用紙に数値を打ち出してそれを見ながら飛行の状況を組み立てて何が起こったかを調べるものでした。紙に埋もれ、データに埋もれて解析を行う時代でした。1970年代にはグラフを描くプロッターも出てきましたが、精密なものは非常に高価でした。1980年代頃から、データを視覚化する考え、すなわち人間の目で見えて理解しやすい形にして判断を容易にするというものの開発が行われ始めました。航空機のデータを使って、飛行の状況を画面上で航空機の動きとして再現するというものです。当時、カナダの事故調査機関であるTSB (Transportation Safety Board) Canada やオーストラリアのATSB (Australian Transportation Safety Bureau) で、まだ初歩的なものですが、コンピュータグラフィックを使った飛行のアニメーションが作られました。日本においても、航空宇宙技術研究所(現宇宙航空開発研究機構: JAXA) がSTOL (Short Take Off and Landing) 実験機「飛鳥」の飛行試験で、記録したデータのアニメーションを活用しました。以前NHKが、御巣鷹山に墜落したJAL123便のFDRデータをアニメーション化して747型機が飛ぶ映像として放映したことがありました。この時は、何台ものコンピュータを使用して相当のお金を掛けて画像を作成したと聞いています。今や新しいハードウェアの出現、解析技術の発展は日々目まぐるしいものがあります。高性能のグラフィックカードを使用すれば通常のパソコンでFDRデータをアニメーション化することが可能になりました。この様なソフトウェアを提供している会社は世界中に何社かありますが、その中でもカナダのCAE Flightscape社は、先に述べたTSB Canadaの技術を引き継いで、アニメーションをユーザー自身が希望する形で作ることが出来る柔軟なソフトウェアを提供しています。ソフトウェアを立ち上げFDRデータを読み込めば直ちにデータの流れて従って機体のモデルと計器類を動かすことができますし、航空写真や衛星写真をそこの地形に貼り付けることによってその上を飛んでいるような臨場感を体験できます。また、計器類を自分で追加してその上でデータを表示することも可能です。



図3 Insight ソフトウェア アニメーション 画面例
(Image courtesy CAE)

参考：アニメーションの動画サンプルは下記アドレスに公開されています。

<http://www.flightscope.com/cae-flightscope-insight-animation-examples/>

この様に可視化された飛行データは、単に解析の一助として利用するだけでは無く、パイロットが自分で操縦したフライトを見つめ直したり、それぞれの空港での進入・着陸の状況を教育資料や路線資料として提供したり、また、シミュレータ訓練の後にデブリーフィングする際のツールとして活用する動きが広がってきています。すなわち、FDM ひいては航空安全を周りで支える環境作りをしているのです。

FDM は、今や航空会社が安全運航を維持する為のひとつのツールとしてきちんとした役割を与えられ、しかも、何でも無い普段の運航の中から将来事故に繋がるかもしれないハザード（潜在的な不安全要素）そしてリスクを捜してくる手段として期待されています。これを効果的な形で実現する為には、単に重大なモニター事象の発生事例に一喜一憂するのでは無く、もっと大きな運航のデータの中に潜んでいる何かを冷静に抽出する努力、そしてモニター事象が発生していない世界からも、予想していなかったような危険要因を探し出せるような新しい技術が必要になってきます。そして、データ（Data）を情報（Information）に、情報（Information）を知識（Knowledge）に、知識（Knowledge）を不安全要因を取り除く行動（Action）に結び付けてゆく、というプロセスを続ける努力が肝要です。FDM が有効なツールであると言っても万能ではありません。しかし、その限界を十分にわきまえ、他の情報をもっと取り入れて有機的に組み合わせていけば、有効な解析そして利用が可能となるはずで