

## 1.1. RNP AR 等の混合運用に関する安全性保証のための分析について

航空交通管理領域 ※天井 治, 松岡 猛  
海上保安大学校（元航空交通管理領域） 藤田 雅人

### 1. はじめに

航空機の飛行は、視程の良い有視界気象状態（Visual Meteorological Condition : VMC）の時に遊覧飛行や航空写真の撮影などで用いられる有視界飛行方式（Visual Flight Rule : VFR）と、常に航空管制官（以下、管制官）の指示に従って飛行する計器飛行方式（Instrument Flight Rule : IFR）に分けられる。航空会社の定期便は通常 IFR で運航され、本稿では IFR で飛行する航空機のみを対象にする。

航空交通管制（以下、航空管制）では、航空機が滑走路に安全に着陸できるように計器進入方式（Instrument Approach Procedure）が定められている。これは「IFR 到着機が秩序良く進入し、計器気象状態（Instrument Meteorological Condition : IMC）においても一定の地点まで滑走路に近づき安全に着陸するための計器に依存した飛行経路、旋回方向、高度、飛行区域および進入復行等の一連の飛行方法」<sup>[1]</sup>である。計器着陸装置（Instrument Landing System : ILS）を用いた進入方式は計器進入方式の一つである。

近年、新しい計器進入方式として、航空機の優れた性能を生かせる RNP AR（Required Navigation Performance - Authorization Required : 特別許可を要する航法性能要件）進入方式<sup>[2]</sup>が開発され、日本でも効果が見込まれる空港から順次導入されている。山などの地形的な制約から ILS 進入方式を設定出来ない場合でも、RNP AR 進入方式では、後述する曲線進入を用いて経路を設定できる。このため、最低降下高度を引き下げることができ、より低視程時においても着陸が可能となり、今まで VMC 時しか着陸ができなかった滑走路にも IMC 時でも着陸が可能

となって就航率向上に寄与している。また RNP AR 進入方式では自由度の高い経路設定が可能となり、経路短縮ひいては飛行時間の短縮に繋がっている。

航空管制では、安全で効率的な航空機の運航のために航空機相互間の最小安全間隔（管制間隔）の基準を定めている。レーダ画面上で航空機を把握して間隔を確保するレーダ間隔の基準は、レーダアンテナから 40 NM（Nautical Mile : 海里（1 NM=1,852 m））以内では 3 NM、それ以上では 5 NM である。後方乱気流を考慮した場合、機種組み合わせによるが、最大で 8 NM<sup>[3]</sup>（スーパーとスモールの組み合わせの場合）となる。時間間隔を考える場合、航空機同士の前後間隔は約 2 分必要である。

ターミナル管制官はレーダ画面上で航空機の動きを把握することにより、通常、時間的余裕のある進入の初期～中間段階でレーダ誘導などの方法で順序付けと間隔設定を行い、滑走路近傍の最終段階では航空機同士の前後間隔のみに注意すれば良いように航空機を実際に線上に並べて管制を行う。ここで、レーダ誘導とは、管制官がレーダ画面上で航空機の動きを見ながら、パイロットに飛行方向等を指示することによって、航空機を誘導することである。

ILS 進入方式では、空港に設置された装置からの電波を用いて、パイロットは水平および垂直方向のガイダンスを得ることができる。原理上 ILS 進入方式では滑走路手前で 7 NM 程の直線飛行を必要とする。一方、RNP AR 進入方式は、全地球航法衛星システム（Global Navigation Satellite System : GNSS）の高精度測位情報と気圧高度を用い、誤差 0.3 NM 以下の航法精度と

RF（Radius to Fix） Leg と呼ばれる円弧旋回を有する航法機能に基づく進入方式で、航空機の要件、運用手順、乗員の訓練などの要件について特別な航行許可が必要である。RF Leg は ILS 進入方式では実現できなかった滑走路近傍における曲線進入を可能とする。図 1 に ILS 進入方式と RNP AR 進入方式のイメージを示す。

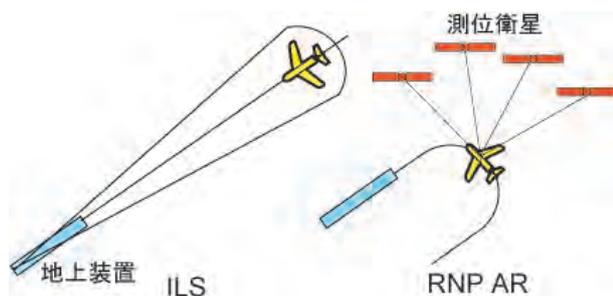


図 1 ILS 進入方式と RNP AR 進入方式

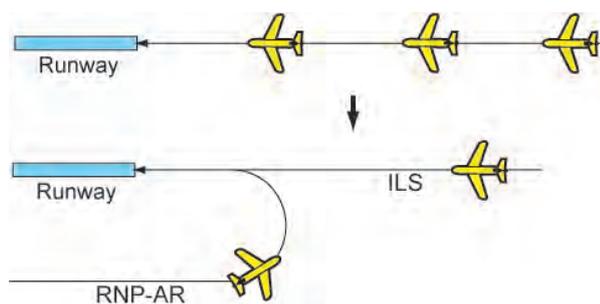


図 2 管制の困難度

これらの ILS 進入方式と RNP AR 進入方式による滑走路近傍での曲線進入とが同一滑走路に対して同時に実施される場合は、管制官は、異なる方向から来て滑走路の手前で合流する各航空機の到着時刻を予測して順序づけを行い、管制間隔を確保することになる。これは、着陸までに時間的余裕が少ない滑走路近傍においての従来の線上ではなく平面に対する思考となり、また飛行時間の誤差による予測性の低下もあるため、処理機数が多くなると管制の困難度が上がるといえる。図 2 にイメージを示した。

我々は、このような幾つかの進入方式の混合

運用の安全性と実現方法を研究している<sup>[4],[5]</sup>。本稿では、混合運用の安全性保証等を Safety Case の考え方に基づく GSN（Goal Structuring Notation）チャートの作成によって進める方法について、レーダデータの解析結果やハザード解析手法の検討結果を示しながら述べる。

## 2. 混合運用について

図 3 に示すように同一滑走路に、例えば ILS 進入方式（方式 1）、RNP AR 進入方式（方式 2）、RNAV（Area Navigation：広域航法）（GNSS）進入方式（方式 3）の 3 つの進入方式が設定され、ILS 進入方式又は RNAV（GNSS）進入方式等の直線進入と RF Leg を含む RNP AR 進入方式を実施する到着機が同時に出現するような運用を混合運用と呼ぶ。尚、RNAV（GNSS）進入方式は、GNSS の情報を用いて飛行するが、RNP AR 進入方式のような RF Leg は利用出来ない。

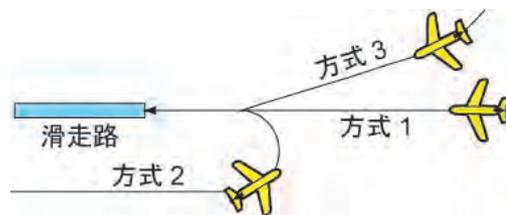


図 3 混合運用の概念

第 1 章で述べたように、混合運用においては、管制官は合流地点の到着時刻を正確に予測して航空機の順序付けを行い、必要に応じ航空機の色速度調整等を行って、合流地点での管制間隔を確保しなければならない。

## 3. Safety Case

Safety Case は、証拠に裏付けられた構造化された議論（Structured Argument）によって、あるシステムを安全であると受け入れることの正当性を示すものである。鉄道分野<sup>[6]</sup>、海上浮体施設<sup>[7]</sup>、沖合施設<sup>[8]</sup>、自動車分野<sup>[9]</sup>、原子力分野<sup>[10]</sup>

など様々な分野で Safety Case が導入されている。航空管制の分野では欧州の EUROCONTROL<sup>[11]</sup>にて研究，作成が行われている<sup>[12]</sup>。

議論の記述方法には，GSN<sup>[13],[14]</sup>がある。最初に安全性を保証すべき基となる主張

(Argument) (「〇〇は安全と見なせる」等。GSN コミュニティでは Goal と呼ばれている) を示し，それを複数のより限定的な主張 (例えば「△△のとき〇〇は安全と見なせる」，「xxのとき〇〇は安全と見なせる」等) に分割していく。分割の方法は，状況毎に場合分けを行う方法など色々な方法が考えられる。それぞれの主張に対して，統計的事実やシミュレーション結果などその主張を支持する証拠 (Evidence : Evi.) が示せるまで細かく分解していく。妥当と見なせる証拠が全て示せたとき，基となる主張の安全性は保証されると考える。しかし，重要な状況の見落とし等も考えられるため，多くの人にチャートを確認してもらうこと，できれば異なる分野の人達にも確認してもらうことが重要と考える。

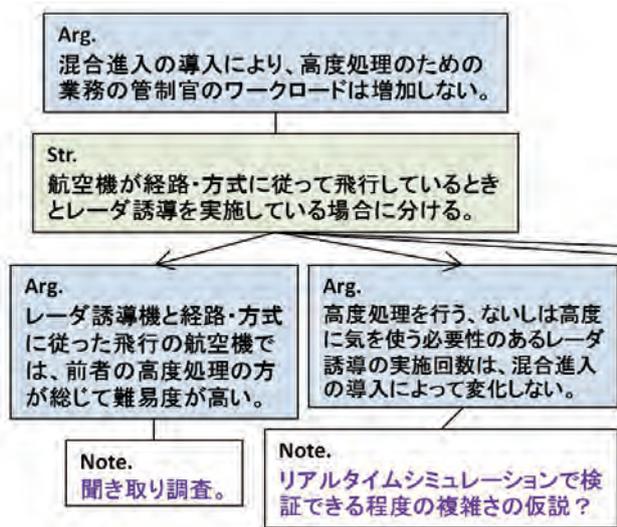


図4 作成中の GSN チャートの一部

図4に現在作成中の GSN チャートのごく一部を示した。Arg.は Argument (主張)，Str.は Strategy (主張の保証方法に関する戦略を記述する方法)

を表す。現在作成中のチャートでは次の状況を考慮している。

- ・ 風向きの変化による着陸方向の変更
- ・ 間違った進入方式での進入

通常，GSN チャートでは，長方形の枠の他に見易い様に菱形，楕円等を使用するようであるが，我々は書きやすい様に長方形のみとし，枠内の色を変えることで見易くしている。また，図4では GSN チャートの一番下の項目はどれも Note. (覚え書き) になっているが，これは GSN チャートが未完成のためである。チャートを完成させるためには，深い検討・考察を重ねて，これらを Arg., Str., Evi.などに変更し，一番下の項目が全て Evi. (証拠) となるようにする。

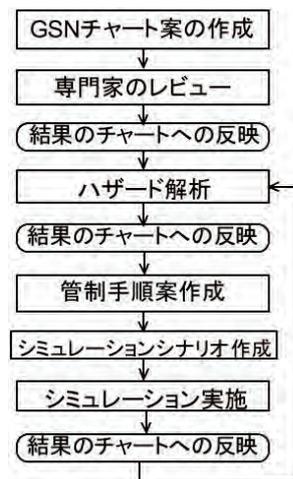


図5 手順

#### 4. 研究の進め方

研究の主目的は，提案する混合運用方式を用いた場合の管制手順案の作成と，当該手順案を用いた運用における安全性の評価である。本研究では，そのそれぞれを3章で述べた GSN チャートの作成により進める。チャートに記載する証拠を示すため，そして，活用できる運用方式の選択のためにレーダデータの解析を行う。チャートは次のように見落とし等の修正を行う。

- ・ GSN チャート案完成時の管制経験者等の専門家による確認

- ・ 作成されたチャートに基づくハザード同定 & リスク評価（以下、ハザード解析）（6章参照）

そして、修正された GSN チャートに基づいて混合運用に対する管制手順案の素案を作成する。当該素案に基づいた方式に従って、チャート内での証拠を提供するため、そして、従来の運用方式と混合運用方式との管制官のワークロードの差等を調べるために航空管制のリアルタイムシミュレーションを行う。

図 5 に手順を示した。リアルタイムシミュレーションの結果を反映させた GSN チャートに対して更にハザード解析を行って修正を繰り返して行き、作成される管制手順案を見落とし等がないものに改良していく。

## 5. レーダデータ解析

混合運用では、航空機の飛行時間のバラツキが運用方法の選択、検討に強く関係する。このため、実測データとしてのレーダデータを用いて航空機毎の航跡を作成し、同一飛行経路を飛行した航空機の飛行時間のバラツキを飛行方式毎に調べている。

RNP AR 進入方式を飛行する航空機の飛行時間のバラツキを岡山空港と函館空港のレーダデータを用いて、それぞれ調べた。その結果、岡山空港（飛行距離 36.3 NM）での飛行時間の標準偏差は 37 秒<sup>[15]</sup>、函館空港（飛行距離 24.4 NM）でのそれは 31 秒<sup>[16]</sup>であった。

函館空港の経路の入口（ウェイポイント名 YAGEN）における対地速度と飛行時間との相関関係を調べた結果、相関係数  $r$  は -0.69 で相関があり、回帰直線との差（残差）の標準偏差は 22.5 秒であった<sup>[16]</sup>。ここで、ウェイポイントは経路上に設定された地理上の点であり、5 文字以下の名前が付けられている。

図 6 に相関関係を示す。図中の緑色の線は回

帰直線を示す。対地速度と飛行時間との相関が高いことは、対地速度の情報を上手く利用することで飛行時間のバラツキを減らせることを示唆している。ILS 進入方式や RNAV (GNSS) 進入方式の場合も同様にして調べており、飛行距離 30 NM 程での飛行時間の標準偏差はいずれも 30 秒程という結果が得られている。

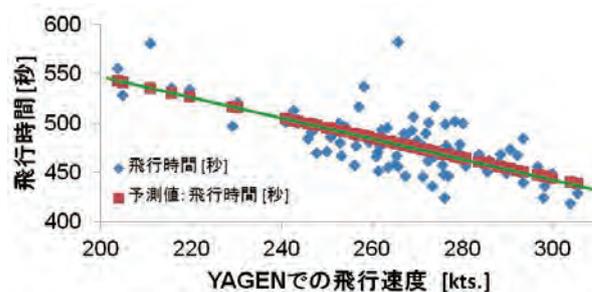


図 6 飛行速度と飛行時間の関係 ( $r=-0.69$ )

前後にいる航空機の飛行時間のバラツキの分布が独立で同じ正規分布に従うと仮定し、飛行時間のバラツキを仮に 35 秒と考えた場合の前後間隔のバラツキの 95%値は 99 秒となり、22.5 秒の場合のそれは 64 秒となる。

## 6. ハザード解析手法の検討

GSN チャートの作成後、効果的な運用が期待できると考えられた運用方式に対し、HAZOP (Hazard and Operability Studies)<sup>[17]</sup>を用いてハザード同定を行う。HAZOP は 1974 年に英国の Imperial Chemical Industries 社によって開発された化学プラントに対する安全性評価の手法である。ある状態からのズレを考えた「早い/遅い」、「高い/低い」などのガイドワードを用いることにより、ハザードを同定し易くしている。

ここでは、GSN チャートの作成を通じて、混合進入方式における管制手順の要件を開発する。その管制手順のフローチャートを作成し、そのフローチャートに HAZOP を適用することにより GSN チャート作成時に見過ごされたハザー

ドを同定する。

本研究では、ハザードの原因も考える。欧州（EUROCONTROL）ではHERA（Human Error Reduction in Air traffic management）-JANUS<sup>[18]</sup>と呼ばれる航空管制に特化した人的過誤の分析手法が開発されている。しかし、これは航空機運航に関する情報が少ない。米国（国防総省）では、HFACS（Human Factors Analysis and Classification System）<sup>[19]</sup>と呼ばれる119の航空機事故の分析が行われているが、こちらは航空機運航を主体とした人的過誤の分類となっている。どちらも一長一短あり、そのままでは我々の目的には適さないことが分かった。このため、双方の人的過誤の分類リストを併せたリストを作成した。現在、作成したリストを用いて、妥当と思われる人的過誤の原因が導き出せそうかどうかを確認中である。図7に当該リストのHAZOPワークシートへの適用例を示す。

			解析の出発点
故障原因/ヒューマンエラーの背後要因・環境条件等（ハザード）	エラータイプ	故障モード/ヒューマンエラー	正常状態からのズレ・異常
同右	同右	人的過誤および関連項目リストを参考に選定・記述（ヒューマンエラーの場合）	異常状況の具体的な記述 フローチャートに沿って可能な異常状態を抽出
Visibility of equipment / information / Lack of tense atmosphere in workplace	Slip error	Pilot type wrong key / push wrong button / with wrong information	FMSにRWY,STAR,TRANSITION,APPROACH等の入力ミス
Fatigue (Flight and Ground Schedule)	Inattentive (不注意、無頓着)	Make mistake / confusion	フライトプラン確認で見落とし

図7 HAZOPワークシートへの人的過誤リスト適用例

## 7. リアルタイムシミュレーション

航空管制のリアルタイムシミュレーションを行い、混合運用時に機数を増やした場合や混合率を変化させた場合に管制官のワークロードがどのように変化するかを調べる。また、従来

方式と混合運用方式でワークロードにどれだけの違いが出るのかなども計測し、GSNチャート内での証拠の提供を図る。

シミュレーションは、パソコンを用いた簡易形シミュレータで行う。図8に示すように、2台のパソコンを用意して、それぞれのパソコンに管制官役とパイロット役を割り当てる。



図8 シミュレーションの概要

管制官役は事前に用意したシナリオに従って画面に表示される交通流を処理し、評価を行う。管制官役としては、航空路管制官を含めた2人の場合や飛行場管制官も含めた状況も考えられるが、さまざまな制約からターミナル管制官役1人での実施を計画している。ただ、一度に一人であっても、シミュレーションの信頼度を上げるためには、異なる複数人の管制官役にシミュレーション実験に参加してもらう必要がある。

パイロット役は、管制官役が音声にて発する管制指示を聞き取って、それに対する応答を行いつつシミュレータに当該指示を入力する。また、必要に応じてパイロットリクエストも行う。

現在、シミュレータプログラムの動作チェックで確認された修正事項と管制経験者等からのコメント・追加要求への対応を行っている。シミュレーションの実施にあたっては、管制官のワークロードに応じたシナリオの作成が重要である。

## 8. まとめ

混合運用方式の安全性評価等について、Safety Case の考え方に基づいた GSN チャートの作成を中心にして行う方法を述べた。また、研究の進捗状況と現在までに得られた知見について述べた。

## 謝 辞

データ収集にご協力頂いた国土交通省航空局、東京航空交通管制部、航空交通管理センター、函館空港事務所の関係各位に感謝致します。

## 文 献

- [1] Aeronautical Information Manual Japan, 630, 国土交通省航空局監修, 日本操縦士協会, 2010 年前期版.
- [2] Required Navigation Performance Authorization Required (RNP AR) Procedure Design Manual, ICAO Doc 9905, First Edition, 2009.
- [3] Recategorization (RECAT) of Federal Aviation Administration (FAA) Wake Turbulence Separation Categories at Memphis International Airport, SAFO 12007, FAA, Dec. 2012.
- [4] 藤田 雅人, 天井 治, “混合進入方式とその安全性解析手法の初期検討”, 信学会 安全性研究会, SSS2013-1, 2013 年 5 月.
- [5] 天井 治, 藤田 雅人, 松岡 猛, “Safety Case の作成による RNP AR(特別許可を要する航法性能要件)進入方式等と従来方式との混合運用に関する安全性分析について”, 信学会 安全性研究会, SSS2014-3, 2014 年 4 月.
- [6] 家田 仁, “英国鉄道の技術的コントロールと規制緩和時代における技術行政の役割”, 運輸政策研究, 運輸政策研究所, Vol.1 No.2, 1998.
- [7] “大規模海上浮体施設の構造信頼性および設計基準研究委員会 最終報告書”, 日本船舶海洋工学会, Oct. 2009.
- [8] A guide to the Offshore Installations (Safety Case) Regulations 2005, Health and Safety Exec., 2006.
- [9] 茂野一彦, “自動車用機能安全規格 ISO 26262 の紹介”, MSS 技法, Vol.23, Mar. 2013.
- [10] THE PURPOSE, SCOPE, AND CONTENT OF SAFETY CASES, NS-TAST-GD-051, Office for Nuclear Regulation, An agency of HSE, May 2013.
- [11] EUROCONTROL, Safety Case Development Manual, DAP/SSH/091, Nov. 2006.
- [12] EUROCONTROL, ACAS II Post-implementation Safety Case, Ver.2.3, Nov. 2011.
- [13] 田口 研治, “機能安全とその保証に関する理論的枠組”, ZIPC WATCHERS Vol.14-5, 2012.
- [14] T. Kelly, Arguing Safety -A Systematic Approach to Managing Safety Cases, PhD thesis, University of York, Sep. 1998.
- [15] 天井 治, “RNP-AR 経路を飛行した航空機の飛行時間のバラツキ”, 信学会 2013 年ソ大, A18-1, 2013 年 9 月.
- [16] 天井 治, “RNP-AR 経路を飛行した航空機の飛行時間のバラツキ -その 2-”, 信学会 2014 年総大, A18-4, 2014 年 3 月.
- [17] Geoff Wells, HAZARD IDENTIFICATION AND RISK ASSESSMENT, Institution of Chemical Engineers UK, 1996.
- [18] EUROCONTROL, The Human Error in ATM Technique (HERA-JANUS), HRS/HSP-002-REP-03, 2003.
- [19] DoD HFACS Department of Defense Human Factors Analysis and Classification System A mishap investigation and data analysis tool, Department of Defense, 2005.