空港灯火による航空機の地上誘導自動化に関する 数値シミュレーション

正会員 青木 義郎* 正会員 谷口 哲夫*

正会員 入 倉 隆*

Numerical Simulation on Surface Guidance of Aircraft Automated by Airport Light

Yoshiro Aoki (Member), Tetsuo Taniguchi (Member),

Takashi Irikura (Member)

(Traffic Safety and Nuisance Research Institute)

ABSTRACT

A computer program was developed to simulate surface movement of aircraft in an airport. This program can automatically select the shortest route, taking account of the delay caused by the approach between aircraft. The following results were clarified by the use of the program:

- (1) Surface movement times calculated for the simulated automatic surface guidance system are not very different from those measured in a real system. The automatic surface guidance system operates as efficiently as a real system operating in the daytime and in good visibility, if block section composition and route selection method are good.
- (2) When traffic density is light, the majority of the average aircraft deceleration events in the automatic surface guidance system occur at the taxi holding positions. However, aircraft deceleration occurs frequently even at the stop bar positions other than the taxi holding positions and the total number of aircraft decelerations increases, as traffic density increases. Therefore, availability of stop bar will extend to all areas of airport surface, as traffic density increases.

1. ま え が き

我が国において航空機の利用者数は増加の一途をたどっており、空港での離発着数の増大や就航率向上のための低視程運航の要求が高まっている。こうしたことから、航空機のスポットと滑走路間での空港面誘導は主に管制官とパイロットとの音声連絡を情報伝達源として行われているが、これに加えて、灯火による視覚情報に基づいて航空機の地上誘導を制御することが望まれてきている。

実際に、ヒースロー空港ではストップバー灯や誘導路中心線灯を空港面全域にめぐらせ、それらを管制官が手動操作によりオンオフ制御させることにより、航空機同士の安全間隔保持や滑走路への誤進入防止、並びに地上走行ルート作成を行っている。また、成田空港においても一部の誘導路区間でストップバー灯の手動操作により交通制御がなされている。

こうして灯火の手動操作により航空機の地上誘導を制御することは、航空機地上誘導の安全性を高めるものであるが、一方で管制官のロードワークを増やすことにもつながる。管制官作業負担やヒューマンエラーを低減させるためにも、航空機の地上誘導を

計算機により自動化あるいは省力化させていくことが必要であると考えられる。しかしながら、事前に選定された経路に基づく航空機の走行シミュレーション²⁾や空港配置の性能評価を目的とした走行シミュレーション³⁾のプログラムの開発及びその実施は試みられているが、走行シミュレーションを用いて、地上走行を自動化させた時と実走行時との運航効率の比較検討を行ったり、交通密度が自動誘導システムに与える影響を解析した例は見あたらない。

本研究では、航空機同士の接近によって生じる遅延時間を考慮した最短経路選択を、Dijkstra法により随時自動的に行うことができる地上走行シミュレーションプログラムを開発した⁴⁾。なお、このシミュレーションプログラムは、空港レイアウト、運航スケジュール、運航方法の変更が容易に行うことができる。これを用いて、航空機の地上誘導を空港灯火により自動化させた場合と通常運用の場合とを比べて運航効率にどのような違いが生じるのかを解析した。また、交通密度が自動誘導システムにおける運航効率や灯火の運用にどのような影響を及ぼすのかを解析することができたので、これらの結果について報告する。

2. 航空機の誘導自動化手法

空港面での航空機の誘導を自動化するためには、
①検知センサによる航空機の位置情報の収集

*運輸省交通安全公害研究所

②航空機位置情報に基づく最適経路の自動選択
 ③航空機へ経路や進行禁止等の走行情報の提供
 が必要となる。①、③を行うためのシステム構成を2.1節で、②を行うためのコンピュータによる最適経路選択手法を2.2節で述べる。

2.1 システム構成

今回の計算機シミュレーションのモデルとなる誘導路交差点部での自動誘導システム構成図を図1に示す。同図に示されるように、誘導路を赤色停止灯列であるストップバーにより区切る閉塞区間を設ける。そして、センサにより各閉塞区間での航空機の有無を検知し、それをもとに経路を自動選択する。自動選択された経路は誘導路中心線灯（緑色進行灯）により、前方閉塞区間への進行禁止はストップバーにより、パイロットに通知する。

そして、このシステムを空港面全域に広げることにより、空港面全域での航空機の経路選択を自動化することが可能となる。なお、本研究では空港面の走行区域について経路選択を自動化するものとして、その走行状況について計算機シミュレーションを行う。

図2 成田空港誘導路ネットワーク図
 Fig. 2 Taxiway network chart of Narita airport.

択し、走行スケジュールを作成する。

②空港面に航空機が複数(M機)存在する場合

航空機がストップバー番号L(N-1)からL(N)に進行すると仮定した場合に、その時間中に他の航空機がL(N-1)→L(N)に対して走行が許可されない区間(同じ閉塞区間の使用、あるいは交差点がない1本の誘導路上での正対走行)に存在するかどうかを走行スケジュールより調べる。存在する場合には、先行する航空機に優先権を与えて後行機はその手前で待機させ、その走行時に発生するM機分全遅延時間($t_1 + t_2 + \dots + t_M$)を、そのi→j間の推定走行時間 $T_{L(N-1)L(N)} = G_{L(N-1)L(N)} / S_{L(N-1)L(N)}$ に加えて、

$$t'_{L(N-1)L(N)} = T_{L(N-1)L(N)} + (t_1 + t_2 + \dots + t_M) \times k \quad (1)$$

ただし、 $k = 1$ (追従 or 交差)、 12 (正対)。

(kは各種航空機接近(図4参照)に対する重み付け。)とし、 $t'_{L(0)L(1)} + t'_{L(1)L(2)} + \dots + t'_{L(\text{Last}-1)L(\text{Last})}$ が最小となる経路をDijkstra法により選択する。

3. 地上走行シミュレーション実験方法

本研究では、成田空港を例に、交通密度等により空港面での航空機の運航効率がどのように変化するのか走行シミュレーションを行う。

3.1 航空機の誘導自動化走行シミュレーション手法

航空機の地上走行シミュレーションのフローチャートを図3に示す。同図に示される走行経路新規作成や走行経路更新を2.2節に記述されている最適経路選択手法を用いて行うことにより、誘導を自動化させた時の走行シミュレーションが実施できる。

このシミュレーションの実施により、走行時間及び減速を必要とする航空機接近回数が解析でき、運航効率についての考察が可能となる。なお、航空機接近の種類は図4に示されるように分類する。

シミュレーションの時間刻みは1秒ごととし、誘導路は図2に示すようなネットワークになるようにストップバーにより80~300mの閉塞ブロックに分割し、前方閉塞区間侵入禁止時の減速開始はストップバー手前40m通過時に、経路の新規作成はゲート及び高速離脱誘導路侵入時に、経路の更新を行う場合にはストップバー手前70m通過時に行うものとする。なお、滑走路の占有は着陸機が離陸機に優先するものとする。

図1 自動誘導システムの構成図
 Fig. 1 Composition chart of automatic guidance system.

2.2 コンピュータによる最適経路選択手法

経路選択の自動化において最も重要となる現在位置から到着地点までの最短経路を求める手法は、最適経路選択の代表的な手法であるDijkstra法を変形することにより導き出した。

閉塞区間に分割されると、空港の誘導路は、図2に示されるようにストップバーに相当する閉塞区間境界線が節点、誘導路が枝となるネットワークで表現できる。そして、誘導路の形状は、ストップバー間を結ぶ誘導路の距離行列 G_{ij} で表現することができる。なお、 i, j はストップバー番号である。ストップバー番号 i, j 間が直接誘導路で結ばれていない場合は距離 ∞ 、 $i=j$ の時は距離0とする。そして現在位置 $L(0)$ から目的地 $L(\text{Last})$ までの最適経路は以下のようにして求める。

①空港面に航空機が1機しか存在しない場合

推定走行時間行列 $T_{ij} = G_{ij} / S_{ij}$ (ただし、 S_{ij} はストップバー番号 i, j 区間における推定速度行列)を使ってDijkstra法⁵⁾により、 $T_{L(0)L(1)} + T_{L(1)L(2)} + \dots + T_{L(\text{Last}-1)L(\text{Last})}$ が最小となる経路、すなわち現在位置から目的地(離陸機であれば誘導停止位置、着陸機であればスポットあるいはゲート)までの最短時間経路を選

図3 地上走行シミュレーション基本フローチャート
Fig. 3 Fundamental flow chart of surface movement simulation.

図4 航空機接近の種類
Fig. 4 Type of the approach between aircraft.

3.2 航空機走行データ

成田空港において、航空機の各区間での走行速度データをビデオ撮影により、各区間での走行時間、区間占有時間、スケジュール、減速を伴う航空機接近回数等の走行データを目視観測により収集した。調査は第2ターミナルビルが運用される前の平成2年8月1～3日の日中に行った。なお、走行シミュレーションもまたそれに合わせて、第2ターミナルビルの運用以前に対して解析を行うものとする。走行スケジュール及び航空機接近回数のサンプルとなる航空機数は240機（離陸機120機、着陸機120機）で収集時間は17時間、そして、この時の交通密度は平均17機/時（1滑走路あたりの、一時間に離発着する航空機数）、最大時26機/時であった。次章においてこの実走行時の走行時間及び航空機接近回数の結果と誘導自動化走行シミュレーションの結果とを比較する。なお、滑走路使用方向はRunway16方向、天気は晴で良視程な状態であった。

また、本走行シミュレーションを行うのに必要となる各区間での航空機走行速度を表1に、そして誘導路上以外での区間占有時間を表2に示す。

4. 走行シミュレーション結果及び考察

4.1 誘導自動化走行と実走行との比較

日中、良視程時での実走行値、並びに誘導を自動化させた時の

表1 航空機の走行速度
Table. 1 The speed of taxiing aircraft.

移動場所	速度(m/s)
誘導路(直線)	9.6 ± 2.9
誘導路(曲線)	5.8 ± 1.4
高速離脱誘導路	12.0 ± 5.0

注) サンプル数は10～20

表2 区間占有(走行)時間
Table. 2 Section occupation(movement)time.

	時間(秒)
滑走路占有時間	110 ± 20
滑走路中央→高速離脱誘導路入口の走行時間	33 ± 12
誘導停止位置→滑走路中央の走行時間	81 ± 20

注) サンプル数は18～110

地上走行シミュレーション（以下「自動化シミュレーション」という。）計算値をそれぞれ図5～7に示す。図5は着陸機に対する走行時間、図6は離陸機に対する走行時間、図7は各種航空機接近回数である。なお、走行時間とはゲートから滑走路中央までの走行時間であり、各種航空機接近回数とは全誘導路上での240機分の各種航空機接近回数の総数である。また、自動化シミュレーションにおける、各航空機の離着陸開始時刻、使用滑走路方向、各ゲート及び高速離脱誘導路の使用頻度は実走行時と同じにした。走行速度の平均値及び標準偏差、誘導路上以外での区間占有時間は表1、表2の平均値及び標準偏差に基づく乱数により与えた。

図5、図6に示されるように実走行値と自動化シミュレーション計算値を比較すると、走行時間平均値は非常に近い値を示しており、走行時間度数分布にも大きな違いは見られなかった。

このことから、閉塞区間の構成方法及び経路選択方法によっては、誘導を自動化しても運航効率を日中、良視程時の通常走行時より落とすことなく走行できる可能性があることが推定される。

図7に示される航空機接近回数は、自動化シミュレーション計算値の方が、追従の場合はやや多く、交差の場合はやや少なくなっている。これは、実際の走行での減速が、自動化シミュレーションの場合と比べて、追従の場合には航空機間隔が短い地点で、交差の場合には航空機間隔が長い地点で開始しているからではないかと推定される（シミュレーションでの減速開始はストップバー手前40m通過時）。

4.2 交通密度が運航効率や各ストップバーの運用に与える影響

航空機の地上誘導を自動化させる場合、他の航空機や占有中の滑走路に接近中の航空機は、誘導路全域に設置されたストップバーの赤色停止信号を見て減速そして停止を行う。このように地上

図5 着陸時走行時間度数分布
Fig. 5 Frequency distribution of surface movement time of the arriving aircraft.

図6 離陸時走行時間度数分布
Fig. 6 Frequency distribution of surface movement time of the departing aircraft.

図7 航空機接近回数
Fig. 7 The number of the approach between aircraft.

誘導を自動化させた場合の各ストップバー位置での赤色停止信号による平均航空機減速回数を図8、全誘導路での平均航空機減速回数を図9、全誘導路での減速や待ち時間によって生じる平均走行遅延時間を図10に示す。なお、シミュレーションは40,000機分、離陸機と着陸機の割合は1：1、着陸方向は、16方向：34方向＝

1：1とする。また、誘導停止位置（滑走路入り口部分の誘導路の停止位置）では離着陸機により滑走路占有中でなくても、航空機は一時停止することになっているが、この場合は減速回数に含めないものとした。

図8～図9に示されるように、交通密度が低い場合には、ストップバーの赤色停止信号による航空機1機あたりの平均減速回数のうち、その多くは誘導停止位置で占められ、交通密度が10(機/時)の時には誘導停止位置での占有率が約50%近くにまで達している。しかしながら、交通密度が高くなるにつれ、こうした減速は誘導停止位置以外でのストップバー位置でも数多く起こるようになり、その分布は誘導路全域に広がっていき、全体での減速回数もまた増大していく。したがって、ストップバーの有効性は交通密度が高いほど空港面全域に広がっていく。

また、平均走行遅延時間についても、交通密度が低い場合には、その多くは誘導停止位置で占められるが、交通密度が高くなるにつれ、誘導停止位置以外でのストップバー位置でも多くなることが図10に示されている。

図8 自動誘導システムにおける各ストップバー位置での平均航空機減速回数
Fig. 8 Average aircraft deceleration frequency at each stop bar position in the automatic guidance system.

図9 全誘導路上での平均航空機減速回数
Fig. 9 Average aircraft deceleration frequency on all taxiways.

図10 全誘導路上での平均航空機走行遅延時間
Fig.10 Average delay time of taxiing aircraft on all taxiways.

5. ま と め

本研究では、航空機同士の接近によって生じる遅延時間を考慮した最短経路選択を、Dijkstra 法により随時自動的に行うことができる地上走行シミュレーションプログラムを開発した。これを用いて、空港面に灯火や航空機センサを張り巡らせて閉塞区間を作成し航空機の地上誘導を自動化させた場合と、日中、良視程時の実走行の場合とを比べて運航効率にどのような違いが生じるのかを解析した。また、交通密度が自動誘導システムにおける運航効率や灯火の運用にどのような影響を及ぼすのかを解析した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 実走行値と自動化シミュレーション計算値とを比較すると、走行時間に大きな違いはない。閉塞ブロックの構成方法及び経路選択方法によっては、誘導を自動化することにより、運航効率を日中、良視程時の従来の走行時より落とすことなく走行できる可能性がある。
- (2) 交通密度が低い場合には、自動誘導システムにおける航空機1機あたりの平均減速回数のうち、その多くは誘導停止位置で占められる。しかしながら、交通密度が高くなるにつれ、減速は誘導停止位置以外でのストップバー位置でも数多く起こるようになり、全体での減速回数もまた増大していく。したがって、ストップバー灯の有効性は交通密度が高いほど空港面全域に広がっていく。

今後も、さらに空港の形状、運航方法、視程、スケジュール等と運航効率との関係について詳細な解析を行っていきたい。

参 考 文 献

- (1) 照明学会, 走行援助灯火システム調査特別研究委員会: 走行援助用灯火システム調査報告書(1986)
- (2) 航空振興財団: 新東京国際空港の誘導路およびエプロンにおける航空機誘導システムの調査研究(そのIII)(1975)

- (3) Thomet, M.A.: The Aircraft Movement Simulation Model, Proceeding of the 1983 Winter Simulation Conference pp.641-646(1983)

- (4) 青木他: 空港面における航空機の経路選択自動化シミュレーション, 交通安全公害研究所研究発表会(1991)

- (5) 伊理他: ネットワーク理論, 日科技連(1976)

(受付日1993年11月10日/採録日1994年1月18日)

あおき よしろう
青木 義郎 (正会員)

昭和39年12月13日生まれ。昭和62年3月横浜国立大学工学部電気光学科卒業。昭和63年4月運輸省交通安全公害研究所入所。現在に至る。航空照明の研究に従事。日本シミュレーション学会会員。

たにぐち てつお
谷口 哲夫 (正会員)

昭和24年9月28日生まれ。昭和51年3月富山大学大学院工学研究科機械工学修士課程修了。航空照明の研究に従事。日本機械学会会員。

いりくら たかし
入倉 隆 (正会員)

昭和31年5月12日生まれ。昭和54年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。昭和57年4月運輸省交通安全公害研究所入所。現在同研究所主任研究官。航空照明の研究に従事。日本光学会会員、北米照明学会会員。