

## 14. 羽田空港における地上走行のシミュレーション評価

航空交通管理領域 ※森亮太、青山久枝、山田泉

### 1. はじめに

昨今、航空交通管理の重要性が認識されてきており、時間を含む4次元トラジェクトリ管理がそのキーワードとなっている。近年の航空機は航法精度が向上しており、3次元トラジェクトリは高い精度で予測・追従ができるようになってきた。その一方で、時間の精度に関しては、風等不確定性の影響や、管制の指示、その他誤差等の影響で、まだ改善の余地がある。しかし、その中でも一番のボトルネックとして懸念されるのが、離着陸のフェーズである。大規模空港は慢性的に混雑しているが、1つの滑走路に離着陸できるのは同時に1機であり、2機の間には最低限の管制間隔も必要である。また、航空機のトラジェクトリは離陸から着陸までではなく、スポットからスポットまで、つまり空港内のタキシングも対象である。離着陸や空港内のタキシングは、管制官の指示およびパイロットの手動操作に頼っており、人間の制御に起因する不確定性が発生しやすい。また、乗客の搭乗遅れ等に起因する不確定性も存在する。さらに混雑時には、空港内で一種の渋滞現象が発生しており、地上における削減可能な待機時間を発生させているだけでなく、その予測困難性に拍車をかけている。空港面の交通流を予測するツールとして、Total Airspace and Airport Modeler (TAAM)[1]やSurface Management System (SMS)[2]といったものも存在するが、いずれも航空機のタキシング速度を等速と仮定しており、空港面交通を高い精度で推定することは期待できない。そこで本研究では、航空機のタキシングに焦点をあて、離着陸の航空機の特徴や、渋滞現象を考慮に入れ、より高い精度で空港面のトラフィックを推定する手法の提案を行う。

タキシングの高精度推定で重要となるのが渋滞現象のモデル化および不確定性の考慮だと考えられるため、本研究ではまず渋滞現象のモデル化の実現を目指す。ここでいう渋滞現象とは、

例えば以下のような現象を指している。航空機が同じスポットを90秒おきに出発し、離陸も90秒間隔で行われると仮定する。このとき、すべての航空機が同じようにタキシングを行えば90秒間隔でスムーズに離陸できるのだが、実際には前方機との間隔や不確定性等の理由により後続機が前方機に比べて少しずつ遅れはじめる。結果として90秒より長い間隔で離陸を行うことになり、この遅れが次々と後続機へ伝搬していくような過程である。しかしながら、渋滞現象そのものは自動車の分野では広く研究が行われている。有名なものとしては、最適速度モデル[3]、Nagel-Schreckenberg(NS)モデル[4]などがあげられる。これらのモデルでは、ドライバーは1つのあるルールに基づいて運転を行うと仮定し、交通量がある密度を超えた段階での渋滞の発生がモデル化が可能である。その中で、今回はセル・オートマトンをベースとしておりモデル化が比較的容易であるNSモデルを選択する。言うまでもなく、自動車の交通流と航空機の交通流はその密度から大きく異なるため、NSモデルをベースとして、空港面交通の特徴を組み込んでいくことで、空港面交通流のモデル化を実現する。

本論文では、まず提案する空港面交通モデルの説明を行い、そのモデルの有効性の検証を行う。そして、構築したモデルを用いて、実際にタキシング時間の削減がどの程度可能であるかの検討を行う。

### 2. NSモデルと空港面交通流の特徴

#### 2.1 セル・オートマトンとNSモデル

最初に、提案するモデルのベースとなるNSモデルについて説明を行う。NSモデルはセル・オートマトンをベースとしているが、セル・オートマトンとは、格子状のセルで構成されており、それぞれのセルが複数の状態量を持ち、その状態量をもとに単位時間ごとに状態量を更新して

いくといったモデルである。なお、時間・空間ともに離散化されている。セル・オートマトンをベースに自動車の交通流をモデル化したものが NS モデルである。その例を Fig. 1 に示す。

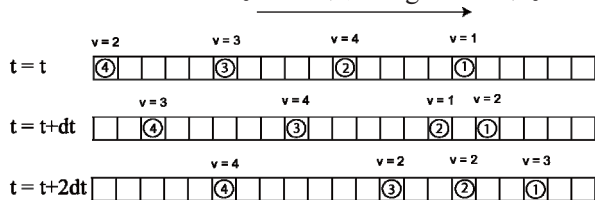


Fig. 1 セル・オートマトンと NS モデル

この例では、1車線の道路を仮定しており、道路が等間隔でセルに区切られている。セル内の番号は自動車を示しており、単位時間ごとに自動車が左から右へと移動していく様子が確認できる。その際、各単位時間に自動車は「速度」というパラメータを持っており、それに応じて移動を行っている。そのため、速度をいかに決定するかがモデル化の鍵だと言えるが、NS model は非常にシンプルなルールで構成されており、適用が簡易である[4]。

## 2.2 空港面交通流の特徴

NSモデルはシンプルかつ有用なモデルではあるが、直接空港面交通流に適用するのは難しい。空港面交通流は、それを特徴づける様々な要素があるからである。今回、その特徴として「離陸間隔」「航空機のダイナミクス」「交差点」「航空機間隔」「速度決定プロセス」の5つを挙げ、それぞれの特徴をパラメータ化し、モデルに組み込んだ。詳細については[5][6]を参照されたい。

### 1) 離陸間隔

空港面交通流として最も重要なのは離陸間隔である。自動車の交通流をモデル化する場合には、一般に無限長の車線を仮定する機会が多いが、離陸機の場合はスポットという入口と離陸滑走路という出口が存在する。航空機が順番に離陸する場合には、ある程度の時間間隔も必要であり、航空機は一般にこの離陸待ちで混雑する。また、滑走路使用は着陸機が優先されるため、同じ滑走路を離着陸機で共用する場合には、離陸待ち時間がさらに長くなる。

離陸間隔は一定の時間間隔で行われるもので

はなく、直前に離陸した航空機の後方乱気流の影響や離陸後の進路により変わってくる。また、離陸許可は音声通信で行われるため、うまく聞き取れなかった場合には時間間隔が長くなるという不確実性や、離陸許可が出ても実際に離陸を開始するタイミングはパイロットに委ねられていることに起因する不確実性も存在し、これら多くの要因を考慮する必要がある。今回は、以下の要素の考慮を行った。

- ・ 離陸機とその直前の離陸機の航空機サイズ

一般に、大型の航空機ほど大きな後方乱気流を発生し、小型の航空機ほど直前の航空機が発生した後方乱気流の影響を受けやすい。そこで、Table 1のように航空機のサイズを2つに分け、大型→小型、大型→大型の順に離陸する航空機ペアに対して、それぞれ、より大きな離陸間隔を設定する。

- ・ 離陸機とその直前の離陸機の離陸後の進路

二機の航空機が離陸後に続けて同方向に飛行すると、離陸後に航空機の間隔が狭まる可能性がある。そのため、続けて同方向に離陸をする際には、より大きな離陸間隔を設定する。

Table 1 航空機サイズ分類

航空機分類	例
大型	B747, B777, B767, A340, A300
小型	B737, A320

### 2) 航空機のダイナミクス

航空機は慣性が大きく、エンジンの反応は遅いため、航空機はタキシング中に急加速や急停止は一般に行わない。例えば自動車の場合は、交差点に入る直前でブレーキを踏めばよいが、航空機の場合は交差点の前から緩やかに減速を行う。そのため、加減速量の最大値を設定する。

### 3) 交差点

交差点において曲がる場合には減速する必要があるため、交差点通過時の速度を設定する。また、1つの交差点に同時に入れる航空機は一機のみであるため、これもルールに組み込む。

### 4) 航空機間隔

自動車の場合は、停止時の車間は約1メートルであるため、モデル化の際には1セルに1つの車を入れ、1セルに2つ以上の車が重複しなければ

よいという簡単なルールが適用できたが、航空機の場合は機体そのものが大きく、かつ、停止時の間隔も大きいので、最低近接距離を設定する。

### 5) 速度決定プロセス

どのように速度を決定するのかは、NSモデルと同様に非常に重要である。自動車のモデルでは、一般に直前の自動車との間隔と現在の速度を元に決定されるが、航空機の場合はエンジンの反応の問題もあり、むやみに間隔をつめるようなことはしない。直前の航空機だけでなく、その前の航空機も見ることができ、自動車よりも視野が広く、得られる情報は多いものと考えられる。今回は、フロアフィールドモデル[7]と呼ばれるモデルを用いて、直近の航空機との距離だけではなく、空港全体の航空機の相互作用により速度を決めることとする。

## 2-3 パラメータの設定

2-2節において抽出された空港面交通流の特徴は、パラメータ化してシミュレーションに用いられる。これらのパラメータの設定によって、シミュレーションが実際と一致するかが決まる。そこで、今回は実際のタキシングデータを模範となるデータ(教師データ)として、シミュレーションが実際とできるだけ一致するようなパラメータを設定した。パラメータの設定手法として、実数値遺伝的アルゴリズム[8]を用いた。

## 3. シミュレーション結果

### 3.1 タキシングデータの取得

シミュレーション手法の妥当性を検証するため、タキシングデータの取得を行った。今回は、東京国際空港(羽田空港)のマルチラテレーション[9]と呼ばれるシステムから得られるデータを用いた。マルチラテレーションは空港面の航空機を監視するためのシステムであり、航空機のトランスポンダが有効である場合に、航空機の座標を高精度(誤差がおよそ10m以下)で毎秒取得することができる。

2010年10月に羽田空港では4本目の滑走路が供用開始となり、滑走路の運用形態が大きく変

わったが、今回はそれ以前の旧運用形態(Fig. 2)を考慮するものとする。

離陸パターンとしては、風向きにより(1)離陸：A滑走路・着陸：C滑走路と(2)離陸：C滑走路・着陸：A滑走路の2通りが主に用いられているが、今回はその両者を考慮した。図において、水色と紫に色付けられた部分が今回考慮した誘導路である。タキシングデータとして、2010/4/19のデータを用い、6:30~22:30の間の離陸447機と着陸429機を対象とした。平均タキシング時間は5.62分、最大タキシング時間は22.16分であった。先に述べたように、航空機のトランスポンダの電源が入っていない場合にはデータを取得できないため、必ずしもすべての航空機のタキシングデータを取得できているとは限らない。

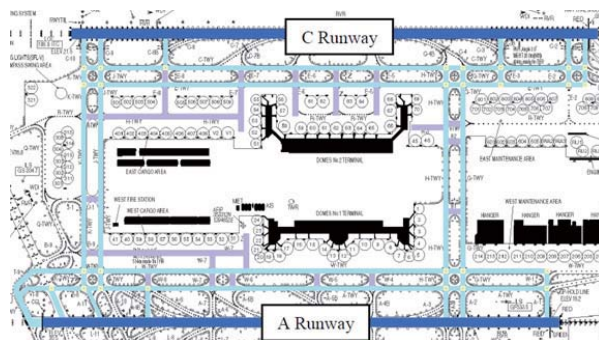


Fig. 2 羽田空港と考慮する誘導路

### 3.2 シミュレーション条件

今回は、誘導路のセルは5mの長さに設定し、シミュレーションの単位時間は5秒とする。追加の条件として、何らかの外的要因により(例えば滑走路一時閉鎖、当該滑走路に着陸機がいる場合)離陸間隔が長くなってしまったという状況が存在するため、そのような通常では考えにくい状況に関しては、進入禁止エリアの設定を行うことで問題の回避を行った。具体的には、離陸待ちの航空機がいる状況で、離陸間隔が2分30秒以上である場合は、何らかの外的要因が働いたと仮定し、その間滑走路から離陸できないように制限をかける。また、各航空機は実際通った誘導路と同じルートを走行するものとし、離陸順序も実際と同じとした。そのため、離陸順序を満たすように2つの誘導路が合流する手前で後続機が待機するという状況もシミュレシ

ョンしてある。

### 3.3 シミュレーション結果

シミュレーションを行うにあたって、最も重要なことは実際とシミュレーション結果がどの程度合致しているかということである。それを確かめるため、平均絶対誤差という指標を用いた。これは実際とシミュレーションの離陸時刻(離陸機)あるいはスポットイン時刻(着陸機)の差の絶対値の平均である。

その結果をTable 2に示す。平均絶対誤差は22.51[s]、最大誤差は130[s]であった。離陸機の平均絶対誤差の方が、着陸機に比べて大きくなっているが、それは以下の理由が考えられる。離陸機は平均タキシング時間が着陸機に比べて長いことや、シミュレーションにおいて重要な離陸間隔の影響を受けるのは離陸機のみであること、などである。しかしながら、離陸機においても平均絶対誤差は平均タキシング時間の5.38%となっており、推定結果は良好だと言える。

しかしながら、本研究は混雑時のタキシングの様子を再現することを目的としており、この指標のみでは実際に混雑時のタキシングが再現できているかどうかを判断することはできない。そこで、Fig. 3とFig. 4にそれぞれ非混雑時・混雑時の一部の時間帯を抜き出し、実際とシミュレーション時のタキシングの違いを示している。横軸は時間を示し、0:00から秒単位で示している。縦軸は離陸滑走路からの位置をセル数で示している。なお、各航空機が用いる誘導路は同じでないため、グラフ上2機の航空機が交差することは起こり得る。

Fig. 3に示される非混雑時においては、いずれの航空機もほぼ同じ速度でタキシングを行っている様子が確認できるが、シミュレーションでもその様子を再現していることが確認できる。その一方で、Fig. 4に示される混雑時には3機目

から、滑走路から100セル付近から徐々に減速している様子がわかる。その後減速は後続機に伝播し、最後の航空機はおよそ滑走路から150セルから減速を始めている様子が確認できる。この傾向は実際のデータとよくあっており、航空機の減速の仕方や減速の始まる地点を忠実に再現できている。

これらの結果から、本提案手法が混雑時・非混雑時に関係なく高い精度でタキシング時間を推定できていることがわかる。

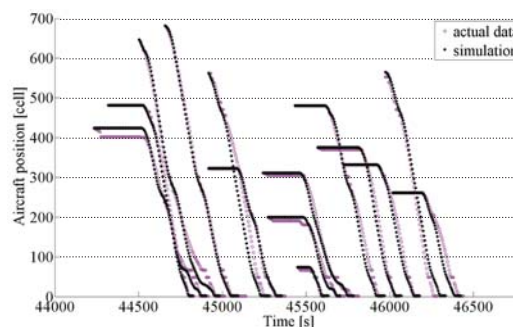


Fig. 3 タキシングシミュレーション (非混雑時: 12時頃)

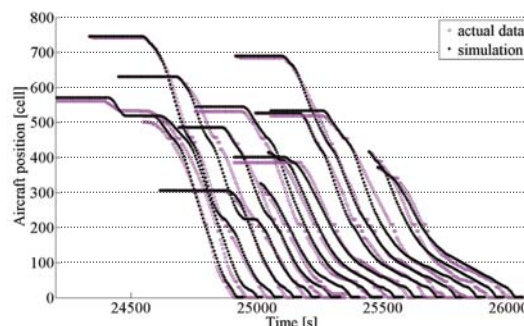


Fig. 4 タキシングシミュレーション (混雑時: 7時頃)

## 4. タキシング時間削減のシミュレータ評価

### 4.1 評価の前提

前章で有用性が確かめられたシミュレーショ

Table 2 シミュレーション結果

	Take-off			Landing			Total
	Total	C RWY	A RWY	Total	A RWY	C RWY	
平均絶対誤差 [s]	25.201	28.041	23.024	18.998	20.500	18.270	22.163
最大誤差 [s]	130	130	95	105	80	105	130
平均タキシング時間 [min]	7.80	7.98	7.66	3.35	3.94	3.06	5.62

ン手法を用いて、実際にタキシング時間をどの程度削減することができるかの検証を行った。今回は、その中でも最もシンプルな方法として、離陸機のスポットアウト時刻を遅らせるという手法による効果を検証する。一般に航空機は、車のアイドリングと同様にエンジンをかけているだけで一定の燃料を消費する。もし、スポットアウトを遅らせることができれば、エンジンをスタートさせる時間を遅らせることができ、結果として消費燃料削減につながる。

しかしながら、その計算のためには、以下のことを考慮する必要がある。

- スポットアウト時刻を遅らせても、離陸時間は変えない

これは大事なことだが、スポットアウト時刻を遅らせた結果、離陸時刻が遅れては本末転倒である。燃料消費削減だけでなく、スケジュールを守ることも重要である。そのため、離陸時間を変えない範囲でスポットアウト時刻を遅らせる。

- 他の航空機に影響を与えない

例えば、離陸機がスポットから出る際に、離陸機が出た後でないと、次の着陸機がスポットに入れないといった状況が存在し得る。この場合、離陸機のスポットアウト時刻を遅らせると、着陸機の到着スケジュールに影響を与えることになる。そのため、他の航空機に影響が出ない範囲でスポットアウト時刻の調整を行う。

つまり、今回はすべての航空機にとって少なくとも不利益が生じないという状況を考えるものとする。

## 4.2 計算方法

2章で構築したシミュレーション手法を用いる。スポットアウトを遅らせることができる最大時間(以下、削減可能時間と呼ぶ)の計算は、以下のような流れで実施する。

- $i=1$ で初期化 →B)
- $i$ 番目の離陸機のスポットアウト時刻を5秒遅らせる →C)
- シミュレーションを実施 →D)
- すべての航空機の離陸時刻・スポットイン

- 時刻に変更がある場合→E)、ない場合→B)
- $i$ 番目の離陸機のスポットアウト時刻を5秒戻し、 $i$ を1増やす。→B)

こうして得られたすべての離陸機のスポットアウト時刻が、最大限遅らせることができるスポットアウト時刻となる。

## 4.3 評価結果

削減可能時間の一覧をFig. 5に示す。それぞれの離陸機を離陸時間の早い方から順に並べ、それぞれの削減可能時間を示している。これらの平均は1.10分であった。

一般に滑走路の混雑時に削減可能時間は生じるため、削減可能時間が生じる時間帯は固まる傾向にあることがわかる。また、最大10分弱の削減可能時間があることもわかった。

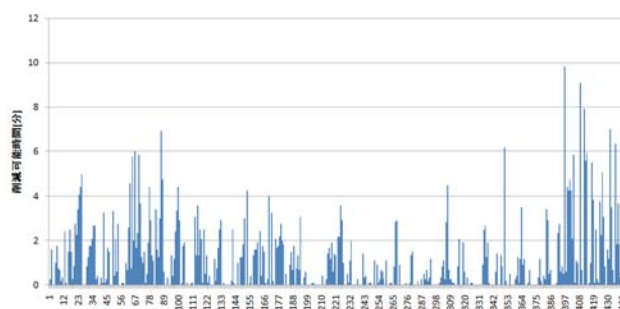


Fig. 5 離陸機ごとの削減可能時間の一覧

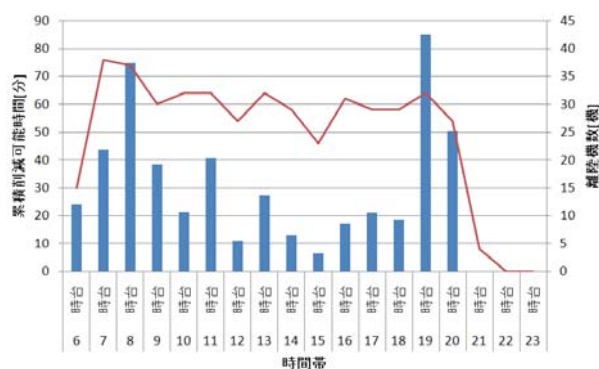


Fig. 6 時間帯による累積削減可能時間の分布

また、Fig. 6には、時間帯ごとの累積削減可能時間(青棒グラフ)とその時間帯の離陸機数(赤線)を示している。8時台と19時台にピークを迎えており、これらの時間帯では他と比べて離陸機数も多い傾向がある。しかしながら、削減可能時間は離陸機数と明らかな相関があるとは言えない。例えば20時台は離陸機数が少ないにも

関わらず、19時台、8時台に次ぐ削減可能時間があることがわかる。逆に離陸機数は7時台がピークであるにも関わらず、削減可能時間は8時台よりかなり少ない。

多くの航空機がほぼ同時刻にスポットアウトした場合には、削減可能時間は増え、例え離陸機数が多い時間帯でもスポットアウト時刻がうまく分散されている場合には削減可能時間は多くはならない。逆にいえば、スポットアウト時刻を管理することで、タキシング時間は減らせるということもできる。

## 5. まとめ

本論文では、空港面における航空機のタキシングのモデル化を行った。その際、特に混雑時において再現性が低くなることを懸念し、混雑時にも対応できるモデルの構築を目指した。モデルは、自動車の渋滞のモデルで有名なNSモデルをベースとし、航空機と空港の実態に合致するようモデルに改良を加えていく形で実現を行った。モデルの有用性は、実際の羽田空港の1日のタキシングデータを用いて検証を行い、平均で25秒以下の精度でシミュレーションを行うことに成功した。そして、そのシミュレーションモデルを用いて、離陸機の削減可能なタキシング時間の推定を行った。その結果、平均しておよそ1分削減できる可能性があることが示された。

しかしながら、今回は1日のデータしか用いていないため、他の日にも適用を行い、その有用性をさらに検証していく必要があると考えられる。また、羽田空港再拡張後にも本手法を適用していく必要がある。

もし日によってパラメータに差があるようであれば、その原因となる現象(例えば天候や風の状況など)をつきとめていく必要があると考えられる。また、一般にTaxi-out時間としてはプッシュバックから離陸までを対象としている場合が多く、今回はプッシュバックの部分は考慮していないため、今後考慮していく必要があるものと考えられる。

## 参考文献

- [1] Jeppesen, Total Airspace and Airport Modeler, <http://www.jeppesen.com/industry-solutions/aviation/government/total-airspace-airport-modeler.jsp>
- [2] Atkins, S., Jung, Y., Brinton, C., Stell, L., Carniol, T., and Rogowski, S., "Surface Management System Field Trial Results," *AIAA 4th Aviation, Technology, Integration and Operations Forum*, AIAA-2009-6241, 2009.
- [3] Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A., and Sugiyama, Y., "Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation", *Physical Review E*, Vol. 51, pp. 1035-1042, 1995.
- [4] Nagel, K., and Schreckenberg, M., "A cellular automaton model for freeway traffic," *J. Phys. I France*, Vol. 2, No. 2, pp. 2221-2229, 1992.
- [5] 森「混雑を考慮した空港面トラフィックのモデル化」飛行機シンポジウム, 1A1, 2010.
- [6] Mori, R., "Modeling of Aircraft Ground Taxiing at Congested Airport," *Proceedings of 3<sup>rd</sup> Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT)*, 2011.
- [7] Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., and Zittartz, J., "Simulation of Pedestrian Dynamics Using a 2-dimensional Cellular Automaton," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 295, No. 3-4, pp. 507-525, 2001.
- [8] Eshelman, L. J., and Schaffer, J. D., "Real-coded genetic algorithms and interval-schemata," *Foundations of Genetic Algorithms*, Vol. 2, pp. 187-202, 1993.
- [9] International Civil Aviation Organization, ICAO A-SMGCS manual, §4.2.2.