

航空滑走路スケジューリング

—複数滑走路を考える—

松枝 友佳, 高橋 里司

本稿では、空港での航空機の離陸、着陸のスケジュールを決定する航空滑走路スケジューリングを扱う。Furini et al. [12] が提案した 1 滑走路の航空滑走路スケジューリングモデルを用いた、東京国際空港を対象とした複数滑走路への適用について紹介する。

キーワード：航空滑走路スケジューリング, 複数滑走路, CPS 制約, 動的計画法

1. はじめに

航空業界において OR の応用はさまざまあり、本稿で取り上げる滑走路スケジューリングは重要な問題の一つである。航空業界の OR は、ヨーロッパやアメリカなど、航空輸送の盛んな地域で多く研究されている [1-4]。一方で、日本では鉄道の OR をベースとした、航空機材のスケジューリングが研究されている [5, 6]。近年、日本は政府の方針として、2020 年に訪日外国人数を年間 4,000 万人にすることを目標にしている¹。このようなことから、彼らの玄関口である空港に関する OR を積極的に研究することがますます必要となってくる。Bennell et al. [7] によると、15 年後には、ヨーロッパやアメリカの多くの空港で、航空交通の需要が空港の能力を大きく超えると言われている。日本でも、後に述べるが、東京国際空港（以降、羽田空港と呼ぶ）など主要な国際線玄関口では、滑走路の運用能力を超え始めている。このような状況から、ジョブスケジューリングやタイムテーブリングなどの航空会社独自の取り組みだけでなく、空港そのものの最適化が必要となる。本稿では、輸送遅延に直結するであろう滑走路のスケジューリングを扱う。

複数の航空機の離着陸に対して、本数や長さが限られた滑走路の割当てを行う問題を航空滑走路スケジューリング問題 [8] と言い、各航空機の使用予定時刻に対する遅れの最小化を目的とする。各航空機の使用予定時刻とは各航空会社が独自に決めている時刻表上での時

刻を指す。複数の航空会社で滑走路を共有するので滑走路側から見ると、複数の航空機の滑走路の使用予定時刻がある時刻に重なっているという事態が発生する。そのため滑走路の適切な運用が必要となる。航空滑走路スケジューリングは、古くから研究されている分野であり、着陸スケジューリングに関しては文献 [9, 10] を参照するとよい。

2000 年前後から日本国内では、航空業界の規制緩和に伴い LCC と呼ばれる格安航空会社が増え気軽に航空機を利用することができるようになり、国内外問わず航空路線数も発着数も増加している。東京にある国際空港である羽田空港の状況を見ると、2010 年頃 30.3 万回だった羽田空港の年間発着回数は 2014 年には 44.7 万回になった [11]。今後のさらなる需要増に対し、遠くない将来運用能力の限界が訪れる。

本稿では、羽田空港を対象とし、複数滑走路の空港に対する滑走路スケジューリングを行うことを目的とする。羽田空港の現在の滑走路運用について述べる。羽田空港の滑走路は全部で 4 本あるが、風向きや進路によって使用する滑走路は一意に決まる。現在の羽田空港の深夜・早朝時間帯以外の滑走路運用は図 1, 図 2 に示すように北風時北方面の航空機の離着陸は C 滑走路で行われ、北風時南方面への着陸は A 滑走路、離陸は D 滑走路で行われる。各航空機と滑走路の関係は 1 対 1 対応しているため、各滑走路に対して、割当てられている航空機の離着陸順と使用時刻を決める 1 滑走路のスケジュールを考えればよい。1 滑走路に対し航空滑走路スケジューリング問題を扱っている先行研究は数多く存在している。羽田空港の滑走路は 4 本だ

まつえだ ゆか, たかはし さとし
電気通信大学大学院情報理工学研究科
〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
mfmfyukachiy@gmail.com
stakahashi@uec.ac.jp

¹ 明日の日本を支える観光ビジョン構想会議：明日の日本を支える観光ビジョン。http://www.mlit.go.jp/common/001126601.pdf (2018 年 9 月 20 日閲覧)。

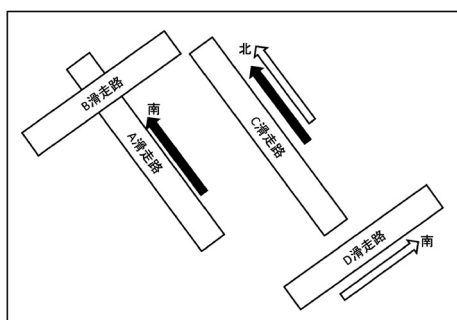


図1 羽田空港北風時の利用
白矢印は離陸を、黒矢印は着陸を表す。

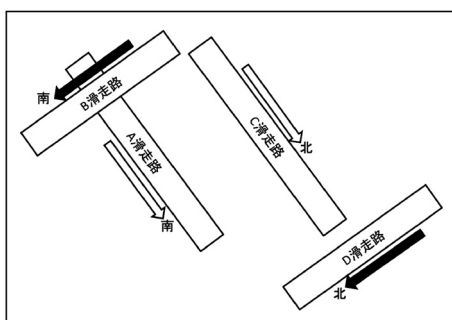


図2 羽田空港南風時の利用

が、先に述べたように、航空機の進路やそのときの風向きによって、航空機と滑走路は1対1対応しているので、1滑走路モデルを適用することができる。また、羽田空港の離着陸状況を見てみると10機の離着陸が同時刻に予定されている場合もあり航空機の過密さがかがえる。実際に現在の運用方法では北風、南風時ともに1時間当たり80回の離着陸が可能になっている。

2. 航空滑走路スケジューリングモデル

ある滑走路を使用予定の航空機の集合に対して滑走路を使用する順序と使用時刻を決定する問題を Aircraft Sequencing Problem (ASP) [12, 13] という。本節では、1滑走路のASPについてモデル化を紹介する。

空港の滑走路を離着陸のどちらかで使用予定のある航空機の集合を A 、スケジュール作成の対象となる時刻幅を T とする。各航空機 $i \in A$ は滑走路の使用を希望する目標時刻 $t_i \in T$ をもち、 t_i を含む区間 $[e_i, l_i]$ 内に滑走路を使用しなければならない time-window 制約をもつ。さらに航空機 $i \in A$ の次に航空機 $j \in A$ が滑走路を使用するとき、安全性の理由から最短で $s_{ij} \in \mathbb{R}$ だけ間隔を空けなければならない。これは、運行安全上必ず守らなければならない間隔であり、空港や国、州の規則、法律によって異なる。スケジューリングの結果、実際に航空機 $i \in A$ が滑走路を使用する時刻を x_i とする。 x_i が t_i より早ければコスト $g_i \in \mathbb{R}$ が、 x_i が t_i より遅ければコスト $h_i \in \mathbb{R}$ がそれぞれ単位時刻あたり発生するとする。本モデルは、目標時刻 t_i からのずれで生じる総コストの最小化を目的とする [7]。

ASPにおいて、総コストの削減を優先するあまり、滑走路使用の目標時刻 t_i の昇順に並べられた使用順序と著しく異なるスケジュールをしばしば出力することがある。たとえば、目標時刻順で3番目に位置してい

表1 航空機のクラスによる航空機間で必要な最小の間隔(秒) [15]

		後(j)						
		到着			離陸			
		H	L	S	H	L	S	
先(i)	到着	H	96	157	196	75	75	75
		L	60	69	131	75	75	75
		S	60	69	82	75	75	75
	離陸	H	60	60	60	90	120	120
		L	60	60	60	60	60	60
		S	60	60	60	60	60	60

た航空機が、ASPを解くことによって、10番目に滑走路を使用することになる場合がある。そのようなスケジュールは、時刻表などのあらかじめ決められた運行に支障をきたすことがあるため、望ましくない。

そこで、ASPにおいて、航空機の並びが目標時刻 t_i 順から著しく入れ替わってしまうようなスケジュールを組まないようにする Constrained Position Shifting (CPS) 制約を考慮する研究 [12-14] がある。ASPにCPS制約を付加した問題をASP-CPSと呼ぶ。CPSは次のように定義される。各航空機を目標時刻の昇順に並べたときの順序を $f_i (i \in A)$ とする。CSPとは、最終的な航空機 i の位置は $[f_i - v^-, f_i + v^+]$ の間に収まるようにする制約である。ただし、 v^-, v^+ は1や2, 3などの小さな定数である。たとえば、 $v^+ = v^- = 1$ のとき各航空機は前後一つ分しか順番を入れ替えることを許されない。このようにそれぞれの航空機の入替えを許容する限度を設ける。また、連続して滑走路を航空機が使用するとき、航空機間に必要とされる最小の間隔 (s_{ij}) について米国連邦航空局 [15] は航空機の大きさ (Heavy, Large, Small) によって表1のように定めている。

Balakrishnan and Chandran [13] は、ASP-CPSに対して、メイクスパン (ここでは、与えられたすべての

航空機の離着陸を完了させる時間)の最小化を目的としたモデル化を行っている。各航空機はtime-window制約とCPS制約に加えて、ある航空機は必ずほかの航空機よりも前に離(着)陸しなければならないとする先行条件を考慮している。文献[13]では、航空機の数多項式サイズのCPSネットワークと呼ばれるグラフを用いた動的計画法により、1滑走路の効率的なスケジューリングを行う新しいアルゴリズムを提案している。実社会ではアトランタ空港やダラス・フォートワース国際空港、ラガーディア空港等離着陸別々の滑走路を使用しており、離着陸それぞれを別々に考えるスケジューリング問題は重要である。

ある航空機 $i \in A$ が、時刻 t に滑走路を使うときに発生するコストを

$$c(i, t) = g_i \max(0, t_i - t) + h_i \max(0, t - t_i)$$

と定義する。Furini et al. [12] は航空機ごとに発生するコストの和を最小化することを目的とし、混合整数線形計画問題への定式化と動的計画法による解法を提案している。このとき、目的関数は

$$\min \sum_{i \in A} c(i, x_i)$$

となり、この目的関数を最小化する $x = [x_i]$ (実際に各航空機が滑走路を使用する時刻)を決定する。ASPの混合整数線形計画問題への定式化はBeasley et al. [16]により示された。それをFurini et al. [12]はASP-CPSに拡張している。ここで変数 δ_{ij} を

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (\text{航空機 } i \text{ が } j \text{ の前に滑走路を使う}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

のように定義する。また α_i, β_i を $\alpha_i = \max(0, t_i - x_i)$, $\beta_i = \max(0, x_i - t_i)$ とする。ASP-CPSは以下のように定式化される。

$$\text{最小化} \quad \sum_{i \in A} (g_i \alpha_i + h_i \beta_i)$$

$$\begin{array}{ll} \text{条件} & e_i \leq x_i \leq l_i & \forall i \in A \\ & \delta_{ij} + \delta_{ji} = 1 & \forall i, j \in A \\ & x_i + s_{ij} - M(1 - \delta_{ij}) \leq x_j & \forall i, j \in A \\ & \alpha_i \geq t_i - x_i & \forall i \in A \\ & 0 \leq \alpha_i \leq t_i - e_i & \forall i \in A \\ & \beta_i \geq x_i - t_i & \forall i \in A \\ & 0 \leq \beta_i \leq l_i - t_i & \forall i \in A \\ & t_i - \alpha_i + \beta_i = x_i & \forall i \in A \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \mathcal{F}_{\min}(i) \leq & \\ \sum_{j \in A \setminus \{i\}} \delta_{ji} + 1 \leq \mathcal{F}_{\max}(i) & \forall i \in A \\ \delta_{ij} \in \{0, 1\} & \forall i, j \in A \end{array}$$

ここで M は大きな正の定数である。 M は $l_i + s_{ij} - e_j$ とすることができるので、任意の相異なる $i, j \in A$ に対し、 $x_i + s_{ij} \delta_{ij} - (l_i - e_i)(1 - \delta_{ji}) \leq x_j$ と書き換えることができる[16]。航空機 $i \in A$ に対して $\mathcal{F}_{\min}(i)$, $\mathcal{F}_{\max}(i)$ はそれぞれ、 i が割当てられ得る最小の位置、最大の位置を表す。

3. 動的計画法

Furini et al. [12] は航空機 i を含まない A の部分集合 S のすべての航空機が最適な並びで滑走路を使用した後に、ある時刻 $t \in [e_i, l_i]$ に航空機 i が滑走路を使うような状態を (S, i, t) と表し、このときの評価値を

$$\mathcal{D}(S, i, t) = \min_{(i', t') \in \mathcal{Q}(i)} [\mathcal{D}(S \setminus \{i'\}, i', t') + c(i, t)]$$

とする。ただし、 $\mathcal{Q}(i) = \{(i', t') \in S \times T \mid t \geq t' + s_{i'i}\}$ である。すべての状態 S, i, t に対して $\mathcal{D}(S, i, t)$ を計算すると、最後の航空機を挿入する状態、すなわち $|S| = |A| - 1$ となる状態の中で、 \mathcal{D} の最小値がこの問題の最適値となる。Furini et al. [12] はこの動的計画法を提案している。

この動的計画法は、状態数が膨大であり、効率化のため、考慮する必要のない状態を削減する必要がある。大きく分けて二つ方法があり、一つはtime-windowの縮小、もう一つが状態空間の大きさの削減である。航空機 i の前もしくは後に必ず割当てべき航空機の集合をそれぞれ $P^-(i), P^+(i)$ とする。また p_i を航空機 i が滑走路を使用する時間とする。このとき、time-windowの縮小は次のように行う。

$$\begin{array}{l} P^-(i) = \{j \in A \mid e_i + p_i + p_j > l_j\}, \\ P^+(i) = \{j \in A \mid e_j + p_j + p_i > l_i\}. \end{array}$$

この $P^-(i), P^+(i)$ を用いて航空機 i のtime-window $[e_i, l_i]$ を、航空機 i が $j \in P^-(i)$ の以前に割当てられないときは $e_i = \max[e_i, \max_{j \in P^-(i)} [e_j + p_j]]$, i が $j \in P^+(i)$ 以前に割当てられるときは

$$l_i = \min[l_i, \min_{j \in P^+(i)} [l_j - p_j]]$$

とする。

Furini et al. [12] はGelinas and Soumis [17] が行ったように、考慮しなければならない状態 (S, i, t) の数

を抑えるために完了上界 $C(S, i, t)$ と目的関数値の上界 z_{UB} を用いる。完了上界とは状態 (S, i, t) においてそれ以降の航空機を目標時刻 t_i の昇順に滑走路を使用させたときに発生するコストであり、

$$C(S, i, t) = \sum_{j \in A \setminus (S \cup \{i\})} c(j, \max\{t_j, \tilde{t}\}),$$

と表す。ただし、

$$\tilde{t} = t + \left[\min_{i, j \in A} s_{ij} \right] \max \{f_j - v^- - |S \cup \{i\}|, 1\}.$$

であり、航空機 i の次に航空機 j が滑走路を使用するときの最小時刻を表す。

また、上界 z_{UB} として航空機を目標時刻 t_i の昇順で s_{ij} の制約を守るように α を定めたときに発生するコスト、もしくは航空機の並びをタブー探索により決定し同様に α を定めたときに発生するコストのどちらかを用いている。

本稿では、上界 z_{UB} を求めるための、2-OPT 法を紹介する。いくつかのジョブがありそれぞれ異なる納期と処理時間を持ち、処理順が与えられる。それぞれの納期から前後にずれた分のコストが発生するとき、コストの和が最小となるように処理時刻を決定する問題を TET (Total Earliness and Tardiness) と呼ぶ [8]。この問題を解くことで、航空機の順番が与えられたときのコストの和の最小値を求める。このとき、TET の最適値は ASP-CPS の上界となる。ジョブを航空機、処理時間を各航空機間の s_{ij} 、納期を t_i とする。このとき、TET は次のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \text{最小化} \quad & \sum_{i \in A} z_i \\ \text{条件} \quad & x_j + s_{j,j+1} \leq x_{j+1} \quad \forall j \in A \\ & z_j \geq g_j(t_j - x_j) \quad \forall j \in A \\ & z_j \geq h_j(x_j - t_j) \quad \forall j \in A \\ & x_j \geq 0 \quad \forall j \in A \end{aligned}$$

上界を求めるアルゴリズムでは、航空機の並びを入れ替える 2-OPT 法を行い、その評価として、この線形計画問題を解く。これらを十分に繰り返すことで、上界を求める。

4. 複数滑走路への適用

本稿では、羽田空港のような複数滑走路のスケジューリングを Furini et al. [12] の 1 滑走路モデルを用いて行う。羽田空港は 4 本の滑走路を離発着の方面および風向きによって割当てている。北風時の運用は、次のよ

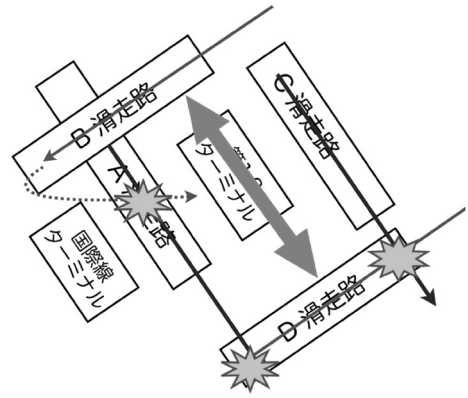


図3 南風時の滑走路運用

うになっており、B 滑走路を使用しないことがわかる。

- A 滑走路：南方面着陸
- C 滑走路：北方面離着陸
- D 滑走路：南方面離陸

また、滑走路間で以下のような決まりがある。

- ・ A 滑走路と C 滑走路は同時離着陸可能
- ・ C 滑走路に着陸予定の機体が D 滑走路を通過している間 D 滑走路からの離陸は不可能
- ・ C 滑走路から離陸した機体が東京湾上空を飛行している間 D 滑走路からの離陸は不可能

この決まりから滑走路 A はほかのどの滑走路の影響も受けず与えず、滑走路 C と滑走路 D はお互いに影響を及ぼし合っていることがわかる。そこでまず対象の航空機の集合を滑走路 A を使用する航空機の集合と、滑走路 C もしくは滑走路 D を使用する航空機の集合にそれぞれ分け、それぞれに対して航空機のスケジューリングを行うことで、複数滑走路の問題を解決する。

一方、南風時の滑走路運用は次のようになっている。

- A 滑走路：南方面離陸
- B 滑走路：南方面着陸
- C 滑走路：北方面離陸
- D 滑走路：北方面着陸

また、B 滑走路と D 滑走路は十分に距離が離れているため、同時使用が可能であるが、図 3 のように、A 滑走路と B 滑走路がタクシング時に、D 滑走路と A、C 滑走路が離着陸時に互いに干渉し合うため、運用上は難しい。そこで、四つの滑走路をバラバラにスケジューリングするのではなく、4 本の滑走路を同時にスケジューリングする工夫を行う。具体的に、航空機の最小間隔 s_{ij} を表 2 のように設定することで、互いの干渉を考慮し、1 滑走路モデルで 4 滑走路のスケジューリングを行うことができる。表 2 では、ある航空機が A 滑走路を

表2 滑走路ごとの最小間隔 [min.]

	A	B	C	D
A	2	1	1	1
B	1	2	1	0
C	1	1	2	1
D	1	0	1	2

表3 単位コスト

ランク	コスト
S (small)	1
M (middle)	3
L (large)	5

使用し、次に別の航空機が B 滑走路を使用する場合、少なくとも 1 分の間隔を空ける必要があることを示している。ここでは、B 滑走路と D 滑走路は十分に距離が空いているため、最小間隔は 0 分とし、同時離着陸にも対応している。このような最小間隔の調整による 1 滑走路モデルの複数滑走路への適用法は、羽田空港に限らず、オープンパラレル方式（並行する滑走路間の距離が十分に長い滑走路運用方式）の複数滑走路をもつ成田国際空港や、関西国際空港などのほかの空港へ応用可能である。

5. 実験

本稿では、実際の羽田空港の時刻表²を用いてスケジューリングを行うが、目標時刻は各航空会社が出している離着陸の予定時刻、コストは用いられている機体の大きさでランク (Small, Middle, Large) を決定し、表 3 のように定める。また変更時刻は、遅延などによって予定時刻から変更された時刻で、実際に航空機が搭乗ゲートに到着（を出発）した時刻である。次の二つの方法 (1)(2) でスケジューリングを試みる。

- (1) すべての航空機 $i \in A$ に対して、目標時刻 t_i の昇順に並べ、time-window を先頭の航空機の t_1 から 30 分引いた時刻 (e_i) から最後の航空機の $t_{|A|}$ に 30 分足した時刻 (l_i) とし、 t_i の昇順から航空機を加えていく動的計画法を開始する。
- (2) 離陸する航空機の e_i と着陸する航空機の l_i をそれぞれ公表されている変更時刻とし、変更時刻の昇順から航空機を加えていく動的計画法を開始する。

表4 実験 3: MILP と動的計画法の各実行時間

航空機の数	MILP (sec.)		動的計画法 (sec.)	
	A	C, D	A	C, D
10(6)	0.03	0.00	0.051	0.021
20(9)	0.05	0.14	0.099	0.193
30(15)	2.47	22.31	0.460	0.952
40(17)	8.37	TL	0.694	4.614
50(19)	7.43	TL	0.984	10.417
60(24)	9.24	TL	1.278	13.097

方法 (1) は時刻表どおりに運用が行われた場合であり、方法 (2) は実際に起きた遅延に準拠した場合のスケジューリングである。

フライトレーダーの情報 [18] をもとに公開されている実際に各航空機が滑走路を使用した時刻と、方法 (1)(2) それぞれにおいて動的計画法により求解した最適解 (\mathbf{x}) との比較を行った。CPS 制約は $v = 3$ とした。すべての航空機に対して s_{ij} は風向きによって変更する。北風時には、すべての航空機の最小間隔を $s_{ij} = 2$ とし、南風時には、表 2 を使用する。

5.1 北風時のスケジューリング

まず、北風時のスケジューリングを行う。羽田空港 2017 年 1 月 19 日午前 9:00 から 10:00 の間に離着陸が予定されている計 60 機の航空機について動的計画法を適用しスケジューリングを行った。表 4 に ASP-CPS に定式化して解いた場合の計算時間と方法 (1) の場合の動的計画法の滑走路別の実行時間をまとめた。航空機の数 () 内は滑走路 A を利用する航空機の数である。また、表中の“TL” は計算時間が 12 時間を超え、途中で計算を打ち切ったことを表す。

方法 (1) は一切の遅延を想定していないスケジューリングであるが、予定時刻から最大で 9 分滑走路使用時刻がずれる航空機も存在する。方法 (1) において、設定した time-window では、最適解での時間幅が [8:54, 9:38] と、元の予定時刻の時間幅 [9:00, 9:35] よりも大きく、羽田空港の時刻表の過密さがうかがえ、羽田空港の運用能力が現時点で限界に近いことがわかる。また、離陸する航空機の変更時刻と滑走路使用時刻をそれぞれ見ると、変更時刻から滑走路使用時刻まで最短で 9 分の航空機もあるがおおよそ 15 分から 20 ほどの時間の空きが発生している。しかし方法 (2) の結果の離陸する航空機を見ると、変更時刻からすぐに滑走路を使用できるようなスケジュールを組むことができた。また変更時刻、滑走路使用時刻をともに見ると大幅に予定時刻からずれている便がいくつかある。電車と同様に航空機も事故や天候により大幅な遅延が発生

² <https://www.tokyo-airport-bldg.co.jp/flight/> (2017 年 1 月 29 日閲覧)

表5 2017年5月1日と4日のコスト比較

	動的計画法	実際
5月1日(563便)	1341	29043
5月4日(568便)	1388	12473

し得る。そこで変更時刻、滑走路使用時刻でそれぞれコストの計算を行った。すると、変更時刻のコストは1696、滑走路使用時刻のコストは2315となった。方法(1)の最適値を1としたとき方法(2)の最適値の相対比は3.4、変更時刻のコストの相対比は4.3、滑走路使用時刻の相対比は5.9である。遅延が起きた際にも最適なスケジューリングを行うことができればそれだけコストを抑えることができるとわかる。

5.2 南風時のスケジューリング

次に、南風時のスケジューリングを行う。羽田空港2017年5月1日の全563便の航空機および、同年5月4日の全568便について方法(2)で動的計画法を適用しスケジューリングを行った。いずれも、6分程度で求解ができている。このときの総コストを表5に示す。結果を見ると、いずれの実験でも、総コストを10分の1から20分の1程度に削減できている。このときの実際のスケジュールは、ゴールデンウィーク中ということがある、大幅な遅延などが発生していた。一概に比較はできないが、実験から、羽田空港では、日常的に遅延が発生していることがわかる。また、現在羽田空港では、滑走路の同時使用を行ってはいないが、実験では、いくつかの航空機の同時離陸が行われていた。これにより、同時離着陸をうまく考慮できれば、運用能力の改善につながると思われる。

6. おわりに

各航空機の滑走路の使用予定時刻に対し、目標時刻からの前後のずれによって発生するコストの最小化を目的とする航空滑走路スケジューリング問題を紹介した。また、CPS制約付きの1滑走路モデルに対し、動的計画法および、新たな上界の求解法を紹介した。適用実験では、複数滑走路をもつ羽田空港に対し、複数滑走路に1滑走路モデルを適用できることを示した。実験結果から、羽田空港を利用する各航空会社の時刻表は羽田空港の滑走路運用の能力を超えていることを確認できた。動的計画法は、 s_{ij} が航空機によって異なる場合や、よい上界を与えられない場合などで極端に実行時間が長くなる。また、スケジューリング対象の航空機の数が少ない場合はMILPに定式化して解いた方が速いこともある。しかし、航空機の数が多い場合

やスケジュールが過密な場合、定式化をして解くには限界があり、動的計画法の利用が有用であることがわかった。

本稿では外部性として、風向きしか考慮しなかったが、その他の気象条件や、国際線の航空機の考慮を行う必要がある。たとえば、悪天候時の運用など、空港によって異なるため、実問題解決のためには、それらの考慮が必ず必要となる。今後ますます航空機利用の増加が見込まれるため、早急に取り組む予定である。

謝辞 本研究は科研費 基盤B(15H02972)および、基盤C(17K00031)の支援を受けている。

参考文献

- [1] F. Neuman and H. Erzberger, "Analysis of delay reducing and fuel saving sequencing and spacing algorithms for arrival traffic," Technical report, TM-103880, Ames Research Center, 1991.
- [2] G. F. Newell, "Airport capacity and delays," *Transport Science*, **13**, pp. 201-241, 1979.
- [3] W. E. Moudani and F. Mora-Camino, "A dynamic approach for aircraft assignment and maintenance scheduling by airlines," *Journal of Air Transport Management*, **6**, pp. 233-237, 2000.
- [4] J. A. D. Atkin, E. K. Burke, J. S. Greenwood and D. Reeson, "A metaheuristic approach to aircraft departure scheduling at London Heathrow airport," In *Electronic Proceedings of the 9th International Conference on Computer-aided Scheduling of Public Transport*, pp. 235-252, 2004.
- [5] 安達統衛, 佐藤眞木彦, 小林重信, "航空機スケジューリング問題への遺伝アルゴリズムの応用," 電子情報通信学会論文誌D, **84-D1(6)**, pp. 888-895, 2001.
- [6] 田村亨, 稲野茂, "地域航空における機材の最適スケジューリング," 土木計画学研究・論文集, **5**, pp. 155-162, 1987.
- [7] J. A. Bennell, M. Mesgarpour and C. N. Potts, "Airport runway scheduling," *A Quarterly Journal of Operations Research*, **9**, pp. 115-138, 2011.
- [8] M. L. Pinedo, *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*, 5th edition, Springer, 2016.
- [9] H. N. Psaraftis, "A dynamic programming approach to the aircraft sequencing problem," Technical report, R78-4, Flight Transportation Laboratory, 1978.
- [10] H. N. Psaraftis, "A dynamic programming approach for sequencing groups of identical jobs," *Operations Research*, **28**, pp. 1347-1359, 1980.
- [11] 国土交通省航空局, "羽田空港発着枠の現状と検討課題," (2013年7月)
- [12] F. Furini, M. P. Kidd, C. A. Persiani and P. Toth, "State space reduced dynamic programming for the aircraft sequencing problem with constrained position shifting," *Lecture Notes in Computer Science*, P. Foulhoux, L. Gouveia, A. Mahjoub and V. Paschos (eds.), Springer, pp. 267-279, 2014.
- [13] H. Balakrishnan and B. G. Chandran, "Algorithms for scheduling runway operations under constrained position shifting," *Operations Research*, **58**, pp. 1650-

1665, 2010.

- [14] R. Dear, “The dynamic scheduling of aircraft in the near terminal area,” Technical report, R76-9, Flight Transportation Laboratory, MIT, 1976.
- [15] Federal Aviation Administration, “Order 7110.65P: Air Traffic Control Document Information,” https://www.faa.gov/regulations_policies/orders_notices/index.cfm/go/document.information/documentID/13937 (2017 年 11 月 12 日閲覧)
- [16] J. Beasley, M. Krishnamoorthy, Y. Sharaiha and D. Abramson, “Scheduling aircraft landing—the static case,” *Transportation Science*, **34**, pp. 180–197, 2000.
- [17] S. Gelinas and F. Soumis, “A dynamic programming algorithm for single machine scheduling with ready times,” *Annals of Operations Research*, **69**, pp. 135–156, 1997.
- [18] Flightradar24 LIVE AIR TRAFIC, <https://www.flightradar24.com/-7.77,6.47/3> (2017 年 1 月 24 日閲覧)