

## 5. 出発時刻調整による空港面交通の滞留軽減効果の推定

航空交通管理領域 ※山田 泉, 住谷 美登里, 青山 久枝, マーク ブラウン

### 1 はじめに

#### 1.1 背景

今後の航空交通量の増加に向けて、航空交通の効率性や定時性の向上のための対応策が求められている。この対応策の一つとして、欧米では、航空交通流管理の考え方を空港面に拡張して、スポット出発時刻の調整によって空港面の滞留の軽減や離陸の定時性向上を図る空港面交通管理方式が導入されている<sup>[1]</sup>。空港面交通管理方式の導入された空港では、本方式が空港面運用の効率化や定時性の向上に有効であることが報告されている<sup>[2][3][4]</sup>。

日本においても、国土交通省航空局の長期ビジョン CARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)では、首都圏をはじめとする混雑空港におけるボトルネックの解消を課題の一つに挙げている<sup>[5]</sup>。また、羽田空港では、スポット出発時刻の調整について試行運用が行われている<sup>[6]</sup>。

#### 1.2 目的

当所では、日本の主要な国際線ハブ空港である成田国際空港（以下、成田空港と称する）について、欧米の空港面交通管理の考え方を参考に、航空機の地上走行の滞留を軽減する手法を検討している。

空港面交通管理の手法を適用した場合に見込まれる滞留軽減効果の試算として、米国で提案されている N-control（走行機数調整）<sup>[7]</sup>について、成田空港の地上走行の特性に合わせた条件を付加して適用した場合の検討結果を述べる。

### 2 成田空港の特徴

成田空港では、長さの異なる 2 本の滑走路（A 滑走路：4,000m、B 滑走路：2,500m）を同時に運用している。交通量については、夕方は出発、到着ともに繁忙となる。また、出発便の約 9 割が A 滑走路を用いるため、出発便の多

い時間帯には A 滑走路周辺に長い待ち行列が形成される。

また、2 本の滑走路の間には、210 個程度のスポットがあり、常時 160 個程度が使用されている。また、エプロン内の走行経路が袋小路状になっている箇所がある。このような場所では、ある航空機のスポットの出入りが他の航空機のスポットの出入りを遮る場合がある。このように、エプロンについては、レイアウトの複雑さにより交通流が複雑になっている。

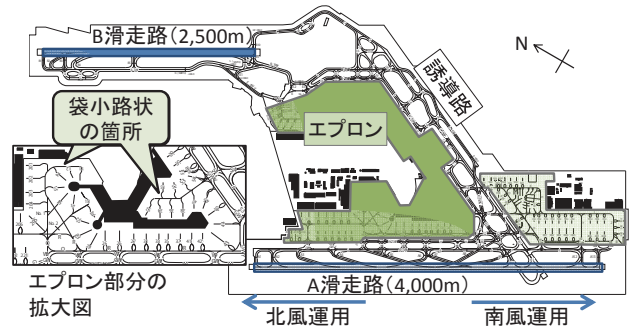


図1 成田空港のレイアウト

### 3 空港面交通管理手法について

#### 3.1 N-control の概要

米国で提案されている N-control<sup>[7]</sup>は、下記の手順により、滑走路へ向かう出発便の走行機数を調整することで、空港面における出発便の混雑を抑制する手法である。

1. 出発便がブロックアウトを要求した時点で、既に地上走行中の出発便数  $N$  を数える。
2.  $N$  が閾値  $N_{ctrl}$  を下回っている間は、即時にブロックアウトさせる。
3.  $N$  が閾値  $N_{ctrl}$  以上となった場合はスポットで待機させる。
4. 地上走行中の出発便のうち 1 機が離陸することによって  $N$  が減少して  $N_{ctrl}$  を下回ったとき、スポットで待機している出発便のうち最初の 1 便をブロックアウトさせる。

N-control によって出発便の滞留が軽減される仕組みについて、模式図 2, 3 を用いて説明

する。図 2, 3 では、出発便 1 便の運航を、ブロックアウトで始まり離陸で終わる 1 本の横棒で示し、それぞれの横棒をブロックアウト順に下から上へ並べて表示したものである。図 2 は、ブロックアウトが 1 分おきに要求され、全ての出発便が 16 分で滑走路までの非滞留の走行を行い、2 分間隔で離陸する場合を仮定して、混雑による出発便の走行時間の増加を模式的に示している。図 2 から、ブロックアウトが離陸よりも頻繁に行われる場合には、後の出発便ほど離陸待ち時間が長くなる傾向が観察される。

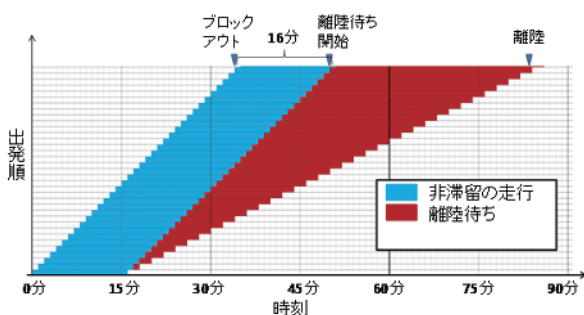


図 2 離陸待ち時間が増加する状況の模式図

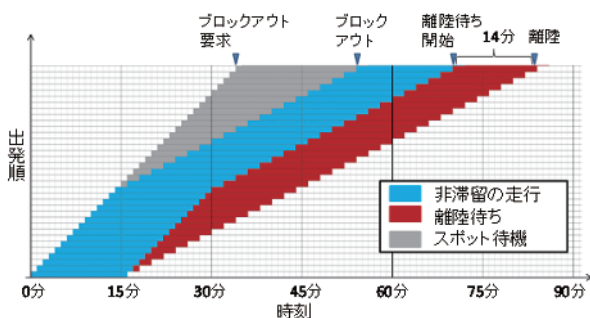


図 3 N-control の適用により離陸待ちが軽減する状況の模式図

図 2 のようにブロックアウト要求が発生する状況に対して、閾値  $N_{ctrl}=15$  の N-control を適用した場合の離陸待ち時間増加の状況を図 3 に模式的に表す。図 3 では、N が 15 となった 16 機目から N-control が適用されている。16 機目以降の離陸待ち時間は、15 機目の離陸待ち時間と等しい 14 分が維持される。図 2 と図 3 の比較から、ブロックアウトの要求からブロックアウトまでの待機時間（スポット待機時間）は、図 2 における離陸待ち時間と図 3 における離陸待ち時間の差分と等しくなることが観察される。

### 3.2 成田空港の特性に応じた N-control の手法

成田空港では、約 9 割の出発便が A 滑走路を用い、A 滑走路付近における離陸待ちが多いことから、A 滑走路を用いる出発便について N-control を適用した効果について検討する。そこで、以下の議論では、3.1 節で述べた走行機数  $N$  として、A 滑走路を用いる出発便の走行機数を数える。

出発便のブロックアウト時刻の調整による空港面交通管理を行う際に、出発便のブロックアウト予定時刻の後、到着便のブロックインまでの間に十分な余裕がなければ、出発便と到着便の間でスポット使用の競合が生じ、出発便のスポットでの待機は到着便の滞留につながる場合がある。図 4 に、ある日のスポット使用状況の例を示す。図 4 では到着便のブロックインから出発便のブロックアウトまでを 1 本の横棒で示している。このうちスポットの空き時間が短い場合は、スポット待機を行うのは適当ではない。

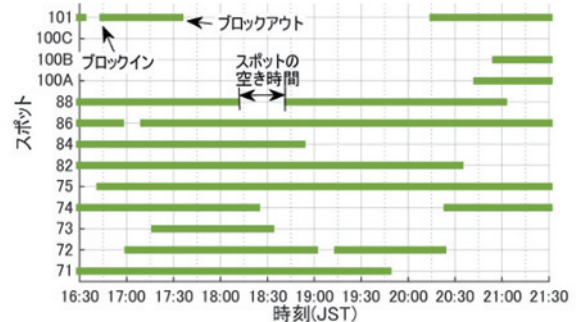


図 4 スポット使用状況の例

また、成田空港では、2 章に述べたように、エプロン内の経路が袋小路状になっている箇所が多数ある。このような箇所では、出発便がブロックアウトした後、他の航空機の走行を遮らない位置へ移動したときに初めて到着便がブロックインのための走行が可能となることから、出発便のブロックアウトと到着便のブロックインの間に長い時間を要する場合がある。図 4 におけるスポットの空き時間には、このような袋小路状の経路の運用に要する時間が含まれていることに留意する必要がある。

そこで、到着便の滞留を生じない範囲でブロックアウト時刻を調整する手法として、3.1 節に示した N-control の手順 3, 4 に下記の制約条件 1 を加える。

- ・ 制約条件 1（スポットの空き時間による制約）：  
スポットで待機している間に、到着便のブロックインまでの時間が当該スポットの最小の空き時間に等しくなった場合は、N が閾値 Nctrl 以上であってもブロックアウトさせる。

また、離陸順と離陸時刻については、実際の運用ではさまざまな制約が適用されている。これらの制約については変更せず、離陸順および離陸時刻が維持されるように、手順 3, 4 に下記の制約条件 2 を加える。

- ・ 制約条件 2（離陸時間による制約）：  
スポットで待機している間に、離陸までの残り時間が、混雑の影響を受けない場合の地上走行時間（基準走行時間）に等しくなった場合は、N が閾値 Nctrl 以上であってもブロックアウトさせる。

以下の議論では、N-control に制約条件 1, 2 を付した手法（以下、提案手法と称する）を A 滑走路の出発便に適用した場合について、効果を試算した結果を述べる。

## 4 用いたデータ

### 4.1 空港面地上交通データベースについて

本研究では、成田空港の空港面運用の特徴について、当所が作成した成田空港の空港面地上交通データベースを用いた分析を進めている。本データベースは、国土交通省航空局から提供を受けた空港面の空港面地上交通データを補間、平滑化することにより、各航空機の毎秒の位置、速度などを算定・作成し、飛行計画情報とともにデータベース化したものである<sup>[8]</sup>。

また、スポットの使用情報については、成田国際空港株式会社より提供を受けた、全便のスポット出入り時刻および使用スポットの情報をデータベースに登録した。

### 4.2 データ取得期間と交通量

データベースに登録した平成 26 年 1 月, 3 月, 5 月, 7 月, 9 月の各 1 週間, 計 35 日間の空港面地上交通データを用いた。表 1 に示すと通りの交通量であった。

表 1 データ取得期間の交通量

運用方向	北風運用		南風運用		合計
滑走路	A	B	A	B	
出発便	5,570	674	4,290	590	11,124
到着便	2,349	3,844	1,821	3,118	11,132

### 4.3 変数の定義

- ・ 出発走行時間：ブロックアウトから離陸までの所要時間。
- ・ 基準走行時間：滑走路における混雑の影響を受けなかった出発便の出発走行時間を、スポットと滑走路の組み合わせで集計した平均値。
- ・ 離陸待ち時間：出発走行時間から基準走行時間を引いた値。
- ・ 離陸待ち機数：A 滑走路を用いる各出発便のブロックアウトから基準走行時間だけ経過した後、当該出発便よりも離陸順が先で未だ離陸していない A 滑走路の出発便数。

### 4.4 交通状況の分析

A 滑走路を用いる各出発便がブロックアウトした時点における、A 滑走路に向かう出発便の走行機数 N の分布を図 5 に示す。図 5 から、N は 0 から 24 の範囲で幅広く分布していることが観察される。

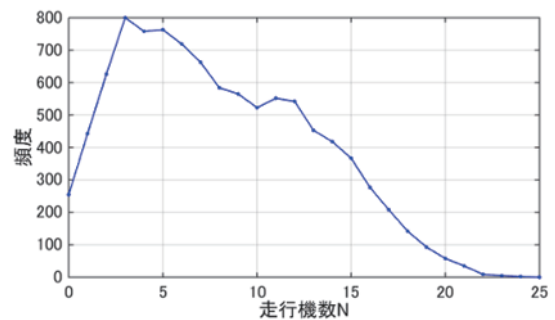


図 5 A 滑走路出発便の走行機数の分布

走行機数 N と、A 滑走路の 15 分間あたり離陸数の関係を図 6 に示す。これは、ある時点における走行機数 N と、当該時点から 15 分間に離陸した出発便数の関係を集計したものである。図 6 から、N が 10 以下の範囲では N の増加にほぼ比例して 15 分間あたり離陸数が増える一方、N が 10 を超える範囲では、N が増加に対

する 15 分間あたり離陸数の増加は緩やかとなり、8 便程度で頭打ちとなることが観察される。

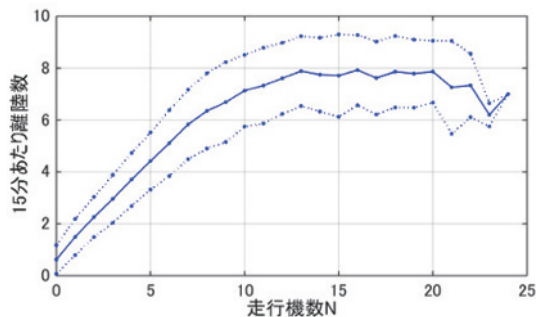


図 6 走行機数と 15 分あたり離陸数の関係（実線：平均値，点線： $\pm 1\sigma$  範囲）

走行機数  $N$  と、離陸待ち機数の関係を図 7 に示す。図 7 から、 $N$  の増加とともに離陸待ち機数が増加する傾向が観察される。この傾向は、図 6 から観察される離陸数が頭打ちとなる傾向のため、 $N$  の増加とともに長い離陸待ちが生じることを示している。

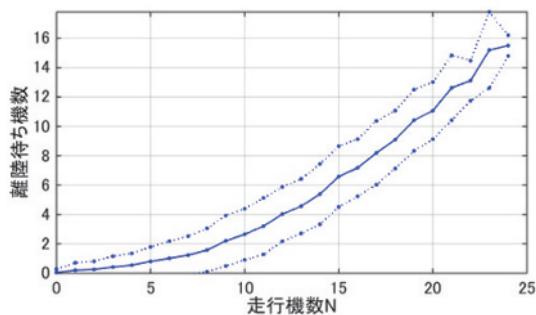


図 7 走行機数と離陸待ち機数の関係（実線：平均値，点線： $\pm 1\sigma$  範囲）

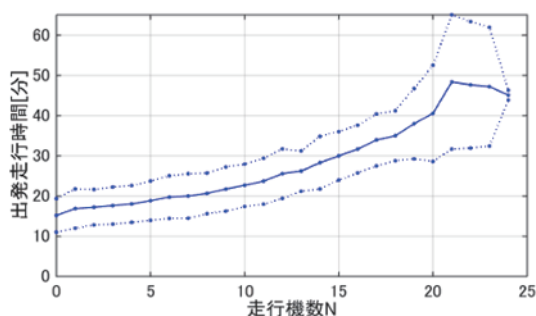


図 8 走行機数と出発走行時間の関係（実線：平均値，点線： $\pm 1\sigma$  範囲）

走行機数  $N$  と、出発走行時間の関係を図 8 に示す。図 8 から、 $N$  の増加とともに出発走行時間が増加する傾向が観察される。この傾向は、

図 7 から観察される  $N$  の増加と離陸待ち機数の増加の関係に対応していると考えられる。

15 分ごとに見た時間帯による走行機数  $N$  および離陸待ち機数の変化を図 9 に示す。図 9 から、10 時から 12 時までの時間帯、および、18 時から 20 時までの時間帯に、走行機数  $N$  が際立って多くなることが示される。これら 2 つの混雑時間帯のうち、夕方の混雑時間帯の方が、走行機数および離陸待ち機数のピークが高く、また、離陸待ち機数の多い状態が長時間にわたって続くことが観察される。

そこで、夕方の混雑時間帯に提案手法を適用した場合の効果について検討する。

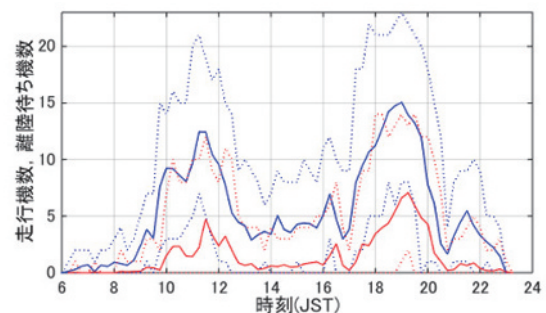


図 9 15 分ごとの走行機数（青）と離陸待ち機数（赤）の変化（実線：平均値，点線：最大値と最小値）

## 5. 提案手法の適用効果の例

図 6 から、15 分あたりの離陸数は、走行機数  $N$  が 13 以上の範囲ではほぼ一定となる傾向が観察される。また、図 7、8 から、この範囲では  $N$  の増加とともに離陸待ち機数と出発走行時間がともに増加する傾向が観察される。この範囲で閾値  $N_{ctrl}$  を設定して提案手法を適用することにより、離陸待ち時間が削減できると考えられる。

そこで一例として、閾値  $N_{ctrl}$  を 17 に設定した場合に得られる効果を試算する。

データ取得期間中のある日の夕方の混雑時間帯について、図 2 と同じ要領で A 滑走路出発便の交通状況を時系列で示したグラフを図 10 に示す。図 10 は、図 2 と同じ要領により、出発便 1 便の運航をブロックアウトから始まり離陸で終わる横棒として表し、それぞれの帯を離陸順に下から上へ並べて表示したものである。図 10 から、下記の情報を読み取ることができ

る。

- a) 離着陸の頻度：各出発便を表す横棒の右端を結ぶ直線の平均的な傾き。
- b) 離陸待ち行列への合流の頻度：青い横棒の右端を結ぶ直線の平均的な傾き。
- c) 離陸待ち機数：ある出発便に注目したとき、赤い横棒の上のある時点からグラフ上で垂直な線を引いたときに、当該出発便よりも下にある棒の本数。

これらの情報をもとに、図 10 から、混雑時には離陸待ち行列への合流の頻度が離着陸の頻度を上回る状態が続くことにより、後の出発便ほど離陸待ち時間が長くなる傾向を読み取ることができる。

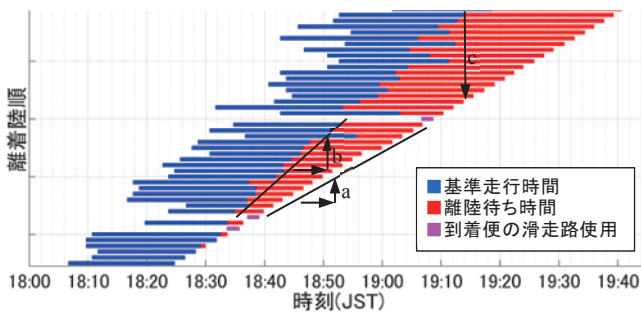


図 10 元のデータにおける出発便の交通状況

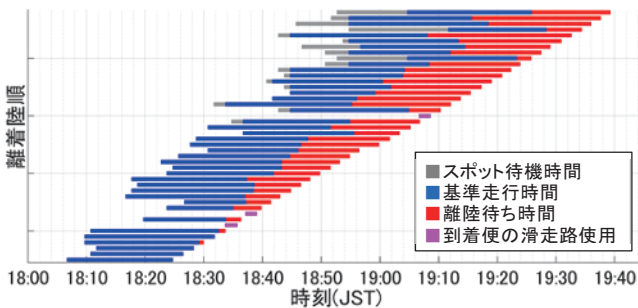


図 11 Nctrl=17 を適用した場合の交通状況

同じ時間帯の出発便のデータに対して、閾値 Nctrl を 17 に設定して提案手法を適用した例を図 11 に示す。図 11 から、出発便の混雑により離陸待ち機数が増えた結果、走行機数 N が閾値 Nctrl を超えることによってスポット待機が生じることがわかる。また、スポット待機をした出発便については、スポット待機を経てブロックアウトした結果、離陸待ち行列への合流が遅められることにより、交通状況としては、合流の頻度が離着陸の頻度に近い状態に抑えられることがわかる。このため、図 10 と図 11 を

比較すると、図 2 と図 3 を比較した場合と同様、提案手法の適用により、離陸待ち時間が減少していることが観察される。

データ取得期間の毎日 18 時から 20 時にブロックアウトした A 滑走路の出発便について、元の空港面交通データと、閾値 Nctrl=17 で提案手法を適用した結果との比較を表 2 に示す。表 2 から、提案手法の適用により、夕方の混雑時間帯について、離陸待ち時間が削減され、削減量はスポット待機時間とほぼ等しくなることが示された。

また、3.3 節の条件 1（スポットの空き時間による制約）は到着便とのスポット使用の競合が生じうる場合に、競合を避けるために適用されるが、閾値 Nctrl=17 の場合には、条件 1 の適用は 4 件に限られた。

表 2 閾値 Nctrl=17 を適用して得られた効果（18 時から 20 時にブロックアウトした出発便）

	元データ	Nctrl=17 適用
出発便数	1,094 便	1,094 便
離陸待ち時間の平均値	11 分 35 秒	10 分 14 秒
離陸待ち時間の最大値	29 分 12 秒	27 分 53 秒
離陸待ち時間の 95%値	22 分 20 秒	19 分 3 秒
スポット待機適用機数		348 便
スポット待機時間の平均値		待機 1 件あたり 4 分 14 秒
条件 1 適用		4 便
条件 2 適用		1 便

## 6. 考察

### 6.1 N-control の効果に影響する要因について

閾値 Nctrl を小さく設定した場合には、滑走路に無駄な空きが生じるおそれがある。図 6 から、15 分あたりの離陸数は 8 便で頭打ちになる傾向が観察される。よって、無駄な空きを生じないためには、15 分以内に離陸可能な場所に常時 8 便の出発便が存在する必要がある。

3.2 節に示した手法では、滑走路に無駄な空

きが生じる可能性は条件 2（離陸時刻による制約）の適用数によって示唆される。5 章で示した  $N_{ctrl}=17$  の適用例では、条件 2 の適用は 1 便であったが、さらに小さい  $N_{ctrl}$  では条件 2 の適用が増える可能性がある。閾値  $N_{ctrl}$  の適切な範囲について、今後、検討を進める。

## 6.2 他の空港面交通管理手法の効果との関連性

N-control は、3.1 節に適用の手順を示したように、ブロックアウトの要求があった時点でスポット待機を行うかどうかを決める。一方、空港面交通管理で一般的に行われるブロックアウト時刻の調整は、各出発便から申告されたブロックアウト予定時刻によって出発走行時間と離陸時刻を予測し、離陸待ち時間が小さくなるようにブロックアウト時刻の調整を行う。このような予測をもとにした空港面交通管理手法では、予測の不確かさによって手法の効果が限定されることが考えられる。

予測をもとにした空港面交通管理手法について、予測の不確かさが手法の効果に及ぼす影響を検討する際に、N-control によって得られる効果と対照することは有益であると考えられる。

## 7. 結論

出発便の走行機数を調整する空港面交通管理手法である N-control を成田空港の空港面交通データに適用した場合の効果について検討した。

A 滑走路に向かう出発便の走行機数  $N$  をもとにした分析では、 $N$  の増加とともに 15 分間あたりの離陸数が頭打ちとなり、その結果、離陸待ち機数および出発走行時間が増加することが確認された。また、現状の運用状況では、夕方に走行機数および離陸待ち機数が多い状態が長く続くことが確認された。

次に、到着便とのスポット使用の競合を回避する制約条件、および、離陸時刻を現状どおりとする条件のもとで N-control を適用した結果を示した。15 分間あたりの離陸数が頭打ちと

なる走行機数  $N$  の範囲 ( $N \geq 13$ ) を参考として、走行機数を制約する閾値  $N_{ctrl}$  を 17 に設定して上記の N-control を適用したところ、18 時から 20 時の間にブロックアウトする出発便について、平均 1 分 20 秒程度の離陸待ち時間の削減が得られる可能性が示された。

今後は、閾値  $N_{ctrl}$  を変更した場合に得られる効果について検討を進める。また、出発走行時間の予測をもとにした空港面交通管理手法についても、N-control の適用で得られる効果を参考として、予測の不確かさが手法の適用効果に及ぼす影響の推定を行うことを予定している。

## 参考文献

- [1] EUROCONTROL, “Airport CDM Implementation Manual”, ver.4, 2012.
- [2] Deutsche Flugsicherung / Flughafen München, “Airport CDM Munich - Results”, 2008-2013.
- [3] D. Bhadra *et al.*, “Benefits of Virtual Queuing at Congested Airports Using ASDE-X: A Case Study of JFK Airport”, 9th USA/Europe ATM R&D Seminar, No. 33, 2011.
- [4] I. Simaiakis *et al.*, “Demonstration of Reduced Airport Congestion through Pushback Rate Control”, MIT Technical Report, No. ICAT-2011-2, 2011.
- [5] 国土交通省航空局, 「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン」, 2010.
- [6] 国土交通省航空局, 「将来の航空交通システムに関する推進協議会 平成 25 年度活動報告書」, 2014.
- [7] N. Pujet *et al.*, “Input-Output Modeling and Control of the Departure Process of Congested Airports”, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, AIAA-1999-4299, 1999.
- [8] ブラウンほか, 「空港面交通管理のための羽田空港の駐機スポット情報に関する解析」, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 111, no. 407, SANE2011-143, pp. 9-14, 2012.