

株式会社NTTデータ数理システム 学生研究奨励賞

# 過密空港の着陸復行による遅延に対応した バッファの最適配置

東海大学 情報理工学部  
コンピュータ応用工学科 中村研究室  
衛本 航 横山 隼

01 背景

02 研究の位置づけと目的

03 提案手法

04 数値実験

05 結論

## 航空機の超過需要

近年、世界中で航空機の超過需要にある。国際航空運送協会（IATA）の報告によれば、2023年世界の航空需要はパンデミック前の94.1%まで回復した。国内線では2019年比3.9%増となり、パンデミック前を上回り同時に過去最高を記録した[1]。

超過需要の主な要因として、以下の2点が挙げられる。

### < 要因 1 > 経済成長 [2]

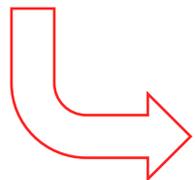
IATAの報告ではアジアや中東の新興経済国で経済成長が続いており、2023年には中国とインドの旅客需要が増加している。

### < 要因 2 > LCC（格安航空会社）の増加 [3]

LCCの普及は、航空業界全体の需要増加に大きく貢献している。LCCの成長は特にアジア太平洋地域でみられ、航空運賃が手頃になことから、より多くの人々が利用するようになった。

表1 2023年・年間RPK率  
(有償旅客が搭乗して飛行した総距離)[1]

	2019年比 (パンデミック前)	2022年比 (パンデミック末期)
国内線 (総合)	3.9%	30.4%
日本	-3.2%	30.7%
アメリカ	3.3%	9.6%
中国	7.1%	138.8%
インド	5.3%	22.3%



このような航空機需要の増加に伴い、滑走路やターミナル施設の過密化が深刻化している。

## 超過需要による影響

超過需要による影響として、特にハブ空港と呼ばれる国内外の路線の経由地となるような役割を持つ大きな空港での運航性能の限界が挙げられる。これにより、**運用上での航空管制の対応力の低下**などにつながり、重大事故を誘発してしまうことが懸念される。

### 超過需要により発生した重大事故の事例：

2024年1月2日に発生した羽田空港地上衝突事故[4][5]は、年末年始の帰省ラッシュと前日に発生した令和6年能登半島地震の被災地対応が重なり、混雑していたことが一因となり発生してしまった。この事故により、混雑空港における運用について、「**安全性**」と「**効率性**」の両立という課題を浮き彫りとなった。



主要空港は「**過密化**」に直面しており、安全性と効率性の両立が大きな課題となっている。

## 空港の過密化

過密化が起因となった問題として大きく3つ挙げられる。

### 過密化による影響

#### 滑走路の増設の妨げ

滑走路を増設したとしても、受け入れることができないほど上空や空港周辺が混雑するため、増設して得られる便数は数多くない[6].

#### 波及的な遅延の増加

コロナ禍前の2019年10~12月の国内の平均遅延率が**11.86%**であるのに対し、2023年10~12月では**14.66%**であり、原因の多くが「機材繰り」であることから、**波及的な遅延**によるものが増えていると考えられる[7][8].

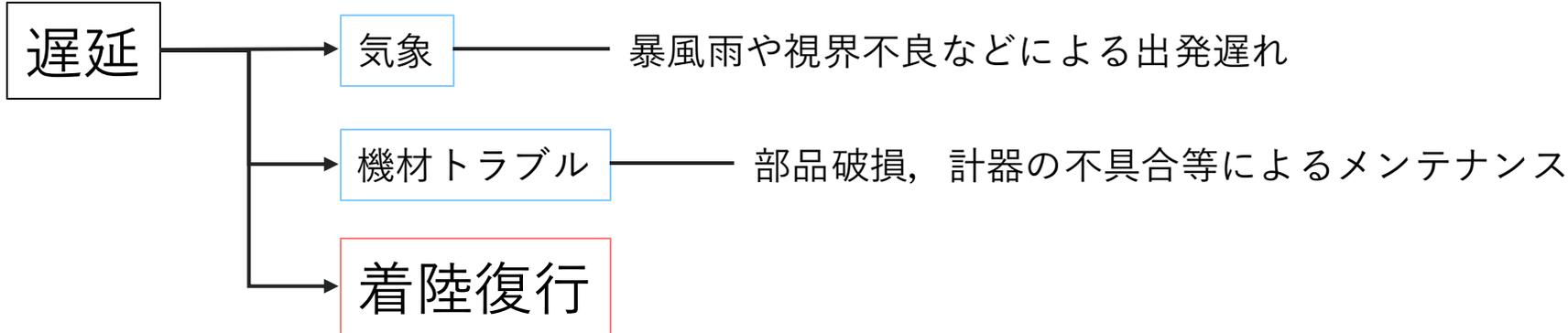
#### 騒音問題

過密化により航空機の往来が多くなっている。過密化に対して新ルートを作成したが、新ルートでは都心上空を低空飛行するため、さらに騒音問題に拍車がかかっている[9].

➤ 特に「波及的な遅延の増加」に関する問題は空港運用に密接に関係している。

## 空港における遅延の要因

今現在、運用上の遅延の要因として以下のようなものが挙げられる。



着陸復行とは、着陸時に安全な着陸ができないと判断した場合に再度上昇し、着陸をやり直すことである。これは突発的な遅延となるため、当該機以降に遅延が波及してしまい、後続機や乗客に多大な影響を与える。

着陸復行となる要因として、近年では過密化が影響しているケースがみられる。特に先行機の滑走路離脱遅れや、間隔不十分を要因としたものが増加傾向にある[10]。

表2 着陸復行全体に対して過密化が起因しているものが占める割合

要因	2021年度	2022年度	2023年度
滑走路離脱遅れ	9.0%	14.6%	18.3%
間隔不十分	2.8%	5.8%	4.5%

➤ 本研究では、特に着陸復行を起因とした遅延問題に着目する。

01 背景

02 研究の位置づけと目的

03 提案手法

04 数値実験

05 結論

## Bruecknerら[11]が提案したバッファ配置について

過密化問題の有効な解決策として、バッファの戦略的配置が注目されている。

Bruecknerらは、各航空機の予定到着時間に対し、以下の3要素を考慮したバッファ配置手法を提案した。

### <要素1> 遅延コスト

遅延は特定のフライトの運航時間にだけ影響するのではなく、遅れて到着することにより次に出発する予定のフライトにも波及して遅延する可能性があり運航時間が通常通りであっても到着が遅れてしまうことがある。

### <要素2> 運用コスト

遅延が発生してしまうと予定していたフライトが長くなっていくため乗務員の時間コストや航空会社の運用コストも高くなってしまう。またバッファを設置することにより発着台数にも差が生まれる。

### <要素3> 早発による不利益

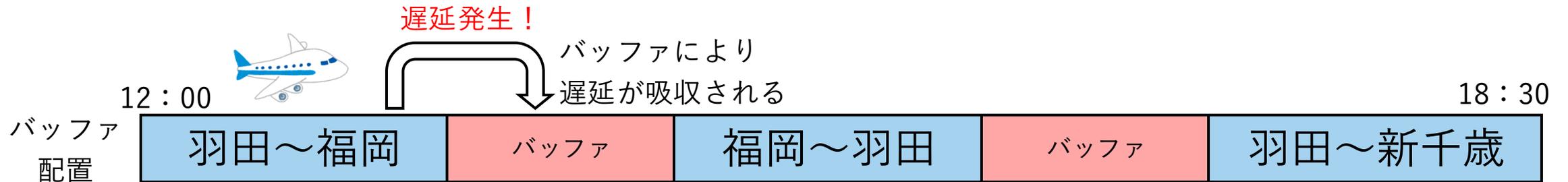
フライトのバッファが長くなると、遅れて到着する可能性は減るが、早く到着する可能性も高くなる。また、乗客は遅延を嫌うが、フライトが定期的に早く到着することも望んでいない。その結果、埋めなければならない時間のギャップが生まれてしまう。

# 研究の位置づけと目的

・バッファなしのパターン(既存モデル)では最初に発生した遅延の影響により次の便の出発が遅れてしまった。その後最初に起きた遅延が連鎖していき折り返しの便でも波及して一度目よりも長い遅延が発生してしまう。



・バッファ配置により、既存モデルと比べ遅延なくに運行することができている。ただし、どちら場合でも遅延が発生しなかった場合には、バッファを置いたことにより運用効率が下がってしまうことになる。



しかし、このバッファでは航空機単体でのバッファ配置となっているため全体の航空機スケジュールのことは考慮されていない。

## 本研究の位置づけ

本研究の特徴は、航空機ごとに個別のバッファを配置するのではなく、空港全体のスケジュールを通してバッファを配置することを提案する点にある。

以下にバッファを空港全体のスケジュールを通じて配置することによる利点と欠点を示す。

### 利点

- ・ 空港毎の状況に合わせたバッファ配置をすることが可能になる。
- ・ バッファ配置をするの単体配置に比べ複数の航空機の遅延が重なった場合に、他機への影響を抑制できる。

### 欠点

- ・ それぞれの路線の需要を考量する必要がある。
- ⇒もとあったスケジュールにバッファを配置するため、それぞれの航空機が一度に寄せられる人数や利用状況を鑑みたバッファを配置をしないといけない。

# 研究の位置づけと目的

## 割り込み位置の決定

本研究では、遅延が発生した場合の割り込み位置を決める必要がある。

ただし、航空機の割り込み位置を決める際には、以下のような点を考慮する必要がある。

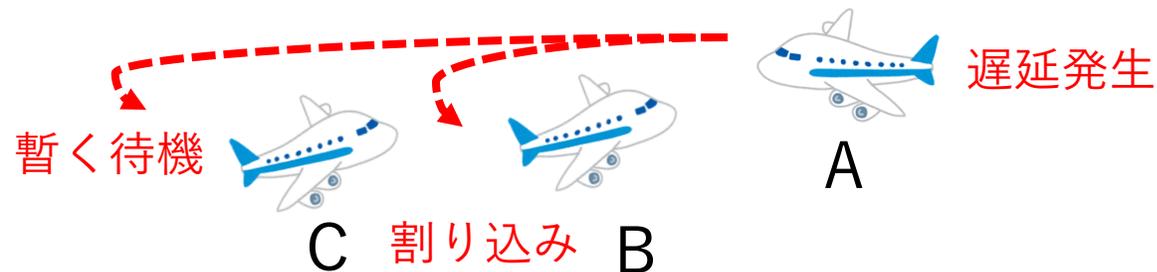
- ・他機間に割り込む

⇒割り込みによって他機の着陸順序が変更されるため、全体の運行スケジュールに遅延が生じる可能性がある。

- ・割り込めずに待機

⇒待機によって着陸が遅れるため、次のフライトや他の運行スケジュールにも影響が出る可能性がある。

航空機の燃料などを考えるといつまでも割り込めないまま待つことはできない。



これにはASP(Aircraft Sequencing Problem) [12]を用いたスケジュール作成の考え方を利用することにより実現することができる。

# 研究の位置づけと目的

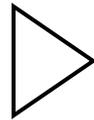
## ASP (Aircraft Sequencing Problem) Furiniら[12]

ASPは、航空機の滑走路使用順序と使用時刻を最適化する問題であり、滑走路を共有する航空機のスケジュールを決定する際に、目標時刻からのずれによる総コストを最小化することを目的としている。

ただし順序入れ替えに関する制限が存在していない！

⇒ 最適な順序を生成することが難しく、時には望ましくないスケジュールを作成してしまうことがある。

時刻	予定順序	航空機名
9:00	1	航空機A
9:00	2	航空機B
10:00	3	航空機C
11:00	4	航空機D
12:00	5	航空機E



航空機名	新しい時刻	元の時刻	予定順序	実際の順序
航空機A	9:00	9:00	1	1
航空機C	10:00	10:00	3	2
航空機D	11:00	11:00	4	3
航空機E	12:00	12:00	5	4
航空機B	13:00	9:00	2	5

ASPでは目標時刻からのずれによる総コストを最小化することを目的としているため9時に予定していた航空機が4時間遅れでのスケジュールになってしまう。それではあまりにも現実性がないものになってしまう。

## 研究の位置づけと目的

### ASP-CPS(Aircraft Sequencing Problem-Constrained Position Shifting) Balakrishnanら[13]

ASP-CPSは、ASPに航空機の位置関係を考慮したものである。CPS制約は、航空機の最終位置が一定の範囲に収まるように制約を設定し、航空機間の入れ替えを制限する。また、滑走路の使用間隔は航空機の大きさに依存しており、遅延コストを最小化する目的関数が導入されている。

時刻	予定順序	航空機名
9:00	1	航空機A
9:00	2	航空機B
10:00	3	航空機C
11:00	4	航空機D
12:00	5	航空機E



航空機名	新しい時刻	元の時刻	予定順序	実際の順序
航空機A	9:00	9:00	1	1
航空機C	10:00	10:00	3	2
航空機B	11:00	9:00	2	3
航空機D	12:00	11:00	4	4
航空機E	13:00	12:00	5	5

ASP-CPSでは航空機の入れ替えに制限を設けることにより遅延コストを最小化にしながら現実的なリスケジュールリングを実現することが可能になっている。

## 本研究の目的

本研究は、ASP-CPS[12][13]の手法を活用し、空港全体のスケジュールを対象としたバッファ配置において、運用効率を考慮しつつ、着陸復行を起因とした遅延の抑制効果が最大となる配置方法を明らかにする。

1. バッファの最適配置による遅延リスクの最小化
2. 運用効率と遅延抑制のトレードオフを定量的に調査

これらの取り組みを通じて、遅延抑制と運用効率の双方を考慮し、空港の過密化の解消及び運用上の安全性向上に貢献することを目指す。

ただし、本研究は単一滑走路でのスケジューリングをモデルとする。

また、着陸復行の発生箇所について既知であるという仮定のもと本研究に取り組む。

01 背景

02 研究の位置づけと目的

**03 提案手法**

04 数値実験

05 結論

## 本研究での提案

本研究では、ASP-CPSによる使用順序の決定に加え、スケジュール上にバッファを設置して航空機の間引きを行い、スケジュール全体での遅延だけでなく、過密化を抑制することも目的とし、これらを実現できる最適なバッファの配置について提案する。



### Bruecknerら[11]と本研究でのバッファ配置方法の違い

Bruecknerら[11]：航空機単体のスケジュールに着目してバッファ配置

⇒ 航空機単体における**波及遅延**（到着遅れによる折り返し便の出発遅延）を抑える。

本研究：空港全体のスケジュールに着目してバッファ配置

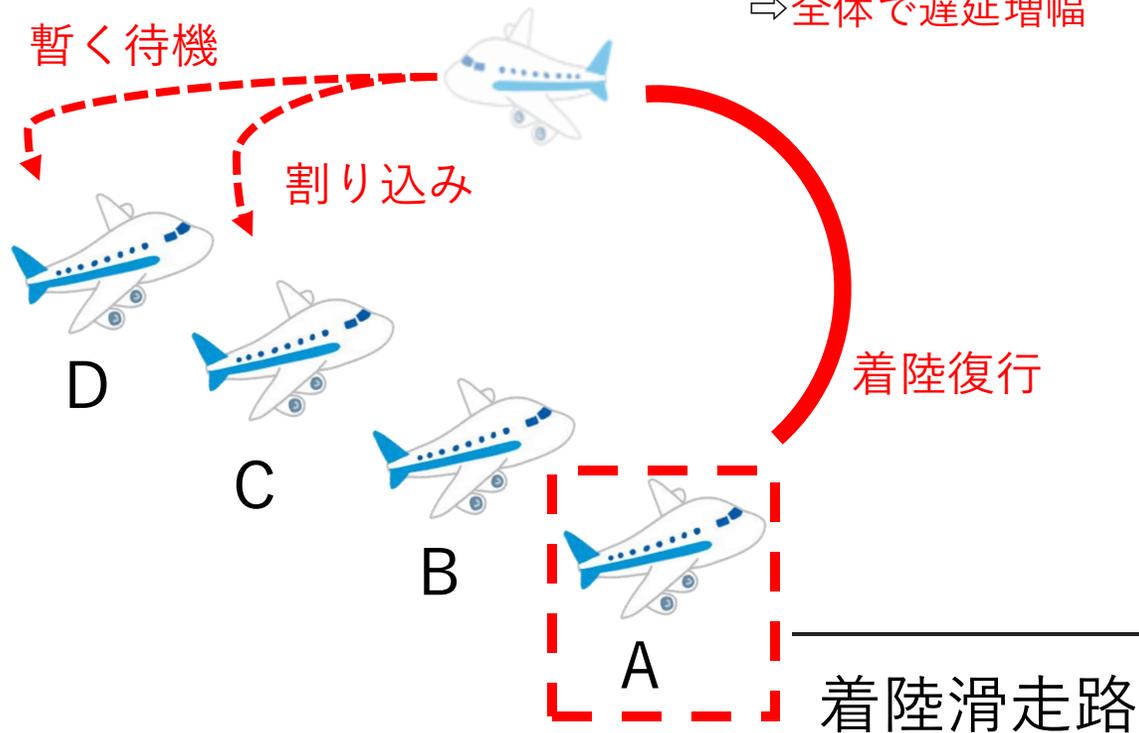
⇒ **スケジュール全体での遅延を抑える**とともに空港の抜本的な過密化抑制を図る。

## バッファの有無による違い

バッファ配置の有無による着陸復行した航空機の動きはそれぞれ以下のように考えられる。

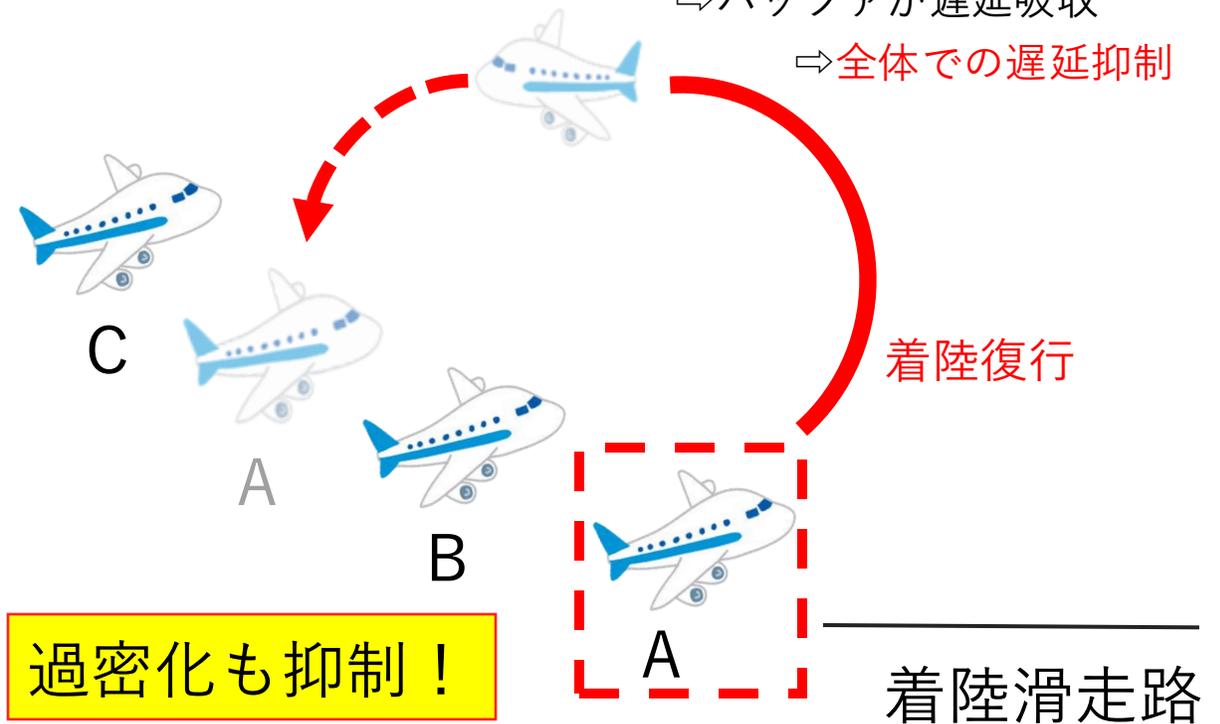
### バッファ無し

- 他機間に割り込み
- 割り込めず待機  
⇒全体で遅延増幅



### バッファ有り

- バッファ内に割り込みへ
- 他機間に割り込み  
⇒バッファが遅延吸収  
⇒全体での遅延抑制



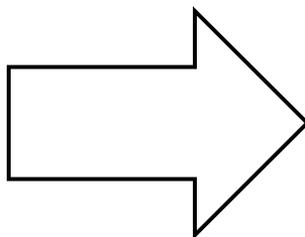
過密化も抑制！

## 本研究で使用する時刻表について

実験で使用する時刻表は、羽田空港の実際の時刻表[14]をもとに、前後の航空機の滑走路使用予定時刻に関する条件のもと、Gurobi Optimizer[15]を用いて元の時刻とのずれが最小になるようにスケジューリングしたものである。なお、前後の航空機同士でのスケジューリング時刻は2分以上空けなければならないものとした。

もとにした実際の時刻表の例

時刻	便名	運行会社
17:00	JAL001	日本航空
17:05	JAL002	日本航空
17:05	ANA001	全日本空輸
17:05	JAL003	日本航空
17:10	ANA002	全日本空輸



本研究で使用する時刻表の例

時刻	便名	運行会社
17:00	JAL001	日本航空
17:03	JAL002	日本航空
17:05	ANA001	全日本空輸
17:07	JAL003	日本航空
17:10	ANA002	全日本空輸

5分刻みの時刻表のため、時刻が重複する。

時刻が重複しないように調整する。

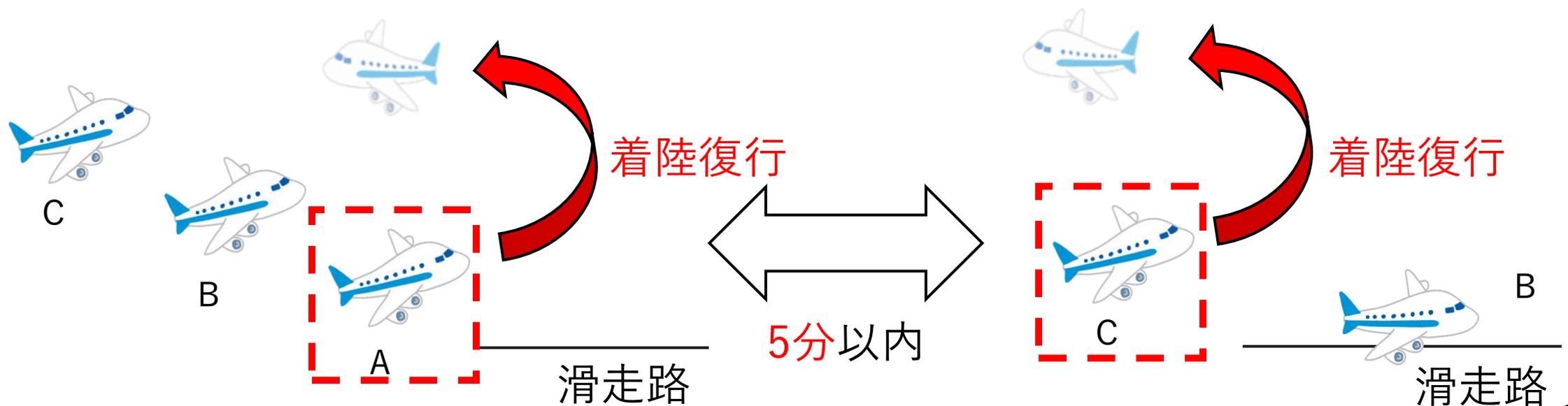
もととした時刻表は、2024年7月29日 17時から24時の羽田空港の着陸便(A滑走路/B滑走路を使用)のものである。

## 着陸復行の連続発生

本研究では、着陸復行の発生に関して、悪天候時などよく見られる「連続」での発生も実際の発生状況をもとに考慮している。

ただし、この「連続」については、厳密な連続ではなく、以下のように独自の定義をしている。

前の航空機が着陸復行をしてから **5分以内** に再び後続機で着陸復行が発生した場合に連続とみなす。



# 提案手法 (buffer placement for go-around delays)

## 本研究における着陸復行のシミュレーションについて

本研究では、実際に羽田空港で発生した着陸復行についてまとめられたデータ[10]をもとに、着陸復行の発生に関する相対度数（以降、実データ）を計算する。本研究では、ある期間の中で、着陸復行が相対度数に基づき、必ず発生するものであると仮定のもと計算を行った。データは令和5年度の1年分である。ただし実験の都合上、計算対象としている各日の時間帯は17時から23時までの6時間としている。計算する内容は次の3つである。

### 発生箇所数

ある期間内において、何箇所が発生するのかを相対度数で示した。本研究では最大で4箇所としている。

### 連続数

各箇所において何連続で着陸復行が発生するかを相対度数で示した。最大で一箇所につき4連続としている。

### 各箇所の発生位置

令和5年度の1年間で、毎日17時から23時に発生した着陸復行の回数を10分毎にカウントし、その結果をもとに相対度数を計算した。

なお、実験においてはこのデータに対し10分毎の線形補完を行い、利用している。

それぞれ計算した結果を、以下の表にまとめた。

表3 実際のデータに基づいた計算結果

	箇所数 (%)	連続数 (%)	発生位置に関する相対度数(10分毎)	
			相対度数	時間帯
1	50.87	78.55	0.035	17時
2	32.1	7.59	0.025	17時
3	10.92	4.95	0.018	17時
4	6.11	8.91	0.015	17時

時間帯	相対度数
17時	0.035
17:10	0.042
17:20	0.025
17:30	0.000
17:40	0.015
17:50	0.025
18:00	0.035
18:10	0.048
18:20	0.025
18:30	0.035
18:40	0.042
18:50	0.030
19:00	0.018
19:10	0.085
19:20	0.025
19:30	0.042
19:40	0.025
19:50	0.035
20:00	0.035
20:10	0.018
20:20	0.030
20:30	0.035
20:40	0.055
20:50	0.025
21:00	0.018
21:10	0.018
21:20	0.018
21:30	0.018
21:40	0.018
21:50	0.018
22:00	0.018

## 本研究の評価指標

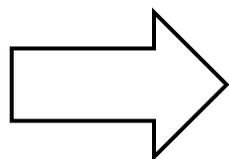
各バッファ配置パターンに対して、本研究では各航空機のリスケジュールリング時刻と本来のスケジュールリング時刻のずれを基準としたコストを算出し、**どれほどそのコストを最小にできるか**を評価指標として用いる。コストには以下の要素が含まれている。

### スケジュールリング時刻からのずれ

元々スケジュールリングされていた時刻と新しく求めた時刻の差を分単位でコスト化。  
EX) 時刻のずれが20分だった場合、コストは20として計算される。

### 搭乗人数

本研究では、航空機のサイズを各航空機の最大搭乗可能人数を用いて表現している。  
ただし、コスト化についてはこれらに搭乗率を掛け合わせた数値を用いる。  
搭乗率は、2024年7月の日本航空の利用実績を参考にし、全ての航空機に対し80%と設定した[16]。



**乗客についても考慮した遅延の最小化を考えることができる！**

# 提案手法 (buffer placement for go-around delays)

## 記号定義

本研究のモデル化にて使用する変数, パラメータ, 集合を示す文字とそれらの定義は以下の表の通りである。

表4 本研究で用いる記号定義

種別	文字	意味	種別	文字	意味
変数	$x_i$	リスケジュール時刻	パラメータ	$s_{ij}$	前後の航空機が空けるべき時刻間隔
	$\beta_i$	遅延時間(元の時刻とリスケ時刻との差)		$t$	元々のスケジュール時刻
	$\delta_{ij}$	ASP-CPSの先行条件(0,1変数)		$e$	リスケジュール可能時刻の範囲下限
パラメータ	$v^+$	滑走路使用順入れ替えが許される上限		$l$	リスケジュール可能時刻の範囲上限
	$cost_i$	各航空機が遅延した際の単位コスト		$o$	各航空機のスケジュール順序
	$aveboard_i$	各航空機の搭乗率		$M$	大きな定数
	$maxboard_i$	各航空機の最大搭乗可能人数	集合	$A$	時刻表内の全ての航空機
	$again$	着陸復行機が再度着陸するまでの最小間隔		$R$	着陸復行が発生した航空機

## 本研究の目的関数

本研究では、スケジュール全体で遅延をどれほど抑えることができるかを評価指標とし、最小化問題に取り組む。

### 目的関数

$$\text{Min } \sum_{i \in A} \underbrace{cost_i}_{\substack{\text{航空機 } i \text{ の単位コスト} \\ \text{(本研究では全機で統一)}}} \times \underbrace{maxboard_i}_{\text{航空機 } i \text{ の最大搭乗人数}} \times \underbrace{aveboard_i}_{\text{航空機 } i \text{ の搭乗率}} \times \underbrace{\beta_i}_{\text{航空機 } i \text{ の遅延時間}}$$

: スケジュール全体での遅延コストの最小化

ここでの遅延コストは、遅延が引き起こす乗客への影響に着目している。

遅延による乗客の影響としては・・・

- ・ 乗り継ぎ便に間に合わない
- ・ 仕事などの場合、それらの予定の変更を余儀なくされる可能性がある

などが考えられる。

## 制約条件 1 (使用順入れ替えと時刻に関する制約)

航空機は以降の制約条件の下でスケジューリングされる。

1. スケジューリング時刻は指定した時刻の対象範囲に収まらなければならない

$$e_i \leq x_i \leq l_i \quad (\forall i \in A)$$

2. 各航空機の使用順序は、許容範囲内で入れ替えが可能である。

$$\sum_{\substack{j \in A \\ i \neq j}} \delta_{ji} + 1 \leq o_i + v^+ \quad (\forall i, j \in A)$$

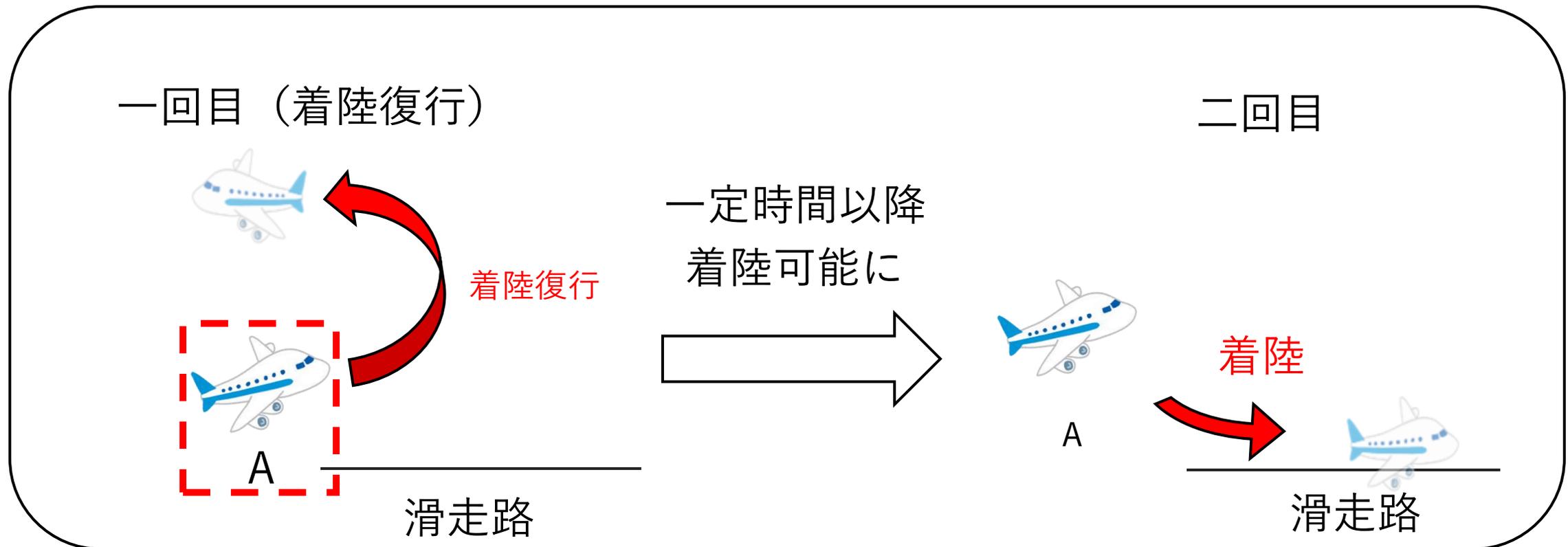
3. 予定時刻より遅延した場合の時刻  $\beta$  は、予定時刻とスケジューリングされた時刻、スケジューリング可能時刻のそれぞれの差の間でなければならない。

$$\beta_i \geq x_i - t_i, \beta_i \leq l_i - t_i \quad (\forall i \in A)$$

## 制約条件 2 (着陸復行に関する制約)

着陸復行となった航空機は、一定時間 (again) 以降にリスケジュールリングされる。本実験では20分とした。

$$x_i \geq t_i + \text{again} (\forall i \in R)$$



## 制約条件 3 (滑走路の使用順序と使用間隔に関する制約)

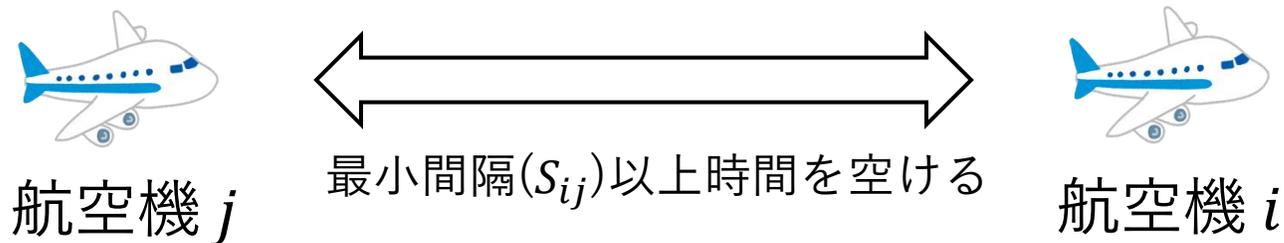
以下二つの制約条件は、計算の効率化のために時刻表の一定範囲内の航空機同士にのみ適用した。

1. 各航空機のペアは、一方が他方よりも先もしくは後にスケジューリングされる。

$$\delta_{ij} + \delta_{ji} = 1 \quad (\forall i, j \in A)$$

2. 前後の航空機同士の滑走路使用時刻 (スケジューリング時刻) は最小間隔以上でなければならない。

$$x_i + s_{ij} - M \cdot (1 - \delta_{ij}) \leq x_j \quad (\forall i, j \in A)$$



適用範囲を限定することで、計算しなくてよい部分のモデル化を省くことができるため、**計算時間を大幅に短縮することが可能**となる。

01 背景

02 研究の位置づけと目的

03 提案手法

**04 数値実験**

05 結論

## 本研究で行う数値実験

本研究では、スケジュール全体での遅延を抑制するには、どのようなバッファ配置が最適であるかを考察するための数値実験を行う。多様な観点からバッファ配置による遅延軽減効果を考察するため、以下の3つの実験を行う。

### 実験1：バッファの位置に着目した実験

バッファをどのような位置に配置することで遅延を最小化できるのか調べる。

ここでは、スケジュールの前半、中盤、後半にバッファを配置したパターンを用意し、それぞれ比較する。



### 実験2：バッファのブロック数（分割数）に着目した実験

バッファの合計時間を統一した場合に、どのように分割することで遅延を最小化できるのか調べる。

バッファのブロック数を変更した複数パターンを用意する。バッファの位置は実験1の結果を加味し決定する。



### 実験3：バッファ配置による運用効率とのトレードオフに着目した実験

この実験では、バッファ幅の変動による遅延吸収と運用便数の関係について調べる。

実験1、実験2を通じて総合的に遅延抑制効果が優れていたパターンのバッファ幅を変動させ、比較する。

## 本研究で用いるバッファパターンの名称

本実験で用いる各バッファパターンを区別するために、以下のように名称を定義する。

$$B(s, n, p)$$

$s$  : ブロック一つあたりのバッファ時間幅

$n$  : ブロック数(分割数)

$p$  : バッファ位置 (F: 前半, M: 中間, L: 後半) ※実験の内容等により省略することがある。

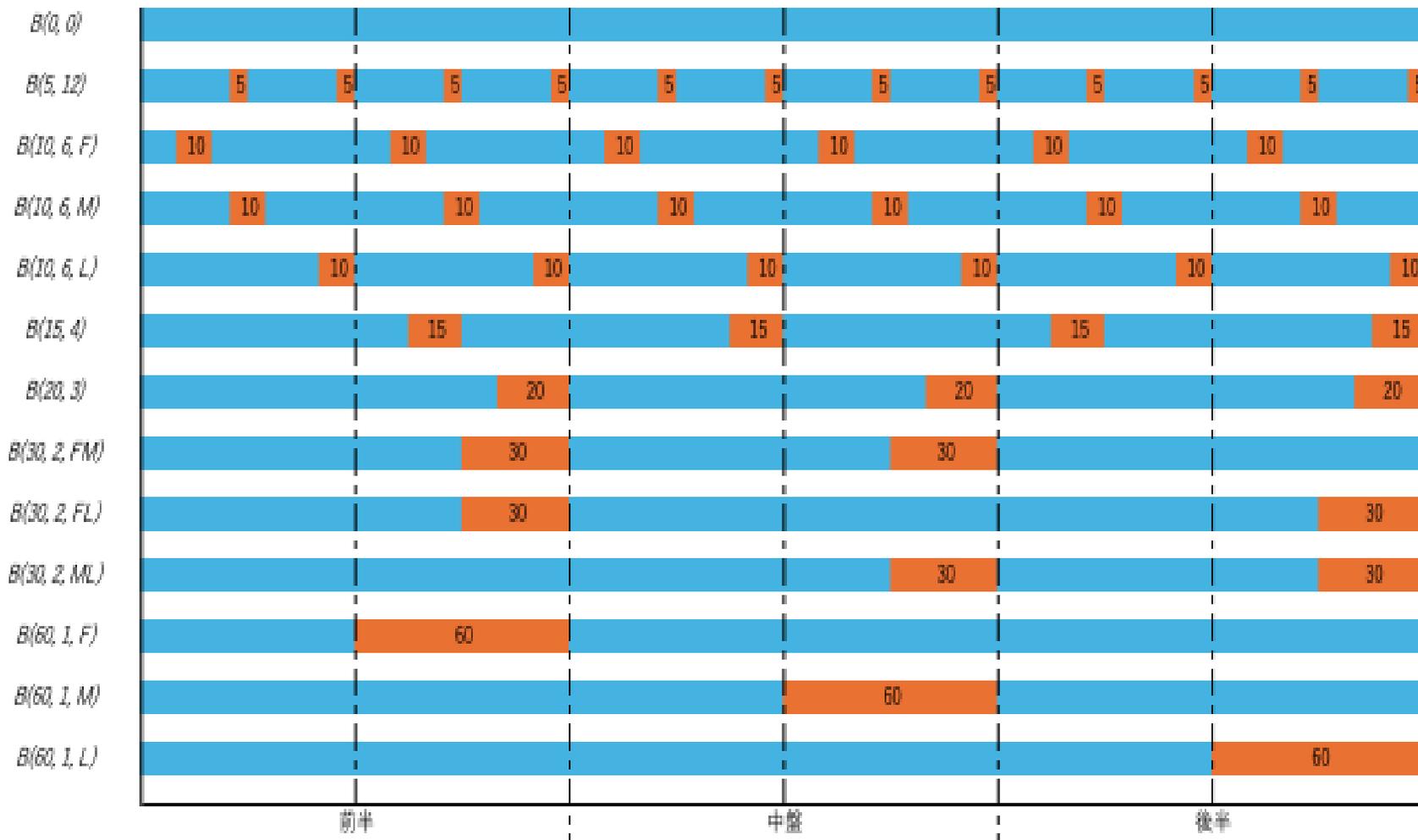
EX) スケジュールの前半と後半に30分のバッファを一つ配置する場合

$$B(30, 2, FL)$$



## 本実験で用いるバッファ配置パターン

表5 本実験で用いるバッファ配置パターン



■ : バッファ  
(中の数字は時間[分])

■ : スケジューリング可能

スケジュールは全体で  
6時間となっている。

----- は、1時間刻み

※ $B(0, 0)$ はバッファを配置しない従来のパターンである。

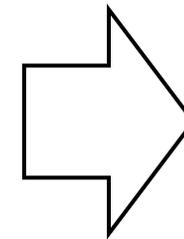
## 本実験で用いる計算環境

- OS : Windows10 Home
- CPU : Intel(R) Core(TM) i5-1035G1CPU@ 1.00GHz 1.19GHz
- メモリ : 8.00GB
- 言語 : Python 3.12
- 数理最適化ソルバー : Nuorium Optimizer 26.1.1

## 本実験で用いる求解オプション

Nuorium Optimizer を使用した整数計画問題の分枝限定法において、本研究の問題規模に合わせた探索が行えるように以下の5つの探索オプションを設定した[17].

- ① Options.Branch.RepairSolution.AGGRESSIVE  
⇒初期解の修正
- ② Options.Branch.Cut.AGGRESSIVE  
⇒切除平面をより多く追加する
- ③ Options.Branch.FeasPump.ON  
⇒整数性を満たさない解に対して、逐次的に連続緩和問題を解く
- ④ Options.Branch.NodeSelect.BESTDEPTH  
⇒深さ優先探索
- ⑤ Options.Branch.ParallelMethod.SUBTREE  
⇒並列化手法Subtree



問題規模に合わせた  
オプションを選択し設定した.

## シミュレーションの終了条件

本実験では、各パターンの比較に目的関数値の平均値を用いる。  
この平均値の収束判定として、以下2つの要素を取り入れた。

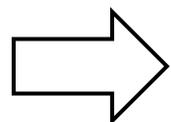
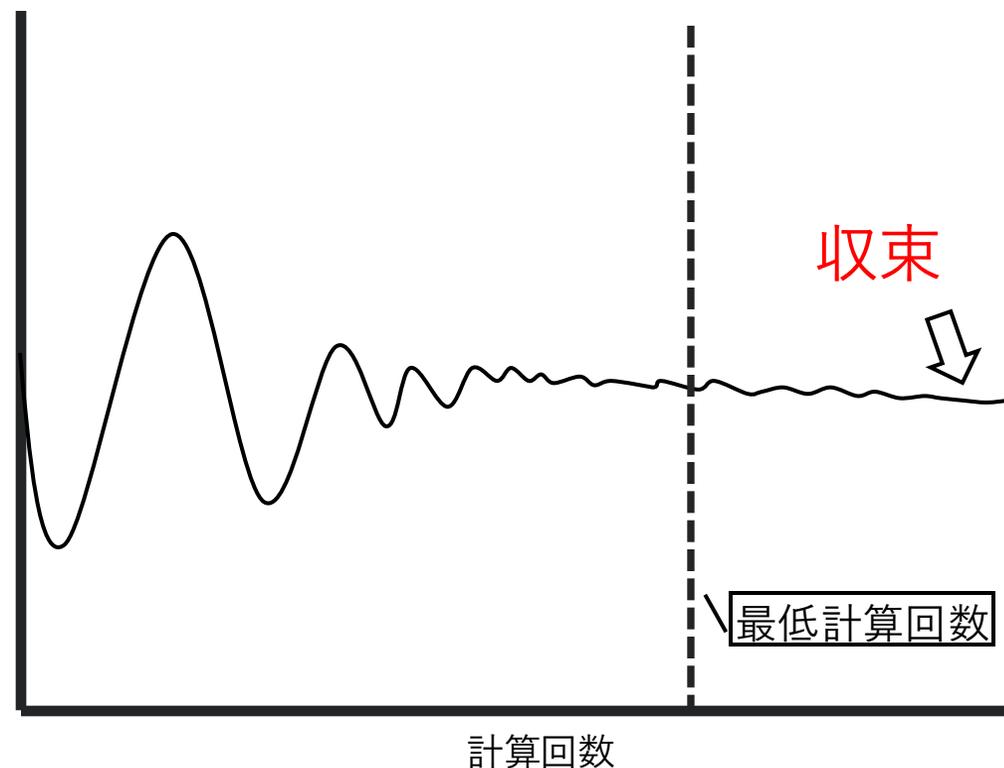
### 信頼区間

他のパターンと目的関数値が十分な差がついた時点で実験を終了させるため、信頼区間を用いる。本実験では、母分散が未知なため、**t分布による95%信頼区間**を計算し、閾値を下回ることによって十分な差が付いたと判断する。

### 最低計算回数

本実験では、できる限り多様なケースにより平均値を計算することが望ましい。そのため、最低計算回数を設定し、サンプルの多様性を保証する。

これまでに得られた目的関数値の平均値



この2つの条件を満たすことでシミュレーションを終了する。

## 本実験での共通条件

- 最低計算回数 ⇒ 1,000回
- 信頼区間の閾値 ⇒ 100,000
- 一回毎の探索時間 ⇒ 10秒

本実験では、実験パターンおよび回数が非常に多いことから、一回毎の探索時間を短く設定している。そのため、目的関数値の算出において、以下のような事象が発生することがある。

- ・ 同条件を与えた場合に求まる目的関数値が非常に大きな数値となってしまうこと。（外れ値を算出）
- ・ 実行可能解が見つからずに、目的関数値が0となってしまうこと。（探索ができず終了）

これらは実験結果に影響を与えると考え、次のような条件を満たした目的関数値のみ実験結果として採用する。

$$0 < \text{算出された目的関数値} \leq 10,000,000$$

この条件を満たした目的関数値のみ、平均値および信頼区間の計算対象とする。

## 本実験で用いる相対度数の種類

様々な遅延パターンに対応できるバッファ配置を本研究では提案したいため、本実験では、実際の着陸復行を基に算出した相対度数（以下、実データ）に加え、発生傾向の偏りを無くした一様分布を基とした相対度数（以下、擬似データ）を用いる。

### それぞれを採用する利点

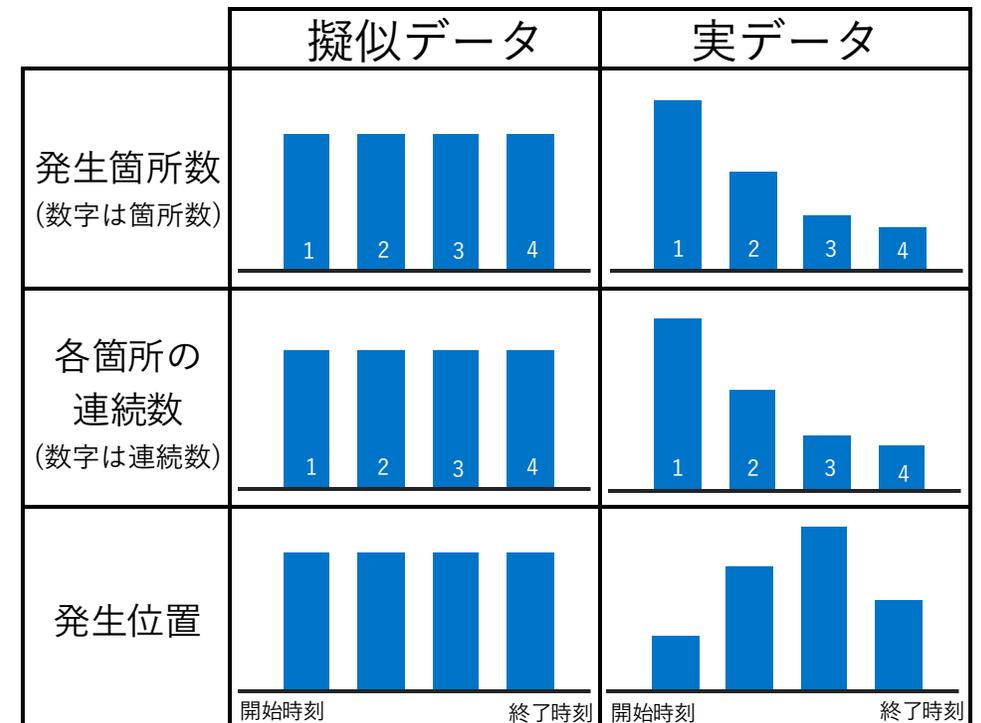
#### 実データ

⇒より現実世界に近い結果を得ることができる。

#### 擬似データ

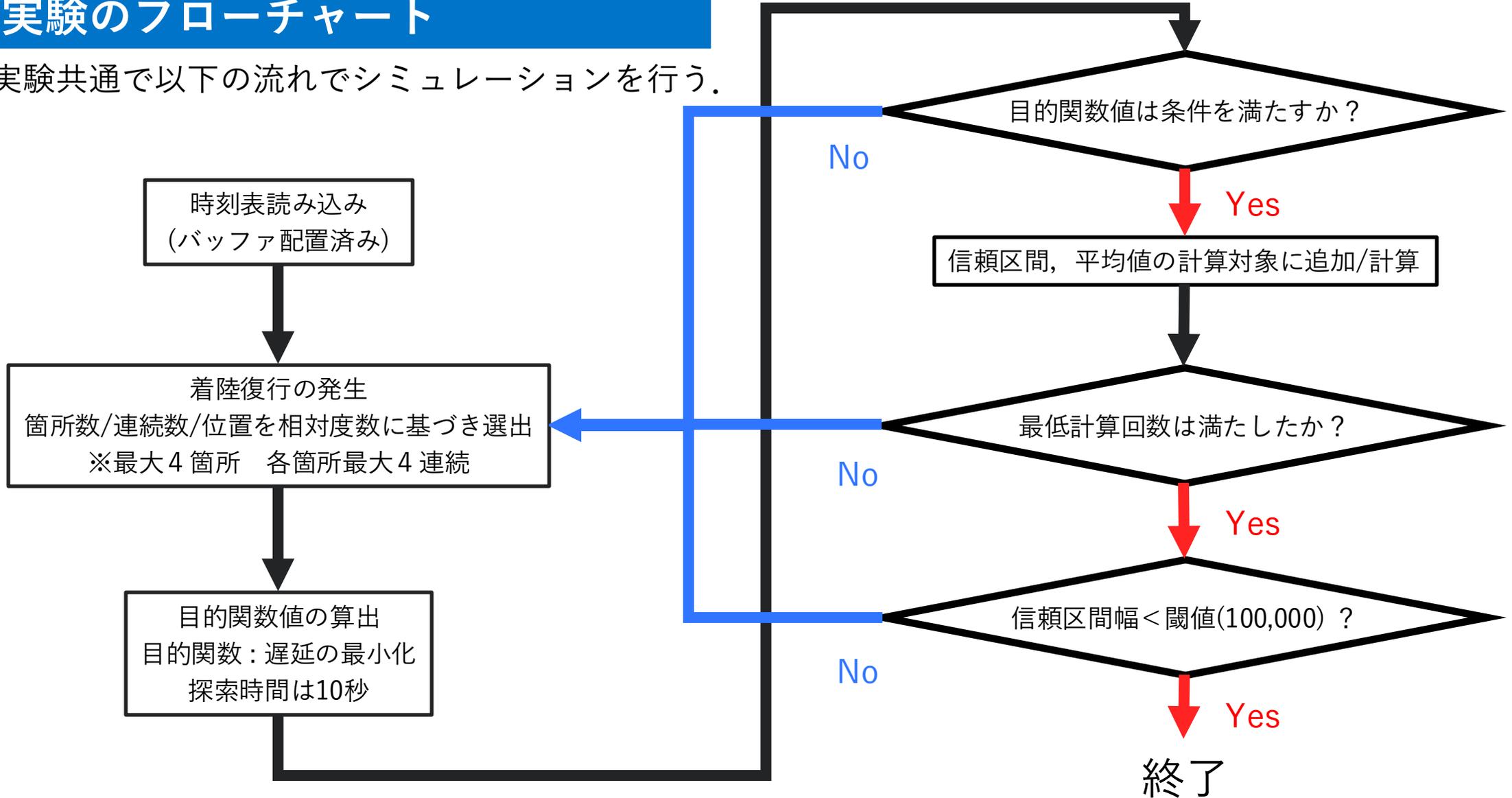
⇒より一般的な傾向や法則を見つけ出すことができる。

表6 それぞれの相対度数のイメージ



## 本実験のフローチャート

各実験共通で以下の流れでシミュレーションを行う。

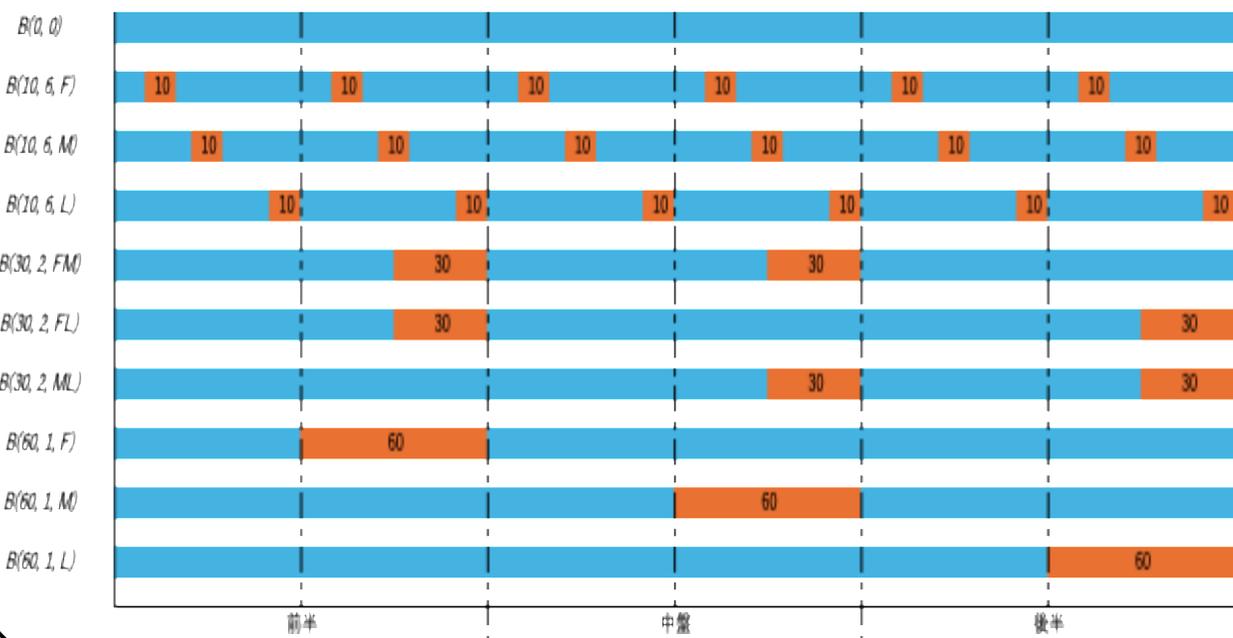


## 実験1 バッファ位置に着目した実験

目的：バッファの位置が遅延吸収に対してどのように影響するかを調査する

方法：以下の配置パターンに対して「実データ」「擬似データ」を用いて実験を行い、バッファを配置しない場合に対する各パターンの目的関数値の収束値の比によって比較を行う。

表7 実験1で用いるバッファ配置パターン



ブロッカー一つのあたりの時間が10, 30, 60分とし、バッファ位置をそれぞれ表8の通り設定したパターンを用いる。

表8 配置時間ごとのバッファ位置について

バッファ一つあたりの時間	バッファ位置	バッファ一つあたりの時間	バッファ位置
60分	前半	10分	前半 (1時間ごと) ⇒毎時10~19分
	中盤		中盤 (1時間ごと) ⇒毎時25~34分
	後半		
30分	前中盤		
	前後半		
	中後半		

## 実験1の結果と考察

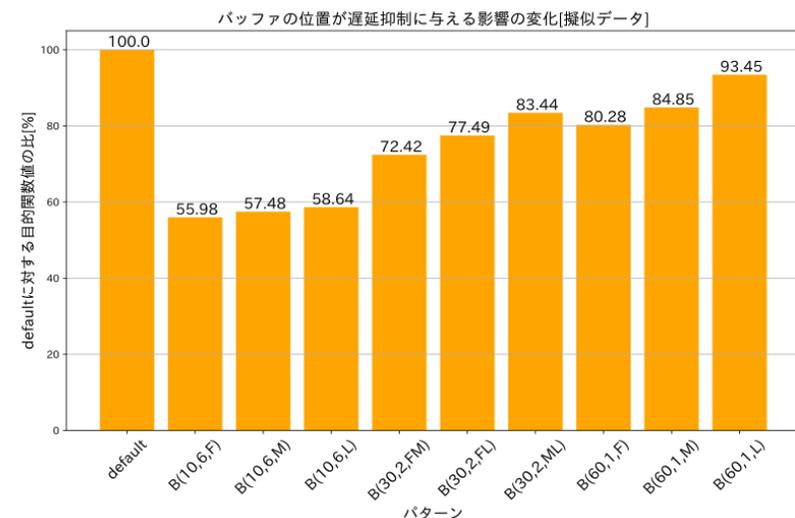
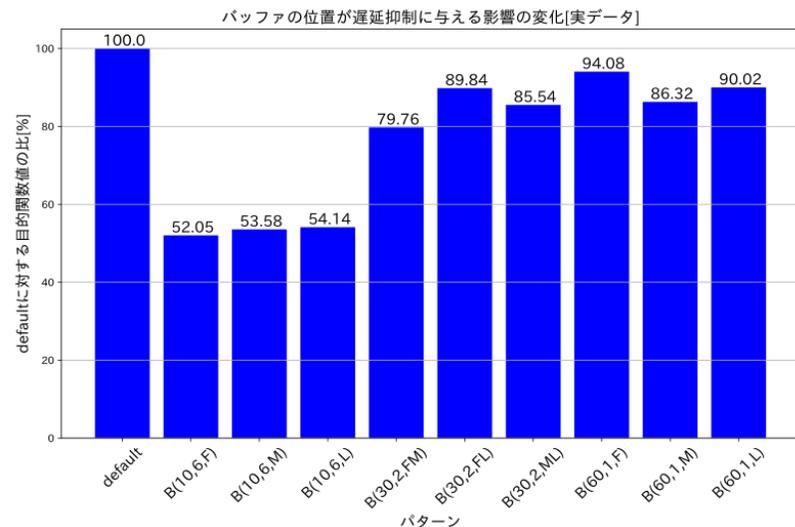


表9 各パターンで最も優れた配置位置

バッファ時間 (一つあたり)	実データ	擬似データ
10	前半(1時間毎)	前半(1時間毎)
30	前中盤	前中盤
60	中盤	前半

実データと擬似データともに「**前半～中盤**」にバッファを配置することで遅延の影響を抑制することができる。

これはなぜか...

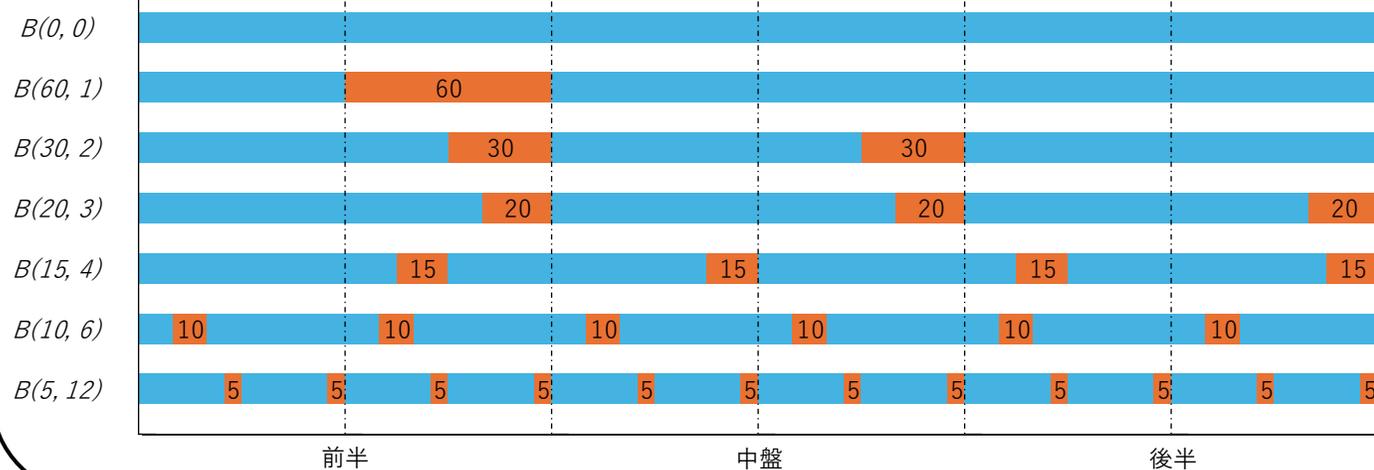
スケジュールの前中盤にバッファがあるため、仮に遅延が発生した場合でも、**後続の航空機に対して波及的な遅延を断ち切ることができる**ため、このような結果が得られたと考えられる。

## 実験2 バッファのブロック数に着目した実験

目的：バッファのブロック数がどのように遅延吸収に影響するか調査する

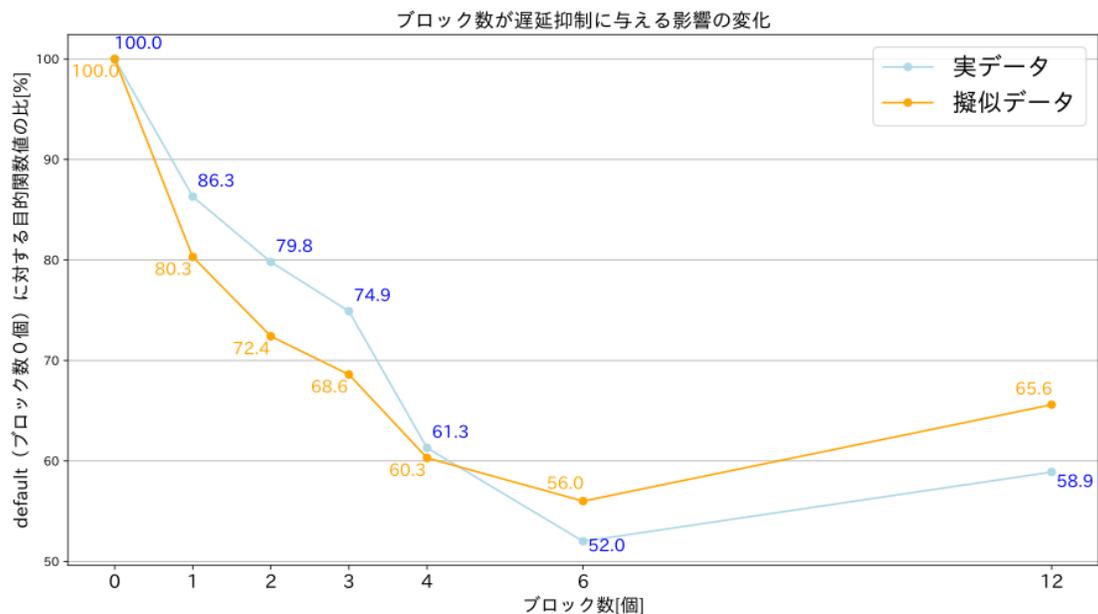
方法：実験1にて、バッファを前半～中盤に配置することでより遅延抑制効果が得られることが判明した。そこで、以下のような前半～中盤（ブロック数が多いものは全体に配置）にバッファを配置したパターンに対し、実験1と同様の手法により比較を行う。

表10 実験2で用いるバッファ配置パターン



この実験ではブロック数に着目するため、ブロック数を0, 1, 2, 3, 4, 6, 12としたパターンを用意した。バッファの合計時間については、ブロック数0（バッファ配置無し）を除き、60分で統一している。

## 実験2の結果と考察



ブロック数が増加するにつれ目的関数値が減少した。  
ブロック数6（バッファ時間10分）で最小となった。

バッファのブロック数を増やし、均等に配置することで、それぞれの**バッファ同士が遅延をカバー**でき、全体として遅延を軽減できる！

その一方で...

なぜブロック数が一定以上になると目的関数値は増加したのか？

ブロック一つあたりの時間が減少してしまったことで、**遅延を吸収しきれず**に後続機への影響を残してしまったことが原因と考えられる。

## 実験3 トレードオフに着目した実験

目的：バッファ幅の変動による遅延吸収と運用便数の関係について調査する

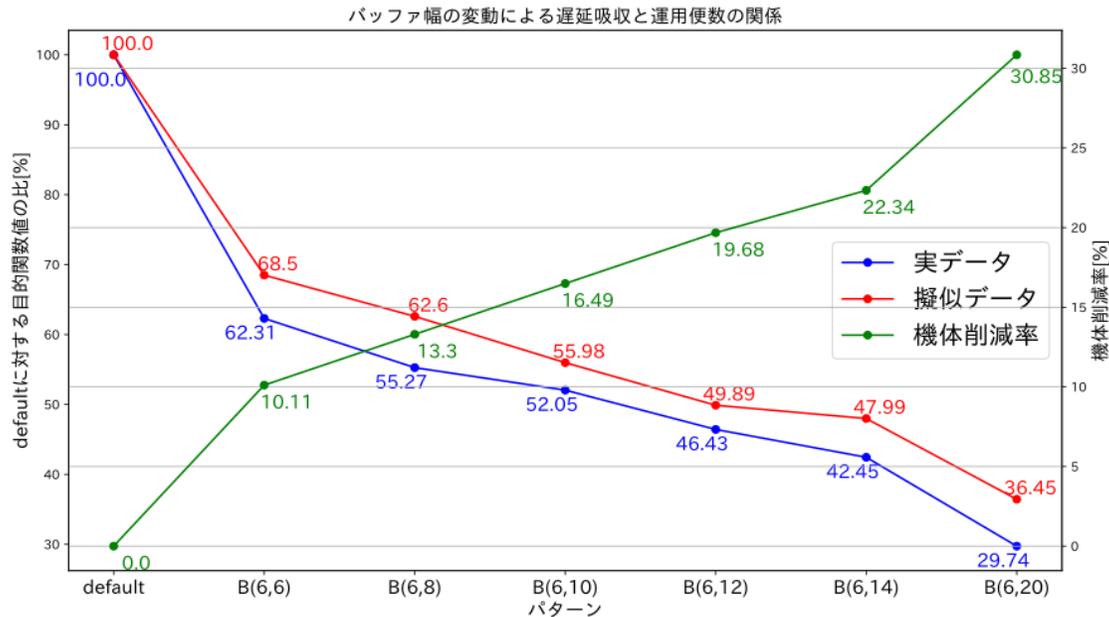
方法：実験1及び2を通じて最も目的関数値が優れていた配置パターンを基準として、同じ配置位置にてブロック一つあたりの時間を変動させ、運用便数と遅延吸収の関係を、実験1および2と同様にバッファを配置しないパターンに対する目的関数値の収束値の比により比較、考察する。

この実験では、実験1及び2を通じて最も目的関数値が優れていた $B(10, 6, F)$ を基準として、ブロック一つあたりの時間を、 $0(\text{default})/6/8/10/12/14/20$ 分と変化させていったパターンを用いる。各パターンでの運用便数と現状からの削減率は右の表の通りである。

表11 各パターンにおける運用便数と現状との比

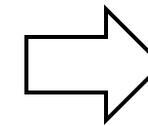
パターン	運用便数	削減率	パターン	運用便数	削減率
default	188	0%	$B(12, 6)$	151	19.68%
$B(6, 6)$	169	10.11%	$B(14, 6)$	146	22.34%
$B(8, 6)$	163	13.30%	$B(20, 6)$	130	30.85%
$B(10, 6)$	157	16.49%			

## 実験3の結果と考察



バッファ幅を広げ、航空機の削減量を増加させるにつれ、実データ、擬似データの結果ともに目的関数値は減少した。

運行便数を10%減らすだけでも、通常に比べ遅延に伴うコストを約30~40%削減できる。



バッファの効果は絶大！

その一方で...

表12 バッファ幅の変動と目的関数値減少率の変化 (擬似データ)

バッファ幅の変動 (一つあたり)	目的関数値減少率	バッファ幅の変動 (一つあたり)	目的関数値減少率
6分⇨8分	5.90%	12分⇨14分	1.90%
8分⇨10分	6.92%	14分⇨20分 (内は変動幅を2分とした場合の概算)	11.54%
10分⇨12分	6.09%		(3.84%)

バッファ一つあたりの時間を12分とした場合を境に、目的関数値の減少率が緩やかになっていることから、**バッファを長く設けすぎてしまうとその効果は薄くなってしまおう**と考えられる。

## 実験1, 2, 3の結果を踏まえた最適なバッファ配置

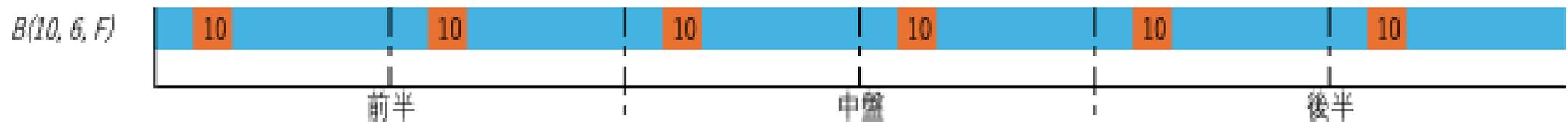
実験1, 2, 3よりそれぞれ以下のことが示された。

実験1 : バッファを「前半～中盤」に配置することで遅延の影響を抑えられること。

実験2 : バッファを分割することでスケジュール全体での遅延の影響が抑えられ、特に6分割（1時間毎に10分）にすることでより遅延を軽減できること。

実験3 : バッファの1ブロックあたりの時間を伸ばすことで遅延に伴うコストをより抑えられるが、一定の時間を超えると、バッファによる遅延抑制効果が薄れてしまうこと。

以上より、本研究にて実験に用いたバッファパターンの中では、バッファ配置パターンを $B(10, 6, F)$ とした場合に最も効率よくスケジュール全体での遅延を抑えることができると結論づける。



01 背景

02 研究の位置づけと目的

03 提案手法

04 数値実験

05 結論

# 結論

## 本研究の目的

本研究は、ASP-CPS[12][13]の手法を活用し、空港全体のスケジュールを対象としたバッファ配置において、運用効率を考慮しつつ、着陸復行を起因とした遅延の抑制効果が最大となる配置方法を明らかにする。

## 実験結果

- ・現在の羽田空港のスケジュールに適用し、バッファを配置することによる遅延の影響の抑制、過密化の解消を実現することができた。
- ・バッファを置かない場合との比較を行った際に、遅延の吸収と運用便数を明確にし、トレードオフの関係性を出すことができた。

## 本研究の貢献

本研究では、過密化に適応したバッファ配置の手法として、空港全体を対象としたバッファ配置を提案し、運用効率と遅延抑制の2つの観点から、その有効性について明らかにした。

⇒空港の過密化の解消並びに運用上の安全性の向上に貢献する。

## 今後の展望

- ・ 単一滑走路から複数滑走路への拡張  
⇒ 過密化の影響を受けやすいハブ空港では、滑走路を複数本用いて運用している空港が多くあるため、それらの空港にも対応したより大規模なモデルの作成が必要となる。
- ・ 航空会社における各航空機の需要率を考慮したスケジュールモデルの作成  
⇒ 過密化を解消するために運行効率をさげてしまったため一台当たりの航空機の需要が高くなるようなスケジュールの作成が必要になる。
- ・ 実際のスケジュールにもとづいた航空機の間引き  
⇒ 実際のスケジュールに合わせると一日に数本しか運航できない特定の路線が生まれてしまう。またANAやJALなどの大手航空会社に運行が偏ってしまう。それを考慮したリスケジュールリングを考える必要がある。

## 参考文献

---

[1] IATA Global Air Travel Demand Continued Its Bounce Back in 2023

<https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-01-31-02/>

[2] Global Outlook for Air Transport A local sweet spot [https://www.iata.org/en/iata-](https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport---december-2023---report/)

[repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport---december-2023---report/](https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport---december-2023---report/)

[3] 株式会社 JTB総合研究所. “アフター・コロナの国際線展開～LCC躍進の背景に迫る～”

<https://www.tourism.jp/tourism-database/column/2024/03/lcc-after-covid/>

[4] 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻, 岡部朋永, 川越吉晃. “羽田空港地上衝突事故の見解”

[http://www.plum.mech.tohoku.ac.jp/pdf/20240103\\_研究室見解\\_0104改定.pdf](http://www.plum.mech.tohoku.ac.jp/pdf/20240103_研究室見解_0104改定.pdf) (閲覧日: 2024/10/17)

[5] BBCニュース. “羽田空港で日本航空機が炎上、海保機と衝突 乗客乗員379人全員脱出と”

<https://www.bbc.com/japanese/67862916>

[6] 国土交通省. “羽田空港のこれから”

<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001316521.pdf>

## 参考文献

---

[7] 国土交通省. “特定本邦航空運送事業者に関する航空輸送サービスに係る情報公開（令和5年10月～令和5年12月）のポイント” <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001741804.pdf>

[8] 国土交通省. “特定本邦航空運送事業者に関する航空輸送サービスに係る情報公開（令和元年10月～12月）のポイント” <https://www.mlit.go.jp/common/001343719.pdf>

[9] 日本経済新聞. “過密化する羽田空港 新ルートでどう変わる？”  
<https://www.nikkei.com/video/6096984075001/>

[10] 大田区議会 羽田空港対策特別委員会.  
[https://www.city.ota.tokyo.jp/gikai/kugikai\\_katsudou/iinkai/iinkaishiryu/hanedakuko/index.html](https://www.city.ota.tokyo.jp/gikai/kugikai_katsudou/iinkai/iinkaishiryu/hanedakuko/index.html)

[11] Jan K. Brueckner, Achim I. Czerny, Alberto A. Gaggero. “Airline mitigation of propagated delays via schedule buffers: Theory and empirics”, 2021  
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554521001058?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=8d76c258e83825e7](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554521001058?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8d76c258e83825e7)

- [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.Fouilhoux, 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.  
<https://www.mit.edu/~hamsa/pubs/BalakrishnanChandranOR.pdf>
- [14] Flightradar24 LIVE AIR TRAFIC . <https://www.flightradar24.com/airport/hnd/arrivals>
- [15] Gurobi Optimizer. <https://www.gurobi.com/jp/products/gurobi/>
- [16] sky-budget. “JAL、2024年7月の搭乗実績を発表 利用率は国際線82.9%、国内線75.8%”  
<https://sky-budget.com/2024/08/31/jal-data-jul2024/>
- [17] NTTデータ数理システム. “Nuorium Optimizer マニュアル V26”  
<https://www.msi.co.jp/solution/nuopt/docs/manual/html/01-00-00.html>

### 謝辞

提供していただきました，Nuorium Optimizerによって，  
本研究を円滑に進めることができました。  
株式会社NTTデータ数理システム様に心より感謝申し上げます。

本研究にデータの使用を許諾していただきました  
大田区議会 羽田空港対策特別委員会様に  
深く感謝申し上げます。