

Title	乗客に与える負荷を考慮した航空機搭乗戦略の評価についての研究
Author(s)	間宮, 大夢
Citation	
Issue Date	2023-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/18330
Rights	
Description	Supervisor: 平石 邦彦, 先端科学技術研究科, 修士(情報科学)

修士論文

乗客に与える負荷を考慮した
航空機搭乗戦略の評価についての研究

間宮 大夢

主指導教員 平石 邦彦

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
(情報科学)

令和 05 年 3 月

Abstract

Much of the previous research has focused on reducing boarding times. This is because the boarding strategies currently used in many airports have been shown to be inefficient. For example, back-to-front boarding strategies, which are often used as boarding strategies, are inefficient, and in some cases, random passenger boarding strategies are more efficient.

Therefore, although various studies have been conducted on efficient boarding strategies for aircraft, such proposed boarding strategies are rarely used in airports. Thus, the fact that efficient boarding strategies are proposed but rarely used in practice is problematic.

In order to ensure that boarding strategies proposed in various studies are actually utilized at airports, I thought it would be necessary to compare boarding strategies. In addition, many conventional studies compare boarding strategies in terms of efficiency. However, if a boarding strategy is only efficient, but places a heavy burden on passengers, there is a possibility that airports that use that boarding strategy will be avoided in the long run.

Therefore, it is necessary to make comparisons not only in terms of efficiency, but also in terms of the burden placed on passengers.

The load on passengers for each boarding strategy is measured by simulating the boarding process.

In addition, although most of the previous studies on boarding strategies have focused on aircraft with a single entrance, there are currently aircraft with not only a single entrance but also two entrances. Therefore, a boarding simulation using an aircraft with two entrances was conducted.

The simulation and the measured stress values of passengers revealed aspects that could not be seen only from the aspect of high efficiency. For example, the strategy that was considered the most efficient had the highest mean and median stress values, while the strategy that was not inefficient but was less efficient than the most efficient strategy had the lowest mean and median stress values.

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	2
1.2	従来研究	3
1.3	目的	4
1.4	新規性	5
第2章	方法	6
2.1	航空機と搭乗方法	7
2.2	乗客モデル	12
2.3	シミュレーション環境と実装方法	13
2.4	評価指標	20
第3章	結果と考察	22
3.1	シミュレーション条件	23
3.2	結果	25
3.3	考察	38
第4章	まとめ	42
4.1	結論	43
4.2	今後の課題	44

目 次

2.1	航空機の全体像	9
2.2	入口が一つの航空機	9
2.3	入口が二つの航空機	9
2.4	back-to-front 方式の搭乗順	10
2.5	back-to-front-outin 方式の搭乗順	10
2.6	outin 方式の搭乗順	10
2.7	group4 方式の搭乗順	10
2.8	random 方式の搭乗順	11
2.9	reverse-pyramid 方式の搭乗順	11
2.10	steffen 方式の搭乗順	11
2.11	n-car5 × 2 方式の搭乗順	11
2.12	Petri net の動き 1	15
2.13	Petri net の動き 2	15
2.14	Petri net の動き 3	16
2.15	Petri net の動き 4	16
2.16	搭乗シミュレーション	17
2.17	積載モデル	18
2.18	乗客モデル	18
2.19	シミュレーションの搭乗客の着席部	19
2.20	シミュレーションの搭乗客の移動部分	19
3.1	取得データの例	23
3.2	乗客の現在地の表し方	24
3.3	搭乗戦略ごとのストレス値に関する箱ひげ図	26
3.4	random 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷	27
3.5	back-to-front 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷	28
3.6	back-to-front-outin 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷	29
3.7	outin 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷	30
3.8	group4 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷	31
3.9	n-car5 × 2 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷	32
3.10	n-car10 × 2 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷	33
3.11	n-car10 × 4 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷	34

3.12	n-car10 × 6 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷	35
3.13	reverse-pyramid 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷	36
3.14	steffen 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷	37
3.15	各戦略の乗客が着席までにかかる時間の箱ひげ図	39
3.16	各戦略のすれ違い回数の箱ひげ図	40
3.17	各戦略のすれ違い回数	40

表 目 次

3.1	乗客の状態を表す数字と文字	24
3.2	ストレスの値の搭乗戦略による比較	26
3.3	各戦略の着席までにかかる時間	39
3.4	各戦略のすれ違い回数	41

第1章 はじめに

1.1 背景

航空機への搭乗時間を短縮することを目的とした航空機への搭乗戦略に関する研究はいくつかある．例えば，Milne and Kelly(2014)[8] は乗客の荷物の量を航空機全体で均等になるように配置をするような手法を提唱し，Shengjie et al.(2014)[11] は乗客の荷物の量によって乗客を配置し，荷物の多い乗客から搭乗させる手法を提唱している．また，Steffen(2008)[14] は最も効率の良い搭乗戦略を提唱している．さらに Steffen and Hotchkiss(2012)[15] は，そこで提唱した方法の実証実験を行っている．航空機への搭乗時間は，航空機にかかわる時間の中でも特に時間がかかる部分である．この搭乗時間を短縮することによって，乗客が移動にかかる所要時間を減らすことができるとともに，出発できる飛行機が何便か増えることで航空会社の利益にもつながります．しかし，現在多く使われている搭乗戦略は時間がかかるものである．このことから航空機への搭乗時間を短縮する搭乗戦略に関する研究は多く行われている．

こうして提唱された戦略は現在多くの空港で使用されている搭乗戦略よりも効率良く乗客を搭乗させることができるものの，実際に空港で使用されていることは少ない．これは航空会社が搭乗戦略を変更する際のコストや搭乗戦略を変更したことによる乗客への負担を考えたためではないかと考える．そのため，空港側が新たな搭乗戦略を導入するためには，各搭乗戦略が時間的に効率が良いことだけに着目をするのではなく，乗客が搭乗する中で感じる負荷についても着目をして各搭乗戦略の評価を行うことが必要だと考える．

1.2 従来研究

従来の研究は搭乗時間を短くする搭乗戦略を提唱するものが多い。例えば、Steffen(2008)[14]は提唱した搭乗戦略は outin 方式や random 方式よりも 2 倍の効率で搭乗することが可能であると示している。さらに、Milne and Kelly(2014)[8]は steffen 方式をもとに新しい戦略を提唱し、Steffen 方式よりも 1.1% ~ 3.0% まで搭乗時間が改善されたと示している。他にも Menkes et al.(2005)[18]は、reverse-pyramid 方式という戦略を説明し、最大 39% 搭乗時間を削減できるとしている。Shengjie et al.(2014)[11]は、Steffen 方式と乗客の特性を組み合わせた新しい搭乗戦略を提唱し、セルラーオートマトンを用いてシミュレーションを行っている。その結果、搭乗時間が最短のもので、高い場合でも Steffen 方式が 26.61 であり、提唱している戦略が 25.62 となっている。また、低い場合や普通の場合でも少し搭乗時間を短縮することができている。このように、効果的な搭乗戦略は提唱されている。また、Zeineddine(2017)[20]は、効率的な搭乗だけでなく、家族や友人などのグループで搭乗を行える搭乗戦略を提唱し、steffen 方式に近い効率で搭乗を行えると示している。

他に行われている研究もいくつかある。Schult(2018a)[12]は実際のデータを用いた乗客のモデル化を行っている。また、Schult(2018b)[13]は検証済みの確率的航空機搭乗モデルを使用し、いくつかの戦略の比較を行っている。他にも、Landeghem and Beuselinck(2002)[19]はシミュレーションを行い、結果を用いていくつかの戦略を比較し搭乗時間の短縮ができる余地を示している。さらに Tang(2012)[16]は乗客の個人特性を考慮した航空機搭乗モデルを作成し、新たな搭乗戦略を提唱している。乗客に注目をしている研究としては、Baek et al.(2013)[4]が乗客の挙動が搭乗にどのような影響を及ぼすのかを示している。

このように、搭乗時間を短縮する新しい搭乗戦略の提唱を行う研究や新たなモデルを用いて搭乗時間の比較を行う研究が行われている。

1.3 目的

本研究の目的は、各搭乗戦略を乗客への負荷という指標を用いて評価することである。これまでの搭乗戦略は搭乗時間に注目をして比較が行われている。しかし、乗客は搭乗時間が短くなることは求めているものの、同時に負荷が少ない搭乗戦略も求めているのではないかと考える。そのため搭乗戦略の評価に乗客への負荷という指標を加えることによって、搭乗時間が短いだけでなく乗客へ負担を与えにくい搭乗戦略を示す。

1.4 新規性

本研究は乗客への負荷に注目し評価を行うことに新規性があると考える．既存研究では、搭乗時間にのみ注目をしている研究がほとんどである．これは搭乗時間を短くすることで、限られた時間の中で1便でも多くの航空機を飛ばすためには必要なことである．またそうすることで航空会社の利益を増やすことや乗客の所要時間の短縮にもつながり大きな利益がある．

また、搭乗戦略を比較している研究もいくつかある．例えば、Cimler et al.(2012)[5]は航空機への搭乗戦略の比較を行うエージェントベースモデルを作成しているものの、やはり比較を行っている点としては搭乗時間である．また、Audenaert et al.(2009)[2]もマルチエージェントを用いたシミュレーションを行い、搭乗戦略のロバスト性などを述べている．さらに Camelia(2018)[6]もエージェントベースのシミュレーションを行い搭乗戦略の比較を行っているものの、着目している点は搭乗の効率と持続性である．

このように搭乗戦略では搭乗時間の短縮に注目が集まることは理解ができるものの、乗客が搭乗する中で感じる負荷についても注目する必要があると考える．搭乗戦略の中でも、人とすれ違う回数が増える戦略や移動に時間がかかり荷物を煩わしく感じる戦略もあるはずである．そのため乗客への負荷という指標を用いた評価を行う．

第2章 方法

2.1 航空機と搭乗方法

本論文で用いる航空機は図 2.1 のようなものである。一列 6 人、20 列の合計 120 人乗りの航空機を使用する。また、座席にはエコノミークラスやビジネスクラスのような区別はなく、すべての座席に乗客が座る。そして、基本的に乗客は乗客が座る座席の収納棚に荷物を置くことになる。しかし収容棚の容量を超えて荷物を置くことはできず、容量が満杯の場合には他の列の収容棚に荷物を置きに行くことになる。乗客は荷物を置くのにかかる時間として、0 ～ 100 までの数字をランダムに割り当てられる。今回はその数字を手荷物の重さとしても使用している。

また、従来の研究では、航空機への入り口を一つとして想定したものが多い。しかし、実際には入り口が二つ存在する航空機も使用されている。そのため入り口が二つ存在する航空機について考える必要がある。

航空機への入り口が二つあることによって、入り口が一つの場合と変化する点がいくつかある。まず、入り口が一つの航空機の場合は、図 2.2 にあるように、オレンジ色の入り口から一方通行で、反対方向に移動することはなく乗客が目指す座席まで移動していく。荷物を載せたり、通路側の乗客が窓側の乗客が座れるように一度通路に出てきたりするような、乗客が座席に座る準備をしている間に他の乗客がその乗客を越していくことができない。つまり、列の先頭が止まってしまうと、列全体が止まってしまうことになる。このような座席内干渉の問題がある。また、19 列目の乗客が自身の座席に座るためには列に並んで、20 列分移動する必要がある。

一方入口が二つある航空機の場合には、図 2.3 にあるように、オレンジの入り口が二つある。入口が二つあることによって、移動が必要な乗客は 9,10 列目の乗客であり移動にかかる距離が 10 列分ほどになり入口が一つの場合よりも短くなる。また、方向が違う乗客が対面した場合乗客同士がすれ違う必要が生まれる。さらに入り口が一つの航空機の場合と同じく、乗客が座席に着席をする準備をしている場合には、その乗客が着席するまでその列を超すことはできない。

このように、入り口の数異なる場合には異なる特徴が出てくるため、入り口が一つの航空機のみならず、入り口が二つの航空機についても考える必要がある。

また、本論文内で比較に用いられる搭乗戦略がいくつかあり、その搭乗戦略を説明していく。

まず 1 つ目は、back-to-front 方式である。この搭乗法は図 2.4 に示されている。図にある番号は埋まっていく座席の順番の例である。この戦略では後ろの席に着席する乗客から搭乗させていく戦略である。乗客の搭乗順はわかりやすいものであるが、Bachmat and Elkin(2008)[3] は back-to-front 方式は random 方式よりも 20% 以上良い結果を出すことはできないと提唱していたり、Jaehn(2015)[7] は乗客が着席するまでにかかる時間が多く、random 方式よりも時間がかかってしまう戦略だと述べていたりする。

2 つ目の戦略は、back-to-front 方式に少し手を加えた back-to-front-outin 方式と

いう戦略である。この戦略は back-to-front 方式と同様に機体の後ろに着席をする乗客から載せていくが、その中でも窓側の乗客を優先的に載せていくという戦略である。具体的には、図 2.5 のような順番で乗客が搭乗していく。

3 つ目は outin 方式である。この戦略は back-to-front-outin 方式のように、窓側の席に座る乗客から搭乗させていくという方法である。ただ back-to-front-outin 方式とは異なり、必ずしも機体の後ろに着席をする乗客から載せていく戦略ではない。図 2.6 は搭乗順の一例である。

4 つ目は group4 方式というものである。この方式は 0 ～ 19 まである列を 4 分割し、搭乗させていく戦略である。具体的には 15 ～ 19 列に座る乗客、10 ～ 16 列に座る乗客、5 ～ 11 列に座る乗客、0 ～ 6 列に座る乗客の順番で乗客を乗せていく戦略である。図 2.7 に一例を示している。

5 つ目は random 方式である。図 2.8 は一例であり、この方式は無作為に乗客を搭乗させていくという戦略である。Jaehn(2015)[7] はこの戦略は back-to-front 方式よりも搭乗にかかる時間は短いとしている。

6 つ目は reverse-pyramid 方式であり、Menkes et al.(2005)[18] が紹介している戦略である。この戦略は窓際の乗客を優先的に搭乗させていくが、すべての窓際の乗客を乗せるのではなく、ある程度の列まで搭乗させた後、それ以降の窓際の乗客を乗せると同時に、窓際の席がすでに埋まっている列の中央の座席に座る乗客も載せていくというように搭乗させていく戦略である。具体的には、図 2.9 にあるように搭乗させていく。

7 つ目は steffen 方式である。この戦略は Steffen(2008)[14] によって提唱された戦略である。最適な搭乗順をアルゴリズムによって探し出し、いくつか搭乗順の例を示しだしている。その例は図 2.10 に示してある。この戦略が時間の効率的には一番良い搭乗戦略だとされている。

8 つ目は n-car 方式である。この方式は上原 (2021)[17] が提唱した戦略である。列を任意の数字で分割し、その分割した列に目標の座席がある乗客を任意の人数乗せていく。このように、任意の値を割り当てることができるため、ある程度柔軟性がある。列を 5 分割し、分割したエリアに目標の座席がある乗客 2 名を載せていく場合の搭乗順の一例を図 2.11 に示す。

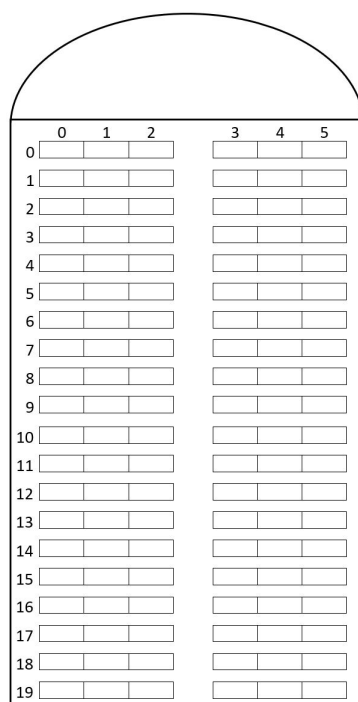


図 2.1: 航空機の全体像

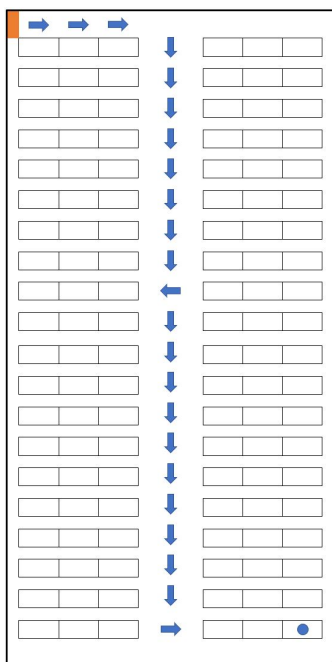


図 2.2: 入口が一つの航空機

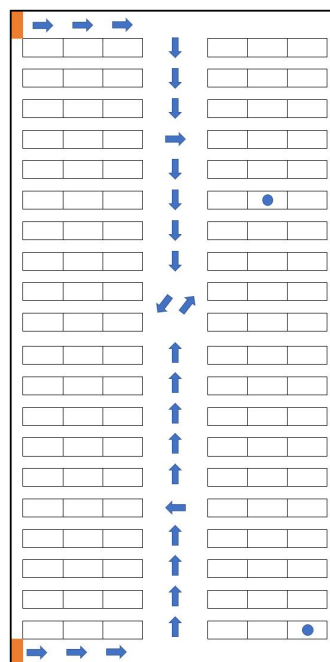


図 2.3: 入口が二つの航空機

114	115	116	117	118	119
108	109	110	111	112	113
102	103	104	105	106	107
96	97	98	99	100	101
90	91	92	93	94	95
84	85	86	87	88	89
78	79	80	81	82	83
72	73	74	75	76	77
66	67	68	69	70	71
60	61	62	63	64	65
54	55	56	57	58	59
48	49	50	51	52	53
42	43	44	45	46	47
36	37	38	39	40	41
30	31	32	33	34	35
24	25	26	27	28	29
18	19	20	21	22	23
12	13	14	15	16	17
6	7	8	9	10	11
0	1	2	3	4	5

図 2.4: back-to-front 方式の搭乗順

38	78	118	119	79	39
36	76	116	117	77	37
34	74	114	115	75	35
32	72	112	113	73	33
30	70	110	111	71	31
28	68	108	109	69	29
26	66	106	107	67	27
24	64	104	105	65	25
22	62	102	103	63	23
20	60	100	101	61	21
18	58	98	99	59	19
16	56	96	97	57	17
14	54	94	95	55	15
12	52	92	93	53	13
10	50	90	91	51	11
8	48	88	89	49	9
6	46	86	87	47	7
4	44	84	85	45	5
2	42	82	83	43	3
0	40	80	81	41	1

図 2.5: back-to-front-outin 方式の搭乗順

0	40	80	100	60	20
1	41	81	101	61	21
2	42	82	102	62	22
3	43	83	103	63	23
4	44	84	104	64	24
5	45	85	105	65	25
6	46	86	106	66	26
7	47	87	107	67	27
8	48	88	108	68	28
9	49	89	109	69	29
10	50	90	110	70	30
11	51	91	111	71	31
12	52	92	112	72	32
13	53	93	113	73	33
14	54	94	114	74	34
15	55	95	115	75	35
16	56	96	116	76	36
17	57	97	117	77	37
18	58	98	118	78	38
19	59	99	119	79	39

図 2.6: outin 方式の搭乗順

90	91	92	93	94	95
96	97	98	99	100	101
102	103	104	105	106	107
108	109	110	111	112	113
114	115	116	117	118	119
60	61	62	63	64	65
66	67	68	69	70	71
72	73	74	75	76	77
78	79	80	81	82	83
84	85	86	87	88	89
30	31	32	33	34	35
36	37	38	39	40	41
42	43	44	45	46	47
48	49	50	51	52	53
54	55	56	57	58	59
0	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29

図 2.7: group4 方式の搭乗順

53	91	17
75	97	98
102	103	14
108	21	69
114	46	116
12	27	62
66	5	68
42	33	74
88	41	80
84	59	86
30	93	32
119	37	38
77	23	44
48	113	50
54	99	56
100	29	2
6	81	8
60	13	104
18	19	20
35	25	26

31	94	95
55	0	101
105	10	107
63	112	49
117	118	36
111	64	65
110	70	71
96	76	72
7	82	51
87	78	89
73	34	24
39	40	79
45	115	47
83	52	90
57	58	85
3	4	67
9	106	11
15	16	92
109	22	43
61	28	1

図 2.8: random 方式の搭乗順

46	75	107
45	74	106
44	73	105
43	72	104
42	61	103
26	60	102
25	59	101
24	58	100
11	57	99
10	56	98
9	55	97
8	54	96
7	53	87
6	52	86
5	35	85
4	34	84
3	33	83
2	32	82
1	31	81
0	30	80

119	79	51
118	78	50
117	77	49
116	76	48
115	71	47
114	70	29
113	69	28
112	68	27
111	67	23
110	66	22
109	65	21
108	64	20
95	63	19
94	62	18
93	41	17
92	40	16
91	39	15
90	38	14
89	37	13
88	36	12

図 2.9: reverse-pyramid 方式の搭乗順

39	79	119
19	59	99
38	78	118
18	58	98
37	77	117
17	57	97
36	76	116
16	56	96
35	75	115
15	55	95
34	74	114
14	54	94
33	73	113
13	53	93
32	72	112
12	52	92
31	71	111
11	51	91
30	70	110
10	50	90

109	69	29
89	49	9
108	68	28
88	48	8
107	67	27
87	47	7
106	66	26
86	46	6
105	65	25
85	45	5
104	64	24
84	44	4
103	63	23
83	43	3
102	62	22
82	42	2
101	61	21
81	41	1
100	60	20
80	40	0

図 2.10: steffen 方式の搭乗順

39	79	119
29	69	109
19	59	99
9	49	89
37	77	117
27	67	107
17	57	97
7	47	87
35	75	115
25	65	105
15	55	95
5	45	85
33	73	113
23	63	103
13	53	93
3	43	83
31	71	111
21	61	101
11	51	91
1	41	81

118	78	38
108	68	28
98	58	18
88	48	8
116	76	36
106	66	26
96	56	16
86	46	6
114	74	34
104	64	24
94	54	14
84	44	4
112	72	32
102	62	22
92	52	12
82	42	2
110	70	30
100	60	20
90	50	10
80	40	0

図 2.11: n-car5 × 2 方式の搭乗順

2.2 乗客モデル

乗客モデルについて説明を行う．まず乗客はそれぞれ目標の座席を持っている．その座席は列番号と行番号を用いて表している．例えば，乗客 A の目標の座席は 10 列，3 行目というように表している．また，乗客は荷物をそれぞれ持っていて乱数によってその荷物の容量を決定する．

最初に乗客は目標の座席がある列まで移動を行う．その移動の際，移動先の列に乗客がいない場合にはすぐに移動をすることができる．しかし，乗客がいた場合にはその乗客が着席をするか，次の列へ移動をしていなくなる限り移動することができない．また，乗客の移動先が反対方向であった場合にはすれ違うことができる．

移動を行い目標とする座席のある列にたどり着いた後，荷物を載せるという行動をする．荷物を載せようとした場合に，各列に定義された収納棚の容量よりも，乗客の荷物の容量のほうが大きかった場合には乗客は他の列へ移動し，移動先の列の収納棚へ荷物を収納する．荷物を載せた後に再び目標の列へ移動する．

目標の列へ到着し荷物を載せた後に，乗客は着席をする．その列に先に乗客が着席していなかった場合にはすぐに着席をすることが可能である．しかし，着席をしようとしている乗客よりもより通路側の席にすでに乗客が着席している場合には席を入れ替える必要があり，席を入れ替えた後に着席する．

2.3 シミュレーション環境と実装方法

今回シミュレーションにRenew[1]というものをを用いる。RenewとはPetri net[10][9]を元にシミュレーションを行うソフトウェアである。

このPetri netはトランジションとプレースの二つを用いて様々なものを表現することができる。図2.12にあるように、トランジションとプレースは矢印でつながっている。トランジションは動作する際に、トランジションに向けた矢印を持つプレースの中にトークンがなくてはならず、図2.13のように、トランジションが動作した後にトランジションから出ていく矢印のついたプレースにトークンが一つ追加される。

また、複数のプレースがトランジションに入っていく場合には、トランジションが動作するためには、すべてのプレースにトークンが一つ以上なくてはならず、同様にトランジションの動作後には、出ていく矢印がつながっている複数のプレースには、すべてのプレースにトークンが一つ追加される。この動作を基本にして、搭乗シミュレーションを作成している。

また、renewはオブジェクト指向のペトリネットを動かすことができる。そのためトークンとして様々なデータ型を扱うことができ、他のクラスとして定義したデータ型を扱うこともできる。さらに時間についても表現することができ、動作が終わるまで時間がかかるものもそれに合わせた時間をかけ動作させることができる。

実際の搭乗シミュレーションの様子が図2.16であり、上原(2021)[17]内のモデルをベースとしている。航空機は図2.1をモデルにしている、6行20列で座席が配置されており、6行の真ん中に通路が通っているため、3行と3行に分割されている。各列には荷物の容量が設定されており、その容量を管理しているクラスが図2.17である。図2.18は乗客モデルであり、乗客の番号、目標とする列番号、目標とする行番号、荷物の重さを持つ。他にも乗客が持つ変数には、他の乗客とすれ違った回数や乗客が着席するまでの時間がある、それらを用いて乗客のストレス値を計算する。このような変数を持った乗客のインスタンスが並行動作をしシミュレーションを行っていく。図2.16の中にある p が乗客のインスタンスになっている。

ベースとしたモデルからの変更点は、乗客が入ることができる場所が、0列目と19列目の二か所あり、乗客同士がすれ違うことができるようになっている点と、各列に荷物の容量が定義されており、その容量を超える荷物を載せることはできず、乗客は別の列へ移動しなくてはならないという要素を取り入れた点である。

図2.19は搭乗シミュレーションの中の乗客が列の間にいる場合の部分である。乗客モデルの仕様を再現するような形になっている。最初に黄色のプレースにトークンとなっている乗客のインスタンスが入ってくる。その後赤いプレースに他に必要な情報とリストになって移動し、そこが目標の列であった場合には荷物を下ろすトランジションを発火し、着席を表すトランジションを発火させる。ただ、荷

物の重さが収容棚の容量よりも小さい場合には発火が可能であるが，その条件を満たさない場合には発火ができず，別の列に移動をし同様の条件で荷物を下ろすトランジションを発火する．また着席を表すトランジションの中で席の入れ替えも行っている．

図 2.20 は乗客が別の列に移動をする部分である．赤いスペースと黄色のスペースはそれぞれ隣接する座席の列と座席への入り口を表す．左右の赤いスペースとトランジションと黄色のスペースの 3 つは次の列に乗客がいない場合に発火するもので，通常の乗客の移動を表している．中央にあるいくつかのトランジションは，乗客同士がすれ違うことを表している部分である．このようにして，乗客が目標の列に移動をしていき，シミュレーションを行っていく．

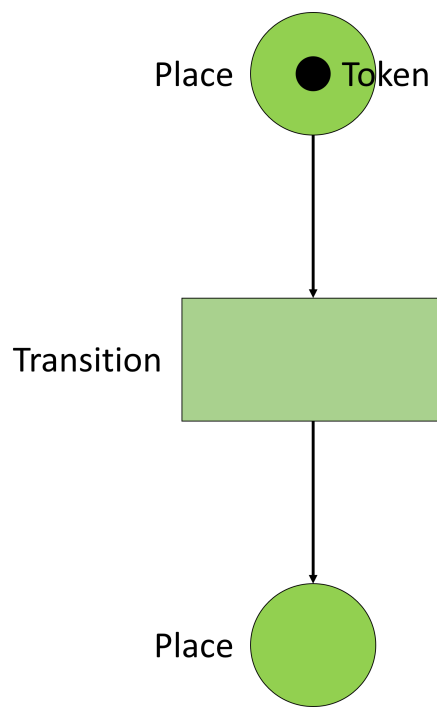


図 2.12: Petri net の動き 1

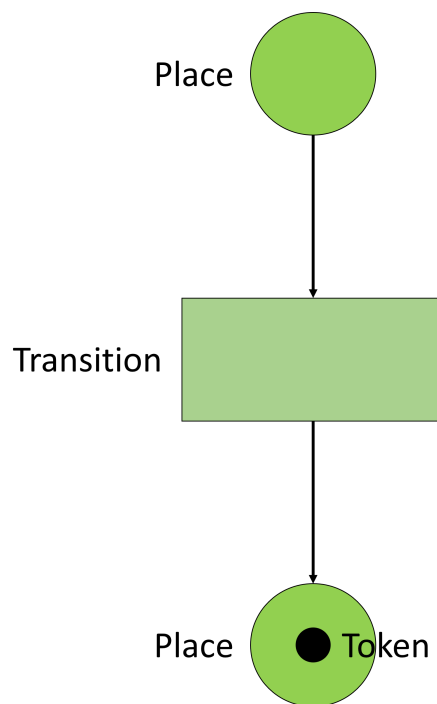


図 2.13: Petri net の動き 2

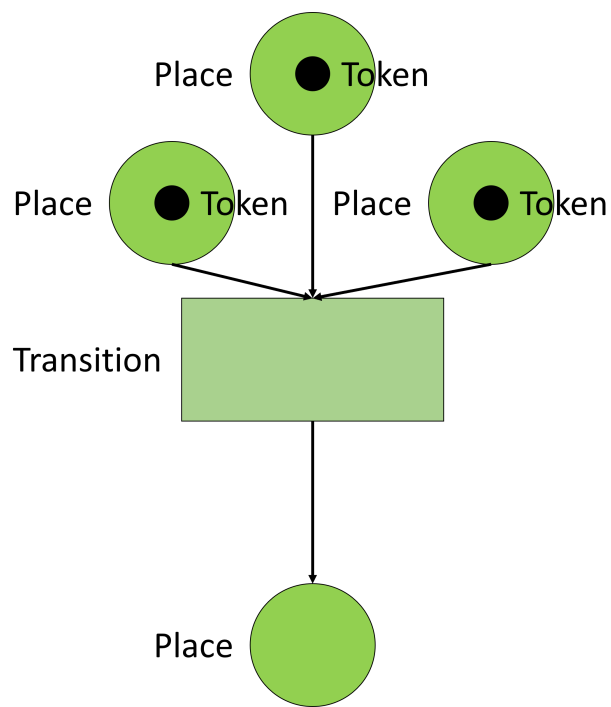


図 2.14: Petri net の動き 3

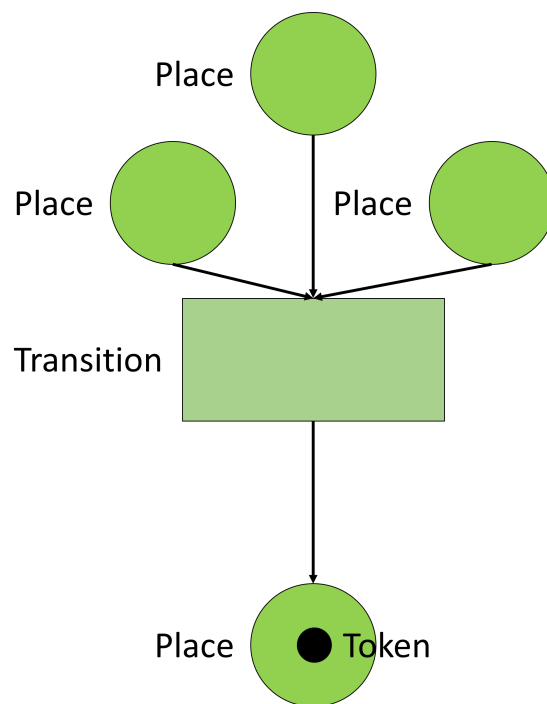
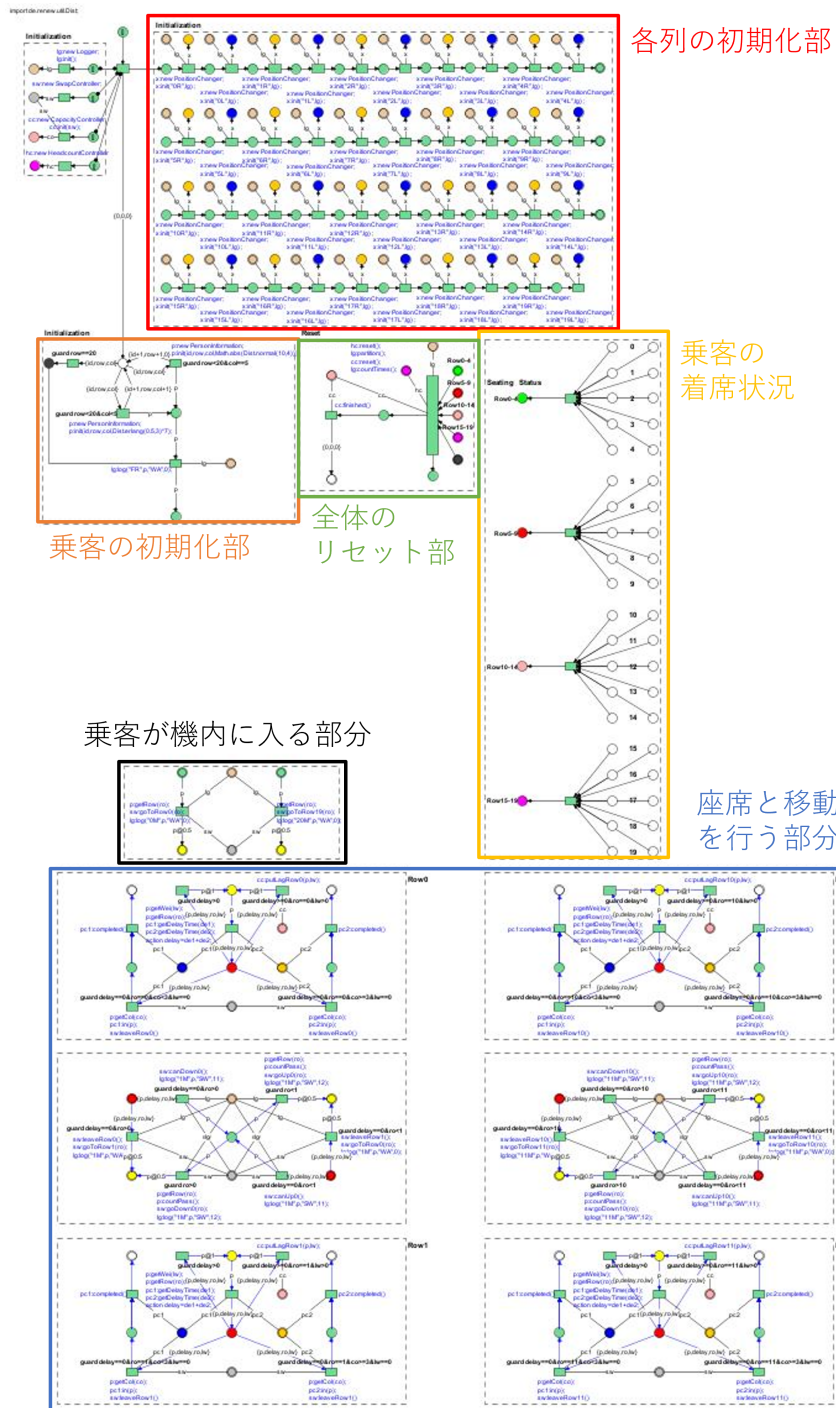


図 2.15: Petri net の動き 4



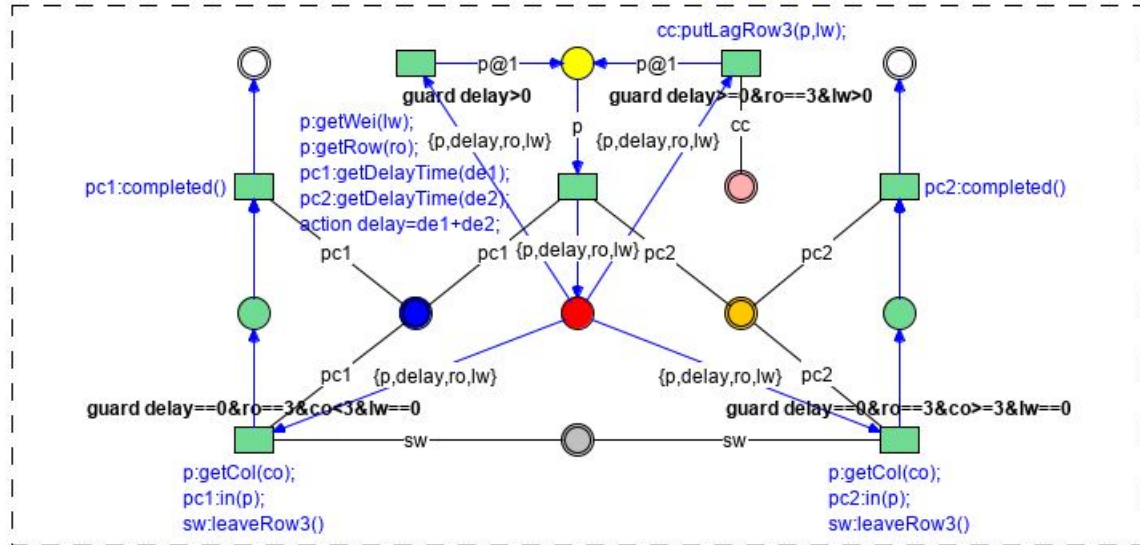


図 2.19: シミュレーションの搭乗客の着席部

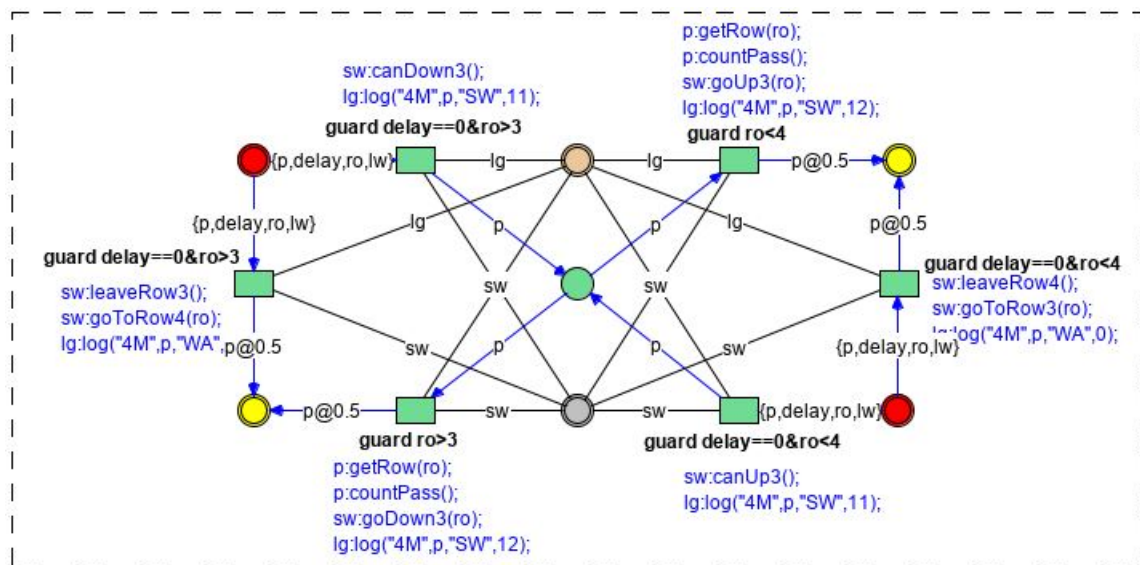


図 2.20: シミュレーションの搭乗客の移動部分

2.4 評価指標

ストレスの値を計算する際の計算式は、ウェーバー・フェヒナーの法則を参考にした。このウェーバー・フェヒナーの法則は、人間の感覚を表す数式と言われ、下記のような式の形になっている。

$$P = k \log_e \frac{I}{I_0}$$

P 人間の感覚

k 定数

I 入ってくる刺激

I_0 基準となる刺激の大きさ

この数式によって人間の感覚を数値的に扱えると言われている。数式の内容としては、基準となる刺激の大きさのほうが多い場合には、入ってくる刺激を小さく感じる。また、入ってくる刺激が大きくなっていてもあまり大きく変化しなくなっていくというような数式になっている。この数式を参考に本研究では下記の評価指標を採用する。

$$P_t = \log_e(t + 1)$$

$$P_{lw} = \log_e(lw + 1)$$

$$P_{sw} = \log_e sw$$

$$stress = P_t + P_{lw} + P_{sw}$$

t 経過時間

lw 乗客の手荷物の重さ

sw 乗客が他の乗客とすれ違った回数

$stress$ 乗客が感じるストレスの値

P_t は乗客が感じる時間の経過である。時間は1ステップごとに1ずつ加算されていく。上限はなく乗客が目標の席に着くまで加算されていく。1が足されているのは初期値が0であるためである。基準となる刺激の大きさは1、定数も1となっている。

P_{lw} は乗客が感じる荷物の重さを表している。荷物の重さは0～100の数値が割り当てられる。シミュレーション中では基本的に一定の値となっている。しかし、

乗客は着席をする前に荷物を下ろし、荷物を下ろした後からは、荷物の重さが0になる。重さが0になることから1を足している。

P_{sw} は乗客がすれ違う際に感じる負担を表している。初期値は1であり、上限はない。乗客とすれ違うたびに加算されていく。

$stress$ は乗客が感じるストレスを表している。今回は上記で示した値を単純に加算する形になっている。基本的には、時間が経過していくごとに数値が少しずつ大きくなっていくが、荷物を下ろした際にストレスの値も下がることになる。乗客が着席するまでの時間が短いほど全体の数値も小さくなる。また、すれ違いの回数が少ないほうが数値は小さくなる。

第3章 結果と考察

3.1 シミュレーション条件

シミュレーションでは120人の乗客が全員着席するまでを1回の試行とし、各搭乗方式ごとに試行を30回繰り返す。データを取得する搭乗戦略はback-to-front方式、back-to-front-outin方式、group4方式、outin方式、random方式、reverse-pyramid方式、n-car5×2方式、n-car10×2方式、n-car10×4方式、n-car10×6方式、steffen方式の11個の戦略である。データを記録するタイミングは乗客が次の列に移動を行う際、乗客がすれ違う際、座席に座る際、座席の入れ替わりがある際の4つのタイミングである。

取得するデータの例は図3.1である。1行目はシミュレーションの経過時間、2行目は乗客が現在いる位置を表す。図3.2にあるように、それぞれの列をL, M, Rの3部分に分けている。3行目は乗客に割り当てられた乗客番号であり、0～119までの番号が割り当てられる。4行目、5行目は乗客が目指している行・列番号。6行目、7行目は表3.1の表の文字と数字が乗客の状態に合わせ記録される。8行目は乗客が感じるストレス値が計算され記録される。

記録がとられるタイミングは乗客が次の列へ移動をする際、乗客がすれ違う際、乗客が座席に座る際、乗客が座席の入れ替えを行う際の4つである。記録として取られていないが、乗客が感じる内部時間はシミュレーションの時間とともに進んでいく。その内部時間が1経過するごとにストレス値が計算される。

0 FR	115	19	1	0 WA	0
0 FR	90	15	0	0 WA	0
0 20M	115	19	1	0 WA	0
0 FR	82	13	4	0 WA	0
0 FR	8	1	2	0 WA	0
0 FR	72	12	0	0 WA	0
0 FR	61	10	1	0 WA	0
0 FR	21	3	3	0 WA	0
0 FR	66	11	0	0 WA	0
0 FR	37	6	1	0 WA	0
0 FR	109	18	1	0 WA	0
0 FR	102	17	0	0 WA	0
0 FR	32	5	2	0 WA	0
0 FR	60	10	0	0 WA	0

図 3.1: 取得データの例

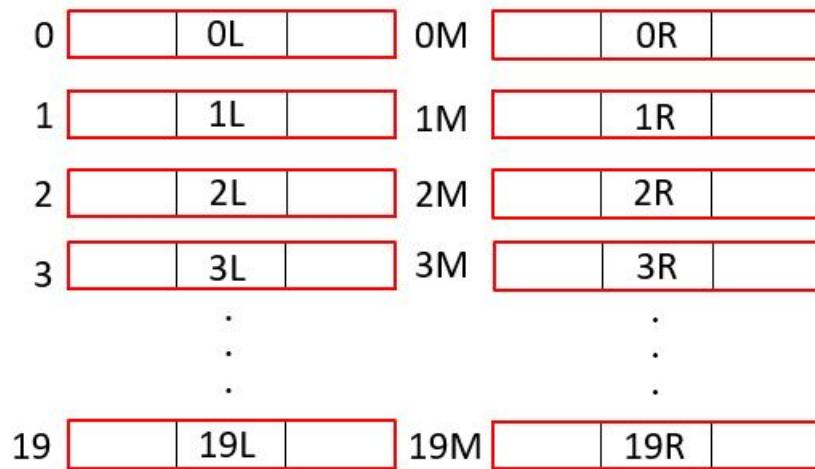


図 3.2: 乗客の現在地の表し方

乗客の状態	乗客の状態を表す文字	乗客の状態を表す数字
walking(歩行中)	WA	0
ready to get the seat(着席可能状態)	GS	1/7
seated(着席中)	SD	8/9/10
position change(席入れ替え中)	PC	2/3/4/5/6
swiching(すれ違い中)	SW	11/12

表 3.1: 乗客の状態を表す数字と文字

3.2 結果

評価指標を用いて、各搭乗戦略を 30 回試行して得られた結果を搭乗戦略ごとに箱ひげ図にしたものが図 3.3 である。箱ひげ図に外れ値が多いのは、乗客が荷物を下ろした際のストレス値の減少した結果が影響を与えていると思われる。箱ひげ図では、あまり大きく各戦略のストレス値の違いが分かりにくくなっている。しかし、具体的な数値を示した表 3.2 を見てみると、平均値が最も小さい手法が n-car10 × 2 方式となっており、次点で group4 方式、次に小さいのが n-car10 × 6 となっている。中央値に関しても平均値が小さいほうが小さくなっている。

時間の効率では最適といわれている steffen 方式が意外にも平均値も中央値も小さくなっている。標準偏差を見ると平均値が小さい n-car10 × 2 方式は各手法の中でも値が大きく、ストレス値にばらつきがある。しかし、steffen 方式は値が小さい。このことから、n-car10 × 2 方式はストレス値にばらつきはあるが、平均をとった場合には小さくなり、steffen 方式はどの乗客も近いストレス値になっている。

また、図 3.5 ~ 図 3.14 までは各戦略を 30 回試行した結果を各試行ごとで乗客 120 名のストレス値の変遷を示している。前節に示されて計算法通りにどの戦略でも同じようなストレスの値の変動の仕方をしている。最初は時間が経つとともにストレス値が急上昇をしていくが、ある程度の時間が経つと大きな変化はなくなるが、乗客が席に着くために荷物を下ろす作業をすると乗客の荷物に関する値が小さくなるためストレス値が小さくなる。このようなグラフの動きがどの乗客でも見ることができる。

	mean	median	valiance	standard deviation
back-to-front	6.891795	6.983	2.325958	1.525109
back-to-front-outin	6.892286	7.09555	2.246985	1.498995
group4	6.78375	6.99075	2.229906	1.493287
n-car10 $\times$ 2	6.84908	7.0534	3.042698	1.744333
n-car10 $\times$ 4	6.692849	6.899	2.778331	1.666833
n-car10 $\times$ 6	6.784748	6.947	2.633059	1.62267
n-car5 $\times$ 2	6.930413	7.0648	2.552664	1.597706
outin	7.007578	7.15325	2.337339	1.528836
random	6.975322	7.0901	2.469082	1.571331
reverse-pyramid	6.867423	7.07665	2.403811	1.550423
steffen	6.937689	7.074	2.330127	1.526475

表 3.2: ストレスの値の搭乗戦略による比較

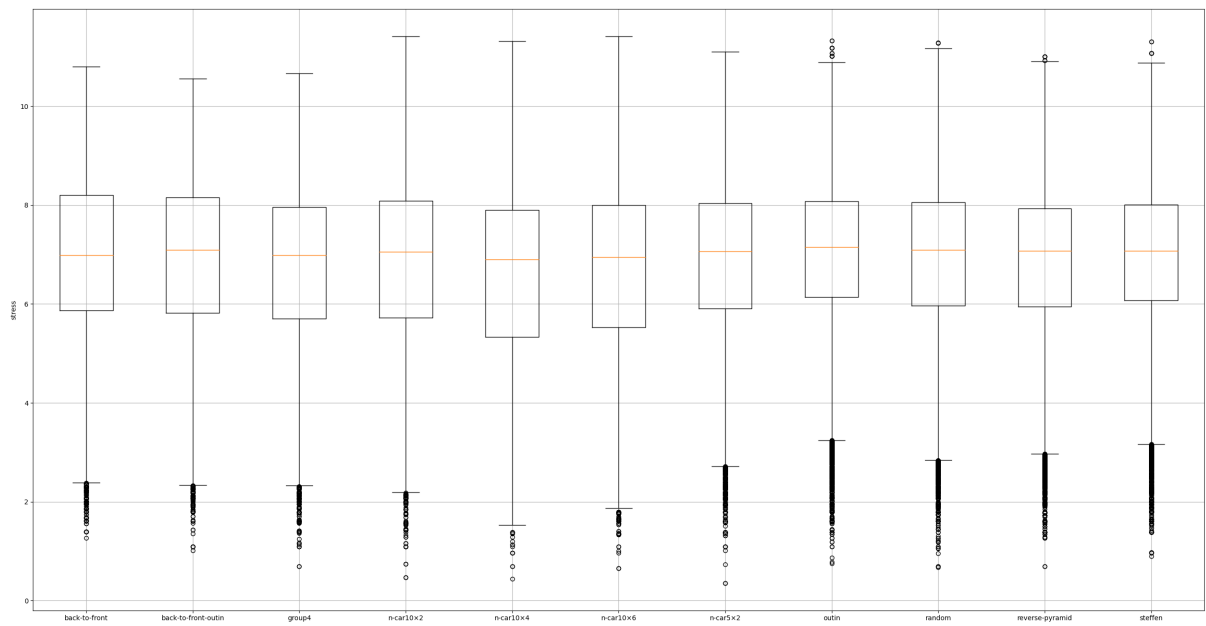


図 3.3: 搭乗戦略ごとのストレス値に関する箱ひげ図

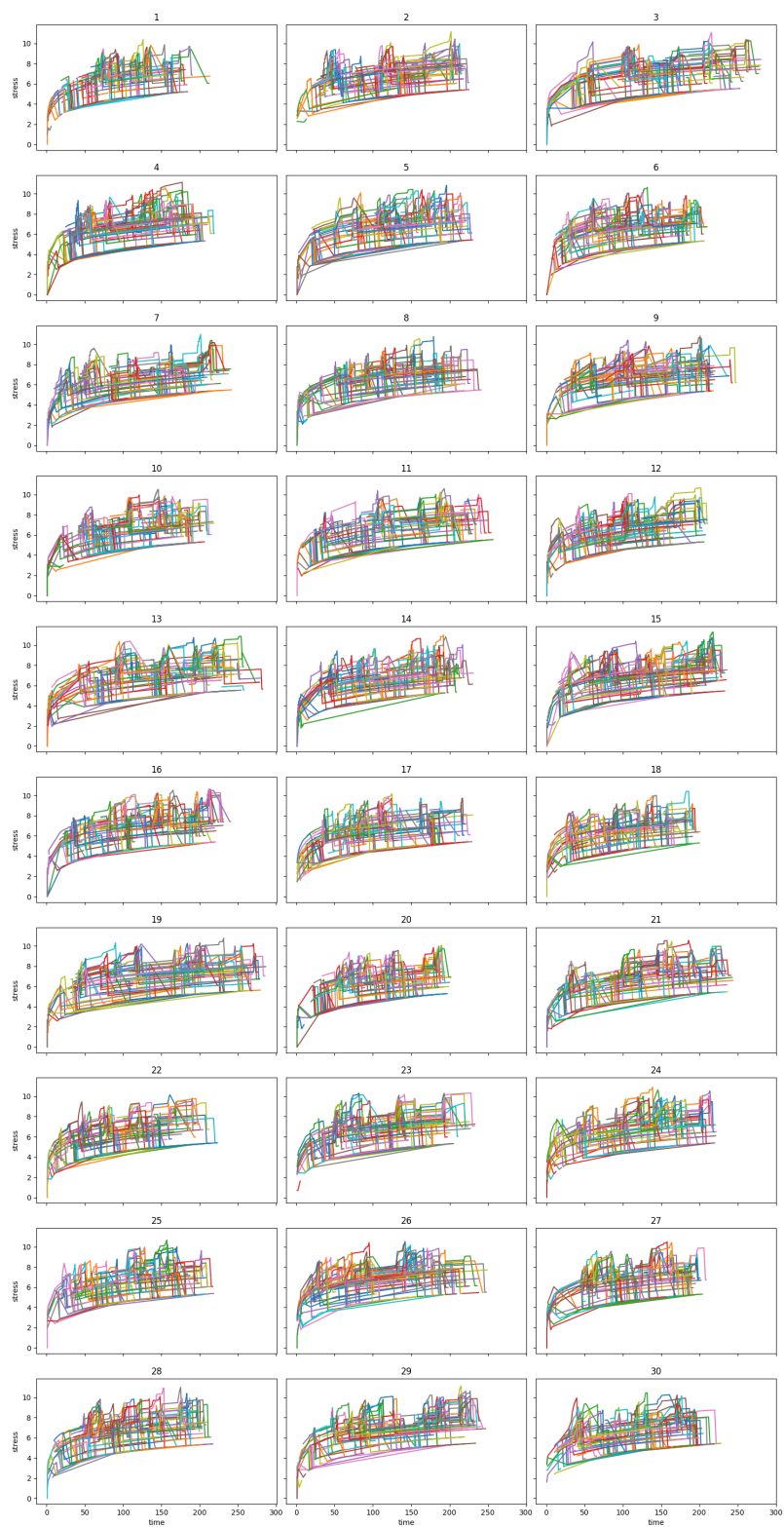


図 3.4: random 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷

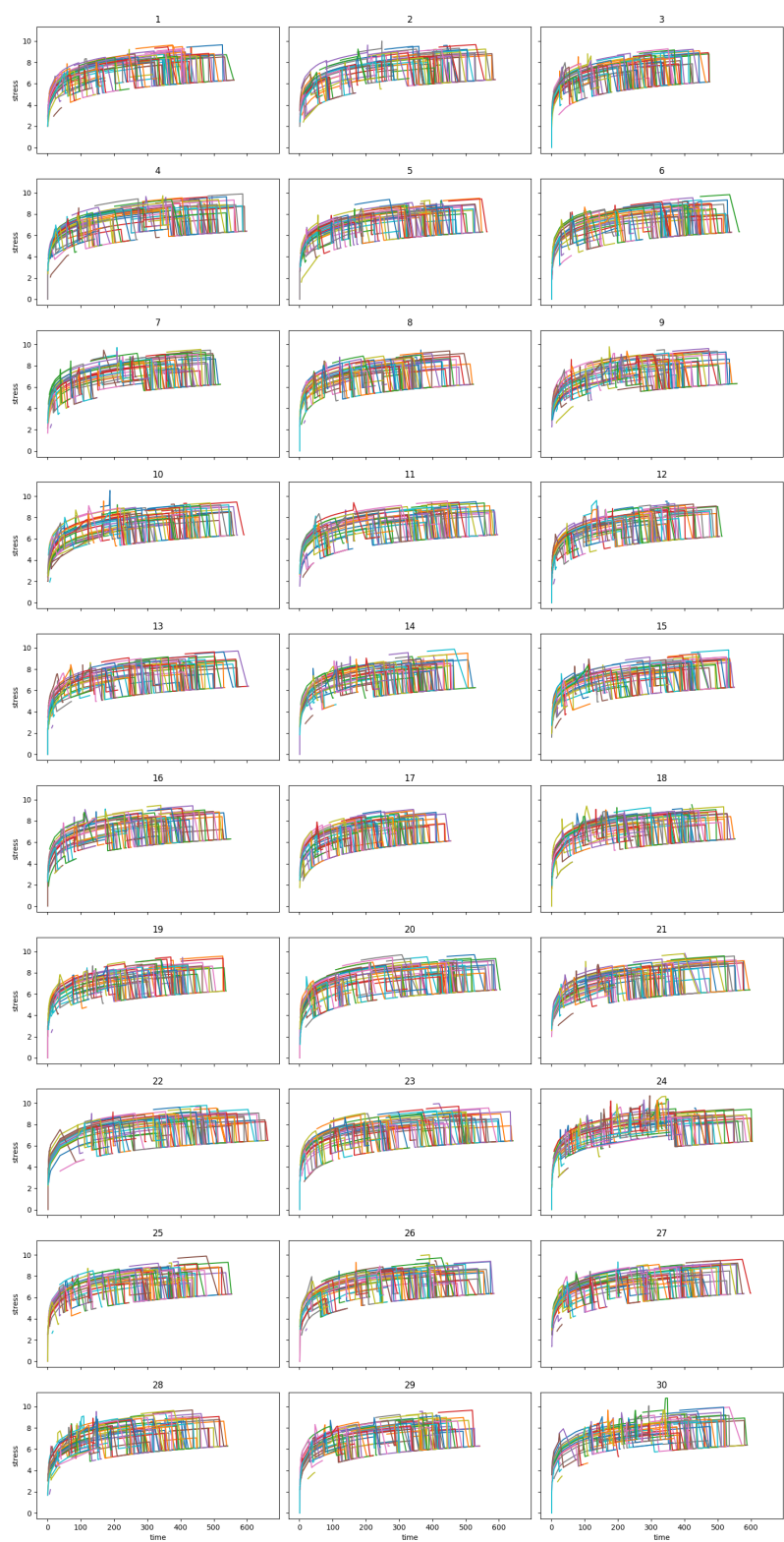


図 3.5: back-to-front 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷

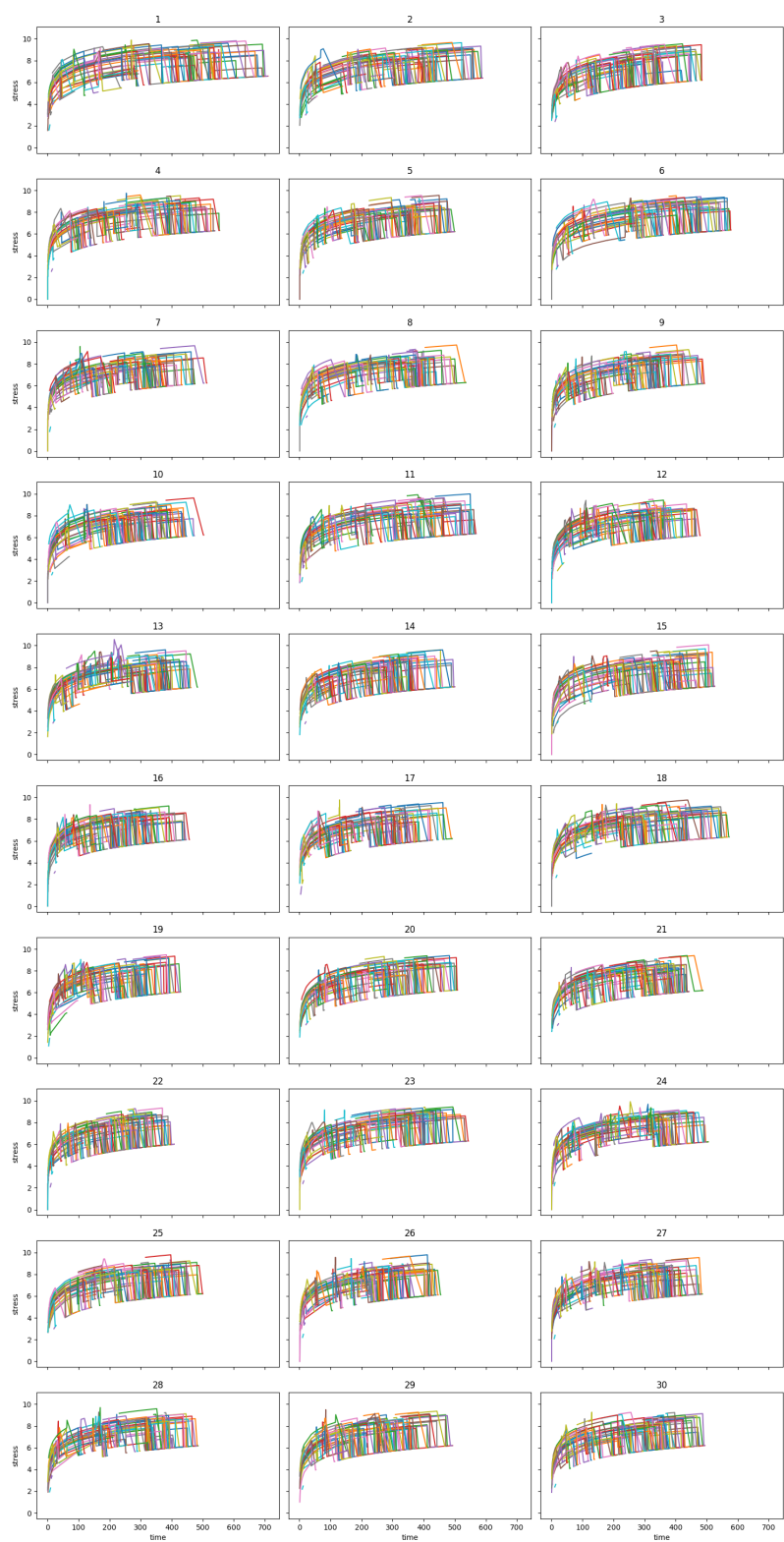


図 3.6: back-to-front-oulin 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷

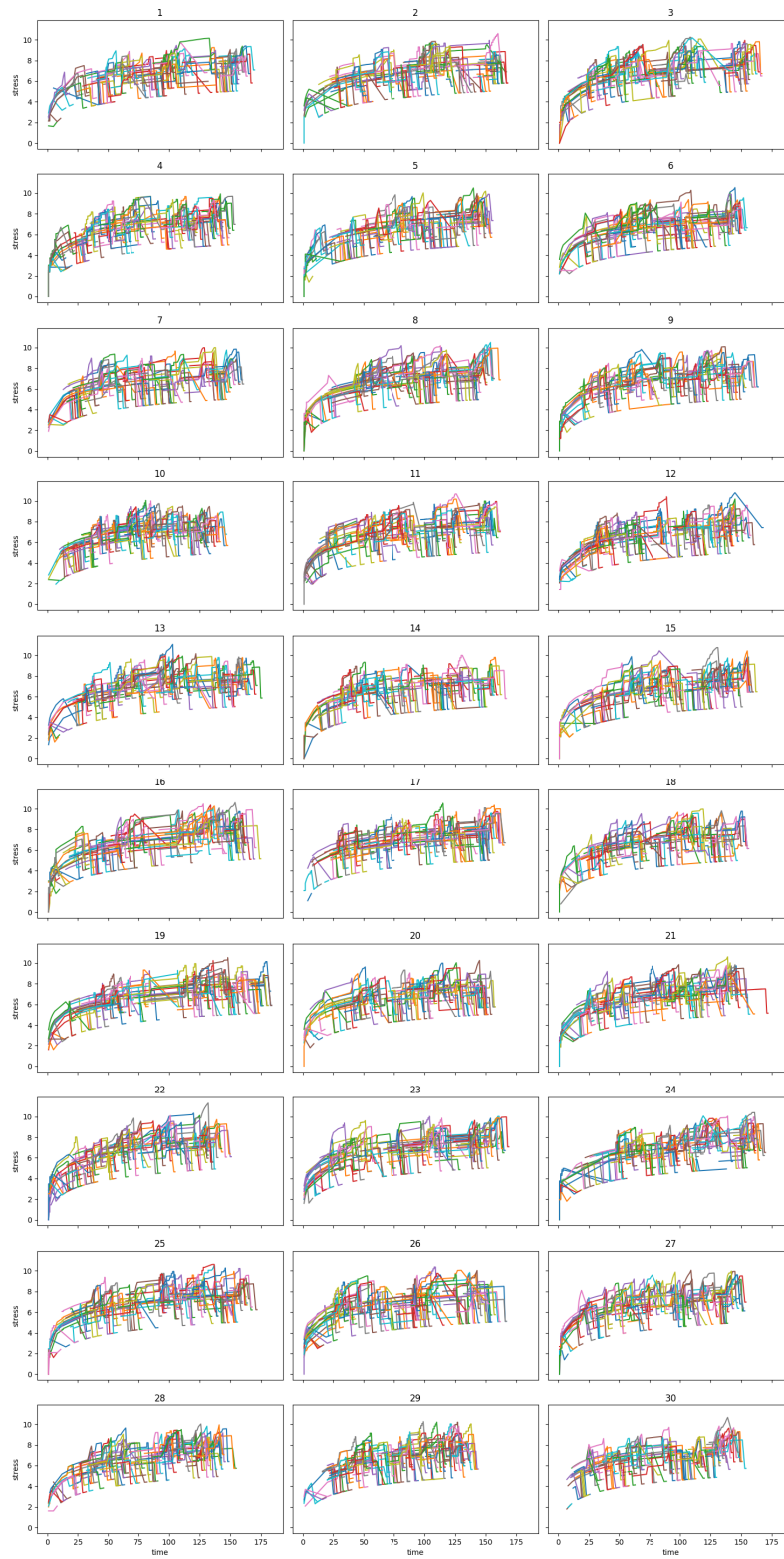


図 3.7: outin 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷

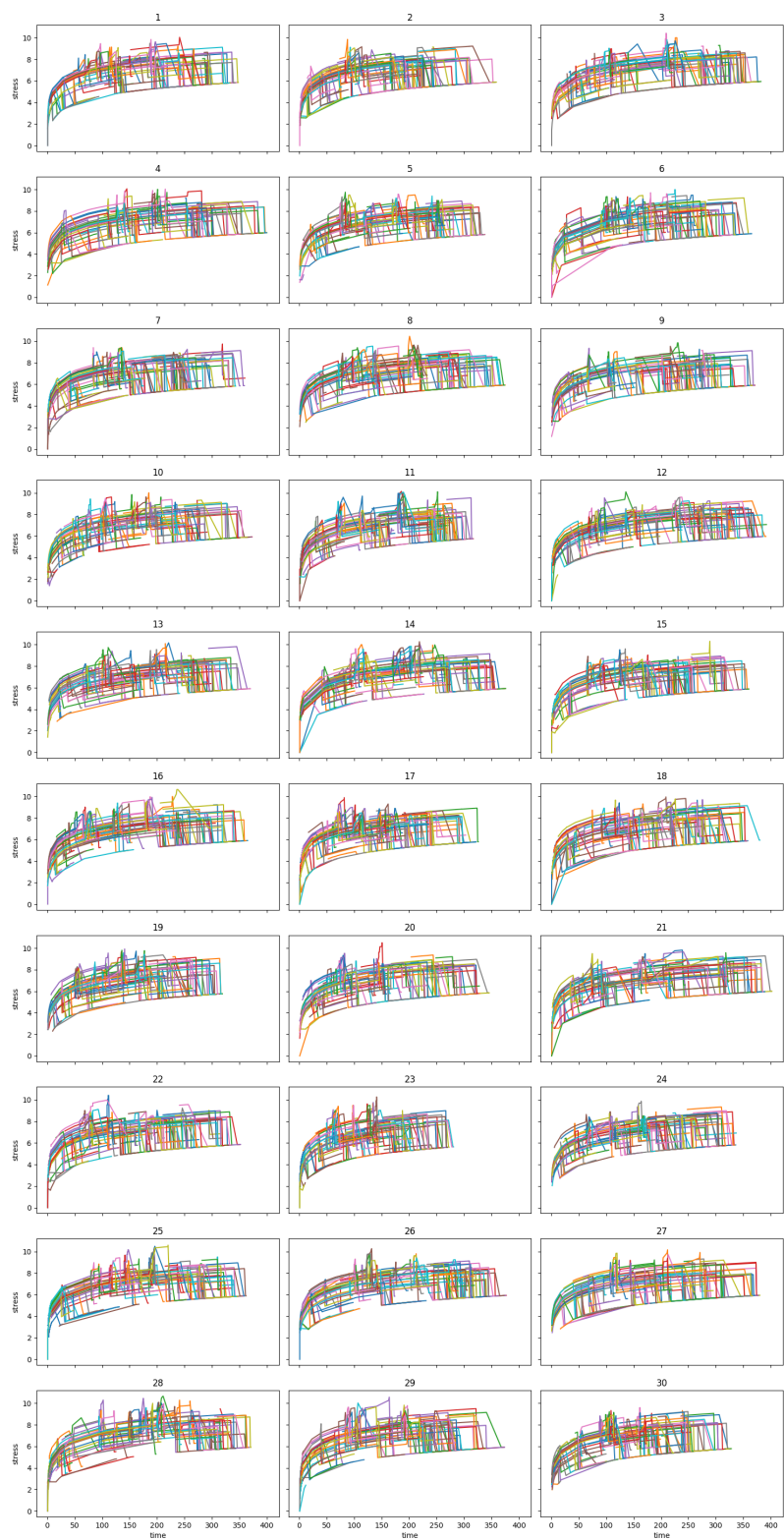


図 3.8: gourp4 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷

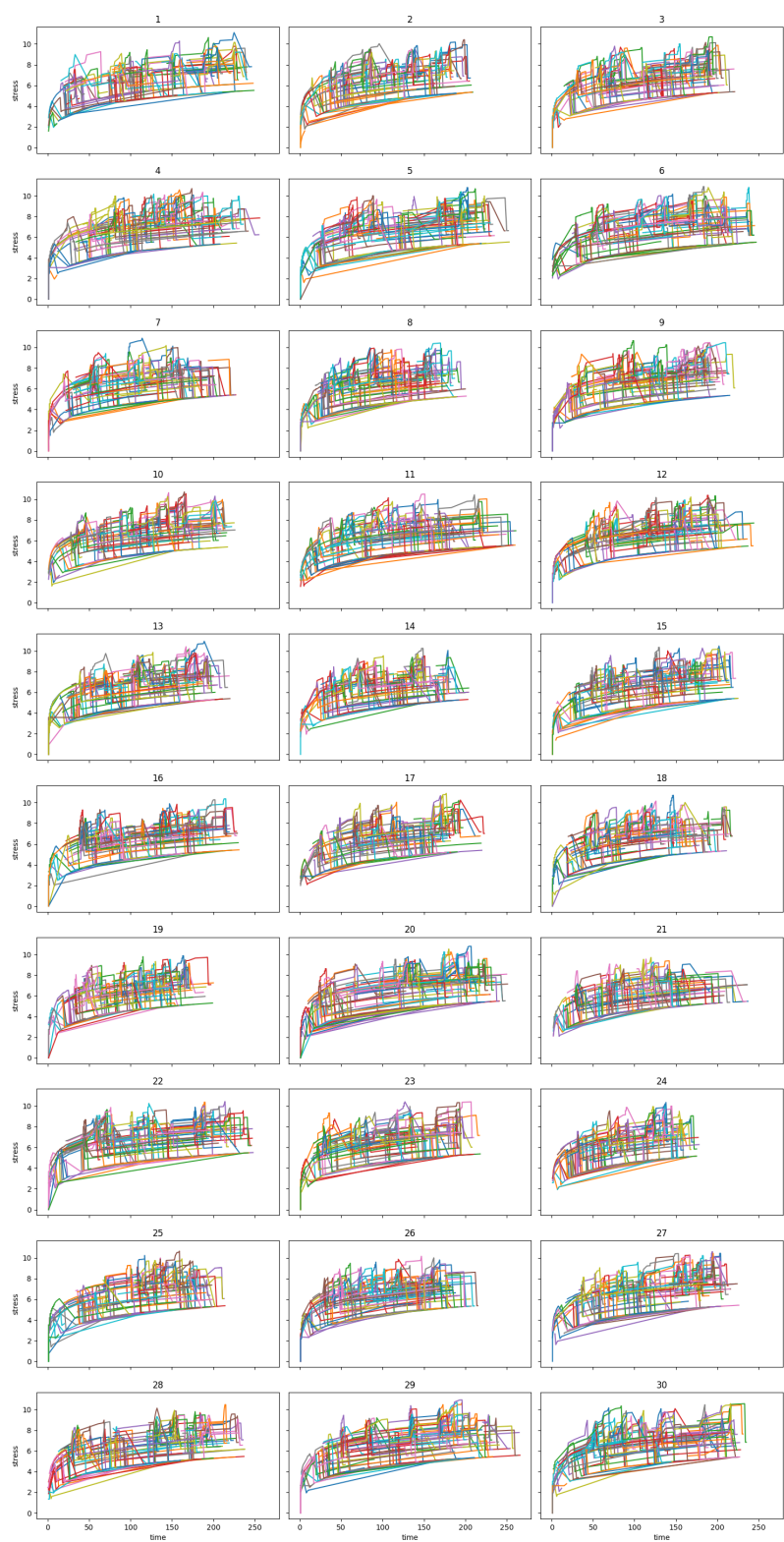


図 3.9: n-car5 × 2 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷

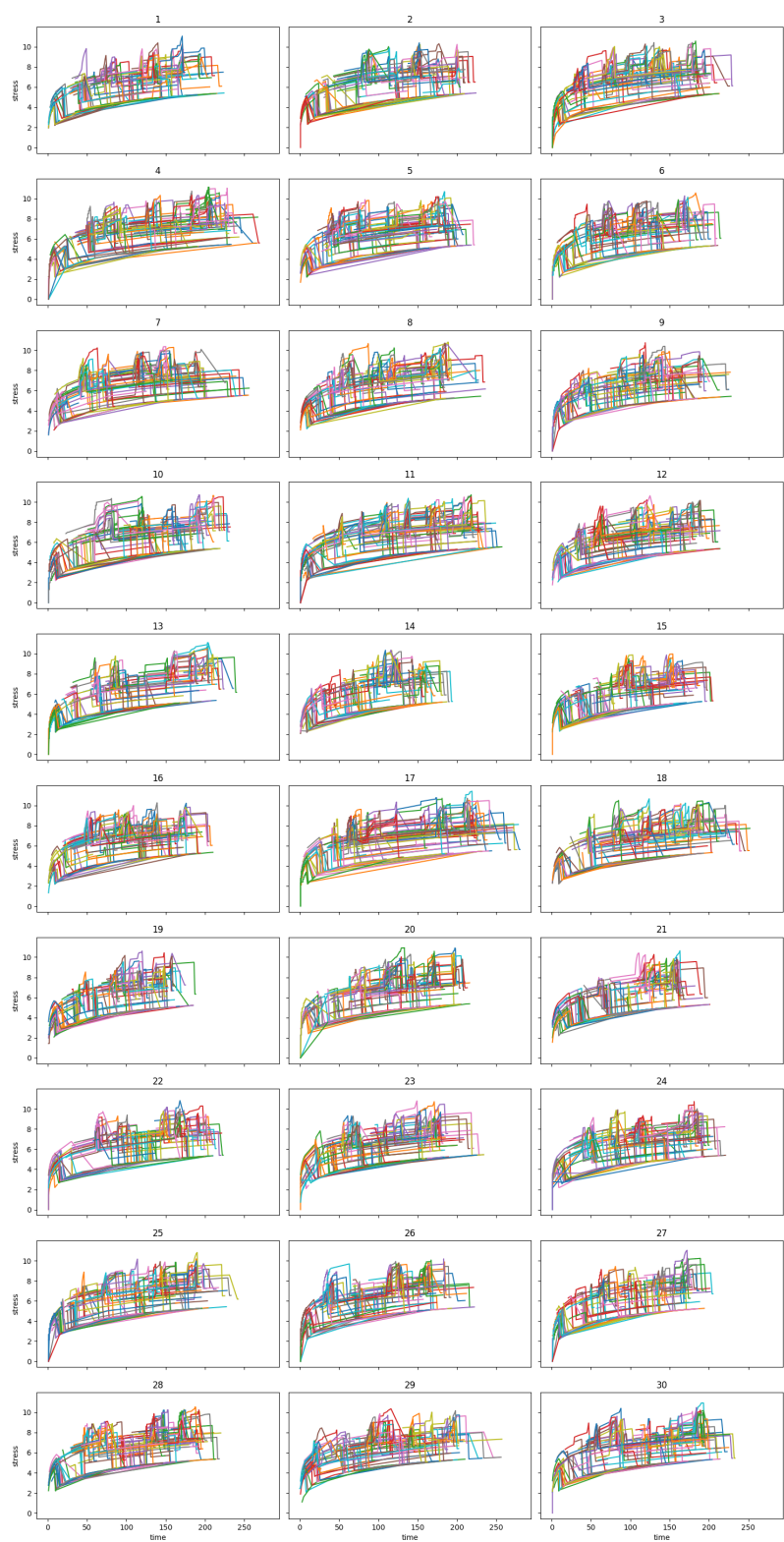


図 3.10: n-car10 $\times$ 2 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷

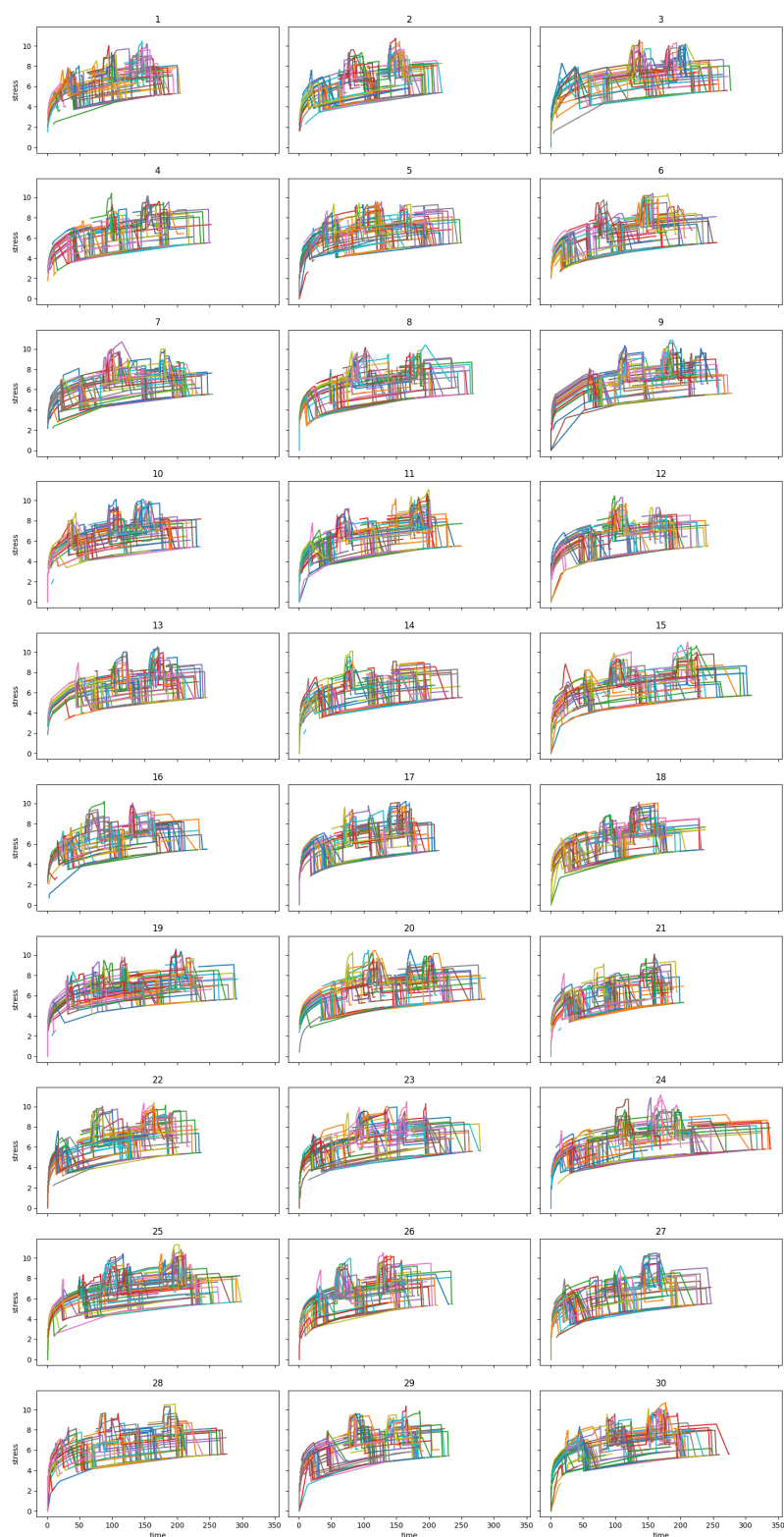


図 3.11: n-car10 × 4 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷

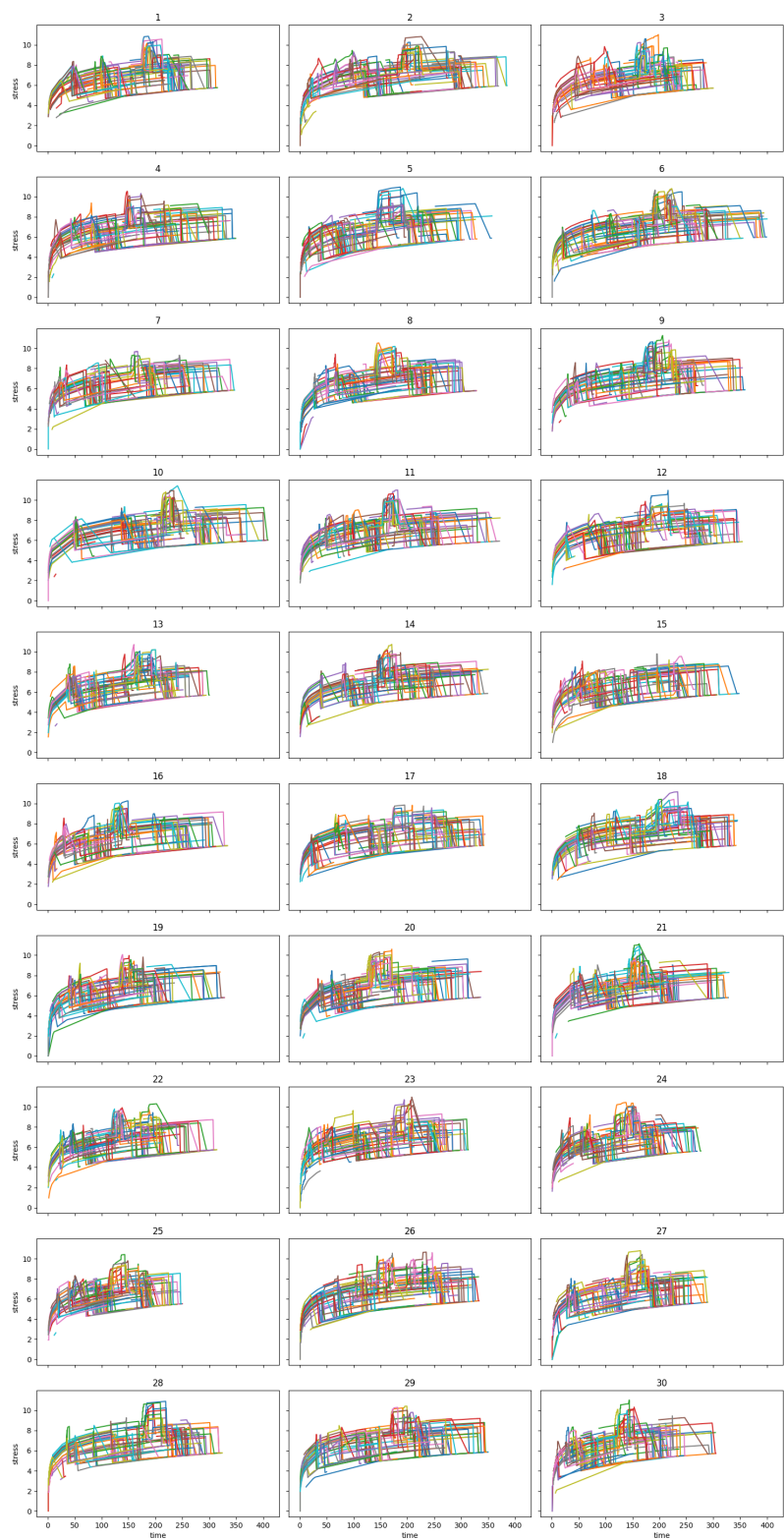


図 3.12: n-car10 × 6 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷

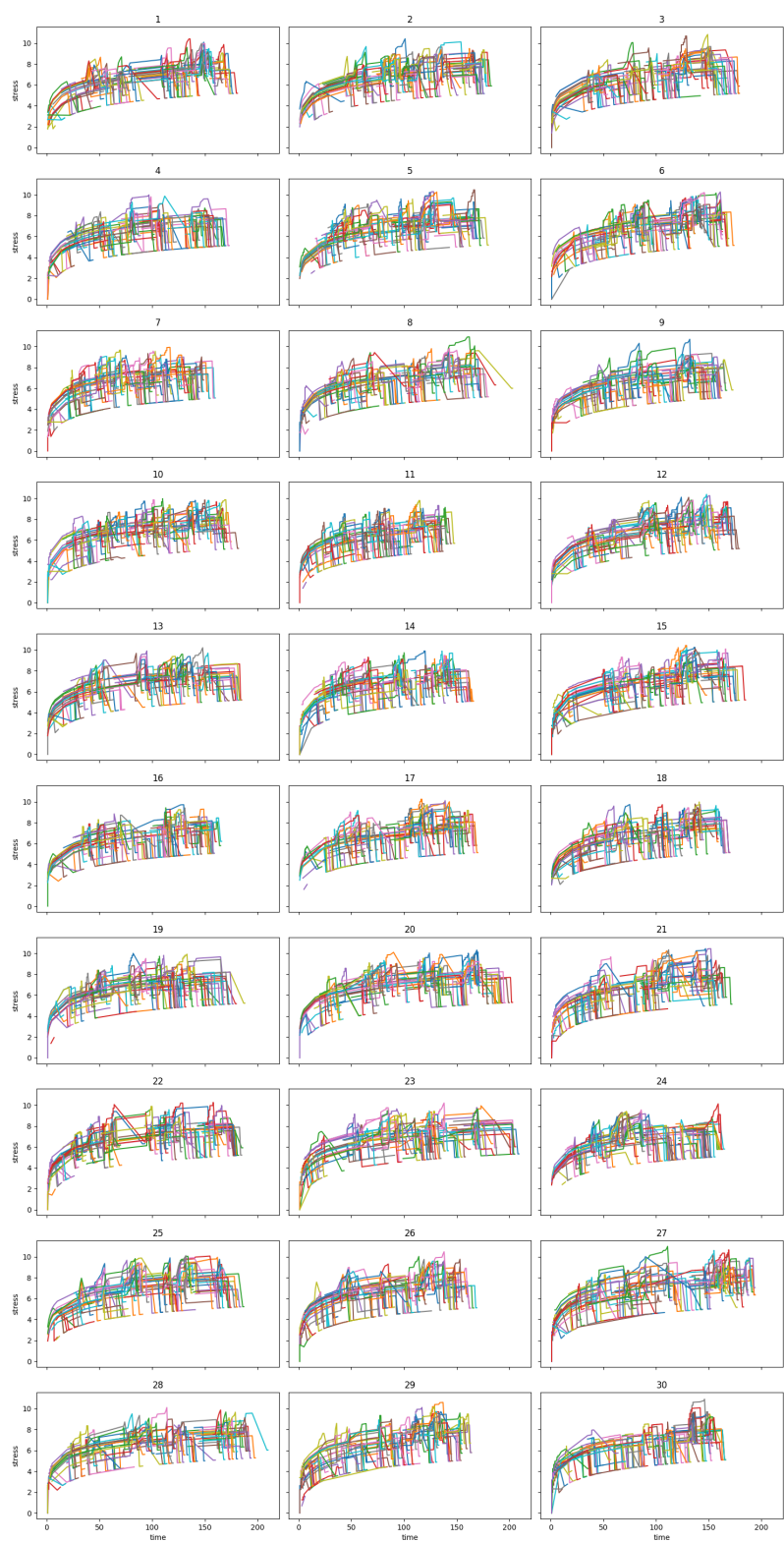


図 3.13: reverse-pyramid 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷

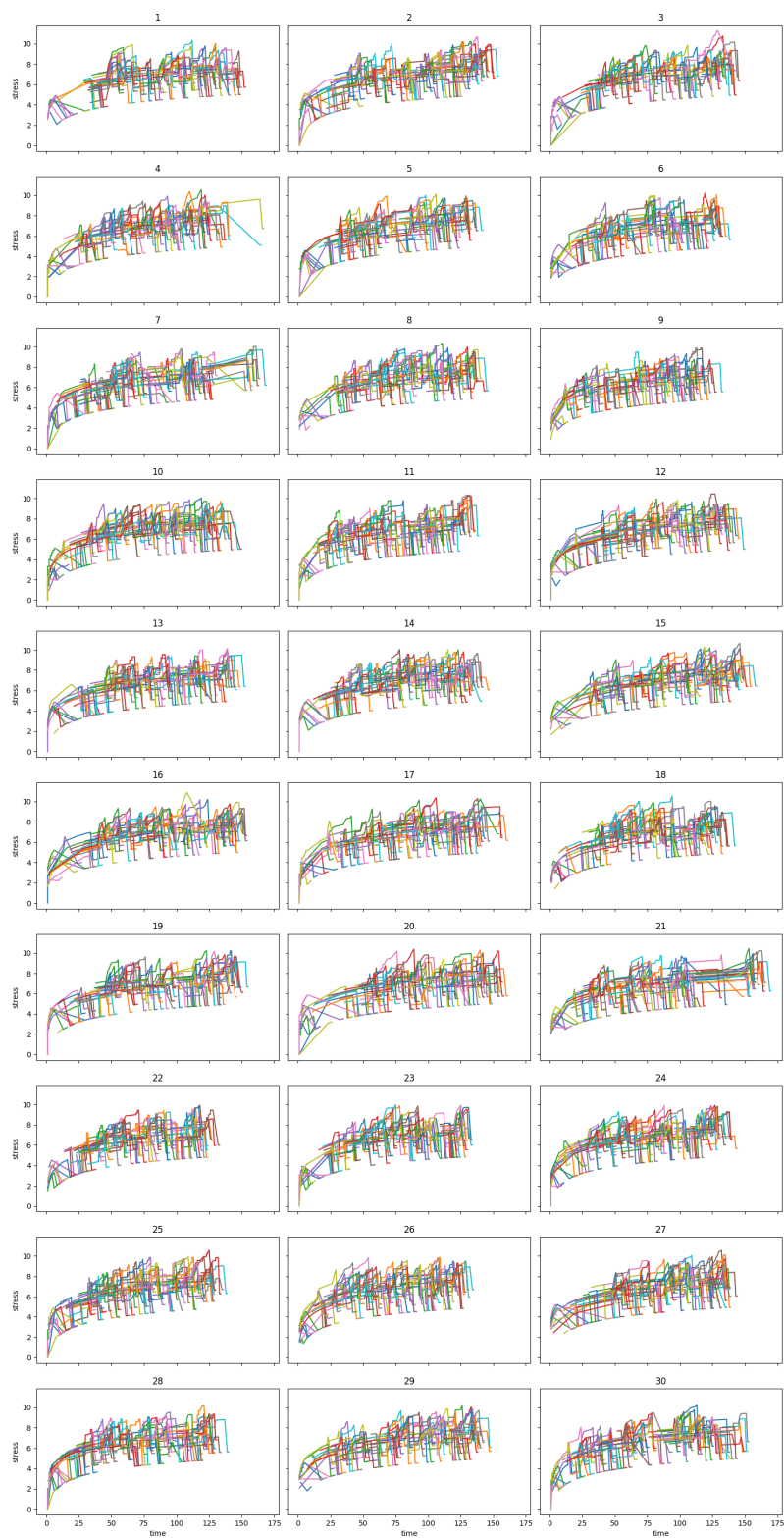


図 3.14: steffen 方式の試行ごとの各乗客のストレス値の変遷

3.3 考察

各戦略の着席までにかかる時間を箱ひげ図にしたものが図 3.15 である．図にあるように steffen 方式は平均や最大値も小さく，一方で back-to-front 方式は平均も最大値，最小値，どれも大きくなっている．また，表 3.3 では具体的な数値を見ることができ，一番平均，中央値が小さい．そのため，ストレス値における時間に対する感覚は小さいものだと考えられる．ストレス値が小さい手法であった n-car 方式は抜きんでた結果はない．

一方ですれ違いの回数について見てみると図 3.16 にあるように steffen 方式はすれ違い回数が多い戦略になっていて，n-car 方式は少ない戦略になっている．また図 3.17 でもその結果が見て取れる．すれ違い回数が 0 ～ 1 回の場合が，n-car 方式は多く，steffen 方式は少なくなっている．

back-to-front 方式がすれ違い回数が少ないことから，乗客の搭乗順が目標とする座席の列ごとに搭乗していく戦略の方がすれ違いの回数が少なくなっていく．反対に，搭乗順の中で複数の列が搭乗していくほどにすれ違う可能性も高くなってしまう．

このように steffen 方式は搭乗時間は短いものの，すれ違い回数が全体として多くなる．そのため搭乗時間の長さでは n-car 方式は steffen 方式よりも長くなってしまうものの，すれ違い回数が少なくなり，ストレス値の比較を行うと steffen 方式よりも小さくなると考えられる．

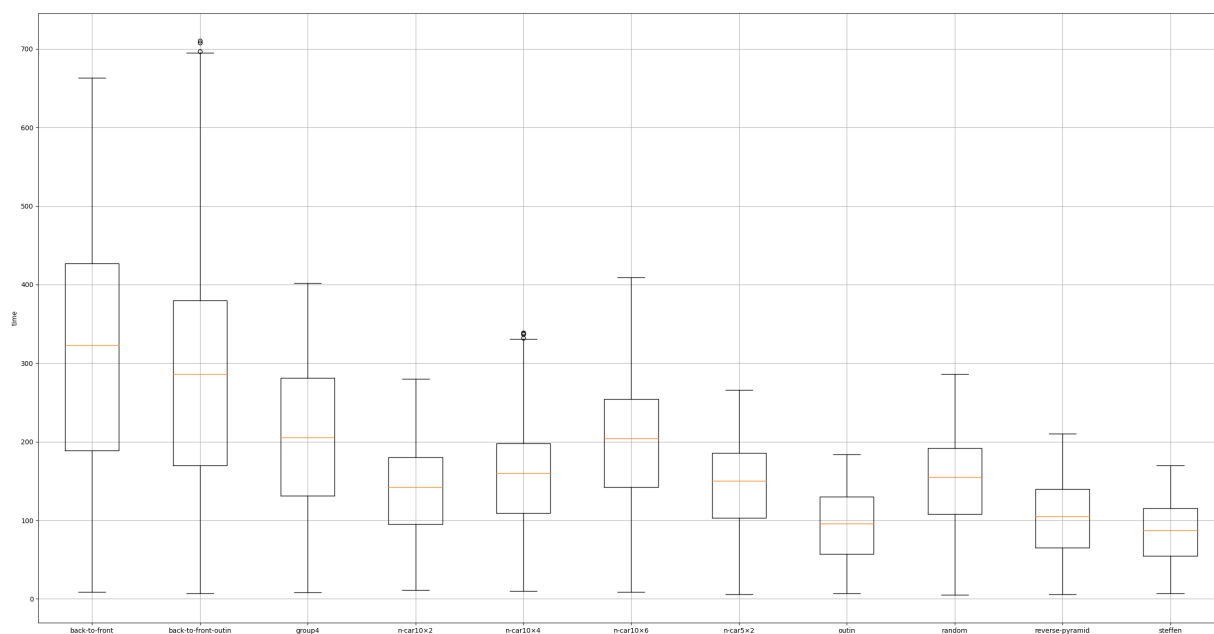


図 3.15: 各戦略の乗客が着席までにかかる時間の箱ひげ図

	mean	median	variance	standard deviation
back-to-front	311.6625	323	22011.8	148.3637
back-to-front-ouin	278.8186	286	18167.04	134.7852
group4	205.12	205	8458.954	91.97257
n-car10 × 2	135.5428	142	3275.607	57.23292
n-car10 × 4	152.4403	160	3848.47	62.03604
n-car10 × 6	197.6786	204	6356.565	79.72807
n-car5 × 2	142.9506	150	3060.01	55.31736
ouin	93.13083	96	1839.324	42.88734
random	147.5678	155	3266.427	57.15266
reverse-pyramid	102.5472	105	2117.683	46.01829
steffen	84.66944	87	1368.162	36.98868

表 3.3: 各戦略の着席までにかかる時間

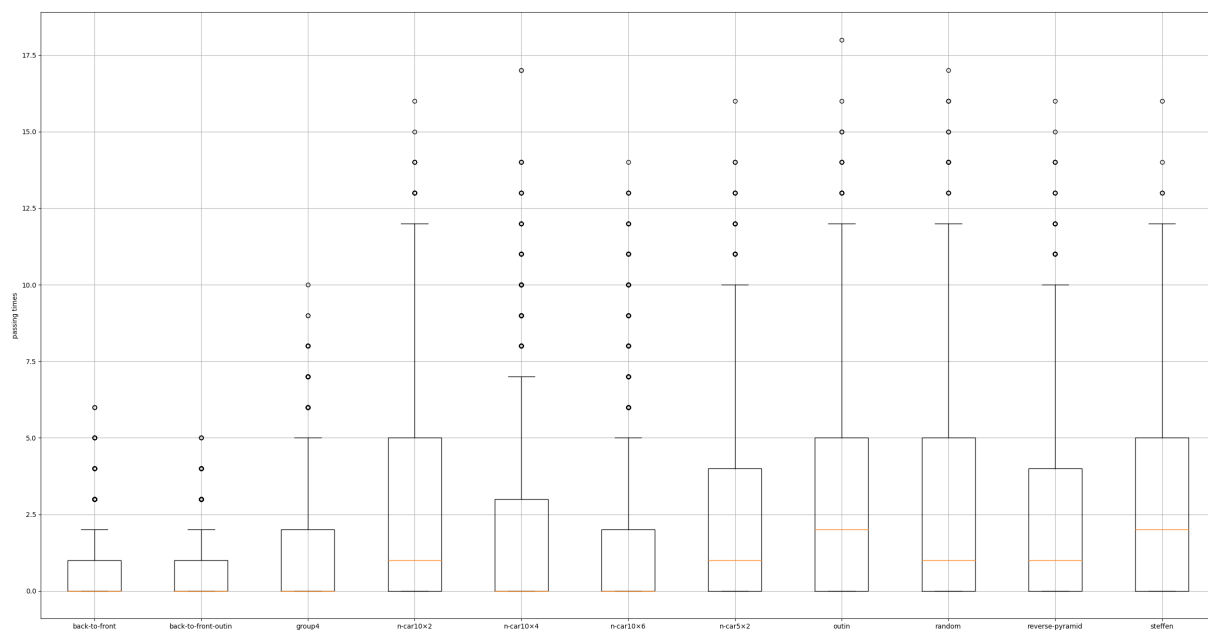


図 3.16: 各戦略のすれ違い回数の箱ひげ図

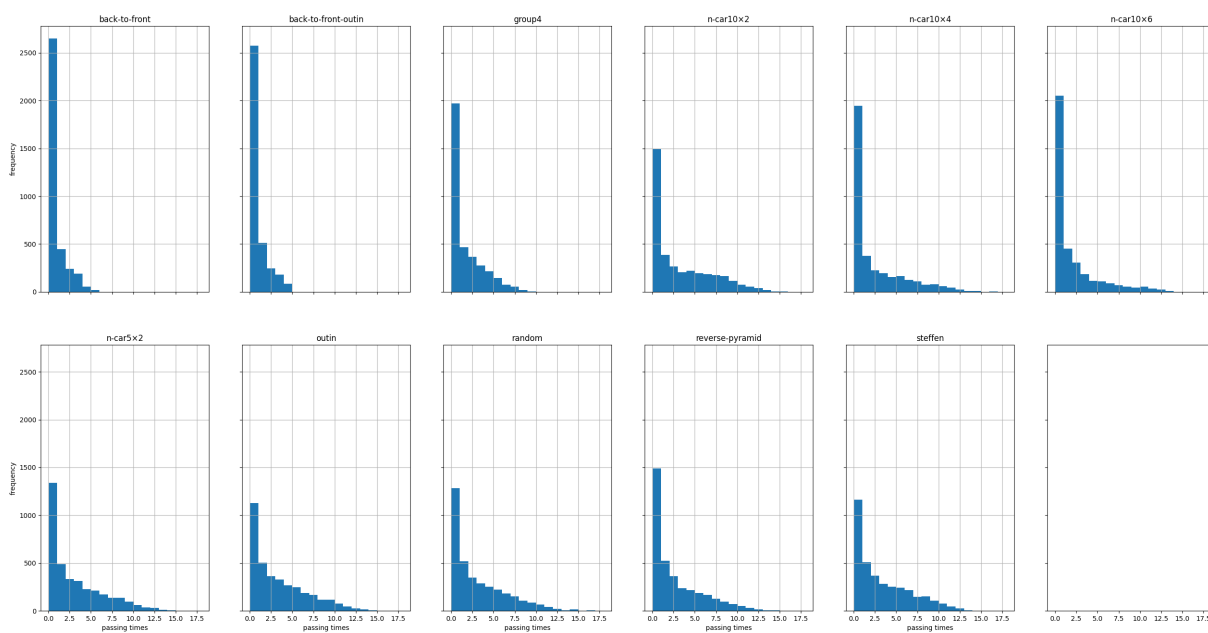


図 3.17: 各戦略のすれ違い回数

	mean	median	variance	standard deviation
back-to-front	0.503333	0	0.992767	0.996377
back-to-front-outin	0.524444	0	0.978291	0.989086
group4	1.296111	0	3.481763	1.865948
n-car10 $\times$ 2	2.858333	1	11.81215	3.436881
n-car10 $\times$ 4	2.036111	0	9.512029	3.084158
n-car10 $\times$ 6	1.619444	0	7.481289	2.735194
n-car5 $\times$ 2	2.667778	1	9.777962	3.126973
outin	2.982222	2	10.34524	3.216402
random	2.721667	1	10.02309	3.165926
reverse-pyramid	2.316667	1	8.689167	2.947739
steffen	2.917222	2	9.851481	3.138707

表 3.4: 各戦略のすれ違い回数

第4章 まとめ

4.1 結論

乗客への負荷を考慮した指標を用いた搭乗戦略の評価を行った。乗客が受けるストレス値の計算方式については、ウェーバー・フェヒナーの法則を参考に、乗客が搭乗を始めてから着席するまでの時間と入れ違いの回数、手荷物の重さに着目をしたものになった。

その計算法を取り入れて搭乗シミュレーションを行いそれぞれの搭乗方式のストレス値の結果を比較してみると、n-car 方式が平均値ではストレス値が小さいものになった。ただ、分散も標準偏差も相対的に大きいものになっていた。

また、効率的には最も良いものと言われている steffen 方式は n-car よりもストレス値の平均値は大きいものになってしまったが、分散も標準偏差も小さいものになっている。

搭乗時間で比較を行ってみると、steffen 方式も n-car 方式も大きな差はない。このことから搭乗時間が短いことはストレス値にあまり影響がなく、すれ違い回数が多い場合の影響が大きくなっている。よって、複数の列を目指す乗客を一度に搭乗させる戦略の方が乗客がすれ違う可能性が高まり、ストレス値が大きくなってしまうと考えられる。

このように、ストレス値を取り入れて評価を行うことで、搭乗時間が短いだけでなく乗客が感じる負荷も少ない搭乗戦略を選ぶことができるようになると思う。

4.2 今後の課題

今後の課題としてはストレス値の指標を改善していくことである。現在の指標では、経過時間とすれ違い回数と荷物の重さの3要素の感覚を加算するという単純なものになっているため、改善が必要である。また、3要素についても他に必要な要素や不要な要素についても考える必要がある。

今回はストレス値のみで比較を行っているが、航空会社は搭乗方式を既存の方式から変更をする際のコストに着目をするのではないかと考える。そこで今後導入に必要なコストや、搭乗方式を継続していく際に必要になるコストを取り入れた比較を行っていきたいと考える。

参考文献

- [1] Renew – the reference net workshop. <http://www.renew.de>. [最終確認日: 2023.01.27].
- [2] J. Audenaert, K. Verbeeck, and G. V. Berghe. Multi-agent based simulation for boarding. In *Belgian/Netherlands Artificial Intelligence Conference*, pages 3–10, 2009. Cited By :37.
- [3] E. Bachmat and M. Elkin. Bounds on the performance of back-to-front airplane boarding policies. *Operations Research Letters*, 36(5):597–601, 2008. Cited By :36.
- [4] Y. Baek, M. Ha, and H. Jeong. Impact of sequential disorder on the scaling behavior of airplane boarding time. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 87(5), 2013. Cited By :10.
- [5] R. Cimler, E. Kautzká, K. Olševičová, and M. Gavalec. Agent-based model for comparison of aircraft boarding methods. *Proceedings of 30th International Conference Mathematical Methods in Economics*, pages 73–78, 2012. Cited By :9.
- [6] Camelia Delcea, Liviu-Adrian Cotfas, and Ramona Paun. Agent-based evaluation of the airplane boarding strategies ’ efficiency and sustainability. *Sustainability*, 10(6), 2018.
- [7] Florian Jaehn and Simone Neumann. Airplane boarding. *European Journal of Operational Research*, 244(2):339–359, 2015.
- [8] R. John Milne and Alexander R. Kelly. A new method for boarding passengers onto an airplane. *Journal of Air Transport Management*, 34:93–100, 2014.
- [9] T. Murata. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4):541–580, 1989.
- [10] C. Adam Petri and W. Reisig. Petri net. *Scholarpedia*, 3(4):6477, 2008. revision #91647.

- [11] Sheng-Jie Qiang, Bin Jia, Dong-Fan Xie, and Zi-You Gao. Reducing airplane boarding time by accounting for passengers' individual properties: A simulation based on cellular automaton. *Journal of Air Transport Management*, 40(C):42–47, 2014.
- [12] Michael Schultz. Field trial measurements to validate a stochastic aircraft boarding model. *Aerospace*, 5(1):27, Mar 2018.
- [13] Michael Schultz. Implementation and application of a stochastic aircraft boarding model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 90:334–349, 2018.
- [14] Jason H. Steffen. Optimal boarding method for airline passengers. *Journal of Air Transport Management*, 14(3):146–150, 2008.
- [15] Jason H. Steffen and Jon Hotchkiss. Experimental test of airplane boarding methods. *Journal of Air Transport Management*, 18(1):64–67, 2012.
- [16] Tie-Qiao Tang, Yong-Hong Wu, Hai-Jun Huang, and Lou Caccetta. An aircraft boarding model accounting for passengers' individual properties. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 22:1–16, 2012.
- [17] Kenji UEHARA, Kunihiko HIRAISHI, and Kokoro IKEDA. An efficient aircraft boarding strategy considering implementation. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, E104.A(8):1051–1058, 2021.
- [18] Menkes H. L. van den Briel, J. René Villalobos, Gary L. Hogg, Tim Lindemann, and Anthony V. Mulé. America west airlines develops efficient boarding strategies. *Interfaces*, 35(3):191–201, 2005.
- [19] H Van Landeghem and A Beuselinck. Reducing passenger boarding time in airplanes: A simulation based approach. *European Journal of Operational Research*, 142(2):294–308, 2002.
- [20] Hassan Zeineddine. A dynamically optimized aircraft boarding strategy. *Journal of Air Transport Management*, 58:144–151, 2017.