



# エレベータ運行計画問題への数理的アプローチ

稲元, 勉

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2008-03-05

(Date of Publication)

2009-08-04

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2981

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002981>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文  
エレベータ運行計画問題への  
数理的アプローチ

平成20年1月

稲元 勉



---

# 目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 論文の構成	4
第 2 章 エレベータ運行の計画問題および計画手法	7
2.1 エレベータシステム	7
2.2 エレベータ運行計画問題	10
2.2.1 問題の概要	10
2.2.2 前提条件	15
2.2.3 記号の定義	16
2.2.4 目的関数	21
2.2.5 決定変数	22
2.3 エレベータ運行計画手法	22
2.3.1 一般的なエレベータ運行計画手法	22
2.3.2 既存計画手法のリスケジューリング問題としての分類	28
2.4 エレベータ運行計画問題への数理計画的アプローチ	36
2.4.1 数理計画的アプローチをとる背景	36
2.4.2 理論的研究と実際的研究の分離	38
2.4.3 交通流に関する情報の利用可能性による問題のクラス分類に基づいた数理計画的アプローチ	39
第 3 章 クラス I: 交通流が確定的である状況におけるエレベータ運行計画	43
3.1 緒言	43
3.2 前提条件	44
3.3 エレベータ運行計画問題の静的最適化問題としてのモデル化	44
3.4 記号の定義	47
3.5 原問題・部分問題の定義	49
3.6 下界値の計算	50
3.7 分枝・限定操作	52
3.8 分枝限定法の計算手続き	59

3.9	計算例および考察	60
3.9.1	パラメータ設定	60
3.9.2	離散時間モデル上の最適なかご運行の計算と評価	61
3.9.3	連続時間モデル上の最適なかご運行の計算と評価	63
3.10	結言	64
<b>第 4 章</b>	<b>クラス II: 交通流が確率的かつ既知である状況におけるエレベータ運行計画</b>	<b>67</b>
4.1	緒言	67
4.2	前提条件	68
4.3	エレベータシステムの確率的離散事象システムとしてのモデル化	69
4.4	記号の定義	71
4.5	エレベータ運行計画問題のマルコフ決定過程としてのモデル化	77
4.6	状態遷移関数の定式化	79
4.6.1	状態の 2 値状態変数の集まりとしてのモデル化	79
4.6.2	状態変数の変化の定式化	80
4.7	状態遷移確率の定式化	90
4.7.1	状態遷移確率の状況入力の生起確率の総和としての定式化	90
4.7.2	状況入力の生起確率の定式化	91
4.8	動的計画法の構成	94
4.9	状態遷移モデルの縮約により効率化された動的計画法	96
4.10	計算例および考察	99
4.10.1	パラメータ設定	99
4.10.2	コスト関数の計算	100
4.10.3	コスト関数を用いたエレベータ割当て方策の評価	102
4.10.4	状態遷移モデルの評価	104
4.11	結言	107
<b>第 5 章</b>	<b>クラス III: 交通流が確率的かつ未知である状況におけるエレベータ運行計画</b>	<b>109</b>
5.1	緒言	109
5.2	前提条件	110
5.3	記号の定義	111
5.4	エレベータ運行ルールのルールベースとしてのモデル化	113
5.4.1	実際的研究におけるエレベータ運行ルールのモデル	113
5.4.2	可用範囲に留意したルールベースの設計	113
5.4.3	ルールベースによるエレベータ割当て計算	116
5.5	遺伝的機械学習によるルールベースの獲得	119

---

5.6	計算例および考察 . . . . .	121
5.6.1	パラメータ設定 . . . . .	121
5.6.2	決定指標の構成 . . . . .	122
5.6.3	3つの問題を対象とした個別のルールベースの獲得 . . . . .	126
5.6.4	獲得されたルールベースの評価 . . . . .	128
5.6.5	連結により作成されたルールベースの評価 . . . . .	131
5.7	結言 . . . . .	131
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>135</b>
	謝辞	139
	参考文献	141
	本研究に関する発表	149



---

## 目 次

1.1	理論的研究と実際的研究の位置づけおよびそれらの拡張方向の概念 . . . . .	4
2.1	本論文において制御対象とされるエレベータシステムの概観 . . . . .	8
2.2	リスケジューリング環境が静的かつ未知の確率分布に従う場合を含めたリス ケジューリング問題の枠組み . . . . .	31
2.3	エレベータ運行計画手法を分類する枠組みおよびその上での既存研究の分類 .	33
2.4	理論的研究と実際的研究の相補的組合せによる研究の展開の概念 . . . . .	39
3.1	2つのかごが異なる時間軸に沿って動いている状況の例の概観 . . . . .	49
3.2	ある例題の原問題 . . . . .	53
3.3	原問題から生成される4つの部分問題 . . . . .	54
3.4	部分問題1から生成される3つの部分問題 . . . . .	55
3.5	ある乗車仕事にとってかごが逆走している状況の概念 . . . . .	56
3.6	他の仕事の処理完了時刻を遅らせることなく処理可能な仕事が存在する状況 の概念 . . . . .	57
3.7	他の仕事の処理完了時刻を遅らせることなく処理可能な仕事のペアが存在す る状況の概念 . . . . .	57
3.8	問題d2のある例題に対するCDSCによるかご運行 . . . . .	62
3.9	問題d2のある例題に対する分枝限定法による最適なかご運行 . . . . .	63
4.1	確率的離散事象システムの模式 . . . . .	71
4.2	間接制御を受ける確率的離散事象システムの模式 . . . . .	72
4.3	状態遷移関数の2つの捉え方 . . . . .	81
4.4	ホール呼び割当て状況の変化に留意した状態遷移の模式 . . . . .	86
4.5	状態遷移確率を状況入力 of 生起確率の和とする見方の概念 . . . . .	92
4.6	準最適なコスト関数と最適なコスト関数との差が最大となる状態遷移モデル の1例 . . . . .	98
4.7	客の平均待ち時間の例題集合に渡る分布 . . . . .	103
4.8	客の最大待ち時間の例題集合に渡る分布 . . . . .	105
4.9	ある例題に対するCDによるかご運行および準最適方策によるかご運行 . . .	106

---

5.1	arg-min ルールによるかご割当て計算の概観 . . . . .	117
5.2	arg-match ルールによるかご割当て計算の概観 . . . . .	118
5.3	問題 p1 を対象とした学習において使用された単位ルール構成要素の含有数の変化 . . . . .	127
5.4	問題 p2 を対象とした学習において使用された単位ルール構成要素の含有数の変化 . . . . .	127
5.5	問題 p3 を対象とした学習において使用された単位ルール構成要素の含有数の変化 . . . . .	128
5.6	問題 p1, p2 に対して有効であるかご運行ルールにより割り当てられたかごに関する決定指標 $A_2$ の分布 . . . . .	130
5.7	3つのルールベースを連結して作成されたルールベースの基となったルールベースに対する目的関数値比の分布 . . . . .	132

---

# 表 目 次

2.1	リスケジューリング環境に関するリスケジューリング問題の分類 . . . . .	29
2.2	エレベータ運行計画問題のクラス分類 . . . . .	40
3.1	離散時間モデル上で分枝限定法を適用する問題のパラメータ設定 . . . . .	60
3.2	離散時間モデル上での分枝限定法の計算時間 . . . . .	61
3.3	離散時間モデル上の最適なかご運行の CDSC によるかご運行に対する有効性	61
3.4	連続時間モデル上で分枝限定法を適用する問題のパラメータ設定 . . . . .	64
3.5	連続時間モデル上で最適なかご運行の CDSC に対する有効性 . . . . .	64
4.1	2 つの動的計画法を適用する際のパラメータ設定 . . . . .	99
4.2	各交通流下において到着する客の OD ペアがある組合せをとる割合 . . . . .	100
4.3	各交通流における $T_f^u, T_f^d$ ( $f = 1, 2, 3$ ) の値 . . . . .	100
4.4	交通流ごとにサンプリングされた状態空間の大きさおよび計算時間 . . . . .	101
4.5	報酬反復法および DPRM の適用において考慮された状況入力数および適用 に要した計算時間 . . . . .	101
4.6	最適方策あるいは準最適方策によるかご運行における客の平均待ち時間比お よび最大待ち時間比の例題集合に渡る平均 . . . . .	104
5.1	遺伝的機械学習を適用する問題の規模を規定するパラメータ設定 . . . . .	121
5.2	問題 p1 の交通パターンを規定する OD 行列 . . . . .	122
5.3	問題 p2 の交通パターンを規定する OD 行列 . . . . .	123
5.4	問題 p3 の交通パターンを規定する OD 行列 . . . . .	123
5.5	本章で対象とされる 3 つの問題の概要 . . . . .	123
5.6	遺伝的機械学習を適用する際のパラメータ設定 . . . . .	124
5.7	決定指標 $A_i$ ( $i = 1, \dots, 5$ ) を用いる arg-min ルールの各問題に対する平均目 的関数値比 . . . . .	126
5.8	獲得されたルールベースの既存手法 (CD) に対する目的関数値比 . . . . .	128
5.9	主に使用された単位ルールのルールベースごとの使用回数 . . . . .	129



---

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究の背景と目的

近年の科学技術の発展は、様々な問題の解決と同時に、研究対象とされる工学問題の増加をもたらしている。その原因は、以前は選択肢が1つしかなく、本質的には問題が存在するが実質的には問題とすることができなかつた状況において、複数の選択肢を考慮することが可能となってきたことにある。このような選択肢の増加は、情報ネットワークの発達やセンサの小型化・高性能化に伴う利用可能な情報量の増大と、計算機技術の発展による計算機のデータ処理能力の向上に負うところが大きい。また、自然環境の破壊や企業間競争の国際化、少子高齢化といった環境の変化も、工学問題を増加させている。これらの問題の多くでは、そのように環境が変化する前には、いちおうの解決を見ていた。しかし、現在では、希少となってしまった(人を含む)資源の使用コストが増大し、ある決定が影響を及ぼす範囲および影響を受ける範囲が地球全体に広がり、以前とは問題設定が変わってしまっている。そのため、以前に求められた解がもはや有効ではなくなっている。現在の世界情勢を踏まえた問題設定のもとで、現状に即した新たな解を求める必要が生じている。

そのような、近年考慮されるようになった工学問題では、人と強い関係を持つシステムが対象とされていることが多い。関係する人の数が多くかつ人の振舞いを実数として表すことが可能な問題であれば、一般に、人の振舞いをマクロに見て平均化・確率変数化することにより、システムの挙動を連続なものとして捉えることができる。このとき微分を考えることが可能となり、微分方程式として構成されるシステムの状態方程式を数値的に解くことでシステムの振舞いを予測・分析し、もって対象問題の解決を図ることが可能となる。さらに、もし解析的に解けるほど簡単なものとして微分方程式を構成できるならば、非常に規模の大きな問題も解くことができる。しかしながら、現実には、人の振舞いを実数で表せることは少なく、さらに平均ではなく最大や最小の振舞いが支配的影響を与えることも多い。このとき、システムの挙動を連続として扱うことが難しく、離散であるとした上でその解決を図らなければならない。そのような、人との関係が強く、かつ本質的に離散であるシステムを対象とする問題のうち身近なものの1つとして、エレベータ運行計画問題を挙げるができる。

エレベータ運行計画問題は、人やモノが小さなコストで建物を垂直方向に移動できるよう、エレベータの運行を計画する問題である<sup>1)</sup>。この計画は、人がある階床で待っているか、エレベータに人が乗っているかといった情報に基づいて行われる。これらの情報は本質的に0か1であり、本来連続であった値を離散化する場合とは異なり、中間値は存在しない。さらに、エレベータの挙動は複雑であり、簡単な状態方程式や状態遷移図として表すことはできず、数値的な予測・分析すら難しい。このように、エレベータ運行計画問題は、解決の困難さと存在の身近さの対照から、興味深いものとなっている。

実世界では、多くの建物で日常的にエレベータシステムが稼働しているが、それらの運行計画は前述の困難な問題を解いた上で決定されているわけではない。エレベータは、現在のように規模が大きくなり、利用可能な情報量が膨大となる以前から使用されており、そこでは熟練者により作製されたルールベースが運行計画のために使用されていた。彼らは、日々エレベータシステムの挙動を追い続けることで、システムの将来の挙動を暗黙のうちに予測できるように熟達したと推察される。エレベータシステムの進歩に追従して、熟練者により連綿と改良の重ねられてきたルールベースが、現在身の回りで多く使用されている。エレベータシステムの進歩が緩やかであったこと、およびこれまでのシステムに対して有効であると実証済みのルールベースが手元にあったことから、このアプローチは合理的であるといえる。しかし、熟練者の減少やエレベータシステムの多様化・複雑化により、ルールベースの改良にかかるコストが増大していることから、そのアプローチを取り続けることはいずれ不可能になると予想される。このような憶測が確かであると認識させるきっかけが、これまでとは全く異なる形態のエレベータシステムの実現<sup>2)</sup>である。そのエレベータシステムでは、これまでに培われたルールベースの有効性を支えている様々な技巧が、用をなさないどころか、むしろシステムの有効性を低下させうる。さらに、そのようなエレベータシステムの挙動は、これまでのシステムにまして複雑で予測しがたいものであることから、システムの挙動を予測するという意味での熟練者を育てることは難しいと考えられる。加えて、ルールベースおよび熟練者の技能に依存した研究は、結果として有効にエレベータを運行させるルールを導くかもしれないが、客観的・一般的である知見の蓄積に寄与することは少なく、うまくいかなかった場合には、費した人的・時間的資源を全て無駄にしてしまうおそれがある。そのようなアプローチとは異なるものとして、計算機が高性能化し並列計算が容易となっている現状<sup>3)</sup>を踏まえて、改めてエレベータの運行計画を最適化問題として捉え、最適解の求解を念頭において研究を進めるといった数理計画的アプローチが考えられる。

非常に小規模なエレベータシステムを対象とするなど、必ずしも現実的ではない前提のもとでモデル化されたエレベータ運行計画問題へ、数理計画法を適用するなどして最適解あるいは最適解に対する相対的評価の可能な解の導出を目的とする研究を、理論的研究と呼ぶことにする。研究成果が大規模なエレベータシステムへ現実的な前提のもとで適用可能であることを要件とし、その上で有効なエレベータ運行の獲得を目的とする研究を、実際的研究と

呼ぶことにする。エレベータシステムのような離散事象システムを対象とした計画問題は、一般に組合せ最適化問題<sup>4)</sup>へと帰着されるため、何らかのブレイクスルーがない限り、現実規模の問題を対象として理論的研究を行うことは合理的ではないと考えられる。しかし、理論的研究には、例えば実利用可能な結果が得られなくても、客観的に明らかな形で問題および求解に関する知識を蓄積することができるという特長がある。また、最適解に基づいて、経験的なものに留まっているヒューリスティクスの評価を客観的・絶対的\*なものとする 것도可能であると考えられる。この種の研究に対し、主にエレベータシステムを開発・販売する企業により進められている実際的な研究では、獲得されたエレベータ運行の最適性についていえるところが少なく、どの程度最適解に近い運行が得られているのかを調べることは困難である。また、数理的に取り扱うことが難しいヒューリスティックな仕組みが使用されることが多く、このとき問題を数学的に取り扱うための基盤を考えることが困難である。そのような研究の上では、研究成果を基盤の上に積み重ねることができず、有効な結果が得られなかった場合には一歩手前の成果から違う方向を模索するといった系統だったアプローチが難しい。しかし、現実規模の問題へ適用することが可能であり、現実のエレベータシステムにおいて研究成果を利用することも容易である。

理論的研究と実際的な研究には、それぞれ前述のような長短所があり、また適用可能な問題の規模も完全には一致しない。エレベータ運行ルールを作製するためにこれまで取られてきたアプローチだけでは、複雑なエレベータシステムの運行計画が難しくなると予想されることから、これらの2種類の研究を並行して進め、それらの研究成果を相補的に組み合わせることが肝要であると考えられる。これを踏まえて、中規模な問題を対象として理論的研究により求められた最適解あるいは求解に関する知見を、実際的な研究において同規模の問題を対象として応用し、さらにその結果を大規模な問題へ拡張するという研究の枠組みを考えることが可能となる。その実現のためには、

- (1) 2種類の研究が(ほぼ)同じ中規模の問題へ適用可能であること;
- (2) その問題に対する理論的研究による成果が、実際的な研究において利用可能であること;
- (3) (実際的な研究において) 有効性が問題の規模に依存しないエレベータ運行を作成するエレベータ運行計画手法を構成すること;

が必要であると考えられる。これらのうち条件(1)、(2)は、それぞれ、

- (1) 理論的研究を実際性の高い問題へ適用可能とする;
- (2) 実際的な研究においてエレベータ運行計画手法の数学的取扱いを可能とする;

ことで満たされると考えられる。このように理論的研究および実際的な研究を拡張するイメージが、図 1.1 に示される。

以上の背景のもと、本研究では、理論的研究による成果の実際的な研究への応用を可能とす

\*最適値に対して相対的ということの意味する。

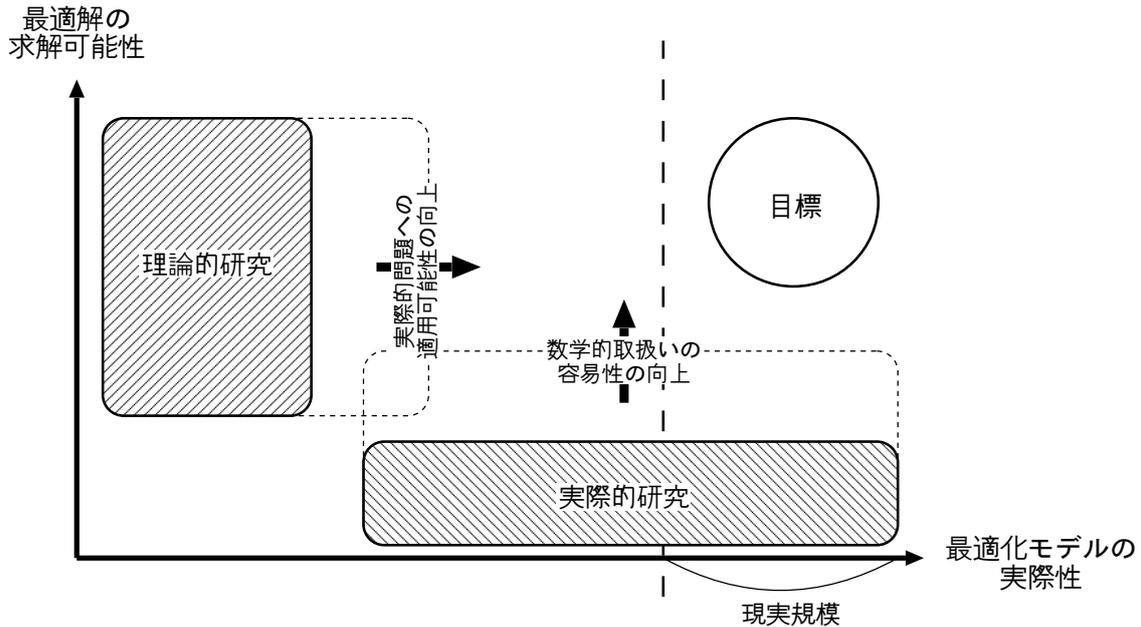


図 1.1: 理論的研究と実際的研究の位置づけおよびそれらの拡張方向の概念  
 理論的研究および実際的研究を、それぞれ、実際性の高い問題へ適用可能となるよう、エレベータ運行計画手法の数学的取扱いが容易となるよう、拡張することが必要であると考えられる。ここで、縦の破線は、理論的研究を行うことのできる問題の規模の限界を表している。

る枠組みの構築が目標とされる。その達成のため、まずは図 1.1 に示されたように、理論的研究および実際的研究をそれぞれ拡張し、両者の隔たりを小さくすることが目的とされる。理論的研究の拡張に際して、エレベータ運行計画問題がその特徴に基づいてクラス分けされ、クラスごとに最適化モデルの構成および数理計画法の適用が行われる。ここで、実際性の高い問題への適用可能性を向上させるために、エレベータシステムの状態遷移が沿う時間モデルを離散から連続へ精緻化可能である分枝限定手続きが構成され、また、エレベータシステムの状態遷移確率が、任意のシステムやシステム利用者の移動パターンの上で成立するよう定式化される。実際的研究の拡張に際しては、最適なエレベータ運行ルールの符号化および獲得の容易性に留意して、ルールベースの要素である単位ルールが設計される。

## 1.2 論文の構成

本論文は、次のように構成される。

まず第 2 章で、エレベータ運行計画問題が整理される。ここでは、制御対象であるエレベータシステムの主要な構成要素が示され、システム利用者が到着する頻度・パターンが交通流として説明される。問題の目的関数が、最小化すべき指標である利用者の不満足度から

主に構成されるものとして定義され、続いて問題の決定変数が、システム利用者によるサービス要求へのエレベータの割当ておよびエレベータの上下動として定義される。

第3章では、エレベータ運行計画問題が静的最適化問題としてモデル化され、これに基づいた分枝限定法の構成が示される。このモデル化は、本来事前に行うことができない、エレベータシステム利用者がいつ、どの階床へ、どの階床を目的階床として到着するかという情報が既知であるという前提のもとで行われる。この前提に加えて、エレベータを機械、利用者の運搬を仕事と見立てることで、対象問題が一種のスケジューリング問題へと帰着される。この求解のために、スケジューリング問題へ適用可能な種々の数理計画法のうち、適用における自由度が高く、問題に関する知見を埋め込むことが比較的容易である分枝限定法が用いられる。そのような特徴を活かして、第3章における分枝限定法は、離散時間モデルと連続時間モデルがほぼ等価に取り扱え、かつある部分問題が明らかに最適でない場合に、それを限定することで計算量を削減できるように構成される。計算例では、擬似乱数により作成されるエレベータシステム利用者の到着データに対して、分枝限定法による最適なエレベータ運行が求められ、これと既存手法によるエレベータ運行とが比較される。

第4章では、エレベータ運行計画問題のマルコフ決定過程<sup>5)</sup>としてのモデル化、およびこれに基づいた2つの動的計画法<sup>6)</sup>の構成が示される。このモデル化は、計画期間におけるエレベータシステム利用者が従う交通流が既知であるという前提と、システムの振舞いを確率的とする要因の明示的考慮に基づいている。これらにより、エレベータシステムの状態遷移確率を定式化することが可能となり、エレベータ運行計画問題は、割引のある無限期間マルコフ決定過程としてモデル化される。この問題に対する一般的解法である報酬反復法が構成され、効率化された動的計画法が提案される。後者の動的計画法の効率化は、エレベータシステムの振舞いを確率的とする要因のうち生起確率が低いものを考慮しないことによる状態遷移モデルの縮約に基づいている。計算例では、2つの動的計画法により得られたエレベータ運行ルールが、既存手法よりも統計的に有意に有効であることが示される。また、後者の動的計画法は、報酬反復法と同程度に有効なエレベータ運行ルールを、より短い計算時間で導出可能であることが示される。

第5章では、それまでのモデルで設定されていた前提の多くが取り除かれ、現実規模のエレベータシステムを対象とする実際的な研究が示される。その状況では、エレベータ運行を計画する時点において、エレベータシステム利用者の到着データはもちろん、利用者が従う交通流に関する情報も利用することができない。エレベータ運行ルールが、そのような数学的取扱いが困難な状況でも利用可能であるルールベースとしてモデル化される。最適なエレベータ運行ルールを符号化でき、かつその獲得が容易であるために、ルールベースを構成する単位ルールが満たすべきと考えられる性質が指摘され、これを踏まえた単位ルールの設計が示される。この設計に基づくルールベースとして有効なエレベータ運行ルールを獲得するために、クラシファイアシステムを獲得するための一般的な手法である遺伝的機械学習<sup>7)</sup>が

用いられる。計算例では、ある交通流に従う学習用データから獲得されたルールベースが、学習用とは異なるデータに対しても、既存手法よりも有効であることを示す結果が報告される。さらに、複数の交通流を対象としてそれぞれ獲得されたルールベースを単純に連結することで、複数の交通流に対して有効であるルールベースの構成が可能であることを示唆する結果が示される。

最後に第 6 章で、それまでの章の結論が整理され、本論文のまとめおよび今後の課題が示される。

---

## 第 2 章

# エレベータ運行の計画問題および計画手法

### 2.1 エレベータシステム

本論文において制御対象とされるエレベータシステムの概観が、図 2.1 に示される。なお、本論文では、エレベータシステムはシステムと短く表記されることがある。

エレベータシステムは多くの要素から構成されるが、それらのうち運行計画に関するものとして、本論文では次が考慮される。

- かが: エレベータシステムの利用者 (以降, 客) やモノを乗せ, 垂直方向へ運ぶための装置。
- デッキ: かが内で乗客やモノを収容するスペース。
- かが扉: かがの扉。
- かが扉開閉ボタン: 乗客がかが扉を開閉させるためのボタン。
- かが呼びボタン: 各かが内に設置されている, 乗客の目的階床を指定・表示するためのボタン。
- コントローラ: 各かがの上下動やかが扉の開閉, かが呼びボタンの点灯状況などを制御する装置。
- シャフト: かがやかを吊すロープなどを内包する装置。
- ホール: 各階床に存在する, 客が到着しかごを待つスペース。
- 主階床: 客の到着頻度が特になりうる階床。多くの場合, 建物への出入口が 1 階に設置されているため, 主階床も 1 階となる。
- 一般階床: 主階床以外の階床。
- ホール呼びボタン (乗り場呼びボタン): 客がサービスの要求をシステムへ伝えるために使用される, 各ホールに備えられているボタン。
- 案内灯: あるホールでかごを待っている客が乗るべきかごを旅行方向ごとに示したり, 接近しているかごの次の移動方向を表示するためのランプ。
- スケジューラ: コントローラやホールなどから送られてくる情報に基づいてかご運行を計画し, ホール呼びへのかご割当てなどを計算する装置。

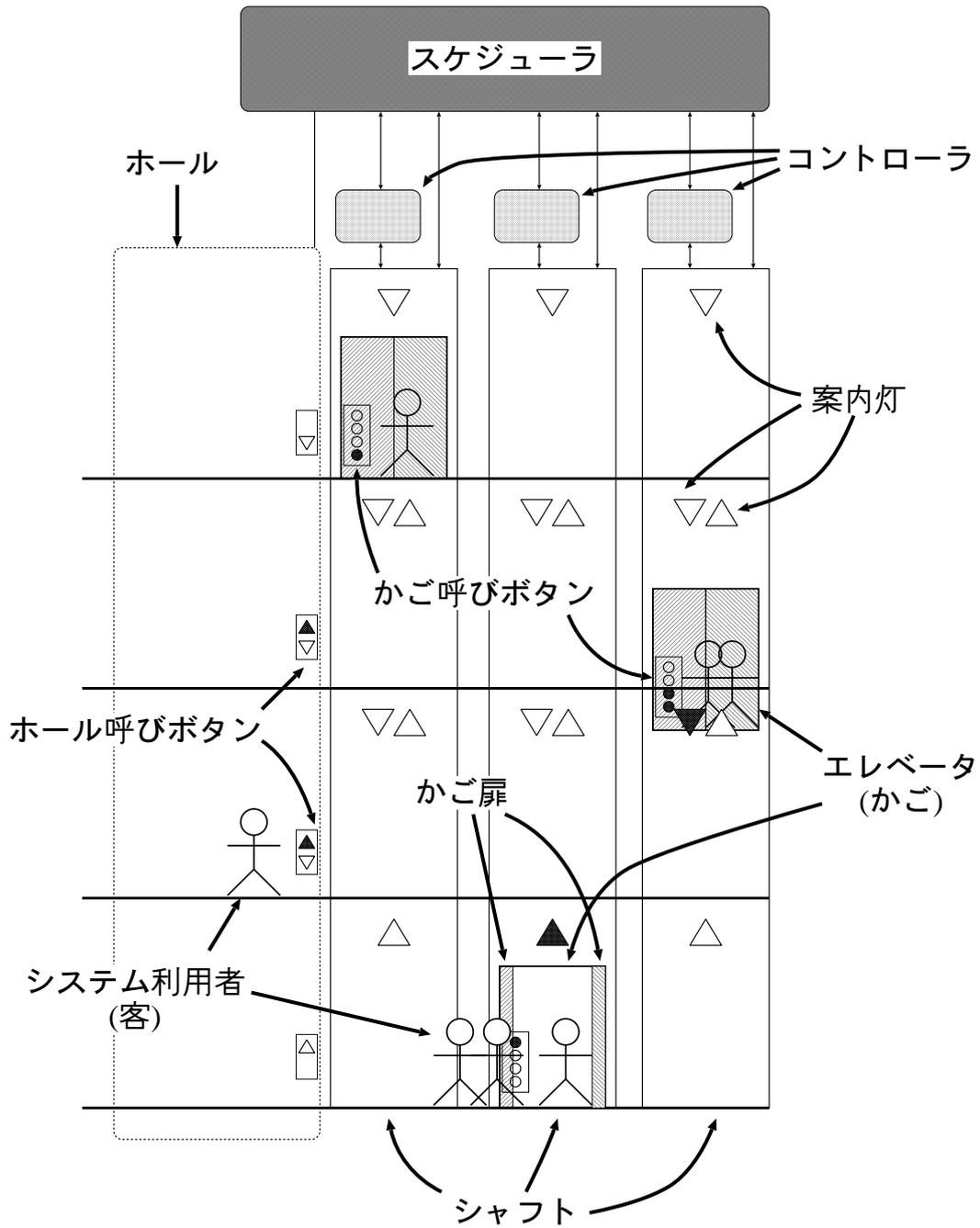


図 2.1: 本論文において制御対象とされるエレベータシステムの概観  
 本論文では、現在の日本において最も一般的であると考えられるエレベータシステムが対象とされる。

“エレベータ”という単語は、かごやシャフト、コントローラなど、客を運ぶための装置一式を指す。ただし、本論文では、厳密性が求められない文脈において、かごを指すものとしてエレベータという単語が使われることがある。

エレベータシステムに備えられたホール呼びボタンやかご呼びボタンが押下されることで、客のサービス要求はシステムへ伝えられる。これらの要求（あるいは処理単位）は、それぞれホール呼び、かご呼びと呼ばれ、対応するボタンを押下することは、それぞれホール呼び、かご呼びの登録と呼ばれる。ここで、エレベータシステムが呼びを登録した客に関する情報を計測することは、原則として不可能である。例えば、ある階床においてホール呼びが登録されたとして、その階床で何人の客が待っているのか、また各客の目的階床はどこであるのかは不明である。そのため、かご運行の計画において、客へのサービスは呼びの処理として考慮されることが一般的である。なお、後述される行先階登録方式エレベータシステムの各ホールへカメラを設置し、画像認識技術を駆使することで、客の情報を計測できると主張されることもある<sup>8)</sup>。しかしながら、例えばカメラに写らない位置に客がいる場合も考えられるため、客の情報を計測するためには、より高度な計測機器が必要であると考えられる。

エレベータシステムの制御は、1975年以前は電子回路により行われていたが、現在ではデジタルコンピュータが一般に用いられている<sup>9)</sup>。制御コンピュータには、エレベータシステムの情報を遅れなく計測し、即時に適切な計算を行い、その結果をシステムへ迅速に伝えることが求められるため、その動作周波数はある程度高くなければならない。例えば、動作周波数が10 Hzと低ければ、計算や制御の実行が即時に完了するとしても、エレベータシステムの情報が計測されるのに0.1秒、何らかの制御が行われるのに0.1秒、合計0.2秒以上の遅れが生じる。都市の再開発などにより建物の高層化が進み、高速で動作するエレベータシステムが増えつつある現在、この大きな遅れは危険である。安全上の視点からは、制御コンピュータの動作周波数はできるだけ高いことが望まれるが、コスト上の視点からは一概にそうとはいえない。これらのバランスをとった周波数として、ボタンの押下状況の計測は10 Hz、エレベータシステムの状態の計測および制御は100 Hzで行えば十分であるとされている<sup>9)</sup>。

前述されたエレベータシステムの主要な構成要素に基づいて、既存のエレベータシステムを次の4つの点について分類することができる。

- (1) ホール呼びボタンの数: 各ホールに設置されているホール呼びボタンの数が、高々上 / 下の2つであるか、より多数であるか。
- (2) ホール呼び割当てポリシー: 新たに登録されたホール呼びへのかご割当てだけを決定し（それまでの割当ては不変）、即時に案内灯を点灯させるか、それまでの割当てでも可変とし遅れて（かごが到着する直前に）案内灯を点灯させるか。
- (3) かご形状: 1つのかごが、かごの乗客全てを内包する1つのデッキだけから構成される

か、複数のデッキから構成されるか。

- (4) シャフトあたりのかご数: 1つのシャフトに1台のかごだけが含まれるのか、複数のかごが含まれるのか。

本論文では、現時点の日本において最も一般的であると考えられるものとして、

- (1) ホール呼びボタンは高々上/下の2つ;
- (2) ホール呼びへのかご割当ておよび案内灯の点灯は即時に行われる (即時割当て方式);
- (3) 1のかごは1つのデッキからなる;
- (4) 1つのシャフトには1のかごだけが含まれる;

というエレベータシステムが対象とされる。これらの4点のいずれかが本論文で対象とされるエレベータシステムとは異なるシステムは、それぞれ、

- (1) 行先階登録方式エレベータシステム<sup>10)</sup> \*;
- (2) 遅延 (非即時) 割当て方式エレベータシステム<sup>11)</sup>;
- (3) ダブルデッキエレベータシステム<sup>12)</sup>;
- (4) マルチカーエレベータシステム<sup>13)</sup>;

と呼ばれる。

## 2.2 エレベータ運行計画問題

### 2.2.1 問題の概要

客がエレベータシステムを用いて階床間を移動するとき、典型的には次のような事象が順に発生し、必要に応じて計算が行われる。

- (1) 客がある階床のホールへ到着する。
- (2) 客がホール呼びボタンを押下し、ホール呼びを登録する。
- (3) スケジューラがホール呼びへのかご割当てを計算し、対応するかごの停車を表す案内灯を適宜点灯させる。また当該かごのコントローラへ、呼び割当てに関する情報を伝える。
- (4) 案内灯を見て、客は割り当てられたかごを待つ。
- (5) コントローラがかごを客の出発階床へ停車させる。
- (6) コントローラがかご扉が開く。
- (7) 客が乗車する。

---

\*費用対効果の視点から、主階床のホールにだけ階床数分のホール呼びボタンを設置し、一般階床のホールには上/下のホール呼びボタンを備えれば十分であるともいわれている。

- (8) 客はかご呼びボタンを押下し，かご呼びを登録する．この情報がスケジューラおよびコントローラへ伝えられ，かご呼びボタンが点灯される．
- (9) コントローラがかご扉を閉じ，かごの上下動を計算する．
- (10) コントローラがかごを動かし，スケジューラは客の出発階床の案内灯を適宜消灯させる．
- (11) スケジューラはかごが客の目的階床へ近付くと，そのホールの対応する案内灯を適宜点灯させる．
- (12) コントローラがかごを客の目的階床へ停車させ，かご呼びボタンを消灯させ，かご扉を開く．
- (13) 客が降車する．
- (14) 一定時間の経過，あるいは他の乗客によるかご扉開閉ボタンの操作により，コントローラがかご扉を閉じる．

エレベータ運行計画問題とは，エレベータシステムの状態や運行計画および予測される将来状態に応じて，客の不満足度やシステムの消費電力量が小さくなるようかご運行を計画する問題である．計画に際して決定される事項は，ホール呼びへのかご割当てと各かごの上下動の2種類に分けられる<sup>1)</sup>．かごの上下動の計画における自由度は乗客がいるとき非常に小さくなること，および1つのかごだけを備えたエレベータシステムにおけるかごの上下動を計画するために有効なルールが考案されている<sup>9)</sup>ことから，前者の事項だけが決定変数とされることが多い．これは，特に即時割当て方式の場合には一般的である．

前述された2種類の決定事項を直接計画することは，決定事項のとりうる組合せ数が多いため，非常に困難である．かごの上下動を何らかのルールにより決定し，ホール呼びへのかご割当てだけを直接計画するとしても，度合は下がるものの，やはり困難である．これらの事実と，あるかごがサービスするホール数を少なくすることは，そのかごの運行の有効性を明らかに高めるといふ知見から，ホールをいくつかのゾーン(あるいはエリア)へと分け，ゾーンへのかご割当てを決定事項とするゾーニング<sup>14)</sup>というかご運行計画手法が考案・利用されている．あるゾーンのホールにおいて登録されたホール呼びへサービスするかごは，比較的素朴なルールに従ってそのゾーンへ割り当てられたいくつかのかごの中から選択され，また各かごの上下動も簡単なルールにより決定される．ゾーニングでは，ゾーンをどのように分けるか，そして各ゾーンをどのかごにより受け持たせるかに工夫が凝らされる<sup>15)</sup>．ゾーン分けの例としては，

- 1階から中央階床までの下部階床;
- 中央階床から最上階までの上部階床;
- 1階と上部階床;
- 1つの会社がテナントとして入っているなど，特に行き来が多い階床群;

など静的に定めるものと、かごの位置や客による呼び登録状況に応じて動的に切り替えるものが挙げられる。ゾーニングは、かご運行が多数の要素（ゾーン分け手法，ゾーンへのかご割当て手法，ゾーン内でのかご割当て手法，かごの上下動決定手法）に依存するため，その上で最適なかご運行を求めることは困難であると考えられる。

エレベータシステムの消費電力量と共にかご運行の評価を構成する客の不満足度は，次のような指標に基づいて考慮されることが多い<sup>1,9,13)</sup>。

- (1) 待ち時間 (waiting time): 客がホールに到着してから，かごへ乗車するまでの時間。
- (2) 旅行時間 (travel time): 客が出発階床でかごへ乗車してから，目的階床で降車するまでの時間。
- (3) システム時間 (system time, service time): 客がエレベータシステムの利用に費した時間。待ち時間と旅行時間の和。
- (4) 長待ち (long wait): 待ち時間があまりに長い。これは，一般に待ち時間が閾値以上（多くの場合，60 秒）であるか否かとして判定される<sup>9)</sup>。ある客の待ちが長待ちである割合は，長待ち率と呼ばれる。

あまりに長い時間かごを待った客はエレベータシステムが設置された建物の責任者へ苦情を申し立てることがあり，これは当該責任者およびエレベータシステム製作・管理会社の評価を著しく下げするために，長待ちには特段の配慮が払われることがある。また，待ち時間の増加により急激に増加するといった客の不満足度に見られる非線形な特徴を表すために，待ち時間の増加に伴い指数関数的に増大する指標として，待ち時間の自乗和が考慮されることもある<sup>16)</sup>。

かご運行の評価へ影響を与えるもう1つの要素であるエレベータシステムの消費電力量は，その低減により客の不満足度を減少させるものではなく，むしろ増加させるものである<sup>17)</sup>。このため，客の不満足度の減少が優先される場合，かご運行の評価においてシステムの消費電力量は考慮されないことが多い。しかし，持続的発展の可能な社会を実現するため，環境保全に関する意識が年々高まっていることから，今後はエレベータシステムの評価においてシステムの省エネルギー性が重要視されるようになると考えられる。エレベータシステムの消費電力量の低減を考慮して計画されたかご運行は，客の不満足度を大幅に増加させることはないという結果も報告されている<sup>18)</sup>ことから，客のわずかな我慢によるシステムの低消費電力量化が期待される。

エレベータシステムでは，かごが訪れる地点（階床）は1次元空間上に並んでいるため，それらの地点が2次元空間上に広がっている Vehicle Routing Problem（以降，VRP）や Pickup and Delivery Problem（以降，PDP）<sup>19)</sup>などの問題で対象とされる交通システムと比べ，客の移動パターンに見られる規則性が強い。ここで，客の移動パターンに見られる規則性は，大きく，

- (1) 交通需要: 客が到着する頻度;
- (2) 交通パターン: 客の出発階床・目的階床があるペア (以降, OD ペア) をとる確率;

という2つの軸から考慮される。本論文では、これらの組合せを交通流と呼ぶ。

交通需要の大小 (強弱) の規定は、エレベータシステムが設置される建物の規模および用途 (オフィスビルであるか、ショッピングセンターであるかなど)、さらには使用されるかご運行計画手法に依存する<sup>13)</sup>。交通需要の大小の規定が建物の規模および用途だけに基づく場合、これらの情報から建物の居住者数が概算され、ある期間 (一般的には5分間) にホールへ到着する人数の建物の居住者数に対する割合により、交通需要の大小が分類される。交通需要の大小の規定が、建物の規模および用途に加えて、使用されるかご運行計画手法に基づく場合、客が到着したときにホールで何台のかごが待機、あるいはすぐに利用可能となるかにより、交通需要の大小が分類される。このような分類の仕方は現実のエレベータシステムを対象として考案されたものであり、実際的ではあるが、適用に際しては多くの事項を仮定しなければならない。このため、本論文では、交通需要の大小をいくぶん人為的であるが定量的な仕方でも考慮する。具体的には、現実規模のエレベータシステムを対象とした研究<sup>20)</sup>で用いられているシミュレーション設定では、交通需要の、

- 最小値が 500 [人/時間];
- 最大値が 2,000 [人/時間];

と想定されていることを参考に、1秒間に到着する客の人数は  $[0.1, 1]$  の範囲に収まると考える。すなわち、客の到着間隔は、

- まばらでも 10 秒に 1 人 (0.1 [人/秒]);
- 頻繁でも 1 秒に 1 人 (1 [人/秒]);

であると前提し、この範囲で交通需要の大小を考える。

交通パターンは、大きく次の4種類に分類される<sup>9,13)</sup>。

- up-peak パターン: オフィスビルにおける入社時に見られる、主階床から一般階床へ旅行するという OD ペアが大半を占めるパターン。主階床が1階でない場合を考慮して、incoming パターンと呼ばれることもある<sup>21)</sup>。

30分ほどの間に建物の居住者数と同程度数の客が集中し、エレベータシステムの負荷が最も高くなることから、建物へ設置するエレベータシステムに求められる性能を見積もる際に考慮される。

- down-peak パターン: オフィスビルにおける退社時に見られる、一般階床から主階床へ旅行するという OD ペアが大半を占めるパターン。主階床が1階でない場合を考慮して、outgoing パターンと呼ばれることもある。

少なくとも日本では<sup>†</sup>、仕事を終える時刻のバラツキにより up-peak パターンよりは負荷が小さく、エレベータシステムの設置計画時に考慮されることは少ない。しかし、継続時間が約 90 分と長い。

- two-way パターン: オフィスビルにおける昼食時などにみられる、主階床へ向かう客と一般階床へ戻る客が作るパターン。up-down パターンと呼ばれることもある<sup>22)</sup>。建物内に食堂が設置されていない場合、up-peak パターンと down-peak パターンが混在したようなパターンであるが、そうでない場合、さらに複雑なパターンとなる。誰かが昼食をとっている時間帯は約 120 分ほどであろうと考えられるが、そのうち前半は down-peak パターン、後半は up-peak パターンとみなせるため、実質的にこのパターンが見られる時間は 30 分から 60 分ほどである。
- inter-floor パターン: オフィスビルにおける執務時間帯にみられる、ある OD ペアの生起確率分布が一様分布に近いパターン。1 つの会社が複数の階床にオフィスを設置している場合などは、OD ペアの生起確率分布に偏りが見られる。  
エレベータシステムの負荷は小さいが、1 日の大半で見られるパターンである。

現実のエレベータシステムでは、これら 4 つの純粋なパターンが見られることは少なく、例えば up-peak パターン 90% と down-peak パターン 10% の混合と見なせるような交通パターンが観測される<sup>13)</sup>。なお、本論文では、ある交通パターンを持つ交通流がそのパターン名を用いて総称されることがある。例えば、交通パターンが up-peak である交通流は、交通需要の大小によらず up-peak 交通流と呼ばれうる。

エレベータシステムに見られる、ある時点の交通流が少数の交通需要・交通パターンの組合せとしてのグループに大きく分類されるという特徴を利用し、交通量データからその時点の交通流を推定し、これに応じてかご運行を計画することが、システムの将来の状態を考慮できるという点からも合理的であると考えられる。そのため、現実の多くのエレベータシステムでは、交通流ごとにかご運行ルールをあらかじめ作成しておき、推定された交通流に応じてそれらを切り替えるという手法がとられている。このとき、エレベータ運行計画問題は、

- (1) 交通量データから交通流を推定する<sup>23,24)</sup>;
- (2) 各交通流に適したかご運行ルールを求める;

という 2 つの小問題へ分割される。元の問題よりも問題の規模は小さいといえるが、

- (1) どのような交通流をあらかじめ想定しておけば十分であるか不明である;
- (2) 交通量データを正確に計測することが難しく、そもそも客の移動を個別に追跡しない限り、真に正確なデータ (OD ペアの集合) を得ることができない;

といった新たな問題が生じるため、求解は容易ではない。

<sup>†</sup> up-peak パターンよりも down-peak パターンの方が負荷が高いとする研究もある。

なお、呼びを登録した客を区別することは、画像処理技術を利用した研究<sup>13)</sup>が進められているものの、RFIDを用いるなどして客の移動を個別に追跡できない限り、原理的に不可能であると考えられる。従って、現実のエレベータシステムが計測可能であるのは、ホール呼びやかご呼びの待ち時間に過ぎず、前述した待ち時間や旅行時間を客ごとに計測することは不可能である。このような客ごとの指標は、主にシミュレーションによるかご運行計画手法の評価において、客に渡る平均、すなわち平均待ち時間、平均旅行時間、平均システム時間、長待ち率を計算するために用いられる。この際、客到着の過渡的(エレベータシステムへ客が到着し始めた/到着が終わりつつある)時間帯を評価から除くために、平均の計算においてそれらの時間帯に到着した客が除外されることもある<sup>25)</sup>。

### 2.2.2 前提条件

本論文で考慮されるエレベータシステムおよび交通流に関する前提条件が、次に示される。

- (1) 客の乗降は中断できない。
- (2) あるホールで乗降する客が複数いる場合、まず降車する客が乗車する客よりも優先され、次に到着時刻の早い客が優先される。
- (3) ホール呼びボタンは上/下へ対応する高々2種類である。最下階床および最上階床では、1種類だけとなる。

主階床などのホールにおいて階床数分のホール呼びボタンが設置されている行先階登録方式のエレベータシステムでは、より有効なかご運行が可能であると考えられる<sup>26)</sup>が、本論文では現時点でより一般的なものとしてこの方式が考慮される。

- (4) ホール呼びやかご呼びに対応する(呼びを登録した客およびその客とODペアが同じである)客を個別に識別することはできない。
- (5) 逆走は禁止される。

ここで、逆走とは、かごが乗客の旅行方向とは逆の方向へ移動することを意味する。逆走を許すことでシステム全体としての効率を向上させることが可能である<sup>10)</sup>が、一般的でないため乗客を不安かつ著しく不満足にさせると考えられることから、本論文では禁止とされる。

- (6) ショッピングモールや病院などでなく、一般のオフィスビルに設置されたエレベータシステムが対象とされる。
- (7) エレベータシステムが設置された建物の階床数は50以下である。

これは、2.2.3節に後述される問題のモデル化における簡便のための条件である。モデルに簡単な変更を加えることで、この前提を任意に緩めることが可能である。

- (8) エレベータシステムに備えられたかごの仕様は全て同じである。

- (9) 客の到着間隔は指数分布に従う．
- (10) 客は、複数のかごへ乗車可能であるとき、任意のかごを選択する．
- (11) かが割当ての再計算は行われない．
- 客がスケジューラにより割り当てられたかごとは異なるかごへ乗車した場合などは、エレベータシステムの実際の振舞いと予測された振舞いとの違いが大きくなるため、かが割当てを再計算することが合理的である．しかし、本論文では、できるだけ一般のエレベータシステムを対象とできるように、そのような再計算は行わないとされる．
- (12) かがは計画開始時刻に、ある階床にて扉を閉鎖させて、客を乗せずに停止している．
- (13) 計画開始時刻におけるかごの直前の移動方向は、かがが最下階床に位置する場合を除いて「上」である．
- (14) かがの加加速度は考慮されない．また、加速度を直接変更することが可能である．

### 2.2.3 記号の定義

本論文で考慮されるエレベータシステムの特徴および問題の規模を規定するパラメータを表すものとして、次の記号を定義する．

- $T$ : 運行計画を考える計画期間．
- $N_p$ : 計画期間にエレベータシステムを利用する客数．
- $N_f$ : エレベータシステムが設置されている建物の階床数．
- $N_c$ : エレベータシステムに備えられたエレベータ数．
- $N_E$ : 考慮される例題数．例題の定義は後述される．
- $1/\lambda$  ( $\lambda > 0$ ): 客の到着間隔の期待値．
- $Z_f$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 階床  $f$  の位置．
- $Z$ : 階床の位置が等間隔である場合の階床間の距離．
- $V^M$  ( $> 0$ ): かががとりうる最大速度．
- $A^M$  ( $> 0$ ): かががとりうる最大加速度．
- $M_c$ : かがの最大積載量．
- $\Delta$ : 客の待ち時間が長待ちであるか否かを判定する際の閾値．

計画期間に到着する客  $P_i$  ( $i = 1, \dots, N_p$ ) の属性を表すために、次の記号を定義する．

- $t_i^p \in [0, T)$ : 客  $i$  の到着時刻．
- $f_i^{po} \in \{1, \dots, N_f\}$ : 客  $i$  の出発階床．
- $f_i^{pd} \in \{1, \dots, N_f\}$  ( $f_i^{pd} \neq f_i^{po}$ ): 客  $i$  の目的階床．

- $M_i^p$ : 客  $i$  の質量 .
- $d_i^p \in \{-1, 1\}$ : 次のように定義される , 客  $i$  の旅行方向 .

$$d_i^p := \begin{cases} 1 & \text{if } f_i^{\text{po}} < f_i^{\text{pd}}, \\ -1 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.1)$$

- $c_i^p \in \{0, \dots, N_c\}$ : 客  $i$  が利用したかご . この値が 0 であることは , 客がかごに乗りしていないことを表す .
- $t_i^{\text{po}} \in [0, T + 1]$ : 客  $i$  の乗車時刻 . この値が  $T$  よりも大きいことは , 客がかごに乗りしていないことを表す .
- $t_i^{\text{pd}} \in [0, T + 1]$ : 客  $i$  の降車時刻 . この値が  $T$  よりも大きいことは , 客がかごから降車していないことを表す .

これらのうち , 到着時刻 , 出発階床 , 目的階床の 3 つ組を , 特にプロファイルと呼ぶことにする .

前述のように , 本論文で対象とされるエレベータシステムでは , 客からのサービス要求は呼びという処理単位として考慮され , ある呼びに対応する客が識別されることはない . 呼びはホール呼びボタンやかご呼びボタンを押下すれば登録され , 例えば 1 人の客により数十もの呼びが登録されることから , 通し番号を与えて呼びを個別に扱うことはあまり合理的ではないと考えられる . その代わりに , 呼びを登録した客の旅行方向および出発階床 / 目的階床から計算される種類  $q$  を , ホール呼びやかご呼びごとに考えるとする .

ホール呼びの種類  $q$  ( $q \in \{2, \dots, 2N_f - 1\}$ ) を , 次の式により計算されるものとして定義する .

$$2f + \frac{d-1}{2}. \quad (2.2)$$

ここで ,  $f \in \{1, \dots, N_f\}$  は客の出発階床であり ,  $d \in \{-1, 1\}$  は呼びを登録した客の旅行方向である . この式とは逆に , ホール呼びの種類  $q$  から , それが登録された階床を次の式により計算することができる .

$$\left\lceil \frac{q}{2} \right\rceil. \quad (2.3)$$

ここで ,  $\lceil x \rceil$  は  $x$  以上の最小の整数を表す . また , 呼びを登録した客の旅行方向を , 次の式により計算することができる .

$$-2(q \bmod 2) + 1. \quad (2.4)$$

ホール呼びと同様に , かが  $k$  におけるかご呼びの種類  $q$  ( $q \in \{100k+2, \dots, 100k+2N_f-1\}$ ) を , 次の式により計算されるものとして定義する .

$$100k + 2f + \frac{d-1}{2}. \quad (2.5)$$

ここで,  $f \in \{1, \dots, N_f\}$  は客の目的階床であり,  $d \in \{-1, 1\}$  は呼びを登録した客の旅行方向である.

種類が  $q$  である呼びの属性を表すものとして, 次の記号を定義する.

- $s_q^q \in \{0, 1, \dots, N_c\}$ : 呼びが登録された場所を表し, 次の式により計算される.

$$s_q^q := \lfloor q/100 \rfloor. \quad (2.6)$$

ここで,  $\lfloor x \rfloor$  は  $x$  以下の最大の整数を表す. 種類  $q$  に属する呼びは, 式 (2.6) の値が 0 であればホール呼び, そうでなければ  $s_q^q$  で登録されたかご呼びである.

- $d_q^q \in \{-1, 1\}$ : 呼びの方向. 呼びを登録した客の旅行方向と等しい.
- $f_q^q \in \{1, \dots, N_f\}$ : 呼びの処理階床.  $s_q^q = 0$  であれば客の出発階床, そうでなければ客の目的階床に等しい.
- $c_q^q \in \{0, 1, \dots, N_c\}$ : 呼びへ割り当てられているかご. この値が 0 であることは, どのかごも割り当てられていないことを表す.

$s_q^q \neq 0$ , すなわち呼び  $q$  がかご呼びであれば, この値は次のように固定される.

$$c_q^q := s_q^q. \quad (2.7)$$

- $t_q^q \in [0, T + 1]$ : 呼びが登録された時刻. この値が  $T$  よりも大きいことは, 対応する呼びが登録されていないことを表す.
- $T_q^q(t) \in [0, t]$ : 種類が  $q$  である呼びのうち最も早く登録された呼びの, 時刻  $t$  における待ち時間.  $t_q^q$  の値に基づき, 次のように計算される.

$$T_q^q(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } t_q^q > T \vee t < t_q^q, \\ t - t_q^q & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.8)$$

呼びの取扱いを容易とするために, 次の記号を定義する.

- $\mathbf{Q}^h := \{2, \dots, 2N_f - 1\}$ : 可能なホール呼びの種類の集合.
- $\mathbf{Q}_k^c := \{100k + 2, \dots, 100k + 2N_f - 1\}$ : かご  $k$  で登録されうるかご呼びの種類の集合.
- $\mathcal{H}^{hu}$ : ある時点で登録されている, 方向を上とするホール呼びの種類の集合. この集合は次のように計算される.

$$\mathcal{H}^{hu} = \left\{ q \in \mathbf{Q}^h \mid t_q^q \leq T, d_q^q = 1 \right\}. \quad (2.9)$$

- $\mathcal{H}^{hd}$ : ある時点で登録されている, 方向を下とするホール呼びの種類の集合. この集合は次のように計算される.

$$\mathcal{H}^{hd} = \left\{ q \in \mathbf{Q}^h \mid t_q^q \leq T, d_q^q = -1 \right\}. \quad (2.10)$$

- $\mathcal{H}^h$ : ある時点で登録されているホール呼びの種類集合．この集合は次のように計算される．

$$\mathcal{H}^h = \mathcal{H}^{hu} \cup \mathcal{H}^{hd}. \quad (2.11)$$

- $\mathcal{H}_k^h (k = 1, \dots, N_c)$ : かが  $k$  が割り当てられているホール呼びの種類集合．この集合は次のように計算される．

$$\mathcal{H}_k^h = \left\{ q \in \mathbf{Q}^h \mid c_q^h = k \right\}. \quad (2.12)$$

- $\mathcal{H}_k^c (k = 1, \dots, N_c)$ : かが  $k$  内で登録されているかご呼びの種類集合．この集合は次のように計算される．

$$\mathcal{H}_k^c = \left\{ q \in \mathbf{Q}_k^c \mid t_q^c \leq T, s_q^c = k, c_q^c = k \right\}. \quad (2.13)$$

ある時点における，エレベータシステムに備えられたかご  $C_k (k = 1, \dots, N_c)$  の属性を表すために，次の記号を定義する．

- $f_k^c \in \{1, \dots, N_f\}$ : 計画開始時刻にかご  $k$  が停止している階床．
- $z_k^c \in [Z_1, Z_{N_f}]$ : かが  $k$  の位置．
- $v_k^c \in [-V^M, V^M]$ : かが  $k$  の速度．
- $a_k^c \in [-A^M, 0, A^M]$ : かが  $k$  の加速度．
- $r_k^c \in [0, 1]$ : かが  $k$  の扉の開放率．扉が完全に開いているとき，この値は1となる．
- $l_k^c \in [0, M_c]$ : かが  $k$  の積載量．
- $e_k^c$ : かが  $k$  の遊休時間．

ここで，遊休時間とは，次の全ての条件が満たされた時点をかごが遊休になった時点とみなし，それからの経過時間を意味する．

- 乗客がらず，かご呼びが登録されていない．
- かが扉を閉鎖してある階床と同じ位置で停止している．
- どのようなホール呼びへも割り当てられていない．

- $d_k^c \in \{-1, 1\}$ : かが  $k$  の直前の移動方向．

ここで，直前の移動方向とは，微小時間前のかごの移動方向を表す．計画開始時刻を除き，かが停止しているならば，停止する直前のかごの移動方向と等しい．

- $b_k^u \in \{0, 1\}$ : かが  $k$  へ旅行方向を上とする客が乗車中であると推定されるか．
- $b_k^d \in \{0, 1\}$ : かが  $k$  へ旅行方向を下とする客が乗車中であると推定されるか．

$b_k^u, b_k^d$  は，かごの積載量の変化や，本論文では明示的に取り扱われていないセンサ（ドアに取り付けられた赤外線センサなど）の出力，およびかが停止している階床におけるホール呼びボタンの押下状況から計算することが可能である．

- $f_k^n \in \{1, \dots, N_f\}$ : 各  $k$  が最短時間で停止可能な階床 (最寄階床) .

かごの位置や速度, 加速度, および登録されているかご呼びから計算されるものであり, 正確には属性といえないが, 取扱いの便宜のために属性とみなされる .

以上の要素に基づいて, エレベータシステムの状態  $x$  は次のように定義される .

$$x := \left\langle z_1^c, v_1^c, a_1^c, r_1^c, l_1^c, d_1^c, b_1^u, b_1^d, \dots, z_{N_c}^c, v_{N_c}^c, a_{N_c}^c, r_{N_c}^c, l_{N_c}^c, d_{N_c}^c, b_{N_c}^u, b_{N_c}^d, \right. \\ \left. c_2^q, \dots, c_{2N_f-1}^q, t_2^q, \dots, t_{2N_f-1}^q, t_{102}^q, \dots, t_{2N_f+99}^q, \dots, t_{100N_c+2}^q, \dots, t_{100N_c+2N_f-1}^q \right\rangle. \quad (2.14)$$

エレベータシステムの状態に基づいて, かごをある条件が満たされるまで動かすつづける間に費される最短時間を見積もるために, 次の関数を定義する .

- $t^f(f_1, f_2)$ : 階床  $f_1$  に停止しているかごが, 階床  $f_2$  へ移動するために必要とする最短時間 .
- $t_k^m(x, z)$ : エレベータシステムの状態が  $x$  であるとき, かご  $k$  が位置  $z$  へ移動するために必要とする最短時間 .  
かごの位置や速度・加速度, 扉開放率だけを考慮し, 呼びは考慮されない .
- $t_k^a(x)$ : エレベータシステムの状態が  $x$  であるとき, かご  $k$  がその中で登録済みである全てのかご呼びを処理するために必要な最短時間 .
- $t_{k,q}^h(x)$ : エレベータシステムの状態が  $x$  であるとき, かご  $k$  がその割り当てられたホール呼び, その中で登録されたかご呼びを適宜処理しつつ, 種類が  $q$  であるホール呼びを処理できる位置まで移動するために必要な最短時間 . かごの行程時間 (journey time) とも呼ばれる<sup>9)</sup> .

計画期間に到着する客の属性は本来確率的であるが, 何らかの手法の評価や手法間の比較を再現性を保ちつつ定量的に行うためには, 確定した情報として取り扱うことが有用である . 本論文では, あるエレベータシステムの規模や交通流下で擬似乱数により作成される,

- 計画開始時点における各かごの停止階床;
- 計画期間に到着する全ての客のプロファイル (到着時刻, 出発階床, 目的階床);

という情報からなるデータを例題  $E_e$  ( $e = 1, \dots, N_E$ ) と呼び, これに基づいて手法の評価や比較を行う . ここで,  $N_E$  は考慮される例題数である .

ある例題に対してあるかご運行計画を実施することで, かご運行が作成され, 客の乗車かごや乗車時刻, 降車時刻が定まる . これらの情報から構成される要素を例題  $e$  の処理状態と呼び, 次のように定義する .

$$y_e := \left\langle c_1^p, t_1^{po}, t_1^{pd}, \dots, c_{N_p}^p, t_{N_p}^{po}, t_{N_p}^{pd} \right\rangle. \quad (2.15)$$

なお, 処理状態を構成する要素は全て, エレベータシステムが計測できない情報である .

## 2.2.4 目的関数

例題  $e$  に対し，何らかのかご運行計画手法を用いて十分に長い時間エレベータシステムを動かすことで，全ての客の処理が完了している処理状態  $y_e$  が得られたとする．このとき，作成されたかご運行の評価値  $F_e(y_e)$  は，次のように計算される．

$$F_e(y_e) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \left( w^w (t_i^{\text{po}} - t_i^{\text{p}}) + w^t (t_i^{\text{pd}} - t_i^{\text{po}}) + w^l L(t_i^{\text{po}} - t_i^{\text{p}}) \right) + w^M \max_{i \in \{1, \dots, N_p\}} (t_i^{\text{po}} - t_i^{\text{p}}). \quad (2.16)$$

ここで， $w^w$ ， $w^t$ ， $w^l$ ， $w^M$  は，それぞれ客の待ち時間，旅行時間，長待ち，最大待ち時間の重みであり， $L(t)$  は  $t$  が待ち時間として長いかな否か（長待ちとみなされるかな否か）を判定する関数である．ある待ちが長待ちであるかな否かの判定は，その待ち時間が閾値  $\Delta$  以上であるかな否か，すなわち次の式により行われる．

$$L(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t \geq \Delta, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.17)$$

一般に， $\Delta$  の値は，実世界の 60 秒に相当するよう設定される<sup>9)</sup>．なお， $w^M$  で重み付けられた客の最大待ち時間は，長待ちがあまり発生しない場合に，長待ち回数や長待ち率に関する比較を代替するために考慮されている．

本論文では，式 (2.16) の値が小さくなったとき，対象例題に対して適切なかご運行が計画・実施されたと見なされる．ここで，繰り返しになるが，かご運行の評価は事後に，すなわちかご運行が作成された後で，かつ対象とするエレベータシステムでは客の識別が不可能であることから理想的にのみ，可能である点に留意が必要である．

任意の例題  $e$  を処理状態  $y_e$  へ写す関数をかご運行計画手法と呼び， $R$  と表す． $R$  は，if-then ルールベース，ファジィ・ルールベース，指標値の重み付け和最小化ルールなどを形式的に表したものである．この関数を用いることで，前述されたかご運行の作成は，式 (2.18) のように形式的に表される．

$$y_e = R(e). \quad (2.18)$$

以上より，例題  $e$  に対するかご運行計画手法  $R$  の評価  $G(R, e)$  は，次のように与えられる．

$$G(R, e) := F_e(R(e)). \quad (2.19)$$

確率的要因がかご運行計画の実施に影響を与えるなど，1 つの例題から複数の処理状態が得られうる場合には，式 (2.19) の値はある確率変数の 1 つの実現値である．

あるかご運行計画手法の現実的評価は，1 つの例題において有効であれば十分ということではなく，例題の生起する確率分布に応じて平均値，あるいは最悪値<sup>27)</sup>において有効である

ことが求められる．本論文では，所与の  $N_E$  個の例題に渡って平均的に有効なかご運行計画手法が有効であるとみなされる．すなわち，かご運行計画手法  $R$  の評価値  $G(R)$  は，次の式 (2.20) として与えられる．

$$G(R) := \frac{1}{N_E} \sum_{e=1}^{N_E} G(R, e). \quad (2.20)$$

2つのかご運行計画手法の有効性を比較する場合，それぞれの手法について式 (2.20) に示された関数により評価値を求め，その上で比較することは不十分であると考えられる．この理由の1つを，例題集合に渡る最悪値について評価する場合を例として示すことが可能である．かご運行計画手法  $R_1$  が，ある例題に対しては評価が非常に低いかご運行を，他の例題に対しては評価がある程度高いかご運行を作成するとする．また，かご運行計画手法  $R_2$  は，全ての例題に対してわずかに悪いかご運行を作成するとする．このとき，手法  $R_2$  は手法  $R_1$  よりも最悪値において有効であると判定されるべきであるが，式 (2.20) により例題間に渡る平均をとってから比較すると，手法  $R_1$  の方がより有効であると判定されてしまう．以上の考察から，手法間の相対的有効性は，例題・手法ごとに式 (2.19) による値を計算し，その比を例題に渡って平均した値として評価することが妥当であると考えられる．すなわち，かご運行計画手法  $R_1$  の  $R_2$  に対する相対的有効性を  $G^r(R_1, R_2)$  と表したとき，この値は次のように与えられる．

$$G^r(R_1, R_2) := \sum_{e=1}^{N_E} \frac{G(R_1, e)}{G(R_2, e)}. \quad (2.21)$$

### 2.2.5 決定変数

処理状態を構成する，客  $P_i$  ( $i = 1, \dots, N_p$ ) に関する次の要素が決定変数とされる．

- $c_i^p$ : 客  $i$  の乗車かご．
- $t_i^{po}$ : 客  $i$  の乗車時刻．
- $t_i^{pd}$ : 客  $i$  の降車時刻．

ただし，これらの値はかご運行計画の実施により結果として定まるものであり，スケジューラが直接定められるものではない．

## 2.3 エレベータ運行計画手法

### 2.3.1 一般的なエレベータ運行計画手法

2.2.1 節で示されたように，かご運行は，

- (1) ホール呼びへのかご割当て;

(2) 各かごの上下動;

という2種類の決定事項に従って定まる．各かごの上下動を定めるルールとして Selective Collective ルール<sup>13)</sup> (あるいは Simplex Collective<sup>9)</sup>; SC) がある．このルールは，ホール呼びの方向を考慮し (selective), 1つだけでなく合理的と考えられる複数の呼びを処理する (collective) よう上下動を決定するものであり, 1つのかごだけを備えたエレベータシステムで広く使用されている．SCの概要は, 次のようになる．

- かごに乗客がいれば, その目的階床の方向へと移動する．
- 移動途中の階床で, 方向がかごの移動方向と同じホール呼びが登録されていれば, その処理階床へ停止する．
- 乗客がおらず, かつあるホール呼びへかごが割り当てられていれば, かごの直前の移動方向と方向が同じ最寄のホール呼びの処理階床へと移動する．そのようなホール呼びがなければ, かごの直前の移動方向と旅行方向が逆であるホール呼びのうち, 処理階床が最遠である呼びの処理階床へと移動する．そのようなホール呼びがなければ, かごの直前の移動方向と方向が同じ最遠のホール呼びの処理階床へと移動する．
- 乗客がおらず, どのようなホール呼びへも割り当てられていなければ, 最寄階床にて停止する．

本論文では, かごの上下動は, かごの加速度を直接指定することで制御されると前提されている．この制御は, 大きく,

- かごを上へ動かす, あるいは下へ動いているかごを減速させる;
- 動いているかごを最寄階床へ停止させる, あるいは停止しているかごを停止させつづける;
- かごを下へ動かす, あるいは上へ動いているかごを減速させる;

という3つに分類することができる．本論文では, これらの制御のための指令を, それぞれ上昇指令, 停止指令, 下降指令と呼ぶことにする．これらの指令は, スケジューラからかごの制御を司るコントローラへと与えられ, コントローラは与えられた指令とかごの状態から加速度を適宜調節する．

前述された3種類の指令に基づいて, SCの詳細を次のように記述することができる．ここで, エレベータシステムに備えられているかご数は1であり, 全ての呼びへはかご1が割り当てられる, すなわち  $\forall q (c_q^q = 1)$  と前提されている．

- 次のいずれかの条件が満たされるとき, 停止を指令する．
  - 最寄階床を目的階床とするかご呼びが登録されている．すなわち,

$$\exists q \in \mathcal{H}_1^c (f_q^q = f_1^q).$$

- 上へのかご呼びが登録されており，かつ最寄階床にて上へのホール呼びが登録されている．すなわち，

$$\exists q \in \mathcal{H}_1^c (d_q^a = 1) \wedge \exists q \in \mathcal{H}^{hu} (f_q^a = f_1^n).$$

- 下へのかご呼びが登録されており，かつ最寄階床にて下へのホール呼びが登録されている．すなわち，

$$\exists q \in \mathcal{H}_1^c (d_q^a = -1) \wedge \exists q \in \mathcal{H}^{hd} (f_q^a = f_1^n).$$

- 次の全ての条件が満たされている．

- \* 上へのかご呼びが登録されていない．すなわち，

$$\nexists q \in \mathcal{H}_1^c (d_q^a = 1).$$

- \* 直前の移動方向が上である．すなわち，

$$d_1^c = 1.$$

- \* 次のいずれかの条件が満たされている．

- 最寄階床にて上へのホール呼びが登録されている．すなわち，

$$\exists q \in \mathcal{H}^{hu} (f_q^a = f_1^n).$$

- かごよりも上の階床で登録されたホール呼びへかごが割り当てられており，かつ最寄階床において下へのホール呼びだけが登録されている．すなわち，

$$\exists q \in \mathcal{H}_1^h (Z_{f_q^a} > z_1^c) \wedge \nexists q \in \mathcal{H}^{hu} (f_q^a = f_1^n) \wedge \exists q \in \mathcal{H}^{hd} (f_q^a = f_1^n).$$

- かごがある階床と同じ位置に停止しており，かつその階床で登録された下へのホール呼びへ割り当てられている．すなわち，

$$v_1^c = 0 \wedge a_1^c = 0$$

$$\wedge \exists f \in \{1, \dots, N_f\} (Z_f = z_1^c, \exists q \in \mathcal{H}_1^h (d_q^a = -1, f_q^a = f)).$$

- 次の全ての条件が満たされている．

- \* 下へのかご呼びが登録されていない．すなわち，

$$\nexists q \in \mathcal{H}_1^c (d_q^a = -1).$$

- \* 直前の移動方向が下である．すなわち，

$$d_1^c = -1.$$

- \* 次のいずれかの条件が満たされている．

- ・ 最寄階床にて下へのホール呼びが登録されている．すなわち，

$$\exists q \in \mathcal{H}^{\text{hd}} (f_q^{\text{q}} = f_1^{\text{n}}).$$

- ・ かがよりも下の階床で登録されたホール呼びへかが割り当てられており，かつ最寄階床において上へのホール呼びだけが登録されている．すなわち，

$$\exists q \in \mathcal{H}_1^{\text{h}} (Z_{f_q^{\text{q}}} < z_1^{\text{c}}) \wedge \nexists q \in \mathcal{H}^{\text{hd}} (f_q^{\text{q}} = f_1^{\text{n}}) \wedge \exists q \in \mathcal{H}^{\text{hu}} (f_q^{\text{q}} = f_1^{\text{n}}).$$

- ・ かががある階床と同じ位置に停止しており，かつその階床で登録された上へのホール呼びへ割り当てられている．すなわち，

$$v_1^{\text{c}} = 0 \wedge a_1^{\text{c}} = 0$$

$$\wedge \exists f \in \{1, \dots, N_f\} (Z_f = z_1^{\text{c}}, \exists q \in \mathcal{H}_1^{\text{h}} (d_q^{\text{q}} = 1, f_q^{\text{q}} = f)).$$

- かが呼びが登録されておらず，かつどのホール呼びへもかが割り当てられていない．すなわち，

$$\mathcal{H}_1^{\text{c}} = \emptyset \wedge \mathcal{H}_1^{\text{h}} = \emptyset.$$

- ある階床と同じ位置に停止しており，かつその階床において客が乗車中である．すなわち，

$$v_1^{\text{c}} = 0 \wedge a_1^{\text{c}} = 0 \wedge (b_1^{\text{u}} = 1 \vee b_1^{\text{d}} = 1) \wedge \exists f \in \{1, \dots, N_f\} (Z_f = z_1^{\text{c}}).$$

- 次の全ての条件が満たされるとき，かがへ上昇（下降）を指令する．

- 前述された，かがへ停止を指令する条件が満たされていない．

- 下（上）へのかご呼びが登録されていない．すなわち，

$$\nexists q \in \mathcal{H}_1^{\text{c}} (d_1^{\text{q}} = -1)$$

$$\left( \nexists q \in \mathcal{H}_1^{\text{c}} (d_1^{\text{q}} = 1) \right).$$

- 次のいずれかの条件が成立している．

- \* 処理階床が上（下）であるかが呼びが登録されている．すなわち，

$$\exists q \in \mathcal{H}_1^{\text{c}} (Z_{f_q^{\text{q}}} > z_1^{\text{c}})$$

$$\left( \exists q \in \mathcal{H}_1^{\text{c}} (Z_{f_q^{\text{q}}} < z_1^{\text{c}}) \right).$$

- \* かがが割り当てられたホール呼びの中に，処理階床がかがよりも上であるものと下であるものの両方があり，かつ次のいずれかが成立している．

- ・ かがが上昇（下降）中である．
- ・ かがが停止中であり，かつその直前の移動方向が上（下）である．

すなわち，

$$\begin{aligned} & \exists q \in \mathcal{H}_1^h \left( Z_{f_q^a} > z_1^c \right) \wedge \exists q \in \mathcal{H}_1^h \left( Z_{f_q^a} < z_1^c \right) \wedge \left( v_1^c > 0 \vee (v_1^c = 0 \wedge a_1^c = 0 \wedge d_1^c = 1) \right) \\ & \left( \exists q \in \mathcal{H}_1^h \left( Z_{f_q^a} > z_1^c \right) \wedge \exists q \in \mathcal{H}_1^h \left( Z_{f_q^a} < z_1^c \right) \wedge \left( v_1^c < 0 \vee (v_1^c = 0 \wedge a_1^c = 0 \wedge d_1^c = -1) \right) \right). \end{aligned}$$

- \* かがよりも上（下）の階床におけるホール呼びへかがが割り当てられており，かつ下（上）の階床におけるホール呼びへ割り当てられていない．すなわち，

$$\begin{aligned} & \exists q \in \mathcal{H}_1^h \left( Z_{f_q^a} > z_1^c \right) \wedge \nexists q \in \mathcal{H}_1^h \left( Z_{f_q^a} < z_1^c \right) \\ & \left( \exists q \in \mathcal{H}_1^h \left( Z_{f_q^a} < z_1^c \right) \wedge \nexists q \in \mathcal{H}_1^h \left( Z_{f_q^a} > z_1^c \right) \right). \end{aligned}$$

- \* 上昇（下降）中であり，かつかがよりも上（下）の階床で登録されたホール呼びへ割り当てられており，さらにある階床と同じ位置にある．すなわち，

$$\begin{aligned} & v_1^c > 0 \wedge \exists q \in \mathcal{H}_1^h \left( Z_{f_q^a} > z_1^c \right) \wedge \exists f \in \{1, \dots, N_f\} \left( Z_f = z_f^c \right) \\ & \left( v_1^c < 0 \wedge \exists q \in \mathcal{H}_1^h \left( Z_{f_q^a} < z_1^c \right) \wedge \exists f \in \{1, \dots, N_f\} \left( Z_f = z_f^c \right) \right). \end{aligned}$$

- \* かがよりも上（下）の階床でホール呼びが登録されており，かつ下（上）の階床でホール呼びが登録されていない．すなわち，

$$\begin{aligned} & \exists q \in \mathcal{H}^h \left( Z_{f_q^a} > z_1^c \right) \wedge \nexists q \in \mathcal{H}^h \left( Z_{f_q^a} < z_1^c \right) \\ & \left( \exists q \in \mathcal{H}^h \left( Z_{f_q^a} < z_1^c \right) \wedge \nexists q \in \mathcal{H}^h \left( Z_{f_q^a} > z_1^c \right) \right). \end{aligned}$$

上昇，停止，下降指令を，それぞれ 1, 0, -1 と表したとき，エレベータシステムの状態を  $\{-1, 0, 1\}$  へ写す，すなわち

$$R^{\text{SC}} : \boldsymbol{x} \mapsto \{-1, 0, 1\}$$

という関数  $R^{\text{SC}}$  として，SC をみなすことができる．

SC は広く有効であると考えられており，例えば2つのかごを備えたエレベータシステムへも適用可能なよう拡張され，Duplex Collective ルール<sup>13)</sup> となっている．より多くのかごを備えたエレベータシステムのかご運行計画においても，各かごの上下動はこのルールを用いて決定し，ホール呼びへのかご割当てだけが問題とされることが多い．これは，即時割当て方式のエレベータシステムが一般的である日本では特に顕著である．このため，あるエレ

ベータシステムの商業的価値の多くが、ホール呼びへのかご割当て手法に集約されることになり、通常その詳細を知ることはできない。書籍<sup>9)</sup>などで既存のかご割当て手法の概要を知ることは可能であるが、現実の実装にはそれらの文献には記されていないアドホックな改良が多く含まれており、その精確な再現は難しい。従って、あるかご運行計画手法の比較対象として現実の最先端の手法を用いることはできず、それを不完全に真似た手法を利用できるに過ぎない。この、本来の手法と不完全な手法の間の有効性における差は、本来の手法が精緻であるほどに大きくなる。

本論文では、あるかご運行計画手法の比較対象として考慮する既存のかご割当て手法の典型例として、文献<sup>28)</sup>に基づいた素朴で実装が容易と考えられる手法を用い、これを Call Dispatching ルール (以降, CD) と呼ぶことにする。この手法では、行先階登録方式エレベータシステムを対象とした Adaptive Hall Call Allocation ルール<sup>9)</sup>と似た規則に従って、ホール呼びへの割当てかごが計算される。CD の概要は、

- SC の使用を前提とし、
- 新規ホール呼びへあるかごを割当てることによる、登録済みの呼びの処理完了時間の増分を見積もり、
- その総和の平均 (あるいは最大値) が最小となるかごを割り当てる、

というものである。この規則による割当てかごは、時刻  $t$ 、状態  $x$  においてホール呼び  $q$  が登録されたとき、それ以上ホール呼びが登録されないという前提のもとで、かご  $k$  が割り当てられている呼びの処理完了時間の総和を  $F_k(x, t)$  とすれば、次のように計算される。

$$\arg \min_{k \in \{1, \dots, N_c\}} (F_k(x_{k,q}(x), t) - F_k(x, t)). \quad (2.22)$$

ここで、 $x_{k,q}(x)$  はかご  $k$  をホール呼び  $q$  へ割り当てるとして状態  $x$  を変更することで計算される状態を表す。

上の式で使用されている  $F_k(x, t)$  の値は、次のように計算される。

$$F_k(x, t) = \sum_{i=1}^N (t^{(i)} - t_{q^{(i)}}^q). \quad (2.23)$$

ここで、かご  $k$  が状態  $x$  に基づき、SC に従って処理する呼びのリスト  $Q_k(x)$  と表したとき、これを用いて  $N$ 、 $q^{(i)}$ 、 $t^{(i)}$  は次のように与えられる。

- $N := |Q_k(x)|$ : 処理される呼びの数。
- $q^{(i)}$  ( $i = 1, \dots, N$ ):  $Q_k(x)$  の  $i$  番目に位置する呼び。
- $x^{(i)}$  ( $i = 0, 1, \dots, N$ ):  $Q_k(x)$  の  $i$  番目の要素を処理し終わった直後の状態。ただし、 $x^{(0)} := x$ 。

- $t^{(i)}$  ( $i = 0, 1, \dots, N$ ): 次のように与えられる,  $Q_k(\mathbf{x})$  の  $i$  番目の要素を処理し終わった直後の時刻.

$$t^{(i)} := \begin{cases} t & \text{if } i = 0, \\ t^{(i-1)} + t_{k,q^{(i)}}^h(\mathbf{x}^{(i-1)}) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.24)$$

本論文では, CD および SC の組合せを CDSC と呼ぶことにする. すなわち, CDSC を用いたとき,

- かごは CD によってホール呼びへ割り当てられ,
- 各かごは SC によって上下へ動かされる.

また, “リスト” という単語は順序づけられた集合を表すものとして用いられる.

本論文では考慮されないが, かごの上下動の決定やホール呼びへのかご割当てといった事項を計画する以外のかご運行を効率化させる方法として, 次を挙げることができる.

- かごが受け持つホール集合をゾーンとして定義し, ゾーンへのかご割当ておよびゾーンの調節を行うゾーニング<sup>9)</sup>.
- ホール呼びの種類の集合をセクタとして定義し, セクタへのかご割当ておよびセクタの調節を行うセクタニング<sup>9)</sup>.
- 行先階登録方式のエレベータシステムを対象とし, ホール呼びを登録した客の OD ペアの集合をミッションと定義し, ミッションへのかご割当ておよびミッションの調節を行うミッション方式<sup>20)</sup>.
- 閑散時や乗客がいない場合などに, ホール呼びがなくてもかごを適切な階床へ移動・待機させるパーキング<sup>29)</sup>.

### 2.3.2 既存計画手法のリスケジューリング問題としての分類

本論文では, オフィスビルに備えられたエレベータシステムが対象とされている. この場合, 高々1日のかご運行を計画すれば十分であるから, 計画期間は有限である. 加えて, エレベータシステムを利用する客数をビルの居住者数に基づいて見積もることができるため, エレベータ運行計画問題は General Pickup and Delivery Problem (以降, GPDP)<sup>19)</sup> の1種であると見なすことが可能である. GPDP は, 計画期間に配送すべき荷物に関する情報が完全に既知であるか否か, 配送車の数が単数か複数かという2つの軸によって, それぞれ静的か動的か, 単一か複数かという計4つのクラスに分類される. これに従えば, エレベータ運行計画問題は動的かつ複数の GPDP というクラスに含まれる. そのような見方は, 動的かつ配送車が複数であるクラスに含まれる問題の数が多く, かつその間の違いを見ることができないという意味で粗いといえる. しかしこれは, 広く研究されている巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem; 以降 TSP) をベースとし, これを静的かつ配送車が

表 2.1: リスケジューリング環境に関するリスケジューリング問題の分類

静的		動的		
決定的	確率的	定期的	フローショップ	ジョブショップ

単一であるクラスとして含むよう拡張することで定義された GPDP の生い立ちから考えれば、自然なことである。

単純化された理想的状況を前提とした TSP から派生した GPDP という見方とはある意味逆のアプローチとして、現実世界における製品の生産現場を念頭においたリスケジューリング問題という枠組みがある<sup>30)</sup>。この枠組みでは、環境が時々刻々と変化する動的な生産システムにおけるリスケジューリングを包括的に捉えるために、

- (1) リスケジューリング環境: 処理対象の仕事の集合がどのような特徴を持つか;
- (2) リスケジューリング戦略: 仕事の処理順序といった生産スケジュールが明示的に作られるのか、あるいはディスパッチング・ルールを用いるなどスケジュールは明示的には作られないのか;
- (3) リスケジューリング手法: 生産スケジュールが明示的に作られるとして、それはどのように作られ、あるいは更新されるのか;

という3つの軸が考慮される。これらのうち特にリスケジューリング環境という軸から、リスケジューリング問題は表 2.1 のように分類される。表 2.1 における用語の意味を次に示す<sup>30)</sup>。

- 静的 (static) / 動的 (dynamic): 仕事数が有限であるか / 無限であるか。
- 決定的 (deterministic) / 確率的 (stochastic): 仕事に関する全ての情報が既知であるか / 不確定な情報があるか。
- 定期的 (cyclic production) / フローショップ (flow shop) / ジョブショップ (job shop): 処理機械も仕事の到着間隔も固定であるか / 処理機械は固定だが仕事の到着が変動するか / 処理機械が可変かつ仕事の到着が変動するか<sup>‡</sup>。

エレベータ運行計画問題を考慮したとき、客に関する情報の利用可能性がリスケジューリング環境に相当するといえる。ただし、静的環境の分類として決定的 / 確率的の2つでは不十分であり、次の分類を考えることが本来の問題により即していると考えられる。

- (1) 決定的: 計画期間に到着する客に関する情報が既知である。
- (2) 交通流がある定常な確率分布に従う。

<sup>‡</sup> フローショップ・スケジューリング問題、ジョブショップ・スケジューリング問題の説明としては不正確である。

- a. 確率分布が既知: 交通流が既知であり, OD ペアや到着間隔に関する確率分布の利用が可能である.
  - b. 確率分布が未知: 交通流が未知である.
- (3) 交通流が非定常な確率分布に従う.
- a. 確率分布が既知: ある時点の交通流はいくつかの候補のうちの1つである.
  - b. 確率分布が未知: 交通流がどのような確率分布に従っているか不明である.
- (4) 交通流の従う確率分布が存在しない.

これらのうち, 交通流の従う確率分布が計画期間に渡って変化する (非定常な) 場合, および交通流の従う確率分布が存在しない場合は, それぞれ

- 計画期間を, 交通流がある1つの確率分布に従っている複数の期間へ分割することが可能であると考えられる;
- 合理的計画が存在しないと考えられる;

ために, 考慮から除外する. 結局, 静的環境は, 決定的である / 定常な既知の確率分布に従う / 定常な未知の確率分布に従う, という3つに分けて考慮すれば十分であると考えられる.

以上を踏まえて捉え直したリスケジューリング問題の枠組みが, 図 2.2 に示される. 図 2.2 における用語のエレベータ運行計画問題の上での意味を, 次に示す.

- 決定的 / 確率的・既知 / 確率的・未知: 計画期間に到着する客に関する情報が全て既知である / 既知の確率分布に従う / 未知の確率分布に従う.
- スケジュール非作成 (no schedule) / 予測-リアクティブ (predictive-reactive): かごの運行スケジュール (どの時刻にどの位置へ移動するか) を作らない / 作成・更新する.
- ディスパッチング・ルール (dispatching rule) / 制御理論的 (control-theoretic): かご運行をディスパッチング・ルール / 制御理論的な根拠によって決定する.
- 周期的 (periodic) / イベント・ドリブン (event-driven) / ハイブリッド (hybrid): 周期的に (一定の間隔で) / 何らかの事象の発生をきっかけとして / 周期的あるいは何らかの事象の発生をきっかけとして, かごの運行スケジュールが作成される.
- スケジュール作成 (schedule generation) / スケジュール修正 (schedule repair): かごの運行スケジュールがどのように作成 / 修正されるか.
- 名目的 (nominal schedules) / ロバスト (robust schedules): かごの運行スケジュールは, (計画通り実行されると考えて) 名目的に / (計画からずれることを見越して) ロバストとなるように作成される.
- 延期 (right-shift rescheduling) / 部分的 (partial rescheduling) / 完全 (complete generation): かごの運行スケジュールは, 計画からのずれにより, 計画通り実行できない

リスクジェーリング戦略		リスクジェーリング方針	リスクジェーリング手法		リスクジェーリング環境							
			スケジュール作成	スケジュール修正	決定的	静的確率的・既知	確率的・未知	定期的	動的フローショップ	動的ジョブショップ		
スケジュール非作成	ティスバッチングルール	/										
	制御理論的											
予測リアクティブ		周期的	名目的	延期								
				部分的								
				完全								
			ロバスト	延期								
				部分的								
				完全								
		イベント・ドリブン	名目的	延期								
				部分的								
				完全								
			ロバスト	延期								
				部分的								
				完全								
		ハイブリッド	名目的	延期								
				部分的								
				完全								
			ロバスト	延期								
				部分的								
				完全								

図 2.2: リスケジェーリング環境が静的かつ未知の確率分布に従う場合を含めたリスケジェーリング問題の枠組み

呼びの処理を先に延ばして修正される / 部分的に修正される / はじめから作成される .

本論文ではオフィスビルにおけるエレベータシステムが対象とされているため、客数が有限、すなわちリスケジューリング環境が静的である場合に問題は限られる . また、かご運行は、客による呼びの登録といった事象の発生をきっかけとして計画されることが普通であり、リスケジューリング方針が周期的、あるいはハイブリッドとなる状況は考えにくい . これらの点を踏まえて、図 2.2 に示された枠組みからエレベータ運行計画問題を対象とする研究が分類されないと考えられる範囲を除外し、加えてリスケジューリングの必要がない問題も含むよう範囲を拡張することで、それらの研究を分類する枠組みとして図 2.3 に示されるものを考えることができる . 図 2.3 では、“リスケジューリング戦略” という軸に“(1 度だけ作成)” という値が追加され、軸の名前自体が“(リ) スケジューリング戦略” と変更されている .“(1 度だけ作成)” という値に対応する行には、スケジュール実施前に一度だけ名目的あるいはロバスタなスケジュールが作成され、以後変更されることはないという研究が含まれる .

エレベータ運行計画問題に関する既存研究のうち、全般的なもの<sup>1,9,13)</sup>を除いた研究の一部が次に示される . これらのうち、最終的にかご運行を作成する研究が、分類上で図 2.3 に示されている .

- 交通流の推定に関するもの .

岩田 97<sup>31)</sup> 交通流を表すものとしていくつかの交通流特徴モードが定義され、それらと客の交通量データとの対応を教師データとして与えられた人工神経回路網 (以降、ANN: Artificial Neural Network) の構成および学習結果が示された .

米田 97<sup>32)</sup> 実数の集まりとして得られる客の交通量データから、整数を要素とする OD 行列を計算する手法が報告された .

- エレベータシステムやかご運行計画手法の分析に関するもの .

田中 06<sup>33)</sup> SC の有効性が、いくつかの評価関数を最小化するようかごを運行させる手法との比較に基づいて調査された .

Markon02<sup>34)</sup> 簡略なエレベータシステムが Kac リングとしてモデル化され、その振舞いの分析結果が示された .

畑中 93<sup>35)</sup> ある交通流下における各ホールにおける待ち行列の期待長さが待ち行列理論を用いて求められ、それらの特徴がいくつかのパラメータ設定の上で示された .

- 効率的であるかご運行計画手法の構築に関するもの .

匹田 89<sup>36)</sup> 交通流ごとに構成されたファジィ・ルールベースによるかご運行計画手法が提案された .

### 2.3 エレベータ運行計画手法

(リ)スケジュール戦略	リスクスケジュール方針	リスクスケジュール手法		リスクスケジュール環境		
		スケジュール作成	スケジュール修正	決定的	詩的 確率的・既知	確率的・未知
(一度だけ作成)	/	名目的	/	Shihong91 Shen07		
		ロバスト				
スケジュール非作成 デバイスバッチング ルール	/	/	/		匹田89 匹田95 岩田01	平沢79 黒沢85 黒沢87 Markon94 Fujino97 鈴木04 白石05 江口05 江口06 池田心06 池田浩司06 周06 谷川06 小堀06 鈴木06 Ikeda07 Yu07 Zhou07
						Crites96 Pepyne97 Pepyne98 Nikovski03 Brand04
予測-リアクティブ	イベント・ドリブン	名目的	延期			
			部分的			田中01 浦口02 別府05
			完全			
		ロバスト	延期			
			部分的			
			完全			Qun07

図 2.3: エレベータ運行計画手法を分類する枠組みおよびその上での既存研究の分類

- 匹田 95<sup>37)</sup> up-peak 交通流を対象とし、かご運行計画において考慮することが有効であると考えられるいくつかの指標を設計し、シミュレーションにより計算されたそれらの指標の分布に基づいたファジィ・ルールベースによるかご運行計画手法が提案された。
- Pepyne97<sup>38)</sup> いくつかの前提のもとで、up-peak 交通流において最適であるかご運行計画手法が導出された。
- Pepyne98<sup>39)</sup> 研究<sup>38)</sup>における、ある種の閾値を頻繁に計算しなければならないという問題を解決するための手法が、計算例と併せて示された。
- 岩田 01<sup>40)</sup> 主に inter-floor 交通流を対象とし、各階床へかごが到着する時間のかご間での偏りを反映する評価指標を考慮したかご運行計画手法が提案された。
- Nikovski03<sup>41)</sup> 主階床でかごを待っている客が目的階床にて降車するまでにかかる時間の見積りをいくつかの前提で動的計画法により求める手法、およびそのような見積りを利用したかご運行計画手法の評価例が示された。
- Brand04<sup>29)</sup> up-peak 交通流および down-peak 交通流下で最適であるパーキング手法が、動的計画法を用いて導出された。
- 鈴木 06<sup>42)</sup> 将来到着する客へのサービスをあまり劣化させないかごを割り当てるというかご運行計画手法が提案・評価された。
- 小堀 06<sup>18)</sup> 新規ホール呼びへのかご割当てに伴う走行距離の増分を見積もる指標を設計し、これを考慮したかご運行計画手法のいくつかのパラメータ設定上での評価例から、客の待ち時間をあまり増やさずにかごの走行距離を短くしうることを示唆する結果が示された。
- 平沢 79<sup>28)</sup> 新規ホール呼びへあるかごを割り当てることによる登録済みの呼びの処理完了時刻を推定し、その増分の総和、あるいは最大値が最小となるかごを割り当てる手法が提案された。
- 黒沢 85,87<sup>17,43)</sup> 客のプロファイルを大まかに考慮するために“エリア”を定義し、これといくつかのパラメータに従って計算される指標の値が大きくなるかごを割り当てる手法、および交通流の変化に応じてパラメータを調節する手法が提案された。
- 江口 05<sup>44)</sup> 大規模なエレベータシステムへの Genetic Network Programming (以降, GNP) の適用結果が示された。
- 江口 06<sup>45)</sup> 研究<sup>44)</sup>における GNP を、割当てかごを直接指定するのではなくある指標における順位で指定する、判定ノードにおける閾値を実数値 GA により調節する、と拡張した GNP によるかご運行計画手法が提案・評価された。
- 周 06<sup>12)</sup> ダブルデッキエレベータシステムを対象としたかご運行ルールを獲得するために、GNP が適用された。

- Zhou07<sup>46)</sup> ダブルデッキエレベータシステムを対象として、かご割当て決定時に考慮される指標のかごに渡る分散も考慮した GNP の構成が提案され、計算例が示された。
- Yu07<sup>47)</sup> ダブルデッキエレベータシステムを対象として、Ant Colony Optimization で用いられるフェロモンに基づいた遺伝的操作が行われる GNP の構成および計算例が示された。
- 田中 01<sup>10)</sup> 行先階登録方式のエレベータシステムを対象とするエレベータ運行計画問題が、新規にホール呼びが登録されるたびに計算が行われる動的最適化問題として定式化され、そのための分枝限定法の構成と計算例が示された。
- 浦口 02<sup>48)</sup> 研究<sup>10)</sup>に基づき、かごに容量制約のある、より現実的なエレベータシステムを対象とした分枝限定法によるかご運行計画手法が示された。
- 白石 05<sup>49)</sup> マルチカーエレベータシステムを対象として、学習オートマトンによる各かごの制御手法が提案され、学習後のオートマトンによるかご運行の評価が示された。
- 別府 05<sup>11)</sup> 行先階登録方式エレベータシステムを対象とし、かごの割当て表示が即時であるシステムとそうでないシステムの有効性を比較した結果が示された。
- 谷川 06<sup>50)</sup> 行先階登録方式エレベータシステムにおけるかご運行計画において、交通量データから推測される乗客数などを用いる手法が、計算例とともに提案された。
- 池田浩司 06<sup>26)</sup> 行先階登録方式かつ即時割当て表示方式であるエレベータシステムと、行先階登録方式かつ遅延割当て表示方式であるエレベータシステムの有効性が、いくつかの計算例とともに比較された。
- Shihong91<sup>51)</sup> 計画期間に到着する全ての客のプロファイルが既知であるという前提下で、有効なかご運行を遺伝アルゴリズムにより求めるというアプローチが示された。
- Markon94<sup>52)</sup> 入力層から中間層への重みは既存のかご運行計画手法を用いた教師あり学習、中間層から出力層への重みは教師なし学習で調節された 3 層 ANN を用いたかご運行計画手法が、その評価とともに示された。
- 鈴木 04<sup>25)</sup> 各かごについて計算される多数の指標を設計し、その重み付け和が最小となるかごを割り当てる手法が、遺伝アルゴリズムによる重み調節手法と併せて提案された。
- 池田心 06<sup>53)</sup> マルチカーエレベータシステムを対象としたかご運行ルールを獲得するために、Exemplar Based Policy (以降、EBP) が適用され、その評価が示された。
- Ikeda07<sup>54)</sup> マルチカーエレベータシステムを対象として、多目的最適化手法を利用することで複数の交通流において有効であるかご運行計画手法を求めうる EBP の構成が、計算例と併せて示された。

- Crites96<sup>16)</sup> 4かご10階床という規模の大きなエレベータシステムへ down-peak 交通流に従って客が到着する問題を対象として, ANN によって状態空間を抽象化した上で強化学習<sup>55)</sup>を適用する手法が提案され, 既存手法との比較結果が示された.
- Fujino97<sup>56)</sup> 階床ごとに待ち時間や旅行時間などの優先度を考え, これらをオンラインの遺伝アルゴリズムにより交通流に適するよう調節することによるかご運行計画手法が示された.
- Shen07<sup>57)</sup> 計画期間に到着する全ての客のプロファイルが既知であるという前提下で, エレベータシステムの連続時間モデルに基づいた分枝限定法の構成と計算例が示された.
- Qun07<sup>27)</sup> エレベータ運行計画問題をロバスト最適化問題としてモデル化し, 目的関数値を最も悪化させるような外乱の下で有効なかご運行を計画する手法が提案・評価された.

## 2.4 エレベータ運行計画問題への数理計画的アプローチ

### 2.4.1 数理計画的アプローチをとる背景

実際に稼働している多くのエレベータシステムにおいて用いられているかご運行ルールは, システムの開発・販売・保守を業とする企業による絶え間ない改良により, 特許などで保護され確認は難しいものの, 非常に有効・精緻なものになっていると推察される. 一般にそれらのルールでは, 1つのシャフト内に1つのかごが含まれるエレベータから構成されるエレベータシステムが前提とされている. そのもとで, シミュレーションや実データにより明らかとなった非効率な運行の発見および解消, ならびに熟練者による有効な規則の発明が積み重ねられることで, 現在の有用なルールが構築されたといえる. しかしながら, 環境負荷の低減や日常生活の安全・安心性の向上のために, 低消費電力性・省資源性・安全性といった多様な面からかご運行を評価することが必要となり, 熟練者にとって, これまでのようにルールを改良することが難しくなりつつある. 加えて, 日本において顕著である少子高齢化に伴い, 熟練者が減少し, より貴重となり, 熟練者によるルールの改良にかかるコストが大きくなってきている. さらには, マイクロコンピュータを利用する, これまでにないエレベータシステムの実現<sup>2)</sup>により, 1シャフトに1かごという前提が将来成り立たなくなる可能性がある. このとき, それまでの熟練者はもはや熟練者ではなくなるといえる. また, そのようなエレベータシステムの振舞いは非常に複雑であるため, システムの挙動を予測できるという意味での熟練者を育成することは, 困難を究めると想像される. 以上の理由から, ルールを漸次的に改良するというこれまでのアプローチは, 今後取ることが難しくなると予想される.

これまでのアプローチに代わる，科学技術の発展により計算機の性能が著しく向上している現状を踏まえたアプローチとして，

- メタ・ヒューリスティクスによる近似最適化を行う，シミュレーションに基づくアプローチ；
- エレベータの運行計画を最適化問題として捉え，最適解の求解を念頭において研究を進めるといった数理計画的アプローチ；

の2つを挙げることができる．メタ・ヒューリスティクスやシミュレーションは様々な状況へ適用することが可能であり，前者のアプローチは多くの研究において取られている．しかしながら，そのアプローチだけを取り続けることには，次のような問題があると考えられる．

- (1) 獲得されたかご運行計画手法の絶対的（最適なかご運行計画手法に対する相対的な）有効性が不明である．
- (2) 計算機の上でのサンプルとしての有効性を示せるに過ぎず，ある状況が生じないことを保証できないため，人命を左右するような状況における利用が憚られる．
- (3) あるエレベータシステムや特定のシミュレータの上でしか成立しないアドホックな結果だけが集まり，系統だった知見となりえない．

これらの問題を，シミュレーションに基づいたアプローチの上で解決することは難しく，もう1つのアプローチである数理計画的アプローチを取ることが必要であると考えられる．例えば，小規模な問題に対して数理計画法を適用することで，1つ目の問題はある程度の解決を見ることができる．他の問題の解決を図るためには，有用性が広く認められている線形制御理論<sup>58)</sup>に基づくアプローチや，TSPの知見に基づくアプローチを分析することが有効であると考えられる．これらのアプローチには，前述の3つの問題に照らしたとき，次のような特長を見ることができる．

- (1) ある種の前提のもとでは最適解，あるいは最適解の目的関数値の下界値<sup>§</sup>を求めることが可能であり，それらに対する有効性について手法を評価することができる．
- (2) 問題の理論的取扱いが可能で，ある条件のもとではある状況が発生しないことの保証などが可能である．
- (3) 対象システムの振舞いが簡素であり，シミュレーションの必要がない．例えシミュレーションの必要があっても，システムの状態遷移規則などが明文化されており，実装に依存せず同様の結果を導くプログラムが作製される．結果として，ある研究成果は，後続の研究において容易に利用することができる．

数理計画的アプローチを取る際にも，このような問題解決の方向を常に念頭においておくことが肝要であると考えられる．

<sup>§</sup> 目的関数値の最大化が目的であれば上界値．

### 2.4.2 理論的研究と実際的研究の分離

エレベータ運行計画問題に対しては、シミュレーションに基づいたアプローチの取られることが多く、数理計画的アプローチの取られることが少ない事由として、次の3つが考えられる。

- (1) エレベータシステムの挙動は、様々な例外を持つ人為的ルールに従い、非常に複雑である。
- (2) 既に稼働しているエレベータシステムがあり、それらは数理計画的に取り扱うには規模が大きすぎる。
- (3) 典型的な VRP などと異なり、スケジューリング問題としてのモデルの基礎をなす仕事 (客の乗降車) に関する情報を利用することができない。

例え (1), (3) の事由を解決できたとしても, (2) の事由の解決はまず不可能であることが明らかであるため, 数理計画的アプローチはあまり取られていないと考えられる。ここで, 現実規模のエレベータシステムを対象とするエレベータ運行計画問題と, より規模の小さなエレベータシステムを対象とするエレベータ運行計画問題とは, 本質的に異なるものであると考えてみる。これにより, 前者の問題へ数理計画法をそのまま適用することは, 例えば線形制御理論をそのまま非線形システムへ適用するように, 合理的ではないと考えることができるようになる。現実規模の問題の最適解を求めることができず, 規模の小さな問題にしか適用できないとしても, 数理計画的アプローチを取ることは次のような期待を持つことができる。

- 制御工学において, 線形システムを対象として構築された理論が局所・部分的な線形性の仮定のもとに非線形システムへも適用されているように, 数理計画的アプローチによる研究成果を, 現実規模の問題を緩和, 限定, あるいは近似した問題において利用する。
- (混合) 整数計画問題において, 整数制約を緩和して線形計画法<sup>59)</sup>を適用することで本来の問題の下界値を高速に計算することができるように, 数理計画的アプローチによる研究成果を, 現実規模の問題の数学的基盤を与えるものとして利用する。

これらを踏まえて, エレベータ運行計画問題に対して数理計画的アプローチを取る際には,

- (1) 小・中規模なエレベータシステムを対象とした問題へ数理計画法を適用するなどして, 最適性が保証されているなど理論的に確かな研究成果を求める;
- (2) その成果を, 大規模なエレベータシステムを対象とした問題において利用する;

という段階的方法が有効であると考えられる。これらの段階に関する研究は, それぞれ並行して進めることが可能であり, またその方が合理的である。これを踏まえて, 本論文では, それらの研究が“理論的研究”, “実際的研究”として個別に考慮される。

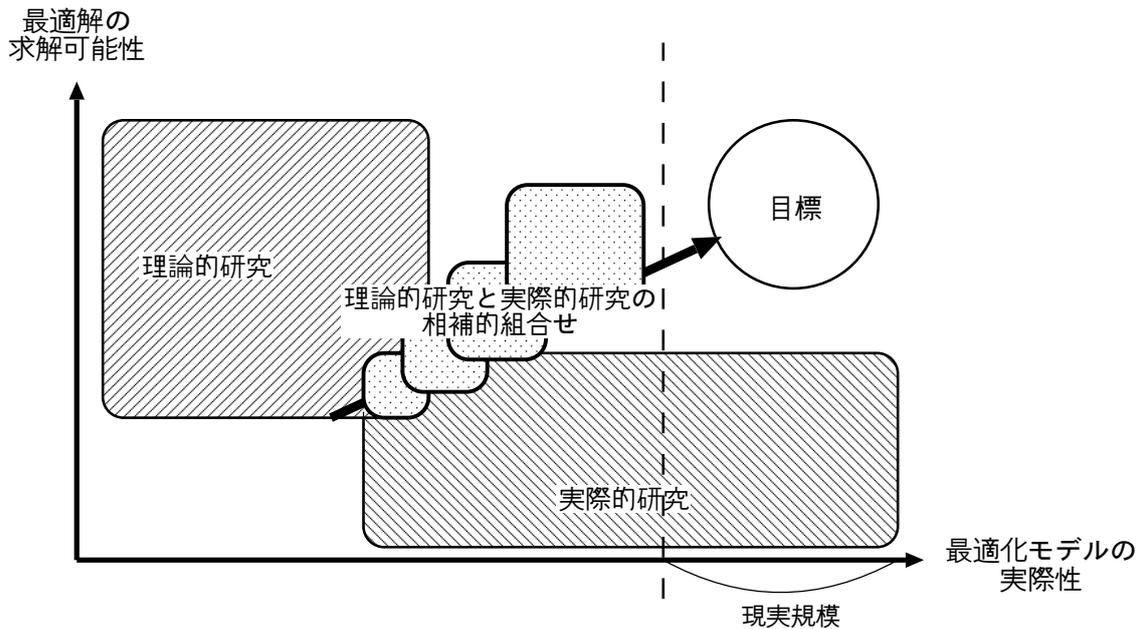


図 2.4: 理論的研究と実際的研究の相補的組合せによる研究の展開の概念  
 中規模な問題において理論的研究および実際的研究が接すれば、両者を相補的に組み合わせることによる研究の展開が可能になると期待される。

1.1 節で述べられたように、理論的研究と実際的研究にはそれぞれ長短所があり、一方が一方を置き換えるというものではない。また、図 1.1 に示されたように、理論的研究は実際性の高い問題に対して適用可能となるよう、実際的研究はかご運行計画手法の数学的取扱いが容易となるよう、並行して進めることが可能である。さらに、今後研究が進み、中規模な問題において両者が接したときには、図 2.4 に示されるように、理論的研究と実際的研究を相補的に組み合わせることによる研究の展開が可能になると期待される。ただし、そのためには、1.1 節に示されたように、理論的研究および実際的研究が十分進められることに加えて、有効性が問題の規模に依存しないかご運行を作成するかご運行計画手法が必要であると考えられる。そのような手法の構成は、今後の課題とされる。

### 2.4.3 交通流に関する情報の利用可能性による問題のクラス分類に基づいた数理計画的アプローチ

本論文では、小・中規模のエレベータシステムを対象としたエレベータ運行計画問題へは理論的研究が行われ、大規模なエレベータシステムに対しては、理論的研究による成果の応用を念頭においた実際的研究が行われる。このとき、2.4.2 節で述べられた数理計画的アプローチがとられることが少ない3つの事由のうち、実稼働しているエレベータシステムの規模が数理計画的に取り扱うには大きすぎるという事由は、問題とならない。また、エレベータ

表 2.2: エレベータ運行計画問題のクラス分類

	交通流が確定的	交通流が確率的	
		定常	非定常
既知	クラス I	クラス II	クラス IV
未知	-	クラス III	

タシステムの挙動が複雑であるという事由は、システムがある状態においてどのように振る舞うかを少しずつ明文化していくことで、手間のかかるものの解決することが可能であると考えられる。残る事由は、客の到着時刻・出発階床・目的階床が不確定である、すなわち交通流に関する情報を完全に利用可能とは限らない、というものである。生産スケジューリングに関する研究では、これらの情報の利用可能性が異なると、まったく別の問題として考慮されることが多い。このことから、エレベータ運行計画問題を数理的に取り扱う際には、交通流に関する情報の利用可能性に応じて異なるモデルを構築することが合理的であると考えられる。

2.3.2 節に示された、エレベータ運行計画問題をスケジューリング問題として見た場合の仕事に相当する客の処理に関する情報の利用可能性について、エレベータ運行計画問題を大きく次の4つのクラスに分類することが可能であると考えられる。

- (1) クラス I: 交通流が決定的であり、計画開始前に全ての客のプロファイルおよびシステムに関する情報を利用できる。
- (2) クラス II: 交通流が定常な確率分布に従い、かつその確率分布が既知である。
- (3) クラス III: 交通流が定常な確率分布に従うことは分かっているが、どのような確率分布に従うかは不明である。
- (4) クラス IV: 交通流の従う確率分布が計画期間において変化する（非定常である）。

この分類を整理すると、表 2.2 のようになる。

表 2.2 に示された4つのクラスのうち、クラス IV は、最も現実的で難しいクラスである。このクラスでは、例えば、計画期間の交通流がある確率分布に従っているという推測の上では有効な客ご運行が得られなかったとき、途中までは推測が正しかったがその後確率分布が変化してしまったのか、あるいはそもそもの推測が間違っていたのかを区別することができない。現実には、このクラスの問題は、全体の計画期間を交通流が定常な確率分布に従う部分へ分割可能であるという仮定のもとで、ある時点で交通流が従う確率分布の推定およびクラス II の問題という2つの問題に分けて扱われることが多い。本論文においても、クラス IV の問題は直接は扱われず、第5章で示されるクラス III の問題を対象とする手法の、クラス IV の問題への適用可能性が示唆されるに過ぎない。

本論文では、クラス I, II の問題に対する数理計画的アプローチの1例が、それぞれ第3

章, 第4章にて示される。クラスIの問題は静的最適化問題としてモデル化することができ, スケジューリング問題を対象とした多くの手法の適用が可能である。第3章では, それらのうちシステムの複雑さを吸収しうる柔軟な適用が可能な手法として, 分枝限定法<sup>60)</sup>が用いられる。システムの時間モデル(離散時間モデルであるか, 連続時間モデルであるか)が, 現実のエレベータシステムと最適化モデルとの差異へ強い影響を与えることが指摘され, その時間モデルの違いを透過的に扱えるよう構成された分枝限定手続きが示される。

クラスIIの問題は, 原理的にはマルコフ決定過程としてモデル化し, その一般的解法である動的計画法<sup>6)</sup>を適用することが可能であると考えられる。しかしながら, エレベータシステムの振舞いが複雑であるため状態遷移確率を与えることができず, その適用は交通流が簡素である<sup>38)</sup>といった前提が成立する場合に限られていた。第4章では, 確率的離散事象システムのシミュレーションに関する考察に基づいて定式化された, 交通流やエレベータシステムを制御するヒューリスティクスに依存しない状態遷移確率が利用されることで, これまでよりも一般的である状況において動的計画法を適用することが可能となっている。

クラスIIIの問題は, 第5章で扱われる。ここでは, それまでの章とは異なり, 理論的研究による成果の利用に留意した実際的研究が行われる。既存の実際的研究が, かの運行計画手法をどのようにモデル化しているかという点から分類され, 最適方策を表現しうるモデルとしてルールベースが選ばれる。実際的研究たるべき, すなわち大規模なエレベータシステムを対象とした問題へも適用可能であるために, ルールベースを構成する単位ルールが満たすべきと考えられる性質が指摘され, それらを反映するものとして考案された単位ルール(such-thatルールと呼ばれる)の設計が示される。続いて, これを要素とするルールベース(arg-matchルールと呼ばれる)を獲得するための, 遺伝的機械学習の構成が示される。



---

## 第 3 章

### クラス I: 交通流が確定的である状況におけるエレベータ運行計画

#### 3.1 緒言

本章では、計画期間に到着する客に関する全ての情報が計画開始前に利用可能であるという状況におけるエレベータ運行計画問題 (2.4.3 節におけるクラス I) が対象とされる。ここで、客に関する全ての情報とは、客がいつ、どの階床へ到着し、どの階床へ移動するかという情報 (プロフィール) を表す。これらの情報が既知であるという前提は、計画期間において処理すべき客に関する情報が例題 (2.2.3 節を参照) として与えられていることに相当する。このとき、前もってかごを客の出発階床に待機させておくといった、その例題に対して最適なかご運行を求めることができる。このようなかご運行は、既存のかご運行ルールの有効性を評価する、あるいは新奇なかご運行ルールを発見する際の参考として有用であると考えられる。また、今後の技術発展により、客の情報をホールへ到着する前に計測することが可能となれば、本章の枠組みをそのまま適用することで非常に有効なかご運行を作成することができると思われる。

本章では、かご運行計画手法の性質として、適用可能な問題の規模よりも、手法により作成されるかご運行の最適性が重視される。交通流が確定的かつ既知であるという前提のもとでは、エレベータ運行計画問題を静的最適化問題としてモデル化することが可能である。このモデルでは、客により登録されるホール呼びおよびかご呼びが仕事として、かごが機械として、それぞれ考慮される。このとき、決定変数は、仕事に相当する呼びへの機械に相当するかごの割当て、およびかごごとに割り当てられた呼びの処理順序となり、エレベータ運行計画問題を一種のスケジューリング問題<sup>61)</sup>とみなすことが可能である。スケジューリング問題の最適解を求めるために利用可能な様々な数理計画法<sup>62)</sup>のうち、本章では分枝限定法<sup>63)</sup>が用いられる。問題に特化した分枝限定手続きを構成することは、市販の数理計画パッケージを用いることと比べて、手間が大きく、また手続きの有効性が実装に強く依存する。しかし、多種多様な問題へ適用することができ、また問題間の違いを柔軟に吸収する仕組みを用意することで、問題への依存性を低くして構成することが可能である。さらに、人

為的な形をとることが多い問題に関する知見を自然な形で求解手順へ埋め込むことが可能であり、これによる計算の効率化も期待される。

### 3.2 前提条件

本章では、次の条件の成立が前提とされる。

- (1) 計画開始時点における全かごの位置、および計画期間に到着する全ての客のプロファイルが既知である。
- (2) かごの扉開放率を考慮しない。
- (3) かごの停止位置はある階床と同じであり、階床間に停止することはない。
- (4) ある階床における客の乗降は、その人数に関わらず一定時間  $T^r$  を要する。
- (5) 客の質量は全て 1 である。また、かごの最大積載量は整数である\*。
- (6) 客は自らに割り当てられたかごを知ることが可能であり、そのかごだけに乗車する。

### 3.3 エレベータ運行計画問題の静的最適化問題としてのモデル化

3.2 節で述べられた前提のもとでは、ある例題に対して最適なかご運行を求める静的最適化問題として、エレベータ運行計画問題をモデル化することが可能である。この最適化モデルでは、最小化すべき目的関数は式 (2.16) として与えられる。また決定変数は、3.2 節の前提から客ごとに処理かごを指定できるため、客へのかご割当てと、客の乗車時刻・降車時刻である。ただし、これらの変数はかご運行の結果として固定されるものであり、変数間には様々な制約条件が課される。さらに、かごを機械、客の乗降車を仕事とみなすことで、エレベータ運行計画問題をスケジューリング問題の一種として見なすことが可能である。

スケジューリング問題において、生産システムの状態遷移が沿うところの時間モデルとして、時刻が離散値を取る離散時間モデルと、そのような制約のない連続時間モデルの 2 つが考えられる。これらの時間モデルに対しては、それぞれ次の最適化モデルが適していると考えられる。

- (1) 離散時間モデルの場合: 計画期間を単位時間ごとに分割し、ある単位時間にある仕事へ割り当てる機械を決定する問題 (設備割当て問題)。このモデルの上では、特に計画期間の長さが、現実的時間で求解可能な問題の規模へ強い影響を与える。
- (2) 連続時間モデルの場合: 機械への仕事の割当て、および各機械上で処理される仕事の処理順序を制約を守って決定する問題 (処理順序決定問題)。このモデルの上では、特にかごおよび仕事の数が、現実的時間で求解可能な問題の規模へ強い影響を与える。

---

\*すなわち、積載量は乗車可能な人数として考慮される。

離散時間モデルの上での生産システムの振舞いを現実のシステムの振舞いへ一致させるためには、単位時間を無限小とすることが必要であるため、不可能である。また、違いが十分小さければよい、と一致条件が緩められても、そのためには単位時間をかなり小さくとることが必要であると考えられる。このとき、例えば求解手法が非常に有効で、離散時間モデルの上では長い計画期間にわたる計画を立てることができるとしても、それは実システムの上では非常に短い時間の計画に過ぎず、あまり有用ではない。これらの点を踏まえ、本章では、最適化モデルを現実問題へ近づけることの容易さから、エレベータ運行計画問題が連続時間モデルの上で、仕事の処理順序決定問題としてモデル化される。

エレベータ運行計画問題を仕事の処理順序決定問題としてモデル化したとき、離散時間モデルと連続時間モデルの違いを、かごが階床間を移動するために必要とする時間の計算式の違いに集約することが可能である。本章では、離散時間モデルにおける階床  $f_1$  から階床  $f_2$  への移動にかかる時間は、式 (3.1) のように与えられるとする。

$$t^f(f_1, f_2) := \begin{cases} |Z_{f_1} - Z_{f_2}| + 1 & \text{if } f_1 \neq f_2, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.1)$$

式 (3.1) と比べて、連続時間モデル上での階床  $f_1$  から階床  $f_2$  への移動にかかる時間の計算式は、複雑となる。その記述のために、次の記号を定義する。

- $t^{fc}(z_1, v, z_2)$ : 位置  $z_1$  にて速度  $v$  で移動中のかごが、位置  $z_2$  で停止するまでに速度  $v$  で等速運動を続けられる時間を表す関数。この値は次のように計算される。

$$t^{fc}(z_1, v, z_2) = \begin{cases} \frac{z_2 - z_1 - \frac{v^2}{2AM}}{v} & \text{if } v > 0, \\ \frac{z_2 - z_1 + \frac{v^2}{2AM}}{v} & \text{else if } v < 0, \\ 0 & \text{else if } v = 0, z_1 = z_2, \\ T + 1 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.2)$$

ここで、 $T + 1$  という値を取ることは、位置  $z_1$  にて速度  $v$  で移動中のかごが、位置  $z_2$  で停止するまでに速度  $v$  で等速運動を続けることができないことを表す。

- $v^f(z_1, v, z_2)$ : 位置  $z_1$  にて速度  $v$  で移動中のかごが、位置  $z_2$  で停止するまでに達成可能な最大速度を表す関数。この値は次のように計算される。

$$v^f(z_1, v, z_2) = \begin{cases} \min(V^M, \sqrt{v'}) & \text{if } a' > 0, \\ \max(-V^M, -\sqrt{v'}) & \text{else if } a' < 0, \\ v & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.3)$$

ここで,

$$a' := \begin{cases} A^M & \text{if } v > 0 \vee (v = 0, z_2 > z_1), \\ -A^M & \text{else if } v < 0 \vee (v = 0, z_2 < z_1), \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$v' := a' (z_2 - z_1) + \frac{v^2}{2}. \quad (3.5)$$

- $t^{\text{fb}}(z_1, v, z_2)$ : 位置  $z_1$  にて速度  $v$  で移動中のかごが, 位置  $z_2$  で停止するまでに続けて加速可能な時間を表す関数. この値は次のように計算される.

$$t^{\text{fb}}(z_1, v, z_2) = \begin{cases} \frac{v^{\text{f}}(z_1, v, z_2) - v}{A^M} & \text{if } v > 0 \vee (v = 0, z_2 > z_1), \\ \frac{v^{\text{f}}(z_1, v, z_2) - v}{-A^M} & \text{else if } v < 0 \vee (v = 0, z_2 < z_1), \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.6)$$

- $t^{\text{fa}}(z_1, v, z_2)$ : 位置  $z_1$  にて速度  $v$  で移動中のかごが, 位置  $z_2$  にて停止できるよう移動する場合の, 停止するまでの時間を表す関数. この値は次のように計算される.

$$t^{\text{fa}}(z_1, v, z_2) = \begin{cases} t^{\text{fb}}(z_1, v, z_2) + t^{\text{fc}}(z', v', z_2) + \frac{|v'|}{A^M} & \text{if } v = 0 \vee \frac{v^2}{2A^M} = |z_2 - z_1| \vee \\ & \left( (z_2 - z_1)v \geq 0, \frac{v^2}{2A^M} \leq |z_2 - z_1| \right), \\ T + 1 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.7)$$

ここで,

$$a' := \begin{cases} A^M & \text{if } z_1 < z_2, \\ -A^M & \text{else if } z_1 > z_2, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3.8)$$

$$v' := v^{\text{f}}(z_1, v, z_2), \quad (3.9)$$

$$z' := z_1 + vt^{\text{fb}}(z_1, v, z_2) + \frac{a'}{2} \left( t^{\text{fb}}(z_1, v, z_2) \right)^2. \quad (3.10)$$

また,  $T + 1$  という値を取ることは, 位置  $z_1$  にて速度  $v$  で移動中のかごは, 位置  $z_2$  にて停止できないことを表す.

式 (3.7) の関数を用いて, 連続時間モデル上での階床  $f_1$  から階床  $f_2$  への移動にかかる時間  $t^{\text{f}}(f_1, f_2)$  は, 次のように与えられる.

$$t^{\text{f}}(f_1, f_2) := t^{\text{fa}}(Z_{f_1}, 0, Z_{f_2}). \quad (3.11)$$

式 (3.1) あるいは式 (3.11) の関数を用いて, エレベータシステムの状態が  $x$  であるとき, 最寄階床に停止しているかご  $k$  が階床  $f$  へ移動し停止するために必要とする時間  $t_k^{\text{m}}(x, Z_f)$

は，次のように与えられる．

$$t_k^m(\boldsymbol{x}, Z_f) := \widehat{t}_k^m(f_k^n, f) := t^f(f_k^n, f). \quad (3.12)$$

また，登録されているかご呼びを処理し終わるまでの最短時間  $t_k^a(\boldsymbol{x})$  は，次のように計算される．

$$t_k^a(\boldsymbol{x}) = \widehat{t}_k^a(f_k^n, \mathcal{H}_k^c) := \begin{cases} 0 & \text{if } \mathcal{H}_k^c = \emptyset, \\ \widehat{t}_k^m(f_k^n, f_1) + \sum_{i=1}^{|f|-1} t^f(f_i, f_{i+1}) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.13)$$

ここで，リスト  $f$  は， $\mathcal{H}_k^c$  に含まれるかご呼びの種類を式 (2.3) により写すことで得られる階床の集合を  $f'$  としたとき，この要素を，

- $\forall f \in f' (f_k^n \leq f)$  ならば非減少順に；
- そうでなければ，非増加順に；

並び替えることで作成されるリストである．また  $f_i (i = 1, \dots, |f|)$  は，このリストの  $i$  番目の要素である．

ホール呼びへのかご割当てを定め，呼びを処理する順序を定めることで，各呼びの処理かごおよび処理完了時刻が一意に定まる．呼びの処理順序を考える際に，

- (1) ある時点で登録されている呼び全体を通して考える；
- (2) 呼びが割り当てられたかごに局所的なものとして考える；

という2つの方途が考えられる．本章では，局所的に通し番号を与えた方が有効であるとされる．また，呼びの処理順序が，決定変数により直接表されるのではなく，呼びの処理完了時刻として間接的に表される．これらの事項により定められるかごの軌跡の端点は，そのかごが割り当てられた呼びのうち処理完了時刻が最大である呼びの，処理完了時刻および処理階床により定められる座標に位置することとなる．この概観は，後述の図 3.1 に示される．

### 3.4 記号の定義

問題の記述を容易とするために，仕事  $J_j (j = 1, \dots, N_j)$  を定義する．ここで， $N_j$  は可能な仕事の数を表し，次のように定義される．

$$N_j := 2N_p. \quad (3.14)$$

仕事  $j$  は， $j \leq N_p$  なら客の乗車（ホール呼びの処理）に，そうでなければ客の降車（かご呼びの処理）に対応する．

仕事  $j$  の属性を表すために，次の記号を定義する．

- $T^r$ : 客が乗降に要する時間．本章では， $T^r = 1$  とされる．

- $f_j^j$ : 次のように定義される, 仕事  $j$  の処理階床 .

$$f_j^j := \begin{cases} f_j^{\text{po}} & \text{if } j \leq N_p, \\ f_{j-N_p}^{\text{pd}} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.15)$$

- $d_j^j$ : 次のように定義される, 仕事  $j$  の方向 .

$$d_j^j := \begin{cases} d_j^{\text{p}} & \text{if } j \leq N_p, \\ d_{j-N_p}^{\text{p}} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.16)$$

- $t_j^{\text{r}}$ : 次のように定義される, 仕事  $j$  の処理開始可能再早時刻 .

$$t_j^{\text{r}} := \begin{cases} t_j^{\text{p}} + T^{\text{r}} & \text{if } j \leq N_p, \\ t_{j-N_p}^{\text{p}} + t^{\text{f}}(f_{j-N_p}^{\text{po}}, f_{j-N_p}^{\text{pd}}) + T^{\text{r}} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.17)$$

- $t_j^{\text{c}} \in [0, T + 1]$ : 仕事  $j$  の処理完了時刻 . この値が  $T$  よりも大きいことは, 仕事  $j$  の処理が完了していないことを表す .
- $c_j^j \in \{0, \dots, N_c\}$ : 仕事  $j$  へ割り当てられたかご . この値が 0 であることは, 仕事  $j$  の処理かごが未定であることを表す .

なお,  $N_p < j$  の場合, この変数は次の制約により一意に固定される .

$$c_j^j = c_{j-N_p}^j. \quad (3.18)$$

分枝限定手続きを記述するために, 次の記号を定義する .

- $U$ : 上界値 . 目的関数値の最小化が目的とされる問題では, 一般に, ある時点までに得られている実行可能解の目的関数値のうち, 最小のものとされる .
- $A$ : 活性な部分問題の集合 .
- $t := \langle t_1^{\text{c}}, \dots, t_{N_j}^{\text{c}} \rangle$ : 仕事の処理完了時刻からなるリスト .
- $c := \langle c_1^j, \dots, c_{N_j}^j \rangle$ : 仕事の処理かごからなるリスト .
- $t_k^{\text{c}} (k = 1, \dots, N_c)$ : かご  $k$  が移動を開始可能な時刻 .
- $t^{\text{c}} := \langle t_1^{\text{c}}, \dots, t_{N_c}^{\text{c}} \rangle$ : かごの移動開始可能時刻からなるリスト .
- $f^{\text{c}} := \langle f_1^{\text{n}}, \dots, f_{N_c}^{\text{n}} \rangle$ : かごの最終停止階床からなるリスト .
- $l^{\text{c}} := \langle l_1^{\text{c}}, \dots, l_{N_c}^{\text{c}} \rangle$ : かごの最終積載量, あるいは最終乗客数からなるリスト .

これらのうち,  $t^{\text{c}}, f^{\text{c}}, l^{\text{c}}$  は, 続く 3.5 節に示される, かごが異なる時間軸に沿って動いている状況を表すために定義されたものである .

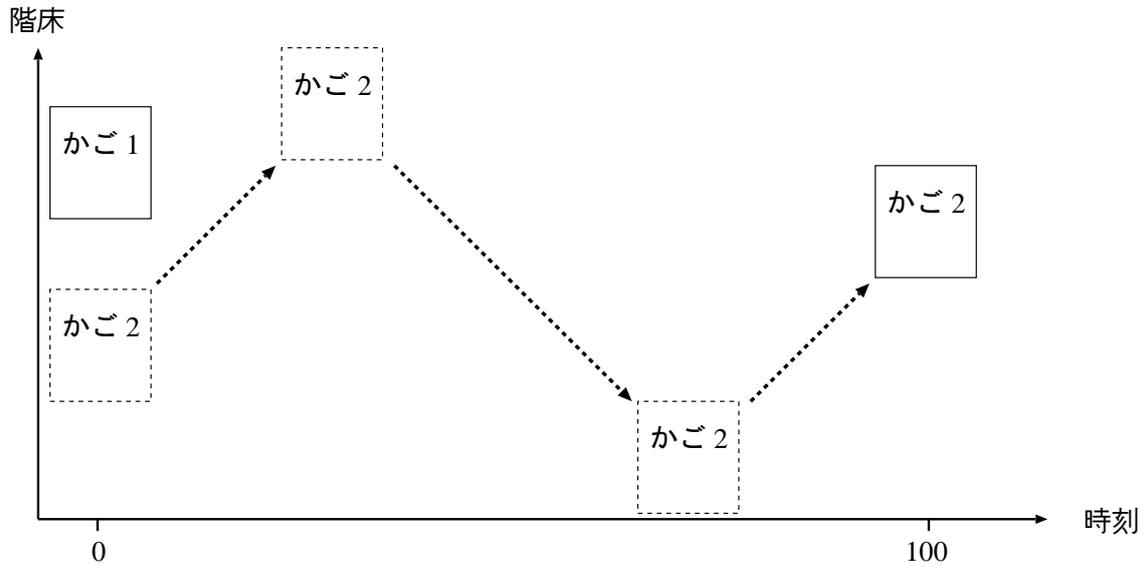


図 3.1: 2つのかごが異なる時間軸に沿って動いている状況の例の概観  
 かご 1 は、どのような仕事へも割り当てられておらず、時刻 0 から任意の仕事の処理を開始可能である。これに対し、かご 2 は複数の仕事へ既に割り当てられており、時刻 100 まではそれらの処理に占有される。それらの仕事を処理した後でなければ、新たな仕事の処理を開始することはできない。

### 3.5 原問題・部分問題の定義

3.3 節で述べられたように、本章では、エレベータ運行計画問題は乗車仕事へのかご割当および仕事の処理順序を決定すべき事項とする静的最適化問題としてモデル化される。さらに、先験知識の埋込みによる分枝限定手続きの効率化を企図し、仕事の処理順序を直接決定変数とするのではなく、各かごの移動開始可能時刻および最終停止位置を決定変数とする。これにより、例えば、遊休なかご 1 は時刻 0 から仕事を処理開始可能であるのに対し、仕事の処理に忙しいかご 2 は時刻 100 まで新たな仕事の処理を開始できないといった、かごが異なる時間軸に沿って動いている状況の取扱いが容易となる。決定変数の一部がこの例のように固定されたかご運行のイメージが、図 3.1 に示される。

図 3.1 に示されたように、決定変数が固定されるにつれ異なる時間軸に沿ってかごが動いていくような運行計画を表すために、全ての決定変数が未定である原問題は、

- どの乗車仕事へもかごが割り当てられていない;
- 仕事の処理は全て完了していない;
- かごは全て初期階床に位置する;
- かごの乗客数は全て 0;

- かごは全て時刻 0 から仕事の処理開始が可能;

であるものとして定義される．ここで，かごの初期階床および計画期間に到着する客のプロファイルは，2.2.3 節で定義された例題として与えられる．従って，原問題や，そこから作成される部分問題および最適なかご運行は，ある 1 つの例題の上で定義される．

部分問題は，原問題の決定変数の一部を固定することで生成される．対象例題を  $e$  と表したとき，その原問題およびこれから生成される部分問題  $\mathcal{P}_e$  は，次のようにリストの集まりとして表される．

$$\mathcal{P}_e := \langle t, c, t^c, f^c, l^c \rangle. \quad (3.19)$$

この表現では，例題  $e$  を対象とする原問題  $\mathcal{P}_e^{(0)}$  は，次のように構成される．

$$\mathcal{P}_e^{(0)} := \langle T+1, \dots, T+1, 0, \dots, 0, 0, \dots, 0, f_1^c, \dots, f_{N_c}^c, 0, \dots, 0 \rangle. \quad (3.20)$$

式 (3.19) に示された部分問題を構成する情報には， $f_k^n$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ) が含まれている．また，その情報に基づいて，かご  $k$  の中で登録されているかご呼びの集合  $\mathcal{H}_k^c$  を，次のように計算することができる．

$$\mathcal{H}_k^c = \left\{ 100k + 2f_j^j + \frac{d_j^j}{2} \mid j \in \{1, \dots, N_p\}, t_j^{jc} \leq T, t_{j+N_p}^{jc} > T, c_j^j = k \right\}. \quad (3.21)$$

従って， $\hat{t}_k^a(f_k^n, \mathcal{H}_k^c)$  を，部分問題を構成する情報から関数  $\hat{t}_k^a(\cdot)$  により次のように計算されるものとして表すことが可能である．

$$\hat{t}_k^a(f_k^n, \mathcal{H}_k^c) = \hat{t}_k^a(\mathcal{P}_e). \quad (3.22)$$

### 3.6 下界値の計算

本章では，ある部分問題の下界値は，乗客のいない客数分のかごを仮想することで緩和された問題の最適解として求められる．例題  $e$  のある部分問題  $\mathcal{P}_e = \langle t, c, t^c, f^c, l^c \rangle$  の下界値を  $F^-(\mathcal{P}_e)$  と表したとき，この値は次の手続きにより計算される．

- (1) 処理が完了していない乗車仕事へ，最短時間で到着が可能なかごを割り当てる．

処理が完了していない乗車仕事の集合を  $\mathcal{J}^+(\mathcal{P}_e)$  としたとき，これは次のように計算される．

$$\mathcal{J}^+(\mathcal{P}_e) = \left\{ j \in \{1, \dots, N_p\} \mid t_j^{jc} > T \right\}. \quad (3.23)$$

$\mathcal{J}^+(\mathcal{P}_e)$  に含まれる任意の仕事を  $j' \in \mathcal{J}^+(\mathcal{P}_e)$  とする．この仕事へ割り当てられるかごを  $k^*$  としたとき，これは次の式により計算される．

$$k^* = \arg \min_{k \in \{1, \dots, N_c\}} \max \left( t_{j'}^{jr}, t_k^c + \widehat{t}_{k,j'}(\mathcal{P}_e) \right). \quad (3.24)$$

ここで、 $\widehat{t}_{k,j}(\mathcal{P}_e)$  は、部分問題  $\mathcal{P}_e$  の上で、かご  $k$  が仕事  $j$  を処理可能なように停止するために必要な最短時間を表し、次のように計算される。

$$\widehat{t}_{k,j}(\mathcal{P}_e) = \begin{cases} \widehat{t}_k^m(f_k^n, f_j^j) & \text{if } \mathcal{J}_{k,j}^\times(\mathcal{P}_e) = \emptyset, \\ \widehat{t}_k^a(\mathcal{P}_e) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.25)$$

ただし、 $\mathcal{J}_{k,j}^\times(\mathcal{P}_e)$  は、かご  $k$  により仕事  $j$  を処理することにより、目的階床と逆方向へ運ばれる（かごが逆走する）客に対応する乗車仕事の集合であり、次のように計算される。

$$\mathcal{J}_{k,j}^\times(\mathcal{P}_e) = \left\{ j' \in \{1, \dots, N_p\} \mid t_{j'}^{jc} \leq T, t_{j'+N_p}^{jc} > T, c_{j'}^j = k, (f_{j'+N_p}^j - f_k^n) d_{j'}^j < 0 \right\}. \quad (3.26)$$

乗車仕事  $j' \in \mathcal{J}^+(\mathcal{P}_e)$  はかご  $k^*$  により処理されるとすることで、乗車仕事  $j'$  の処理完了時刻を次のように与えることができる。

$$\max \left( t_{j'}^{jr}, \widehat{t}_{k^*}^m(f_{k^*}^n, f_{j'}^j) \right). \quad (3.27)$$

以上をまとめて、全ての  $j' \in \mathcal{J}^+(\mathcal{P}_e)$  について、その割当てかごおよび処理完了時刻は次のように固定される。

$$\begin{aligned} c_{j'}^j &= k^*, \\ t_{j'}^{jc} &= \max \left( t_{j'}^{jr}, \widehat{t}_{k^*}^m(f_{k^*}^n, f_{j'}^j) \right). \end{aligned} \quad (3.28)$$

(2) 処理が完了していない降車仕事を、他の仕事に起因する制約などを考慮せずに処理する。

処理が完了していない降車仕事の集合を  $\mathcal{J}^-(\mathcal{P}_e)$  としたとき、これは次のように計算される。

$$\mathcal{J}^-(\mathcal{P}_e) = \left\{ j \in \{N_p + 1, \dots, N_j\} \mid t_j^{jc} > T \right\}. \quad (3.29)$$

全ての  $j' \in \mathcal{J}^-(\mathcal{P}_e)$  について、その割当てかごと処理完了時刻は次のように設定される。

$$\begin{aligned} c_{j'}^j &= c_{j'-N_p}^j, \\ t_{j'}^{jc} &= t_{j'-N_p}^{jc} + t^f(f_{j'-N_p}^j, f_{j'}^j). \end{aligned} \quad (3.30)$$

前述の手続きにより固定された仕事の処理かごおよび処理完了時刻から、全ての客  $p \in \{1, \dots, N_p\}$  の乗車かご、乗車時刻および降車時刻が次のように固定される。

$$\begin{aligned} c_p^p &= c_p^j, \\ t_p^{po} &= t_p^{jc}, \\ t_p^{pd} &= t_{p+N_p}^{jc}. \end{aligned} \quad (3.31)$$

この結果, 処理状態が一意に定まり, 式 (2.16) を用いて, この緩和問題の最適解の目的関数値を計算することが可能となる. この値が, すなわち部分問題  $e$  の下界値である.

なお,  $\mathcal{P}_e$  では全ての仕事の処理が完了している場合, 下界値は目的関数値と等しくなる. すなわち, 仕事の処理により作成された処理状態を  $\mathbf{y}$  とすれば,  $\mathcal{J}^+(\mathcal{P}_e) = \emptyset$ ,  $\mathcal{J}^-(\mathcal{P}_e) = \emptyset$  ならば,

$$F^-(\mathcal{P}_e) = F_e(\mathbf{y}). \quad (3.32)$$

### 3.7 分枝・限定操作

部分問題  $\mathcal{P}_e = \langle t, c, t^c, f^c, l^c \rangle$  において処理の完了していない, すなわち  $t_j^{jc} > T$  なる仕事  $j$  が存在するとき, この問題から部分問題を生成する分枝操作は次のようになる.

- 仕事  $j$  が乗車仕事である場合:

(1) 客を乗せることができるかこの集合  $\mathcal{K}^\circ$  を, 次のように計算する.

$$\mathcal{K}^\circ = \{k \in \{1, \dots, N_c\} \mid l_k^c < M_c\}. \quad (3.33)$$

(2)  $\mathcal{K}^\circ = \emptyset$  ならば, 部分問題  $\mathcal{P}_e$  から部分問題は生成されない.

そうでないならば, 全ての  $k \in \mathcal{K}^\circ$  について次のような部分問題  $\mathcal{P}_{e'}$  が生成される.

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{e'} := \langle & t_1^{jc}, \dots, t_{j-1}^{jc}, t', t_{j+1}^{jc}, \dots, t_{N_j}^{jc}, c_1^j, \dots, c_{j-1}^j, k, c_{j+1}^j, \dots, c_{N_j}^j, \\ & t_1^c, \dots, t_{k-1}^c, t', t_{k+1}^c, \dots, t_{N_c}^c, f_1^n, \dots, f_{k-1}^n, f_j^j, f_{k+1}^n, \\ & l_1^c, \dots, l_{k-1}^c, l_k^c + 1, l_{k+1}^c, \dots, l_{N_c}^c \rangle. \end{aligned} \quad (3.34)$$

ただし,

$$t' := t_k^c + t^f(f_k^n, f_j^j). \quad (3.35)$$

この操作により, 部分問題  $\mathcal{P}_e$  から計  $|\mathcal{K}^\circ|$  個の部分問題が生成される.

- 仕事  $j$  が降車仕事である場合:

$k := c_{j-N_p}^j$  について, 次のような部分問題  $\mathcal{P}_{e'}$  が生成される.

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{e'} := \langle & t_1^{jc}, \dots, t_{j-1}^{jc}, t', t_{j+1}^{jc}, \dots, t_{N_j}^{jc}, c_1^j, \dots, c_{j-1}^j, k, c_{j+1}^j, \dots, c_{N_j}^j, \\ & t_1^c, \dots, t_{k-1}^c, t', t_{k+1}^c, \dots, t_{N_c}^c, f_1^n, \dots, f_{k-1}^n, f_j^j, f_{k+1}^n, \\ & l_1^c, \dots, l_{k-1}^c, l_k^c - 1, l_{k+1}^c, \dots, l_{N_c}^c \rangle. \end{aligned} \quad (3.36)$$

ただし,

$$t' := t_k^c + t^f(f_k^n, f_j^j). \quad (3.37)$$

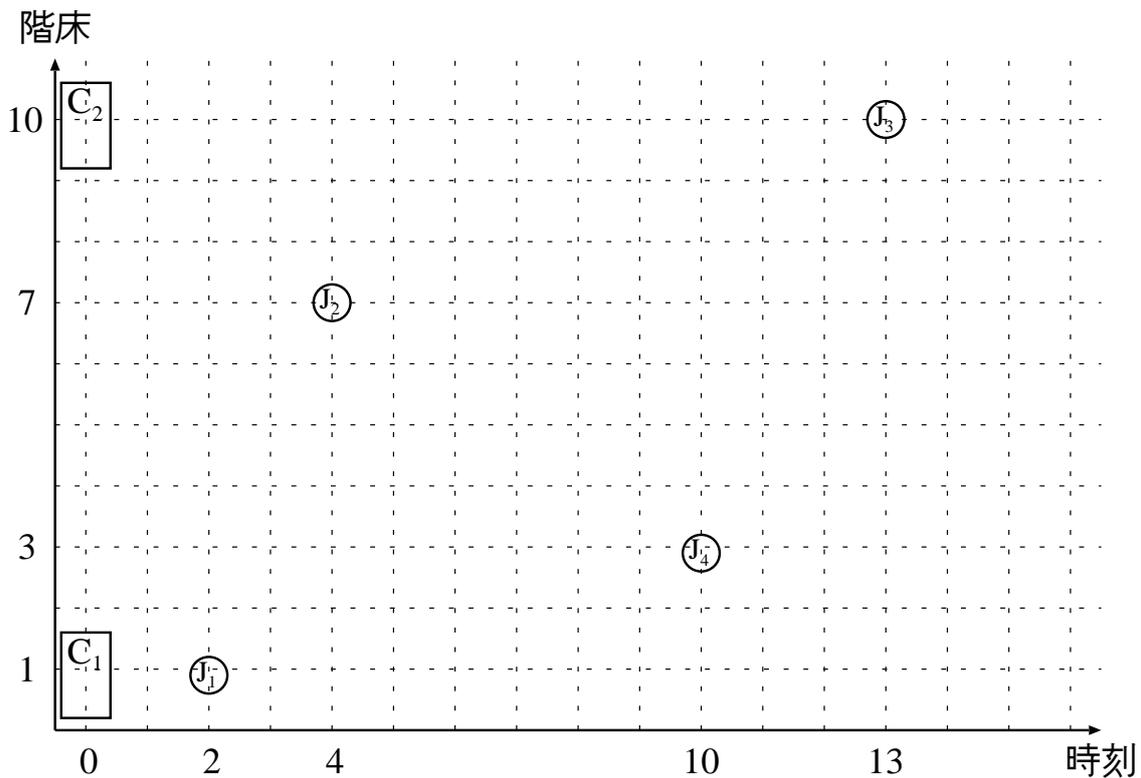


図 3.2: ある例題の原問題

対象問題は、2 かご 10 階床というエレベータシステムへ 2 人の客が到着するものである。そのある例題の原問題では、どちらのかごも時刻 0 から仕事の処理開始が可能であり、各かごの動きが沿う時間軸は一致している。

なお、式 (3.34), (3.36) では、仕事が 1,  $N_j$ , あるいはかごが 1,  $N_c$  である場合が考慮されていない。そのような場合の記述は、式 (3.34), (3.36) とほぼ同様となり冗長であると考えられるため、割愛されている。

分枝操作の様子を、2 かご 10 階床、階床間の距離が 1 というエレベータシステムへ 2 人の客が到着する 1 つの例題を例にとって図示する。この例題では、

- 計画開始時刻にかご 1, 2 が停止している階床が、それぞれ 1, 10;
- 客 1 の到着時刻, 出発階床, 目的階床が、それぞれ 2, 1, 10;
- 客 2 の到着時刻, 出発階床, 目的階床が、それぞれ 4, 7, 3;

となっている。この例題の原問題を図 3.1 と同様に示すと、図 3.2 のようになる。

原問題から、その決定変数の一部を、

- (1) 仕事 1 へかご 1 を割り当てるとして固定することで、図 3.3(a) に示す部分問題 1 が;
- (2) 仕事 2 へかご 1 を割り当てるとして固定することで、図 3.3(b) に示す部分問題 2 が;
- (3) 仕事 1 へかご 2 を割り当てるとして固定することで、図 3.3(c) に示す部分問題 3 が;

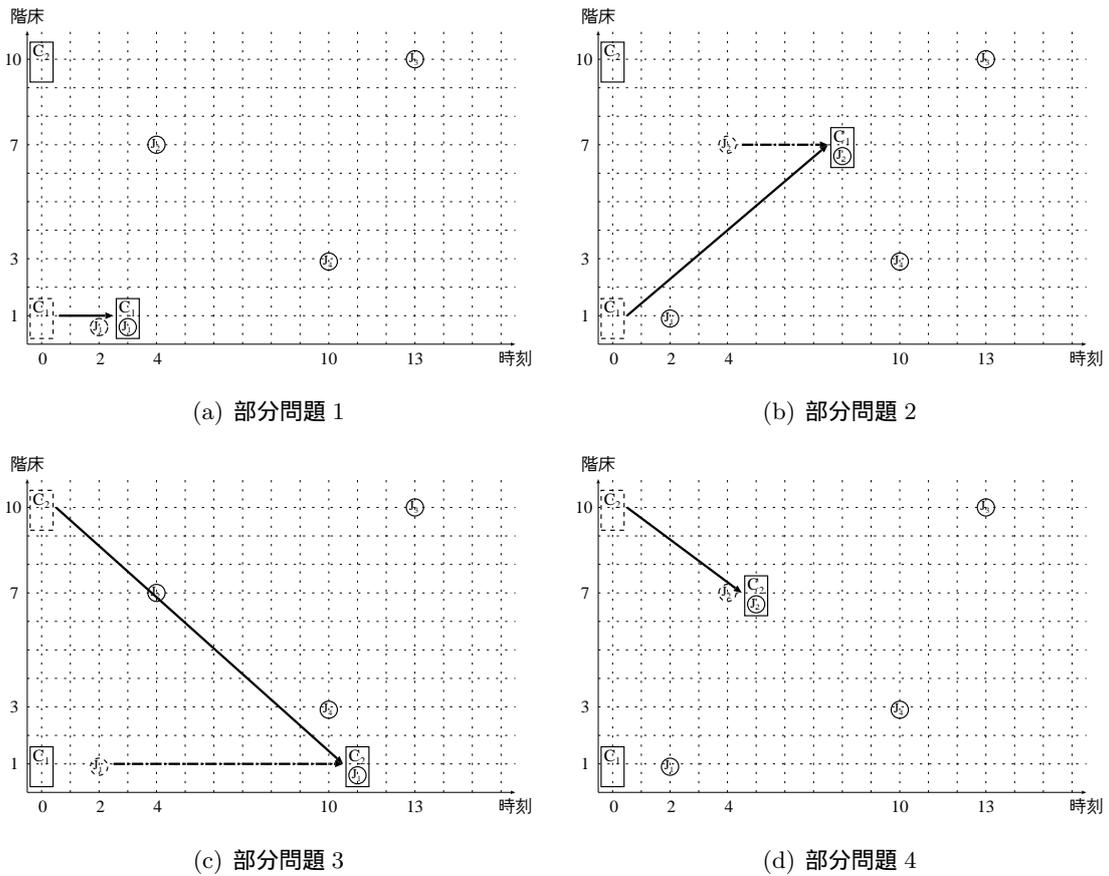


図 3.3: 原問題から生成される 4 つの部分問題

これらの部分問題では、各かごの動きが沿う時間軸が全て異なっている。特に、部分問題 3 では、かご 2 は仕事 1 を処理するために長時間占有される。

(4) 仕事 2 へかご 2 を割り当てるとして固定することで、図 3.3(d) に示す部分問題 4 が、それぞれ生成される。

次に、部分問題 1 に着目する。この決定変数の一部を、

- 仕事 1 を処理したかご 1 が次に仕事 2 を処理するとして固定することで、図 3.4(a) に示される部分問題 5 が<sup>†</sup>;
- 仕事 3 を処理 (客 1 を降ろす) として固定することで、図 3.4(b) に示される部分問題 6 が;
- 仕事 2 へかご 2 を割り当てるとして固定することで、図 3.4(c) に示される部分問題 7 が;

<sup>†</sup>ここでは、説明の容易のために、逆走が許されている。

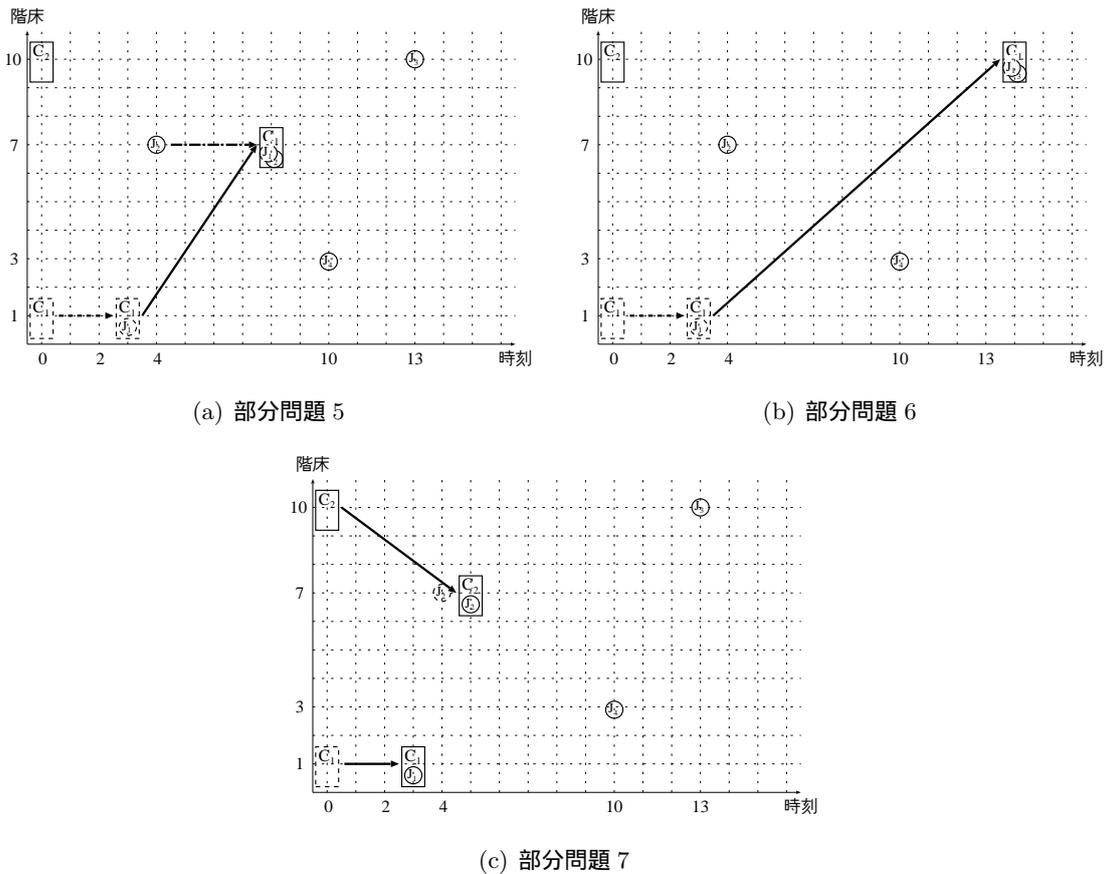


図 3.4: 部分問題 1 から生成される 3 つの部分問題

部分問題 6 では、かご 1 が長時間占有され、かご 2 はどの仕事にも占有されていないことに対し、部分問題 7 では、どちらのかごもある程度の時間占有される。

それぞれ生成される。部分問題 2, 3, 4 からの分枝操作も同様になるが、その例示は冗長であると考えられるため割愛される。

生成された部分問題は、活性な部分問題の集合  $A$  へ追加される。一般に、この集合は分枝限定法の計算において空間計算量を最も消費する要素であることから、その要素数をできるだけ抑えることが望ましい。このため、仕事  $j$  へかご  $k$  を割り当てることで生成された部分問題  $\mathcal{P}_{e'}$  は、次のいずれかの条件が成立した場合に、集合  $A$  へは追加されない。

- (1) 部分問題  $\mathcal{P}_{e'}$  の下界値が上界値以上である。

すなわち、次式が成立する。

$$U \leq F^-(\mathcal{P}_{e'}). \tag{3.38}$$

- (2) 部分問題  $\mathcal{P}_{e'}$  では、ある乗車仕事にとってかごが逆走している。

この状況の概念が図 3.5 に示される。

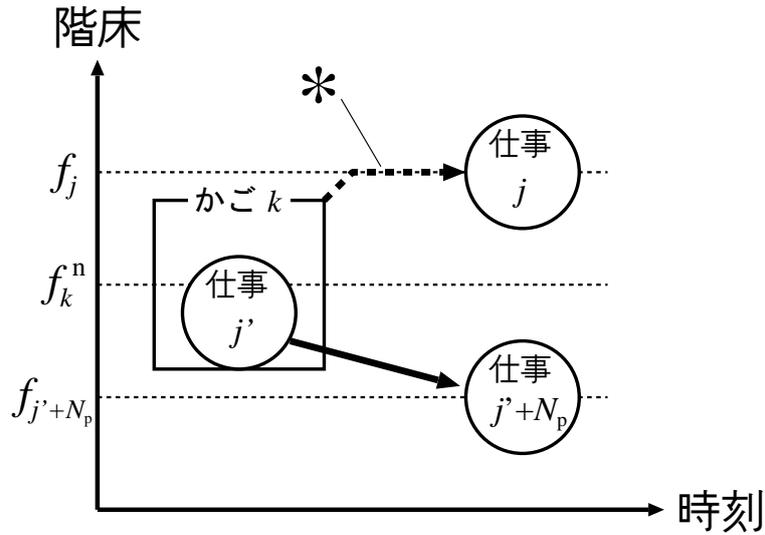


図 3.5: ある乗車仕事にとってかごが逆走している状況の概念

かご  $k$  が仕事  $j$  を処理するために\*で示される方向へ移動することは、乗車仕事  $j'$  にとっては逆走となる。

これは、次の式により与えられる集合  $\mathcal{J}_{k,j}^{b1}(\mathcal{P}_{e'})$  が空でないこととして判定される。

$$\mathcal{J}_{k,j}^{b1}(\mathcal{P}_{e'}) := \mathcal{J}_{k,j}^{\times}(\mathcal{P}_{e'}). \quad (3.39)$$

- (3) 部分問題  $\mathcal{P}_{e'}$  では、仕事  $j$  の処理完了時刻を遅らせることなく、ある降車仕事を処理することが可能である。

この状況の概念が図 3.6 に示される。

これは、次の式により与えられる集合  $\mathcal{J}_{k,j}^{b2}(\mathcal{P}_{e'})$  が空でないこととして判定される。

$$\mathcal{J}_{k,j}^{b2}(\mathcal{P}_{e'}) := \left\{ j' \in \{N_p + 1, \dots, N_j\} \mid j < j', c_{j'}^j = k, t_{j'}^{jc} > T, \right. \\ \left. \max \left( t_j^{jr}, \max \left( t_{j'}^{jr}, t_k^c + t^f \left( f_k^n, f_{j'}^j \right) \right) \right) + t^f \left( f_{j'}^j, f_j^j \right) \leq \max \left( t_j^{jr}, t_k^c + t^f \left( f_k^n, f_j^j \right) \right) \right\}. \quad (3.40)$$

- (4) 部分問題  $\mathcal{P}_{e'}$  では、仕事  $j$  の処理完了時刻を遅らせることなく、ある乗車仕事と降車仕事のペアを処理することが可能である。

この状況の概念が図 3.7 に示される。

この条件が成立することは、次の式により与えられる集合  $\mathcal{J}_{k,j}^{b3}(\mathcal{P}_{e'})$  が空でないこと

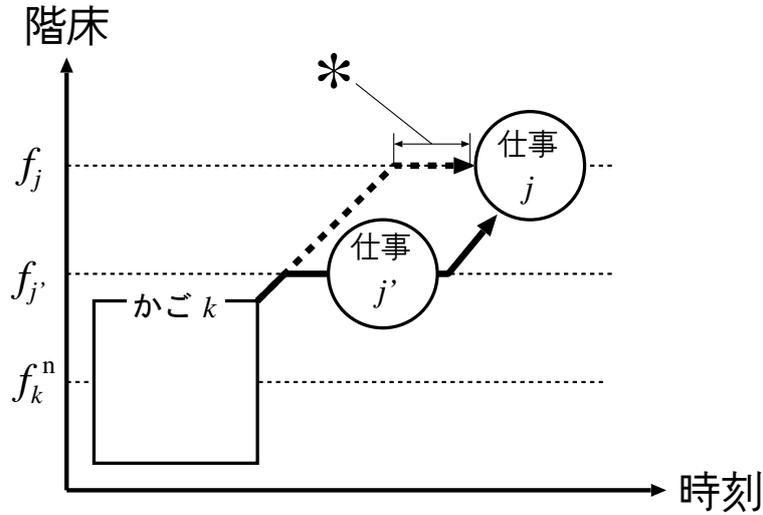


図 3.6: 他の仕事の処理完了時刻を遅らせることなく処理可能な仕事が存在する状況の概念  
 \*で示される仕事  $j$  の処理開始までの遊休時間が十分長ければ, 仕事  $j$  の処理完了時刻を遅らせることなく, 別の降車仕事  $j'$  を処理することが可能である.

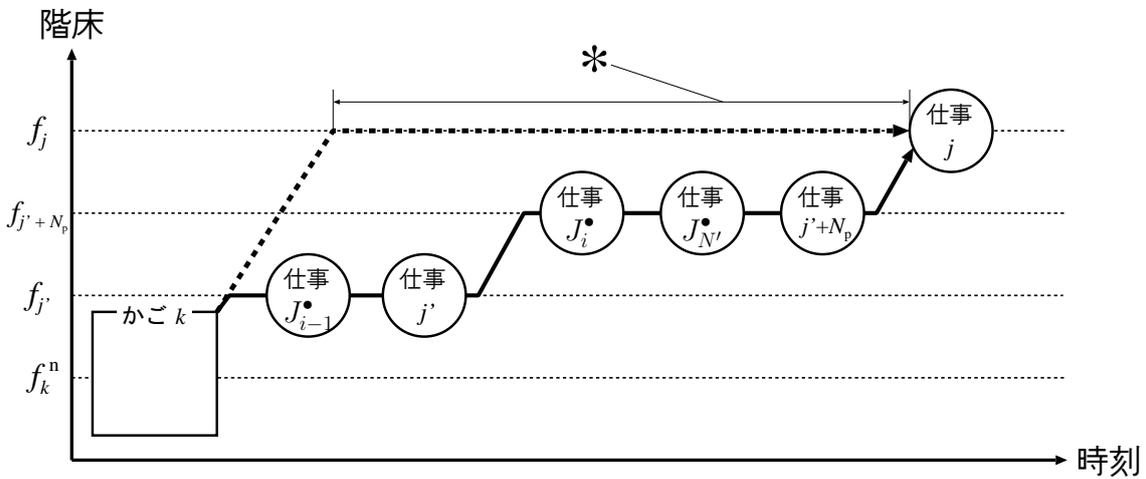


図 3.7: 他の仕事の処理完了時刻を遅らせることなく処理可能な仕事のペアが存在する状況の概念  
 \*で示される仕事  $j$  の処理開始までの遊休時間が十分長ければ, 仕事  $j$  の処理完了時刻を遅らせることなく, (i) 処理済みの適当な仕事  $J_i^*$  の前に乗車仕事  $j'$  を処理し, (ii) 最後の処理済みの仕事  $J_{N'}^*$  の後に, 降車仕事  $j' + N_p$  を処理することが可能である. ただし,  $N' := N_k^*(P_{e'})$ .

として判定される .

$$\begin{aligned}
 \mathcal{J}_{k,j}^{\text{b3}}(\mathcal{P}_{e'}) &:= \left\{ j' \in \{1, \dots, N_p\} \mid t_{j'}^{\text{jc}} > T, t_{j'+N_p}^{\text{jc}} > T, \right. \\
 &\quad \exists i \in \{1, \dots, N_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'})\} \left( \max_{i' \in \{i, \dots, N_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'})\}} l_{i'}^{\text{b}} < M_c, t'_{j',i,k} + t^f(f_{j'}^{\text{j}}, f_{J_i^{\bullet}}^{\text{j}}) \leq t_{J_i^{\bullet}}^{\text{jc}} \right), \\
 &\quad \left. \max \left( t_j^{\text{jr}}, t'_{j'+N_p,k} + t^f(f_{j'+N_p}^{\text{j}}, f_j^{\text{j}}) \right) \leq \max \left( t_j^{\text{jr}}, t_{J_{N_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'})}^{\bullet}}^{\text{jc}} + t^f \left( f_{J_{N_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'})}^{\bullet}}^{\text{j}}, f_j^{\text{j}} \right) \right) \right\}.
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

なお, 式 (3.41) では, 表記の容易のため, 次のように定義される記号が用いられている .

- $\mathcal{J}_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'}) := \{j' \in \{1, \dots, N_j\} \mid t_{j'}^{\text{jc}} \leq T, c_{j'} = k\}$ : 部分問題  $\mathcal{P}_{e'}$  において, かも  $k$  による処理が完了している仕事の集合 .
- $N_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'}) := |\mathcal{J}_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'})|$ : 集合  $\mathcal{J}_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'})$  の大きさ .
- $J_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'}) := \langle J_1^{\bullet}, \dots, J_{N_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'})}^{\bullet} \rangle$ : 集合  $\mathcal{J}_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'})$  の要素を,
  - まず, 処理完了時刻の非減少順に;
  - 次に, 処理完了時刻が同じ場合は, 降車仕事を先に;
 並び替えることで作成されるリスト .
- $l_i^{\text{b}} (i = 1, \dots, N_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'}))$ : 次のように逐次的に計算される, 仕事  $J_i^{\bullet}$  の処理完了時点におけるかも  $k$  の積載量 (乗客数) .

$$l_1^{\text{b}} := l_k^{\text{c}} + \begin{cases} 1 & \text{if } J_1^{\bullet} \leq N_p, \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (i = 1), \tag{3.42}$$

$$l_i^{\text{b}} := l_{i-1}^{\text{b}} + \begin{cases} 1 & \text{if } J_i^{\bullet} \leq N_p, \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (i > 1).$$

- $t'_{j',i,k} := \max \left( t_{j'}^{\text{jr}}, \tilde{t}_{i,k} + t^f(\tilde{f}_{i,k}, f_{j'}^{\text{j}}) \right) (i = 1, \dots, N_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'}))$ : 仕事  $J_i^{\bullet}$  の直前にかも  $k$  で処理された場合の仕事  $j'$  の処理完了時刻 . ここで,

$$\tilde{t}_{i,k} := \begin{cases} t_k^{\text{c}} & \text{if } i = 1, \\ t_{J_{i-1}^{\bullet}}^{\text{jc}} & \text{otherwise,} \end{cases} \tag{3.43}$$

$$\tilde{f}_{i,k} := \begin{cases} f_k^{\text{n}} & \text{if } i = 1, \\ f_{J_{i-1}^{\bullet}}^{\text{j}} & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{3.44}$$

- $t''_{j',k} := \max \left( t_{j'}^{\text{jr}}, t_{J_{N_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'})}^{\bullet}}^{\text{jc}} + t^f \left( f_{J_{N_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'})}^{\bullet}}^{\text{j}}, f_{j'}^{\text{j}} \right) \right)$ : 仕事  $J_{N_k^{\bullet}(\mathcal{P}_{e'})}^{\bullet}$  の直後にかも  $k$  で処理された場合の, 仕事  $j'$  の処理完了時刻 .

### 3.8 分枝限定法の計算手続き

例題  $e$  を対象とした分枝限定法の計算手続きは、次のようにまとめられる。

1° (初期設定)  $\mathcal{A} := \{\mathcal{P}_e^{(0)}\}$ ,  $U := \infty$  とする。

2° (部分問題の選択)  $\mathcal{A} = \emptyset$  ならば, 7° を実行する。

そうでなければ, 活性化部分問題の集合から下界値が最小であるものを選択し,  $\mathcal{P}$  とする。すなわち,

$$\mathcal{P} := \arg \min_{\mathcal{P}' \in \mathcal{A}} F^-(\mathcal{P}'). \quad (3.45)$$

続いて, 3° を実行する

3° (上界値の更新) 部分問題  $\mathcal{P}$  において全ての仕事の処理が完了しているならば, 上界値を更新する。

式 (3.23), (3.29) で計算される集合がどちらも空, すなわち,

$$\mathcal{J}^+(\mathcal{P}) = \emptyset, \mathcal{J}^-(\mathcal{P}) = \emptyset \quad (3.46)$$

であれば,

$$U := \min(U, F^-(\mathcal{P}_e)) = \min(U, F_e(\mathbf{y})). \quad (3.47)$$

ここで,  $\mathbf{y}$  は部分問題  $\mathcal{P}$  の情報から定まる, かご運行による処理状態である。この後, 6° を実行する。

式 (3.46) の条件が満たされていないならば, 4° を実行する。

4° (限定操作) 部分問題  $\mathcal{P}$  の下界値が上界値以上であれば, これを終端させる。

次の条件が成立していれば, 6° を実行する。

$$F^-(\mathcal{P}) \geq U. \quad (3.48)$$

成立していなければ, 5° を実行する。

5° (分枝操作) 部分問題  $\mathcal{P}$  のうち 1 つの仕事の処理を完了させた部分問題を, 3.7 節に示された分枝操作により生成し, それらの集合を  $\mathcal{A}'$  とおく。

$\mathcal{P}' \in \mathcal{A}'$  なる部分問題のうち終端条件を満たさないものを, 活性化部分問題の集合  $\mathcal{A}$  へ追加する。すなわち, 新たに処理される仕事を  $j$ , その処理かごを  $k$  としたとき, 次の条件:

$$F^-(\mathcal{P}') < U, \mathcal{J}_{k,j}^{b1}(\mathcal{P}') = \emptyset, \mathcal{J}_{k,j}^{b2}(\mathcal{P}') = \emptyset, \mathcal{J}_{k,j}^{b3}(\mathcal{P}') = \emptyset \quad (3.49)$$

が全て満たされる場合に,

$$\mathcal{A} := \mathcal{A} \cup \{\mathcal{P}'\} \quad (3.50)$$

とする。

この後, 6° を実行する。

表 3.1: 離散時間モデル上で分枝限定法を適用する問題のパラメータ設定

問題	$N_p$	$N_c$	$N_f$	$Z$	交通パターン	$\lambda$	$M_c$	$\Delta$	$T$
d1	20	1	15	2	inter-floor	1	12	12	256
d2	10	3							

6° (部分問題の終端) 活性化部分問題の集合から, 2° で選択された部分問題を取り除く. すなわち,

$$A := \mathcal{A} \setminus \{P\}. \quad (3.51)$$

この後, 2° を実行する.

7° (計算終了)  $U$  を例題  $e$  に対する最適なかご運行による目的関数値として, 手続きを終了する.

なお, 次の2点は実装上の技術的留意点であるが, 時間・空間計算量に大きな影響を与えるため, 特に記しておく.

- $A$  は, 単純な集合ではなく, 下界値の非減少順にリスト<sup>64)</sup>として実装する. これにより, 2° の計算時間が短くなる.
- 部分問題は, 例えばクラスのインスタンス<sup>65)</sup>などの複雑な型とはせず, 可能な限りプリミティブな型, 例えば範囲の上限が計画期間以上である最小の整数型の1次元配列などとして実装する. これにより,  $A$  の保持に消費されるメモリ量が小さくなる.

### 3.9 計算例および考察

#### 3.9.1 パラメータ設定

本節では, 1つのかごを備えたエレベータシステム, および複数のかごを備えたエレベータシステムを対象とした分枝限定法の計算例が示される. まずは, 離散時間モデル, すなわち階床間の移動時間が式 (3.1) で計算される場合の, 表 3.1 に示される2つの問題に対する計算結果が示される.

表 3.1 における客の到着間隔および長待ちとみなす閾値 ( $\Delta$ ) の値は, 離散化の単位時間が5秒という想定のもとで設定されたものである. これは, 式 (3.1) において, かごが階床間を移動するためには1単位時間がかかると想定されているが, これが現実の時間では5秒に相当するという見積もりによる. また, 表 3.1 の階床数・かご数は,

- 問題 d1: 最適なかご運行に対する SC の有効性を調べる;
- 問題 d2: 主に, 最適なかご運行に対する既存のかご運行計画手法の有効性を調べる;

表 3.2: 離散時間モデル上での分枝限定法の計算時間

問題	例題数	平均 [秒]	標準偏差
d1	50	51.1	56.1
d2	30	3,510	5,740

表 3.3: 離散時間モデル上の最適なかご運行の CDSC によるかご運行に対する有効性

問題	目的関数値比の平均	平均待ち時間比の平均	平均旅行時間比の平均	長待ち率の平均	
				分枝限定法	CDSC
d1	0.915	0.879	1.01	0.579	0.896
d2	0.723	0.187	0.982	0	0.759

ことを目的として設定されている。なお、交通流は、交通需要が中程度である執務時間帯に見られるものに相当する。同様の交通流下で有効にかごを運行させるための手法<sup>40)</sup>が提案されているが、本章では適用の容易のために、既存のかご運行計画手法として 2.3.1 節に示された CDSC が用いられる。

### 3.9.2 離散時間モデル上の最適なかご運行の計算と評価

3.9.1 節で示された問題 d1 の例題を 50 個、問題 d2 の例題を 30 個作成し、それぞれの例題へ分枝限定法を適用する。この計算は、CPU が Pentium IV 2.0 GHz、搭載メモリ量が 1 GByte である計算機上で行われ、表 3.2 に示される時間を要した。

表 3.2 より、例題ごとに計算時間のバラツキが大きく、またかご数が多いほど計算時間が長いことが見て取れる。

分枝限定法により求められた最適なかご運行の有効性を、その目的関数値、平均待ち時間、平均旅行時間、長待ち率の、CDSC により作成されたかご運行におけるそれらの値に対する比の、例題集合に渡る平均として計算した。この値が小さいほど、最適なかご運行は CDSC によるかご運行と比べて平均的に有効であるといえる。集計の結果が表 3.3 に示される。ここで、式 (2.16) に示された目的関数における重みは、待ち時間、旅行時間、長待ち率を同等に重要であり、かつ最大待ち時間は考慮しないとして、

$$w^w = 1, w^t = 1, w^l = 1, w^M = 0 \quad (3.52)$$

と設定されている。また、長待ちが発生せず無限大となってしまうことがあるため、長待ち率については比を計算せず、分枝限定法による平均と CDSC による平均が併記されている。

表 3.3 より、次が見て取れる。

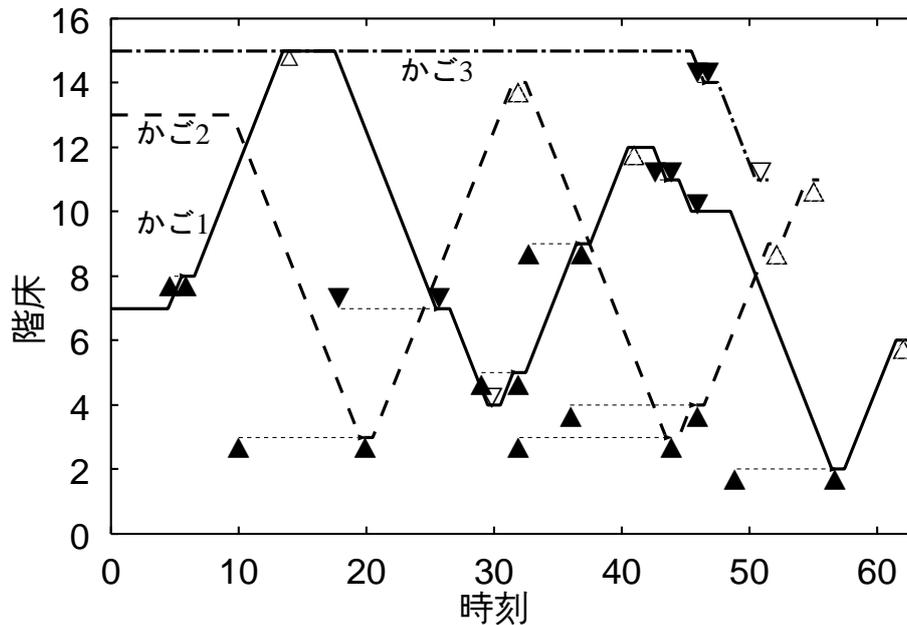


図 3.8: 問題 d2 のある例題に対する CDSC によるかご運行

かご 1 と 3 が、時刻 15 のあたりで 15 階に固まっている。

- SC によるかご運行の有効性は、最適なかご運行と比べて平均で 9.5%ほど劣っている。
- 最適なかご運行により、待ち時間を短くし長待ち率を改善することが可能である。この改善率は、かごが複数の場合特に大きい。
- かご数が 1 つの場合<sup>‡</sup>、最適なかご運行の方が旅行時間が長くなりうる。

これらより、次がいえると考えられる。

- SC は、少なくとも本節で考慮されている交通流下では、有効である。
- CDSC は、少なくとも本節で考慮されている交通流下では、あまり有効ではない。

後者の原因を調べるために、問題 d2 の 30 個の例題のうち平均待ち時間比が最小であった (最適なかご運行と CDSC によるかご運行との差が最大であった) 例題に注目した。この例題に対し CDSC および分枝限定法を適用することで得られたかご運行が、それぞれ図 3.8, 3.9 に示される。ただし、これらの図において、

- 実線、破線、一点鎖線は、それぞれかご 1、かご 2、かご 3 の軌跡;
- ▲, △ は、上方向の客の乗車および降車;
- ▼, ▽ は、下方向の客の乗車および降車;

を表している。

<sup>‡</sup>この場合の CDSC は、正確には SC である。

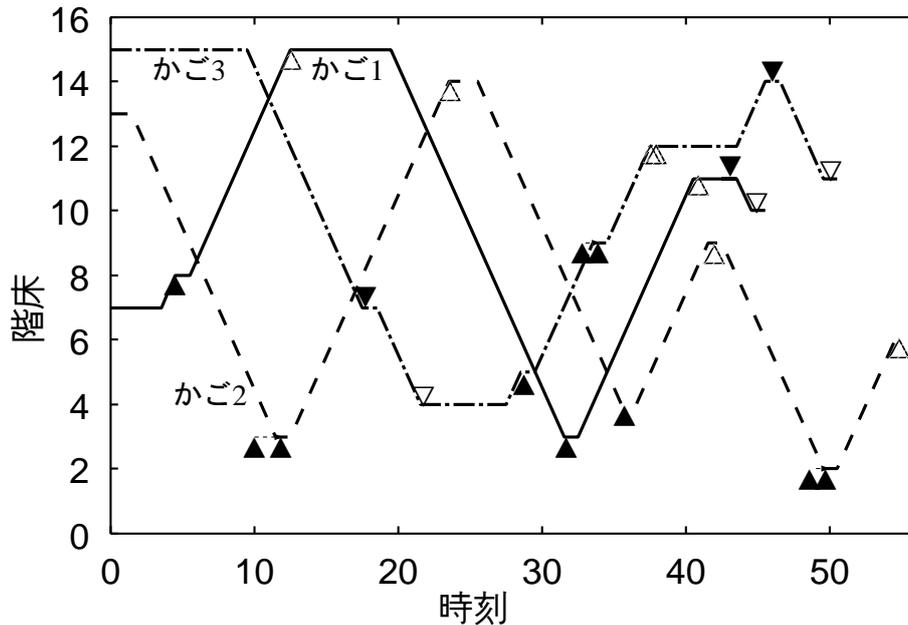


図 3.9: 問題 d2 のある例題に対する分枝限定法による最適なかご運行  
かごが固まることがあまりない。また、時刻 32 のあたりに 3 階へ到着する客のために、かご 1 が 15 階から前もって移動している。

図 3.8 と図 3.9 を比較することで、複数かごを備えたエレベータシステムでは CDSC が有効でない原因の 1 つとして、端に位置するかご (図 3.8 ではかご 3) が、ホール呼びの登録された階床へ移動する際に時間がかかるために客の輸送へ利用されず停止のまま残され、かつこれが長時間続くことを挙げることができる。この対策の 1 つとして、例えば、端に位置するかごへ別のかごが近付くとき、前者のかごが後者のかごと逆の方向へ、呼び発生の有無によらず移動・待機するというルールが考えられる。

### 3.9.3 連続時間モデル上の最適なかご運行の計算と評価

次に、連続時間モデル、すなわち式 (3.11) により階床間の移動時間が計算される場合の計算結果を示す。このモデルでは、パラメータは表 3.4 のように設定される。ここで、問題の規模が、表 3.1 のものと比べて小さい。これは、連続時間モデル上では分枝限定法の適用にかかる時間は離散時間モデルよりも全般に長いという状況のもと、分枝限定法の適用回数がある程度以上に保つためである。

表 3.4 に示された 2 つの問題に対し分枝限定法を適用することで得られた表 3.3 に対応する値が、表 3.5 に示される。

表 3.5 より、連続時間モデルでも離散時間モデルと同じ傾向が見て取れる。ただし、最適なかご運行と CDSC による運行との差は離散時間モデルよりも大きくなっている。特に、1

表 3.4: 連続時間モデル上で分枝限定法を適用する問題のパラメータ設定

問題	$N_p$	$N_c$	$N_f$	$Z$	交通パターン	$\lambda$	$M_c$	$\Delta$	$T$	$A^M$	$V^M$
c1	14	1	15	4	inter-floor	1	12	60	256	1	2
c2	8	3									

表 3.5: 連続時間モデル上で最適なかご運行の CDSC に対する有効性

問題	目的関数値比の平均	平均待ち時間比の平均	平均旅行時間比の平均	長待ち率の平均	
				分枝限定法	CDSC
c1	0.722	0.659	0.928	0.202	0.405
c2	0.357	0.110	0.923	0	0.158

つのかごだけが備えられたシステムを対象とした問題では、離散時間モデル上の最適なかご運行の旅行時間が平均的には CDSC よりも長くなっていることに対して、連続時間モデルの場合には、わずかながら短くなっている。この原因は、単純には、連続時間モデルの方が階床間の移動に長時間を要するためであると考えられる。

離散時間モデルと連続時間モデルで分枝限定法の計算時間に差をもたらす要因の1つとして、下界値が、前者では同じ整数値をとる場合が多いことに対して、後者ではそのようなことがほとんどないことが考えられる。この結果、前者ではたまたま早い段階で選択された部分問題から効率的なかご運行が生成され、上界値が低い値として更新されることにより、後続の多くの部分問題が限定されていると想像される。これに対して後者では、計算の遅い段階までそのような有効な上界値が求まっていないのではないかと考えられる。この仮説の調査は、今後の課題である。

### 3.10 結言

本章では、計画期間に到着する客に関する情報が全て既知であるという前提のもと、エレベータ運行計画問題が静的最適化問題としてモデル化された。このモデルでは、客の処理は2つの仕事、乗車に対応する乗車仕事および降車に対応する降車仕事として表される。決定変数は、機械と捉えられるかごの乗車仕事への割当てと、各かごによる仕事の処理順序として考慮される。その上で、現実のエレベータシステムと最適化モデルとの差に強い影響を持つ時刻モデルの違い（離散時間モデルであるか、連続時間モデルであるか）を、かごの階床間の移動にかかる時間の計算式へと集約するモデルが示された。

次に、その最適化モデルに基づいた分枝限定法の一構成が示された。この構成では、かごがある仕事を処理可能となるまでの時刻およびかごの状態を、かごと個別に考慮できるように部分問題が構成される。ある部分問題からの分枝は、ある仕事をあるかごで処理すると

して決定変数の一部を固定することで行われる。部分問題の終端は、下界値が上界値以上であると判定されることによる一般の限定操作に加え、ある部分問題からは最適解が求められないことを判定する3つの判定式を用いた限定操作により行われる。

客が中程度の頻度で inter-floor パターンに従って到着するという問題に対して、かごが1つだけである問題、かごが3つである問題の2種類が考慮され、それらの例題に対して分枝限定法および既存のかご運行計画手法 (CDSC) が適用された。この結果作成されたかご運行の目的関数値や平均待ち時間から、本章で対象とされる交通流の上では、SC は有効である、CDSC はあまり有効でないという傾向を示す結果が得られた。この傾向は、離散時間モデルおよび連続時間モデルの両方について見られ、連続時間モデルの方でより強く見られることが示された。また、CDSC が有効でない1つの例題に注目して、CDSC によるかご運行と分枝限定法による最適なかご運行を比較することで、CDSC の有効性を向上させうる1つの案が示された。

今後の課題として、部分問題のより精確な下界値を与えること、限定条件の追加による分枝限定法で求解可能な問題の規模の向上、混合整数計画問題としての定式化と市販の数理計画パッケージの適用による求解、3.9.2 節で述べられたようなアドホックな規則が追加されたかご運行ルールの評価や、分枝限定手続きの進行過程の詳細な分析が挙げられる。



---

## 第 4 章

### クラス II: 交通流が確率的かつ既知である状況におけるエレベータ運行計画

#### 4.1 緒言

本章では、エレベータシステムの交通流が確率的かつ既知である状況におけるエレベータ運行計画問題 (2.4.3 節におけるクラス II) が対象とされる。この状況では、計画期間に到着する客の到着間隔および出発階床、目的階床がそれぞれ何らかの確率分布に従っており、その分布に関する情報を利用することが可能である。このような前提が暗黙のうちに課されている研究は多いが、確率分布として明示的に考慮されている研究は少ない。その理由の 1 つとして、現実のエレベータシステムではそのような確率分布の推定が難しいことが挙げられる。しかし、システムの振舞いの背後に何らかの確率分布を仮定し、その特徴を利用することで有用な結果を導くことも可能である<sup>66)</sup> ことから、そのような理由は本質的ではないと考えられる。より本質的な理由として、客の交通流が従う確率分布と、エレベータシステムの状態遷移が従う確率分布との関係が単純ではなく、そのモデル化が困難であることが挙げられる。これは、交通流の従う確率分布が判明していても、エレベータシステムの状態遷移確率を計算することは困難である、と換言できる。さらにその困難の原因は、かごの動きがヒューリスティクスによって決定される、ある状態から遷移しうる状態が無数にあるといった、システムの状態遷移の複雑さにあるといえる。しかしながら、多くの研究においてエレベータシステムの精緻なシミュレータが作製・利用されている現況を鑑みるに、システムの状態遷移は、人間にとって網羅できないほど複雑であっても、原理的には計算できるはずである。

以上の背景のもと、本章では、エレベータシステムが確率的離散事象システムとして捉えられ、状態、制御入力、状況入力、そして状態遷移関数を要素としてモデル化される。ここで、状況入力は、客による操作がエレベータシステムへ与える、必ずしも計測可能ではない影響をモデル化したものである。このとき、交通流の従う確率分布が既知であるとは、状況入力の生起確率分布が既知であることと同義である。本章における確率的離散事象システムのモデルでは、エレベータシステムがある状態からある状態へ遷移する確率は、そのような

遷移をもたらす状況入力の生起確率の総和として定式化することが可能である。この式といくつかの近似のもとで、エレベータ運行計画問題はマルコフ決定過程としてモデル化され、この問題に対する一般的解法である動的計画法の代表的な手法である報酬反復法<sup>6)</sup>の構成が示される。その適用により、小規模なエレベータシステムに対しては最適なかご運行計画手法を求めることができる。また、状態遷移確率の計算式に見られる特徴を利用することで、エレベータシステムの状態遷移モデルの粗視化が可能となり、その上で報酬反復法を適用する手法(以降、DPRM: Dynamic Programming on Reduced Models)が提案される。計算例では、それら2つの動的計画法により求められるかご運行計画手法が、既存手法よりも統計的有意に有効であると考えられる結果が示される。続いて、DPRMを用いることで、報酬反復法の適用により求められるかご運行計画手法と比べてあまり有効性の劣らないかご運行計画手法を、より短い計算時間で求められうることが示される。

## 4.2 前提条件

本章における前提は、3.2節で示された条件と同じであるものが多いため、異なる点を列挙するにとどめる。

- (1) 時刻が等間隔に分割することで離散化され、計画期間が単位時間の集まりとみなされる。
- (2) 全ての事象が離散時刻に同期して生じる。
- (3) 計画期間に交通流が従う確率分布が既知である。  
これは、3.2節における前提(1)をより現実的としたものである。
- (4) かごの加速度、速度、扉開放率は考慮されない。
- (5) かごの積載量を考慮しない。  
これは、3.2節における前提(5)を、さらに緩めたものである。
- (6) かごは、上昇中、停止中、降下中という3つの状態をとり、客は停止中のかごにだけ乗降することが可能である。
- (7) 上昇(下降)中のかごは、方向転換の前に一旦停止する。
- (8) かごの扉は即時に開放され、客は即時に乗降車する。続いて、客による割込みがない限り、ドアは $T^c$ 単位時間後に閉鎖される。
- (9) かごの垂直方向の位置が等間隔に離散化され、かごの位置の定義域が単位距離の集まりとみなされる。
- (10) かごは1単位距離を移動するために、1単位時間を要する。

- (11) 階床間の距離  $Z$  は正整数をとる．また，階床  $f$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ) の位置  $Z_f$  は，次のように与えられる．

$$Z_f = Zf. \quad (4.1)$$

- (12) 階床間の移動に必要な時間として，移動にかかるものだけが考慮され，かごの加減速や扉の開閉にかかる時間に相当するものは考慮されない．
- (13) 客は利用可能なかごが複数同時に到着した場合，任意のかごを選択・乗車する．これは，3.2 節における前提 (6) の削除に相当する．
- (14) 決定変数は，ホール呼びへのかご割当てのみであり，かごの動きは SC により決定される．
- (15) ホール呼びの期待待ち時間の概算値が既知である．  
ホール呼びの期待待ち時間は，かご運行計画手法を固定しなければ求めることはできないが，その概算値であれば，CDSC などの既存のかご運行計画手法を用いることで仮に計算可能であると考えられる\*．

### 4.3 エレベータシステムの確率的離散事象システムとしてのモデル化

エレベータシステムは，次の 2 つの意味で離散事象システムであるといえる．

- (1) 状態の計測および制御にデジタルコンピュータが用いられており，計測や制御が行われる時刻が不連続である．
- (2) ホール呼びボタンやかご呼びボタンという，ノミナルで中間値の存在しない状態をとる要素の考慮が重要である．

なお，本章では，特に注意のない限り，時刻とは離散時刻を表すものとする．離散化幅は，呼びの検知や案内灯の点消灯などであれば 0.1 秒，エレベータシステムの制御であれば 0.01 秒で十分であるとされている<sup>9)</sup>．

多くの離散システムはマルコフ性を有し，その時刻  $t+1$  における状態は，時刻  $t$  における，

- システムの状態;
- システムへ与えられた制御;
- システムが受けた外乱;

から一意に決定されると考えることができる．もし時刻  $t'$  ( $t' < t$ ) におけるシステムの状態にも依存するなら，それらを含めて状態を定義しなおすことで，直前の時刻にだけ依存するものとして同様にモデル化できる<sup>6)</sup>．本章では，システムが処理すべき仕事に相当する客

\*この前提は，エレベータシステムの状態を，ある時点におけるホール呼びの待ち時間を含むものとして定義し，後述の状況入力の生起確率を状態に依存するものとして定式化することで，取り除くことができる．

のプロファイル (到着時刻, 出発階床, 目的階床) の生起が確率的である点を踏まえて, 前述した3つの要素を, それぞれ

- 時刻  $t$  における状態  $x(t) \in \mathcal{X}$ ;
- 時刻  $t$  における制御入力  $u(t) \in \mathcal{U}$ ;
- 時刻  $t$  における状況入力  $w(t) \in \mathcal{W}$ ;

と呼ぶことにする. ここで,  $\mathcal{X}$ ,  $\mathcal{U}$ ,  $\mathcal{W}$  は, それぞれ状態空間, 制御入力空間, 状況入力空間である. ただし, 状況入力は, 例えばホール呼びの背後にいる客数が不明であるように, 必ずしもシステムから計測できるとは限らない. また,  $x(t)$  の具体的構成は, 離散化幅を十分に小さくし, 計測可能な情報を全て含めることで, 式 (2.14) に示されたものとなるが, 4.2 節に示された前提のもとで問題の取扱いを容易とするために, 本章では後述の式 (4.15) に示されるように構成される.

前述の3つの要素に基づいて, エレベータシステムの状態遷移関数  $f$  が,

$$f: \mathcal{X} \times \mathcal{U} \times \mathcal{W} \mapsto \mathcal{X} \quad (4.2)$$

として与えられていれば, 時刻  $t$  の状態, 制御入力, 状況入力から, 次のように時刻  $t+1$  の状態を計算することが可能である.

$$x(t+1) = f(x(t), u(t), w(t)). \quad (4.3)$$

2.1 節で示されたエレベータシステムにおけるコントローラは, システムの安全性を損なわないことが保証された何らかの規定ルールに従い, システムの状態に応じた制御入力を自動的に計算しシステムへ与えるものであると考えることができる. この考えの上で式 (4.3) の関係を模式的に表すと, 図 4.1 のようになる.

ところで, 本章では, 4.2 節で示されたように, エレベータシステムの制御可能な情報はホール呼びへのかご割当てとされている. 2.1 節で示されたエレベータシステムにおけるスケジューラが, この情報の変更を担うものと考えることができる. かごの上下動は, スケジューラにより変更されたシステムの状態に基づき, コントローラとして実装された SC により計算される. このような間接制御を表すために, 時刻  $t$  において新たに登録されたホール呼びに対するかご割当てを決定と呼び,  $a(t) \in \mathcal{A}$  と表す. ここで,  $\mathcal{A}$  は決定空間である. 状態  $x$  において決定  $a$  を選択することによる状態の変更を, 次の関数  $R^a$  として表す.

$$R^a: \mathcal{X} \times \mathcal{A} \mapsto \mathcal{X}. \quad (4.4)$$

このとき, 状態  $x$  において決定  $a$  を選択することで最終的にコントローラから出力される制御入力  $u$  は, 次のように計算される.

$$u = R^{\text{SC}}(R^a(x, a)). \quad (4.5)$$

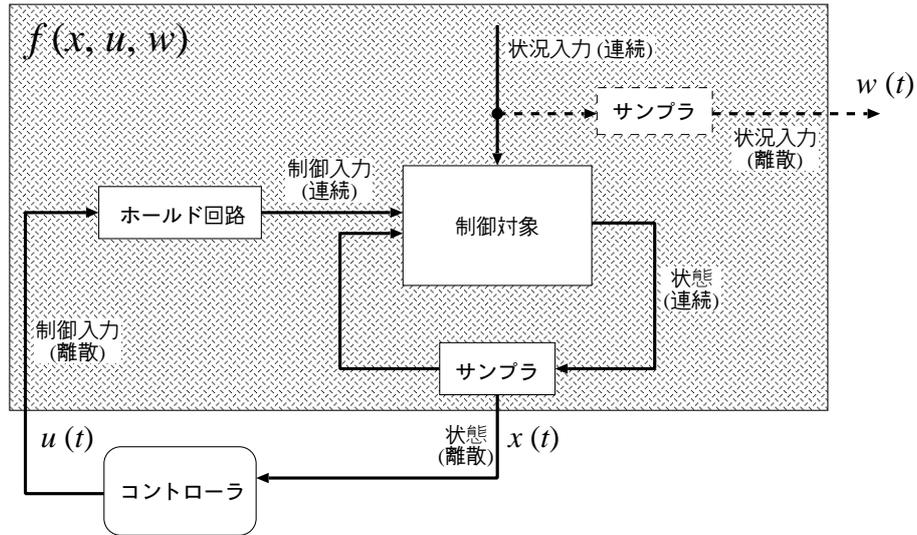


図 4.1: 確率的離散事象システムの模式

右上の状況入力のサンプリングを表す部位において破線が用いられていることは、状況入力に一般には計測できないことを表している。

これらの関数を含めた状態遷移の表記を容易とするために、関数  $R^a$ ,  $R^{SC}$  および状態遷移関数  $f$  を内包する関数  $g: \mathcal{X} \times \mathcal{A} \times \mathcal{W} \mapsto \mathcal{X}$  を、次のように定義する。

$$g(x, a, w) := f(R^a(x, a), R^{SC}(R^a(x, a)), w). \quad (4.6)$$

式 (4.6) の関係を図 4.1 に基づいて模式的に表すと、図 4.2 のようになる。

## 4.4 記号の定義

4.2 節に示された前提のもとでエレベータ運行計画問題をモデル化するために、次の記号を定義する。なお、これらのうちいくつかは、4.3 節で示された記号の再掲となっている。

- 交通流に関する記号。

- $M_{f_1, f_2}$  ( $f_1, f_2 = 0, \dots, N_f + 1$ ): ある客の出発階床が  $f_1$ 、目的階床が  $f_2$  である確率。ただし、 $M_{0, f} = M_{N_f + 1, f} = M_{f, 0} = M_{f, N_f + 1} = M_{f, f} = 0$  ( $f = 1, \dots, N_f$ )。
- $M_f$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): ある客の出発階床が  $f$  である確率。次のように計算される。

$$M_f = \sum_{f'=1}^{N_f} M_{f, f'}. \quad (4.7)$$

- $M_f^u$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 到着した階床の旅行方向が上である確率。次のように計算

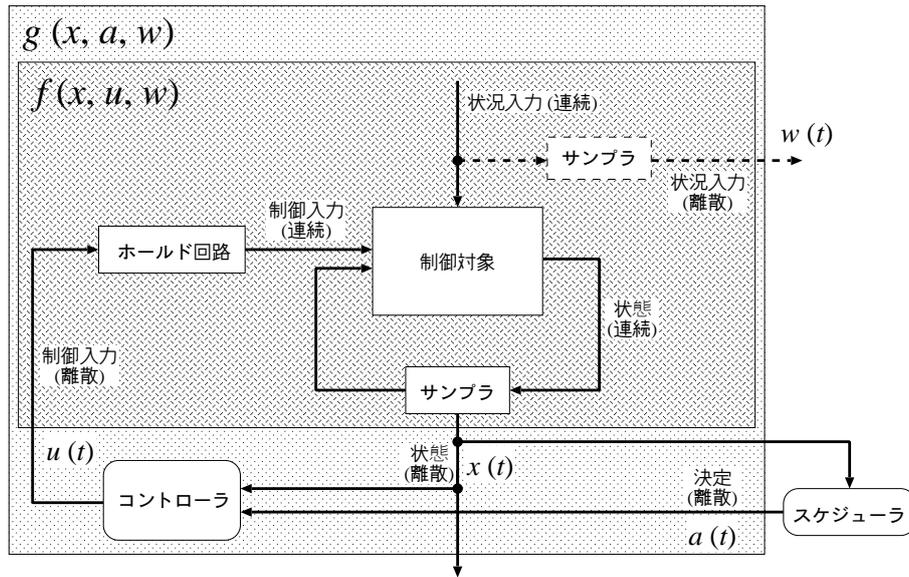


図 4.2: 間接制御を受ける確率的離散事象システムの模式

スケジューラが新たに導入されている．これが与える決定およびエレベータシステムの状態に基づいてコントローラは制御入力を計算し，これによりエレベータシステムは制御される．

される．

$$M_f^u = \sum_{f'=f+1}^{N_f+1} M_{f,f'} \quad (4.8)$$

- $M_f^d$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 到着した階床の旅行方向が下である確率．次のように計算される．

$$M_f^d = \sum_{f'=0}^{f-1} M_{f,f'} \quad (4.9)$$

- $T_{f_1, f_2}^i(x)$  ( $f_1, f_2 = 1, \dots, N_f$ ): 状態  $x$  にて，階床  $f_1$  から階床  $f_2$  へ向けて出発するかごが，階床  $f_1$  へ到着する時間間隔の期待値．
- $T_{f_1, f_2}^w(x, t)$  ( $f_1, f_2 = 1, \dots, N_f$ ): 時刻  $t$  に状態  $x$  で，出発階床を  $f_1$ ，目的階床を  $f_2$  とする客により登録されたホール呼びのうち，先頭のホール呼びの期待待ち時間．2.2.3 節の記号を用いて，次のように定義される．

$$T_{f_1, f_2}^w(x, t) := \begin{cases} T_{q_{f_1}}^q(t) & \text{if } f_1 < f_2, \\ T_{q_{f_1}}^d(t) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4.10)$$

- $T_f^u$  ( $f = 1, \dots, N_f - 1$ ): 階床  $f$  における上へのホール呼びの期待待ち時間の概算値．

–  $T_f^d$  ( $f = 2, \dots, N_f$ ): 階床  $f$  における下へのホール呼びの期待待ち時間の概算値 .

• エレベータシステムの状態に関する記号 .

–  $x(t) = \boldsymbol{x}(t) \in \mathcal{X}$ : エレベータシステムの時刻  $t$  における状態 . ここで ,  $\mathcal{X}$  は状態空間である .

– 呼びに関する記号 .

\*  $q_f^u(t) \in \{0, 1\}$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 階床  $f$  にて上方向のホール呼びが登録されているか .

\*  $q_f^d(t) \in \{0, 1\}$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 階床  $f$  にて下方向のホール呼びが登録されているか .

\*  $q_{k,f}^c(t) \in \{0, 1\}$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ;  $f = 0, \dots, N_f + 1$ ): かご  $k$  において階床  $f$  へのかご呼びが登録されているか . ただし ,

$$q_{k,0}^c(t) = q_{k,N_f+1}^c(t) = 0.$$

\*  $a_{k,f}^u(t) \in \{0, 1\}$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ;  $f = 1, \dots, N_f$ ): かご  $k$  が階床  $f$  における上方向へのホール呼びへ割り当てられているか .

\*  $a_{k,f}^d(t) \in \{0, 1\}$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ;  $f = 1, \dots, N_f$ ): かご  $k$  が階床  $f$  における下方向へのホール呼びへ割り当てられているか .

– かご  $k$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ) に関する記号 .

\*  $b_k^u(t) \in \{0, 1\}$ : 旅行方向が上である客がかご  $k$  へ乗車中であると推定されるか .

\*  $b_k^d(t) \in \{0, 1\}$ : 旅行方向が下である客がかご  $k$  へ乗車中であると推定されるか .

\*  $z_{k,z}(t) \in \{0, 1\}$  ( $z = Z - 1, \dots, ZN_f + 1$ ): かご  $k$  が位置  $z$  にあるか . ただし ,

$$z_{k,Z-1}(t) = z_{k,ZN_f+1}(t) = 0,$$

$$\sum_{z=Z-1}^{ZN_f+1} z_{k,z}(t) = 1.$$

\*  $v_k^u(t) \in \{0, 1\}$ : かご  $k$  が上昇中であるか .

\*  $v_k^s(t) \in \{0, 1\}$ : かご  $k$  が停止中であるか .

\*  $v_k^d(t) \in \{0, 1\}$ : かご  $k$  が下降中であるか . なお , これら 3 つの記号のうち , 常に 1 つだけが 1 をとる . すなわち ,

$$v_k^u(t) + v_k^s(t) + v_k^d(t) = 1. \quad (4.11)$$

\*  $d_k^u(t) \in \{0, 1\}$ : かご  $k$  の直前の移動方向が上であるか .

- \*  $d_k^d(t) \in \{0, 1\}$ : 客  $k$  の直前の移動方向が下であるか。なお、これら 2 つの記号のうち、常に 1 つだけが 1 をとる。すなわち、

$$d_k^u(t) + d_k^d(t) = 1. \quad (4.12)$$

- \*  $x_k^c(t)$ : 次のように定義される、客  $k$  の状態。

$$x_k^c(t) := \left\langle b_k^u(t), b_k^d(t), v_k^u(t), v_k^s(t), v_k^d(t), d_k^u(t), d_k^d(t), z_{k,Z}(t), \dots, z_{k,ZN_f}(t) \right\rangle. \quad (4.13)$$

–  $N_x$ : 状態を構成する変数 (状態変数) の数。

- 客  $k$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ) へ与える指令 (制御入力) に関する記号。

–  $u(t) = \mathbf{u}(t) \in \mathcal{U}$ : 時刻  $t$  にシステムへ与える制御入力。ここで、 $\mathcal{U}$  は制御入力空間である。

–  $u_k^u(t) \in \{0, 1\}$ : 時刻  $t$  にかご  $k$  へ、上昇指令が与えられるか。

–  $u_k^s(t) \in \{0, 1\}$ : 時刻  $t$  にかご  $k$  へ、停止指令が与えられるか。

–  $u_k^d(t) \in \{0, 1\}$ : 時刻  $t$  にかご  $k$  へ、下降指令が与えられるか。なお、これらの 3 つの記号のうち、常に 1 つだけが 1 をとる。すなわち、

$$u_k^u(t) + u_k^s(t) + u_k^d(t) = 1. \quad (4.14)$$

–  $a(t) = \mathbf{a}(t) \in \mathcal{A}$ : 時刻  $t$  にスケジューラが選択する決定。ただし、 $\mathcal{A}$  は決定空間である。

ここで、決定は、ホール呼びへのかご割当て状況を、割当てが増えるように変更する 1 つの組合せである。例えば、1 階へ旅行方向が上である客が到着し、新たにホール呼びを登録したとする。このとき、スケジューラは  $N_c$  個の決定を選択することが可能である。もし複数の、例えば  $n$  個のホール呼びが同時に登録された場合は、スケジューラが選択しうる決定の数は  $(N_c)^n$  となる。

- エレベータシステムの振舞いを確率的とする要因 (状況入力) に関する記号。

–  $w(t) = \mathbf{w}(t) \in \mathcal{W}$ : 時刻  $t$  にシステムが受ける状況入力。ここで、 $\mathcal{W}$  は状況入力空間である。

–  $N_w := |\mathcal{W}|$ : 状況入力空間の大きさ。

–  $P(w|x)$ : 状態  $x$  のもとで状況入力  $w$  が生起する確率。本章における交通流が既知であるという前提から、これを計算することが可能である。

–  $T^c$ : かがが扉を閉鎖するまでの時間。本章では、 $T^c = 1$  とする。

- $w_f^u(t) \in \{0, 1\}$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 階床  $f$  にて旅行方向が上である客がホール呼びボタンを押下したか。ただし,

$$w_{N_f}^u(t) = 0.$$

- $w_f^d(t) \in \{0, 1\}$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 階床  $f$  にて旅行方向が下である客がホール呼びボタンを押下したか。ただし,

$$w_1^d(t) = 0.$$

- $w_f^{ru}(f) \in \{0, 1\}$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 階床  $f$  にて旅行方向が上である客がホール呼びボタンを再押下したか。

ここで、ホール呼びボタンの再押下は、

- \* 到着したかこの積載量が一杯である;
- \* 旅行方向の異なる複数の客が待っていて、乗客のいないかごへ一方が先に乗車した;

といった場合に生じる。このような事象は、新たに到着した客による新規ホール呼びの登録という事象の生起確率分布よりも複雑な確率分布に従って生起すると考えられるため、別に考慮されている。

- $w_f^{rd}(t) \in \{0, 1\}$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 階床  $f$  にて旅行方向が下である客がホール呼びボタンを再押下したか。

- $w_{k,f}^{au}(t) \in \{0, 1\}$ : 階床  $f$  にて旅行方向が上である客がかご  $k$  へ乗車中であるか。

- $w_{k,f}^{ad}(t) \in \{0, 1\}$ : 階床  $f$  にて旅行方向が下である客がかご  $k$  へ乗車中であるか。

- $w_{k,f_1,f_2}^c(t)$ : 出発階床が  $f_1$ 、目的階床が  $f_2$  である客が、時刻  $t$  にかご  $k$  へ乗車したか。

- システムの状態遷移に関する記号。

- $f(x, u, w)$ : 状態  $x$  にあり状況入力  $w$  を受けているシステムへ制御入力  $u$  を与えたとき、次の時刻にシステムが遷移する状態を表す関数。

- $f_i(x, u, w) \in \{0, 1\}$  ( $i = 1, \dots, N_x$ ): 状態  $x$  にあり状況入力  $w$  を受けているシステムへ制御入力  $u$  を与えた場合の、状態変数  $i$  の値の変化を表す関数。

- $g(x, a, w)$ : 状態  $x$  にあり状況入力  $w$  を受けているシステムへ決定  $a$  を与えたとき、次の時刻にシステムが遷移する状態を表す関数。

- $g_i(x, a, w) \in \{0, 1\}$  ( $i = 1, \dots, N_x$ ): 状態  $x$  にあり状況入力  $w$  を受けているシステムへ決定  $a$  を与えた場合の、状態変数  $i$  の値の変化を表す関数。

- $p_{x,x'}(a)$ : 状態  $x$  にて決定  $a$  を選択した場合に、システムが状態  $x'$  へと遷移する確率。

• 動的計画法の構成に関する記号 .

- $C(x)$ : 状態  $x$  の即時コスト . 本章では , 後述のように , 状態  $x$  において登録されているホール呼び数として定義される .
- $\alpha$  ( $0 \leq \alpha < 1$ ): 割引率 .
- $J(x)$ : 状態  $x$  から無限期間に渡って最適な決定を選択しつづけた場合の , 割り引かれた即時コストの累積和の期待値 .  $J(\cdot)$  は最適なコスト関数と呼ばれる .
- $\mathcal{A}_x$ : 状態  $x$  にて選択可能な決定の集合 .
- $\mathcal{S}_x$ : 状態  $x$  から遷移しうる状態の集合 .
- $\tilde{\mathcal{W}}$ : 縮約された状況入力空間 . この具体は , 4.9 節に後述される .
- $N_{\tilde{\mathcal{W}}}$ : 縮約された状況入力空間の大きさ .
- $\theta$ : 状況入力の縮約度 . この具体は , 4.9 節に後述される .
- $\tilde{p}_{x,x'}(a)$ : 縮約された状態遷移モデルの上で , 状態  $x$  にて決定  $a$  を選択した場合にシステムが状態  $x'$  へと遷移する確率 . この具体は , 4.9 節に後述される .
- $\tilde{\mathcal{S}}_x$ : 縮約された状態遷移モデルの上での , 状態  $x$  から遷移しうる状態の集合 . この具体は , 4.9 節に後述される .
- $\tilde{J}(x)$ : 状態  $x$  から無限期間に渡って , 縮約された状態遷移モデル上で最適な決定を選択しつづけた場合の , 割り引かれた即時コストの累積和の期待値 . 本章では ,  $\tilde{J}(\cdot)$  は準最適なコスト関数と呼ばれる .
- $\bar{C}$ : 即時コストの上界 .
- $\bar{J}$ : コスト関数の上界 .

これらの記号を用いて , 時刻  $t$  におけるエレベータシステムの状態  $x(t)$  は次のように構成される .

$$x(t) = \mathbf{x}(t) := \left\langle a_{k,1}^u(t), \dots, a_{k,N_f-1}^u(t), a_{k,2}^d(t), \dots, a_{k,N_f}^d(t), \right. \\ \left. q_1^u(t), \dots, q_{N_f-1}^u(t), q_2^d(t), \dots, q_{N_f}^d(t), \mathbf{x}_1^c(t), \dots, \mathbf{x}_{N_c}^c(t) \right\rangle. \quad (4.15)$$

従って , 状態変数の数は次のようになる .

$$N_x = 2(N_f - 1) + ((3 + Z)N_f + 4 - Z)N_c. \quad (4.16)$$

時刻  $t$  にエレベータシステムへ与える制御入力  $\mathbf{u}(t)$  は , 次のように構成される .

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t) := \left\langle u_1^u(t), u_1^s(t), u_1^d(t), \dots, u_{N_c}^u(t), u_{N_c}^s(t), u_{N_c}^d(t) \right\rangle. \quad (4.17)$$

時刻  $t$  にエレベータシステムが受ける状況入力  $w(t)$  は、次のように構成される。

$$w(t) = \mathbf{w}(t) := \left\langle w_1^u(t), \dots, w_{N_f-1}^u(t), w_2^d(t), \dots, w_{N_f}^d(t), \right. \\ \left. w_{1,1,2}^c(t), \dots, w_{1,1,N_f}^c(t), w_{2,1,2}^c(t), \dots, w_{N_c,1,2}^c(t), \dots, w_{N_c,N_f,N_f-1}^c(t) \right\rangle. \quad (4.18)$$

ここで、いくつかの要素は、次の理由から状況入力を構成するものとはされていない。

- $w_f^{ru}(f)$ ,  $w_f^{rd}(t)$ : 本章ではかご呼びの積載量が考慮されておらず、客の乗りあぶれがほとんど生じないため、これらはほぼ常に 0 であることから。
- $w_{k,f}^{au}(t)$ ,  $w_{k,f}^{ad}(t)$ : 他の要素から、それぞれ次の式 (4.19), (4.20) により計算可能であると考えられることから。

$$w_{k,f}^{au}(t) = z_{k,Zf}(t) v_k^s(t) \left( 1 - (1 - q_f^u(t)) (1 - w_f^u(t)) (1 - w_k^{ru}(k)) \right) \\ \left( 1 - (1 - z_{k,Z}(t)) \left( 1 - (1 - c_k^{bd}(t)) d_k^u(t) \right) \right). \quad (4.19)$$

$$w_{k,f}^{ad}(t) = z_{k,Zf}(t) v_k^s(t) \left( 1 - (1 - q_f^d(t)) (1 - w_f^d(t)) (1 - w_k^{rd}(t)) \right) \\ \left( 1 - (1 - z_{k,ZN_f}(t)) \left( 1 - (1 - c_k^{bu}(t)) d_k^d(t) \right) \right). \quad (4.20)$$

ここで、 $c_k^{bu}(t)$ ,  $c_k^{bd}(t)$  は、それぞれ後述の式 (4.33), (4.34) により計算される。

## 4.5 エレベータ運行計画問題のマルコフ決定過程としてのモデル化

本章では、問題の取扱いを容易とするために、客の平均待ち時間、すなわち、式 (2.16) に示された関数における重みを、

$$w^w = 1, w^t = 0, w^l = 0, w^M = 0$$

と設定した関数が、目的関数とされる。

2.2.1 節で示された本論文全体に渡る問題設定、および 4.3 節で示された確率的離散事象システムとしてのモデル化より、本章においてエレベータ運行計画問題は、客の平均待ち時間の期待値を最小化するようなホール呼びへのかご割当てを求める多段決定問題の 1 種であるといえる。エレベータシステムの状態が  $x$  であるときにホールで待っている客数が、 $n^p(x)$  として計測可能であると仮定する。このとき、計画期間  $T$  に渡る状態の系列  $x(1), \dots, x(T)$  として得られたかご運行により移動した客の平均待ち時間は、次のように表される。

$$\frac{\sum_{t=1}^T n^p(x(t))}{N_p}. \quad (4.21)$$

しかしながら, 2.2.2 節の前提条件より, ホールで待っている客数が計測可能であるという仮定は成立しえない. これに代わる指標として, ホール呼びの客に渡る平均待ち時間が考えられる. これは, 状態  $x$  において登録されているホール呼び数を  $C(x)$  とすれば, 次のように与えられる.

$$\frac{\sum_{t=1}^T C(x(t))}{N_p}. \quad (4.22)$$

定義より, 次の関係:

$$C(x) \leq n^p(x) \quad (\forall x \in \mathcal{X}) \quad (4.23)$$

が成立するため, 式 (4.22) は式 (4.21) の下界を与える. すなわち,

$$\frac{\sum_{t=1}^T C(x(t))}{N_p} \leq \frac{\sum_{t=1}^T n^p(x(t))}{N_p}. \quad (4.24)$$

もし任意の時刻・ホールにおいて, 旅行方向を同じとする客が高々1人しかかごを待っていないければ, 式 (4.24) における等号付き不等号は, 等号となる.

$C(x)$  は状態  $x$  の即時コストを与える関数であるとみなせることから, これと状態空間  $\mathcal{X}$ , 決定空間  $\mathcal{A}$  および状態遷移確率に基づいて, 式 (4.22) を目的関数とするエレベータ運行計画問題は, 次のような有限期間マルコフ決定過程<sup>5)</sup> として表すことが可能である.

$$\langle \mathcal{X}, \mathcal{A}, p_{\cdot, \cdot}(\cdot), C(\cdot) \rangle. \quad (4.25)$$

ここで,  $p_{x, x'}(a)$  は, 状態  $x$  で決定  $a$  を選択することで, エレベータシステムが状態  $x'$  へ遷移する確率を表す.

式 (4.21) と式 (4.22) により計算される値の差は,

- 執務時間帯のように交通頻度が低い;
- down-peak 交通パターンのように客の出発階床がバラついている;
- ホールで待っている客数は, 例えば登録されているホール呼び数の約2倍であるといった仮定が可能である;

といった場合に, 小さくなる. そのため, エレベータ運行計画問題のマルコフ決定過程としてのモデル化は有用であると考えられる. しかしながら, そのようなアプローチが取られていることは少ない. この大きな原因として, 次の2つが考えられる.

- (1) 状態空間があまりに大きい (“次元の呪い”).
- (2) 一般にはエレベータシステムの状態遷移確率を利用できない.

up-peak 交通パターンに従って客が到着する問題をマルコフ決定過程としてモデル化し, その一般的解法である動的計画法<sup>6)</sup> を適用することで最適なかご運行計画手法を導出している研究<sup>38)</sup> では,

- 交通パターンを up-peak に限定することで、かごが主階床を出発してから主階床へ帰ってくるまでの時間である Round Trip Time (以降, RTT)<sup>9)</sup> をある正規分布に従う確率変数としてモデル化することが可能となり,
- これにより, 状態を〈主階床で待っている客数, 主階床で利用可能なかご数〉という組合せとして設計したとき, 状態間の遷移確率を与えることが可能となり,
- また, そのような状態の定義の帰結として状態空間が小さくなっているために, 動的計画法の適用が可能となっている.

本章では, エレベータシステムの状態遷移確率を利用できないことをより重要と考え, 後述の 4.6 節および 4.7 節で, その解決が図られる. “次元の呪い” も重要な問題ではあるが, その解決あるいは回避は今後の課題とされ, 計算例では状態空間があまり大きくならない問題が対象とされる. しかしながら, そのように規模が小さな問題であっても, 有限期間のマルコフ決定過程としてモデル化した場合, 時刻ごとに各状態ととるべき決定を保持しなければならない. このとき, 動的計画法を適用するために必要な空間計算量は大きくなり, 求解は困難である. そこで本章では, 有限期間ではなく, 割引率  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha < 1$ ) で割引かれた無限期間のマルコフ決定過程として, エレベータ運行計画問題はモデル化される. このとき, 目的関数は, 式 (4.22) から次の式 (4.26) のようになる.

$$\frac{\sum_{t=1}^{\infty} \alpha^{t-1} C(x(t))}{N_p}. \quad (4.26)$$

本章では, これ以降, 式 (4.26) に示された関数が, マルコフ決定過程としてモデル化されたエレベータ運行計画問題の目的関数とされる.

## 4.6 状態遷移関数の定式化

### 4.6.1 状態の 2 値状態変数の集まりとしてのモデル化

エレベータシステムの状態は多数の状態変数から構成されており, 非常に複雑な遷移を示す. このため, システムの状態遷移を表す際に用いられることが多い, 状態を節点, 状態遷移を節点間の弧とする状態遷移図を描くことは困難である. さて, 現況を見渡すと, そのような振舞いの複雑なシステムに対しては, シミュレーションに基づいたアプローチが広くとられている<sup>67)</sup>. シミュレーション内では順方向の状態遷移が計算されていることから, 暗黙のうちに状態遷移関数が符号化されているといえる. エレベータシステムの状態遷移も, 人に理解しやすい状態遷移図という形で表現することは難しいが, 機械的には処理可能な状態遷移関数という形では表現できると考えられる.

状態遷移図を描くことの困難さと, シミュレーションプログラムを作製することの手軽さとの対比から, 状態遷移の表現におけるこのような難しさの違いは, 同時に考慮する状態変

数の数に起因するという考察を得ることができる。状態遷移図を描く場合は、全ての状態変数が考慮される1つの写像を定めようとしている。これに対して、シミュレーションプログラムを作製する場合は、状態変数の一部の変化を表すプログラム内関数が多数用意され、それらが集団として機能することにより状態遷移関数が符号化されているといえる。この考察を踏まえて、状態を節点のような1つの単位、あるいは整数として取り扱うのではなく、状態変数からなるベクトルの形のままで取り扱うことを考える。状態変数がある順序、例えば式(4.15)に現れる順に、1から $N_x$ の通し番号を付与し、それぞれ $x_i(t) \in \{0, 1\}$  ( $i = 1, \dots, N_x$ )と表すことにする。これを用いて、時刻 $t$ におけるエレベータシステムの状態を次のように表すことができる。

$$\mathbf{x}(t) = \langle x_1(t), x_2(t), \dots, x_{N_x}(t) \rangle. \quad (4.27)$$

この表現に対応させ、状態遷移関数も、 $N_x$ 個の2値関数のベクトルとして次のように表すことができる。

$$f(\mathbf{x}, u, w) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, u, w) := \langle f_1(\mathbf{x}, u, w), f_2(\mathbf{x}, u, w), \dots, f_{N_x}(\mathbf{x}, u, w) \rangle. \quad (4.28)$$

ここで、 $f_i(\mathbf{x}, u, w) \in \{0, 1\}$  ( $i = 1, \dots, N_x$ )は、状態 $\mathbf{x}$ をとり状況入力 $w$ を受けているシステムへ制御入力 $u$ を与えたときに、 $i$ 番目の状態変数がどのように変化するかを定める関数である。状態遷移関数を1つの関数とみなす考えと、式(4.28)のように複数の関数の結合としてみなす考えの概観が、それぞれ図4.3(a), 4.3(b)に示される。

#### 4.6.2 状態変数の変化の定式化

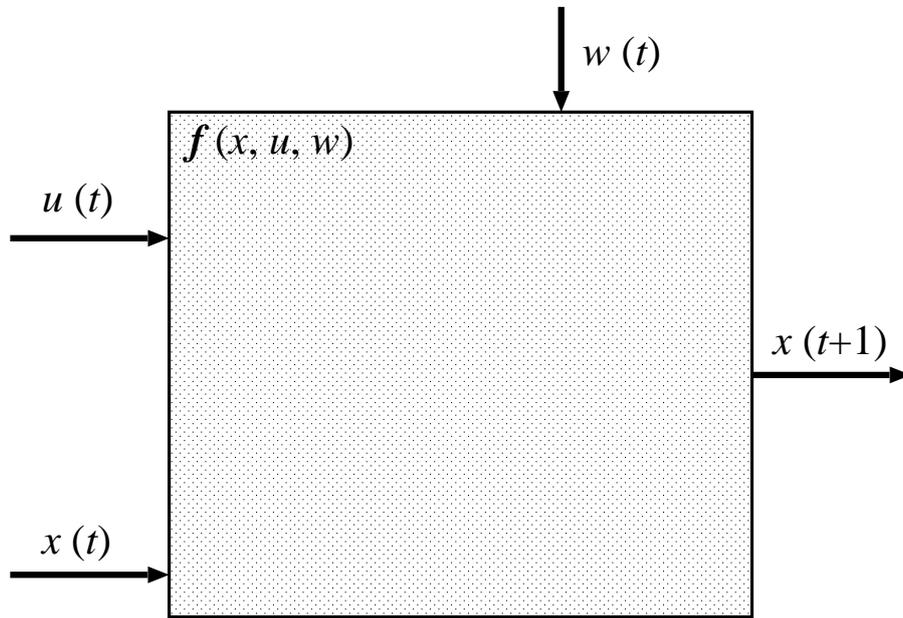
本小節では、式(4.27)のように状態を構成している状態変数の変化が定式化される。この定式化は、状態変数の変化を定性的に明文化し、それを式で表すという手続きにより行われる。定性的に表された遷移則の表現形式として、様々なものが考えられる。例えば、状態変数が0-1であることから、ブール式により表すことも可能である。本章では、状態変数を確率変数として拡張することを視野に入れ、0か1をとる整数の素朴な四則演算により状態変数の変化式を構成するものとする。

変化式の記述を容易とするために、ある種の状況が成立しているか否かを表す次のような記号が定義される。

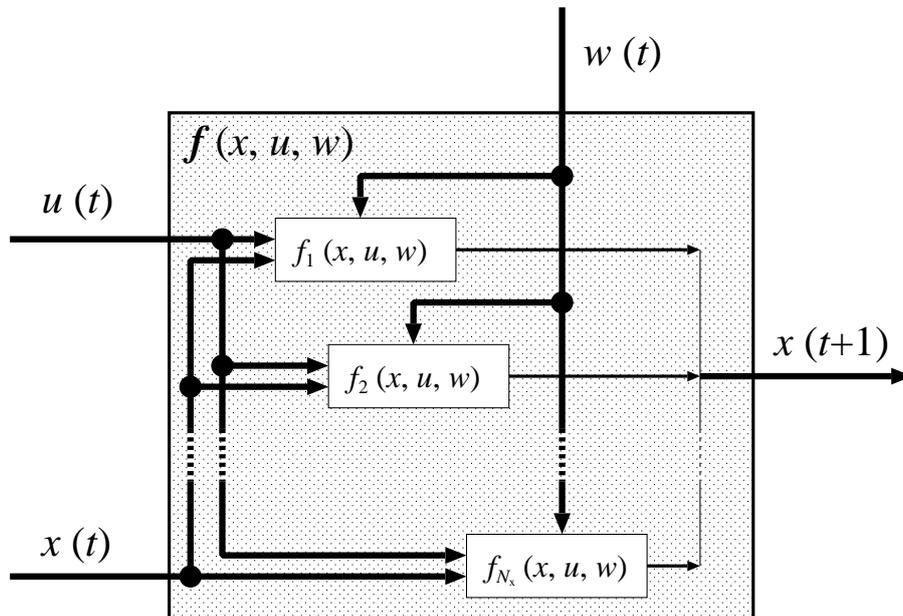
- $c_{k,f}^u(t)$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ;  $f = 1, \dots, N_f$ ): 時刻 $t$ におけるかご $k$ の位置よりも、階床 $f$ の位置が上であるか。

この値は、かごの位置を $z$ としたとき、 $z \geq Zf$ の場合に0となることから、次のように計算される。

$$c_{k,f}^u(t) = \prod_{z=Zf}^{ZN_f} (1 - z_{k,z}(t)). \quad (4.29)$$



(a) 1つの大きな関数とみなす場合



(b) 多数の小さな関数の集まりとみなす場合

図 4.3: 状態遷移関数の2つの捉え方

状態遷移関数が、図 4.3(a) では1つの大きなブラックボックスのようにみなされることに対し、図 4.3(b) では、小さな関数の多数の集まりとみなされる。ここで、 $N_x$  は状態を構成する状態変数の数を表す。

- $c_{k,f}^d(t)$  ( $k = 1, \dots, N_c; f = 1, \dots, N_f$ ): 時刻  $t$  におけるかご  $k$  の位置よりも, 階床  $f$  の位置が下であるか .

この値は, 式 (4.29) の対称として, 次のように計算される .

$$c_{k,f}^d(t) = \prod_{z=Z}^{Zf} (1 - z_{k,z}(t)). \quad (4.30)$$

- $c_{k,f}^U(t)$  ( $k = 1, \dots, N_c; f = 1, \dots, N_f$ ): 時刻  $t$  におけるかご  $k$  の位置が, 階床  $f - 1$  以下であるか . あるいは, 階床  $f - 1$  が, 時刻  $t$  におけるかごの位置以上であるか .

この値は次の式により計算される .

$$c_{k,f}^U(t) = \prod_{z=Z(f-1)+1}^{ZN_f} (1 - z_{k,z}(t)). \quad (4.31)$$

- $c_{k,f}^D(t)$  ( $k = 1, \dots, N_c; f = 1, \dots, N_f$ ): 時刻  $t$  におけるかご  $k$  の位置が, 階床  $f + 1$  以上であるか . あるいは, 階床  $f + 1$  が, 時刻  $t$  におけるかごの位置以下であるか .

この値は, 式 (4.31) の対称として, 次のように計算される .

$$c_{k,f}^D(t) = \prod_{z=Z}^{Z(f+1)-1} (1 - z_{k,z}(t)). \quad (4.32)$$

- $c_k^{\text{bu}}(t)$ : 時刻  $t$  にかご  $k$  において上へのかご呼びが登録されているか .

$\exists f \in \{1, \dots, N_f\} (c_{k,f}^u(t)q_{k,f}^c(t) = 1)$  ならば 1 となることから, この値は次のように計算される .

$$c_k^{\text{bu}}(t) = 1 - \prod_{f=1}^{N_f} (1 - c_{k,f}^u(t)q_{k,f}^c(t)). \quad (4.33)$$

- $c_k^{\text{bd}}(t)$ : 時刻  $t$  にかご  $k$  において下へのかご呼びが登録されているか .

この値は, 式 (4.33) の対称として, 次のように計算される .

$$c_k^{\text{bd}}(t) = 1 - \prod_{f=1}^{N_f} (1 - c_{k,f}^d(t)q_{k,f}^c(t)). \quad (4.34)$$

- $c_{k,f}^s(t)$  ( $k = 1, \dots, N_c; f = 1, \dots, N_f$ ): 時刻  $t + 1$  にかご  $k$  が階床  $f$  へ停止可能か .

この値は, 次の式により計算される .

$$c_{k,f}^s(t) = z_{k,Zf}(t)v_k^s(t) + z_{k,Zf+1}(t)v_k^d(t) + z_{k,Zf-1}(t)v_k^u(t). \quad (4.35)$$

- $c_k^e(t)$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ): 時刻  $t$  にかご  $k$  においてかご呼びが登録されていないか .

この値は, 次の式により計算される .

$$c_k^e(t) = \prod_{f=1}^{N_f} (1 - q_{k,f}^c(t)). \quad (4.36)$$

- $c_k^{\text{au}}(t)$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ): 時刻  $t + 1$  にかご  $k$  が停止可能な階床において, 上へのホール呼びへかご  $k$  が割り当てられていないか.

この値は, 次の式により計算される.

$$c_k^{\text{au}}(t) = \prod_{f=1}^{N_f} (1 - a_{k,f}^{\text{u}}(t) c_{k,f}^{\text{s}}(t) q_f^{\text{u}}(t)). \quad (4.37)$$

- $c_k^{\text{ad}}(t)$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ): 時刻  $t + 1$  にかご  $k$  が停止可能な階床において, 下へのホール呼びへかご  $k$  が割り当てられていないか.

式 (4.37) の対称として, 次のように計算される.

$$c_k^{\text{ad}}(t) = \prod_{f=1}^{N_f} (1 - a_{k,f}^{\text{d}}(t) c_{k,f}^{\text{s}}(t) q_f^{\text{d}}(t)). \quad (4.38)$$

- $c_k^{\text{uq}}(t)$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ): 時刻  $t$  におけるかご  $k$  の位置よりも上の階床のホール呼びへかご  $k$  が割り当てられていないか.

この値は, 次の式により計算される.

$$c_k^{\text{uq}}(t) = \prod_{f=1}^{N_f} (1 - a_{k,f}^{\text{u}}(t) c_{k,f}^{\text{u}}(t)) (1 - a_{k,f}^{\text{d}}(t) c_{k,f}^{\text{u}}(t)). \quad (4.39)$$

- $c_k^{\text{dq}}(t)$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ): 時刻  $t$  におけるかご  $k$  の位置よりも下の階床のホール呼びへかご  $k$  が割り当てられていないか.

この値は, 式 (4.39) の対称として, 次のように計算される.

$$c_k^{\text{dq}}(t) = \prod_{f=1}^{N_f} (1 - a_{k,f}^{\text{u}}(t) c_{k,f}^{\text{d}}(t)) (1 - a_{k,f}^{\text{d}}(t) c_{k,f}^{\text{d}}(t)). \quad (4.40)$$

次に, これらの記号を用いて, 各状態変数の変化が定式化される. まずは, 呼びの登録状況を表す状態変数の変化が定式化される.

- $q_k^{\text{u}}(\cdot)$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ) の変化式:

時刻  $t + 1$  において, 階床  $f$  の上へのホール呼びは, 次のいずれかの条件が成立したときに登録されるとする.

- 時刻  $t$  に階床  $f$  で上への客が到着するか, 上への客がホール呼びボタンを再押下する.
- 次の全ての条件が成立している:
  - \* 時刻  $t$  に階床  $f$  で上へのホール呼びが登録されている.
  - \* 全てのかごについて, 時刻  $t$  に階床  $f$  で上への客が乗車中であると推定されない.

- \* 全てのかごについて、時刻  $t$  に階床  $f$  で上への客が乗車中ではないか、上への客が乗車中である場合は階床  $f$  よりも上の階床を目的階床とする客が乗車していない。

前述の条件成立の有無は、次の式により計算される。

$$q_f^u(t+1) = 1 - \left( 1 - \left( w_f^u(t) + (1 - w_f^u(t)) w_f^{ru}(f) \right) \right. \\ \left. \left( 1 - q_f^u(t) \prod_{k=1}^{N_c} (1 - b_k^u(t) z_{k,Zf}(t)) \right. \right. \\ \left. \left. \prod_{k=1}^{N_c} \left( 1 - w_{k,f}^{au}(t) + w_{k,f}^{au}(t) \prod_{f'=f+1}^{N_f} (1 - w_{k,f,f'}^c(t)) \right) \right) \right). \quad (4.41)$$

- $q_k^d(\cdot)$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ) の変化式:

式 (4.41) の対称として、次のように計算される。

$$q_f^d(t+1) = 1 - \left( 1 - \left( w_f^d(t) + (1 - w_f^d(t)) w_f^{rd}(t) \right) \right. \\ \left. \left( 1 - q_f^d(t) \prod_{k=1}^{N_c} (1 - b_k^d(t) z_{k,Zf}(t)) \right. \right. \\ \left. \left. \prod_{k=1}^{N_c} \left( 1 - w_{k,f}^{ad}(t) + w_{k,f}^{ad}(t) \prod_{f'=1}^{f-1} (1 - w_{k,f,f'}^c(t)) \right) \right) \right). \quad (4.42)$$

- $q_{k,f}^c(\cdot)$  ( $k = 1, \dots, N_c; f = 1, \dots, N_f$ ) の変化式:

次の全ての条件が成立するときに、時刻  $t+1$  においてかご  $k$  で階床  $f$  を目的階床とするかご呼びが登録されているとする。

- かご  $k$  が階床  $f$  の位置にて停止していない。すなわち、階床  $f$  の位置にないか、停止していない。
- 次のいずれかが成立している。
  - \* 階床  $f$  へのかご呼びが登録されている。
  - \* 階床  $f'$  において客が乗車中であると推定され、かつその階床にてかご  $k$  へ乗車する客が存在した場合、その中に目的階床を  $f$  とする客がいる。
  - \* 階床  $f'$  にかごが停止しており、かつ客が乗車中であり、さらにその階床にてかご  $k$  へ乗車する客が存在した場合、その中に目的階床を  $f$  とする客がいる。

この状況は、次の式により計算される。

$$q_{k,f}^c(t+1) = (1 - z_{k,Zf}(t)v_k^s(t)) \left( 1 - (1 - q_{k,f}^c(t)) \prod_{f'=1}^{N_f} \left( 1 - (b_k^u(t)z_{k,Zf'}(t) + b_k^d(t)z_{k,Zf'}(t)) w_{k,f',f}^c(t) \right) \prod_{f'=1}^{N_f} \left( 1 - v_k^s(t)z_{k,Zf'}(t) (w_{k,f'}^{au}(t) + w_{k,f'}^{ad}(t)) w_{k,f',f}^c(t) \right) \right). \quad (4.43)$$

あるかごが割り当てられているホール呼びの数は、スケジューラがある決定を選択することで、同じであり続けるか、増加する。この変化は即時とみなすことができる。かごが割り当てられているホール呼びの数が減少する場合は、コントローラからの制御入力により、かごが適切な向きでホール呼びの登録されている階床へ到着したときに限る。この変化はかごが動作した結果であるため、ある程度時間がかかり、その前に決定によるホール呼び割当て状況の変化が反映されていると考えられる。従って、時刻  $t+1$  における状態の計算は、期  $t$  の状態および決定から計算された一時的なホール呼び割当て状況に依存するものと考えることが妥当である。さらに、時刻  $t+1$  におけるホール呼び割当て状況は、時刻  $t+1$  におけるかごの状態などにも依存すると考えることができる。これらの考察を踏まえたエレベータシステムの状態変化の流れを模式的に表すと、図 4.4 のようになる。

図 4.4 に示されたエレベータシステムの状態の変化の概形に基づき、ホール呼びへのかご割当て状況を表す状態変数の変化は、次のように定式化される。

- $a_{k,f}^u(\cdot)$  ( $k = 1, \dots, N_c; f = 1, \dots, N_f$ ) の変化式:

時刻  $t$  において次の全ての条件が成立したとき、時刻  $t+1$  における階床  $f$  での上へのホール呼びに対するかご  $k$  の割当ては取り消されとする。

- かご  $k$  が階床  $f$  に停止している。
- 次のいずれかが成立している。
  - \* かご  $k$  が最上階になく、次のいずれかが成立している。
    - ・ 上へのかご呼びが登録されている。
    - ・ 上へのかご呼びが登録されておらず、かごが 1 階にある。
    - ・ かご呼びが登録されておらず、直前の移動方向が上である。
    - ・ かご  $k$  よりも下の階床におけるホール呼びへ、かご  $k$  が割り当てられていない。

これを踏まえて、階床  $f$  における上へのホール呼びへかご  $k$  を割当てるか否かは、次

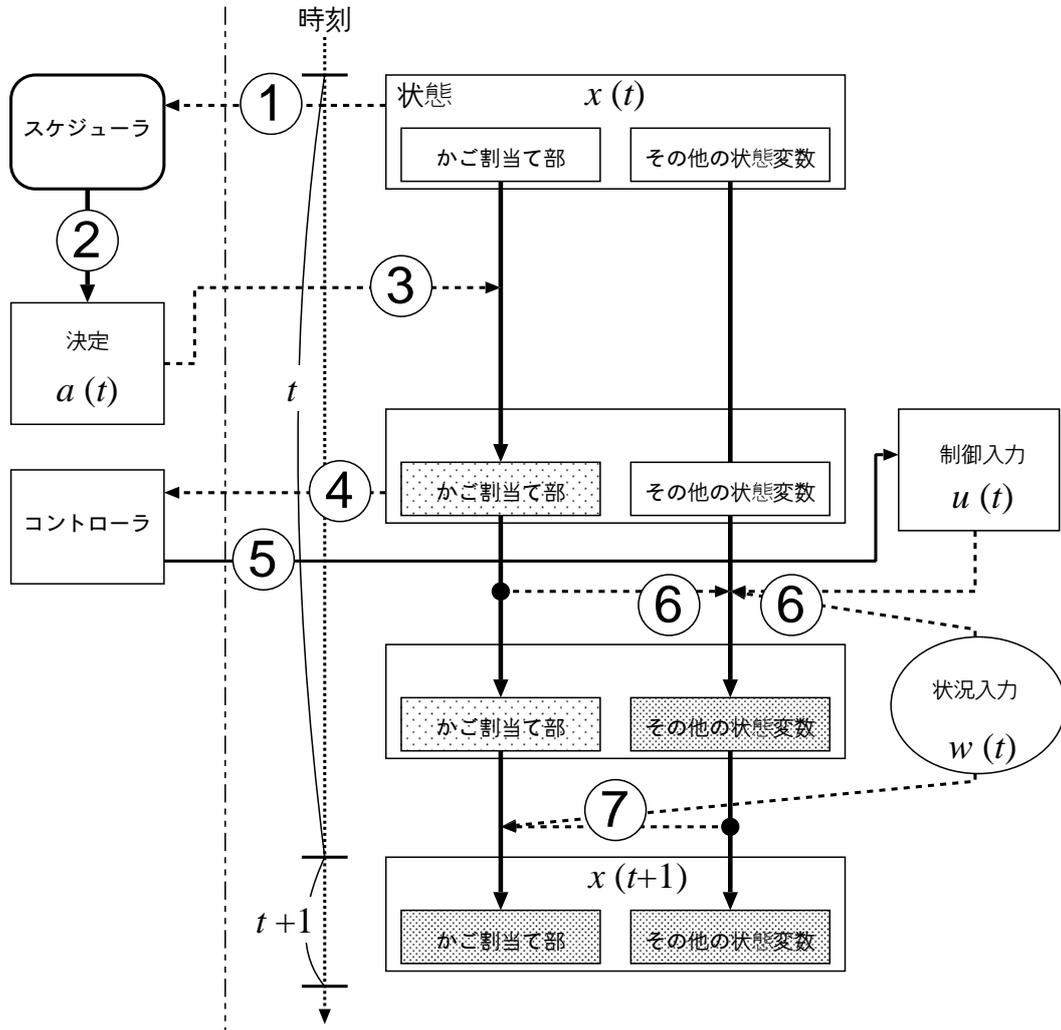


図 4.4: ホール呼び割当て状況の変化に留意した状態遷移の模式

エレベータシステムの状態は「かご割当て部」と「その他の状態変数」に分割して示されている。前者は  $a_{k,f}^u(\cdot)$ ,  $a_{k,f}^d(\cdot)$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ;  $f = 1, \dots, N_f$ ) の集まりを、後者はこれら以外の状態変数の集まりを、それぞれ表す。

図中における①は、スケジューラによるエレベータシステムの状態の計測を、②は、スケジューラによる決定の計算を、③は、スケジューラが選択した決定による「かご割当て部」の変更 (式 (4.4) の写像  $R^a$ ) を、④は、コントローラによるエレベータシステムの状態の計測を、⑤は、コントローラによる制御入力の計算を、⑥は、状態、制御入力、状況入力による「その他の状態変数」の計算を、⑦は、状態および状況入力による「かご割当て部」の計算を、それぞれ表す。

の式により計算される．

$$\begin{aligned}
a_{k,f}^u(t+1) = & a_{k,f}^u(t) \left( 1 - v_k^s(t+1) z_{k,Z_f}(t+1) \right. \\
& \left( 1 - \left( 1 - (1 - z_{k,Z_{N_f}}(t+1)) \left( c_k^{\text{bu}}(t+1) + z_{k,Z}(t+1) \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left( 1 - c_k^{\text{bu}}(t+1) \right) + d_k^u(t+1) \left( 1 - c_k^{\text{bu}}(t+1) - c_k^{\text{bd}}(t+1) \right) \right) \right) \\
& \left. \left( 1 - \prod_{f'=1}^{N_f} \left( 1 - c_{k,f'}^d(t+1) a_{k,f'}^u(t) \right) \left( 1 - c_{k,f'}^d(t+1) a_{k,f'}^d(t) \right) \right) \right). \quad (4.44)
\end{aligned}$$

階床  $f$  における下へのホール呼びへかご  $k$  を割当てるか否かは，式 (4.44) の対称として，次の式により計算される．

$$\begin{aligned}
a_{k,f}^d(t+1) = & a_{k,f}^d(t) \left( 1 - v_k^s(t+1) z_{k,Z_f}(t+1) \right. \\
& \left( 1 - \left( 1 - (1 - z_{k,Z}(t+1)) \left( c_k^{\text{bd}}(t+1) + z_{k,Z_{N_f}}(t+1) \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left( 1 - c_k^{\text{bd}}(t+1) \right) + d_k^d(t+1) \left( 1 - c_k^{\text{bu}}(t+1) - c_k^{\text{bd}}(t+1) \right) \right) \right) \\
& \left. \left( 1 - \prod_{f'=1}^{N_f} \left( 1 - c_{k,f'}^u(t+1) a_{k,f'}^d(t) \right) \left( 1 - c_{k,f'}^u(t+1) a_{k,f'}^u(t) \right) \right) \right). \quad (4.45)
\end{aligned}$$

かご  $k$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ) の状態を構成する状態変数の変化は，次のように定式化される．

•  $b_k^u(\cdot)$  の変化式:

時刻  $t$  に以下の全ての条件が満たされたとき，時刻  $t+1$  に旅行方向を上とする客が階床  $f$  にてかご  $k$  へ乗車中であるとする．

- 旅行方向が下である客が階床  $f$  にてかご  $k$  へ乗車中であると推定されていない．
- かご  $k$  が階床  $f$  に停止中である．
- 下へのかご呼びが登録されていない．
- 次のいずれかが成立している．

\* 階床  $f$  にて上へのホール呼びが登録されており，かつ次のいずれかが成立している．

- 上へのホール呼びが登録されている．
- かご呼びが登録されておらず，かつかご  $k$  の直前の移動方向が上である．
- かご  $k$  が 1 階にある．
- 階床  $f$  にて下へのホール呼びが登録されておらず，かつかご  $k$  の位置よりも下で登録されたホール呼びへかご  $k$  が割り当てられていない．

\* 階床  $f$  にて上へのホール呼びが登録されておらず、かつ次の全てが成立している。

- ・ 階床  $f$  にてかご  $k$  へ上への客が乗車中であると推定される。
- ・ 時刻  $t$  に階床  $f$  へ、旅行方向を上とする客が到着する<sup>†</sup>。

前述の条件成立の有無は、次の式により計算される。

$$b_k^u(t+1) = \left(1 - b_k^d(t)z_{k,Zf}(t)\right) v_k^s(t)z_{k,Zf}(t) \left(1 - c_k^{bd}(t)\right) \left(q_f^u(t) \left(1 - \left(1 - c_k^{bu}(t)\right) \left(1 - c_k^e(t)d_k^u(t)\right) \left(1 - z_{k,Z}(t)\right) \left(1 - \left(1 - q_f^d(t)\right) c_k^{dq}(t)\right)\right) + \left(1 - q_f^u(t)\right) b_k^u(t)z_{k,Zf}(t)w_f^u(t)\right). \quad (4.46)$$

•  $b_k^d(\cdot)$  の変化式:

時刻  $t+1$  に旅行方向が下である客が階床  $f$  にてかご  $k$  へ乗車中であると推定されるか否かは、式 (4.46) の対称として、次の式により計算される。

$$b_k^d(t+1) = \left(1 - b_k^u(t)z_{k,Zf}(t)\right) v_k^s(t)z_{k,Zf}(t) \left(1 - c_k^{bu}(t)\right) \left(q_f^d(t) \left(1 - \left(1 - c_k^{bd}(t)\right) \left(1 - c_k^e(t)d_k^d(t)\right) \left(1 - z_{k,ZN_f}(t)\right) \left(1 - \left(1 - q_f^u(t)\right) c_k^{uq}(t)\right)\right) + \left(1 - q_f^d(t)\right) b_k^d(t)z_{k,Zf}(t)w_f^d(t)\right). \quad (4.47)$$

•  $v_k^s(\cdot)$  の変化式:

次のいずれかの条件が成立するとき、時刻  $t+1$  にかご  $k$  は停止動作をとるとする。

- かごの移動方向が上であり、かつかごの最寄階床にて上へのホール呼びが登録されており、さらに停止が指令されている。
- 最寄階床を目的とするかご呼びが登録されている。
- かごの移動方向が下であり、かつかごの最寄階床にて下へのホール呼びが登録されており、さらに停止が指令されている。
- シャフトの端にある。すなわち、次のいずれかが成立している。
  - \* 最上階にて上昇が指令されている。
  - \* 最下階にて下降が指令されている。
  - \* 最上階の1つ下の位置にて上昇中である。
  - \* 最下階の1つ上の位置にて下降中である。

<sup>†</sup>かごがスタックしないように、ホール呼びボタンの再押下は除外する。

- かが呼びが登録されておらず、かつある階床に停止中であり、さらにそこで客が乗車中と推定されている。
- かが呼びが登録されておらず、かつ停止が指令されている。
- 客が乗車中である<sup>‡</sup>。
- 上へのかが呼びが登録されており、かつ旅行方向が上である客が乗車中と推定される。
- 下へのかが呼びが登録されており、かつ旅行方向が下である客が乗車中と推定される。

この条件成立の有無は、次の式により計算される。

$$\begin{aligned}
v_k^s(t+1) = & 1 - \prod_{f=1}^{N_f} (1 - v_k^u(t)c_{k,f}^s(t)q_f^u(t)u_k^s(t)) \\
& \prod_{f=1}^{N_f} (1 - c_{k,f}^s(t)q_{k,f}^c(t)) \prod_{f=1}^{N_f} (1 - v_k^d(t)c_{k,f}^s(t)q_f^d(t)u_k^s(t)) \\
& \left(1 - (z_{k,ZN_f}(t)u_k^u(t) + z_{k,Z}(t)u_k^d(t) + z_{k,ZN_f-1}(t)v_k^u(t) + z_{k,Z+1}(t)v_k^d(t))\right) \\
& \left(1 - c_k^e(t) \left(1 - \prod_{f=1}^{N_f} (1 - b_k^u(t)z_{k,Zf}(t)v_k^s(t)) (1 - b_k^d(t)z_{k,Zf}(t)v_k^s(t))\right)\right) \\
& (1 - c_k^e(t)u_k^s(t)) \prod_{f=1}^{N_f} (1 - (w_{k,f}^{au}(t) + w_{k,f}^{ad}(t))) \\
& \left(1 - c_k^{bu}(t) \sum_{f=1}^{N_f} b_k^u(t)z_{k,Zf}(t)\right) \left(1 - c_k^{bd}(t) \sum_{f=1}^{N_f} b_k^d(t)z_{k,Zf}(t)\right). \quad (4.48)
\end{aligned}$$

•  $v_k^u(\cdot)$  の変化式:

次の全ての条件が満たされたとき、時刻  $t+1$  にかご  $k$  は上昇動作をとるとする。

- 時刻  $t+1$  に停止動作をとらない。
- 下へのかが呼びが登録されていない。
- 次のいずれかが成立している。
  - \* 上へのかが呼びが登録されている。
  - \* 上への移動が指令されている。

この状況成立の有無は、次の式により計算される。

$$v_k^u(t+1) = (1 - v_k^s(t+1)) (1 - c_k^{bd}(t)) (1 - (1 - c_k^{bu}(t)) (1 - u_k^u(t))). \quad (4.49)$$

<sup>‡</sup>なお、客が階床  $f$  にてあるかご  $k$  へ乗車中であれば、必ず  $v_k^s(t) = 1$ ,  $z_{k,Zf}(t) = 1$  である。

- $v_k^d(\cdot)$  の変化式:

時刻  $t+1$  にかご  $k$  が下降動作をとるか否かは、式 (4.49) の対称として、次のように計算される。

$$v_k^d(t+1) = (1 - v_k^s(t+1)) \left(1 - c_k^{\text{bu}}(t)\right) \left(1 - \left(1 - c_k^{\text{bd}}(t)\right) \left(1 - u_k^d(t)\right)\right). \quad (4.50)$$

- $d_k^u(\cdot)$  の変化式:

かご  $k$  の直前の移動方向は、次の全ての条件が満たされた場合に上であるとする。

- 下降以外の動作をとっている。
- 直前の移動方向が上であるか、上昇動作をとっている。

この条件の成立の有無は、次の式により計算される。

$$d_k^u(t+1) = \left(1 - v_k^d(t)\right) \left(d_k^u(t) + \left(1 - d_k^u(t)\right) v_k^u(t)\right). \quad (4.51)$$

- $d_k^d(\cdot)$  の変化式:

かご  $k$  の直前の移動方向が下であるか否かは、式 (4.51) の対称として、次のように計算される。

$$d_k^d(t+1) = \left(1 - v_k^u(t)\right) \left(d_k^d(t) + \left(1 - d_k^d(t)\right) v_k^d(t)\right). \quad (4.52)$$

- $z_{k,z}(\cdot)$  ( $z = Z, \dots, ZN_f$ ) の変化式:

この変化は、次の式により計算される。

$$z_{k,z}(t+1) = z_{k,z}(t)v_k^s(t) + z_{k,z+1}(t)v_k^d(t) + z_{k,z-1}(t)v_k^u(t). \quad (4.53)$$

ある状態変数への番号  $i \in \{1, \dots, N_x\}$  の付与は、対応する状態変数の変化式  $f_i(\cdot, \cdot, \cdot)$  との対応を保つ限り、任意である<sup>§</sup>。式 (4.6) で示された関数  $g$  を定義する際の考え方を関数  $f_i: \mathcal{X} \times \mathcal{U} \times \mathcal{W} \mapsto \{0, 1\}$  へ適用することで、これらに対応する関数  $g_i: \mathcal{X} \times \mathcal{A} \times \mathcal{W} \mapsto \{0, 1\}$  が、次のように与えられる。

$$g_i(x, a, w) := f_i(R^a(x, a), R^{\text{SC}}(R^a(x, a)), w) \quad (i = 1, \dots, N_x). \quad (4.54)$$

## 4.7 状態遷移確率の定式化

### 4.7.1 状態遷移確率の状況入力の生起確率の総和としての定式化

エレベータシステムがある状態をとっているときに、スケジューラがある決定を選択したとする。このとき、スケジューラには必ずしも見えないところでシステムは何らかの状況入

<sup>§</sup>ある状態へ遷移する元となる状態を計算する、いわゆる逆遷移関数を構築する際には、この対応付けを何らかの規則に従って与え、状態変数番号の昇順あるいは降順に計算することで、計算効率の向上が可能であると考えられる。

力を被り，結果としてある状態へ遷移する．そのような，ある状態遷移をもたらす状況入力を計算するために，状態  $x$  にあり状況入力  $w$  を受けているエレベータシステムに対し決定  $a$  を選択することで，システムが状態  $x'$  へ遷移するか否かを判定する一致関数  $\delta_{x,x'}(a, w)$  を考える．この関数は，4.6.2 節に示された各状態変数の変化を表す関数を用いることで，次のように定式化される．

$$\begin{aligned}\delta_{x,x'}(a, w) &:= \prod_{i=1}^{N_x} (x_i x'_i + (1 - x_i)(1 - x'_i)) \\ &= \prod_{i=1}^{N_x} (x_i g_i(x, a, w) + (1 - x_i)(1 - g_i(x, a, w))).\end{aligned}\tag{4.55}$$

ここで， $x_i, x'_i$  は，それぞれ状態  $x, x'$  の  $i$  番目の状態変数値を表す．この関数の定義をより定性的に示すと，次のようになる．

$$\delta_{x,x'}(a, w) = \begin{cases} 1 & \text{if } x' = g(x, a, w), \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}\tag{4.56}$$

このような一致関数を利用できれば，状況入力の定義より，エレベータシステムがある状態遷移を起こす確率は，ある条件のもとでそのような遷移を生じせしめる状況入力の生起確率の総和として表すことが可能である．この概念が図 4.5 に示される．

図 4.5 に示された概念を式で表すと，次のようになる．

$$p_{x,x'}(a) = \sum_{w \in \mathcal{W}} P(w|x) \delta_{x,x'}(a, w).\tag{4.57}$$

ここで， $P(w|x)$  は状態  $x$  において状況入力  $w$  が生起する確率を表す．

#### 4.7.2 状況入力の生起確率の定式化

状況入力の生起確率は，式 (4.18) に示された状況入力の構成より，次の 3 つの要素:

- (1) ある階床へ旅行方向が上である客が到着する確率;
- (2) ある階床へ旅行方向が下である客が到着する確率;
- (3) ある階床で，ある階床を目的階床とする客が，あるかごへ乗車する確率;

から計算される．要素 (1), (2) は交通流だけから計算可能であるが，要素 (3) の計算には，ホールで待っている客数を見積もるためにホール呼びの待ち時間が必要であり，エレベータシステムの状態および要素 (3) を計算する時刻に依存する．これら 3 つの確率を表すために，次の記号を定義する．

- $P_f^u$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 階床  $f$  へ旅行方向が上である客が到着する確率．

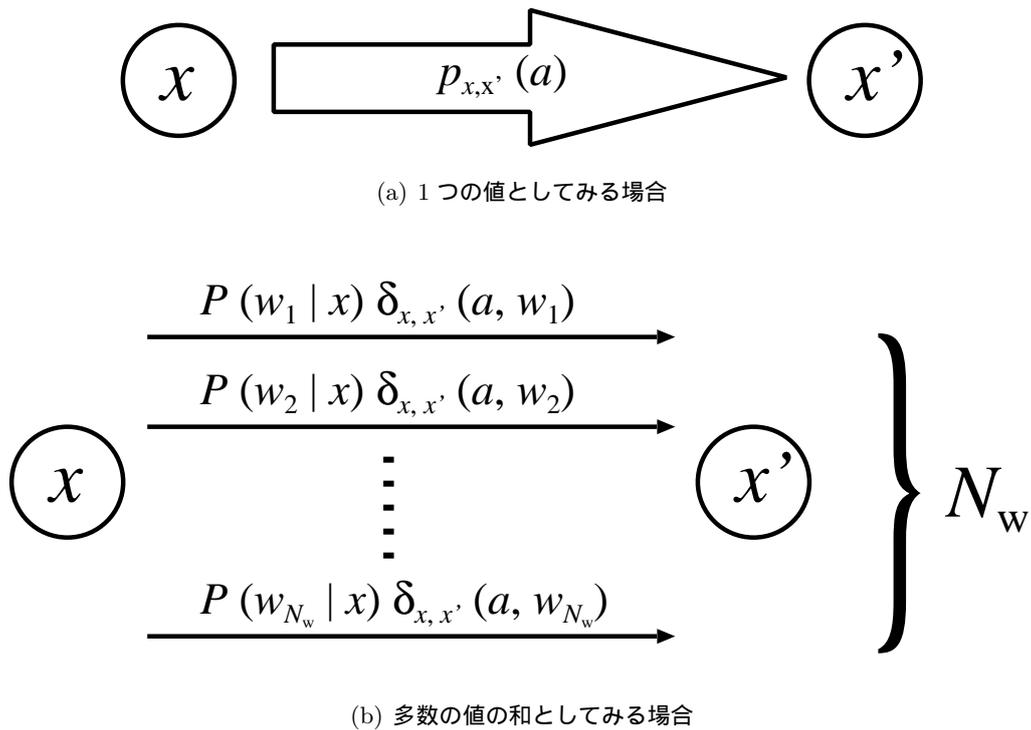


図 4.5: 状態遷移確率を状況入力 of 生起確率の和とする見方の概念

図 4.5(a) は状態遷移確率を 1 つの値としてみる概念を, 図 4.5(b) は状態遷移確率を状況入力の生起確率の和としてみる概念を, それぞれ表す. ここで,  $N_w$  は状況入力の数を表し,  $w_n$  ( $n = 1, \dots, N_w$ ) は  $n$  番目の状況入力を表す.

- $P_f^d$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 階床  $f$  へ旅行方向が下である客が到着する確率 .
- $P_{f_1, f_2}^c(x, t)$  ( $k = 1, \dots, N_c; f_1, f_2 = 1, \dots, N_f$ ): 時刻  $t$  に状態  $x$  で , 目的階床を  $f_2$  とするある客が階床  $f_1$  に到着している確率 .

これらの確率は , 次のように計算される .

- $P_f^u$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): ある時刻に旅行方向を上とする客が階床  $f$  へ到着する頻度の期待値が  $\lambda M_f^u$  であり , かつ  $P_f^u$  が 0 となるのは , 単位時間にそのような客が 1 人も到着しない場合 (そのような客が 0 人到着するという事象の余事象) であるから ,

$$P_f^u = 1 - \exp^{-\lambda M_f^u} . \quad (4.58)$$

- $P_f^d$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ): 式 (4.58) の対称として , 次のように計算される .

$$P_f^d = 1 - \exp^{-\lambda M_f^d} . \quad (4.59)$$

- $P_{f_1, f_2}^c(x, t)$  ( $f_1, f_2 = 1, \dots, N_f$ ): この確率は , あるかごが階床  $f_1$  に位置する確率  $1/(N_c T_{f_1, f_2}^i(x))$  と , 階床  $f_2$  の方向へ移動するかごが階床  $f_1$  へ到着・出発するまでの間に , 出発階床を  $f_1$  , 目的階床を  $f_2$  とする客が 0 人到着する事象の余事象の確率との積とみなせるため ,

$$P_{f_1, f_2}^c(x, t) \simeq \frac{\left(1 - (\exp^{-\lambda M_{f_1, f_2}})^{T_{f_1, f_2}^w(x, t) + T^c}\right)}{N_c T_{f_1, f_2}^i(x)} . \quad (4.60)$$

これらの記号を用いて , 時刻  $t$  に状態  $x$  にて状況入力  $w(t)$  が生起する確率は , 次のように表される .

$$\begin{aligned} P(w(t) | x) \simeq & \prod_{f=1}^{N_f-1} (w_f^u(t) P_f^u + (1 - w_f^u(t)) (1 - P_f^u)) \prod_{f=2}^{N_f} (w_f^d(t) P_f^d + (1 - w_f^d(t)) (1 - P_f^d)) \\ & \prod_{f_1=1}^{N_f} \prod_{f_2=1}^{N_f} \left( \frac{1 - \prod_{k=1}^{N_c} (1 - w_{k, f_1, f_2}^c(t))}{2^{N_c} - 1} P_{f_1, f_2}^c(x, t) + \prod_{k=1}^{N_c} (1 - w_{k, f_1, f_2}^c(t)) (1 - P_{f_1, f_2}^c(x, t)) \right) . \end{aligned} \quad (4.61)$$

ここで ,  $w_{k, f_1, f_2}^c(t) = 1$  となる確率は ,  $P_{f_1, f_2}^c(x, t) = 1$  となる場合を構成する , 1 つ以上のかごへ客が乗車する事象の確率を等しいとみなすことで , その組合せ数である  $2^{N_c} - 1$  により除されている .

式 (4.61) によると , ある時刻にエレベータシステムがある状態をとるたびに状況入力の生起確率を計算せねばならず , 計算負荷が大きい . これを回避するために , 時刻や状態に依存する情報を , 次のように近似する .

- $T_{f_1, f_2}^w(x, t)$  ( $f_1, f_2 = 1, \dots, N_f$ ): 4.2 節に示された前提より利用可能である, ホール呼びの期待待ち時間の概算値で代用する. すなわち,

$$T_{f_1, f_2}^w(x, t) \simeq \begin{cases} T_{f_1}^u & \text{if } f_1 < f_2, \\ T_{f_1}^d & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4.62)$$

- $T_{f_1, f_2}^i(x)$  ( $f_1, f_2 = 1, \dots, N_f$ ): 4.2 節に示された前提より, 任意の時点におけるかごの積載率は非常に小さいとみなせることから, かごの RTT は待ち時間の約 2 倍と見積もることができる<sup>9)</sup> ため,

$$T_{f_1, f_2}^i(x) \simeq \begin{cases} 2T_{f_1}^u & \text{if } f_1 < f_2, \\ 2T_{f_1}^d & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4.63)$$

この近似により, 式 (4.60) は, 時刻や状態に依存しない形として次のように近似される.

$$P_{f_1, f_2}^c(x, t) \simeq P_{f_1, f_2}^c := \begin{cases} \frac{\left(1 - \left(\exp^{-\lambda M_{f_1, f_2}}\right)^{T_{f_1}^u + T^c}\right)}{2N_c T_{f_1}^u} & \text{if } f_1 < f_2, \\ \frac{\left(1 - \left(\exp^{-\lambda M_{f_1, f_2}}\right)^{T_{f_1}^d + T^c}\right)}{2N_c T_{f_1}^d} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4.64)$$

以上より, 状況入力  $w(t)$  の生起確率  $P(w(t))$  は, 次のように時刻や状態に依存しない形で近似される.

$$\begin{aligned} P(w(t) | x) &\simeq P(w(t)) := \\ &\prod_{f=1}^{N_f-1} \left( w_f^u(t) P_f^u + (1 - w_f^u(t)) (1 - P_f^u) \right) \prod_{f=2}^{N_f} \left( w_f^d(t) P_f^d + (1 - w_f^d(t)) (1 - P_f^d) \right) \\ &\prod_{f_1=1}^{N_f} \prod_{f_2=1}^{N_f} \left( \frac{1 - \prod_{k=1}^{N_c} \left(1 - w_{k, f_1, f_2}^c(t)\right)}{2^{N_c} - 1} P_{f_1, f_2}^c + \prod_{k=1}^{N_c} \left(1 - w_{k, f_1, f_2}^c(t)\right) (1 - P_{f_1, f_2}^c) \right). \end{aligned} \quad (4.65)$$

式 (4.55), (4.65) に示された記号を用いて, 状態  $x$  にて決定  $a$  を選択することによりシステムが状態  $x'$  へ遷移する確率を, 次のように近似的に表すことができる.

$$p_{x, x'}(a) \simeq \sum_{w \in \mathcal{W}} P(w) \delta_{x, x'}(a, w). \quad (4.66)$$

## 4.8 動的計画法の構成

マルコフ決定過程は現実世界の様々な状況においてみられるため, 多くの研究が行われ, 多様な解法が構築されている. そのような解法の 1 つとして, 動的計画法<sup>6)</sup>がある. この解法では, 意思決定者が状態  $x$  から最適な決定をとり続けた場合に被るコストの期待値  $J(x)$

に基づいて、最適解は導出される．そのような関数は最適なコスト関数と呼ばれ、これが求められれば、状態  $x$  における最適な決定を、

$$\arg \min_{a \in \mathcal{A}_x} \sum_{x' \in \mathcal{X}} p_{x,x'}(a) J(x') \quad (4.67)$$

として求めることが可能である．ただし、 $\mathcal{A}_x$  は状態  $x$  にて選択可能な決定の集合を表す．動的計画法の代表的解法として、報酬反復法、方策反復法、線形計画法が挙げられる<sup>68)</sup>．本章では、次の点：

- 方策反復法は、コスト関数に加えて、各状態で選択する決定を保持する必要がある；
- 線形計画法は、素朴な実装では状態遷移確率行列を計算機の主メモリに保持することが難しい<sup>¶</sup>；

を踏まえて、報酬反復法が用いられる．

本章のモデルにおけるコスト関数は、定義よりその値域が、

$$C(x) \subset [0, \bar{C}] \quad (4.68)$$

と限られているため、最適なコスト関数が存在する<sup>6)</sup>．ここで、 $\bar{C}$  は即時コストの最大値を表し、本章の前提下では高々  $2(N_f - 1)$  である．加えて、交通パターンに関する情報を利用することで、この最大値をより小さくみなすことが可能である．例えば、純粋な up-peak パターンでは、主階床以外でホール呼びが登録されることはないため、 $\bar{C} = 1$  とできる．

報酬反復法を用いることで、最適なコスト関数  $J(\cdot)$  は、式 (4.70) のように計算される関数  $J_n(\cdot)$  ( $n = 0, 1, \dots$ ) の極限、すなわち、

$$J(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} J_n(x), \quad \forall x \in \mathcal{X} \quad (4.69)$$

として求められる．

$$\begin{aligned} J_0(x) &:= 0, \\ J_{n+1}(x) &:= \min_{a \in \mathcal{A}_x} \sum_{x' \in \mathcal{S}_x} p_{x,x'}(a) (C(x') + \alpha J_n(x')) \quad (n = 0, 1, \dots). \end{aligned} \quad (4.70)$$

ここで、 $\mathcal{S}_x$  は状態  $x$  から遷移しうる状態集合を表し、次のように計算される．

$$\mathcal{S}_x := \bigcup_{w \in \mathcal{W}} \bigcup_{a \in \mathcal{A}_x} \{g(x, a, w)\}. \quad (4.71)$$

<sup>¶</sup>状態遷移確率行列はほとんどの要素が 0 である疎な行列となっており、これを効率的に扱う手法を用いれば、線形計画法の利用も可能であると考えられる．

#### 4.9 状態遷移モデルの縮約により効率化された動的計画法

式 (4.66), (4.71) が示すように, 最適なコスト関数の計算には, 状況入力空間に渡る多数回の繰返しが必要である. 状況入力空間は, エレベータシステムの規模が大きくなるにつれ指数関数的に増大するが, その多くは非常に小さな生起確率を持つと考えられる. これらの状況入力は, 式 (4.66) より状態遷移確率へあまり影響を与えないものの, その取扱いには, 状態遷移確率へ強い影響を与える生起確率の高い状況入力と同程度のコストを要する. このことから, 生起確率が低い状況入力を考慮しないことで, エレベータシステムの大まかな挙動を保ちつつ計算コストを減らすという動的計画法の効率化が期待される.

本論文では, 生起確率が低い状況入力を考慮しないことを状態遷移モデルの縮約と呼ぶ. また, 考慮されなかった状況入力を除いた集合を縮約された状況入力空間と呼び,  $\widetilde{\mathcal{W}}$  と表す. 縮約された状況入力空間の構成法としては様々なものがあるが, 本章では素朴な方法として, 生起確率の低い順に, その総和が縮約度と呼ぶパラメータ  $\theta \in [0, 1)$  以下となる状況入力を考慮しないこととする. すなわち, 状況入力を生起確率の非増加順に  $w_{i_1}, w_{i_2}, \dots, w_{i_{N_w}}$  としたとき,  $\widetilde{\mathcal{W}}$  は次のように計算される.

$$\widetilde{\mathcal{W}} = \bigcup_{n=1}^{N_w} \{w_{i_n}\}. \quad (4.72)$$

ただし,  $N_{\widetilde{\mathcal{W}}}$  は縮約された状況入力空間の大きさを表し, 次のように計算される.

$$N_{\widetilde{\mathcal{W}}} = \arg \min_{n \in \{1, \dots, N_w\}} \left\{ n \left| \sum_{n'=1}^n P(w_{i_{n'}}) \geq 1 - \theta \right. \right\}. \quad (4.73)$$

式 (4.73) より, 縮約度が 0 のとき  $N_{\widetilde{\mathcal{W}}} = N_w$  となり,  $\widetilde{\mathcal{W}} = \mathcal{W}$  となることが確認される.

状況入力空間の代わりに縮約された状況入力空間を用いることで, 縮約された状態遷移モデルの上での状態遷移確率, およびある状態から遷移しうる状態集合は, 式 (4.66), (4.71) より, それぞれ次のように与えられる.

$$\tilde{p}_{x,x'}(a) \simeq \sum_{w \in \widetilde{\mathcal{W}}} P(w) \delta_{x,x'}(a, w). \quad (4.74)$$

$$\tilde{\mathcal{S}}_x := \bigcup_{w \in \widetilde{\mathcal{W}}} \bigcup_{a \in \mathcal{A}_x} \{g(x, a, w)\}. \quad (4.75)$$

縮約された状態遷移モデルの上で最適なコスト関数を, 準最適なコスト関数と呼び,  $\tilde{J}(\cdot)$  と表す. これは, 式 (4.69) と同様, 次のように求められる.

$$\tilde{J}(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \tilde{J}_n(x), \quad \forall x \in \mathcal{X}. \quad (4.76)$$

ここで、 $\tilde{J}_n(\cdot)$  ( $n = 0, 1, \dots$ ) は、式 (4.70) と同様に、式 (4.74), (4.75) から次のように逐次計算される関数である。

$$\begin{aligned} \tilde{J}_0(x) &:= 0, \\ \tilde{J}_{n+1}(x) &:= \min_{a \in \mathcal{A}_x} \sum_{x' \in \tilde{\mathcal{S}}_x} \tilde{p}_{x,x'}(a) \left( C(x') + \alpha \tilde{J}_n(x') \right) \quad (n = 0, 1, \dots). \end{aligned} \quad (4.77)$$

準最適なコスト関数が求まったとき、それと最適なコスト関数との差は次のように限定される。

$$J(x) - \frac{\theta(\bar{C} + \alpha \bar{J})}{1 - (1 - \theta)\alpha} \leq \tilde{J}(x) \leq J(x) \quad (\forall x \in \mathcal{X}). \quad (4.78)$$

ここで、 $\bar{J}$  はコスト関数の上界を表し、素朴な計算により高々次のように与えることができる。

$$\bar{J} = \frac{\bar{C}}{1 - \alpha}. \quad (4.79)$$

式 (4.78) は、

$$\tilde{p}_{x,x'}(a) \leq p_{x,x'}(a) \quad (\forall x, x' \in \mathcal{X}; \forall a \in \mathcal{A}), \quad (4.80)$$

$$\tilde{J}_0(x) \leq J_0(x) \quad (\forall x \in \mathcal{X}) \quad (4.81)$$

が成立することから明らかな次の関係:

$$\tilde{J}_n(x) \leq J_n(x) \quad (\forall x \in \mathcal{X}; n = 0, 1, \dots), \quad (4.82)$$

および、図 4.6 に示される準最適なコスト関数と最適なコスト関数との差が最大となる 1 つの状態遷移モデルを考えることで導かれる。

図 4.6 に示された状態遷移モデルを縮約度  $\theta$  で縮約したモデルの上で、準最適なコスト関数  $\tilde{J}(\cdot)$  が求まっているとする。このとき、

$$\tilde{J}(x_1) = (1 - \theta) \left( C(x_2) + \alpha \tilde{J}(x_2) \right), \quad (4.83)$$

$$\tilde{J}(x_2) = (1 - \theta) \left( C(x_2) + \alpha \tilde{J}(x_2) \right) \quad (4.84)$$

という関係が成立するため、状態  $x_1, x_2$  の準最適なコストは、それぞれ次のように求まる。

$$\tilde{J}(x_1) = \frac{1 - \theta}{1 - (1 - \theta)\alpha} C(x_2), \quad (4.85)$$

$$\tilde{J}(x_2) = \frac{1 - \theta}{1 - (1 - \theta)\alpha} C(x_2). \quad (4.86)$$

次に、縮約されておらず全ての状況入力が考慮されている、状態  $x_0$  への遷移が生じる状態遷移モデルを考える。状態  $x_0$  の即時コストおよび最適コストが、それぞれ  $C(x_0), J(x_0)$  として与えられているとし、

$$\hat{J} := \theta(C(x_0) + \alpha J(x_0)) \quad (4.87)$$

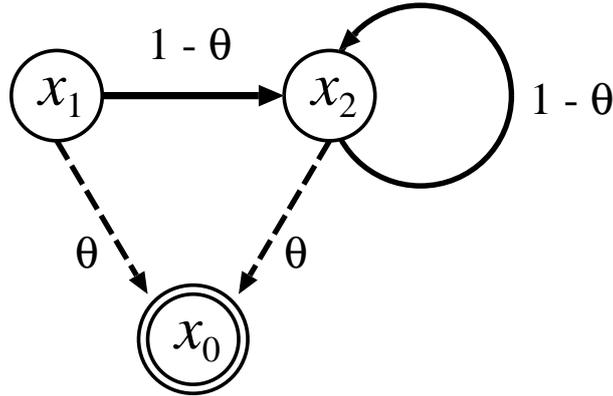


図 4.6: 準最適なコスト関数と最適なコスト関数との差が最大となる状態遷移モデルの 1 例

$x_0$  は吸収状態であり,  $x_1, x_2$  は確率  $1 - \theta$  で状態  $x_2$  へ, 確率  $\theta$  で状態  $x_0$  へ, それぞれ遷移する. また, 状態遷移モデルの縮約度  $\theta$  の縮約により, 状態  $x_0$  への遷移をもたらす状況入力が考慮されなくなる.

とおく. このとき, 状態  $x_1, x_2$  の最適コストの間には, 次の関係が成立する.

$$J(x_1) = (1 - \theta)(C(x_2) + \alpha J(x_2)) + \hat{J}, \quad (4.88)$$

$$J(x_2) = (1 - \theta)(C(x_2) + \alpha J(x_2)) + \hat{J}. \quad (4.89)$$

これより, 状態  $x_2$  の最適コストは次のようになる.

$$J(x_2) = \frac{1 - \theta}{1 - (1 - \theta)\alpha} C(x_2) + \frac{\hat{J}}{1 - (1 - \theta)\alpha}. \quad (4.90)$$

この結果を用いて, 状態  $x_1$  の最適コストは次のようになる.

$$\begin{aligned} J(x_1) &= (1 - \theta)C(x_2) + (1 - \theta)\alpha J(x_2) + \hat{J} \\ &= (1 - \theta)C(x_2) + (1 - \theta)\alpha \frac{(1 - \theta)C(x_2)}{1 - (1 - \theta)\alpha} + (1 - \theta)\alpha \frac{\hat{J}}{1 - (1 - \theta)\alpha} + \hat{J} \\ &= \frac{1 - \theta}{1 - (1 - \theta)\alpha} C(x_2) + \left( \frac{(1 - \theta)\alpha}{1 - (1 - \theta)\alpha} + 1 \right) \hat{J} \\ &= \frac{1 - \theta}{1 - (1 - \theta)\alpha} C(x_2) + \frac{\hat{J}}{1 - (1 - \theta)\alpha}. \end{aligned} \quad (4.91)$$

式 (4.85), (4.91) より, 縮約による状態  $x_1$  のコストの変化は,

$$\tilde{J}(x_1) - J(x_1) = -\frac{\hat{J}}{1 - (1 - \theta)\alpha}. \quad (4.92)$$

この式の右辺の下界は, 即時コスト関数の値域およびコスト関数の上界より,

$$-\frac{\hat{J}}{1 - (1 - \theta)\alpha} \geq -\frac{\theta(\bar{C} + \alpha\bar{J})}{1 - (1 - \theta)\alpha}. \quad (4.93)$$

表 4.1: 2つの動的計画法を適用する際のパラメータ設定

パラメータ	値
計画期間 ( $T$ )	2,000
かご数 ( $N_c$ )	2
階床数 ( $N_f$ )	3
客数 ( $N_p$ )	100
階床間の距離 ( $Z$ )	2
客の到着間隔の期待値 ( $1/\lambda$ )	10
割引率 ( $\gamma$ )	0.9

図 4.6 に示された状況下では、状態遷移モデルの縮約により状態  $x_1$  のコストが受ける影響が最大であることから、

$$\tilde{J}(x) - J(x) \geq -\frac{\hat{J}}{1 - (1 - \theta)\alpha} \geq -\frac{\theta(\bar{C} + \alpha\bar{J})}{1 - (1 - \theta)\alpha}, \quad \forall x \in \mathcal{X}, \quad (4.94)$$

よって、

$$J(x) - \frac{\theta(\bar{C} + \alpha\bar{J})}{1 - (1 - \theta)\alpha} \leq \tilde{J}(x), \quad \forall x \in \mathcal{X}. \quad (4.95)$$

以降、便宜的に、縮約された状態遷移モデルの上で報酬反復法により準最適なコスト関数を求める手法を、DPRM (Dynamic Programming on Reduced Models) と呼ぶことにする。

## 4.10 計算例および考察

### 4.10.1 パラメータ設定

本節では、4.8 節で示された報酬反復法および 4.9 節で示された DPRM という 2 つの動的計画法を、小規模な 2 つの問題に対して適用することで得られた結果が示される。これらの結果は、 $T_f^u, T_f^d$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ) および  $\theta$  を除いたパラメータが表 4.1 に示されるように設定された、CPU が Xeon 3.0 GHz、搭載メモリ量が 2 GByte という計算機上での計算により得られた。

2 つの動的計画法が適用された問題は、交通需要は同じであるが交通パターンが異なっており、一方では down-peak パターンに従って、もう一方では two-way パターンに従って、それぞれ客が到着する。これらの交通パターンが、各交通流下で到着する客の出発階床および目的階床 (OD ペア) がある組合せをとる確率の百分率として、表 4.2 に示される。

$T_f^u, T_f^d$  ( $f = 1, \dots, N_f$ ) の値は、次の手続きにより、交通流ごとに作成した例題に対する既存のかご割当て手法の適用結果から計算される。

1° ある交通流に従うものとして、10,000 個の例題を作成する。

表 4.2: 各交通流下において到着する客の OD ペアがある組合せをとる割合

出発階床	目的階床					
	Down-peak			Two-way		
	1	2	3	1	2	3
1	0	0	0	0	25	25
2	50	0	0	25	0	0
3	50	0	0	25	0	0

表 4.3: 各交通流における  $T_f^u, T_f^d$  ( $f = 1, 2, 3$ ) の値

出発階床 ( $f$ )	Down-peak		Two-way	
	$T_f^u$	$T_f^d$	$T_f^u$	$T_f^d$
1	-	-	2.26	-
2	-	4.10	-	3.56
3	-	4.94	-	3.18

- 2° 各例題に対して既存のかご割当て手法を適用する．既存のかご割当て手法としては，2.3.1 節で示された CD を使用した．
- 3° 既存手法の適用により作成された 10,000 個のかご運行から，計  $10000N_p$  名の客の待ち時間を計算する．
- 4° これらの客を旅行方向と出発階床の組合せによりグループ分けする．
- 5° 各グループについて，そのグループに属する客に渡る待ち時間を平均し，これをそのグループの旅行方向および出発階床と対応するホール呼びの平均待ち時間の概算値とみなす．

この手続きにより計算された値が，表 4.3 に示される．

#### 4.10.2 コスト関数の計算

一般に，動的計画法の適用においては状態空間が既知でなければならない．対象システムの規模が大きくなるにつれ，状態空間も指数関数的に大きくなる．これは“次元の呪い”と呼ばれ，動的計画法の適用における最大の困難の 1 つとされている．本章では，この困難の解決あるいは回避は行われず，状態空間がそのまま考慮される．ただし，状態空間には，ある交通流下でエレベータシステムがとりえない状態も多数含まれていると考えられることから，システムがとりうる状態のみからなる集合がサンプリングされ，これで状態空間が代用される．そのような集合を  $\tilde{x}$  と表せば，これは次の式により逐次与えられる集合

表 4.4: 交通流ごとにサンプリングされた状態空間の大きさおよび計算時間

	$ \tilde{\mathcal{X}}_0 $	$ \tilde{\mathcal{X}} $	計算時間 [秒]
Down-peak	1,241	2,572	632.18
Two-way	17,570	126,984	719,737

表 4.5: 報酬反復法および DPRM の適用において考慮された状況入力数および適用に要した計算時間

交通パターン	縮約度 ( $\theta$ )	状況入力数	計算時間 [秒]
Down-peak	0	64	864.73
	0.1	3	245.7
Two-way	0	2,048	601,753
	0.1	4	20,513.1

$\tilde{\mathcal{X}}_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ):

$$\tilde{\mathcal{X}}_{n+1} := \bigcup_{x \in \tilde{\mathcal{X}}_n} \bigcup_{w \in \mathcal{W}} \bigcup_{u \in \mathcal{U}} \{f(x, u, w)\}. \quad (4.96)$$

の極限, すなわち,

$$\tilde{\mathcal{X}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \tilde{\mathcal{X}}_n \quad (4.97)$$

として計算される. ここで,  $\tilde{\mathcal{X}}_0$  は, 4.10.1 節で参照された 10,000 個の例題に対する既存手法の適用結果において計測された状態の集合である. 状態空間が有限であることから, 式 (4.96) により計算される集合はある段階で収束し,  $\tilde{\mathcal{X}}_{n+1} = \tilde{\mathcal{X}}_n$  となる. 状態空間のサンプリング計算はその時点で終了し,  $\tilde{\mathcal{X}} := \tilde{\mathcal{X}}_n$  とされる.

状態空間のサンプリングにかかった計算時間およびサンプリングされた状態集合の大きさが, 併せて表 4.4 へ示される. 表 4.4 より, down-peak 交通流を対象とした場合よりも two-way 交通流を対象とした場合の方が, 状態集合が大きく計算に長時間を要していることが見てとれる.

2つの問題に対して, 通常報酬反復法および縮約度を 0.1 とした DPRM を適用することで, それぞれ最適, 準最適コスト関数が得られた. この計算の終了条件は, 全ての状態についてコスト関数値が変化しなくなることである. この際に考慮された状況入力数および計算に要した時間が, 表 4.5 に示される. ここで, 報酬反復法による結果が,  $\theta = 0$  の行として示されている.

表 4.5 より, 状態遷移モデルの縮約により考慮される状況入力数が大幅に減少していること, および, 状況入力数の減少率ほどには顕著でないものの, コスト関数の計算にかかる時間も短くなっていることが見てとれる. 特に two-way 交通流を対象とした場合では, 計算時間は 1/30 程度となっている.

### 4.10.3 コスト関数を用いたエレベータ割当て方策の評価

本小節では、4.10.2 節で求められた最適なコスト関数および準最適なコスト関数によるかご運行の有効性が調べられる。そのために、4.10.1 節で参照された down-peak 交通流に従うものとして作成された 10,000 個の例題から 1,000 個が任意に選択され、既存手法 (CD)、最適方策、準最適方策がそれぞれ適用された。最適方策は、有限期間のマルコフ決定過程であれば関数の系列であるが、本章では無限期間のマルコフ決定過程が対象とされているため、最適方策は状態を決定へと写す 1 つの関数とみなすことができる<sup>6)</sup>。具体的には、最適方策および準最適方策は、それぞれ、最適なコスト関数を用いて式 (4.67) により、準最適なコスト関数を用いて次の式:

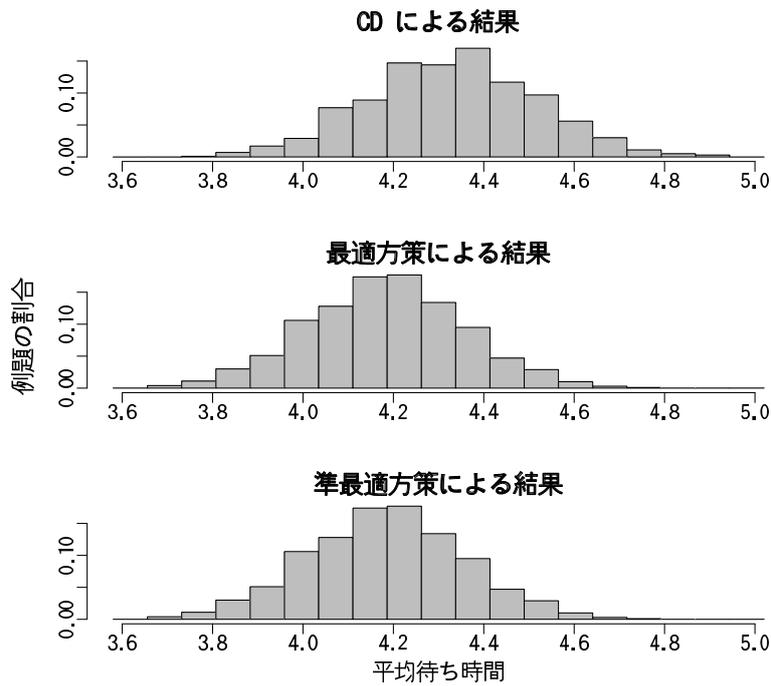
$$\arg \min_{a \in \mathcal{A}_x} \sum_{x' \in \mathcal{X}} p_{x,x'}(a) \tilde{J}(x') \quad (4.98)$$

により決定を与えるかご割当て手法である。なお、既存手法としては CD が用いられる。

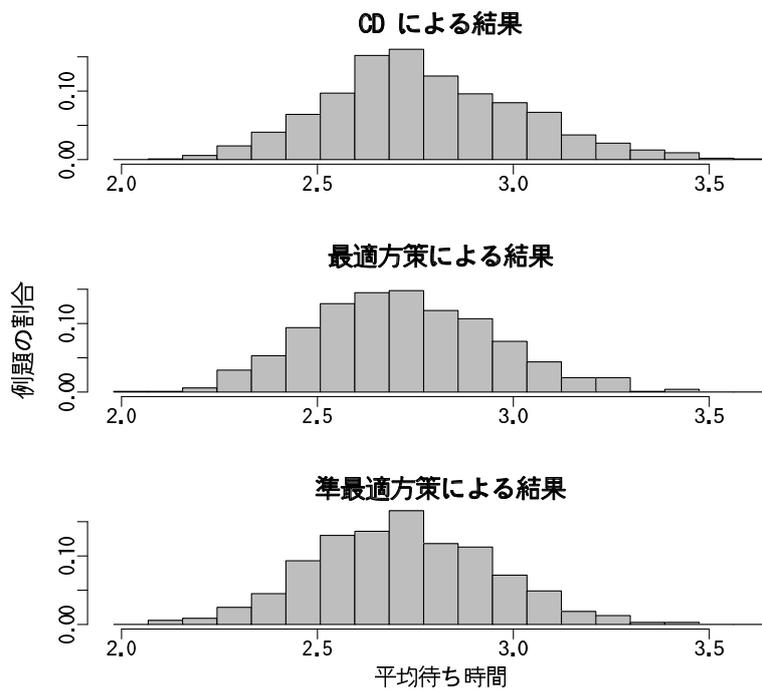
CD、最適方策および準最適方策による客の平均待ち時間の分布が、客の平均待ち時間がある範囲に含まれる例題の割合として、図 4.7(a) に示される。同様に、two-way 交通流を対象とした場合の同様の分布が、図 4.7(b) に示される。

図 4.7(a), 4.7(b) より、最適方策および準最適方策は CD よりも統計的に有意に有効であると推測される。このことを調べるために、一定の交通流下であるかご割当て手法を用いてかごを運行させたとき、あるホールである時刻にかごを待っている客数は、ホール・方向の組合せごとに同一の確率分布に従うと仮定する。このとき、十分に長い計画期間に渡るそれらの和は正規分布に従い、かつこれらを階床および方向に渡って足し合わせた値の定数倍である客の平均待ち時間も、正規分布とみなすことができる。この考えに基づき、各かご割当て手法より得られたかご運行における客の平均待ち時間の集合をそれぞれ異なる標本として、Welch の検定を適用した。この結果、CD による標本の母集団と最適方策による標本の母集団は同じ母平均を持つという帰無仮説、および CD による標本の母集団と準最適方策による標本の母集団は同じ母平均を持つという帰無仮説は、どちらも有意水準 0.01 で棄却された。なお、最適方策による標本の母集団と準最適方策による標本の母集団は同じ母平均を持つという帰無仮説は、有意水準 0.1 でも棄却されなかった。これらの結果より、客の平均待ち時間に関して、最適方策および準最適方策は CD よりも有効、かつ互いに大きく異なることはないと考えられる。

現実のエレベータシステムの運用においては、客の平均待ち時間よりも長待ち率が重要視されることが多い。最適方策や準最適方策によるかご運行も、例えば客の平均待ち時間において有効であっても、長待ち率が高いならば、必ずしも現実的に有効とはいえない。これを調べるために、平均待ち時間よりも長待ちの発生と関係が強い指標である客に渡る最大待ち時間を考慮し、その例題集合に渡る分布を調べる。down-peak 交通流および two-way 交通流に従って客が到着する 2 つの問題を対象とした分布が、それぞれ図 4.8(a), 4.8(b) に示され



(a) Down-peak 交通流下における客の平均待ち時間の分布



(b) Two-way 交通流下における客の平均待ち時間の分布

図 4.7: 客の平均待ち時間の例題集合に渡る分布

横軸はある例題から各かご割当て手法により作成されたかご運行における客の平均待ち時間の範囲を，縦軸はそのような範囲に含まれる例題の割合を表す。

表 4.6: 最適方策あるいは準最適方策によるかご運行における客の平均待ち時間比および最大待ち時間比の例題集合に渡る平均

縮約度 ( $\theta$ )	Down-peak		Two-way	
	平均待ち時間比	最大待ち時間比	平均待ち時間比	最大待ち時間比
0	0.967661	0.846011	0.97957	0.93831
0.1	0.967707	0.845307	0.981108	0.944241

る。この結果より、検定を行うことは難しいが、客の最大待ち時間においても、平均待ち時間の場合と同様のことがいえると推測される。

次に、最適方策および準最適方策の CD に対する有効性を定量的に調べるために、客の平均待ち時間および最大待ち時間の CD に対する比を計算した。客の平均待ち時間比は、式 (2.16) における待ち時間、旅行時間、長待ち率、最大待ち時間の重みを、それぞれ

$$w^w = 1, w^t = 0, w^l = 0, w^M = 0$$

と設定した上で、式 (2.21) の  $R_1$  として最適方策あるいは準最適方策を、 $R_2$  として CD を用いた場合の値に等しい。同様に、客の最大待ち時間比は、待ち時間、旅行時間、長待ち率、最大待ち時間の重みを、それぞれ

$$w^w = 0, w^t = 0, w^l = 0, w^M = 1$$

と設定した場合の値に等しい。

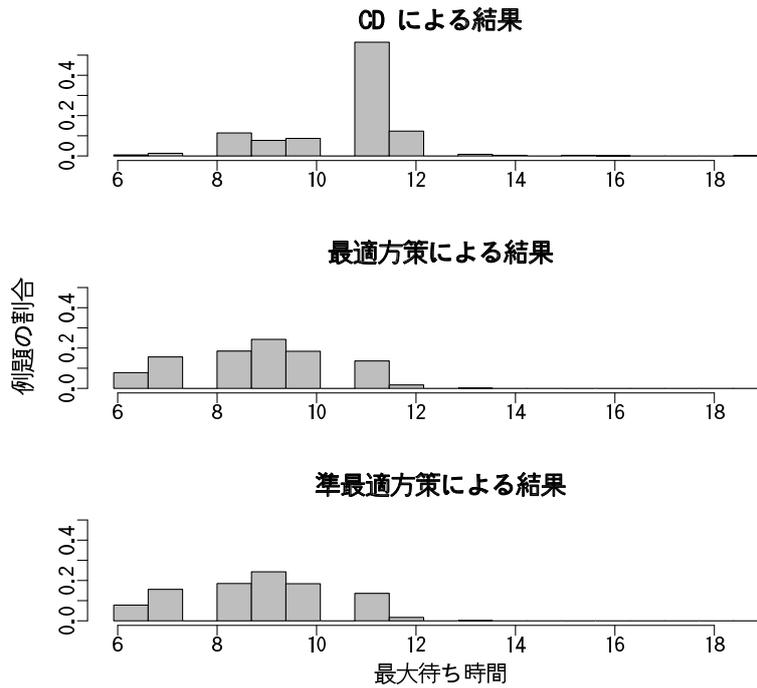
前述の、交通流ごとに選択された 1,000 個の例題集合に渡って計算されたこれらの比の平均が、最適方策による結果を  $\theta = 0$  の行として表 4.6 に示される。

表 4.6 より、例えば down-peak 交通流下では、動的計画法によるかご割当ては平均待ち時間において約 3.2%、最大待ち時間において約 15%、CD よりも平均的には有効であると考えられる。このように、動的計画法により求められたコスト関数に基づくかご割当て手法は、CD よりも有効であると考えられる。ただし、“次元の呪い” が解決 / 回避されていないため、対象とできるエレベータシステムの規模が限られている点に注意が必要である。

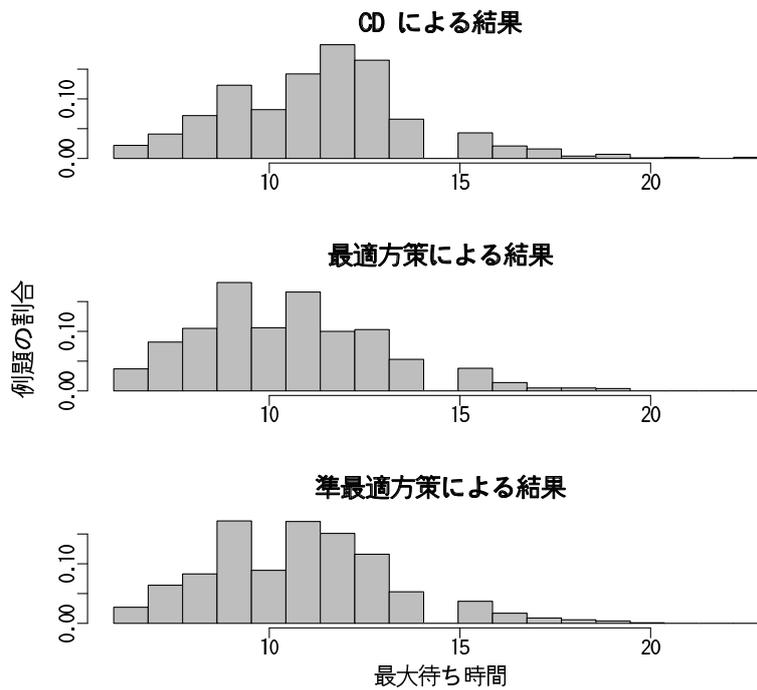
#### 4.10.4 状態遷移モデルの評価

図 4.7(b) の基データから、準最適方策が CD に対して最も有効であった (平均待ち時間が短かった) データを選択し、それに対応する例題に対して CD および準最適方策を適用することで、2 つのかご運行が得られた。これらの運行における期間  $[1, 50]$  のかごの軌跡およびホール呼び登録状況の推移が、図 4.9 に示される。

図 4.9 より、時刻 8 前後に 3 階に到着した客を乗せたかご 2 が 1 階へ移動する途中、1 階においてホール呼びが登録されたとき、CD は当該ホール呼びの待ち時間を短くするために



(a) Down-peak 交通流下における客の最大待ち時間の分布



(b) Two-way 交通流下における客の最大待ち時間の分布

図 4.8: 客の最大待ち時間の例題集合に渡る分布

横軸はある例題から各かご割当て手法により作成されたかご運行における客の最大待ち時間の範囲を，縦軸はそのような範囲に含まれる例題の割合を表す。

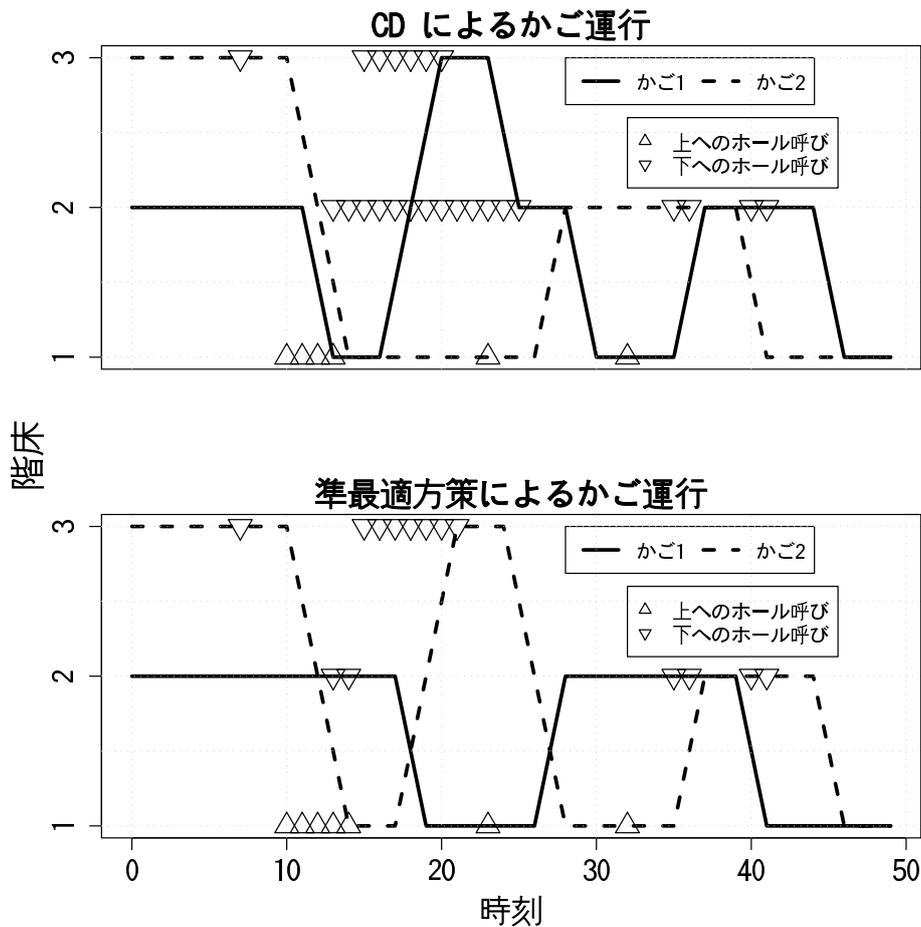


図 4.9: ある例題に対する CD によるかご運行および準最適方策によるかご運行  
 上, 下のプロットは, それぞれ CD, 準最適方策によるかご運行を表す.  
 各プロットにおける実線, 破線は, それぞれかご 1, 2 の軌跡を表す. また,  
 上三角, 下三角は, ある期・ある階床において上, 下へのホール呼び  
 が登録されていることを表す.

遊休中のかご 1 を割り当てていることに対し, 準最適方策は既に 1 階へ向かっているかご 2 を割り当てていることが見てとれる. この結果, エレベータシステムの性能を悪化させる大きな要因である団子運転<sup>69)</sup>が回避され, 準最適方策によるかご運行では, 特に時刻 12 に 2 階で登録された下へのホール呼びの待ち時間が短くなっている. これらの結果より, 本章で用いられた状態遷移モデルは, エレベータシステムの重要な振舞いを表現しうると考えられる. また, 小規模なエレベータシステムに対しては, DPRM により求められた準最適コスト関数に基づいたかご割当て方策により, 団子運転をある程度は回避しうると考えられる.

## 4.11 結言

本章では、エレベータシステムが、システムからは必ずしも計測できない、システムの振舞いを確率的とする要因（状況入力）を考慮することで、間接制御を受ける確率的離散事象システムとしてモデル化された。これに基づき、計画期間の交通流がある既知の確率分布に従うという前提のもとで、ホール呼びへのかご割当てを計画するエレベータ運行計画問題が、ある時刻で登録されているホール呼び数を即時コストとする割引のある無限期間のマルコフ決定過程としてモデル化された。ここで、エレベータシステムの状態遷移確率は、ある状態にてある決定を選択することでシステムをある状態へ遷移せしめる状況入力の生起確率の総和として定式化された。この式では、エレベータシステムの状態を多数の2値状態変数からなるものと考え、各状態変数の変化を2値関数として個別に考慮することで構成された、システムの状態遷移関数が用いられている。

次に、マルコフ決定過程としてのモデルに対する報酬反復法の構成が示された。その計算式から、最適なコスト関数の計算には状況入力空間に渡る多数回の繰返しが必要であることが指摘され、生起確率の低い状況入力を考慮しないこと（状態遷移モデルの縮約）による計算の効率化が示唆された。これに基づき、縮約された状態遷移モデルの上で報酬反復法を適用する動的計画法（DPRM）が提案された。その特徴として、生起確率の非減少順に選ばれた状況入力が考慮されないよう状態遷移モデルを縮約することで、最適なコスト関数とDPRMによる準最適なコスト関数との差を、考慮されない状況入力の生起確率の総和に比例する範囲に限定できることが示された。

計算例では、報酬反復法およびDPRMが、交通パターンがdown-peakあるいはtwo-wayである2つの問題に対して適用された。この結果、動的計画法により求められたコスト関数を用いたかご割当て手法は、統計的に有意に既存手法（CD）よりも客の平均待ち時間を短くしうることが示された。また、DPRMを用いることで、報酬反復法により求められた最適なコスト関数にあまり劣らない準最適なコスト関数を、より短い計算時間で求められることが示された。

今後の課題として、割引率をより1に近づけた場合の計算結果の調査や、コスト関数を近似する動的計画法<sup>70)</sup>の利用などによる“次元の呪い”の回避、状況入力の遷移確率の精確化、最適方策との比較による既存のかご運行計画手法の分析、状態遷移関数の構成を容易とする方法論の構築、電子回路としての計算手続きの実装<sup>71)</sup>に関する考察などが挙げられる。



---

## 第 5 章

### クラス III: 交通流が確率的かつ未知である状況におけるエレベータ運行計画

#### 5.1 緒言

本章では、計画期間における交通流がある定常な確率分布に従っていることは判明しているが、確率分布そのものは未知であるという状況におけるエレベータ運行計画問題 (2.4.3 節におけるクラス III) が対象とされる。このような状況は、第 3 章や第 4 章において考慮されたものと比べてより現実的である。それでも、実際の交通流は時刻の進行に伴って変化するため、本章で前提とされる状況が厳密に成立する時間はあまり長くないと考えられる。しかし、その状況は、出社時など高い交通頻度が短時間続く場合に成立すると考えられること、そして交通流が非定常な確率分布に従う問題 (クラス IV) を考慮するための基礎を与えうることから、その状況のもとでのエレベータ運行計画を考えることは重要であると考えられる。

第 3 章や第 4 章で示された研究と本章で示される研究は、対象とする問題のクラスが異なるだけでなく、立場が理論的であるか実際的であるかという点が異なる。すなわち、本章で構成されるかご運行計画手法は、大規模なエレベータシステムへ適用可能であることを要件とする。ここで、大規模なエレベータシステムとは、強化学習が適用されたもの<sup>16)</sup>と同様、4 かご 10 階床以上のものを指すとされる。前述の要件より、例えば交通流の従う確率分布が判明しても、例えば第 4 章で示された動的計画法の適用が“次元の呪い”のために不可能であるなど、最適化手法をそのまま用いることはできない。そのため、実際的研究の多くは理論的研究と切り離して進められ、2.4.2 節で示された両者の相補的組合せによる研究へ注意が払われることはほとんどない。しかし、計算機のコモディティ化やオープンソースソフトウェアの発展、CPU のマルチコア化などによって並列計算が身近になっていること<sup>3)</sup>、および大量の主メモリを搭載した計算機の利用が容易となりつつあることから、遠くない将来に中規模な問題に対しては理論的研究による最適なかご運行の導出が可能になると期待される。このとき、最適なかご運行を教師データとして、何らかの学習あるいは回帰分析を行うことで、理論的研究の成果を大規模な問題へ応用するという方法が考えられる。この方法をとるためには、実際的研究における手法は、理論的研究による結果の再現あるいは結果への

追従を、可能であれば容易に、行えるという性質を備える必要があると考えられる。

以上の背景のもと、本章では、エレベータ運行計画問題が、エレベータシステムの状態から割当てかごを計算するルールベースを獲得する問題としてモデル化される。このルールベースは、多くの状態へマッチし適切なかごを与える一方、不適当な状態へはマッチしないよう設計された単位ルールから構成される。この特徴から、適切な単位ルールを蓄積させていくことによる最適なかご割当てルールへの漸次的な接近が期待されるため、そのようなルールベースは前述の性質をある程度備えていると考えられる。現時点では教師データの利用が不可能であるため、ルールベースとして符号化されるかご運行ルールは、教師なし学習により獲得される。単位ルールがクラシファイアシステム<sup>7)</sup>を構成するクラシファイアの前件部に似ていることから、教師なし学習手法として、クラシファイアシステムを獲得するための一般的手法である遺伝的機械学習<sup>72)</sup>が適用される。計算例では、客が異なる交通流に従って到着する複数の問題に対して遺伝的機械学習が適用され、問題ごとにルールベースが獲得される。これらのルールベース、およびそれらを連結して作成されたルールベースが、学習時に対象とされた問題の例題に対して評価される。

## 5.2 前提条件

本章における前提は、4.2節に示されたものとほぼ同様であるため、異なる点を列挙するにとどめる。

- (1) 時刻は実数値をとり、エレベータシステムはイベント・ドリブン・システムとしてモデル化される。
- (2) 計画期間の交通流は一定であるが、不明である。
- (3) かごの加速度、速度、扉開放率を考慮する。
- (4) かごの加速度を  $\{-A^M, 0, A^M\}$  の1つとして離散的に変更することで、かごの上下動は制御される\*。
- (5) かごの速度は  $[-V^M, V^M]$  の範囲をとる。
- (6) 客は、ある階床と同じ位置に速度0で停止しており、かつ扉開放率が100%であるかごへのみ、乗降できる。
- (7) かごの積載量を考慮する。
- (8) 客の質量は一様である。
- (9) 階床の位置は実数値をとり、また階床間の距離が一様とは限らない。
- (10) ホール呼びの期待待ち時間は不明である。

\*現実のエレベータシステムとは異なり、かごの加加速度は制御されない。

- (11) 客は、乗ろうとしたかごへ、積載量オーバーや旅行方向の異なる他の客に先を越されることで乗れなかった場合、ホール呼びボタンを再押下する。
- (12) 少なくとも、ホール呼びボタンを押下することでイベントが生起する。
- (13) 一時にかごへ割り当てられていないホール呼び数は、高々1つである<sup>†</sup>。
- (14) 客が長待ちとみなす閾値は60秒である。すなわち、

$$\Delta = 60.$$

なお、本章では、目的関数として、式 (2.16) における重みを、

$$w^w = 1, w^t = 1, w^l = 60, w^M = 0 \quad (5.1)$$

と設定した関数が用いられる。

### 5.3 記号の定義

本章では、これまでに定義された記号の一部に加えて、次に定義される記号が使用される。なお、エレベータシステムの状態  $\boldsymbol{x}$  は、式 (2.14) のように与えられているとする。

- $N_a$ : 決定指標の数。
- $\mathcal{O}$ : 決定指標の組合せが張る空間。
- $A_{k,q}^{(i)}(\boldsymbol{x}, t)$  ( $i = 1, \dots, N_a; k = 1, \dots, N_c$ ): 時刻  $t$ , 状態  $\boldsymbol{x}$  にて、種類が  $q$  であるホール呼びへかご  $k$  を割り当てるとした場合の決定指標  $i$  の値。
- $D^{(i)} \in \mathcal{N}$  ( $D^{(i)} > 0$ ) ( $i = 1, \dots, N_a$ ): 決定指標  $i$  の分割数。ここで、 $\mathcal{N}$  は0を含む自然数の集合を表す。
- $A_m^{(i)}$  ( $i = 1, \dots, N_a$ ): 決定指標  $i$  の下界値。
- $A_M^{(i)}$  ( $A_M^{(i)} > A_m^{(i)}$ ) ( $i = 1, \dots, N_a$ ): 決定指標  $i$  の上界値。
- $\bar{A}_{k,q}^{(i)}(\boldsymbol{x}, t)$  ( $i = 1, \dots, N_a; k = 1, \dots, N_c$ ): 時刻  $t$ , 状態  $\boldsymbol{x}$  にて、種類が  $q$  であるホール呼びへかご  $k$  を割り当てるとした場合の決定指標  $i$  の値を、 $[0, D^{(i)} - 1]$  の範囲に収まるよう規格化した整数値。  $A_{k,q}^{(i)}(\boldsymbol{x}, t)$  から、次のように計算される。

$$\bar{A}_{k,q}^{(i)}(\boldsymbol{x}, t) := \left\lfloor D^{(i)} \frac{A_{k,q}^{(i)}(\boldsymbol{x}, t) - A_m^{(i)}}{A_M^{(i)} - A_m^{(i)} + \epsilon} \right\rfloor. \quad (5.2)$$

ただし、 $\epsilon$  は十分小さな正数である。

<sup>†</sup>同時に複数のホール呼びボタンが押下されることがないため。離散時間モデルでも、単位時間が十分短ければ、この前提が成立しているとみなせる。

- $r_m^{(i)} \in \{0, \dots, D^{(i)} - 1\}$  ( $i = 1, \dots, N_a$ ): 規格化された決定指標  $i$  がとる値のうち, 考慮される最小のもの .
- $r_M^{(i)} \in \{0, \dots, D^{(i)} - 1\}$  ( $r_M^{(i)} \geq r_m^{(i)}$ ) ( $i = 1, \dots, N_a$ ): 規格化された決定指標  $i$  がとる値のうち, 考慮される最大のもの .
- $C_k^s(x)$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ): 状態  $x$  においてかご  $k$  の近傍にあるかごの集合 . 次のように計算される .

$$C_k^s(x) = \left\{ k' \in \{1, \dots, N_c\} \mid k' \neq k, v_k^c = v_{k'}^c, f_k^n = f_{k'}^n \right\}. \quad (5.3)$$

- $C_{k,q}^n(x)$ : 状態  $x$  において, 種類が  $q$  であるホール呼びを処理可能な状態へと遷移するために要する時間が, かご  $k$  による時間以下であるかごの集合 . 次のように計算される .

$$C_{k,q}^n(x) = \left\{ k' \in \{1, \dots, N_c\} \mid k' \neq k, t_{k',q}^h(x) \leq t_{k,q}^h(x) \right\}. \quad (5.4)$$

ここで,  $t_{k,q}^h(x)$  は 2.2.3 節で示されたかご  $k$  の行程時間を表す .

- $N_r$ : ルールベースを構成する単位ルールの数 .
- $r_j$  ( $j = 1, \dots, N_r$ ): ルールベースにおける  $j$  番目の単位ルール .
- $r_j^{(i)} \in \{r_m^{(i)}, \dots, r_M^{(i)}, \#\}$  ( $j = 1, \dots, N_r; i = 1, \dots, N_a$ ): ルールベースにおける  $j$  番目の単位ルールの  $i$  番目の構成要素 . ここで,  $\#$  は, 任意の要素に適合するドントケア記号である .
- $m_{a,j}$ : あるかごに関して計算される規格化された決定指標の組合せ  $a$  と, 単位ルール  $j$  との適合度 .
- $m_a$ : あるかごに関して計算される規格化された決定指標の組合せ  $a$  と, ルールベースとの適合度 . 次のように与えられる .

$$m_a := \max_{j \in \{1, \dots, N_r\}} m_{a,j}. \quad (5.5)$$

- $N_e^1$ : 学習用例題集合の大きさ .
- $N_i$ : 遺伝的機械学習における集団を構成する個体数 . なお, 本章では Pitt アプローチの遺伝的機械学習<sup>73)</sup> が用いられるため, 1 つの個体が 1 つのルールベースに対応する .
- $e_M$ : 個体の評価回数の上限值 .
- $p_c$ : 交叉率 .
- $p_m$ : 突然変異率 .

## 5.4 エレベータ運行ルールのルールベースとしてのモデル化

### 5.4.1 実際研究におけるエレベータ運行ルールのモデル

第3章、第4章では、まずエレベータ運行計画問題が既存の最適化問題の1つとしてモデル化され、次にそれらのモデルに適した解法が構成・適用された。このようなアプローチは、現実規模のエレベータシステムを対象としたときに最適化問題の規模が非常に大きくなり、今までに知られているどのような解法でも求解に非現実的な資源が必要となることから、実際研究においてはとることができない。実際研究では、かご運行計画手法（あるいはかご運行ルール）を何らかのパラメータを持つものとしてモデル化し、そのパラメータ値をメタ・ヒューリスティクスなどを用いて調節するというアプローチがとられることが多い。そのようなアプローチでとられているモデルおよび各モデルを用いる研究は、大きく次のように分類できると考えられる。

- 背後に擬似的コスト関数を考え、コストの小さくなるかごを割り当てるというモデル:
  1. 抽象化された状態空間の上で定義される近似的コスト関数を獲得する<sup>16)</sup>。
  2. 擬似的コスト関数を有効なかご割当てに関係すると考えられる関数の重み付け和とし、その重みを学習させる<sup>17, 28, 42)</sup>。
- ANN としてのモデル:
  3. 入力層から中間層の重みを既存のかご運行計画手法を教師として、中間層から出力層の重みを教師なしで、それぞれ学習させる<sup>52)</sup>。
- 一種の意思決定木としてのモデル:
  4. ループを生じうる有向グラフとしてモデル化し、GNP により獲得する<sup>44)</sup>。
- ルールベースとしてのモデル:
  5. ファジィ・ルールベースとしてモデル化し、熟練者との協同作業により獲得する<sup>36)</sup>。
  6. EBP としてモデル化し、遺伝アルゴリズムにより獲得する<sup>53)</sup>。

### 5.4.2 可用範囲に留意したルールベースの設計

5.4.1 節で示された6つのモデルのうち、

- 近似的コスト関数としてのモデル化 (モデル 1) では、状態の抽象化;
- 何らかの関数の重み付け和としてのモデル化 (モデル 2, 3) では、それらの関数の設計;
- ファジィ・ルールベースとしてのモデル化 (モデル 5) では、熟練者の負担の軽減;

が難しく、中規模のエレベータシステムを対象とした理論的研究の結果を教師とする学習を行うことは困難であると考えられる。これら以外のモデルでは、何を教師データとするか（最適なコスト関数か、最適な運行ルールか）に留意する必要があるものの、教師あり学習は基本的に可能であると考えられる。本章では、状態をかごへと写す任意のかご運行ルールを if-then ルールからなるルールベースとして表現することが原理的には可能であるという事実から、それらのモデルのうちルールベースが選択される。

かご運行ルールをルールベースとしてモデル化するには、ルールベースを構成する単位ルールの設計が肝要である。例えば、十分詳細なものとして定義された状態を前件部、そのときに割り当てるべきかごを後件部とする if-then ルールを単位ルールとすることが考えられる。しかし、このとき、ルールベースはエレベータシステムが取りうる状態の数だけの単位ルールを含むことが必要となり、動的計画法の適用と同様“次元の呪い”のために、その実現は非常に困難である。最適なかご運行ルールを表現することができ、かつ獲得が容易となるようルールベースを設計するためには、少なくとも次の点に留意が必要であると考えられる。

(1) 合理的距離の定義不可能性:

エレベータシステムの状態はノミナルな離散状態変数（呼び登録の有無など）を含むため、状態空間上で合理的距離を定義することができない。また、決定（ある状態で割り当てるべきかご）もノミナルであるため、決定空間上でも合理的距離を定義することができない。

(2) 可用範囲の広さ:

単位ルールは、複数の状態において用いられるよう設計されなければならない<sup>74)</sup>。すなわち、複数の状態にまたがる可用範囲を持たねばならない。

(3) 可用範囲の独立性:

ある状態で用いられる単位ルールは、他の単位ルールには依存せずに定められなければならない。すなわち、可用範囲が他の単位ルールから影響を受けてはならない。そうでなければ、同じルールベースに異なる単位ルールを加えることで作成された 2 つのルールベースはまったく違ったかご運行ルールとなりえ、漸次的なルールベースの構成が困難となる。

EBP を用いた研究<sup>53)</sup>では、事例ベースと単位ルール間のトーナメントを用いて計算される類似度により状態間の距離を代用することで、前述の留意点の (1) および (2) が解決されている。しかしながら同時に、類似度を用いることで、留意点 (3) が問題になると考えられる。

以上の考察を踏まえ、本章では、“相対的にある特徴を持つ決定（かご）を割り当てる”という規則を表しうるものとして、単位ルールを設計する。このような単位ルールを、その特徴から、such-that ルールと呼ぶことにする。such-that ルールの集まりとしてのルールベー

スは、コスト関数を何らかの関数の重み付け和として考えるというモデルを一般化したものとなっており、そのようなモデルに基づくかご運行ルールを arg-min ルールと呼ぶとすれば、本章のルールは arg-match ルールと呼ぶことが妥当であると考えられる。また、arg-min ルールにおいて重み付けられる関数や、arg-match ルールにおいてかごの特徴を表す関数を、決定指標と呼ぶことにする。arg-min ルールでは、任意の状態において割当てかごが計算されることに対し、arg-match ルールでは、その状態に適合する単位ルールが存在しない可能性がある。このような場合は、何らかのデフォルトルールが用いられるとする。デフォルトルールは、いずれ有効な単位ルールが蓄積されることで使われなくなると期待されるため、任意でよいと考えられる。本章では、デフォルトルールとして 2.3.1 節に示された CD が用いられる。

単位ルール  $r_j$  は、次のように  $N_a$  個の要素から構成されるリストとして設計される。

$$r_j := \langle r_j^{(1)}, \dots, r_j^{(N_a)} \rangle. \quad (5.6)$$

ここで、単位ルール  $j$  の構成要素  $r_j^{(i)}$  ( $i = 1, \dots, N_a$ ) は、あるかごに関する決定指標  $i$  の値が当該単位ルールと適合するか否かを表し、次のいずれかの値を取る。

$$\{r_m^{(i)}, \dots, r_M^{(i)}, \#\}. \quad (5.7)$$

$r_j^{(i)}$  が取りうる値は、次のように定義される。

- $r_m^{(i)}, r_M^{(i)}$ : それぞれ、規格化された決定指標  $i$  の考慮される最小値、最大値。
- $\#$ : ドントケア記号。単位ルールの構成要素  $r_j^{(i)}$  がこの値をとっているとき、その単位ルールは任意のかごに対して、決定指標  $i$  について適合していると判定される。

時刻  $t$  に種類が  $q$  であるホール呼びが新規に登録され、かご  $k$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ) に関する決定指標  $i$  の値が計算されているとする。このとき、ある単位ルール  $j$  ( $j = 1, \dots, N_r$ ) において、次の式 (5.8) に示される関係が成立すれば、かご  $k$  が割当てかごとして選択される。

$$r_j^{(i)} = \bar{A}_{k,q}^{(i)}(\mathbf{x}, t) \vee r_j^{(i)} = \#, \quad \forall i \in \{1, \dots, N_a\}. \quad (5.8)$$

ただし、単位ルールの構成要素がドントケア記号をとっていない場合の方が、より適合するとみなされるべきである。

以上の設定より、単位ルールのとりうる組合せの数は次のようになる。

$$\prod_{i=1}^{N_a} (D^{(i)} + 1). \quad (5.9)$$

あるルールベースは、これらの組合せの 1 つを  $N_r$  個連結させることで作成されるリストであり、その組合せ数は膨大となる。ここで、集合ではなくリストとされる理由は、かご運行の再現性を保つため、式 (5.8) の関係が複数の〈単位ルール, かご〉のペアについて成立した場合、それらのうち 1 つのペアだけが一意に使用されることを企図しているためである。

### 5.4.3 ルールベースによるエレベータ割当て計算

5.4.2 節で示されたルールベース (arg-match ルール) によるかご割当ては, かごごとにルールベースとの適合度を計算し, その値が最大となるかごを割り当てることで行われる. 適合する単位ルールが存在しない場合に, デフォルトルールによるかごを割り当てることは, 少なくとも 1 つの単位ルールが適合する場合の適合度の最小値よりも小さく, かつ適合する単位ルールが存在しない場合の適合度の最大値よりも大きな閾値を設定し, デフォルトルールにより計算されたかごへこの閾値と等しい適合度を与えることで実施できる. このようなかご割当て計算は, その発想の基となった, 決定指標の重み付け和最小化ルール (arg-min ルール) によるかご割当て計算との比較により理解が容易になると考えられることから, arg-min ルール, arg-match ルールによるかご割当て計算の概観が, それぞれ図 5.1, 5.2 に示される.

ルールベースに含まれる単位ルール  $\langle r_1, \dots, r_{N_r} \rangle$  の, あるかごに関する規格化された決定指標の組合せ  $\mathbf{a} := \langle a_1, \dots, a_{N_a} \rangle$  に対する適合度  $m_{\mathbf{a},j}$  は, 次のように計算される.

$$m_{\mathbf{a},j} = d_{\mathbf{a},j}^{(1)} (\max(N_r, N_a))^2 + d_{\mathbf{a},j}^{(2)} (\max(N_r, N_a)) + d_j^{(3)}. \quad (5.10)$$

ここで,  $d_{\mathbf{a},j}^{(1)}$ ,  $d_{\mathbf{a},j}^{(2)}$ ,  $d_j^{(3)}$  は, それぞれ次のように定義される.

- $d_{\mathbf{a},j}^{(1)} \in \{0, \dots, N_a\}$ : 決定指標の組合せ  $\mathbf{a}$  と適合する単位ルール  $j$  の構成要素の数. 次のように計算される.

$$d_{\mathbf{a},j}^{(1)} = \left| \left\{ i \in \{1, \dots, N_a\} \mid r_j^{(i)} = a_i \vee r_j^{(i)} = \# \right\} \right|. \quad (5.11)$$

- $d_{\mathbf{a},j}^{(2)} \in \{0, \dots, N_a\}$ : 決定指標の組合せ  $\mathbf{a}$  と一致する単位ルール  $j$  の構成要素の数. 次のように計算される.

$$d_{\mathbf{a},j}^{(2)} = \left| \left\{ i \in \{1, \dots, N_a\} \mid r_j^{(i)} = a_i \right\} \right|. \quad (5.12)$$

- $d_j^{(3)}$ : 単位ルール  $j$  のルールベースにおける位置. 次のように計算される.

$$d_j^{(3)} = j - 1. \quad (5.13)$$

ここで,  $d_j^{(3)}$  の影響により, 決定指標の組合せとの適合の度合いが同じである単位ルールが複数存在したとき, ルールベースにおいて後ろに位置するものが優先される<sup>‡</sup>.

規格化された決定指標の組合せ  $\mathbf{a}$  のルールベースに対する適合度  $m_{\mathbf{a}}$  は, 次のように与えられる.

$$m_{\mathbf{a}} := \max_{j \in \{1, \dots, N_r\}} m_{\mathbf{a},j}. \quad (5.14)$$

<sup>‡</sup> $d_j^{(3)} := N_r - j$  とすれば, 前に位置する単位ルールが優先される.

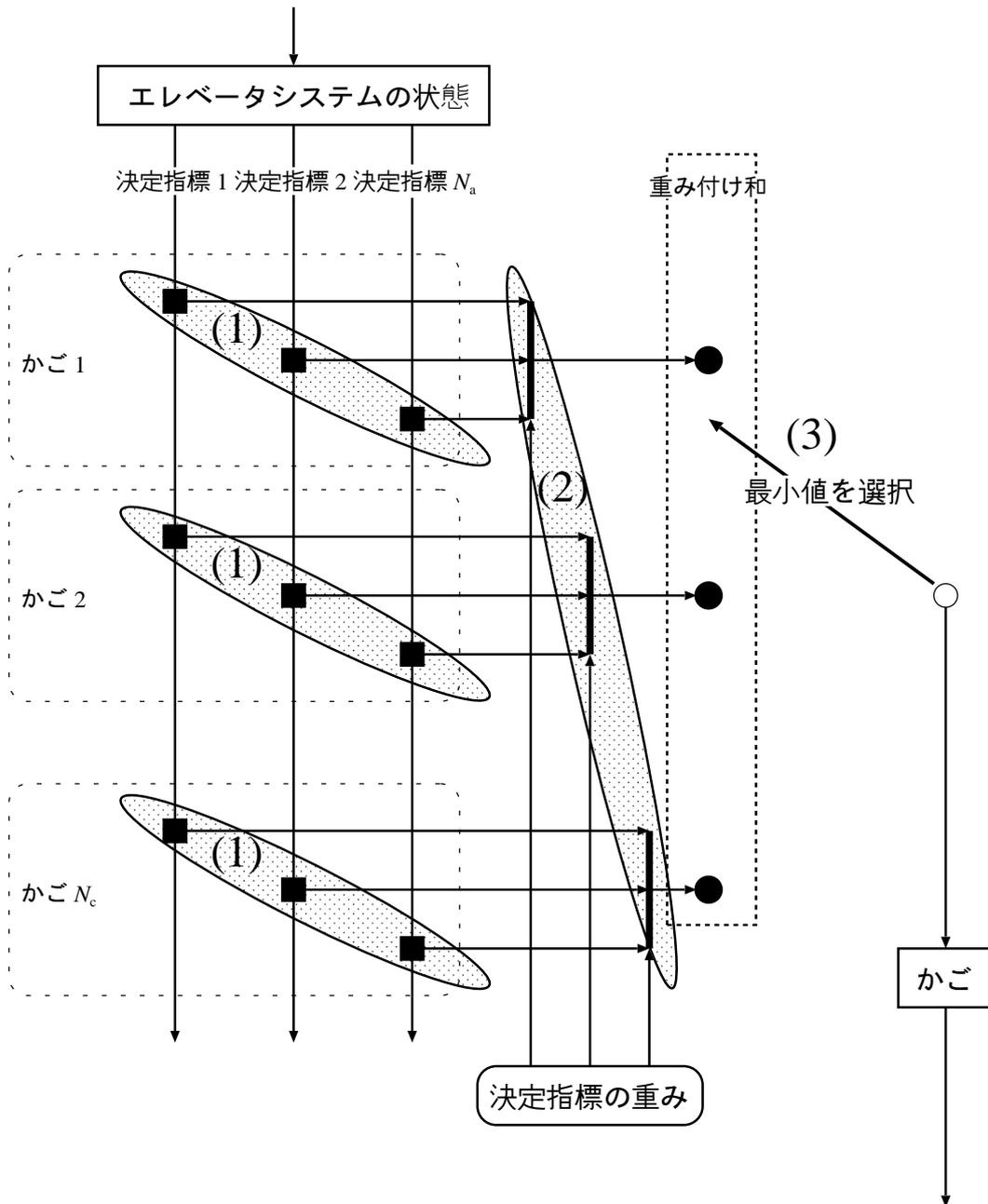


図 5.1: arg-min ルールによるかご割当て計算の概観

割り当てられるかごは、次のように計算される。(1) 各かごについて、それぞれ決定指標が計算される。(2) 各かごについて、決定指標と重みから重み付け和が計算される。(3) 重み付け和が最小であるかごが選択される。

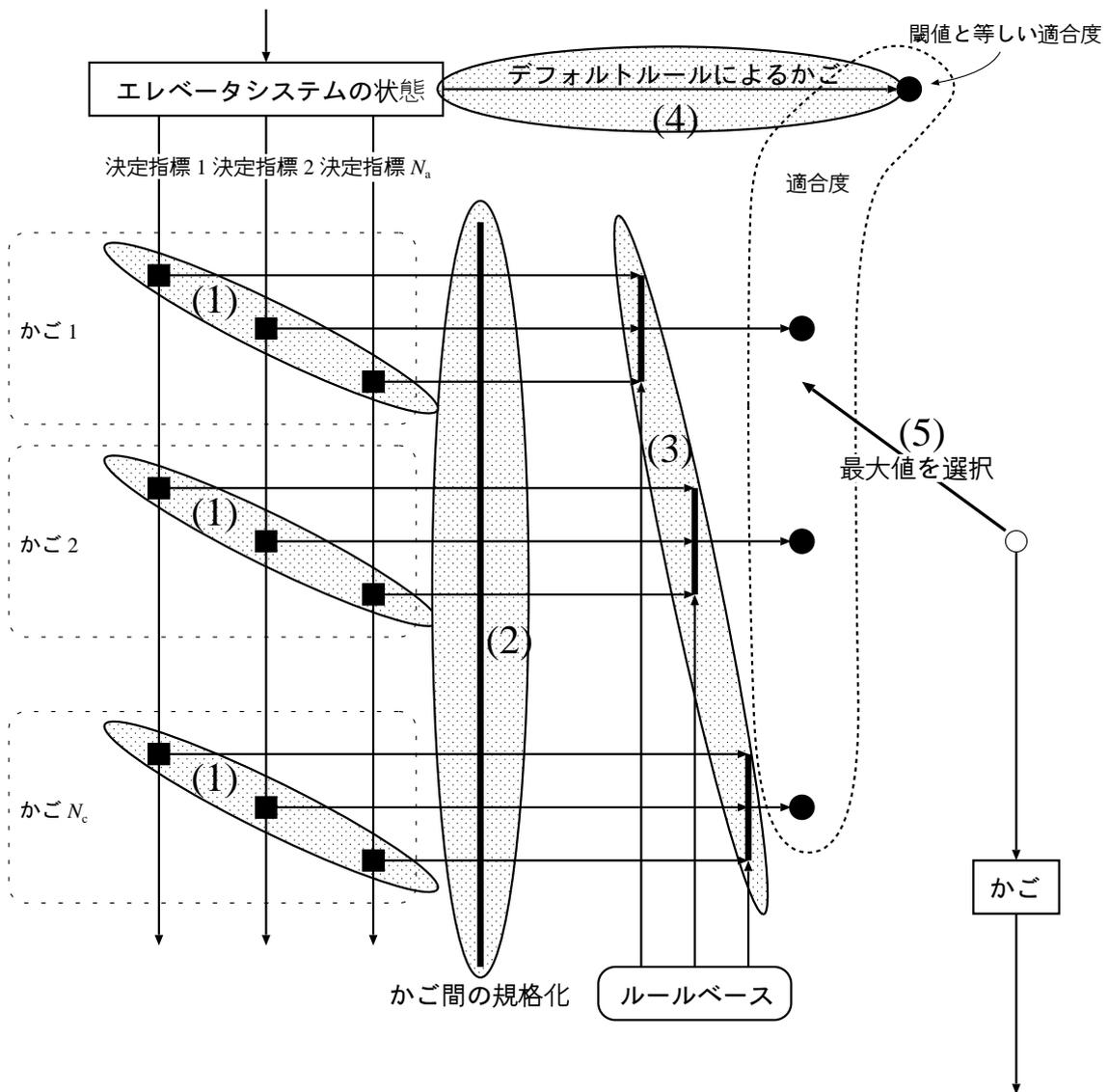


図 5.2: arg-match ルールによるかご割当て計算の概観

割り当てられるかごは、次のように計算される。(1) 各かごについて、それぞれ決定指標が計算される。(2) 各かごの各決定指標が、かご間に渡って規格化される。(3) 各かごについて、規格化後の決定指標値とルールベースからルールベースとの適合度が計算される。(4) デフォルトルールによる割当てかごが計算され、固定された閾値に等しい適合度が与えられる。(5) 各かごおよびデフォルトルールによる割当てかごの中で、適合度が最大であるかごが選択される。

かご  $k$  ( $k = 1, \dots, N_c$ ) について計算される決定指標の組合せのルールベースとの適合度を  $\hat{m}_k$ , デフォルトルールにより計算されたかごの適合度を  $\hat{m}_0$  とおけば, 割当てかご  $k$  は,

$$k = \begin{cases} k' & \text{if } k'' = 0, \\ k'' & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.15)$$

として選択される. ただし,  $k'$  はデフォルトルールにより計算されたかごを表し,

$$k'' := \arg \max_{k''' \in \{0, \dots, N_c\}} \hat{m}_{k'''} \quad (5.16)$$

である. デフォルトルールの適合度を与えるために, 2つの閾値  $\theta_1, \theta_2$  を, それぞれ

$$\theta_1 := N_a (\max(N_r, N_a))^2, \quad (5.17)$$

$$\theta_2 := N_a (\max(N_r, N_a))^2 + N_a \max(N_r, N_a) \quad (5.18)$$

と定義する. このとき, あるかごについて計算される規格化された決定指標の組合せ  $a$  は,

- (1)  $m_a < \theta_1$  なら, ルールベースと適合しない;
- (2)  $m_a < \theta_2$  なら, ルールベースと一致しない;

と考えることが妥当である. 従って, 閾値  $\theta_1$  をデフォルトルールの適合度とする. すなわち,

$$\hat{m}_0 := \theta_1. \quad (5.19)$$

## 5.5 遺伝的機械学習によるルールベースの獲得

5.4節に示された単位ルールは, クラシファイアシステムにおいて用いられるクラシファイア<sup>75)</sup>の前件部に似ている. これを踏まえて, 有効なかご運行を生成するルールベースを求めするために, クラシファイアシステムの一般的獲得方法である遺伝的機械学習 (Genetics-Based Machine Learning; GBML)<sup>72)</sup> が用いられる. 遺伝的機械学習に基づいた手法は, Michiganアプローチ<sup>76)</sup>と, Pittアプローチ<sup>73)</sup>の2つに大別される. どちらのアプローチでも, 複数の個体からなる1つの集団が遺伝アルゴリズムにより進化させられるが, Michiganアプローチでは1つの集団が1つのルールベースを (あるいは, 1つの個体が1つの単位ルールを) 符号化していることに対し, Pittアプローチでは1つの集団が個体数に等しい複数のルールベースを (あるいは, 1つの個体が1つのルールベースを) 符号化している点が大きく異なる. 前者のアプローチの特徴として, 使用されたクラシファイアを記憶しておく機構 (ルール/メッセージシステム) や, ある状況で得られた評価をその状況の発生に貢献したクラシファイア群へと伝播する機構 (クレジット分配システム) などを用いることで, ルールベースをオンライン的に (環境の変化に追従するように) 学習できることが挙げられる. 後者のアプローチの特徴として, クレジット分配システムなどの複雑な機構を必要とせず構成

が容易であり、オフライン的な (ある環境を前提とした) 学習に適していることが挙げられる。前者のアプローチをとる手法として、ルール/メッセージシステムやクレジット分配システムの構成が異なる多数の手法が提案されている<sup>77,78)</sup>。これと比べて、後者のアプローチをとる研究で用いられている手法は、適用される遺伝的操作が異なるに過ぎないなど、基本的に同じである場合が多い<sup>79)</sup>。肯定的に換言すれば、Pitt アプローチでは、恣意性の低い手法を構成することが可能である。

本章では、これらの特徴を踏まえて、

- エレベータシステムの挙動が複雑・確率的であり、決定選択の影響が大きい (ある状態である決定を選択したことが、後続の状態遷移へどのような影響も与える);
- システムが置かれる環境は交通流に相当するが、5.2 節に示された前提より、これは計画期間において一定であると考えられる;

ことから、Pitt アプローチが取られる。これ以外の、本章で用いられる遺伝的機械学習の構成における特徴として、次が挙げられる。

- ルールベースを学習する際に、ある問題の  $N_e^1$  個の例題 (例題に関しては、2.2.3 節を参照) からなる集合が用いられる。この集合は学習用例題集合と呼ばれる。
- ある例題集合に対するルールベース  $R$  を符号化する個体の適応度は、次の式により計算される。

$$\max((w^w + w^t)T - G(R), 0). \quad (5.20)$$

ここで、 $w^w, w^t$  は、それぞれ客の待ち時間、旅行時間の重みであり、式 (5.1) のように設定される。また、 $G(R)$  は、 $N_e = N_e^1$  とした上で式 (2.20) により計算されるルールベース  $R$  の評価値である。

- 個体間で交叉を適用する前に、個体ごとに、染色体を構成する単位ルールがランダムに並び替えられる。
- 単位ルールの構成要素ごとに交叉・突然変異といった遺伝的操作が適用される。
  - ある個体が符号化するルールベース上のある位置 (遺伝子座) に置かれている単位ルールは、別の個体が符号化するルールベース上の同じ位置にある単位ルールと、確率  $p_c$  で一点交叉される。
  - 単位ルールの各構成要素は、確率  $p_m$  でランダムに対立遺伝子 (式 (5.7) に示された集合) の 1 つに変更される。
- 個体の適応度計算にかかる時間 (エレベータシステムシミュレータを用いたかご運行の計算にかかる時間) が長いことから、その回数を減らすために、Simple GA<sup>80)</sup>、Minimal Generation Gap<sup>81)</sup> および Steady State GA<sup>82)</sup> を組み合わせた次のような世代交代モデルが用いられる。

表 5.1: 遺伝的機械学習を適用する問題の規模を規定するパラメータ設定

パラメータ	値
計画期間 ( $T$ )	10,000
かご数 ( $N_c$ )	4
階床数 ( $N_f$ )	10
客数 ( $N_p$ )	50
最大速度 ( $V^M$ )	2
最大加速度 ( $A^M$ )	1
客の質量 ( $M^P$ )	50
かごの最大積載量 ( $M_c$ )	1,100
長待ちとみなす閾値 ( $\Delta$ )	60
決定指標の数 ( $N_a$ )	5
客の到着間隔の期待値 ( $1/\lambda$ )	72 あるいは 7.2

- (1) 個体集団から 2 つの親を, ルーレット選択により復元抽出する.
  - (2) これらの親から 2 つの子を生成し, 次の手続きにより一方の親を一方の子で置き換える.
    - 子のうち適応度が高いものが個体集団に含まれず (染色体<sup>§</sup>の同じ個体が個体集団にない), かつその適応度が親の少なくとも一方より高ければ, 適応度がその子より小さい親を 1 つ (複数あれば適応度の高い方を) 選択し, その子で置き換える.
    - 子のうち適応度が高いものが親と置き換えられなければ, 同じ手続きにより, 子のうち適応度が低いものによる置換えを行う.
- 個体評価回数の累計が閾値  $e_M$  を超えたときに, 学習は終了される.

## 5.6 計算例および考察

### 5.6.1 パラメータ設定

本節で対象とされるエレベータシステムの規模を含んだ, 問題の規模を規定するパラメータ設定が, 表 5.1 に示される.

本節では, 表 5.1 に規模の示されたエレベータシステムへ,

- (1) 到着間隔の期待値が 72 で, 交通パターンが表 5.2 に示される OD 行列による up-peak 型;

<sup>§</sup>個体が符号化するルールベースに相当する.

表 5.2: 問題 p1 の交通パターンを規定する OD 行列

出発階床	目的階床									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	1/21	1/21	1/21	1/21	1/21	1/21	1/21
2	0	0	0	1/21	1/21	1/21	1/21	1/21	1/21	1/21
3	0	0	0	1/21	1/21	1/21	1/21	1/21	1/21	1/21
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- (2) 到着間隔の期待値が 72 で、交通パターンが表 5.3 に示される OD 行列による down-peak 型;
- (3) 到着間隔の期待値が 7.2 で、交通パターンが表 5.4 に示される OD 行列による two-way 型;

という交通流に従って客が到着する 3 つの問題に対する遺伝的機械学習の適用結果が示される。ここで、表 5.2, 5.3, 5.4 の要素は、到着した客の OD ペアがある組合せをとる確率を表す。これらの問題の特徴を整理したものが、表 5.5 に示される。

これらの 3 つの交通流は、既存研究<sup>20)</sup> の設定に基づいて設定された。その研究で用いられている OD 行列は、階床の間でなく、階床群 (低部階床群, 中部階床群, 高部階床群) の間の OD ペア生起確率として設定されている。それらを素朴な方法で変換したため、表 5.2, 5.3, 5.4 に示された OD 行列は少し人工的となっている。エレベータシステムが設置される建物の機能を想定し、居住者数を概算し、さらにある交通パターンが継続する時間を見積もることで、交通流をより現実的なものとして設定することは、今後の課題とされる。

ルールベースを構成する単位ルール数を含んだ、遺伝的機械学習の適用に関するパラメータ設定が、表 5.6 に示される。

### 5.6.2 決定指標の構成

arg-min ルールや arg-match ルールの有効性は、使用される決定指標の有効性に強く依存する。決定指標の設計は高度に知的な作業であり、その方法論は確立されていない。本章で

表 5.3: 問題 p2 の交通パターンを規定する OD 行列

出発階床	目的階床									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1/30	1/30	0	0	0	0	0	0	0
2	1/30	0	1/30	0	0	0	0	0	0	0
3	1/30	1/30	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4/105	4/105	4/105	0	0	0	0	0	0	0
5	4/105	4/105	4/105	0	0	0	0	0	0	0
6	4/105	4/105	4/105	0	0	0	0	0	0	0
7	4/105	4/105	4/105	0	0	0	0	0	0	0
8	4/105	4/105	4/105	0	0	0	0	0	0	0
9	4/105	4/105	4/105	0	0	0	0	0	0	0
10	4/105	4/105	4/105	0	0	0	0	0	0	0

表 5.4: 問題 p3 の交通パターンを規定する OD 行列

出発階床	目的階床									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	1/70	1/70	1/70	1/70	1/70	1/70	1/70
2	0	0	0	1/70	1/70	1/70	1/70	1/70	1/70	1/70
3	0	0	0	1/70	1/70	1/70	1/70	1/70	1/70	1/70
4	1/70	1/70	1/70	0	1/105	1/105	1/105	1/105	1/105	1/105
5	1/70	1/70	1/70	1/105	0	1/105	1/105	1/105	1/105	1/105
6	1/70	1/70	1/70	1/105	1/105	0	1/105	1/105	1/105	1/105
7	1/70	1/70	1/70	1/105	1/105	1/105	0	1/105	1/105	1/105
8	1/70	1/70	1/70	1/105	1/105	1/105	1/105	0	1/105	1/105
9	1/70	1/70	1/70	1/105	1/105	1/105	1/105	1/105	0	1/105
10	1/70	1/70	1/70	1/105	1/105	1/105	1/105	1/105	1/105	0

表 5.5: 本章で対象とされる 3 つの問題の概要

問題	交通パターン	交通頻度 ( $\lambda$ )
p1	up-peak	1/72
p2	down-peak	1/72
p3	two-way	1/7.2

表 5.6: 遺伝的機械学習を適用する際のパラメータ設定

パラメータ	値
学習用例題集合の大きさ ( $N_e^1$ )	20
ルールベースを構成する単位ルール数 ( $N_r$ )	200
個体数 ( $N_i$ )	200
評価回数の最大値 ( $e_M$ )	80,000
交叉率 ( $p_c$ )	0.6
突然変異率 ( $p_m$ )	0.0001

は、有効な arg-min ルールにおいて使用されている決定指標は arg-match ルールでも有効であると仮定され、まずある程度有効となるよう arg-min ルールが構成される。次に、その arg-min ルールで使用されている決定指標が、arg-match ルールにおいても使用される。

arg-min ルールの構成は、その容易のために決定指標の数を 5 つ ( $N_a = 5$ ) として、次の手続きにより行われた。

- 1° 決定指標の重みの組合せ集合を作成する。1 つの重みの組合せは、 $\{0, 1, 3, 5\}$  のいずれかの値を 5 個選択し、5 つの値に渡る総和が 1 となるよう正規化することで作成される。重みの組合せ数は、全ての値が 0 となる場合を除いた 1,023 となる。
- 2° 決定指標の評価に用いられる例題集合として、問題 p1 の例題が 50 個作成される。
- 3° 5 つの決定指標を設計する。
- 4° 決定指標の組合せを評価する。2° で作成された各例題に対して、CD および 1° で作成された重み組合せの 1 つを用いる arg-min ルールによるかご運行が生成され、目的関数値比 (式 (2.20) を参照) の例題集合に渡る平均が計算される。このようにして重み組合せごとに得られた 1,023 個の目的関数値比の平均の、重み組合せに渡る最小値として、決定指標の組合せの評価が与えられる。
- 5° 評価の結果が妥当なものであると考えられれば、手続きを終了する。
- 6° そうでない場合、5 つの決定指標から最も効いていない (目的関数値比の平均の小さい重み組合せにおいて、重みの小さいことが多い) 決定指標を選択し、主観的に改良あるいは他の決定指標に置き換える。
- 7° 4° を実行する。

この手続きにより、次に示す 5 つの決定指標が設計された。

- (1) 決定指標  $A_1 = A_{k,q}^{(1)}(\mathbf{x}, t)$ : かご  $k$  の割り当てられているホール呼びの待ち時間の総和が、他のかごと比べて大きい。次のように計算される。

$$A_{k,q}^{(1)}(\mathbf{x}, t) = \frac{\sum_{q' \in \mathcal{H}_k^h} T_{q'}^q(t)}{\sum_{k'=1}^{N_c} \sum_{q' \in \mathcal{H}_{k'}^h} T_{q'}^q(t)}. \quad (5.21)$$

- (2) 決定指標  $A_2 = A_{k,q}^{(2)}(\mathbf{x}, t)$ : かご  $k$  が, 近傍のかごと比べて長時間遊休であるか. 次のように計算される.

$$A_{k,q}^{(2)}(\mathbf{x}, t) = 1 - \frac{e_k^c}{\sum_{k' \in C_k^s(\mathbf{x})} e_{k'}^c}. \quad (5.22)$$

ここで,  $C_k^s(\mathbf{x})$  は, 状態  $\mathbf{x}$  においてかご  $k$  の近傍にあるかごの集合を表す.

- (3) 決定指標  $A_3 = A_{k,q}^{(3)}(\mathbf{x}, t)$ : 割当てを計算中の種類  $q$  のホール呼びが発生している階床に, かご  $k$  よりも早く到着するかごが多数あるか. 次のように計算される.

$$A_{k,q}^{(3)}(\mathbf{x}, t) = \frac{|C_{k,q}^n(\mathbf{x})|}{N_c - 1}. \quad (5.23)$$

ここで,  $C_{k,q}^n(\mathbf{x})$  は, 状態  $\mathbf{x}$  において種類が  $q$  であるホール呼びを処理可能な状態へと遷移するために要する時間が, かご  $k$  による時間以下であるかごの集合を表す.

- (4) 決定指標  $A_4 = A_{k,q}^{(4)}(\mathbf{x}, t)$ : かご  $k$  で登録されたかご呼び数が, 他のかごと比べて多いか. 次のように計算される.

$$A_{k,q}^{(4)}(\mathbf{x}, t) = \frac{|\mathcal{H}_k^c|}{\sum_{l=1}^{N_c} |\mathcal{H}_l^c|}. \quad (5.24)$$

- (5) 決定指標  $A_5 = A_{k,q}^{(5)}(\mathbf{x}, t)$ : 割当てを計算中であるかごの積載量が, 他のかごと比べて大きいか. 次のように計算される.

$$A_{k,q}^{(5)}(\mathbf{x}, t) = \frac{l_k^c}{\sum_{k'=1}^{N_c} l_{k'}^c}. \quad (5.25)$$

ここで,  $T_q^c(t)$ ,  $\mathcal{H}_k^h$ ,  $e_k^c$ ,  $\mathcal{H}_k^c$ ,  $l_k^c$  の定義は, 2.2.3 節に示される. これらの決定指標は, その定義から, 全て  $[0, 1]$  の範囲に収まっている. すなわち, 決定指標の下界値および上界値は, 次のように与えられる.

$$A_m^{(i)} := 0, \quad A_M^{(i)} := 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, N_a\}. \quad (5.26)$$

前述の手続きにより設計された arg-min ルールの平均目的関数値比が, 本節で対象とされる 3 つの問題ごとに, 1,023 個の組合せの中で最小の平均目的関数値比を与えた重みの組合せと併せて, 表 5.7 に示される. ここで, 平均目的関数値比は, 問題ごとに作成された 50 個の例題に対して arg-min ルールを適用することで計算された目的関数値比を, 例題集合に渡って平均したものである.

表 5.7 より, 前述の決定指標  $A_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ ) の重み付け和としての arg-min ルールは, 重み組合せを適切に設定することで, 3 つの問題に対して既存手法 (CD) よりも平均的には有効となりえると考えられる.

表 5.7: 決定指標  $A_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ ) を用いる arg-min ルールの各問題に対する平均目的関数値比

問題	決定指標の重み					平均目的関数値比
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	
p1	1/2	0	0	0	1/2	0.913235
p2	5/7	0	1/7	0	1/7	0.943511
p3	3/6	1/6	1/6	1/6	0	0.982595

### 5.6.3 3つの問題を対象とした個別のルールベースの獲得

5.6.2 節で示された 5 つの決定指標に基づくものとして arg-match ルールを考え、3 つの問題に適したルールベースを、問題ごとに遺伝的機械学習を適用することで獲得する。ここで、5.6.2 節で示されたように、arg-min ルールが既存手法よりも有効であると考えられるため、そこで用いられている決定指標値の小さくなるかご割当ては有効であると考えられる。これを踏まえて、単位ルールの構成要素の最小値および最大値は、それぞれ次のように設定される。

$$r_m^{(j)} := 0, \quad r_M^{(j)} := 2. \quad (5.27)$$

また、各決定指標の分割数を 10 とする。すなわち、

$$D^{(i)} = 10, \quad \forall i \in \{1, \dots, N_a\}. \quad (5.28)$$

以上の設定により、単位ルールの組合せ数を  $(3 + 1)^5 = 1,024$  と比較的少なくできるため、有効なルールベースの獲得に必要な計算量が抑えられると期待される。なお、ルールベースは 3 つの問題ごとに求められるため、遺伝的機械学習の適用回数は 3 回となる。

学習によるルールベースの変化をみるために、かご運行作成時に使用された単位ルールの構成要素の割合の変化が調べられる。学習開始前のルールベースを、問題 p1 のための学習用例題集合へ適用した際に使用された単位ルールを選択し、その構成要素 (本章の設定では、 $\{0, 1, 2, \#\}$  のいずれか) の数を決定指標ごとに集計した結果が、図 5.3(a) に示される。学習終了後のルールベースを用いて行った同様の集計結果が、図 5.3(b) に示される。

問題 p2, p3 に関する図 5.3 と同様のデータが、それぞれ図 5.4, 5.5 に示される。

図 5.3, 5.4 より、問題 p1, p2 に対しては、単位ルールの構成要素の数について学習による変化がみられる。特に決定指標  $A_4, A_5$  について、問題 p1 では、構成要素がドントケア記号あるいは小さな値をとる単位ルールが増えていることに対し、問題 p2 では、様々な構成要素をとる単位ルールが増えている。この違いは、交通流の交通パターン (表 5.2, 5.3) から推察される、客がかごへ乗車する際に他の乗客がいる確率の差を反映していると考えられる。その確率が down-peak 交通流では高いため、有効なかご運行を行うためには乗客数な

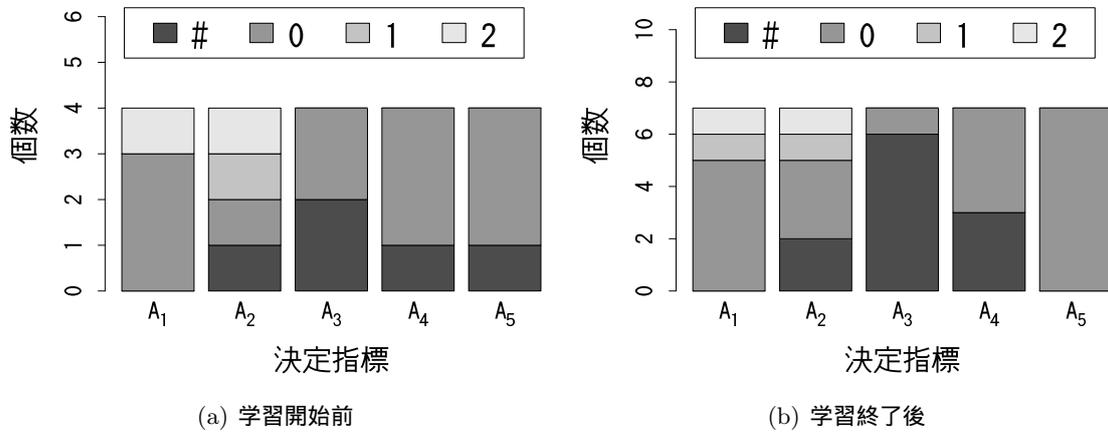


図 5.3: 問題 p1 を対象とした学習において使用された単位ルール構成要素の含有数の変化  
 左側のプロットは学習開始前のルールベース, 右側のプロットは学習終了後のルールベースを用いた結果である. 例えば, 学習終了後のルールベースでは,  $r_j^{(5)} = 0$  という単位ルールだけが使用されている.

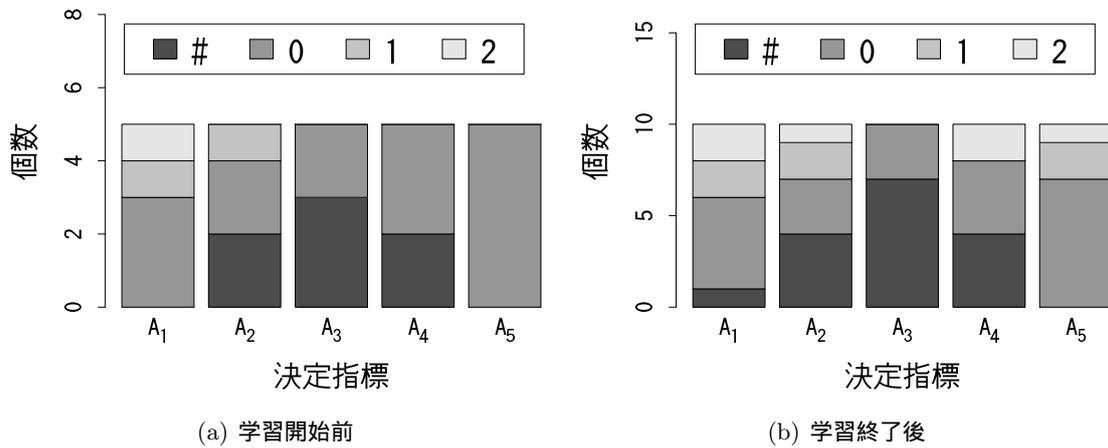


図 5.4: 問題 p2 を対象とした学習において使用された単位ルール構成要素の含有数の変化  
 左側のプロットは学習開始前のルールベース, 右側のプロットは学習終了後のルールベースを用いた結果である. 例えば, 学習開始前のルールベースでは,  $r_j^{(5)} = 0$  という単位ルールだけが使用されている.

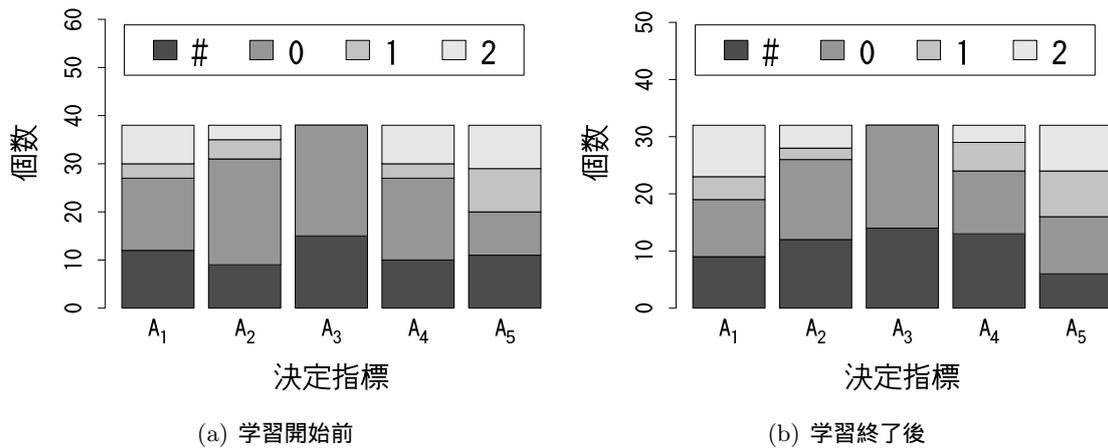


図 5.5: 問題 p3 を対象とした学習において使用された単位ルール構成要素の含有数の変化  
左側のプロットは学習開始前のルールベース，右側のプロットは学習終了後のルールベースを用いた結果である。

表 5.8: 獲得されたルールベースの既存手法 (CD) に対する目的関数値比

問題	統計量		
	最小値	平均	最大値
p1	0.803	0.9167	0.9896
p2	0.8514	0.9464	1.022
p3	0.7815	1.003	1.293

どを考慮することが必要であり，これが決定指標  $A_4$ ,  $A_5$  を細かく考慮するルールベースの獲得につながっていると考えられる．なお，問題 p3 に対しては，図 5.5 より，単位ルールにおける構成要素含有数には大きな変化が見られず，交通流を反映したルールベースが獲得されていないと推測される．

#### 5.6.4 獲得されたルールベースの評価

本小節では，5.6.3 節で示されたルールベースの有効性が，既存のかご運行ルール (CD) に対する目的関数値比の例題集合に渡る平均として評価される．ここで用いられる例題集合を，評価用例題集合と呼ぶことにする．この集合は，本章で対象とされる問題ごとに 1,000 個の例題を作成することで作成される．3 つの問題に対してそれぞれ獲得されたルールベースの，評価用例題集合に渡る目的関数値比の最小値，平均，最大値が，表 5.8 に示される．

表 5.7, 5.8 より，問題 p1, p2 に対して獲得されたルールベースの有効性は，arg-min ルールにあまり劣らないことが見て取れる．問題 p3 に対しては，arg-min ルールの場合とは異なり，有効なルールベースが求められていないことが見て取れる．

表 5.9: 主に使用された単位ルールのルールベースごとの使用回数

単位ルール番号	単位ルール	問題		
		p1	p2	p3
1	0,#,0,0,0	38,194	0	0
2	0,#,0,#,0	0	36,329	0
3	0,0,0,0,0	0	0	21,895
4	0,0,0,#,#	0	0	15,329
5	0,0,#,#,0	6,841	0	4,782
6	0,#,#,#,0	0	4,908	0
7	##,0,0,#	0	0	4,879
8	#,1,#,0,0	0	4,666	0
9	0,2,#,#,0	0	4,319	0
10	0,2,#,0,0	3,251	0	0
-	その他 (CD)	2,116 (9)	139 (0)	9,206 (0)

獲得されたルールベースの特徴を調べるために、ルールベースの評価時に使用された単位ルールおよびその使用回数が、ルールベースごとに集計された。その結果が表 5.9 に示される。ここで、使用回数が全体の 5% に満たなかった単位ルールは“その他”として集計され、またどの単位ルールも適合せずデフォルトルール (CD) が使用された回数は、“その他”の右側へ括弧書きで示されている。また、単位ルール番号は、可能な全ての単位ルールを通しての番号ではなく、表 5.9 に示された 10 個の単位ルールを通しての番号である。

表 5.9 より、各ルールベースで主に使用される単位ルールが異なっていることが見てとれることから、5.4.2 節で留意された単位ルール間での可用範囲の独立性は、ある程度達成されていると考えられる。また、全てのルールベースについて、ある状況では少なくとも 1 つの単位ルールが適合し使用されている、すなわちデフォルトルールがほとんど使われていないことが見てとれる。特に、単位ルール 8 および単位ルール 9 の使用状況より、問題 p2 に対して有効である割当てかごは、問題 p1 に対して有効である割当てかごと比べて、決定指標  $A_2$  の値が大きいことが多いと推察される。これを調べるために、問題ごとに、有効であるかご運行ルールにより割り当てられるかごについて、決定指標  $A_2$  の値の分布が計算された。各問題に対して有効なかご運行ルールとして、最適なかご運行ルールを用いることが理想ではあるが、本節では遺伝的機械学習により獲得された問題 p1, p2 用のルールベースが用いられる。範囲  $[0, 1]$  を 10 個の区間に等分割し、 $A_2$  の値がある区間に含まれた回数を 2 つのルールベースごとにプロットしたものが、図 5.6 に示される。ここで、縦軸 (決定指標  $A_2$  の値がある範囲に含まれる回数) は、常用対数軸とされている。

図 5.6 に示された 10 個の区間のうち、ドントケア記号を除いて単位ルールの構成要素が

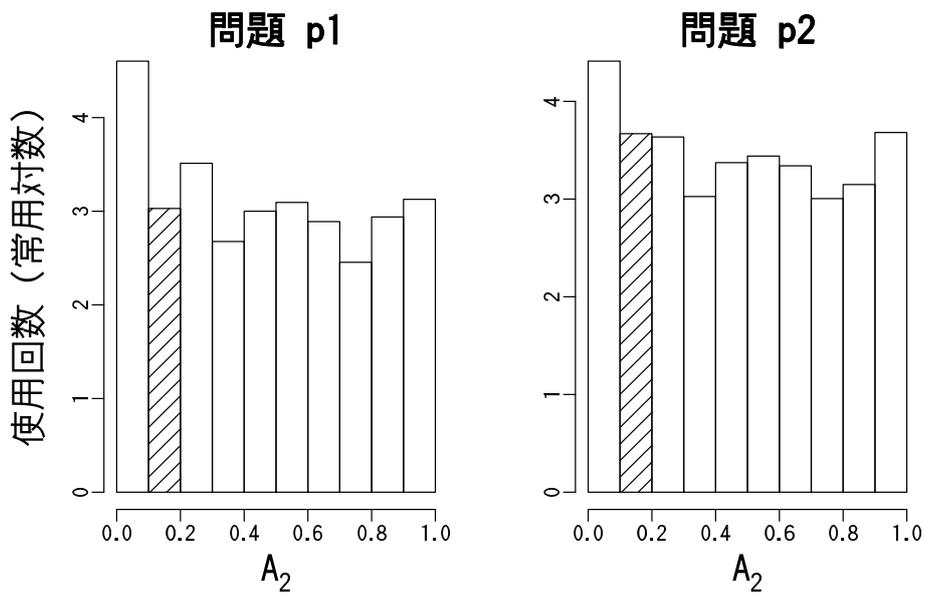


図 5.6: 問題 p1, p2 に対して有効であるかご運行ルールにより割り当てられたかごに関する決定指標  $A_2$  の分布

横軸は、決定指標  $A_2$  の値がとる範囲を表す。縦軸は、評価用例題集合へ有効なかご運行ルールを適用した場合に割り当てられたかごについて計算された決定指標  $A_2$  の値が、前述の範囲に含まれた回数を、常用対数で表す。

とりうる  $[0, 0.1)$ ,  $[0.1, 0.2)$ ,  $[0.2, 0.3)$  の 3 つの区間に注目すると, 決定指標  $A_2$  の値が区間  $[0.1, 0.2)$  に含まれることが, 問題 p2 では問題 p1 よりも多くなっていることが見て取れる. よって, 問題 p2 では, 有効な割当てかごに関する決定指標  $A_2$  の値は区間  $[0.1, 0.2)$  に含まれることが多く, 遺伝的機械学習によりこの特徴を捉えたルールベースが獲得されていると推測される.

### 5.6.5 連結により作成されたルールベースの評価

表 5.9 より, ルールベースごとに使用される単位ルールが異なっているため, これらを連結して 1 つのルールベースとしても, 例えば up-peak 交通流に従って客が到着する場合は単位ルール 1 が, down-peak 交通流に従って客が到着する場合は単位ルール 2 が使用されるなど, その並行動作を期待することができる. これを調べるために, 問題 p1, p2, p3 に対して獲得された計 3 つのルールベースをこの順に連結することで, 1 つのルールベースが作成された. このルールベースが, 5.4.2 節で参照された評価用例題集合へ適用され, かご運行およびその目的関数値が計算された. これらの値の, 各問題に特化したルールベースによるかご運行の目的関数値に対する比の分布が, 箱ヒゲ図<sup>83)</sup>として図 5.7 に示される.

図 5.7 より, 問題 p1, p2 に対しては, 各問題だけを対象として獲得されたルールベースにそれほど劣らない (平均で 5% 程度の劣化) かご運行が得られていることが確認される. よって, 個別の学習により獲得されたルールベースが, 他のルールベースへ影響を与えることなく, また他のルールベースから影響を受けることなく, 並行して機能していると考えられる. この, 単位ルールの可用範囲の独立性に起因すると考えられる特徴から, 本章の手法は, クラス IV の問題, すなわち交通流の従う確率分布が計画期間において変化する問題に対しても適用可能であることが期待される.

なお, 問題 p3 に対しては, 目的関数値比が小さくなっている場合と大きくなっている場合の分布が, ほぼ対称となっている. これは, そもそも問題 p3 を対象として獲得されたルールベースが十分有効ではないことに起因すると考えられる.

## 5.7 結言

本章では, 定常であるが未知の交通流に従って客が到着するという前提のもとで, 大規模なエレベータシステムを対象としたエレベータ運行計画問題が取り扱われた. 理論的研究の成果を, 現実規模のシステムを対象とすることが要件である実際の研究へ応用する方法の 1 つとして, 将来の計算機技術の発展によって中規模なエレベータシステムを対象とした最適なかご運行ルールが求められるという期待のもと, それを教師データとする学習あるいは回帰分析を行い, その結果を大規模なエレベータシステムへ応用するという方法が示唆された. これを踏まえて, かご運行ルールをどのようにモデル化しているかという点から既存の

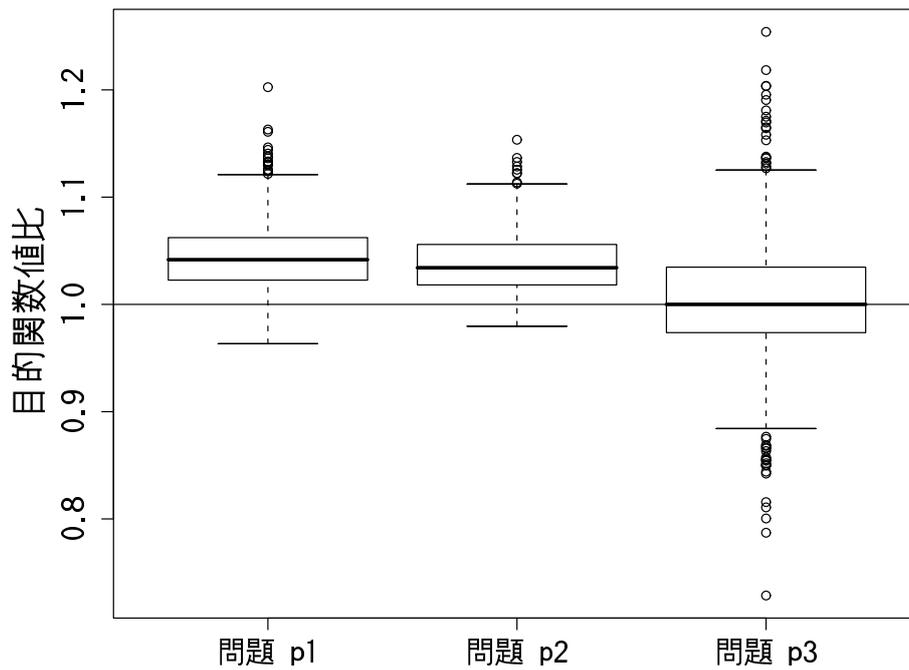


図 5.7: 3つのルールベースを連結して作成されたルールベースの基となったルールベースに対する目的関数値比の分布

箱ヒゲ図では、中央の箱を構成する下端、中線、上端が、それぞれ第1、第2、第3四分位数を表し、ヒゲの下端、上端が、それぞれ中程の外れ値 (mild outlier) とみなされる下端および上端を表し、点が極端な外れ値 (extreme outlier) を表している。

実際の研究が整理・分類された。それらのモデルのうち、原理的には任意のかご運行ルールを表現できることから、ルールベースが選択された。

次に、現実規模のエレベータシステムを対象としうるために、ルールベースを構成する単位ルールが備えるべきと考えられる性質が示された。特に、ルールベース獲得の容易性から、単位ルールの可用範囲が広くかつ独立である必要性が指摘された。それらを考慮した単位ルールの設計が示され、そのような単位ルールは such-that ルールと呼ばれた。この単位ルールを要素とするルールベースは、かご割当て時に各かごについて計算される決定指標を考え、それらの重み付け和が最小となるかごを選択するというルール (arg-min ルール) の一般化に相当し、arg-match ルールと呼ばれた。arg-match ルールを用いることで、新規に登録されたホール呼びに対しては、各かごについて計算される決定指標値に基づいて計算されるルールベースとの適合度を最大とするかごが割り当てられる。適合度が十分に高くなければ、デフォルトルールにより計算されたかごが割り当てられる。

現時点では教師データを利用できないことから、前述のように設計されたルールベースとして有効なかご運行ルールを獲得するために、教師なし学習が行われた。具体的には、単位ルールはクラシファイアの前件部と似ていることから、クラシファイアシステムの一般的獲得手法である遺伝的機械学習が構成・適用された。学習は、交通パターンが up-peak, down-peak および two-way である 3 つの問題に対して行われ、それぞれルールベースが獲得された。このうち、up-peak 交通流および down-peak 交通流を対象として獲得されたルールベースは、既存のかご運行ルール (CD) よりも、目的関数値比において平均的には有効であることが示された。また、3 つのルールベースを連結して作成されたルールベースの有効性は、個別のルールベースにあまり劣らないことを示す結果が得られ、ルール設計時に留意された単位ルール間での可用範囲の独立性が保たれている可能性が指摘された。また、arg-match ルールのクラス IV の問題への適用可能性が示唆された。

今後の課題として、まずは、より自然な交通流の設定、決定指標を設計するための系統だった方法の構築が挙げられる。two-way 交通流に従って客が到着する問題に対しては、さらなる計算と結果の分析が必要である。これらとは独立し、かつ本論文ではより重要視されている課題として、中規模なエレベータシステムを対象として求められた最適解の教師データとしての利活用可能性に関する調査・検討が挙げられる。これに資することが期待される具体的課題として、シミュレータの動作の詳述に基づく、エレベータシステムの状態遷移関数の定式化が挙げられる。



---

## 第 6 章

### 結論

本論文は、エレベータシステムを対象とし、有効なエレベータ運行を求める問題であるエレベータ運行計画問題に関する 3 つの研究をまとめたものである。エレベータシステムはいたるところで利用されている交通システムであり、その開発や販売、保守を業とする企業によって、システムの運行計画手法が連綿と改良され続けている。しかしながら、それらの手法は、すでに存在する大規模なエレベータシステムを対象とできることが要件であるため、ヒューリスティックなものとならざるをえず、最適性という観点から評価することは難しい。これを踏まえて、第 1 章では、最適性を追求する理論的研究と、現実規模の問題への適用が要件である実際的な研究が区別され、複雑化の速度が増している現実問題を乗り越えるために、これらの研究を、その長短所を踏まえて併用するアプローチの必要性が論じられた。本論文で報告された 3 つの研究は、そのアプローチをとるために必要である、理論的研究の実際性の高い問題への適用可能性の向上、および実際的な研究におけるかご運行計画手法の数学的取扱い容易性の向上を企図して行われたものである。それらの研究を取り扱った章を含む各章の結論が、次に述べられる。

まず、第 2 章では、エレベータ運行計画問題が概観された。この中で、本論文において対象とされる典型的なエレベータシステムを含む、主要なエレベータシステムが列挙された。また、システム利用者（客）の情報を完全には計測できないこと、客の到着頻度および交通パターンの組合せとしての交通流が大きくいくつかに分類されることが指摘された。次に、エレベータシステムおよびエレベータ運行計画問題のモデルが示された。このモデル化により、問題の目的関数および決定変数が明示され、それらに基づいて、計画問題を取り扱うための一般的枠組みであるスケジューリング問題の中にエレベータ運行計画問題が位置づけられた。この視点から、エレベータ運行計画問題と生産計画問題などとの大きな違いとして、スケジューリング問題における仕事に相当する客の乗降車に関する情報を必ずしも利用できない点が指摘された。これを踏まえて、エレベータ運行計画問題は、特にリスケジューリング問題の枠組みの中に位置づけられた。リスケジューリング問題としての見方に基づくことで、エレベータ運行計画手法に関する既存研究が整理・分類された。また、この分類に際して、客に関する情報がどの程度判明しているかという見方の軸が示され、これからエレベータ運行計画問題を次の 4 つのクラスに分類し、クラスごとに考慮するアプローチが提案さ

れた。

- (1) クラス I: 客に関する情報が確定している状況におけるエレベータ運行計画。
- (2) クラス II: 交通流が定常かつ既知の確率分布に従う状況におけるエレベータ運行計画。
- (3) クラス III: 交通流が定常かつ未知の確率分布に従う状況におけるエレベータ運行計画。
- (4) クラス IV: 交通流が非定常な確率分布に従う状況におけるエレベータ運行計画。

これらのうち、最も現実的であるが取扱いの難しいクラス IV を除いたクラスが、続く章で取り上げられるとされた。

第 3 章では、第 2 章で示されたクラス I の問題におけるエレベータ運行計画に関する研究が示された。このクラスでは、運行計画の前に、計画期間に到着する全ての客のプロファイル (到着時刻, 出発階床, 目的階床) が判明している。そのため、エレベータ運行計画問題を一般の静的最適化問題として捉えることが可能であり、エレベータ (かご) が機械、客の乗車および降車が個別の仕事 (乗車仕事, 降車仕事) とみなされるスケジューリング問題としてモデル化された。このとき、全ての客のプロファイルおよび計画開始時刻にかごが停止している階床の組合せに対して、最適なかご運行が存在する。そのようなかご運行を求めるために、静的最適化モデル、およびその上で構成された分枝限定法が示された。そのモデルでは、乗車仕事に対するかごの割当てと、各かごの仕事処理順序が決定変数とされる。分枝限定法は、現実のシステムと最適化モデルとの差異に強い影響を与える時刻モデルの違い (離散時間モデルであるか、連続時間モデルであるか) を、かごの階床間の移動にかかる時間の計算式へ集約することが可能となるよう構成された。また、柔軟な構成が可能であるという分枝限定法の特長を活かして、明らかに最適解が得られない状況に関する知識を限定操作へ埋め込むことで、適用可能な問題の規模を向上させる技法が示された。計算例では、客が inter-floor パターンに従って到着する、単一のかごが設置されたエレベータシステムおよび複数のかごが設置されたシステムを対象とする問題に対する、分枝限定法の適用結果が示された。それらの結果より、1 つのかごの運行を計画するために広く使用されているヒューリスティクスである Selective Collective ルール (SC) は、1 つのかごを対象とした場合非常に有効であること、また既存のかご割当て手法の 1 つである Call Dispatching ルール (CD) はあまり有効でないことが示された。ここで得られたある最適なかご運行と、CD によるかご運行との比較により、CD の素朴な改良案が報告された。

第 4 章では、クラス II の問題におけるかご運行計画に関する研究が示された。このクラスでは、計画期間に到着する客の従う交通流が既知であり、それに特化したかご運行計画手法を用いることで有効なかご運行を得ることが可能である。一日の時間帯などによって交通流をある程度限定できることから、多くの既存研究において、このクラスが対象とされている。本論文では、エレベータシステムがマルコフ性を有することから、いくつかの近似の上でエレベータ運行計画問題がマルコフ決定過程としてモデル化された。次に、システムの状態を多数の 2 値状態変数の集まりとしてモデル化し、各状態変数ごとにその変化を表す式を与

え、それらの集まりとして状態遷移関数を表すという方法により、状態遷移関数が構成された。続いて、システムからは制御できない、計測すらできないかもしれない要素を状況入力として考慮し、その生起確率を定式化することで、ある状態遷移を引き起こす状況入力の生起確率の総和として状態遷移確率が定式化された。これにより、マルコフ決定過程に対する一般的解法である動的計画法の適用が可能となり、その代表的手法である報酬反復法が構成された。また、状態遷移確率の計算式に見られる特徴に基づき、生起確率が低い状況入力を考慮しないことにより効率化された動的計画法である DPRM (Dynamic Programming on Reduced Models) が提案された。計算例では、この手法および報酬反復法が、down-peak 交通流、two-way 交通流に従って客が到着する2種類の問題に対して適用された。この結果から、それらの2つの動的計画法により、小規模なシステムに対しては既存のかご割当て手法よりも統計的有意に有効なかご運行計画手法を与えられること、および DPRM は報酬反復法による最適なコスト関数と同程度に有効なコスト関数を、より短い計算時間で求められることが示された。

第5章では、クラス III の問題におけるかご運行計画に関する実際的な研究が示された。このクラスでは、客が何らかの確率分布に従って到着することはわかっているが、確率分布自体は未知であるという、クラス I やクラス II よりも現実的である前提が課せられている。理論的研究の成果を実際的な研究へ応用する1つの方法として、近い将来、中規模なエレベータシステムを対象として最適なかご運行ルールを求めることが可能になるという期待のもとで、それを教師データとする学習・回帰分析によるかご運行計画手法の構成が示唆された。ここで、教師あり学習の容易さから、既存研究におけるかご運行計画手法のモデルが整理・分類され、それらのうち有望と考えられるモデルの1つとしてルールベースが選択された。そして、ルールベースを構成する単位ルールが有すべき性質として、可用範囲の広さおよび単位ルール間での独立性が指摘され、これらに留意した単位ルールの設計が示された。そのような単位ルールから構成されるルールベースとして、大規模なエレベータシステムを対象としうるかご運行ルールを獲得するために、クラシファイアシステムの一般的な学習手法である遺伝的機械学習が構成された。計算例では、異なる交通流に従って客が到着する3つの問題に遺伝的機械学習が適用され、それぞれの問題に特化したルールベースが獲得された。これらのルールベースは、客の交通パターンが two-way 交通流に従う問題を除いて、既存のかご運行計画手法よりも平均的には有効であることが示された。また、それら3つのルールベースを連結して作成された1つのルールベースの各問題に対する有効性が、連結する前の個別のルールベースにあまり劣らないことが示された。このことから、単位ルール間での可用範囲の独立性が保たれている可能性が指摘され、クラス IV の問題への適用可能性が示唆された。

第3章、第4章で示された研究により、理論的研究をこれまでよりも実際性の高い問題へ適用することが、また第5章で示された研究により、実際的な研究においてかご運行ルールを

これまでよりも数学的に取り扱うことが可能になったと考えられる。しかしながら、いまだ理論的研究と実際的研究の隔たりは大きく、これを小さくすることが当面の課題として挙げられる。この課題は、計算機技術の発展により、中規模なエレベータシステムを対象として最適なかご運行計画手法を求めることが可能になったときに、ひとまずの解決を見ると期待される。そのとき、図 2.4 に示された、理論的研究および実際的研究の相補的組合せによる研究の展開が可能になると期待される。それを見越した課題として、実際的研究において、最適なかご運行に対する有効性が問題の規模に依存しないかご運行を作成しうるかご運行計画手法を構成することが挙げられる。それらとは並行する課題として、第3章、第4章、第5章に示された3つの手法の有効性を、それらを同一の例題へ適用することで得られるかご運行を通して比較することが挙げられる。

---

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切なご指導およびご鞭撻を賜りました神戸大学大学院工学研究科 玉置 久 教授に謹んで感謝を申し上げます．また，本研究の継続にあたり格別のご支援を賜りました，兵庫県立福祉のまちづくり工学研究所 所長 北村新三 神戸大学名誉教授に心からお礼申し上げます．神戸大学大学院国際文化学研究科 村尾 元 准教授には，特に研究環境の整備に関する適切なご教示・ご助言を賜りました．ここに深謝の意を申し上げます．

研究を実施するために神戸大学大学院工学研究科 玉置研究室の設備を使用させていただくにあたり，多大なご支援およびご協力を賜りました神戸大学大学院工学研究科 太田 能准教授，ならびに高木由美 助手へ，深い謝意を申し上げます．また，公私にわたるご協力を賜りました松本卓也 博士に厚くお礼申し上げます．

研究途上において終始適切なご助言およびご教示を賜りました，立命館大学情報理工学部 榊原一紀 助手に深い感謝の意を申し上げます．また，スケジューリング問題に関してご教授およびご助言を賜りました，摂南大学工学部 諏訪晴彦 准教授に厚くお礼申し上げます．京都大学大学院工学研究科電気工学専攻 田中俊二 助教には，エレベータ運行計画問題に関する多くのご教示・ご討論を賜りました．ここに深い謝意を申し上げます．

学生時代からの先輩であり遺伝アルゴリズムに関してご教示を賜りました，兵庫県立福祉のまちづくり工学研究所 大森清博 博士に感謝の意を表します．研究生活を始めるきっかけとなりました人間の2足歩行についてご教示を賜りました，兵庫県立工業技術センター 中本裕之 氏に厚くお礼申し上げます．また，強化学習手法に関してご教示を賜りました，新潟県立看護大学 永吉雅人 助手に謝意を表します．

本研究を始めるきっかけを与えてくださるとともに実用面からの知見・ご意見をご教示いただきました，三菱電機先端技術総合研究所 岩田雅史 博士に厚くお礼申し上げます．三菱電機先端技術総合研究所 北山 匡史 氏には，入手することが困難な文献の収集・調査において，多大なご尽力を賜りました．ここにお礼申し上げます．また，エレベータシステムのシミュレータや研究課題に関して有益なご助言を賜りました，フジテック株式会社 マルコン シャンドル 博士に感謝の意を表します．

本論文をまとめるにあたってたびたび休暇をいただき，その度に神戸大学広報室の室員の方々へご迷惑をお掛けしました．お詫びするとともに，厚くお礼申し上げます．また，本研究に関する資料の収集や研究発表のための出張などに必要な事務手続きをとるにあたりご尽

力いただきました，神戸大学企画部社会連携課の方々に謝意を表します．

神戸大学工学部旧北村研究室の教員諸氏には，学生時代から多くのご指導およびご助言を賜りました．特に，森本 郁 氏，産業技術短期大学 豊田信一 講師に厚くお礼申し上げます．また，神戸大学大学院工学研究科 玉置研究室の学生諸氏には，研究を進めるにあたり多くのご協力をいただきました．特に，杉川 智 氏，伊藤義人 氏，フォロンダ オーガスト 氏，大原 誠 氏に謝意を示します．そして，公私にわたり研究生生活の支えとなったご支援を賜りました，兵庫県宍粟市山崎町の旧友ならびに神戸大学工学部旧北村研究室の同期学生諸氏に深謝の意を表します．

最後に，長い学生生活とそれに続く不安定な研究生生活を選ぶことに理解を示し，絶え間ないご支援・ご協力を賜りました両親を含む家族に，心からの感謝の意を表します．

---

## 参考文献

- 1) 木治潤一: “エレベーター運行のスケジューリング”, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 46, No. 9, pp. 475–480, 2001.
- 2) Günter Reuter: “TWIN Lift System Part Two: Technical Description”, *Elevator World*, Vol. 52, No. 4, pp. 58–64, 2004.
- 3) Thomas L. Sterling, Donald J. Becker, John Salmon, and Daniel F. Savarese: “PC クラスタ構築法 — Linux によるベオウルフ・システム —”, 産業図書, 2001.
- 4) 西川, 三宮, 茨木: “最適化”, 岩波講座情報科学, 第 19 巻, 岩波書店, 1996.
- 5) D.J. White: “Markov Decision Processes”, John Wiley & Sons, 1993.
- 6) Dimitri P. Bertsekas: “Dynamic Programming: Deterministic and Stochastic Models”, PRENTICE-HALL, Inc., 1987.
- 7) 竹内 勝: “遺伝的アルゴリズムによる機械学習”, 計測と制御, Vol. 32, No. 1, 1993.
- 8) Jung-Hwan Kim and Byung-Ro Moon: “Adaptive and Dynamic Elevator Group Control with a Genetic Algorithm”, In L. Spector, E.D. Goodman, A. Wu, W.B. Langdon, H.M. Voigt, M. Gen, S. Sen, M. Dorigo, S. Pezeshk, M.H. Garzon, and E. Burke, editors, *Proc. of GECCO 2001*, pp. 1322–1329, 2001.
- 9) Gina Barney: “Elevator Traffic Handbook — Theory and Practice”, Spon Press, 2003.
- 10) 田中俊二, 荒木光彦: “行き先階登録方式エレベータの運行決定問題に関する研究”, スケジューリング・シンポジウム 2001 講演論文集, pp. 131–136, 2001.
- 11) 別府重憲, 谷川真理子, 田中俊二, 荒木光彦: “行き先階登録方式エレベータの群管理問題 — 即時案内表示方式と非即時案内表示方式の比較 —”, 第 49 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 357–358, 2005.
- 12) 周 金, 于 路, 間普真吾, 平澤宏太郎, マルコンシャンドル: “Genetic Network Programming によるダブルデッキエレベータ群管理システム”, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2006 講演論文集, pp. 131–135, 2006.
- 13) George R. Strakosch, editor: “The Vertical Transportation Handbook”, John Wiley & Sons, Inc., 1998.

- 14) G.F. Newell: “Strategies for Serving Peak Elevator Traffic”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 32, No. 8, pp. 583–588, 1998.
- 15) Zong Qu, Luo Xin-Yu, and Wang Zhen-Shi: “The Research of Dynamic Programming Zoning Control Method in Elevator Up-peak Mode”, *Elevator World*, Vol. 50, No. 6, pp. 105–110, 2002.
- 16) Robert H. Crites and Andrew G. Barto: “Improving Elevator Performance Using Reinforcement Learning”, *Advances in Neural Information Processing System 8*, pp. 1017–1023, 1996.
- 17) 黒沢憲一, 平沢宏太郎, 葛貫壮四郎, 米田健治, 坂井吉男, 萩中弘行: “エレベータの知能群管理方式 — その1: 呼び割当て論理 —”, *情報処理学会論文誌*, Vol. 26, No. 2, pp. 278–287, 1985.
- 18) 小堀真吾, 鈴木直彦, 岩田雅史, 匹田志朗: “エレベーター群の走行距離と待時間の相関に関する特性解析”, 第49回自動制御連合講演会予稿集 (CD-ROM), 2006.
- 19) M.W.P. Savelsbergh and M. Sol: “The General Pickup and Delivery Problem”, *Transportation Science*, Vol. 29, No. 1, pp. 17–29, 1995.
- 20) 岩田雅史: “エレベータ群システムにおける運行制御に関する研究”, 神戸大学博士論文, 2001.
- 21) Kiyoshi Yoneda: “Interger Estimation of Origin-Destination Tables”, *電学論 C*, Vol. 114, No. 4, pp. 483–490, 1994.
- 22) 堀 大成, 林 勝洋: “建築と設備技術者のためのエレベータ・エスカレータ計画”, 技術書院, 1994.
- 23) 松本幸正, 藤田素弘, 松井 寛: “断面交通量に基づく休日 OD 交通量の推定手法に関する研究”, *土木学会論文集*, Vol. IV-18, No. 458, pp. 7–16, 1993.
- 24) 河上省吾, 陸 化普, 広島康裕: “観測リンク交通量に基づくモード別分布交通需要推定モデルとその適用性の検討”, *土木学会論文集*, Vol. IV-18, No. 458, pp. 45–54, 1993.
- 25) 鈴木裕通, 高橋 聡, 佐野泰仁, 須藤 豪, マルコン シヤンドル, 喜多 一: “遺伝的アルゴリズムによるマルチカーエレベータ制御ルールのシミュレーションベース最適化”, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 40, No. 4, pp. 466–473, 2004.
- 26) 池田浩司, 田中俊二, 荒木光彦: “非即時案内表示方式を用いた行き先階登録方式エレベータの乗客割り当て方法の検討”, 第50回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 475–476, 2006.
- 27) Zong Qun and Wang Weija: “Application of Robust Optimization Scheduling Strategy in Elevator Group Control Systems”, *Elevator World*, Vol. 55, No. 8, pp. 116–126, 2007.

- 28) 平沢宏太郎, 葛貴壯四郎, 岩坂達夫, 金子 隆, 河竹好一: “エレベータ群管理における呼び割付け方式”, 電学論 C, Vol. 99, No. 2, pp. 27–32, 1979.
- 29) Matthew Brand and Daniel Nikovski: “Optimal Parking in Group Elevator Control”, Technical report, Mitsubishi Electric Research Laboratories, Inc., 2004.
- 30) Guilherme E. Vieira, Jeffrey W. Herrmann, and Edward Lin: “Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies, and methods”, *Journal of Scheduling*, Vol. 6, No. 1, pp. 39–62, 2003.
- 31) 岩田雅史, 匹田志朗, 駒谷喜代俊: “ニューラルネットワークによるエレベータ交通流の検出”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 33, No. 3, pp. 209–215, 1997.
- 32) 米田 清, 中山靖子, 松本敏明: “エレベータ群のトレース駆動シミュレーション”, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 42, No. 5, pp. 371–374, 1997.
- 33) 田中俊二, 荒木光彦: “行き先階登録方式エレベータの動的運行最適化における評価関数の検討”, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2006 講演論文集, pp. 125–130, 2006.
- 34) Sandor Markon and Yoshikazu Nishikawa: “On the Analysis and Optimization of Dynamical Cellular Automata with Application to Elevator Control”, In *Proc. of The 10th Japanese-German Seminar Nonlinear Problems in Dynamical Systems*, pp. 1–12, 2002.
- 35) 畑中 隆, 滝根哲哉, 高橋 豊, 長谷川利治: “エレベータシステムの待ち行列理論によるモデル化と性能評価”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 6, No. 9, pp. 396–406, 1993.
- 36) 匹田志朗, 駒谷喜代俊: “ファジィ・ルールベースを用いた新しいエレベータ群管理システム”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 99–104, 1989.
- 37) 匹田志朗, 駒谷喜代俊: “エレベータ群管理における出勤時運転について”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 11, pp. 1896–1904, 1995.
- 38) David L. Pepyne and Christos G. Cassandras: “Optimal Dispatching Control for Elevator Systems During Uppeak Traffic”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 5, No. 6, pp. 629–643, 1997.
- 39) David L. Pepyne and Christos G. Cassandras: “Design and Implementation of an Adaptive Dispatching Controller for Elevator Systems During Uppeak Traffic”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 6, No. 5, pp. 635–650, 1998.
- 40) 岩田雅史, 匹田志朗: “サービス分布評価指標を用いたエレベータ群管理”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 164–171, 2001.
- 41) Daniel Nikovski and Matthew Brand: “Decision-Theoretic Group Elevator Scheduling”, Technical report, Mitsubishi Electric Research Laboratories, Inc., 2003.

- 42) 鈴木直彦, 小堀真吾, 岩田雅史, 匹田志朗: “かご協調型割当方式を用いたエレベーター群管理”, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2006 講演論文集, pp. 28–30, 2006.
- 43) 黒沢憲一, 三浦雅樹, 平沢宏太郎, 米田健治, 坂井吉男, 萩中弘行: “エレベータの知能群管理方式 — その2: 学習論理 —”, 情報処理学会論文誌, Vol. 28, No. 3, pp. 299–309, 1987.
- 44) 江口 徹, 周 金, 平沢宏太郎, 古月敬之, マルコンシャンドル: “Genetic Network Programming によるエレベータ群管理システムの基礎検討”, 電学論 C, Vol. 125, No. 7, pp. 1055–1062, 2005.
- 45) 江口 徹, 周 金, 平沢宏太郎, 古月敬之, マルコンシャンドル: “ランキング処理とノード関数最適化を考慮した Genetic Network Programming によるエレベータ群管理システム”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 3, pp. 281–290, 2006.
- 46) Jin Zhou, Lu Yu, Shingo Mabu, Kotaro Hirasawa, Jinglu Hu, and Sandor Markon: “Double-Deck Elevator Systems using Genetic Network Programming based on Variance Information”, In *Proc. of SICE Annual Conference 2007 (CD-ROM)*, pp. 163–169, 2007.
- 47) Lu Yu, Jin Zhou, Shingo Mabu, Kotaro Hirasawa, Jinglu Hu, and Sandor Markon: “Elevator Group Control System using Genetic Network Programming with ACO Considering Transitions”, In *Proc. of SICE Annual Conference 2007 (CD-ROM)*, pp. 1330–1336, 2007.
- 48) 浦口幸宏, 田中俊二, 荒木光彦: “定員制約を考慮した行き先階登録方式エレベータの運行決定問題に関する研究”, スケジューリング・シンポジウム 2002 講演論文集, pp. 146–151, 2002.
- 49) 白石和章, 濱上知樹, 平田廣則: “学習オートマトンによるマルチカーエレベータ制御”, 電学論 D, Vol. 125, No. 1, pp. 91–98, 2005.
- 50) 谷川真理子, 田中俊二, 荒木光彦: “現実的状况における行き先階登録方式エレベータの群管理問題 — 乗客推定を用いた乗客割り当て方法の検討 —”, 第 50 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 471–472, 2006.
- 51) Lao Shihong, Markon S., and Y. Nishikawa: “確定呼びに対するエレベータ群管理かご割当問題の Genetic Algorithm による解法”, 第 34 回自動制御連合講演会予稿集, pp. 347–350, 1991.
- 52) Markon, 喜多, 西川: “ニューラルネットワークを利用した適応型エレベータ群管理システム”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 7, No. 12, pp. 487–497, 1994.
- 53) 池田 心, 鈴木裕通, 喜多 一, マルコンシャンドル: “マルチカーエレベータのスケジュー

- リング問題”, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2006 講演論文集, pp. 137–142, 2006.
- 54) Kokolo Ikeda, Hiromichi Suzuki, Sandor Markon, and Hajime Kita: “Traffic-Sensitive Controllers for Multi-Car Elevators; Design, Multi-Objective Optimization and Analysis”, In *Proc. of SICE Annual Conference 2007 (CD-ROM)*, pp. 2655–2662, 2007.
- 55) Richard S. Sutton and Andrew G. Barto: “強化学習”, 森北出版, 2000.
- 56) Atsuya Fujino, Toshimitsu Tobita, Kazuhiro Segawa, Kenji Yoneda, and Akihiro Togawa: “An Elevator Group Control System with Floor-Attribute Control Method and System Optimization Using Genetic Algorithms”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 4, pp. 546–552, 1997.
- 57) Zhen Shen and Qianchuan Zhao: “A Branch and Bound Method to the Continuous Time Model Elevator System with Full Information”, In *Proc. of SICE Annual Conference 2007 (CD-ROM)*, pp. 327–330, 2007.
- 58) 北村新三, 武川 公, 松永公廣: “制御工学”, 基礎電気・電子工学シリーズ, 第 10 巻, 森北出版, 1998.
- 59) 玉置 久: “システム最適化”, オーム社, 2005.
- 60) 福島雅夫: “数理計画入門”, システム制御情報ライブラリー, 第 15 巻, 朝倉書店, 2001.
- 61) Michael Pinedo: “SCHEDULING: Theory, Algorithms, and Systems”, PRENTICE HALL ENGLEWOOD CLIFFS, 1995.
- 62) 玉置 久: “ジョブショップ・スケジューリングのモデル化と解法に関する研究”, 京都大学博士論文, 1993.
- 63) 茨木俊秀: “組合せ最適化 — 分枝限定法を中心として”, 講座・数理計画法, 第 8 巻, 産業図書, 1983.
- 64) Nicolai M. Josuttis: “C++標準ライブラリ チュートリアル&リファレンス”, アスキー, 2001.
- 65) Patrick Henry Winston: “ウィンストンの C++”, アジソン・ウェスレイ・パブリッシャーズ・ジャパン, 1995.
- 66) Anthony J. Bell and Terrence J. Sejnowski: “An information-maximisation approach to blind separation and blind deconvolution”, *Neural Computation*, Vol. 7, No. 6, pp. 1129–1159, 1995.
- 67) Zong Qun, Ya Shuhong, Cai Yu, and Xue Lihua: “Markov Chain-Based Elevator Traffic Modeling by the Monte Carlo Method”, *Elevator World*, Vol. 50, No. 11, pp. 133–137, 2002.
- 68) R.A. ハワード: “ダイナミックプログラミングとマルコフ過程”, 培風館, 1985.

- 69) Tapio Tyni and Jari Ylinen: “Genetic Algorithms in Elevator Car Routing Problem”, In Lec Spector, Erik D. Goodman, Annie Wu, W.B. Langdon, Hans-Michael Voigt, Mituso Gen, Sandip Sen, Marco Dorigo, Shahram Pezeshk, Max H. Garzon, and Edmund Burke, editors, *Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2001)*, pp. 1413–1422, 2001.
- 70) Thomas Dean and Robert Givan: “Model Minimization in Markov Decision Processes”, *The National Conference of Artificial Intelligence*, pp. 106–111, 1997.
- 71) 土郎正宗: “攻殻機動隊”, 講談社, 1991.
- 72) 玉置 久: “遺伝的機械学習アルゴリズム”, *電学論 C*, Vol. 119, No. 8/9, pp. 925–930, 1999.
- 73) Robert E. Smith: “Learning classifier systems”, In T. Bäck, D. B. Fogel, and Z. Michalewics, editors, *Evolutionary Computation*, Vol. 1, pp. 114–123, 2000.
- 74) Dale Schuurmans and Jonathan Schaeffer: “REPRESENTATIONAL DIFFICULTIES WITH CLASSIFIER SYSTEMS”, In *Proc. of 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms*, pp. 328–333, 1989.
- 75) John H. Holland and Judith S. Reitman: “COGNITIVE SYSTEMS BASED ON ADAPTIVE ALGORITHMS”, In D.A. Waterman and F. Hayes-Roth, editors, *Cognitive Systems based on adaptive algorithms*, pp. 313–329, 1978.
- 76) Stewart W. Wilson and David E. Goldberg: “A Critical Review of Classifier Systems”, In *Proc. of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 244–255, 1989.
- 77) Yves Kodratoff and Ryszard Michalski, editors: “MACHINE LEARNING — An Artificial Intelligence Approach —”, Vol. 3, MORGAN KAUFMANN PUBLISHERS, Inc., 1990.
- 78) Stewart W. Wilson: “ZCS: A Zeroth Level Classifier System”, In *Evolutionary Computation 2*, pp. 1–18, 1994.
- 79) Sandip Sen: “A tale of two representations”, *Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems*, pp. 245–254, 1994.
- 80) 北野宏明 (編): “遺伝的アルゴリズム”, 産業図書, 1993.
- 81) 佐藤 浩, 小野 功, 小林重信: “遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価”, *人工知能学会誌*, Vol. 12, No. 5, pp. 734–744, 1997.
- 82) Gilbert Syswerda: “A Study of Reproduction in Generational and Steady-State Genetic Algorithms”, In Gregory J.E. Rawlins, editor, *Foundations of Genetic Algorithms*, Vol. 1, chapter 2, pp. 94–101, Morgan Kaufmann, 1991.

- 83) J.W. Tukey: "Exploratory Data Analysis", Addison-Wesley, 1977.



---

## 本研究に関する発表

### 論文発表

- (1) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元, 北村新三: “エレベータ運行計画問題の静的最適化モデルと分枝限定法”, 電学論 C, Vol. 123, No. 7, pp. 1334–1340, 2003.
- (2) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元: “遺伝的機械学習によるエレベータ運行ルールの獲得手法”, 電学論 C, Vol. 126, No. 6, pp. 761–770, 2006.
- (3) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元: “エレベータ運行計画問題に対する動的計画法の一構成と状態遷移モデルの縮約による効率化”, 計測自動制御学会論文集 (掲載予定).

### 国際会議

- (1) Tsutomu Inamoto, Hisashi Tamaki, Hajime Murao, and Shinzo Kitamura: “An Application of Branch-and-Bound Method to Deterministic Optimization Model of Elevator Operation Problems”, In *Proc. of SICE Annual Conference 2002 (CD-ROM)*, pp. 1345–1350, 2002.
- (2) Tsutomu Inamoto, Hisashi Tamaki, and Hajime Murao: “Model-Approximated Dynamic Programming based on Decomposable State Transition Probabilities”, In *Proc. of SICE Annual Conference 2007 (CD-ROM)*, pp. 17–20, 2007.

### 紀要

- (1) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元, 北村新三: “分枝限定法によるエレベータ運行計画問題の静的最適化 — 連続時間モデルに基づく分枝限定アルゴリズムの一構成方法 —”, 神戸大学大学院自然科学研究科 紀要, 第 22 巻-B, pp. 13–20, 2004.

### 口頭発表

- (1) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元, 北村新三: “エレベータ運行計画問題の静的最適化モデルと分枝限定法”, 平成 14 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集 (CD-ROM), pp. 369–374, 2002.

- (2) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元, 北村新三: “エレベータ運行計画問題の静的最適化モデルと分枝限定法の一構成法”, 第 47 回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 39–41, 2003.
- (3) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元, 北村新三: “エレベータ運行計画最適化のためのルール獲得手法の一構成例”, 第 9 回創発システムシンポジウム講演資料, pp. 129–132, 2003.
- (4) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元, 北村新三: “遺伝的機械学習によるエレベータ運行ルールの獲得手法”, 第 11 回創発システムシンポジウム講演資料, pp. 137–140, 2005.
- (5) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元: “簡略な状態空間表現に基づいたエレベータ運行計画問題への強化学習によるアプローチ”, 第 33 回知能システムシンポジウム資料, pp. 103–108, 2006.
- (6) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元: “状態遷移を明示的に考慮したシミュレーションモデルによる状態遷移確率に基づいたエレベータ運行計画問題へのアプローチ”, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2006 講演論文集, pp. 119–124, 2006.
- (7) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元: “離散システムの状態遷移確率の 2 値関数に基づいた定式化とエレベータ運行計画問題への適用”, 第 13 回創発システムシンポジウム講演資料, pp. 115–118, 2007.
- (8) 稲元 勉, 玉置 久, 村尾 元: “エレベータ運行計画問題に対する動的計画法の一構成 — 状態遷移モデルの縮約を中心として —”, 平成 19 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集 (CD-ROM), pp. 1082–1087, 2007.