

# 機械式立体駐車場におけるスケジューリング

NKK 阿瀬 始

## 1. はじめに

車の数が非常に多い日本、とくに大都市等では、特定の目的のために車が集まるような場所・地域には、数百台以上が収納できる大規模駐車場が必要となる。ショッピングセンター、イベントセンター、病院などがその例である。駐車場には大別して自走式と機械式[1]があるが、土地の広さに対する収納台数という点では機械式が優り、大規模駐車場に適している。駐車場における客に対するサービスの向上という観点からは、入庫あるいは出庫を迅速に行うこと、人や物(車)に対する安全性を高めることが要求される。ここでは、設備を効率良く運用することにより、入庫や出庫を迅速に行うための方法について論じる。自走式では運転者に行き先等について適切なガイドを示す程度のことしかできないが、機械式では台車の運行をうまくスケジュールすることにより作業効率を大きく改善することが可能である。台車の運行管理のためのスケジューリング方法については他に公表された文献が見あたらないので、以下に著者の研究を中心に論じる。

## 2. 機械式立体駐車場

本論文で考察する対象は、図1に示す構造をもつ機械式立体駐車場である。図1の駐車場は多階からなり、それぞれ一つずつある入庫口および出庫口は、それぞれ入庫エレベータおよび出庫エレベータにより各階と結ばれている。各階には台車が走るレーンの両側に、駐車室が一つずつレーンに沿って配置されている(ただし、入庫および出庫エレベータ室になっている室には車は駐車できない)。この型の駐車場を単列型駐車場という。レーン上には台車が2台あり、レーン上を自由に移動し、駐車室とエレベータ室間の車の出し入れを行う。ただし、2台の台車は同一レーン上を走行するので、両台車はある距離(=  $\delta$ )までしか接近できない。また、レーンは駐車場の端までしかないので、端から距離  $\delta$  以内の駐車室にはその端の側の台車しか到達できない。両台車が距離  $\delta$  以内に接近あるいは相手台車の向こう側に移動しようとする状態を干渉と呼び、干渉が発生するときにはどちらかの台車が干渉が生じない地点まで退避し待機するという干渉回避処理が必要となる。

入庫の時は、利用者は入庫待ち行列の最後尾につけ、待ち行列の先頭まで進むと入庫口の所定の位置で車を降りることができる。出庫の時は、利用者は出庫待ち行列の最後尾につけ、待合所で出庫口に自分の車が出てくるのを待つことになる。いずれの場合もその待ち時間の短縮は利用者に対するサービスの向上になる。

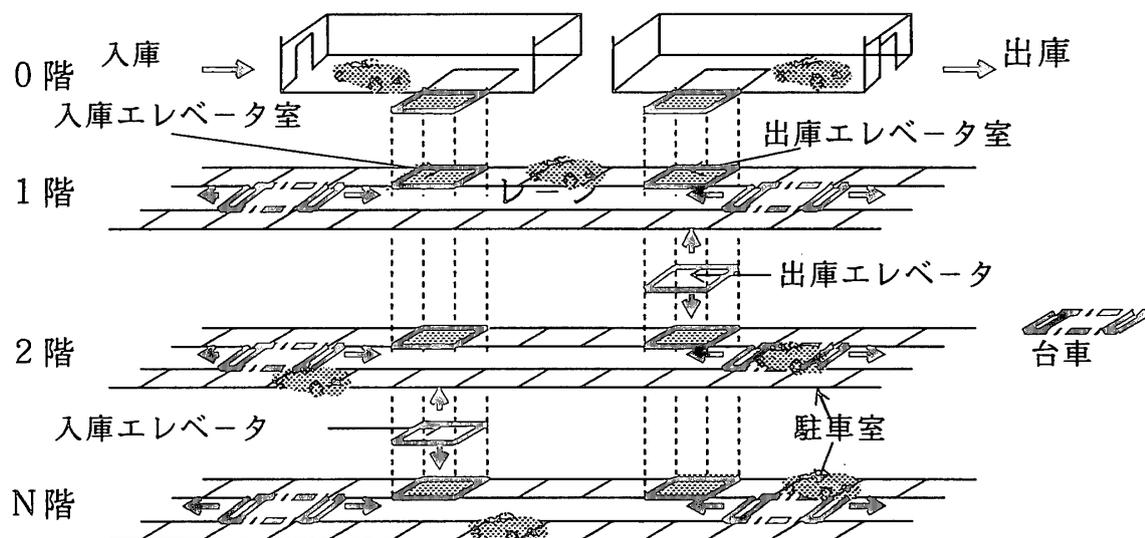


図1 単列型機械式立体駐車場

### 3. スケジューリング問題

#### 3.1 入庫処理と出庫処理

入庫要求に対し、その入庫車を階  $j$  の駐車室に格納するとすると、入庫エレベータと階  $j$  の台車は図2のダイアグラムの上図と下図に示す一連の動作を行う。上図は階  $j$  に車を入庫するため、入庫エレベータが  $E^P_1 \sim E^P_4$  の四つの部分作業からなる処理を行う様子を示している。ただし、縦軸はエレベータの位置（階0と階  $j$ ）、横軸は時間である。

- 1)  $E^P_1$  は入庫口(階0)で扉を開き車を移載し扉を閉める、
- 2)  $E^P_2$  は車を積載して階  $j$  への移動、
- 3)  $E^P_3$  は台車の到着を待ち車を台車へ移載、
- 4)  $E^P_4$  は階  $j$  から階0に空で移動、

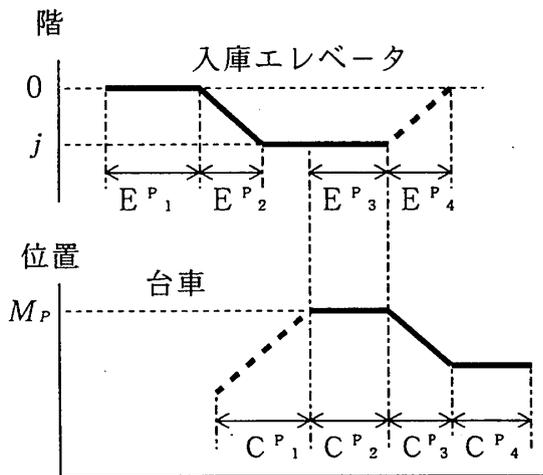


図2 入庫作業ダイアグラム

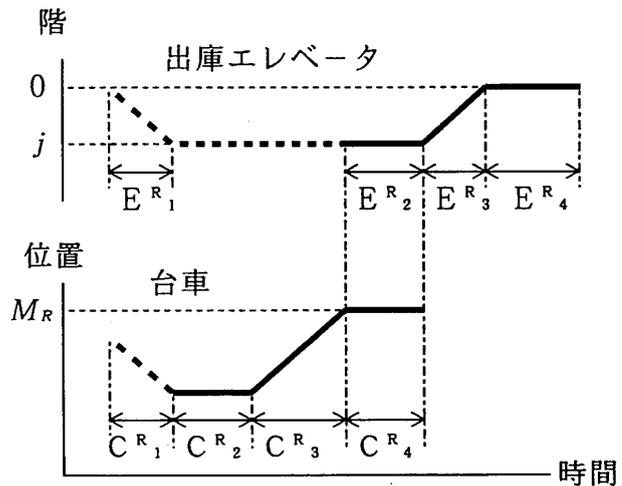


図3 出庫作業ダイアグラム

という部分作業である。これに対し、下図は入庫処理をする階  $j$  の台車が  $C^P_1 \sim C^P_4$  の四つの部分作業からなる処理を行う様子を示している。

- 1)  $C^P_1$  は入庫エレベータ室への空移動、
- 2)  $C^P_2$  は入庫エレベータから車の移載、
- 3)  $C^P_3$  は車を積載して入庫する駐車室への移動、
- 4)  $C^P_4$  は台車から駐車室への車の移載、

という部分作業である。ただし、縦軸は階  $j$  におけるこの台車の水平位置を表している。

一方出庫要求に対し、その出庫車が階  $j$  の駐車室に格納されているとすると、出庫エレベータと階  $j$  の台車は図3のダイアグラムの上図と下図に示す一連の動作を行う。上図は階  $j$  に格納されている車の出庫のため、出庫エレベータが  $E^R_1 \sim E^R_4$  の四つの部分作業からなる処理を行う様子を示している。

- 1)  $E^R_1$  は出庫口(階0)から階  $j$  への空移動、
- 2) その後台車の到着を待ち  $E^R_2$  は台車から車の移載、
- 3)  $E^R_3$  は車を積載して階  $j$  から出庫口への移動、
- 4)  $E^R_4$  は扉を開き車を出し扉を閉める、

という部分作業である。これに対し、下図は出庫処理をする階  $j$  の台車が  $C^R_1 \sim C^R_4$  の四つの部分作業からなる処理を行う様子を示している。

- 1)  $C^R_1$  は出庫車の格納されている駐車室への空移動、
- 2)  $C^R_2$  は駐車室から車の移載、
- 3)  $C^R_3$  は車を積載して出庫エレベータ室への移動、
- 4)  $C^R_4$  は出庫エレベータに車の移載、

という部分作業である。図2と図3のダイアグラムにおいて、実線は車を積載している状態、破線は車を積載していない状態を表す。入庫処理においては、部分作業 $E^P_3$ と $C^P_2$ は同期して行われなければならないから、 $E^P_2$ と $E^P_3$ の間、あるいは $C^P_1$ と $C^P_2$ の間に通常は待ち時間が発生する。また出庫処理においては、部分作業 $E^R_2$ と $C^R_4$ は同期して行われなければならないから、 $E^R_1$ と $E^R_2$ の間、あるいは $C^R_3$ と $C^R_4$ の間に通常は待ち時間が発生する。

複数台の入出庫要求に対しては図2と図3の処理を繰り返すことになるが、台車は2台で処理するので、台車のダイアグラムは一般に干渉回避動作を含む複雑なものとなる。

### 3.2 スケジューリング問題

前述した公共施設、ショッピングセンター、病院などに設置された機械式立体駐車場の場合は、駐車場の利用は1日単位と考えてよい。1日の初めは入庫主体、1日の終わりは出庫主体、そして途中の時間帯は入庫と出庫が入り混じる形態と考えられる。入庫、出庫、入出庫それぞれに対応し、スケジューリング問題が存在する。入出庫スケジューリング問題が最も一般的で、入庫スケジューリング問題、出庫スケジューリング問題は特別な場合である。入庫スケジューリング問題と出庫スケジューリング問題の大きな違いは、出庫の時には各出庫車の格納されている駐車室は決まっているのに対して、入庫の時には入庫先は決まっていなくて、そのとき空いている駐車室を任意に選択できることである。

図1の駐車場では入庫エレベータおよび出庫エレベータはそれぞれ1台だけであるので、入出庫作業時間を最短にするという観点からは、各エレベータの動かし方に対するスケジューリングの余地はない。一方、台車は2台あるので、入庫あるいは出庫をどちらの台車が処理するか、干渉が発生した場合にどちらの作業を優先するかを選択することができる。したがって、入出庫スケジューリング問題における決定変数は、入庫先の駐車室および台車割り当てと干渉回避方法である。

入出庫スケジューリング問題において入庫室の決定は、入庫した車がいずれは出庫するのであるから、将来の入出庫スケジューリング問題に影響を与える。将来の出庫作業の効率を考えればできるだけ出庫エレベータ側の駐車室に入庫させたいが、それは現在の入庫作業の効率を悪くすることになる。すなわち、入出庫スケジューリング問題における評価は、現時点だけの入庫待ち行列と出庫待ち行列だけに対して行えばいいのではなく、現時点からその日の終わりまでを考慮して行わなければならない。しかしながら、スケジューリングにあたって得られる確定的な情報は、駐車場の駐車室の現在の空き状況、現時点での入庫待ち行列および出庫待ち行列である。したがって、将来のことも考慮するためには、現時点で入庫する車がいつ出庫するかという予測情報が必要となる。精度の高い予測を得ることは容易ではないと考えられるし、ある程度の予測が得られるとしても問題を確率的にとり扱わなくてはならなくなるのでやはり容易ではない。ただ、将来の影響に対する考慮は入庫室の決定に集約させるということにすると、入出庫スケジューリング問題は第1段で入庫室を決定し、第2段で入庫室が与えられたという条件のもとでの入出庫スケジューリング問題を解くという2段階の問題を解くことに帰着される。第1段の問題についてはそれほど研究が進んでいないので、第2段の問題についてのみ次章でその解法を論じる。

## 4. 部分問題に対する解法

### 4.1 厳密解法

部分問題である第2段の問題は、各階の台車にとっては入庫車についても出庫車についても出発位置と到着位置が与えられたという条件で、どちらの台車が作業をするか、干渉があったときにどちらの台車を優先させるかを決定する問題になる。これは結局は図2や図3で示した2台の台車のダイアグラムを決定する問題である。この問題は次に示す状態を定義すると、状態を節点に対応させ、ある節点から遷移可能な状態を有向枝で結び、その遷移に要する時間（入出庫の一部の作業時間）をその枝の重みとする重み付き有向グラ

フの始点から終点に至る最短経路問題に帰着される[4],[5]。

【定義1】入出庫スケジューリング問題に対する状態（1階の場合）

2台の台車が入出庫作業をすることに対応する状態はつぎのように定義される。

$(p, r)(a_1, a_2, b_1, b_2, t_1, t_2, q_1, q_2)$

$p$  : 現在処理対象となっている入庫番号 ;  $p \in \{\phi, 1, \dots, n_P\}$

$r$  : 現在処理対象となっている出庫番号 ;  $r \in \{\phi, n_P+1, \dots, n_P+n_R\}$

$a_i$  : 台車  $i$  が処理する入庫/出庫番号 ;  $i = \{1, 2\}$

$b_i$  : 台車  $i$  が処理する部分作業番号 ;  $i = \{1, 2\}$

$t_i$  : 台車  $i$  が部分作業  $b_i$  を開始する時刻 ;  $i = \{1, 2\}$

$q_i$  : 台車  $i$  が部分作業  $b_i$  を開始する位置 ;  $i = \{1, 2\}$

ここに  $a_1$  と  $a_2$  は、 $\phi$ 、入庫列  $p, \dots, n_P$ 、出庫列  $r, \dots, n_P+n_R$  のうちのどれかであり、 $a_1 \neq a_2$  であり、 $p$  と  $r$  のうち少なくとも一つは  $a_1$  と  $a_2$  のどちらかに設定されていなければならない。時刻  $t_1$  と  $t_2$  のうちどちらかは0である。

状態  $(p, r)(a_1, a_2, b_1, b_2, t_1, t_2, q_1, q_2)$  から遷移する次の状態は、干渉があったときにどちらの台車を優先するかということと、入庫番号  $p$  または出庫番号  $r$  が+1進むときに状態を更新させた方の台車が次に残りの入庫/出庫のどれを処理するかを与えれば確定する[5]。入出庫スケジューリング問題の特別な場合である入庫スケジューリング問題や出庫スケジューリング問題の場合には状態の定義はもう少し簡単になる[2]。

【定義2】出庫スケジューリング問題に対する状態（1階の場合）

2台の台車が出庫作業をすることに対応する状態はつぎのように定義される。

$k(a, b, c, d)$

$a$  : 車  $k$  を出庫した台車番号、 $a = 1, 2$

$b$  : 相手台車が処理中の出庫車の番号 ;  $b \in \{\phi, k+1, \dots, n\}$

$c$  : 干渉の有無と相手台車の積載状態

= 0 : 干渉なし

= 1 : 干渉が有り相手台車は車  $b$  を積載している

= 2 : 干渉が有り相手台車は車を積載していない

$d$  : 相手台車に対する上述の時刻(- $t$ )の  $t$  を時間刻み  $\Delta t$  で離散化した値

入庫スケジューリング問題に対する状態の定義は定義2と同様である。駐車場が多階の場合は、1階の場合の状態の階数分の直積を作り、さらに階ごとの時刻のずれを表す変数および入出庫の場合には入庫エレベータと出庫エレベータの到着時刻を変数に加えて状態を構成すればよい[2],[3],[5]。出庫スケジューリング問題の場合を定義3に示す。

【定義3】出庫スケジューリング問題に対する状態（多階の場合）

状態  $k((a_1, b_1, c_1, d_1, e_1), \dots, (a_n, b_n, c_n, d_n, e_n))$

$a_j$  : 出庫車  $k$  が階  $j$  の場合は車  $k$  を出庫した台車番号。出庫階以外の階  $j$  においては最近の出庫処理を行った台車番号。  $a_j = 1, 2$

$b_j$  : 階  $j$  における相手台車が処理中の出庫車の番号。  $b_j \in \{\phi, k+1, \dots, n\}$

$c_j$  : 階  $j$  における干渉の有無と相手台車の積載状態。

= 0 : 干渉なし

= 1 : 干渉が有り相手台車は車  $b_j$  を積載している

= 2 : 干渉が有り相手台車は車を積載していない

$d_j$  : 時刻(- $t$ )の  $t$  を時間刻み  $\Delta t$  で離散化した値

$e_j$  : 出庫車  $k$  を処理する階  $j$  においては0。そうでない階においては、出庫  $k$  の作業終了時刻を時刻0としたとき、階  $j$  の最近の出庫の作業終了時刻(- $t'$ )の  $t'$  を時間刻み  $\Delta t$  で離散化した値。

ただし、階  $j$  の出庫がすべて終了なら0とする。

問題が重みつき有向グラフの最短路問題に帰着されたので、動的計画法による厳密解法が存在する。その計算量は入庫待ち行列と出庫待ち行列の数に対して多項式オーダーであり、階数に対しては指数オーダーである。特に出庫スケジューリング問題に対しては[2],[3]で具体的なオーダーが得られており、次式のようなになる。

$$\text{節点数} = O(D^N E^{N-1} n^{N+1})$$

$$\text{枝数} = O(D^N E^{N-1} n^{N+1})$$

$n$  : 出庫数、 $D$  :  $d_j$ の最大個数、 $E$  :  $e_j$ の最大個数

## 4.2 近似解法

動的計画法による厳密解法は多くの計算機メモリを必要とし、計算時間もかかる。したがって、実運用への適用を考える場合には、比較的短時間で質の良い解を得ることのできる近似解法が要求される。入出庫スケジューリング問題は重み付き有向グラフの最短経路問題に帰着されるから、始点から終点に至るパスを一意的に定める表現が解表現となる。入出庫スケジューリング問題の解表現[4],[5]は少し複雑になるので、ここでは出庫スケジューリング問題に対する解表現を説明する。出庫スケジューリング問題に対する解表現は変数  $A(m, k)$  と  $B(m, k)$  からなる。

$A(m, k)$  = 階  $m$  において  $k$  番目の出庫車を処理する台車番号

$B(m, k)$  = 階  $m$  において  $k$  番目の出庫処理のときに干渉があった場合の優先台車番号

$m = 1, \dots, N$ ;  $k = 1, \dots, K_m$

$N$  : 階数、 $K_m$  : 階  $m$  における出庫数

この解表現を用いると、変数  $A(m, k)$  と  $B(m, k)$  は値が1か2であるから、ある解を表す点  $\{A(m, k), B(m, k)\}$  の近傍を、どちらかの変数の1成分の値を1から2あるいは2から1に変更した点の集合と定義できる。変更箇所を2成分以上と定義することももちろん可能である。この近傍定義により局所探索アルゴリズムが構成できるし、また遺伝アルゴリズムにおける交叉や突然変異も構成できるので、メタヒューリスティック[7]による様々な近似解法を試みることができる。[4],[5]では、いくつかのメタヒューリスティックをとりあげ、出庫スケジューリング問題および入出庫スケジューリング問題に対して適用した結果を比較検討している。

## 5. 今後の展開

### 5.1 設備面

機械式駐車場の建設にあたっては現在も様々な要求があり、構造的にいろいろな工夫がなされていくものと考えられる。その代表的なものは、より空間利用率を上げたいということからきている。図1の駐車場は各階においてレーンの両側にレーンに沿って駐車室が1室ずつ配置されているので単列型と言われたが、これに対し、図4に示すようにレーンの両側に駐車室を2室ずつ配置した構造にすると空間利用率が向上する。この構造の駐車室を複列型と言う。この複列型の駐車場においては、レーンから見て手前側の駐車室に車を出し入れする場合は単列型の場合と全く同じ作業になるが、奥側の駐車室に車を出し入れする場合は単列型の場合にはなかった新たな作業が必要となる。すなわち、奥側の駐車室に車を出し入れする担当の台車Aの作業の前に、相手台車Bがまず手前の駐車室の車を積載して干渉が生じない位置に移動してそこで待機し、台車Aの作業が終了後、台車Bが積載待機していた車を元の駐車室に戻すという作業が必要になる。また、図4では入庫エレベータ室、出庫エレベータ室ともレーンに対して手前側に配置されているが、奥側に配置される場合もある。その場合は各エレベータ室とレーンの間の室はバッファの機能を持

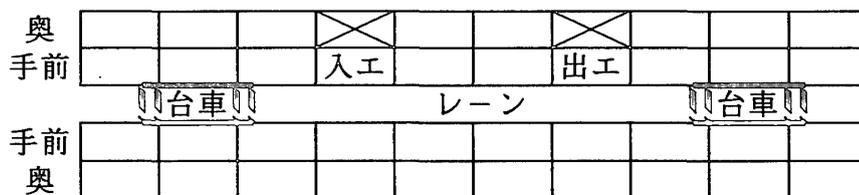


図4 複列型駐車場のある階の平面図

つことができる。

## 5.2 解法面

解法面で今後必要となるのは、

1) 5.1節で示したような他の型の設備に対するアルゴリズムの開発  
2) 実運用に適した短時間で質の良い解が得られるアルゴリズムの開発  
であろう。機械式立体駐車場の場合、型式認定や性能評価の際にはオフラインのアルゴリズムで良いので、厳密解法や多少時間がかかっても質の高い近似解を与える近似解法は重要である。また、それらは実運用で用いるアルゴリズムの評価にも必要なものでその意味でも重要である。したがって、1)に対しては他の型の設備ごとに厳密解法や高精度の近似解法が必要であるということになる。次に2)に対しては、前述した入庫および入出庫スケジューリング問題における入庫室の決定問題に対するアルゴリズムの開発も必要である。

また、客に対して待ち時間を少なくするというサービスを徹底的に追求するというのであれば、たとえば以下に示すような設備の運用上の工夫も考えられ、その場合はその拡張的な運用も考慮に入れたスケジューリング問題を考えなければならない。

- 1) 台車が空いている時間帯を利用して、駐車室に格納されている車を将来の出庫に備えて有利な出庫エレベータ付近の駐車室に移す。
- 2) 入庫エレベータあるいは出庫エレベータが空いている時間帯に特定の階の出庫あるいは入庫が連続する場合、空いているエレベータを使って負荷の少ない階に車を移動し、その階の台車にも作業を分担させる。

## 6. おわりに

近年、いろいろなシステムにおいて顧客満足という観点からその運用方法を見直すということが強く認識されつつある。その実現には、設備上の工夫や情報網の整備など対象とするシステムごとに様々な側面があるが、設備を効率的に運用管理することのできるスケジューリングはその有力な方法の一つと考えられる。ここでとりあげた機械式立体駐車場にもスケジューリング技術が積極的に取り入れられ、「××の駐車場では台車やエレベータが賢く動くので客をあまり待たせない。」といった評判をあちこちで耳にするようになりたいものである。

## 参考文献

- 1) 三星他：立体駐車場設備。建築と社会，Vol. 77, No. 4, pp. 27-65(1996)
- 2) 阿瀬, 茨木, 柳浦：機械式立体駐車場出庫スケジューリング。  
京都大学大学院情報学研究科数理工学専攻テクニカルレポート(1998)
- 3) 阿瀬, 茨木, 柳浦：機械式立体駐車場出庫スケジューリング。  
システム制御情報学会，Vol. 12, No. 7, pp. 417-427(1999)
- 4) 阿瀬, 茨木, 柳浦：機械式立体駐車場入出庫スケジューリング。  
スケジューリングシンポジウム'99(1999)
- 5) 阿瀬, 茨木, 柳浦：機械式立体駐車場入出庫スケジューリング。  
京都大学大学院情報学研究科テクニカルレポート(1999)
- 6) ベルマン：ダイナミック・プログラミング。東京図書(1973)
- 7) 柳浦, 茨木：メタ戦略のロバスト性について。  
第8回RAMPシンポジウム, pp. 109-124(1996)