ISSN 2186-5647

自動倉庫のモデル設計における
初期導入コスト低減のための入出荷アルゴリズム改良

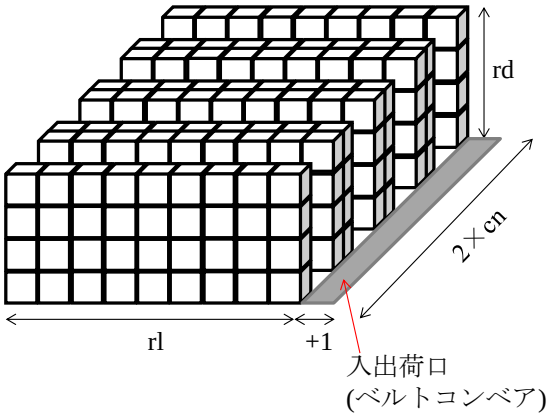
日大生産工 (研究員)　○佐藤 哲也　日大生産工(院)　生島 義英
豊橋創造大学大学院客員教授　唐澤 豊
日大生産工　若林 敬造　元日大生産工　渡邊 昭廣

1 はじめに

近年の物流業界では，コンピュータにより在庫と入出荷処理を管理･制御する立体自動倉庫が普及している。しかし，初期導入コストは高額であるにも関わらず，稼働率の実態を把握し機会損失を明確化することは困難である。そこで本研究では，自動倉庫の稼働率を見積もるため，パレットの入出荷に用いる複数台のクレーンの並列動作性を考慮したモデルを構築し，要求性能を満たしつつ初期導入コストが最小となる自動倉庫をシミュレーション計算により設計する。このとき，入出荷処理のアルゴリズム･モデルをどのように設定するかによって、クレーンの稼働率が大きく変化し，要求性能を維持したまま導入コストの低減が可能であることを示した。以下詳細を述べる。

2 立体自動倉庫の計算機モデル構築

自動倉庫とは，コンピュータにより在庫と入出荷処理を管理･制御する倉庫である。本研究では，T11規格のパレットを使用した立体自動倉庫のモデルについて検討を行った。本モデルでは，ラック2列毎にクレーンが昇降・走行するスペースを設ける。計算モデルにおけるラック配置図をFig.1に示す。そして，入荷と出荷の処理を1度のクレーンの動作で行う“デュアルサイクル動作”を原則とする[1)]。シミュレーション計算に必要な各種条件は，立体自動倉庫



ラック: [rd][2×cn][rl]の 3 次元配列
rd:ラック段数
cn: クレーン台数
rl: ラック連数

Fig.1　計算モデルにおけるラック配置図

Table 1　シミュレーション条件

項目	条件	コスト（万円）	規格	備考
ラック	高さ10 m以下	4	T11規格パレット	ラック1つあたり
	高さ20 m以下	4.5	荷姿: 1,100×1,100×1,200 mm　重量: 800 kg	
	高さ30 m以下	5	ラック: 1,450×1,365×1,175 mm	
クレーン	高さ10 m以下	1,000	10 m　走行120 m/分　昇降30 m/分　フォーク20 m/分	1台あたり
	高さ20 m以下	2,000	20 m　走行160 m/分　昇降40 m/分　フォーク20 m/分	本体制御付き
	高さ30 m以下	3,000	30 m　走行200 m/分　昇降60 m/分　フォーク20 m/分	
レール	高さ10 m以下	10		mあたり
	高さ20 m以下	15		
	高さ30 m以下	20		
スプリンクラー	高さ3 m、平面2ラックに1台	8	スプリンクラーは2段に1箇所	面積1,400㎡未満は不要 高さ10 m未満は不要
耐震床	1,000 ㎡以上	8		㎡あたり　高さ20m以下に利用
	1,000 ㎡以下	10		これ以上高いと建物側で対応

※建物は、別途とする

Improvement of Receiving and Shipping Algorithm in Model Design of Automatic Warehouse System for Reducing Initial Introduction Costs

Tetsuya SATO, Yoshihide IKUSHIMA, Yutaka KARASAWA,
Keizo WAKABAYASHI and Akihiro WATANABE

のメーカーより提供いただいた概算コスト・仕様データをもとに設定した (Table 1)。

商品は事前にABC分析に基づいてグループ分けすることを想定し，予め初期在庫，入荷，出荷についてリストを乱数により生成した。まず出荷リストの順序に従い，該当する商品のうち最もロット番号の若い商品を出荷するとする。次に入荷先ラックをクレーンのアクセスタイムが最小となるように決定，入出荷を一度のクレーン動作で行う“デュアルサイクル動作”のシステムとしてモデルを構築した。

各コスト計算式は，以下のように設定した。

・**ラックコストC_O：**
$C_O = n \times K_O = rd \times (2 \times cn) \times rl \times K_O$
(n: ラック数，K_O: ラック1個あたりのコスト[万円])

・**クレーンコストC_R：**
$C_R = cn \times K_R$
(K_R: クレーン1台あたりのコスト[万円])

・**レールコストC_Z：**
$C_Z = cn \times (rl \times RL) \times K_Z$
(K_Z: レール1 mあたりのコスト[万円]，rl×RLは小数点以下切り上げ)

・**スプリンクラーコストC_S：**
$C_S = (cn + 1) \times (rd / 2) \times rl \times K_S$
(K_S: スプリンクラー1基あたりのコスト[万円]、rd / 2は小数点以下切り上げ)
※倉庫面積≧1400 m^2かつラック全体の高さ ≧ 10 mの場合のみ

・**耐震床コストC_F：**
$C_F = ((3 \times cn \times RW) \times ((rl + 1) \times RL)) \times K_F$
(3×cn×RW: 倉庫幅(クレーン含む)[m]，(rl + 1)×RL: 倉庫長さ(入出荷口含む)[m]，
K_F: 耐震床1m^2あたりのコスト[万円]，
((3×cn×RW)×((rl + 1)×RL)) = 面積[m^2]は小数点以下切り上げ)

ここで，ラックは[rd][2×cn][rl]の3次元配列とし，rd ラック段数，cn: クレーン台数，rl: ラック連数，RH: ラック高さ，RW: ラック幅，RL: ラック長さとした。

シミュレーションプログラムは，Microsoft Visual Studio 2012 Update 4にて構築を行った (Visual C++ / OpenMP)。計算環境は，CPU: AMD Phenom II X6-1090T (6コア6スレッド, 3.2 GHz)，メインメモリ: DDR2 PC2-6400 SDRAM 16GB，OS: Microsoft Windows 7 x64 (SP1) とした。

本稿では，自動倉庫設計のための要求として，ラック総数4,000個，使用面積1,800 m^2以内，ラック積み上げ高さ30 m以内 (法令による) を設定しており，初期在庫商品数は2,000とした。また，入出荷リストにおける商品数もそれぞれ2,000とし，これら入出荷処理が1時間で完了することを要求する処理能力とした。

3 固定ロケーション型立体自動倉庫におけるクレーンの並列動作性

はじめに，固定ロケーション型の立体自動倉庫のモデルについて検証を行った。クレーンが全て独立に動作可能な理想的状態では，入出荷オペレーションの完了に要する時間S_Tは各クレーンの処理時間C_T[i]を用い，以下のように表すことができる。

$$S_T = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_T[i]$$

このとき，ラックの配置が[6][52][13]，クレーン台数26 台，使用面積1751.43 m^2の条件において，要求処理能力を満たす中でのコスト最小となった (58,558 万円)。なお，各2,000件の入出荷オペレーションを完了するまでに要する時間は54.32 min.であった (シミュレーション計算時間: 60,324.66 ms)。

しかし，本結果は複数台のクレーンの並列動作性について一切考慮しておらず，全クレーンの処理時間の平均をオペレーション完了までの時間とした場合である。そこで，入出荷オペレーションを各リストの順序通りに実行することを前提とし (In-Order処理)，クレーンの並列処理性を考慮した処理時間算定を行うこととした。入荷先のラックは，入出荷処理のセット毎に倉庫内のラック全てをラスタスキャンして，アクセスタイム最小のラックとしている。このとき，要求を満たしつつコスト最小となる条件は，ラックの配置が[7][148][4]，クレーン台数74 台，使用面積1,780.30 m^2であった (197,156 万円，処理時間55.35 min.，シミュレーション計算時間56,653.93 ms)。

本計算モデルでは，出荷元ラックは商品種別とロット番号によって一意に決まるため，そのとき使用するクレーンの担当範囲ラックにてABCのグループが割付された空きラックのうちアクセスタイム最小の場所を入荷先ラックとしている。該当範囲に空きラックがない場合には，入出荷処理を別のクレーンで行うものとしている。つまりこのモデルにおいては，

出荷元ラックの決定がクレーンの並列動作性に最も影響する。

まず，入荷先ラックの決定について改良を考えた。入出荷口からのアクセスタイムが等しいラックは，倉庫全体で2×cn個存在するが，ロット番号が連続する同一商品を同じクレーンが担当するラックに格納した場合，入出荷処理においてクレーンの並列動作に支障が生じ，待機が必要となると考えられるためである。つまり，アクセスタイムが等しいラックも，全てを等価として扱うべきではないといえる。そこで，倉庫内のラックを2×rl×rd = 1単位として扱い，Fig. 2のように走査して入荷先ラックを決定する改良を行った。これにより，ロット番号の連続する同一商品が同一クレーンの担当するラックに格納される確率が低減され，クレーンの並列動作性が向上すると期待できる。このとき，要求を満たしつつコスト最小となる条件は，ラックの配置が[10][80][5]，クレーン台数40 台，使用面積1,154.79 m^2であった(111,440 万円，処理時間59.49 min.，シミュレーション計算時間57,086.56 ms)。このように，入荷先ラックの決定方法を変更するだけで，同じ要求性能を満たしつつ，自動倉庫全体の導入コストが大きく変化することが明らかとなった。

次に，入出荷処理の順序最適化について検討を行った。ここでは，出荷リストについては順序を変えず，上述の通りにロット番号の若い商品から順に出荷するものとする。そして，入荷については，クレーンの台数cnを上限とし，リスト内の順序を入れ替えることを検討した (Out-of-Order処理)。これは，入出荷口のベルトコンベアにて入荷商品をクレーンまで運ぶ際，その先を調整することに相当する。ここで，入荷リストのうち入れ替えを検討する単位をnとすると，シミュレーションにおける計算量は${}_nP_n$の順列 (Permutation) となるため，厳密にはn!回の計算が必要となる。しかし，

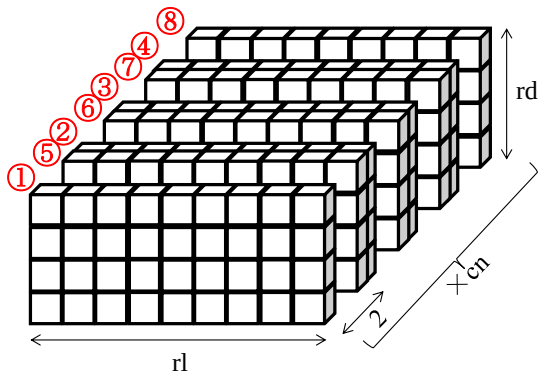


Fig.2　入荷先決定のためのラック走査順序

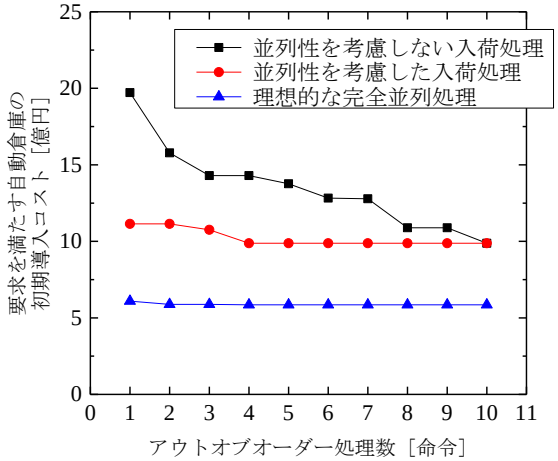


Fig.3　自動倉庫の初期導入コストの Out-of-Order 処理検討リスト範囲依存性

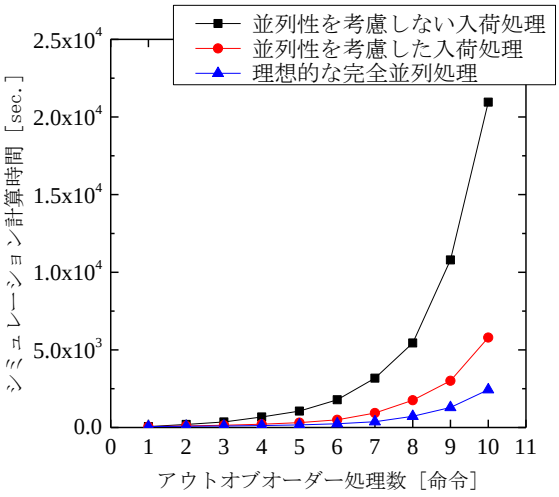


Fig.4　シミュレーション計算時間の Out-of-Order 処理検討リスト範囲依存性

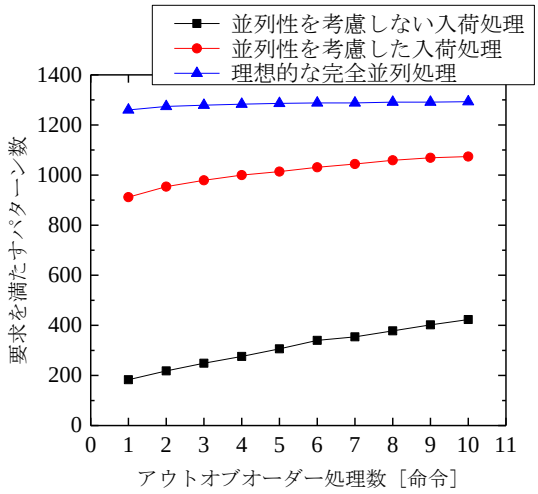


Fig.5　要求を満たすパターン数の Out-of-Order 処理検討リスト範囲依存性

ABC分析に基づく分類が3種類しかないため，実質的には3×n回の計算回数で概ね等しい結果を得ることが出来る。上記条件において，入荷リスト内の順序入れ替えを検討する範囲nを変化させたときの，各入荷先決定アルゴリズムにおける自動倉庫の初期導入コストの推移をFig. 3に，シミュレーション計算時間の推移をFig. 4に，要求を満たすパターン数の推移をFig. 5にそれぞれ示す。

4　フリーロケーション型立体自動倉庫モデルにおける入出荷処理

ここまで，ABC分析に基づくラックへのグループ割付を行う固定ロケーション型の自動倉庫を対象に，入出荷アルゴリズム改良に関するモデル検討をシミュレーション計算により行ってきた。ここでは，ラックへのグループ割付を行わないフリーロケーション型の立体自動倉庫について検討を行う。

フリーロケーション型の自動倉庫は，どの棚にどの品目を保管しても良い運用であり，入荷商品は空いている場所に保管していく。この方式は，Amazonの物流センターでも採用されていることが知られている。

ここでは，前節の検討と同様，①理想的な完全並列処理，②並列性を考慮しない入荷処理，③並列性を考慮した入荷処理について検討を行う。なお，入荷リストのOut-of-Order処理については，効果が見込めないため実施しなかった。

①の理想的な完全並列処理において，要求性能を満たしつつコスト最小となる条件は，ラックの配置が[6][38][18]，クレーン台数19台，使用面積1,737.00 m^2であった (54,062万円，処理時間56.92 min.，シミュレーション計算時間28,164.09 ms)。

②の並列性を考慮しない入荷処理条件において，要求性能を満たしつつコスト最小となる条件は，ラックの配置が[12][86][4]，クレーン台数143台，使用面積1,034.50 m^2であった (116,726万円，処理時間58.99 min.，シミュレーション計算時間27,637.66 ms)。

そして，③の並列性を考慮した入荷処理条件において，要求性能を満たしつつコスト最小となる条件は，ラックの配置が[6][68][10]，クレーン台数34 台，使用面積1799.55 m^2であった (69,480.0万円，処理時間54.57 min.，シミュレーション計算時間27,056.86 ms)。

結果より，③の並列性を考慮した入荷処理条件において，フリーロケーション型の自動倉庫であれば，理想的な完全並列処理が実現する状況と比較して28.5 %のコスト増で済むことがわかる。これは，前節の固定ロケーション型における入荷処理の最適化と比較しても効果が高いものであるといえる。

以上より，今回設定した要求性能・入出荷リストの要件においては，フリーロケーション型の方が固定ロケーション型と比較してコスト的に優位であることが明らかとなった。

5 まとめ

本研究では，近年物流業界で普及している立体自動倉庫を対象に入出荷の行程をモデル化し，シミュレーション計算により初期導入コストが入出荷アルゴリズムの変更でどのように変化するか，検討を行った。

結果，今回設定した初期在庫，入出荷リスト，要求性能の条件においては，固定ロケーション型と比較してフリーロケーション型の自動倉庫とした方が要求性能を満たす設計における導入コストが低減できることが明らかとなった。

しかし，一般的には固定ロケーション型の方が出荷時の動作効率が高いとされており，初期在庫条件，入出荷リストの条件，要求性能の設定によっては，今回の結果は変化すると予想される。さらに，自動倉庫設置後の運用期間の推移による処理性能の低下についてもあわせて検討していく必要がある。

これら検討を行っていくことで，自動倉庫における稼働率の実態と機会損失の見積もりが可能となると期待する。

参考文献

1) 塩見敏弘,「自動倉庫の最適設計に関する基本的研究」，平成11年度 神奈川大学大学院博士前期課程 経営工学専攻 修士論文 (2000).