

## 配送センターにおけるマテリアルフロー設計アルゴリズムの開発

安永 能子\*・太田 順\*・二階堂 諒\*・小林 豊和\*\*

伊藤 富男\*\*・東 俊光\*\*・田村 博文\*\*\*・秋吉 正崇\*\*\*

### Development of Design Algorithm for Material Flow in the Delivery Center

Takako YASUNAGA\*・Jun OTA\*・Makoto NIKAIDO\*・Toyokazu KOBAYASHI\*\*

Tomio ITO\*\*・Toshimitsu HIGASHI\*\*・Hirofumi TAMURA\*\*\* and Masataka AKIYOSHI\*\*\*

**Abstract:** The delivery center is a facility for making shipment for customers directly or indirectly. A material flow network design problem for the delivery centers is that of determining the number of product flows, storage size, kind and amount of devices. It was usually solved through simulation-based approaches or ad-hoc methodologies. These approaches were taken because of many complicated conditions are accompanied by the problem, such as lead time of the products and variation of them. In this study, an algorithm is proposed in consideration of these conditions. It is examined in this study for a design that involves the formulation of material flow into the shape of mixed integer problems. Effectiveness of the proposed algorithm is shown by using the data in a real factory.

**Keywords:** warehouse management, material flow, logistics, mixed integer problems

#### 1. 序論

##### 1.1 研究の背景

工場等で生産された多種類の製品を入庫し、小売店や問屋へ出庫する配送センターは物流の根幹を成す非常に重要な施設である<sup>[1]</sup>。配送センターへの要求は「問屋等の下流より製品の発注があった場合に、ある決められた時間（リードタイム）内に在庫する」ことである。その実現のために、当該センターには、以下の二つの機能が必要である。(a) 常に必要な量の製品を確保しておくこと。(b) 入庫から出庫の間で荷姿変換すること。すなわち、出庫は製品をいくつか組み合わせたケース単位（たとえば1ケース=12製品単品）で行われることが多い。それに対して入庫は、ケースが段状に積まれたパレット（たとえば1パレット=8ケース/段×4段=32ケース）単位で行われることが多い。入庫から出庫に至る途中で、パレットをケースに変換することを荷姿変換と呼ぶ。

この機能を実現するための配送センター内の製品の流れ、すなわちマテリアルフローを以下に示す（Fig. 1）。

- (1) **入庫・一次保管**：工場から配送センターに多種類の製品がパレットで入庫される。これらをパレット系自動倉庫（automatic warehouse for pallets）にそのまま一次保管する。パレット系自動倉庫へのパレットの出し入れは、付帯するクレーンで行なう。
- (2) **荷姿変換**：出庫する際に、デパレタイザ（depalletizer）やロボット（robot）により、パレットをケース単位に崩す。ここでロボットはパレットからケースを一つずつ取り上げるのに対して、デパレタイザはパレットを段ごとに一気にケースにばらす。すなわち、デパレタイザの方がロボットより変換効率が高い代わりにコストも高い。

- (3) **二次保管**：ケース単位の製品をケース系自動倉庫（automatic warehouse for cases）に保管する。ケースの出し入れは、ケース系自動倉庫に付帯したクレーンで行なう。

- (4) **出庫**：製品の出庫要求にしたがって製品を出庫する。ここで前述の機能(a)はパレット系自動倉庫ならびにケース系自動倉庫により実現されており、機能(b)はデパレタイザ、ロボットという荷姿変換装置により実現されている点に注意されたい。

配送センター設計の実際は、前半フェーズとして、さまざまな仕様を仮決めし、それに対するマテリアルフロー設計問題解を導出し、それに基づいて仕様を再検討する、というサイクルを何度も繰り返して導解することが多い。ここで、配送センターのマテリアルフロー設計問題を「多品種の製品ごとに決められた量の出庫をリードタイム内に実現する配送センター内の倉庫サイズ、倉庫用クレーン・荷姿変換装置の台数、装置間の製品の流量を求める問題」と定義する。これはシステムのスペックを決めコスト見積もりをするためのものである。ちなみにここでの装置とは荷姿変換装置と倉庫用クレーンとを総称して用いている。仕様がある程度固まりマテリアルフロー設計解が確定した後で、後半フェーズとして機器の配置設計（レイアウト設計）や実運用のための各種搬送機器の運用制御設計を行なうことが多い。このことより、以下の二つの事柄がわかる。

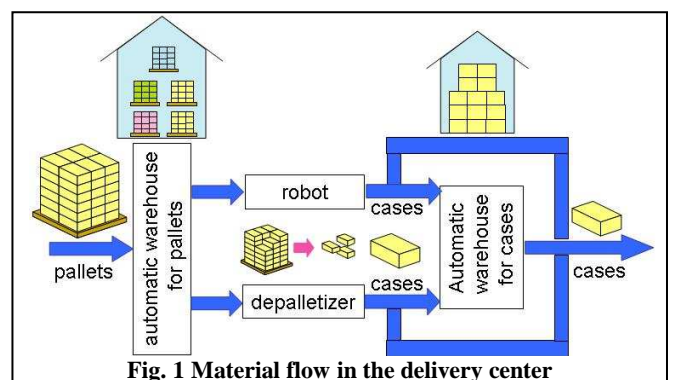


Fig. 1 Material flow in the delivery center

\* 東京大学大学院工学系研究科 文京区本郷 7-3-1  
\*\* 村田機械(株) 愛知県犬山市橋爪中島 2  
\*\*\* ムラタシステム(株) 京都市南区吉祥院南落合町 3  
\* The University of Tokyo  
\*\* Murata Machinery, LTD.  
\*\*\* Murata Systems, LTD.  
(Received April 14, 2006)

- ・ 現実的な観点から前半フェーズのマテリアルフロー設計問題の体系化を目指すことには意味がある。
- ・ マテリアルフロー設計問題では、導解の高速性が望まれる。すなわち現実的な問題規模（数百の品目数、数千の出庫ケース数）で、数分程度での導解が必要である。

上記の考察より、本論文では、配送センターにおけるマテリアルフロー問題を扱う。

## 1.2 従来研究

上記問題に関する従来研究を概観する。

まず、現場における実際の設計は、経験を積んだ熟練者が先験的知識に基づいて多大な日数をかけて行なう場合が多い。また、その結果として、設計者個人によって設計解のバリエーションが多く存在するという問題点がある。

広域の物流ネットワークで工場配置や配送ルートを決する研究としては、最適な工場の配置や資源の回収ルートの研究<sup>[1]</sup>や、製品保管技術の発達が生産品の配送ルートに与える影響に関する研究<sup>[2]</sup>が存在するが、グラフ理論のネットワークフロー問題解法に基づいて工場間のフロー量を決定するのが主目的であり、荷姿変換装置や倉庫サイズを考慮するのが困難である。また上流からの製品の補充量や補充タイミングを決定する安全在庫理論<sup>[3]</sup>では、倉庫サイズを決定することは可能であるが、装置台数を同時に求める問題に直接適用することはできない。ロジスティクスネットワーク設計モデル<sup>[4]</sup>は、本論文における問題をある程度モデル化できるフレームワークを有しているものの、後述する「製品の性質によるフローの相違」や「リードタイムの存在によるフローの時間変化」についての記述の方法論については言及していない。

また配送センター内の作業に関する非常に詳細なモデルを構築し、実際の作業データを入力してシミュレーションベースで配送センター全体の挙動を評価する設計法もある<sup>[5]</sup>。しかしこれはモデル構築に手間がかかり、更には設計解導出に多大な時間がかかることが容易に推測される。すなわち、前述した数分オーダーでの設計解の導出は非常に困難であることがわかる。

決められた設備において、発注量に応じて製品の流れるタイミングや量を決定する運用方式に関する研究は多くなされている<sup>[6-9]</sup>が、設備自体を設計対象としている配送センター設計問題とは対象を異にする。

## 1.3 本研究の目的と論文の構成

本研究の目的を、先に定義した配送センターのマテリアルフロー設計問題を数分程度以内で解く高速アルゴリズムの提案、とする。

リードタイムを考慮した多品種問題を抜いつつ、高速に導解する必要がある。本研究ではこの様なモデル構築および設計解の導出にかかる時間の短縮を満たす為、単純化したモデルによるマテリアルフロー問題を解く手法を用いる。製品の補充期間と出庫期間を別のモデルとして考え、多品種製品を出庫量の多寡によって2つのモデルに分離して考える複数ネットワークフローモデルを提案する。このモデルは混合整数計画問題として定式化できるため、導解時間の問題も解決可能である。

本論文の構成を以下に示す。まず2章で問題を定式化する。

3章で複数ネットワークフローモデルを提案する。4章でそれを混合整数計画問題として定式化し、配送センター設計アルゴリズムを提案する。5章で実際の入出庫データを用いて提案設計アルゴリズムの評価を行なう。具体的には以下の三点について評価する。

- ・ さまざまな要求リードタイムが与えられたときに、それに適した設計解を導出する。それらが数分オーダー以内で導解できることを示す。
  - ・ 既存の評価手法に沿って、提案アルゴリズムによって得られた解の妥当性を評価し、その有効性を検証する。
  - ・ よりシンプルなフローモデルと解の比較を行い、提案モデル（複数ネットワークフローモデル）の妥当性を示す。
- 6章で本論文を結論づける。

## 2. 問題の定式化

Fig. 1 のマテリアルフローを Fig. 2 の形式でモデル化する。以下図中の表記について述べる。

- ・ S: 配送センターへの製品の供給源
- ・ G: 配送センターからの製品の搬送先
- ・ L<sub>1</sub>: パレットをケースに分割するロボット
- ・ L<sub>2</sub>: パレットをケースに分割するデパレタイザ
- ・ W<sub>1</sub>: 入庫したパレットを保管するパレット系自動倉庫
- ・ W<sub>2</sub>: ケースを保管するケース系自動倉庫
- ・ LW<sub>1</sub>, LW<sub>2</sub>: 倉庫 W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>それぞれへ製品を出し入れするクレーン。

本論文で扱うマテリアルフロー設計問題を、

- ・ 各装置の性能（単位時間あたりの処理量）とコスト
- ・ 配送センターに対する発注間隔とリードタイム。
- ・ 製品ごとの出庫数
- ・ 製品ごとの1パレットあたりの段数、ケース数。

から

- ・ 各装置（L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, LW<sub>1</sub>, LW<sub>2</sub>）の台数
- ・ 各倉庫の容量（W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>）
- ・ Fig. 2 の各アーク（装置間ならびに装置・倉庫間）を流

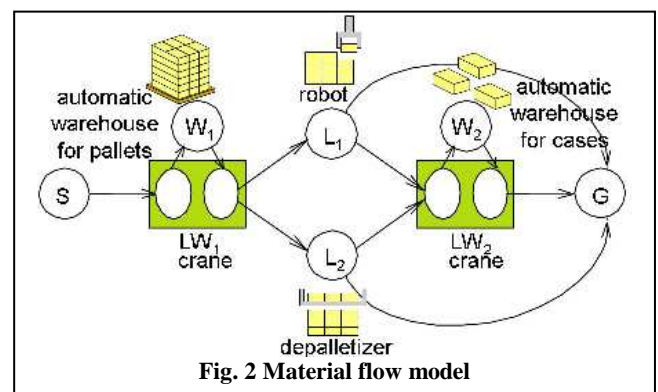


Fig. 2 Material flow model

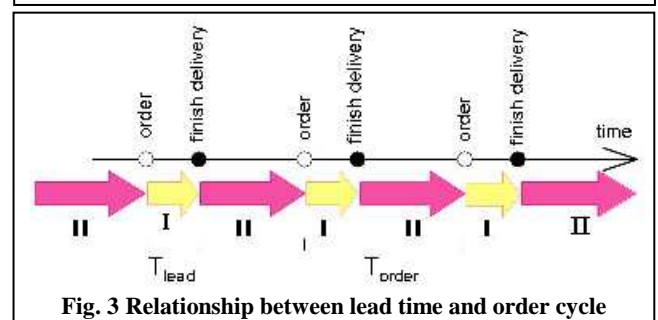


Fig. 3 Relationship between lead time and order cycle

れる製品のフロー量

を得る問題と考える。ここで、Fig. 3 に配送センターへの発注間隔とリードタイムの関係を示す。「発注～出庫完了」を表わす時間を I, 「出庫完了～つぎの発注」を表わす時間を II としている。ここですべての製品が同一発注間隔ならびにリードタイムを有するものとする。これは、実際の発注は間屋毎にばらばらになされるが、配送センターでは、ある一定量の発注をまとめて処理していることを意味する。

上記で説明したフローでは、ケース単位での出庫を想定している。これは飲料や工業製品等比較的規格化しやすい製品を扱っている倉庫におけるフローをモデル化したものであり、本論文ではケース出庫のみを考えたアルゴリズム構築を行なう。また製品供給源 S からの入庫は、必要十分な量の製品を (Table 2 における「在庫日数 (inventory days)」に相当する) 一定の間隔で常に供給する状況を仮定する。

### 3. 複数ネットワークフローモデルの提案

前章での問題を解くにあたって実システムに関する以下の二つの条件をモデル化する。

- 発注がなされてから実際に出庫するまでの時間帯 (Fig. 3 の I) のフローと、出庫が終わってからつぎの発注がなされるまでの時間帯 (Fig. 3 の II) のフローは異なる。前者の時間帯では一斉に出庫が行われ、後者の時間帯には出庫に備えて荷姿変換や倉庫格納等がなされる。図中  $T_{lead}$  (リードタイム) は I の長さを、 $T_{order}$  (発注間隔) は I + II の長さをあらわす。
- 製品は、その出庫数の多寡により二種類に分類される。一品目あたりの出庫数が比較的多い製品を A ランク品と呼び、少ない製品を B ランク品と呼ぶ。ランクにより、製品を格納する倉庫が異なる。A ランク品は大量の出庫を行なうため、両方の倉庫  $W_1, W_2$  を利用し、B ランク品は少量であるため、倉庫  $W_1$  (パレット系自動倉庫) のみを用いる。この点を考慮し、多品種に対応した複数ネットワークフローモデルを提案する。A ランク品、B ランク品それぞれについて時間帯 I, II の挙動に着目しながら以下にモデル化する。

#### 3.1 A ランク品のフローモデル

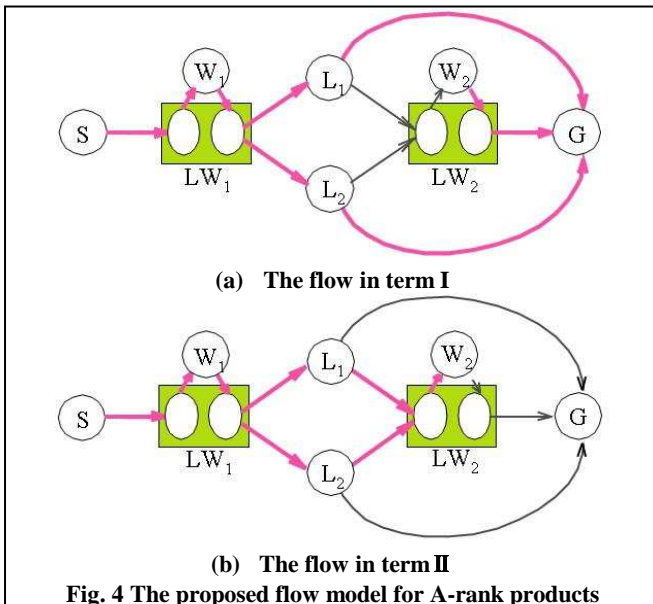


Fig. 4 The proposed flow model for A-rank products

出庫数の多い A ランク品を、リードタイム内に出庫し終えるために、出庫していない時間にもケースへ変換し、ケース系自動倉庫  $W_2$  に格納しておく。発注があった際にそれらも同時に出庫することで、少ない荷姿変換装置数で要求出庫数を満たすことができる。これを、Fig. 3 の I と II の各時間帯においてネットワークフローモデル化する。すなわち、フローが Fig. 4 の二種類存在すると考える。この図において太線のアークでは製品が流れ、破線のアークでは製品が流れていないことを意味している。時間帯 I ではパレットをケースに分割し、 $W_2$  に入れずにそのまま出庫する。それと並行して  $W_2$  に保管していたケースも同時に出庫する。時間帯 II では、できるだけ多くの製品をケースに変えて  $W_2$  に格納する。これより、限られた時間内での大量出庫が可能となる。

#### 3.2 B ランク品のフローモデル

出庫数が比較的小さい B ランク品のフローは以下の点が A ランク品と異なる。すなわち発注に応じてパレットから必要な分のケースを取り出すが、ケースに余剰がある場合にはそのまま再度パレット自動倉庫に戻される。逆に一つのパレット上に存在するケース数が出庫数に不足する場合には計 2 つのパレットが  $W_1$  から出されることとなる。このことより  $W_1$  に出入りする製品のパレット数が A ランク品の場合より多くなる。これを Fig. 5 に示すように表現する。

このモデルではパレット自動倉庫  $W_1$  へのパレットの出し入れによってパレット自動倉庫用クレーン  $LW_1$  にかかる負荷を  $LW_1$  のノードに出入りするアークで表現している。これらのフロー容量の和が B ランク製品の品目数に等しいとして問題を解く。

#### 4. 混合整数計画問題としての定式化

前章までにモデル化した問題は、以下の混合整数計画最適化問題と考えることができる<sup>[4]</sup>。以下では  $p$  と  $q$  は製品の荷姿の違いを表わす。 $i$  と  $j$  はフローにおけるノードを表わす。 $\lambda$  はその中でもクレーンやロボット等の装置を示す。

入力

- $T_{lead}(\text{day})$ : リードタイム。発注から出庫終了までにかかる日数。
- $T_{order}(\text{day})$ : 発注間隔。発注からつぎの発注までの日数間隔。
- $K_w(\text{yen/unit})$ : 倉庫 1 単位の価格
- $K_\lambda(\text{yen/unit})$ : 装置  $\lambda$  の単価
- $D_{mir}^p(\text{CS/day})$ : 製品  $p$  の 1 日あたりの需要量
- $U_{pq}^p(\text{CS/PL})$ : 製品  $p$  のパレット 1 つあたりのケース数
- $U_{act}^p(\text{CS/column})$ : 製品  $p$  のパレット 1 段あたりのケース数
- $E_j(\text{unit} \cdot \text{day/PL or CS.})$ : 1 つの製品を 1 日で処理す

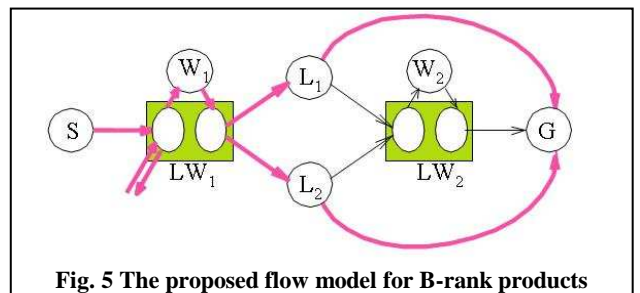


Fig. 5 The proposed flow model for B-rank products

るのに必要な装置 $\lambda$ の個数.

**変数**

設計対象となる変数は, 前節で述べたように以下の二種類である.

- $x_{ij}^p$  (PLorCS/day): アーク  $(i,j)$  上を製品  $p$  が 1 日あたり移動する量. 実数値をとる. 以降  $x_{ij}$  をアーク  $(i,j)$  上をすべての製品が 1 日あたり移動する量とする.
- $\omega_\lambda$  (unit): 装置 $\lambda$ の個数. 整数値をとる.

**評価関数**

評価関数には, 配送センター建設にかかるコストを用いる. 倉庫や装置にかかる初期総費用を最小化するフローを求める.

評価関数 = 資源費用 + 倉庫設置費用

- 資源費用 =  $\sum_1 K_1 \omega_\lambda$  : 装置の価格.
- 倉庫設置費用 =  $\sum_j K_w T_{lead} x_{ij}$  : 倉庫設置にかかる費用.

$j$ は倉庫,  $i$ はその一つ前のノード番号を表わす. なおここでは単純のため, 安全在庫の影響を考慮していない.

**拘束条件**

拘束条件を以下に挙げる.

- 製品出庫量下限:  $D_{\min}^p \leq \sum_i x_{ig}^p$  出庫が製品の需要量を満たすように行われるという制約.  $g$ は出庫先ノードを,  $i$ は $g$ の一つ前のノード番号を示す.
- 倉庫保管サイズ制約:  $x_{ij}^p T_{lead} = x_{jk}^p (T_{order} - T_{lead})$  時間帯 I においてケース系自動倉庫から出される製品数と時間帯 II においてケース系自動倉庫へ保管される製品数が一致する制約. この制約条件は, ケース系自動倉庫の時間帯 I, II それぞれの A ランク品フローに関してのみ適用される.  $j$ はケース系自動倉庫に相当するノード番号を表わす.  $i$ はケース系自動倉庫の一つ前のノード,  $k$ はケース系自動倉庫の一つ後のノードを意味する.
- 倉庫フロー整合条件:  $\sum_i x_{ij}^p = \sum_k x_{jk}^p$  パレット系自動倉庫において, 入るフローと出るフローの総量が一致するという制約.  $j$ はパレット系自動倉庫に相当するノード番号を表わす.  $i$ はパレット系自動倉庫の一つ前のノード,  $k$ はパレット系自動倉庫の一つ後のノードを意味する.
- アセンブリ整合条件:  $\sum_i x_{il}^p = \sum_j \frac{x_{lj}^q}{U_{pq}^p}$  装置 $\lambda$ においてパレット  $p$ 一つが異なる数量のケース  $q$ に変換される場合に, 入るフロー量と出るフロー量が一致する制約.  $i$ は装置 $\lambda$ の一つ前のノード,  $j$ は装置 $\lambda$ の一つ後のノードを意味する.
- 資源数と処理能力:  $E_l (\sum_i x_{il} + \sum_j x_{lj}) < \omega_\lambda$

装置 $\lambda$ の台数がフロー量総量を上回るという制約.  $i$ は装置 $\lambda$ の一つ前のノード,  $j$ は装置 $\lambda$ の一つ後のノードを意味する.

	A-rank products	B-rank products
Total number of products [cases]	3632	1987
Number of columns [columns]	252	32
Remaining cases [cases]	1620	1758
Number of deliveries	537	976

inventory days (day)	3
order cycle (day)	1
unit price of L <sub>1</sub> (YEN)	10,000,000
unit price of L <sub>2</sub> (YEN)	30,000,000
unit price of LW <sub>1</sub> (YEN)	10,000,000
unit price of LW <sub>2</sub> (YEN)	3,000,000
unit price of W <sub>1</sub> (YEN)	1,000
unit price of W <sub>2</sub> (YEN)	500
throughput capacity of L <sub>1</sub> (unit · day/case) E <sub>L1</sub>	1/1600
throughput capacity of L <sub>2</sub> (unit · day/case) E <sub>L2</sub>	1/4000
throughput capacity of L W <sub>1</sub> (unit · day/pallet) E <sub>LW1</sub>	1/560
throughput capacity of L W <sub>2</sub> (unit · day/case) E <sub>LW2</sub>	1/960

上記問題設定は混合整数計画問題の形式で表現できる. このようにして, 配送センターのマテリアルフロー設計問題を定式化することができた. 当該問題はさまざまな最適化ソフトを用いても導解可能である. ここでは Intel Pentium M 900MHz 計算機上の MATLAB Version7.0.4 を用いてコーディングした.

**5. 実データを用いた提案アルゴリズムの評価**

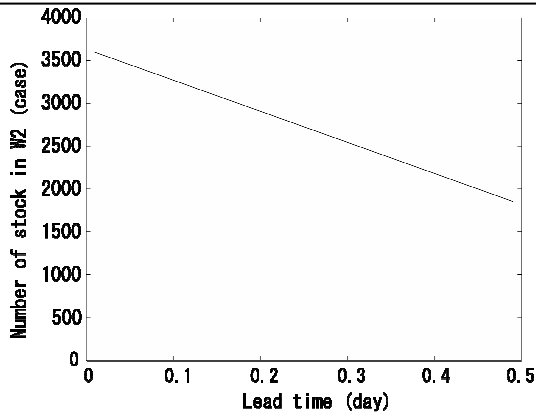
**5.1 入力値となる実データ**

実際の出庫データと設備仕様を用いて設計を行なう. 配送センターでは多品種の製品を扱っているが, 品目毎に出庫数や, 一つのパレットに載っているケース総数・段数が異なる. ここで出庫は, 一段あたりのケース数で割り切れる数のケースはデパレタイザで処理し, それに満たない量のケースはロボットで処理するという仮定を置いた. これは実際の作業をモデル化したものである.

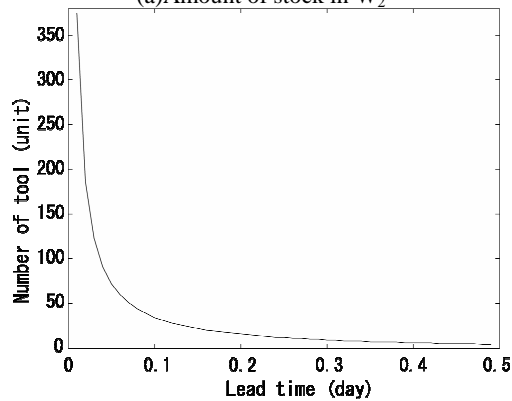
実際の出庫データから, デパレタイザで荷姿変換する製品の段数とロボットで荷姿変換する製品のケース数(端数)をランク別に整理した結果を Table 1 に示す. その他の入力パラメータは実システムを参考にして Table 2 に示したものをを用いた.

**5.2 リードタイムを変化させたときの導解**

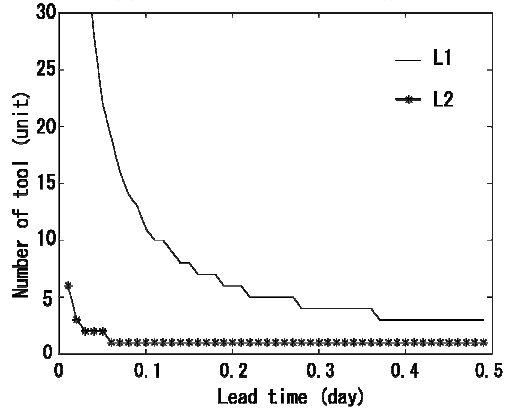




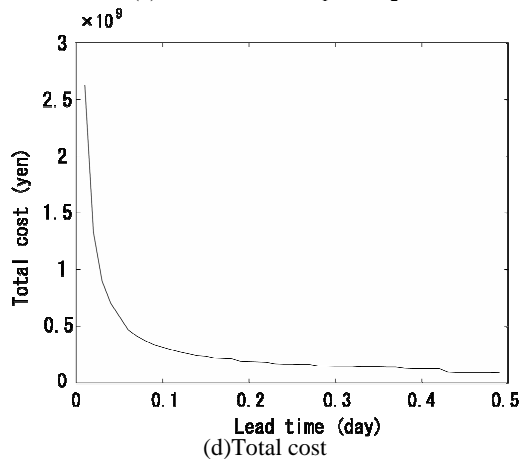
(a) Amount of stock in  $W_2$



(b) The number of units in  $LW_2$



(c) The number of  $L_1$  and  $L_2$



(d) Total cost

Fig. 6 Design results with variety of lead time

### 5.2.1 計算結果

リードタイムを発注間隔の範囲内で最小 0.01[day]から最大 0.49[day]まで 0.01[day]刻みに 49 種類与えて問題を解いた時、出力結果がどのように変化するかを確かめた。計算時間はすべてのリードタイムを求めるために約 5 分で済んでおり、要求に対して十分短い時間であることがわかった。計算によって得られた結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6(a) はリードタイムを変化させたときのケース系自動倉庫  $W_2$  の容量を表わしたものである。Fig. 6(b) はケース系自動倉庫用クレーンの台数を、Fig. 6(c) はデパレタイザ・ロボットの台数を表わしている。Fig. 6(d) は総費用を表わしている。

仮定より、フローの上流に位置する  $LW_1$  は、リードタイムにかかわらず常に製品が流れているとみなせる。したがってこの値はリードタイムに関わらず一定であり、 $\omega_{LW_1}=3$  [台]という結果になった。同様にして  $W_1$  については 132 [pallet]という結果が得られた。

### 5.2.2 考察

リードタイムを変化させて出力させた結果について、考察を行った。

- ・ ケース系自動倉庫  $W_2$  のサイズについて、リードタイムが長いほど  $W_2$  のサイズが小さくなっている。これは出庫終了からつぎの発注までの時間が短くなるため、つぎの出庫に向けて  $W_2$  に補充できるケース製品が少なくなることによる。
- ・ リードタイムと装置台数の関係について、リードタイムが短いほど、 $W_2$  に保管されていたケースを短時間で出して出庫を終えなければならない、単位時間あたりの仕事量が無限大に発散するため、 $LW_2$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  の値も同様に無限大に発散する。
- ・ 総費用も倉庫サイズと同様、リードタイムが長くなるほど小さくなる。リードタイムが 0.1 日など短い時に総費用が非常に大きくなるのは、 $L_1$  と  $LW_2$  の台数による影響が大きい。それらの台数変化がゆるやかになる  $T_{lead} \geq 0.15$  程度からは、総費用の変化も小さくなっていく。

上記の考察結果は著者らの設計実務上の見解に矛盾しておらず、提案アルゴリズムの妥当性を示している。

### 5.3 実際の設計における従来評価との比較

つぎに、提案手法により得られた設計結果が従来行われてきた方法と矛盾しないかを検証する。これは、提案手法を構築する上で仮定したいくつかの近似が妥当なものかを検証するためのものである。従来法として、実際の配送センター設計で利用されている評価方法を用いる。これは、与えられた資源すなわち装置台数や倉庫容量が最大限まで利用され

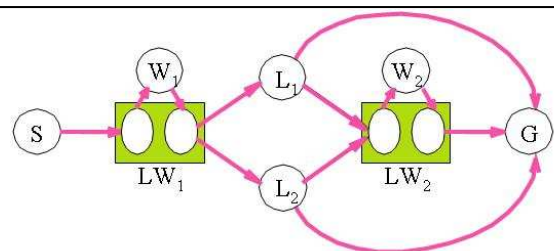


Fig.7 Single-flow network model

たときにきちんと作業達成できるかどうかを評価するものである。

ここで示した評価方法は「出庫条件を満たすか」のみを判定するものであり、コストが最小となる装置の組み合わせを求めるものではない。すなわち、あくまで評価用であり、直接設計に用いることはできないことに注意されたい。

**[STEP1]**

Aランク製品で発注されている製品数のうち、段単位で出庫する製品数 ( $L_2$  または  $W_2$  から出庫する製品数) を  $D_{surfA}$  [case] とする。ここで  $D_{surfA}$  [case] の量について、以下の二つの場合に分けられる。

- (1)  $\frac{T_{lead}\omega_{L2}}{E_{L2}} \geq D_{surfA}$  のとき：すべての出庫を  $L_2$  で行なう。  
 (2)  $\frac{T_{lead}\omega_{L2}}{E_{L2}} < D_{surfA}$  のとき： $D_{surfA} - \frac{T_{lead}\omega_{L2}}{E_{L2}}$  の出庫を

$W_2$  から行なう (残りは  $L_2$  から出庫する)。

**[STEP2]**

Bランク製品で発注されている製品数のうち、端数で出庫する製品数 ( $L_1$  または  $W_2$  から出庫する製品数) を  $D_{fracB}$  [case] とする。ここで  $D_{fracB}$  [case] の量について、以下の二つの場合に分けられる。

- (1)  $\frac{T_{lead}\omega_{L1}}{E_{L1}} \geq D_{fracB}$  のとき：すべての出庫を  $L_1$  で行なう。  
 (2)  $\frac{T_{lead}\omega_{L1}}{E_{L1}} < D_{fracB}$  のとき： $D_{fracB} - \frac{T_{lead}\omega_{L1}}{E_{L1}}$  の出庫を

$W_2$  から行なう (残りは  $L_1$  から出庫する)。

**[STEP3]**

STEP1 と STEP2 の結果を用いて  $W_2$  からの出庫量  $D_{W2}$  を求める。この量の出庫を行なうために  $W_2$  に付帯するクレーン台数  $\omega_{LW2}$  が以下の式を満たす必要がある。

$$\omega_{LW2} \geq \frac{D_{W2}E_{LW2}}{T_{lead}} > \omega_{LW2} - 1 \quad (1)$$

**[STEP4]**

STEP3 を満たしていたとき、さらに倉庫の在庫量に関して以下の式を満たす必要がある。これは補充できる個数以上の製品が  $W_2$  から出庫されることのないようにするための条件である。

$$D_{W2} \leq \left( \frac{\omega_{L1}}{E_{L1}} + \frac{\omega_{L2}}{E_{L2}} \right) (T_{order} - T_{lead}) \quad (2)$$

上記のアルゴリズムに沿って、提案アルゴリズムの設計結果を評価する。ここでは実際の配送センターの状況に近いという観点からリードタイム 0.45 の際の解を評価した。この時、 $\omega_{L1}=3$  [台]、 $\omega_{L2}=1$  [台]、 $\omega_{LW1}=2$  [台]、 $\omega_{LW2}=5$  [台]、 $W_1=132$  [pallet] という解が得られている。

**STEP1**

$$D_{surfA} = 3632 - 1620 = 2012 \quad (3)$$

$$\frac{T_{lead}\omega_{L2}}{E_{L2}} = 0.45 \times 1 \times 4000 = 1800 \quad (4)$$

より  $\frac{T_{lead}\omega_{L2}}{E_{L2}} < D_{surfA}$  である。よって  $2012 - 1800 = 212$  個分の

の出庫を  $W_2$  から行なう。

**STEP2**

$$D_{fracB} = 1758 \quad (5)$$

$$\frac{T_{lead}\omega_{L1}}{E_{L1}} = 0.45 \times 3 \times 1600 = 2160 \quad (6)$$

より  $\frac{T_{lead}\omega_{L1}}{E_{L1}} \geq D_{fracB}$  である。よってすべての出庫を  $L_1$  か

ら行なう。

**STEP3**

・ Aランク製品：212+1620=1832 ケース

・ Bランク製品：1987-1758=229 ケース (=32 段)

となるので、 $D_{W2} = 1832 + 229 = 2061$  ケースとなる。

2061 ケースを  $LW_2$  で処理するので以下の式より(1)式を満たす。

$$5 \geq 2061 \div (0.45 \times 960) = 4.77 > 4$$

**STEP4**

$(3 \times 1600 + 1 \times 4000) \times (1 - 0.45) = 4840 \geq 2061$  となることから(2)式についても満たされている。

これより、提案アルゴリズムにより得られた結果が従来の評価の観点からも妥当であることがわかった。これより提案アルゴリズム構築時に設定した仮定が、設計前半部における解という観点から実問題適用に関して十分であると解釈できる。

**5.4 より単純なネットワークフローモデルとの比較**

本論文で提案する複数ネットワークモデルの妥当性を示すために、より単純なネットワークフローモデルに対して同じ入力を与えたときの計算結果の比較を行なう。

**5.4.1 単一ネットワークフローモデル**

比較モデルとして、操業の間フロー量が常に一定であるネットワークフローモデルを Fig. 7 に挙げる。これは、常に在庫処理をしていることを意味するため、出庫中すなわち発注～出庫までの間だけ装置が稼動することを意味する。これを単一ネットワークフローモデルと呼ぶこととする。

フロー形状が異なる点や定常フローである点を除けば、これは提案モデルと同様の入出力・評価関数・拘束条件を有する。

**5.4.2 計算結果**

ここではリードタイムが 0.45 日のときの計算結果を示し、提案モデルとの比較を行なう。単一ネットワークフローモデルでは製品がケース系自動倉庫に保管されることなく出庫される。これは、以下の理由による。(a) 時不変であるため、出庫する時間にのみ稼動し、その時間帯において  $L_1$ 、 $L_2$  を利用することになる。(b) この際ケース系自動倉庫に製品を保管すると倉庫費用がかかってしまうため、このモデルではケース系自動倉庫を経由せず直接 G 地点に配送されることになる。

[著者紹介]

ここで得られた結果は,  $\omega_{L1}=5$ [台],  $\omega_{L2}=2$ [台],  $\omega_{LW1}=3$ [台],  $\omega_{LW2}=0$ [台],  $W_1=132$ [pallet]で, コストは  $1.43 \times 10^8$  [YEN]であった. 提案アルゴリズムのコスト ( $9.50 \times 10^7$  [YEN]) の 1.5 倍程度のコストがかかっていることがわかり設計用フローモデルとして妥当ではない. これより提案ネットワークフローモデルの必要性ならびに提案アルゴリズムの優位性が示された.

なお, 本論文ではケース単位での出庫のみがある場合を想定したが, より一般的な配送センターを想定した場合, パレット単位での出庫や単品単位での出庫をする製品も存在する. その場合には本論文のフローがより複雑化されるが, その場合でも提案手法の拡張により適用可能であると考えられる.

### 6. 結論

本論文では, 多品種を対象とし, リードタイムの概念を組み入れた配送センターのマテリアルフロー設計法を提案した. 複数フローモデルを用いて混合整数計画問題として定式化したことにより, 49 種類の相異なるリードタイムに対する導解を 5 分程度で行なうことができる高速性が得られた. 実際の出庫データを入力として検証することで, 提案モデルの妥当性を示した.

### 参考文献

- [1] M. Fleischmann, H.R. Krikke, R. Dekker and S.D.P. Flapper: A characterization of logistics network for product recovery, *Omega*, **28-6**, 653/666 (2000)
- [2] B.I. Bendixsen and B. Dreyer: Technological changes – the impact on the raw material flow and production, *European Journal of Operation Research*, **144-2**, 237/246 (2003)
- [3] F.W. Harris: How many parts to make at once, *Factory: The Magazine of Management*, **10-2**, 135/136 (1913)
- [4] 久保幹雄: ロジスティクス工学, 朝倉書店 (2001)
- [5] S.J. Mason, P.M. Ribera, J.A. Farris and R.G. Kirk: Integrating the warehousing and transportation functions of the supply chain, *Transportation Research Part E*, **39-2**, 141/159 (2003)
- [6] J.A. Tompkins, J.A. White, Y.A. Bozer, E.H. Frazelle, J.M.A. Tranchoco and J. Trevino: 吉本 一穂監訳: 施設計画の理論と実践, 日本能率協会マネジメントセンター (1997)
- [7] J.P. van den Berg and W.H.M. Zijm: Models for warehouse management: Classification and examples, *International Journal of Production Economics*, **59-1-3**, 519/528 (1999)
- [8] 田, 下原, 劉, 榎木: スリーゾーンのバッファ・マネジメント・アプローチ, 第 16 回自律分散システム・シンポジウム, 171/176 (2004)
- [9] B-I. Kim, S.S. Heragu, R.J. Graves and A. St. Onge: A Hybrid Scheduling and Control System Architecture for Warehouse Management, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **19**, 991/1001, (2003)



安永能子 (正会員)

2003 年東京大学工学部機械情報工学科卒, 2005 年同大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修了. 配送センター設計理論の研究に従事. 現在, 防衛庁技術研究本部に勤務.



太田 順 (正会員)

1989 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了. 同年新日本製鐵(株)入社. 91 年東京大学工学部助手. 94 年同講師. 96 年より東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助教授. この間 96-97 年 Stanford 大学 Center for Design Research 客員研究員, 群知能ロボットと移動知, 生産・搬送システムの設計, ヒューマンナリス等の研究に従事. 博士(工学).



二階堂 諒

2005 年東京大学工学部システム創成学科知能社会システムコース卒業. 現在東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程に在学中.



小林豊和

1981 年村田機械株式会社入社, 物流システム事業部 (現 L&A 事業部) システム設計課に配属, 1999 年医薬業界メーカー物流プロジェクトマネージャー, 2002 年 L&A 事業部ロジスティクスソリューション部, 2003 年 L&A 事業部 SE 統括部 SASD 部 (System Analysis/System Development Department) を経て, 2006 年 L&A 事業部技術統括室部長兼 SASD 部部长. 現在に至る. 主に物流システムの運用設計ならびに搬送・生産・LS シミュレーション開発に従事.



伊藤 富男

1977 年村田機械株式会社入社, 物流システム事業部システム開発課 (現ムラタシステム) に配属. 1992 年物流システム事業部 (現 L&A 事業部) システムエンジニアリング部 SA 課 (現 SASD 部) に転属. 現在に至る. シミュレーション, 解析, プログラム開発に従事.



東 俊光 (正会員)

1992 年早稲田大学大学院修士課程修了. 同年村田機械株式会社入社, 物流システム事業部 (現 L&A 事業部) に配属. 2000 年名古屋大学大学院博士課程後期課程マイ

クロスシステム工学専攻修了。現在に至る。博士（工学）。物流搬送機器の制御ソフトウェアの開発及び搬送シミュレータ開発に従事。計測自動制御学会，日本ロボット学会，IEEEの会員



**田村 博文**

1985 年京都コンピュータ技術専門学校卒業。同年村田機械（株）入社，物流システム事業部（現 L&A 事業部）に配属。87 年村田技研（株）（現ムラタシステム（株））に配属。現在に至る。物流情報システムの解析，標準化及びパッケージ

化の設計，開発に従事。



**秋吉 正崇**

1991 年私立岡山商科大学卒業。同年ムラタシステム大分（株）入社，技術 1 課に配属。現在に至る。小規模および中規模の物流システムの設計，開発に従事。