最適棚割り自動作成システムの試作

M2008MM015 梶田雅子
指導教員：鈴木敦夫

1　はじめに

近年，企業は消費者ニーズを踏まえた生産性の向上を図るため，経験や勘に頼ってきたこれまでの計画立案から，POS データに基づく客観的な事実を踏まえた計画立案が求められるようになった．そして，POS システムが普及し始めた頃から消費者の購買行動や店頭の売場作りについて，多くの実証的な研究が行われてきた [1]．POS を用いた商品販売を促進する手段の一つとして棚割りシステムがある．棚割りとは売場において，商品を陳列する棚にどのような商品をどう並べるかを決定することをいう．売場生産性の向上を図るには棚割りを作成する際，売れ筋商品や高利益商品の拡販，死に筋商品の排除が重要となる [2]．しかし，膨大な商品における棚割り作成には，多大な時間と労力が必要となる．また，事業目標や制約事項が数多く重なり合い，競合し変化していく状況で自在に棚割りを検討することは難しく，担当者の大きな業務負担となっている．これらの背景から，計算機を用いて自動的に棚割りを作成する棚割りシステムの期待は高まってきた．市販されている一般的な棚割りシステムは POS 分析機能を用い様々な視点から現状把握と課題発見を行い，簡単な操作に，見やすい表示を行うことで棚割り業務の負担を軽減する．だが，このシステムは棚割りを行う各社独自の制約事項を考慮した柔軟な棚割り作成に，対応しきれない部分がある．

そこで本研究では，棚割り問題を 0-1 整数計画法の問題として定式化し，PC 上の数理計画ソフトウェアを用い利益が最大となる実用的な最適棚割りシステムを作成する．また，現作業のサポート，棚割り業務の効率化を目指すため現場担当者からのヒヤリングを基に，実際の棚割り作成における制約事項をモデル化し VBA プログラムを用いてシステムに組み込む．これにより，研究対象独自の最適な棚割りを行うことを可能とする．

2　問題へのアプローチ

棚割り問題は以下の 2 段階に分けて解いていく．

2.1　第 1 段階：最適な品揃えの決定

まず第 1 段階では，限られた棚に配置する商品を実データから選び出し，利益が最大となる最適な品揃えを行う．品揃えでは市場の要求に合致した商品および商品構成を効果的で効率的な方法によって選び，消費者に提示することが求められる．よって，ここでは以下のことを考慮する．

- 実際に現場の棚割り担当者が考慮している各社または対象商品独自の制約条件を満たす.
- 機能，素材，容器等の商品特性を考慮し，配置する商品に偏りが出ないようにする.
- 在庫管理費用に影響を及ぼさないよう，配置する商品数はある一定の制限数を持たせる.

2.2　第 2 段階：棚割りレイアウトの作成

次に第 2 段階の棚割りレイアウトの作成においては，第 1 段階で選ばれた商品をどこの位置にどのように陳列するかを，販売促進につながる効果的な配置を考慮し決定する．ここでは消費者が商品を探しやすく，比較しやすくするため，以下のことを考慮する．

- 把握しやすさを考慮したグループ分けを行い，同グループ商品を消費者の自然視野に収まる範囲に陳列.
- フック掛け商品は棚置き商品より上段に配置する.
- 下段にいくほど，商品サイズ (縦幅) が大きいものを配置する.

3　事例：ねじ卸売会社における最適棚割り

3.1　ねじ卸売会社の棚割り

研究対象のねじ卸売会社では建築，自動車，機械など各分野で使用される約 10 万種類もの締結部品を取り扱っており，これら商品を販売する際には小売店などに卸している．そして，卸した商品の棚割りに関しては店舗側に一任するのではなく，同社が各店舗側から割り当てられたゴンドラに会社独自で商品を選び陳列している．だが，膨大な数の商品から棚割りを作成することは難しく，多大な時間と労力が必要となるため担当者の大きな業務負担となっているのが現状である．

そこで，本研究では小ねじ，ボルト，釘など 8 種類のカテゴリーを対象とした最適な棚割りシステムを構築する．

3.2　問題の解法

ねじ卸売会社における最適棚割りシステムを作成するにあたり，以下の特徴を踏まえる必要がある．

- ライン間に関連性がある.
- 各ラインごとに多種のパッケージが存在する.
- カテゴリー間に関連性がある.
- 商品の種類よりもサイズを豊富にする.

研究対象のねじ卸売会社では締結部品を 1 本ずつ単品売りしているのではなく，ある一定量をパッケージに入れ販売している．このパッケージに入っている商品の量が少ない順に小袋，中袋，棚置きがある．以後，この 3 つのタイプをラインと明記する．棚割りを構成する際には，ある商品の中袋を配置する場合はその商品の小袋を必ず配置し，棚置きを配置する場合はその商品の中袋を必ず配置する．また，ラインごとにパッケージの種類が多数あり，各ラインのどのパッケージを選択するか決定する．

次にカテゴリー間における関連性について説明する．カテゴリーとは商品の種類のことである．具体的には本研

究の対象データとして用いる小ねじ，ボルト，釘などの8種類のことである．カテゴリー間における関連性があるということは，あるカテゴリー商品を配置するのであればそのカテゴリーに関連を持つ他のカテゴリーでサイズが等しい商品を必ず配置するということである．

同社では，同じ商品ではあるがサイズが異なる商品の集まりをアイテム No. で表している．そして，少数のアイテム No. で同アイテム No. の商品を多く，言い換えれば種類ではなくサイズを豊富にしている．そこで，棚割りシステムの手順として以下のことを実行する．

手順

1. 全商品データで最適化計算を行う．
2. 各アイテム No. で商品数が極端に少ないものに関してはそのアイテム No. の商品データを全商品データから省く．
3. 2 で作成した新商品データで最適化計算を行う．
4. 各アイテム No. で商品数が極端に少ないものがなくなるまで 2〜3 を繰り返す.

以上の作業を行うことで，アイテム No. の総数を減らし，配置する各アイテム No. の商品数を増やしていく．

3.3 第1段階：最適な品揃えの決定

3.3.1 記号定義

添字

I：商品集合
I_l：アイテム No.l に属する商品集合
$\mathcal{I} = \{\ I_1, I_2, \cdots, I_l, \cdots, I_L\ \}$
R_m：ライン m に属する商品集合
R_1=小袋に属する商品集合
R_2=中袋に属する商品集合
R_3=棚置きに属する商品集合
$\mathcal{R} = \{\ R_1, R_2, \cdots, R_m, \cdots, R_M\ \}$
G_t：カテゴリー t に属する商品集合
G_1=ボルトに属する商品集合
G_2=小ねじに属する商品集合
G_3=ねじ付属に属する商品集合
$\mathcal{G} = \{\ G_1, G_2, \cdots, G_t, \cdots, G_T\ \}$
Q_e：材質 e に属する商品集合
$\mathcal{Q} = \{\ Q_1, Q_2, \cdots, Q_e, \cdots, Q_E\ \}$
S_a：太さ (商品サイズ)a に属する商品集合
$\mathcal{S} = \{\ S_1, S_2, \cdots, S_a, \cdots, S_A\ \}$
D_b：長さ (商品サイズ)b に属する商品集合
$\mathcal{D} = \{\ D_1, D_2, \cdots, D_b, \cdots, D_B\ \}$
J：段数の添字集合
K：ゴンドラの添字集合

定数

P_i：商品 i の上代計
C_i：商品 i の売価計
N_i：商品 i の納品数
W_i：商品 i の商品横幅
F_m：ライン R_m に属する商品で構成された段数
μ：ゴンドラの横幅
σ：商品間の仕切り幅
τ：空白スペースの最大横幅
α_t：カテゴリー G_t に属する商品の最小数
β_e：材質 Q_e に属する商品の最小数
γ：アイテム No. の合計最大数
U：大きな整数 ($U = 10000$)

変数

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{商品 } i \text{ をゴンドラ } k \text{ の } j \text{ 段目に配置する} \\ 0 & \text{商品 } i \text{ をゴンドラ } k \text{ の } j \text{ 段目に配置しない} \end{cases}$$

$$y_{mjk} = \begin{cases} 1 & \text{ライン } R_m \text{に属する商品を} \\ & \quad \text{ゴンドラ } k \text{ の } j \text{ 段目に配置する} \\ 0 & \text{ライン } R_m \text{に属する商品を} \\ & \quad \text{ゴンドラ } k \text{ の } j \text{ 段目に配置しない} \end{cases}$$

$$z_l = \begin{cases} 1 & \text{アイテム } No.I_l \text{に属する商品を配置する} \\ 0 & \text{アイテム } No.I_l \text{に属する商品を配置しない} \end{cases}$$

3.3.2 定式化

目的関数

$$\max \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} P_i x_{ijk} \tag{1}$$

$$\max \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_i x_{ijk} \tag{2}$$

$$\max \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} N_i x_{ijk} \tag{3}$$

制約条件

$$\sum_{i \in R_m} W_i x_{ijk} + \sigma \sum_{i \in R_m} x_{ijk} - \sigma \leq \mu \qquad (R_m \in \mathcal{R}, j \in J, k \in K) \tag{4}$$

$$\sum_{i \in R_m} W_i x_{ijk} + \sigma \sum_{i \in R_m} x_{ijk} - \sigma \geq \mu - \tau \qquad (R_m \in \mathcal{R}, j \in J, k \in K) \tag{5}$$

$$\sum_{j \in J} y_{mjk} = F_m \qquad (k \in K, m \in \{1, \cdots, M\}) \tag{6}$$

$$\sum_{i \in R_m} x_{ijk} \leq U y_{mjk} \qquad (R_m \in \mathcal{R}, j \in J, k \in K) \tag{7}$$

$$\sum_{i \in G_t} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} \geq \alpha_t \qquad (G_t \in \mathcal{G}) \tag{8}$$

$$\sum_{i \in Q_e} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} \geq \beta_e \qquad (Q_e \in \mathcal{Q}) \tag{9}$$

$$\sum_{i \in I_l} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq U z_l \qquad (I_l \in \mathcal{I}) \tag{10}$$

$$\sum_{l=1}^{L} z_l \leq \gamma \tag{11}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} x_{ijk} \leq 1 \qquad (i \in I) \tag{12}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} x_{ijk} = \sum_{j\in J}\sum_{k\in K} x_{i'jk} \tag{13}$$

$$((i,i') \in \{(i,i')| i \in G_1 \cap S_a, G_2 \cap S_a, i' \in G_3 \cap S_a\}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} x_{ijk} \geq \sum_{j\in J}\sum_{k\in K} x_{i'jk}$$
$$((i,i') \in \{(i,i')| \tag{14}$$
$$i \in R_1 \cap I_l \cap S_a \cap D_b, R_2 \cap I_l \cap S_a \cap D_b,$$
$$i' \in R_2 \cap I_l \cap S_a \cap D_b, R_3 \cap I_l \cap S_a \cap D_b\})$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \qquad (i \in I, j \in J, k \in K) \tag{15}$$

$$y_{mjk} \in \{0,1\} \qquad (j \in J, k \in K, m \in \{1,\cdots,M\}) \tag{16}$$

$$z_l \in \{0,1\} \qquad (l \in \{1,\cdots,L\}) \tag{17}$$

各式の意味は次の通りである．

(1) 上代計が最大になるように設定する．
(2) 売価計が最大になるように設定する．
(3) 納品数が最大になるように設定する．
(4) 各ゴンドラの各段に陳列する商品の総横幅が 1 段分のゴンドラ横幅に収まる．
(5) 各ゴンドラの各段に陳列する商品の総横幅が一定以上ある．
(6) ライン R_m に属する商品で構成された段の数は各設定値を満たす．
(7) ゴンゴラ k の j 段目にライン R_m に属する商品を配置する場合は y_{mjk} を 1 とする．
(8) 各カテゴリーの商品数は各設定値以上とする．
(9) 各材質の商品数は各設定値以上とする．
(10) アイテム No.I_l に属する商品を配置する場合は z_l を 1 とする．
(11) 配置するアイテム No. の総数は設定値以下とする．
(12) 商品を配置する場合は 1 箇所のみとする．
(13) ねじ付属 (他の締結部品を補う部品) に関しては，ボルトや小ねじで太さが等しい商品は必ず配置する．
(14) 中袋を配置する場合はその商品の小袋を，棚置きを配置する場合はその商品の中袋を必ず配置する．
(15) 変数 x_{ijk} を 0-1 変数で表す．
(16) 変数 y_{mjk} を 0-1 変数で表す．
(17) 変数 z_l を 0-1 変数で表す．

3.4 第 2 段階：棚割りレイアウトの作成

3.4.1 記号定義

添字

I：商品集合
I_l：アイテム No.l に属する商品集合
$\mathcal{I} = \{\ I_1, I_2, \cdots, I_l, \cdots, I_L\ \}$
R_m：ライン m に属する商品集合
$\mathcal{R} = \{\ R_1, R_2, \cdots, R_m, \cdots, R_M\ \}$
G_t：カテゴリー t に属する商品集合
$\mathcal{G} = \{\ G_1, G_2, \cdots, G_t, \cdots, G_T\ \}$
J：段数の添字集合
K：ゴンドラの添字集合

定数

W_i：商品 i の商品横幅
F_m：ライン R_m に属する商品で構成された段数
S_j：j 段目の重み $(S_1 = 1, \cdots, S_j = j)$
D_k：ゴンドラ k 本目の重み $(D_1 = 1, \cdots, D_k = k)$
c：同要素に属する商品同士の最大許容段差
e：同要素に属する商品同士の最大許容ゴンドラ差
μ：ゴンドラの横幅
σ：商品間の仕切り幅
τ：空白スペースの最大横幅
α：同カテゴリー商品の配置差の重み
β：同アイテム No. 商品の配置差の重み $(\alpha < \beta)$
γ：段差の重み
δ：ゴンドラ差の重み $(\gamma < \delta)$
U：大きな整数 $(U = 10000)$

変数

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{商品 } i \text{ をゴンドラ } k \text{ の } j \text{ 段目に配置する} \\ 0 & \text{商品 } i \text{ をゴンドラ } k \text{ の } j \text{ 段目に配置しない} \end{cases}$$

$$y_{mjk} = \begin{cases} 1 & \text{ライン } R_m \text{に属する商品を} \\ & \quad \text{ゴンドラ } k \text{ の } j \text{ 段目に配置する} \\ 0 & \text{ライン } R_m \text{に属する商品を} \\ & \quad \text{ゴンドラ } k \text{ の } j \text{ 段目に配置しない} \end{cases}$$

$z_{ii'}$：商品 i と商品 i' の段差
$v_{ii'}$：商品 i と商品 i' のゴンドラ差

3.4.2 定式化

目的関数

$$\min \quad \sum_{t=1}^{T}\sum_{i,i'\in G_t} \alpha(\gamma z_{ii'} + \delta v_{ii'}) + \sum_{l=1}^{L}\sum_{i,i'\in I_l} \beta(\gamma z_{ii'} + \delta v_{ii'}) \tag{18}$$

制約条件

$$\sum_{i\in R_m} W_i x_{ijk} + \sigma \sum_{i\in R_m} x_{ijk} - \sigma \leq \mu \qquad (R_m \in \mathcal{R}, j \in J, k \in K) \tag{19}$$

$$\sum_{i\in R_m} W_i x_{ijk} + \sigma \sum_{i\in R_m} x_{ijk} - \sigma \geq \mu - \tau \qquad (R_m \in \mathcal{R}, j \in J, k \in K) \tag{20}$$

$$\sum_{j\in J} y_{mjk} = F_m \qquad (k \in K, m \in \{1,\cdots,M\}) \tag{21}$$

$$\sum_{i\in R_m} x_{ijk} \leq U y_{mjk} \qquad (R_m \in \mathcal{R}, j \in J, k \in K) \tag{22}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} S_j(x_{ijk} - x_{i'jk}) \leq z_{ii'} \qquad ((i,i') \in I_l, G_t) \tag{23}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} S_j(x_{ijk}-x_{i'jk}) \geq -z_{ii'} \quad ((i,i')\in I_l, G_t) \quad (24)$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} D_k(x_{ijk}-x_{i'jk}) \leq v_{ii'} \quad ((i,i')\in I_l, G_t) \quad (25)$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} D_k(x_{ijk}-x_{i'jk}) \geq -v_{ii'} \quad ((i,i')\in I_l, G_t) \quad (26)$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} x_{ijk} = 1 \quad (i\in I) \quad (27)$$

$$z_{ii'} \leq c \quad ((i,i')\in I_l, G_t) \quad (28)$$

$$v_{ii'} \leq e \quad ((i,i')\in I_l, G_t) \quad (29)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (i\in I, j\in J, k\in K) \quad (30)$$

$$y_{mjk} \in \{0,1\} \quad (j\in J, k\in K, m\in\{1,\cdots,M\}) \quad (31)$$

$$z_{ii'} \geq 0 \quad ((i,i')\in I_l, G_t) \quad (32)$$

$$v_{ii'} \geq 0 \quad ((i,i')\in I_l, G_t) \quad (33)$$

各式の意味は次の通りである．

(18) 同要素である商品同士の段差，ゴンドラ差が最小になるように設定する．
(19) 各ゴンドラの各段に陳列する商品の総横幅が 1 段分のゴンドラ横幅に収まる．
(20) 各ゴンドラの各段に陳列する商品の総横幅が一定以上ある．
(21) ライン R_m に属する商品で構成された段の数は各設定値を満たす.
(22) ゴンゴラ k の j 段目にライン R_m に属する商品を配置する場合は y_{mjk} を 1 とする．
(23) 商品 i と商品 i' の段差は $z_{ii'}$ 以下とする．
(24) 商品 i と商品 i' の段差は $-z_{ii'}$ 以上ある．
(25) 商品 i と商品 i' のゴンドラ差は $v_{ii'}$ 以下とする．
(26) 商品 i と商品 i' のゴンドラ差は $-v_{ii'}$ 以上ある．
(27) 各商品 1 箇所に配置する．
(28) 商品 i と商品 i' の段差は設定値以下とする．
(29) 商品 i と商品 i' のゴンドラ差は設定値以下とする．
(30) 変数 x_{ijk} を 0-1 変数で表す.
(31) 変数 y_{mjk} を 0-1 変数で表す.
(32) 変数 $z_{ii'}$ は 0 以上とする．
(33) 変数 $v_{ii'}$ は 0 以上とする．

3.5 実行結果

ねじ卸売会社における棚割り問題を 0-1 整数計画法の問題として定式化し 11 店舗 1 年間分出荷データを用い，最適化計算を行うと実行結果は表 1 のようになった．(表 1 は全商品データと比較したものである．) なお，使用した PC の CPU は，Intel(R) Pentium(R) 3.20GHz，メモリが 1.0GB，OS は Microsoft WindowsXP である．この PC で，LINDO 社の数理計画ソフトウェア（What ’s Best!9.0.3.3）を用いて計算した．

結果から，全商品数の 30% を陳列するだけで約 50% の利益が得られることが分かった．なお，最適な品揃えの決定には 7 秒，棚割りレイアウトの作成では 5 分の計算時間を要した．

表 1 実行結果

	最適化要素		
	上代計	売価計	納品数
上代計	53.34 %	53.13 %	50.45 %
売価計	52.49 %	52.67 %	49.55 %
納品数	50.1 %	50.0 %	52.3 %
商品数	30.3 %	30.3 %	30.3 %

今回は最適化を行う要素として上代計，売価計，納品数の 3 パターンを計算した．これら結果を比較すると，上代計や売価計がそれぞれ最大になるように計算した場合と納品数が最大になるように計算した場合とで，利益としては多少の差があるだけだが，選ばれる商品に大きな違いがあることが分かった．納品数が多い商品，つまり消費者ニーズに合致した商品が店頭に配置されていなければ，品揃えが悪いというイメージを消費者に与えてしまい，顧客満足度の低下に繋がる．このため利益を最大化する際には，消費者の需要が高い商品については必ず配置するという制約を付け加える必要がある．ただし，売場としての利益を得るために低価値の売れ筋商品をどの程度，配置するかを十分に熟慮することが重要となる．

4 おわりに

本研究では，事例に応じた棚割り問題を 0-1 整数計画法の問題として定式化を行い，実用的な最適棚割り自動作成システムの試作に取り組んできた．この結果，実際に現場で必要となる制約事項を考慮した上で，利益が最大となる最適な商品群の構成に成功した．また商品を探しやすく，比較しやすくするため，把握しやすさを考慮したグループごとに，消費者の自然視野に収まるよう陳列するレイアウトを短時間で導き出すことができた．これらのことにより，開発したシステムを導入することで従来のように多大な時間と労力を必要としない上，容易にシミュレーションが可能となり，売場を常に最も適切な状態に近づけることができるといえる．そして，実際の棚割り作成における制約事項をモデル化し，VBA プログラムを用いシステムに組み込み自動化することで，対象企業独自の棚割りを効率的にサポートすることが可能となった．

参考文献

[1] Moncer A. Hariga, Abdulrahman Al-Ahmari, Abdel-Rahman A. Mohamed : A joint optimisation model for inventory replenishment, product assortment, shelf space and display area allocation decisions, *European Journal of Operational Research* 181 (2007), 239-251.

[2] 伊東尚美，梶田雅子 : ホームセンターの品揃え問題について，2007 年度南山大学数理情報学部数理科学科卒業論文，2007.