Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00296

Received date : 27 September, 2021

Accepted date : 28 January, 2022

J-STAGE Advance Publication date : 4 February, 2022

© The Japan Society of Mechanical Engineers

この記事はクリエイティブ・コモンズ [表示-非営利-改変禁止 4.0 国際]ライセンスの下に提供されています。
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>)

工具鋼販社における切断費用・端材を低減する規格在庫寸法決定方式の開発

勝又 大介^{*1}, 智田 崇文^{*1}, 木嶋 宏彰^{*2}

Decision method for standard stock size to reduce cutting cost and end material in special steel sales company

Daisuke KATSUMATA^{*1}, Takafumi CHIDA^{*1}
and Hiroaki KIJIMA^{*2}

^{*1} Hitachi, Ltd., Research and Development Group, Center for Technology Innovation - Production Engineering and MONOZUKURI
292 Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 244-0817, Japan

^{*2} Hitachi Metals, Ltd.
2107-2 Yasugi-cho, Yasugi-shi, Shimane 692-8601, Japan

Abstract

In the sale of steel materials such as tool steel, it is important to optimize the size of standard stocks to reduce end material and cutting costs resulting from number of cuts and cutting area. If there is difference between the size of standard stocks and the sales size of steel, excess cutting and end material occur. So, the size of standard stocks is important to reduce end material and cutting cost. However, in the conventional method, stock manager analyzes past orders and determines the size of standard stocks which is not the optimum. Therefore, we developed a method to determine the size of standard stocks that reduce cutting costs and end material by (1) creating candidates for standard stocks, (2) giving evaluation score to all combinations of past orders allocations to standard stocks candidates and (3) sorting out optimum standard stocks by mixed integer programming so that total evaluation score is high. As a result of the computational experiment, the development method reduced 2.7% number of cuts, 17.3% cutting area, and 6.3% end material volume compared to the conventional method.

Keywords : Inventory management, Steel, Standard stock, 3D cutting, Optimization

1. 緒 言

本研究で対象とする工具鋼はバイト、ドリルなどの刃物や、自動車部品の金型など、幅広い用途で使用されており、ものづくりに欠かすことは出来ない重要な材料である。自動車業界を筆頭に JIT (Just In Time) 生産を行う顧客が多い工具鋼業界では、受注から製品出荷までの要求リードタイムが 2 日程度と短い。このような短納期要求を満たすために工具鋼販社は顧客拠点近くに販売拠点を設け、在庫販売型のサプライチェーンを構築している。図 1 に一般的な工具鋼鋼材の販売プロセスを示す。まず工具鋼販社が材質・厚さ・幅によって決まる規格在庫品を工具鋼工場に発注する (図中, 1. Order)。工具鋼工場では受注した規格在庫品に従い製造し、各工具鋼販社へ納入する (図中, 2. Manufacturing, 3. Deliver)。次に、納入された規格在庫品は工具鋼販社内の倉庫で在庫として保管される (図中, 4. Stock)。この時、その製造プロセスの複雑さから、工具鋼販社が発注してから納入されるまでのリードタイムは一般的に約 3~4 か月程度と長く、顧客の要求リードタイム (2 日程度) と乖離がある。そのため、顧客から受注が入った際は工具鋼販社が保有している大きな在庫から顧客の要求寸法である小さな製品を切り出し、顧客へと出荷する (図中, 5. Order, 6. Cutting, 7. Deliver)。

Fig. 1 Sales process of tool steel. In order to increase profit, it is important to have appropriate standard stocks to reduce the cutting cost and end material.

次に、工具鋼販社の利益を大きく左右する切断工程（図1中、6. Cutting）について詳しく説明する。本研究では、平角鋼材の在庫を厚み、幅、長さの3次元で切断し、小さな平角鋼材を出荷する形態を対象とする。図2に規格在庫品（図中、Standard stock）から2つの製品（図中、Order）を切り出す例を示す。本例では、まず破線の切断面に沿い幅方向（左右方向）に切断する（図中、Width cutting）。この切断によって、規格寸法に合わない余りである端材が発生する（図中、End material (1)）。この端材は将来の受注に対して在庫となるが、所定の期間受注が無い場合に廃棄され、材料費などが損失となる。次に、破線の切断面に沿い厚さ方向（上下方向）に切断する（図中、Thickness cutting）。本例では、幅方向の切断と同様に、厚さ方向の切断においても端材が発生する（図中、End material (2)）。最後に、長さ方向を破線の切断面に沿い切断することで、製品2つを切り出す（図中、Length cutting）。本例では、幅、厚さ、長さ方向それぞれ1回ずつの計3回切断している。この切断時における切断回数や切断面積に応じて生じる切断作業工数や、切断時の歩留まりロスによって切断費用が発生する。

Fig. 2 Example of cutting.

このように、工具鋼販社の利益拡大（コスト削減）には、切断回数や切断面積に応じて生じる切断費用と、必要な製品を切り出した後の余りである端材の削減が重要な課題である。工具鋼販社において切断費・端材を削減するためには、以下の2つのアプローチが考えられる。

1. 受注時における切断費・端材を削減する切断指示
2. 切断費・端材を削減する規格在庫品の在庫管理（適切な発注量・品目の決定）

上記のアプローチ1に対しては、切断ロス最小化問題として、原材料の規格が与えられた場合、最小のロスで必要な品物を獲得する手法が数多く報告されている。例えば、2次元の切断ロス最小化問題の解法として、坂本による局所最適化を用いた解法（坂本, 1993, Valle et al., 2012）や、小島らによる加工法による制約を考慮した列生成法に基づく解法が提案されている（小島, 杉, 2014）。また、3次元の切断ロス最小化問題の解法として、Viegasらによる使用在庫数を低減するタブーサーチに基づく解法が提案されている（Viegas et al., 2015）。

上記のアプローチ2に対しては、適切な発注量と品目の決定の2つに分類でき、それぞれ従来研究がある。適切な発注量については、発注費用と在庫費用による費用関数を最小化する経済的発注量に関する研究がある。Moon らは、発注点方式において発生する品切れ量の期待値に関する制約の下で、発注量と発注点の同時決定問

題を考察している (Moon and Choi, 1994). その後, 竹本らにより最適な発注量について論じられてきた (竹本, 有蘭, 2009, Thiel et al., 2010, Tajbakhsh, 2010).

一方, 発注する品目を最適化する手法についての先行研究は少ない. 例えば紙管製造業を対象として, 董が半製品の寸法最適化手法を報告している (董, 2000a, 2000b). また, PC 製品を対象に, Ward らが PC 製品, 部品の品目構成を最適化する手法を報告している (Ward et al., 2010). しかし, 本研究が対象とする半製品を 3 次元で切断し, 出荷する形態における半製品の寸法を最適化する研究は著者らの知る限りない. このため, 工具鋼販社では発注担当者が過去の受注を分析し, 経験に基づき規格在庫品の寸法を決定しているのが一般的である. 切断費用や端材を最小化する規格在庫品の寸法決定は組合せ最適化問題を内包する困難な問題であり, 熟練担当者であっても非常に時間を要する業務である. そこで, 本研究では工具鋼販社における切断費用・端材を削減する規格在庫品の寸法を最適化する手法を提案する.

2. 切断制約と規格在庫品の寸法決定問題

本章では, 工具鋼販社における切断工程に関わる制約条件 (以下, 切断制約) を説明した後, 規格在庫品の寸法決定問題を説明する.

2.1 切断制約

本研究が対象とする工具鋼販社の切断工程における材料の流れを図 3 に示す. 受注した際には, その時点の規格在庫品 (図中, Standard stocks) もしくは端材 (図中, End material) から, 製品 (図中, Product) を切り出す. 切断時に発生した端材 (図中, Generated end material) は次の受注から在庫として使用することができる. また, 規格在庫品は適切に発注が行われることで不足することはないと仮定する.

Fig. 3 Material flow in cutting process.

次に, 切断機にかかわる制約を図 4 に示す切断機の模式図を用いて説明する. 規格在庫品や端材 (図中それぞれ, Standard stock, End material) は切断機の持ち手 (図中, Handle) により保持され, 切断刃 (図中, Blade) により切断される. 切断機の制約には持ち手代制約と切断代制約がある. 持ち手代 (Handle size) とは切断機が材料を保持するために必要な寸法であり, 持ち手代制約とは切断後に持ち手代以上に材料が残っている必要がある制約である. この持ち手代は使用する材料の幅・厚みにより 1 つに規定される. 切断代 (図中, Cutting size) についても同様に使用する在庫の幅・厚みにより規定され, この切断代分の材料は工場へと戻りリサイクルされるか, 屑となり廃棄される. 切断代制約とは, 切り出すための規格在庫品や端材の寸法が, 受注寸法に加えて切断代が必要となる制約である.

Fig. 4 Schematic of cutting machine.

2・2 規格在庫品の寸法決定問題

本研究の目的は、ある期間に想定される受注情報に基づいて、端材・切断費用を低減する規格在庫品の寸法を決定することである。この時、理想的には将来の受注を時系列（受注順番）まで予測し規格在庫品の寸法を決定することが望ましいが、これは現実的では無い。また、規格在庫品を十分に豊富に用意すれば切断費用、端材を最小とすることが出来るが、倉庫容量の制約や棚卸資産の増大のため、こちらも現実的でない。そこで本研究では、図 5 に示すようにある期間の受注の時系列を無視し（図中、Order data）、規格在庫品の種類数を制約とした上で（図中、Maximum number of standard stocks data）、切断費用、端材を低減する規格在庫品の寸法（図中、Standard stock data）を決定する問題を規格在庫品の寸法決定問題（図中、Deciding stock size）と定義する。本論文は、想定される将来の受注情報が与えられた時に規格在庫品の寸法を決定することを目的とし、将来の受注情報の予測は本研究の対象外とする。

Fig. 5 Standard stock size decision problem.

3. 提案方式

3・1 提案方式の概要

図 6 に本研究で提案する規格在庫品の寸法最適化アルゴリズムのフローを示す。提案方式は大きく 3 つのステップからなる。Step 1 では、規格在庫品の候補群を生成する。例えば、厚さ上下限、幅上下限を設定し、厚さ 5 mm、幅 5 mm 毎の格子状に生成していく（図中、Step1）。この時の厚さ上下限、幅上下限は工場での製造制約によって設定される。Step 2 では、読み込んだ過去の受注と規格在庫品の候補の全てに対して、切断回数、切断面積、端材発生量を計算し、それぞれの重みに応じた評価点を与える。この重み値は、評価点が高いほど経営効果が大きくなるように設定する。例えば図中右側において受注①（図中、Order①）を規格在庫品 A から切断するときの最も良い切断指示による、切断回数、切断面積、端材発生量を計算し、各指標の重み和から 15 ポイントを付与（図中、15pts）、受注①を規格在庫品 B から切断するときは 10 ポイントを付与（図中、10pts）といったように、規格在庫品の候補群から受注品を切断した時の全ての組合せに対して評価点を付与する。本ステップは 3・2 節で詳細に説明する。Step 3 では、混合整数計画法を用い、切断回数、切断面積、端材発生量の重み和である評価点の合計値が高くなるように規格在庫品の候補群から残すべき規格在庫品を選別する。本ステップは 3・3 節で詳細に説明する。

3・2 規格在庫品候補群の評価

規格在庫品候補群への評価（図 6 中、Step2）では、受注した際に、対象とする規格在庫品から切り出したときに発生する切断回数、切断面積や端材量などから総合的に評価点を付与する。本研究では、全通り探索により、受注時に最も切断回数、切断面積、端材発生量の重み和が少なくなる切断指示を決定することで各規格在庫品の候補群に評価点を付与する。

まず最適な切断指示について説明する。切断指示の組合せは、(1) 受注分割、(2) 重ね、(3) 回転、(4) 在庫への割当て、の 4 つの要素からなる。4 つの要素について図 7 に示す。

Fig. 6 The flow chart of deciding standard stock size.

- (1) 受注分割 (図中, (1) Split) : 複数個から成る 1 つの受注を, 複数在庫に割当てるために分割する. 例えば図 7 では, 受注個数 3 に対して, 2 個と 1 個に分割した例を示している. また, ここで分割について定義する. 例えば受注個数 3 の場合は, (3 個), (1 個, 2 個), (1 個, 1 個, 1 個) の 3 つの分割方法の組合せが生成され, これを分割パターンと呼ぶ. また, 例えば 1 つの受注を (1 個, 2 個) のように 2 つに分割した場合, この 2 を分割数と呼ぶこととし, 分割後のそれぞれである, 1 個や 2 個を分割グループと呼ぶこととする.
- (2) 重ね (図中, (2) Stack) : 分割後の個数が複数の場合の重ね方を決定する. 例えば, 図 7 では, 幅方向に 2 つ重ねた例を示している. 図 8 に示すように, 例えば分割後の数量 2 の場合, 幅方向に 2 つ (図中, Pattern 1), 厚さ方向に 2 つ (図中, Pattern 2), 長さ方向に 2 つ (図中, Pattern 3) 重ねる合計 3 つの重ねパターンが生成される. 分割数 3 以上の場合には, これらの基本パターンの組み合わせで重ねパターンが生成される.
- (3) 回転 (図中, (3) Rotation) : (2) で決定した重ねた受注に対して, 回転方向を決定する. 図 7 では, 受注幅と受注長さを入れ替えるように回転した例を示している. 本例において回転パターンは, 図 9 に示すように, 幅方向を厚さ方向へと回転する (図中, Pattern 2) など, 合計 6 つの回転パターンが生成される.
- (4) 在庫への割り当て (図中, (4) Allocation) : (3) で決定した回転方向にて受注を在庫へ割り当てる.

Fig. 7 Four elements of cutting method.

Fig. 8 Stack patterns in the case of two orders.

Fig. 9 Rotation patterns.

本研究の開発アルゴリズムは、前述の (1) ~ (4) の要素の組合せを全て探索し、最も目的関数の良い解を評価点とする。評価点を計算するフローを図 10 に示す。まず、受注情報、在庫情報、目的関数の重みを読み込む (図中、Read order, stock and coefficient information)。次に受注個数に応じて、同一受注の分割の集合である、分割パターンを全通り生成する (図中、Create all split patterns from the order quantity)。次に、分割パターンごと (図中、Split pattern loop)、および分割パターン内の分割グループごとに以下の処理を繰り返す (図中、Split number loop)。次に、該当分割グループの個数に応じて、全ての重ねパターンを生成する (図中、Create all stack patterns)。例えば 3 個の場合は、(厚さ方向 1, 幅方向 : 1, 長さ方向 3), (厚さ方向 1, 幅方向 : 3, 長さ方向 1), (厚さ方向 3, 幅方向 : 1, 長さ方向 1) の 3 つの重ねパターンが生成される。該当重ねパターンにおいて、全ての回転パターンを生成し (図中、Create all rotation directions)、回転パターン全て (図中、Rotation pattern loop)、および全ての在庫に対して以下の処理を繰り返す (図中、Stock allocation loop)。次に、該当の分割グループ、重ねパターン、回転パターンにて在庫へ割当て (図中、Assign stock in the target way)。

このときの規格在庫品候補 s 、受注 o 、分割パターン p 、分割グループ t 、重ねパターン st 、回転パターン r での切断指示に基づき、切断回数、切断面積、端材発生量を求める。これにより、規格在庫品候補 s から受注 o 、分割パターン p 、分割グループ t 、重ねパターン st 、回転パターン r 時の評価点 $TMPScore_{s,o,p,t,st,r}$ を次式により計算する。(図中、Calculate the objective function)。

$$\begin{aligned}
 TMPScore_{s,o,p,t,st,r} &= Wcn * CuttingNumber_{s,o,p,t,st,r} + Wca * CuttingArea_{s,o,p,t,st,r} + Wem \\
 &\quad * EndMaterialVolume_{s,o,p,t,st,r}
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中、以下の記号を用いた。

- $CuttingNumber_{s,o,p,t,st,r}$: 規格在庫品候補 s 、受注 o 、分割パターン内 p 、分割グループ t 、重ねパターン st 、回転パターン r 時の切断回数。
- $CuttingArea_{s,o,p,t,st,r}$: 規格在庫品候補 s 、受注 o 、分割パターン内 p 、分割グループ t 、重ねパターン st 、回転パターン r 時の切断面積。
- $EndMaterialVolume_{s,o,p,t,st,r}$: 規格在庫品候補 s 、受注 o 、分割パターン内 p 、分割グループ t 、重ねパターン st 、回転パターン r 時の端材発生量。
- Wcn : 切断回数に係る重み値。
- Wca : 切断面積に係る重み値。
- Wem : 端材発生量に係る重み値。
- $TMPScore_{s,o,p,t,st,r}$: 規格在庫品候補 s 、受注 o 、分割パターン内 p 、分割グループ t 、重ねパターン st 、回転パターン r 時の評価点。

そして、上記の計算結果が現状の最適解より良い場合は、最適な解として更新する（図中、Remember as the best solution）。上記を全ての在庫への割当て、回転パターン、重ねパターン、受注分割パターンに対して繰り返すことで、規格在庫品候補 s から受注 o の分割パターン内 p の分割グループ t で最適な切断指示で切断した時の評価点 $SCORE_{s,o,p,t}$ が次式にて計算する。

$$SCORE_{s,o,p,t} = \text{Min}(TMPSCORE_{s,o,p,t,st,r}) \quad \text{for } \forall r \in R_{s,o,p,t}, \forall st \in ST_{s,o,p,t} \quad (2)$$

式中、以下の記号を用いた。

$R_{s,o,p,t}$: 規格在庫品候補 s から受注 o の分割パターン内 p の分割グループ t 時の回転パターンの集合。

$ST_{s,o,p,t}$: 規格在庫品候補 s から受注 o の分割パターン内 p の分割グループ t 時の重ねパターンの集合。

Fig. 10 The flow chart of scoring each standard stock.

3・3 規格在庫品候補の選別

規格在庫品候補の選別のステップ（図 6 中、Step3）では、前節で生成した評価点を基に、残すべき規格在庫品を混合整数計画法を用いて選別する。規格在庫品候補の選別の混合整数計画モデルを次に示す。

[決定変数]

- $x_{s,o,p,t}$: 規格在庫品候補 s に受注 o の分割パターン p の分割グループ t を割付ける時 1, そうでない時 0 をとる 0-1 変数 ($\forall s \in S, \forall o \in O, \forall p \in P_o, \forall t \in T_p$).
- $usePattern_{o,p}$: 受注 o に対して分割パターン p を採用したとき 1, そうでない時 0 をとる 0-1 変数 ($\forall s \in S, \forall o \in O$).
- $assignStock_s$: 規格在庫品候補 s を使用したとき 1, そうでない時 0 をとる 0-1 変数 ($\forall s \in S$).

[定数]

- $MAXSTOCK$: 規格在庫品種類数の最大値.
- O : 受注の集合.
- S : 規格在庫品候補の集合.
- P_o : 受注 o の分割パターンの集合.
- T_p : 分割パターン p 内の分割グループの集合.
- $SCORE_{s,o,p,t}$: 規格在庫品候補 s に受注 o の分割パターン p の分割グループ t を充てた時の評価点.
- $SPLITNUM_p$: 分割パターン p の分割数.

[目的関数]

目的関数として規格在庫品候補群の評価で与えた切斷回数, 切斷面積, 端材発生量の重み和である評価値の合計を最大化する (式 (3)).

$$\text{Maximize} \quad \sum_{o \in O} \sum_{p \in P_o} \sum_{t \in T_p} \sum_{s \in S} x_{s,o,p,t} \times SCORE_{s,o,p,t} \quad (3)$$

[制約式]

$$\sum_{s \in S} x_{s,o,p,t} = 1 \quad \text{for } \forall o \in O, \forall p \in P_o, \forall t \in T_p \quad (4)$$

$$\sum_{t \in T_p} \sum_{s \in S} x_{s,o,p,t} = SPLITNUM_p \times usePattern_{o,p} \quad \text{for } \forall o \in O, \forall p \in P_o \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P_o} usePattern_{o,p} = 1 \quad \text{for } \forall o \in O \quad (6)$$

$$x_{s,o,p,t} \leq assignStock_s \quad \text{for } \forall s \in S, \forall o \in O, \forall p \in P_o, \forall t \in T_p \quad (7)$$

$$\sum_{s \in S} assignStock_s \leq MAXSTOCK \quad (8)$$

ここで, 制約式のうち, 式 (4) は受注 o の分割パターン p の分割グループ t を割り当てられる在庫は 1 つであることを表す. 式 (5) は受注 o の分割パターン p を使用したとき 1, そうでない時 0 を取る $usePattern_{o,p}$ の値を取得する制約式である. 式 (6) は受注 o が使用できる分割パターンは 1 つであることを表す. 式 (7) は規格在庫品候補 s を使用したとき 1, そうでない時 0 をとる $assignStock_s$ の値を取得する制約式である. 式 (8) は使用する規格在庫品が設定した $MAXSTOCK$ 以下であることを表す. また, 上記 $MAXSTOCK$ は最適化計算時の設定パラメータである.

4. 提案方式の評価

4・1 評価方法

提案方式の評価のために、全探索可能な小さな問題を作成し、全探索と本方式を比較した。受注は、受注厚、受注幅をそれぞれ 1mm から 30mm の一様乱数として、30 数量作成した。この時、組み合わせ数を抑制するために、それぞれの受注の受注数量は 1、受注の回転は図 9 の Pattern 1 のみ許容した。規格在庫品候補は、在庫厚、在庫幅それぞれ下限 5mm、上限 30mm とし、厚さ 5 mm、幅 5 mm 毎の格子状に 36 種類とした。この規格在庫品候補の内、5 種類の規格在庫品を求める。また、本評価にて用いた切断回数、切断面積、端材発生量に係る重み値を表 1 に示す。これらの重み値は、発注担当者が考慮する重要度を反映して設定した。本評価は、CPU: Intel Xeon E5-2690 2.90GHz を用いて実験した。

Table 1 Weighting coefficient value.

W_{cn}	$W_{ca} [/\text{m}^2]$	$W_{em} [/\text{m}^3]$
-1.0	-10.0	-100.0

4・2 評価結果

表 2 に全探索と本方式により求めた規格在庫品の目的関数値および計算時間の比較結果を示す。全探索時の目的関数を 1.00 とした時に、本方式は目的関数が 0.99 を取る解を出力した。本方式は受注の時系列の順番を考慮していないため、必ずしも最適な解を導出する訳では無いが、全探索時の目的関数と近い解を導出することを確認した。また全探索時の計算時間 646.2 秒に対して、本方式は 0.2 秒で解を出力し、本方式が全探索よりも高速に解を出力することを確認した。規格在庫種類数や受注数の増加により組合せ数は指数的に増加し、規格在庫の種類数が数十種類、受注数が数百の問題においては、全探索における実時間内での求解は困難となる。5 章では、工具鋼販社における実データを用いた評価について説明する。

Table 2 Results of computational experiment. The development method outputs solution close to exhaustive search at high speed.

	Objective value	Computation time [s]
Exhaustive search	1.00	646.2
Development method	0.99	0.2

5. 実データ実験

5・1 実験方法

提案方式の評価のために、提案方式で求めた規格在庫品と、従来方式である発注担当者が過去の受注を分析して決めた規格在庫品の 2 条件で計算機実験を実施し、切断回数、切断面積、端材量を比較した。図 11 に実験方法を示す。実験には工具鋼販社の特定材質における販売データ 1 年分を用いた。本来は、将来の受注寸法を予測し、その予測値から規格在庫品を決定すべきである。ただし、将来の受注寸法の予測は本報の範疇を超える為、今後の課題とする。そこで本研究では、従来手法の規格在庫品の決定方法と同様に、販売データ 1 年分の内、前半 6 か月の受注寸法が次 6 か月の将来の受注寸法と同一と仮定し、規格在庫品の寸法を計算した（図中、Calculation term）。このとき、提案方式における規格在庫品の種類数（制約式 (6)）は従来方式である発注担当者が決めた工具鋼販社の種類数と同一とした。次に、後半 6 か月分の販売データを評価用とし、提案方式と従来方式で求めた規格在庫品の 2 条件における切断シミュレーションを実施した（図中、Simulation term）。受注数はそれぞれ前半 6 か月 662、後半 6 か月 513 である。比較項目は、6 か月間における切断回数（図中、(1) Number

of cuts), 切断面積 (図中, (2) Cutting Area) 及び, 6 か月後に保有する端材量 (図中, (3) Volume of final end material) である.

Fig. 11 Experimental method.

5・2 実験結果

表3にシミュレーションによる6か月間の総切断回数, 切断面積, および6か月後に保有する端材総体積の改善率を示す. それぞれ切断回数2.7%, 切断面積17.3%, 端材量6.3%低減する結果を確認した.

Table 3 Results of computational experiment. The development method outputs better solution in number of cuts, cutting area and volume of final end material than conventional method.

	Number of cuts	Cutting area	Volume of final end material
Improvement rate [%]	2.7	17.3	6.3

5・3 考察

従来方式である発注担当者が決めた規格在庫品と提案方式で求めた規格在庫品の違いについて分析する. 表4に従来方式と提案方式における, 計算機実験に用いた1年分の受注の最大幅, 最大厚さよりも大きい規格在庫品の種類数, 及び異なる幅, 厚さの規格在庫品の種類数を示す. まず表4の従来方式 (表中, Conventional method) における受注の最大幅, 最大厚さよりも大きい規格在庫品の種類数 (表中, Number of standard stocks over max sales width, Number of standard stocks over max sales thickness) を見ると, それぞれ幅7種類, 厚さ7種類となっている. 一方, 提案方式 (表中, Development method) で求めた規格在庫品において受注の最大幅, 厚さよりも大きい種類数 (表中, Number of standard stocks over max sales width, Number of standard stocks over max sales thickness) は, それぞれ幅3種類, 厚さ1種類と従来方式と比較して少ない. 規格在庫品が受注寸法と比較して大きくなると, 端材量や切断費が増加するため, 受注の多い寸法と近い寸法の規格在庫品を保有することが望ましい. しかし, 従来方式は提案方式と比較して受注寸法よりも大きな規格在庫品を多く保有する傾向にある. この傾向は, 人間心理における微小確率の過大評価 (Kahneman and Tversky, 1979) に起因すると考える. すなわち, 発注担当者は客観的確率の低い失注リスクを過大評価する為, 大きめの寸法を規格在庫品としている. この結果, 従来方式では切断時に大きな在庫から切断する必要性が生じ, 提案方式と比較し, 切断回数, 切断面積, 端材量が増加したと考える.

また, 受注製品の寸法 (厚さ, 幅, 長さ) のいずれかが, 規格在庫品の寸法と一致すると, 切断する必要がなくなり, 切断回数を削減できる. このため, 異なる幅, 厚さの規格在庫品を多く持つ方が, 受注寸法と一致する確率が高くなり, 切断回数が削減できる. 表2の従来方式 (表中, Conventional method) の異なる幅の規格在庫品種類数 (表中, Number of different width standard stocks), 異なる厚さの規格在庫品種類数 (表中, Number of different thickness standard stocks) を見ると, それぞれ13種類, 19種類保有していることが分かる. 一方, 提案方式 (表中, Development method) における異なる幅の規格在庫品種類数, 異なる厚さの規格在庫品種類数は, それぞれ19種類, 22種類であり従来方式と比較して多い. これにより, 提案方式は受注寸法と規格在庫品の寸法が一致する確率が上がり, 切断回数, 切断面積, 端材量が減少したと考える.

Table 4 Feature of standard stock size in conventional method and development method.

	Number of standard stocks over max sales width	Number of standard stocks over max sales thickness	Number of different width standard stocks	Number of different thickness standard stocks
Conventional method	7	7	13	21
Development method	3	1	19	22

6. 結 言

本研究では、工具鋼販売における切断費用・端材を削減する規格在庫品の寸法決定方式を提案し、実際の工具鋼販社における販売実績、規格在庫品を用いて評価検証を行った。

工具鋼販社における、切断費・端材削減には保有している規格在庫品の寸法が重要となる。本方式は、規格在庫品候補を自動生成した後、切断指示を(1)受注分割、(2)重ね、(3)回転、(4)在庫割当ての4つの要素で表現し、全探索することにより、各規格在庫品候補に評価点を付与する。その後、混合整数計画法を用いて評価点合計が最大となる規格在庫品の寸法を導出する。これにより、過去受注に応じた規格在庫品の寸法を決定することができる。

計算機上で提案方式を評価し、過去受注を分析し、人が決定した実際の工具鋼販社の規格在庫品と比較して切断回数 2.7%、切断面積 17.3%、端材量 6.3%低減する結果を得た。本方式を用いることで、切断費・端材を削減する規格在庫品の寸法を自動決定できることを確認した。

本研究は、工具鋼販社を対象とし、切断費用、端材を削減する規格在庫品の寸法を計算した。今後の課題として、規格在庫品を製造する工場内の半製品の寸法についても同時に最適化する手法の開発、及び将来の受注寸法を予測する手法の開発が挙げられる。

文 献

- Kahneman, D. and Tversky, A., Prospect theory: An analysis of decision under risk, *Econometrica*, Vol.47, No.2 (1979), pp.263-292.
- 小畠純, 杉正夫, 加工法による制約を考慮した列生成法を用いた長方形板取問題の解法, 日本機械学会生産システム部門講演会論文集, Vol.2014 (2014), pp.55-56, DOI:10.1299/jsmemecjo.2005.4.0_21.
- Moon, I. and Choi, S., The distribution free continuous review inventory system with a service level constraint, *Comput.Ind.Eng.*, Vol.27, Issue1-4 (1994), pp.209-212.
- 坂本豊和, 局所最適化に基づく 2 次元在庫切断アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.76, No.4 (1993), pp.605-611.
- Tajbakhsh, M. M., On the distribution free continuous-review inventory model with a service level constraint, *Comput. Ind. Eng.*, Vol.59, Issue4 (2010), pp.1022-1024.
- 竹本晴彦, 有菌育生, 不適合品による不確実性の在庫システムへの影響, 日本経営工学会論文誌, Vol.60, No.5 (2009), pp.249-258, DOI:10.11221/jima.60.249.
- Thiel, D., Hovelaque, V. and Hoa, V. T. L., Impact of inventory inaccuracy on service-level quality in (Q,R) continuous-review lost-sales inventory models, *Int. J. Prod. Econ.*, Vol.123, Issue2 (2010), pp.301-311.
- 董彦文, 半製品最適利用のための意思決定支援システムの設計に関する研究, 商業論集, Vol.68, No.3 (2000a), pp.57-68.
- 董彦文, 半製品最適規格決定の近似解法とその実現, 商業論集, Vol.69, No.1 (2000b), pp.27-39.
- Valle, A.M.D., de Queiroz, T.A., Miyazawa, F. K. and Xavier, E. C., Heuristics for two-dimensional knapsack and cutting stock problems with items of irregular shape, *ISIJ International, Expert System with Applications*, Vol.39, Issue168 (2012), pp.12589-12598.
- Viegas, J.L., Vieira, S. M., Henriques, H. M. P. and Sousa, J. M. C., A tabu search algorithm for 3D bin packing problem in the

steel industry, Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol.321 (2015), pp.355-364.

Ward, J., Zhang, B., Jain, S., Fry, C., Olavson, T., Mishal, H., Amaral, J., Beyer, D., Brecht, A., Cargille, B., Chadinha, R., Chou, K., DeNyse, D., Feng, Q., Padovani, C., Raj, S., Sunderbruch, K., Tarjan, R., Venkatraman, K., Woods, J. and Zhou, J., HP transforms product portfolio management with operations research, Franz Edelman Award for Achievement in Operations Research and the Management Sciences (January-February 2010), Vol.40, Issue1 (2010), pp.17-32.

References

- Kahneman, D. and Tversky, A., Prospect theory: An analysis of decision under risk, *Econometrica*, Vol.47, No.2 (1979), pp.263-292.
- Kohata, J. and Sugi, M., A column generation method for solution of rectangular cutting stock problem considering practical cutting constraints, *Manufacturing Systems Division Conference*, Vol.2014 (2014), pp.55-56, DOI:10.1299/jsmemecjo.2005.4.0_21 (in Japanese).
- Moon, I. and Choi, S., The distribution free continuous review inventory system with a service level constraint, *Comput.Ind.Eng.*, Vol.27, Issue1-4 (1994), pp.209-2012.
- Sakamoto, T., 2D cutting-stock algorithms based on the local optimization, *IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics A*, Vol.J76, No.4 (1993), pp.605-611 (in Japanese).
- Tajbakhsh, M.M., On the distribution free continuous-review inventory model with a service level constraint, *Comput. Ind. Eng.*, Vol.59, Issue4 (2010), pp.1022-1024.
- Takemoto, Y. and Arizono, I., The impact of nonconforming items on inventory systems, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol.60, No.5 (2009), pp.249-258, DOI:10.11221/jima.60.249 (in Japanese).
- Thiel, D., Hovelaque, V. and Hoa, V.T.L., Impact of inventory inaccuracy on service-level quality in (Q,R) continuous-review lost-sales inventory models, *Int. J. Prod. Econ.*, Vol.123, Issue2 (2010), pp.301-311.
- Tou, G., Hanseihin saiteki riyo no tameno Ishi kettei sien sisutemu no sekkei ni kansuru kenkyu, Vol.68, No.3 (2000a), pp.57-68 (in Japanese).
- Tou, G., Hanseihin saiteki kikaku kettei no kinji kaiho to sono jitsugen, *Shogyo ronshu*, Vol.69, No.1 (2000b), pp.27-39 (in Japanese).
- Valle, A.M.D., de Queiroz.T.A., Miyazawa, F. K. and Xavier, E. C., Heuristics for two-dimensional knapsack and cutting stock problems with items of irregular shape, *ISIJ International, Expert System with Applications*, Vol.39, Issue168 (2012), pp.12589-12598.
- Viegas, J.L., Vieira, S. M., Henriques, H. M. P. and Sousa, J. M. C., A tabu search algorithm for 3D bin packing problem in the steel industry, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol.321 (2015), pp.355-364.
- Ward, J., Zhang, B., Jain, S., Fry, C., Olavson, T., Mishal, H., Amaral, J., Beyer, D., Brecht, A., Cargille, B., Chadinha, R., Chou, K., DeNyse, D., Feng, Q., Padovani, C., Raj, S., Sunderbruch, K., Tarjan, R., Venkatraman, K., Woods, J. and Zhou, J., HP transforms product portfolio management with operations research, Franz Edelman Award for Achievement in Operations Research and the Management Sciences (January-February 2010), Vol.40, Issue1 (2010), pp.17-32.