

分枝限定法を使った管一品の最適切断計画

奥本泰久*, 藤田 克巳**

Optimization of Pipe Cut Using Branch-and-bound Method

Yasuhisa OKUMOTO, Katsumi FUJITA

Synopsis

In many industrial products such as vessels and vehicles, and in industrial plants, many metal pipes are fitted for the transfer of fluid and gas or for the parts of the structure. These pipes are generally mass-produced by the process of fabrication and sub-assembly in a pipe factory. Though the planning of pipe cut, which includes the nesting plan and cutting sequence, is very important as the first step of a production, it depends on the experience of workers in general. If the planning of nesting, to allocate many parts of pipes in one specified pipe, is rationally done, the scrap materials can be reduced. Therefore, this paper has investigated how to select some parts (pipes) for a specified pipe so as to eliminate the scraps using branch-and-bound method, as a combinatorial optimization problem. In addition, the cutting sequence of pipes has also been studied so as to eliminate the waiting time for the next stage in a stock yard.

Keyword: Pipe factory, Nesting, Branch-and-bound method, Combinatorial optimization problem

1. 緒言

船舶を始め多くの大型工業製品や各種のプラントでは、多くの金属製パイプが流体や気体の移送用として、また、構造物の一部として多用されている。一般に、これら大型パイプは管専用工場で加工し小組立されるが、管本体は定尺の素材から部品取りを行うのが一般的である。管は多種、多様であり、材質や直径が同一なものの中から、長尺の素材にうまく割り当て（ネスティングし）残材を残さないようにする必要があるが、この作業は通常作業者の経験を元に行っている。したがって、未経験者でもより合理的にネスティングを行

え、端材としてのスクラップ量を減らすよう、新しいシステムの導入が望まれる。本研究はこのような管の部材取りに関するもので、数多くの管を定尺の素材から無駄なく取材するアルゴリズムを検討し、これをプログラム化した。この方法は管のみならず長尺物の部材取り全てに当てはまる。なお、最適化のアルゴリズムはプログラムが簡単で精度の良い解が得られる分枝限定法とした。

追加検討として、管素材の切断の順序によっては後工程（加工、組立）でストックが増えることが予想されるので、ストックの少ない投入順序についても検討した。

* 近畿大学工学部システムデザイン工学科 Department of System Design, School of Engineering, Kinki Univ.
** タイムテック(株) Timetec Ltd.

2. 部材取りの最適組合せ

定尺の素材1本から部品n本を取材する際、部品の組合せ総数は 2^n 組考えられる。部品が3本の場合の組合せをTable1に示す。図中のA, B, Cは部品を示し、1, 0は部品の使用, 不使用を示す。部材取りの最適組合せは、これらすべての組合せのなかで一番残材の少ないものである。部品数が増えると、 2^n 通りの組合せから最適な組合せを人海戦術で求めることは不可能に近くなる。

Table1 Combination of parts

Parts Case	A	B	C
1	1	1	1
2	1	1	0
3	0	1	1
4	1	0	1
5	1	0	0
6	0	1	0
7	0	0	1
8	0	0	0

定尺の素材長さを R とし候補となる部品が n 個あり、部品 j ($j=1, \dots, n$)の長さが a_j , その残材を Z とする。変数 $x_j=1$ あるいは 0 で部品 a_j を組合せに加えるか加えないかを表す。最小化する目的関数を Z とすると、この最適化組合せ問題は次式のように定式化される。

$$Z = R - \sum_{j=1}^n (a_j x_j) \rightarrow \min. \quad (1)$$

(素材1本に入らない場合は、残りの部品について繰り返す)

また、定尺を超える部品の組合せは考えられないので制約条件については次式が成り立つ。

$$R \geq \sum_{j=1}^n a_j x_j \quad (2)$$

$$a_j \geq 0, R \geq 0$$

3. 分枝限定法

前述したように最適な組合せを求めるには多くの計算時間を必要とする。このように、考えられる全ての組合せについて探索する方法を列挙法とっているが、ここでは、処理する計算時間を減らし多くの部品を扱えるようにするため、分枝限定法のアルゴリズムを用いた。

分枝限定法の基本手順は、組合せ最適化問題の実行可能領域をいくつかの部分領域に分割し、そのおのこの実行可能領域とする部分問題を考え(これを分枝

操作と呼ぶ)可能性のある部分問題だけをさらに調べることである¹⁾。

具体的な例を挙げてこのアルゴリズムをどのように管の部材取りに用いたかをFig.1で説明する。今、定尺 R の素材が1本あり、部品A, 部品B, 部品C, ...があるとする。このとき考えられる部品の組合せパターンはFig.1で示され、樹木図を辿るルールは以下のようになる。

- (1) Fig.1について左端の頂点 a を始点、右端を終点とする。
- (2) 始点から終点までの分岐点を右上に移動する場合は部品を使用し、右下に移動する場合は部品を使用しないとする。
- (3) 基本的に樹木図を右上に進む。
- (4) 部品の総長さが素材の長さを超えたとき、または終点まで進んだとき、直前に右上に通った分岐点まで戻りその分岐点を右下に進む。
- (5) 枝端に着くと処理を終了する。

最適な組合せはここで得られた解の内最適なものを選ぶ。

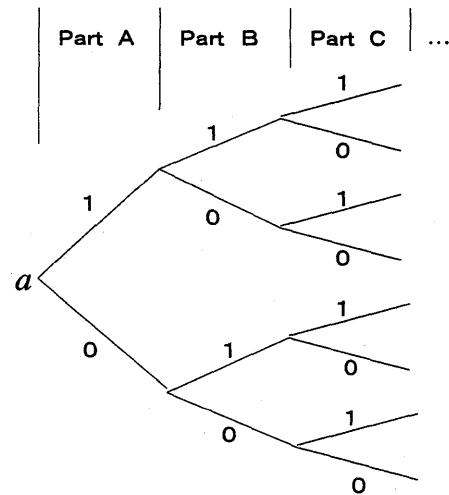


Fig.1 Decision tree

具体的に(1)~(5)のルールに従って樹木図を辿ると、部品の総長さが素材の長さを超える場合があり、それ以上右上に進む(部品を更に加える)必要はなくなる。このように解の可能性のない場合についてはその時点で処理を打ち切ることで考えられる総処理数を減らすことができる。また、「残材が0~100mmであれば処理を完了する」というような条件を新たに加えると処理総数をさらに減らすことができる。

分枝操作では式(1), (2)で定式化した問題を P_0 としたとき、 X_0 を X_1 と X_2 に分割し、この分割に対応した部分問題 P_k , $k=1, 2$ を考える。

$$X_1 = \{x \in X_0 \mid x_p = 0\}$$

$$X_2 = \{x \in X_0 \mid x_p = 1\}$$

これらの部分問題 $P_k, k=1, 2$ を解くことができれば、問題 P_0 の最適解が得られる。これらの部分問題が直接解けない場合には、新たな関数を 0 あるいは 1 に固定することにより部分問題を次々と生成する²⁾。

4. 最適化シミュレーション

今回対象とした管工場では、複数の客先から注文が入り、これを日程や材質、管径ごとにソーティングし、日程計画に沿って管の切断計画を立てている (Fig.2)。ここで、対象とする複数の管に対し歩留まりを考慮して素材 (管の場合通常 5.5m) からネ스팅する。本稿ではこのネ스팅計画部分を C 言語でプログラム化した。プログラムの出力は Excel 形式の Cutting list とした。

プログラムの手順は Fig.3 に示すように、まず 1 番目の素材 A に対し管部品リストから順に適用する候補を分枝限定法で選択し、その内スクラップが最小とな

る組合せを決定する。次に 2 番目 B の素材に対し、上記で採用された管を除いた中から順次候補を選び、最終的にスクラップが最小となる組合せを決定する。以降この操作を繰り返す。

実際の工場でのデータを使って、定尺 5.5m の素材から部材取りのシミュレーションを行った結果を Fig.4 に示す。素材は十分な本数があるものとし、素材 1 本ずつについて組合せを決定していった。ここでは定尺 5.5m の素材 10 本 (総長さ 55m) から、部品を 26 本 (総長さ 52.166m) を取材した。歩留りは次式の計算より 94.85% となった。残材が約 5% である。

$$\eta = \frac{\sum a_j}{\sum R_j} \times 100 \quad (\%)$$

η : 歩留り (%)

R_j : 素材長さ

a_j : 部品長さ

このときのコンピュータ (400MHz の Celeron cpu) の処理時間を Fig.4 に示す。処理時間は部品数が多くなるにつれ急激に増加しているが、6,000 本の部品の組合せ最適化問題が、わずか 777 秒 (13 分) の処理時間であった。

次に、扱うパイプの数が多い場合の歩留まりを比較するために、部品の長さが 0.5m~5.45m の間でランダムな (仮定の) 200 本についてのシミュレーションを行った。その場合の歩留りは 96.48% であり、計算にかかった時間はわずか数秒であった。

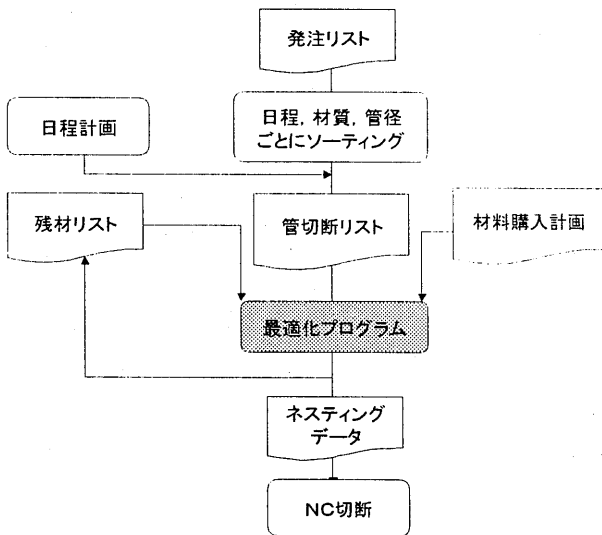


Fig.2 Flow of pipe cutting

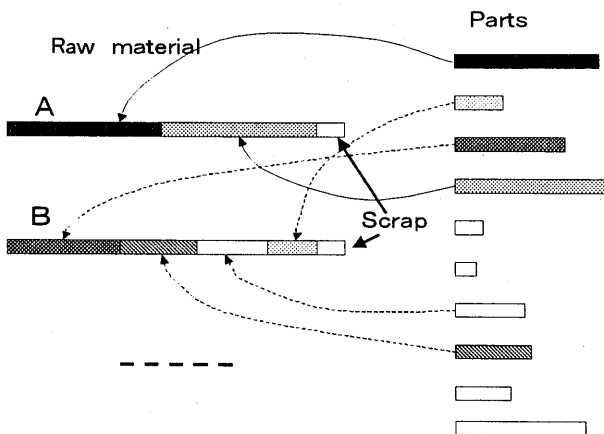


Fig.3 Selection of pipes

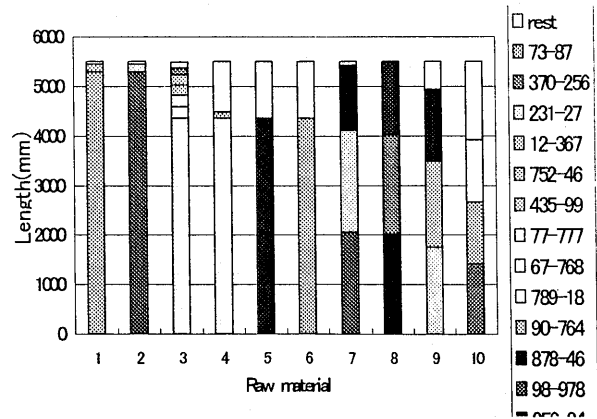


Fig.4 Simulation results

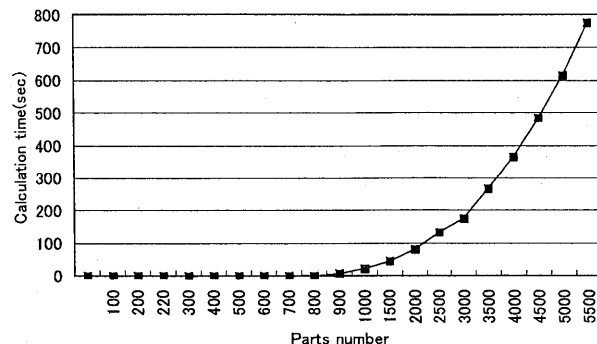


Fig.5 Calculation time

これらの結果により、多くの部品を扱う部材取りを行う場合、スクラップの削減やこの計画時間の短縮のため、本プログラムは大変有効であることがわかる。

5. 加工順序の最適化

通常、管工場では複数のパイプやフランジ、エルボ、バルブなどと組み合わせたサブ材として出荷される (Fig. 6, Fig. 7)。組み合わせられるパイプは素材から切断されるため、切断が終了すると、それらの部品は組立てられる部品が全て揃うまでストックヤードに留まることになる。多くの部品を停滞させると、工場のスペースが無駄になり、かつ組立てるための部品を探す時間も長くなる。したがってここでは、どのような順序で切断すればストックが少なくなるかを検討する。

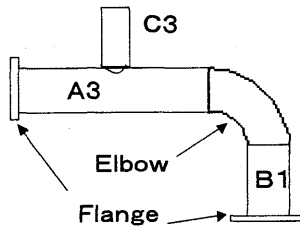


Fig. 6 Sub-assembled part

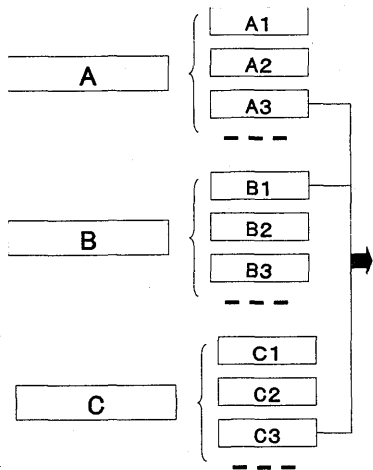


Fig. 7 Sub-assembled pipes

投入順序の組合せを求める場合、投入する素材が n 本の場合その組合せは Fig. 8 に示すように $n!$ 通りある。この中からストック数が最小となる最適投入順序を、同じく分枝限定法で検討した。

Fig. 8 の節点の番号を素材番号とし、これを番号の若い順に探索していけば $1-2-3 \dots n$ の経路を辿るが、終端に達すると直前の分岐に戻りこれを順に繰り返す。この中から最適値を求めることになるが、ここではストックヤードの面積 (計算では管の本数) をチェック

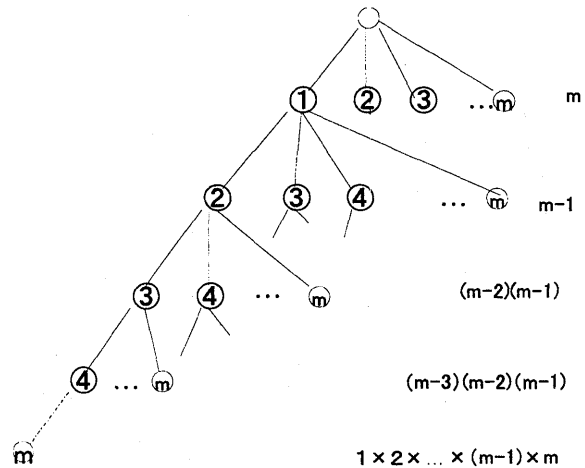


Fig. 8 Combination tree of parts

し、ストック本数の制限を満たさない場合は以降の探索を中止して直前の分岐にバックトラックする方法をとっている。この手順をC言語でプログラム化した。

ここでは簡単なシミュレーション例として、素材 14 本ごとの最適投入順序を算出し、それを繰り返して素材 294 本、部品 819 本から製品 294 個が生産される時の工程シミュレーションを行った³⁾。Fig. 9 に計算結果を示す。図の横軸は時間の経過、縦軸はストックされるパイプの本数である。図によれば、ストックヤード内のストック数が半分以下に改善されていることがわかる。これにより、ストックヤードのエリアを狭くし作業場所を広くすることが可能になる。

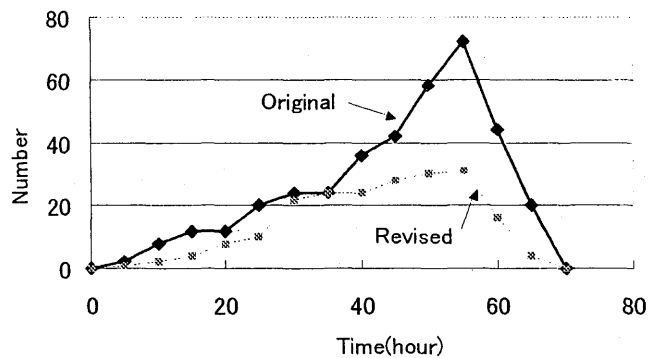


Fig. 9 Simulation results of stock

6. 結言

本稿は金属製パイプを素材から切断、加工し、サブ材に組立てる管加工専用工場に関する研究で、最初の工程である切断について検討した。異なった長さを持つ多くの管部品を、定尺の素材から残材を最小化するように取材 (ネスティング) する方法を検討しプログラム化した。あわせて、組立て工程前でのストック数が少なくするシミュレーションも行った。最適化の手法は計算のロジックが比較的簡単で最適値が得られる分

枝限定法とした。これらの試算結果次のことがわかった。

- (1) 切断におけるシミュレーション結果、素材 10 本、部品 26 本の取材では歩留りは 94.9%であったが、部品を増やすと 96.5%に増加した。
- (2) 分枝限定法を使うことにより、コンピュータの処理能力は 6,000 本程度の部品に対しても実用上十分な処理結果となった。
- (3) 次工程であるストックヤードに溜まる部品数を最小化する最適な切断順序も検討し、試算結果ストック数を 1/2 にすることが可能となった。

参考文献

- 1) 大野勝久：Excel によるシステム最適化，コロナ社，pp.135-136
- 2) 奈良宏一，佐藤泰司：システム工学の数理的手法，コロナ社，pp.144-145
- 3) 奥本泰久，藤岡慎治：シミュレーション技法と分枝限定法を用いた管加工・組立の最適化計画，西部造船会会報 第 105 号，pp.165-177，(2003.3)