事例紹介

鋼材ヤードにおける鋼板搬出スケジューリング

阿瀬　始，勘定　義弘

（キーワード：重工製造業，鋼材ヤード，最適化，スケジューリング，Lagrange 分解法，ダブーサーチ）

1.　はじめに

近年，橋梁，鉄骨，船などの大型構造物を製造する重工製造業においては，高生産性を追求するために製造過程で生じる様々な最適化問題が取り組まれつつある．これらの大型構造物を構成する主要部材が工場内で製造される工程は類似しており，切断→加工→小組立→中組立→大組立という流れにまとめられる．各工程には，スループット向上につながる様々な最適化問題が内在する[1]が，ここでは紙面の制約から，最初の切断工程に材料を供給するプロセス，すなわち鋼材ヤードにおける鋼板搬出プロセスに対する鋼板搬出スケジューリング問題を紹介することにする．

2.　鋼板搬出スケジューリング問題の定式化

重工製造業は完全受注生産であり，各オーダー品を製造するために必要な鋼板は船でまとめて入荷される．入荷した鋼板は，門型クレーン１台を備えた図１に示す鋼材ヤードで陸揚げされ，D 1，E 1などのように番地づけられた位置(山)にオーダー別に山積みされて切断工程に送られるまでストックされる．迅速に陸揚げすることが優先されるので，山積みの順序は特に意識されていない．ところが，下流工程からは切断機の稼働率はできるだけ高く，かつ製造の優先順位をできるだけ遵守するようにという要請があるので，搬出時に搬出順序を考えなければならない．また，ある山の二段目より下の鋼板を搬出するには，その上にある鋼板を１枚ずつクレーンで別の山に移動させる必要がある．この操作を山移動と呼ぶ．山移動には時間がかかる．これらのことを考慮して，各鋼板を指定された切断機にどういう順序でいつ搬出するかを決定するのが鋼板搬出スケジューリング問題であり，以下のように定式化される．ただし，各オーダーの鋼板の山を送り先の切断機種でグルーピングし，それ以上分割するとある切断機種の鋼板が別の山グループの中に現れてしまうことになるような最小の山集合を山グループと呼ぶ．山移動先として，鋼板が積まれていない山が指定されることもあり，その場合はそれらの山も含めて山グループとする．

記号

H：山グループ（以下山 G と書く）の数

q_{hmj}：山 Gh の切断機 m で切断する j 日の最大枚数

μ_{hmj}：山 Gh において切断機 m に j 日に送る板枚数

ξ_{hm}：山 Gh の切断機 m に対する優先順不満足度

η_{hmj}：山 Gh の切断機 m に対する j 日の山移動回数

γ：山移動回数を考慮する重み

r_j：j 日の山移動回数上限

目的関数

① 切断機稼働率最大（非稼働率最小）

$$\text{非稼働率}=\sum_h\sum_m\sum_j \max(0,\ q_{hmj}-\mu_{hmj}) \tag{1}$$

② 工事優先順の満足度最大（不満足度最小）

$$\text{不満足度}=\sum_h\sum_m \xi_{hm} \tag{2}$$

③ 山移動回数最小

$$\text{山移動回数}=\sum_h\sum_m\sum_j \eta_{hmj} \tag{3}$$

制約条件

① １日あたりの切断機送り枚数は上限以下

$$\mu_{hmj}\leqq q_{hmj}：\text{各 } j,\ m,\ h \text{ に対し} \tag{4}$$

② １日の山移動回数はその日の許容上限回数以下

$$g_j\equiv\sum_h\sum_m \eta_{hmj}-r_j\leqq 0：\text{各 } j \text{ に対し} \tag{5}$$

鋼材ヤード搬出スケジューリング問題は，制約条件(4)，(5)のもとで目的関数(1)～(3)を最小にするような，鋼板

あせ　はじめ
JFE エンジニアリング
〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2-1
かんじょう　よしひろ
JFE エンジニアリング
〒514-0393 津市雲出鋼管町 1

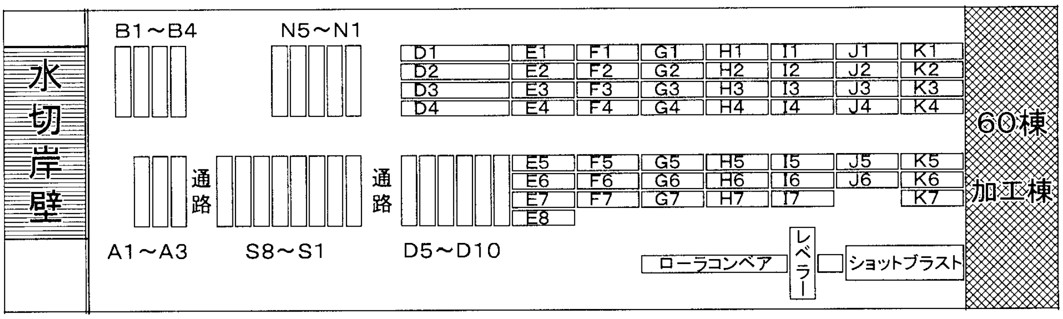

図1　鋼材ヤード

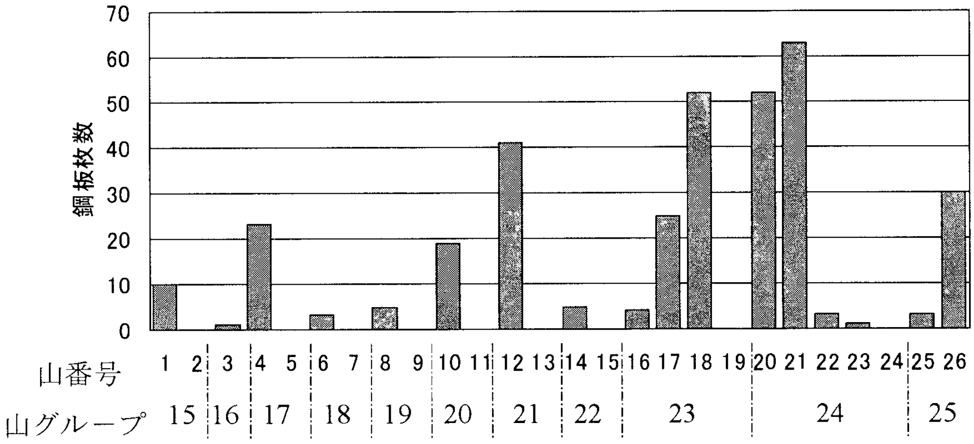

図2　山情報

の搬出順序，搬出日，山移動の際の移動先を決定する最適化問題である．実際には，処理や特性が同じ鋼板を連続させるなどの細かい制約もあるが，ここでは簡単のため無視する．

3．解法

目的関数は(1)～(3)の順で優先度が高い．そこで，目的(1)に対しては（各オーダーの最終日はやむを得ないとして）切断機を開始可能日からフル稼働させる，すなわち，$\mu_{hmj}=q_{hmj}$ とする．そうすると制約条件(4)は不必要となる．さらに鋼板の搬出順序が決まると搬出日は確定することになるので，鋼板搬出日は決定変数ではなくなる．次に山移動の際の移動先であるが，移動先が二つ以上ある場合はどこに移動させるのが最適かは非常に難しい問題である．ここでは，移動先は移動先対象の山の中で高さが最も低い山というルールにより決定することにした．山を低くしておくと，その後の山移動回数が少ないはずというヒューリスティックに基づいたものである．以上の準備のもと，目的関数(2)，(3)を重みをつけてスカラー化し，制約条件(5)を緩和すると，次のLagrange関数を制約条件なしで最小化するというLagrange緩和問題が得られる．

$$L(\lambda)=\sum_h\sum_m(\xi_{hm}+\gamma\sum_j\eta_{hmj})+\sum_j\lambda_j g_j \tag{6}$$

式(5)を用いて式(6)をさらに変形すると次式になる．

$$\begin{aligned}L(\lambda)&=\sum_h\left\{\sum_m\left(\xi_{hm}+\gamma\sum_j\eta_{hmj}\right)\right.\\&\quad\left.+\sum_j\lambda_j\left(\sum_m\eta_{hmj}-r_j/H\right)\right\}\\&\equiv\sum_h L(h,\lambda)\end{aligned}$$

したがって，Lagrange分解法[2]が適用でき，山グループごとの最適化問題を解けばよいことがわかる．山グループ h の切断機 m に対する不満足度は，その鋼板搬出順序の理想的順序との隔たりとして定式化される．山移動回数は，山移動が必要な時点での山グループの山の状態（各鋼板の山および何段目にあるか）に依存して決まる．この山の状態は鋼板の搬出あるいは山移動ごとに変化する．したがって，上述の最適化問題は実は状態の遷移も制約条件として持つ最適化問題である．Lagrange分解法における子問題は状態遷移制約のもとで $L(h,\lambda)$ を最小化する組合せ最適化問題になる．厳密解法は難しいと思われるので，この解法にはタブーサーチ[3]を用いた．

表1　山グループとオーダーおよび計算結果

	日	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
機種1	山グループ	17	17	21	21	21	21	25	25	25											
	オーダー番号	5	5	6	6	6	6	7	7	7											
	鋼板枚数	12	11	12	12	12	5	12	12	9											
	山移動回数	12	1	25	28	0	0	6	3	2											
機種2	山グループ	16		20	20	20	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	オーダー番号	5		6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	鋼板枚数	1		5	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
機種3	山グループ			20	20		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	オーダー番号			6	6		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	鋼板枚数			3	3		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
	山移動回数	0		3	1	0	21	11	21	16	16	15	23	12	16	10	7	1	10	3	0
機種4	山グループ	15	15	19		23	23	23	23	23	23	23	23	23	23						
	オーダー番号	5	5	6		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7						
	鋼板枚数	6	4	5		9	9	9	9	9	9	9	9	9	1						
	山移動回数	3	0	1		29	7	13	2	9	12	12	0	3	0						
機種5	山グループ	18		22																	
	オーダー番号	5		6																	
	鋼板枚数	3		5																	
	山移動回数	1		1																	
山移動回数合計		16	1	30	29	29	28	30	26	27	28	27	23	15	16	10	7	1	10	3	0

4. スケジューリング結果の例

結果の一例を示す．オーダーは5~7，切断機集合は{1}，{2，3}，{4}，{5}である．図2に示すように26個の山が11の山グループに分けられており，各山には鋼板が積まれている．オーダーと切断機集合の山グループへの対応は表1に示されている．表1には1日あたりの山移動回数上限が30回とした場合の結果も示されている．1日の山移動回数が上限の30回に等しい日が2日あり，その他の日は30未満に抑えられている．

5. おわりに

重工製造業における鋼材ヤードでの鋼板搬出スケジューリング問題をとりあげ，著者らの研究の一端を紹介した．重工製造業においては他にも興味ある最適化問題が存在する．機会があればそれらについても紹介したいと考えている．

参考文献

[1] 阿瀬，勘定：重工製造業における計画・スケジューリング，スケジューリングシンポジウム '2002，pp. 20-31，2002.

[2] 黒田編：Lagrange緩和法とスケジューリング，COM・SCM・スケジューリング研究部会，1999.

[3] 柳浦，茨木：組合せ最適化，朝倉書店，2001.