ヤードクレーンスケジューリング問題における総作業時間の比較研究
―クレーンの交差が可能な場合と不可能な場合―

和田 研輔（沼田 一道 助教授，田中 健一 助手）

1．はじめに

1.1. 研究背景

経済のグローバル化が進む中，物流業界においても貿易の重要度が増している．大型交易貨物の輸送では海上コンテナ輸送が主流であり，貨物を収納したコンテナをコンテナ船が主要な港を結んで運搬している．コンテナの輸送を行う会社は，当然ながら，輸送コスト削減や輸送時間の短縮を求めている．輸送時間の短縮を考える際，コンテナ船がコンテナ港に滞在する時間（ターンアラウンドタイム）の短縮を図る必要がある．ターンアラウンドタイムの多くはコンテナの積み降ろしに費やされている．そのため，輸送時間の短縮を実現するためには，コンテナの積み降ろしの効率化が必要である．

コンテナ港には，到着したコンテナや，これから出荷するコンテナを一時的に保管しておくヤードゾーンが併設されている．コンテナ船入港の際，船で運ばれてきたコンテナは，岸壁クレーンによって陸揚げされ，直接トラックに積み込まれる．トラックに積まれたコンテナはヤードゾーンに運ばれ，ヤードクレーンによって積み降ろされる．出港時は，入港の際と逆の流れでコンテナ船に積み込まれる．このように，船が到着し，また船が出発するまでに掛かる時間をターンアラウンドタイムと呼ぶ．

コンテナの積み降ろしの効率化を考える際，岸壁クレーンのスケジューリングとヤードクレーンのスケジューリングが対象となる．本研究ではヤードクレーンの積み降ろし作業におけるスケジューリングについて考える．

1.2. 研究目的

ヤードクレーンのスケジューリングに関しては，文献[2]などの先行研究がなされている．しかし，そのいずれもクレーン同士が交差できない状況でスケジューリングを行っている．これに対し，文献[1]には交差可能なヤードクレーンの記述が見られる．そこで本研究では，ヤードクレーンの動作条件が変わることにより，全コンテナを積み降ろす作業に掛かる時間（総作業時間）がどの程度変化するか見るため，交差可能・不可能な場合のそれを比較する．

2．問題設定

2.1. ヤードクレーンの概要

ヤードクレーンは到着したコンテナをヤードゾーンの指定の位置に積み降ろす作業を行う．ヤードゾーンはいくつかの Block からなり，各 Block の各列を Slot，奥行きを Row と呼ぶ．また積み上げる高さを Tire と呼ぶ．

トラックは，コンテナを積み降ろす Slot に横付けされ，ヤードクレーンの到着を待つ．ヤードクレーンは Block を挟むレーン上をトラックの位置まで移動し，トラックに積まれたコンテナを目的の Row，Tire に積み上げる．

ヤードゾーンの様子を図 2.1 に示す．

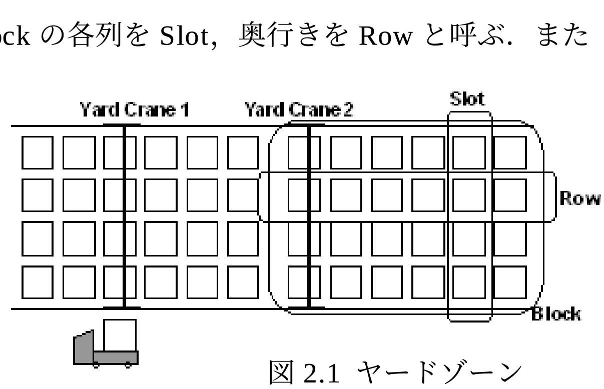

図 2.1 ヤードゾーン

2.2. 交差可能なヤードクレーンスケジューリング問題

ヤードクレーンスケジューリング問題とは, クレーン数, コンテナ数と各コンテナの到着時間, 積み降ろす Slot が与えられた状態で，総作業時間が最短となるような各ヤードクレーンのコンテナ処理順序を決定する問題である．ただし，コンテナの到着先は Slot のみ扱い，Row や Tire は考慮しないものとする．文献[2]では，ヤードクレーンがレーンを共有しているために互いに交差できないものとしてスケジューリングを行っている．本研究では，追越しが可能なものとしてヤードクレーンスケジューリング問題を解く．

3．定式化

2.2 節で述べた交差可能なヤードクレーンスケジューリング問題を数理計画問題として定式化する．Slot の数をl，ヤードクレーンの数をm，1 つのコンテナを Slot に積み上げることをジョブと呼び，その数を n とする．また，Slot 番号を $\theta=\{1,2,\Lambda\ ,l\}$，ヤードクレーン番号を $k=\{1,2,\Lambda\ ,m\}$，ジョブ番号を$i=\{1,2,\Lambda\ ,n\}$とする．ジョブiの到着 Slot をβ_i，到着時刻をr_iとし, クレーンでヤードに積み上げるのに掛かる処理時間をH, クレーンkの初期 Slot 位置をα_kとする. ジョブhからジョブiへの移動時間をd_{hi}とする（ただし$d_{0(k)i}$：クレーンkの初期位置α_kからジョブiへの移動時間）．n_kをクレーンkにより処理されるジョブ数とする．$x_{i,p,k}$をジョブiをクレーンkでp番目に処理するとき1, それ以外は0をとる決定変数とする. ジョブiの処理終了時刻をf_iとすると，定式化は以下のようになる．

$$\min \quad \max_{1\le i\le i} \quad \{f_i\} \tag{3.1}$$

$$\text{s.t.} \quad f_i \ge \max\left(r_i,\quad \sum_{k=1}^{m}\left\{ d_{0(k)i}\cdot x_{i1k} + \sum_{h=1}^{n}\sum_{p=2}^{n_k}\left(f_h + d_{hi}\right)\left(x_{h,p-1,k}\cdot x_{i,p,k}\right)\right\}\right) + H \tag{3.2}$$

$$n_k = \sum_{i=1}^{n}\sum_{p=1}^{n} x_{i,p,k} \qquad \sum_{k=1}^{m} n_k = n \tag{3.3}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{i,p,k} = 1 \qquad {}^{\forall}k \qquad 1\le {}^{\forall}p \le n_k \tag{3.4}$$

$$\sum_{k=1}^{m}\sum_{p=1}^{n_k} x_{i,p,k} = 1 \qquad {}^{\forall}i \tag{3.5}$$

$$\left|f_i - f_j\right| \ge H \qquad {}^{\forall}i, j \qquad \left(\beta_i = \beta_j\right) \tag{3.6}$$

$$x_{i,p,k} \in \{0,1\} \qquad {}^{\forall}i, p, k \tag{3.7}$$

（3.1）式は，目的関数で，f_iの中で最も大きいものは総作業の終了時刻を表し，それを最小化するという問題である．（3.2）式は，変数f_iの制約条件を表している．（3.3）式は，変数n_kの制約条件を表している．（3.4）式は，あるクレーンの各順番でジョブが 1 つ処理されるという制約条件を表している．（3.5）式は，すべてのジョブは必ずどこかで処理されるという制約条件を表している．（3.6）式は，同じ Slot で複数のクレーンが同時に処理を行わないという制約条件を表している．（3.7）式は，$x_{i,p,k}$が0か1であるという制約条件を表している．

4．解法

m台のクレーンにn個のジョブを割り当てる方法はm^n通りある．また，割り当てられたジョブについて処理順序を列挙すると，最悪の場合で$n!$通りある．これらを列挙法で解けば最適解を得ることは出来るが，nの値が大きくなると許容時間内で解くのは困難である．そこで本研究では，最適性の保証はないが良質の解をできるだけ短い時間で求められる近似解法を用いて解く．

4.1. 交差不可能な場合の解法

交差不可能な場合の総作業時間を求めるためには，文献[2]の解法を用いる．文献[2]では，2 段階に分けてヤードクレーンのスケジューリング問題を解いている．第 1 段階では，クレーンが移動する範囲を固定して，その範囲に到着するジョブはすべてその 1 つのクレーンで処理するものとして，Slot の分割位置を動的計画法で決定する．第 2 段階では，第 1 段階で割り当てたクレーンとジョブを基に，クレーンの交差を許さないことを条件に，隣のクレーンとジョブの入れ替えをすることによって総作業時間が最短となるような解を探索する．

4.2. 交差可能な場合の解法

本研究では交差可能な場合の総作業時間を求めるために 2 つの解法（解法 A，解法 B）を提案する．解法 A は，交差不可能という条件を緩和した形で，文献[2]と同様に，分割・入れ替えの 2 段階で解く方法である．解法 B は，交差が可能になったことにより，文献[2]のようにクレーンの移動範囲を分割する必要がなくなったことをふまえ，貪欲的にジョブを選択する方法である．

4.2.1. 解法 A

文献[2]の解法と同様に解くが，第 2 段階でジョブの入れ替えを行う際，文献[2]のように隣のクレーンと限定せず，これを任意のクレーン同士で交換できるものとする．また，文献[2]の解法ではジョブの入れ替えを行った時にクレーンが交差をしない場合のみジョブの入れ替えを許したが，解法 A ではクレーンの交差が可能なので，ジョブの入れ替え時に注意する点は，同一時刻に同じ Slot で複数のクレーンが処理しないことである．

4.2.2. 解法 B

全てのクレーンに対して，そのとき未処理のジョブを処理し終わる時刻を各ジョブについて算出する．（クレーン数）×（未処理のジョブ数）個の中で最も小さい値を持っているジョブとクレーンの組合せで処理する．ただし，ジョブとクレーンの組合せを取り入れる際，そのクレーンの時間をジョブ処理終了時刻まで進行させる．そして，次に未処理のジョブの処理終了時刻を算出するときには，その進められた時刻の後に処理するものとして算出する．この作業をすべてのジョブの処理が終わるまで続けることで総作業時間が短いと期待される解を構成する．

5. 数値実験

5.1. 実験概要

Slot 数 10 と 40 で到着時刻と到着 Slot をランダムに与えたジョブを 100 個生成する．クレーン 3 台で全てのジョブを処理し終える総作業時間を求める．ただし，1 つのジョブ処理に掛かる時間は $H = 3$ で一定とし，また Slot 間の移動時間は $d_{hi} = |\beta_i - \beta_h|$ で与える．

このような条件の下で，文献[2]の解法と提案する解法（解法 A，解法 B）について，全てのジョブの処理が終了する時刻（総作業時間）を求めて比較する．

プログラムは Borland 社の Delphi6 で作成した．

5.2. 実験結果・考察

文献[2]の解法と提案する解法（解法 A，解法 B）における数値実験の結果を表 5.2.1，表 5.2.2 に示す．ただし，表中の「比 A」は文献[2]の総作業時間に対する解法 A の総作業時間の比であり，「比 B」も同様，文献[2]に対する解法 B の比である．数値実験の結果より以下のことが分かった．

解法 A において，文献[2]の解法の条件を緩和した形なので，解の悪化はほとんど見られないものの総作業時間の改善も大きいものではないことが分かる．

解法 B による総作業時間の短縮は 20 回中 3 回観察されたが，平均的にみると，解法 B の精度は十分でないことが分かる．

本研究で取り上げた「交差」がどのような場合に起こるか考える．ある時点で 2 台のクレーン（クレーン A，クレーン B）が隣接している際に，クレーン A が処理中であり，クレーン B の，クレーン A を挟んだ反対側に未処理のジョブ i が存在したとする．その場合，ジョブ i を処理するために, クレーン B がクレーン A を越えて移動することで交差が起こると考えられる. そのため, Slot 数が増えるとクレーンが隣接している可能性は減るので，交差が起こる可能性も減る．これは比 A や比 B を Slot 数 10 と 40 で比べると，解法 A も解法 B も Slot 数 40 の方の平均が大きな値を取っていることからも分かる．

表 5.2.1 数値実験結果 (Slot 数：10)

実験番号	文献[2]	解法 A	比 A	解法 B	比 B
1	120	110	0.917	113	0.942
2	111	110	0.991	125	1.126
3	122	111	0.910	121	0.992
4	125	124	0.992	126	1.008
5	117	112	0.957	128	1.094
6	118	119	1.008	126	1.068
7	118	112	0.949	116	0.983
8	111	111	1.000	119	1.072
9	120	120	1.000	125	1.042
10	123	122	0.992	127	1.033
平均	118.5	115.1	0.972	122.6	1.036

表 5.2.2 数値実験結果 (Slot 数：40)

実験番号	文献[2]	解法 A	比 A	解法 B	比 B
1	146	146	1.000	160	1.096
2	149	149	1.000	167	1.121
3	125	125	1.000	143	1.144
4	125	125	1.000	132	1.056
5	150	150	1.000	164	1.093
6	151	148	0.980	166	1.099
7	216	216	1.000	223	1.032
8	227	227	1.000	245	1.079
9	467	467	1.000	471	1.009
10	475	475	1.000	475	1.000
平均	223.1	222.8	0.998	234.6	1.073

６．まとめ

6.1. 結論

本研究では，ヤードクレーンの「交差可能性」に着目し，交差可能な場合とそうでない場合で総作業時間にどの程度の差が現れるかという問題を扱った．そのため，まず，交差可能な場合の定式化を行い，解法（解法 A，解法 B）を提案した．ただし，比較の対象である交差不可能な場合の解法には文献[2]のものを用いた．次に，各解法（文献[2]，解法 A，解法 B）についてプログラムを作成して数値実験を行った．この結果，文献[2]の数値と比べて，解法 A，解法 B 共に数値の大きな改善は見られず，ヤードクレーンが交差可能になることによってもたらされる総作業時間の改善効果はあまり大きくないということが分かった．

6.2. 今後の課題

本研究では，ジョブの処理時間 H は一定とし，到着時間や到着 Slot はあらかじめ分かっているものとして問題を解いた．より現実に近い状況を扱うためには， 積み降ろす Row や Tire によって作業時間 H を変化させ，到着したジョブをリアルタイムで把握してクレーンに割り当てることが必要となるが，これらは今後の課題である．

主要参考文献

[1]星野智史,太田順,篠崎朗子,橋本英樹:“港湾物流搬送システムのためのコンテナ蔵置計画とエージェント行動即設計”，第 17 回 自律分散システム・シンポジウム,pp.75-80（2005）

[2]W.C.Ng：“Crane scheduling in container yards with inter-crane interference”, European Journal of Operational Research 164,pp.64-78 (2005)

[3]柳浦睦憲,茨木俊秀:「組合せ最適化-メタ戦略を中心として-」,朝倉書店（2001）