

コンテナ埠頭における荷役施設配置の最適化

稲村 肇*・Senathirajah SRITHARAN**
・Noel Regaspi VILLAMOR***

前日に決定される船舶の着岸位置に対し、クレーンやトレーラーの配置を合理的かつ迅速に決定することは重要である。本研究はバンコック港のコンテナ埠頭を例として、ラグランジュ緩和法によるDPを用いたクレーンの最適配置およびそれに対応するトレーラーの配置法について述べている。手法の妥当性はシミュレーションによって確かめられた。本研究は開発途上国のさまざまな港に関して適用可能である。

Keywords : port planning, dynamic programming, container handling, resource allocation

1. 本研究の背景と目的

タイのように港湾施設の十分でない発展途上国においては限りある荷役施設を効率的に使用する必要がある。特に、現在多くの港湾で最も重要な施設となっているコンテナ埠頭において、クレーンやトレーラーといった施設配置の決定は港湾管理の最も重要な要素となっている。従来からこのような意思決定は、①専門家の経験による判断、②簡単なシミュレーションに基づく判断、③待ち行列理論による解析解、によってなされてきた。しかし、このような決定は日々、短時間の間に行わなければならない。シミュレーションでは時間と費用がかかりすぎる。待ち行列理論では多くの単純な仮定を設けなければならない。現実と離れてしまう。

この問題に数理計画の最適化手法が適用されてこなかった理由は以下の3点に集約される。

- ① 荷役施設はその数も種類も多く、それぞれに制約が生じる。
- ② 船舶の到着時刻や、取り扱いコンテナ数が前日までわかっていない。
- ③ 貨物の荷役は多段階の連続的過程である。

本研究ではこのような問題に対し、ラグランジュ緩和法によるダイナミック・プログラミングを適用し解決を図る。なお、最適化過程の妥当性をチェックするためシミュレーションも試みた。研究の目的は以下のようにまとめられる。

(a) モービルクレーン、船上クレーン、トレーラーといった荷役施設の最適配置を決定するためにダイナミック・プログラミングによるモデルを構築する。

(b) シミュレーションを使ってDPと結果を比較しモデルの妥当性をチェックする。

(c) バンコック港のコンテナ埠頭にモデルを適用し、実際の調査結果と比較する。併せて現システムの効率を評価する。

2. 従来の研究

(1) 港湾モデル

港湾管理の評価を行うに際し、数理モデルは重要な役割を果たしている。港湾の評価モデルで最も一般的なものはシミュレーションである。Baron³⁾ (1978) はヴェネゼラ港の開発に際し地域港湾戦略モデルを開発した。ここでは貨物の荷役費用が重要要素として考えられ、①港湾施設と設備の固定費用、②貨物荷役の直接費用、③船舶の滞船費用、の3者が考慮されている。このモデルは、後にFrankel (1981) によって改良された。Wong *et al.*¹³⁾ (1983) はターミナルの分析、設計、評価モデルを開発した。このモデルは計画・設計のためのモデルであり、荷さばき用のエプロン、野積場、ゲート等における待ち行列を考慮してターミナル運営を解析している。Al-Kazily²⁾ (1983) は複数のコンテナターミナルの荷役の生産性に関して研究を行った。彼は国家レベルで荷役の効率を考え、各ターミナルの取扱いコンテナ数、貨物量を推計した。

Baunach *et al.*⁴⁾ (1985) はインドネシアのバタン島の石炭埠頭の計画において離散的事象のシミュレーションを適用した。このモデルは港湾のほとんどすべての管理・運用を包含している。Frankel⁷⁾ (1987) は不確実性をもつ需要量におけるコンテナターミナルの最小投資費用を得るためにダイナミックプログラミングを適用した。これは、港湾管理者の意思決定を援助するためである。Van Hee *et al.*¹¹⁾ (1988) は港湾の意思決定支援システムを作った。このシステムは3つのサブモデルを

* 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市青葉区荒巻青葉)

** 工修 アジア工科大学 土質・交通学科

*** 工修 アジア工科大学 土質・交通学科

もっている。すなわち、(a) 上屋や埠頭の規模の決定、(b) 労務と設備の必要量の決定、(c) 労務の時間的配分の決定。このシステムは、新規コンテナターミナルの意思決定過程の支援のためのものであり、Van Hee and Wijbrands¹²⁾ (1988) によって拡張された。Inamura *et al.*¹⁵⁾ (1989) は非常に混雑した港湾に関し、岸壁の容量、ストック地域の面積、荷役の効率等を考慮してその限界的容量を検討している。

(2) 最適配分モデル

Luss⁹⁾ (1984) は多種の生産物需要をさばく施設の決定論的多期間拡張計画のためのダイナミック・プログラミングのアルゴリズムを開発した。このモデルはおのおのの施設ユニットが個々の生産物の需要ロットに対して同時にサービスが行われることを仮定している。Aknic¹¹⁾ (1985) は活動の構成の決定と個々の多活動を許す施設の配置問題を同時に考慮した。ここでは施設の建設と活動に要する固定費用を考慮している。Zufryden¹⁴⁾ (1986) はスーパーマーケットの整数個の棚に置くべき商品の最適配置を決定するために DP を適用している。ここでは空間の弾力性、販売費用、市場の潜在需要を考慮している。Cavalier and Jeya Chandra⁵⁾ (1986) は多空港間の航空機の運営に関し乗務員の最適配置モデルを提案している。乗務員の休息のための航空機の待ち時間を最小化するために、ここでは非線形計画法でモデル化し、ヒューリスティック・アルゴリズムでこれを解いている。Hansen and Giauque⁸⁾ (1986) は本研究で扱うような多要素の空間的ダイナミックプログラミングに関する基本的アルゴリズムを開発し、線形、非線形の目的関数を容易に扱えるようにした。

3. 最適化システムの基本構造

コンテナターミナルにおいては、荷役、輸送、保管等多くの機能が存在する。これらの機能は次の2つのプロセスに分割される。

- (a) 船舶と岸壁の間の貨物の揚げ積み。
- (b) 岸壁から埠頭内あるいは埠頭外の保管施設への輸送。

いま、問題は両過程に対するおのおのの荷役・輸送施設の最適配置を見出すことである。一般に港湾においては、ピーク時を満たすほどの数のクレーンをもっておらず、またクレーンにはさまざまな大きさがあることである。一方、トレーラーはその価格が安いいため十分な数が存在しているが、バンコックのような開発途上国の港湾においてはストック施設内の混雑により過大の供給は効率低下を招く。一般的な施設の配置問題の最適化は先にみたようにダイナミックプログラミングによるモデル化が多くなされているが、このような制約や、荷役が連続している過程を解く問題の研究はなされていない。本研

Table 1 Average Handling Rate of Cranes.

		Average Handling Rate (TEU/Hour)				
Ship Type (Capacity-TEU)	Crane Type	Type of Operation	>1200	1199-900	899-600	<599
			Mobile-Gantry (185 T)	Loading	12	14
	Unloading	16	18	20	20	
Mobile-Derrick (150 T)	Loading	10	12	14	14	
	Unloading	12	14	16	16	
Mobile-Derrick (80 T)	Loading	0	0	10	10	
	Unloading	0	0	12	12	
Ship Gear	Loading	16	18	20	22	
	Unloading	20	22	24	26	

究においては、これらの制約をラグランジュ乗数法を DP⁶⁾ に適用することによって解決を図る。これで得られたクレーン数を所与とし陸上輸送のためのトレーラーの配置を定めることにより、荷役の連続性に関する整合性は保たれる。本システムは既存施設の最適配置のみならず新規施設の導入に関する評価にも適用し得る。

(1) 船舶とクレーンの種類

コンテナは一般に、フルコンテナ船、セミコンテナ船、一般貨物船の3種の船によって輸送される。一般にはフルコンテナ船が最も大きく、一般貨物船が最も小さい。コンテナを揚げ積みするためのクレーンには次の4種がある。

- ① 岸壁のガントリクレーン
- ② モービルクレーン
- ③ ガントリクレーン (SHIP GEAR)
- ④ デリッククレーン (SHIP GEAR)

クレーンの荷役効率はクレーンの種類、大きさおよび揚げる場合と積む場合によって異なる。表-1はバンコック港における実態調査(7日間24時間調査を行った)の結果から求められた船型別クレーンの種類別の平均効率の一例である(なお、バンコック港には岸壁のガントリクレーンはない)。

(2) クレーンの最適配置

一般にコンテナターミナルは多数のバースをもっている。ここではまず、バース別の船舶の大きさを設定し、次にクレーンの種類と数を考える。いま

- N : バースに到着している船舶の総数
- L : 利用可能なクレーンの種類数
- X_j : 種類 j のクレーンの総数 ($j=1, 2, \dots, L$)
- x_{ij} : 船舶 i に配分された種類 j のクレーン数 ($i=1, 2, \dots, N$)
- $r_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iL})$: 船舶 i に種類 1 のクレーンを x_{i1} , 種類 2 のクレーンを x_{i2}, \dots 割り当てた場合に要する費用。

たとえばある数のコンテナの荷役に要する時間の最小化を図れば、目的関数および制約式は以下のとおり。

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N r_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iL}) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^N x_{ij} = X_j \quad (j=1, 2, \dots, L) \dots\dots\dots (2)$$

これはクレーンが1種類の場合は最も単純なDP問題となる。ここで式(2)は一般的には不等式となるが、ここでは r が x に関する単調減少関数であるため等式とできる。いま L より小なる数の K 個のラグランジュ乗数 $\lambda_j(j=1, 2, \dots, K)$ を導入すれば、上記の問題は式(3)、(4)のように書き直せる。

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N r_i(x_{i1}, \dots, x_{iL}) - \sum_{j=1}^K \lambda_j \left(\sum_{i=1}^N x_{ij} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^N x_{ij} = X_j \dots\dots\dots (4)$$

ここでラグランジュ乗数を任意に $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K$ と置けば上記の問題は $(L-K)$ 次のDPを解けば良いことになる。いま簡便のために $(L-K)=1$ とすれば、これは単純な一次元のDPとなり、簡単に解ける。このラグランジュ乗数は反復収束法により改訂され、最適解を求めることができる。

クレーンの効率は船舶の大きさに依存しているため、おのおののバースに対する各種のクレーンの効率がまず設定される。本研究では3種類のモービルクレーンが考慮されるため、三次元のDPで定式化される。おのおののバース i における費用(所要時間)は以下の式により計算される。ここで、クレーンの遊休コストは償却費用として考えているため一定として考慮していない。

$$r_i(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}) = NC_i / \sum_{j=1}^3 MR_{ij} \cdot x_{ij} \dots\dots\dots (5)$$

NC_i : 船舶 i で揚げ積みされるコンテナの数
 MR_{ij} : 船舶 i に対しクレーン j を使った場合の効率(クレーンの荷役能力)

x_{ij} : 船舶 i が割り当てられるクレーン j の数
 シップギアが併用される場合も同様に次式で決定される(これを一般型とする)。シップギアを使用しない場合は $SR_i=0$ 。

$$r_i(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}) = NC_i / \left\{ \left(\sum_{j=1}^3 MR_{ij} \cdot x_{ij} \right) + SR_i \right\} \dots\dots\dots (6)$$

SR_i : 船舶 i のシップギアの荷役効率
 この場合、費用 r_i の単位は時間であり、ある数のコンテナを揚げ積みするために、あるクレーンの組合せを与えた場合の所要時間となっている。所要時間の最小化問題は時間当たりの荷役数の最大化問題ともなる。

スペースの制約から1隻の船舶に割り当て可能なクレーン数には上限がある。過大な割り当ては荷役効率の低下を招く。船舶 i の上限を Y_i とすれば、制約式は以下のように表せる。

$$x_{i1} + x_{i2} + x_{i3} < Y_i \dots\dots\dots (7)$$

ここでは船舶の大きさを考慮して Y_i を3とした。この条件は一次元DPを解く場合の状態数に対応すると

いう意味で重要であり、クレーンの種々の組合せに関し考慮される(これが4になると演算時間は約3倍となる)。

三次元DPは2つの任意のラグランジュ乗数を導入することにより、一次元のDPへと変換される。一次元のDPを解くたびに新しくラグランジュ乗数が改訂される。この反復過程は最適解が得られるまで繰り返される。

(3) トレーラーの最適配置

もし要請を満たすだけのトレーラーを保有しており、また保管施設において十分な荷役施設をもっていれば各バースに必要なだけのトレーラーを配置し、それを最適解として求めれば良い。しかし先に述べたように開発途上国の港湾においてはピーク時に間に合うような十分な陸上施設が存在しないためこの面から、投入トレーラー数に制約が生じる。以下の計算過程は、最適なクレーンの配置が決定された後になされる。

a) バース側の制約

バース i において扱われる時間当たりのコンテナ数 TN_i (TEU)と必要とされるトレーラーの数 TR_i は次式で与えられる。

$$TN_i = \sum_{j=1}^3 (MR_{ij} \cdot x_{ij}) + SR_i \dots\dots\dots (8)$$

$$TR_i = \frac{1}{2} CY_i * \left[\sum_{j=1}^3 (MR_{ij} \cdot x_{ij}) + SR_i \right] / 60 \dots\dots\dots (9)$$

ここで CY_i はバース i におけるトレーラーの岸壁からストック地までの往復時間、すなわちサイクルタイム(分単位)である。これには岸壁と保管施設における最少の荷役時間が含まれている。ここで、トレーラーはすべて40フィート(実際もそうである)と仮定され、1台のトレーラーは2TEUのコンテナを輸送するとする。したがって1時間当たり、全バースで必要とされるトレーラーの数 TTR は次式で表せる。

$$TTR = \frac{1}{120} \sum_{i=1}^N \left[CY_i * \sum_{j=1}^3 (x_{ij} \cdot MR_{ij}) + SR_i \right] \dots\dots\dots (10)$$

b) 陸上施設側の制約

ここで陸上側の混雑を考えたバース i に投入可能な最大トレーラー数を考える。投入可能トレーラー数は、①岸壁での混雑、②保管施設での混雑、③輸送経路での混雑、によって制限される。

①に関しては式(10)の値を越えない限りは満足される。②は当該バースに対応する各保管施設の状況に依存して変化し、サイクルタイムをそのまま増加させる。③は輸送経路におけるダンゴ現象等の不確実性によるものであり、一般に輸送時間の長さに依存する。すなわち②を考慮したうえでのサイクルタイムに対しての最小車頭間隔を考慮すれば良いことになる(③は平均輸送時間に反映される)。これらを考慮した投入可能最大トレーラー

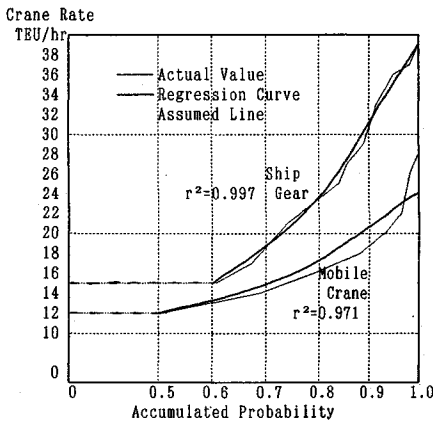


Fig.1 Exponential Regression of Crane Rate.

数は式 (11), (12) で与えられる.

$$NT_i = (CY_i + SD_i) / HW_i \dots\dots\dots (11)$$

$$HW_i = f(CY_i) = a + b CY_i \dots\dots\dots (12)$$

ただし,

NT_i : パース i への最大トレーラー投入台数.

CY_i : 平均輸送時間 (岸壁での荷役時間を含む)

SD_i : 保管施設での平均遅れ時間 (保管施設における荷役能力に依存するがここでは所与とする)

HW_i : 最小車頭間隔

a, b : 定数

ここで, 1時間当たりの延べトレーラー台数 ANT_i は式 (13) で表せる.

$$ANT_i = 60 / (CY_i + SD_i) * NT_i = 6 / HW_i \dots\dots\dots (13)$$

各パースに割り当てられる最大延べトレーラー数は式 (10) と式 (13) の両者の最小値として決定される. このときの各パースへのトレーラーの割当て数は式 (11) により計算される.

(4) シミュレーションによる割当ての決定

ここでは DP による配分結果の妥当性 (最適性) を判断するためにシミュレーションモデルを作成した. シミュレーションにおいては DP のときと異なり, クレーンの効率とトレーラーのサイクルタイムに関し確率分布を導入している.

a) クレーンの効率

図-1 はバンコック港における実態調査に基づく実績値と回帰分析の結果を示したものである. ここでは実際の荷役実績を考慮し, 確率分布関数のおよそ 0.5 以下に関しては最小荷役効率を仮定し, およそ 0.5 以上に関して指数回帰分析を行っている. 破線は分布型の連続性を考慮したものである.

モービルクレーン:

Table 2 The Berth Utilization Status.

DATE	25th NOV		26th NOV		27th NOV		28th NOV		29th NOV		30th NOV		1st DEC		2nd DEC	
TIME	12	18	00	06	12	18	00	06	12	18	00	06	12	18	00	06
Berth No																
20 A																
20 AB																
20 B																
20 C																
20 D																
20 E																
20 F																
20 G																
22 A																
22 C																
22 D																
22 F																

$$= 4.66 e^{1.65RN} \quad (RN > 0.573) \left. \begin{aligned} & \\ & = 12 \quad (RN < 0.573) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

相関係数=0.971

シップギア:

$$= 3.33 e^{2.45RN} \quad (RN > 0.614) \left. \begin{aligned} & \\ & = 15 \quad (RN < 0.614) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

相関係数=0.997

RN: 一樣乱数

b) トレーラーのサイクルタイム

トレーラーのサイクルタイムに関しては実際の観測値に基づいて平均値と標準偏差 (10分:一定とする) を定め, 正規分布を仮定した. 最小車頭間隔 HW に関しては実績値より, 式 (16) の結果が得られた.

$$HW = 1.316 + 0.0114 CY \dots\dots\dots (16)$$

4. バンコック港のケーススタディー

(1) バンコック港の概要

バンコック港はチャオプラヤー川の河口から 26~29 km 遡った川の左岸にある. この港では, パース割当ては当日の朝, 最終的に決定される. ある種の優先パースはあるものの, ファーストカム・ファーストサーブド政策が原則となっている. コンテナ船は原則として東埠頭, 雑貨船は西埠頭の扱いとなっている. コンテナパースは 9パースだが修理等で現在使えるのは 7パースである. 表-2 はパースの使用状況であり, 7パースのパース占有率は 85.8% と非常に高い.

コンテナ化は輸出を中心に急速に進展しており, 近年の成長率は 15~20% に達している. 代替港がなくバンコック市の中心にあり地域が限られていることから, 港湾管理者は円滑なコンテナ扱いのため管理運営上の各種の改善を要請されている. それらはクレーン配置の合理化, トレーラー配置の合理化, 荷役過程の連続性の確保, 保管地域の整備, それに必要な施設の導入, さらには空コンテナの在庫管理, 維持・修繕, 文書手続きの合理化等である. 本研究はこれらの問題の解決のために計画された.

(2) データの収集と計算条件

この最適化システムはバンコック港をケーススタディーとして開発された. システムに必要なデータは,

Table 3 Information on Vessels and Containers.

NA	NS	NCL	NCU	SGL	SGU	NM	NCY
2	950	322	562	14	20	L	18
3	970	707	284	14	20	U	30
4	1490	642	407	0	0	U	10
5	1410	387	204	0	0	L	30
6	630	65	124	0	0	L	20
7	1330	82	147	14	20	U	20

Table 4 Mobile Crane Rates.

Crane Type	Type of Operation	Ship Size			
		1	2	3	4
1	L	10	12	14	14
	U	16	18	18	20
2	L	10	12	12	14
	U	16	16	16	18
3	L	0	10	12	14
	U	0	12	14	14

バンコック港の各種統計および1週間の24時間調査によって収集された。観測された船舶は32隻、コンテナ個数は11356個、うち約1/3が40ftコンテナであり、14876 TEUであった。船舶の平均在港時間は48時間、申告ベースの1隻当たりの平均揚積量は657.5 TEUであった。1隻当たりの平均トレーラー投入数は揚げ荷が19台、積み荷が17台程度である。ばらつきが大きく一概には言えないが一般的には、昼間は交通混雑のためコンテナが岸壁でトレーラーを待ち(平均14分)、夜間はトレーラーがクレーンの荷役を待っている(平均待ち時間15分)状態である。

これらを含め設定された条件は以下のとおり。

- 岸壁数: 7バース
 - 船舶到着岸壁数: 6バース
 - 積み荷の岸壁数: 3バース
 - 揚げ荷の岸壁数: 3バース
 - クレーンの種類: 3
 - 船舶の大きさ: 4種類
 - クレーン台数 (165t): 2台
 - クレーン台数 (150t): 4台
 - クレーン台数 (80t): 6台
 - 利用可能トレーラー数: 40台
- 表-3にはケーススタディーに使用された船舶およびそれに関連する情報が示されている。ここで、
- NA: バース番号
 - NS: 船舶の大きさ (DWT)
 - NCL: 取扱いコンテナ数 (積み荷)
 - NCU: 取扱いコンテナ数 (揚げ荷)
 - SGL: シップギアの効率 (積み荷)
 - SGU: シップギアの効率 (揚げ荷)
 - NM: 揚げ積み状況 (積みがL, 揚げがU)
 - NCY: 当該船のトレーラーのサイクルタイム
- 船型別 (ただし1: <600 TEU, 2: <900 TEU, 3: <1200 TEU, 4: 1200 TEU), クレーンの大きさ別 (1,

Table 5 Optimal Allocation of Cranes.

Number of Berth	2	3	4	5	6	7	Total
No. of Containers to be Handled	322	284	467	387	65	147	
Cranes to be Allocated	Type1	0	0	2	0	0	2
	Type2	0	0	1	3	0	4
	Type3	2	2	0	0	2	6
Expected No. of Containers to be Handled	38 /h	48 /h	58 /h	42 /h	20 /h	20 /h	226 /h

Table 6 Optimal Allocation of Trailers.

Berth Number	2	3	4	5	6	7	Total
Required No. of Trailers	11	7	12	10	6	3	49
Allocated No. of Trailers	6	7	10	8	6	3	40

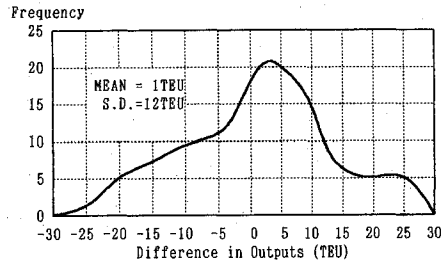


Fig.2 Variation of Difference of Outputs.

2, 3), 揚げ (U: unloading) 積み (L: loading) 別、クレーンの効率が表-4に示されている。

(3) 計算結果

a) ダイナミックプログラミング

DPによるクレーンの配分結果が表-5に示されている。これによればバース4および5には最大数である3台が配分されている一方、シップギアをもち、かつ扱いコンテナ数が少ないバース7には1台もクレーンが配分されていない。表-3と表-4の数値を用いれば、クレーンの最適配置を行った場合のバース別のコンテナ取扱量が計算される。最大はバース4の58 TEU/hであり、最小はバース6, 7の20 TEUで、1時間当たりの総取扱可能量は226 TEUとなる。

b) DPとシミュレーションの比較

結果を評価するために式(14), (15)で設定したクレーンの効率とトレーラーのサイクルタイムの分布を乱数で定めたシミュレーションとの比較を行った。表-6はクレーン配置から定まる適正トレーラーの配分数と、利用可能なトレーラーの数を40に制限した場合の最適配分数の比較を示している(バンコック港のシャシー台数は、管理者が78台、民間業者が100台以上保有しており埠頭上にはシャシーがあふれている。ここではトレーラーの最適配置を知るためにこのように数を制限した結果を考察した)。1000回のシミュレーションとDPの結果(最適値: 186 TEU/h)との比較が図-2に示されている。分散は大きいものの平均値との差は非常に小さくモデルの妥当性を示している。このときのクレーン

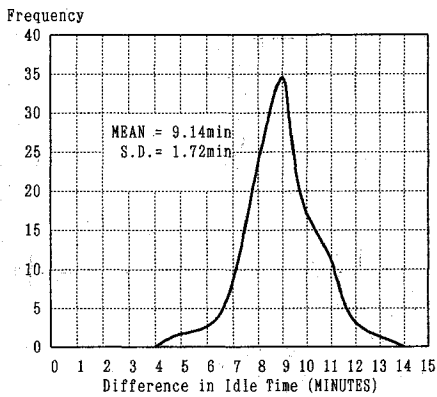


Fig.3 Variation of Difference in Idle Times of Crane.

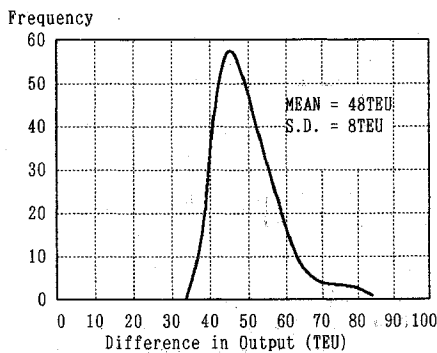


Fig.4 Variation of Difference of Output (The result of DP-Actual TEU handled).

のアイドルタイムの分布が図-3に示されている。これによればシミュレーションにおける平均値は9.14分、すなわち、総荷役時間の15%程度である。またレンジは4から14分、標準偏差は1.72分程度であった。

c) DPと実績値の比較

図-4はDPの結果とバンコック港の取扱実績を比較したものである。バンコック港の実績は計算結果を平均で48 TEUも下回っている。これは上記のようなクレーンの最適配置がなされていないのみならず、実際の港湾内の昼間の交通混雑により、トレーラーが到着せずクレーンにシミュレーション結果を大きく上回るアイドルタイムが生じていることを示している。

5. 結論と今後の展望

本研究で得られた結論は以下のようにまとめられる。

(1) 本研究で開発されたシステムはどの国のコンテナターミナルでも、バース数、コンテナ船の種類、クレーン(モビルクレーンの場合)やトレーラーの種類や数に関係なく適用が可能である。またこのシステムはパーソナルコンピュータで10分程度の演算で解が求まるため、実用に供せると考える。

(2) クレーンの最適配置に関するダイナミックプログラミングのシステムの妥当性は1000回のシミュレーションで確かめられた。結果の差は平均値が1 TEU、標準偏差が12 TEU、レンジが-30から+30であり、標準偏差は取扱量186 TEUに対して7%弱と十分小さい。

(3) バンコック港の取扱実績はDPの結果を35から85 TEU下回っている。平均は48 TEU、標準偏差は8 TEUである。これはバンコック港の現在のオペレーションが最適値の60.5%の効率でなされていることを意味している。

(4) 本研究ではクレーンの配置とトレーラーの配分を2段階で最適化しているが、これはもちろん理論的には最適解を与えない。最適解を求めるためには両プロセスの同時最適が必要とされるがそれは著しく難しい。しかし、ケーススタディーの結果、本モデルが実用的には十分使用できる精度をもつことがわかった。

(5) ここでは多次元ダイナミックプログラミングが2つのラグランジュ乗数と1つの外部制約式を用いて解かれた。この演算はきわめて能率良く解かれたが、ラグランジュ乗数を増加させて試算した結果、乗数の数が4を越える場合には計算時間が著しく増加することがわかった。したがって、結論①においてクレーンは4種類が限界である。

(6) 今後の課題としては荷役プロセスの2段階同時最適化の解決が挙げられよう。

参考文献

- 1) Aknic Umit: Multi-Activity Facility Design and Location Problems, Management Science, Vol.31, No.3, 1985.
- 2) Al-Kazily Joan: Productivity at Marine-Land Container Terminal, Transportation Research Record, 907, 1983.
- 3) Baron Paul: Regional Port Strategy Model, Transportation Research, Vol.3, 1978.
- 4) Baunach, G. R., Wibberley, E. S. and Wood, B. R.: Simulation of Coal Transshipment Terminal: Batam Island Indonesia, Mathematics and Computers Simulation, No.27, 1985.
- 5) Cavalier, T.M. and Jeya Chandra, M.: A Heuristic Algorithm for Assigning Crews Among Bases in an Airlift Operation, Journal of the Operational Research Society, Vol.37, No.4, 1986.
- 6) Dreyfus Stuart E. and Averill M. Law: The Art and Theory of Dynamic Programming, Academic Press, New York, 1977.
- 7) Frankel, E.G.: Port Planning and Development, John Wiley & Sons, New York, 1987.
- 8) Hansen, V. and Giaque, C. W.: Task Allocation in Distributed Processing Systems, Operations Research Letters, Vol.5, No.3, 1986.
- 9) Luss, H.: Capacity Expansion Planning for a Single Facility Production Line, European Journal of Operations Re-

- search, 18., North Holland, 1984.
- 10) Noel R. Villamor: Modelling and Simulation of Port Operations, A.I.T. Thesis, Bangkok, Thailand, 1988.
- 11) Van Hee, K.M., Hitink, B. and Leegwater, D.K.: PORTPLAN: Decision Support System for Port Terminals, European Journal of Operations Research, 34., North Holland, 1988.
- 12) Van Hee, K.M. and Wijbrands, R.J.: Decision Support System for Container Terminal Planning, European Journal of Operations Research, 34., North Holland, 1988.
- 13) Wong, J.P., Grant, R. A. and Curley, G.R.: TANDEM: Marine and Rail Container Terminal Simulation Model, Transportation Research Record, 907, 1983.
- 14) Zufryden, S.F.: A Dynamic Programming Approach for Product Selection and Shelf Space Allocation, Journal of the Operational Research Society, Vol.37, No.4, 1986.
- 15) Inamura, H., Tabata, T., Sato, S. and Sritharan, S.: Determination of The Capacity of A Highly Saturated Port, The Fifth World Conference on Transport Research, B545, Yokohama, 1989.

(1991. 1. 12 受付)

OPTIMAL ALLOCATION OF HANDLING EQUIPMENT IN A CONTAINER TERMINAL USING DYNAMIC PROGRAMMING WITH LAGRANGIAN RELAXATION APPROACH

Hajime INAMURA, Senathirajah SRITHARAN
and Noel Regaspi VILLAMOR

The need for optimal allocation of handling equipment in a terminal with the aid of computer is widely recognized since container handling has a complex procedure and many decisions have to be made every day by day. Most of the research works have been carried out to meet this requirement by using either the queuing theory or simulation, however, the former needed simplification of the problem whereas the latter is time consuming and costly. A computer based system was developed with the application of multi-dimensional dynamic programming in order to determine the optimal allocation of handling equipment. The validity of the system was checked by both the computer simulation and the actual data at the port of Bangkok.