コンテナターミナルにおける搬出入作業の考察

正員 渡 辺 逸 郎*

The Analysis on Receiving/Delivering of Containers in Terminals

by Itsuro Watanabe

Summary

Sea-side operations between containerships and wharf apron in container terminals are usually well-organised based upon the scheme of unloading/loading in before-hand. Accordingly, it is relatively easy to estimate the required number of container-handling equipment to support quay-side container-cranes.

On the other hand, land-side operations for receiving/delivering of containers to/from yards through gates are very difficult to make the scheme in before-hand, as the operations are strongly affected by factors which are generally out of control to terminal operators, such as shippers'/consignees' intentions, conditions of road-transport, etc.. Accordingly, the estimate on the required number of handling equipment to perform the operations is very difficult in general. This point is analysed based upon the queueing methods for several cases in combinations of arrival patterns of road-hauliers' trucks with the index of accessibility of containers stacked in yards, for both operations using straddle-carriers and rubber-tyred-gantries, in the paper.

As the result of analysis, recommendable required number of container-handling equipment is summarised in Table 1.

コンテナターミナルにおける本船と岸壁間の海側荷役は、ストウェジブラン等の事前に得られた情報により作成されるコンテナ陸揚・船積計画により行われるので、その作業に必要なコンテナクレーン、及びそれをバックアップするヤード荷役機器の台数・荷役能率についての理論的な考察も容易である。そのため、これまでにこの問題に対して、多くのシミュレーションや分析が行われている。従って、その所要台数も事前に比較的容易に決定できる。これに対して、コンテナの内陸との授受、即ちコンテナの搬出入作業は、その授受の日時が荷主の意向、道路事情等で左右されコンテナターミナル自体で事前計画を立てることが極めて難しい。従って、その搬出入作業を主体とする陸側荷役に必要ヤード荷役機器の所要台数については、その作業がこれらターミナル外の要因によって発生するため、

理論的考察が難しく経験的な取扱いに留まっているのが現状である。

本論文は、この搬出入作業に必要なヤード荷役機器の台数について、ストラドルキャリア（以下、SCと略す）及びトランスファクレーン（以下、TCと略す）の2方式につき、公道用トラックの到着率をパラメータとして待ち行列の理論により、考察を試みたものである。

1. 考察の前提条件

1.1 SC方式

SC方式では、一般に Fig. 1 に示す通り、ゲートハウスからターミナル内へ進入した公道用トラックは、マーシャリングヤード手前にあるインターチェンジスロット（トランスファポイントともいう）に駐車して、SCによるコンテナ搬出入作業を待つことになる。このため、ターミナルには複数のインターチェンジスロットが用意されている。このとき、SCは公道用トラックの到着順に荷役作業を行うから、インターチェンジスロットの数ではなくSCの台数 s を窓口とする待ち行列の問題として取扱うことができる。

* コンテナシステムテクノロジ

ここで、公道用トラックがインターチェンジスロットにポアソン到着するとし、SCの搬出入作業時間（サービス時間）分布を単位分布とすれば、 $M/D/s(\infty)$ の待ち行列の問題となる。また、このときのSCの搬出入作業のサイクルタイム（サービス時間 $1/\mu$ ）は次の通りである。

$$1/\mu = t_1 + t_2/S \quad (1.1)$$

ここで、

t_1 : マーシャリングヤード中心からインターチェンジスロットまでの走行時間と公道用トラックとの荷役時間（分）

t_2 : マーシャリングヤードにおける荷役時間（分）

S : マーシャリングヤードにおけるコンテナ積段数による取出率¹⁾

1.2 TC方式

TC方式では、ゲートハウスからターミナルへ進入した公道用トラックは、マーシャリングヤードへ進んで、ゲートで指示された位置に駐車して、TCによるコンテナ搬出入作業を待つことになる。このとき、一般にこの近傍にあるTCがその駐車位置に移動して、その搬出入作業を行うことになる。従って、このTCの担当区域に駐車している公道用トラックに対しては、原則として到着順に荷役を行うことになる。しかし、別のTCの担当区域に駐車している公道用トラックのマーシャリングヤードへの到着順とは、全く無関係である。これは、TCの台数を m 台とすると、窓口 m の待ち行列と考えられる。しかし、各窓口は全く独立の単一窓口である。従って、公道用トラックがマーシャリングヤードへポアソン到着し、その到着率を λ とし、TCの荷役サイクルタイム（サービス時間 $1/\mu$ ）分布を単位分布

とすると、各TCに対しては $M(\lambda/m)/D/1(\infty)$ の待ち行列となる。このとき、TCの搬出入のサイクルタイム（サービス時間 $1/\mu$ ）は、次の通りとなる。

$$1/\mu = t_1 + t_2/S \quad (1.2)$$

ここで、

t_1 : 各TCの担当区域の中心から公道用トラック駐車位置までの平均走行時間（分）

t_2 : 公道用トラックとの荷役時間（分）

S : マーシャリングヤードにおけるコンテナ積段数による取出率

2. 公道用トラックの平均列待ち時間及び台数

以上の前提により、SC及びTCの各方式について、次の各ケース毎にヤード荷役機器の投入台数と公道用トラックの平均列待ち時間（ W_q : 分）及び平均列待ち台数（ L_q ）の関係を求める。

・公道用トラックの到着率 λ は、次の4ケースとする。

$\lambda=0.4$ (台/分) 1日8時間, 年287日(土曜日半休),
20' と 40' が TEU 比で 1:1 とすると, 年 73, 472 TEU と
なる。

$\lambda=0.8$ (台/分) 年 146, 944 TEU

$\lambda=1.2$ (台/分) 年 220, 416 TEU

$\lambda=1.6$ (台/分) 年 293, 888 TEU

・マーシャリングヤードの地形を、岸壁平行方向に 300 m, 直角方向に 200 m の直方形とする。

・SCのサイクルタイム

インターチェンジスロットがマーシャリングヤード外部 300 m の辺の中央部に隣接するとみて、各サイクル毎の平

Fig. 1 Model Layout for Straddle Carrier System

Fig. 2 Allocated Territories of Rubber-Tyred Gantries in Marshalling Yard(In case of 4RTGs)

均走行距離は $2 \times (75 \text{ m} + 100 \text{ m})$ となる。SC の速度を $10 \sim 11 \text{ (km/時)}$ とすると、平均走行時間は 2 分となる。公道用トラックへの荷役、マーシャリングヤードでの荷役時間をそれぞれ 0.5 分、1 分とする。

従って、 $1/\mu = 2.5 + 1/S$ (分)

・ TC のサイクルタイム

TC の公道用トラックへの荷役時間を 2.5 分とする。Fig. 2 に示す通り、 TC_m 台は $300 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ を m 等分した区域の中心に位置し、公道用トラックの駐車位置までの平均距離を 90 m/分 の速度にて移動する時間を計算する。このとき、TC は走行と横行を行うから、この操輪に要する時間を計 0.5 分とする。この結果、そのサイクルタイムは台数 m に応じて、次の通りとなる。

$m=1$	$1/\mu = 3.28 + 2.5/S$
$=2$	$= 2.44 + 2.5/S$
$=3$	$= 2.17 + 2.5/S$
$=4$	$= 1.89 + 2.5/S$
$=5$	$= 1.72 + 2.5/S$
$=6$	$= 1.61 + 2.5/S$
$=7$	$= 1.53 + 2.5/S$
$=8$	$= 1.47 + 2.5/S$
$=9$	$= 1.43 + 2.5/S$
$=10$	$= 1.39 + 2.5/S$

・ 取出率 S は、SC 方式では 1 及び 2～3 段積を考慮して 0.7 及び 0.6 の 3 ケース、TC 方式では 1 及び 2～4 段積を考慮して 0.7, 0.6, 0.5 の 4 ケースを選定した。輸出コンテナの搬出荷役では、概してリハンドリングがないから、 $S=1$ と考えてよい。輸入コンテナの搬出荷役では段積みしたコンテナの中から所定のコンテナを取出すことが多いから、一般に $S=0.7 \sim 0.5$ と考える。

以上の各ケースにつき、公道用トラックの平均列待ち時間 (W_q 分) 及び平均列待ち台数 (L_q) を計算した。ここで、TC 方式での公道用トラックの L_q は各区域の計算から得た値に TC の台数 m を乗じたもの、即ちマーシャリングヤード全体での平均列待ち台数を求めた。

λ の各ケース毎に取出率 S と平均列待ち台数 L_q との関係をもとめて Fig. 3 に、取出率 S と平均列待ち時間 W_q との関係をもとめて Fig. 4 に図示する。また、各取出率 S 毎に到着率 λ と平均列待ち台数 L_q との関係をもとめて Fig. 5 に図示する。

3. ヤード荷役機器所要台数の考察

ここで、サービス時間 (荷役作業サイクルタイム) を単位分布で考えたが、これが指数分布、アーラン分布の場合を考察する。TC 方式では、 $M(\lambda/m)/M_{or}E_k/1(\infty)$ となる。サービス時間が指数分布のときの平均列待ち台数及び待ち時間は単位分布のときのそれぞれの値の 2 倍となる。従って、アーラン分布のときは単位分布のそれぞれの値の $1 \sim 2$

となり、次数 k の増加に従って、この値は 1 に近づく。SC 方式では、 $M/M_{or}E_k/s(\infty)$ となる。 $M/M/s(\infty)$ について試算すると、単位分布の各値の 2 倍以下の数値となる。これから、サービス時間を単位分布としても実用上は差支えないといえよう。

Fig. 3 及び 4 をみると、搬出入作業に同数のヤード荷役機器を投入すれば、SC 方式が TC 方式より有利といえる。SC 方式では取出率 S が 0.7 から 0.6 になると、また、TC 方式では S が 0.6 から 0.5 になると、平均列待ち台数及び待ち時間が急激に増加する。また、Fig. 5 によれば、取出率が悪くなると平均列待ち台数は到着率の増加により急激に増加するようになる。

Fig. 3 及び 4 から、搬出入の陸側作業に必要なヤード荷役機器の台数を考察する。この場合、確率的に搬出入コンテナのうち、取出率 $S=1$ の輸出コンテナの搬入と取出率 $S=1 \sim 0.5/0.6$ の輸入コンテナの搬出が、ほぼ等しいと考えて良い。勿論ある時間帯には、そのいずれかに偏ることも起こり得るが、このときは以下述べる一般的なヤード荷役機器の台数に対して、応急的に荷役機器を追加する等の対応が必要になることはいうまでもない。

SC 方式の $\lambda=0.4$ (台/分) の場合、2 台でも S の如何に拘わらず、すなわち如何なる積段数でも、平均列待ち台数及び待ち時間は 1 台又は 1 分以下であるから 2 台配備で十分といえる。 $\lambda=0.8$ の場合、 $S < 1$ すなわち輸入コンテナの搬出が続く場合、3 台では明らかに台数不足になるから、如何なる S に対しても平均列待ち台数及び待ち時間が 1 台又は 1 分以下である 4 台を配備すれば良いであろう。 $\lambda=1.2$ の場合、搬入コンテナに対しては 5 台配備でよいが、 $S=0.6$ の搬入コンテナに対しては不十分である。かといって 6 台を配備すれば余裕がありすぎるので、5.5 台の配備が適当であろう。 $\lambda=1.6$ では、 S の如何なる値でも平均列待ち台数及び待ち時間が 1 台又は 1 分以下である 7 台の配備で良いと考えられる。SC 方式では、SC の台数と平均列待ち台数の和が、インターチェンジの所要スロット数になる。

一方、TC 方式の $\lambda=0.4$ の場合、 $S=0.5$ の状態の積段でコンテナの搬出が続くと平均列待ち時間が 1 分を越す場合も起こるが、このような事態が起こる確率は極めて低いから、3 台配備で良いであろう。 $\lambda=0.8$ の場合、5 台では $S \leq 0.5$ の輸入コンテナの搬出には不足すると考えられる。かといって 6 台では十分すぎるから、5.5 台配備が適当といえよう。 $\lambda=1.2$ の場合、4 段積 ($S=0.5$) のときは待ち台数及び待ち時間が若干大きくなるが、配備された 8 台全部にこれが起こる頻度は稀と考えられるから、8 台配備で良いであろう。 $\lambda=1.6$ の場合、9 台では $S=0.6$ で平均列待ち台数は 48 台、待ち時間は約 30 分になってしまい台数不足となる。 $S=0.5$ のとき、若干の台数不足が起こるかも知れないが、TC の配備台数が多いので、作業のやりくりにより、

Fig. 3 The Index of Accessibility (S)—The Expected Number of Trailers in Queue (L_q)

Fig. 4 The Index of Accessibility(S)—The Expected Time of Trailers in Queue(W_q)

Fig. 5 The Arrival Rate of Trailers(λ)—The Expected Number of Trailers in Queue(L_q)

Table 1 Total Number of Yard-Use Equipment SC and TC Operational Systems

No. of Container Cranes	No. of Equipment Sea-Side		Reach Rate of Trailers λ (Tr./min.)				
			0.4	0.8	1.2	1.6	
1	SC	3.5	5.5	7.5	9	10.5	
	TC	2	5	7.5	10	12	
2	SC	7	9	11	12.5	14	
	TC	4	7	9.5	12	14	
3	SC	10.5	12.5	14.5	16	17.5	
	TC	6	9	11.5	14	16	
4	SC	14	16	18	19.5	21	
	TC	8	11	13.5	16	18	
5	SC	17.5	19.5	21.5	23	24.5	
	TC	10	13	15.5	18	20	
6	SC	21	23	25	26.5	28	
	TC	12	15	17.5	20	22	
No. of Yard-Use Equipment Land-Side			SC	2	4	5.5	7
			TC	3	5.5	8	10

10 台配備で対応できるであろう。以上の考察から、TC 方式ではその配備台数が、SC 方式に比し、取出率 S すなわちコンテナ積段数によりより大きく影響されることが明らか

であるから、TC 方式においては輸入コンテナは $S \geq 0.6$ となる 3 段積以下にすべきであろう。

海側荷役では一般にコンテナクレーン 1 台当たり、SC 方式では 3~4 台、TC 方式では 1~2 台を配備している。コンテナクレーン 1 台当たり SC は 3.5 台、TC は 2 台として、これと上述の陸側荷役作業に必要なヤード荷役機器の所要台数とを組合わせたものが Table 1 である。SC 方式では、海側荷役に TC 方式より多くの台数を必要とし、陸側荷役では TC 方式より少ない台数で良いからこの組合わせは興味ある結果となる。コンテナクレーンが 1 台の場合には、SC 方式と TC 方式のヤード機器台数に余り差がなく、かえって SC 方式の台数が少なくすむケースが多い。コンテナクレーンが 2 台以上の場合で、その数が多くなるほど、TC の台数が SC の台数より少なくなることが判る。

参 考 文 献

- 1) 渡辺逸郎：コンテナターミナルにおけるコンテナの取出しに関する考察，日本造船学会論文集，第 171 号 (1992)，pp. 263~269