

超大型船寄港ターミナルでのヤード配置計画に及ぼすコンテナ取扱量の影響*

Effects of Container Throughput on Yard Storage Planning in the Terminal where Mega-containerships Call **

西村悦子**・今井昭夫***
By Etsuko NISHIMURA **・Akio IMAI ***

1. はじめに

コンテナ取扱量の急激な増加とその傾向が期待される中、アジア-欧州間を中心に、積載容量10,000TEUを越える超大型船が就航している。文献14)によると、2006年に登場した、EMMA MAERSK や ESTELLE MEARSK を始めとし、2008年現在で22隻がそれにあたる。当該船舶のうち、寄港地での滞在時間に関わる情報を調べると、MAERSKの情報が一部公開されている⁹⁾。そこでまず、表1に示す一航海での地域別寄港地数をみる。中国と日本は国別で示すが、中国内の港湾への寄港が多く、文献9)によると、東南アジア方面に行く前に同一港湾を複数回寄港するケースが示されている。また日本への寄港は2隻あり、文献9)から寄港地が横浜と名古屋であるのがわかる。次に、表2に一寄港地での滞在時間を示す。なお、本船の荷役作業以外の時間も含んでいる。北米港湾は、最短でも4日程度と他地域より極端に長く、荷役作業以外の目的での滞在が長いことが想像できる。平均値から、中国、中東が20時間前後、欧州で1日程度、日本は10時間程度と北米を除く他地域の半分程度であることから、荷役コンテナ数自体が少ないことが想像できる。また標準偏差より、滞在時間のばらつきは中東や欧州は寄港地によって大きく様々であるのに対し、日本のそれは小さく、横浜と名古屋に寄港する2隻の荷役個数は、ほぼ同数であると言える。

そこで次に、実績の荷役コンテナ数や投入岸壁クレーン(QC)数が確認できないため、超大型船の担当QC数を3、5、7基、コンテナ1個当たり1.5分かかると仮定して、荷役個数がどの程度であるかを概算したのが表3である。極端な事例である北米を除外して考え、投入台数を多く見積って5基や7基使用したとしても、中国4000弱～5000強、中東は4000強～6000弱、東南アジアは6000強～8000弱、欧州は5000強～7000弱、日本は2000弱～3000弱と最も取扱が少ないのが分かる。また文献9)より、いずれのケースも、航路ネットワークは超大型船導入前の大型船

表1 地域別の寄港地数

船名	中国	日本	東南ア	中東	欧州	北米
EDITH	4				4	
ELEONORA	6			1	5	
ELLY	7			2	4	
EMMA	7			1	5	
ESTELLE				1	6	
EUGEN	7			1	4	
EVELYN	7			2	1	
MARCHEN	5	2	1			1
MAREN	2		1	1		1
MARGETHE	2		2	3	5	
METTE	5	2	1	3	4	1
平均	4.7	0.4	0.5	1.4	3.5	0.3
平均(無寄港地域除く)	5.2	2.0	1.3	1.7	4.2	1.0

表2 一寄港地での滞在時間

単位：時間	中国	日本	東南ア	中東	欧州	北米
最短	9.0	9.0	25.4	3.0	6.3	90.0
最長	40.5	10.5	36.6	64.5	69.1	98.4
平均	18.6	9.6	31.3	21.4	24.7	95.3
標準偏差	6.7	0.7	5.1	15.0	10.2	4.6

表3 (概算)超大型船担当QC数と荷役コンテナ数

単位：個	中国	日本	東南ア	中東	欧州	北米
3基	2,236	1,146	3,758	2,568	2,966	11,431
5基	3,727	1,910	6,263	4,280	4,943	19,052
7基	5,218	2,674	8,769	5,991	6,920	26,673

コンテナ1個当たりの荷役時間を1.5分と仮定。

のものとはほぼ同様であることが確認できた。本来、超大型船の導入効果は、寄港地数を現状より減らし、1寄港地での荷役コンテナ数を増やすことで、コンテナ1個あたりのコストを抑えることにある。これはハブ・アンド・スポーク型の輸送形態がより強調されることを意味するが、現状の航路ネットワークは従来サイズの大型船の代替となっているに過ぎず、効果を見出せていない。従来サイズの大型船の寄港を想定した1寄港地での取扱量の場合と、超大型船の寄港を想定し寄港地を集約して1寄港地の貨物量を増やした場合では、それぞれに対する他の各種パラメータによる影響度合いが異なると考えられる。

そこで本研究では、当該港湾での取扱いの中心がフィーダー船との間でのトランシップ貨物になることを前提に、各地域で貨物が集約された場合と、実績と同程度の場合を想定し、トランシップ貨物を超大型船とフィーダー船の間で、効果的に接続できるよう、コンテナヤードへの配置計画を検討する。

* キーワード：ターミナル計画、港湾計画

** 正会員 工博 神戸大学大学院准教授 海事科学研究科
(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1,
TEL / FAX : 078-431-6258, E-mail : e-nisi@maritime.kobe-u.ac.jp)

*** 正会員 工博 神戸大学大学院教授 海事科学研究科
(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1,
TEL / FAX : 078-431-6261, E-mail : imai@maritime.kobe-u.ac.jp)

2. 現状の寄港スケジュールと荷役手順

実績の超大型船とフィーダー船の寄港スケジュールの詳細は調査中で、明らかでないため、従来サイズの船の情報によると、従来の方式では、大型船の寄港に合わせるようにフィーダー船は寄港し、大型船積載予定のコンテナは、当該船の到着前にヤードに一時保管され、当該船の陸揚げ、船積みの順で作業し、当該船は出港する。

またフィーダー船に積載予定のコンテナは、大型船と同様に、当該船の到着前にヤードに一時保管されている。つまり、互いの積載予定コンテナは、それらが到着前にヤードに一時保管済みで、当該船の揚げ作業終了後に積載される。従って、特定の大型船からの揚げコンテナを積むフィーダー船、および大型船に積載予定コンテナを運んで来るフィーダー船は異なることが多く、この場合には作業手順上、トランシップ貨物か、ローカル貨物かを区別する必要はない。具体的にはいずれかの船に積載予定のコンテナは、ヤード内積みエリアに保管され、内陸からの輸出用ローカル貨物とともに船に積載される。

しかしながら、一度の取扱が膨大になるであろうトランシップコンテナの荷役作業を考えると、ターミナルに滞留中のコンテナをなるべく早くターミナル外に出し、別のコンテナを受け入れる仕組みを検討されるべきである。したがって、超大型船と特定のフィーダー船間での揚げ積み両方の作業を実施するケースも増加する。しかし1章で述べたように、現時点ではそのような取扱貨物量に至っていないのが現状である。

また一般的な荷役作業に関する事項は次のようになる。

- ・各船の荷役順序：揚げ作業後に積み作業を開始する
- ・各船の担当QC数とブロック利用：荷役コンテナ数に依存し、同時期に作業するQCに割当てられたヤードクレーン（YC）やトレーラーの作業が干渉し合わないように、QC毎に異なるブロックを利用する。
- ・コンテナ取扱：船への積み付け時の荷繰り作業や船の安定性を維持できるように、積載予定船ごとに仕向け地と重量区分で保管される。

3. 既往の研究

本研究に関連する既往の研究は、以下のものがある。Kozan and Preston⁷⁾はコンテナ保管とYCの荷役順序を決定要素とし、遺伝的アルゴリズム利用した解法を考案している。Kim and Kim³⁾は輸出コンテナを対象に、1隻分のみを計画対象としたYCの荷役コスト最小化モデルを構築している。Kim and Bae²⁾は船の滞在時間短縮のため、コンテナ保管位置とYCの作業割当と作業順を決定している。他に、Kim and Kim⁴⁾、Kim et al.⁵⁾およびKim and Park⁶⁾では、輸出コンテナを対象に、荷繰り回数や再割

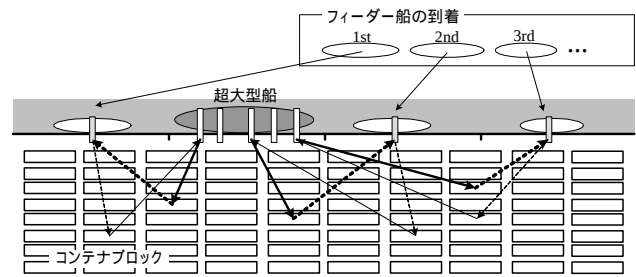


図1 問題範囲の概念

当数を最小化して保管位置を決定している。Zhang et al.¹³⁾では、係留位置と保管場所間の距離が短くなるように、計画期間の各ブロックに保管されるコンテナ数を決定している。またPetering et al.¹²⁾ではシミュレーションモデルで、ヤード内の保管ブロックサイズとブロック間でYCの制御システムによって、QCの1時間あたりの作業回数の変化を調べている。Lee et al.⁸⁾では、輸出・トランシップコンテナを対象に、船からヤードまでの揚げ作業のみを考慮したYCの移動最小化問題を扱っている。Han et al.¹⁾では文献8)の問題にヤードから船への積み作業時間を考慮し、タブサーチにより解を得ている。

既往の研究を整理すると、コンテナの取扱いにはコンテナ単位と複数コンテナから成るグループ単位があり、前者のものに対し、YC移動距離や荷繰り回数最小化しているものが多い。また後者を対象に、本船の滞在時間最小化を目的に、1隻のみが計画対象にしたものがあり、一定期間の複数船を計画対象としたものはない。そこで先行研究¹¹⁾には、超大型船からフィーダー船への一方のみを対象にコンテナ配置計画を検討しているが、一般に本船滞在時の荷役には、揚げ作業と積み作業があり、一方の荷役のみを実施して出港することはない。そこで本研究では両方の荷役を考慮した配置計画を検討する。

4. 本問題の概要

ここでは2. で紹介した現状の荷役作業に対するモデルの範囲について述べ、定式化を説明する。

(1) モデル化の範囲

図1は4バースから成るターミナルを示し、超大型船とフィーダー船の係留、複数コンテナから成るコンテナブロックを示す。コンテナヤードを通過するトランシップ貨物には図中の矢印方向の移動があり、超大型船とフィーダー船間で両方向のフローを対象とする。対象コンテナは船への積み付け順序の調整のため、一旦ヤードに必ず保管されることとする。

各船への積み付け作業は、当該船の陸揚げ作業が完了してから行える。また問題の単純化のため、フィーダー船の担当QC数は1基のみとし、コンテナの取扱いは、フィーダー船毎に1コンテナグループとして扱い、各グループに属するコンテナは1コンテナブロック内に収まる

ものとする。

超大型船とフィーダー船はそれぞれ、自船の揚げ作業後に積み作業開始されるが、揚げ作業が終了しても、他船からのコンテナがヤードに到着済みでなければ、ヤードに保管されるまで待ち、積み作業を開始する。

(2) 問題の定式化

まず本問題の定式化に使用するパラメータと変数を示し、次に定式化を示す。

○ パラメータ

$i (=1, \dots, NQ) \in QC$	超大型船担当のQC番号
$p (=1, \dots, NB) \in BT$	フィーダー船の係留バース番号
$j (=1, \dots, NV) \in V$	フィーダー船の船番号
$l (=1, \dots, NP) \in YP$	ヤード内のコンテナブロック番号
VL	非常に大きい数値
K_j^{MY}	船jのコンテナグループの荷役を行うQCの、超大型船からヤードまでの揚げ作業順
$NT_{jj'}^F$	フィーダー船jが船j'の次に到着なら1、そうでなければ0
$NT_{jj'}^{YM}$	ヤードから超大型船への積み作業で、船jのコンテナが船j'のコンテナの次に実施されるとき1、そうでないとき0
Q_{ij}^{MY}	超大型船からヤードへQC iがフィーダー船jのコンテナを荷役するとき1、そうでないとき0
Q_{ij}^{YM}	ヤードから超大型船へQC iがフィーダー船jのコンテナを荷役するとき1、そうでないとき0
R_{pj}	フィーダー船jがバースpに係留されるとき1、そうでないとき0
A_M	超大型船の到着時刻
A_j	船jの到着時刻
$C_{B(i)l}^{MY}$	超大型船担当のQCの位置B(i)からヤードブロックlへのフィーダー船jの荷役作業時間
$C_{B(i)l}^{YM}$	ヤードブロックlから超大型船担当のQCの位置B(i)へのフィーダー船jの荷役作業時間
C_{pl}^{YF}	ヤードブロックlからバースpへの、フィーダー船jの荷役作業時間
C_{pl}^{FY}	バースpからヤードブロックlへのフィーダー船jの荷役作業時間

○ 変数

x_{jl}^{MY}	超大型船からやってくるフィーダー船jのコンテナがヤードブロックlに保管されるとき1、そうでないとき0である0-1の整数変数
x_{jl}^{FY}	フィーダー船jからやってくるコンテナがヤードブロックlに保管されるとき1、そうでないとき0である0-1の整数変数
x_{jl}^*	超大型船もしくはフィーダー船jからやってくるコンテナがヤードブロックlに保管されるとき1、そうでないとき0である0-1の整数変数

f_{jl}^{MY}	超大型船からやってくる、船jに積載予定コンテナに対するヤードブロックlへの保管完了時刻
f_{jl}^{FY}	フィーダー船jのコンテナに対するヤードブロックlへの保管完了時刻
b_{jl}^{YM}	ヤードブロックlに保管される船jのコンテナに対する超大型船への船積み開始時刻
b_{jl}^{YF}	ヤードブロックlに保管されるコンテナに対するフィーダー船jへの船積み開始時刻
$\alpha_{ljj'}^{MF}$	超大型船からのコンテナjとフィーダー船からのコンテナj'が同一ヤードブロックlに保管されるとき1、そうでないとき0である0-1整数変数
$\alpha_{ljj'}^{FM}$	フィーダー船jからのコンテナと超大型船からのコンテナj'が同一ヤードブロックlに保管されるとき1、そうでないとき0である0-1整数変数

○ 本問題の定式化

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \sum_{i \in QC} \sum_{j \in V} \sum_{l \in YP} (C_{B(i)l}^{MY} Q_{ij}^{MY} x_{jl}^{MY} + C_{B(i)l}^{YM} Q_{ij}^{YM} x_{jl}^{FY}) + \\ & \sum_{i \in QC} \{ \sum_{j \in V} \sum_{l \in YP} Q_{ij}^{YM} b_{jl}^{YM} - \sum_{j' \in V, l' \in YP} Q_{ij'}^{YM} (b_{j'l'}^{YM} + C_{B(i)j'l'}^{YF} x_{j'l'}^{FY}) \} NT_{jj'}^{YM} + \\ & \sum_{p \in BT} \sum_{j \in V} \sum_{l \in YP} R_{pj} (C_{pl}^{FY} x_{jl}^{FY} + C_{pl}^{YF} x_{jl}^{MY}) + \sum_{p \in BT} \sum_{j \in V} \sum_{l \in YP} R_{pj} (b_{jl}^{YF} - f_{jl}^{FY}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \sum_{l \in YP} x_{jl}^* = 1 \quad \forall j \in V, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{jl}^* \leq 1 \quad \forall l \in YP, \quad (3)$$

$$x_{jl}^{MY} \leq x_{j'l}^{FY} + (1 - \alpha_{ljj'}^{MF}) VL \quad \forall j, j' (< j) \in V, l \in YP, \quad (4)$$

$$f_{j'l}^{FY} \leq b_{jl}^{YM} + (1 - \alpha_{ljj'}^{MF}) VL \quad \forall j, j' (< j) \in V, l \in YP, \quad (5)$$

$$x_{jl}^{FY} \leq x_{j'l}^{MY} + (1 - \alpha_{ljj'}^{FM}) VL \quad \forall j, j' (< j) \in V, l \in YP, \quad (6)$$

$$f_{j'l}^{MY} \leq b_{jl}^{YF} + (1 - \alpha_{ljj'}^{FM}) VL \quad \forall j, j' (< j) \in V, l \in YP, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} f_{jl}^{MY} \leq & (A_M + C_{B(i)l}^{MY} Q_{ij}^{MY}) x_{jl}^{MY} + \sum_{j' \in V, l' \in YP} \frac{\max\{K_j^{MY} - K_{j'}^{MY}, 0\}}{K_j^{MY} - K_{j'}^{MY}} \\ & \times C_{B(i)j'l'}^{MY} Q_{ij'}^{MY} x_{j'l'}^{MY} + VL(1 - x_{jl}^{MY}) \end{aligned} \quad \forall j \in V, l \in YP, i \in QC, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} f_{jl}^{FY} \leq & \max\{(A_j + C_{pl}^{FY}) R_{pj} x_{jl}^{FY}, (b_{j'l'}^{YF} + C_{pl}^{YF} x_{j'l'}^{MY}) R_{pj'}\} NT_{jj'}^F \\ & + VL(1 - x_{jl}^{FY}) \quad \forall j, j' (< j) \in V, l \in YP, p \in BT, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{jl}^{YM} \leq & \max\{f_{jl}^{FY}, (b_{j'l'}^{YM} + C_{B(i)j'l'}^{YM} x_{j'l'}^{FY}) Q_{ij'}^{YM}\} NT_{jj'}^{YM} \\ & + VL(1 - x_{jl}^{FY}) \quad \forall j, j' (< j) \in V, l \in YP, i \in QC, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{jl}^{YF} \leq & \max\{f_{jl}^{MY}, (b_{j'l'}^{YF} + C_{pl}^{YF} x_{j'l'}^{MY}) R_{pj'}\} NT_{jj'}^F + VL(1 - x_{jl}^{MY}) \\ & \forall j, j' (< j) \in V, l \in YP, p \in BT, \quad (11) \end{aligned}$$

$$f_{jl}^{FY} \leq b_{jl}^{YM} \leq VL x_{jl}^{FY} \quad \forall j \in V, l \in YP, \quad (12)$$

$$f_{jl}^{MY} \leq b_{jl}^{YF} \leq VL x_{jl}^{MY} \quad \forall j \in V, l \in YP, \quad (13)$$

$$x_{jl}^{MY}, x_{jl}^{FY}, x_{jl}^* \in \{0, 1\} \quad \forall j \in V, l \in YP, \quad (14)$$

$$\alpha_{ljj'}^{MF}, \alpha_{ljj'}^{FM} \in \{0, 1\} \quad \forall j, j' \in V, l \in YP, \quad (15)$$

$$b_{jl}^{YM}, b_{jl}^{YF}, f_{jl}^{MY}, f_{jl}^{FY} \geq 0 \quad \forall j \in V, l \in YP, \quad (16)$$

目的関数(1)は、超大型船の揚げ作業、積み作業開始までの待ち、積み作業終了し出港するまでの時間、およびフィーダー船揚げ作業、積み作業開始まで待ち、積み作業終了し出港するまでの時間の合計の最小化を示す。積み作業開始を待つ時間は、当該船の揚げ作業終了後、コンテナの一時待機と見ることができ、揚げ作業時間+一時待機+積み作業時間=コンテナのターミナル滞在時間となる。そのため、超大型船滞在に関わる全コンテナの滞在時間を最小化する。

制約式(2)は超大型船やフィーダー船からヤードにやってくる各コンテナグループは、1ヶ所のヤードブロックに保管される。式(3)は各ブロックには超大型船やフィーダー船からのコンテナグループが1つまで保管できる。

制約式(4)と(5)は、超大型船からのコンテナグループとフィーダー船からのコンテナに滞在時期が重ならなければ、同一ブロックの利用可能を意味する。式(4)の詳細について述べる。船*j*と*j'*のコンテナが同一ブロック*l*を利用するとき変数 $\alpha_{ijj'}^{MF} = 1$ となり、左辺=右辺=1となる。また反対に、一方が当該ブロック*l*を利用したり、両者ともに当該ブロック*l*を利用しない場合、変数 $\alpha_{ijj'}^{MF} = 0$ となり、左辺=0もしくは1、右辺=VLとなり、左辺<右辺となる。次に式(5)は変数 $\alpha_{ijj'}^{MF}$ が1のとき、ヤードから超大型船への船*j*のコンテナ積み作業開始時刻は、フィーダー船*j'*のコンテナのヤード保管完了時刻後

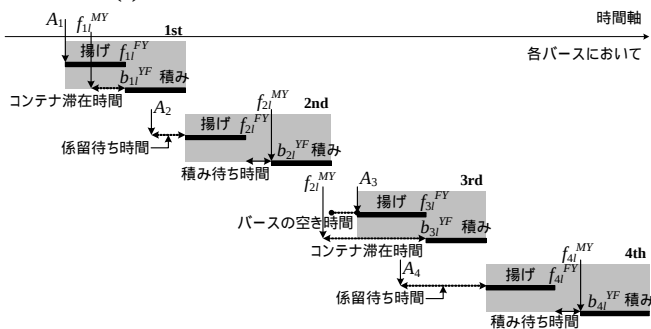
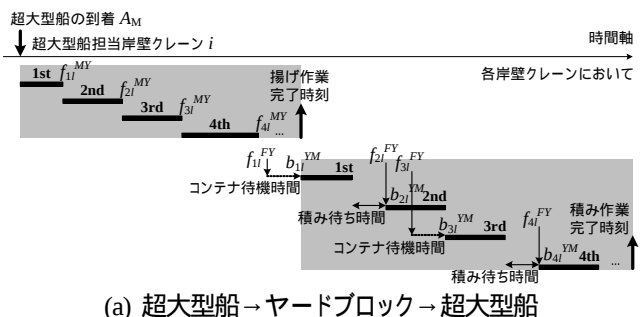


図2 対象船とヤードブロック間の揚げ積み作業のフロー

ヤードブロック番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
超大型船からの船 <i>j</i> 関連のコンテナ番号	7	2	10	3	4	1	9	5	8	6
フィーダー船 <i>j'</i> から 来るコンテナ番号	6	9	5	1	3	2	4	10	7	8

図3 個体表現方法

であることを示す。変数 $\alpha_{ijj'}^{MF} = 0$ のときに左辺=右辺となり、ヤードから超大型船への船*j*のコンテナ積み作業開始時刻は、フィーダー船*j'*のコンテナのヤード保管完了時刻より前でも後でも構わない。

同様に制約式(6)と(7)はフィーダー船*j*からのコンテナと超大型船からのコンテナグループ*j'*の滞在時期が重ならなければ、同一ブロックの利用可能を意味する。詳細説明については、式(6)と(7)は、式(4)と(5)の変数 $\alpha_{ijj'}^{MF}$ を変数 $\alpha_{ijj'}^{FM}$ に置き換えて考えれば良い。

制約式(8)と(13)は、各コンテナグループの超大型船からヤードまでの陸揚げ作業完了時刻を定義する。 $x_{ji}^{MY} = 0$ なら式(8)より $f_{ji}^{MY} \leq VL$ 、式(13)より $f_{ji}^{MY} = 0$ となるため、 $f_{ji}^{MY} = 0$ とすることができる。また $x_{ji}^{MY} = 1$ なら式(8)より $f_{ji}^{MY} =$ 超大型船到着後、当該コンテナグループ*j*の揚げ作業完了時刻を示し、式(13)より $f_{ji}^{MY} < VL$ となることから前者の時刻と定義することが出来る。

制約式(9)と(12)は、フィーダー船からヤードへの陸揚げ作業完了時刻を定義する。 $x_{ji}^{FY} = 0$ なら式(9)より $f_{ji}^{FY} \leq VL$ 、式(12)より $f_{ji}^{FY} = 0$ となるため、 $f_{ji}^{FY} = 0$ とすることができる。また $x_{ji}^{FY} = 1$ なら式(9)より $f_{ji}^{FY} =$ 船到着時刻、または直前の船の出港後、フィーダー船からヤードへの揚げ完了時刻のいずれか遅い方となる。式(12)より $f_{ji}^{FY} < VL$ となるため、前者の時刻と定義することが出来る。

制約式(10)と(12)は、ヤードから超大型船への各コンテナグループの船積み作業開始時刻を定義する。 $x_{ji}^{FY} = 0$ なら式(10)より $b_{ji}^{YM} \leq VL$ 、式(12)より $b_{ji}^{YM} = 0$ となるため、 $b_{ji}^{YM} = 0$ とすることができる。また $x_{ji}^{FY} = 1$ なら式(10)より $b_{ji}^{YM} =$ フィーダー船からヤードへの作業完了時刻、もしくは直前の船*j'*のコンテナの船積み作業完了時刻の遅い方となる。式(12)より $b_{ji}^{YM} \leq VL$ となることから前者の時刻と定義することが出来る。

制約式(11)と(13)は、ヤードからフィーダー船への各コンテナグループの船積み作業開始時刻を定義する。 $x_{ji}^{MY} = 0$ なら式(11)より $b_{ji}^{YF} \leq VL$ 、式(13)より $b_{ji}^{YF} = 0$ となるため、 $b_{ji}^{YF} = 0$ とすることができる。また $x_{ji}^{MY} = 1$ なら式(11)より $b_{ji}^{YF} =$ 超大型船からヤードへの作業完了時刻、もしくは直前の船*j'*のコンテナの船積み作業完了時刻の遅い方となる。式(13)より $b_{ji}^{YF} \leq VL$ となることから前者の時刻と定義することが出来る。

式(12)は超大型船への積み作業開始はフィーダー船からヤードにコンテナの保管完了後であることを意味し、式(13)はフィーダー船への積み作業開始は超大型船からヤードにコンテナ保管完了後であることを保証する。

(3) 目的関数の説明

図2に示す作業のフローを元に、目的関数の説明を行う。式(1)の第1項は超大型船からヤード、ヤードから超大型船への作業時間、図2(a)の太線を意味し、コンテナ

の保管場所 x_{ji}^* に依存する。第2項は超大型船担当QCごとに当該コンテナの積み作業開始時刻と同一クレーンで作業する直前のコンテナの揚げ完了時刻との差、つまり超大型船担当クレーン積み待ち時間を意味する。第3項はフィーダー船からヤード、ヤードからフィーダー船の作業時間、図2(b)の太線を意味し、 x_{ji}^* に依存する。第4項はフィーダー船係留バースごとに積み作業開始時刻と揚げ作業完了時刻との差、つまりフィーダー船の積み待ち時間を意味する。

5. 解法

本問題は、定式化中の制約式が多く、既往研究のように、解の精度が得られる解法で解くことは非常に困難である。そこで、こうした問題に適用が容易である遺伝的アルゴリズムを用いる。

(1) 個体表現方法

図3は本問題の個体表現方法を示している。各船のコンテナグループ番号に対し、超大型船とフィーダー船両方向からの保管場所を示し、ランダムに決定される。なお、揚げ作業開始時刻、積み作業開始時刻を次のアルゴリズムで決定し、もし同一場所に異なる2隻分のコンテナが指定された場合、滞在時間帯が重ならないければ、得られた時刻そのままを目的関数計算に使用し、重なる場合には後発のコンテナの処理開始時刻を後ろへずらす。

(2) 目的関数の計算アルゴリズム

個体表現より、各船の荷役コンテナのヤード内位置情報(x_{ji}^{MY} , x_{ji}^{FY})が決定されるため、以下では位置情報とその他の情報を元に作業開始・完了時刻を決定するアルゴリズムを示す。なおこれは大きく4つに分けられ、で超大型船からヤードへの各コンテナグループの揚げ作業完了時刻、でフィーダー船からヤードへの揚げ完了時刻、ヤードからフィーダー船への積み完了時刻、でヤードから超大型船への積み完了時刻が得られ、では、で得られた時刻より目的関数値を求める。なお、とで使用する変数 f_{st} は、当該クレーンで一番目に処理するなら0、そうでなければ1であると判断するために使用する。またヤード内位置情報は、 $x_{ji}^{MY}=1$ なら $MY(j)=l$ とし、 $x_{ji}^{FY}=1$ なら $FY(j)=l$ として利用する。

超大型船→ヤードブロック

Step1: QC番号 $i=1$ とする。

Step2: $i>$ 超大型船担当クレーン数なら、揚げが完了し積み開始できる時刻を $Lst_i=CT1$ としてへ。コンテナ番号 $j=1$ 、作業順 $k=1$ 、 $f_{st}=0$ とする。

Step3: $j>$ 対象コンテナグループ数なら、QCの積み作業開始時刻を記憶し、Step7へ。

Step4: コンテナ j をQC i が担当、その作業順が k ならStep5へ、そうでなければ、Step6へ。

Step5: コンテナ j のヤードへの揚げ完了時刻(f_{ji}^{MY})を次で求める。 $f_{st}=0$ なら、 $CT1=A_j+C_{B(i)MY(j)}^{MY}$ とし、そうでなければ、 $CT1=CT1+C_{B(i)MY(j)}^{MY}$ とする。 $f_{ji}^{MY}=CT1$ 、 $f_{st}=1$ 、 $k=k+1$ とする。

Step6: $j=j+1$ とし、Step3へ。

Step7: $i=i+1$ とし、Step2へ。

フィーダー船→ヤード、ヤード→フィーダー船

Step1: フィーダー船対象バース番号 $i=1$ とする。

Step2: $i>$ フィーダー用バース数なら、へ。そうでなければ、コンテナグループ番号 $j=1$ 、 $f_{st}=0$ とする。

Step3: $j>$ 対象フィーダー数なら、Step7へ。

Step4: 船 j がバース p に係留なら、Step5へ。そうでなければ、Step6へ。

Step5: 船 j からのコンテナの揚げ作業完了時刻(f_{ji}^{FY})と船 j の積み作業開始時刻(b_{ji}^{FY})を次で求める。

Step5-1: $f_{st}=0$ なら、 $CT2=A_j+C_{pjFY(j)}^{FY}$ 、 $f_{ji}^{FY}=CT2$ 、 $f_{st}=1$ とし、Step5-3へ。そうでなければ、Step5-2へ。

Step5-2: $A_j<CT2$ なら、 $CT2=CT2+C_{pjFY(j)}^{FY}$ 、そうでなければ、 $CT2=A_j+C_{pjFY(j)}^{FY}$ 、 $f_{ji}^{FY}=CT2$ 、 $f_{st}=1$ とする。

Step5-3: $f_{ji}^{MY}<f_{ji}^{FY}$ なら、 $b_{ji}^{FY}=f_{ji}^{FY}$ とし、そうでなければ、 $b_{ji}^{FY}=f_{ji}^{MY}$ とし、 $k=k+1$ として、Step7へ。

Step6: $j=j+1$ とし、Step3へ。

Step7: $i=i+1$ とし、Step2へ。

ヤードブロック→超大型船

Step1: QC番号 $i=1$ 、作業順 $k=1$ とする。

Step2: $i>$ 超大型船担当クレーン数なら、へ。そうでなければ、コンテナ番号 $j=1$ とする。

Step3: $j>$ 対象コンテナ数なら、Step7へ。

Step4: コンテナ j をQC i が担当し、作業順が k ならStep5へ。そうでなければ、Step6へ。

Step5: コンテナ j の超大型船への積み作業開始時刻(b_{ji}^{YM})を次で求める。 $k=1$ および $f_{ji}^{FY}<Lst_i$ なら、 $b_{ji}^{YM}=Lst_i$ とし、 $k=1$ および $f_{ji}^{FY}<Lst_i$ なら、 $b_{ji}^{YM}=f_{ji}^{FY}$ とする。 $k>1$ および $f_{ji}^{FY}<CT3$ なら、 $b_{ji}^{YM}=CT3$ とし、 $k>1$ および $f_{ji}^{FY}<CT3$ なら、 $b_{ji}^{YM}=f_{ji}^{FY}$ とする。 $CT3=b_{ji}^{YM}+C_{B(i)FY(j)}^{YM}$ 、 $k=k+1$ とする。

Step6: $j=j+1$ とし、Step3へ。

Step7: $i=i+1$ とし、Step2へ。

目的関数の計算

Step1: QC番号 $i=1$ 、作業順 $k=1$ 、目的関数 $OBJ=0$ とする。

Step2: $i>$ 超大型船担当クレーン数なら、終了。そうでなければ、コンテナ番号 $j=1$ とする。

Step3: $j>$ 対象コンテナ数なら、Step6へ。

Step4: 割り当てられた作業時間(超大型船→ヤード→フィーダー船、その反対方向)、および各船の積み作業開始までの待ち時間を以下の式で求める。

$$OBJ=OBJ+(C_{B(i)j}^{MY}Q_{ij}^{MY}+C_{B(i)j}^{FY}R_{pj})x_{ji}^{MY}+$$

$$(C_{B(i)jl}^{FY} R_{pj} + C_{B(i)jl}^{YM} Q_{ij}^{YM}) x_{jl}^{FY} + b_{jl}^{FY} - f_{jl}^{MY} + b_{jl}^{YM} - f_{jl}^{FY} \quad (17)$$

Step5: $j=j+1$ とし、Step3へ。

Step6: $i=i+1$ とし、Step2へ。

(3) 遺伝演算とGAパラメータ

遺伝演算とGAパラメータは予備実験の結果、以下のものを設定した。

○ 遺伝演算

選択: トーナメント戦略

交叉: 部分一致交叉 (詳細は文献 10) を参照)

突然変異: 変異率により変異を起こす場合、2つの遺伝子を任意に選択し、交換する。

○ GAパラメータ

個体群サイズ50、突然変異率0.09、世代数5000

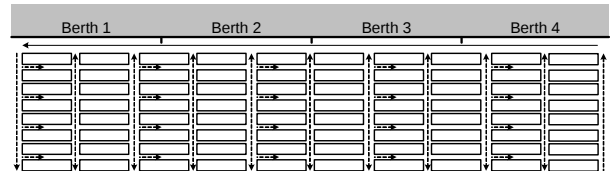
6. 数値実験

(1) 計算実験の概要

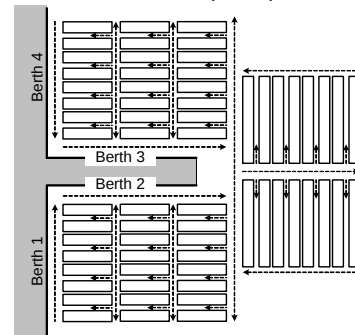
ターミナルの形状は最長移動距離や、利用可能バース数を変化させ、評価指標に大きく影響する。そこで図4に示す2種類を想定し、一直線上に並んだ4バースから成るタイプL、大規模なくぼみに超大型船を係留させて両舷荷役を可能にしたタイプIを考える。タイプLとIでの超大型船担当のQC数はそれぞれ、7基と10基とし、両者の面積・岸壁延長は同一とする。

ターミナルの混み具合をフィーダー船の到着間隔で表現するため、平均到着間隔1時間と2時間の指数分布で生成させる。また超大型船の到着時期の違いは、当該船の到着を待つフィーダー船の増減を意味し、評価指標に影響する。現状での大型船の寄港時期は、それに積載予定コンテナは到着済み (フィーダー船到着分布の後方) である。しかしながら、反対の状況にある、ほとんどのフ

ィーダー船がこれからやって来るケースの実験も行っておけば、どのパラメータが大きく影響するかの判断に使える。そのため、フィーダー船の到着分布に対し、1隻目と最後の船の到着時刻、その間の前から1/3と2/3の4ヶ所に設定した。超大型船およびフィーダー船 - ヤード間の荷役時間は、最短の保管場所でコンテナ1個当たり1.2分と仮定し、荷役個数と移動距離に依存するように文献11)と同様の方法で求め、表4で示すものを与えた。



(a) タイプL (Linear)

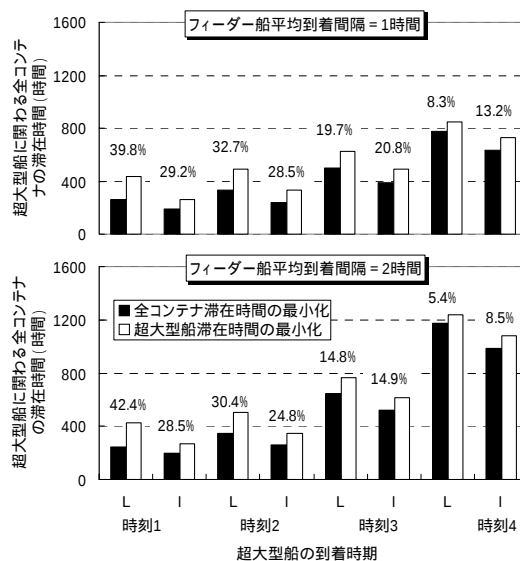


(b) タイプI (Indent)

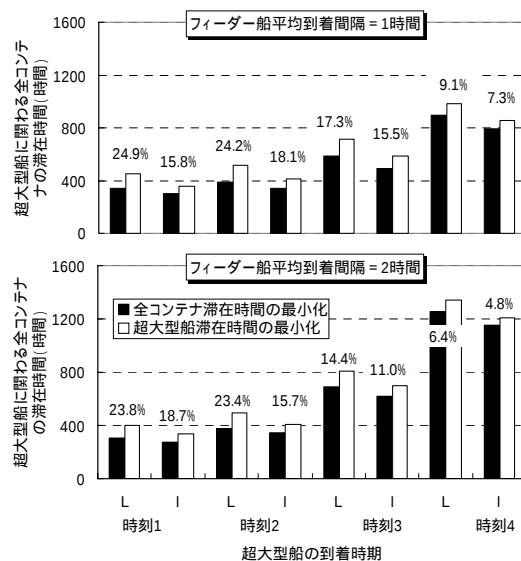
図4 ターミナルレイアウト

表4 荷役時間データ

単位: 時間	最近距離		最遠距離		平均距離	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
超大型船 ~ ヤードブロック						
タイプL	3.0	1.1	9.2	2.7	5.9	2.1
タイプI	3.0	1.1	7.8	2.5	5.5	2.0
ヤードブロック ~ フィーダー船						
タイプL	2.9	1.1	9.0	2.7	5.7	2.1
タイプI	2.9	1.1	7.7	2.5	5.3	2.0



(a) 現状程度の荷役個数 × 2ヶ所寄港



(b) 現状の2倍荷役個数 × 1ヶ所寄港

図5 超大型船に関わる全コンテナの滞滞時間

(2) 計算結果

フィーダー船の到着時刻と荷役時間データを5種類ずつ用意し、各ケース25個の計算結果の平均を求めた。ここでフィーダー船のサービス時間を含むことの効果を見るために、目的関数である超大型船に関わる全コンテナ滞在時間を最小化する と共に、超大型船のみの滞在時間を最小化した場合 での、超大型船に関わる全コンテナの滞在時間、超大型船の滞在時間をそれぞれ図5と6に示す。図中の%は と の差を以下の式で求めている。

$$\text{差}(\%) = (\text{ } - \text{ }) / \text{ } \times 100 \quad (18)$$

なお一度に扱う貨物量の違いを見るために、全体の荷役個数を同一とし、(a)は現状の荷役個数で2ヶ所寄港する場合、(b)は貨物集約を仮定し、現状の2倍の荷役個数で1ヶ所寄港する場合の時間長を示す。また(a)と(b)を比較するために、両者の差を(b)の値で除した、貨物集約での時間延長率を表5に示す。

a) 超大型船に関わる全コンテナ滞在時間への影響

まず目的関数の違いを見ると、いずれのケースも全船の滞在時間を最小化した方が短く、その差は超大型船の到着が早い場合に大きい。これは、超大型船を待つフィーダー船の多さが評価指標に大きく影響しており、超大型船の到着が早く、それを待つフィーダー船が少ないと、待ち時間は保管場所決定に大きく影響され、評価指標の

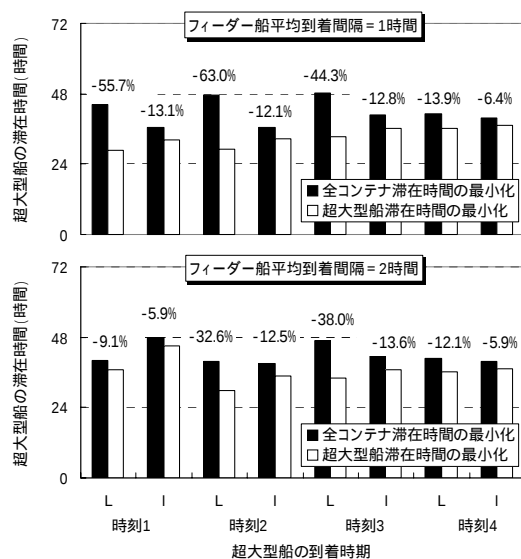
差も大きい。反対の状況下では、待ち時間は超大型船の到着待ちと保管場所決定によるため、超大型船の到着待ちの影響が大きい。評価指標の差が出ていない。

ターミナルの形状で比較すると、いずれのケースもタイプIの時間がタイプLのそれより短い。これはタイプIでの超大型船担当QC数が多く、超大型船の荷役作業が早く済み、また表4からも、荷役時間そのものも若干タイプI が短いためであるといえる。またフィーダー船の到着間隔で比較すると、間隔の長い2時間のサービス時間が長い。これは間隔が延びたことで、フィーダー船の出港待ち時間が延長し、全体的に時間延長になっている。

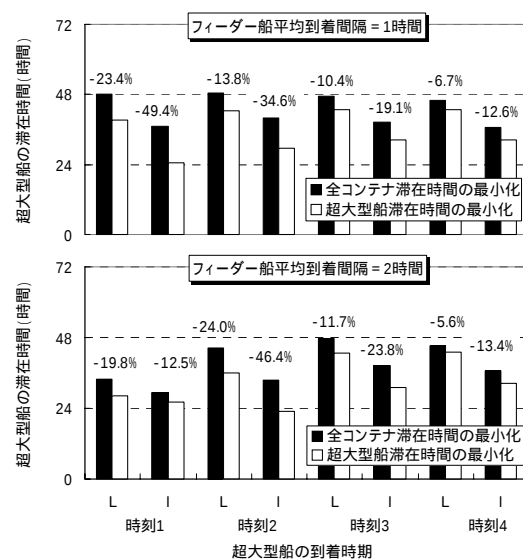
目的関数で比較すると、いずれのケースも負であり、超大型船の滞在時間のみを最小化した方が短い。その差はフィーダー船の到着間隔1時間で超大型船の到着時期に依存し、2時間ではレイアウトの違いでの依存度が高い。1時間のケースで超大型船の到着が早く、超大型船自身がフィーダー船を待つ時間が長いほど差が大きいと言える。時間長は、特にレイアウトによって異なり、QC数の違いと荷役時間長が影響している。

c) 貨物集約と時間延長率

超大型船が一度に扱う貨物の増加は、同時に対象とするフィーダー船の隻数も増えるため時間延長になること



(a) 現状程度の荷役個数 × 2ヶ所寄港



(b) 現状の2倍荷役個数 × 1ヶ所寄港

図6 超大型船の滞在時間

表5 貨物集約での時間延長率 (%)

	フィーダー船 平均到着間隔	超大型船の到着時期		時刻1		時刻2		時刻3		時刻4	
		ターミナルレイアウト		L	I	L	I	L	I	L	I
超大型船に関わる 全コンテナ滞在時間	1 時間	全コンテナ滞在時間の最小化		23.1	37.1	14.8	30.4	14.9	21.7	13.0	20.2
		超大型船滞在時間の最小化		4.1	25.2	4.1	20.3	12.4	16.4	13.8	14.8
	2 時間	全コンテナ滞在時間の最小化		19.0	29.8	7.8	24.3	6.4	15.9	6.3	13.9
		超大型船滞在時間の最小化		-7.2	20.1	-1.6	15.2	5.9	12.0	7.4	10.4
超大型船の滞在時間	1 時間	全コンテナ滞在時間の最小化		7.8	1.2	1.7	8.1	-1.4	-5.6	9.9	-8.8
		超大型船滞在時間の最小化		26.9	-30.6	31.4	-10.2	22.4	-11.5	15.6	-15.2
	2 時間	全コンテナ滞在時間の最小化		-18.2	-63.5	11.1	-17.4	2.0	-9.2	10.3	-7.5
		超大型船滞在時間の最小化		-29.9	-73.8	16.8	-52.7	20.7	-18.9	15.5	-15.2

が予想される。そこで各ケースにおける時間延長率を示したのが表5である。全コンテナ滞在時間はほとんどのケースで時間延長し、超大型船のみを見ると、反対に時間短縮になるケースが多い。全コンテナ滞在時間は、超大型船の到着時期が早く、当該船を待つフィーダー船の隻数が少ないケースでその差が大きい。全コンテナ滞在時間最小化の両レイアウト、超大型船滞在時間最小化のタイプIでそのことが言えるが、タイプLでは反対の傾向にある。超大型船の滞在時間は、特にタイプIの全ケースで負の値で時間短縮しており、超大型船の到着時期が早いと短縮率も大きい（つまり延長率が小さい）。これは計画対象の隻数が増え、同一ブロック利用可の比率も増えることから、対象QCからブロックを利用でき、荷役時間が短縮する。このことは、QCが多く利用できるタイプIで、到着時期が早いときに影響度が大きい。

7. おわりに

超大型船が寄港するコンテナターミナルでのトランシップ貨物を対象に、超大型船とフィーダー船間の両方向のフローを考慮したコンテナのヤードへの配置問題を取り上げ、一度に扱う荷役コンテナ数の違いで評価指標がどう変化するかを検討した。

計算パラメータとして、超大型船の到着時期、フィーダー船の到着間隔（混み具合）、ターミナルの形状、一度に扱う貨物量を変化させた。実在する港湾に最も近いパラメータに着目すると、大型船の積み予定コンテナはその到着前にヤードに配置され、フィーダー船の到着分布は比較的混み合った状況になる。このケースで貨物集約すると、超大型船に関わる全コンテナの滞在時間は延長するが、超大型船の滞在時間はレイアウトによって傾向が異なることがわかり、タイプIのときは時間短縮効果があった。よって、レイアウト設計の工夫が重要であると言える。本研究は国際ハブがターゲットであり、ローカル貨物中心である現在の国内港湾にその考え方を適

用することは出来ない。しかしながら、将来国際ハブを目指すのであれば、大型船の寄港と取扱量の増加を見越して、対策を講じる必要があり、税制面の優遇なども含めて多くの船に寄港してもらうための工夫も必要となるであろう。

謝辞

本研究は科学研究費（21710153）の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Han, Y. et al.: A yard storage strategy for minimizing traffic congestion in a marine container transshipment hub, *OR Spectrum* 30, 697-720, 2008.
- 2) Kim, K.H. and Bae, J.W.: Re-marshaling export containers in port container terminals. *Computers & Industrial Engineering* 35, 655-658, 1998.
- 3) Kim, K.H. and Kim, D.Y.: Group storage methods at container port terminals. *The American Society of Mechanical Engineers, 75th Anniversary Commemorative Volume, MH-Vol.2, The Material Handling Engineering Division*, 15-20, 1994.
- 4) Kim, K.H. and Kim, H.B.: Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals. *International Journal of Production Economics* 59, 415-423, 1999.
- 5) Kim, K.H. et al.: Deriving decision rules to locate export containers in container yards. *European Journal of Operational Research* 124, 89-101, 2000.
- 6) Kim, K.H. and Park, K.T.: A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers. *European Journal of Operational Research* 148, 92-101, 2003.
- 7) Kozan, E. and Preston, P.: Genetic algorithms to scheduling container transfers at multimodal terminals. *International Transactions in Operational Research* 6, 311-329, 1999.
- 8) Lee, L.H. et al.: An optimization model for storage yard management in transshipment hubs, *OR Spectrum* 28, 536-561, 2006.
- 9) Mearsk Line ウェブサイト, <https://www.maerskline.com/appmanager/> (2009.10.20 ダウンロード)
- 10) Nishimura, E. et al.: Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms, *European Journal of Operational Research* 131, 282-292, 2001.
- 11) Nishimura, E. et al.: Container storage and transshipment marine terminals. *Transportation Research Part E* 45, 771-786, 2009.
- 12) Petering, M.E. and Murty, K.G.: Effect of block length and yard crane deployment systems on overall performance at a seaport container transshipment terminal, *Computers & Operations Research* 36, 1711-1725, 2009.
- 13) Zhang, C. et al.: Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research Part B* 37, 883-903, 2003.
- 14) オーシャンコマース: 2009 年度版国際輸送ハンドブック, 189-490.

超大型船寄港ターミナルでのヤード配置計画に及ぼすコンテナ取扱量の影響

西村悦子・今井昭夫

10,000TEU 超級のコンテナ船が登場しているが、各寄港地での荷役個数は従来の大型船と同等で、当該船の導入効果を発揮できていない。そこで本研究では、超大型船からフィーダー船間の両方向のコンテナ配置計画を取り上げ、一度に荷役するコンテナ数を現状程度と集約する場合での比較を行った。計算結果より、全コンテナ滞在時間、超大型船の滞在時間は共に、超大型船の到着時期、ターミナル形状や混雑状況に依存し、QC が多く割られるタイプ I での超大型船の滞在時間は、貨物集約の方が時間短縮になることがわかった。

Effects of container throughput on yard storage planning in the terminal where mega-containerships call

By Etsuko NISHIMURA and Akio IMAI

We address the storage planning for transshipment containers at the terminal where the mega-containership calls. In this paper, we assume that the container flow is both ways between the mega-containership and feeders, we compare the service time taking large container volume by getting together at one mega-port calling with that time of current handling volume at multi-port calling. From the results, the total service time for all containers related to the mega-containership and the service time for mega-containership depend on the arrival time of mega-containership and feeder ships, terminal layouts. The service time for mega-containership at Indented type under large handling volume is shorter than that time under small handling volume at multi-port calling.