

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350444

研究課題名(和文) 港湾コンテナターミナルにおける荷役マシンの併用と効果的運用に関する研究

研究課題名(英文) Study on multiple types of handling equipment usage and effective operation in marine container terminals

研究代表者

西村 悦子 (NISHIMURA, ETSUKO)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60311784

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：コンテナ船の巨大化する中、国内外の港湾では荷役システムの高度化が進んでいる。その1つに、1ターミナルで異なるタイプの荷役機器を導入する所もある。そこで本研究では、どのような状況下で、複数タイプ導入に効果があるのかを検討した。具体的には、複数タイプを導入しているターミナルの特徴と荷役機器の作業特性を把握する。ターミナルの形状や規模、ブロックレイアウト等のコンテナの配置方法に影響を与える項目について、パラメータや制約条件としてモデル化を行い、アルゴリズムの提案と数値実験による考察を行った。その結果、最適解が得られる小規模な問題では、単一タイプでの運用に効果があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Containerships are getting larger and larger, involves the handling equipment requires advanced technology in marine container terminals. As one of some ideas, multiple types of handling equipment are often operated in a specific terminal. In this project, we propose the way to operate multiple types of handling equipment simultaneously at a specific terminal and also to find the situation effectively being operated. To be concrete, we investigated terminals that multiple types of equipment have already operated in order to find features of those terminals and machinery characteristics. After that, we developed the mathematical model with parameters and constraints such as terminal configuration and container block layout. In order to find effectively feasible solutions of the model, we developed the algorithm by using metaheuristics. From computational results, it is clear that one type of equipment outperforms multiple types of equipment, in small size problem with optimal solution.

研究分野：港湾物流

キーワード：港湾 モデル化 アルゴリズム コンテナターミナル

1. 研究開始当初の背景

2009年のリーマンショックで、国際コンテナ貨物流動量が減少する時期もあったが、近年は回復しただけでなく、それ以上に取扱貨物量は増加している。特に近隣アジア諸国の主要港湾ではその規模の拡大、サービス水準の向上、コスト低減を実現することで、取扱貨物量を増大させ、アジアのハブとして位置付けられている。またコンテナ船の大型化は非常に著しく、満載積載で1万TEU(20フィートコンテナ換算での個数)積みを越える船が登場しており、現時点の最大サイズ14,000TEU積み船も登場し、100隻以上が欧州とアジアを中心とした基幹航路を担当している。こうした中、日本への超大型船の寄港実績はあるが、他のサイズも含めた基幹航路の船の寄航頻度は他港に比べて低く、相対的に地位が低下している。この現状を打破するため、アジア主要港湾に引けを取らないコスト・サービス提供と船の大型化に対応するため、国際コンテナ戦略港湾政策が進められている。具体策として、例えば阪神港では、条件を満たす船に対し、入港料や岸壁使用料免除のインセンティブを与えて、寄港隻数・取扱貨物の増加を期待している。また交通政策審議会・港湾分科会では、効率的・効果的事業実施のために、「港湾施設の有効活用」が挙げられ、具体的には複数バースから成るターミナルを一括運用するというものであり、スーパー中樞港湾プロジェクトで提案されている。しかし、これは直接的な取扱貨物量の増加対策ではなく、増えた場合でも少ない設備で対応可能な工夫であるため、未だ結果が出ておらず、現在の戦略港湾政策と組合せて、効果を期待する所である。

こうした中、今後、最新システムの導入が予想されるが、マシンの特性や海外の状況を事前に把握しておく必要がある。国内港湾では1ターミナルは最大3バース程度から成り、それを超える大規模なものはないが、海外の4バース以上から成る大規模ターミナルでは、複数種類の荷役機械が導入され、エリアを分けて運用されている。

そこで本研究では、1ターミナルに複数タイプの荷役機器を導入できることを前提に、それらが効果的に作用する担当エリアの割当とその運用モデルを構築する。

2. 研究の目的

コンテナヤードで荷役作業に使用するマシンの種類は国内・海外で主に使用されているタイヤ式門型クレーン(Rubber Tyred Gantry Crane, RTG)、レール式門型クレーン(Rail Mounted Gantry Crane, RMG)、ストラドルキャリア(Straddle Carrier, SC)の3種類のいずれかの組合せを想定し、与えられたエリア内での複数種類の荷役機器が作業することに対する現状の把握からスタートする。

まずはどのような状況下にある場合、複数種類が用いられるかの特徴とその境界を掴み、現時点では単一種類であるが、複数種類を用いた方が効果的となる可能性のターミナルの傾向(規模とレイアウト等)も調査する。続いて、荷役機器は年々高度化しているため、現時点で最新の作業特性の調査も実施する。これらの調査結果から荷役機器タイプ別のエリア割当を行う問題、機器の組合せ別の最適ターミナルサイズを決定する問題をそれぞれ定式化し、ターミナルの形状や規模、機器のタイプ、ブロックレイアウト等のうち、どの要因が結果に大きく影響するのかを数値実験から明らかとする。これには、コンテナの配置方法にも工夫が必要となるため、既存研究では入力データとして与えていた船の係留位置も本問題では決定要素として扱い、コンテナの配置と船の係留位置を同時に行えるアルゴリズムの提案を行う。

3. 研究の方法

(1) ターミナルレイアウトと荷役機器タイプに関する調査

本研究課題の位置づけを明らかにするために、世界のコンテナ取扱ランキング上位30港湾に属するコンテナターミナルに関する情報(そこで採用される荷役機器のタイプ、ヤードレイアウトと保管エリア形状など)について、ターミナルのWebサイトやGoogle Earth等を用いて調査し、それらの特徴について整理する。

(2) 荷役機器タイプと搬送車両の特徴把握

供用効果を検討する前段階として、荷役機器別の特徴を把握するために、以下のモデルを構築した。

① コンテナ配置の最適化による荷役方式の比較(ストラドルキャリアの効果的運用)

世界の主要港湾を見ると、採用される荷役機器のタイプは、設置時期や地理的背景などによって異なり、各タイプに適するターミナル規模やレイアウトも異なる。現在、タイヤ式門型クレーン(RTG)は世界中で採用件数が最も多く、次いでストラドルキャリア(SC)が多い。そのため、ここではRTGとSCのターミナルを対象にコンテナ配置問題を考える。具体的には問題の定式化と運用タイプについて検討し、多目的GAを用いたアルゴリズムの開発を行う。

② 搬送車両の運用方法に関する検討

コンテナ船の大型化の効果を発揮するためにも、ハブ港湾ではメガシップ不在時の他船利用や接続のためのフィーダー船が利用することがあり、マルチユーズターミナル(MUT)としての利用が必要となる。MUTとして利用する場合、船の係留位置がコンテナの保管場所にいつも近接するとは限らないため、無駄な待ち時間延長等が発生し、バース空間の有効利用ができなくなる可能性

がある。このことから、荷役時間延長を抑える工夫が必要となる。そこでここでは、ヤードトレーラー (Yard Trailer, YT) の運用方法に着目する。すでに先行研究で、YC のコントロール方法を提案しているが、最近では岸壁クレーン (QC) も高度化しており、また搬送車両では複数個積載できるマルチトレーラー導入のターミナルも増えている。そこで、それらを組合せた場合の導入効果やボトルネックとなる部分を明らかにする前段階として、一度にコンテナ 1 個のみを荷役する従来型 QC とヤードトレーラーでより精緻な分析を行うために、Simulated Annealing (SA) によるアルゴリズム開発を行う。

(3) コンテナターミナル形状に関する検討

(1)の結果、海外には様々な形状を持つターミナルが存在することが明らかとなった。そこでここでは、与えられた形状を持つコンテナヤード保管エリアにおけるコンテナブロックのサイズと通路配置の最適化問題について検討する。また評価指標を考える上で、ターミナル内でのコンテナ搬送は一方通行、両通行等制約があり、ブロックサイズが小さいほど、地点間の移動距離は短く時間も短縮されるが、ブロックサイズ間には搬送車両の走行通路スペースを設置する必要があるため、コンテナ保管容量は小さくなる。そこで長方形やその他ターミナル形状が与えられたときに、国内外で主に使用されているタイヤ式門型クレーン (Rubber Tyred Gantry Crane, RTG) 採用のターミナルを前提として、のヤードトレーラーの走行通路配置を決定要素とするモデルを構築し、多目的 GA を用いたアルゴリズムの開発を行う。

(4) バース利用効率を考慮したヤード配置

コンテナ配置問題 (Yard Arrangement Problem, YAP) というものがある。YAP では、陸揚げもしくは船積みされるコンテナをヤード内のどこかに一旦保管されることを前提として、コンテナ荷役にかかる時間を抑えるように、コンテナの配置場所を決定する問題である。またターミナルの荷役効率に関するもう 1 つの研究に、船の係留場所を決定する問題 (Ship-to-Berth Assignment Problem, BAP) がある。この問題は計画期間内に到着する船の係留位置と係留順序を決定する問題である。ターミナルが比較的空いている場合には、コンテナを移入と移出に利用される船の係留位置に近い場所に置けるが、混雑する状態下では実現が難しい。つまり船の係留バースとコンテナの保管場所を同時に考えれば、より船間のコンテナの接続がスムーズであると言える。そこで YAP と BAP を同時に最適化する解法アルゴリズムを開発する。

(5) 供用効果の検討に関する問題への拡張

(4)で構築したモデルを基に、ローカル貨物の取り扱いを可能とすることで、輸出・輸

入・トランシップで保管されるエリアを分離し、輸出用コンテナの内陸側荷役 (内陸からの到着分) について RTG と RMG それぞれ担当できるものとし、本船荷役部分 (船からヤード、ヤードから船) は RTG が担当するものとして、モデル化を行う。これにより、RTG のみ導入のターミナルと RTG と RMG 併用ターミナルとの比較を行うことが可能となる。CPLEX による問題の定式化と、小規模な問題での実験を行う。

4. 研究成果

(1) ターミナルレイアウトと荷役機器タイプに関する調査

複数タイプの荷役機器が同一ターミナルで利用されるケースについて、より詳細な整理を行った。ターミナルの規模 (岸壁延長や水深)、荷役機器のタイプ、岸壁・ターミナル形状などである。その結果、ターミナルの規模には関わらず、複数タイプのマシンが採用されており、ターミナル内での割当状況は、①岸壁側・内陸側に区別、②隣り合うバース間で区別されるなどがあり、互いに干渉がないよう運用されていることがわかった。ここでモデル化を考えると、①なら本船荷役と内陸側荷役を分けたモデル化、②ならバース単位で荷役機器が異なるモデル化が必要であることがわかった。当該研究では、①で研究

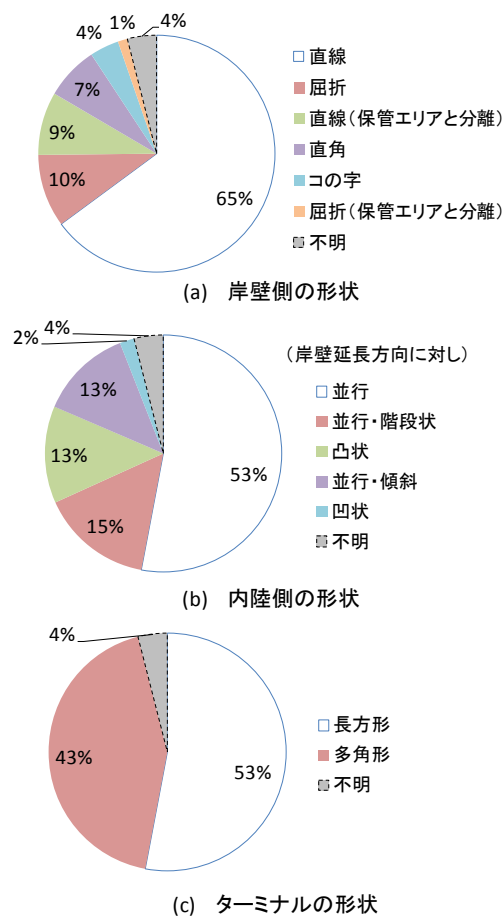


図 1 世界のコンテナ取扱ランキング上位 30 港にあるターミナルの形状

を進めることにする。またレイアウトについては図1に示すように、長方形が半数を超えるものの、4割以上で長方形以外の多角形となるターミナルあることがわかる。なお、この場合に長方形ターミナルと同様に、等間隔で通路を配置すれば、荷役効率に影響することから、図中には示していないが、ほとんどのケースで等間隔に配置されていないことが明らかとなった。

(2) 荷役機器タイプと搬送車両の特徴把握
① コンテナ配置の最適化による荷役方式の比較(ストラドルキャリアの効果的運用)

RTGは単位面積あたりの保管容量が多いことから、日本国内ではRTG採用のターミナルが多いが、比較的安価なSC採用のターミナルについて、RTGと同程度の評価を得られる条件を予め検討することは港湾ターミナルの国際競争力を向上させるためにも重要と考える。そこでSCに着目し、ヤード内でのコンテナ配置場所決定の最適化によって、表1のように、コンテナブロックの取扱い(ブロック数や各ブロックの容量等)、SCの性能の高度化や走行通路の設定方法等の様々な条件下においてSCがRTGの評価に近くなるのか、もしくはそれに近い評価を得られるのかを検討した結果を図3に示す。

2目的問題を扱うため、タイプ別に得られたパレート解集合を合成し、その中からさらにパレート解を求め(真のパレート解と呼ぶ)、真のパレート解集合に含まれる、運用タイプ別の解の個数割合を求めた結果を図3に示す。RTGが良いケースが多く最も優れていることが明らかであるが、SCが優れているケース(SC-route)も約2割存在すること

表1 本研究で採用した各運用タイプ

タイプ名	内容
RTG	RTG方式ターミナル
SC-1xCap7	SC方式ターミナルで、1ブロック容量が7コンテナ群(従来SCと呼ぶ)とする場合
SC-0.9	従来SCに比べて、荷役時間10%短縮可能な高性能なSCを採用する場合
SC-0.95	従来SCに比べて、荷役時間5%短縮可能な高性能なSCを採用する場合
SC-7xCap1	従来SCのブロックサイズを7分割し、1ブロック容量が1コンテナ群とする場合
SC-route	従来SCのエプロン部分の走行ルートを改良して、小回りができる場合(図2参照)

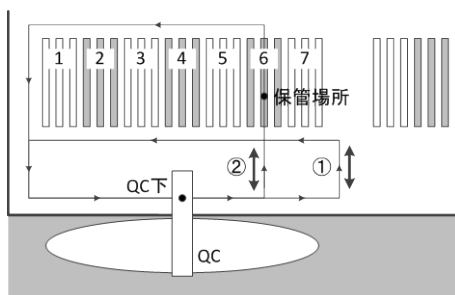


図2 SC-routeの概念図

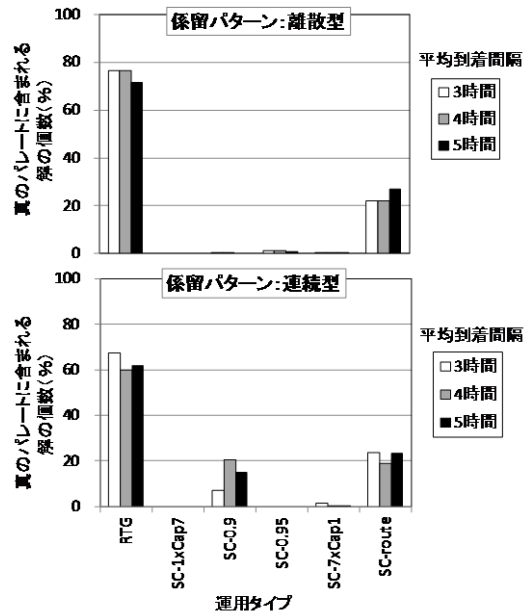


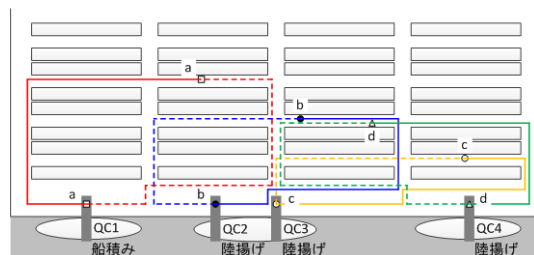
図3 RTGを含む真のパレート解集合に含まれる解の割合

が分かった。総サービス時間とスペース占有率について考察すると、RTGが最も良い結果を示した。この結果は、国内外でRTGが最も多く採用されている荷役機器であることを裏付けている。また走行ルートを工夫することができれば、SCの作業効率を大きく向上することがわかった。

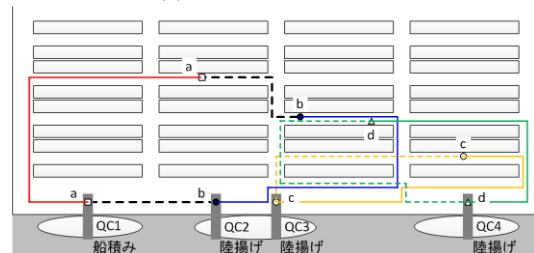
② 搬送車両の運用方法に関する検討

図4にQC4基が荷役中であり、図の左から順に、船積み、陸揚げ、陸揚げ、陸揚げ作業中である状況を示す。各QCで陸揚げもしくは船積みされるコンテナは、それぞれヤード内にあるQC地点と同じマーカーの地点に保管され、地点間の実線はコンテナ搬送を、点線は空車での移動を意味する。

図4(a)からわかるように、QC下とヤード内の保管場所間でヤードトレーラーがコンテ



(a) 従来の運用方法



(b) 動的運用

図4 搬送車両の運用形態と考え方

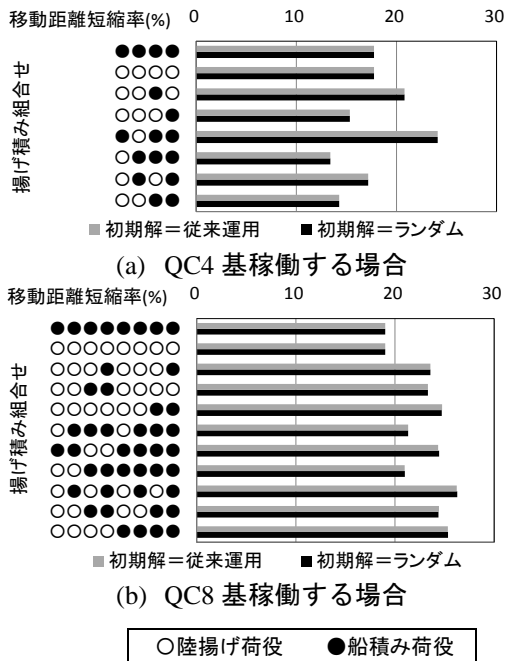


図5 容量1個、ターミナル全体に配置する場合での距離短縮効果

ナを往復輸送するが、往路もしくは復路のいずれかは空車となる。そこで空車で移動を抑えるために図4(b)のような動的運用を考える。QC1とQC2のヤードトレーラーの空車移動を黒色点線のようにリンクすることで、従来運用よりも移動距離が短くなっているのがわかる。本問題では図4(b)のように、複数のQCにヤードトレーラーを割当てた運用方法を考える。図5の結果より、いずれのケースも13%を超えており、分布空間が広いほど提案する方法による効果が高い。その中でも特に効果が高いのは、稼働数4基では、陸揚げと船積み中のQCが交互に配置される場合であり、8基になると荷役状況の組合せに限らず20%前後の効果がある。初期解の違いでは、その差はほとんどないことが分かった。

(3) コンテナターミナル形状に関する検討

目的関数は、総保管スペースの最大化、および岸壁-ヤードブロック間の合計移動距離の最小化の2目的とし、配置条件として、通路数は所与とし、与えられた数必ず設置する、各通路は隣り合うことはなく、また保管エリアの両端を除いて、岸壁延長に垂直に設置することとした。

400m×4バースの全長1600mで、形状は単純な形状の長方形と、世界の主要港でも多くみられる階段型、凸型、傾斜型の4種類で、の数値実験を行った結果として、従来で良く用いられる等間隔に通路を配置する場合と、提案する方法による通路配置で得られた目的関数値の差を表2に示す。なお本問題は多目的問題であり、複数個の解が得られるが、等間隔の場合での解は1つであるため、等間隔との差(%)についての平均値、標準偏差、最大値、最小値と解の個数を示している。計

表2 等間隔での結果との差

通路数=5							
ターミナルの形状	距離短縮率(%)			容量増加率(%)			解の個数
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	
長方形	5.7	5.7	5.7	0.0	0.0	0.0	1
階段型	26.1	28.8	21.1	4.7	5.9	3.4	4
傾斜型	36.5	37.2	35.4	7.2	7.7	6.7	5.5
凸型	18.3	20.3	13.5	5.9	7.1	4.6	9.4
通路数=7							
ターミナルの形状	距離短縮率(%)			容量増加率(%)			解の個数
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	
長方形	5.6	5.6	5.6	0.0	0.0	0.0	1
階段型	25.2	26.3	23.6	7.1	8.0	6.2	3
傾斜型	31.6	33.4	29.0	8.8	9.7	7.9	7.5
凸型	13.8	17.0	7.2	7.2	8.7	5.7	10.8
通路数=9							
ターミナルの形状	距離短縮率(%)			容量増加率(%)			解の個数
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	
長方形	8.4	8.4	8.4	0.0	0.0	0.0	1
階段型	29.9	31.6	26.7	7.9	9.3	6.5	4
傾斜型	30.7	32.7	26.2	9.6	10.6	8.6	8.0
凸型	13.8	16.9	6.4	8.2	10.0	6.4	11.8

算結果より、いずれの形状でも等間隔より提案する方法で距離短縮効果、容量増量効果があるのがわかる。またこの効果の大きさは形状によって異なることが明らかとなった。

(4) バース利用効率を考慮したヤード配置

目的関数は、総サービス時間(船の待ち時間+荷役時間)の最小化、制約条件として、①各バースで同時に1隻だけがサービスされる、②トランシップコンテナの取扱いは仕向地別・船別に複数コンテナグループとして扱う、③コンテナグループはブロックに必ず1回保管される、として計算した結果を表3に示す。本研究で提案する方法で得られた、総サービス時間を既往研究の解法と比較する。いずれの混み具合においても、提案する方法は既往研究の解法より短い総サービス時間が得られている。また改善ケース数とは提案する方法の結果が良いケース数を示すが、いずれの混み具合においても、提案する方法は既往研究の解法より短いサービス時間で済むことが明らかとなった。

表3 総サービス時間の解法比較

平均到着間隔	3時間		4時間		5時間	
	既往研究	提案する方法	既往研究	提案する方法	既往研究	提案する方法
平均	1547	1365	577	547	385	374
標準偏差	277	223	186	163	81	77
最小	1098	999	334	327	255	246
最大	2466	2107	1190	1057	605	588
平均改善率(%)	11.7		5.2		2.9	
改善ケース数(%)	100		100		100	

(5) 供用効果の検討に関する問題の拡張

(4)の問題に対し、ローカル貨物を扱うために追加されたパラメータとして、輸出コンテナが内陸から到着する時期、輸入コンテナが

ターミナルから内陸へ出発する時期である。さらに本船荷役と内陸側荷役で異なる荷役機器を使うため、保管エリアを分割して計算した結果を、表4に示す。3日間に到着する船6隻と12隻を対象にした結果を示すが、RTGとRMGの大きな違いは、クレーンサイズの違いから、各コンテナブロックの保管容量とブロック間を移動するヤードトレーラーの走行ルートである。小規模問題であることから保管容量の違いより、走行ルートの違いが大きく結果に反映されており、RMGの方が若干遠回りをせざるを得ないことから、RTGとRMGと組合せた方の荷役時間がかかっているという結果になった。日本の港湾では小規模なターミナルが多いため、従来からの本船荷役と内陸側荷役両方とも、RTGを使った荷役が効果的であると言える。

表4 荷役機器の組合せによる比較

対象隻数	総サービス時間(時間)				CPU時間(秒)			
	6隻		12隻		6隻		12隻	
荷役コンテナ数	2400	3600	4800	9600	2400	3600	4800	9600
RTG + RTG	64	86*	128	162	38.7	842.5*	560.8	477.1
RTG + RMG	74	84	148	165	65.4	40.1	578.6	510.3
差(%)	15.63	-	15.63	1.85				

※最適解ではない。

(6) 今後の展望

荷役機器の特徴を踏まえた研究成果は学会等への発表も行っており、今後は(5)の問題について、大規模問題を解くことが出来るモデル構築と数値実験を行っていく必要がある。大規模問題では保管容量の違いが大きく反映されるため、大規模なハブ港湾での効果が期待できるものである。また現在のRMGモデルは岸壁に平行にコンテナブロックを配置する形態を対象としたため、今後の発展として、欧州にあるような岸壁延長に垂直にコンテナブロックを配置するRMGモデルでの検証が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 西村 悦子, 山下 太郎, 本船荷役のパターン区分を考慮したヤードトレーラー動的運用の効果, 日本航海学会論文集, 査読有, No.133, 20-27, 2015
- ② 西村 悦子, 江村 聡一郎, ストラドルキャリア方式コンテナターミナルを対象としたコンテナ配置計画, 日本航海学会論文集, 査読有, No.131, 81-88, 2014
- ③ 西村 悦子, 今井 昭夫, コンテナ配置の最適化による荷役方式の比較, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 査読有, Vol.69, No.5, I_659-I_667, 2013

[学会発表] (計 8 件)

- ① 西村 悦子, 山下 太郎, 本船荷役のパターン区分を考慮したヤードトレーラー動的運用の効果, 日本航海学会第132回講演会, 2015.05.28-29, 横浜ワールドポーターズ (神奈川県)
- ② 王 立今, 西村 悦子, パースの利用効率を考慮したトランシップコンテナのヤード最適配置, 日本航海学会第131回講演会・物流研究会セッション, 2014.10.31-11.01, 北海道大学 (北海道)
- ③ Etsuko Nishimura, Multi-objective container storage arrangement at the container terminal with polygon configuration, The International Conference on Logistics and Maritime Systems - LOGMS2014, 2014. 08. 27-29, Rotterdam (Netherlands)
- ④ Wang Lijin, Etsuko Nishimura, Yard arrangement problem with consideration of berth space utilization efficiency, The International Conference on Logistics and Maritime Systems - LOGMS2014, 2014. 08. 27-29, Rotterdam (Netherlands)
- ⑤ Etsuko Nishimura, Yard arrangement at the container terminal with irregular configuration, 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies - IFORS2014, 2014.07. 14-18, Barcelona (Spain)
- ⑥ 西村 悦子, 江村聡一郎, ストラドルキャリア方式ターミナルを対象としたコンテナ配置計画, 日本航海学会第130回講演会, 2014.05.22-23, 東京海洋大学海洋工学部 (東京都)
- ⑦ 西村 悦子, 多角形コンテナターミナルでのコンテナ配置計画, 日本機械学会第22回交通・物流部門大会(TRANSLOG 2013), 2013.12.10-12, 東京大学生産技術研究所 (東京都)
- ⑧ Etsuko Nishimura, Effect of handling equipment type on optimizing container arrangement EURO-INFORMS 26th European Conference on Operational Research 2013.07.01-04, Bremen (Germany)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 悦子 (NISHIMURA, Etsuko)
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授
研究者番号: 60311784