

**コンテナバス共同利用のための  
バス最適割当に関する研究**

**2002年12月**

**西村悦子**

**コンテナバス共同利用のための  
バス最適割当に関する研究**

**2002年12月**

**西村悦子**

## 序

コンテナ化の進展や、これに伴う複合一貫輸送の普及は、輸送手段間の結節点である港湾の機能を大きく変化させている。複合一貫輸送の目的は起点から終点までの全輸送区間において輸送費用および輸送時間の合理化を行うことであり、島国であるわが国において物流の中継基地としての港湾の役割が期待されている。コンテナ港湾は自国内のローカル貨物の集荷のみならず、周辺諸国港湾へのトランシップ貨物を扱い、物流システムの拠点としての機能が重要視されている。このことは近隣諸国間とのハブ・アンド・スポーク輸送が展開されていることを意味する。基幹航路とフィーダー航路とを結ぶのがハブであるが、ここ数年アジア近隣諸国の経済発展に伴った主要港湾の台頭が目覚しく、日本の主要港湾のハブ機能が低下している。今後国内の港湾が基幹航路の船舶ではなく、2次輸送のフィーダー船を中心に扱うことになると、トランシップ貨物を扱わない分の収入は得られなくなり、またローカル貨物の輸送時間長および輸送コスト増の危険性も含んでいる。以上のことからハブ機能を保持することは重要である。貨物を取り戻すためにここ数年政府の政策はハード面に重きを置き、大水深バースの建設等を中心に対策をとってきた。このため、コンテナ施設の過剰な状況が発生している。一方で最近ではソフト面も検討され、その内容は港湾諸手続の電子化、および他港から大きく遅れを取っている24時間荷役実施への推進である。2000年に行われた港湾運送事業法の改正により事業参入規制が緩和されている。具体的には港湾荷役事業の事業区分が免許制から許可制へ、運賃・料金が確定認可制から事前届出制になった。これまで公社ふ頭からバースを借り受けるのは船会社であり、元請として港湾運送業者がコンテナターミナルの管理運営を行っていた。船社と元請の複数企業が関係するため、それだけでもコスト高の原因であったといえる。しかしながらこの法改正により、1港湾運送業者が独自で港湾の運用を実施できることから、競争が活発化してコスト低減が期待されているが、それだけでなく今後、PSA (Port of Singapore Authority) や HPH (Hutchison Port Holdings) のようなメガオペレータが日本国内から出現することも期待できる。しかしながら法改正によるコスト低減策が実現に至るまでにはある程度の時間を要すると予想される。

そこで本研究ではコンテナバースを共同利用して、バースの運用方法を工夫することで供用バース数の集約が可能であることを示し、それによってバース運用の効率化につながられることを示すのが目的であり、このことによってコスト低減が期待できる。具体的には共同利用する上で必要となるコンテナ船の効率的な係留位置決定方法を検討する。本研究で示す方法は日本国内に限らず、いずれの港湾においても利用できるものであるが、今

後国内で使用されコスト低減へならびに貨物集積の一助となれば幸いである。

2002年12月

西村悦子

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	1
1.1 研究の背景と目的 .....	1
1.2 本論文の構成 .....	4
第1章に関する参考文献 .....	6
<b>第2章 国内主要港湾の現状と課題</b> .....	7
2.1 国内主要港湾の現状 .....	7
2.1.1 コンテナ取扱量の推移 .....	7
2.1.2 港湾関連コスト .....	8
2.1.3 24時間荷役実施の現状 .....	10
2.1.4 コンテナ専用ふ頭の利用状況 .....	13
2.2 国内主要港湾の問題解決策と課題 .....	18
2.2.1 港湾運送の規制緩和 .....	18
2.2.2 コスト削減策 .....	18
2.2.3 24時間・365日荷役実現策 .....	19
2.2.4 低利用ターミナルの高度利用策 .....	20
2.3 マルチユーザターミナルの役割と効果 .....	20
2.3.1 マルチユーザターミナルの概要 .....	20
2.3.2 管理運営主体 .....	21
2.3.3 バース割当計画の必要性 .....	23
2.4 バース割当に関する既往の研究 .....	23
第2章に関する参考文献 .....	28
<b>第3章 単一船舶のみの係留を考慮したバース割当計画</b> .....	31
3.1 概説 .....	31
3.2 バース割当問題とモデルの定式化 .....	31
3.2.1 前提条件 .....	32
3.2.2 バース割当計画の概念 .....	33
3.2.3 定式化 .....	33
3.2.4 定式化の証明 .....	35
3.3 ラグランジュ緩和問題を用いた勾配法 .....	39
3.3.1 ラグランジュ緩和 .....	39
3.3.2 本問題のラグランジュ緩和問題 .....	41
3.3.3 劣勾配法 .....	42
3.3.4 ラグランジュ乗数の決定 .....	43
3.3.5 近似解法 .....	45
3.4 初期状態の違いによる解の精度への影響 .....	53

3. 5	到着時間分布による待ち時間への影響	56
3. 6	到着順と荷役時間長の並びの関係による解の精度への影響	61
3. 7	実績データによる比較分析	68
3. 8	結語	72
	第3章に関する参考文献	73
<b>第4章</b>	<b>複数船舶の同時係留を考慮したバース割当法</b>	<b>75</b>
4. 1	概説	75
4. 2	モデルの定式化	75
4. 2. 1	前提条件	75
4. 2. 2	定式化	75
4. 2. 3	定式化の誘導	77
4. 3	ラグランジュ緩和問題を用いた劣勾配法の適用限界	78
4. 4	遺伝的アルゴリズムを用いた解法	78
4. 4. 1	解法の概要	78
4. 4. 2	コアアルゴリズム	81
4. 4. 3	個体の表現	83
4. 4. 4	バースの水深に関する処理	84
4. 4. 5	同時係留を考慮した総在港時間の計算	84
4. 4. 6	目的関数の適応度への変換	85
4. 4. 7	遺伝演算	86
4. 5	モデルの適用事例	88
4. 5. 1	1スパンの問題における各個体表現の解の精度比較	88
4. 5. 2	解の収束状況	89
4. 5. 3	複数スパンの問題における単一解の計画と複数解の計画との比較	93
4. 6	実績データによる比較分析	95
4. 7	結語	98
	第4章に関する参考文献	99
<b>第5章</b>	<b>船の優先度を考慮した多目的バース割当法</b>	<b>101</b>
5. 1	概説	101
5. 2	モデルの定式化	102
5. 2. 1	目的関数	102
5. 2. 2	定式化	103
5. 3	多目的GAを用いた解法	105
5. 3. 1	解法の概要	105
5. 3. 2	パレート最適集合	106
5. 3. 3	解法1	107
5. 3. 4	解法2	108
5. 3. 5	提案する方法(解法3)	110

5. 3. 6 適応度 .....	111
5. 3. 7 遺伝演算子とパラメータ .....	111
5. 4 モデルの適用事例 .....	112
5. 4. 1 各解法の性能評価 .....	113
5. 4. 2 優先度の有無による比較分析 .....	115
5. 5 実績データによる比較分析 .....	121
5. 6 結語 .....	123
第5章に関する参考文献 .....	124
<b>第6章 本研究の今後の展開と課題 .....</b>	<b>125</b>
6. 1 概説 .....	125
6. 2 今後の展開 .....	125
6. 3 荷役シーケンスの最適化 .....	127
6. 3. 1 コンテナヤードにおける荷役システム .....	127
6. 3. 2 既往の研究 .....	130
6. 3. 3 トレーラー運用の前提 .....	131
6. 3. 4 シミュレーションモデルの概要 .....	133
6. 3. 5 トレーラーのルーチング .....	135
6. 3. 6 シミュレーション実験 .....	141
6. 4 結語 .....	147
第6章に関する参考文献 .....	148
<b>第7章 結論 .....</b>	<b>151</b>

## 第1章 序論

### 1.1 背景と目的

わが国の港湾は、いち早くコンテナ化への対応が行われ、近年までアジアを代表する国際コンテナ港湾として、中国、台湾、韓国を中心とした東アジア地域から欧州、北米向けの中継貨物を扱うアジアのハブとして発展してきた。

そもそもコンテナが登場する以前においては、工業生産力の増大や貿易額が伸びるにしたがって、取扱貨物量が大幅な伸びを示していた。陸上輸送、海上輸送両方における輸送効率の進展に対してその結節点である港湾は、当時港湾諸施設の整備があまり進んでいなかったせいで船混み<sup>1), 2)</sup>といった社会問題が発生し、国民経済の再生産構造を見直す重要課題として、その後の整備計画は貨物輸送量増大に対処するものとなった<sup>3)</sup>。当時は雑貨を中心に輸送する定期船（一定スケジュールで海外や国内の港間を往復する）は大部分が公共ふ頭を利用し、当時専用ふ頭は不定期船が利用し、工場から直接出荷される大量のバルク貨物を扱うのがほとんどであった。在来の定期船が公共ふ頭を利用した理由は、公共の場合等国等の資金が投じられ使用料が安くすんだこと、専用の場合には特定船社のみが利用するため、建設費等を利用者が全て負担する必要があることから、経費が一般に高くなってしまふことが挙げられる<sup>3)</sup>。

その後コンテナ輸送に代表される協同輸送体制が進展し、世界規模で産業や貿易の構造に影響を与えた。このような情勢は貿易の1機能を担う港湾運送においてもコンテナ輸送に対応した近代化が要求された。このときコンテナ専用船の場合にも経済の高度成長の要請から公社ふ頭の利用が減り、専用ふ頭を利用することとなったが、多くの貨物が集まったことから十分採算が取れていた。

しかしながら昨今、日本の主要港はアジアの競争港の出現に伴い、ハブ港の地位が低下している。また国内においては、90年代以降、国際化やバブル崩壊後における地方の活性化のための施策として積極的にコンテナ化が推進され、新潟港等のような日本海側の港湾の台頭には著しいものがあり、従来の港湾情勢に変化が起こっているため、貨物の分散化に拍車がかかっている<sup>6)</sup>。貨物の分散化は日本海側沿岸諸港の問題だけでなく、太平洋側においても同様である。また1995年1月17日に起こった阪神・淡路大震災直後、それまで神戸港で船積み・陸揚げされていた貨物の一部が地方港を経由して輸出入され始めたことで、地方港利用が俄かに注目されるようになり、各地で新しいコンテナターミナルの整備が進められるようになった<sup>8)</sup>。

以上のことから、神戸港をはじめとする日本の主要港ではハブ機能が低下傾向にある。つまり大型コンテナ船が就航し、アジアー北米、アジアー欧州間を結ぶ基幹航路が日本国

内港湾に存在する割合が低下している。このような傾向が今後も続くと中継貨物を扱うことによって得られる収入がなくなり、2次輸送に頼ることによって国内ローカル貨物がコスト増になる可能性<sup>2)</sup>も懸念される。このため、日本に基幹航路を存続させることは重要課題である。

そこでここ数年の政府の港湾整備計画は、新たな物流の展開とアジア諸国の港湾対策にある。その内容としては、わが国の港湾における相対的地位の低下を解消する施策であり、それに伴う外貿ターミナルの整備、それと連動したターミナル内部の機能高度化である。

ハブ港の条件としては、大型コンテナ船が接岸できる水深を確保した港湾施設を有することが重要となるが、現在日本に課せられた課題は、大型コンテナ船が接岸できるふ頭の問題だけでなく、ふ頭自体のサービス機能が問題となっている。まず、日本の港湾でのサービス時間は時間帯制限や休日があり、従来から指摘されている24時間365日荷役の実現は一部の地域では行われているが、平常の時間帯以外は割増料金が課せられており、サービスという意味からすると全面的には未だ不十分である。

またハブ弊害要因として考えられるもう1点は、日本の港湾の諸料金がアジアのそれに比べて高いことである。欧米に比べるとさほど差はないが、アジアの主要港と比べると約2倍程度になっている。

したがって休日・夜間の荷役体制の不便さ、高いふ頭使用料と荷役料金、これらが重なって日本の港湾は使い勝手の悪い港<sup>4)</sup>として、国際的に定着しつつある。このため、こうしたハブへの阻害要因を取り除く努力をすべきである。

一方現在、ほとんどの外航コンテナ船が寄港した際に利用するターミナルは公社方式と呼ばれ、地方公共団体が管理し、港湾運送事業者が高いリース料で借り受けた当該船社もしくはアライアンスグループが専用的に利用できるものである。したがって、先述のように取扱貨物量が多く、寄港隻数が多ければ、専用利用にメリットがあり、コンテナ1個あたりに対するコストも抑えられるため、高いリース料も十分カバーできた。しかしながら、現在のように取扱貨物量が少ない場合、バースに空き時間が生じるケースがあり、相対的なコスト高になってしまう。

そこで、船会社への専用ふ頭として利用させるのではなく、各船がどのバースでもサービスを受けることができるような複数バースの共同利用を提案する。つまり、各船の入港予定をもとに事前に係留計画を立て、寄港のたびに利用バースが決定されるため、ある船が寄港するときに特定のバースにいつも係留されるものではない。これによって、共用バース数削減とこれによるコストの低減が期待できる。

このような公共利用形式のコンテナ港（以下、マルチユーザターミナルと呼ぶ）では、船とバースの割当の仕方がバースのパフォーマンスに大きく影響する。したがって本研究では、港湾管理者を主体として、利用船社への配慮も考慮したコンテナ船のバースへの効率的な割当方法を提案する。これは、従来から行われているハード面の整備によるコスト

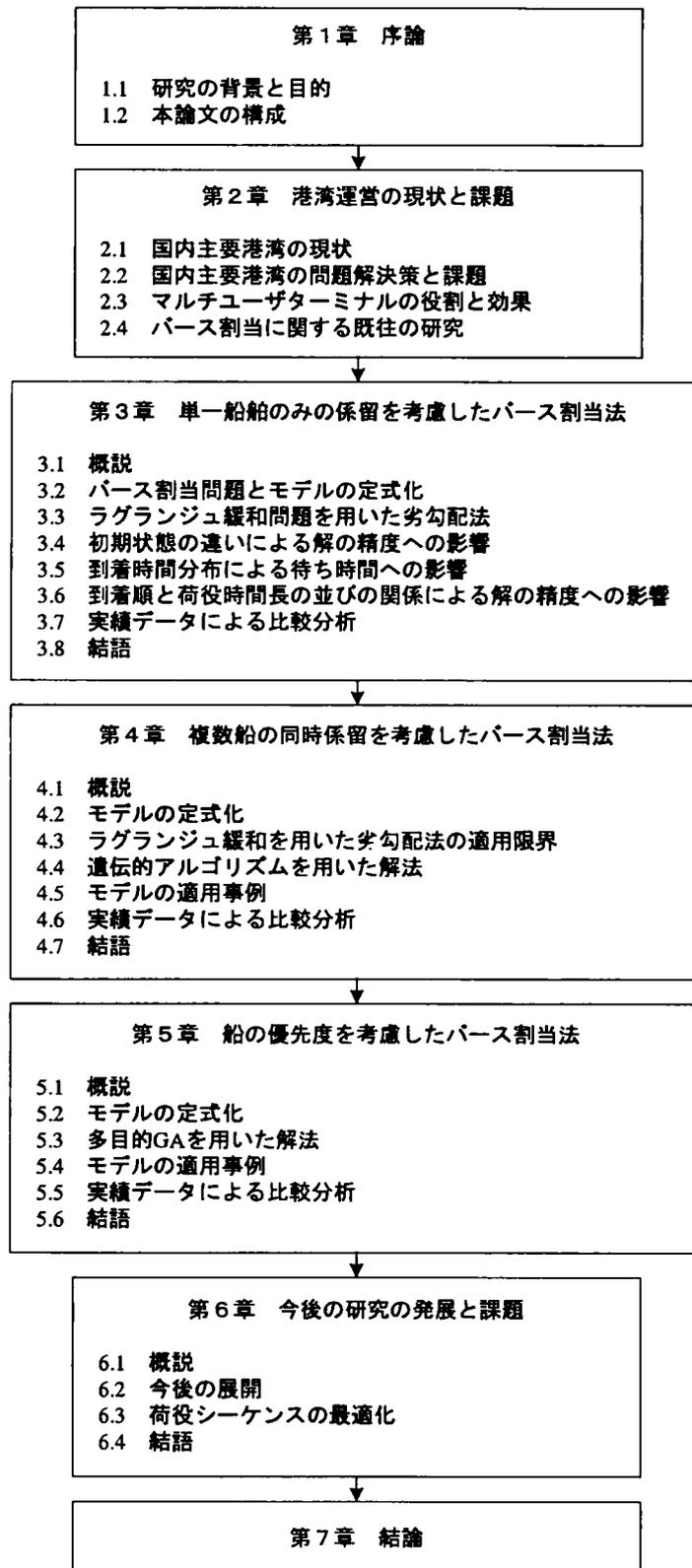


図1.1 本論文の構成

削減策を打ち出しているのではなく、ソフト面の運用方法改善によりコスト低減への一方策になることを期待できるものである。

## 1.2 本論文の構成

本論文は図1.1に示すような全7章から構成されている。

第2章では、国内主要港湾の現状を把握するため、まずここ数年の世界の主要港も含めた取扱量の推移をみる。また港湾関連コストの港湾間比較を行い、日本の主要港がどの程度近隣港湾と比較して高いかを確認し、取扱量が増減することにより影響が出る部分を確認するためにコストの内訳をみる。サービス面で問題とされている24時間荷役実施状況を整理し、世界の動向を確認する。さらに神戸港の実績データよりコンテナ専用ふ頭の利用状況を調べる。現状を把握した後に、指摘されている問題点を解決するための方策をコスト面とサービス面から整理し、残されている課題を述べる。運用面からの対策として本研究ではマルチユースターミナルを導入することを提案するが、これの概要を述べ、他の方式との違いについて示した後に、この方式におけるバース割当計画の必要性について述べる。最後にバース割当計画に関する既存の研究を紹介する。

本運用形態のターミナルでは寄港のたびに係留バースが決定されることを先述したが、このため、当該船舶が係留されるバースの背後ヤードに常にその荷役コンテナが蔵置されとは限らない。したがって、係留バースの決定の仕方がバースのパフォーマンスに大きく影響を与える。そこで第3章から第5章では効率的に船をバースに割当て方法提案する。

第3章では、各バースには同時期に1隻のみ係留できることを仮定し、バースの水深などは考慮しない単純な問題として扱う。まずバース割当問題の概要として、前提条件と計画の概念について述べる。次にモデルの定式化について述べ、解法としては最悪の解の精度を示すことができるラグランジュ緩和問題を用いた劣勾配法(LR)を使用するが、これについて述べる。本研究の緩和問題は、到着後に係留されるという制約を緩和することになるが、全船が係留開始前に到着すれば緩和した制約を全て満足するため、緩和問題の解がそのまま元問題の解となる。反対に全船が係留開始後に到着すれば制約を満足しない船が多く、最適解が得られにくくなる。したがって、計画の開始位置が解の精度に与える影響が大きいと考えられる。そこで事例計算としては、まず初期状態の違いが解の精度に与える影響を分析する。次に到着分布は現状では指数分布に従うことが確認できているが、運用方法を改善することによって分布形が変化することも予想されるため、異なる分布形で到着したときにどのような傾向を示すかを調べる。さらに神戸港の実績データを用いて、本章で提案する方法による解の値と実績とを比較し、バース数がどれだけ集約が可能かを示す。

現状では 1 バースに複数の船が同時期に係留されることがあることから、第 4 章では、バース水深制約や岸壁長と全長との関係を考慮した、前章より現実的な問題としてモデル化を試みる。前章と同様にまずモデルの定式化を行い、この問題では LR を適用できないことについて述べ、制約が増えてもモデル化が比較的容易にできる遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた解法について述べる。GA では、常に複数の解を保持しながら解を探索するという特徴を持っているため、この特徴を生かした計画と上位の単一解のみを用いる場合で計算時間と解の精度の点から実用性について調べる。さらに GA では解の候補を個体として次元配列で表現し、これの評価の高いものを残して最終的な解となるような探索を行うが、個体表現方法 2 種類を使って検討する。

第 3 章及び第 4 章ではフィーダー船と基幹航路の船舶を同等に扱っている。これは、公共ふ頭の多目的バースなどでは行われている方法であるため、そのようにしている。またこれとは反対に、荷役コンテナの多い船はターミナル側にとって利益が大きいことから、なるべく待たせないよう配慮されることもあり、現実にはこのような相反した考え方が適宜係留順の決定に反映されている。したがって第 5 章では以上のことを考慮するため、荷役コンテナが多い船をなるべく待たせないような評価関数を加えた多目的問題として扱う。まず目的関数の考え方について述べ、モデルの定式化を行う。解法には多目的 GA を用いるが、本研究で使用する具体的な方法について述べる。複数の多目的 GA の解法で検討するが、それらの解の性能評価を行い、優先度の有無による各船の待ち時間への影響分析を行う。神戸港の実績データを用いて、提案する方法による効果分析を行う。

第 6 章では、本研究の今後の展開として第 5 章までに扱った問題ではターミナル内の作業の挙動はブラックボックスになっているため、それらを考慮するために必要な研究について現段階の進捗状況について述べ、残された課題を示す。

最後に第 7 章では、本研究で得られた成果を示すとともに、今後の研究に残された課題を列挙し、本研究の結論とする。

## 第1章に関する参考文献

- 1) 北見俊郎, 「港湾政策」の形成と課題, 丘書房, 264-265, 1985.
- 2) 港湾投資評価研究会, みなとの役割と社会経済評価, 東洋経済新報社, 98-100, 2001.
- 3) 國分和雄, 知ってもらいたい日本の港, 近代文芸社, 157-158, 2000.
- 4) 文献 3), 171-173.
- 5) 小林照夫, 日本の港の歴史—その現実と課題—, 交通研究協会, 成山堂書店, 91-95, 1999.
- 6) 文献 5), 152-156.
- 7) 小林照夫, 澤喜司郎, 香川正俊, 吉岡秀輝共編著, 現代日本経済と港湾, 成山堂書店, 89-91, 2001.
- 8) 商船三井営業調査室, 定航海運の現況 2000/2001—正念場をのりこえ新たなる飛躍へ—, 111-113, 2001.

## 第2章 国内主要港湾の現状と課題

### 2.1 国内主要港湾の現状

#### 2.1.1 コンテナ取扱量の推移

阪神・淡路大震災の前年度である1994年から1999年までの6年間のコンテナ貨物取扱量の推移をみる。1999年の取扱量上位から順に20位まで<sup>30), 31), 32), 33), 34)</sup>を表2.1に示

表2.1 世界コンテナ取扱ランキング

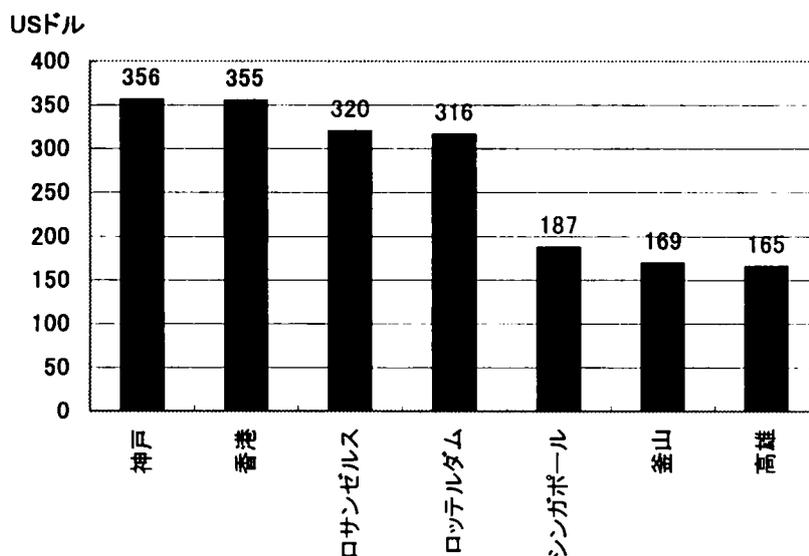
単位：1000TEU

	1999年		1998年		1997年		1996年		1995年		1994年	
	順位	取扱量										
Hong Kong	1	16211	2	14582	1	14567	1	13460	1	12550	1	11050
Singapore	2	15945	1	15136	2	14135	2	12944	2	11846	2	10399
Kaohsiung	3	6985	3	6271	3	5693	3	5063	3	5232	3	4900
Busan	4	6440	5	5946	5	5234	5	4725	5	4503	5	3213
Rotterdam	5	6343	4	6011	4	5495	4	4971	4	4787	4	4539
Long Beach	6	4408	6	4098	6	3505	8	3007	9	2390	8	2574
Shanghai	7	4210	10	3066	11	2520	18	1930	19	1527	25	1130
Los Angeles	8	3829	8	3378	9	2960	9	2683	9	2555	9	2519
Hamburg	9	3738	7	3547	7	3338	7	3054	6	2890	7	2726
Antwerp	10	3614	9	3266	8	2969	10	2654	10	2329	11	2208
NY/NJ	11	2863	12	2466	12	2519	13	3518	11	2276	13	2034
Dubai	12	2845	11	2804	10	2600	14	2247	14	2073	14	1882
Felixtowe	13	2697	13	2462	15	2251	16	2042	15	1898	16	1734
Tokyo	14	2696	14	2169	14	2322	12	2311	12	2177	15	1805
Port Klang	15	2550	22	1820	22	1685	25	1410	28	1134	30	944
Tanjung Priok	16	2273	19	1898	17	2091	24	1422	25	1300	23	1252
Gioia Tauro	17	2253	15	2126	27	1449	61	572	311	16	-	-
Bremen/ Bremerhaven	18	2181	23	1812	20	1706	20	1543	20	1526	18	1503
Kobe	19	2176	16	2101	18	1944	15	2229	23	1464	6	2916
Yokohama	20	2173	17	2091	13	2348	6	2348	7	2757	10	2317

す。香港およびシンガポールは他と比べて極端に取扱量が多く、年間1500万TEU以上ものコンテナを扱っており、3位の高雄の2倍以上になっている。国内主要港では、東京、横浜、神戸が20位以内に入っており、東京は約270万TEUで順位に大きな変動がないものの、神戸、横浜は200万TEU程度に止まっている。神戸は震災以前は6位と上位に位置していたのに対し、震災以後1996年は若干回復したが、年々順位を落としている。横浜についても年々順位が落ちているのがわかる。このことから、国内主要港湾の国際的地位は相対的に低下している現状が明らかとなっている。反対に、上海は年々順位を上げており、ここ数年の発展にはめざましいものがある。

## 2. 1. 2 港湾関連コスト

図2. 1には40フィートコンテナ1個あたりの港湾関連コスト<sup>38), 44)</sup>を示す。図2. 1(1)

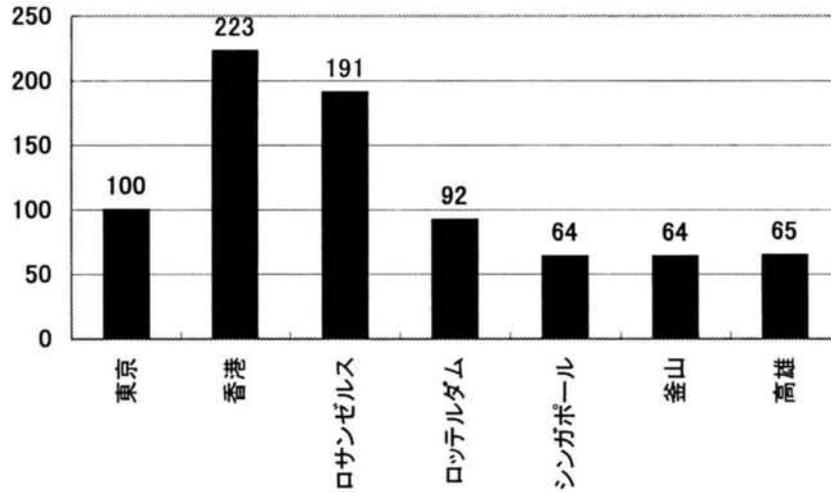


出典：平成9年度版海運白書

- 注1) 船会社からのヒアリングに基づき、運輸省作成（1995年時点、一部1994年のデータを使用）。
- 注2) 港湾諸料金は、入港税、トン税、パイロット料、タグボート料、エスコートボート料、網取り料、その他船舶経費、ターミナル費用、荷役料の合計。
- 注3) パイロット料、タグボート料、網取り料は平日の基本料金。
- 注4) ターミナル費用は、ターミナル貸付料の他にターミナル維持経費が含まれる。
- 注5) 荷役料は平日の料金で、ラッシング作業費用は含まれていない。また荷役料による料金割引制度がある場合は、それが適用された場合の実勢価格となっている。
- 注6) 入港船型は、3,600TEU=5万GT級とする。
- 注7) 入港条件：平日デイトタイム着岸、テイトタイム離岸。
- 注8) PORT DUE（入港料、トン税）は、入港回数による割引制度がある場合はそれが適用された料金になっている。
- 注9) 入港1回についてコンテナ取扱個数は、40フィートコンテナ300個と仮定している（日本の平均取扱個数。またコンテナ1個あたりの港湾諸料金は取り扱い個数により変動しうる）。
- 注10) 為替レート（1996年3月29日現在）1米ドル=107.35円=7.5705香港ドル=1.6510オランダギルダー=1.40698シンガポールドル=785.87ウォン=27.527香港ドル。

図2. 1(1) 40フィートコンテナ1個あたりの港湾諸料金（1995年現在）

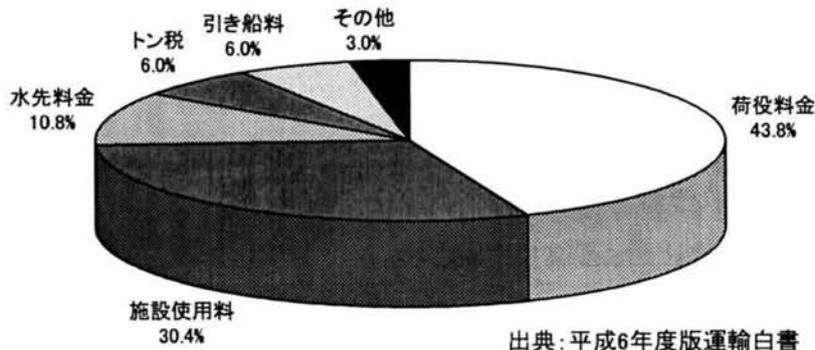
東京=100とする



出典: 港湾, 2002年6月

- 注1) コンテナ取扱料金は、CTオペレータ、利用船社に対するヒアリング（1999年、2000年）結果による。  
 注2) 入港船型は3,700TEU型=50,000G/T級（48,342G/T）とする。積卸量1,200個（1,800TEU）の場合。入港条件は平日（7:30着岸、21:00離岸）  
 注3) 各港の料金は、実際の年間取扱量を前提としたヒアリング結果に基づいており、東京、釜山、高雄については、それぞれ30万TEU扱う場合の料金となっている。  
 注4) 為替レート（2001年3月時点） 台湾1NT\$=3.78円、韓国1ウォン=0.0935円、香港1HK\$=16.39円、シンガポール1S\$=69.47円、オランダギルダー=51.68円、米国1\$=125.5円  
 注5) 港湾諸料金とは以下の諸費用の合計である。リース料、係留施設使用料、オフィス労働者人件費、港湾労働人件費、荷役機械償却費、荷役機械メンテナンス費、電力費、オフドックコンテナ料、トン税、入港料、各使用料（パイロット、進路警戒船、タグボート）、網取放作業料、その他

図2. 1(2) 40フィートコンテナ1個あたりの港湾諸料金(2000年現在)



出典: 平成6年度版運輸白書

図2. 2 神戸港におけるコンテナ1個あたりの港湾関係費用

は1994年と1995年のデータ、図2. 1(2)は1999年と2000年のデータより作成している。日本の主要港の代表としてそれぞれ神戸、東京を参考にしてしている。1995年当時、神戸はシンガポール、釜山および高雄の約2倍となっており、香港とは同程度、ロサンゼルスおよびロッテルダムより少し高い程度である。それから5年後のデータでは、内訳が必ずしも5年前と等しいとは限らないため単純な比較はできないが、東京はシンガポール、釜山、高雄より約1.5倍程度になっており、差が若干縮まっている。それに対し、香港、ロサンゼルスは極端に高くなっているのがわかる。以上のことから若干の改善は見られたもののコストはやはり近隣諸国に比べると高くなっている。

次に図2. 2には港湾関係費の内訳<sup>43)</sup>を示すが、全体の4割が荷役料金、3割が施設使用料となっており、入港時に必ずかかる費用を除けば、約7割強がターミナル側のコストといえる。したがって、ターミナル側の支出に相当する荷役機器準備やバース借受け等にかかる初期投資は取扱貨物量の増減によって変化するものではないため、貨物取扱が少ない場合にはこの部分を抑えることができればコスト低減を行うことができる。

### 2. 1. 3 24時間荷役実施の現状

国内主要港湾では24時間荷役を各方面から要望されているが、1999年現在の海外主要港における荷役実態<sup>35)</sup>を表2. 2に示す。

各港湾とも複数のターミナルを有しており、ターミナルごとに荷役実施体制は異なるが、各港湾の大部分で表に示すような実施体制になっている。

ゲートオープンの時間帯については、情報が得られなかったところもあるが、24時間荷役については、ほとんどの主要港湾において実施されている。しかしながらこの当時、ニューヨーク/ニュージャージーを除くアメリカ国内の港湾と名古屋を除く日本国内の港湾において実施されていないことがわかる。反対に、近隣アジアの主要港では完全な24時間体制をとっているのがわかる。なお、国内港湾においては労使協定上の荷役時間制限があることから配船スケジュールが制限されるなどといった港湾の利便性悪化<sup>24)</sup>の指摘がある。

そこでさらに、2000年2月の国内主要港における日曜夜間荷役の実態<sup>24)</sup>を示す。表2. 3には国内主要港湾11港における曜日別の荷役実績を示す。1ヶ月間の隻数を示す。まず11港合計を見ると、日曜荷役は他の曜日に比べて1/4程度に止まっている。また港ごとに見ると、全体に隻数の多い東京、横浜では他の曜日の1/4~1/3となっており、大阪、神戸では1/7程度とより少なくなっている。しかしながら名古屋では約半分、博多でも約4割が日曜荷役を行っており、若干多くなっているのがわかる。これは割増料金の適用有無が関係していると推測される。

表2.2 本船荷役とゲートオープンの時間帯

世界の主要港湾	本船荷役可能時間帯	ゲートオープン時間帯
アントワープ	ほとんどが24時間荷役可能	一部で月曜日から金曜日の6:00～22:00頃オープン
ブレーメン/ブREMELハーフェン	ほとんどが24時間荷役可能	ほとんどが24時間オープン
ハンブルグ	24時間荷役可能	一部で月曜日から土曜日の7:00頃～13:00頃オープン
ジオイアタウロ	24時間荷役可能	-
ロッテルダム	ほとんどが24時間荷役可能	ほとんどが24時間オープン
フェリクストゥ	24時間荷役可能	-
ロングビーチ	ほとんどが24時間荷役可能	一部で月曜日から金曜日の6:00頃～17:00頃オープン
ロサンゼルス	一部24時間荷役可能	一部で月曜日から金曜日の6:00頃～17:00頃オープン
ニューヨーク/ニュージャージー	24時間荷役可能	月曜日から金曜日の6:00頃～17:00頃オープン
シアトル	17:00～18:00を除いて荷役可能	月曜日から金曜日の7:00頃～17:00頃オープン
香港	24時間荷役可能	24時間オープン
上海	24時間荷役可能	-
神戸	月曜日～土曜日の12:00～13:00、16:30～17:30、4:00～8:30を除く時間帯、および休日以外	-
大阪	月曜日～土曜日の12:00～13:00、16:30～17:30、4:00～8:30を除く時間帯、および休日の12:00～13:00、17:00以降を除く時間帯	-
名古屋	24時間荷役可能	8:30～16:30
東京	月曜日～土曜日の12:00～13:00、18:00～19:00、24:00～1:00を除く時間帯、および日曜・休日の12:00～13:00、16:00頃以降を除く時間帯	月曜日～金曜日の9:00～16:30（ただし、12:00～13:00を除く）オープン
横浜	月曜日～土曜日の12:00～13:00、16:30～17:30、4:00～8:30を除く時間帯、および休日以外	月曜日～金曜日の9:00～16:30、および土曜日の8:30～11:30オープン
釜山	24時間荷役可能	24時間オープン
マニラ	24時間荷役可能	24時間オープン
ポートクラン	24時間荷役可能	-
シンガポール	24時間荷役可能	24時間オープン
高雄	24時間荷役可能	24時間オープン
デュバイ	24時間荷役可能	24時間オープン

※ なお、当該港湾にあるコンテナターミナル全体のほとんどは3/4以上、一部は1/4以下を意味する。

表2.3 国内主要港湾における曜日別荷役実績(2000年2月)

単位：隻数

港名	曜日							合計
	月	火	水	木	金	土	日	
東京	42	63	30	29	24	39	9	236
横浜	45	46	29	32	30	36	8	226
川崎	1	4	0	5	2	1	0	13
千葉	1	4	7	3	5	3	2	25
名古屋	32	64	47	59	56	38	24	320
清水	14	17	9	20	13	9	7	89
四日市	3	5	11	7	10	11	0	47
大阪	31	26	14	27	22	18	3	141
神戸	42	50	67	52	41	27	7	286
関門	33	28	30	28	14	12	1	146
博多	20	20	25	17	19	21	8	130
11港合計	264	327	269	279	236	215	69	1659
シェア (%)	15.9	19.7	16.2	16.8	14.2	13.0	4.2	100.0

出典：国土交通省海事局資料

表2.4 国内主要港湾における時間帯別荷役実績(2000年2月)

単位：隻数

港名	時間帯								1ヶ月間 寄港隻数 の合計
	18:00以降		21:30以降		24:00以降		4:00以降		
	隻数	比率%	隻数	比率%	隻数	比率%	隻数	比率%	
東京	130	55.1	118	50.0	90	38.1	38	16.1	236
横浜	109	48.2	82	36.3	64	28.3	17	7.5	226
川崎	3	23.1	2	15.4	2	15.4	0	0.0	13
千葉	14	56.0	9	36.0	7	28.0	3	12.0	25
名古屋	118	36.9	76	23.8	44	13.8	6	1.9	320
清水	48	53.9	31	34.8	25	28.1	18	20.2	89
四日市	20	42.6	14	29.8	7	14.9	3	6.4	47
大阪	54	38.3	36	25.5	19	13.5	1	0.7	141
神戸	95	33.2	59	20.6	48	16.8	8	2.8	286
関門	34	23.3	8	5.5	6	4.1	1	0.7	146
博多	72	55.4	43	33.1	36	27.7	16	12.3	130
11港合計	697	42.0	478	28.8	348	21.0	111	6.7	1659

出典：国土交通省海事局資料

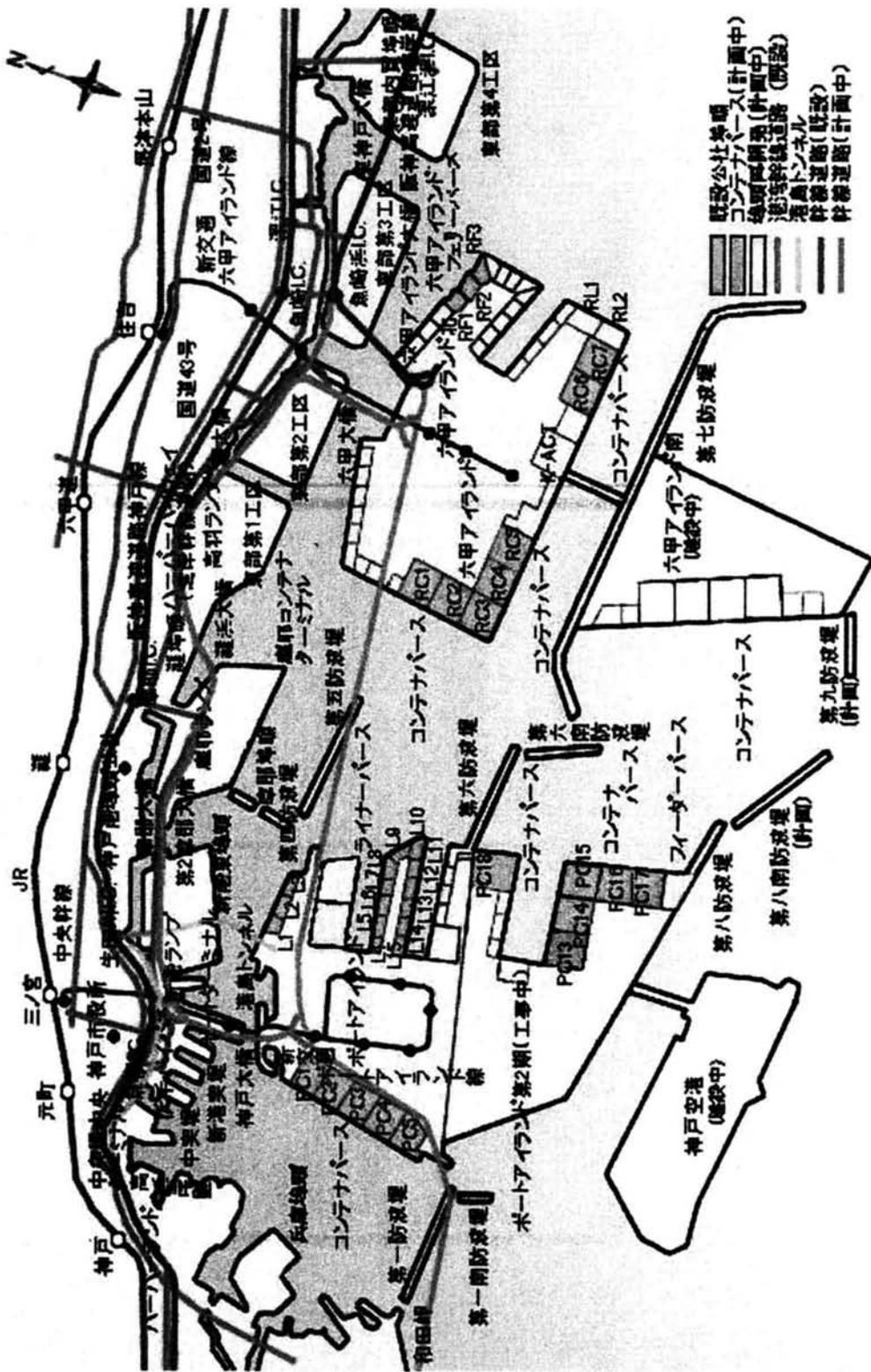
表2. 4は夜間の時間帯別荷役隻数<sup>24)</sup>を示す。全体でみると、4割が18:00以降、2割が24:00以降も荷役を実施しているが、4:00以降になると実施している所はかなり少ない。個々にみると、18:00以降も半数以上荷役しているのは東京、千葉、清水、博多である。しかしながら神戸は1/3に過ぎない。先の4港湾は24:00以降も3割は荷役を実施している。したがって、船社等サービスを利用する側にとって日本国内の港湾は利用しにくいものとなっていることがわかる。しかしながら、2000年11月の港湾運送事業の規制緩和実施を受け、2001年4月には港運労使間で日曜・夜間荷役の実施が合意された。今後動向が期待される所である。

#### 2. 1. 4 コンテナ専用ふ頭の利用状況

神戸港の実績データを用いて、コンテナ専用ふ頭の利用状況を調べる。ここで使用するデータは、神戸港六甲アイランドとポートアイランドの公社ふ頭で当時使用可能であったコンテナ専用バースに寄港したコンテナ船の入出港データである。図2. 3(1)は神戸港全体の公社ふ頭配置図<sup>15)</sup>を示し、図2. 3(2)と(3)はそれぞれ六甲アイランド<sup>16)</sup>とポートアイランド<sup>17)</sup>のふ頭配置図と各バースの利用船社を示す。ここで示されたコンテナバースのうち、1996年2月と2000年2月に供用されていたバースを表2. 5に示す。各バースの岸壁延長と水深、当時の利用船社と当該船社のアライアンスおよび船社グループを示し、1996年2月および2000年2月に供用されていたバースに○印を付けている。なお、ポートアイランドのPI-Dバースは公共バースであるが、単一のコンテナ専用ふ頭であるため1996年2月分には含めている。

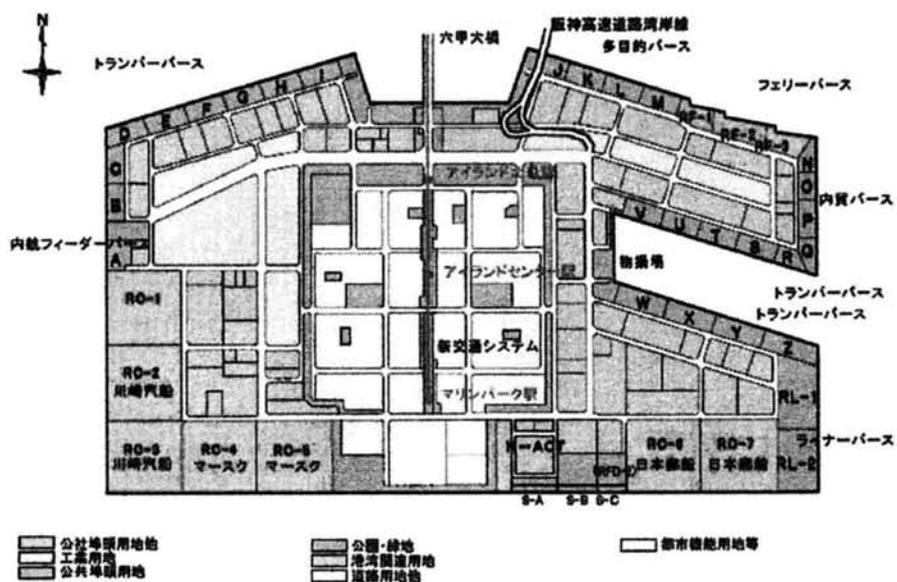
この表より、アライアンスの編成状況が変化したこともあり、利用船社が両年度で異なっていることがわかる。2000年の時点では水深-15mのバースがあることから1996年以降、商船三井は大型船が係留できるバースに移動し、新規にCOSCOが利用している。1996年当時使用可能であったバースは7バース、2000年当時利用船社が存在したバースは13バースであった。そこで次に、当時のコンテナ船入出港データを用いて、供用バースのうちどれだけのバースを同時に使用していたかを各バース数に対する占有時間として表し、それらが全体の何%を占めるかを占有率として示す。表2. 6(1)と(2)にはそれぞれ1996年2月および2000年2月の占有率を示す。なお、それぞれ時期に対象バースに係留されたコンテナ船はそれぞれ279隻、243隻である。

1996年当時7バースすべてを使用している時間は9時間、全体の1%に過ぎず、2~4バース使用が最も多いことがわかる。また2000年当時全13バースを同時に使用するケースはなく、すべてのバースが空いている状態が28%と全体の1/4もあり、バース数が過剰に供用されているのがわかる。図2. 4からも以上のことが明らかである。



出典：神戸港埠頭公社ウェブサイト ([http://www.exd.city.kobe.jp/kptc/j\\_f03-1.html](http://www.exd.city.kobe.jp/kptc/j_f03-1.html))

図2.3(1) 神戸港公社ふ頭配置図(全体)



出典：神戸港埠頭公社ウェブサイト ([http://www.exd.city.kobe.jp/kptc/j\\_f05.html](http://www.exd.city.kobe.jp/kptc/j_f05.html))

図2.3(2) 六甲アイランドふ頭配置図

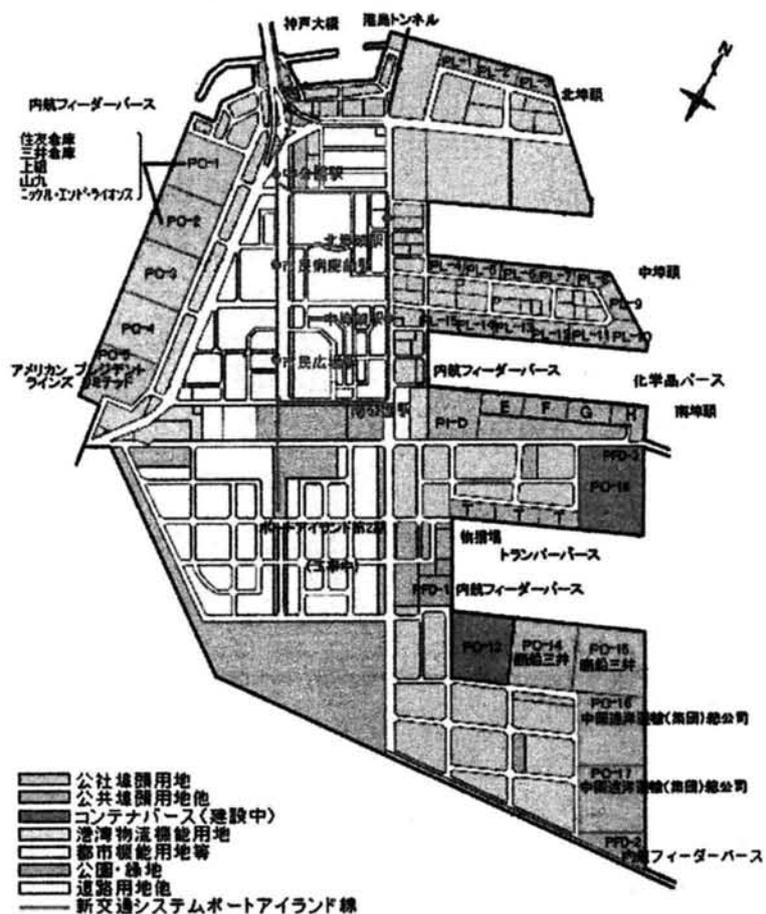


表2.5 神戸港におけるコンテナバースの概要

	バース名	岸壁延長(m)	水深(m)	利用船社		アライアンス編成		1996年2月当時供用	2000年2月当時供用
				1996年	2000年	1996年	2000年		
六甲アイランド	RC-2	350	-13	Sealand、川崎汽船	川崎汽船	K Line/ YangMing (/Hyundai <sup>※1</sup> /COSCO <sup>※2</sup> )	K Line /COSCO /Yang Ming	○	○
	RC-3	350 350	-13 -14	—	川崎汽船			—	○
	RC-4	350	-14	Mearsk	Mearsk Sealand	Mearsk /Sealand	Mearsk Sealand	○	○
	RC-5	350	-14	—	Mearsk Sealand			—	○
	RC-6	350	-14	—	日本郵船	Grand Alliance <sup>※3</sup>	Grand Alliance <sup>※4</sup>	—	○
	RC-7	350	-14	日本郵船	日本郵船			○	○
ポートアイランド	PC-1	300	-12	—	商船三井	—	The New World Alliance <sup>※6</sup>	—	○
	PC-2	300	-12	ナビックス、NL	商船三井、 P&ONL	The New World Alliance <sup>※5</sup>	The New World Alliance <sup>※6</sup>	○	○
	PC-4	300	-12	APL	—	The New World Alliance <sup>※5</sup>	—	○	—
	PC-5	300	-12	—	APL	—	The New World Alliance <sup>※6</sup>	—	○
	PC-7	300	-12	商船三井	—	The New World Alliance <sup>※5</sup>	—	○	—
	PC-14	350	-15	—	商船三井	—	The New World Alliance <sup>※6</sup>	—	○
	PC-15	350 350	-15 -15	—	商船三井			—	○
	PC-16	350	-15	—	COSCO	—	K Line /COSCO /Yang Ming	—	○
	PC-17	350	-15	—	COSCO			—	○
	PI-D	150	-12	公共	公共	—		○	—
当時使用可能なバース数								7	13

※1： 当該船社は、アジア/欧州航路の場合にのみ含まれる。

※2： 当該船社は、アジア/北米航路の場合にのみ含まれる。

※3： 1996年のGrand Alliance はNYK/Hapag-Lloyd/NOL/P&OCLより編成される。

※4： 2000年のGrand Alliance はNYK/Hapag-Lloyd/OOCL/P&O (MISC) <sup>※2</sup>より編成される。

※5： 1996年のThe New World Alliance はアジア/北米西岸航路でMOL/APL/OOCL、アジア/北米東岸航路でMOL/APL/OOCL/Nedlloyd、アジア/欧州航路でMOL/APL/OOCL/Nedlloyd/MISCより編成される。

※6： 2000年のThe New World Alliance はMOL/APL/Hyundai/NOLより編成される。

表2. 6(1) 1996年2月のバースの占有時間と占有率

単位：時間

同時使用バース数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	合計
占有時間	19	76	138	159	136	90	62	9	-	-	-	-	-	-	689
占有率%	3	11	20	23	20	13	9	1	-	-	-	-	-	-	100

表2. 6(2) 2000年2月のバースの占有時間と占有率

単位：時間

同時使用バース数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	合計
占有時間	221	105	84	92	107	58	36	26	29	16	7	3	0	0	783
占有率%	28	13	11	12	14	7	5	3	4	2	1	0	0	0	100

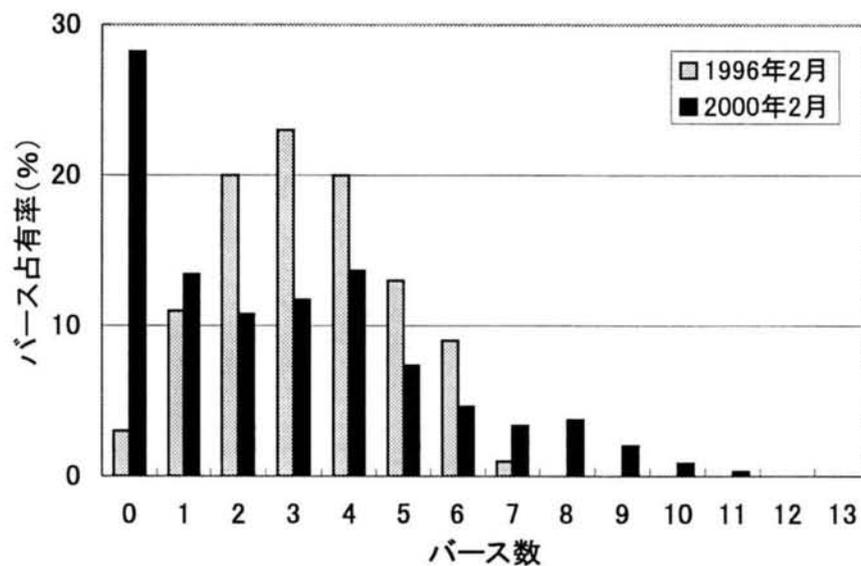


図2. 4 バース占有率

## 2.2 国内主要港湾の問題解決策と課題

トランシップ機能を強化するために必要な方策としては、文献13)では、港湾運送事業者、船社、荷主ともに、コストの低廉化、24時間・365日荷役実施を挙げている。したがってそれぞれを実施するための方策を以下で整理する。

### 2.2.1 港湾運送の規制緩和

個々の対策について整理する前に、2000年11月から施行されている港湾運送事業法の改正について述べる。

先に示した日本の港湾における物流環境の変化から港湾運送事業法の改正があり、2000年11月1日より施行されている<sup>22), 45)</sup>。規制緩和の内容としては、特定港湾(当面東京、川崎、横浜、千葉、清水、名古屋、四日市、大阪、神戸、下関、北九州、博多、以上の12港湾)を対象に事業免許制を廃止(需給調整規制の廃止)し許可制にすること、および運賃・料金の許可制を廃止し事前届出制にすることである。また免許制に替わって港湾運送の安定化や悪質な労務供給者の参入を防止するために、いくつかの留意事項が盛り込まれ、規制緩和実施による悪質事業者の参入や過度のダンピング等を防止するため、失格事由を拡充して罰則の強化を行う。改正後、新規事業者の参入や業務範囲の変更など動きが次第に活発化しており、その成果が現れつつある。

### 2.2.2 コスト削減策

国内主要港湾の1つである神戸港を利用する港湾運送事業者、荷主、船社・代理店、内航フィーダー船社に対して行われたアンケート<sup>11)</sup>では、神戸港の短所として第1に港湾のトータルコストが高いこと、第2、第3にそれぞれ水先制限が厳しく、料金が高いことと、国内移送費が高いことが挙げられている。また削減すべき港湾関係コストとしては、サービス提供側である港湾運送事業者は要望の高い順に、港湾施設使用料、ターミナル借受料、水先料・引き船料・綱取り料、荷役料となっており、第4番目に荷役料がきているのに対し、利用者側である荷主は港湾施設使用料、荷役料という順番になり、船社はまず水先料・引き船料・綱取り料、次に荷役料と利用者側としては荷役料が2番目になっている。利用者側とサービス提供者側とに若干に認識の差があるものの、どの立場においても荷役料は削減すべきコストとしての要望が高い。

荷役料金は港湾ごとに決められた1トンあたりの費用等で算出される<sup>14)</sup>が、これのほとんどは人件費等で構成されている。したがって、この部分は固定費とみなすことができ、コンテナの取扱量が増えれば、コンテナ1個あたりの荷役料は減らすことができる。

現在の入港状況で単位バースあたりの取扱量を増やすには、先で示した占有率の低

いバースを集約して、各バースの稼働率を上げる必要がある。またバースの集約により削減されたバースに要していた各種費用も削減できる。

これに伴い、内外航バースの一元管理やフィーダー船の外航バースへの直付けが実現できれば、港湾運送事業者や荷主、船社が期待している横もち費用の削減やフィーダーへの積替え時間の短縮<sup>12)</sup>が実現できる。

ただし内航フィーダー船社にとってこれを実現するには、定時制の確保、フィーダー貨物発生バースとの連続運用、係留位置の有効な配置が必要である。またバース集約を具体的に実施するためにも同様のことを実現する必要がある。2000年から港湾運送事業者が許可制から届出制になり、規制が緩和され実施しやすい形態に移行されつつある。

### 2.2.3 24時間・365日荷役実現策

国内においては一部で実施されているが、夜間や土日荷役を行う場合割増料金を徴収していることから、なるべくこの時間帯を避けるような配船が行われており、また

	日本	シンガポール、 香港、高雄、釜山	ロッテルダム	ロサンゼルス
荷役作業	月～土 8:30～翌朝4:00 日 8:30～16:00 (3年間の例外的措置) 祝 8:30～16:00 (年末年始休暇 (12/31～1/4) クローズ)	24時間可	24時間可	24時間可
ゲート	月～金 8:30～16:00 (12:00～13:00は昼休み) 土 8:30～11:30 日祝日 クローズ (年末年始休暇 (12/31～1/4) クローズ)	24時間可	月～金 5:00～翌朝 3:00 (12:00～13:00は昼休み) 土 5:00～15:00 日 クローズ	24時間可



2001年11月29日港運労使間の合意

	荷役作業	ゲート
日本	24時間可 (1/1のみクローズ)	8:30～20:00 (1/1のみクローズ)

出典：国土交通白書(平成13年度)

図2.5 港湾24時間フルオープン化の進展状況

この時間帯に到着しても平常料金の時間帯まで待機しているケースも多く見受けられる。したがって、この体制を確立して労働力の確保等を実施する必要があるが、まずは料金設定のフラット化を行うことが重要である。1日3交代のような体制を実施することができれば職域の確保にもなり、サービス向上と雇用機会の拡大という点からも重要とされる方策にすべきである。これに関しても2001年度の港湾春闘において、港運労使が港湾の24時間フルオープン化実現の第一歩となる合意に至り、同年4月5日から実施することになった<sup>23)</sup>。図2.5にあるように、日本の港湾も24時間荷役実施が恒久化され、安定的な実施を推進する方向になっており、今後この効果が期待される。

#### 2.2.4 低利用ターミナルの高度利用策

先で示したバース占有率から利用率が低いことが明らかとなったが、これを解決するために文献18)ではいくつか意見が出て来ている。

活用方法としては、港湾管理者からは「既存の公社方式から新方式への移行」や「ふ頭公社から一部の用途を転換する」、船社からは「複数船社を集合させる」、港湾運送事業者からは「港湾機能を集約し、低未利用地に新しい機能を」となっており、各方面からバース集約とそれに伴う一部の用途転換が意見として出されている。したがって、この問題解決に対してもバース集約がキーワードになっている。なお、文献19)で提言されている「岸壁水深、クレーン性能等を考慮し、かつ借受者が希望する背後ヤード規模を岸壁と一体的に貸し付けることとし、余った用地を他の利用に転換する」の実現可能性については、港湾管理者側から公社財産を普通財産にして、公共バースは港湾関連用地にすれば可能であるとしており、またふ頭公社側からすれば、港湾法第55条7項に規定する特定用途港湾施設の使用に係わる弾力的な運用という条件をクリアすれば実現できるものとしている。

### 2.3 マルチユーザターミナルの役割と効果

#### 2.3.1 マルチユーザターミナルの概要

マルチユーザターミナルシステムは日本国内には存在しないが、オランダのロッテルダム港にあるDelta Multi-user Terminal、韓国の釜山港にあるPusan East Container Terminal (PECT)がそれに相当する。運用方法上マルチユーザ化したものであり、複数の船社で複数バースを共同利用するというものである。本研究ではバース集約のためにこのマルチユーザターミナルの導入を検討する。なお、アライアンスを組んだ複数船社による1グループで複数バースを利用する場合も同様と考えてよい。具体的には、当該港湾に船が寄港してそれを係留させる場合、専用ターミナルでは常に固定位置に係留され、到着時に係留予定バースに他船が係留中で当該船舶が係留できないとき、

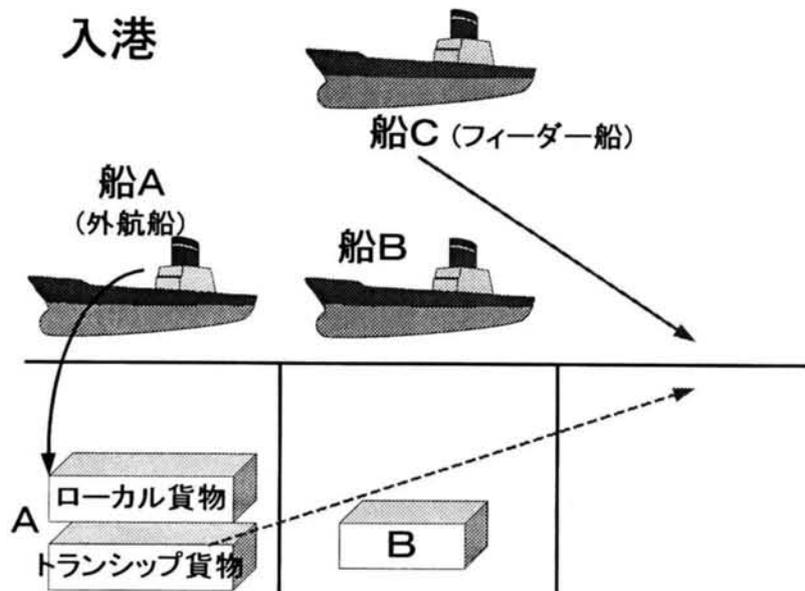


図2.6 マルチユーザターミナルの概念図

隣接するバースが空いていたとしても待ちが生じることがある。しかしながら、この共同化されたバース運用方法では寄港のたびに係留位置を決定するものである。これによって、空き状態のバースを減らし、バースの利用効率を上げることが期待できるという特徴を持つターミナルである。

図2.6にマルチユーザターミナルの概念図を示す。船Aの揚げコンテナをAの背後ヤードに置き、そのうち船Cへのトランシップ貨物を扱う例を示す。フィーダー船の直付けを考慮する場合にはトランシップ貨物を扱うときに図の船Aもしくは船Cに対して蔵置位置と離れてしまうことが予想される。全入港船舶に対しコンテナの蔵置位置が背後ヤードにある場合はおよそ荷役コンテナ数と使用ガントリークレーン数でおよその荷役時間が決まるため、当該船舶にとってはいずれの場所に係留されても荷役に要する時間はほぼ等しい。しかしながら、図2.6で示すケースの場合、係留バースによっては荷役時間が長くなることもあることを想定すると、施設使用料や荷役機器の使用料は使用時間で決定されるため、なるべく荷役時間の短くてすむ場所を船社としては希望してくるはずである。

### 2.3.2 管理運営主体

国内におけるコンテナターミナルの管理運営主体について整理する。

国内における公共方式のターミナルはほとんどが1もしくは2バースで運用されて

いる。なお横浜港、大阪港には隣接する3バース以上のバースを運用しているものがあるが、多目的バースとしての利用がほとんどであり、文献37)より名古屋港の金城ふ頭（4バース隣接）、飛島ふ頭90-92号（3バース隣接）、93-94号（2バース隣接）、神戸港の摩耶コンテナターミナル（4バース隣接）のみがコンテナ専用の公共コンテナターミナルである。多目的バースでのコンテナの取扱方法は、背後ヤードにはほとんど蔵置スペースがなく船が到着してから、近くにある上屋からコンテナを搬送する形となっており、コンテナ専用ターミナルとはかなり異なる。

また一般に公共方式では不特定多数のユーザによる利用を可能としているが、国内のコンテナターミナルの場合、専用ではないにしてもある程度事前に決まった船社が利用することになっている。したがってコスト計算を行う場合には、公共形式の場合と公社ふ頭を共同利用する場合とによって整備および管理主体が異なることから、同じだけのバース集約効果があっても具体的な数値は異なってくる。

そこで以下では現在存在する管理方式として、先の2方式と新方式、PFI方式<sup>20)</sup>概要について述べる。各方式において、上物、下物別に整備・管理の主体者、ターミナルオペレータおよびその他の事項を表2.7に示す。新方式とは、公共で岸壁を整備し、運営は公社に委ねる方式である。これは岸壁を公共整備することによって利用料金を抑えることができ、背後のヤードを特定の港運業者が一体運営することで利用効率の向上等をねらった、ターミナルサービスの向上を図る方式である。PFI方式とは、公共施設の建設、維持管理、運営等を民間の資金、経営能力、技術能力を活用して行う方式である。現在、北九州港響灘コンテナターミナルでPFI方式による管理運営主体の選定が行われている<sup>25)</sup>。

表2.7 各方式の概要

	整備・管理		ターミナルオペレータ	その他（施設利用形態等）
	下物（岸壁・土地）	上物（岸壁クレーン、上屋等）		
公共方式	国と港湾管理者	港湾管理者	民間（港運）	使用の都度、使用許可
公社方式	民間（船社）	民間（船社）	民間（船社）	下物、上物とも年間リース
新方式	国と港湾管理者	民間（船社）	民間（船社）	岸壁は公共利用が原則
PFI方式（事例案）	国と港湾管理者（維持管理は借受者）	民間（借受者）	民間（借受者）	借受者は港運会社、船社その他新規参入の民間事業者

出典：規制緩和における港湾運営方式の研究報告書，平成12年3月

各方式によって表に示すような違いがあるため、どの方式でマルチユーザ化するかによって厳密に削減されるコストは異なる。

そこで本研究では、コスト計算を行う前段階を想定し、どの方式においても複数の隣接バースを共同利用すると見なせるものを対象に適用できる運用方法を提案する。

### 2.3.3 バース割当計画の必要性

供用バース数を削減することを目的に、マルチユーザターミナルの導入を本研究では試みる。船社が専用的に利用するターミナルの場合、係留予定バースの背後ヤードに当該船舶に積載するコンテナを蔵置すれば、荷役にかかる時間を抑えることができる。しかしながらここで対象とするマルチユーザターミナルの場合、トランシップ貨物を扱うときには基幹航路の船舶（本船と呼ぶ）と内航もしくは外航のフィーダー船との間に一度ヤードを介した、コンテナの移動がある。このため、本船とフィーダー船が常に隣接して係留できる場合には、両者に最も近い所に荷役コンテナを蔵置しておけばよいが、通常そのようにうまくいかないため、どちらか一方にとっては離れた所に蔵置されることもある。この蔵置位置－係留バース間の距離差は荷役作業時間長に影響を与えると考えられるため、船の係留位置の決定の仕方次第では、バースの利用効率を良くも悪くもする。このことから、船の係留位置を決定する方法（バース割当計画）を提案する必要がある。

## 2.4 バース割当に関する既往の研究

バース最適割当に関する既存の研究は非常に少ないが、公共的な利用のバースを想定した研究としては、Brownら<sup>2),3)</sup>の研究がある。これは軍港における戦闘艦艇の係留割当計画に関するものである。基本的には複数のバースと複数の船の割当であり、公共の商港と同じ計画である。しかしこれらの研究では、商港でありみかけない係留後の係留先の移動や、船が利用するバース設備の優劣が評価尺度になっており、商港には不向きな計画手法である。

早瀬ら<sup>8)</sup>は石油タンカーを対象とした石油出荷計画問題を扱っている。ここではタンカーをどのバースへ接岸し、どのアームを使用して出荷するかを決定要素としている。出荷は到着順に行い、個々の船の滞在時間が最小となるバースに係留させるが、このとき所与とするのはタンクなどが使用可能であるか、タンクの石油製品残量がどれだけあるかを考慮して係留計画を行う。船の到着予定の変更も考慮できる問題として扱っている。

製鉄所の鋼材出荷計画に関する研究としては、福村ら<sup>7)</sup>、梅田ら<sup>41),42)</sup>の研究がある。福村らはエキスパートシステムのアプローチを採用し、船積み優先時刻指定や納期指定を満足するような係留計画を行っている。評価指標としては、出港時間帯を守ることができる船

の割合を最大にすること、および停泊時間の最小化等を用いている。到着順が大前提である。梅田らは船舶の荷役バースと船舶の作業優先順序を個々の船の滞船時間、製品の作業バースまでの搬送時間、および納期遅れ時間が最小になるように決定している。まずヒューリスティック探索によってバースの決定を行い、分枝限定法によって荷役優先度の決定を評価関数が最小になるように行っている。

在来貨物を扱った港湾を対象にしたものとして、El Sheikhら<sup>5)</sup>は船舶の寄港周期を考慮したバース割当計画をモデル化している。シミュレーションモデルを用いてFirst-In-First-Out (FIFO) 規則をもとに空きバースに船を係留させていくアルゴリズムを構築している。年間のバースの利用率と総待ち時間を評価指標としている。

コンテナ港湾を対象にコンテナ船の係留計画を行ったものとしては、Taharら<sup>40)</sup>、Laiら<sup>26)</sup>、永岩ら<sup>29)</sup>、Imaiら<sup>10)</sup>、Chanら<sup>4)</sup>の研究がある。

Taharらはシミュレーションモデルによりバースの利用率を最適化して、貨物取扱量と船の在港時間を推定するモデルを構築している。ここではフィーダー船であるか基幹航路の船舶であるかの区別をすることで優先度を設けているが、到着順にサービスを受けるという条件 (First-Come-First-Served、FCFS) のもとで係留バースのみを決定する問題として扱っている。

実際に香港のHIT (Hong Kong International Terminal Group) 社では、自社の6バースを公共的に利用した動的なバース運用が提案されている。ここでは、その1社で6つの隣接バースを保有し、ある船は毎回特定のバースに係留されていた。ところが、そのためにバース待ちが生じ非効率になっていた。そこで、船を動的に割当てる方法<sup>26)</sup>が提案されている。ヒューリスティック手法により待ち時間を含めた滞在時間を最小化するように係留位置を決定している。

永岩らは公共コンテナバースに対する割当法を検討した。ここでは、時間軸に対していくつかの期間に分けて割当計画を立案している。そして前計画期間における各バースの最後の船が出港し、当該計画期間に対してバースが空きになった後に、当該計画期の対象船に係留させる。そのとき、全対象船がバース空きになる以前に入港済みである条件を用いている。

またImaiらはこの割当法を用いて、船の荷役能率と係留待ちをしている後着の船が先着の船より先にバースに係留されるときに不満を考慮した2目的バース割当法を検討している。これらの研究で用いている割当法では、対象船舶が計画開始時刻にすでに入港していることが前提である。しかしこのような状況はバース数に比べて入港船が極めて多い状態であり現実にはまれである。

Chanらは総荷役時間と総在港時間をそれぞれ最小とする場合においても一方がどのような値をとるかを検討している。文献29)と同様に、対象船舶が計画開始時刻にはすでに到着済みであることが条件である。

以上の研究と本研究の相違点を挙げるとすれば、先着順優先の制約をあえて設けていない点にある。第3章で詳細な説明をするが、このことにより若干の待ちを許してバース集約によるコスト低減を期待する。実際にここで提案する方法を現場の支援システムとして導入する場合には、この待ちの長さは、顧客（船社）の不満足度を示す評価尺度になる。そこで事前に計画が立てられる訳であるから、当該船舶の到着前に船に係留開始可能予定時刻を知らせることができれば、前の寄港地からの航行速度を落として到着時刻をコントロールすることにより実現可能である。また船舶の燃料費は航行速度の3乗に比例して高くなることが指摘されている<sup>9)</sup>。したがって運航費低減にも寄与できるものとなる。

なお、マルチユーザーターミナルが存在するオランダにおいてはこのような研究を行った例は見られない。そこでまずオランダにある大学の大学院で構成されている TRAIL という研究組織があるが、ここでのコンテナターミナルに関する研究プロジェクトの動向について調べる。自動化ターミナルに関する研究<sup>27)</sup>、コンテナ搬送車両の技術開発に関する研究<sup>6)</sup>、コンテナ荷役の自動化に関する研究<sup>28)</sup>、無人搬送車両のコントロール方法に関する研究<sup>46)</sup>、次世代のターミナルに関する研究<sup>1)</sup>等が行われており、主として自動化・無人化を念頭に入れた研究が盛んに行われているのがわかる。

そこで次にバース割当に関する研究が行われている地域の特徴を探るために、バースの整備状況と取扱量との関係を見る。表2. 8に世界の主要港湾における1999年の取扱貨物量、総岸壁延長<sup>35)</sup>、単位延長あたりの取扱個数を示す。また、各国ごとにバース割当に関する研究の有無も同様に示す。

単位延長あたりの取扱個数より供用バース数の過剰性が判断できる。バース数が過剰であると判断されるのは、神戸、続いてシアトル、大阪、アントワープの順であり、反対に不足していると判断できるのは、香港、シンガポール、続いて上海、釜山である。バース割当に関する研究が行われているのは、イギリス、アメリカ、中国、日本、シンガポールであり、アメリカ、日本を除く国々では取扱量が多く、バースが不足していると見なされる所においてこうした研究が必要とされている。

このことから、バース数が十分足りている所では、到着順に処理すれば、待ちを発生させずにサービスを提供できる。しかしながら、不足している所では到着順のみでは対処できないため、何らかのバース割当計画が立案されている。中国、シンガポールにおいてバース割当の研究が行われているのがそのことを示している。反対に日本の場合、全ての供用バースを利用するなら、単純に到着順で処理すれば十分である。しかしながら、バース集約を目的とするためには供用バース数を減らして一見不足しているような状態にして、係留計画に工夫すれば処理可能であることを示す必要がある。そこで本研究ではこのような問題を解決するための方法を提案する。

なお、バース集約に着目するとこれに関連する研究としては、公共ふ頭の最適バース数を決定する問題を扱ったもの<sup>36)</sup>がある。与えられた期間における取扱貨物量、1

表2.8 国内外の主要港湾の取扱量と整備状況との関係

世界の主要港湾	取扱貨物量 A (1000TEU)	総岸壁延長 B (m)	単位延長あたりの 取扱個数 A/B (TEU/m)	各国におけるバース割当に 関する研究の有無
アントワープ	3614	9661	374	ベルギー なし
ブレーメン/ブレメル ハーフェン	2181	3840	568	ドイツ なし
ハンブルグ	3738	6263	597	
ジオイアタウロ	2253	3011	748	イタリア あり
ロッテルダム	6343	8400	755	オランダ なし
フェリクストウ	2697	2523	1069	イギリス なし
ロングビーチ	4408	6688	659	アメリカ あり
ロサンゼルス	3829	5862	653	
ニューヨーク/ニュー ジャージー	2863	5998	477	
シアトル	1490	4361	342	
香港	16211	5754	2817	中国 あり
上海	4210	2281	1846	
神戸	2176	7860	277	日本 あり
大阪	1270	3520	361	
名古屋	1567	3370	465	
東京	2696	3764	716	
横浜	2173	3670	592	
釜山	6440	4547	1416	
マニラ	2147	5300	405	フィリピン なし
ポートクラン	2550	3592	710	マレーシア なし
シンガポール	15945	5933	2688	シンガポール あり
高雄	6985	5182	1348	台湾 なし
デュバイ	2845	3786	751	アラブ首長国連邦 なし

バース1日あたりの平均荷役量、在港隻数を用いて、バース数を1つずつ増設するためにかかる費用とこれにより船の滞在時間が短縮して減らせる費用とを比較し、最適バース数を決定している。前者にはバース建設費、維持・修理費、機器使用料、人件費としており、後者はバースが増えて滞在時間の船費減少分であり、船費として船の建造費、維持・修理費、人件費としている。

本研究では集約効果を示すために、現状での評価指標を用いる。これは日本の主要港湾の荷役速度が他港と比較して引けを取らないほど良いとされていること、それから最低限保持しなければならない水準が現状であるためである。荷役速度はガントリークレーンの技術開発上、スプレッダーの巻き上げ速度等の点からは現状の形態であれば、頭打ち状態といわれている。したがって、荷役機械に特別な技術革新が行われない限り、現状の荷役速度（単位時間あたりの荷役個数）を維持しつつ、コストを低減するための方法を検討するのが現実的であると考えられる。

## 第2章に関する参考文献

- 1) Y.M. Bontekoning, H. Priemus and R. Dekker, New generation intermodal terminals : a simulation tool to support investment decisions, TRAIL Project, <http://www.trail.tudelft.nl/>, 1997-2001.
- 2) Brown, G.G., Lawphongpanich, S. and Thurman, K.P., Optimizing ship berthing, *Naval Research Logistics*, Vol.41, 1-15, 1994.
- 3) Brown, G.G., Cormican, K.J., Lawphongpanich, S. and Widdis, D.B., Optimizing submarine berthing with a persistence incentive, *Naval Research Logistics*, Vol.44, 301-318, 1997.
- 4) Chan, W.T. and Imai, A., The berth allocation problem : Heuristic method using genetic algorithms, *Computer applications in engineering*, Proc. of the 1<sup>st</sup> JSPS-NUS seminar on integrated engineering, 1996.
- 5) El Sheikh, A.A.R., Paul, R. J., Harding, A.S. and Balmer, D.W., A microcomputer-based simulation study of a port, *Journal of Operational Research Society*, Vol.38, No.8, 673-681, 1987.
- 6) J.J.M. Evers and E.H. Fumee, Smart vehicles : mechanics and mechatronics, TRAIL Project, <http://www.trail.tudelft.nl/>, 1999-2003.
- 7) 福村聡, 佐能克明, 山川栄樹, 鋼材出荷計画エキスパートシステムと分枝限定法, *オペレーションズ・リサーチ*, 33-39, No.1, 1988.
- 8) 早瀬健夫, 伊藤潔, 松本巖, 印南裕久, OSSES : 石油出荷ヤードのための出荷スケジューリングエキスパートシステム, *人工知能学会誌*, Vol.8, No.1, 79-89, 1993.
- 9) 今井昭夫, コンテナ輸送システムにおける設備計画の最適化に関する研究, 京都大学博士論文, 1989.11 .
- 10) Imai, A., Nagaiwa, K. and Chan, W.T., Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.31, No.1, 75-94, 1997.
- 11) 関西交通経済研究センター, 神戸港における内航フィーダー貨物の誘致に関する調査研究報告, 39-69, 平成12年3月.
- 12) 文献11), 91-102.
- 13) 関西交通経済研究センター, 神戸港のハブ機能強化に関する調査研究報告書ーコンテナターミナル運営の効率化ー, 69-71, 平成10年3月.
- 14) 交通日本社, 貨物運賃と各種料金表, 1999.
- 15) 神戸港埠頭公社ウェブサイト, [http://www.exd.city.kobe.jp/kptc/j\\_f03-1.html](http://www.exd.city.kobe.jp/kptc/j_f03-1.html) .
- 16) 神戸港埠頭公社ウェブサイト, [http://www.exd.city.kobe.jp/kptc/j\\_f05.html](http://www.exd.city.kobe.jp/kptc/j_f05.html) .
- 17) 神戸港埠頭公社ウェブサイト, [http://www.exd.city.kobe.jp/kptc/j\\_f04.html](http://www.exd.city.kobe.jp/kptc/j_f04.html) .

- 18) 港湾空間高度化センター, 規制緩和における港湾運営方式の研究報告書, 27-28, 平成12年3月.
- 19) 文献18), 60-63.
- 20) 文献18), 45-46.
- 21) 国際港湾貨物流通協会, 東・東南アジアにおける国際貨物流通に係わる主要港湾の概要と実態調査, 36-37, 平成6年1月.
- 22) 国土交通省, 国土交通白書 (平成13年度), 257-258, 平成14年3月.
- 23) 国土交通省, 海事レポート (平成13年度), 42-44, 平成13年7月.
- 24) 文献23), 174-176.
- 25) 小林照夫, 澤喜司郎, 香川正俊, 吉岡秀輝共編著, 現代日本経済と港湾, 成山堂書店, 61-62, 2001.
- 26) Lai, K.K. and Shih, K., A study of container berth allocation, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.26, No.1, 45-60, 1992.
- 27) J.R. van der Meer, M.B.M. de Koster and R. Dekker, Operational control and design of internal transport, TRAIL Project, <http://www.trail.tudelft.nl/>, 1996-2000.
- 28) P.J.M. Meersmans, R. Dekker and A.P.M. Wagelmans, Control systems for automated container handling, TRAIL Project, <http://www.trail.tudelft.nl/>, 1997-2001.
- 29) 永岩健一郎, 今井昭夫, 公共コンテナ埠頭におけるバース割当計画, 日本航海学会論文集, No.90, 119-129, 1994.
- 30) National Magazine, Containerisation International Yearbook, 6-9, 1996.
- 31) National Magazine, Containerisation International Yearbook, 8-9, 1998.
- 32) National Magazine, Containerisation International Yearbook, 8-9, 1999.
- 33) National Magazine, Containerisation International Yearbook, 8-9, 2000.
- 34) National Magazine, Containerisation International Yearbook, 8-9, 2001.
- 35) 文献34), 35-173.
- 36) 則武通彦, 公共ふ頭における最適バース数の決定に関する研究, 土木学会論文報告集No.278, 113-122, 1978.10.
- 37) オーシャンコマース, 国際輸送ハンドブック (2002年度), 602-604, 2002.
- 38) 日本港湾協会, データで見る日本の港湾の国際競争力, 港湾6月号, Vol.79, 7-8, 2002.
- 39) 商船三井営業調査室, 定航海運の現状2000/2001-正念場をのりこえ新たな飛躍へ-, 2001.
- 40) Tahar, R. M. and Hussain K., Simulation study for seaport planning and management, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium, Advanced Manufacturing Process, Systems, and Technologies (AMPST 99), 443-451, 1999.

- 41) 梅田豊裕, 小西正躬, 北村章, 金村真三, 高見真司, 予測評価探索をともなう分枝限定法による出荷バースの操業スケジューリングシステム, 制御情報学会論文誌, Vol.13, No.4, 194-203, 2000.
- 42) 梅田豊裕, 大塚喜久, 金村真三, 高見真司, 製鉄所出荷バースの操業スケジューリング, 第41回システム制御情報学会研究発表講演会, 361-362, 1997.
- 43) 運輸省, 運輸白書 (平成6年度), 1994.
- 44) 運輸省, 海運白書 (平成9年度), 1997.
- 45) 運輸省, 運輸白書 (平成12年度), 2000.
- 46) I.F.A. Vis, M.B.M de Koster, and R. Dekker, Analysis and development of control concepts for automated container transport system, TRAIL Project, <http://www.trail.tudelft.nl/>, 1997-2002.

## 第3章 単一船舶のみの係留を考慮したバース割当計画<sup>4), 5)</sup>

### 3.1 概説

第2章で示した既往の研究の中で文献 8)と 9)では、対象船舶すべてが計画開始時刻にはすでに入港していることを前提としている。しかしながら、このような状況はバース数に比べて入港船が極めて多い状態であり現実にはまれである。そこで本研究ではより現実的なバース割当が行えるように、船の到着が必ずしも計画開始時刻以前ではない、つまり計画開始後に到着する船も対象とする場合のバース割当法を検討する。

3.2節では、バース割当計画の具体的な内容を示し、評価指標と前提条件について述べ、問題の定式化と定式化の証明を行う。3.3節では、ラグランジュ緩和問題を用いた劣勾配法 (LR) による解法手順について述べ、3.4～3.6節では、解の精度と各要素の違いによる解への影響分析を行う。さらに3.7節では、神戸港の実績データを用いて提案する方法の効果分析を行う。

### 3.2 バース割当問題とモデルの定式化

先に示したように神戸港では、バースが空きになっている状態が目立ち、供用バースすべてを同時に使用している時間はわずかであった。したがって、複数のコンテナバースを共同利用し、割増料金をなくして船とバースの割当を動的にすることによって、バースの利用率を上げることが期待できる。

そこで次に、マルチユーザーターミナルにおけるコンテナ船のバースへの割当法について検討する。

バース割当の評価は文献 8)でさまざまなものが検討されているが、バースの公共性の点から総在港時間 (つまり各船のバース待ち時間と荷役時間の合計の総和) の最小化が適切であると考えられる。なおバース待ち時間とは、係留予定のバースに他船が荷役中で当該船が係留できないとき、他船が出港して当該船が係留できるまでの時間を意味し、荷役時間とは当該船が荷役を開始して揚げ作業、積み作業を終了して荷役が完了するまでの時間を示している。したがって、当該港湾における対象バースで作業する本船に対する待ち時間と岸壁での直接の本船荷役時間のみを対象としており、例えば陸側の荷役である外来トレーラーへ (から) の荷役や荷主までの輸送時間等は対象としていない。

荷役時間に関しては公共形式の場合、おそらく各バースとも同一性能の機器を用意すると考えられ、バースごとの荷役能率は異ならないと考えられる。しかし動的にバースと船の割当を決定するため、必ずしもある船の荷役するコンテナが当該船舶の係留バース近傍

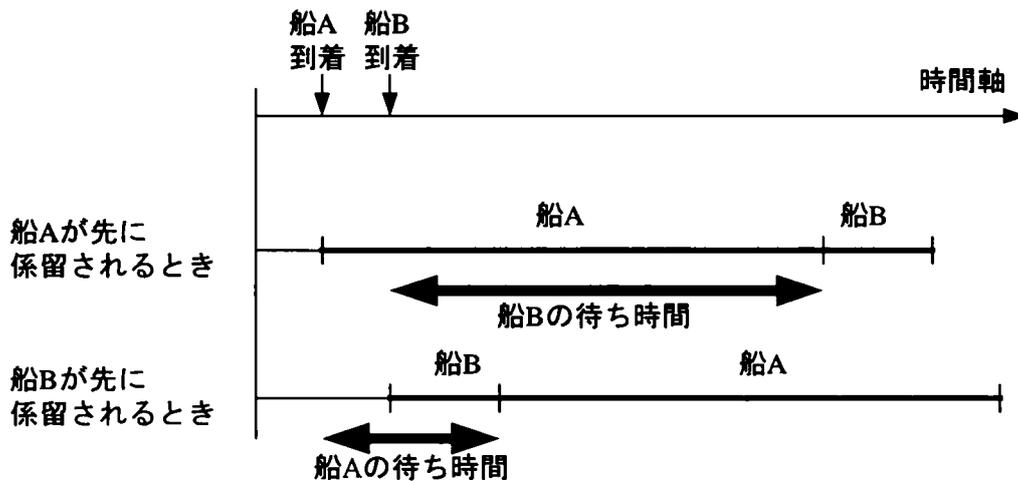


図3. 1 FCFSルールを制約に設けない理由

に蔵置されるとは限らないであろう。このような場合、荷役方式にもよるが、船の係留バースが異なれば荷役時間に差がでてくると考えられる。

また係留順序を決定する場合、実際にはFirst-Come-First-Served (FCFS) のルールに基づいて入港順に係留させたり、またターミナル側にとって優先とすべき顧客(船)、例えば貨物量の多い船を優先にすることが考えられる。しかしながら、港全体で考えると各船の待ち時間に関するサービスが問題になってくる。つまり、例えば荷役時間の大きく異なる2隻の船がほぼ同時に港に到着する場合、図3. 1に示すように荷役時間の短い(貨物量の少ない)船を先に係留させた方が他船への待ち時間が短くてすむことになる。これは先述の貨物量の多い船を優先的に係留させるという条件に反する。しかしこれらの条件を緩和することにより、港全体として在港時間が短くなり、利用バース数が少なくてすむ。このことによって、減らした分のバースにかかるべきコストの削減が期待できる。そのため、本研究ではあえて係留順には制約を設けていない。しかしながら目的関数が総在港時間の最小化であり、待ち時間も考慮しているため、各船が極端にバース待ちをすることはなく、ある程度先着順は考慮されているものと考えてよい。

### 3. 2. 1 前提条件

バース割当において、以下の条件を仮定する。

#### (a) 係留条件

1つのバースには同時に1隻しか係留できない。

#### (b) 荷役時間

荷役時間は係留バースによって、必ずしも等しいとは限らない。

#### (c) 対象船舶

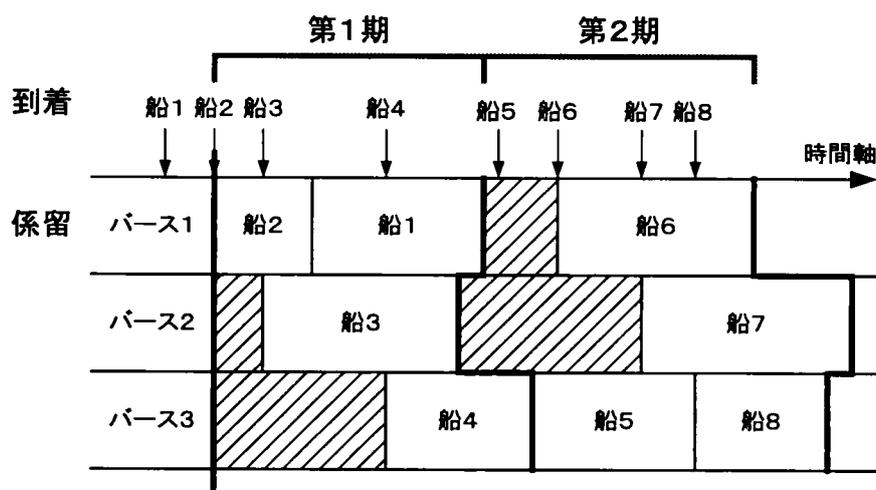


図3. 2 係留計画の概念

船には計画開始前に入港するものと後に入港するものがあるが、それらをすべて計画対象とする。

### 3. 2. 2 バース割当計画の概念

図3. 2に本問題の概念図を示す。3バースに8隻の船が係留されている状況を示しており、下向きの矢印は当該船の到着を示す。なお、船番号は到着順に付している。斜線はバースが空いている状態を示している。この図で、第2期を現在の計画対象として考えると、直前の計画期間（ここでは第1期）の最後の船が出港してバースが空きになる時刻、つまり太線を第2期の計画開始時刻とする。これはバースによって異なることもある。またこの割当結果の船2のように、後に入港した船が先に係留されることも可能としている。

### 3. 2. 3 定式化

本問題は一種の割当問題になる。定式化で用いる変数とパラメータは以下の通りである。

$i(=1, \dots, I) \in B$  : バース番号 ( $I$ : 対象バース数)

$j(=1, \dots, T) \in V$  : 船番号 ( $T$ : 対象船舶の隻数)

$k(=1, \dots, T) \in O$  : 係留順序 (当該対象時間内での)

$C_{ij}$  : 船  $j$  がバース  $i$  で行う荷役時間

$P_k$  :  $k$  までの順番の集合

$A_j$  : 船  $j$  の到着時刻

$S_i$  : 前計画期間からバース  $i$  にいる船が出港し、本計画期間内でバース  $i$  が空きにな

る時刻（当該計画期間の計画開始時刻）

$W_i$  : バース  $i$  の計画開始時刻以降の到着船の集合

$x_{ijk}$  : もし船  $j$  がバース  $i$  で  $k$  番目に係留されるとき1、そうでないとき0である0-1整数変数

$y_{ijk}$  : 船  $j$  がバース  $i$  の  $k$  番目の船として係留される直前での、バース  $i$  の空き時間。  
これは一種のスラック変数である

本問題は、次のように定式化される。

$$\begin{aligned}
 \text{[PD] Minimize} \quad & \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in O} \{(T - k + 1)C_{ij} + S_i - A_j\}x_{ijk} + \\
 & \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in O} (T - k + 1)y_{ijk} \tag{3.1}
 \end{aligned}$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i \in B} \sum_{k \in O} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in V \tag{3.2}$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall i \in B, k \in O \tag{3.3}$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{m \in P_i} (C_{ii}x_{ilm} + y_{ilm}) + y_{ijk} - (A_j - S_i)x_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in B, j \in W_i, k \in O \tag{3.4}$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \tag{3.5}$$

$$y_{ijk} \geq 0 \ \& \ \text{integer}, \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \tag{3.6}$$

式(3.1)は目的関数である総在港時間の最小化を示している。制約式(3.2)は各船が必ずいずれかのバースに1回係留されることを保証し、式(3.3)は各バースで、ある時点ではただ1隻しか係留できないことを意味する。式(3.4)は船の入港後にバース  $i$  に係留されることを保証する。ここでもしバース  $i$  に係留中の  $(k-1)$ 番目の船が出港した後に、当該バースに  $k$ 番目の係留予定船  $j$  が入港する場合、スラック変数  $y_{ijk}$  は正になり、逆に  $(k-1)$ 番目の船が出港する前に  $k$ 番目の船  $j$  が入港したならば、 $y_{ijk}=0$ になる。解では、すべての船がいずれかのバースにただ1度だけ係留されなければならない。したがって、1つのバースに対象船すべてが係留されるという解も考えられるため、集合  $O$  の位数 (cardinality) は船の隻数  $T$  と等しくなければならない。

また解は最適性を失うことなく、次のように解釈されて変換されるものとする。つまり、もし各バースへの割当が不連続なとき、たとえば、 $x_{1.1}=0$ 、 $x_{1.2}=0$ 、 $x_{133}=1$ 、 $x_{114}=1$ 、（ここで  $x_{1.1}$  とはバース1に1番目に割当られるすべての船の決定変数のこと）であれば、割当

順序を前へシフトして、 $x_{112}=1$ 、 $x_{131}=1$ と解釈すればよい。

### 3. 2. 4 定式化の証明

3. 2. 1で定式化を行ったが、ここではその定式化が正しいことを証明するために、まず式の意味について説明し、次に例を用いて証明する。

まず式(3.1)の目的関数の各項を説明の都合上、並べ替えてさらに分解すると、(3.7)式

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in O} \{ \underbrace{S_i - A_j}_{\text{第1項}} + \underbrace{C_{ij}}_{\text{第2項}} + \underbrace{(T-k)C_{ij}}_{\text{第3項}} \} x_{ijk} + \sum_{i \in B} \sum_{j \in W} \sum_{k \in O} \{ \underbrace{y_{ijk}}_{\text{第4項}} + \underbrace{(T-k)y_{ijk}}_{\text{第5項}} \} \quad (3.7)$$

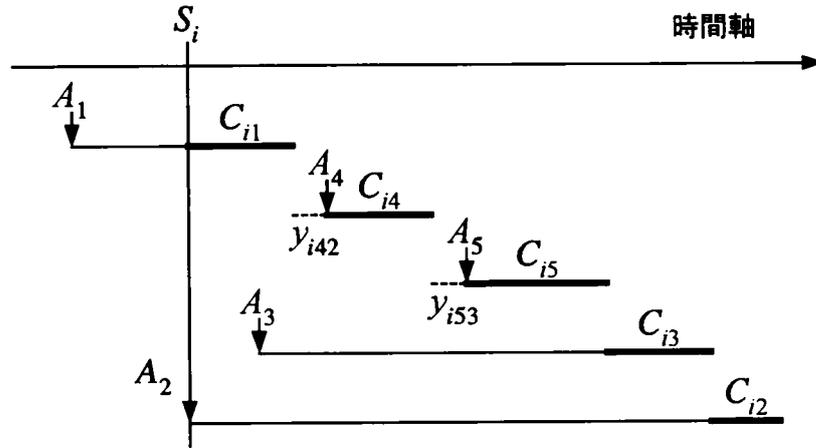
のようになる。各項のそれぞれの意味については次のようになる。バース  $i$  に  $k$  番目に係留される船  $j$  を対象船とすると、船  $j$  がバース  $i$  の計画開始より前に入港する場合、入港してから計画が始まるまでの待ち時間が発生するが、第1項の  $S_i - A_j$  はそれを示している。対象船の荷役時間は第2項目の  $C_{ij}$  である。また当該バース全体で見ると、この  $C_{ij}$  は対象船より後に係留される船の待ち時間の一部にもなる。したがって、第3項の  $(T-k)C_{ij}$  はそれらすべての船、つまり  $(T-k)$  隻分に対しての待ち時間となる。第4項の  $y_{ijk}$  は、対象船の直前に係留された船が出港してから、対象船が入港するまでのバースの空き時間である。またこれは荷役時間と同様、対象船より後に係留される船の待ち時間にもなるため、第5項の  $(T-k)y_{ijk}$  は、それらすべての船、つまり  $(T-k)$  隻分の待ち時間を表す。

次に、係留例として図3. 3の(1)と(2)を用いて詳細に各項の意味を示す。(1)はバース  $i$  に船5隻が係留されている様子を示している。横軸に時間軸、上から順に船の係留を示しており、下向きの矢印が船の入港、太線が船の係留、実線が各船の在港時間（待ち時間+荷役時間）を示している。 $S_i$ 、 $A_j$ 、 $C_{ij}$  については定式化のところで説明したとおりである。なお、船番号  $j$  は入港順に付している。この図に、総在港時間を求める手順がわかりやすくするため補助線を加えたのが図3. 3の(2)である。この図を用いて各項を説明する。

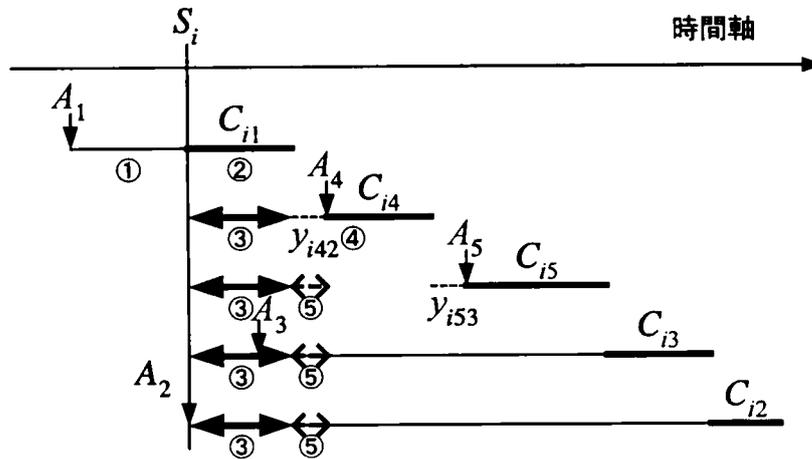
対象船を5隻とし、船  $j$  が船1であると考えると、第1項の  $S_i - A_1$  は船1が  $A_1$  に到着してバース  $i$  が計画開始になるまでの待ち時間（①の部分）になる。第2項の  $C_{i1}$  は船1の荷役時間で②にあたる。また船1が係留されることによって、その船の荷役時間が後に係留される船の待ち時間になるので、第3項の  $(T-k)C_{i1}$  は  $(5-1)C_{i1}$  となり、船1の後にバース  $i$  に係留される4隻分の待ち時間の一部として計算される。これは船2～5の③に対応する。

ところで、船4と5は入港後すぐに係留されているので、船1の荷役時間  $C_{i1}$  はこれらの船の待ち時間にはならない。また船3は船1の係留途中に入港しているので、 $C_{i1}$  はその待ち時間としては長すぎる。これらに対して式(3.1)は次のように作用する。船4は、計画開始以降に入港するので  $S_i - A_4$  は負の値を持つ。また、第4項の  $y_{i42}$  は船4の係留直前のバース空き時間であるが、これも船4の待ち時間の一部として計算される。ところで、船4の在港時

(1) 係留例



(2) 総在港時間の考え方



(3) 係留事例

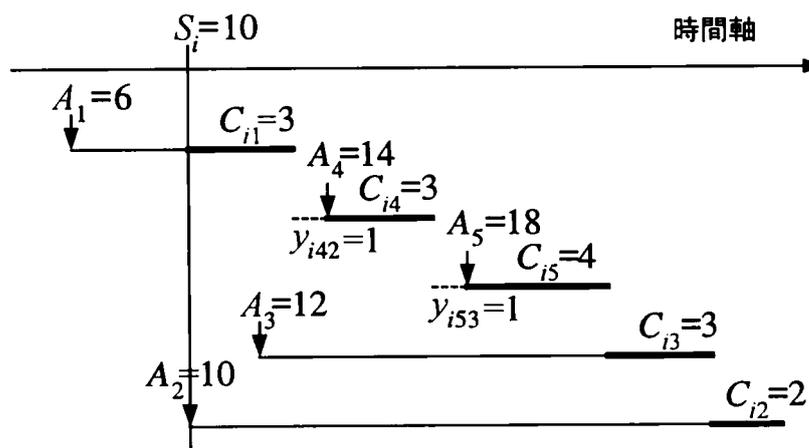


図3.3 目的関数の説明

間を求めると  $S_i - A_4$  は負で与えられているため、これに船1の荷役時間  $C_{i1}$  と船4の係留直前の空き時間  $y_{i42}$  を加えて差し引きゼロとなり、待ち時間はないものとして計算できる。

また、船4の係留直前の空き時間  $y_{i42}$  は船4の後に係留される船の待ち時間になるため、第5項の  $(T-k)y_{ijk}$  は  $(5-2)y_{i42}$  となり、船4の後にバース  $i$  に係留される3隻分の待ち時間の一部として計算される。これは船2、3、5の⑤の部分である。また他船についても同様に考えていくことができる。以上により、総在港時間が式(3.1)によって求まる。

また各バースにおいて係留順は隻数分用意しているが、実際には各バースには係留順よりも少ない船が係留されることになるのがほとんどである。例えば、あるバースに1隻しか係留されない場合、その1隻の船が当該バースの1番目に係留されるとすると、後の船に対する待ち時間を求める必要はないと考えられる。ところが、本問題の目的関数は総在港時間の最小化であるため、割当結果の係留順は後ろづめになる。つまり、仮に対象船舶10隻を3バースに係留させる問題の解で、あるバースに1隻のみが係留されることになれば、その船は1隻だけ10番目に係留され、1～9番目には係留船はないということになる。

次に、図3. 3の(3)の係留例を用いて目的関数値である総在港時間を求めていく。この図は、図3. 3の(1)の  $S_i$ 、 $A_j$ 、 $C_{ij}$  のそれぞれに値を与えたものである。

まず、定式化した式を使わずに総在港時間を求める。そこで、この図より各船の待ち時間と荷役時間を求めたのが表3. 1である。

表3. 1 各船の待ち時間と荷役時間

船 $j$	待ち時間	荷役時間
1	4	3
2	15	2
3	10	3
4	0	3
5	0	4

この表より、各船の待ち時間と荷役時間の総和を求めると、44時間である。

また仮に対象船が10隻の場合に、当該バース  $i$  において係留順が後ろづめの方が総在港時間が小さくなるので、係留順は6～10番目に係留されるとし、式(3.1)にあてはめると、

$$k=6 \quad (10-6+1) \times 3 + 10 - 6 = 19$$

$$k=7 \quad (10-7+1) \times 3 + 10 - 14 + (10-7+1) \times 1 = 12$$

$$k=8 \quad (10-8+1) \times 3 + 10 - 18 + (10-8+1) \times 1 = 7$$

$$k=9 \quad (10-9+1) \times 3 + 10 - 12 = 4$$

$$k=10 \quad (10-10+1) \times 2 + 10 - 10 = 2$$

となり、以上を合計すると総在港時間は44時間となる。

したがって、直接各船の待ち時間と荷役時間から求めた場合と、定式化の式から求めた場合では同じ在港時間が得られることがわかる。

さらに制約式(3.4)について述べる。式(3.4)は、計画開始以降に入港する船に対してのみ必要となる制約である。そこでまず、式(3.4)を変形すると、下のような式になる。

$$\sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} (C_{il} x_{ilm} + y_{ilm}) + y_{ijk} \geq (A_j - S_i) x_{ijk} \quad (3.8)$$

図3.4は横軸が時間軸であるが、鎖線は対象船の直前に係留された船の在港状態を示している。

$A_j - S_i$ は図中の①に相当し、計画開始から対象船が入港するまでの時間である。

$\sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} (C_{il} x_{ilm} + y_{ilm})$  は次のような意味になる。 $l$ は当該バースにおいて対象船より前

に係留された船であり、 $m$ は船 $l$ の係留順を示しているため、当該バースに対象船が係留されるまでに係留された船の荷役時間とバースの空き時間の合計である。したがって、制約式(3.4)では計画開始以降に入港する船だけを対象としているので、

$\sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} (C_{il} x_{ilm} + y_{ilm})$ の値は当該バースに対象船の直前に係留された船の出港時刻である。

したがって上の式は、 $x_{ijk}=1$ なら左辺=右辺となり、 $x_{ijk}=0$ であれば左辺>0となるので、入港前に係留されることはない。よって、式(3.4)は入港後に係留されることを保証している。

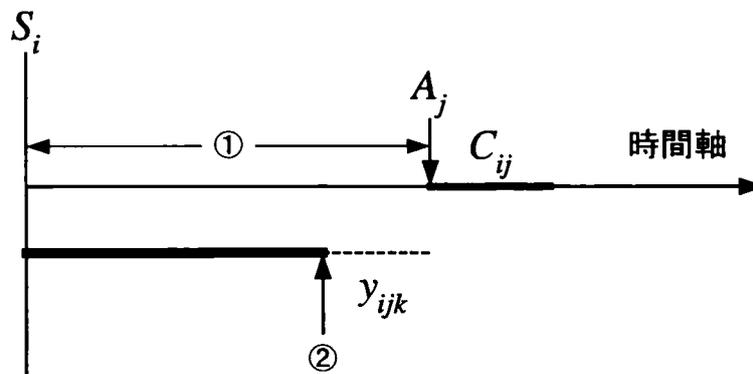


図3.4 制約式(3.4)の考え方

### 3.3 ラグランジュ緩和問題を用いた劣勾配法

本問題は一般化された割当問題であり、最適解を求めるのが困難であるので、近似解法を用いることにする。ここで、近似解法として解の下界値を与えてくれるLRを用いることにする。

#### 3.3.1 ラグランジュ緩和<sup>7)</sup>

組み合わせ最適化問題中の難しい問題に対する良い解を見つけるには、最適値に可能な限り近い上界と下界を計算することが必要である。

良い上界値を求めるための一般的な手法は、基本的には、ヒューリスティック手法である。また、良い下界値を求めるために適用可能な一般的解法の1つとしてLRがある。

LRを用いた解法の大まかな処理の流れは以下ようになる。

ステップ1：問題を整数（または混合整数）計画問題として定式化する

ステップ2：この定式化のいくつかの制約条件式にラグランジュ乗数を付けて、これらの制約を目的関数に緩和して組み込む

ステップ3：結果の整数（または線型）計画問題を解く

上記のステップ3で得られた解の値が元問題の最適解の質の良さの下界を与えている。これにより、LRが適用できる場合には、ヒューリスティック手法によって得られた実行可能解の質を評価し、またさらなる計算が必要かどうかを判断できる。

また図3.5に示すように縦軸を値とし、線を上にとどるほど値が大きくなるものとする

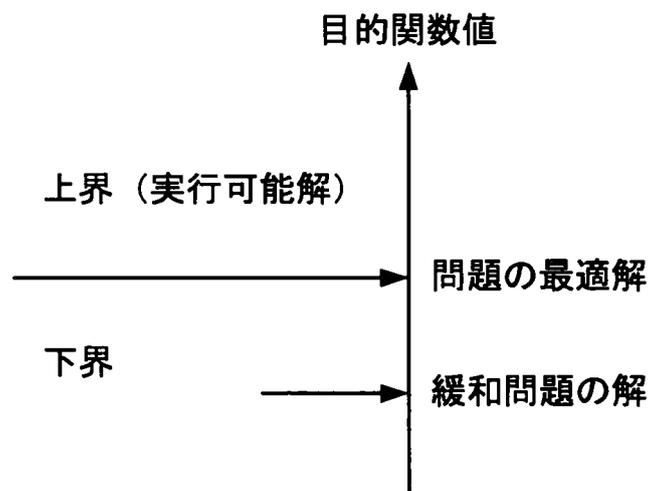


図3.5 最小化問題の図的解釈

と、本問題の最適値は正確にどこにあるかわからないが、この線上のどこかに存在する。

概念的にこの最適値は縦軸を次の2つに分ける働きをする：

- ・最適値より上の値が上界値を与える
- ・最適値より下の値が下界値を与える

最適値を見つけるためには、解法は上界と下界の両方を考慮しなければならない。つまり、良い近似解を得るには、以下に示す制約値の質2点が重要となる。

- ・解の値は最適値に近ければ近いほど良い、つまり小さいほど良い
- ・下界値はできるだけ大きく、最適値に近ければ近いほど良い

本問題のような最小化問題の場合には、ヒューリスティック解法で解の値を作り出すことができる。下界値はLRで求めることができる。

この手法の特徴をまとめると、以下の点のように表せる。

- ・多くの組み合わせ最適化問題は、簡単な問題に制約を付加することで複雑な問題になっている。このような複雑な制約を目的関数に吸収すれば、解きやすい問題になり、これを用いてラグランジュ乗数の値を適切なものにする
- ・実際の経験によると、LRは適切な計算量で非常によい下界を与えてくれる

なおLRを用いた研究には、片山ら<sup>6)</sup>およびCurrentら<sup>1)</sup>のものがあり、元問題をラグランジュ緩和問題に変形するいくつかの問題を示している研究には、Gavish<sup>3)</sup>およびFisher<sup>2)</sup>の研究が挙げられる。

まず片山らは、走行費用とリンク設置費用の総和を最小にする容量制約のないネットワーク問題を扱っており、ここで定式化された問題に対し、フロー保存の制約式をラグランジュ緩和している。ここでの緩和問題は連結ネットワークで最小費用のリンクを選択する問題に変形でき、最小木問題の解法アルゴリズムを用いて解を得ている。

Currentらの研究では、トラックに容量制約のある3次元の輸送問題を扱っており、定式化された問題に対し、容量制約の式を緩和している。ここでの緩和問題は通常の2次元の輸送問題として変形でき、このアルゴリズムによって下界値を求めている。

次にGavishは、多項式オーダーで解くことができない問題に対し、緩和問題への変形について検討している。一般化割当問題の緩和問題を古典的な割当問題に、公共投資予算問題のそれをナップザック問題に、容量制約のある施設配置問題のそれを輸送問題に、多品種輸送フロー問題のそれを輸送問題に変形するなどし、緩和問題が一般に良く知られている問題として表現できることを示している。

Fisherの研究では、線形計画問題に対してラグランジュ緩和を行った研究のレビューを行っている。例えば、巡回セールスマン問題の制約一部を緩和して最小木問題または割当問題に、一般化割当問題をナップザック問題に、集合分割問題をマッチング問題として変形して問題を解決する研究があることを示している。

### 3.3.2 本問題のラグランジュ緩和問題

本問題をLRで近似的に解くが、この緩和問題は元問題から式(3.4)を緩和した以下の問題となる。

$$\begin{aligned}
 \text{[P1] Minimize} \quad & \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in O} \{(T-k+1)C_{ij} + S_i - A_j\} x_{ijk} - \\
 & \sum_{i \in B} \sum_{j \in W, k \in O} \lambda_{ijk} (S_i - A_j) x_{ijk} + \\
 & \sum_{i \in B} \sum_{j \in W, k \in O} (T-k+1 - \lambda_{ijk}) y_{ijk} - \\
 & \sum_{i \in B} \sum_{j \in W, k \in O} \lambda_{ijk} \sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} (C_{il} x_{ilm} + y_{ilm}) \tag{3.9}
 \end{aligned}$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i \in B} \sum_{k \in O} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in V \tag{3.10}$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall i \in B, k \in O \tag{3.11}$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \tag{3.12}$$

$$y_{ijk} \geq 0 \ \& \ \text{integer}, \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \tag{3.13}$$

ここで $\lambda_{ijk}$ はラグランジュ乗数である。

$y_{ijk}$ は制約式に現れていないので冗長である。したがって目的関数を整理すると問題は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \text{[P2] Minimize} \quad & \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in O} \{(T-k+1)C_{ij} + S_i - A_j\} x_{ijk} - \\
 & \sum_{i \in B} \sum_{j \in W, k \in O} \lambda_{ijk} (S_i - A_j) x_{ijk} - \\
 & \sum_{i \in B} \sum_{j \in W, k \in O} \lambda_{ijk} \sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} C_{il} x_{ilm} \tag{3.14}
 \end{aligned}$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i \in B} \sum_{k \in O} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in V \tag{3.15}$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall i \in B, k \in O \tag{3.16}$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \tag{3.17}$$

この問題の目的関数のパラメータを整理すると以下の式ようになる。

$$[P3] \quad \text{Minimize} \quad \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in O} E_{ijk} x_{ijk} \quad (3.18)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i \in B} \sum_{k \in O} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in V \quad (3.19)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall i \in B, k \in O \quad (3.20)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \quad (3.21)$$

ここで  $E_{ijk}$  は目的関数(3.14)のパラメータを整理したものである。

この問題は3つの添字  $i, j, k$  からなるいわゆる3次元割当問題である。そこでこの問題の  $i \in B, k \in O$  を、それらを組み合わせた新たな添字  $n \in N$  (ただし、 $|N| = |B| \times |O|$ ) に置き換えると、以下の式ようになる。

$$\text{Minimize} \quad \sum_{n \in N} \sum_{j \in V} D_{nj} x_{nj} \quad (3.22)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{n \in N} x_{nj} = 1, \quad \forall j \in V \quad (3.23)$$

$$\sum_{j \in V} x_{nj} \leq 1, \quad \forall n \in N \quad (3.24)$$

$$x_{nj} \in \{0, 1\}, \quad \forall n \in N, j \in V \quad (3.25)$$

ここで目的関数(3.22)の  $D_{nj}$  は、式(3.18)の  $E_{ijk}$  の添字  $i \in B, j \in V, k \in O$  を添字  $n \in N, j \in V$  に変換したものである。この問題は割当問題であり容易に解ける。

### 3.3.3 劣勾配法

ラグランジュ乗数の値の選択は生成される下界の質という意味から非常に重要である。そこでラグランジュ乗数を求めるために、一般的な手法である劣勾配法を使う。

劣勾配法とは、ラグランジュ乗数の初期集合から組織的にそれから先の乗数を生成していく繰り返し手続きである。これは、乗数を適切に選択することによって、緩和問題から得られる下界値を最大化しようとする手続きと考えることができる。

本問題をラグランジュ緩和問題を使った劣勾配法で近似的に解く。劣勾配法の処理手順を以下に示し、全体の流れを図3.6に示す。

- ステップ1：ラグランジュ乗数の初期値を設定する  
 ステップ2：元問題のラグランジュ緩和問題を作り、それを解いて下界値を求める  
 ステップ3：緩和問題の解を修正して、元問題の実行可能解を求める  
 ステップ4：収束条件である、①最適解が求まっているか、または②繰り返し回数が設定値を越えている条件を満たしていれば終了  
 ステップ5：その目的関数値から新たなラグランジュ乗数を計算する。ステップ2へ戻る

### 3.3.4 ラグランジュ乗数の決定

劣勾配法によって、ラグランジュ乗数を更新するが、その乗数の値は以下のようにして求める。

本問題では入港後に係留されるという制約である式(3.4)を緩和している。いま、緩和された制約を改めて示すと、

$$\sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} (C_{il} x_{ilm} + y_{ilm}) + y_{ijk} - (A_j - S_i) x_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in B, j \in W_i, k \in O \quad (3.26)$$

となる。そこで、上で示した手順をより詳細に書くと、計算手順は次のようになる。

- ステップ1： $d$  に、 $0 < d \leq 2$  を満足するような適当な値を与える。本研究では初期値として  $d=2$  とする

ステップ2：現在の乗数の集合について緩和問題を解き、解  $X_{ijk}$  を得る

ステップ3：現在の解  $X_{ijk}$  について、

$$G_{ijk} = (A_j - S_i) X_{ijk} - \sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} (C_{il} X_{ilm} + y_{ilm}) + Y_{ijk}, \quad \forall i \in B, j \in W_i, k \in O \quad (3.27)$$

のような劣勾配  $G_{ijk}$  を定義する

ステップ4：スカラーのステップ長  $T$  を

$$T = \frac{d(Z_{UB} - Z_{LB})}{\sum_{i=1}^m G_{ijk}^2} \quad (3.28)$$

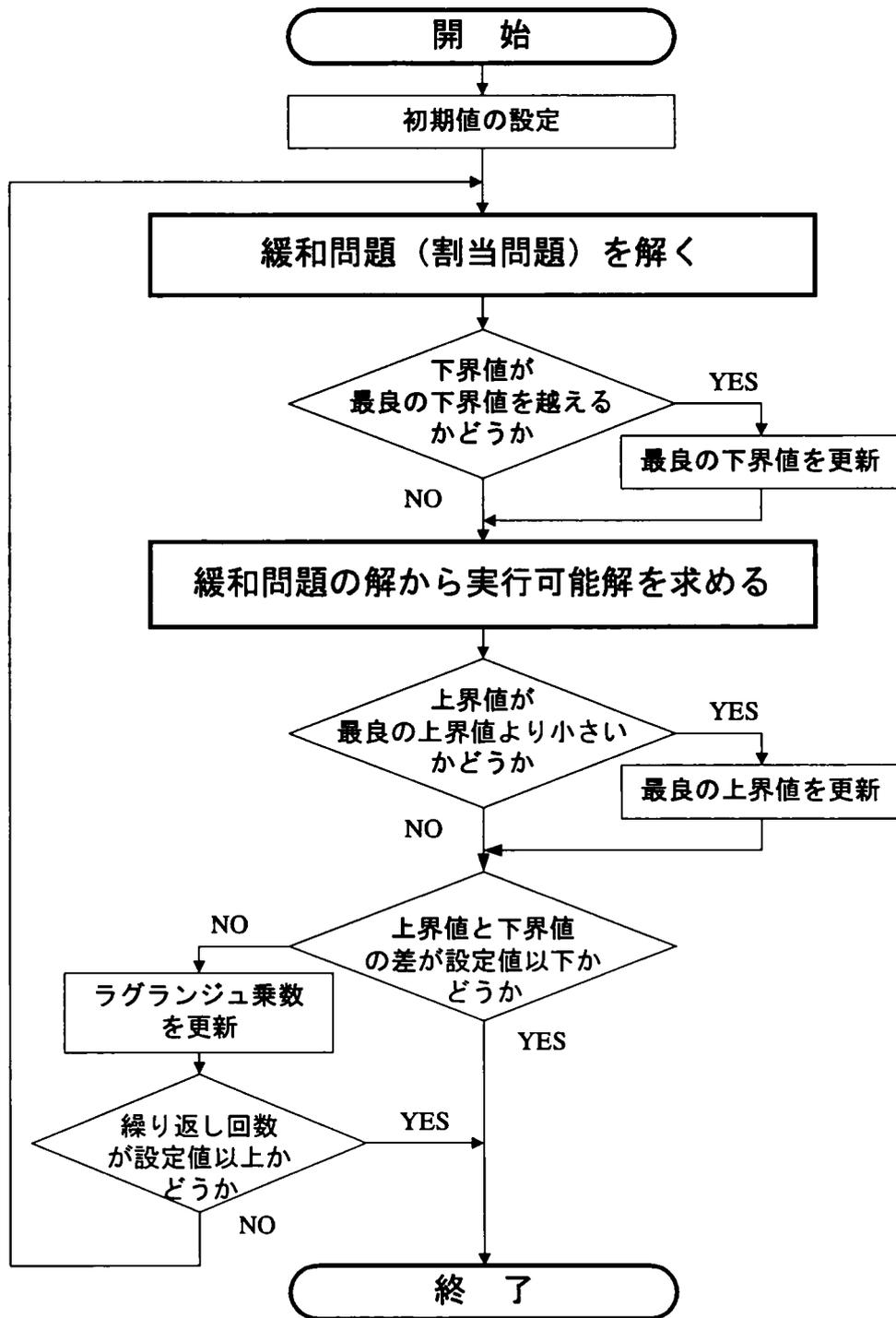


図3. 6 劣勾配法の流れ

として求める。このステップ長は、現在の下界値  $Z_{LB}$ （今まで求めた最良の緩和問題の解の目的関数値）と上界値  $Z_{UB}$ （今まで求めた最良の実行可能解の目的関数値）間の距離およびパラメータ  $d$  によって求められる  
 ステップ5：ラグランジュ乗数  $\lambda_{ijk}$  を次式によって更新し、ステップ2へ戻って、新しい乗数の集合で緩和問題を再び解く

$$\lambda_{ijk} = \max(0, \lambda_{ijk} + TG_{ijk}), \quad \forall i \in B, j \in W_i, k \in O \quad (3.29)$$

以上の繰り返しの手続きでは計算は終わることがないので、繰り返し回数を制限するか、上界値と下界値との差を見ることで最適解が求まっているかどうかを判断し、最適解が求まっていれば終了する。

### 3.3.5 近似解法

3.3.3で示した劣勾配法のステップ2で実行可能解を求めるが、ここではそれを求める近似解法について説明する。

緩和問題の解では必ずしも緩和した制約式(3.4)、つまり対象船は入港後に係留されるという条件を満足しない。そこで、劣勾配法では緩和問題の解を修正して実行可能解を求める。今回はこれを行うために、以下の3つの方法を考えた。

#### (1)F1：係留時刻を入港時刻まで単純にずらす

各バースにおける係留船で入港順に入港時刻以前に係留されている船を調べ、そのような船（ $k$ 番目に係留されているものとする）が存在すれば、その船の係留開始時刻を入港時刻まで後退させる。さらに、その船よりも後に係留される予定の船すべてに対しても、先の船をずらした時間だけ係留開始時刻を後ろにずらして係留させる。次に、ずらした係留時刻でまた、入港時刻以前に係留されている船がないか調べ、同様のことを繰り返す。なお、係留バースと係留順に変更はない。

#### (2)F2：処理対象バース内で、船の係留順の入れ替えを行う

各バースにおける係留船を入港順に入港時刻以前に係留されている船を調べ、そのような船（ $k$ 番目に係留されるものとする）があれば、まずその船の係留開始時刻を入港時刻までずらす。次に、その船よりも後に係留される予定の船すべてに対して、それぞれの船をずらしてできた空気に係留させると仮定する。その場合に、当該船舶の出港時刻と他船の入港時刻の差が最小なものを優先的な順としてその空気に係留させる。空気がふさがってしまえば、次の入港時刻前に係留されている船を調べ、同様のことを繰り返す。なお、他バースへの移動はない。

以下ではF1の処理後係留順を変更する具体的な処理手順を示す。ここで、当該船  $j$  の出港時刻と他船  $j'$  の入港時刻との差を  $W_j$  で示し、式(3.30)で求められ、 $L^U$  は制約を満足しない船  $U$  と当該船  $j$  以外の後続船とから成る集合を示し、 $D_j$  は船  $j$  の予定出港時刻を意味する。

$$W_j = \sum_{j' \in L^U} (D_j - A_{j'}), \quad (3.30)$$

これはある船を  $k$  番目に係留させたときの出港時刻より、前に入港している船に対しては待ち時間、後に入港する船に対しては他船の入港までの空き時間と解釈することができる。そこで両方を待ち時間と捉え、空き時間は負の待ち時間と解釈し、この値の合計で判断する。

ステップ1：バース番号、 $i=1$ とする。

ステップ2：すべてのバースの処理が実行されれば、終了。

ステップ3：当該バース  $i$  で到着前にサービスを受ける予定船  $U$  を係留処理の早い順に見つける。もし前の船  $U$  がバース  $i$  で処理される最後の船なら、 $i=i+1$  として、ステップ2へ。

ステップ4：船  $U$  の係留開始時間を到着時刻まで後退させる

ステップ5：船  $U$  の後続船から成る船集合  $R$  の中から係留開始の早い船を見つけ、 $j$  その船とする。もし前の船  $j$  がバース  $i$  の最後の船であるか、もしくは船  $U$  の直前に空き時間がないとき、ステップ10へ。

ステップ6： $W_j$  を求める

ステップ7：集合  $R$  から次の船  $j$  を見つける。もし前の船  $j$  が当該バースの最後の船ならステップ8へ、そうでなければステップ6へ。

ステップ8：船  $U$  の直前にシフトすることができる  $W_j$  が最小な船  $j^*$  を見つける。そのような船がなければステップ10へ。

ステップ9：船  $U$  の直前に船  $j^*$  をシフトし、ステップ5へ。

ステップ10：船  $U$  の後続船すべてに対し新しい係留開始時間を計算して、ステップ3へ。

以下では、図3.7を用いて  $W_j$  が最小な船を制約を満足しない船の前にできた空きシフトする理由について述べる。

図の(1)は緩和問題である割当問題を解いて得られた解を示す。入港後に係留されるという制約を緩和しているため、他船への待ち時間が短くなるように荷役時間長の

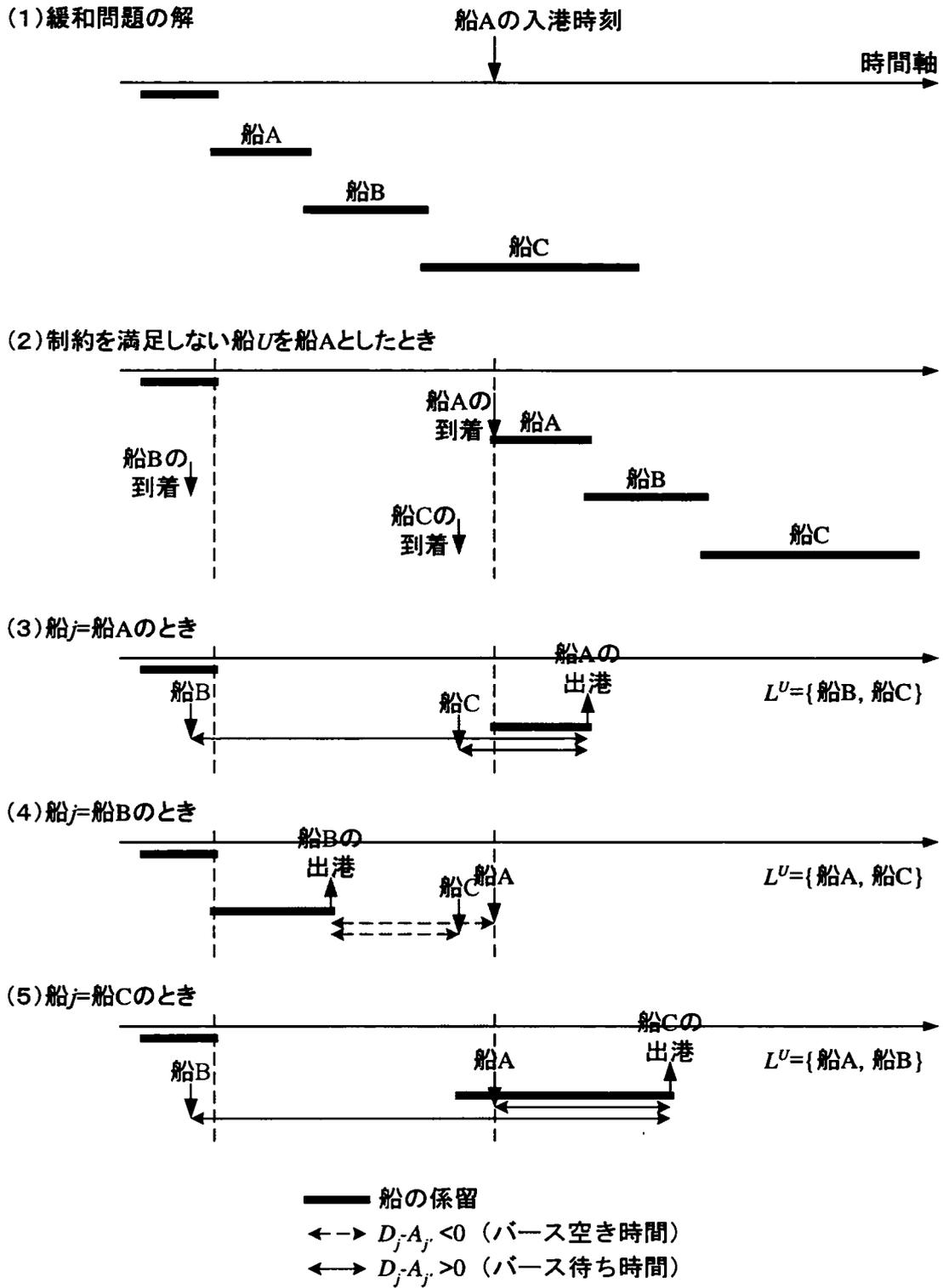


図3. 7  $w_j$  が最小な船舶をシフトする理由

短い船から順に係留されているのがわかる。次に(2)では、入港時刻よりも前に係留されている船Aを処理F1と同様に入港時刻まで後ろにずらした図を示している。このとき、船BとCの到着が図のようであったときに船A直前の空きにシフトさせる船を決定する。なおこのとき船Aも含めて調べるが、 $W_j$ が最小である船が船Aとなったとき、この空きにシフトさせるべき船がなかったと解釈する。

まず(3)では船Aについて $W_j$ を調べる。 $D_A - A_B > 0$ 、 $D_A - A_C > 0$ となっており、船Aを $k$ 番目にすると船BとCがその次でどのような順に係留されても、最短でも図に示すだけの待ち時間は生じる。次に(4)では船Bについて調べるが、 $D_B - A_A < 0$ 、 $D_B - A_C < 0$ となり、待ちではなく、空き時間が生じているのがわかる。(5)では船Cについて調べる。(3)と同様であるが、若干待ち時間が(3)より長くなってしまふことがわかる。

したがってこの事例では、 $W_j$ が最小になるのは(4)のときであり、この場合船Bをこの空き時間にシフトさせることになるが、船Bの出港後船Aの入港までに空きができ、同様のことを行うことによってシフトさせるべき船を調べることになる。

したがって船  $j$  の係留順が変更されると、船  $U$  の後続船の最終的な割当は未決定状態となる。しかしながら、現在の位置が[P3]の最適解であり、もし後続船がサービス開始前に到着していれば良い割当となるため、それらの現在の位置を保持されることが望まれる。 $L^U$ 内の船の到着が船 $j$ の出港より遅ければ、その $W_j$ は小さくなる。したがって、なるべく小さい $W_j$ を持つ船  $j$  を見つけることは新しい順番でバースの別の空き時間を生じ、その空き時間にできるだけ多くの船のシフトすることができれば、目的関数値をより小さくすることができる。もし船 $U$ の後続船が船  $j$  の出港前に到着すれば、 $W_j$ は大きくなり、この船  $j$  をシフトさせると待ち時間を長くすることになりうる。以上のことよりなるべく小さい $W_j$ を持つ船を見つけている。

なお、制約を満足しない船は係留順に調べることにする。もし反対の順でこれを実行すれば、満足しない船の処理後、やはり処理前に満足しなかった船はまたすべてまだ制約を満足しないままである。しかしながら、上で示した処理では満足しない船の処理ごとに、後続船全ての係留開始時刻を再計算するため、他船の修正時に当該船が制約を満たすこともありうることから、処理が逆の順より少なく済ませるという理由があるからである。

### (3)F3 : すべてのバースを対象に船の係留順の入れ替えを行う

各バースにおける係留船で入港順に入港時刻以前に係留されている船を調べ、そのような船 ( $k$  番目に係留されているとする) があれば、まずF2と同じ処理を行う。以上の処理を行った後、まだバースに空きがあるかを調べる。空きがある場合、他のバースに係留中の船で、現在処理の対象としているバースに係留可能な船を調べる。係留可能な船の基準

としては、この空きの終了以前に出港する船であることである。また目的関数値が小さくなるように、他バースの船を処理対象バースに移動させた場合に、そのバースで増える時間が元のバースで減る時間より少なければ、総在港時間は短くなるので当該船をその空きに係留させる。さらにまた、次の入港時刻前に係留されている船を調べ、同様のことを繰り返す。

ここで、処理対象バースにおいて長くなる時間というのは、当該船の荷役時間と待ち時間である。また、元のバースにおいて短くなる時間というのは、当該船の待ち時間と荷役時間、さらに当該船より後に係留されている船に対する待ち時間である。

ステップ1：バース番号、 $i=1$ とする。

ステップ2：すべてのバースの処理が実行されるなら、終了。

ステップ3：当該バース $i$ で到着前にサービスを受ける予定の船 $U$ を係留処理の早い順に見つける。もし前の船 $U$ がバース $i$ で処理される最後の船であれば、 $i=i+1$ としてステップ2へ。

ステップ4：F2の処理のステップ4～9の処理を行う。

ステップ5：バース $i$ が船 $U$ のサービスとF2のステップ9において船のシフト前の順での直前との間にある空き時間を集合 $E$ とする。

ステップ6：集合 $V$ から到着の早い船を見つける。もし全ての船の処理が終了していれば、ステップ11へ。

ステップ7：もしそれが制約を満足する船でバース $i$ に割当てられるなら、ステップ6へ。

ステップ8：到着後サービスを受けることが可能なとき $E$ の中で空き時間を見つける。もしそのような空き時間がなければ、ステップ6へ。

ステップ9：バース $i$ に移動するとき当該船舶とその後続船の在港時間の総和と、現在サービスされる予定バースでの総在港時間を計算する。もし後者が前者より大きくなければ、ステップ6へ。

ステップ10：バース $i$ に当該船舶をシフトし、ステップ6へ。

ステップ11：船 $U$ の後続船すべてに対し新しい係留開始時刻を計算する。空き状況も変化するので $E$ 内の空き時間も新しく更新する。ステップ3へ。

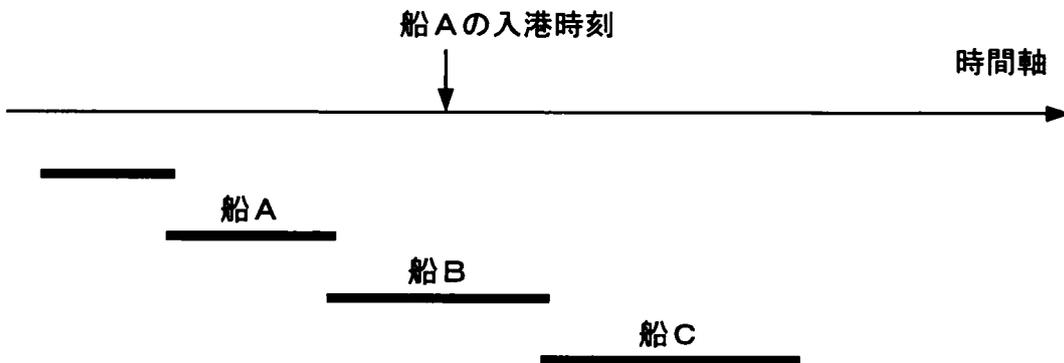
以下で例を用いて、この3つの方法について簡単に述べる。図3.8は、横軸に時間軸、下向きの矢印が船の到着、太線がその船の係留を示している。この図の緩和問題の解では船Aは到着前に係留されるという結果になっている。

そこでまず、F1の手法では単純に船Aを到着時点まで係留時刻を後ろへずらし、さらに船A以降の船すべてについても船Aをずらした時間だけ後ろへ係留開始時刻をずらす。

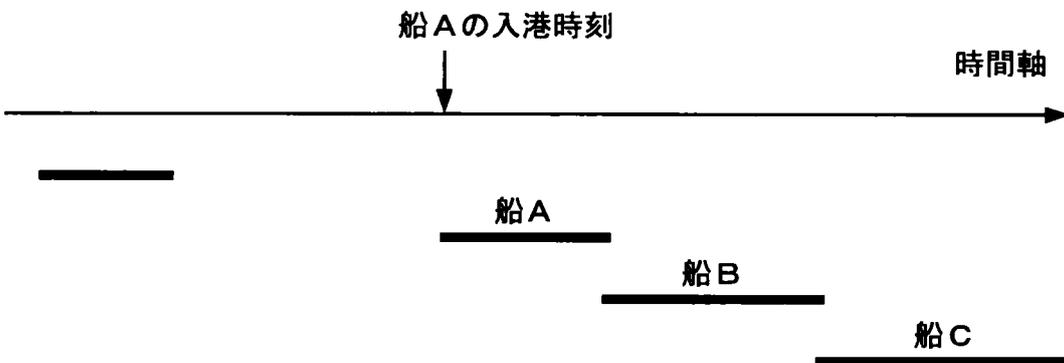
次にF2の手法ではF1の処理を行い、船Aの係留前にずらしてできた空きに、そのバース内で、船Aより後に係留されている船で船Aの直前に係留させても到着後に係留される船があれば、その船を船Aの直前にシフトさせて、解を良くなるようにする。この例では、仮に船Aより後に係留されている船B、Cを船Aの前に係留させた場合、図3. 8のように船B、Cの順で係留させれば、2船とも入港後に係留される。したがって、船BとCは船Aの前に移動することができる。

またF3の手法では、F2の処理を行ってもまだバースに空きがある場合、つまり船Cの入港が船Aの出港時刻より遅いとき、船AとCの前に空き時間が生じる。このとき、他のバースから上で述べた条件を満足するような船Eを船Cの前の空きにシフトさせる。船Dは出港時刻が船Aの入港より後であるので処理対象バースへのシフトはできない。

緩和問題の解



近似解法：F1



近似解法：F2

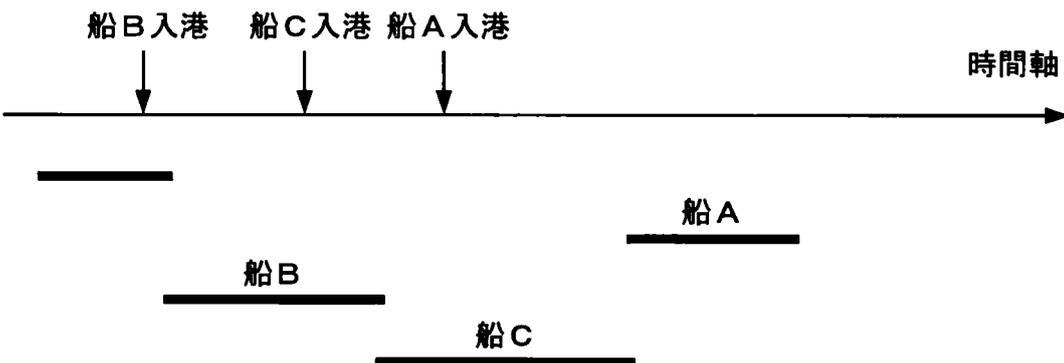


図3. 8(1) 緩和問題の解から実行可能解を求める方法(1)

近似解法：F3

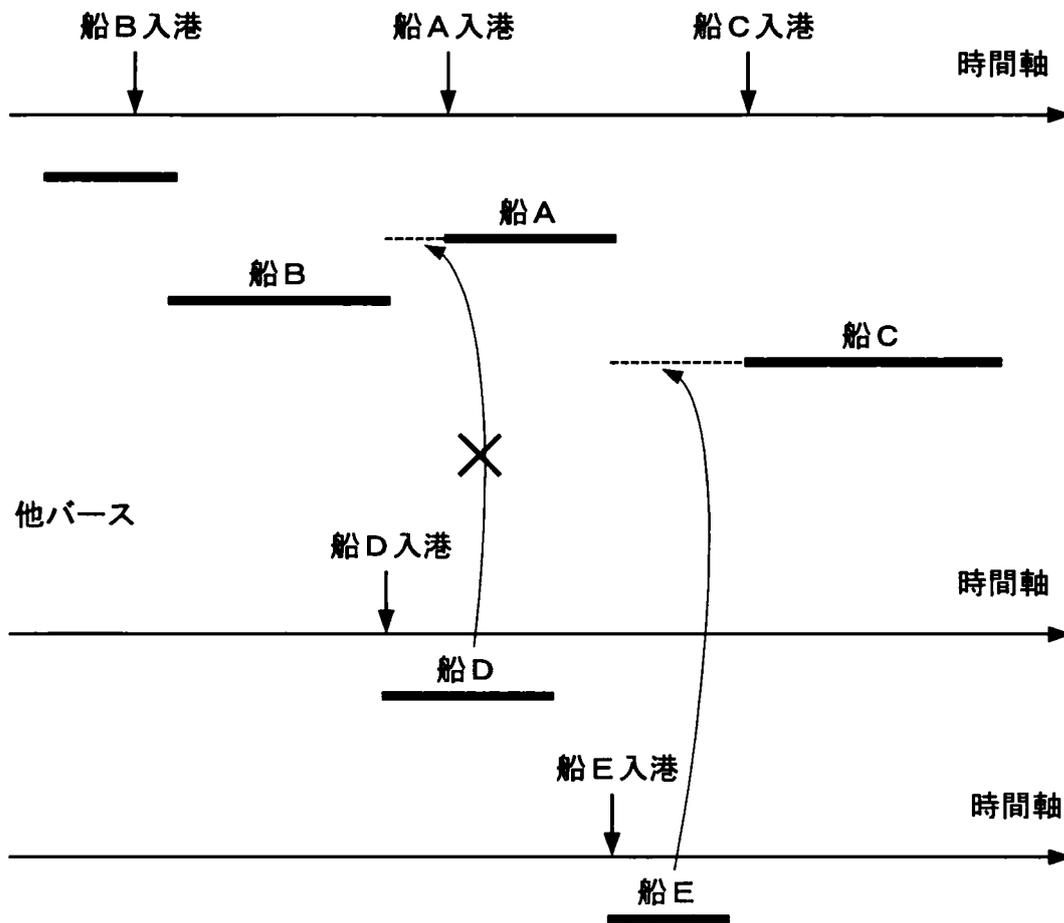


図3. 8(2) 緩和問題の解から実行可能解を求める方法(2)

### 3.4 初期状態の違いによる解の精度への影響

本章で提案したLRによる解法の有効性を示すために、神戸商船大学情報処理センターの計算処理サーバ leo (機種名：S-4/2000E、CPU：SuperSPARC+ (60MHz)) 上のFORTRANコンパイラ (日本語SPARC Works Professional FORTRAN 3.0.1) を用いて、人工的に発生させた入港時刻と荷役時間データを与え、問題の規模を変化させた場合の解の精度を調べた。

この問題でパラメータとして用いる船の入港分布と荷役時間分布は神戸港の調査データから分析した<sup>10)</sup>。その結果、一般にいわれるように入港分布は指数分布に従い、荷役時間は2次のアーラン分布に従っていた。そこで、計算で用いる入港間隔と荷役時間をそれぞれ指数分布と2次のアーラン分布から発生させた。計算に用いたバース数は5、7、10である。

一般の公共形式における船のバース割当は港湾管理者が行う。その場合、計画期間幅の長さは管理者が決定すべき問題であるが、その期間幅の長さというのはここで求める解に影響すると考えられる。期間幅の影響は対象船の数を変えることで調べることができる。そのため、対象船を25と50隻にし、これとバース数の組み合わせで合計6ケースの問題を考える。なお、25隻の期間幅は神戸港の調査で3日、50隻は6日程度に相当する。入港間隔と荷役時間を乱数で発生させるがそれぞれ同じ種を用い、それを上記の各ケースで10種類用意する。

解の精度の検討においては、1つの計画スパンでの問題で考える。本章で考える問題における計画開始時刻は管理者にはコントロールできないものであるが、それが計画期間幅のどのあたりに位置するかということも近似解の精度に影響を及ぼすと考えられる。つまり、もし開始時刻が最後の入港船よりも後なら、緩和した制約である入港後に係留されるという状況が、各船がどの順番に係留されても満足され、緩和問題の解が元問題の最適解になる。反対に、開始時刻が最初の入港船よりも前であれば、緩和した制約を満足しない船が多くなる可能性があるため、元の問題の最適解が求まりにくくなる。したがって、計画開始時刻が大きくなるほど実行可能解の目的関数値がよくなると考えられる。

そこで、各ケースのある種に対して図3.9に示すように、計画開始時刻が対象船の最初に入港するものと最後に入港するもの入港時刻幅の中間 (計画開始時刻1)、 $5/8$  (時刻2)、 $3/4$  (時刻3)、 $7/8$  (時刻4) の4つの問題を設定した。

表3.1には解の精度を示すGAP (%) と計算時間を示す。なおGAPは (得られた解の値 - 下界値) / 下界値  $\times 100$  であり、各ケースの10回の平均値である。CPUは計算時間の10回の平均、繰り返し回数は処理終了までに要した回数の平均を示す。

まず問題サイズごとに計画開始時刻  $S_i$  の変化による影響を見ると、開始時刻が後になるほどGAPの値が小さく、解の精度が良くなっており、開始時刻の大小が解の精度や計算時間に影響を及ぼすことがわかる。



図3. 9 計画開始時刻の設定

次に問題サイズによる影響をみると、同一隻数でバース数が増えると、GAPが大きくなる傾向にあるが、特に開始時刻が早いときにその傾向が強い。また同一バース数で隻数が増えると、GAPは大きくなる傾向にある。繰り返し回数についてはほとんどが設定した200回まで処理を行っているが、25隻のケースで開始時刻4の場合に200回より前で最適解が得られているケースもある。

実行可能解を求める方法としては、F1よりF2の方が、F2よりF3の方が割当の変更の自由度が大きいことから、結果的に解の精度が良くなると予想される。そこで各解法の解の精度を比較すると、結果からF1とF2はそのような関係にあるが、F2よりF3が良いケースは少なく、全体の傾向としてF2が最も解の精度が良いという結果になった。

次にCPU時間については、アルゴリズムの複雑さからすると、F1よりF2が、F2よりF3が処理に時間がかかると予想される。結果を見ると、全体的には3つの間に大きな差がないものの5バース25隻と7バース25隻の開始時刻1のときに、F1が他よりもかなり時間がかかっている。またF3が他よりも多少時間がかかっているケースがあることもわかる。F3の計算に時間がかかるのは、先で予想したように、劣勾配法での緩和問題の解を修正して実行可能解を求めるステップにおいて、アルゴリズムが最も複雑であるためと考えられる。F1の計算時間が長くかかる理由としては、次のことが考えられる。F1に時間がかかるのは時刻1のときであるが、解の精度が悪いことから繰り返し計算で生成されるラグランジュ乗数によって緩和問題の解が実行可能解になりにくいいため、実行可能解を求めるための解の修正が他の手法より必要であると想像される。したがって、計算時間がかかることもあると考えられる。

さらに、同一隻数でバース数が増えたり、同一バース数で隻数が増えることによって問題の規模が大きくなると、処理時間が長くなっている。また計画開始時刻が遅くなるほど処理時間が短くなっている。これは、解の精度と同様に緩和問題の解から実行可能解を求

表3.1 解の精度と計算時間

問題サイズ バース数 × 隻数	開始時刻	F1			F2			F3		
		GAP (%)	CPU (秒)	繰り返し回数	GAP (%)	CPU (秒)	繰り返し回数	GAP (%)	CPU (秒)	繰り返し回数
5×25	1	37.9	82.2	200.0	<b>27.1<sup>a</sup></b>	<b>50.2<sup>b</sup></b>	200.0	34.5	51.0	200.0
	2	12.3	<b>38.4<sup>b</sup></b>	200.0	<b>7.9<sup>a</sup></b>	41.3	200.0	8.5	39.0	200.0
	3	3.4	27.5	200.0	<b>1.7<sup>a</sup></b>	28.3	200.0	<b>1.7<sup>a</sup></b>	<b>27.1<sup>b</sup></b>	200.0
	4	0.7	18.0	160.3	<b>0.4<sup>a</sup></b>	18.7	160.3	<b>0.4<sup>a</sup></b>	<b>17.7<sup>b</sup></b>	160.3
7×25	1	49.2	115.0	200.0	<b>43.1<sup>a</sup></b>	67.1	200.0	54.2	<b>62.2<sup>b</sup></b>	200.0
	2	13.6	56.9	200.0	<b>11.7<sup>a</sup></b>	<b>50.6<sup>b</sup></b>	200.0	14.4	64.1	200.0
	3	3.3	38.9	200.0	<b>2.8<sup>a</sup></b>	<b>35.6<sup>b</sup></b>	200.0	3.4	37.3	200.0
	4	0.5	26.7	200.0	<b>0.3<sup>a</sup></b>	<b>24.2<sup>b</sup></b>	168.1	<b>0.3<sup>a</sup></b>	24.4	168.1
10×25	1	60.3	80.1	200.0	<b>48.3<sup>a</sup></b>	<b>80.0<sup>b</sup></b>	200.0	65.5	<b>80.0<sup>b</sup></b>	200.0
	2	14.6	<b>65.4<sup>b</sup></b>	200.0	<b>11.4<sup>a</sup></b>	66.1	200.0	18.5	67.8	200.0
	3	3.6	<b>45.6<sup>b</sup></b>	200.0	<b>3.3<sup>a</sup></b>	45.9	200.0	5.6	46.1	200.0
	4	0.7	32.6	200.0	<b>0.4<sup>a</sup></b>	<b>32.0<sup>b</sup></b>	184.0	0.6	35.0	184.0
5×50	1	117.8	<b>718.1<sup>b</sup></b>	200.0	<b>65.1<sup>a</sup></b>	733.7	200.0	96.7	755.9	200.0
	2	38.5	593.4	200.0	<b>15.1<sup>a</sup></b>	<b>591.4<sup>b</sup></b>	200.0	24.4	617.7	200.0
	3	12.4	<b>470.9<sup>b</sup></b>	200.0	<b>3.5<sup>a</sup></b>	<b>470.9<sup>b</sup></b>	200.0	5.5	491.0	200.0
	4	2.4	<b>291.8<sup>b</sup></b>	200.0	<b>0.6<sup>a</sup></b>	292.7	200.0	0.8	306.4	200.0
7×50	1	139.6	<b>979.5<sup>b</sup></b>	200.0	<b>99.0<sup>a</sup></b>	981.7	200.0	141.6	1019.1	200.0
	2	33.4	<b>798.9<sup>b</sup></b>	200.0	<b>21.1<sup>a</sup></b>	804.2	200.0	30.1	841.6	200.0
	3	9.9	<b>636.2<sup>b</sup></b>	200.0	<b>5.0<sup>a</sup></b>	641.1	200.0	7.1	659.8	200.0
	4	2.0	<b>388.4<sup>b</sup></b>	200.0	<b>0.8<sup>a</sup></b>	392.5	200.0	0.9	402.1	200.0
10×50	1	166.3	<b>1357.4<sup>b</sup></b>	200.0	<b>145.5<sup>a</sup></b>	1373.7	200.0	219.7	1428.7	200.0
	2	32.7	<b>1105.9<sup>b</sup></b>	200.0	<b>27.5<sup>a</sup></b>	1109.3	200.0	41.6	1153.7	200.0
	3	7.9	<b>887.1<sup>b</sup></b>	200.0	<b>6.5<sup>a</sup></b>	909.0	200.0	10.3	911.3	200.0
	4	1.5	<b>525.5<sup>b</sup></b>	200.0	<b>1.0<sup>a</sup></b>	539.0	200.0	1.7	547.3	200.0

※ a: それぞれのケースにおいて3解法中で最も精度の良いもの  
 b: それぞれのケースにおいて3解法中で最もCPU時間の短いもの

める際、修正を必要とする可能性のある船の隻数が全体に占める割合によって変わるためである。つまり、開始時刻の遅い方が修正の割合が少ないため処理時間も短くてすむからである。

### 3.5 到着時間分布による待ち時間への影響

先述のように到着間隔と荷役時間は、指数と2次のアーラン分布に従う。しかしマルチユーザ形式を導入した場合に入港調整等を行う可能性もあり、入港船の到着が専用形式と同様の分布形に従うとは限らない。そこで、分布を変化させた場合に目的関数の総在港時間やバース待ち時間がどう変化するかを検討する。具体的には到着間隔を指数分布、2次と3次のアーラン分布の3つの分布関数で発生させた。

表3.2は指数、2次と3次のアーラン分布で到着したときの総在港時間を示すが、バース数が増えると当然ながら係留が早くなり、総在港時間が短くなっている。また分布形間で比較すると、2次と3次のアーラン分布ではほとんど差がないが、指数分布で到着するとき25隻の場合には総在港時間がアーラン分布よりも長く、50隻の場合では逆に最も短くなっている。以上の傾向は開始時刻1、2、3及び4それから近似解法それぞれにおいても同様である。また開始時刻が後になればなるほど、開始時刻が遅くなるために船がより待たされることになるため、総在港時間が長くなっている。

次に各船の待ち時間の平均と標準偏差を表3.3に示す。平均待ち時間に関してまず近似解法間で比較すると、25隻の場合どの分布形においても比較的F2が最も時間が短くなっているが、50隻の場合全ケースでF2による時間が短くなっている。ばらつき具合については標準偏差より、25隻の場合F2では他よりばらつきが大きくなっているが、50隻の場合比較的F2のばらつきが小さくなっている。

分布形の違いによる比較をすると、25隻の場合各船が2次のアーラン分布で到着すると待ち時間が比較的短くなっており、50隻の場合では現状の指数分布のときに他の分布形より短くなっている。また標準偏差より、25隻の場合F2は指数よりはばらつきが小さいもののF3よりはばらつきが大きくなっているのが分かる。50隻の場合はほとんどのケースで指数分布でのばらつきが小さくなっている。したがって船の到着の分布形が変わると、隻数が少なく計画期間が短い場合には現状より待ち時間が短くなり、ばらつきは若干小さくなるケースもあるが、計画のスペンが長くなると現状より待ち時間が比較的長くなり、ばらつきも大きくなる傾向にある。

さらに、5バースのケースでの各船の待ち時間分布を図3.10に示す。まず25隻の場合で、当該待ち時間での隻数の多いピークは開始時刻1では0～12時間の半日程度のところと24時間前後のところの2ヶ所にある。時刻2では1つ目のピークが小さくなり、少し後ろへずれ、2つめのピークが36時間前後のところとなっている。時刻3については時刻1と2より全体的

表3.2 各到着分布における総在港時間

単位：時間

バース数 × 隻数	開始時刻	近似解法	到着分布関数			バース数 × 隻数	開始時刻	近似解法	到着分布関数		
			指数	2次アーラン	3次アーラン				指数	2次アーラン	3次アーラン
5×25	1	F1	411	349 <sup>c</sup>	351	5×50	1	F1	1365 <sup>c</sup>	1625	1599
		F2	361	295	292 <sup>c</sup>			F2	1026 <sup>c</sup>	1213	1213
		F3	380	308	308 <sup>c</sup>			F3	1107 <sup>c</sup>	1443	1402
	2	F1	523	448	439 <sup>c</sup>		2	F1	1857 <sup>c</sup>	2130	2110
		F2	486	407 <sup>c</sup>	412			F2	1465 <sup>c</sup>	1768	1744
		F3	489	409 <sup>c</sup>	421			F3	1618 <sup>c</sup>	1868	1906
	3	F1	644	560 <sup>c</sup>	572		3	F1	2195 <sup>c</sup>	2585	2589
		F2	630	547 <sup>c</sup>	558			F2	2000 <sup>c</sup>	2417	2379
		F3	631	547 <sup>c</sup>	558			F3	2035 <sup>c</sup>	2463	2423
	4	F1	799	706 <sup>c</sup>	717		4	F1	2679 <sup>c</sup>	3168	3154
		F2	796	704 <sup>c</sup>	715			F2	2614 <sup>c</sup>	3119	3086
		F3	796	704 <sup>c</sup>	715			F3	2631 <sup>c</sup>	3131	3097
7×25	1	F1	315	256	245 <sup>c</sup>	7×50	1	F1	1120 <sup>c</sup>	1343	1294
		F2	315	247	239 <sup>c</sup>			F2	919 <sup>c</sup>	1092	1097
		F3	347	274	265 <sup>c</sup>			F3	1046 <sup>c</sup>	1202	1279
	2	F1	431	345 <sup>c</sup>	350		2	F1	1464 <sup>c</sup>	1745	1796
		F2	423	340 <sup>c</sup>	346			F2	1305 <sup>c</sup>	1610	1613
		F3	432	357	351 <sup>c</sup>			F3	1401 <sup>c</sup>	1658	1722
	3	F1	548	461 <sup>c</sup>	470		3	F1	1927 <sup>c</sup>	2287	2245
		F2	548	460 <sup>c</sup>	470			F2	1824 <sup>c</sup>	2243	2208
		F3	554	465 <sup>c</sup>	476			F3	1840 <sup>c</sup>	2260	2216
	4	F1	704	612 <sup>c</sup>	623		4	F1	2457 <sup>c</sup>	2961	2936
		F2	700	608 <sup>c</sup>	619			F2	2425 <sup>c</sup>	2935	2898
		F3	701	608 <sup>c</sup>	618			F3	2425 <sup>c</sup>	2935	2898
10×25	1	F1	319	251	235 <sup>c</sup>	10×50	1	F1	912 <sup>c</sup>	1110	1082
		F2	302	238	224 <sup>c</sup>			F2	851 <sup>c</sup>	1020	1035
		F3	331	258	250 <sup>c</sup>			F3	1082 <sup>c</sup>	1312	1262
	2	F1	415	338	335 <sup>c</sup>		2	F1	1297 <sup>c</sup>	1564	1564
		F2	406	323 <sup>c</sup>	324			F2	1232 <sup>c</sup>	1522	1520
		F3	423	344 <sup>c</sup>	349			F3	1384 <sup>c</sup>	1650	1719
	3	F1	533	442 <sup>c</sup>	451		3	F1	1760 <sup>c</sup>	2149	2156
		F2	530	439 <sup>c</sup>	447			F2	1707 <sup>c</sup>	2123	2099
		F3	534	452 <sup>c</sup>	459			F3	1779 <sup>c</sup>	2190	2181
	4	F1	672	579 <sup>c</sup>	590		4	F1	2325 <sup>c</sup>	2823	2798
		F2	671	578 <sup>c</sup>	589			F2	2297 <sup>c</sup>	2802	2769
		F3	674	581 <sup>c</sup>	592			F3	2339 <sup>c</sup>	2827	2812

※ c: それぞれのケースにおいて3つの到着分布中で最も総在港時間が短いもの

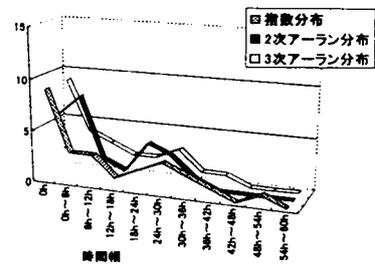
表3.3 各船の平均待ち時間と標準偏差

単位：時間

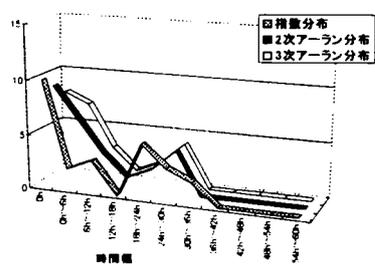
隻数			25隻						50隻					
バース数	計画開始	近似解法	指数分布		2次アーラン分布		3次アーラン分布		指数分布		2次アーラン分布		3次アーラン分布	
			平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
5	1	F1	12.9	15.0	<b>10.4<sup>d</sup></b>	<b>11.8<sup>e</sup></b>	10.5	12.1	<b>24.5<sup>d</sup></b>	<b>24.5<sup>e</sup></b>	29.6	27.5	29.1	27.3
		F2	11.0	12.1	8.3	10.9	<b>8.2<sup>d</sup></b>	<b>10.6<sup>e</sup></b>	<b>17.7<sup>d</sup></b>	<b>19.8<sup>e</sup></b>	21.4	21.4	21.5	21.7
		F3	16.4	14.3	<b>9.3<sup>d</sup></b>	<b>11.7<sup>e</sup></b>	10.6	12.8	<b>25.6<sup>d</sup></b>	<b>24.9<sup>e</sup></b>	32.9	29.5	29.6	29.1
	2	F1	17.4	16.1	14.4	15.3	<b>14.1<sup>d</sup></b>	<b>13.9<sup>e</sup></b>	<b>34.3<sup>d</sup></b>	30.3	39.8	30.2	39.4	<b>29.3<sup>e</sup></b>
		F2	15.9	15.0	<b>12.7<sup>d</sup></b>	14.0	12.9	<b>13.0<sup>e</sup></b>	<b>26.5<sup>d</sup></b>	<b>25.0<sup>e</sup></b>	32.5	26.7	32.1	27.5
		F3	17.1	13.7	15.9	15.4	<b>13.4<sup>d</sup></b>	<b>12.2<sup>e</sup></b>	<b>33.1<sup>d</sup></b>	28.3	35.4	<b>28.1<sup>e</sup></b>	63.3	49.6
	3	F1	22.2	17.8	<b>18.9<sup>d</sup></b>	16.0	19.3	<b>15.1<sup>e</sup></b>	<b>41.1<sup>d</sup></b>	<b>31.8<sup>e</sup></b>	48.9	32.4	49.0	34.4
		F2	21.7	16.7	<b>18.3<sup>d</sup></b>	15.8	18.8	<b>14.7<sup>e</sup></b>	<b>37.2<sup>d</sup></b>	<b>30.0<sup>e</sup></b>	45.5	30.9	44.8	32.5
		F3	22.6	15.9	<b>18.4<sup>d</sup></b>	15.4	18.8	<b>13.7<sup>e</sup></b>	<b>39.5<sup>d</sup></b>	30.6	49.4	<b>29.7<sup>e</sup></b>	45.9	31.4
	4	F1	28.4	18.3	<b>24.7<sup>d</sup></b>	16.4	25.2	<b>15.7<sup>e</sup></b>	<b>50.8<sup>d</sup></b>	<b>33.5<sup>e</sup></b>	60.6	34.3	60.3	36.4
		F2	28.3	18.3	<b>24.7<sup>d</sup></b>	16.4	25.1	<b>15.6<sup>e</sup></b>	<b>49.5<sup>d</sup></b>	<b>33.0<sup>e</sup></b>	59.6	34.1	58.9	35.9
		F3	28.3	18.3	<b>24.7<sup>d</sup></b>	16.4	25.5	<b>15.0<sup>e</sup></b>	<b>52.5<sup>d</sup></b>	<b>30.4<sup>e</sup></b>	60.9	33.3	59.4	35.7
7	1	F1	10.2	11.3	7.5	10.6	<b>7.1<sup>d</sup></b>	<b>9.9<sup>e</sup></b>	<b>19.9<sup>d</sup></b>	<b>23.0<sup>e</sup></b>	24.3	25.0	23.2	23.7
		F2	10.2	11.2	7.5	10.3	<b>7.1<sup>d</sup></b>	<b>9.9<sup>e</sup></b>	<b>15.8<sup>d</sup></b>	<b>20.1<sup>e</sup></b>	19.3	21.3	19.4	21.8
		F3	10.8	11.7	<b>7.9<sup>d</sup></b>	<b>11.0<sup>e</sup></b>	9.2	12.4	<b>26.0<sup>d</sup></b>	29.8	26.7	<b>27.0<sup>e</sup></b>	26.4	31.7
	2	F1	14.9	13.9	<b>11.4<sup>d</sup></b>	12.8	11.7	<b>11.9<sup>e</sup></b>	<b>26.7<sup>d</sup></b>	<b>27.1<sup>e</sup></b>	32.4	27.8	33.4	29.9
		F2	14.5	14.1	<b>11.2<sup>d</sup></b>	13.1	11.5	<b>12.0<sup>e</sup></b>	<b>23.5<sup>d</sup></b>	<b>25.5<sup>e</sup></b>	29.6	26.6	29.7	27.5
		F3	15.3	15.2	<b>11.9<sup>d</sup></b>	13.0	12.0	<b>12.5<sup>e</sup></b>	<b>28.1<sup>d</sup></b>	<b>28.0<sup>e</sup></b>	34.1	30.6	38.1	36.6
	3	F1	19.6	16.5	<b>16.1<sup>d</sup></b>	15.1	16.5	<b>14.3<sup>e</sup></b>	<b>36.0<sup>d</sup></b>	<b>31.0<sup>e</sup></b>	43.2	31.4	42.4	32.7
		F2	19.6	16.5	<b>16.1<sup>d</sup></b>	14.9	16.5	<b>14.2<sup>e</sup></b>	<b>33.9<sup>d</sup></b>	<b>29.5<sup>e</sup></b>	42.3	30.6	41.6	32.0
		F3	19.9	16.5	<b>16.2<sup>d</sup></b>	14.8	16.6	<b>14.3<sup>e</sup></b>	<b>35.4<sup>d</sup></b>	31.2	47.6	<b>30.9<sup>e</sup></b>	43.5	32.6
	4	F1	25.9	18.4	<b>22.2<sup>d</sup></b>	16.3	22.6	<b>15.2<sup>e</sup></b>	<b>46.6<sup>d</sup></b>	<b>33.0<sup>e</sup></b>	56.7	33.7	56.2	36.1
		F2	25.7	18.2	<b>22.0<sup>d</sup></b>	16.3	22.5	<b>15.5<sup>e</sup></b>	<b>46.0<sup>d</sup></b>	<b>32.5<sup>e</sup></b>	56.2	33.0	55.4	35.2
		F3	25.7	18.3	<b>22.0<sup>d</sup></b>	16.2	22.4	<b>15.2<sup>e</sup></b>	<b>46.1<sup>d</sup></b>	<b>32.4<sup>e</sup></b>	56.3	33.0	55.8	35.0
10	1	F1	10.0	11.0	7.3	10.1	<b>7.0<sup>d</sup></b>	<b>9.6<sup>e</sup></b>	<b>15.7<sup>d</sup></b>	<b>20.4<sup>e</sup></b>	19.6	20.9	19.1	21.5
		F2	9.9	10.8	7.3	10.2	<b>7.0<sup>d</sup></b>	<b>9.6<sup>e</sup></b>	<b>14.8<sup>d</sup></b>	<b>19.9<sup>e</sup></b>	18.1	20.8	18.5	21.2
		F3	13.5	13.1	<b>8.4<sup>d</sup></b>	<b>11.8<sup>e</sup></b>	10.2	12.7	<b>23.6<sup>d</sup></b>	<b>29.9<sup>e</sup></b>	32.0	33.9	46.6	43.3
	2	F1	14.5	13.7	11.4	12.5	<b>11.3<sup>d</sup></b>	<b>11.8<sup>e</sup></b>	<b>23.6<sup>d</sup></b>	<b>24.8<sup>e</sup></b>	29.1	26.7	28.9	26.9
		F2	14.2	14.0	<b>11.0<sup>d</sup></b>	12.7	<b>11.0<sup>d</sup></b>	<b>11.9<sup>e</sup></b>	<b>22.4<sup>d</sup></b>	<b>25.2<sup>e</sup></b>	28.2	26.1	28.2	27.2
		F3	14.8	15.1	<b>11.4<sup>d</sup></b>	<b>12.7<sup>e</sup></b>	13.1	13.9	<b>29.7<sup>d</sup></b>	31.5	32.8	<b>31.1<sup>e</sup></b>	41.8	41.4
	3	F1	19.3	16.2	<b>15.6<sup>d</sup></b>	14.7	15.9	<b>14.0<sup>e</sup></b>	<b>33.0<sup>d</sup></b>	<b>29.4<sup>e</sup></b>	40.8	30.4	40.9	32.1
		F2	19.2	16.3	<b>15.5<sup>d</sup></b>	14.8	15.9	<b>13.9<sup>e</sup></b>	<b>31.9<sup>d</sup></b>	<b>29.7<sup>e</sup></b>	40.3	30.4	39.8	32.1
		F3	19.5	16.8	<b>15.8<sup>d</sup></b>	15.6	16.1	<b>14.5<sup>e</sup></b>	<b>34.0<sup>d</sup></b>	<b>31.8<sup>e</sup></b>	43.9	34.1	43.4	35.2
	4	F1	24.8	18.5	<b>21.1<sup>d</sup></b>	16.5	21.5	<b>15.5<sup>e</sup></b>	<b>44.3<sup>d</sup></b>	<b>32.5<sup>e</sup></b>	54.3	33.1	53.7	35.5
		F2	24.9	18.6	<b>21.1<sup>d</sup></b>	16.1	21.6	<b>15.7<sup>e</sup></b>	<b>43.8<sup>d</sup></b>	<b>32.5<sup>e</sup></b>	53.9	33.4	53.2	35.6
		F3	25.0	18.5	<b>21.2<sup>d</sup></b>	16.2	21.9	<b>15.7<sup>e</sup></b>	<b>45.2<sup>d</sup></b>	<b>33.5<sup>e</sup></b>	55.7	<b>33.5<sup>e</sup></b>	55.4	36.6

※ d: 3分布形間で平均待ち時間が最短なもの  
 e: 3分布形間で標準偏差が最小なもの

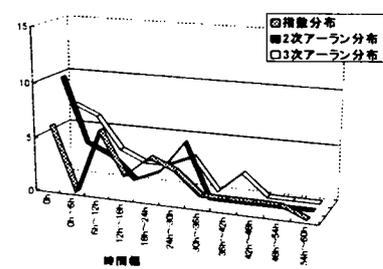
計画開始1  
近似解法F1



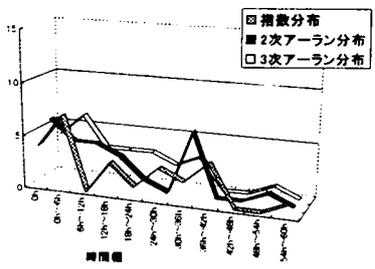
計画開始2  
近似解法F2



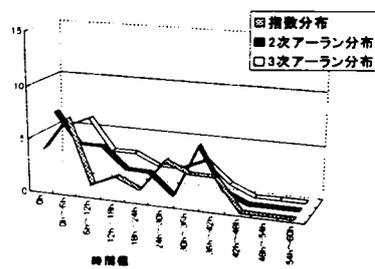
計画開始1  
近似解法F3



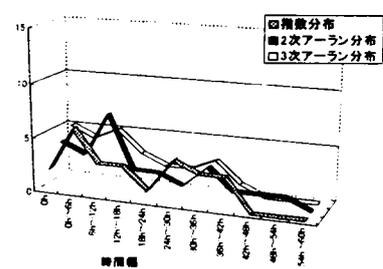
計画開始2  
近似解法F1



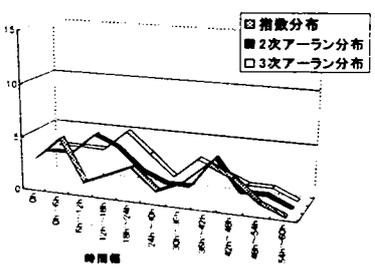
計画開始2  
近似解法F2



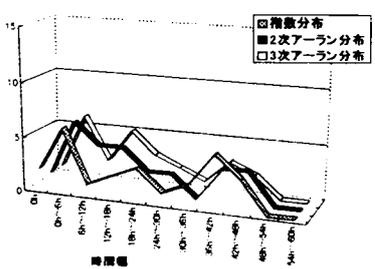
計画開始2  
近似解法F3



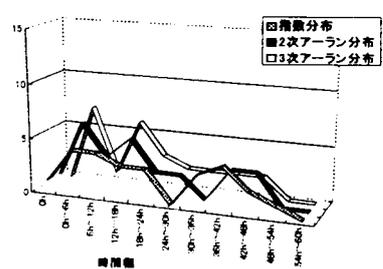
計画開始3  
近似解法F1



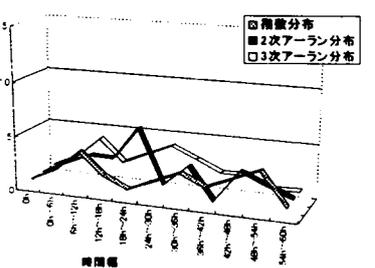
計画開始3  
近似解法F2



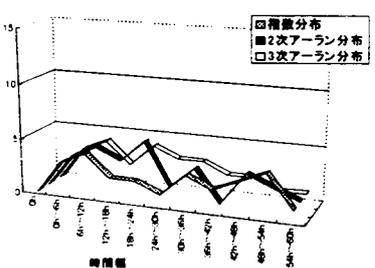
計画開始3  
近似解法F3



計画開始4  
近似解法F1



計画開始4  
近似解法F2



計画開始4  
近似解法F3

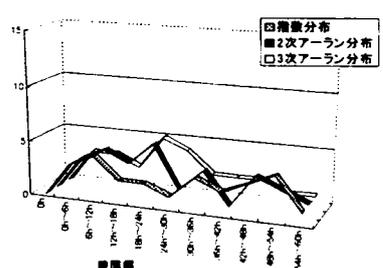
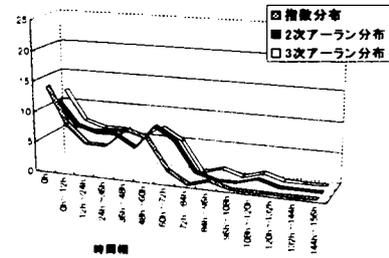
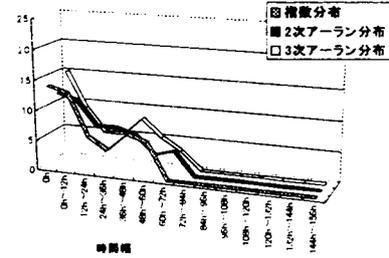


図3. 10(1) 5 パース 25 隻の問題における各船の待ち時間分布

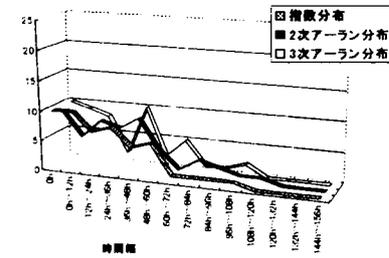
計画開始1  
近似解法F1



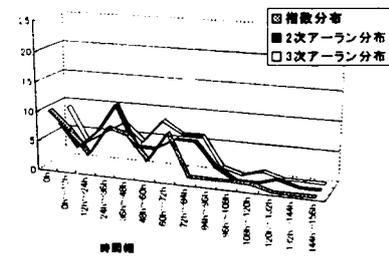
計画開始1  
近似解法F2



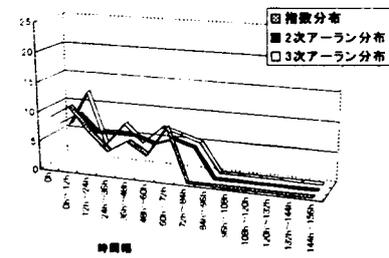
計画開始1  
近似解法F3



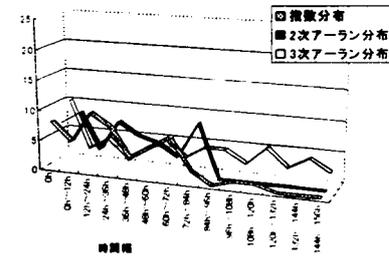
計画開始2  
近似解法F1



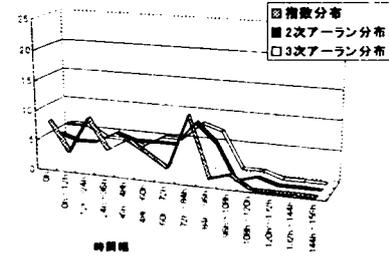
計画開始2  
近似解法F2



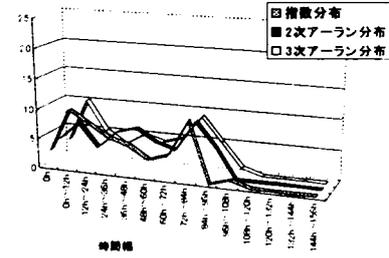
計画開始2  
近似解法F3



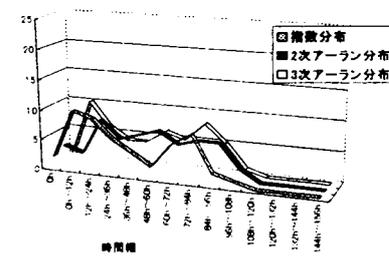
計画開始3  
近似解法F1



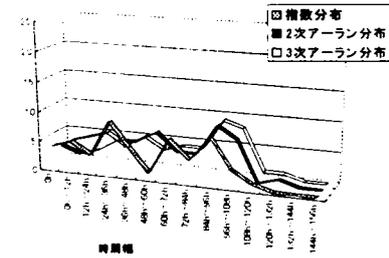
計画開始3  
近似解法F2



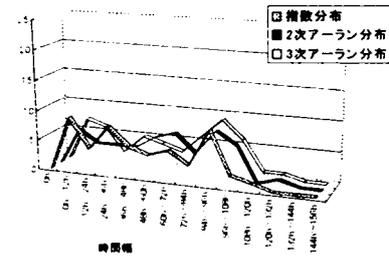
計画開始3  
近似解法F3



計画開始4  
近似解法F1



計画開始4  
近似解法F2



計画開始4  
近似解法F3

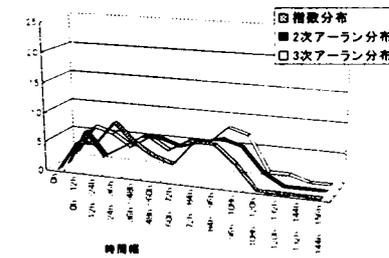


図3. 10(2) 5 バース 50 隻の問題における各船の待ち時間分布

になだらかになり、極端なピークは若干抑えられているのに対し、時刻4では極端なピークはなく待ち時間0の船が少なくなり、各船の待ち時間の長さにはばらつきが目立つ結果となっている。50隻の場合は、2つ目のピークの位置が右にずれ、開始時刻1では60時間前後、時刻2、3、4となるほど長くなり、時刻4では100時間前後がピークとなっている。

指数分布のときの総在港時間は25隻のときに最も長くなっており、待ち時間分布をみると、指数分布では他より比較的待ち時間の長い船が存在する。このために総在港時間が長くなっていると考えられる。逆に50隻の場合、指数分布では他より待ち時間が長い船が少ないため総在港時間が短くなっていると考えられる。

以上より、到着分布が高次のアーラン分布になって到着間隔が長い船が増すと、対象隻数が少ないときは待ち時間が短く、在港時間も少なくなるが、隻数が多いと逆の傾向になることが明らかになった。

### 3. 6 到着順と荷役時間長の並びの関係による解の精度への影響

目的関数である総在港時間（各船の荷役時間と待ち時間の総和）は、当該船が係留される時その船の荷役時間が後続船の待ち時間に影響を及ぼす。このため、係留順における荷役時間長の変化のパターンの違いにより、対象船より後に係留される船の待ち時間の長さが変動する。したがって、本問題では総在港時間は荷役時間の短い船を先に係留させた方が目的関数値は小さくなる。緩和問題の解は入港後に係留されるという制約がないため、その解は荷役時間が短い船が先に係留されることになる。もし、元問題において荷役時間の長い船が先に入港する場合であっても、緩和問題の解では上で述べたような結果になる。したがって、この場合の緩和問題の解では先に入港した船が後に係留されるため、緩和した制約（入港後に係留される）を満足するように修正する際に、制約を満足しない船が多くなると考えられ、良い実行可能解が求まりにくくなる。また反対に、荷役時間が短い船が先に入港する場合は緩和問題の解が元の問題の実行可能解になりやすく、最適解が得られやすい。

そこで、前の事例計算で用いた人工的に生成した船の入港時刻と荷役時間を、各船の入港時刻と荷役時間の関連性を解除して、各問題ごとに船の入港順に荷役時間を昇順に並び替えた場合（問題B）と降順に並び替えた場合（問題C）について検討を行う。つまり、前者は入港が前であるほど荷役時間が短く、後者はその反対に入港が前であるほど荷役時間が長くなるように値を設定する。なお、先に行った計算をここでは問題Aと呼ぶことにする。

それぞれの場合でのGAPとCPU時間を表3.4と表3.5に示す。なお、これらの値は3.5節で行った計算と同じく、それぞれ10回の平均値を示している。

### (1) 荷役時間長が昇順の場合

計画開始時刻の影響は表3. 4に示すように、問題Aと同様に計画開始時刻が遅くなるほどGAPの値が小さくなり、解の精度の良くなっていることがわかる。この問題は比較的最適解を求めやすい問題であると考えられるが、5、7バース50隻の開始時刻3と10バース25隻以外のケースの計画開始時刻4の問題において3つの解法すべてで最適解が求まったケースがあり、そのことが裏付けられる結果となっている。全体としては問題Aと同様に、問題の規模が大きくなるとGAPが大きくなり、解の精度が悪くなる傾向にあるといえる。

さらに3つの解法を比較すると、F1とF2はほぼ同じ値を示しているが、最も複雑な処理を行うF3が解の精度が悪くなるという結果になった。これは、F3の場合は実行可能解を求める際の処理が複雑であるために緩和問題の解を必要以上に修正をしたため、結果として解の精度が悪くなってしまったと考えられる。

CPU時間については、表3. 4より問題Aと同様に、F3が時間のかかるケースやF1が最も時間がかかるケースが存在した。さらに問題の規模が大きくなれば、処理時間が長くなり、また計画開始時刻の遅くなるほど処理時間が短くなるという傾向が見られる。

### (2) 荷役時間長が降順の場合

計画開始時刻の変化の影響については表3. 5に示すように、問題Aと同様、開始時刻が遅いほどGAPが小さく、解の精度の良くなっている。また3つの解法を比較すると、F2のGAPが最も小さく解の精度の良くなっている。さらに全体を見ると、同一バース数で隻数が増えると解の精度が悪くなるが、同一隻数でバース数が変化した場合は極端に大きくそのようにはなっていない。つまり、25隻の場合バース数が変化しても解の精度がほとんど変化しない。またこの場合、F2とF3はほとんど解の精度に差がなく、50隻の場合もほぼ同様のことがいえるが、F2とF3の差は25隻の場合よりも大きい。

CPU時間については、表3. 5に示すように問題AとBと同様の結果が得られた。

### (3) 荷役時間長の並びによる解の精度の影響

船の入港順と荷役時間長の変化の仕方によって問題の解きやすさが異なることから、解の精度に差があると考えられる。そこで、入港順に荷役時間の長さがランダムに与えられた場合である基本計算（問題A）、昇順の計算（問題B）、またその反対の場合である降順の計算（問題C）の3ケース間で解の精度を比較する。

表3. 6はF1、F2およびF3の解法ごとに問題の規模別に、荷役時間長の並びがGAPに与える影響を比較したものである。

この結果から、問題Bの昇順の場合には他に比べてGAPが小さいことがわかる。これは、先に考察したように昇順では問題が解きやすいことを示している。逆に、最適解が降順では求めにくいと考えられるが、F1では問題Cが圧倒的にGAPが大きくなっている。F2では

表3.4 問題Bにおける解の精度と計算時間

問題サイズ バース数 × 隻数	開始 時刻	F1			F2			F3		
		GAP (%)	CPU (秒)	繰り 返し 回数	GAP (%)	CPU (秒)	繰り 返し 回数	GAP (%)	CPU (秒)	繰り 返し 回数
5×25	1	7.1	46.2	200.0	7.1	45.7	200.0	10.8	44.8	200.0
	2	0.7	34.4	180.1	0.7	35.3	180.1	1.3	34.0	180.1
	3	0.1	9.7	53.8	0.1	8.2	50.7	0.1	8.0	50.7
	4	0.0	0.1	1.0	0.0	0.1	1.0	0.0	0.1	1.0
7×25	1	19.4	59.8	200.0	19.2	62.4	200.0	27.8	74.8	200.0
	2	4.2	51.4	200.0	4.2	52.4	200.0	6.6	50.5	200.0
	3	0.5	34.3	160.3	0.5	32.1	160.3	0.9	31.9	160.3
	4	0.0	0.1	1.1	0.0	0.1	1.1	0.0	0.1	1.1
10×25	1	32.0	81.4	200.0	32.0	81.9	200.0	39.9	85.2	200.0
	2	9.2	68.0	200.0	9.2	67.7	200.0	13.1	70.6	200.0
	3	2.1	48.6	200.0	2.1	48.9	200.0	4.2	51.3	200.0
	4	0.1	30.0	140.8	0.1	30.2	140.8	0.2	31.1	140.5
5×50	1	8.1	718.2	200.0	8.0	719.1	200.0	12.3	748.4	200.0
	2	0.2	188.6	60.7	0.2	190.5	60.7	0.2	196.1	60.7
	3	0.0	1.9	1.0	0.0	1.9	1.0	0.0	2.0	1.0
	4	0.0	1.4	1.0	0.0	1.4	1.0	0.0	1.5	1.0
7×50	1	25.6	983.0	200.0	25.4	983.3	200.0	46.4	1024.1	200.0
	2	2.9	807.2	200.0	2.9	800.9	200.0	7.5	834.9	200.0
	3	0.0	67.5	20.9	0.0	67.1	20.9	0.0	69.6	20.9
	4	0.0	1.8	1.0	0.0	1.8	1.0	0.0	1.9	1.0
10×50	1	53.1	1380.2	200.0	53.0	1438.3	200.0	76.1	1500.5	200.0
	2	10.9	1146.8	200.0	10.9	1139.7	200.0	19.9	1209.1	200.0
	3	1.2	1113.3	200.0	1.1	847.5	200.0	4.4	1059.0	200.0
	4	0.0	122.4	40.8	0.0	123.3	40.8	0.0	130.2	40.8

表3.5 問題Cにおける解の精度と計算時間

問題サイズ バース数 × 隻数	開始 時刻	F1			F2			F3		
		GAP (%)	CPU (秒)	繰り 返し 回数	GAP (%)	CPU (秒)	繰り 返し 回数	GAP (%)	CPU (秒)	繰り 返し 回数
5×25	1	51.3	52.6	200.0	28.0	48.8	200.0	27.2	50.6	200.0
	2	23.5	43.4	200.0	12.0	43.1	200.0	11.4	44.1	200.0
	3	8.9	32.7	200.0	4.5	33.2	200.0	4.3	32.4	200.0
	4	2.2	24.1	200.0	1.6	22.9	200.0	1.6	23.4	200.0
7×25	1	53.7	79.1	200.0	28.4	67.4	200.0	28.7	65.5	200.0
	2	21.4	56.1	200.0	11.6	57.2	200.0	12.0	56.4	200.0
	3	7.5	42.1	200.0	5.3	43.2	200.0	4.9	42.8	200.0
	4	2.0	32.9	200.0	1.9	33.5	200.0	1.9	33.4	200.0
10×25	1	54.3	87.7	200.0	30.5	88.5	200.0	33.7	88.1	200.0
	2	21.6	75.3	200.0	11.6	76.5	200.0	13.5	76.0	200.0
	3	7.7	55.1	200.0	4.1	56.4	200.0	4.4	56.5	200.0
	4	1.7	42.5	200.0	2.1	43.1	200.0	1.8	43.8	200.0
5×50	1	120.2	767.5	200.0	61.1	772.4	200.0	66.5	796.4	200.0
	2	52.2	646.8	200.0	25.9	650.9	200.0	30.3	668.2	200.0
	3	21.5	536.4	200.0	10.5	537.1	200.0	11.4	553.6	200.0
	4	6.2	362.1	200.0	2.9	359.7	200.0	3.2	372.5	200.0
7×50	1	142.5	1049.8	200.0	58.0	1050.5	200.0	73.5	1081.2	200.0
	2	57.5	874.2	200.0	27.1	884.1	200.0	31.2	897.1	200.0
	3	21.2	715.4	200.0	11.7	720.8	200.0	12.5	738.0	200.0
	4	5.4	473.1	200.0	3.1	477.7	200.0	3.4	494.7	200.0
10×50	1	171.2	1570.3	200.0	67.5	1508.5	200.0	88.1	1544.3	200.0
	2	57.8	1221.8	200.0	25.8	1246.4	200.0	33.6	1320.0	200.0
	3	19.1	999.2	200.0	11.7	1031.7	200.0	13.2	1091.5	200.0
	4	4.6	698.3	200.0	3.4	675.9	200.0	3.5	669.2	200.0

開始時刻1の問題において、問題Aで若干F1より多くのケースでGAPが大きくなっているが、大多数が問題CでGAPが最大になっている。F3については約半分弱が問題AのGAPが大きく、その他は問題CでGAPが大きくなっており、必ずしも予想通りにはなっていない。

#### (4) 荷役時間長の並びによる計算時間の影響

CPU時間についても(3)と同様の分析を行う。表3.7は解法ごとに荷役時間長の並び方が与える計算時間への影響を比較したものである。

最も解きやすい問題とされる問題Bで計算時間が短くなるケースが多いが、問題Aは問題Bさほど大きな時間差がないことが分かる。逆にアルゴリズムが複雑な問題Cで計算時間が最もかかっている。また開始時刻が後になるほど、計算時間の差が大きいことが分かる。問題Bにおいて5、7バースの開始時刻4のケースでは他の2つより極端に計算時間が短くなっており、GAPの値がこれらのケースではかなり解が求めやすい問題であり、簡単に最適解が求められたことによるといえる。

表3.6 荷役時間長の並びごとの解の精度GAP

単位：%

パース数 × 隻数	開始 時刻	F1			F2			F3		
		問題A	問題B	問題C	問題A	問題B	問題C	問題A	問題B	問題C
5×25	1	37.9	7.1	<b>51.3<sup>f</sup></b>	27.1	7.1	<b>28.0<sup>f</sup></b>	<b>34.5<sup>f</sup></b>	10.8	27.2
	2	12.3	0.7	<b>23.5<sup>f</sup></b>	7.9	0.7	<b>12.0<sup>f</sup></b>	8.5	1.3	<b>11.4<sup>f</sup></b>
	3	3.4	0.1	<b>8.9<sup>f</sup></b>	1.7	0.1	<b>4.5<sup>f</sup></b>	1.7	0.1	<b>4.3<sup>f</sup></b>
	4	0.7	0.0	<b>2.2<sup>f</sup></b>	0.4	0.0	<b>1.6<sup>f</sup></b>	0.4	0.0	<b>1.6<sup>f</sup></b>
7×25	1	49.2	19.4	<b>53.7<sup>f</sup></b>	<b>43.1<sup>f</sup></b>	19.2	28.4	<b>54.2<sup>f</sup></b>	27.8	28.7
	2	13.6	4.2	<b>21.4<sup>f</sup></b>	<b>11.7<sup>f</sup></b>	4.2	11.6	<b>14.4<sup>f</sup></b>	6.6	12.0
	3	3.3	0.5	<b>7.5<sup>f</sup></b>	2.8	0.5	<b>5.3<sup>f</sup></b>	3.4	0.9	<b>4.9<sup>f</sup></b>
	4	0.5	0.0	<b>2.0<sup>f</sup></b>	0.3	0.0	<b>1.9<sup>f</sup></b>	0.3	0.0	<b>1.9<sup>f</sup></b>
10×25	1	<b>60.3<sup>f</sup></b>	32.0	54.3	<b>48.3<sup>f</sup></b>	32.0	30.5	<b>65.5<sup>f</sup></b>	39.9	33.7
	2	14.6	9.2	<b>21.6<sup>f</sup></b>	11.4	9.2	<b>11.6<sup>f</sup></b>	<b>18.5<sup>f</sup></b>	13.1	13.5
	3	3.6	2.1	<b>7.7<sup>f</sup></b>	3.3	2.1	<b>4.1<sup>f</sup></b>	<b>5.6<sup>f</sup></b>	4.2	4.4
	4	0.7	0.1	<b>1.7<sup>f</sup></b>	0.4	0.1	<b>2.1<sup>f</sup></b>	0.6	0.2	<b>1.8<sup>f</sup></b>
5×50	1	117.8	8.1	<b>120.2<sup>f</sup></b>	<b>65.1<sup>f</sup></b>	8.0	61.1	<b>96.7<sup>f</sup></b>	12.3	66.5
	2	38.5	0.2	<b>52.2<sup>f</sup></b>	15.1	0.2	<b>25.9<sup>f</sup></b>	24.4	0.2	<b>30.3<sup>f</sup></b>
	3	12.4	0.0	<b>21.5<sup>f</sup></b>	3.5	0.0	<b>10.5<sup>f</sup></b>	5.5	0.0	<b>11.4<sup>f</sup></b>
	4	2.4	0.0	<b>6.2<sup>f</sup></b>	0.6	0.0	<b>2.9<sup>f</sup></b>	0.8	0.0	<b>3.2<sup>f</sup></b>
7×50	1	139.6	25.6	<b>142.5<sup>f</sup></b>	<b>99.0<sup>f</sup></b>	25.4	58.0	<b>141.6<sup>f</sup></b>	46.4	73.5
	2	33.4	2.9	<b>57.5<sup>f</sup></b>	21.1	2.9	<b>27.1<sup>f</sup></b>	30.1	7.5	<b>31.2<sup>f</sup></b>
	3	9.9	0.0	<b>21.2<sup>f</sup></b>	5.0	0.0	<b>11.7<sup>f</sup></b>	7.1	0.0	<b>12.5<sup>f</sup></b>
	4	2.0	0.0	<b>5.4<sup>f</sup></b>	0.8	0.0	<b>3.1<sup>f</sup></b>	0.9	0.0	<b>3.4<sup>f</sup></b>
10×50	1	166.3	53.1	<b>171.2<sup>f</sup></b>	<b>145.5<sup>f</sup></b>	53.0	67.5	<b>219.7<sup>f</sup></b>	76.1	88.1
	2	32.7	10.9	<b>57.8<sup>f</sup></b>	<b>27.5<sup>f</sup></b>	10.9	25.8	<b>41.6<sup>f</sup></b>	19.9	33.6
	3	7.9	1.2	<b>19.1<sup>f</sup></b>	6.5	1.1	<b>11.7<sup>f</sup></b>	10.3	4.4	<b>13.2<sup>f</sup></b>
	4	1.5	0.0	<b>4.6<sup>f</sup></b>	1.0	0.0	<b>3.4<sup>f</sup></b>	1.7	0.0	<b>3.5<sup>f</sup></b>

※ f: 当該解法内でGAPが最大になった問題

表3.7 荷役時間長の並びごとの計算時間

単位：秒

パース数 × 隻数	開始 時刻	F1			F2			F3		
		問題A	問題B	問題C	問題A	問題B	問題C	問題A	問題B	問題C
5×25	1	<b>82.2<sup>g</sup></b>	46.2	52.6	<b>50.2<sup>g</sup></b>	45.7	48.8	<b>51.0<sup>g</sup></b>	44.8	50.6
	2	38.4	34.4	<b>43.4<sup>g</sup></b>	41.3	35.3	<b>43.1<sup>g</sup></b>	39.0	34.0	<b>44.1<sup>g</sup></b>
	3	27.5	9.7	<b>32.7<sup>g</sup></b>	28.3	8.2	<b>33.2<sup>g</sup></b>	27.1	8.0	<b>32.4<sup>g</sup></b>
	4	18.0	0.1	<b>24.1<sup>g</sup></b>	18.7	0.1	<b>22.9<sup>g</sup></b>	17.7	0.1	<b>23.4<sup>g</sup></b>
7×25	1	<b>115.0<sup>g</sup></b>	59.8	79.1	67.1	62.4	<b>67.4<sup>g</sup></b>	62.2	74.8	<b>65.5<sup>g</sup></b>
	2	<b>56.9<sup>g</sup></b>	51.4	56.1	50.6	52.4	<b>57.2<sup>g</sup></b>	<b>64.1<sup>g</sup></b>	50.5	56.4
	3	38.9	34.3	<b>42.1<sup>g</sup></b>	35.6	32.1	<b>43.2<sup>g</sup></b>	37.3	31.9	<b>42.8<sup>g</sup></b>
	4	26.7	0.1	<b>32.9<sup>g</sup></b>	24.2	0.1	<b>33.5<sup>g</sup></b>	24.4	0.1	<b>33.4<sup>g</sup></b>
10×25	1	80.1	81.4	<b>87.7<sup>g</sup></b>	80.0	81.9	<b>88.5<sup>g</sup></b>	80.0	85.2	<b>88.1<sup>g</sup></b>
	2	65.4	68.0	<b>75.3<sup>g</sup></b>	66.1	67.7	<b>76.5<sup>g</sup></b>	67.8	70.6	<b>76.0<sup>g</sup></b>
	3	45.6	48.6	<b>55.1<sup>g</sup></b>	45.9	48.9	<b>56.4<sup>g</sup></b>	46.1	51.3	<b>56.5<sup>g</sup></b>
	4	32.6	30.0	<b>42.5<sup>g</sup></b>	32.0	30.2	<b>43.1<sup>g</sup></b>	35.0	31.1	<b>43.8<sup>g</sup></b>
5×50	1	718.1	718.2	<b>767.5<sup>g</sup></b>	733.7	719.1	<b>772.4<sup>g</sup></b>	755.9	748.4	<b>796.4<sup>g</sup></b>
	2	593.4	188.6	<b>646.8<sup>g</sup></b>	591.4	190.5	<b>650.9<sup>g</sup></b>	617.7	196.1	<b>668.2<sup>g</sup></b>
	3	470.9	1.9	<b>536.4<sup>g</sup></b>	470.9	1.9	<b>537.1<sup>g</sup></b>	491.0	2.0	<b>553.6<sup>g</sup></b>
	4	291.8	1.4	<b>362.1<sup>g</sup></b>	292.7	1.4	<b>359.7<sup>g</sup></b>	306.4	1.5	<b>372.5<sup>g</sup></b>
7×50	1	979.5	983.0	<b>1049.8<sup>g</sup></b>	981.7	983.3	<b>1050.5<sup>g</sup></b>	1019.1	1024.1	<b>1081.2<sup>g</sup></b>
	2	798.9	807.2	<b>874.2<sup>g</sup></b>	804.2	800.9	<b>884.1<sup>g</sup></b>	841.6	834.9	<b>897.1<sup>g</sup></b>
	3	636.2	67.5	<b>715.4<sup>g</sup></b>	641.1	67.1	<b>720.8<sup>g</sup></b>	659.8	69.6	<b>738.0<sup>g</sup></b>
	4	388.4	1.8	<b>473.1<sup>g</sup></b>	392.5	1.8	<b>477.7<sup>g</sup></b>	402.1	1.9	<b>494.7<sup>g</sup></b>
10×50	1	1357.4	1380.2	<b>1570.3<sup>g</sup></b>	1373.7	1438.3	<b>1508.5<sup>g</sup></b>	1428.7	1500.5	<b>1544.3<sup>g</sup></b>
	2	1105.9	1146.8	<b>1221.8<sup>g</sup></b>	1109.3	1139.7	<b>1246.4<sup>g</sup></b>	1153.7	1209.1	<b>1320.0<sup>g</sup></b>
	3	887.1	<b>1113.3<sup>g</sup></b>	999.2	909.0	847.5	<b>1031.7<sup>g</sup></b>	911.3	1059.0	<b>1091.5<sup>g</sup></b>
	4	525.5	122.4	<b>698.3<sup>g</sup></b>	539.0	123.3	<b>675.9<sup>g</sup></b>	547.3	130.2	<b>669.2<sup>g</sup></b>

※ g：当該解法において計算時間が最長な問題

### 3.7 実績データによる比較分析

次に、神戸港で得られた実績データを用いて、本章で考案した割当法によるマルチユーズターミナルとして利用することにおけるバースの利用効率と実績のそれとの比較を行う。

#### (1) 計算の前提

神戸港の1ヶ月間の入港船を対象として、1計画期間を1日、3日、6日とし、それぞれ29、10、5の期間に分けてバース割当の計算を行う。

荷役時間は、実績データではある船が実際に係留されたバースでの荷役時間はわかっているが、その船が他のバースで荷役にどのくらい時間がかかるかはわからない。そこで、各バースのコンテナ1個あたりの荷役時間と各船の荷役コンテナ数との積をその船が当該バースでかかる荷役時間とする。

各期間の計画開始時刻は、直前の計画期において各バースで最後に出港した船の出港時刻とする。なお、第1期の各バースの計画開始時刻は同一とする。

#### (2) 計算結果

図3.11は供用バース数を3~7まで変化させた場合の総在港時間の値を示している。実績では、明らかに土日荷役の利用を避けるためにわざとバース待ちをしているケースがあった。しかし、本研究で提案した割当法ではこれは考慮していない。そこで、このような待ち時間を実績から取り除いている。

図3.11より、1計画期間が長くなるほど、総在港時間も長くなっている。これは、3.5節の事例計算で明らかになったように、期間が長くなると対象船が増えて解の精度が悪くなり、総在港時間が大きくなるためであると考えられる。この結果より、1計画期間が1日であれば、実績よりも2バース少ない5バースでも実績とほぼ同じ総在港時間で済むという結果になった。

次に、それぞれの期間における計画開始時刻を調べた。表3.8には当該スパンの船舶の計画を立てる際、前計画期間の最後の船が出港してバースが空きになる時刻が当該スパンのどの位置にくるかを調べたものである。図3.12に示すように、値が0なら計画開始時刻が当該スパンの最初と等しく、50なら最初と最後のちょうど真中部分を位置し、100なら最後と等しい。また負の値の場合は当該スパンの船が到着する前に、100より大きい場合は当該スパンの船舶全てが到着済みということになる。なお、1スパン1日の問題の場合では(29期間×バース数)個の開始時刻位置の平均と標準偏差を示し、3日の場合(10期間×バース数)個、6日の場合(5期間×バース数)個の平均と標準偏差を示す。

その結果、各期間によって差はあったが、同一バース数で期間幅が大きくなり対象船が増えるほど、開始時刻は早くなり、同一期間幅ではバース数が増えると、開始時刻は早く

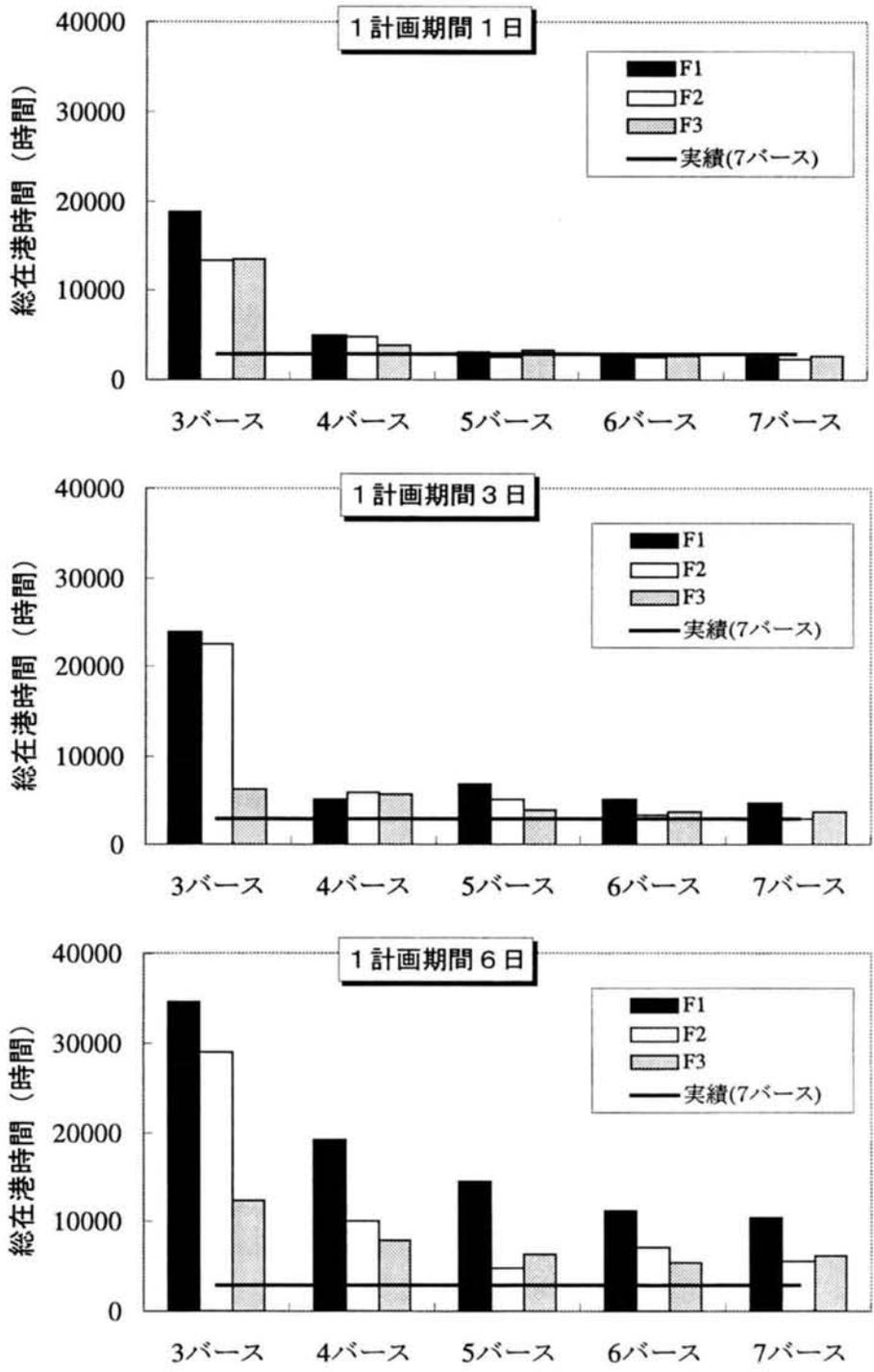


図3. 11 実績データによる総在港時間

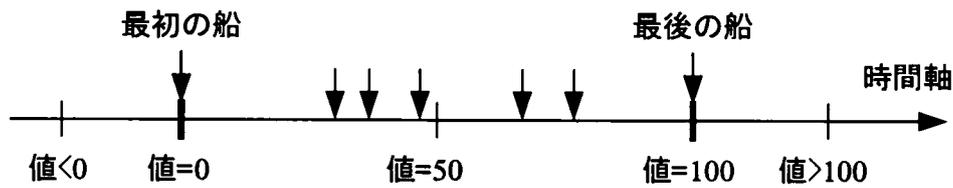


図3. 12 計画開始時刻の位置

表3. 8 各問題における計画開始時刻の平均位置と標準偏差

バース数	近似解法	1日		3日		6日	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
3バース	F1	304.3	23.9	139.3	10.1	99.8	5.3
	F2	308.4	25.5	132.5	8.7	88.3	5.0
	F3	309.6	29.7	118.7	11.3	88.3	5.0
4バース	F1	65.7	31.7	54.5	11.5	53.2	9.5
	F2	61.0	35.9	43.6	9.2	44.0	9.9
	F3	61.7	32.3	34.7	18.8	39.4	19.4
5バース	F1	22.5	40.7	30.1	13.1	35.3	14.9
	F2	21.1	46.8	20.0	17.6	18.4	18.5
	F3	18.4	50.0	14.1	26.5	24.8	33.8
6バース	F1	5.8	49.6	12.7	25.4	21.3	16.4
	F2	1.3	62.1	3.9	18.9	7.8	19.0
	F3	2.4	55.9	3.3	24.8	6.2	22.4
7バース	F1	-10.0	65.8	5.8	25.8	11.8	19.9
	F2	-7.0	61.0	-2.2	25.7	-1.5	22.9
	F3	-15.1	63.2	-10.4	36.5	-2.0	32.3

なる傾向にあることがわかった。したがって、問題の規模が大きくなると計画開始時刻は早くなる傾向にあり、緩和した制約を満たさない船が多くなって、これにより解の精度が悪くなっている。

さらに各船がどの程度バース待ちをしているかを調べた。表3. 9に供用バース数ごとの各船の待ち時間の平均と標準偏差を示す。この結果より、バース数が増えると当然待ち時間が短くなり、またばらつきも小さくなっている。1計画期間の長さによる変化の影響をみると、どのバース数でも期間幅が短いほど、待ち時間が短くなっており、ばらつきも小さくなっていることがわかる。

実績の待ち時間と比較すると、1計画期間が1日の場合であれば5バースでも平均待ち時間は短くなるという結果になった。

以上のことをまとめると、どの供用バース数においても計画期間が短い方が平均の待ち時間が短くなり、総在港時間も短くなっている。また、待ち時間の標準偏差も期間幅の短い方が小さくなっている。したがって、計画期間幅が短いときの方が在港時間、待ち時間も短くなり、かつ待ち時間の長さのばらつきが少なく、入港船の満足度の高いサービスが提供できると考えられる。

表3.9 各船の待ち時間の平均と標準偏差

単位:時間

バース数	近似解法	1日		3日		6日	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
3バース	F1	63.1	40.5	83.1	51	124.8	71.3
	F2	64.3	41.8	78.6	48.8	106.1	67.8
	F3	64.9	42.0	68.2	48.1	97.3	73.4
4バース	F1	10.1	10.1	10.2	15.7	64.3	52
	F2	9.2	9.7	21.9	21.1	46.1	42.1
	F3	9.4	9.7	19.2	18.9	57.7	46.9
5バース	F1	2.7 <sup>h</sup>	4.7	16.8	20.5	45.9	54.8
	F2	2.6 <sup>h</sup>	4.2	9.7	13.5	24.6	33.8
	F3	3.9	7.3	13.7	17.7	61.2	68.5
6バース	F1	1.4 <sup>h</sup>	3.3	10.4	16	34	43.3
	F2	1.3 <sup>h</sup>	3.0	4.7	8.1	17.9	25.0
	F3	2.8 <sup>h</sup>	5.4	9.6	13.6	29.8	35.0
7バース	F1	0.7 <sup>h</sup>	2.1	8.4	13.7	31	38.6
	F2	0.5 <sup>h</sup>	1.4	3.6	7.2	12.7	19.6
	F3	2.5 <sup>h</sup>	5.7	8.5	12.8	28.6	39.0
実績7バース		平均	3.4 (同時保留船除く)			標準偏差	7.8

※ h: 実績より平均待ち時間が短いもの

### 3.8 結語

本章では各バースに1隻のみの係留を仮定して船の係留位置決定方法を提案した。ここでは制約式の一部を緩和した問題を解くことで最悪の解の精度を示すことができることで知られている、LRを用いて検討した。

本研究で得られた成果は、次のようになる。

- ① 実行可能解を求めるために、3つの近似解法を提案した。具体的には、到着前に係留される船の処理として、F1（割当てられたバース内で到着時刻まで係留開始時刻を後ろにずらす）、F2（割当てられたバース内で係留順序を入れ替える）、F3（他のバースも含めて係留順を入れ替える）を検討した。割当変更の自由度がF1よりF2、F2よりF3が大きいため、その順で解の精度が良くなると予想したが、結果としてはF2の解の精度が最も良いということになった。またCPU時間については大差はないもののF1やF3が最も時間がかかるケースもみられた。
- ② 近似解法全てに共通する傾向として、計画開始時刻が計画期間幅のどのあたりにくるか、または与えられた問題の規模によって解の精度が異なる。計画開始はなるべく後になるほど精度が良くなり、問題の規模は大きくなるほど精度が悪くなる傾向にあることがわかった。
- ③ マルチユーザ方式にしたとき到着分布が現状と同様とは限らないため、入港分布を変化させた場合の総在港時間や各船の待ち時間への影響を検討した。その結果、船の到着間隔が広がると、隻数が少ないときは各船の待ち時間は短くなり、在港時間も短くなるが、隻数が増すと逆の傾向になることがわかった。
- ④ 緩和問題の解は必ず荷役時間の短い順に係留順が決定されるため、与える問題そのものの荷役時間長が船の到着順に昇順であれば、緩和問題の解＝実行可能解となるためこの場合良い解を求めやすい問題、反対に降順は良い解を求めにくい問題と考えることができる。そこで、到着順に昇順、降順、ランダム3つの問題を与えて検討した。予想通り、全解法で昇順の問題が解の精度が最も良くなる傾向にあることがわかった。
- ⑤ 神戸港での実績データを用いて割当計算を行ったが、1回の計算の規模を小さく、つまり対象期間幅を短くする方が在港時間、待ち時間も短くなり、各船間の待ち時間のばらつきも少なくなることがわかった。さらに、1計画期間が1日のときは実績の供用数の2/3のバース数で実績と同程度のサービスが行えることが明らかになった。

以上の結果から、提案した解法は十分実用的であり、以上の傾向を把握した上で利用することができれば、管理者の支援システムとしてマルチユーザ形式のバース運用面でより効果的なものになると考えられる。

### 第3章に関する参考文献

- 1) Current, J., Imai, A. and Pirkul, H., The capacitated carrier transportation problem : An application of the axial three-dimensional transportation problem with heuristic, *Transportation Science*, Vol.28, No.4, 328-336, 1994.
- 2) Fisher, L. M., The lagrangian relaxation method for solving integer programming problem, *Management Science*, Vol.27, No.1, 1-18, 1981.
- 3) Gavish, B., On obtaining the 'best' multipliers for a lagrangean relaxation for integer programming, *Computer & Operations Research*, Vol.5, 55-71, 1978.
- 4) 今井昭夫, 西村悦子, 計画開始時刻を考慮した公共バースの割当法, *土木計画学研究・論文集*, No.15, 557-564, 1998.
- 5) Imai, A., Nishimura, E. and Papadimitriou, S., The dynamic berth allocation problem for a container port, *Transportation Research Part B*, Vol.35, No.4, 87-103, 2001.
- 6) 片山直登, 岩田実, 柳下和夫, 三原一郎, 今澤明男, ラグランジュ緩和法を用いた容量制約のないネットワーク計画問題の解法, *土木計画学研究・論文集*, No.11, 105-112, 1993.
- 7) Reeves, C. R. (横山ら共訳), *モダンヒューリスティックー組み合わせ最適化の先端手法一*, 日刊工業新聞社, 249-280, 1997.
- 8) 第2章, 文献 29).
- 9) 第2章, 文献 10).
- 10) 西村悦子, 公共バースにおけるバース割当問題, *神戸商船大学修士論文*, 1998.

## 第4章 複数船舶の同時係留を考慮したバース割当法<sup>5),6),7)</sup>

### 4.1 概説

第3章では、ラグランジュ緩和問題を使った劣勾配法 (LR) でバース割当を検討した。これは、各バースに同時に1隻しか係留できないことを仮定している。しかしながら、現実には2隻以上の船が1つのバースに同時期に係留される場合が存在しており、1隻のみの係留はあまり現実的ではない。LRを用いる場合、前章の問題のように元問題のある制約を緩和した問題は整数計画問題となり、その最適解が簡単に得られなければ、適用することはできない。しかしながら、複数船の同時係留を考慮すると制約が増え、緩和問題自体が容易に解けなくなり、LRで解くことは困難になる。そこで本章では、そのような問題においても対応できることで知られている遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて、同時係留を可能にした場合の効率的なバース割当の方法を検討する。

4.2節では、問題の定式化を行い、4.3節では、LRを用いて解けない理由を述べる。4.4節では、GAを用いた解法手順を示し、4.5節では、人工的に生成させたデータを使用して数値実験を行った結果を示す。最後に4.6節では、神戸港の実績データを使用して提案する方法の効果を示す。

### 4.2 モデルの定式化

#### 4.2.1 前提条件

バース割当において、以下の係留条件と荷役時間を仮定する。

##### (a) 係留条件

- ①各船は必ずいずれかのバースに1回係留される
- ②当該船の係留バースにおいて、当該船の全長に係留の際必要となる延長を考慮した必要延長と、他船の必要延長の和が当該バース岸壁長を超えなければ、それらは同時期に係留を可能とする

③各船はバースの水深がその船の喫水に安全距離を加えた必要水深以上のバースに割当てる

##### (b) 荷役時間

荷役時間は係留されるバースによって、必ずしも同じではない

#### 4.2.2 定式化

本問題は、式(4.1)―(4.10)のような一種の割当問題になる。ここで、

$i (=1, \dots, I) \in B$  : バース番号 ( $I$ : 対象バース数)

$j (=1, \dots, T) \in V$  : 船番号 ( $T$ : 対象船舶の隻数)

$C_{ij}$  : 船  $j$  がバース  $i$  で行う荷役時間

$A_j$  : 船  $j$  の到着時間

$WD_i$  : バース  $i$  の水深

$DR_j$  : 船  $j$  の喫水に安全距離を加えた必要水深

$QL_i$  : バース  $i$  の岸壁長

$L_j$  : 船  $j$  の全長に係留の際に必要なになる延長を考慮した必要延長

$x_{ij}$  : もし船  $j$  がバース  $i$  に係留されるとき1、そうでないとき0である0-1整数変数

$y_{jj'}$  : あるバースにおいて船  $j$  と船  $j'$  との係留時刻が重なっているとき1、そうでないとき0である0-1整数変数

$m_j$  : 船  $j$  の係留開始時刻、これは一種のスラック変数である

本問題は、次のように定式化される。

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} (m_j - A_j + C_{ij}) x_{ij} \quad (4.1)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i \in B} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in V \quad (4.2)$$

$$m_j - A_j \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in B} (WD_i - DR_j) x_{ij} \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (4.4)$$

$$(m_{j'} + \sum_{i \in B} C_{ij'} x_{ij'} - m_j)(m_j + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij} - m_{j'}) y_{jj'} x_{ij'} \geq 0, \quad \forall i \in B, j \in V, j' \in V - \{j\} \quad (4.5)$$

$$(m_{j'} + \sum_{i \in B} C_{ij'} x_{ij'} - m_j)(m_j + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij} - m_{j'})(1 - y_{jj'} x_{ij'}) \leq 0, \quad \forall i \in B, j \in V, j' \in V - \{j\} \quad (4.6)$$

$$\sum_{i \in B} (QL_i - \sum_{j' \in V - \{j\}} L_{j'} y_{jj'} x_{ij'} - L_j) x_{ij} \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (4.7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in B, j \in V \quad (4.8)$$

$$y_{jj'} \in \{0, 1\} \quad \forall j, j' \in V \quad (4.9)$$

$$m_j \text{ is integer}, \quad \forall j \in V \quad (4.10)$$

上記のモデルで決定変数は、 $x_{ij}$ 、 $y_{jj'}$ と $m_j$ である。式(4.1)は目的関数である総在港時間の最小化を示している。制約式(4.2)は対象船が必ずいずれかのバースに係留されることを保証し、式(4.3)は各船が入港後に係留されることを意味している。式(4.4)は船 $j$ の必要水深が係留されるバース $i$ の水深を超えないことを保証している。式(4.5)と(4.6)は船 $j$ と船 $j'$ が当該バースで同時に係留されているかどうかという係留状況を示し、両船の係留開始時刻から出港時刻までに重なる時間があれば $y_{jj'}=1$ 、なければ $y_{jj'}=0$ となる。式(4.7)はバース $i$ において、船 $j$ の必要延長と、同時に係留される船 $j'$ の必要延長との和が、バース $i$ の岸壁長を超えないことを保証している。

#### 4. 2. 3 定式化の誘導

ここでは、制約式(4.5)、(4.6)、および(4.7)について解説する。まず制約式(4.5)と(4.6)は、当該船 $j$ と他船 $j'$ が同時に係留されているかどうかを示すものである。

$m_{ij} + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij}$  は当該船 $j$ の出港時刻を表し、 $m_{ij'} + \sum_{i \in B} C_{ij'} x_{ij'}$  は他船 $j'$ の出港時刻を示す。

つまり、

$$m_{ij} + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij} - m_{ij'} \quad (4.11)$$

は船 $j$ の出港時刻と船 $j'$ の係留開始時刻との差、

$$m_{ij'} + \sum_{i \in B} C_{ij'} x_{ij'} - m_{ij} \quad (4.12)$$

は船 $j$ の係留開始時刻と船 $j'$ の出港時刻との差を示すことになる。したがって、船 $j$ と船 $j'$ の係留中に、重なる時間があれば式(4.11)と(4.12)は両者とも必ず正の値をとり、なければ式(4.11)または(4.12)のどちらかが負となる。つまり、船 $j$ が船 $j'$ より前に係留されるなら、式(4.11)は負となり、(4.12)は正となる。また船 $j$ が船 $j'$ より後に係留されるのであれば、式(4.11)は正、(4.12)は負となる。したがって、 $y_{jj'}=1$ であれば式(4.5)の左辺 $>0$ 、式(4.6)の左辺 $=0$ となり、 $y_{jj'}=0$ なら式(4.5)の左辺 $=0$ 、式(4.6)の左辺 $<0$ となり、重なる時間があれば $y_{jj'}=1$ 、なければ $y_{jj'}=0$ となる。

また式(4.7)は、複数船を同時係留させる際に必要となる、岸壁長と各船の必要延長との関係に対する制約である。式(4.7)を変形すると下の式のようになる。

$$\sum_{i \in B} Q L_i x_{ij} \geq \left( \sum_{j' \in V - \{j\}} L_{j'} y_{jj'} x_{ij'} - L_j \right) x_{ij} \quad (4.13)$$

$\sum_{j' \in V - \{j\}} L_{j'} y_{jj'} x_{ij'}$  は当該船と係留時間に重なりのある船の全長の和を示している。したがっ

て、(4.13)式の右辺は当該船も含めた同時係留船の必要延長の和であり、これが係留バースの岸壁長を越えなければ、それらの船は同時係留可能であることを保証している。

#### 4. 3 ラグランジュ緩和問題を用いた劣勾配法の適用限界

第3章では制約になかった、バースの水深と船の喫水との関係等を考慮したより現実的な問題を本章では扱う。第3章で使用したLRは元問題を直接解くことが困難である場合に、元問題の制約式の一部を緩和したときその緩和問題が輸送問題や割当問題のように既存の解法で容易に解けることが明らかな場合に利用することができる<sup>9)</sup>。また最悪の解の精度として下界値を与えてくれるため最適解を得ることができないような問題でもその解の精度を保証してくれることから、第3章ではLRを使用した。しかしながら、先述の関係を考慮すると式(4.1)~(4.10)で明らかなように制約が増えるため、LRで解くことは困難になる。

GAを用いたスケジューリング問題に関する研究<sup>1), 2), 8)</sup>は多数行われているが、港湾計画、特にバーススケジューリングに関する研究において、GAを使った研究は例が少ない。そこで本研究では、GAを用いてバース割当の新たな解法を検討する。

GAに関する研究は今まで多く行われている。GAは近似解法であるため、その解の良さが問題になる。その点に関して、GAによる解と厳密解を比較したもの<sup>1)</sup>や、GAと他の人工知能の手法との解の精度の比較を行った研究<sup>2)</sup>はされている。しかし前者の場合、厳密解が簡単に得られる問題でなければ、そのような比較はできない。また後者における近似解法間での比較では、それらによる解が最適解よりどの程度悪いかははっきりしない。ところで、LRでは解の下界値がわかり、解の値と下界値との差をみることで最悪の解の精度がわかる。そこでまず、第3章で扱った問題を対象に、GAによる割当法で求めた解の値とLRによるそれとを比較することによって、GAで求めた解の精度を検討し、それから本章で対象とする前提条件での問題を検討する。

#### 4. 4 遺伝的アルゴリズムを用いた解法

本問題は非線形整数計画問題であり、最適解を求めるのが困難であるので、GAを用いて近似的に解く。

##### 4. 4. 1 解法の概要

海外のコンテナ港では、本研究で提案するような公共形式のバース運用をしているところや、複数の私有バースを持つターミナル会社がある。これらの場合、おおむね1週間程度の寄港予定船を与件として動的なバース割当を検討している。

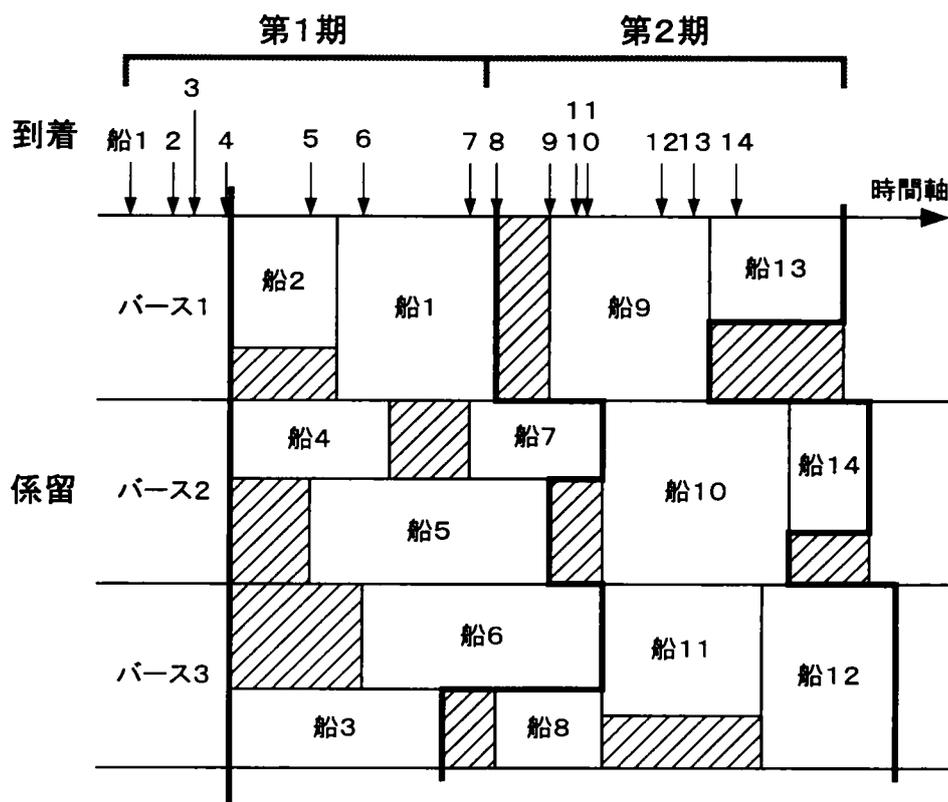


図4. 1 係留計画の概要

本研究では、このような与えられた入港予定船を図4. 1に示すようにいくつかの計画期間（N期）に分割して、計算を行う方法を検討する。つまり、第1期の船のバース割当をまず求め、次にそれを前提として第2期を計算する。このようにして、最終的にN期まで計算を行う。なお図4. 1は前章の図3. 1と類似した図となっているが、バース2の船4と5、5と7、バース3の船3と6、6と8のように同時期に複数船が同一バースに係留されることがあることを認めていることに注意する。

各期の計算を次の4. 4. 2に示すGAによるコアアルゴリズムで行うが、GAは最善、次善というように複数の解を保持しながら探索を行うという特徴を持っている。通常各期の最善解を求め、それをもとに次期の最善解を求める。その処理により、第1～N期の各最善解の集合を全体の問題の最善解とする。しかしながら、各期間で最善でない解つまり、例えば2番目に良い解を次の計画に用いた方が最終的にすべての計画を終了したとき、先に述べた通常の方法に比べて目的関数値が良くなることも考えられる。

そこで本章では、各期で最善のみをもとに次期の計算を行う計画（以降、単一解の計画と呼ぶ）と、各期で最善ならびに所与の数の他の解を求め、それぞれの解をもとに次期の計算を行い、次期の複数解をもとにさらにその次の期間の解を求める計画（以降、複数解

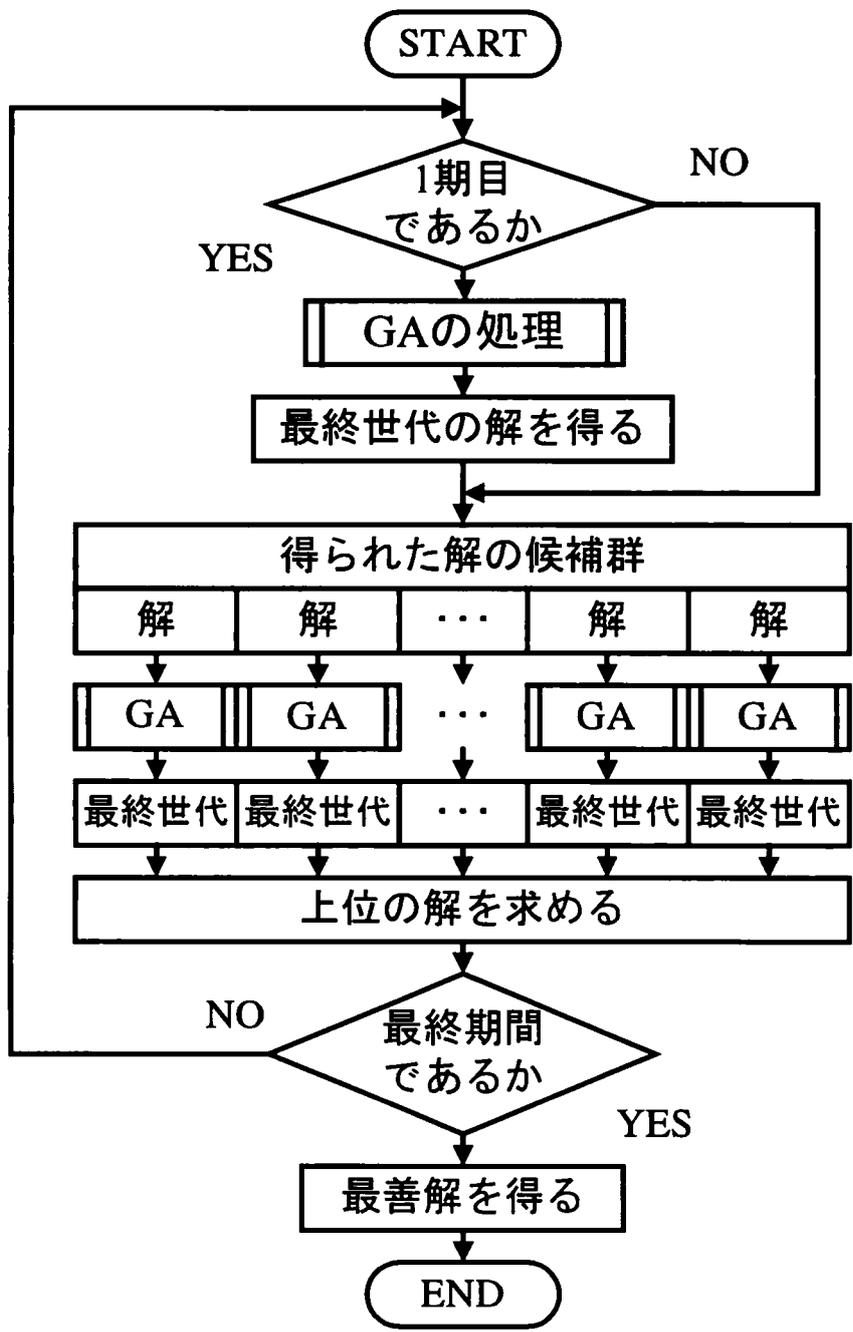


図4. 2 複数解の計画における全体の流れ

の計画と呼ぶ)の2種類の方法で計画を行う。このようにして、全体の最善の解を得る。

図4.2に複数解の計画における全体の処理の流れを示し、以下に詳細なアルゴリズムを示す。なお、 $p$ は現計画期、 $N$ は最終の計画期間、 $S$ は複数解の数とする。

ステップ1：第1期において、コアアルゴリズムでバース割当の計算を行い、複数の解の候補( $S$ 個)を得る。各解の情報として、目的関数値、各バースでの最後の船が出港して空きになった時刻、最後の船の必要延長がある。 $p=2$ (対象期間を第2期)とする。

ステップ2： $p>N$ なら、終了。そうでなければ、第 $p$ 期において、解の候補ごとにバース割当の計算を行い、それぞれ複数解(計 $S^2$ 個)を得る。

ステップ3：ステップ2において得られた複数解すべての中から目的関数値が小さい順に上位 $S$ 個を得る。 $p=p+1$ としてステップ2へ。

#### 4.4.2 コアアルゴリズム

GAというのは、自然界における生物の進化モデルである。すなわち、世代を形成している個体の集合の中で、環境への適応度の高い個体が次世代によって多く生き残り、また交叉および突然変異を起こしながら次の世代を形成していく過程を模した最適化手法である。GAの処理の流れを図4.3に示すが、ここで本問題の目的関数を適応度に、解の候補を個体にそれぞれ対応させる。おおまかな流れを以下に示す。

ステップ1：初期の個体群を生成させる。

ステップ2：各個体に対し、各船が保留バースの水深を満足しているか調べ、1隻でも満足していない船が存在すれば、適応度をゼロとする。

ステップ3：目的関数値を求め、適応度に変換する。

ステップ4：1世代目であれば、ステップ5へ。そうでなければ、親の個体群と子の個体群の中で、同じ型の一方を省き、残りの中で適応度が上位のものを新たな親の個体群とする。現世代が最終世代であれば、終了。

ステップ5：遺伝演算(交叉、突然変異)を行い、新たな個体を生成させ、ステップ2へ。

なお、世代交代数はいくつか値を変化させて目的関数値を比較したところ、1000世代より少ないと値がまだ収束しておらず、多いと収束が終わっており、ほとんど値が良くなっていなかった。また世代数が多いと計算時間がかかることから、1000世代に設定した。また、各世代の個体数については、文献3)より多くの研究例で30程度あれば十分であると述べら

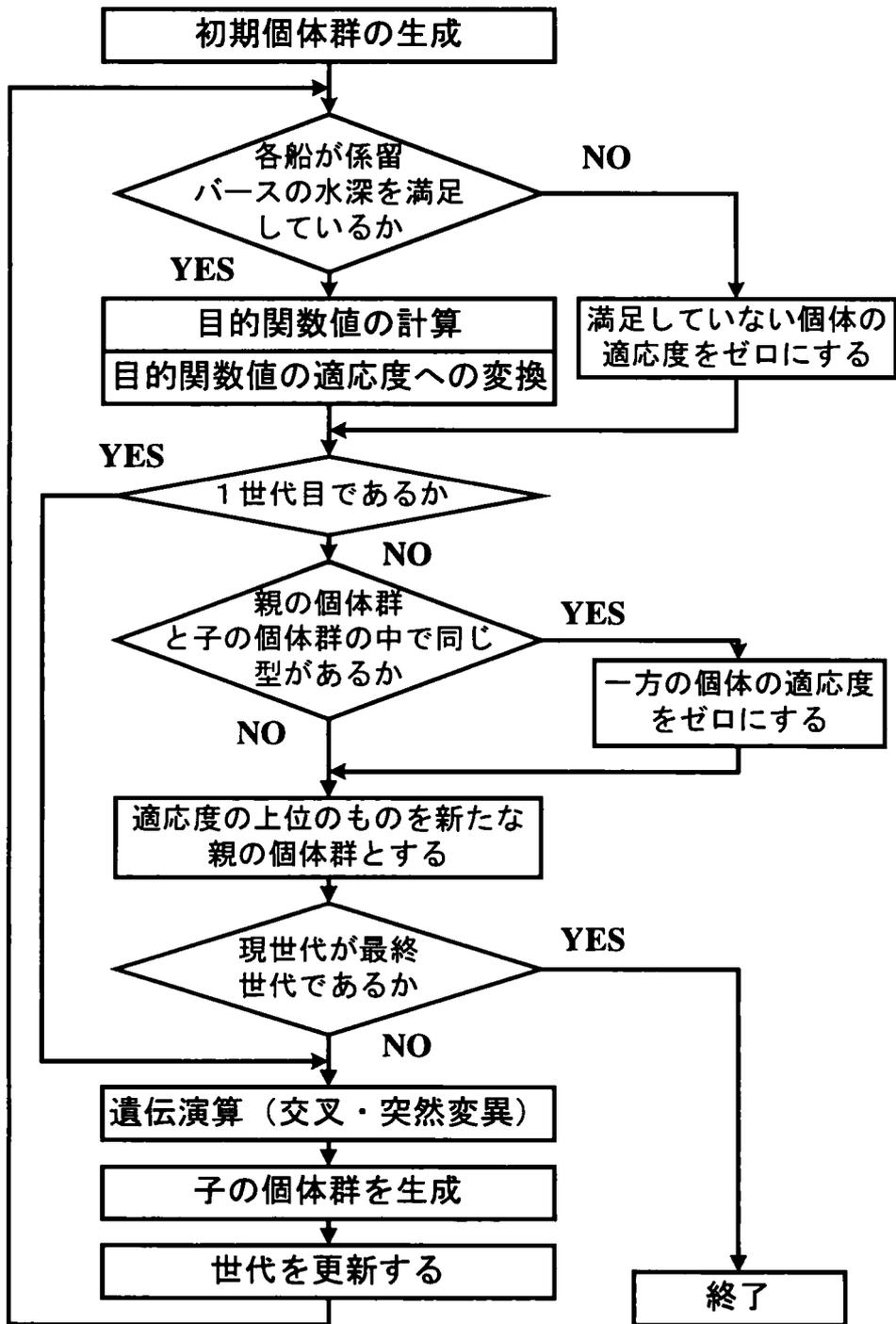


図4. 3 GAの処理手順

れている。また個体群サイズを変化させて目的関数値を調べると、個体数が少ないと解はあまり良くなり、多いと計算時間がかかることがわかったので、本研究では30個に設定した。

#### 4.4.3 個体の表現

船のバースへの割当の候補、つまりどの船がどのバースでどの順に係留されるかを個体として表現する必要がある。文献3)と4)において、巡回セールスマン問題では地点を遺伝子、訪問順を遺伝子座の順で表現する例が示されている。そこでこの配列表現を参考に、本問題では、船を遺伝子、係留順を遺伝子座の順とし、さらに遺伝子にゼロを加えることによって、遺伝子ゼロのある遺伝子座の前後で係留バースを区別することにする場合（R1と呼ぶ）と、ストリング長により係留バースを区分する場合（R2と呼ぶ）の2種類を用意した。ここで個体の表現方法を詳細に述べると、R1の方法では（バース数-1+船の隻数）

##### 個体表現方法：R1

遺伝子：船番号1~9、0（ゼロ）

（セル番号） 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

個体	2	8	5	9	0	4	7	3	1	6
係留バース	1	1	1	1		2	2	2	2	2
係留順	1	2	3	4		1	2	3	4	5

↑  
バースの境界

##### 個体表現方法：R2

遺伝子：船番号1~9、0（ゼロ）

（セル番号） 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

個体	0	0	0	2	8	0	5	0	9	4	7	0	3	1	0	6	0	0
係留バース	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
係留順				1	2		3		4	1	2		3	4		5		

↑  
バースの境界

図4.4 個体の表現例

個のセルを持つ1次元配列を用意し、各セルに船番号と(バース数-1)個のゼロを遺伝子としてランダムに入れる。0(ゼロ)は、係留バースの境界とみなし、左からゼロの直前までがそのバースの係留船、その順が係留順となる。R2の方法では(バース数×船の隻数)個のセルを持つ1次元配列を用意し、各セルに船番号と((バース数-1)×隻数)個のゼロを遺伝子としてランダムに入れる。左から隻数分の所を順に係留バースの境界とみなし、当該バース内で左から順にそのバースでの係留順となる。

図4.4に、9隻の船を2バースに割当る場合での表現例を示す。この例では、バース1に船2、8、5、9の順で係留され、バース2には船4、7、3、1、6の順で係留されることを示している。

#### 4.4.4 バースの水深に関する処理

新たにできた個体におけるすべての船が必ずしも係留バースの水深の制約を満足しているとは限らない。そこで、これを考慮するために以下の処理を行う。

まず、新たな世代の個体群が生成され、目的関数値を求める前にそれぞれの子の個体に対し、係留船の必要水深が当該バースの水深を超えていないかを調べる。もし、越えている船が1隻でもあれば、その個体は制約を満足していないため、適応度を0とし、次世代には引き継がれないようにする。

#### 4.4.5 同時係留を考慮した総在港時間の計算

コアアルゴリズムの中で適応度を求めるが、評価の高い適応度を得る(総在港時間を最小にする)ためには、同時係留が可能かどうかを判断しつつ、各船の係留開始をなるべく早くしなければならない。同時係留の可否は、各船の到着時刻および全長と他船のそれらの関係で決定される。先の個体表現では、各船の係留バースとそこでの係留順が決まるだけである。そのため、実際の同時係留の処理では、係留順を満足しつつ、岸壁長の制約を考慮して、できるだけ早い時刻に船を係留させることになる。そこで、各船の係留開始時刻を求める方法について以下で述べる。

処理はバースごとに係留順で行うが、処理を行う時点ですでに係留済みの船を係留船と呼ぶ。まず、処理対象船および係留船の全長と岸壁長との関係が制約を満足しているかどうかを考慮して、基準となる時刻を決定する。次に、決定した基準時刻と対象船の到着の前後関係を調べる。もし基準時刻より対象船の到着が早いかまたは同じであれば、対象船はその基準時刻直後に係留されることになり、基準時刻が対象船の係留開始時刻になる。また逆に、基準時刻より後であれば、対象船の到着直後に係留され、対象船の到着時刻がその船の係留開始時刻になる。

次に、その基準時刻を決定する方法を以下で詳細に述べる。なお、係留順を $k$ 、その船を $S(k)$ 、その船の全長を $L(S(k))$ 、当該バースの対象船の隻数を $T$ として処理を行う。処理のあ

る時点において、係留船の中で出港が最も遅い船ならびにその船と同時係留されている船を $V(i)$ と表し、出港の最も遅い船も含めた同時係留の隻数を $PL$ とする。このとき $V(i)$ は出港の遅い順に並べられている。したがって、最後の船は $V(1)$ 、それと同時に係留されている船は出港の遅い順に $V(2)$ 、 $\dots$ 、 $V(PL)$ と表される。なお、 $V(1)$ が単一係留の場合 $PL=1$ となる。

ステップ1： $k=1$ とし、当該船を入港後すぐに係留させ、 $k=k+1$ とする。

ステップ2： $k>T$ なら、処理終了。そうでなければ、 $i=1$ 、 $r=1$ として、係留船の中で出港が最も遅い船 $V(1)$ を見つける。

ステップ3： $r>k-1$ なら、つまり係留船をすべて調べ終えたら、 $PL=i$ 、 $m=1$ として、 $V(j)$  ( $j=1, \dots, PL$ ) を出港が遅い順に並び替えて、ステップ6へ。

ステップ4：船 $S(r)$ と船 $V(1)$ の係留時間が重なっていれば、 $i=i+1$ 、 $V(i)=S(r)$ とする。つまり、 $V(1)$ と同時係留されている船を見つける。

ステップ5： $r=r+1$ として、ステップ3へ。

ステップ6： $m>PL$ なら、船 $S(k)$ の到着時刻を基準時刻として、ステップ9へ。

ステップ7： $\sum_{n=1}^m L(V(n)) + L(S(k)) > \text{岸壁長}$ なら、つまり最後に同時係留されている船と処理対象船の全長の和が岸壁長を越えれば、 $V(m)$ の出港時刻を基準時刻とし、ステップ9へ。

ステップ8： $m=m+1$ として、ステップ6へ。

ステップ9： $k=k+1$ として、ステップ2へ。

#### 4.4.6 目的関数の適応度への変換

本問題は最小化問題であるので、目的関数の値が小さいほど適応度を高く評価しなければならない。したがって、目的関数値を適応度に変換する必要がある。この適応度関数の1つとして、目的関数の逆数が考えられる。しかしながら文献3)で述べられているように、この場合最適解に近いほど適応度は増加し、得られた解が最適解より離れていても、他の解に比べて極端に適応度が大きければ次世代を生成させるときに、選択確率が極端に高くなる。したがって、これが常に親として選択され、交叉による染色体の多様性が維持できなくなる危険性がある。そこで、目的関数の極端な挙動を吸収するような適応度関数を用いる必要がある。この関数には指数関数とシグモイド関数があり、これらについていくつか予備実験を行った結果、シグモイド関数の方が良い結果が得られたので、これを使って目的関数値を適応度に変換することにする。

目的関数値を $y(x)$ で表現すると、シグモイド関数 $f(x)$ は以下のように表すことができる。

$$f(x) = 1 / (1 + \exp(y(x) / 10000)), \quad (4.14)$$

ここで、 $f(x)$ は0~0.5の値をとる。

#### 4.4.7 遺伝演算

遺伝演算として以下の処理を行い、次世代の個体群を生成する。遺伝演算は世代ごとに行う必要があるため、ここではある世代の個体群に対する処理方法を述べる。

##### (1) 選択

GAパラメータ推定のための予備実験より、ルーレット戦略とトーナメント戦略を用いたが、ルーレット戦略の場合突然変異率を0.3~0.5等、大きく設定しなければ、LRと同等以上の解の精度が得られなかった。しかしながら、トーナメント戦略であれば一般的に使用される変異率0.1以下の値でもLRと同等程度の解の精度が得られることがわかったので、トーナメント戦略を採用する。

ここで使用したトーナメント戦略の方法は、まず2つの個体をランダムに選択し、両者を比較して適応度の高い方を1つ目の親とし、同様のことを再度行って2つ目の親とする。なおここで、ペア数は設定する個体群の半分とし、これらはすべて異なるペアリングになるように決定する。

##### (2) 交叉

文献3)と4)では致死遺伝子が発生しない方法として部分一致交叉を使っているが、これに若干の改良を加えて本問題に適用する。まず2点交叉、つまり親の個体に対し、ランダムに2ヶ所のセルを選択し、そのセルの間で遺伝子である船番号の入れ替え処理を行う。しかしできた子の個体では、遺伝子がなくなったり、同じ遺伝子が2つ存在することがあり、各船は必ずいずれかのバースに1回係留されるという制約を満足しないことがある。そこで、その制約を満足するよう次の処理を行う。仮に、個体AとBが親として選ばれたとする。先述の入れ替えた遺伝子を交換部の遺伝子と呼び、以下のアルゴリズムで交換部の遺伝子を再度置き換えることはしない。交換部の遺伝子を中心に遺伝子座（ここでは配列のセルと呼ぶ）の順に処理する。なお、 $k$ を交換部内のセルの番号として、処理対象セルを $d(k)$ とする。そして1つ目のセルを $k=1$ 、最終のセルを $LK$ とし、 $k=1\sim LK$ までの処理を以下のように行う。

ステップ1：処理の対象を個体Aとする。 $k=1$ として、 $d(k)$ を見つける。

ステップ2：個体Aで $k > LK$ であり、個体AとB両方処理が完了なら終了。そうでなければ、個体BをAに置き換え、 $k=1$ として $d(k)$ を見つける。

ステップ3： $d(k)$ の遺伝子aが個体内に2つであれば、 $k'=k$ としてステップ4へ。そう

でなければ、ステップ6へ。

ステップ4：個体Bの $d(k')$ の遺伝子はその個体内で2つあるかを調べる。2つあれば、それを個体Aの交換部でない方の遺伝子aのセルに入れ、ステップ6へ。そうでなければ、個体Bの $d(k')$ の遺伝子と同じ遺伝子を個体Aで見つけ、 $k'$ をそのセルの番号にして、ステップ5へ。

ステップ5：個体Bの $d(k')$ の遺伝子を見つけ、ステップ4へ。

ステップ6： $k=k+1$ として、ステップ2へ。

ここで、図4.5に交叉方法の例を示す。これは、適応度により個体AとBがペアとなるように選択され、これらは次世代の子を生成させる親の個体であるとする。そこでまず、図の太線の位置がランダムに決まり、個体AとBの間でその内側の範囲を入れ替え、個体C'とD'を生成させる。このC'では、船番号1、2、7のように個体内に同じ船番号が2つあり、また9、0、1のように失われた船番号がある。このようにある船はいずれかのバースに1回係留されるという制約を個体C'は満足していない。個体D'も同様である。そこで、太線内の\*印に注目し、図の①、②、③の順に制約が満足するように以下の入れ替える処理を行う。

### 親の個体ペア

個体A	2	8	5	9	0	4	7	3	1	6
個体B	6	3	1	2	5	7	0	8	9	4

### 生成された子の個体

		①	②		③					
	*		*	*		*	*	*		*
個体C'	2	8	1	2	5	7	7	3	1	6
個体D'	6	3	5	9	0	4	0	8	9	4
				*	*	*	*	*	*	*

		②				③		①		
個体C	9	8	1	2	5	7	4	3	0	6
個体D	6	3	5	9	0	4	1	8	2	7

図4.5 交叉方法の事例

①の処理：個体C'の船1と同じ位置にある個体D'内の船を見つける。ここでは、船5がそれに当たるが、これはすでにC'に存在するので入れ替えない。そこで次に、C'の船5と同じ位置にあるD'のゼロを見つける。これはC'にはないので、個体C'では太線の外側に位置する船1の所にゼロを入れ、個体D'ではゼロの所に船1を入れる。

②の処理：個体C'の船2と同じ位置にある個体D'の船9はC'にはないので、個体C'では太線外側にある船2の所に船9を入れ、個体D'では船9の所に船2を入れる。

③の処理：個体C'の船7と同じ位置の個体D'にある船4はC'にはないので、個体C'では太線外側にある船7の所に船4を入れ、個体D'では船4の所に船7を入れる。

以上の処理を行い、個体AとBからその子である個体CとDが生成される。

### (3) 突然変異

変異率は0.01~0.1の間で変化させ、数ケースの予備実験を行ったところ、個体表現R1は0.09、R2は0.08のときに比較的良好な解が得られた。そこで変異率を先で示した値に設定して、個々の個体に対し、0~1の一樣乱数を生成させ、0.5を境界として突然変異が起こるかどうか決定する。起こると判断された場合、当該個体の遺伝子をランダムに2つ選択して入れ替える。

## 4.5 モデルの適用事例

本研究で提案するGAを用いたバース割当の解法の有効性を示すために、人工的に生成させた入港時刻と荷役時間データを与え、提案する解法によって得られる解の精度を調べる。なおここでは、神戸商船大学情報処理センターの計算処理サーバleo（機種名：S-4/2000E、CPU：SuperSPARC+(60MHz)）上のC言語コンパイラ（日本語SPARC Works Professional C 3.0.1）を用いて、人工的に発生させた入港時刻と荷役時間データを与え、問題の規模を変化させた場合の解の精度を調べた。

この問題でパラメータとして用いる船の入港分布と荷役時間分布は第3章と同様、神戸港の調査データで分析した結果、一般に言われるようにそれぞれ指数分布と2次のアーラン分布を示すことが分かった。そこで、合同法によって一樣分布に従う擬似乱数を発生させ、それを用いて先の分布関数でそれぞれのデータを発生させることにする。

計算で設定した供用バース数は5、7、10であり、対象船舶は25隻と50隻とし、この組み合わせで合計6ケースそして、各ケース40個の問題を用意した。

### 4.5.1 1スパンの問題における各個体表現の解の精度比較

まずGAによる割当法の解の精度をみるために、第3章のLRで解いた問題と同様のものをGAでも解いて、両者を比較検討する。つまり、各バースである時点では1隻しか係留でき

ないことを条件として、両解法の解の精度比較を行う。

図4. 6は各ケースの問題を解いたときの平均総在港時間を示している。なおLRは前章で提案した3解法の中で解の精度が最も良かったF2を用いており、下界値はそのLRによって得られた下界値の値を示している。%は各解法の値と下界値の誤差であり、式(4.15)で求めたものである。

$$\text{各解法の解の精度(\%)} = \frac{\text{解の値} - \text{下界値}}{\text{下界値}} \times 100, \quad (4.15)$$

なお最適解の値は下界値より小さくなることはないので、この値はその解の最適解との最悪の誤差になる。

5バースの場合若干GAの方が精度が悪くなっている。その他のケースにおいてはGAとLRに差はほとんどなく、5バース50隻の問題以外では、GAのR1とR2の間にもほとんど差がないことがわかる。図中の%をみると、25隻の問題では15%前後、50隻では約20%前後となっており、問題の規模が大きくなると誤差も大きくなっている。

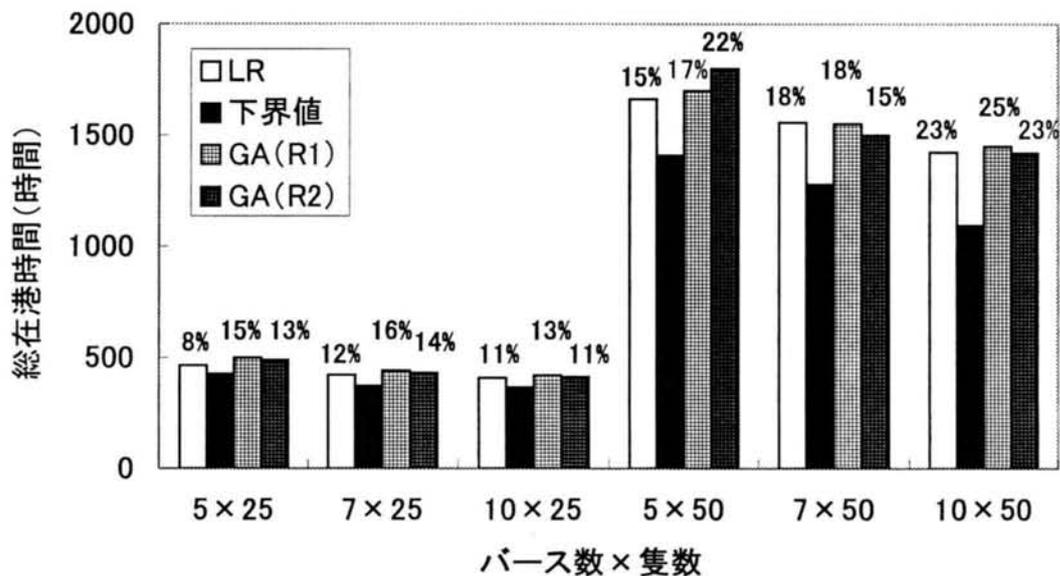


図4. 6 既存の解法との比較

#### 4. 5. 2 解の収束状況

次に同時係留を考慮して先と同じ6つの問題で数値実験を行った。ここでは最終世代は2000まで実行させたときの解の収束状況を見る。図4. 7は個体表現R1とR2それぞれで同時係留を考慮する場合と考慮しない場合の4つの結果をそれぞれ示している。

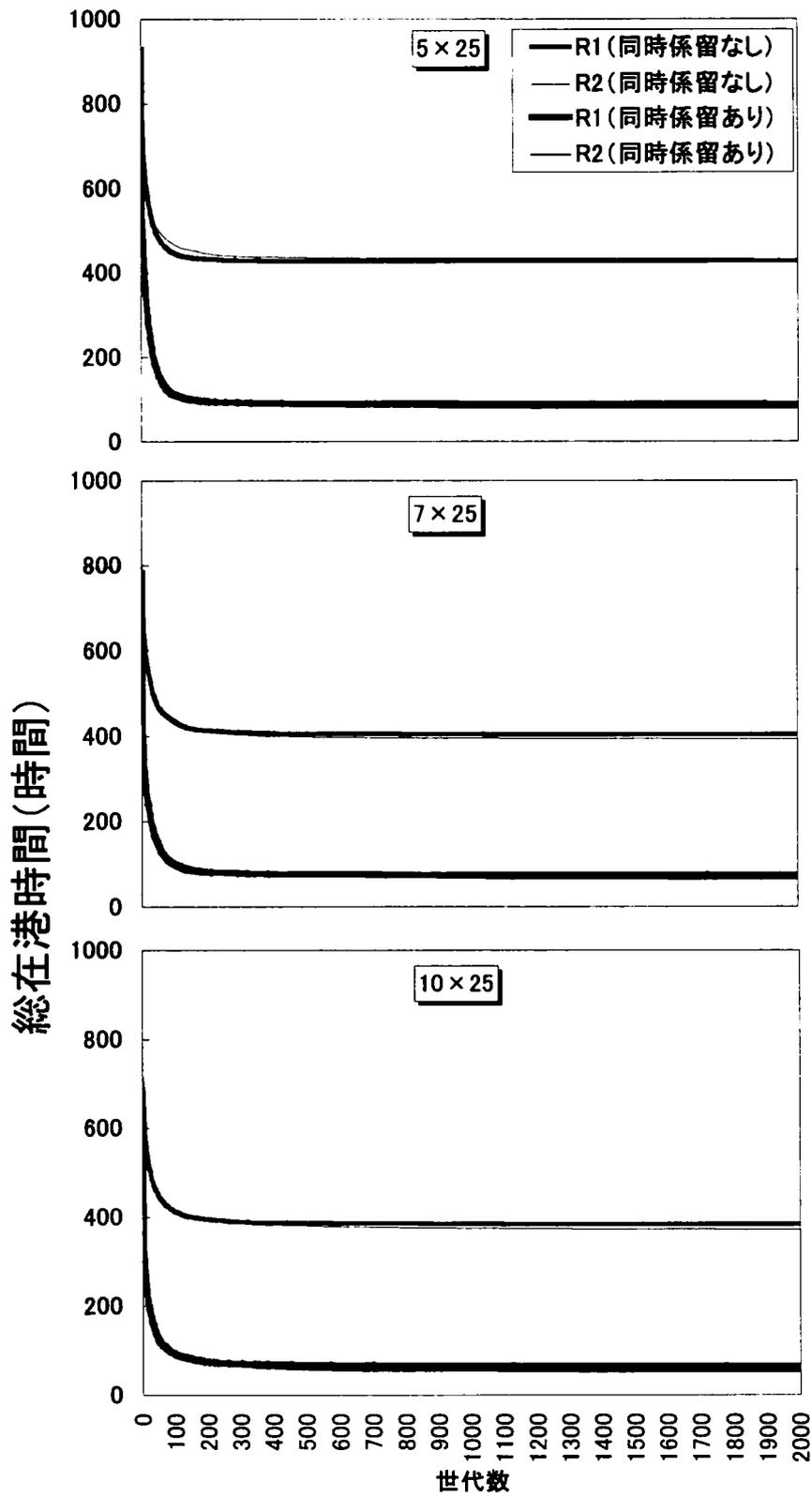


図4. 7(1) 解の収束状況(25隻の場合)

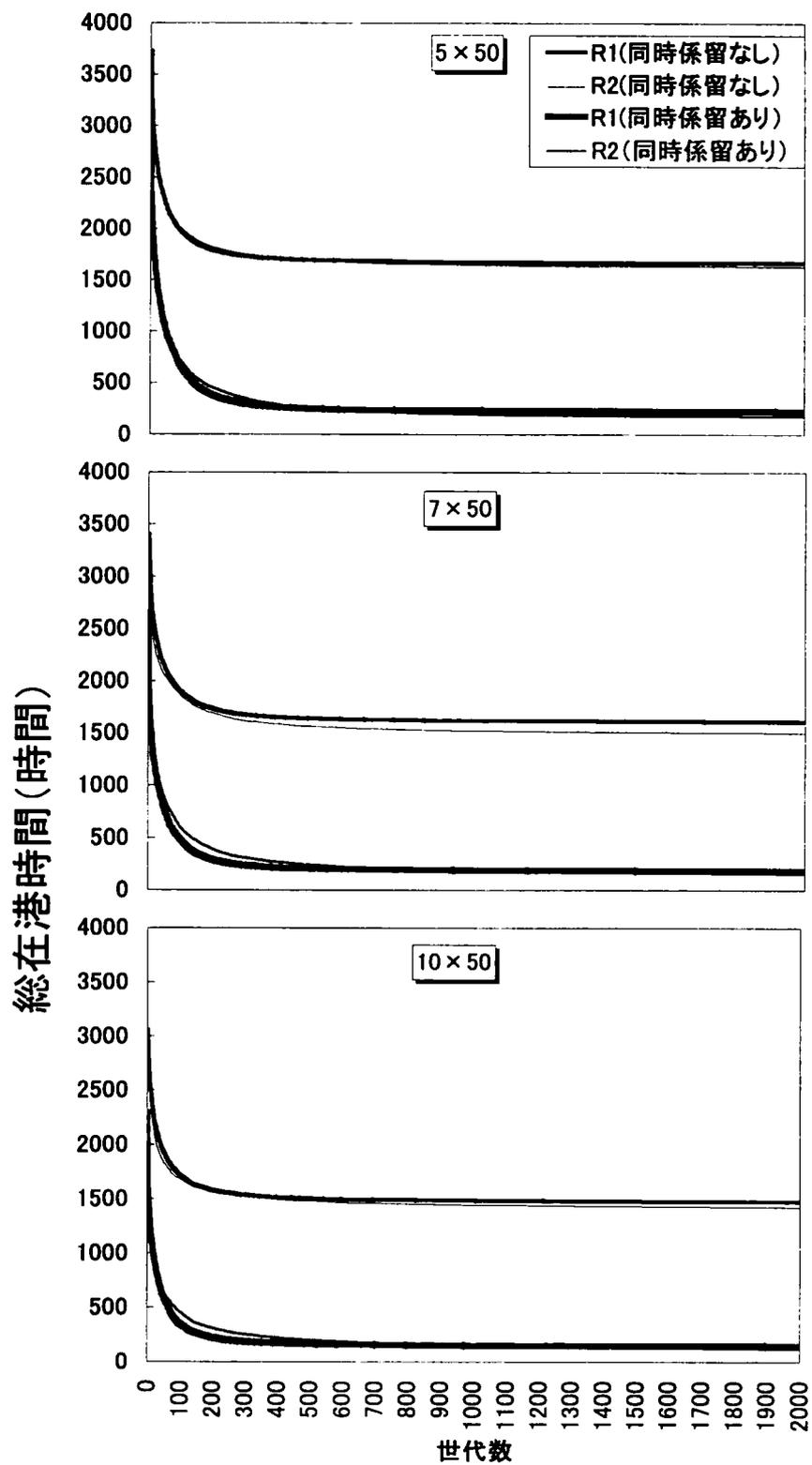


図4. 7(2) 解の収束状況(50隻の場合)

まず同時係留を考慮する場合と考慮しない場合について比較する。図4. 7は収束状況を見るために以降で分析するものより繰り返し回数に相当する世代数を多くしているため、この比較については以降の分析評価と同様の1000世代で判断する。当然のことであるが、前者の目的関数値が後者より小さくなっているのがわかる。25隻の場合、5バースで前者は後者の1/4程度、10バースで1/5程度になっており、また50隻の場合には5バースで1/6、10バースで1/8になっている。したがって、バース数や隻数が増え問題の規模が大きくなるほど、同時係留にすることで、なるべく荷役時間が短くて済むバースに割当てられ、待ち時間も短くて済んでいるのがわかる。

次に収束状況についてみると、どの問題においても、同時係留を考慮するしないにかかわらず、200世代以降の収束がほとんど進んでいない。2000世代目では、R2はR1より短いかもしくは同程度の総在港時間を得ている。同時係留を考慮しない5バース25隻の問題、同時係留を考慮した50隻の問題では、R1は400世代までR2より良いが、それ以降ではR2の方が若干良くなっている。このことから、R1の方が収束の速度が速いことがわかる。

次にストリング長が長いほど、探索空間が広がり解の精度が良くなることが考えられる。しかしながらストリング長は計算時間への影響も大きいいため、これに対する解の精度と計算時間の関係について調べる。ここでは同時係留を考慮した問題を用いてストリング長と計算時間との関係性を調べる。表4. 1はそれぞれの問題での各個体表現のストリング長と2000世代の計算に要した計算時間を示す。ストリング長はR2の方が長く、計算時間もそれに伴ってR1より長くなる傾向にあるのがわかる。

以上のことから、解の質は両者にさほど大きな差はないが、計算時間を見るとR2がR1の2~3倍になっており、R1を使用する方が現実的であるといえる。

表4. 1 ストリング長と計算時間

バース数×隻数	ストリング長		平均CPU時間 (秒)	
	個体表現 R1	個体表現 R2	個体表現 R1	個体表現 R2
5×25	29	125	4.7	8.9
7×25	31	175	6.6	13.5
10×25	34	250	9.5	22.1
5×50	54	250	15.4	29.2
7×50	56	350	20.8	45.5
10×50	59	500	28.5	76.5

### 4. 5. 3 複数スパンの問題における単一解の計画と複数解の計画との比較

ここでは複数スパンの計画においての単一解の計画と複数解の計画での結果を比較する。まず人工的に生成させた入港船データを用いて、より多くのケースの計算を行い、解法のより詳細な比較実験を行う。なお、4. 5. 2においてR1とR2に解の精度に大きな差がないものの計算時間がR2ではR1の2倍以上かかることから、R1で十分であるとの結果が得られている。したがってここでは、R1のみを用いることにする。

#### (1) パラメータ

この問題でパラメータとして用いる船の入港分布、荷役時間分布は、神戸港の調査データによると、それぞれ指数分布と2次のアーラン分布を示すことがわかった。そこで、合同法によって一様分布に従う疑似乱数を発生させ、それを用いて先の分布関数でそれぞれのデータを発生させることにした。また、各船の全長と喫水については調査データの平均値より、一様分布でそれぞれデータを発生させた。この計算では、実績データをもとに1ヶ月分の船のデータを発生させ、バース割当の計算を行う。

#### (2) 1ヶ月間の総在港時間

図4. 8は各期間幅に対して、供用バース数を3~7まで変化させた場合の単一解の解法による1ヶ月間の総在港時間と、複数解の解法によるそれを示している。この結果から、どのケースも複数解の解法の方が総在港時間が短くなっているのがわかる。また、1回の計画スパンが長くなり、対象船舶が増え問題の規模が大きくなると同じバース数であっても総在港時間が長くなるのがわかる。

#### (3) CPU時間

表4. 2は図4. 8の数値実験をS-4/2000E (CPU : SuperSPARC+ (60MHz) ) 上で行ったときの単一解と複数解それぞれによるCPU時間を示したものである。

両解法のCPU時間を比較すると、1ヶ月間の計画を行うのに、単一解では10分から1時間弱であるのに対し、複数解の方では5時間半から1日弱かかっており、複数解は単一解の約30倍の計算時間がかかるのがわかる。これは実績データによる計算実験においても、各ケース同程度のCPU時間がかかっており、同じ傾向が見られる。したがって、総在港時間がさほど両解法に差がないことから、実用上は計算時間が短くてすむ単一解の方で十分であるといえる。

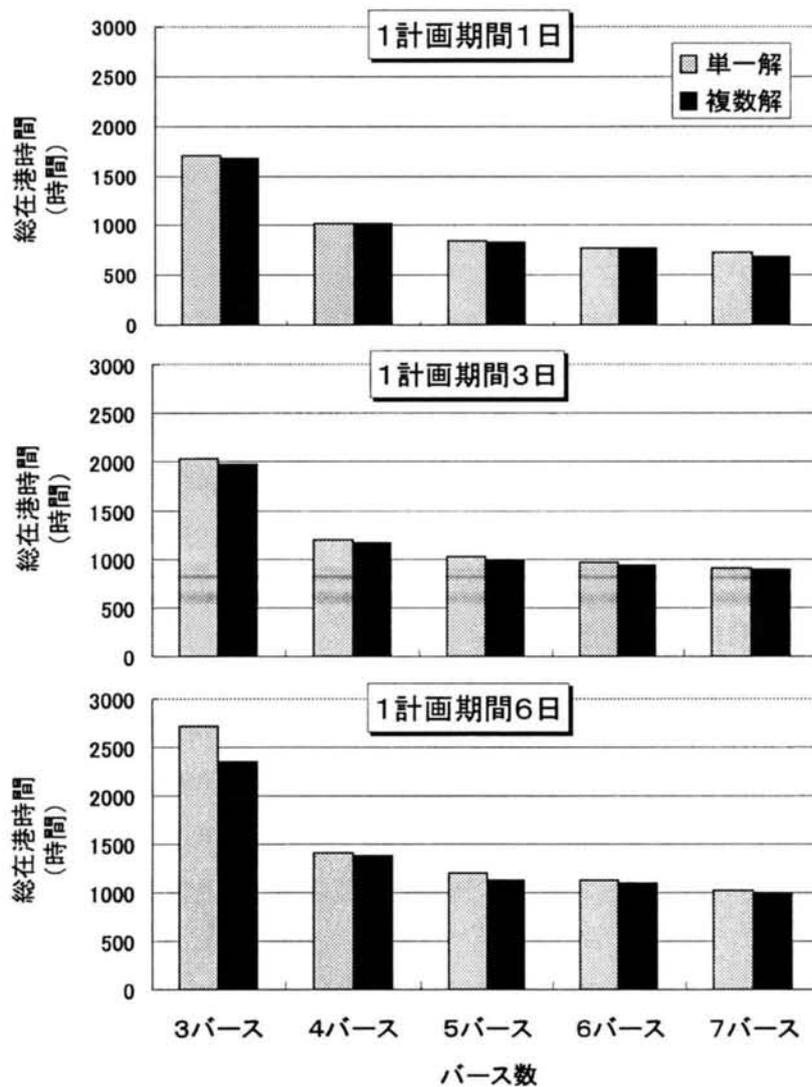


図4. 8 生成データによる単一解の解法と複数解の解法との比較

表4. 2 両計画方法におけるCPU時間

単位：分

	3バース		4バース		5バース		6バース		7バース	
	単一解	複数解	単一解	複数解	単一解	複数解	単一解	複数解	単一解	複数解
1スパン1日	10	319	13	371	16	480	21	575	25	704
1スパン3日	16	442	20	561	25	712	29	823	33	975
1スパン6日	24	622	32	783	40	968	45	1112	52	1243

## 4.6 実績データによる比較分析

次に、考案したバース割当法を用いて公共形式によるバースの利用効率と実績のそれとの比較を行う。

### (1) 計算の前提

神戸港の1ヶ月間の入港船を対象として、1計画期間を1日、3日、6日とし、それぞれ29、10、5の期間に分けてバース割当の計算を行う。荷役時間は実績データでは各船が実際に係留されたバースでの荷役時間はわかっているが、その船が他のバースで荷役にどの程度かかるかわからない。そこで、各バースのコンテナ1個あたりの荷役時間と各船の荷役コンテナ数の積をその船が各バースでかかる荷役時間とする。

### (2) 単一解の解法による実績との比較

先述の1スパンの計算を行って、R1とR2の解の精度比較を行った。そこで次に実績データを使って複数スパンの計画を行う場合の精度を見る。ここでは単一解の解法において、R1とR2で表現したときの結果と実績との比較を行う。

図4.9に供用バース数を3~7まで変化させた場合の、単一解の計画で、個体表現R1とR2の両解法による1ヶ月間の総在港時間を示す。R1とR2には大きな差はないが、1スパン3日の4バースのとき、6日の3および4バースのときR2が良くなっているのが分かる。当時7バース使用可能であったが、供用バース数5バースでも実績の総在港時間とほぼ同じかそれ以下になっており、現状より2バース少ない5バースでも現状とほぼ同じサービスが提供できることがわかる。また計画期間幅を変化させて計算しているが、1期間が1日での総在港時間が他に比べて比較的短くなっており、1回の計算の規模が大きくなって対象船が増えると全体の総在港時間が若干長くなる傾向にある。

### (3) 実績寄港データによる単一解と複数解の解法比較

先ほど述べた複数スパンの計画を使って、実績データでの係留計画を行い、単一解の計画と複数解の計画の両計画法による解の精度の比較、それらと実績7バースでの総在港時間との比較を行う。なお個体表現方法はR1を用いる。図4.10は両解法による各供用バース数における総在港時間と実績7バースでの1ヶ月間の総在港時間を示している。これから、実績7バースの総在港時間と複数解の解法でのそれとを比較すると、単一解と実績との比較で得られた結果と同様の結果、つまり2バース少ない5バースでも実績と同程度の総在港時間が得られるということがわかった。また単一解と複数解による総在港時間を比較すると、どのケースも複数解の方が良くなっており、対象期間全体で考えると前の期間で最も評価の良かったものを次の計画に用いても、必ずしも最終的に最良の解が得られるわけではな

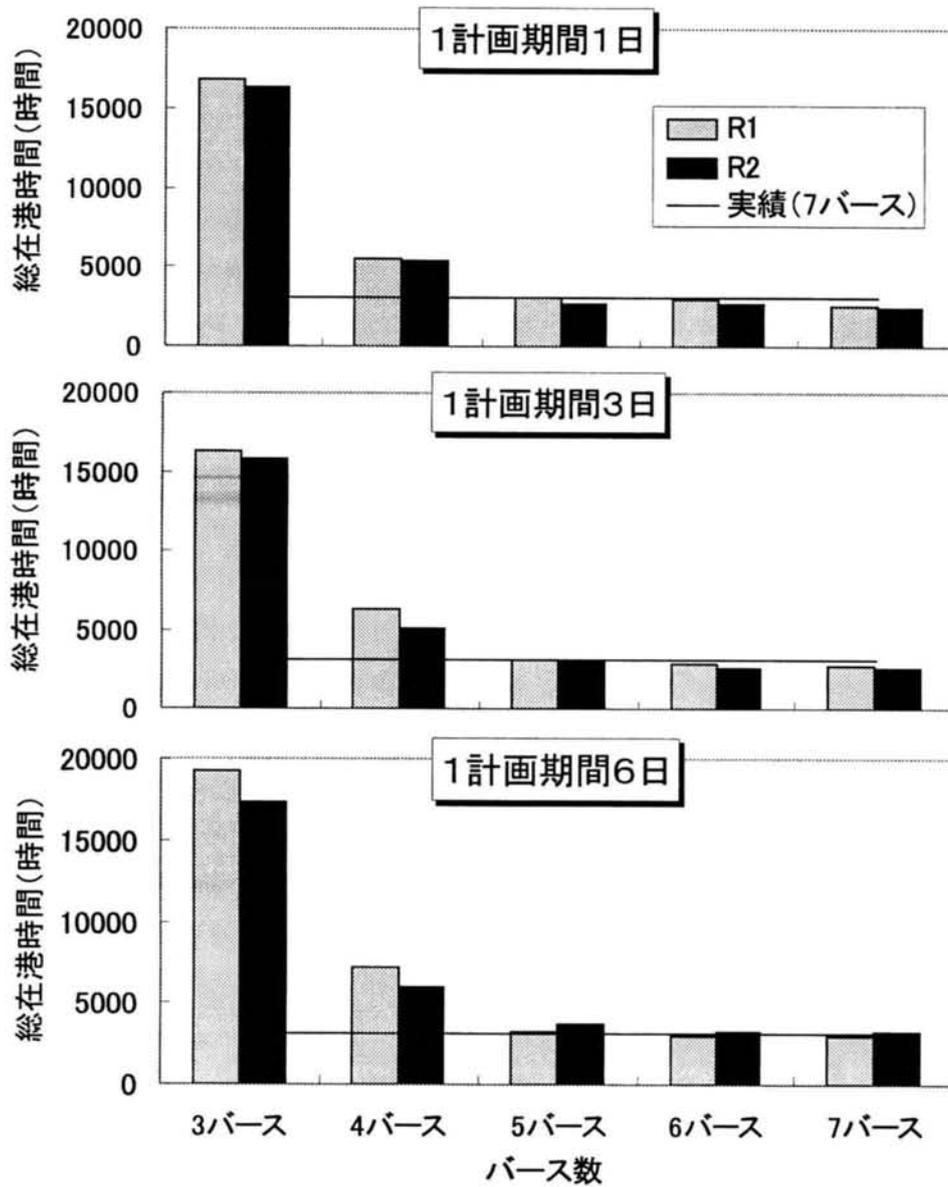


図4.9 単一解の計画での個体表現R1とR2による実績との比較

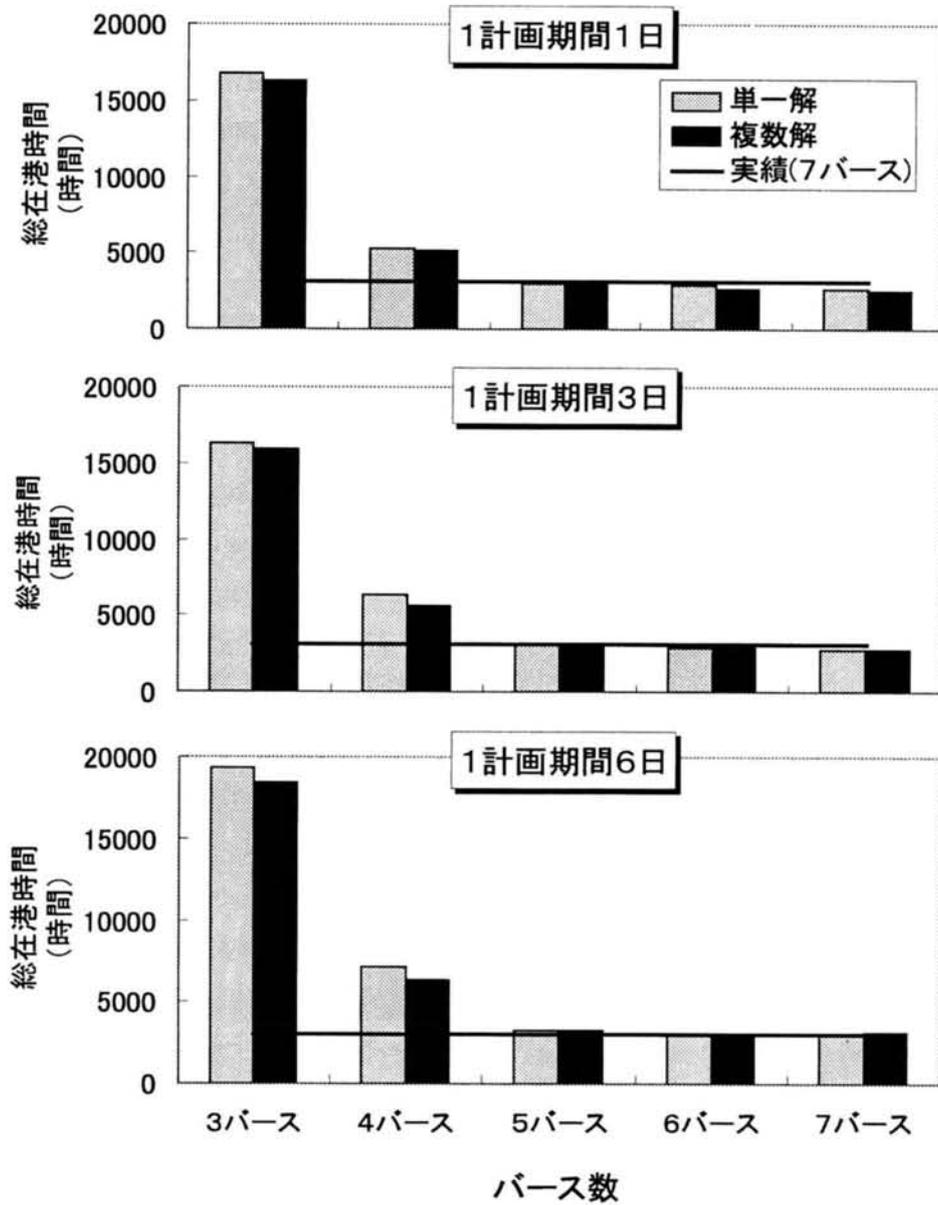


図4. 10 実績データによる単一解の計画と複数解の計画との比較

いことが明らかとなった。しかし、両者には、極端な差がみられないことから、実用上は単一解の解法で十分である。

#### 4.7 結語

本章では、現実には2隻以上の船が1つのバースに同時期に係留される場合が存在することから、より現実に近い条件でバース割当を実現するために、複数船の同時係留を可能とした条件でバース割当方法を検討した。

計算結果から明らかとなったことを以下に示す。

- ① 前章での係留条件、つまり1バースに1隻のみ係留可能を条件として、既存の解法であるLRと解の精度を比較したが、GAはほぼ同程度であることがわかった。
- ② 本章における問題の解法には遺伝的アルゴリズムを用いることにし、2種類の個体表現方法（R1とR2）で検討した。両者を比較すると、R1は収束が速く、2000世代まで繰り返すとその時点ではR2の方が目的関数値は小さいという結果になった。しかしながら、その差はわずかであり、計算時間のかからないR1を使用するのが実用的である。
- ③ 同時係留を考慮して複数スパンの計画を行う場合、常に前期間の最善解を用いて計画する場合と、そうでない解も考慮した複数解を用いて計画する場合を比べると、多少後者の方が解が良いことがわかった。しかしながら、後者の計算時間は前者の約30倍になることから、実用上は前者で十分であるといえる。
- ④ 神戸港の実績データを用いて比較分析を行った結果、提案した解法を用いれば、現状の2/3のバース数でも現状とほぼ同じサービスが提供できることが明らかとなった。

以上のことから、前章よりも問題に係留条件の制約を増やして、より現実的な問題として扱ったが、現状のように入港隻数に対しバース数が過剰である場合、バースを共同利用すれば、供用バース数を減らすことができ港湾関連コストの削減が可能になる。

#### 第4章に関する参考文献

- 1) Harmann, S., A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling, *Naval Research Logistics*, Vol.45, No.7, 733-750, 1998.
- 2) Ishibuchi, H., et al., Genetic algorithms and neighborhood search algorithms for fuzzy flow-shop scheduling problems, *Fuzzy sets and System*, 67, 81-100, 1994.
- 3) 石田良平, 村瀬治比古, 小山修平, 遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森山出版, 1997.
- 4) 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993.
- 5) 西村悦子, 今井昭夫, 複数解を考慮した遺伝的アルゴリズムによる公共バースの割当法, *土木計画学研究・論文集*, No.16, 827-834, 1999.
- 6) 西村悦子, 今井昭夫, 遺伝子アルゴリズムを用いた公共バースの割当法, *日本航海学会論文集*, No.100, 181-189, 1999.
- 7) Nishimura, E., Imai, A. and Papadimitriou, S., Berth Allocation Planning in the public berth system by genetic algorithms, *European Journal of Operational Research*, Vol.131, No.2, 54-64, 2001.
- 8) 玉置 久, 長谷川嘉成, 小笹淳二, 荒木光彦, メタ戦略によるプラスチック成型工程スケジューリング問題の解法, *計測自動制御学会論文集*, Vol.31, No.5, 650-657, 1995.
- 9) 第3章, 文献7).

## 第5章 船の優先度を考慮した多目的バース割当法<sup>6), 7)</sup>

### 5.1 概説

第3章と第4章におけるバース割当の評価は、バースの公共性の点から、総在港時間（船のバース待ち時間と荷役時間の合計の総和）の最小化としており、係留順にはFirst-Come-First-Served (FCFS) ルールは考慮していない。これは、例えば同時期に到着する船2隻を同一バースに係留させる必要がある場合、両者の荷役時間長の差が大きければ、係留順を決める際に荷役時間が短い船を先に係留させた方が、他船への待ち時間が短くて済むという考え方からFCFSをあえて考慮していない。現実には、公共の多目的バースではそうした計画が行われている。

そこで本章ではより現実的なモデルを構築するため、ターミナル（サービス提供側）を主体として船社（利用者側）に優先度を設けることを考える。ここでターミナルを主体として利用船社に優先度を設けるとすれば取扱貨物量の多い船を優先することが考えられる。図5.1は横軸に時間軸、縦軸が当該バースのバース延長を示している。ある単位時間に荷役量の多い船Aのみを対象に荷役する場合と船B～Fのように荷役量が少ない船数隻が頻繁に出入りするケースを考える。このとき単位時間あたりの荷役量を比較すると、後者には出入りする時間等が含まれるため、前者の方が多くなり、ターミナル側にとっては利益が大きい顧客として捉えられるため取扱量の多い船を優先にする。また現実には公共の多目的

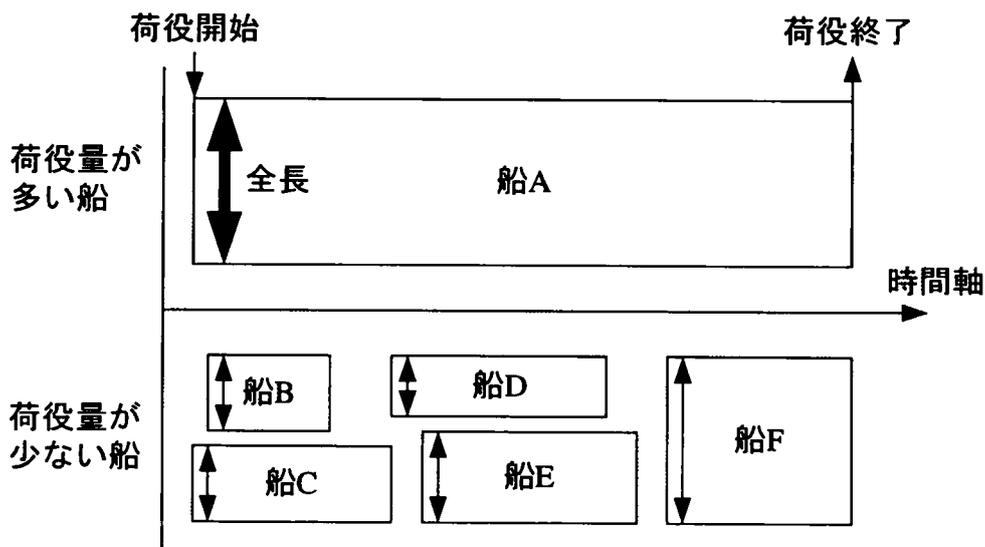


図5.1 荷役コンテナ数の多い船を優先にする理由

バース等では、この大口の船はなるべく待たされないよう配慮されることもある。そこで待ち時間のみに着目し、係留順決定には荷役量の大小を優先度として考慮し、係留バース（位置）決定にはそのような優先度を設けず、なるべく荷役コンテナが蔵置されている所に近い位置に割当ててを考へる。将来的には位置決定にもこうした優先度を設けた検討の必要性が出るかもしれないが、ここでは係留順のみに優先度を設ける。

5.2節では目的関数の考え方について述べ、問題の定式化を行う。5.3節では多目的GAを用いた解法手順を示す。5.4節では、適用事例として提案した各解法の性能評価等を行い、5.5節で実績データによる効果分析を行う。

## 5.2 モデルの定式化

### 5.2.1 目的関数

先で述べたように現場では、荷役コンテナの多い船が優先される場合と荷役時間の短い船が先に係留される場合の両者の相反した考え方が、適宜係留順の決定に反映されている。したがって評価指標を設定するにあたって、このような相反する考え方を考慮して係留順を決定するには、トレードオフ関係を設置する必要がある、今までのように1目的問題として扱うことは困難である。

そこで評価指標は、前章までの目的関数である総在港時間の最小化、および重み付き総待ち時間（各船の荷役コンテナ数×待ち時間の総和）の最小化とする。

目的関数の設定理由は以下の通りである。前者の評価関数では他船の待ち時間への影響度の関係から荷役時間の短い船が先に係留される傾向にある。後者については以下で詳細な説明をするが、なるべく荷役時間の長い船（≒荷役貨物量の多い船）が先に係留されることになり、待ち時間に関して全く逆の評価関数となっている。したがって前者が高く評価される場合と後者が高く評価される場合において、それらの間にある意味トレードオフの関係があるといえる。またこの2つの評価指標を同時に満足するのは困難であるため、パレート解として前者を高く評価するもの、後者を高く評価するもの、その中間といった複数の解を求めることができれば、複数の代替案を提示することが可能となる。このことより、それらの中から意思決定者がそのとき最も適当であるものを選択すれば実用上問題ない。したがって、1目的としては表現できなかったものを多目的にすることでより現実的な計画が期待できるものである。なおもし重みつき総在港時間のみを最小化することを考えると、係留位置決定にも優先度が考慮され考へている評価指標とは異なり、また荷役時間と待ち時間を分けて多目的の評価尺度とするとこれらにはトレードオフの関係が見当たらないことから、上で示したもので評価する。

したがって、基本的にはFCFSルールを制約条件には入れないが、荷役コンテナ数の多い船をなるべく待たせないという船の優先度を設け、具体的には、待ち時間×荷役コンテナ

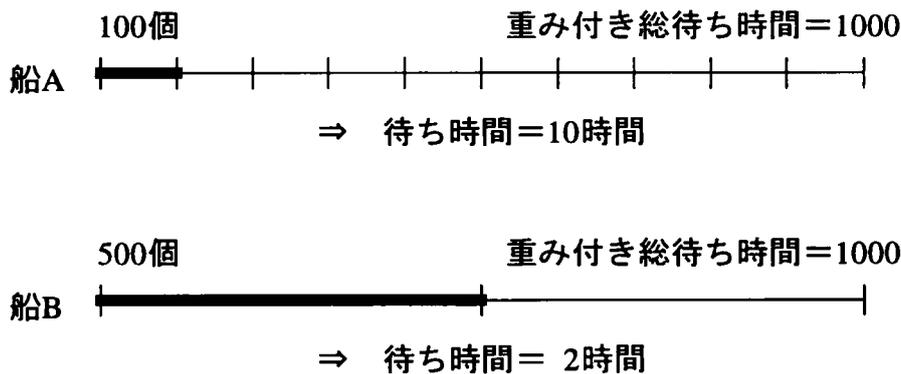


図5. 2 重み付き総待ち時間の概念図

数を最小化する評価指標を目的関数に加えることにする。これは例えば図5. 2のように、船AとBがそれぞれ100、500個の荷役を必要とする場合、両者の重み付き待ち時間が等しければ、船Aより船Bの方が待ち時間は短くなる。つまり例えば重み付き総待ち時間が1000となっている場合、実待ち時間は船Aが10時間、船Bが2時間と解釈でき、船Bの方が待ち時間が短くて済む。以上のことから、待ち時間×荷役コンテナ数を重み付き待ち時間と呼び、この総和を最小化すれば、荷役コンテナ数が多い船はなるべく待ち時間が短くて済む。この考え方から、待ち時間とコンテナ数の積を評価関数とする。

そこで本問題におけるバース割当の評価は、以下のようにする。

- ①総在港時間（各船のバース待ち時間+荷役時間の総和）の最小化
- ②重み付き総待ち時間（各船のバース待ち時間×荷役コンテナ数の総和）の最小化

### 5. 2. 2 定式化

本問題は式(5.1)―式(5.12)のような一種の割当問題になる。ここで、

$i(=1, \dots, I) \in B$  : バース番号 ( $I$ : 対象バース数)

$j(=1, \dots, T) \in V$  : 船番号 ( $T$ : 対象船舶の隻数)

$C_{ij}$  : 船 $j$ がバース $i$ で行う荷役時間

$A_j$  : 船 $j$ の到着時刻

$WD_i$  : バース $i$ の水深

$DR_j$  : 船 $j$ の喫水に安全距離を加えた必要水深

$QL_i$  : バース $i$ の岸壁長

$L_j$  : 船 $j$ の全長に係留の際に必要な延長を考慮した必要延長

$HC_j$  : 船 $j$ の荷役コンテナ数

$x_{ij}$  : もし船 $j$ がバース $i$ に係留されるとき1, そうでないとき0である0-1整数変数

$y_{jj'}$  : 当該バースにおいて船  $j$  と船  $j'$  との係留時刻が重なるとき1, そうでないとき0である  
 0-1 整数変数

$m_j$  : 船  $j$  の係留開始時刻、一種のスラック変数である

本問題は、次のように定式化される。

$$\text{Minimize } Z = (Z_1, Z_2) \quad (5.1)$$

Subject to

$$\sum_{i \in B} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in V \quad (5.2)$$

$$m_j - A_j \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (5.3)$$

$$\sum_{i \in B} (WD_i - DR_j) x_{ij} \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (5.4)$$

$$(m_{j'} + \sum_{i \in B} C_{ij'} x_{ij'} - m_j)(m_j + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij} - m_{j'}) y_{jj'} x_{ij'} \geq 0, \\ \forall i \in B, j \in V, j' \in V - \{j\} \quad (5.5)$$

$$(m_{j'} + \sum_{i \in B} C_{ij'} x_{ij'} - m_j)(m_j + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij} - m_{j'})(1 - y_{jj'} x_{ij'}) \leq 0, \\ \forall i \in B, j \in V, j' \in V - \{j\} \quad (5.6)$$

$$\sum_{i \in B} (QL_i - \sum_{j' \in V - \{j\}} L_{j'} y_{jj'} x_{ij'} - L_j) x_{ij} \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (5.7)$$

$$Z_1 = \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} (m_j - A_j + C_{ij}) x_{ij} \quad (5.8)$$

$$Z_2 = \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} HC_j (m_j - A_j) x_{ij} \quad (5.9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in B, j \in V \quad (5.10)$$

$$y_{jj'} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, j' \in V \quad (5.11)$$

$$m_j \text{ is integer}, \quad \forall j \in V \quad (5.12)$$

上記のモデルで決定変数は、 $x_{ij}$ 、 $y_{jj'}$  と  $m_j$  である。制約式(5.2)は対象船が必ずいずれかのバースに係留されることを保証し、式(5.3)は各船が入港後に係留されることを意味している。式(5.4)は船  $j$  の必要水深が係留されるバース  $i$  の水深を超えないことを保証している。

式(5.5)と(5.6)は船  $j$  と船  $j'$  が当該バースで同時に係留されているかどうかを示すもので

ある。 $m_{ij} + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij}$  は当該船  $j$  の出港時刻を表し、 $m_{ij'} + \sum_{i \in B} C_{ij'} x_{ij'}$  は他船  $j'$  の出港時刻を示す。つまり、

$$m_{ij} + \sum_{i \in B} C_{ij} x_{ij} - m_{ij'} \quad (5.13)$$

は船  $j$  の出港時刻と船  $j'$  の係留開始時刻との差を示し、

$$m_{ij'} + \sum_{i \in B} C_{ij'} x_{ij'} - m_{ij} \quad (5.14)$$

は船  $j$  の係留開始時刻と船  $j'$  の出港時刻との差を示す。これより、船  $j$  と  $j'$  の係留時間に重なる時間帯があれば式(5.13)と(5.14)は両者とも必ず正の値をとり、そうでなければどちらか一方が負となる。つまり、船  $j$  が船  $j'$  より前に係留されるなら、式(5.13)は負、式(5.14)は正となり、船  $j$  が船  $j'$  より後に係留されるなら、式(5.13)は正、式(5.14)は負となる。したがって、 $y_{jj'} = 1$  であれば式(5.5)の左辺  $> 0$ 、式(5.6)の左辺  $= 0$  となり、 $y_{jj'} = 0$  であれば式(5.5)の左辺  $= 0$ 、式(5.6)の左辺  $< 0$  となり、重なる時間帯があれば  $y_{jj'} = 1$ 、なければ  $y_{jj'} = 0$  となる。

また式(5.7)は、複数船を同時係留させる際に必要となる、岸壁長と各船の必要延長との関係に対する制約である。式(5.7)を変形すると下のような式になる。

$$\sum_{i \in B} Q L_i x_{ij} \geq \sum_{i \in B} \left( \sum_{j' \in V - \{j\}} L_{j'} y_{jj'} x_{ij'} - L_j \right) x_{ij} \quad (5.15)$$

$\sum_{j' \in V - \{j\}} L_{j'} y_{jj'} x_{ij'}$  は当該船と係留時間に重なる時間帯のある船の全長の和を示している。

したがって、式(5.15)の右辺は当該船を含めた同時係留船の必要延長の和であり、これが係留バースの岸壁長を超えなければ、それらの船は同時係留可能であることを示している。

式(5.8)と(5.9)は目的関数を示しており、それぞれ総在港時間、重み付き総待ち時間を表している。

### 5.3 多目的GAを用いた解法

本問題は多目的最小化問題であり、すべての目的関数を同時に最小にすることは容易ではない。そこで、GAを用いて多目的最適化問題の解となるパレート最適解を求める。

#### 5.3.1 解法の概要

海外のコンテナ港においてマルチユーザーターミナルとして公共形式でバース運用を行っ

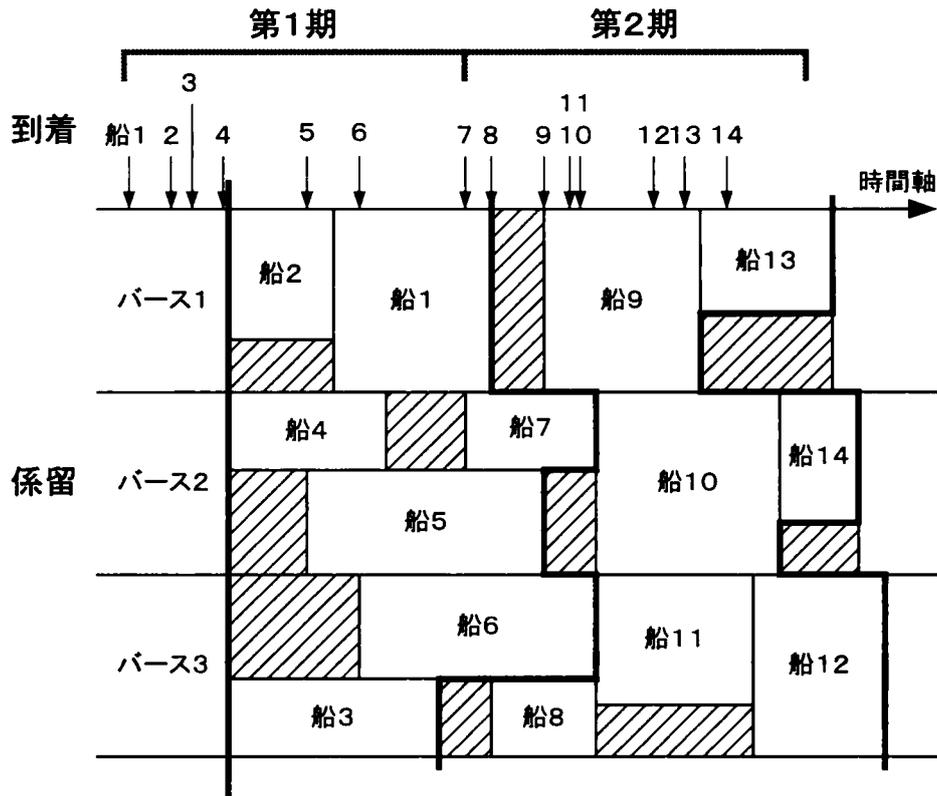


図5.3 バース係留計画

ているところでは、おおむね1週間程度の寄港予定船を与件として動的なバース割当を行っている。

本研究においても前章で説明したように、与えられた入港予定船を図5.3に示すようにいくつかの期間に分割して計算を行うことを考える。つまり、第1期の船のバース割当をまず求め、次にそれを前提として第2期を計算し、第3期と以降の計画を行う。図5.2は横軸に時間軸をとり、3バースに船14隻が到着し、係留される様子を示している。各期の計算は以降で示すGAによるアルゴリズムで行うが、多目的GAでは最終的に複数の解から成るパレート解集合を得ることができる。ここで1目的問題であれば、得られた解の中から最善の単一解を用いて次の計画を行えるが、多目的問題の場合どの解を使って次の計画を行うべきかは港湾管理者等の考え方によるものである。したがってここでは複数期間の計画は試みず、単期間での計画のみを行うことにする。

### 5.3.2 パレート最適集合

パレート最適解とは、ある目的関数値を改善するためには少なくとも他の1つの目的関数値を劣化せざるを得ない解のことである。GAは個体群を用いて探索が進められるため、各

目的関数に対してある程度良い値をとる個体を同時に持ちながら探索をすすめることができ、パレート最適集合を直接求めることができる。GAによるパレート最適集合の生成方法を検討した既存の研究には、各目的関数について独立に選択するもの<sup>8), 10)</sup>、解の優越関係に基づいて選択を行うもの<sup>2), 3), 4)</sup>、さらに両者を組み合わせたもの<sup>9)</sup>等がある。これらの手法による解の精度は、扱う問題によって異なると考えられるが、上記の中で比較的解の精度の良い玉置らの方法<sup>9)</sup>とHyunらの方法<sup>4)</sup>を本問題に対し用いることにする。ただし、個体表現方法等は第4章の1目的問題と同様の方法を用い、パレート最適集合の選定部分に対してのみ、先の2解法とそれらを組み合わせた新たな方法を用いることにする。

GAの処理の中でパレート最適集合を求め、新たな世代の個体群を決定し、各個体にランクを付ける手順について以下の3種類の方法を検討する。なお、 $rank (\in R)$ はランク番号、 $l (\in L)$ は目的関数の種類、 $popsizel$ は個体群サイズとする。

### 5.3.3 解法1 (玉置らの方法<sup>9)</sup>)

これは、並列選択 (VEGAと呼ばれている) とパレート保存戦略の2種類の方法を組み合わせたものである。並列選択は、次世代の個体群を目的関数の種類と同数の部分個体群に分割し、目的関数ごとに部分個体群を形成する。パレート保存戦略は、個体群中でのパレート個体をすべて次世代の個体群に継承する方法である。以下に手順を示し、概念図を図5.4に示す。

ステップ1 : 個体群からパレート最適解を求め、パレート個体数= $popsizel$  なら全パレート個体にランク番号 $rank=1$ を与える。パレート個体数 $>popsizel$  ならステップ2へ。パレート個体数 $<popsizel$  ならステップ3へ。

ステップ2 : パレート個体を目的関数と同数の部分個体群に分割し、各目的関数に対し値が最小なものから順にランクを $rank=1$ から昇順に付け、ランク付済み個体数= $popsizel$  になれば、ランク付け終了。

ステップ3 : まずパレート個体すべてに $rank=1$ とする。残りの個体群を目的関数と同数の部分個体群に分割し、各目的関数に対し値が最小なものから順にランクを $rank=2$ から昇順に付け、ランク付済み個体数= $popsizel$  になれば、ランク付け終了。

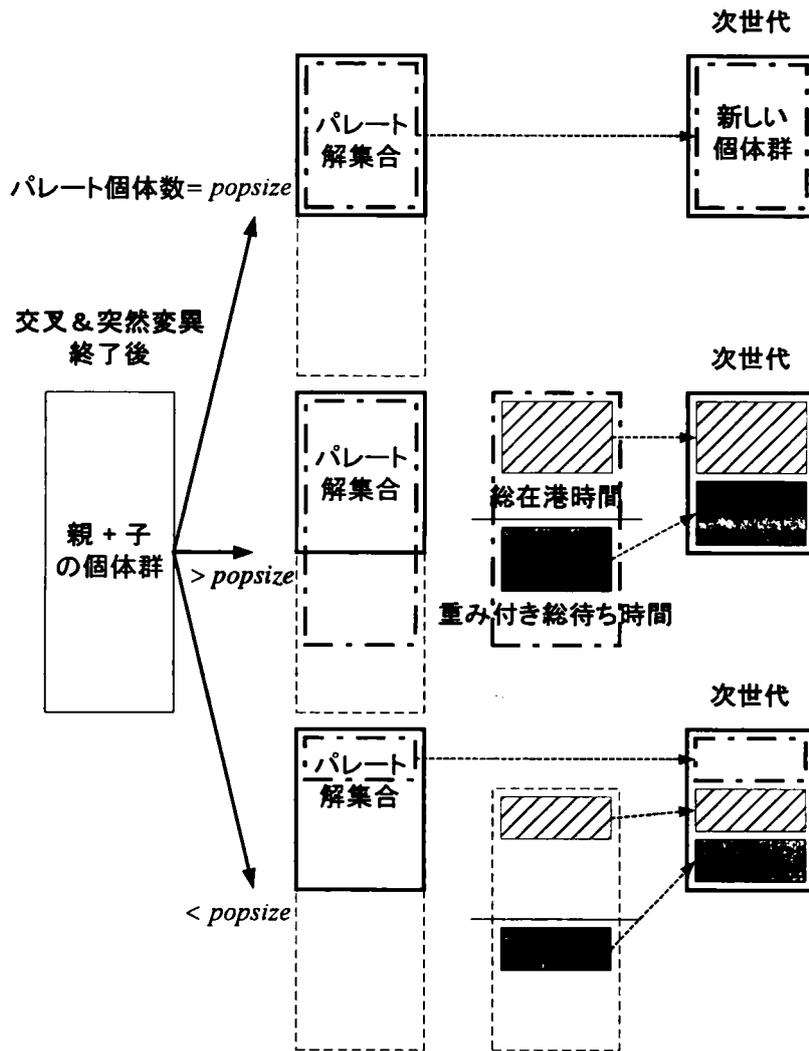


図5.4 解法1の概念図

### 5.3.4 解法2 (Hyunらの方法<sup>4)</sup>)

この手法はパレート最適集合を求め、1個体ごとに順序付けするものである。図5.5はそれぞれの目的関数値を持つ解の2次元空間を示しており、丸印は各個体を示している。なお概念図を図5.6に示し、手順は以下になるが、 $t$ は世代、 $Pop$ は親と子の全個体の集合とする。

ステップ1：各目的関数について最大値、最小値 (図5.5の $MAX_{it}$ 、 $MIN_{it}$ ) を求め、これを次式に代入し、図中の①、②のような長方形の1辺の長さ $\sigma_n$ を求め、 $n=1$ 、集合 $S=Pop$ とする。

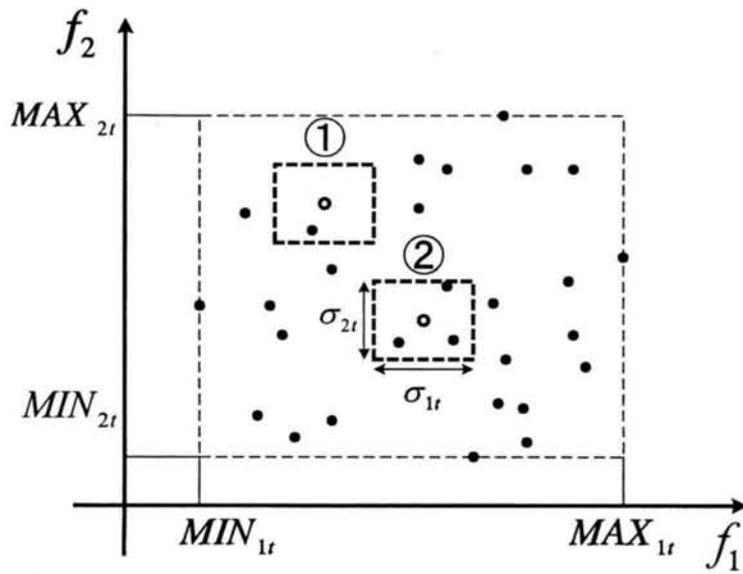


図5.5 解密度算出図

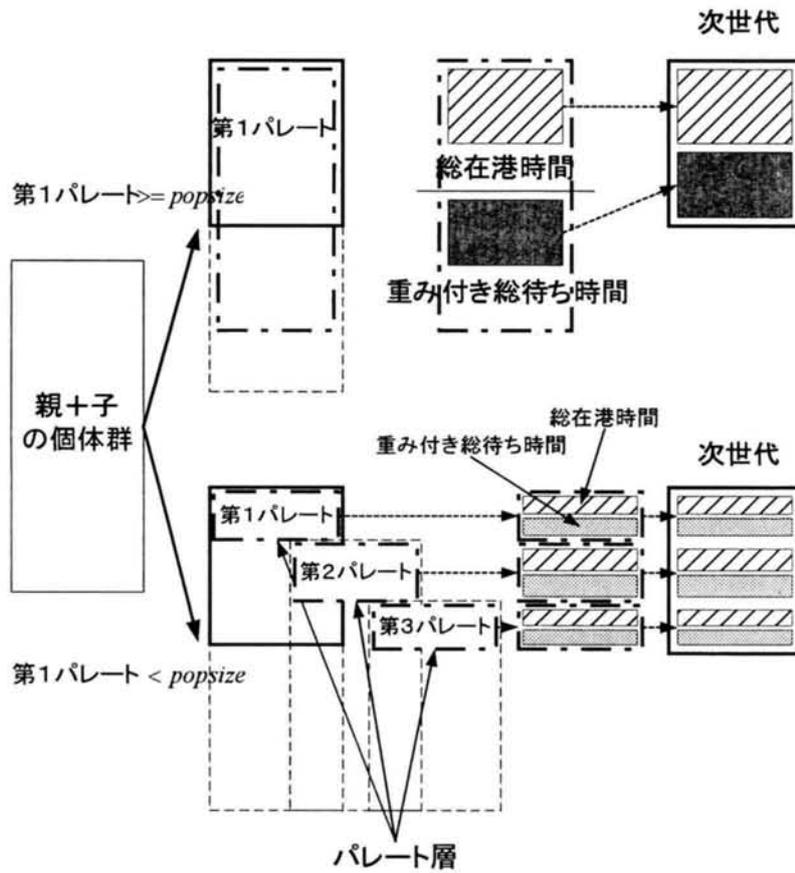


図5.6 解法2の概念図

$$\sigma_u = (MAX_u - MIN_u) / \sqrt[L]{popsize}, \quad \forall l \in L \quad (5.16)$$

ステップ2：各個体を中心に長方形を置き、その中に含まれる個体数を中心個体の解密度とする。

ステップ3：集合  $S$  の中でパレート解集合  $P$  (解の数： $p$ ) を求め、その中で解密度の高いものから順にランク番号  $rank = n \sim n+p-1$  を付す。

ステップ4：個体群からステップ3でランク付けされたものを除き、残りの個体集合を  $S$ 、 $n = n+p$  とする。 $popsize$  個の個体に対しランク付けが終われば終了、そうでなければステップ3へ。

### 5.3.5 提案する方法 (解法3と呼ぶ)

ここで提案する方法は、解法1で使用されているVEGA<sup>8),10)</sup>の概念と、解法2で使用されているパレート層という概念を組み合わせたものである。まずパレート最適集合を見つけ、さらに各パレート層内で並列選択を行い、個体レベルでランク付けを行う。この方法は解法1と良く似ているが、解法1は第1パレート層の中で全ての個体に対し高いランクとして評価する。それ以下の層内の個体についてはパレート最適性が考慮されていない。しかしながら、最終的に得られるパレート解集合は第2パレート層以降もパレート最適性を考慮することによって改善することができるかもしれない。このため、Goldberg<sup>2)</sup>が提案する並列選択を含んだ方法を考えている。この方法では、Hyunらの方法と同様に複数のパレート層を見つけ、各層内でVEGAを用いる。図5.7にその概念図を示し、全体の選択処理について次に示す。

ステップ1： $r=0$ 、 $u=0$ 、 $v=0$ 、 $P_u = POP_r$  とする。

ステップ2： $u$  番目のパレート層  $PS_u = \{p_i \mid p_i \text{ は } P_u \text{ 中の非劣解}\}$  を見つける。

ステップ3： $u$  番目のパレート層にある個体群は部分個体群中の個体数が等しくなるように、 $L$  個の部分個体群に分割する。目的関数それぞれに対し部分個体群を生成する。

ステップ4：昇順に個体を並べ替え、 $k=1$  とする。

ステップ5：もし  $v > pop\_size$  なら、個体にランク付けすることを終了する。もし  $k > LPS_u / L$  なら、ステップ7へ。そうでなければ、 $k$  番目の個体にランク  $r$  を割当てる。

ステップ6： $v=v+1$ 、 $k=k+1$ 、 $r=r+1$  とし、ステップ5へ。

ステップ7： $u=u+1$ 、 $P_u = P_{u-1} - PS_{u-1}$  とする。もし  $P_u \neq \emptyset$  なら、ステップ3へ。そうでなければ、個体にランク付けすることを終了する。

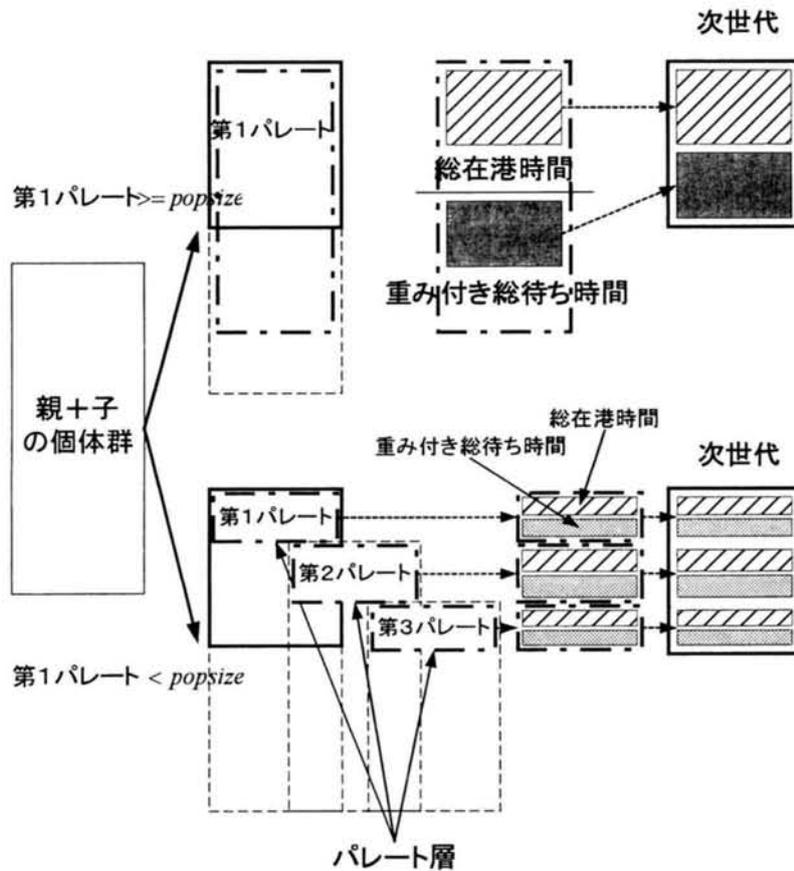


図5.7 解法3の概念図

### 5.3.6 適応度

両手法で決定した各個体のランク番号を以下の式<sup>4)</sup>に代入して各個体の適応度 *Fitness* を求める。

$$Fitness[ind(rank)] = q(1-q)^{rank-1}, \quad \forall rank \in R \quad (5.17)$$

パラメータ  $q$  は  $0 < q < 1$  の間で設定するが、本問題の解法1では0.5、解法2では0.38、解法3では0.5とする。なお、 $ind(*)$ はランク\*の個体を示す。

### 5.3.7 遺伝演算子とパラメータ

遺伝演算子と各種パラメータは以下のようにする。

#### (1) 選択交配

子を生成させる個体ペアを選択するために、トーナメント選択戦略を用いた。トーナメ

ント選択とは、個体群の中から設定した数の個体を無作為に選択し、その中で最も適応度の高い個体を次世代に残すという手続きを、次の世代に残したい数の個体を選択されるまで繰り返すというものである。ここでは2つの個体をランダムに選択し、適応度の高い方の個体を個体ペアの一方とし、同様のことを再度行って、他方の個体を選択する。

## (2) 交叉

個体ペアが決定した後、部分一致交叉という交叉方法を使って子の個体群を生成させた。本問題における詳細な交叉処理については第4章に示すとおりである。また、交叉確率は0.9に設定した。

## (3) 突然変異

突然変異率は解法1で0.09、解法2で0.06、解法3で0.07とする。これは交叉確率と組み合わせ、これらのパラメータを変化させて数ケースの予備実験を行ったところ、ここで示した値での解が最も良い値を示したため、この値にしている。

まず生成された各個体に対し、突然変異が起こるか否かを乱数値で判断する。突然変異を起こすと判断された場合、ランダムに2つの遺伝子を選択し、それらを入れ替えることにする。

## (4) 世代数と個体群サイズ

本問題ではなるべく多くのパレート解が選ばれるように個体群サイズは100とし、世代数は収束状況から500世代までとした。

## 5.4 モデルの適用事例

本問題におけるGAパラメータの推定にあたり、数ケースの計算結果から最善のものとして先に示した値を採用したが、問題の規模（例えば、対象船舶の隻数の増減）により最善解が得られる各パラメータ値は異なる。そこで本研究では、供用5バースに入港船25隻を係留させるという問題規模で検討する。なおこれは、以前調査した神戸港の入港分布により、計画対象期間として3日間に相当する。この問題規模で異なる乱数の種20個により人工的に生成させた問題、合計20個で計算を行う。

なおここでは、神戸商船大学情報処理センターの計算処理サーバ leo（機種名：S-4/2000 E、CPU：SuperSPARC+(60MHz)）上のC言語コンパイラ（日本語SPARC Works Professional C3.0.1）を用いている。

#### 5.4.1 各解法の性能評価

まず両解法で得られる解の精度の比較を行う。文献5)では多目的GAのアルゴリズムを定量的に性能評価している。そこでは得られたパレート解集合の評価は、パレート解の個数、それらの解の多様性、真のパレート解との近接度合等で行っている。パレート解の個数は多いほど、選択肢が増えることから優れていると評価される。また解の多様性は、これが大きいほど一方の目的関数のみに対し非常に優れた解や両者とも妥協した解など、異なるパターンの解が多く見つかることから、ばらつきの大きい方が優れているとされる。さらに、真のパレート最適集合が容易に得られる問題であれば、それになるべく近いものが当然のことながら優れている。そこで以上で述べた3つの評価指標を元に、3解法の性能評価を行う。

##### (1)各解法による目的関数値と解の多様性

まず、解法ごとの目的関数値とその多様性（ばらつき具合）をみる。多目的問題では問題ごとに各解法によるパレート解集合が見つかり、さらに解集合内の各解に対し目的関数値が求まる。そこで、各問題の両解法による解の目的関数値の平均値と標準偏差を表5.1に示す。最下行にはそれらの平均値を示す。

まず全体の平均から、総在港時間は解法3の平均が他の2解法によるものより短く、標準偏差は解法2の方が大きくなっている。また重み付き総待ち時間も解法3の平均が他の2解法より短く、標準偏差は大きくなっている。したがって、解法2はばらつきが大きく、広い解空間で解を得ており、解集合の多様性の点では解法2が優れている。

次に問題ごとにみると、総在港時間の平均については問題20個のうち解法1の時間が短いケースは5、解法2では7ケース、解法3では8ケースであり、3解法にほとんど差がない。それに対し、ばらつきが大きいのは解法1、2、3でそれぞれ2、13、3ケースであり、解法2が比較的多様性に富んだ解を得ている。さらに重み付き総待ち時間については解法1の平均が他方より短いのは4ケース、解法2では6ケース、解法3では10ケースであり、ばらつきが大きいのはそれぞれ6、9、5ケースで大差がない。したがって、解のばらつきは多少解法2の方が大きいため優れているといえるが、解集合の優劣については明らかではない。そこで次に、各解法で得られた解集合間の相対精度を求め、それにより優劣の判断を行う。

##### (2)各解法の相対精度とパレート解の個数

本問題のように真のパレート最適解が不明である場合、真のパレート解集合との近接度合を測ることはできない。そこで複数のパレート解集合の相対的な優劣を比較する方法<sup>1)</sup>が提案されており、この方法を用いて解の精度比較を行い、さらにパレート解の個数も調べる。まず、すべてのパレート解集合を合成し、その中でパレート最適集合  $NDR$  を再計算する。このとき、元々のパレート解集合  $ND_k$  で  $NDR$  に含まれる個体の割合を集合  $ND_k$  の

表5. 1 各問題における両解法による解の目的関数値

単位：時間

問題 番号	総在港時間						重み付き総待ち時間					
	解法1		解法2		解法3		解法1		解法2		解法3	
	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差
1	465	17	451 <sup>a</sup>	35 <sup>b</sup>	464	28	73880	3801	56495	7081 <sup>b</sup>	36930 <sup>a</sup>	1684
2	482	46 <sup>b</sup>	469	10	416 <sup>a</sup>	22	58101	2211	68497	11701 <sup>b</sup>	47572 <sup>a</sup>	3055
3	374	18	371	41 <sup>b</sup>	337 <sup>a</sup>	28	15791	7239 <sup>b</sup>	9737 <sup>a</sup>	3933	12825	4176
4	346	6	299 <sup>a</sup>	17 <sup>b</sup>	307	11	18596	5267 <sup>b</sup>	13030 <sup>a</sup>	977	13381	3029
5	565 <sup>a</sup>	41	592	46 <sup>b</sup>	583	7	139815	10911 <sup>b</sup>	125465 <sup>a</sup>	8968	161100	9951
6	614	7	605	29 <sup>b</sup>	544 <sup>a</sup>	27	153425	2031	149122	4981	131152 <sup>a</sup>	14535 <sup>b</sup>
7	607	30	533 <sup>a</sup>	34	567	36 <sup>b</sup>	102594	10744	82131 <sup>a</sup>	3699	91111	14472 <sup>b</sup>
8	525 <sup>a</sup>	18	578	20 <sup>b</sup>	633	39	98341 <sup>a</sup>	4341	100044	5569 <sup>b</sup>	119370	5021
9	384	54 <sup>b</sup>	406	25	352 <sup>a</sup>	12	37967	5701	71172	28135 <sup>b</sup>	29711 <sup>a</sup>	12643
10	372	30	381	47 <sup>b</sup>	367 <sup>a</sup>	21	44901	12871	37033	15131 <sup>b</sup>	35335 <sup>a</sup>	7773
11	419 <sup>a</sup>	2	470	3 <sup>b</sup>	469	1	75576 <sup>a</sup>	4829	92342	4418	87672	8013 <sup>b</sup>
12	461 <sup>a</sup>	35	476	16	466	36 <sup>b</sup>	59933	4759 <sup>b</sup>	65349	2874	59889 <sup>a</sup>	3695
13	388 <sup>a</sup>	13	558	44 <sup>b</sup>	417	24	56557 <sup>a</sup>	4203	57731	2233	61349	6342 <sup>b</sup>
14	391	21	386 <sup>a</sup>	16	404	28 <sup>b</sup>	55911	2536	58735	5704 <sup>b</sup>	54420 <sup>a</sup>	4579
15	343	4	394	27 <sup>b</sup>	338 <sup>a</sup>	6	44299	4889	38017 <sup>a</sup>	6040 <sup>b</sup>	30070 <sup>a</sup>	5007
16	374	7	325 <sup>a</sup>	15	336	26 <sup>b</sup>	44259	7639 <sup>b</sup>	27786 <sup>a</sup>	842	31828	3854
17	291	29 <sup>b</sup>	292	20	285 <sup>a</sup>	28	11103	2434	12163	4591 <sup>b</sup>	9440 <sup>a</sup>	1022
18	287	20	273 <sup>a</sup>	21 <sup>b</sup>	300	15	4072 <sup>a</sup>	877	7433	869	9267	2781 <sup>b</sup>
19	303	17	294 <sup>a</sup>	27 <sup>b</sup>	318	24	15588	2701 <sup>b</sup>	11943	955	9159 <sup>a</sup>	1591
20	325	8	316	31 <sup>b</sup>	269 <sup>a</sup>	7	26982	4775	13048 <sup>a</sup>	7584 <sup>b</sup>	14356	4557
平均	416	21	423	26	409	21	56885	5238	54864	6314	52297	5889

※ a : 平均が他解法より小さいもの  
b : 標準偏差が他解法より大きいもの

相対精度とするというものである。以下に手順を示すが、ここで $ND_k$ は解法 $k$  ( $\in AP$ :  $AP$ は解法の集合) で得られるパレート解集合を示す。

ステップ1: 各解法による解集合 $ND_k$ をすべて合成し、集合 $NDA$ を作る。

ステップ2:  $NDA$ からパレート最適集合 $NDR$ を再計算する。

ステップ3: 解法 $k$ において $NDR \cap ND_k$ である解を見つけ、それらを集合 $PO_k$ とする。

ステップ4:  $ND_k$ に含まれる $PO_k$ の割合を以下の式で計算し、これを解法 $k$ の相対精度 $RQ_k$ とする。

$$RQ_k(\%) = \frac{|PO_k|}{|ND_k|} \times 100, \quad k \in AP \quad (5.18)$$

表5. 2は20個の問題それぞれにおいて、各解法で得られた解の個数 $|ND_k|$ 、それらのうち再計算でパレートとして選ばれた解の数 $|PO_k|$ 、および相対精度 $RQ(\%)$ を示している。また最下行には解法ごとにそれらの平均を示す。

まず20個の問題の平均値から各解法によるパレート解の数をみると、解法1、2、3でそれぞれ13.5、13.2、12.4となっており、ほとんど差がないが若干解法1が多いことがわかる。しかしながら、相対精度は解法3の方が高くなっている。さらに問題ごとにどちらの相対精度が高いかを調べると、解法1が高いケースが5、解法2が高いケースが3、解法3が高いケースが12であり、解法3が比較的精度の良い解を得ているのがわかる。

#### 5. 4. 2 優先度の有無による比較分析

既存の研究である総在港時間のみを目的関数としたときの計算結果と比較し、バース割当計画を2目的問題として扱うことにした効果を調べる。まず荷役コンテナ数の増減による待ち時間長に影響があるかを調べる。

##### (1) 各船に対する待ち時間長のばらつき

本問題では目的関数の1つとして重み付き総待ち時間を採用しており、これが優れている解は荷役コンテナ数が多いほど、その船の待ち時間は短くなる。反対に総在港時間が優れているとされる解では、荷役コンテナ数の多い船が高い優先度でサービスされる必要はない。したがって、これら2つを目的とした本問題では、荷役コンテナ数の多い船は各解法で得られるパレート解集合内の解の間で、待ち時間に大きなばらつきが出ると予想される。そこでここでは、各船の待ち時間の長さやそのばらつきが荷役コンテナ数によってどのように影響するかを調べる。

表5. 3は問題1において3解法で得られた解での各船の待ち時間を示している。なお、船

表5. 2 各解法の相対精度

問題 番号	解法1			解法2			解法3		
	$ ND_k $	$ PO_k $	$RQ_k(\%)$	$ ND_k $	$ PO_k $	$RQ_k(\%)$	$ ND_k $	$ PO_k $	$RQ_k(\%)$
1	14	0	0	12	0	0	14	14	100 <sup>f</sup>
2	11	0	0	12	0	0	9	9	100 <sup>f</sup>
3	21	0	0	12	9	75	7	7	100 <sup>f</sup>
4	5	0	0	9	8	88.9 <sup>f</sup>	3	2	66.7
5	25	3	12	32	32	100 <sup>f</sup>	15	0	0
6	3	0	0	19	0	0	26	26	100 <sup>f</sup>
7	37	0	0	20	19	95	36	36	100 <sup>f</sup>
8	15	15	100 <sup>f</sup>	15	0	0	7	0	0
9	16	4	25	14	0	0	9	6	66.7 <sup>f</sup>
10	17	3	17.6	23	20	87	9	9	100 <sup>f</sup>
11	2	2	100 <sup>f</sup>	4	0	0	3	0	0
12	7	5	71.4 <sup>c</sup>	10	0	0	6	4	66.7
13	10	10	100 <sup>f</sup>	20	0	0	17	2	11.8
14	8	4	50	6	2	33.3	17	13	76.5 <sup>c</sup>
15	6	1	16.7	12	0	0	12	12	100 <sup>f</sup>
16	14	0	0	6	6	100 <sup>f</sup>	8	1	12.5
17	24	0	0	12	2	16.7	12	12	100 <sup>f</sup>
18	5	5	100 <sup>f</sup>	6	2	33.3	23	0	0
19	14	1	7.1	4	3	75	8	8	100 <sup>f</sup>
20	15	0	0	15	7	46.7	6	6	100 <sup>f</sup>
平均	13.5	2.7	30.0	13.2	5.5	37.5	12.4	8.4	65.0

※ c: 相対精度が3解法内で最も高いもの

は荷役コンテナ数の昇順に示し、その船番号は船の到着順を付している。問題1では解法1、2、3でそれぞれ14、12、14個のパレート解を見つけており、このことは25隻の船が各解法の解集合内にそれぞれ14、12、14個の異なる待ち時間を有することを意味する。そこで表5. 3に船ごとに各解による待ち時間の平均値と標準偏差を示す。さらに1目的問題で得られる最善解は1つであるため、その解での待ち時間も最右列に示す。

まず標準偏差をみると、解の間で待ち時間にばらつきが多い船（標準偏差300以上）は解法1では船19、12と4、解法2では船14、3、11、10および6であることがわかる。またこれ

表5. 3 各船の待ち時間

荷役 コンテナ 数	船 番号	解法1		解法2		解法3		1目的 問題
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	
170	19	264	380 <sup>d</sup>	0	0	110	63	0
240	14	253	277	374	340 <sup>d</sup>	264	106	0
251	20	0	0	0	0	10	12	90
387	13	315	227	36	0	499	0	167
419	12	794	341 <sup>d</sup>	613	0	547	36	529
431	3	0	0	1226	610 <sup>d</sup>	0	0	0
438	23	510	212	669	45	205	0	1725
445	16	428	0	117	0	692	0	855
490	17	0	0	0	0	0	0	0
543	2	0	0	0	0	0	0	0
602	11	578	253	358	431 <sup>d</sup>	482	157	1054
626	4	132	322 <sup>d</sup>	678	0	0	0	0
690	9	0	0	890	0	1068	228	264
750	22	0	0	31	49	0	0	256
769	25	543	173	0	0	0	0	715
770	10	49	0	263	338 <sup>d</sup>	49	0	49
791	24	58	141	0	0	0	0	0
796	5	640	261	0	0	0	0	747
835	15	1	3	0	0	0	0	0
873	8	126	0	0	0	390	0	131
876	7	1419	0	12	10	977	0	0
921	1	0	0	0	0	0	0	0
934	6	231	210	627	765 <sup>d</sup>	173	0	987
960	21	104	104	0	0	83	101	1223
980	18	356	0	82	70	0	0	0

※ d : 標準偏差が300以上のもの

らの船の荷役コンテナ数は順に170、419、626、240、431、602、770および934であり、荷役コンテナ数に関係なく解間で待ち時間長にばらつきがある。なお解法3は比較的他よりばらつきが小さくなっている。

また各船の平均待ち時間長をみると、まったく待ちのない船も存在するが、船19、3のように1目的では待つ必要のなかった船が2目的により待つことや、待ち時間が長くなることもある。反対に、船23、16のように待ち時間が短縮されたケースもある。これらは荷役コンテナ数に関係なく存在し、以上の結果は問題2～20にもいえる。以上のことは、待ちが発生するかどうかは当該船が到着したときに前の船が荷役中であるか否かで決まる。また待ち時間長は前の船がいつから荷役を開始し、どれだけ荷役に時間がかかるかにもよる。したがって船の到着のタイミングが大きく影響するため、単純に荷役コンテナ数の増減と待ち時間長のばらつきとの関係が予想した通りの結果には至っていない。

## (2)各船の待ち時間と荷役時間

ここでは荷役コンテナ数500以上をL、未満をSの2つに区分し、それぞれに該当する船の1隻あたり平均待ち時間と平均荷役時間を表5. 4に示し、全問題における荷役コンテナ数の変化とそれによる各時間長の関係調べ。

まず全体の傾向を見るために、全問題における結果の平均をとったものを表5. 4(1)に示す。船Sは待ち時間、荷役時間ともに1目的よりどの解法においても短くなっている。しかしながら船Lは待ち時間は短くなっているが、荷役時間は若干長くなっているのがわかる。また待ち時間長について見ると、1目的では船Lの方が待ち時間が長いのに対し、2目的で

表5. 4(1) 各船の平均待ち時間と平均荷役時間の全問題平均

### 各船の平均待ち時間

船サイズ	荷役コンテナ数	2目的問題			1目的問題
		解法1	解法2	解法3	
船S	500個未満	261	293	317	392
船L	500個以上	228	216	193	500

### 各船の平均荷役時間

船サイズ	荷役コンテナ数	2目的問題			1目的問題
		解法1	解法2	解法3	
船S	500個未満	442	448	414	462
船L	500個以上	1004	1024	985	961

はどの解法でもそれぞれ船Lは短くなっている。当然のことであるが、荷役時間についてはコンテナ数が多い船Lが長くなっている。したがって、重み待ち時間を追加することで荷役個数の多い船に対しては待ち時間の短縮効果が見られることがわかった。

次に表5. 4(2)を用いて個々の問題での傾向を見る。まず2目的の解による時間長と1目的によるそれを比較すると、結果は次に示す4つのパターンに分けられ、当該問題・船サイズで1目的より、①待ち時間と荷役時間ともに短くなった、②待ち時間は長くなったが荷役時間が短くて済むバースに係留された、③待ち時間は短縮できたが荷役に時間がかかるバースに係留された、④待ち時間および荷役時間ともに長くなった、である。20問題×船サイズの合計40ケースのうち、結果が①に該当するのは解法1、2、3においてそれぞれ11、12、17であり、②に該当するのはそれぞれ2、3、1ケースで、船サイズSのときのみでLにそのようなケースはない。また③にあてはまるのはそれぞれ26、22、16ケース、④にあてはまるのはそれぞれ1、3、6ケースで④に関しても船サイズSの場合のみである。したがって、Lは③のケースにほとんどが該当することから、荷役コンテナ数の多い船をなるべく待たせないようにするため、荷役時間のかかるバース、つまり荷役コンテナの蔵置位置と離れているバースに係留される傾向にある。以上の結果からも1目的よりも船Lの待ち時間短縮するという目的は果たしているといえる。

次に当該問題内で船SとLの待ち時間長を調べると、LがSより待たされるケースは解法1と2でそれぞれ9、7ケースあったが、1目的の方は11ケースと若干多く、1目的よりも2目的化によるL船の待ち時間短縮効果が現れている。

表5. 4(2) 問題ごとの各船の平均待ち時間と平均荷役時間

問題 番号	船 サイズ	平均待ち時間 (分)				平均荷役時間 (分)			
		解法1	解法2	解法3	1目的 問題	解法1	解法2	解法3	1目的 問題
1	S	285	337	481 <sup>e</sup>	374	505	577	600	624
	L	265	184	201	339	1035 <sup>e</sup>	994 <sup>e</sup>	1020 <sup>e</sup>	969
2	S	272	240	409	657	612 <sup>e</sup>	590 <sup>e</sup>	189	459
	L	185	240	147	771 <sup>f</sup>	1125 <sup>e</sup>	1052	1158 <sup>e</sup>	1097
3	S	205	154	128	315	577 <sup>e</sup>	495 <sup>e</sup>	559 <sup>e</sup>	404
	L	34	8	25	686 <sup>f</sup>	941 <sup>e</sup>	1045 <sup>e</sup>	766	797
4	S	189	138	76	211	503 <sup>e</sup>	363	539 <sup>e</sup>	468
	L	41	30	20	69	883 <sup>e</sup>	831 <sup>e</sup>	837 <sup>e</sup>	807
5	S	374 <sup>e</sup>	447 <sup>e</sup>	381 <sup>e</sup>	279	257	274 <sup>e</sup>	644 <sup>e</sup>	268
	L	540 <sup>f</sup>	484 <sup>f</sup>	502 <sup>f</sup>	884 <sup>f</sup>	1046 <sup>e</sup>	1159 <sup>e</sup>	863	1035
6	S	783	986	731	1038	352 <sup>e</sup>	267 <sup>e</sup>	482 <sup>e</sup>	240
	L	580	526	382	769	1002 <sup>e</sup>	988 <sup>e</sup>	990 <sup>e</sup>	925
7	S	699 <sup>e</sup>	436 <sup>e</sup>	791 <sup>e</sup>	400	692 <sup>e</sup>	644 <sup>e</sup>	784 <sup>e</sup>	488
	L	345	302	298	926 <sup>f</sup>	1154 <sup>e</sup>	1112 <sup>e</sup>	1054	1090
8	S	358	379 <sup>e</sup>	321	361	527	667	784	787
	L	388 <sup>e</sup>	381 <sup>f</sup>	386 <sup>f</sup>	762 <sup>f</sup>	1122 <sup>e</sup>	1235 <sup>e</sup>	1030	1104
9	S	144	235	371 <sup>e</sup>	252	336	413	617 <sup>e</sup>	428
	L	179 <sup>f</sup>	338 <sup>f</sup>	269	628 <sup>f</sup>	1088 <sup>e</sup>	894	967 <sup>e</sup>	951
10	S	191	126	221	615	356	391	271	444
	L	193 <sup>f</sup>	179 <sup>f</sup>	179	368	971 <sup>e</sup>	1047 <sup>e</sup>	1247 <sup>e</sup>	791
11	S	129 <sup>e</sup>	269 <sup>e</sup>	188 <sup>e</sup>	76	381	498 <sup>e</sup>	644 <sup>e</sup>	409
	L	341 <sup>f</sup>	362 <sup>f</sup>	293 <sup>f</sup>	634 <sup>f</sup>	996	1007 <sup>e</sup>	958	1000
12	S	286	423 <sup>e</sup>	446 <sup>e</sup>	301	422	455	621 <sup>e</sup>	503
	L	216	195	211	324 <sup>f</sup>	1155 <sup>e</sup>	1124 <sup>e</sup>	1279 <sup>e</sup>	1089
13	S	292	739 <sup>e</sup>	277	546	365	502	555	618
	L	263	210	209	316	920 <sup>e</sup>	1220 <sup>e</sup>	783	875
14	S	263	218	397	560	389 <sup>e</sup>	341	442 <sup>e</sup>	373
	L	266 <sup>f</sup>	294 <sup>f</sup>	266	522	935 <sup>e</sup>	971 <sup>e</sup>	865	910
15	S	179	284	592 <sup>e</sup>	576	433	525	597 <sup>e</sup>	571
	L	232 <sup>f</sup>	223	96	478	820 <sup>e</sup>	873 <sup>e</sup>	825 <sup>e</sup>	768
16	S	157	169	205	325	553 <sup>e</sup>	386	563 <sup>e</sup>	442
	L	251 <sup>f</sup>	121	159	547 <sup>f</sup>	851	901	842	1110
17	S	89	70	45	280	385 <sup>e</sup>	445 <sup>e</sup>	453 <sup>e</sup>	382
	L	56	68	54 <sup>f</sup>	231	1041 <sup>e</sup>	961 <sup>e</sup>	821 <sup>e</sup>	778
18	S	25	64	117	147	452 <sup>e</sup>	395	484 <sup>e</sup>	442
	L	33 <sup>f</sup>	49	56	215 <sup>f</sup>	1029 <sup>e</sup>	954 <sup>e</sup>	970 <sup>e</sup>	946
19	S	141	55	121	184	375 <sup>e</sup>	348 <sup>e</sup>	483 <sup>e</sup>	341
	L	56	63 <sup>f</sup>	58	178	942 <sup>e</sup>	1025 <sup>e</sup>	855	938
20	S	153	81	46	343	368	379	393	542
	L	97	58	42	344 <sup>f</sup>	1015	1082	838	1245

※ 船のサイズSは荷役コンテナ数500未満、Lは500以上の船  
e: 当該サイズで1目的問題の解より時間が長くなったもの  
f: 当該問題で、Lの待ち時間がSのそれよりも長いもの

## 5.5 実績データによる比較分析

神戸港の実績データを用いて、現在の利用形態である専用利用の場合と比較することにより、マルチユーザ化の効果を述べる。第3章、第4章では1996年2月の1ヶ月間のデータを使用し、複数スパンの計画として比較分析を試みたが、本章では2000年2月15日～17日の3日間に神戸六甲アイランド専用6バースで荷役を行った19隻の船を対象とした、1スパンの計画で比較分析を行う。

図5.8に供用バース数を6～2まで変化させたときの目的関数である総在港時間、重み付き総待ち時間、および重みを省いた実総待ち時間を示す。なお多目的の場合、パレート解として複数解が得られることから全ての値をプロットしている。各船が実際に係留されたバースでの荷役時間データは存在するが、他バースでのそれは存在しない。そこで前章までと同様に各船のコンテナ1個あたりの荷役時間を求め、さらにバースごとにそれらの平均を出し、各船のコンテナ数とそれとの積を当該船の荷役時間としている。したがって実績と比較する場合、当該船舶に対して実績の荷役時間と計算使用のそれとが異なってくる。これを避けるために実績6バースでの荷役時間も計算使用データとしてそれぞれの目的関数値を計算している。この処理により、現実には待っていない船に対し待ち時間がカウントされているため、実績6バースの待ち時間が大きくなっていることに注意する。

まず2目的での結果をみると、解法間で比較すると差はほとんどがなく、バース数が少ないときに解の間でばらつきが出ているのがわかる。バース数が増えると目的関数値は小さくなっていくが、5、6バース間ではほとんど変化していない。待ち時間は5、6バースでほとんどゼロに近づいている。

1目的問題の解法と比較すると、いずれの目的関数においても2目的にすることで値が小さくなっている。本来なら総在港時間は1目的の解法が2目的の解法より時間が短くなるものであるが、1目的の解法で得られる解も近似解であるため必ずしもそうはなっていないことが図5.8からわかる。またこれは前節の分析結果から、あくまで平均的な見解に止まるが、待ち時間および荷役時間ともに長くなった船は荷役量が少ない船であり、そのケース数も少なかったことから、それ以外の傾向（①待ち時間・荷役時間ともに短縮、②待ち時間延長・荷役時間短縮、③待ち時間短縮・荷役時間延長）が多く見られ、全体として考えるといずれの目的関数も小さくなっている。

実績6バースの評価値と比較すると、2目的の3解法では総在港時間で3バース、重み付き総待ち時間で4バース、実総待ち時間で4バースでも実績6バースとほぼ同じかそれ以下の値が得られており、2/3から半分程度にバース数を減らしても現在と同程度のサービスが提供できることがわかる。

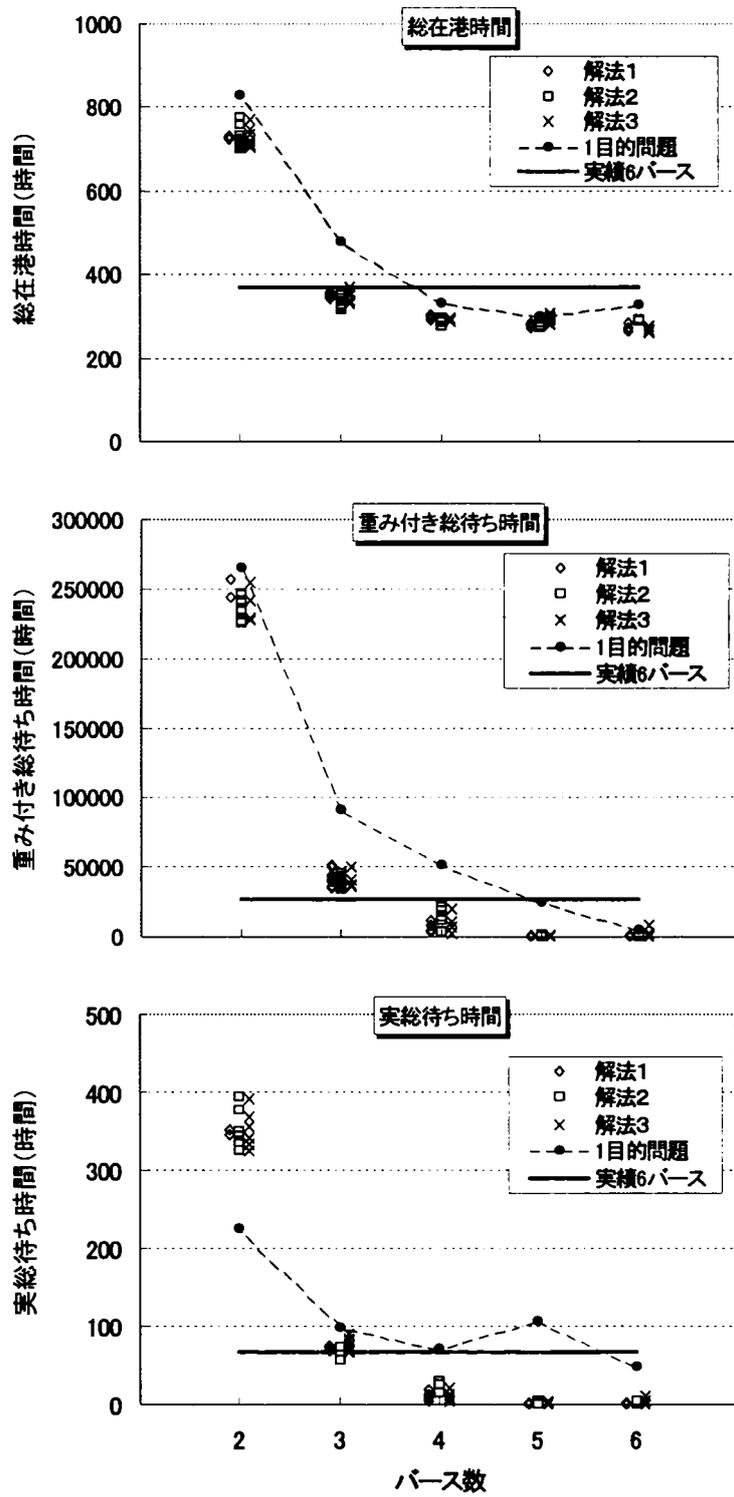


図5.8 実績6バスでの専用利用との比較

## 5.6 結語

本章では、さらにより現実的なモデルを構築するため、ターミナル（サービス提供側）を主体として船社（利用者側）に優先度を設けることを考え、取扱貨物量の多い船を優先とした船とバースを割当てする方法を検討した。

- ① 解法としては多目的GAを用いたが、GAの処理中で次世代の個体群に対するランキング方法が異なる3種類の解法で検討を行った。解の多様性の観点からは既存の解法2が若干他より優れているが、3つを比較した相対精度からは提案する解法3が最も優れているという結果になった。
- ② 多目的化により、荷役コンテナ数の多い船の待ち時間が解間においてばらつくと予想したが、荷役コンテナ数に関係なくそれらにばらつきがあることがわかった。
- ③ 船の優先度を考慮しない1目的問題の解と比較することにより、荷役コンテナ数の多い船に対する待ち時間が多目的化によって短縮できることが確認できた。
- ④ 最後に提案した解法を神戸港に適用すると、供用バース数を2/3～約半分程度にしても現状と同程度のサービスが提供できることがわかった。

このことから、マルチユーザターミナルとして利用し、余分なバースを減らすことができれば、それにかかるコストの削減を期待することができる。

## 第5章に関する参考文献

- 1) ABCL project, 並列オブジェクト指向言語の汎用高並列計算機向け処理系の開発とその応用実証プログラムによる評価, 1997.
- 2) Goldberg, D. E., Genetic algorithms in search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
- 3) Hom, J., et al., A niched pareto genetic algorithm for multi-objective optimization, Proc. of the 1<sup>st</sup> IEEE Conference on Evolutionary Computation, 82-87, 1994.
- 4) Hyun, J. C., et al., A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines, Computers & Operations Research. Vol.25, No.7/8, 675-690, 1998.
- 5) 比尾根一雄, 並列遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化問題のパレート最適解集合の生成法と定量的評価法, 第9回自律分散システムシンポジウム, 計測自動制御学会, 295-300, 1997.
- 6) 西村悦子, 今井昭夫, 佐村智子, 船の優先度を考慮したマルチユーザコンテナターミナルにおける多目的バース割当法, 土木計画学研究・論文集, No.18, 721-728, 2001.
- 7) Nishimura, E., Imai, A. and Papadimitriou, S., Multi-objective berth allocation in a multi-user container terminal, Proceedings of the 9<sup>th</sup> World Conference of Transportation Research, available in CD-ROM, 2001.
- 8) Schaffer, J. D., Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms, Proc. of the 1<sup>st</sup> international conference on genetic algorithms and their applications, 93-100, 1985.
- 9) 玉置久, 森正勝, 荒木光彦, 遺伝的アルゴリズムを用いたパレート最適解集合の生成法, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.8, 1185-1192, 1995.
- 10) 山田忠史, 則武通彦, 谷口栄一, 多賀慎, 物流ターミナルの最適配置計画への多目的計画法の適用, 土木学会論文集, No.632, IV-45, 41-50, 1999.10.

## 第6章 本研究の今後の展開と課題

### 6.1 概説

本研究ではバースの集約を目的として、マルチユーザターミナル導入を試み、この場合に発生すると予想される問題点を解決するために、第3～5章のようなバース運用の方法を提案した。ここで明らかとなることは、提案する方法を用いればバース数の集約が実現可能であり、これを行うことによってコスト削減効果が期待できることである。しかしながら、具体的にどれだけのコストを削減できるかを示すことはできない。なぜなら、ターミナル内の作業状況はブラックボックスとして扱っているため、荷役にどれだけの荷役機器を要したか、また作業状況による荷役時間変動を考慮していないためである。

そこで本章では、バース集約時にブラックボックスと仮定していたターミナル内部作業の挙動をモデル化して荷役時間推定を実現し、具体的なコスト削減効果を見るための今後の研究発展について述べる。

6.2節では、マルチユーザターミナル導入時に発生するであろう問題点について述べ、これを解決するために第3章～第5章までの研究を含めた研究プロジェクトの今後の展開について述べる。6.3節ではコンテナターミナル内の荷役作業シーケンスの最適化に関する研究として現在の進捗状況を述べる。最後に6.4節では、まとめとして今後に残された課題について述べる。

### 6.2 今後の展開

マルチユーザターミナル導入時に発生する運用上の問題点を考えると、岸壁を境に海側と陸側の大きく2つに分けられる。ここで船社の専用ターミナルと異なる点は各船の係留バースは寄港するたびに決定されるため、その都度異なることがあり、またトランシップ貨物も同時に扱われるので、荷役コンテナが当該船舶もしくはフィーダー船のいずれかから離れる可能性があることに注目すると、海側陸側それぞれに生じる問題は以下のようなになる。

海側に生じる問題は、船の係留位置の決定の仕方次第によってはバースのパフォーマンスに影響する点である。したがって、第3～5章ではコンテナ船の係留位置決定方法を提案し、現状の供用バース数を必要とするのか、バース集約しても現状のサービス水準を維持できるかを検討している。

さらに陸側に生じる問題は、当該船舶の係留位置と荷役コンテナの蔵置位置との間

の距離が離れることにより、現状の運用形態では荷役時間が長くなる可能性がある点にある。これの単純な対処方法としては、トレーラー台数を増やすことが上げられるが、ドライバー数も増やすことになるため、かなりのコスト増の可能性はある。したがって今後の研究として、トレーラーの荷役シーケンス決定方法を提案し、トレーラー台数を増やさないで、本問題を対処できるかどうかを検討する必要がある。

そこで第3～5章の内容も含めた全体の構成を図6.1に示す。大きく4つのブロックに分かれており、本研究で行っている①バース割当計画、陸側の問題を解決するための②荷役シーケンスの最適化、それからバース割当と荷役シーケンス最適化の問題をリンクさせるにあたり、その作業状況を反映した③荷役時間推定モデルを構築する。

①ではターミナル内の作業挙動はブラックボックスとしており、作業の混雑状況や荷役機器の投入台数等の変化による時間変動は考慮されていないという課題がある。

②ではコンテナ船の在港時間を計測するためにシミュレーションモデルを構築する

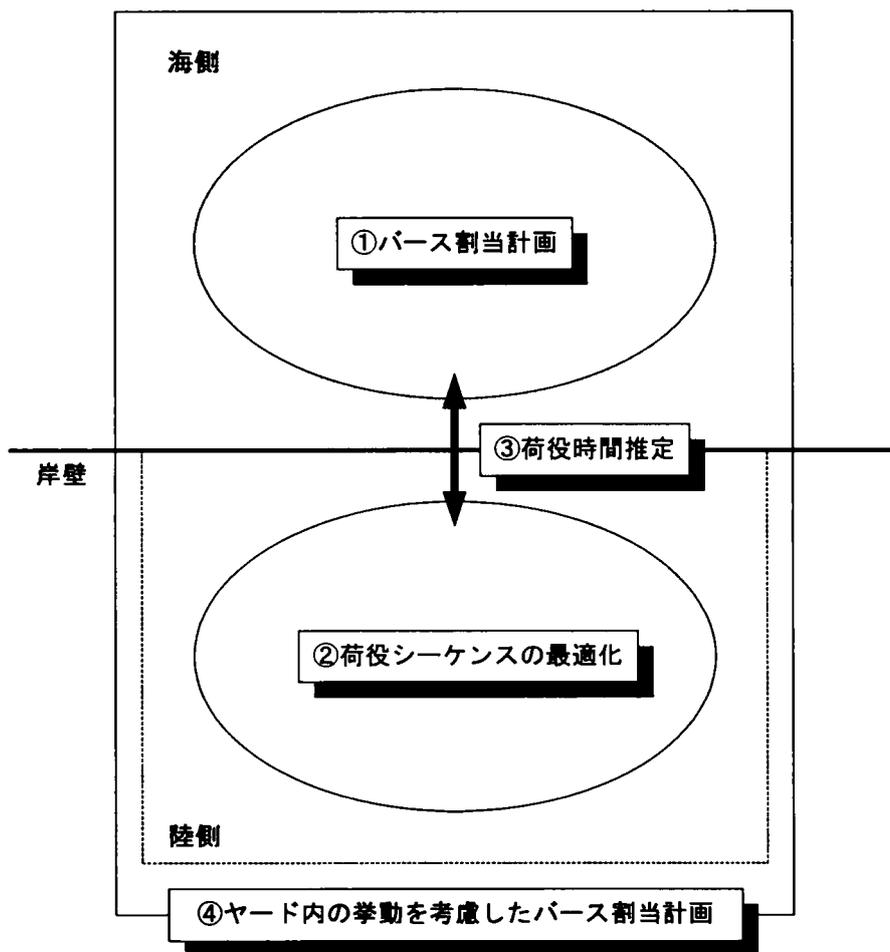


図6.1 研究全体の概念図

が、これを実行すれば荷役時間を計測できる。しかしながら、ここで計測されるのは当該船舶が係留されたバースのみでの時間であり、隣接する他のバースに仮に係留された場合にどうなるかを②のみでは算出できない。したがって、別途時間を予測するためのモデルが必要となる。なお、時間推定のために本来なら実績データを用いるべきであるが、現場での荷役作業内容の変更や荷役機器の投入台数を変動させることは不可能である。したがって、シミュレーションモデルの結果を用いる。

最終的に②の結果より荷役機器の必要台数を算出し、③より推定される荷役時間を用いて、コストの最小化を目的とした④ターミナル内作業の挙動を考慮したバース割当計画を実現する。このことによって、具体的なコスト削減効果を示すことができ、より現実の計画に適用できるものとなる。

次節以降では、②の研究の進捗状況を示すことにする。

### 6.3 荷役シーケンスの最適化<sup>16)</sup>

現在、日本国内主要港のコンテナターミナルの多くでは、ガントリークレーン(GC)、トランステナー(YC)およびトレーラーといった荷役機器の組み合わせによって荷役が行われており、貨物が近傍に蔵置されていない場合、荷役機器の投入台数および運用方法が荷役の能率や速度に大きく影響する。マルチユーザコンテナターミナルでは、船と蔵置場所が離れていると、距離が短い場合に比べてトレーラーの到着頻度が減少するため、GCのサイクルタイムが長くなり荷役時間が長くなる。したがって、荷役時間は船の係留位置とヤードでのコンテナの蔵置位置との関係によって異なる。もし、各船の係留位置に無関係に荷役時間を等しくするなら、船と蔵置場所が離れている場合には多くのトレーラーを投入すればよい。しかしマルチユーザターミナルでは、船のバースへの割当は動的に行なわれるため、ある割当状況ではトレーラーが大量に遊休状態になることもありうる。そこで現在のようにトレーラーをGCに固定的に割当てずに動的に割当てる、新たなトレーラーの運用方法を検討する。これにより船の係留位置によって多少の荷役時間のばらつきはあるかもしれないが、船と蔵置位置が離れていてもさほどトレーラー（ドライバーを含む）を増加させることなく船の荷役時間を短縮することができると考えられる。

#### 6.3.1 コンテナヤードにおける荷役システム

現在、世界のコンテナ港において様々な荷役方式が使用され、本船と蔵置ヤード間の荷役作業が行われている。そこでまず、現在使用されている荷役方式ならびに荷役機器の整理を行う。

主な荷役方式3つの特徴を述べる。

### (a) (オン)シャーシ方式

この方式では、コンテナは岸壁からトレーラーによってヤードまで搬送され、そのままの形で蔵置される。

利点：積み重ねて蔵置されないため、目的のコンテナをすばやく取り出せる。

欠点：多段積みできないため、広大なターミナルが必要となる。

### (b) ストラドルキャリア方式

岸壁にあるガントリークレーンと呼ばれるクレーンから受取ったコンテナは、これによりヤードまで搬送され、直接これ自身が荷役を行い蔵置することができる(図6. 2<sup>9</sup>参照)。

利点：機動性に富んでいる。

欠点：ヤードクレーン方式より段積みがあまりできず、蔵置能力が低い。

### (c) トランステナー(ヤードクレーン)方式

岸壁からトレーラーで搬送されたコンテナに対し、ヤードに配置されたこれによって蔵置場所までの積みおろしを行う(図6. 2<sup>9</sup>参照)。

利点：蔵置能力が高い。

欠点：重量物であるため、路面の整備・保守に費用がかかる。

種類としては、①タイヤ式トランステナー (Rubber-Tired Gantry crane, RTG)、②大型レール式門型クレーン (Rail-Mounted Gantry crane, RMG)、③レール式門型クレーン

(Rail-Mounted Gantry crane, RMG)、④天井走行式クレーン (Over Head Bridge Crane, OHBC) 以上4つがある。

### (d) ヤードクレーン方式でのピークル

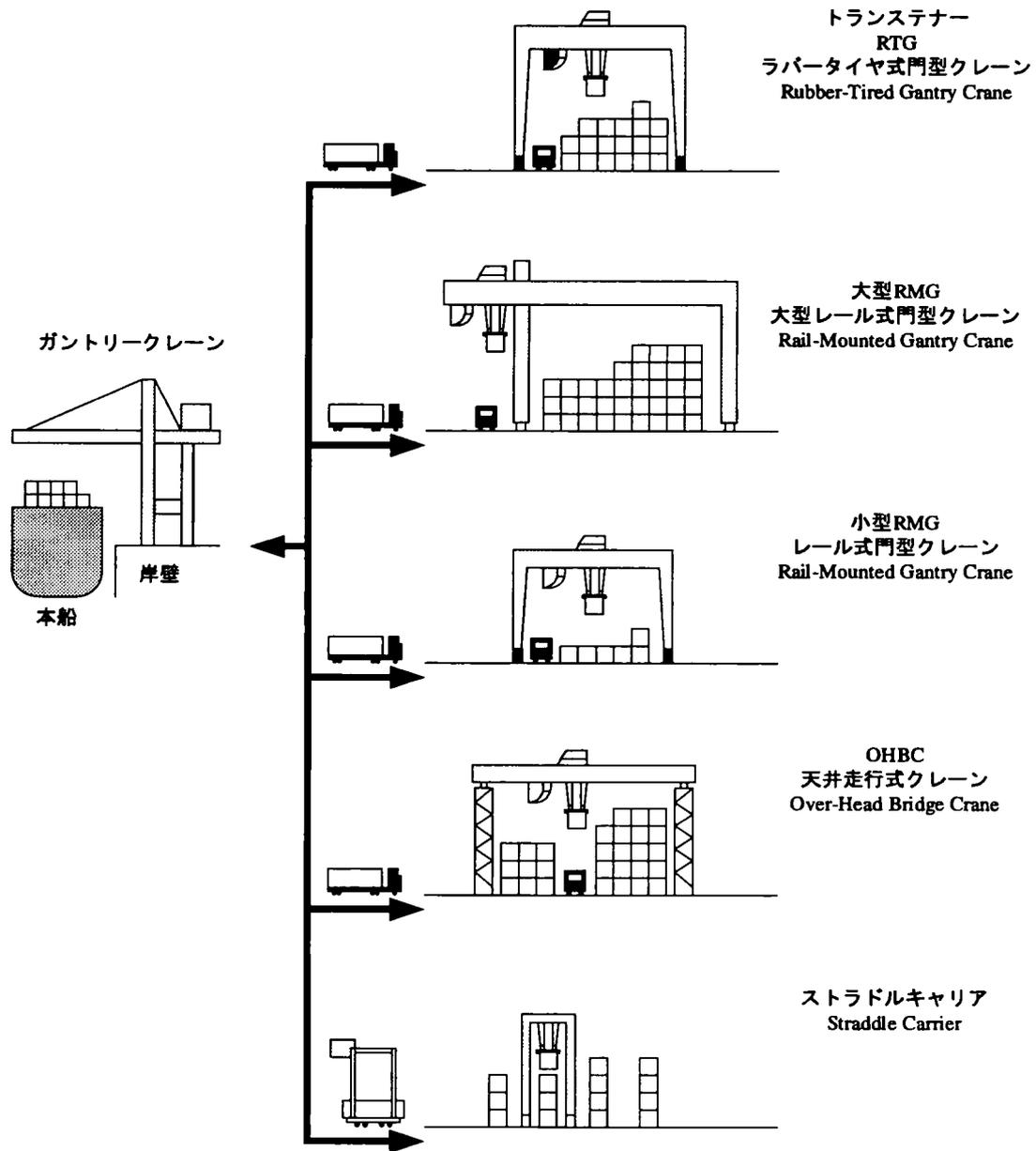
本研究では、日本でよく使用されている、蔵置能力の高いトランステナー方式のターミナルを想定するが、そこでガントリークレーンと蔵置ヤード間でコンテナを搬送するために利用されている搬送車両について述べる。

① 従来型トレーラー：40フィートコンテナなら1個、20フィートコンテナなら2個を同時に積載できる。日本では最も主流な搬送車両である。

② AGV (Automated Guided Vehicle)：ロッテルダム港などで使用されている、無人搬送車である。

③ Double-stack型トレーラー：シンガポール港で使用されており、上下2段に積載できる。

④ Longer combination vehicle (LCV)<sup>4)</sup>、Double or triple trailer (例えば、Tumpike double)：荷台部分が2台もしくは3台に連結したものである。現在ターミナルで使用されている例は明らかではないが、将来計画として使用予定が報告されている。



出典：海運、2000年4月

図6.2 ヤードクレーンとストラドルキャリア

⑤ マルチトレーラーシステム:キングストン(ジャマイカ)、ロッテルダム(オランダ)、バンクーバー(カナダ)で現在使用されている。トレーラーヘッドに対し、5~6台の連結シャーシを牽引して走行する。

以上の搬送車両があるが、本節では日本で一般的に使用されている従来型トレーラーについて検討する。

### 6.3.2 既往の研究

ターミナルシミュレーションを行った既存の研究として、奥山ら<sup>17)</sup>はコンテナの揚げ積み量と陸側からの搬出入パターンから貯留個数と搬出入個数を求めている。長尾ら<sup>13)</sup>は循環型待ち行列に対して、待ち合わせ理論とシミュレーションとの比較により理論解析の適用限界を明らかにし、コンテナ船の荷役に最適な荷役機器の組み合わせ数を決定している。三木ら<sup>10), 11)</sup>は隣接バースでGCを共同利用した場合の荷役能率の向上を検討している。文献 17)ではコンテナターミナル内の挙動はブラックボックスとしており、文献 13)では既存の運用形態を前提とし、運用形態の新たな提案はされていない。文献 10)と 11)ではGCの共同利用という点から新たな運用法を提案しているが、トレーラーの運用形態は既存のものである。

荷役スケジューリングに関する研究として、Ballisら<sup>11)</sup>はシミュレーション技法を使って外来トレーラーへのサービス向上を検討しており、Steenkenら<sup>20)</sup>はストラドルキャリアの作業シーケンスをヒューリスティクスにより決定している。これらはいずれもストラドルキャリア方式のターミナルを対象としている。Eversら<sup>2)</sup>はロッテルダムECTのAGV方式のターミナルでのAGV運行管理を行ない、Kimら<sup>8)</sup>はトランステナー方式のターミナルでテナーの作業シーケンスを決定している。しかし、トレーラーの運用方法改善を扱ったものはない。

我々が検討する方法はDial-a-Ride問題と異なるが、それに似ている。Dial-a-Ride問題に関する研究として、Psaraftis<sup>18), 19)</sup>は動的計画法、Mosheiov<sup>12)</sup>とHealyら<sup>5)</sup>はヒューリスティクスにより解を求めているが、小巡回(後に詳述する)が構成される場合には扱えない。Gendreauら<sup>3)</sup>は文献 5)、18)および19)と同じ条件でヒューリスティクスとタブサーチを用いている。鈴木ら<sup>21), 22), 23)</sup>は地点を訪問する順序に制約のある最短路に対し、グラフ理論を用いて解を求めている。文献 23)でこの問題がNP完全であることを示し、文献 21)と22)では2種類に定式化される緩和問題を用いて下界値を求めるアルゴリズムを提案している。これらは同一地点を2回以上通ることも可能としている。

以上の文献では本研究で前提とする、①すべての地点を必ずちょうど1回訪問し、②小巡回の構成を可能とする、という条件を満たしているものはない。

### 6.3.3 トレーラー運用の前提

本問題では、コンテナ船がマルチユーザターミナルのいずれかのバースに係留され、コンテナの陸揚げ船積み作業を行い、出港するという、ターミナルでの一連の荷役作業をモデル化する。コンテナターミナルで行われる作業は、主に本船荷役と搬出入の荷役に分けられる。より現実的なモデルを構築するには、これら両方をモデル化するべきであるが、ヤード内での荷役効率化のために一般にはコンテナの蔵置位置は輸入と輸出のブロックに区分され、入港船の到着時期により、さらにそれらのブロック内においても蔵置位置に区別がある。したがって、本船荷役のための荷役作業と搬入搬出のための荷役作業との間で影響し合うことは少なくなっている。このことから、本研究では本船荷役のみをモデル化する。わが国の港湾で多く導入されている荷役方式は多段積みにより狭い土地を有効利用ができる、トランステナー方式である。そこで本研究ではトランステナー方式を採用するターミナルをモデル化する。

#### (1) 現状の荷役形態

図6.3は専用形式の2バースにおいて、各バースに船1隻に係留されている状況での、GC、YCとトレーラーのそれぞれの作業サイクルを示している。揚げ荷役は、GCが本船から岸壁にいるトレーラーまでの荷役作業を行い、トレーラーがGC下からヤードのYCの所までコンテナを搬送する。そして、YCがトレーラーから蔵置場所までの荷役を行う。積み荷役は揚げ荷役の逆になる。日本では通常、当該船の作業で揚げ作業が終了するまで、積み作業は行われない。

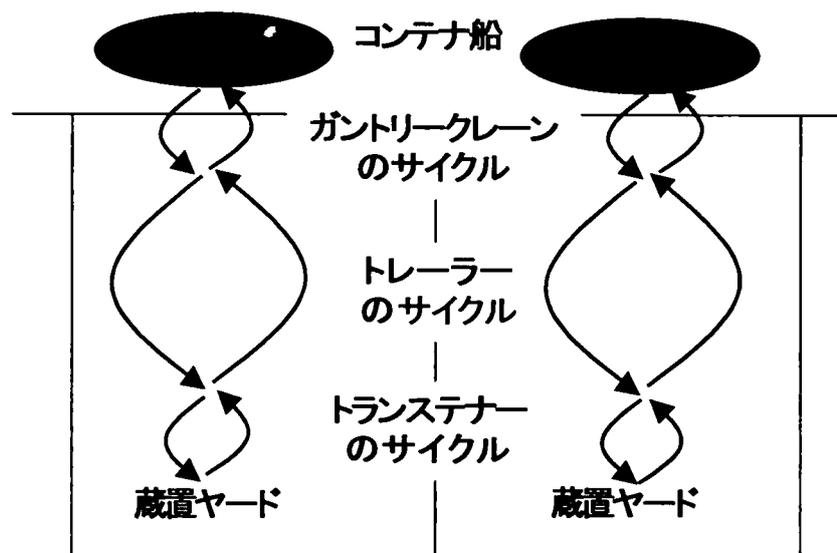


図6.3 既存の運用方法

現状の専用形式のターミナルでは、船の全長によってGCの投入台数が決定され、本船荷役で使用されるYCはGC1基に対し、およそ2台程度が投入される。またトレーラーは4台が特定のGC1基に割当てられ、担当するGCとYCとの間を往復する。

船とコンテナの蔵置場所が離れている場合、トレーラーがGCに対し固定、つまり特定のGCの担当で動くと、移動距離が長くなりGCの荷役速度が落ちると予想される。荷役速度を落とさないためには、トレーラーの投入台数を増やせば対処できる。しかし投入台数が増えると、それだけ人件費等も増えるためコストが高くなり、またヤード内の混雑の発生率も高くなって、反対に荷役速度を落とす原因にもなりかねない。

そこでこのようなトレーラーの固定的な動き方を動的にする。つまりトレーラーは特定のGCを担当してコンテナを搬送するのではなく、事前の荷役計画で決定されたトレーラーのスケジュールによって、動的にヤード内の荷役を行う方法を本研究では提案する。

## (2) 新たな運用方法の概念

トレーラーの新たな運用方法の概念について述べる。例えば図6. 4のような2バースを有するマルチユーザーターミナルにおいて、今、船Aが隣接バース直背の蔵置エリアへの揚げ作業中で、船Bが積み作業中であると仮定する。このとき、仮に船Aのあるコンテナをヤードへ搬送したトレーラーが、もとのGCの所に戻らず、近くにある船Bのコンテナを船BのGCまで運び、そこから船AのGCの所まで行き、次の揚げ作業を行うとする。この場合、固定運用とは異なってトレーラーは半分ですみ、また全体として固定運用より空荷の距離が短くなるため、より少ないトレーラーの投入台数で同じGCの荷役速度が維持できる。

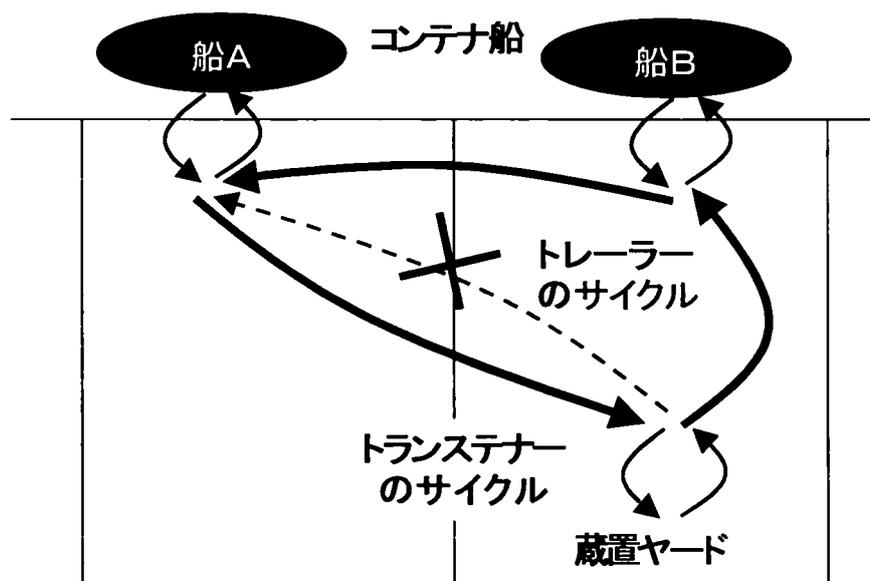


図6. 4 運用方法概念図

#### 6.3.4 シミュレーションモデルの概要

本研究では、汎用シミュレーション言語であるSLAM IIをシステム化した汎用シミュレーションモデル構築ツールVisualSLAMを用いて荷役シミュレーションモデルを構築する。VisualSLAMには、モデル内を動き回る要素を生成させる機能を持つノード、サービスを待つために並ぶ行列を表現するノード、その他のノードがあり、これらを組み合わせてシミュレーションモデルを構築することができる。

##### (1)モデルの構成

本モデルは大きく3つの部分から成る。まず1つめは、船の到着および荷役開始を決定する部分である。2つめとして揚げ荷役、3つめに積み荷役を行う部分がある。まず全体の処理の流れを以下に述べるが、 $f(i)$  はバース $i$ の現在の作業状況を表し、0~2までの整数変数で判別する。0はバース $i$ に係留船がなく、荷役作業が行なわれていないことを示しており、1は揚げ作業中、2は積み作業中を意味している。これはグローバル変数であり、シミュレーション中にどこで変数値が変化しても、その値を使って各バースの作業状況を判別することができる。

ステップ1：シミュレーション時間を設定し、各バース $i=1, \dots, B$  ( $B$ :対象バース数)の作業状況を $f(i)=0$  (作業なし)とする。

ステップ2：船が指数分布に従って到着する。

ステップ3：事前に計画された係留予定バース $i$ で他船が荷役作業中であるか判断する。作業中 ( $f(i)=1$ または2) ならステップ4へ、作業なし ( $f(i)=0$ ) であればステップ5へ。

ステップ4：作業終了まで待機し、他船の荷役作業が終了すれば( $f(i)=0$ になった時点で)ステップ5へ。

ステップ5：当該船係留バース $i$ での各荷役機器での揚げ積み荷役コンテナ数の更新して、当該バースを揚げ作業 $f(i)=1$ とし、これと他バースの作業状況から、トレーラーのルーチング (復路) を決定する。

ステップ6：当該バース $i$ の陸揚げ作業を行なう。

ステップ7：揚げ作業が終了 (処理コンテナ数 $\geq$ シミュレーション開始からの全体の揚げ荷役コンテナ数) すれば、当該バースを積み作業 $f(i)=2$ とし、トレーラーのルーチング (復路) を再決定する。

ステップ8：当該バース $i$ の船積み作業を行なう。

ステップ9：積み作業が終了 (処理コンテナ数 $\geq$ シミュレーション開始からの全体の積み荷役コンテナ数) すれば、当該バース作業なし $f(i)=0$ とし、トレーラ

一のルーチング（復路）を再決定する。

ステップ10：以下ステップ2～9がシミュレーション終了時刻まで繰り返される。

## (2) 荷役作業処理

本モデルはVisualSLAMというシミュレーションモデル構築ツールによって構築しているが、各荷役作業（揚げ作業、積み作業）をVisualSLAMで用いられるネットワーク図の形式を使って、実際のモデルを簡略化したものを図6.5に示し、上のステップ6（揚げ作業）の詳細について述べる。ステップ8（積み作業）についてはGCとYCの作業を入れ替えたものと考えればよい。

船がターミナルに到着し、バースに係留され荷役が始まると、図6.5の揚げ作業のGC、YC、トレーラーの「CREATEノード」から要素が生成される。GCの要素はGCのスプレッダーの動きを表し、岸壁から船内へ、船内から岸壁のトレーラーの所までのサイクルを図6.5のAの部分では示している。YCの要素はYCのスプレッダーの動きを表し、蔵置ヤードのトレーラーから蔵置場所へ、蔵置場所からトレーラーの所までのサイクルをBの部分で示している。トレーラーはGC下～YC下間の往路、復路をCの部分で表されている。

「QUEUEノード」は要素を待機させるために使用する。GCとトレーラー両方の要素がそれぞれの「QUEUEノード」に1つずつ到着すれば次の「MATCHノード」によって先に

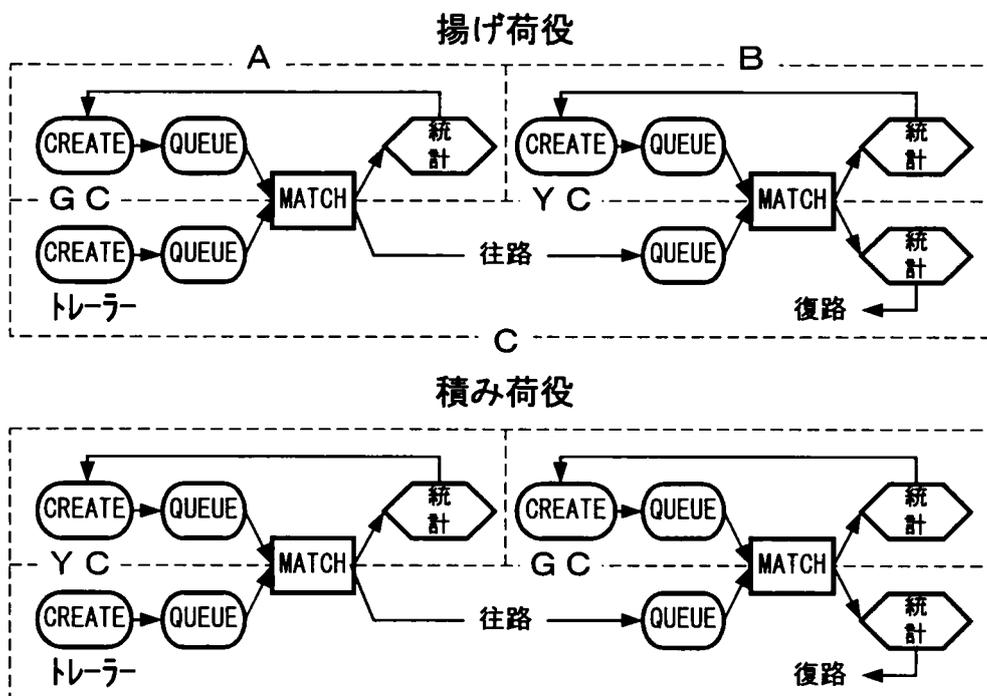


図6.5 荷役作業簡略図

進むことができる。もし一方のみ到着の場合は、到着した方の「QUEUEノード」に待機し、もう一方が到着するまで待つ。この待ち時間はカウントされ、統計として記録される。要素が両方揃えば、先に進み、GCは統計をとって先の「CREATEノード」に戻り、次の要素が生成される。これは次のコンテナ荷役のためのスプレッダーの動きを表す。トレーラーはGCのところからコンテナを受け取った後、YCの所まで進み「QUEUEノード」でYCと両者が揃うまで待つ。つまり、往路は「MATCHノード」～「QUEUEノード」の間であり、復路は、YCとトレーラーの両者が揃ってコンテナをYCに渡した後、統計をとり、先に述べたステップ5で決定されるルーチングに従って、揚げ作業中のGCもしくは積み作業中のYCのいずれかのトレーラーの「CREATEノード」へ向かう。

図6.5のA、B、Cの部分は各船の処理コンテナ数が設定値に達するまで続けられ、達したら積み作業へ移り、GCとYCが入れ替わった作業順序で同様の作業が行なわれる。復路の行き先を常に同じトレーラーの「CREATEノード」に指定すれば、固定運用のモデルになる。

### 6.3.5 トレーラーのルーチング

トレーラーを動的に運用するには、あるGCまたはYCへのコンテナ搬送（往路と呼ぶ）後、どのGCもしくはYCのところへ行くべきかの決定を行わなければならない。つまり往路は、事前に計画されるヤード内の蔵置スケジューリングによって、ヤード内または船内のコンテナ蔵置場所が決定される時点で自動的に決まる。なおコンテナの蔵置場所は、荷役機器の余分な移動や荷繰り回数をなるべく少なくするように決定されている。反対に復路については、空荷での移動であるため、できるだけその走行距離が短くなるようにルーチングを決定する必要がある。そこでトレーラーの復路決定モデルを構築する（実際には、往復を一体としたルートを決める）。

#### (1) ルーチング計画の概要

本研究で想定しているルーチング計画は図6.6のような計画で用いることにする。

図6.6は横軸にバースA、BおよびCが連続バースとして供用され、縦軸に時間軸をとっており、船1と4がバースAに、船3、5、7がバースBに、船2と6がバースCに係留され、バースを占有している状態を示している。一般に本船荷役は、船からヤードへの揚げ荷役が終了後、ヤードから船への積み荷役を行うことから、図中において点線で揚げと積みを区別している。この図のように、時々刻々とターミナル全体の作業状況は変化していくが、本ルーチング計画はある作業組み合わせが変化し直後に計画し、次の変化まで同じルーチングで運用を行う。例えば、上のルーチング計画①の太線の時点ではバースAでは船1の作業状況が揚げから積み作業に変化しているのがわかる。そこでこの時点で計画を行うが、このときバースAが積み作業、バースBが揚げ作業、バースCが揚げ作業という組み合わせ

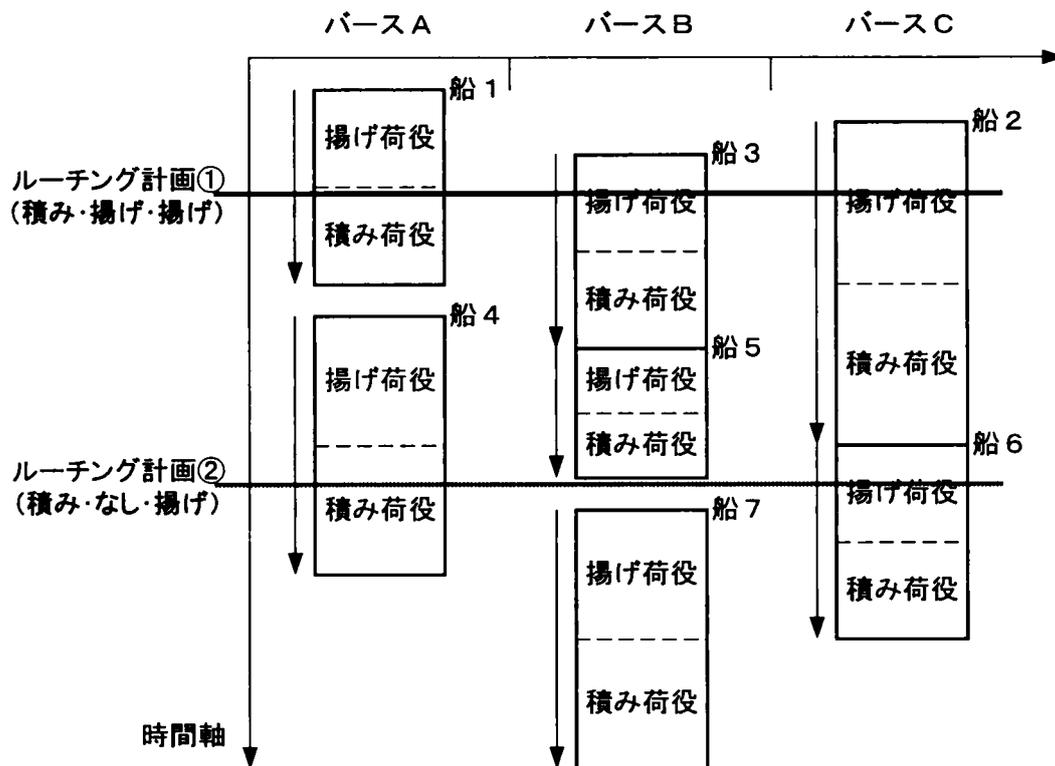


図6.6 計画の概要

でターミナル内におけるコンテナの移動の往路が決まり、これにより計画を行う。また、ルーティング計画②の太線の時点ではバースBで船5が積み作業を終了したため、作業なしとなり、バースAが積み作業、Bが作業なし、Cが揚げ作業という組み合わせで計画する。

マルチユーザターミナルで荷役している船の集合を考え、その状態ごとにトレーラーのルーティングを考える。図6.7は供用4バースにおいて、各バースに船1隻が係留される場合を示している。各船の係留位置とその船に荷役されるコンテナの蔵置ヤードは○印で表している。岸壁側の○印とヤード側の○印の間の矢印は往路の向きを示しており、「ノード1→7」はノード1のバースに係留された船のコンテナがノード7の蔵置ヤードに揚げ荷役されていることを意味している。また「ノード6→3」はノード6のバースに蔵置されていたコンテナがノード3に係留される船に積み荷役されることを示している。トレーラーが他の荷役機器にコンテナを受け渡しする場所(図6.7の○印)を、船ごとに1つのノードとして考える。トレーラーによるGC→YC、YC→他のYC、YC→GC、GC→他のGCの移動経路をアークと考えると、本問題は往路が与えられていて、復路を決定するルーティング問題となる。

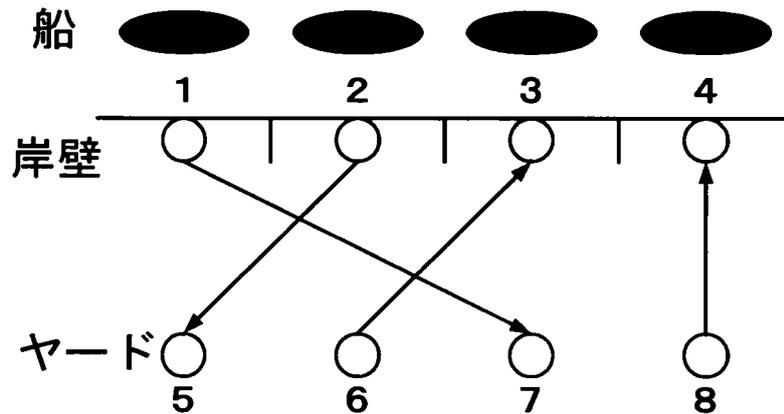


図6.7 起終点ノードと往路

## (2)問題の前提

本問題の前提条件は、以下のようになる。

- 往路は既知とする
- 小巡回（すなわち、すべてのノードを1つの大きな巡回路で訪問されない）が複数形成されても構わない
- 各船のコンテナはいずれかのバースの背後地にまとめて蔵置される
- 各トレーラーにはサイズに関わらず、コンテナは1個のみ積載可能とする

以上の前提条件を満たすために、本問題を先行順序制約のある割当問題として考える。なお、Dial-a-Ride問題とは先行順序制約があり、なおかつすべてのノードを必ず1つの巡回路（ハミルトンサイクル）で訪問される問題であり、本問題とは異なる。

## (3)定式化

本問題は式(6.1)–(6.5)のように定式化される。ここで、

$N$  : ノード全体の集合

$i, j (= 1, \dots, n) \in N$  : ノード番号

$S \subset N$  : 往路（コンテナ積載での移動）の始点集合

$C_{ij}$  : ノード  $i$  と  $j$  の間の距離

$T^i$  : 地点  $i$  を始点とする往路の終点

$x_{ij}$  : もしノード  $i$  からノード  $j$  へトレーラーの移動があれば1、なければ0である0-1整数変数

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} C_{ij} x_{ij} \quad (6.1)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in N \quad (6.2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \quad (6.3)$$

$$x_{iT^i} = 1, \quad \forall i \in S \quad (6.4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in N \quad (6.5)$$

目的関数は総走行距離の最小化であり、制約式(6.2)はトレーラーがそれぞれのノードに必ず1回到着することを意味し、式(6.3)は各ノードからトレーラーが必ず1回出発することを示している。式(6.4)はある1つの往路における始点に対し1つの終点が割当てられていることを示している。

#### (4) 解法

本問題は先行順序制約のある割当問題であり、多項式オーダーの計算量で解けるアルゴリズムが存在することは証明されていない。つまり供用バース数が増え、先で示したノード数が多くなると解くことが困難になる。また現実にあるような、同時期での1バースへの複数船の係留を考慮すると、同時荷役隻数が増えノード数が多くなる。例えば4バースでも、小型船なら最大10隻程度係留できると考えられ、この場合、解の組み合わせが多くなり総当たり法では解くことができない。そこで、GAを用いた近似解法を提案する。またGAを使用する理由として、最終的に複数の代替案が得られるからである。ここでは最善解の結果によるルーチングをシミュレーションモデルで実行させた結果のみを示すが、現実に使用する場合は代替案中からそのとき意思決定者が最適であると判断するルートを選択すべきである。したがって、こうした理由からもGAが適当であると判断した。GAの全体の流れを図6. 8に示す。

#### (5) 個体表現

トレーラーが岸壁側GCおよびヤード側YCとコンテナ受渡し場所をノードとして表現し、トレーラーがノードを巡回する順序を1次元配列で示す。往路は既知としているため、往路の始点と終点のペアを1つの遺伝子として表現した「往路遺伝子」と、0または-1で表現し

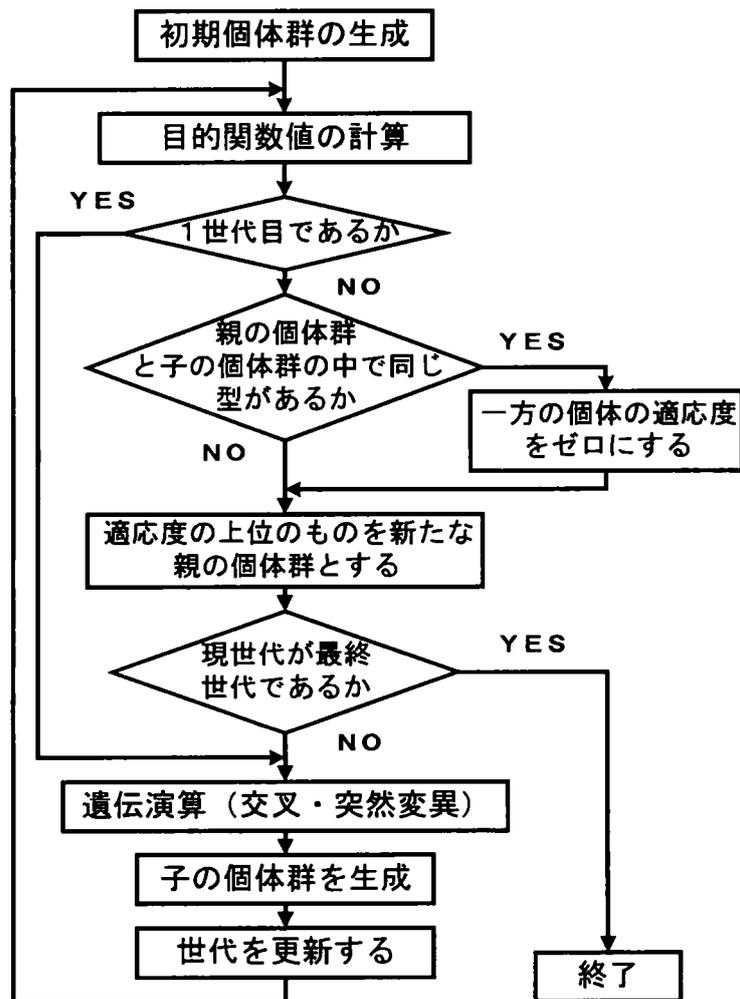
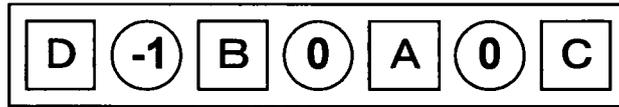


図6. 8 GAのフロー

た「小巡回決定遺伝子」の2種類の遺伝子をその1次元配列に交互に入れる。小巡回決定遺伝子の0は、前後に置かれた往路遺伝子を結合し、-1は前後の往路遺伝子を分割して小巡回を形成し、左から順に巡回することになる。

先に示した図6. 7の例を使って説明するが、このルーチングを求めるために図6. 9のような遺伝子型を生成させる。起終点ペアを示す1つの文字列で表現した往路遺伝子A=(1, 7)、B=(2, 5)、C=(6, 3)、D=(8, 4)と、0または-1で表現した小巡回決定遺伝子を交互に1次元配列にランダムに入れ、図6. 9のような遺伝子型が生成される。

図6. 9が仮にGAの処理の中で最終的に得られた解であったとすると、ノード番号を用いた配列表現にすると、図6. 10のようになる。小巡回決定遺伝子は0なら前後の往路遺伝子を結合し、-1であれば分割するため、ルートは往路遺伝子DとBの前後で分割され、最終的



往路遺伝子 (起終点ペア)  
 A=(1,7), B=(2,5), C=(6,3), D=(8,4)

小巡回決定遺伝子  
 0 なら、前後の往路遺伝子結合  
 -1 なら、小巡回生成

図6. 9 遺伝子型

配列表現

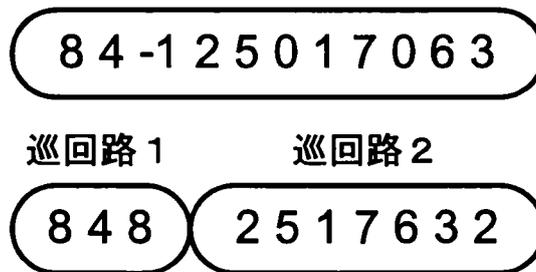


図6. 10 ノード番号による配列表現

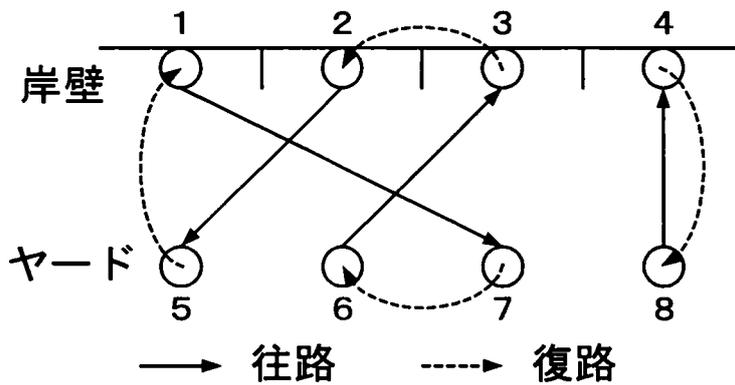


図6. 11 巡回路の一例

に図6. 11の巡回路が形成され、復路を示す点線が決定される。

## (6) 遺伝演算

遺伝演算は次のようにするが、個体群サイズは10、世代数は50とする。

- a. 選択：ルーレット戦略（適応度に比例した選択確率でペアリングを決定する）＋エリート保存選択戦略（良い解を次世代へ継承する）
- b. 交叉：致死遺伝子が生成されないことで知られている、部分一致交叉（交叉確率0.6）
- c. 突然変異：突然変異率0.05により突然変異が起きるか否かを決定するが、起きるとき遺伝子を1つランダムに選択し、往路遺伝子であれば他の往路遺伝子をもう1つ選択して入れ替える。ランダムに選択した遺伝子が小巡回決定遺伝子であり、それが0なら-1に、-1なら0に変換する。

### 6. 3. 6 シミュレーション実験

以下の2ケースにおいてトレーラーの投入台数を変化させて、従来行なわれている固定運用と我々が提案する動的運用のシミュレーションを行い、両運用方法の差を検討する。

ケース1：供用2バースにおいて、各バースにコンテナ船1隻ずつが係留され、各バースGC2基、YC4台（全体でGC4基、YC8台）で荷役作業を行う

ケース2：供用4バースにおいて、各バースにコンテナ船1隻ずつが係留され、各バースGC4基、YC4台（全体でGC8基、YC16台）で荷役作業を行う

次に述べる分布形の作業時間を用いて時間データの乱数の種を変えて5回シミュレーションを行った。

#### (1) 使用データの概要

シミュレーションで用いるデータは、各荷役機器の荷役作業時間と船の到着間隔である。

荷役作業時間は、1997年11月18～22日に神戸港の六甲アイランドのコンテナターミナルで荷役作業を行ったコンテナ船に対する、各荷役機器の待ち時間を除いた作業時間である。また、船の到着間隔は1997年2月の1ヶ月間に神戸港に入出港したコンテナ船から得られたものである。

船の到着間隔は実績を分析した結果、一般に言われるように指数分布に従っていたので、その分布関数で発生させることにする。荷役作業時間は、各荷役機器に対しコンテナ積載での移動と空荷での移動とに分けて、それぞれの作業時間の分布形を検討した。表6. 1に示すような、 $k$ 次のアーラン分布および正規分布に従うことがわかったので、それぞれの

分布関数で作業時間を発生させることにする。コンテナは船内およびヤード内で蔵置場所が異なるので、分布関数はその違いを表現している。

なお、各船の荷役コンテナ数は揚げ積み別にそれぞれ200~300の一様乱数により与え、各船にGC2基使用するため、それぞれ半分の量の荷役を行う。

表6.1 各荷役機器の分布関数と平均所要時間

	往路		復路 (空荷)	
	次数 $k$	平均値 (分)	次数 $k$	平均値 (分)
GC陸揚げ	16	0.8	15	0.7
GC船積み	正規分布	0.8	35	0.6
YC	19	1.2	6	0.9
トレーラー	28	1.5	12	1.5

## (2) 本事例におけるトレーラーのルーチング

1週間に到着する船、ケース1では20隻、ケース2では40隻を対象とし、各船の荷役コンテナの蔵置ブロックの位置は船ごとに任意に決定されるべきであるが、VisualSLAMでこの蔵置パターンの変化を考慮するにはパターンごとにプログラムを作らなければならなくなるため、今回は以下に示す蔵置位置の1パターンのみとしている。ただし、ブロック内のコンテナの蔵置位置は乱数により上で示した分布形により生成している。

ケース1 (供用2バース) の場合：当該船の係留バースと隣り合うバースの背後ヤードに蔵置される

ケース2 (供用4バース) の場合：バース1~4がこの順で隣接しているとき、バース1~3に係留される船はそれぞれ隣り合うバース2、3、4に、バース4の係留船のコンテナはバース1の背後ヤードに蔵置される

本事例では各バースに1隻のみ係留可能であり、最大2隻~4隻が同時に作業する。そのため、本事例のように問題の規模が小さい場合、総当り法を用いて最適解を求めることができる。そこで総当り法で求めた厳密解と比較したところ、提案した解法によりすべて最適解が得られており、このルーチングを用いてシミュレーションを行った結果を以下に示す。なお、各巡回路でのトレーラー数は本来なら各巡回路長比によって分配すべきであるが、VisualSLAMでは柔軟にその数の増減コントロールができないため、投入トレーラー数/全往路ペア数×当該巡回路内の往路ペア数としている。

### (3)シミュレーション結果

1週間のシミュレーションを行なって、GCにおけるコンテナ1個あたりの平均サイクルタイム（待ち時間+作業時間）を求めたのが図6. 12と図6. 13である。動的運用のトレーラーは投入台数をケース1では8~20台、ケース2では16~40台まで1台ずつ変化させ（図中で太線の折れ線）、固定運用のトレーラーは各GC1基に対し2~5台、つまり全体でケース1なら8、12、16、20台、ケース2なら16、24、32、40台を投入した場合（マーカー別の直線）の荷役時間を示している。

まず、運用方法別に投入台数による荷役時間の変化をみると、固定運用では台数を増やせばGCの待ち時間が減るため作業時間が短縮できる。動的運用でも固定とほぼ同様の傾向がみられるが、ケース1では10~12、14~17、19~20のように台数を変化させても作業時間はほとんど変わらないときもある。またケース2では少しずつではあるが、台数が増えると作業時間は短縮される傾向がある。

また固定と動的を比較すると、ケース1の場合固定運用で20台投入での作業時間は、動的運用の19台とほぼ等しくなっており、動的運用にすると約1台減らせる。さらに固定運用で16、12台投入する場合には、動的運用でそれぞれ14、10台の荷役時間とほぼ等しくなっている。したがって2バースの場合、動的運用なら固定運用より1~2台程度少なくとも、同程度の荷役時間で済むことがわかる。ケース2の場合においては、固定運用で40台投入での作業時間は、動的運用では36台でほぼ等しくなっている。さらに固定運用で32と24台投入する場合には、動的運用でそれぞれ29、22台で同じ荷役時間が達成されている。したがって、動的運用を行えば固定運用より2~4台程度少なくとも、同程度の荷役時間で済むことがわかる。

各船にとって荷役コストを低く抑えるためには係留時間の短縮が重要となってくる。そのため、荷役が効率的に行なわれているかどうかを判断する基準として、各船の荷役開始から出港までにかかる在港時間の短縮が考えられる。そこで動的運用と固定運用の在港時間をケース1では投入台数8、12、16、20台の4種類、ケース2では16、24、32、40台の4種類で調べたのが図6. 14、図6. 15である。ここでは、各船に2基のGCを稼働させたため、2基のうち荷役終了の遅い方の荷役時間がその船の在港時間である。なお、データごとに各船の荷役コンテナ数は異なるため、比較の都合上、5回のうちのある1回のシミュレーションにおける在港時間別の隻数を示す。なお他の4回の結果も同様の傾向である。図の横軸は2時間ごとの時間幅、縦軸は全隻数に対する割合として隻数を示している。

当然のことであるが、投入台数が増えれば在港時間が短くなっているのがわかる。また固定運用より動的運用の方が、ケース1では各船ともおよそ2時間程度、ケース2ではそれ以上荷役が早く終了しているが、ケース2での16台の場合固定運用では47時間程度かかっている船が動的運用にすることで26時間前後に抑えられている。したがって、単純に台数を増やせば荷役速度を上げられるが、台数を増やさなくても運用方法を改善することで、

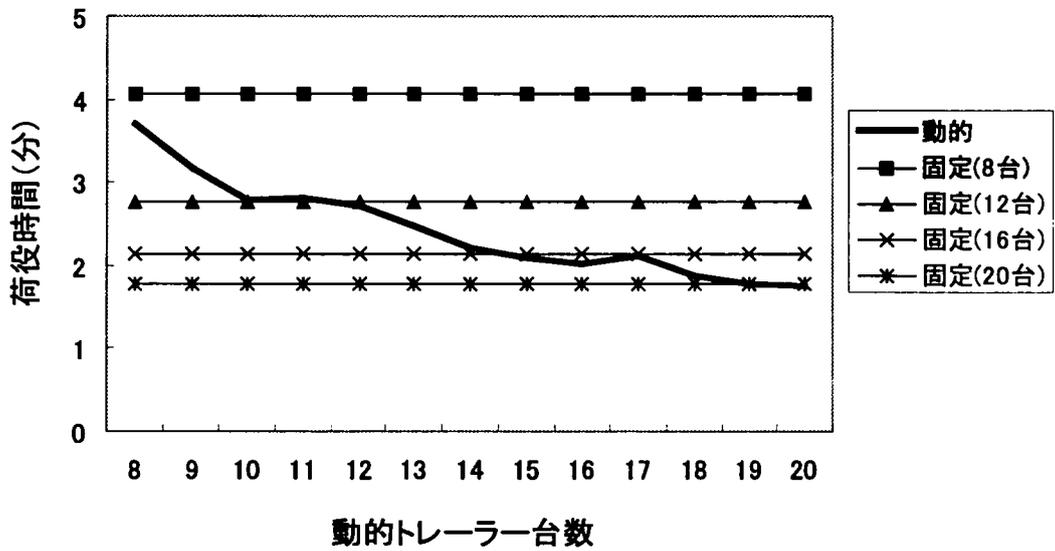


図6. 12 供用2バスにおけるGCの平均サイクルタイム

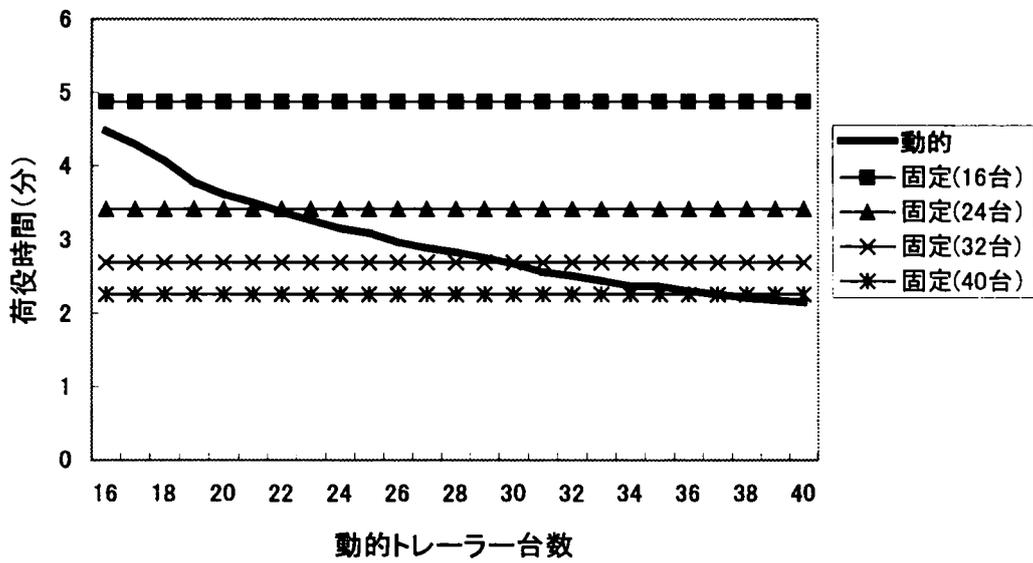


図6. 13 供用4バスにおけるGCの平均サイクルタイム

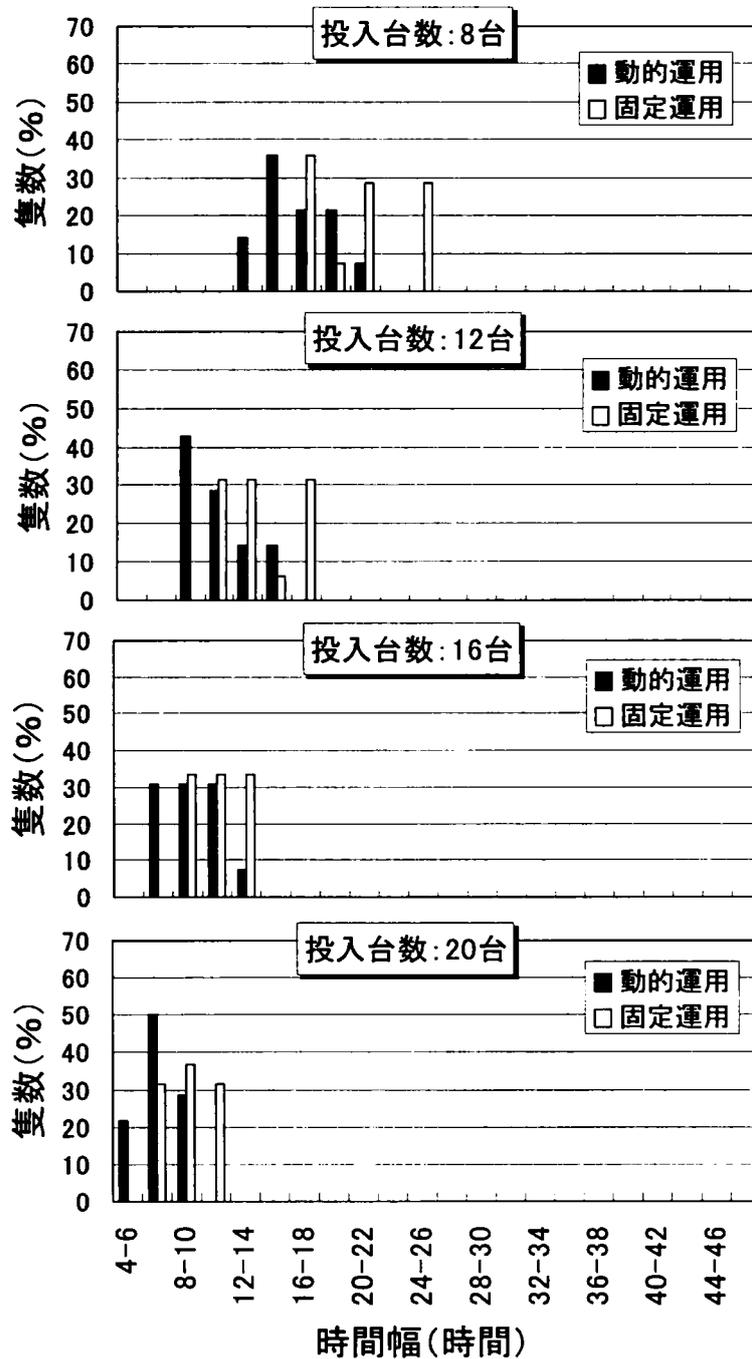


図6. 14 供用2バース(ケース1)での各船の在港時間

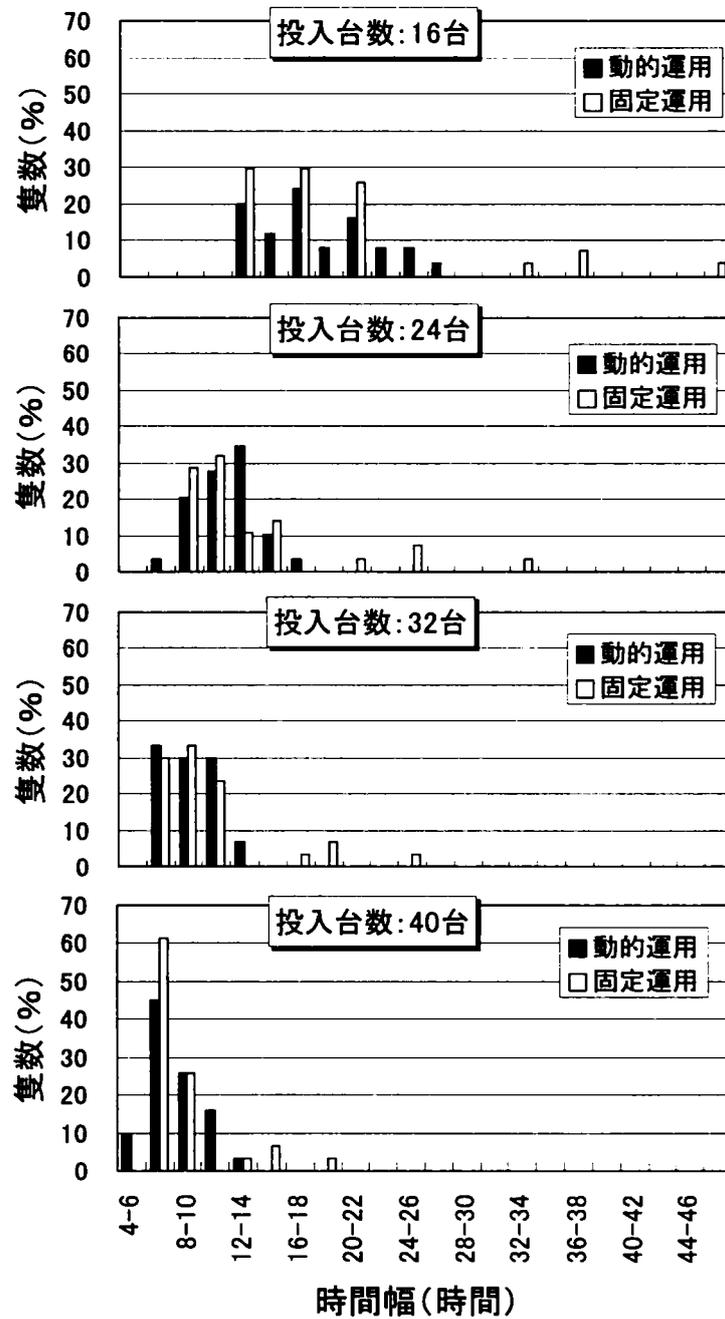


図6. 15 供用4バース(ケース2)での各船の在港時間

現状の荷役速度を十分維持できるといえる。

さらに投入台数の変化による各船の在港時間のばらつきをみると、ケース1において投入台数が少ない8台の場合では、各船の在港時間は固定運用で15～25時間、動的運用で13～21時間である。一方、台数が多い20台の場合では、固定運用で7～11時間、動的運用で5～9時間となっており、両運用方法とも投入台数の少ないときに時間のばらつきが大きくなっているのがわかる。しかし動的運用の方が固定運用よりも比較的ばらつきが小さい傾向がみうけられる。ケース2では16台の場合、固定運用で13～47時間、動的運用で13～27時間となっており、動的運用を行うことによって各船の在港時間のばらつきが小さくなり、均等化される傾向にある。台数が多い40台の場合でも、固定運用で7～19時間、動的運用で5～13時間となっており、在港時間のばらつきは、16台の場合ほどではないが動的運用の方が小さい。この傾向も2バースの場合と同じである。

#### 6.4 結語

本章では本研究の今後の展開と残された課題を整理し、マルチユーザターミナルの導入時にヤード内荷役運用上発生するであろう問題点を解決するために、国内では主流のトランステナー方式のコンテナターミナルにおける本船荷役トレーラーの新たな運用方法を検討した。

- ① 供用2バースと4バースの2ケースでシミュレーション実験を行ったが、提案した運用方法を用いればトレーラーの投入台数を現状より最低1割は削減できることが明らかとなった。
- ② また荷役開始から出港までにかかる在港時間については、各船の係留位置と対象コンテナの蔵置ヤードとの位置関係によって異なるが、動的運用を行えばトレーラーの投入台数を増やさなくても、固定運用に比べて2バースなら2時間程度、4バースであればそれ以上、在港時間を短縮できる船も存在することが明らかとなった。また各船の在港時間のばらつきも動的運用の方が小さいことがわかった。

以上のことから、提案した方法を使ってトレーラーの運用方法の改善を行えば、ヤード作業が複雑であるマルチユーザターミナルにおいて、従来の固定運用方式よりもトレーラー数が減らせ、その分にかかる人件費等のコストも含めて、港湾コスト低減に寄与するといえる。

## 第6章に関する参考文献

- 1) Ballis, A. and Abacoumkin, C., A container terminal simulation model with animation capabilities, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.30, No.1, 37-57, 1996.
- 2) Evers, J. J. M. and Koppers, S. A. J., Automated guided vehicle traffic control at a container terminal, *Transportation Research Part A*, Vol.30, No.1, 21-34, 1996.
- 3) Gendreau, M., Laporte, G. and Vigo, D., Heuristics for the travelling salesman problem with pickup and delivery, *Computers & Operations Research*, No.26, 699-714, 1999.
- 4) Harrison, R. et al., Mega-containerships and mega-containerports in the Gulf of Mexico : A literature review and annotated bibliography, Texas Department of Transportation, May 2000.
- 5) Healy, P. and Moll, R., A new extension of local search applied to the dial-a-ride problem, *European Journal of Operational Research*, No.83, 83-104, 1995.
- 6) 第3章, 文献 4).
- 7) 第3章, 文献 5).
- 8) Kim, K. H. and Kim, K. Y., An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals, *Transportation Science*, Vol.33, No.1, 17-33, 1999.
- 9) 増田真博, コンテナターミナルの今後, *海運*, 35-38, 2000. 4.
- 10) 三木楯彦, 港湾利用の効率化, *日本航海学会誌NAVIGATION*, No.132, 10-17, 1997.
- 11) 三木楯彦, 久保雅義, 貢春龍, 隣接する複数のコンテナターミナルの性能評価, *日本航海学会論文集*, No.95, 331-341, 1996.
- 12) Mosheiov, G., The travelling salesman problem with pick-up and delivery, *European Journal of Operational Research*, No.79, 299-310, 1994.
- 13) 長尾義三, 則武通彦, 多重リンク系の輸送動態に関する一考察, *土木学会論文報告集*, No.212, 77-88, 1973.
- 14) 第4章, 文献 5).
- 15) 第4章, 文献 7).
- 16) 西村悦子, 今井昭夫, マルチユーザコンテナターミナルにおける動的ヤードオペレーション, *土木計画学研究・論文集*, No.17, 721-728, 2000.
- 17) 奥山育英, 中井典倫子, 久保重美, コンテナ埠頭の規模および荷役方式に関する考察, *港湾計画研究所報告*, Vol.10, No.3, 159-236, 1971.
- 18) Psaraftis, H. N., A dynamic programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem, *Transportation Science*, No.14, 130-154, 1980.
- 19) Psaraftis, H. N.,  $k$ -Interchange procedures for local search in a precedence-constrained routing problem, *European Journal of Operational Research*, No.13, 391-402, 1983.
- 20) Steenken, D., Henning, A., Freigang, S. and Voss, S., Routing of straddle carriers at a

- container terminal with the special aspect of internal moves, OR Spektrum, No.15, 167-172, 1993.
- 21) 鈴木久敏, 野村重信, 訪問順序制約のある最短路問題, 第7回数理計画シンポジウム論文集, Vol.7, 127-142, 1986.
- 22) 鈴木久敏, 野村重信, 訪問順序制約のある最短路問題—運搬経路計画問題に対する統一的視点—, 日本経営工学会誌, Vol.38, No.5, 320-325, 1987.
- 23) 鈴木久敏, 野村重信, 訪問順序制約のある最短路問題の解法, 日本経営工学会誌, Vol.38, No.5, 326-333, 1987.

## 第7章 結論

本研究は、国際競争力が低下している日本国内主要コンテナ港湾に対し、コスト低減を目標としたバース集約を実現するために必要なコンテナバースの運用方法を提案した。具体的には、複数の隣接するバースを共同利用し、そこで必要となるコンテナ船の効率的な係留位置の決定方法を検討した。

まず第2章において、国内主要コンテナ港湾の現状を把握するために、阪神淡路大震災の前年である1994年から1999年までの6年間におけるコンテナ取扱量の推移をみた。ここでは世界上位20位までに国内主要港は東京、神戸、横浜がランクインしているが、年々神戸、横浜は順位を落としていることが明らかとなり、国際的地位は相対的に低下していることを確認した。

次に国内主要港の港湾関連コストが高いことがハブ機能低下の原因と指摘されているが、具体的に世界の他港と比べてどれだけコストが高いかをみた。傾向としては近隣諸国であるシンガポール、釜山、高雄より約1.5~2倍程度になっていることがわかる。さらに港湾関係費の内訳より、貨物量に関係なく入港時に必ずかかる費用を除いたターミナル側のコストは全体の約7割であることが示され、この部分がどれだけバース集約できるかによってコストに反映される部分であることを示した。

国内港湾が使いにくい港湾とされるもう1つの理由に、24時間荷役が実施されていないことが挙げられている。そこで世界の主要港湾の24時間荷役実施体制について調べた。本船荷役についてはアメリカ国内港湾と名古屋を除く日本国内港湾で実施されておらず、近隣アジア諸国の主要港湾では完全な24時間体制になっていることがわかった。

さらに国内主要港湾における日曜夜間荷役の実態を調べた。割増料金が適用される所とそうでない所で差が出ている。時間帯については東京、千葉、清水、博多で18:00以降なら半数以上、24:00以降でも約3割程度が荷役を実施しているが、神戸港では18:00以降で約1/3、24:00以降で17%程度が実施しているに過ぎないという実態があり、主要港間でも実施体制に差があることが明らかとなった。

次に神戸港の公社ふ頭を対象に、共用バースのうちどれだけのバースを同時期に使用したかを各バース数に対する占有時間として求めた。その結果、1996年当時で全バース数を同時に使用するのは1ヶ月間のうち9時間、全体の約1%に過ぎず、2~4バースを同時に使用するケースが多くあったのに対し、2000年当時では全バース使用するケースはなく、全バースが空いている状態が全体の1/4もあることが明らかとなった。

以上の問題を解決するための方策を整理した。まず平成12年11月に港湾運送事業法の改正が行われ、事業免許制を許可制に、運賃・料金が許可制から届出制に規制緩和されたことを述べた。さらに事業者、船社、荷主に対し行われたアンケートにより、荷役料が下

げるべき港湾関係コストとして要望が高いことが示された。また内外航バースの一元管理、およびバース集約を実現するために係留位置の有効な配置が必要であることを示した。

24 時間荷役実施策については、法改正により体制としては整っているが、割増料金の適用されている所があるため、料金のフラット化を実現する必要がある。

低利用ターミナルの高度利用のためには、港湾管理者、船社、港湾運送業者等各方面からバース集約とそれに伴う一部の用途転換が意見として出されていることを示した。

本研究ではマルチユーザターミナルを日本の港湾に導入することを考えるが、まずその概要を示した。次に管理運営主体が異なる 4 つの方式を紹介した。どの方式を用いるかでコスト計算の値は異なってくると考えられるが、本研究ではその前段階を想定し、運用方法のみを提案する。このようなマルチユーザターミナルでは、トランシップ貨物を扱うときに本船もしくはフィーダー船のいずれかに対し荷役コンテナが近くに蔵置されないこともあることからこの問題を解決できるように船の係留位置決定方法の必要性を述べた。

バース最適割当に関する既往の研究としては、アメリカの軍港を対象としたもの、石油タンカーを対象とし、石油出荷計画問題の中でバース割当を行ったものがある。また製鉄所の鋼材出荷計画、在来貨物を扱ったもの、コンテナ港湾を扱ったものについて紹介した。ほとんどが FCFS ルールを満足するようにヒューリスティック手法やシミュレーションで解を求めている。しかしながら、本研究はあえて FCFS ルールを制約に設けていないのが特徴である。このことにより、先に到着した船が後に係留されることもあるが、事前に当該船舶に係留開始時刻を知らせることができれば、航行スピードを落として係留可能時刻に到着すれば良い。このことによって、燃料費を抑えることも可能である。

この種の研究が実施されている例は比較的少なく、マルチユーザターミナルが存在するオランダ等において行われていない。そのためこの研究を必要としている環境を調べた。結果としてバースが不足している所では必要とされており、こうした研究もされていることがわかった。

第 3～5 章ではバース集約を目的として、船の係留バースを決定する方法を示した。

第 3 章では各バースに同時期には 1 隻のみしか係留できないことを条件として、総在港時間が最小になるように船の係留バースと係留順を決定する方法を提案した。ここでは制約式の一部を緩和した問題を解くことで最悪の解の精度を示すことができる、ラグランジュ緩和問題による劣勾配法 (LR) を用いて検討した。本章で得られた成果は、次のようになる。

- ① 実行可能解を求めるために、3 つの近似解法を提案した。具体的には、緩和問題の解において到着前に係留されるように割当てられた船に対する処理として、F1 (割当てられたバース内で到着時刻まで係留開始時刻を後ろにずらす)、F2 (割当てられたバース内で係留順序を入れ替える)、F3 (他のバースも含めて係留順を入れ替える) を検討した。割当変更の自由度が F1、F2、F3 の順で大きくなっていくため、F3 が最も良く、

次に F2、F1 と順に解の精度が良くなると予想したが、結果としては F2 の解の精度が最も良く、CPU 時間については大差はないもの F2 が最も時間が短くてすむ傾向にあることがわかった。

- ② 近似解法全てに共通する傾向として、計画開始時刻が計画期間幅のどのあたりにくるか、または与えられた問題の規模によって解の精度が異なることが明らかとなった。
- ③ マルチユーザ方式にしたとき到着分布が現状と同様とは限らないため、入港分布を変化させた場合の総在港時間や各船の待ち時間への影響を検討した。その結果、船の到着間隔が広がると、隻数が少ないときは各船の待ち時間は短くなり、在港時間も短くなるが、隻数が増すと逆の傾向になることがわかった。
- ④ 緩和問題の解は必ず荷役時間の短い順に係留順が決定されるため、与える問題そのものの荷役時間長が船の到着順に対し昇順であれば、緩和問題の解＝実行可能解となるため、そのようなデータの問題は良い解を求めやすい。反対に降順のデータでは良い解を求めにくいと考えることができる。そこで、到着順に昇順、降順、ランダム の 3 つの問題を与えて検討した。予想通り、全解法で昇順の問題が解の精度が最も良くなる傾向にあることがわかった。
- ⑤ 神戸港での実績データを用いて割当計算を行ったが、1 回の計算の規模を小さく、つまり対象期間幅を短くする方が在港時間、待ち時間も短くなり、各船間の待ち時間のばらつきも少なくなることがわかった。さらに、1 計画期間が 1 日のときは実績の供用数の  $2/3$  のバース数で実績と同程度のサービスが行えることが明らかになった。

結果から、提案した解法は十分実用的であり、以上の傾向を把握した上で利用することができれば、管理者の支援システムとしてマルチユーザ形式のバース運用面でより効果的なものになると考えられる。

現実のコンテナバースでは、1 バースに複数の船舶が同時期に係留されることもある。そこで第 4 章では、複数船の同時係留を可能とした条件でバース割当方法を検討した。ここでは係留条件として全長とバース延長の関係、水深と船の喫水との関係を考慮している。計算結果から明らかとなったことを以下に示す。

- ① ここで扱った問題では遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて問題を解決したが、この手法の結果のみでは、最適解からどの程度離れているかという解の精度を示すことができないという問題点がある。そこでまず、1 バースに 1 隻のみ係留できるという条件で、既存の解法である LR と解の精度を比較すると、GA は同程度であることがわかった。
- ② 解の候補を 2 種類の方法で表現し、それら個体表現 R1 と R2 を比較すると、ストリング長が短い R1 の収束が速く、2000 世代まで繰り返すとその時点ではストリング長の長い R2の方が目的関数値は小さいという結果になった。しかしながら、その差は小さく、計算時間のかからない R1 を使用するのが実用的であることが明らかとなった。
- ③ 同時期に複数船の係留を考慮し、複数スパンの計画を行う場合、常に前期間の最善解

を用いて当該期間の計画を行う場合と、そうでない解も考慮した複数解を用いて当該期間の計画を行う場合で最終的な評価指標の値を調べた。両者を比較すると、当然のことながら後者の方が多少解が良いことがわかった。しかしながら、後者の計算時間は前者の約30倍であり、解の精度の差も小さいことから実用上は前者で十分であるといえる。

- ④ 神戸港の実績データを使ってバース集約効果を見ると、提案した解法は現状の2/3のバース数でも現状とほぼ同じサービスが提供できることが明らかとなった。

以上のように、前章よりも問題の制約を増やして、より現実的な問題として扱ったが、現状のように入港船に対しバース数が過剰である場合、バースを共同利用すれば、供用バース数を減らすことができ港湾関連コストの削減が可能になる。

第3章および第4章では、バース割当の評価は船のバース待ち時間と荷役時間の合計の総和である総在港時間を最小化するものとしており、FCFSルールの制約は設けていない。なぜなら例えば同時期に到着する船2隻を同一バースに係留させなければならないとき、両者の荷役時間長の差が大きければ荷役時間の短い船を先に係留させた方が他船への待ち時間が短くて済むからである。現実には公共の多目的バースなどではそうした計画が行われている。またこれとは反対に、1回の寄港で多くのコンテナを荷役する船（≒荷役時間が長い船）はターミナル側にとって利益が大きいことから、なるべく待たせないように配慮されることもある。したがって、現実には両者の相反した考え方が適宜係留バースと係留順の決定に反映されている。このような考え方を考慮して係留順を決定するには、前章までのように単目的問題として扱うのは困難である。

そこで第5章では、船とバースを割当てる方法を港湾管理者側からみた船の優先度を考慮した多目的問題として捉え、同時に複数の解を保持しながら探索を進めることが可能であるGAを用いて検討した。成果をまとめると以下のようなになる。

- ① GAの処理中で各世代の個体集合に対するランキング方法として3種類の方法で検討を行った。解の多様性の観点からは解法2が若干他より優れているが、相対精度からは解法3が最も優れているという結果になった。
- ② 多目的化により、荷役コンテナ数の多い船の待ち時間が解間においてばらつくと予想したが、荷役コンテナ数に関係なくそれらにばらつきがあることがわかった。さらに船の優先度を考慮しない1目的問題の解と比較することにより、荷役コンテナ数の多い船に対する待ち時間が多目的化によってある程度短縮できることが確認できた。
- ③ 最後に提案した解法を神戸港に適用すると、供用バース数を2/3～約半分程度にしても現状と同程度のサービスが提供できることがわかった。

このことから、マルチユーザーターミナルとして利用し、余分なバースを減らすことができれば、それにかかるコストの削減を期待することができる。

第6章では、本研究の今後の発展と今後に残された課題を整理した。まずマルチユ

一ユーザーミナル導入時に発生するであろう問題点を海側と陸側に分けて説明し、それらが解決されれば、本研究がより現実的な問題として捉えられ、コスト削減効果を具体的に示すことができることを述べた。

海側は第3～5章で解決できるが、陸側については本章で考え方を述べ、現段階の研究成果を示した。具体的には、トランステナー方式のコンテナターミナルにおける荷役トレーラーの新たな運用方法を検討した。

- ① 供用2バースと4バースの2ケースでシミュレーション実験を行ったが、提案した運用方法を用いればトレーラーの投入台数を現状より最低1割は削減できることが明らかとなった。
- ② また荷役開始から出港までにかかる在港時間については、各船の係留位置と対象コンテナの蔵置ヤードとの位置関係によって異なるが、動的運用を行えばトレーラーの投入台数を増やさなくても、固定運用に比べて2バースなら2時間程度、4バースであればそれ以上、在港時間を短縮できる船も存在することが明らかとなった。また各船の在港時間のばらつきも動的運用の方が小さいことがわかった。

以上のことから、提案した方法を使ってトレーラーの運用方法の改善を行えば、ヤード作業が複雑であるマルチユーザーミナルにおいて、固定運用方式よりもトレーラー数が減らせ、その分にかかる人件費等のコストも含めて、港湾コスト低減に寄与するといえる。しかしながら使用したソフトウェアに機能限界があることと、扱った問題の制約（トレーラー容量）の点から現実的な問題とはなっていない。したがって、シミュレーションモデル構築上の問題点を解決し、トレーラー容量を増減可能にして同様の分析を行う必要がある。さらには、このシミュレーションモデルからの観測データを用いて従来型運用と提案する動的運用での本船荷役時間の推定モデルを構築することができれば、最終目標としている「ターミナル内の挙動を考慮したバース割当計画」を実現でき、コスト削減効果を具体的に示すことが可能となる。

## 謝 辞

本論文を作成するにあたり、本研究の遂行に際してご指導、ご協力を頂いた方々に感謝致します。

京都大学大学院工学研究科教授、谷口栄一先生ならびに飯田恭敬先生には本研究の遂行ならびに本論文をまとめるにあたって、終始有益なるご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに、謹んで感謝の意を表します。

神戸商船大学商船学部教授、今井昭夫先生には筆者が神戸商船大学学部学生として研究室に配属されて以来、終始研究活動のあらゆる面で暖かいご指導、ご鞭撻を賜りました。心より厚く感謝致します。

大阪産業大学経営学部教授、三木楯彦先生（元神戸商船大学商船学部教授）には筆者が神戸商船大学在学中より広い見地から研究内容に対するご指導、ご助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

元神戸商船大学技術官、故樽美正彦氏には筆者が学部・大学院時代に、研究活動に必要な基礎的技術を御教示頂くとともに、ご助言、ご協力を頂きました。心より感謝致します。

神戸商船大学技術官、黒木克典氏には筆者が助手として勤務し始めてから情報技術上において多大なるご支援とご協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

日本郵船神戸ターミナルの小原祥司氏、元神戸海運管理部の中村広樹氏、大阪市港湾局の浦川知子氏および満生馨氏には、データ収集の場の提供、および現場の基礎的知識をご教示頂き、多大なるご協力を頂きました。心より感謝の意を表します。

最後に、神戸商船大学物流管理学研究室の学生諸氏には、データの整理、モデル構築にあたって多大なるご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表する次第であります。