

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

修士論文

海上物流システムの最適設計に
関する研究

2008年2月14日提出

指導教員 鈴木 克幸 准教授



学生証番号 66774

有木 俊博

第1章	序論	4
1.1	研究背景	4
1.2	研究目的	5
1.3	研究概要	6
第2章	物流ネットワーク最適化に関する既存の枠組み	8
2.1	概要	8
2.2	ネットワーク構築に関する先行研究	8
2.2.1	先行研究の背景・目的	8
2.2.2	先行研究の概要	8
2.2.3	先行研究の長所	10
2.2.4	先行研究の短所	10
2.2.5	モデル化に対する研究課題	12
2.2.6	最適化機構に対する研究課題	12
第3章	評価モデルの作成及び評価式の設計	13
3.1	概要	13
3.2	評価式の概念設計	13
3.3	Port to Port 型モデルにおけるフロー予測	14
3.3.1	P to P型輸送システムについて	14
3.3.2	P to P型輸送システムにおける輸送設備のモデル化	15
3.3.3	P to P型輸送システムにおける荷主行動のモデル化	17
3.3.4	P to P型輸送システムにおけるフロー予測式	18
3.3.5	P to P型輸送システムにおけるフロー予測の精度について	24
3.3.6	P to P型輸送システムにおけるフロー予測の改善	27
3.3.7	P to P型輸送システムにおけるフロー予測精度の改善効果	29
3.3.8	P to P型輸送システムにおけるフロー予測まとめ	30
3.4	D to D型モデルによるフロー予測	31
3.4.1	D to D型モデルについて	31
3.4.2	D to D型輸送システムにおける輸送設備のモデル化	31
3.4.3	D to D型輸送における荷主行動のモデル化	34
3.4.4	D to D型モデルにおけるフロー予測式	34
3.4.5	D to D型モデルにおけるフロー予測	40
3.4.6	D to D型モデルまとめ	44
3.5	評価式の定式化	45
3.6	評価モデルの拡張	47
3.6.1	評価モデルに課していた限定条件について	47
3.6.2	周遊周期の多様化	47

3.6.3	航路形状の多様化.....	51
3.7	本章のまとめ	52
第4章	最適スケジュール探索のアルゴリズム.....	54
4.1	概要.....	54
4.2	スケジュールの組み合わせ変数としての表現	54
4.3	組合せ最適化における代表的な近似解法のアルゴリズム	57
4.3.1	近似解法について.....	57
4.3.2	ランダム多スタート局所探索法 (MLS 法)	57
4.3.3	遺伝アルゴリズム (GA 法)	57
4.3.4	アニーリング法 (SA 法)	58
4.3.5	タブー探索法 (TS 法)	59
4.3.6	組合せ最適化における近似解法の全般の枠組みと、本研究で参照すべき手法について.....	59
4.4	GA を用いた最適化アルゴリズム	60
4.4.1	GA 法における、各オペレータ及びパラメータの設定	60
4.4.2	GA 法における探索終了条件	64
4.4.3	初期型 GA における探索性能	65
4.4.4	ペナルティ関数法の適用	66
4.4.5	ペナルティ関数法を適用した GA の探索性能	67
4.5	GLS を用いた最適化アルゴリズム.....	69
4.5.1	GLS 概要	69
4.5.2	本研究で用いる GLS のオペレータ設定.....	70
4.5.3	GLS による探索性能	73
4.5.4	GLS 法の改良	74
4.5.5	改良版 GLS による探索性能	75
4.5.6	Adaptive GLS とその探索性能.....	77
4.6	個体評価に要する計算量の削減	78
4.7	本章のまとめ	79
第5章	中～大規模問題における最適スケジュール設計.....	80
5.1	概要.....	80
5.2	中～大規模問題でのシミュレーション	80
5.2.1	シミュレーションの対象.....	80
5.2.2	データ設定.....	81
5.2.3	シミュレーション結果.....	92
5.3	本章のまとめ	94
第6章	マルチレベル最適化手法	95

6.1	概要	95
6.2	マルチレベル最適化について	95
6.3	離散型シミュレータ概要	96
6.4	マルチレベル最適化の効果.....	98
6.5	本章のまとめ	98
第7章	低炭素型物流システム的设计手法.....	99
7.1	概要	99
7.2	低炭素型物流へのニーズ	99
7.3	低炭素型物流の構築に向けた概念設計	100
7.3.1	コンテナ輸送の分類	100
7.3.2	ターゲットとなる輸送種の抽出と、低炭素化の為のアプローチについて ...	101
7.4	評価モデル、評価式の変更.....	104
7.4.1	評価モデル、評価式の変更について.....	104
7.4.2	評価式の設定	104
7.4.3	P-D型輸送システムにおける輸送設備のモデル化.....	105
7.4.4	P-D型モデルにおけるフロー予測式.....	109
7.4.5	評価式、評価モデルの変更点まとめ.....	114
7.5	最適化アルゴリズムへの変更点.....	114
7.6	低炭素型物流構築シミュレータを用いた分析.....	114
7.6.1	シミュレーションの設定.....	114
7.6.2	シミュレーションに用いるデータ	115
7.6.3	シミュレーション結果.....	118
7.7	本章のまとめ.....	121
第8章	結論	122
8.1	結論	122
8.2	今後の展望	123
参考文献	124
謝辞	127

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、経済活動のグローバル化に伴い、国家間の貨物輸送量が急増している。とりわけ、中国は労働力や資源を生かして生産国として急速な経済成長を遂げており（図1-1）、それに伴い日中間の貿易額も着実な増加傾向にある（図1-2）。

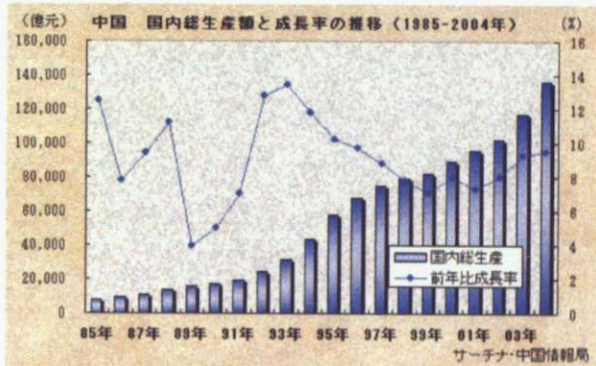


図1-1 中国のGDPと成長率の推移



図1-2 日中貿易額の推移

これら国家間を移動する貨物は主として定期コンテナ船が輸送し、重量ベースで約98%を、金額ベースでも75%のシェアを占めている（図1-3）。ところが、主たる輸送手段である船舶輸送システムは、勘と経験に基づいて構築されているというのが現状であり、ここに経済的損失が生じている。輸送システムの様な大規模システムではこの損失額は巨額であり、また貨物量の増大傾向も踏まえれば、これらの損失を削減すべく理論に基づいて最適にシステムを設計する事が必須である。

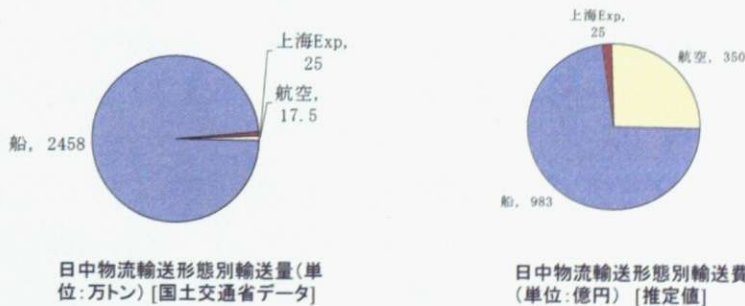


図1-3 日中間でのモード別輸送状況 (左: 重量ベース 右: 金額ベース)

1.2 研究目的

本研究では、日中間の海上コンテナ輸送を主対象として、コンテナの海上物流ネットワークをシミュレーションにより最適設計する事を試みる。近距離海上物流ネットワークの設計を考えるにあたり、主な設計対象として二種存在する。一つはネットワークの節を形成する港湾であり、他方は節同士を結ぶつけるコンテナ船である。各設計対象を更に細分化すれば、港湾に関しては、港湾の地点情報といった形状面と港湾の設備といった性質面の二種に分類でき、船舶に関しては船舶の運航する航路やスケジュールといった形状面と、船舶の速度や積み量、燃費、運賃等といった性質面に分類できる。以上の4種を設計対象と考えて設計する事が求められるが、このうち港湾に関する二種の設計対象は本研究では考慮しない。なぜならば、港湾に関しては、形状面、性質面どちらにしても地理的条件を強く受けて決定されてしまい、仮に最適解が導けたとしてもその実現性が極めて乏しい為である。また、船舶に関しては、初期検討として可変性の強い形状的側面に重点を置く。具体的には設計対象となる船舶の最適運航スケジュールの算出を行う。ここで、最適という用語を用いているので、本研究におけるシステムの最適性を定義しておく。

一般的にシステムの最適性、すなわち目指すべき状態を定義すると、その“システムに関わる主体に生じる全ての価値から損失を引いたものが最大化されている状態”と考える事ができる。物流システムの場合であれば、主たるプレイヤーとしてシステム構築者である船社と利用者である荷主が存在し、それぞれに生じる価値と損失は、船社は収入と支出、荷主は貨物を運ぶ事で得られる価値と支払う運賃コストと捉える事ができる。ところが、物流システムでは効用の一部である、貨物を輸送したことにより生じる価値の定量化が極めて難しい。そこで、物流に関する多くの研究では輸送システムで生じる価値については考慮せず、“システム全体で生じる損失量が最小の状態”を最適としてきた[1]。この様な最適性の定義に従ってシステム構築を試みる研究として、大和らの手法[2]、[3]、荒井らの手法[4]、本研究の前身にあたる手法[5]、Liらの手法[6]やZhouらの手法など[7]多数存在する。

ところが、このような定義では船社側の収入が加味されておらず、ひいては船社の収入を無視してシステムの設計を行う事を意味する。システムを構築するのはあくまで船社であるという事を考慮すれば、このような定義に基づいて提案されるシステムでは実現性が希薄である。

そこで、本研究ではより現実的なシステムを提案するという意図に基づいて、最適なシステムの状態を“設計対象とする特定船社の利益が最大化されている状態”として定義する。システムトータルで考えると、この定義に従って得られたシステムでは必ずしも効率的ではない。しかし、この定義に基づいて算出されたシステムにおいて、船社間

で競争が起こる為、設計対象を変えながら繰り返し最適化を行う事で、市場の原理により、システム全体で見た効率性も次第に達成される。但し、船舶の航路変更には、一般に6ヶ月程度の期間を要する為、システムの初期設計を行う段階で他の船社の反応を見越して行う事はしない。

以上の定義に従って再度本研究の目的を記述すると、海上輸送システムの一部を担う特定船社が保有する船舶のみを設計対象とし、その利益が最大化される様にスケジュールを算出する事となる。

1.3 研究概要

本研究は“日中間物流の最適化に関する研究[8]”を土台とした研究であり、その最適化機構は、各船舶のスケジュールを変数とし、その最適なセットを求める組合せ最適化問題として解くものである。

この機構を用いる場合、適切な解を現実的な計算時間で求める為に下記2点が論点になる

- I 最適化アルゴリズムの性能（速度、精度、使用メモリ量が優れている）
- II 各組み合わせに対する評価が正確かつ迅速に行えるモデル（以降、評価モデルと表現する）の構築

よって本研究では下記の検討を行っている。

- I 最適化アルゴリズムに関して
 - ① 効率的な探索アルゴリズムの検討及び開発
 - ② 異なる精度を持ったモデルを連携させてより精度の高い解を探索するマルチレベル最適化手法の検討
- II 評価モデルに関して
 - ① 海上のみを捉えた port to port 型輸送モデルの構築
 - ② 輸送の始点から終点までを考慮した door to door 型輸送モデルの構築
 - ③ 適切な顧客行動モデルの構築
 - ④ 実条件に対応した輸送システムモデルの開発

なお、本論分では以降、輸送媒体である船舶や港をモデル化したものを輸送モデル、輸送モデルと顧客モデルを合わせて物流が行われる様子を記述したモデルを輸送シス

テムモデルあるいは単に評価モデルと表現する。

以下、上記の内容の記述箇所を明確にする為、本論文における各章の概要を簡潔に説明する。

第2章では、物流ネットワーク最適化に関する先行研究の調査を行い、先行研究の紹介および問題点の追求を行う。

第3章では、第2章での調査結果を元に短所を改善した海上輸送モデル（以降 port to port 型輸送モデル）を示した後、その発展型である door to door 型輸送モデルについて述べる。更に顧客行動モデルの構築や実条件に対応したモデルの設計を行い、輸送システム全体のモデルを定義し、それを元に航路の適切さを評価する式を作成している。

第4章では組合せ最適化アルゴリズムに対する研究をまとめる。

第5章では、第3章、第4章で開発した機構を用いて中～大規模な問題に対する最適スケジュールを求める。

第6章では、マルチレベル最適化手法について延べる。

第7章では本研究で開発されたシミュレータを改良し、異なる目的へ応用している。具体的には低炭素型物流システムを設計する手法について述べる。

第8章では本研究での成果及び今後の展望をまとめる。

第2章 物流ネットワーク最適化に関する既存の枠組み

2.1 概要

物流ネットワークをシミュレーションにより構築するにあたり、モデリングの精度が解の精度に重大な影響を及ぼす為、適切なモデル化を行う必要がある。本章では、適切なモデル化を行うにあたり、物流ネットワーク構築に関する代表的な手法として大和らの手法[2]を取り上げ、そのモデルや手法の長所や短所を明らかにし、本研究で検討すべき課題について述べる。

2.2 ネットワーク構築に関する先行研究

2.2.1 先行研究の背景・目的

近年、海上コンテナ貨物の激増に伴い、コンテナ船の大型化が進んでいる。これは既存の航路を前提としたものであり、それが次第に変更され成立しているものである。しかしながら、これが本当に合理的な変更であるのかは明確でない。つまり、船舶が大型化していくことが本当に得であるのかという疑問が存在する。

そこで、港から発生、吸収される OD 貨物(発生地点(Origin)と吸収地点(Destination)の定まっている貨物)の量と、その港湾の位置関係に着目して、航路変更に際して航路のあるべき形態を導き出し、船舶に対する要求仕様(とりわけ、船舶の最大積載量に着目したもの)を抽出する手法を提案するものである。

2.2.2 先行研究の概要

一般的に、航路形態(トポロジー)を Point-to-Point 型, Go-Around 型, Hub-Spokes 型の3つに分類することができ、このトポロジーは極めて数学的な構造を有している。そこで、海上コンテナ貨物輸送モデルをネットワーク問題として表現し、数理計画問題として求解する事としている。

数理計画問題として、定式化されたものの概念を以下に示す

目的関数：船舶の運航コスト+貨物の輸送時間コスト+積み替えコスト

- 制約条件：①OD 情報のついたコンテナのフローは OD 地点以外では増減しない。
②各ネットワークの枝における OD 情報のついたコンテナのフロー量の合算は、その枝を通過する全船団の輸送能力を上回らない（容量制約）
③船舶の航路が初等的な閉航路である条件
④コンテナのフローが正である条件

①の制約条件について、多少補足を行う。

例えば、東京から上海に600 TEUs のコンテナを運ぶ場合、この OD 情報のついた600のコンテナを様々なフローで上海へ運ぶことになるが、その途中の経由地で OD 情報がついたコンテナは降ろされることは無いという条件である。なお、OD 情報の付いたコンテナのフローは一通りのフローではなく、様々なフローを合算したものと扱う。

以上の制約の下、全ての船舶の速度を一定として、目的関数を最小化するような全ての OD 情報付きコンテナのフロー、及び各船舶のルートを求める。計算にあたっては、船団行列を整数変数で表現した場合、求解が非常に困難となるため、いくつかの条件を緩和し、求解可能な問題にモデル化する。その手法として段階的設計手法を用いる。この方法は、各数理計画手法の求解能力・解の意味に着目し、3段階に分けて解を求めるものである。

第一段階：各船舶（ここで言う船舶とは、いくつかの同スペックを保持している船舶を一まとまりに扱ったもの）に積載量を与える。全船舶により、OD 地点の決定している貨物を運ぶ際の犠牲量（船舶の運航コスト+貨物の時間コスト+積み替えコスト）が最小になるように各船舶のルートを求める。但し、船舶のルートは整数による表現ではなく、連続量による表現とする。これにより正確な航路表現は失われるが、線形計画法が適用可能となり、迅速に解を求める事が可能となる。

さらにこの各船舶の航路情報から、要素の大きい順に航路を抽出し、地域分けを行う。

第二段階：第一段階によって行われた地域の内、拠点港に着目し、その地域の貨物が全て拠点港に集約されているとみなす。集約後、再び線形計画問題を解き、拠

点港同士のネットワーク設計及び、ネットワーク上に必要な最小容量の船舶決定を行う。

決定した小型船と大型船の2船団を元に、整数計画問題として定化を行う。大型船の容量を様々に変化させる事で、積載量とコストの関係を見積もる。但し、整数計画問題を解くだけでは積み替えコストが入らないので、それを補正したコストと積載量の関係より極小点を見積もり、その際の積載量と航路を得る。

第三段階：地域分けされた部分に対しても第二段階と同様に評価する事で、航路設計を行う

以上の3段階を通じて、最適航路設計を行うものである。

2.2.3 先行研究の長所

先行研究の枠組みは、ルート先クラスター後法[2]およびクラスター先・ルート後法[2]を併用したものと捉える事が可能である。

第一段階によって、仮のルートを効率的かつ論理的に構築し、そのルートを元にクラスター化を行う。

第二段階ではクラスター化された地域を訪れるような航路を整数計画法により、(この段階ではクラスター化されているので、ノード数が減少し整数計画法による求解が可能) 求める。

第三段階では、各クラスター内でのルートを同様に整数計画法により求める。

このような手法は大規模問題であるルート設計等に関して大変有効であり、相応の効果が期待できる

2.2.4 先行研究の短所

以上、先行研究の有用性を述べたが、実用化できるかといえ、一概にそうとは言えない部分がある。またモデル化や評価コストに関して、不正確な部分も多い。以下その具体的な内容に関して言及する。

モデリング : 先行研究におけるモデルでは、単純に、要求輸送量を全船舶で運んでいるか、という事に特化した制約であり、どの船舶がどの貨物を運んでいるのかという情報が現れない。しかし、船速が変わればも

もちろん輸送時間は変化し発生する時間コストも船舶によって変化する。実際の船舶も12 knot~20 knot の間の船速をもつ[3]事を考慮すれば、正確な時間コストを求める為には、どの船舶がどの貨物を運んでいるのかという情報を求める必要がある。

また、輸送システム全体で生じるコストを上記の様に設定する事は、荷主と船社を同一の意思を持ったプレイヤーとみなしたモデルである。現実には、荷主が自社船を保有しない限りこの前提は成り立たない。

モデルが、海上のみを対象としている事も問題である。実際の物流は port to port で行われるわけではなく、door to door で行われる。

貨物の時間コスト：先行研究においては、全ての貨物の単位時間あたりの時間コストは均一である。しかし実際はコンテナ毎に単位時間あたりの時間コストは異なる。単位時間あたりの発生コストの分布を考慮する事でより精度の高い総コスト算出が可能となる。

次に、時間コストが発生する輸送時間であるが、先行研究では

$$(\text{輸送時間}) = \text{OD フローが通過する枝の総距離} / \text{船速}$$

と与えられているが、実際には、その他に荷役時間や港での停泊時間、コンテナの滞留時間等も含めてかけられるべきである。

実用化への問題点：先行研究の枠組みを実用化するにあたり、問題点としてスケジュール作成という点が挙げられる。現実の物流というものは、おおよそ2のべき乗方策にのっとって行われている[2]。海上物流の場合、サイクル時間は1週間であり多くの船がこれに則り、週当たり一便が就航している[3]。このような観点から、実用化するにあたり、同時にスケジュールリングというものも考えていく必要がある。スケジュールリングまでも見越してルート最適化を行うと、港での停泊時間やコンテナの滞留時間が変化し、最適航路形状が変わる可能性もある。

また、本手法では常に全体での効率性を論じる事になり、単一の船社が独占状態で運航しているケースを除けば、各船社が協力的に航路変更していく事が前提となる。しかし、現実には競合関係にあるため実現性に乏しい。

2.2.5 モデル化に対する研究課題

本研究では、以上で挙げたようなモデルの問題点を解決する為に、

- ① 荷主と船社を個別別に扱い、荷主は荷主の視点での行動を、船社は船社の視点で行動するモデルの構築
- ② 貨物の輸送時間をより厳密に扱う為に、荷役時間や停泊時間、滞留時間を導入したモデルの構築
- ③ 貨物の持つ単位時間あたりのコストの分布を考慮したモデル構築
- ④ door to door 型モデルの構築
- ⑤ スケジュールベースでの最適化を可能とするモデルの構築を行う。

2.2.6 最適化機構に対する研究課題

一般にモデルを高精度化すれば、それに応じてそのモデルの数理的表現は複雑化する。今回のケースも例外ではなく、2.2.5 で示したモデルを構築した場合、もはや先行研究に則った様式では最適化する事は困難である。

そこで、本研究では、序論で述べたような組み合わせ最適化による最適化機構を用いる事とする。一般に組み合わせ最適化による機構は、

- 1) 組み合わせた解を評価する機構
- 2) 効率的に組み合わせ（探索）を行う機構

から成り立つ。重要な点は、1) の機構では既に組み合わせ変数が定数として与えられている点である。これにより変数が定数として表現される為モデルの数理表現が簡易化し、複雑なモデルを通じた評価をも可能としている。しかし、其の反面組み合わせ最適化機構は反復処理が多くなり計算時間を要する。実時間で解を得るために、効率的な探索機構の構築する事が研究課題となる。

第3章 評価モデルの作成及び評価式の設計

3.1 概要

本章では、設計対象船舶のスケジュールを任意に組み合わせた際の評価値を得る事を考える。まず評価式の概念設計を行っている。そこから得られる知見と二章での考察結果を基に物流システムのモデル構築を行っている。モデルとしては簡易版である port to port 型モデル、及び陸路も含めた door to door 型モデルを示す。その後、各モデルを用いて得られた情報を基に、設計した評価式の概念を具体的に定式化していく。また、各モデルの作成にあたりいくつか簡易化の為の条件を導入しているため、最後にそれらを緩和した拡張モデルについて述べる。

なお、本モデルにおいて設計対象の船舶を評価する際には、当該船舶のスケジュール及び設計対象外の船舶全てのスケジュールが所与の条件となる事に留意されたい。

3.2 評価式の概念設計

本研究の目的は任意船社、あるいは任意船舶の利益が最大化される航路を設計する事であった。そこで設計船舶に任意のスケジュールを設定した際の評価値としては、一定期間における設計船舶の総利益額を設定する。

一定期間における設計船舶の利益額は、

$$[\text{期間中の利益額}] = [\text{期間中の収入}] - [\text{期間中の支出}] \quad (3-1)$$

で定義される。各項の構成を詳述すると下記の様に表される。

$$[\text{期間中の収入}] = \sum (\sum [\text{期間中に設計船舶が輸送したOD別貨物量}] \times [\text{OD別運賃}]) \quad (3-2)$$

$$[\text{期間中の支出}] = \Sigma ([\text{期間中の傭船費}] + [\text{期間中の燃料費}] + [\text{期間中の港湾利用費}] + [\text{期間中のハンドリング費}]) \quad (3-3)$$

ここで(3-2)式に用いられているODとは積み地 (Origin) と降ろし地 (Destination) のセットを示し、以降この表記を用いる。(3-2)式の第一項について補足するが、これは一定期間に船舶がどこからどこへ、どれだけの貨物を輸送したかを表している。このOD毎の輸送量にOD区間の運賃を乗じ全ODの総和をとると期間中の一隻の船舶の収入になり、更に設計対象船舶で総和をとるとその総収入となる。(3-3)式は期間中の船舶毎の支出を、設計対象船舶で総和をとったものである。ここで、コンテナのハンドリング費はコンテナの積み地、降ろし地に依存する事を考慮して式(3-2), (3-3)を下記の様に変更する。

$$[\text{収入}]' = \Sigma (\Sigma ([\text{期間中における船舶のOD別輸送量}] \times [\text{OD別運賃} - \text{OD別ハンドリング費}])) \quad (3-4)$$

$$[\text{支出}]' = \Sigma ([\text{期間中の傭船費}] + [\text{期間中の燃料費}] + [\text{期間中の港湾施設利用費}]) \quad (3-5)$$

評価モデルでは船舶のスケジュールが全て所与である事に着目すれば(3-5)式の各項は容易に計算可能である。傭船費は船舶毎に固定値であるし、燃料費は経路に依存する。また港湾施設利用費は機構回数に依存するので結局は経路に依存する為である。ところが(3-4)式は容易には定まらない。第一項の船舶毎のOD別輸送量、言い換えればシステム全体で貨物がどのように流れているかというフロー情報が必要な為である。すなわち、任意システムの評価を行う為には任意システムを構築した際の貨物フローを求める事が必須となる。この貨物フローは荷主の行動によって構築されていくので、以下輸送モデルと荷主行動モデルを作成しこの貨物フローを求める事を試みる。

3.3 Port to Port 型モデルにおけるフロー予測

3.3.1 P to P 型輸送システムについて

貨物フロー予測モデルを構築するにあたり、初期検討として、物流が港から港で発生する状況を仮定する。これをP to P型輸送システムと呼ぶ。このP to P型輸送システムは下記の特徴を持つ。

1. 船舶は港から港へ貨物を輸送する
2. 一定期間に輸送するべきコンテナが港で随時発生し、其の総量は所与である。
3. 各コンテナは港を目的地としてもつ。

本項ではこの輸送システムにおける貨物フローを予測するために、P to P 型モデルにおける輸送設備のモデル化、及び荷主行動のモデル化を行なう。そして、それらを合わせた P to P 型輸送システムモデルを基にフロー予測式を構築する。

3.3.2 P to P 型輸送システムにおける輸送設備のモデル化

輸送設備のモデル化を行うにあたり下記の仮定を導入する。

1. 船舶を乗り継いででの輸送は行わない。
2. 各船舶は一週間で航路を周回する。
3. 船舶の航路は単純閉ループに限定。
4. 港はあらゆる船舶が常時利用可能である。
5. 全ての貨物を積み降ろしするには LoLo 船で各 6 時間、RoRo 船で各 3 時間要するものとし給油等もこの時間内で終了する。
6. 各船舶の運賃は輸送区間ごとに与えられている。
7. 各港間の航海距離は一定で与えられる。
8. 各船舶は、当該船舶の積み込み開始時刻まで予約可能である。

ここで各仮定の妥当性について確認をしておく。

1 の条件に関して：

本研究においては日中間での輸送という、比較的短時間で輸送可能な近距離輸送を主対象としたスケジューリング設計を目的としているので、乗り継ぎに時間を要する輸送は行われぬという仮定は妥当なものと捉える事ができる。

2、及び 3 の条件に関して：

現実には、多様な航路形態や周期が存在する為この仮定は妥当性にかける。しかし初期検討としてモデルを複雑化しない為に条件を課している。これらの条件の緩和については 3.6 で述べる。

4の条件に関して：

港の利用に関しては船舶の喫水や開港時刻等の影響を受ける為妥当ではない。しかし、これらの条件に関してはスケジュール設計の時点で制御する事が可能である為、スケジュールが所与の下で貨物フローを予測する本モデルではこれを許容する。

5の条件に関して

積み降ろしの貨物量によって多少変動するが、前述のように大まかな輸送時間を知る為のモデルであるので定数で表現する事は許容可能と考える。LoLo 船と Lift-on Lift-off 船の略称であり、RoRo 船とは Roll-on Roll-off の略称である。前者はクレーンで積み下ろしが行われるのに対し、後者はトレーラーで高速に積み下ろしが行われる為、このような時間設定としている。

6, 7, 8の条件に関して

凡そ現実の通りであり妥当な仮定である。

以上の簡易化条件を課した上で構築した輸送設備の概形を下記に示す。

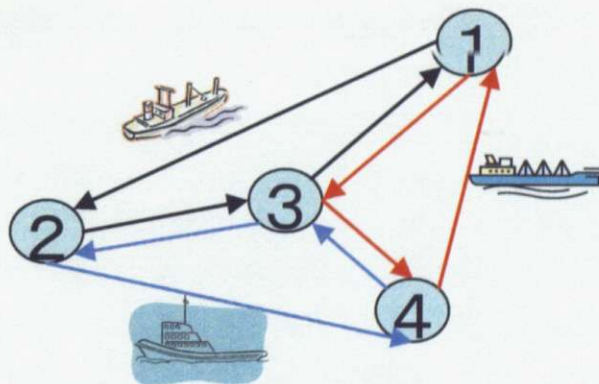


図 3-1 4港3船団のイメージ

図3-1において各船舶の航路が色別に記述されている。これらの航路に加え各船舶は運航時刻情報が与えられている。

このモデルにおいて各貨物が発生地点から設定された目的地へ移動する。この際、取りうる経路は複数存在する。例えば港③で発生し港①へ向かうコンテナについて考える。導入した仮定の基では、黒色の経路で直接輸送されるケースと赤色の経路で港④を経由して輸送されるケースが存在する。この二種の経路を詳述したものを下記に示す。

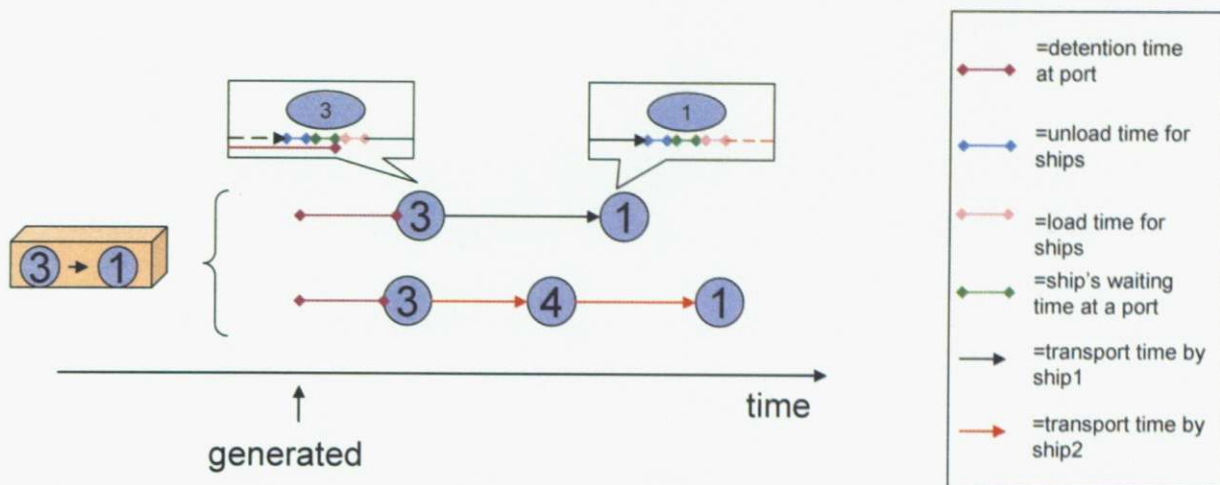


図 3-2 貨物の輸送経路例

この経路における各線分の実行に要する時間は導入した過程と、所与のスケジュールを参照する事で全て実数として得られる。

上記の経路のうちどちらを選択するかは荷主の行動基準によって決定される。よって、貨物フローを予測するステップとして次に荷主の行動モデルを構築する。

3.3.3 P to P 型輸送システムにおける荷主行動のモデル化

上記の様に複数の経路が存在する場合、荷主は輸送によって生じる価値から経路別の必要コストを減じた値が最大となる経路を選択し、輸送により生じる価値があらゆる経路の必要コストよりも低い場合は輸送自体を行わないものであると考えられる。但し、序論で述べた様に荷主が輸送に対して感じる価値は定量化しにくい概念である為、輸送に対して感じる価値を十分に大きい値と仮定する。この仮定の下では、荷主は常に貨物を輸送しその経路としては必要コストが最小な経路を選択する。この時、荷主が考慮するコストとしては下記の3項目を考える。

- ① 運賃コスト
- ② 輸送時間コスト
- ③ 積み込み開始までの港における滞留時間コスト

既存の研究では荷主のコストとしてしばしば①、②のみが考えられている[4], [5]。しかし③のコストも重要であると考えられる。ここで、各自が移動する経路を選択する状況を想定してもらいたい。おそらく、安価な経路で移動しようという考えが生じるであろう。但し安価だけで移動に時間がかかるのでは不毛であり、それなりの移動速度も求めるであろう。ところが、この2つの要素を満たすとしても、その経路が一日に一便し

か存在せず、多くを待ちに費やすのではどうであろうか。おそらく誰もその経路を選択しないであろう。結局は、移動したいと感じた瞬間から目的地に到達するまでの全時間コストと運賃を統合的に捉えて経路を選択するのではなかろうか。このような視点に立ち、③のコストを考慮している。なお、その他考慮すべきコストとしては安全性やサービスの質、定時制なども存在するが現段階ではこれらの定量化が困難であるためモデルには含めていない。

以上で定義した3つのコストの総和が最小となる経路を各荷主が選択する事で現実に近い貨物フローを予測する事が可能となる。しかし、このような荷主行動モデルを構築した場合、コンテナ毎に経路を選択していく必要性が生じ、フロー予測に多大な時間を要する。この後、スケジュール最適化を行う際にこの過程が反復される事を考慮すればフロー予測は正確かつ迅速に行う事が求められる。

そこで、この荷主行動モデルに下記の3つの仮定を導入する。

1. 荷主は、各自のコストでは無く荷主全体でのコストが最小になる様行動する。
2. 荷主が時間に対して感じるコスト(時間価値)はあらゆる貨物に対して一定である。
3. 荷主が輸送するコンテナを連続量とする。

1.の仮定は、荷主全体の総コストを最小化する事でのフロー予測を可能とする為のものである。但し、この仮定による精度への影響は未知数である為後に検証を行う必要がある。2.と3.の仮定は総コストを最小化する事を容易にする為の近似である。各貨物を均質化して時間に対するコストの感じ方を均一にし、さらに貨物を連続量として扱う事で、上記の総コスト最小化問題を連続関数の最小化問題として扱う事が可能となる。

3.3.4 P to P型輸送システムにおけるフロー予測式

以上で定義した輸送設備モデルと荷主行動モデルを用いれば、フロー予測式は荷主の総コストを最小化するものとして定義できる。この予測式において求めるものは、各船舶が輸送するOD地点ごとの貨物量であるのでこれを設計変数とし $x_{k,i,j}$ で表す。ここ

で k は船舶を表し i, j はそれぞれO地点とD地点の港を示す。船舶の航路が初等航路に限定されている事を踏まえれば、これらの情報と船舶スケジュールを参照する事で具体的な輸送経路が一通りに定まり、実際の経路に1対1に対応した変数となっている。

一週間での貨物フローを予測する事を考え、目的関数となる荷主に生じるコストを定義していく。

1) 運賃コスト

$$f_1 = \sum_k \sum_{(i,j)} x_{k,i,j} c_{i,j}^k \quad (i,j) \in (O,D)^k \quad (3-6)$$

ここで、 $c_{i,j}^k$ は船舶毎の i から j への運賃である。式(3-6)はあらゆる経路で輸送される貨物の運賃の総和を意味する。 $(O,D)^k$ は船舶 k が輸送可能な OD セットの集合を現す。

2) 輸送時間コスト

$$f_2 = \sum_k \sum_{(i,j)} x_{k,i,j} \cdot time_{k,i,j} \cdot t_{c,i,j} \quad (i,j) \in (O,D)^k \quad (3-7)$$

ここで、 $time_{k,i,j}$ は船舶 k が i から j へ貨物を輸送するのに要する時間である。ここで
の輸送時間とは i での積み始めから j での降ろし終了までに要する時間であり、 j の到着日時から i の出発を日時を引き、船舶別の積み降ろし時間を足したものである。これはスケジュールが与えられているので所与である。また $t_{c,i,j}$ は i から j へ向かう貨物が時間に対して感じるコストを金銭化する時間価値パラメータでありその単位として JPY/hr・TEUs を持つ。以上を用いて表される式(3-7)は全ての経路で輸送される貨物に生じる時間コストを金額換算して総和を取ったものである。

3) 滞留時間コスト

滞留時間コストは図 3-2 における紫の線分において要する時間に時間価値パラメータを乗じて総和を取ったものとして定義できるが、この線分の長さは(2)の輸送時間コストのケースとは異なり一定値では無い。なぜならば滞留時間は貨物の発生時刻に依存して決定される為である。よって、輸送時間コストとは異なるアプローチを取らざるを得ない。ここで滞留時間コストを扱う為には貨物の発生時刻について下記の仮定を導入する。

仮定：

1. 貨物は一定の割合で発生する。

さて、荷主全体での滞留コストが小さいとはどういう状態であろうか。その性質を踏まえて考えると、できる限り貨物が港にたまらない状態となる。

例えば港 i に 3 船舶が寄港しており、3 船舶で (i, j) 貨物の要求輸送量を輸送する状況を想定してみる。滞留コストのみに着目すれば、港に滞留している貨物全てを到着した船舶が輸送していく状態が理想的であり、下図の様に表現される。下図において横軸は一週間の時間の経過を表す。

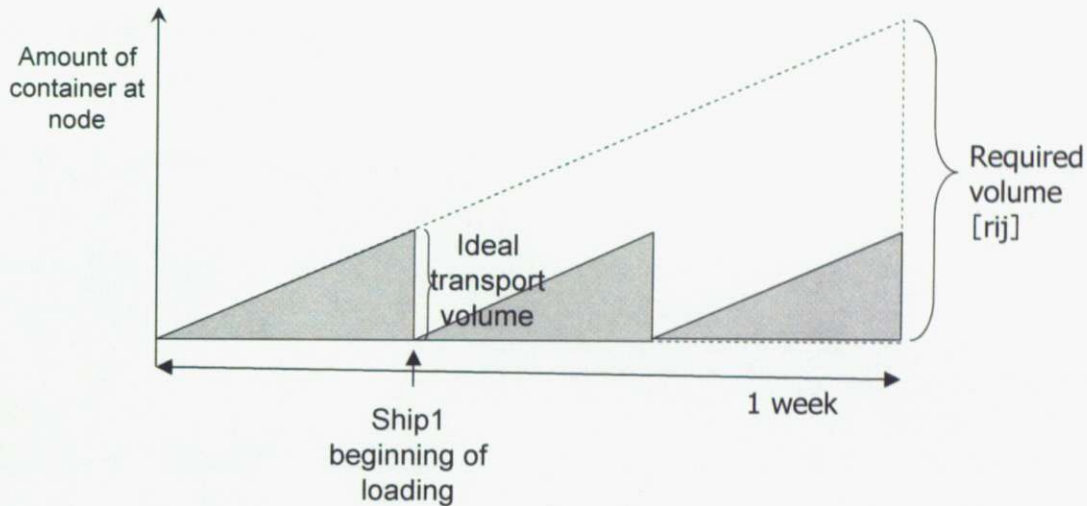


図 3-3 滞留状態の理想像

ところが、現実には船舶が満載であるとか、運賃コストや輸送時間コストに引きずられ等積み残しが生じ、理想状態からずれを生む。この状態を下図に示す。

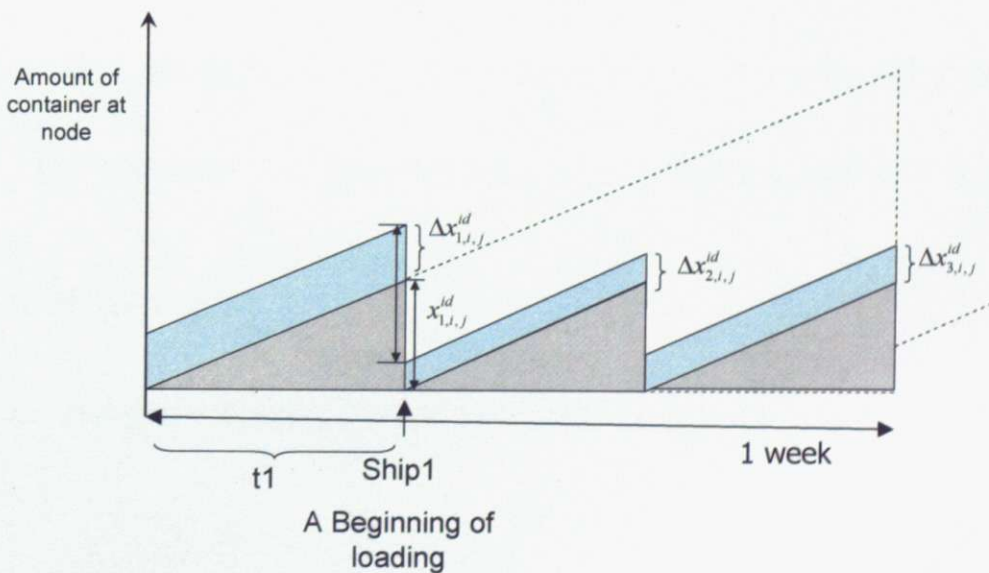


図 3-4 滞留状態の実像

上図において、 $\Delta x_{1,i,j}^{id}$ とは船舶 1 に対して直近の船舶が積み残した貨物の量を示す。

この積み残された量に滞留した時間、すなわち直近の船舶との輸送間隔 t_1 を乗じたものが延べ滞留時間の増分であり、図中の一つ目の平行四辺形の面積である。すなわち、理想滞留像に置ける灰色の面積にこれらの各平行四辺形を足し合わせたものが延べ滞留時間として定義される。ここで灰色の面積は常に生じる滞留時間であるのでフロー予測の為には、平行四辺形の面積の総和のみを考えても差し支えない。この平行四辺形の面積は理想量からの増加量 $\Delta x_{k,i,j}^{id}$ を新たな変数として導入すると、

$$f_3 = \sum_{(i,j)} t_{c,i,j} \cdot t_{i,j}^{additional} \quad (i,j) \in (O,D) \quad (3-8)$$

$$t_{i,j}^{additional} = \sum_k t_k \cdot \Delta x_{k,i,j}^{id} \quad (3-9)$$

となる。

上式は、延べ滞留時間に時間価値パラメータを乗じたものの総和を取る事をいみしている。但し、あくまでフロー予測の為に十分な関数なのであって厳密な滞留コストでは無い事に注意されたい。

以上で述べた三式を足し合わせた式が荷主に発生する総コストでありこれを最小化する事でフローを得る。

$$f = f_1 + f_2 + f_3 \quad (3-10)$$

上式の各項は、設計変数に対して一次式であることから、(3-10)式も設計変数に対して一次の式となる。

なお、設計変数は貨物フローに加え理想量からのズレ量が便宜上加わり下式の通り。

$$x = (x_{k,i,j}, \Delta x_{k,i,j}^{id}) \quad (3-11)$$

これらの設計変数は自由な値を取れるわけではなく、いくつかの制約が加わる。

$x_{k,i,j}$ に対する制約は下記が存在する。

①一週間の要求輸送量を満たしている条件

$$\sum_k x_{k,i,j} = [r_{i,j}] \quad (3-12)$$

ここで、 $r_{i,j}$ は一週間で i から j へ輸送する貨物の量 (required volume) を示す所与の定数であり、全船舶で輸送される貨物を OD 別に合算した場合に所定の量を輸送している条件を表す。この制約は、最低限の荷主便益を守る為に課している。

②フローが正である条件

$$x_{k,i,j} \geq 0 \quad (3-13)$$

③非輸送区間ではフローが生じない条件

$$x_{k,i,j} = 0 \quad (i,j) \notin (O,D)^k \quad (3-14)$$

④輸送制約を満たしている条件

$$\sum_{(i,j)} x_{k,i,j} \leq m^k \quad (i,j) \in (O,D)^{k+1,m^k} \quad (3-15)$$

ここで m^k は船舶 k の最大積載数であり、この式は船舶 k が輸送する各種フローを重ねていった際に、船舶 k の最大積載量を越える部分が現れない事を示す。

$\Delta x_{k,i,j}^{id}$ に対する制約は下記の通り。

⑤理想量からの増加量が正である条件

$$\Delta x_{k,i,j}^{id} \geq 0 \quad (3-16)$$

$x_{k,i,j}$ と $\Delta x_{k,i,j}^{id}$ の両者にかかる制約は下記の通り。

⑥理想量と実輸送量とのつりあい式を満たす条件

$$x_{k,i,j} - \Delta x_{k,i,j}^{id} + \Delta x_{k',i,j}^{id} = x_{k,i,j}^{id} \quad (3-17)$$

(3-17)式は下図のように、理想量に増加量を足し、減少量 (= 積み残し量、これは後続船舶 k' の増加量に等しい) を引いたものが実際の輸送量である $x_{k,i,j}$ と等しい事を表す。 k' は k の直後に寄港する船舶であり、スケジュールを参照する事で特定できる。また、滞留コストに対する各船舶の理想的な輸送量であるが、貨物が一定の割合で発生する仮定を踏まえれば、一週間の要求輸送量に (輸送間隔日数/7) を乗じる事で求まる。

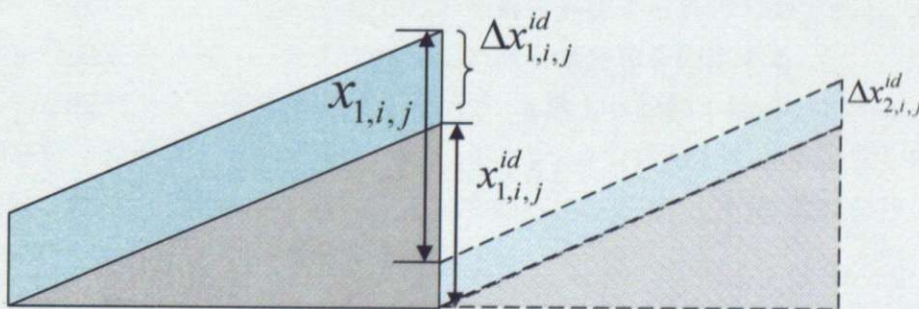


図 3-5 理想量と実用の関係

以上で挙げた制約式(3-12)～(3-17)は設計変数に対して一次の制約式であるので、下記のようにまとめる事ができる。

$$g(x) \leq 0 \quad (3-18)$$

よって、貨物フローは(3-10), (3-11), (3-18)を用いた下式を解いて得られる解のうち貨物フローの相当する要素を抽出したものとなる。

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ g(x) \leq 0 \end{aligned} \tag{3-19}$$

上式は全て線形式であるので、高速アルゴリズムの一つである線形計画法[9]を用いて解く事でフローを得る。但し、式の導出にあたり様々な近似を課しており、得られる解の精度については不明確である。とりわけ荷主行動モデルに課した近似は、解く事に重点を置いて課したものである為どれ程の誤差を生じさせるのか検証する必要がある。また、滞留コストの導入についても設計変数の増大を招く為、導入すべきかどうか吟味する必要がある。

3.3.5 P to P型輸送システムにおけるフロー予測の精度について

3.3.4で定義した式によってフローを予測した場合の精度について検証を行う。フロー精度を比較する為に二種のフロー予測機構を新たに用いる。

一つは、荷主の行動モデルにおいて滞留コストの概念を除外した、従来の研究で行われてきたフロー予測機構を模したものである。これは滞留コストの概念を導入する必要があるかを議論する為のものである。

もう一方は、荷主行動モデルにおいて導入した仮定を排除し、コンテナ一つ一つに異なる時間価値をある分布に従ってあたえ、時間軸に沿って乱数的に発生させて経路を選択させる機構である（これを離散型と呼ぶ）。こちらのモデルはP to P型システムにおけるフロー予測結果を比較検討する為の参照解を算出する為のものである。但し、その他の条件を一致させる為、コンテナの発生には一様分布を仮定する。

これらの3種のフロー予測モデルを用いて、4港10船舶の輸送システムにおけるフロー予測を行った結果を下記に示す。シミュレーションに際して必要となる各種データについては、共通のデータを任意に設定している。ここでは、比較検討を行う事が主題であるのでデータについては割愛する。

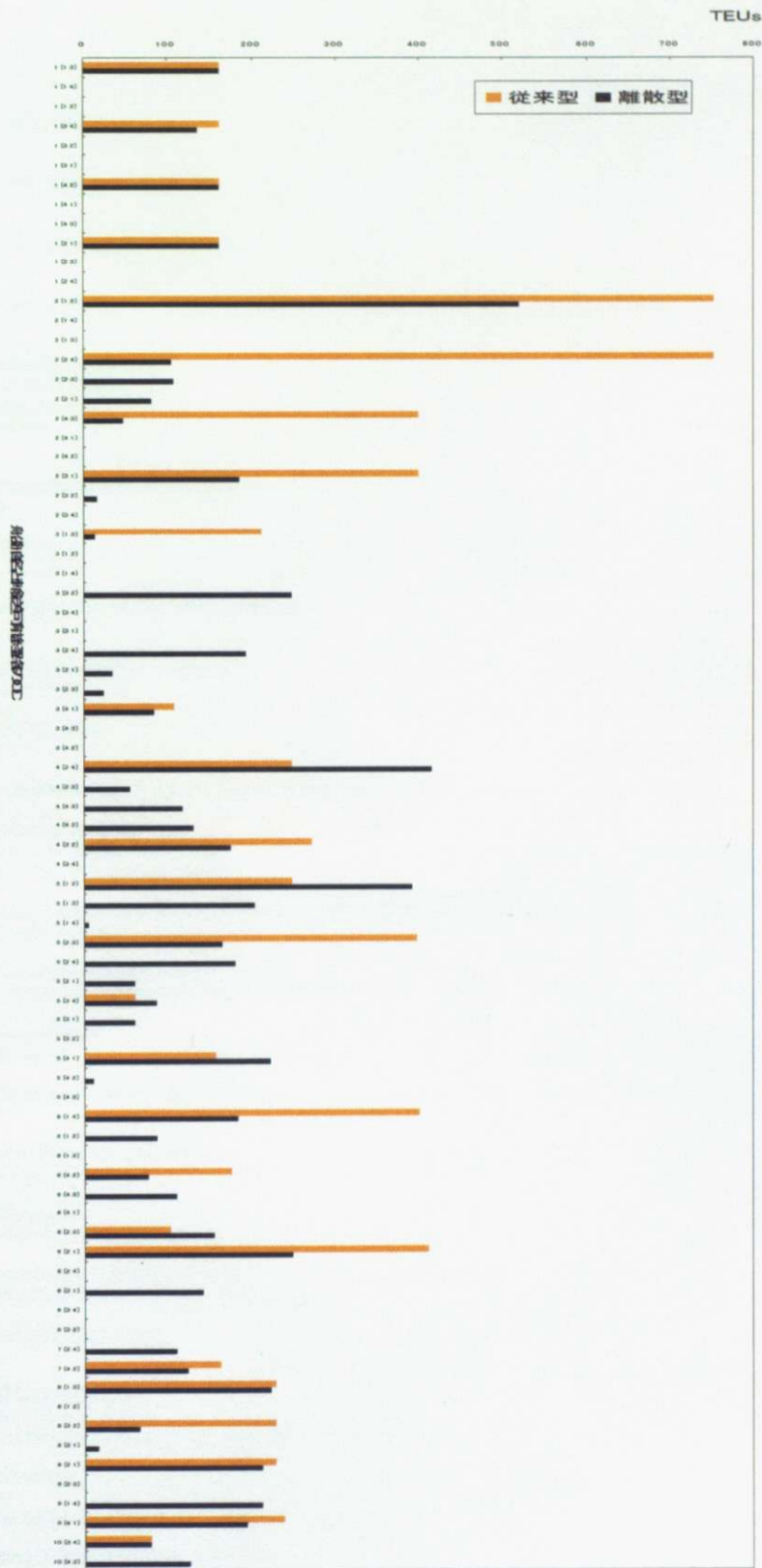


図 3-6 従来型によるフロー予測と離散型によるフロー予測の比較

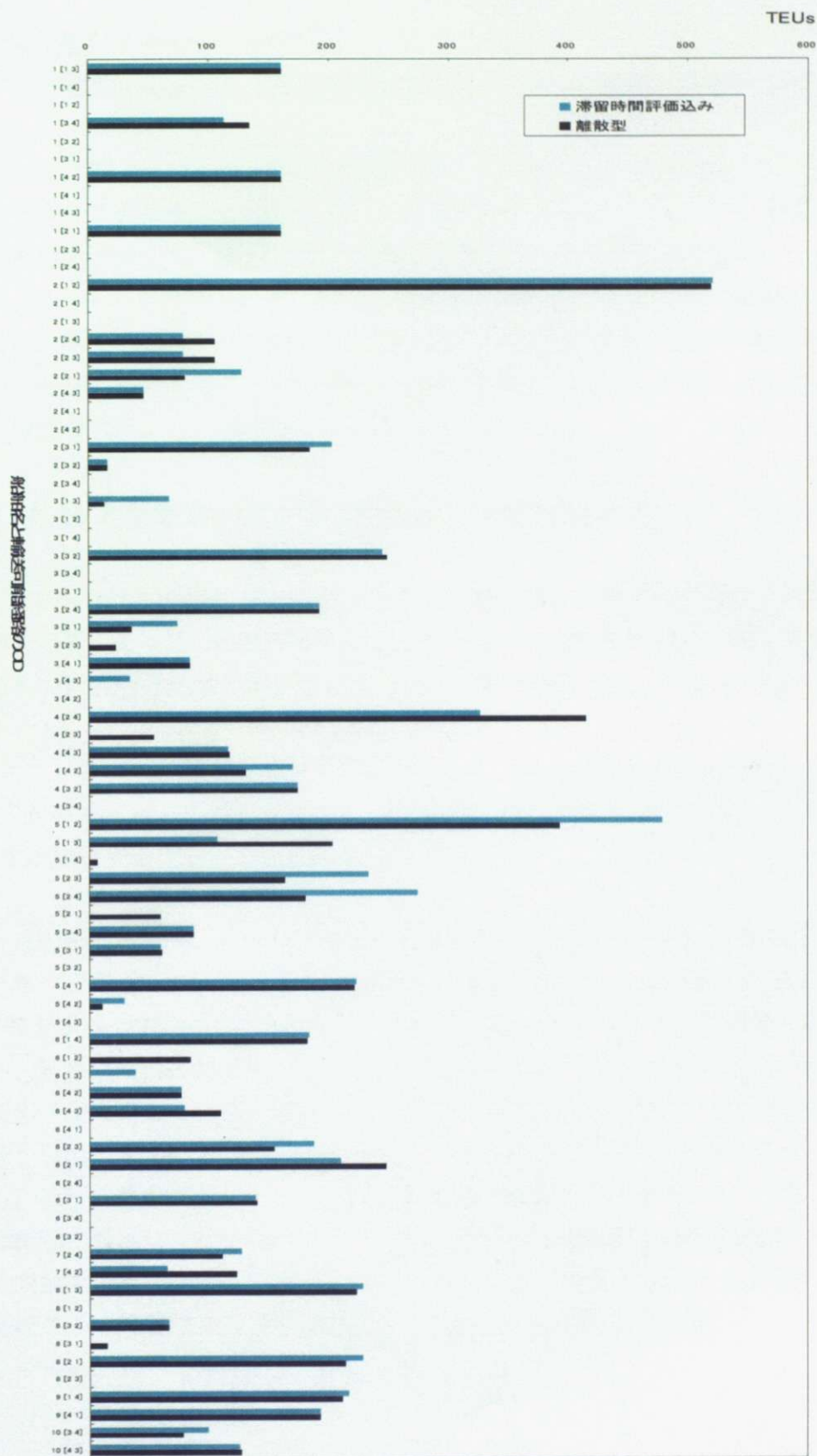


図 3-7 滞留時間導入モデルによるフロー予測と離散型によるフロー予測の比較

上図において、縦軸は船舶毎の輸送可能なODのセットを表す。横軸は各船舶がODセット間で輸送する貨物の量を表している。図3-6、3-7におえる黒色の棒グラフはいずれも離散型によって予測された貨物フローであり、精度を比較する為の参照解である。

図3-6と図3-7における従来型のフロー予測結果と滞留時間コストを導入した場合のフロー予測結果を比較すると、大きな剥離が存在している。この事実より、計算コストを増大させても、滞留コストの概念は導入すべきであると結論づける。

また、図3-7では得られたフローと参照解の類似性が極めて高い事が示されている。これより、荷主行動モデルで課した近似はある一定の妥当性を持つ事が分かる。

しかし多少の誤差も生じている事も示されている。以下、この誤差を減少させる事について検討を行う。

3.3.6 P to P型輸送システムにおけるフロー予測の改善

3.3.5で示された参照解との誤差は荷主の行動モデルに課した仮定によって生じているものである。よって、予測精度を向上させる為には荷主行動モデルに課した仮定をより妥当なものに近づける事を考える。本モデルで荷主行動に課した仮定は以下の通り。

1. 荷主は、各自のコストではなく荷主全体でのコストが最小になる様行動する。
2. 荷主が時間に対して感じるコスト(時間価値)はあらゆる貨物に対して一定である。
3. 荷主が輸送するコンテナを連続量とする。

これらの仮定のうち、1,3の仮定はフロー予測を迅速に行う為には必須な仮定であり変更する事は困難である。そこで2の仮定をより妥当なものとする事を考える。

2の仮定が持つ意味は、あらゆるコンテナを均質化して等価なものとする事である。しかし、実際には様々な品種がコンテナに積み込まれており、それ故、荷主が感じる時間価値も一様ではなく、ある種の分布を持つ。この分布は一般に対数正規分布に従う傾向が強く[10]、前述の離散型モデルではこの分布に従ってコンテナに時間価値を設定している。この分布が仮定2により一つの代表値で表現されており、ここで失われた分布情報は誤差の発生につながる。そこでここで失われる情報量を緩和する為には、分布を一つの代表値で表現するのではなく、複数パターン(複数)の時間価値によって表現する。

例えば3つの時間価値で分布を近似する場合、下図の様に対数正規分布グラフを $\mu - \sigma$ 、 $\mu + \sigma$ において3分割する

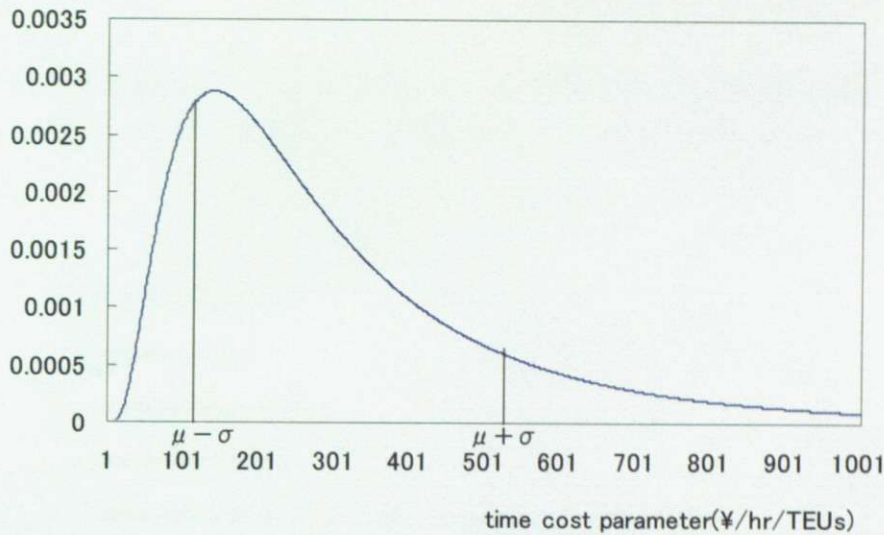


図 3-8 対数正規分布にしたがう時間価値の分布図 ($\mu=5.5$, $\sigma=0.75$)

各ブロックの代表値は、そのブロックにおける確率変数と確率密度関数の積をブロック区間で積分したものを、確率密度関数の区間累積値で除したもので定義する。これは各ブロック内で時間価値の加重平均をとる事を意味する。

以下に $\mu = 5.5$ 、 $\sigma = 0.75$ である場合の代表値、及び区間累積値を示す。

表 3-1 各ブロックの性質

ブロック名称	区間累積値(%)	代表値(JPY/ht・TEUs)
<i>low</i>	0.16	81.85
<i>middle</i>	0.68	265.26
<i>high</i>	0.16	722.47

以上で定義したブロックを導入して荷主行動モデルを再定義しフロー予測式の定式化を行う。

各船舶が輸送する OD 貨物量を更に貨物の持つ時間価値量の大小によって区別して輸送する量を求める為、設計変数 $x_{k,i,j}$ を $x_{k,i,j}^{low}$, $x_{k,i,j}^{middle}$, $x_{k,i,j}^{high}$ と拡張し、それに伴い $\Delta x_{k,i,j}^{id}$ も

$\Delta x_{k,i,j}^{id,low}$, $\Delta x_{k,i,j}^{id,middle}$, $\Delta x_{k,i,j}^{id,high}$ とする。要求輸送量 $R=[r_{i,j}]$ については、表 1 におけるブロック

量に乗ずる事で、ブロック毎に R^{low} , R^{middle} , R^{high} と定義する。時間犠牲量パラメータも表 3-1 で定義されたものをブロック毎に用いる。これらの記号を用いてブロック毎に定式化し、全ブロックの総和をとる事で、3.3.4 で定義した、目的関数及び制約式を拡張した式が得られる。

3.3.7 P to P型輸送システムにおけるフロー予測精度の改善効果

3.3.6 で新たに定義したモデルを用いてフロー予測を行った結果を下記に示す。シミュレーションに用いたデータやグラフの表記は3.3.5における図3-6、3-7に従うものとする。

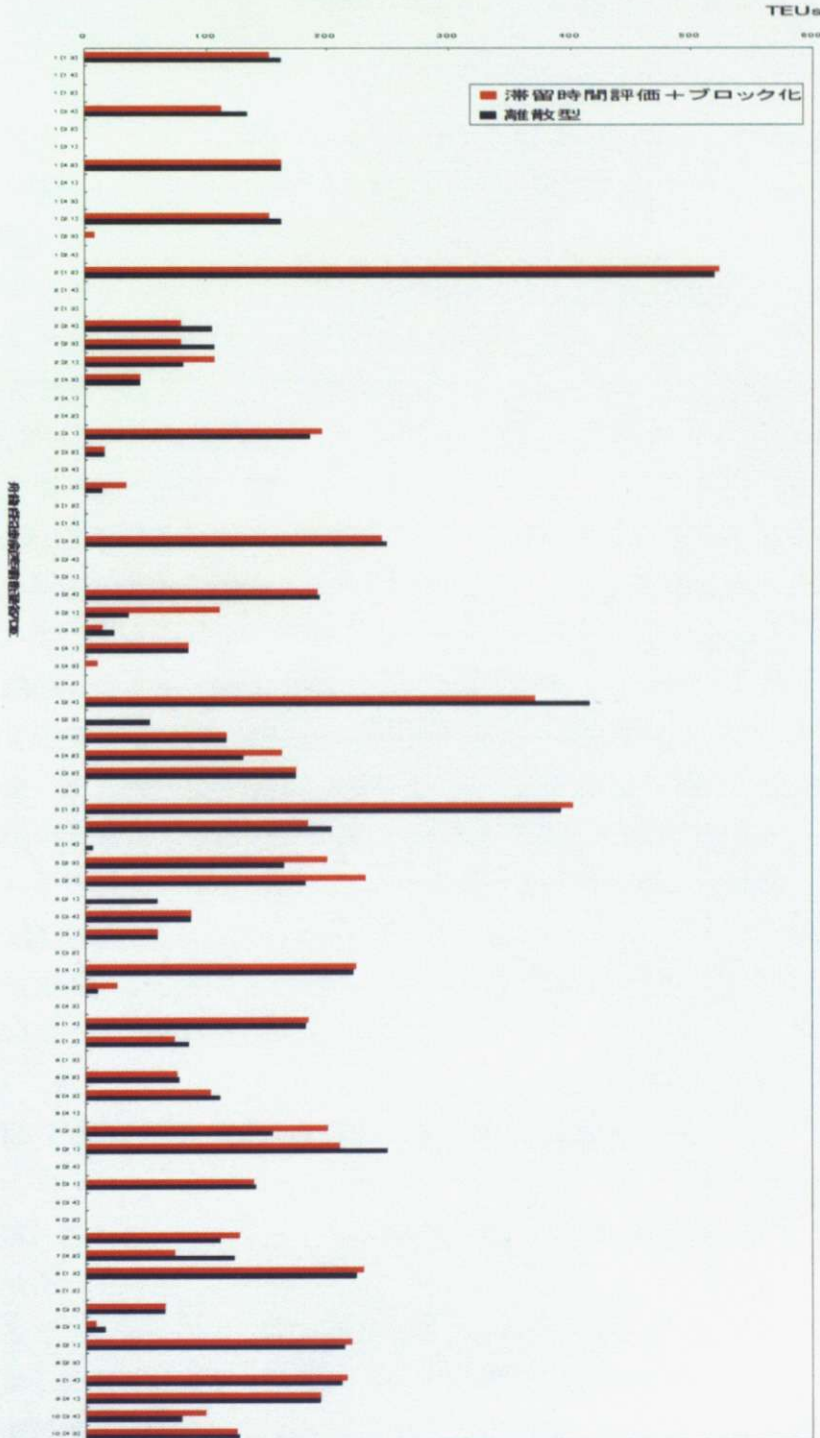


図 3-9 ブロック近似導入モデルと離散型モデルによるフロー比較

上図を図3-7と比較すればやや予測フローの精度が改善された事が分かる。定量的な評価も行う為に、ブロック近似導入前後における参照解からの誤差量の変化を下表に示す。誤差量としては、平均二乗誤差と平均誤差を示している。

表3-2 ブロック近似導入による予測精度向上の定量的評価

	参照解からの平均二乗誤差	参照解からの平均誤差
ブロック近似導入前	938.91	16.28
ブロック近似導入後	383.68	10.31

表より、定量的にも誤差が減少している事が確かめられる。この結果を踏まえれば、分割ブロック数をより細かくしていけばある一定まで誤差を減少させる事が可能である事が分かる。

但し、ブロック近似を導入してフロー予測をするには設計変数も分割して増加させ、それに応じて一部の制約式数を増加させる必要がある。これはフロー予測を行う計算コストの増大を意味しており、その計算量は凡そブロックの分割数に比例して増加する[9]。果たしてそれだけの計算コストに見合った効果が得られるかを吟味した上で導入の是非を決定すべきである。

本研究では、このブロック近似は導入しないものとする。導入しない理由を二つ挙げる。一つは3.3.5で検討したモデルケースではブロック近似導入前でも高精度なフロー予測が行われており十分に実用に耐えると判断した為である。他方は、本研究が日中間のように比較的近海の海上輸送を主対象としてスケジュール設計を行う為である。近海輸送では輸送距離が短い為、経路毎の輸送時間の差は比較的緩やかであり、それ故、貨物が時間価値分布を持つ事による、貨物フローへの影響も緩やかになる。反対に遠距離輸送システムを対象として設計する際には経路毎の輸送時間の差が拡大する為、貨物の時間価値分布を考慮する事がフロー予測の精度に重大な影響を及ぼす。

すなわち、遠距離輸送システムや船舶の速度差が大きいシステムを対象とする際にはブロック近似の導入は効果的であるが、近海輸送や船舶の速度差が小さいシステムでは効果が計算コストに見合わず効果的とは限らない。

3.3.8 P to P型輸送システムにおけるフロー予測まとめ

- 本項では、P to P型モデルによる貨物フロー予測を行う為のモデリング及び定式化を行った。
- 適切なモデリングにより、高精度なフローが高速に得られる事をデータより示した。
- 滞留コストの概念をモデルに導入し、その重要性について示した。
- 更に予測精度を向上させる為に、貨物の時間価値分布をブロック近似で表現する手法を示した。しかし、本研究については適切な手法ではないので導入しない。

3.4 D to D型モデルによるフロー予測

3.4.1 D to D型モデルについて

前項では港間での貨物移動を対象として各船舶が積載するOD貨物量を予測するモデルを開発した。しかし現実には貨物はドアからドアへ輸送されるものであり、P to P型モデルで想定していた“各港で貨物が発生し目的地を港として持つ”という設定は成り立たない。輸送システムの構造が変化すれば港に集まる貨物量自体が変化してしまう為、任意の輸送システムにおいて船舶が輸送するOD貨物量を適切に予測するには、現実には貨物が発生する地点から吸収される地点までの貨物流を予測していく事が不可欠である。

そこで本項では、前述のP to P型モデルを拡張し、ドアからドアへの貨物流を予測する事で船舶が積載するOD貨物量を予測するモデルを開発する。但しドアからドアへの輸送を密に扱う事は、規模面から不可能であるので、ある一定ドアを集約し都市から都市への輸送として扱う事とする。以下、このシステムをD to D型輸送システムと呼ぶ。このD to D型輸送システムは下記の特徴を持つ。

1. 船舶は港から港へ貨物を輸送する。
2. 港から都市の区間は内陸輸送モードによって輸送される。
3. 一定期間に輸送するべきコンテナが内陸都市で随時発生し、其の総量は所与。
4. 各コンテナは都市を目的地としてもつ。

この輸送システムにおける貨物フローを予測するために、D to D型モデルにおける輸送設備のモデル化、及び荷主行動のモデル化を行なう。そして、それらを合わせた輸送システムのモデルを基にフロー予測式を構築する。

3.4.2 D to D型輸送システムにおける輸送設備のモデル化

輸送設備のモデル化を行うにあたりP to P型輸送設備モデルに課した仮定を同様に用いる。更に陸路に関するモデル化が必要なので下記の仮定を新たに導入する。

1. 陸路の輸送モードとしてはトレーラーのみを想定する。
2. 各トレーラーは都市⇄港間で直行輸送する。
3. トレーラーは常時利用可能。

4. トレーラーは、港と都市が同一の地域にある場合のみ輸送を行う。
5. トレーラーの移動速度は常に一定とする。
6. トレーラーに対する積み降ろし時間、給油時間はかからないものとする。

ここで各仮定の妥当性について確認しておく。

1の条件に関して：

港と都市間を輸送する内陸輸送のモードとしては、トレーラー輸送の他に鉄道輸送が存在する。しかし、鉄道輸送は旅客輸送ダイヤの影響を受け微量のみしか輸送できないので、ここでは除外した。

2、3、4の条件に関して：

トレーラーはコンテナ一個を輸送する為、直行輸送以外の経路の存在を仮定する必要は無い。またスケジュールに従って輸送するわけではないので、前もって予定しておく事で常時利用可能である。その経路としては一般には都市⇄都市間を輸送するトレーラーも多数存在する、しかし、本研究は日中間の様な海で隔てられた国家間の海上貨物輸送の効率化を目的としている為、国家間輸送に関与しないトレーラーのみによる輸送については考慮しない。4の条件は陸上輸送経路が不可能な、海で隔てられた港⇄都市間の陸上輸送を排除する条件であり、必要不可欠な条件である。日中のケースでは区域として国家を想定する。

5の条件に関して：

トレーラーの移動速度は高速道、一般道で劇的に変化する。しかし本モデルが貨物フローを予測する為のものであり大まかな輸送に要する時間をモデルで再現する事で十分である事を踏まえれば、許容可能な仮定である。

6の条件に関して：

いずれも微小時間なので、考慮せずとも影響は微小である。

以上で、新たに導入した仮定を踏まえて構築したモデルの概形図を下記に示す。

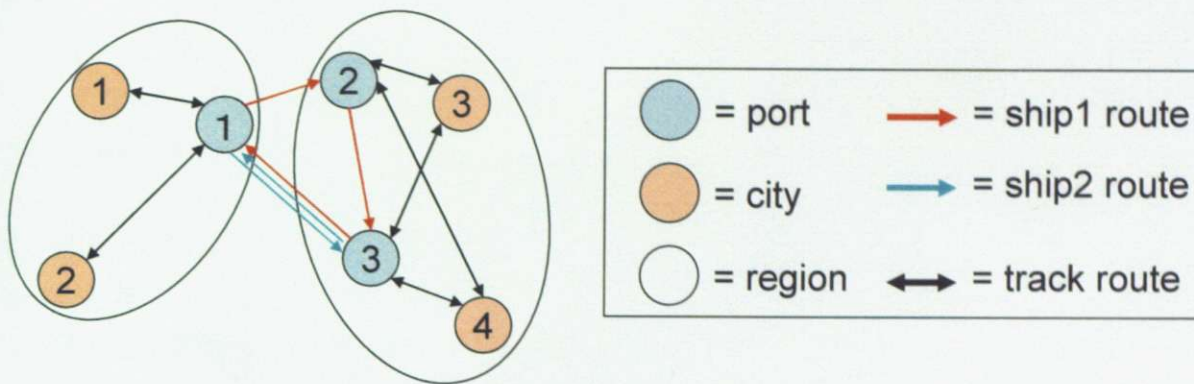


図 3-10 4都市3港2船団のイメージ

図3-10において各船舶の航路が色別に記述されている。これらの航路に加え各船舶は運航時刻情報が与えられている。

このモデルにおいて各貨物が発生地点から設定された目的地へ移動する。この際、取りうる経路は複数存在する。例えば都市①で発生し都市④へ向かうコンテナについて考える。導入した仮定の基では、3通りの輸送経路が存在する。この三種の経路を詳述したものを下記に示す。

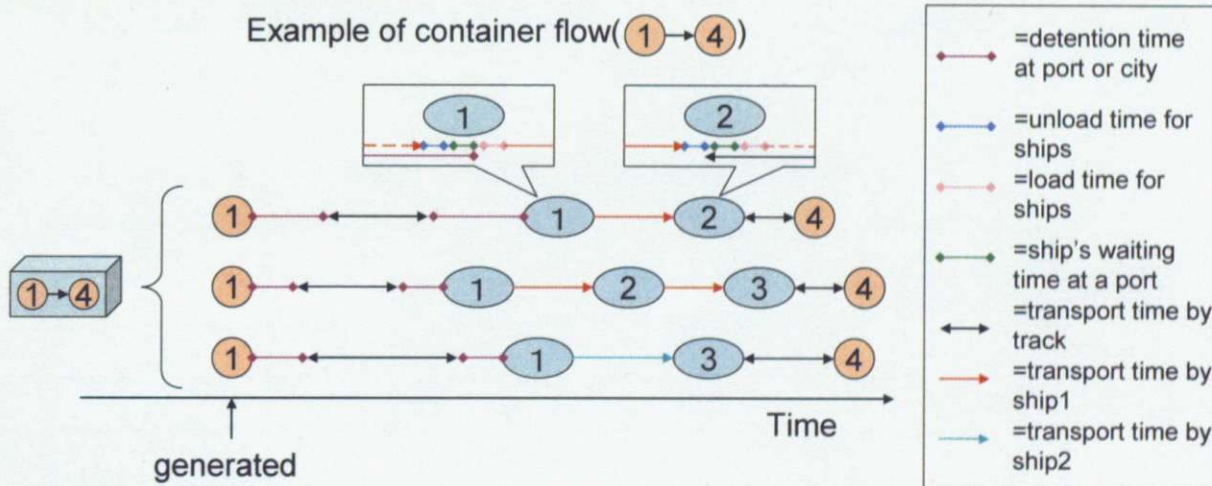


図 3-11 貨物の輸送経路例

上図はP to P型における経路図を拡張したものである。都市①から港①へのトレーラー輸送に関しては、港①で船舶が積みを開始する時刻までに輸送完了すればよいので任意の時刻で記述している。

さて、上記の経路のうちどちらを選択するかは荷主の行動基準によって決定される。よって、P to P型同様、次に荷主の行動モデルを構築する。

3.4.3 D to D型輸送における荷主行動のモデル化

D to D型における荷主行動モデルもP to P型と同様であり、同様の仮定の下、荷主全体で下記の3項目の総コストを最小化するように行動する。

- ① 運賃コスト
- ② 輸送時間コスト
- ③ 積み込み開始までの港における滞留時間コスト

3.4.4 D to D型モデルにおけるフロー予測式

以上で定義した物流設備モデル及び荷主行動モデルを用いて、フロー予測式を構築する。一週間での貨物フローを予測する事を考え、目的関数となる荷主に生じるコストを順次定義していく。求めたい変数はP to P型同様、各経路で輸送される貨物量であり、これを $x_{Di,Pj,Pk,Dl}^k$ と表す。この変数に振られているインデックスは5つあり、 D_i 、 D_l がODを示し P_j 、 P_k が積み港、及び降ろし港を、 k が船舶名称を表す。これと船舶 k のスケジュールを参照する事で具体的な経路と1対1に対応する。

定式化に用いる記号が複雑化しているので、主に用いる記号の定義を表3-3に示しておく。

表3-3 定式化に用いる記号と定義

記号	定義	記号	定義
P	港の集合	$Arr^k = [arr_i^k]$	船舶 k の港 i 到着時刻(day)
D	都市の集合		
P^k	船舶 k が経由する港の集合	$Dep^k = [dep_i^k]$	船舶 k の港 i 出港時刻(day)
$Ctr = [ctr_{i,j}]$	トレーラーの運賃(JPY)		
$Csh = [csh_{i,j}]$	船舶の運賃(JPY)	lsh^k	船舶 k の積み時間(hr)
		ush^k	船舶 k の降ろし時間(hr)
$Cti = [cti_{i,j}]$	時間価値パラメータ (JPY/hr・TEUs)	$R = [r_{i,j}]$	都市間での週間要求輸送量 (TEUs)
		Cdp	港と都市間の陸路輸送が存在する(港、都市)の集合
$Ddp = [ddp_{i,j}]$	港都市間距離(km)	str	トレーラー速度(km/hr)

1) 運賃コスト

$$f_1 = \sum_k \sum_{(Di, Dl) \in D \times D} \sum_{(Pj, Pl) \in P \times P} x_{Di, Pj, Pk, Dl}^k \cdot (ctr_{Di, Pj} + ctr_{Pk, Dl} + csh_{Pj, Pk}) \quad (Di, Dl) \in D \times D, (Pj, Pl) \in P \times P \quad (3-20)$$

(3-20)式は各経路で発生する運賃、すなわち都市から港、港から都市のトレーラー輸送及び港間の船舶輸送によって発生する運賃を当該経路で輸送される貨物量に乘じ、全経路で総和を取ったものである。これにより荷主全体で生じる運賃コストが求まる。

2) 輸送時間コスト

$$f_2 = \sum_k \sum_{(Di, Dl) \in D \times D} \sum_{(Pj, Pl) \in P \times P} x_{Di, Pj, Pk, Dl}^k \cdot cti_{Di, Dj} (ttr_{Di, Pj} + ttr_{Pk, Dl} + tsh_{Pj, Pk}^k) \quad (Di, Dl) \in D \times D, (Pj, Pl) \in P \times P$$

$$ttr_{Di, Pj} = ddp_{Di, Pj} / str$$

$$ttr_{Pk, Dl} = ddp_{Dl, Pk} / str$$

$$tsh_{Pj, Pk}^k = 24 \times (arr_{Pk}^k - dep_{Pj}^k) + lsh^k + ush^k \quad (3-21)$$

(3-21)式は、各経路で発生する輸送時間、すなわち都市から港、港から都市のトレーラー輸送時間及び、港間の船舶輸送にかかる時間を時間価値パラメータを用いてコスト換算し、それを当該経路で輸送される貨物量に乘じ、全経路で総和を取ったものである。これにより荷主全体での輸送時間コストが定義される。各経路におけるモード別の輸送時間についても記述した。トレーラーについては積み下ろし時間を0としているので単純に距離/速度で輸送時間を、船舶についてはスケジュールを用いて輸送時間を定義しており、図3-11の経路図に従って、移動日数を時間に変換し積み降ろし時間を足し合わせたものとする。

3) 滞留時間コスト

滞留時間コストも、P to P型と同様の概念で行う。滞留時間に当たる線分は図3-11で示されている通り、このモデルでは二つ存在する。それぞれ、都市での滞留と港での滞留を意味しているが、これらの滞留時間を足し合わせて評価したとしても問題はない。そこで図3-12の様に、滞留は都市でのみ発生させ、船舶の積み開始時刻に港に到着する様トレーラー輸送が開始されるものとする。

輸送経路例(①→④)

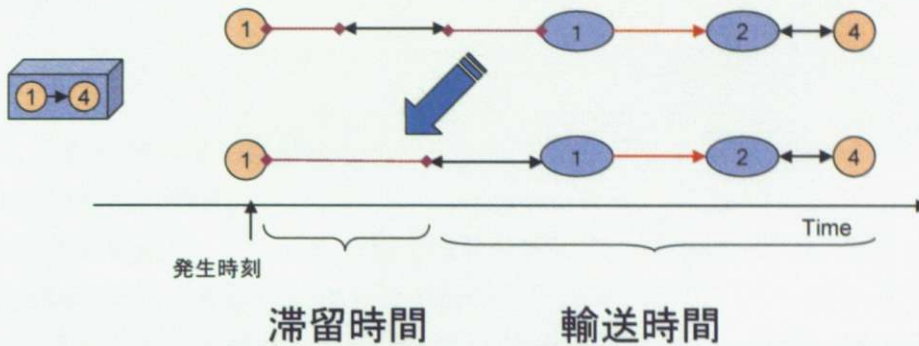


図 3-12 滞留時間を都市に集約したケース

このような手続きを行う事で、結局は P to P 型における滞留同様に定義していく事が可能になる。今回は都市で滞留が発生するので、都市の貨物発生に対して以下の仮定を導入する。

仮定：

1. 貨物は一定の割合で発生する

この仮定の下、都市での滞留コストに対して理想的な状況を図示すると下記の様になる。

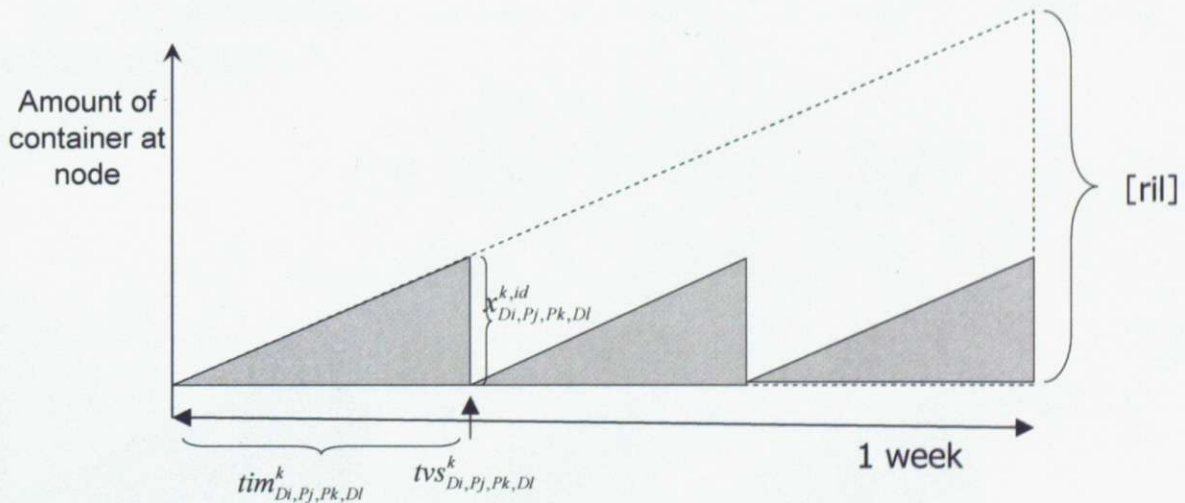


図 3-13 D to D 型における港での滞留状態の理想像

図 3-13 における $tvs_{Di,Pj,Pk,DI}^k$ は、図 3-3 とは異なり、船舶の積み開始時刻ではない。D to D 型モデルでは図 3-12 に示したようにトレーラーの輸送開始まで滞留が

発生するので、その時刻を表している。この時刻は経路毎に求まり、下式で表される。

$$tvs_{Di,Pj,Pk,DI}^k = dep_{Pj}^k - (lsh^k + ddp_{Di,Pj} / str) \quad (3-22)$$

これは、船舶の積み開始時刻からトレーラーの輸送にかかる時間分遡った時刻であり、仮想積み開始時刻と呼ぶ。

また輸送間隔も変化し、この仮想輸送時刻を用いて下式で表される。なお、式中の k' は仮想輸送開始時刻が船舶 k の次となる船舶名を示す。このモデルでは k' と k が等しいケースも多々存在するが同一の場合でも必ず積み港、もしくは降ろし港は異なるので仮想輸送開始時刻は区別される。

$$tim_{Di,Pj,Pk,DI}^{k'} = tvs_{Di,Pj,Pk,DI}^{k'} - tvs_{Di,Pj,Pk,DI}^k \quad (3-23)$$

これを用いれば理想輸送量は P to P と同様の概念により下式で表される。

$$x_{Di,Pj,Pk,DI}^{k,id} = r_{Di,DI} \cdot tim_{Di,Pj,Pk,DI}^k / \sum_k tim_{Di,Pj,Pk,DI}^k \quad (3-24)$$

次に、この理想的な状態から他の条件によって変化した延べ滞留時間を考えると、下記の色つきの面積になる。

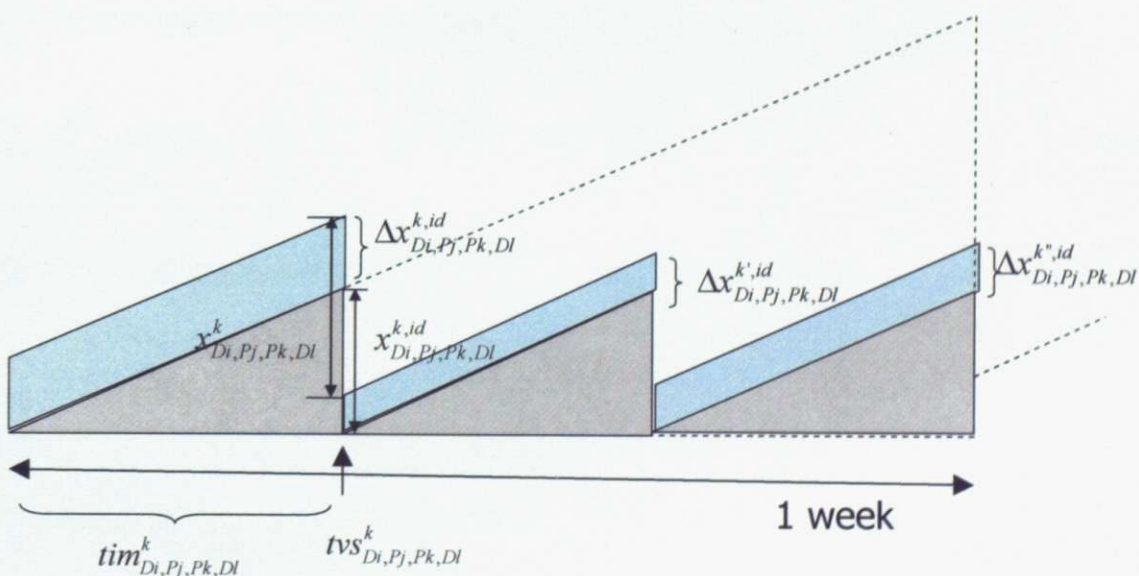


図 3-14 D to D における滞留状態の実像

実質的には、延べ滞留の増加量に当たる図中の平行四辺形部分の総面積を評価する事で十分であったので、この面積を求めそこに時間価値パラメータを乗じ、全ODについての総和を取る事で滞留コストとする。

$$f3 = \sum_{(Di,DI)} \sum_{(Pj,Pk)} \sum_k cti_{Di,DI} tim_{Di,Pj,Pk,DI}^k \Delta x_{Di,Pj,Pk,DI}^{k,id} \quad (Di,DI) \in D \times D, (Pj,Pk) \in P \times P \quad (3-25)$$

よって、荷主全体での総コストは、

$$f(x) = f1 + f2 + f3 \quad (3-26)$$

となる。

(3-26)を目的関数として最小化する事で、各経路で輸送される貨物流を予測する。設計変数は理想量からの増分を表す変数が追記され、

$$x = (x_{Di,Pj,Pk,DI}^k, \Delta x_{Di,Pj,Pk,DI}^{k,id}) \quad (3-27)$$

である。

これらの変数に対してはP to P型と同様の制約が存在し、 $x_{Di,Pj,Pk,DI}^k$ に対しては下記の通り。

①一週間の要求輸送量を満たしている条件

$$\sum_k \sum_{(Pj,Pk)^k} x_{Di,Pj,Pk,DI}^k = r_{Di,DI} \quad (Pj,Pk)^k \in P^k \times P^k \quad (3-28)$$

②フローが正である条件

$$x_{Di,Pj,Pk,DI}^k \geq 0 \quad (3-29)$$

③非輸送区間ではフローが生じない条件

$$x_{Di,Pj,Pk,DI}^k = 0 \quad (Pj, Pk) \notin P^k \times P^k \quad (3-30)$$

$$x_{Di,Pj,Pk,DI}^k = 0 \quad (Di, Pj) \notin Cdp \cup (DI, Pk) \notin Cdp \quad (3-31)$$

これは、海上の経路が存在しないか、陸路での経路が存在しない輸送経路では輸送できないという制約であり、図3-11で示したような実在する経路のみに限定する為の式である。

④輸送制約を満たしている条件

$$\sum_{(Di,Dj)} \sum_{(Pj,Pk)} x_{Di,Pj,Pk,DI}^k \leq m^k \quad (3-32)$$

ここでの m^k も船舶 k の最大積載数であり、船舶 k が輸送する各種フローを重ねていった際に、船舶 k の最大積載量を越える部分が現れない事を示す。

$\Delta x_{Di,Pj,Pk,DI}^{k,id}$ に対する制約は下記の通り。

⑤理想量からの増加量が正である条件

$$\Delta x_{Di,Pj,Pk,DI}^{k,id} \geq 0 \quad (3-33)$$

また $x_{Di,Pj,Pk,DI}^k$ と $\Delta x_{Di,Pj,Pk,DI}^{k,id}$ の両者にかかる制約は、

⑥理想量と実輸送量とのつりあい式を満たす条件

$$x_{k,i,j} - \Delta x_{k,i,j}^{id} + \Delta x_{k',i,j}^{id} = x_{k,i,j}^{id} \quad (3-34)$$

となる。

以上で挙げた制約式(3-28)～(3-34)は設計変数に対して一次の制約式であるので、下記のように表現されるまとめる事ができる。

$$g(x) \leq 0 \quad (3-35)$$

よって、貨物フローは(3-26), (3-27), (3-35)を用いた下式解く事で得られる解のうち貨物フローに相当する要素を抽出したものとなる。但し、下式はP to P型モデルと比較し設計変数が増加しており、求解に必要な計算量は大幅に増大する。

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ g(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (3-36)$$

3.4.5 D to D型モデルにおけるフロー予測

上記で定義した式は、P to P型モデルをベースとして拡張する事で得られた式であるので、新たに追記した陸路モデルが不適切でない限り、高精度なフローを短時間で算出できる。また陸路モデルの適切さについては3.4.2で既に述べたので、ここでは予測の精度評価に重点をおくのではなく、例題を通じて、どのような出力が得られるのかを示す。

想定する例題は

- 4都市、4港でのフロー予測
- 都市①→③へ輸送する貨物のみが週当たり100TEUs発生している。
- 船舶は4隻就航

を考える。

各港、都市間の距離は及び区域設定は下図の通り。図中における黒線が港間距離(miles)を、赤線が港都市間距離(km)を表す。青色のノードは港を表している。

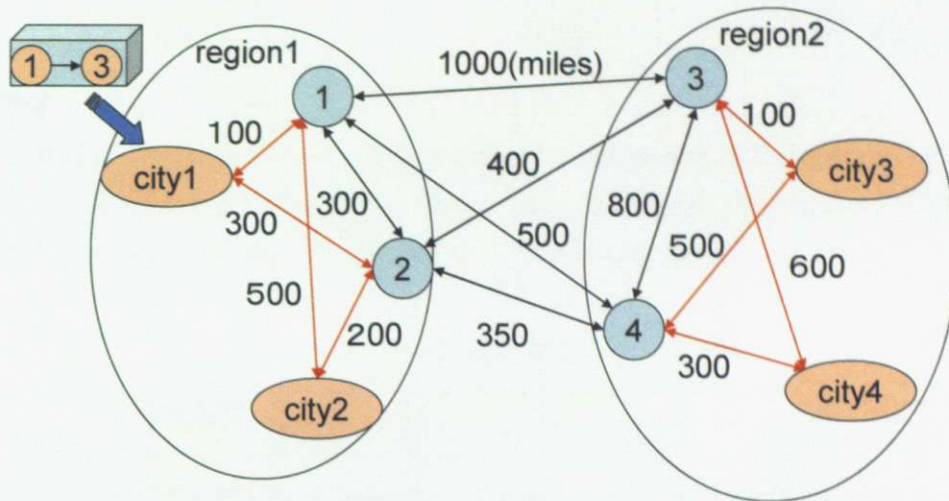


図 3-15 例題における各種距離の設定

上図のシステムに就航している船舶のスケジュール及びフロー予測に関連するデータを下記に示す。

表 3-4 船舶の運航スケジュール

ship_ID	port1	arr time	dep time	port2	arr time	dep time	port3	arr time	dep time	port4	arr time	dep time
1	2	2.0	2.6	4	3.3	3.9	3	5.1	5.7	1	7.8	8.4
2	1	1.0	1.5	3	3.8	4.3	4	5.7	6.2			
3	1	0.0	0.6	2	1.5	2.2	3	3.4	4.0			
4	2	4.0	5.1	3	6.2	7.3	4	8.9	10.1			

表 3-5 船舶の基礎データ

ship ID	船速(knot)	最大積載量(TEUs)	船舶タイプ
1	20.1	161	RoRo
2	18.5	752	LoLo
3	14	392	LoLo
4	15.5	614	LoLo

表 3-4 における arr time は到着時刻を dep time は出発時刻を表す。各時刻は基準時刻 0 を日曜日の 0 時とし、そこから間隔尺度 1 を一日として表記している。例えば到着時刻が 2.0 であれば火曜日の 0 時に到着する事になる。また表 3-5 に記載したデータについては、最大積載量と船舶タイプが利用される事になる。

その他データは下記の通り

船舶の運賃：

船舶運賃は全船舶に等しいデータを与えた。この運賃は輸送される経路に関わらず積み港と降ろし港で決まるものとする。但し、LoLo 船と RoRo 船の船タイプでは区別し、それぞれ下表の様に与える。行が積み港で、列が降ろし港を表す。

表 3-6 LoLo 船の運賃 (JPY/TEUs)

port ID	1	2	3	4
1	0	0	40000	40000
2	0	0	40000	40000
3	67000	67000	0	0
4	67000	67000	0	0

表 3-7 RoRo 船の運賃 (JPY/TEUs)

port ID	1	2	3	4
1	0	0	50000	50000
2	0	0	50000	50000
3	100000	100000	0	0
4	100000	100000	0	0

トレーラー運賃：港⇄都市間距離のデータを五十倍した金額に設定した。。

トレーラー速度：25 km/hr

時間価値パラメータ：300 JPY/hr・TEUs

以上のデータを入力し、貨物フローを予測した結果を下表に示す。

表中の左3列には設計変数のインデックスであった船舶名称と、[積み港、降ろし港]、[輸出地、輸入地]のセットが記述されており、これによりどの経路かを間接的に示している。具体的な経路については船舶のスケジュール情報を参照する事で得られる。4列目には当該経路で輸送される貨物量を、5列目には、当該経路に置ける理想量からの剥離を示した。

表 3-8 例題における貨物フロー

ship_ID	[積み地、 降ろし地] (port)	[輸出地、 輸入地] (city)	輸送量	理想量から の増分
1	[2 4]	[1 3]	0.0	0.0
1	[2 4]	[1 4]	0.0	0.0
1	[2 4]	[2 3]	0.0	0.0
1	[2 4]	[2 4]	0.0	0.0
1	[2 3]	[1 3]	0.0	5.7
1	[2 3]	[1 4]	0.0	0.0
1	[2 3]	[2 3]	0.0	0.0
1	[2 3]	[2 4]	0.0	0.0
1	[4 1]	[3 1]	0.0	0.0
1	[4 1]	[3 2]	0.0	0.0
1	[4 1]	[4 1]	0.0	0.0
1	[4 1]	[4 2]	0.0	0.0
1	[4 2]	[3 1]	0.0	0.0
1	[4 2]	[3 2]	0.0	0.0
1	[4 2]	[4 1]	0.0	0.0
1	[4 2]	[4 2]	0.0	0.0
1	[3 1]	[3 1]	0.0	0.0
1	[3 1]	[3 2]	0.0	0.0
1	[3 1]	[4 1]	0.0	0.0
1	[3 1]	[4 2]	0.0	0.0
1	[3 2]	[3 1]	0.0	0.0
1	[3 2]	[3 2]	0.0	0.0
1	[3 2]	[4 1]	0.0	0.0
1	[3 2]	[4 2]	0.0	0.0
1	[1 4]	[1 3]	0.0	0.0
1	[1 4]	[1 4]	0.0	0.0
1	[1 4]	[2 3]	0.0	0.0
1	[1 4]	[2 4]	0.0	0.0
1	[1 3]	[1 3]	0.0	10.4
1	[1 3]	[1 4]	0.0	0.0
1	[1 3]	[2 3]	0.0	0.0
1	[1 3]	[2 4]	0.0	0.0
2	[1 3]	[1 3]	12.6	10.4
2	[1 3]	[1 4]	0.0	0.0
2	[1 3]	[2 3]	0.0	0.0
2	[1 3]	[2 4]	0.0	0.0
2	[1 4]	[1 3]	0.0	0.0
2	[1 4]	[1 4]	0.0	0.0
2	[1 4]	[2 3]	0.0	0.0
2	[1 4]	[2 4]	0.0	0.0

ship_ID	[積み地、 降ろし地] (port)	[輸出地、 輸入地] (city)	輸送量	理想量から の増分
2	[3 1]	[3 1]	0.0	0.0
2	[3 1]	[3 2]	0.0	0.0
2	[3 1]	[4 1]	0.0	0.0
2	[3 1]	[4 2]	0.0	0.0
2	[4 1]	[3 1]	0.0	0.0
2	[4 1]	[3 2]	0.0	0.0
2	[4 1]	[4 1]	0.0	0.0
2	[4 1]	[4 2]	0.0	0.0
3	[1 3]	[1 3]	40.8	0.0
3	[1 3]	[1 4]	0.0	0.0
3	[1 3]	[2 3]	0.0	0.0
3	[1 3]	[2 4]	0.0	0.0
3	[2 3]	[1 3]	4.6	0.0
3	[2 3]	[1 4]	0.0	0.0
3	[2 3]	[2 3]	0.0	0.0
3	[2 3]	[2 4]	0.0	0.0
3	[3 1]	[3 1]	0.0	0.0
3	[3 1]	[3 2]	0.0	0.0
3	[3 1]	[4 1]	0.0	0.0
3	[3 1]	[4 2]	0.0	0.0
3	[3 2]	[3 1]	0.0	0.0
3	[3 2]	[3 2]	0.0	0.0
3	[3 2]	[4 1]	0.0	0.0
3	[3 2]	[4 2]	0.0	0.0
4	[2 3]	[1 3]	42.0	5.7
4	[2 3]	[1 4]	0.0	0.0
4	[2 3]	[2 3]	0.0	0.0
4	[2 3]	[2 4]	0.0	0.0
4	[2 4]	[1 3]	0.0	0.0
4	[2 4]	[1 4]	0.0	0.0
4	[2 4]	[2 3]	0.0	0.0
4	[2 4]	[2 4]	0.0	0.0
4	[3 2]	[3 1]	0.0	0.0
4	[3 2]	[3 2]	0.0	0.0
4	[3 2]	[4 1]	0.0	0.0
4	[3 2]	[4 2]	0.0	0.0
4	[4 2]	[3 1]	0.0	0.0
4	[4 2]	[3 2]	0.0	0.0
4	[4 2]	[4 1]	0.0	0.0
4	[4 2]	[4 2]	0.0	0.0

表3-8では、輸送された総量は100 (TEUs) となり、貨物の輸送は輸出地、輸入地が[1, 3]でのみ行われている。これらは、貨物設定が[1, 3]で100TEUsであったので当然の結果である。これらの貨物は船舶2, 3, 4で輸送され、4種の経路で輸送されている。船舶1が用いられない理由は、RoRo 船の運賃がLoLo より高い事が理由である。モデルの仮定に従えば、RoRo 船は6時間程輸送時間を削減できるが、それに時間価値パラメータを乗じても1800円の価値を生むだけである。それでは当然、10000~33000円の運賃上昇はカバーできない。無論滞留コストの観点から多少船舶1の利用に追い風が生じるが、船舶1は経路も優れていないので全く利用されない結果となった。

船舶の最大積載制約を違反する可能性が0であるにも関わらず用いられている経路が4種の存在するのは滞留コストの影響である。滞留コストを導入せず、運賃と輸送時間のみで考える従来の静的な解析では、単一の経路のみ選択されてしまう。しかし、近似を用いて動的な解析に近い結果を得る本機構ではこの様な問題点が解消されており、ここでも滞留の概念の重要性が伺える。

輸送量と、理想量からの剥離量を示す列を比較しながら見ると、いくつかの経路で理想量からの剥離は生じているのに輸送はされていないというケースが存在する事が確認できる。これは、その経路に向けて積み残しが生じてきたが、その経路で輸送される事は無く、更に次の経路へと積み残していく事を意味していると解釈する。

以上、簡単に例題を解いた結果の見方及びその考察を行った。次に、この結果の利用方法について述べる。本モデルによって得たい情報は、各船舶が様々な港間で輸送する貨物量であった。よって、得られた解を下式により港間での輸送量へ変換する。

$$x_{Pj, Pk}^k = \sum_{(Di, D)} x_{Di, Pj, Pk, Di}^k \quad (3-37)$$

これにより、P to P型で得た $x_{k,i,j}$ と等しい情報がより正確なモデルを通じて得られる。

3.4.6 D to D型モデルまとめ

- 本項では、D to D型フロー予測を行う為のモデリング及び定式化を行った。
- 例題を通じて、適切なフローが得られる事を確認した。
- 計算量についてはP to P型と比較し増大する。とはいえ、港間のみで輸送を捉えるのは適切ではないので、D to D型モデルで解析していく事が望まれる。その為には、計算量の増大を最小限に抑える事を検討していかなければならない。計算量の増大は、貨物を輸送する経路が増大する事に起因するので、適切に都市を集約し

経路の増大を必要最小限に抑える必要がある。

- 本モデルでフロー予測を行う為には、都市間での貨物輸送量データが必要である。ところが、實際上入手可能なデータは港間での輸送量データであり、都市間でのデータは入手困難である。今後、どのようにデータを推定していくか検討する必要がある。

3.5 評価式の定式化

本項では3.2で定義した評価式を具体的に定式化していく事を考える。評価を行う対象期間は一週間とする。3.4、4.5で開発したモデルにより、任意の物流システムにおける一週間の貨物フローを求める事が可能となった。この貨物フローを $x_{k,i,j}$ とする。この値を用いれば、週当たりの総収入を表す(3-4)式は下記の様になる。

$$\text{週当たりの総収入} = \sum_k \sum_{(i,j)} x_{k,i,j} \cdot (c_{i,j}^k - l_i^k - u_j^k) \quad (3-38)$$

上式において、 $c_{i,j}^k$ は船舶kでi, →jへ貨物を輸送するのに発生する運賃を、 l_i^k, u_j^k は同船舶のi, jでの積み費、降ろし費を表しており、それぞれデータとして与えられる。次に週当たりの支出を表す(3.5)式を項別に定式化していく。

(i) 傭船費

船舶kの傭船費はLloyd's Registerのデータ[11]を元に以下の補間式で定義し、

$$\text{傭船費 (JPY/週)} = 1490.1 \times m^k + 206584 \quad (3.39)$$

と表す。 m^k は船舶の最大積載量である。

(ii) 燃料費

船舶kの燃料費は

燃料費 (JPY/週) = 燃料価格 (JPY/k1) × 船舶kの燃料消費量 (g/hr) × 船舶kの週当た

$$\text{り運航時間(hr/週)} \div C \text{ 重油比重 (kg/k1)} \times 0.001 \quad (3.40)$$

で表される。

なお、燃料価格は2004年度のデータより、29163 (JPY/k1) とし、C 重油比重は0.95とする。週当たりの運航時間はスケジュールが所与である為、24(hr/day) × 7(day) から港で停泊する時間を引いたもので計算する。

燃料費を決定する要素として、燃料消費量が残るが各船舶の燃料消費量は、

$$\text{船舶 } k \text{ の燃料消費量 (g/hr)} = 0.13 \times \text{Hp}^k \quad (3.41)$$

で表す。この式中に現れる HP^k は船舶 k の馬力であり船舶データベース[10]を参照して求める。実船データベースが存在しない場合は次の補間式よりもとめる

$$\text{Hp}^k = 0.9 \times \text{Cps}^k \times (s^k)^3 \times (\text{Gross}^k)^{2/3} \quad (3.42)$$

s^k 、 Gross^k はそれぞれ船舶 k の船速と総トン数を表し船舶データベース[12]より求める。 Cps^k は係数であり、

$$\text{Cps}^k = -0.0015386 \times \log_e (\text{Gross}^k) + 0.018806 \quad (3.43)$$

で決定される値である。

(iii) 港湾施設利用費

船舶 k の港湾施設利用費は、

$$\text{港湾施設利用費 (JPY/週)} = 20 (\text{JPY/回} \cdot \text{ton}) \times (\text{Gross}^k) \times \text{寄港回数(回/週)} \quad (3.44)$$

で定義する。港湾施設の利用費は船舶の総トン数に応じて課金されるので、一回当たり利用費を求め、そこに寄港回数に乗じたものである。寄港回数は、スケジュールを参照して求める。

以上で定義したコストを設計船舶分重ね合わせ、

$$\text{週当たり支出} = \sum_k \{(i) + (ii) + (iii)\} \quad (3.45)$$

とする事で週あたりの支出について定義できる。但し、設計船舶の中に就航しない船舶が現れた場合、その船舶の支出は全て発生しないものとする。

以上で定義した式(3.38)から式(3.45)を減じたものが評価式であり、得られる週あたり利益が評価値となる。

3.6 評価モデルの拡張

3.6.1 評価モデルに課していた限定条件について

3.2~3.6 で示した評価モデルは、どちらのモデルもフロー予測の段階で限定条件を課している為、一般的な船舶スケジュール全てに適用可能ではない。そこで評価モデルを拡張すべく、モデルに課していた限定条件を取り払う事を考える。具体的には下記2項の緩和を行う

- ① 各船舶は一週間で航路を周回する。
- ② 船舶の航路は単純閉ループに限定。

3.6.2 周遊周期の多様化

ここまで構築したモデルにおいては船舶の周遊周期を全て一週間としていたが、現実には多様な周期をとる。とはいえ、大半の船舶の周期は一週間であり、その他周期も2週間、3週間、といった、一週間を基準としたものである[11]。これらの周期に限定されるのは、経済活動を円滑に進めるのに一週間単位の周期が適切である為である[13]。

この様な事情を踏まえれば、設計対象船舶航の航路を一週間に限定したとしてもある程度理にかなったスケジュールが得られる。しかし、設計対象外の船舶のスケジュールに対しては貨物フロー予測の段階で航路を変更する事はできないので、変則的な周期を持つ船舶の取り扱いについても考える必要がある。

変則的な周期を持つ船舶が存在するという事は、貨物フローが週毎に変化する事を意味する。よって、これまで用いてきた一週間の貨物フロー予測ではそのフローを適切に捉える事ができない。フローを適切に捉える為の最も単純な方法は、週ごとの貨物フロー変化の挙動が一巡する期間で予測を行う事である。例えば、周期が2週間と3週間の船舶が混在する場合、フロー変化の挙動が一巡するのは船舶の周遊周期の最小公倍数である6週間である。下記に2週間と3週間船舶が混在するシステムにおいて、周期が一週間の船舶が輸送する貨物の週ごとの挙動を示す。凡例は各貨物のODである港名を表す。

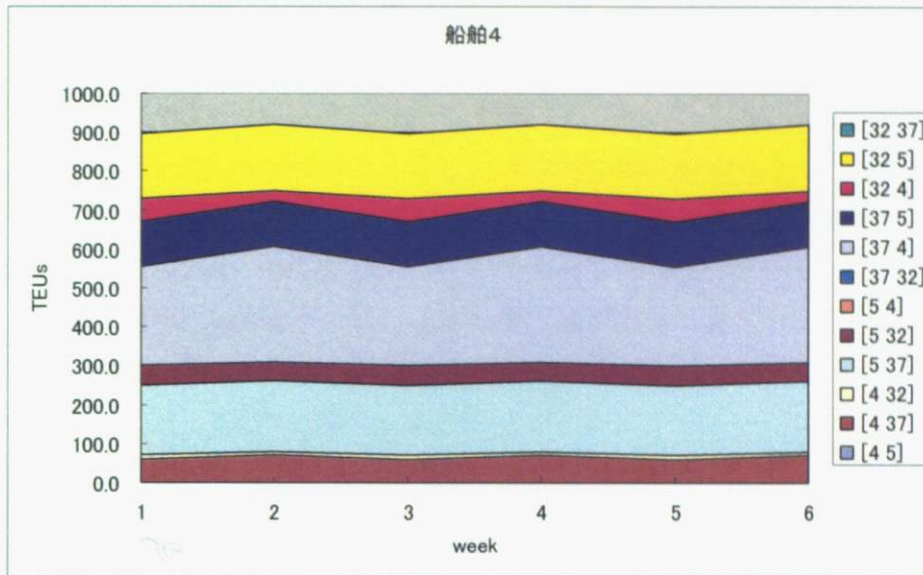


図 3-16 貨物フローの振動例

上図で示した様に貨物フローの挙動を捉えて予測する事は可能であるが、上記の予測方法には設計変数が増大するという問題点がある。これまでは、一週間の予測期間であったので、周期が一週間の船舶であればあるOD貨物の輸送経路は一通りであった。しかし予測期間を6週間にすると、経路は一通りであっても、何週目の経路かを区別する必要があり、それ故、設計変数である各経路で輸送される貨物量も区別され、変数の数は6倍になる。

この様に設計変数を増大させる事は、フロー予測を迅速に行うという本研究の趣旨にそぐわない。また、本研究は船社の利益を最大化する事が目的であるので、週当たりの平均的な利益額を算出して、言い換えれば、平均的な貨物フローを予測して評価する事で十分である。そこで以下、フロー予測期間を一週間とし、特殊船が混在する際の週当たり平均的な貨物流を予測する手法について述べる。

貨物フローが振動する原因はサービススパンが一定でない事である。そこでサービススパンを画一化するため、

①周期がn週間の特殊船は、同質な船舶を週遅れでn-1隻周遊させサービススパンを一週間にする。

という変更を加える。但しこのままでは、週当たりの当該船舶の輸送能力が上昇してしまうので、

②各特殊船の最大積載量をnで割る

という変更を加える。これらの変更を、フロー形成の主体である荷主の行動基準に照らし合わせると、運賃コスト、及び輸送時間犠牲量については等価な変更である事が分かる。しかし、滞留時間犠牲量については等価な変換ではない。特殊船が分裂して隻数

が増大した為、特殊船の輸送頻度が増大し特殊船に有利な変換となっている。この滞留コストについても等価な変換となる様に下記の変更を加える。

③特殊船と、直近の船舶との輸送間隔を $1/n$ 倍してスケジュールを変更する。

この変更により、特殊船の理想滞留量が $1/n$ に減少し、直後の船舶の理想滞留量がその分増大する。理想滞留量を減少させると、同量の貨物を輸送しようとした場合、それだけ直前の船舶からの積み残しが必要となり、特殊船の輸送に不利に働く。また直後の船舶に対しては有利に働く事になる。この有利さは特殊船と直後の船舶の輸送間隔が開く事によって、相殺され後続船に関しては等価な変換である。しかし、同様に特殊船と直近の船舶との輸送間隔も縮小して特殊船に有利に働き相殺されてしまうので、下記の操作を行う。

④特殊船へ積み残す事による滞留コスト増分を計算する際には、輸送間隔をスケジュール変更前で計算する。

これらの操作により、①、②の特殊船に有利な変換が相殺される。また、特殊船の直近の船舶についても④の操作により、特殊船との輸送間隔が①、②を行う前と同値になり理想滞留も変わらない事から等価な変換となる。

以上の①～④の操作を行う事で特殊な周期を持つ船舶を周期が一週間の船舶と同様に扱う事が可能となる。しかし、特殊船の運航スケジュールは分割後も依然として n 週間であるので、一週間スケジュールを作成する必要がある。一週間分のスケジュールとしては、分割した特殊船全てのスケジュールから同一時刻より一週間分のスケジュールを取り出し、重ね合わせたものとする。分割後の各特殊船が輸送する経路別の貨物量は等しくなる事を考慮すれば、このスケジュールで算出される各特殊船の輸送経路を一隻の特殊船の輸送経路のごとく扱い制約式を適用することが可能である。これを特殊船の新たなスケジュールとして扱う事で、フロー予測が可能となる。但し、この断片的なスケジュールの集合体は、滞留コストや運賃コスト、及び各種制約式への適用には十分であるが、輸送時間を算出するに不十分であるので、輸送時間の算出には元の船舶スケジュールを参照する。

任意のデータの下、周回周期が2週間のもの、3週間のものが存在するケース、及び両者が混在するケースについて P to P 型を用いてフロー予測を行ったのでその結果を示す。グラフの見方は図3-6と同様であり、横軸が各船舶の輸送可能な経路を、縦軸がその経路で輸送される貨物量を表す。また、参照解として全船舶の周期の最小公倍数の期間でフロー予測を行った結果を一週間に平均化したものを黒色の棒グラフで示している。



図 3-17 周期が2週間の船舶が一隻存在する場合の貨物フロー



図 3-18 周期が3週間の船舶が一隻存在する場合の貨物フロー

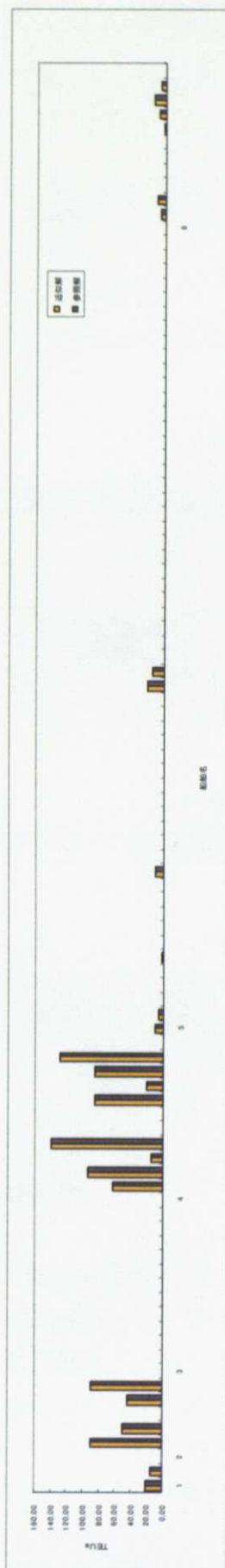


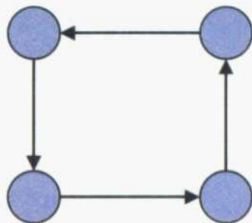
図 3-19 周期が2週間と3週間の船舶が混在する場合の貨物フロー

図3-17～図3-19によって構築した理論より平均的なフローを得られる事が示されている。これにより、多様な周遊周期を持つ船舶に対しても、高速にフロー予測を行う事が可能となった。

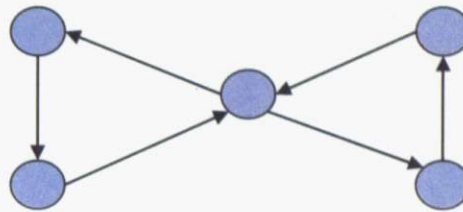
3.6.3 航路形状の多様化

ここまでのモデルでは、船舶の航路形状を単純な閉ループにのみ限定していた。ところが実際には様々な形状の航路を持つ。下記に現実に存在する航路の図を示す。なお、単純閉ループ航路は初等航路と表記している。

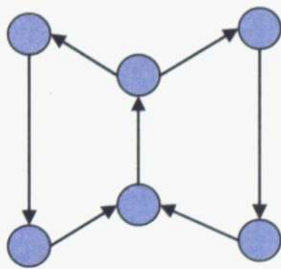
①初等航路



②振り子航路1



③振り子航路2



④n振り子航路

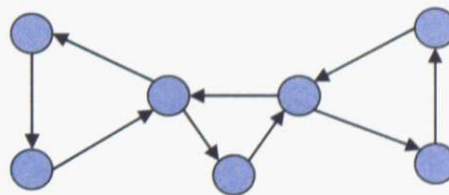


図 3-20 実在する航路の形状分類

実在する航路は、周期的な動きをするので閉ループ構造ではあるが、その形態は様々である。ここでこれらの特殊な形態が存在する事の問題点は、一度のループで同一の港を複数回通過するケースが存在する事である。単純閉ループであれば、港間を移動するOD貨物は一つの船舶では一つの経路で輸送されていたが、同一の港を複数回通過するスケジュールでは、経路も複数存在するし、また同一の経路でも時刻の異なる経路が存在する事になる。そうなれば、当然制約式における輸送制約条件のかかりかたも異なってくる。

この様な問題に対応する方法として、同一の港をインデックスを用いて区別することを行う。例えば②のタイプの振り子航路に対して同一の港を区別し、その航路を書き直すと下記の様になる。

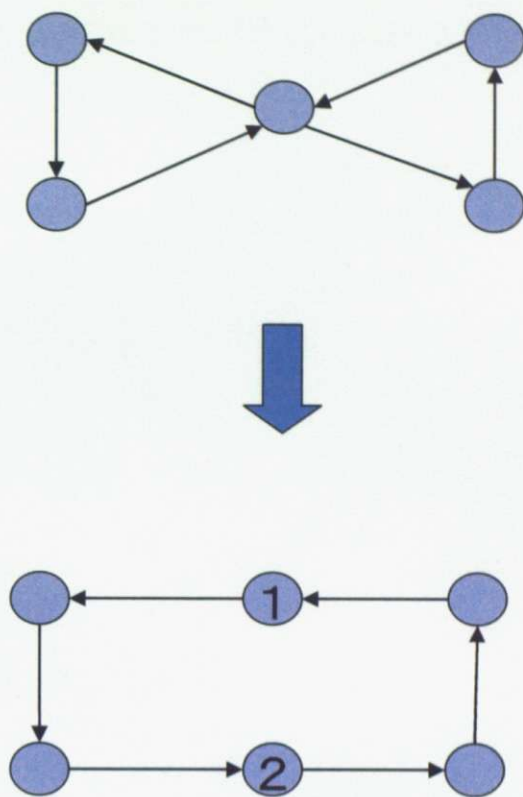


図 3-2 1 同一の港を区別した航路形態

上図の様に、複雑航路も同一港を区別する事で初等航路と同様の形態となる。これは他の形状にも成り立ち、結局は航路が一筆書きの要領で描かれる閉じるループである限り、全て初等航路と同等に扱う事ができる。

3.7 本章のまとめ

本章において、任意スケジュールを船舶に割り当てた際の輸送システムに対して評価を行う機構をおよび具体的な評価式を示した。

評価を行う為のモデルとして、P to P 型、D to D 型の二種を示した。両モデルの特徴は下記の通り。

P to P 型モデルは海上輸送のみを考慮して評価を行うものである。不十分なモデルではあるが高速に評価値が得られる為、大規模問題に対してスケジュール最適化を行う際に用いると効果的である。また、データが入手可能であるという利点もある。

D to D 型モデルでは陸路も含めたモデルによって、海上輸送を評価するモデルである。P to P 型と比較しやや評価に時間を要するが、より正しい評価が可能である。それゆえ、ある程度小さい問題に対して用いると効果的である。但し、各種データが全て入手可能ではなく、データを推定していく必要がある。

また、実問題に対応して複雑なシステムにも対応して評価を行う事ができるようモデルの拡張も行った。

第4章 最適スケジュール探索のアルゴリズム

4.1 概要

設計船舶のスケジュールを多様に変形させ組み合わせ、3章で開発したモデルを用いて各組み合わせの優劣を判定する操作を繰り返し行う事で最適なスケジュールを求める事が可能となった。

本章では、より効果的に最適スケジュールを探索する為に、

- ①スケジュールの組み合わせ変数としての表現方法の検討
- ②効率的な組み合わせ最適化アルゴリズムに対する検討を行う。

なお、②の検討事項であるが、本研究が最終的に目標とする最適化問題の規模が、港数が中国側と日本側をあわせて54港、船舶数が138隻という大規模な問題であり、想定した大規模問題に対して厳密解を有限時間で得られない事が判明している為[8]、近似最適解を効率的に求める手法を検討していく。

4.2 スケジュールの組み合わせ変数としての表現

設計船舶のスケジュール最適化を組み合わせ最適化機構によって行うには、スケジュールが組み合わせ変数により表現される必要がある。ここで用いる変数は、効率的な探索の為に必要最小限に留める事が求められる。本項では、必要最小限の変数によってスケジュールを表現する事について検討を行う。

一般的な船舶の運航スケジュールについて3章で掲載したものを再掲すると下表の様になる[12]。

表 4-1 一般的なスケジュールの表現 (port1 から順に寄港)

ship_ID	port1	arr time	dep time	port2	arr time	dep time	port3	arr time	dep time	port4	arr time	dep time
1	2	2.0	2.6	4	3.3	3.9	3	5.1	5.7	1	7.8	8.4
2	1	1.0	1.5	3	3.8	4.3	4	5.7	6.2			
3	1	0.0	0.6	2	1.5	2.2	3	3.4	4.0			
4	2	4.0	5.1	3	6.2	7.3	4	8.9	10.1			

表 4-1 を見ると、設計船舶のスケジュールを表現していく為には、

- ① 各船舶が寄港する港の名称
- ② 各船舶の寄港時刻、及び出港時刻

が必要であることがわかる。しかし、これらの要素を自由変数としてとると、

- (1) 評価モデルに課している仮定と矛盾するスケジュールが発生する。
- (2) 組み合わせ変数が多くなり、最適解の探索に時間を要する。

といった問題が生じる。

(1) に関して具体的にスケジュールが満たさなければならない条件として下記のもの挙げられる。

(1-i) 港での積み下ろし時間を船型毎に 3 又は 6 時間としていたので、与えられるスケジュールが各港に停泊する時間は最低 6 又は 12 時間必要である。

(1-ii) 港間距離が一定値で与えられているので、船舶が港から港へ移動する時間は船舶毎の最高速度を用いても移動不可能な時間であってはならない。

これらの条件は各船舶が港を通過していく間隔に関するものであるもので、これらの条件を満たすように船舶の運航予定を下記の操作で設定する。以下の操作は船舶の周期が 1 週間の場合のものであるが、周期が 2 週間以上の場合も同様の概念で行う。但し、これらの操作を行う為には、船舶毎に周回周期を設定しておく必要がある。本研究では、設計船舶の周回周期は基本的には一週間に限定して考える。

- ① 船舶が寄港する港、及びその経路を設定する。
- ② 各港での停泊時間を船型に応じて設定し、また港間の移動時間についても平均船速及び港間距離を用いて計算し設定する。
- ③ ①、②で設定される最短周回周期を 1 週間に規格化するために、余剰時間を各港での停泊時間として均等に追加する。

これらの操作のイメージを下記に示す。

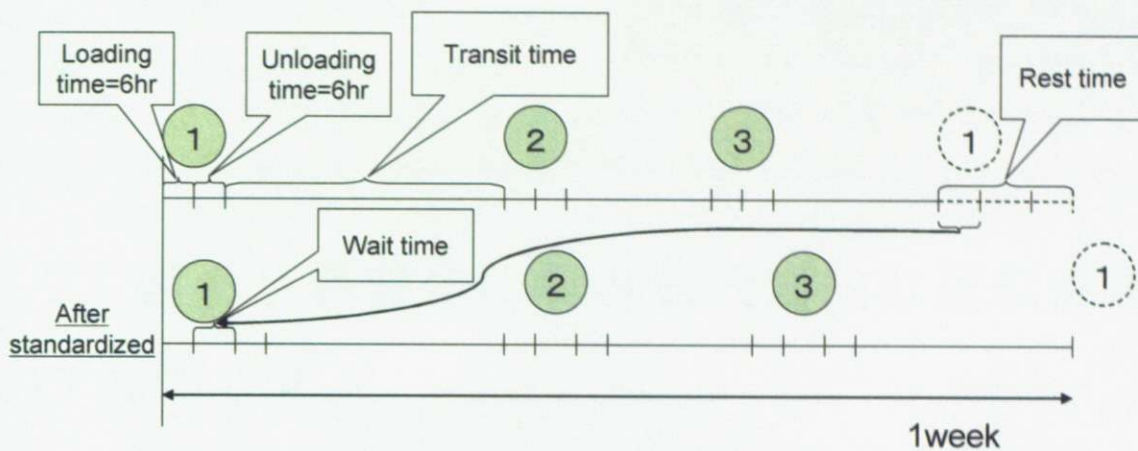


図 4-1 週間の運航予定作成手順

上記の操作により、1週間分の運航表が設定されたが、この時点では各港に到着もしくは出発する時刻情報を持たない。これら時刻情報を与える為には、週の運航がどの時刻から開始されるかを設定されれば十分である。週間の運航予定を帯状に表現し、その開始時刻を与えて全体のスケジュールを作成する様子を下記に示す。図中において、各船舶の図4-1の操作により得られる週間の運行予定を basic schedule として表記している。

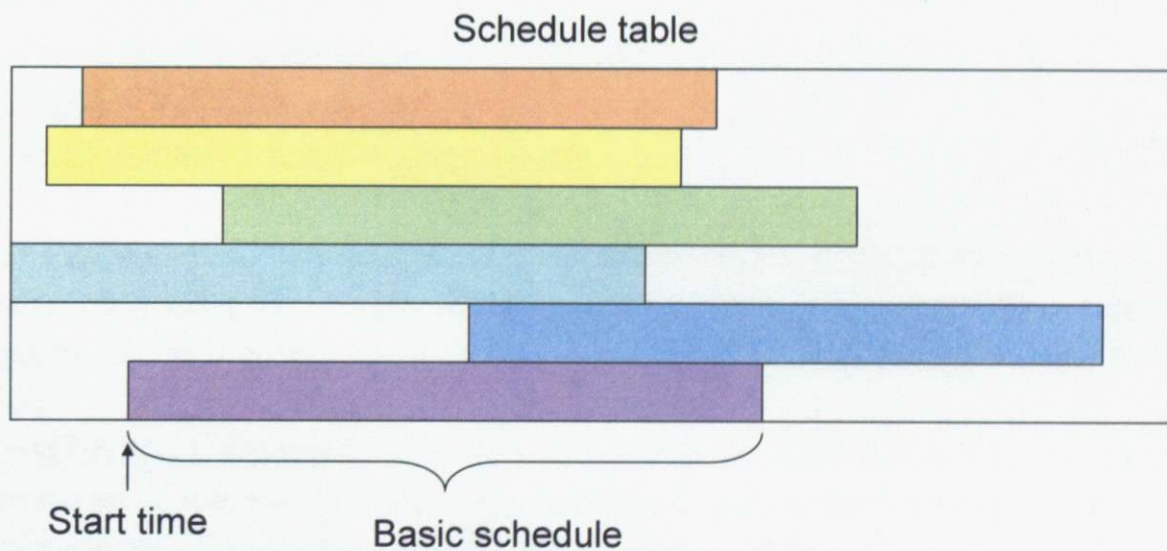


図 4-2 全体のスケジュール作成

これらの操作により評価モデルと整合性を持った設計船舶のスケジュールが得られ、更に設計外船舶の所与のスケジュールを合わせる事でシステム全体のスケジュールとなる。この操作に必要なとなる情報、すなわち組み合わせ変数は、船舶の航路と図4-2

における運航開始時刻のみであるので、スケジュールの構成要素全てを変数とする場合と比較し変数が減少する。船舶の航路は任意の港を基点として、寄港する順に港名を記述する事とする。運航開始時刻は任意のスカラー量であるが、組み合わせ最適化を用いる都合上、0～7 (day)の間の値を0.5刻みで取れるものとする。

4.3 組み合わせ最適化における代表的な近似解法のアルゴリズム

4.3.1 近似解法について

組み合わせ最適化問題は NP 困難な問題に属し、厳密解を求める事が難しい[14]。しかし現実には様々な組み合わせ最適化問題が存在し、一定の精度を持った解を算出する事が求められてきた。これまで、組み合わせ最適化問題に対して適切な解を算出する種々のアルゴリズムが開発されてきたので、それらの手法を紹介すると共に、本問題に対してはどのようなアプローチをとるべきか検討する。

4.3.2 ランダム多スタート局所探索法 (MLS 法)

ランダム多スタート局所探索法 (multi-start local search 以下 MLS) とは

- ① 初期解をランダムに生成する
- ② 生成した初期解を単純局所探索により改善する

という2つのステップを繰り返し行い、この過程で得られた最良解を近似解とするものであり、最も単純な枠組みにより近似解を与えるものである[14]。ここで用いる単純局所探索とは、解 x の近傍における改善解へ逐次移動していく単純な局所探索として定義する。

同種の枠組みで近似解を与える手法として GRASP 法、反復局所探索法 (ILS 法)、適応的多スタート法等が挙げられる[15]。どの手法も、MLS 法における初期解の生成方法に工夫を凝らしたものであり MLS 法より有効な手法として位置づけられる。

4.3.3 遺伝アルゴリズム (GA 法)

遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm 以下 GA 法) とは、生物の進化のメカニズムを最適化手法に応用したものであり、

- ① 初期集合として初期解を P 個生成する。
- ② 初期集合より P 個の個体を複製する。
- ③ i) 複製された個体集合より二つ以上の個体を選択肢し、交叉オペレータにより選択した個体を組合せ、異なる個体を生成する。
ii) ②あるいは③-i) で生成した解に対し、突然変異オペレータによりランダムな変形を加える。
- ④ ①及び③で生成された個体を対象として淘汰オペレータにより P 個の個体に淘汰する。
- ⑤ ④で生成された集合が探索終了条件を満たせば暫定解を出力する。そうでなければ、生成された集合を①の初期集合と置き換え、②～⑤を反復する。

という枠組みからなる[16]。

特徴としては、MLS 法では保持している解が一つであるのに対し、GA 法では複数の解を保持しておき、それらを組合せて新たに解を生成する点にある。それにより、過去の探索履歴が反映した探索を行う事が可能であるし、悪性の解を基点に異なる方向へ探索が進むことで局所解からの脱出も可能である。また、枠組みも大変柔軟性が高いものであり、各オペレータの内容を解くべき問題に応じて適宜変更することで、問題に適した効率的な探索が行う事が可能である。

同様の枠組みの手法として、交叉オペレータとしてより柔軟な枠組みを用いた散布探索法や、GA に局所探索を組合せた GLS 法 (genetic local search) 等がある[15]。

4.3.4 アニーリング法 (SA 法)

アニーリング法 (simulated annealing 以下 SA 法) とは、

- ① 初期解の生成
- ② i) 解 x の近傍にある解をランダムに選択し x' とする。
ii) $\Delta = \tilde{f}(x') - \tilde{f}(x)$ とする。
iii) $\Delta \leq 0$ ならば (改善解であれば) 確率 1 で、そうでなければ確率 $e^{-\Delta/t}$ で $x = x'$ を受理する。
- ③ 探索終了条件が満たされれば暫定解を出力、そうでなければ温度 t を更新して②を繰り返す

という枠組みからなる[17]。

これは、現在の解 x の近傍にある各解 x' に解の良さに応じた遷移確率を設定し、その確率にしたがって次の解を選び局所探索を行っていくものである。改悪解でも遷移確

率を与える事により移動を可能とするので、単純局所探索に比べ、精度の悪い局所解には陥りにくい傾向にある。ただし、遷移確率を単純に解の良さに応じて与えるだけでは、探索が進まないで、物理現象の焼きなましよりアイデアを得て、遷移確率を温度 t で制御する事になる。探索の初期段階では温度 t を十分高くする事でランダムな移動を許し、探索が進むにつれ温度 t を下げていく事で改悪解への移動を制限していく。

同様の枠組みで、遷移確率を異なる方法で制御するものとして、大洪水法 (great deluge algorithm) や閾値受理法 (threshold accepting) 等がある[15]。

4.3.5 タブー探索法 (TS 法)

タブー探索 (tabu search 以下 TS 法) とは

- ① 初期解 x を生成する。タブーリストを初期化する
- ② x の近傍の中から、タブーリストで禁止されているものを除いて最も望ましいと思われる解 x' を $x = x'$ として受理する。
- ③ 探索終了時条件が満たされれば、暫定解 x を出力する。そうでなければ、タブーリストを更新し②に戻る

という枠組みからなる[15]。このタブーリストは最近探索した解が含まれるように制御され、二つの解を行き来するようなサイクリング現象が起こらないように制御する役割を果たす。

TS 法も SA 法同様、単純局所探索を改善し、より良い局所解に陥るような制御機構を備えたものである。同種の手法として、移動戦略に確率的な要素を加えた確率的タブー探索法などが挙げられる[15]。

4.3.6 組合せ最適化における近似解法の全般の枠組みと、本研究で参照すべき手法について

以上、代表的な組合せ最適化における近似解法の枠組みを解説したが、これらの手法以外にもニューラルネットワーク等、様々な有効な手法が存在する[18]。

これらすべての手法は

- I 初期解を生成する
- II 生成した初期解を改善する
- III 探索の終了条件が満たされれば探索を終了する。そうでなければ、IIを反復する

という枠組みに集約する事ができ、各手法は I 及び II に対して種々の工夫を凝らし効

率的に探索を行う事を目的とするものである。また、前述の様々な手法を併用することでより効率的な探索も可能となる。

ここで、どの手法を主軸として近似解法の算出を目指すかという選択が生じる。本研究では、様々な方向へ探索が進む事で局所解から脱出し多様な解を試行可能な GA 法を主軸において近似解の算出を試みるものとする。この様な機構を選択した理由はスケジュール最適化問題の性質に拠る。運航スケジュールの中で寄港する港の順序を入れ替える、もしくは寄港する港を一つ変化させた場合に利益が大幅に変化する事からスケジュール最適化問題は多峰性に富む解空間を保持している事が予想され、その様な広範囲に解空間に対しては広範囲の解を探索して解を導く機構が適切なのである。

次項では、GA 法をどのように実装しているかについて述べ実際に本問題に適用した結果を示す。更に、効率的な探索にはどのような検討をする必要があるか述べる。

4.4 GA を用いた最適化アルゴリズム

4.4.1 GA 法における、各オペレータ及びパラメータの設定

本研究において、近似解を算出するために初期型として、4.3.3 の枠組みに則った単純遺伝アルゴリズムを適用したものの実装を試みる。単純遺伝アルゴリズムの適用に際して、種々のオペレータの働きやパラメータの設定を行う必要がある。本項では、それらの持つ役割の分析を行い、本研究で用いるオペレータやパラメータの設定を説明する。

①各個体のコーディング方法、初期個体生成方法、及び個体数について：

GA を用いるには解をどのように表現するかを設定する必要がある。通常、組合せ最適化問題においては、各組合せ要素のとり値を配列として格納するのが一般的であるが、GA の場合、交叉オペレータや変異オペレータの都合上それらを異なる表現で扱う事が多い。

i) バイナリコード

バイナリコードとは、組合せの各要素を2進数で表現し、各要素を連結させてビット配列の遺伝子として表現するものである。2進数表現のため、用いる記号が0または1のみであり、それゆえ交叉オペレータや変異オペレータを設定しやすい特徴がある。

ii) グレイコード

連続する2つの符号間のハミング距離が常に1となるコーディング法をグレイコーディングという。グレイコードはバイナリコードと比較して、終盤での解探索の効率が良くなるという報告がなされている[19]。

iii) 実数コード

組合せ要素の値をそのまま配列として格納し、個体の遺伝子として表現するものを実数コードという。実数コードに対応した各種オペレータの設定が必要となる。

各手法によるコードの違いを下表に示す。

表 4-2 各コーディング法におけるコード

表現対象	2進コード	グレイコード	実数コード
0	0000	0000	0
1	0001	0001	1
2	0010	0011	2
3	0011	0010	3
4	0100	0110	4
5	0101	0111	5
6	0110	0101	6
7	0111	0100	7
8	1000	1100	8
9	1001	1101	9
10	1010	1111	10
11	1011	1110	11
12	1100	1010	12
13	1101	1011	13
14	1110	1001	14
15	1111	1000	15

本研究では各種オペレータの設定が多少手間になるが、本問題の性質を踏まえて実数コードによるコーディングを採択している。採択した理由は、探索の無駄を省く為である。例えば、最適化に用いる港が10港である場合、各港を区別して表現する為には、少なくとも0～9の十通りの数字を表せる必要となる。この時、2進コードやグレイコードでは4桁のビットを準備する事になり、必然10～15の数字も存在してしまう。それらの数字に対しては対応する港が無いので、生成された個体が無駄になるのである。

実数コードを用いた初期個体のコーディングは下記のプロセスで行う、

- ① 設計対象となる船舶の周遊周期を設定。
- ② 乱数を用いて船舶が寄港する港数の上限を設定
- ③ 設定した港数の範囲でかつ周遊周期で周回可能な範囲まで乱数を用いて港名(港ID)を取得する事を反復。ここで得られた港IDを順に並べてベクトル表現したものを航路とする
- ④ ①～③を各船舶に行う。
- ⑤ ④で得られた各船舶の航路ベクトルを船舶ID順に並べる。
- ⑥ ⑤で生成された遺伝子の跡に、各船舶の周遊開始時刻を乱数取得し並べる。

上記のプロセスで得られる遺伝子の例を下図に示す。

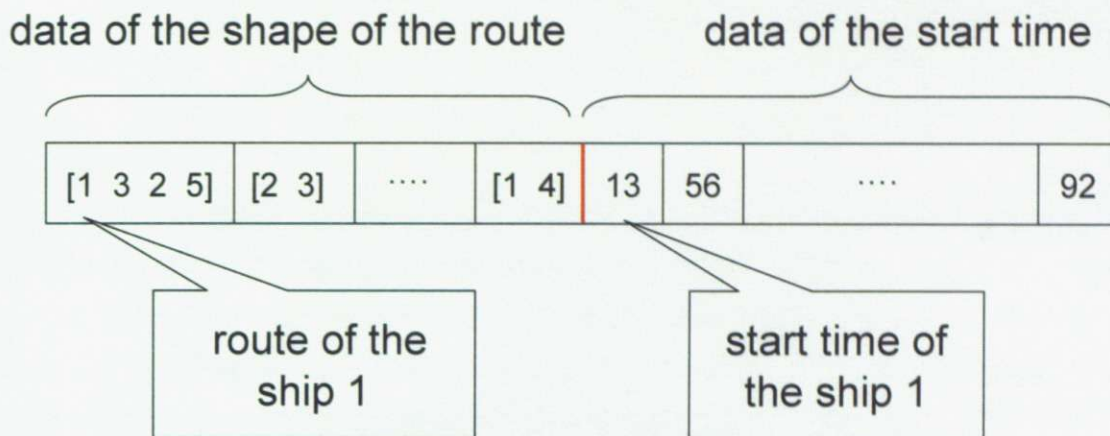


図 4-3 遺伝子の表現

次に個体数についてであるが、あまりにも少ないと、集団がすぐに同一の個体で埋め尽くされてしまい、精度の低い局所解に陥る初期収束が起こってしまう。逆に個体数が多いと幅広い探索が行える半面、世代交代に時間がかかり個体の進化を効率的に行えない。本研究では、これら両方のファクターを考慮し、個体数を 200 と定める。

②交叉オペレータ及び交叉率：

本研究で用いる固体のコーディングに対して適用可能な交叉オペレータとして以下を考える。

i) 一点交叉

2 個体を選択し、それらの遺伝子をランダムに決定した交叉点から後半同士を交換する。

ii) 二点交叉、k 点交叉

二点交叉とは、一点交叉における遺伝子の交換を選択した 2 箇所の交叉点ではさまれた部分で行うものである。k 点交叉はこれを拡張し、k 箇所の要素を選択し、その間にはさまれる遺伝子を飛び飛びに交換したものである。

iii) 一様交叉

一様交叉とは、k 点交叉における交叉点を定めないものであり、毎回ランダムな交叉点数を与えて交叉を行うものである。マスク交叉ともいう。

一般に交叉点が多くなれば、多様な解の生成が可能となるが、その分、解に対する変形すなわち破壊も大きくなってしまい、適応個体が生成されにくくなる。本研究では、組み合わせ変数のなかの航路ベクトルに対して、設定した期間中に周遊できなければな

らないという比較的強い制約がかかってくるので、効果的に適応個体を生成する為一点交叉を用いる事とする。なお航路情報が格納された点遺伝子座で一様交叉を発生させる場合は、通常の交叉を行った後、更に乱数を用いて、当該遺伝子座の航路ベクトルに対しても交叉を行う。

次に、ランダムに選択した2個体に対して実際に交叉オペレータを実行する確率を定めなくてはならない。この確率を交叉率と呼ぶ。交叉率は低すぎると、進化ペースが鈍くなってしまう。逆に、交叉率が高すぎると前世代の個体そのまま残らず、前世代の個体に対しての突然変異による探索が行えなくなってしまう。しかしある程度高くても、世代が経つにつれ同一の個体に収束していく事を考慮すれば、問題はない。今回は交叉率として一般的な、0.6~0.9の間で0.65を用いる事にする[17]。

③ 突然変異および突然変異発生率：

突然変異オペレータは、解の多様性の維持及び、探索空間の確保の両者の役割を担うオペレータである。一般に高すぎると、交叉により生成された良性の解を破壊してしまう恐れがあるし、逆に低すぎると十分な探索空間が保持されず精度の悪い局所解で探索が終了してしまう可能性がある。

突然変異の与え方は、一般的なバイナリコードで表現される場合、遺伝子長の逆数程度の確率で各遺伝子座の0, 1を反転させるのが良いとされている[17]。これを実数コードに適用する場合、そのまま適用できないので、設定し直す必要である。

まず、通常のバイナリコードにおける突然変異について考えてみる。遺伝子長が n の遺伝子に対して、各遺伝子座の要素を $1/n$ で反転させるという事は、平均すると、ある遺伝子に対して一つの遺伝子座で反転が起こるというものである。これを実数コードで考えてみると、期待値としては一つの遺伝子座の要素がランダムな値に変更されるという事に対応する。

すなわち、実数コード表現に対応する突然変異オペレータとしては、

- i) 発生率は各遺伝子座に対して遺伝子長の逆数程度
- ii) 発生時は、各遺伝子座がとりうる値、もしくはベクトルを、ランダムに選択するとして定義する。

④複製・淘汰オペレータ

GAにおいて、解の多様性の保持が探索の効率を決める重要なファクターとなる。

あまりにも多様な解を保持してしまうと最適解の方向へ探索が進まず(停滞)、逆に解の多様性が初期に失われてしまうと(初期収束)、交叉、変異による探索が十分に行われないうまま、精度が著しく低い局所解に陥る可能性が高い。

その為、複製・淘汰戦略に関して様々な研究が行われており、有力な手法として MGG (minimal generation gap) の世代交代が挙げられる [20]。
MGG における各オペレータの働きとしては、

複製オペレータ：集団から適応度を無視してランダムに個体を選択する。

淘汰オペレータ：交叉を行う基となる 2 個体とそれより生成される 2 個体をあわせて家族と考え、家族内でのエリートを保存し、残りの 3 個体から適応度に比例した選択率で 1 個体を選ぶ。

というものである。

本研究ではこの MGG に基づき、さらに複製オペレータにもエリート保存戦略を適用したものを採用する。その際、保存するエリート個体数は 1 個体とする。

これらのオペレータを実行するにあたり、各個体の適応度を算出する必要がある。適応度としては、目的関数が利益の最大化であったので利益額で与える。もちろん単純に利益額で与える事が適切であるとは限らない。というのも、各個体の適応度にあまり差が出ない問題であれば、良性個体の選択圧が低くなり、効率的な淘汰が行われず停滞が起こる事が予測されるし、逆に適応度に激しい差が生じるようであれば、良性個体の選択圧が高まり初期収束が起こる事が予測されるからである。しかし前述の MGG を用いれば、多少適応度の算出方法が好ましく無いものであったとしても、解の優劣の判定さえ出来る物であれば、停滞や初期収束に陥らずに、進化の過程を経る事が出来る。よって、本研究では適応度は単純に利益額とする。

4.4.2 GA 法における探索終了条件

4.4.1 で設定したオペレータ及びパラメータによって、GA 法を用いた探索が可能となる。残りの設定事項として、探索の終了条件が挙げられる。

本研究で与える、探索終了条件としては、

- ① 最低世代交代数として 100 世代以上の交代を行う。
- ② 暫定解の更新が 50 世代以上行われていなければ探索を終了する。
- ③ 最大探索回数である 1000 世代に到達すれば、終了する。

の 3 条件を課した。これらは解くべき問題の規模に応じて、適正な値が変化するのでその都度考察する必要がある。

4.4.3 初期型 GA における探索性能

4.4.1 及び 4.4.2 で設定した内容に基づいた GA のプログラムを実装し、初期型の単純 GA による解探索性能を評価する。

解く問題としては、港数が 8、船舶数が 10 程度の中規模な問題を設定する。解析に用いるモデルは P to P 型を用いる。設計目的は、開発時期の都合上、3 章で述べた評価式の最大化とは異なり、システム全体での総コスト最小化となっている。この際のコストとしては、船社、荷主に発生するコストの総和を考えおり下式で定義される。また、最適化の方向が異なるので個体の適応度としては総コストの逆数を与えている。

$$\text{総コスト} = \text{運航費} + \text{荷主の時間犠牲量} + \text{荷役費} \quad (4-1)$$

ここでは、探索性能の評価を目的とするので、目的関数が異なる事に問題はないと判断した。なお、港間の距離としては、8 港を 1 週間で一周できるような近距離の港を仮想データとして入力した。この様に設定した理由は幅広い実行可能領域を保つためである。また、探索終了条件についても、十分な探索を行わせる目的で、強制的に 1000 世代まで計算を行う事とする。

この条件下で、シミュレーションに必要な仮想データを入力し、シミュレーションを行い、暫定解の推移を下図に示す。解の精度の比較対象として、MLS により構築した暫定解を示す (MLS で用いた単純局所探索の具体的な内容については 4.5.2 に記述する)。

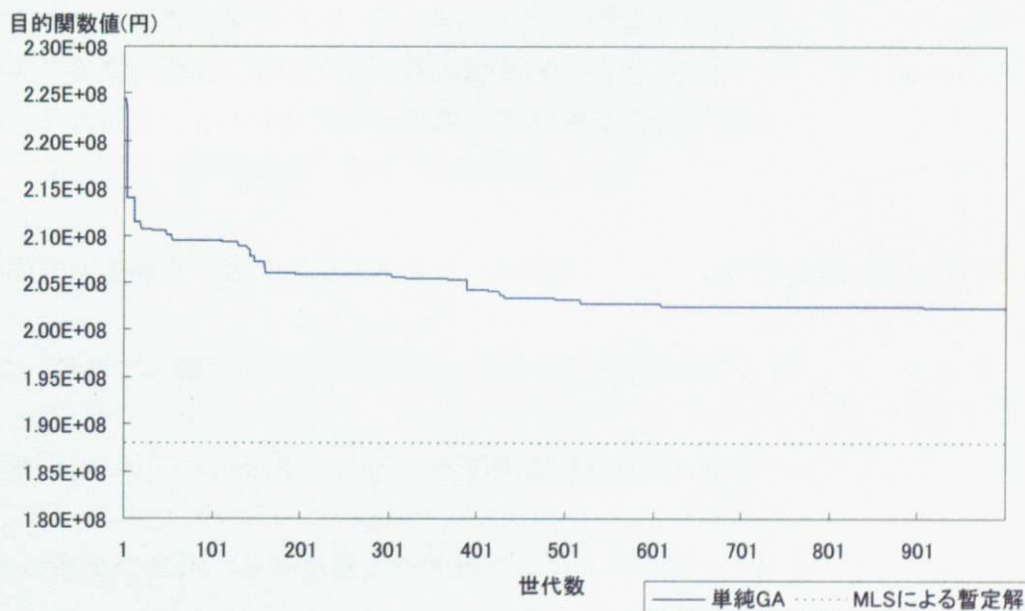


図 4-4 初期型 GA における探索性能

図4-4より、初期型のGAでは、1000世代シミュレーションを行ったところで、MLS程度の精度すら実現できていない事が伺える。

より有用な解を得る為に、以下、実装したGAの改良を考える。

4.4.4 ペナルティー関数法の適用

組合せ最適化問題において、最適解は実行可能領域と制約により実行不可能な領域との境界上に存在する場合が大半である[15]。このような性質を鑑みると、より実行可能領域と実行不可能領域との境界上の探索を集中して行う必要がある。その為、実行可能領域、実行不可能領域という概念をなくし、実行不可能領域をも探索空間に含めて探索を行う手法が良く用いられる。

そのような仮想的な探索空間を生成するにあたり、通常はペナルティー関数というものを考える[15]。ペナルティー関数とは、解が実行不可能領域上に存在するとき、その制約違反量に応じて表されるものであり、これを目的関数値に足し合わせる、もしくは掛け合わせる事で、仮想的な目的関数値を算出し、実行不可能領域に存在する解をあたかも実行可能解であるかの様に扱う事が可能となる。そこで初期型GAに、このペナルティー関数を導入する事を試みる。

本研究において、実行不可能領域とは、3章で述べた評価モデルで評価ができない領域を表す。より厳密に表現すれば、設定したスケジュールでは貨物フロー予測の段階で課される制約に違反する為貨物フローが予測できない領域である。これは、ここで設定している目的関数、すなわち総コスト算出についてもあてはまり、荷主の時間犠牲量を算出するのに必要な貨物フローが予測できない領域である。そこで、これら貨物フローが予測できない領域に対しても一定の評価をする為、貨物フロー予測式において制約を違反する量に応じてペナルティーを課し目的関値を設定する。

ここで用いる目的関数は、下式で定義する。

$$\text{目的関数} = \text{運航費} + \text{荷主の時間犠牲量} + \text{荷役費} + \text{フロー制約式違反量} \times 100000 \quad (4-2)$$

また、3章で定義した評価式に対しては下式で定義する。

$$\text{評価値} = [\text{収入}] - ([\text{支出}] + \text{フロー制約式違反量} \times 100000) \quad (4-3)$$

(4-2)は最小化され、(4-3)が最大化されるのでペナルティーは逆向きにかかる事になる。

4.4.5 ペナルティー関数法を適用した GA の探索性能

4.4.3 と同一の初期個体に対して、4.4.4 の式(4-2)で設定したペナルティー関数を適用した目的関数を最小化する際の探索性能を単純 GA と比較したものを下図に示す。

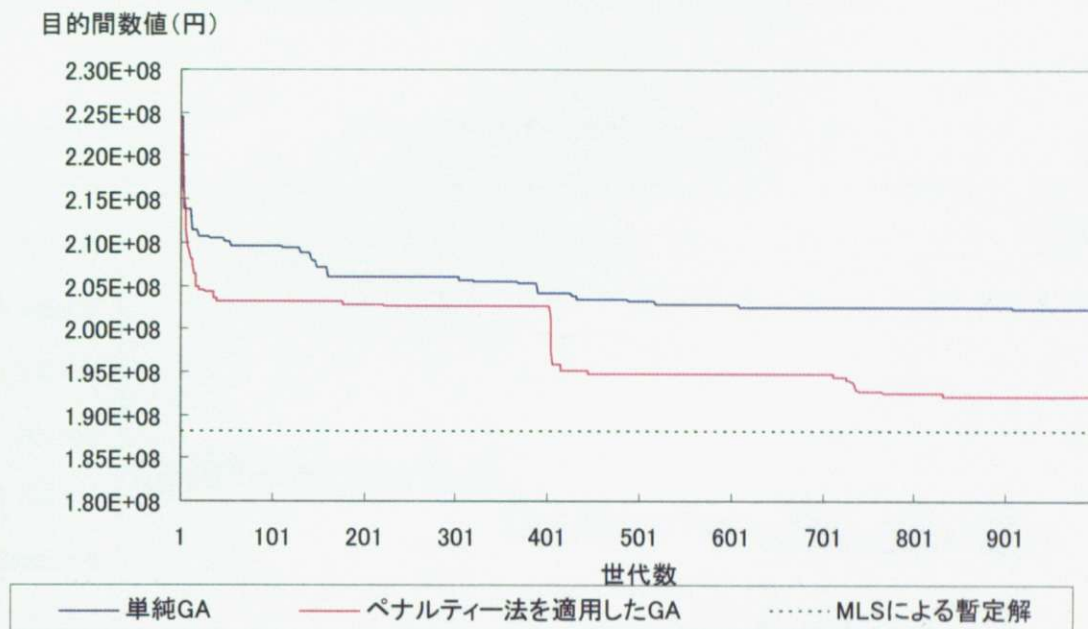


図 4-5 ペナルティー法を適用した GA の探索性能

図4-5より、ペナルティー関数を導入する事で、解の探索性能が上昇した事が伺える。しかし、依然1000世代経過してもMLSで算出した暫定解の精度すら実現出来ない。この原因についての考察を以下に述べる。

このような結果が得られた原因としてはいくつかの要因が考えられる。まず、一つ目の要因としてはペナルティーの与え方が正しくなかったという事が挙げられる。一般にペナルティー係数を決定するにあたり、最終的な暫定解が実行可能領域に含まれる様に十分な量のペナルティーを与える必要がある。しかし、逆にペナルティー係数を高く設定しすぎると、ペナルティー付きの個体が適応できずに死滅してしまい、解の探索性能の上昇に貢献しない事になる。通常は多くの実験を行い、問題に応じて適切に定める事になるが、数回の実験程度では最適な値に設定するのは困難を極める。以上の事を考えると、数回の実験より設定した上記のパラメータでは適切でなかった可能性は否定できない。しかし、探索の中途における暫定解のいくつかに実行不可能領域のものが含まれている事を確認できたので、ペナルティー係数の設定が非常に不良なものであったとも考えにくく、これのみが直接的な原因であるとは思われない。

次の要因としては、個体数の少なさが考えられる。図4-5で得られる暫定解の推移を見ると、凡そ500世代程度までに暫定解の更新がほぼ行われなくなっている。この事を詳しく考察する為の下図にペナルティー付きGAで得られる各世代での目的関数の平均値の推移を示す。これより初期の個体からの交叉による探索はおおよそ50世代目までに終了している事が分かる。その後は突然変異による偶発的な発見を主軸とし、交叉によるなだらかな解の改善が行われていると考えられる。

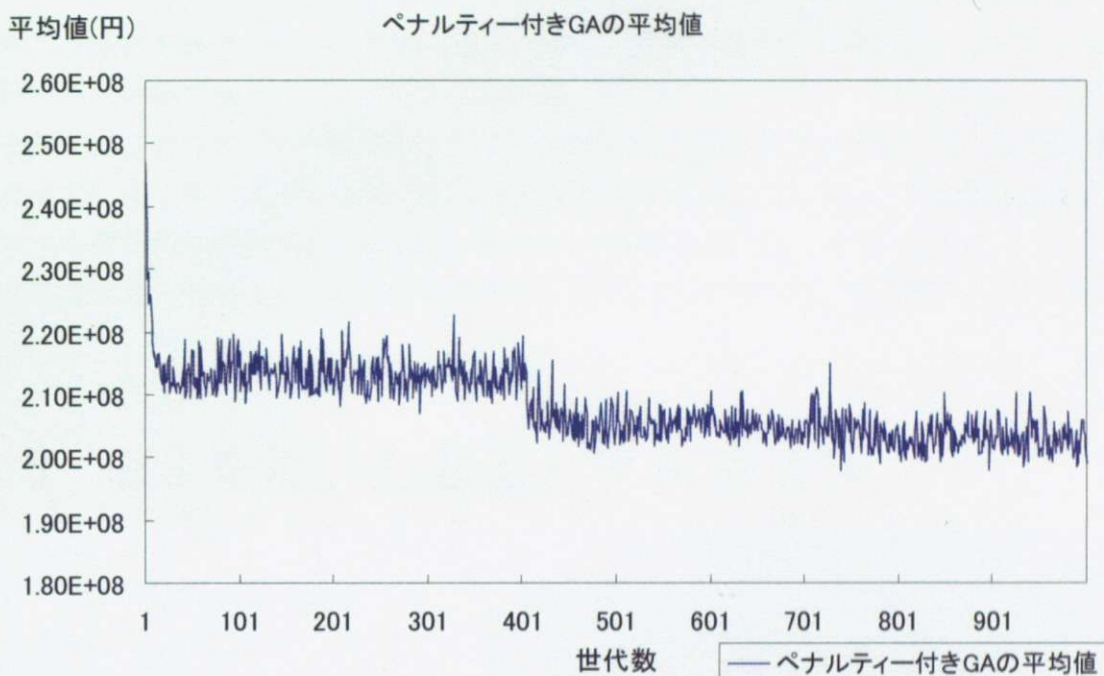


図4-6 ペナルティー付きGAの各世代における平均値の推移

このように探索中期に突然変異による探索に陥ってしまうのは、広すぎる探索空間が要因である。乱数で与えた初期個体をどのように交叉オペレータによって組合せた所で実現できる組み合わせは限られており、探索中期以降では、突然変異オペレータによる組合せパターンの増加能力に頼らざるを得なくなる。しかし、いくら突然変異によって様々な組合せパターンの実現が可能といったところで、広大な解空間における無数のパターンを実現するにはそれこそ膨大な時間を要する事になり、図4-5に示したような暫定解の推移にならざるを得ない。かといって、安易に突然変異率を上昇させると、今度は交叉オペレータによる探索性能に影響を及ぼす事になる。

以上の考察をまとめると

- ペナルティ係数の設定値が、探索性能に直接的な影響を及ぼしているとは考えにくい。
- むしろ、探索空間の大規模なものに対しての GA の探索能力の限界が原因である。となる。

実際、GA を用いた組合せ最適化では MLS と同程度かそれ以下の精度の解しか得られないという報告もある[15]。同書によれば、GA 法による交叉は通常 MLS 法の局所探索によって改善されていく解と比較して、元の解構造を十分には保持していない（言い換えると多様化を頻繁に行いすぎる）場合が多く、探索の集中化の能力が十分で無い事に起因するとの事である。

近年ではこれらの GA の弱点をパラメータ設定から克服するのではなく、局所探索と組合せてしまう事で克服しようという手法がある。そのような GA と局所探索を組合せた手法を遺伝的局所探索法 (genetic local search 以下 GLS) と呼ぶ[7]。

本研究においても GA で有用な解が得られなかったので、GLS の適用を試みる事にする。

4.5 GLS を用いた最適化アルゴリズム

4.5.1 GLS 概要

4.4 で述べたように、本研究が対象とする規模の問題に対しては、GA を用いた近似解法では有用な解が得られない事が判明した。そこで GA と局所探索を組合せた GLS の実装を試みる。

GLS の枠組みとして代表的なものを以下にあげる。

- ① 初期集合として初期解を P 個生成する。
- ② 初期集合より P 個の個体を複製する。
- ③ i) 複製された個体集合より二つ以上の個体を選択肢し、交叉オペレータにより選択した個体を組合せ、異なる個体を生成する。
ii) ②あるいは③-i で生成した解に対し、突然変異オペレータによりランダムな変形を加える。
- ④ ③で生成された P 個の個体に対して局所探索を行う。
- ⑤ ①及び④で生成された個体を対象として淘汰オペレータにより P 個の個体に淘汰する。
- ⑥ ⑤で生成された集合が探索終了条件を満たせば暫定解を出力する。そうでなければ、

生成された集合を①の初期集合と置き換え、②～⑥を反復する

この手法は、GA におけるアルゴリズムに⑤を追記したものに等しい。⑤が局所探索を担うオペレータであり、代表的な局所探索をかけるタイミングは上記の通り交叉、及び突然変異オペレータにより生成される子世代に対してかけるものである。この局所探索オペレータは別の捉え方をすると、突然変異オペレータを拡張したものとも捉える事が出来る。すなわち、ランダムに変異を起こすオペレータを、近傍探索により解の改善が必ずなされるように変異を起こすオペレータへと変換したものである。ただし、十分な解空間を確保する為にも突然変異オペレータは必須である。この他にも、交叉の際に局所探索を織り交ぜて、より優位な個体が生成されるようにする手法等もある[21]。

本研究では上記の代表的な枠組みに則って GLS 法の実装を行う。実装に際しては、局所探索オペレータの性能を十分に検討して決定しなければならない。局所探索能力が弱ければ、GA の局所探索能力の改善に貢献しないし、逆に強すぎれば GA において初期収束が起こり、十分な解空間を探索できない事につながる為である。

4.5.2 本研究で用いる GLS のオペレータ設定

本研究で用いる GLS の具体的な設定に関しては、4.4 で実装した GA オペレータを流用するものとし、新たに設定する必要がある局所探索オペレータに関して述べる。

局所探索オペレータを設定するにあたり、定めるべき項目としては以下の4つが挙げられる。

- ① どの個体に対して局所探索を行うのか
- ② どのレベルまで局所探索を行うのか。
- ③ 局所探索において、局所解を探索する空間である近傍をどのように設定するのか。
- ④ 近傍内においてどのような解の移動戦略を用いるのか。

上記の番号に沿って、本研究で設定した内容の解説を行う。

①どの個体に対し局所探索を行うか：

理想的には、全個体に対して局所探索を行いたい、実行時間の都合上エリートのみ局所探索を行う事とする。エリートのみ局所探索オペレータをかけたとしても、GA による交叉オペレータの存在や、多数の個体を保持するという特徴を考えると局所解から脱出し、異なる解へ移動することが可能であろうという判断に基づく。

②どのレベルまで局所探索を行うか：

局所探索を行う際に、局所最適解のレベルまで探索を行うと精度の低い局所解に陥り、初期収束を引き起こす可能性が高い。よって本研究では一度の局所探索で、複数の近傍の中から一つを選択し、一度だけその近傍内の解に移動するものとする。近傍の選択については③に記述する。

③近傍設定：

本研究では近傍として以下の5つを用いる

i) r_swap 近傍… 2隻の船舶のルートパターンを入れ替え。

図4-3において航路が格納されている要素から2箇所任意に選択肢し、格納されている航路ベクトルを交換する。

ii) n_swap 近傍… 一つの船舶の周遊航路の内、2つの港の訪れる順番を交換したもの。

図4-3において航路ベクトルが格納されている要素を一つ任意に選択しベクトル情報を取得する。その船舶が[1→4→6→3→(1)]という航路を描いていたとする。ここで、船舶が訪れる順番を2つの港で交換する。例えば4, 6を交換し、[1→6→4→3→(1)]といったルートを生成し、これを当該船舶の新たなルートとして格納する。

ただし、対象船舶の航路長が2であれば、結果は変わらないので、近傍探索は行わない。近傍の大きさとしては、対象とする船舶の航路長に依存し。航路長の円順列の組合せ分存在する。上記のような航路であれば6通りとなる。

iii) n_reduce 近傍

図4-3において航路ベクトルが格納されている要素を一つ任意に選択しベクトル情報を取得する。その船舶が[1→4→6→3→(1)]という航路を描いていたとする。ここで、船舶が訪れる港を一つ減らす。例えば4を訪れないことにし、[1→6→3→(1)]といったルートを生成し、これを対応する船舶の新たなルートとして格納する。但し、対象船舶の航路長が2であれば、その船舶は就航しない様に変更されるものとする。

近傍の大きさは対象とする船舶の航路長に依存し、航路長と同じ数だけ存在する。上記の航路では4通り。

iv) n_add 近傍

図4-3において航路ベクトルが格納されている要素を一つ任意に選択しベクトル情報を取得する。その船舶が[1→4→6→3→(1)]という航路を描いていたとする。ここで、船舶が訪れる港をひとつ、任意の位置に追記する。例えば港5を4と6の間に訪れることにし、[1→4→5→6→3→(1)]といったルートを生じ、これを対応する船舶の新たなルートとして格納する。

但し、新たに追記した際に設定した周遊期間で周回できないケースでは追加しないものとする。

近傍の大きさは対象とする船舶の航路長および、港の数nに依存して決定され、上記の航路では $4 \times n$ 通り。

v) t_swap 近傍… 2隻の船舶の周遊開始時刻の入れ替え。

図4-3において時刻が格納されている要素から2箇所任意に選択し、格納されている要素を交換する。

以上で定めた近傍 i)、ii)、iii)、iv)、v)のうちから、3:3:1:1:2の確率で一つの近傍を選択するものとする。

このような確率に基づいて近傍を選択させるのは、各近傍の特徴に拠る。iii)、iv)の近傍は訪れる港を追記、又は削除するだけであるので、その後最適に順番を並び替える必要がある。そこで、最適に港を並べ直す為に、緩やかに港を並べ直すii)の近傍探索の選択率をiii)、iv)のよりも高く設定する必要がある。またi)の近傍探索も、ii)、iii)、iv)により船舶の航路形状が変化するたびに最適な状態を探す必要があるため、比較的选择率を高く保つ必要がある。

④移動戦略:

一般的な近傍探索における移動戦略としては以下の2通りが存在する。

i) 即時移動戦略

近傍内において改善解が見つければ、即時その解に移動する。

ii) 最良移動戦略

近傍内の解を全て探索し、最良の解へ移動する。

その他に考えられる移動戦略として、

iii) SA法で用いられている様な枠組みを適用して改悪解への移動も可能にする、

iv) TS 法の枠組みを適用して、改悪解への移動も考慮する。

等が挙げられるが、本研究ではこの近傍探索と GA を組合せる為、多少精度の悪い局所解に陥ったところで、交叉や変異オペレータの存在や多様な解を保持する機構により、局所解からの脱出は可能であると判断し、i) または ii) を採択する。

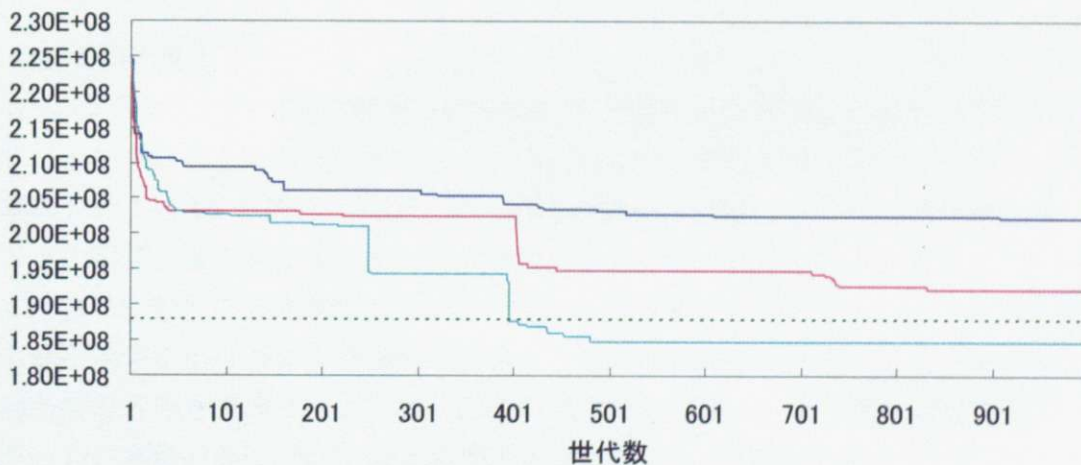
また、ii) よりは i) のほうがより緩やかな局所探索が行われる事となる。ここでは多様な解の保持に重点を置き、精度の低い局所解にはより陥りにくいであろうと予測される i) の移動戦略を採択する事とする。

以上①～④で設定した項目に則り、局所探索オペレータを実装し、GA に付加する。なお、GA の探索性能の比較対象として用いられている MLS による暫定解はこれらで設定した近傍（局所最適解に陥る様に多少変更は加えた）に則って局所探索を行う事で生成されたものである。

4.5.3 GLS による探索性能

4.5.2 で設定した項目に従って実装した GLS の探索性能を分析する。4.4.3 及び 4.4.4 で設定した物と同様のパラメータおよび同一の初期個体を用いて、シミュレーションを行ったものを下図に示す。

目的関数値(円)



— 単純GA — ペナルティを適用したGA — ペナルティ+GLS MLSによる暫定解

図 4-7 GLS 法の探索性能

図4-7より、GLSを用いた近似解法では、MLSを上回る解の精度を示す事が出来た。また、10船団程度の規模であれば、港数が8港であっても500世代までには収束しており、シミュレーション時間から逆算すると2時間程度で有用な解が得られたことになる。なお、暫定解の推移を示すグラフにおいて数箇所急激に暫定値が改善されている箇所があるが、それは船舶が就航しないという航路パターンの発見の為である。

4.5.4 GLS法の改良

4.5.3で示したように、GLS法によってある一定の精度を持った解が中規模な問題に対して得られる事が判明した。しかし、あくまでMLSでの暫定解と比較しての話であり、必ずしもこの局所解の精度が高いとは断言できない。そこで、4.5.1~4.5.3で実装したGLSで得られる解の精度を上昇させる為、改良を試みる。GLS法において収束した解の精度が低いという仮定のもと、以下話を進める。

GLS法により得られた解の精度が低い要因は、局所探索の機能がGAによる局所解からの脱出能力を超えてしまう事である。そのような事態が生じないように十分配慮して、4.5.2で各設定を行ったが、仮に生じているとすればGLS法による解はもはや単純局所探索よりわずかに良い程度の精度しか持たないことになる。そこで、この現象が起きているという仮定のもと、GLS法の改善を考える。

改善方法としては、GAによる探索能力（局所解から脱出し新たな解を求める）を向上させる、もしくは局所探索の能力を低下させるという2つが考えられる。以下これらを行う為の具体的な方法について述べる。

GAの探索能力向上：

GAの探索能力、特に局所解からの脱出能力を増大させる為に、エリートを優先的に交叉に参加させるという方法が考えられる。エリートを優先的に交叉に参加させる事で初期においてはGAの探索性能の上昇が見込めるし、中期においては局所解に陥ったエリートの形質を遺伝的に受け継いだ改悪解を多量に生み出すことで、淘汰オペレータをくぐり抜け、生き残る改悪解の個体数を増加させる事が出来る。これらの悪性の遺伝子にも局所探索をかけるような機構を準備しておけば、別方向からの探索が始まり、現在の局所解の近傍を脱出し、より精度の良い局所解の近傍へたどり着く可能性も高まる。

これらの実現の為に、複製、淘汰に関するオペレータと交叉オペレータに変更を加え、

複製オペレータ：エリートを10個体複製し、その後エリートを除いた残りの個体から重複を取り除いてルーレットのよる抽出を行う。

淘汰オペレータ：エリートを必ず残し、残りは（前世代+子孫）から重複を取り除いてルーレットによる抽出。

交叉オペレータ：エリートは必ず、エリート以外の個体と一点交叉を行う。残りの個体に関しては交叉率に基づいて交叉を行う。
とする。

局所探索能力の低下：

初期型の GLS では同一個体に集中して局所探索がかり、単純局所に陥る可能性があった。そこでこのような事態を防ぐ為に、エリートに対して毎世代局所探索を行うのではなく、乱数により 4 回に一回程度、局所探索を行う様に制御する事とする。さらに GA の探索能力向上の項でも述べたように、他方向からの探索による局所解からの脱出を助長する為に、エリート以外の各個体にも 40 世代に一度程度の確率で局所探索を行うものとする。

以上で定めた内容を初期型 GLS に付加し改良版 GLS の実装を行う。

4.5.5 改良版 GLS による探索性能

初期型 GLS と改良版 GLS の探索性能を比較する為にシミュレーションを行う。設定するパラメータとしては基本的に 4.4.3、4.4.4 及び 4.5.3 で用いたパラメータと同一のものを用いる。但し、局所解からの脱出能力を評価したいので、脱出困難な局所解が多数出来る様に、要求輸送量を 1/3 倍し、就航する必要の無い船舶数が多くなるように設定した。以下にシミュレーション結果を示す。

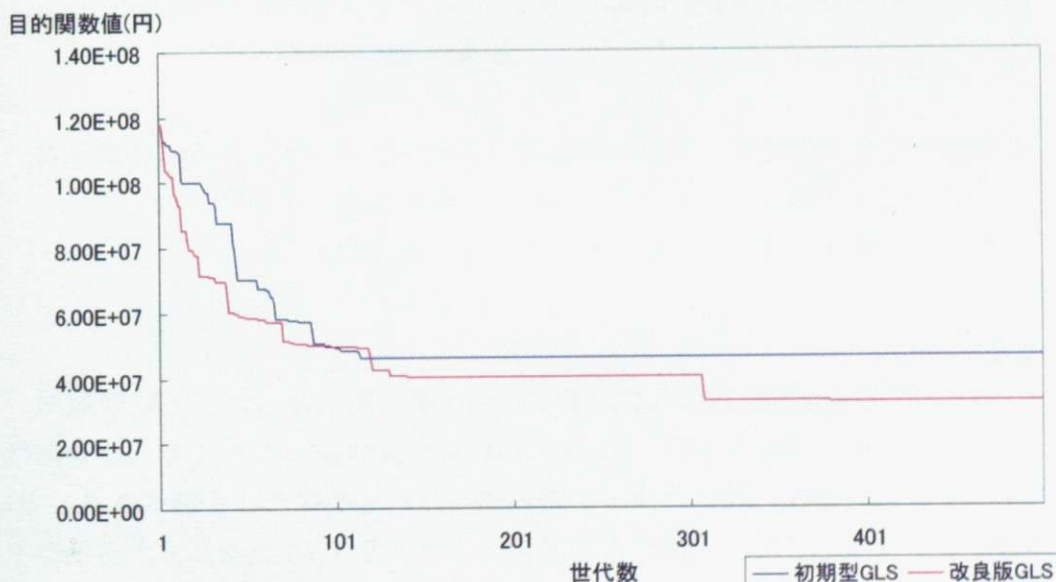


図 4-8 改良版 GLS による探索性能

上図より、探索初期において、改良版 GLS では解の収束が早い事が分かる。この理由としては、①GA の探索能力の向上、及び②局所探索をエリート個体以外にもかかるようにしたことによって、交叉オペレータによる探索効率が上昇した為である。本来このような探索初期における過度の収束は、局所解に陥りやすいので好ましく無いが、淘汰オペレータを変更し、あえて解がより多様になるようにしているので問題ないと判断する。実際、改良版 GLS において、探索初期から中期にかけてもなだらかに暫定解の更新が行われている様子が伺える。

次に、局所解からの脱出能力についてであるが、改良版 GLS の方が暫定解が良い事、探索中期においてもなだらかに暫定解の更新が行われている事、及び探索の終期においても暫定解の更新がなされている事を考えると、局所解からの脱出能力は初期型より上昇したといえる。

以上より、初期型 GLS と比較し、改良版 GLS の探索能力の方が高いと言える。

以下、このような探索能力の差を生む原因について考察し、より柔軟な GLS の枠組みについて述べる。

上記の様に、初期型 GLS と改良版 GLS の探索性能に差が現れたのは、それぞれ GA による探索及び局所探索による解の改善をどのように扱うかに依存する。まず GA と局所探索のメリット、デメリットについて述べ、その後それぞれのアルゴリズムにおける扱い方を考察する。

GA： メリット…多様な解を保持する事により、局所解から脱出する機構をもつ。

デメリット…過去の探索履歴を生かし、独自のオペレーティングシステムを用いて探索を行う為、局所から脱出しながら比較的良好な解を探索する事は可能であるが、逆に探索の集中化の能力が低く、局所最適解の発見が困難である。

局所探索：メリット…探索の集中化の能力が高く、局所解を発見する能力が高い。

デメリット…探索の集中化の能力が高すぎて、精度の低い局所解に陥る可能性が高い。また、局所解からの脱出機構を持たない。

初期型 GLS では、解の探索能力は専ら局所探索に依存する事になり、GA はむしろ解の探索というよりは、局所解からの脱出用に用いられる事になる。対して改良版 GLS では、GA を主軸とした探索を行い、局所探索を新たな解の発見に役立て、更に局所からの脱出能力を高めた GA によって、局所解からの脱出も図ろうとする物である。

すなわち、両者の差異は GA と局所探索どちらに探索の主軸をおくかという事になる。あまりにも GA 主体の GLS では局所解の発見が出来ず、精度の低い暫定解が得られるだ

けであるし、逆にあまりにも局所探索に重点を置くと精度の悪い局所解に陥り、脱出が困難になる。無論、時間が無限にあれば、GA を主軸においたプログラムを回し続ける事で精度の良い解が得られる可能性も高まるが、実用上は、有限時間内にある一定の精度を持った解を算出する事が求められる。よって、GA 及び局所探索による探索比率を最適に制御する事が求められる。

4.5.6 Adaptive GLS とその探索性能

4.5.5 の考察結果を基に、探索主軸を GA と LS で適応的に変化させる事を試みる。すなわち、解の更新が行われていない場合は、LS を行う割合を更新具合に応じて変化させ、エリートに偏向して LS を行う様にする。解の更新が行われれば、再び GA を探索主軸に戻し、十分な探索を行う。その為に、エリートに LS を行う確立 $P(t)$ を以下の式で制御する。エリート以外の個体については、エリート個体と合算で5個体に LS が行われる様にランダムに行う。なお、式中の t は前回の更新からの世代数を示す。

$$P(t) = \begin{cases} \frac{5}{20-t} & t \leq 15 \\ 1 & t \geq 15 \end{cases} \quad (4-4)$$

以下に初期型 GLS、改良版 GLS、Adaptive GLS による探索結果を示す。シミュレーションデータには 4.5.5 と同様のものを設定している。

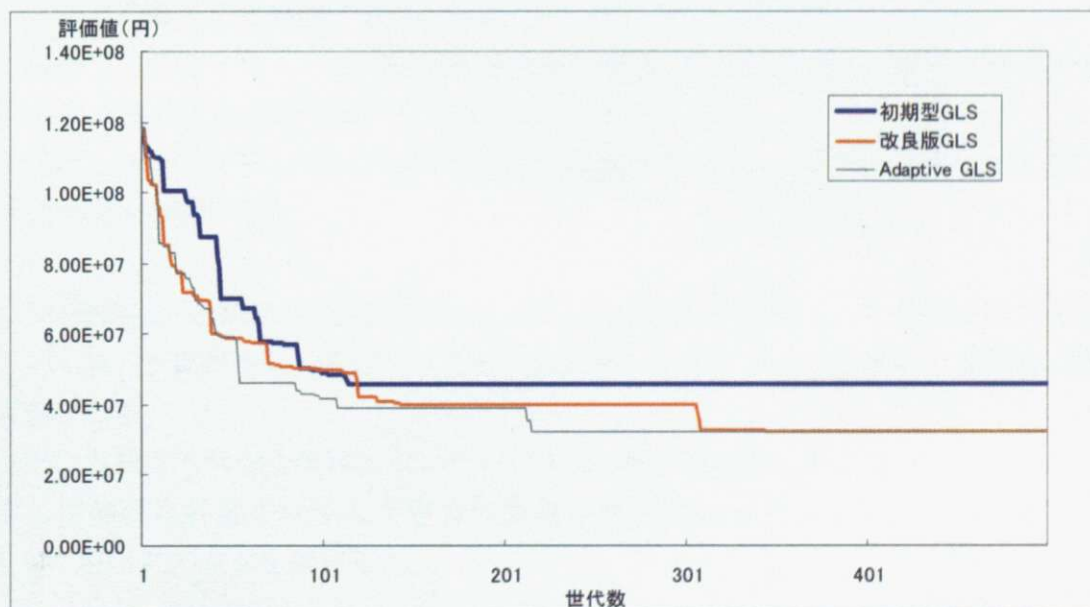


図 4-9 Adaptive GLS の探索性能

図4-9より、Adaptive GLS では改良版 GLS と比較し同程度の精度の解に早期の世代に到達しており、高い探索能力を保持している事が伺える。以降、本研究で用いる最適化アルゴリズムとして Adaptive GLS を適用する。

4.6 個体評価に要する計算量の削減

4.3 ~4.5 において、できうる限り少ない回数の個体評価で良解が得られる機構について検討してきたが、効率的な探索アルゴリズムの構築には個体評価に要する時間自体を短縮するアプローチもある。本研究で用いる個体の評価には、3章で述べた様に、LP を用いて貨物フローを算出する必要があり時間を要するので、個体評価の計算時間を短縮する事は極めて有効である。

一般には、個体評価時間の短縮を試みる際には、すでに評価した個体から変化した部分のみをとりだし、その変化による影響を考慮して算出する[15]。しかし本問題で扱う個体は、その評価に必要な貨物フロー算出をする際に個体全体の情報が必須であり、変量のみを扱う事ができない。そこで、探索済みの個体とその評価値をある一定数メモリし、メモリ内の個体と等しい個体を評価する際にはその評価値を参照する事とする。これにより、一部の個体評価時間を0にする事が可能となる。但し、探索した個体全てをメモリするわけにはいかないので、以下のルールに基づいて、個体と評価値をメモリする。

- ① 評価する個体と等しい個体がメモリ内に存在する場合、参照された個体と評価値をメモリの最上位に移動する。
- ② 評価する個体と等しいものがメモリに無い場合、新たに評価した個体と評価値をメモリの最上位に設定する。
- ③ ②によってメモリしておく個体数の上限を超えた場合、メモリ内の最下位の個体と評価値を削除する。

GA の機構は、その性質上ある程度まとまった解集合を保持しながら解空間上を移動していく為、上記のルールを設定すると、必要最小限のメモリで効果的に参照解の確保が可能となる。

以下に重複する評価を削除しないケースと、メモリ個体数を1000及び2000に設定して無駄な評価を削除した場合の累積評価時間を示す。シミュレーションには4.5.5 で用いたデータを流用した。

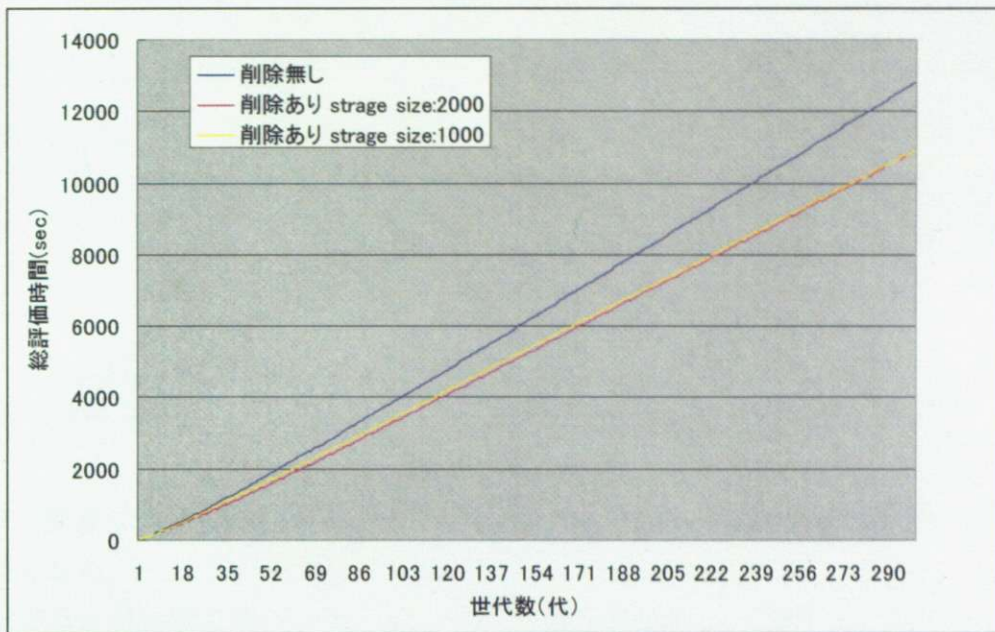


図 4 - 1 0 重複個体の削除を行う効果

上図より、累積計算時間が2割程度短縮されている事が伺える。この、計算時間の短縮効果は解が収束に近づくほど効果を発揮することになる。なお、図中ではメモリする個体数がどちらのケースであっても大差ないが、これはもちろん解く問題の規模に依存するので、効果的な大きさを適切に設定する必要がある。本研究では、メモリ個体数は2000とする。

4.7 本章のまとめ

- 本章では、効率的なスケジュール最適化機構に対する検討を行った。
- 採用するアルゴリズムはGA、LSをベースとして各種拡張を施した Adaptive GLS であり、その性能について検討を行った。またその活用に際して必要なパラメータについても述べた。
- 計算量の削減を行う為に評価済み個体を適切にメモリし保持する手法を示した。