

不確定性を考慮した配船計画の最適化に関する研究

和田 祐次郎¹・濱田 邦裕²・平田 法隆²

A Study on the Optimization of Ship Allocation Planning in Consideration of Uncertainty Factors

Yujiro WADA, Kunihiro HAMADA and Noritaka HIRATA

Abstract

Various uncertainty factors of logistics exist in actual maritime logistics and these factors should be considered in advance in order to get accurate results. However, it is difficult to consider these various uncertainty factors, therefore, these factors are expressed by fixed value in present studies.

This study develops new optimization methods considering the uncertainty factors of logistics by using robust optimization and multi objective optimization. By using these methods, the uncertainty of transportation volume, ship speed, and oil price are considered and new ship allocation planning optimization system is developed. Thereby, the influences of uncertainty factors are considered and the effectiveness of the developed methods is shown by using the optimization system.

Keywords : logistics and shipping, robust optimization, multi objective optimization, uncertainty factors

キーワード: 海運・物流, ロバスト最適化, 多目標最適化, 不確定性

1. 諸言

実際の海上物流には、貨物量の季節変動、海象の影響による船舶遅延等の不確定要因が存在し、その予測は困難である。これらの不確定要因を確定値として海上物流を計画した場合、それらの変動の影響により荷主や船社が大きな損失を被る可能性がある。したがって、実際の海上物流の計画では、物流の不確定要因を考慮して計画を立案することが望ましい。

このように実際の海上物流には様々な不確定要因が存在し、そのような条件下での効率的な配船計画の立案には、高度な意思決定が求められる。そのため、これまでの配船計画は専門家の勘と経験に依存して作成されてきた。しかし近年、配船計画の高度化を目指し、様々な研究⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾により配船計画の最適化手法や不確定性の評価手法が提案されている。しかし、配船計画の最適化手法と物流の不確定性の双

方に着目した研究の蓄積は少ない状況である。

そのため著者らは、物流の不確定性を考慮した配船計画の最適化に関する研究⁽⁹⁾を実施している。この研究では港湾間のコンテナ配送問題を最適化問題として定式化した。そして、貨物量の不確定性と船速の不確定性を考慮した配船計画の最適化手法を提案し、海上物流にロバスト最適化を適用することの有効性を示した。しかし、物流の不確定性が海上物流に与える影響を十分に考察できていなかった。

そこで本研究では、これまでの既往研究⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾と著者らの既研究⁽⁹⁾を踏まえ、ロバスト最適化手法と多目標最適化手法を用いて、貨物量の不確定性、船速の不確定性及び原油価格の不確定性を考慮した配船計画の最適化手法を提案する。さらに、コンテナ配送問題の利益最大化問題を取り上げ、これらの不確定性が配船計画に与える影響を考察する。

¹ 学生会員 広島大学 大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1) D140665@hiroshima-u.ac.jp

² 正会員 広島大学 大学院工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1) hamada@naoe.hiroshima-u.ac.jp

2. 既往研究の概要

上述の通り既往研究により様々な配船計画の最適手法や不確定性の評価手法が提案されている。

大和ら⁽¹⁾は、数理計画法を用いたコンテナ輸送ネットワークの計画手法を提案した。荒井ら⁽²⁾は、複雑な制約条件や目的関数に対応できる遺伝的アルゴリズム(以下 GA)を用いた海上コンテナ輸送ネットワークの最適設計手法を提案した。新谷ら⁽³⁾は、空コンテナを考慮した配船計画の最適化手法を提案し、空コンテナの回送が航路形成に与える影響を分析した。有木ら⁽⁴⁾はコンテナ輸送問題をネットワークフロー問題として定式化・モデル化し、局所探索型 GA 用いて船隊と各船舶の寄港順序を求めた。以上の研究により、海上輸送ネットワークの計画手法や配船計画手法が提案されている。しかし、これらの研究は、貨物量や原油価格等を確定値として取扱っているため、物流の不確定性を十分に考慮することができなかった。

このような経緯を踏まえ、近年、物流の不確定性に着目した研究が実施されている。松倉らの研究⁽⁵⁾では、気象・海象、機器故障等の外乱による海上物流の遅れに着目し、船舶の遅延を確率的に評価することでその影響を考慮した輸送計画の作成手法を提案した。Zhang ら⁽⁶⁾も海上物流の外乱による船舶の遅延に着目し、海上物流の外乱に対してロバスタな船舶の寄港順序とそのスケジューリング手法を提案した。Wang ら⁽⁷⁾は船舶の輸送時間・港湾滞在時間の変動に着目し、それらが輸送コストに与える影響を考慮したコンテナ船の定期船隊編成手法を提案した。また Meng ら⁽⁸⁾は、貨物量の不確定性に着目し、貨物量が正規分布に従うと仮定した条件で、船社の利益の期待値を最大化する船隊編成手法を提案した。

しかしながら、海上物流の不確定性に着目した研究の蓄積は依然として少なく、対象とする不確定性も時間や貨物量の変動に限られている状況である。また、実施された研究も単一目標問題に限られており多目標問題への対応という観点で課題がある。そこで本研究では、貨物量の不確定性、船速の不確定性及び原油価格の不確定性を考慮した配船計画の最適化手法を検討する。

3. 本研究の基本方針

3.1 本研究の配船計画問題の考え方

既往研究では、港湾間の貨物量、港湾間の距離、利用可能な船舶の種類、及び各種コスト等が予め与

えられ、以下の条件の下、輸送コストや船社の利益が最良となる船隊・各船舶の寄港順序・スケジュールを決定する最適化問題として定式化している。

①ウィークリーサービス⁽²⁾⁻⁽⁴⁾

②計画期間中の船型、船速は一定⁽²⁾⁻⁽⁴⁾

③実入りコンテナ需要の満足⁽²⁾⁻⁽⁴⁾

④空コンテナ需要の考慮⁽³⁾(但し、空コンテナ需要は必ずしも満足する必要はない)

また一般的に物流の不確定性は船社の利益、輸送コスト、総輸送時間等に影響を与え、それらは配船計画の評価値、制約条件に影響を与える。不確定性を考慮した既往研究⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾では、確率的な指標や期待値を用いて、評価値が最良となる配船案を探索する。

本研究でも既往研究を参考に最適化問題として配船計画問題を定式化する。具体的には、港湾間の貨物量(OD 表)、港湾間の距離(距離表)、利用可能な船舶の種類と最大隻数、港湾間の貨物運賃(運賃表)、原油価格及び各種コストを既知(入力条件)とし、それらを基に評価指標が最良となる船隊・各船舶の寄港順序を決定する。

3.2 本研究で対象とする不確定性

本研究では以下に示す三つの不確定性に着目する。

(1) 貨物量の不確定性

貨物量の変動として、季節等による定期的な変動と不確定で予測困難な変動が考えられる。本研究では不確定で予測困難な貨物量の変動に着目する。配船計画の観点からは、貨物量の変動しても安定して利益が得られることが望ましい。そこで本研究では Meng ら⁽⁸⁾と同様に、貨物量の変動条件下において船社の利益の期待値を最大化する問題として考える。

(2) 船速の不確定性

海上輸送は気象・海象等の影響により遅延しやすいという特徴がある。そして、その遅延は後の荷役・輸送工程に伝播しやすく、荷主の経営等に与える影響が大きい。本研究では船速の変動を対象とし、海象・気象の変動による船舶の遅延を考慮する。ところで、配船計画の観点からは、船速が多少変動してもスケジュール通りの運航が可能であることが望ましい。そこで本研究では、目的関数ではなく運航スケジュールに対する制約条件として船速の不確定性を取り扱う。

(3) 原油価格の不確定性

原油価格の変動は船社の利益に直結するため、本来であれば貨物の不確定性と同様に利益の期待値へ

の影響を考慮することが望ましい。しかし、原油価格は生産国と輸入国の需給バランス、政治的な影響等により変動するため予測は困難であり、分布関数により表現することも困難である。そこで本研究では、原油価格の上昇に対するロバスト性を評価する目的関数を付加する。

3.3 問題設定

本研究では港湾間のコンテナ配送問題に着目する。港湾間の貨物量(OD 表)、港湾間の距離(距離表)、利用可能な船舶の種類と最大隻数、港湾間の貨物運賃(運賃表)、原油価格及び各種コストを既知とし、以下のように配船計画の最適化問題を定義する。設計変数、目的関数、制約条件を以下に示す。

- (1) 設計変数：利用する船舶の隻数、各船舶の仕様(選択制)、各船舶の寄港順序、各船舶の貨物分配量
- (2) 目的関数：船社の利益の期待値最大化、原油価格の上昇に対するロバスト性の最大化
- (3) 制約条件：利用可能な最大隻数、1 週間以内の閉航路という制約を満足する確率、各船舶の貨物容積

3.2 節で示した三つの不確定性はそれぞれ以下の項目において考慮される。

- ・ 貨物量の不確定性：目的関数である船社の利益の期待値の算出
- ・ 船速の不確定性：1 週間以内の閉航路という制約を満足する確率
- ・ 原油価格の不確定性：目的関数である原油価格の上昇に対するロバスト性

なお、本研究では船社がどのような貨物を選択する

かを考察するため、すべての貨物を輸送するという制約条件は設けていない。

3.4 最適化の概要

Fig. 1 に本研究の最適化の概念図を示す。本研究では荒井らの研究⁽²⁾を参考に、船隊と航路(各船舶の寄港順序)を計画する上位問題と、与えられた船隊・航路の下に各船舶への貨物の分配を決定する下位問題の二段階最適化問題として定式化する。

上位問題は、利用する船舶の隻数、各船舶の仕様(選択制)、各船舶の寄港順序を設計変数とし、船社の利益の期待値と原油価格の上昇に対するロバスト性を目的関数とする多目標最適化問題としてモデル化する。それにより、船社の利益の期待値と原油価格の上昇に対するロバスト性の関係を定量的に把握する。下位問題では、上位問題で仮定された船隊と航路の下で、各船舶への貨物の分配を決定し、船社が獲得できる収入の期待値を最大化する。つまり単一目標問題としてモデル化する。

本研究の上位問題の設計案と下位問題の設計案には強い従属関係が存在する。このような問題は、土木計画学の政策立案に関する研究において題材とされることが多く、単純な関係式によって設計案を求めることが困難という特徴を持つ。設計案に強い従属関係が存在するような複雑な問題では、二段階最適化問題の利用の可能性が文献⁽¹⁰⁾により議論され、それを応用した研究例も示されている。この文献⁽¹⁰⁾を参考に、本研究でも上位問題と下位問題からなる二段階最適化問題として定式化する。上位問題、下位問題の詳細は4章、5章で説明する。

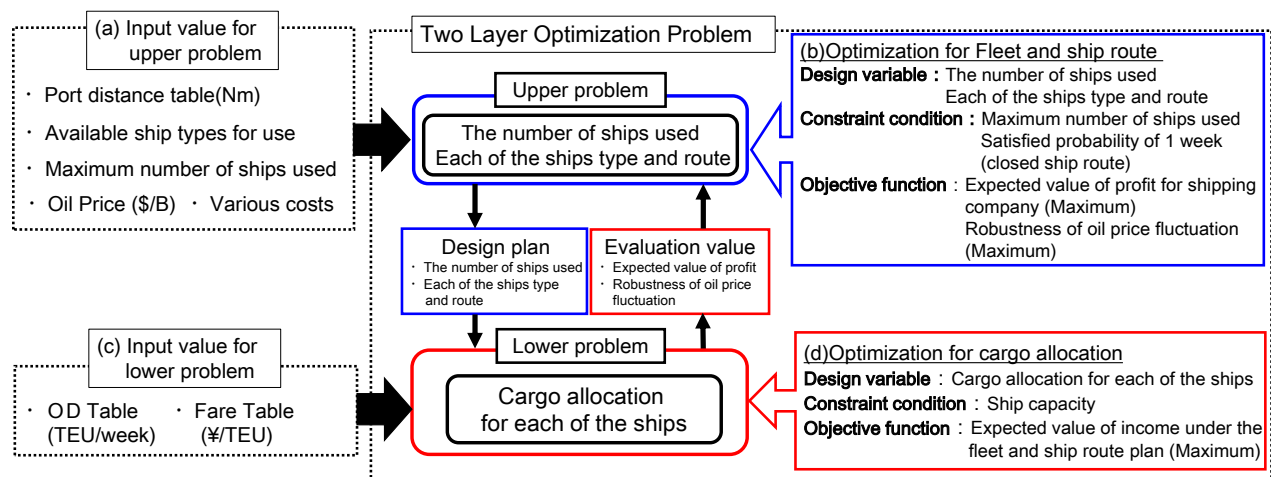


Fig. 1 Formulation as two layer optimization problem

3.5 既往研究と比較した本研究の特徴

以上の基本方針を踏まえ、既往の不確定性を取り扱った研究と本研究の相違点を以下に整理する。

- (1) 貨物量の不確定性の影響を船社の利益に対する期待値として取り扱う方法は Meng ら⁽⁸⁾と同様である。但し、Meng ら⁽⁸⁾が扱っていない船舶のルーティング問題も含めた配船計画の最適化を検討する。
- (2) 船速の不確定性については、Wang ら⁽⁷⁾は目的関数である輸送コスト・燃料費への影響を取り扱ったが、本研究では制約条件として扱っている。
- (3) 原油価格の変動の影響は既往研究では研究実績がなく、本研究が初めての試みである。
- (4) 既往研究では不確定性を単一目標問題として取り扱っているが、本研究では多目標問題として取り扱う。

4. 上位問題の定式化

上位問題の問題設定は以下の通りである。

入力情報(既知)：港湾間の距離（距離表）、利用可能な船舶の種類、利用可能な最大隻数、原油価格、各種コスト

設計変数：利用する船舶の隻数、各船舶の仕様（選択制）、各船舶の寄港順序

制約条件：利用可能な最大隻数、1週間以内の閉航路を満足する確率

目的関数：船社の利益の期待値最大化、原油価格の

上昇に対するロバスト性の最大化

このように、上位問題を多目標最適化問題として定式化することで、船社の利益の期待値と原油価格の上昇に対するロバスト性との関係を定量的に考察する。本章ではこれらの定式化について述べる。定式化に利用する記号をTable 1に整理する。

4.1 設計変数の定式化

上位問題では、船隊と航路（寄港順序）を検討する。Table 2に示す3種類の船舶を利用可能とし、航路として、往復航路、巡回航路、振り子航路の3種類の航路を想定する。

式(1)に示すように、設計変数である利用する船舶の隻数とその仕様は、船舶番号 k と船型 a による配列で表現される。各船舶の寄港順序は式(2)のように、港湾間の有効リンクを表現する r_{ij} の配列で表現する。

$$S = [k(a)] \quad (1)$$

$$R^{k,a} \triangleq [r_{ij}^{k(a)}] \quad (2)$$

Table 2 Available ship types for use in this study

Ship Type	1	2	3
Speed (knot)	25	22	18
TEU	5000	3000	1000
GT (ton)	65000	44000	22700

Table 1 Definition of the symbols

記号	説明	記号	説明	記号	説明
[添字等]		[制約条件]		[係数]	仮定値
i, j	港湾番号	$\sigma_{ij}^{k(a)}$	船舶 k の港湾 i, j 間の船速の標準偏差 (knot)	st	港湾滞在時間 12 (hour)
k	船舶番号	$u^{k(a)}$	船舶 k の輸送時間の中央値 (hour)	$c1$	港湾機械使用費 210000 (¥/hour)
a	利用可能な船型 (Table 2)	$\sigma^{k(a)}$	船舶 k の輸送時間の標準偏差 (hour)	$c2$	荷役費 39000 (¥/TEU)
$k(a)$	船型 a の船舶 (船舶番号: k)	$Pr^{k(a)}$	船舶 k の制約満足確率 (%)	[収入]	
[設計変数]	(上位問題)	x	制約条件 (168 (hour))	I	船社の収入 (¥)
$S = [k(a)]$	配船計画に利用する船隊	Spr	制約満足確率の指定値 (%)	f_{ij}	港湾 i, j 間の貨物運賃 (¥/TEU)
$r_{ij}^{k(a)}$	船舶 k の港湾 i, j 間の有向リンク (0: 航路なし, 1: 航路あり)	[目的関数]		EvI	船社の収入の期待値 (¥)
$R^{k(a)} = [r_{ij}^{k(a)}]$	船舶 k の寄港順序	P	船社の利益の期待値 (¥)	n	モンテカルロ試行回数
$al^{k(a)}$	船舶 k への貨物分配率	O_{max}	原油最大価格 (\$/B)	I_b	モンテカルロ試行回数 b 番目の船社の収入 (¥)
$Al = [al^{k(a)}]$	利用可能船舶への貨物分配案	[コスト]		[船舶]	
Al_{ij}	港湾 i, j 間の貨物分配案	C	輸送コスト (¥)	$m^{k(a)}$	船舶 k の最大積載量 (TEU)
$SAL = [Al_{ij}]$	港湾間全体の貨物分配案	$Cs^{k(a)}$	備船費 (¥)	$g^{k(a)}$	船舶 k の総トン数 (ton)
$l_{ij}^{k(a)}$	船舶 k の港湾 i, j 間の貨物積載量 (TEU)	$Cf^{k(a)}$	燃料費 (¥)	$Ps^{k(a)}$	船舶 k の馬力 (ps)
$[l_{ij}^{k(a)}]$	船舶 k の航路全体の貨物積載量 (TEU)	$Cp^{k(a)}$	港湾施設利用費 (¥)	$s^{k(a)}$	船舶 k の設定速度 (knot)
[入力情報]		$Cm^{k(a)}$	船舶管理費 (¥)	[その他]	
d_{ij}	港湾 i, j 間の距離 (Nm)	$Cl^{k(a)}$	貨物荷役費 (¥)	[rOD_{ij}]	正規乱数の変動を与えた OD 表 (TEU)
$[d_{ij}]$	距離表 (Nm)	Cop	C重油価格 (¥/kl)		
Od_{ij}	港湾 i, j 間の OD 貨物量 (TEU)	Op	原油価格 (\$/B)		
[OD_{ij}]	OD 表 (TEU)	Oc_{max}	C重油最大価格 (¥/kl)		
Ms	利用可能な最大隻数	Cef	燃料費を除く輸送コスト (¥)		

4.2 制約条件の定式化

4.2.1 利用する船舶の最大隻数

本研究では、利用可能な最大隻数 Ms を設定し、式(3)で示す条件を満たす範囲内で利用する船舶の隻数を最適化する。

$$Ms \geq \sum_k k(a) \quad (3)$$

4.2.2 1週間以内の閉航路を満足する確率

本研究では、有木らの研究⁽⁴⁾を参考に、制約条件として1週間以内に最初の港に戻ることができる閉航路であることを条件として与える。船速の不確定性はTable 2の設定速度に影響を与え、それによって輸送時間が変動すると考える。この場合、船速の不確定性は「1週間以内に最初の港に戻ることができる」という制約条件の判定に影響を与える。そこで、Table 2の船型毎の設定速度、各船舶の寄港順序、港湾間の距離を基に制約を満足する確率を算出し、確率的に制約判定を行う。船速の変動は正規分布に従うものと仮定し、船舶の種類・航路毎にその標準偏差は既知とする。

以下に示す流れで確率的に制約判定を行う。

- (1) システム利用者が、1週間以内という制約条件をどの程度の確率で満足したいかを指定する(式(4)、制約満足確率 Spr の指定)。
- (2) 式(5)、(6)を用いて各船舶の輸送時間の中央値と標準偏差を算出する。なお、輸送時間の標準偏差は誤差伝播則⁽¹¹⁾を用いて算出する。
- (3) 上記(2)で求めた中央値と標準偏差から、式(7)を用いて各船舶が1週間以内に最初の港に戻る確率を算出する。この値と(1)で指定された値を比較することにより、制約判定を行う(式(4))。

$$Spr \leq Pr^{k(a)} \quad (4)$$

$$u^{k(a)} = \frac{\sum_i \sum_j d_{ij} r_{ij}^{k(a)}}{s^{k(a)}} + st \times \sum_i \sum_j r_{ij}^{k(a)} \quad (5)$$

$$\sigma^{k(a)} = \sqrt{\sum_i \sum_j \left(\frac{\sigma_{ij}^{k(a)}}{s^{k(a)}} \times \frac{d_{ij} r_{ij}^{k(a)}}{s^{k(a)}} \right)^2} \quad (6)$$

$$Pr^{k(a)} = \left(0.5 \pm \int \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^{k(a)}} \exp\left(-\frac{(x-u^{k(a)})^2}{2(\sigma^{k(a)})^2}\right) dx \right) \times 100 \quad (7)$$

船速の変動の正規性を確認するため、2015年に横浜港に到着したコンテナ船の平均航海速度のバラつきを、AISデータ⁽¹²⁾ (Automatic identification system)を用いて分析した。その結果をFig. 2に示す。この図に示すように、船速は正規分布に従って変動していることが分かる。また、船速の変動の正規性を定量的に判断するためシャピロ-ウィルク検定⁽¹³⁾を実施した。その結果、P値=0.270 (P値 \geq 0.05ならば正規分布として取り扱える)となり、定量的にも正規性の仮定が妥当であることが分かる。以上の結果を基に、船速の変動を正規分布として取り扱うことにした。なお、実際は船速の不確定性は燃料費に影響を与え、それにより輸送コストは変動するが、本研究ではこの影響は考慮していない。

4.3 目的関数の定式化

上位問題の目的関数は船社の利益の期待値と原油価格の上昇に対するロバスト性の最大化である。しかし、これらの目的関数を算出するためには、各船舶の貨物の積み付け方を決定し、船社の獲得できる収入の期待値を計算する必要がある。本研究では、各船舶への貨物の分配を決定する下位問題により船社の収入の期待値を算出し、その収入の期待値と輸送コストを用いて船社の利益の期待値及び原油価格の上昇に対するロバスト性を算出する。

ところで、本研究では全ての貨物を輸送するという制約条件を与えていない。このために船社の輸送戦略として以下の二つの戦略が考えられる。

- (1) 獲得できる船社の利益の期待値に対して燃料費が安価になるように、利用隻数を抑えつつ、各船舶の移動距離を短くする。
- (2) 利用隻数を増加させて、多くの貨物を輸送することで収入を増加させる。

ここで目的関数が船社の利益の期待値最大化の場合

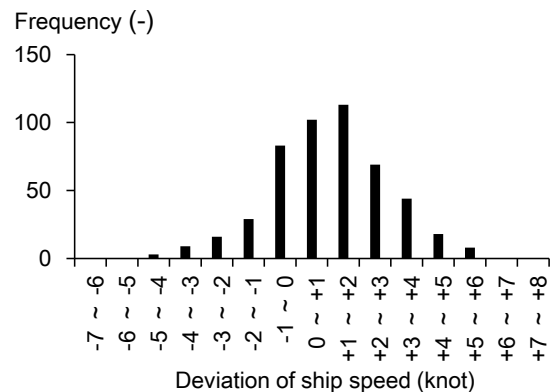


Fig. 2 Distribution of ship speed deviation

合には(2)が優位となり、原油価格の上昇に対するロバスト性という観点からは配船案全体の燃料費を小さくする(1)が優位になると考えられる。本研究では多目標最適化問題として取り扱うことにより、これらの戦略の関係を考察する。

4.3.1 船社の利益の期待値

本研究では船社の収入の期待値と輸送コストの差を船社の利益の期待値と定義する。算出式を(8)に示す。船社の収入の期待値は下位問題により求めており、5章の式(25)を用いて算出する。輸送コスト、及び各種費用は式(9)-(15)を用いて算出する。これらの算出式は有木らの研究成果⁽⁴⁾を参考にした。なお C 重油価格は Fig. 3 の関係を用いて算出する(式(12))。

$$Maximum(P) = EvI - C \quad (8)$$

$$C = \sum_k (Cs^{k(a)} + Cf^{k(a)} + Cp^{k(a)} + Cm^{k(a)} + Cl^{k(a)}) \quad (9)$$

$$Cs^{k(a)} = 1490.1 \times m^{k(a)} + 206584 \quad (10)$$

$$Cf^{k(a)} = Cop \times 0.13 \times Ps^{k(a)} \times \left(\frac{\sum_i \sum_j d_{ij} r_{ij}^{k(a)}}{s^{k(a)} \times 0.95} \right) \times 0.001 \quad (11)$$

$$Cop = f(Op) \quad (12)$$

$$Cp^{k(a)} = 80 \times g^{k(a)} \times \sum_i \sum_j r_{ij}^{k(a)} + c1 \times \sum_i \sum_j r_{ij}^{k(a)} \times st \quad (13)$$

$$Cm^{k(a)} = \left(\frac{\sum_i \sum_j d_{ij} r_{ij}^{k(a)}}{s^{k(a)}} \right) \times 15092 \times 2 \quad (14)$$

$$Cl^{k(a)} = \sum_i \sum_j l_{ij}^{k(a)} \times c2 \quad (15)$$

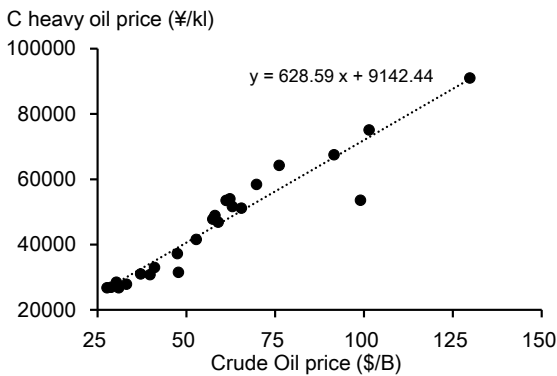


Fig.3 Relation between crude oil prices and C heavy oil prices

4.3.2 原油価格の上昇に対するロバスト性

本研究では、原油価格の上昇に対するロバスト性を原油最大価格として定義し、これを上位問題の目的関数として取り扱う。原油最大価格とは、設定された原油価格に対してどの程度まで上昇に耐えうるかを示す指標で、船社が損失を出さない原油価格の最大値を示す。算出手順を以下に示す。

- (1) 式(16)を用いて燃料費を除く輸送コスト (Cef) を算出する。
- (2) 燃料費を除く輸送コスト、下位問題で決定される船社の収入の期待値、及び配船案の燃料消費量の合計値を用いて、収入と支出がバランスする時の C 重油価格を算出する(式(17))。
- (3) Fig. 3 に示す C 重油価格と原油価格の関係を用いて原油最大価格を算出する(式(18))。

$$Cef = \sum_k (Cs^{k(a)} + Cp^{k(a)} + Cm^{k(a)} + Cl^{k(a)}) \quad (16)$$

$$Oc_{max} = \frac{EvI - (Cef)}{\sum_k (0.13 \times Ps^{k(a)} \times \left(\frac{\sum_i \sum_j d_{ij} r_{ij}^{k(a)}}{s^{k(a)} \times 0.95} \right) \times 0.001)} \quad (17)$$

$$Maximum(O_{max}) = f(Oc_{max}) \quad (18)$$

4.4 上位問題の最適化手法と遺伝子表現

4.4.1 最適化手法

上位問題の最適化には遺伝的アルゴリズムを多目標問題へと拡張した NSGA2 (Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm- II)⁽¹⁴⁾を用いる。NSGA2 の特徴は、ランキング手法と混雑距離の計算を導入している点にある。ランキング手法は、解の優越関係に基づき、各々の個体にランクをつけ、そのランクにより個体の選択を行う手法である。混雑距離は、解の多様性を維持しながら広範囲に均等に解を分布させるために導入している。また、NSGA2 はエリート保存のプロセスを導入しているため解の収束が早いという特徴がある。

4.4.2 遺伝子表現

遺伝子列の構造の一部(1 隻分)を Fig. 4 に示す。この図に示すように、遺伝子列は船舶の種類、航路の種類、寄港数及び寄港順序の情報から構成される。この図の船舶 A の遺伝子列の場合、船舶の種類の遺伝子が“1”、航路の種類の遺伝子が“2”、寄港数の遺伝子が“3”である。その後の寄港順序は“3・1・2・4”であるが、寄港数の遺伝子が“3”であるため順序の早

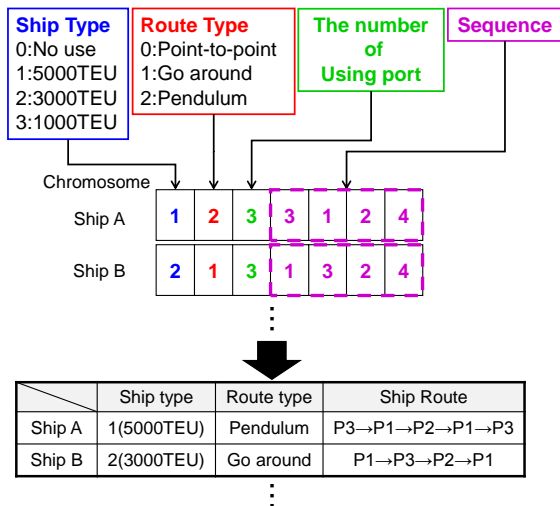


Fig. 4 Gene coding for upper problem

い“3・1・2”が採用され、この“3・1・2”の港湾を利用する振り子航路となる。よってこの場合、5,000TEUの船舶を用いて、P3→P1→P2→P1→P3という寄港順序で船舶を運航するという設計案となる。同様に船舶Bの場合、3,000TEUの船舶を用いて、P1→P3→P2→P1という巡回航路となる。なお、上位問題では予め利用できる最大の隻数を入力する必要があり、これは遺伝子列のビットサイズに影響を与える。4港8隻の場合は56bitの配列で設計案は表現される。

5. 下位問題の定式化

下位問題の目的は、上位問題で仮定されたある船隊・航路の設計案を対象として、貨物量の変動条件下における船社の収入の期待値を算出することである。本研究では、この問題を以下の二つの問題に分けて考える。

(1) 貨物の分配問題

ある貨物量が仮定された際に、船社の収入が最大となるように、貨物の各船舶への分配を決定する問

題。この問題は典型的なナップザック問題であるため、最適化にはGAを利用する。

(2) 期待値の算出問題

貨物の分配問題の解を利用して貨物量の変動条件下における収入の期待値を算出する問題。本研究ではモンテカルロシミュレーションを利用する。

本章ではこれら二つの問題の定式化を行う。なお、定式化にあたって利用する記号はTable 1に示されている。

5.1 貨物の分配問題の定式化

5.1.1 問題設定

貨物の分配問題では港湾間の貨物量(OD表)、港湾間の貨物運賃(運賃表)及び投入する船舶の仕様と寄港順序を既知(固定値)とする。以下に設計変数、制約条件、目的関数を示す。

- (1) 設計変数：各船舶の貨物分配量
- (2) 制約条件：各船舶の貨物容積
- (3) 目的関数：船社の収入の最大化

5.1.2 貨物分配の基本的な考え方

ここではFig. 5に示すように、3港間のコンテナ貨物を、Ship A (往復航路)、Ship B (巡回航路)、Ship C (振り子航路)の三つの船舶に分配することを考える。

P1からP2への貨物OD(P1,P2)はShip A、Ship B、Ship Cの全ての船舶に分配可能である。これらを各船舶へと分配したものが、Fig. 5における $OD_A(P1,P2)$ 、 $OD_B(P1,P2)$ 、 $OD_C(P1,P2)$ である。一方、P1からP3への貨物を積み替えなしで輸送可能な船舶はShip BとShip Cのみである。そこで、この貨物は $OD_B(P1,P3)$ 、 $OD_C(P1,P3)$ としてShip BとShip Cに分配され、これらの荷物はP1→P2と、P2→P3のルートにおいて船舶に積載されることになる。

以上のルールにしたがって、OD表の各港湾間の貨物を、船舶の各ルートに割り振ったものがFig. 5に示

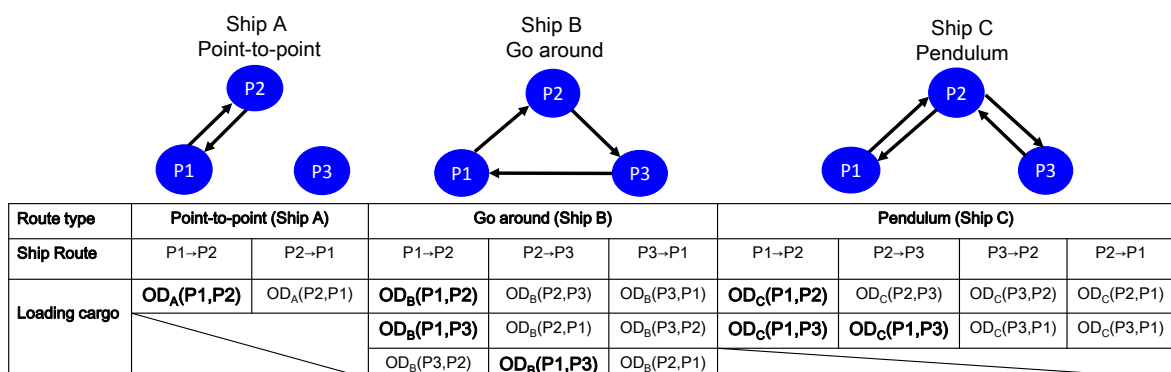


Fig. 5 Relation between the route type and the loading cargo

すテーブルである。この関係を用いると、OD表に記載される各港湾間の貨物を、各船舶へと割り振る比率を決定すれば、目的関数を算出することができる。

5.1.3 設計変数の定式化

設計変数は OD 表の各港湾間の貨物を船舶へと割り振る比率であり、港湾 ij 間の各船舶への貨物分配率が式(19)、式(20)により表現される。そして、その分配案、OD 表、各船舶の仕様と寄港順序を基に各船舶の港湾 ij 間の貨物積載量が決定する(式(21))。

実際には Fig. 6 に示す遺伝子列が OD 表の経路毎に生成される。対象となる経路において船舶 A と船舶 B が利用可能な場合には、この貨物は船舶 A と船舶 B に 5 : 3 で分配される。具体的には Fig. 6(a) に示す遺伝子列の場合、Ship A (船型: 5,000TEU)、Ship B (船型: 3,000TEU) の 2 隻が港湾 P1、P2 含む寄港順序であった場合、この 2 隻に OD(P1,P2)の貨物が分配される。OD(P1,P2) の貨物量が 2,400TEU の場合、Ship A に 1,500TEU、Ship B に 900TEU と分配されることとなる。

なお、下位問題も上位問題と同様、利用可能な船舶の最大隻数が遺伝子列のビットサイズに影響を与える。4 港 8 隻の場合は 96bit の配列で表現される。また、下位問題の遺伝子列は 0 から 10 までの一様乱数を用いて生成される。

$$Al = [al_{k(a)}] \quad (19)$$

$$SAL = [Al_{ij}] \quad (20)$$

$$[l_{ij}^{k(a)}] = f([Al_{ij}], [OD_{ij}], [r_{ij}^{k(a)}], k(a)) \quad (21)$$

5.1.4 制約条件の定式化

式(22)に示すように下位問題の制約条件は各船舶の貨物容積である。各航路の貨物積載量は船型 a の

最大積載量以下とする。最大積載量を超える場合には、貪欲法⁽¹⁵⁾を用いて各航路における収入が最大となるように積載貨物を選定する。

$$m^{k(a)} \geq l_{ij}^{k(a)} \quad (22)$$

5.1.5 目的関数の定式化

目的関数は、船社の収入の最大化である。式(23)に示すように、各船舶の各航路での貨物積載量に貨物運賃を乗じ、利用する船舶の総和をとることにより算出する。

$$Maximum(I) = \sum_k (\sum_i \sum_j l_{ij}^{k(a)} \times f_{ij}) \quad (23)$$

5.2 期待値の算出問題の定式化

5.2.1 貨物量の変動の定式化

本研究では、式(24)を用いて貨物量を変動させる。そしてその変動は貨物量の変動は正規分布に従うと仮定し、その変動を考慮する。

貨物量の変動の正規性を確認するため、貨物取扱量データ(大阪港コンテナ取扱個数表、2008 年-2014 年)⁽¹⁶⁾を分析した。その結果を Fig. 7 に示す。この図に示すように、貨物量は正規分布に従って変動している。また、貨物量の変動の正規性を定量的に判断するためシャピロ-ウィルク検定⁽¹³⁾を実施した。その結果、P 値=0.199 (P 値 \geq 0.05 ならば正規分布として取り扱える)となり定量的にも正規性の仮定が妥当であることが分かった。以上より、本研究では貨物量の変動を正規分布として取り扱うことにした。

$$[rOD_{ij}] = f([OD_{ij}]) \quad (24)$$

5.2.2 期待値の算出

5.2.1 項の検討結果に基づき、正規乱数を発生させ

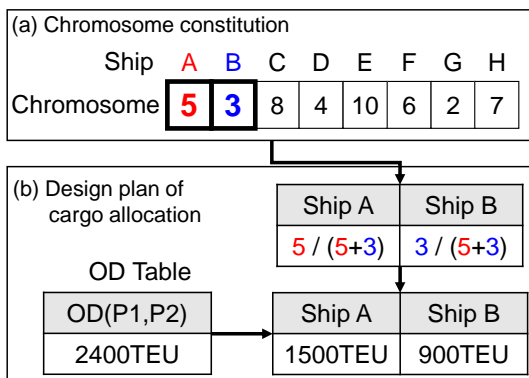


Fig. 6 Gene coding for lower problem

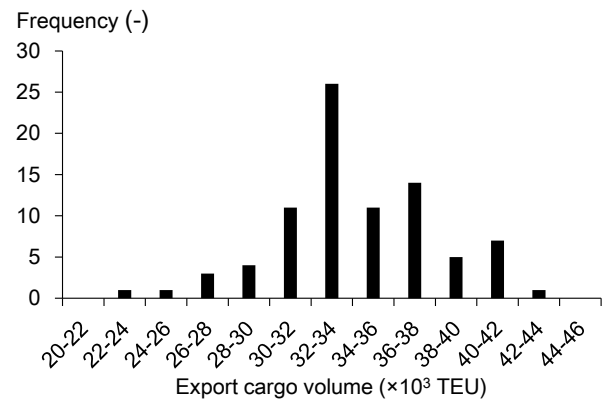


Fig. 7 Distribution of exports volume

てモンテカルロシミュレーションを行うことで船社の収入の期待値を算出する。以下にその流れを示す。

- (1) OD 表に正規乱数を基にしたノイズを与え、港湾間の貨物量を変動させる (Fig. 8(a))。
- (2) ノイズを与えた OD 表の条件下で、貨物の分配問題の最適化を実施し最適解を得る (Fig. 8(b))。
- (3) モンテカルロシミュレーションを用いて上記 (1)、(2)を繰り返し実施し (Fig. 8(c))、貨物の分配問題の最適解を蓄積する。
- (4) 蓄積した貨物の分配問題の最適解を基に、収入の期待値を算出し (式(25))、その期待値と輸送コストを基に船社の利益の期待値及び原油最大価格を算出する (式(8)、式(18))。そして、それらを上位問題の評価値として取り扱う (Fig. 8(d))。

$$EvI = \frac{1}{n} \sum_{b=1}^n I_b \quad (25)$$

つまり、貨物の変動に伴って、各船舶への貨物の分配が異なるものと仮定して、上位問題の設計案のロバスト最適解を求めている。

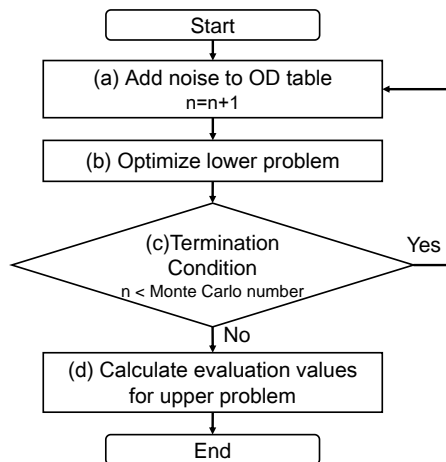


Fig. 8 Consideration method for transportation volume uncertainty

6. ケーススタディ 1

6.1 問題設定

本章では4港間の配船計画問題に着目する。Table 3 に OD 表、港湾間の距離表、運賃表を示す。この OD 表・運賃表の値は、文献²⁾を参考にして、架空の値を設定した。利用可能な船舶は Table 2 に示した3種類とし、利用可能な最大隻数は8隻と設定した。

本研究では3種類の不確定性を考慮しており、目的関数も船社の利益の期待値に加えて原油価格の上昇に対するロバスト性を考慮している。これらの影響を個別に考察するために、以下の4 Case の最適化を実施し、その結果を比較する。

Case 1: 通常の最適化 (不確定性なし)

Case 2: 貨物量の不確定性を考慮したロバスト最適化 (OD 表の 25%の変動量を標準偏差で与え、それによって正規分布で変動させる。)

Case 3: 船速の不確定性を考慮したロバスト最適化 (3knot の変動量を標準偏差で与える。)

Case 4: 多目標最適化 (目的関数: 原油最大価格と船社の利益の最大化)

各 Case において考慮されている不確定性、目的関数、制約条件を Table 4 に整理する。Table 4 に示すように Case1-3 は単一目標問題であるため、最適化には NSGA2 ではなく、sGA (Simple genetic algorithm) を用いている。また、原油価格の変動を考慮していない Case 1-3 では原油価格は 90\$/B と設定した。最適化に用いた GA パラメータを Table 5 に整理する。

Table 3 OD, distance, and fare table between ports

Port	P1			P2			P3			P4		
	TEU	Nm	¥	TEU	Nm	¥	TEU	Nm	¥	TEU	Nm	¥
P1				2182	668	70500	6520	1035	83500	4593	1336	94000
P2	2330	668	70500				4225	491	65000	2249	912	79500
P3	15870	1035	83500	1750	491	65000				4543	599	68500
P4	9920	1336	94000	2010	912	79500	0	599	68500			

Table 4 Relation between uncertainty factors, objective function, and constraint condition

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Cargo volume uncertainty		×	○	×	×
Ship speed uncertainty		×	×	○	×
Oil price uncertainty		×	×	×	○
Optimization method		sGA	sGA	sGA	NSGA2
Objective function	Expected value of profit for shipping company	○	○	○	○
	Robustness for oil price fluctuation	×	×	×	○

6.2 貨物量の不確定性の影響の考察

6.2.1 通常の最適化結果と貨物量の変動を考慮した最適化結果の比較

通常の最適化であるCase 1の最適化結果と、貨物量の変動を考慮したCase 2の最適化結果をTable 6に比較する。

Case 1の場合、3隻の船舶(S1, S3, S4)が巡回航路で港湾P3と港湾P1に寄港している。今回の問題設定ではOD(P3, P1)の貨物量がOD表の中で最多かつ運賃も二番目に高い設定となっている。つまりCase 1では、多数の船舶を用いて、貨物量が多く、かつ利益率の高いOD(P3, P1)の貨物を輸送する設計案となっている。また、2隻の船舶(S1, S2)は運賃の高い航路P4→P1を選択することで収入を増加させている。以上より通常の最適化では、運賃収入が多くなる航路を中心に船舶を投入すると考えられる。

一方Case 2の場合、船舶S1, S2の航路は変化しないものの、船舶S3, S4の航路・寄港順序が変化する。船舶S3は寄港数(港湾P2)が増加し、振り子航路に変化する。船舶S4はP1→P3→P2→P1という巡回航路に変化する。このように変化した理由は、6.2.2項、6.2.3項で考察する。

6.2.2 モンテカルロシミュレーションによる最適化結果の特徴の考察

Case 1の場合は貨物量の不確定性を考慮していな

いため貨物量の変動条件下における利益が不明である。そこでモンテカルロシミュレーションを用いて、貨物量の変動条件下におけるCase 1とCase 2の船社の利益の相違を調査した(モンテカルロ試行回数1000回)。その結果をFig. 9に示す。Case 2では20.0～30.0×10⁶(¥)の利益を獲得できる頻度を減少させ、35.0～40.0×10⁶(¥)の利益を獲得できる頻度を増加させることで利益の期待値を増加させている。このモンテカルロシミュレーションの結果に基づき船社が獲得できる利益の期待値を算出した結果もTable 6に示されている。Table 6に示すように貨物量の変動を考慮しない場合、Case 1は47.9×10⁶(¥)、Case 2は43.1×10⁶(¥)でCase 1の方が船社の利益は高い。一方、不確定性を考慮する場合、Case 1は33.0×10⁶(¥)、

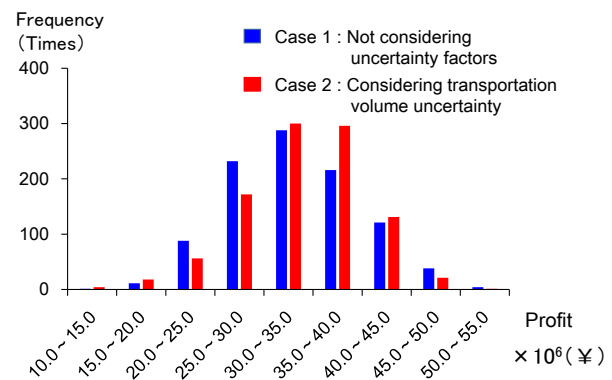


Fig. 9 Transportation volume uncertainty influence

Table 5 GA parameters

	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
	Upper problem	Lower problem	Upper problem	Lower problem	Upper problem	Lower problem	Upper problem	Lower problem
Generation	100	50	100	50	100	50	100	50
Population	100	50	100	50	100	50	100	50
Crossover rate (%)	100							
Mutation rate (%)	3							
Crossover method	Single-point crossover							
Selection method	Tournament selection (Tournament size : 2)							

Table 6 Optimization results considering transportation volume uncertainty

Case 1					Case 2				
Ship ID	Capacity (TEU)	Route Type	Route	Total Time (Hour)	Ship ID	Capacity (TEU)	Route Type	Route	Total Time (Hour)
S1	5000	Go around	P3 P4 P1	155.7	S1	5000	Go around	P3 P4 P1	155.7
S2	3000	Point-to-point	P1 P4	145.4	S2	3000	Point-to-point	P1 P4	145.4
S3	3000	Go around	P1 P2 P3	135.7	S3	3000	Pendulum	P1 P2 P3 P2	153.3
S4	3000	Go around	P1 P2 P3	135.7	S4	3000	Go around	P1 P3 P2	135.7
Profit (× 10 ⁶ ¥)					Profit (× 10 ⁶ ¥)				
Not considering transportation volume uncertainty					Not considering transportation volume uncertainty				
47.9					43.1				
Expected value of Profit (× 10 ⁶ ¥)					Expected value of Profit (× 10 ⁶ ¥)				
33.0					33.8				
Considering transportation volume uncertainty					Considering transportation volume uncertainty				

Case 2は 33.8×10^6 (¥)でCase 2の方が船社の利益の期待値は高くなる。またCase 1の不確定性を考慮する場合としない場合では、 14.9×10^6 (¥)の差があり、船社の利益の期待値を基準にすると約45%の差が生じている。以上より、貨物量の不確定性の影響により最適解が変化することが理解できる。

6.2.3 貨物量の変動の影響の考察

Case 1とCase 2の利益の差を考察するため、Table 3に示したOD貨物量の基準値と、全ての港湾間の貨物量が25%減少した場合で、各航路の利益がどのように変化するかを調査した。その結果をTable 7に示す。Table 7には各航路に投入される船舶の隻数も示されている。

貨物量が基準値の場合、Case 1では航路P1→P2、P2→P3、P3→P1に2隻の船舶(S3, S4)を投入することにより、全体の利益を増加させている。しかし、貨物量が25%減少した場合、航路P1→P2、P2→P3の利益が大きく減少する。一方、Case 2の場合、利益の変動の大きい航路P1→P2、P2→P3への投入隻数が1隻となっている。それにより航路P1→P2、及びP2→P3における利益の減少が抑えられている。なお、Case 2では航路P3→P2で2隻の船舶(S3, S4)を用いており、その影響により大きく利益が減少するが、その2隻が航路P2→P1を取ることでその利

益の減少を相殺する。このように、Case 2では貨物量が変動しても安定的に利益が確保できる配船案となっている。

6.3 船速の不確定性の影響の考察

ここでは、通常の最適化であるCase 1の結果と船速の不確定性を考慮したCase 3の結果を比較する。Case 3では船速が標準偏差3.0 knotで変動すると仮定し、制約条件を1週間以内の閉航路という条件から制約満足確率 $\geq 95.0\%$ に変更して最適化を行った。Table 8にその結果を比較する。Case 1の場合、S2、S3、S4の船舶は、輸送時間の標準偏差を考慮しても高確率で制約を満足することが分かる。しかし、船舶S1は制約満足確率が93.8%となり、制約条件を満足しない。そのためCase 3では港湾P4を抜港し、輸送時間を減少させることで制約を満足させる。さらにS1の船舶を5,000TEUから3,000TEUの船舶に変更して輸送コストを抑えることで、利益の減少を抑えている。なお輸送時間の標準偏差は、船舶を小型化した影響により、若干増加する。この場合も不確定性の影響により最適解が変化する。

6.4 原油価格の不確定性を考慮した最適化

原油価格の上昇に対するロバスト性、船社の利益

Table 7 Difference of detailed profits between Case 1 and Case 2

Port			P1		P2		P3		P4	
			Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
P1	Number of using ships				2	1	1	2	1	1
	Not decrease	Profit ($\times 10^6$ ¥)			3.6	1.4	15.8	15.1	-2.3	-2.3
	25% decrease	Profit ($\times 10^6$ ¥)			-16.7	-3.0	16.5	1.7	-3.8	-3.3
P2	Number of using ships		0	2			2	1	0	
	Not decrease	Profit ($\times 10^6$ ¥)					4.4	12.8		
	25% decrease	Profit ($\times 10^6$ ¥)	0	23.6			-1.8	11.7	0	0
P3	Number of using ships		2	0	0	2			1	1
	Not decrease	Profit ($\times 10^6$ ¥)	8.9	0	0	-24.9			13.9	13.9
	25% decrease	Profit ($\times 10^6$ ¥)	12.0	0	0	-24.7			-7.9	-8.3
P4	Number of using ships		2	2	0		0			
	Not decrease	Profit ($\times 10^6$ ¥)	3.6	3.6	0		0			
	25% decrease	Profit ($\times 10^6$ ¥)	14.8	15.7	0		0			

Table 8 Optimization results considering ship speed uncertainty

Case 1							Case 3						
Ship ID	Capacity (TEU)	Route Type	Route	Median (Hour)	Standard Deviation (Hour)	Reliability (%)	Ship ID	Capacity (TEU)	Route Type	Route	Median (Hour)	Standard Deviation (Hour)	Reliability (%)
S1	5000	Go around	P3 P4 P1	155.7	8.6	93.8	S1	3000	Point-to-point	P1 P3	118.1	9.1	100
S2	3000	Point-to-point	P1 P4	145.4	11.7	97.3	S2	3000	Point-to-point	P1 P4	145.4	11.7	97.3
S3	3000	Go around	P1 P2 P3	135.7	8.2	100.0	S3	3000	Go around	P1 P2 P3	135.7	8.2	100.0
S4	3000	Go around	P1 P2 P3	135.7	8.2	100.0	S4	3000	Go around	P1 P2 P3	135.7	8.2	100.0
Profit ($\times 10^6$ ¥)				47.9			Profit ($\times 10^6$ ¥)				45.8		

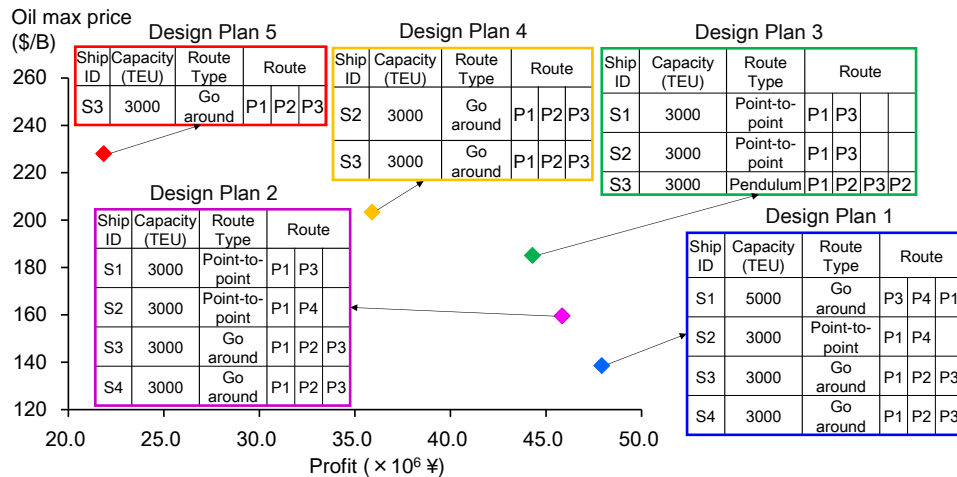


Fig.10 Relation between the profit and oil max price

の双方を考慮した多目標最適化を実施した結果 (Case 4) を Fig. 10 に示す。図の Design plan 1-5 は多目標最適化によって獲得されたパレート最適解に利益の大きい順に番号を振ったものである。この図に示すように、原油最大価格と船社の利益の間には、トレードオフの関係が存在し、原油最大価格の上昇には隻数の減少、寄港数の減少及び船舶サイズの縮小が有効であると考えられる。

具体的には Design plan 1 から Design plan 2 では船舶 S1 を 5,000TEU から 3,000TEU に縮小し、港湾 P4 を抜港する。Design plan 2 から Design plan 3 では船舶 S4 を減少させ、船舶 S2 を港湾 P4 から港湾 P3 への寄港に変化させる。それに加え、船舶 S3 を振り子航路に変化させる。以上により原油最大価格を上昇させる。その影響により船社の利益は減少するものの、その減少額は Design plan 3 から Design plan 5 の間の減少額に比べて小さい。同様に、Design plan 3 から Design plan 4 では、船舶 S1 を減少させ、船舶 S3 を巡回航路に変化させる。さらに、船舶 S2 は港湾 P2 を加えた巡回航路にする。Design plan 4 から Design plan 5 では船舶 S2 を減少させる。以上により原油最大価格を上昇させるものの、その上昇額は Design plan 1 から Design plan 3 の間に比べて小さい。以上の結果から、原油価格上昇に対するロバスト性と利益の双方を考慮すると Design Plan 3 が一つの候補になると考えられる。

このように Design plan 1-5 を比較すると投入する隻数の減少、寄港数の減少、船舶サイズの縮小により、原油価格の上昇に対するロバスト性が向上することが理解できる。これにより配船案全体の燃料消費量が抑えられるため、原油価格の上昇による船社の利益の減少を小さくすることができる。一方、隻

数の減少、寄港数の減少、船舶サイズの縮小により運賃収入は減少するため、それにより獲得できる船社の利益は減少する。以上によって、船社の利益と原油最大価格との間に、トレードオフの関係が発生していると考えられる。

以上より、多目標最適化手法を適用することで、船社の利益と原油最大価格を考慮した配船計画案のパレートフロントが獲得できた。そして、これらの目的関数の関係を定量的に把握できた。

6.5 解空間と計算時間について

一般的に配船計画問題は広大な解空間を有することが知られている。4 港 8 隻で上位問題の解空間の探索範囲を簡易的に見積った結果、 2.43×10^{12} 通り (実行不可能な解も含む) となった。これに下位問題の影響も考慮するとさらに解空間は拡大する。それに加え、港湾数・利用可能な最大隻数の増加の影響も解空間の拡大に影響する。そのため本研究では、総当たり法 (列挙法) を用いずにメタヒューリスティック手法を用いて求解しているが、それでも二段階最適化問題として定式化しているため、最適解の探索には時間を要する。Case 4 においては最適解の探索に 12 時間程度を要した。したがって、現実問題の適用には分散処理などを考慮する必要がある、今後の課題である。

7 ケーススタディ 2

7.1 問題設定

6 章では、不確定性が配船計画に与える影響を確認するため、解空間の小さい 4 港間の配船計画問題に適用することでその影響を確認した。

解空間の広い 4 港以上の問題でも最適解を獲得で

Table 9 OD, distance, and fare table between ports (6 ports optimization problem)

Port	P1			P2			P3			P4			P5			P6		
	TEU	Nm	¥	TEU	Nm	¥	TEU	Nm	¥	TEU	Nm	¥	TEU	Nm	¥	TEU	Nm	¥
P1				2618	668	70500	9200	1035	83500	4593	1336	94000	6890	1152	88000	6008	1583	104000
P2	4200	668	70500				4225	491	65000	2249	912	79500	2764	543	66000	3701	1150	88000
P3	22187	1035	83500	1750	491	65000				4543	599	68500	1345	551	66000	6315	823	76000
P4	9920	1336	94000	2010	912	79500	0	599	68500				1567	1029	83500	6285	341	59000
P5	3256	1152	88000	2315	543	66000	3310	551	66000	1048	1029	83500				3048	1256	92000
P6	8196	1583	104000	1469	1150	88000	5933	823	76000	1968	341	59000	3048	1256	92000			

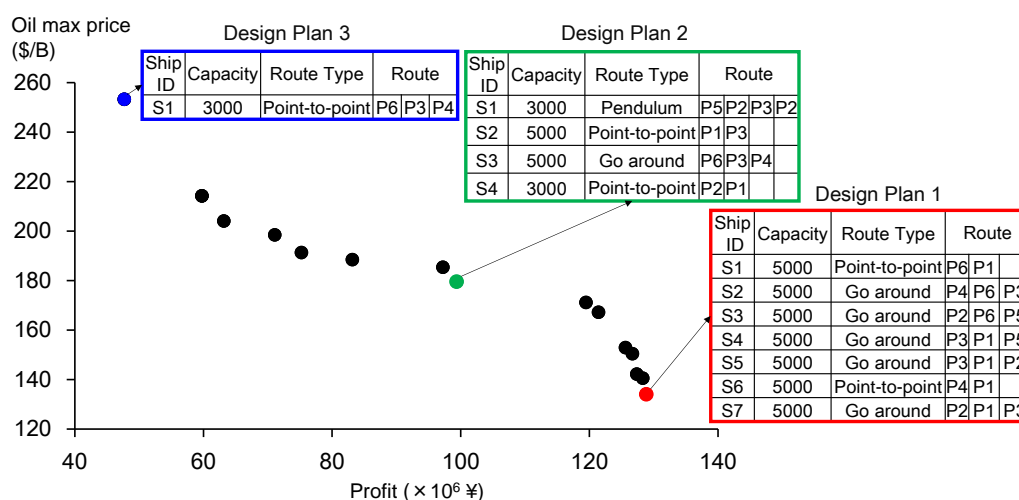


Fig.11 Relation between the profit and oil max price (6 ports optimization problem)

きるかを確認するため、Table 3 の問題設定に 2 港を加えた計 6 港間で最適化を実施した。この場合、OD 表の設定領域は 12→30 と 2 倍以上となり、使用できる船舶も 15 隻と設定した。これらは指数的に解空間の増大を招くため、探索領域は 4 港問題の約 3.64×10^{28} 倍となっている。

Table 9 に OD 表、港湾間の距離表、運賃表を示す。GA パラメータについては解空間が拡大したため、上位問題の GA パラメータを 200 世代、個体数を 100 個体と設定した。その他の設定は 6 章の Case 4 と同様である。

7.2 最適化結果

原油価格の上昇に対するロバスト性と船社の利益の双方を考慮した多目標最適化を実施した結果を Fig. 11 に示す。図の Design plan1-3 は獲得した最適解から設計案を 3 案抽出した結果である。

4 港問題と比較すると問題設定を拡張することによって、原油最大価格の最大値、船社の利益の最大値が上昇していることが分かる。また 4 港問題では、

獲得した設計案は 5 案であったのに対し、6 港問題では問題設定を拡張した影響により設計案が 15 案に増え、解の多様性が増加する。さらに、4 港問題では Design plan 1 のみが 5,000TEU の船舶を 1 隻使用し、その他は 3,000TEU の船舶を使用する設計案となる一方、6 港問題では Design plan 2 では 2 隻、Design plan 1 では全て 5,000TEU の船舶を使用して、船社の利益を増加させる。このように、6 港問題の設計案では船社の利益を増加させるために、5,000TEU の船舶を多用する点に特徴がある。以上より、港湾数や船舶隻数の異なる問題設定に対しても本研究の提案手法が適用可能であることを示した。

8. 結言

8.1 本研究の結論

本研究ではコンテナ配送問題を上位問題と下位問題からなる二段階最適化問題として定式化した。そしてロバスト最適化と多目標最適化手法を用いて、貨物量、船速及び原油価格の不確定性を考慮した配船計画の最適化手法を提案した。貨物量の不確定性

はモンテカルロシミュレーションを、船速の不確定性は誤差伝播則を用いてその不確定性を表現した。原油価格の不確定性は原油最大価格を上位問題の目的関数として付与し、船社の利益と原油最大価格の多目標最適化問題に拡張することで、それらの目的関数の関係を定量的に把握する手法を提案した。提案手法をコンテナ配送問題に適用することで貨物量、船速及び原油価格の不確定性の影響を考察し、提案手法の有効性を示した。

8.2 今後の課題

本研究は手法の検討を主目的としたため、対象とした問題は簡易的であり、船型データについても2000年代に実施された荒井らの研究を参考に設定している。したがって、現実問題に適用するためには課題が残されている。それに加え本研究では海上物流の不確定性を予測が困難な外乱(ノイズ)と捉え、最適化を実施した。しかし実際の海上物流ではそれらは時間的に変動すると考えられる。本研究ではその点に関しては十分に考慮できていない。

現実問題に適用するための課題として、以下が挙げられる。

- ・ ハブアンドスポーク型の輸送形態の考慮
- ・ 最新の船型データや貨物流動を踏まえた計算
- ・ 1週間以内の閉航路というような簡易的な制約条件の見直し
- ・ 最適化計算の高速化
- ・ 不定期の変動のみではなく、定期的な変動の考慮

これらの課題を解決し、現実の海上物流問題に適用することが今後の課題である。

参考文献

- (1) 大和裕幸・角田智弘・小山健夫・伏見彬：数理計画法によるコンテナ船航路の設計手法について，日本造船学会論文集，第184号，pp.607-615，1998.
- (2) 荒井誠・柳井良哉：GAを用いた海上コンテナ輸送ネットワーク最適化手法の研究，日本船舶海洋工学会論文集，第4号，pp.55-61，2006.
- (3) 新谷浩一・今井昭夫・西村悦子：空コンテナの回送を考慮したコンテナ船のロケーション・ルーチング問題，日本航海学会論文集，第111号，pp.273-284，2004.
- (4) 有木俊博・鈴木克幸：GLS法による日中海上物流の最適化，日本船舶海洋工学会論文集，第3号，pp.69-76，2006.
- (5) 松倉洋史・Michelle C. Buen-Tumilba・大和裕幸：海上輸送シミュレーションによる工場間物流の外乱評価，日本船舶海洋工学会論文集，第12号，pp.175-185，2010.
- (6) Zhang, C., Nemhauser, G., Sokol, j., Cheon, M-K., and Papageorgiou, D. : Robust inventory routing with flexible time window allocation. Working paper, 2015.
- (7) Wang, S., and Meng, Q. : Liner ship route schedule design with sea contingency time and port time uncertainty. Transportation Research Part B: Methodological, 46(5), pp.615-633, 2012.
- (8) Meng, Q., Wang, T., and Wang, S. : Short-term liner ship fleet planning with container transshipment and uncertain container shipment demand. European Journal of Operational Research, 223(1), pp.96-105, 2012.
- (9) 和田祐次郎・濱田邦裕・平田法隆：不確定性を考慮した配船計画の最適化に関する研究，日本船舶海洋工学会講演論文集，第11号，CD-ROM，2010.
- (10) 宮城俊彦：均衡制約付き最適化問題の土木計画学の応用の可能性，土木計画学研究・講演集，No.20，1997.
- (11) 森忠治：測量学1-基礎編-，丸善，2001.
- (12) IHS Mint (Marine intelligence Network) : <http://marketintelligencenetwork.com>, (Accessed 28 September 2016).
- (13) Shapiro, S. S., and Wilk, M. B. : An analysis of variance test for normality (complete samples), Biometrika, 52(3/4), 591-611, 1965.
- (14) Deb, K. and Goel, T. : Evolutionary multi-criterion optimization, Evolutionary algorithms in engineering and computer science, pp.135-162, 1999.
- (15) Chvatal, V. : A greedy heuristic for the set-covering problem, Mathematics of Operations Research, vol.4, No.3, pp.233-235, 1979.
- (16) 大阪市政港湾統計(年報) : <http://www.city.osaka.lg.jp/port/page/0000067066.html>, (Accessed 23 September 2016).