

遺伝的アルゴリズムを用いた 不定期船の配船計画作成に関する研究

—オーダー式配船への取り組み—

正員 松倉 洋史*
正員 大和 裕幸**

正員 勝原 光治郎*

Study on Trumper Allocation Planning Using Genetic Algorithm
- "Order Type" Ship Allocation -

by Hiroshi Matsukura, Member Mitujirou Katuhara, Member
Hiroyuki Yamato, Member

Summary

Trumper allocation is important and difficult work operation because it affects heavily on transport efficiency and stability although a lot of factors must be considered carefully and properly. Provided that high performance trumper allocation plan be generated automatically by using computer program, it is very useful not only for labor saving but also for designing highly efficient enterprise-level maritime transport system through various and repeated analysis. There are 2 major types of trumper allocation ways. One is "tank balance type (or VMI: Vender Managed Inventory type)" and authors took it up in the former paper.

In this paper we tried to solve the other one, "order type" trumper allocation. In "order type" allocation an operator receives a lot of orders from cargo owner in which detailed tasks are described, for example loading port name, day, item, quantity, and the operator tried to execute all the orders completely and efficiently under the restrictions. Firstly, we developed "order-type" allocation method by utilizing GA: Genetic Algorithm and logistics simulator, and implement it into an automatic allocation system. Secondly we apply it for a transport system modeled with a real ship operator and assess the system performance. We could conclude that our automatic trumper allocation system could generate fine allocation plans those are as efficient in total fuel consumption as the one made by human operators with high probability.

1. 緒 言

不定期船輸送における配船計画の作成は非常に重要かつ困難な作業であるが、ほとんどが人手により行われている。仮にコンピュータを利用して配船計画を自動生成することが出来れば、計算機能力を有効活用することで配船性能を改善して輸送効率を上げることが可能となると共に、多数のシナリオ分析等による海上輸送システム設計のための物流シミュレーション解析が現実的となる。

前報¹⁾では、不定期船輸送において代表的かつ支配的な輸送方式であるタンクバランス式及びオーダー式という 2 つの配船方式のうち、タンクバランス式の配船方式を取り上げた。本報では、もう 1 方の配船方式であるオーダー式を取り上げる。両者は荷主から託される輸送の自由度において大きな違いがある、全く異なる輸送方

式である。

本稿では、不定期船の自動配船手法の活用策について論じると共に、オーダー式配船を対象として、遺伝的アルゴリズムの枠組み及び染色体評価用の物流シミュレータを用いた不定期船自動配船手法を開発し、実船社を対象として配船を試みる。

上記のような配船問題は、いわゆるルート決定問題の 1 つである。海外におけるこれまでの研究²⁾はトラック・航空機等の非船舶を対象としたものがほとんどであり、不定期船を対象としたものは少ない³⁾。不定期船に対しては輸送単位の大きさ、考慮すべき要因の多さ、自由度の大きさなどの様々な困難がある³⁾。更に、本稿で解析対象として取り組んだ内航海運については、日本は島国であるため航行経路が網の目状となって経路が複雑多岐にわたることなどで難易度が高い。国内における研究としては、著者らによるタンクバランス式配船を対象とした取り組み¹⁾³⁾⁶⁾の他はあまり行われていない。

* 独立行政法人 海上技術安全研究所

** 東京大学大学院 新領域創成科学研究科

原稿受理 平成 18 年 3 月 31 日

2. 不定期船の自動配船の活用

2.1 輸送の概要

多くの不定期船社では、荷主からの輸送要求や船舶の位置・状態、港湾情報等の輸送関連情報を集約・分析する配船センターを設けて配船計画を一元的に作成している。配船センターから各タンカーに届く指示は、荷役月日、港、製品種類、荷役量、荷役種類(積み揚げ)等の輸送に必要な基本情報のみであり、各タンカーはそれをもとに航行経路、沖待ちの要不要、入出港時刻、荷役開始/終了時刻等、配船指示を実施可能となるよう現場の状況・条件に応じた詳細な計画を立てて実際の輸送活動を行う。

2.2 輸送形態の分類

不定期船による輸送は大きく以下の2種類の方式に分かれる。

(1) オーダー式

荷主が船社に対して荷役月日(荷役を予定する日)・港・製品種類・荷役量等の詳細な輸送指示(オーダー)を出すものである。船社側はオーダーに対して船舶の割り当てを行う。船社には、主として、どの船をどの輸送に割り当てるかという自由度及び、荷役月日について荷主との交渉により多少前後に動かすという自由度のみを持つ。

(2) タンクバランス式

船社が陸上のタンクの在庫(タンクバランス)を管理している場合である。トラック等の陸上輸送における VMI(Vender Managed Inventory)方式に相当する。すなわち、荷主からはタンクをオーバーフローあるいはドライアウトさせないということのみを依頼され、どのような輸送を行うかについては一任されている場合である。船社が荷主と一体となって輸送を行っている場合の他、荷主が自社船隊を有して輸送を行っている場合である。

両者は配船の満たすべき要件が異なるため(1)はオーダーの充足、(2)はタンクバランスの維持、全く異なる輸送形態である。

前報¹⁾ではタンクバランス式配船を対象に自動配船を試みた。タンクバランス式は、オーダー式に比して輸送の自由度が高く配船作成時の探索空間が広いこと、潜在的に効率の高い配船を作成することが可能である。しかしながら、オーダー式は国内の相当数の船社が行っている輸送形態であり、当該輸送形態に対して自動配船技術を開発することは不定期船輸送の効率化推進に非常に大きな意味を持つと考える。

以上により本報告ではオーダー式の輸送形態を取り上げる。

2.3 自動配船の困難性

計算機による不定期船の配船自動化を困難にしているのは、主として次の理由である。

(1) 輸送単位が数百~数千トンと大きい上に、使用する船の隻数も限られるため、個々の輸送遅延の影響が大きく、各輸送の正確な

取り扱いが必要(例えば、入港時間に間に合わなければ翌日以降の入港・荷役となる等)。

(2) 船舶、港湾、貯蔵施設、工場、航路状況等、考慮すべき条件が複雑かつ多岐にわたる上、配船アルゴリズム上でのそれらの統一的な取り扱いが難しい。

例えば、船齢や建造時の設計方針等により、速力(港間の所要時間に影響)・機関馬力(燃費に影響)・荷役ポンプ能力(荷役所要時間に影響)等の性能が船毎にかなり異なり、運航評価上無視できない。速力については、同一船でも航行時に積んでいる荷物量に応じて可能な速度が変化する(船は1航海の時間が長いことが多く、1knot程度の速度差でも港到着時には数時間の差となる)。

(3) 入出港、積み揚げ、沖待ち等の時刻等、活動の状態を変化させるタイミングが無段階である(どの時刻で切り替えても良い)ため、組合せ爆発が起きやすい。

本報告では上記要素を扱う。このような問題に対しては、列生成法等の数理計画法によるアプローチもあるが、ここでは幾つかのヒューリスティック手法の中から遺伝的アルゴリズムの枠組みを用いると共に各染色体の評価にシミュレータを利用することとした。

2.4 自動配船の利用法

計算機による不定期船の自動配船には、主として以下の2種類の利用法が考えられる。

(1) 配船業務の支援

船社の配船担当者が行う配船業務の支援システムとして、日常的業務で利用するものである。すなわち、配船担当者の入力データをもとに、自動配船システムが配船案を配船担当者に提示し、それを担当者が修正・確認の後に採用することで配船業務を支援する。配船担当者の作業負担軽減となると共に、担当者よりも優れた配船を作成可能な場合は輸送の効率化に資することとなる。

なお、実務における配船計画の作成対象期間は、オーダー式の場合で2週~1月間程度であるが、オーダーの内容変更・追加・取り消しが入るため、その都度配船計画を修正する必要がある。

(2) 海上輸送に関する中長期計画等の検討

日常業務とは離れた中長期的な経営計画の策定に利用するものである。リプレース船の基本仕様決定、船隊整備計画作成、貯蔵設備・船社バース等の陸上設備投資計画評価、融通・共同配船等の企業間協力における契約方式(利益分配ルール等)の策定、地震等の災害時対策の作成等である。これらは輸送システム・方式の改善に資することから、大幅な輸送及び投資効率の改善につながる可能性がある²⁾。

なお、本目的のためには、細部に囚われずに対象輸送システムの持つ総体としての性能を評価する必要があるため、ある程度モデル化されたシステムの評価を行うことで十分である。自動配船手法としては、(1)に対応するものと(2)に対応するもの

に基本的な違いはないが、大きく輸送及び投資効率の改善を期待できることから、本稿では(2)を行うことを想定した自動配船手法を開発し、当該目的のために必要な配船性能を発揮できるかにつき論ずることとする。

海上輸送に関する中長期計画等の検討においては、まず、船隊仕様・初期船舶配置、港湾配置・属性(接岸可能隻数・サイズ、荷役可能時間帯等)、オーダー・タンク在庫量等の、多様なパラメータを持つ輸送システムをコンピュータ上に構築する。それに対して適切な配船案を作成し、作成した配船案に従って船舶をコンピュータ上で仮想的に動かして各種指標を測定し、当該輸送システムを持つ各種の性能(輸送効率など)を評価するという手順になる。

その際、船隊初期配置やオーダー・タンク在庫量については数多くの組合せがありうるが、それら可能性のある値の組合せについて十分な範囲の評価を行わなければ、当該輸送システムを持つ総体としての性能を適切に評価することは出来ない。しかし、個々の組合せについて人が配船案を作成するのは、工数的にも習熟度においても非現実的である。通常、配船担当者は担当する輸送システムに関するある程度の配船業務の経験後に、優秀な配船案を作成出来るようになるからである。検討対象である初見の輸送システムについて上記を適切な時間内に実施するのは困難である。従って、(2)の目的のために適切な評価を実施するには、自動配船システムの利用が不可欠である。

3. オーダー式配船のための自動配船手法

3.1 遺伝的アルゴリズムの概要

遺伝的アルゴリズムは複数の実行可能解を保持しつつ、その解を進化のアナロジーを用いて改善していく方法の総称であり、以下のように表現できる⁷⁾。ただし、 $P(t)$ は第 t 世代の集団、交叉及び突然変異を行う関数を $generate()$ 、選択を行う関数を $select()$ とする。

この基本的な枠組みは踏襲しつつも、解こうとしている課題に適合するよう、染色体生成法、性能評価法、評価関数の構成、各種パラメータの調整等を研究・開発することとなる。

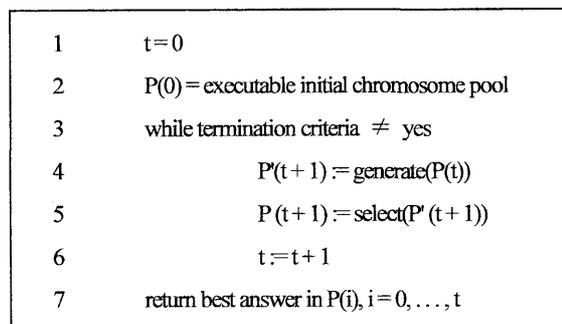


Fig.1 Outline of Genetic Algorithm

3.2 自動配船の実現に向けたアプローチ

本稿では染色体の輸送性能の評価を、多項式からなる評価関数等

により静的に行うのではなく、物流シミュレータ上で動的に行うこととした。即ち染色体に配船計画案を記述し、検討対象となる輸送システムを出来るだけ忠実に再現したシミュレータ上で実行して輸送結果のパラメータを収集することで、どの程度の輸送性能が期待できる配船案であるのか評価する。

シミュレータを用いることで、輸送性能の評価で時間がかかるデメリットはあるものの、次のようなメリットを享受可能である。

- (1) 入出港制限時間帯や船舶の仕様等、輸送システムの条件が変化しても、ほぼ同一の配船アルゴリズムで対応することが可能である。同様に、シミュレータの設定ファイルや染色体の生成用のデータベースを編集することで、多様な企業に対してもかなりの程度対応可能である等、汎用性が高い。
- (2) 解析対象の複雑さの増加は主としてシミュレータ部分が担うため、アルゴリズムが単純となる。なお、シミュレータの作成においては、オブジェクト指向プログラミング技術及び関連技術を適切に用いることで、現実世界の持つ複雑さを実用的な工数内で取り扱うことが可能と考える。

3.3 自動配船手法

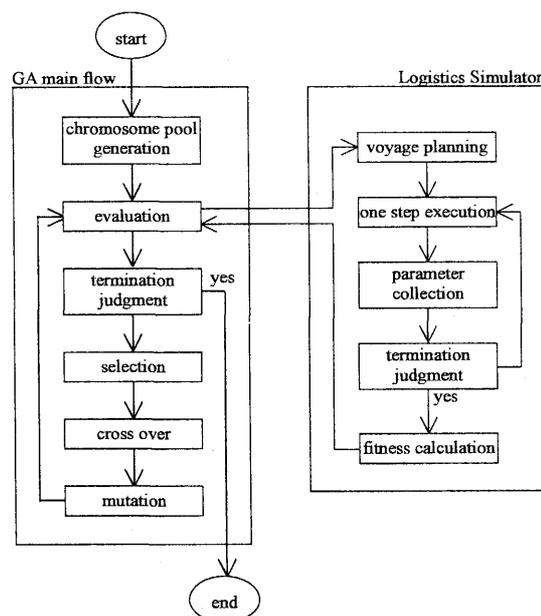


Fig.2 Structure of Automatic Tramp Allocation Algorithm

上記を実現するための自動配船システムの構成を Fig.2 とした。

まず、進化機構側(図の左側)で初期染色体プールを生成し、次に各染色体を物流シミュレータ(図の右側)に送って輸送性能(環境への適合度: Fitness Score)を評価する。その際、シミュレータは染色体を読み込み航行計画に変換し、解析対象に近似するよう設定された輸送環境で航行計画を仮想的に実行して、輸送性能関係のパラメータを収集する。シミュレーション終了後、それらを用いて評価値の計算を行う。全染色体の評価値を計算した後、優秀な成績を残した染色体の特性が残りやすくなるよう次世代の染色体を生成する。

次世代の染色体生成においては、まず、成績の良い染色体が確率

的に多く残るよう選択を行い、続いて、選択された個体を対象に交叉及び突然変異を行う。それらにより形成された染色体プールを再びシミュレータで評価する。以上を終了条件を満たすまで繰り返す。

3.3.1 染色体の初期発生

通常、染色体は1次元であることが多いが、各船相互のオーダー間における時間順序を扱いやすくするために、本検討における染色体はFig.3の様に縦に船名・横にオーダーを並べた2次元のものとした。オーダーは2.1で述べた様な、港名・積み揚げ・荷役指定日・品目等の荷役の最も基本的な情報(荷役情報)のセットを持つ。例えば、A港において品目Bの積みを行い、C港において品目Dの揚げを行う場合は、「港名:A、品目:B、荷役種類:積み、荷役指定日:2004年6月10日」及び「港名:C、品目:D、荷役種類:揚げ、荷役指定日:2004年6月12日」という情報が登録される。複数港積みや複数港揚げについても同様である。

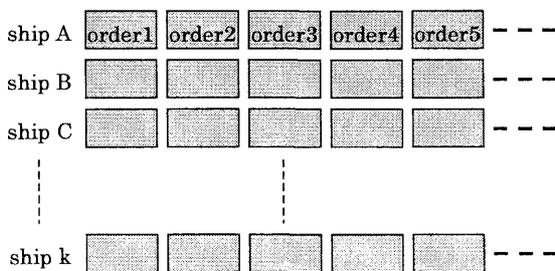


Fig.3 Chromosome Structure

各船へのオーダーの割り当てにおいて、同一船における連続するオーダーの、前オーダーの最終荷役日と後オーダーの最初の荷役日が重複もしくは逆転した場合は致死遺伝子となる。オーダー割り当てでは、致死遺伝子とならないよう配慮しつつ、乱数により行われる。

3.3.2 評価

配船計画の作成に関して考慮される基本的方針は、「輸送を実現した上で、運航経費が少ないこと」である。運航経費は、固定的経費である船舶経費とは異なり、燃料油費・港費・運航店費等から構成され変動的経費の性質を持つ。このうち、燃料油費は運航経費の中で大きな割合を占めると共に(平成11年度調査で運航経費中の4割以上を占めており⁸⁾、昨今の燃料価格高騰下では更に大きな割合となっていると推察される)、配船結果によって大きく増減する可能性がある。そのため、上記基本方針は、「依頼されたオーダーの全てを実施した上で、総燃料消費量を削減すること」と換言できる。

以上より、配船結果の評価要素としては、輸送持続時間及び船隊全体の総燃料消費量を用いた。配船案をシミュレータで実行中に、許容時間を超えてオーダーの実施が遅れれば輸送、すなわち配船計画は失敗したこととなる。上記の輸送持続時間とは、輸送を失敗せずに輸送を継続できていた時間をいう。

具体的には、各染色体の適合度の評価値Fは、以下に述べる F_{time} と F_{fuel} の積により算出される値とし、小さい方が優れているよう構成した。

$$F = F_{time} \times F_{fuel} \cdots \cdots (1)$$

(1) 輸送持続時間をもとにした評価要素(F_{time})

輸送持続時間tをもとに、以下により算出される値である。なお C_t は任意の定数(ただし $C_t > 1$)、 $T_{necessary}$ は必要な輸送持続時間(例えば38日間の輸送計画を立てるならば $38 \times 24 = 912$ 時間)である。 F_{time} は小さい方が望ましい。

$$F_{time} = C_t - t/T_{necessary} \cdots \cdots (2)$$

(2) 船隊の総燃料消費量をもとにした評価要素(F_{fuel})

F_{fuel} は、輸送を持続できなくなったとき(荷役指定日時に対し許容される猶予時間内に荷役を行えなかったとき)、もしくは輸送持続時間が $T_{necessary}$ に達したときの船隊の総燃料消費量をもとに、以下により算出される値である。なお、 C_f を任意の定数(ただし輸送持続時間tが F_{time} 、ひいては全体の評価値Fに与える影響を、本要素の与える影響より大きくするため、 F_{time} と F_{fuel} の変化域を違えるべく $C_f > C_t$ とする)、 $f_{terminate}$ をシミュレーション終了時の総燃料消費量、 f_{max} を全隻がシミュレーション開始時から終了時まで、機関常用出力で航行を続けた場合の総燃料消費量、 R_{fuel} を燃料消費率(例えば $[g/ps \cdot hr]$ の次元を持つ)、Pを機関出力、hを航行時間とする。 F_{fuel} は小さい方が望ましい。

なお、本稿で解析対象とする輸送貨物は白油であり、黒油と異なり停泊中のタンクヒーティングは不要であるため、燃料は航行中のみ消費されることとした。

$$f_{terminate(or)max} = R_{fuel} \times p \times h$$

$$F_{fuel} = C_f + \frac{\sum_{全隻} f_{terminate}}{\sum_{全隻} f_{max}} \cdots \cdots (3)$$

進化過程の前半では輸送持続時間が短い(荷役指定日時に対し許容される猶予期間内に荷役を実施できなかったことにより短時間で輸送に失敗することから、 F_{time} が支配的である。しかし、全体の評価値Fを F_{time} と F_{fuel} の積とすることで、同一の輸送持続時間でも総燃料消費量が改善されれば評価値Fは向上する。これにより、同一の輸送持続時間の配船案同士における探索能力を確保できるようにした。

また、 F_{time} はひとたび必要輸送持続期間に達した後は一定値となり、後は必要輸送持続期間終了時の燃料消費量の改善が行われる。

3.3.3 選択

上位から一定数の成績の良い染色体は、エリートとして無条件に次世代に残すこととした。このような扱いをする際は、優秀な染色体の消滅及び破壊を防ぐことが可能であるという利点の一方、あまり優秀ではない解(局所解)が進化の早期に染色体プール内で支配的となり、多様性が確保されずに必要な探索能力を得られない可能性がある。そこで次節に述べる交叉及び突然変異の発生確率を高くして探索能力を保つようにした。

なお、選択は、乱数により任意の n 個 ($n=2,3,4,\dots$) の染色体を選び、評価値を比較して良い方を残すトーナメントにより行う。これを必要な染色体数を充足するまで反復する。

n を大きくすることで優秀な解がより選ばれやすく調整することが可能である。また、評価値の絶対値によってではなく、染色体間の順位のみに着目して選択を行うことで、進化の過程(特に後半)において各染色体の評価値が接近しても進化時の淘汰圧が下がらないようにし、局所探索能力を出来るだけ確保するよう配慮した。

3.3.4 交叉

交叉では、対象とする2つの染色体について任意の基準日を定め、当該日付以降に開始されるオーダーを後半とし、残りを前半として1点交叉を行う。その際、2種類の染色体における同一船のオーダーの切れ目で、常に交換が可能であるとは限らない(例えば、片方の船の前半最後の荷役日が、他方の船の後半最初の荷役日以降であるもの場合)。そのため、必ずしも同一船同士の交換はせず、切れ目の適合する船の組合せを乱数で選択することとした。

一般的に、1点交叉よりも2点交叉の方が、更には一様交叉の方が探索能力は高いとされている⁹⁾。しかし、本報告で採用した染色体作成法においては1点交叉を除いて非致死性(ここでは、ある船に割り当てられたオーダーのうち、交叉後に任意の2つのオーダーにおいて前後のオーダーの日付が重複もしくは逆転しないこと)の染色体を作成可能であることは保証されない。配船対象の船舶数が増加すれば非致死性の染色体を作成出来る可能性は著しく低下する。そのため1点交叉を行うこととした。

なお、探索範囲が広がるよう、一回の進化で同一染色体が複数回の交叉を受けることも可能とした。

3.3.5 突然変異

突然変異においては、探索空間のなるべく多くを探索出来るよう、以下の3種類の突然変異オペレータを適用することとした。

(1) 2オーダー交換

任意の1つの染色体につき、ランダムに選んだ相異なる船の任意の2オーダーを交換するものである。これにより、少数のオーダーの配置が不適切なことで性能が良くない染色体の性能向上を期待できる。

(2) 2船交換

任意の1つの染色体につき、ランダムに選んだ任意の2船を交換するものである。これにより、総航行距離の長いオーダーに燃費の良い船が割り当てられることで、全体の燃料消費量が削減される、あるいは、速い船と遅い船とが交換されることで今まで期日に間に合わなかったオーダーが間に合うようになる等の好影響が生じる可能性がある。

(3) シャッフル

任意の1つの染色体につき、ランダムに選んだ任意の基準日以降に開始されるオーダーを、乱数を用いて全く新たに割り当て直

すものである。この場合、進化過程後半においては、本オペレータにより生成された染色体が直ちに高い性能を得ることは考えづらい。しかし、本オペレータによってオーダーの新しい組合せが数多く生じることから、染色体プールに多様性が生まれ、その後の進化の好結果につながりやすくなると期待できる。

なお、いずれの突然変異においても探索範囲が広がるよう、1回の進化における同一染色体の複数回の突然変異を可能とした。

4. 自動配船システムの開発

Fig.2 に従いパーソナルコンピュータ(以下、PC)上に自動配船システムを実装した。ただし、物流シミュレータの開発・管理を容易にし汎用性を上げるため、また並列分散計算に対応出来るようにするため、進化機構と物流シミュレータは完全に分離して別プログラムとした。相互の通信にはインターネット及びイントラネットの汎用的な通信規格であるTCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)を用いており、LANを介してデータの交換を行う。

前報においては染色体評価に利用可能なのは1個のシミュレータのみであったため、解を得るまでに非常に長い計算時間を要していた。本報では、進化機構側のプログラムを分散計算処理に対応させることで、任意の数のPCを用いて並列分散計算を行う機能を整備した。本機能では、シミュレータの稼働状態を監視してタスク配分を行うため、LANに接続できる市販のMS-Windows搭載のPCであればどのような性能のものでも混在して利用可能である。また、使用するPCには特段の設定は必要なく、シミュレーションプログラム及び設定ファイルをコピーした後に実行するだけで良い。

上記整備により、企業の持つ多数の事務用パソコンの余剰能力を自動配船計算に活用することも可能である。これにより大規模な計算システムを持たない企業においても本計算を行うことが出来る。

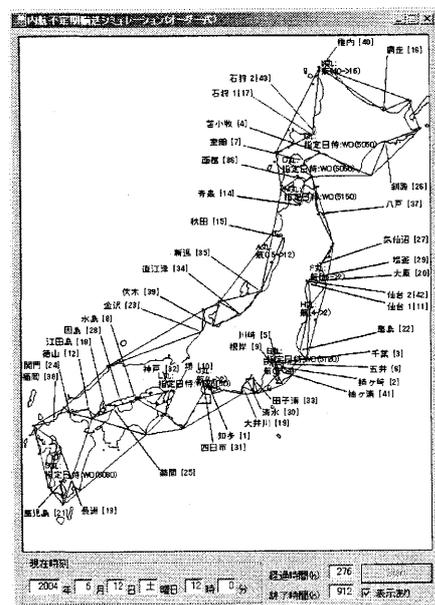


Fig.4 Simulator Snap Shot

物流シミュレータとしては、物流システムを構成する要素のうち、物流計画部門を除いた生産・輸送・販売の現場活動に相当する機能を担当する部分を PC 上に再現した。Fig.4 に開発したシミュレータの画面表示例を示す。

なお、本報告の取り組みにおいては、全く新しく開発し直す必要があったのは進化機構(探索アルゴリズム)部分のみであり、シミュレータについては、後述の例題において、配船方式が異なり、また、隻数・港数共に前報の2倍程度の数である船社を対象としたにも関わらず、設定ファイルの編集、評価関数の変更、染色体の変換、及び日付指定機能を付加する程度の小規模な改修で対応することが可能であった。これは、3.2 の後段で述べた、シミュレータを染色体評価に用いる利点を有効に利用できたためであると考えられる。

5. 配船の自動作成

5.1 全体モデルへの適用

5.1.1 モデルの概要¹⁰⁾

開発した自動配船アルゴリズムの性能を見るため、オーダー式配船により内航白油輸送を行っている国内大手船社を対象に自動配船を試みた。当該船社は半世紀上の歴史を持ち、非常に熟達した担当者が優れた配船を作成しているため対象として適切と考える。

(1) 白油輸送

白油は、ガソリン、灯油、軽油等の無色透明あるいはそれに近い色相の油類である。白油は、海外で原油から精製後に外航船により輸入されることもあるがその量は多くなく、ほとんどは原油の状態です輸入され、国内の精油所で精製されて白油となる。その後、タンカー等により国内各所の貯蔵タンク(中間貯蔵所もしくは最終需要家)へ輸送される。これが内航白油輸送である。

(2) 対象期間

内航白油輸送において繁忙期は冬季であり、その間の船隊稼働率は高い。しかし、冬季は時化の影響が大きく運航不能や遅延が多発し、また、輸送日程が過密であることからその後処理として必ずしも効率的ではない輸送が行われることがある。そのため、自動配船システムの比較対象としては不適切である。

本報告において対象とする期間は比較的海象の安定している夏季の1月間(2004年6月)とした。この時期は台風を除いて上記のような外乱が少なく、また、輸送変更に対しても、繁忙期ではないために輸送間隔が比較的長いために吸収しやすく、効率的輸送を実現しやすい。当該期間にはFig.5に示す経路で大型の台風4号と6号が上陸したため¹¹⁾、6月11・21日の両日を中心として輸送に影響を受けたと考えられる。ただし、台風の強さ・進路等については事前に予想がつくこと、短期間に通過していること、及び連続して通過していないことから、避泊もしくは他輸送への振替等の対処が可能であるため、影響は限定的である。

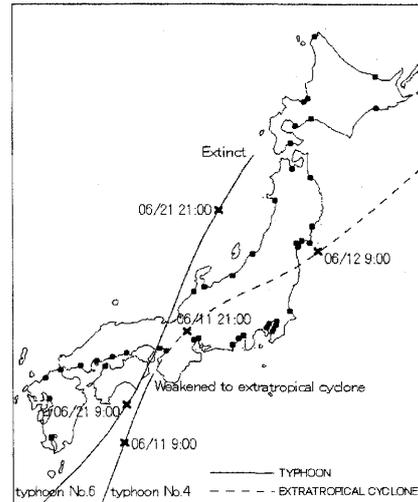


Fig.5 Typhoon Course and Date (June 2004)

Table.1-1 Basic Calculation Specifications (Simulation)

Cargo Type	White Oil
Simulation Term	4 weeks
Number of Port	43
Number of Ship	13
Ship Specifications	Size: 4,896~4,999DWT Speed: 11.4~13.9knot(full), 12~14.9knot(empty) Normal Horsepower: 2,380~3,740 Ps
Number of Order	97
Fitness Parameters	$C_1 = 1.5$ $C_2 = 4$

Table.1-2 Basic Calculation Specifications (Genetic Algorithm)

Number of Chromosome	500 individuals in chromosome pool
Number of Heterogeny	Full Model: 2,000 generation Subset Model: 500 generation
Percentage of Elite	2%
Tournament Size	n=2
Percentage of Crossover	40%
Percentage of Mutation	2 Orders Exchange: 40% 2 Ships Exchange: 40% Shuffle: 40%

(3) 対象船舶

今回取り上げたのは2004年6月当時に当該船社が運用していた船舶のうち、白油用で5,000DWT程度のものほぼ全隻となる13隻である(サイズの異なる船は独立して運用されるため、同程度の船舶のみを対象としても配船課題としての一般性は失われない)。

(4) 配船方針

対象船社では、夏季に輸送能力の余裕があっても、係船して残りの船舶の稼働率を上げるのではなく、船隊全隻を用いた上で効率的配船に努めるという方針の運用を行っている。そのため、自動配船においても運航船舶数を維持した上で、なるべく効率の良い運航を目指すこととした。

(5) "事前の荷役日調整"と"事後(実行時の)荷役猶予期間"の取り扱い

配船実務においては、配船計画を作成する際に荷主と交渉し、荷役の指定日を自らの作成する配船案の船繰りに合わせ、ある程度前後に調整すること(以下、事前の荷役指定日調整)が可能である。また、配船計画を作成後、実際に運航を行う際には運航遅延もしくは

前倒しが生じることがあるが、ある程度は許容される(以下、事後(実行時)の荷役猶予期間)。自動配船においては、事前の荷役日調整は行わず、事後(実行時)の荷役猶予期間は±1日とすることとした。

(6) 混載及び複数港積み/揚げの取り扱い

オーダー式配船の場合は、荷主から積み地/揚げ地及び荷役内容(どの港でどの貨物をどれだけ荷役するか)を指定され、通常は変更出来ないため、貨物混載や複数港揚げ/積み方を考慮する必要はない。

(7) シミュレーションの基本仕様

Table.1 に自動配船システムの計算の基本パラメータを示す。輸送対象の精油所及び貯蔵所のある港については Fig.4 を参照されたい。

5.1.2 自動配船結果

Fig.6 に 500 個体を 2,000 世代進化させる試行を 30 回行った計算の結果を示す。配船担当者の作成した配船結果(以下、実績値)を実現する染色体を作成して試行と同条件下でシミュレータにて再生し、自動配船結果を評価したものと同一の評価関数を用いて評価値を計算したところ、 $F=2.219$ となった(図中点線)。グラフの評価値は小さい方が優秀な解を示しており、図の右側の目盛りは、実績による燃料消費量(KL 換算)を 100%とした際の、実績値に対する、自動配船結果による総燃料消費量の超過量(+値)あるいは削減量(-値)を示す(進化過程の後半では常に $t = T_{necessary}$ となるため、評価値は総燃料消費量に支配される)。

下記の試行では、30 回の計算の全ての世代交代後半において総燃料消費量が実績の-5%前後(Fitness Score では 0.01 強に相当)となっており、5.3 節で述べる自動配船と配船実績の有利不利を考慮しなければ、実績値を越える配船性能を示している。

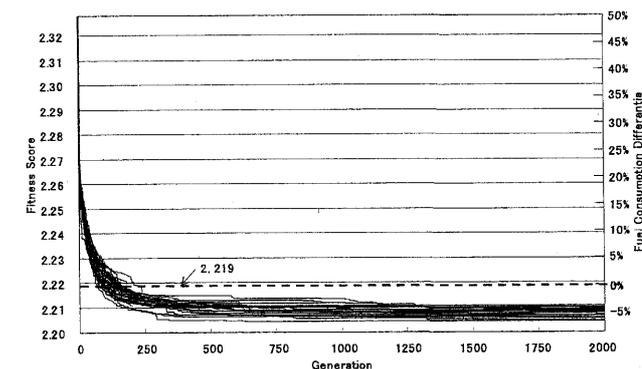


Fig.6 Results of Tramp Allocation: Fitness Score/Fuel Consumption Differentia

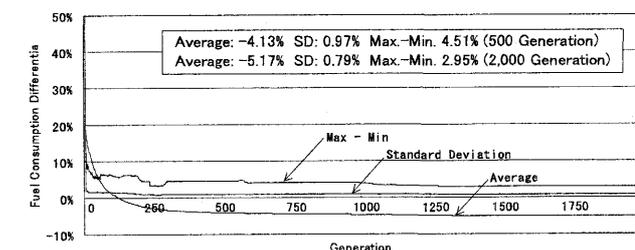


Fig.7 Results of Tramp Allocation: Fuel Consumption Differentia

Fig.7 は、上述の右目盛りの内容について、30 回の試行における各世代の平均、標準偏差、及び最大-最小値を示したグラフである。

5.2 サブセットモデルへの適用

計算例を増やして手法の性能を更に検討するために、13 隻からなる全体モデルから 10 隻のサブセットを 5 種類作成して自動配船を試行した。

なお、Fig.7 から、500 世代程度を観察することで配船性能の判断が可能と考え、以下では 500 世代の進化計算を行うこととした。ただし、全体モデルでは 500 世代から 2,000 世代まで進化を継続することにより、更に約 1%の性能改善が行われている。

5.2.1 モデルの概要

船のサブセットは以下の組合せを用いた。タスクとして与えられるオーダーは、配船実績において各組合せを構成する船に割り当てられていたものを用いた。

Table.2 Subset Contents

	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3	Pattern 4	Pattern 5
Ship A	○		○	○	○
Ship B	○		○	○	○
Ship C	○		○	○	○
Ship D	○	○		○	○
Ship E	○	○		○	○
Ship F	○	○		○	○
Ship G	○	○	○		○
Ship H	○	○	○		○
Ship I	○	○	○		○
Ship J	○	○	○	○	
Ship K		○	○	○	
Ship L		○	○	○	
Ship M		○	○	○	○

5.2.2 自動配船結果

5 種類のサブセットに対する自動配船結果を Table.3 及び Fig.8-1 ~8-5 に示す。各 30 回の計算を行っており、Table.3 では 500 世代経過時の各サブセットの平均、最大、最小、最大と最小の差、及び標準偏差を示している。

Table.3 から、パターン 1 から 5 までの全てにおいて、平均で実績値よりも総燃料消費量の少ない配船を作成していることが分かる。

また、延べ 150 回の試行において、Fig.8-2 パターン 2 の(a)及び Fig.8-5 パターン 5 の(b)の各 1 回づつで、実績値よりも燃料消費量の多い配船結果で終わっている。これは解の探索時に、進化計算打ち切り時の 500 世代までに局所解から抜け出せなかったものである。最適解ではなく、近似解を求めるといった遺伝的アルゴリズムの特性上、一定の頻度で発生するのは避けられないと考える。

Table.3 Summary of Tramp Allocation Result (Subset)

Subset	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3	Pattern 4	Pattern 5
Average [%]	-4.12	-2.67	-3.48	-3.16	-2.23
Max. [%]	-0.67	0.90	-1.93	-0.97	0.50
Min. [%]	-5.83	-4.76	-4.93	-6.13	-5.05
Max. - Min. [%]	5.16	5.66	3.00	5.16	5.54
Standard Deviation [%]	1.12	1.29	0.83	1.13	1.43

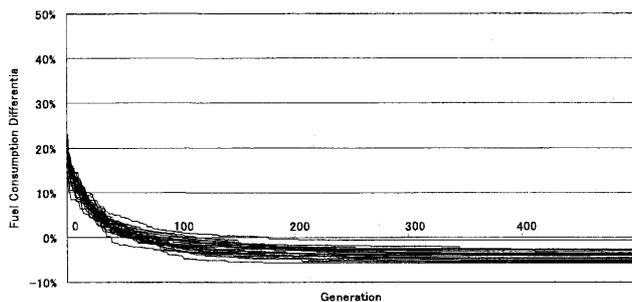


Fig.8-1 Results of Trumper Allocation (Pattern 1)

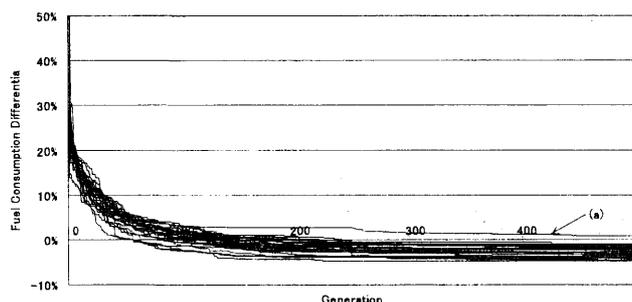


Fig.8-2 Results of Trumper Allocation (Pattern 2)

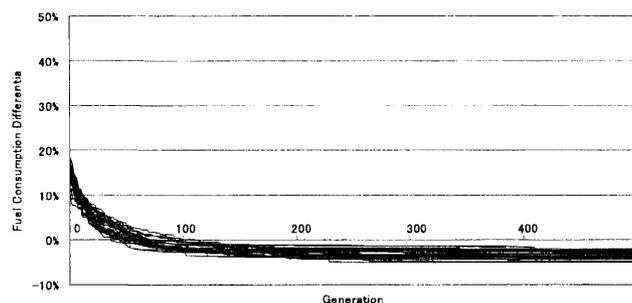


Fig.8-3 Results of Trumper Allocation (Pattern 3)

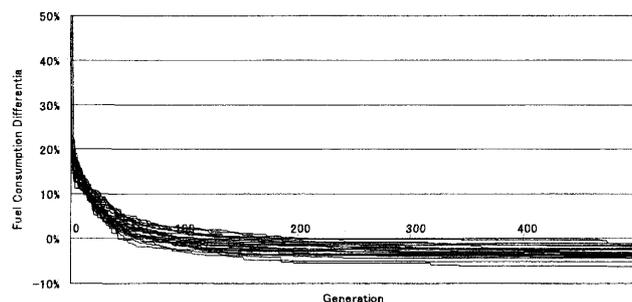


Fig.8-4 Results of Trumper Allocation (Pattern 4)

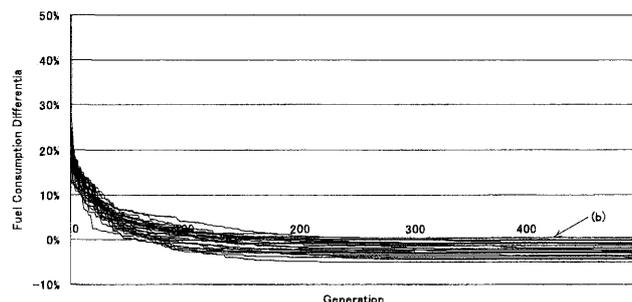


Fig.8-5 Results of Trumper Allocation (Pattern 5)

5.3 配船性能に関する考察

(1) 自動配船が有利な点

自動配船の結果は、モデル化した輸送システムを対象に、確定した1月分の配船結果をもとに配船を行ったものである。それに対し配船実績は、荷主からのオーダーの変更や、時化・台風等の外乱に対応しつつ作成されたものである。この点において自動配船結果は配船実績よりも有利な条件下で計算されたものである。ただし、検討対象期間は繁忙期となる冬季ではないため、実務上は外乱自体が少なく、また、輸送間隔が空いており外乱を吸収しやすい。

外乱の影響について検討する。Fig.9は、各日における、シミュレーション期間中の船隊総燃料消費量に対する当該日の燃料消費量の差異(配船実績による消費量-自動配船による消費量(30回の試行の平均値))。自動配船の方が配船実績よりも燃料消費量が少なければ正の値となる)をとったものである。燃料消費量の観点から両者の配船の優劣を時系列で観察することが出来る。6月11日と21日に台風が通過しているが、両日前後において前の台風では自動配船の方が成績が良く、後の台風では配船実績の方がやや成績がよい。仮に配船に対する影響が生じる期間を台風前後3日(計7日間)としてその間の値を合計すると、図中の counting term A が+2.5%、counting term B が-0.9%の計1.6%である。5.1.2で述べたように自動配船の燃料消費量削減幅が5%前後であること(合計値の1.6%は5%の3割程度でしかない)、及びFig.9において、台風による影響が少なくなったと考えられる月末においても自動配船結果の方が優れた値を示していることなどから、台風による影響は限定的と考えられる。

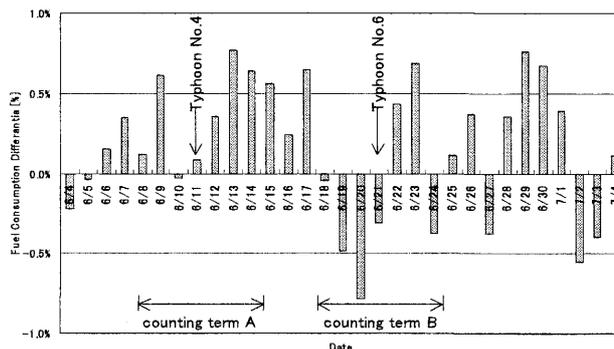


Fig.9 Transition of Fuel Consumption Differentia (against Total Fuel Consumption during Simulation Term)

(2) 配船実績が有利な点

配船現場では5.1.1(5)で述べたような"事前の荷役日調整"を行うことで、荷役指定日がある程度動かすことが可能である。これに対し、自動配船では荷役指定日を動かすことが出来ない。

また、自動配船が対象としているのは、実際に配船を行った当時の配船計画に適するよう、配船現場で荷役指定日を調整済みのオーダーリストである。自動配船は、他の配船事例に適合させたオーダーリストを対象に、自らは荷役指定日を調整することなく

新規に配船計画を作成している。この点、配船現場の方が有利である。

上記のように両者にとって有利・不利な点があるため、本報告における計算は厳密な比較とはならない。しかし、全体モデルの自動配船において人より平均 5%程度の効率の良い配船結果を生成しており、その標準偏差も 1%弱と小さい。また、上記(1)(2)で述べた有利・不利の条件の不揃いはあるものの、定量的影響については(1)の影響が、(2)に加えて 5%の性能差を大きく越える程の支配性を持つとは考えにくい。

以上より、本自動配船手法及びそれを実装したシステムによって、配船実績と少なくとも同等程度の配船案を安定して作成することが出来るようになったと考える。

なお、本システムでは 4 章で述べた通り、任意の数の PC を用いて計算が可能である。例として CPU が 3.4GHz(Intel 社 Pentium 4)、メモリが 512MB の PC 6 台(進化機構用 1 台、シミュレータ用 5 台。各 PC では 1 計算バイナリを実行)を用いた場合、配船実績に基づく総燃料消費量を下回るまで(平均 130 世代弱)におよそ 40 分弱の所要時間であった。現状ではシミュレータよりも進化計算部分がボトルネックとなっており、プログラムの見直しや、統計的解析手法を取り入れるなどにより進化機構の高度化を進めることで、計算所要時間の短縮が可能と考える。

6. 結言

本稿では、自動配船手法の活用法について論じると共に、オーダー式の配船方式を対象に、遺伝的アルゴリズム及び物流シミュレータを用いて不定期船の配船計画を自動で作成する取り組みについて報告した。配船アルゴリズムを開発・実装し、実船社の輸送システムを対象に配船案の作成を試みた結果、次の結論を得た。

オーダー式の配船方式に関し、人の作成する配船案と同等程度の性能を持つ配船案を、自動かつ安定的に生成する配船手法を開発することが出来た。海上輸送の中長期計画等のシミュレーション評価を用いて海上輸送システムを改善することで、大幅な輸送及び投資効率の改善につながる可能性を持つが、本自動配船手法は当該用途について十分な実用性を持つと考える。

今後は、自動配船手法の性能向上をはかると共に、中長期的期間を対象とした、海上輸送システムのシミュレーションによる検討手法を開発していきたい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、旭タンカー株式会社殿には多大なる御協力を頂いた。記してここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 松倉他, 遺伝的アルゴリズムを用いた不定期船の配船計画作成に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集第 2 号, 2006, pp85-92
- 2) Campbell, A. and M. Savelsbergh, "A Decomposition Approach for the Inventory Routing Problem" *Transportation Science*, Volume 38, Number 4, 2004, pp488-502.
- 3) David Ronen, "Marine inventory routing: shipments planning." *Journal of the Operation Research Society*, Volume 53, 2002, pp108-114.
- 4) Marielle Christiansen, et al., "Ship Routing and Scheduling: Status and Perspectives", *Transportation Science*, Volume 38, No.1, 2004, pp1-18.
- 5) 松倉他, 内航セメント輸送シミュレーション手法の研究, 日本造船学会講演会論文集第 1 号, 2003, pp31-32
- 6) 松倉他, 企業間協力が海上不定期輸送に与える効果のシミュレーション評価, 日本造船学会論文集第 195 号, 2004, pp43-51
- 7) 久保他, 応用数理計画ハンドブック, 朝倉書店, 2004, pp604-607
- 8) 財団法人海事産業研究所, 内航海運コスト分析研究会報告書, 1999
- 9) 伊庭, 遺伝的アルゴリズムの基礎 -GA の謎を解く-, オーム社, 1996
- 10) 石油連盟, 石油業界の推移 平成 13 年度版, 2004
- 11) 気象庁, <http://www.data.kishou.go.jp/yohou/typhoon/>, 過去の台風