

環境負荷を考慮した海上コンテナの集配ルーチング

正会員○西村 悦子（神戸大学） 非会員 三瀬 敏敬（神戸大学海事科学部）

要旨

温室効果ガス削減の一方策として、環境省主導のプロジェクトに「海上コンテナの国内トラック輸送効率化」があり、この内容の一部であるコンテナ状態とトラック積載状態に着目し、集配ルーチング問題について取り上げた。目的関数には CO₂ 排出量の最小化とし、実入りコンテナ、空コンテナ、空車のそれぞれの移動距離に重みづけをして算出し、訪問順に制約のある先行順序制約のあるルーチング問題として扱った。焼きなまし法を利用した解法を提案したが、従来の運用形態と比較して 20 数%~30%程度の CO₂ 削減効果があることが明らかとなった。

キーワード：物流、コンテナ輸送、ルーチング問題、地球温暖化対策

1. はじめに

地球温暖化が進む中、人為的に排出される温室効果ガスのうち、二酸化炭素 CO₂ が 9 割以上を占め、影響度が最も大きいと見積もられている。これは主として、工場、自動車交通および火力発電所等から排出されており、2009 年現在で日本は、中国やアメリカの 1/4 以下ではあるものの、世界の第 5 番目に排出量が多いことで知られている⁽¹⁾。

自動車交通に関連して、貨物輸送に着目すると、海上コンテナの陸上輸送においては、輸出の場合、トラックは港湾ターミナルから荷主まで貨物を配送し、空車の状態でターミナルに戻る。また輸入の場合も同様に、トラックは荷主の所まで空車で移動し、バンニング後のコンテナをターミナルまで搬送している。図 1 に示すように、特定の着荷主（輸入元）に着目すると、実入りコンテナが到着後、空コンテナの状態にしてターミナルや他の荷主へ供給できるまである程度の時間を要する。また反対に、発荷主（輸出元）は空コンテナをターミナルや他の荷主から調達し、実入りの輸出用コンテナに仕立てている。同様にこれにも時間が必要となる。

こうした現状がある中、環境省主導で、「海上コンテナの国内トラック輸送効率化（E029）」プロジェクト⁽²⁾が検討されている。具体的には、輸出入貨物と、これらを国内輸送するための空コンテナとのマッチングを行い、空コンテナの国内トラック輸送量を削減するものである。このプロジェクトのうち、コンテナの輸送経路に着目すると、インランドデポ

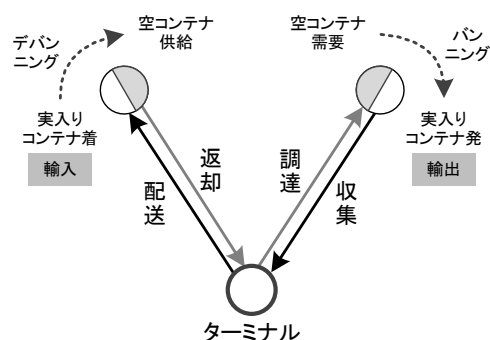


図 1 海上コンテナ国内輸送における従来の運用形態

を内陸部に設置し、ここで空コンテナのマッチングを行い、空コンテナの輸送量を削減することを目標としている。評価には文献(3)で示された温室効果ガスのうち CO₂ 排出量の算定を行い、従来の方法に比べてどれだけ削減できるかを検討している。コンテナの状態には輸入と輸出の実入り、空コンテナの 3 タイプがある。

そこで本研究では、コンテナの状態（実入り、空コンテナ）と空車を考慮したトラックのルーチングを考える。先のプロジェクトを表現するには、インランドデポの立地場所を事前に検討しなければならないため、本研究ではインランドデポは想定しない。つまり、輸入顧客地点では、コンテナが到着後、デバンニングを行って空コンテナ供給状態となる。輸出顧客地点では、まず空コンテナの需要として、空コンテナをどこからか調達し、バンニング後ターミ

ナルに搬送する。各地点はコンテナ2つの状態を持つことから、時間軸を考慮すれば、現実に近い問題を扱える。しかしバンニングとデバンニングにかかる時間、コンテナが発送可能になるまでの時間は一定ではないため、本研究では無視する。ある時間帯（時刻）に、各地点がどの状態であったかを所与とし、この条件下でのトラックの配送問題を考える。

これに関連する既往の研究に、輸出入の実入りコンテナを対象に、往復輸送から三角輸送することで空車での移動距離延長を抑え、必要となるトラック台数を最小化して、これに係るコストを最小化したもの⁽⁴⁾がある。本研究では目的関数を CO₂ 排出量の最小化とし、配送状態に、実入りコンテナ、空コンテナ、空車を対象としている点が文献(4)と異なる。

2. 問題の概要

従来の一般的なトラックの運用形態として、実入り・空コンに関わらず、海上コンテナ輸送のトラックは、港湾ターミナルを出発して着荷主にコンテナ貨物を届けたのち、空車の状態でターミナルに戻る。また反対に、空車の状態で発荷主の顧客の所へ行き、コンテナを受け取ってターミナルに戻る。

そこで、コンテナの状態（実入り・空コンテナ）を区別するために、図2に事例を示す。ターミナル0を太線黒丸で表現し、実入りコンテナ発荷主をP、実入りコンテナ着荷主をD、空コンテナ供給荷主をEs、空コンテナ需要荷主をEdとして示す。

まず実入りコンテナに時間軸の要素は入れないが、地点Pの場合、バンニングによって実入りコンテナ発に仕立てるために、事前に空コンテナを調達する必要がある。そこで空コンテナ供給地点から事前に届くため、(Ed→)Pとして表現する。同様に地点Dなら、実入りコンテナ着の後、デバンニングを行って空コンテナとなり、供給できる状態になるためD(Es→)と表記する。

次に地点Esは、空コンテナ供給状態になるために事前に実入りの状態で到着するため、(D→)Esと表記し、地点Ed(→P)は空コンテナ到着後、デバンニングを行って、数時間後にはDとなる。

図2(a)の顧客地点のコンテナ状態を事例に、本来、時々刻々と状況が変化するが、ある時期で区切って、各地点がそれぞれ実入りコンテナの着荷主・発荷主である、もしくは空コンテナの供給地点・需要地点であると解釈すると、図2(b)のように配送ネットワ

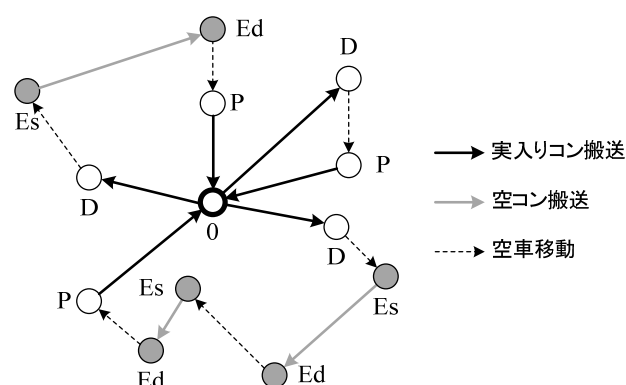
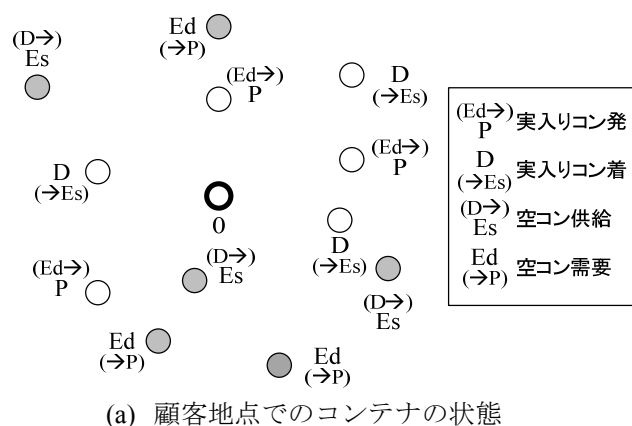


図2 本問題のコンテナ状態と移動事例

ークを構成することが出来る。

つまりターミナル0からDへ、Pからターミナル0へ実入りコンテナ搬送が行われ、EsとEd間のいずれかの組み合わせでEsからEdに空コンテナが配送される。またさらに、これら以外でトラック空車移動が行われる。したがって、実入りコンテナ搬送、空コンテナ搬送と空車移動に関わる移動距離をそれぞれ求めることが可能となる。

これらに各状態でのCO₂排出量は異なるため、それぞれに重みとして単位距離当たりの排出量を掛けることで、対象となるルーティングにおけるCO₂排出量を求めることができ、従来の運用方法と比較することでその効果を調べる。

4. 解法

4.1 全体の処理手順

本研究では、問題の定式化と今後、制約を増やした時にも対応できるように、メタヒューリスティクスの中の焼きなまし法を用いる。

焼きなまし法 (Simulated Annealing, SA) の代表的な特徴の1つは、評価値が改善される解を採択す

ることに加えて、ある制限のもとで評価値が悪化する解も採択することである。この発見的手法が「山登り」という能力を持つことを意味する。

初期段階では、良くない解（最小化問題の場合、より大きな評価値を有する解）を採択する確率が大い。しかし、繰り返し行われる探索処理が進むに従い、より悪化度の小さい解だけが採択されるようになり、最終的に良い解だけ採択される。また SA は初期の構成にはよらず、高品質な解を求めることができる。さらに、プログラム化も比較的容易であることも当該研究で選択した理由の1つである。

SA の解法アルゴリズム⁽⁵⁾を図3に示す。アルゴリズムのコアとなる部分は、図中のグレー部分であるメトロポリス (Metropolis) と呼ばれる手続きにある。これは、ある温度 T において、物理現象の焼きなまし (アニーリング) 過程をシミュレートしている。

4.2 解の表現方法

配送の順路を考える上で、実入りコンテナの移動に関して D の直前はターミナル 0 、 P の直後も同様にターミナル 0 と言える。また空コンテナについては E_s で受け取って、 E_d に搬送する。それ以外は空車での移動となり、実入りもしくは空のコンテナ搬送には $0 \rightarrow D$ 、 $P \rightarrow 0$ 、 $E_d \rightarrow E_s$ の3ペアが考えられる。

したがって、まず複数ある E_d と E_s の中でペアを決定し、これを含む3種類のペアを1つのノードとして捉え、これらをランダムに並べることで順路を決定する。

5. 数値実験

5.1 使用データの概要

まず、顧客に関するデータについて述べる。顧客数は、実入りコンテナ配送顧客 D 、実入りコンテナ収集顧客 P 、空コンテナ収集顧客 E_s 、空コンテナ配送顧客 E_d の4種の顧客の地点座標をランダムに生成させる。地点数はそれぞれ同数とし、10ずつ計40地点、20ずつの計80地点、30ずつの計120地点の3種類の問題を考える。

また各顧客の地点座標の与え方は、文献(4)と同様に、ターミナルからの離れ具合で決定する。つまり顧客地点 i の (x, y) 座標を以下の式(1)で定義する。

$$P_i = (R1_i \times 100 - 50) \times (\gamma + R2_i \times 0.4) \quad (1)$$

ここで、 γ とは顧客の分布幅を意味し、0.2、0.4 と 0.6 の3通りの広がり具合、 $R1_i$ と $R2_i$ は 0~1 の実数

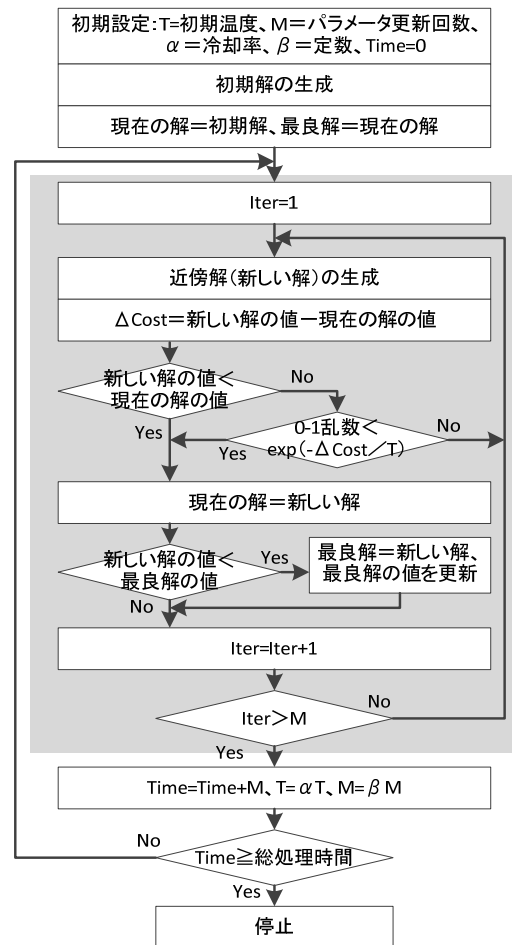


図3 SA の処理手順

乱数を示す。 $R1_i$ で基礎となる範囲を定め、 $R2_i$ で個々の問題に対する違いを設けている。

対象コンテナを搬送するトラックは、同一種類を用意し、いずれのトラックを利用するかによって CO_2 排出量や所要時間が異なることは想定しない。また各地点間を移動する際のトラックの最大稼働時間に限界を設け、時間以内にターミナルに戻ることとする。ここで最大稼働時間を 8 時間と 10 時間の 2 ケースを想定する。

実入りコンテナを積載した状態での走行距離、空コンテナを積載した状態での走行距離、空車の状態での走行距離が算出方法を明らかにした。これらに 1km 走行あたりの温室効果ガス排出量を掛ければ、配送経路における総排出量がわかる。

CO_2 排出量計測への変換方法は文献(3)に、以下のように示されている。

$$BE_x = W \times (1/10^3) \times EF_x \times (1/10^3) \times CV \times CEF \times CO_2 / C \quad (2)$$

ここで、

x トラックの状態 (fc : 実入りコンテナ積載、

ec : 空コンテナ積載、 e : 空車)

BE_x トラック状態 x における走行距離 1km あたりの CO_2 排出量 ($\text{t-CO}_2/\text{km}$)

W 積載量 (kg)

EF_x トラック状態 x における燃費 (km/kℓ)

CV トラックで使用される化石燃料の単位発熱量 (GJ/kℓ)

CEF トラックで使用される化石燃料の C 排出係数 (t-C/GJ)

CO_2/C トラックで使用される化石燃料の CO_2 排出係数 ($\text{t-CO}_2/\text{t-C}$)

よって、トラックの順路に対する総 CO_2 排出量は、以下ようになる。

$$\begin{aligned} \text{総 } \text{CO}_2 \text{ 排出量} = & \text{実入りコンテナ走行距離} \times BE_{fc} \\ & + \text{空コンテナ走行距離} \times BE_{ec} \\ & + \text{空車距離} \times BE_e \end{aligned} \quad (3)$$

5.2 計算結果

図 4 に CO_2 排出量、図 5 に CO_2 削減率を示す。なお、従来の運用形態とはターミナルから各顧客地点までの往復輸送を示し、提案する方法は、トラック最大稼働時間 8 時間と 10 時間の結果を示す。 CO_2 削減率は従来の運用形態での CO_2 排出量を基準に提案する方法でのそれとの差を示したものである。

全体的な傾向として、地点数が増え、分布幅が大きくなると、移動距離が長くなることから CO_2 排出量が多くなっているのがわかる。また従来の方法と比較すると、いずれのケースでも、提案する方法の CO_2 排出量の方が少ない。トラックの最大稼働時間で比較すると、大差がないのがわかる。そこで CO_2 削減率を見る。トラックの最大稼働時間が長い方の削減効果が大きいのがわかる。また地点数が少ないときに削減効果が大きく、分布幅が大きい時にその効果が大きい。

6. おわりに

本研究では、海上コンテナの集配活動に関してコンテナの状態と積載状態を考慮したトラックのルーティング問題を扱った。全体の傾向から、対象となる顧客の地点数や分布状況によって、 CO_2 削減効果は異なるが、20 数%～30%の削減効果があることがわかった。またトラックの稼働時間によっても若干ではあるが影響されることが明らかとなった。

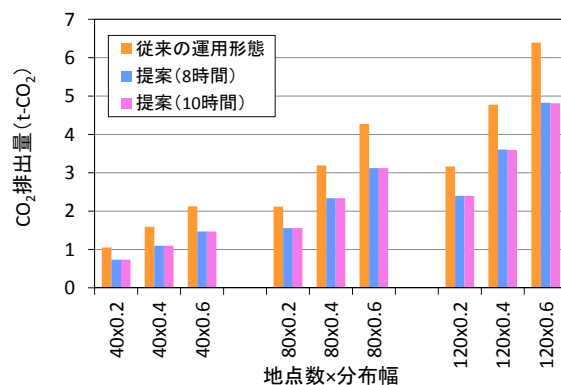


図 4 CO_2 排出量

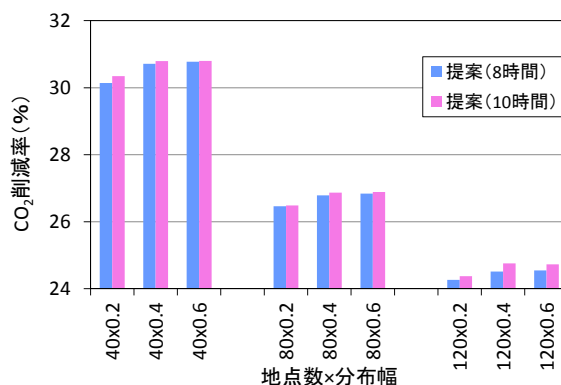


図 5 CO_2 削減率

参考文献

- (1) 全国地球温暖化防止活動推進センター Web サイト: 地球温暖化とは, 地球温暖化の基礎知識, http://www.jccca.org/global_warming/knowledge/kno03.html, 2013.3.6.
- (2) 環境省 Web サイト: 海上コンテナ輸送に関わる国内トラック輸送効率化 (E029), http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=19005&hou_id=14682, 2012.4.20.
- (3) 経済産業省資源エネルギー庁 Web サイト: 物流分野の CO_2 排出量に関する算定方法ガイドライン, <http://www.enecho.meti.go.jp/policy/images/060518pamph.pdf>
- (4) Imai, A., Nishimura, E., Current, J. : A Lagrangian relaxation-based heuristic for the vehicle routing with full container load, *European Journal of Operational Research*, Vol.176(1), 87-105, 2007.
- (5) Sadiq M.Sait, Habib Youssef 著, 白石洋一訳, 組合せ最適化アルゴリズムの最新手法ー基礎から工学応用までー, 46-48, 丸善株式会社, 2002.