

CO₂ 排出量最小化のための 貨物割当と配送経路の共生進化に基づく探索手法

Vehicle Routing and Cargo Allocation Based on Symbiotic Evolution for CO₂ Emissions Minimization

大谷 紀子 増井 忠幸
Noriko Otani Tadayuki Masui

東京都市大学環境情報学部

Faculty of Environmental and Information Studies, Tokyo City University

The freight carriers are obliged to reduce CO₂ emissions caused by the freight delivery. In case of delivery of the freights with different weight to two or more destinations, the shortest route is not necessarily the route with minimum CO₂ emissions. Previous works had not considered the number and the variety of the maximum load of the truck that belonged to the freight carrier. This paper redefines the vehicle routing problem with minimum CO₂ emissions (VRP with MCE) that takes into consideration the number and the variety of the maximum load of the truck, and proposes a method for solving this problem. Because of the computational difficulty that results from the combination explosion, Symbiotic Evolution, which is a kind of Evolutionary Computation, is employed. A case study is conducted and the results validate the usefulness of the proposed method.

1. はじめに

現在、物流事業者には貨物配送に係る CO₂ 排出量の削減が強く求められている。1 回の配送作業で複数の配送先に貨物を配送する際には、一般に移動距離が最短になるよう配送順を決めるが、CO₂ 排出量はトラックの貨物積載量によって変動するため、最短経路が CO₂ 排出量最小経路になるとは限らない。また、配送先をいくつかに分割して、グループごとに別便で配送する方が、CO₂ 総排出量が減少する可能性もある。

複数の配送先に対する貨物配送において CO₂ 排出量を最小化することを目的として、貨物割当と配送経路の探索手法が検討されている [大谷 11a, Otani 11b]。しかし、先行研究では使用するトラックの最大積載量が 1 種類に固定されており、トラックの保有台数も考慮されていない。本稿では、CO₂ 排出量最小化配送経路・貨物割当問題において、物流事業者の保有するトラックの最大積載量と台数を考慮できるよう問題を再定義し、共生進化に基づく解探索手法を提案する。

2. CO₂ 排出量最小化配送経路・貨物割当問題

2.1 CO₂ 排出量の算定方法

本研究では CO₂ 排出量の算定方法として改良トンキロ法を採用し、CO₂ 排出量 e (t-CO₂) を式 (1) で算出する。

$$e = w \times d \times y \times \alpha \times 10^{-3} \quad (1)$$

ここで、 w (t) は貨物の積載量、 d (km) は移動距離、 y (L/t-km) は貨物輸送量あたりの燃料使用量を表す。また、 α (t-CO₂/kL) は燃料の種類によって定められる CO₂ 排出係数である。省エネ法の告示では、軽油を燃料とする場合の CO₂ 排出係数は 2.62 t-CO₂/kL とすると示されている。

経済産業省告示第 66 号では、軽油を燃料とする最大積載量 z (kg) のトラックに対する y は式 (2) で算定すると定めている。

$$\ln y = 2.71 - 0.812 \ln \frac{x}{100} - 0.654 \ln z \quad (2)$$

連絡先: 大谷紀子, 東京都市大学環境情報学部

〒 224-8551 横浜市都筑区牛久保西 3-3-1, 045-910-2938

E-mail: otani@tcu.ac.jp

ここで、 x (%) は積載率を表す。積載率が 10%未満の場合には、式 (2) の積載率を 10%として求めた y の値を式 (1) における y として用いる。

2.2 問題の定義

物流事業者の保有するトラックの最大積載量と台数を考慮して、CO₂ 排出量を最小とする配送経路および貨物割当を決定する問題 (Vehicle Routing and Cargo Allocation Problem with Minimum CO₂ Emissions; VRCAP-MCE) を以下のように定義する。ただし、最大積載量の多いトラックを大きいトラック、少ないトラックを小さいトラックと表現する。

- 複数の配送先に異なる重量の貨物を配送するときの CO₂ 排出量が最小となるような配送経路を求める。着荷主の不在は考慮しない。
- 配送先をユニットと呼ばれるグループに分割し、荷積み・配達・帰着の一連の配送作業をユニットごとに行なう。
- 各配送作業では、すべての貨物を積載できるトラックのうち、最小のトラックを使用する。ただし、使用するトラックが他の配送作業でも使用することになっており、より大きいトラックに空きがある場合には、大きいトラックで代用し、同一トラックの使用回数を最小限に抑える。
- 各配送経路の出発点と終着点は配送センターとする。
- CO₂ 排出量は改良トンキロ法により算出する。空荷の場合には積載量を 0.01kg として計算するものとする。
- 以下の情報は既知とする。
 - 物流事業者が保有するトラックの最大積載量と台数
 - 各配送先への貨物の重量
 - 各配送先間の移動距離
 - 各配送先と配送センターとの移動距離

配送先数を N とし、各配送先に 1 ~ N 、配送センターに 0 の識別番号を割り当てる。本稿ではこの番号を dpID と呼ぶ。

N 箇所の配達先を M 個に分割したときの各ユニットを $U_1 \sim U_M$ と表す．ユニット U_j に含まれる配達先の数を N_j とすると、ユニット U_j に関する配達経路は式 (3) で表される．

$$\vec{r}_j = (r_j[0], r_j[1], \dots, r_j[N_j], r_j[N_j + 1]) \quad (3)$$

ここで、 $r_j[i]$ は i 番目に訪れる配達先の dpID を表す．出発点と帰着点を配達センターとするために、 $r_j[0] = 0, r_j[N_j + 1] = 0$ とする．配達先 $1 \sim N$ に配達する貨物の重量を $w_1 \sim w_N$ と表すと、 $k - 1$ 番目の配達先から k 番目の配達先までの区間積重量 $W_j[k]$ は式 (4) で算出される．

$$W_j[k] = \sum_{i \in U_j} w_i - \sum_{i=1}^{k-1} w_{r_j[i]} \quad (4)$$

式 (1) において、 d を $k - 1$ 番目の配達先から k 番目の配達先までの距離 $d_{r_j[k-1], r_j[k]}$ 、 w を $W_j[k]$ として算定した CO_2 排出量を $e_j[k]$ とすると、VRCAP-MCE は、式 (5) で定められる目的関数 $f(\vec{r}_1 \cdots \vec{r}_M)$ の値を最小とするようなユニットと各ユニットにおける経路 $\vec{r}_1 \cdots \vec{r}_M$ を求める最適化問題となる．

$$f(\vec{r}_1 \cdots \vec{r}_M) = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{N_j+1} e_j[k] \quad (5)$$

2.3 問題の特徴

VRCAP-MCE では、最短経路探索問題よりも、目的関数の値が訪問順に大きく依存する．例えば、連続する 2 地点の順序が入れ替わった場合、最短経路探索問題では当該 2 地点間の距離は変わらない．しかし、VRCAP-MCE では当該 2 地点間での CO_2 排出量が変化する．また、同じ部分経路でも、全経路における配置により CO_2 排出量は異なる．さらに、ユニットの構成によっても目的関数の値は変化する．したがって、 CO_2 排出量が少なくなるような近隣地点の訪問順を探索すると同時に、 CO_2 総排出量が少なくなるような近隣地点の配達経路の並べ方とユニットの構成を探索する必要がある．

3. VRCAP-MCE のための解探索手法

遺伝的アルゴリズムの 1 手法として提案された共生進化では、部分解を個体とする集団と、部分解の組合せを個体とする全体解集団を並行して進化させる．部分解集団では最適解に含まれ得る多様な部分解を生成する．全体解集団で部分解のより良い組合せを学習することで、多様な解候補からの探索が可能となる．部分解と、部分解の組合せを同時に学習できることから、共生進化は VRCAP-MCE に適しているといえる．本研究では、トラックの最大積載量と台数を考慮して解を探索できるよう先行研究 [大谷 11a] における提案手法を改良する．以下、変更点を中心に解探索手法を概説する．

3.1 前処理

提案手法では、遺伝子型から表現型への変換時に dpID の並びを利用する．近隣地点を連続して訪問するような解を導きやすくするために、移動距離の短い地点を順に選びながら dpID を割り当てる．

まず、配達センターを現在地とし、最も近い配達先の dpID を 1 とする．次に、dpID が 1 の配達先を現在地として、最も近い配達先の dpID を 2 とする．以上のように、未訪問の配達先のうち、現在地からの距離が最も短い配達先に次の dpID を割り当て、現在地を変更しながら同様の処理を繰り返す．

```

for i := 1 to Lw {
  for j := 1 to Lp {
    p_j := 全体解の i 番目の遺伝子が参照する部分解の p_j;
    if((∀k(k < i × Lp + j)) ∧ (r[k] ≠ p_j)) {
      r[(i - 1)Lp + j] := p_j;
    } else {
      k := (r[k] ≠ p_j) を満たす最小値 k;
      j2 := r[k] を設定したときの j;
      x := g_j2^1 ~ g_j2^31 の表す整数値;
      y := g_j^1 ~ g_j^31 の表す整数値;
      if(y < x) {
        r[k] := 0;
        r[(i - 1)Lp + j] := p_j;
      } else {
        r[(i - 1)Lp + j] := 0;
      }
    }
  }
}
for i := 1 to N {
  if(r[i] = 0)
    r[i] := (∀k(r[k] ≠ n)) ∧ (1 ≤ n ≤ N) を満たす最小値 n;
}
    
```

図 1: 表現型への変換アルゴリズム

3.2 遺伝子表現

ユニット構成と各ユニットでの配達経路を 1 つの解として表現するため、配達順を示す N 個の dpID の列において、各 dpID の間にユニット境界ビットを導入する．ユニット境界ビットが 1 のときは、前後の配達先は別のユニットに属することを意味し、2 つの配達先は別の便で訪問する．0 のときは、前後の配達先は同じユニットに属し、同一便で 2 つの配達先を連続して訪問する．

部分解集団の個体の染色体は長さ $L_p \times 32$ のビット列である． $g_j^1 \sim g_j^{31}$ は部分経路で j 番目に訪問する配達先の dpID を表し、 g_j^{32} がユニット境界ビットである．全体解集団の個体の遺伝子は部分解集団の個体を参照するポインタであり、染色体は長さ $L_w = \lceil N/L_p \rceil$ のポインタ列である．

遺伝子 $g_j^1 \sim g_j^{31}$ は式 (6) により p_j に変換される．

$$p_j = \sum_{k=1}^{31} 2^{31-k} g_j^k \% N + 1 \quad (6)$$

全体解に含まれるすべての部分解の遺伝子から求めた p_j を用いて、図 1 の手順により表現型である配達経路を生成する．1 つしか出現しない p_j はそのまま表現型の dpID とし、複数出現する p_j は遺伝子 $g_j^1 \sim g_j^{31}$ の表す整数値が最大である箇所の dpID とすることで、dpID の並びへの過度な依存を防止する．埋められなかった箇所を出現しなかった dpID で順に埋める．

各ユニットで使用するトラックは、全貨物を積載可能な最小のトラックとする．ただし、最小のトラックが他のユニットにも割り当てられており、より大きいトラックに空きがある場合は、未使用の大きいトラックを使用する．

3.3 適応度

全体解集団の個体の適応度は、可能な限りトラックの複数回使用を避けるため、 CO_2 総排出量に同一トラックの複数回使用に関するペナルティを加えた値とする．最大積載量を超える貨物はいずれのトラックでも配送できないため、1 つのユニットにおける配達貨物の総重量が最大積載量を超える場合の CO_2

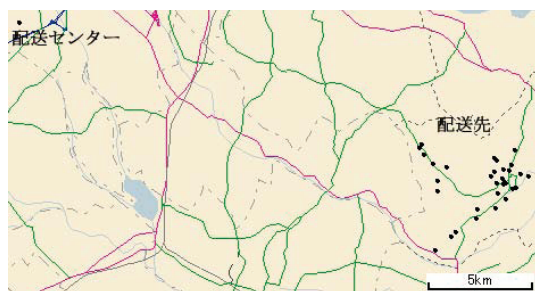


図 2: 配送センターと配送先の位置

表 1: 評価実験におけるパラメータの値

パラメータ	値
部分解集団の個体数 I_p	2000
全体解集団の個体数 I_w	2000
部分解個体の含む配送先数 L_p	8
世代交代回数 G	30000
最大積載量超過時の CO ₂ 排出量 H	10000
複数回使用トラックの 1 回あたりのペナルティ P	100

表 2: 貨物重量データ

データ	貨物重量 [kg]
random-1	$\forall i w_i = [0, 1] \times 1000/32$
flat-1	$\forall i w_i = 31$
heavy1-1	$w_i = 125 (i = 6, 15)$ $w_i = 25 (i \neq 6, 15)$
heavy2-1	$w_i = 125 (i = 8, 21)$ $w_i = 25 (i \neq 8, 21)$
heavy3-1	$w_i = 125 (i = 12, 26)$ $w_i = 25 (i \neq 12, 26)$
random-2	$\forall i w_i = [0, 1] \times 6000/32$
flat-2	$\forall i w_i = 186$
heavy1-2	$w_i = \text{heavy1-1} \times 6$
heavy2-2	$w_i = \text{heavy2-1} \times 6$
heavy3-2	$w_i = \text{heavy3-1} \times 6$

表 3: 保有トラックデータ

データ	最大積載量		
	350kg	1000kg	2000kg
truck1	0 台	0 台	3 台
truck2	0 台	4 台	1 台
truck3	3 台	5 台	0 台

排出量は十分大きな値 H として、個体の評価が低くなるようにする。同一トラックの複数回使用に関するペナルティは、ユニット数から使用するトラックの台数を引いた値にペナルティ値 P を乗じて算出される。部分解集団の個体の適応度は、当該個体を参照する全体解個体の中で最も評価の高い個体の適応度とする。いずれの適応度も小さいほど評価は高い。

3.4 世代交代

部分解集団の世代交代では、部分解集団を L_w 個のグループに分け、各グループに対して Moriarty らが用いた世代交代モデル [Moriarty 96] を適用する。グループに分けることで、集団の単一個体への収束を回避し、 L_w 種類の個体を保持した状態への収束を促進する。全体解集団の世代交代モデルとしては、局所解収束の回避と進化的停滞の抑制を意図して考案された MGG モデル [佐藤 97] を採用する。初期集団を生成した後、両集団の世代交代と評価を G 回繰り返す。最も適応度の良い全体解の表現型を解として出力する。

4. 評価実験

4.1 データと条件

ある物流事業者の顧客である茨城県稲敷市の配送先 32 箇所に貨物を配送する場面を想定して実験を行なった。距離データは、各配送先の位置情報をもとに実際の移動距離を地図上で計測して作成した。配送センターと各配送先の位置を図 2 に、実験で使用したパラメータの値を表 1 に示す。

貨物重量データとして表 2 に示す 10 種類のデータを用意した。表中の $[0, 1]$ は 0 以上 1 以下の乱数を表し、dpID は前処理で決定した番号である。末尾が “-2” のデータは、貨物総重量が 2000kg を超えており、複数のユニットに分割しなければ配送できない場合のデータである。また、“heavy” のついたデータは、2 箇所に極端に重い貨物を配送する場合のデータである。保有トラックの最大積載量と台数には、表 3 に示す 3 種類のデータを使用した。以下、最大積載量が 350kg, 1000kg, 2000kg のトラックをそれぞれ軽トラック, 1t トラック, 2t トラックと呼ぶ。

4.2 結果

提案手法により VRCAP-MCE の解探索を 10 回ずつ実行した。得られた解の CO₂ 排出量平均、ユニット数、および複数回使用するトラックの数を表 4 に示す。末尾に “-1” のついている貨物重量データでは、1t トラックを使用できる truck2 と truck3 で CO₂ 排出量が少ない。一方、末尾に “-2” のついている貨物重量データでは、2t トラックを多く使用できる truck1 で CO₂ 排出量が少なくなっている。いずれのデータにおいても複数回使用トラック数は 0~1 であり、保有しているトラックに応じた配送経路と貨物割当が得られていると考えられる。

heavy3-2 と truck1, truck2, truck3 を使用した際に得られた配送経路を図 3~5 に示す。各図は図 2 の配送先部分の拡大図であり、右向き矢印は最初に訪問することを、左向き矢印は配送センターに戻ることを表す。また、dpID につけられた丸印は、配送貨物が他よりも重い配送先であることを意味する。実際の配送でトラックは道路を走行するが、図では配送先を直線で結んで、配送順がわかるように記載している。

2t トラックを使用できる truck1 と truck2 では、他より重い貨物は 2t トラックで配送し、他の貨物を配送しながら重い貨物を配送する地点に行き、その後でさらに残りの貨物を配送する経路が得られている。2t トラックを使用できない truck3 では、他より重い貨物ともう 1 箇所分の貨物の計 900kg が 1t トラックに割り当てられている。750kg の貨物を除くと、1t トラックには 6 箇所分、軽トラックには 2 箇所分の貨物が積載できるので、1t トラックに対しては積載制限を超えない範囲で曲折の少ない経路になるような配送地点が割り当てられ、残りの地点を軽トラックでまわるような経路が得られている。

5. おわりに

CO₂ 排出量最小化配送経路・貨物割当問題において、物流事業者の保有するトラックの最大積載量と台数を考慮できるように問題を再定義し、共生進化に基づく解探索手法を提案した。評価実験の結果、保有トラックの種類と台数に応じた配送経路

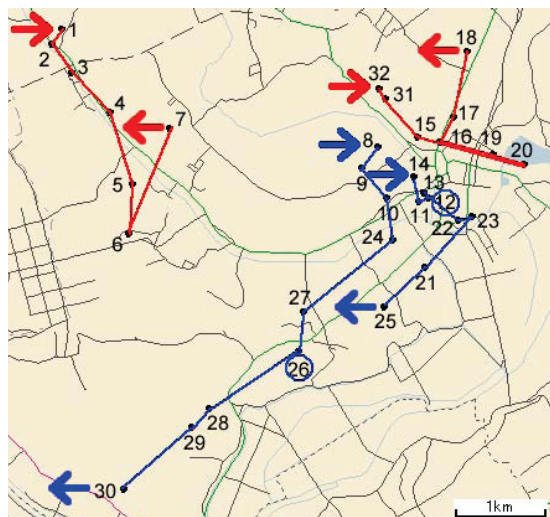


図 3: heavy3-2, truck1 で得られた配送経路

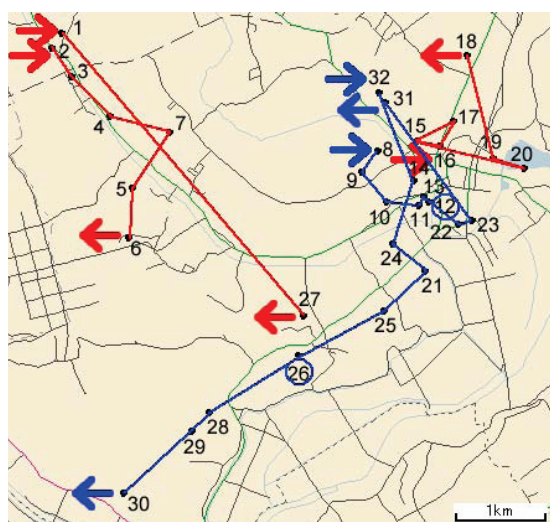


図 4: heavy3-2, truck2 で得られた配送経路

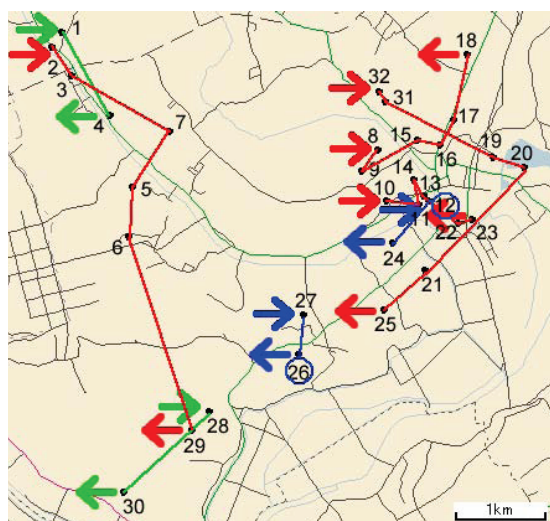


図 5: heavy3-2, truck3 で得られた配送経路

表 4: CO₂ 排出量の平均 [kg-CO₂]

貨物重量 データ	トラック データ	CO ₂ 排出 量平均	ユニット 数	複数回使用 トラック数
random-1	truck1	19.49	1~3	0
	truck2	18.31	1	0
	truck3	18.28	1	0
flat-1	truck1	24.22	1	0
	truck2	22.19	1	0
	truck3	22.12	1	0
heavy1-1	truck1	23.84	1	0
	truck2	21.87	1	0
	truck3	21.92	1	0
heavy2-1	truck1	24.01	1	0
	truck2	22.05	1	0
	truck3	22.10	1	0
heavy3-1	truck1	24.31	1	0
	truck2	22.21	1	0
	truck3	22.17	1	0
random-2	truck1	42.48	2	0
	truck2	49.56	3	0
	truck3	58.46	4	0
flat-2	truck1	73.79	4	1
	truck2	80.87	5	1
	truck3	103.82	8	1
heavy1-2	truck1	72.13	4	1
	truck2	80.44	5	1
	truck3	106.53	8,9	1
heavy2-2	truck1	73.21	4	1
	truck2	80.65	5	1
	truck3	105.24	8	1
heavy3-2	truck1	73.45	4	1
	truck2	81.20	5	1
	truck3	106.20	8,9	1

と貨物割当が得られることが確認された。提案手法では、単純な配送時間の増加を回避するために、トラックの複数回使用を抑制するように目的関数を設定したが、今後は配送に係る人員や、距離に応じた配送時間も考慮する必要がある。

謝辞

本論文は、平成 23~25 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)), 課題番号: 23510190) の研究成果の一部を取りまとめたものである。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- [Moriarty 96] Moriarty, D. and Miikkulainen, R.: Efficient Reinforcement Learning through Symbiotic Evolution, *Machine Learning*, Vol. 22, pp. 11-32 (1996)
- [大谷 11a] 大谷 紀子, 増井 忠幸: CO₂ 排出量最小化配送経路・貨物割当問題のための共生進化における遺伝子表現と操作, 進化計算シンポジウム 2011 予稿集 (2011)
- [Otani 11b] Otani, N. and Masui, T.: Method for Solving the Vehicle Routing Problem with Minimum CO₂ Emissions, in *Proc. of AAMSA & ACMSEA2011*, pp. 1368-1375 (2011)
- [佐藤 97] 佐藤 浩, 小野 功, 小林 重信: 遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価, 人工知能学会誌, Vol. 12, No. 5, pp. 734-744 (1997)