

CO₂ 排出量とコストを考慮した配送経路・貨物割当問題の解法Vehicle Routing and Cargo Allocation for CO₂ Emissions and Cost Minimization

大谷 紀子 増井 忠幸
Noriko Otani Tadayuki Masui

東京都市大学メディア情報学部
Faculty of Informatics, Tokyo City University

Cargo carriers are obligated to reduce the CO₂ emissions from cargo transportation activities. In our previous work, we have attached great importance to CO₂ emissions and proposed the method to solve the vehicle routing and cargo allocation problem with minimum CO₂ emissions. However cargo carriers tend to make every effort for reducing not CO₂ emissions but their cargo transportation cost. The purpose of this paper is reducing not only CO₂ emissions but also the transportation cost in case of delivering cargos with different weights to two or more delivery points by trucks. We define a vehicle routing and cargo allocation problem with minimum cost and minimum CO₂ emissions (VRCAP-MCMCE) and propose a method for solving this problem. Experiments were conducted using not only some virtual data but also practical data from a cargo carrier in Japan. 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、複数のトラックで配送を分担する際には、貨物の割当によっても CO₂ の総排出量は変動する。

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 [Otani 11, Otani 12]。実用可能な手法とするためには、現場の事情を勘案して問題の制約条件と目的関数を設定する必要がある。先行研究 [Otani 12] では、物流事業者が保有するトラックの最大積載量と台数を考慮するとともに、トラックの複数回使用を抑制することで、作業が完了するまでの時間の増加を回避している。本手法は荷受けから配送までを自社で取り扱う物流事業者に対して有効であるが、実配送を下請け業者に委託する物流事業者にとっては役に立たない。現状では、多くの物流事業者が実配送を下請け業者に委託しているため、物流事業者と実配送を担当する下請け業者の両者が関わる貨物割当と配送経路の決定手法を開発する必要がある。

貨物配送の委託費用は、貨物の個数や重量、体積のほか、トラックをチャーターする時間、距離、日数など、さまざまな基準により定められる。トラックのチャーター価格によって委託費用が決められる場合、物流事業者はできるだけ委託費用が低くなるように下請け業者が所有するトラックへの貨物割当を決定する。一方、下請け業者にとっては、委託された配送を低コストで実施することで、利益が向上する。配送費用は主に人件費と燃料費であるが、CO₂ 排出量が少ない経路で配送することで燃料費を削減することができる。また、環境に配慮した物流を実現することで、社会にも貢献できる。

本稿では、CO₂ 排出量に加え、物流事業者と下請け業者の

コストをも考慮するように CO₂ 排出量最小化配送経路・貨物割当問題を再定義した上で、貨物割当と配送経路の探索手法を提案する。

2. CO₂ 排出量とコストを考慮した配送経路・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。

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

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

下請け業者への委託費用を最小限に抑えつつ、CO₂ 排出量が最小となるような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 Cost and Minimum CO₂ Emissions; VRCAP-MCMCE) を以下のように定義する。

- 物流事業者は、荷主から複数の配送先への異なる重量の貨物配送を受注し、下請け業者に委託する。
- 委託費用は使用するトラックのチャーター価格の合計とする。各トラックのチャーター価格は最大積載量によつ

連絡先: 大谷紀子, 東京都市大学メディア情報学部

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

E-mail: otani@tcu.ac.jp

て定められており、最大積載量が多いほど高く設定されているが、最大積載量のより少ないトラックを複数台使用する方が安くなるようなことはない*1。

- 委託費用が最小となる範囲内で、CO₂ 排出量が最小となるようなユニット構成と各ユニットにおける配送経路を求める。ユニットとは、複数の配送先からなるグループであり、荷積み・配達・帰着の一連の配送作業はユニットごとに行なわれる。
- 各配送経路の出発点と終着点は配送センターとする。
- 配送対象のすべての貨物は、下請け業者が保有するトラックを複数回使用せずに配達できるものとする。
- CO₂ 排出量は改良トンキロ法により算出する。空荷の場合の CO₂ 排出量が 0 になることを避けるために、貨物の積載量と積載率の移動距離による加重平均を求め、それぞれ式 (1) における w 、式 (2) における x とする。
- 以下の情報は既知とする。
 - 下請け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_i に含まれる配送先数を N_i とすると、ユニット U_i に関する配送経路 r_i は式 (3) で表される。

$$\vec{r}_i = (r_i[0], r_i[1], \dots, r_i[N_i], r_i[N_i + 1]) \quad (3)$$

ここで、 $r_i[j]$ は j 番目に訪れる配送先の dpID を表す。出発点と帰着点を配送センターとするために、 $r_i[0] = 0$ 、 $r_i[N_i + 1] = 0$ とする。配送先 1~ N に配達する貨物の重量を $w_1 \sim w_N$ と表すと、 $k-1$ 番目の配送先から k 番目の配送先までの区間積載量 $W_i[k]$ は式 (4) で算出される。

$$W_i[k] = \sum_{n \in U_i} w_n - \sum_{j=1}^{k-1} w_{r_i[j]} \quad (4)$$

i 番目の配送先から j 番目の配送先までの距離を $d_{i,j}$ とすると、 $d_{i,i}$ は 0 となる。ユニット U_i における総移動距離 d_i 、重みづけ貨物重量 w_i 、貨物輸送量あたりの燃料使用量 y_i はそれぞれ式 (5)~式 (7) で算出される。

$$d_i = \sum_{j=1}^{N_i+1} d_{r_i[j-1], r_i[j]} \quad (5)$$

$$w_i = \frac{1}{d_i} \sum_{k=1}^{N_i} W_i[k] \times d_{r_i[k-1], r_i[k]} \quad (6)$$

$$\ln y_i = 2.71 - 0.812 \ln \frac{w_i}{z_i} - 0.654 \ln z_i \quad (7)$$

ここで、 z_i はユニット U_i で使用するトラックの最大積載量である。すべての貨物の配送に係る CO₂ 総排出量 $f(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_M)$ は、式 (8) で算出される。

$$f(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_M) = \sum_{i=1}^M w_i \times d_i \times y_i \times \alpha \times 10^{-3} \quad (8)$$

VRCAP-MCMCE は、委託費用が最小となる範囲内で、式 (8) で定められる目的関数 $f(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_M)$ 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 $\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_M$ を求める最適化問題となる。

3. VRCAP-MCMCE のための解探索手法

VRCAP-MCMCE の解としては、CO₂ 排出量よりも委託費用を重視した貨物割当と経路探索が望ましい。目的の解を得るために、まず簡便な方法で委託費用が低くなるような貨物割当を仮決定し、仮の委託費用を上回らない範囲で CO₂ 排出量が減少するように貨物割当を調整する。貨物割当の探索手順を以下に記す。ここで、使用可能な各トラックに対しては、最大積載量ごとに通し番号が振られているものとする。

1. 配送センターから最も遠い配送先を始点として、ダイクストラ法によりすべての配送先をたどる経路を作成する。
2. 1 で得られた経路の順に、各配送先の貨物をいずれかのトラックに割り当てる。このとき、貨物を積載するのに十分な空きのあるトラックのうち、最も最大積載量が多く、通し番号が若いトラックに割り当てるものとする。
3. 各トラックの配送経路を決定し、CO₂ 排出量を算出する。
4. 1 つの配送先をランダムに選択し、選択した配送先の貨物を他のトラックに移動できない場合は 6 に進む。
5. 貨物の移動によって移動元のトラックが空になる場合、移動元のトラックを最大積載量の少ないトラックに変更できる場合、および移動元と移動先のトラックの CO₂ 排出量の合計が減少する場合は、貨物を移動して 8 へ進む。
6. 4 で選択した配送先とは異なる配送先をランダムに選択する。選択した配送先の貨物が 4 で選択した配送先の貨物と交換可能で、貨物の交換によって CO₂ 排出量が減少する場合は、交換して 8 に進む。
7. 6 を *Adjust* 回繰り返していない場合は 6 に戻る。
8. 4~7 を *Adjust2* 回繰り返していない場合は 4 に戻る。

貨物割当の方針としては、近い配送先をまとめることが最も基本的と考えられる。2 において、1 で作成された経路の順に貨物を割り当てることで、近隣の配送先が可能な限り同じトラックに割り当てられるようになる。

3, 5, 6 では、CO₂ 排出量を算出するために配送経路探索が必要となる。各トラックに割り当てられた貨物の総重量は、最大積載量以下であることが保証されており、トラックの複数回利用を考慮する必要がないため、先行研究 [Otani 11] と同様の探索手法を利用することとする。

5 における貨物の移動によって、移動元のトラックが空になったり、最大積載量の少ないトラックに変更可能になったりするということは、そのときの貨物割当よりも委託費用の少ない貨物割当が見つかったことになる。ここで CO₂ 排出量を考慮せずに貨物を移動することで、CO₂ 排出量よりも委託費用を重視した解探索を実現している。

*1 一般的なチャーター価格は、トラック 2t トラックで 30,000 円、4t トラックで 40,000 円、10t トラックで 50,000 円程度である。

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	300
全体解集団の個体数 I_w	300
世代交代数 G	5000
貨物交換の試行回数 $Adjust$	20
貨物移動・交換の試行回数 $Adjust2$	300



図 1: 配送センターと配送先の位置

4. 評価実験

実データと仮想データの両者を用いた実験により、提案手法の有効性を検証した。実験で使用したパラメータの値を表 1 に示す。1 回の解探索で配送経路探索を繰返し実行するため、集団の個体数と世代交代数は先行研究よりも低めに設定した。

4.1 実データによる評価

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 1 に示す。

貨物重量として表 2 に示す 4 種類のデータを用意した。以降、dpID はダイクストラ法により並べ替えた後の順序を表す。“heavy” のついたデータは、極端に重い貨物を 2 箇所に配送する場合のデータである。また、下請け業者は最大積載量が 350kg の軽トラック、1t トラック、および 2t トラックをそれぞれ 2 台ずつ保有しているものとする。

各貨物重量データを用いて提案手法により VRCAP-MCMCE の解探索を実行した。最初に決定した仮の貨物割当と、調整を繰り返して最終的に得られた貨物割当における移動距離の総和、CO₂ 総排出量、使用するトラックの数を表 3 に示す。いずれの貨物重量データにおいても、調整の前後でトラック数に変化は見られなかったが、CO₂ 排出量は減少しており、同じ委託費用で CO₂ 排出量の少ない貨物割当が実現

表 2: 貨物重量データ

データ	貨物重量 [kg]
<i>flat</i>	$\forall i w_i = 186$
<i>heavy1</i>	$w_i = 750 (i = 6, 25)$
	$w_i = 150 (i \neq 6, 25)$
<i>heavy2</i>	$w_i = 750 (i = 1, 13)$
	$w_i = 150 (i \neq 1, 13)$
<i>heavy3</i>	$w_i = 750 (i = 9, 18)$
	$w_i = 150 (i \neq 9, 18)$

表 3: 実データにおける貨物割当調整の効果

貨物重量	調整	移動距離 [km]	CO ₂ 排出量 [kg-CO ₂]	トラック数		
				2t	1t	軽
<i>flat</i>	前	436.21	154.57	2	2	2
	後	397.09	144.45	2	2	2
<i>heavy1</i>	前	355.47	137.01	2	2	1
	後	340.34	132.99	2	2	1
<i>heavy2</i>	前	360.02	137.99	2	2	1
	後	344.24	133.59	2	2	1
<i>heavy3</i>	前	359.79	138.15	2	2	1
	後	343.14	133.75	2	2	1

できていることがわかる。

貨物データとして *heavy1* を使用した際の調整前と調整後の貨物割当における配送経路をそれぞれ図 2(a), (b) に示す。各図は図 1 の配送先部分の拡大図であり、矢印が指している配送先は、配送センターの次に訪問することを表す。赤いラインが 2t トラックで配送する経路、青いラインが 1t トラックで配送する経路、緑のラインが軽トラックで配送する経路であり、dpID につけられたピンクの丸印は、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。

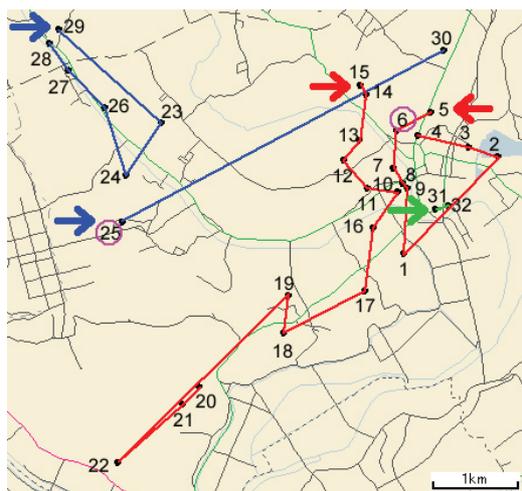
調整の前後にかかわらず、他より重い貨物を配送する配送先は、各配送経路中において早い段階で訪問しており、CO₂ 排出量を抑えた経路が得られているといえる。しかし、配送先 6 に関しては、調整前は配送センターから遠い配送先と同じユニットに属しているが、調整後は配送先 6 よりも配送センターに近い配送先 14, 15 と同じユニットに属し、少しずつ貨物を下ろしながら配送先 6 に向かうような経路が得られている。また、配送先 25 は、調整前は非常に遠い配送先 30 と同じユニットに属しているが、調整後はより近い配送先 24 と同じユニットに属している。以上より、貨物割当の調整により、CO₂ 排出量がより少ない経路が得られていることがわかる。

4.2 仮想データによる評価

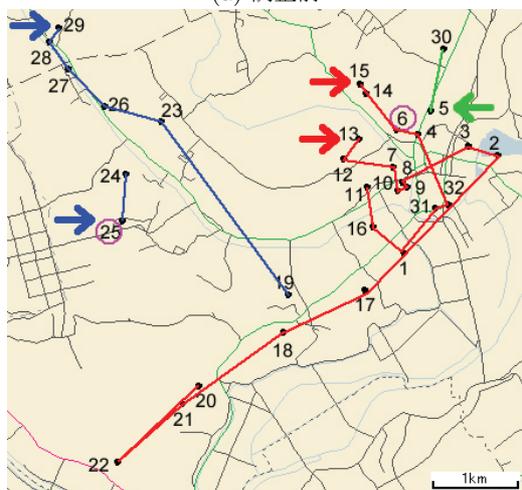
多数の配送先がある場合の有効性を調べるために、仮想データを作成して実験を行なった。 xy 平面の $0 \leq x \leq 9, 0 \leq y \leq 9$ の範囲の格子点上に 100 個の配送先があるとし、点 (5, 30) の位置に配送センターがあるものとする。各配送先間の距離は、 x 軸の 1 目盛の長さを 6km, y 軸の 1 目盛の長さを 3km として、格子状の道路をたどって到達するときの距離とする。各配送先の貨物重量は、100kg 以上 1000kg 以下の範囲でランダムに決定する。各配送先の位置と貨物重量を図 3 に示す。赤点が配送先、赤点の右側の数値が各配送先の貨物重量である。また、下請け業者は最大積載量が 2t, 4t, 10t のトラックをそれぞれ 5 台ずつ保有しているものとする。

提案手法により VRCAP-MCMCE の解探索を実行したところ、移動距離の総和、CO₂ 総排出量、使用するトラック数は貨物割当の調整の前後で表 4 のように変化した。調整後は、CO₂ 排出量が減少するだけでなく、調整前よりも委託費用を低く抑えるような貨物割当が実現できている。

調整前と調整後の貨物割当における配送経路をそれぞれ図 4(a), (b) に示す。調整前は近隣の配送先が同一ユニットに属しているが、調整後は少し離れた配送先も同一ユニットに入れることで、最大積載量の少ないトラックの使用や、CO₂ 排出量の削減を可能としている。



(a) 調整前



(b) 調整後

図 2: heavy1 で得られた配送経路

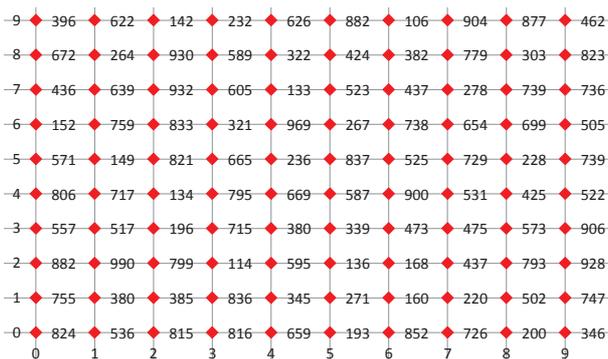
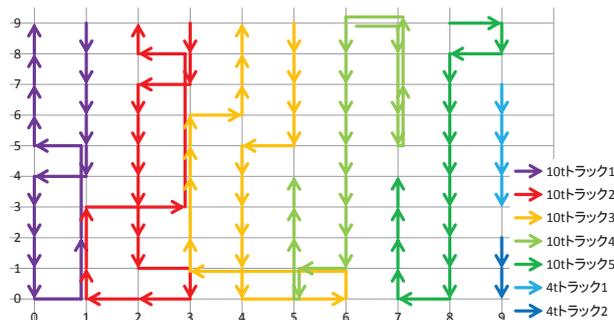


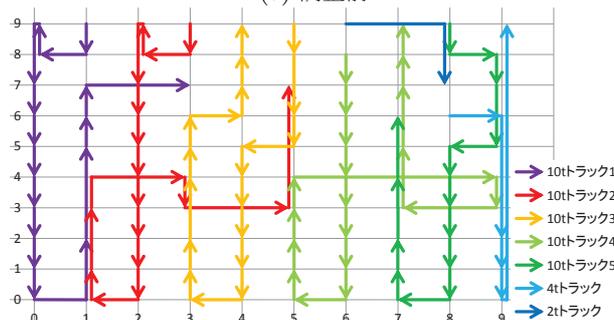
図 3: 仮想データにおける配送先と貨物重量 [kg]

表 4: 仮想データにおける貨物割当調整の効果

調整	移動距離 [km]	CO ₂ 排出量 [kg-CO ₂]	トラック数		
			10t	4t	2t
前	1626	1233.06	5	2	0
後	1566	1178.94	5	1	1



(a) 調整前



(b) 調整後

図 4: 仮想データで得られた配送経路

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、CO₂ 排出量に加え、物流事業者と下請け業者のコストをも考慮できるような問題を再定義し、解探索手法を提案した。評価実験の結果、物流事業者のコストを上げることなく CO₂ 排出量を削減、すなわち下請け業者のコストを下げるような貨物割当が提案手法により得られることが確認された。

今後は、よりさまざまなパターンのデータで提案手法の特性を明確にする。また、配送先ごとにトラックの最大積載量に関して制限がある場合や、配達時刻の指定がある場合の対処方法についても検討を進めていく。

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

- [Otani 11] Otani, N. and Masui, T.: Method for Solving the Vehicle Routing Problem with Minimum CO₂ Emissions, in *Proc. of AAMSA & ACMSA2011*, pp. 1368-1375 (2011)
- [Otani 12] Otani, N. and Masui, T.: Consideration of the Variety of the Trucks in Vehicle Routing and Cargo Allocation Problem with Minimum CO₂ Emissions, in *Proc. of GCSM2012*, pp. 383-388 (2012)