

交通渋滞によるCO₂排出量を考慮した配送計画問題に対するNSGA-IIアルゴリズムの適用

CHEN, Yanping / 陳, 艶萍

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

63

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025410>

交通渋滞によるCO₂排出量を考慮した配送計画問題に対するNSGA-IIアルゴリズムの適用

Application of NSGA-II for the green vehicle routing problem
considering CO₂ emissions due to traffic congestion

陳 艶萍

Yanping CHEN

指導教員 千葉英史

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

Over the past few years, global warming and climate change have become central issues with regards to sustainable development. There is evidence that transportation sector may play a critical role in reducing carbon emissions. Previous research has demonstrated that proper route planning can help to solve this conundrum. This study investigates a time-dependent Circle Congestion Areas Model and Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) that enables us to minimize distribution cost and carbon emissions for a Green Vehicle Routing Problem (GVRP). This study first focuses on the vehicle speed in different time periods and under different congestion conditions, then improves the congestion areas model. Next, using this new model, this study improves NSGA-II. Furthermore, a simulation experiment is carried out to test the improved model and NSGA-II. The computational results show that vehicles can effectively avoid congested areas and the total amount of carbon emissions can be reduced. The research brings a solution to the GVRP with time-dependent traffic congestion.

Key Words : GVRP, NSGA-II, Circle Congestion Areas Model

1. はじめに

ここ数年、地球温暖化が全世界共通の環境問題として、ますます注目されるようになった。国土交通省によると、2019年度における日本の二酸化炭素排出量（11億800万トン）のうち、運輸部門からの排出量（2億600万トン）は18.6%を占めている。そして、自動車全体の排出量は、運輸部門の86.1%（日本全体の16%）を占めている [1]。

そのため、車両配送計画問題 (Vehicle Routing Problem) の目的関数に関して、経済コストを考慮するだけでなく、環境への影響に着目して、運送分野の炭素排出の削減を促進することが極めて重要であると考えられる。

また、2014年、Canhong Linらは炭素排出量を考慮した異種固定車両の配送計画問題を提案し、その配送計画モデルを検討した。その結果、運行コスト削減と物流低炭素化の両立の可能性を示した [2]。

本研究では、主に自動車の走行速度による炭素排出への影響に着目することで、時間に依存する速度を考慮した円形渋滞領域モデルを提案する。そして、提案モデルに基づいた搬送計画問題に対して、NSGA-IIアルゴリズムを適用して得られる計算実験結果を考察する。

2. 円形渋滞領域モデル

(1) モデルの概要

本研究では、距離やコストだけでなく、車両走行時の二酸化炭素の排出量をまとめて最小化することを目標として、運行コストと炭素排出量を総合的に考慮した経路を求める方法を与える。

炭素排出量に強く影響を与える要素の一つは速度である。そして、速度に最も影響を与える要因の一つとして、交通渋滞が挙げられる。そこで、図1に示すような円形渋滞領域モデルを考える。具体的には、対象領域内で、互いに交差しない任意の大きさの円形渋滞領域を z 個用意し、渋滞領域での速度行列と通常の走行速度を、それぞれ v_c と v_f とする。

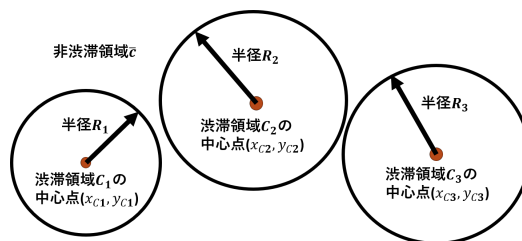


図1 円形渋滞領域モデルの例

(2) 時間による渋滞状況の変化

z 個の渋滞領域に対し、一日の渋滞状況を j 段の時間帯に分ける。これより、渋滞領域 C_i での時間帯 m における速度を v_{ij} とすると、 z 個の渋滞領域における一日の速度 v_c は、以下のような速度行列として書くことができる。

$$v_c = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{z1} & v_{z2} & \cdots & v_{zm} \end{bmatrix}.$$

さらに、各渋滞領域において、各速度 v_{ij} は4つのレベル $v_{L0}, v_{L1}, v_{L2}, v_{L3}$ ($v_f = v_{L0} < v_{L1} < v_{L2} < v_{L3}$) のいずれかをとると仮定する。実際には、車両の位置および時刻における速度・渋滞状況データから、 $v_{L0}, v_{L1}, v_{L2}, v_{L3}$ の値を決める。

- 任意の時刻において、車両が渋滞領域にいない場合、走行速度は v_f である。
- 任意の時刻において、車両が渋滞領域にいる場合、走行速度は v_c を使って表される。

(3) サブ経路

ノード数と車両数を、それぞれ n と K とする。ノード i から j までの経路を a_{ij} とする。 a_{ij} での車両 k の走行距離を d_{ijk} とし、これを長さ γ で分けると、 r 段からなるサブ経路 $l_{ijk}^1, l_{ijk}^2, \dots, l_{ijk}^r$ が得られる。 r に関して以下の関係式が成立つ。

$$r = \left\lceil \frac{d_{ijk}}{\gamma} \right\rceil.$$

車両 k がサブ経路 l_{ijk}^r で走行を開始する時刻を t_{ijk}^r とする。これより、経路 a_{ij} を車両 k が走行するのに必要な時間を T_{ijk} とすると、以下が成立つ。

$$T_{ijk} = t_{ijk}^r + \frac{d_{ijk} - \gamma(r-1)}{v_{ijk}^r} - t_{ijk}^1$$

ここで v_{ijk}^r はサブ経路 l_{ijk}^r における速度である。

3. 炭素排出量の計算

既存研究により、自動車の二酸化炭素排出量は燃料消費量に比例関係があるので、燃料消費量をどう見積もるかはグリーン配送計画問題における重要なポイントである。現在、車両の燃料消費量を見積もる方法は主に2つあり、路上測定法と燃料消費モデル分析法である。前者は走行車両の炭素排出データをリアルタイムに収集することに基づいている。後者は車両、環境、交通状況に関する様々なパラメータ（車の速度、負荷、加速度）に基づいた燃料消費量に関するモデルから推定することである燃料消費に関するモデルについて、3つのモデルに分類することができる [3]。具体的には、排出係数モデル (emission factor models)、平均速度モデル (average speed models)、モーダルモデル (modal models) である。

本研究では、平均速度モデルを採用する。さらに、平均速度モデルにおいて、特に欧州委員会から出版された MEET レポート [4] で与えられた炭素排出モデルを活用する。そのため、車両 k の経路 a_{ij} のサブ経路 l_{ijk}^r における炭素排出率を算出するモデルは以下のように書ける。

$$\begin{aligned} \varepsilon(v_{ijk}^r) &= \delta_0 + \delta_1 v_{ijk}^r + \delta_2 (v_{ijk}^r)^2 + \delta_3 (v_{ijk}^r)^3 \\ &\quad + \frac{\delta_4}{v_{ijk}^r} + \frac{\delta_5}{(v_{ijk}^r)^2} + \frac{\delta_6}{(v_{ijk}^r)^3} \end{aligned}$$

ただし、 $\delta_0, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$ が車両の重さによって決められる係数であり、 v_{ijk}^r はサブ経路 l_{ijk}^r における車両 k の平均走行速度である。

4. 数理計画定式化

(1) 目的関数

本問題の目的は、炭素排出量 F_1 と運行コスト F_2 を総合的に考慮した経路を求めることである。目的関数 F_1, F_2 の最小化は以下のように表すことができる。

$$\min F_1 = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^K X_{ijk} \sum_{r'=1}^r \varepsilon(v_{ijk}^{r'}) \cdot d_{ijk}^{r'}$$

$$\begin{aligned} \min F_2 &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^K X_{ijk} \cdot T_{ijk} \cdot \mu_1 \\ &\quad + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^K X_{ijk} \cdot d_{ijk} \cdot \mu_2 \\ &\quad + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^K X_{ijk} \cdot P_{ijk} \end{aligned}$$

ここで、 ε_{ijk} は車両 k がノード i から j へ走行するときの炭素排出率であり、 μ_1 は人件費係数であり、 μ_2 は車両コスト係数であり、 P_{ijk} はペナルティ関数である。

(2) 制約条件

$N = \{0, 1, \dots, n\}$ 、顧客 i の需要量を q_i 、車両 k の最大積載量を Q_k とすると、制約条件は以下のように書ける。

$$\sum_{j=1}^n X_{0jk} \leq 1, \text{ for all } k. \quad (1)$$

$$\sum_{j=0}^n X_{ijk} = 1, \text{ for all } i, k. \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n X_{ijk} = 1, \text{ for all } j, k. \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N: i \neq j} X_{ijk} = \sum_{i^* \in N: i^* \neq j} X_{ji^*k}, \text{ for all } j, k. \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} \cdot q_i \leq Q_k, \text{ for all } j, k. \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{0jk} \leq k, \text{ for all } j. \quad (6)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}, \text{ for all } i, j, k. \quad (7)$$

ここで、 d_{ijk}^r がサブ経路 l_{ijk}^r で車両 k の走行距離である。式 (1) は車が倉庫に戻ったら二度と出発しないことを意味する。式 (2) と (3) は顧客 1 人につき 1 台の車が配送することを意味する。式 (4) は車が顧客にサービスをしてから離れなければ

ばならないことを意味する。式 (5) は貨物の重さが積載量の上限を超えてはならないことを意味する。式 (6) は車両数の上限が k 台であることを表す。式 (7) は車両 k が経路 a_{ij} を走行するか否かを表す。

(3) ペナルティ関数

コストをよりよく計算するために、車両の到着時刻が顧客の要求時間より早いか遅い場合、運行コストが追加的にかかることを表すペナルティ関数 P_{ijk} を導入する。具体的には次の通りである。

$$P_{ijk} = \begin{cases} w_1 \times (ET_i - t_{ik}), & t_{ik} < ET_i \\ 0 & ET_i \leq t_{ik} \leq LT_i \\ w_2 \times (t_{ik} - LT_i), & t_{ik} > LT_i \end{cases}$$

うち、 P_{ijk} は車両 k がノード i から j まで走行する経路のペナルティ値であり、 w_1 と w_2 はペナルティ係数であり、 ET_i および LT_i はそれぞれ顧客 i に対するニーズの開始時刻および終了時刻であり、 t_{ik} は車両 k が i に着く時刻である。

5. NSGA-II アルゴリズム

Deb らによって提案された NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)[5] を適用する。これは従来の遺伝的アルゴリズムに基づいて、単目的最適化問題ではなく、特に多目的最適化問題に対して各個体に対する高速非優劣ソートおよび混雑度ソートによるランキング法を用い、優越されていないパレート最適解を求めることを目指すアルゴリズムである。

本問題では、炭素排出量と運行コストの最小化を同時に目的関数としているので、このアルゴリズムを適用することで良解が得られると考えられる。

6. 計算機実験

(1) 実験データ

本研究では、車両の型番を同一に設定し、配達員のサービス時間を 0 に設定する。文献 [6] で提案された配送計画問題のためのデータリスト Rc102 を使用して計算機実験を行った。このデータリストの特性としては、ランダム構造とクラスタ構造が混在し、現実の状況をよりよくシミュレートできることである。具体的なデータ情報は以下の通りである。

Rc102

- 顧客数 : 100
- デポ数 : 1
- デポの座標 : (40,50)
- 車両数 : 25
- 車両種類数 : 1
- 車両の最大積載量 : 200
- サービス時間 : 0

(2) パラメータの設定

円形渋滞領域、速度とペナルティ関数のパラメータ設定は以下の通りである。

円形渋滞領域パラメータ

- 領域の個数 : 2
- 領域の中心座標 : (10,10); (50,50)
- 領域の半径
 - 実験 1 – 5; 5
 - 実験 2 – 20; 20

速度パラメータ

- 時間帯 : 6
- 通常の走行速度 v_f : 17
- 渋滞速度行列

$$\begin{aligned} 1) & \begin{bmatrix} 17 & 5 & 10 & 10 & 5 & 17 \\ 17 & 5 & 10 & 10 & 5 & 17 \end{bmatrix} \\ 2) & \begin{bmatrix} 24 & 7 & 14 & 14 & 7 & 24 \\ 24 & 7 & 14 & 14 & 7 & 24 \end{bmatrix} \\ 3) & \begin{bmatrix} 35 & 10 & 20 & 20 & 10 & 35 \\ 35 & 10 & 20 & 20 & 10 & 35 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

車両パラメータ

- δ_0 : 110
- δ_3 : $3.75 * 10^{-4}$
- δ_4 : 8702
- $\delta_1, \delta_2, \delta_5, \delta_6$: 0

他のパラメータ

- ペナルティ関数パラメータ
 - w_1 : 10
 - w_2 : 10
- 運営コスト係数
 - 人件費 μ_1 : 1169 円/時
 - 車両コスト μ_2 : 100 円/km

(3) 実験結果

進化回数を 5 に設定し、各パラメータでの結果を比較した。まずは速度行列の各要素をすべての同じ 17 に設定して、渋滞半径が 5 および 20 となる場合の計算結果を、それぞれ図 2 と 3 に示す。これらの結果により、炭素排出量を表す F1(縦軸) について、渋滞半径 5 のときの結果が渋滞半径 20 のときの結果よりも 50% 近く少ないことが確認できる。このことは、円形渋滞領域モデルが渋滞による炭素排出量を合理的に計算できることを示している。

次に、速度行列が

$$\begin{bmatrix} 17 & 5 & 10 & 10 & 5 & 17 \\ 17 & 5 & 10 & 10 & 5 & 17 \end{bmatrix}$$

の場合、渋滞半径が 5 および 20 のときの計算結果をそれぞれ

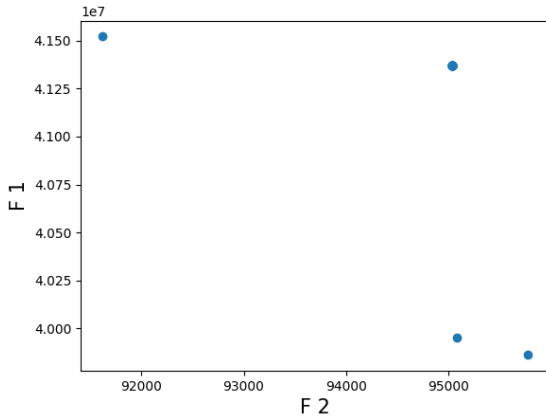


図 2 同じ速度行列で渋滞半径 5 の結果

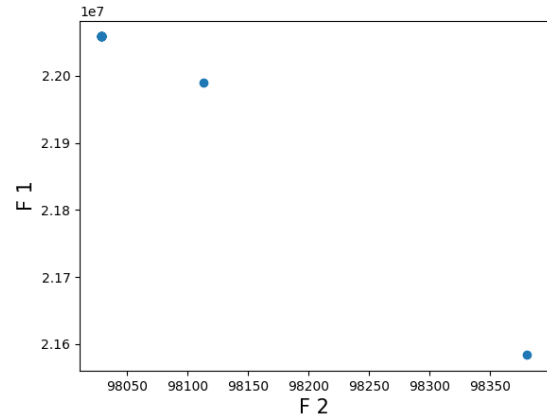


図 4 (1) 番目の速度行列, 渋滞半径 5 のときの結果

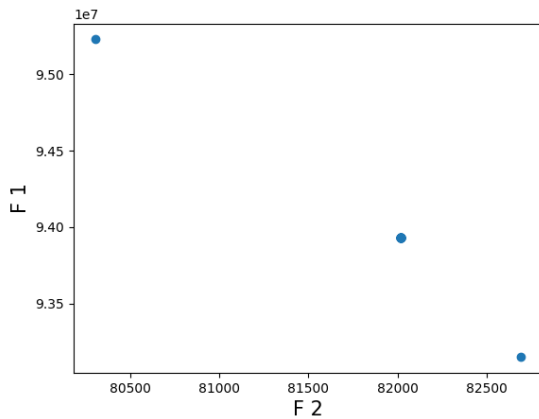


図 3 同じ速度行列で渋滞半径 20 の結果

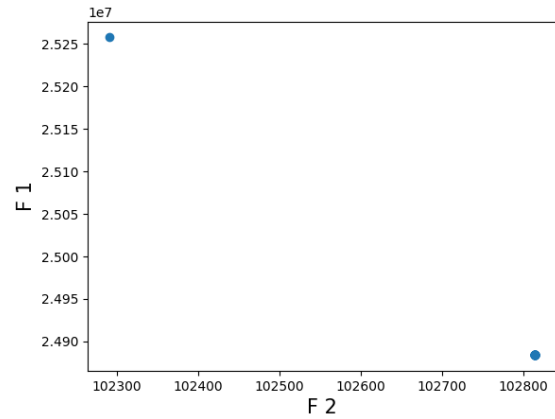


図 5 (1) 番目の速度行列, 渋滞半径 20 のときの結果

れ図 4 と 5 に示す。さらに、同じ半径異速度の結果 (図 2 と図 4, 図 3 と図 5) を比較し、炭素排出量 (F1 関数) が数倍の差あり、そのため、提案モデルが炭素排出量に及ぼす速度の影響を表すことを確認できる。

さらに、NSGA-II アルゴリズムが二重目的の配送計画問題に対して効果的であることが明らかになり、運行コストは少し増加したものの、炭素排出量は著しく減少し、本研究の目的を達成したと考えられる。

7. おわりに

本研究では、時間帯と速度を考慮した円形渋滞領域モデルを構築した上で、炭素排出量と運行コストを最小化する二重目標の車両配送計画問題に対し、NSGA-II アルゴリズムを用いて解決した。

今後の課題としては、現実の道路や地図情報を用いて、このような問題に対して、リアルな交通渋滞を検討し、低炭素物流の実現を目指すことが挙げられる。また、現実問題を解決するために、より効率的なアルゴリズムを検討することも考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省 運輸部門における二酸化炭素排出量, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html (2021 年生 10 月 23 日参照)
- 2) Canhong Lin, K.L. Choy, G.T.S. Ho, S.H. Chung, and H.Y. Lam, "Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends", *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, No. 4, pp. 1118-1138, 2014.
- 3) A. Esteves-Booth, T. Muneer, J. Kubie, and H. Kirby, "A review of vehicular emission models and driving cycles", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 216, pp. 777-797, 2002.
- 4) J. Hickman, D. Hassel, R. Joumard, Z. Samaras, and S. Corenson, "Methodology for calculating transport emissions and energy consumption", Technical Report, European Commission, 1999.
- 5) K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197, 2002.
- 6) Marius M. Solomon, "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints", *Operations Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 254-265, 1987.