

走行時間短縮を考慮したネットワーク駐車管理シミュレーションに関する研究*

A Study of Network Parking Management Simulation with a Consideration towards Driving Time*

本波和也**・内田賢悦***・加賀屋誠一****・萩原亨*****

By Kazuya MOTONAMI**・Ken'etsu UCHIDA ***・Seiichi KAGAYA****・Toru HAGIWARA*****

1. はじめに

札幌都心部に関わらず多くの市街地では、違法駐車車両が存在する。都市部に蔓延する違法駐車車両は、交通渋滞の大きな原因となるなど、交通の円滑と安全を阻害し、市民生活に著しい弊害をもたらしている。

こうした背景から、2006年6月1日より違法駐車禁止取り締まりの民間委託・手続簡略化などを含む道路交通法の一部改正により、放置車両と路上駐車に対する取り締まりが強化された。それにより札幌市内の取り締まり重点地域に指定されている所では道路交通法改正から1カ月後の調査で約26%の減少が認められた。

しかしながら、その後はドライバーが助手席に人を乗せておくなどといった対抗策を講じてきているため、効果が薄れてきている。こうした現状では、路上駐車を無くすことは難しく、路上駐停車自体を認めない路線を設定することが必要であると考えられる。一方では、全ての路線で駐停車を禁止することによる、都市内物流への影響も考える必要がある。

本研究では、駐停車を禁止することのできるリンクの数を制限し、さらに取り締まりによるドライバーの行動を考慮した上で、最も総走行時間短縮効果の大きくなる取り締まり計画を策定することを念頭に、評価モデル構築を行なう。モデルを構築する際に第6章に示すGAを用いている。

2. 取り締まりにおける効率性

(1) 道路利用者の経路選択

取り締まり作業は道路の交通容量を拡大するが、それに対して道路利用者は経路選択を変更することが考えられ

るため、経路選択を内生化した問題として定式化する。すなわち、取り締まりに対する道路利用者の反応を利用者均衡配分によって表現し、配分交通量および走行時間を推計することで、総走行時間の最小化を行なう均衡制約付き最適化問題として問題を定式化している。

(2) 最適化問題の定式化

取り締まり作業に関する均衡制約付き最適化問題は以下に示す bi-level 問題として定式化される。

[上位問題：総走行時間最小化]

$$\min \sum_{a \in A} t_a(x_a) \cdot x_a \quad (1)$$

$$\text{w.r.t. } \mathbf{I} = (I_1, \dots, I_m) \in \mathbb{R}^m \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{e} \mathbf{I}^T \leq \alpha \quad (3)$$

where $\mathbf{e} = (1, \dots, 1, \dots)^T$.

[下位問題：利用者均衡]

$$\min Z_u = \sum_{a \in A} \int_0^{q_a} t_a(x_a) dx \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} - Q_{rs} = 0 \quad \forall rs \in \Omega \quad (5)$$

$$x_a = \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{rs \in \Omega} \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs} \quad \forall a \in A \quad (6)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, x_a \geq 0 \quad (7)$$

$$t_a(x_a) = t_a^0 \left(1 + \alpha_1 \left(\frac{x_a}{c_a(I_a)} \right)^{\alpha_2} \right) \quad (8)$$

t_a : リンク a における旅行時間

x_a : リンク a の交通量

I_a : リンク a に対する状態を示し、取り締まる場合 1、それ以外の場合 0 をとる変数である。

α : 最大取り締まり路線数

A : リンクの集合

Ω : OD ペアの集合 K_{rs} : OD ペア rs 間の経路集合

f_k^{rs} : OD ペア rs 間の分布交通量

Q_{rs} : OD ペア rs 間の第 k 経路の交通量

$\delta_{a,k}^{rs}$: OD ペア rs 間の第 k 経路がリンク a を含むとき 1、それ以外の時に 0 をとる変数

*キーワード：経路選択 配分交通 駐車取り締まり

**学生員、学士、北海道大学大学院工学研究科
(札幌市北区北13条西8丁目, Tel/Fax 011-706-6211)

***正員、博(工)、北海道大学大学院工学研究科
(札幌市北区北13条西8丁目, Tel/Fax 011-706-6211)

****フェロー、学博、北海道大学大学院工学研究科
(札幌市北区北13条西8丁目, Tel/Fax 011-706-6211)

*****正員、工博、北海道大学大学院工学研究科
(札幌市北区北13条西8丁目, Tel/Fax 011-706-6211)

t_a^0 : リンク a における自由旅行時間

$c_a(I_a)$: リンク a の交通容量であり、 I_a の値によって決定される。

T : 行列またはベクトルの転置操作

α_1, α_2 : パラメータ

3. 駐停車車両の行動

(1) 駐停車禁止隣接リンクへの影響

駐停車を禁止したリンクでは駐停車車両がなくなるが、その車両の全てが駐停車をやめる訳でなく、隣接リンクに移動する車両もあると考えられる。その影響を表現するために、 $|A|$ 本から成るネットワークを考える。ここで、 A はリンクの集合である。また $|A|+1$ 番目のダミーリンクを考え、これは駐停車をやめる車両が移動するリンクとする。ネットワーク上のリンクは、駐停車を禁止するリンクとしないリンクに分けられ、それぞれの集合を A_1, A_2 と表現する。 $(A = A_1 \cup A_2)$ リンク $a_1 \in A_1$ に接続するリンクが k 本ある場合考え、それらのリンクの集合を以下で表す。

$$L(a_1) = \{a_1^1, \dots, a_1^k\}$$

初期車両のベクトルを以下で表現する。

$$\mathbf{f}_0 = (f_1, \dots, f_{|A|}, f_{|A|+1} = 0)^T$$

取り締まりによる各リンクへの駐停車車両の影響を考えると、第 (i, j) 要素を p_{ij} とする $(|A|+1) \times (|A|+1)$ の推移確率行列 \mathbf{P} を考える。 (i, j) は、それぞれリンク番号を表し、 p_{ij} はリンク i を駐停車禁止とした場合、リンク i 上の駐停車車両がリンク j へ移動する確率を表す。ここで、リンク a_1 を駐停車禁止とした場合を考える。ダミーリンクに移動する確率を β とすると、 \mathbf{P} の定義より、以下の関係が成立する。

$$p_{a_1|A|+1} = \beta \quad (9)$$

次に駐停車を止めない $f_{a_1}(1-\alpha)$ 台の車両の行動について考える。本研究においては、リンク a_1 に接続するリンク上の駐停車車両数に比例し、 $f_{a_1}(1-\alpha)$ 台の駐停車車両が接続するリンクへ移動すると仮定する。ここでは、ドライバーは、駐停車車両が多いリンクほど、取り締まられる可能性が小さいと考えることを想定し、上述の仮定を置いている。したがって、リンク a_1 を取り締まったことによりリンク $a_1^{k'} \forall k' \in L(a_1)$ に移動する確率は、次の式で表すことができる。

$$p_{a_1 a_1^{k'}} = \frac{f_{a_1^{k'}}}{\sum_{a_1^k \in L(a_1)} f_{a_1^k}} \quad (10)$$

また、取り締まりリンクから駐停車車両がなくなり、さらにリンク a_1 に接続するリンク以外には、駐停車車両は移動しないため、以下の関係が成立する。

$$(p_{a_1 a} \mid a \in A - L(a_1)) = 0 \quad (11)$$

一方、取り締まりを行わないリンク $a_2 \in A_2$ では、そこに駐停車している車両の移動はないため、以下に示す関係が成立する。

$$p_{a_2 a} = \begin{cases} 1 & \text{if } a = a_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

以上の関係から、駐停車を禁止するリンクとそうでないリンクにわけ、それらに 1 から $|A|+1$ までの連番を与えると、リンク番号が 1 から $|A|$ は取り締まりリンク、リンク番号が $|A|+1$ から $|A|+1$ は取り締まりを行わないリンクとなる。このとき、駐停車車両の推移確率行列は、以下で与えられる。

$$\mathbf{P} = \left(\begin{array}{ccc|ccc} p_{11} & \dots & p_{1|A|} & p_{1|A|+1} & \dots & p_{1|A|+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{|A|1} & \dots & p_{|A||A|} & p_{|A||A|+1} & \dots & p_{|A||A|+1} \\ \hline 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & 0 & 0 & & 1 \end{array} \right) \quad (13)$$

$$= \begin{pmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{pmatrix}$$

このとき、取り締まり後のリンク駐停車車両ベクトル \mathbf{f}^* は、吸収マルコフ連鎖を適用すると、以下で与えられる。

$$\mathbf{f}^* = (\mathbf{P}^n)^T \mathbf{f}_0 \Big|_{n \rightarrow \infty} \quad (14)$$

$$= \begin{pmatrix} \mathbf{0} & (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{pmatrix}^T \mathbf{f}_0$$

4. リンク交通容量の推定

(1) 待ち行列理論の導入

駐停車禁止リンクを取り締まると一時的に駐停車車両は無くなるが、一定時間が経過すると、再び駐停車車両が現れると考えられる。また駐停車を禁止していないリンクにおいては、駐停車車両が存在したままだが、存在しない時間帯もあると考えられる。そのため、各リンクにおける交通容量の時間的推移も考える必要がある。ここでは、4で推計したネットワーク上の駐停車車両分布を考慮し、ある時間帯の各リンクの交通容量を待ち行列理論を適用して推計することにする。

(2) M/M/s 待ち行列理論

ここでは、駐停車するリンクが複数あるため、M/M/s 待ち行列モデルの適用を考える。s を最大駐停車可能台数、駐停車する車両の平均到着率を λ、車両一台あたりの平均駐停車移動確率を μ、ある時間のリンクに n 台の駐停車が存在する確率 P_n(t) とし方程式を立てると以下になる。ここで、リンク全体の平均駐停車時間 nμ となり、1 度に 2 台以上の車両が到着、移動することはないものと仮定する。また、λ および μ は時間帯によらず一定であるとする。

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)(1 - \lambda\Delta t) + P_1(t)\mu\Delta t + o(\Delta t) \quad (15)$$

$$P_n(t + \Delta t) = P_{n-1}(t)\lambda(t)\Delta t + P_n(t)(1 - \lambda\Delta t)(1 - n\mu\Delta t) + P_{n+1}(t)(n+1)\mu\Delta t + o(\Delta t) \quad (16) \quad (1 \leq n \leq s)$$

$$P_n(t + \Delta t) = P_{n-1}(t)\lambda(t)\Delta t + P_n(t)(1 - \lambda\Delta t)(1 - s\mu\Delta t) + P_{n+1}(t)s\mu\Delta t + o(\Delta t) \quad (n \geq s) \quad (17)$$

システムが安定状態になった時を考慮定常確率を用いると、lim_{t→∞} P_n(t) = p_n であり、微分することにより得られる方程式を解くと以下の関係式が成り立つ。

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{(s\rho)^n}{n!} + \frac{(s\rho)^s}{s!(1-\rho)}} \quad (18)$$

where

$$L_q = \frac{\rho(s\rho)^s}{s!(1-\rho)^2} P_0 \quad \text{and} \quad L = L_q + s\rho. \quad (19)$$

L : 各リンク内に存在する車両の期待値

第7章に示す数値計算例では、fⁱ⁺¹ = L とし、ρ を算出している。

(3) 交通容量の推定

本研究では、駐停車が 0 台の時の確率 P₀ を用い各リンクの平均の交通容量を算出する。リンク上に駐停車がない場合の交通容量ベクトルは以下で与えられる。

$$\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_{|A|})^T$$

このとき、取締りの影響を考慮した交通容量を以下で与える。

$$c_a^* = c_a \times P_0 + c_a \times (1-\gamma) \times (1-P_0) \quad \forall a \in A \quad (20)$$

ここで、γ は駐停車車両が 1 台以上ある場合の車線数による交通容量低減率であり表1に示す。

5. GA の適用

表1. 駐停車による低減率

車線数	片側3車線	片側2車線	片側1車線
低減率(γ)	40%	29%	19%

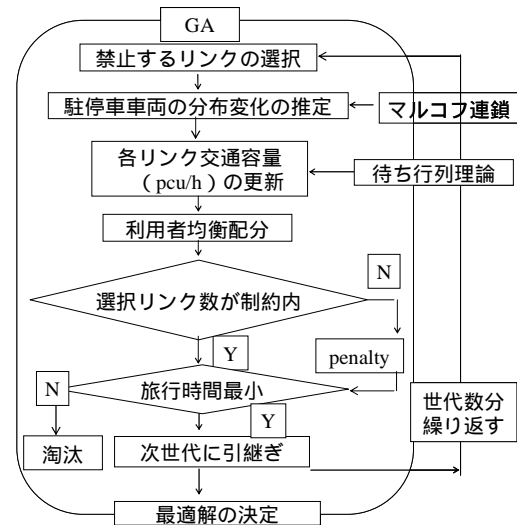


図1. GA のフロー

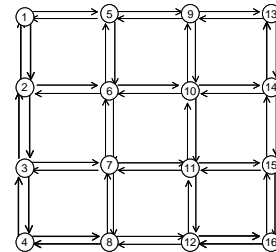


図2. 仮想ネットワーク

GA とはダーウィンの進化論に基づいて構築された最適化問題の解の探索手法であり、優秀な遺伝子配列を次世代に引継ぎ最適な解を求めるといふものである。膨大な計算時間がかかるような問題でも、短時間で比較的優れた解を求めることができる。

小規模なネットワークならば問題ないが、大規模なネットワークになると、ネットワークを構成するリンク数を n とした場合、取り締まりリンクの組み合わせは 2ⁿ となり、その組み合わせ数は莫大な数になってしまう。第3章に示した問題は、均衡制約付きの組み合わせ最適化問題と換言できる。実ネットワークへの適用を想定し、本研究で最適な取り締まり路線を算出するために GA を適用することにした。GA の計算フローを図1に示す。

6. 数値計算例

(1) ネットワーク設定

本研究において、図2に示すノード16、リンク数48の仮想ネットワークを作成し分析を行っていく。

(2) 計算条件

実際の路線では駐停車禁止する箇所を固定しなければならない。そこで本研究では、1時間単位ごとの駐停車禁止最適リンクを算出ることにより時間的変化を考慮した上で、固定した駐停車禁止最適リンクを求める。 i 時間後の車両ベクトルを f^{i*} 、 $i-1$ 時間間の車両ベクトルを f^{i-1} と表現すると、 f^{i+1} は以下の式により算出している。

$$f^{i+1} = (f^{i*} \sum_{a \in A} f_a^i + f^0) / 2 \quad (21)$$

GAにおいては人口サイズ1000、最大世代数200、交叉確率0.6、突然変異確率0.01としている。

また、向かい合うリンク(例:リンク1とリンク2)は駐停車を禁止するかどうか、車線数、初期駐停車車両台数は同じになるようにしている。

各リンクの距離は全て100mとし、表2示すように車線数から交通容量および法定速度を決めている。仮想OD交通量は表3に示すとおりである。また、仮想ネットワークに与えた車線数、初期駐停車車両を表4に示す。また、駐停車を禁止できるリンクは最大18箇所とした。

(3) 計算結果

取り締まり開始から、0~1時間の禁止最適リンクを図4、1~2時間の禁止最適リンクを図5、2~3時間の駐停車禁止最適リンクを図6に示す。矢印のあるリンクが各時間帯における駐停車禁止最適リンクであることを示している。これらの図から、時間帯により最適リンクは変動するが、路線別に考えるとある程度固定したリンクを選択していることが窺える。図には示していないが他の時間帯の結果を考慮すると、ノード1~4、1~13、3~15、13~16を連ねる路線を駐停車禁止にすることが、仮想ネットワークにおける最適解であると考えられ、図6に示す。またその路線は交通量の多い路線であった。

7. まとめ

本研究の成果を以下に示す。

GAを用いた最適取り締まりリンク選択評価モデルを構築することができた。これにより具体的取り締まり道路の組み合わせを求めることが可能であることが示された。

駐停車禁止の隣接リンクへの影響、交通量の時間的変化を考慮した上で、交通量の多い路線に固定し、駐停車を禁止することでも十分な効果が上げられることを示せた。

表2. 車線数による交通容量と法定速度

車線数	交通容量	法定速度
片側3車線	6600pcu/h	60km/h
片側2車線	4400pcu/h	50km/h
片側1車線	1250pcu/h	40km/h

表3. 仮想OD

Origin	Destination	交通量
1	16	5000pcu/h
4	13	5000pcu/h
13	4	5000pcu/h
16	1	5000pcu/h

表4. 各リンクの初期条件

No.	No.	車線数	車両	No.	No.	車線数	車両
1	2	3	0.5	7	11	3	3
1	5	2	0.5	8	12	2	3
2	3	3	0.5	9	10	1	3
2	6	2	3	9	13	2	1
3	4	3	0.5	10	11	1	3
3	7	3	3	10	14	1	3
4	8	2	3	11	12	2	1
5	6	2	1	11	15	3	3
5	9	2	0.5	12	16	2	1
6	7	2	1	13	14	2	1
6	10	1	3	14	15	3	0.5
7	8	2	1	15	16	3	0.5

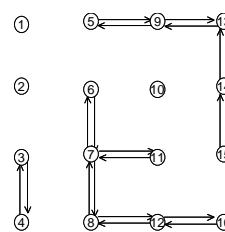


図3. 0~1時間

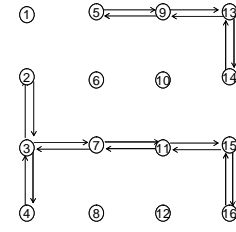


図4. 1~2時間

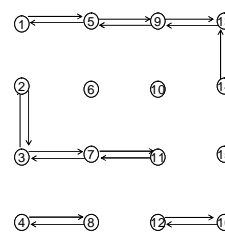


図5. 2~3時間

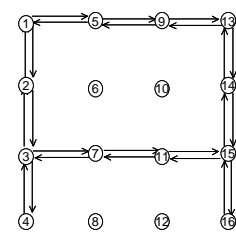


図6. 禁止最適路線

参考文献

- 1) 内田賢悦, 加賀屋 誠一: 積雪寒冷地における凍結防止剤の最適散布量決定に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.800/IV-69, pp.87-100, 2005.
- 2) 有村幹治ほか: 最適除雪道路選択モデルに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No16, pp387-392, 1999.