経路選択を考慮したグリッドロック回避モデルの開発

Development of a Gridlock Avoidance Model Considering Users' Route Choices

北海道大学工学部　○学生員　鐙　一那 (Kazuna Abumi)
北海道大学大学院工学院　学生員　新田　翔 (Sho Nitta)
北海道大学大学院工学研究院　正　員　峪　龍一 (Ryuichi Tani)
北海道大学大学院工学研究院　正　員　内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

1. はじめに

1. 1 背景と目的

道路ネットワークで生じる交通渋滞現象の一つにグリッドロックがある．グリッドロックとは，ある道路で発生した渋滞が他の道路に影響を及ぼし，それが連鎖的に発生することで，道路の交通容量の低下や，道路ネットワーク全体にわたる大渋滞を引き起こす現象である．特に，渋滞列がループを形成している場合，ループ内の車両はどこにも動くことができないため，より深刻な渋滞を引き起こす．

グリッドロックの発生例として，東日本大震災時の東京都心部が挙げられる．地震の影響で多くの人が普段の業務をとりやめ，一斉に帰宅を開始したことによる交通需要の増加や，多くの鉄道が運行を見合わせたことで，道路に滞留する歩行者が増加したことによる道路の交通容量の低下がグリッドロックを引き起こし，一日弱にわたる大渋滞が発生した．

将来，大きな災害が発生した場合にも同様の事例が起こると考えられている．内閣府[1]や警視庁[2]は，大地震発生後の交通渋滞や帰宅困難者に対する対策の検討，およびその重要性について述べている．したがって，その効果的な対策について早急に検討する必要性がある．

渋滞は，交通需要が時間的・空間的に偏在している状態である．そのため，渋滞を解消するためには，交通需要を時間的に，または空間的に分散させるような政策を実施する必要がある．時間的分散政策では出発時刻の調整，空間的分散政策では流入制限による経路変更の強制が挙げられる．

味沢ら[3]が示すように，一般的には，時間的分散政策を実施する方が，渋滞解消に対してより大きな効果を期待できるとされている．これは，渋滞列は超過需要によって形成される待ち行列であり，たとえ僅かな超過需要であっても，それが時間経過により累積することで長大な渋滞列を形成するためである．

しかし，災害発生時に時間的分散政策を実施することは困難であると考えられる．時間的分散政策の一つとして出発時刻の調整が挙げられるが，災害時は誰もがなるべく早く現在地から出発したいと考えるのが自然である．したがって，時間的分散政策を災害発生時に実施する場合，それを行政主導で行う際にはドライバーからの反発を受けることが予想される．加えて，出発時刻の調整をドライバーに促すことの効果も期待できない．

一方で，空間的分散政策ではドライバーの利用経路を変更させる．このことに対しても，ドライバーからの反発は予想されるが，その大きさは，出発時刻を調整する際の反発の大きさよりも小さくなると予想できる．

以上を踏まえて，本研究では，交通需要を時間的にではなく，空間的に分散させ，渋滞の連鎖的発生を回避する効果的なモデルを提示することを目的とする．

1. 2 既往研究の整理と本研究の位置づけ

グリッドロック発生抑制方策に関する既往研究として，大島ら[4]は，単一格子状のネットワークにおけるグリッドロック発生抑制方策として，交差点内に合流する車両の比を，青信号比の調整やランプメータリングにより調整する方法を提案している．Daganzo[5]は，交通が集中する区間において，緩やかに流入制限を行う方法を提案している．杉下ら[6]は，ネットワークからノードやリンクを意図的に除去することでグリッドロックを回避する方法を提案している．

しかし，先に挙げた研究では，現実に即したドライバーの経路選択行動が考慮されていない．大島ら[4]は，交差点の右折率を一定としている．現実には，交差点の右折率は時間や交通状況によって変化する．杉下ら[6]は，ドライバーは距離の最短経路を利用するとしている．現実には，ドライバーは道路の混雑状況を考慮し，自身の移動時間が最小となる経路を選択する．Daganzo[5]はそもそもドライバーの行動を定義していない．したがって，本研究では，現実に即したドライバーの経路選択行動を考慮したグリッドロック回避方策を考える．

Sugishita et al.[7]が示すように，ドライバーの合理的な経路選択がグリッドロック発生を助長する場合がある．本研究は，そのような可能性も考慮したグリッドロック回避モデルを開発するものである．

2. グリッドロック回避モデル

2. 1 概要

本研究では，交通需要を空間的に分散させることで渋滞の連鎖的発生を回避することを目的としている．そのために，行政はリンクに対して流入制限を行い，ドライバーの経路変更を強制させる．この際，行政はドライバーの行動をあらかじめ予測して政策を実施しなければならない．

そこで本研究では，このようなグリッドロック回避政策決定問題を均衡制約付き数理最適化問題(MPEC)として定式化する．定式化の詳細としては，上位問題にドラ

イバーの総移動コストを最小化するような流入制限リンク配置問題を，下位問題に確率的利用者均衡配分を設定する．

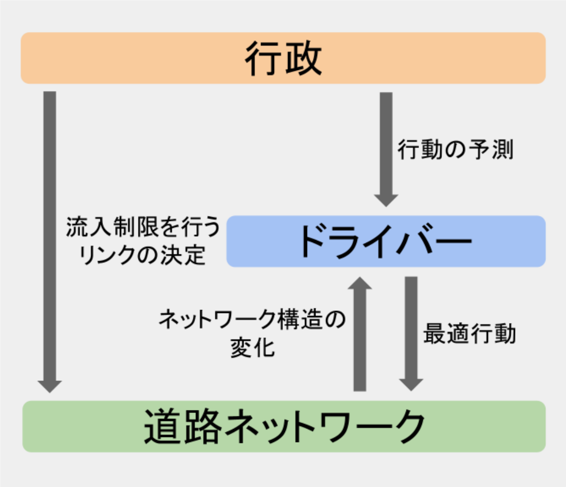

図-1　本研究のフレームワーク

2．2 本研究における仮定

本研究では，以下に示す仮定を設定している．

・災害発生時の道路ネットワークを対象とする．

・災害発生前，交通流は利用者均衡配分の均衡状態となっており，その状態において渋滞は発生していない．

・災害発生後，あるリンクの交通容量が瞬間的に減少し，そのリンク上で渋滞が発生する．以上の仮定により，グリッドロックにおいて連鎖的渋滞発生の起点となるボトルネック道路が定義される．

・交通容量減少後のネットワークに対して，流入制限が速やかに行われる．

・リンク上での残留交通量は考慮しない．

・流入制限後のネットワークに対して，交通流は確率的利用者均衡配分の均衡状態となる．

・OD 間が途絶した場合，ドライバーは起点ノード上で待機する．

・OD 間が途絶していない場合，その OD 間のすべてのドライバーがトリップを行う．これは，災害発生時に人々が一斉に帰宅を開始した事実に基づく仮定である．

3．グリッドロック回避モデルの定式化

3．1 記号

本稿で用いる記号とその意味を記す．

A	リンク集合
Ω	OD ペア集合
K_{rs}	OD ペア$rs \in \Omega$間の経路集合
I_k^{rs}	OD ペア$rs \in \Omega$間の経路kで通過するリンク集合
q_{rs}	OD ペアrs間の分布交通量
μ_a	リンクaにおける交通容量
t_a	リンクaの移動時間
t_{a0}	リンクaにおける自由走行時の移動時間
α, β	BPR 関数内のパラメータ
θ	分散パラメータ
κ	トリップを中止するときのコスト
A'	流入制限を行わないリンク集合
Ω'	途絶していない OD ペア集合
K_{rs}'	OD ペア$rs \in \Omega'$間の利用可能な経路集合
c_{rs}^k	OD ペアrs間の経路kを利用する費用
p_{rs}^k	OD ペアrs間の経路kを選択する確率
S_{rs}	OD ペアrs間の期待最小費用
f_k^{rs}	OD ペアrs間の経路kを通る経路交通量
$\delta_{a,k}^{rs}$	OD ペアrs間の経路kにリンクaが含まれるとき 1，そうでないとき 0 をとる変数
η	ラグランジュ乗数
x_a	リンクaを通る交通量
y_a	リンクaにおいて流入制限を行うとき 1，そうでないとき 0 をとる制御変数

3．2 ネットワーク構造変化の定式化

本研究では，上位問題でドライバーの総移動コストが最小になるように，流入制限を行うリンクの組み合わせを決定する．これにより，リンク集合，経路集合，OD ペア集合といった，ネットワーク構造に関する集合が変化する．このことを定式化する．

上位問題の制御変数ベクトル$\boldsymbol{y}$により，リンク集合Aは，流入制限を行わないリンク集合A'と流入制限を行うリンク集合$\bar{A}'$に分割される．制御変数は，式(1)で表されるような，0 か 1 の値をとるバイナリ変数であるため，A'は式(2)のように定義される．

$$y_a \in \{0,1\} \qquad \forall a \in A \qquad (1)$$

$$A' = \{a \in A | y_a = 0\} \qquad (2)$$

リンク集合の変化により，それぞれの OD ペアに対する経路集合が変化する．具体的には，A'に含まれないリンクを通る経路は途絶する．したがって，流入制限実施後のネットワークに対する OD ペアrs間の経路集合K'_{rs}が次のように定義される．

$$K'_{rs} = \{k \in K_{rs} | I_k^{rs} \subseteq A'\} \qquad \forall rs \in \Omega \qquad (3)$$

経路集合の変化によって，OD 間に経路が存在しなくなる場合がある．すなわち，OD ペア集合は途絶していない OD ペア集合Ω'と途絶した OD ペア集合$\bar{\Omega}'$に分割される．経路集合が空集合であるかどうかに着目して，Ω'は次のように定義される．

$$\Omega' = \{rs \in \Omega | K_{rs} \neq \emptyset\} \qquad (4)$$

3．3 下位問題の定式化

(1) 最適化問題としての下位問題

下位問題では，3.2 で述べた，上位問題によって決定されるネットワークに対して交通量配分を行う．交通量配分は，確率的利用者均衡配分に基づき，式(5)-(9)で与えられる．

$$\min_{x} \sum_{a\in A'} \int_0^{x_a} t_a(w)dw + \frac{1}{\theta} \sum_{rs\in\Omega'} \sum_{k\in K_{rs}'} f_k^{rs} \ln \frac{f_k^{rs}}{q_{rs}} \qquad (5)$$

subject to

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

$$t_a(x_a) = t_{a0}\left\{1 + \alpha\left(\frac{x_a}{\mu_a}\right)^{\beta}\right\} \qquad \forall a \in A' \tag{7}$$

$$\sum_{k \in K_{rs}'} f_k^{rs} - q_{rs} = 0 \qquad \forall rs \in \Omega' \tag{8}$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \qquad \begin{array}{l}\forall k \in K_{rs}' \\ \forall rs \in \Omega'\end{array} \tag{9}$$

(2) KKT 条件による制約条件としての表現

下位問題を上位問題の制約条件として記述することを考える．下位問題である確率的利用者均衡配分は凸計画問題であることが知られている．したがって，下位問題を，ラグランジュ乗数η_{rs} ($\forall rs \in \Omega'$)を用いて KKT 条件として書き換えることで，上位問題の制約条件として表すことができる．下位問題の Lagrangean $L(\boldsymbol{f}, \eta)$を式(10)-(12)として定義すると，その KKT 条件は式(6)-(9), (13), (14)として表され，これらが上位問題の制約条件となる．

$$L(\boldsymbol{f}, \eta) = Z_L(x(\boldsymbol{f})) + Z_H(\boldsymbol{f}) + \sum_{rs \in \Omega'} \eta_{rs}\left\{q_{rs} - \sum_{k \in K_{rs}'} f_k^{rs}\right\} \tag{10}$$

$$Z_L(x(\boldsymbol{f})) = \sum_{a \in A'} \int_0^{x_a} t_a(w)dw \tag{11}$$

$$Z_H(\boldsymbol{f}) = \frac{1}{\theta}\sum_{rs \in \Omega'}\sum_{k \in K_{rs}'} f_k^{rs} \ln\frac{f_k^{rs}}{q_{rs}} \tag{12}$$

$$f_k^{rs}\frac{\partial L}{\partial f_k^{rs}} = 0 \qquad \begin{array}{l}\forall k \in K_{rs}' \\ \forall rs \in \Omega'\end{array} \tag{13}$$

$$\frac{\partial L}{\partial f_k^{rs}} > 0 \qquad \begin{array}{l}\forall k \in K_{rs}' \\ \forall rs \in \Omega'\end{array} \tag{14}$$

3．4 上位問題の定式化

3.2 で述べたように，上位問題では，ドライバーの総移動コストが最小になるように，流入制限を行うリンクの組み合わせを決定する．

この際，リンクに対する流入制限により通行を禁止することは，ネットワークからリンクを削除することに相当する．そのため，OD 間の途絶を考慮する必要がある．

土倉ら[8)]は，道路ネットワークの信頼性に関する指標である，時間信頼性と連結信頼性を統合した便益評価の式として，次の式を用いている．

$$\sum_{rs \in \Omega}[q_{rs}\pi^{rs}\lambda^{rs} + q_{rs}\kappa(1 - \pi^{rs})] \tag{15}$$

ここで，π^{rs}は OD ペアrs間が途絶する確率，λ^{rs}は OD ペアrs間が連結しているときのコストである．第 1 項は総移動コストの期待値を表しており，第 2 項はトリップをとりやめる際の総コストの期待値を表している．

OD 間に経路が一つでもあれば，ドライバーはトリップを行うことができる．一方，OD 間が途絶した時，ドライバーはトリップをとりやめるしかない．トリップをとりやめる際のコストとは，トリップをとりやめることによる不利益をコストとして表したものである．

本研究では，式(15)をもとに，経路途絶によるトリップの中止を考慮したドライバーの総移動コストを目的関数として設定する．

ドライバーの行動を Logit 型の確率的利用者均衡配分として記述しているため，OD ペアrs間のコストλ^{rs}は，ランダム効用理論に基づく期待最小費用S_{rs}として次のように置き換えられる．

$$\lambda^{rs} = S_{rs} = -\frac{1}{\theta}\ln\sum_{k \in K_{rs}} \exp[-\theta c_{rs}^k] \tag{16}$$

ここで，c_{rs}^kはリンク移動時間の和として定義される．リンク移動時間は式(7)として定義されるため，c_{rs}^kは次のように表される．

$$c_k^{rs} = \sum_{a \in A} t_a(x_a)\delta_{a,k}^{rs} \tag{17}$$

ここで，S_{rs}は，式(18)を用いて，式(19)のように変形できる．

$$p_{rs}^k = \frac{\exp[-\theta c_{rs}^k]}{\sum_{k \in K_{rs}} \exp[-\theta c_{rs}^k]} \tag{18}$$

$$S_{rs} = -\frac{1}{\theta}\ln\frac{\exp[-\theta c_{rs}^k]}{p_{rs}^k} = c_{rs}^k + \frac{1}{\theta}\ln p_{rs}^k \tag{19}$$

ここで，式(19)の両辺にp_{rs}^kを乗じ，OD ペアrs間の全経路について総和をとる．

$$\sum_{k \in K_{rs}} p_{rs}^k S_{rs} = \sum_{k \in K_{rs}} p_{rs}^k c_{rs}^k + \frac{1}{\theta}\sum_{k \in K_{rs}} p_{rs}^k \ln p_{rs}^k \tag{20}$$

このとき，S_{rs}はkに依らないため，左辺はS_{rs}に一致し，次の式を得る．

$$S_{rs} = \sum_{k \in K_{rs}} p_{rs}^k c_{rs}^k + \frac{1}{\theta}\sum_{k \in K_{rs}} p_{rs}^k \ln p_{rs}^k \tag{21}$$

式(21)を式(15)に代入することで，次の式を得る．

$$\sum_{rs \in \Omega}\sum_{k \in K_{rs}} q_{rs}\pi_{rs}p_{rs}^k c_{rs}^k + \sum_{rs \in \Omega}\frac{1}{\theta}\sum_{k \in K_{rs}} q_{rs}\pi_{rs}\, p_{rs}^k \ln p_{rs}^k + \sum_{rs \in \Omega} q_{rs}\kappa(1 - \pi_{rs}) \tag{22}$$

本研究では，政府が流入制限を行うリンクを政策的に選択することができる．そのため，OD 間は途絶していないか，またはあえて途絶させられているかの 2 通りの状態しかない．したがって，OD 間の途絶確率π^{rs}は，$rs \in \Omega'$のとき 1，$rs \in \bar{\Omega}'$のとき 0 をとる．したがって，式(22)の第 1 項は次のように変形できる．

$$\sum_{rs \in \Omega'}\sum_{k \in K_{rs}'} q_{rs}p_{rs}^k c_{rs}^k \tag{23}$$

式(23)は，式(6)，(17)，(24)を用いることで式(25)のように変形できる．

$$f_k^{rs} = q_{rs}p_{rs}^k \tag{24}$$

$$\sum_{a \in A'} x_a t_a(x_a) \tag{25}$$

第 2 項は第 1 項と同様にして，次のように変形できる．

$$\sum_{rs \in \Omega'}\frac{1}{\theta}\sum_{k \in K_{rs}'} q_{rs}p_{rs}^k \ln p_{rs}^k \tag{26}$$

式(26)は，式(24)を用いることでさらに次のように変形できる．

$$\frac{1}{\theta}\sum_{rs \in \Omega'}\sum_{k \in K_{rs}'} f_k^{rs} \ln\frac{f_k^{rs}}{q_{rs}} \tag{27}$$

第 3 項は第 1 項，第 2 項と同様にして，次のように変

形できる．

$$\sum_{rs\in\overline{\Omega'}} q_{rs}\kappa \tag{28}$$

以上の式変形により，本研究における総移動コスト評価式が式(29)中の関数により定義される．本研究の上位問題の最適化問題は，次の式(29)により定式化される．

$$\begin{aligned}\min_{y} & \sum_{a\in A'} x_a t_a(x_a) \\ & + \frac{1}{\theta}\sum_{rs\in\Omega'}\sum_{k\in K_{rs}'} f_k^{rs}\ln\frac{f_k^{rs}}{q_{rs}} \\ & + \sum_{rs\in\overline{\Omega'}} q_{rs}\kappa\end{aligned} \tag{29}$$

制約条件は，式(1)-(4)，(6)-(14)である．

4. まとめと今後の課題

本研究では，交通渋滞現象の一つであるグリッドロックに着目し，一部のリンクに対し流入制限を行い，交通を空間的に分散させてその発生を回避することを考えた．この場合に，ドライバーの総移動コストを最小化するための，流入制限を行うべきリンクの組み合わせを特定する Bi-level 型のモデルを提案した．このモデルでは，上位問題を OD 間の途絶を考慮した総移動コストを最小化させる流入制限リンクの配置問題，下位問題を確率的利用者均衡配分とするMPEC型の最適化問題として定式化した．

今後の課題として，以下の二点が挙げられる．

一点目は，このモデルの有効性の検証である．リンクに対する流入制限が，グリッドロック回避に対して有効に働くかどうかを検証する必要がある．その方法として，規模の小さなテストネットワークを設定し，解の全列挙を行う．流入制限を行うリンクのあり得る組み合わせを全列挙し，それぞれの場合について交通量配分を行うことで解の全列挙ができる．列挙した解の性質，および解と対応する目的関数の関係を調べる．

二点目は，このモデルを規模の大きなネットワークに適用する方法の検討である．あり得るリンクの組み合わせを全列挙する場合分けの数は，リンク総数が増えると爆発的に増加する．したがって，前述した解の全列挙は，規模の大きなネットワークには適用できない．また，MPEC 型の最適化問題の厳密解を効率的に求めることは，均衡条件を制約条件として持つというMPECの問題構造の複雑さから非常に困難である．したがって，近似解を求める方法についての検討が必要である．解の全列挙から得られた結果を踏まえて，近似解を効率的に求める手法を検討する．

参考文献

1) 内閣府: “大規模地震の発生に伴う帰宅困難者対策のガイドライン”，防災情報のページ，更新日付2021-11-19, http://www.bousai.go.jp/jishin/kitakukonnan/pdf/kitakukonnan_guideline.pdf, 参照 2021-12-10.

2) 警視庁: “震度 5 強の地震が発生した場合の交通規制” 大地震発生時の交通規制，更新日付 2019-04-01，https://www.keishicho.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/saigai/shinsai_kisei/kotsu.html, 参照 2021-12-10.

3) 味沢慎吾，吉井稔雄，桑原雅夫: 道路交通需要の空間的・時間的分散による渋滞削減効果に関する研究，土木学会年次学術講演会，Vol.53，No.4，pp.600-601，1998.

4) 大島大輔, 大口敬: シングルグリッドネットワークにおけるグリッドロック現象の発生抑制方策に関する研究, 土木学会論文集 D3, Vol.74, No.3, pp.165-182, 2018.

5) Daganzo, C. F.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.41, No.1, pp.49-62, 2007.

6) 杉下佳辰，坂井勝哉，井料隆雅，朝倉康夫: ノード・リンク意図的除去によるグリッドロックの回避，土木計画学研究発表会・講演集, Vol.57, CD-ROM, 2018.

7) Sugishita, K., Asakura, Y.: Influence of route choice behavior on vulnerability to cascading failure in transportation networks, *Mathematics Applied in Transportation and Traffic Systems (MATTS)*, Delft, Netherlands, October 2018.

8) 土倉悟，中山晶一朗，高山純一: 時間信頼性と連結信頼性を統合した道路評価法の開発および金沢市道路ネットワークへの適用，土木学会論文集 D3, Vol.69, No.5, pp.I_555-I_562, 2013.

9) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析 －最新の理論と解法－, 1998.