

動的交通制御による最適避難ネットワーク計画

浦田 淳司¹・羽藤 英二²

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科都市工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: urata@bin.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、避難行動に焦点をあて、動的交通制御モデル(SO-DTA)を構築する。研究の目的は、自動車利用者が最短時間で避難完了するためのネットワーク計画の検討である。SO-DTAは動的配分モデル(DTA)を二段階計画モデルに拡張したものであり、下位問題ではDTAにより動的な交通流の伝搬を再現し、上位問題として全体の交通流を最適化するモデルである。道路交通管理者は、上位問題として、車道の一方通行規制による自動車交通流の最適制御を行う。道路利用者の交通状態を再現するモデルには動的利用者最適(DUO)モデルを導入する。これが下位問題となる。利用者の旅行時間認知には不完全情報を仮定し、一つ先のリンクの旅行時間のみを正しく認知できるとする。これにより、災害時の非均衡で、リンク旅行時間情報が伝達されない状況を再現する。最後に、簡易なネットワークで数値計算を行い、不完全情報の状況下では完全情報よりも避難完了時間が長くなること、一方通行規制により避難完了時間の短縮が実現できることを示す。

Key Words : *Dynamic Traffic Assignment, Traffic Management, System Optimal, Bi-level Programming, Evacuation, Lane Reversal*

1. はじめに

(1) 背景

東日本大震災での津波による死者・行方不明者は大きく3つのカテゴリに分かれると指摘されている。一つ目は、高齢者をはじめとする災害時要援護者などの自力避難できなかった被災者である。二つ目は、避難意識希薄者で、津波に対する危機意識が低く避難をしなかった方や避難開始が遅く津波に巻き込まれた被災者である。三つ目は、要援護者の避難支援や避難意識希薄者への働きかけといった他者支援行動をしていた被災者である。ここには、災害時要援護者や避難意識希薄者は、他者支援により避難できた可能性があったが、一方で他者支援行動により犠牲者が増えてしまったという相反する問題がある。東日本大震災以降、日本各地で避難計画が検討・立案されているが、要援護者の支援者の避難遅れの問題、支援時の車活用と渋滞発生による避難遅れの問題は依然残されている。

こうした問題は、地域で要援護者支援や車活用のルールを事前に決め、共有しておくことにより、ある程度解決可能である。しかし、事前ルールが最適なルールであるのか、突発的な災害に対応できるのか、といった問題に対しては理論的な検討が求められる。特に、渋滞の問題には、有効な道路運用・制御やネットワーク整備といった方策が解決のために必要である。So&Daganzo(2010)¹⁾では、ランプでの流入量制御により避難時間を最小化する方策をシンプルなモデルで示している。こうした

交通制御による最適避難計画は、投資コストは小さいが大きな効果が見込まれるため、適用可能性があり、研究の意義は大きい。

(2) 研究課題

本研究の研究課題は大きく二つである。一つは、異常時の避難移動をいかに捉えるかである。異常現象の発生頻度は極めて稀である。そのため、多くの交通流モデルの研究で仮定されている均衡状態は成立せず、非均衡の状態である。非均衡状態であるため、道路の旅行時間情報を経験的に知ることはできない。また、異常時は避難などを目的とした移動が短時間で大量に発生する。そのために混雑や渋滞が生じやすく、混雑の交通表現はモデル構築にあたっての重要な要素となる。この場合、道路ネットワーク上の混雑(予測)情報は、利用者にとって不完全情報となる。災害時の混雑情報を道路利用者に伝える仕組み²⁾はまだなく、またリスク情報と一緒に混雑情報を伝えることも難しい。

二つ目の課題は早期避難をいかに実現するかである。異常時の行動を捉えた上で、早期避難を実現させるための知見を得ることが工学分野には求められている。交通計画分野における早期避難のための貢献には、道路ネットワークの最適計画と効率的な住民避難計画立案がある。平常時交通の最適な道路ネットワーク計画や災害時の利用者最適行動の下では、災害時の全体の早期避難は実現しない。具体的実現方策を考える。既存

市街地では道路ネットワークの大規模な再構築は困難であるが、リンク容量拡充といった小規模な方策は実現可能であろう。また、避難移動のシステム最適化のために、自動運転や信号といった機械的制御が必要となるが、こうした制御方策の実現はまだ遠い先のことであろう。リンクや交差点での通行方向規制といった原始的な行動制御方策であれば、実現可能である。こうした整理の上で、近い将来の地震・津波被害において早期避難を実現させるためには、実現性の高い方策を講じる必要がある。

(3) 研究目的

二つの課題に対して、本研究の研究目的と研究手法は次とする。研究全体の目的は、異常時の避難行動を再現する動的な交通流モデルを用いた最適避難ネットワーク構築のための制御方策の検討である。そのために、本研究は避難行動を再現する動的な交通流モデルと交通運用による最適制御の二つの内容により構成する。

一つ目は、災害時の交通状態の仮定に則った自動車避難行動の再現モデルを構築する。モデルでは、道路利用者が旅行時間を正確に知らない非均衡の交通状態を前提とする。また、混雑・渋滞の生起と道路利用者の渋滞回避行動が再現可能な動的な交通モデルが必要である。動的モデルを用いることで、出発時刻の集中性も再現可能となる。具体には、動的な交通配分モデルとして、Dynamic User Optimal(以下、DUOモデル)³⁾⁴⁾を用いる。DUOモデルでは、その瞬間の経路旅行時間を用いた経路選択構造を導入しており、将来経験経路旅行時間を用いていない点で異常時の非均衡下の経路選択構造との親和性が高い。利用者の認知するリンク旅行時間には不完全情報を仮定する。ネットワーク上の一部のリンクの旅行時間のみを認知し、他のリンク旅行時間は正確には知らない状況で、道路利用者は経路選択を行う。

次に、交通運用制御による避難最適化を行う。制御のための交通運用方策としては、一方通行規制を導入する。一方通行規制は交通運用方策であり、非機械的な制御可能であるため、低コストで実施できる。地域において事前ルールとして共有しやすいというメリットもある。また、一方通行規制により道路利用者の移動方向を間接制御することができ、本研究では対象としていないが、他者支援行動による避難開始の遅れ等を防ぐことが可能となる。ただし、一方通行規制による避難最適化のためには、規制実施の道路を決定するための検討が必要となる。そこで、最適制御方策検討のための全体の枠組みを二段階計画問題として構築する。下位問題として道路利用者の交通状態の再現にDUOモデルを用い、上位問題の道路計画者の目的関数は避難

完了時刻の最小化とする。上位問題の制御変数は、一方通行規制を行う道路リンクの組合せである。以上のように、交通運用制御による避難最適化のため、動的な交通流の最適制御モデル(SO-DTA)を構築する。

本稿では、2章で動的な交通の制御モデルに関する既往研究を整理する。3章では、モデル全体のフレームワークと具体の定式化を示す。4章では、モデルを用いたシンプルなmany-to-oneのネットワークにおける数値計算結果を示す。5章では、結論と今後の課題をまとめる。

2. 既往研究のレビュー

災害からの避難時は、道路の混雑状況や渋滞列が時々刻々と変化し、それによって利用者の経路選択が影響を受ける。そのため、最適な交通制御方策の評価のためには、動的配分モデル⁵⁾⁶⁾(以下、DTA)を用いた検討が必要である。本項では、DTAを用いた交通最適制御(SO-DTA)に関する研究を中心にレビューを行う。

まず、道路利用者の直接制御により、システム最適を達成する研究を整理する。Ziliaskopoulos(2000)⁷⁾では、CTMモデル⁸⁾⁹⁾を用い、単一目的地のSO-DTA問題を線形計画問題として定式化している。目的関数は総旅行時間最小化であり、線形計画問題を双対問題として再定式化を行い、簡易なネットワークでの数値計算例を示している。Chiu et al.(2007)¹⁰⁾では、Ziliaskopoulos(2000)⁷⁾のSO-DTAモデルを突発災害からの避難に適用している。Qian et al.(2012)¹¹⁾では、DTAにPoint Queueモデルを導入し、渋滞の発生による下流への影響を明示的に捉えた定式化を行っている。計算アルゴリズムとしてMSAを改良した方法を用い、単一目的地の中規模なネットワークで数値計算している。Ma et al.(2013)¹²⁾では、DTAに渋滞の延伸を評価でき、かつ連続時間で評価できるモデルを導入している。全道路利用者の目的地到達までの合計時間の最小化を目的関数としている。解の計算のため、離散時間モデルでの線形計画問題として再定式化を行い、解の存在を示した上で、2リンクネットワークでの数値計算を行っている。これらは、利用経路・車両速度を特定する最適化であり、自動車の完全制御を想定している。

次に、ボトルネックや交差点での流量制御により、システム最適を達成する研究を示す。ランプでの流入制御方策に関する研究として、Zhang&Shen(2010)¹³⁾がある。ここでは、ネットワークへの流入時の制御により、総旅行時間を最小化するためのモデルを定式化している。DTAには、CTMとPoint Queueモデルの二つを導入している。また、流入前の待機時間を不公平性の指標と捉え、待機時間最小化を上位問題の目的関数としたモデルを構築し、大域解の存在も示している。また、

ボトルネックでの渋滞の回避のために、渋滞メカニズムを考慮したネットワーク通行権取引制度に関する研究¹⁴⁾¹⁵⁾がある。ここでは、ボトルネック容量と等しい通行権を道路管理者が発行し、市場で自由に売買することで、社会的最適な状況が達成可能であることが示されている。流入制御に関しては、So&Daganzo(2010)¹⁾は、流入率とリンク容量の関係に着目し、全員の最短時間避難のためのシンプルな定式化を行っている。ここでは、DTA等の複雑な交通モデルを用いず、流出入に関する簡易な交通モデルを用いている。これを複数経路ネットワークに拡張したDaganzo&So(2011)¹⁶⁾では、リンク容量と交差点での合流率・分岐率の関係をモデル化している。交差点制御による避難最適計画に関する研究として、Liu et al.(2007)¹⁷⁾がある。ここでは、緊急避難を円滑に行うために、GPSによる車両位置観測とあわせたリアルタイム交通マネジメントの枠組みを提示している。ここでは、DTAにはマイクロ交通シミュレーションモデルを用いている。各期ごとに観測する車両位置情報を活用し、DSOモデルにより当該期の最適な交差点制御戦略を決定する。DSOモデルは非線形計画問題として定式化し、GRG法を用いて解を求めている。また、ここでは制御可能な交差点数に限界があるため、制御数上限を考慮したモデル化の必要性が指摘されている。

これらの利用者の直接制御やボトルネックでの流量制御は、制御が連続的かつ動的であるため、機械による制御が必要となる。そのため、早期の実用化が難しいという課題がある。

次に、離散的かつインフラ整備による制御方策であるネットワーク計画問題（以下、NDP）を整理する。NDPに関するSO-DTA研究として、Ukkusuri&Waller(2008)¹⁸⁾がある。DTAとしてCTMモデルを用い、予算制約がある中での道路容量拡張の最適戦略を算出するモデルを構築している。目的関数は総旅行時間の最小化であり、OD需要の不確実性を考慮し、確率的線形計画問題として定式化している。Lin(2011)¹⁹⁾は、DTAにCTMモデルを用い、VIと近似、メタヒューリスティクスの導入により計算の効率化を図っている。Kalafatas&Peeta(2009)²⁰⁾では、DTAにCTMモデルを用い、総旅行時間最小化問題を定式化し、格子状の小規模ネットワークで数値計算を行っている。制御戦略はリンクの一方通行規制とし、規制実施の上限を定め、制約条件としている。人口分布や避難人口、安全地帯の範囲等の分布によるシナリオを設定し、比較を行っている。また、一方通行規制を制御方策とした災害時避難の研究もあり、Xie et al.(2010)²¹⁾では、DTAにはCTMモデルを用い、総旅行時間を最小化するための制御方策をモデル評価している。Karoonsoontawong

and Lin(2011)²²⁾では、DTAとしてシミュレーションモデルを用い、制御方策は一方通行規制としている。一方通行制御の規制の時間的な変化を含めた検討をしている。一方通行規制に加えて、交差点での進入方向規制に特に着目しているXie&Turnquist(2011)²³⁾では、同様の制御方策を交通流モデルにはSUEを用いて評価している。どちらも解法アルゴリズムとして、ラグランジュ緩和とタブーサーチを組合せた方法を提案し、中規模ネットワークでの計算を可能としている。NDPとは異なるが、空間的規制による交通制御を検討した研究としてShi et al.(2014)²⁴⁾がある。制御のために自動車を使えないエリアを設定し、交通手段の限定による制御方策の有効性を示している。下位問題はDTAではなく、マルチクラスの需要変動型SUEモデルを用い、交通手段制限エリアの最適な範囲を求める問題を定式化している。これは、利用者の選択肢集合の制約による交通制御モデルである。

また、逐次的な経路選択と情報認知に関する研究としては、Pel et al.(2011)²⁵⁾がある。ここでは、道路利用者の経路選択行動には逐次選択型と事前決定型の2種類があると仮定し、避難経路指示方策の効果を検証している。災害時の避難経路指示に全員が従わなくても、従う割合が高ければ全員避難の所要時間は全員が従う場合と大きく変わらないことを示している。また、Unnikrishnan&Lin(2012)²⁶⁾では、静的な均衡配分を下位問題とし、その中でリンク旅行時間の認知は直前ノードでのみ可能であるとした経路選択機構を設定している。実際に、旅行時間の設定の違いに大きく計算結果が異なると指摘している。Paz&Peeta(2009)²⁷⁾では、ドライバーの情報感度と経路選択を捉えるモデルと、管理者側の最適情報戦略構築のためのSO-DTAモデルを用いて、ネットワークパフォーマンスの向上を試みている。

本研究で導入する動的交通制御モデルは、既往研究と比べて、下位問題のDTAにDUOモデルを導入している点で特徴的である。DUOモデルは、現時点までの交通状況に依存した非均衡下の経路選択を行う点とPhysical Queueにより渋滞の上流延伸を考慮できる点で、異常時の交通状態との親和性が高い。また、道路利用者のリンク旅行時間の認知を不完全情報とし、異常時の交通状態の再現性を高めている。一方通行規制による交通運用制御は既往研究でも扱われているが、制御方策は他の方策と比較して簡易であり、実用化しやすい方策である。また、リンク容量拡充による対策と比べて、移動方向を間接制御できる点が特徴的である。これにより、本研究では扱わないが、避難以外の行動による避難開始遅れ²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾を間接的に制御することが可能である。

3. 動的交通制御モデル

(1) モデルのフレームワーク

本項では、モデル全体のフレームワークについて述べる。動的交通制御問題は、上位問題に制御の最適化モデル、下位問題に交通状態の再現モデルを用いた二段階計画問題のフレームとなる。

上位問題の目的関数は、全員の避難完了までの時間の最小化とする。制御はリンクごとに行われ、制御変数は道路管理者による車道の一方通行規制実施有無である。これにより、道路ネットワークの連結性を決定する。なお、制御変数は規制実施有無と規制方向の組合せとなり、離散量となる。

下位問題では、交通流を再現するために DUO モデルを導入する。上位問題で決定されたネットワーク構造によって交通流の経路選択は影響を受ける。DUO モデルは、渋滞列の延伸や交通量保存則、FIFO 原則を再現できるモデルである。道路利用者は、各時点での最短旅行時間となる経路を選択する。また、異常時の生起は低頻度現象であり、非均衡状態である。加えて、混雑情報の伝達や認知は難しく、全リンクの旅行時間を正確に知ることはできない。そこでリンク旅行時間認知が不完全であるという仮定を DUO モデルに導入する。正確なリンク旅行時間を認知できるのは、リンクの上流ノードに到着した時とする。

道路利用者は、それ以外のリンクの旅行時間は自由流状態でのリンク旅行時間と認知して、経路選択を行うとする。

このリンク旅行時間認知の枠組みを図-1 を用いて、説明する。車両がノード 1 にいるときは、リンク 1-2 の旅行時間のみを真値で認知する。リンク 2-3、3-4 は自由流旅行時間を認知する。実際は混雑しており、これは真値とは異なる。車両がノード 2 にいるときは、リンク 2-3 の旅行時間を真値で認知する。混雑している場合は、その瞬間の旅行時間である。リンク 3-4 は真値のリンク旅行時間は認知せず、自由流旅行時間を認知する。なお、本研究では、道路利用者の出発時刻や出発地、到着地は所与とする。

(2) 一方通行規制による交通制御

本項では、一方通行規制による道路利用者の行動制御の特徴を整理する。

管理者の交通制御方策として、一方通行規制(車線制御)、交差点分流率制御(信号制御)、流入抑制(ランプ制御)の3つがある。一方通行規制は利用可能性の有無が明確であり、利用者は規制により受ける影響が理解しやすい。また、一旦規制を実施すれば、道路上での人力または機械による制御管理のための労力はほとんど

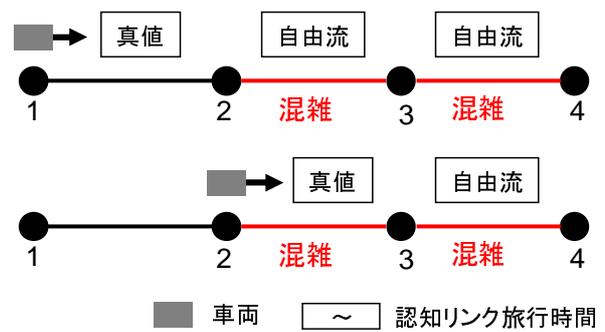


図-1 不完全情報下の車両位置とリンク旅行時間の認知の関係

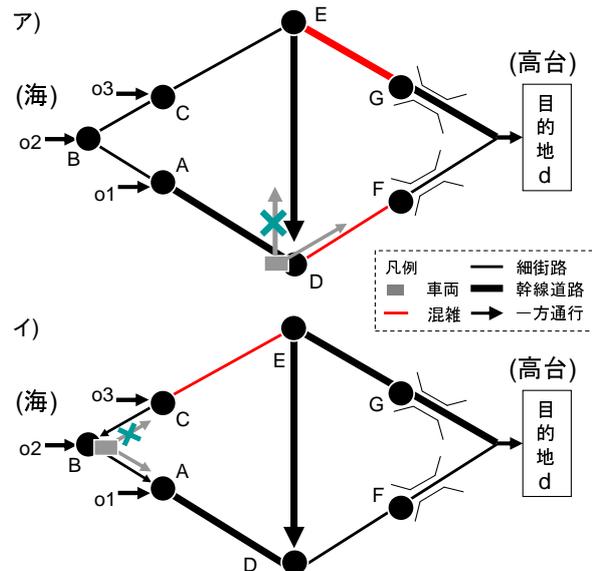


図-2 一方通行規制による経路選択への影響

でない。それまでの対向車線も走行可能になり、道路容量を増やすことができるという利点もある。分流率制御・流入制御は、利用者の現在地・経由地・目的地や出発時刻分布を観測できなければ、最適な割合を決めることはできない。また、利用者の規制認知は難しく、システムの災害への頑健性も求められる。多くの利用者に認知してもらい、違反者が生じないことが条件であるが、一方通行規制は、他と比較して、導入しやすくまた課題が少ない方策である。

次に、不完全情報下の経路選択において、一方通行規制が道路利用者の避難時間を短縮する影響を与える単純な事例を示す。図-2 の道路ネットワークを用いて説明する。図-2 ア) はリンク E→D 間に一方通行規制を指定した場合である。リンク E-G、リンク D-F はそれぞれ渋滞している。ノード D にいる車両はリンク D-F の渋滞を認知できるが、逆側のリンク E-G の渋滞は認知できず、自由流旅行時間と認知する。目の前の渋滞回

避のため、リンク E-G を目指した移動が起こるが、結果としてリンク E-G の渋滞に遭遇し、避難時間は長時間化する。そこで、管理者はノード D の利用者がリンク E-G での渋滞に遭遇するのを避けるためにリンク E → D に一方通行規制を行う。これにより、避難時間の短時間化を図る。

図-2 イ) はリンク C → A 間に一方通行規制を指定した場合である (C から B へは逆流になるのでリンク C-B は利用されない)。ノード B にいる利用者はリンク C-E での混雑を認知できないため、経路 B-C-E-d と経路 B-A-D-d の経路旅行時間は等しいと認知している。しかし、図に示したようにリンク C-E に混雑が発生していれば、経路 B-C-E-d を回避したほうがよい。そこで、管理者側がリンク C → A 間に一方通行規制を行うことで、道路利用者が経路 B-C-E-d を選択するように制御する。これにより、避難時間の短時間化を図ることができる。これは、o3 からの需要が多い場合に特に有効となる。

このように、管理者は、道路利用者の行動選択を想定し、全体の避難時間が最小となるように一方通行規制による制御を行う。

(3) モデルの定式化

本研究では、動的な交通流を再現する DTA には DUO モデルを導入する。DTA には、DUE・DUO・DSO と大きく 3 つのモデルがあり、その違いについては赤松・太田 (1995)³¹⁾ に簡潔にまとめられている。導入する DUO モデルとしては、Kuwahara&Akamatsu(2001)⁴⁾、桑原・赤松 (1997)³⁾ を参考とする。この DUO モデルでは、渋滞列は Physical Queue モデルで表現することができ、渋滞列の延伸を評価できる。そのため、渋滞が発生しやすい異常時の交通流再現に適している。また、Many-to-Many の OD であっても、交通量保存則と FIFO 原則を成立させたまま、解を求めることができる。

次に、動的交通制御モデルの定式化を行う。変数の表記を示す。

パラメータ

$G(N, A)$: ノード N , リンク A で構成するネットワーク

l_{ij} : リンク ij のリンク長

t : 時刻 ($0 \leq t \leq T$)

o : 出発地 ($o \subset N$)

d : 到着地 ($d \subset N$)

k_{ij}^{max} : 渋滞時の交通密度

w_{ij} : リンク ij の自由流側の Wave Speed

w'_{ij} : リンク ij の渋滞流側の Wave Speed

η_{ij}^* : ノード j におけるノード i からの交通流の合流率の参照値 (交差点形状等で決定)

変数

$Q_{id}(t)$: 時刻 t までにノード i を出発地とし、到着地 d に向かう累積交通量

$A_{ij}(t)$: リンク ij に時刻 t までに流入した台数

$D_{ij}(t)$: リンク ij から時刻 t までに流出した台数

$q_{id}(t)$: 時刻 t でノード i を出発地とし、到着地 d に向かう交通量 ($= \frac{dQ_{id}(t)}{dt}$)

$\lambda_{ij}(t)$: 時刻 t でリンク ij への流入交通流率 ($= \frac{dA_{ij}(t)}{dt}$)

$\mu_{ij}(t)$: 時刻 t でリンク ij からの流出交通流率 ($= \frac{dD_{ij}(t)}{dt}$)

$\beta_{jk}(t)$: 時刻 t でリンク jk 全体で渋滞していれば 1, それ以外は 0

$Y_{jk}(t)$: 時刻 t でリンク jk への可能流出交通流率

$X_{ij}(t)$: 時刻 t でリンク ij から可能流入交通流率

$\tau_{ij}(t)$: 時刻 t におけるリンク ij の旅行時間

$T_{ij}(t)$: 時刻 t にリンク ij を通過した車両の経験リンク旅行時間

$\pi_{id}(T)$: 時刻 t におけるノード i から目的地 d までの現時点瞬間の最短旅行時間

$\delta_{ij}^d(t)$: 時刻 t でリンク ij がノード i から到着地 d への最短経路上にある場合は 1, ない場合は 0

$F_{ij}(x, t)$: 時刻 t までにリンク ij の下端から x だけ上流位置を通過する累積交通量

$f_{ij}(x, t)$: 時刻 t でリンク ij の下端から x だけ上流位置の交通流率 ($= \frac{\partial F_{ij}(x, t)}{\partial t}$)

$k_{ij}(x, t)$: 時刻 t でリンク ij の下端から x だけ上流位置の交通密度 ($= \frac{\partial F_{ij}(x, t)}{\partial x}$)

$v_{ij}(x, t)$: リンク ij の時刻 t , 位置 x での自動車速度

$\phi_{jk}(t)$: 時刻 t のノード j からノード k への交通流の分流率

$\eta_{ij}(t)$: 時刻 t のノード j におけるノード i からの交通流の合流率

定式化は次となる。制約条件 (下位問題) は DUO モデルによる交通流再現であり、上位問題は全員の避難完了時刻 T_{finish} の最小化問題である。

$$\min T_{finish} = \min \left(t \left| \sum_{j'} D_{j'd}(t) = \sum_{i'} Q_{i'd}(t) \right. \right) \quad (1)$$

j' : 目的地 d の隣接ノード, i' : 出発地ノード

subject to

交通量保存則

$$-\sum_h D_{hi}^d(t) + \sum_j A_{ij}^d(t) = Q_{id}(t) \quad (2)$$

FIFO 原則

$$\frac{\mu_{ij}^d(t)}{\mu_{ij}(t)} = \frac{\lambda_{ij}^d(\hat{t})}{\sum_d \lambda_{ij}^d(\hat{t})}, \quad t = \hat{t} + T_{ij}(t) \quad (3)$$

リンク旅行時間

$$\begin{aligned}\tau_{ij}(t) &= \int_0^{t_{ij}} \frac{dx}{v_{ij}(x,t)} \\ &= \frac{x_{ij}^*(t)}{w_{ij}} + \int_{x_{ij}^*(t)}^{l_{ij}} \frac{dx}{v_{ij}(\mu_{ij}(t - (l_{ij} - x)/w'_{ij}))}\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}A_{ij}\left(t - \frac{x_{ij}^*(t)}{w_{ij}}\right) \\ = D_{ij}\left(t - \frac{l_{ij} - x_{ij}^*(t)}{w'_{ij}}\right) + k_{ij}^{max}(l_{ij} - x_{ij}^*(t))\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}v_{ij}\left(\mu_{ij}\left(t - \frac{l_{ij} - x}{w'_{ij}}\right)\right) \\ = \frac{\mu_{ij}(t - (l_{ij} - x)/w'_{ij})}{k_{ij}^{max} - \mu_{ij}(t - (l_{ij} - x)/w'_{ij})/w'_{ij}}\end{aligned}\quad (6)$$

流入交通流率

$$\beta_{jk}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } A_{jk}(t) > D_{jk}(t - \frac{l_{jk}}{w'_{jk}}) + k_{jk}^{max}l_{jk} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}\quad (7)$$

$$Y_{jk}(t) = (1 - \beta_{jk})f_{jk}^{max} + \beta_{jk}(t)\mu_{jk}(t - l_{jk}/w'_{jk})\quad (8)$$

$$X_{ij}(t) = \begin{cases} f_{ij}^{max} & \text{if } A_{ij}(t - l_{ij}/w_{jk}) \\ \lambda_{ij}(t - l_{ij}/w_{ij}) & \text{otherwise.} \end{cases}\quad (9)$$

$$\mu_{ij}(t) = \min\{X_{ij}(t), Y_{jk}(t)\}, \quad j : \text{line}\quad (10)$$

$$\mu_{ij}(t) = \min\{X_{ij}(t), \sum_k Y_{jk}(t), \min_k \left(\frac{Y_{jk}(t)}{\phi_{jk}(t)}\right)\}, \quad (11)$$

$j : \text{diverge}$

$$\phi_{jk}(t) = \frac{\sum_d \delta_{jk}^d(t) \lambda_{ij}^d(\hat{t})}{\sum_k \sum_d \delta_{jk}^d(t) \lambda_{ij}^d(\hat{t})} \quad \text{where } t = \hat{t} + T_{ij}(t)\quad (12)$$

$$\mu_{ij}(t) = \min\{X_{ij}(t), \eta_{ij}(t)Y_{jk}(t)\}, \quad j : \text{merge}\quad (13)$$

$$\eta_{ij}(t) = \begin{cases} 1 - \sum_{i' \neq i} X_{i'j}(t)/Y_{jk}(t) \\ \text{if } \sum_{i' \neq i} X_{i'j}(t) < (1 - \eta_{ij}^*)Y_{jk}(t) \\ \eta_{ij}^* & \text{otherwise.} \end{cases}\quad (14)$$

最短経路原則

$$\lambda_{ij}^d(t) \left(\tau_{ij}(t) - \pi_{id}(t) + \pi_{jd}(t) \right) = 0\quad (15)$$

$$\tau_{ij}(t) - \pi_{id}(t) + \pi_{jd}(t) \geq 0\quad (16)$$

基礎条件

$$F_{ij}(l_{ij}, t) = A_{ij}(t)\quad (17)$$

$$F_{ij}(0, t) = D_{ij}(t)\quad (18)$$

$$f_{ij}(l_{ij}, t) = \lambda_{ij}(t)\quad (19)$$

$$f_{ij}(0, t) = \mu_{ij}(t)\quad (20)$$

$$\lambda_{ij}(t) \geq 0\quad (21)$$

$$\mu_{ij}(t) \geq 0\quad (22)$$

$$A_{ij}^d(t + \Delta t) = A_{ij}^d(t) + \lambda_{ij}^d(t)\Delta t\quad (23)$$

$$D_{ij}^d(t + \Delta t) = D_{ij}^d(t) + \mu_{ij}^d(t)\Delta t\quad (24)$$

式 (2) はノード i における交通量保存則, 式 (3) は到着地別交通の FIFO 条件を示す. 式 (4) はリンク旅行時間の算出式であり, 式 (5) で与えられる x_{ij}^* はリンク内の

渋滞列有無の分岐点を示し, 式 (6) は渋滞時の速度を示す. 式 (7)~(14) は Physical Queue の場合のノード j の流出交通流率 $\mu_{ij}(t)$ の決定に関する式である. 式 (7) はリンク jk の渋滞の延伸が上流ノード j に達しているかどうかの判定式, 式 (8) は下流リンクの可能流入流率, 式 (9) は上流リンクの可能流出流率を示す. 流出交通流率は式 (10), (11), (13) で決まり, それぞれノード j が分岐・合流なしノード, 分岐ノード, 合流ノードの場合を定める. ノード j での分岐率・合流率は式 (12), (14) によって与える. 式 (15), (16) は最短経路利用の原則を示す. 式 (17) 以降は, 基礎条件であり, 式 (17)~(20) はリンクの流出入台数とリンク内の交通状態の関係を示す. 式 (21), (22) は交通流の非負制約を示す. 式 (23), (24) は時間帯 t の $A_{ij}^d(t)$, $D_{ij}^d(t)$, $\lambda_{ij}^d(t)$, $\mu_{ij}^d(t)$ と次の時間帯 $t + \Delta t$ の関係式である. なお, ここで Δt は $\Delta t \leq (\min_{ij} l_{ij}/w_{ij})$ を満たす必要がある. また, 式 (2) は時刻 t で微分した式 (25) と等価である. 式 (26) は目的地別の保存則を示す.

$$-\sum_h \mu_{hi}^d(t) + \sum_j \lambda_{ij}^d(t) = q_{id}(t)\quad (25)$$

$$\lambda_{ij}^d(t) = \delta_{ij}^d(t)(q_{id}(t) + \sum_h \mu_{hi}^d(d))\quad (26)$$

以上により, 動的交通制御モデル (SODTA) を構成する. 上位問題の制御変数は規制候補リンクの規制実施有無と規制方向の組合せであり, 離散量となる. そのため, 規制候補リンクの数が多い場合は NPhard となり, 既往研究²³⁾等でも用いられているように, メタヒューリスティクスや MIP ソルバーを用いたアルゴリズム的な解法が必要となる. 次章では, シンプルなネットワークにおいて, 総当り法による数値計算を行う. そのため, ここでは解法について特に言及しない.

4. 数値計算

本章では, many-to-one のシンプルなネットワークで数値計算を行う. まず, 完全情報と不完全情報の場合の 2 つのケースで規制なしでの避難完了時刻を算出し, 不完全情報下の避難遅れへの影響を検証する. 次に, 不完全情報下で, 一方通行規制を実施した場合の避難完了時刻への影響を検証する.

(1) 条件設定

数値計算を行うネットワークの設定は次とする. 図-3 の通り, 3 出発地 1 到着地の道路ネットワークを設定する. 左側の出発地から右側の到着地に, 逆流なしで近づく状況を想定する. そのため, 一方通行規制を行う候補リンクは図中の緑色のリンクの 3 本である. 図の太線は幹線道路, 細線は細街路を示す.

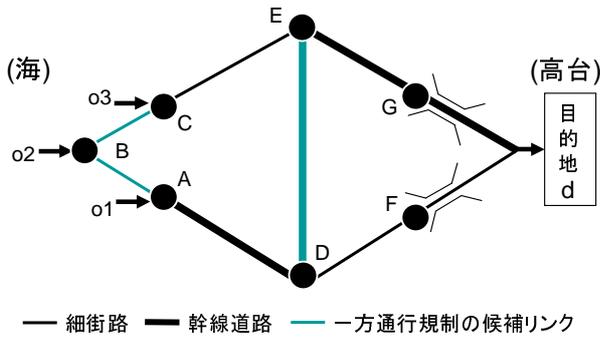


図-3 3 出発地 1 到着地のネットワーク

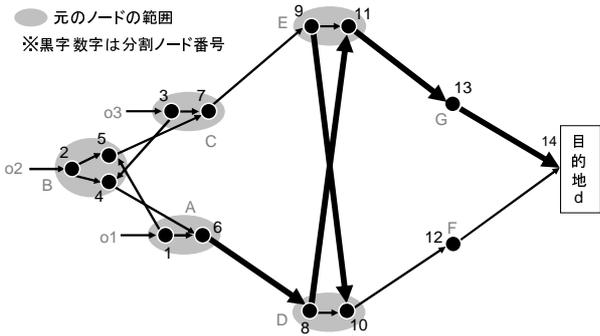


図-4 数値計算用ネットワーク (分割ノードの設定)

ここで、DUO モデルではネットワーク上に”合流ノード”または”分岐ノード”がある場合の交通量の算出式は定義されるが、”合流かつ分岐ノード”の算出式は定義されない。そこで、図-4 のように合流かつ分岐部を分解し、リンクと分割ノードを設定する。

また、リンクそれぞれの設定は表-1 となる。ノード 12,13 がボトルネックとなる。自由流での速度は幹線道路のほうが細街路よりも速い。自由流では、経路 o2-B-C-E-G-d と経路 o2-B-A-D-F-d, 経路 o2-B-A-D-E-G-d の所要時間は等しい。また、一方通行規制を行った場合は、規制と逆方向のリンク ij の渋滞時の交通密度 k_{ij}^{max} と最大交通流率 f_{ij}^{max} を 2 倍とする。

OD 交通量は、o1, o2, o3 を出発地として、d を目的地とする。どの出発地も全て等しい交通量を持つとする。時間 $0 \leq t < 0.3$ では 1000(veh/h)、時間 $0.3 \leq t < 1.0$ では 2000(veh/h)、 $1.0 \leq t$ では 0(veh/h) とする。また、 $\delta t = 0.001$ とする。

(2) 計算結果

a) 完全情報と不完全情報の比較

まず、一方通行規制を実施しない場合で、完全情報の場合と不完全情報の場合を比較する。完全情報下でのリンク別累積交通量は図-5、不完全情報下は図-6 に示す。

表-1 リンク別条件設定

リンク (i,j)	l_{ij} (km)	w_{ij} (km/h)	w'_{ij} (km/h)	k_{ij}^{max} (veh/km)	f_{ij}^{max} (veh/h)
(1,6)	0.24	40	20	400	4000
(1,5)	0.60	40	20	400	4000
(2,4)	0.24	40	20	400	4000
(2,5)	0.24	40	20	400	4000
(3,4)	0.60	40	20	400	4000
(3,7)	0.24	40	20	400	4000
(4,6)	0.60	40	20	400	4000
(5,7)	0.60	40	20	400	4000
(6,8)	2.40	60	20	400	4000
(7,9)	2.40	40	20	400	4000
(8,10)	0.24	40	20	400	4000
(9,11)	0.24	40	20	400	4000
(8,11)	1.56	60	20	400	4000
(9,10)	1.56	60	20	400	4000
(10,12)	1.20	40	20	400	4000
(11,13)	1.20	60	20	400	4000
(12,14)	1.20	40	20	400	3000
(13,14)	1.20	60	20	400	3000

完全情報の場合にリンク G-d のフローが全て流出した時間は 1.172(h)、リンク F-d からは 1.133(h) となり、避難完了時刻は 1.172(h) となる。不完全情報の場合にリンク G-d のフローが全て流出した時間は 1.208(h)、リンク F-d からは 1.166(h) となり、避難完了時刻は 1.208(h) となる。不完全情報のほうが避難完了時刻が遅い。完全情報の場合はリンク E-D はフローが流れていないが、不完全情報ではリンク E-D にフローが流れている。これはリンク E-G の混雑回避のためであるが、リンク D-F において混雑が発生しており、所要時間の短縮にはならず、全体の避難完了時刻が遅くなっている。また、リンク D-E についても、不完全情報の場合は完全情報の場合よりも 2 倍近いフローが流れている。

b) 一方通行規制実施による影響

次に、二段階問題を総当り法により解くことで、不完全情報下での一方通行規制制御による影響を考慮した避難完了時間の計算結果を示す。一方通行規制のパターンは、リンク A-C については (規制なし、A-C 方向のみ通行可、C-A 方向のみ通行可) の 3 パターン、リンク D-E については (規制なし、D-E 方向のみ通行可、E-D 方向のみ通行可) の 3 パターンである。あわせると、全体の管理者が選択できる制御パターンは 9 パターンとなる。規制パターン別の避難完了時間は表-2 となる。

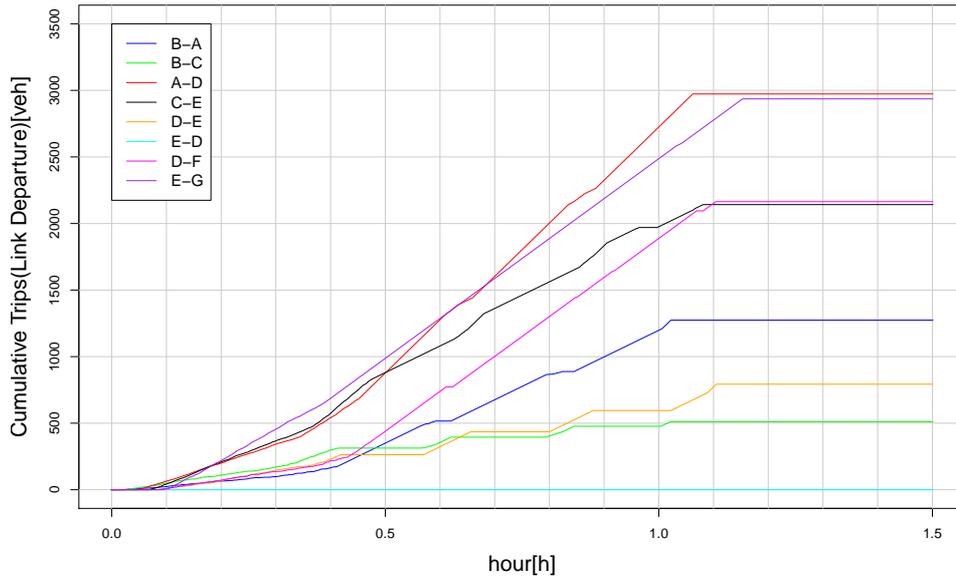


図-5 完全情報下のリンク別累積交通量

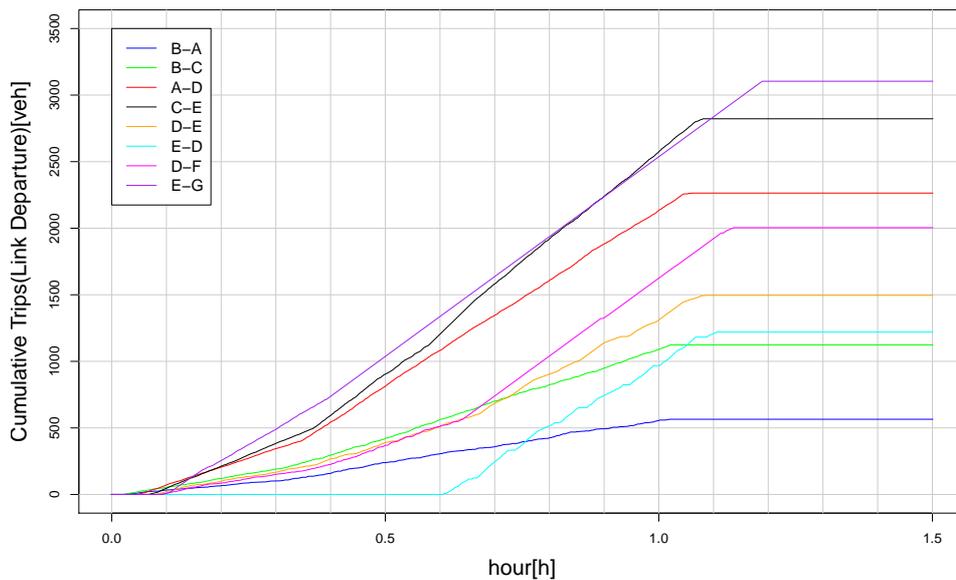


図-6 不完全情報下のリンク別累積交通量

リンク A-C は規制せず、リンク E-D 方向のみ通行可とした場合が、避難完了時刻が最も短く、1.126(h) となっている。これは、完全情報の場合の避難完了時刻よりも短い。ただし、このとき、E-D 間のリンクフローは 0 であり、ブラエスのパラドクスと同じ状態となっている。C-A 方向のみを通行可とした場合は 1.191(h) となり、規制をしなかった場合よりも短くなっている。

これは、通行規制をしない場合はノード G からリンク C-E まで渋滞が延伸するが、C-A 方向のみを通行可とした場合はリンク E-G のみの渋滞に収まるためである。この場合、リンク D-E にフローは流れるため、ノード F から延伸する渋滞も短く抑えられる。

表-2 規制パターン別避難完了時間

リンク A-C 通行可	リンク D-E 通行可	最終流出時刻 (h)	
		リンク F-d	リンク G-d
両方向	両方向	1.166	1.208
両方向	D-E	1.128	1.353
両方向	E-D	1.126	1.126
A-C	両方向	1.192	1.240
A-C	D-E	1.109	1.581
A-C	E-D	1.134	1.200
C-A	両方向	1.191	1.156
C-A	D-E	1.134	1.283
C-A	E-D	1.351	1.111
参考) 完全情報			
両方向	両方向	1.133	1.172

※ 網掛けはネットワーク全体の避難完了時刻

5. おわりに

本研究では、最適避難ネットワークの検討のための動的交通制御モデルを提案した。災害時交通状況の特徴である(1)非均衡、(2)渋滞延伸、(3)動的経路探索、(4)リンク旅行時間の認知不可能性を再現するため、交通流モデルとして、リンク旅行時間の不完全情報を仮定したDUOモデルを導入した。また、利用者への受け入れやすさや早期の実現可能性を考慮し、制御施策としては一方通行規制を設定した。これにより、本研究では最適避難のための動的交通制御モデルとして、上位問題に管理者の一方通行規制によるネットワーク計画、下位問題に不完全情報の仮定とDUOモデルによる交通流再現を設定し、SO-DTAモデルを構築した。ブラエスのネットワークでの数値計算により、不完全情報の状況下では完全情報の場合よりも避難完了時間が長くなることを示し、不完全情報の仮定の必要性が示した。また、一方通行規制を実施することで、避難完了時間の短縮が実現できることを示した。

課題としては、今回の数値計算は、シンプルなネットワークにおける簡単な内容に留まっていることが挙げられる。需要に偏りのある場合は一方通行規制の効果がより大きくなると想定され、さらなるケーススタディが必要である。また、実践的には大規模なネットワークでの計算が必要であり、メタヒューリスティクスなどを適用した計算アルゴリズム開発が求められる。また、一方通行規制は道路利用者の経路選択の間接的制御方策である。つまり、他者協調行動も含めたトリップチェーン選択と組み合わせることで、その効果はより大きくなると想定され、その検証のための交通流モ

デルの開発が必要である。また、最終的には地域の避難者全員の避難完了時間の最小化のためには、交通手段選択や出発時刻選択も含めた総合モデルとすることが求められる。

参考文献

- 1) So, Sk., Daganzo, C.F.: Managing Evacuation Routes, *Transportation Research Part B*, Vol. 44, pp. 514-520, 2010.
- 2) 村上圭子: "災害ビッグデータ"活用の今後, 都市計画, Vol.62-6, pp.28-33, 2013.
- 3) 桑原雅夫, 赤松隆: 多起点多終点 OD における渋滞延伸を考慮したリアクティブ動的利用者最適交通量配分, 土木学会論文集, No.555/IV-34, pp.91-102, 1997.
- 4) Kuwahara, M., Akamatsu, T.: Dyanmic User Optional Assignment with Physical Queues for a Many-to-many OD Pattern, *Transportation Research Part B*, Vol. 35, pp. 461-479, 2001.
- 5) 赤松隆: 交通流の予測・誘導・制御と動的なネットワーク配分理論, 土木計画学研究・講演集, Vol.13, pp.23-48, 1996.
- 6) Mun, J.S.: Traffic Performance Models for Dynamic Traffic Assignment An Assessment of Existing Models, *Transport Reviews*, Vol. 27, pp.231-249, 2007.
- 7) Ziliaskopoulos, A.K.: A Linear Programming Model for the Single Destination System Optimumdynamic Traffic Assignment Problem, *Transportation Science*, Vol. 34, pp.37-49, 2000.
- 8) Daganzo, C.F.: The Cell Transmission Model. Part I: A Simple Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory, *Transportation Research Part B*, Vol. 28, pp.269-287, 1994.
- 9) Daganzo, C.F.: The Cell Transmission Model, Part II. Network Traffic, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, pp.799-813, 1995.
- 10) Chiu, Y., Zeng, H., Villalobos, J., Gautam, B.: Modeling no-notice mass evacuation using a dynamic traffic flow optimization model, *IIE Transaction*, Vol. 39, pp. 83-94, 2007.
- 11) Qian, Z., Shen, W., Zhang H.M.: System-optimal dynamic without queue spillback: Its path-based formulation and solution cost, *Transportation Research Part B*, Vol. 46, pp.874-893, 2012.
- 12) Ma, R., Ban, X., Pang J.S., Liu, H.: Continuous-Time Dynamic System Optimal for Single-Destination Traffic Networks Considering Queue Spillbacks, *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, Washington*, No. 01478179, 2013.
- 13) Zhang, H.M., Shen, W.: Access Control Policies without inside Queues: Their Properties and Public Policy Implications, *Transportation Research Part B*, Vol. 44, pp. 1132-1147, 2010.
- 14) 赤松隆: 一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度, 土木学会論文集 D, Vol. 63, pp. 287-301, 2007.
- 15) 和田健太郎, 赤松隆: 単一ボトルネックにおける渋滞と混雑を解消する情報効率的メカニズムの設計, 土木学会論文集 D, Vol.66, pp. 160-177, 2010.
- 16) Daganzo, C.F., So, Sk.: Managing Evacuation Networks, *Transportation Research Part B*, Vol. 45, pp. 1424-1432, 2011.
- 17) Liu, H.X., Ban, J.X., Ma, W., Mirchandani, P.B.: Model Reference Adaptive Control Framework for Real-Time Traffic Management under Emergency Evacuation, *Journal of Urban Planning and Devel-*

- opment, Vol.133, pp.43-50, 2007.
- 18) Ukkusuri, S.V., Waller, S.T.: Linear Programming Models for the User and System Optimal Dynamic Network Design Problem: Formulations, Comparisons and Extensions, *Network and Spatial Economics*, Vol. 8, pp.383-406, 2008.
 - 19) Lin, D.-Y.: A dual variable approximation-based descent method for a bi-level continuous dynamic network design problem, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 26, pp. 581-594, 2011.
 - 20) Kalafatas, G., Peeta, S.: Planning for Evacuation Insights from an Efficient Network Design Model, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 15, pp.21-30, 2009.
 - 21) Xie, C., Lin, D.Y., Waller, S.T.: A Dynamic Evacuation Network Optimization Problem with Lane Reversal and Crossing Elimination Strategies, *Transportation Research Part E*, Vol. 46, pp. 295-316, 2010.
 - 22) Karoonsoontawong, A., Lin, D.-Y.: Time-Varying Lane-Based Capacity Reversibility for Traffic Management, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 26, pp.632-646, 2011.
 - 23) Xie, C., Turnquist, M.A.: Lane-based Evacuation Network Optimization: An Integrated Lagrangian Relaxation and Tabu Search Approach, *Transportation Research Part C*, Vol. 19, pp. 40-63, 2011.
 - 24) Shi, F., Xu, G., Liu, B., Huang, H.: Optimization Method of Alternate Traffic Restriction Scheme based on Elastic Demand and Mode Choice Behavior, *Transportation Research Part C*, Vol. 39, pp. 36-52, 2014.
 - 25) Pel, A., Bliemer, M., Hoogendoorn, S.: Modeling traveller behavior under emergency evacuation conditions, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, Vol.11, pp.166-193, 2011.
 - 26) Unnikrishnan, A., Lin, D.-Y.: User Equilibrium with Recourse: Continuous Network Design Problem, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 27, pp. 512-524, 2012.
 - 27) Paz, A., Peeta, S.: Behavior-consistent real-time traffic routing under information provision, *Transportation Research Part C*, Vol. 17, pp. 642-661, 2009.
 - 28) Urata, J., Hato, E.: Modeling the Cooperation Network Formation Process for Evacuation Systems Design in Disaster Areas with a Focus on Japanese Megadisasters, *Leadership and Management in Engineering*, Vol. 12, pp.231-246, 2012.
 - 29) 浦田淳司, 羽藤英二: 複雑ネットワークモデルを用いた豪雨災害時の協調行動形成に関する研究, 土木学会論文集 D3, Vol. 69, pp. 29-40, 2013.
 - 30) 浦田淳司, 羽藤英二, 植村恵里: 将来リスクの動的変化を考慮した逐次型避難開始時刻選択モデル, 第33回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 255-260, 2013.
 - 31) 赤松隆, 太田敏史: 3つの動的交通配分原則の特性比較, 土木計画学研究発表会講演集, Vol. 17, pp. 419-422, 1995.

Dynamic Network Management Model with Stochastic Cooperation Behavior and System Optimal

Junji URATA, Eiji HATO

This research constructs a dynamic traffic management model in the evacuation situations. This paper aims to plan the optimal networks for refugees in the shortest time by cars. This dynamic traffic management model is a bi-level programming. In the upper level, the transportation planner decides lane reversals in the networks. In the lower level, we introduce the dynamic user optimal model to illustrate emergency transportation. Road users cannot know accurate link travel costs because of their unusual situations and imperfection of the information propagation. This model suppose that users can learn the link travel cost information when they reach the upstream node. Numerical experiments are conducted on a simple network. This results show the influence of the incomplete information and the effect of lane reversal.