

動的交通量配分の最近の潮流

井料 隆雅¹

¹正会員 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: iryo@kobe-u.ac.jp

動的交通量配分問題の研究の最近の成果についてレビューを行い今後の課題を整理した。特に、2010年7月に開催された国際会議DTA2010で発表された成果、および、最近の学術誌に掲載された内容を中心にレビューを行った。その結果、動的交通量配分問題はすでに交通量の配分スキームとして一般化しつつあり、今後多くの拡張例および応用例が提案されることが期待できることがわかった。一方で、解法に関する研究はまだ発展途上であり、さらに、動的均衡配分問題の均衡解の唯一性は必ずしも保証されないため、これらの問題を解決することが今後重要な課題となりうることがわかった。

Key Words : *Dynamic Traffic Assignment, Dynamic User Equilibrium*

1. はじめに

動的交通量配分問題とは動的な交通流モデルを用いた交通量配分問題である。道路における混雑、特に渋滞現象は1日の中の時間軸(Within-day time)に依存する現象であり、BPR(Bureau of Public Road)関数をはじめとする静的な交通流モデルではその特徴を正確に記述することはできない。よって、混雑する道路ネットワークにおける交通流の分析や制御、および各種の交通施策の評価を行う際には、動的な特徴を明示的に記述した交通流モデルを使用する必要がある。

動的交通量配分問題の理論研究の成果は1970年代から公表されはじめ、すでに多くの重要な理論的知見が既知のものとなっている(2007年における状況は桑原¹⁾、井料²⁾を参照のこと)。一方、いくつかの重要な問題は未解決のままである。たとえば、動的均衡配分問題(Dynamic User Equilibrium: DUE)を一般的なネットワーク構造で必ず解ける解法はまだ提案されていない。このことは、信頼できる解を確実に発見し、それを政策評価等に用いるという、静的均衡配分では当たり前の手続きをとることすらまだ困難な状況であることを意味する。一方で、動的交通量配分問題を政策評価や交通制御など実務的な課題へ応用した研究も多く現れてきており、これらの未解決問題の研究を進めることの重要度はより増しているといえよう。

本稿では、動的交通量配分問題の研究が最近どのように展開され、その結果どのようなことが解決され、そしてどのような問題がまだ残されているかを示すことを目

的とする。そのために、第2節において2010年7月に開催された動的交通量配分問題の国際会議 The Third International Symposium on Dynamic Traffic Assignment (DTA2010)での発表内容の概要を紹介する。第3節以降では、特に動的均衡配分問題に関する最近のいくつかの研究成果についてより詳しくレビューする。

2. DTA2010での発表内容の概要

2010年7月に開催されたDTA2010では2本の招待講演と39本の一般講演が行われた。それらはおおむね

- ・ 動的均衡配分問題の拡張とその解法
- ・ ネットワーク最適化や交通制御に関する応用課題
- ・ ネットワークローディングモデルの提案
- ・ Day-to-day Dynamics との融合

の4つのカテゴリーに分類できる。なお、一部の発表では Within-day Dynamics を含まない Day-to-day Dynamics のみを対象にした研究が紹介された。個別の発表タイトルおよび著者は、国際会議そのものの概要とともに付録に示した。また、以下では各発表を発表番号に A を付した記号で引用している。たとえば A1)は付録の表-A2 の発表番号1を指す。

DTA2010 で特徴的だったのは、動的交通量配分問題の拡張が多様な形で試みられているということである。これは選択行動(経路選択および出発時刻選択)およびネットワークローディングモデルの双方から確認できる。たとえば、前者であれば、旅行時間の信頼性を考慮した出発時刻選択問題^{A3)A4)}や経路選択問題^{A14)}、後者であれ

ばミクロ的な要素の考慮^{A17)A18)A19)A20)A26)} や確率的影響の考慮^{A23)A24)}などである。これらのような多様な定式化と分析が行われていることは、動的交通量配分問題が交通ネットワーク分析の研究者にとって当たり前のものとなりつつあることを意味しているといえよう。

一方、動的交通量配分問題の解法や性質に関する発表は多くはなかった。そのなかで見られたものは、近似的なフローモデルを前提とした解法等の紹介^{A5)A6)A21)}、マルコフ連鎖による Day-to-day Dynamics の検討^{A36)}である。

3. 動的均衡配分問題の解法に関する最近の成果

動的均衡配分問題の解法に関する最近の研究成果を紹介する。3(1)節では、変分不等式によるアプローチを用いた解法に関する研究、3(2)節では、時間分解法によるアプローチを用いた解法に関する研究、3(3)ではネットワークの連続空間近似を用いた動的均衡配分問題の定式化と解法に関する研究を紹介する。

(1) 変分不等式によるアプローチ

変分不等式を用いた均衡配分問題の求解は以前からよく用いられているアプローチである（例えば Freisz³⁾, Lo and Szeto⁴⁾ Szeto and Lo⁵⁾, Akamatsu and Kuwahara⁶⁾）。変分不等式によるアプローチの問題は、解法の収束性が必ずしも保証されないことである。実際、Lo and Szeto⁵⁾によって、計算の収束性について問題を示すような例が数値計算により示されている。

Friesz et al.⁷⁾ では、変分不等式を不動点問題に変換し、それに対する解法の収束性を一定の「数学的」条件下で示している。条件としては、以前から指摘されていた「経路旅行費用の単調増加性」のほか、”Component-wise strongly pseudomonotone”な経路費用関数についても示している。ただし、この条件が交通量配分問題上で持つ意味、たとえば、実際の交通ネットワークの構造の関係などについては特段明らかにはしていないことに注意したい。なお、本論文では Sioux-Fall Network における数値計算例で計算がうまく収束していることを示しているが、この例において OD 交通量は Single Destination となるように設定されている（右下のノードを唯一の終点としている）ことに注意を要する。以上のほか、本論文では、ネットワークローディングの効率的な計算方法や、Day-to-day Dynamics とその計算方法の提案も行っている。

(2) 車両を離散的に考えた配分問題の解法

多くの動的均衡配分問題では交通流を連続体に近似してあつかっているが、交通流は本来不可分な車両の集合で構成されており、それを離散的な表現で取り扱うことはいたって自然である。また、実務的な活用例がすでに

多く見られるマイクロ交通シミュレーションとの整合性も高い。

井料は車両を離散的に扱う動的均衡配分問題における効果的な解法を示した⁸⁾。この解法において、動的均衡配分問題は純戦略のみを考える戦略型ゲームとして定式化され、均衡状態は Nash 均衡として定義されている。ネットワークローディングモデルとしては、ボトルネックに限らず、より一般的な追従モデルも使用可能であり、渋滞の延伸や、渋滞流の速度の差による渋滞列の交通密度の違いなども明示的に取り扱うことができる。

この研究で提案された解法は「順序配分アルゴリズム」と呼ばれる。順序配分アルゴリズムでは、車を1台1台ネットワークに順番に最短経路に配分することを行う。このとき、いくつかの条件下において「あとから同様の手順で配分される車両によって追い越されることがない」車両（最早未配分車両）の存在が証明できる。あとから追い越されないということは、あとから配分された車両によって当初選んだ経路が最短経路でなくなる、ということが発生しないことを意味する。よって、最早未配分車両を順番にネットワークに配分すれば、結果としてすべての車両が最短経路を選択している状態を導出できる。

順序配分アルゴリズムの問題点は最早未配分車両の存在性である。実際、ネットワーク構造によっては最早未配分車両は存在しないことがある。単一起点および単一終点では最早未配分車両が必ず存在することを簡単に証明できる。

順序配分アルゴリズムは Kuwahara and Akamatsu により提案された時間分解法⁹⁾¹⁰⁾の拡張である。実際、順序配分アルゴリズムを単一起点ネットワークに適用すれば、「出発時刻が早い順にネットワークに配分する」ようになるが、これは出発時刻順に車両を配分する時間分解法と同等の手順と解釈できる。

なお、順序配分アルゴリズムはかつて多用された分割配分と似ているように見えるが、順序配分アルゴリズムでは「先に配分された車両はあとから配分された車両の影響を受けない」ことを厳密に証明しており、全く異なる方法論であることに注意したい。また、この性質は動的な交通流モデルを用いているために発生するものである。静的な交通流モデルによる分割配分では同じ結果は期待できない。

(3) 連続空間上での単一終点問題

唯一な終点を持つ連続空間上における動的均衡配分問題の効果的な解法が Jiang et al. により示されている¹¹⁾。交通ネットワークを連続空間で近似的に表現することは古くから行われており、均衡配分問題については Sasaki et al. による研究がある¹²⁾。本論文は単一終点を持つ連続空

間における動的均衡配分問題 (Predictive Continuum Dynamic User-Optimal: PDUO-C) の定式化と解法を示している。PDUO-C では交通流モデルとして連続体上に速度密度関係 (いわゆる Macroscopic Fundamental Diagram) と交通量保存則を定式化している。旅行費用としては旅行時間のほか、高密度の交通流そのものに対する不効用も考慮できる。出発時刻は固定とされている。単一終点ネットワークであるため、各地点から終点までの最小旅行費用は唯一に決定できる。この最小旅行費用をポテンシャル関数として定義している。これらを用いることにより、PDUO-C を偏微分方程式系として記述し、その解法を提案している。

PDUO-C のポイントは「ポテンシャル関数」を用いて最小費用経路の選択行動を数学的に表現していることである。ポテンシャル関数は終点までの最小費用経路での旅行費用を示し、その勾配は各地点での最短経路の方向を示す。単一終点問題ではこのようなポテンシャル関数がすべての車両に対して一意に設定できるので、このような解法を用いることが可能となっている。

ポテンシャル関数を用いる方法の数学的なメカニズムは本質的には時間分解法と同じである。ポテンシャルは時間分解法におけるノード費用と等価と考えられる。このことを考えれば、PDUO-C の問題を単一起点に拡張することは容易に可能なことが想像できる。

4. 動的均衡配分問題の解の性質に関する最近の成果

解の唯一性は均衡配分問題では重要な性質である。動的均衡配分問題の解の唯一性についてはネットワーク構造に制約をおいた一部のケースでは証明されていたものの、一般的に唯一性が成立するかどうかということは長らく明らかにはなっていないかった。

この問題に対し、Iryo¹³⁾はもっとも単純な定式化 (出発時刻を固定し、利用者は最小旅行時間を持つ経路を選ぶとし、ボトルネックモデルを用い、特別な車両間相互作用は考慮しない) による動的均衡配分問題における解の唯一性に対する反例を示し、それにより動的均衡配分問題では解の唯一性が一般には成立しないことを証明した。Iryoが反例を示すために用いたネットワークを図-1に示す。図-1において、OD交通量はノードaからノードd、およびノードcからノードbに存在する。この場合に、すくなくとも1つの凸でない均衡解の解集合が存在し、その中ではリンク交通量および遅れ時間が唯一に定まらないことを示した。図-2に、この解集合に含まれる3つの均衡状態における渋滞パターン (各リンクの最大遅れ時間) を示した。図-2より、各々の均衡解で異なるリンク遅れ時間が実現することがわかる。

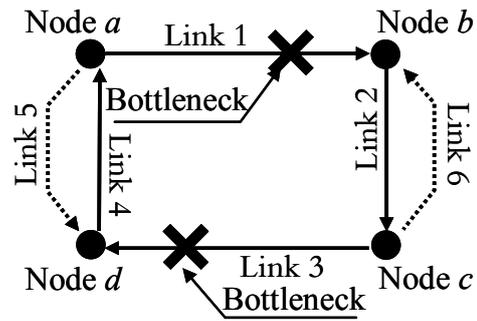


図-1 複数均衡解を持ちうるネットワーク¹³⁾

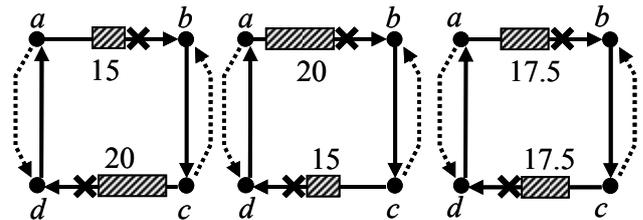


図-2 3つの均衡状態におけるリンク最大遅れ時間¹³⁾
(数字はボトルネックでの最大遅れ時間を示す)

5. おわりに

本稿では動的交通量配分問題の最近の潮流について、特にDTA2010で発表された内容、および動的均衡配分問題に関する最近の研究成果を中心に示した。最近の研究内容から読み取れることは、動的交通量配分問題はすでに交通量の配分スキームとして一般化しつつあり、今後多くの拡張例および応用例が提案されることが期待できる一方で、解法に関する研究はまだ発展途上であることである。今後、多様な応用や拡張を現実的に使用可能なものとするためにも、動的交通量配分問題、特に動的均衡配分問題の解法に関する研究をより進める必要があるといえよう。また、均衡解の唯一性が必ずしも保証されない問題に対してどのような対応をすべきかについても今後検討を加える必要があるだろう。この問題に対してもっとも期待できるアプローチはDay-to-dayダイナミクスを用いることと考えられる。これまでDay-to-dayの意味では静的であった動的均衡配分問題を、両方 (Within-day、とDay-to-day) の時間軸で動的にした分析が、唯一性の問題に対して何らかの方策を示す可能性があるといえよう。

付録 DTA2010の概要と発表リスト

The Third International Symposium on Dynamic Traffic Assignment(DTA2010)の概要を表-A1に、発表リストを表-A2に示す。

表-A1 The Third International Symposium on Dynamic Traffic Assignment(DTA2010)の概要

開催日	2010年7月29日～31日 (3日間)
開催場所	高山グリーンホテル (岐阜県高山市)
発表件数	招待講演2件, 一般講演39件
Symposium Chair	Masao Kuwahara
International Scientific Advisory Committee	David Watling, Chris Tampère, Michiel Bliemer, David Boyce, Giulio Erberto Cantarella, Malachy Carey, Terry L. Friesz, Benjamin Heydecker, Masao Kuwahara, Hong K. Lo, Srinivas Peeta, Mike Smith, Piet Bovy (Honorary Member)
Regional Committee	Masao Kuwahara*, Takashi Akamatsu, Yasuo Asakura, Motohiro Fujita, William H. K. Lam, Takuya Maruyama, Yukimasa Matsumoto, Shoshi Mizokami, Se-il Mun, Agachai Sumalee, Jun-ichi Takayama, Ken-etsu Uchida, S. C. Wong, Toshio Yoshii, Fumitaka Kurauchi*, Shoichiro Nakayama*, Takamasa Iryo* (*:Local Organising Team)

表-A2 The Third International Symposium on Dynamic Traffic Assignment(DTA2010)の発表リスト

番号	著者	タイトル
招待1	Mike Smith	Day to Day and within Day Traffic Assignment and Control Processes; with Implications for the Design of Intelligent Network Management and Control Strategies
招待2	Terry L. Friesz	Dynamic Traffic Assignment: Some History, Unanswered Questions and New Directions
1	Flötteröd, G.	A General Methodology and a Free Software for the Calibration of DTA Models
2	Frederix R., Tampère, C. M. J., Viti, F.	Dynamic Origin-Destination Estimation in Congested Networks
3	Siu, B. W. Y., Lo, H. K.	Punctuality-Based Dynamic Travel Choice Modeling
4	Li, H., Bliemer, M. C. J., Tu, H.	Reliability-Based Departure Time User Equilibrium
5	Friesz, T. L., Kim, T., Lee, I.	Computing Dynamic User Equilibria with Alternative Network Loading Models
6	Nakayama, S.	A Semi-Dynamic Traffic Assignment Model with Flow Propagation Based on Sensitivity Analysis
7	Yushimoto, W. F., Ban, X., Holguín-Veras, J.	Staggered Work Hours: a Bi-Level Model and the Role of Incentives
8	Rochau, N., Noekel, K., Bell, M. G. H.	Integrating Aspects of Unreliability in a Schedule-Based Transit Assignment Model
9	Zhong, R., Sumalee, A., Maruyama, T., Luathep, P.	Dynamic Traffic Equilibrium Model for Dynamic Pricing and Road Capacity Allocation Scheme
10	Yoshii, T., Endo, K.	Verification of the Area Ramp Metering Control Strategy Using Macroscopic Fundamental Diagram
11	Huibregtse, O., Hegyi, A., Hoogendoorn, A.	Implementation of Optimized Traffic Assignment in Disaster Relief: the Effectiveness of Evacuation Instructions and Blocking Roads
12	Suzuki, T.	Discriminated Discounts Based on ETC to Improve Highway Bottleneck Congestion
13	Dong, J., Mahmassani, H. S.	Online Dynamic Traffic Assignment for Predictive Traffic Management through Information Supply and Pricing
14	Hosseinloo, S. H., Bell, M. G. H.	Formulation of a Risk-Averse Dynamic Traffic Assignment
15	Pel, A. J., Bliemer, M. C. J., Hoogendoorn, S. P.	Dynamic Equilibrium Assignment Convergence by En-Route Flow Smoothing
16	Fonzona, A., Schmöcker, J., Bell, M. G. H.	Selecting Potentially Optimal Routes through Optimistic and Pessimistic Node Potentials
17	Bar-Gera, H., Ahn, S.	Empirical Macroscopic Evaluation of Freeway Merge-Ratios
18	Nitzani, M. B., Bar-Gera, H., Gertsbakh, I.	Isolated Signalized Intersections in Dynamic Traffic Assignment
19	Osorio, C., Flötteröd, G., Bierlaire, M.	A Differentiable Dynamic Network Loading Model That Yields Queue Length Distributions and Accounts for Spillback
20	Raadsen, M. P. H., Mein, H. E., Schilpzand, M. P., Brandt, F.	Implementation of a Single Dynamic Traffic Assignment Model on Mixed Urban and Highway Transport Networks Including Junction Modelling
21	Jiang, Y., Wong, S. C., Ho, H. W., Zhang, P., Liu, R., Sumalee, A.	Dynamic Continuum Modeling Approach to Urban Traffic Equilibrium Problems
22	Ge, Y. E., Zhou, X.	On Two Stable States of Time-Varying Traffic Flow on Signalised Networks
23	Sumalee, A., Zhong, R., Pan, T., Iryo, T., Lam, W. H. K.	Stochastic Cell Transmission Model for Traffic Network with Demand and Supply Uncertainties
24	Pan, T., Sumalee, A., Zhong, R., Uno, N.	The Stochastic Cell Transmission Model Considering Spatial and Temporal Correlations for Traffic States Prediction
25	Schakel, W., Huibregtse, O., Hoogendoorn, S.	Network Performance Degeneration in Dynamic Network Loading Models
26	Balijepalli, C., Carey, M., Watling, D.	Introducing Lanes and Lane-Changing in a Cell-Transmission Model
27	Waller, S. T., Kumar, R., Nezamuddin, N.	A Graph Theoretical Combinatorial Algorithm and Dual Approximation Scheme for Large-Scale Dynamic Traffic Assignment Calibration Problems
28	He, X., Liu, H. X.	Modeling the Day-to-Day Traffic Evolution Process after an Unexpected Network Disruption
29	Tanaka, M., Uno, N., Shiomi, Y., Ahn, Y.	An Experimental Study of Effects of Travel Time Distribution Information on Dynamic Route Choice Behavior
30	Wada K., Akamatsu, T.	An Evolutionary Approach to Dynamic Traffic Congestion Control: Implementing Tradable Network Permits Based on Combinatorial Auction
31	Yperman, I., Snelder, M.	Evaluating Network Performance Using Different Dynamic Traffic Models Within a DTA Framework
32	Jiang, T., Miska, M., Kuwahara, M.	Detector Placement Optimisation Based on DTA and Empirical Data
33	Lee, S., Lee, S., Son, H., Choi, I.	Dynamic Route Choice Adjustment Process Using the Log Files of Car Navigation Systems
34	Armstrong, J., Connors, R., Watling, D.	Comparing the Transient Dynamics and Equilibria of Perturbed Networks with Differing Structural Properties
35	Cantarella, G. E., Velonà P., Vitetta, A.	Signal Setting with Demand Assignment: Global Optimization with Equilibrium Stability Constraints
36	Iryo, T.	Discretised Vehicle Assignment: Characteristics of Equilibrium Solutions and Evolution Processes
37	Watling, D.	Dynamic Process Models for Long-Range Transport Planning
38	Smith, M. J., Hazelton, M., Lo, H. K., Cantarella, G. E., Watling, D.	The Long Term Behaviour of Day-To-Day Traffic Assignment Models
39	Tampère, C. M. J., Viti, F.	Dynamic Traffic Assignment under Equilibrium and Non-equilibrium: Do We Need a Paradigm Shift?

参考文献

- 1) 桑原雅夫：動的配分理論－蓄積と展望，土木計画学研究発表会・講演集，35，CD-ROM，2007.
- 2) 井料隆雅：動的均衡配分問題における解の特性に関する研究解説，土木計画学研究発表会・講演集，35，CD-ROM，2007.
- 3) Friesz, T.L., Bernstein, D., Smith, T.E., Tobin, R.L., and Wie, B.W.: A Variational Inequality Formulation of the Dynamic Network User Equilibrium Problem, *Operations Research*, Vol. 41, No. 1, pp. 179-191, 1993.
- 4) Lo, H.K. and Szeto, W.Y.: A Cell-Based Variational Inequality Formulation of the Dynamic User Optimal Assignment Problem, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 5, pp. 421-443, 2002.
- 5) Szeto, W.Y. and Lo, H.K.: A Cell-Based Simultaneous Route and Departure Time Choice Model with Elastic Demand, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 38, No. 7, pp. 593-612, 2004.
- 6) Akamatsu, T. and Kuwahara, M.: Dynamic Network Equilibrium Model of Simultaneous Route / Departure Time Choice for a Many-to-One OD Pattern, *Working Paper*, 1996.
- 7) Friesz, T. L., Kim, T., Kwon, C., and Rigdon, M. A.: Approximate Network Loading and Dual-Time-Scale Dynamic User Equilibrium. *Transportation Research Part B*, Vol. 45, No. 1, 176-207, 2011.
- 8) 井料隆雅：車両を離散化した動的交通量配分問題の Nash 均衡解の解法，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol. 67, No. 1, pp.70-83, 2011 .
- 9) 赤松隆，桑原雅夫：渋滞ネットワークにおける動的利用者均衡配分，土木学会論文集，No.488/IV-23, pp.21-30, 1994.
- 10) Kuwahara, M. and Akamatsu, T.: Dynamic Equilibrium Assignment with Queues for a One-to-Many OD Pattern, in *Transportation and Traffic Theory : Proceedings of the 12th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*, C.F. Daganzo (ed.), Elsevier, New York, pp. 185-204, 1993.
- 11) Jiang, Y., Wong, S. C., Ho, H. W., Zhang, P., Liu, R., and Sumalee, A: A Dynamic Traffic Assignment Model for a Continuum Transportation System. *Transportation Research Part B*, Vol. 45, No. 2, 343-363, 2011.
- 12) Sasaki, T., Iida, Y., Yang, H.: User Equilibrium Traffic Assignment by Continuum Approximation of Network Flow. In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT11)*, Japan, Yokohama, pp. 233-252, 1990.
- 13) Iryo, T: Multiple Equilibria in a Dynamic Traffic Network. *Transportation Research Part B: Methodological*, In Press, 2011, DOI: 10.1016/j.trb.2011.02.010.