

令和 3 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03320

研究課題名（和文）高頻度運行都市鉄道システムの統合解析モデルの構築

研究課題名（英文）Integrated Analytical Modeling of Urban Rail Transit System with High-Frequent Operations

研究代表者

福田 大輔 (Daisuke, Fukuda)

東京工業大学・環境・社会理工学院・特定教授

研究者番号：70334539

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,900,000円

研究成果の概要（和文）：高頻度で運行される都市鉄道システムでは、列車-乗客-駅-ネットワークの複雑な相互作用によって時空間的に不安定な遅延現象が発生する。これは、従来の交通流理論やネットワーク理論では十分な説明が難しく、新たな理論体系の構築が求められている。そこで本研究では、高頻度運行都市鉄道システムの性能（効率性・安定性等）に関する包括的な理解を高めるべく、下記の初研究に取り組んだ。(1) 鉄道 Fundamental Diagramの現実的拡張と検証、(2) 鉄道利用者及び鉄道運営者の動的行動モデルの構築、(3) 列車運行定時制向上の経済便益計測手法の構築と検証。

研究成果の学術的意義や社会的意義

都市鉄道分野における交通流解析研究は限定的であり、観測データに基づく検証も少ない。本研究のように、高頻度での列車運行という特性を明示的に考慮し、さらに、乗客や鉄道ネットワークとの相互作用も考慮した解析フレームを構築・検証することで、都市鉄道システムを対象とする包括的な交通流理論体系の確立に寄与できると期待される。また、本研究の成果は、需要の抑制や列車の運行方式など、需要側・供給側の双方から適切な列車遅延抑止政策・遅延回復策等を検討する上で一般的な知見を提供するため、都市鉄道の計画及び運用に関する実務上の貢献も十分にあると期待される。

研究成果の概要（英文）：This Kakenhi project conducted the following series of studies in order to obtain comprehensive insights into the train delay and its propagation phenomena in urban rail systems: (1) The extension of the concept of "Train Fundamental Diagram" and its empirical verification; (2) The development of dynamic traffic assignment model for urban rail system; (3) The development of an economic evaluation method for delay and punctuality of urban rail transit based on scheduling approach.

研究分野：交通工学，交通経済学，交通行動分析

キーワード：交通工学 交通行動分析 交通ネットワーク分析 公共交通運用 経済評価

1. 研究開始当初の背景

高密度に整備された首都圏の都市鉄道は、朝夕のラッシュアワーを中心に高頻度で列車を運行して輸送力を高め、膨大な通勤鉄道需要に対応してきた。しかし、高頻度運行は「慢性的な列車遅延」という副作用を引き起こした。遅延は動学的に不安定な現象で、発生当初は小さくとも、駅に随時到着する乗客との相互作用によって時空間的に拡大する。特に、相互直通運転等で広範化した鉄道網では、遅延の波及により大規模な輸送障害や混雑が生じる場合もある。高頻度で運行される都市鉄道システムでは、列車～乗客～駅～ネットワークの複雑な相互作用によって時空間的に不安定な遅延現象が発生する。これは、従来の交通流理論やネットワーク理論では十分な説明が難しく、新たな理論体系の構築が求められている。

2. 研究の目的

高頻度運行都市鉄道システムの性能（効率性・安定性等）に関する包括的な理解を高めるべく、下記の初研究に取り組む。

- (1) 鉄道 Fundamental Diagram の現実的拡張と検証；
- (2) 鉄道利用者及び鉄道運営者の動的行動モデルの構築；
- (3) 列車運行定時制向上の経済便益計測手法の構築と検証。

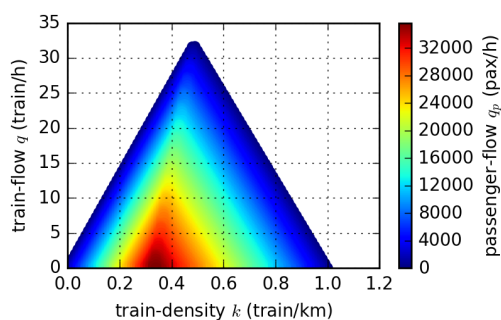
3. 研究の方法

代表者の福田の統括のもと、交通工学の理論研究に実績のある中堅、若手の分担者らがモデルの構築と検証を担う形で推進する。その際、鉄道の遅延に関する実務的知見が豊富な連携研究者より、方法論の妥当性や有用性に関する助言を随時受けつつ研究を実施する。

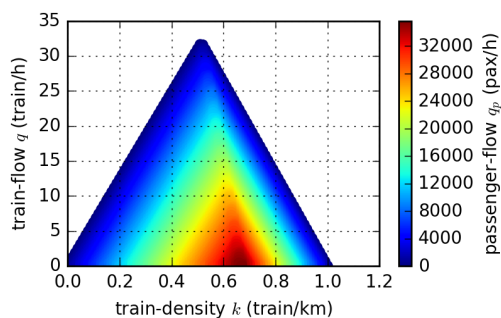
4. 研究成果

(1) 鉄道 Fundamental Diagram の現実的拡張と検証

高頻度運行鉄道システムにおける巨視的な交通状態量(列車流率, 列車密度, 旅客流率)の間に成り立つ関係である、鉄道 Fundamental Diagram (FD) を導出した。鉄道 FD は、動的な「線路上の列車の混雑」・「乗客の駅での混雑」・それらに起因する遅延を明示的に考慮した鉄道運行のモデルであり、一般的な議論に資するため、自動車交通流理論の分野で広く用いられる手法を援用し、数学的に扱い易いモデルとなっている (図 1)。



(a) $l = 3$ (km) の場合



(b) $l = 1.5$ (km) の場合

図 1：鉄道 FD の数値例

鉄道FDをとりまく周辺概念は下記のように整理される。

- ・マイクロモデル：マイクロな(個別の列車の挙動を考慮した)単純鉄道運行モデル
- ・鉄道FD：定常状態のもとでマイクロモデルが従う関係である Fundamental Diagram
- ・マクロモデル：鉄道FDに基づくマクロな鉄道運行モデル

鉄道FDの性質より、理想的な環境のもとでの鉄道システムの定性的な諸性質が示唆された。また、実際のように需給が時間変動する場合でも、マクロモデルがマイクロモデルの傾向をある程度再現できる場合があることを確認した。特に、マイクロモデルの鉄道運行が安定化制御されている場合には、マクロモデルがマイクロモデルをよく近似できる可能性が示唆された。

鉄道FDについては、乗降時間に非線形が存在する場合へと拡張された、その性質を考察したところ、非線形モデルの仮定のもとでは、ある旅客流率を運ぶのに最適な列車台数・運行頻度が存在することや、輸送可能な旅客流率を最大化する運行状態が存在することなどが理論的に明らかになった。

さらに、鉄道FD及びそれを援用したマクロな高頻度鉄道運行モデルの現実的妥当性を検証するべく、実際の都市鉄道の運行データを用いた検証を行った。具体的には東急田園都市線(東京)の列車運行実績・時刻表・旅客乗降に関する数週間の観測データ、並びに、ボストン地下鉄のオープンデータを用い、交通工学における状態変数の基本定義に立脚して列車流率・列車密度・乗客流率という3変数間の関係を図化した(図2)。これより、理論モデル(図1)が示唆する変数関係が現実にも存在する可能性が示唆された。さらに、それらの明確な関数関係を導くべく、データを幾つかの特定化された関数にフィットさせ、その適合度を検証することで具体的な関数形を導くことにも成功した。

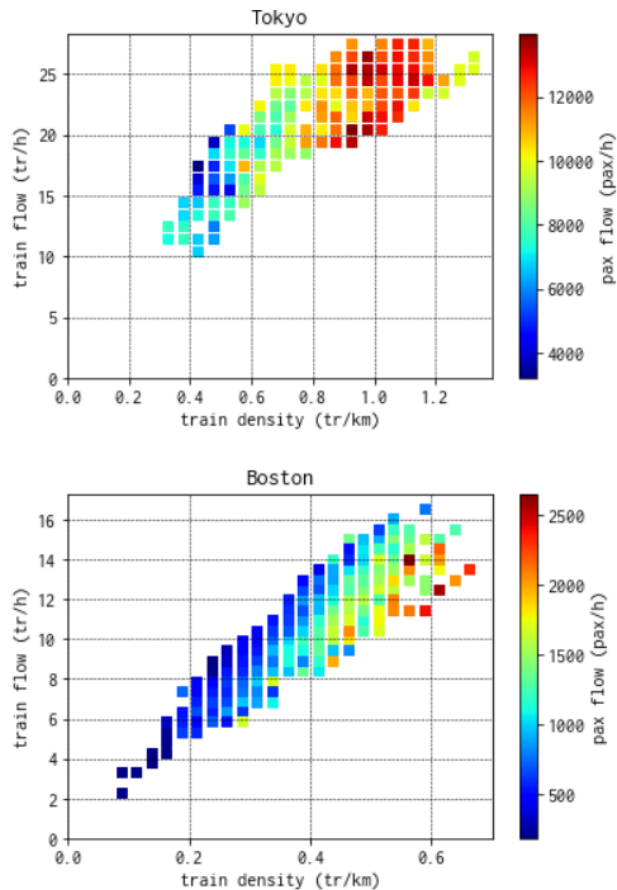


図2：観測データを用いた鉄道FDの検証結果(上：東京データ、下：ボストンデータ)

(2) 鉄道利用者及び鉄道運営者の動的行動モデルの構築

混雑した都市鉄道輸送システムにおける朝の通勤問題に対する乗客の到着の平衡分布を記述するためのマクロな動的行動モデルを構築した(図3)。(1)で開発されたマクロ列車運行サブモデルを採用した上で、さらに乗客と列車の本質的な物理的関係を維持しながら、乗客と列車のダイナミクス間の相互作用を簡略化して表現している点に特徴がある。提案されたモデルの利用者均衡条件を導き出した上で、均衡解の存在について議論を行っている。

次に、さまざまな乗客需要設定の下での数値例を通じて、均衡の特性を分析した。また、提案モデルの応用として、利用者均衡制約のある単純な時間依存の時刻表最適化問題を分析したところ、ディスパッチの頻度を高めることによって均衡時の利用者コストを増加させる可能性がある「容量増加パラドックス」が存在することが示された。これより、高頻度運行下での適切な

時刻表設計や、それが乗客の均衡時旅行コストに与える影響についての新たな知見が得られた。

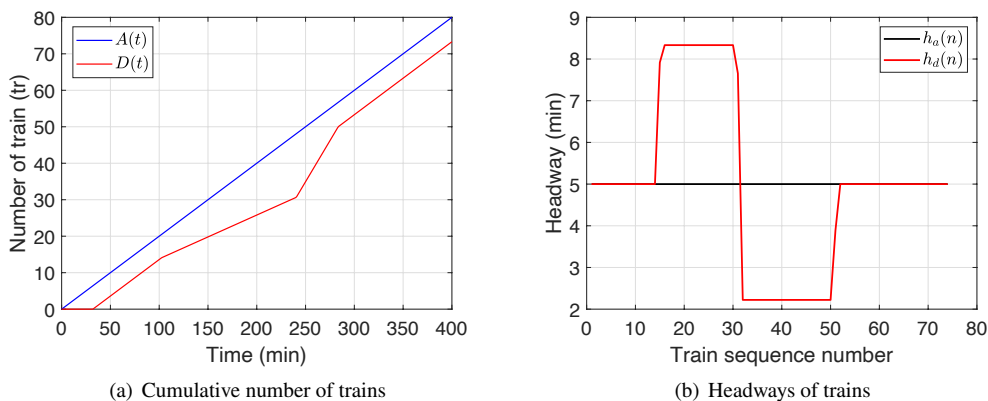


図 3：鉄道システムの動的挙動の例

(3) 列車運行定時制向上の経済便益計測手法の構築と検証

旅行時間信頼性評価の代表的アプローチの一つであるスケジューリングアプローチに立脚して、都市鉄道の列車遅延及び定時性の経済便益評価を行うための分析枠組を新たに構築した。“旅行時間変動”と“運行ダイヤからの列車発着の乖離”を明示的に考慮してスケジューリングアプローチの拡張を行い、東京圏鉄道通勤者の実行動データと列車運行実績データを統合的に活用して鉄道乗車時刻選択モデルのパラメータ推定を行った上で、旅行時間変動価値を推計した。その結果、走行遅延 1 分減少の金銭的価値は、早着時間に換算すると約 3.14 分の減少に等しいこと、あるいは、遅着時間に換算すると約 1.48 分の減少に経済的に等価であるという結果が得られた。これより、鉄道利用者がダイヤからの乖離によって生じる遅延の不効用を、早着時間や遅着時間が同時間分だけ増加することによる不効用よりも大きく認識していることが示された。

さらに、ケーススタディとして通勤者の始業時刻分散施策（図 4）の経済評価を行った。具体的には、鉄道乗車時刻選択モデルと列車運行シミュレーションを用いて行動変化予測を行い、既存研究を参考に時間価値を設定して施策の利用者便益を試算したところ、約 23 円/(人・日)という現実的に見て妥当な試算結果が得られた。

表 1：旅行時間変動価値の推計結果

変数	算出式	旅行時間変動価値
早着時間 SDE (分)	$\beta/\alpha \times \omega$	14.5(円/分)
遅着時間 SDL (分)	$\gamma/\alpha \times \omega$	30.8(円/分)
遅刻確率 P_L (%)	$\theta/\alpha \times \omega$	7.3(円/%)
走行遅延 RD (分)	$\lambda/\alpha \times \omega$	45.6(円/分)

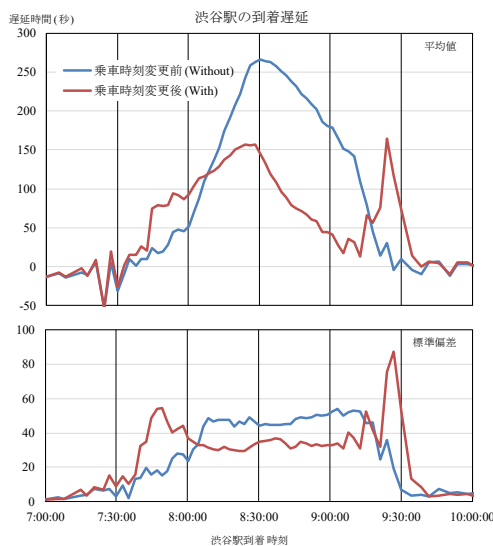


図 4：時間帯別に見た渋谷駅における列車到着遅延状況変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Lykov, S., Seo, T., and Asakura, Y.	4. 巻 12
2. 論文標題 Analysis of spatiotemporal dependencies in two-dimensional traffic flow in large-scale urban area with probe vehicle data	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies	6. 最初と最後の頁 1676-1696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11175/easts.12.1676	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 和田 健太郎, 瀬尾 亨, 中西 航, 佐津川 功季, 柳原 正実	4. 巻 73
2. 論文標題 Kinematic Wave理論の近年の発展: 変分理論とネットワーク拡張	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 I_1139-I_1158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.73.I_1139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kentaro Wada, Koki Satsukawa, Mike Smith and Takashi Akamatsu	4. 巻 in press
2. 論文標題 Network throughput under dynamic user equilibrium: Queue-spillback, paradox and traffic control	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transportation Research Part B: Methodological	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trb.2018.04.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Takashi Akamatsu and Kentaro Wada	4. 巻 79
2. 論文標題 Tradable network permits: A new scheme for the most efficient use of network capacity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Transportation Research Part C: Emerging Technologies	6. 最初と最後の頁 178-195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trc.2017.03.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 中西航, 布施孝志	4. 巻 73
2. 論文標題 測位値に基づく歩行経路の逐次推定におけるネットワークの誤差に関する検討	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3	6. 最初と最後の頁 I_549-I_557
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.73.I_549	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kato, Hironori; Fukuda, Daisuke; Yamashita, Yoshihisa; Iwakura, Seiji; Yai, Tetsuo	4. 巻 2668
2. 論文標題 Latest urban rail demand forecast model system in the Tokyo Metropolitan Area	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board	6. 最初と最後の頁 60-77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3141/2668-07	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sun, W. and Schmoecker, J.D.	4. 巻 6
2. 論文標題 Considering passenger choices and overtaking in the bus bunching problem	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transportmetrica B: Transport Dynamics	6. 最初と最後の頁 151-168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21680566.2017.1387876	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 河井 智弘、福田 大輔	4. 巻 55
2. 論文標題 首都圏鉄道通勤者のサテライト型テレワーク利用意向と生活行動パターン変化に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 都市計画論文集	6. 最初と最後の頁 174 ~ 181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11361/journalcpj.55.174	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 KOBAYASHI Wataru, FUKUDA Daisuke, IWAKURA Seiji	4. 巻 76
2. 論文標題 ECONOMIC EVALUATION FOR DELAY AND PUNCTUALITY OF URBAN RAIL TRANSIT BASED ON SCHEDULING APPROACH	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)	6. 最初と最後の頁 236 ~ 250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.76.3_236	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Arum Salsabila Panji, Fukuda Daisuke	4. 巻 6
2. 論文標題 The impact of railway networks on residential land values within transit-oriented development areas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Asian Transport Studies	6. 最初と最後の頁 100009 ~ 100009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eastsj.2020.100009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Xie Chaoda, Wang Xifu, Fukuda Daisuke	4. 巻 12
2. 論文標題 On the Pricing of Urban Rail Transit with Track Sharing Freight Service	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sustainability	6. 最初と最後の頁 2758 ~ 2758
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/su12072758	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Zhang, J., Wada, K., and Oguchi, T.
2. 発表標題 An empirical study on fundamental diagram of urban rail transit: The case of Boston 's subway data.
3. 学会等名 The 60th JSCE infrastructure Planning Conference
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zhang, J., Wada, K.
2. 発表標題 Fundamental diagram of urban rail transit: An empirical investigation by Boston's subway data.
3. 学会等名 The 8th Symposium of the European Association for Research in Transportation
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Fukuda M. Imaoka and T. Seo
2. 発表標題 Empirical investigation of fundamental diagram for urban rail transit by using commuter rail data in Tokyo
3. 学会等名 TRANSITDATA2019 - The 5th International Workshop on Research and Applications on the Use of Passive Data from Public Transport
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seo, T., Wada, K., and Fukuda, D.
2. 発表標題 A macroscopic and dynamic model of urban rail transit with delay and congestion
3. 学会等名 Transportation Research Board 96th Annual Meeting, Washington DC, The United States (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	Schmoecker J. D. (Schmoecker Jan-Dirk) (70467017)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	和田 健太郎 (Wada Kentaro) (20706957)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	
研究分担者	瀬尾 亨 (Seo Toru) (90774779)	東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授 (12608)	
研究分担者	中西 航 (Nakanishi Wataru) (70735456)	東京工業大学・環境・社会理工学院・助教 (12608)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	森地 茂 (Morichi Shigeru) (40016473)	政策研究大学院大学・政策研究科・名誉教授 (12703)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関