【様式５】

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成　果　報　告　レ　ポ　ー　ト
Ｎｏ．２４－３

研究テーマ

道路の旅行時間信頼性の評価と運用に係る研究開発
–経済便益計測手法の提案と経路誘導システムの構築–

研究代表者：	東京工業大学大学院准教授	福田 大輔
共同研究者：	京都大学大学院教授	文 世一
	東京海洋大学教授	兵藤 哲朗
	京都大学大学院准教授	Jan-Dirk Schmöcker
	City University London 講師	Ioannis Kaparias
	上海海事大学助教	馬 江山
	計量計画研究所	牧村 和彦
	三菱総合研究所	土谷 和之

平成２７年７月

新道路技術会議

目 次

研究概要 **1**

第 **1** 章 研究の背景と目的 **3**
1.1 背景 . . . 3
1.2 研究開発の目的 . . . 3
1.3 期待される成果 . . . 4
1.4 報告書の構成 . . . 4

第 **2** 章 旅行時間信頼性の経済評価方法の体系的整理 **5**
2.1 用語の整理 . . . 5
2.2 旅行時間変動の捉え方 . . . 5
2.3 旅行時間の統計分布 . . . 5
2.4 旅行時間変動の価値付けに関するモデリングの方法 . . . 6
2.5 スケジューリングアプローチ . . . 6
2.6 旅行時間変動価値の推計例 . . . 7
2.7 統合アプローチ . . . 7
2.8 おわりに〜旅行時間信頼性の便益評価に向けた課題 . . . 8

第 **3** 章 旅行時間変動に起因するドライバーの移動コストの試算 **11**
3.1 はじめに . . . 11
3.2 トリップスケジューリングモデル . . . 11
3.3 旅行時間信頼性価値とドライバーコストの導出 . . . 12
3.4 *H* 指数の性質 . . . 13
3.5 ドライバーの移動コストの試算 . . . 13
3.6 統合アプローチの妥当性・展開可能性 . . . 15
3.7 おわりに . . . 15

第 **4** 章 旅行時間信頼性経済便益評価のケーススタディ **16**
4.1 プロジェクトの概要 . . . 16
4.2 便益評価の範囲 . . . 16
4.3 旅行時間信頼性評価に用いる交通データ . . . 16
4.4 基礎データ分析 . . . 17
4.5 *H* 指数および信頼性比のパターン . . . 17
4.6 便益試算のための設定 . . . 18
4.7 旅行時間信頼性向上便益の試算 . . . 19
4.8 おわりに . . . 19

第 **5** 章 一般道路網全体を対象とした旅行時間信頼性評価の試論 **21**
5.1 はじめに . . . 21
5.2 基準化旅行時間の算出 . . . 21
5.3 安定分布へのフィッティング . . . 21
5.4 ケーススタディ . . . 22
5.5 おわりに . . . 23

第 **6** 章 統合アプローチのパラメータ推定方法の検討 **24**
6.1 はじめに . . . 24
6.2 SP 選択実験の想定 . . . 24
6.3 実験計画 . . . 24

6.4 モデルの特定化 24
6.5 行動モデルおよび時間信頼性価値の推定結果 25
6.6 まとめ 26

第 7 章 遅刻リスク回避型経路誘導アルゴリズムの開発 **27**
7.1 Reliable Routing に関する既往研究のレビュー 27
7.2 戦略的な経路選定の考え方と Hyperpath に基づく経路誘導 27
7.3 自動車の動的経路誘導問題への Hyperpath の適用 28
7.4 既存の Hyperpath アルゴリズム 28
7.5 Hyperpath アルゴリズムの高速化 30
7.6 提案アルゴリズムのパフォーマンステスト 30
7.7 他の経路誘導アルゴリズムとの比較 32
7.8 おわりに 34

第 8 章 Hyperpath に基づく遅刻リスク回避型経路誘導システムの開発と検証 **37**
8.1 はじめに 37
8.2 経路誘導システムの構築 37
8.3 実道路ネットワークでの走行実験 38
8.4 おわりに 40

第 9 章 リスク回避型経路誘導の社会的普及がネットワーク交通流に及ぼす影響 **41**
9.1 はじめに 41
9.2 交通シミュレータの概要 41
9.3 DTA の流れ 41
9.4 簡易ネットワークを用いた検討 41
9.5 大規模ネットワークにおける Hyperpath 普及の影響分析 45
9.6 おわりに 47

第 10 章 全体まとめ **48**
10.1 本研究開発の成果 48
10.2 研究開発成果が社会に果たす役割 49

参考文献 **51**

【様式３】

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」（平成２６年度採択）
研 究 概 要

番号	研究課題名	研究代表者
No.24-3	道路の旅行時間信頼性の評価と運用に係る研究開発 −経済便益計測手法の提案と経路誘導システムの構築−	東京工業大学大学院 准教授　福田 大輔

道路の旅行時間信頼性（移動の定時性）が向上したことによる経済便益の計測・評価手法を提案・検証すると共に，旅行時間の不確実性を前提とした経路誘導アルゴリズムの開発及びそのシステム構築を行った．具体的には，(1) 旅行時間信頼性向上の経済便益の計測・評価手法の提案と検証，(2)-1 旅行時間の不確実性を考慮した経路誘導アルゴリズムの開発とシステム構築，(2)-2 そのようなインテリジェントな経路誘導システムの社会的普及がネットワーク交通流全体に及ぼす影響の分析という，旅行時間信頼性の (1)「評価」および (2)「運用」という二つの観点から研究開発を行った．

１．背景と目的

道路整備は，平均旅行時間で測られる速達性の向上のみならず，旅行時間信頼性の向上にも大きく貢献するため，その経済便益を適切に計測して事業評価において考慮可能かどうかを検討することが求められている．また個々の道路利用者にとっても，定時性の高い経路を利用したいというニーズや，そのような経路推奨機能を持つカーナビへの期待は大きい．このような「旅行時間信頼性」という移動の質の高さを規定する重要な特性を対象に，(1) 旅行時間信頼性向上の経済便益の計測・評価手法の提案と検証，(2)-1 旅行時間の不確実性を考慮した経路誘導アルゴリズムの開発とシステム構築，(2)-2 そのようなインテリジェントな経路誘導システムの社会的普及がネットワーク交通流全体に及ぼす影響の分析に関する研究開発を行う．

２．研究内容

【平成 24 年度】　（a=評価, b=運用に関する研究開発をそれぞれ指す）

a-1．旅行時間信頼性の経済評価に関する国内外の研究及び実務の最新動向についての包括的レビュー
a-2．旅行時間信頼性の貨幣価値原単位を推定するための統合アプローチの開発
a-3．旅行時間信頼性指標の将来予測モデルのプロトタイプの開発
b-1．Reliable Routing に関する国内外の研究及び技術開発の最新動向のレビュー
b-2．旅行時間変動のもとでの遅刻リスク回避型経路誘導アルゴリズム（Hyperpath）の開発と，シミュレーションによる提案手法の妥当性・優位性の確認

【平成 25 年度】

a-4．都市高速道路を対象とした旅行時間信頼性向上の経済便益や時間変動コストの試算
a-5．ネットワークレベルで旅行時間信頼性を効率的に把握・評価するための数理統計学的方法論の開発
b-3．Hyperpath アルゴリズムのクラウドサーバー上での Web Routing システムとしての実装
b-4．Agent ベースの交通流シミュレータープロトタイプの開発と，Hyperpath による経路誘導に従うドライバー普及効果の基礎分析

【平成 26 年度】

a-6．便益評価手法に関するケーススタディの深度化と実務への適用に向けた簡略化の可能性の検討
a-7．旅行時間変動の社会的限界費用についての基礎理論検討
b-5．動的経路誘導アプリケーション “HyperNav”の開発と実走実験による時間信頼性向上効果の確認
b-6．Agent ベースシミュレーターの精緻化と実道路ネットワークにおける Hyperpath 普及の効果分析

３．研究成果

(1) 旅行時間変動の貨幣価値を推定するための統合アプローチを開発した．本手法はミクロ経済学理論に整合した上で，経済便益は標準偏差の減少分によって計測すれば良いため，実用上の容易性も兼ね備えている．都市内高速道路を対象としたケーススタディより，旅行時間変動に起因するコストがドライバーの総コストに比して無視できない大きさ（約二割程度）を占める可能性があることが明らかになった．

(2) 定時性確保の観点から最適な経路を推奨する遅刻リスク回避型経路誘導アルゴリズムを開発した．経路探索スピードの高速化を計った上で，実道路ネットワーク上での利用を念頭に置いて，HP に基づく遅刻リスク回避型経路誘導システムの構築と Android アプリケーションの開発を行った．公道上での実走実験を通じて，従来のものに比べて，新たな経路誘導は旅行時間のばらつきを抑制させる効果，特に大きな遅れ時間の生起確率を有意に低下させる効果があることが明らかにされた．

(3) リスク回避型経路誘導に従うドライバーが徐々に増加した際の社会的影響を評価できる，エージェントベースの動的交通流シミュレーションを開発した．Day-to-Day シミュレーションより，リスク回避型経路誘導に従う車両のシェアが高普及の場合において，全車両の平均旅行時間の平均値と平均旅行時間の標準偏差が共に有意に減少することが確認され，本経路誘導の市場浸透に伴ってネットワーク全体の旅行時間信頼性の向上のみならず，条件次第で速達性向上も期待できることが明らかになった．対象を首都圏一般道ネットワーク全体に拡大してシミュレーションを行った場合でも同様の結果が得られることも確認された．

４．主な発表論文

[1] **Fukuda, D.**, Ma, J., Yamada, K. and Shinkai, N. (forthcoming) Tokyo: Simulating hyperpath-based vehicle navigations and its impact on travel time reliability. In: Horni, A., Nagel, K. and Axhausen, K. (Eds.) *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*, Chapter 78.

[2] Ma, J. and **Fukuda, D.** (forthcoming) A hyperpath-based network generalized extreme-value model for route choice under uncertainties. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.*

[3] Xiao, Y. and **Fukuda, D.** (2015) On the cost of misperceived travel time variability. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol.75, pp.96-112.

[4] Ma, J., Schmöcker, J.-D. and **Fukuda, D.** (2013) Faster hyperpath generating algorithm for vehicle navigation. *Transportmetrica*. Vol.9, pp.925–948.

[5] Fosgerau, M. and **Fukuda, D.** (2012) Valuing travel time variability: Characteristics of the travel time distribution on an urban road. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.24, pp.83–101.

５．今後の展望

旅行時間信頼性向上の経済便益計測手法に関しては，(1) より高い信頼度で貨幣価値原単位を推計するための調査方法の開発，(2) ネットワーク全体の便益計算手法の実用化，(3) 旅行時間信頼性予測モデルの精度向上，(4) 交通量配分モデルとの整合的な統合などといった諸検討が更に必要と考えられる．

旅行時間の不確実性を考慮した経路誘導システムに関しては，(1) 開発した経路誘導アルゴリズムのさらなる高速化を図ること，(2) スマホアプリのユーザーインターフェースを向上させること，(3) フィールド実験のさらなる蓄積を通じて本経路誘導方式が優位性を発揮する場面をより明確にすること，(4) 普及評価のための交通シミュレーターに関して，構築した首都圏規模のシステムを活用して，より望ましい交通管理・運用政策について政策シミュレーションを実施すること，などが残された課題として挙げられる．

６．道路政策の質の向上への寄与

サブテーマ(1)の成果は，道路事業の評価手法の高度化・精緻化に直接的に貢献するものであると考えている．旅行時間信頼性の経済便益は利用者便益全体の二割強を占めるという海外での試算も存在あり，本研究でも同程度の試算結果が得られている．時間に厳格な日本人の国民性を鑑みると，そのシェアはさらに大きくなる可能性もある．さらには，対象を旅客交通のみならず物流交通へと拡張することで，定時性確保に対する全体ニーズは更に大きくなると考えられる．このような中で，本研究開発を通じて考案・検証された統合アプローチに基づく経済便益評価は，旅行時間信頼性の経済便益を適切に計測できる方法論の一つとして，今後便益評価マニュアル等を検討するにあたっての有用な知見の一つとなると考えている．

サブテーマ(2)-1 の成果は，旅行時間が不確実な状況におけるドライバーの最適な経路誘導につながる新たな技術開発がなされる可能性を示唆している．自動車での移動における不満項目として“定時性の低さ”が挙げられることは多く，本研究で開発した HP に基づく経路誘導は，計算負荷が低くドライバーの解釈も容易であるため，適切なクライアントアプリケーションやユーザーインターフェースの開発が進めば実用化の可能性は十分にあるものと考えられる．また，サブテーマ(2)-2 の成果は，HP のようなインテリジェントな経路誘導方式が広く社会に普及することによって社会全体の便益も向上することを確認するものである．今回得られた知見を踏まえてシステムを拡張し，より高精度の需要データや旅行時間データを適用することにより，本研究開発成果が「経路誘導システムをどのような方針で普及させれば道路ネットワーク全体の効率性が向上するのか」を具体的に検討する上での評価ツールとして昇華することが期待される．

７．ホームページ

http://fukudalab.hypernav.mobi/

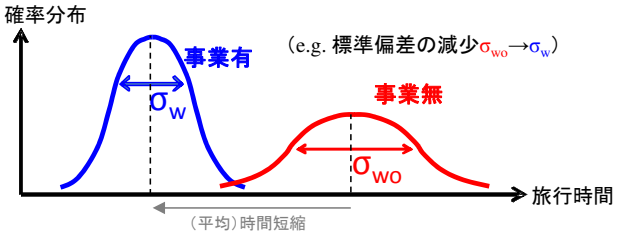
第1章　研究の背景と目的

1.1　背景

道路の旅行時間は安定的なものではなく，時間帯もしくは日によって大きく変動する．特に，普段とは異なる需要変化や，事故・天候変化による道路容量低下などといった，“Non-Recurrent” な要因による旅行時間の変動 (Travel Time Variability: TTV) は，利用者にとって大きなコストとなる．道路整備や料金施策による交通流の円滑化は，平均旅行時間によって測られる速達性の向上のみならず，旅行時間信頼性の向上にも大きく貢献するため，その経済便益を適切に計測して事業評価に導入可能かどうかを検討することが求められている（図–1）．この動きは欧州において近年特に活発化している．

また，普段の道路利用において旅行時間信頼性が重要となる場面として，カーナビゲーションシステム等による目的地までの経路誘導が挙げられる．我が国の道路では，ETC2.0 システム等をはじめとして，様々な観測機器により高い時空間分解能で交通観測を行うことが可能になっており，旅行時間信頼性に関しても，その詳細をネットワークのレベルで把握できるようになりつつある．最近では，Google のような民間ベースのスマートフォン・アプリケーションなどによるポータブルかつリアルタイムな道路混雑情報提供も普及しつつある．これら充実した旅行時間データベースを有効活用して，道路利用者の満足度向上に資するためにも，旅行時間信頼性を考慮した適切な経路誘導システムの開発が期待されている．

これまでの旅行時間信頼性評価の実務では，Buffer Time Index のような供給側の性能水準を示すパフォーマンス指標が多く用いられてきた．しかし，旅行時間信頼性の経済便益を，事業評価，特に，費用便益分析の俎上に乗せるためには，利用者の視点，すなわちミクロ経済学的基礎を有した分析が新たに必要となる．とりわけ，旅行時間変動の貨幣価値換算（Valuation）のための理論構築とその適切な推計方法の提案，ならびに，施策実施に伴う旅行時間信頼性向上の将来予測手法の確立が必要とされている．



図–1 旅行時間信頼性向上便益の概念

一方，経路誘導については，現行の多くのシステムにおいて，静的な最短経路探索ならびにそれを援用した経路途上での Re-Routing アルゴリズムが基礎として用いられている．しかし，旅行時間が変動する状況では，事前（移動開始前）に最短な経路が，事後（移動終了後）にも最短となる保証はない（図–2）．利用者の遅刻リスク許容度や迂回の可能性（多経路）を考慮したリスク回避型動的経路誘導の基礎理論の確立，ならびに，それを応用した経路誘導システムの構築が求められている．さらに，起こりうる近未来の社会を考えたとき，そのような経路誘導システムが多数の車両に搭載・利用された際に，それがネットワーク交通流全体にどのような影響を与えるかについても検討する必要があると考えられる．

1.2　研究開発の目的

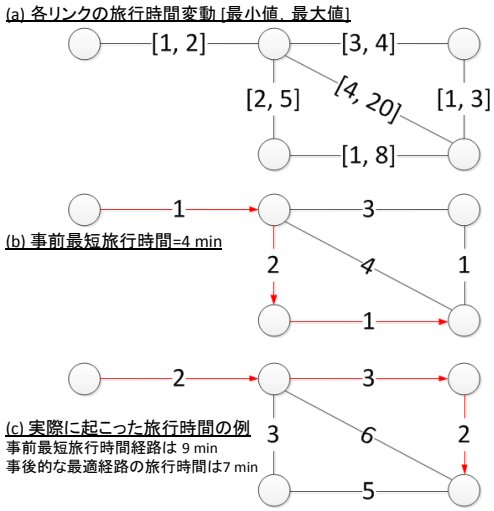
本研究開発は，旅行時間信頼性という，移動の質の高さを規定する重要な特性を対象として，以下の三点に関する研究開発を行うことを目的とする（図–3）．

1. 旅行時間信頼性向上の経済便益の計測・評価手法の提案と検証

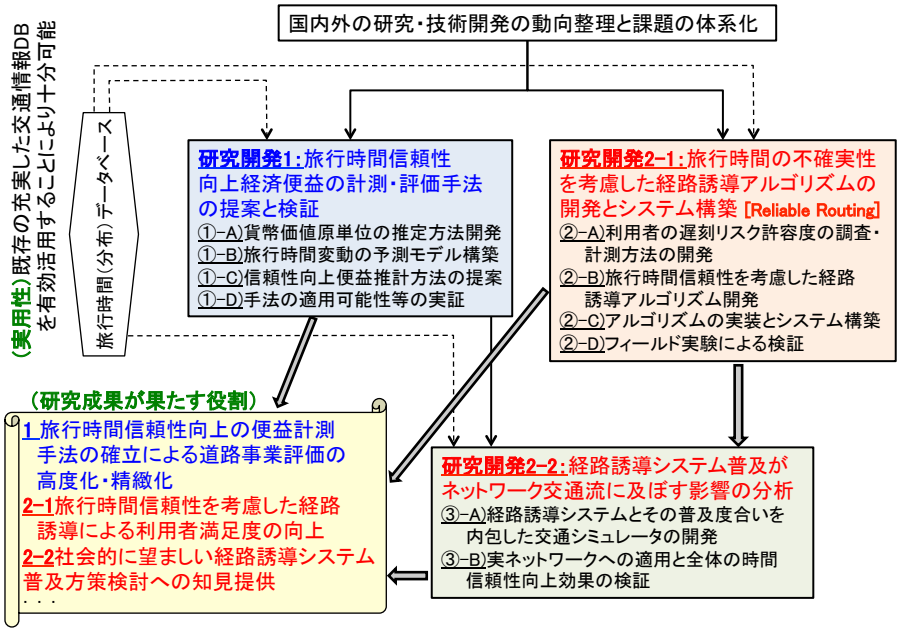
2-1. 旅行時間の不確実性を考慮した経路誘導アルゴリズムの開発とシステム構築

2-2. 経路誘導システムの普及がネットワーク交通流全体に及ぼす影響の分析

これらはいずれも，先述の技術的・方法論的ニーズを踏まえて蓄積された要素技術や方法論のさらなる高度化により実現するものであり，道路の事業評価方法への新たな知見を与えると共に，道路交通運用技術の更なる発展につながるものと期待される．



図–2 旅行時間変動と経路誘導の単純例



図–3 研究の流れ

1.3 期待される成果

先述した三つの研究開発に期待される成果の詳細内容は，それぞれ以下のとおりである．

(1) サブテーマ **1**：旅行時間信頼性向上の経済便益の計測・評価手法の提案と検証

旅行時間信頼性の経済評価に関する国内外の研究動向を整理し，課題を体系的に取りまとめた上で，以下の項目について方法論開発を行う．

- 貨幣価値原単位の調査・推定方法の開発
- 施策実施後の旅行時間変動を予測するモデルの構築
- 経済理論と整合的な旅行時間信頼性向上便益推計方法の提案
- 実際の道路事業等を対象とした提案方法の適用可能性・妥当性の検証

(2) サブテーマ **2-1**：旅行時間の不確実性を考慮した経路誘導アルゴリズムの開発とシステム構築

旅行時間信頼性を考慮した経路誘導に関する国内外の研究並びに技術開発の動向を整理し，課題を体系的に取りまとめた上で，以下の技術開発を行う．

- 旅行時間変動の下での道路利用者の遅刻リスク許容度の調査・計測方法の開発
- 時間信頼性を考慮した経路誘導アルゴリズムの開発
- 経路誘導アルゴリズムの実装とシステム構築
- フィールド実験による提案方法の妥当性の検証

(3) サブテーマ **2-2**：経路誘導システムの普及がネットワーク交通流全体に及ぼす影響の分析

2-1 で開発した経路誘導システムが大多数の車両に搭載される近未来の社会を念頭に，国内外の最新研究動向を踏まえ，経路誘導システムの普及が交通流全体に及ぼす影響を分析する．そのために以下の検討を行う．

- 経路誘導システムの普及とネットワーク交通流との関係を把握するためのシミュレータの開発
- 実ネットワークへの適用とネットワーク全体の信頼性向上効果の検証

すなわちサブテーマ 2-2 では，サブテーマ 2-1 で開発したインテリジェントな経路誘導システムが広く普及した際に，旅行時間信頼性を含めた社会的費用がどのように変化するのかを，サブテーマ 1 で構築した便益評価方法論を援用して検討するものである．

1.4 報告書の構成

第 2 章 ~ 第 6 章はサブテーマ 1 に係る内容である．第 2 章では旅行時間信頼性の経済評価の包括的レビューを行う．第 3 章は本研究で提案する便益評価のための統合アプローチについて詳述し，第 4 章ではそのケーススタディーについて詳述する．第 5 章は一般道路網全体の便益評価方法の試論を詳述する．第 6 章では統合アプローチのパラメータ推定方法について検討する．

第 7 章と第 8 章はサブテーマ 2-1 に係る内容である．第 7 章では本研究で提案する Hyperpath (HP) に基づく遅刻リスク回避型経路誘導方式について詳述する．第 8 章では HP に基づく経路誘導を実ネットワークで可能とするシステム開発について説明した上で，実装実験の結果を詳述する．第 9 章はサブテーマ 2-2 に係る内容で，近未来を念頭に HP 基準に従う車両が広く社会に普及したときに道路網全体の定時性や速達性がどう変化するのかを評価する交通流シミュレーターの開発とそれを用いた分析結果について述べている．

最後に第 10 章では，本研究開発の成果をまとめた上で，それが社会に果たし得る役割について述べている．

第 2 章　旅行時間信頼性の経済評価方法の体系的整理

2.1　用語の整理

本研究では，主に“旅行時間変動”という表現を用いる．これは，「信頼性」という表現が，サービスの故障のような不測で望ましくない（つまり不運な）現象を表わすのに適しているのに対し，本研究では「旅行時間は本質的に変動するものであり，結果的に旅行時間が短くなったとしても，その変動は旅行者にとってコストである」という基本認識に基いているためである[1)]．また，「信頼性」並びに「規則性」は，時刻表と比べた際の変動を計測するために用いることで区別する．特に「信頼性」は出発時刻が明示的に表されているときに用い，「規則性」は運行間隔が明示的に与えられたときに用いるのが適切であると思われる．さらに，時間評価値に関しても，広く使われている「時間価値（Value of Time: VOT）」という表現ではなく，「旅行時間価値（VTT：Value of Travel Time）」という厳密な意味での表記を用いることとする．

以上より，本研究では以下の関連用語を主に用いる．

- 旅行時間（Travel Time）：*TT*
- 旅行時間価値（Value of Travel Time）：*VTT*
- 旅行時間変動（Travel Time Variability）：*TTV*
- 旅行時間変動価値（Value of Travel Time Variability）：*VTTV*

2.2　旅行時間変動の捉え方

旅行時間は，“自由流旅行時間（混雑の無い最少旅行時間: Free-flow travel time）”と，それからの“遅れ（Delay）”とに分解して取り扱われることが多い．しかしこの定義による遅れには，週末と平日の違いや一日の中でのピーク時・オフピーク時の旅行時間の系統的な違いのように，予測可能で不確実性を引き起こさないものも含まれている．そこで旅行者の観点から旅行時間変動を考える場合には，上述の遅れを，観測されたトリップの特性から説明できる“システマティックな遅れ（周期的 [Recurrent] な遅れ）”と，“説明・予測が不可能な遅れ（非周期的 [Non-Recurrent] な遅れ）”とに分けて考えるのが適切である[2),3)]．予測不可能な遅れは，旅行者が知覚できなかった全ての遅れ時間を含んでおり，事故や告知無しの路上工事に起因する交通需要の増減や道路容量の低下等に起因するものである．

実際の分析では，説明不可能な遅れはある確率分布に従う確率変数として表されることが多い．しかし，上述の分離方法については，幾つかの異なる解釈の仕方がある．初期の研究[4),5)] では，これら 3 つの要素は正の値として定義されており，説明不可能な遅れが正の平均値を持つことを示唆している．また，説明不可能な遅れを平均ゼロの確率変数とみなす方が好ましい場合もある[6),7),8)]．すなわち，平均旅行時間は自由流旅行時間と系統的遅れによって表され，説明不可能な遅れは，単純に，平均遅れ周辺の変動を意味することになる．説明不可能な遅れの分布形状は両ケースで同じになるが，統計分布の位置尺度が唯一異なる．

旅行時間変動を考慮した利用者行動のモデル分析では，通常，非周期的遅れが何らかの確率分布に従うと考える．本研究では，旅行時間変動価値の推計を念頭に置いて，“旅行時間変動＝旅行時間の確率変動”と定義する．すなわち，旅行時間変動が“予測不可能遅れの変動”を意味するものと考える．これに対し，自由流旅行時間とシステマティック遅れの偏差については，“システマティック変動”と称することで区別する．

2.3　旅行時間の統計分布

単一の公共交通路線，あるいは，単路道路区間における旅行時間分布の計測は，比較的単純でわかりやすい．多くの研究において，旅行時間分布は正規分布とは有意に異なり，他の分布，例えば，対数正規分布，Burr 分布，安定分布，Skew 正規分布，Skew-t 分布，混合正規分布等により適合度が高いことを見出している[3),8),9),10),11),12),13)]．また，Bates et al.[2)] では，鉄道到着時刻の時刻表からの遅延時間の分布は，一般化ポワソン分布により近いことを見出している．旅行時間は，物理的な限界の存在から旅行時間には下限が存在する一方（最小旅行時間），甚大なインシデントの発生等により，稀ではあるものの非常に大きな旅行時間が生起する場合もある．すなわち旅行時間分布は一般的に，左右非対称で右裾が長い形状となる[6)]．

また，連続する複数の道路区間における各旅行時間分布を，全区間の旅行時間分布に変換することはより複雑な問題となる．このような確率分布の畳込みが可能かどうかを判断するためには，連続した道路区間において各旅行時間の分布がどのように関連しているのかを知る必要がある[14),15),16),17)]．また，公共交通のトリップチェーンでは，わずかな遅れで乗り換えなどができなくなり，さらに大きな遅れにつながってしまうという，さらに複雑な問題を抱えている．従って，バスや鉄道の乗り継ぎに失敗する確率，並びに，乗り遅れによる追加的遅延をモデル化することが必要である[9)]．いずれにしても，旅行時間分布形状の全容を明らかにすることは，大量の交通観測データが得られるようになった現在においても難しい問題であることに変わりはない．こうした中で，近年 Ng et al.[18)] は，確率分布形を仮定せずに N 次までのモーメント統計量のみを用いて旅行時間信頼性指標を構築する方法を提案している．

2.4 旅行時間変動の価値付けに関するモデリングの方法

旅行時間変動を交通行動モデルに組み込む際の代表的なアプローチは，平均－分散アプローチとスケジューリングアプローチに大別される[1),2)]．これら二つのアプローチは，旅行時間変動が旅行者に認識されている状況をどうモデル化するかという点で異なっている．スケジューリングアプローチでは，旅行時間変動は，旅行者自身のスケジュール決定を介して効用に影響を与えると仮定される．すなわち，どれぐらいの頻度で遅れるのか，また，平均的にどのくらいの長さの時間で遅れる（あるいは，早く着く）のかといった視点である．一方，平均–分散アプローチでは，早着遅着にかかわらず，不確実性そのものによって生じる旅行時間変動による旅行者の不便さが直接的にモデル化される．

行動モデルを同定するためには，平均－分散アプローチでは経路選択や交通手段選択，スケジューリングアプローチでは出発時刻選択に関する行動データが必要となる．なお，実際の旅行時間変動と関連付けられた行動データ（RP [Revealed Preference] データ）の取得は一般的に難しく[19),20)]，旅行時間変動価値推計のために必要な行動データは選好意識調査（SP [Stated Preference] 調査）から得られることが多い．

(1) 平均－分散アプローチ

平均－分散アプローチは，旅行者が希望到着時刻に対して早着したか遅着したかにかかわらず，旅行時間の不確実性そのものによって生じる不都合さを直接的に記述したモデルである[3),19),20),21),22),23),24),25),26)]．このアプローチでは旅行者の効用が旅行費用 C，平均旅行時間 ET，旅行時間変動 σ_T に依存すると仮定される．σ_T としては多くの場合標準偏差が用いられるが，タイル値レンジ[20),23),27)] 等も用いられる場合もある．

一般に，効用関数は次式で表わされる．

$$U = \delta C + \zeta ET + \rho \sigma_T \tag{1}$$

ここで δ，ζ，ρ はそれぞれ，料金，旅行時間，旅行時間変動の限界効用である．通常これらは，経路選択行動あるいは交通手段選択行動に関する選択データを用いて推定される．式 (1) に基づけば，計量経済学的に求められた旅行費用と旅行時間変動の各限界不効用の比を単純に取ることによって，$VTTV$ を式 (2) によって推計することができる．

$$VTTV = \frac{\rho}{\delta} \tag{2}$$

この $VTTV$ は，説明変数に社会経済属性を共変量として導入したり，あるいは，ランダム係数モデルによる非観測異質性を導入することにより，その母集団分布を推計することも可能である[27)]．例えば，空港アクセス交通を対象とした定時性を導入した交通手段選択モデルに関する国内研究事例[28),29)] も見られる．また，平均－分散アプローチを公共交通の遅延の問題に拡張した一連の研究[30),31),32)] では，主として長距離鉄道における遅延の社会的費用を，SP データを用いて推定している．

実務，特に大規模な事例では，その分り易さや分析の容易さから，平均－分散アプローチが頻繁に用いられてきた．とりわけ国レベルでの旅行時間変動価値の推計では，オランダ[33)]，ノルウェー[34)]，スウェーデン[35)] のように，平均–分散アプローチが用いられている．特にオランダでは，2009 年に全国規模の SP 調査が実施されており，その分析結果を用いて旅行時間変動の経済便益が費用便益分析のガイドラインに導入される見込みである[33),36),37)]．

モデルの単純さ故に多くの適用事例がある平均–分散アプローチだが，効用関数の引数として平均や標準偏差のような“統計尺度”が含まれることのミクロ経済学的根拠は明らかでない．すなわち，行動論的基礎に立脚したモデルというよりもむしろ，交通システムの供給モデルから得られる旅行時間変動に基づくモデルであると言える．交通経済学では移動を必要悪と仮定し，移動そのものによって効用は生じず，仕事，買い物，訪問などの派生需要と考えることが通常である[38),39)]．この枠組みの元では，不確実性は諸活動の時間配分計画を複雑化することを通じて旅行者の不効用につながる．すなわち旅行時間変動は，旅行時間が予想していたものよりも時には短くなったり，またあるときには長くなるという帰結をもたらし，旅行者の活動計画に影響を与える．これに関連して Bates et al.[2)] は，「旅行時間の不確実性は，何が起こるかわからないことによる不安やストレス，苛立ちにつながり，それが旅行者の不効用になる」と述べている．平均–分散アプローチは，旅行時間の不確実性の適切な尺度が標準偏差であることを仮定したモデルであると解釈することができるが，そのミクロ経済学的基礎を厳密に追求せず，関数形をアドホックに仮定して推定を行なっている場合が多い．

2.5 スケジューリングアプローチ

スケジューリングアプローチは，Noland and Small[4)] による旅行時間が確率的に変動する状況での出発時刻選択モデルが嚆矢とされているが，元々は経済学分野において Small[40)] が提案した旅行時間が確定的に与えられる状況における旅行者の出発時刻選択モデルに基づいている．交通工学分野では，Gaver[41)] がスケジューリングコストの概念を提唱した嚆矢とされており，初期の実証研究も幾つか見られる[42),43)]．これらはいずれも，旅行時間が確定的，すなわち，旅行時間変動が存在しない世界を想定した出発時刻選択モデルであるが，Noland and Small[4)] は，旅行時間変動が旅行者のスケジュール決定に及ぼす影響を分析するためにモデルを

拡張した．

旅行者の効用は，旅行費用 C，旅行時間 T，また，旅行者の希望到着時刻（PAT: Preferred Arrival Time）からどれ位遅着したか（SDL: Schedule Delay Late），あるいは逆にどれ位早着したか（SDE: Schedule Delay Early）に基づいて決定され，出発時刻 t_h の選択を規定すると考える．効用関数は式 (3) で表される．

$$U(t_h) = \delta C + \alpha T + \beta SDE + \gamma SDL + \theta D_L \qquad (3)$$

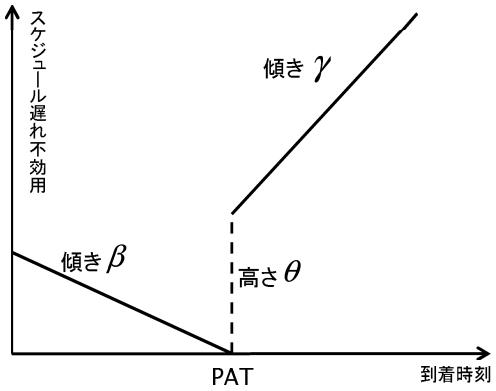
ここで D_L は遅着の場合に 1 となるダミー変数である．α, β, γ はそれぞれ旅行時間，早着，遅着の限界効用であり，また θ は遅着そのもののペナルティである（図–4）．本モデルにおいても，共変量を含めることで旅行者間の異質性を考慮することが可能である[40),44)]．また，スケジューリングに関連する限界効用の大小関係については，多くの実証研究[2),3),25),40),44),45),46),47),48)] において $|\gamma| > |\beta|$ という結果が得られており，遅着の影響の方が早着よりも影響が大きいことが示唆されている．このような早着と遅着に関する不効用の非対称性は，遅着のペナルティ項 θ を導入することで拡大する．

旅行時間がランダムで確率変数と見なせる場合，スケジューリングアプローチは期待効用最大化問題として表される．期待効用は式 (4) のように表される．

$$EU = \delta C + \alpha ET + \beta E(SDE) + \gamma E(SDL) + \theta P_L \qquad (4)$$

ここで $E(\cdot)$ は期待値演算子である．また，P_L は遅着が生じる確率である．

旅行時間変動が一般的な統計分布に従う場合，式 (4) に基づく旅行者の期待効用最大化問題を解析的に解くことはできない．Noland and Small[4)] は，旅行時間変動が出発時刻に依存せずに独立で，かつ，旅行時間変動が一様分布または指数分布に従う場合に解析解が得られることを示した．例えば指数分布を仮定した場合，出発時刻 t_h に関して最大化された期待効用は式 (5) のように表される[2)]．



図–4 $\alpha - \beta - \gamma$ 選好に基づくスケジュールコスト関数

$$EU^* = \delta C + \alpha ET + \theta P_L^* + H(\alpha, \beta, \gamma, \theta, b, \Delta)b \qquad (5)$$

ここで b は旅行時間が従う指数分布の平均（かつ標準偏差）である．$H(\cdot)$ は，出発が単位時間遅れた場合の道路混雑増加率 Δ，並びに，他のパラメータによって規定される定数である．また，P_L^* は最適遅着確率（Optimal Probability of Being Late）と呼ばれ[2)]，ドライバーが最適出発時刻を選択した際に旅行時間の不確実性下で遅着する確率を表わす．これは，旅行時間が指数分布に従う場合には式 (6) で与えられる．

$$P_L^* = \frac{b(\beta - \alpha\Delta)}{\theta + b(\beta + \gamma)} \qquad (6)$$

スケジューリングアプローチに基づいた場合の $VTTV$ は，遅着，早着それぞれに対する限界効用と費用の限界効用の比をとることにより，式 (7) のように二つの異なる値が求められる．

$$VTTV_{SDE} = \frac{\beta}{\delta}, \quad VTTV_{SDL} = \frac{\gamma}{\delta} \qquad (7)$$

2.6 旅行時間変動価値の推計例

先述のとおり，国レベルでの旅行時間変動の価値付けについては，現在のところスウェーデン，ノルウェー，オランダで検討がなされているが，まだ，国のガイドラインとしてオーサライズされた具体的な値としては定まっていない．推定結果の多くは欧米のものであり，紹介した二つのアプローチを個別に用いたり，あるいは統合した推計を行うことによって旅行時間変動価値（$VTTV$）を推計している．ここで各貨幣価値は調査実施年の各通貨の為替レートを用いて日本円に換算している．研究のほとんどが SP データを用いており，$VTTV$ や信頼性比（VTT に対する $VTTV$ の比）の推計値が研究間で大きくばらついていることが指摘されている．

また，旅行時間変動価値は，選択の文脈に大きく依存することが示唆されている．例えば Koster et al.[49)] では，空港アクセス交通における時間信頼性価値の推計をスケジューリングモデルと SP 調査を用いて行なっている．アクセス交通における旅行時間変動に起因する費用はビジネス旅客でコスト全体の 0 ~ 30% である一方，非ビジネス旅客で 0 ~ 25% であり，それらが有意に異なると結論付けている．さらに旅行時間変動価値が出発時間帯に応じて変化することも指摘されている．

2.7 統合アプローチ

(1) 二つのアプローチの関連性

Bates et al.[2)] 並びに Noland and Polak[3)] は，1. 旅行時間変動がパラメータ b を持つ指数分布で表される，2. 旅行時間分布が出発時刻から独立である，3. θ が 0 に等しい，という三つの条件が満足されれば，式 (5) が

式 (8) のように単純化できることを示した．

$$EU^* = \delta C + \alpha ET + \beta \ln\left(\frac{\beta+\gamma}{\beta}\right) b \qquad (8)$$

ここで b は旅行時間が指数分布に従う場合の標準偏差であることから，最大期待効用が平均旅行時間と標準偏差に関して線形となっていることが分かる．すなわち，ある限定的な条件のもとで，スケジューリングアプローチは平均–分散アプローチに帰着する．

しかし，式 (8) を導出するために設けた諸仮定の中でも，確率分布形の仮定の現実的妥当性については多くの実証研究が疑問を投げかけている．すなわち，想定されている指数分布や一様分布は，現実の旅行時間分布とは大きく乖離している．また先述の通り，スケジューリングアプローチと平均–分散アプローチの適合度の比較を行っている幾つかの研究[25),44),45)]では，平均－分散アプローチは旅行時間価値を過大評価し，旅行時間変動価値を過小評価することが示唆されている．

以上より，スケジューリングアプローチは平均–分散アプローチよりも多くの優れた特性を有していると考えられる．しかし，スケジューリングアプローチの実適用に当たっては，各ドライバーの希望到着時刻（PAT）に関する情報の収集が必要であり，一般的にこの作業は容易ではない．また，統計分布の形状や出発時刻への非依存性の仮定についても，先述の通り，現実の旅行時間分布とは大きな乖離が見られる．なお，スケジューリングアプローチでは，$VTTV$ として $E(SDE)$，$E(SDL)$ それぞれの限界価値（式 (7)）が求まる．すなわち，$VTTV$ に相当する複数の限界価値を併用しなければならなくなる．このような理由から，$VTTV$ 推計の実務におけるスケジューリングアプローチの適用例は少なく，多少の理論的厳密さを欠いても，分析の容易さや分かりやすさを優先して，平均–分散アプローチが多く用いられている状況にある．

(2) 統合アプローチ

平均－分散アプローチは，標準偏差等の旅行時間変動尺度を効用関数の引数として含んでいるため，実適用は容易であるが厳密な理論的背景を持たない．一方スケジューリングアプローチは，早着するか遅着するかで効用を規定しており，利用者行動に立脚したより厳密なモデル化である．しかしデータ収集の困難さや旅行時間分布の仮定の妥当性に対する疑問から実用が困難となっている．すなわち旅行時間変動の経済評価に向けては，両アプローチの相互補完が必要となる．

この問題意識に基づき，Fosgerau and Karlström[6)] 並びに Fosgerau and Fukuda[8)] は，統合アプローチによる新たなモデルの提案を近年行った．これは Noland and Small[4)] のアプローチを発展させたもので，スケジューリング・アプローチ型の効用関数から定式化を開始し，任意の旅行時間分布のもとでの旅行者の最大期待効用が平均–分散モデルの形式に帰着することを示したものである．旅行者の希望到着時刻は明示的には現れず，さらに，シンプルな平均－分散型の定式化であることから，実適用も比較的容易となっている．

統合アプローチについては，第 3 章でその概要と適用事例を紹介する．

2.8 おわりに～旅行時間信頼性の便益評価に向けた課題

本章の最後に，プロジェクト評価への実適用に向けて解決すべき課題を整理し，今後の展望をまとめる．

(1) モデリングの拡張

本章でレビューした研究はいずれも，個人の行動モデルを基本とした経路選択，交通手段選択，出発時刻選択等のシンプルな意思決定状況を想定している．実際の旅行者の行動に照らし合わせると，時刻と経路の同時選択等，複合的選択の場面を扱う方がより現実的である（例えば飯田ら[50)]）．また，混雑下における出発時刻に関するボトルネック均衡[51)] を考慮したモデルの構築等も必要となる．例えば Fosgerau[52)] は，道路容量のランダム性を仮定した Arnott et al.[53)] のボトルネック均衡モデルを拡張し，道路容量変動並びに需要変動の限界費用を導出している．また，日々の行動という動的側面を考慮すると，旅行時間が変動する状況における学習プロセス[54),55)] が旅行時間変動の価値付けに及ぼす影響についても分析を行う必要がある．

(2) ネットワーク全体の旅行時間分布特性

分析の範囲をネットワークレベルに拡大した場合に課題となるのが，旅行時間分布の取り扱いである．感知器やプローブ観測技術等の進展とデータの蓄積により旅行時間分布の推計が容易に行えるようになったものの，通常，旅行時間分布はリンク単位での推計にとどまっており，経路や OD レベルでの旅行時間信頼性推計は依然として難しい．旅行時間はリンクを跨いで相関することから，リンク毎の旅行時間の標準偏差を足し合わせて経路全体の旅行時間の標準偏差と見なすことは一般にはできない．加法性を有する正規分布等の統計分布族の適用[56)] も考えられるが，旅行時間分布の経験的特性（e.g., 左右非対称，右裾が長い等）を十分再現できるようなものではない．このように，リンクレベル → 経路レベル →OD レベル → ネットワークレベルでの旅行時間変動の分析へと拡張するにつれて，“変動尺度の非加法性”が実適用上の大きな課題となる．

したがって，旅行時間分布を何らかのパラメトリックな統計分布によって表現することを考える場合，その経験的特性を再現し，かつ，集計化のために好ましい統計学的性質を有していることが望ましい．これに関して，Fosgerau and Fukuda[8)] では，加法性を有した

“安定分布”という統計分布族の適用可能性を示唆しているが，さらなる事例分析を通じて，これが “Stylized Fact”として確立されれば，トリップ単位での *VTTV* 推計の作業が容易になると期待される．

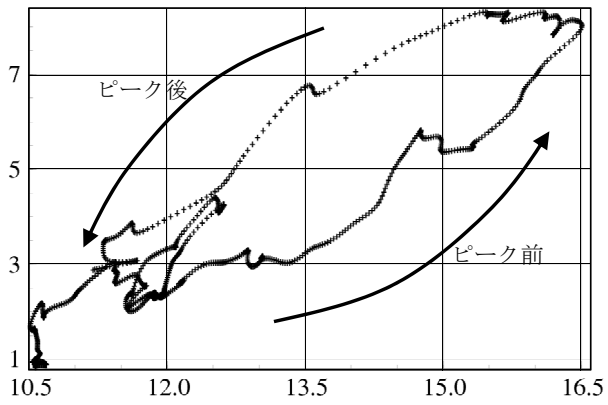
(3) 旅行時間変動の予測手法の開発

交通施策の実施に伴う旅行時間変動の将来変化を予測するためには，旅行時間の日変動や時刻別変動の予測モデル構築が必要である．現時点では既往研究の多くが，被説明変数に標準偏差や変動係数のような旅行時間信頼性指標を，また，説明変数には，道路性能，環境条件，平均旅行時間等を用いた経験式の適用にとどまっている．例えば Eliasson[57] は，ストックホルムの都市内道路のデータを用いて，非線形の予測モデルを構築している．またイギリスの Department for Transport[58] では，指数関数型の特定化も行われている[59]．これらは旅行時間変動の供給関数と呼ぶべきものに最も近いモデルではあるものの，その定式化はアドホックであり，安定性や移転可能性なども検証されていない．その意味でも，旅行時間変動の予測手法は今後さらなる検討がなされるべき課題の一つである．

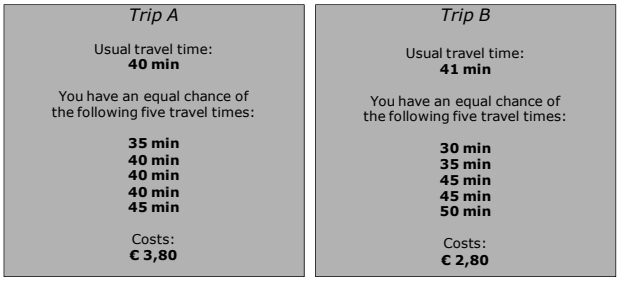
なお，このトピックに関連して，単一道路リンクにおける旅行時間の標準偏差と平均に関しては，多くの実証研究[1),6),8),60),61),62)] において**図–5** のようなループ関係（出発時刻順にプロットすると，逆時計回りのループになる）が概ね共通に観察されている．そのダイナミクスを見ると，まず，交通量が多くなるに連れて平均旅行時間のピークがまず現れる．その後，平均旅行時間は徐々に低下していく一方で遅れて標準偏差のピークが現れている．Fosgerau[63] は，待ち行列理論とイェンセンの不等式を用いて，この現象が生じるメカニズムを理論的に説明した．平均旅行時間は標準偏差に比べて計測や予測が容易であり，これらの間に明確な関係を規定できれば，平均旅行時間から標準偏差を予測できるようになると期待される．

(4) 適切な選好意識調査方法の確立

旅行時間変動価値の推計のためには旅行者の選択行動データが必要となるが，RP データでは変数間の相関が強いことから，SP 調査の適用が基本となるであろう．SP 調査については，旅行時間変動をどのような形式で提示するかによって回答が大きく異なる可能性が従来から指摘されている[2),64)]．例えば，同じ旅行時間分布の情報を数字の羅列として示すのか，それとも棒グラフなどの視覚化を行ってから示すのかによって，回答が有意に異なることが確認されている[65]．例えばオランダでは，念入りなプレ調査を行って何種類ものフォーマットをテストし，最終的に**図–6** に示すようなシンプルな形式を本調査で採用している．ここでは，回答の容易さを優先してスケジューリング属性は除外されている．このように，時間信頼性価値の推計を企図した SP 調査においては，尚一層，分かりやすさに配慮した設計が求められるが，一方でスケジューリング属性は，信頼性価値を推計する上で必須の要素でもある．例えば Devarasetty et al.[66] は，HOT や HOV のような「管理レーン (Managed Lane)」の導入による時間節約・信頼性向上価値の推計を，スケジューリング属性も考慮した上で行っている．SP 調査の適用についての最新のレビューは Li et al.[67] が詳しい．



図–5 延長約 15km の都市内高速道路における平均旅行時間 (横軸：分) と標準偏差 (縦軸：分) の関係[61]



図–6 オランダで採用された SP フォーマット[33]

(5) 経済便益推定におけるデータ収集上の課題

新たな交通プロジェクトにおける旅行時間信頼性向上の経済便益を推計するためには，(1) 旅行時間信頼性指標もしくは旅行時間分布の将来予測，並びに，(2) 旅行時間変動指標の限界的金銭的な価値（旅行時間変動価値）の推計，という 2 つの作業が必須となる．これまでのレビュー結果を踏まえて，旅行時間信頼性指標構築のためデータ収集上の課題を**表–1** に整理する．また，旅行時間変動価値推計のためのデータ収集上の課題を**表–2** に整理する．移動軌跡データ[68] やトラフィックカウンターデータ[69),70)] を行動モデルに適用した研究も行われるようになりつつある．

表–1 旅行時間信頼性指標構築のための代表的なデータ収集方法とその特徴

データのタイプ	特　　徴
トラフィック カウンター	オイラー型交通状態観測方法の代表的なもの．設置地点毎に，通過車両台数・オキュパンシー・スポット速度等を時系列で入手することができる．但し設置地点間の旅行時間については，タイムスライス方等によって推定することで算出する必要がある．個別の車両を特定することはできず，車両やドライバーに依存した系統的影響を除外することはできない．我が国の都市内高速道路では，非常に高密度で感知器が設置されており，旅行時間信頼性についても高い精度で算出することが可能と思われる．一方，都市間高速道路では設置間隔が長くなることから相対的に旅行時間信頼性指標の精度も低下すると考えられる．
カーナビ搭載車両 等から得られる 移動軌跡データ	ラグランジュ型交通状態観測方法の代表的なもの．GPS機器等を搭載したプローブカーによって収集される非常に詳細な各車両の情報であり，基本的に個別車両がある区間を走行する際の時刻や位置情報から当該車両の旅行速度やリンク通過時間（旅行時間）等を算出することができる．リンク単位のみならず，経路や起終点レベルでの旅行時間信頼性指標を算出することも原理的には可能である．但し，プローブデータが充実してきた現在においても，ある旅行者の特定の“トリップ全体”に対する旅行時間変動を十分な精度で把握するために必要なデータ数を確保することは一般に難しい．また，マップマッチング等のデータ処理技術を別途必要とし，旅行時間の推計結果もその処理技術に大きく依存する可能性がある．さらに，地方部におけるプローブカー混入率は依然として低く，旅行時間信頼性指標を高い信頼度で推計することが困難な場合も多々起こり得る．
スマートフォンや 携帯電話端末等 から得られる 移動軌跡データ	GPS機能を持つスマートフォンや携帯電話端末によって得られる移動軌跡に関する記録データ．自動車のみならず，全ての交通機関におけるヒトの移動情報を取り扱うことができる．但し，トリップの目的や利用手段については，外的条件に基づく推測によって規定しなければならない．また，カーナビのデータと同様，トリップ単位での旅行時間変動を十分な精度で把握するために必要なデータ数を確保することは一般に難しい．
ETCデータ	高速道路においてETC車載器を搭載した車両のインターチェンジへの流入時刻と流出時刻の差より，インターチェンジ間の旅行時間を流入時刻別に求めることが可能．極めて大量のデータであり，十分な精度で旅行時間信頼性指標を求めることができるものと期待される．個々の車両の系統的特徴を捉えることも可能である．但し，途中の高速道路サービスエリア等における立ち寄り行動等を把握することは一般的に難しい．また，一部のフリーフローアンテナ設置区間等を除いて，当該インターチェンジ間に代替経路が存在する場合にどの経路を実際に選択したのかを判別することが難しい．
ナンバープレート 認識データ	路上に設置された高精度カメラ等に各車両のナンバープレートを認識し，各設置地点間での撮影時間差より各車両の旅行時間を求めることが可能である．ナンバープレートの画像認識技術は年々向上しており，観測数も非常に多いことから高い精度で旅行時間信頼性指標を推計することが可能であると考えられる．但し，カメラの設置された箇所は限られており，道路ネットワーク全体をカバーできるような状況にはまだ至っていない．

表–2 旅行時間変動価値推計のための代表的なデータ収集方法とその特徴

データのタイプ	特　　徴
選好表明データ （SPデータ）	旅行時間が変動する仮想的な状況を被験者に提示し，複数のプロファイル間で比較を行わせて選択データ，順序付けデータ，評点データ等のSPデータを取得する方法．旅行時間，旅行時間変動，費用等に関する設定を完全に統制することが可能であり，旅行時間・旅行時間変動・費用・スケジューリング属性間のトレードオフ関係を適切に考慮することができる．しかし，選択実験の繰り返しにより被験者に飽きが生じる可能性が従来指摘されている．加えて，旅行時間変動に関する選択実験の場合，変動をどのような「形式（フォーマット）」によって被験者に提示するのかによって，推定結果が有意に異なることが指摘されており，調査票の表現には細心の注意を必要とする．
顕示選好データ （RPデータ）	個々のドライバー等の実際の交通行動に基づいて作成したデータ．スケジューリングモデルの場合にはドライバーの実際の出発時刻と希望到着時刻の情報を原則として必要とする．但し，各旅行者の旅行時間変動の説明変数をどのように設定するのかを検討することが難しい．そのため，実際の行動データに加えて旅行時間データを併用することが必須となる．例えば，Small et al. (2005) ではRPデータを用いた経路選択モデル（HOVレーン v.s. ノーマルレーン）が構築されているが，旅行時間変動属性（95%タイル値）については，実際に当該道路を日々繰り返して走行した実験車両から得られた旅行時間データを用い，分位点回帰によって流入時刻別の旅行時間95%タイル値を推定し，当該ドライバーの流入時刻とマッチングさせることにより，経路選択モデル推定用の旅行時間信頼性指標を利用者毎に作成している．
移動軌跡データ	プローブ車両やスマートフォンより得られた移動軌跡データを出発時刻選択や経路選択に関するRPデータと見立てて選択モデルを構築・推定する方法．先述のRPデータの場合と同様，モデル推定用の旅行時間信頼性指標を利用者毎に設定することが難しい．小規模な実験としての検討例（Carrion and Levinson (2013) など）が報告されているにとどまっている．
トラフィック カウンターデータ	トラフィックカウンターを用いた長期間の観測データを用い，個々の車両ではなく，交通量に対する「集計モデル」を構築することにより，旅行時間変動価値を求めることができる場合がある．代表的な例として，Liu et al. (2004)，Liu et al. (2007) では，一般レーンかHOV（High Occupancy Vehicle）レーンかの選択場面において，Loop Detectorデータから得られた集計交通量を用いた旅行時間信頼性価値の推計方法を提案している．価格やサービス水準が異なる並走する経路が存在する場合など，適用できる状況は限られているが，実際の集計的な行動データに基づいた推定であり，分析結果に対する信頼性は高いものと期待される．

第3章　旅行時間変動に起因するドライバーの移動コストの試算

3.1 はじめに

本章では，旅行時間の不確実性下でのドライバーのスケジューリングモデルに基づいて，旅行時間変動に起因するドライバーのコストを算出する方法を提示し，実際に試算をおこなう．施策前後におけるドライバーのコストを差を求めることができれば，それがそのまま旅行時間信頼性向上の経済便益となることから，旅行時間変動に起因するドライバーのコストを適切にモデル化することがまずは重要となる．そのためには，旅行時間変動指標の限界的金銭的な価値（旅行時間変動価値）をどのように定義し，どのように推計すればよいのかを定めなければならない．この“価値付け（Valuation）”については，従来より平均–分散アプローチに基づいた行動モデルが適用されてきたが[21),71)]，その理論的基礎は必ずしも明確ではなかった．

今回用いるのは，Fosgerau and Karlström[6)]・Fosgerau and Fukuda[8)] において提案された“統合アプローチ”である．旅行時間の変動に対するドライバーの反応として最も考えられるものは，余裕時間を持って出発時刻をシフトするというスケジューリングに関する意思決定である．すなわち，経済便益を計測するためにはミクロ経済学の考え方と整合するようにドライバーのコストを定義する必要がある．統合アプローチでは，スケジューリング・アプローチに基づいてドライバーの出発時刻選択行動をモデル化し，ドライバーの最適化行動の帰結として得られる最小期待不効用関数が平均－分散モデルとなることが示されている．このような考え方は，Noland and Small[4)] によって提案されていたが，Fosgerau and Karlström[6)]・Fosgerau and Fukuda[8)] はそれをさらに一般化し，任意の旅行時間分布のもとでドライバーのコスト関数を導出することができるようにしたものである．得られるコスト関数の形状は平均－分散モデルと同一であり，さらに，スケジューリングモデルを推定する上でのドライバーの希望到着時刻に関する情報を必ずしも必要とせず，実務への適用も容易であるという特徴を持っている．

3.2 トリップスケジューリングモデル

(1) ドライバーの不効用関数

日々の通勤で単一リンクの道路を利用するドライバー（経路選択は考えず，出発時刻選択のみを行う）を考える．このとき，一般性を失うことなく，ドライバーの目的地希望到着時刻を $PAT = 0$ と仮定する．道路の旅行時間は Day-to-Day で確率的に変動し，ドライバーはその不確実性下で出発時刻の決定を行う．その際，ドライバーは当該リンクの旅行時間分布について既知であると仮定する．

次に，通勤交通に伴うドライバーのコストを考える．ここでは，ドライバーが被る不効用が「旅行時間が変動する事を見越して早く出発する早発不効用（Departing Early）」，「希望到着時刻よりも遅く到着する遅着不効用（Scheduling Delay Late）」，「旅行時間の長さによる不効用（Travel Time）」の 3 つの要素で構成されるものとする[1]．これらのスケジューリングコストに関する線形性を仮定し，実旅行時間を T，ドライバーの出発時刻を $-D(D > 0)$ とすると，ドライバーの総不効用関数は次式で表わされる．

$$C(D,T) = \eta D + \lambda (T-D)^+ + \omega T \tag{9}$$

$$\text{ただし } (T-D)^+ = \begin{cases} T-D & \text{if } T-D \geq 0 \\ 0 & \text{if } T-D < 0 \end{cases}$$

ここで，η, λ, ω は不効用関数（コスト関数）を構成する各不効用要因の相対的重要度を規定する非負のパラメータである．第一項 ηD が早発不効用を，第二項 $\lambda(T-D)^+$ が遅着不効用を，第三項 ωT が移動の不効用を表している．なお，式 (9) を見ると明らかな通り，ここでは簡略化のため費用の項を含んでいない．実際に旅行時間価値や旅行時間変動価値を推計する際には，費用に対する各スケジューリングコストの限界代替率を求める必要があるが，それは，実際の推計の際に容易に導入可能である．

出発時刻選択に関する代表的な既往研究[4),40)] とこの定式化との相違点は，早着不効用の代わりに早発不効用を導入している点にある．しかしながらこれらのモデルは，リ・パラメトライズすることで本モデルに等価になることが分かっている[2]．

(2) 旅行時間分布の設定

旅行時間信頼性について考えるにあたり，旅行時間 T は日々変動する確率変数と見なす．その T が従う旅行時間分布の表現としては様々なものが考えられるが，統合アプローチにおいては，下記のような位置－尺度（Location-Scale）型の表記を用いて表現される．

$$T = \mu + \sigma X$$

ここで，μ,σ はそれぞれ旅行時間分布の位置及び尺度を規定する滑らかな未知関数である．本研究では，μ を平均旅行時間，また，σ を旅行時間の標準偏差によって与える．このとき，確率変数 X の平均は 0，分散は 1 と

[1] 典型的な出発時刻選択モデルでは早発不効用の代わりに，希望到着時刻よりも早く到着することによる不効用（Schedule Delay Early）が適用されることが多いが，後述の通り両者は表裏一体の関係にある

[2] 具体的には，$\eta = \beta$, $\omega = \alpha - \beta$, $\lambda = \beta + \gamma$ というように，$\alpha-\beta-\gamma$ 系と $\eta-\lambda-\omega$ 系の各選好パラメータ表現の間には一対一の関係が成り立ち[1)]，両者は数理的には等価である．

なり，これを “基準化旅行時間（Standardized Travel Time）”と称する．さらに，X の確率密度関数を ϕ，分布関数を Φ とする．すなわち，旅行時間の変動を表現するにあたり，T の代わりに X に着目する点が統合アプローチの特徴である．

(3) ドライバーの最適出発時刻選択行動

ドライバーは旅行時間の変動を考慮して期待効用最大化原理（期待不効用最小化原理）に従って出発時刻を選択する．旅行時間 T が確率的に変動することを考慮し，式 (10) で表される期待不効用を最小化するように出発時刻 $-D$ を選択するものとする．

$$\begin{aligned} EC^* &= \min_D EC(D,T) \\ &= \min_D \left[\eta D + \lambda \int_{\frac{D-\mu}{\sigma}}^{\infty} (\mu + \sigma x - D)\phi(x)\mathrm{d}x + \omega\mu \right] \end{aligned} \tag{10}$$

この関数の凹性は確認されていることから[6]，最適化問題 (10) は唯一解を持つ．一階条件は次式で与えられる．

$$\Phi\left(\frac{D^* - \mu}{\sigma}\right) = 1 - \frac{\eta}{\lambda} \tag{11}$$

この式 (11) を書き改めると，最適ヘッドスタート（最適出発時刻の負値）D^* が求まる．

$$D^* = \mu + \sigma\Phi^{-1}\left(1 - \frac{\eta}{\lambda}\right) \tag{12}$$

式 (9) に示されているドライバーの不効用関数は，既往研究[40] と同様に PAT を境として折れ曲がった形状となるものの，最適ヘッドスタート (式 (12)) は，μ と σ に関して線形となっていることが分かる．ここで，式 (12) の右辺第一項は平均旅行時間を表す．また第二項は基準化旅行時間分布の $\left(1 - \frac{\eta}{\lambda}\right) \times 100$ パーセンタイル値に旅行時間の標準偏差を乗じたものとなっている．すなわち，期待効用理論に従う合理的なドライバーは，第二項によって表される時間の余裕を見込んで自身の出発時刻を決定していることになる[3]．

式 (12) の右辺第二項の引数である $\frac{\eta}{\lambda}$ は “最適遅着確率”(ドライバーが最適化行動をとった際に遅着する確率) と呼ばれる[2]．旅行時間が変動するもとでは，時として旅行時間が大きくなることによって希望到着時刻よりも到着が遅くなる状況が生じる．期待効用を最大化するという意味において最適な出発時刻選択を行っているドライバーは，そのような遅着の生じる可能性を許容しなければならないが，最適値着確率はその許容の度合を直接的に表すものである．例えば，最適値着確率が 0.05 のドライバーは，式 (12) で与えられる最適出発時刻に毎日通勤を開始続けたとしても，20 回に 1 回の割合で遅刻することを許容していることとなる．

[3] これは，交通工学の研究者らによる初期の出発時刻選択研究で提唱された “Safety Margin[72]” もしくは “Effective Travel Time[73]” と同一の概念である．

以上の関係を図示すると図–7 のようになる．横軸は基準化旅行時間を，縦軸は累積確率を表し，累積密度関数 $\Phi(x)$ が描かれている．基準化旅行時間はその性質上正負両方の値を取りうることから横軸にはマイナス側も含まれている．この図に即して式 (11) を解釈すると，「合理的なドライバーは，希望到着時刻よりも遅着しない確率が $1 - \frac{\eta}{\lambda}$ となるように，基準化旅行時間軸上において最適出発時刻 $X^* \equiv \frac{D^* - \mu}{\sigma}$ を選択している」ということになる．すなわち，合理的なドライバーは，自身が予定希望到着時刻よりも遅着する確率を $\frac{\eta}{\lambda}$ と見込んだ上で出発時刻選択を行なっているため，確率 $1 - \frac{\eta}{\lambda}$ に対応する基準化旅行時間軸上のパーセンタイル値が $\frac{D^* - \mu}{\sigma}$，すなわち，基準化旅行時間軸上で見た最適ヘッドスタートに等しくなる．

以上をまとめると，統合アプローチにおいては，

- 最適遅着確率（最適な出発時刻選択を行っても予定希望到着時刻より遅着してしまう確率）：$\frac{\eta}{\lambda}$
- ドライバーの最適な見込旅行時間：(平均旅行時間) ＋ (旅行時間の標準偏差) × (基準化旅行時間分布の $\left(1 - \frac{\eta}{\lambda}\right) \times 100$ パーセンタイル値)

という想定がなされているということになる．

3.3 旅行時間信頼性価値とドライバーコストの導出

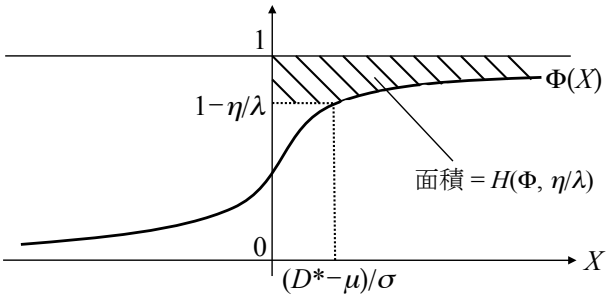
次に，最適ヘッドスタート (式 (12)) をドライバーの不効用関数 (式 (10)) に代入して，最小化された期待コスト関数（期待間接不効用関数）を導出する．簡単な計算により，期待コスト関数は式 (13) で与えられる．

$$EC^* = (\eta + \omega)\mu + \lambda H\left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda}\right)\sigma \tag{13}$$

ここで，$H(\cdot)$ は以下の式によって定義される定数（H 指数）である．

$$H\left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda}\right) = \int_{1-\frac{\eta}{\lambda}}^{1} \Phi^{-1}(\nu)\mathrm{d}\nu \tag{14}$$

H 指数は，ドライバーの選好 (η, λ) 及び基準化旅行時間分布 (Φ) に依存する関数であり，図–7 に示した斜線部分の面積に相当する．式 (14) の定義より，H 指数は「最



図–7 最適遅着確率・最適ヘッドスタート・H 指数

適な出発時刻に従って日々交通を繰り返すドライバーが予定到着時刻より遅れる場合の平均的な遅延時間を，基準化旅行時間の尺度で測った値」と解釈することができる[4]．

さて，式 (13) の第一項 $(\eta+\omega)\mu$ は，平均旅行時間 μ の絶対的な大きさに起因する移動のコストを表わしている．すなわち，その限界費用である $\frac{\partial EC^*}{\partial \mu}=\eta+\omega$ は，節約時間価値 (Value of Travel Time: VTT) に相当する[5]．一方，第二項 $\lambda H\left(\Phi,\frac{\eta}{\lambda}\right)\sigma$ は旅行時間の変動によるドライバーの不効用であり，その限界費用である $\frac{\partial EC^*}{\partial \sigma}=\lambda H\left(\Phi,\frac{\eta}{\lambda}\right)$ は旅行時間信頼性価値 (Value of Travel Time Variability: $VTTV$) に相当する．

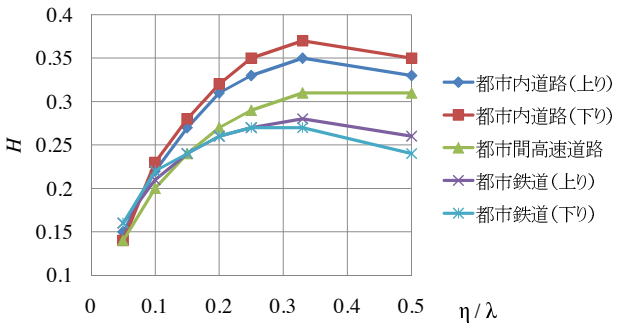
式 (13) を見ると，期待コストが平均旅行時間 μ と標準偏差 σ の線形和となっていることが分かる．すなわち，統合アプローチによるドライバーのコスト関数は，平均－分散モデルのシンプルな形式をとる．

3.4 H 指数の性質

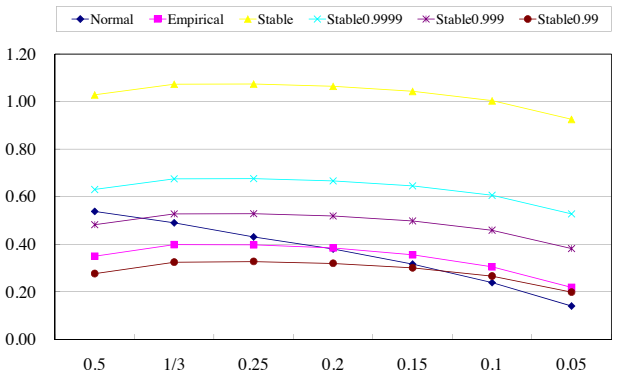
旅行時間信頼性価値が $\lambda H\left(\Phi,\frac{\eta}{\lambda}\right)$ によって与えられることからも明らかなように，統合アプローチを用いた旅行時間信頼性の経済評価においては，H 指数がどのような値をとるのかが決定的な役割を果たす．この H は，ドライバーのスケジューリング選好特性（パラメータ：η，λ）のみならず，当該道路における旅行時間分布の特性（すなわち，基準化旅行時間分布関数 Φ）に依存する．したがって，様々な状況における旅行時間分布の特性を理解し，H 指数がどのような値を取り得るのかをあらかじめ認識しておくことが重要である．

図–8 には，デンマークで長期間に渡って観測された各交通サービス（都市内道路上下方向，都市間高速道路，都市鉄道上下方向）の旅行時間データを用いて，それぞれの基準化旅行時間分布 Φ を推計し，異なる最適遅着確率 η/λ の各値に対して H 指数を試算した結果が示されている[1)]．交通サービス間での相違はあるものの，値の大小傾向は概ね似通っていることが分かる．

また，式 (14) の定義式からも明らかなように，H 指数の値の大小を規定する決定的な要因は，当該基準化旅行時間分布の右裾部分の形状である．一般に，右裾部分の厚みが増す（Right fat tailed）程，H 指数の値は大きくなると考えられるが，現実の旅行時間分布も，頻度は少いながらも稀に生じる重大インシデントにより非常に長い旅行時間が生じる場合がある．**図–9** は，Fosgerau and Fukuda[8)] による様々な統計分布を対象とした H 指数の試算結果である．実際の基準化旅行時間分布 (Empirical) に対する H 指数の計算値に加え，標準正規分布 (Normal), 右裾が正規分布よりも厚くロングテール現象を表現可能な安定分布 (Stable Distribution[74)]) を想定した時の H 指数の計算値も示されている．右裾の値の切断を何通りかの基準で切断した安定分布の H 指数の値からも明らかなように，現実的な旅行時間分布を仮定しなければ旅行時間変動価値に大きなバイアスが生じる可能性が示唆される．



図–8 最適遅着確率と H 指数関係（事例別）



（横軸：最適遅着確率，縦軸：H 指数，基準化旅行時間分布は，Normal-標準正規分布，Empirical-経験分布，Stable-安定分布，Stable0.9999，Stable0.999，Stable0.99-各パーセンタイル値での切断安定分布 をそれぞれ仮定）

図–9 基準化旅行時間分布の設定と H 指数の関係

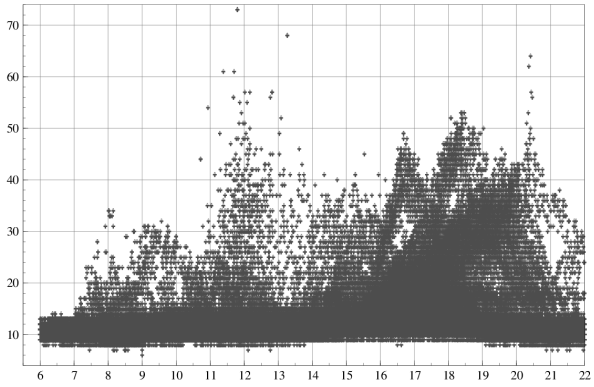
3.5 ドライバーの移動コストの試算

(1) データの概要

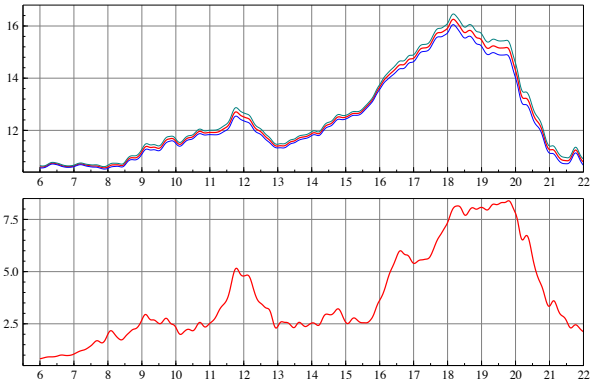
東名高速道路の厚木 IC から流入し横浜町田 IC から流出する ETC 搭載車両から得られた IC 間旅行時間の車両単位データを用いる．このデータは，2007 年 7 月 18 日~9 月 30 日間の休日（お盆含む）を除いた平日 6:00~22:00 に流入した普通車両のものである．海老名 SA に立ち寄っていると考えられるデータ等を除外した結果，用いるサンプルは全部で 256,753 となった（**図–10**）．

[4] Franklin and Karlström[62)] では，これを “Mean Latensss Factor” と称している

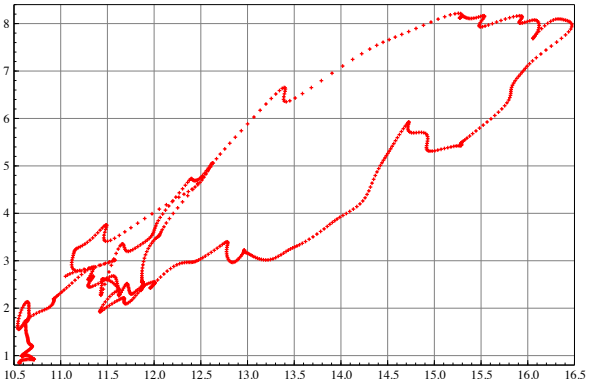
[5] より正確には，$\eta+\omega$ を移動費用の限界費用で除したものが節約時間価値に相当する．コスト関数に移動費用項が含まれていれば，貨幣価値を導出することもできる．



図–10 ETC から得られた流入時刻別旅行時間データ（横軸：各車両の厚木 IC 流入時刻，縦軸：横浜町田 IC 流出までの旅行時間 (分)）



図–11 旅行時間の平均 (上段，含む 95%信頼区間) と標準偏差 (下段) の推定結果



図–12 旅行時間の平均 (横軸) と標準偏差 (縦軸) の相関関係［単位：両軸とも分］

(2)　平均旅行時間及び標準偏差の推計結果

まず，出発時刻別の平均旅行時間と旅行時間標準偏差をノンパラメトリック・カーネル回帰分析[75] によって求めた結果を図–11 に示す．図の横軸は流入時刻 (時)，縦軸は旅行時間 (分) を表している．朝の時間帯よりも夕方時間帯における平均旅行時間が大きくなっており，朝の都心方向ラッシュよりも夕方の都心方面に向かう交通量が卓越していることが伺える．また，正午付近にも小さなピークが存在していることが読み取れる．一方，旅行時間の標準偏差を見ると，平均旅行時間とほぼ連動して同様の動きで増減していることが分かる．

以上の知見は，横軸に時刻別の平均旅行時間を，縦軸に旅行時間の標準偏差をプロットした図–12 からも明らかである．平均旅行時間が大きいときには旅行時間の変動 (標準偏差) も大きくなり，逆に，旅行時間が小さい時には時間は安定している (i.e. 標準偏差が小さい) ということが示唆される結果であるが，このようなループ関係（出発時刻順に平均旅行時間と旅行時間の標準偏差をプロットすると，逆時計回りのループになる）は，道路交通に限らず，都市鉄道の遅延においても確認されている．すなわち，交通量が多くなるにつれて最初に平均旅行時間のピークがまず現れる．その後，平均旅行時間は徐々に低下していく一方で遅れて標準偏差のピークが現れるような現象である．Fosgerau[63] は，待ち行列理論とイェンセンの不等式を用いて，この現象が生じるメカニズムを理論的に説明している．

(3)　ドライバーの移動コストの試算

式 (13) より，ドライバーのコストは次式で表される．

$$TC = VTT \times \mu + VTT \times RR \times \sigma \qquad (15)$$

ここで，RR は節約時間価値に対する時間信頼性価値の相対比 (Reliability Ratio) であり，次式で定義される．

$$RR := \frac{VTTV}{VTT} = \frac{\lambda}{\eta + \omega} H\left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda}\right) \qquad (16)$$

すなわち，ドライバーの移動コストを計算するためには，平均旅行時間 μ，旅行時間の標準偏差 σ，節約時間価値 VTT，並びに，信頼性比 RR を規定すれば良い．このうち，平均旅行時間と旅行時間の標準偏差については流入時刻ごとの推計値（図–11）が既に得られており，実際の施策において便益を計算するような場合には，それらの将来予測値を用いれば良い．また，節約時間価値は，国のガイドライン値[76] 等を暫定的に用いることが考えられる．一方，信頼性比 RR を求めるためには，ドライバーのスケジューリングパラメータ η, λ 並びに基準化旅行時間分布 Φ が必要となる．このうち，基準化旅行時間分布は得られた結果を用いれば良いが，スケジューリングパラメータについては，出発時刻選択モデル等の推計結果を援用する必要がある．

スケジューリング・パラメータの値に関しては，国内における妥当な推計事例が存在しないため，代表的研究である Small[40] より，$(\eta, \lambda, \omega) = (1, 1, 5)$ という値を援用する．これらを式 (16) に代入し，旅行時間データから推定された基準化所要時間分布を用いて RR を算出すると約 0.97 となった．すなわち，旅行時間標準偏差が単位削減することに対してドライバーが持つ支払意志額は，平均旅行時間が単位削減することに対する支払意志額とほぼ同程度であることが示唆される．

この信頼性比算定値と道路事業の費用便益分析マニュアル[76] における VTT の設定値 (=62.86 円/分/台) を式 (15) に適用し，流入時刻別にドライバーの総コストを試算した結果を図–13 に示す．旅行時間の不確実性に起因するコスト（赤）は旅行時間に起因するコスト（青）に比べて小さいが，おおよそどの時間帯において 1~2.5 割程度のシェアを占めていることが確認される．これは，ロンドン[77]，ストックホルム[78] の混雑料金の事後的費用便益分析の試算結果と同程度の値である．

3.6 統合アプローチの妥当性・展開可能性

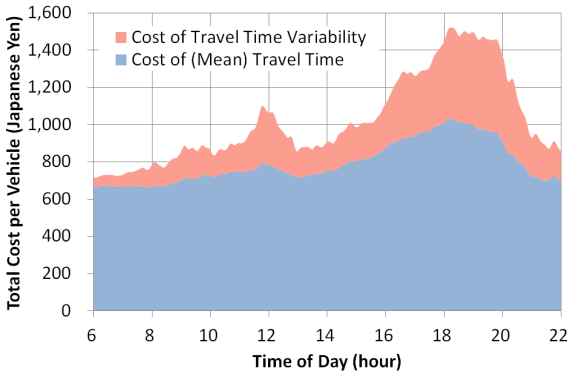
改めて，本章で概説した統合アプローチの特徴を以下のように整理する．

(1) ミクロ経済理論との整合性と解析の容易性の確保

平均–分散アプローチに基づく不効用関数は，実際の旅行時間等を明示的に引数として考慮したものではない．これに対しスケジューリングアプローチは，期待効用理論の枠組みで旅行時間変動を明示的に考慮した出発時刻選択行動のモデル化を行なっている．経済理論との整合性も確保されつつ，経済便益は標準偏差の減少分によって計測すれば良く，実用性も高い．

(2) 一般的な旅行時間分布に対する適用可能性

既存研究の多くは，正規分布のような扱いが容易な統計分布の利用を前提に理論展開がなされている場合がほとんどであるのに対し，統合アプローチでは任意の旅行時間分布を適用することが可能となっている．実際の旅行時間分布は正規分布とは大きく異なる形状を有しており，現実的な旅行時間分布を仮定しなければ旅行時間変動価値に大きなバイアスが生じてしまう可能性がある．統合アプローチでは，現実の旅行分布に近い適切な分布を用いて旅行時間変動価値や便益を算出することが可能である．



図–13 流入時刻別に見た車両一台当たりの総コスト (青：平均旅行時間，赤：標準偏差)

(3) 経路レベルでの旅行時間信頼性評価への拡張可能性

統合アプローチも含めた従来研究のほとんどは，旅行時間データの蓄積を容易に行うことが可能な道路リンク単位での分析を念頭に置いたものである．しかし旅行時間信頼性は，本来的には旅行者のトリップ“全体”に対して定義されなければならなず，経路単位での分析への展開が必須である．そのためには旅行時間変動尺度や確率分布をリンクを跨いで足しあわせ，経路レベルでの旅行時間信頼性指標や旅行時間分布を構築する必要があるが，残念ながらそのような加法性の性質は単純な設定（独立な正規分布等）を前提としてのみ成り立つものであり，現実の旅行時間分布特性とは大きく乖離する可能性がある．これに対し，統合アプローチをさらに一般化したアプローチが近年提案されている[7),17)]．これらの研究では，Vickrey[79] によるより一般的なスケジュールコスト関数を仮定し，その特殊ケースとして統合アプローチを包含するような一般化がなされている．特に重要なことに，得られた旅行時間変動価値はスケジューリングパラメータのみに依存するため，経路レベルへの拡張が容易に可能となる．

3.7 おわりに

本章では，新たに提案した統合アプローチに基づく旅行時間信頼性の経済便益評価方法の実証的検討を行った．我が国の都市間高速道路より得られた大量の ETC データを用いて，旅行時間変動を考慮したドライバーのコストを試算した．その結果，旅行時間変動に起因するコストが，ドライバーの総コストに比して無視できない大きさ（2 割程度）を占める可能性があることが示唆された．

今後は，コストの計算にとどまらず，施策前後におけるコスト変化の試算を行い，便益の計測にまで展開させる必要がある．また，得られたスケジューリングパラメータや，基準化旅行時間分布の妥当性や普遍性についてもさらなる考察・検討が必要である．

第 4 章　旅行時間信頼性経済便益評価のケーススタディ

本章では，統合アプローチの実用化に向けて，その特徴や改善すべき点等を明らかにするべく，都市高速道路プロジェクトを対象としたケーススタディを行う．

4.1　プロジェクトの概要

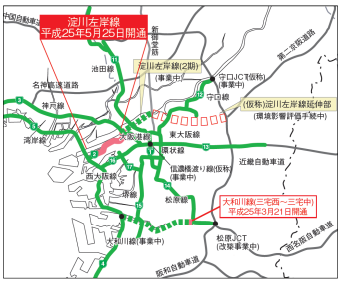
本章では，阪神高速道路の 2 号淀川左岸線一期事業（図–14）を対象とした検討を行う．この事業は，昭和 62 年度に工事着手された，大阪市此花区島屋から同区高見までの 4.3km の区間であり，平成 25 年 5 月 25 日に開業した．今回の開通により，約 60km に及ぶ大阪都市再生環状道路の一翼を担う淀川左岸線の一期区間が完成し，3 号神戸線と 5 号湾岸線が直接つながることによる阪神高速道路の利便性向上が期待されている（http://www.hanshin-exp.co.jp/topics2/1361351355F.pdf）．本線の設計速度は 60km/h，本線部の車線数は上下線各 2 車線となっている．事業費については，まだ未開業の二期事業分を含めた淀川左岸線全体の額として 4915 億円となるということが 2011 時点の事業評価委員会資料において報告されている（http://www.hanshin-exp.co.jp/company/kigyou/evaluation/2011-1216-1313.pdf）．

4.2　便益評価の範囲

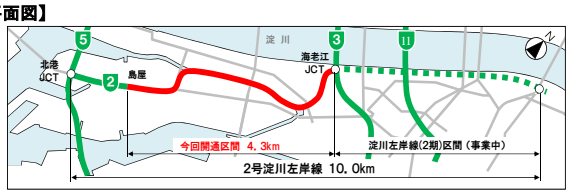
本事業が強く影響を及ぼすと考えられる特定の OD ペアの交通に対象を絞って便益評価の範囲を定めることとする．本事業はあくまでも 2 号淀川左岸線事業の一部区間であり，本事業施行によって有意な影響を被ると考えられるのは，主に，神戸ー大阪方面の移動トリップである．具体的には，神戸から大阪南部への移動において，従前には，神戸線 → 環状線 → 湾岸線という経路をとっていたトリップが，事業施行に伴い，神戸線 → 淀川左岸線 → 湾岸線というショートカットが発生することにより，大きな時間短縮便益が図られるものと思われる．それに伴って旅行時間信頼性の向上も図られるものと考えられる．また，これと競合する神戸線 →(摩耶 → 住吉浜)→ 湾岸線という経路や，神戸線 →(京橋 → 住吉浜)→ 湾岸線という経路も当該事業の影響を受けると思われる．

そこで，図–15 に示した A，B，C の三つの経路を対象とした便益評価を行う．なお，本研究の便益試算は，費用便益分析で通常行われる with-without 分析ではなく，開業前後の交通データを用いた before-after 分析であることに予め留意されたい．

【位置図】



【平面図】



図–14 阪神高速道路の 2 号淀川左岸線一期区間
（出典：http://www.hanshin-exp.co.jp/topics2/1361351355F.pdf）

4.3　旅行時間信頼性評価に用いる交通データ

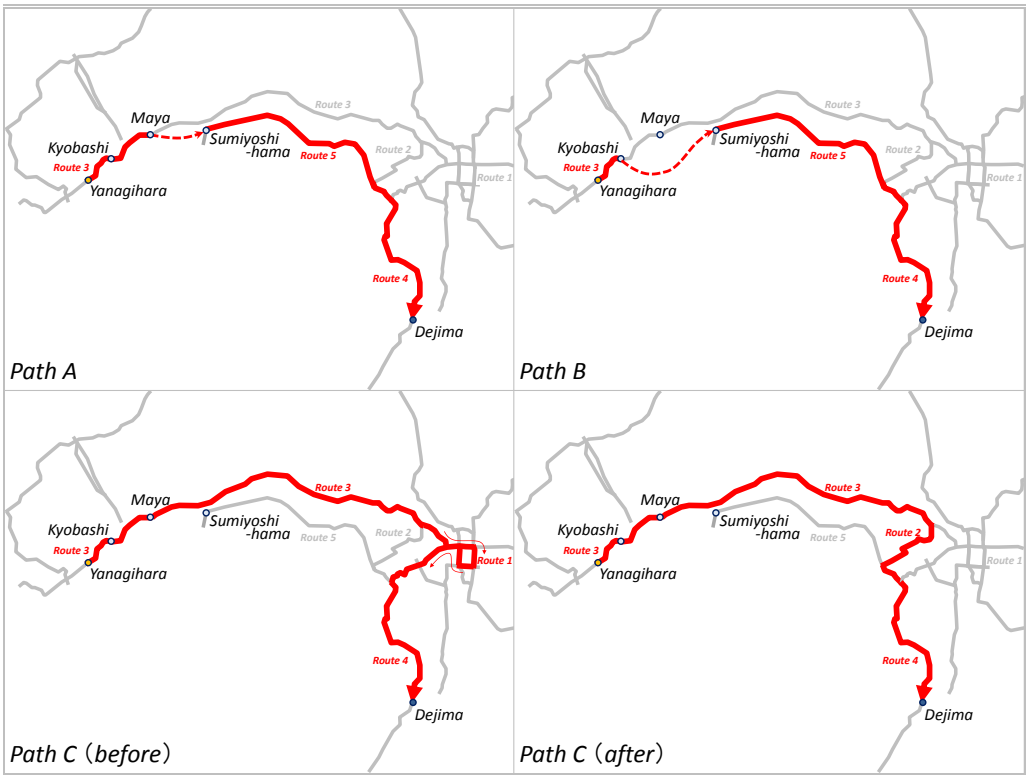
表–3 に示すように，開業前の平日 114 日間分，及び，開業後の平日 120 日分の交通データを用いる．各経路の旅行時間については，分析期間における固定検知器（トラカン）の情報を用いる．本研究ではタイムスライス法を用いることによりスポット速度を旅行時間に換算した上で検討を行う．こうして算定された分析期間中の経路旅行時間の統計データを用いて旅行時間信頼性評価を行うことが可能となる．

一方，経路交通量については，ETC システムから得られた集計交通量により，分析のためのランプ間 OD 交通量・経路交通量とする．

また，前章で述べたとおり，便益評価の重要な原単位である信頼性比の算出のためには，予め H 指数を定める必要がある．H 指数の引数の一つに当該道路区間の基準化旅行時間分布（Φ）があるが，これは先述のトラ

表–3 各種設定条件

試算対象路線	2号淀川左岸線（島屋ランプ～海老江Jct.）
試算期間	供用前：平成24年11月25日～平成25年5月24日 供用後：平成25年6月1日～平成25年11月30日
試算範囲	神戸→堺方面の以下のOD交通量・経路で算定 OD：神戸線柳原ランプ以西→4号湾岸線出島ランプ以南 経路A：【神戸線→（摩耶→住吉浜）→湾岸線】 経路B：【神戸線→（京橋→住吉浜）→湾岸線】 経路C：供用前【神戸線→環状線→湾岸線】 供用後【神戸線→淀川左岸線→湾岸線】
ランプ間 OD交通量	ETC統計データ（流入時刻を1時間単位で集計済）
旅行時間	5分間固定検知器（トラフィックカウンター）データ
スケジューリング パラメータ	Small (1982)による推計値から以下の値を設定： η =−0.065　λ =−0.319　ω =0.041　　(η / λ =0.203)



図–15 分析対象エリアと経路

カンから得られた旅行時間分布より直接求めることができる，もう一方の引数の最適遅着確率 (η/λ) については，前章と同様に Small[40] の結果を援用する（表–3）．

4.4 基礎データ分析

基礎的なデータ分析の結果を表–4，5 に示す．対象 OD における経路 C の分担率は 10.4%から 24.6%に有意に増加している．一方，供用前後での日平均交通量は 38 台/日の増加（176→214）に留まっている．

次に，各経路における旅行時間の平均値ならびに標準偏差の値を算出する．まず，経路別・時間帯別（1 時間単位）で算出した結果を図–16 , 17, 18 に示す．施策前後において（青 → 赤），淀川左岸線利用（経路 C）では旅行時間の平均・標準偏差とも減少しており，整備の効果があることが確認される．一方湾岸線（経路 A, B）においては，旅行時間の平均・標準偏差共に微増という結果となっている．

4.5 H 指数および信頼性比のパターン

図–19 には経路別に見た H 指数 (式 (14)) のプロジェクト前後での変化をまとめて示している．経路 A や経路 B に比べて経路 C の H 指数が比較的安定的に時間推移していることが確認される．一方，経路 B の 9 時台や 21 時台等では，H 指数が小さな値を示しており，安定的な値となっていないことが確認できる．

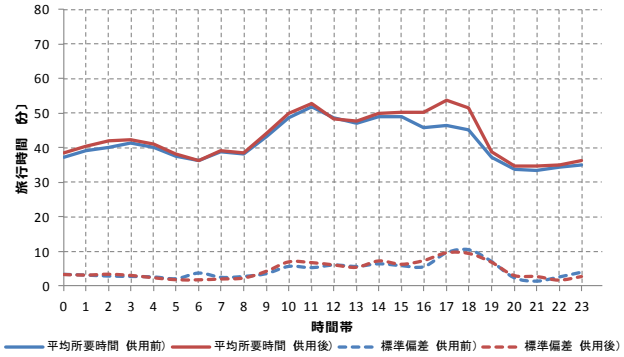
表–4 供用前（平日 114 日間）の交通量

経路	期間延べ交通量〔台〕	日平均交通量〔台/日〕	経路分担率
A	9,860	86	49.0%
B	8,159	72	40.6%
C	2,089	18	10.4%
合計	20,108	176	100.0%

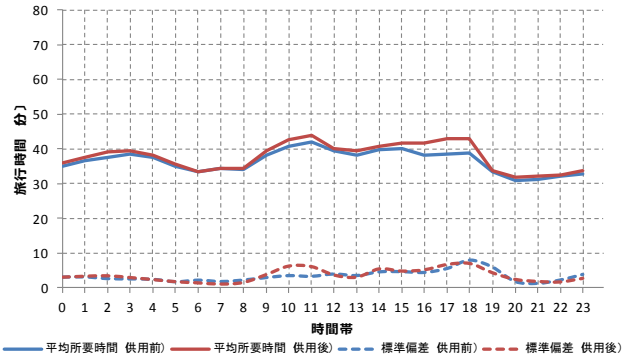
表–5 供用後（平日 120 日間）の交通量

経路	期間延べ交通量〔台〕	日平均交通量〔台/日〕	経路分担率
A	10,579	88	41.3%
B	8,737	73	34.1%
C	6,316	53	24.6%
合計	25,632	214	100.0%

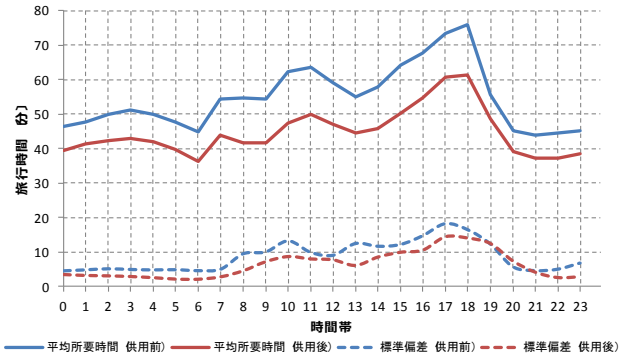
この点について，図–20 に経路 B の 9 時台及び 12 時台の実旅行時間分布と基準化旅行時間分布を示す．両分布ともに 9 時台に非常に大きな旅行時間が確認できる．これは平成 25 年 2 月 6 日に発生した事故渋滞（最大渋滞長 5.2km，8:37 発生 ~10:02 解消）に起因することが判明した．このような稀なインシデントよって極端に大きな旅行時間が生じると，H 指数の安定性に影響を与えることが伺える．それ以外の Recurrent な旅行時間の変動状況においては，H 指数はいずれの経路



図–16 経路 A の平均旅行時間と標準偏差



図–17 経路 B の平均旅行時間と標準偏差



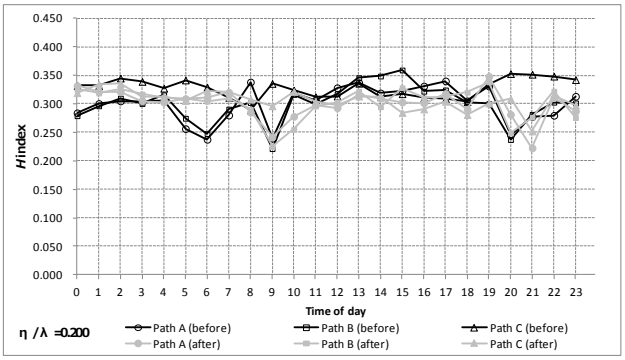
図–18 経路 C の平均旅行時間と標準偏差

においても出発時刻に強く依存することがないことが確認される．これより H 指数の集約の可能性が示唆される．以降では，外れ値を除去して得られた H 指数に基づいた便益計測を行う．

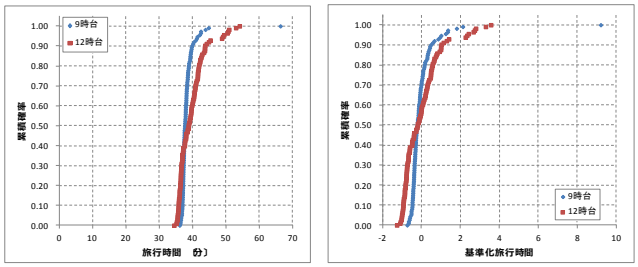
4.6 便益試算のための設定

(1) 便益の定義

以上で得られた旅行時間データならびに交通量データを用いて，便益の試算を行う．その基本的な流れを図–21 に示す．すなわち，時間帯別・経路別・施策前後



図–19 H 指数のプロジェクト前後での変化



(a) 旅行時間分布　　**(b)** 基準化旅行時間分布

図–20 旅行時間分布（供用前・経路 B・外れ値除去前）

別に，平均旅行時間 μ，標準偏差（信頼性指標）σ，H 指数を算定し，次式に示す施策前後での一般化費用変化に伴う消費者余剰増分（台形公式）で利用者便益 B を定義する．

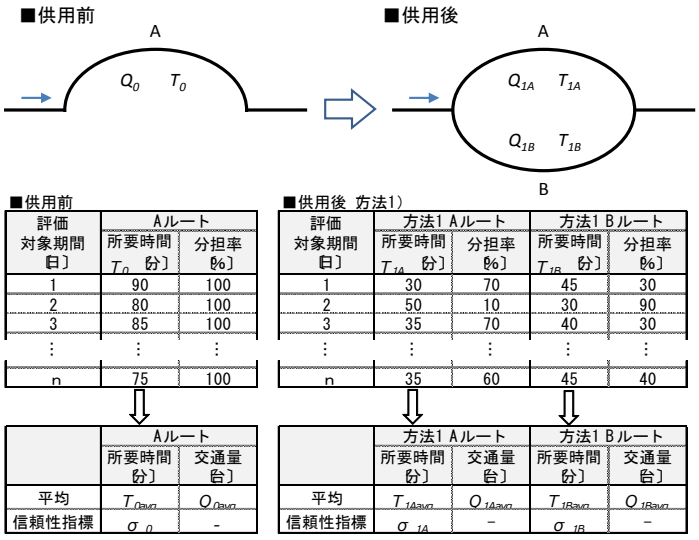
$$B = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{K}\sum_{hour=1}^{Hour}\left(Q^{o}_{k,\,hour} + Q^{w}_{k,\,hour}\right)\left(TC^{o}_{k,\,hour} - TC^{w}_{k,\,hour}\right)$$

$$TC = VTT \times \mu + VTT \times RR \times \sigma$$

ここで RR：信頼性比，K：総経路数，$Hour$：総時間帯区分数，w, o：供用後・供用前をそれぞれ表すラベルである．原単位については表–6 に示すとおりに定めた．

表–6 貨幣価値原単位の設定

原単位	Small (1982)
信頼性比	0.928
時間信頼性価値	37.21円/分・台
時間価値	40.10円/分・台 （H20国交省 B/Cマニュアル）



図–21 便益計測の基本的考え方

(2) 信頼性比

信頼性比の算定に必要な *H* 指数は経路別・時間帯別・供用前後別に算定されている．従って，これらを平均した値に基づいて算定した信頼性比及び時間信頼性価値を表–6 に示す．算定した結果，信頼性比は 0.928，時間信頼性価値は 37.21 円/分・台の値が得られた．得られた信頼性比は，英国やニュージーランドのマニュアルの値とほぼ同等となっている．

4.7 旅行時間信頼性向上便益の試算

(1) 便益の試算

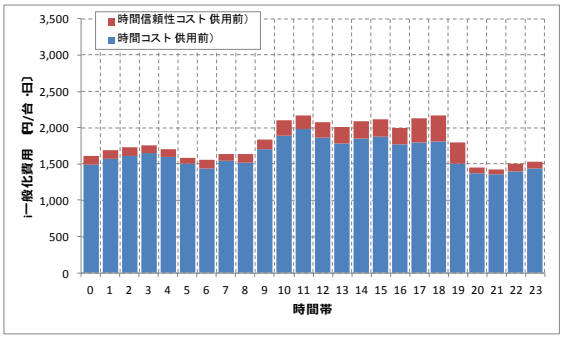
以上の手順で得られた結果や考え方に基づき一般化費用と時間信頼性便益を算定した結果を図–22~25 に示す．1 日当たりの純時間信頼性向上便益額は 1,412 円/日となり，時間短縮便益（5,386 円/日）に対して，約 26 パーセントに相当している．また，1 台当たりの時間信頼性便益は 7.2 円/台・日，時間短縮便益は 27.6 円/台・日となっている．時間帯別に見ると，多くの時間帯で正の便益が生じているが，一部の時間帯では負の便益が生じている．また，時間帯別の 1 台当たりの便益額に関しは，6~8 時台では時間信頼性便益として 30~50 円/台・日程度，時間短縮便益として 70~80 円/台・日程度の便益が生じていることが確認できる．

(2) *H* 指数の集約の度合いと便益試算値の関係

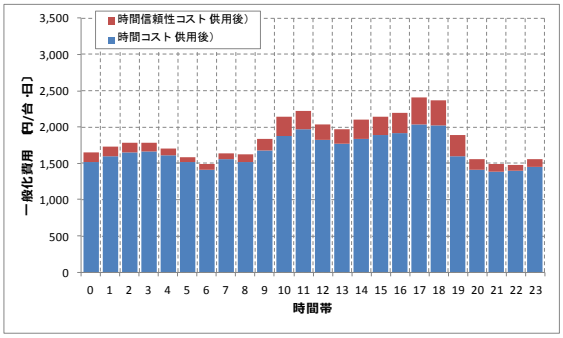
H 指数の集約について，まず経路に着目して，①経路別・時間帯別→②経路別→③全体（経路）といった順で集約した場合，次に，時間帯に着目して①経路別・時間帯別→④時間帯別→⑤全体（時間帯別）といった順で集約した場合の合計 5 パターンを検証した．集約パターン別の信頼性便益の試算結果を表–7 に示す．経路に着目した場合①＞②＞③の順，時間帯に着目した場合は①＞④＞⑤の順で時間信頼性便益額は小さくなっていることが把握できる．すなわち *H* 指数を共通化するほど便益額は小さくなっていることが理解できる．特に，経路では②→③，時間帯では①→④での集約で便益額の減少が相対的に大きくなっている．従って，試算結果では，実務で適用する際に，③経路別への集約に留めておくことが妥当であることが示唆される．

4.8 おわりに

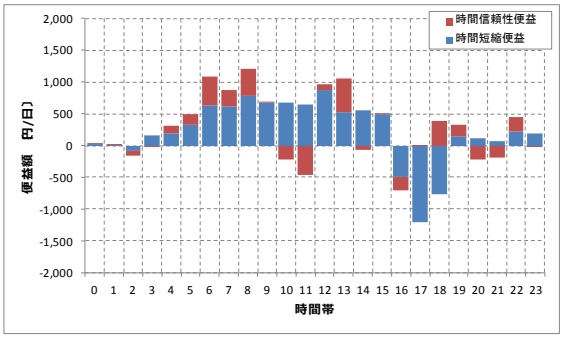
本研究では，阪神高速道路 2 号淀川左岸線を対象に時間信頼性便益を試算した．トラカンデータを用いた before-after 分析を行った結果は以下のとおりである．(1) まず，統合アプローチに基づく *H* 指数を経路別・時間帯別・供用前後別に試算した結果，*H* 指数は同一と見なすことはやや難しいことが分かった．同一と見なすことが難しい要因として，非常に稀なインシデントによって生じた極端に大きな旅行時間の存在が挙げられる．(2) 次に，本試算による信頼性比は 0.928，時間信頼性価値は 37.21 円/分・台となった．また，時間信頼性便益は 7.2 円/台・日となり，時間短縮便益（27.6 円/台・日）の 26 %程度となった．この便益については，H 指数を時間的・空間的に集約し共通化するほど，時間信頼性便益額は小さくなる傾向が確認できた．



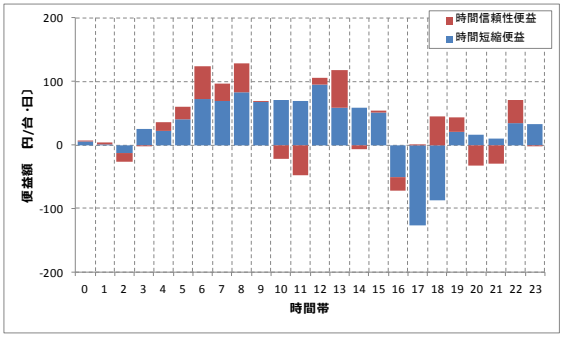
図–22 供用前の一般化費用



図–23 供用後の一般化費用



図–24 時間帯別の便益額



図–25 1 台当たりの時間帯別便益額

表–7 H 指数の集約度合いに応じた便益試算結果

	便益額〔円/日〕	便益額〔円/台・日〕	信頼性便益/時間短縮便益
①経路別時間帯別	1,412	7.2	0.26
②経路別	1,338	6.9	0.25
③全体（経路別）	1,210	6.2	0.22
④時間帯別	1,272	6.5	0.24
⑤全体（時間帯別）	1,202	6.2	0.22
【参考】時間短縮	5,836	27.6	-

第5章　一般道路網全体を対象とした旅行時間信頼性評価の試論

5.1　はじめに

一般に，旅行時間データの蓄積は一般に短いセクション単位で行われるため，旅行者のトリップ全体の旅行時間変動を十分な精度で把握するために必要なデータ数を確保することは困難である．現状では大量の旅行時間データが得られる短いセクション毎に旅行時間変動を計測し，それらをつなぎ合わせて経路全体の旅行時間変動を推計する手順を取らざるを得ない．しかし，リンク単位での旅行時間変動から経路全体の旅行時間変動を求めるにあたっては二つの大きな課題が残されている．一つ目はリンク間での旅行時間の相関の存在である．通常，渋滞等による旅行時間の増加はリンクを跨いで波及する．例えばTaylor[80]は，高速道路旅行時間データの統計解析より，隣接するリンクの旅行時間どうしに強い相関が存在することを示している．通常は分散等の変動尺度を単純にリンク間で足し合わせて経路全体の旅行時間変動と見なすことが多いが，相関が存在する場合には便益が過大推計されてしまう．

二つ目の課題は，旅行時間分布の集計化に関するものである．価値付けのための一般的な行動モデル[6]に整合させるためには，旅行時間変動を標準偏差等の代表値のみで把握するのではなく，分布そのものの変化として把握する必要がある．その場合，旅行時間分布を畳み込んで得られる分布が元と同じ分布族となると操作性が高い．そのような特性を有する統計分布の代表例が正規分布[56]であるが，実際の旅行時間分布は左右非対称で右裾が長い等の特徴を有しており[81]，正規分布とは大きく異なっている．

本章では，経路やネットワークレベルでの旅行時間変動把握のためには避けて通ることのできない上記二つの課題に対し，安定分布という新たな統計分布族の適用可能性並びに有用性を検討するものである．まず，旅行時間のリンク間相関に関しては，旅行時間をその平均と標準偏差で基準化して得られる基準化旅行時間として考えた場合に，独立性の仮定が概ね妥当となることを実証的に示す．次に，その基準化旅行時間分布に安定分布を当てはめ，データへの適合度の高さを示す．最後に，基準化旅行時間分布のリンク間での畳み込みの可能性について考察する．

5.2　基準化旅行時間の算出

流入時刻 t における当該リンクの旅行時間 T を以下のように位置–尺度型の形式で表す．

$$T = \mu(t) + \sigma(t)X$$

ここで，$\mu(t)$ は時刻における平均旅行時間，$\sigma(t)$ は時刻における旅行時間変動の尺度である．本研究では変動尺度として四分位範囲 (Interquartile Range) を用いる．$\mu(t)$ 並びに $\sigma(t)$ はノンパラメトリック回帰分析[75]を適用することにより滑らかな関数としてデータから推定することができる[82]．また X は基準化旅行時間 (Standardized Travel Time) と呼ばれる．基準化旅行時間は，旅行時間変動価値を推計するための統合モデル[6]でも用いられる．

旅行時間と流入時刻の組み合わせの i 番目の観測結果を (T_i, t_i) とすると，推定された平均旅行時間関数 $\hat{\mu}(t_i)$ 並びに変動尺度関数 $\hat{\sigma}(t_i)$ を用いて，対応する基準化旅行時間 X_i を以下の式で求めることができる．

$$X_i = \frac{T_i - \hat{\mu}(t_i)}{\hat{\sigma}(t_i)} \tag{17}$$

一般に平均旅行時間や旅行時間変動は，流入時刻によって大きく異なる．式 (17) により求められる基準化旅行時間データは，流入時刻に固有の平均旅行時間と旅行時間変動によって基準化されるため，リンク間での相関の程度が削減されることが期待される．

5.3　安定分布へのフィッティング

(1)　安定分布とは

安定分布 (Stable Distribution)[74),83)]とは，極値の存在に起因する分布の裾厚 (heavy tail) や分布の非対称性 (skewness) を表現することが可能な統計分布族である．物理的な限界から旅行時間には下限が存在する一方，甚大なインシデントの発生等により，稀ではあるものの非常に大きな旅行時間が生起する場合もある．安定分布は，旅行時間分布に特徴的なこれらの特性を適切に考慮することができる．

基準化旅行時間 X が安定分布 S に従うとき，一般に $X \sim S(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ と表わされる[83]．すなわち安定分布は四つのパラメータによって規定される．$\alpha \in (0, 2]$ は安定性パラメータ (stability parameter) と呼ばれ，分布の裾厚を規定するパラメータである．$\alpha = 2$ の場合，安定分布は正規分布に帰着し，その値が小さくなるにつれて正規分布よりも分布の裾が長くなる．これにより，いわゆるロングテール現象を表現することもできる（但し分布の二次以上のモーメントは無限大に発散する）．$\beta \in [-1, 1]$ は歪度を規定するパラメータであり，$\beta = -1$ の場合には左に最大に歪み，逆に $\beta = +1$ の場合には右に最大に歪む．基準化旅行時間分布の場合，β は +1 に近い値になると期待される．$\gamma > 0$ は分布のスケールを，$\delta \in \mathbf{R}$ は中心の位置をそれぞれ規定するパラメータである．なお，γ，δ はそれぞれ標準偏差，平均を表わすものではないことに注意されたい．

安定分布は，$\alpha = 1$，$\beta = 0$ の場合にはコーシー分布

に，$\alpha = 0.5$，$\beta = 1$ の場合にはレヴィ分布にそれぞれ一致する．すなわち安定分布は，正規分布，コーシー分布，レヴィ分布を含むより広い分布族である．

(2)　安定特性

旅行時間分布の統計分析を行うに当たり，安定分布が持つ好ましい特性が“安定特性 (Stability property)”である．これは「互いに独立した異なる安定分布に従う確率変数の和は，それらの安定分布が同一の安定パラメータ α の値を持つ場合に限り安定分布に従う」という性質である．すなわち，畳込みにより生成された新たな安定分布は同じ安定パラメータ α を有する．残りのパラメータも次の手順で求めることができる．

$X^j \sim S(\alpha, \beta^j, \gamma^j, \delta^j)$, $j = 1, ..., J$ を J 個の異なる安定分布に従う互いに独立な確率変数とする (但し α は共通)．このとき，これらの確率変数の平均 $\bar{X} = (1/J)\sum_{j=1}^{J} X^j$ は，次の安定分布に従う[74]．

$$\bar{X} \sim S(\alpha, \bar{\beta}, \bar{\gamma}, \bar{\delta}), \tag{18}$$

ここで，安定分布の各パラメータは以下で与えられる．

$$\bar{\beta} = \frac{\sum_{j=1}^{J} \beta^j \left|\gamma^j/J\right|^\alpha}{\sum_{j=J}^{m} \left|\gamma^j/J\right|^\alpha},$$

$$\bar{\gamma} = \left(\sum_{j=1}^{J} \left|\gamma^j/J\right|^\alpha\right)^{1/\alpha},$$

$$\bar{\delta} = \begin{cases} \sum_{j=1}^{J} \delta^j/J + \left(\tan\frac{\pi\alpha}{2}\right)\left[\bar{\beta}\bar{\gamma} - \sum_{j=1}^{J} \beta^j\gamma^j/J\right] & (\alpha \neq 1) \\ \sum_{j=1}^{J} \delta^j/J + \frac{2}{\pi}\left[\bar{\beta}\bar{\gamma}\log\bar{\gamma} - \sum_{j=1}^{J} \beta^j\gamma^j/J \log\left|\gamma^j/J\right|\right] & (\alpha = 1) \end{cases}$$

すなわち連続する道路リンク区間において各リンクの基準化所要時間が共通の α を持つ安定分布にそれぞれ従い，さらにそれらの基準化所要時間が互いに独立と仮定すれば，安定特性によりリンク単位で推計された基準化所要時間分布を経路全体での基準化所要時間分布へと容易に集約（畳込み）することが可能となる．さらには，基準化されていない通常の旅行時間分布に関しても，同様の畳み込みを行うことが可能となる．

(3)　一般化中心極限定理

安定分布に関するもう一つの重要な特性は，“一般化中心極限定理（Generalized Central Limit Theorem: GCLT)”と呼ばれる．古典的な中心極限定理は「(有界の分散を持つ) 独立な確率変数の正規化された和は標準正規分布に弱収束する」というものであった．Gnedenko and Kolmogorov[84] はこれを確率変数の分散が無限の値となる場合を含む状況へと拡張し，一般化中心極限定理と称した．簡単に述べるとこの定理は「互いに独立な“(分散が有界でない場合も含めた）いかなる”確率変数の正規化された和に対しても，その唯一の極限分布が存在し，それが安定分布となる」ということを示すものである[74),83]．

大きな数のリンク数で構成される細密な都市内道路ネットワークを考えよう．各リンクで観測される基準化旅行時間分布は，正規分布のような左右対称のものではなく，稀ながらも起こりうる大きなインシデントの影響により，右の裾が厚くなっていると仮定する．このような状況で一般化中心極限定理を適用すると，「この全ネットワーク上で長期間にわたって観測された各リンクの基準化旅行時間の総和の分布は，安定分布に収束する」という結論を導くことができる．これにより，経路レベルあるいは OD レベルでの基準化旅行時間分布の推計や，さらには，該当する旅行時間変動価値等の推計が可能になることが示唆される．

(4)　安定分布のパラメータ推定

一般に，安定分布の確率密度関数は陽には与えられておらず，通常は特性関数 $\phi(\tau) = \mathrm{E}(\exp(i\tau X))$ によって表現される．その場合，全てのパラメータに関して確率密度関数が連続的となり，数値解析上扱い易いという理由で，下記の Zolotarev's (M) parameterization[83] による表現がよく用いられる．

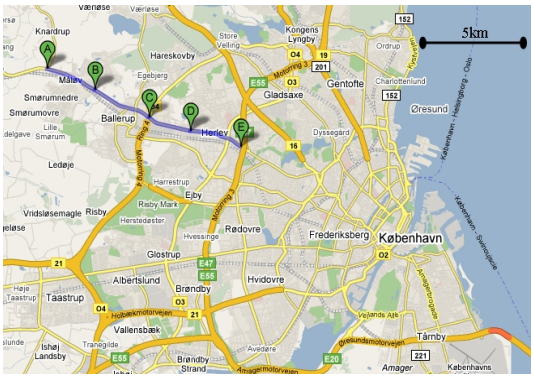
$$\phi(\tau) = \begin{cases} \exp\left\{-\gamma^\alpha|\tau|^\alpha\left[1 + i\beta(\mathrm{sign}\tau)\left(\tan\frac{\pi\alpha}{2}\right)\right.\right. \\ \left.\left.((\gamma|\tau|)^{1-\alpha} - 1)\right] + i\delta\tau\right\} \qquad (\alpha \neq 1 \text{ のとき}) \\ \\ \exp\left\{-\gamma|\tau|\left[1 + i\beta(\mathrm{sign}\tau)\tan\frac{2}{\pi}(\ln|\tau| + \ln\gamma)\right]\right. \\ \left.+i\delta\tau\right\} \qquad (\alpha = 1 \text{ のとき}), \end{cases}$$

安定分布のパラメータは，この特性関数に基づく数値尤度最大化により，実際のデータを用いて推定することができる[85]．

5.4　ケーススタディ

(1)　データの概要

ここではデンマーク・コペンハーゲンの中心部と郊外とを結ぶ Frederikssundsvej という放射状道路の一部区間 (11.263 km) において，2007 年 1 月 16 日 ~5 月 8 日に観測されたリンク流入時刻と旅行時間のデータを用いる．図–26 の A~E 各地点に設けられたカメラによるナンバープレート認識によって流入時刻一分毎に計測された旅行時間のうち，平日の 6 時 ~22 時のデータ



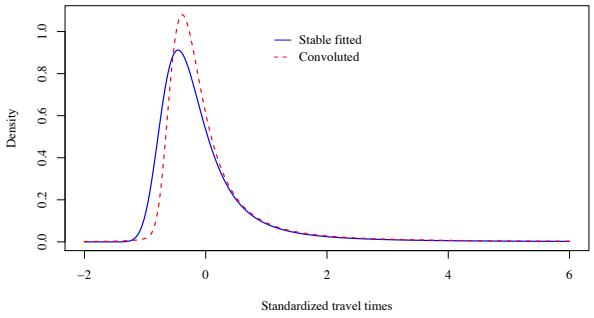
図–26 分析対象の都市内道路 (Frederikssundsvej)

表–8 旅行時間データの概要と Plug-in バンド幅 (分)

ID	方向	延長 (km)	n	$h_T^{plug,\mu}$	$h_T^{plug,F}$	$h_t^{plug,F}$
1	A → B	2.725	60669	32.9	47.5	0.162
2	B → C	3.279	59950	32	46.1	0.406
3	C → D	2.508	57759	32.1	46.2	0.183
4	D → E	2.751	54462	32.6	46.9	0.339
5	A → E	11.263	24271	37.9	53.1	0.895

表–9 安定分布のパラメータ推定値

Section	1	2	3	4	合成	5
α	1.16	1.11	1.14	1.12	1.13	1.30
β	0.88	0.91	0.92	0.99	0.92	1.00
γ	0.33	0.28	0.32	0.30	0.26	0.30
δ	-0.53	-0.52	-0.48	-0.48	-0.30	-0.38
対数尤度	-67600	-59883	-61490	-55424	–	-21940
n	60669	59950	57759	54462	–	24271



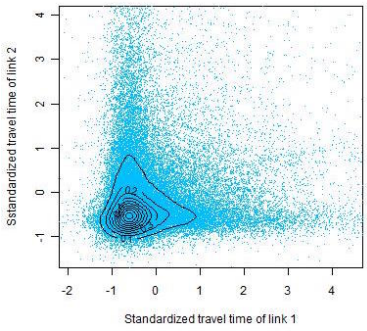
図–27 推定された安定分布と畳込みによって求められた安定分布の比較 [区間 A → E]

を用いる．ID5 の区間とは，1~4 の小区間を数珠つなぎにした区間であり，起点 A から E までを通して走行した車両のみから経路全体の旅行時間データを得ている．この区間の分析結果と ID1~4 の各区間の比較を行うことで本検討に対応することができる．表–8 に各道路セクションの概要と推計に用いたバンド幅を示す．

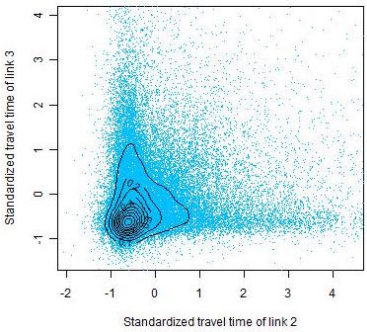
(2)　基準化旅行時間の推計と安定分布への当てはめ

まず，ノンパラメトリック回帰[82] によって平均旅行時間 $\hat{\mu}(t_i)$ と変動尺度（四分位範囲）$\hat{\sigma}(t_i)$ を推計する．次に，得られた関数を式 (17) に代入し，各区間の任意の旅行時間サンプル i に対する基準化旅行時間 X_i を算出する．この得られた基準化旅行時間データセットを用いて安定分布の最尤推定を行った結果を表–9 に示す．いずれの区間でも α の推定値は有意に 2 (正規分布) より小さく，分布の右裾が正規分布よりも厚く，安定分布の形状に近いことが示唆される．また，β の推定値がいずれも上限の 1 に近いことから分布が大きく歪んでいることが分かる．これは，稀少ながらも重大なインシデント等に起因する極端に大きな基準化旅行時間がデータに含まれているためと考えられる．

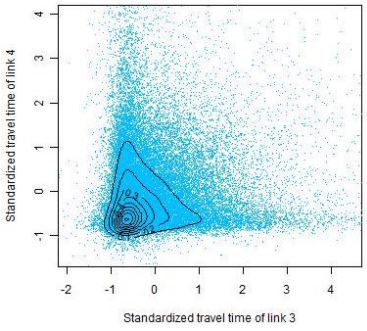
また，異なる区間どうし（1~4）で比べると，α の推定値は互いに近い値となっている．図–27 には α の推定値の平均 (≈ 1.132) を用い，式 (18) に基づいて合成を行った結果も併せて示している．道路地点 A から E まで



(a) Links 1 and 2 (54,310 sample)



(b) Links 2 and 3 (50,499 sample)



(c) Links 3 and 4 (52,649 sample)

図–28 隣接する区間の基準化旅行時間の同時分布

での通してのデータの分析結果 (Link 5) の α の推定値が 1.30 であることから，二つの分布はややずれている．これは，基準化旅行時間の次元で見た場合でも，完全に無相関とはならないことを意味している．このことは，隣接する区間（Link 1 と 2，2 と 3，3 と 4）の間で対応する基準化旅行時間の組み合わせについての同時確率密度関数を推定した図–28 からも概ね確認される．

5.5　おわりに

本章では，旅行時間変動のリンク間加法性に関して，基準化旅行時間並びに安定分布に基づいた考察を行った．具体的には，旅行時間のリンク間相関への対処の可能性と旅行時間分布のリンク間での畳み込みの可能性を検討した．さらに，リンク毎の旅行時間変動に基づいてネットワーク全体の変動を把握する上で安定分布の持つ一般化中心極限定理が有用となる可能性を論じ，そのような想定の妥当性を実証的に確認した．

第6章　統合アプローチのパラメータ推定方法の検討

6.1　はじめに

本章では，選好意識調査（SP 調査）を実施して，統合アプローチのスケジューリング関数のパラメータを推定する．調査においては，旅行時間分布並びに最適遅着確率の情報を実験的に操作する必要がある．しかし，経路選択を繰り返すために，被験者に飽きが生じたり，不確実性下での意思決定のため旅行時間分布が正確に認識されるかどうかと言う観点からの課題が残されている．例えば Tseng et al.[65] では，9 つの異なる旅行時間分布の被験者への表示方法について検証し，表示の明快さ，選択のしやすさ，全ての情報の考慮のしやすさ，表示の魅力，選択への答えやすさ等の観点から，回答者の教育水準等に関わらず，棒グラフ等よりも数字による直接的表示の方が，情報の考慮のし易さ・回答の答え易さ等の観点で一番優れると結論付けている．

以上の基本的考えに立脚し，本章で行ったインターネット調査では，図**–29** のような表示形式により，被験者に二つの経路 A，B のうちいずれか一方を選択することを要請した．実験では，各経路の旅行時間変動と到着時刻制約をコントロールすることで，被験者に対して多様な旅行時間分布の状況を提示している．

図**–29** 選好意識調査における経路選択実験の表示例

6.2　SP 選択実験の想定

選択に先立ち想定してもらった実験の前提条件は下記のとおりである．

(a) 毎朝，自動車を利用して会社に通勤している．
(b) 二つの道路 A，B の長さや構造は全く同じだが，唯一，旅行時間変動のみが異なる．
(c) 旅行時間変動は，過去約 100 日間の調査から予め分かっており，「平均旅行時間」と「早着・遅着が起こった回数」によって，図**–29** のように表される．
(d) 自宅を出発する時刻は毎日同じである．

以上の条件のもと，ずっと同じ道路を利用し続けることを念頭に経路選択を行うよう被験者に教示した．

6.3　実験計画

選択肢プロファイルの作成方法は次のとおりである．まず，前章で推定した安定分布より 100 個の乱数を発生させた．これらの乱数に対し，あらかじめ表**–10** のように設定された平均旅行時間，標準偏差を用いて 100 個の旅行時間乱数へと変換させた．その上で，別途予め与えられた最適遅着確率（表**–10**）を用い，希望到着時刻に対する早着/遅着の差の時間を算出した．最後に，予め設定した各階級（図**–29**）に対し，これらの結果を用いて度数分布表を作成した．

表**–10** 選好意識調査における各因子とその水準

因子	水準				
平均旅行時間	48 分	54 分	60 分	66 分	72 分
標準偏差	8 分	10 分	12 分	14 分	16 分
最適遅着確率	0.3	0.2	0.4	0.1	0.5

なお，表**–10** に示す通り，経路選択実験における平均旅行時間，標準偏差，最適遅着確率の組み合わせは各 5 通りである．因子数が 3 で各 5 水準なので，$5\times5\times5 = 125$ 通りの選択肢プロファイルプロファイルが作成され，その組み合わせは $125\times1244 = 15{,}500$ 通りとなる．本研究では合崎・西村[86] の方法に基づき，この中から 100 個の選択肢の組み合わせを部分抽出し，さらにこの 100 個の中からランダムに抽出された 18 個の選択実験を各被験者に提示している．

調査対象者は全国の 20 代から 50 代の男女で，マーケティングリサーチ会社の WEB モニターを対象に実施した．普段通勤に自動車を利用している人のみが被験者となるようスクリーニングした．調査の信頼性を高めるために，曖昧・いい加減な回答を除去するためのいくつかのスクリーニングをさらに行った結果，分析に用いる個人サンプル数は 232 である．それぞれが 18 の異なる経路選択を行っており，合計 4176 の選択データが得られた．

6.4　モデルの特定化

ランダム効用理論に基づき，個人 i の t 番目の選択実験における二つの経路 A，B の期待効用差関数 $\Delta EU_{it} \equiv EU_{it}^{A} - EU_{it}^{B}$ を何通りかの形で特定化し，推定結果の比

較を行う．各説明変数の定義を以下に示す．

- μ_{it}^A, μ_{it}^B：選択肢 A・B の平均旅行時間（分）
- Female_i：女性ダミー変数
- Age(above30)_i：30 歳以上ダミー変数
- ComTime:通勤時間（分）
- log (Income):世帯年収 (万円) の対数値
- σ_{it}^A, σ_{it}^B：選択肢 A・B の旅行時間標準偏差（分）
- θ：平均旅行時間の限界効用で常に一定値と仮定
- κ：旅行時間標準偏差の限界効用主効果分で，モデルによってはランダムに変動する．
- ε_{it}：位置尺度 0，スケールパラメータ 1 のロジスティック分布 Logistic(0, 1) に従うホワイトノイズ項（ランダム項）．
- ξ_i：パネル効果を考慮したランダム効果モデルにおける非観測異質性項で，平均 0，分散 ω_ξ^2 の正規分布 $\text{N}(0, \omega_\xi^2)$ に従うと仮定する．標準偏差 ω_ξ は未知パラメータとして推定される．
- κ_i：Model 2，4 では旅行時間標準偏差の限界効用 κ_i が個人間で異なるランダム係数モデル（Mixed Logit Model）が用いられている．また，Model 3, 4 では κ_i が平均 κ，分散 ω_ξ^2 の正規分布 $\text{N}(\kappa, \omega_\kappa^2)$ に従うとそれぞれ想定する（κ 及び ω_κ は未知パラメータとして推定される）．

このような変数設定のもと，以下のような効用関数形の妥当性について比較検証を行う．

Model 1 (二項ロジットモデル)

$$\begin{aligned}\Delta EU_{it} &= \theta(\mu_{it}^A - \mu_{it}^B) + [\kappa + \kappa_F \times \text{Female}_i \\ &+ \kappa_{AGE} \times \text{Age(above30)}_i + \kappa_{INCOME} \times \log(\text{Income})_i \\ &+ \kappa_{COM} \times \text{ComTime}_i](\sigma_{it}^A - \sigma_{it}^B) + \varepsilon_{it}, \\ &\text{where } \varepsilon_{it} \sim \text{Logistic}(0, 1)\end{aligned} \tag{19}$$

Model 2 (パネル二項ロジットモデル)

$$\begin{aligned}\Delta EU_{it} &= \theta(\mu_{it}^A - \mu_{it}^B) + [\kappa + \kappa_F \times \text{Female}_i \\ &+ \kappa_{AGE} \times \text{Age(above30)}_i + \kappa_{INCOME} \times \log(\text{Income})_i \\ &+ \kappa_{COM} \times \text{ComTime}_i](\sigma_{it}^A - \sigma_{it}^B) + \xi_i + \varepsilon_{it}, \\ &\text{where } \xi_i \sim \text{N}(0, \omega_\xi^2),\ \varepsilon_{it} \sim \text{Logistic}(0, 1)\end{aligned} \tag{20}$$

Model 3 (二項ロジットモデル (正規ランダム係数)

$$\begin{aligned}\Delta EU_{it} &= \theta(\mu_{it}^A - \mu_{it}^B) + [\kappa^i + \kappa_F \times \text{Female}_i \\ &+ \kappa_{AGE} \times \text{Age(above30)}_i + \kappa_{INCOME} \times \log(\text{Income})_i \\ &+ \kappa_{COM} \times \text{ComTime}_i](\sigma_{it}^A - \sigma_{it}^B) + \varepsilon_{it}, \\ &\text{where } \kappa^i \sim \text{N}(\kappa, \omega_\kappa^2),\ \varepsilon_{it} \sim \text{Logistic}(0, 1)\end{aligned} \tag{21}$$

Model 4 (パネル二項ロジットモデル (正規ランダム係数))

$$\begin{aligned}\Delta EU_{it} &= \theta(\mu_{it}^A - \mu_{it}^B) + [\kappa^i + \kappa_F \times \text{Female}_i \\ &+ \kappa_{AGE} \times \text{Age(above30)}_i + \kappa_{INCOME} \times \log(\text{Income})_i \\ &+ \kappa_{COM} \times \text{ComTime}_i](\sigma_{it}^A - \sigma_{it}^B) + \xi_i + \varepsilon_{it}, \\ &\text{where } \xi_i \sim \text{N}(0, \omega_\xi^2), \kappa^i \sim \text{N}(\kappa, \omega_\kappa^2), \\ &\qquad \varepsilon_{it} \sim \text{Logistic}(0, 1)\end{aligned} \tag{22}$$

Model 5 (二項ロジットモデル)

$$\begin{aligned}\Delta EU_{it} &= \theta(\mu_{it}^A - \mu_{it}^B) + [\kappa + \kappa_F \times \text{Female}_i \\ &+ \kappa_{AGE} \times \text{Age(above30)}_i \\ &+ \kappa_{COM} \times \text{ComTime}_i](\sigma_{it}^A - \sigma_{it}^B) + \varepsilon_{it}, \\ &\text{where } \varepsilon_{it} \sim \text{Logistic}(0, 1)\end{aligned} \tag{23}$$

6.5 行動モデルおよび時間信頼性価値の推定結果

Model 1, 5 は Multinomial Logit Model，Model 2, 3, 4 は Mixed Logit Model による定式化となっており，シミュレーション対数尤度の最大化によってパラメータを推定した（乱数生成回数 500 回）．結果を**表–11** に示す．

平均旅行時間と標準偏差はいずれも有意となっている．また，パラメータの値については，負のものについてみると κ が最も大きく，次いで通勤時間の交互作用項 $\kappa_{ComTime}$，θ の順となっている．さらに，κ_{income}，$\kappa_{above30}$，κ_F の各推計値より，収入が高いこと，また年齢が 30 歳以上であること，女性であること等が，旅行時間変動に対する感度を下げる要因となっていることがわかる．また，通勤時間が長いほど，旅行時間変動に対する感度が大きくなっている．

次に信頼性比を推計する．**表–12** および**表–13** に各被験者属性のタイプと，それぞれのタイプの各モデルを用いた場合の信頼性比の推計結果を示す．ここでは通勤時間を 60 分，年収を 500 万円に設定している．いずれのモデルにおいても，タイプ 3（女性，30 歳以上）のセグメントの信頼性比が最も低く，タイプ 2（男性，30 歳以下）の信頼性比が最も高くなっている．Lam and Small[20] では，女性の信頼性比が男性よりも約 2.3 倍高い結果となっており，本研究の結果はそれと反対の傾向を示すものとなった．また，全体の平均値は，2.40 前後の値となっている．これは，2.4 分の旅行時間標準偏差の短縮の価値が，1 分の平均旅行時間短縮の価値に等しいことを意味している．これは，Noland et al.[45] で得られた 1.27 より大きく，Batley[87] による推計値 3.28 よりは小さい結果である．

旅行時間信頼性価値 ($VTTV$) は図**–11** の最下列にまとめて記されている．我が国の現行の道路投資マニュアルにおける旅行時間節約価値を信頼性比に乗じた結果，平均で 147 円/分という値が得られた．

最後に，統合モデルのスケジューリングパラメータ $\hat{\eta}$, $\hat{\omega}$, $\hat{\lambda}$ を復元する．復元に先立ち，最適遅着確率を推

表–11 統合モデルの推定結果

推定結果	モデル 1		モデル 2		モデル 3		モデル 4		モデル 5	
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値
θ	-0.0526	-17.73	-0.0574	-7.32	-0.0544	-13.07	-0.0536	-11.59	-0.0525	-17.72
κ	-0.263	-2.66	-0.281	-2.52	-0.28	-2.49	-0.271	-2.53	-0.12	-4.21
ω_κ					0.121	1.12	0.121	1.12		
κ_F	0.032	1.76	0.0354	1.74	0.0361	1.74	0.0339	1.74	0.0359	1.74
κ_{AGE}	0.0415	1.65	0.0439	1.58	0.0452	1.61	0.0427	1.6	0.0447	1.79
κ_{INCOME}	0.024	1.51	0.0254	1.45	0.0253	1.44	0.0247	1.47		
κ_{COM}	-0.001	-2.02	-0.001	-1.94	-0.001	-1.92	-0.001	-1.94	-0.0009	-1.86
ω_ξ			0.651	1.26			0.158	0.18		
初期尤度	2894.6									
最終対数尤度	-2689.4		-2688.5		-2689.0		-2689.3		-2690.6	
自由度修正済み尤度比	0.069		0.069		0.069		0.069		0.069	
サンプル数	232									
回答数	4176									
信頼性比の平均値	2.28		2.16		2.36		2.29		2.53	
VTT (円/分)	62.86 (費用便益分析マニュアル[76] より)									
VTTV (円/分)	143.62		142.11		148.44		144.08		159.37	

表–12 被験者特性

タイプ	被験者特性	人数
タイプ 1	男性，30 歳以上	122
タイプ 2	男性，30 歳以下	20
タイプ 3	女性，30 歳以上	75
タイプ 4	女性，30 歳以下	15

表–13 信頼性比

タイプ	モデル 1	モデル 2	モデル 3	モデル 4	モデル 5
タイプ 1	2.26	2.25	2.35	2.28	2.45
タイプ 2	3.05	3.02	3.18	3.08	3.30
タイプ 3	1.65	1.64	1.68	1.65	1.77
タイプ 4	2.44	2.40	2.52	2.44	2.62
平均値	2.35	2.33	2.43	2.36	2.54

表–14 統合モデルパラメータの復元結果

パラメータ	モデル 1	モデル 2	モデル 3	モデル 4	モデル 5
λ	-0.49	-0.53	-0.53	-0.50	-0.55
η	-0.125	-0.13	-0.13	-0.12	-0.13
ω	0.072	0.077	0.079	0.074	0.08

計する必要があるが，これは各選択実験で実際に選択されたプロファイルの最適遅着確率の平均値をとることによって推計した．その結果，推計値 $\frac{\hat{\eta}}{\hat{\lambda}}$ は 0.239 となった．すなわち，旅行者は（最適状態においては）100 回のトリップのうち 24 回程度の希望到着時刻からの遅刻が生じることを許容していることを意味している．

スケジューリングパラメータの復元結果を表–14 に示す．これらの結果は，誤差項のスケールが異なるため値の絶対比較はできないが，それぞれの相対比率は，既往研究（例えば，Small[40] による $(\hat{\eta},\ \hat{\omega},\ \hat{\lambda}) = (-0.319, -0.065, -0.041)$）という結果と比較的類似した傾向を示していることが分った．

6.6 まとめ

本章では，選好意識調査から得られた行動データを旅行者のスケジューリング行動を記述する統合モデルに適用し，旅行時間信頼性価値の推計を行った．パネル効果や観測/非観測異質性を考慮した離散選択モデルを用いた推定結果は，信頼性比の平均値が 2.40 というものであった．すなわち，今回の実証分析の限りにおいては，旅行時間信頼性の向上便益が旅行時間短縮便益と比較しても無視できない大きさであることが示唆された．また，性別・年収・普段の通勤時間などの被験者特性によっても，旅行時間変動価値が有意に異なる可能性が示された．さらに，平均-分散アプローチによって得られたパラメータと基準化旅行時間分布の情報を用いてスケジューリングモデルの選好パラメータを復元し，それを既往研究と比較した結果，推計結果は類似していることも確認された．

但し今回の推計結果は，あくまでも小規模のサンプルを対象とした試算値である．今後は，選好意識調査における回答結果の信頼性の検証，旅行時間分布のばらつきの提示方法の検証，期待効用理論からの乖離の可能性の検証等が必要になる．また，今回の選好意識調査では，選択肢属性に費用を含めておらず，信頼性比の算出に留まっている．旅行時間価値と旅行時間変動価値を分離して推定することにより，価値の二重計算の可能性が生じる可能性が考えられるため，調査の負荷と結果の妥当性とのトレードオフを考慮した推計方法を今後検討する必要がある．

第7章　遅刻リスク回避型経路誘導アルゴリズムの開発

本章では，本研究で新たに開発・提案するハイパーパス（Hyperpath: HP）の考え方に基づく動的経路誘導について述べる．まず，関連する研究のレビューを行った上で，提案する Hyperpath-based Dynamic Route Guidance の基本概念とそのアルゴリズムについて概説する．さらに，幾つかの数値的検証を通じて，提案する方法の妥当性について概説する．

7.1 Reliable Routing に関する既往研究のレビュー

(1) 旅行時間不確実性と **Reliable** な最短経路の探索

本来，旅行時間は不確実な特性を有するものである．そのような旅行時間の不確実性は，経路の選定にも大きな影響を及ぼしうると考えられるが，何らかの基準に基づいてそのような不確実性のリスクを軽減させるような経路を推奨するのが Reliable Routing である．Reliable Routing に関する研究では，各リンクの旅行時間の確率分布をあらかじめ仮定した上で，統計的な期待総旅行時間が最小となる（Least Expected Travel Time: LET）ような経路を推奨するような方法も提案されている[88),89),90)]．しかし，実ネットワーク規模になると計算量が極めて膨大になることが指摘されており，LET 基準に基づく経路推奨は実用化には至っていない．

一方，Kaparias らによる一連の研究[91),92),93),94)] では，旅行時間分布そのものではなく，標準偏差やパーセンタイル値のような旅行時間変動指標に基づいて経路を推奨する方法を提案・検証している．特に Kaparias and Bell[94)] では，Kaparias et al.[92)] で開発された Reliable Rouitng システム (ARIAdNE) を用い，ロンドンの一般道路において Reliable Routing の実フィールドテストを実施し，その有用性を確認している．さらに近年の Nie らによる一連の研究[95),96)] では，予定した時刻通りに到着できるかどうか (on-time arrival) という観点から，評価基準を「On-time arrival probability の最大化」とした新たな Reliable Routing アルゴリズムを開発している．これは LET 基準に比べて相対的に計算量が少なく，実ネットワークにおける幾つかの検証も試みられている[97),98),99)] が，絶対的な計算量は依然として多いことも指摘されている．

(2) 多経路推奨の考え方

旅行時間不確実性の考慮の有無にかかわらず，これまで扱ってきた経路推奨アルゴリズムでは，基本的に“単一”の経路が算出・推奨される．しかし，渋滞や事故などによってネットワークの状態が不確実になる場合には，事前すなわちトリップ開始前において最短であったその単一経路がトリップ完了後に事後的に見ても最短である保証は無い．交通量の増加はネットワークの不確実性をさらに増加させるものと考えられ，そのような単一の経路のみの推奨によってドライバーの定時性に対する不満を下げることは難しい．

また，旅行時間の不確実性に対するリスク態度は，ドライバーによって大きく異なる．多少の遅れを許容するドライバーもいれば，厳格な定時性を強く求めるドライバーもいる．単一の経路のみを推奨する経路誘導方式ではこのようなドライバーの遅刻リスク態度の多様性に対処することができない．また，ネットワーク全体の効率性の観点から見た場合でも，単一の経路推奨が多くのドライバーに対してなされることは，その経路への過剰な交通を発生させ，結果的に当該リンクの旅行時間増やネットワーク全体の混雑増を招く可能性があり，シミュレーション研究でもそのことが従来より指摘されている[100)]．

このような理由から，単一ではなく複数の経路をドライバーに推奨するためのアルゴリズムやその妥当性が検討されてきた．多くの商用のナビゲーションシステムにおいては，通常の最短経路探索におけるリンクウェイトをリンク旅行時間から別の変数に置き換えることによって，異なる基準に基づき複数の経路を推奨するような仕組みが取られている．リンクウェイトは，距離（最短距離経路），時間（最短時間経路），金銭費用（最小費用経路）等の個別要素，もしくはそれらの線形結合としての一般化費用として定義される．

7.2 戦略的な経路選定の考え方と Hyperpath に基づく経路誘導

戦略的な経路選定 (strategic routing) あるいは対応型の経路選定 (adaptive routing) は，Miller-Hooks and Mahmassani[89)]，Miller-Hooks[90)] による旅行時間が確率的に変動する交通ネットワークにおける LET 基準に基づくものが最初の研究と思われる．経路途上における Re-Routing がドライバーにとって有益であることは確かだが，プレ・トリップ段階における LET 基準に基づく推奨経路は，十分な数の代替経路を含んでいない場合もある．真の最適経路は，経験される旅行時間に関する中間情報にも依存していることから，最終的な到着地ノードに至るまでの「指示」を提供するような仕組み，すなわち「戦略（Strategy）」を提供する方がドライバーにとって有益である可能性が考えられる．

戦略の考え方に従うと，ドライバーに対しては予め定まった経路が推奨されるのではなく，経路途上での交通状況や交通情報を考慮しながら，途中の指示ノードにおいて，右折・直進・左折などの指示がなされ，その繰り返しによって最終的な目的地に到達するような手続きがなされる．戦略であることから，この指示の

され方は交通状況に依存して変化し得る．

7.3 自動車の動的経路誘導問題への Hyperpath の適用

このような戦略的あるいは適応的な経路選定の考え方は，グラフ理論の用語を用いると「Hyperpath (HP)」という言葉で称される．Bell[101] は，道路交通の文脈で，HP を用いた経路誘導の適用可能性について検討している．公共交通における HP 研究[102),103)] におけるリンク a の運行頻度 f_a は，道路リンク a における潜在的最大遅れ時間 (potential maximum delay) d_a として解釈することができる．LET 基準等の想定と異なり，旅行時間は不確実に変動するもののその確率分布は予め定められていない．必要な情報は，各リンクに固有の統計的最大遅れ時間と最小旅行時間のみである．これは「経路 A の旅行時間は統計的に 10 分 ~15 分である」と言った形で表現される，ドライバーの認知負荷も小さいと考えられる．

HP を用いた経路誘導方法の利点として，旅行時間不確実性を単純かつ自然な形で導入するため計算負荷が比較的小さく，大規模なネットワークにおいても適用可能な点が挙げられる．このモデルによる行動基準にに従うドライバーは，「経路としての最大遅れ時間を最小化する」ような経路群の中から経路選択を行うことから，本モデルはリスク回避性向を持っている．すなわち，経路誘導の文脈においては，HP は，不確実性の下で旅行時間が最短となりうる経路 “群”を指すこととなる．

Bell[101] は，Dijkstra 法のヒューリスティック開放である A*アルゴリズム[104] を参考に SF アルゴリズムを改良した Hyperstar アルゴリズムを提案し，HP を求めている．以下では，代表的な HP 生成アルゴリズムについて概説する．

7.4 既存の Hyperpath アルゴリズム

(1) 変数の定義と定式化

A: リンク集合
I: ノード集合
H: Hyperpath リンク集合
A_i^+: ノード i を起点とするリンク部分集合
A_i^-: ノード i を終点とするリンク部分集合
d_a: リンク a における最大遅れ時間
f_a:リンク a の運行頻度 f_i: ノード i を起点とするリンク部分集合の運行頻度 p_a: リンク a が利用される確率
c_a: 遅れがない場合のリンク a の旅行時間 u_i: ノード i から s への最大遅れを最小化する経路旅行時間
w_i: ノード i において晒される最大遅れ
h_i: ノード i における r に対するポテンシャル
y_i: ノード i の頻度
N: 十分に大きな数（設定値）
r: 起点ノード
s: 終点ノード

このとき，「最大遅れ時間が最小となる (Minimizing the maximum exposure to delay)」ような経路選定基準は以下のように定式化される．

$$\min_{p,w} \sum_{a\in A} c_a p_a + \sum_{i\in I} w_i \tag{24}$$

$$\text{Subject to} \sum_{a\in A_i^+} p_a - \sum_{a\in A_i^-} p_a = g_i \quad i \in I \tag{25}$$

$$p_a d_a \le w_i \quad a \in A_i^+, i \in I \tag{26}$$

$$p_a \ge 0 \quad a \in A \tag{27}$$

本モデルでは，道路上の時間遅れはリンクではなくノード固有のものとして表現される．したがって，この問題は自由流時間にリンク利用確率を掛けたものにノードにおける最大遅れを足しあわせたものを評価指標とし，これを最小化することを目的としている（式 (24)）．その際の制約として，起点ノード r と終点ノード s 以外ではノード i を起点・終点とするリンク集合の選択確率が等しいこと（式 (25)），ノード i における最大遅れ w_i はそのノードを起点とするリンク a の期待遅れ時間以上（リンクが 1 つの時は等式）であること（式 (26)），リンク選択確率が非負であること（式 (27)) が考慮される．

(2) 静的な Hyperpath 探索アルゴリズム

Bell[101] では，計算の効率化のため，出発ノードを基準 ($h_r = 0$) としたノードポテンシャルを以下のように導入している．

$$c'_a = c_a + h_i - h_j \qquad \forall a = (i,j) \in A$$

探索は終点ノードから出発ノードへ（高ポテンシャルから低ポテンシャルへ）行なう．このとき，ノード j からの期待旅行時間は，

$$u'_i = u_i + h_i - h_s \qquad \forall j \in I$$

のようになる．また，このポテンシャルは以下の前提条件（ノードポテンシャルの最適性条件[105]）を満たさなければならない．

$$h_j \le h_i + c_a \qquad \forall a = (i,j) \in A \tag{28}$$

Bell[101] では，格子ネットワーク上の辺長 (Manhattan Distance) をポテンシャルとみなした次の “Hyperstar” アルゴリズムを提案している．

0. 初期化

$u_i \leftarrow \infty, i \in I - \{s\}, u_s \leftarrow 0;$
$f_a \leftarrow 1/d_a$ if $d_a > 0$, otherwise $f_a \leftarrow N;$
$f_i \leftarrow 0, i \in I;$
$y_i \leftarrow 0, i \in I - \{r\}, y_r \leftarrow 1;$
$L \leftarrow A;$
$H \leftarrow \emptyset.$

1. リンク a の選択

Find $a = (i, j) \in L$ with minimum $h_i + u_j + c_a$;

$L \leftarrow L - \{a\}$

2. ノード i の更新

if $u_i \geq u_j + c_a$

if $u_i = \infty$ and $f_i = 0$, then $\beta \infty 1$

else $\beta \leftarrow f_i u_i$

$u_i \leftarrow (\beta + f_a(u_j + c_a))/(f_i + f_a)$;

$f_i \leftarrow f_i + f_a$;

$H \leftarrow H + a$;

if $L = \emptyset$ or $h_i + u_j + c_a > u_r$, then go to Step 3

else go to Step 1

（終了判定）

3. ローディング

$\forall a \in A$ について $h_i + u_j + c_a$ の降順で,

if $a \in H$ then $p_a \leftarrow (f_a/f_i) y_i$ and $y_j \leftarrow y_j + p_a$

else $p_a \leftarrow 0$.

全てのリンクの最大遅れ d_a が 0 のとき，Hyperstar アルゴリズムは自由流旅行時間が最小の経路（通常の最短経路）のみを生成する．これは自由流旅行時間をリンクウェイトとおいた A*アルゴリズム[104] と同様の結果である．一般の HP では，今あるリンクが全て最大限遅れたときに自由流時間でそれより早く着く経路がないかという観点から経路群を形成する．よって，発生する遅れがこの最大遅れの範囲内であれば，経路群内のいずれかの経路が最短時間経路になる．

各リンクの選択確率は当該リンクの最大遅れ時間に応じて決定される．仮にルート A：自由流 10 分最大遅れ 10 分，ルート B：自由流 15 分最大遅れ 10 分とすると，$p_a = (1/10)/(1/10 + 1/10) = 1/2$ となる．一方，A: 自由流 5 分最大遅れ 15 分，B:自由流 15 分最大遅れ 5 分とすると，$p_a = (1/15)/(1/15 + 1/5) = 1/4$ となる．

すなわち，Hyperpath では「旅行時間は長いが，大きく遅れる確率が低いルート」の方が「旅行時間は短いが，大きく遅れる確率が高いルート」よりもより高い確率で推奨される．これに関しては，リスク回避傾向を明示的に考慮した拡張モデルへと展開することで，現実に則した柔軟な推奨を行うことが可能になる．

(3)　時間依存 Hyperpath 探索アルゴリズム

Bell et al.[106] では，各リンクの自由流時間と最大遅れが離散化された時刻に依存して変化する状況における Hyperstar アルゴリズム（Time-Dependent Hyperstar）を提案している．Bell[101] では，到着ノードから HP リンクセットの探索を行なっていたが，そのような Backward 型の探索ではノード r に到達した時点における到着ノード s の期待旅行時間を表現できなかった．Bell et al.[106] では出発ノードから到着ノードへ向けての探索へとアルゴリズムの変更を行っており，以下のように表される（下線部が変更点）．

$$\min_{p,w} \sum_{a \in A} p_a c_a(u_i) + \sum_{j \in I} w_j$$

$$\text{Subject to} \sum_{a \in A_j^+} p_a - \sum_{a \in A_j^-} p_a = b_j \quad j \in I$$

$$p_a d_a(u_i) \leq w_j \quad \forall a \in A_j^+, j \in I$$

$$p_a \geq 0 \quad a \in A$$

0. 初期化

$u_i \leftarrow \infty, i \in I - \{r\}, u_r \leftarrow \infty$;

出発地 r を除く全てのノード i の期待旅行時間を ∞ に設定

$f_a \leftarrow 1/d_a$ if $d_a > 0$, *otherwize* $f_a \leftarrow N$;

リンク頻度をリンク最大遅れの逆数，または適当に大きな数値に設定

$f_i \leftarrow 0, i \in I$;

ノード頻度を全て 0 に設定

$y_i \leftarrow 0, i \in I - \{s\}, y_s \leftarrow 1$;

目的地以外の全てのノード選択確率を 0 に

$L \leftarrow A$;

$H \leftarrow \emptyset$.

1. リンク a の選択

Find $a = (i, j) \in L$ with minimum $h_j + u_i + c_a(u_i)$;

$L \leftarrow L - \{a\}$.

出発点 r から出るリンクのうち，自由流時間が最も小さいリンクを選択（2 周目以降はノード j から s の最大遅れ最小時間との和）

$L \leftarrow L - a$

2. ノード i の更新

if $u_j \geq u_i + c_a(u_i)$

if $u_j = \infty$ and $f_j = 0$, then $\beta \leftarrow 1$

else $\beta \leftarrow f_j u_j$

$u_j \leftarrow (\beta + \frac{1}{d_a(u_i)}(u_i + c_a(u_i)))/(f_j + \frac{1}{d_a(u_i)})$,

選択されたリンク a の起点ノードの u_i を更新,

$f_j \leftarrow f_j + \frac{1}{d_a(u_i)}$

$H \leftarrow H + \{a\}$;

if $L = \emptyset$ or $u_i + c_a(u_i) > u_s$, then go to Step 3

else Step 1

終了判定

3. ローディング

$\forall a \in A$ について $h_j + u_i + c_a(u_i)$ の降順で,

if $a \in H$ then $p_a \leftarrow \frac{1}{f_j d_a(u_i)} y_j$ and $y_i \leftarrow y_i + p_a$

else $p_a \leftarrow 0$.

7.5 Hyperpath アルゴリズムの高速化

本研究では，大規模ネットワークにおける HP 探索を想定して，Spiess and Florian[103] アルゴリズムの高速化手法を提案しており，従来アルゴリズムとの比較を通じて，その優位性を示している．高速化は，(1) 楽観的ノードポテンシャル（optimistic node potentials），並びに，(2) ノード有向探索（node-directed search）という二つの異なる概念を導入することによって実現される．アルゴリズムの数理的基礎に関する詳細は，Ma[107] を参照されたい．これら二通りの高速化の方法は，単独あるいは結合的に，従来の SF アルゴリズムあるいは HD アルゴリズムに対して適用され，展開形として幾つかのバリエーションアルゴリズムが導かれる．**表–15** には，既存のアルゴリズム（太字）と新たに展開して開発されたアルゴリズム（赤字）の一覧を示している．上付き添字の “*i*” は楽観的ノードポテンシャルの導入を表し，“*d*” はノード有向探索の導入を表す．

新アルゴリズムの有意性を示すため，Ma[107] では以下の三つの命題が提示され，その証明もなされている．

命題 1. 悲観的旅行時間（遅れが最大となる時間）は実旅行時間の過大推計値であることから，ノードポテンシャルとしての利用は適切ではない．一方，楽観的旅行時間（自由旅行時間）は，実旅行時間の過少推計値であり，ノードポテンシャルに必要な最適性条件（式 *(28)*）を満足する．

命題 2. 楽観的ノードポテンシャルは，実旅行時間の最大推定値である．

命題 3. *SF* タイプのアルゴリズムではリンクの再チェックプロセスは必要ない．一方，*HD* タイプのアルゴリズムではリンクの再チェックが必須となる．

提案されたアルゴリズムの詳細については Ma[107] を参照されたい．以降に示すように，本研究で提案するアルゴリズムは従来の SF，HS，HD 等の大幅なスピードアップを達成することができる．

7.6 提案アルゴリズムのパフォーマンステスト

楽観的ノードポテンシャル及びノード有向探索の導入は，算出される HP に何の影響も与えない．従って，**表–15** に示した 8 つのアルゴリズムは全て同じ結果を算出する．そこで，比較において重要となるのはそれらの計算速度の違いである．本節では，仮想的な交通ネットワークを用いてこれら 8 つの HP 生成アルゴリズムの速度比較を行う．比較においては，計算速度のみならず，探索の過程でチェックされているリンクの数にも着目する．これは，チェックされるリンクの数が少なければ少ないほど，計算速度の向上に寄与すると考えられるためである．

表–15 アルゴリズムのバラエティ

ベース ＼ 改良	ノードポテンシャル: Manhattan 距離	ノードポテンシャル: 楽観的旅行時間	ノード有向探索	両方
SF (Spiess & Florian)	**Hyperstar (HS)**	SF^{i}	SF^{d}	SF^{di}
HD (Hyperpath-Dijkstra)	×	HD^{i}	HD^{d}	HD^{di}

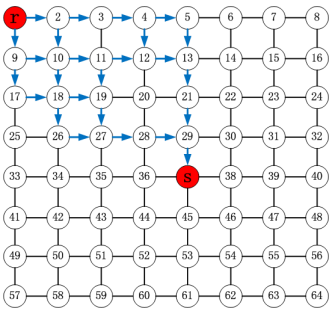
表–16 旅行時間の設定

i	j	$c_{(i,j)}$	R
1	2	1.5000	0.5313
2	3	1.3610	0.7027
3	4	1.7729	0.1717
4	5	1.8187	0.6617
5	6	1.8722	0.9257
6	7	1.5820	0.9747
7	8	1.5706	0.3410
9	10	1.5597	0.7933
10	11	1.4173	0.8680
11	12	1.2747	0.8280
12	13	1.1977	0.3443
...	...	...	...

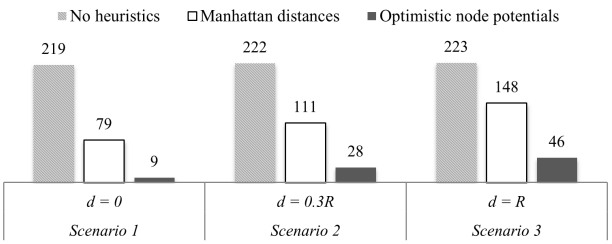
(1) 楽観的ノードポテンシャル導入の効果

本研究では，Bell[101] と同一の設定で提案する楽観的ノードポテンシャル導入がリンクチェック作業の効率化にどのように寄与するのかを検証した．Bell[101] では，Manhattan 距離（格子状ネットワークにおける格子の辺長）をノードポテンシャルとして採用し，8×8 の仮想的な格子状ネットワークを用いた検証を行なっている．また，各リンクの自由旅行時間を全て 1 に統一し，最大遅れ時間については，0 – 1 の間の一様乱数 R によって生成することによって与えている，この R に対し，(1) $0\times R$，(2) $0.3R$，(3) R の三段階のネットワーク混雑レベルを仮定して，モンテカルロシミュレーションによる検証を行なっている（**図–30**，**表–16**）．

図–30 に示した起点 r，終点 s に対して i アルゴリズムを適用した結果を**図–31** に示す．楽観的ノードポテンシャルの導入により，探索されるリンクの数が劇的に



図–30 検証用ネットワーク



図–31 Hyperpath 探索過程でチェックされたリンク数

減少していることが確認される．これは計算速度の向上にも直結する．その影響は，混雑がない Scenario 1 の状況において最も顕著に現れているが，混雑が中程度（Scenario 2），及び，激しい混雑の場合（Scenario 3）においても，探索リンク数は有意に少なくなっていることが分かる．

(2)　一般ネットワークにおける計算速度の比較

表–15 に示した新たな 6 つのアルゴリズムを例題ネットワークに適用したところ，いずれの 6 つのアルゴリズムの計算速度とも，その差は無視できるほど非常に小さいものであった（0 ms から 2 ms 程度）．そこで以下では，ネットワークの規模を拡大・多様化して，提案する 6 つのアルゴリズムを適用し，それらのアルゴリズムの特徴を明らかにすることを試みる．ここでは，図–32 に示す四種のネットワーク（(a)50 × 50 格子ネットワーク，(b) ランダム・スモール・ワールドネットワーク，(c) 米国全土の主要道路ネットワーク，(d) ニューヨーク州内の主要道路ネットワーク）の比較検証を行った（図中の m: リンク数，n: ノード数）．

リンク旅行時間については，(a)，(b) の仮想的な二つのネットワークに対しては，自由旅行時間は $[0, 1]$ の一様乱数によって生成すると共に，最大遅れについては，$[0, 0.25]$ の一様乱数によって生成することで与えた．一方，実ネットワーク (c)，(d) については，自由旅行時間を “リンク長 (m)/60(km/h)” によって定めると共に，最大遅れについては，“R× リンク長 (m)/60(km/h)” によって与えることとした．

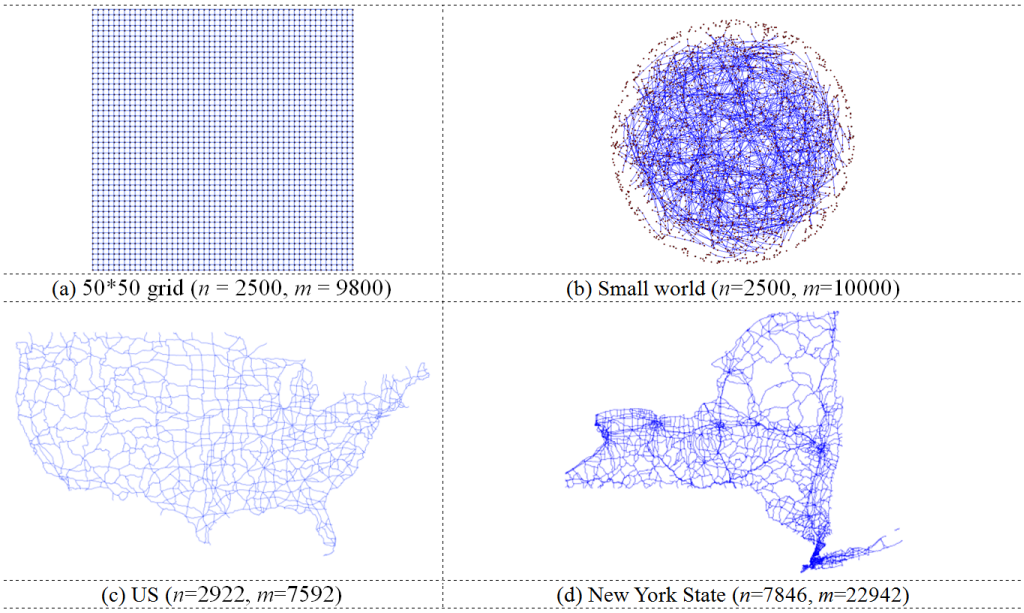
各ネットワークにおいて起終点ペアをランダムに 10 個生成し，ペアノード間の最小楽観的旅行時間によって昇順に並べ替えることにより，検証用の起終点ペアを生成した．その上で，各起終点ペアに対し旅行時間の乱数を 3 パターン作成し，その上でアルゴリズムの計算時間の比較を行った．表–17 に各ケースにおける計算時間の平均値を 1000 分の 1 秒（millisecond: ms）単位で示す．数は少ないがネットワークの混雑状況次第では，SF^i の実行時間が SF の実行時間よりも長くなるようなケースも見られる．一方 HD^i と HD^d の比較，もしくは SF^i と SF^d の比較より，ノード有向検索はアルゴリズムのパフォーマンスを向上させる上でより重要な役割を果たしていることが明らかになっている．また実際には，これらの二つの方法が一緒に実装されることにより提案されている中で最も早い計算速度が達成されることが分かる．(a) グリッド，(b) スモール・ワールドでは，HD^{di} は全体的に最速な結果をもたらしている．一方 (c) 米国と (d) ニューヨーク州では，SF^{di} と HD^{di} が類似した結果となっていることが確認される．

以上の考察より，SF^{di} 及び HD^{di}，すなわち楽観的ノードポテンシャルとノード有向探索を併用した手法が最もパフォーマンス的に優れていることがわかる．さらにアルゴリズムの構造から判断すると，SF^{di} よりも HD^{di} のパフォーマンスの方が，特にネットワークのリンク数がノード数よりも相対的に多い場合には優れてくるはことが期待される[108]．それぞれのネットワーク構造の平均次数を計算すると (a)3.92，(b)4.00，(c)2.60 となっており，SF^{di} と HD^{di} の計算速度の違いは，この次数の相違によってもある程度明らかになっている．

(3)　SF^{di} アルゴリズムと HD^{di} アルゴリズムの比較

図–33 に SF^{di} 及び HD^{di} の各アルゴリズムのさらに詳しい比較結果を示す．これらの図において，横軸はランダムに生成された起終点ペアを最短距離の順番で昇順に並べたものである．また，縦軸は計算時間（単位：ms）の対数軸である．多くの場合においてこれら 2 つのアルゴリズムはほぼ同様の傾向を示していることが分かる．但し，グリッドネットワーク並びにスモールワールドネットワークにおいては，SF^{di} の方が若干計算速度が遅くなっている．また，スモールワールドネットワークにおける幾つかのケースでは，SF^{di} の計算速度が HD^{di} のそれをはるかに卓越していることが分かる．その理由として，スモールワールドネットワークに固有のクリーク（clique）の存在が考えられる．これらのケースを精査したところ，生成された最小費用 HP の中に多くのリンクが結合しているハブ的役割を果たすノードが含まれていることが確認された．すなわち，ハブ型のネットワークにおいては，SF^{di} の計算効率性が場合によっては低下する可能性が示唆される．

さらに，SF^{di} と HD^{di} の違いを精査するために，New York 州道路ネットワークを対象として比較分析を行った．この分析では，100 個の起終点ペアをランダムに生成し，起終点間距離によって昇順に並べ替えている．その上で各起終点ペアに対し 10 回ずつシミュレーションを行った．その結果を表–17 及び図–34 に示す．図–34 より，概して SF^{di} の方が HD^{di} よりも計算効率性が高いことが見て取れる．両アルゴリズムは，旅行時間の不確実性が存在しないネットワーク（図–34 (a)），あるいは，起終点間距離が近い状況では性能的に拮抗しているものの，旅行時間の不確実性が増したり (図–34 (b),



図–32 検証用ネットワーク

表–17 平均計算時間の比較（単位：ms）

アルゴリズム	(a)**Grid**				(b)**Small world**				(c)**U.S.**			
	0	1*R*	2*R*	5*R*	0	1*R*	2*R*	5*R*	0	1*R*	2*R*	5*R*
HD	373	312	311	311	396	342	334	335	444	434	434	438
HD^{i}	40	105	145	190	34	49	69	113	42	193	242	310
HD^{d}	61	61	61	62	96	90	85	82	69	74	73	74
HD^{di}	23	30	36	49	23	25	27	33	19	31	37	47
SF	7335	8200	8381	8383	9620	10418	10393	10574	6400	6474	6475	6468
SF^{i}	191	3618	6148	8673	107	927	1952	4415	226	4366	5381	6965
SF^{d}	102	88	85	82	555	533	492	500	46	44	44	46
SF^{di}	24	37	52	72	23	28	38	84	20	31	31	41

アルゴリズム	(d)**New York State**			
	0	1*R*	2*R*	5*R*
HD^{di}	158	554	712	995
SF^{di}	155	381	403	424

(c), (d))，起終点間距離が長くなるに従って，両者の違いが明確に現れてくることが確認される．以上より，SF^{di} と HD^{di} のどちらが計算効率性が良いかは，主にネットワークの位相構造に依存していることが推察される．但し，今回検証したケースの限りでは，HD^{di} よりも SF^{di} の方が計算効率性に優れていることが確認された．

7.7 他の経路誘導アルゴリズムとの比較

(1) 検証用ネットワークと旅行時間変動の設定

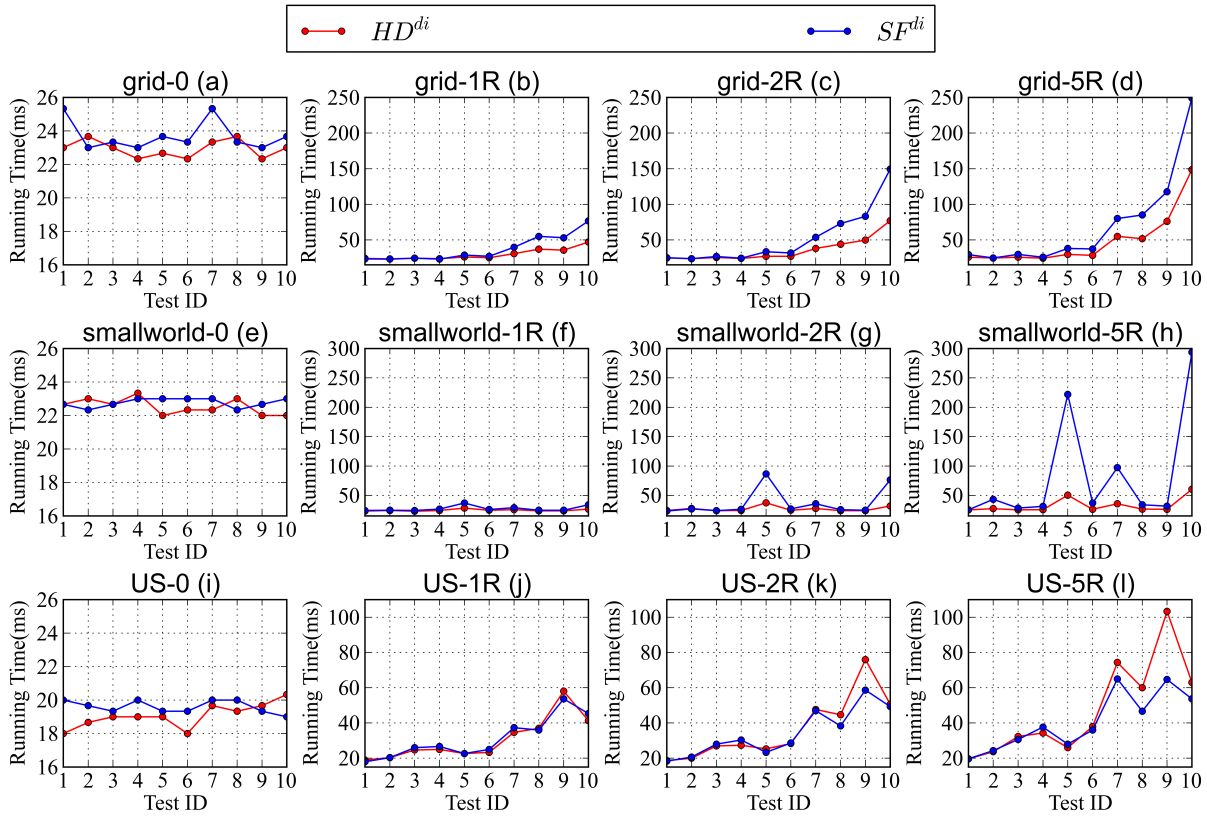
本節では，HP アルゴリズムによる経路誘導と他の代表的な経路誘導との比較分析を行う．この目的は，カーナビゲーションシステム等において利用されている標準的な経路誘導方式と比較して HP による経路誘導アルゴリズムがどのような場面で有意性を発揮しうるのかを明らかにすることにある．商用のナビゲーションには多様な経路誘導機能が実装されているが，基本的考え方は「車両が移動する毎に，各 Decision Node における最新の交通情報に基いて，逐次的に静的な最短経路探索を目的地まで繰り返す」というものである．

そこで，旅行時間が不確実に変動する交通ネットワークでモンテカルロシミュレーションを実施し，以下に示す 4 つの経路探索アルゴリズムの性能比較分析を行う．

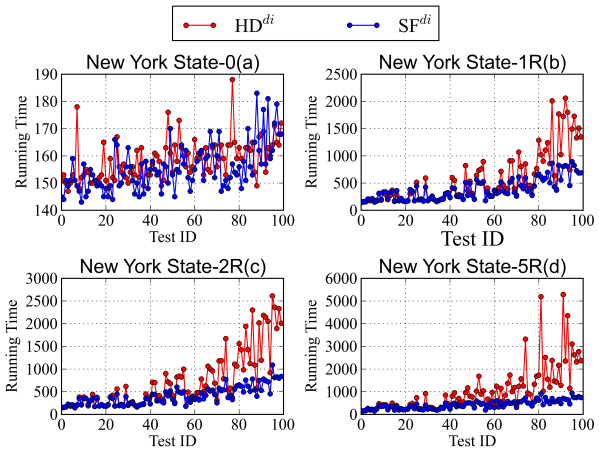
- 確定的最短経路探索[109]：SP
- 確定的・時間依存型・最短経路探索[110]：TDSP
- 静的 Hyperpath 探索[101),107)]：HP
- 時間依存型 Hyperpath 探索[106]：TDHP

HP の設定状況，すなわち「道路リンクには自由旅行時間と最大遅れ時間という，二種類の旅行時間特性が含まれている」において通常の最短経路探索を行うにあたり，リンクウェイトをあらかじめ一意に定める必要がある．本研究では自由旅行時間（最小旅行時間）に基く楽観的（Optimistic）な基準と，最大遅れ時間（最大旅行時間）に基づく悲観的（Pessimistic）な基準をさらに細分化してから最短経路探索を実施する．表–18 に検討する 6 つの経路探索アルゴリズムを列挙する．

本分析では，Bell[101] と同様に 8×8 のグリッドネッ



図–33 SF^{di} アルゴリズムと HD^{di} アルゴリズムの計算速度の比較（grid・small world・U.S. の各ネットワーク）



図–34 SF^{di} アルゴリズムと HD^{di} アルゴリズムの計算速度の比較（New York 州の道路ネットワーク）

トワーク（図–30）を用いる．その際，旅行時間変動の出発時刻依存性を考慮するため，時間帯に応じて旅行時間の変動が異なるように設定した（表–19）．

(2)　検証結果 1：全体テスト ~ ネットワーク全体の評価

まず，ドライバーが 1 日を 30 分ずつに区切った 48 の時間帯の中からランダムに自身の出発時刻を決定したと想定し，各ドライバーの起終点もランダムに生成し

表–18 実装された経路探索アルゴリズム

アルゴリズム名	略記	データ構造
Hyperpath	HP	Fibonacci heap
Time-dependent hyperpath	TDHP	unsorted list
Optimistic time-dependent shortest path	TDSP_Opt	Fibonacci heap
Pessimistic time-dependent shortest path	TDSP_Pes	
Optimistic shortest path	SP_Opt	Fibonacci heap
Pessimistic shortest path	SP_Pes	

て各経路誘導アルゴリズムに従って経路を走行する状況をシミュレートした．シミュレーションは各経路誘導アルゴリズムに対し 100 万回ずつ試行し，各ドライバーが実際に要した旅行時間 t_{sim} とトリップ開始前に想定されていた予定旅行時間 t_{prior} との差を評価する．図–35 (a) には各経路誘導アルゴリズムにおける時間差 ($|t_{prior} - t_{sim}|$) の経験分布，図–35 (b) には旅行時間の相対比 (t_{prior}/t_{sim}) の経験分布を示している．

図–35 より，最短経路基準によるアルゴリズム (SP_Opt, SP_Pes, TDSP_Opt, TDSP_Pes) は，実旅行時間との乖離が小さい経路をより多く算出していることが確認される．しかし図–35 を概観する限り，HP ベースのアルゴリズム（HP，TDHP）との経験分布の違いは明確には表れていない．そこで，図–35 (b) を拡大し

表–19 時間帯別の旅行時間変動設定

時刻 (秒：深夜 0)	分類	旅行時間乱数生成原理	最大値	最小値	平均値
0 - 14440	late night	$t + Rt, R \in [0, 0.2]$	t	$1.2t$	$1.1t$
14440 - 21600	early morning	$t + Rt, R \in [0.2, 0.4]$	$1.2t$	$1.4t$	$1.3t$
25200 - 32400	morning peak	$1.2t + Rt, R \in [0.8, 5.0]$	$2.0t$	$6.2t$	$3.6t$
64800 - 75600	afternoon peak	$1.2t + Rt, R \in [0.6, 3.0]$	$1.8t$	$4.2t$	$3.0t$
others	off-peak	$1.1t + Rt, R \in [0.4, 0.6]$	$1.5t$	$1.7t$	$1.6t$

（注）$1t = 900$ 秒，R：各レンジにおける一様乱数．

表–20 全体テスト：時間差 ($|t_{prior} - t_{sim}|$) の基本統計量

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	mean	std.
HP	0	0	45.7	81.6	121.8	170.7	235.4	350.8	1534.8	17576.3	508.58	1196.52
TDHP	0	0	45.4	81.2	121.1	169.7	234.9	348.7	1534.3	16146.2	508.86	1200.18
TDSP_Opt	0	0	0	38.2	98.1	157.3	229.6	347.3	1302.1	23645.0	508.46	1347.24
TDSP_Pes	0	0	0	38.2	98.1	157.3	229.6	347.3	1302.1	23645.0	508.46	1347.24
SP_Opt	0	0	0	38.6	98.4	157.5	229.5	346.9	1306.6	24694.2	509.19	1347.47
SP_Pes	0	0	0	38.6	98.4	157.5	229.5	346.9	1306.6	24694.2	509.19	1347.46

（注）数値はパーセンタイル値を指す．

た図–36 より，最短経路基準のアルゴリズムの経験分布の方が HP ベースのアルゴリズムの経験分布よりも右裾が長くなっていることが明確に確認される．すなわち，最短経路基準のアルゴリズムでは，実旅行時間と予定旅行時間との乖離が非常に大きくなる場合が起こりやすいことが示唆される．一方 HP ベースの経路誘導アルゴリズムでは経験分布の右裾は相対的に短い．すなわち HP ベースの経路誘導は，大きな遅れへの遭遇を極力回避する方法であることが確認される．これは各経験分布の統計値を示した表–20 からも明らかである．

(3)　検証結果 2：個別テスト ~ 旅行時間の日変動の影響

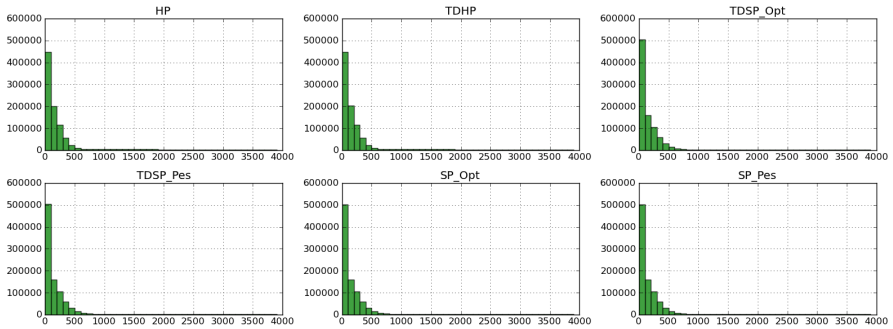
次に，図–?? 中のノード 1 を起点，ノード 64 を終点とし，各経路誘導アルゴリズムに対して 1 万回，10 万回，100 万回の三段階でシミュレーションを試行した．その結果を図–37 に示す．HP に基づく経路誘導（HP, TDHP）に従う車の旅行時間変動は，最短経路基準のアルゴリズム（SP_Opt，SP_Pes, TDSP_Opt, TDSP_Pes）に従う車の旅行時間変動よりも有意に小さくなっていることが確認される．すなわち，混雑等によって旅行時間の不確実性が大きいネットワークを日々通勤などで移動するドライバーにとって，HP に基づく経路誘導は，旅行時間の定時性を高められる可能性が示唆される．

さらに，ピーク時間帯の分析と起終点は同じ設定のもと，車両の出発時刻を深夜 0 時に固定することにより，オフピーク時間帯におけるシミュレーションを実施した（試行回数 1 万回）．旅行時間分布を図–38 に示す．オフピーク時でもピーク時と同様に，HP に基づく経路誘導は旅行時間の定時性を高めることができる可能性があることが確認される．

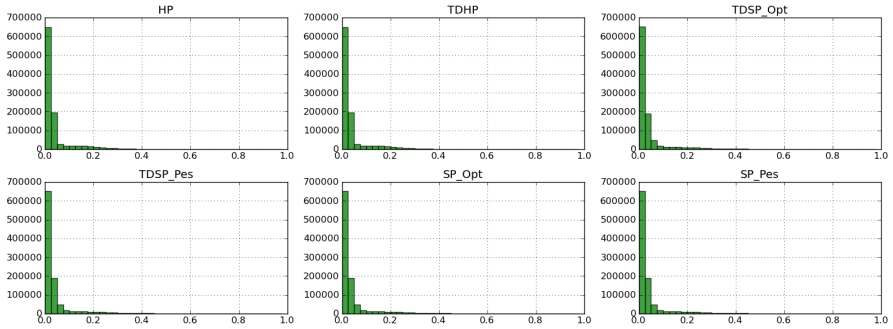
7.8　おわりに

本章では，HP に基づくリスク回避型動的経路誘導の基礎理論の構築，並びに，提案するアルゴリズムの妥当性・有用性のシミュレーションによる検証を行った．まず，既存の HP モデルのさらなる高速化を実現可能な，新たな HP 生成アルゴリズムを開発した．そのアルゴリズムは，(1) 楽観的ノードポテンシャルの導入，(2) ノード有効探索の実施，というそれぞれ独立した 2 つの経路探索基準を新たに導入することによって達成された．それらの方法の妥当性を数理的に証明した上で，最小費用 HP 基準に基づく経路群生成の基本特性について様々な状況下でシミュレーション的な検討を行った．多様なネットワーク構造，及び，多様な不確実性の状況のもとでの検証結果より，上記 2 つの経路探索基準を既存の SF アルゴリズムに導入した SF^{di} アルゴリズムのパフォーマンス全体的に優れていることが確認された．

次に，HP に基づく経路推奨基準と，他の標準的な経路推奨基準との比較検討をシミュレーション分析により実施した．モンテカルロシミュレーションの結果より，HP による経路誘導アルゴリズムの方が最短経路基準のアルゴリズムよりも，標準偏差等の旅行時間信頼性の観点のみならず，微量ながら平均旅行時間の観点からも優れていることが確認された．また，混雑等によって旅行時間の不確実性が大きいネットワークを日々通勤などで移動するような局面において，HP に基づく経路誘導が旅行時間の定時性を高めることができる可能性があることが示唆された．

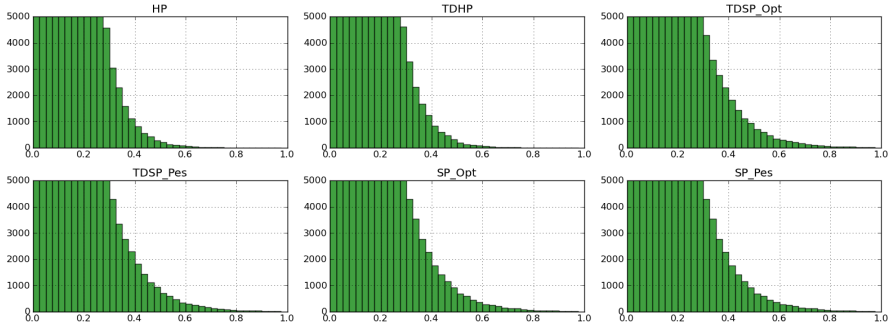


(a) 時間差 ($|t_{prior} - t_{sim}|$) の経験分布

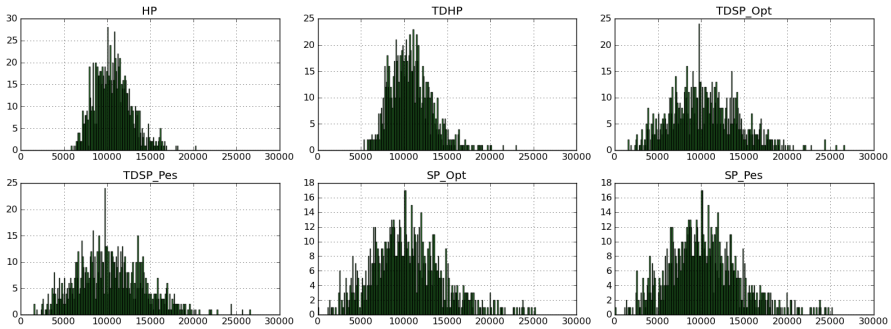


(b) 時間比 ($|t_{prior}/t_{sim}|$) の経験分布

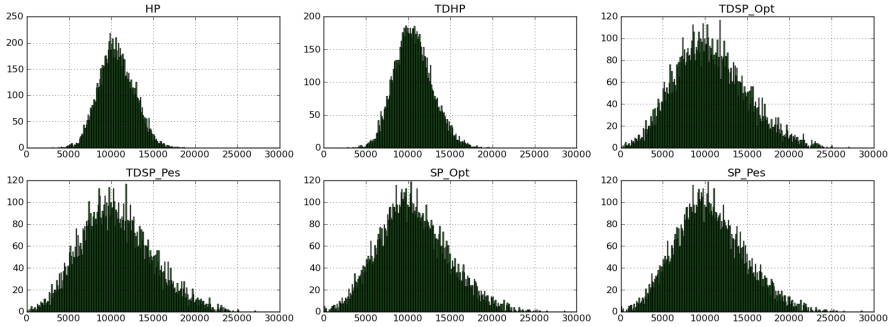
図–35 各経路誘導アルゴリズムによって算出された旅行時間と実際の旅行時間との乖離



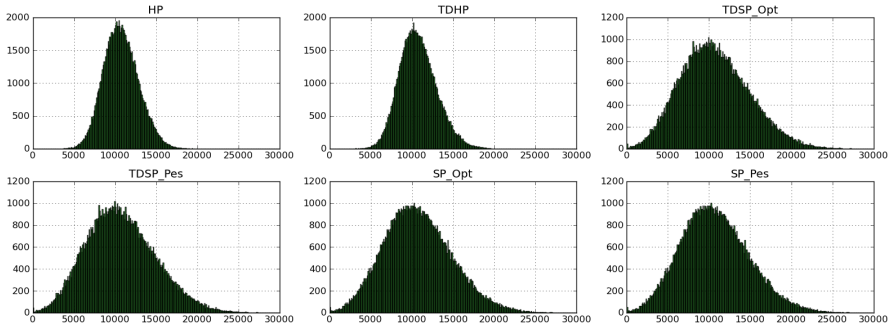
図–36 旅行時間と実際の旅行時間との乖離の拡大図



(a) シミュレーション回数 1 万

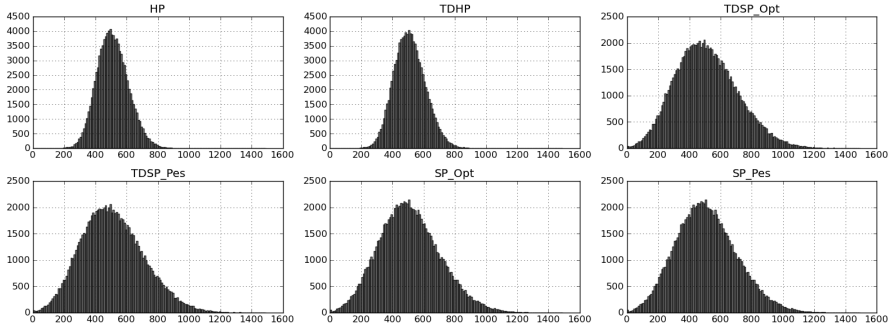


(b) シミュレーション回数 10 万



(c) シミュレーション回数 100 万

図–37 固定起終点に対する旅行時間分布（ピーク時）



図–38 固定起終点に対する旅行時間分布 (オフピーク時)

第 8 章　Hyperpath に基づく遅刻リスク回避型経路誘導システムの開発と検証

8.1　はじめに

本章では，実道路ネットワークに適用可能な Hyperpath (HP) に基づく遅刻リスク回避型経路誘導システムを構築する．次に，公道上での走行実験を通じて，システムの旅行時間信頼性に対する効果を検証する．

HP に基づく経路誘導アルゴリズムに関しては，Bell et al.[106] を参考に時刻依存型の最適 HP 推奨アルゴリズムを構築する．システム化にあたっては，関東圏における道路ネットワークデータと統計的旅行時間データを用いることで，実道路ネットワークでの適用を可能にする．さらに，開発した経路誘導アプリを用いて走行実験を行う．走行実験は，二つの異なる経路誘導方式 (HP または Shortest path: SP) にそれぞれ従う経路誘導の比較を様々な条件下で行い，得られたデータから，HP に基づく経路誘導が従来型の SP に比べて時間信頼性の高い経路誘導となるかどうかを検証する．

8.2　経路誘導システムの構築

(1)　全体像

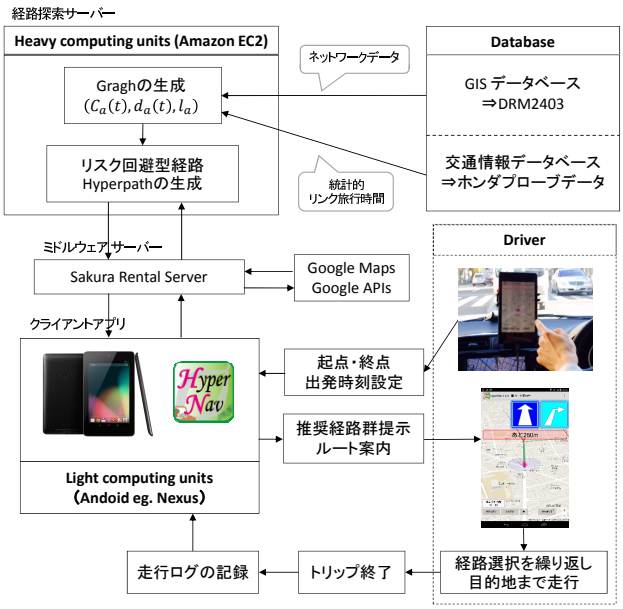
経路誘導システムの全体像を図–39 に示す．経路探索に使用する Database は 2 種類で，GIS データベースに DRM2403，交通情報データベースにホンダインターナビのホンダプローブデータを用いている．ドライバーは，クライアントアプリ上で起点・終点・出発時間を設定する．その情報が Android 端末から Amazon EC2 上の仮想サーバーに送られることで，HP に基づく経群路が計算され，その計算結果がアプリ上に表示される．ドライバーはこのアプリ上でのルート案内に従い，経路選択を繰り返しながら目的地まで走行を行う．

(2)　Hyperpath に基づく経路誘導アルゴリズム

HP 探索は Bell et al.[106] の Time-dependent Hyperster algorithm に，さらに Ma[107] による Faster hyperpath generating algorithm を適用して計算の高速化を図っている．各リンクの旅行時間はプローブデータから 15 分間隔で集計し (0:00-0:15, 0:15-0:30,..., 23:45-0:00)，それぞれの統計値を用いて経路を計算する．

(3)　実道路ネットワークのデータ設定

本システムでは Digital Road Map (DRM) 平成 24 年度版「DRM2403」を GIS データベースとして用いる．DRM における道路網は固有の番号が設定されているノードとリンクの組合せにより表現される．適用範囲は関東圏を全域をカバーしており，この範囲に含まれるリンクレコード数は 460,098 となっている．



図–39 遅刻リスク回避型経路誘導システムの全体像

表–21 道路幅員コードと自由流速度

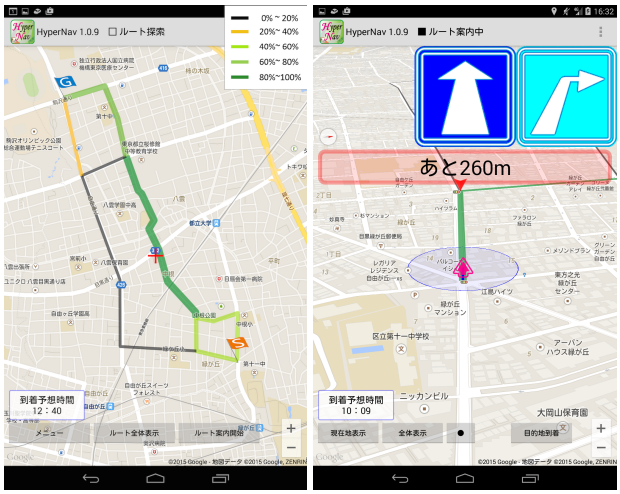
	道路幅員	自由流速度
1.	13.0m 以上	50km/h
2.	5.5m~13.0m	40km/h
3.	3.0m~5.5m	30km/h
4.	3.0m 以下	20km/h

HP の計算に必要な統計的リンク旅行時間は，ホンダインターナビの 2013 年 9 月 ~2014 年 2 月の六ヶ月間のデータより構築する．このデータは DRM の基準に準じたリンク単位にあらかじめ分割された旅行時間として記録されている．15 分毎の時間間隔に分け，進入時間毎に集計を行う．走行実験は平日のみの走行を考えているため，休日，祝日，年末年始，台風や大雪による積雪などの日の走行データは予め除外した．

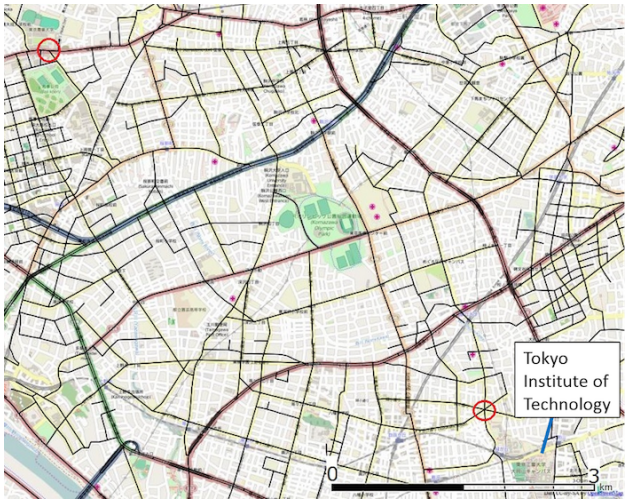
HP の計算に用いる最小旅行時間の値は集計された 15 分毎のリンク旅行時間の 5 パーセンタイルを値を仮定し，最大遅れ時間は，リンク旅行時間の 95 パーセンタイルと 5 パーセンタイルの差の値を仮定している，しかし，全てのリンクでデータが記録できているわけではなく，交通量の少ない深夜の時間や山地などの郊外の道路では記録が無いものもある．リンクカバー率は 92.6%，15 分毎に集計されたデータレコードのカバー率は 65.0% である．そこで，データを与えるためのリンクの属性値に DRM リンクデータに含まれる道路幅員コードを用い，それに対応する自由流速度を設定し，リンク旅行時間データの無いレコードに対して与えることとする（表–21）．このようなリンクにおける最大遅れ時間は 0 と仮定する．

(4)　経路誘導アプリケーション

経路誘導システムをタブレット端末上で操作し，経路案内を行うための Android Apps “HyperNav” を開発



図–40 HyperNav 上の経路探索結果画面 (左) と経路案内中画面 (右)



図–41 出発地と目的地の位置関係（Open Street Map）

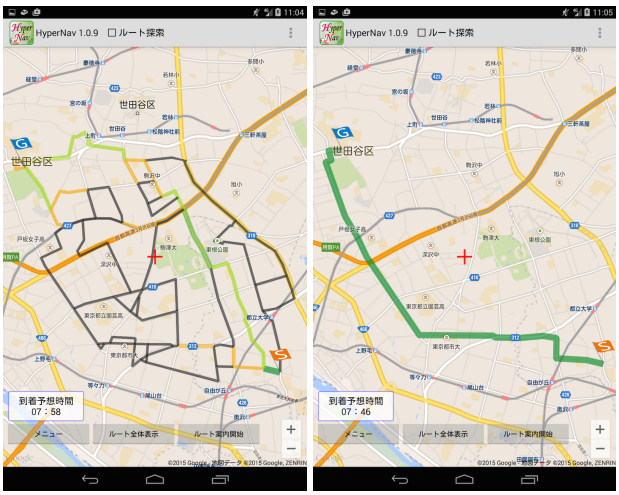
した．本アプリでは，地図上での起終点の指定と出発時間を設定することで経路探索が行われる．図–40 左に実際に計算された HP のスナップショットを示す．経路の色はリンクの選択確率 (p_a) を表している．また，画面左下には悲観的到着時刻 (u_s)（最長の遅れが生じたとしてもこの時間までには到着することができると考えられる時刻）が示されている．経路探索は HP に基づく経路誘導と SP に基づく経路誘導の両方が実行可能である．経路案内中は，走行中のログデータが保存され，1~3 秒毎に取得された GPS データより実旅行時間や実走行経路を確認することができる．図–40 右には走行中のユーザーインターファイスを示している．HP は経路分岐点においての案内が特殊で，分岐ノードにおいて進行可能な方向に対して，画面上部のいくつかの案内板で進行可能方向が指示される．

8.3 実道路ネットワークでの走行実験

(1) 実験概要

走行実験はで，HP に従う車両と SP に従う車両が同時に出発し，目的地までの実旅行時間と実経路等を記録する．HP 車両と SP 車両の違いは経路探索の方式のみであり，同じ旅行データベースとアプリ表示画面に基づいている．

HP と SP の経路計算に用いるリンク旅行時間はリンクのパーセンタイル値を用いる．HP では，リンクの最小旅行時間に 5%タイル値，最大遅れ時間に 95%タイル値と 5%タイル値の差を用いる．一方，SP のリンク旅行時間データには，リンクの中央値（50%タイル値）を採用している．平均値ではなく中央値を採用した理由は，旅行時間の分布は右の裾が厚く，左に偏った分布であるため，平均値を用いると，大きい値に引きずられたリンク旅行時間で計算されてしまうためである．特



図–42 HP と SP の経路探索結果（7 時 30 分出発）

に，今回扱うデータは時間帯別に分けて集計しており，サンプル数が少ないものが多数のために，その傾向が強まると考えられる．

走行実験は 2014 年 12 月 8 日 ~12 日，15 日 ~19 日の平日 10 日間で行った．平日に実験を実施したのは，通勤退勤ラッシュ時のような混雑が見られる時間とそうでない時間帯においての効果の違いを検証するためである．トリップの起終点は，目黒区緑が丘付近と世田谷区桜ヶ丘付近の往路・復路で設定した．起点終点間の直線距離は約 8km である．図–41 は起終点の位置を Open Street Map 上で示しており，起終点は赤丸で示されている．黒の直線は DRM のデータベースに含まれる道路リンクを示しており，このリンクで経路探索が行われる．以下では，緑が丘から桜ヶ丘に向かうトリップを “Trip A”，桜ヶ丘から緑が丘に向かうトリップを “Trip B” と称する．表–22 に，実際の実験時のトリップ毎の出発時間を示す．

図–42 は HP と SP における実際の経路計算結果の例

表–22 実験時のトリップ毎の出発時間

	Trip	出発時間
朝	A	7:30
	B	8:05
	A	8:40
	B	9:10
昼	A	13:00
	B	13:30
夕	A	17:00
	B	17:30
	A	18:00
	B	18:30

表–23 実旅行時間の基本統計量

基本統計量 (単位：分)	Trip A		Trip B	
	HP	SP	HP	SP
平均	23.07	23.94	21.82	22.89
標準誤差	0.47	0.61	0.43	0.78
中央値	22.68	23.45	21.45	23.00
標準偏差	3.11	4.01	2.72	5.02
分散	9.67	16.11	7.42	25.21
尖度	1.23	0.03	1.25	2.60
歪度	0.75	0.61	0.69	1.21
範囲	15.85	17.23	14.25	24.25
最小	17.00	16.97	16.05	16.00
最大	32.85	34.20	30.30	40.25
標本数	43	43	41	41

を示している．これらの経路計算結果を見ると，HP は交通量が比較的少ない道路が推奨されており，SP は環状七号線のような交通量が比較的多い道路が推奨されていることがわかる．

以降では，次の三仮説 H_1 ~ H_3 について検証する．

H_1: HP と SP の実旅行時間の変動を比べると，HP の変動の方が小さい．

H_2: 混雑時間帯では，H_1 の効果がより大きくなる．

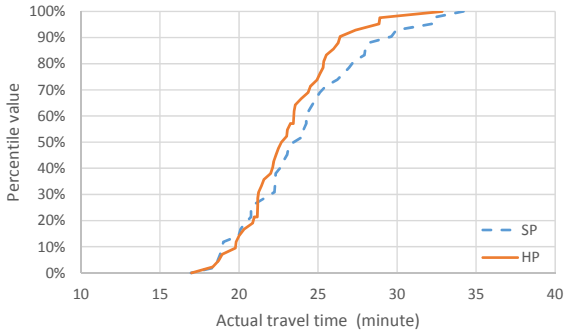
H_3: HP の推奨経路群が多いほど H_1 の効果は大きい．

(2) 走行実験の結果

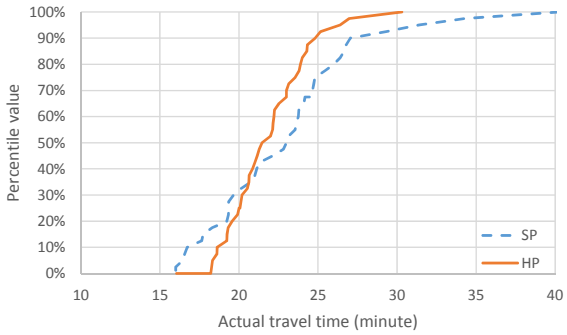
走行実験から得られた実旅行時間データ数は 168 件 (Trip A: 86，Trip B: 82) である．実旅行時間の基本統計量を表–23 に示す．HP と SP の平均や標準偏差は Trip A・B 共に HP が小さい結果になっている．これより，HP は SP よりも旅行時間が短く，ばらつきも小さくなる経路誘導方式であることが示唆される．また，図–43 と図–44 に実旅行時間の経験分布を示す．Trip A・B 共に，HP に従う分布の方がばらつきが小さいことが確認できる．HP のばらつきは小さいものの，パーセンタイル値 0%~30%の付近では旅行時間は HP の方が大きくなっていることがわかる．例えば，Trip B において 20 分以内に目的地に到着する確率は，HP で 25%，SP で 33%となっている．一方，25 分以内に目的地に到着する確率は，HP で 92%，SP で 76%となっている．

(3) 旅行時間変動の差の検定

まず H_1 について，HP と SP それぞれの経路誘導の実旅行時間のばらつきに有意に違いがあるかを検定する．帰無仮説を「2 群間の分散に差がない (等分散である)」と仮定し，対立仮説を「2 群間の分散に差がある (等分散でない)」とした F 検定の結果を表–24 に示す．



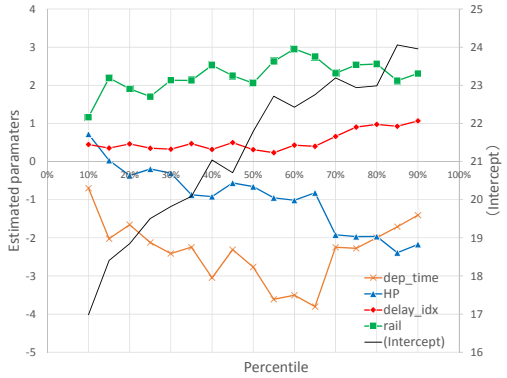
図–43 実旅行時間の経験分布 (Trip A)



図–44 実旅行時間の経験分布 (Trip B)

表–24 HP–SP 間での旅行時間の分散の差の F 検定検定

	Trip A	Trip B
観測数	43	41
自由度	42	40
分散比	1.67	3.40
$P(F <= f)$	0.05	0.00
F 境界値 (5%)	1.67	1.69



図–45 分位点回帰分析の推定結果

これより，両 Trip において有意水準 5%で帰無仮説が棄却され，HP と SP の実旅行時間のばらつきには有意な差が生じていることが確認された．

(4) 旅行時間変動の分位点回帰

次に，H_2 と H_3 について，外的な規定要因を考慮した実旅行時間分布に対する HP の効果の検証を行う．分析では，より詳細な説明変数と被説明変数の関係を得る必要があるため，分位点（パーセンタイル値）を規定する要因を探る統計モデルである分位点回帰 (Quantile

表–25 分位点回帰分析の詳細推定結果

	10% tile		15% tile		20% tile		25% tile		30% tile		35% tile	
(Intercept)	16.99	**	18.40	**	18.85	**	19.51	**	19.82	**	20.09	**
HP	0.72		0.03		-0.37		-0.20		-0.30		-0.87	
delay_idx	0.45		0.35		0.46	*	0.35		0.32		0.47	
dep_time	-0.70		-2.02	*	-1.66		-2.12	**	-2.41	**	-2.25	**
rail	1.17		2.19	**	1.90	*	1.70	**	2.13	**	2.13	**

	40% tile		45% tile		50% tile		55% tile		60% tile		65% tile	
(Intercept)	21.04	**	20.71	**	21.79	**	22.71	**	22.43	**	22.75	**
HP	-0.92		-0.56		-0.66		-0.95		-1.02		-0.82	
delay_idx	0.32		0.50		0.31		0.23		0.43		0.40	
dep_time	-3.05	**	-2.31	*	-2.77	**	-3.61	**	-3.51	**	-3.80	**
rail	2.52	**	2.25	**	2.07	**	2.63	**	2.95	**	2.75	**

	70% tile		75% tile		80% tile		85% tile		90% tile		
(Intercept)	23.19	**	22.94	**	22.99	**	24.06	**	23.96	**	
HP	-1.92	**	-1.97	**	-1.97	**	-2.39	**	-2.17		
delay_idx	0.66	*	0.91	**	0.98	**	0.92	**	1.07		
dep_time	-2.25	*	-2.28	*	-2.00		-1.71		-1.40		
rail	2.31	**	2.53	**	2.56	**	2.12	**	2.31		

"**" と "*" は有意水準 5%と 10%を示す

Regression) を適用する．分位点回帰とは，ある従属変数の条件付きタイル値を推定する方法であり，異なる分位点に対する説明変数の影響度の相違を分析することが可能である[111]．

被説明変数は実旅行時間 (travel_time$_\alpha$) の幾つかの分位点とする（α は分位点）．説明変数に HP ダミー変数 (HP)，統計的な起終点間の遅れ指標 (delay_idx)，出発時間ダミー (dep_time)，線路通過ダミー (rail) を用いて，分位点毎のパラメータを推定する．HP ダミー変数は，HP に基づく経路誘導で走行したデータ示す変数である．遅れ指標 (delay_idx) は，出発時間毎における悲観的旅行時間と期待旅行時間の差をとった上で標準化した値であり，時間帯毎の起点から終点までの旅行時間の不確実性を表現している．この遅れ指標が大きいときほど旅行時間の不確実性が大きくなることが期待される．出発時間ダミー (dep_time) は期待旅行時間が一番短いと期待される 18:30 に出発したデータのダミー変数である．これらの説明変数を含むモデル式を以下に示す（u_α は誤差項を表す）：

$$\begin{aligned}\text{travel_time}_\alpha = \beta_{0\alpha} + \beta_{1\alpha}[\text{HP}] + \beta_{2\alpha}[\text{delay_idx}] \\ +\beta_{3\alpha}[\text{dep_time}] + \beta_{4\alpha}[\text{rail}] + u_\alpha \quad (29)\end{aligned}$$

分位点回帰モデルの分位点毎の推定結果を表**–25** に示し，パラメータの値を図示化したものを図**–45** に示す．定数項 (Intercept) はどの分位点においても有意な値で推定されており，推定値はおよそ旅行時間と同様の値で右肩上がりになっていることがわかる．次に，HP ダミーの推定値は分位点が 70%から 85%の時にマイナスの値で有意に作用していることがわかる．また，分位点が大きくなるにつれてマイナスの値が大きくなっている．これらより，HP に基づく経路誘導に従うことで，旅行時間のばらつきを抑えられることが示唆される．また，推定値は有意ではないが，HP ダミーの推定値は，分位点が小さくなるにつれて値が上昇し，15%タイル値でプラスに転じている．すなわち，HP に基づく経路誘導に従うことで基本的には旅行時間を減少させることができるが，旅行時間が極端に短くなる確率は減少することが示唆される．次に，遅れ指標 (delay_idx) について，この説明変数も HP ダミー変数同様に 70%から 85%において有意な結果になっている．また，推定値はプラスで 70%から 85%にかけて右肩上がりに値が上昇している．つまり，遅れが見込まれる時間帯においては旅行時間を上昇させ，また，ばらつきも大きくなることが考えられ，これは仮説通りの結果が得られたといえる．次に，出発時間ダミー (dep_time) に関して，こちらは 25%から 75%までの間で特に推定値が有意にマイナスの値を取っていることがわかる．時間帯としては一番混雑が少ない時間をダミー変数として導入しているので妥当な結果が得られたと考えられる．最後に線路通過ダミー変数 (rail) についてはほとんどの分位点で有意にプラスの値であり，線路を通過する経路は，旅行時間を増加させることが示唆されている．

8.4 おわりに

本章では，実道路ネットワーク上で実行可能な HP に基づく経路誘導システムの構築を行い，走行実験を通じて，HP に基づく遅刻リスク回避型経路誘導が実際に旅行時間信頼性を向上させるかどうかを検証した．システム構築では，Time-depandent な遅刻リスク回避型経路誘導を実装し，プローブデータより構築したリンク旅行時間データベースを適用した上で，実際にカーナビとして使用するための Android アプリの開発を行った．開発したアプリを用いた走行実験より，HP に基づく経路誘導の旅行時間の平均値と分散が SP に基づく経路誘導と比較して小さい値をとっていることが確認できた．さらに，HP に基づく経路誘導に従うことで，旅行時間のばらつきを抑えられることや旅行時間が極端に短くなる確率は減少することが確認された．

第 9 章　リスク回避型経路誘導の社会的普及がネットワーク交通流に及ぼす影響

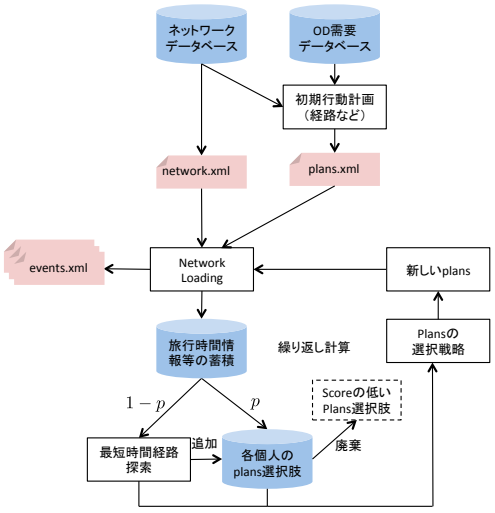
9.1　はじめに

本章では，Hyperpath (HP) に基づく遅刻リスク回避型経路誘導方式にしたがうドライバーが徐々に増えていく近未来の道路交通を念頭に，HP の普及がネットワークフローに及ぼす影響を評価することを目的とする．交通流シミュレーションによって，まず，交通条件 (交通量，ネットワークサイズ，HP 利用率など) を変化させたときにネットワーク全体のパフォーマンス指標 (平均旅行時間，旅行時間変動) がどのように変化するのかを明らかにする．次に，首都圏の一般道ネットワークを対象に，HP の普及がネットワークフローに及ぼす影響を試算する．

9.2　交通シミュレータの概要

本研究では，ベルリン工科大学及びスイス連邦工科大学チューリッヒ校の研究者によって開発された，大規模交通シミュレータ MATSim を利用する．MATSim はエージェントベースであるため，個々人の行動を観測するのに適している．各エージェントは一日の行動計画を持っており，一日単位の繰り返し計算が行われる中で前日の交通状況を基に次の日の経路，出発時刻，活動時間等を変更することができる．

シミュレーションの流れは図–46 のようになる．ネットワークと OD 需要データベースを基に，主要なインプットデータである network.xml，plans.xml を作成する．network.xml はネットワークの形状や各リンクの属性（交通容量等）を持っている．plans.xml は，各エージェントの一日の行動計画（出発点，目的地群の座標，出発時刻，到着時刻，経路等）を含んでいる．インプットデータを用いて Network Loading が行われ，各時間帯の旅行時間情報などが蓄積される．この蓄積情報に基づいて各エージェントの行動計画の事後評価が行われ，新たな行動計画が各エージェントの選択肢に追加される．各エージェントは複数の行動計画の中からルールに従って翌日の行動計画を決定し，これが新しい plans として翌日の Network Loading に利用される．繰り返し計算は予め設定した日数分行われ，各日の events.xml 等のアウトプットファイルを出力することができる．events.xml は，各エージェントが実際に走行した経路や経験したリンク旅行時間等の情報を含んでおり，詳細な分析に利用することができる．また，events.xml ファイルを基にシミュレーションの様子を動画として視覚化することができる．



図–46 MATSim の構造

9.3　DTA の流れ

HP に基づく経路誘導を行うにあたり，通常のインプットデータに加えて最大遅れ時間情報が必要となる．最大遅れ時間情報を得る方法としては，実際の交通情報を用いる方法とシミュレーションから得られる旅行時間情報を用いる方法が考えられる．前者の方法を取る場合，シミュレーションのネットワークや OD 需要が現実の交通情報と十分な整合性を持っている必要がある．本研究では後者の方法により遅れ時間情報を得ることとする．

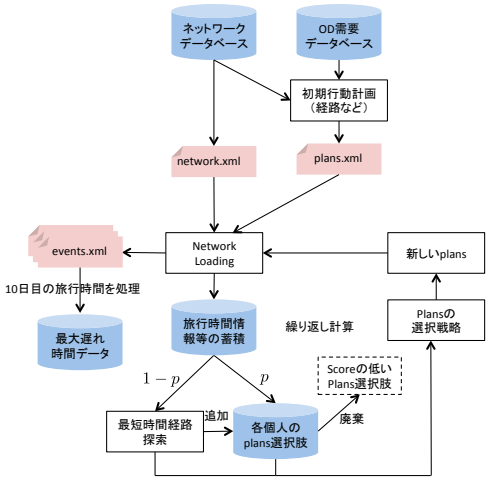
(1)　Hyperpath に基づく経路誘導の導入方法

まず HP に基づく経路誘導がない状態で数日分のシミュレーションを実行し，アウトプットとして出力される linkstats ファイルを利用して最大遅れ時間を算出する (図–47)．linkstats ファイルにはそれぞれのリンクの各時間帯における最大旅行時間と最小旅行時間（自由流時間）等が含まれており，この差分をとることにより最大遅れ時間情報を得る．この最大遅れ時間情報は，各リンクの持つ属性として MATSim に渡すことができる．

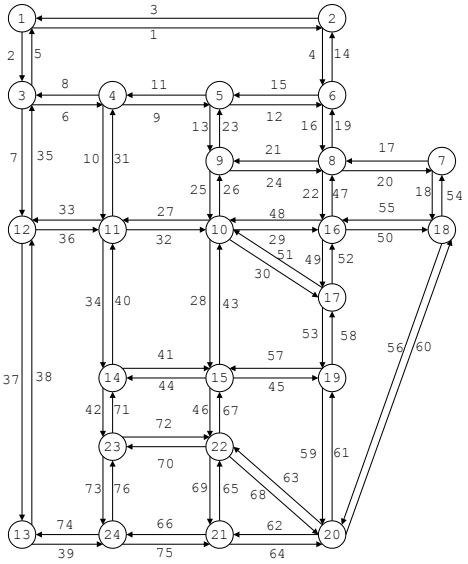
次に，得られた最大旅行時間情報を用いて，HP に基づく経路誘導に従う車両が混入する状況におけるシミュレーションを行う（図–48）．経路再検討の方法として，確率に応じて HP に基づく経路誘導を適用することにより，普及と交通流への影響を分析する．

9.4　簡易ネットワークを用いた検討

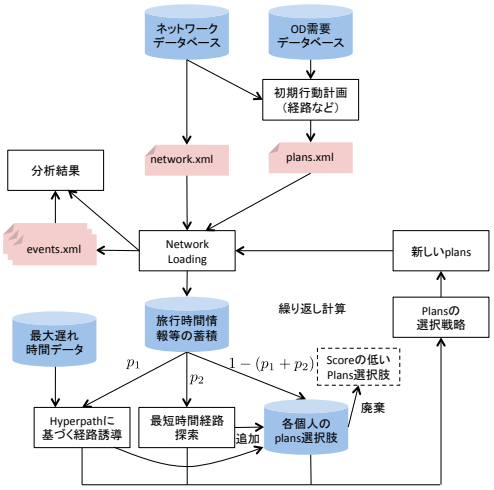
検証用ネットワークとして Sioux Falls ネットワークを利用する．これは，交通量配分のベンチマークテストとして多用される 24 ノード 76 リンクからなる仮想ネットワークである（図–49）．



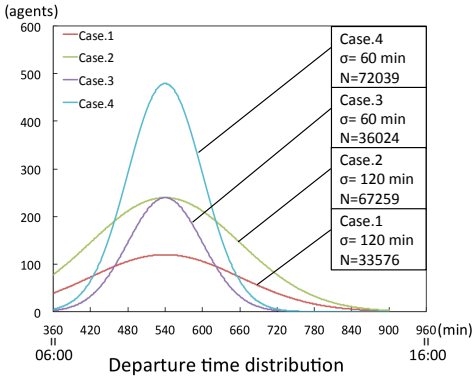
図–47 最大遅れ時間データの取得



図–49 Sioux Falls ネットワーク



図–48 HP に基づく経路誘導を含む DTA



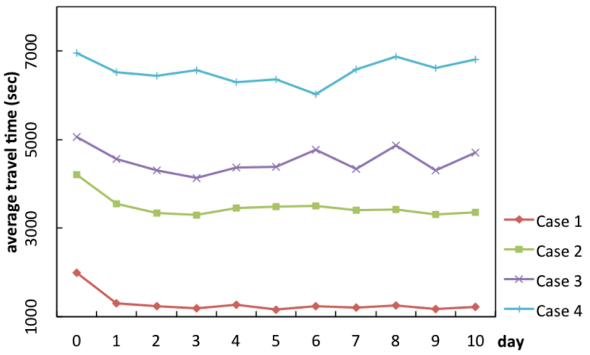
図–50 OD 需要の出発時刻分布パターン (4 Cases)

提供されている OD 表は日単位であるため時間帯ごとの変動を持たない．本研究では時間帯毎に交通需要が変動することを考慮するため，出発時刻が正規分布に従うと仮定した．また，交通需要のパターンによってリスク回避型経路誘導の効果が異なると予測されるため，トリップ数と出発時刻の標準偏差に異なる値を用いた計 4 パターンの OD 需要を作成した（図–50）．さらに，交通量の多寡の影響を調べるため，Case.1・2 では全トリップの 10%を，Case.3・4 では全トリップの 20%をランダムに抽出している．すなわち Case.1 は比較的交通量が少なく，また需要が時間的に分散的な場合，Case.2 は比較的交通量が多いが需要が時間的に分散的な場合，Case.3 は比較的交通量が少ないが需要が時間的に集中的な場合，Case.4 は比較的交通量が多く需要が時間的に集中している場合を表す．

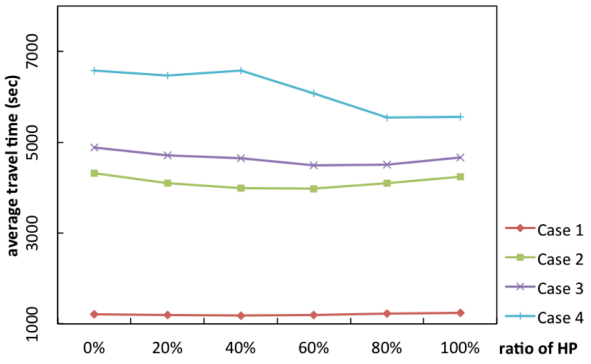
(1)　統計旅行時間データの取得

HP に基づく経路誘導では，各リンクの最大遅れ時間等の統計的な旅行時間データが必要となる．そこで，HP に基づく経路誘導を含めたシミュレーションをする前段階として，統計的な旅行時間データを得るための 10 日分の交通流シミュレーションを行った．ここで得られた結果を元に統計的な旅行時間データを取得し，後述のシミュレーションに利用する．

10 日分の結果は図–51 のとおりである．トリップ数が 2 倍の Case.2 と Case.4 は Case.1 と Case.3 に比べて平均旅行時間が大きく，また出発時刻分布の標準偏差が小さい Case.3 と Case.4 は同じエージェント数の場合よりも平均旅行時間が大きい．本研究では，それぞれのケースについて 5 日目から 10 日目の最大遅れ時間の最大値を利用して HP に基づく経路誘導が交通流



図–51 各ケースの平均旅行時間・HP なし（10 日分）



図–52 各ケースの平均旅行時間，HP あり（1 日分）

に与える影響を分析する．時間帯別の最大遅れ時間として，1 時間ごとに異なる最大遅れ時間を考慮する．

(2)　シミュレーション結果 1（One-shot simulation）

全車両の平均旅行時間　Case.1~Case.4 のそれぞれについて，HP に基づく経路誘導に従う車両の割合を 0%~100%まで 20%おきに変化させてシミュレーションを行った結果を図–52 に示す．トリップ数が比較的少ない Case.1 及び Case.2 では，HP に基づく経路誘導に従う車両の割合が変化しても平均旅行時間に大きな差は見られなかった．出発時刻標準偏差が小さい Case.3 においては，HP に基づく経路誘導の割合が 20%から 40%の間にやや旅行時間の減少が見られるが，更に割合が増加すると旅行時間は最短時間経路誘導が 100%の場合に徐々に戻っている．また，トリップ数を比較的多く設定した Case.2，Case.4 の結果を見ると．Case.2 では，HP に基づく経路誘導に従う車両の割合が 60%まで増加するまでの間は単調に平均旅行時間が減少しているが，その後やや増加している．Case.4 では，HP に基づく経路誘導の割合が増加すると共に 80%まで増加するまでは単調に平均旅行時間が減少している．特に割合が 40%から 80%までの間では 15%（17 分）程度の旅行時間の減少が見られた．

考察　Case.1 では，平均旅行時間を含む多くの結果で HP に基づく経路誘導と最短時間経路誘導の間に大きな差異が見られなかった．これは，混雑がそれほど発生していない場合には，遅れ時間が小さいため，HP と最短時間経路がほぼ一致していたためと考えられる．本研究において，HP は最大遅れ時間に応じて潜在的最短経路群から確率的に経路誘導を行うことを想定しているが，Case.1 においては最短時間経路以外を選ぶ確率が比較的低かったと考えられる．

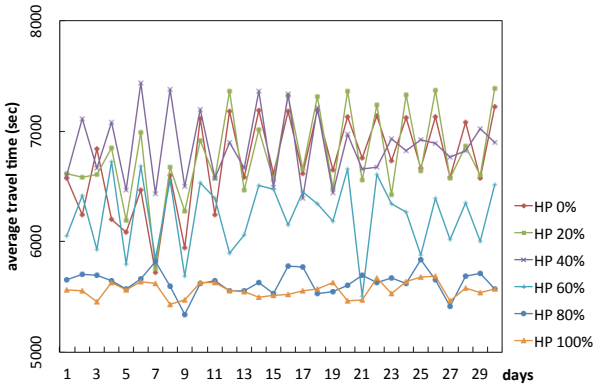
HP に基づく経路誘導に従う車両の混入率が増加した際に，一定の割合までは平均旅行時間が減少するが，その後減少率は増加に転じる，または減少幅が小さくなっている．これは同一情報，同一経路誘導方法に従う車両が増加したためと考えるのが自然である．HP では確率的に誘導するため最短時間経路誘導などと比べてその影響は少ないと考えられるが，多くの経路誘導方法と同様に，混入率が一定値を超えると平均旅行時間が増加すると考えられる．

平均旅行時間と混雑リンク数の状況を総合的に考えると，HP の導入率が 40%から 80%程度の時に平均旅行時間が減少し，また旅行時間の増加率が 100%から 300%付近のリンク数が減少している．このことから，HP に基づく経路誘導ではこれらのリンクを回避していることが推測される．従って，HP に基づく経路誘導に従う車両は，旅行時間増加率の観点から見ると，より混雑の小さいリンク，または旅行時間増加率の大きいリンクへ誘導され，結果として平均旅行時間が減少している．後者はやや不自然と考えられるかもしれないが，仮に他のリンクにおいて過去にさらに大きな遅れ時間が生じていた場合，旅行時間増加率が大きいリンクへ誘導される可能性も示唆される．

(3)　シミュレーション結果 2（30 days simulation）

全車両の平均旅行時間　図–53 は，Case.4 の OD 交通需要を用いて HP に基づく経路誘導に従う車両の割合を 0%~100%まで 20%毎に変化させた際のシミュレーションを 30 日分行った結果を示している．横軸は日数，縦軸はそれぞれの日における全エージェントの平均旅行時間を表す．HP の割合が 0%，20%と比較的小さい場合は，似たような傾向が得られた．日によって平均旅行時間のばらつきが大きく，30 日間の平均旅行時間の最小値と最大値に約 1500~1600 秒（25 分 ~27 分程度）の差異が見られた．即ち，交通需要パターンが同じであっても平均旅行時間が最小値から 25%~30%程度増加することがあるということが確認される．

HP の割合が 40%，60%の時には，若干ではあるが日々の平均旅行時間のばらつきが小さくなっているこ



図–53 平均旅行時間（30 days simulation，Case.4）

表–26 平均旅行時間の集計結果（30 days，Case.4）

	min (sec)	max (sec)	Mean	SD
HP 0%	5718	7219	6713	408
HP 20%	5756	7387	6786	405
HP 40%	6396	7436	6854	304
HP 60%	5503	6728	6241	317
HP 80%	5343	5838	5633	104
HP 100%	5434	5686	5564	70

とが確認できる．特に 20 日目以降では，ばらつきが小さい傾向にある．特に 60%の場合では，全体的に平均旅行時間が比較的小さい値で推移している．30 日間の平均旅行時間の最小値と最大値の差異は，約 1000 秒 ~1200 秒（17 分 ~20 分程度）であった．一方，HP の割合が 80%，100%と比較的大きい場合にも同様な傾向が得られた．他の場合に比べて，全体的に平均旅行時間が小さい値で推移していることが確認できる．また，日々の平均旅行時間のばらつきも 30 日間通して小さい傾向が確認された．平均旅行時間の最小値と最大値の差異は，約 250 秒 ~500 秒（4 分 ~8 分程度）であった．つまり，平均旅行時間は最大でも最小値から 10%以内の増加にと留まっているということが確認された．

以上の結果を集計すると**表–26** のようになる．平均旅行時間の 30 日間の平均値は，HP の割合が増加するとともに一様に減少傾向にあることが確認できる．また，平均旅行時間の 30 日間のばらつきを表す標準偏差も一様に減少傾向にある．即ち，HP に基づく経路誘導に従う車両の割合が増加するとともに，平均旅行時間は減少し，また日々の平均旅行時間のばらつきも小さくなるという結果を得た．

表–26 の平均旅行時間の最小値及び最大値を見ると，最小値は HP の割合が 40%の場合を除けばおおよそ 5300~5800 秒（88 分 ~96 分程度）の範囲に収まっているのに対し，最大値は 5700 秒 ~7400 秒（95 分 ~123 分程度）と大きな差異が確認された．平均旅行時間の最小値と最大値の差異が最も小さかったのは HP の割合が 100%の場合で，最も大きかったのは HP の割合が 20%の場合であった．

混雑の発生状況　**図–54 ~59** は，30 日目のピーク時における走行速度のスナップショットを示している．走行速度が 10km/h 以下のリンク数は，HP に従う車両の割合が 0%，20%の場合には 20 本程度見られるのに対し，40%，60%，80%の場合には，15 リンク程度となっている．一方で，割合が 100%の場合には，走行速度が 10km/h 以下のリンク数が約 20 本程度見られた．

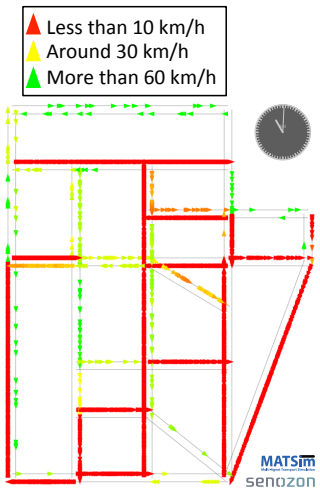
また，HP の割合が 0%や 20%の場合には，全く利用されていないリンクが 10 本以上見受けられるが，割合がそれ以上になると，全く利用されていないリンク数は 5 本程度に減少していることがわかる．

考察　平均旅行時間の 30 日間の推移から，HP の割合が増加するにつれて平均旅行時間が減少し，また日々の平均旅行時間のばらつきも減少するという結果を得た．HP の割合が少ない時は，最短時間経路に基づく経路誘導に従う車両が相対的に多い場合である．最短経路経路誘導に従う車両は，前日のリンク旅行時間に基づいた最短時間経路を翌日の経路として選択するが，同一時間帯・同一 OD の車両群は同一の経路を選択する．従ってその様な車両群の日々の経路変更によって平均旅行時間に大きなばらつきが生じていると考えられる．

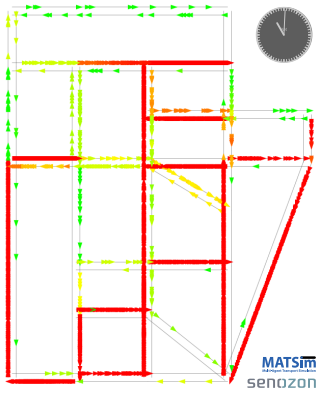
一方，HP に基づく経路誘導に従う車両群は，統計的な旅行時間データにのみ基づいて誘導されるため，日々の平均旅行時間のばらつきが比較的小さくなっていると考えられる．また，同一時間帯・同一 OD の車両群でも，複数経路群から確率的に異なる経路に誘導されるため，車両の集中が発生しにくく，全体的に平均旅行時間が小さくなっていると考えられる．

HP の割合が 100%の場合にも，日々の平均旅行時間に若干のばらつきが見られる．これは，ベースとなっている統計的な旅行時間データは普遍のものを用いているため，それぞれの経路の選択確率自体は同じであるが，生成された乱数が異なるために選択された経路は他の日と全く同じにならない場合があるためである．例えば，ある時間帯，ある OD における HP が経路 A と経路 B からなり，経路 A の選択確率が 30%，経路 B の選択確率が 70%の場合，それぞれの車両について 0~1 の乱数を生成し，乱数の値が 0.3 未満の場合には車両は経路 A へ誘導，乱数の値が 0.3 以上の場合には車両は経路 B へ誘導される．

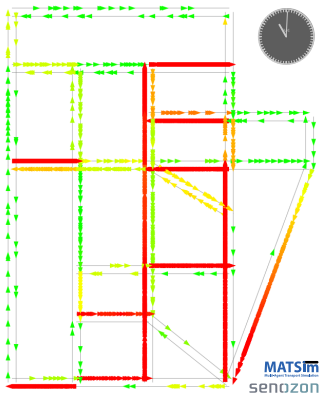
図–54 ~59 から，HP の割合増加に伴い 30 日目のピーク時に使われているリンク数が増加しているという結果を得た．これは HP に基づく経路誘導において，比較的分散的なネットワーク利用が達成されていることを示唆している．また，分散的なネットワーク利用によって走行速度が改善されていることからも，HP に基



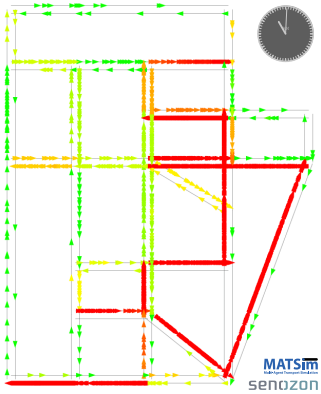
図–54 Case.4 HP 0%
on day 30



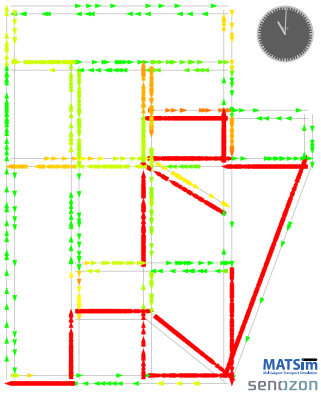
図–55 Case.4 HP 20%
on day 30



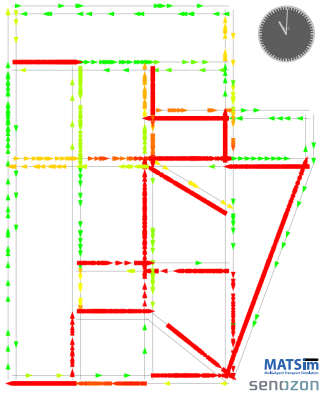
図–56 Case.4 HP 40%
on day 30



図–57 Case.4 HP 60%
on day 30



図–58 Case.4 HP 80%
on day 30



図–59 Case.4 HP100%
on day 30

づく経路誘導の効果が確認される．

9.5 大規模ネットワークにおける Hyperpath 普及の影響分析

(1) 設定条件

次に HP の普及率と実際の交通ネットワーク全体への影響及び，その実ネットワーク規模での計算可能性を明らかにするため，首都圏一般道を対象とするシミュレーションを行う．対象とするネットワークデータは表–27 に示すように首都圏中心部と近郊における細街路を除いた一般道である．OD 需要は表–28 に示した平成 20 年パーソントリップ調査の自動車通勤トリップを基に，計算負荷削減のためトリップ数の 1%を Agent 数，つまり，1 Agent=車両 100 台として適用する．

このシミュレーションでは，Intel Xeon E5 6 コア 3.5GHz，メモリ 64GB の環境下で計算を実行した．この環境では 1 Agent の HP の計算にかかる時間は 50 ミリ秒程度であり，最も計算時間の掛かる HP が 80%のケースで 30 日分の計算で 7 時間程度の計算時間となる．それに合わせて，ネットワークの容量も 1%に縮小してシミュレーションを行った．各トリップの発着点は計基ゾーン内にランダムで生成し，同じゾーン内のトリップは除外した．シミュレーションは朝の混雑時間帯を想定し，Agent の出発時刻を朝 7 時をピーク (平均値)，標準偏差 1 時間の正規分布として与えており，前節の分析と同様に出発時刻の変更は行わないものとする．図–60 に本研究のシミュレーションで利用したネットワークデータの全景を示す．四角で囲んだエリアがパーソントップ調査の対象地域内に相当する．

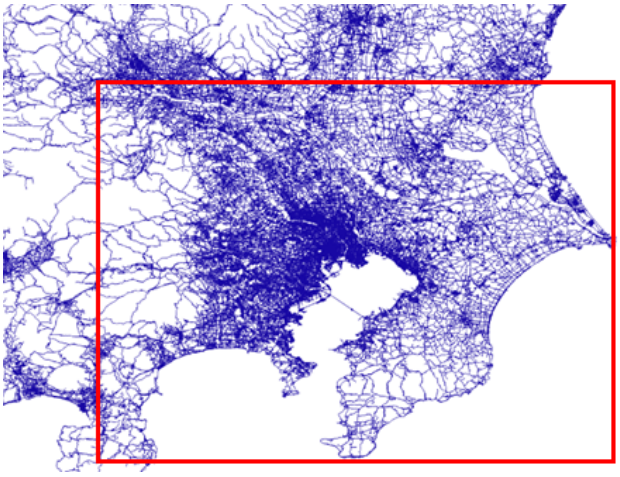
シミュレーションでは将来的な HP に基づく経路誘

表–27 シミュレーションの基本データ

項目	要素
ノード数	444,228
リンク数	177,971
Agent 数	219,642
シミュレーション時間	午前 5 時～午前 10 時
エリア	東京都，神奈川県，千葉県，埼玉県，茨城県南部

表–28 平成 20 年パーソントリップ調査の概要

項目	要素
ゾーン数	601
OD ペア数	17,166
自動車通勤トリップ数	2,306,892
エリア	東京都，神奈川県，千葉県，埼玉県，茨城県南部

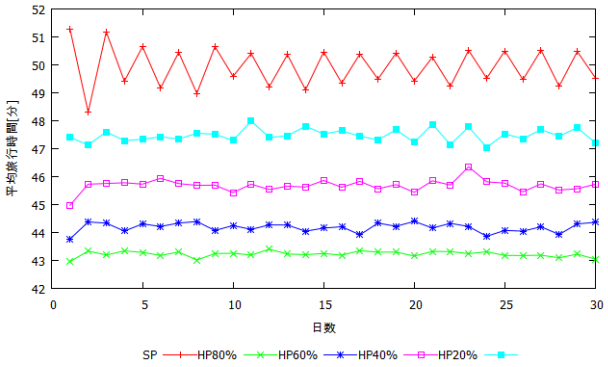


図–60 シミュレーションに利用した DRM データ

導の普及を考え，HP と SP に従うドライバーの比率を変化させ，複数のケースで評価を行う．HP の生成に必要な統計的遅れ時間は，SP のみのケースで 30 日分の day-to-day シミュレーションを行い，得られたリンク最大遅れ時間の平均値を利用し，30 日分のシミュレーション結果を用いて全 Agent の 1 日平均旅行時間 t^n[分] を算出し，その集計値として Agent の 30 日分平均旅行時間 t^n_{ave}，30 日分標準偏差 σ[分] を評価する．

(2)　シミュレーション結果と考察

このシミュレーションにおけるパフォーマンス指標の変化を見る．まず，図–61 に全 Agent の 1 日平均旅行時間の推移を示す．また，表–29 には全 Agent の 30 日分平均旅行時間 t^n_{ave}[分] と標準偏差 σ[分] を示す．Agent 全体の平均旅行時間は SP が 100%のケースと HP80%のケースで約 7 分程度の差があり，HP の普及率の増加に従ってネットワークのパフォーマンス指標が十分向上している．また，SP のみのケースでは平均旅行時間の日変動が大きく現れている．t^n_{ave} の標準偏差 σ について，SP のみのケースと HP を含むケースの間では t^n_{ave}



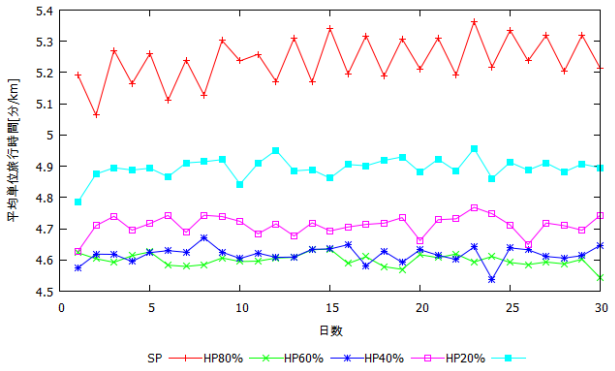
図–61 全 Agent の平均旅行時間 t^n_{ave} の推移

表–29 首都圏ネットワークでの全 Agent 平均旅行時間と標準偏差

経路選択アルゴリズム	$\bar{t}$[分]	σ[分]
HP 80%	43.23	0.10
HP 60%	44.19	0.16
HP 40%	45.69	0.22
HP 20%	47.48	0.23
SP 100%	49.92	0.71

についての F 検定より，5%水準の有意差があることも確認され，HP に基づく経路誘導の導入と普及率の増加でネットワーク全体の平均旅行時間の短縮とその標準偏差の低下が起きていることが示唆される．

なお，首都圏一般道ネットワークでは，OD ペア間で旅行距離の差が大きく，旅行時間はトリップ長の影響を大きく受ける．したがって，Agent の旅行時間を旅行距離で割って 1km あたりの旅行時間として単位距離旅行時間 t_{unit}[分/km] を計算し，t_{unit} の全 Agent の n 日目の平均値として t^n_{unit} を算出，平均旅行時間の場合と同様に t^n_{unit} の 30 日分平均値 $\bar{t}_{unit}$ と 30 日分標準偏差の σ_{unit} を定める．図–62 は t^n_{unit} の推移を示し，表–30 には 30 日分集計値を示した．どちらのケースでも，平均旅行時間による比較と同様，HP の比率が大きくなると単位距離旅行時間の減少と，標準偏差の減少が見られる．単位旅行時間については，標準偏差のスケールが非常に小さいが，1 日平均の単位旅行時間 t^n_{unit} について F 検定による仮説検定を行った結果，SP100%のケースと HP を含むそれぞれのケースにおいて，観測数 30 に対して 5%の水準で統計的に有意であることを確認している．しかしながら，HP の比率が 60%，80%となるケースではケース間に大きな差が見られず，この二つのケースでは，t^n_{unit} についての平均，標準偏差 σ_{unit} は共に有意な差はない．この場合，Agent 全体の平均旅行時間の低下は見られることから，Agent の平均旅行距離が短



図–62 単位距離旅行時間 t^n_{unit} の推移

表–30 首都圏ネットワークでの単位距離あたり旅行時間と標準偏差

普及の度合い	$\bar{t}_{unit}$[分]	σ_{unit}[分]
HP 80%	4.60	0.02
HP 60%	4.62	0.02
HP 40%	4.71	0.03
HP 20%	4.90	0.03
SP 100%	5.24	0.07

くなるのではないかと考えられる．

以上のシミュレーション結果より，HP に基づく経路誘導の普及率上昇に伴う，道路ネットワークの旅行時間信頼性のパフォーマンス指標の向上が生じる可能性が示唆される．

9.6 おわりに

本章では，HP によるリスク回避型経路誘導の普及が交通流に与える影響について，シミュレーション手法による動的経路配分を行うことにより分析を行った．まず，特に混雑が激しい状況において，リスク回避型経路誘導に従う車両の割合が増加するに従って平均旅行時間の減少が見られた．30 日間のシミュレーションでは，特にリスク回避型経路誘導の割合が 80 %と 100 %の場合において，平均旅行時間の減少ならびに平均旅行時間の日変動の減少が確認された．このことから，HP の普及率向上と共に道路ネットワークの旅行時間信頼性に関わるパフォーマンス指標が向上することを確認された．同様の検証を，首都圏一般道のネットワークにおけるシミュレーションでを通じて行ったところ，やはり，同様の結果が得られた．以上より，HP に基づくリスク回避型経路誘導の市場浸透に伴い，平均旅行時間及びに旅行時間信頼性の改善効果が期待できる可能性が示唆された．

第10章　全体まとめ

10.1　本研究開発の成果

本研究開発の成果を以下のとおりまとめる．

(1)　旅行時間信頼性向上の便益評価手法に係る研究開発

■旅行時間信頼性の経済評価方法の体系的整理（第2章）旅行時間信頼性の経済評価に関する国内外の研究及び実務の動向を調査し，特に旅行時間信頼性価値に関する包括的レビューを通じて，経済便益推計に必要となるデータ収集上の課題等を整理した．これにより，本研究で開発する旅行時間信頼性向上の便益評価方法の新規性・妥当性を明らかにした．

■旅行時間変動に起因するドライバーの移動コストの試算（第3章）

旅行時間信頼性の貨幣価値原単位（旅行時間変動価値）を推定するための統合アプローチによる経済評価手法を開発した．本手法は，旅行時間やスケジューリング制約を効用関数の引数として明示的に考慮していることからミクロ経済学理論にも整合している．その上で，旅行時間変動を明示的に考慮したドライバーの出発時刻選択行動のモデル化を行い，旅行時間変動価値を導出することができる．本アプローチは，経済理論との整合性も確保されつつ，経済便益は標準偏差の減少分によって計測すれば良いという，実用上の容易性も兼ね備えている．この統合アプローチの妥当性に関して，高速道路旅行時間データを用いた基礎分析を通じて検証し，旅行時間変動に起因するコストがドライバーの総コストに比して無視できない大きさ（約二割程度）を占める可能性があることを明らかにした．

■旅行時間信頼性便益のケーススタディ（第4章）

2013 年 5 月に供用された阪神高速道路第 2 号淀川左岸線を対象に，実際のプロジェクトの統合アプローチによる便益試算を行った．ETC-OD データを用いた before-after 分析を行ったところ，時間信頼性便益は 7.2 円/台・日［時間短縮便益（27.6 円/台・日）の 26 %程度］となり，既存の事例と同程度のシェアとなることが確認された．なお，経路別・時間帯別・供用前後別に個別に推定された時間信頼性指数（H 指数）を比較したところ，条件間で H 指数を同一と見なすことはやや難しいことが分かった．しかし，非常に稀なインシデント等の影響を適切に除去したデータを用いて H 指数を再計算すると，集約化の可能性が高まることが明らかになった．さらに，H 指数の集約の度合いを高めるほど，時間信頼性便益額は小さくなる傾向があることが明らかになった．以上により，統合アプローチの特徴や実務への適用に向けた簡略化の可能性についての示唆を得られたものと考えている．

■一般道路網を全体対象とした旅行時間信頼性評価の試論（第5章）

リンク単位での旅行時間信頼性評価から，経路やネットワーク全体での評価へと論理整合的に拡張するための基礎的方法について検討を行った．具体的には，リンク間での旅行時間の相関の程度を削減するための基準化旅行時間を用いた分析方法の検討，並びに，安定分布と一般化中心極限定理に基づくネットワーク全体の旅行時間信頼性の近似的評価ための基礎理論を提案した．一般道路における実旅行時間データを用いた検討を通じて，提案方法の一定程度の有効性を確認した．

■統合アプローチのパラメータ推定方法の検討（第6章）

統合アプローチに基づく旅行時間信頼性価値の推計を行った．インターネットによる Stated Preference 調査を通じて得られたデータを用いてパネル効果や観測／非観測異質性を考慮した離散選択モデルを推定した結果，信頼性比の標本平均値が 2.40 と推定された．過去の事例と比べても値の乖離は小さく，少なくとも今回の実証分析の限りにおいては旅行時間信頼性向上便益が旅行時間短縮便益と比較しても無視できない大きさとなる可能性が示唆された．さらに，性別・年収・普段の通勤時間などといった被験者特性によっても旅行時間変動価値が有意に異なる可能性も確認された．

なお，紙面の都合上本報告書では詳述できなかったが，本研究開発では，以下のような検討も行っている．詳細については，初年度および二年度報告書を参照されたい．

■旅行時間変動の将来予測モデルの構築

ETC データやプローブデータより得られる旅行時間信頼性指標を道路特性や交通特性によって説明することが可能な，旅行時間変動の将来予測モデルのプロトタイプを開発した．都市間高速道路（ETC データ），都市内高速道路（プローブデータ），都市内一般道路（プローブデータ）を対象として予測式の推計を行い，いずれの場合においてもリーズナブルな推定結果が得られた．

■旅行時間変動の社会的限界費用に関する基礎理論の構築

ボトルネック渋滞による待ち行列の延伸が旅行時間変動価値に及ぼす影響（旅行時間変動の社会的限界費用）についての理論的な検討を行った．古典的なボトルネックモデルを拡張的して内生的な出発レートを考慮した旅行時間変動価値を理論的に導出し，比較静学分析を行ったところ，渋滞長に依存してランダム遅れの変動が変化する状況では社会的限界費用には何の変

化も生じないことなど，直感には合致しない興味深い知見が得られた．この成果は，特に混雑が激しい一般道路などにおける，より適切な旅行時間信頼性の便益推計のための基礎的知見を与えると考えている．

(2) 旅行時間の不確実性を考慮した動的経路誘導システムに関する研究開発

■遅刻リスク回避型経路誘導アルゴリズムの開発 (第7章)

不確実性下での意思決定理論を踏まえ，旅行時間が変動する状況において恒常的な定時性確保の観点から最適な経路をドライバーに推奨する遅刻リスク回避型動的経路誘導アルゴリズムを新たに開発した．これは，単一の最短経路ではなく遅刻リスクを最小化する最適な経路群（Hyperpath: HP）を求めるものであり，本研究では，(1) 楽観的ノードポテンシャルの導入，(2) ノード有効探索の実施，というそれぞれ独立した 2 つの経路探索基準を新たに導入することによって経路探索スピードの高速化に成功した．これにより，本経路誘導手法の実務への適用可能性を確認した．さらに HP に基づく経路推奨基準と他の標準的な経路推奨基準との比較をシミュレーションによって行ったところ，HP による経路誘導アルゴリズムの方が，旅行時間信頼性の観点は勿論のこと，状況次第では平均旅行時間の観点からも優れる場合が起こり得ることが確認された．以上を通じて，提案する手法の妥当性並びに従来手法に対する優位性を明らかにした．

■Hyperpathに基づく遅刻リスク回避型経路誘導システムの開発と検証 (第8章)

実道路ネットワーク上での利用を念頭に置いて，HP に基づく遅刻リスク回避型経路誘導システムの構築を行った．システム構築においては，民間プローブの長期旅行時間データベースより旅行時間変動プロファイルを推定した上で，出発時刻に応じて最適な HP を出力する時間依存型 HP 探索の高速アルゴリズムをサーバー上に実装した．その上で，サーバー（HP 計算）~ クライアント（車上での経路誘導）方式による動的経路誘導 Android アプリケーション“HyperNav”を開発した．次に，構築したシステムを用いて様々な交通条件下での実走実験を実施し，どのような状況下で HP による経路誘導が旅行時間信頼性向上の効果をもたらしうるのかを実証的に検証した．公道上での実走実験を通じて本経路誘導システムの旅行時間信頼性に対する効果を検証したところ，HP による経路誘導は最短経路探索に基づく経路誘導と比べて，旅行時間のばらつきを抑制させる効果，特に大きな遅れ時間の生起確率を有意に低下させる効果があることが明らかになった．

■リスク回避型経路誘導の社会的普及がネットワーク交通流に及ぼす影響 (第9章)

近い未来に HP ルールに従うインテリジェントな自動車が徐々に社会に普及していく状況を念頭に置いて，HP によるリスク回避型経路誘導に従うドライバーが徐々に普及することの影響を評価できる，エージェントベースの動的交通流シミュレーターを開発した．まず，簡易な仮想ネットワーク上において，どのような交通流条件（OD ペア，道路容量，ネットワークの位相構造，普及のバランス等）において HP 経路規範のドライバー群によってネットワーク全体の定時性が向上する可能性があるのかを明らかにした．具体的には，特に混雑が激しい状況において，リスク回避型経路誘導に従う車両の割合が増加するに従って平均旅行時間の減少が見られた一方，混雑が少ない状況では，最短経路誘導との有意な差異は見られないなどの知見が得られた．さらに，Day-to-Day シミュレーションより，リスク回避型経路誘導に従う車両が高普及の場合において，全車両の平均旅行時間の平均値と平均旅行時間の標準偏差が共に有意に減少することが確認された．これより，最短時間経路に従う車両の平均旅行時間は激しい日変動を持つのに対し，リスク回避型経路誘導に従う車両の平均旅行時間は日変動が小さく，HP によるリスク回避型経路誘導の市場浸透に伴い，ネットワーク全体の旅行時間信頼性の改善のみならず，状況次第では平均旅行時間の減少（速達性の向上）も期待されることが明らかになった．さらに，シミュレーションの計算アルゴリズムの高速化を計った上で対象を首都圏の一般道路ネットワーク全体に拡大し，実 OD 表を用いて HP 車両普及のシミュレーションを行ったところ，同様の結果が得られることが確認された．

以上をまとめると，本研究開発を通じて，道路の旅行時間信頼性の評価と運用に関して，(1) アカウンタビリティの高い経済便益評価の方法論開発とその妥当性・実用性の確認，ならびに，(2) 遅刻リスク最小化のための最適経路誘導アルゴリズムの開発と現実のシステムとしての有用性・実用可能性の確認，を行うことができたと考えている．

10.2 研究開発成果が社会に果たす役割

まず，まず，サブテーマ (1) の成果は，道路事業の評価手法の高度化・精緻化に直接的に貢献するものであると考えている．旅行時間信頼性の経済便益は利用者便益全体の二割強を占めるという海外での試算もあり，本研究の試算でも同程度の結果が得られている．時間に厳格な日本人の国民性を鑑みるとそのシェアはさらに大きくなる可能性もある．さらには，対象を旅客交通のみならず物流交通へと拡張することで，定時性確

保に対する全体ニーズは更に大きくなると考えられる．このような中で，本研究開発を通じて考案・検証された統合アプローチに基づく経済便益評価は，旅行時間信頼性の経済便益を適切に計測できる方法論の一つとして，今後便益評価マニュアル等を検討するにあたっての有用な知見の一つとなると考えている．

次に，サブテーマ (2)-1 の成果は，旅行時間が不確実な状況におけるドライバーの最適な経路誘導につながる新たな技術開発がなされる可能性を示唆している．自動車での移動における不満項目として“定時性の低さ”が挙げられることは多く，本研究で開発した HP に基づく経路誘導は，計算負荷が低くドライバーの解釈も容易であるため，適切なクライアントアプリケーションやユーザーインターフェースの開発が進めば実用化の可能性は十分にあるものと考えられる．

さらに，サブテーマ (2)-2 の成果は，HP のようなインテリジェントな経路誘導方式が広く社会に普及することによって社会全体の便益も向上することを確認するものである．今回得られた知見を踏まえてシステムを拡張し，より高精度の需要データや旅行時間データを適用することにより，本研究開発成果が「経路誘導システムをどのような方針で普及させれば道路ネットワーク全体の効率性が向上するのか」を具体的に検討する上での評価ツールとして昇華することが期待される．

参考文献

1) Fosgerau, M., Hjorth, K., Brems, C. and Fukuda, D.: Travel time valiability: definition and valuation,Technical report, Technical University of Denmark, 2008.
2) Bates, J., Polak, J., Jones, P. and Cook, A.: The valuation of reliability for personal travel, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 37, No. 2-3, pp. 191–229, 2001.
3) Noland, R. and Polak, J.: Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues, *Transport Reviews*, Vol. 22, No. 1, pp. 39–54, 2002.
4) Noland, R. and Small, K.: Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of morning commutes, *Transportation Research Record*, Vol. 1493, pp. 150–158, 1995.
5) Noland, R.: Commuter responses to travel time uncertainty under congested conditions: expected costs and the provision of information, *Journal of Urban Economics*, Vol. 41, No. 3, pp. 377–406, 1997.
6) Fosgerau, M. and Karlström, A.: The value of reliability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 44, No. 1, pp. 38–49, 2010.
7) Fosgerau, M. and Engelson, L.: The value of travel time variance, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, No. 1, pp. 1–8, 2011.
8) Fosgerau, M. and Fukuda, D.: Valuing travel time variability: Characteristics of the travel time distribution on an urban road, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 24, pp. 83–101, 2012.
9) Rietveld, P., Bruinsma, F. and van Vuuren, D.: Coping with unreliability in public transport chains: a case study for netherlands, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 35, No. 6, pp. 539–559, 2001.
10) Emam, E. and Ai-Deek, H.: Using real-life dual-loop detector data to develop new methodology for estimating freeway travel time reliability, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1959, pp. 140–150, 2006.
11) Guo, F., Rakha, H. and Park, S.: Multistate model for travel time reliability, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2188, pp. 46–54, 2010.
12) Zou, Y. and Zhang, Y.: Use of skew-normal and skew-t distributions for mixture modeling of freeway speed data, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2260, No. -1, pp. 67–75, 2011.
13) Susilawati, S., Taylor, M. and Somenahalli, S.: Distributions of travel time variability on urban roads, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 47, No. 8, pp. 720–736, 2013.
14) Rakha, H., El-Shawarby, I., Arafeh, M. and Dion, F.: Estimating path travel-time reliability, In *Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC '06. IEEE*, 2006.
15) Black, I. and Fearon, J.: Forecasting and appraising travel time variability in urban areas: A link-based approach, In *European Transport Conference, 2009*, 2009.
16) 福田大輔：旅行時間変動のリンク間加法性に関する一考察，土木計画学研究・講演集，Vol. 41，2010.
17) Engelson, L. and Fosgerau, M.: Additive measures of travel time variability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, No. 10, pp. 1560–1571, 2011.
18) Ng, M., Szeto, W. and Waller, T.: Distribution-free travel time reliability assessment with probability inequalities, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, No. 6, pp. 852–866, 2011.
19) Senna, L.: The influence of travel time variability on the value of time, *Transportation*, Vol. 21, No. 2, pp. 203–228, 1994.
20) Lam, T. and Small, K.: The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 37, No. 2-3, pp. 231–251, 2001.
21) Jackson, W. and Jucker, J.: An empirical study of travel time variability and travel choice behavior, *Transportation Science*, Vol. 16, No. 4, pp. 460–475, 1981.
22) Black, I. and Towriss, J.: Demand effects of travel time reliability,Technical report, Centre for Logistics and Transportation, Cranfield Institute of Technology, London, 1993.
23) Brownstone, D. and Small, K.: Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 39, No. 4, pp. 279–293, 2005.
24) Nam, D., Park, D. and Khamkongkhun, A.: Estimation of value of travel time reliability, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 39, No. 1, pp. 39–61, 2005.
25) Hollander, Y.: Direct versus indirect models for the effects of unreliability, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 40, No. 9, pp. 699–711, 2006.
26) Bhat, C. and Sardesai, R.: The impact of stop-making and travel time reliability on commute mode choice, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 40, No. 9, pp. 709–730, 2006.
27) Small, K. A., Winston, C. and Yan, J.: Uncovering the distribution of motorists' preferences for travel time and reliability, *Econometrica*, Vol. 73, No. 4, pp. 1367–1382, 2005.
28) 山下智志，黒田勝彦：交通機関の定時性と遅刻回避型効用関数，土木学会論文集，No. 536/IV–31，pp. 59–68，1996.
29) 山下智志：遅刻回避行動における時刻べ-スの効用関数，統計数理，Vol. 45，No. 1，pp. 89–105，1997.
30) Börjesson, M. and Eliasson, J.: Train passengers' valuation of travel time unreliability, In *European Transport Conference, 2008*, 2008.
31) Börjesson, M.: Modelling the preference for scheduled and unexpected delays, *Journal of Choice Modelling*, Vol. 2, No. 1, pp. 29–50, 2009.
32) Börjesson, M. and Eliasson, J.: On the use of "average delay" as a measure of train reliability, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 45, No. 3, pp. 171–184, 2011.
33) Warffemius, P.: Preliminary results of the Dutch valuation study, In *International Meeting on Value of Travel Time Reliability and Cost-Benefit Analysis*, 2009.
34) Samstad, H.: Norwegian valuation studies 2008–2010, In *International Meeting on Value of Travel Time Reliability and Cost-Benefit Analysis*, 2009.
35) Transek: Restidsosäkerhet och förseningar i vägtrafik – Effektsamband för samhällsekonomiska beräkningar, Transek AB for Vägverket, 2006.
36) de Jong, G., Tseng, Y., Kouwenhoven, M., Verhoef, E. and Bates, J.: The value of travel time and travel time reliability - survey design final report,Technical report, Significance 2007.
37) de Jong, G., Kouwenhoven, M., Kroes, E., Rietveld, P. and Warffemius, P.: Preliminary monetary values

for the reliability of travel times in freight transport, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, Vol. 2, pp. 83–99, 2009.
38) Becker, G. S.: A theory of the allocation of time, *The Economic Journal*, Vol. 75, No. 299, pp. 493–517, 1965.
39) DeSerpa, A.: A theory of the economics of time, *The Economic Journal*, Vol. 81, No. 324, pp. 828–846, 1971.
40) Small, K.: The scheduling of consumer activities: work trips, *American Economic Review*, Vol. 72, No. 3, pp. 467–479, 1982.
41) Gaver, D. P.: Headstart strategies for combating congestion, *Transportation Science*, Vol. 2, No. 2, pp. 172–181, 1968.
42) Abkowitz, M.: An analysis of the commuter departure time decision, *Transportation*, Vol. 10, pp. 283–297, 1981.
43) Hendrickson, C. and Plank, E.: The flexibility of departure times for work trips, *Transportation Research Part A: General*, Vol. 18, No. 1, pp. 25–36, 1984.
44) Small, K., Noland, R., Chu, X. and Lewis, D.: Valuation of travel-time savings and predictability in congested conditions for highway user-cost estimation,Technical Report 431, National Cooperative Research Highway Program, 1999.
45) Noland, R., Small, K., Koskenoja, P. and Chu, X.: Simulating travel reliability, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 28, No. 5, pp. 535–564, 1998.
46) van Amelsfort, I. and Bliemer, M.: Valuation of uncertainty in travel time and arrival time: Some findings from a choice experiment, In *The 45th Congress of the European Regional Science Association*, 2005.
47) Asensio, J. and Matas, A.: Commuters' valuation of travel time variability, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 44, No. 6, pp. 1074–1085, 2008.
48) Börjesson, M.: Joint rp–sp data in a mixed logit analysis of trip timing decisions, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 44, No. 6, pp. 1025–1038, 2008.
49) Koster, P., Kroes, E. and Verhoef, E.: Travel time variability and airport accessibility, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, No. 10, pp. 1545–1559, 2011.
50) 飯田恭敬，柳沢吉保，内田敬：通勤交通の経路選択と出発時刻分布の同時推定法，土木計画学研究・論文集，No. 9，pp. 93–100，1991.
51) Vickrey, W.: Congestion theory and transport investment, *American Economic Review*, Vol. 59, pp. 251–261, 1969.
52) Fosgerau, M.: Congestion costs in bottleneck equilibrium with stochastic capacity and demand, 2008.
53) Arnott, R., de Palma, A. and Lindsey, R.: Information and time-of-usage decisions in the bottleneck model with stochastic capacity and demand, *European Economic Review*, Vol. 43, pp. 525–548, 1999.
54) Avineri, E. and Prashker, J.: Sensitivity to travel time variability: travelers' learning perspective, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 13, No. 2, pp. 157–183, 2005.
55) Ettema, D. and Timmermans, H.: Costs of travel time uncertainty and benefits of travel time information: Conceptual model and numerical examples, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 14, No. 5, pp. 335–350, 2006.
56) 飯田恭敬：交通計画のための新パラダイム–交通ネットワーク信頼性と OD 交通量逆推定，技術書院，2008.
57) Eliasson, J.: Forecasting travel time variability, In *European Transport Conference, 2006*, 2006.
58) Department for Transport: The reliability subobjective. tag unit 3.5.7. web tag guidance note,Technical report, Department for Transport, London 2009.
59) 牧浩太郎，土谷和之，伊藤智彦，由利昌平：英国の道路事業評価における所要時間信頼性に関する便益計測手法，交通工学，Vol. 45，No. 2，pp. 49–52，2010.
60) Bates, J.: Reliability: the missing model variable, In Hensher, D. ed. *Travel Behaviour Research: The Leading Edge*, Oxford, UK, Elsevier Science 2001.
61) 福田大輔，松本治之，市村強：トリップスケジューリングモデルに基づく所要時間信頼性の経済評価，土木計画学研究・講演集，Vol. 39，2009.
62) Franklin, J. and Karlström, A.: Travel time reliability for stockholm roadways: Modeling the mean lateness factor, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2134, No. -1, pp. 106–113, 2009.
63) Fosgerau, M.: On the relation between the mean and variance of delay in dynamic queues with random capacity and demand, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 34, No. 4, pp. 598–603, 2010.
64) 村上岳司，原田昇，太田勝敏：SP 調査における所要時間信頼性の表現形式が選択に与える影響，土木計画学研究・論文集，Vol. 20，pp. 539–546，2003.
65) Tseng, Y.-Y., Verhoef, E., de Jong, G., Kouwenhoven, M. and van der Hoorn, T.: A pilot study into the perception of unreliability of travel times using in-depth interviews, *Journal of Choice Modelling*, Vol. 2, No. 1, pp. 8–28, 2009.
66) Devarasetty, P., Burris, M. and S.W., D.: The value of travel time and reliability-evidence from a stated preference survey and actual usage, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 46, No. 8, pp. 1227–1240, 2012.
67) Li, Z., Hensher, D. and Rose, J.: Willingness to pay for travel time reliability in passenger transport: A review and some new empirical evidence, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 46, No. 3, pp. 384–403, 2010.
68) Carrion, C. and Levinson, D.: Valuation of travel time reliability from a gps-based experimental design, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 2013.
69) Liu, H., Recker, W. and Chen, A.: Uncovering the contribution of travel time reliability to dynamic route choice using real-time loop data, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 38, No. 6, pp. 435–453, 2004.
70) Liu, H., He, X. and Recker, W.: Estimation of the time-dependency of values of travel time and its reliability from loop detector data, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 41, No. 4, pp. 448–461, 2007.
71) Taylor, M.: Travel time variability - the case of two public modes, *Transportation Science*, Vol. 16, No. 4, pp. 507–521, 1982.
72) Knight, T.: An approach to the evaluation of changes in travel unreliability: A "safety margin" hypothesis, *Transportation*, Vol. 3, No. 4, pp. 393–408, 1974.
73) Hall, R.: Travel outcome and performance: The effect of uncertainty on accessibility, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 17, No. 4, pp. 275–290, 1983.

74) Nolan, J.: *Stable Distributions - Models for Heavy Tailed Data*, BirkhäuserBoston, in press.
75) Li, Q. and Racine, J.: *Nonparametric Econometrics: Theory and Practice*, Princeton University Press 2007.
76) 国土交通省道路局：費用便益分析マニュアル，Technical report，2006.
77) SACTRA: Transport and the economy: Full report,Technical report, The Standing Advisory Committee for Trunk Road Assessment, Department of Transport, United Kingdom, 2006.
78) Eliasson, J.: A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 43, pp. 468–480, 2009.
79) Vickrey, W.: Pricing, metering, and efficiently using urban transportation facilities, *Highway Research Record*, Vol. 476, pp. 36–48, 1973.
80) Taylor, M.: Reliability and cost-benefit analysis in Australia and New Zealand, In *International Meeting on Value of Travel Time Reliability and Cost-Benefit Analysis*, 2009.
81) van Lint, J. and van Zuylen, H.: Monitoring and predicting freeway travel time reliability: using width and skew of day-to-day travel time distribution, *Transportation Research Record*, Vol. 1917, pp. 54–62, 2005.
82) 福田大輔, フォスグロゥモーゲンス：道路交通における所要時間分布特性の統計解析: 時間信頼性の経済評価に向けて, 土木計画学研究・講演集, Vol. 372008．CD-ROM.
83) Zolotarev, V.: *One-Dimensional Stable Distributions*, American Mathematical SocietyProvidence, RI, 1986.
84) Gnedenko, B. V. and Kolmogorov, A. N.: *Limit Distributions for Sums of Independent Random Variables*, Addison-Wesley 1954.
85) Nolan, J.: Maximum likelihood estimation of stable parameters, In Barndorff-Nielsen, O. E., Mikosch, T. and Resnick, S. I. eds. *Lévy Process: Theory and Applications*, Boston, Birkhäuser, pp. 379–400, 2001.
86) 合崎英男，西村和志：データ解析環境 R による選択型コンジョイント分析入門，農業工学研究所技報，Vol. 206, pp. 151–173，2007.
87) Batley, R.: Marginal valuations of travel time and scheduling, and the reliability premium, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 43, No. 4, pp. 387–408, 2007.
88) Fu, L. and Rilett, L.: Expected shortest paths in dynamic and stochastic traffic networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 32, No. 7, pp. 499–516, 1998.
89) Miller-Hooks, E. and Mahmassani, H.: Least expected time paths in stochastic, time-varying transportation networks, *Transportation Science*, Vol. 34, No. 2, pp. 198–215, 2000.
90) Miller-Hooks, E.: Adaptive least-expected time paths in stochastic, time-varing transportation and data networks, *Networks*, Vol. 37, No. 1, pp. 35–52, 2001.
91) Chen, Y., Bell, M. G., Wang, D. and Bogenberger, K.: Risk-averse time-dependent route guidance by constrained dynamic a search in decentralized system architecture, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1944, No. 1, pp. 51–57, 2006.
92) Kaparias, I., Bell, M., Chen, Y. and Bogenberger, K.: Icnavs: a tool for reliable dynamic route guidance, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 1, No. 4, pp. 225–233, 2007.
93) Kaparias, I., Bell, M. G. H. and Belzner, H.: A new measure of travel time reliability for in-vehicle navigation systems, *Journal of Intelligent Transport Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 202–212, 2008.
94) Kaparias, I. and Bell, M.: Testing a reliable in-vehicle navigation algorithm in the field, *Intelligent Transport Systems, IET*, Vol. 3, No. 3, pp. 314–324, 2009.
95) Nie, Y. and Fan, Y.: Arriving-on-time problem: discrete algorithm that ensures convergence, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1964, pp. 193–200, 2006.
96) Nie, Y. M. and Wu, X.: Shortest path problem considering on-time arrival probability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 43, No. 6, pp. 597–613, 2009.
97) Wu, X. and Nie, Y.: Implementation issues in approximate algorithms for reliable a priori shortest path problem, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, Vol. 2128, pp. 173–183, 2009.
98) Xing, T. and Zhou, X.: Finding the most reliable path with and without link travel time correlation: A lagrangian substitution based approach, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, No. 10, pp. 1660 – 1679, 2011.
99) Lei, H., Xing, T., Taylor, J. and Zhou, X.: Monitoring travel time reliability from the cloud, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2291, No. 1, pp. 35–43, 2012.
100) Ben-Akiva, Bierlaire, M., Bottom, M., Koutsopoulos, J., H. and R., M.: Development of a route guidance generation system for real-time application, In *The 8th IFAC Symposium on Transportation Systems*, Chania, Creta, Greece, 1997.
101) Bell, M.: Hyperstar: A multi-path Astar algorithm for risk averse vehicle navigation, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 43, No. 1, pp. 97–107, 2009.
102) Nguyen, S. and Pallottino, S.: Equilibrium traffic assignment for large scale transit networks, *European Journal of Operational Research*, Vol. 37, No. 2, pp. 176–186, 1988.
103) Spiess, H. and Florian, M.: Optimal strategies: A new assignment model for transit networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 23, No. 2, pp. 83 – 102, 1989.
104) Hart, P., Nilsson, N. and Raphael, B.: A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, *IEEE Transactions On Systems Science And Cybernetics*, Vol. 4, No. 2, pp. 100–107, 1968.
105) Flinsenberg, I.: *Route Planning Algorithms for Car Navigation*, VDM Verlag 2009.
106) Bell, M., Trozzi, V., Hosseinloo, S., Gentile, G. and Fonzone, A.: Time-dependent hyperstar algorithm for robust vehicle navigation, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 46, No. 5, pp. 790 – 800, 2012.
107) Ma, J.: Hyperpath-based strategic route guidance considering travel time uncertainty, Ph.D. dissertation, Tokyo Institute of Technology, 2012.
108) Cominetti, R., Correa, J. and Correo, C.: Common-lines and passenger assignment in congested transit networks, *Tranportation Science*, Vol. 35, No. 3, pp. 250–267, 2001.
109) Dijkstra, E.: A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematic*, Vol. 1, pp. 269–271, 1959.
110) Chabini, I. and Lan, S.: Adaptations of the A* algorithm for the computation of fastest paths in deter-

ministic discrete-time dynamic networks, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, Vol. 3, No. 1, pp. 60–74, 2002.
111) Koenker, R.: *Quantile Regression (Econometric Society Monographs)*, Cambridge University Press 2005.