

# Hyperpathに基づく遅刻リスク回避型 経路誘導システムの構築と検証

伊藤 海優<sup>1</sup>・福田 大輔<sup>2</sup>・馬 江山<sup>3</sup>

<sup>1</sup>非会員 元東京工業大学大学院修士課程学生 理工学研究科土木工学専攻

E-mail: myu999zzz@gmail.com

<sup>2</sup>正会員 東京工業大学大学院准教授 理工学研究科土木工学専攻 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M11-11)

E-mail: fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 上海海事大学助教

E-mail: tonny.achilles@gmail.com

ドライバーにとって旅行時間の信頼性は重大な関心事のひとつであり、特に遅刻リスクを回避したい場合には到着時刻の不確実性が道路利用の満足度を低下させる。適切な経路誘導に基づくこの問題の緩和方法の一つとして、旅行時間が不確実な状況で潜在的に最短となり得る経路を推奨する Hyperpath に基づく遅刻リスク回避型経路誘導 (Bell, 2009<sup>1)</sup>) が挙げられる。本研究では、実道路ネットワークに適用可能な遅刻リスク回避型経路誘導システムを構築した。また、公道上での走行実験により、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。その結果、Hyperpath による経路誘導は最短経路探索に基づく経路誘導と比較して、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を有意に低下させる効果があることが確認された。

**Key Words:** vehicle navigation, route guidance, risk-averse, time reliability, field experiment

## 1. はじめに

### (1) 背景

我が国のカー・ナビゲーションシステム（カーナビ）は、1980年代初頭に初めて商用として登場し、その市場普及と技術発展は現在も進展している。また、カーナビによる交通情報提供に着目すると、2014年に登場した「ETC2.0」およびそれに含まれる ITS スポットサービスによる広域な交通情報提供が話題として直近の話題として挙げられる。ITS スポットサービスは、対応するカーナビから収集されたプローブカーデータを基にした交通情報提供が主なサービスであり、プローブカーが走行している全道路区間の交通情報を取得可能である。さらに、個々のドライバーの嗜好の耐用性に配慮した経路誘導システムの展開も進んでいる。例えば、最速ルートに加えて、一般道優先ルート、省燃費ルートなど多様な基準による経路探索を可能とするカーナビも登場している。特に近年では、スマートフォンやタブレット端末を利用したクラウド型のカーナビゲーションアプリの普及も顕著であり、こうしたアプリ等から収集される端末利用者の移動軌跡データは新たな交通情報としての利用可能性を持っていると考えられる。

これら情報通信技術の発展やカーナビの在り方の変化は、道路交通の円滑化や経路決定の利便性向上に一定の貢献をしており、リアルタイム交通情報を用いること

で、従来よりも正確に到着時刻を予測できるようになりつつある。しかし、このような情報技術が進展しても、交通状態の時間的・空間的な不確実性や、Knock-on effect 等によって引き起こされる到着時間の大幅な遅れのリスクを完全に払拭することは難しい。特に、カーナビ利用者の視点から経路誘導の在り方を考えたとき、旅行時間の信頼性は重要な関心事であり、到着時刻の大幅な遅れは道路利用の利便性を大きく損ねると考えられる<sup>2)</sup>。そこで、旅行時間の信頼性を考慮することで、到着時刻の大幅な遅れの回避や旅行時間のばらつきを抑える経路誘導が提案されてきた。その一つとして「(遅刻) リスク回避型経路誘導」が挙げられる。

### (2) リスク回避型経路誘導

リスク回避型経路誘導の基本的な概念は、旅行時間に関する何らかの基準に基づいて、不確実性の高い道路リンクを回避するような経路へと誘導するというものである。代表例として、用いる基準としてリンク毎の旅行時間分布が正規分布に従うと仮定した上で、経路の旅行時間標準偏差やパーセンタイル値に基づいて経路を推奨する研究<sup>3)-7)</sup>などが挙げられる。特に Kaparias and Bell<sup>7)</sup>では、Kaparias et al.<sup>5)</sup>で開発された Routing システム“ARIAdNE”を用い、ロンドンの一般道路において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。しかし、旅行時間の標準偏差やマイル値に

よるリスク回避型経路誘導は、一般的に計算量が非常に多くなることも指摘されている<sup>8)</sup>。

本研究で着目するリスク回避型経路誘導は、Bell<sup>1)</sup>やBell et al.<sup>9)</sup>で提案された“Hyperpath (以下 HP)”の概念に基づくものである。HPとは、旅行時間が不確実で実際に経験する旅行時間が事前に不明の場合に、事後的に最短時間経路と成り得る経路群 (attractive set) を指す。これは、公共交通の分野で提唱された経路探索アルゴリズム<sup>10)</sup>を道路交通に適用させたものである。経路群の生成にはリンク毎の統計的遅れ時間 (maximum delay) と自由流時間 (uncongested travel time) のみに基づいており、旅行時間分布の情報を用いないことから計算量は小さい。この経路誘導方式のカーナビへの適用方法については、Ma<sup>8)</sup>で具体的な実装方法が提案されている。さらに Yamada et al.<sup>11)</sup>では、HPに基づくリスク回避型経路誘導に従う車両の混入率を変化させた交通流シミュレーション分析を行っている。しかし、実際の道路ネットワーク上で HP 基準に従って敬老誘導が行われた際に、定時性の向上が本当に実現できるのかどうかは明らかになっていない。

## 2. 本研究の目的

以上の問題意識にもとづき、本研究では二つの目的を定める。一つは、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うことである。もう一つは、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個々の利用者に時間信頼性の高い効果を与えることができるかを検証することである。

HP に基づく経路誘導システムのアルゴリズムに関しては、Bell et al.<sup>9)</sup>を参考に時刻依存 (Time-dependent) 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。

## 3. Hyperpath の基本概念

旅行時間が不確実の下で旅行時間が最短となりうる経路は一つに決まらず経路群として示され、これを HP と呼ぶ。Bell et al.<sup>9)</sup>における Time-Dependent HP の探索

### 変数の定義

$i, I$ : ノード, ノード集合  
 $a, A$ : リンク, リンク集合,  
 $a = (i, j)$  はノード  $i$  からノード  $j$  を示すリンク  
 $r, s$ : 起点ノード, 終点ノード  
 $H$ : Hyperpath リンク集合  
 $A_i^+$ : ノード  $i$  を起点とするリンクセット  
 $A_i^-$ : ノード  $i$  を終点とするリンクセット  
 $c_a(t)$ : 時間  $t$  におけるリンク  $a$  の最小旅行時間  
 $d_a(t)$ : 時間  $t$  におけるリンク  $a$  の最大遅れ時間  
 $p_a$ : リンク  $a$  の選択確率 (推奨割合)  
 $f_i$ : ノード  $i$  を終点とした  $H$  に含まれるリンクの最大遅れ時間の逆数の線形和  
 $u_i$ : ノード  $i$  での悲観的到着時間  
 $w_i$ : ノード  $i$  での悲観的遅れ時間  
 $h_i$ : ノード  $i$  における  $s$  に対するポテンシャル  
 $b_i$ : ノード  $i$  が  $s$  の時に 1, ノード  $i$  が  $r$  の時に -1, それ以外は 0  
 $N$ : 十分に大きな数

では、ネットワーク上のあるノード  $j$  に進入するリンクの中で最大遅れ到着時間よりも早く到着することのできるリンクを検索し、それを HP に含めることで、ノード  $j$  までの期待到着時間を最小化するように計算される。また、推奨される HP に属するノードに進入する各リンクの使用確率  $p$  がそれらのリンクの最大遅れ時間から計算される。ここでの、リンクの使用確率はそのリンクの時間信頼性指標におけるリンク推奨割合として見ることもできる。HP の計算に用いられる指標はリンクの最小旅行時間と最大遅れ時間であり、Time-dependent の場合ではこれらの値は時間依存で変化することを想定している。

Bell et al.<sup>9)</sup>による期待旅行時間最小化問題は、以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \\ & \sum_{a \in A} p_a c_a(u_i) + \sum_{j \in I} w_j \quad (1) \\ & \text{subject to} \\ & \sum_{a \in A_j^+} p_a - \sum_{a \in A_j^-} p_a = b_j \quad (j \in I) \\ & p_a d_a(u_i) \leq w_j \quad (\forall a \in A_j^+, j \in I) \\ & p_a \geq 0 \quad (a \in A) \end{aligned}$$

この最小化問題の解 (最適 HP) は以下のアルゴリズムによって求めることができる。

### 0. Initialization

$$\begin{aligned} u_i & \leftarrow \infty(N), i \in I - \{r\}, u_r \leftarrow 0; \\ f_i & \leftarrow 0, i \in I; \\ y_i & \leftarrow 0, i \in I - \{s\}, y_s \leftarrow 1; \\ L & \leftarrow A, H \leftarrow \emptyset. \end{aligned}$$

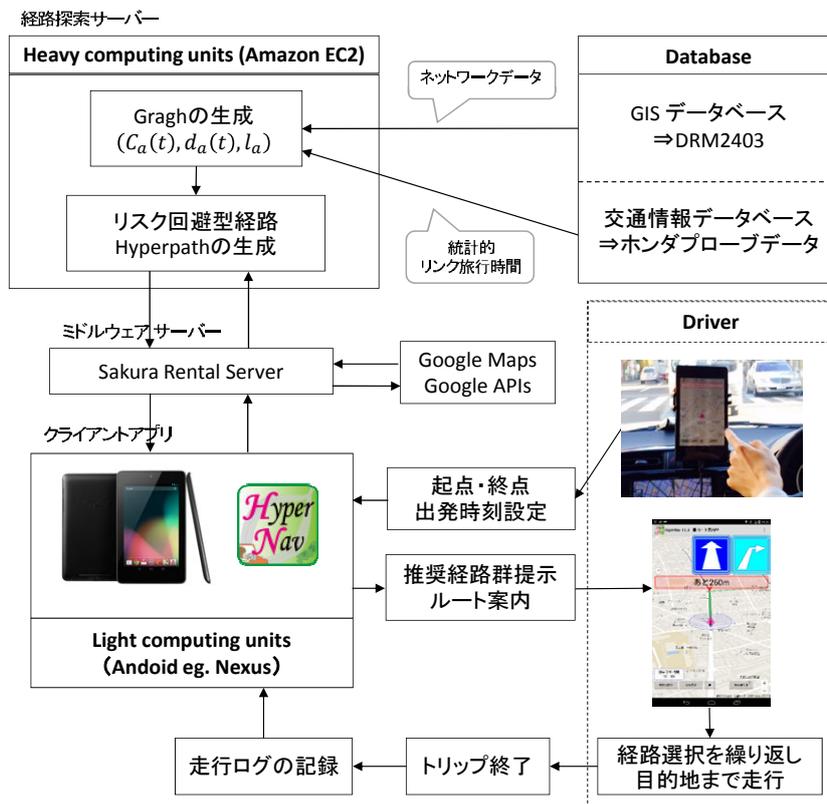


図-1 Hyperpath に基づく遅刻リスク回避型経路誘導システムの全体像

### 1. Select link $a$

Find  $a = (i, j) \in L$

with minimum  $u_i + c_a(u_i) + h_j$ ;  $L \leftarrow L - \{a\}$

### 2. Update node $i$

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

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

else  $\beta \leftarrow f_j u_j$

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

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

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

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

else Step 1

### 3. Loading

For every link  $\forall a \in A$  in decreasing order of  $h_j + u_i + c_a(u_i)$ ,

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  $p_a \leftarrow 0$ .

なお、上記のアルゴリズムは下記の二つの前提条件を仮定している。Assumption 1 はノードポテンシャルが三角不等式の性質を満足するための仮定である。As-

sumption 2 は FIFO (first in-first out) を満足するための仮定である。

Assumption 1:  $h_i \leq c_a(u_i) + h_j \quad \forall a = (i, j) \in A$

Assumption 2:  $u_i + c_a(u_i) > u'_i + c_a(u'_i) \quad u_i > u'_i$

## 4. 経路誘導システムの構築

本研究における経路誘導システムの全体像を図-1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ナビのホンダプロ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 に基づく経路群が計算され、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。これらの詳細は 3.(1)~(3) で示す。

### (1) Hyperpath に基づく経路誘導アルゴリズム

HP に基づく経路誘導アルゴリズムは Bell et al.<sup>9)</sup> の Time-dependent Hyperster algorithm をもとに、さらに Ma<sup>8)</sup> による Faster hyperpath generating algorithm を用いて、計算の高速化を行っている。本研究では、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. 実際の道路ネットワークにおけるリンク旅行時間は, 交通量の少ない深夜帯と朝夕の通勤ラッシュ時とで大きく異なるため, このように時間依存性を想定することが現実的である.

なお, リンク旅行時間を用いて Time-dependent を考慮した経路計算を行うときには, 「リンクに先に進入した車両は後から進入した車両よりも先にリンクから出ていかなくてはならない, 順序が入れ替わることはない」という FIFO 原則を保証しなければならないことに注意が必要である. FIFO を考慮したリンクの旅行時間の計算は Sung et al.<sup>12)</sup> で詳細な説明がされているので参照されたい.

## (2) 実道路ネットワークのデータ設定

本システムでは日本デジタル道路地図協会が管理する道路地図データベースの平成 24 年度版である「DRM2403」を GIS データベースとして用いる. デジタル道路地図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」の組み合わせによって表現される. システムの適用範囲は関東圏を覆うように設定しており, この適用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-2 に適用範囲に含まれるリンクを GIS 上で図示化したものを示す.

HP の計算には統計的なリンク旅行時間が必要である. リンク旅行時間データベースには, ホンダイインターナビのプローブデータの 2013 年 9 月~2014 年 2 月の六ヶ月間のデータを利用する. ホンダイインターナビのデータは 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が収録されており, GIS データベースのネットワークと紐付けがなされている. 経路誘導システムのリンク旅行時間データに使用するために, プローブデータを 15 分毎の時間間隔に分けた進入時間毎に集計をする. 本研究での走行実験は平日のみの走行を考えているため, 休日, 祝日, 年末年始に記録されているデータを除外した. 同様に, 台風や大雪による積雪などの日もデータが異常値である可能性を考慮して除外した.

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 パーセントイルを値を仮定し, 最大遅れ時間は, リンク旅行時間の 95 パーセントイルと 5 パーセントイルの差の値を仮定している.

しかしながら, 全てのリンクレコードに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. さらに, 15 分毎にデータを集計していることで, そのカバー率はさらに小さくなる. 本リンク旅行時間デー

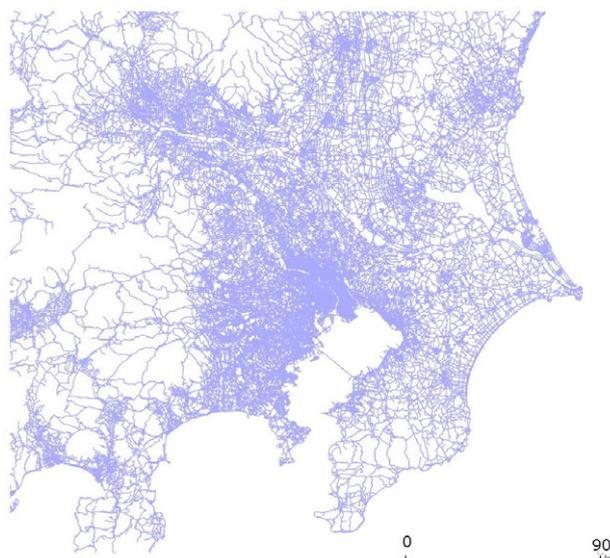


図-2 GIS 上における適用範囲の DRM リンク

表-1 DRM 標準における道路幅員コードと与える自由流速度

	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

タベースにおける総リンクのカバー率は 92.6% で, 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, 各リンクが持つ特有の属性値からレコードに適当なリンク旅行時間を与える. 本システムでは, 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-1). また, このようなデータレコードにおける最大遅れ時間は 0 と仮定する.

## (3) 経路誘導アプリケーション

本研究では, 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. 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-3 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



図-3 HyperNav 上の経路探索結果画面のスナップショット



図-4 HyperNav 上の経路案内中画面のスナップショット

できると考えられる時刻) が示されている。

図-4は走行中のユーザーインターフェイスを示している。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。

## 5. 実道路ネットワークでの走行実験

### (1) 実験の概要

HPに基づく経路誘導における旅行時間信頼性についての効果を検証するため、SPによる経路誘導との比較走行実験を実施した。実験はHPに從う車両とSPに從う車両で同時刻に出発し、目的地までの実旅行時間と実経路等を記録する(図-5、6)。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、3.(2)で示したように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。



図-5 走行中の様子 (HP)

図-6 走行中の様子 (SP)

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-7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-2に、実際の実験時のトリップ毎の出発時間を示す。

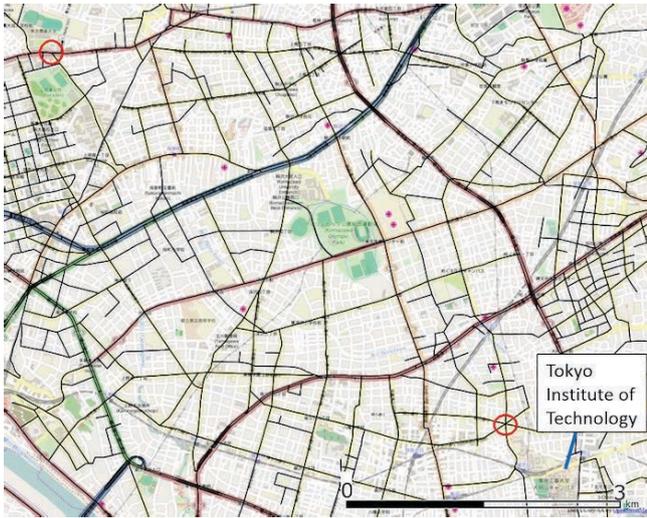


図-7 出発地と目的地の位置関係 (Open Street Maps)

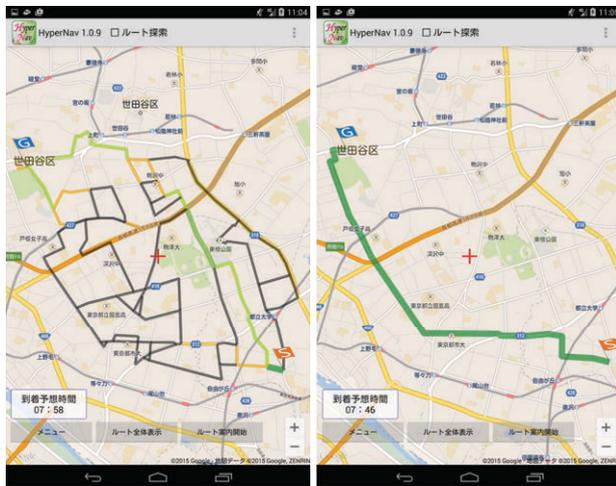


図-8 HP と SP の経路探索結果 (at 7:30)

表-2 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

図-8 は HP と SP における実際の経路計算結果の例を示している。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。

図-9 と図-10 は実験トリップで計算された出発時間

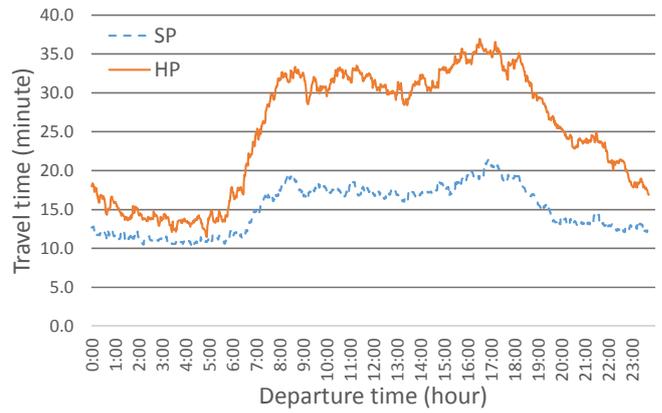


図-9 悲観的旅行時間と期待旅行時間 (Trip A)

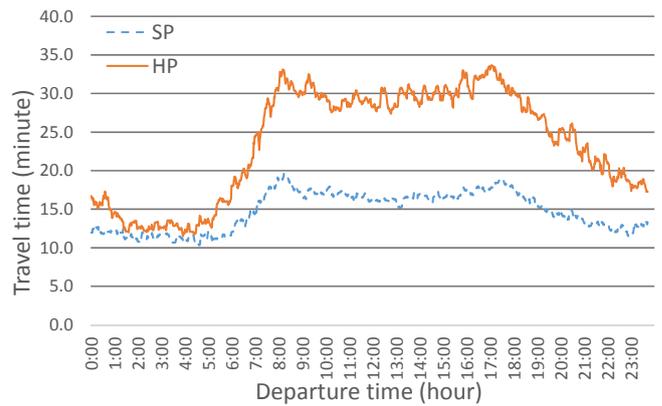


図-10 悲観的旅行時間と期待旅行時間 (Trip B)

毎の HP の悲観的旅行時間と SP の期待旅行時間を出発時間 1 分毎の推移で示した図である。旅行時間は 6 時から 8 時の間で急激に増加し朝のピークを迎えた後、昼にかけて少し減少して夕方にもう一度ピークを迎え、17 時以降は減少傾向にあることがわかる。

本研究では、走行実験で得られる結果において考えられる次の三つの仮説  $H_1 \sim H_3$  について検討する。

$H_1$ : 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。

$H_2$ : 道路混雑時間帯においては、 $H_1$  の効果がより大きくなる。

$H_3$ : HP による推奨経路群が多いほど  $H_1$  の効果が大きい。

## (2) 走行実験の結果

走行実験から得られた実旅行時間のデータを表-3 に示す。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。この表は実験日と出発時間毎に集約されており、出発時間毎の実旅行時間の平均 (Mean) と分散 (SD) も示されている。

実旅行時間の基本統計量を表-4 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

表-3 走行実験による実旅行時間 (単位：分)

Dec.		8 Mon	9 Tue	10 Wed	11 Thu	12 Fri	15 Mon	16 Tue	17 Wed	18 Thu	19 Fri	Mean	SD		
Trip A	7:30	HP	N.A.	23.6	21.2	22.2	19.8	17.0	18.4	20.9	18.9	21.6	20.4	2.0	
		SP	N.A.	20.9	18.9	24.4	25.5	24.3	20.1	20.8	17.0	23.1	21.7	2.8	
	8:40	HP	N.A.	27.4	24.5	22.4	22.1	23.3	26.4	22.5	23.9	21.4	23.8	2.0	
		SP	N.A.	23.5	22.3	27.0	23.1	18.6	28.0	22.3	26.2	27.3	24.2	3.1	
	13:00	HP	26.0	20.3	N.A.	N.A.	21.2	25.3	18.7	21.2	23.4	19.8	22.0	2.6	
		SP	18.8	N.A.	19.0	20.0	N.A.	26.6	20.8	20.4	N.A.	24.6	21.5	3.0	
	17:00	HP	N.A.	N.A.	28.9	24.4	25.4	32.9	24.9	28.9	26.3	N.A.	27.4	3.0	
		SP	N.A.	25.1	22.8	28.2	22.6	32.2	29.6	30.0	24.9	N.A.	26.9	3.6	
	18:00	HP	23.0	23.1	22.7	23.5	25.5	21.0	21.3	25.1	20.0	22.0	22.7	1.7	
		SP	22.3	24.1	20.9	18.7	22.3	34.2	24.3	27.9	24.1	32.2	25.1	4.9	
	Trip B	8:05	HP	N.A.	24.3	N.A.	30.3	N.A.	N.A.	19.2	23.8	22.5	23.6	24.0	3.6
			SP	N.A.	31.4	26.7	19.4	26.0	N.A.	N.A.	26.4	29.3	23.6	26.1	3.9
9:10		HP	N.A.	26.4	23.2	24.3	21.0	25.2	20.6	23.9	18.2	20.1	22.5	2.7	
		SP	N.A.	23.8	23.2	22.1	23.0	24.1	19.6	21.3	21.1	20.1	22.0	1.6	
13:30		HP	18.6	21.2	16.1	N.A.	20.9	23.0	19.6	20.6	21.5	20.5	20.2	2.0	
		SP	22.8	21.0	16.6	27.1	N.A.	20.8	16.0	16.0	40.3	26.8	23.0	7.7	
17:30		HP	N.A.	N.A.	19.3	22.2	27.0	22.2	24.0	20.2	22.2	N.A.	22.4	2.5	
		SP	N.A.	19.2	25.5	24.2	24.8	23.8	24.7	24.6	34.3	N.A.	25.1	4.2	
18:30		HP	22.1	23.0	22.0	19.9	24.8	18.3	20.0	21.3	19.3	18.6	20.9	2.1	
		SP	18.3	23.6	16.5	16.7	N.A.	N.A.	17.7	19.4	17.7	19.3	18.6	2.3	

“N.A.”は欠損を意味する。

表-4 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

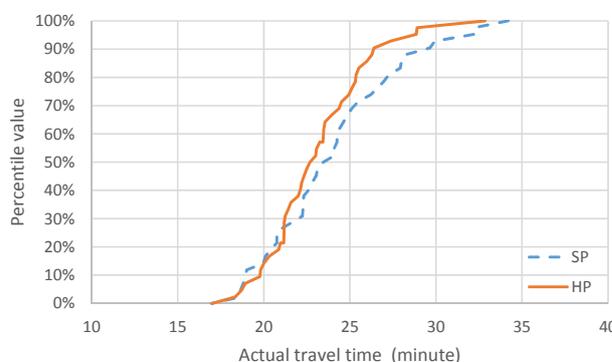


図-11 実旅行時間の経験分布 (Trip A)

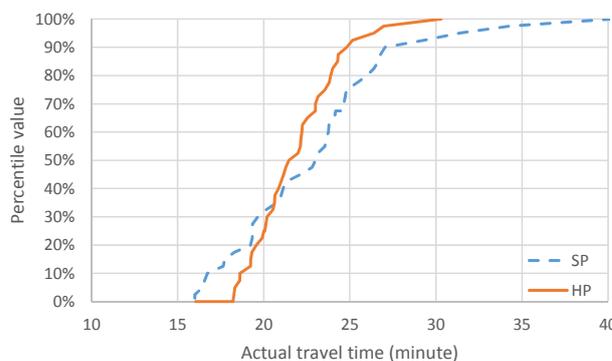


図-12 実旅行時間の経験分布 (Trip B)

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。次に、図-11と図-12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。ただし、HPのばらつきは小さいものの、パーセンタイル値が0%から30%の付近では旅行時間はSPよりも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では25%となっているが、SPでは33%である。一方、25分以内に目的地に到着する確率はHPでは92%となっているが、SPでは76%になっている。

### (3) 統計的な検定

#### a) 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-5に示す。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。

#### b) 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

表-5 F 検定による旅行時間の分散の検定

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

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 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<sup>13)</sup>。

まず、交互作用項を考慮しないモデルを構築した (Model 1)。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。ここで、 $\alpha$  は分位点を示す。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を示す変数である。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を期待される。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 Model 1 を以下に示す ( $u_{\alpha}$  は誤差項を表す)：

$$travel\_time_{\alpha} = \beta_{0\alpha} + \beta_{1\alpha}[HP] + \beta_{2\alpha}[delay\_idx] + \beta_{3\alpha}[dep\_time] + \beta_{4\alpha}[rail] + u_{\alpha} \quad (2)$$

分位点回帰モデルの分位点毎の推定結果を表-6 に示し、パラメータの値を図示化したものを図-13 に示す。推定は、10%から90%までの5%毎の異なる分位点に対して行った。

まず定数項 (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、こちらはほとんどの分位点で有意にプラスの値であることがわかる。つまり、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。

次に、どのような条件の下で HP に基づく経路誘導がより大きな効果を発揮できるのかを明らかにするため、交互作用項を考慮したモデルを構築した (Model 2)。これは、 $H_2$  と  $H_3$  について、道路交通量の多いときの効果と、推奨経路が多いときの効果を検証することを企図したものである。Model 2 を以下に示す：

$$travel\_time_{\alpha} = \beta_{0\alpha} + \beta_{1\alpha}[HP] + \beta_{2\alpha}[delay\_idx] + \beta_{3\alpha}[dep\_time] + \beta_{4\alpha}[rail] + \beta_{5\alpha}[delay\_idx] \times [HP] + \beta_{6\alpha}[num\_node] \times [HP] + u_{\alpha} \quad (3)$$

ここで“ $num\_node$ ”はHP全体の意思決定ノード数(分岐ノード数)を数え上げた変数である。つまり意思決定ノード数が多いほど、HPの経路が増加し、ドライバーにとっては柔軟に経路を選択しながら目的地に到達できるので、時間信頼性の高い効果が得られる可能性があるという仮説の下でこの交互作用項を含めた。

表-7に推定結果を示す。定数項 (Intercept) と HP ダミーの推定値は前モデル同様に推定されていることがわかる。次に、交互作用項についての考察を行う。 $numnode \times HP$  では、分位点が60%~90%までの区間で正の値が推定されている。また傾向も右肩上がりに値が上昇していることがわかる。つまり、この結果から示唆されることは、意思決定ノード数が多いほど旅行時間を増加させ、ばらつきも増加しているということである。これは、仮説と逆の結果になっている。このような結果に至った理由は、意思決定ノード数が多いということは最大遅れ時間が大きい可能性があり、旅行時間の不確実性が大きいトリップであると考えられるためである。また、 $delayidx \times HP$  の交互作用項はど

表-6 分位点回帰分析の推定結果 (Model 1)

	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

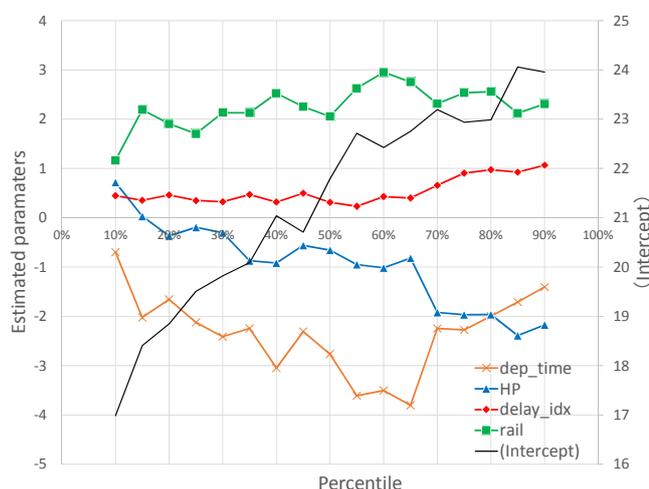


図-13 分位点回帰分析の推定結果 (Model 1)

の分位点においても有意水準 10%以下の有意性は見られなかった。以上より、すなわち、HPによる経路誘導がどのような条件下でより有用化に関しての明確な知見は得られなかった。

## 6. 結論と今後の課題

本研究では、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個々の利用者に時間信頼性の高い効果を与えることができるかを検証した。

HPに基づく経路誘導システムの構築では、Bell et al.<sup>9)</sup>に基づき、Time-dependantな遅刻リスク回避型経路誘導

の構築を行った。ここで実道路ネットワークに適用するためのGISデータベースにDRM2403を使用し、リンク旅行時間データベースにホンダイインターナビのプロープデータを使用した。また、実際にカーナビとして使用するためのAndroidアプリの開発も行った。

走行実験では、HPに基づく経路誘導における旅行時間信頼性についての効果を検証するため、最短経路探索との比較走行実験を実施した。このデータを使用し、基礎分析や仮説検証を踏まえた結果について考察を行ったところ、まず、HPに基づく経路誘導と最短経路探索に基づく経路誘導それぞれで走行して得られた実旅行時間データに関して、トリップ毎に分けて、基本統計量を計算した。そこで、HPに基づく経路誘導の旅行時間の平均値と分散がShorttest path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。特に分散はF検定によって統計的にも有意に違いが見られた。また、実旅行時間のパーセンタイル値を計算し、経験分布で結果を示した。経験分布から、HPに基づく経路誘導の分布のばらつきがSPに基づく経路誘導と比較して小さいことを確認できた。また経験分布からは、旅行時間が短くなる確率はSPに基づく経路誘導のほうが大きいことが確認できた。これらの基礎分析を通じて、走行実験前に期待していた結果が十分に得られ、HPに基づく経路誘導が定時性の高い経路誘導となることが示唆された。

さらに、旅行時間に影響する規定要因を考慮して、HPに基づく経路誘導の効果を詳細に分析するために分位点回帰を行った。分位点回帰の結果から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、基本的には旅行時間を減少させることがで

表-7 分位点回帰分析の推定結果 (Model 2)

	10% tile	15% tile	20% tile	25% tile	30% tile	35% tile
(Intercept)	16.94 **	18.36 **	18.03 **	19.36 **	19.17 **	20 **
HP	4.37	3.51	2.83	1.06	1.14	1.43
delay_idx	0.46	0.38	0.67 *	0.41	0.64 *	0.53
dep_time	-0.95	-2.01	-1.96 **	-2.12 **	-2.08 **	-2.8 **
rail	1.10	1.79 *	1.87 **	1.61 **	2.19 **	2.09 **
num_node × HP	-1.08	-0.97	-0.57	-0.30	-0.28	-0.3
delay_idx × HP	-0.08	-0.22	-0.48	-0.17	-0.32	-0.43
	40% tile	45% tile	50% tile	55% tile	60% tile	65% tile
(Intercept)	19.85 **	19.93 **	21.59 **	22.84 **	23.05 **	24.25 **
HP	0.27	-5.38	-5.94	-7.14 *	-8.19 **	-10.03 **
delay_idx	0.66 *	0.69	0.34	0.14	0.23	-0.03 *
dep_time	-2.78 **	-2.31 *	-2.60 **	-3.64 **	-3.01 **	-3.14 **
rail	2.32 **	2.36 **	2.65 **	2.75 **	2.95 **	3.67 **
num_node × HP	0.30	1.80	1.55	1.60	1.90 **	2.15 **
delay_idx × HP	-0.56	0.02	0.30	0.59	0.56	0.85
	70% tile	75% tile	80% tile	85% tile	90% tile	
(Intercept)	23.99 **	23.14 **	23.08 **	23.73 **	23.96 **	
HP	-10.01 **	-10.82 *	-9.71 **	-13.14 **	-12.72	
delay_idx	0.18	0.76 *	0.91 **	0.83	1.07	
dep_time	-2.69 *	-2.83 **	-1.93	-1.16	-2.88	
rail	3.48 **	3.37 **	3.15 **	3.22 **	3.43	
num_node × HP	2.09 **	2.75 **	2.47 **	3.03 *	4.09 *	
delay_idx × HP	0.79	0.26	0.10	0.67	-0.30	

\*\*\*と\*\*は有意水準5%と10%を示す

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確認できた。なお、HPによる経路誘導がどのような条件下でより有用化に関しての明確な知見は得られなかった。今後は、どのような条件下でHPの効果がより大きく発揮できるかを引き続き検証する必要がある。

謝辞： 本研究は、道路政策の質の向上に資する技術研究開発「道路の旅行時間信頼性の評価と運用に係る研究開発」（代表者：福田大輔）、および、文部科学省科学研究費補助金基盤研究B（代表者：福田大輔、番号：25289160）の支援を受けて行われた。また、Androidアプリ“HyperNav”は、地域未来研究の田名部様、菅様からのご支援を受けて開発された。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Bell, M. G.: Hyperstar: A multi-path astar algorithm for risk averse vehicle navigation, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 43, No. 1, pp. 97–107, 2009.
- 2) Park, K., Bell, M., Kaparias, I. and Bogenberger, K.: Learning user preferences of route choice behaviour for adaptive route guidance, *Intelligent Transport Systems, IET*, Vol. 1, No. 2, pp. 159–166, 2009.
- 3) Chen, B. Y., Lam, W. H., Sumalee, A., Li, Q., Shao, H. and Fang, Z.: Finding reliable shortest paths in road networks under uncertainty, *Networks and spatial economics*, Vol. 13, No. 2, pp. 123–148, 2013.
- 4) 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 Trans-*

*portation Research Board*, Vol. 1944, No. 1, pp. 51–57, 2006.

- 5) 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.
- 6) 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(4), pp. 202–212, 2008.
- 7) 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.
- 8) Ma, J.: Hyperpath-based strategic route guidance considering travel time uncertainty, Ph.D. dissertation, Tokyo Institute of Technology 2012.
- 9) Bell, M. G., Trozzi, V., Hosseinloo, S. H., 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.
- 10) 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.
- 11) Yamada, K., Ma, J. and Fukuda, D.: Simulation analysis of the market diffusion effects of risk-averse route guidance on network traffic, *Procedia Computer Science*, Vol. 19, pp. 874–881, 2013.
- 12) Sung, K., Bell, M. G., Seong, M. and Park, S.: Shortest paths in a network with time-dependent flow speeds, *European Journal of Operational Research*, Vol. 121, No. 1, pp. 32–39, 2000.
- 13) Koenker, R.: *Quantile Regression (Econometric Society Monographs)*, Cambridge University Press 2005.

(2015. 4. 24 受付)

# DEVELOPMENT OF HYPERPATH-BASED RISK AVERSE ROUTE GUIDANCE SYSTEM AND ITS VERIFICATION THROUGH A FIELD EXPERIMENT

Myu ITO, Daisuke FUKUDA and Jiangshan MA

This study develops Hyperpath(HP)-based risk-averse route guidance system as executable system on the actual road network and the verification of effects on travel time reliability of this route guidance system through driving field experiment. By using the developed car navigation, driving experiments has been carried out compared to shortest path based route guidance on the actual road network. It is indicated that the average and standard deviation of HP is smaller than those of shortest path (SP) and the minimum value of travel time of SP is smaller than that of HP. It is also suggested that there is a difference in the variation in actual travel time between HP and SP and the effect of reducing the travel time by Hyperpath-based route guidance. In other words, it is possible to reduce the probability of a tardy arrival.