交通ネットワーク信頼性研究の展望

山﨑　浩気[1]・嶋本　寛[2]・宇野　伸宏[3]・倉内　文孝[4]

[1]正会員　京都大学助教　学術情報メディアセンター（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）
E-mail:yamazaki@media.kyoto-u.ac.jp

[2]正会員　京都大学講師　工学研究科都市社会工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

[3]正会員　京都大学准教授　経営管理研究部（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

[4]正会員　岐阜大学准教授　工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）

従来の交通サービスの量的な充実のみならず，サービスの質を評価し向上させることの重要性に関する認識が広がっており，旅行時間信頼性指標の実務展開のニーズが高まっている．本稿では，過去4年間連続して企画していた一連の交通ネットワーク信頼性に関する企画セッションでの議論を整理することで，信頼性研究の動向を把握するとともに，本年度の企画セッションにおける議論の材料を提供する．

これまでの4年間で，交通ネットワーク信頼性のうち，特に時間信頼性に着目した実ネットワークへの適用が急速に進展して，信頼性概念を計画評価へと適用することを意図した研究事例も増えてきた．これらを踏まえて，研究動向と今後の課題を整理して，5年間の本企画セッションの総括とする．

Key Words : *Network reliability, Perspective*

1. はじめに

21世紀における社会経済システムはより複雑かつ活動的になり，交通サービスの量的な充実のみならず，サービスの質を評価し向上させることが重要である．交通サービスの質を評価する一つの指標として信頼性の考え方がある．災害などの突発事象が発生してもネットワーク全体として大きな機能低下が生じない，といった災害等に関する耐性や，交通集中などに起因する渋滞時発生時にも深刻な遅れが生じない，という交通需要の変動に対する頑健性の評価がその考え方の一例である．欧米諸国でのネットワーク信頼性研究の進展を受けて，日本国内においても特に日常的な事故リスクを踏まえた時間信頼性改善に向けた取り組みが行われてきており，実フィールドの適用事例も増えている．

以上を踏まえ，ネットワーク信頼性に基づく交通インフラならびにサービスの計画・運用・評価は，実務的にも学術的に重要な課題と認識し，過去4年間土木計画学研究発表会（春大会）において「交通ネットワーク信頼性」に関する企画セッションを開催してきた．本稿では，上記企画セッションにおける発表論文をレビューすることによって，今後の信頼性評価，計測評価手法について，今後の交通サービスの信頼性研究の方向性を議論するための情報提供をすることを目的とする．

2. 発表論文の整理

過去4年間の発表件数56件のうち，大多数は時間信頼性というキーワードを使った発表であった．発表論文に関しては，論文通し番号およびそれぞれの著者によって付けられている論文キーワードをまとめた表を作成している．年度ごとの発表件数の変遷は，第35回大会（2007年，九州大学）13編，第37回大会（2008年，北海道大学）13編，第39回大会（2009年，徳島大学）20編，第41回大会（2010年，名古屋工業大学）10編であった．まず本章では，4年間の研究経過を日常的事象の取り扱いの有無と著者が利用しているキーワードから簡潔にまとめる．**表-1**に全56編の発表概要を掲載する．なお，表中に記載されたキーワードは，後の分析で分類しやすくするために著者らによって一部文言等を変更している．

56件の発表のうち，瀬戸らによる2件の発表（論文番号26, 56）は，脆弱性概念を用いて日常時の最短経路のx倍までの旅行時間経路が何本あるかによって，ネットワークの評価を行うものであり，容量を医療サービスの享受可能性などで比較している．非日常をメインに扱った研究はこの2編のみであり，残り54編の発表は，日々の交通需要変動や天候，イベントなどの外的要因によって引き起こされる日常的なサービスレベルの変動を対象とした，旅行時間信頼性（Travel time reliability）に関連する論文である．多くは，日常的事象を想定して道路上の旅行時間を分布的に取り扱うことで交通ネットワーク信頼性の中でも，特に旅行時間信頼性を評価するものである．

表-1　交通ネットワーク信頼性セッションでの発表論文

ID	年	著者	題目	キーワード
1	第35回（2007年）	小松，中山，高山	リンクレベルでの渋滞変化を考慮した時間信頼性指標に関する研究	解析手法（ネットワーク分析）
2		若林	高速道路交通サービスの信頼性評価のための連結信頼性と旅行時間変動の分析	旅行時間信頼性 連結信頼性 変動（旅行時間）
3		倉内，宇野，嶋本，山﨑	交通ネットワークサービスの信頼性解析に関する研究動向	（レビュー論文）
4		川北，北澤，飛ヶ谷，田名部，朝倉	阪神高速道路における所要時間の信頼性に関する分析	旅行時間信頼性 データ処理（タイムスライス法）
5		片岡，岡，熊谷，岩佐	CCTVを用いた安価な道路監視・計測システムの開発	データソース（CCTV） データ処理（画像処理）
6		宇野，倉内，嶋本，山﨑，小笹，成田	ETCデータを用いた都市間高速道路の旅行時間信頼性分析	データソース（ETC） 旅行時間信頼性 高速道路（都市間）
7		野間，奥谷，井坪，前川	交通量自動観測器を用いた一般道の時間信頼性分析～筑波山交通調査を事例に～	旅行時間信頼性 調査（旅行時間） データソース（AVI）
8		中村，中嶋，牧村，井坪	トラックプローブデータを用いた旅行時間信頼性指標に関する一考察	データソース（プローブカー） 旅行時間信頼性
9		中山，長尾	道路ネットワークの旅行時間信頼性の推定及び評価の課題と展望	旅行時間信頼性 変動（交通量）
10		三輪，岡本，山本，森川	プローブカーデータによる交通状況変化時点の検出に関する研究	データソース（プローブカー） 交通管理（情報提供）
11		Wccrasooriya,Bajwa, Kuwahara,Sarvi, Chung	Bus travel time prediction using bus probe data	変動（旅行時間） 解析手法（旅行時間予測） データソース（プローブカー）
12		丹下，土谷，田名部，井坪	プローブパーソン調査結果を用いた旅行時間変動と個人行動変化に関する基礎的検討	調査（調査論） 解析手法（交通行動分析） 計画（道路）
13		田名部，朝倉，井坪	所要時間変動と経路選択の関係性に関する実証分析	旅行時間信頼性データソース（プローブパーソン）交通現象（経路選択）
14	第37回（2008年）	若林	各種旅行時間信頼性指標の比較と課題	旅行時間信頼性 評価指標（旅行時間信頼性） 評価指標（比較）
15		梶原，石田，野中	所要時間の信頼性に関する評価指標の比較分析	交通管理 評価（サービス水準）
16		福田，フォスグロゥ	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	評価（時間信頼性価値） 変動（旅行時間） 評価（プロジェクト）
17		安東，谷口，山田，岡	平均分散モデルを用いた道路ネットワークにおける経路の所要時間評価に関する基礎的研究	交通管理（情報提供） 交通現象（経路選択） 解析手法（ネットワーク分析）
18		野間，奥谷，橋本	道路ネットワークの評価における時間信頼性指標の適用に関する研究	旅行時間信頼性 調査（旅行時間） データソース（AVI）
19		宗像，割田，岡田	首都高速道路における所要時間の信頼性指標を用いた事業評価事例	評価（公共事業） 解析手法（ネットワーク分析）
20		飛ヶ谷，石橋，田名部，朝倉	旅行時間信頼性指標と既存の渋滞評価指標との比較～阪神高速道路の実例～	旅行時間信頼性 交通現象（渋滞） 評価（サービス水準）
21		Mehran,Nakamura	Applying travel time reliability for pre-evaluation of expressway congestion improvement schemes	旅行時間信頼性 評価（サービス水準） 評価指標（BTI） 交通現象（渋滞）
22		Chalumuri,Iryo, Asakura	Seemingly unrelated regression model for analysing travel time variation; a case study of hanshin express-way	変動（旅行時間） 解析手法（統計解析） 高速道路（都市内）
23		橋本，奥谷	季節変動・天候が時間信頼性評価に与える影響分析	変動（季節） 変動（天候） 旅行時間信頼性
24		日下部，井料，朝倉	出発時刻選択と旅行時間信頼性	旅行時間信頼性 交通現象（利用時刻選択） 評価指標
25		関根，堤，岡本，石田	長期間の自動車移動再現シミュレータを用いたDSRC路側機の配置戦略に関する分析	解析手法（交通行動分析） 交通管理（情報提供）
26		瀬戸，倉内，宇野	脆弱性の概念を用いた道路網接続性評価に関する研究	計画（道路） 評価（脆弱性） 評価指標（クリティカルリンク）
27	第39回（2009年）	中山，高御堂	道路利用者行動からの時間信頼性評価のレビュー	（レビュー論文）
28		太田，山﨑，宇野，塩見	ETCデータを用いた所要時間信頼性に基づく新規高速道路供用効果分析	評価（サービス水準） データソース（ETC） 旅行時間信頼性
29		有馬，安東，谷口，山田	道路ネットワークにおける所要時間の平均と分散を考慮した最適経路決定手法に関する研究	交通管理（情報提供） 交通現象（経路選択） 解析手法（ネットワーク分析）
30		梶原，菊地，坂爪，割田，山下，倉内	所要時間信頼性指標のための首都高速道路利用者の行動実態について	旅行時間信頼性 調査（アンケート） 評価指標
31		上坂，橋本，吉岡，中西	空港アクセス道路の定時性評価のケーススタディ	評価（公共事業） 計画（道路） 解析手法（交通行動分析）
32		藤生，高田	鉄道利用者の損失時間縮減に対する支払意思額の推定	評価（支払意思額） 旅行時間信頼性 評価（利用者）
33		足立，藤川，朝倉	所要時間信頼性の向上に伴う高速道路利用時刻変化の実証分析	旅行時間信頼性 交通現象（利用時刻選択） 高速道路
34		若林，松本，鈴木，鈴木	都市間高速道路の旅行時間の変動と管理者・利用者からみた旅行時間信頼性指標との関係	旅行時間信頼性 評価指標（旅行時間信頼性） 評価指標（比較）
35		割田，坪山，船岡，宗像	都市高速道路を対象とした旅行時間信頼性による新たな評価手法の研究	旅行時間信頼性 評価（道路） 高速道路（都市内）
36		福田，松本，市村	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	評価（時間信頼性価値） 変動（旅行時間） 評価（プロジェクト）
37		高山，中山，鈴木，福田	高速道路における救急車専用退出路の設置効果に関する研究	計画（防災）
38		宗像，割田，山下	首都高速道路における所要時間信頼性指標を用いたネットワーク全体の評価手法の検討	評価（公共事業） 解析手法（ネットワーク分析）

39		吉岡，橋本，上坂	車線数と交通量が所要時間に及ぼす影響に関する実証的研究	旅行時間信頼性データソース（ETC） 旅行時間信頼性
40		Mehran,Nakamura	Assessing impacts of hard shoulder utilization on travel time reliability and safety	旅行時間信頼性 評価（サービス水準） 交通管理（路肩運用） 交通管理
41		牧，土谷，伊藤，由利	諸外国における道路の所要時間信頼性向上に関する評価手法のレビュー	旅行時間信頼性 評価（公共事業） 評価（便益）
42		坪田，菊地，梶原，坂爪，割田，倉内	首都高速道路における所要時間信頼性向上便益の試算	旅行時間信頼性 評価（プロジェクト）
43		今村，中山，高山，長尾	パーセンタイル値を旅行時間信頼性指標とした均衡配分モデル及びその金沢市道路ネットワークへの適用	解析手法（ネットワーク分析）
44		伊藤，倉内，宇野，永田，田中	旅行時間信頼性指標の推定手法に関する研究	評価（サービス水準） 交通管理（情報提供）
45		梶原，中本，石田，野中	所要時間信頼性に関する指標の提案と適用事例	旅行時間信頼性 評価（サービス水準）
46		岩里，石橋，朝倉，田名部	所要時間信頼性指標を用いたサービス水準評価手法の検討	旅行時間信頼性 交通現象（渋滞） 評価（サービス水準）
47	第41回（2010年）	高橋，福田	選好意識調査と統合モデルに基づく旅行時間変動価値の推計の試み	評価（変動価値） 変動（旅行時間） 解析手法（交通行動分析）
48		Wahaballa,Kurauchi, Takagi,Othman	Review of benefit evaluation models for travel time reliability improvements	旅行時間信頼性 変動（旅行時間） 評価指標（VoR） 評価（費用便益分析）
49		堀江，山本，吉田，若林	旅行時間の変動と管理者および利用者からみた旅行時間信頼性指標	変動データ処理（マッチング） 旅行時間信頼性
50		足立，藤川，朝倉	高速道路における多頻度利用者の見込み所要時間実証分析	旅行時間信頼性 データ処理（多頻度利用者） 高速道路
51		藤川，森田，福田	高速道路の所要時間分布からみた信頼性情報のあり方に関する研究	旅行時間信頼性 変動（旅行時間） 高速道路
52		杉本，山﨑，宇野，塩見	都市間高速道路の走行速度変動要因に関する基礎的考察	評価（サービス水準） 交通現象（交通流） 交通管理
53		岩里，山本，田名部，菅，朝倉	阪神高速道路のWEBアクセスログの分析に基づく所要時間信頼性情報の提供方針	旅行時間信頼性 交通管理（情報提供） 調査（WEBログ）
54		上坂，橋本，吉岡，中西，朝倉	AVIデータを用いた一般道路における時間信頼性指標の算出方法	調査（調査論） 計画（計画情報）
55		原田，上坂	山岳道路における時間信頼性の低下要因と道路利用者の意識	評価（公共事業） 調査（意識調査） 計画（計画情報）
56		瀬戸，宇野，塩見	非重複経路を考慮したアクセシビリティ評価指標の構築	評価指標（アクセシビリティ） 評価指標（非重複経路） 評価（脆弱性）

(1) 発表キーワードの変遷

まず，原稿内容を示しているキーワードについて，整理をおこなうことで年度ごとの発表動向についてまとめる．56編の論文で164個のキーワードが用いられていたが，これらをある程度共通性をもつ13のキーワードに再分類した結果を**表-2**に示す．集約が難しい19つのキーワードについては分析対象外として，集約をおこなっている．これ以降はこの集約キーワードの経年変化などに基づき，分析を進めることとする．

発表内容の経年変化を俯瞰するために，**図-1**に各集約キーワードが占める割合を示す．当初（第35回，2007年）はデータソース，データ処理，解析手法に関するキーワードが占める割合が40%以上と高かったが，回を追うごとにこれらのキーワードが占める割合が減少する反

表-2 集約したキーワードとその小分類

集約キーワード	小分類
データソース	AVI，CCTV，ETC，プローブカー，プローブパーソン
データ処理	タイムスライス法，画像処理，マッチング，多頻度利用者
解析手法	ネットワーク分析，交通行動分析，旅行時間予測，統計解析
調査	調査論，旅行時間，アンケート，WEBログ，意識調査
計画	道路，防災，交通情報
変動	交通量，旅行時間，季節，天候
交通管理	情報提供，路肩運用
交通現象	経路選択，渋滞，利用時刻選択，交通流
評価	サービス水準，プロジェクト，公共事業，時間信頼性価値，脆弱性，費用便益分析，変動価値，道路，便益，利用者，支払い意志額
評価指標	Buffer Time Index，クリティカルリンク，比較，旅行時間信頼性，Value of Reliability，アクセシビリティ，非重複経路
旅行時間信頼性	
連結信頼性	
高速道路	都市間，都市内

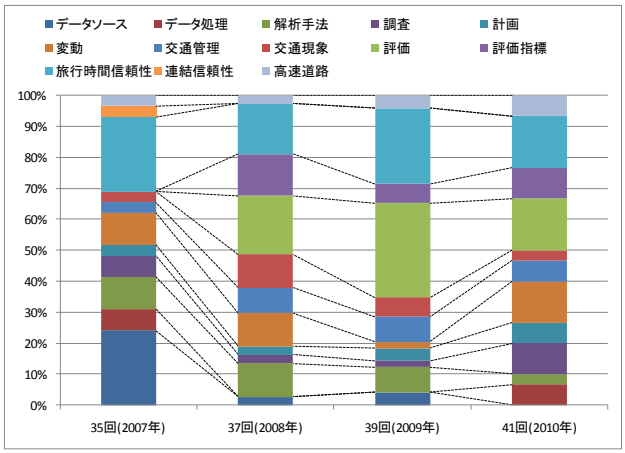

図-1 集約キーワードの経年変化

面，評価，評価指標に関するキーワードが占める割合が高くなる傾向が読み取れる．第39回大会（2009年）では評価に関するキーワードが集中したが，これはネットワーク信頼性に基づく評価結果を，交通システムの計画・運用にいかにフィードバックするかという視点での論文が増加したためと考えられる．その後の第41回大会（2010年）では，評価だけでなく変動，調査，データ処理に関するキーワードが占める割合が再び高くなっているが，これは変動する交通状況をいかに利用者に提供するかという視点からの研究等，新たな視点からの研究が増加したためであるとも考えられる．

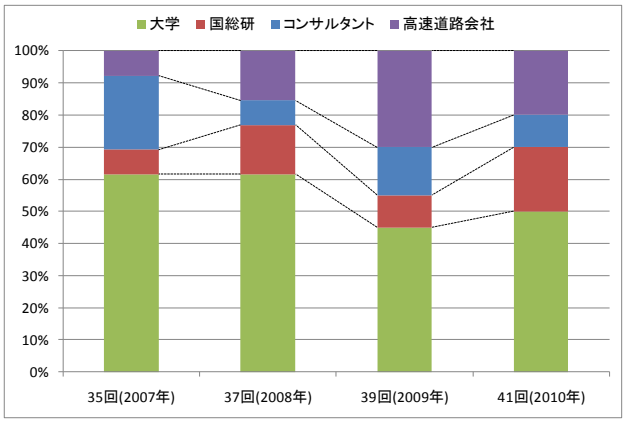

図-2　発表者所属の変遷

(2)　発表者所属機関の変遷

図-2に年度別の発表者の所属の内訳を示す．大学や研究所などの研究機関からの発表がおおよそ半数を占めているが，特に第39回大会（2009年）では，高速道路会社からの発表が多かった．これは旅行時間信頼性評価のためのデータの利用可能性，ならびに，求められる交通サービス水準の高さを反映したものと考えられる．

3.　信頼性研究の動向

以上のように整理された56編の論文について，分析の主たる目的（計画評価あるいは現状分析）と，アプローチ（方法論あるいはデータ解析）の2つの軸において整理を試みた（**図-3**）．図中では発表会ごとに異なる凡例を付与している．なお，この図における2軸上での各論文の位置づけについては，本稿の著者らの議論に基づく主観的なものであり，必ずしも各論文の著者の意図を反映できていない可能性が十分にある．この点，ご容赦いただきたいと思う．

この図をこの図をみると，第35回大会（2007年）においては，左上，あるいは右下に位置する論文がほとんどである．すなわち，現象把握を目的とし，観測データを用いて分析を進めた研究と，理論的側面から信頼性指標の活用方法を検討している研究に二分されていたと考えることができるだろう．第37回大会（2008年）では，比較的プロットが全体にわたって存在する．特に，左下には，信頼性解析の方法論を提案した上で，現状把握を試みた論文，あるいは観測データを用いて計画評価をめざしたものなど，分析に広がりを見せている．第39回大会（2009年）においてもその傾向は継続されているが，若干データ解析の方に偏っている．

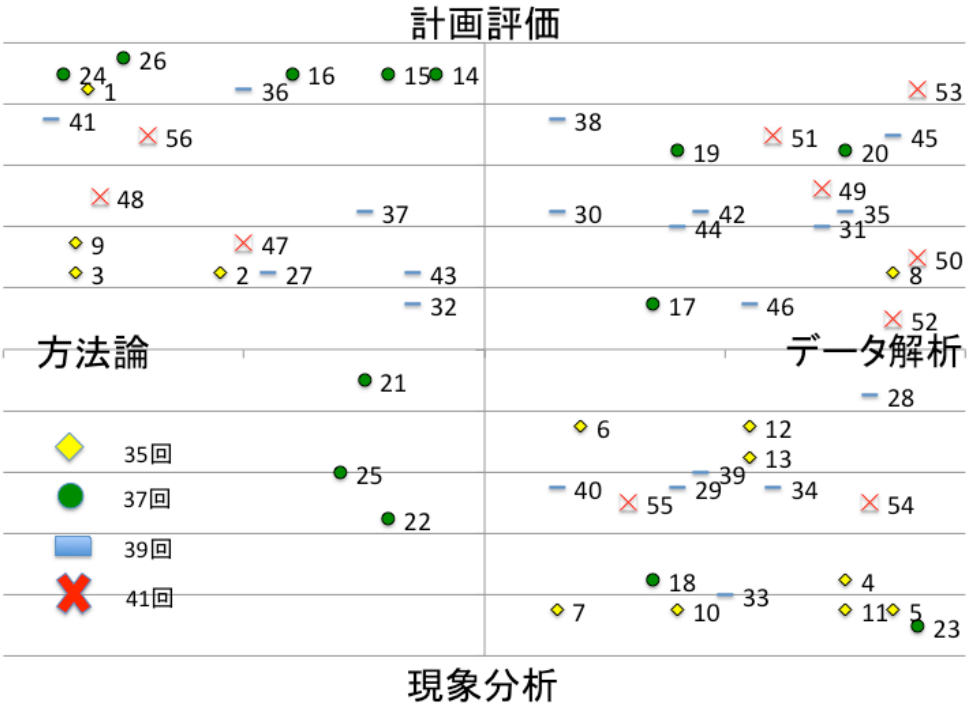

図-3　分析対象・ソースに関する論文分類

前述のとおり，第39回大会は，もっとも発表件数が多く，実務に携わられる方，特に高速道路会社からの報告が多かったため，日常的に蓄積されている各種データを有効活用し，交通サービス提供におけるPDCAサイクルをまわすことの実践の一部として実施された研究が含まれているためと考えている．また，分析の主たる目的（計画評価あるいは現状分析）とアプローチ（方法論あるいはデータ解析）2軸のみでは表せない変動要因について，細かく分類してアプローチする方向性やアンケートをして利用者意向を聞くなど，時間信頼性以外のデータ解析を積極的におこなう研究が第41回大会（2010年）では見られた．詳細な年度ごとの傾向把握については，第43回大会（2011年）発表予定の論文も評価図内に含めて，発表時にも報告したい．

4. おわりに

本稿では，計画学春大会において継続的に開催された企画セッションでの発表内容を横断的に取りまとめ，交通ネットワーク信頼性研究に関する動向を整理した．先行研究にて4年前に整理した9つの交通ネットワーク信頼性アプローチの中では触れる事が出来なかった，実ネットワークにおける評価手法検討，時間信頼性評価指標の検討，および実ネットワークへの適用法の検討がかなり進展したことが見て取れた．4年間の発表の中で特徴的であるのは，利用データの変遷である．当初は時間信頼性解析に利用できるデータというのは限られており，時間信頼性解析に俎上に載せるためのデータ利用方法を検討する論文も多く見られた．その後各研究機関，あるいは道路管理会社からも旅行時間信頼性解析に利用できるデータ利用の提案もあり，さまざまなデータを利用して旅行時間分布，旅行時間変動を解析してきている．第40回大会（2009年），第41回大会（2010年）においては，旅行時間信頼性解析手法の検討・データ活用法の提案に関する論文はある程度収束して，旅行時間のデータについて時空間的に豊富に得られることを前提として，時間信頼性価値・便益の算定を理論的に求解していく研究，実フィールドでの信頼性情報提供に向けた検討へと研究対象が広がってきている．実際に道路利用者が信頼性情報に対して求めている指標をアンケート等によって明らかとすることで，情報ニーズに合致した，理解が容易な信頼性指標の検討も行われてきている．

また，信頼性評価に耐えうるデータが収集されてきたことより，季節間，月別，時間帯別と解析対象もより精緻に分析するようになってきている．さらにこれらの変動要因を解析するため，降雨量データや観光ピークにおける交通量観測結果と照合して，その影響を追求する方向性もいくつか見られる．情報提供を行う際に，より詳細にデータを蓄積したものより解析した結果に得られた時間信頼性指標は利用者にとっても，時間信頼性価値をさらに実感する一助となる．

現在のところ，利用データが豊富に得られることもあり，旅行時間信頼性評価研究のフィールドが高速道路のものが大部分を占めており，一般道や鉄道分野における時間信頼性の研究事例はまだまだ少なく，今後の検討課題と言える．また，評価結果をいかに交通インフラの計画，運用等に反映させて行くのか，旅行時間信頼性という考え方は，従来計測の対象とされてきた交通システムの便益に加えうるものとなるのか，といった点について，今後も継続的に検討を進めていく必要があると考える．本セッションの発表では，日常的な変動を評価することに主眼を置いた研究が多く，従来から用いられていたTimeslice法に加えて，ETCデータのように本来のデータ収集目的とは異なるが，豊富に蓄積される旅行時間データを活かす方法，CCTVやナンバープレートマッチング手法でもかなり正確な旅行時間データを得られるようになってきた．このような旅行時間計測手法の検討とその周囲の交通状況を詳細検証できるようになってきたことから，交通の質を評価する手法としてここまでの研究成果の蓄積が為されたものと考える．また，得られた交通の質の評価結果である指標を利用者に還元する施策についても検討が行われてきており，それぞれの道路管理者の試行結果と利用者ニーズのマッチング結果を今後，解析していく必要があると考える．

謝辞：今回を含めて5年間に及ぶ「ネットワーク信頼性」に関する企画セッションにて研究発表して頂いたすべての発表者の方々に謝意を表します．

参考文献

1) 中山：道路の時間信頼性に関する研究レビュー，土木学会論文集 D3，Vol.67，No.1，pp.95-114，2011
2) 福田：旅行時間変動の価値付けに関する研究展望とプロジェクト評価への適用に向けた課題の整理，土木計画学研究・論文集，Vol.27，pp.437-448，2010

（2011.5.6 提出）

PERSPECTIVES OF TRANSPORT NETWORK RELIABILITY ANALYSIS

Hiroki YAMAZAKI, Hiroshi SHIMAMOTO,
Nobuhiro UNO and Fumitaka KURAUCHI