

行動モニタリングに関する最近の研究動向

力石 真¹・藤原 章正²・中島 英樹³・張 峻屹⁴

¹正会員 広島大学大学院国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:chikaraishi@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 広島大学大学院国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:afujiw@hiroshima-u.ac.jp

³学生会員 広島大学大学院国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:m100008@hiroshima-u.ac.jp

⁴正会員 広島大学大学院国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:zjy@hiroshima-u.ac.jp

現時点のデータを用いて将来時点の状態を予測・評価することを主たる目的とする交通計画の実現過程には、不可避免的に不確実性が伴うことが広く知られている。本研究では、特に長期の将来事象を対象とする交通計画においては不確実性を意思決定に取り込んだ頑健な計画手法を構築する必要性が高いとの認識のもと、主に計量経済学の分野で開発されてきている行動モニタリングに関する一連の方法論について体系的なレビューを行い、交通計画でのモニタリング手法の適用可能性について議論する。併せて、バックキャスト手法の実際適用におけるモニタリングの役割について整理し、モニタリング手法の現状と今後の課題について考察する。

Key Words : *Travel Behavior Monitoring, Structural Change, Uncertainty, Backcasting*

1. はじめに

土木計画、交通計画などをはじめとする計画の実現過程においては、将来の状態を予測することが頻繁に行われるが、予測行為には不可避免的に不確実性が伴う。例えば昨今の高速道路をめぐる動きをみると、2008年のガソリン価格の暫定税率の執行・復活、化石燃料価格の乱高下、2009年3月から開始された高速道路料金の休日特別割引、2010年6月に実施された高速道路無料化社会実験など、予期せぬ外生条件や外部環境の変化が頻繁に生じており、これらが交通需要量に無視できない影響を与えていることが指摘されている（例えば国土交通省HP: <http://www.mlit.go.jp/>）。また、予測が将来時点において生じ得る社会の状態に依存するものである以上、予測精度の改善による不確実性の完全な排除は不可能であると思われる。

以上のような認識は、計画に関わる多くの研究者によって指摘されているところであり（例えば、Morgan and Henion (1990)を参照。交通計画に関わる議論については、土木学会 (2003)を参照されたい）、予測精度の改善に代わる対応案が様々な議論されている。Kouvelis and Yu

(1997)は、不確実性下における最良の意思決定方法は、不確実性を排除するよりもむしろ、不確実性の存在を認識し、それを理解するように努め、最終的に計画プロセスの意思決定理由の一部として組み込んでいくことであるとしている。また、交通計画の分野においても、新谷ら (1987)は、不確実性に対し頑健な計画の在り方として、計画の進展を定常的に確認し、計画に与える影響を分析し、必要に応じてフィードバックを行うといったモニタリングシステムを計画プロセスの中に確立する必要性を指摘している。

不確実性に対応するためのメカニズムを計画プロセス内に組み込む努力は、計画そのものの質の向上だけでなく、不確実性の存在を明確に意識しそれに対応しようとする意思表示にもつながる。例えば、不確実性の存在を考慮した、幅を持った予測値を提示することにより、計画案の社会的受容性を高めることのできる可能性が屋井ら (2006)によって示されている。従って、不確実性に対応しようとする行為そのものが一定程度の価値を持つと考えられ、不確実性を明示的に取り扱うための装置を計画プロセス内に備えることの意義は少なくないものと思われる。しかしながら、不確実性を計画プロセス内に具

体的にどのように組み込んでいけば良いかに関する議論は十分になされていないのが現状と考えられる。

本研究では、不確実性に対応するためのメカニズムの1つと考えられるモニタリングに着目し、その実際適用可能性の検証を念頭に、主に計量経済学分野で開発されてきている行動モニタリングに関する一連の方法論について体系的なレビューを行い、モニタリング研究の課題について整理することを目的とする。なお、モニタリングには、大別して、計画者を対象としたもの（例えば、計画の策定・実施が予定通りに進んでいるか）と、計画対象者を対象としたもの（例えば、行動の意思決定構造に変化が生じているか）の2種類あると考えられるが、本研究では後者のみに焦点を絞る（後者のモニタリングを本研究では行動モニタリングとし、以下では単にモニタリングと呼ぶ場合、計画対象者を対象としたモニタリングを指す）。また別の観点からは、計画目標が妥当であるかどうか、すなわち、社会的な価値観の変化に伴って計画目標を変更する必要があるかどうかを逐次確認・意思決定するためのモニタリングも極めて重要と考えられるが、本稿では、計画目標は一定であり、その達成を目指している状況下を想定する。例えばCO2排出量25%削減という目標を一旦確定すると、その後目標は変わらないものとして研究を進める。計画目標自体の変更を許容したモニタリングフレームについては、計画のシンプルを与えることにより可能となる可能性があるが、本稿では議論しない。

以下、2章では、モニタリングの基本的な考え方や際に検討すべき個別要素について整理する。3章では、モニタリングの際に必要なデータについて整理する。4章では、モニタリングの方法を整理する。5章では、モニタリングの仕組みを実際に計画プロセスに組み込む際に必要となる計画修正の判断について議論する。6章では、本研究の成果をまとめるとともに、今後の研究課題について整理する。

2. モニタリングシステム

(1) 本研究におけるモニタリングの基本的な考え方

冒頭に述べたように、交通状態は様々な外的条件の影響を受け変化する。Goodwin (1998)は、この点を踏まえ、交通現象が安定した均衡状態に達する可能性は極めて低いとし、交通行動を「状態」ではなく「過程」として扱うことの重要性を指摘している。また、外的条件の変化は、予め把握することが困難な場合が多い。従って、外的条件の変化に対して交通状態がどのように適応していくかについてのプロセス（適応過程）を観測することが肝要と考えられる。北村 (2003)は、以上のような適応過

程を念頭に、経時変化を明示的に考慮した動的分析が必要であると指摘している。

本稿は、こういった交通現象の動的側面を、予測モデルに反映するというよりはむしろ、予測段階における不確実性を許容しつつも、計画プロセス全体として不確実性を制御できないか、そのためのモニタリングとしてどのような形態があり得るかについて議論することを狙いとする。すなわち、本研究では、モニタリングを計画プロセスに内在する不確実性を制御する装置と見なし議論を進める。

不確実性の制御を頻繁に取り扱う研究分野として、金融工学や金融計量経済学がある。ダイナミックに変化する金融市場においては、資産の将来価格が時間とともに動き、不確実性に支配される過程として価格を取り扱う重要性が広く認識されている (Luenberger, 1997)。例えば投資の設計指針の1つとして、将来価格の不確実性を制御し、リスクの水準を引き下げる視点がある。もちろん交通分野における意思決定は、金融市場に比べて不可逆性の高い事象が多く、一定程度異なる性質を持つものの、このようなダイナミクスを取り扱う分野における研究蓄積から、交通分野におけるモニタリングシステム構築に対して有用な知見を引き出そうとする試みの重要性は少なくないと考えられる。

(2) モニタリングシステムの構成要素

モニタリングとは、予め設定した計画や行動について、その進捗状況、予測と実際の乖離の程度等を随時確認することを意味する。よって、モニタリングを実施するためには、必要な情報を含むデータ（モニタリングデータと呼称）と、当初の予測値や計画とズレが生じているかどうかを判断するモニタリング手法が少なくとも必要である。本稿では、これらに加えて、実際に計画プロセスに組み込む際に必要となる、モニタリング結果に基づく計画修正の判断も議論の対象に含める。まとめると、大別して、モニタリングデータ、モニタリング手法、判断の3つの要素によってモニタリングシステムは構成されると考える (図-1)。

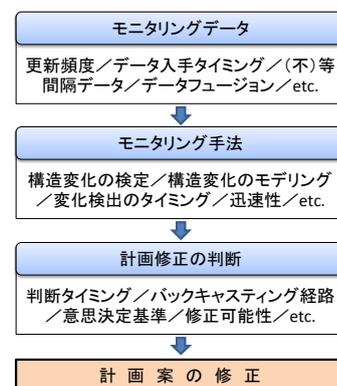


図-1 モニタリングシステムの概念図と構成要素

(3) モニタリングの時間スケール

モニタリングには、旅行時間情報提供といった短期的なスケールのものから、将来交通量といった長期的なスケールのもので存在する。前者の場合、ある特定の空間における極めて短期の予測が求められ、日々の交通需要の変動をどの程度迅速に反映したモニタリングが可能かが論点となるであろう。この場合、交通現象は定常または有限個の状態を用いて定義可能なケースが多いと考えられ、モニタリング手法と言うよりはむしろ、どのようにして迅速にデータを入手するか、ETCデータや公共交通ICカードデータなどの不等間隔データをどうやって利活用するかが主な課題になると考えられる。一方で後者の場合、安定した集計データを用いたモニタリングの適用が可能なケースが多いと考えられる。長期的なモニタリングを行う際に重要な点は、即時性の高いデータが利用可能かどうかというよりはむしろ、需要構造の変化をどのように検出するか、また、変化が検出された場合にどのように計画修正の判断を行うかに関する制度設計が重要と考えられる。本稿は主に長期的なモニタリングに関心があるが、手法の応用可能性を考慮し、以下では短期的なモニタリングに関するレビューを含める。

以上を踏まえ、本稿では、モニタリングデータ、モニタリング手法、計画修正の判断に関する各種関連研究のレビューを行う。なお、本レビューは、モニタリングに関連する研究をすべてカバーするというよりはむしろ、実務を意識した上でモニタリングの重要性を概観し整理することに関心がある。モニタリングの重要性を再認識し、今後の研究課題を一定程度明確にすることが出来れば、本稿の目的は達成されたといえる。

3. モニタリングデータ

近年、交通量常時観測データに加えて、ETCデータ、公共交通ICカードデータ、プローブカーデータなど、自動的に取得可能なデータが急速に増えている。どのデータをモニタリングに利用すべきかについては、モニタリングの目的に依存すると考えられる。例えば、長期の需要構造の変化をモニタリングする場合、データ入手の即時性よりも、データの代表性や信頼性が重要になるものと考えられる。反対に、所要時間に関する情報提供のような短期の変化が重要となる場合、より即時性の高いデータを利用する必要がある。

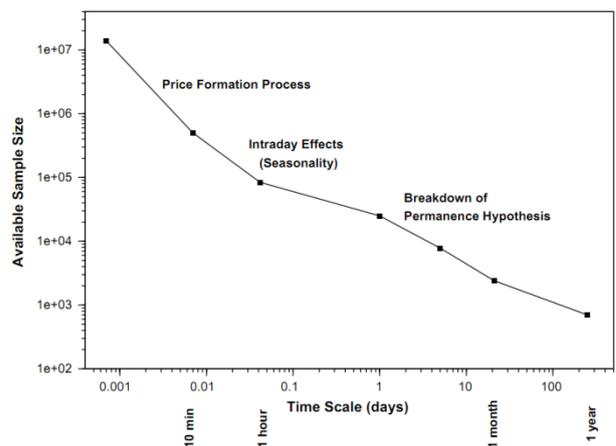
(1) 標本数とデータ頻度

モニタリングデータの基本特性の1つに、一定期間内

に入手可能な標本数とデータの更新頻度が挙げられる。図-2は、金融の分野における標本数データ、利用頻度と代表的な利用例を示している。図より分かるように、数10万のデータが短期の内に入ってくる取引データは、価格形成プロセスの把握に不可欠である。一方、一時間単位のデータは、日内変動に関する情報を、また、週単位や月単位のデータは、価格形成メカニズムの構造的な変化に関する情報を提供する。

a) 観測頻度と分析との対応関係

以上に述べた分析レベルまたは集計レベルの選択が、モデルからの示唆に大きく影響を与えることが、金融の分野において指摘されている (Dacorogna et al., 2001)。これは、交通分析の分野における、集計モデルから非集計モデルへの流れと基本的に同様の考え方に基づくものであるが、ETCデータなどの高頻度データの取り扱いについては、交通分野においては十分に議論されているとは言い難い。もちろん、ETCデータを用いた分析例として、OD表作成への利用 (吉田ら, 2006) や旅行時間信頼性評価 (山崎ら, 2008) などがあるものの、基本的にはある一定の集計単位を所与として分析が進められるケースがほとんどである。村永 (2001)は、株式市場における取引を例に「潜在的なニーズは、取引が執行される動的なプロセスでのみ認識されるため、取引が起こった際の価格変動や執行価格から次の均衡価格への収束速度といった動学的指標を観測する必要があり」とし、高頻度で取引される銘柄ほどデータの観測頻度を高める必要があると指摘している。このような、観測頻度と分析の対応関係を明らかにする研究蓄積が、ETCデータ等の高頻度データの利活用を進めるためには必要と考えられる。



出典 : Dacorogna et al. (2001)

図-2 利用可能標本数(y軸)、データ頻度(x軸)と代表的な利用例

b) 不等間隔データの取り扱い

超高頻度データは、基本的には不等間隔で観測されるデータであることが特徴である (藁谷・牧, 2010)。不

等間隔データは、次章にてみる各種時系列分析手法の適用が困難な場合が多く、データの前処理が重要となる。基本的な方法として不等間隔データを等間隔データに変換する方法が考えられる。また、不等間隔データから効率的な情報を如何に取り出し分析するかに着目し、幾つかの時系列オペレータと呼ばれるデータ加工方法が提案されている (Zumbach and Muller, 2001) 。その他、生存時間モデルを用いて取引時間間隔のばらつきを考慮した Engle and Russell (1998) の ACDモデル (autoregressive conditional duration model) や Engle (2000) の超高頻度データを用いた GARCHモデルは、直接モデル内で不等間隔データを処理する枠組みを持ち、交通分野における不等間隔データ分析への応用可能性が高い。なお、高頻度データの取り扱いについては、例えば Goodhart and O'Hara (1997) に詳しい。今後、以上のような手法を実際の交通問題に適用した実証分析の蓄積が望まれる。

c) 変動・変化を捉えるための調査設計

モニタリングデータの望ましい性質の1つとして、自動的に入手可能なデータであることが挙げられる。しかしながら、二次データを用いたモニタリングは、対象とする現象の一部をモニタリングしているに過ぎない場合が多く、実際に調査を実施してモニタリングデータを取得する必要がある場合がある。例えばETCデータやトラカンデータを用いた高速道路料金の休日特別割引の影響評価は、高速道路交通量の増減については把握可能なものの、その増加が新たな需要の発生によるものなのか、他の交通手段からの転換によるものなのかの判断が出来ない。従って、交通行動に関する動き全体を把握可能な総合都市交通体系調査を定期的に行うことが望ましいと考えられる。一方、交通行動を把握するための調査を、どの程度のサンプル数、間隔で実施すべきかに関する研究事例は限られている。数少ない研究事例として、Pas (1987) や北村ら (2001)、Kitamura et al. (2003) がある。Pas は複数日にわたるデータを取得することの利点をパラメータ推定精度の改善及び調査コストの削減の観点から議論している。また、Kitamura et al. は、離散パネル調査 (1日の交通行動調査を同一個人に対して一定間隔で繰り返す調査) による変化の観測は困難であるとしている。これは、観測されたばらつきが、一時的な変動によるものなのか、変化と捉えるべきものなのかの峻別が不可能なことから分かる。German Mobility Panel (Zumkeller, 2009) といった複数日-複数期間に及ぶ交通行動調査は、交通行動の変動と変化の峻別を可能とする貴重な調査である。

以上のパネルデータの調査設計にあたっては、近年急速な理論発展がみられるマルチレベル分析の枠組みを活用することが有用と思われる (Moerbeek, et al. (2010) 参照)。これは、Pas (1987) の手法と同様に、モデルの推定

精度を基準に調査フレームの設計を行うものである (例えば200[人]×10[日]か100[人]×20[日]か)。特にパネル調査の設計に焦点を当てた研究として、Raudenbush (1997) や Raudenbush and Xiao-Feng (2001) の研究がある。また、Hedeker et al. (1999) や Galbraith et al. (2002)、Muthen and Curran (1997) は、パネル消費の問題や欠損値があることを想定した最適調査設計手法を提示している。これらの手法は、変動及び変化を効率的に捉える点において交通行動調査に対しても適用可能であり、モニタリングデータの全体構成を考える際に役に立つものと思われる。

(2) データの強化

上述したように、モニタリングに利用可能なデータは数多くあるものの、より迅速に、又は、より正確にモニタリングを行うために、データを強化して利用する方法が考えられる。以下では、そのうちの幾つかを紹介する。

景気の悪化といったマクロ要因の変化に伴う交通状態の変化は、複数の時系列データを同時に監視することにより迅速に検出できる可能性がある。例えば Hall et al. (2011) は、同時方程式モデルの枠組みで複数時点の構造変化の検出が可能なモデルを提案し、複数の時系列が共起する情報を利用した迅速なモニタリングの可能性を示している。また、Hall et al. が行っている時系列間の共起を利用した推論の強化方法に加えて、地域間の共起を利用した推論の強化方法が考えられる。例えば地域レベルの推論を行う必要であるが特定地域のデータのみから推論を進めるには精度が低い場合が存在する。このような問題への対処方法として、地域の差異を变量効果としてモデルに組み込む手法が考えられる (Godstein, 2003)。仕組みとしては、主に育種学の分野において発展してきた BLUP法と呼ばれる手法を用いた際に算出される縮約推定量に着目する (佐々木, 2007)。この手法を地域レベルの価格弾力性の推定に利用した例として、Maddala et al. (1997) の研究がある。また、Train (2003) の Individual-level parameter も本質的に縮約推定量と同じであり、近年関連手法の研究蓄積が進んでいる。

4. モニタリング手法

上述したように、土木計画・交通計画の場面で使用されるモデルの多くは、定常性を仮定しており、一度特定したモデル構造は時間軸上に変化しないことを前提としている。一方、多くの既往研究において、モデル構造は経時的に変化する可能性は高く、ある時点で特定したモデルを用いた予測や評価が誤った判断を導く可能性が高いことは広く指摘されている。例えば、混雑課金や高速道路料金、自動車関連税などのコストに対する人々の反

応は、経済情勢によって大きく変わることが予想される。従って、モデル構造が時間軸上にどのように変化し得るかをモニタリングし、過去の判断を修正することにより、誤った判断を最小化するよう努めることが求められる。

計量経済の分野は、交通分野と比較して、以上のような構造変化に対する研究蓄積が豊富である。本章では、計量経済分析で行われている構造変化の方法論を中心に既存手法をまとめる。

(1) 構造変化の検定

構造変化の検定は、モニタリングシステム内では警告を鳴らす役割を担うものと考えられる。Hansen (2001)は、1980年代以降の特筆すべき構造変化の検定に関する研究として、大別して1) 構造変化の時点が未知の場合の検定方法、2) 構造変化の時点の推定、3) ランダムウォークと構造変化の峻別の3点存在するとしている。以下では、これら3つの視点から、Hansen (2001)以降の研究を含めて既往研究を概観する。

古典的な構造変化の検定方法にChow検定 (Chow, 1960)がある。Chow検定では、回帰モデルにかかる係数がある既知の時点で変化するという仮説を検定する。Chow検定は、構造変化の時点が既知であるという状況下で利用可能な手法であるが、実際の適用場面においては、構造変化が生じ得る時点の絞り込みは可能であっても、構造変化の時点が既知であることは稀である。この問題に対処できる手法の1つにCUSUM検定と呼ばれる検定方法がある (Page, 1955; Brown et al. 1975)。一方、Andrews (1993)は、CUSUM検定は構造変化の検出力が弱いことを指摘し、変化地点が未知の場合の検定方法を提案している。また、構造変化が複数の時点で起きている場合の検定方法については、例えば、Bai and Perron (1998)が提案した方法がある。Bai and Perronが提案している手法は、段階的に構造変化を検出する手法であり、構造変化が一箇所起きていると判断されれば、全サンプルを構造変化が起きた時点でサブサンプルに分割し、生成されたサブサンプルに対して再度構造変化の検定を行う方法である。なお、構造変化を特定する対象としては、平均値や回帰係数以外にも、ボラティリティの変化の検出を目的とする場合も存在する (例えば、Van Dijk et al., 2002; Doyle and Faust, 2005)。

上述した構造変化の検定手法は、主に構造変化が生じているかどうかに関心があり、構造変化が起こったタイミングについて正確に議論を加えようとするものではない。構造変化のタイミングを特定する方法については、Baiらの一連の研究がある (Bai, 1994; Bai, 1997a; Bai, 1997b; Bai and Perron, 1998; Bai et al., 1998)。Baiの手法は、基本的に線形回帰モデルを対象としたものであり、複数の方程式で構造変化が生じる場合や複数回の構造変化が生じる

場合の検出方法について言及している。その他、同時方程式モデルの枠組みで複数時点の構造変化の検出が可能なモデルの提案 (Hall et al., 2011)、状態空間モデルとしての変化時点の観測 (Chopin, 2007) など、幾つかの発展手法が提案されている。

ある観測変数が単位根過程に従う場合、単位根過程であることを考慮せずにモデルを構築すると誤ったモデルを導いてしまう問題は、見せかけの回帰問題として広く認識されてきた。一方でPerron (1989)は、構造変化による変数の挙動とランダムウォークの挙動の識別をより丁寧に行わないとモデル構造を誤って特定してしまうことを指摘している。Perronが提案した手法は、構造変化がある場合の単位根検定方法であり、ある既知の時点において構造変化が発生したと仮定した状況下での検定方法として3パターンの検定方法を示している。

Perron(1989)の方法は、構造変化の時点が既知のケースのみを取り扱っているが、Chow検定からの一連の発展と同様に、様々な発展形が提案されている。例えば、Zivot and Andrews (1992)やBanerjee et al. (1992)、Perron (1997)は変化時点が未知の場合の検定方法を提案し、Lumsdaine and Papell (1997)、Kim et al. (2000)、Lee and Straziich (2003)は、複数回の構造変化に対応した手法を提案している。交通計画の多くが定常性を仮定した長期予測モデルのもとで成立しているため、以上のような構造変化と単位根過程の識別は、交通分野における予測問題においても極めて重要なものと考えられる。

(2) 状態変化を伴うモデル

交通行動は経済動向とリンクする側面があるため、経済データの時系列挙動とリンクする部分が少なくない (山上, 1991; 梶川, 1999)。従って、経済状態が多くの構造変化を伴う以上、交通行動についても構造変化が生じている可能性は高い。上述した各種検定は、基本的には構造変化が生じているかどうかを検定するためのものであり、変化を積極的に記述するものではない。一方、状態変化が存在することを前提とし、状態変化を直接モデル化する方法として、各種状態空間モデルが挙げられる (Kim and Nelson, 1999; Durbin and Koopman, 2001; Commandeur and Koopman, 2007)。特に、有限個の状態が仮定できる場合、推移確率行列を用いて状態間の移動を表現するマルコフ推移モデルなどのモデル内で変化を取り扱う手法の価値は極めて大きいものと思われる。例えば、旅行時間等の短期的な予測の場面においては、事故や工事ははじめとする突発事象下での旅行時間予測メカニズムと通常状態での旅行時間予測メカニズムは異なるものと考えられる。この場合、現在の交通環境によって状態間を推移するようなスイッチングモデルを使用することにより、時々刻々と変化する交通環境に対応した情報提

供システムが構築できる可能性がある。

(3) モニタリング手法への展開

各種構造変化の検定手法をはじめ、上述した多くの手法は、現在手元にあるデータ内に構造変化がないかどうかを確認するものであった。この点を批判したのがChu et al. (1996)で、構造変化を検出できないことによるコストを最小化するために、いち早く変化を検出する必要があるとの考えのもと、新しいデータを入手するたびに構造変化の検定を繰り返すモニタリング手法を提案している。彼らの手法は、逐次残差に着目したCUSUM型のモニタリングと、パラメータの逐次推定に基づくFluctuationモニタリングの2種類であり、構造変化が生じたかどうかを結果として返すものである。その後、Leisch et al. (2000)によるGeneralized fluctuation test (Chu et al. (1996)の手法を特殊形として含む) やCarsoule and Franses (2003)及びZeileis et al. (2005)の動学モデルへの拡張など、リアルタイムのモニタリングを意識した時系列分析手法が提案されてきている。

上述したように、以上のようなリアルタイムのモニタリングを考える際には、データの質に配慮する必要がある。例えば、経済動向をモニタリングする上においてGDP速報値は極めて有用であるが、その後速報値は様々な修正が加えられるため、速報値に基づく各種政策判断は誤っている可能性がある。言い換えると、いち早く変化を検出することと、質の高いデータに基づいて判断することの間には、ある種のトレードオフの関係が存在するケースがある。Garatt and Vahey (2006)はこの問題に着目し、UKのマクロ経済データを使用した実証分析を行い、多くのマクロ経済データの速報値にはバイアスがあることを指摘している。このようなデータの質に関する実証分析を、交通関連の各種データに対しても積み重ねていく必要があるように思われる。

5. 計画修正の判断

以上概観したように、モニタリングデータに望まれる性質やデータの強化方法、構造変化の検定、モデリング手法、モニタリング手法は他分野において活発に議論されており、交通問題に対して応用可能な部分は少なくない。これらについては、今後実証分析を重ね、望ましいシステム構成を議論していくことにより、ある程度の方角性は見えてくるものと思われる。一方、どの程度の需要の変化が観測された場合に計画案の修正を検討すべきかといった政策意思決定に関わる判断については、更なる検討を要する。

モニタリングを利用した不確実性の取り扱いは、特に

バックキャストिंगに基づく計画実現過程の中で役立つものと思われる。例えば中村ら (1998)は、CO2排出量削減の文脈において、地域または都市における必要削減量を設定した上で必要な政策介入の程度を決定する目標設定型アプローチの重要性を指摘している。また、近年、最適化問題としてバックキャストिंगを捉え、目標時点に至るまでの各々の時点における施策メニューを提示する研究が行われている（例えば、芦名・藤野, 2008; 増井ら, 2007; 岩本, 2011）。一方で、バックキャストिंगアプローチに基づき描かれたシナリオの実現過程においては、冒頭に述べたように、不確実性の問題を避けることは出来ないように思われる。このような状況下においては、描写したシナリオの実現度合いを逐次モニタリングし、設定した目標を達成できるように計画案を修正していく必要がある。このような修正を可能とするために、計画のフレキシビリティをシナリオ決定の際の1つの要因とするとともに、施策メニューの拡張に尽力する必要があると考えられる。また、都市構造の決定など極めて長期的かつ不可逆的な性質を持つ施策については修正が困難な側面があるため、不確実性に強い計画案を初期段階において提案しておく必要がある。ロバスト最適化 (Ben-Tal and Nemirovski, 1998; Bertsimas and Sim, 2004) の概念は、このような意思決定をサポートするツールとして利用できる可能性が高い。この場合、政策の経緯をみる役割としてモニタリングを位置付けることができる。

6. おわりに

本稿では、予測に付随する不確実性への対処方法としてモニタリングによる計画案の逐次修正に着目し、他分野における既往研究のレビューを踏まえて交通計画におけるモニタリングの適用可能性及び今後の課題について整理した。レビューの結果より、モニタリングデータ及びモニタリング手法の検討については、すでに多くの既往研究があり、多くの手法が実証的な分析と通した検証を待っていることが明らかとなった。具体的には、1) 高頻度データの利活用を含め、観測頻度と分析対象との対応関係を実証分析結果をもとに整理すること、2) 変動・変化を捉えるための最適な調査設計案を提示すること、3) 交通需要構造変化の検出に経済データを活用すること、4) Generalized fluctuation testなどの既存モニタリング手法を交通データに対して適用することなどが実証分析の対象として挙げられる。計画修正の判断については、バックキャストिंगアプローチの中にモニタリングシステムを位置付けることが有用である可能性を指摘した。今後は、本稿で紹介した各種手法の交通現象への適用を進める予定である。

参考文献

- 1) Andrews, D. W. K.: Tests for Parameter Instability and Structural Change with Unknown Change Point, *Econometrica*, Vol. 61, pp. 821-856, 1993.
- 2) Bai, J.: Least squares estimation of a shift in linear processes, *Journal of time series analysis*, Vol. 15, pp. 453-472, 1994.
- 3) Bai, J.: Estimation of a change point in multiple regression models, *Review of Economics and Statistics*, Vol. 79, pp. 551-563, 1997a.
- 4) Bai, J.: Estimating multiple breaks one at a time, *Econometric Theory*, Vol. 13, pp. 315-352, 1997b.
- 5) Bai, J., Perron, P.: Estimating and testing linear models with multiple structural changes, *Econometrica*, Vol. 66, pp. 47-78, 1998.
- 6) Bai, J., Lumsdaine, R. L., Stock, J. H.: Testing for and dating common breaks in multivariate time series, *Review of Economic Studies*, Vol. 64, pp. 395-432, 1998.
- 7) Bannerjee, A., Lumsdaine, R. L., Stock, J. H.: Recursive and sequential tests of the unit-root and trend-break hypothesis: Theory and international evidence, *Journal of Business and Economic Statistics*, Vol. 10, pp. 271-287.
- 8) Ben-Tal, A., Nemirovski, A.: Robust convex optimization, *Mathematics of Operations Research*, 23, pp. 769-805, 1998.
- 9) Bertsimas, D., Sim, M.: The price of robustness, *Operations Research*, Vol. 52, pp. 35-53, 2004.
- 10) Brown, R. L., Durbin, J., Evans, J.: Techniques for testing the constancy of regression relationships over time, *Journal of the Royal Statistical Society B*, Vol. 37, 149-192, 1975.
- 11) Carsoule, F., Franses, P. H.: A note on monitoring time-varying parameters in an autoregression, *Metrika*, Vol. 57, pp. 51-62, 2003.
- 12) Chow, G. C.: Test of equality between sets of coefficients in two linear regressions, *Econometrica*, Vol. 28, pp. 591-605, 1960.
- 13) Chu, C.-S. J., Stinchcombe, M., White, H.: Monitoring Structural Change, *Econometrica*, Vol. 64, pp. 1045-1065, 1996.
- 14) Commandeur, J. J. F., Koopman, S. J.: *An Introduction to State Space Time Series Analysis*, Oxford University Press, 2007 (訳: 和合肇: 状態空間時系列分析入門、シーエービー出版, 2008).
- 15) Dacorogna, M.M., Gencay, R., Muller, U.A., Pictet, O.V.: *An Introduction to High-Frequency Finance*, Academic Press, 2001.
- 16) Garratt, A., Vahey, S. P.: UK real-time macro data characteristics, *The Economic Journal*, Vol. 116, pp. 119-135, 2006.
- 17) Doyle, B. M., Faust, J.: Breaks in the variability and comovement of G-7 economic growth, *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 87, pp. 721-740, 2005.
- 18) Durbin, J., Koopman, S. J.: *Time Series Analysis by State Space Methods*, Oxford University Press, New York, 2001.
- 19) Engle, R. F., Russell, J. R.: Autoregressive conditional duration: A new model for irregularly spaced transaction data, *Econometrica*, Vol. 66, pp. 1127-1162, 1998.
- 20) Engle, R. F.: The econometrics of ultra-high-frequency data, *Econometrica*, Vol. 68, pp. 1-22, 2000.
- 21) Galbraith, S., Stat., M., Marschner, I. C.: Guidelines for the design of clinical trials with longitudinal outcomes, *Controlled Clinical Trials*, Vol. 23, pp. 257-273, 2002.
- 22) Goldstein, H.: *Multilevel Statistical Models*, Third Edition, Edward Arnold, London, 2003.
- 23) Goodhart, C. A. E., O'Hara, M.: High frequency data in financial markets: Issues and applications, *Journal of Empirical Finance*, Vol. 4, pp. 73-114, 1997.
- 24) Goodwin, P.: The end of equilibrium, in T. Gärling, T. Laitila and K. Westin (eds.) *Theoretical Foundations of Travel Choice Modeling*, Elsevier, Amsterdam, pp. 103-132, 1998.
- 25) Greene, W. H.: *Econometric Analysis*, 6th edition, New Jersey, Pearson Prentice Hall, 2008.
- 26) Hall, A. R., Han, S., Boldea, O.: Inference regarding multiple structural changes in linear models with endogenous regressors, *Journal of Econometrics*, 2011 (forthcoming).
- 27) Hansen, B. E.: The new econometrics of structural change: dating breaks in U.S. labor productivity, *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 15, pp. 117-128, 2001.
- 28) Hedeker, D., Gibbons, R. D., Waternaux, C.: Sample size estimation for longitudinal designs with attrition: Comparing time-related contrasts between two groups, *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, Vol. 24, pp. 70-93, 1999.
- 29) Kim, T. H., Leybourne, S. J., Newbold, P.: Spurious rejections by Perron tests in the presence of a break, *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, Vol. 62, pp. 433-444, 2000.
- 30) Kim, T.-H., Nelson, C. R.: *State-Space Models with Regime Switching: classical and Gibbs-Sampling Approaches with Applications*, The MIT Press, Cambridge, 1999.
- 31) Kitamura, R., Yamamoto, T., Fujii, S.: The effectiveness of panels in detecting changes in discrete travel behavior, *Transportation Research Part B*, Vol. 37, pp. 191-206, 2003.
- 32) Kouvelis, P., Yu, G.: *Robust discrete Optimization and Its Applications*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- 33) Lee, J., Strazicich: Minimum langrange multiplier unit root test with two structural breaks, *Review of Evonomnics and Statistics*, Vol. 85, pp. 1082-1089, 2003.
- 34) Luenberger, D. G.: *Investment Science*, Oxford University Press, 1997.
- 35) Lumsdaine, R. L., Papell, D. H.: Multiple trend breaks and the unit-root hypothesis, *Review of Economics and Statistics*, Vol. 79, pp. 212-218, 1997.
- 36) Maddala, G. S., Trost, R. P., Li, H., Joutz, F.: Estimation of Short-Run and Long-Run Elasticities of Energy Demand from Panel Data Using Shrinkage Estimators, *Journal of Business & Economic Statistics*, Vol. 15, pp. 90-100, 1997.
- 37) Moerbeek, M.: Randomization of clusters versus randomization of persons within clusters: Which is preferable?, *The American Statistician*, Vol. 59, pp. 72-78, 2005.
- 38) Moerbeek, M., Van Breukelen, G. J. P., Berger, M. P. F.: Optimal Designs for Multilevel Studies, in J. deLwwuw, E. Meijer (eds.) *Handbook of Multilevel Analysis*, Springer, New York, pp. 177-205, 2010.

- 39) Morgan, M. G., Henrion, M.: *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*, Cambridge University Press, 1990.
- 40) Muthen, B. O., Curran, P. J.: *General longitudinal modeling of individual differences in experimental designs: A latent variable framework for analysis and power estimation*, *Psychological methods*, Vol. 2, pp. 371-402, 1997.
- 41) Page, E. S.: *A test for a change in a parameter occurring at an unknown point*, *Biometrika*, Vol. 42, pp. 523-527, 1955.
- 42) Pas, E. I.: *Multiday Samples, Parameter Estimation Precision, and Data Collection Costs for Least Squares Regression Trip-Generation Models*, *Environment and Planning A*, Vol. 18, pp. 73-87, 1986.
- 43) Perron, P.: *The great crash, the oil price shock, and the unit root hypothesis*, *Econometrica*, Vol. 57, pp. 1361-1401, 1989.
- 44) Perron, P.: *Further evidence on breaking trend functions in macroeconomic variables*, *Journal of Econometrics*, Vol. 80, pp. 355-385, 1997.
- 45) Raudenbush, S. W.: *Statistical analysis and optimal design for cluster randomized trials*, *Psychological Methods*, Vol. 2, pp. 173-185, 1997.
- 46) Raudenbush, S. W., Xiao-Feng, L.: *Effects of study duration, frequency of observation, and sample size on power in studies of group differences in polynomial change*, *Psychological Methods*, Vol. 6, pp. 387-401, 2001.
- 47) Train, K. E.: *Discrete Choice Methods with Simulation*, 1st edition, Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- 48) Van Dijk, D., Osborn, D. R., Sensier, M.: *Changes in variability of the business cycle in the G7 countries*, Centre for Growth and Business Cycle research discussion paper series No. 2002-28/A, 2002.
- 49) Zeileis, A., Leisch, F., Kleiber, C., Hornik, K.: *Monitoring structural change in dynamic econometric models*, *Journal of Applied Econometrics*, Vol. 20, pp. 99-121, 2005.
- 50) Zivot, E., Andrews, W. K.: *Further evidence on the great crash, the oil-price shock, and the unit root hypothesis*, *Journal of Business and Economic Statistics*, Vol. 10, pp. 251-270, 1992.
- 51) Zumbach, G., Muller, U. A.: *Operators on inhomogeneous time series*, *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, Vol. 4, pp. 147-178, 2001.
- 52) Zumbach, D.: *The dynamics of change - latest results from the German mobility panel*, paper presented at the 12th International Conference on Travel Behaviour Research, Jaipur, December 13-18, 2009.
- 53) 芦名秀一, 藤野純一: *多地域最適電源計画モデルを用いたわが国電力部門における CO2 削減シナリオの検討*, *エネルギー・資源学会論文誌*, Vol. 29, pp. 1-7, 2008.
- 54) 岩本真由子: *低公害車普及による長期 CO2 管理システムの開発*, 広島大学大学院工学研究科平成 22 年度修士論文, 2011.
- 55) 梶川俊二: *高速道路の交通量と景気動向に関する最近の動向分析 - 東名高速道路に関する分析 -*, *高速道路と自動車*, 第 42 巻, 第 12 号, pp. 43-50, 1999.
- 56) 北村隆一, 藤井聡, 山本俊行: *離散時間パネル調査の調査期間, 調査間隔, 標本数の最適化*, *土木学会論文集*, No. 681/IV-52, pp. 13-23, 2001.
- 57) 北村隆一: *変動についての試行的考察*, *土木計画学研究・論文集*, Vol. 20, pp. 1-15, 2003.
- 58) 交通予測事後評価研究会 (研究代表者: 新谷洋二): *交通計画における予測の事後評価に関する研究*, トヨタ財団助成研究報告書, I-022, 1987.
- 59) 佐々木義之: *変量効果の推定と BLUP 法*, 京都大学学術出版会, 2007.
- 60) 土木学会: *特集: 交通需要予測*, *土木学会誌*, Vol. 88, No. 7, pp. 5-40, 2003.
- 61) 中村英樹, 林良嗣, 都築啓輔, 加藤博和, 丸田浩史: *目標設定型アプローチによる運輸起源の CO2 排出削減施策の提示*, *土木計画学研究・論文集*, No. 15, pp. 739-745, 1998.
- 62) 増井利彦, 松岡譲, 日比野剛: *バックキャスティングによる脱温暖化社会実現の対策経路*, *地球環境*, 12, pp. 161-169, 2007.
- 63) 養谷千風彦, 縄田和満, 和合肇: *計量経済学ハンドブック*, 朝倉書店, 2007.
- 64) 養谷千風彦, 牧厚志: *応用計量経済学ハンドブック*, 朝倉書店, 2010.
- 65) 村永淳: *本邦株式市場の流動性に関する動学的考察*, *金融研究*, 2001.4, pp. 49-78, 2001.
- 66) 山上俊彦: *高速道路の交通量と景気動向*, *高速道路と自動車*, 第 34 巻, 第 11 号, pp. 31-38, 1991.
- 67) 山崎浩気, 宇野伸宏, 倉内文孝, 嶋本寛, 小笹浩司, 成田博: *ETC データを用いた都市間高速道路の交通時間信頼性評価に関する研究*, *土木計画学研究・論文集*, Vol. 25, pp. 935-945, 2008.
- 68) 吉田博哉, 田中成典, 吉田均, 杉江功, 山本昌孝, 神野裕昭, 樫山武浩: *ETC データを利用した高速道路の交通量分析に関する基礎研究*, *土木情報利用技術論文集*, Vol. 15, pp. 119-126, 2006.

(2011.5.6)

State-of-art of Behavior Monitoring Research

Makoto Chikaraishi, Akimasa Fujiwara, Hideki Nakashima, Junyi Zhang

In the process of implementing transportation policies, the adequate treatment of uncertainty is certainly required, since the planning decisions are done based on the predicted values and/or evaluation results which come from information regarding past observed behaviors. This paper offers a review of behavior monitoring research considering the applicability of monitoring methods for transportation planning. We also discuss the role of monitoring in the application of backcasting approach, and provide the current state of monitoring research and future tasks.