

状態空間モデルを用いた高速道路の交通特性の時空間的な変動分析

名取 優太¹・佐々木 邦明²・山本 隆³・井口 均⁴

¹正会員 山梨県技師 県土整備部中北建設事務所峡北支所 (〒407-0024 韮崎市本町4-2-4)
natori-amwm@pref.yamanashi.lg.jp

²正会員 山梨大学教授 大学院医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)
E-mail: sasaki@yamanashi.ac.jp

³正会員 (株) 高速道路総合技術研究所基盤整備推進部計画分析課 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail: t.yamamoto.ae@ri-nexco.co.jp

⁴正会員 (株) 高速道路総合技術研究所基盤整備推進部計画分析課 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail: h.iguchi.aa@ri-nexco.co.jp

本研究は、高速道路の利用履歴のデータを時系列データとして用いることで、時間別の交通量変動特性等を分析するものである。料金施策の交通量への影響を定量的に把握するために、季節、曜日、時間帯による変動およびインターチェンジ別の交通量特性を分析する。そのために時系列的な変化等を内包する状態空間モデルのフレームを用いた。用いたデータは中央自動車道の八王子料金所を通過する交通量で、山梨県内の各ICから東京方面に向かう交通量の変動を分析した。各ICからの交通量の変動を、各要素に分解することで、河口湖等のICからは季節や曜日、時間帯の大きな変動が観測された一方、曜日変動が小さい利用形態である上野原IC、また時間帯別にはピークの現れ方とその季節的変動といったように、山梨県内のICから東京に向かう交通の特性が明確になった。

Key Words : *Time Series Analysis, State-space Model, ETC, Highway Traffic*

1. はじめに

平成13年に利用者の利便性向上や、料金所渋滞の緩和を目的として、ETCシステムが導入された。現在では各種利用促進施策により、利用台数約690万台、利用率約88%²⁾にまで普及している。ETC搭載車が高速道路を利用すると料金収受に伴い、入出IC・入出時間・車種・料金等のデータが自動で記録される。このデータは大量かつ正確であり、逐次的に時時々刻々と蓄積されていく特徴がある。また、蓄積されていく高速道路の交通量を鑑みると、休平日の違いや、季節による影響などが組み合わさり1年を通じて複雑な変動をしている。

ここで、ETCの利用履歴データの特徴を生かしたアプローチを行う際の問題点として、大量データによるモデルの計算負荷がある。データが逐次的に更新されるために、全てのデータを用いて交通量の特徴分析を行うアプローチでは、データ更新に伴って分析を行う必要がある上に、データ量が徐々に大きくなり負荷が大きくなる。この問題の解決法の一つとしてベイズ的なアプローチが考えられる。これは事前情報を用いた予測(事前分布)とデータ獲得後の予測の修正(事後分布)によって現象を記

述するものである。これによって、交通需要モデルを構築する際にも、ある時点までの情報によって記述されたモデルから、データの更新による新たな情報の追加によるパラメータの修正を行うために計算負荷を低減することが可能である。特に時系列的な記述をベースとするシステム方程式と観測方程式系による状態空間モデルは、逐次的に状態を記述できるモデル体系であり、これまで道路交通量を分析した事例も存在し、筆者らはこれまで高速道路の日交通量データに対して状態空間モデルを用いた分析³⁾が行われてきた。しかし需要マネジメント等への適用を考えると、日交通量では日内の変動情報を捨てていることから、マネジメントに必要な情報量の多くが集約の過程で失われていると考えられる。

そこで本研究では、集約レベルを時間として、ETCの利用履歴データを状態空間モデルにより成分分解し、経時的にどのような需要変動があるのか検討する。特に今回は、渋滞が頻発し問題となっている、中央自動車道の八王子料金所を東京方向に通過した交通量について、山梨県圏内のIC毎に河口湖・勝沼・上野原・甲府昭和・甲府南・相模湖の6ヶ所を抽出し、それぞれ東京方面に向かう交通量にどのような相違があるのか検証した。

2. データ概要

本研究で用いるデータは、平成18年4月～平成19年3月の1年間に日本全国のICから高速道路入り、図2-1に示すように中央道入り(東京)方向で八王子料金所を通過した利用データである。



図2-1 データ概要

このデータを対象とした理由として、八王子料金所東京方面の手前には小仏トンネルがあり、休日には、このトンネルを先頭に渋滞が頻発しており、交通量の特性を把握することが重要である。また、本研究で対象とした平成18年度のETCの料金体系は、深夜割引、通勤割引、早朝夜間割引等の比較的明解な割引制度のみであった。そのため料金体系による交通量の変動は考慮しなくともよいことがあげられる。ただし、分析対象が時間別の交通量であることから、時間帯別の料金割引の影響はモデルに導入可能である。まず、対象期間において八王子料金所を東京方面で通過した時間交通量を図2-2に示す。利用データ総数は約630万台であり、一日あたりの通過交通量は1万7000台となっている。また対象期間内のH19年3月の時間交通量を図2-3に示す。

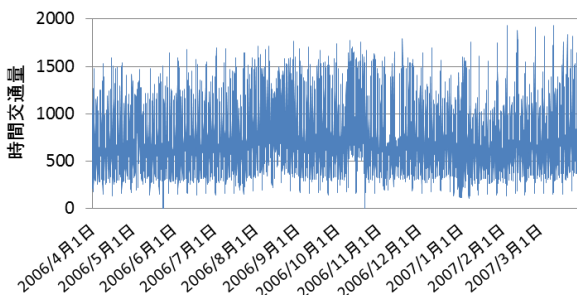


図2-2 八王子料金所通過交通量(平成18年4月～平成19年3月)

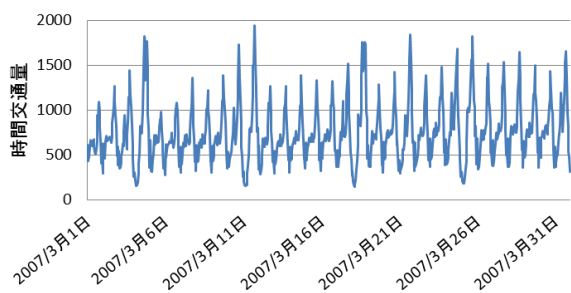


図2-3 八王子料金所通過交通量(平成19年3月)

定性的な傾向として、図 2-2 を見ると夏季に増加し、冬季に減少するような長期的な変動が見られる。また図 2-3 を見ると、1日単位での顕著な周期変動があることがわかる。さらに日によってピーク時間交通量に大きな違いがある。これはピーク時間交通量も周期的に変動するため、曜日による周期変動と考えられる。

次に対象とする河口湖・勝沼・上野原・甲府昭和・甲府南・相模湖の各 IC から高速道路に入り、八王子料金所を通過した交通について、対象期間内の H19 年 3 月の時間交通量をそれぞれ図 2-4～2-9 に示す。

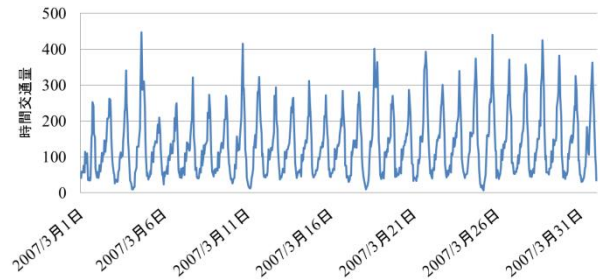


図 2-4 河口湖 ICからの交通量(平成 19年 3月)

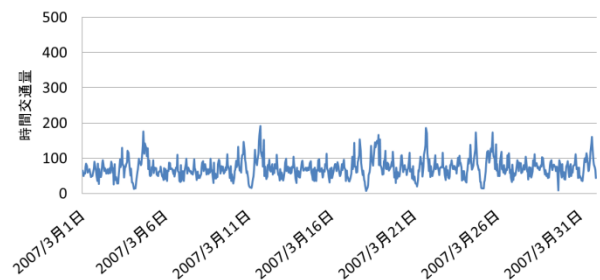


図 2-5 勝沼 ICからの交通量(平成 19年 3月)

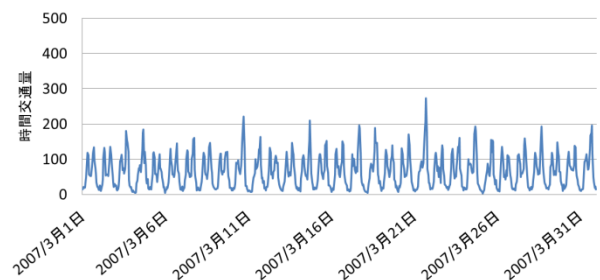


図 2-6 上野原 ICからの交通量(平成 19年 3月)

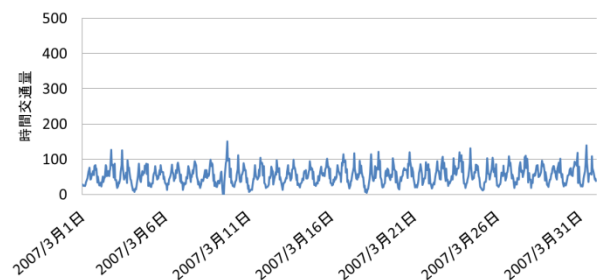


図 2-7 甲府昭和 ICからの交通量(平成 19年 3月)

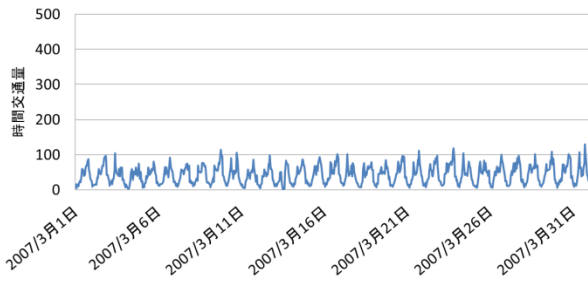


図 2-8 甲府南 IC からの交通量(平成 19 年 3 月)

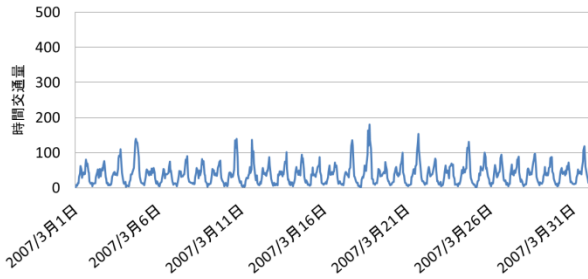


図 2-9 相模湖 IC からの交通量(平成 19 年 3 月)

各 IC の八王子料金所通過交通量に占める割合は河口湖：約 18.0%，勝沼約 9.8%，上野原：約 8.2%，甲府昭和：約 6.9%，甲府南：約 5.4%，相模湖：約 5.1%であり、本研究で検討する IC の合計で八王子 TB を通過する交通量全体の約 53.4%を占めている。

それぞれの時間交通量の変動特性は、交通量が一時的に顕著に増加する河口湖や上野原、また週に 1 回程度交通量の特徴的な変動が見られる勝沼や相模湖、またあまり特徴的な変化が見られない甲府昭和や甲府南など、IC によって八王子料金所を通過する交通量に違いがあることがわかる。これらの傾向を定量的に把握するために、それぞれの交通量に対して、上記の特徴を考慮した状態空間モデルを用いて成分分解を行い、それぞれの交通量にどのような特徴があるか分析する。

3. 交通量成分分解モデル

2 章から対象交通量の成分として、1 日単位での周期変動及び 1 週間単位での周期変動の 2 種類の循環変動が考えられる。そのため、本研究では成分分解に用いる手法として生駒、八名らが提案⁴⁾している、2 種類の循環成分を考慮出来るよう拡張された季節調整モデルを用いる。これは北川によって開発された季節調整モデルを 2 種類の周期性を考慮できるよう拡張したものであり、時系列データをトレンド成分、1 週間周期の変動、1 日周期の変動、及び有色雑音成分(AR 成分)に分解するモデルである。この時系列モデルでは、時系列的な記述をベースとするシステム方程式と観測方程式により、時系列デー

タの内部状態を動的に推定していく。このモデルでは ETC データによる交通量 y_n は(1)式であらわされる観測方程式によって記述される。

$$y_n = T(n) + D(n) + s(n) + c(n) + \varepsilon_n \quad (1)$$

ここで各成分は T：長期的な変動を表すトレンド成分
D：7日を周期とする循環変動を表す曜日変動成分
s：24時間を周期とする循環変動を表す日内変動成分
c：有色雑音成分を表す AR 成分、及び観測ノイズ w である。また各成分のシステム方程式は以下に示す式(2)-(6)で表される。

1) トренд成分

$$x_T(n) = F_T(n)x_T(n-1) + G_T(n)v_T(n) \quad (2)$$

v_T はシステムノイズであり、 $N(0, \tau_D^2)$ に独立に従う。

また、トレンド成分の階差は 1 とし、その要素は(2-1)に表される。

$$x_T(n) = [t_1(n)]^t \quad (2-1)$$

2) 曜日変動成分

$$x_D(n) = F_D(n)x_D(n-1) + G_D(n)v_D(n) \quad (3)$$

v_D はシステムノイズであり、 $N(0, \tau_D^2)$ に独立に従う。

また、曜日変動成分の周期は 7 とし、その要素は(3-1)に表される。

$$x_D(n) = [d_1(n), d_2(n) \dots d_6(n)]^t \quad (3-1)$$

3) 日内変動成分

$$x_s(n) = F_s(n)x_s(n-1) + G_s(n)v_s(n) \quad (4)$$

v_s はシステムノイズであり、 $N(0, \tau_s^2)$ に独立に従う。

また、日内変動成分の周期は 24 とし、その要素は(4-1)に表される。

$$x_s(n) = [s_1(n), s_2(n) \dots d_{23}(n)]^t \quad (4-1)$$

4) AR 成分

$$x_a(n) = F_a(n)x_a(n-1) + G_a(n)v_a(n) \quad (5)$$

v_a はシステムノイズであり、 $N(0, \tau_a^2)$ に独立に従う。

また、 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ は AR 係数であり、その次数 m は AIC 最小法によって検討する。

5) 観測ノイズ

$$\varepsilon_n \sim N(0, \sigma^2) \quad (6)$$

ETC データにおける観測ノイズの位置づけは、時間で集約する際の取り扱い方によるものとする。

これらのシステム方程式及び観測方程式をまとめて、式(7)式(8)の状態空間モデルを得る。

$$\text{システムモデル} \quad x_n = Fx_{n-1} + Gv_n \quad (7)$$

$$\text{観測モデル} \quad y_n = Hx_n + \varepsilon_n \quad (8)$$

ここで行列 F, G, H はそれぞれ式(9)で表現される。各行

列の詳細については生駒ら⁴⁾を参照されたい。

$$F = \begin{bmatrix} F_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_a \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} G_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_a \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} H_T^n \\ H_D^n \\ H_S^n \\ H_a^n \end{bmatrix} \quad (9)$$

上述の状態空間モデルに、式(10)、式(11)で表されるように、時系列の関係を線形で状態を表現することで、カルマンフィルタのアルゴリズムが適用できる。よって、上述のモデルに式(10)で表される1期先予測、式(11)で表されるフィルタ等、式(12)で表される平滑化を繰り返し各時間における交通状態を推定する。

一期先予測

$$\begin{cases} x_k|k-1 = F_k x_{k-1}|k-1 \\ V_k|k-1 = F_k V_{k-1}|k-1 F_k^t + G_k Q G_k^t \end{cases} \quad (10)$$

フィルタ

$$\begin{cases} k_k = V_k|k-1 H_k^t (H_k V_k|k-1 H_k^t + R_n)^{-1} \\ x_k|k = x_k|k-1 + k_k (y_k - \bar{y}_k|k-1) \\ V_k|k = V_k|k-1 - k_k H_k V_k|k-1 \end{cases} \quad (11)$$

平滑化

$$\begin{cases} A_k = V_k|k F_{k+1}^t V_{k+1|k}^{-1} \\ x_k|N = x_k|k + A_k (x_{k+1|N} - x_{k+1|k}) \\ V_k|N = V_k|k + A_k (V_{k+1|N} - V_{k+1|k}) A_k^t \end{cases} \quad (12)$$

ここで、上述のモデルで状態推定を行う際にはパラメータとして観測ノイズの分散 σ^2 、各システムノイズの分散($\tau^2_T, \tau^2_D, \tau^2_S, \tau^2_a$)、AR係数 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ を与える必要がある。これらの値は観測データに基づく最尤推定法によって求めるものとする。またカルマンフィルタに用いる初期分布として、対象データの初めの1週間において一旦推定を行い、その推定値を初期分布として用いた。

4. 状態推定結果

3章で示したモデルを用いてそれぞれの交通量データを各成分に分解した。その推定された各成分について説明する。

1) トレンド成分

トレンド成分について、河口湖 IC の交通量を例として図 4-1 示す。図中の青線は時間交通量変動であり、赤

線が、推定されたトレンド成分である。トレンド成分は時系列の誤差期待値の時間変動であり、今回考慮しなかった各種変動の期待値を表していると考えられる。例えば考慮しなかった変動の一つとして交通量の季節変動があげられる。河口湖 IC からの交通量は夏季に増加し冬季に減少するような1年を通しての変動が見られ、8月中旬にピークを迎え、1月中旬に最も低い値となる、その差は約 57 台時であった。この値は時間帯別の変動などを排除して、純粋に一時間当たりの期待値がピーク時とオフピーク時ではこれだけの違いがあることを示している。一方でその他の IC からの交通量に関しては、トレンド成分の変動幅は河口湖と比較しては小さな値を取り、季節変動を含めた時間・曜日等の変動以外の影響による交通量の変動は比較的少ないと考えられる。その他の IC の例として、図 4-2 に勝沼 IC からの交通量のトレンド成分の変動を示す。勝沼 IC は甲府盆地のゲートに当たり比較的観光需要など季節変動の影響を受けやすいと考えられる IC であるが、全体の変動幅も河口湖と比較して小さく、トレンド成分は秋季に上昇するが全体としてはほぼ一定になっている。

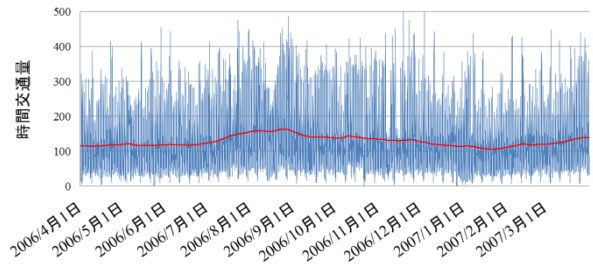


図 4-1 河口湖 IC からのトレンド成分：赤線

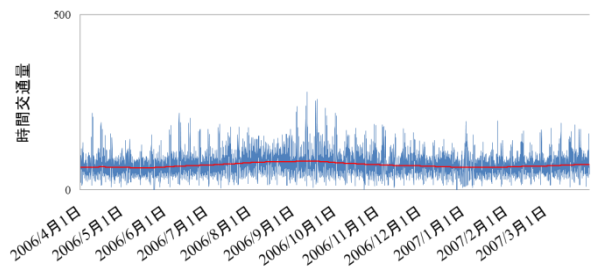


図 4-2 勝沼 IC からのトレンド成分：赤線

2) 曜日変動成分

続いて曜日変動成分について検討を行う。曜日成分については、各要素の周期変動に4種類のパターンが確認された。まず一つ目が、図 4-3 に示すような金曜日にピークを持つパターンであり、甲府昭和 IC 及び甲府南 IC がこれに該当した。二つ目は、図 4-4 に示すような土曜日にピークを持つパターンであり、勝沼 IC が該当する。三つ目は図 4-5 に示すように日曜日にピークを持つパターンであり、河口湖 IC 及び相模湖 IC が該当する。最後に四つ目は図 4-6 に示すように曜日による交通量の変動が

ほとんどないパターンであり、上野原 IC が該当する。

これらの違いは目的別の需要構造によって影響を受けていると考えられる。河口湖 IC や勝沼 IC のように金曜～日曜に大きく正となり平日が負となるパターンは観光需要の影響と考えられるが、土曜日に大きく正となる勝沼と日曜が大きな河口湖では同じ観光でも行動パターンが異なると考えられる。金曜に正となる甲府昭和と甲府南の各 IC は甲府盆地の業務中心地区に近い IC であり、業務交通が大きく影響していると考えられる。いずれも週末を迎えるにあたって業務交通が増加すると考えられる。上野原 IC に関してはゴルフ場への交通による休日の交通量増加が考えられるが、平日の通勤・業務交通とほぼ同様であり、結果として平休日の差がほとんど無いと考えられる。また、曜日変動の季節変動については、各 IC ともに、一年を通して、各要素に変動は見られず、季節により曜日変動の要素は変化しないと考えられる。

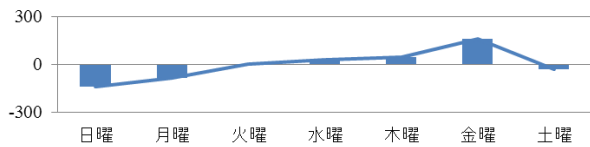


図 43 甲府昭和 IC の曜日変動/日

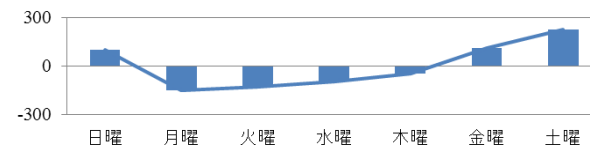


図 44 勝沼 IC の曜日変動要素/日

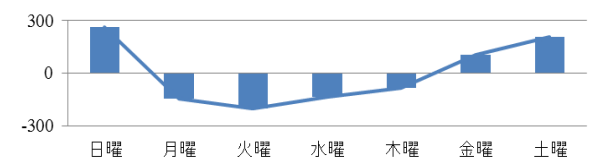


図 45 河口湖 IC の曜日変動要素/日

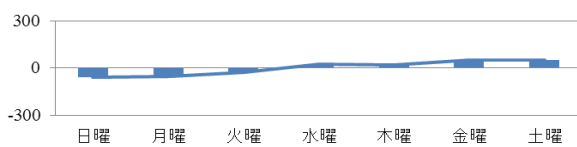


図 46 上野原 IC の曜日変動要素/日

3) 日内変動成分

次に、日内変動成分では、周期変動に 2 種類のパターンが見られた。まず一つ目は図 4-6 に河口湖 IC の例を示したような夕方に 1 つのピークを持つパターンであり、これには河口湖 IC のほかに勝沼 IC が該当した。曜日変動からも週末の交通が多いことが示されており、観

光需要の影響が大きい。特に夕方のみにピークが現れるのは、到着分布が比較的ばらつきのに対して、帰宅のための需要の分布が比較的集中することを示していると考えられる。もう一つは図 4-7 に示すような朝と夕方に 2 つのピークを持つパターンであり、上野原、甲府昭和、甲府南及び相模湖が該当する。これらの IC は曜日変動から業務や通勤といった目的が多いと考えられる。よって同日に双方向で行って帰ってくるが多いために、朝と夕方にそれぞれピークが発生するパターンであるとされる。

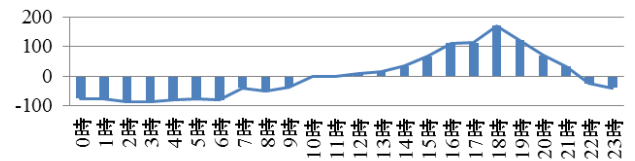


図 4-6 河口湖 IC の日内変動要素/時

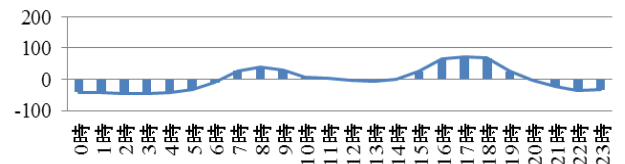


図 4-7 上野原 IC の日内変動要素/時

また、曜日変動成分と同様に、これらの時間変動成分の季節的な変動については、各 IC において顕著な変動は見られず、季節により日内変動の要素は変化しないと考えられる。

5. おわりに

本研究では、ETC 利用履歴データから得られた八王子 TB 交通量を時系列データとして活用し、2 種類の循環成分を考慮した季節調整モデルによって分析を行った。特にシステムの線形関係を仮定してカルマンフィルタのアルゴリズムを用いて、長期的な変動を表すトレンド成分、7日を周期とする曜日変動成分、24時間を周期とする日内変動成分、有色雑音成分を表す AR 成分に交通量を分解することで、それぞれの変動等について定量的な分析を行った。

結果として、トレンド成分に関しては、河口湖 IC からの交通量に、夏季に増加し、冬季に減少する長期的な変動が確認されたが、他の IC では一年を通して長期的な変動が見られなかった。また、IC によって、曜日変動及び日内変動成分の需要変動に異なるパターンが見られ、夕方のみにピークを持つパターンや朝と夕方に 2 つのピークを持つパターンが確認された。これらはいずれ

も交通目的と深く関係していると考えられ、個別の利用パターンからの目的推定とあわせて、IC別の特性を考慮することが適切な需要マネジメントに必要と考えられる。

今回は料金等が安定している期間を用いて特性を導出したが、料金の変動等が含まれるように分析期間を延ばしていくことで、時間別の料金等による施策の影響について、ある特定の時間帯のみが影響を受けているのか、全体で影響を受けているのか、またその影響の経時的な変動を分析することが可能である。これにより詳細正確な施策や道路運用方法の検討が可能であると考えられる。また観測交通量をETCデータとして得られる入出IC情報から分割する事により、OD及び時間帯を考慮したミクロな分析も可能となる。

謝辞

本研究は、株式会社高速道路総合技術研究所と山梨大学の共同研究の一環として実施したものである。EXCO 3社及び株式会社高速道路総合技術研究所には、貴重なデータ提供とともに有意義なコメントを頂いた。この場を借りて厚くお礼申し上げたい。

参考文献

1) 国土交通省道路局 HP

(http://www.mlit.go.jp/road/soudan/soudan_10b_01.html)

- 2) 国土交通省 発表(2012年11月1日時点)
- 3) 佐々木邦明, 中沢航太, 山本隆, 川崎健史: ベイズ型状態空間モデルを用いた交通量変動の分析, 交通工学 47(2), pp.27-32, 2012
- 4) 生駒哲一, 八名和夫: ベイズ型時系列モデルによる成分分解を用いたネットワークトラヒックの定量的分析法, 統計数理, 第 54 巻第 2 号, pp.425-444, 2006
- 5) 福田大輔: データ同化アプローチによる交通状態の推定に関する研究動向, 交通工学, Vol.47(2), pp.33-38, 2012
- 6) 姜興起著: R で学ぶデータサイエンス—ベイズ統計データ解析—, pp.98-161, 2010
- 7) 北川源四郎: モンテカルロ・フィルタおよび平滑化について, 統計推理, 第 44 巻第 1 号, 1996
- 8) 北川源四郎: FORTRAN77 時系列解析プログラミング, 岩波書店, pp.205-231, 1993
- 9) 赤池弘二, 甘利俊一, 北川源四郎, 樺島祥介, 下平英寿, 室田一雄, 土屋隆: 赤池情報量基準 AIC: モデリング・予測・知識発見, 共立出版, 2007
- 10) 北川源四郎: 時系列の分解—プログラム DECOMP の紹介—, 統計数理, 第 34 巻 pp.255-271, 1986