

交通流におけるフィードバック原理に基づく 推定技術の現状と展望

中辻 隆*

カルマンフィルターを用いた交通流のフィードバック推定法に関し、その構成要素であるマクロ交通流モデルとカルマンフィルターにおいて過去10年来大きな展開が見られている。本稿では、Daganzoらによる高次モデル批判とその後の新たに提案されたマクロモデル、あるいは非線形カルマンフィルターの限界を巧妙な変換で克服してTaylor展開の2次項までの近似を可能としたUnscentedカルマンフィルター、さらには交通流推定におけるフィードバック手法に関する近年の動向と今後の展望について報告する。

A State-of-the-Art of Traffic Flow Estimates Based on Feedback Concept : New Developments in Macroscopic Traffic Flow Modeling and Kalman Filtering

Takashi NAKATSUJI*

Macroscopic traffic flow model and Kalman filter are major players in the traffic flow estimates based on feedback scheme. The controversies on the Payne-type high-order macroscopic traffic flow model in the middle 1990's are followed by the new developments in the traffic flow modeling later in the last decade. The unscented Kalman filter proposed in the late 1990's has a potential to replace the conventional extended Kalman filter because of the high capability of representing non-linear phenomena. This article summarizes the recent innovations in both macroscopic traffic modeling and Kalman filter technique along with the state-of-the-art of the feedback traffic flow estimates.

1. はじめに

時間的に変動する交通状態について現下の正確な状況を把握することは、一般的に困難な作業である。特に状態量の直接的な計測が難しい時にはその推定に多くの困難を伴う。この際、理論的に推定された計測量と実測された計測量との乖離が小さくなるよう状態量の調整を行うフィードバック手法は、状態量の動的推定手法として広く用いられている。

カルマンフィルター技法(KFT)は、フィードバック推定における代表的な手法である。交通流の分野でも、交通状態の推定・予測だけでなく、流入制御などの最適化、あるいはモデルの同定のための手法として用いられている。特に交通状態推定においては、交通密度やOD旅行時間など直接計測が困難な交通変量を、それらと密接な関連を有している車両感知器データやプローブ車データから間接的に推定する用法として用いられている。マクロ交通流モデルをKFTの状態方程式として採用した手法においては、その構成要素であるマクロ交通流モデルとKFTに関して、1990年代以後モデルの定式化に関わる論争や新たなモデル化の展開が行われている。また、

* 北海道大学大学院工学研究科助教授
Associate Professor, School of Engineering,
Hokkaido University
原稿受理 2006年1月16日

プローブ車データなど新たな形態の計測データも利用可能になっており、フィードバック推定手法の大きな発展が期待されている。

本稿においては、マクロモデルとKFTを組み合わせたフィードバック推定法を中心にして、2章においてはマクロ交通流モデルに関して従来のモデルの簡単なレビュー、1990年代中頃以後における高次項を有するマクロ交通流モデル批判、さらにはその後には提案されている新たなマクロモデルについて紹介を行う。3章においては、従来の1次項までのTaylor転換に基づく拡張カルマンフィルタに替わって巧妙な変換によって2次項までの近似を可能としたUnscentedカルマンフィルタについてその基本的な考え方を紹介する。4章においては、1970年代末から1980年代初めにCremerら¹⁾によって確立された交通状態の推定手法を中心にしたKFTの交通流問題への適用について紹介する。また、OD交通量 / OD旅行時間の推定やモデルの同定への適用についても紹介を行う。

2. マクロ交通流モデル

Cremer¹⁾らによって提案されたフィードバック推定法においては、マクロ交通流モデルはKFTとともに重要な構成要素であり、その選択は最終的な推定精度に最も大きな影響を与える。マクロ交通流モデルに関しては、既に多くの著者²⁻⁵⁾が優れたレビューを行っている。ここでは、本稿の展開に関連した文脈でモデルの紹介を行う。

2-1 単純マクロモデル (LWRモデル)

マクロ交通流モデルは、1950年代に行われたLighthill and Whithamの研究⁶⁾とRichards⁷⁾の研究を始祖とし、LWRモデルとも言われている。時刻 t 、および位置 x における密度を $\rho(x, t)$ 、交通量を $q(x, t)$ 、そして平均速度を $v(x, t)$ とする時、LWRモデルではこれら三つの交通変量を求めるのに、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \dots\dots\dots(1)$$

$$q = \rho v \dots\dots\dots(2)$$

$$v = V(\rho) \dots\dots\dots(3)$$

r : 流入・流出交通量

$V(\rho)$: 均衡速度 (密度 - 速度関係式)

の方程式を用いている。連続式(1)と基本関係式(2)はマクロ交通流モデルにおいて共通であり、式(3)がこ

のモデルを特徴づけている。簡単な道路構造に対しては、特性曲線 (衝撃波) を用いて解析的に解を求めることも可能である。Michalopoulos⁸⁾らは単純モデルに基づくKRONOSの開発を行っている。

通常の交通流では交差点での停止車両など先方に渋滞がある場合には運転者が後方から速度調整を行うために密度が段階的に変化する。単純マクロモデルにおいては、こうした現象を表現するための密度勾配項が含まれていない。そのため密度変化が不連続になり、従って衝撃波も過大となる傾向にある。また、速度 v においては分散性を考慮せず均衡速度に瞬時に収束すると仮定されているために、実交通の密度 - 速度関係に見られる過渡領域でのヒステリシス特性、あるいはstop and go渋滞や低速車に後続する交通流に見られるファントム渋滞など渋滞時の表現に問題点が指摘されている^{4,5)}。

1990年代中期におけるDaganzo⁹⁾によって高次モデル批判をもとに提案されたCell Transmission Model (CTM)¹⁰⁾も単純マクロモデルに分類されるが、上流部からの需要と下流部における時間的、空間的容量を考慮して境界での交通量を決めているので待ち行列の形成表現が正確であり、渋滞時の交通流の表現精度に優れていると言われている。わが国で広く用いられているブロック密度法¹¹⁾も基本的には同じ概念に基づいている。Lebacque¹²⁾は、上流からの需要交通量と下流における供給可能交通量の定義を体系化するとともに、差分計算法のGodunov法に基づいた定式化を行っている。

2-2 高次マクロモデル

Payne¹³⁾は、式(3)の代わりに、運転者の追従挙動をもとに、交通流の速度変化を表す式、

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{1}{\tau} [v - V(\rho)] - \dots\dots\dots(4)$$

の導出を行った。式(4)はモーメント法とも言われ、左辺第2項は上流からの影響を表す移流項、右辺第1項が均衡速度への収束を表す緩和項、そして第2項が下流からの影響を表す密度勾配項と言われている。ここで、 τ は緩和時間であり、 τ はその中に密度 - 速度関係式を内在化しうるパラメータである¹⁴⁾。

Payneモデルは、密度の急変やヒステリシス特性など単純マクロモデルの欠点を部分的に補うことには成功したが、新たな問題点も指摘され幾多の改良が試みられてきた。Papageorgiouら¹⁵⁾は、オンランプやオフランプでの挙動を表現するために付加項

を導入した改良を行っている。Cremerら¹⁶⁾は、密度勾配項が低密度時に密度に過敏であることから新たな調整パラメータを導入した。

$$v \frac{v}{t} + v \frac{v}{x} = - \frac{1}{t} [v - V(x)] - \frac{\mu}{x} \frac{1}{x} \dots(5)$$

Ross^{17,18)}はPayneモデルの緩和項に問題があるとし、均衡速度の代わりに自由流速度を用い、さらに密度緩和項を無視したモデルの提案を行った。Michalopoulosら¹⁹⁻²³⁾はRossのモデルを批判²⁷⁾するとともに、Payneモデルでは高密度領域で非現実的な密度となりうることを指摘した²¹⁾。さらに、車線変更や追越し挙動による摩擦抵抗を考慮し粘性項¹⁹⁾や半粘性項²²⁾を導入するなど高次モデルに関する改良を数多く行った。最終的には緩和時間を密度の関数としたモデル^{24,25)}の提案を行っている。変動を平滑化するために粘性項を導入したモデルは、Kuene²⁶⁾やKerner²⁷⁾らによっても提案されている。

Hoogendoorn⁴⁾は、交通圧力 P なる変数を導入してモーメント方程式を次式のように表している。

$$v \frac{v}{x} + \frac{v}{t} = - \frac{v - V(x)}{x} - \frac{1}{x} \frac{P}{x} + \dots \frac{v^2}{x^2} \dots(6)$$

これは、 P や v の値によって、これまでに提案されたPayne型の高次モデルが一般化されることを示している。ここで μ は粘性パラメータである。

式(1)と粘性項を除いた式(6)をまとめてベクトル表示(保存系)すると、

$$\frac{u}{t} + \frac{f}{x} = \frac{u}{t} + \frac{f}{u} \frac{u}{x} = s \dots\dots\dots(7)$$

$$u = \begin{pmatrix} v \\ q \end{pmatrix} \quad f = \begin{pmatrix} q \\ v^2 + R \end{pmatrix} \dots\dots\dots(8)$$

式(7)においてヤコビアン $J = f/u$ の固有値は特性波の伝搬速度(衝撃波)を与えるが、高次モデルにおいてそれらは、

$$w = v \pm \sqrt{\frac{P}{x}} \dots\dots\dots(9)$$

となり、解の一つが速度 v よりも常に大きくなる。Daganzo⁹⁾は交通流の実体よりもその影響の方が先に到着するのは非現実的であると批判した。また、

$$v = V(x) - r \frac{1}{x} \dots\dots\dots(10)$$

と表す時、渋滞領域の末端部など密度勾配 p/x が大きくなる所では速度 v が負値となりうると批判している。Liuら²⁴⁾やDel Castilloら²⁸⁾も同様な指摘を行っている。Daganzo⁹⁾は、交通流は異方性(運転者は後続車より先行車に多くの注意を払う)や非対称性(高速車は低速車の存在によって減速や追越しなどを余儀なくされるが、低速車が高速車によって挙動を変えることは少ない)があること、ボトルネックでは流体と異なり速度低下が起こること、運転者の特性(攻撃性)の影響が大きいことなどを指摘し流体力学に基礎を置く高次モデルを批判した。Papageorgiou²⁹⁾は、高次モデルで求めている速度は平均速度であるので、特性波速度が個々の車の速度より大きくなることはあり得ると反論している。こうした高次モデル批判は、DaganzoによるCTMの提案、あるいはHelbinやHoogendoornらによるGas Kineticモデルの新展開など、それ以後におけるマクロ交通流モデルの進展に大きな影響を与えた。

2-3 Gas Kineticモデル

高次マクロモデルが流体力学に基礎を置くのに対してGas Kineticモデルは個々の運転者の挙動を考慮したMesoscopicなモデルである。1970年代にPrigogine and Hermann³⁰⁾、Paveri Fontana³¹⁾、あるいはPhillips³²⁾らがBoltzmann気体力学にヒントを得てその基礎を確立した。モデルの複雑さ、特に多く含まれるパラメータの同定と解釈の困難さから1980年代にはあまり顧みられなくなった。しかしながら、1990年代以降、実証的な交通流特性の分析を通してHelbinやHoogendoornらによってモデルの再評価と改良が行われ新たな展開を見せている。

Gas Kinetic(GT)モデルでの最も基本的な考え方は、密度は時間 t や空間 x だけでなく速度 v や希望速度 v_0 の関数であるとした位相密度(Phase Space Density) $\rho(x, v, v_0, t)$ がある。密度 $\rho(x, v, t)$ や平均速度 $V(x, t)$ は位相密度の速度 v や希望速度 v_0 に関する積分として定義される。GTモデルを特徴づける変数に速度分散 $\sigma(x, t)$ がある。

$$T(x, t) = \frac{1}{(x, t)} \int (v - V)^2 dv \rho(x, v, t) \dots\dots\dots(11)$$

Paveri Fontana³¹⁾は、高速車と低速車の非対称な相互作用を想定し、Boltzmann方程式の1次、2次、および3次のモーメントから、密度、速度 v 、および σ に関する方程式を以下のように誘導した。

$$\frac{1}{t} + \frac{(\sigma - V)}{x} = 0 \dots\dots\dots(12)$$

$$\frac{V}{t} + V \frac{V}{x} = - \frac{I}{x} \left(\frac{V}{x} \right) + \frac{V_e - V}{x} \dots\dots\dots(13)$$

$$\frac{V}{t} + V \frac{V}{x} = - 2 \frac{V}{x} - \frac{I}{x} \left(\frac{V}{x} \right) + \frac{\chi e^{-\chi x}}{x} \dots\dots(14)$$

ここで、 V_e と e は速度と速度分散の均衡値であり χ は平均速度の歪度を表している。

$$G(x, t) = \frac{I}{(x, t)} dV (v - V)^2 \sim (x, v, t) \dots\dots\dots(15)$$

式(12)には v が、式(13)には χ が、さらに式(14)にはと常に1次上の独立変数が含まれシステムとして閉じていない連立微分方程式となっている。すなわち、式(12)で v を明示的に定義すると1次元の単純モデルに、あるいは式(13)で χ を定義すると2次元モデルに、さらに式(14)で χ を外生的に与えると閉じた3元連立微分方程式に帰着する。

Helbingら³³⁻³⁵⁾は、ドイツ・アウトバーンでの実データ、特に交通渋滞時のデータを用いて固定型、振動型、移動型、あるいはstop and go波²⁶⁾などの渋滞の形態や、ブーメラン現象やpinch現象などの複合的な形態、さらにはsynchronized flow^{36,37)}との関係など交通渋滞の形成に関する実証的な分析を行うとともに、これらの交通渋滞特性の過渡的生成過程や複合的なブーメラン現象が、既存の単純マクロ(LWR)モデルでは表現できないことを指摘している。さらにGas Kineticモデル³⁸⁻⁴²⁾に基づく高次マクロモデルでは、Daganzoらによる批判を克服していることを強調している。

Helbingらのモデルは、Non local Gas Kineticモデルと称され、運転者の速度分散 (x, t) を外生的に与えた2次元の構造を有している。式(13)は、

$$\frac{v}{t} + V \frac{V}{x} = - \frac{I}{x} \left(\frac{V}{x} \right) + \frac{V_0 - V}{x} - \frac{V_0 - V_e}{x} \dots\dots(16)$$

右辺の各項はそれぞれ、速度分散 (x, t) による圧力項、希望速度への加速度項、 $(I / \max + T \times V)$ だけ離れた下流地点 x_i における交通状況への減速項を表している。 T は平均車頭時間。均衡速度 V_e は、

$$V_e = V_0 \left[1 - \frac{1}{2A \max} \left(\frac{T}{1 - \frac{a}{\max}} \right) B(\chi, v) \right] \dots\dots\dots(17)$$

と表される。 $B(\chi, v)$ は相対速度偏差 v に対するボ

ルツマンファクターである。速度分散 (x, t) は、

$$(x, t) = A(\chi) V^2(x, t) \\ A(\chi) = \left[A_0 + A \tanh\left(\frac{(x, t) - c}{x}\right) \right] \dots\dots\dots(18)$$

と表されている。Hoogendoornら^{43,44)}は多車線、マルチクラスヘモデルの拡張を行っている。

2 - 4 数値差分法

マクロ交通流モデルにおいては、差分法による数値解析を行っているので数値差分法の選択は解析精度に大きな影響を及ぼす。先に述べたように、Lebacque^{1,2)}は、CTMの定式化においてGodunov法を推奨している。Payne型の高次マクロモデルの数値解法としてLyrintzis²²⁾やLiuら²⁵⁾は、風上差分法(Upwind法)をベースとした手法を提案している。風上差分法は交通状況に応じて差分範囲が上流側と下流側に変化することを特徴としているが、高次モデルにおいてはヤコビアン (式(7))の対角化による行列式の値(絶対値 | |)の算定が必要とされている。Lyrintzis²²⁾やLiu²⁵⁾らは、流速差分法を採用している。特に、Liuら²⁵⁾は、彼らの提案した高次モデル²⁴⁾を差分方程式と通常の微分方程式の初期値問題(Rieman問題)に分解した上でHarten Lax van Leer法に基づく流速差分法の優位性を示している。同様にNgoduyら⁴⁵⁾もPayne型の高次モデルに対して、Rieman解をベースとしたHarten Lax van Leer andinfeld法が計算効率、および安定性に優れているとしている。一方、Gas Kineticモデルに対しては、Helbinら⁴²⁾は、風上差分法がMacormack法やLax Wendroff法の2段階手法に比べて精度がよいと報告している。

3 . カルマンフィルター

3 - 1 拡張カルマンフィルター (EKF)

状態変数 $x(k)$ の時間変動を表す状態方程式 f と $x(k)$ と計測変数 $y(k)$ の関係を表す計測方程式 g がともに非線形関数であると仮定する。すなわち、

$$x(k) = f[x(k-1), u(k-1)] + v(k-1) \\ y(k) = g[x(k)] + w(k) \dots\dots(19)$$

$u(k)$: 入力(制御)変数

$v(k), w(k)$: 誤差

両式をTaylor展開し1次項までの近似を行うと、

$$\begin{aligned} x(k) &= A_k \cdot x(k-1) + B_k \cdot u(k-1) + p(k-1) + v(k-1) \\ y(k) &= C_k x(k) + q(k) + w(k) \end{aligned} \quad \dots(20)$$

ここで、

$$\begin{aligned} p(k) &= f[x(k), u(k)] - A_k \hat{x}(k) - B_k \bar{u}(k) \\ q(k) &= g[\hat{x}(k)] - C_k \hat{x}(k) \end{aligned} \quad \dots(21)$$

$$A_k = \frac{f}{x} \Big|_{\hat{x}(k), \bar{u}(k)} \quad B_k = \frac{f}{u} \Big|_{\hat{x}(k), \bar{u}(k)} \quad C_k = -\frac{g}{x} \Big|_{\hat{x}(k)} \quad \dots(22)$$

と線形化されるので、線形カルマンフィルターの理論をそのまま適用できる。すなわち、状態変数 $x(k)$ と計測変数 $y(k)$ の予測値を、

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) &= f[\hat{x}(k-1), u(k-1)] \\ \hat{y}(k) &= g[\hat{x}(k)] \end{aligned} \quad \dots(23)$$

と表す時、状態変数は次式に従って補正される。

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k) + K_k [y(k) - \hat{y}(k)] \quad \dots(24)$$

ここで K_k はカルマンゲインと呼ばれ、

$$\begin{aligned} K_k &= M_k^{xy} (M_k^{yy})^{-1} \\ M_k^{xy} &= M_k^{xx} C_k^T \\ M_k^{yy} &= C_k M_k^{xx} C_k^T + W_k \\ M_k^{xx} &= A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T + V_{k-1} \\ P_k &= M_k^{xx} - K_k M_k^{xy} K_k^T \end{aligned} \quad \dots(25)$$

V_k, W_k : 誤差 $v(k), w(k)$ の共分散行列

P_k : 状態変数の推定値の共分散行列

3-2 Unscentedカルマンフィルター (UKF)

EKFでは、Taylor展開において1次式までしか近似していないために非線形性の強い現象においては大きな誤差を伴う。一般的に非線形関数

$$z(k) = f[x(k)] \quad \dots(26)$$

を2次項まで含めてTaylor展開した時、 $z(k)$ の近似値の平均値と分散、およびは $x(k)$ との共分散は、

$$\begin{aligned} \bar{z} &= f(\bar{x}) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} P_{xx} x f \\ P_{zz} &= J_f P_{xx} J_f^T - \frac{1}{4} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} P_{xx} x f \right) \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} P_{xx} x f \right)^T \dots(27) \\ P_{xz} &= P_{xx} J_f^T \end{aligned}$$

と求めることができる。ここで、 $J_f = \partial f / \partial x$ (ヤコビアン行列)、 T は転置操作を意味している。いま、

$x(k)$ の分散行列 P_{xx} をCholesky分解しその下三角行列の i 列目要素を s_i とする時、

$$\begin{aligned} f_0 &= \bar{x} \\ f_i &= \bar{x} + s_i, f_{i+1} = \bar{x} + s_{i+1}, \dots, f_n = \bar{x} + s_n \\ f_{n+i} &= \bar{x} - s_i, f_{n+i+1} = \bar{x} - s_{i+1}, \dots, f_{2n} = \bar{x} - s_n \end{aligned} \quad \dots(28)$$

をUnscented変換と言う。その非線形関数

$$z_i = f(x_i) \quad \dots(29)$$

を定義するとき、 $z(k)$ に関する平均や分散との間に、

$$\begin{aligned} \bar{z} &= \sum_{i=0}^{2n} h_i z_i \\ \bar{P}_{zz} &= \sum_{i=0}^{2n} h_i [(z_i - \bar{z})(z_i - \bar{z})^T] \\ P_{zz} &= \sum_{i=0}^{2n} h_i [(z_i - \bar{z})(z_i - \bar{z})^T] \end{aligned} \quad \dots(30)$$

なる関係を導くことができる。ここで、 h_i はあらかじめ決められた重み定数である。すなわち、式(30)は、 $z(k)$ の平均値と分散、およびは $x(k)$ と $z(k)$ の共分散はUnscented変換によって (k) と (k) に関する総和演算に帰着することを意味している。

EKFにおいては、式(22)による微分演算が困難な場合があるだけでなく、式(25)のカルマンゲインや共分散行列演算において精度の低下を招くことがある。式(30)は、状態方程式と計測方程式を式(27)(29)に倣って変換を行うことによって、式(22)の微分演算なしに式(25)のカルマンゲイン等を求めることができることを表している。ここでの主な演算は P_{k-1} と M_{k-1} のCholesky分解である。詳細は文献(46) (47) に詳しい。

UKFの交通流問題への適用は始まったばかりである。目下の所モデルパラメータの同定問題への適用に限られている⁽⁴⁸⁾。しかしながら、従来例えばOD旅行時間などの推定においては、微係数演算の制約から自己回帰的な線形モデルを用いて状態方程式を記述することが多かったが、微係数演算からの解放はより複雑なモデル構造の採用を可能とし、近似精度の高さも保証されているので今後多く使用されるものと期待されている。

3-3 デュアル・カルマンフィルター (DKF)

マクロ交通流モデルに含まれているモデルパラメータは解析に先立って外生的に求めておくのが通常である。従来、モデルパラメータを内生的に求める場合には、未知パラメータを状態変数として追加処理することが一般的に行われてきた^(1, 49)。未知パラメータに関する状態方程式をもととの方程式と

は別立てとし、二つの状態方程式と一つの計測方程式からなる構造としたデュアル・カルマンフィルタも提案されている⁴⁷⁾。もともとの状態変数と未知パラメータを交互に調整するのでBi Level法に似た手法と言える。感知器データやプローブ車データを計測変数とし、OD交通量(交差点分岐率)と交通状態(密度、平均速度)の二組の状態変数を同時推定する手法として有望視されている。

4. 交通流のフィードバック推定

4-1 交通状態の推定

交通現象をKFTによって表現し動的な交通変動を推定する試みは、既に1970年代初頭にGazisら^{50,51)}やNahiri⁵²⁾が、道路区間内に存在する車の台数を状態変数とするとともに車両感知器によって計測された地点速度や道路両端部における交通量データを計測変数として交通密度や空間平均速度を推定する手法の定式化を行っている。Cremer¹⁾は、Payne¹³⁾によって提案された高次マクロモデルを改良したモデル¹⁵⁾をKFTの状態方程式とし、交通密度と空間平均速度を状態変数、車両感知器データの交通量と地点速度を計測変数とした定式化を行うとともに、解の安定性やパラメータの同定に関する議論を行うなど交通状態のフィードバック推定に関する基礎を確立した。1980年代末からは高次マクロモデルに修正が提案されるとともに実道路網への適用が行われた^{16,53)}。Lanら⁵⁴⁾は高速道路における交通需要の予測に適用した。また、Baysian推定とKFTを組み合わせて高速道路の交通状態を推定する手法がWhittakerら⁵⁵⁾によって提案されている。Wangら⁵⁶⁾は、EKFを用いた一般化を行っている。

Pourmoallemら⁵⁷⁾は、状態および計測の両方程式をニューラルネットワーク(NN)モデルで表現することを試みている。また、Nanthawichitら⁵⁸⁾は、高速道路の単路区間を対象としてプローブ車データと車両感知器データを交通流理論に則り統合的に計測方程式に取り込んだEKFの定式化を行い交通密度や空間平均速度の推定を行っている。

4-2 OD交通量、OD旅行時間の推定

リンク交通量からOD交通量を推定する試みは静的な推定に限らず、動的な推定を含め非常に多くなされているが、KFTを用いた研究も数多くなされている。Cremerら^{59,60)}は、単独交差点を対象として、制約付き最小二乗法等他の手法との比較を行ってKFTに基づく手法の優位性を検証している。

Okutani⁶¹⁾は街路網を対象としてリンク交通量からOD交通量の推定を行っている。Ashokら⁶²⁾は、高速道路を対象としてリンク交通量を計測変数としたKFTの定式化を行っているが、前のステップでの推定量との差を状態変数としている。Dixonら⁶³⁾は、AVIデータとリンク交通量データを組み合わせたOD交通量推定を試みている。

リンク旅行時間やOD旅行時間にもさまざまな手法が提案されているが、KFTの適用性に関しても多く研究がなされている。Chenら^{64,65)}のモデルでは状態方程式を自己帰帰モデル構造として5分先の短期予測モデルを作成している。日変動特性を考慮した旅行時間推定法がKwonら⁶⁶⁾によって提案されている。Nanthawichitら⁶⁷⁾は、交通状態(密度と空間平均速度)をKFTによって推定した後、空間平均速度から旅行時間を推定法が、自己帰帰的なKFTモデルより優れていると主張している。OD交通量とOD旅行時間を状態変数とし、感知器データを計測変数としたKFTの両方程式をNNモデルで表現しOD交通量とOD旅行時間の同時推定を行うモデルがSuzukiら^{68,69)}によって提案されている。

5. あとがき

限られた計測情報から全体像を把握しようとする試みは、「群盲像をなでる」に似て多くの制約と困難を伴う。現象を正確に計測するハードの技術と並んで計測情報を分析するソフトの技術が重要である。Cremer¹⁾らによって提案されたフィードバック推定法はマクロ交通流モデルとKFTを主な構成要素としているが、1990年代中期以後、マクロ交通流モデルにおいては、高次項を有するマクロモデルに関する論争を経て、単純モデルではCTM(Cell Transmission Model)、高次モデルでは、Gas kineticモデルに基づくHelbingモデルなどが提案されている。KFTにおいても、Taylor展開の2次近似に基づくUnscentedカルマンフィルタが提案され、演算精度のみならず微分演算を伴わない操作性の良さから注目されている。

計測データに関しても、わが国では車両感知器データは質、量ともに豊富であるが、必ずしも計測された情報が十分に活用できておらず情報抽出技術の高度化が求められている。また、各種のプローブ車データやAVIデータ、あるいは気象データや経済データなどの融合化による効果も期待されている。

運転者の挙動を完全に表現する交通流モデルの実

現はきわめて困難である。実測データに基づいてモデルの推定誤差を補正するフィードバック推定法において、分析モデルの高度化や計測データの多様化を反映するために、推定・予測法のさらなる進化が求められている。

参考文献

- 1) Cremer M.: Der Verkehrsfluss auf Schnellstrassen, Springer Verlag, New York, pp. 11-84, 1979
- 2) R. Kuehne et al.: Continuum Flow Models in Revised Monograph on Traffic Flow Theory A State of the Art Report, FHWA, Chap. 5, 1997 (Not published)
- 3) Helbing D.: Verkehrsdynamik Neue physikalische Modellierungskonzepte, Springer, Berlin, pp. 135-175, 1997
- 4) Hoogendoorn S. P.: Multiclass Continuum Modelling of Multilane Traffic Flow PhD thesis, Delft Univ., the Netherlands, pp. 13-42, 1999
- 5) Lebacque, J. P. and J. B. Lesort: Macroscopic Traffic Flow Models A Question of Order. Proceedings of the 14th Intrn. Symp. Transportation and Traffic Theory, Jerusalem, Israel, pp. 3-25, 1999
- 6) Lighthill M. J. and G. B. Whitham: On kinetic Waves II: A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. Proc. Royal Society, Series A, Vol. 229, No. 1178, pp. 317-345, 1955
- 7) Richards P. I.: Shock Waves on the Highway. Oper. Res., 4(1), pp. 42-51, 1956
- 8) Michalopoulos P. G.: Dynamic Freeway Simulation Program for Personal Computers, Transp. Res. Rec. 971, TRB, pp. 68-79, 1984
- 9) Daganzo C.: Requiem for Second Order Fluid Approximations of Traffic Flow. Transp. Res., Vol. 29B, No. 4, pp. 277-286, 1995
- 10) Daganzo C. F.: The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory, Transp. Res., Vol. 28B, No. 4, pp. 269-287, 1994
- 11) 桑原、吉井、堀口「ブロック密度法を用いた交通流の表現方法について」『交通工学』Vol. 32, No. 4, pp. 39-44, 1997年
- 12) Lebacque J. P.: The Godunov Scheme and What It Means for First Order Traffic Flow Models, Proc. 13th Intrn. Symp. Transportation and Traffic Theory, pp. 647-677, 1996
- 13) Payne H. J.: Models of Freeway Traffic and Control Simulation Council Proc. Mathematics of Public Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 51-61, 1971
- 14) Gerlough D. L. and M. J. Huber: Chapter 7 in Traffic Flow Theory A Monograph, Special Report 165, TRB, 1975
- 15) Papageorgiou M. et al.: Macroscopic Modeling of Traffic Flow on the Boulevard Peripherique in Paris, Transp. Res., Vol. 23B, No. 1, pp. 29-47, 1989
- 16) Cremer, M. and A. D. May: An Extended Traffic Flow Model for Inner Urban Freeways. Proc. 5th IFAC/IFIP/IFORS Intrn. Conf. on Control in Transportation Systems, pp. 239-244, 1986
- 17) Ross P.: Traffic Dynamics, Transp. Res., Vol. 22B, No. 6, pp. 421-435, 1988
- 18) Ross P.: Some Properties of Macroscopic Traffic Models, Transp. Res. Rec. 1194, TRB, pp. 129-134, 1988
- 19) Michalopoulos P. G. et al.: Continuum Modeling of Traffic Dynamics. Proc. 2nd Intrn. Conf. Applications of Advanced Technology in Transportation Eng., pp. 36-40, 1991
- 20) Michalopoulos P. G. et al.: Development of an Improved High Order Continuum Traffic Flow Model, Transp. Res. Rec. 1365, TRB, pp. 125-132, 1992
- 21) Michalopoulos P. G., et al.: Continuum Modelling of Traffic Dynamics for Congested Freeways, Transp., Res., Vol. 27B, No. 4, pp. 315-332, 1993
- 22) Lyrintzis A. S., P. Yi, P. G. Michalopoulos et al.: Advanced Continuum Traffic Flow Models for Congested Freeways Jour. Transp. Eng., Vol. 120, No. 3, pp. 461-477, 1994
- 23) Lyrintzis A. S., G. Liu and P. G. Michalopoulos: Development and Comparative Evaluation of High Order Traffic Flow Models, Transp. Res. Rec. 1457, TRB, pp. 174-183, 1994
- 24) Liu G., A. S. Lyrintzis and P. G. Michalopoulos:

- Improved High Order Model for Freeway Traffic Flow ,Transp .Res .Rec .1644 ,TRB ,pp . 37 46 , 1998
- 25) Liu G . A S .Lyrintzis and P .G .Michalopoulos: Numerical Simulation of Freeway Traffic Flow , Jour . Transp . Eng . , Vol .123 , No .6 , pp 503 513 , 1994
- 26) Kuehne R .D .: Macroscopic Freeway Model for Dense Traffic - Stop Start Waves and Incident Detection , Proc .9th Intrn . Symp . Transportation and Traffic Theory ,VNU Science Press , Utrecht , pp 21 42 , 1984
- 27) B .S .Kerner and P .Konhaeuser: Cluster Effect in Initially Homogeneous Traffic Flow ,Physical Review E , Vol .48 , pp 2335 2338 , 1993
- 28) Del Castillo et al .: A Formulation for the Reaction Time of Traffic Flow Models . Proc .12th Intrn . Symp . Transportation and Traffic Theory , Berkeley , 1993
- 29) Papageorgiou M .: Some Remarks on Macroscopic Traffic Flow Modelling , Transp . Res . , Vol . 32A , No 5 , pp 323 329 , 1998
- 30) Prigogine I . and R .Herman: Kinetic Theory of Vehicular Traffic , Elsevier , New York , 1971
- 31) Paveri Fontana S .L .: On Boltzmann Like Treatments for Traffic Flow: A Critical Review of the Basic Model and an Alternative Proposal for Dilute Traffic Analysis ,Transp .Res . ,Vol . 9B , pp 225 235 , 1975
- 32) Phillips , W . F .: A New Continuum Model Obtained from Kinetic Theory .IEEE Trans . on Automatic Control AC 23 , pp .1032 1036 , 1978
- 33) Helbing D .: Empirical Traffic Data and Their Implications for Traffic Modeling , Physical Review E , Vol 55(1) , pp 25 28 , 1997
- 34) Helbing D .: Fundamentals of Traffic Flow , Physical Review E , Vol 55(3) , pp 3735 3738 , 1997
- 35) M .Schoenhof and Helbing D .: Empirical Features of Congested Traffic States and Their Implications for Traffic Modeling , <http://vwv1sb7.vkw.tu.dresden.de/TrafficForum/>
- 36) B . S . Kerner and H . Rehborn: Experimental Properties of Complexity in Traffic Flow ,Physical Review E ,Vol 53(5) ,pp 4275 4278 ,1996
- 37) B .S .Kerner: The Physics of Traffic ,Springer , New York , pp 87 104 , 2004
- 38) Helbing D .: Gas kinetic Derivation of Navier Stokes Like Traffic Equations ,Physical Review E , Vol 53(3) ,pp 2266 2381 , 1996
- 39) Helbing D .: Gas Kinetic Based Traffic Model Explaining Observed Hysteretic Phase Transition ,Phys .Rev .Letters 81 ,pp 3042 3045 ,1998
- 40) Treiber , M . , A . Hennecke and Helbing D .: Derivation , Properties and Simulation of a Gas Kinetic Based Non Local Traffic Model , Physical Review E , Vol 59 , pp 239 253 , 1999
- 41) Helbing D . , A . Hennecke , V . Shvetsov , and Treiber M .: MASTER Macroscopic Traffic Simulation Based on a Gas Kinetic , Non Local Traffic Model , Transp . Res . , Vol . 35B , pp . 183 211 , 2001
- 42) Helbing , D . and Treiber , M .: Numerical Simulation of Macroscopic Traffic Equations , Computing in Science and Engineering , Vol . 6(5) , pp 89 99 , 1999
- 43) Hoogendoorn S .P et al .: Continuum Modeling of Multiclass Traffic Flow ,Transp .Res . ,Vol . 34B , pp . 123 146 , 2000
- 44) Hoogendoorn S .P . and P .H .L .Bovy: Generic Gas kinetic Traffic Systems Modeling with Applications to Vehicular Traffic Flow ,Transp . Res . , Vol . 35B , pp .317 336 , 2001
- 45) Ngoduy D ,Hoogendoorn S .P and Van Zuylen H . J .: Comparison of Numerical Schemes for Macroscopic Traffic Flow Models , Transp . Res h Rec . TRB , pp 52 61 , 2004
- 46) Julier S .J . et al .: A New Approach for Filtering Nonlinear System . Proc . of the American Control Conference , pp . 1628 1632 , 1995
- 47) Wan E .A et al .: The Unscented Kalman Filter . in Kalman Filtering and Neural Networks , John Wiley and Sons , New York , pp 221 280 , 2001
- 48) Antoniou C . ,Ben Akiva M . and Koutsopoulos , H .N .: On Line Calibration of Traffic Prediction Models . the 84th Annual Meeting of TRB , 2005(CD ROM)

- 49) Cremer M . and M . Papageorgiou:Parameter Identification for a Traffic Flow Model . Automatica ,Vol .17 ,No 6 ,pp 837 843 ,1981
- 50) Gazis D . C . and Knapp C . H .:On Line Estimation of Traffic Densities from Time Series of Flow and Speed Data , Transp . Sci . Vol . 5 , No .8 , 283 301 , 1971
- 51) Szeto M .W and Gazis D .C .:Surveillance and Control of Traffic Systems by Application of Kalman Filtering Techniques ,IBM Research , RC 3690 ,1972
- 52) Nahi , N .E and A .N .Trivedi:Recursive Estimation of Traffic Variables: Section Density and Average Speed . Transportation Science , Vol . 7 , pp 269 286 , 1973
- 53) Kurkjian A . et al .:Estimation of Roadway Traffic Density on Freeways Using Presence Detector Data . Transp . Sci . ,Vol 14 No 3 , pp 232 261 , 1980
- 54) Lan C . J . and S . P . Miaou:Real Time Prediction of Traffic Flows Using Dynamic Generalized Linear Models . Transp . Res . Rec . 1687 , TRB , pp .168 178 , 1999
- 55) Whittaker J . et al .:Tracking and Predicting a Network Traffic Process . Intrn . Jour . Forecasting , Vol . 13 , pp 51 61 , 1997
- 56) Wang , Y . , and Papageorgiou , M .:Real Time Freeway Traffic State Estimation Based on Extended Kalman Filter:A General Approach . Transp . Res . ,Vol 39B ,No .2 ,pp .141 167 ,2005
- 57) Pourmoallem N . ,Nakatsuji T . and Kawamura A .:A Neural Kalman Filtering Method for Estimating Traffic States on Freeways 『土木学会論文集』 No .569 ,IV 36 , JSCE , pp .105 114 , 1997
- 58) C .Nanthawichit ,T .Nakatsuji and H Suzuki: Dynamic Estimation of Traffic States on a Freeway Using Probe Vehicle Data 『土木学会論文集』 JSCE ,No .730/IV 59 ,pp .43 54 ,2003
- 59) Cremer M and Keller H .:Dynamic Identification of Flows from Traffic Counts at Complex Intersections . ,8th Intrnl . Symp . Transportation and Traffic Theory , pp .121 142 , 1981
- 60) Cremer M . , and H . Keller:A New Class of Dynamic Methods for the Identification of Origin Destination Flows . Transp . Res . , Vol . 21B , pp .117 132 , 1987
- 61) Okutani I .:The Kalman Filtering Approaches in Some Transportation and Traffic Problems , Proc .10th Intrn . Symp . Transportation and Traffic Theory , pp .431 450 , 1987
- 62) Ashok K . and M . E . Ben Akiva:Dynamic Original Destination Matrix Estimation and Prediction for Real Time Traffic Management Systems ,Proc .12th Intrn Symp .Transportation and Traffic Theory , pp .465 484 , 1993
- 63) Dixon M . and L . R . Rilett:Real Time Original Destination Estimation using Automatic Vehicle Identification Data ,Preprint No .00 1590 ,79th Annual Meeting of TRB , 2000(CD ROM)
- 64) Chen M . and S . Chien:Dynamic Freeway Travel Time Prediction With Probe Vehicle Data Link Based Versus Path Based ,Transp . Res . Rec . 1768 , TRB , pp .157 161 , 2001
- 65) Chien S .I . J . and C . M . Kuchipudi:Dynamic Travel Time Prediction with Real Time and Historical Data , Preprint No .02 2548 ,81st Annual Meeting of TRB , 2002(CD ROM)
- 66) Kwon J et al .:Day to Day Travel Time Trends and Travel Time Prediction from Loop Detector Data . Transp . Res . Rec . 1717 , TRB , pp .120 129 , 2000
- 67) Nanthawichit C . ,Nakatsuji T . and H Suzuki: Application of Probe Vehicle Data for Real Time Traffic State Estimation and Short Term Travel Time Prediction on a Freeway ,Transp . Res . Rec . , No .1855 ,pp 49 59 , TRB , 2003
- 68) H Suzuki ,T .Nakatsuji et al .:Dynamic Estimation of Origin Destination Travel Time and Flow on a Long Freeway Corridor Neural Kalman Filter , Transp . Res . Rec . , TRB , No . 1739 , pp .67 75 , 2000
- 69) 鈴木、中辻「フィードバック原理に基づく交通状態推定手法を応用した高速道路上起終点旅行時間の推定」『土木学会論文集』 No .695/IV 54 , pp .137 148、2002年