

I-3 ハイブリッド型交通流シミュレーションモデルの開発と評価

Development and Evaluation of Hybrid Traffic Simulation Model

渋谷 秀悦*

Shuetsu Shibuya

中辻 隆**

Takashi Nakatsuji

加来 照俊***

Terutoshi Kaku

【抄録】個々の車両と区間ごとの両方のパラメータを使用したハイブリッド型の交通流シミュレーションを開発し、高速道路と市街路に適用、検証を行った。K-V曲線など観測が必要なパラメータは、最適化手法を用いて求めることで、観測作業を省きかつシミュレーションの精度を向上させた。高速道路での検証は、その再現性の高さのみならず、アルゴリズムの改良により渋滞の伝播、延伸を再現させることが可能となった。市街路での検証は、発進、停止の処理をアルゴリズムに組み込むことで適用が可能となり、車群の動きを実際に近い形で再現できている。

【Abstract】 A hybrid-type traffic simulation model, which originated from the DYNEMO model for a freeway, was developed and applied to a freeway road section and an urban road network. By modifying the original model, the model represented the propagation of congestion and the elongation of queue length on a freeway. By integrating the movements of stop and go at intersections into the original model, the simulation model reconstructed the vehicular platoon on an urban network. Also, some model parameters were identified using an optimization technique without directly measuring traffic flows. This also served to improve the simulation precision.

【キーワード】ハイブリッド、ダイネモ、K-V曲線、最適化

【Keywords】 hybrid, DYNEMO, K-Vcurve, optimization

1. はじめに

現在、交通流シミュレーションは交通現象解析や交通状態予測のために数多く開発、適用されているが、これらはその基本的概念によりマイクロモデルとマクロモデルに大別される。

マイクロモデルでは、Gazisら¹⁾による追従理論などをベースとして、INTRAS²⁾を始め多くのモデルが開発されている。その中でもNETSIM³⁾が国内外で広く利用され、国内でもこのモデルをベースとして研究、開発が進められているものがある。マイクロ

モデルは個々の車両データが得られる反面、計算時間と記憶容量を要する。そのため、多数の交差点を配しているような大規模なネットワークでのシミュレーションには不向きである。

一方マクロモデルは、交通流を数値的に捉え、交通量などマクロな指標で表すもので、交通量、密度、平均速度の間の関係式（車両保存則、 $Q=KV$ ）により計算されるモデルが一般的である。早くに開発され広く利用されたTRANSYT⁴⁾は交通量を基準とした計算と交通流の拡散を取り入れているのが特徴

*学生員、工修、北海道大学大学院工学研究科土木工学専攻（札幌市北区北13条西8丁目、TEL 011-706-6214）

**正員、工博、北海道大学工学部土木工学科（札幌市北区北13条西8丁目、TEL 011-706-6215, FAX 011-726-2296）

***正員、工博、北海道工業大学土木工学科（札幌市手稲区前田7条15丁目4-1、TEL 011-681-2161）

であるが、自由流のみで有効であったモデルである。他に代表的なモデルとしては、速度式に密度変動や定常状態への緩和を加えた Payne によるモデル⁵⁾、Payne のモデルを拡張した Cremer モデル⁶⁾などが挙げられる。また独自に国内でも経路選択を主眼においたブロック密度法⁷⁾、BOX モデル⁸⁾、DYTAM-I⁹⁾などが開発されている。

マクロモデルは、単位区間ごとにのみパラメータを持つので計算時間が短く大規模なネットワークに適している反面、各車両ごとにはデータが得られないという弱点を持ち合わせている。

本研究では、ミクロモデルとマクロモデル双方の概念を含んだハイブリッド型の交通流シミュレーションを開発することによって大規模ネットワークに適用可能で演算能力の高いシミュレーションを実現している。

現在までに開発されているハイブリッド型のモデルは少ないが、その中で高速道路用に DYNEMO¹⁰⁾¹¹⁾が開発された。我が国でも街路用の AVENUE¹²⁾が開発されているが、このモデルでは個々の車両の位置情報を正確には表現していない。

ハイブリッド型モデルはミクロモデルとマクロモデルの弱点を補うことによって、中規模や大規模なネットワークに対しても個々の車両の情報を保持しながらシミュレーションを行うことができるので期待されているが、モデル構造に未だ改良の余地があるうえ、モデルパラメータへの依存性、あるいは処理能力に対して必ずしも評価が定かではない。

本研究では DYNEMO モデルをベースとしたハイブリッドモデルの作成と改良を行い、モデルパラメータの同定法の確立などによりハイブリッドシミュレーションモデルの評価を行った。

2. ハイブリッドモデル

2.1 DYNEMO モデル

本研究では、高速道路網のために設計された DYNEMO (Dynamic Network Model) をその基本として開発を行った。以下にこのモデルの手法とその概要について述べる。

シミュレーションを行う対象となる 1 本の路線を、一定距離 l のセグメント $S_i (i=1, \dots, N)$ に分割して計

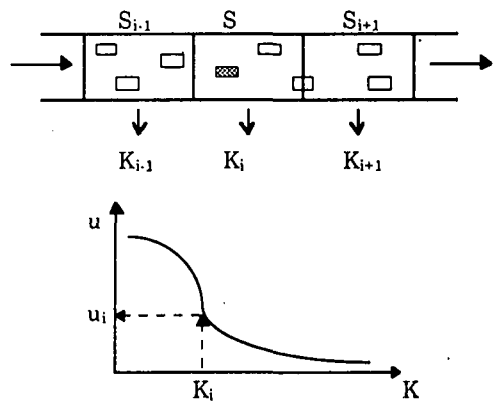


図-1 DYNEMO のマクロ変数算定

算の際の基本単位とする。それぞれの S_i には、時刻 t におけるセグメントごとの車両台数 (密度) K_i と空間平均速度 u_i がパラメータとして保持されている。これらの値の算出は、各タイムインターバル Δt の最初に各セグメントの車両台数を数え上げ、その値を交通密度とし、 $K-V$ 曲線から空間平均速度を得ている (図-1)。

DYNEMO ではあらかじめ観測を行い、 $K-V$ 曲線を求めておく必要があり、次式で定義される鐘型曲線を使用している。

$$V = V_f e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{K}{K_0} \right)^2} \quad (1)$$

V_f は自由速度、 K_0 は臨界密度を示す。

速度にはセグメントの仮定速度と車両の仮定速度が存在する。セグメントの仮定速度とは、その密度で運転者が走行しようとする望んでいる速度のことを指す。

DYNEMO では、自由流と渋滞流とで異なるアルゴリズムに従ってセグメントの仮定速度を計算している。自由流では、 $K-V$ 曲線式を平均値 (図-2 中の実線) として、車両ごとに正規乱数で設定された傾向値 δ に応じて、予め定義された最低速度 u_i から最高速度 \bar{u}_i までの範囲内で分布させることで、仮定速度 \hat{u}_i が決定されている (図-2)。

$$\hat{u}_i = \bar{u}_i + \frac{v_\delta - v_0}{v_1 - v_0} \cdot (\bar{u}_i - u_i) \quad (2)$$

v_δ , v_0 , v_1 はそれぞれ $K \rightarrow 0$ における、計算の対象となる車両、 $\delta=0$ の車両、 $\delta=1$ の車両の速度を示す。

一方渋滞流では、各車両は自由な走行に対して制

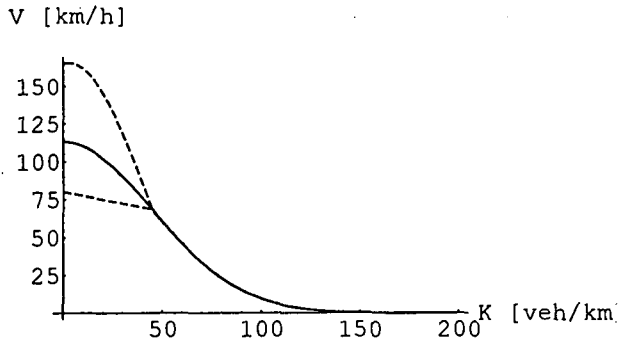


図-2 K-V曲線(DYNEMO)

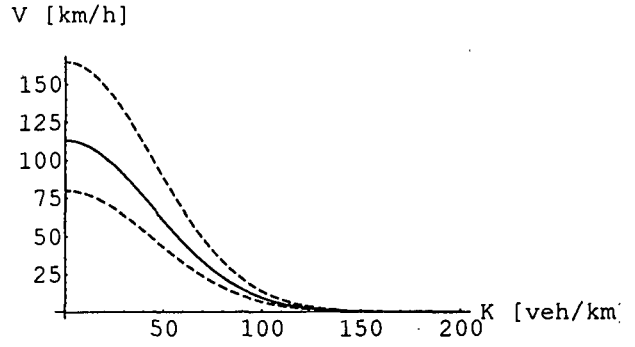


図-3 K-V曲線(Hybrid)

限を受けるといふ仮定から、全ての車両が δ に関係なく K-V 曲線に従って平均速度 u_i が仮定速度となる。

$$\hat{u}_i = u_i \quad (3)$$

各車両の仮定速度は、その車両が現在走行しているセグメントの仮定速度とその前方にあるセグメントの仮定速度の、車両位置 x による加重平均である。

$$\hat{u}_i^x = \left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot \hat{u}_i + \frac{x}{l} \cdot \hat{u}_{i+1} \quad (4)$$

この車両仮想速度から最大加速度を考慮して各車両の速度、位置を算出し、車両データを更新する。

$$u^{(t+\Delta t)} = \min \left\{ v_\delta, u^{(t)} + b_{\max} \cdot \frac{\hat{u}_i^x - u^{(t)}}{v_1} \cdot \Delta t \right\}, \hat{u}_i^x > u^{(t)} \quad (5)$$

$$u^{(t+\Delta t)} = \max \left\{ \hat{u}_i^x, u^{(t)} + b_{\min} \cdot \frac{u^{(t)} - \hat{u}_i^x}{v_1} \cdot \Delta t \right\}, \hat{u}_i^x \leq u^{(t)} \quad (6)$$

b は加速度の最大値、最小値を示す。

すなわち、DYNEMO モデルでは、セグメントごとの空間平均速度から交通密度、そしてタイムインターバル後の個々の車両のデータを決定して、その後個々の車両の位置をセグメントのデータに反映させることによって、真の意味でのハイブリッドモデルを実現している。

2. 2 DYNEMO モデルの改良

DYNEMO モデルでは、渋滞流においては車両は均一速度になるという考えから式(3)が用いられている。しかし実際には、渋滞流では必ずしも均一速度は実現されず速度のばらつきが見られることから、

次のようにモデルの改良を行った。

DYNEMO では図-2 に示されているように、自由流でのみセグメントの仮定速度における最低速度 \underline{u}_i と最高速度 \bar{u}_i が次式で定義されている。

$$\underline{u}_i = v_0 - \frac{v_0 - u_{opt}}{K_{opt}} \cdot K_i \quad (7)$$

$$\bar{u}_i = \underline{u}_i + \frac{v_1 - v_0}{E(V_f) - v_0} \cdot (u_i - \underline{u}_i) \quad (8)$$

K_{opt}, u_{opt} はそれぞれ臨界密度、臨界速度を、 $E(V_f)$ は自由速度の期待値を示す。

この式では、渋滞流の時運転者の速度傾向を考慮せずにセグメントの仮定速度を決定しているため、大きな速度変動が見られない。そこで本研究のハイブリッドモデルでは、渋滞流の交通流を実際の状況により近く表現するために、全ての交通密度の場合において次式を式(7),(8)に替えて、次式を新たに定義した。

$$\underline{u}_i = v_0 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{K}{K_{opt}} \right)^2} \quad (9)$$

$$\bar{u}_i = v_1 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{K}{K_{opt}} \right)^2} \quad (10)$$

この式から描かれる K-V 曲線を図-3 に示す。

さらに、渋滞流での速度変動が見られるように、交通流の変動は密度変動に対して敏感であるとの仮定から、次式に示すように各車両の仮定速度式(4)に交通状態の予想項を加えた。

$$\hat{u}_i^x = \left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot \hat{u}_i + \frac{x}{l} \cdot \hat{u}_{i+1} - \frac{\Delta t}{l} \cdot \frac{k_v}{k_r} \cdot \frac{K_{i+1} - K_i}{K_i} \quad (11)$$

k_v は予想係数、 k_r は緩和時間を示す。

以上のように改良したモデルを以下、Hybrid と書き表すこととする。

2. 3 街路用ハイブリッドモデル

ハイブリッドモデルは、個々の車両の出力値を持ち、かつ計算時間が短いという特長から、市街路ネットワークのシミュレーションにも適している。そこで、本研究のハイブリッドモデルを拡張して街路への適用を行った。

市街路対応のシミュレーションを開発する際、右左折を含む交差点における処理が問題となる。

本研究のハイブリッドモデルでは、マクロの計算も含まれているため、進行方向の信号が赤の時には、交差点内のセグメント（停止線の先）を仮想的に渋滞密度に設定することで、擬似的に各車両に停止の挙動を実現させている。

右左折に関してはモデルの性質から、交差点入り口で右左折率に応じて車両を分配することも、各車両に傾向値と同様に経路を示すパラメータを予め与えて、車両ごとにそのパラメータに従い車両の進行方向を決定することも可能である。今回は前者を用いている。

交差点内での車両の移動に関しては、図-4に示すように交差点内に設定した流入リンクと流出リンクを連絡するセグメントを配置し、これを経由して受け渡している。この連絡セグメントは左折、直進、右折のそれぞれに取り付けられ、この区間では前後のセグメントのマクロデータを使わず車両データのみでミクロ的に移動を行い、対向車によるブロッキングなど個々の車両に対する処理に対応させている。

また、車線変更や追い越しなど、セグメント内での個々の車両による影響の取り扱いは、セグメントを1車線ごとではなく複数の車線もまとめて定義しているため特に考慮してはいない。

DYNEMO や本研究でのハイブリッドモデルは、個々の車両とセグメントの両方においてパラメータを保持し、アルゴリズムに関しても双方のパラメータによる影響を考慮して計算を行っている。これらの点から見て、他のハイブリッド型モデルに比べて、よりハイブリッドの意味において純粋に近いモデルを採用していると言える。

3. パラメータ同定

DYNEMO モデルではK-V曲線が重要な役割を

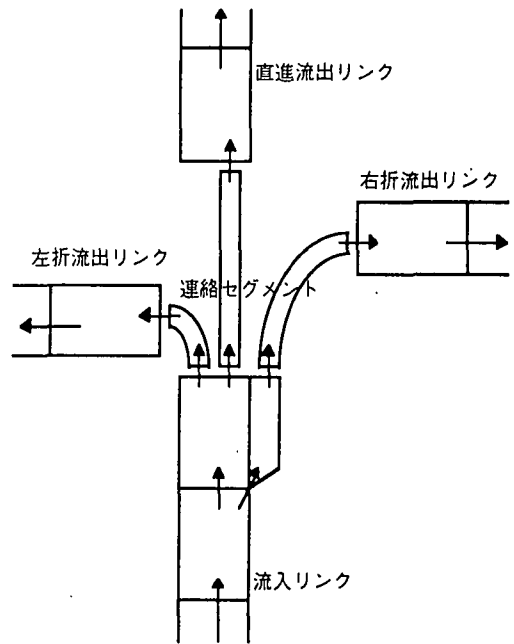


図-4 交差点付近のセグメント構造

果たしている。すなわち、マクロモデルやハイブリッドモデルにおいては、K-V曲線のパラメータの感度が高いと言われており、パラメータの推定精度がシミュレーション結果に大きな影響を及ぼしている。一般的に、K-V曲線は、代表的な道路区間や時間帯におけるビデオ観測を通して密度と速度の観測値を得て、最小自乗法を用いてそのパラメータを推定することが行われてきた。しかしながら、ビデオ観測においては、観測が可能な場所の選択に制約があったり、ビデオデータの編集作業に膨大な労力を要するなど、道路区間や時間帯に応じてきめ細かなK-V曲線の設定を行うには適していない。一方、我が国の高速道路や一般街路においては、多数の車両感知器が設置され、日夜絶え間なく交通量や地点速度などのデータが計測されている。

本研究では、これらの車両感知器データを利用して、K-V曲線のパラメータの同定を行うことを考える。すなわち、ハイブリッドシミュレーションによって推定された観測値点の交通量、あるいは地点平均速度を y 、車両感知器によって実測された値を \hat{y} とすると、それらの誤差を最小とするようパラメータの最適化を行った。すなわち、目的関数として

$$J = \sum_{i=1}^T (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (12)$$

を定義した。こうしたシミュレーションに基づくパラメータの同定では、K-V曲線のパラメータだけでなく、実態観測からは推定困難な他のモデルパラメータも同時に推定できるという長所もある。ここでは、式(1)中の自由速度 V_f 、臨界密度 K_c のK-V曲線パラメータに加え、形状パラメータ α と最低自由速度 v_0 も同定の対象とした。一般的に各パラメータには下限と上限があるので次のような制約条件を設定した。

$$\begin{aligned} \alpha_{\min} &\leq \alpha \leq \alpha_{\max}, K_{opt\min} \leq K_{opt} \leq K_{opt\max} \\ v_{0\min} &\leq v_0 \leq v_{0\max}, V_{f\min} \leq V_f \leq V_{f\max} \\ V_f e^{-\frac{1}{2}} &\leq v_0 \leq V_f \end{aligned} \quad (12)$$

すなわち、ここでの問題は制約条件付きの非線形最適化問題となる。この数値解を求める手法としてここでは、BoxのComplex法¹³⁾を用いた。本手法は、ローカルミニマムに陥らずに最適解を探索する能力に優れていることを最大の特色としている。

4. Hybridモデルの検証

4.1 道央自動車道での検証

まず、パラメータ同定手法を組み込んだHybridモデルの有効性を検証した。シミュレーションの対象区間は、道央自動車道の北広島I.C~恵庭I.C間の苫小牧向き8.0kmの、途中に車両の流出入がない閉区間とした。観測は1993年9月17日の6時30分から7時30分まで3カ所で行い、交通量と時間平均速度を得た。セグメントは500mを16個とし、3地点の観測データの内、流入地点のデータを入力値としてシミュレーションを行い、流出地点での交通量が実測値に合うよう4つのパラメータの調整を行った。

最適化された各パラメータ値の結果から得られるK-V曲線(実線)を図-5に示した。参考のために、ビデオ観測から直接密度と速度を求めて回帰分析により得られたK-V曲線(破線)も示した。ビデオ観測から得られた方は、最適化により得られたのよりも右寄りになった。これは渋滞域での観測データが、自由域のに比べて少なかったためと思われる。

最適化されたパラメータの妥当性を評価するため

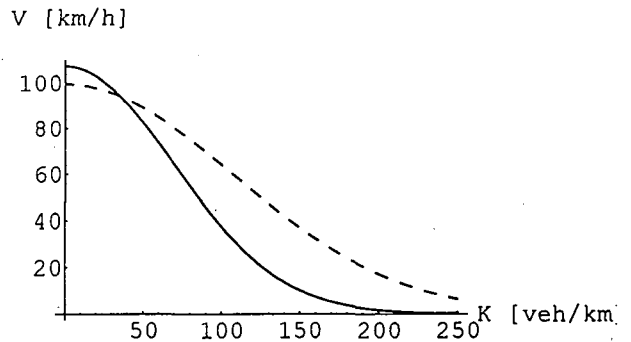


図-5 K-V曲線

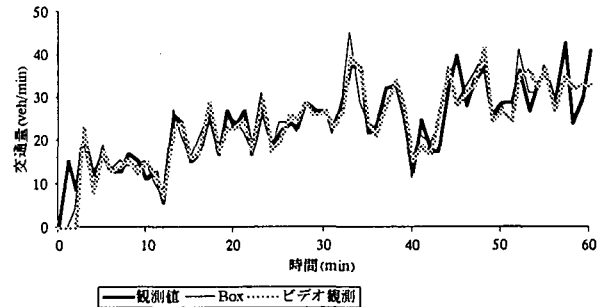


図-6 交通量比較

に、流入点から3.5km先の間差点における交通量で、観測値と推定されたパラメータに基づくシミュレーション値との比較を行った。中間点での交通量の比較グラフを図-6に示す。1分間ごとの交通量にも関わらず、値にあまり大きな違いはなく、概ね観測値をトレースしていると見て取れる。そのため目的関数の値が最適化によってより良くなったのが、交通量では最適化前から適合性が高いために明確には見えていない。

さらに中間地点における時間平均速度のRMS誤差(Root Mean Square=平均2乗誤差)を求めたところ、ビデオ観測からでは12.24kmだったのに対し、Boxでは5.76kmと最適化の有効性が確認できた。

4.2 首都高速道での検証

道央自動車道での観測では、交通量が少なく自由域のデータが多かったため、渋滞域のデータを多く含む交通流に対して同定手法の有効性を評価するために、首都高速道におけるデータを用いて検証を行った。

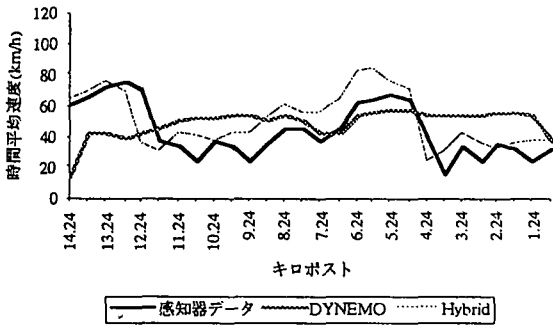


図-7 各地点における時間平均速度比較 (6時10分)

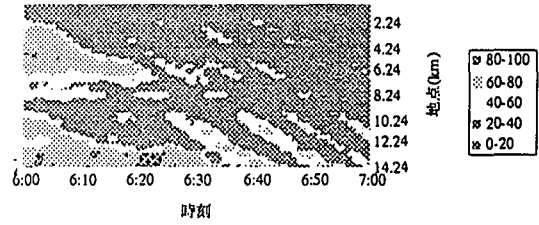


図-8(1) 時間平均速度分布図 (感知器データ) (単位: km/h)

表-1 各時刻ごとの速度のRMS誤差 (単位: km/h)

時刻	DYNEMO	Hybrid
6:10	22.55	13.61
6:20	23.93	17.14
6:30	20.33	21.95
6:40	21.10	15.91
6:50	15.21	14.55
7:00	22.53	15.21

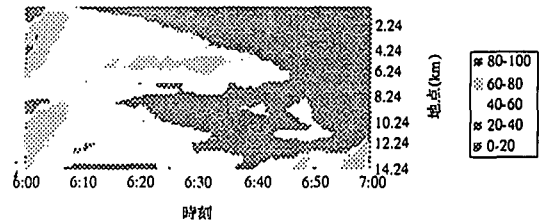


図-8(2) 時間平均速度分布図(DYNEMO) (単位: km/h)

また、2.2で述べたモデルの改良が渋滞域での精度向上を目的としているので、その有効性を調べるためにDYNEMOとの比較を行った。

シミュレーションの対象とした路線は、首都高速神奈川1号横羽線で金港I.C (14.24km地点) から生麦合流点 (9.04km地点) を経由して大師I.C (0.74Km地点) までの全長13.5kmである。この路線を500mのセグメント27個としてシミュレーションを行った。

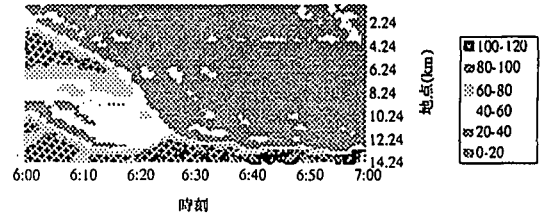


図-8(3) 時間平均速度分布図(Hybrid) (単位: km/h)

入手したデータの内容は、数百メートルおきに配置されている車両感知器より得られる1分毎の地点交通量、時間平均速度、占有率である。このデータから、シミュレーションの条件に合わせるため、入力値をシミュレーションのタイムインターバルである10秒ごとの値に換算してシミュレーションを行った。使用した感知器データは平成5年10月28日の早朝6:00から7:00までの1時間である。

トに車両を発生、消去させている。また、渋滞の発生地点が生麦合流点 (中間点) のみならず大師I.Cの前方でも存在していたため、シミュレーション区間の流出点のデータを考慮する必要があった。そこで、流出点の観測データから流出点前方の交通密度を算定し、入力値に加えることで渋滞流の発生をシミュレーションに取り込んでいる。

この対象路線の区間は、基本的に2車線の1本の路線ではあるが、途中数カ所のオンランプ、オフランプと大黒I.Cからの合流点が路線の途中に存在している。これらの合分流については、観測データから交通量を取り込んで、ランプの存在するセグメン

この検証で入手できたデータは感知器による地点観測データのみなので、自由速度累加曲線、K-V曲線は最適化手法を用いて曲線式を決定した。目的関数は、流出点のデータも入力値として使用してしまっているため、中間点 (7.74km地点) における

値とし、1分間交通量でパラメータの同定を行った。

6時10分での各地点における交通量の比較を図-7に示す。特に1.24~4.24km区間と9.74~11.74区間において渋滞による平均速度の落ち込みをよく追従しており、モデルの改良の効果が確認できる。

また、シミュレーションを開始して10分ごとの時刻断面における、全地点の観測値とシミュレーション値との時間平均速度のRMS誤差を表-1に示す。DYNEMOに比べてHybridの方がおおよそ観測値により近いシミュレーション結果を示している。

また、観測値、DYNEMOによるシミュレーション、Hybridによるシミュレーションの時間-距離軸での平均速度分布図をそれぞれ図-8(1),(2),(3)に示す。この図は、横軸に距離、縦軸に経過時間をとり、等高線グラフを用いて各地点、各時刻での平均速度を20km/hごとに色分けして表現している。この3つの図を見比べると、DYNEMOでもHybridでも観測値のようなはっきりとした粗密波の帯はあまり見られなかったが、渋滞の延伸がDYNEMOでは観測値と大きく異なっているのに対して、Hybridではほぼ同じ形を示していて、モデルの有効性を確認することができる。

4.3 市街路での検証

前節で示したように、本研究でのハイブリッドモデルは渋滞流の表現にも優れているので、その利点を活かして信号交差点を持つ市街路に適用し、検証することを試みた。

実際の交通データによるシミュレーションでは、大きなネットワークになるほどリンク途中からの流出入による影響が大きくなるので、今回は他の街路対応シミュレーションモデルと同じ条件で仮想の入力データを計算し、評価値を比較することでモデルの検討を行うこととした。

比較したシミュレーションモデルは、代表的なマクロモデルであるTRANSYT(リンクごとにパラメータを保持)、CREMERモデル(リンクをセグメントに分割してセグメントごとにパラメータを保持)と代表的なマイクロモデルであるNETSIMの3種類である。

シミュレーション区間は例題として作成されたデ

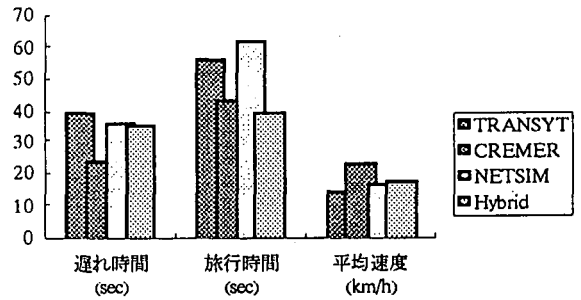


図-9 評価値比較

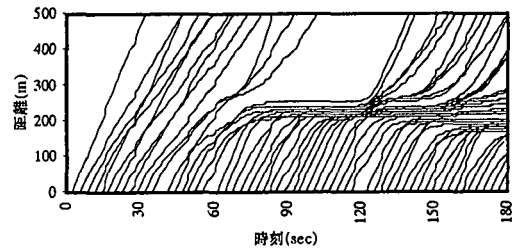


図-10 信号交差点付近における時間距離図

ータで、4枝交差点を2つ連結させた(のべ20リンク)単純なものである。評価値として、旅行時間、遅れ時間、平均速度をそれぞれ算出して比較している(図-9)。予想と違い、マイクロモデルとマクロモデルのちょうど中間の値とはならなかったが、どの評価値でもHybridモデルは他のモデルとの値から大きく外れていることはない。ただ、旅行時間が他のモデルに比べて短く、改良の余地が見られる。

また、ハイブリッドモデルのシミュレーションによる車両の走行軌跡を図-10に示す。単独交差点を250m地点(中間点)に設置し、進行方向に対して青60秒、赤60秒のサイクル長120秒で信号を設定した。信号による減速波、停止、そして発進波が、一般的な観測によるものと同様であるのが見て取れる。走行軌跡が交差しているのは、走行する車両を2車線まとめて計算しているためで、追い越しが発生していると解釈することで問題ないと思われる。

本研究のハイブリッドモデルの特長である計算時間の速さは、マイクロモデルであるNETSIMを100とするとHybridは35と、マクロモデルほどではないがかなり速い結果が得られた。

また、ハイブリッドのもう一つの長所として車両の位置データを持っているので、アニメーションや図-10に示すような時間距離図を出力することが可

能である。

5. まとめと今後の課題

本研究の成果を以下にまとめる。

- 1) 高速道路用に開発された DYNEMO をベースとしたハイブリッドモデルの作成を行った。
- 2) 渋滞域における精度向上を図るために速度モデルを改良した。
- 3) K-V 曲線のパラメータを従来の直接観測する方法に替えて、車両感知器データからシミュレーションと最適化手法を組み合わせる手法を確立した。
- 4) 上記の推定手法は従来の方法では推定できなかった、K-V 曲線以外の他のモデルパラメータの推定も可能にした。
- 5) パラメータの推定は自由流だけでなく渋滞流に対しても精度が良かった。
- 6) 市街地交通流へ適用するため信号交差点処理のモデル化を行った。
- 7) 演算時間がミクロに比べて良かっただけでなく、アニメーションや時間距離図を出力することが可能である。

今後の課題としては、モデルに関しては渋滞流のよりミクロ的な検証で、交通集中渋滞のみならず事故渋滞についての検証を考えている。また今回開発したモデルはマクロのアルゴリズムが主であったので、より車両のミクロ的な挙動の影響を考慮したモデルの改善を目指している。特に粗密流とその伝播を的確に再現できればと考えている。

また、市街路に関してもシミュレーションの比較のみでは不十分と考えられるため、感知器データを用いての検証が考えられるが、できればミクロ的な検証を行いたいので、大規模な観測によりさらに細かいデータが得られればと考えている。

本研究によりハイブリッドモデルの有用性が確認できたので、大規模ネットワークの適用を今後は是非検証したい。

最後に、観測データを提供して下さった首都高速道路公団神奈川管理部に謝意を表します。

参考文献

- 1) Gazis, D.C., Herman, R., and Rothery, R.W. Nonlinear Follow-the Leader Models of Traffic Flow. Operations Research, Vol. 9, pp. 499-505, 1959.
- 2) Wicks, D.A.; Liebermann, E.B. Developing and Testing of INTRAS, a Microscopic Freeway Simulation Model, Federal Highway Administration, Rept. FHWA-RD-76-76, 1977
- 3) TRAF-NETSIM User's Manual, FHWA, 1989
- 4) TRANSYT-7F User's Manual, FHWA, 1984
- 5) Payne, H. J. FREFLO: A Macroscopic Simulation Model of Freeway Traffic. Transp. Res. Rec. 722, Urban System Operations, National Acad. of Sciences, Washington D.C., pp.68-77, 1979
- 6) M. Cremer, A Macroscopic Simulation Model of Urban Traffic Flow and its Application for Traffic Control Systems, 2nd Intern. CARDI Semi. on urban Traffic Networks, 1992
- 7) 桑原雅夫, 上田功, 赤羽弘和, 森田紳之; “都市内高速道路を対象とした経路選択機能を持つネットワークシミュレーションモデルの開発”, 交通工学, Vol. 28, 1993. 7
- 8) 飯田恭敬, 内田敬, 藤井聡, 鷹尾和亨; “渋滞の延伸を考慮した動的交通流シミュレーションモデル”, 土木計画学研究講演集, No.14 (1), 1991
- 9) 木戸伴雄, 池之上慶一郎, 斉藤威; “街路網における経路探索・交通配分モデル(DYTAM-1)”, 科学警察研究所報告交通編, Vol. 19, No. 1, pp. 1-10, 1978. 2
- 10) Thomas Schwerdtfeger. DYNEMO: A Model for the Simulation of Traffic Flow in Motorway Networks, Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp.65-87, 1984
- 11) Rainer Wiedemann, Thomas Schwerdtfeger. Makroskopisches Simulationsmodell für Schnellstraßennetze mit Berücksichtigung von Einzelfahrzeugen (DYNEMO), Heft 500, 1987
- 12) 堀口良太, 片倉正彦, 桑原雅夫; “都市街路網の交通流シミュレータ-AVENUE-の開発”, 交通工学研究発表会論文集, No.13, pp. 33-36, 1993. 11
- 13) James L. Kuester, Joe H. Mize: Optimization Techniques with Fortran