

冬期追従挙動モデルによる札幌都市圏冬期交通流の再現

Reproduction of the Winter Traffic Flow in Urban Area of Sapporo City
by the Winter Car-following Behavior Model

宗広 一徳* 高橋 尚人** 浅野 基樹*** 中辻 隆****

Kazunori MUNEHIRO, Naoto TAKAHASHI, Motoki ASANO, and Takashi NAKATSUJI

北海道等の積雪寒冷地においては、冬期間の降積雪や雪氷路面の出現により、一般交通車両の旅行速度が低下し、特に都市圏では交通渋滞に至る等の大きな経済的損失を被っている。これに対し、道路管理者が冬期道路交通状況の実態を正確に把握すると共に、予め冬期道路交通状況を予測評価する手法の確立が求められている。筆者らは、航空写真解析やプローブカー調査のデータ解析を行うと共に、交通流マイクロシミュレーションによる冬期交通流及び道路網の予測評価について研究している。本報告では、交通流マイクロシミュレーションの冬期追従挙動モデルの構築、札幌市都心部の道路網を対象とし、同追従挙動モデルによる車両挙動の表現及び冬期道路交通流の現況の再現結果について報告する。本報告の骨子は、以下により構成されている。

1. 苫小牧寒地試験道路における追従挙動走行実験データ並びに航空写真解析データを用いた交通流マイクロシミュレーションの冬期追従挙動モデルの構築
 2. 交通流マイクロシミュレーションの冬期追従挙動モデルを用いた冬期交通流の現況の再現結果
 3. 交通流マイクロシミュレーションによる冬期交通流の現況の再現結果に関し、タクシーGPSデータによる検証
- 《キーワード：交通流マイクロシミュレーション、冬期交通流、追従挙動、プローブカー》

In a snowy and cold region like Hokkaido of Japan, a large economical loss can result from reduction of traffic speed is subjected by traffic jam through appearance of snowy-icy road surface during winter. To prevent these situations, the road administrator should have a good grasp of the correct situation for winter road traffic and establish methods that could predict and evaluate these situations. Our research involves analyzing of traffic data using aerial photographs and probe-car surveys with taxi GPS data. In addition, we are studying about prediction and evaluation of urban road network and winter traffic flow by traffic micro simulation. We are reporting the result of our research which shows establishment of winter traffic simulation model with car-following behavior, and traffic behavior and reproduction of winter traffic flow by traffic micro simulation in urban area of Sapporo City.

The report consists of following main points.

1. Establishment of car-following equation model for traffic micro simulation, using data of car-following behavior experiment at the Tomakomai Winter Test Truck and aerial photographs.
 2. Reproduction of present winter traffic flow by car-following equation model of traffic micro simulation.
 3. Verification of the reproduction for winter traffic flow by traffic micro simulation, through comparing probe-car surveys with taxi GPS data.
- 《Keywords: traffic micro simulation, winter traffic flow, car-following behavior, probe-car surveys》

1. はじめに

積雪寒冷地においては、冬期間の降積雪並びに雪氷路面の出現により、一般交通車両の旅行速度が低下し、特に都市圏では交通渋滞に至る等の大きな経済的損失を被っている。これに対し、道路管理者が冬期道路交通状況の実態を正確に把握すると共に、予め冬期道路交通状況を予測評価する手法の確立が求められている。筆者らは、各種の調査手法（例えば、冬期交通センサス、交通量常時観測調査、プローブカー調査、航空写真解析）により冬期交通実態をより正確に把握すると共に、交通流マイクロシミュレーションによる冬期交通流や道路網の予測評価について研究している。本稿では、これまでの追従挙動走行実験や航空写真解析により得た知見を踏まえ、交通流マイクロシミュレーションの冬期追従挙動モデルの構築を試みたこと、札幌市中心部の道路網をケーススタディとし、冬期追従挙動モデルによる車両挙動の表現と冬期道路交通現況の再現、及び同再現結果とプローブカーデータとの比較検討について、報告する。

2. 冬期追従挙動モデル構築へのアプローチ

(1) 交通流マイクロシミュレーションの適用

現存の道路網や交差点等に関し、新たな交通運用施策（交通規制、信号現示の変更等）や道路整備施策（車線拡幅、交差点改良、新たな施設の設置等）の実施を検討する際、同導入効果や現況道路に対する影響を把握するため、施策実施に伴う交通状況の変化を事前に予測することが必要とされている。このことについては、従来、交通量配分等のマクロ的な手法により、交通状況を予測することが実施されてきた。

これに対し、交通流マイクロシミュレーションは、信号や右折レーンの有無等の詳細な交通要因を明示的並びに直接的に取り扱うことができ、シミュレーション結果について画像を通じて分かりやすいアウトプットを得られること等から、新しい交通予測手法として期待されている。すでに、FHWA（米国連邦道路庁）による「NETSIM」をはじめ、官民学の関係機関により、使用目的に応じて幾つかのシミュレーションモデルの開発が進められている。しかしながら、積雪寒冷地の道路交通状況（例えば、路面状態、車両挙動）を考慮したシミュレーションモデルの検討は、これまでほとんど行われていないのが実状である。筆者らは、積雪寒冷地の道路交通状況を考慮したシミュレーションの冬期追従挙動モデルに関する研究開発を進めているが、本モデルの適用により期待される効果例を列挙すると以下の通りである。

積雪寒冷地の道路状況に対応した車両挙動及び冬期交通流に関し、設定モデルにより1台毎の車両を発生させて表現することにより、パソコン画像を通じた分かりやすいアウトプットを得る。

信号や右折レーンの有無や路上駐車状況等の詳細な交通要因を反映する。

最大滞留長、交通量、平均旅行速度等の集計を通じ、冬期交通流及び冬期交通渋滞状況を把握すると共に、夏期の道路交通状況との比較及び評価を行う。

冬期道路管理状態（路面状態や除排雪状況等）に応じた道路交通状況を予測評価する。

対象エリア内に新たな交通運用施策や道路整備施策の導入を検討する際、道路交通状況の変動に関し、積雪寒冷地における冬期交通条件を踏まえた上で、効率的に予測評価する。

(2) モデル構築へのアプローチ

交通流マイクロシミュレーションの冬期追従挙動モデル構築のため、筆者らはこれまで冬期道路交通に関する研究の一環として「追従挙動走行実験」による冬期車両挙動に関する検討⁴⁾、並びに「航空写真解析」による面的な冬期道路交通状況の把握検討³⁾に取り組んできた。その概要は、下記1)及び2)の通りである。

1) 追従挙動走行実験

追従挙動走行実験は、平成12年10月及び平成13年12月に独立行政法人北海道開発土木研究所所有の苫小牧寒地試験道路（北海道苫小牧市柏原、延長2,700m）にて実施した。実験データの取得に際しては、リアルタイムキネマティック測位（RTKGPS：トリブルジャパン社製MS750）により、夏期（路面状態：乾燥）及び冬期（路面状態：凍結及び圧雪）において追従走行する車両の位置、速度、加速度、先行車両と後続車両との反応遅れ時間等を取得した。（表-1参照）



写真 - 1 RTKGPS基地局衛星受信装置



写真 - 2 追従挙動走行実験（冬期：平成13年12月）

2) 航空写真解析

札幌市全域の道路交通状況を面的に把握することを目的とし、同上空から航空写真を撮影し、夏期及び冬期の交通状況に関する解析を行った。(航空写真解析の実施概要については、表 - 1 を参照。) 航空写真は、夏期：平成11年9月21日(火)及び冬期：平成12年2月24日(木)の午前8～9時の間、飛行高度2,000m(縮尺1/12,500の精度)により撮影した。撮影範囲は250km²(札幌市内の全DID地区が含まれる)にて20秒間の時間差により各2枚を撮影した。撮影された航空写真は、20秒間の時間差であることを利用し、各国道路線上の車両(夏期及び冬期：3～4万台)を対象とし、各車両の速度、各路線のセンサス区間毎の平均車両速度等を算出し、冬期渋滞箇所の抽出等に活用した。

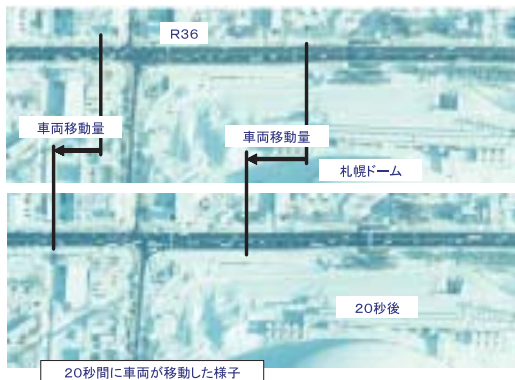


写真 - 3 航空写真の撮影による車両移動量の算出

表 - 1 モデル適用を検討した実験データ

項目	追従挙動走行実験	航空写真解析
取得データ場所	苫小牧寒地試験道路	札幌市上空
実験データ取得日	平成12年10月16～18日 平成13年12月18～19日	平成11年9月21日(火) 平成12年2月24日(木)
データ項目	走行状況	位置、速度、加速度
	車両状況	車頭距離 20秒間隔の各平均速度
	道路状況	各車種、車体長等 (夏期10台、冬期4台) 各路面状態 ・夏期：乾燥 ・冬期：凍結及び圧雪
計測間隔	0.1秒	20秒間隔：2時点
データ取得モード	・正玄半波長、1波長、2波長、3波長の各走行 ・自由走行 ・一定走行 夏期:20,40,60,80km/h 冬期:20,30,40km/h	・夏期及び冬期 ・札幌市上空より撮影した航空写真をもとに車両位置・速度を抽出 ・各3～4万台を解析

3. 冬期追従挙動モデルの検討

(1) 追従方程式の設定

交通流ミクロシミュレーションによる車両挙動の表現としては、一般的に追従方程式が用いられている。既往の研究から代表的な追従方程式⁶⁾としては、リニアモデル、Hermanモデル、ガジスモデル、越モデルの変形式がある。本研究が対象とする積雪

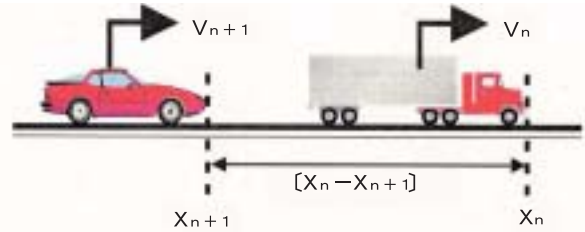


図 - 1 追従走行の模式図

リニアモデル

$$a_{n+1}(t+\Delta) = \alpha[V_n(t) - V_{n+1}(t)]$$

Hermanモデル

$$a_{n+1}(t+\Delta) = \alpha \frac{[V_n(t) - V_{n+1}(t)]}{[X_n(t) - X_{n+1}(t)]}$$

ガジスモデル

$$a_{n+1}(t+\Delta) = \frac{\alpha V_{n+1}^m(t+\Delta)}{[X_n(t) - X_{n+1}(t)]^m} [V_n(t) - V_{n+1}(t)]$$

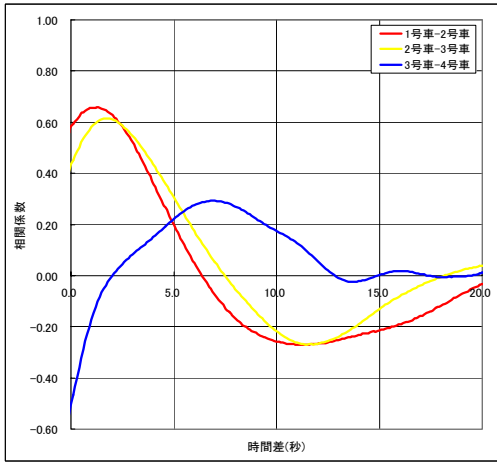
越モデルの変形式

$$a_{n+1}(t) = \frac{\alpha}{[X_n(t-\Delta_1) - L_n - X_{n+1}(t-\Delta_1)]^m} [V_n(t-\Delta_1) - V_{n+1}(t-\Delta_1)] + \frac{\beta}{[X_n(t-\Delta_2) - L_n - X_{n+1}(t-\Delta_2)]^m} \cdot [X_n(t-\Delta_2) - L_n - X_{n+1}(t-\Delta_2) - Sd_{n+1}\{V_{n+1}(t-\Delta_2)\}] + \lambda \cdot [Vd_{n+1} - V_{n+1}(t-\Delta_3)] \cdot \delta$$

ここで、a：加速度、X：位置、V：速度、L：車両の長さ、Vd：希望速度、Sd：希望車間距離、t：時刻、 δ ：反応遅れ時間、 $\Delta_1 \sim \Delta_3$ ：それぞれ速度差・車間距離・希望速度に対する反応遅れ時間、 $\alpha, \beta, \lambda, m$ ：モデルパラメータ

寒冷地における車両挙動に関しては、冬期交通流をミクロ的に的確に表現するとの観点から、先行車両を後方車両が追従走行することを基本として再現することとした。冬期追従走行については、上述の追従挙動走行実験により実証を行った。

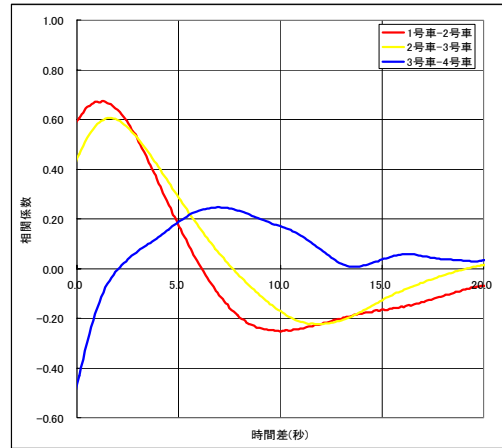
上記～の追従方程式から、同式のパラメータとしては先行車両と追従車両の「速度差」及び「距離差」、追従車両の「速度(自車)」、先行車両と追従車両の「速度差/距離差」、「速度差×速度(自車：追従車両)/距離差」等の適用が考えられる。表-1の追従挙動走行実験のデータ(冬期直線部及び冬期交差点部)に関し、想定されるパラメータと追従挙動データ(追従車両の加速度)との相関係数をグラフ化したところ、図-2(a)～(e)及び図-3(a)～(e)を得た。同グラフから、表-2に示すとおり、「速度差」、「速度差/距離差」、「速度差×速度(自車)/距離差」が他と比べて、追従挙動データ(追従車両の加速度)との相関係数がやや高い結果となった。以上を踏まえ、速度及び車間距離に関するパラメータを含み、かつモデル化の自由度が高いの越モデルの変形式をベースとし、冬期追従挙動のモデル化を試みた。



	1号車-2号車	2号車-3号車	3号車-4号車	平均	標準偏差
max	0.659	0.615	0.293	0.522	0.200
min	-0.271	-0.270	-0.502	-0.348	0.134

図 - 2 (a) 速度差の相関係数

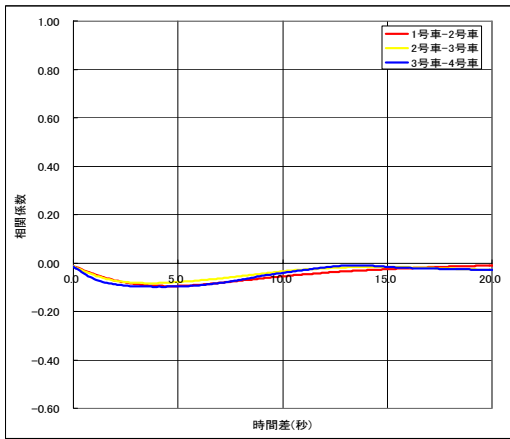
[冬期直線部、20km/h ~ 40km/hの自由走行]



	1号車-2号車	2号車-3号車	3号車-4号車	平均	標準偏差
max	0.673	0.606	0.246	0.508	0.229
min	-0.252	-0.224	-0.466	-0.314	0.132

図 - 2 (d) 速度差 / 距離差の相関係数

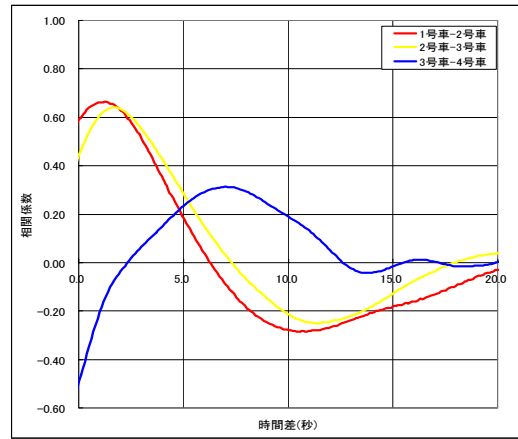
[冬期直線部、20km/h ~ 40km/hの自由走行]



	1号車-2号車	2号車-3号車	3号車-4号車	平均	標準偏差
max	-0.010	-0.015	-0.009	-0.011	0.003
min	-0.095	-0.083	-0.098	-0.092	0.008

図 - 2 (b) 距離差の相関係数

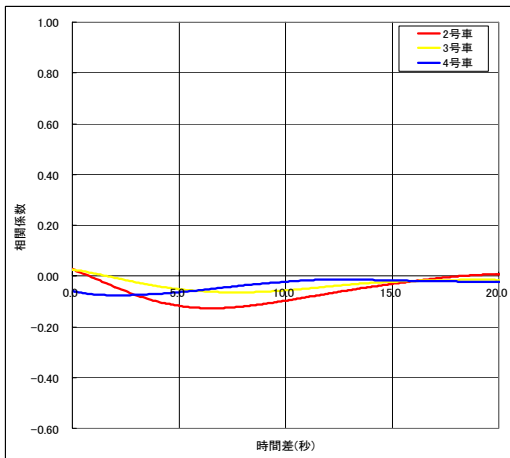
[冬期直線部、20km/h ~ 40km/hの自由走行]



	1号車-2号車	2号車-3号車	3号車-4号車	平均	標準偏差
max	0.664	0.642	0.313	0.540	0.197
min	-0.287	-0.251	-0.493	-0.344	0.130

図 - 2 (e) 速度差 × 速度 (自車) / 距離差の相関係数

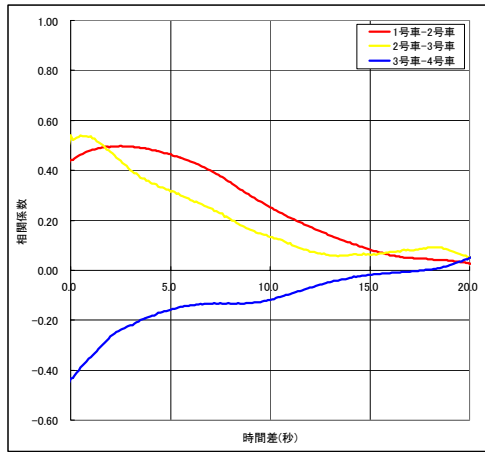
[冬期直線部、20km/h ~ 40km/hの自由走行]



	2号車	3号車	4号車	平均	標準偏差
max	0.026	0.025	-0.013	0.013	0.022
min	-0.127	-0.064	-0.076	-0.089	0.033

図 - 2 (c) 速度差 (自車)の相関係数

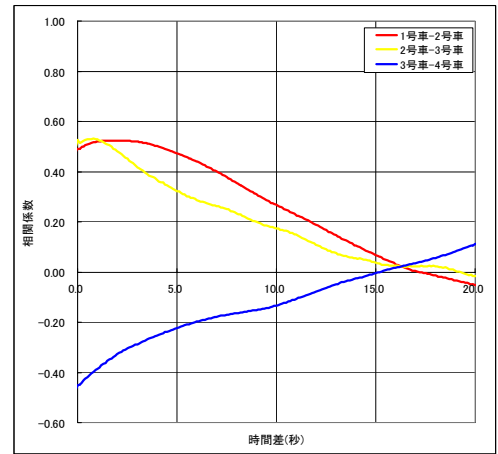
[冬期直線部、20km/h ~ 40km/hの自由走行]



	1号車-2号車	2号車-3号車	3号車-4号車	平均	標準偏差
max	0.497	0.539	0.050	0.362	0.271
min	0.028	0.052	-0.433	-0.118	0.273

図 - 3(a) 速度差の相関係数

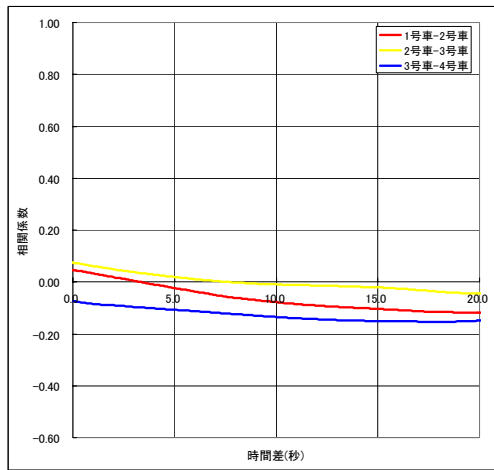
[冬期交差点部、接近速度20km/h、20m手前で信号認識]



	1号車-2号車	2号車-3号車	3号車-4号車	平均	標準偏差
max	0.524	0.531	0.111	0.389	0.241
min	-0.051	-0.017	-0.451	-0.173	0.241

図 - 3(d) 速度差 / 距離差の相関係数

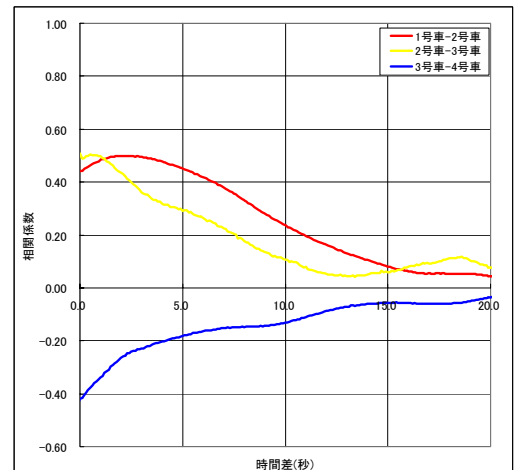
[冬期交差点部、接近速度20km/h、20m手前で信号認識]



	1号車-2号車	2号車-3号車	3号車-4号車	平均	標準偏差
max	0.046	0.075	-0.073	0.016	0.079
min	-0.119	-0.044	-0.153	-0.106	0.056

図 - 3(b) 距離差の相関係数

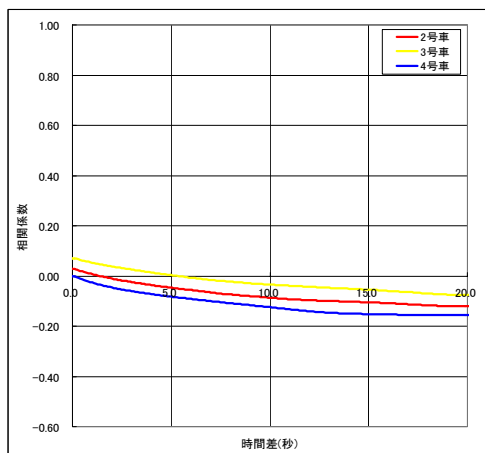
[冬期交差点部、接近速度20km/h、20m手前で信号認識]



	1号車-2号車	2号車-3号車	3号車-4号車	平均	標準偏差
max	0.499	0.506	-0.035	0.324	0.310
min	0.045	0.043	-0.418	-0.110	0.266

図 - 3(e) 速度差 x 速度 (自転車) / 距離差の相関係数

[冬期交差点部、接近速度20km/h、20m手前で信号認識]



	2号車	3号車	4号車	平均	標準偏差
max	0.028	0.070	-0.001	0.033	0.036
min	-0.121	-0.076	-0.157	-0.118	0.041

図 - 3(c) 速度差 (自転車)の相関係数

[冬期交差点部、接近速度20km/h、20m手前で信号認識]

表 - 2 各パラメータ別の追従挙動との相関係数

各ケースのパラメータ		相関係数 max	相関係数 min	
冬期 直線部 (速度20～40km/h) 自由走行	速度差	1 - 2号車	0.659	-0.271
		2 - 3号車	0.615	-0.270
		3 - 4号車	0.293	-0.502
	距離差	1 - 2号車	0.026	-0.127
		2 - 3号車	0.025	-0.064
		3 - 4号車	-0.013	-0.076
	速度 (自車)	2号車	-0.010	-0.095
		3号車	-0.015	-0.083
		4号車	-0.009	-0.098
	速度差 / 距離差	1 - 2号車	0.673	-0.252
		2 - 3号車	0.606	-0.224
		3 - 4号車	0.246	-0.466
速度差 × 速度(自車) / 距離差	1 - 2号車	0.664	-0.287	
	2 - 3号車	0.642	-0.251	
	3 - 4号車	0.313	-0.493	
冬期 交差点部 (速度20km/h)	速度差	1 - 2号車	0.497	0.028
		2 - 3号車	0.539	0.052
		3 - 4号車	0.050	-0.433
	距離差	1 - 2号車	0.046	-0.119
		2 - 3号車	0.075	-0.044
		3 - 4号車	-0.073	-0.153
	速度 (自車)	2号車	0.028	-0.121
		3号車	0.070	-0.076
		4号車	-0.001	-0.157
	速度差 / 距離差	1 - 2号車	0.524	-0.051
		2 - 3号車	0.531	-0.017
		3 - 4号車	0.111	-0.451
速度差 × 速度(自車) / 距離差	1 - 2号車	0.499	0.045	
	2 - 3号車	0.506	0.043	
	3 - 4号車	-0.035	-0.418	

(2) 追従方程式のパラメータの検討

追従方程式に関しては、上述の追従挙動走行実験の結果を踏まえ、越モデルの変形式をベースに「先行車両と後続車両との速度差」、「車間距離と希望車間距離との差」、「自車の速度と希望速度との差」の3要素を反映するものとして設定した。追従方程式のパラメータ(、、1、m)、希望車間距離・希望速度の各パラメータの検討に際しては、前述2. で言及した夏期及び冬期の各期における追従挙動走行実験並びに航空写真解析のデータを用いた(表-3参照)。追従方程式、説明変数及び算出したパラメータの一覧については、表-4に示す通りである。なお、については自車の速度が希望速度を上回ってれば1、そうでなければ0としている。

表 - 3 パラメータ算出に使用したデータ

パラメータ	使用データ	
追従方程式パラメータ(、、1、m)	追従挙動実験データ ・冬期及び夏期 ・自由走行モード	速度、車間に対応した加速度データを適用するため、多様な交通状況に対して平均的な値を得ることから、自由走行モードのデータを利用。
希望車間距離	追従挙動実験データ ・冬期及び夏期 ・一定走行モード	希望車間距離を把握するため、車間等の走行状態が定常的に近いデータを利用。
希望速度	航空写真データ ・冬期及び夏期	希望速度算定の説明変数となる規制速度を把握するため、面的に解析したデータを利用。

表 - 4 追従方程式、説明変数及びパラメータ

[追従方程式]

$$a_{n+1}(t) = \alpha \times [V_n(t \cdot \Delta_1) \cdot V_{n+1}(t \cdot \Delta_1)] \div [X_n(t \cdot \Delta_1) \cdot L_n \cdot X_{n+1}(t \cdot \Delta_1)]^l + \beta \times [X_n(t \cdot \Delta_2) \cdot L_n \cdot X_{n+1}(t \cdot \Delta_2)]^m \times [X_n(t \cdot \Delta_2) \cdot L_n \cdot X_{n+1}(t \cdot \Delta_2) \cdot Sd_{n+1} \{V_{n+1}(t \cdot \Delta_2)\}] + \lambda \times [Vd_{n+1} \cdot V_{n+1}(t \cdot \Delta_3)] \times \delta$$

[説明変数及びパラメータ]

変数	パラメータ	設定条件
n, n+1	先行車・後続車の添え字	夏期1.543・冬期1.489
a	加速度	夏期0.103・冬期4.875
X	位置	l 夏期0.478・冬期0.604
V	速度	m 夏期2.524・冬期3.454
L	車両の長さ	A 夏期0.360・冬期1.071
Sd	希望車間距離 (= A × V + B)	B 夏期4.220・冬期4.456
Vd	希望速度 (= C × Vreg + D)	C 夏期0.737・冬期0.748
Vreg	規制速度	D 夏期5.348・冬期0.393

Δ₁ ~ Δ₃ : それぞれ速度差、車間距離、希望速度に対する反応遅れ時間

1) 追従方程式パラメータ (α 、 β 、 l 、 m)

パラメータ (α 、 β 、 l 、 m) は、遺伝的アルゴリズムの手法により、初期値を設定し、追従走行する後続車両の加速度について、実測値 (追従挙動走行実験データ) との比較評価を繰り返すことにより求めた。遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms : GA) とは、生物が環境に適応して進化していく過程を工学的に模倣した学習的アルゴリズムである。追従方程式が非線形の方程式であり、各項の間には明確な物理的関連性がないことから、本手法を適用した。GAは、母集団の初期化 (Initialization)、評価 (Evaluation)、選択 (Selection)、交叉 (Crossover)、突然変異 (Mutation)、終了判定 (Terminate Check) の遺伝的操作を繰り返し行うことにより、目的関数に対する最適値を求めるものである。GAを用いて追従方程式のパラメータを算出する手順は以下の通りである。(図 - 4 参照)

初期値の設定 (母集団の初期化)

初期値は第一世代であり、ある程度のばらつきを持たせ、いくつか設定する。

評価

パラメータを入力した追従方程式から算出した後続車両の加速度値と実測値 (追従挙動走行実験データ) とを比較する。

選択

実測値に近い解を与えるパラメータを次の世代に残すよう選択する。

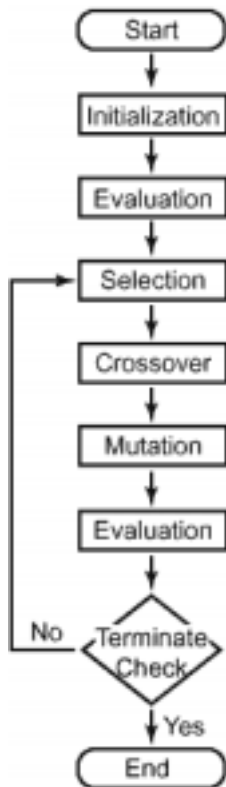


図 - 4 GAのフロー図

交叉

で選択されたパラメータ(親)から、その特性を受け継ぐ次世代のパラメータ(子)を作る。

突然変異

解が局所的な最適解に落ち着くのを防ぐため、ある確率でパラメータを変化させる。

評価

パラメータを入力した追従方程式から算出した後続車両の加速度値と実測値 (追従挙動走行実験データ) とを比較する。

終了判定

の評価により比較した両者の差が十分に小さければ終了する。

本手法により、 α 、 β を繰り返し、世代を更新していくと実測値に近い値を算出するパラメータが多く残ることになる。本追従方程式のパラメータ (α 、 β 、 l 、 m) の算出は、表 - 5 に示す制御条件のもとに、上述のGAの手法により検討した。なお、パラメータについては、 $\alpha \leq \pi/2$ を条件とした。($l = 0$ のとき、 $\alpha \cdot \Delta t$ が $\pi/2$ より大きくなると、車列の後方ほど速度の乱れが大きくなり、衝突が生じる漸近的不安定な状態となるため。)

表 - 5 GAの制御条件

選択	エリート選択
交叉	一様交叉 (50%)
突然変異	突然変異 (1%)
世代	1000世代
世代毎の個体数	100

GAを1000世代まで実施し、夏期のパラメータ (α : 1.543、 β : 0.103、 l : 0.478、 m : 2.524) 及び冬期のパラメータ (α : 1.489、 β : 4.875、 l : 0.604、 m : 3.454) を求めた。パラメータに関しては、車両8台による簡易シミュレーション (パラメータ入力した追従方程式による走行) を実施し、追従走行の安定性について確認作業 (追突、追抜き等の不安定な状態を除く) を行った。なお、パラメータの収束状況に関し、世代 (Generation) と適合度 (AVERAGE FITNESS) は、図 - 5 に示す通りである。

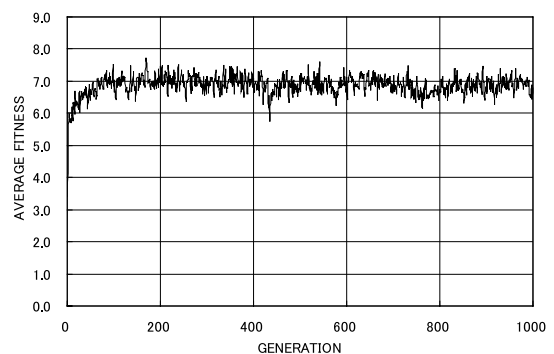


図 - 5 パラメータ算出における収束状況 (冬期)

ここで、適合度とは、パラメータを入力した追従方程式により計算した後車の加速度値と実測値の差の二乗和の逆数で示したものである。本検討では50世代目あたりから、計算による後続車両の加速度値と実測値の誤差が十分小さくなる結果となり、1000世代目までに十分収束していると考えられる。

2) 希望車間距離

希望車間距離については、次式により表すことができる。

$$S_d = A \times V + B$$

ここで、 S_d ：希望車間距離(m)

V ：自車の速度(km/s)

希望車間距離に関し、追従挙動走行実験データ（直線部・速度一定走行のデータ）で得られた速度と車頭距離（実測値）により検討を行った。同実験による速度と車頭距離（実測値）について回帰分析を行ったところ、次式を得た。

夏期： $y = 0.3599x + 8.756$ （相関係数 $r : 0.842$ ）

冬期： $y = 1.0714x + 8.756$ （相関係数 $r : 0.536$ ）



写真 - 4 追従挙動走行実験・夏期
(苫小牧寒地試験道路)



写真 - 5 追従挙動走行実験・冬期
(苫小牧寒地試験道路)

夏期の相関係数 r は0.842と高く、データのばらつきが少ない傾向が得られた。この結果から、夏期の道路路面（乾燥）の場合、各ドライバーによる車両運転挙動特性の差異に関わらず、走行速度と車頭距離の関係について、一定の傾向があると考えられる。他方、冬期の相関係数 r は0.536とややばらつく傾向となった。これは冬期の道路路面状態（凍結及び圧雪）における走行速度と車頭距離は、路面が非常にすべりやすい（すべり摩擦係数が小さい）条件下で実験したものであることから、各ドライバーによる車両運転挙動特性の差異が比較的大きく現われたことによるものと考えられる。

追従挙動走行実験時の実験車両の平均車両長さに関し、各期において計算したところ、夏期4.536m（実験車両9台の平均）、冬期4.300m（実験車両4台の平均）となる。この各期の平均車両長さを考慮し、夏期のパラメータ（ $A : 0.360$ 、 $B : 4.220$ ）、冬期のパラメータ（ $A : 1.071$ 、 $B : 4.456$ ）を得た。

3) 希望速度

希望速度については、次式により表すことができる。

$$V_d = C \times V_{reg} + D$$

ここで、 V_d ：希望速度(km/h)

V_{reg} ：規制速度(km/h)

撮影した航空写真から得られた札幌周辺における車両交通データから、道路交通センサスの各センサス区間における各期の希望速度、規制速度の値を抽出した。ここで、希望速度は、航空写真解析による各センサス区間において算出した車両走行速度の90%タイル値とした。規制速度とは、通常の各期における規制速度値に従った。規制速度と希望速度について回帰分析を行ったところ、次式を得た。

夏期： $y = 0.7368x + 19.2550$ （相関係数 $r : 0.428$ ）

冬期： $y = 0.7484x + 1.4132$ （相関係数 $r : 0.255$ ）

夏期と冬期の希望速度を比較したところ、冬期の方が平均して18km/h程度低くなる傾向が得られた。なお、上述の回帰分析によれば、夏期の相関係数 r は0.428、冬期の相関係数 r は0.255となり、共にデータがばらつく結果となった。以上より、パラメータ C について夏期0.737、冬期0.748、 D について夏期5.348、冬期0.349（注：m/s単位により表示）を得た。

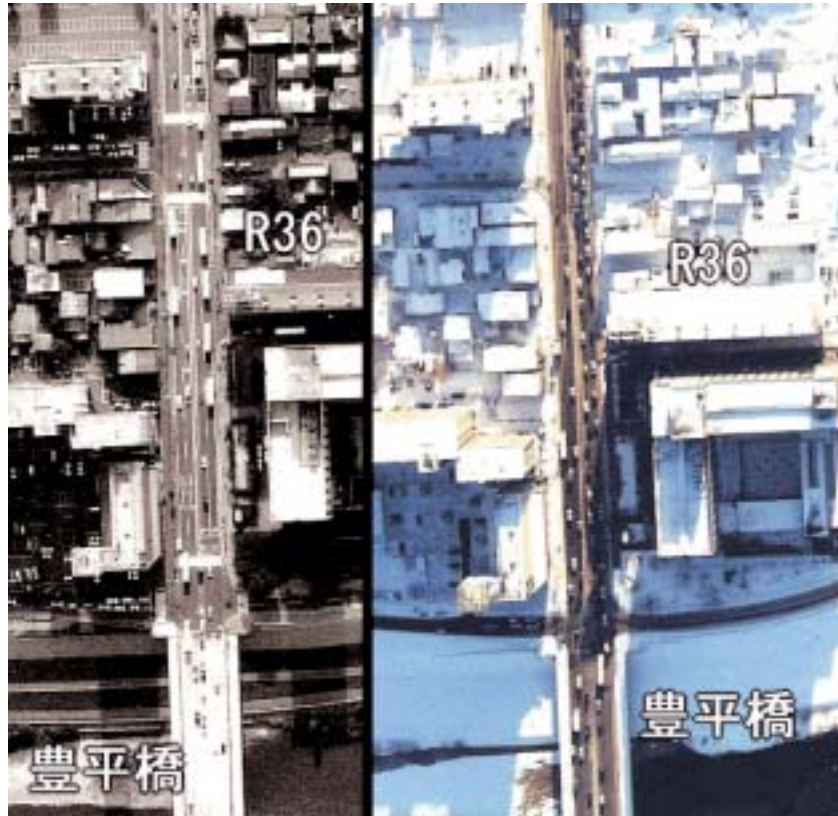


写真 - 6 航空写真 (夏期)

写真 - 7 航空写真 (冬期)

4. シミュレーションによる現況道路交通の再現

(1) シミュレーション対象

本シミュレーションの対象道路ネットワークは、図 - 6 に示す札幌市都心部の道路網とした (南北方向：北 8 条通～北大通～南大通～南 4 条通、東西方向：西 11

丁目通～創成川通～東 3 丁目通)。対象道路ネットワークにおけるシミュレーションのデータ作成は、下記データに基づいた。

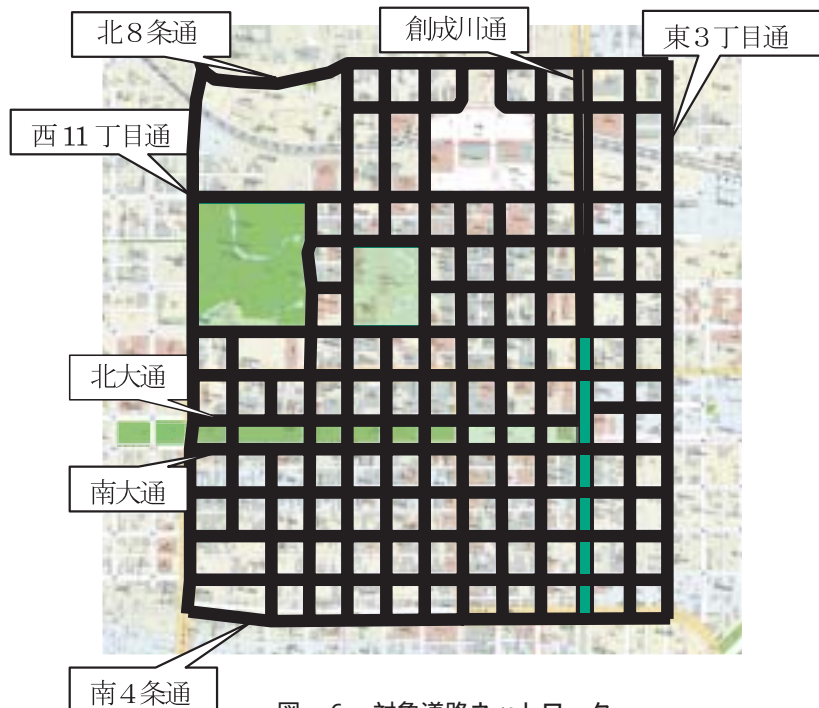


図 - 6 対象道路ネットワーク

道路構造基本データ(ネットワーク形状、車線数、幅員、規制速度、右左折規制、右折待ち位置等)
 路上駐車車両データ
 信号現示オフセット
 時間帯別(14・17時台)の車種別OD

(2) 交通流マイクロシミュレーションの実施

本件対象道路ネットワークに関し、上述の追従方程式(夏期、冬期別にパラメータを設定)を反映した交通流マイクロシミュレーション「KUNJ - SAKURA」により実行し、札幌市都市部の夏期及び冬期における道路交通状況を再現した。本シミュレーションは1台毎の車両挙動をパソコンモニター上で表示可能であり、ユーザーは交通流(車両挙動、滞留長等)を視覚的に把握できる等の特長を有している(図-7参照)。本シミュレーションにより得られた交通流に関し、リンク毎の平均旅行速度を夏期・冬期(時間帯は14時台)について計算したところ[方向別に集計し全624リンク、図-8(a)及び(b)参照]、以下の傾向が見られた。

冬期の旅行速度は、一般的に夏期よりも低下している。夏期の場合、対象ネットワークの全リンク中の約2割のリンクが旅行速度10km/h以下、約2%が旅行速度5km/h以下となった。他方、冬期の場合、全リンク中の約4割のリンクが旅行速度10km/h以下、約6%が旅行速度5km/h以下となった。

冬期のシミュレーション結果から、旅行速度5km/h以下のリンクが連続している区間では、特に交通の走行性が損なわれていると予測される。同区間を列挙すると、東西方向を結ぶ路線として、北2条通西1~4丁目、南1条通東2~西4丁目、南北方向を結ぶ路線として、東2丁目通の北大通~南4条間等となっている。

H11冬期交通センサスによる国道センサス区間の平均旅行速度に関し、本件ネットワーク内の5センサス区間を抽出すると10.5~21.3km/hであった。本シミュレーションを通じ、センサス区間データより、きめ細かい各リンクの旅行速度を求めることができた。



図-7 シミュレーションによる表示例

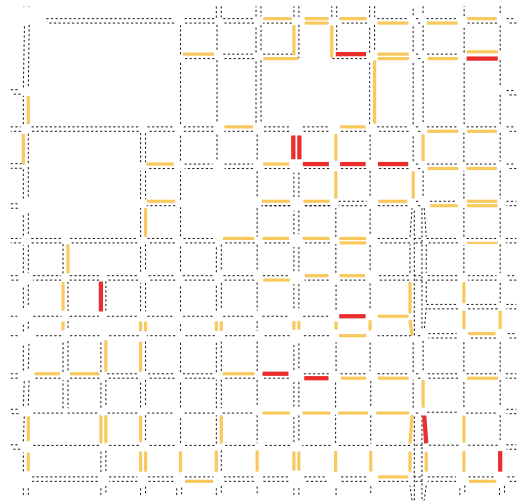


図-8(a) 平均旅行速度(夏期14時台)

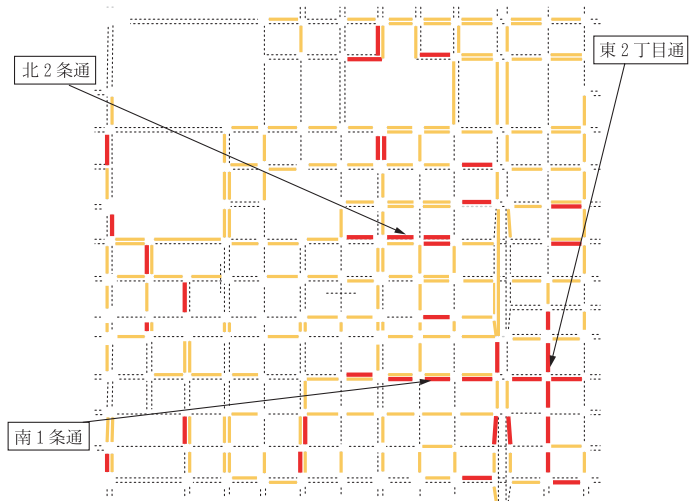
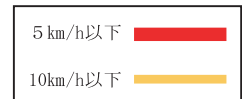


図-8(b) 平均旅行速度(冬期14時台)



5. プロブカーデータによるシミュレーション結果の検証作業

上記4. で得られたシミュレーション結果に関し、プロブカーデータによる検証作業を試みた。本論文中的プロブカーデータとは、GPSを搭載したタクシー115台の走行データを分析し、座標、速度等を計算したものである。同タクシー115台の総走行距離は1日当りおよそ6万kmに及び、豊富なデータ量が取得できるとの特長を有している。現況道路交通の実態把握の高度化という観点から、精度の高い旅行速度データの取得等が期待されており、現在研究中のものである。(図-9)

本シミュレーション対象域内において、プロブカーデータから区間毎(14区間)の平均旅行速度の計算値について、以下を条件として抽出した。

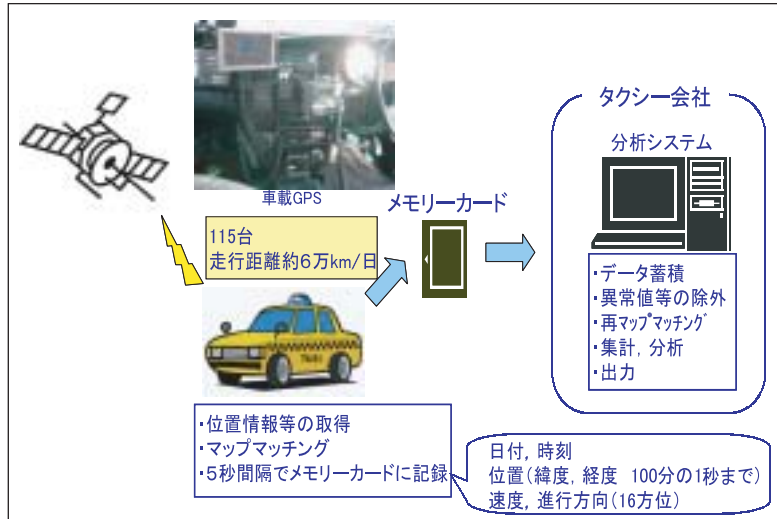


図 - 9 プロブカー調査によるデータ取得の流れ

- a) 対象区間
北1条通 (国道230号、国道5号、国道12号)
南4条通 (国道36号)
西11丁目通 (国道230号)
創成川通 (国道5号)
- b) 対象期間
夏期～2001年10月の火曜日、水曜日、木曜日
(休日の前後、5・10日を除く)
冬期～2002年1月の火曜日、水曜日、木曜日
(休日の前後、5・10日を除く)
- c) 対象時間帯
昼間～13時～16時
夕方～16時～19時

抽出したプロブカーデータ (図 - 10及び図 - 11中の「プロブ」) 並びに本シミュレーションによる平均旅行速度の計算値 (図 - 10及び図 - 11中の「推計」) を比較したところ、得られた傾向及び考察は以下の通り。

対象14区間の平均旅行速度に関し、推計値とプロブ値を比較したところ、夏期の推計値/プロブ値は昼間で1.01、夕方で1.03となり、シミュレーションによる推計値の妥当性が高いと考えられる。他方、冬期の推計値/プロブ値は昼間で0.70、夕方で0.72となり、推計値よりもプロブ値の方が3割程度高くなる結果となった。

対象14区間毎に冬期・昼間の平均旅行速度について、推計値とプロブ値を比較したところ、各区間における推計値/プロブ値は、0.41～1.27と大幅にばらつく結果となった。

交通流マイクロシミュレーションの冬期追従挙動モデルの設定に際しては、上述の通り苫小牧寒地試験道路で凍結及び圧雪路面を設定し、同条件下での追従走行実験結果を反映させている。しかし、札幌都市

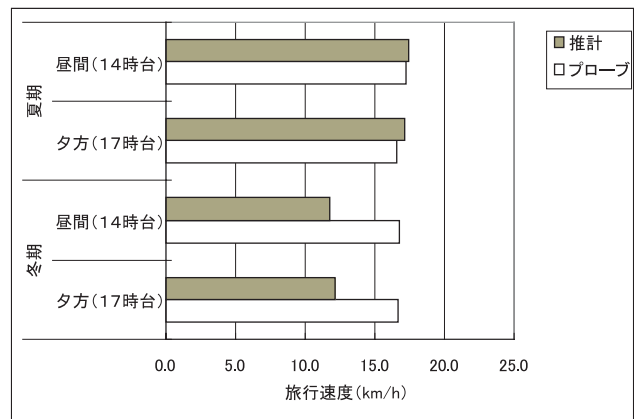


図 - 10 平均旅行速度の推計値とプロブ値との比較 (夏期及び冬期：対象14区間の平均)

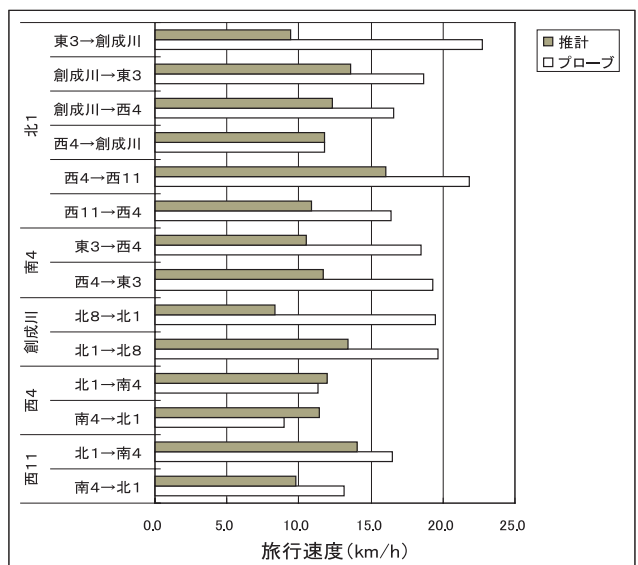


図 - 11 平均旅行速度の推計値とプロブ値との比較 (対象14区間：冬期・昼間14時台)

圏の現道の冬期路面は、除排雪レベルの向上等に伴い、凍結や圧雪ではなく、湿潤や乾燥に近い路面状態も出現していると考えられる。すなわち、今回抽出したプローブ値は、冬期の道路条件を一律に捉えており、路面状態や有効幅員等の違いについては加味していない。よって、推計値とプローブ値の差異は、冬期追従挙動モデル（追従方程式）の設定の基礎とした追従走行実験の冬期路面条件が、現道の冬期路面実態よりも厳しい条件下であったものと考えられる。

6. まとめ

本研究により得られた結果並びに今後の課題について、以下に列挙する。

- (1) 冬期道路交通に関する研究として取り組んできた追従挙動走行実験及び航空写真解析により得られた知見を踏まえ、交通流マイクロシミュレーションの冬期追従挙動モデルの構築を試行した。モデルパラメータ(夏期及び冬期)は、追従挙動走行実験(直線部分及び交差点部)での先行車両と後続車両の追従挙動データの相関を考慮し、設定を試みた。
- (2) 札幌市都市圏の道路網をケーススタディとし、追従挙動モデル(夏期及び冬期)に基づく交通流マイクロシミュレーションにより、各期の交通流(14時及び17時)の現況を再現した。同シミュレーション結果によれば、札幌市都市圏では夏期よりも冬期において、各リンクの平均旅行速度が低下する傾向が得られた。
- (3) シミュレーションの再現性を検討するため、各リンクの平均旅行速度の推計値とプローブカーデータとの比較による検証を試みたところ、夏期の両データの比(推計値/プローブ値)は昼間(14時台)で1.01、夕方(17時台)で1.03となり、シミュレーションによる推計値の妥当性が高いと考えられる結果を得た。他方、冬期の両データの比(推計値/プローブ値)は昼間で0.70、夕方で0.72となり、推計値よりもプローブ値の方が3割程度高くなる結果となった。
- (4) 冬期道路条件は、降雪、車両通行による圧雪、圧雪の融解、凍結等の繰り返しによる路面状態の変化、並びに除排雪作業の有無による有効幅員、雪堤高の違い等、大幅な変動要因を含有している。冬期追従挙動モデルの設定に際しては、各路面状態(路面すべり摩擦係数の変化)や、有効幅員の違い等を考慮した車両挙動の再現が必要とされており、これらの要因を冬期追従挙動モデルに反映させることが今後の課題であると考えられる。
- (5) 今後、冬期追従挙動モデルの妥当性を評価するに際しては、高精度な実測データを用いてシミュ

レーション結果との比較検討を繰り返すことが必要であると考えられる。同モデルを評価する検証用データとしては、冬期交通の実態に即したデータを適用する観点から、タクシーGPSデータに基づくプローブ値の適用が有効と考えられる。よって、同GPSデータにより取得されるプローブデータの高度化も併せて進めつつ、冬期追従挙動モデルの精緻化及び改良を進める予定である。

7. おわりに

本研究では、交通流マイクロシミュレーションの冬期追従挙動モデルの構築、同モデルによる冬期交通挙動の再現について論じたが、今後、研究中の道路交通評価手法(プローブカー調査や航空写真解析等)による事例研究の積み重ねを行い、冬期交通実態の把握の高度化を進める予定である。本研究のシミュレーション実施に際し、札幌市から交通現況のデータ提供等の協力を得た他、(株)ニュージェックより各種データ取りまための協力を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) (社)交通工学研究会編：やさしい交通シミュレーション、2000年6月
- 2) 吾田洋一、高木秀貴、大沼秀次：交通流シミュレーションの開発と渋滞現象への適用、北海道開発土木研究所月報、1996年2月
- 3) 吾田洋一、浅野基樹：航空写真による都市内幹線道路の交通状況の把握(第2報)、北海道開発土木研究所月報、2002年3月
- 4) 吾田洋一、浅野基樹、中辻隆：RTKGPSを使用した夏期と冬期の追従実験の解析、北海道開発土木研究所月報、2002年11月
- 5) 大庭孝之、越正毅、桑原雅夫、赤羽弘和：渋滞流における追従挙動モデルの検証、土木学会第43回年次学術講演会、pp.252~253、1988年10月
- 6) 新田鉄兵：道路交通流理論における車両モデルの研究、東京大学計数工学科卒業論文、1999年2月
- 7) 大口敬：高速道路単路部渋滞発生解析 - 追従挙動モデルの整理と今後の展望 -、土木学会論文集No. 660 / -49, pp39~51, 2000年10月
- 8) (社)交通工学研究会交通シミュレーション自主研究委員会：交通流シミュレーションの標準検証プロセスVerificationマニュアル(案)、2002年6月
- 9) C. NANTHAWICHT, T. NAKATSUJI, H. SUZUKI : Dynamic Estimation of Traffic States on a Freeway using Probe Vehicle data, J. Infrastructure Plan, and Man., JSCE, No.730 / -59, pp.43-54, 2003 April
- 10) 宗広一徳、高橋尚人、浅野基樹：冬期道路交通状況の評価手法に関する研究、寒地技術論文・報告

集Vol.19、pp.516～521、2003年11月

- 11) 宗広一徳、高橋尚人、浅野基樹：札幌都市圏における冬期交通挙動の再現、平成15年度土木学会北海道支部論文報告集、pp.670～673、2004年2月
12) 宗広一徳、高橋尚人、浅野基樹：交通流シミュレーションによる冬期道路交通の評価：第16回雪と道路

の研究発表会論文集、pp.320～325、2004年2月

- 13) (社)日本道路協会：道路構造令の解説と運用、2004年2月
14) 北海道開発局道路計画課：平成11年度冬期道路交通実態調査・基本集計表／箇所別基本表



宗広 一徳*
Kazunori MUNEHIRO

北海道開発土木研究所
交通研究室
研究員
技術士（建設）



高橋 尚人**
Naoto TAKAHASHI

北海道開発土木研究所
交通研究室
主任研究員



浅野 基樹***
Motoki ASANO

北海道開発土木研究所
交通研究室
室長
技術士（建設・総合）



中辻 隆****
Takashi NAKATSUJI

北海道大学大学院工学
研究科都市環境工学専攻
交通システム工学講座
助教授
工学博士