

都市内高速道路ドライビングシミュレータの開発と心理的負担からみた適用性

Designing the driving simulator for urban expressway and its applicability for the analysis of mental load in driving

平田輝満*・屋井鉄雄**

Terumitsu HIRATA・Tetsuo YAI

This paper presents the development of a driving simulator for urban expressway, mainly long urban tunnel, and its applicability for the analysis of driving environment and behaviors. In tunnel, we usually drive under high strain because of its low visibility and spatial pressure. In urban expressway, we must have more mental load because of more conflict with other vehicles, severe change of vertical slope and so on.

First, we surveyed mental load with RR-Interval when driving in expressway tunnel through an actual driving experiment. After that, we designed a driving simulator, mainly how to control surrounding vehicles, and verified its applicability. By using it, the risk of driving in long urban expressway tunnel and the safing effects of ITS (AHS) will be analyzed.

Keywords : driving simulator, urban expressway, long tunnel, mental load
ドライビングシミュレータ, 都市内高速道路, 長大トンネル, 心理的負担

1. はじめに

大都市圏における環状道路等、整備の必要性が高い高速道路は未だ存在し、今後そういった新規高速道路を、既に高密度化された都市内において建設する場合には、周辺環境への影響等を考慮して地下構造にしなければ社会的合意形成を円滑に進めることができない。実際、海外の事例を挙げると、フランスの都市内環状高速道路A86の西側約10kmは、周辺の住環境、森林、歴史的建造物を保全するため、2本の地下トンネルで建設中である¹⁾。しかし、トンネル内の走行は、空間的圧迫感や視認性の悪さなどからドライバーに大きな負担を与え、車両事故の被害も甚大となる。さらに都市内の地下構造高速道路となれば、これまでの山岳トンネルとは異なり、交通量が多いことや分合流地点の存在のために他車との交錯も多くなり、また地上道路との接続による縦断勾配変化や長区間トンネル内を走行することによる疲労など、ドライバーへの多くの負担が予想され、その走行環境や安全性が危惧される。今後高齢化も進み、道路走行環境の向上が一層求められる状況では、ドライバーに多くの負担をかけることが予想される都市内高速道路の走行環境や、道路交通の安全化の切り札として期待されているITS（高度道路交通システム）の効果を十分に検討する必要がある。

そこで本研究では、地下構造の都市内高速道路における走行環境を分析するためのドライビングシミュレータ（以下DS）を設計開発し、その適用性について検討する。DSを活用することにより、実在しない道路を評価することが可能であり、また実走実験では困難な、実験条件の

統一や、高齢者やサンデードライバー等の運転に不得手な被験者に対しても、安全に走行実験を行うことが可能となる。

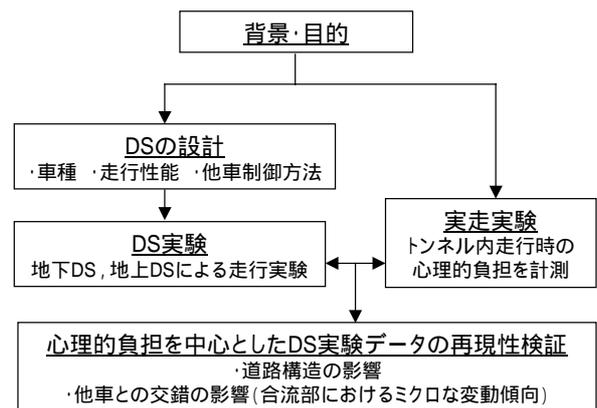


図-1 研究フロー

2. 既往研究と本研究の位置付け

情報処理技術、仮想現実技術の進展に伴って、交通計画、交通工学の分野においてもDSを活用した研究が国内外で近年増えてきている。その適用対象としては、トンネル坑口形状やサグ形状などの道路構造評価²⁾³⁾、ITS（主に情報提供）の効果分析⁴⁾⁵⁾⁶⁾やそのヒューマン-マシンインターフェースの研究⁷⁾⁸⁾、携帯電話の使用などの運転以外のタスクが安全性に与える影響の分析⁹⁾など幅広く活用されているが、本研究で主に対象としている地下構造の都市内高速道路における走行環境を、DSを活用して総合的に分析している研究は過去にない。また、DS研究の多くでは、特定の周辺交通流に対する被験者の行動や、周辺交通流は関係ない道路構造等の評価を行うことが目的であるため、他車の制御方法を詳細に検討している研

*正会員 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (Tokyo Institute of Technology)
**正会員 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (Tokyo Institute of Technology)

究は数少なく、合流部区間における渋滞時の他車制御方法に関する研究¹⁰⁾など一部の研究で議論されているのみである。地下構造の都市内高速道路では、その構造に加えて、他車交通流も走行環境に大きな影響を与える。そのため本研究では、DS内の他車交通流制御方法についても詳細に検討し、その後、心理的負担を中心としたDS実験データの再現性を検討した。

3. トンネル内走行時の心理的負担の計測

高速道路のトンネル部における心理的負担の計測を目的に、東名高速(都夫良野トンネル 1630m)、アクアライン(6988m)、首都高都心環状線(三宅坂トンネル約 200m)において実走実験を行った。心理的負担の指標としてはRR間隔を使用した。RR間隔は、心電波形において最も顕著なパルス状のR波と次のR波との間隔時間であり、この間隔が小さい程、心拍数が大きくなり心理的負担が大きいことを示す。時間制約上、被験者は1名であるが、1分間に100個弱のRR間隔を収集しているためデータとしては十分にあり、概ね傾向は現れていると考える。

図-2 図-3 は都夫良野トンネルを挟む中井PAと足柄PAの区間(約 22km)の上下線における心理的負担を、トンネル部以外、トンネル部平均、都夫良野トンネルごとに平均した値である。トンネルは、下りは都夫良野トンネルを含めて2箇所、上りは9箇所。

上下線ともトンネル内でRR間隔が小さくなっており心理的負担が大きいことが分かる。またRR間隔が正規分布すると仮定して、上下線ごとに平均0分散1に標準化したデータをとっても、3車線トンネルより2車線トンネルの方がRRが小さく、空間が狭いことによる圧迫感を受けていることが分かった。

図-4 は首都高都心環状線、浜崎橋～三宅坂JCT～代官町、におけるRRである。三宅坂JCTではトンネル内で合流が行われる。トンネル内では若干RRが小さくなっているが、三宅坂JCTの合流部に着目してみると、逆にRRが大きくなっている。このコースでは合流部の本線を走っており、立場的には合流される側になるため、横の動きがない分、心理的負担は小さいと考えられる。また今回は特に合流車がなく、道路幅が広がっただけであることも理由の一つであろう。また、昨年度の首都高における心理的負担の計測結果から、首都高では他車との交錯が多く、常に心理的負担がかかっているため、トンネルの影響があまり顕著に現れないという分析結果を得ていた。今回もその考察が当てはまる結果となっている。

図-5 は首都高新宿線から都心環状線に合流するコースで、三宅坂JCTでは、合流する側となる。前述の通り、首都高ではトンネル内走行時に顕著な差が現れないと考

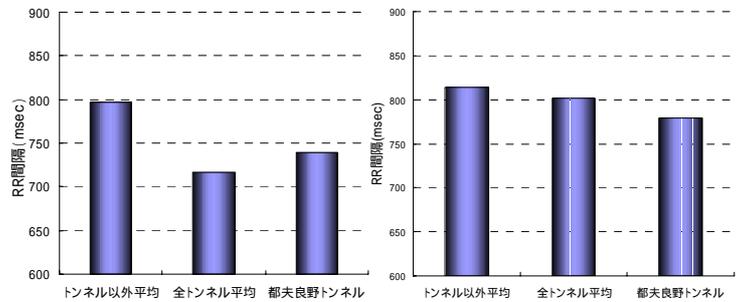


図-2 都夫良野トンネル (下り:2車線)

図-3 都夫良野トンネル (上り:3車線)

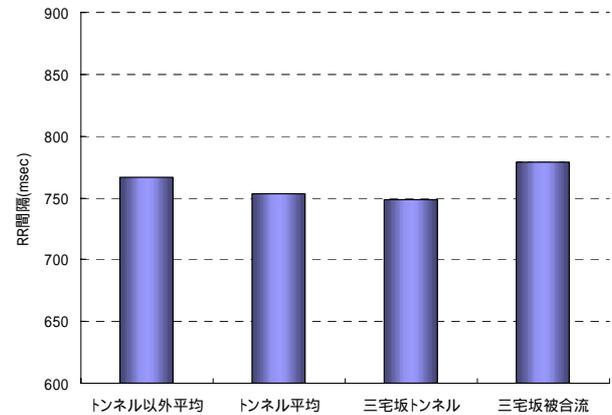


図-4 首都高、浜崎橋～三宅坂

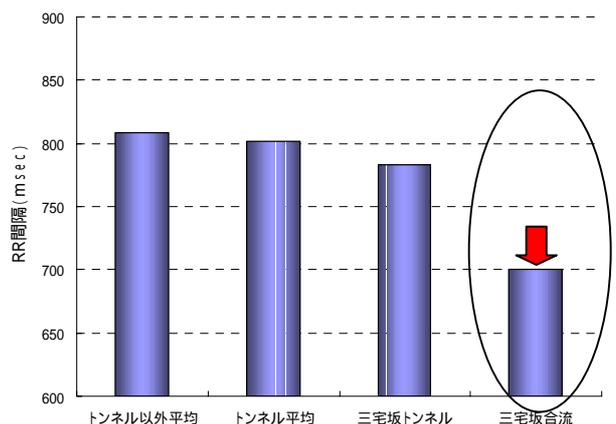


図-5 首都高外苑～三宅坂～神田橋

えられるが、合流時にはドライバーに非常に大きな心理的負担が加わることが分かる。

これらの結果から、トンネル内走行時には大きな心理的負担がかかり、また他車との交錯でより大きな負担がかかることが分かる。地下構造の都市内高速道路では、今まで経験したことのない長区間にわたるトンネル内走行に加えて、交通量も非常に多いことが予想され、他車との頻繁な交錯、トンネル内の長時間走行、トンネル内合流などから心理的負担が非常に大きいと考えられる。

4. 地下構造都市内高速道路のDSの設計開発

4-1. DSシステムの概要

DSは図-6のような構成となっており、運転席部の操作系は実車部品(三菱プレジジョン製)を使用している。

このシミュレータの機能の概要を以下に示す。

開発, 動作環境

MicroSoft Visual C++, World Tool Kit(OpenGL)で開発。
Windows2000で動作。CG画像は28インチディスプレイに表示する。

表示仕様

解像度	800 * 600pixel (最大 1280 * 960)
フレームレート	30fps (最大 60fps)
同時発色数	3200色 (32bit-colour)
瞬間表示頂点数	30万 vtx
同時車両発現数	32台

記録項目

経過時間, 自車他車の走行位置, 自車他車の走行速度,
自車アクセル開度, 自車ブレーキ使用量

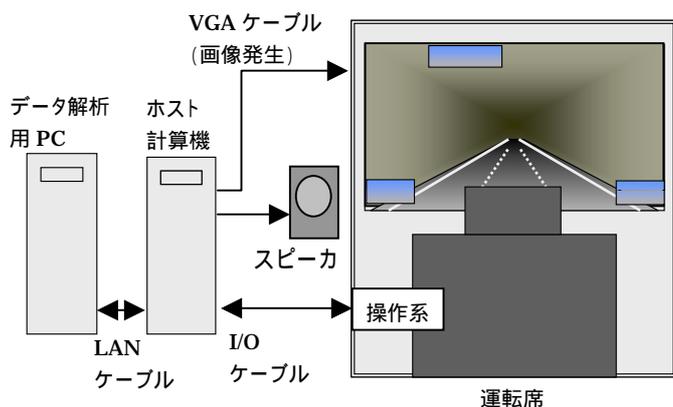


図-6 DSのシステムブロック図

4 - 2 . 対象道路

今後増加すると思われる構造をもつ, 地下構造の都市内高速道路(約16km, 3JCT, 5IC, 最大縦断勾配約3%)を想定して作製している。縦断勾配により自車にかかる重力加速度も再現している。

4 - 3 . 車種構成

他車として発生可能な車種は表-1の通り。大型車やバンなどの車両は, 周辺ドライバーの視界を狭め, 圧迫感を与えるため, それらの混入率や車種構成は道路走行環境を決定する一つの要因であると考えられる。本シミュレータでは, 大型車を含む商用車を新車登録台数(1999, 2000年)から代表的と思われる車両を選定した。

表-1 車種構成

	車名	排気量(cc)	全長(mm)	総重量(kg)
普通車	キャバリエ	2392	4595	1300
	アルト	658	3395	690
	パジェロ	2972	4220	1840
商用車	RX-7	1308	4285	1260
	ハイエース	2985	4690	3205
	エルフ	4570	4685	4425
	フォワード	7790	8490	7760
	ギガマックス	14256	11990	24740

4 - 4 . 他車の制御アルゴリズム

DSの他車制御アルゴリズムと交通シミュレーション

の大きな違いとして以下の2つが挙げられる。

- ・DSでは被験者が実際に走行実験を行なうので, リアルタイム性が要求される。DSでは3DCG画像を発生させるだけで膨大な計算量を必要とするため, 複雑で計算量の多い他車制御アルゴリズムであると計算機の処理能力が追いつかずリアルタイム性が損なわれる恐れがある。

- ・交通シミュレーションでは, 交通流解析が主目的となるので, 車両が急ブレーキを踏んだり, また衝突したりしてもさほど大きな影響はないが, DSではそういった通常考えられない車両挙動が起きると, 被験者の走行に大きな影響を与えてしまうので, なるべくスムーズな走行が達成されるようなアルゴリズムが必要となる。

これらの制約内で最大限現実の走行特性を再現させることを考えた。

単路部(追従, 追越, 進路譲渡)

単路部におけるドライバーの行動規範と, それを反映させた他車制御アルゴリズムの概略フロー図を表-2, 図-7に示す。アルゴリズム内の加速度決定モデルは以下のGazis, Hermanらが提案したモデル¹¹⁾(1式)を使用する。追従時の加速度決定モデルは未だ研究途上であり現実の追従挙動を正確に表現するモデルは存在しない。本研究では実験条件に合わせて加速度を柔軟に操作する必要があると考えられるため, パラメータの操作によりそれが可能な(1)式を採用した。

$$a_{n+1} = \lambda \frac{\{v_{n+1}(t)\}^m}{\{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l} [v_n(t) - v_{n+1}(t)] \quad (1)$$

a: 加速度, x: 位置, v: 速度, λ, m, l: パラメータ
添え字nは車両番号で, この場合nが前車, n+1が追従車となる

表-2. 単路部における行動規範	
1	自由走行状態では希望走行速度 v_0 で走行
2	希望車間距離は速度の関数(速度大ほど車間距離大)
3	前車との車間距離が希望車間距離より狭くなったら減速(加速度は, 速度, 相対速度, 車間距離の関数。速度, 相対速度が大ほど, 車間距離が短いほど大; 式1)
4	車間が狭くても相対速度がプラス(前者が離れていく)のときは, 若干減速するだけで強くはブレーキングしない
5	車間が詰まって前車に追従している場合, 走行速度(=前車の走行速度)が希望走行速度と比べて大きく低い場合には追越する。それほど差がなければ前車に追従しつづける。
6	追越をする場合には, 追越車線の側方ギャップにおいて, 前後車とのTTC(Time To Collision, (車間距離)/(相対速度))が T_b 秒以上またはマイナス, かつ前後車との車間が L_b m以上であったら隣接車線へ車線変更する。それまでは前車に追従。
7	追越するときの加速度は, 車種とその時の速度によって異なる。(大型車は加速度が小さい。また積載量による総重量の変化の影響も受ける。)
8	追い越しが完了したら元の車線に戻る。他車が存在して戻れない場合は戻るまでそのまま希望走行速度で走行する。
9	追越車線を走行している車は, 速度の速い追従車が来たら車線変更して先を譲る。逆に追越車線追従車は前車との車間が詰まっても車線変更して追い抜くより, 前車が先を譲るのを待って追従する。

* v_0, T_b, L_b はパラメータとして変更可能

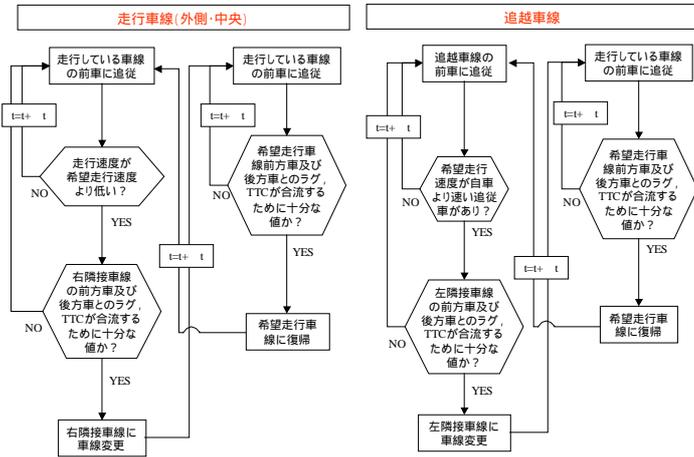


図-7 単路部における他車制御の概略フロー図

合流部

合流挙動モデルは交通工学の分野では比較的簡易で計算量が小さいと考えられるギャップアクセプタンスモデルに独自の改良を加えたものを採用している。合流部における行動規範と、それを反映させた他車制御アルゴリズムの概略フロー図を表-3.4, 図-8 に示す。交通シミュレーション研究における合流モデルの多くでは、前後複数のギャップの中で最適なギャップを評価、選択し、そのギャップへ合流するために最適な加速度を与えて走行させているが、そのギャップ評価に用いられる効用関数のパラメータを交通流の実測から推定する必要があり、本研究のように現実にはない道路へ適用は困難である。また比較的複雑な挙動となるため実験に合わせて他車を制御するのも困難となる。本研究では、合流車本線車とも前述の追従アルゴリズムを流用し、追従対象の決定問題としてすべてを表現した。これにより計算量も少なく他車の制御が簡易になることが予想される。本研究で考案した合流モデルでは、合流車は合流可能区間に入ったら本線前車に追従する。逆に本線車は合流可能区間に入ったら本線及び合流車線の中で一番近い前車に追従する(但し、TTC が一定以下の合流車は追従対象としない)。そうすることで、合流に適切なギャップが自動的に形成され、合流車は側方ギャップが合流可能条件になったら合流を開始する。合流車が本線に形成されるギャップへの流入可否判断は、本線の前後方車との車間距離、TTC (Time To Collision: (車間距離) / (相対速度)) で行なうものとした。

5. DS 実験データの再現性検討

DS を活用した室内実験では、実験条件の統一、データ収集の容易さ、被験者の安全性の確保、現実に存在しない道路における走行実験が可能であることなどのメリットが挙げられるが、必ずしも実走実験と同様のデータを

1	加速可能区間前では目標速度まで加速
2	加速可能区間前では前方に他車があったら追従
3	加速可能区間では、合流車線車、本線車の中で一番近い前車に追従しながら合流できる側方ギャップを評価する
4	側方ギャップを形成している本線前車と本線後車との TTC が T_m 以上またはゼロ以下で、かつ両者との車間も L_m 以上の場合に合流する
5	終端区間(ノーズ端から L_{end} の区間)に入ったらノーズ端までに停止できる加速度で減速しながら側方ギャップを評価

1	走行速度が希望走行速度より V km/h 以上低かったら車線変更(この V km/h は流入区間以外における追従走行時の値より低く設定し車線変更しやすくする。これで避走現象の再現とする)
2	合流可能区間では、本線車、合流車線車のなかで一番近い前車を対象として追従(ただし、TTC が $T_{non-give}$ 秒以下 ($0 < TTC < T_{non-give}$) の合流車には追従しない: すべての合流車に進路を譲るわけではなく、速度差の大きな合流車には進路を譲らない)
3	合流車線終端区間で合流できていない他車があったら、進路を譲る(終端区間に入ったら、終端区間に存在する合流他車と追従関係を結びやすくする)

* $T_m, L_m, L_{end}, T, T_{non-give}$ はパラメータとして変更可能

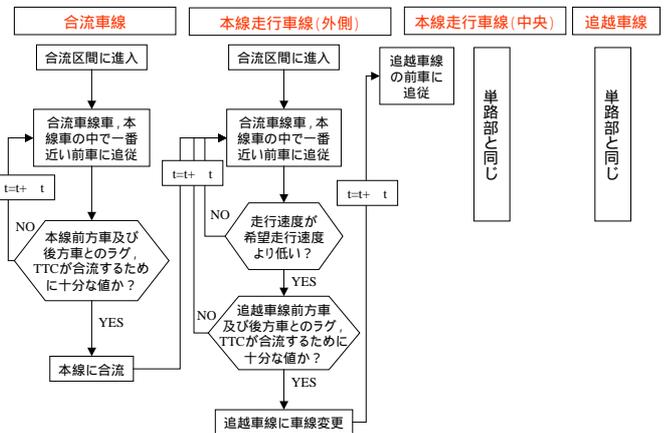


図-8 合流部における他車制御の概略フロー図

再現できるわけではない。そのため DS による室内実験をおこなう際には、その実験目的に合わせて、その再現性を十分に検討する必要がある。そこで本研究では、以下の2点について、心理的負担を中心に DS 実験データの再現性を検討した。なお現時点で、本 DS は開発途中であり、その試作機によって検討を行っているため、データの絶対値を議論するまでは及ばず、その傾向を議論するにとどまっている。

5-1. 道路構造が心理的負担に与える影響

前述の実走実験でも確認されたように、トンネル内走行時は、地上部走行時に比べて心理的負担が大きくなる。その傾向が DS 実験によっても現れるかを、地上部 DS (三菱プレジジョン製) と地下構造 DS (両者の画面: 図-9) の走行実験から確かめた。図-10 はある被験者が地上、地下それぞれ4回づつ交互に走行した時の RR 間隔を道路構造別に平均した結果である。まず、地下 DS と地上 DS で比較すると、地下 DS 走行時の方が RR 間隔が小さく



図-9 地下,地上 DS の画面

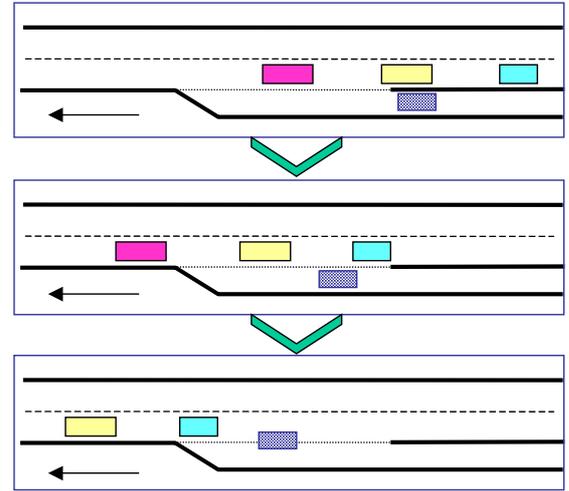


図-11 実走実験時の合流形態

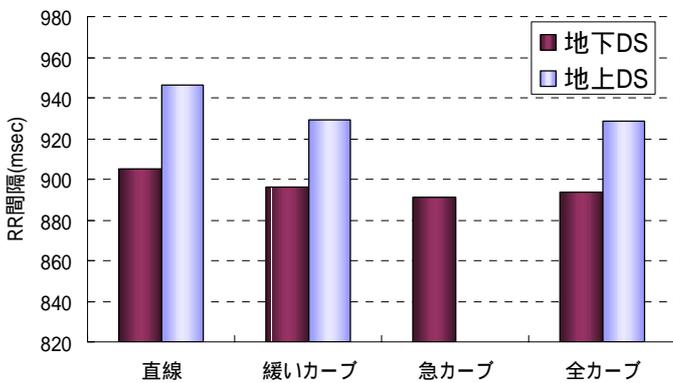


図-10 DS 運転時の道路構造別心理的負担

表-5 道路構造別心理的負担の平均値の差の検定

		地上(直線部)		
		**		
地下(直線部)				
	直線	緩カーブ	急カーブ	
直線		**	**	
緩カーブ			*	
急カーブ				

** 1%有意差, * 10%有意差

心理的負担が大きい結果となった(平均値の差の検定においても有意差:表-5)。DSの視覚的な効果だけでもトンネル内の圧迫感が再現される可能性があるといえよう。また、直線、カーブの影響をみると、直線部に比べカーブ部で心理的負担が大きくなっている(有意差:表-5)。昨年度までに行った首都高における実走実験では、被験者によって異なるが、直線部に比べてカーブ部で心理的負担が大きくなる傾向にあり、DSによってもその傾向が再現されているといえよう。

5-2. 地上合流部における実走実験データとの比較

地下合流部における実走実験データを得るのが困難なため、今回は地下DSの合流部の設計を行なう際の基礎データを得ることを目的として、首都高東池袋オンランプ

における地上部実走実験データと、そのときの周辺交通流を再現させた地上DSによる走行実験データを比較することにより、心理的負担の短時間変動の大きな合流部における走行データの再現性について、ミクロな視点で考察を行なった。使用した実走実験のサンプルの合流形態を図11に示す。DS実験と実走実験は同じ被験者である。

図12は制限を与えず自由に走行させた時の走行データである。これを見ると、DSの走行速度が実走より約40km/hも大きい。そのため合流ギャップも実走とは異なるギャップに入っていた。これは、DSを活用した研究で必ず問題になる、速度感の欠如からくる結果であろう。次に、図13は実走実験時の合流速度である50km/hで走行するよう推奨した場合の運転挙動データである。この時、実走実験と同じギャップに合流していたが、被験者は速度が非常に遅く感じることから強い違和感があり、そのため心理的負担の変動も非常に少ない。最後に、図14は実走実験時の合流速度より若干大きい70km/hで走行するよう推奨した場合である。この時、他車の速度も同様に大きくしている。被験者は、この実験時が一番実走実験時と近い感触で走行できたと語っており、RR間隔の推移傾向がほぼ一致していることから、そのことが伺える。

このように、DS実験ではシミュレータの性質上、どうしても実道路上を走行している場合より速度感が欠如してしまうため、心理的負担もDS実験では変化しにくいといえる。そのため、リアリティの向上や映像の流し方を工夫することにより、速度感を現実さに近づける努力が今後も必要であり、地下DSの合流部を設計する上でも、これらの実験結果を踏まえ、より現実性を高める必要がある。

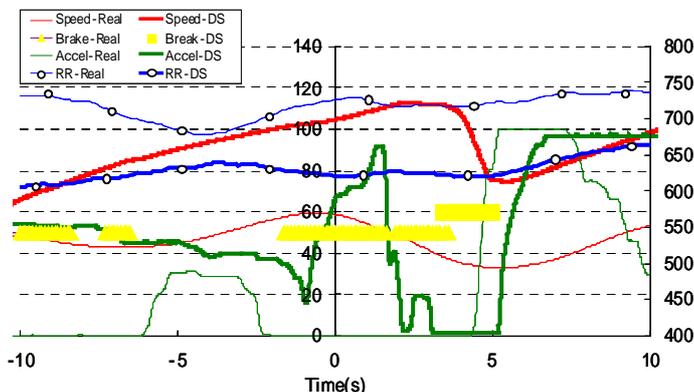


図-12 合流部走行データ(自由走行)

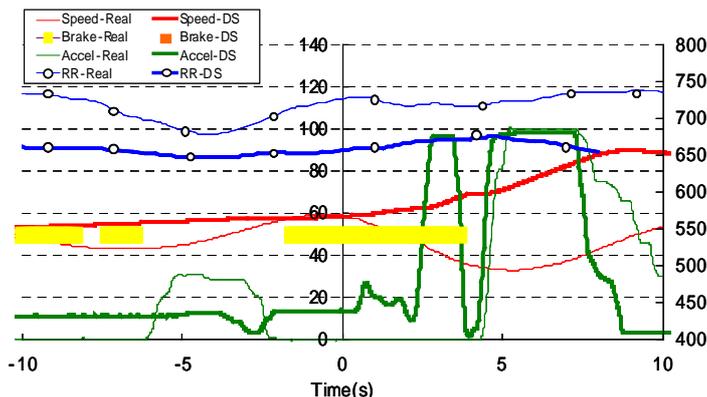


図-13 合流部走行データ(50km/h 推奨)

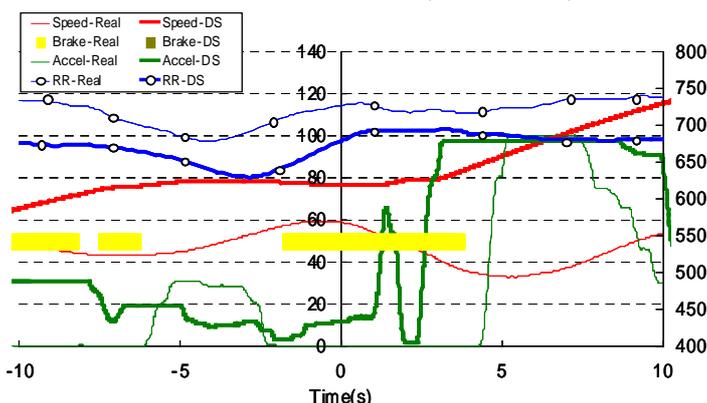


図-14 合流部走行データ(70km/h 推奨)

6. おわりに

本研究では、地下構造の都市内高速道路の走行環境を分析するためのDSを設計開発し、特に他車の制御方法について詳細に検討した。また、その試作機によって、心理的負担を中心にDS実験データの再現性を検討した。その結果、DS実験によっても、地下空間の圧迫感やカーブ等の道路構造変化による心理的負担の変化がある程度再現されていることがわかった。しかし、合流部における他車との交錯による心理的負担の短時間変動の再現性を分析したところ、DSでは速度感が欠けるため、速度を出しすぎる傾向にあり、また、実走実験時と同様の速度で走行するよう推奨した場合には、心理的負担の変動が実走時ほど現れなかった。実走時の走行速度より大きな速度で走行するよう推奨した場合には、心理的負担の変動

が再現されるという結果からも、今後、DSのリアリティを向上させる工夫が必要である。

今後、DSシステムの検証をさらに行ながら、その再現性を向上させ、その後、地下構造の都市内高速道路の安全性を評価し、さらに各種安全施策の効果を検討する予定である。

<謝辞>

本ドライビングシミュレータのソフトウェアは、株式会社トリオンの方々と共同研究で開発している。ここに記して関係各位に感謝の意を表する。

<参考文献>

- 1) Cofiroute A86 website, <http://www.a86ouest.com/uk/home/home.cfm>
- 2) 池田武司・飯田克弘・森康男(2000),「運転者の挙動と心理を考慮したトンネル坑口形状評価」,第20回交通工学研究会論文報告集, pp37-40
- 3) 飯田克弘・池田武司・河井健・森康男,山岸将人(2001),「プロトコル法を用いた運転者挙動分析結果に基づくサグ部の道路構造改善方針の検討」,土木計画学研究・論文集 Vol.18 no.5, pp919-926
- 4) 若杉貴志・平松金雄(1999)「前方車両衝突警報に対するドライバの反応時間」,JARI Research Journal Vol.21 No.10, pp38-41
- 5) Samantha L. Comte(2000),「New systems: new behaviour?」,Transportation Research Part F, Volume 3, Issue 2, June, pp 95-111
- 6) Linda Ng and Fred Mannering(2000),「Statistical Analysis of the Impact of Traveler Advisory Systems on Driving Behavior」,Transportation Research
- 7) Ronald R. Mourant et al. (2001),「Measuring the Divided Attention Capability of Young and Older Drivers」,80th Annual Meeting, Transportation Research Board, CD-ROM
- 8) 鈴木桂輔・ホーカンヤンソン(2001),「車線逸脱警報装置の警報呈示方法の解析 - 聴覚・触覚による車線逸脱警報を呈示した場合のドライバの操舵特性 - 」,自動車研究 第23巻 第11号, pp27-30
- 9) 川野常夫(1998),「自動車運転時の運転特性,会話特性から見た携帯電話の影響」,シンポジウム 携帯電話の利用性と人間工学, pp37-42
- 10) 西川功, Majid Sarvi, 桑原雅夫, 森田緯之(2000),「首都高速道路合流部における車両挙動に関する研究-交通流シミュレーションを組み込んだドライビングシミュレータの活用-」,第20回交通工学研究会発表論文報告集, pp.45-48
- 11) 佐佐木綱 監修・飯田恭敬 編著(1992),「交通工学」,国民科学社, pp143-149