

MOVIC-T4 を活用した都市内地下道路の走行安全性分析*

Traffic Safety Analysis in Underground Urban Expressway Using MOVIC-T4*

平田輝満**・馬原崇史***・屋井鉄雄**

By Terumitsu HIRATA**・Takashi MAHARA***・Tetsuo YAI**

1. はじめに

近年、特に都市部において検討されることの多い地下高速道路は、建設用地の問題や周辺環境への悪影響を軽減できる一方で、既存の道路空間とは異なる「トンネル」と「都市内交通」の複合的な走行環境であるが故に未知の危険性を有する。筆者らはこれまでに 10km を超える都市内地下道路で仮想的に走行実験が可能なドライビングシミュレータ (DS) を開発し、その走行安全性について分析を行ってきた¹⁾。本研究では、新たに開発を行ったドライビングシミュレータ:MOVIC-T4²⁾の再現性分析結果の概要、及び、MOVIC-T4 を活用した走行安全性分析 (新たな評価指標による運転者の覚醒水準評価、インシデント発生時の衝突危険性分析) について報告する。

2. MOVIC-T4 のシステム概要

MOVIC-T4 では、走行画面をヘッドマウントディスプレイ (HMD) に表示し、頭部トラッキング センサーにより運転者の顔の向きと走行画面を連動させ 360 度視界を再現している。また走行時の体感加速度を小型の 2 軸モーションベースで再現している。再現道路は約 15km の 3 車線地下道路であり、周辺走行車の台数、車種、走行特性を変化させ、様々な交通流シナリオを自由度高く設定可能である²⁾。

3. MOVIC-T4 による走行実験データの再現性分析

(1) 再現性検討データ

本来であれば、都市内地下道路上の走行データの再現性を直接検討することが望ましいが、本研究で対象としているような地下道路は実存しないため、それは困難である。そこで、トンネルという特性と走行実験の容易さ等の理由から、アクアライントンネル (約 10km) を対象



図-1 MOVIC-T4 の外観と走行画面

として再現性分析を行った。本研究で行う都市内地下道路の走行安全性分析のための走行実験では、追従時の覚醒水準の変動、前方停止車両に対する衝突回避挙動、に関して主に分析を行うため、再現性を検討すべき最低限の走行データとしては、追従時の覚醒水準変動を評価する指標 (皮膚電位水準: SPL³⁾), 追従車間距離、前方停止車両に対する減速挙動データである。本研究では、これらに加え、走行速度 (知覚速度) についても分析を行った。

(2) 実験概要

被験者は 10 名の本学学生である。実験はアクアラインの浮島と海ほたるの間を往復して行った。計測データは、速度、前後加速度、車間距離、時刻、SPL、RR 間隔 (心理的負担指標) である。

a) 知覚速度

被験者に 60, 100km/h と感じる速度で走行させ、両速度を交互に 3 回ずつ計測した。

b) 知覚車間距離

上記選択車間距離などを深く分析するために、知覚車間距離も併せて計測した。ここでは、25, 50, 100, 150m だと感じる車間距離で前方車両を追従させ、その時の車間距離を計測した。各車間距離は最低 3 回ずつランダムに指示・計測した。

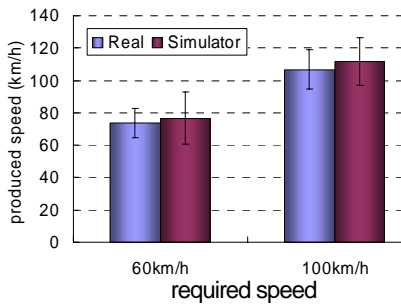
c) 選択車間距離

被験者に普段通りの安全だと感じる車間距離で前方車両に追従させた。走行速度は実験スタッフの運転する前方車で制御し、60, 100km/h の 2 パターンで交互に 3 回ずつ走行し、その際の追従車間距離を計測した。

d) 覚醒水準 (SPL)

トンネル前半は 60km/h、後半は 100km/h で走行する前方車を追従させ、その際の SPL を計測した。実験中の会話・

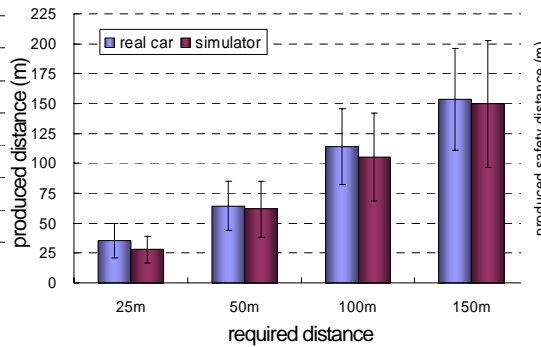
*キーワード: 都市内地下道路, DS, 走行安全性, 覚醒水準
** 正会員 博士(工学), 学振特別研究員, 東京工業大学 総合理工学研究科, 〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259 G3-14
TEL&FAX:045-924-5675, hirata@plan.cv.titech.ac.jp
***正会員 修士(工学), NIT 東日本
****正会員 工博, 東京工業大学 総合理工学研究科



	60km/h	100km/h
real	73.6 (10.6)	106.6 (12.5)
simulator	77.8 (13.2)	109.1 (13.9)
t-test result	t=1.33, P=0.19	t=0.73, P=0.47

* Mean (SD)

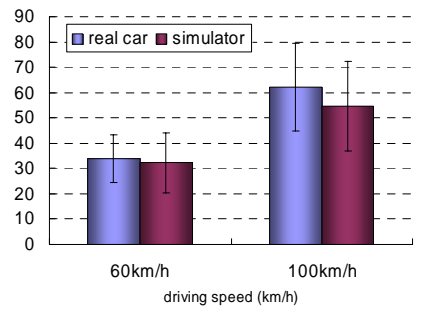
図-2 各推奨速度下での走行速度の被験者平均 (N=10)



	25m	50m	100m	150m
real	35.1 (14.4)	64.5 (20.6)	113.9 (31.6)	153.7 (42.8)
simulator	27.8 (11.2)	61.7 (23.6)	105.2 (36.6)	149.7 (53.3)
t-test result	t=2.63, P=0.01	t=0.62, P=0.53	t=1.24, P=0.22	t=0.34, P=0.74

*Mean (SD)

図-3 各推奨車間距離下での車間距離 (知覚車間) の被験者平均 (N=10)



	60km/h	100km/h
real	33.8 (9.4)	62.2 (17.2)
simulator	32.3 (11.9)	54.6 (17.8)
t-test result	t=0.53, P=0.60	t=1.66, P=0.10

* Mean (SD)

図-4 各走行速度での選択車間距離の被験者平均 (N=10)

発言は禁止した。

e) 停止挙動

一般道直線部にて 80km/h で走行し, 前方の停止車両のなるべく近くに停止させた。減速中の減速度の調整は認めたが, 一度ブレーキを踏んだら離さないよう指示した。

(3) 再現性の分析結果

a) 知覚速度

図-2 は実走, シミュレータ実験における 2 つの推奨速度下での走行速度の全被験者の平均値である。まず実走データについてみると, 多くの先行研究でも言われているように, 要求速度より実際の走行速度は大きい。つまりドライバーは走行速度を過小評価している。また一般的に要求速度と実際の走行速度の差は低速ほど大きくなる傾向があるが⁽⁴⁾, その傾向も観測された。シミュレータ実験データと実走データの差をみると, 若干シミュレータ実験の生成速度のほうが実走より大きい, 有意な差ではない。つまり平均的には, シミュレータにおける知覚速度は再現性を有しているといえる。

b) 知覚車間距離

図-3 は各推奨車間距離下での実際の車間距離の全被験者平均である。全体的に DS の方が車間距離が小さい, つまり知覚車間距離は大きい (過大推計) 傾向があるが, 25m では実走とシミュレータで有意差が認められるものの, その差は大きくは無く, 他の推奨車間距離では有意差は認められなかった。

c) 選択車間距離 (安全車間距離)

図-4 は 2 つの走行速度下での選択車間距離 (安全車間距離) である。実走, DS 共に速度が上がると車間距離も大きくなり, 速度に応じた車間距離変化を再現している。また実走と DS の差をみると, 60,100km/h 走行時共に DS の方が車間距離を小さく選択する傾向があるが有意差はなかった。

d) 覚醒水準 (SPL)

皮膚電位水準 (SPL) は掌と腕内側との電位差であり,

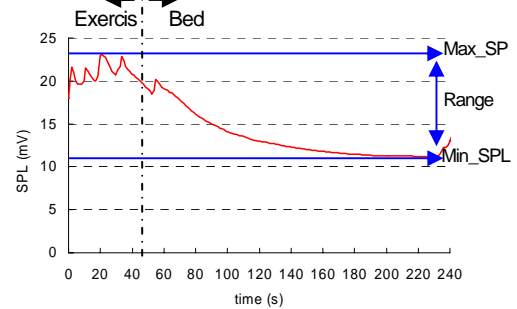


図-5 皮膚電位水準 (SPL) の基準化

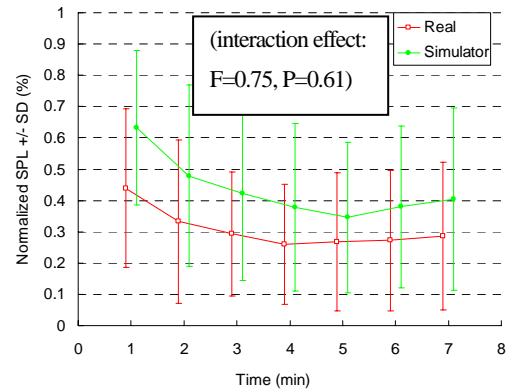


図-6 追従走行時の SPL 変化の被験者平均 (N=10)

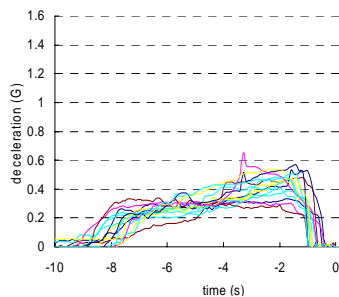


図-7 減速度 G (実走)

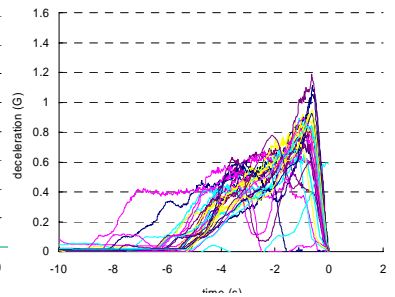


図-8 減速度 G (DS: Motion-ON)

表-1 最大減速度の比較

	Real	Simulator (Motion-ON)	Simulator (Motion-OFF)
Mean of Max Deceleration (G)	0.46 (0.09)	0.83 (0.21)	0.90 (0.17)

* Mean (SD)

覚醒水準に敏感に反応し, 時間分解能高く計測可能である。覚醒水準が低下すると SPL も低下する。分析では, 被験者ごとに軽い運動時及び安静時それぞれを最大, 最

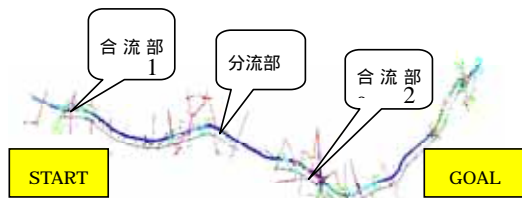


図-9 道路構造

小 SPL としデータの基準化（最小値 0～最大値 1）を行った（図 5）。図 6 に全被験者の基準化 SPL の平均値の時間変動を示す。実走・DS の絶対値には差があるものの、走行全体を通した変動傾向に差はなく（交互作用効果検定で有意差なし）、SPL を評価指標として覚醒水準の時間変動を捕らえることは可能と考えられる。

e)減速挙動

図 7, 8 に実走, DS における停止までの減速度推移（シミュレーション画面上の減速度で, MOTION による体感減速度ではない）を示す。実走ではほぼ一定の減速度で滑らかに停止しているが, DS では初動減速度が小さく（踏み出しも遅く）前方停止車の直前で急激に減速度が大きくなっている。Motion で体感加速度を再現しているとはいえ実走と同程度の減速度を再現できないことなどが影響していると考えられる。しかし, 表 1 に示すように, Motion により若干ではあるが最大限速度が抑えられ ($t=1.58, P=0.06$), 実走の減速度に近づいている。

(4)再現性分析のまとめ

以上の MOVIC-T4 による走行実験データの再現性分析の結果, 速度, 車間距離, 覚醒水準評価指標 (SPL) に関しては概ね再現性を有していることが分かった。減速挙動に関しては過大な減速度が再現される傾向があり, 安全性分析の際には, その点を留意する必要がある。(より詳細な分析内容は文献 5) 参照)

4. 都市内地下道路の走行安全性分析

(1)平常走行時の潜在的危険性分析 (覚醒水準低下)

a)実験目的

都市内地下道路では, トンネル内の圧迫感や都市内道路特有の交通量の多さ, 分合流車の存在などの心理的負担要因が存在する一方で, トンネル内の視覚刺激の単調性から覚醒水準の低下が起こることもある⁶⁾。筆者らの先行研究¹⁾では主に後者の視点から分析を行ってきており, 本研究でも同様の視点から, より信頼性の高いシミュレータと覚醒水準評価指標を用いて新たに分析を行う。本研究では, 交通密度, 走行速度, 大型車混入率を既存高速道路のデータをもとに幾つか設定し, 生体反応データ (SPL) から都市内地下道路での覚醒水準低下に起因する潜在的な危険性について分析する。

b)被験者

表-2 平常時走行実験の走行条件

条件	交通量	速度	大型車混入率
大小	大	小	小
大大	大	小	大
小大	小	大	大
*交通量大 & 速度小 : 2600 台/時 & 80km/h			
*交通量小 & 速度大 : 2000 台/時 & 100km/h			
*大型車混入率小 : 14.9%, 大 : 83.3%			

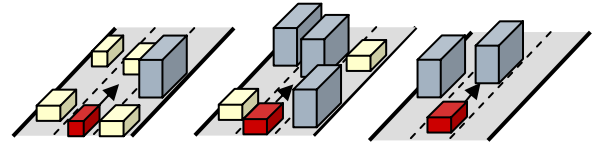


図-10 走行条件のイメージ

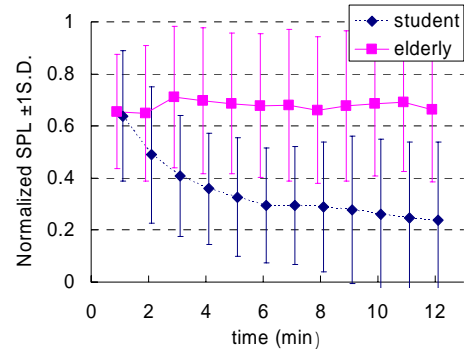


図-11 基準化 SPL (交通量大 - 大型車混入率小)

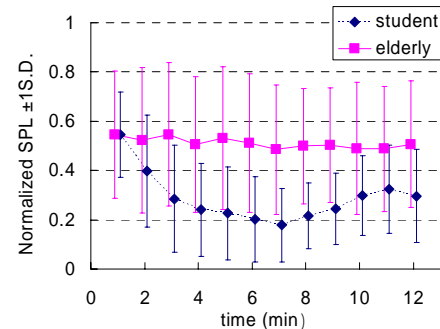


図-12 基準化 SPL (交通量大 - 大型車混入率大)

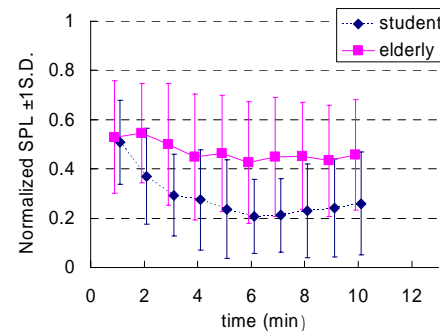


図-13 基準化 SPL (交通量小 - 大型車混入率大)

被験者は, 一般ドライバーとして本学学生及び教官が 13 サンプル(22~30 歳), 高齢ドライバーが 21 サンプル(63~72 歳)である。

c)実験条件・手順

十分な練習走行を行った後, 一般ドライバーは表 2 に示す 3 つの実験条件を 1 回ずつランダムに走行し(各走行後が十分な休憩を取る)高齢者は 3 つの実験条件のうちどれか 1 つを走行した。従って, 各走行条件のサンプル数は, 一般が 13, 高齢が 7 である。被験者は 3 車線ある

うちの中央車線で追従走行し、途中3箇所で分合流部が存在する(図9)。

d)実験結果

図11~13に、各走行条件における一般(学生+教官)と高齢者の基準化SPLの時間変動を示す。SPLが小さいほど覚醒水準が低下していることを示す。全体を通して言える事は、一般ドライバーは走行開始後、単調にSPLが低下、つまり覚醒水準が低下しており(時間の主効果は3条件全てで1%有意 by Repeated-ANOVA)、一方、高齢者は3条件とも覚醒水準の低下は見られない。一般ドライバーでは都市内地下道路の心理的負担要因より覚醒水準低下要因が勝り、高齢者はその逆であったことが推察される。条件間の差を見ると、さほど大きな差はないものの、「交通量大-大型車混入率小」が他の2条件(共に大型車混入率大)に比べ覚醒水準の低下が小さい傾向がある。大型車混入率が大きいほど圧迫感が大きく、心理的負担は高まり、覚醒水準も低下しにくいと想像されたが結果は逆の傾向であった。前方車が大型車の場合、前方視界が大きく遮られ視覚刺激の変化が抑制され、その状態の継続は覚醒水準の低下を助長するとの報告もあるが、今回、大型車混入率大の条件では追従対象車は大型車、混入率小では普通車であったため、そのことが結果の一因とも考えられる。

(2)インシデント発生時の危険性と情報提供効果の分析

a)実験目的

本実験では、実際に走行中にインシデント(事故車)が発生した場合の顕在的危険性を分析した。

b)被験者

被験者は、一般ドライバーとして本学学生及び教官が7サンプル(22~30歳)、高齢ドライバーが18サンプル(63~72歳)である。

c)実験条件・手順

事故車は図9の分流部又は後半の合流部で発生させた2ケースを模擬し、それぞれの交通流条件を表2の に設定した。実験では被験者が追従している前方車が事故車両直前で急減速し、そのブレーキランプに被験者が反応することになる。一般、高齢者それぞれを2グループに分け、1つは情報提供なし(表3の)、もう1つは情報提供あり(表3の)の実験を行った。情報提供は音声と画像によって行い、「もし情報提供があった場合は前方に注意して運転し、停止車両がある場合はそのまま停止してください」と指示した。

d)実験結果

紙面の都合上、合流部事故のケース(条件 の比較)のみ結果を示す。表4は情報提供のない場合、ある場合の追突人数、反応時間、平均減速度を示している。全体的に高齢者に対して情報提供の効果が大きいのが、学生に

表-3 インシデント発生時走行実験の走行条件

条件	交通量	速度	大型混入	事故車	情報提供
分流部事故・情報なし	大	小	大	分流部	なし
合流部事故・情報なし	小	大	大	合流部	なし
分流部事故・情報あり	大	小	大	分流部	200M前
合流部事故・情報あり	小	大	大	合流部	150M前

は効果は小さい。

表-4 情報提供効果(合流部事故)

条件 の情報提供のタイミングは前方車の減速開始とほぼ同じか若干早い程度であるため、もともと効果は小さいと考えられるが、前方車の減速に対する反応時間が非常に遅い高齢者には、今回のような比較的余裕の少ない情報提供であつても効果があることが示唆される。しかし、情報提供により高齢者の平均減速度はむしろ大きくなっている。非日常的な情報提供に慌て必要以上の急減速が引き起こされたと考えられる。このような、情報提供による急減速が新たな事故に繋がる可能性が伺える。ただし、MOVIC-T4では過大な減速度が生じやすいため(再現性検討参照)あくまで条件間の相対的な値の差の議論にとどまる。

(1)追突人数

	情報提供なし	情報提供あり
学生	2/4人	2/3人
高齢	7/9人	2/9人
計	9/13人	4/12人

(2)反応時間

(被験者ブレーキ開始時刻 - 前方車ブレーキ開始時刻)

	情報提供なし	情報提供あり	差の検定P値
学生	2.1秒	1.9秒	0.81
高齢	4.1秒	2.7秒	0.09*
計	3.5秒	2.5秒	0.13

(3)平均減速度

	情報提供なし	情報提供あり	差の検定P値
学生	0.43G	0.41G	0.77
高齢	0.3G	0.45G	0.08*
計	0.34G	0.44G	0.18

5. おわりに

本研究では、新たに開発したDS:MOVIC-T4の再現性及び都市内地下道路の走行安全性について検討を行い、運転者の覚醒水準低下からみた潜在的危険性、事故車発生時の顕在的危険性及び情報提供の効果について分析を行った。

参考文献

- 1) 平田他:都市内地下道路における運転者の意識水準低下に関する分析,土木計画学研究・論文集,Vol.21, No.4, pp. 915-923, 2004.
- 2) 平田他:ドライビングシミュレーションシステム Movic-T4の開発とパフォーマンス評価,第24回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 17-20, 2004.
- 3) 荒木他:パイオフィードバックによる居眠り運転防止方法の評価,土木計画学研究・講演集,Vol.29, CD-ROM, 2004.
- 4) Recarte, M. A., & Nunes, L. M.: Perception of speed in an automobile: Estimation and production. Journal of Experimental Psychology: Applied, 2(4), pp.291-304, 1996.
- 5) Terumitsu HIRATA et al.: Development of Driving Simulation System MOVIC-T4 and its Validation using Field Driving Data, Journal of the Japan Society of Civil Engineers (投稿中)
- 6) 西村千秋:ドライバーの覚醒水準と安全,国際交通安全学会誌, vol.19, no.4, pp.19-28, 1993.