

## MOVIC-T4 を活用した都市内地下道路の走行安全性に関する基礎的研究\*

### Traffic Safety Analysis in an 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

都市部において近年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、地域分断の問題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の未知の危険性を有すると考えられる。都市内地下道路などの次世代型道路の走行安全性は、既存の事故データでは説明できず、ましてや実際に走行実験をすることもできない。そこで、近年進展著しいバーチャルリアリティ技術を活用したドライビングシミュレータ(DS)実験により、それら道路の走行安全性を分析することが、1つの方法として考えられる。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DSを開発し、特にドライバーの覚醒水準に着目して、その走行安全性分析を行ってきた<sup>1)</sup>。初期のDSは体感加速度を再現するための動揺装置を持たないFixed-base型DSであったが、覚醒水準や減速挙動を分析するには運転中の体感加速度が大きく影響すると考えられる。そのため、体感加速度を再現可能で、さらに可視範囲を拡大したドライビングシミュレータMOVIC-T4を新たに開発した<sup>2)</sup>。本研究では、この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追突危険性分析)について報告する。

#### 2. 既往研究と本研究における分析の視点

トンネル内の運転挙動・走行安全性については過去にも研究が行われており、トンネル内事故の発生箇所や事故形態の統計分析<sup>3)4)</sup>、トンネル抗口・内部における速度推移・速度低下に関する研究<sup>5)6)</sup>、トンネル内走行時

の注視点<sup>3)</sup>や視線誘導方策に関する研究<sup>9)</sup>、トンネル内照明の明るさと運転挙動の関係に関する研究<sup>10)</sup>などがある。しかし、都市内の長大な地下道路を対象とした研究は筆者の知る限り存在しない。また、本研究で特に着目しているトンネル内走行時の覚醒水準低下現象であるが、トンネル内の視覚刺激の単調性、つまり、景色の変化が少なく、視界から得られる情報が変化しない状況では、脳が複雑な判断を必要とせず、次第に覚醒水準が低下する可能性があり<sup>11)12)</sup>、実際に、長大なトンネルほど事故率が高く、これは覚醒水準・注意力の低下が起因している可能性があるとの報告<sup>13)</sup>や、長大トンネルの設計に際しては退屈感の減少という視点も必要との指摘などもある<sup>14)</sup>。図-1に都市内地下道路における運転者の覚醒水準に影響を与える要因をまとめているが、トンネル内の圧迫感、地上道路との接続のための縦断勾配変化、また都市内道路における高密度交通流などの要因が重なり、普段より緊張した走行状態が予想される都市内地下道路ではあるが、ある程度の長時間走行が続くと、トンネル内の単調な視覚刺激や追従走行の継続、また大深度地下の活用による線形の直線化などの影響により覚醒水準低下が生じ得る可能性もあり、そうした場合、区間途中で存在するであろう分合流部で回避行動が正常に行えない恐れもある。筆者らの過去の研究<sup>1)</sup>で、Fixed-base型DSによる走行実験から都市内地下道路における覚醒水準低下について検証を行ったものの、DSの再現性及び覚醒水準評価指標の信頼性の問題も残されていた。

以上の問題意識のもと、本研究では、都市内地下道路において覚醒水準低下が起こりうるか、どのような要因が影響を与えているか、また覚醒水準低下の防止対策を検討する際には何を考慮すべきかについて、MOVIC-T4による走行実験を通じて分析を行った。なお、覚醒水準評価指標についても、より信頼性の高い皮膚電位水準(SPL)を新たに活用した。最後に、地下道路では大規模事故の防止が特に求められるため、実際にインシデントが発生した場合の後続車両の追突危険性と簡易な情報提供システムの効果分析を行い、今後行う予定である多重衝突事故の防止対策の検討に繋げるための基礎データを収集した。

\*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(PD), 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

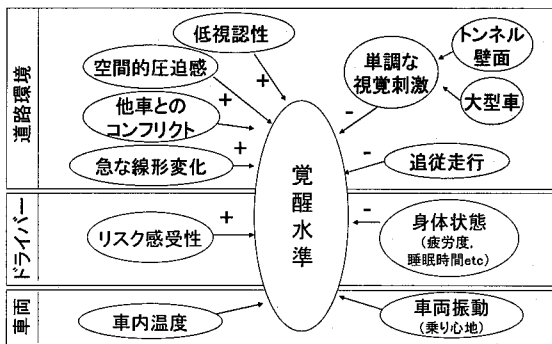


図-1 都市内地下道路における運転者の覚醒水準に影響を与える要因

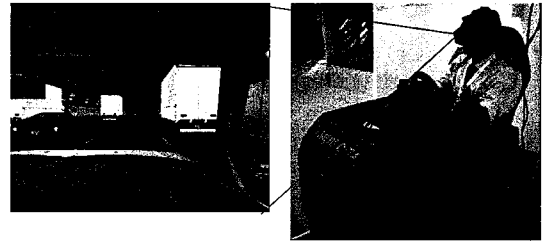


図-2 MOVIC-T4 の外観と走行画面

表-1 MOVIC-T4 による走行実験データの再現性分析結果の概要

|                      | 推奨速度        | real                     | simulator                 | t-test result<br>(Real vs Simulator) |
|----------------------|-------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 知覚速度 (km/h)          | 60 km/h     | 73.6 (10.6)              | 77.8 (13.2)               | P=0.19                               |
| (推奨速度下における実走行速度)     | 100 km/h    | 106.6 (12.5)             | 109.1 (13.9)              | P=0.47                               |
|                      | 走行速度        | real                     | simulator                 | t-test result<br>(Real vs Simulator) |
| 選択車両間距離 (m)          | 60 km/h     | 33.8 (9.4)               | 32.3 (11.9)               | P=0.60                               |
|                      | 100 km/h    | 62.2 (17.2)              | 54.6 (17.8)               | P=0.10                               |
|                      | 推奨車両間距離     | real                     | simulator                 | t-test result<br>(Real vs Simulator) |
| 知覚車両間距離(m)           | 25 m        | 35.1 (14.4)              | 27.8 (11.2)               | P=0.01**                             |
|                      | 50 m        | 64.5 (20.6)              | 61.7 (23.6)               | P=0.53                               |
| (推奨車両間距離下における実車両間距離) | 100 m       | 113.9 (31.6)             | 105.2 (36.6)              | P=0.22                               |
|                      | 150 m       | 153.7 (42.8)             | 149.7 (53.3)              | P=0.74                               |
|                      | Real        | Simulator<br>(Motion-ON) | Simulator<br>(Motion-OFF) | t-test result<br>(Motion-ON vs -)    |
| 急制動時の最大減速度 (G)       | 0.46 (0.09) | 0.83 (0.21)              | 0.90 (0.17)               | P=0.06*                              |

>> Mean (Standard Deviation)

### 3. MOVIC-T4 のシステム概要

MOVIC-T4 (図-2) 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による素早い傾斜運動で再現している。以上の構成により、MOVIC-T4 は非常に小型であるにも関わらず体感加速度を再現し、また HMD により広い可視範囲及び VR 空間への高い没入感を達成している点が既存 DS と異なる特徴である。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<sup>2)</sup>。

### 4. MOVIC-T4 による走行実験データの再現性分析の概要

#### (1)はじめに

本研究の先行研究で、実道走行実験データとの比較により MOVIC-T4 による走行実験データの再現性検討を行った<sup>15)16)</sup>。本稿では以下にその概要のみを説明する。

#### (2)再現性検討を行う走行データ

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、①追従時の覚醒水準の変動、②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、追従車両間距離、前方停止車両に対する減速挙動データである。本分析では、これらに加え、走行速度 (知覚速度) に関しても分析を行った。

#### (3)実験方法と結果の概要

以下にそれぞれの走行データに関する再現性分析の結

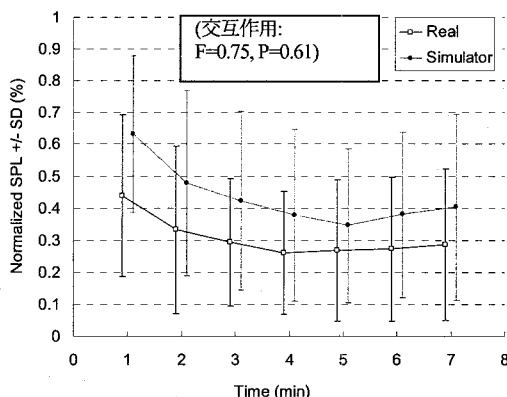


図-3 追従走行時の SPL 変化の被験者平均

果の概要を示す。実走及び DS 走行実験はアクアライントンネル（約 10km）を対象として行った。被験者は 10 名の本学学生である。表-1 に結果の概要（各指標の被験者平均）を示す。

#### a) 知覚速度

被験者に 60, 100km/h と感じる速度で走行させた結果、両速度において実走と DS に有意な差は見られず、DS の知覚速度は再現性を有しているといえる。

#### b) 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 60・100km/h）。その結果、実走と 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おり、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。

#### c) 知覚車間距離

上記選択車間距離などをより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た。その結果、DS の知覚車間距離が若干大きい傾向があったものの、50～150m では有意差はなく、25m では有意差が認められるものの、その差は大きくはなかった。

#### d) 覚醒水準の評価指標（皮膚電位水準：SPL<sup>17)18)</sup>

皮膚電位水準（SPL）は掌と腕内側との電位差であり、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。掌に生じる精神的発汗により、覚醒水準が低下すると SPL も低下する。実験では、トンネル前半が 60km/h、後半が 100km/h で走行する普通車を追従させた。その結果、実走・DS の走行全体を通した変動傾向に差はなく（図-3、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) 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。その結果、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、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、Motion により若干ではあるが最大限速度が抑えられ、実走の減速度に近づいていた。

#### (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 15)16)参照）

### 5. 都市内地下道路の走行安全性分析

#### (1) 都市内地下道路における覚醒水準低下に関する分析（平常走行時の潜在的危険性分析）

##### 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<sup>11)12)</sup>。筆者らの先行研究<sup>1)</sup>では主に後者の視点から分析を行ってきたが、使用していた DS が Fixed-base 型であることから、体感の加速度や揺れ、振動などの刺激が一切なく、実際より覚醒水準低下を引き起こしやすい可能性も否めない。また覚醒水準の評価指標として瞬き頻度を使用していたが、覚醒水準と相関があるとされている「生理的瞬き」と「意識的な瞬き」を分離できない問題や、シミュレーション画面を注視し続けることによる眼の疲労の影響など、改善すべき点が幾つかあった。本研究でも同様の視点から都市内地下道路の走行安全性分析を試みるが、上記課題を改善するために、新たなシミュレータ MOVIC-T4 と覚醒水準評価指標 SPL を用いて分析を行う。

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

本実験は、比較的危険性の高い運転者と考えられる、

表-2 平常時走行実験の走行条件

| 条件     | [A] | [B] | [C] |
|--------|-----|-----|-----|
| 交通量    | 大   | 大   | 小   |
| 速度     | 小   | 小   | 大   |
| 大型車混入率 | 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%

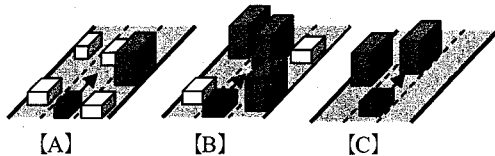


図-4 走行条件のイメージ

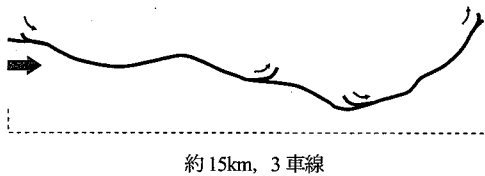


図-5 道路構造の概要

学生ドライバー13 サンプル (22~30 歳) と高齢ドライバー21 サンプル (63~72 歳) を対象被験者として行った。高齢者は一般的に身体能力の衰えにより、学生ドライバーに関しては運転経歴の短さによる未熟な運転技能やリスクテイキングな運転などにより危険性が高いと考えられる。

#### c) 実験条件・手順

十分な練習走行を行った後、学生ドライバーは表-2 及び図-4 に示す3つの実験条件を1回ずつランダムに走行し(各走行後は十分な休憩を取る)、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、学生が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指示された特定車両を追従走行した、また、走行区間の途中4箇所で左側合流車・分流車が存在するが(図-5)、被験者は中央車線を走行しており、直接それら車両の影響は受けないが、左車線走行車が合流車に対して減速を行ったり(中央車線に避走は行わないが、そういった情報は一切被験者へは与えていない)、分流したりするため、視覚情報として間接的に影響を与えている。

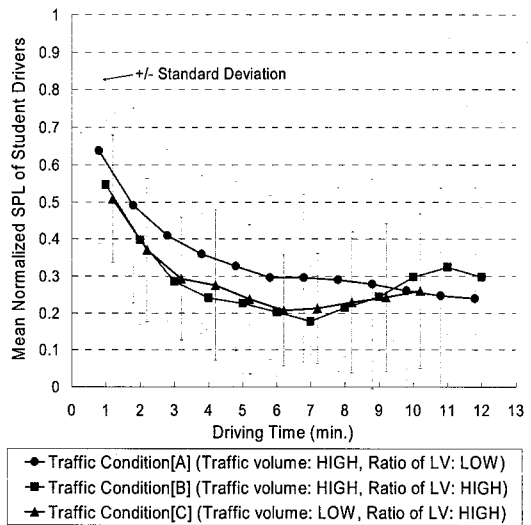


図-6 基準化 SPL の時間変動 (被験者平均: 学生)

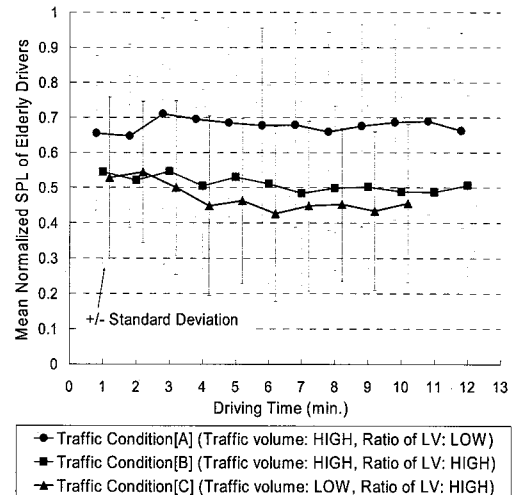


図-7 基準化 SPL の時間変動 (被験者平均: 高齢者)

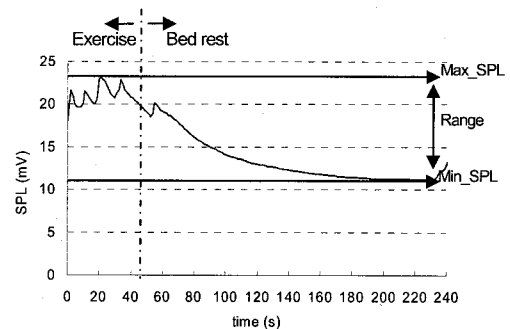


図-8 皮膚電位水準 (SPL) の基準化

#### d)実験結果

図-6、図-7に、3つの走行条件（表-2）におけるSPLの時間変動の学生・高齢者ごとの平均値を示す。SPLは個人ごとにその値や変動幅が異なり、また、あるSPLの値がどの程度の覚醒水準を表すかも異なる。従って、本分析では、被験者ごとに軽い運動時及び目を閉じて安静時のSPLを別途計測し、それぞれ最大・最小SPLとし、データの基準化（最小値0～最大値1）を行った（図-8参照）。「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、学生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（SPLに対する時間の主効果は3条件全てで1%有意：表-3参照）、一方、高齢者は3条件とも有意な覚醒水準の低下は見られない。学生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。リスクの感受性が低い学生等の若年ドライバーは、5分程度の走行で覚醒水準が低下しうるとともに、道路構造からみると、前半の単路部において覚醒水準が低下しきっており、その後の分合流部において周辺車両とのコンフリクトがある場合は、覚醒水準低下の影響で適切な回避行動が取れない可能性も十分にあることが示唆された。

続いて条件間の差を見る。表-4に各条件別の全走行時間のSPL平均値を示しているが、さほど大きな差はないものの、「【A】交通量大ー大型車混入率小」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（いずれのペアも統計的に有意な差はないが、高齢者の【A】と【C】の間は15%有意）。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。大型車に追従する場合は前方の交通状況が把握しづらい上、覚醒水準の低下も引き起こすとなると、非常に危険な走行状態と言える。また、スリードリミッターの装備義務のある大型車に追従する場合は、比較的走行速度が低いため車間が詰まり易いとも考えられる。従って、前方車が大型車の場合は特に広い車間を維持させる工夫が必要であろう。

(2)インシデント発生時の追突危険性と前方障害物の情報提供効果の分析

#### a)実験目的

トンネル内事故は、閉塞空間であるが故に大災害に発

表-3 SPL 時間変動の検定結果

| 走行条件                               |     | [A]    | [B]    | [C]    |
|------------------------------------|-----|--------|--------|--------|
| 交通量                                |     | 大      | 大      | 小      |
| 大型車混入率                             |     | 小      | 大      | 大      |
| 時間の主効果の検定結果:P値<br>(Repeated-ANOVA) | 学生  | 0.00** | 0.00** | 0.00** |
|                                    | 高齢者 | 0.81   | 0.95   | 0.56   |

表-4 全走行時間平均SPLの条件間比較

| 走行条件       |     | [A]  | [B]  | [C]  |
|------------|-----|------|------|------|
| 交通量        |     | 大    | 大    | 小    |
| 大型車混入率     |     | 小    | 大    | 大    |
| 基準化SPLの全平均 | 学生  | 0.34 | 0.29 | 0.28 |
|            | 高齢者 | 0.68 | 0.51 | 0.47 |

表-5 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 | 大型車混入率 | 事故車 | 情報提供  |
|-------------|-----|----|--------|-----|-------|
| ①分流部事故・情報なし | 大   | 小  | 大      | 分流部 | なし    |
| ②合流部事故・情報なし | 小   | 大  | 大      | 合流部 | なし    |
| ③分流部事故・情報あり | 大   | 小  | 大      | 分流部 | 200M前 |
| ④合流部事故・情報あり | 小   | 大  | 大      | 合流部 | 150M前 |

展する可能性があり、大深度地下道路ともなれば災害時の避難もより困難であろう。単発の事故を防ぐことも当然重要ではあるが、単発の事故は前述の覚醒水準低下等により確率的に生じてしまう（完全には防ぐことはできない）と考えると、事故車両の後続車が巻き込まれる事故、つまり2次的追突事故や多重衝突事故を防止する方法も併せて検討し、大災害に発展させない工夫をすることが、地下トンネルでは特に重要であると考えられる。今後、都市内地下道路における多重衝突事故分析及び事故防止対策を検討するにあたり、本実験ではまず、実際に走行中にインシデント（事故車）が発生した場合に、その後続車がどの程度衝突する可能性があるのか、また簡易な前方事故車に関する情報提供システムの効果がどの程度あるのかについて基礎的な分析を行った。

#### b)被験者

被験者は、学生ドライバーとして本学学生7サンプル（22～30歳）、高齢ドライバー18サンプル（63～72歳）である。

#### c)実験条件・手順

事故車は、区間中間の分流部及びやや後半の合流部（図-4）で発生させた2ケースを模擬し、それぞれの交通流

表-6 インシデント発生時の追突危険性と情報提供効果

| 分流部事故（区間中間）：速度＝低                  |        |        |            | 合流部事故（区間後半）：速度＝高 |        |        |            |
|-----------------------------------|--------|--------|------------|------------------|--------|--------|------------|
| (1) 追突人数                          |        |        |            |                  |        |        |            |
|                                   | 情報提供なし | 情報提供あり | 母比率の差の検定P値 |                  | 情報提供なし | 情報提供あり | 母比率の差の検定P値 |
| 高齢                                | 5/9人   | 0/9人   | 0.01**     | 高齢               | 7/9人   | 2/9人   | 0.02**     |
| 学生                                | 0/4人   | 0/3人   | -          | 学生               | 2/4人   | 2/3人   | 0.66       |
| 計                                 | 5/13人  | 0/12人  | 0.02**     | 計                | 9/13人  | 4/12人  | 0.07*      |
| (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 | 平均の差の検定P値  |                  | 情報提供なし | 情報提供あり | 平均の差の検定P値  |
| 高齢                                | 2.1秒   | -1.1秒  | 0.00**     | 高齢               | 4.1秒   | 2.7秒   | 0.09*      |
| 学生                                | 3.2秒   | -2.9秒  | 0.00**     | 学生               | 2.1秒   | 1.9秒   | 0.81       |
| 計                                 | 2.4秒   | -1.5秒  | 0.00**     | 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 | 平均の差の検定P値  |                  | 情報提供なし | 情報提供あり | 平均の差の検定P値  |
| 高齢                                | 0.40G  | 0.37G  | 0.71       | 高齢               | 0.3G   | 0.45G  | 0.08*      |
| 学生                                | 0.34G  | 0.18G  | 0.03**     | 学生               | 0.43G  | 0.41G  | 0.77       |
| 計                                 | 0.38G  | 0.32G  | 0.33       | 計                | 0.34G  | 0.44G  | 0.18       |

\*\*1%有意、\*5%有意

条件を表-2の【B】、【C】に設定した。当初は、発生位置の違いで、前節の覚醒水準低下の影響を見ようと考えていたが、学生は区間中間ですでに低い覚醒水準に達しており、また高齢者は覚醒水準に変化がなかったため、事故車の発生位置の違いは、本分析には特に影響を及ぼさないと考えられる。また、走行条件の【B】と【C】では走行速度が異なるため追突可能性に大きな影響を及ぼす。

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。学生、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-5の①②）、もう1つは情報提供あり（表-5の③④）の実験を行った。情報提供はフロントガラス部にヘッドアップディスプレイとして「前方に低速車あり」という画像情報を警告音とともに提供し、「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。情報提供タイミングは、分流部では事故車の200M前、合流部では150M前であり、合流部事故の方が余裕の少ない状況である（前者はインフラ側で事故車を検知し、後者は車載システムにより前方車の急減速を検知するイメージ）。このような情報提供システムは試験的に実用化もされており、本研究においても地下道路における多重衝突事故分析を行うにあたり、まずはこのような簡易な情報提供システムの効果と影響について把握し、今後の研究における走行支援システムの検討に繋げる。

#### d) 実験結果と考察

表-6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。当然ではあるが、合流部事故の方が、分流部事故に比べて追突可能性が高い（走行速度が速いため）。また、全体的に高齢者の方が追突危険性が高く、その分、高齢者に対して情報提供の効果が大きい。学生には効果は小さい。条件④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っても効果があることが示唆される。しかし、合流部事故では、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。減速度が大きくなったことで追突を回避できたとも言えるが、一方で、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も考えられる。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も伺える。ただし、MOVIC-T4では過大な減速度が生じやすい（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。

#### (3) 走行安全性分析のまとめ

以上の走行安全性の分析より、約15kmの都市内地下道路において、特に若年ドライバーの覚醒水準低下が起り得ること、一方、高齢ドライバーは緊張状態が続くこと（高覚醒を維持）、大型車追従が覚醒水準低下の一因になっている可能性があることが分かった。つまり、高齢ドライバーにとって都市内地下道路は、トンネル内の圧迫感や高密度交通流などの要因により、普段より緊張

した走行状態となり易い一方で、リスク感受性の低い若年ドライバーにとっては、トンネル内の単調な視覚刺激などの影響により、5分程度の走行で覚醒水準低下が生ずる可能性が高いことが示唆された。従って、緊張状態を緩和するための道路線形の改良や交通流の制御を検討するとともに、道路線形やトンネル内壁デザインの単調性を緩和するなどの覚醒水準低下防止対策も併せて検討する必要があると考えられる（特に分合流部手前区間において）。また、大型車に追従する車両の車間距離を広めに維持する対策も検討事項として挙げられる。

また、インシデント発生時の追突危険性の分析より、特に高齢者が事故発生時に前方の事故車へ追突する可能性が高いこと、簡易な情報提供でも追突を回避させる効果が十分にあること、また情報提供により過度の急減速が引き起こされる可能性もあること、などが分かった。過度の急減速により次の後続車の追突が引き起こされることも考えられるので、単純に急減速により追突を回避できたから問題なしとするのではなく、さらなる後続車を巻き込む多重衝突事故に発展させないための追突回避をさせる走行支援策も併せて必要であると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、新たに開発した MOVIC-T4 を活用し、都市内地下道路の走行安全性分析を行った。走行安全性分析では、運転者の覚醒水準低下からみた潜在的危険性を検証し、都市内地下道路でも覚醒水準低下が起こりうることを示した。さらに、事故発生時の2次的追突危険性及び情報提供の効果について定量的に分析を行った。

今後の課題としては、より高密度で周辺車両とコンフリクトがある状況における走行安全性の分析、覚醒水準の低下防止対策の検討（インフラ側からの対策、車載型の支援装置による対策等）、多重追突事故の発生メカニズムの分析及び被害軽減対策の検討などが挙げられる。

## 謝辞

本研究は、シミュレーション研究会を通して国土交通省関東地方整備局外環調査事務所に多大なご協力を頂いた。また、三井住友海上福祉財団より平成16年度研究助成を受けている。ここに記して関係各位に感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 平田輝満, 飯島雄一, 屋井鉄雄: 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) 平田輝満, 山口晋弘, 屋井鉄雄, 高川剛: 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) 阪神高速道路公団・財団法人災害科学研究所: トンネル事故に関する研究 (その3), 1999.
- 4) F. H. Amundsen and G. Ranes: Studies on traffic accidents in Norwegian road tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, Issue. 1, pp.3-11, 2000.
- 5) 後藤秀典, 田中淳, 赤羽弘和, 割田博: 都市高速道路のトンネル区間を対象とした事故分析, 第25回交通工学研究発表会論文報告集, pp.49-52, 2005.
- 6) 越正毅: 高速道路トンネルの交通現象, 国際交通安全学会誌, Vol.10, No.1, pp.32-38, 1984.
- 7) 飯田克弘, 森康男, 金鍾旻, 池田武司, 三木隆史: ドライビングシミュレータを用いた室内実験システムによる運転者行動分析-実験データの再現性検討と高速道路トンネル項口の評価, 土木計画学研究・論文集 No.16, pp93-100, 1999.
- 8) 仲柴二三夫, 竹本勝典, 上野卓雄: トンネル抗口における視環境改善対策について, 第19回交通工学研究発表会論文報告集, pp.5-8, 1999.
- 9) 実車実験によるトンネル走行時の視線誘導方策に関する研究, 第22回交通工学研究発表会論文報告集, pp.9-12, 2002.
- 10) 永関久信, 米川英雄: 交通特性とトンネル内照明-東名改築・都夫良野トンネル高速走行実験と実態調査, 高速道路と自動車, Vol.35, No.10, pp.19-26, 1992.
- 11) 加藤正明: 高速道路の事故分析-トンネル内の事故原因について-, 人間工学, Vol.16, No.3, pp.99-103, 1980.
- 12) 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.
- 13) Lemke, K.: Road Safety in Tunnels, Transportation Research Record 1740, pp.170-174, 2000.
- 14) Lidstrom, M.: Using Advanced Driving Simulator as Design Tool in Road Tunnel Design, Transportation Research Record 1615, pp.51-55, 1998.
- 15) Terumitsu HIRATA, Tetsuo YAI and Takashi MAHARA: Traffic Safety Analysis in an Underground Urban Expressway using Driving Simulation System MOVIC-T4, Transportation Research Board 85<sup>th</sup> Annual Meeting, CD-ROM, 2006.
- 16) Terumitsu HIRATA, Tetsuo YAI and Tsuyoshi TAKAGAWA: 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).
- 17) 宮田洋 (監修)・藤沢清, 柿木昇治, 山崎勝男 (編集): 新生理心理学<1巻>生理心理学の基礎, 北大路書房, 1998.
- 18) 荒木学, 屋井鉄雄, 平田輝満: バ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.

---

## MOVIC-T4 を活用した都市内地下道路の走行安全性に関する基礎的研究

平田輝満・馬原崇史・屋井鉄雄

次世代道路である都市内地下道路は、都市内道路とトンネルの複合的走行環境となり、未知の危険性を有すると考えられる。本研究では、新たに開発したドライビングシミュレータ MOVIC-T4 を活用し、長大な都市内地下道路の走行安全性分析を行った。まず、トンネル内特有の視覚刺激の単調性に起因した運転者の覚醒水準低下からみた走行安全性を検証し、約 5～10 分程度の走行で覚醒水準低下が起こり得ることを示した。また、区間途中で事故車両が発生した場合の後続車の追突危険性及び、簡易な情報提供システムの効果について分析も行った。

---

## Traffic Safety Analysis in an Underground Urban Expressway using MOVIC-T4

By Terumitsu HIRATA・Takashi MAHARA・Tetsuo YAI

This paper describes the traffic safety analysis in an underground urban expressway using the motion-base driving simulator MOVIC-T4. First, the deterioration of a driver's awareness level is analyzed. Second, the secondary accident risk of rear-end collision to the accident vehicle is analyzed. In addition, the effectiveness of a simple information system is analyzed under the abovementioned risky traffic situation. The results indicated that the deterioration of the driver's awareness level can occur while driving in underground urban expressways for around 10 minutes. An information system to warn the driver of an accident vehicle ahead can prevent a rear-end collision.

---