

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 Underground Urban Expressway

屋井研究室 01M30030 飯島 雄一 (IIJIMA, Yuuichi)

Keywords : 意識水準 , 心理的負担 , 都市内地下道路 , ドライビングシミュレータ
consciousness level, mental-load, urban expressway tunnel, driving simulator

1. 背景, 目的

高密度化された都市内において新規高速道路を建設する場合には, 周辺環境への影響を考慮して地下構造で検討されることが多い。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る。さらに都市内道路となれば, 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ることや, 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, より大きな負担が予想される。だが一方で, トンネル内走行時は, その視覚刺激の単調性などから, ドライバーの意識水準の低下が起こる可能性も指摘されている。都市内地下道路では他車との交錯が多いことから, 一見して意識水準の低下は起こり難いと考えられるが, 走行条件によっては意識水準の低下が起こり得ると考えた。この仮説が正しいとすると, 意識水準の低下した状態で合流部等の交通流が乱れる地点に進入し, 適切な回避行動がとれない危険性があると考えられる。そこで本研究では, 主に高齢ドライバー(以下高齢D)を対象として, ドライビングシミュレータ(以下DS)による走行実験を行い, 都市内地下道路における心理的負担及び, 意識水準に関して分析を行った。

2. 既往研究と本研究の位置付け

トンネル内の走行安全性に関する研究は比較的多く行われており, 運転挙動データ, 事故統計データ, アンケートによる意識調査等を用いて様々な角度から検討されている。しかし, 心理的負担や意識水準といったドライバーの内面に着目し, さらに都市内トンネルを対象として走行

安全性を検討している研究は見当たらない。また, 運転中の意識水準に関する研究では, その危険性の割に客観的な評価が困難であることから, 研究のほとんどが信頼性の高い意識水準評価指標や意識水準推定方法を探るものであり, 道路評価の視点から意識水準に着目した研究は数少ない。本研究では, DSを活用した都市内地下道路における走行実験から, 主に, どのような走行条件で意識水準が低下し得るのかを詳細に分析し, 走行安全性評価の基礎データを得ることを目的としている。

3. 都市内地下道路における意識水準と心理的負担

3-1. 意識水準とは

意識水準とは大脳皮質の活動度合いを意味し, 生体の内面的, 外面的要因によって常に変動し, 極端に低下した状態が睡眠である。意識水準の低下を引き起こす要因は, 生理的リズム, 疲労, 作業の単調性などが考えられ, 作業前の体調がよくても作業内容が単調であれば意識水準の低下が起こる可能性がある。

3-2. 意識水準の低下した走行の危険性

意識水準の低下により, ドライバーは速度感や立体感といった正常な走行感覚を奪われ, 次第に, 体や目は起きているのに脳のはたらきが鈍いために外部の刺激に対して反応を示さない状態へと陥ってしまう。その結果, 情報の誤認や判断の誤り, 動作の遅れ, 誤操作を招く可能性があり, 非常に危険な状態だといえる。

3-3. 都市内地下道路における意識水準と心理的負担

都市内地下道路では, 空間的な圧迫感や視認性の悪さ, 他車との交錯が多いことなどから, ドライバーは普段より

緊張した状態となることが予想される。しかし一方で、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が続くため、脳が複雑な判断を必要とせず、次第に脳の意識水準が低下する。また、トンネル内では速度感が掴み難いため特定車両に追従することが多いと言われており、さらに前車が大型車である場合には前方視界が遮られる。前方の視界が遮られた状態が続くと次第にスピード感が鈍り、自分の車が静止しているような錯覚に陥る。この状態に陥ると前方車両の速度に同調して走行してしまうため、脳の活動レベルが低下するとの報告もある。従って、長大な都市内地下道路においても、単路部区間で上記のような走行条件に陥ると、進入直後は緊張していたドライバーが徐々に走行に慣れ、意識水準を低下させる要因の影響が勝ってくることは十分考えられる。このような考えから、都市内地下道路の走行安全性を検討するにあたり、ドライバーの意識水準低下や心理的負担の時系列変化に着目していくことが重要であると思われる。

4. 意識水準評価指標の選定

4-1. 運転中の意識水準評価指標

意識水準評価指標は、ドライバー本人から内観報告を求める主観的評価指標と、外部からの観察や測定を行う客観的評価指標に分けられる。さらに客観的評価指標は、ドライバーの行動や様子から評価する運転行動評価指標と、ドライバーの生理的状態の変化から評価する生理的評価指標に分けられる。運転行動評価指標として、車体のブレや反応時間、タスク達成率などがあり、生理的評価指標として脳波、皮膚電位活動、眼球運動などがある。本研究では、簡易な装置で計測でき、ドライバーへの負担が少なく、過去の実績もある「瞬き頻度」と「RR 間隔」を評価指標として用いた。瞬きは、眠気が生じるような意識水準が比較的低い状態における変動に対して感度が高く、RR 間隔は、興奮状態のような意識水準が比較的高い状態における変動に対して感度が高いと言われており、本研究では両者を補完的に用いることとした。

4-2. 評価指標としてのまばたき

正常人に見られるまばたきは、生理的なまばたき、反射的なまばたき、意識的なまばたきの3種類に分類でき、意識水準の変動によって発生パターンに変化が見られ

るのは生理的まばたきである。生理的まばたきは正常人ですら毎分5~20回程度見られ、この支配中枢は視床下部および辺縁系に存在する。この視床下部、辺縁系は大脳新皮質、辺縁皮質両者に賦活、抑制作用を及ぼしているといわれ、意識水準の変動と密接に関わっている。このために意識水準が低下すると、乾燥等の眼球情報の伝達経路に不具合が生じ、その結果、瞬きの回数の増加、群発的な瞬きの発生、開閉時間の増加など様々な変化が見られる。本研究では、ドライバーの表情を録画したビデオ映像から瞬き頻度の計測を行った。

4-3. 評価指標としてのRR 間隔

RR 間隔は心電波形における最も顕著な突出点であるR波の時間間隔であり、これが大きくなると心拍数が減り安静状態に近づく。逆に小さくなると心拍数が増加し心理的負担が大きくなることを示す。RR 間隔の測定はホルダー心電計を用いて行った。

5. ドライビングシミュレータを用いた走行実験

5-1. 実験概要

走行実験は Fixed-base の DS を用いて実施し、対象道路は全長約 16km の 3 車線地下高速道路で、直線区間・カーブ区間、縦断勾配変化があり、3JCT・5IC を有する。被験者としては、比較的危険性の高いと思われる高齢ドライバー (N=10) 及び、比較対象として運転頻度の高いタクシードライバー (以下タクシーD) (N=9) を対象とした。また主に DS 実験データの再現性検討を目的とした予備的実験を学生 (N=3) に対して行った。

表 5-1. 被験者概要

| 被験者No. | 実験実施日 | 被験者区分 | 年齢(歳) | 性別 | 一般道運転頻度 |
|--------|---------------------------|-----------|-------|----|---------|
| S 01 | 2002, 11/20, 11/22, 11/25 | 学生 | 23 | 男 | 年に数回 |
| S 02 | 2002, 11/21, 11/25, 11/25 | 学生 | 22 | 男 | 月に数回 |
| S 03 | 2002, 11/26, 11/26, 12/2 | 学生 | 23 | 男 | 年に数回 |
| O 01 | 2002.12/18 | 高齢ドライバー | 68 | 男 | 週2, 3回 |
| O 02 | 2002, 12/19, 2003, | 高齢ドライバー | 66 | 男 | 月2, 3回 |
| O 03 | 2002, 12/21, 2003, | 高齢ドライバー | 67 | 男 | 週2, 3回 |
| O 04 | 2002.12/25 | 高齢ドライバー | 74 | 男 | 月1回 |
| O 05 | 2002.12/25 | 高齢ドライバー | 64 | 男 | 週1回 |
| O 06 | 2002.12/26 | 高齢ドライバー | 67 | 男 | ほぼ毎日 |
| O 07 | 2002.12/26 | 高齢ドライバー | 75 | 男 | ほぼ毎日 |
| O 08 | 2003.1/9 | 高齢ドライバー | 70 | 男 | 週2, 3回 |
| O 09 | 2003.1/10 | 高齢ドライバー | 65 | 男 | ほぼ毎日 |
| O 10 | 2003.1/11 | 高齢ドライバー | 75 | 男 | 月2, 3回 |
| T 01 | 2003.1/15 | タクシードライバー | 56 | 男 | ほぼ毎日 |
| T 02 | 2003.1/15 | タクシードライバー | 33 | 男 | ほぼ毎日 |
| T 03 | 2003.1/18 | タクシードライバー | 46 | 男 | 週2, 3回 |
| T 04 | 2003.1/18 | タクシードライバー | 44 | 男 | 週2, 3回 |
| T 05 | 2003.1/20 | タクシードライバー | 53 | 男 | ほぼ毎日 |
| T 06 | 2003.1/20 | タクシードライバー | 51 | 男 | ほぼ毎日 |
| T 07 | 2003.1/21 | タクシードライバー | 41 | 男 | ほぼ毎日 |
| T 08 | 2003.1/21 | タクシードライバー | 57 | 男 | ほぼ毎日 |
| T 09 | 2003.1/22 | タクシードライバー | 41 | 男 | ほぼ毎日 |

5-2. 走行条件の選定

本研究では、特に意識水準が低下しやすいと思われる走行条件（同一車線、前方車追従走行）を選び、その中で周辺走行車の条件（車両数、車種、走行速度）を変化させて実験を行った（表 5-2 参照）。分合流車は発生させず、全区間走行時の意識水準、心理的負担、走行挙動データの変化を観測し、周辺走行車、走行時間、道路構造等の影響を分析した。なお、表 5-1 に示す走行条件のうち、高齢 D は ~ を、タクシー D は ~ を行い、走行順は各被験者でランダムに割り当てた。また慣れの影響等を見るために、各条件のスタート後約 90 秒は、最右車線において普通車に追従させた（ピボット区間）。表 5-3 には、DS 実験データの再現性検討のための実験概要を示す。

表 5-2 本実験における走行条件の概要

| 構造 | 走行条件 | 略名 |
|-----|--|----|
| 地下 | 大型車に追従（他に周辺車なし） | 大前 |
| 地下 | 大型車に追従 + 中央車線に通過車両（約 900 台/hour/lane） | 自由 |
| 地下 | 大型車に追従 + 4 台の側方車（全て同速度） | 側方 |
| 地下 | 単独走行（周辺車なし・他条件の走行速度と同程度の速度で走行するように推奨） | なし |
| 地上* | 普通車に追従（他に周辺車なし） | 地上 |
| 地下 | 普通車に追従（他に周辺車なし） | 普前 |
| 地下 | 大型車に追従 + 前半部に停止車両 | 停前 |
| 地下 | 大型車に追従 + 後半部に停止車両 | 停後 |

* 地上：地下と同線形で周辺は草原

表 5-3. 再現性検討のための実験条件の概要

| 実験 | 実験概要 | 実験条件No | 道路条件 | 周辺車 | 停止車両 | 走行速度 |
|------|--|---------|------|---------------|------|--------------|
| A-01 | スピードメータを隠し、走行速度がわからない状態にし、推奨速度で走行してもらい、DS の速度感を見る。 | A-01-01 | 地上 | なし | なし | 推奨速度 50km/h |
| | | A-01-02 | 地下 | なし | なし | 推奨速度 50km/h |
| | | A-01-03 | 地上 | なし | なし | 推奨速度 100km/h |
| | | A-01-04 | 地下 | なし | なし | 推奨速度 100km/h |
| | | A-01-05 | 地上 | なし | なし | 推奨速度 150km/h |
| | | A-01-06 | 地下 | なし | なし | 推奨速度 150km/h |
| A-02 | 周辺車数を変化させ、その影響を見る | A-02-01 | 地下 | なし | なし | 推奨速度 120km/h |
| | | A-02-02 | 地下 | 大型前方車のみ | なし | 120km/h |
| | | A-02-03 | 地下 | 大型前方車のみ | あり | 120km/h |
| | | A-02-04 | 地下 | 大型前方車 + 大型側方車 | なし | 120km/h |
| | | A-02-05 | 地下 | 大型前方車 + 大型側方車 | あり | 120km/h |
| | | A-02-06 | 地上 | 大型前方車 | なし | 120km/h |
| A-03 | 走行速度を変化させ、その影響を見る | A-03-01 | 地下 | 大型前方車のみ | なし | 70km/h |
| | | A-03-02 | 地下 | 大型前方車のみ | あり | 70km/h |
| | | A-03-03 | 地下 | 大型前方車のみ | なし | 120km/h |
| | | A-03-04 | 地下 | 大型前方車のみ | あり | 120km/h |
| | | A-03-05 | 地下 | 大型前方車のみ | なし | 150km/h |
| | | A-03-06 | 地下 | 大型前方車のみ | あり | 150km/h |
| | | A-03-07 | 地上 | 大型前方車のみ | なし | 120km/h |
| | | A-03-08 | 地下 | 大型前方車のみ | あり | 120km/h |

6. ドライビングシミュレータによる実験データ特性と再現性

6-1. 速度感に関する実験データの分析

自分の走行速度が分からない状況にし（DS の速度計を隠す）、推奨速度（50km/h, 100km/h, 150km/h の 3 種類）で走行してもらった。図 6-1 は学生 3 人の各推奨速度にお

ける平均走行速度である。トンネルは地上に比べて平均走行速度が低くなっており（ $P < 0.01$ ）、これは同じ速度で走行しているつもりであっても、トンネル内では壁面の影響で、速度が速く感じ、無意識の内に速度を抑えた結果だと思われる。一般に、トンネル内は地上に比べて速度感が高いと言われている。今回の結果はそれと同傾向を示しており、DS 上でトンネル内の速度感覚が再現されているといえる。

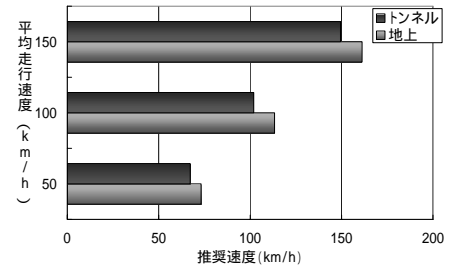


図 6-1 DS における地上とトンネルの走行速度感覚の比較

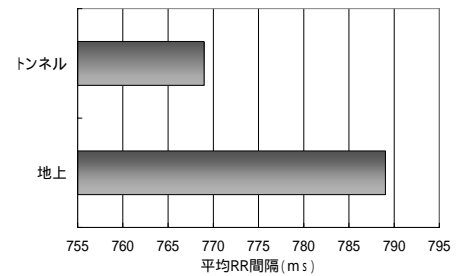


図 6-2 トンネル内走行と地上走行の平均 RR 間隔の比較

6-2. 心理的負担に関する実験データの分析

DS 上でトンネル特有の圧迫感を再現できているかについて検討を行った。学生 3 人が地下道路と地上道路を、それぞれ 5 回ずつ走行したときの平均 RR 間隔を比較したものが図 6-2 である。ただし、トンネル内ではその視覚の単調刺激により、走行の後半で意識水準が低下し、RR 間隔が変化することも考えられるので、厳密なトンネルの圧迫感の影響を見るために、走行開始から 90 秒間のデータを対象にしている。結果を図 6-2 に示す。地上に比べてトンネル内走行では平均 RR 間隔が短くなっており（ $P < 0.01$ ）、心理的負担が大きい傾向が表れている。DS でトンネル内の圧迫感が再現されているといえる。

7. 都市内地下道路における意識水準の分析

高齢 D 及びタクシー D の瞬き頻度（回/分）の時系列データ（走行条件別の平均）を、それぞれ図 7-1、図 7-2 に示す。瞬き頻度は、被験者によって非常に差があるため、被験者ごとに地下走行条件のピボット部の瞬き回数を算出し、その値で瞬き頻度を除すことにより基準化を行った。

なお、高齢 D の中には、瞬き頻度が正常人より非常に少ない被験者が数人存在したため、そのデータは除外した。今回、分析で使用できた被験者数は、高齢 D が 5 人、タクシー D が 7 人である。

まず、被験者属性の比較を行うと、高齢 D の方が、タクシー D に比べて、全体的に瞬き頻度の変動が大きく、高齢 D の方が、意識水準の変動が大きいことが伺える。瞬き頻度の時系列変化量を統計的に検定したところ (Repeated Measures ANOVA)、高齢、タクシー D の両者で、すべての時点間で差がある訳ではないが、基本的に各走行条件内で、差の比較的大きな値の間は有意な差がある ($P < 0.10$)。従って、本実験程度の長さをもつ地下道路で、意識水準の低下が起こりうることを示唆される。

また、高齢者の変動パターンと、図 7-3 の道路構造図を比較すると、分合流部やその案内標識の存在が影響していることがわかる。それらの刺激のない 3~4 分時点の区間で非常に意識水準が低下していることがわかる。このことから、この 2km 弱の単路部区間でも意識水準の低下が起こり、さらに最も現実に近い交通流である「自由」においても、その傾向が見られることから、交通量の多い都市内道路でも、意識水準の低下が起こりうることを示唆される。また刺激に関しては、合流車等がなくても、道路構造の変化のみで、意識水準が回復し、また、これは予想外であったが、道路標識により、ドライバーの意識水準が回復する可能性があることがわかった。

また、各条件間の瞬き頻度の変動パターンの差を検討したところ (パターンの平行性の検定)、高齢 D では、「大前」と「側方」「なし」の条件間で差が認められ、その他は差が認められなかった。今回は、全体的に車間距離が 100m 以上離れるケースが多かったため、追従対象車の影響があまり無かったと考えられる。また、側方に車両が走行している場合には、その圧迫感により、意識水準が保たれたと考えられる (「側方」の RR 間隔は他に比べて小さいことから裏付けられる)。「なし」では、自分で速度をコントロールする必要があることから、意識水準が保たれたと考えられる。

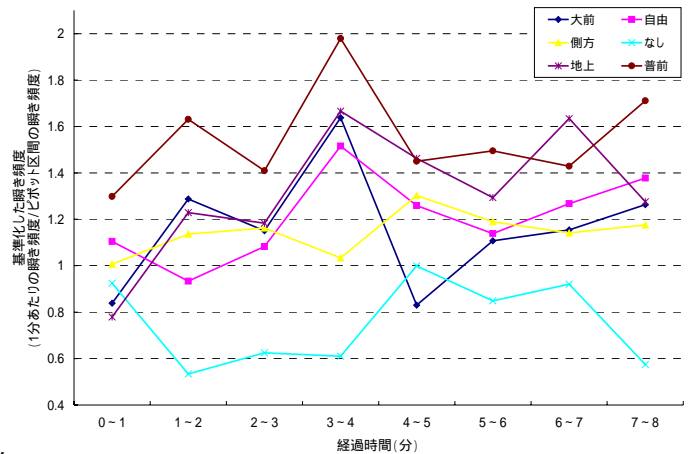


図 7-1 高齢 D の走行条件別瞬き頻度

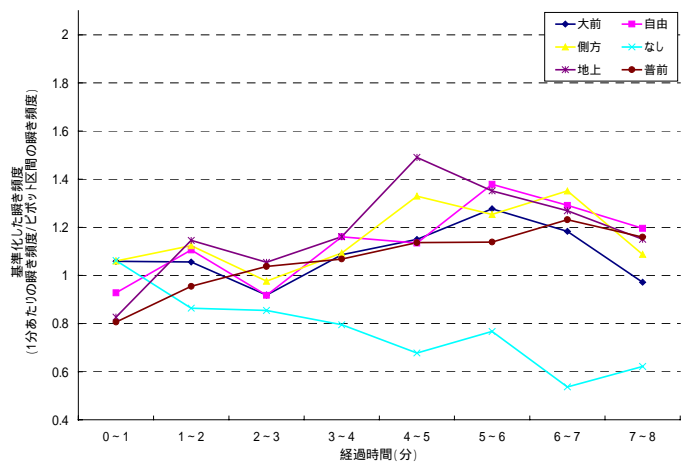


図 7-2 タクシー D の走行条件別瞬き頻度

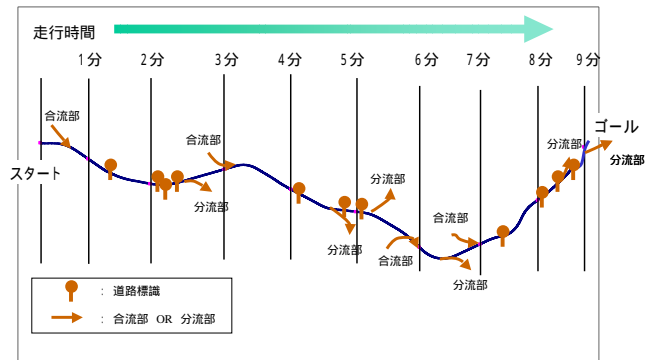


図 7-3 道路構造

8. 結論

本研究では、DS による走行実験から、特に意識水準の低下しやすい走行条件を想定したものの、都市内地下道路において意識水準の低下が起こりうることを示唆できた。今後は、合流車等の影響の分析や、瞬きに変わる、より感度の高い意識水準評価指標を用いた分析が必要である。