

副次課題種別による単調刺激内の 軽微な変化に対する反応特性分析

木村 大地¹・佐野 可寸志²・中平 勝子³・鳩山 紀一郎⁴

¹ 非会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

E-mail: s183248@stn.nagaokaut.ac.jp

² 正会員 長岡技術科学大学教授 環境社会基盤工学専攻(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

E-mail: sano@vos.nagaokaut.ac.jp

³ 非会員 長岡技術科学大学准教授 情報・経営システム工学専攻(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

E-mail: katsuko@vos.nagaokaut.ac.jp

⁴ 正会員 長岡技術科学大学客員准教授 環境社会基盤工学専攻(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

E-mail: kii@vos.nagaokaut.ac.jp

本項では、漫然状態を誘発する覚醒度の低下を防ぐ一つの方略として、音楽鑑賞や同乗者との会話といった副次課題に着目し、渋滞時に発生する前方車両のブレーキランプの変化などの軽微な環境変化への運転手の反応と副次課題との関係を生体反応によって分析する。実験は次のように設計した。渋滞下を想定した運転手視点の静止画に前方車両のブレーキオン・オフを模した視覚刺激を提示し、ブレーキに模した刺激が変化した際にマウスを押下するという主課題を与えた。上記の副次課題にクイズを含めた計 3 種類の副次課題を提供し、その際の生体反応を計測した。本実験において、同乗者との会話やクイズといった副次課題を提供した際に、主課題の状態変化に伴う生体反応は低く、副次課題を行う事により覚醒度が高い状態を維持できると予測される。

Key Words: *traffic congestion, inattentive driving, alertness, secondary task, biometric information*

1. はじめに

交通渋滞を解消するための研究はこれまでに数多くなされているが、大規模イベント開催による交通量増加や交通事故発生時などで、交通渋滞は発生する。2016年の西日本高速道路株式会社の調査¹⁾によれば、高速道路内での交通渋滞発生時の死傷事故率は、非渋滞時に比べ 30 倍程度増加している。渋滞時では必要な運転操作の減少による緊張感の緩和から、覚醒度が低下し漫然運転に陥りやすくなる。令和元年度の法令違反別交通死亡事故件数²⁾では漫然運転の 14.8%を含む安全運転義務違反が 55.8%と高い割合を占めている。そのため、渋滞中の漫然運転を解消することにより、交通事故を減らすことができると考えられる。

漫然運転とは、運転以外に注意が向いていないにも関わらず、運転に向けるべき注意力が低下している状態³⁾の事であり、眠気と関連付けた研究⁴⁾が存在する。そこで本研究では、覚醒度の低下を防ぐことにより、漫然状

態を防止することができるのではないかと考えた。

漫然運転の解消手段としての運転手の眠気を軽減する手法についてはいくつか研究されており、久米ら⁵⁾や小川ら⁶⁾は副次課題を与えることにより、漫然運転を解消できると報告されている。しかし、これらの研究は通常運転時を対象としたものが多数である。副次課題が渋滞下の運転手に与える影響を調査したものとして松村ら⁷⁾の研究が存在する。松村らは渋滞時の退屈感やストレスを減少させることを目的としての副次課題に着した研究を行った。松村らは「何もしない」「音楽」のような受動的副次課題と「会話」「クイズ」のような能動的副次課題を提供し、渋滞下の運転手の反応時間や知覚時間に副次課題が与える影響を調査した。松村らの調査によると、副次課題種別による反応時間の変化は見られなかったが、受動的副次課題に比べ、能動的副次課題を実施した場合、知覚時間が減少したと報告している。これらの研究から、能動的副次課題を実施することにより漫然状態を防止できると考えられる。しか

し、松村らの研究では、覚醒度に関する調査がなされておらず、渋滞下の運転手へ副次課題を与えることが、漫然運転防止になるかは明らかになっていない。

覚醒状態を把握するための指標として瞳孔運動が存在する。瞳孔径は自律神経の支配を受けており、副交感神経が交感神経に対して優位になると瞳孔は収縮する⁷⁾。Lowensteinら⁸⁾の研究によると、眠気自覚がある場合には低周波の大きな揺らぎ（LLFF）が発生すると報告されている。和久井⁹⁾の研究では LLFF において瞳孔径が最小値付近にある時では、単純反応が著しく遅れることを報告している。このことから瞳孔径の収縮は覚醒度の低下を意味していると考えられる。瞳孔径の他にサッケード運動を用いて、漫然状態を検出する研究がなされている。和久井ら¹⁰⁾はサッケード運動と瞳孔運動との関係は大きく、覚醒度が低下するとサッケード運動のピーク速度が低下し、サッケード運動の間隔は短くなる傾向があることを明らかにしている。これらの研究から、瞳孔径およびサッケード運動を計測することにより、運転中の運転手の覚醒度を把握することが可能であると考えられる。

本研究では、松村らの研究をもとに、漫然運転の誘発につながる覚醒度の低下を防ぐ一つの方略として、副次課題に着目し、渋滞時に発生する前方車両のブレーキランプの変化などの軽微な環境変化への運転手の反応特性と副次課題との関係を瞳孔径およびサッケード運動の計測により明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要と計測項目

本研究では、渋滞下での運転を想定した実験を行い、副次課題の影響を調査した。実験の様子を図-1 に示す。実験は主課題と副次課題の2種類を提供した。実験1回あたりの所要時間は15分とし、1人の被験者に対して合計3回の実験を実施した。本実験は松村ら⁹⁾が行った実験と同一である。

(1) 被験者及び使用走行映像

実験には、事前にインフォームドコンセントを受けた長岡技術科学大学の学生16名（平均年齢 22.2±0.73）と長岡市在住の8名（平均年齢 44±12.7）が参加した。また、男女比が同一となる様に被験者数を設定した。使用した走行映像を図-2 に示す。本実験では、図-2 のような静止画に前方車両のブレーキランプを点灯および消灯することにより、渋滞を再現した。ブレーキランプ変化の間隔は、消灯時から点灯が9～11秒、点灯時から消灯が22～50秒とした。



図-1 実験の様子（松村ら⁹⁾の論文より引用）



図-2 走行映像（松村ら⁹⁾の論文より引用）

(2) 主課題

被験者には図-2 に示す前方車両のブレーキランプが点灯または消灯する際にマウスを押下するという主課題を与えた。マウスを押下する回数は1回の実験で40回である。

(3) 副次課題

本実験では、「音楽」「会話」「クイズ」の3種類の課題に加え、主課題のみを実施する「なにもしない」の計4つの副次課題を提供した。「音楽」は被験者の好みの音楽を視聴してもらった。「会話」は同乗者との会話を想定し、被験者の知人を被験者の左隣に座らせ会話をしてもらった。実験は防音室で行ったため、会話の内容を把握していない。「クイズ」はワイヤレスマイクを使用して出題した。クイズの問題は全て3択の択一式とし、回答後にはそのクイズに関する解説を提供した。

1人の被験者に対し行った実験の回数は3回であるため、全ての被験者はいずれか1つの副次課題は実施していない。実施していない副次課題および副次課題を提供する順番は、4つの副次課題が均等になるように8パターンを準備し、各パターンの実施した人数は同じになるように設計した。この8パターンを表-1 に示す。

表-1 副次課題を提供した順番

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 |
|---|--------|--------|--------|
| A | なにもしない | 音楽 | クイズ |
| B | 音楽 | なにもしない | クイズ |
| C | 音楽 | 会話 | なにもしない |
| D | クイズ | 会話 | 音楽 |
| E | 会話 | 音楽 | なにもしない |
| F | なにもしない | クイズ | 会話 |
| G | 会話 | クイズ | 音楽 |
| H | クイズ | なにもしない | 会話 |

(4) 計測項目

本実験では実験中の被検者の覚醒度を測定するためにアイトラッキングカメラ (Tobii pro nano) を使用して被験者の視行動及び瞳孔径を計測した。本研究で計測した項目を以下に示す。

a) 瞳孔ゆらぎ(LLFF)

Lowensteinら⁸⁾の研究から覚醒水準が低下した際に瞳孔ゆらぎ (LLFF) が発生することが報告されている。本実験では、実験開始時からの瞳孔径の変化を計測し、瞳孔ゆらぎ (LLFF) が発生しているかを調査した。

b) ベースラインおよび瞳孔径変化量

主課題であるマウス押下による覚醒度の変化を得るために、画面変化から3秒間の瞳孔径の変化を計測した。画面変化500ms前から画面変化までの瞳孔径の平均をベースラインとし、ベースラインからの変化量を瞳孔径変化量とした。

c) サッケード割合

画面変化から次の画面変化までの各区間におけるサッケードの所要時間が占める割合を計測した。

3. 実験結果

本実験において、視行動を正しく計測できなかった4人の被検者については、分析から除外した。そのため、各副次課題を実施した人数は、「なにもしない」が15人、「音楽」が16人、「会話」が14人、「クイズ」が15人となった。

(1) 瞳孔ゆらぎ (LLFF)

全ての実験データを対象に、実験開始時からの瞳孔径変化による瞳孔ゆらぎ (LLFF) が発生しているかを調査した。その結果、3人の被検者で瞳孔ゆらぎを確認することができた。一例を図-3に示す。この瞳孔揺らぎは主に、「なにもしない」や「音楽」といった、受動的副次課題を実施している時に発生し、能動的副次課題を

実施している場合では瞳孔揺らぎを確認することはできなかった。このことから、検出できた人数は少ないが、受動的副次課題では眠気が発生し、能動的副次課題には眠気を抑える効果があると考えられる。

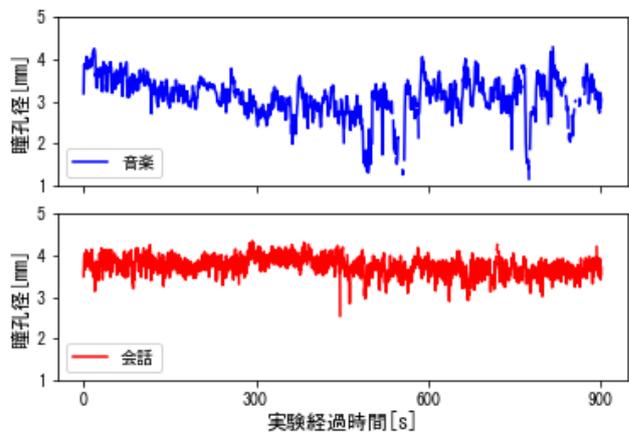


図-3 瞳孔揺らぎ例 (被験者 A3_右目)

(2) ベースライン変化

全被験者を対象にマウス押下時のベースラインの平均を副次課題ごとに表したものを図-4に示す。図-4から、「なにもしない」「音楽」といった受動的副次課題に比べ、「会話」「クイズ」といった能動的副次課題を実施した場合の方が、ベースラインが高い傾向を示している。この結果から、能動的副次課題には高い覚醒度を維持する効果があると考えられる。

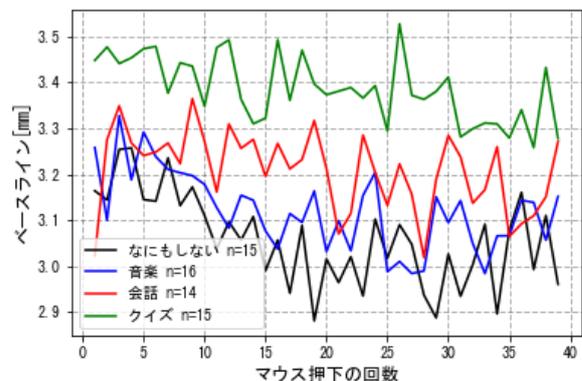


図-4 マウス押下の回数とベースライン変化

(3) マウス押下時の瞳孔径変化

主課題であるマウス押下時の瞳孔径変化を見るために、画面変化から3[s]間のベースラインからの瞳孔径変化を実験ごとにまとめた。一例を図-5に示す。図-5は特定被験者に対して主課題のマウス押下40回の画面変化からの瞳孔径の変化を0.05[s]ごとに箱ひげ図で表したものである。マウスを押下した範囲を赤色領域で示している。図-5から、マウス押下時に瞳孔径が拡大する傾向が見られる。この傾向はほぼ全ての実験で見られ、瞳孔径が

収縮した実験は存在しなかった。このことから、被験者は画面変化に反応して覚醒度が上昇していると考えられる。しかし、瞳孔径変化の度合いは実験ごとに異なり、変化が小さい場合は変化の大きい時と比べ、集中力が低下しており、漫然状態であると考えられる。

表-2 各領域ごとの瞳孔径最大変化の個数

| 副次課題 | 前半 | 中盤 | 後半 |
|--------|----|----|----|
| なにもしない | 6 | 7 | 9 |
| 音楽 | 9 | 7 | 7 |
| 会話 | 4 | 7 | 10 |
| クイズ | 9 | 11 | 6 |

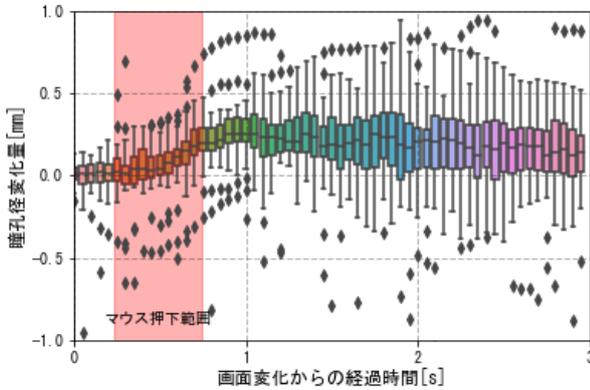


図-5 瞳孔径変化例 (被験者 A1_何もしない_右目)

次に、漫然状態時には軽微な画面変化に対する反応が減少すると考えられるため、40 回の主課題の内、画面変化 3[s]間の瞳孔径変化が最大であった時の変化量を最大瞳孔径変化量として計測した。この最大瞳孔径変化時のマウス押下回数と最大瞳孔径変化量との関係を表したものを図-6 に示す。図-6 では、マウス押下回数の時のベースラインをマーカーの大きさで表した。また、マウス押下回数 1~20 回を前半領域、11~30 回を中盤領域、21~40 回を後半領域に分類し、瞳孔径変化が最大であったマウス押下回数を副次課題ごとにまとめたものを表-2 に示す。表-2 から、「音楽」では領域ごとの差は見られなかった。「なにもしない」「会話」の二つの副次

表-3 最大瞳孔径変化量の度数分布表

| データ区間 [mm] | なにもしない | 音楽 | 会話 | クイズ |
|------------|--------|------|------|------|
| 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.6 | 4 | 3 | 0 | 1 |
| 0.8 | 5 | 8 | 3 | 9 |
| 1.0 | 2 | 2 | 4 | 2 |
| 1.2 | 2 | 0 | 2 | 1 |
| 1.4 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 1.6 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 1.8 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 2.0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 平均[mm] | 0.81 | 0.82 | 1.15 | 0.86 |

課題では、前半に比べ後半の方が瞳孔径変化が最大である被験者が多く見られた。一方、「クイズ」では、実験中盤で瞳孔径変化が最大の被験者が多数を占めている。この結果から、「なにもしない」と「会話」実施時は実験後半であっても、画面変化に対する反応が大きいため、集中力が高い状態が維持できていると考えられる。「クイズ」を実施した場合は、後半での反応が低いことから、実験中盤までは集中力が維持されているが、後半になるにつれて、集中力が低下していることが考えられる。次に各実験での最大瞳孔径変化量の値の度数分布を表した

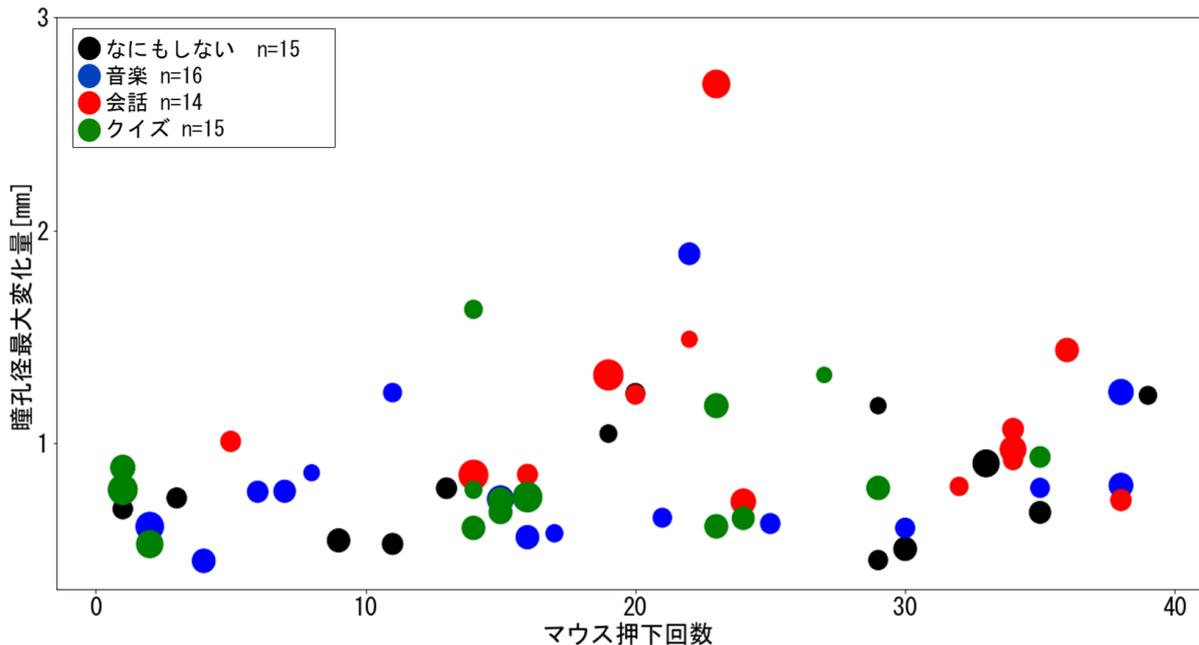


図-6 各実験での最大瞳孔径変化量

ものを表-3 に示す。表-3 では、「なにもしない」「音楽」「クイズ」の副次課題では、最大瞳孔径変化量が 0.8mm が最頻値であるが、「会話」は 1.0mm である。また、最大瞳孔径変化量の平均でも、「会話」が他の副次課題と比べ「音楽」と「クイズ」とで有意傾向（音楽： $t(23)=2.00, p<0.1$ 、クイズ： $t(21)=1.87, p<0.1$ ）、「なにもしない」とで 5%水準で有意（ $t(19)=2.20, p<0.05$ ）で大きい。このことから、「会話」では他の副次課題と比べ、軽微な画面変化であっても覚醒の程度は大きいと考えられる。

(4) サッケード割合

視行動を正しく計測できなかつた 4 人に加えサッケード運動を正しく計測できなかつた被験者 2 人は分析から除外した。画面変化から次の画面変化までの期間のサッケード運動を行った時間の割合を副次課題ごとにまとめたものを図-7 に示す。Chiew ら¹¹⁾の研究では、運転手が漫然運転状態に陥ると、周辺環境の認知行動が緩漫となりサッケードの発生頻度が低下すると述べている。しかし、本実験では、被験者に画面に映る前方車両を注視するように指示したため、サッケード運動が多い事は主課題に集中できていない、つまり、漫然状態にあると考えられる。図-7 から、「会話」「クイズ」の能動的副次課題は「なにもしない」「音楽」の受動的副次課題と比べ、サッケード運動が占める割合が高いことが分かる。このことから、能動的副次課題実施時は、受動的副次課題と比べ、主課題に集中できていないと考えられる。次に、時間経過によるサッケード運動の変化に着目し、実験全体およびマウス押下回数 20 回までの前半、20 回以降の後半それぞれの区間で回帰分析を行った。この結果を表-4 に示す。表-4 から、実験全体では、「何もしない」「クイズ」「音楽」で時間経過により、サッケードの割合が増加しており、この 3 つの副次課題と比べると、「会話」はあまり変化していないことが分かる。「何もしない」では、前半の傾きは小さく、後半の傾き

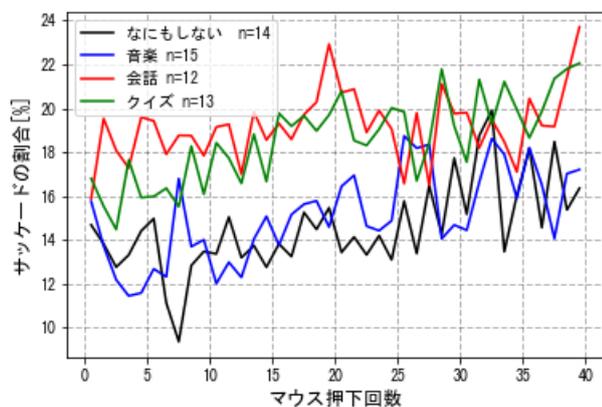


図-7 サッケード割合

表-4 回帰分析の結果

| | | なにもしない | 音楽 | 会話 | クイズ |
|----|---------------------|--------|-------|-------|-------|
| 前半 | 傾き | 0.06 | 0.11 | 0.14 | 0.21 |
| | 決定係数 R ² | 0.061 | 0.165 | 0.324 | 0.604 |
| 後半 | 傾き | 0.185 | 0.040 | 0.06 | 0.12 |
| | 決定係数 R ² | 0.275 | 0.020 | 0.042 | 0.206 |
| 全体 | 傾き | 0.11 | 0.12 | 0.05 | 0.13 |
| | 決定係数 R ² | 0.375 | 0.434 | 0.125 | 0.602 |

が大きいことから、実験後半において、集中力が低下していると考えられる。一方、「音楽」と「会話」では、前半の傾きが大きく、後半は傾きが小さいことから、「なにもしない」と比べ実験後半での注意力の低下は小さいと考えられる。「クイズ」では前半の傾きが他の副次課題と比べ大きく、後半でも前半よりも傾きが小さいが傾きが大きい事がわかる。このことから、「クイズ」実施時は時間経過によって集中力が低下していると考えられる。

4. 考察

これまでの分析の結果、漫然状態防止への効果を副次課題ごとにまとめたものを表-5 に示す。表-5 は結果をもとにした主観的評価であり、- は覚醒を低下させる方向に、+ は覚醒度を高める方向に働くものとして表示した。記号の個数が多いほど、より強い影響があることを示す。空欄は覚醒度に影響しないものである。「なにもしない」と「音楽」の 2 つの受動的副次課題はどちらも似たような傾向をしめし、音楽を聞くことによる効果は見られなかった。「会話」「クイズ」の能動的副次課題実施時は、受動的副次課題と比べると、覚醒度が高い状態を維持している効果があると考えられる。しかし、「クイズ」実施時は、時間経過による集中力の低下が見られ、漫然状態に移行していることが示唆される。「会話」実施時は他の副次課題と比べ、時間経過による覚醒度の低下は見られず、漫然運転の防止に効果があると考えられる。

表-5 副次課題ごとの効果

| | なにもしない | 音楽 | 会話 | クイズ |
|----------|--------|------|------|------|
| 瞳孔ゆらぎ | --- | --- | | |
| ベースライン変化 | --- | --- | +++ | ++++ |
| 最大瞳孔径変化数 | | | ++++ | ++ |
| 最大瞳孔径変化量 | | | ++ | |
| サッケード割合 | ---- | ---- | - | -- |

5. 結論

本研究では、松村らの研究をもとに副次課題と渋滞時のブレーキランプの変化などの軽微な環境変化への反応との関係を瞳孔径およびサッカード運動によって調査した。調査の結果、「会話」「クイズ」といった能動的副次課題は「何もしない」「音楽」といった受動的副次課題と比べ、高い覚醒度を示すことが明らかになった。

「なにもしない」「音楽」に加え、「クイズ」では時間経過による覚醒度の低下が示唆され、「会話」では覚醒度の低下は見られなかった。

漫然運転防止策として一般的には音楽鑑賞が推奨されているが、本研究の結果から渋滞時に関してはあまり効果が無いと考えられる。また、今回の研究では「会話」が一番効果が高かったが、同乗者がいない場合では、実施することができないため、1人で運転している場合でも効果のある副次課題を検討する必要があると考えられる。上田ら¹²⁾は渋滞時遭遇時にストレス軽減を目的とした周辺車両との匿名会話システムを提案しているが、このような技術を応用することにより、1人で運転している場合でも能動的副次課題を提供できるようになると感ぜられる。

謝辞：

モスクワ州立大学心理学部の Faniya SULTANOVA 上級講師と Valentina BARABANSHCHIKOVA 教授には研究の初期段階で有益な助言を頂き、ここに謝意を表したい。本研究の一部は科研費（研究課題番号 19K12246）の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) 西日本高速道路株式会社 平成 30 年 4 月 3 日 ニュースリリース「NEXCO 西日本管内のゴールデンウィーク期間における高速道路の渋滞予測」

- 2) 令和元年中の交通事故の発生状況
https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r02kou_haku/zenbun/genkyo/h1/h1b1s1_2.html
- 3) 久米 拓弥, 内藤 貴博, 石田 健二, 河合 政治, 松永 真也, 西井 克昌, 北島 洋樹：車載装備を利用した漫然状態の検出および解消手法の開発, 自動車技術会論文集, 45 巻, 3 号, p. 567-572, 2014
- 4) 富田 浩行, 久保田 整, 海老澤 嘉伸：瞳孔検出システムを用いた覚醒度低下検知技術の開発, 自動車技術会論文集, 43 巻, 3 号, p. 757-762
- 5) 小川 洋明, 石田 健二, 大須賀 美恵子：ドライバの能動的行動に基づく覚醒維持手法に関する研究, 自動車技術会論文集, 44 巻, 6 号, p. 1459-1464, 2013
- 6) 松村 翼, 鳩山 紀一郎, 木村 大地, 佐野 可寸志, Faniya SULTANOVA, Valentina BARABANSHCHIKOVA：渋滞下の副次課題がドライバーの精神疲労・知覚時間・注意レベルに及ぼす影響, 交通工学論文集, 7 巻, 4 号, p. A_1-A_7, 2021
- 7) Loewenfeld, I.E. (1993): The Pupil. Anatomy, Physiology and Clinical Applications. Iowa State University Press.
- 8) Lowenstein, O., Feinberg, R., Loewenfeld, I.E. (1963): Pupillary movements during acute and chronic fatigue, Invest. Ophthalmol. Vis. Sci., 2(2), pp.138-157.
- 9) 和久井 秀樹, 平田 豊：眼球・瞳孔運動に現れる覚醒状態とその神経機構, 日本神経回路学会誌, 21 巻, 1 号, p. 20-31, 2014
- 10) 和久井 秀樹, 平田 豊：サッカード運動を指標とした覚醒低下検知, 生体医工学, 51 巻, 6 号, p. 328-341, 2013
- 11) Chiew Xin Yi, 三宅 哲夫, 章 忠, 秋月 拓磨：運転環境下におけるサッカード計測, 自動制御連合講演会講演論文集, 59 巻, 第 59 回自動制御連合講演会, セッション ID ThC3-6, p. 444-447, 2016
- 12) 上田 真聖, 北村 尊義, 泉 朋子, 仲谷 善雄：周辺車両との匿名会話システムによる渋滞遭遇時のストレス軽減と他車配慮運転の促進, 第 78 回全国大会講演論文集, p.157-158, 2016

(Received ??, ????)

(Accepted ??, ????)

RESPONSE CHARACTERISTICS ANALYSIS TO MINOR CHANGES WITHIN A MONOTONIC STIMULUS BASED ON THE TYPE OF SECONDARY TASK

Daichi Kimura, Kazushi SANO, Katsuko NAKAHIRA and Kiichiro HATOYAMA

In this report, we will focus on secondary tasks such as listening to music and talking with passengers as a way to prevent the decline in arousal that induces distraction, and analyze the relationship between the driver's reaction to minor environmental changes such as the change in the brake lights of the vehicle in front of him during traffic jams and the secondary task by means of biological responses. The experiment was designed as follows. Visual stimuli simulating the on/off of the brakes of a vehicle in front of the driver were presented in a still image from the driver's perspective, assuming a traffic jam, and the primary task was to press the mouse when the stimuli simulating the brakes changed. A total of three types of secondary tasks, including a quiz, were provided and the biological responses were measured. In this experiment, the biological response to the change in the state of the main task was lower when the secondary tasks such as a conversation with a passenger and a quiz were provided, and it is predicted that the state of high arousal can be maintained by performing the secondary tasks.