

# 機能音および照明を用いたドライバ覚醒水準維持に関する研究

## Study on Arousal Level Maintenance of Vehicle Driver by Using Functional Sounds and Illuminations

精密工学専攻 10号 岡崎 啓吾  
Keigo Okazaki

### 1. はじめに

近年、運転中の集中力低下や緊張感の薄れから、居眠りによる漫然運転が多発している。この要因のひとつは、夜間時の高速道路走行のような単調運転による覚醒水準の低下が考えられ、覚醒など生理作用に影響を及ぼす香りや機能音の研究が行われている<sup>(1,2)</sup>。しかし、覚醒水準の低下に対する従来の対策は居眠りと警告による目覚ましの繰り返しとなり、根本的な対策とはいえないため、覚醒水準維持を目的とした眠気を防止できる新たな対策が必要である。

一方、車内照明の多様化に伴い、スピードメータなどの内装部にLED照明が利用されるようになり、色豊かな車内空間が実現可能である。しかし、照明色の選択は主にデザイン性が重視され、覚醒水準維持を目的とした照明色など、色の持つ心理的および生理的効果は詳細に考慮されていない。

そこで本研究では、主観および客観評価に基づき、まず覚醒効果がある音として自動車の車室内定常走行音（以下、走行音）を用いて、覚醒水準維持に効果的な機能音を検討する。また、夜間の高速運転時を想定して、走行速度に応じた照明色と走行音の関係性を検討し、視覚刺激が覚醒水準に与える影響を把握する。さらに、走行音の聴覚刺激と照明色の視覚刺激を組み合わせ合わせた複合刺激により、運転者が煩わしく感じることなく覚醒水準維持の実現を目指す。なお、本研究のデータ取得について、被験者に十分な説明を行い、インフォームド・コンセントを得ている。

### 2. 機能音による覚醒水準維持の検討

#### 2.1 評価で使用する機能音

本実験では、運転者が走行中に煩わしさを感じることなく覚醒水準の低下を防止できる機能音を用いる。原音は高速走行を想定してエンジン回転数 3500 rpm の走行音を用い、過去の研究の結果<sup>(3,4)</sup>を基に、覚醒効果に差がある音として以下の3種（PS1～PS3）を作成する。原音（Original）と各機能音の周波数特性を Fig. 1 に示す。なお、本実験はスピーカにより機能音を提示し、被験者位置における機能音の Loudness は全て 10 sone に統一する。

- PS1: 原音のロードノイズ成分に相当する周波数帯域（40～500 Hz）の音圧レベルを 6 dB 上げた音
- PS2: 原音の風切り音に相当する周波数帯域（1 k～5 kHz）の音圧レベルを 6 dB 上げた音
- PS3: 原音の可聴域外に相当する周波数帯域（20 k～22 kHz）の音圧レベルを 6 dB 上げた音

#### 2.2 機能音を使用した覚醒評価の概要

覚醒水準の評価は、心理的な主観評価はカロリンスカ眠気尺度<sup>(5)</sup>（以下、KSS-J: Karolinska sleepiness scale）を用い、生理的な客観評価は心拍変動（以下、HRV: Heart Rate Variability）を用いる。評価の手順を Fig. 2 に示す。本実験は、夜間走行を模擬するために暗室で実施する。被験者は椅子に座り、まず主観評価として KSS-J に回答する。回答終了後に 1 分間安静にし、その後、機能音を 1.2 m 前方に設置

したスピーカから 12 分間提示する。その際、ECG を測定し、提示終了後に再び KSS-J に回答する。なお、室内の温度を  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度を 30～50 %、二酸化炭素濃度を 500～1000 ppm に調整する。さらに、被験者の疲労や実験の慣れの影響を考慮して、各実験は同一日に連続して行わず、異なる日に実施する。その際、サーカディアンリズムの影響を考慮して、同一被験者の実験を全て同じ時間帯に実施し、被験者には機能音の内容を教示しないブラインド試験を行う。被験者は 20 歳代の 6 名とする。

#### 2.2.1 KSS-J

9 段階の眠気の強さに対する項目から 1 つを選択し得点化する。ここでは客観評価の前後に KSS-J による評価を実施し、評価後から評価前の得点を引いた得点差を眠気得点とする。

#### 2.2.2 HRV

測定した被験者の ECG データを周波数解析して、心拍変動を求める。自律神経系活動を反映した指標である LF（0.04～0.15 Hz）と HF（0.15～0.40 Hz）を求め、それらの比率の LF/HF からストレス度や緊張度がわかる。ここでは音源の提示から 12 分後の LF/HF を算出する。

#### 2.3 機能音を使用した覚醒評価

KSS-J による主観評価の結果を Fig. 3 に、HRV による客観評価の結果を Fig. 4 に示す。ここで、Fig. 3 は値が大きいほど眠気があることを示す。Fig. 4 は安静時を基準に各機能音を提示したときの結果を正規化し、値が大きいほどストレスを感じて覚醒効果があることを示す。

主観評価の結果より、PS1 は原音に対して眠気得点が高いが、PS2 と PS3 は原音より眠気得点が低く、覚醒維持の効果が大きいことがわかる。一方、客観評価の結果は、主観評価と同様、PS1 は原音に対してリラックスしており、覚醒効果が小さく、PS2 と PS3 は原音と比較すると覚醒効果があるといえる。また、各機能音を提示した際の主観評価と客観評価の結果は同じ傾向で、相関係数は -0.93 で負の強い相関があり、HRV を用いることで覚醒効果を評価できるといえる。

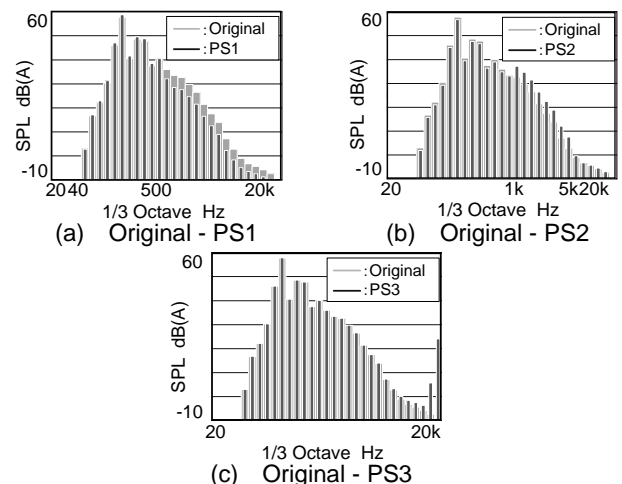


Fig. 1 Evaluation sounds

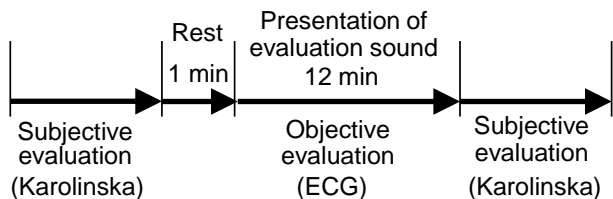


Fig. 2 Time protocol of evaluation with presentation sound

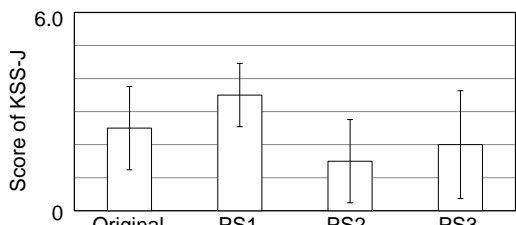


Fig. 3 Averaged subjective evaluation(KSS-J)

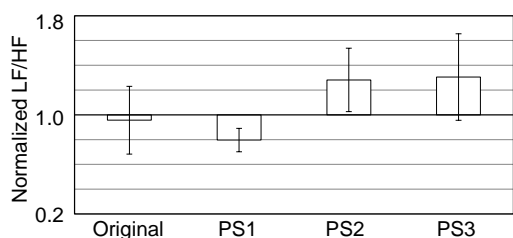


Fig. 4 Averaged objective evaluation(HRV)

### 3. 照明色による覚醒水準維持の検討

本章では、夜間の高速運転時を想定し、走行中の覚醒水準維持に有効な色刺激を検討する。まず、SD法を用いて色刺激が与える心理的作用を把握する。次に、特定の速度だけでなく、走行速度に応じた色刺激と心理的作用の関係性を把握する。さらに、2章同様、KSS-Jによる主観評価とHRVによる客観評価を用いた覚醒評価に基づき、覚醒水準維持に効果的な色刺激を検討する。

#### 3.1 SD法による色刺激が与える心理的作用

本節は、自動車の車内照明を想定した色刺激を与え、SD法に基づき心理的作用を把握することを目的とする。車内照明を模擬するために、内装の一部を光らせた静止画像を作成し、被験者の1.2 m前方にプロジェクタにより横：1.6 m×縦：1.2 mの大きさで投影する。色刺激にはマンセルの色相環に基づき、60°ずつ色相角をずらした赤、黄、緑、シアン、青、マゼンタの6種を用いる。そして、各色刺激の車内画像に対して12の形容詞対を7段階で絶対評価する。なお、走行環境を再現するため、スピーカで走行音を提示した環境で評価を実施する。被験者は20歳代の12名とする。

SD法より得られた結果を因子分析し、第一因子から順に快適因子、迫力因子、軽快因子の3因子を抽出する。色相角と快適因子、迫力因子の関係をFig. 5に示す。ここで、それぞれ因子得点が高いほど快適感および迫力感が高いことを示す。快適感と迫力感の相関係数は-0.86で、強い相関がある。色相角0°±60°の赤系色刺激(赤、黄、マゼンタ)は迫力感が大きく快適感が小さい傾向を、色相角180°±60°の青系色刺激(シアン、青、緑)は迫力感が小さく快適感が大きい傾向を示す。色相角が180°変化することで快適感や迫力感が逆の傾向を示し、赤系色は緊張して興奮する傾向、青系色は落ち着いて沈静する傾向があり、走行環境下の車内照明は、快適感や迫力感など何を重視するかにより、色刺激の使い分けが必要であると考えられる。

### 3.2 エンジン回転数を変えた走行音と色刺激の関係性

本節は、走行速度に応じた色刺激の心理的作用の変化を把握し、速度変化と色刺激の心理的作用との関係性を検討することを目的とする。過去の研究事例から聴覚と視覚の複合刺激下において、音と映像の整合性が音の評価に影響を及ぼすことが報告されているため<sup>(6)</sup>、本節では快適感と覚醒感に加え、走行音と色刺激のマッチング感についても評価する。

走行速度の変化を模擬するため、低速走行から高速走行までを想定してエンジン回転数を1500 rpm、2000 rpm、2500 rpm、3000 rpm、3500 rpmにした5種の走行音を用いる。そして、3.1節と同様の実験環境で6種の色刺激を提示し、それぞれの走行音提示環境下において、各色刺激の印象を評価する。本実験は、シェッフエの対比較法を用い、得られた回答を分析して、各エンジン回転数に応じた色刺激についてマッチング感、快適感、覚醒感を評価する。被験者は20歳代の12名とする。

Fig. 6にマッチング感、Fig. 7に快適感、Fig. 8に覚醒感の評価結果を示す。マッチング感と快適感に着目すると、各色刺激とエンジン回転数の相関係数は、マッチング感が(マゼンタ、赤、黄、緑、シアン、青) = (0.97, 0.82, 0.70, -0.99, -0.89, -0.94)、快適感が(0.93, 0.89, 0.72, -0.71, -0.91, -0.95)となる。いずれも色相角0°±60°の赤系色刺激(赤、黄、マゼンタ)はエンジン回転数と正の相関、色相角180°±60°の青系色刺激(シアン、青、緑)はエンジン回転数と負の相関があることが確認できる。さらに、各色刺激に対するマッチング感と快適感の相関係数は(マゼンタ、赤、黄、緑、シアン、青) = (0.87, 0.98, 0.90, 0.63, 0.86, 0.95)で、緑を除いて強い相関があり、走行速度と色刺激とのマッチング感が増すと、快適感も向上することがわかる。一方、覚醒感に着目すると、各色刺激においてエンジン回転数の変化に伴う得点差は小さく、覚醒効果が大きい色刺激は赤系色刺激の黄やマゼンタで、小さい色刺激は青系色刺激の青や緑であることがわかる。さらに、各色刺激とエンジン回転数との相関係数は、(マゼンタ、赤、黄、緑、シアン、青) = (0.28, -0.18, 0.70, -0.11, 0, -0.59)で相関は小さく、エンジン回転数が覚醒感に与える影響は小さいため、走行環境下において覚醒水準を維持させる手法として、走行速度に関係なく照明色の利用は有効といえる。

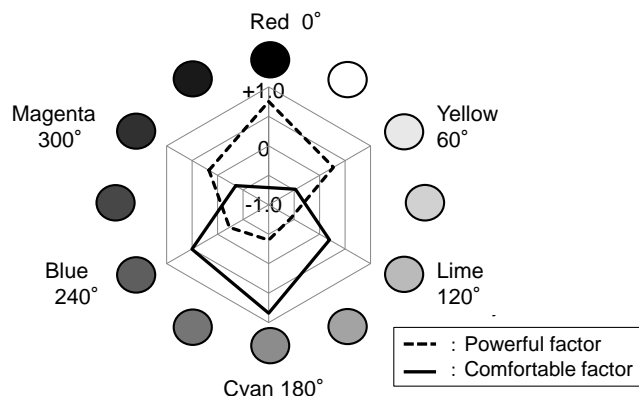


Fig. 5 Factor score of powerful and comfortable factor

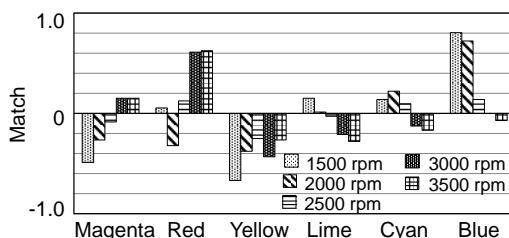


Fig. 6 Matching factor by paired comparison method

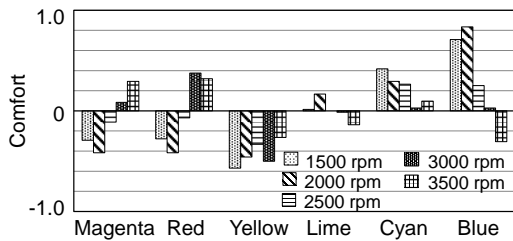


Fig. 7 Comfortable factor by paired comparison method

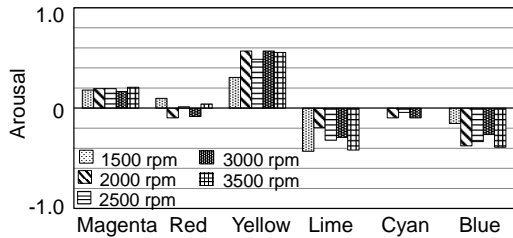


Fig. 8 Arousal factor by paired comparison method

### 3.3 覚醒水準維持に効果的な色刺激の選定

本節は、走行環境を想定して、覚醒水準維持に効果的な色刺激を、2章と同様に KSS-J と HRV を用いて選定することを目的とする。色刺激には部屋の照明を利用して、赤、黄、緑、シアン、青、マゼンタと暗室の7種を用いる。そして、走行音提示環境下において7種の色刺激を提示し、各条件において KSS-J, HRV それぞれについて評価する。なお、2章と同様の実験手順に従い、機能音の提示と同時に色刺激も提示して評価を行う。その際、走行環境を模擬させるため、運転者からの視界の走行映像を作成し、被験者の1.2 m前方に設けた32インチの液晶ディスプレイに映す。同一被験者の実験は全て異なる日の同じ時間帯に実施し、ブラインド試験を行う。被験者は2章と同じ20歳代の6名とする。

KSS-Jによる主観評価の結果を Fig. 9 に、HRVによる客観評価の結果を Fig. 10 に示す。主観評価より、暗室と青色刺激は眠気得点が高く、覚醒維持の効果が小さいことが確認できる。一方、赤系色刺激は眠気得点が低く、覚醒維持の効果が大きいことがわかる。その中でも、赤やマゼンタは標準偏差が大きく被験者毎にばらつきが大きいものに対し、黄色刺激はばらつきが小さく安定して眠気得点が低いことが確認できる。また客観評価より、主観評価と同様、暗室と青色刺激はリラックスする傾向があり、覚醒効果が小さいことが確認できる。一方、赤系色刺激は緊張感が増す傾向にあり、覚醒効果が大きいことがわかる。

ここで、色刺激が覚醒水準維持に与える効果について考察する。3.2節で示した3500 rpmにおける色刺激の覚醒感と、本節の主観評価および客観評価の相関係数は (KSS-J, HRV) = (-0.54, 0.79) で、およそ一致した傾向を示す。したがって、印象評価の結果は信頼でき、走行環境下において覚醒水準を維持させる手法として、走行速度に関係なく照明色の利用が有効だと判断できる。以上の結果より、安定して覚醒維持の効果が大きいとされ、印象評価と客観評価においていずれも覚醒維持の効果が大きいとされた黄色刺激を、複合刺激を用いた覚醒評価に使用するのが望ましいと考えられる。

## 4. 複合刺激による覚醒水準維持の検討

2章と3章では、覚醒水準維持に効果的な聴覚刺激や視覚刺激を検討した。そこで本章では、前章より選定した覚醒水準維持に効果的な視聴覚刺激を用い、複合刺激による覚醒水準維持の効果について、主観評価と客観評価に基づき基礎検討する。さらに、車室内環境への適用を目的に、実車を用いて複合刺激による覚醒水準維持の有効性を検討する。

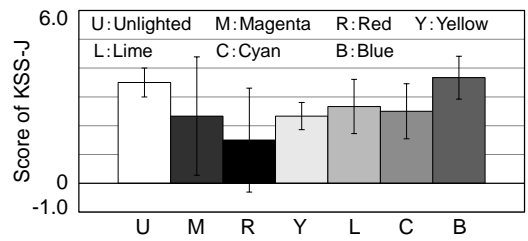


Fig. 9 Averaged subjective evaluation (KSS-J)

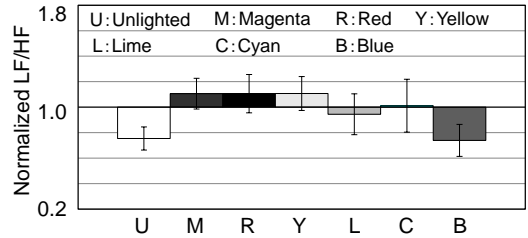


Fig. 10 Averaged objective evaluation (HRV)

### 4.1 複合刺激による覚醒水準維持の効果

本節は、走行環境を想定して、覚醒水準維持に効果的な機能音と色刺激による複合刺激の効果を検討することを目的とする。機能音には原音と2.3節より覚醒水準維持に効果的であったPS2を用いる。色刺激には部屋の照明を利用し、3.3節より覚醒水準維持の効果が大きい黄色照明、覚醒水準維持の効果が小さい青色照明、および暗室の3種を用い、2種の機能音と組み合わせ全6種を評価する。なお、3.3節と同様の実験手順に従い、機能音と同時に色刺激も提示して、KSS-J と HRV を用いて覚醒水準を評価する。被験者は2章と同じ20歳代の6名とする。

KSS-Jによる主観評価の結果を Fig. 11 に、HRVによる客観評価の結果を Fig. 12 に示す。主観評価より、機能音の影響に着目すると、色刺激の違いに関係なく、2.3節と同様にPS2は原音の提示環境に比べて眠気得点が低く、覚醒水準維持の効果が大きい。一方、色刺激の影響に着目すると、各機能音の提示環境においても、黄色刺激は暗室や青色刺激に比べて眠気得点が低く、覚醒水準維持に効果的である傾向を示す。これより、機能音と色刺激はそれぞれ独立して覚醒水準に影響を及ぼし、機能音と色刺激を合せることで覚醒効果が大きくなると考えられる。また、客観評価においても、原音の提示環境に比べてPS2の提示環境はLF/HFの値が高く、覚醒水準維持に効果的であることがわかる。また、暗室や青色刺激の提示環境に比べて黄色刺激の提示環境はLF/HFの値が高く、覚醒水準維持に効果的な傾向を示す。さらに、主観評価同様、PS2と黄色照明の複合刺激が最も覚醒水準維持に効果的であり、機能音と色刺激を合せることで覚醒効果が大きくなるといえる。さらに、主観評価と客観評価の相関係数は-0.91で負の強い相関があり、HRVを用いることで覚醒水準を評価できるといえる。

以上の結果より、走行環境でも機能音および色刺激がそれぞれ独立して有意に働き、覚醒水準維持に効果的であることを確認した。そして、機能音PS2と黄色刺激がともに覚醒水準維持に効果的であることを確認し、これらを組み合わせることで効果が大きくなることを確認した。

### 4.2 実車への適用を考慮した覚醒水準維持の検討

本節は、実際の車を用いて覚醒評価を実施し、覚醒水準維持に効果的な刺激を実車に適用できるか検討することを目的とする。その際、覚醒水準の評価は、心理的な主観評価としてKSS-Jを、生理的な客観評価としてHRVを用いる。評価に使用する機能音は原音と覚醒水準維持に効果的であったPS2を用い、色刺激は覚醒効果が大きい黄色刺激、照明なし

を用いる。ここで、実験環境の変化により空間の特性が異なり、機能音の聞こえ方が変わってしまう問題が予想される。そこで、車室内環境における運転席位置で機能音を測定し、周波数分析により前章で使用した周波数特性になるように補正した機能音を使用する。本実験は実車への適用を目的に、機能音は車載スピーカを使用して提示、色刺激は車室内前部の内装の一部をライン照明で点灯させて提示する。さらに、走行環境を模擬させるため、運転者からの視界の走行映像を作成し、前面のスクリーンに投影する。また、被験者はハンドルを握った状態で着座し、主観評価および客観評価を実施する。なお、本実験においても3.3節と同様の実験手順に従い、最も覚醒水準維持に効果的な組み合わせとされた機能音PS2と黄色刺激の組み合わせについて、原音と照明なしの組み合わせと比較検討することで、覚醒水準維持に効果的な刺激の実車環境における有効性を検討する。ここで、被験者は一般性を考慮して、まだ覚醒実験に参加したことのない20歳代の7名を選出する。

KSS-Jによる主観評価の結果をFig. 13に、HRVによる客観評価の結果をFig. 14に示す。主観評価より、原音と照明なしの組み合わせと機能音PS2と黄色刺激の組み合わせを比較すると、眠気得点に差が見られなかった。この原因として、実車を用いた覚醒実験ではライン照明の点灯範囲が小さく、主観的な印象変化が小さくなってしまったためであると考えられる。また、本実験は被験者が覚醒実験に初めて参加するため、主観評価に対する慣れの影響から得点に大きな差が出なかったと推測される。一方、客観評価の結果をみると、主観評価と異なり、原音と照明なしの組み合わせに対して機能音PS2と黄色刺激の組み合わせの方がLF/HFの値が高く、4.1節の結果と同様に、覚醒水準維持に効果的な傾向を示す。

ここで、4.1節の結果と本節の実車を用いた環境における評価結果の比較をTable 1に示す。前節の評価結果と本節の評価結果の相関係数は $R=0.67$ で、概ね4.1節の傾向と一致していることが確認できる。以上より、覚醒水準維持に効果的な刺激を実車に適用できるといえる。

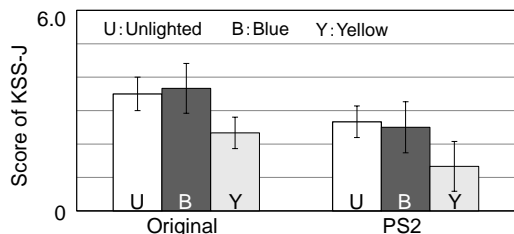


Fig. 11 Averaged subjective evaluation(KSS-J)

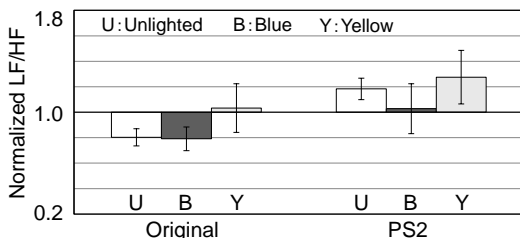


Fig. 12 Averaged objective evaluation(HRV)

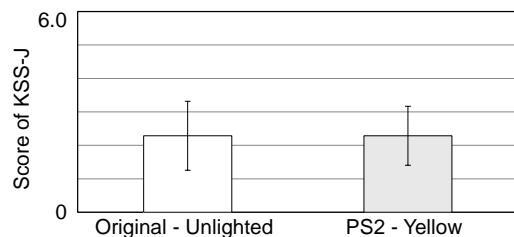


Fig. 13 Averaged subjective evaluation(KSS-J)

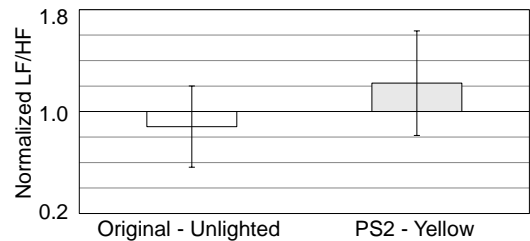


Fig. 14 Averaged objective evaluation(HRV)

Table 1 Mean and Standard Deviations(SD) of KSS-J and HRV in both conditions

		KSS-J		HRV	
		Mean	SD	Mean	SD
In room	Original - Unlighted	3.50	0.50	0.75	0.08
	PS2 - Yellow	1.33	0.75	1.34	0.26
In a car cabin	Original - Unlighted	2.29	1.03	0.88	0.32
	PS2 - Yellow	2.29	0.88	1.22	0.41

## 5. 研究成果

- (1) 覚醒水準維持に有効な音響特性を検討し、風切り音に相当する1 k-5 kHzの周波数帯域と、可聴域外の高周波帯域の音圧レベルを上げると覚醒水準維持に有効であることを明らかにした。
- (2) エンジン回転数に応じた、照明色とマッチング感、快適感および覚醒感との相関を検討し、エンジン回転数に関係なく黄色とマゼンタが覚醒に有効であることを明らかにした。
- (3) 走行音と照明色の複合刺激に対する覚醒水準維持の有効性を検討し、聴覚刺激と視覚刺激はそれぞれ独立して覚醒水準に影響を及ぼし、覚醒効果の高い刺激を組み合わせることで効果が向上することを明らかにした。
- (4) 実車を用いた環境において、客観評価により複合刺激が覚醒水準維持に効果的な傾向を示すことを明らかにし、覚醒水準維持に効果的な刺激を実車に適用できることが示唆された。

## 参考文献

- (1) 各務勇氣 他、運転中のドライバへの香り提示による覚醒効果に関する研究、電子情報通信学会, Vol. 100, No. 150, pp. 49-54 (2010)
- (2) 有光哲彦, 岡崎啓吾 他、音環境および色環境の複合刺激が体感温度に及ぼす影響の評価、音響学会, Vol. 71, (2015)
- (3) Masao Yamaguchi, *et al.*, A study on the evaluation method of being accustomed to hearing vehicle interior noise, Proc. Inter-Noise 2011, SS38 (2011)
- (4) 岡崎啓吾 他、視聴覚情報に基づく覚醒水準維持の研究、自動車技術会学術講演会前刷集, No. 61-14, pp. 15-18 (2014)
- (5) Kosuke Kaida, *et al.*, Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables, Clinical Neurophysiology, Vol. 117, No. 7, pp. 1574-1581 (2006)
- (6) 戸井田義徳 他、音と色光の複合刺激による環境の評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. 1994, pp. 1987-1988 (1994)