

道路側面に設置された点滅柱状物体により生起する視覚誘導自己運動感覚を交通工学的に応用した自動車運転者の速度感覚変化手法

Changing Driver's Sensation of Speed Applying Vection Caused by Flickering Boards Placed on Sides of Road

学生会員 川島祐貴^{†1}, 正会員 内川恵二^{†1}, 正会員 金子寛彦^{†1},
 福田一帆^{†1}, 山本浩司^{†2}, 木屋研二^{†3}
 Yuki Kawashima^{†1}, Keiji Uchikawa^{†1}, Hirohiko Kaneko^{†1},
 Kazuho Fukuda^{†1}, Kouji Yamamoto^{†2} and Kenji Kiya^{†3}

Abstract We propose a method for presenting visual stimuli to change a driver's sensation of speed on a freeway: utilizing vection, one of the perceptual properties needed for self-motion and show that this method can be used on a freeway with CG simulation movies. Furthermore we investigated the relationship between the velocity of vection-inducing stimuli and the sensation of speed. Our study consists of three experiments. In all experiments, the simulated freeway 3D movies were presented on a wide hemisphere screen and the magnitude of the observer's sensation of speed was measured. Vection-inducing stimuli were produced by flickering in the boards on both sides of the freeway. This flickering yielded apparent motion. We set the speed of the vection-inducing stimuli and that of the driver's car as experimental variables. The observer compared two movies consecutively presented with different conditions and selected the one that gave a sensation of faster speed. The observer's sensation of speed increased linearly with the speed of vection-inducing stimuli. Our study suggests that controlling the speed of vection-inducing stimuli could enable the driver's sensation of speed to be manipulated in real freeways.

キーワード：ベクション, 自己運動知覚, 速度感覚, 交通工学, 高速道路走行

1. まえがき

自己の運動感覚は視覚系、前庭感覚系、触覚系、聴覚系などさまざまな感覚系からの情報が統合されて生起することが知られている¹⁾。自動車運転時では、運転者は視覚系により周囲の景色の流れ、前庭感覚系により加速や減速による平衡感覚の変化、触覚系によりアクセルペダルの踏み方、さらに聴覚系によりエンジン音や風切り音といったさまざまな入力情報を取り込み、それらを統合して自車の走行速度を判断していると考えられる。ただし、高速道路走行時のように長い距離を一定速度で運動する場合は、前庭

感覚系は動きの加速度検出器であること、また、触覚系や聴覚系は一定強度の刺激に順応してしまうことなどから¹⁾、視覚情報が自己運動感覚の主要因となる。この視覚系による自己運動感覚は、ベクション(視覚誘導自己運動感覚)と呼ばれ、これまで多くの特性が調べられている。

ベクションを生起させるためには、観察者の視野中に運動刺激を呈示する必要があるが、その運動刺激を呈示する面積および視野位置がベクション生起に大きな影響を及ぼすことが示されている^{2)~5)}。Brandtらは、視野中心視角60degの領域のみに刺激が呈示される場合は弱いベクションしか生じないが、視野中心部120deg程度までマスクし、その外側に刺激を呈示する場合には強いベクションが生じることを示した²⁾。また、運動刺激が背景として知覚されることがベクション生起に重要であることも知られている^{6)~9)}。このように、通常は静止していると認識される刺激が持つ特徴である大視野、視野周辺、背景といった特徴を備えた刺激の運動が、ベクションへ大きく影響していることが明らかとなっている。しかし、ベクション研究の多くが、刺激の性質とベクション強度の関係からベクションのメカニズムの解明を目指したものであり¹⁰⁾、ベクションの基礎特性を積極的に応用して、映像技術を開発する研究はまだほと

2010年10月5日受付、2011年3月7日再受付、2011年4月12日採録

†1 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 物理情報システム専攻
 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259-G2-1, TEL 045-924-5453)

†2 中日本高速道路株式会社

(〒424-0114 静岡県静岡市清水区庵原町219-11, TEL 054-371-0582)

†3 西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社

(〒424-0114 静岡県静岡市清水区庵原町219-11, TEL 054-371-0582)

†1 Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology
 (4259 Nagatsuta Midori-ku Yokohama, 226-8502, Japan)

†2 Central Nippon Expressway Co.Ltd

(219-11 Ihara-cho Shimizu-ku Shizuoka, 424-0114, Japan)

†3 West Nippon Expressway Engineering Kyushu Co.Ltd

(219-11 Ihara-cho Shimizu-ku Shizuoka, 424-0114, Japan)

んどみられない。

高速道路を一定速度で走行中に道路の勾配がわずかに変化すると、視覚的にはその変化に気づかず、アクセルペタルをそのままの強さで踏み続け、速度超過や速度低下が起こる。その結果、交通事故や交通渋滞が引き起こされ、高速道路の設計上、何らかの手段で解決すべき問題となっている¹¹⁾。自動車運転時の速度感覚が主に道路上の白線やテクスチャ、あるいは道路側面の塀や樹木等の物体によるベクションによって引き起こされているならば、人工的刺激によってベクションを生起させ、それにより自動車運転者の速度感覚を変化させることも可能と考えられる¹²⁾。実際に、運転者に速度変化を気付かせる具体的な対策がとられている例もある。例えば、美女木ジャンクションでは図形パターンを路面上に描き、そのパターンによって運転者にベクションを生起させ、速度感覚の変化をもたらすことを試みている¹³⁾。しかし、これらは道路上に描かれた静的な図形刺激によってベクションを誘導するわけであるが、点滅する運動刺激を道路側面に配置することでベクションを誘導して、運転者の速度感覚を変える方法も考えられる。この方法は道路上の図形パターンとは異なり、運動刺激の点滅速度を調整することでその時の交通状況に柔軟に対応できるという利点がある。しかしこのような実例はこれまでに報告されていない。

実際の自己運動の速度が大きくなると、それによって生じる視野中の物体の相対速度も大きくなる。この自己運動と視覚情報の速度関係は、ベクションの強度とベクション誘導刺激の速度間にも同様に成り立つことが示されている。Sauvan & BonnetやGraafらは格子縞パターン刺激を被験者に呈示し、刺激の運動速度が速くなるにつれて、被験者により強いベクションが生じることを示した^{14) 15)}。これらの過去の研究結果から、視野の一部に点滅する刺激を呈示して自動車運転者に仮現運動を知覚させ、その呈示刺激の速度を実際の走行によって生じる視野中の物体の運動速度以上にすることによって、運転者により大きな速度感覚を与えることが可能と考えられる。そこで本研究では、道路側面に設置した点滅する仮現運動刺激をベクション誘導刺激として運転者に呈示し、それによって運転者の速度感覚を変化させることが可能かどうかを調べ、さらに、可能な場合、ベクション効果は視覚刺激の点滅条件にどの程度依存するかを調べることを目的とした。

本研究は実験1, 2, 3から成り、広視野スクリーン上に高速道路の走行状況をシミュレートした動画刺激を呈示し、その仮想環境内の道路側面にベクション誘導刺激として均等間隔に設置した柱状物体が点滅する視覚刺激を加えた。全実験において、実験変数にベクション誘導刺激速度と自車の走行速度を用い、ベクション誘導刺激速度によって速度感覚が異なるか、また、ベクション誘導刺激が速度感覚に与える影響が自車の走行速度によって異なるかを調べた。実験1では、道路側面に呈示されたベクション誘導刺激が自動車運転者の速度感覚にどのような効果を与えるか

を調べた。ベクション誘導刺激と背景の輝度コントラストが大きくなるとベクションは強くなることが報告されているので¹⁴⁾、昼夜環境がベクション誘導刺激による速度感覚の変化に影響することが考えられる。そのため実験条件に昼間と夜間の条件を含めた。実験2と3は実験1の結果を補足するために行った。実験2では、点滅刺激ではなく柱状物体の存在そのものが運転者の速度感覚を変化させた可能性を調べた。このために、柱状物体を道路側面に設置しない条件を含め、ベクション誘導刺激条件と比較した。実験3では、ベクション誘導刺激の速度を実験1での速度よりさらに大きくした場合の速度感覚の変化を調べた。

2. 実験 1

2.1 実験概要

実験1では、ベクション誘導刺激によって自動車運転者の速度感覚が変化するかどうかを調べ、変化するならば、どのような変化を与えるかを確かめる。実験変数は自車の走行速度、ベクション誘導刺激の移動速度、およびシミュレート環境が昼間か夜間かである。それぞれの環境で高速道路走行をシミュレートし、実験を行う。

2.2 方 法

高速道路走行の動画刺激の呈示には球面立体ディスプレイ、汐留Cyber Dome(直径約8.5m, Panasonic社製)を用いた。立体表示は偏光眼鏡方式によってなされる。被験者は床面から1.3mの観覧台に置いた椅子に座り、動画刺激を観察する。被験者の眼の高さはディスプレイの上下のほぼ中央位置になった。実験では10人の被験者が同時に刺激を観察できるように、被験者椅子が5台ずつ2列に観覧台上に設置される。後列は前列よりも0.4m後方にあり、椅子5台の左右幅は3.0mである。前列中央部からディスプレイ最奥面までの視距離は3.05mである。この時の動画刺激は視角垂直85deg、水平120degの大きさとなる。後列中央部からの動画刺激は垂直76deg、水平110deg、左右の端からは垂直76deg、水平101degとなる。左右の端から見たスクリーンの法線は23.5deg左右に傾くことになるが、被験者の内観からこのような動画画像の歪みは特に気にならず、実験には支障がないことが確かめられている。

動画刺激は、高速道路走行をシミュレートしたCG映像とその中に置かれたベクション誘導刺激からなる。図1に動画刺激の1画面を示す。ベクション誘導刺激は、高速道路側面に5m間隔に設置された柱状物体を順次点滅させ、自車の進行方向とは逆方向に仮現運動させることにより作成した。柱状物体は5本毎、つまり25m間隔の柱状物体が一セットとして同時に点滅し、ある時間後に次のセットが同時に点滅する。柱状物体は縦200cm、横40cmの大きさである。ここでは、柱状物体が全面点灯することによりベクション誘導刺激を作成したが、これは実際の高速道路でもLED配列を用いるために、ほとんど全面が発光しているよう見えるためである。

動画刺激には昼間条件と夜間条件があり、それぞれの条



図1 動画刺激の1画面

ベクション誘導刺激は高速道路側面に5m置きに設置された柱状物体を5本毎に順次点滅させることで作成した。図中、手前から5本置きに柱状物体が点灯している。実験1, 2, 3でこの動画刺激を使用した。One scene used in the simulation movie. Thevection inducing stimuli were produced by flickering boards, every five items, placed in a 5 m step on the both sides of a freeway. In the figure the nearest and every five boards are lit. This simulation movie was used in experiments 1, 2 and 3.

件は走行状況のシミュレートCG映像で作成した。柱状物体の輝度値は昼間条件で点灯時 $5.39\text{cd}/\text{m}^2$ 、無点灯時 $3.73\text{cd}/\text{m}^2$ 、夜間条件で点灯時 $5.50\text{cd}/\text{m}^2$ 、無点灯時 $1.39\text{cd}/\text{m}^2$ である。背景風景の輝度値は昼間条件で、空 $12.8\text{cd}/\text{m}^2$ 、道路面 $1.14\text{cd}/\text{m}^2$ 、壁面 $4.60\text{cd}/\text{m}^2$ 、夜間条件で空 $0.03\text{cd}/\text{m}^2$ 、道路面 $0.09\text{cd}/\text{m}^2$ 、壁面 $1.19\text{cd}/\text{m}^2$ である。

実験では、自車の走行速度とベクション誘導刺激の移動速度を実験変数とした。1試行中に被験者に呈示される動画刺激は3区間から成る。まず、順応区間が30s呈示される。

これは、被験者が動画刺激に順応し、ベクションを生起させるため用いられる。順応区間の動画刺激には柱状物体は置かれていない。次に、第1区間と第2区間がそれぞれ20s、連続して呈示される。第1区間と第2区間では動画刺激の実験変数の組合せが異なっている。図2に各試行における動画刺激呈示の様子を示す。第1区間と第2区間の開始位置には信号機状の物体を道路脇に置き、被験者に区間の開始がわかるようにした。動画刺激呈示後、被験者は第1区間と第2区間のどちらでより速い速度感覚が得られたかを一対比較法(二者強制選択)により選択する。回答時間は5sで、回答中はディスプレイには動画刺激の最後の静止フレーム、あるいは次の試行の最初の静止フレームが呈示されている。

自車の走行速度としては、高速道路の制限速度の100km/hより遅い80km/hと速い120km/hの2条件を選んだ。ベクション誘導刺激の移動速度には、予備的な観察からベクション効果が感覚できる速度として、地面に対して60km/hと120km/hの2条件を選び、さらに柱状物体の点灯なし条件を含めて計3条件とした。1セッション内では、自車の走行速度の2条件とベクション誘導刺激の3条件を組合せた6条件のうち、異なった条件が第1区間と第2区間に呈示され、全条件が総当たりするように試行を行った。また、同じ条件を第1区間に呈示する場合と第2区間に呈示する場合も別試行で行った。したがって、同じ実験条件の組合せは2試行あり、1セッション内での試行数は合計60回になった。区間内の条件の組合せとその呈示順はランダムに決められる。昼間と夜間条件は別のセッションで行った。

被験者は19名(男性18名、女性1名)で、年齢22歳から58

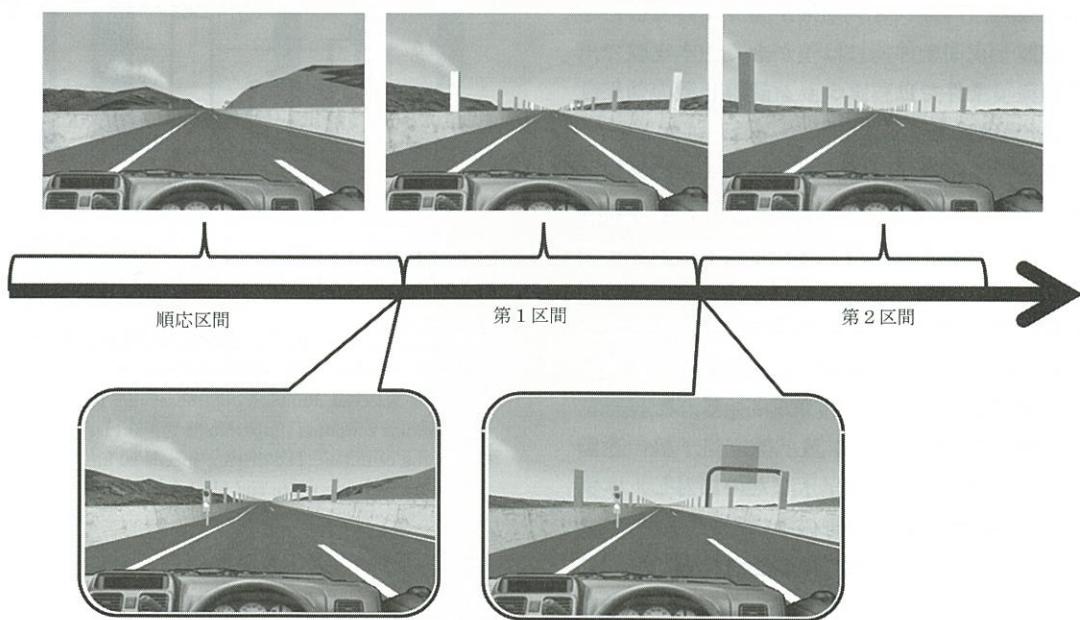


図2 各試行における動画刺激の呈示順序

シミュレートした高速道路に順応区間、第1区間、第2区間の三つの連続した区間を設定した。順応区間の呈示時間は30s、第1、2区間の呈示時間はそれぞれ20sである。各区間の開始地点には信号機状オブジェクトが配置してある。

The presenting order of simulation movies in a trial. The simulated freeway road consists of three continuous zones, the adaptation zone, the first test zone and the second test zone. The adaptation zone is presented for 30 s and each of the test zones is presented for 20 s. Traffic-light objects are placed at the start points of each test zone.

歳(平均年齢34.9歳)である。1名を除き全員運転免許を保持し、裸眼または矯正で視力正常である。被験者は10人と9人の2組に別れ、それぞれの組毎で全員同時に実験を行った。

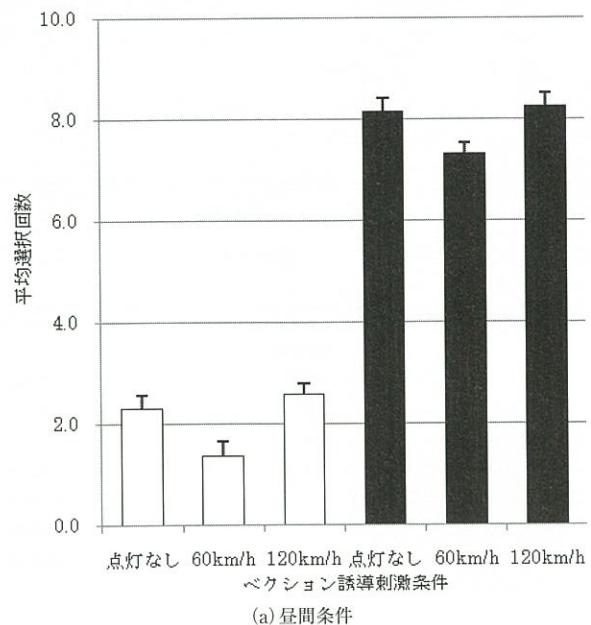
2.3 結果と考察

図3に、各条件における全被験者を平均した選択回数を示す。昼間条件と夜間条件はそれぞれ図3(a)と図3(b)に示されている。昼間条件と夜間条件での選択回数にはt検定の結果、有意差はなく(自車走行速度80km/hでは点灯なし条件:t=0.57, ベクション誘導刺激60km/h条件:t=0.0, 120km/h条件:t=-0.19, 自車走行速度120km/hでは点灯なし条件:t=0.0, ベクション誘導刺激60km/h条件:t=0.0, 120km/h条件:t=-0.21, いずれもp>0.5), 平均選択回数は、自車走行速度80km/hではベクション誘導刺激条件の違いで1~3回、自車走行速度120km/hでは7~9回になっていることがわかる。図3の結果をThurstonの比較判断の法則Case V¹⁶⁾を用いて感覚尺度化し、図4に示す。縦軸は速度感覚の尺度値、横軸は各ベクション誘導刺激条件であるが、尺度値の小さい順に並んでいる。自車走行速度80km/hのベクション誘導刺激60km/h条件で尺度値が基準値0になっている。図4(a)昼間および図4(b)夜間の両条件において、カイ2乗検定により適合検定をした結果、昼間条件: $\chi^2_0=21.7$, f=10, p=pr{| $\chi^2<23.2$ |}>0.01, 夜間条件: $\chi^2_0=20.6$, f=10, p=pr{| $\chi^2<21.2$ |}>0.02となり、尺度値と実測値の違いは有意でないことが確かめられた。したがって、この方法による尺度化は適切であるといえよう。

図4から、自車走行速度80km/hと120km/hの両方において、ベクション誘導刺激の移動速度が60km/hから120km/hになると、感覚尺度値が増大していることがわかる。これは、ベクション誘導刺激の移動速度が速くなることで、被験者の感覚速度が増大し、ベクション効果が強くなったことを示している。昼間と夜間条件間には差がなく、本実験で用いた昼夜の周囲環境条件ではベクション誘導刺激の効果は同程度であることがわかった。

昼間条件と夜間条件では、点灯時のベクション誘導刺激と背景(壁面)の輝度コントラストはそれぞれ7.9%と64.4%となる。ベクションの強さは、刺激と背景の輝度コントラスト(約20%~56%)に依存することが示されているが¹⁴⁾、本実験では昼夜条件間でベクション効果に大きな差はなかった。輝度コントラストとベクションの関係を調べた過去の研究¹⁴⁾では、固視点から左右に視角60deg離れた視野位置に、それぞれ直径23degのサイン波状垂直格子縞の運動刺激をベクション誘導刺激として呈示したのに対し、本実験では、ベクション誘導刺激は視野のさほど大きな領域を占めていなかった。また、本実験では被験者は順応区間により、すでに充分なベクションを感じていた。これらの実験条件の違いが過去の研究¹⁴⁾と本実験の結果の違いを生んだと考えられる。ただし、本実験のシミュレーション環境では呈示可能な輝度範囲に限界があり、実際の屋外における昼夜間の大きな背景輝度の差は、完全には再現できていないので、実際の昼夜間でのベクション効果の違いをみる

□自車走行速度80 km/h ■自車走行速度120 km/h



□自車走行速度80 km/h ■自車走行速度120 km/h

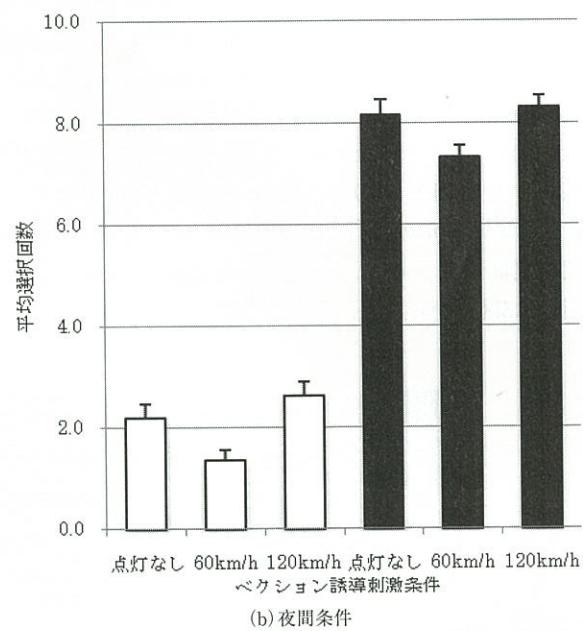


図3 各ベクション誘導刺激条件における被験者の平均選択回数
(実験1)

自車走行速度80 km/hと120 km/hはそれぞれ白と黒の棒で示されている。

Means of selected numbers over observers for each vection inducing stimulus condition (Experiment 1). (a) Daytime condition, (b) Nighttime condition. The driving speeds 80 km/h and 120 km/h are presented with the white and black bars.

ためには、実際の環境下での実験が必要である。

また、図4では、点灯なし条件での尺度値はベクション誘導刺激60km/hの尺度値よりも大きく、120km/hの尺度値に近いことが示されている。これは点灯なし条件での被験者の感覚速度がベクション誘導刺激60km/hの場合よりも大きく、ベクション誘導刺激120km/hの場合と同程度に

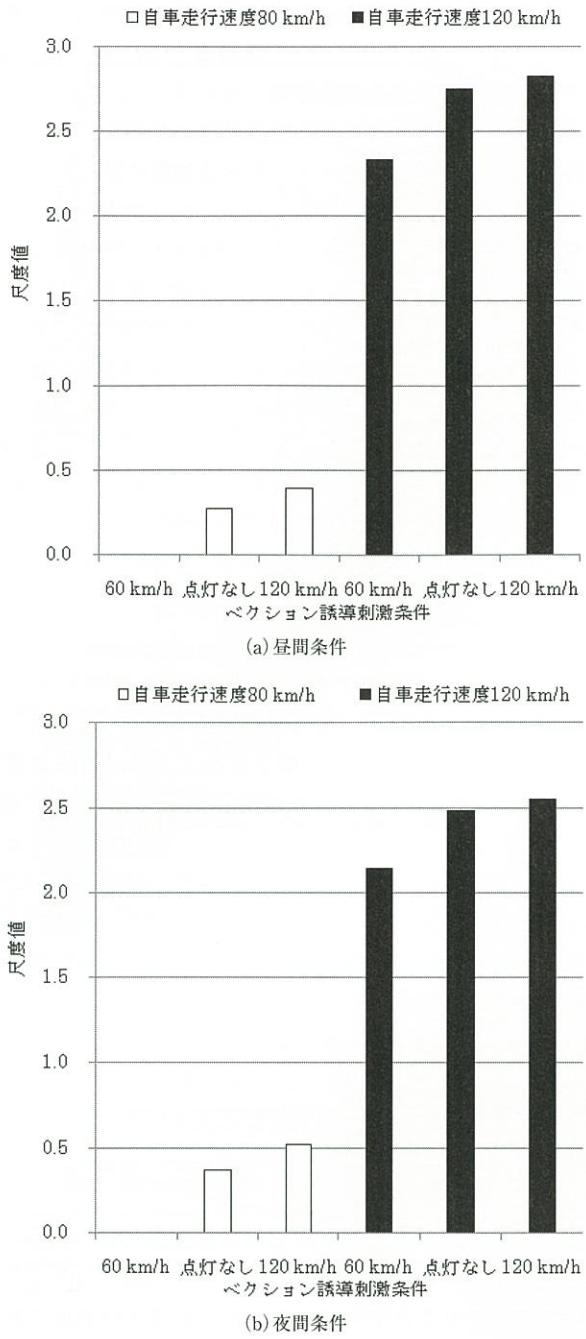


図4 各ベクション誘導刺激条件における感覚尺度値(実験1)
ベクション誘導刺激条件は尺度値の小さい順に並んでいる。自車走行速度80 km/hのベクション誘導刺激60 km/h条件で尺度値が基準値0になっている。

The interval scales for each vection inducing stimulus condition (Experiment 1). (a) Daytime condition, (b) Nighttime condition. The vection inducing stimulus conditions are arranged in the smaller order of their scales. The scale value is the standard value 0 at the driving speed of 80 km/h and the vection inducing stimulus speed of 60 km/h.

なっていることを意味している。この原因については「5.総合考察」でまとめて考察するが、実験2では、この原因を探るために、背景風景上に柱状物体を設置しない条件を加えて実験を行う。

実験1の結果では、ベクション誘導刺激が60km/hから120km/hに増大した時にベクション強度は確かに増大しているが、その差は自車走行速度が80km/hから120km/hに

増大した場合のベクション効果に比べれば小さいものであった。そこで、実験3ではベクション誘導刺激の移動速度をさらに増した場合、ベクション効果がどの程度増大するかを調べる。

3. 実験 2

3.1 実験概要

実験2では、実験1の結果を踏まえて、道路側面に設置した柱状物体そのものが運転者の速度感覚を変化させた可能性を調べる。実験条件として、ベクション誘導刺激条件60km/hと点灯なし条件に加えて、柱状物体を道路側面に設置しない条件を新たに設ける。自車の走行条件は実験1と同様である。

3.2 方法

実験2では、柱状物体を道路に設置しない条件、柱状物体を道路に設置するが点灯させない条件、柱状物体を実験1と同様に5本おきに点灯して移動させる条件を比較する。実験1において、昼間と夜間条件の結果にはほとんど差がみられなかったので、実験2では昼間条件のみを用いた。

刺激の呈示には開口直径140cmの球面立体ディスプレイ(Panasonic社CyberDome1400)を使用した。視距離は40cmである。動画刺激の視角サイズは、実験1の前列中央部の位置からのサイズと同様であり、手続きも実験1と同様である。ただし、ベクション誘導刺激速度は60km/hの1条件とした。被験者は1人ずつ実験を行う。被験者は実験1にも参加した8名(男性)である。

3.3 結果と考察

被験者の選択回数から実験1と同様に各条件でのベクションの速度感覚を尺度化し、図5に表す。実験2においてもカイ2乗検定により尺度化の適合性が確かめられた($\chi^2_0 = 21.8, f=10, p=pr \{ \chi^2 < 23.2 \} > 0.01$)。図5では、自車走行速度80km/hと120km/hの両速度内において、感覚速度は柱状物体なし条件、ベクション誘導刺激60km/h条件、点灯なし条件の順に増大している。感覚速度はベクション刺激60km/h条件の方が点滅なし条件よりも小さくなり、これは実験1の結果と一致した。

実験2で明らかになったことは、柱状物体を置くと、点灯しなくても、ベクション効果が柱状物体を置かない場合よりも強くなることである。これは、柱状物体が道路側面に配置されるだけで、背景のみの場合よりも感覚速度が増加したことを意味している。点灯なし条件の感覚速度は、柱状物体が5本おきに点滅して60km/hで移動する場合よりもやや大きくなっている。これも実験1と同様の結果である。この点灯なし条件でも感覚速度については「5.総合考察」で考察することにする。

4. 実験 3

4.1 実験概要

実験3では、実験1により得られたベクション誘導刺激による速度感覚の増大の変化幅がより大きくなるかどうかを

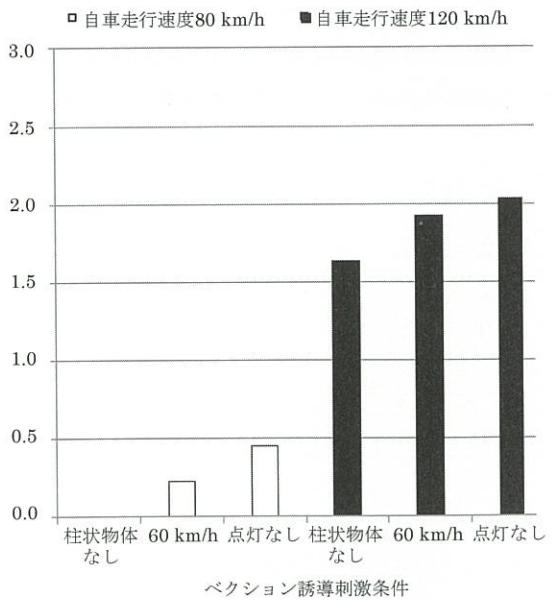


図5 各ベクション誘導刺激条件における感覚尺度値(実験2)

昼間条件を用いた。ベクション誘導刺激条件は尺度値の小さい順に並んでいる。自車走行速度80km/hの柱状物体なし条件で尺度値が基準値0になっている。

The interval scales for eachvection inducing stimulus condition (Experiment 2). The daytime condition was used. The vection inducing stimulus conditions are arranged in the smaller order of their scales. The scale value is the standard value 0 at the driving speed of 80 km/h and no vection inducing stimulus condition.

みるために、ベクション誘導刺激の移動速度を実験1で調べた条件よりさらに増した場合の速度感覚の変化を調べる。

4.2 方 法

刺激呈示および手続きは実験2と同様である。ベクション誘導刺激の移動速度として120km/hと240km/hの2条件を用いた。被験者は実験1と2の両方に参加した6名(男性)である。

4.3 結果と考察

図6に、自車走行速度80km/hと120km/hのそれぞれにおいて、ベクション誘導刺激120km/hの感覚尺度を基準値0とした場合のベクション誘導刺激240km/hの感覚尺度値を示す。実験1と2のように、同じ一つの条件の感覚尺度を基準値0とできなかったのは、自車走行速度80km/hと120km/hの条件間の一対比較では、被験者は自車走行速度120km/hの方が常に速い速度感を得るとしてこちらを必ず選択してしまい、自車走行速度条件間での尺度値を決められなかつたためである。しかし、ここではベクション誘導刺激が120km/hと240km/hの時の尺度値の差は各自車走行速度内で求められたので、その差を実験1の結果に加えて、図7に示す。図7では横軸がベクション誘導刺激の移動速度、縦軸が感覚尺度値である。図中の実線は回帰直線である。この直線の相関係数は自車走行速度80km/hと120km/hそれぞれで0.9991と0.9999である。図7より、自車走行速度80km/hと120km/hの両方において、ベクション誘導刺激の移動速度が60km/hより240km/hに増大するにつれて尺度値が線形に増加することが示された。また、その傾きは

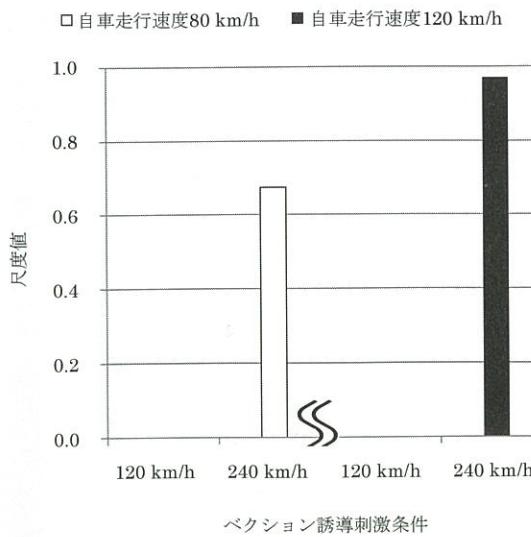


図6 ベクション誘導刺激240km/h条件における感覚尺度値(実験3)
各自車走行速度におけるベクション誘導刺激速度120km/h条件で尺度値が基準値0になっている。

The interval scales for vection inducing stimulus of 240 km/h (Experiment 3). The scale value is the standard value 0 at the vection inducing stimulus of 120 km/h in each driving speed condition.

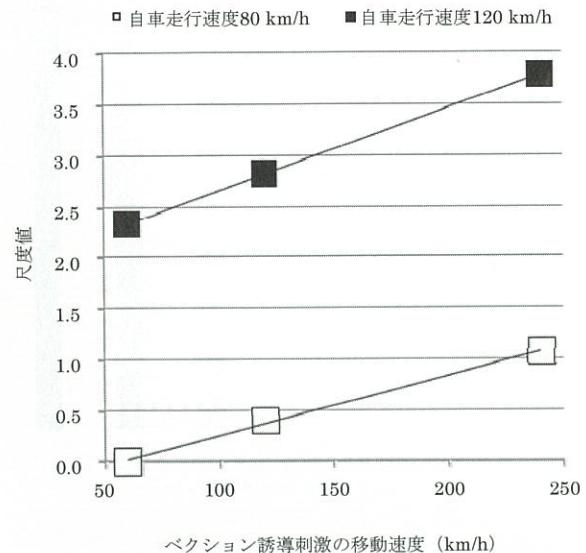


図7 ベクション誘導刺激の移動速度に対する感覚尺度値
実験1の結果に実験3の結果を加えて示す。自車走行速度80km/hと120km/hはそれぞれ白四角と黒四角で示す。図中の実線はそれぞれの測定点に近似した回帰直線である。

The interval scale as a function of velocity of vection inducing stimulus. The results in Experiment 3 are shown in addition to those in Experiment 1. The white and black squares represent the driving speed conditions of 80 km/h and 120 km/h, respectively. The solid lines in the figure are regression lines to be fitted to the data points.

自車走行速度120km/hと80km/hにおいて、それぞれ0.0081と0.0059になり、自車走行速度が速いほど大きく、尺度値の増加率は、自車走行速度120km/hでは80km/hの1.4倍となっている。この結果より、道路側面に設置した柱状物体を動的に点滅することにより、運転者の速度感覚を変化させられるという実験1の結果が確かめられ、さらにベクション誘導刺激の速度値に線形比例して感覚速度が増減する

こと、その増減の度合いは自車走行速度が大きいほどより高いことが明らかとなった。

本実験では、ベクション誘導刺激の速度が増すと、それに比例して運転者の感覚速度が増大するという結果が得られたが、刺激の速度とベクションの大きさとの関係を調べた過去の研究でも、それらが線形な関係になることが示されている^{14) 15)}。したがって、本実験は過去の実験結果を支持していることになる。このベクション誘導刺激の速度と感覚速度の比例関係は、刺激の強度とその知覚量の関係で良く知られている対数関係(Weber-Fechner則)とは異なっている。輝度差弁別のような視覚系の初期レベルが反映しているような特性では、Weber-Fechner則が成り立つが、線分の長さ判断のような視覚系の比較的高次レベルが関与しているような特性では、Weber-Fechner則が成立しないことも知られている。したがって、刺激速度とベクション強度の関係は、視覚系高次レベルが関与しているために、単純なWeber-Fechner則が成立しないのではないかと推測できる。

ベクション知覚時の映像酔いは、特定の周波数の刺激で顕著に見られることが良く知られているが、本実験では、ベクション誘導刺激の特定の速度(あるいは周波数)でベクション強度が大きくなつたという結果にはなっていない。これは、映像酔いの場合は視覚系からの応答と他の前庭感覚、触覚系、聴覚系などの感覚系からの応答との矛盾がその一因であると考えられ¹⁷⁾、映像酔いはベクション強度が大きいほど激しくなるものではないからであろう。本実験では、視覚系のみが自己運動を示し、その他の感覚系は自己の静止か等速運動を示している環境を作っているので、感覚系間にはさほど大きな矛盾は生じないと見える。

5. 総合考察

本研究では、道路側面に設置された柱状物体を点滅させることにより運転者にベクションを誘導し、それにより運転者の速度感覚を変化させることができるかどうか、さらにもしこれが可能な場合、運転者の速度感覚は柱状物体の点滅条件によってどのように変化するかを調べることを目的とした。実験1と3により、道路側面に置いた柱状物体のベクション移動速度を60km/hより240km/hまで増加させると観察者の速度感覚もそれに伴い増大すること、つまり柱状物体が誘導するベクションにより、運転者の速度感覚が変化しうることが明らかとなった。さらに、ベクション誘導刺激の移動速度に比例して、感覚速度は増大するという関係が示され、柱状物体の点滅条件と運転者の速度感覚の関係が明らかとなった。この特性に基づき、さらに自車走行速度と柱状物体の点滅速度をシステムティックに変化させて観察者の速度感覚を測定することで、これら2種類の速度の組合せによって生じる人間の速度感覚をモデル化することも可能と考えられる。このモデル化は研究の一つの重要な方向性を持つものであり、今後の課題としたい。

実験2、3では刺激呈示のためのディスプレイが実験1のデ

ィスプレイとは異なっていた。これは実験1で用いた大型ディスプレイが実験2、3では使用できなかつたためであるが、両ディスプレイでは、動画刺激の視角サイズ等に違いはなく、被験者の網膜に入力される刺激はまったく等しい。さらに実験2、3に参加した被験者は、実験1にも参加した被験者であり、その内観から特に実験の応答には装置の違いは影響しなかつたという内観を得ている。したがって、本研究ではディスプレイの違いは結果に影響していないと考える。本研究は、シミュレーションの動画画面を用いているが、高速道路の幅や曲率は実在の高速道路を忠実に再現したものであり、また画面の視野サイズは周辺視野を充分含むように大きくし、さらに画像を立体視するなど実在環境にできるだけ近い実験環境を実現している。したがって、本研究は、実際の場面においてこのようなベクション誘導刺激により、運転者の速度感を変化させる上で充分有用な結果を提供していると考えられる。

図7より、ベクション誘導刺激の移動速度に線形に比例して感覚速度は変化するという関係が明らかとなった。ただし、過去のベクションに関する研究では、ベクション誘導刺激が呈示される領域が大きいほどベクション効果は強くなり^{2) 5)}、手前よりも背景物体の運動がより大きくベクションに影響することが示されている^{6) ~9)}。したがって、本実験で得られた関係、特に直線の傾きはベクション誘導刺激の時空間条件に依存し、本実験に用いた柱状刺激の大きさ、設置位置、点灯間隔などを変えた場合にはこの関係も変わるものと考えられる。また実際の環境では、背景風景がシミュレーション画面と異なるためにベクション刺激の効果がそれにより影響されることも考えられる。

実験1と2により、柱状物体の点灯なし条件で得られた速度感覚が、柱状物体の点灯あり条件でベクション誘導刺激の移動速度が60km/h~120km/hで得られる速度感覚と同程度になることが示された。この原因には、まず、今回用いた背景風景の特性のために、その上に物体をさらに置くことで、ベクション効果が高まるのではないかということが考えられる。つまり、背景上にある物体の数が少なく、柱状物体を道路側面に配置するとそれだけで物体数が増し、そのためにベクション効果が強まつたのではないかということである。あるいは、柱状物体を置いたことが背景をより現実的にし、そのためベクション効果が強まつとも考えられる。ベクションを誘導する物体数の密度が小さい場合は、物体数が増すにつれてベクション効果が強まること⁷⁾、また背景が現実的になるとそれだけでベクション効果が強まること¹⁸⁾は過去の研究でも報告されている。いずれにしても、柱状物体を配置するだけで点灯しなくてもベクション効果が強まることは実験2により確かめられた。

次に、柱状物体を点灯すると(移動速度60km/h)、点灯しない場合よりも返ってベクション効果が弱まる原因を考える。柱状物体が点灯する場合には、柱状物体は5本おきに点灯している。この点灯により柱状物体の設置間隔が5本置き(25m)に見え、点灯なし条件では1本置きの5mで見

える。つまり、点灯なし条件の方が柱状物体の配置間隔が密に見えるということである。この見えは被験者からの内観報告よって確かめられている。前述したように、視野内のベクション誘導刺激の数が少ない場合には、その数が増すほどベクション効果は強まること⁷⁾、また刺激图形の個数によって速度知覚が変化すること¹⁹⁾が過去の研究でも報告されている。したがって、柱状物体が点灯すると、その個数が少なく見えてしまうことがベクション効果が弱まる原因として考えられる。ただし、この現象は視野内にベクション誘導刺激数が少ない場合に限って起きるものであり、実際の風景にはさまざまな物体が多数存在するので、単に柱状物体を設置しただけでベクション効果が増大するとは考えにくい。

6. む す び

本研究では、高速道路走行をシミュレートした動画刺激を用いて、両側の道路側面に設置した柱状物体を動的に点滅させることによりベクションを観察者に誘導して、その結果、観察者の速度感覚を変化させられることを明らかにした。また、柱状物体のベクション移動速度と観察者に生じる感覚速度の大きさの関係を求めた。本研究結果により、ベクション効果を実際の高速道路に応用して運転者の感覚速度を変化させることが可能であることが示唆されるが、解決しなければならない問題もいくつか残されている。本研究では高さ2mの柱状物体をベクション誘導刺激として用いたが、発光器をベクション誘導刺激として実際の高速道路へ設置し、保守運用することを考えると、ベクション誘導刺激はより小さいサイズが望まれる。また、発光器が多いほどコストも増大するため、ベクション誘導刺激の個数も少ない方が良い。したがって、ベクション効果を充分強く生起させるために必要なベクション誘導刺激のサイズと個数を知る必要がある。また、発光器は道路の側面片側だけに設置する方がコストや整備の点から望ましいため、道路片側のみにベクション刺激を与えた場合のベクション効果を調べる必要がある。これらの問題解決には更なる実験が必要であり、これは本研究の今後の課題である。

〔文 献〕

- 1) 内川恵二編：“感覚・知覚の科学3”，聴覚・触覚・前庭感覚，朝倉書店，東京（2008）
 - 2) T. Brandt, J. Dichgans and E. Koneig: "Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception", *Experimental Brain Research*, 16, 5, pp.476-491 (1973)
 - 3) R. Held, J. Dichgans and J. Bauer: "Characteristics of moving visual scenes influencing spatial orientation", *Vision Research*, 15, 3, pp.357-365 (1975)
 - 4) G. Johansson: "Studies on visual perception of locomotion", *Perception*, 6, 4, pp.365-376 (1977)
 - 5) S. Nakamura: "Effects of stimulus eccentricity onvection reevaluated with a binocularly defined depth", *Japanese Psychological Research*, 50, 2, pp.77-86 (2008)
 - 6) M. Ohmi, I.P. Howard and J.P. Landolt: "Circularvection as a function of foreground-background relationships", *Perception*, 16, 1, pp.17-22 (1987)
 - 7) T. Brandt, E.R. Wist and J. Dichgans: "Foreground and background in dynamic spatial orientation", *Perception & Psychophysics*, 17, pp.497-503 (1975)
 - 8) I.P. Howard and T. Heckmann: "Circularvection as a function of the relative sizes, distances and positions of two competing visual displays", *Perception*, 18, 5, pp.657-665 (1989)
 - 9) H. Ito and I. Shibata: "Self-motion perception from expanding and contracting optical flows overlapped with binocular disparity", *Vision Research*, 45, pp.397-402 (2005)
 - 10) 中村信次：“視覚誘導自己運動知覚の実験心理学”，北大路書房，京都（2006）
 - 11) 伊吹山太郎, 伊吹山四郎：“交通工学シリーズ7”，新訂道路の人間工学，技術書院，東京（1986）
 - 12) G. Denton: "The Influence on visual pattern on perceived speed", *Perception*, 9, 4, pp.393-402 (1980)
 - 13) <http://smartshimbun.jp/headline/49/>
 - 14) X.M. Sauvan and C. Bonnet: "Spatiotemporal boundaries of linearvection", *Perception & Psychophysics*, 57, 6, pp.898-904 (1993)
 - 15) B. De Graaf, A.H. Wertheim, W. Bles and J. Kremers: "Angular velocity, not temporal frequency determines circularvection", *Vision Research*, 30, pp.637-646 (1990)
 - 16) J.P. ギルホールド：“精神測定法”，pp.189-218，培風館，東京（1962）
 - 17) J.T. Reason : "Motion sickness adaptation: A neural mismatch model", *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71, pp.819-829 (1978)
 - 18) I.P. Howard and L. Childerson: "The contribution of motion, the visual frame and visual polarity to sensations of body tilt", *Perception*, 23, pp.753-762 (1994)
 - 19) 金頭静, 野口薰：“運動图形の形態的特徴が速度知覚に及ぼす効果”，デザイン学研究, 46, 2, pp.55-62 (1999)
-
- 

川島 祐貴
2007年、東京理科大学理工学部卒業。
2009年、東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。現在、同大学院博士課程在籍中。学生会員。



内川 恵二
1980年、東京工業大学大学院総合理工学研究科修了。York Univ. (Canada) Post doctoral fellow, 東京工業大学助手, 助教授を経て、1994年より、東京工業大学大学院総合理工学研究科教授。1986年～1987年、UCSD, Visiting Researcher. 視覚情報処理、色覚認識、心理物理学を専門とする。工学博士。正会員。



金子 寛彦
1992年、東京工業大学大学院博士課程修了。1992年、York University (Canada) 研究員。1995年、ATR人間情報通信研究所研究員。2000年、東京工業大学像情報工学研究施設助教授。2008年、東京工業大学物理情報システム専攻准教授となり、現在に至る。視覚心理物理学、特に空間認識、立体視を専門とする。博士(工学)。正会員。



福田 一帆
2006年、東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。2006年、同大学院産官連携研究員。2006年～2009年、カナダヨーク大学博士研究員。2009年～2010年、東京工業大学大学院総合理工学研究科特任助教。2010年より、同大学院総合理工学研究科助教。工学博士。



山本 浩司
1988年、東京理科大学理工学部機械工学科修了。1988年、日本道路公団、2005年、中日本高速道路(株)、2008年、京都大学大学院工学研究科博士課程修了。土木施設のアセットマネジメントを専門とする。博士(工学)。



木屋 研二
1986年、熊本県立球磨工業高等学校卒業。1986年、福岡道路エンジニア(株)。2002年、(財)高速道路技術センター。2007年より、西日本高速道路エンジニアリング九州(株)。