

博士論文

視覚誘導自己運動感覚の誘起により
車酔いを低減する車載ディスプレイの開発

A Vection-inducing Design of Onboard Displays
for Reducing Car Sickness

2008 年 9 月

三重大学大学院工学研究科

森本 明宏

目次

1. 序論.....	- 5 -
1.1. はじめに.....	- 5 -
1.2. 本研究の目的.....	- 7 -
1.3. 本論文の構成.....	- 7 -
2. TV視聴が車酔いに及ぼす影響.....	- 10 -
2.1. 目的.....	- 10 -
2.2. 実験方法.....	- 10 -
2.2.1. 被験者.....	- 10 -
2.2.2. 実験装置.....	- 10 -
2.2.3. 刺激（乗車条件と乗車コース）.....	- 11 -
2.2.4. 動揺病不快感の測定と解析方法.....	- 15 -
2.2.5. 実験手順.....	- 15 -
2.3. 実験結果.....	- 17 -
2.3.1. 車酔い発症の時間推移.....	- 17 -
2.3.2. 車酔い感受性.....	- 19 -
2.3.3. 動揺病不快感の評定尺度から距離尺度への変換.....	- 22 -
2.3.4. 動揺病不快感の増強.....	- 25 -
2.4. 考察.....	- 27 -
3. 右左折時に発生する車酔いに対する対策.....	- 31 -
3.1. 目的.....	- 31 -
3.2. 対策案.....	- 32 -
3.2.1. 対策案の基本的な考え方.....	- 32 -
3.2.2. 対策案 1.....	- 32 -
3.2.2.1. 対策案 A1-1.....	- 32 -
3.2.2.2. 対策案 A1-2.....	- 33 -
3.2.3. 対策案 2.....	- 34 -
3.2.4. 対策案 3.....	- 35 -

3.2.4.1.	対策案 A3-1	- 35 -
3.2.4.2.	対策案 A3-2	- 35 -
3.3.	予備実験	- 37 -
3.3.1.	実験方法	- 37 -
3.3.2.	結果	- 37 -
3.4.	実車走行実験	- 39 -
3.4.1.	実験方法	- 39 -
3.4.1.1.	被験者	- 39 -
3.4.1.2.	実験装置	- 39 -
3.4.1.3.	刺激（乗車条件と乗車コース）	- 40 -
3.4.1.4.	動揺病不快感の測定と解析方法	- 41 -
3.4.1.5.	実験手順	- 41 -
3.5.	結果	- 43 -
3.5.1.	実験その 1	- 43 -
3.5.1.1.	動揺病不快感の増強	- 43 -
3.5.2.	実験その 2	- 45 -
3.5.2.1.	車酔い発症の時間推移	- 45 -
3.5.2.2.	車酔い感受性	- 48 -
3.5.2.3.	動揺病不快感の評定尺度から距離尺度への変換	- 50 -
3.5.2.4.	動揺病不快感の増強	- 51 -
3.6.	考察	- 53 -
4.	加減速時に発生する車酔いに対する対策	- 60 -
4.1.	目的	- 60 -
4.2.	対策案	- 61 -
4.2.1.	対策案の基本的な考え方	- 61 -
4.2.2.	対策案（実験その 1）	- 61 -
4.2.3.	対策案 1（実験その 2）	- 63 -
4.2.4.	対策案 2（実験その 2）	- 65 -
4.3.	予備実験	- 69 -
4.3.1.	実験方法	- 69 -
4.3.2.	結果	- 69 -

4.4.	実車走行実験	- 71 -
4.4.1.	実験その1	- 71 -
4.4.1.1.	実験方法	- 71 -
4.4.2.	実験その2	- 73 -
4.4.2.1.	実験方法	- 73 -
4.5.	実車走行実験	- 76 -
4.5.1.	実験その1	- 76 -
4.5.1.1.	動揺病不快感の増強	- 76 -
4.5.2.	実験その2	- 78 -
4.5.2.1.	車酔い発症の時間推移	- 78 -
4.5.2.2.	車酔い感受性	- 80 -
4.5.2.3.	動揺病不快感の評定尺度から距離尺度への変換	- 82 -
4.5.2.4.	動揺病不快感の増強	- 82 -
4.6.	考察	- 84 -
5.	右左折時および加減速時に発生する車酔いに対する対策	- 87 -
5.1.	目的	- 87 -
5.2.	対策案	- 88 -
5.2.1.	対策案の基本的な考え方	- 88 -
5.2.2.	対策案（実験その1）	- 88 -
5.2.3.	対策案1（実験その2）	- 91 -
5.2.4.	対策案2（実験その2）	- 94 -
5.3.	予備実験	- 99 -
5.3.1.	実験方法	- 99 -
5.3.2.	結果	- 99 -
5.4.	実車走行実験	- 101 -
5.4.1.	実験その1	- 101 -
5.4.1.1.	実験方法	- 101 -
5.4.2.	実験その2	- 103 -
5.4.2.1.	実験方法	- 103 -
5.5.	実車走行実験	- 106 -
5.5.1.	実験その1	- 106 -

5.5.1.1.	動揺病不快感の増強	- 106 -
5.5.2.	実験その2	- 108 -
5.5.2.1.	車酔い発症の時間推移	- 108 -
5.5.2.2.	車酔い感受性	- 110 -
5.5.2.3.	動揺病不快感の評定尺度から距離尺度への変換	- 112 -
5.5.2.4.	動揺病不快感の増強	- 112 -
5.6.	考察	- 114 -
6.	総合考察	- 117 -
	謝辞	- 122 -
	参考文献	- 123 -
	発表論文リスト	- 127 -

1. 序論

1.1. はじめに

乗り物酔いと呼ばれる動揺病 (Motion Sickness) は、船・電車・自動車・バス・飛行機などの乗り物に乗車した際に発症することが知られている。動揺病の症状には、ほてり・冷や汗、頭痛、顔面蒼白、唾液の増加、めまい、眠気、吐き気、嘔吐などがある [1-1]。動揺病は、2 歳くらいから発症し始め 12 歳くらいで最も発症しやすく、その後年齢と共に発症しにくくなり、50 歳以降では発症することが少ないこと、また男性よりも女性の方が発症しやすいことが報告されている [1-2]。

動揺病の発生メカニズムは諸説あるが、最も有力な説として「感覚矛盾説」 [1-2] があげられる。感覚矛盾説とは、目から得られる視覚情報と、半規管 (回転感覚) や耳石器 (加速感覚・傾斜感覚) から得られる平衡感覚情報と、皮膚・関節などから得られる体性感覚情報の間に、感覚情報の矛盾が発生した場合に動揺病が発生するという説である。

自動車・バスで発症する動揺病は車酔いと呼ばれているが、車酔いは後部座席で長時間連続して縦揺れや横揺れを受けると発症しやすいこと [1-3]、0.5Hz 程度以下のゆっくりとした右左折や加減速で発症しやすいこと [1-4] が報告されている。車酔いは、特に自動車に乗車中に地図を見たり読書を行うと発症しやすいことが良く知られている。視覚からは車の動きに対応した身体の動きが知覚できないが、平衡感覚からは車の動きに対応した身体の動きを知覚するために、視覚と平衡感覚間に感覚情報の矛盾が発生し、車酔いが発症すると考えられている。近年、自動車の後部座席で TV を視聴するリアエンターテインメントシステムが普及しつつあるが、TV を注視すると走行中の読書と同様に視覚からは車の動きに対応した身体の動きが知覚できないため、車酔いを発症する可能性が懸念される。

先行研究では、車酔いの発生に対して視覚が大きく影響することが報告されている。Turner & Griffin [1-4] - [1-6] は、56 台のバスに乗車した 3,256 名の乗客に対してアンケート調査を実施し、公共輸送における車酔いの発生に関して調査した。この報告によると、長距離バスでの旅行中に乗客の 28.4% は不快と感じ、12.8% は吐き気を発症し、1.7% は嘔吐した。道路前方の視野に関するさまざまな条件下で動揺病不快感を比較検討し、道路前方があまり見えない条件では車酔いが増強する結果を得た。道路前方が全く見えない乗客の車酔い発生率は 34.6% であり、道路前方の視界が良好な乗客の車酔い発生率 12.7% に比べて、約 3 倍高い発生率であった [1-6]。道路前方の視野が良好な条件では、車酔いの発生を完全には抑制することはできなかったが、揺れの大きさが異なっても動揺病不快感強度にはほとんど差が見られなかった [1-5]。一方道路前方の視野が悪い条件では、女性は男性

より車酔いを発症しやすいことが示された [1-6]。これらの結果により、道路の前方視野を良好にすることで、車酔いを極めて低減し得ることが示唆された。更に、バス旅行が初めての人あるいはほとんどバス旅行をしない人にとって、前方視野を良くすることが車酔いに対して極めて有効であることが示唆された。

Probst ら [1-7] は、直線加速度を与えた実車実験を行い、車酔いにおける視覚の効果を示した。実験は、a) 開眼で道路前方の視野良好、b) 閉眼、c) 開眼で室内の静止物を注視、の 3 種類の条件下で実施され、被験者は高速道路上で頻繁なブレーキ操作により前後加速度を与えられた。動揺病不快感は、条件 c) で最も増強し、次に条件 b) で増強した。すなわち開眼で室内の静止物を注視した条件では、車酔いに対し悪影響を与え、閉眼条件よりも強い車酔いを発生させた。Griffin & Newman [1-8] も、前方視野の有効性を示した。道路前方の視野が良好な条件では、前方視野の広さにかかわらず同程度に車酔いが減少した。一方前方視野が不良な条件では、横方向の視野の有無にかかわらず遮眼条件と同程度の車酔いが発生した。

感覚矛盾説に立脚すると、TV 視聴時の車酔いを抑制するには、視覚と平衡感覚の感覚情報の矛盾を低減させることが重要である。視覚情報に一致するように平衡感覚情報を変更させる事は、耳の後部に微弱な電流を通電することで前庭感覚へ刺激を与える例 [1-9] が報告されているものの難しいと考えられる。これに対して、車の動きに対応した平衡感覚情報に一致するように視覚情報を変更させる事は比較的容易であると考えられる。感覚矛盾説に基づき、視覚から車の運動情報を与えて車酔いを低減させる研究が少数ながら行われている。Griffin & Newman [1-8] は、車の前方に取り付けたカメラで道路前方を撮影しながら、乗員がその映像を見ることができる表示装置を使用し、車酔いに対する効果を検証した。しかしながら車酔いを低減する結果は得られず、むしろ車酔いが悪化した。カメラによる道路前方の撮像画角は、乗員が表示装置を見る際の表示画角とほぼ一致していたが、表示装置は、車の動きの適切な感覚情報を与えることができなかつたと思われる。この理由として、車の走行中にカメラと表示装置が揺れたため、あるいは減速時に乗員が小さな画面にたびたび視点を合わせる必要があつたためなどと考察している。また車の加減速時に生じる車酔いを低減することを目的として、車載 TV 視聴中に、車両のピッチ回転によるディスプレイの上下移動分だけ TV 映像を反対方向に移動して表示させる対策についても報告されている。TV 映像として静止画 (2 行の文字ニュースを 8 秒毎に更新) を視聴した際には有意な車酔い低減効果が見られた [1-10] が、動画像を視聴した際には車酔い低減効果は見られなかつた [1-11]。動画像を視聴した際には、動画像自身がカメラのズーム・チルト等の影響で上下移動しているのか、対策により TV 映像が上下移動しているのか、乗員が

区別できなかったためと考察している。そこで動画像の対策では、TV 映像の中央に十字と鉤型の指標を重畳し TV 映像の上下移動と連動することで、対策による TV 映像の上下移動の様子が分かるようにしたが、車酔い低減効果に有意差が見られなかった [1-11]。

1.2. 本研究の目的

本研究の目的は、1) 乗車中の TV 視聴により車酔いがどの程度増強するかを検証すること、2) TV 視聴により増強した車酔いを低減する対策を考案し、その効果を実車実験で検証することである。

まず 1) を検証する実車実験では、カーブの多い道を走行し被験者に車酔いを発生させた。被験者には乗車中に車載 TV で映画を視聴させて、動揺病不快感強度を測定した。同時に読書、普通乗車での走行実験を行い、動揺病不快感の比較を行った。車載 TV の普及が進む今日、乗車中の TV 視聴によってどの程度車酔いが増強するかを予測することは極めて重要である。また、車酔いの増強を抑制する車載 TV の開発、更には車酔いの発生を予防あるいは低減する車載 TV の開発が望まれる。本研究は、このような車載 TV の開発にあたって、車酔い低減効果の目標や評価基準を定めるための基礎的知見を与えるものと期待される。

2) における車酔い低減対策の基本的な考え方は、TV 視聴と同時に視覚から車の動きを運動感覚情報として与えることで、視覚と平衡感覚間の感覚情報の矛盾を減少させ、その結果車酔いを低減させる、というものである。車酔いは右左折の多い道路や加減速時に発症しやすいことが知られているので、a) 右左折に対する対策、b) 加減速に対する対策、c) 複合対策（右左折・加減速対策に加えて遠心加速度対策を含む）、に分けて車酔い低減対策の効果の検証を行った。

1.3. 本論文の構成

本論文は、6 章で構成される。以下、本論文の構成順に要旨を述べる。

1 章では、従来の車酔い研究、特に感覚矛盾説による車酔い発生メカニズムの説明、視覚が車酔い発症に及ぼす影響についてレビューし、本研究の目的について述べる。

2 章では、車酔い低減対策の効果検証に先立って、乗車中に TV 視聴することで車酔いがどの程度増強されるか検証した。実車実験では、TV 視聴、読書および普通乗車の 3 条件で車酔い不快感強度を測定した。いずれの条件でも車酔い不快感強度が乗車時間にほぼ比例して増強した。TV 視聴条件では、普通乗車に比べて車酔い不快感が約 2 倍に増強したが、これは読書に比べて 2 割程度少ないだけの車酔い不快感であった。乗車中に TV 視聴を行う

と、視覚からは車載 TV に映された映像空間での動きを知覚するのに対して、平衡感覚からは車の動きに対応した身体の動きを知覚するため、感覚情報の矛盾が増大し車酔いが増強したと考えられる。

3章では、右左折時に発生する車酔いを低減することを目的として、考案した対策の有効性の検証を行った。視覚から車の右左折時に発生する Yaw 回転の情報を映像として与え、自分が回転していると感じる視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）を発生させ、視覚と平衡感覚との感覚情報の矛盾を減少させるように対策を施した。映像に奥行き感がある時、視覚誘導自己運動感覚は主に背景と感じられる映像の動きによって発生することが報告されている。そこで TV 視聴時の対策案では、TV 映像（主映像）を縮小してディスプレイ中央部に表示し、主映像の周辺に背景と知覚できるような映像を背景映像として配置した。対策案 1 では車の Yaw 角速度に比例した速度で背景映像を左右に移動し、対策案 2 では Yaw 角速度に比例した角度で主映像自体を回転し、対策案 3 では対策 1 と対策 2 を合成して表示し、回転感覚を発生させた。3 対策共に、TV 視聴により増強した車酔いが 70% 以上低減できるという極めて大きな効果が得られた。

4章では、加減速時に発生する車酔いを低減することを目的として、考案した対策の有効性の検証を行った。視覚から車の加減速感覚を映像として与え、視覚と平衡感覚との感覚情報の矛盾を減少させるように対策を施した。対策案 1 では前後加速度に比例した速度で背景映像を前後移動して、自分が前後に動いていると感じるリニアベクションを発生させた。対策案 2 では加速度と重力加速度の合成ベクトルの方向が傾斜感覚と知覚されることを応用し、加速度に応じて背景映像をピッチ方向に傾斜させて、視覚から加減速感覚を与えた。対策案 1 の車酔い低減効果は約 67%、対策案 2 の車酔い低減効果は約 21% であった。対策案 2 による傾斜感覚の対策は車酔い低減効果が小さかったものの、後述の 5 章で述べる複合対策の検証実験では、右左折の対策と組み合わせた際に効果が出やすいというメリットがあった。

5章では、右左折および加減速が混在する場合に発生する車酔いを低減することを目的として、考案した対策の有効性の検証を行った。なお大きな半径の道路を走行する際には、車の Yaw 角速度が小さくとも大きな遠心加速度が発生することから、3章の右左折の対策、および 4章の加減速の対策に、遠心加速度の対策を加えた複合対策について有効性の検証を行った。対策案 1 では、前後加速度に比例した速度で背景映像を前後移動してリニアベクションを発生させ、遠心加速度に比例した速度で別の背景映像を左右に移動すると共に、Yaw 角速度に比例した角度で主映像自体を回転し、回転感覚を与えた。対策案 2 では一枚の背景映像を用い、加速度に応じて背景映像をピッチ方向に傾斜させて加減速感覚を与え、

Yaw 角速度に比例した速度で背景映像を左右に移動させて回転感覚を与えた。更に遠心加速度と重力加速度の合成ベクトル方向がロール方向の傾斜感覚と知覚されることを応用し、遠心加速度に応じて背景映像をロール方向に傾けて、視覚から傾斜感覚を与えた。対策案 1 による車酔い低減効果は約 32%、対策案 2 による車酔い低減効果は約 73% であり、対策案 1 に比べて対策案 2 の車酔い低減効果が高かった。対策案 1 では前後加速度・Yaw 角速度・遠心加速度という 3 種類の入力を用いて、それぞれ個別の映像を動かしたために、統合した運動感覚が誘起されにくかった可能性がある。これに対して対策案 2 では対策案 1 と同じ 3 種類の入力を用いているが、一枚の背景映像を動かしたため、対策案 1 に比べて車酔い低減効果が高かったと考えられる。

6 章では、2 章から 5 章の実験結果を踏まえ、総合的な考察を行う。TV 視聴することによって約 2 倍以上に増強した車酔いを、右左折に対する対策、加減速に対する対策、そして複合対策のいずれの提案手法においても、約 70% 程度低減するという顕著な効果を得ることができた理由について考察し、今後更なる低減効果を得るための対策案について提案する。

2. TV 視聴が車酔いに及ぼす影響

2.1. 目的

近年、自動車の後部座席で TV 視聴を行うリアシートエンターテインメントと呼ばれるシステムが増えてきている。自動車に乗車中に地図を見たり読書を行うと、車酔いを起こしやすいことが良く知られているが、乗車中に TV 視聴を行うと、乗車中の読書と同様に車酔いが発症する可能性がある。平衡感覚からは体が動いているという情報が伝えられるのに対して、視覚からは体の動きに対応した情報が伝えられないため、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾 [1-2] が生じて車酔いが増強すると考えられる。

本章の目的は、乗車中に TV 視聴することにより、車酔い不快感がどの程度増強されるか検証することである。車酔い低減対策の効果検証に先立って実車実験を実施し、TV 視聴、読書および普通乗車の 3 条件で、動揺病不快感強度の比較を行った。

2.2. 実験方法

2.2.1. 被験者

被験者は、これまでにめまいや難聴など耳鼻咽喉科疾患の既往のない 20 歳前後の健康男女 31 人（男性 21 名、女性 10 名）であった。実車走行実験は、あらかじめ被験者に実験の主旨、内容、手順、評価方法、予期される人体への影響などについて十分な説明を行い、書面による被験者の事前同意を得て行った。確認した項目は、

- ・ 実験中に車酔いが発症し不快感が生じる可能性があること
- ・ 被験者の希望により実験期間中であればいつでも参加の延期、中断ができること
- ・ その延期・中断によって不利益を被らないこと
- ・ 実験中に得た個人データを個人が特定できる形では公表しないこと

の 4 項目であった。被験者の動揺病不快感が強く実験を継続できない場合には、直ちに実験を中断した。なお、実験で用いたプロトコルは三重大学大学院工学研究科の実験倫理委員会で承認を受けた。

2.2.2. 実験装置

三列シート 7 人乗りのミニバンタイプの車（全長 4,690 [mm]、幅 1,760 [mm]、高さ 1,660 [mm] で、2,362 [cc] のガソリンエンジン車）を使用して実車実験を行った。1 回の実験につき、1～2 名の被験者を二列目シートに座らせて走行した。前席のヘッドレストの位置に 2 台の車載 TV をそれぞれ天井から吊り下げ設置した。被験者から車載 TV までの距離は約 60cm で

あった。車載 TV は 11 [inch] (横 24.4 [cm]、縦 13.8 [cm]、水平解像度 800 [dot]、垂直解像度 480 [dot])、水平視角は約 23 [deg] であった。TV 視聴は、DVD プレイヤーによる映画の再生とし、音声は FM カーステレオを介して車両の両サイドのドアに付けられたスピーカーから再生した。車内の様子を図 2-1 に示す。



図 2-1 実車実験時の車内の様子

2.2.3. 刺激（乗車条件と乗車コース）

以下の 3 つの乗車条件で車酔いを発生させ、動揺病不快感を比較した。

- a) TV 視聴条件
- b) 読書条件
- c) 普通乗車条件

a) の TV 視聴条件では、被験者に車載 TV で映画を視聴させた。使用した映画¹は、激しい動きや不快なシーンが無く、被験者が意識を集中しやすい恋愛映画や家族コメディ映画のようなストーリー性の高い映画とした。なお音声は日本語で、字幕が無い映画とした。b) の読書条件では、ほとんど文字は無いが多数の小さな人物画（キャラクター）が書かれて

¹ ウォーターボーイズ、スウィングガールズ、THE 有頂天ホテル、県庁の星、ALWAYS 三丁目の夕日、フラガール、The Sound of Music 等（以降の実車実験における TV 視聴条件で使用した映画を含む）

いる絵本²を使用した。被験者は絵本に描かれている多数の人物画からある特定の人物画を見つけ出す作業を行った。一方、c)の普通乗車条件では、被験者には特別な制約は課さず静かに乗車させた。普通に乗車しているように、車の外を自由に見ることを許可した。

実験で使用した走行経路は、カーブが多く時々なだらかな傾斜がある郊外路で、信号は無いが2箇所の一旦停止があった。道路沿いには家が無く、交通量はまばらで渋滞は無かった。走行経路を図 2-2 に、カーブの一例を図 2-3 に示す。走行経路は1周約 2.1 [km]、1周の走行時間は反時計回りに走行し約 3 分であり、1回の実験では5周走行し、走行時間 15 分とした。運転にばらつきが出ないように全実験を運転手 1 人で実施し、運転手には制限速度 (50 [km/h]) を守り、できるだけ正確に車線に沿って等速で走行するように運転させた。車の運動は 6 自由度 (加速度 3 軸、角速度 3 軸) で計測した (図 2-4)。走行経路には 19 箇所の鋭いカーブがあり、Yaw 回転の角速度は最大約 35 [deg/s] であった (図 2-5)。なお遠心加速度 (水平方向加速度) は最大約 4.4 [m/s^2] であった (図 2-6)。前後加速度は、加速時に発生する前方方向の加速度が最大約 1.6 [m/s^2] であるのに対して、減速時に発生する後方方向の加速度が最大約 3.5 [m/s^2] と、前方方向の加速度に比べて大きかった。車の特性上アクセル操作による加速よりブレーキ操作による減速の方が加速度を発生させやすいためである [1-1]。

² ウォーリーを探せ、ポケモンを探せ 等



図 2-2 実験で使用した走行経路



図 2-3 走行経路のカーブの一例

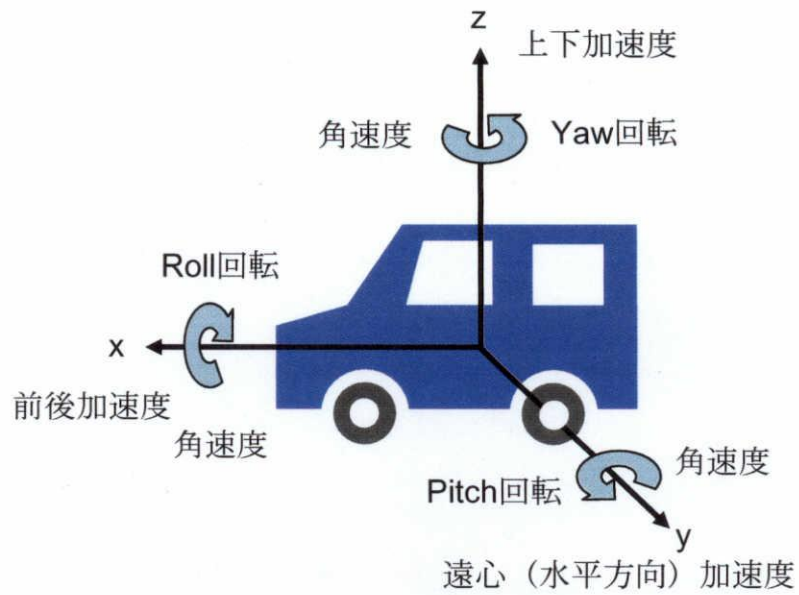


図 2-4 3 軸加速度、3 軸角速度の説明図

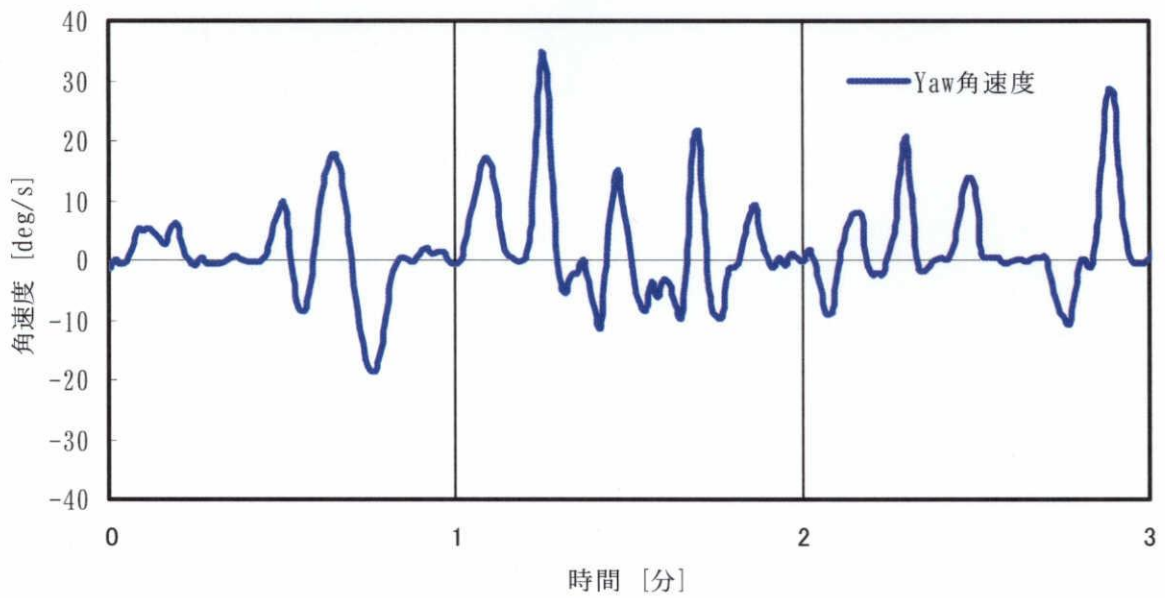


図 2-5 走行経路一周で発生する Yaw 方向の角速度

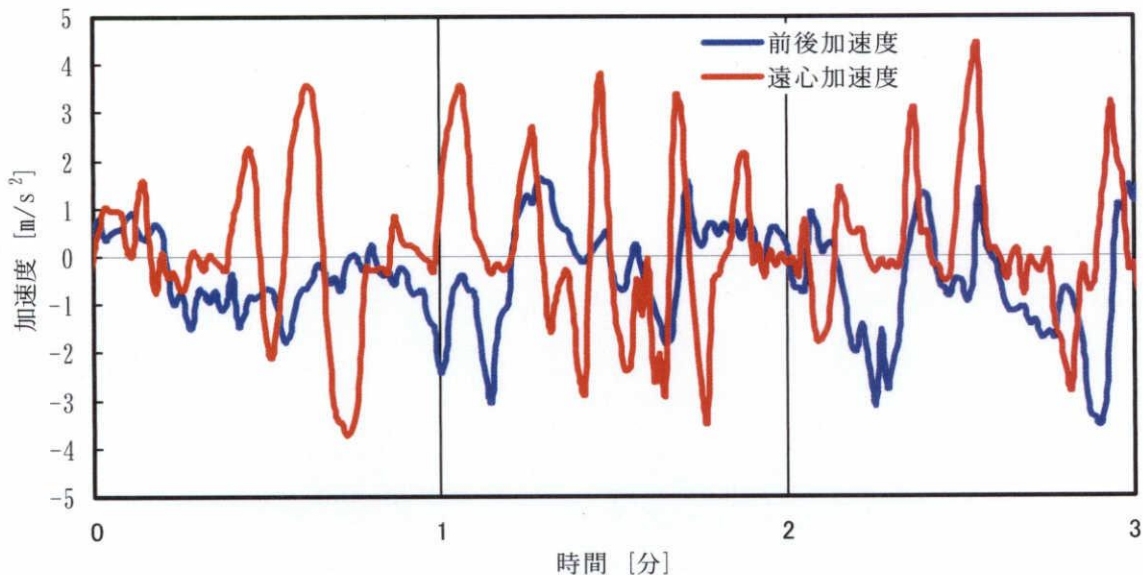


図 2-6 走行経路一周で発生する前後加速度と遠心加速度

2.2.4. 動揺病不快感の測定と解析方法

主観的な心理量である動揺病不快感を定量的に解析するために、評定尺度法によって不快感強度を序数尺度で測定した後、範疇判断の法則 [2-1] に基づいて距離尺度化を施した。0 (不快感なし) ~10 (不快感・吐き気が強くこれ以上乗車できない状態) までの 11 段階で主観的に評価させ、実験中に感じる不快感の強さを 1 分間毎に口頭で回答させた。なお被験者には、0~10 の評定値で不快感をできるだけ等間隔に表現するよう指示した。また、不快感が強いために実験を中断した場合には、中断後の動揺病不快感は最大評定値の 10 として解析した。動揺病不快感の解析において、評定尺度は被験者毎の車酔いに対する感受性を調整 (詳細な手順は 2.3.2 章に記載) した後で、範疇判断の法則 (condition B) に基づいて等間隔な尺度である距離尺度 (間隔尺度) に変換 (詳細な手順は 2.3.3 章に記載) した。

2.2.5. 実験手順

それぞれの試行では 1~2 人の被験者が車両の二列目シートに乗車した。実験走行経路の開始地点に到着するまで約 15 分要し、約 10 分間の休憩後実験を開始した。乗車条件ができる限り均等になる様に、被験者を各条件に割り当てた。実車実験は 15 分間であった。主観的な動揺病不快感を、走行開始直前から 1 分毎に回答させた。被験者の不快感が強く実験中断を被験者が望んだ時には直ちに実験を中断した。各条件での試行数と、中断した試

行数を表 2-1 に示す。

表 2-1 各条件での試行数（カッコ内は中断した試行数）

乗車条件	試行数
TV 視聴	27 (3)
読書	27 (3)
普通乗車	39 (0)
合計	93 (6)

2.3. 実験結果

2.3.1. 車酔い発症の時間推移

動揺病不快感は、全ての条件下で乗車中次第に増強した。3条件それぞれについて、動揺病不快感の時間推移を図2-7のヒストグラムに示す。左奥から手前側の軸は評定尺度での動揺病不快感を示す。左手前から右側の軸は乗車時間を示す。3条件で試行数が異なるため、ヒストグラムを直接比較しやすいように縦軸は試行数ではなく試行数の割合で示している。また一例として図2-7のヒストグラムのうち、3条件それぞれについて、0分経過（実験開始）、5分経過、10分経過、15分経過（実験終了）における動揺病不快感を図2-8に示す。横軸は評定尺度での動揺病不快感を示し、縦軸は試行数ではなく試行数の割合で示している。

ほとんど全ての試行において乗車開始時刻（0分）では動揺病不快感は0であった。TV視聴条件、読書条件ではほとんど全ての試行で動揺病不快感が次第に増強した。不快感の分布は、時間経過に伴って右側に推移、すなわち不快感が増強した。TV視聴条件および読書条件では、約10%の試行において試行の途中で不快感10に達した。一方、普通乗車条件の約40%が15分経過（実験終了）しても不快感が0（不快感なし）のままであった。普通乗車条件では、全ての試行で全乗車時間を通して不快感が中程度以下（6以下の不快感）のままであった。Wilcoxonの順位和検定（両側検定）の結果、TV視聴条件では3分以降全ての乗車時間で、普通乗車条件に比べて有意に動揺病不快感が増強していることが認められた（ $p < 0.01$ ）。また読書条件では13分（ $p = 0.051$ ）を除いて9分以降全ての乗車時間で、TV視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が増強していることが認められた（ $p < 0.05$ ）。また、各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和をAUC法（Area Under Curve Method）[2-2]で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動をWilcoxonの順位和検定（両側検定）で検定した。TV視聴条件では、普通乗車条件に比べて有意に動揺病不快感が増強していることが認められた（ $p < 0.01$ ）。また読書条件では、TV視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が増強していることが認められた（ $p < 0.05$ ）。

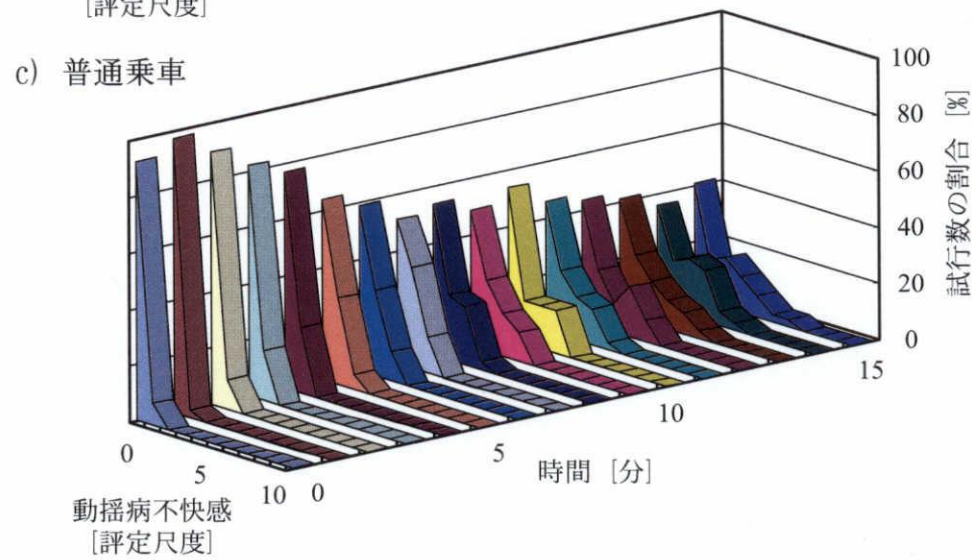
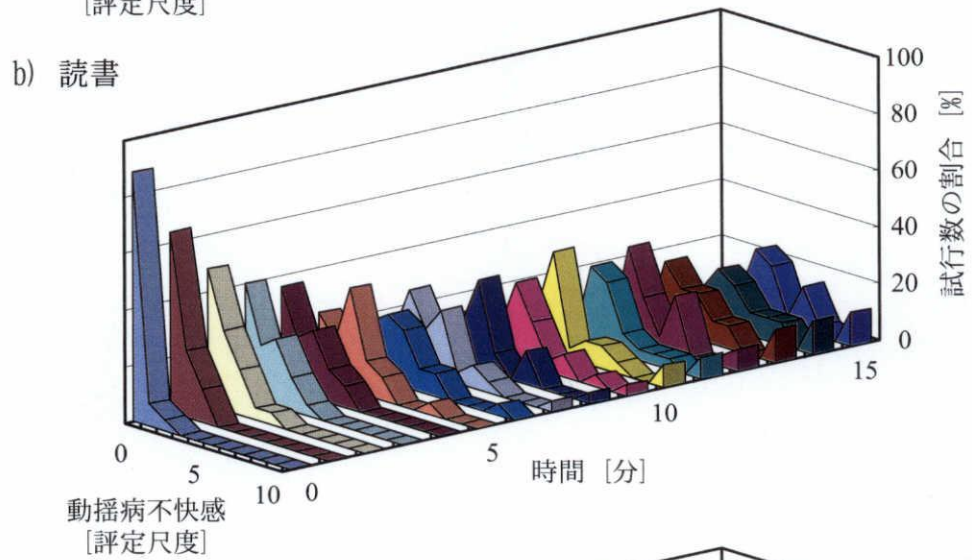
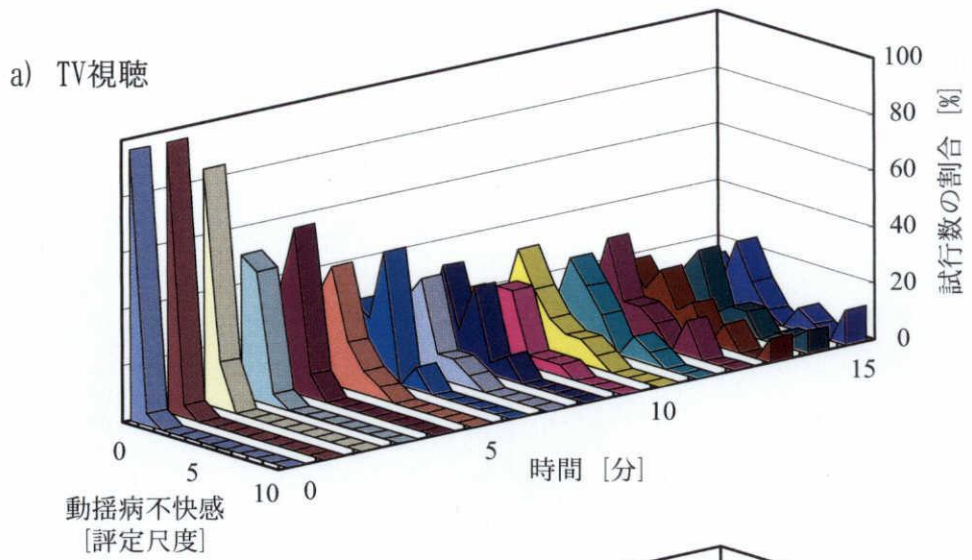


図 2-7 動揺病不快感の時間推移

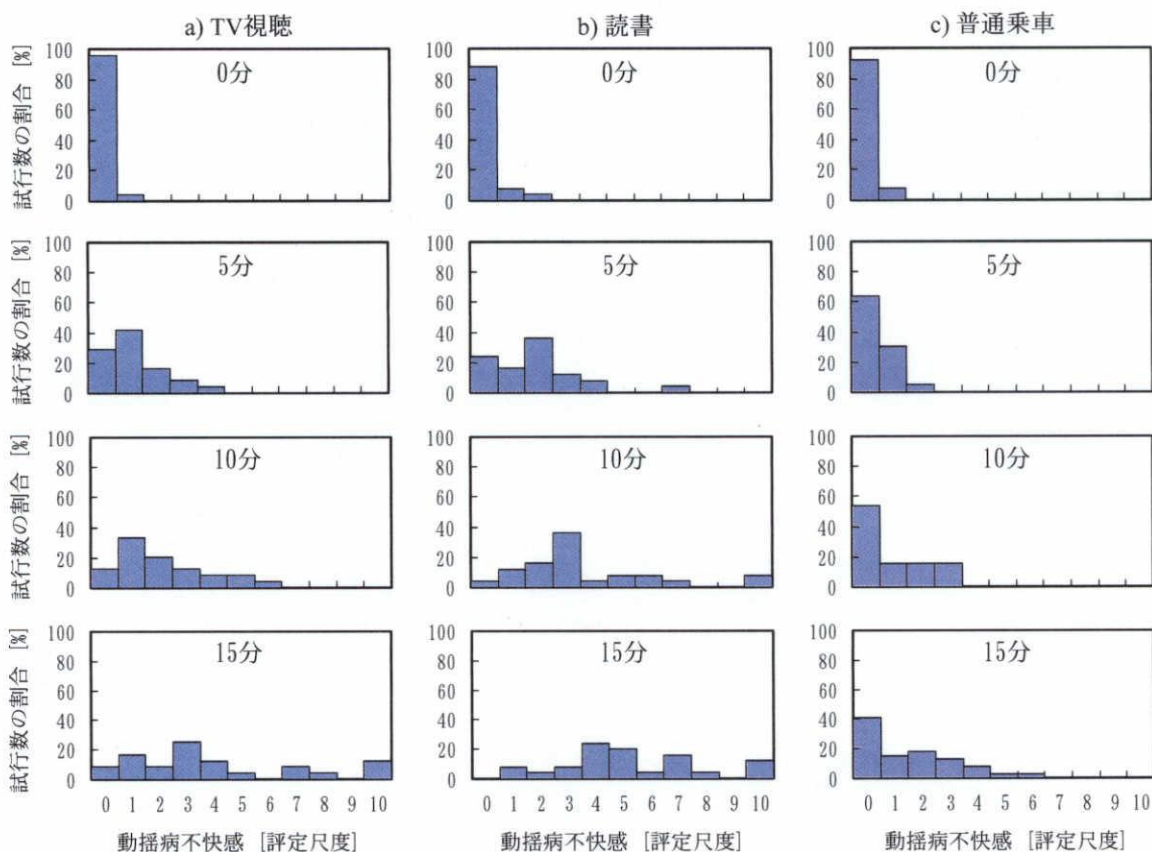


図 2-8 動揺病不快感の時間推移 (0 分、5 分、10 分、15 分経過)

2.3.2. 車酔い感受性

車酔いのしやすさ、すなわち車酔いに対する感受性は被験者により大きく異なる。上記 3 乗車条件で動揺病不快感を比較するためには、被験者の車酔いに対する感受性がそれぞれの条件に均等に分布するように、被験者を割り当てる必要がある。

ほとんど全ての試行において不快感が直線的に増強しているため、各被験者の一試行毎に、横軸に乗車時間、縦軸に不快感強度を取って最小二乗法による回帰直線の傾きを算出した。直線的に増強した不快感推移の一例を図 2-9 に示す。被験者毎に、3 条件を通して全試行で求めた回帰直線の傾きを平均し、その平均値によって被験者の車酔い感受性を表した。ここで、乗車開始時刻 (0 分) では動揺病不快感は 0 (不快感なし) と想定されるため、原点を通る直線に回帰した。図 2-10 は車酔いに対する被験者の感受性のヒストグラムを示す。図 2-10 上図のヒストグラムは、横軸に被験者の感受性を、縦軸にその感受性を示した被験者数を示している。例えば、感受性が 0.67 [score/min] の被験者の場合、15 分乗車後に最大不快感 10 に達することになる。また、感受性が 0.1 [score/min] の被験者なら、15 分乗車後に不快感が 2 に満たないことになる。31 人の被験者間で、感受性は幅広く分布

したが、5人の被験者は極めて感受性が低く（0.05 [score/min] 未満）、15分走行後でも全くあるいはほとんど不快感がなかった。多数の被験者の感受性は0.1~0.2近傍を中心に0.5 [score/min]以上まで広がっていた。被験者1名は0.8 [score/min]という非常に高い感受性であった。

被験者の実験参加は本人の自由意志によるものであるため、全ての被験者が同じ試行数それぞれの乗車条件の実験に参加したとは限らない。一般に、車酔いに対して高い感受性を持つ被験者は、強い車酔いが発生すると以降の実験参加を取り止める割合が

高い。従って図2-10下図に示すように、被験者の全試行の感受性の分布は、図2-10上図の被験者数の分布とは異なっている。すなわち感受性の高い被験者によって行われた試行数は、感受性の低い被験者によって行われた試行数に比べて相対的に少なくなっている。そこで、車酔いに対する感受性を感受性L (low)と感受性H (high)の2つのグループに分けることとし、試行数がほとんど同じになるように0.2 [score/min]（図2-10下図に点線で示す）をグループの境界として被験者を分類した。3乗車条件についてそれぞれの感受性に分類した試行数を表2-2に示す。各乗車条件では、2つの感受性のグループの比が同一にはならなかったため、以降の解析では感受性LとHの比が46:47（全試行数の比）となるように、各乗車条件・各時刻の評定値の分布に重み付けを行い車酔い感受性の偏りを補正した。

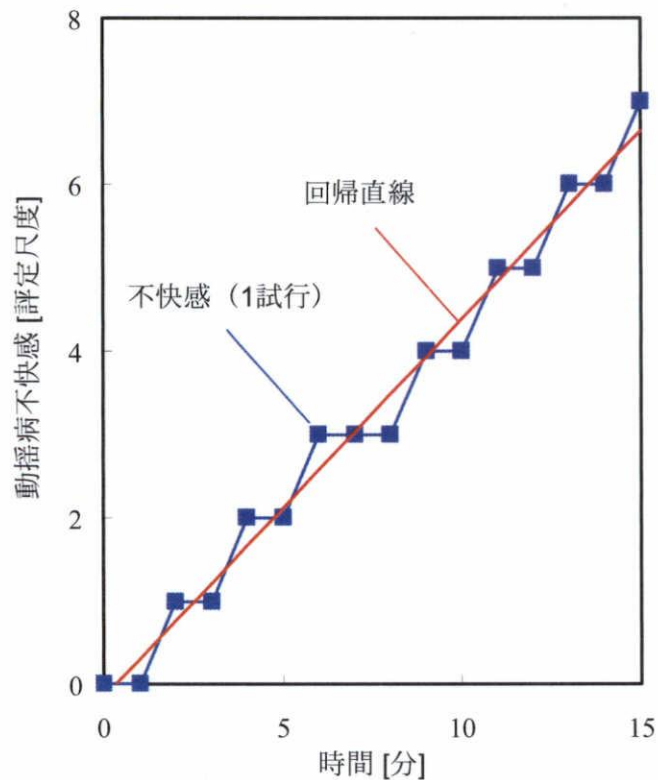
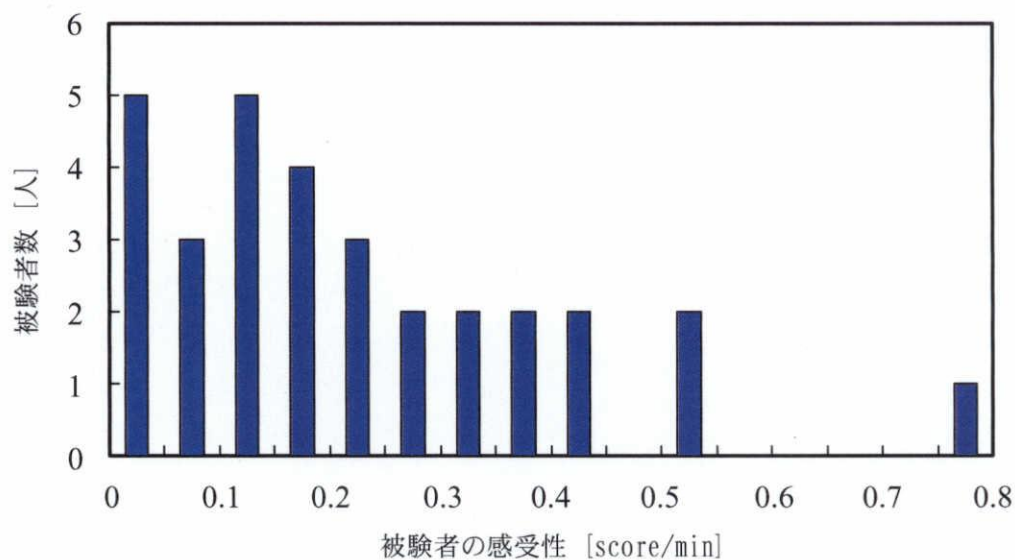


図 2-9 不快感推移の例 (1 試行)

a) 被験者の感受性の分布



b) 被験者の全試行数の感受性の分布

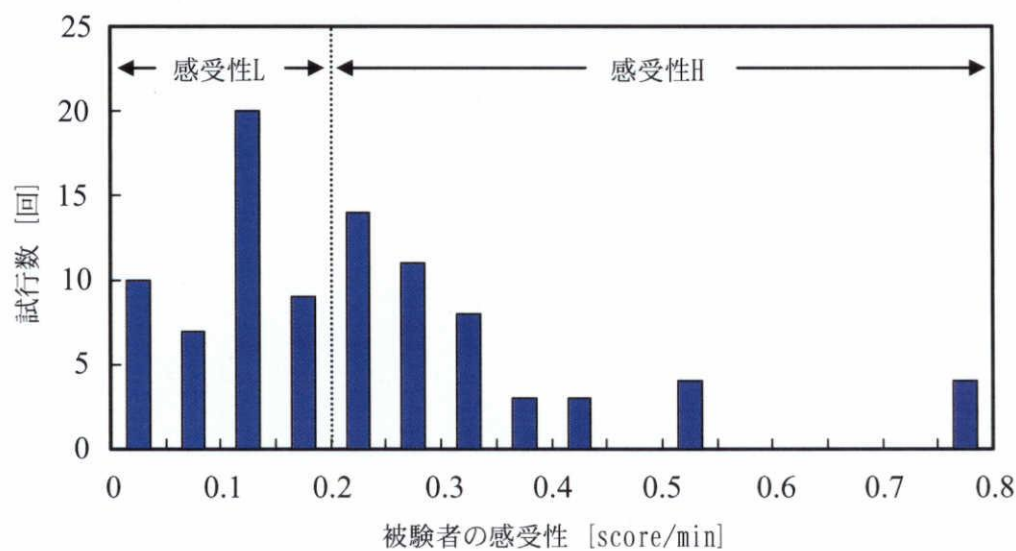


図 2-10 車酔いの感受性の分布

表 2-2 被験者の感受性によって分類された試行数

乗車条件	感受性 L	感受性 H
TV 視聴	15	12
読書	11	16
普通乗車	20	19
合計	46	47

2.3.3. 動揺病不快感の評定尺度から距離尺度への変換

動揺病不快感は、11段階の評定尺度を使って計測した。11段階の評定尺度は数字の表現を使っているが、それぞれのカテゴリーは隣接したカテゴリーから必ずしも同一の距離間隔であるとは限らない順序尺度である。このため、評定尺度で表現された動揺病不快感は、厳密には定量的に扱うことができない。そこで、範疇判断の法則 (condition B) [2-1] に基づいて、測定した評定尺度を等間隔が保証される距離尺度に変換した。そのために、以下のような仮定をおく。

- 1) 被験者は心理学的連続体を持っており、動揺病不快感強度はその心理学的連続体上の点に位置づけられる。評定尺度の各カテゴリーは心理学的連続体上の範囲を区切る。
- 2) 与えられた刺激（本研究では、各刺激条件下での各乗車時間）に対する反応の強度（本研究では動揺病不快感強度）は、心理学的連続体上で正規分布する。ここで正規分布は、刺激毎に定まる平均値と分散を持つ。
- 3) 隣接するカテゴリー間の境界も、それぞれ心理学的連続体上で分布しており、各境界の位置は同一の分散を持つ正規分布に従う。被験者は刺激に対する反応の強度が位置するカテゴリーを選択する。

上記仮定に基づいて、個々の動揺病不快感の分布を正規分布に適合させ、距離尺度を構成した。まず 2.3.2 章で述べたように、車酔いに対する感受性による重み付けを行うことによって、尺度間の変換前に動揺病不快感の分布の偏りを補正した。次にカテゴリー境界を心理学的連続体上で算出し、距離尺度と評定尺度の換算を行った。ここで評定尺度と同様に距離尺度の最大値が 10 になるように換算した。

上記の距離尺度への変換の手順について図 2-11、図 2-12 を用いて説明する。図 2-11 はある乗車条件、ある時刻の評定尺度による不快感の分布を取り出して、距離尺度に変換する過程を表したものである。各条件の各時刻における刺激に対する反応（動揺病不快感強度）は、距離尺度で表される心理学的連続体上で正規分布すると仮定する。各カテゴリーの評定尺度の比率に等しい確率を持つように、心理学的連続体上で各カテゴリーの距離尺度を標準正規分布の z 値を用いて与えた。ある乗車条件の全ての時刻について、図 2-11 に示した距離尺度への変換を行った結果を図 2-12 に示す。●のマークが各時刻における分布の確率密度の最大値であり、■のマークが各時刻の不快感強度の平均値である。不快感強度の平均値を乗車条件別に走行開始から 1 分毎にプロットしたものが 2.3.4 章で後述する図 2-15 である。

図 2-13 に、評定尺度と各カテゴリーの不快感強度の平均値を距離尺度で表したときの関係を示す。本実験では、評定尺度の 0~1 の距離が最も大きく、次に 9~10 の距離が大きかった。評定尺度 1~9 では距離尺度とほぼ線形の関係があった。

図 2-14 は本実験における動揺病不快感の評定尺度（上段）と距離尺度（下段）の関係を示す。それぞれのカテゴリーの境界と、各カテゴリーにおける不快感強度の平均値に対応する距離尺度を▼マークで示している。

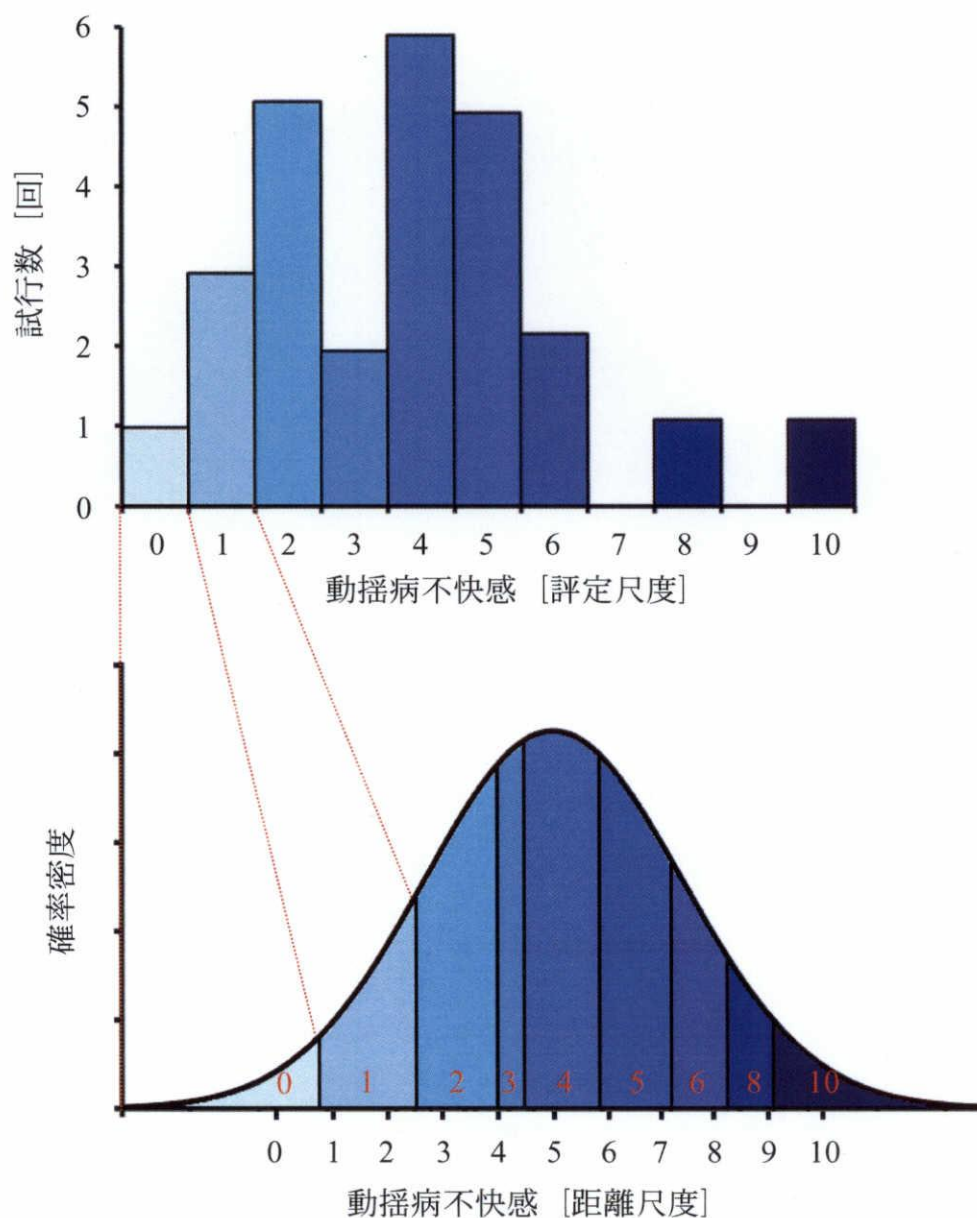


図 2-11 距離尺度化の手順（その 1）

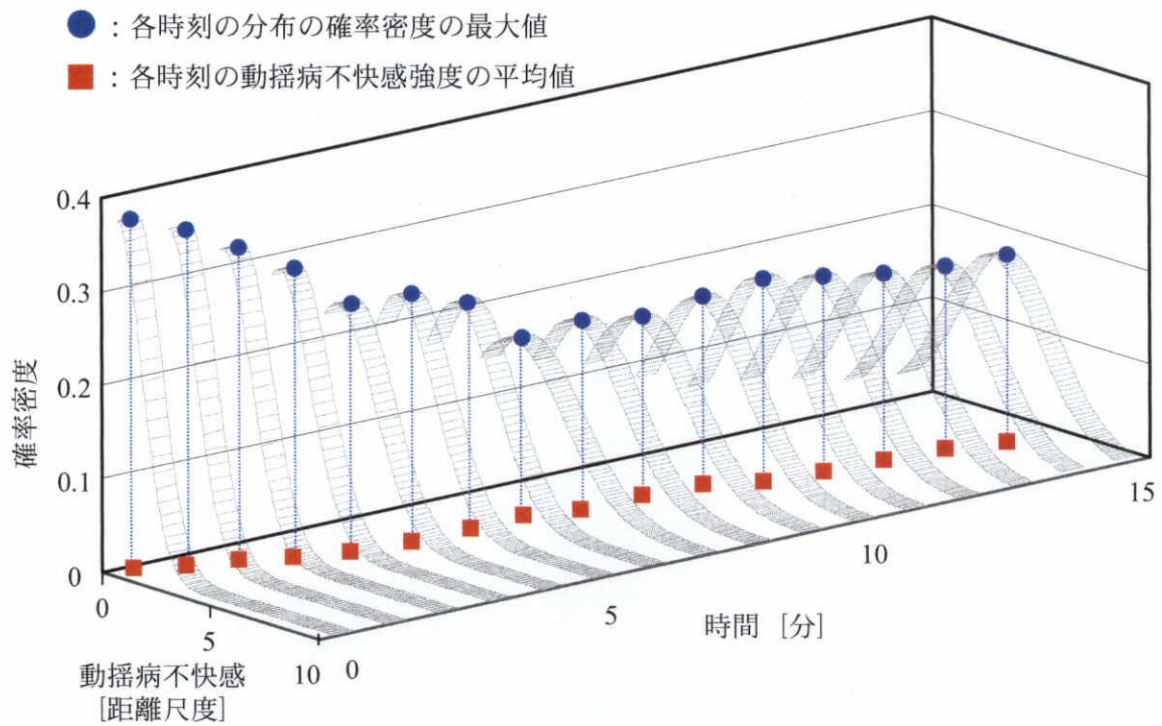


図 2-12 距離尺度化の手順 (その 2)

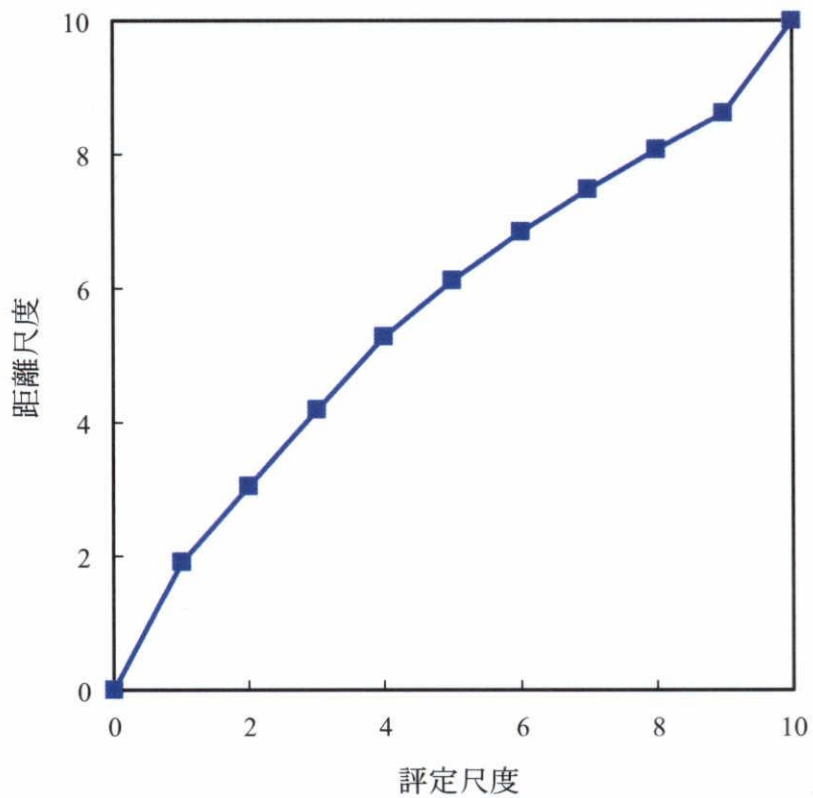


図 2-13 評価尺度と距離尺度の関係

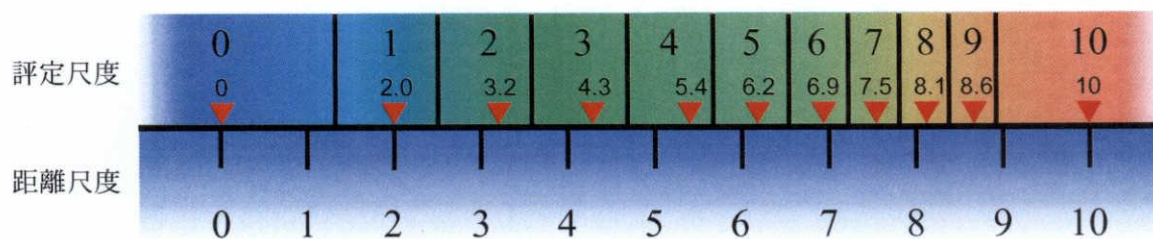


図 2-14 評定尺度と距離尺度の関係 (カテゴリー境界を表示)

2.3.4. 動揺病不快感の増強

2.3.3章で述べたように各乗車条件で動揺病不快感を1分毎に測定し、動揺病不快感強度の分布が心理学的連続体上で正規分布に従うと仮定した。動揺病不快感の平均強度は、算出したそれぞれの分布の平均値とした。図 2-15 は、3 乗車条件における動揺病不快感の平均強度の時間推移を示す。図のそれぞれの点は、乗車時間の経過 1 分毎の平均強度を示す。3 条件とも、動揺病不快感は 15 分間の乗車時間にほぼ比例して増強した。動揺病不快感は全乗車時間を通して、読書条件で最も強く、次に TV 視聴条件で強く、3 条件間で顕著な差が認められた。

各乗車条件での動揺病不快感の平均強度の時間推移を、原点を通る直線に回帰した。各乗車条件の回帰直線の傾きを表 2-3 に示す。普通乗車条件の回帰直線の傾きを基準とすると、

読書条件 : TV 視聴条件 : 普通乗車条件 = 2.7 : 2.2 : 1

であった。すなわち、普通乗車に比べると TV 視聴により動揺病不快感が 2 倍以上に増強した。これは読書条件に比べると約 2 割低い不快感であった。

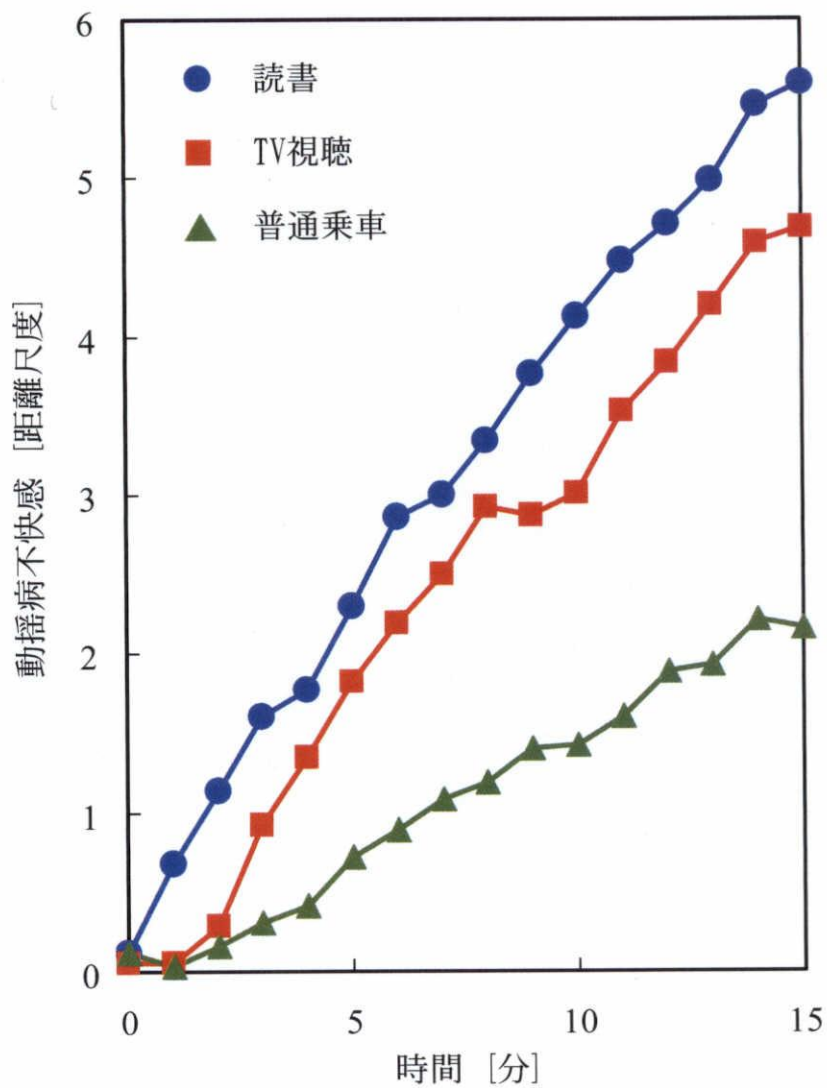


図 2-15 動揺病不快感の平均強度の時間推移

表 2-3 各乗車条件での回帰直線の傾きと傾きの比

乗車条件	回帰直線の傾き	傾きの比
TV 視聴	0.324	2.2
読書	0.401	2.7
普通乗車	0.149	1

2.4. 考察

先行研究 [2-3] - [2-6] では、様々な手法で動揺病不快感強度が表現されている。最も有名な手法の一つは、Graybiel ら [2-4] によって提案された診断基準 (diagnostic criteria) である。評点は被験者が発症した個々の車酔いの症状によって 5 段階 (1, 2, 4, 8, 16 の評点) で与えられ、動揺病不快感は評点の合計に従って 5 段階にカテゴリー分けされている。症状の種類や程度により、適切な評点がなされていると考えられるが、異なる症状の同じ評点が同じ動揺病不快感を示すのか保証されておらず、また 2 倍の評点が 2 倍の動揺病不快感を示すのかも保証されていない。また、Reason & Graybiel [2-5] は動揺病不快感の表現方法として、不快感指数 (well-being score) を提案している。不快感指数は、被験者によって 11 段階 (0~10) によって評価される。通常、動揺病の症状は被験者に特定の評点で現れると考えられるが、個々の評点の幅は主観的に決められているため、評点は序数尺度であり、厳密には定量的に扱うことができない。本研究においても、動揺病不快感の測定手法として彼らの不快感指数と同一の手法を用いており、測定された評点は序数尺度である。しかし、この評点を範疇判断の法則 [2-1] に基づいて距離尺度化することによって、動揺病不快感の定量的解析を可能にしている。

図 2-13 は、評定尺度と各カテゴリーの不快感強度の平均値を距離尺度で表した時の関係を示している。評定尺度 0~1 の距離が他の評定尺度の距離よりも大きかった。評定尺度における 0 は動揺病不快感を全く感じていない状態を意味し、1 は動揺病不快感を知覚し始めていることを意味している。すなわち評定尺度 0 と 1 の間には、動揺病不快感を検出する閾値が存在することを意味する。被験者が車酔いを知覚し始めて、初めて不快感強度を「1」と返答するのにためらいがあったために、評定尺度 0~1 の距離が大きくなったと考えられる。

図 2-15 は、刺激時間に比例して動揺病不快感が増強したことを示している。同様の傾向が、動揺病不快感を評定尺度 7 段階で評価した先行研究 [2-7] [2-8] でも見られている。30 分間の実験において動揺病不快感が、水平方向の身体動揺 [2-7] や視運動刺激 [2-8] の継続時間に比例して増強する結果が得られている。これに対して、動揺病の症状は突然に発症し、その後階段状に悪化するように思われる。Reason & Graybiel [2-5] は、動揺病の症状と不快感指数 (well-being score) の関係を示した。胃の違和感のようないくつかの軽い症状が不快感指数 3~4 で、症状の増強が不快感指数 6~7 で、強い吐き気は不快感指数 10 で発生する。症状のように外見に表れる様子は階段状に変化するが、その一方で症状を引き起こす体内の状態は継続的に変化することが考えられる。強い動揺病不快感は感覚情報の矛盾の大きさ (矛盾の強さを刺激時間で積分した大きさ) に比例することが報告されてお

り [2-9]、短時間（例えば 15 分）の刺激時間の場合には、動揺病不快感は刺激時間に比例して増強すると考えられる。

本研究では全条件で動揺病不快感が乗車時間に比例して増強したので、各乗車条件での動揺病不快感の平均強度の時間推移を、原点を通る直線に回帰した。得られた回帰直線の傾きを用いて、各乗車条件間で動揺病不快感強度を比較した。その結果、TV 視聴条件では普通乗車条件に対して 2 倍以上車酔いが悪化することすることが示された。これは、読書条件より 2 割程度少ないだけの動揺病不快感であった。TV 視聴条件や読書条件における動揺病不快感の増強は、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾の増大に起因すると考えられる。すなわち読書をしている際には視覚から静止した状態であることを知覚する一方、車載 TV を視聴した際には映像空間での動きもしくは静止の情報を知覚する。これに対して、平衡感覚からは車の動きを反映した体の動きの情報を知覚する。このように TV 視聴条件および読書条件では二つの感覚器は強い感覚情報の矛盾を引き起こし、車酔いを悪化させたと考えられる。本研究の普通乗車条件では視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾が上記 2 条件に比べて小さいと考えられるが、車の内部を見ていると感覚情報の矛盾を引き起こし動揺病不快感が増強する。しかし外部視野、特に前方視野が与えられると、動揺病不快感が低減されることが報告されている [1-8]。

TV 視聴条件と読書条件間で発生した動揺病不快感強度の差異について考察する。要因の一つとして、外部視野の有無の差が考えられる。TV 視聴条件では被験者は二列目シートに座り、前方 60 [cm] の位置に設置された車載 TV で映画を視聴した。このため被験者は車載 TV の周辺後方から前方外部を部分的に見ることができた。これに対して読書条件では、被験者は少し下向きの姿勢で読書を行った。すなわち読書条件では周辺視野は車室内部に制限されており、被験者は視覚から体の動きの情報を全く得ることができなかった。Griffin & Newman [1-8] は、車酔いを抑制するために前方視野の重要性を報告している。例え視野が狭くとも、前方視野を得ることができれば車酔いを低減できるという結果であった。本研究の TV 視聴条件では、車載 TV の周辺後方から前方外部が部分的に見えたために、読書条件より車酔いが低減されたと考えられる。

TV 視聴条件と読書条件間で動揺病不快感強度の差異が発生した別の要因として、静止した視覚対象に対する被験者の注視度合いの差が考えられる。先行研究 [1-7] [2-7] [2-10] - [2-12] では、動揺刺激を受けた場合には、閉眼・遮眼の状態より開眼で室内の静止物を注視した方が、動揺病不快感が増強したと報告されている。本研究の TV 視聴条件においては、被験者は水平視角約 23 度の車載 TV の画面全体を集中して見ており、その視野は中心視野の広い範囲に広がるものであった。一方、読書条件では、被験者はページ内に描かれた小

さな人物画（キャラクター）を探索しており、サッケードを起こしながらも中心窩近傍での一点注視に近い状況であった。静止物を注視する際には、前庭動眼反射は効果的に抑制されるが、この条件では視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾により動揺病が発生しやすい可能性がある。もし字幕付きの映画を視聴する場合には、読書条件に近い一点注視の視覚的負荷が加わることになり、車酔いがより増強されることが考えられる。また、本実験では被験者を TV 視聴に集中させるためにストーリー性の高い映画を使用した。映画の内容によって被験者の興味の度合いが異なり、集中度が変化して車酔いの誘起に影響するものと思われる。なお、この点に関しては、乗車中の読書や普通乗車においても同様の影響が考えられる。

更に別の可能性として、被験者の頭部位置の差異が考えられる。TV 視聴条件では頭部はまっすぐに前を向いた状態であったのに対して、読書条件では頭部は少し下向きであった。先行研究 [1-1] [2-13] - [2-15] により、直線加速度を与える方向が人や動物の動揺病の発生率に影響することが明らかにされている。Vogel ら [1-1] は、水平方向（前後方向）の直線加速度を車中で通常に着席、および仰向けに横たわった被験者に与え、動揺病の症状を計測した。直線加速の実験では、通常に着席した場合の方が仰向けに横たわった場合よりも、車酔い不快感が増強された。一方、加速度の方向が加速度知覚に与える効果について、多くの心理学的研究

[2-16] - [2-19] によって定量的に解析されている。被験者に遠心加速度を負荷し、重力加速度との合ベクトルの大きさや方向を頭部矢状面（身体を左右に二分する面）および前額面（身体を前後に二分する面）上で変化させて、誘起される傾斜感覚や知覚される加速度の方向が計測された。これらの結果の解析から、“卵形囊斑³の平均的な面”（水平面に対して 25～30 度上向き（図 2-16。卵形囊斑の模式図は [2-21] より引用））に平行な加速度が加速度知覚に最も影響することが明らかにされている。上述の実験で車

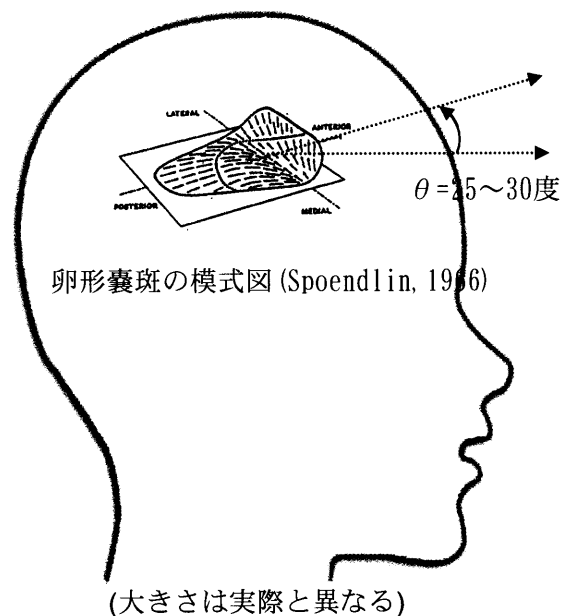


図 2-16 卵形囊斑の平均的な面と水平面とのなす角度の説明図

³ 耳石器には、主に水平方向（前後・左右）の直線加速度を知覚する卵形囊斑と、主に上下方向の直線加速度を知覚する球形囊斑が存在する [2-20]

の前後方向に直線加速度が加えられた時、通常に着席した方が仰向けに横たわった場合よりも“卵形囊斑の平均的な面”が水平面となす角度が小さいため、加速度知覚が強く働いて車酔いをしやすかったと考えられる。本研究での走行条件では、車の前後方向に加わる加速度は左右方向の遠心加速度より小さかったが、頭部の前屈姿勢によって加速度知覚に相違を生じさせる。読書条件では、被験者頭部が下向きの状態であり“卵形囊斑の平均的な面”がTV視聴条件に比べて水平面に近くなっているため、前後方向の加速度知覚が強まり、TV視聴条件に比べて動揺病不快感が幾分増強された可能性が考えられる。

TV視聴によって増強された動揺病不快感を低減する手法について提案する。感覚矛盾説[1-2]に基づく最も合理的な解決方法は、車の運動情報を伝える平衡感覚と一致するように、視覚を介して運動感覚を与えることである。すなわち、車載TVで映画を視聴する際に、車の運動に一致した視運動刺激が与えられて視覚誘導自己運動感覚（ベクシオン）が無意識下で知覚され、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾が低減されることが望ましい。この視運動刺激によって、普通乗車時に生じる感覚情報の矛盾よりも更に矛盾を減少させることが出来れば、車酔いの発生を予防あるいは抑制する車載TVが開発されることになる。

3. 右左折時に発生する車酔いに対する対策

3.1. 目的

2章で、TV視聴を行うと、TV視聴しない普通乗車に比べて約2倍以上に車酔い不快感が増強することを報告した。これは読書に比べると2割減の車酔い不快感であった。乗車中にTV視聴を行うと、視覚からはTVに映された映像世界での動きもしくは静止の情報が知覚されるため、平衡感覚によって知覚される運動感覚情報との矛盾が増大し、車酔いが増強したと考えられる。

車酔いは右左折の多い道路や加減速時に発症しやすいことが知られている[1-4]。本章の目的は、最も車酔いが発生しやすいと考えられる車の右左折時に発生する車酔いを低減することである。乗車中のTV視聴時の車酔い低減対策として、車のYaw回転に対する対策を3種類考案し、その有効性を実車実験で検証した。

本研究における感覚矛盾説[1-2]に基づく車酔い低減対策の基本的な考え方は、TV視聴と同時に視覚から車の動きを運動感覚情報として与えることで、視覚と平衡感覚間の感覚情報の矛盾を減少させ、その結果車酔いを低減させる、というものである。すなわち、TV視聴する際に車の動きに一致した視運動刺激を与えることで無意識下のうちに視覚誘導自己運動感覚（ベクション）を誘起し、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を低減させる。

視覚誘導自己運動感覚とは、移動する視運動刺激を観察した場合に、物理的には静止しているはずの自分の身体が視運動刺激の運動方向と反対方向に運動しているかの様に知覚される現象のことで、ベクション(Vection) [3-1]と呼ばれ古くから知られている。ベクションは、自分の身体が回転運動していると感じるサーキュラーベクション、自分の身体が直線運動していると感じるリニアベクションに分類される[3-2]。本章における車酔い低減対策は、視覚から車のYaw回転に一致した視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）を誘起し、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を低減させるというものである。

3.2. 対策案

3.2.1. 対策案の基本的な考え方

TV を視聴しながら、視覚から車の動きを運動感覚として与えることにより、視覚と平衡感覚間の感覚情報の矛盾を減少させて車酔いを低減することを対策のコンセプトとした。視覚から車の Yaw 回転の情報を与える映像、すなわち自分が回転しているような視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）を与える映像を TV 映像に付加し、平衡感覚との感覚矛盾を減少させることとした。

映像に奥行き感がある時、サーキュラーベクションは主に背景と感じられる映像の動きによって発生する[3-3]。そこで TV 視聴時の車酔い低減対策として、図 3-1 に示すように TV 映像（主映像）をディスプレイ中央部に表示し、TV 映像の周りに背景と知覚できる映像を背景映像として配置し、車の Yaw 回転の情報を与えることにした。また主映像と背景映像の境界を分かりやすくするために主映像の周辺に枠を描画した。

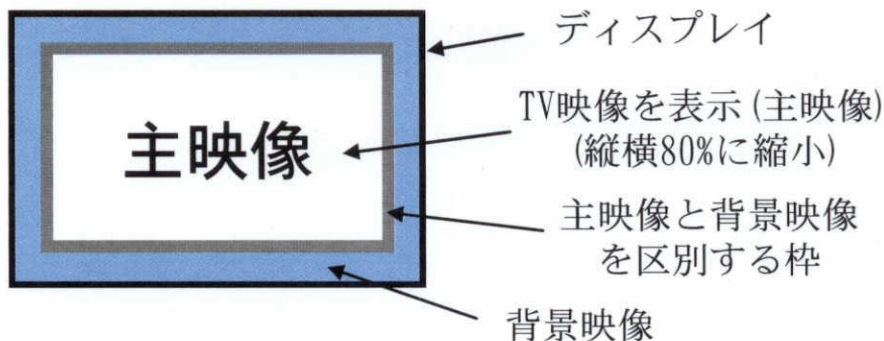


図 3-1 TV 映像（主映像）、背景映像、枠の説明図

3.2.2. 対策案 1

対策案 1 では、対策案で使用されている動作パラメータ（比例係数）を変更し、2 回実験を行った。

3.2.2.1. 対策案 A1-1

図 3-2 に示すように背景映像として縦縞のストライプを用いた（以下対策案 A1-1 と記す）。車の Yaw 回転の角速度 $\omega(t)[\text{deg/s}]$ （左折時、すなわち反時計回りを正）を計測し、その角速度に比例した速さ $v_{\text{yawA}}(t)[\text{deg/s}]$ （左に移動を正）で背景映像の縦縞を左右に動かした。ここで $v_{\text{yawA}}(t)$ は背景映像を距離

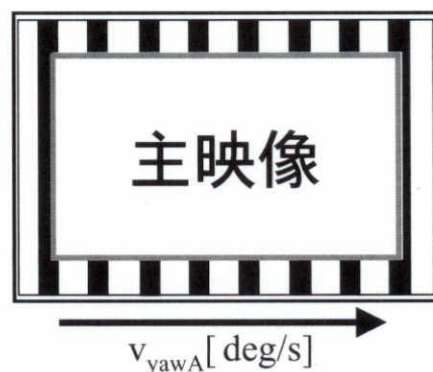


図 3-2 対策案 A1-1 の概要図

50[cm]の視点から見たときの縦縞移動の角速度であり、

$$v_{yawA}(t) = -k_{yawvA} \times \omega(t) \quad (k_{yawvA} : \text{比例係数}) \quad (3-1)$$

で与えた。縦縞の移動方向は車の Yaw 回転と逆方向であり、車が左方向に曲がる場合は背景映像を右方向に、車が右方向に曲がる場合は背景映像を左に移動した。式(3-1)の比例係数 k_{yawvA} は、後述する予備実験を参考に 0.43 に決定した。

3.2.2.2. 対策案 A1-2

対策案 A1-1 では、背景映像の移動速度を式(3-1)で与え、比例係数 k_{yawvA} を予備実験により決定した。これに対して本対策案では、乗員が乗車中にディスプレイを注視して TV 映像に没入している状態を考えると、乗員は主映像の表示画面を実際のディスプレイより広く感じているのではないかと、いう仮定をおいた。主映像を撮像したカメラの水平方向の撮像画角は映像シーンによって変わるが、ここではディスプレイの水平方向の視角を水平方向の撮像画角と一致しているとし、撮像画角は人間の注視野に相当するとした。注視野の定義は複数存在するが、提示刺激を認識し全体的な外界情報を判断する範囲は水平方向 100 度程度、垂直方向 85 度程度に広がっているという報告があり [3-4]、本研究では注視野を 90 度とした (図 3-3)。以上より水平視角を実際のディスプレイの水平視角 23 度とは異なり、人間の注視野 90 度と感覚的にみなすこととし、式(3-1)の比例係数 k_{yawvA} を式(3-2)より 0.20 とした (対策案 A1-2 と記す)。

$$k_{yawvA} = \frac{\tan(23/2)}{\tan(90/2)} = 0.20 \quad (3-2)$$

更に背景映像に回転しているという効果をつけるために、図 3-4 の様に縦縞のストライプを描画した。図 3-5 に示すように、円柱に縦縞のストライプを貼り付け、円柱の中心から仮想カメラで撮影することで実現した。ただし、図 3-2 と図 3-4 を比較すると、図 3-2 ではストライプの幅とその間隔が一定であるのに対して、図 3-4 ではストライプの幅とその間隔が中心に比べて右左端の方がやや広がっているものの図 3-2 との差異がやや分かりにくかった。

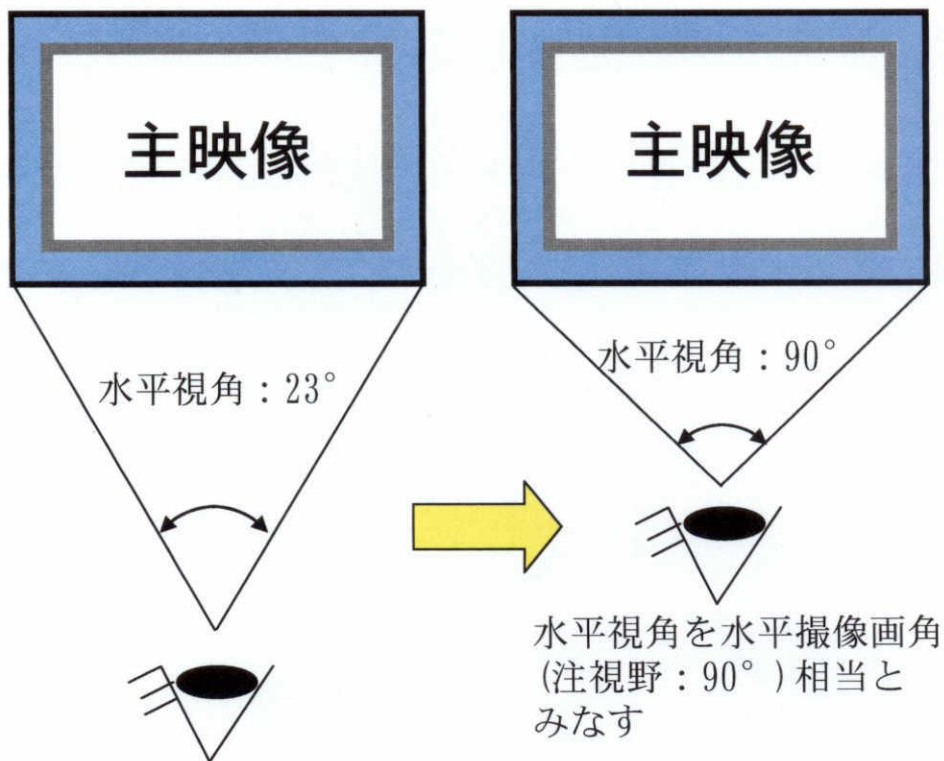


図 3-3 対策案 A1-2 でのパラメータ決定の考え方



図 3-4 対策案 A1-2 の概要図

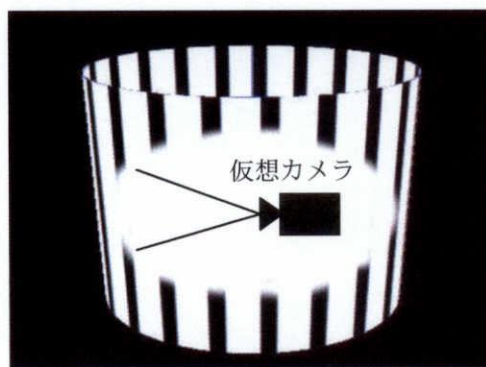


図 3-5 円柱状のストライプの実現

3.2.3. 対策案 2

図 3-6 に示すように、車の Yaw 回転の角速度 $\omega(t)$ [deg/s] に合わせて TV 映像を台形化 (横方向に短縮、左右辺を伸長・短縮) することにより、あたかも映像を映写している仮想スクリーンが、横方向の中心を軸として回転角 $\theta_{yawA}(t)$ [deg] の水平回転をするかの様に表示した (以下、対策案 A2 と記す。仮想スクリーンを上から見て反時計回りを正)。回転角 $\theta_{yawA}(t)$ は、車の Yaw 回転の角速度 $\omega(t)$ と比例するように、

$$\theta_{yawA}(t) = -k_{yaw\theta A} \times \omega(t) \quad (k_{yaw\theta A} : \text{比例係数}) \quad (3-3)$$

で与えた。回転方向は車の Yaw 回転と逆方向とし、車が左方向に曲がる場合は仮想スクリーンを上方方向から見て時計回りに、車が右方向に曲がる場合は仮想スクリーンを反時計回りに回転した。式(3-3)の比例係数 $k_{yaw\theta A}$ は、後述する予備実験を参考に 0.96 に決定した。なお、対策案 A2 での仮想スクリーンの回転のパラメータに対しては、3.2.2.2 章で述べた注視野の考え方は影響しないため、予備実験で算出したパラメータを本実験でも採用することとした。



図 3-6 対策案 A2 の概要図

3.2.4. 対策案 3

対策案 3 では、対策案で使用されている動作パラメータ（比例係数）を変更し、2 回実験を行った。

3.2.4.1. 対策案 A3-1

図 3-7 に示すように、対策案 A1-1 と対策案 A2 を合成して表示した（以下、対策案 A3-1 と記す）。すなわち縦縞のストライプの背景映像を左右に動かし、TV 映像を台形化した。縦縞移動の角速度および仮想スクリーンの回転角は、それぞれ対策案 A1-1、対策案 A2 と同一とした。

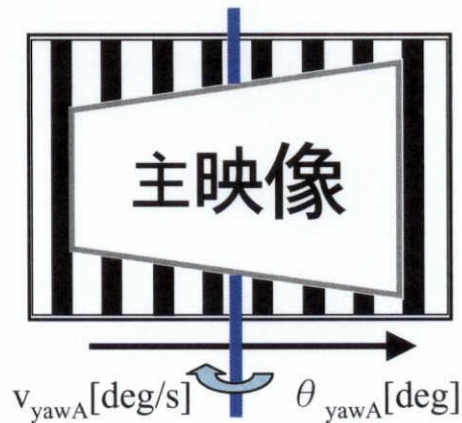


図3-7 対策案A3-1の概要図

3.2.4.2. 対策案 A3-2

本対策案は、図 3-7 の対策案 A3-1 と対策の主な考え方は同一であるが、3.2.2.2 章（対策案 A1-2）で述べた注視野の考え方の影響を考慮した（以下、対策案 A3-2 と記す）。すなわち対策案 A3-2 では、仮想スクリーンの回転角は対策案 A2 と同一であるが、縦縞移動の角速度を対策案



図 3-8 対策案 A3-2 の概要図

A1-1 ではなく対策案 A1-2 と同一にした。また図 3-8 に示すように、図 3-4 の対策案 A1-2 と同様に背景映像に回転しているという効果をつけた。

3.3. 予備実験

上記の対策案では、視運動刺激によって生じる視覚誘導自己運動感覚を、平衡感覚で知覚される車の Yaw 回転の感覚に一致させることが重要である。適切な映像の動きを求めるために、実車走行実験に先立って実験室内で予備実験を実施し、式(3-1)、式(3-3)の比例係数 k_{yawv} 、 $k_{yaw\theta}$ を定めた。

3.3.1. 実験方法

20 歳前後の健康な男女を被験者とした。外部視界を遮断した回転装置（図 3-9）に被験者を正立座位で乗せ、正弦波状に 6 秒間で 90 度の右回転および左回転（最大角速度 30[deg/s]）を交互に繰り返して、車が交差点を 90 度右左折する状況を模擬した。回転装置の角速度を測定し、対策案 A1-1 あるいは対策案 A2 を施した映像を描画した。式(3-1)、式(3-3)の比例係数 k_{yawv} 、 $k_{yaw\theta}$ の値は可変とし、被験者が調整するポテンシオメーターからの入力に試行毎に定めた乱数を加えた値とした。被験者の 50[cm]前方に設置した 11[inch] ディスプレイに映像を表示して、被験者に注視させた。なお中央部の主映像には静止画を用いた。平衡感覚で知覚される回転感覚と、視覚によって誘起される運動感覚が一致するように、映像の動きを被験者にポテンシオメーターで調整させた。調整は逆行を許し、被験者が充分な一致を感じるまで続けさせた。調整終了後にポテンシオメーター入力（乱数を含む）による比例係数 k_{yawv} あるいは $k_{yaw\theta}$ の値を記録した。試行数は両対策案について各 40 回であった。

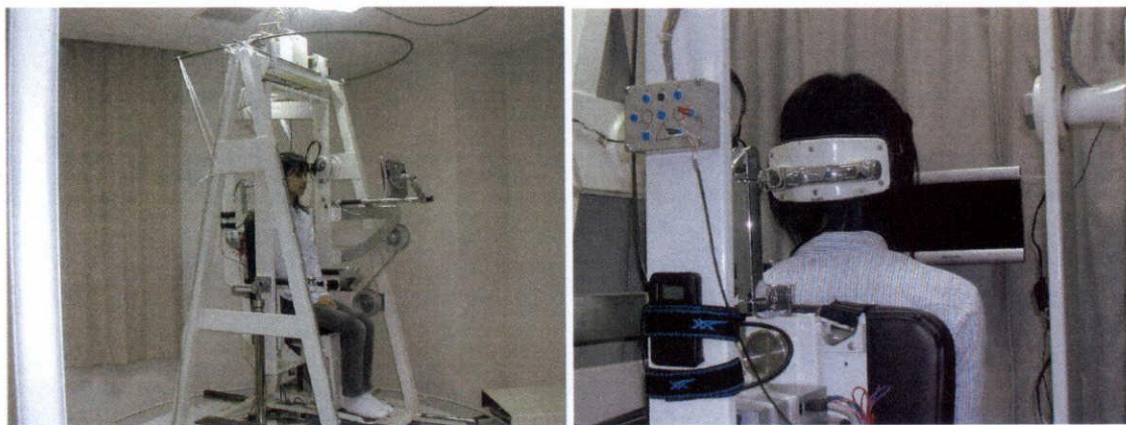
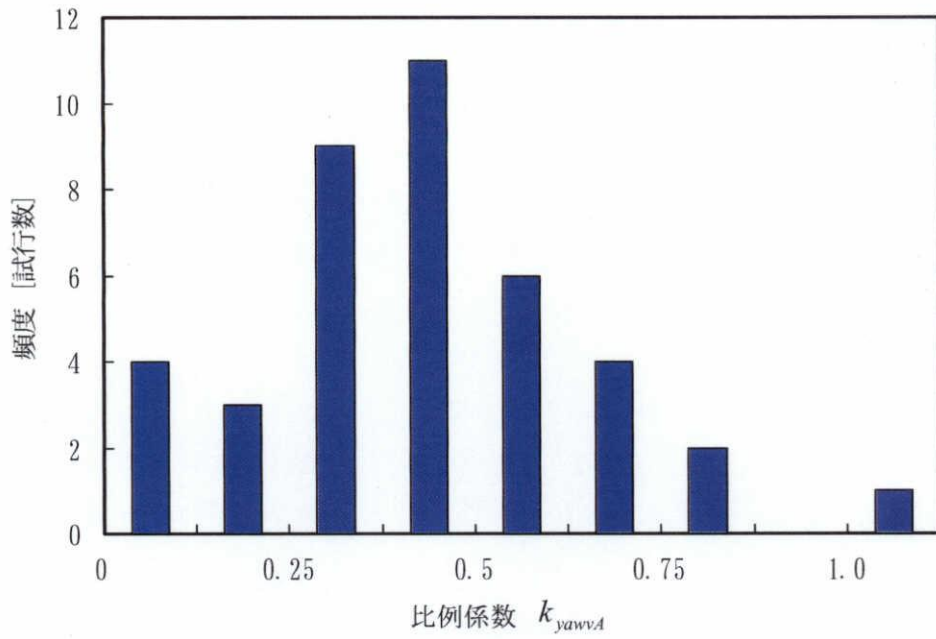


図 3-9 予備実験で使用した回転装置

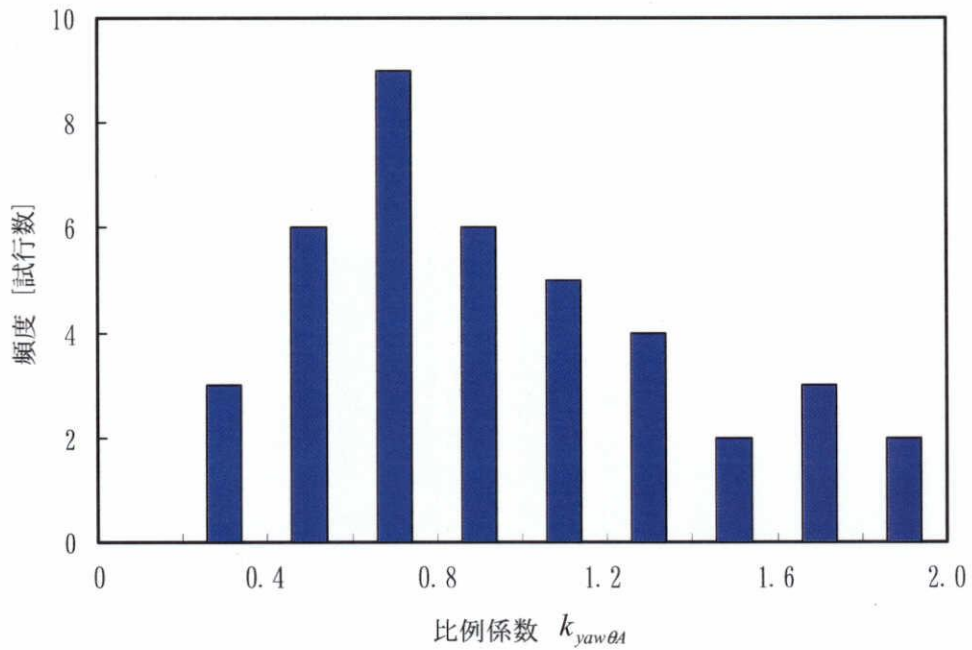
3.3.2. 結果

図 3-10(a)に対策案 A1-1 の比例係数 k_{yawv} の分布を、図 3-10(b)に対策案 A2 の比例係数 $k_{yaw\theta}$ の分布をヒストグラムで示す。 k_{yawv} は 0.43 ± 0.21 （平均±標準偏差）、 $k_{yaw\theta}$ は 0.96

±0.46 であり、個人差の大きな分布であった。



a) 対策案 A1-1 の比例係数 k_{yawvA} の分布



b) 対策案 A2 の比例係数 $k_{yawthetaA}$ の分布

図 3-10 対策案の比例係数の分布

3.4. 実車走行実験

3.4.1. 実験方法

3.4.1.1. 被験者

被験者は、これまでにめまいや難聴など耳鼻咽喉科疾患の既往のない 20 歳前後の健康男女 56 人（男性 41 名、女性 15 名）であった。実車走行実験は、あらかじめ被験者に実験の主旨、内容、手順、評価方法、予期される人体への影響などについて十分な説明を行い、書面による被験者の事前同意を得て行った。確認した項目は、

- ・ 実験中に車酔が発症し不快感が生じる可能性があること
- ・ 被験者の希望により実験期間中であればいつでも参加の延期、中断ができること
- ・ その延期・中断によって不利益を被らないこと
- ・ 実験中に得た個人データを個人が特定できる形では公表しないこと

の 4 項目であった。被験者の動揺病不快感が強く実験を継続できない場合には、直ちに実験を中断した。

3.4.1.2. 実験装置

4 列シート 10 人乗りのバンタイプの子（全長 5,380[mm]、幅 1,880[mm]、高さ 2,285[mm]で、2,693[cc]のガソリンエンジン車）を使用して実車実験を行った。1 回の実験につき、1～5 名の被験者を 2～4 列目シートに座らせて走行した。前席のヘッドレストの位置に 5 台の車載 TV をそれぞれ天井から吊り下げ設置した。被験者から車載 TV までの距離は約 60cm であった。車載 TV は 11[inch]（横 24.4[cm]、縦 13.8[cm]、水平解像度 800[dot]、垂直解像度 480[dot]）、水平視角は約 23[deg]であった。TV 映像（主映像）は、縦横 8 割（横 20.5[cm]、縦 11.5[cm]）に縮小して表示した。TV 視聴は、DVD プレイヤーによる映画の再生とし、音声は車両の後方上部に取り付けられたステレオスピーカーから再生した。車と車内の様子を図 3-11、図 3-12 に示す。



図 3-11 実験で使⽤した車



図 3-12 実車実験時の車内の様子

3.4.1.3. 刺激（乗車条件と乗車コース）

以下の7つの乗車条件で車酔いを発生させ、動揺病不快感を比較した。

- a) 対策案 A1-1 を施した TV 視聴
- b) 対策案 A1-2 を施した TV 視聴
- c) 対策案 A2 を施した TV 視聴
- d) 対策案 A3-1 を施した TV 視聴
- e) 対策案 A3-2 を施した TV 視聴
- f) TV 視聴
- g) 普通乗車(TV 視聴無し)

a)～f)のTV視聴条件では、被験者に車載TVで映画を視聴させた。使⽤した映画は、激しい動きや不快なシーンが無く、被験者が意識を集中しやすい恋愛映画や家族コメディ映画のようなストーリー性の高い映画とした。なお音声は日本語で、字幕が無い映画とした。g)の普通乗車条件では、被験者には特別な制約は課さず静かに乗車させた。普通に乗車しているように、車の外を自由に見ることを許可した。対策案1と対策案3では、対策案の動作パラメータ（比例係数）を変更したため、実験期間の前半でa)対策案A1-1およびd)対策案A3-1、実験の後半でb)対策案A1-2およびe)対策案A3-2の効果を検証した。その他の乗車条件、すなわちc)対策案A2、f)TV視聴条件、g)普通乗車条件は、実験期間を通して効果を検証した。

実験で使⽤した走行経路は2.2.3章の実験で使⽤したコースと同一で、カーブが多く時々なだらかな傾斜がある郊外路で、信号は無いが2箇所一旦停止があった。道路沿いには家が無く、交通量はまばらで渋滞は無かった。走行経路は1周約2.1[km]、1周の走行時間は反時計回りに走行し約3分であり、1回の実験では7周走行し、走行時間21分とした。

運転にばらつきが出ないように全実験を運転手 1 人で実施し、運転手には制限速度 (50 [km/h]) を守り、できるだけ正確に車線に沿って等速で走行するように運転させた。車の運動は 6 自由度 (加速度 3 軸、角速度 3 軸) で計測した。走行経路には 19 箇所の鋭いカーブがあり、Yaw 回転の角速度は最大約 35 [deg/s] であった。なお遠心加速度 (水平方向加速度) は最大約 4.4 [m/s^2] であった。前後加速度は、加速時に発生する前方方向の加速度が最大約 1.6 [m/s^2] であるのに対して、減速時に発生する後方方向の加速度が最大約 3.5 [m/s^2] と、前方方向の加速度に比べて大きかった。

3.4.1.4. 動揺病不快感の測定と解析方法

動揺病不快感の測定と解析方法は、2.2.4 章と同一である。主観的な心理量である動揺病不快感を定量的に解析するために、評定尺度法によって不快感強度を序数尺度で測定した後、範疇判断の法則 [2-1] に基づいて距離尺度化を施した。0 (不快感なし) ~10 (不快感・吐き気が強くこれ以上乗車できない状態) までの 11 段階で主観的に評価させ、実験中に感じる不快感の強さを 1 分間毎に口頭で回答させた。なお被験者には、0~10 の評定値で不快感をできるだけ等間隔に表現するよう指示した。また、不快感が強いために実験を中断した場合には、中断後の動揺病不快感は最大評定値の 10 として解析した。動揺病不快感の解析において、評定尺度は被験者毎の車酔いに対する感受性を調整 (詳細な手順は 3.5.2.2 章に記載) した後で、範疇判断の法則 (condition B) に基づいて等間隔な尺度である距離尺度 (間隔尺度) に変換 (詳細な手順は 2.3.3 章と同一) した。

3.4.1.5. 実験手順

それぞれの試行では 1~5 人の被験者が車両の 2~4 列目シートに乗車した。実験走行経路の開始地点に到着するまで約 15 分要し、約 10 分間の休憩後実験を開始した。10 分間の休憩中は車を停止し、映画を視聴させた。乗車条件ができる限り均等になる様に、被験者を各条件に割り当てた。実車実験は 21 分間であった。主観的な動揺病不快感を、走行開始直前 5 分、走行開始時、その後 1 分毎に回答させた。被験者の不快感が強く実験中断を被験者が望んだ時には直ちに実験を中断した。各条件での試行数と、中断した試行数を表 3-1 に示す。

表 3-1 各条件での試行数（カッコ内は中断した試行数）

乗車条件	試行数
対策案 A1-1	41 (2)
対策案 A1-2	25 (0)
対策案 A2	69 (1)
対策案 A3-1	47 (3)
対策案 A3-2	23 (1)
TV 視聴	59 (3)
普通乗車	57 (0)
合計	321 (10)

3.5. 結果

実験期間の前半に行った実験（対策案 A1-1 および対策案 A3-1）を TV 視聴条件、普通乗車条件と比較した結果（以下、実験その 1 と記す）と、実験期間の後半に行った実験（対策案 A1-2 および対策案 A3-2）を対策案 A2、TV 視聴条件、普通乗車条件と比較した結果（以下、実験その 2 と記す）、に分けて記す。

3.5.1. 実験その 1

実験期間の前半に行った実験（対策案 A1-1 および対策案 A3-1）を TV 視聴条件、普通乗車条件と比較した結果を示す。

3.5.1.1. 動揺病不快感の増強

評定尺度法によって得られた動揺病不快感を定量的に解析するために、範疇判断の法則に基づき等間隔な尺度である距離尺度（間隔尺度）に変換した。図 3-13 は、4 乗車条件における動揺病不快感の平均強度の時間推移を示す。図のそれぞれの点は、乗車時間の経過 1 分毎の平均強度を示す。4 条件とも、動揺病不快感は 21 分間の乗車時間にはほぼ比例して増強した。動揺病不快感は、対策案 A3-1 条件および TV 視聴条件で最も強かった。対策案 A1-1 では、動揺病不快感が TV 視聴条件に比べてやや改善された。普通乗車条件では動揺病不快感が最も低かった。

対策案における動揺病不快感の効果を表すために改善率を定義した。すなわち、各乗車条件での動揺病不快感強度の時間推移を原点を通る直線に回帰し、TV 視聴条件での回帰直線の傾きが普通乗車条件での傾きにまで低減されたときを 100% の改善率と定義した。各乗車条件での回帰直線の傾きと各対策の改善率を表 3-2 に示す。対策案 A1-1 の改善率は 13.6% であったが、対策案 A3-1 の改善率は -13.3% と改善効果が見られなかった。

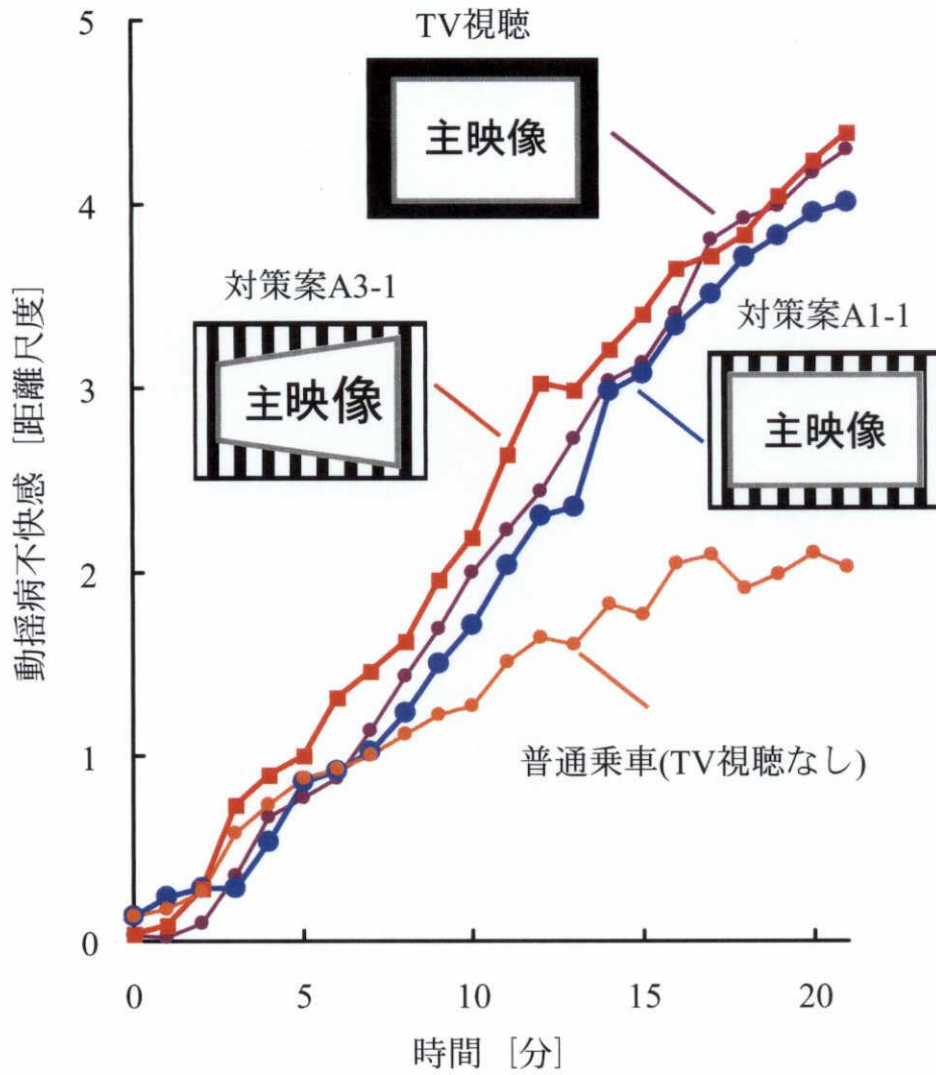


図 3-13 動揺病不快感の平均強度の時間推移

表 3-2 各乗車条件での回帰直線の傾きと改善率

乗車条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
対策案 A1-1	0.195	13.6
対策案 A3-1	0.219	-13.3
TV 視聴	0.207	-
普通乗車	0.118	-

3.5.2. 実験その2

実験期間の後半に行った実験（対策案 A1-2 および対策案 A3-2）を対策案 A2、TV 視聴条件、普通乗車条件と比較した結果を示す。

3.5.2.1. 車酔い発症の時間推移

動揺病不快感は、全ての条件下で乗車中次第に増強した。5 条件それぞれについて、動揺病不快感の時間推移を図 3-14 のヒストグラムに示す。左奥から手前側の軸は評定尺度での動揺病不快感を示す。左手前から右側の軸は乗車時間を示す。5 条件で試行数が異なるため、ヒストグラムを直接比較しやすいように縦軸は試行数ではなく試行数の割合で示している。

ほとんど全ての試行において乗車開始時刻（0 分）では動揺病不快感は 0 であった。対策案 A1-2 条件では、全ての乗車時間を通して不快感が 7 以下であった。約 24%の試行が 21 分経過（実験終了）しても不快感が 0（不快感なし）のままであった。対策案 A2 条件では、約 1%の試行において試行の途中で不快感 10 に達したが、約 30%の試行が 21 分経過しても不快感が 0 のままであった。対策案 A3-2 条件では、約 4%の試行において試行の途中で不快感 10 に達したが、約 40%の試行が 21 分経過しても不快感が 0 のままであった。これに対して、TV 視聴条件では、約 5%の試行において試行の途中で不快感 10 に達した、約 19%の試行が 21 分経過しても不快感が 0 のままであった。3 つの対策案に比べて TV 視聴条件では動揺病不快感が強くなった。なお普通乗車条件では、全ての乗車時間を通して不快感が 6 以下で、約 44%の試行が 21 分経過しても不快感が 0 のままであった。

Wilcoxon の順位和検定（両側検定）の結果、対策案 A1-2 条件では、13 分以降の全ての乗車時間で $p < 0.05$ で、TV 視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が低減されたことが認められた。対策案 A2 条件では、乗車 10～15 分は $p < 0.05$ で、16 分以降の全ての乗車時間で $p < 0.01$ で、TV 視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が低減されたことが認められた。対策案 A3-2 条件では、乗車 10～13 分は $p < 0.05$ で、14 分以降の全ての乗車時間で $p < 0.01$ で、TV 視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が低減されたことが認められた。なお 3 対策間には全ての乗車時間で有意差は見られなかった ($p > 0.05$)。また、各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和を AUC 法 (Area Under Curve Method) [2-2] で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動を Wilcoxon の順位和検定（両側検定）で検定した。対策案 A1-2 条件では、 $p < 0.05$ で TV 視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が低減されたことが認められた。対策案 A2 条件では、 $p < 0.01$ で TV 視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が低減されたことが認められた。対策案 A3-2 条件では、 $p < 0.01$ で TV 視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が低減されたことが認められた。なお 3 対策間には有意差は見られなかった(対

策案 A1-2 と対策案 A2 の間 : $p=0.72$ 、対策案 A1-2 と対策案 A3-2 の間 : $p=0.62$ 、対策案 A2 と対策案 A3-2 の間 : $p=0.26$ 。

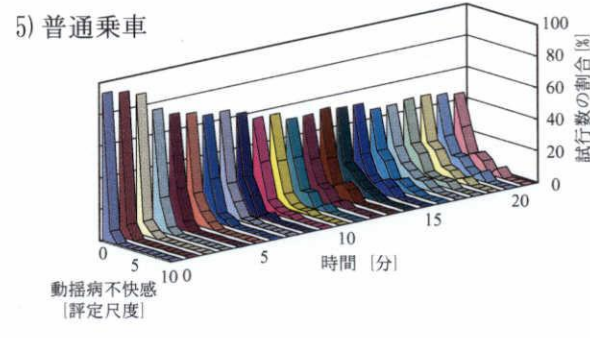
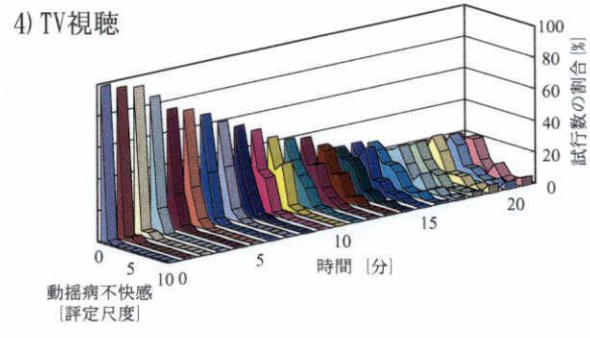
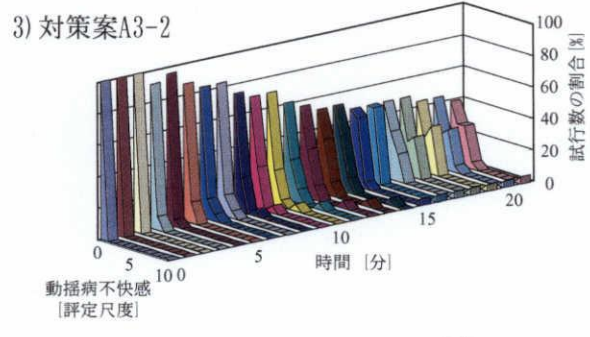
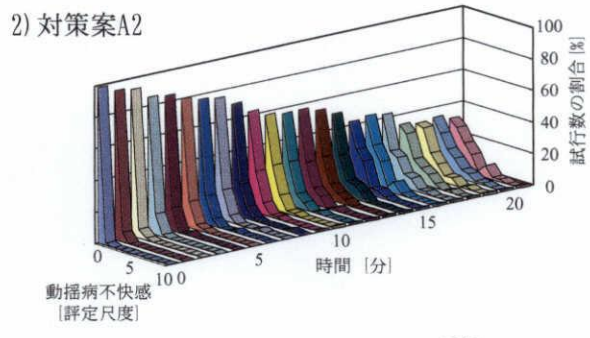
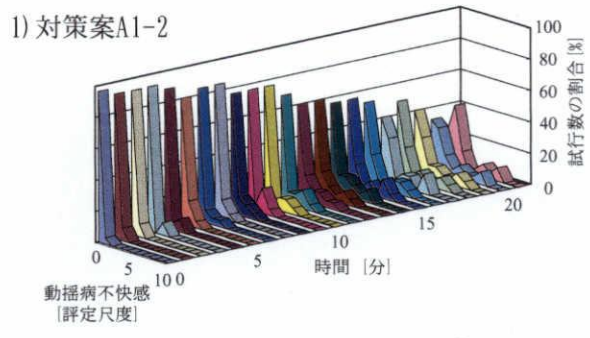


図 3-14 動揺病不快感の時間推移

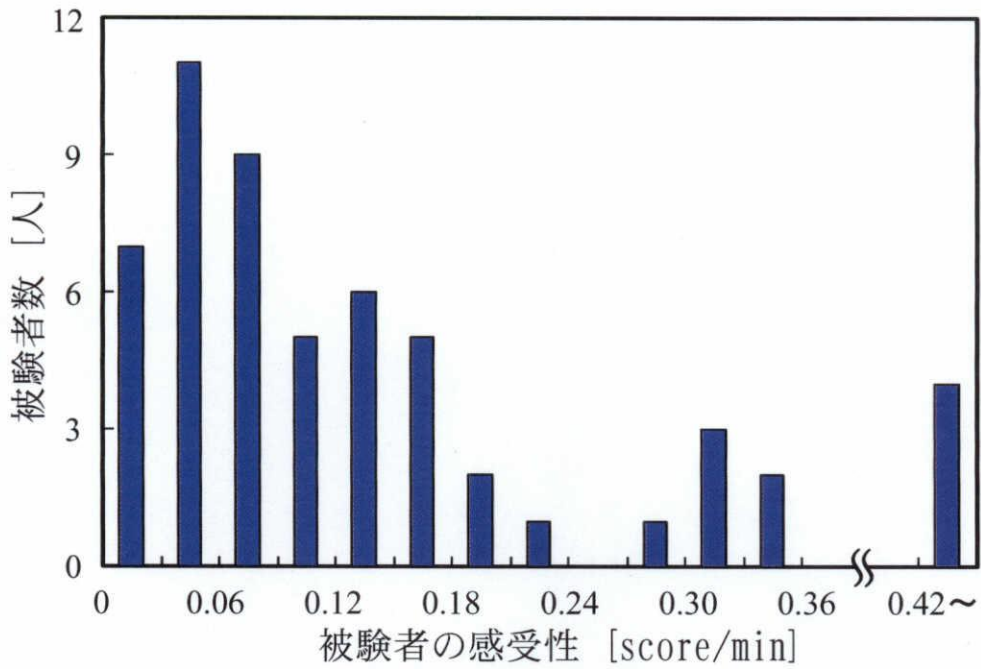
3.5.2.2. 車酔い感受性

前記 5 乗車条件で動揺病不快感を比較するために、各乗車条件間で感受性の偏りをなくす必要がある。このために、2.3.2 章と同様に、車酔いに対する感受性の補正を行った。

図 3-15 は車酔いに対する被験者の感受性のヒストグラムを示す。図 3-15 上図のヒストグラムは、横軸に被験者の感受性を、縦軸にその感受性を示した被験者数を示している。56 人の被験者間で、感受性は幅広く分布したが、7 人の被験者は極めて感受性が低く (0.03 [score/min] 未満)、21 分走行後でも全くあるいはほとんど不快感がなかった。多数の被験者の感受性は 0.03~0.09 近傍を中心に 0.42 [score/min] 以上まで広がっていた。被験者 1 名は 1.1 [score/min] という非常に高い感受性であった。図 3-15 下図のヒストグラムは、横軸に被験者の感受性を、縦軸に被験者の全試行の感受性の分布を示している。

試行数がほぼ 3 等分になるように被験者を感受性によって感受性 L (Low)、感受性 M (Middle)、感受性 H (High) の 3 つのグループに分類した。3 つのグループの境界線は 0.06 と 0.12 [score/min] (図 3-15 下図に点線で示す) とした。5 乗車条件についてそれぞれの感受性に分類した試行数を表 3-3 に示す。各乗車条件では、3 つの感受性のグループの比が同一にはならなかったため、以降の解析では感受性 L と M と H の比が 75 : 82 : 76 (全試行数の比) となるように、各乗車条件・各時刻の評定値の分布に重み付けを行い車酔い感受性の偏りを補正した。

a) 被験者の感受性の分布



b) 被験者の全試行数の感受性の分布

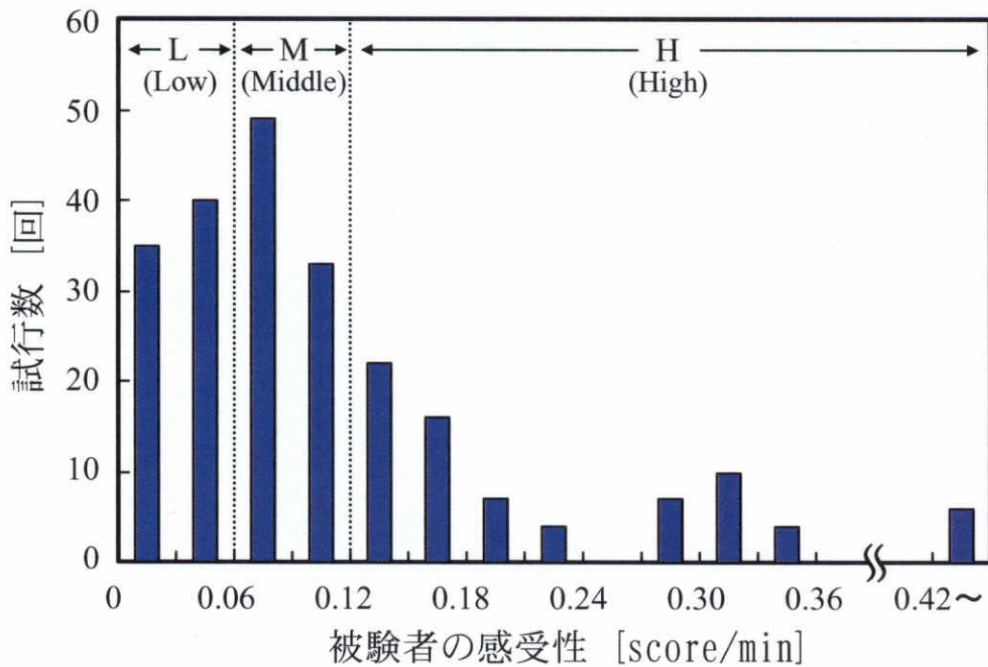


図 3-15 車酔いの感受性の分布

表 3-3 被験者の感受性によって分類された試行数

乗車条件	感受性 L	感受性 M	感受性 H
対策案 A1-2	12	5	8
対策案 A2	21	25	23
対策案 A3-2	11	7	5
TV 視聴	18	21	20
普通乗車	13	24	20
合計	75	82	76

3.5.2.3. 動揺病不快感の評定尺度から距離尺度への変換

2.3.3 章の「動揺病不快感の評定尺度から距離尺度への変換」と同一の手法を使用した。図 3-16 に、評定尺度と各カテゴリーの不快感強度の平均値を距離尺度で表したときの関係を示す。本実験では、評定尺度の 0~1 の距離が最も大きく、次に 9~10 の距離が大きかった。評定尺度 1~9 では距離尺度とほぼ線形の関係があった。

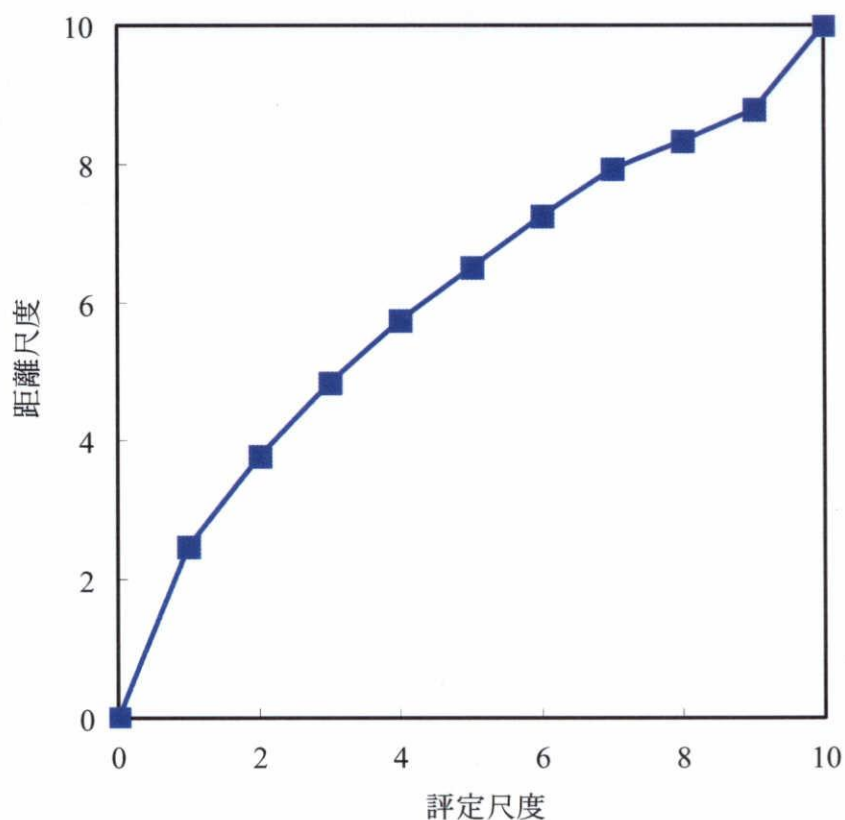


図 3-16 評定尺度と距離尺度の関係

3.5.2.4. 動揺病不快感の増強

図 3-17 は、5 乗車条件における動揺病不快感の平均強度の時間推移を示す。図のそれぞれの点は、乗車時間の経過 1 分毎の平均強度を示す。5 条件とも、動揺病不快感は 21 分間の乗車時間にほぼ比例して増強した。3 対策案（対策案 A1-2、対策案 A2、対策案 A3-2）共に、TV 視聴条件に比べて動揺病不快感が顕著に改善された。

各乗車条件での回帰直線の傾きと各対策の改善率を表 3-4 に示す。3 対策案共に 70% 以上の高い改善率であった。

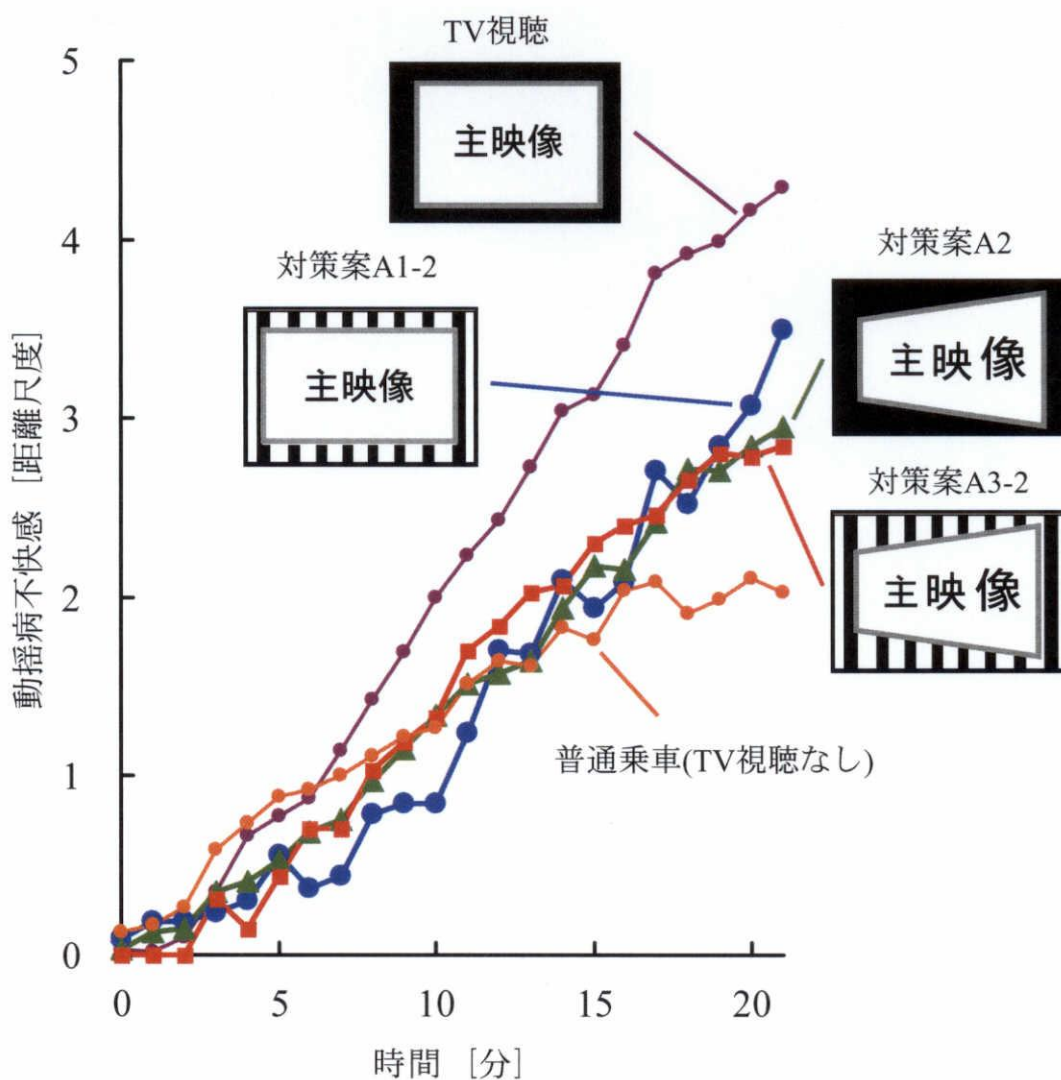


図 3-17 動揺病不快感の平均強度の時間推移

表 3-4 各乗車条件での回帰直線の傾きと改善率

乗車条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
対策案 A1-2	0.139	75.9
対策案 A2	0.138	76.8
対策案 A3-2	0.143	71.8
TV 視聴	0.207	—
普通乗車	0.118	—

3.6. 考察

2章で述べたように、乗車中にTV視聴を行うと、視覚からはTVに映された映像世界での動きもしくは静止の情報が知覚されるため、平衡感覚によって知覚される運動感覚情報との矛盾が増大し車酔いが増強した。本章では右左折に対する対策案を3種類考案し、実車実験によりその有効性を検証した。本対策では、視覚から車のYaw回転に一致した視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）を誘起し、視覚-平衡感覚間の感覚情報の矛盾を小さくすることにより、顕著な車酔い低減効果を得ることが示された。

近江らは、映像に奥行き感がある時、サーキュラーベクションは主に背景と感じられる映像の動きによって発生すると報告した[3-3]。対策案A1-2および対策案A3-2では、縦縞ストライプが背景と感じられるように主映像の周辺に背景映像として配置したために、効果的に視覚誘導自己運動感覚が発生したと考えられる。縦縞ストライプには模様連続性があり、その中央の一部が欠如しても主映像によって覆い隠されているように認識された。このため、容易に縦縞ストライプが背景であると認識でき、車酔いを顕著に低減できたと考えられる。なお主映像に使用した映画は、通常広い水平撮像画角のカメラで撮影され、注視野全体に広がる水平視角を有する映画館やディスプレイで視聴することが多い。被験者が主映像であるディスプレイを注視して映画に没入した際には、主映像の表示画面を実際のディスプレイの水平視角よりも広い水平撮像画角の大きさに感じていたと思われる。背景映像がその主映像の周辺に配置されたために、周辺に配置されたストライプが実際のディスプレイの水平視角よりも心理的に広く感じら、このため車酔いが顕著に低減されたと考えられる。

一方対策A2では、あたかも仮想スクリーン面が垂直軸を回転するかのように映画を表示した。これにより車のYaw回転による回転運動感覚を視運動刺激として与えることができた。図3-17の実験結果から、対策案A2では対策案A1-2および対策案A3-2と同程度の視覚誘導自己運動感覚を与えることができたと考えられる。上述したように、被験者が主映像に没入した場合は、主映像の表示画面を実際のディスプレイの水平視角よりも広く感じていたと思われる。このために対策案A2では、主映像が回転しているというよりは自分が回転しているという感覚を被験者に与えることができ、これにより車酔いが顕著に低減されたと考えられる。

なお3種類の対策案では、図3-1に図示したように主映像と背景映像の境界を分かりやすくするために主映像の周辺に枠を描画した。Howard & Howard [3-5]は、前景に静止物が全く存在しない場合には、視運動刺激による視覚誘導自己運動感覚が顕著に減少したことを示し、前景と背景の相対運動の重要性を報告した。対策案A1-2では、主映像の周辺に

枠があることで主映像が静止物であると認識されたと考えられ、このためその背景にあたる縦縞ストライプの視運動刺激により、効果的に視覚誘導自己運動感覚が発生できたと思われる。また対策案 A2 では、枠があるために主映像である映画の回転が効果的に認識でき、視覚誘導自己運動感覚が効果的に発生できたと考えられる。このために本対策案では、車酔いが顕著に低減されたと考えられる。

さて Brandt ら[3-6]は、水平視角 30 度程度では視覚誘導自己運動感覚はほとんど発生しないと報告している。一方 Post[3-7]は、水平視角 75 度までの範囲ではどこに視運動刺激が呈示されても、視運動刺激の面積が同じ（水平視角・垂直視角共に 30 度の円）なら同程度の視覚誘導自己運動感覚が発生することを示した。さらに Andersen & Dyre[3-8]は水平視角 15 度のみの視運動刺激でも視覚誘導自己運動感覚が発生することを示した。本研究では水平視角が 23 度であったが、顕著な車酔い低減効果が得られており、平衡感覚との感覚矛盾が小さい自己運動感覚が与えられたものと考えられる。

自分が動く可能性があると思わせることで、自己運動感覚が効果的に発生することは古くから知られており、遊園地に設置されているビックリハウス(Haunted Swing)と呼ばれる乗り物で応用されている[3-9]。観客を小部屋内の回転可能なブランコ状のイスに座らせ、一方で観客の周囲の小部屋自体を回転させることで効果的に視覚誘導自己運動感覚を発生させている。通常の実験室内実験では、視覚誘導自己運動感覚は、身体の静止時に視運動刺激によって誘起される自己運動感覚として測定される。これに対して本研究では、走行する車に乗車し平衡感覚から運動感覚が知覚されている状態で、視運動刺激によって平衡感覚と一致するように視覚誘導自己運動感覚を発生させた。すなわち本研究は、実験室内実験のように平衡感覚と視覚に感覚矛盾のある状態ではなく、両感覚から一致した自己運動感覚が得られる状態での視覚誘導自己運動感覚であったと考えられる。このために本対策案では自己運動感覚が効果的に発生し、車酔いが顕著に低減されたとと思われる。

本実験において、1 回目の試行（被験者にとって全乗車条件を通して 1 回目の試行）で得られた動揺病不快感と 2 回目以降の試行で得られた動揺病不快感の間に、順序効果が生じているか検証する。本実験には被験者 56 人が参加し 321 試行を実施した。このうち、被験者 41 名は 3 回以上実験に参加した（ただし、被験者により乗車条件は異なる）。図 3-18 に、前記被験者 41 名の試行 1 回目と試行 2 回目および試行 3 回目の計 123 試行について、各条件における動揺病不快感の平均強度の時間推移（距離尺度）を示す。動揺病不快感は、試行 1 回目条件で最も強く、試行 2 回目条件と試行 3 回目条件ではほぼ同等の動揺病不快感であった。各乗車条件での動揺病不快感の時間推移を原点を通る直線に回帰し、各条件

間で回帰直線の傾きの比を比較したところ、試行 1 回目条件では試行 2 回目条件、試行 3 回目条件に対して動揺病不快感がそれぞれ 19.7%、25.6% 増強した。各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和を AUC 法 (Area Under Curve Method) [2-2] で算出し、各条件の動揺病不快感の経時的変動を Wilcoxon の符号付順位和検定 (両側検定)⁴ で検定した。試行 1 回目条件では、試行 2 回目条件および試行 3 回目条件に比べて $p < 0.01$ で有意に動揺病不快感が増

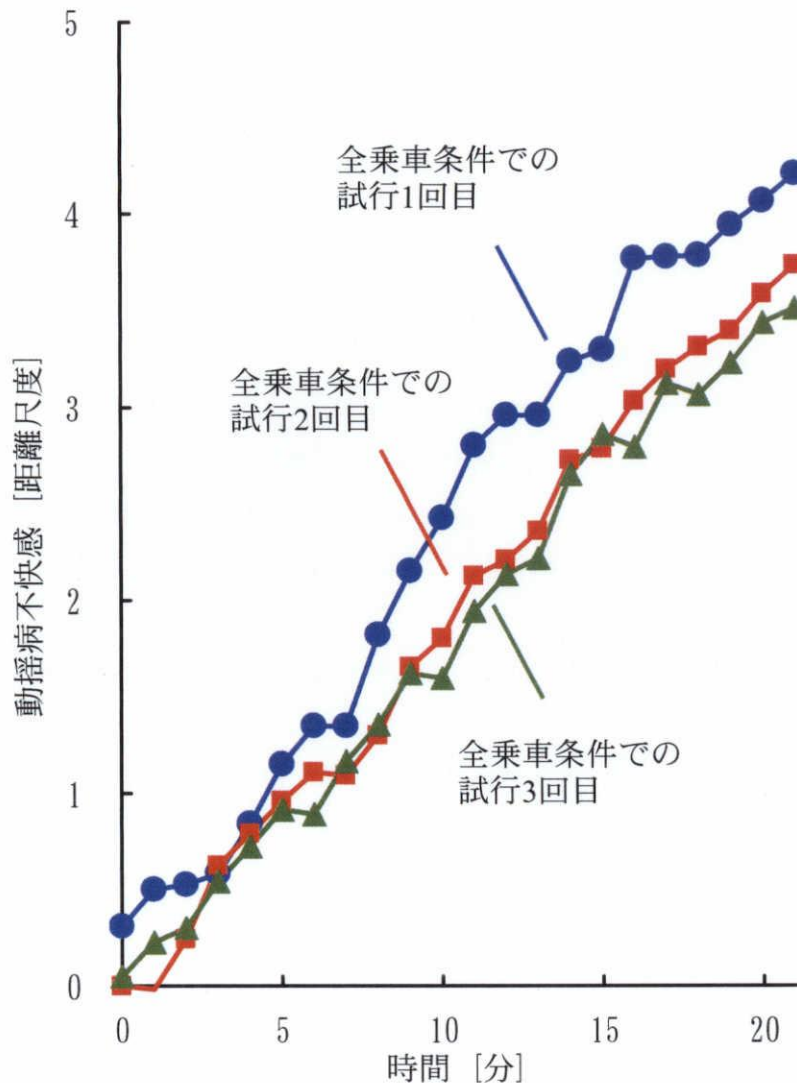


図 3-18 動揺病不快感の平均強度の時間推移

強していることが認められた。なお試行 2 回目条件と試行 3 回目条件には有意差は見られなかった ($p = 0.07$)。すなわち試行 1 回目と試行 2 回目以降では、生じる動揺病不快感に順序効果が見られた。ただし 3.4.1.5 章の実験手順で述べたように、本実験においては乗車条件ができる限り均等になる様に、被験者をあらかじめ各条件に割り当てた。このため、いずれかの乗車条件に全乗車条件における試行 1 回目の被験者が偏る事はなく、これにより試行 1 回目により生じる動揺病不快感強度の順序効果は各乗車条件間で打ち消されていることになる。

⁴ 本条件では、試行 1 回目、試行 2 回目および試行 3 回目のそれぞれのデータ間に“対応がある”ため、Wilcoxon の符号付順位和検定を使用した

次に、対策の効果に慣れあるいは学習による順序効果があるか、すなわち同一対策内での1回目の試行で得られた動揺病不快感と2回目の試行で得られた動揺病不快感の間に、順序効果が生じているか検証する。対策案A2条件では、全対策で最も試行数が多く(69試行)、被験者24名が2回以上対策A2条件に参加した。図3-19に、前記被験者24名の試行1回目と試行2回目の計48試行について、各条件における動揺病不快感の平均強度の時間推移(距離尺度)を

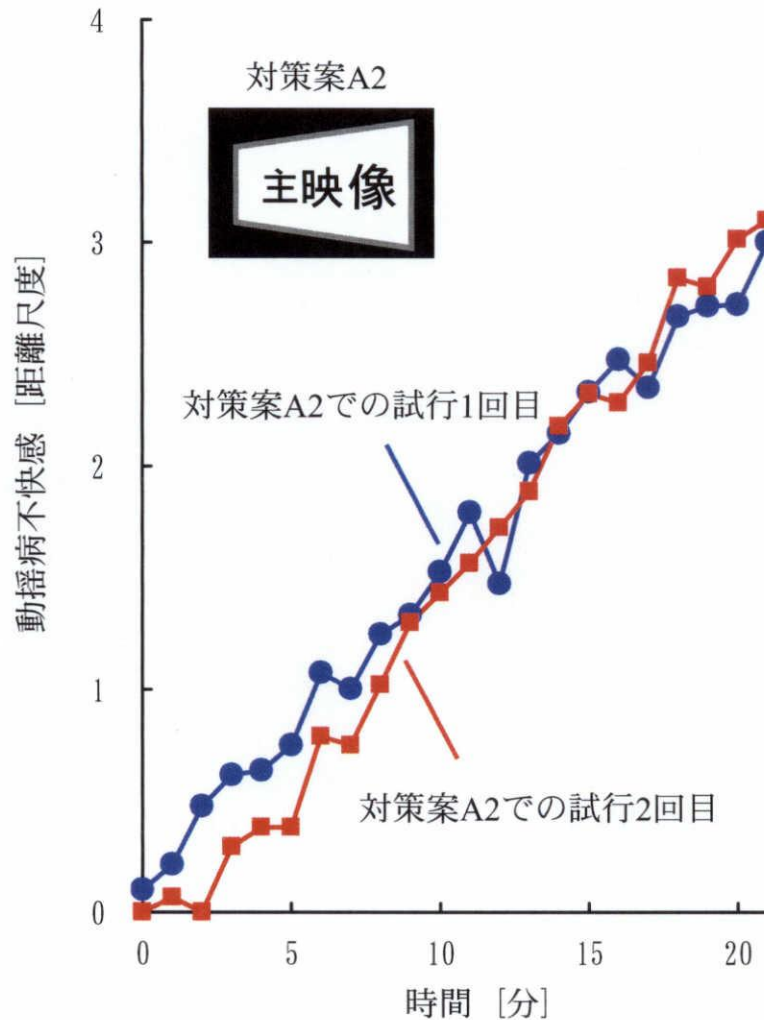


図3-19 動揺病不快感の平均強度の時間推移

示す。対策案A2での試行1回目条件と試行2回目条件ではほぼ同等の動揺病不快感であった。各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和をAUC法(Area Under Curve Method) [2-2]で算出し、2条件の動揺病不快感の経時的変動をWilcoxonの符号付順位和検定(両側検定)で検定した。試行1回目条件では、試行2回目条件に比べて有意差は見られなかった($p=0.24$)。すなわち同一対策内において、1回目の試行と2回目の試行で順序効果があるとは言えないことが判明した。

本実験では、3.5.2.2章に示したように車酔いに対する感受性を算出し、各被験者を感受性High、感受性Middle、および感受性Lowの3グループに分類した。ここでは車酔いの感受性により車酔い対策の効果に差があるか検証する。図3-20に、試行数の多い対策案A2条件とTV視聴条件および普通乗車条件について、動揺病不快感の平均強度の時間推移(距離尺度)を各感受性に分類して示す。感受性High、感受性Middle、感受性Low共に、対

策案 A2 では TV 視聴条件に比べて動揺病不快感が顕著に改善された。各感受性での対策案 A2 の改善率を算出したところ、感受性 High、Middle、Low でそれぞれ 75.7%、96.1%、69.6%であった。感受性 Middle でやや改善率が高いが、表 3-4 に示す対策案 A2 の改善率 76.8%（感受性の分類無し）と比較して著しく改善率が劣る感受性の分類は無く、いずれの感受性においても高い車酔い低減効果があることが確認できた。各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和を AUC 法 (Area Under Curve Method) [2-2] で算出し、各感受性毎に TV 視聴条件と対策案 A2 の動揺病不快感の経時的変動を Wilcoxon の符号付順位和検定（両側検定）で検定した。感受性 High および感受性 Middle において、対策案 A2 では $p < 0.05$ で、TV 視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が低減されたことが認められた。なお感受性 Low では有意差は見られなかった ($p = 0.16$)。

今回提案した車酔い低減対策について、更なる改善効果を得るための考察を以下で行う。

対策案 A3-2 は対策案 A1-2 と

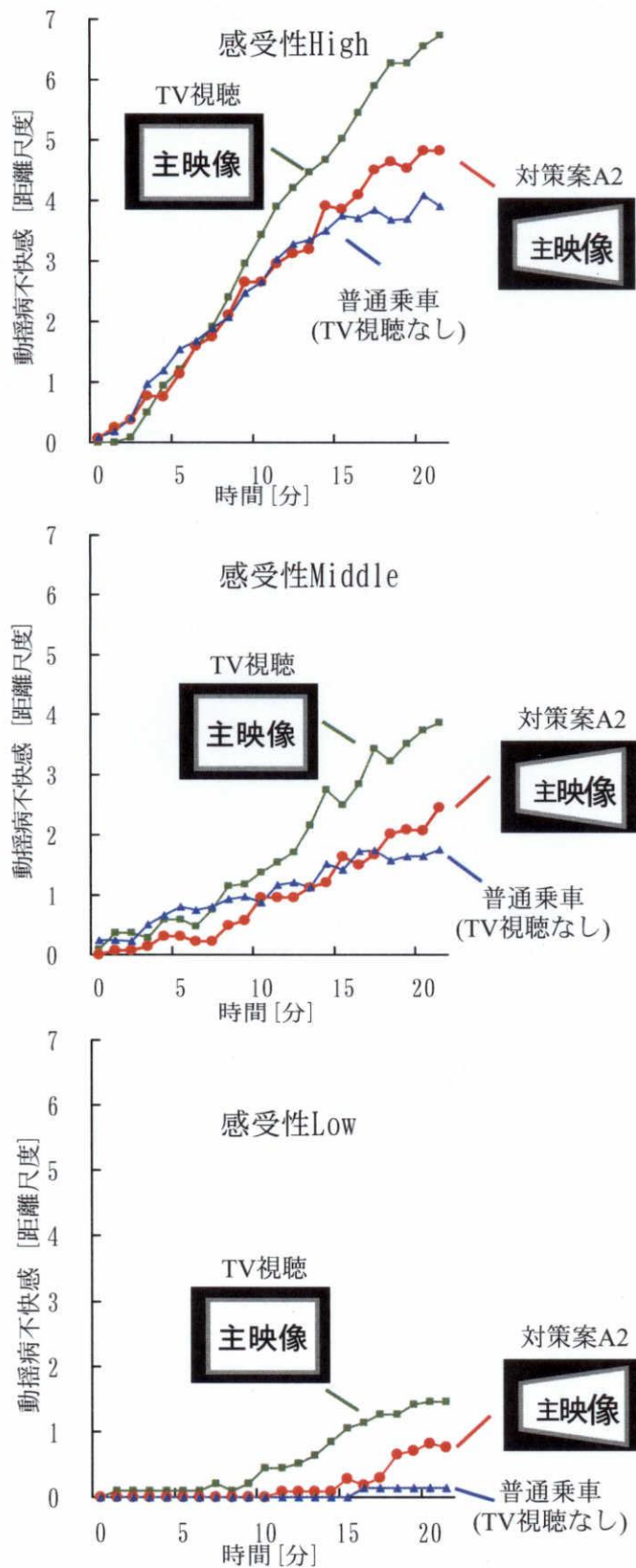


図 3-20 動揺病不快感の平均強度の時間推移

対策案 A2 を併用しており、対策案 A1-2 と対策案 A2 の相乗効果により改善率が上がると予想されたが、有意差のない結果であった。対策案 A1-2、A2、A3-2 共に Yaw 回転に対する情報のみを映像で与えているため、ほぼ同程度の改善率が得られたものと思われる。なお、本研究では対策案 A3-2 の映像の動きに用いる 2 つの比例係数を、対策案 A1-2 および対策案 A2 の比例係数と等しく定めたが、両者の相互作用を考慮した比例係数を求めて用いれば、車酔い低減対策の改善効果が更に上がったと考えられる。

実験その 1 の実験結果 (図 3-13) で述べたように、縦縞の動きの速度を対策案 A1-2 から対策案 A1-1 に、そして対策案 A3-2 から対策案 A3-1 の様に変更すると改善効果が著しく劣化した。これは、視運動刺激によって視覚誘導自己運動感覚が誘起されたものの、縦縞の動きが早すぎて平衡感覚に十分に一致できなかったためだと考えられる。Brand ら[7]は、90~120[deg/s]までなら視運動刺激の速度に比例して視覚誘導自己運動感覚が増加したと報告した。これらの結果は、車酔い低減効果が映像の動きの速さ・大きさに強く依存しており、各対策案における比例係数の最適化が非常に重要であることを示している。なお、予備実験では簡易化のために実験室内の回転装置を用いて比例係数を決定した。回転装置では実車に比べて右左折時に発生する遠心力が小さいことから、予備実験でも実車を使って走行中に比例係数を決定するほうが望ましいと思われる。また予備実験では静止画を用いて比例係数を定めたが、実車実験と同様に動画を用いて比例係数を定めた方が良いと考えられる。

対策案 A1-2、対策案 A3-2 では、それぞれ対策案 A1-1、対策案 A3-1 に対して、背景映像を円柱に貼り付け、背景映像に回転しているという効果をつけた。視覚的にはその差はやや分かりづらかったが、対策案 A1-2、対策案 A3-2 の車酔い改善率が、それぞれ対策案 A1-1、対策案 A3-1 に比べて顕著に大きかったことから、その効果が大きかったものと考えられる。例えば図 3-21 (4 章で使用する背景

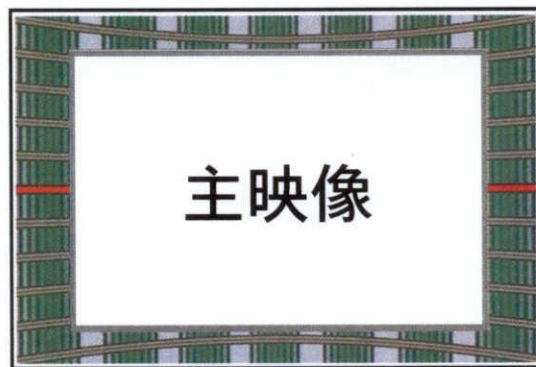


図3-21 背景映像の変更例

映像を円柱状に貼り付けた例) に示すように、ストライプの幅を変える等、背景映像のデザインを変えることで更に背景映像に回転しているという効果が付与できれば、車酔い低減効果が更に改善されると思われる。

図 3-10 の比例係数の分布に示すように、平衡感覚と一致する自己運動感覚を誘導する視運動刺激の動きの大きさには個人差が大きい。本研究では、予備実験の結果を基に、ある

いは注視野を考慮した上で、全被験者で一定の比例係数を用いて各対策案の車酔い低減効果を調べた。被験者毎に比例係数を最適化した上で対策案を適用すれば、車酔い低減効果が更に改善されると考えられる。

本章では、車の右左折時に発症する車酔いの対策を検証し 70%以上の車酔い改善率を得た。しかし、車酔いは車の右左折時だけでなく加減速時にも発症する [1-5]。仮に今回の実験コースが一旦停止等のない、すなわち加減速があまり発生しないコースだったら更に改善率が上がったと思われる。ただし一般に車の右左折時にはアクセル操作・ブレーキ操作による加減速を伴うことが多い。

右左折・加減速が混在した道路で車酔いを低減するには、車の加減速に対する車酔い低減対策を考案することが必要である。更に、今回の Yaw 対策と加減速対策を併用した複合対策を考案することで更なる改善効果が期待できる。

4. 加減速時に発生する車酔いに対する対策

4.1. 目的

3章では、右左折時に発生する車酔いに焦点を当てて車酔い低減対策を考案し、その有効性を検証した。視覚から車のYaw回転に一致した視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）を誘起し、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を低減させ、その結果車酔いを70%以上改善することが確認できた。

車酔いは右左折だけでなく加減速でも発生することが知られている。本章の目的は、加減速時に発生する車酔いを低減することである。乗車中のTV視聴時の車酔いを低減するために、まず車酔い低減対策の効果の検証するための基礎実験を行い（以降、実験その1と記す）、その後2種類の車酔い低減対策の有効性を実車実験で検証した（以降、実験その2と記す）。

本章における感覚矛盾説[1-2]に基づく車酔い低減対策の基本的な考え方は、3章の右左折時に発生する車酔いに対する対策と同じく、TV視聴と同時に視覚から車の動きを運動感覚情報として与えることで、視覚と平衡感覚間の感覚情報の矛盾を減少させ、その結果車酔いを低減させる、というものである。

対策案1（対策案B2）では、TV視聴する際に車の動きに一致した視運動刺激を与えることで無意識下のうちに視覚誘導自己運動感覚（ベクション）を誘起し、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を低減させる。3章の車酔い低減対策では、視覚から車のYaw回転に一致した視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）を誘起したが、本対策案における車酔い低減対策は、車の加減速に一致した視覚誘導自己運動感覚（リニアベクション）を誘起し、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を低減させるというものである。

対策案2（対策案B3）では、加減速が継続すると加速度と重力加速度の合成ベクトルの方向が見かけの重力加速度の方向と感じられ、このためピッチ方向の傾斜感覚が発生していると知覚される[4・1]ことを応用した。本対策案では、加速度に応じて背景映像をピッチ方向に傾斜させると共に上下移動し、視覚から傾斜感覚による加減速感覚を与え、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を低減させる。

4.2. 対策案

4.2.1. 対策案の基本的な考え方

TVを視聴しながら、視覚から車の動きを運動感覚として与えることにより、視覚と平衡感覚間の感覚矛盾を減少させて車酔いを低減することを対策のコンセプトとした。視覚から車の加減速の情報を与える映像、すなわち自分が進行方向に加減速しているような視覚誘導自己運動感覚（リニアベクション）を与える映像、あるいはピッチ方向の傾斜感覚を与える映像をTV映像に付加し、平衡感覚との感覚矛盾を減少させることとした。

TV視聴時の車酔い低減対策として、図4-1に示すようにTV映像（主映像）をディスプレイ中央部に表示し、TV映像の周りに周辺映像（実験その1）あるいは背景映像（実験その2）を配置し、車の加減速の情報を与えることにした。また、主映像と周辺映像・背景映像との境界を分かりやすくするために主映像の周辺に枠を描画した。

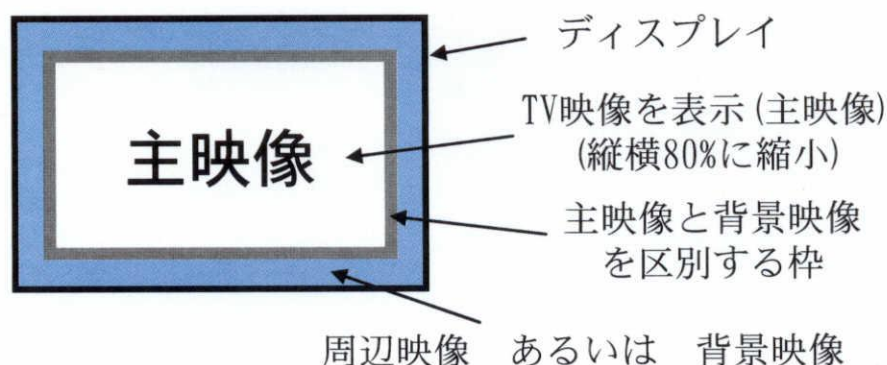


図4-1 TV映像（主映像）、周辺映像・背景映像、枠の説明図

4.2.2. 対策案（実験その1）

白黒格子状のテクスチャを周辺映像として主映像の上下左右の4面にトンネル状に配置した(図4-2。以下、対策案B1と記す)。車の前後加速度に応じた速度で周辺映像を前後移動して、自分が前後に移動しているという視覚誘導自己運動感覚（リニアベクション）を発生させた。加速時には周辺映像を手前側に移動して前向きのリニアベクションを、減速時には周辺映像を逆方向に移動して後ろ向きのリニアベクションを発生させた。



図4-2 対策案B1の説明図

対策案では、図 4-3 の様に仮想空間を考えてトンネル状に周辺映像を配置し、カメラから見える範囲（撮像画角内）をディスプレイに表示した。青い部分が主映像に相当し、周辺映像の黄色い部分がディスプレイに表示される。垂直方向の撮像画角 θ_0 は 60 度、水平方向の撮像画角は 73.8 度であった。仮想カメラから主映像までの距離を単位 (1[L]) とした。車の加速度 $\alpha_x(t)[m/s^2]$ (車の進行方向に加速する場合の加速度を正)、周辺映像の前後の移動速度を $v_{fB0}(t)[L/s]$ (車の進行方向の速度を正) とするとその関係式は式(4-1)で表される。

$$v_{fB0}(t) = -k_{fB0} \times \alpha_x(t) \quad (k_{fB0} : \text{比例係数}) \quad (4-1)$$

さらに、加速時には周辺映像を図 4-4(a)の様に伸長し、減速時には図 4-4(b)の様に縮小した。周辺映像の伸長度合い $r(t)$ は、式(4-2)の様に車の加速度に比例させた。

$$r(t) = \exp\left(\frac{\alpha_x(t)}{k_{rB0}}\right) \quad (k_{rB0} : \text{比例係数}) \quad (4-2)$$

比例係数は実車による予備実験を参考に k_{fB0} は 0.24、 k_{rB0} は 3.0 と定めた。

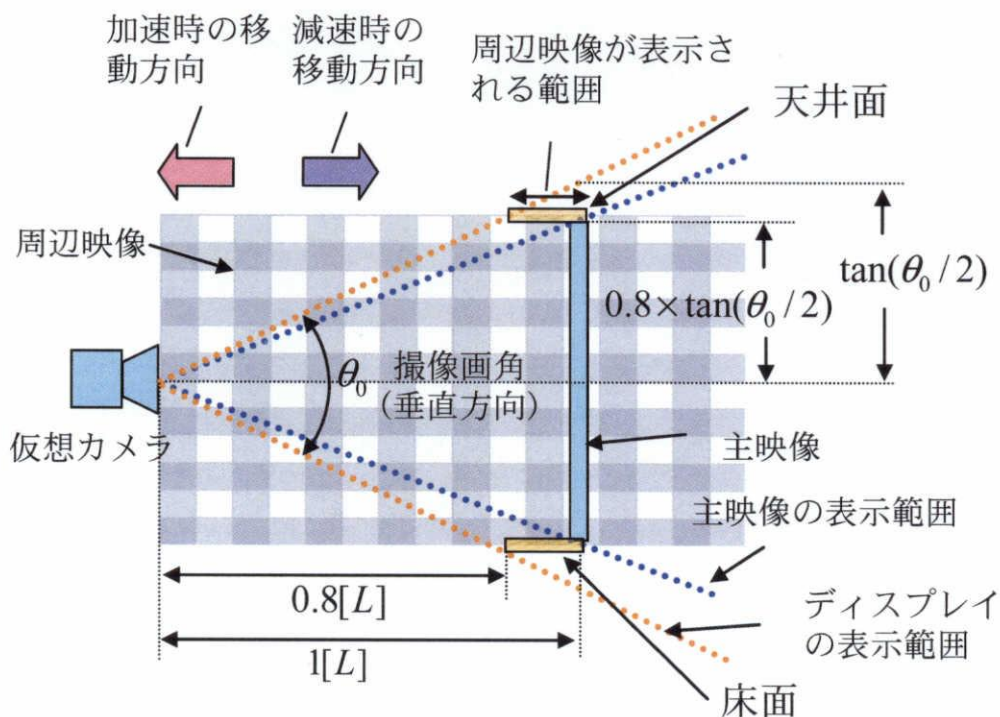


図 4-3 対策案の仮想空間 (横から見た図)

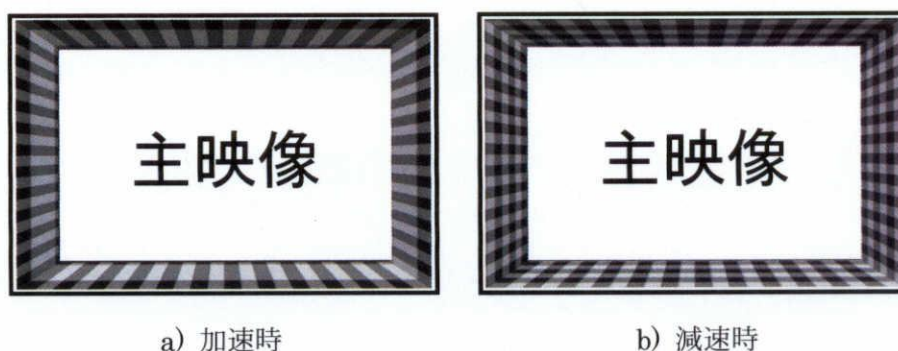


図 4-4 背景映像の伸長

4.2.3. 対策案 1 (実験その 2)

車の前後加速度に比例した速度で背景映像を前後移動して (図 4-5)、自分が前後に移動しているという視覚誘導自己運動感覚 (リニアベクション) を発生させた (以下、対策案 B2 と記す)。加速時には背景映像を手前方向に移動し前向きのリニアベクション



図 4-5 対策案 B2 の概要図

を、減速時には背景映像を逆方向に移動して後ろ向きのリニアベクションを発生させた。対策案では、図 4-6 の様に仮想空間を考えて枠状のテクスチャ 4 枚を背景映像として配置し、カメラから見える範囲 (撮像画角内) をディスプレイに表示した。青い部分が主映像に相当し、主映像の周辺に背景映像が表示される。垂直方向の撮像画角 θ_0 は 60 度、水平方向の撮像画角は 73.8 度であった。仮想カメラから主映像までの距離を単位 (1[L]) とし、背景映像を 1.5[L]~1.875[L]の間で前後に移動した。車の加速度 $\alpha_x(t)[m/s^2]$ (車の進行方向に加速する場合の加速度を正)、背景映像の前後の移動速度を $v_{jB1}(t)[L/s]$ (車の進行方向の速度を正) とするとその関係式は式(4-3)で表される。式(4-3)の比例係数 k_{jB1} は後述する実車による予備実験を参考に 0.1004 に決定した。

$$v_{jB1}(t) = -k_{jB1} \times \alpha_x(t) \quad (k_{jB1} : \text{比例係数}) \quad (4-3)$$

説明のために背景映像としてのテクスチャ (枠) を 1 枚毎に色づけすると、図 4.6 の仮想空間はディスプレイを正面から見た場合、図 4-7 のように模式化される。常に 4 枚のテクスチャ (枠) が表示されるようにした。車の加速中には枠が外側に広がるように見え、加速中に一番外側の枠がディスプレイから見えなくなると、枠の一番内側 (奥側) から再び

現れるように動作させた。減速中には逆方向に動作させた。

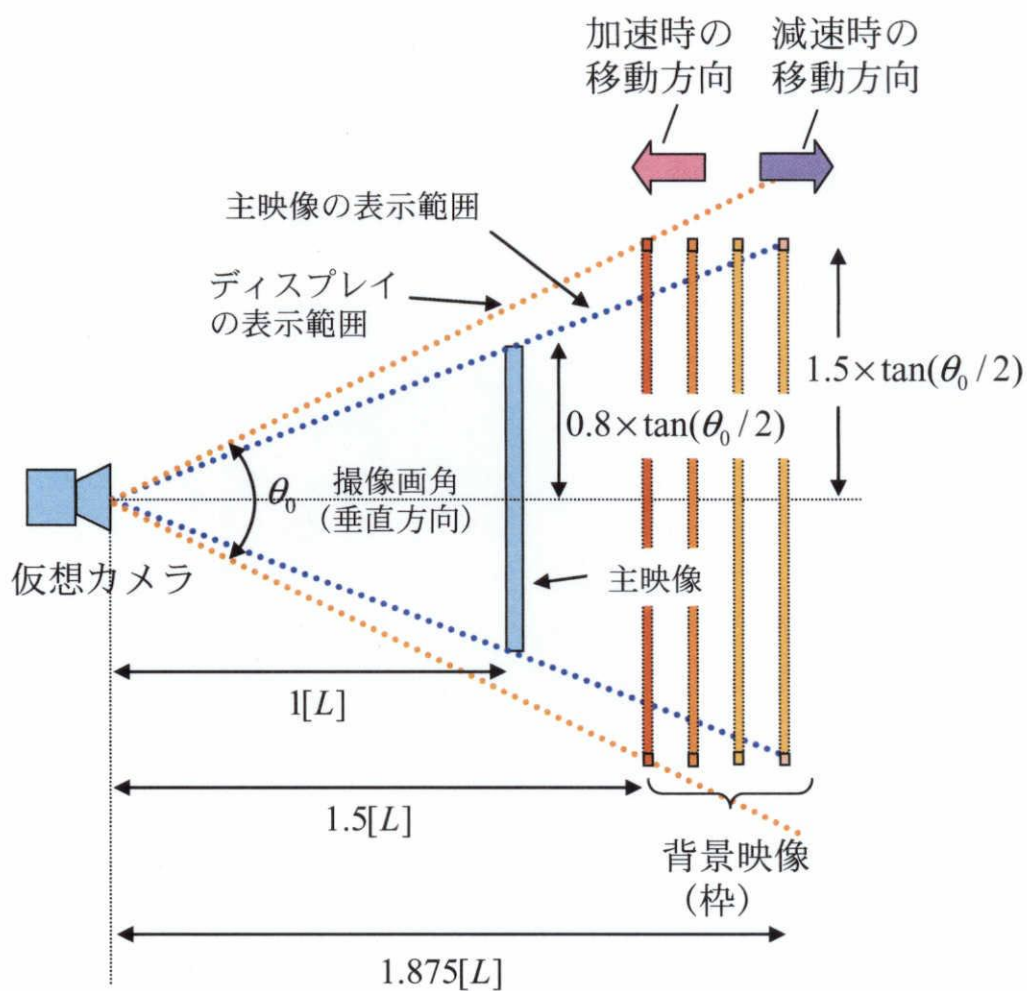


図 4-6 対策案 B2 の仮想空間 (横から見た図)



図 4-7 テクスチャ (枠) の説明図

4.2.4. 対策案 2 (実験その 2)

加減速が継続すると、加速度と重力加速度の合成ベクトルの方向が見かけの重力加速度の方向と感じられ (図 4-8)、このためピッチ方向の傾斜感覚が発生していると知覚されることが報告されている[4-1]。そこで加速度に応じて背景映像をピッチ方向に傾斜 (図 4-9) させると共に上下移動し、視覚から傾斜感覚を与えて、これにより加減速感覚を与えた (以下、対策案 B3 と記す)。加速時には背景映像の上側を奥方向・下側を手前方向に回転しながら下向きに移動し (図 4-10(a))、逆に減速時には背景映像の上側を手前方向・下側を奥方向に回転しながら上向きに移動した (図 4-10(b))。

図 4-8 の様に、車の加速度 $\alpha_x(t)[m/s^2]$ (車の進行方向に加速する場合の加速度を正) により発生する合成ベクトルと重力加速度方向のなす角度を $\theta_{gx}(t)[deg]$ とすると、その関係式は式(4-4)、すなわち式(4-5)で表される。 $\theta_{gx}(t)$ に比例させて、背景映像をピッチ方向に傾斜、上下移動させた。

$$\tan \theta_{gx}(t) = \alpha_x(t) / g \quad (4-4)$$

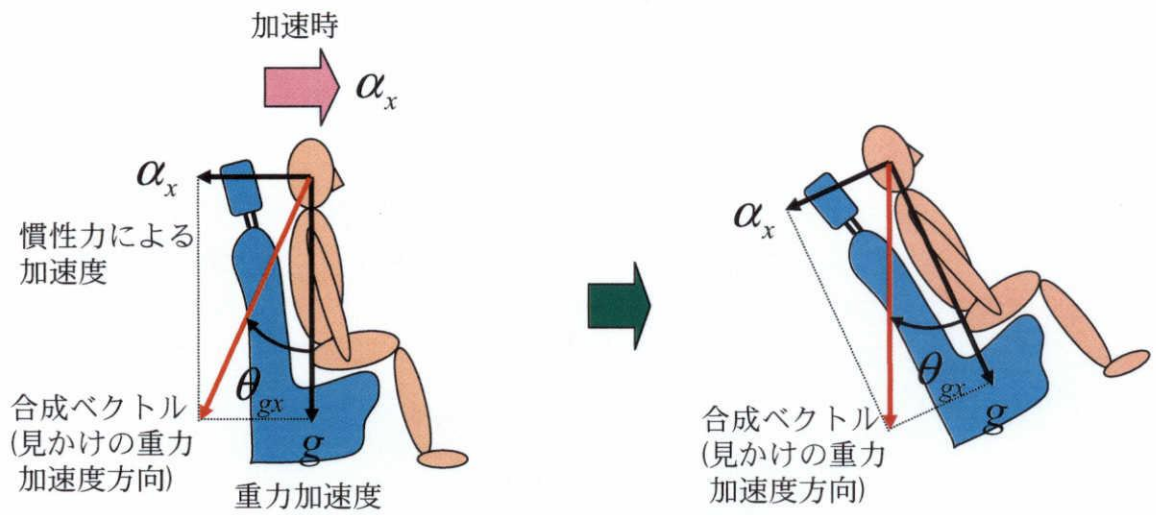
$$\theta_{gx}(t) = \tan^{-1}(\alpha_x(t) / g) \quad (4-5)$$

対策案では、図 4-11 の様に仮想空間を考えて、図 4-10 の様な縦横にストライプがあり縦方向の中心に赤い横線があるテクスチャを背景映像として配置し、カメラから見える範囲 (撮像画角内) をディスプレイに表示した。青い部分が主映像に当たり、主映像の周辺に背景映像が表示される。垂直方向の撮像画角 θ_0 は 60 度、水平方向の撮像画角は 73.8 度であった。仮想カメラから主映像までの距離を単位 (1[L]) とした。図 4-11 (加速時) の様に、背景映像のピッチ傾斜角度を $\theta_p(t)[deg]$ (車の進行方向に対して下向きに回転を正)、上下移動角度 $\theta_s(t)[deg]$ (車の進行方向に対して下向きに回転を正) とすると、その関係式は式(4-6)、式(4-7)で表される。式(4-6)、式(4-7)の比例係数は後述する実車による予備実験を参考に $k_{pB2}=0.5797$ 、 $k_{sB2}=0.6886$ に決定した。

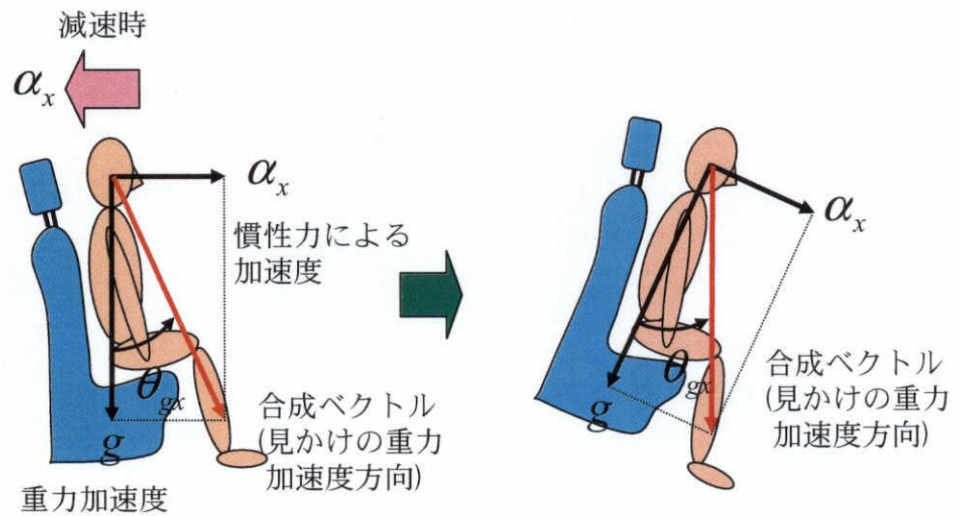
$$\theta_p(t) = k_{pB2} \times \tan^{-1}(\alpha_x(t) / g) \quad (k_{pB2} : \text{比例係数}) \quad (4-6)$$

$$\theta_s(t) = k_{sB2} \times \tan^{-1}(\alpha_x(t) / g) \quad (k_{sB2} : \text{比例係数}) \quad (4-7)$$

なお、背景映像の赤い横線は水平線を示し、加減速が発生していない場合は、ディスプレイの中心に静止するようにした。



a) 加速時



b) 減速時

図 4-8 加減速時に知覚するピッチ方向の傾斜感覚

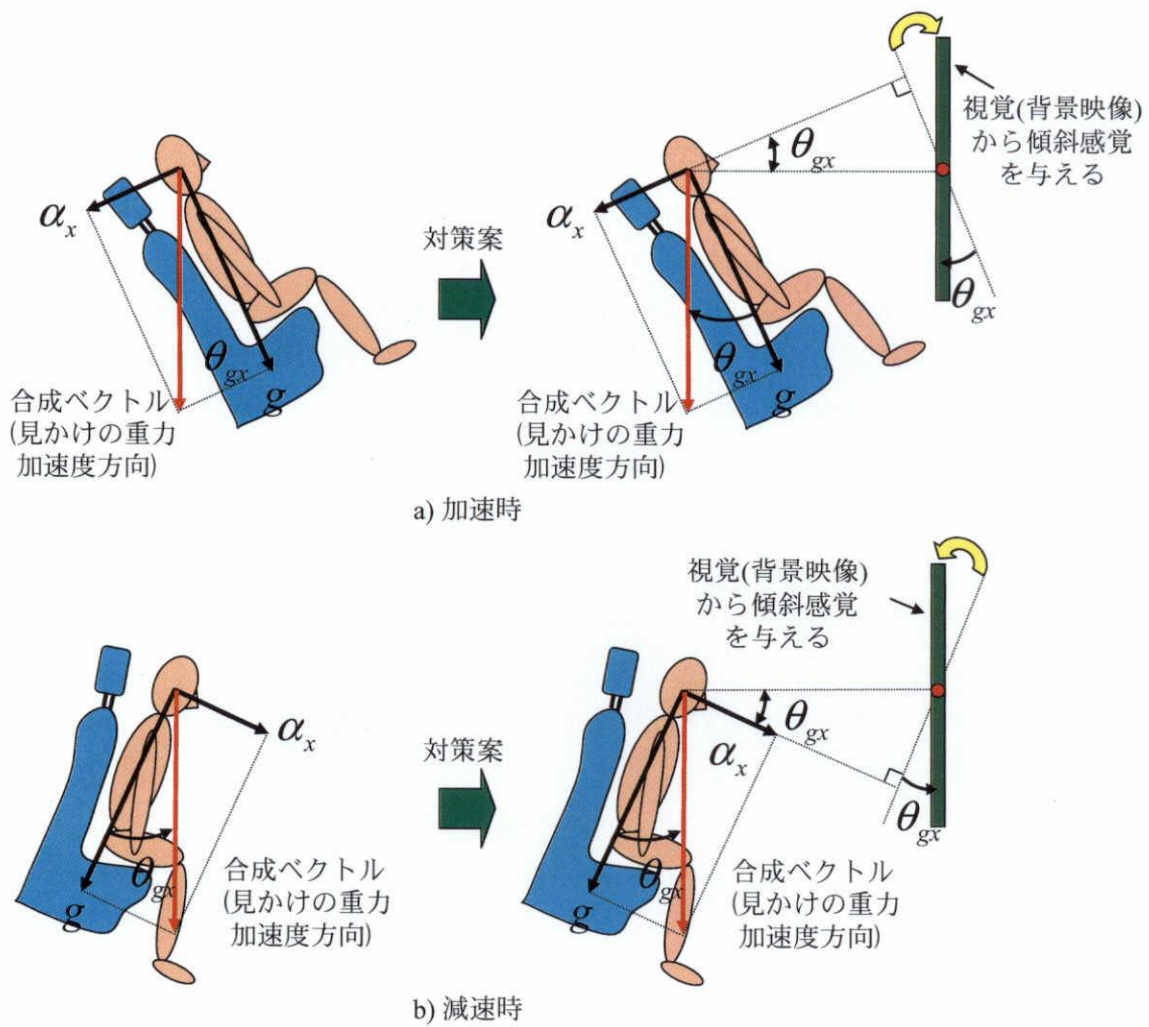


図 4-9 ピッチ方向の傾斜感覚の与え方の考え方

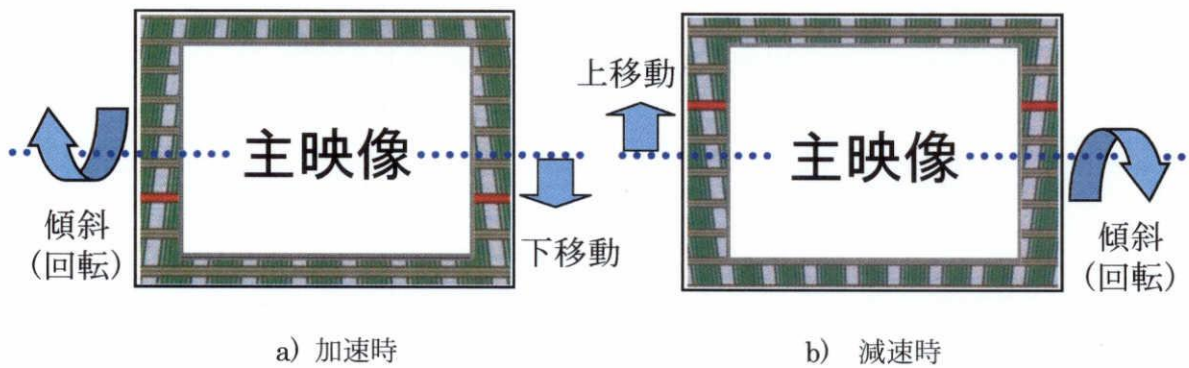


図 4-10 対策案 B3 の概要図

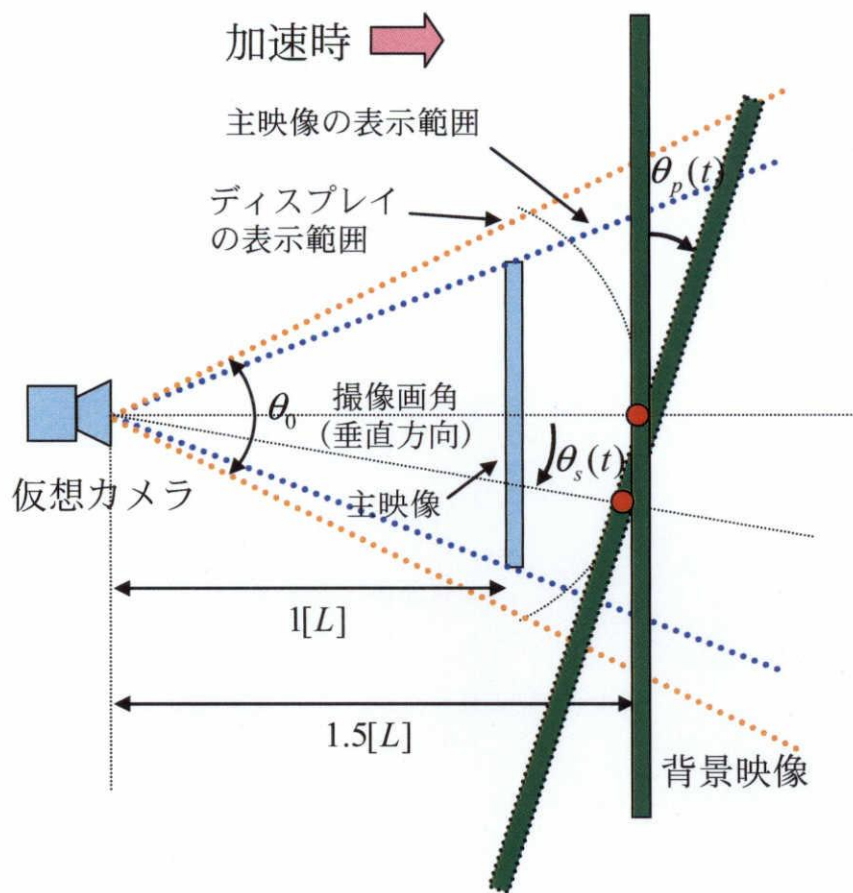


図 4-11 対策案 B3 の仮想空間 (横から見た図) (加速時)

4.3. 予備実験

上記の対策案では、視運動刺激によって生じる視覚誘導自己運動感覚を、平衡感覚で知覚される車の加減速の感覚に一致させることが重要である。適切な映像の動きを求めするために、実車走行実験に先立って実験室内での予備実験ではなく実車による予備実験を実施し、式(4-3)、式(4-6)、式(4-7)の比例係数 k_{fvB1} 、 k_{pB2} 、 k_{sB2} を定めた。

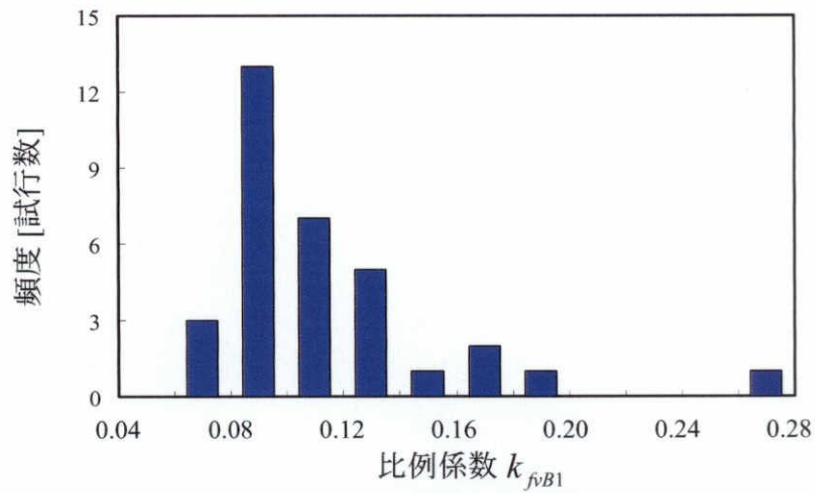
4.3.1. 実験方法

20歳前後の健康な男女8名を被験者として実験を行った。信号機が無く長い直線が多い道路(4.4.2.1.3章に後述する実車走行実験と同一コース)を、加減速を繰り返しながら走行した。走行中に、考案した対策案B2または対策案B3を被験者の約60[cm]前方に設置した11[inch]の車載TVに表示し、映画を視聴させた。視運動刺激によって生じる視覚誘導自己運動感覚と、平衡感覚で知覚される車の加減速の感覚が一致するように、背景映像の動き(比例係数)を被験者にポテンシオメーターで調整させた。調整は逆行を許し、被験者が十分な一致を感じるまで続けさせた。調整終了後にポテンシオメーター入力による比例係数 k_{fvB1} 、 k_{pB2} 、 k_{sB2} の値を記録した。なお、試行毎にポテンシオメーターの入力を最小値または最大値に初期化した。試行数は比例係数それぞれについて33回、合計99試行であった。

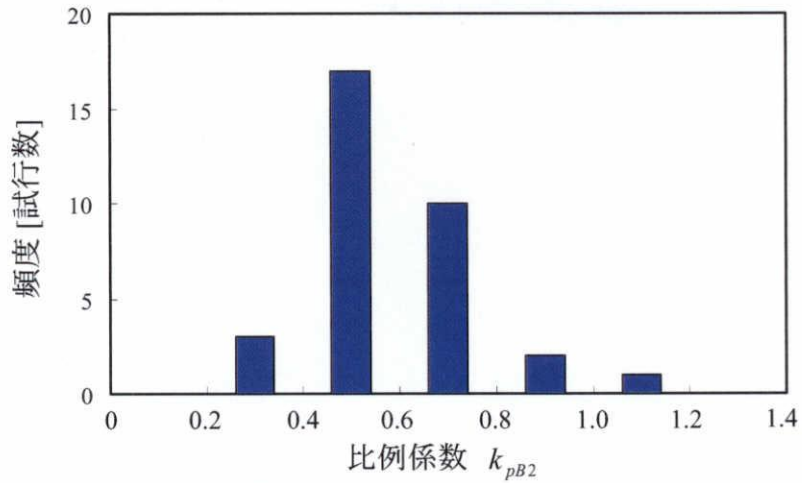
4.3.2. 結果

図4-12(a)に対策案B2の比例係数 k_{fvB1} の分布を、図4-12(b)に対策案B3の傾斜角度の比例係数 k_{pB2} の分布を、図4-12(c)に対策案B3の上下移動の比例係数 k_{sB2} の分布を、ヒストグラムで示す。 k_{fvB1} は 0.11 ± 0.039 (平均±標準偏差)、 k_{pB2} は 0.59 ± 0.19 、 k_{sB2} は 0.70 ± 0.25 であり、個人差の大きな分布であった。

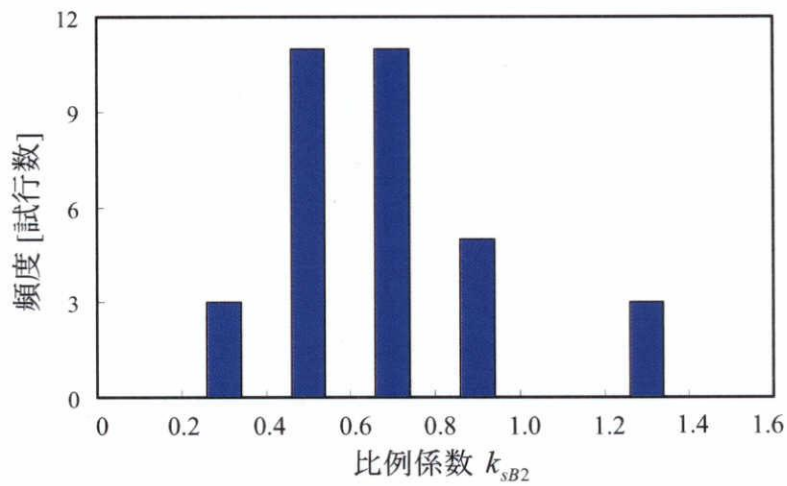
それぞれの分布の中央値より、 k_{fvB1} は0.1004、 k_{pB2} は0.5797、 k_{sB2} は0.6886とした。



a) 対策案B2の比例係数 k_{fvB1}



b) 対策案B3の傾斜角度の比例係数 k_{pB2}



c) 対策案B3の上下移動の比例係数 k_{sB2}

図 4-12 対策案の比例係数の分布

4.4. 実車走行実験

4.4.1. 実験その1

車酔い低減対策1種類（対策案 B1）の有効性を検証した。

4.4.1.1. 実験方法

4.4.1.1.1. 被験者

被験者は、これまでにめまいや難聴など耳鼻咽喉科疾患の既往のない20歳前後の健康男女54人（男性39名、女性14名）であった。実車走行実験は、あらかじめ被験者に実験の主旨、内容、手順、評価方法、予期される人体への影響などについて十分な説明を行い、書面による被験者の事前同意を得て行った。確認した項目は、

- ・ 実験中に車酔いが発症し不快感が生じる可能性があること
- ・ 被験者の希望により実験期間中であればいつでも参加の延期、中断ができること
- ・ その延期・中断によって不利益を被らないこと
- ・ 実験中に得た個人データを個人が特定できる形では公表しないこと

の4項目であった。被験者の動揺病不快感が強く実験を継続できない場合には、直ちに実験を中断した。

4.4.1.1.2. 実験装置

3.4.1.2章の右左折時の車酔い低減対策の検証実験で使用した実験装置と同一の装置を使用した。4列シート10人乗りのミニバンタイプの車（全長5,380[mm]、幅1,880[mm]、高さ2,285[mm]で、2,693[cc]のガソリンエンジン車）を使用して実車実験を行った。1回の実験につき、1～5名の被験者を2～4列目シートに座らせて走行した。前席のヘッドレストの位置に5台の車載TVをそれぞれ天井から吊り下げ設置した。被験者から車載TVまでの距離は約60cmであった。車載TVは11[inch]（横24.4[cm]、縦13.8[cm]、水平解像度800[dot]、垂直解像度480[dot]）、水平視角は約23[deg]であった。TV映像（主映像）は、縦横8割（横20.5[cm]、縦11.5[cm]）に縮小して表示した。TV視聴は、DVDプレイヤーによる映画の再生とし、音声は車両の後方上部に取り付けられたステレオスピーカーから再生した。

4.4.1.1.3. 刺激（乗車条件と乗車コース）

以下の3つの乗車条件で車酔いを発生させ、動揺病不快感を比較した。

- a) 対策案 B1 を施した TV 視聴

b) TV 視聴

c) 普通乗車(TV 視聴無し)

a), b) の TV 視聴条件では、被験者に車載 TV で映画を視聴させた。使用した映画は、激しい動きや不快なシーンが無く、被験者が意識を集中しやすい恋愛映画や家族コメディ映画のようなストーリー性の高い映画とした。なお音声は日本語で、字幕が無い映画とした。

c) の普通乗車条件では、被験者には特別な制約は課さず静かに乗車させた。普通に乗車しているように、車の外を自由に見ることを許可した。

乗車コースは、3.4.1.3 章の右左折時の車酔い低減対策の検証実験の乗車コースと同一のコース（1 周 3 分のコースを 7 周、計 21 分間走行）を使用した。

4.4.1.1.4. 動揺病不快感の測定と解析方法

3.4.1.4 章の右左折時の車酔い低減対策の検証実験の「動揺病不快感の測定と解析方法」と同一の手法を使用した。

4.4.1.1.5. 実験手順

3.4.1.5 章の右左折時の車酔い低減対策の検証実験の実験手順と同一の実験手順とした。それぞれの試行では 1~5 人の被験者が車両の 2~4 列目シートに乗車した。実験走行経路の開始地点に到着するまで約 15 分要し、約 10 分間の休憩後実験を開始した。10 分間の休憩中は車を停止し、映画を視聴させた。乗車条件ができる限り均等になる様に、被験者を各条件に割り当てた。実車実験は 21 分間であった。主観的な動揺病不快感を、走行開始直前 10 分、5 分、走行開始時、その後 1 分毎に回答させた。被験者の不快感が強く実験中断を被験者が望んだ時には直ちに実験を中断した。各条件での試行数と、中断した試行数を表 4-1 に示す。

表 4-1 各条件での試行数（カッコ内は中断した試行数）

乗車条件	試行数
対策案 B1	41 (2)
TV 視聴	49 (5)
普通乗車	44 (0)
合計	134 (7)

4.4.2. 実験その2

車酔い低減対策2種類（対策案 B2、対策案 B3）の有効性を検証した。

加減速のみの効果を調べるために、4.4.1章の実験その1とは異なり、信号機が無く長い直線が多いコースを使用した。

4.4.2.1. 実験方法

4.4.2.1.1. 被験者

被験者は、これまでにめまいや難聴など耳鼻咽喉科疾患の既往のない20歳前後の健康男女48人（男性33名、女性15名）であった。実車走行実験は、あらかじめ被験者に実験の主旨、内容、手順、評価方法、予期される人体への影響などについて十分な説明を行い、書面による被験者の事前同意を得て行った。確認した項目は、

- ・ 実験中に車酔いが発症し不快感が生じる可能性があること
- ・ 被験者の希望により実験期間中であればいつでも参加の延期、中断ができること
- ・ その延期・中断によって不利益を被らないこと
- ・ 実験中に得た個人データを個人が特定できる形では公表しないこと

の4項目であった。被験者の動揺病不快感が強く実験を継続できない場合には、直ちに実験を中断した。

4.4.2.1.2. 実験装置

4.4.1.1.2の実験その1の実験装置と同一の装置を使用した。

4.4.2.1.3. 刺激（乗車条件と乗車コース）

以下の4つの乗車条件で車酔いを発生させ、動揺病不快感を比較した。

- a) 対策案 B2 を施した TV 視聴
- b) 対策案 B3 を施した TV 視聴
- c) TV 視聴
- d) 普通乗車(TV 視聴無し)

a)～c)のTV視聴条件では、被験者に車載TVで映画を視聴させた。使用した映画は、激しい動きや不快なシーンが無く、被験者が意識を集中しやすい恋愛映画や家族コメディ映画のようなストーリー性の高い映画とした。なお音声は日本語で、字幕が無い映画とした。

d)の普通乗車条件では、被験者には特別な制約は課さず静かに乗車させた。普通に乗車しているように、車の外を自由に見ることを許可した。

実験で使用した走行経路は、信号機が無く直線距離が長い平坦な道路で、交通量はまばらで渋滞は無かった。1周4分の道路(約2km)を5周、計20分間走行し、加減速を1周につき10回、合計50回繰り返しながら走行した。運転にばらつきが出ないように全実験を運転手1人で実施し、運転手には制限速度(60[km/h])を守るよう指示した。道路の直線部分では加速→等速→減速→停止を繰り返して運転させた。またカーブはできる限りゆっくりと走行し、Yaw加速度、遠心力が発生しないように運転させた。車の運動は6自由度(加速度3軸、角速度3軸)で計測した。減速時の最大加速度は4~5[m/s²]と図2-2のコースで発生した減速時の最大加速度(3.5[m/s²])に比べて、比較的大きかった。加速時の最大加速度は約2[m/s²]であった。走行経路を図4-13に示す。



図 4-13 走行経路と加減速の様子

4.4.2.1.4. 動揺病不快感の測定と解析方法

動揺病不快感の測定と解析方法は、2.2.4章と同一である。主観的な心理量である動揺病不快感を定量的に解析するために、評定尺度法によって不快感強度を序数尺度で測定した後、範疇判断の法則[2-1]に基づいて距離尺度化を施した。0(不快感なし)~10(不快感・吐き気が強くこれ以上乗車できない状態)までの11段階で主観的に評価させ、実験中に感じる不快感の強さを1分間毎に口頭で回答させた。なお被験者には、0~10の評定値で不快感をできるだけ等間隔に表現するよう指示した。また、不快感が強いために実験を中断した場合には、中断後の動揺病不快感は最大評定値の10として解析した。動揺病不快感の解析において、評定尺度は被験者毎の車酔いに対する感受性を調整(詳細な手順は4.5.2.2章に記載)した後で、範疇判断の法則(condition B)に基づいて等間隔な尺度である距離尺度(間隔尺度)に変換(詳細な手順は2.3.3章と同一)した。

4.4.2.1.5. 実験手順

それぞれの試行では1~5人の被験者が車両の2~4列目シートに乗車した。実験走行経路の開始地点に到着するまで約15分要し、約10分間の休憩後実験を開始した。10分間の休憩中は車を停止し、映画を視聴させた。乗車条件ができる限り均等になる様に、被験者を各条件に割り当てた。実車実験は20分間であった。主観的な動揺病不快感を、走行開始直前10分、走行開始直前5分、走行開始時、その後1分毎に回答させた。被験者の不快感が強く実験中断を被験者が望んだ時には直ちに実験を中断した。各条件での試行数と、中断した試行数を表4-2に示す。なお今回の実験では、実験中に中断した被験者はいなかった。

表 4-2 各条件での試行数（カッコ内は中断した試行数）

乗車条件	試行数
対策案 B2	46 (0)
対策案 B3	47 (0)
TV 視聴	46 (0)
普通乗車	44 (0)
合計	183 (0)

4.5. 実車走行実験

4.5.1. 実験その 1

4.5.1.1. 動揺病不快感の増強

評定尺度法によって得られた動揺病不快感を定量的に解析するために、範疇判断の法則に基づき等間隔な尺度である距離尺度（間隔尺度）に変換した。図 4-14 は、3 乗車条件における動揺病不快感の平均強度の時間推移を示す。図のそれぞれの点は、乗車時間の経過 1 分毎の平均強度を示す。3 条件とも、動揺病不快感は 21 分間の乗車時間にほぼ比例して増強した。動揺病不快感は、TV 視聴条件で最も強かった。対策案 B1 では、動揺病不快感が TV 視聴条件に比べて改善された。普通乗車条件では動揺病不快感が最も低かった。

各乗車条件での回帰直線の傾きと対策の改善率を表 4-3 に示す。対策案 B1 の改善率は 26.1%であった。

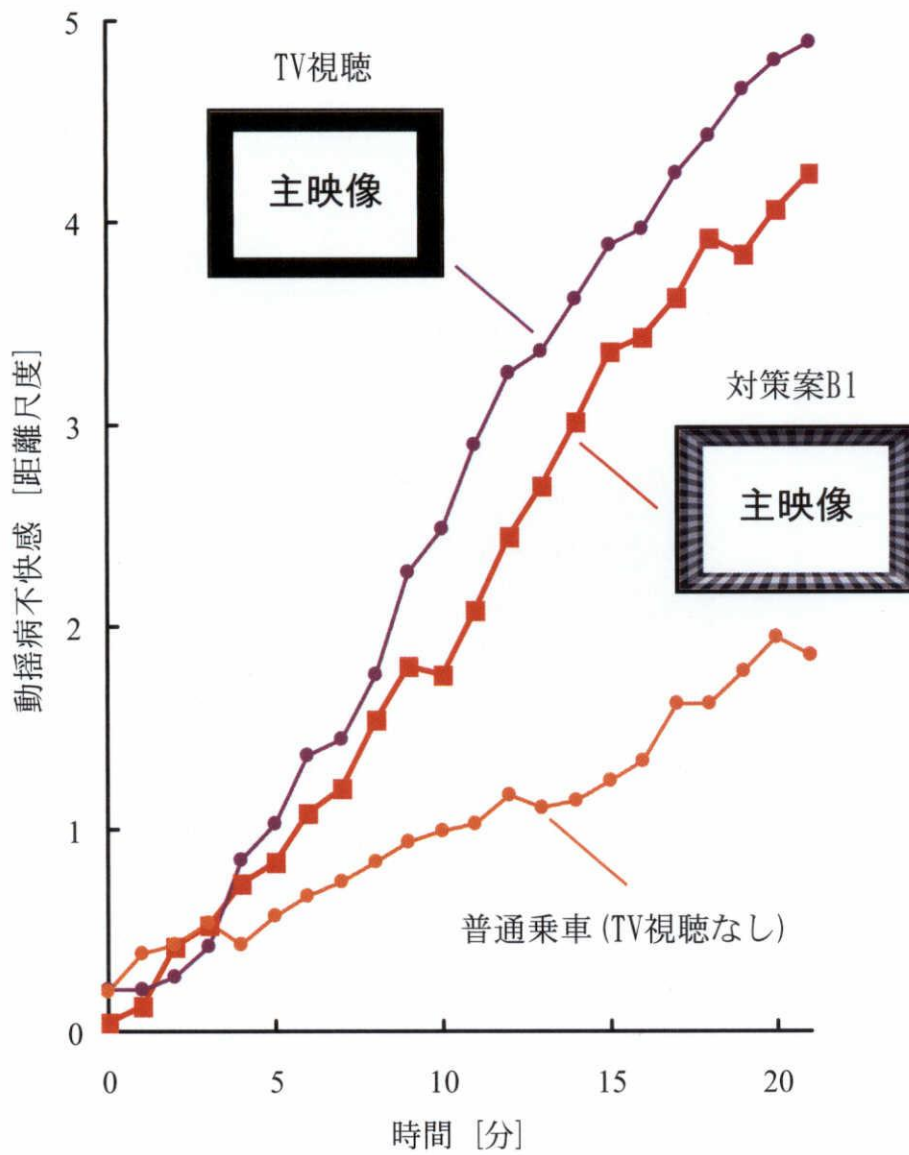


図 4-14 動揺病不快感の平均強度の時間推移

表 4-3 各乗車条件での回帰直線の傾きと改善率

乗車条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
対策案 B1	0.201	26.1
TV 視聴	0.246	—
普通乗車	0.092	—

4.5.2. 実験その2

4.5.2.1. 車酔い発症の時間推移

動揺病不快感は、全ての条件下で乗車中次第に増強した。4条件それぞれについて、動揺病不快感の時間推移を図4-15のヒストグラムに示す。左奥から手前側の軸は評定尺度での動揺病不快感を示す。左手前から右側の軸は乗車時間を示す。4条件で試行数が異なるため、ヒストグラムを直接比較しやすいように縦軸は試行数ではなく試行数の割合で示している。

ほとんど全ての試行において乗車開始時刻(0分)では動揺病不快感は0であった。対策案B2条件では、全ての乗車時間を通して不快感が6以下であった。約59%の試行が20分経過(実験終了)しても不快感が0(不快感なし)のままであった。対策案B3条件では、全ての乗車時間を通して不快感が7以下であった。約51%の試行が20分経過(実験終了)しても不快感が0(不快感なし)のままであった。これに対して、TV視聴条件では、全ての乗車時間を通して不快感が7以下であったが、試行が20分経過しても不快感が0のままの被験者の割合は、対策案B2、対策案B3より低い約39%であった。2つの対策案に比べてTV視聴条件では動揺病不快感が強くなった。なお普通乗車条件では、全ての乗車時間を通して不快感が6以下で、約56%の試行が20分経過しても不快感が0のままであった。

Wilcoxonの順位和検定(両側検定)の結果、対策案B2条件では、20分($p=0.059$)を除き14分以降の全ての乗車時間において $p<0.05$ で、TV視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が低減されたことが認められた。対策案B3条件では、乗車時間6分($p<0.05$)を除き、TV視聴条件と比べて有意差は見られなかった($p>0.05$)。また、各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和をAUC法(Area Under Curve Method) [2-2]で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動をWilcoxonの順位和検定(両側検定)で検定した。対策案B2条件では、 $p<0.05$ でTV視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が低減されたことが認められた。対策案B3条件では、TV視聴条件と比べて有意差は見られなかった($p=0.24$)。

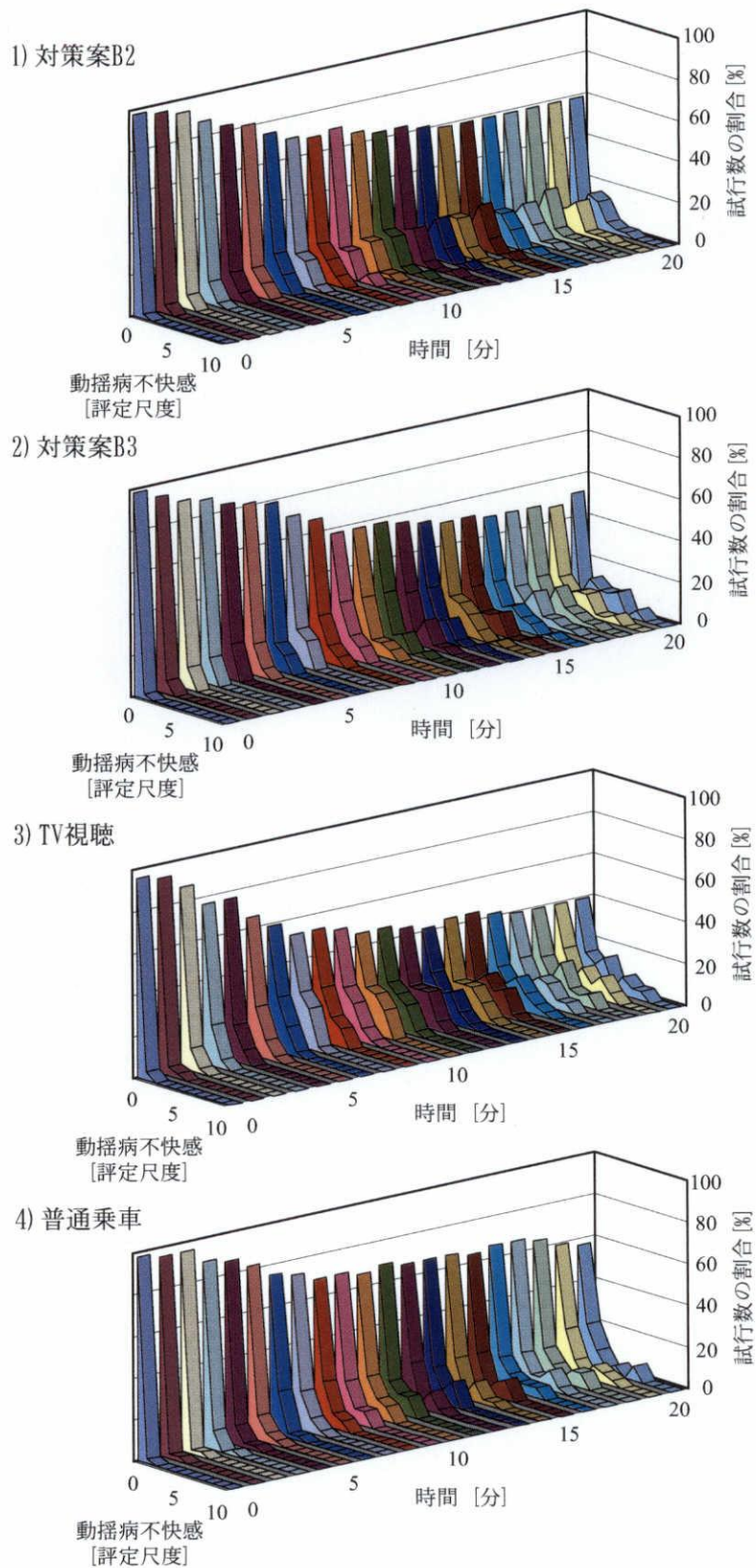


図 4-15 動揺病不快感の時間推移

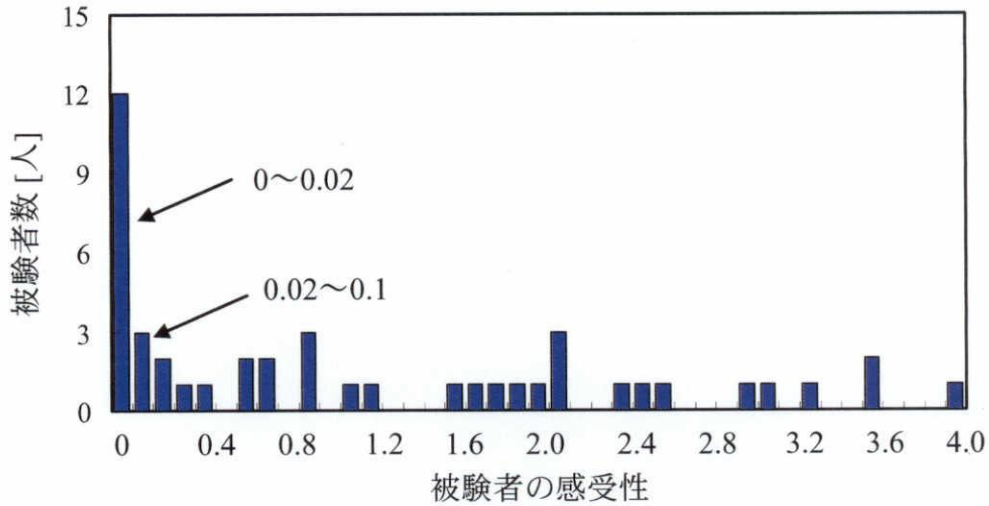
4.5.2.2. 車酔い感受性

前記 4 乗車条件で動揺病不快感を比較するために、2.3.2 章と同様に、車酔いに対する感受性の補正を行った。

各被験者の一試行毎に、横軸に乗車時間、縦軸に不快感強度を取って最小二乗法による回帰直線の傾きを算出した。ここで、乗車開始時刻（0 分）では動揺病不快感は 0（不快感なし）と想定されるため、原点を通る直線に回帰した。次に各乗車条件毎に回帰直線の傾きの平均値を算出し、各試行の傾きを前述した平均値で割り正規化することで、各試行の感受性を算出した。各被験者毎に、感受性の平均値を算出することで、被験者の車酔い感受性を表した。感受性 1.0 は、各被験者の車酔いのしやすさが、被験者の平均の車酔いのしやすさと同程度であることを示している。なお、Grubbs-Smirnov 棄却検定 [4-2] を用いて有意水準 1% で飛び離れた感受性の試行のデータ、および乗車開始時刻に不快感が 2 以上に達しているデータを解析から除外した。図 4-16 は車酔いに対する被験者の感受性のヒストグラムを示す（感受性の横軸の間隔は感受性 0 近傍の最初の 2 本を除いて 0.1 である）。図 4-16 上図のヒストグラムは、横軸に被験者の感受性を、縦軸にその感受性を示した被験者数を示している。48 人の被験者間で、感受性は幅広く分布したが、12 人の被験者は極めて感受性が低く（0.02 未満）、20 分走行後でも全くあるいはほとんど不快感がなかった。多数の被験者の感受性は 0.02~1.2 近傍を中心に 2.0 以上まで広がっていた。被験者 5 名は 3 以上という非常に高い感受性であった。図 4-16 下図のヒストグラムは、横軸に被験者の感受性を、縦軸に被験者の全試行の感受性の分布を示している。

全ての乗車条件に対してほとんど酔わない被験者（感受性が 0.02 未満）を感受性 N (No) として解析から除外し、残りの試行数がほぼ 3 等分になるように被験者を感受性によって感受性 L (Low)、感受性 M (Middle)、感受性 H (High) の 3 つのグループに分類した。3 つのグループの境界線は 0.5 と 1.8（図 4-16 下図に点線で示す）とした。4 乗車条件についてそれぞれの感受性に分類した試行数を表 4-4 に示す。各乗車条件では、3 つの感受性のグループの比が同一にはならなかったため、以降の解析では感受性 L と M と H の比が 49 : 42 : 51（N を除く全試行数の比）となるように、各乗車条件・各時刻の評定値の分布に重み付けを行い車酔い感受性の偏りを補正した。

a) 被験者の感受性の分布



b) 被験者の全試行数の感受性の分布

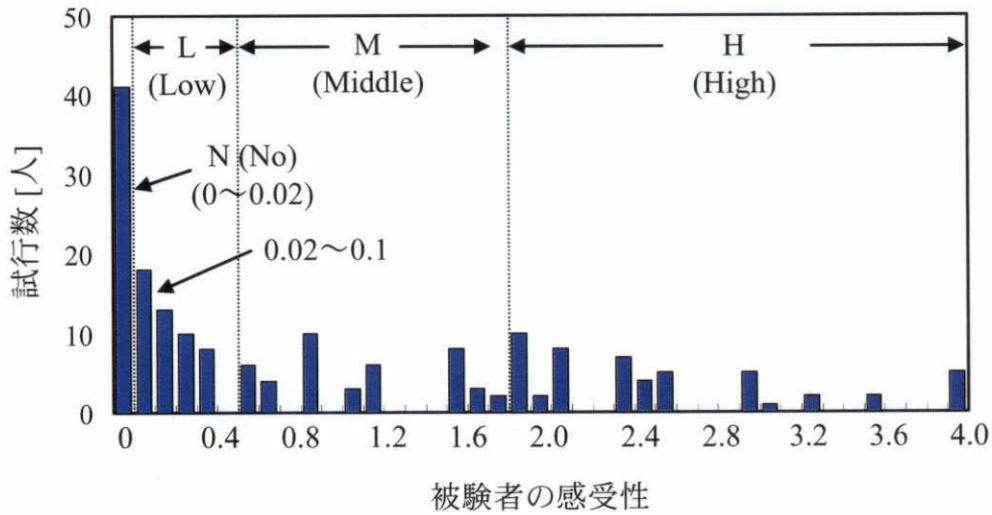


図 4-16 車酔いの感受性の分布

表 4-4 被験者の感受性によって分類された試行数

乗車条件	感受性 N	感受性 L	感受性 M	感受性 H
対策案 B2	10	14	9	13
対策案 B3	11	12	13	11
TV 視聴	9	12	11	14
普通乗車	11	11	9	13
合計	41	49	42	51

4.5.2.3. 動揺病不快感の評定尺度から距離尺度への変換

2.3.3 章の「動揺病不快感の評定尺度から距離尺度への変換」と同一の手法を使用した。図 4-17 に、評定尺度と各カテゴリーの不快感強度の平均値を距離尺度で表したときの関係を示す。本実験では、評定尺度の 0~1 の距離が最も大きかった。評定尺度 1~8 では距離尺度とほぼ線形の関係があった。

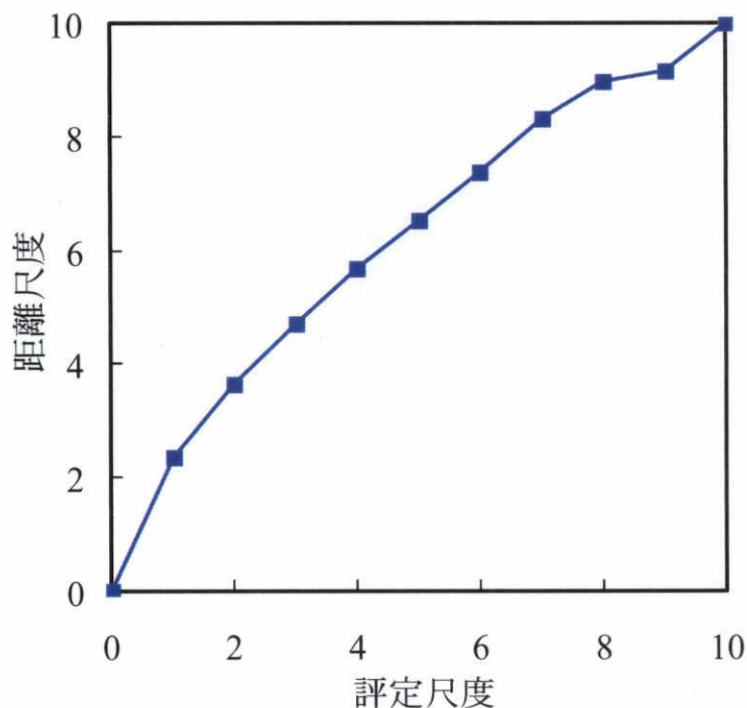


図 4-17 評定尺度と距離尺度の関係

4.5.2.4. 動揺病不快感の増強

図 4-18 は、4 乗車条件における動揺病不快感の平均強度の時間推移を示す。図のそれぞれの点は、乗車時間の経過 1 分毎の平均強度を示す。4 条件とも、動揺病不快感は 20 分間の乗車時間にほぼ比例して増強した。対策案 B2 では、TV 視聴条件に比べて動揺病不快感が顕著に改善された。対策案 B3 では、乗車 20 分目を除き TV 視聴条件に比べて動揺病不快感が改善された。

各乗車条件での回帰直線の傾きと各対策の改善率を表 4-5 に示す。対策案 B2 の改善率は 67.1%と高く、対策案 B3 の改善率は 21.3%であった。

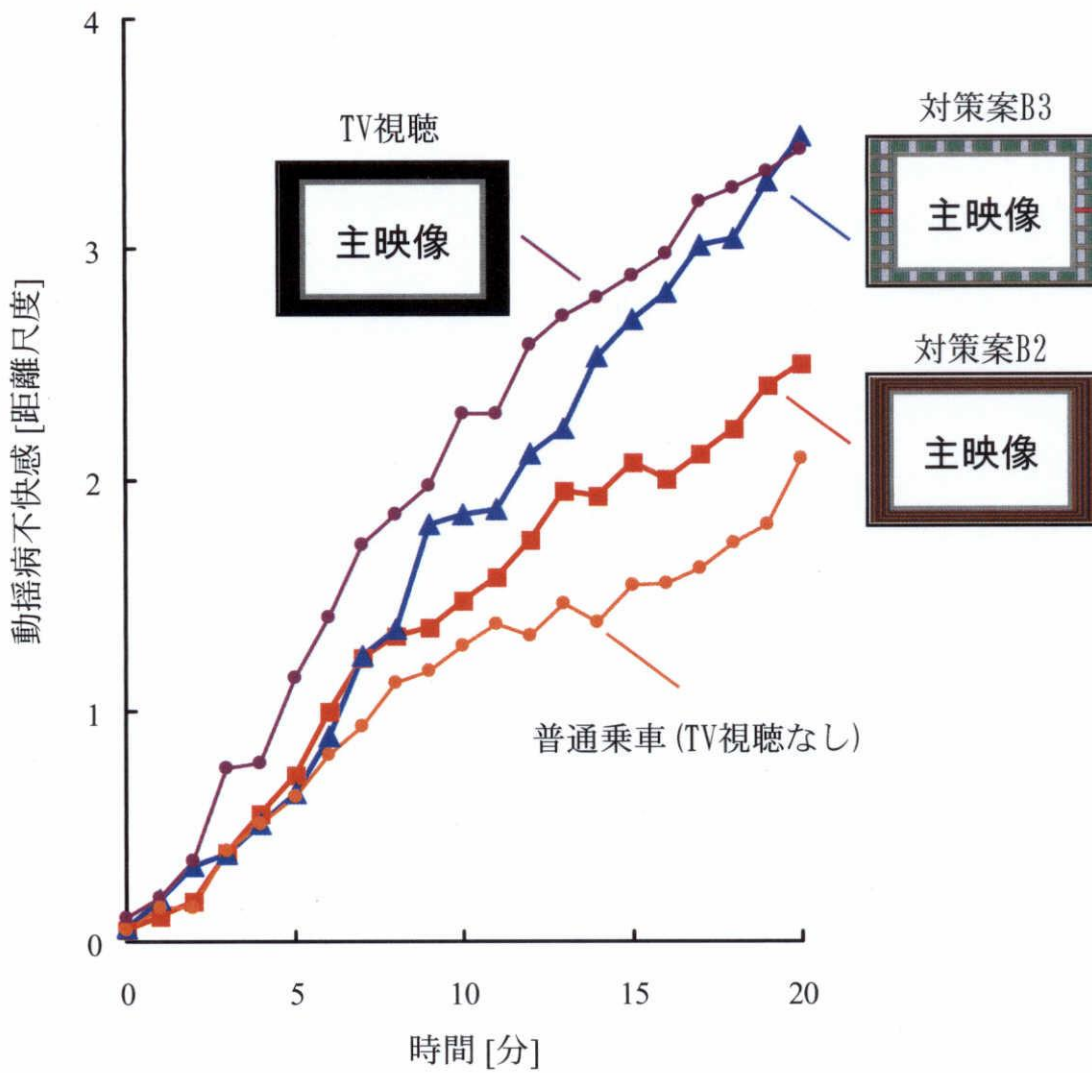


図 4-18 動揺病不快感の平均強度の時間推移

表 4-5 各乗車条件での回帰直線の傾きと改善率

乗車条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
対策案 B2	0.134	67.1
対策案 B3	0.175	21.3
TV 視聴	0.193	—
普通乗車	0.106	—

4.6. 考察

2章で述べたように、乗車中にTV視聴を行うと、視覚からはTVに映された映像世界での動きもしくは静止の情報が知覚されるため、平衡感覚によって知覚される運動感覚情報との矛盾が増大し車酔いが増強した。本章では、加減速に対する対策案を3種類考案し、実車実験によりその有効性を検証した。いずれの対策でも、視覚から車の加減速に一致した運動感覚を誘起し、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を小さくすることにより、車酔い低減効果を得ることが示された。特に対策案B2では、改善率が67.1%と顕著な車酔い低減効果が得られた。

通常、前後方向のリニアベクションは放射状の視運動刺激によって誘起されることが報告されている[3-8]。対策案B2では枠状の背景映像を前後移動することで放射状の視運動刺激を与えたことになり、このためリニアベクションが効果的に誘起され、顕著な車酔い低減効果が得られたと考えられる。

前後方向のリニアベクションは、主に中心視に対する視運動刺激によって誘起されることが報告されている。Andersenら[3-8]は水平視角15度のみの視運動刺激でもリニアベクションが発生することを示した。またAndersen & Braunstein[4-3]は、水平視角を7.5度、10.6度、15度、21.2度に変えて視運動刺激を与え、いずれも同程度リニアベクションが発生することを示した。これに対して、Telford & Frost[4-4]はディスプレイの注視点中心の領域（直径6度、23度、54度の円）をマスクし、視運動刺激をそのマスク領域の周辺のみ与えたところ、いずれも同程度の強度のリニアベクションが発生することを示した。さらに、マスク領域の周辺の視運動刺激を与える領域を同心円状にして、視運動刺激を与える面積に制限を加えても、マスク領域の直径が60度程度までは、同程度の強度のリニアベクションが発生することを報告した。すなわち、前後方向のリニアベクションの誘起に中心視に対する視運動刺激が必ずしも必要では無いことを示した。本研究で使用したディスプレイの水平視角は23度であり、中央部には主映像が表示され視運動刺激は中心視野の水平視角約19度の領域がマスクされていることになるが、いずれの対策でも背景映像の視運動刺激により平衡感覚との矛盾が小さい視覚誘導自己運動感覚を誘起することができ、その結果顕著な車酔い低減効果が得られたと考えられる。

対策案B3では加速度と重力加速度の合成ベクトルの方向が傾斜感覚と知覚されることを応用し、加速度に応じて背景映像から傾斜感覚を与えることで、視覚から加速度感覚を与えた。対策案B3では、ストライプ状のテクスチャを背景と感じられるように主映像の周辺に背景映像として配置したが、改善率が21.3%と対策案B2よりも低かった。車の加減速の特性上、加速時よりも減速時に加速度が大きくなる傾向がある[1-1]。あらかじめ予備実

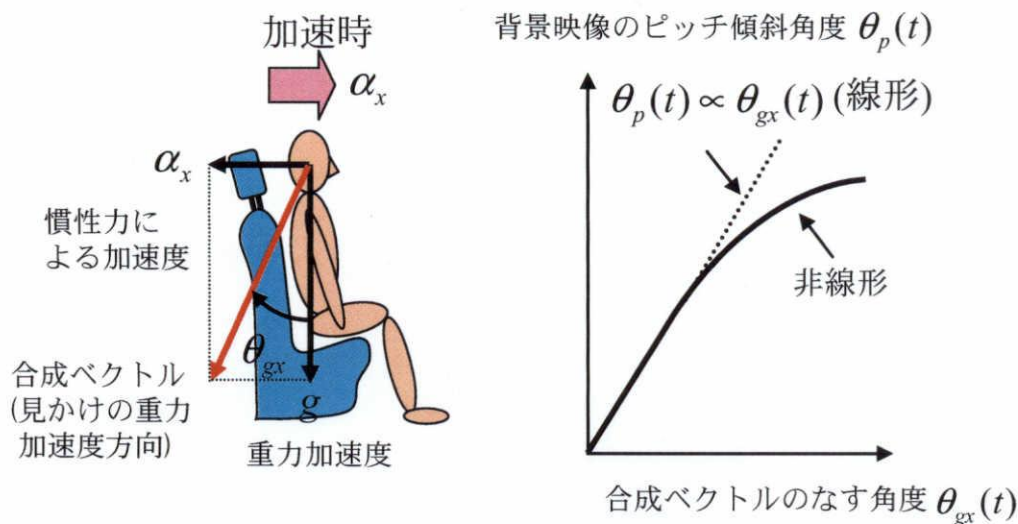


図4-19 背景映像のピッチ傾斜角度と、加減速により発生
する合成ベクトルのなす角度の非線形関係

験を行い背景映像のピッチ方向の傾斜角度を定める比例係数を決定したが、被験者は減速時に比例係数を調整する傾向が強かった。このため、加速時には十分な傾斜感覚を与えることができなかった可能性がある。そこで、背景映像のピッチ方向の傾斜角度 $\theta_p(t)$ と、加減速により発生する合成ベクトル（見かけの重力加速度方向）が重力加速度方向となす角度 $\theta_{gx}(t)$ との関係を、線形（式 4-6 参照）ではなく例えば図 4-19 に示す様に非線形に変更し、大きな加速度が発生する場合に傾斜角度を抑制するようにすれば、車酔いの改善効果が高くなると考えられる。なお、同様のことが背景映像の上下移動角度 $\theta_s(t)$ （式 4-7 参照）にも言える。また、アクセル・ブレーキの踏み込み時には急に加速度が比較的大きく発生した。このため、対策案の背景映像が急激に傾斜して滑らかな動きとならなかったために、徐々に発生する加減速感が十分に与えられなかった可能性がある。本対策案では、背景映像のなめらかな動きを実現するために、車から得られる加速度にローパスフィルタ処理を施して高周波成分を落としたが、充分ではなかった可能性がある。ローパスフィルタによる時間遅れを考慮した上で、ローパスフィルタ処理の最適化を行えば背景映像の動きがなめらになり、これにより十分な傾斜感覚が得られ車酔いが改善されることが考えられる。なお、走行中には道路の凸凹等による予期せぬノイズが発生するが、ローパスフィルタ処理を施すことにより、車の前後方向の加速度以外で背景映像が傾斜してしまうことを抑制する効果もある。また、視覚誘導自己運動感覚は、視運動刺激の輝度にほぼ比例して増強して誘起することが報告されている[4-5]。対策案 B3 の背景映像は輝度が強すぎるため、視運動刺激として強すぎた可能性もあった。そこで 5 章の加減速と右左折に対する複合対策案では、対策案 B3 の背景映像の輝度を落としたデザインを使用することとする。なお、5 章で複合

対策の有効性を報告するが、対策案 B3 は右左折時に対する対策と組み合わせやすく、統合した運動感覚を与えることにより車酔いを低減しやすいというメリットがあった。

一方、実験その 1 で検証した対策案 B1 では、車酔い低減効果が上がらなかった。近江ら [4-6] は、放射状の視運動刺激の背景に静止物を提示すると視覚誘導自己運動感覚が抑制されることを報告している。対策案 B1 では、図 4-3 に示した仮想空間の様にトンネル状に周辺映像を配置したために、周辺映像が主映像の手前に存在し、主映像が背景であると認識された。更に主映像が静止物であると認識された場合には、視覚誘導自己運動感覚の誘起が抑制され、このため車酔い低減対策の効果が上がらなかった可能性がある。

図 4-12 の比例係数の分布に示すように、平衡感覚と一致する自己運動感覚を誘導する視運動刺激の動きの大きさには個人差が大きい。本研究では、予備実験の結果を基に全被験者で一定の比例係数を用いて、各対策案の車酔い低減効果を調べた。被験者毎に比例係数を最適化した上で対策案を適用すれば、車酔い低減効果が更に改善されると考えられる。

本実験で使用した直線が多いコース（図 4-13）では、減速時の最大加速度が $4\sim 5$ [m/s²] と右左折の多いコース（図 2-2）で発生した減速時の最大加速度（ 3.5 [m/s²]）に比べて、比較的大きかった。加減速により発生した TV 視聴条件の不快感強度は、20 分経過後（実験終了時）に約 3.5（図 4-18）であったが、右左折時に発生した TV 視聴条件の不快感強度は、21 分経過後（実験終了時）に約 4.3（図 3-17）であった。Griffin ら [2-7] [4-7] は、被験者に前後方向または左右方向に 1[Hz]以下の動揺を与え動揺病を発生させたが、動揺病の発生において与えた動揺方向による有意差が無かったことを報告している。これに対して、本研究では直線道路の加減速時に発生する車酔いは、カーブで発生する車酔いより小さいことが示唆された。TV 視聴時に直線道路を走行し加減速を行った場合には、視覚からは車の加減速の情報が得られずに視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾が発生し、車酔いが生じる。一方 TV 視聴時に右左折を行う場合には一般にアクセル・ブレーキ操作による加減速も伴うが、視覚からは車の回転の情報と加減速の情報の両方が得られない。このために、右左折時に発生した視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾が加減速時に発生した感覚情報の矛盾よりも大きくなり、車酔いが大きくなったと考えられる。

3 章で右左折時に発生する車酔いを低減する対策について検証し、本章で加減速時に発生する車酔いを低減する対策について検証したところ、それぞれ顕著な車酔い低減効果が得られた。一般的に道路には右左折と加減速が混在するため、右左折と加減速に対応した複合対策の車酔い低減効果について次章で検証する。

5. 右左折時および加減速時に発生する車酔いに対する対策

5.1. 目的

3章では、右左折時に発生する車酔いに焦点を当てて車酔い低減対策を考案し、その有効性を検証した。視覚から車のYaw回転に一致した視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）を誘起し、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を低減させ、その結果車酔いを70%以上改善することが確認できた。

4章では、加減速時に発生する車酔いに焦点を当てて車酔い低減対策を考案し、その有効性を検証した。視覚から車の加減速に一致した視覚誘導自己運動感覚（リニアベクション）を誘起し、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を低減させ、その結果車酔いを67.1%改善することが確認できた。また、加速度と重力加速度の合成ベクトルの方向が傾斜感覚と知覚されることを応用し、加速度に応じて背景映像から傾斜感覚を与えたところ、車酔いを21.3%改善することができた。

本章の目的は、右左折および加減速が混在する場合に発症する車酔いを低減することである。TV視聴時の車酔いを低減するために、まず車酔い低減対策の効果の検証を行う基礎実験を行い（以降、実験その1と記す）、その後2種類の車酔い低減対策の有効性を実車実験で検証した（以降、実験その2と記す）。

本章における感覚矛盾説[1-2]に基づく車酔い低減対策の基本的な考え方は、3章の右左折時に発生する車酔いに対する対策、4章の加減速時に発生する車酔いに対する対策と同様である。すなわちTV視聴と同時に視覚から車の動きを運動感覚情報として与えることで、視覚と平衡感覚間の感覚情報の矛盾を減少させ、その結果車酔いを低減させる、というものである。なお半径の大きな道路を走行する際には、車のYaw角速度が小さくても大きな遠心加速度が発生する。そこで3章の右左折時の対策、4章の加減速時の対策に、更に遠心加速度の対策を加えた複合対策について有効性の検証を行った。

対策案1（対策案C2）では、前後加速度に比例した速度で背景映像を前後移動しリニアベクションを発生させ、Yaw角速度に比例した角度で主映像自体を回転するとともに、遠心加速度に比例した速度で別の背景映像を左右に移動して、回転感覚を与えた。

対策案2（対策案C3）では一枚の背景映像を用い、加速度に応じて背景映像をピッチ方向に傾斜させて加減速感覚を与え、Yaw角速度に比例した速度で背景映像を左右に移動させて回転感覚を与えた。更に遠心加速度と重力加速度の合成ベクトル方向がロール方向の傾斜感覚と知覚されることを応用し、遠心加速度に応じて背景映像をロール方向に傾けて、視覚から傾斜感覚を与えた。

5.2. 対策案

5.2.1. 対策案の基本的な考え方

TVを視聴しながら、視覚から車の動きを運動感覚として与えることにより、視覚と平衡感覚間の感覚矛盾を減少させて車酔いを低減することを対策のコンセプトとした。右左折時には、視覚から車のYaw回転の情報を与える映像、すなわち自分が回転しているような視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）を与える映像をTV映像に付加、あるいは主映像自体を回転し、平衡感覚との感覚矛盾を減少させることとした。また加減速時には、視覚から車の加減速の情報を与える映像、すなわち自分が進行方向に加減速しているような視覚誘導自己運動感覚（リニアベクション）を与える映像、あるいはピッチ方向の傾斜感覚を与える映像をTV映像に付加し、平衡感覚との感覚矛盾を減少させることとした。さらに半径の大きな道路を走行する際には、車のYaw角速度が小さくても大きな遠心加速度が発生するため、自分が遠心力を感じながら回転しているような視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）を与える映像、あるいはロール方向の傾斜感覚を与える映像をTV映像に付加し、平衡感覚との感覚矛盾を減少させることとした。

サーキュラーベクションは、映像に奥行き感がある時主に背景と感じられる映像の動きによって発生する[3-3]。TV視聴時の車酔い低減対策として、図5-1に示すようにTV映像（主映像）をディスプレイ中央部に表示し、TV映像の周りに周辺映像（実験その1）あるいは背景映像（実験その2）を配置し、車のYaw回転および加減速の情報を与えることにした。また主映像と周辺映像・背景映像との境界を分かりやすくするために主映像の周辺に枠を描画した。

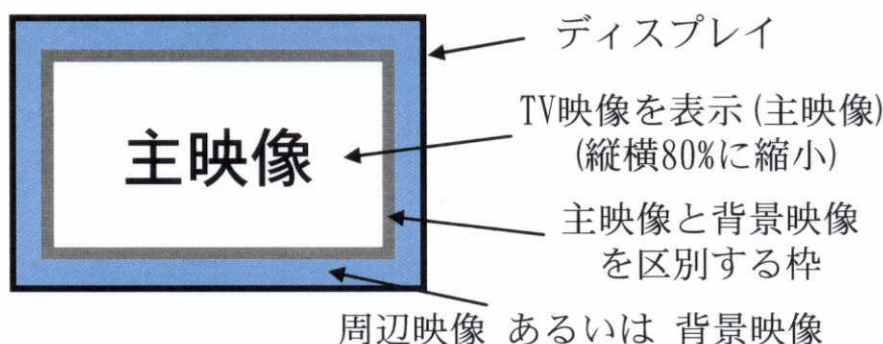


図5-1 TV映像（主映像）、背景映像、枠の説明図

5.2.2. 対策案（実験その1）

対策案は、1) 前後加速度に比例した速度で周辺映像を前後移動しリニアベクションを発生させ、2) Yaw角速度に比例した角度で主映像自体を回転すると共に、3) 遠心加速度に比

例した速度で周辺映像の上下部分を左右に移動して回転感覚を与える、という 3 種類の対策の複合である。

白黒格子状のテクスチャを周辺映像として主映像の上下左右の 4 面にトンネル状に配置した (図 5-2。以下、対策案 C1 と記す)。車の前後加速度に応じた速度で周辺映像を前後移動して、自分が前後に移動しているという視覚誘導自己運動感覚 (リニアベクション) を発生させた。加速時

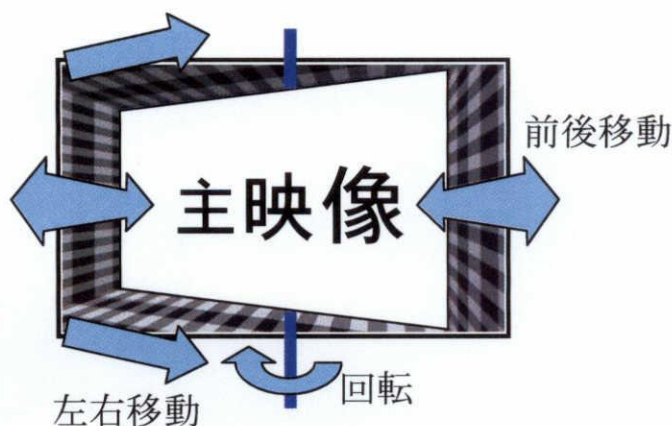


図 5-2 対策案 C1 の概要図 (左折時)

には周辺映像を手前側に移動して前向きのリニアベクションを、減速時には周辺映像を逆方向に移動して後ろ向きのリニアベクションを発生させた。加減速時の周辺映像の前後の移動は、加減速時の対策と同様に 4.2.2 章の式(4-1)、式(4-2)で与えた。比例係数も同一の値とした。

対策案では、図 5-3 の様に仮想空間を考えてトンネル状に周辺映像を配置し、カメラから見える範囲 (撮像画角内) をディスプレイに表示した。青い部分が主映像に相当し、周辺映像の黄色い部分がディスプレイに表示される。垂直方向の撮像画角は 60 度、水平方向の撮像画角 θ_1 は 73.8 度であった。仮想カメラから主映像までの距離を単位 (1[L]) とした。

車の Yaw 回転の角速度 $\omega(t)$ [deg/s] (左折時、すなわち反時計回りを正) に合わせて TV 映像を台形化 (横方向に短縮、左右辺を伸長・短縮) することにより、あたかも映像を映写している仮想スクリーンが、横方向の中心を軸として回転角 $\theta_{yawC0}(t)$ [deg] の水平回転をするかの様に表示した (仮想スクリーンを上から見て反時計回りを正)。仮想カメラを $-\theta_{yawC0}(t)$ 回転することで (図 5-3。仮想スクリーンと仮想カメラの回転方向は逆)、主映像とトンネル状の周辺映像が回転するようにした。回転角 $\theta_{yawC0}(t)$ は、車の Yaw 回転の角速度 $\omega(t)$ に応じて式 (5-1) で与えた。主映像とトンネル状の周辺映像が回転しすぎないように、回転角度に θ_{max} という上限をつけた。 θ_{max} は 27 度とした。式 (5-1) の様な非線形な処理とし、Yaw 回転の角速度 $\omega(t)$ が微小なときは主映像と周辺映像の回転が極めて小さくなるようにした。

$$\theta_{yawC0}(t) = \begin{cases} -\theta_{max} \times (1 - e^{-\frac{\omega(t)}{k_{yaw\theta C0}}})^3 : (\omega \geq 0) \\ \theta_{max} \times (1 - e^{-\frac{\omega(t)}{k_{yaw\theta C0}}})^3 : (\omega < 0) \end{cases} \quad (k_{yaw\theta C0} : \text{比例係数}) \quad (5-1)$$

回転方向は車の Yaw 回転と逆方向とし、車が左方向に曲がる場合は仮想スクリーンを上方向から見て時計回りに、車が右方向に曲がる場合は仮想スクリーンを反時計回りに回転した。式(5-1)の比例係数 $k_{yaw\theta C0}$ は、予備実験を参考に 11.0 に決定した。

半径 R の円周上を車が Yaw 角速度 ω で走行すると、遠心加速度 α_y は式(5-2)で表せる(図 5-4)。すなわち半径の大きな道路を走行する際には、車の Yaw 角速度が小さくても大きな遠心加速度が発生する。

$$\alpha_y = R \times \omega^2 \quad (5-2)$$

そこで遠心加速度の対策として、自分が遠心力を感じながら回転しているような視覚誘導自己運動感覚(サーキュラーベクション)を与えた。車の遠心方向の加速度 $\alpha_y(t)$ [deg/s] (右折時に発生する遠心加速度を正) を計測し、その遠心加速度に比例した速さ $v_{\alpha y C0}(t)$ [L/s] (右に移動を正) で式(5-3)の様に周辺映像の上下部分のみを左右に動かした。

$$v_{\alpha y C0}(t) = -k_{\alpha y C0} \times \alpha_y(t) \quad (k_{\alpha y C0} : \text{比例係数}) \quad (5-3)$$

周辺映像の移動方向は車の Yaw 回転と逆方向であり、車が左方向に曲がる場合は周辺映像を右方向に、車が右方向に曲がる場合は周辺映像を左に移動した。式(5-3)の比例係数 $k_{\alpha y C0}$ は、予備実験を参考に 0.12 に決定した。

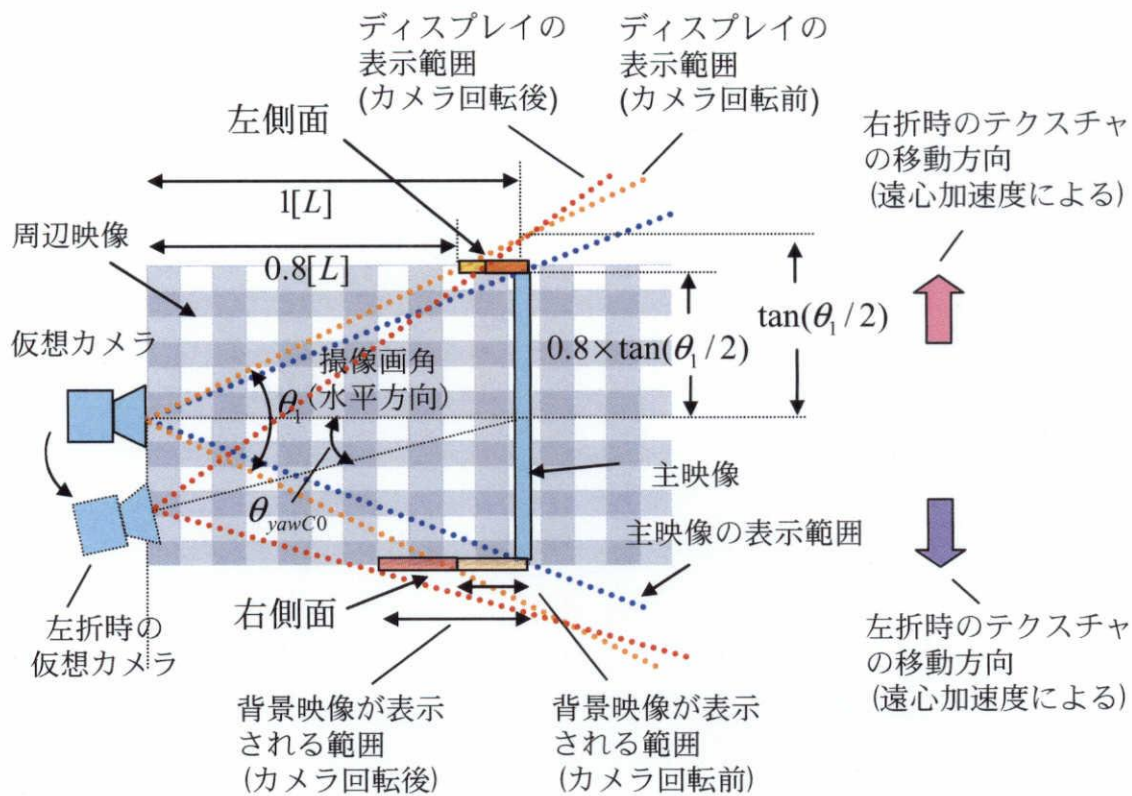


図 5-3 対策案の仮想空間 (上から見た図)

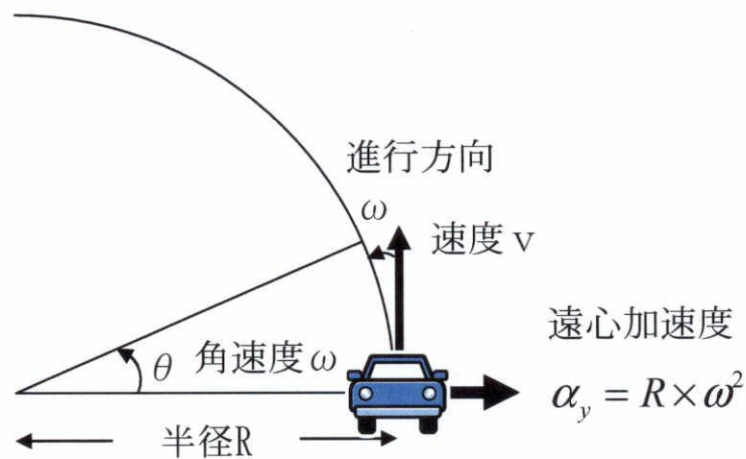


図 5-4 遠心加速度の説明図

5.2.3. 対策案 1 (実験その 2)

対策案 1 は、1) 前後加速度に比例した速度で背景映像を前後移動しリニアベクションを発生させ、2) Yaw 角速度に比例した角度で主映像自体を回転すると共に、3) 遠心加速度に比例した速度で別の背景映像を左右に移動して回転感覚を与える、という 3 種類の対策の

複合である。

4.2.3 章の対策案 B2 と同様に、車の前後加速度に比例した速度で背景映像を前後移動して、自分が前後に移動しているという視覚誘導自己運動感覚（リニアベクション）を発生させた（図 5-5。以下、対策案 C2 と記す）。加速時には背景映像（枠状のテクスチャ）を手前方向に移動し前向きのリニアベクションを、減速時には背景映像

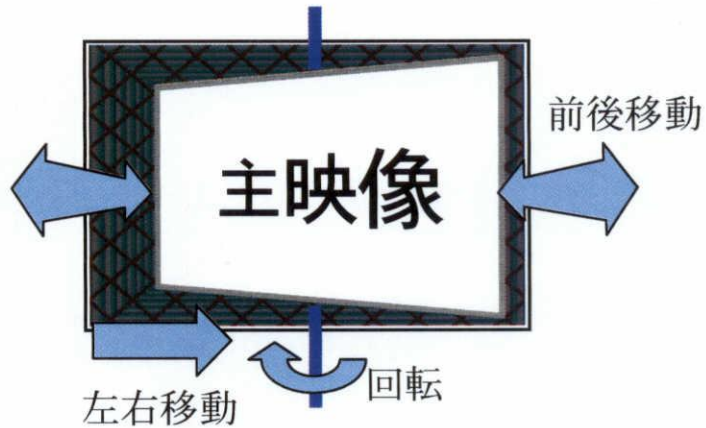


図 5-5 対策案 C2 の概要図(左折時)

を逆方向に移動して後ろ向きのリニアベクションを発生させた。

対策案では、図 5-6 の様に仮想空間を考えて遠心加速度対策用の網目状のテクスチャ（後述）と枠状のテクスチャ 6 枚の 2 種類のテクスチャを背景映像として配置し、カメラから見える範囲（撮像画角内）をディスプレイに表示した。車の静止時には枠状のテクスチャが 4 枚表示されるが、走行中の右左折時には主映像を映写した仮想スクリーンが回転（後述）し、このため背景映像の表示される面積が変わるため、枠状のテクスチャが 6 枚表示されるようにした。青い部分が主映像に相当し、主映像の背景に網目状のテクスチャ、枠状のテクスチャがこの順番に背景映像として表示される。垂直方向の撮像画角は 60 度、水平方向の撮像画角 θ_1 は 73.8 度であった。仮想カメラから主映像までの距離を単位 (1[L]) とし、枠状の背景映像を前後に移動した。加減速時の背景映像の前後の移動は、対策案 B2 と同様に式(4-3)で与えた。比例係数も同一の値とした。なお枠状の背景映像の色は、対策案 B2 で用いた背景映像の色から変更した。

Yaw 角速度に比例した角度で主映像を映写している仮想スクリーン自体を回転し、回転感覚を与えた。車の Yaw 角速度を $\omega(t)[\text{deg}/s]$ （左折時、すなわち反時計回りを正）、仮想スクリーンの回転角度を $\theta_{\text{yaw}C1}(t)[\text{deg}]$ （仮想スクリーンを上から見て反時計回りを正）とすると、仮想スクリーンの回転角度 $\theta_{\text{yaw}C1}(t)$ は車の Yaw 角速度 $\omega(t)$ に比例するように式 (5-4) で与えた。

$$\theta_{\text{yaw}C1}(t) = -k_{\text{yaw}\theta C1} \times \omega(t) \quad (k_{\text{yaw}\theta C1} : \text{比例係数}) \quad (5-4)$$

回転方向は車の Yaw 回転と逆方向とし、車が左方向に曲がる場合は仮想スクリーンを上方向から見て時計回りに、車が右方向に曲がる場合は仮想スクリーンを反時計回りに回転し

た。対策案 A2 の式(3-3)の比例係数 $k_{yaw\theta}$ は実験室内の予備実験で算出したが、本対策では後述する実車による予備実験を参考に 0.4118 に決定した。

遠心加速度の対策として、自分が遠心力を感じながら回転しているような視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）を与えた。なお前後加速度の対策とは別の網目状の背景映像を使用した。車の遠心方向の加速度 $\alpha_y(t)[m/s^2]$ （右折時に発生する遠心加速度を正）を計測し、その遠心加速度に比例した速さ $v_{\alpha y C1}(t)[L/s]$ （右に移動を正）で式(5-5)の様に網目状の背景映像を左右に動かした。

$$v_{\alpha y C1}(t) = -k_{\alpha y C1} \times \alpha_y(t) \quad (k_{\alpha y C1} : \text{比例係数}) \quad (5-5)$$

背景映像の移動方向は車の Yaw 回転と逆方向であり、車が左方向に曲がる場合は背景映像を右方向に、車が右方向に曲がる場合は背景映像を左に移動した。式(5-5)の比例係数 $k_{\alpha y C1}$ は、後述する予備実験を参考に 0.186 に決定した。

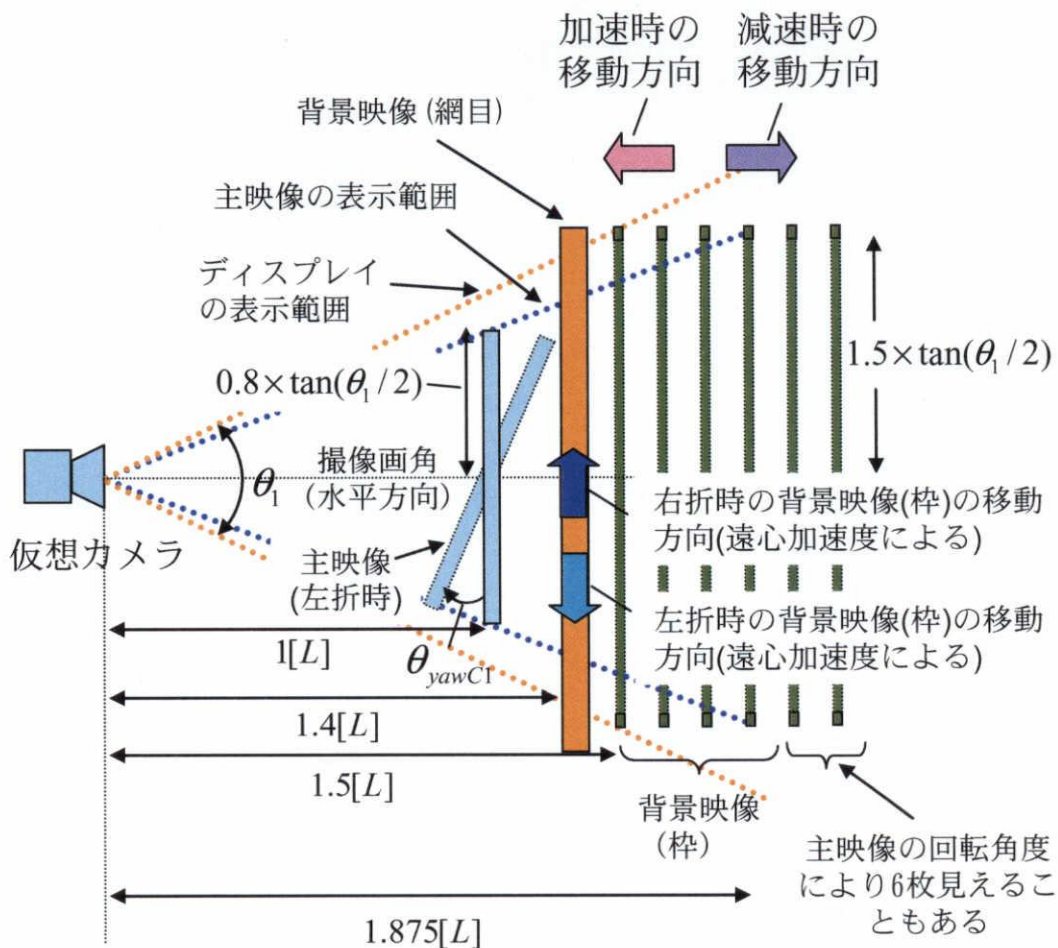


図 5-6 対策案 C2 の仮想空間（上から見た図）

5.2.4. 対策案 2 (実験その 2)

対策案 2 は一枚の背景映像を用い、1) 加速度に応じて背景映像をピッチ方向に傾斜させて加減速感覚を与え、2) Yaw 角速度に比例した速度で背景映像を左右に移動させて回転感覚を与え、3) 遠心加速度に応じて背景映像をロール方向に傾けて傾斜感覚を与える、という 3 種類の対策の複合である。

加減速が継続すると、加速度と重力加速度の合成ベクトルの方向が見かけの重力加速度の方向と感じられ、このためピッチ方向の傾斜感覚が発生していると知覚される[4-1]。そこで 4.2.4 章の対策案 B3 と同様に、加速度に応じて背景映像をピッチ方向に傾斜させると共に上下移動し、視覚から傾斜感覚を与えて、これにより加減速感覚を与えた(図 5-7。以下、対策案 C3 と記す)。加速時には背景映像の上側を奥方向・下側を手前方向に回転しながら下向きに移動し、逆に減速時には背景映像の上側を手前方向・下側を奥方向に回転しながら上向きに移動した。加減速時の背景映像のピッチ傾斜角度を $\theta_p(t)[deg]$ (車の進行方向に対して下向きに回転を正)、上下移動角度 $\theta_s(t)[deg]$ (車の進行方向に対して下向きに回転を正) は、対策案 B3 と同様に式(4-6)、式(4-7)で与えた。比例係数も同一の値とした。

右左折時の対策として、視覚から車の Yaw 回転の情報を、すなわち自分が回転しているような視覚誘導自己運動感覚(サーキュラーベクション)を与えた。

対策案では、図 5-8 の様に仮想

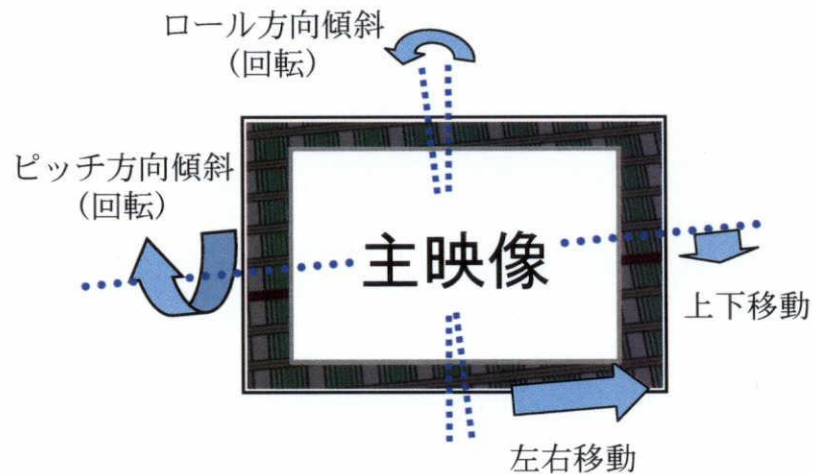


図 5-7 対策案 C3 の概要図(左折および加速時)

空間を考えて、対策案 B3 で用いた背景映像と同一形状の背景映像を主映像の背景に配置し、カメラから見える範囲(撮像画角内)をディスプレイに表示した。ただし対策案 B3 で用いた背景映像は輝度が強く、このため視運動刺激として強すぎた可能性があったため、対策案 C3 では背景映像の輝度を落とした。垂直方向の撮像画角は 60 度、水平方向の撮像画角 θ_1 は 73.8 度であった。仮想カメラから主映像までの距離を単位(1[L])とした。車の Yaw 回転の角速度 $\omega(t)[deg/s]$ (左折時、すなわち反時計回りを正) を計測し、その角速度に比

例した速さ $v_{yawC2}(t)[L/s]$ (左に移動を正) で式(5-6)の様に背景映像を左右に動かした。

$$v_{yawC2}(t) = -k_{yawvC2} \times \omega(t) \quad (k_{yawvC2} : \text{比例係数}) \quad (5-6)$$

背景映像の移動方向は車の Yaw 回転と逆方向であり、車が左方向に曲がる場合は背景映像を右方向に、車が右方向に曲がる場合は背景映像を左に移動した。式(5-6)の比例係数 k_{yawvC2} は、後述する予備実験を参考に 0.02887 に決定した。

車がカーブをする際には、遠心加速度と重力加速度の合成ベクトルの方向が見かけの重力加速度の方向と感じられ、このためロール方向の傾斜感覚が発生していると知覚される [4-1] (図 5-9)。そこで遠心加速度に応じて背景映像をロール方向に傾斜させた。車が左に曲がる際には背景映像を反時計回りに回転し、右に曲がる際には背景映像を時計回りに回転して、ロール方向の傾斜感覚を与えた (図 5-7、図 5-10)。図 5-9 の様に、車の遠心加速度 $\alpha_y(t)[m/s^2]$ (車の右折時に発生する遠心加速度を正) により発生する合成ベクトルと重力加速度方向のなす角度 $\theta_{gy}(t)[deg]$ の関係式は式(5-7)、すなわち式(5-8)で表される。 $\theta_{gy}(t)$ に比例させて、背景映像をロール方向に傾斜させた。

$$\tan \theta_{gy}(t) = \alpha_y(t) / g \quad (5-7)$$

$$\theta_{gy}(t) = \tan^{-1}(\alpha_y(t) / g) \quad (5-8)$$

背景映像のロール傾斜角度を $\theta_r(t)[deg]$ (車の進行方向に対して時計周りを正) とすると、その関係式は式(5-9)で表される。式(5-9)の比例係数は後述する実車による予備実験を参考に $k_{rc2}=0.3786$ に決定した。

$$\theta_r(t) = k_{rc2} \times \tan^{-1}(\alpha_y(t) / g) \quad (k_{rc2} : \text{比例係数}) \quad (5-9)$$

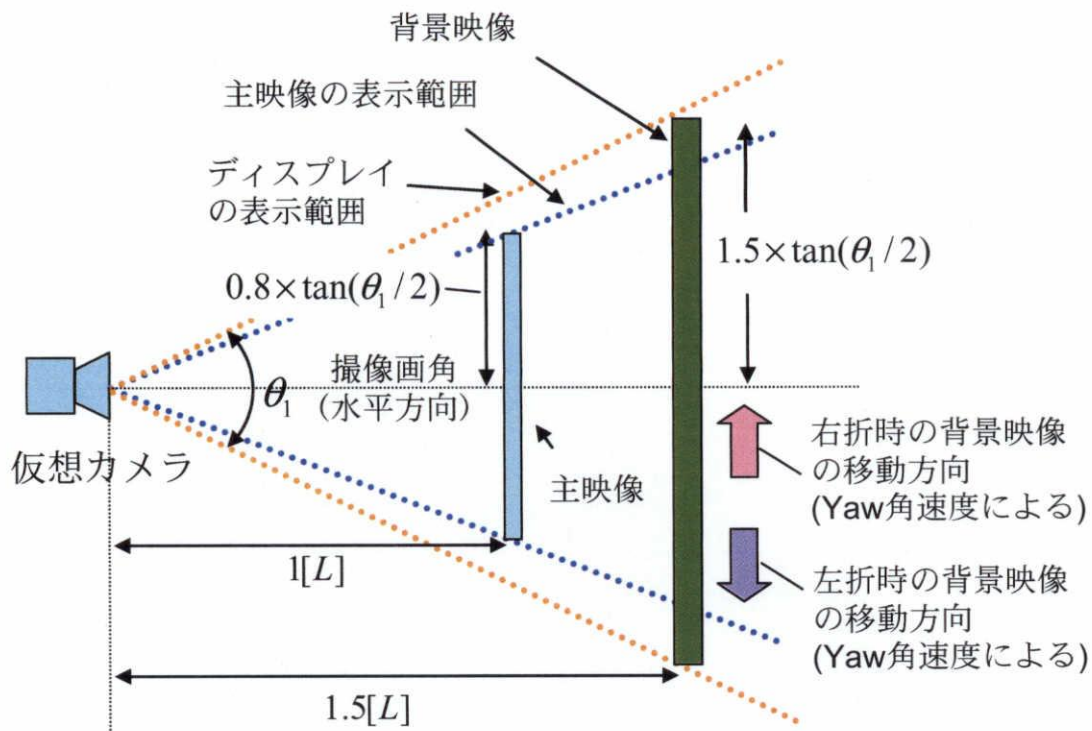


図 5-8 対策案 C3 の仮想空間 (上から見た図)

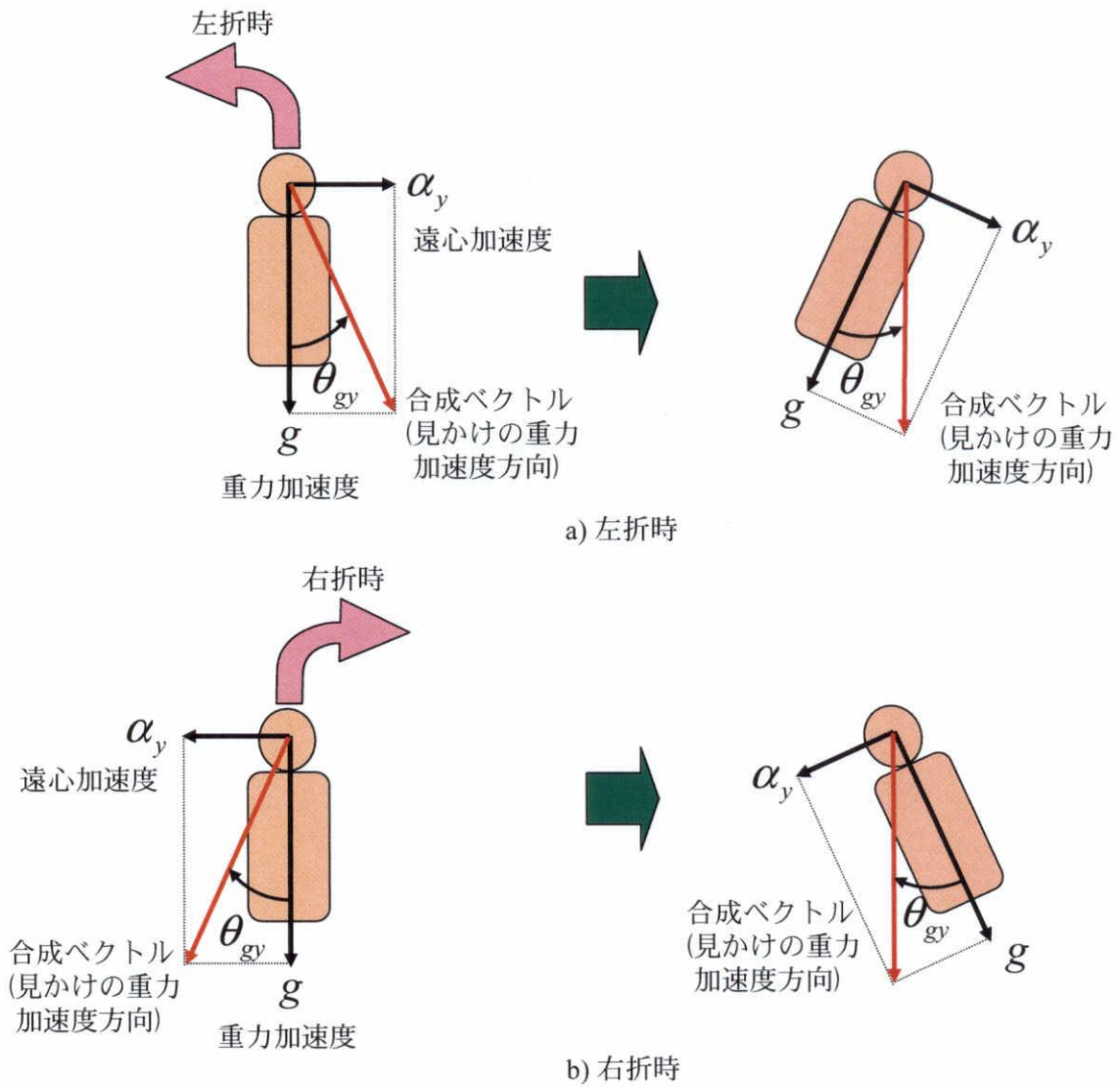
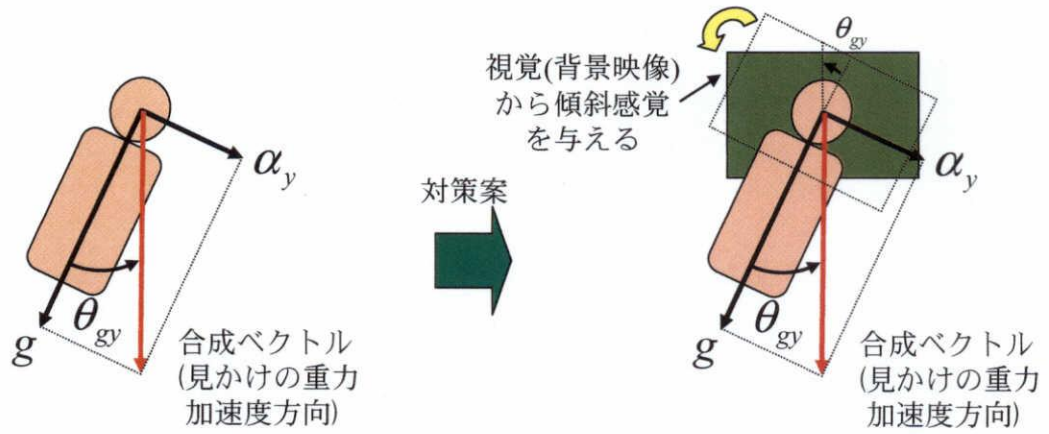
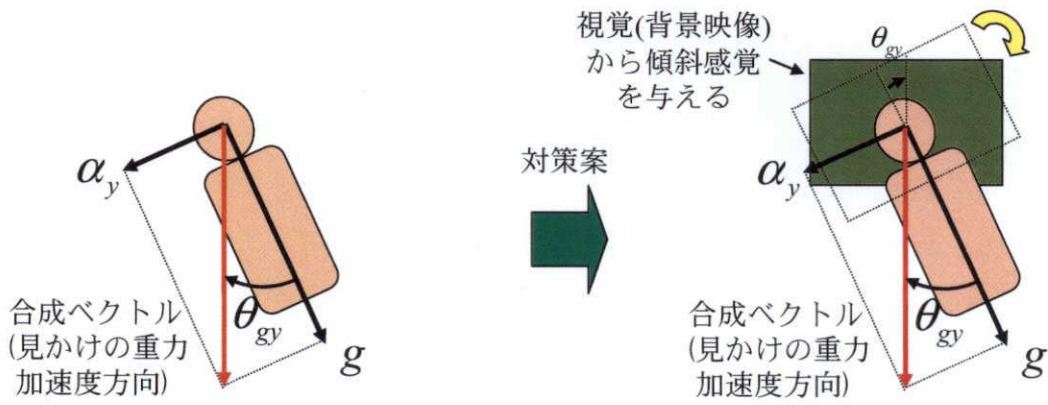


図 5-9 右左折時に知覚するロール方向の傾斜感覚



a) 左折時



b) 右折時

図 5-10 ロール方向の傾斜感覚の与え方の考え方

5.3. 予備実験

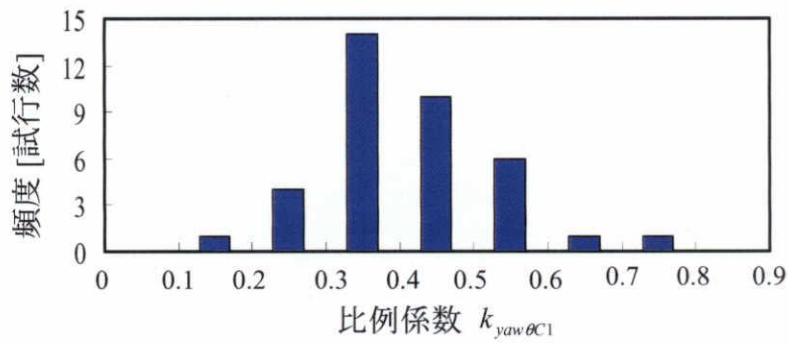
上記の対策案では、視運動刺激によって生じる視覚誘導自己運動感覚を、平衡感覚で知覚される車の加減速の感覚、Yaw 回転の感覚、遠心加速度の感覚に一致させることが重要である。適切な映像の動きを求めるために、実車走行実験に先立って実車による予備実験を実施し、式(5-4)、式(5-5)、式(5-6)、式(5-9)の比例係数 $k_{yaw\theta C1}$ 、 $k_{\alpha v C1}$ 、 $k_{yawv C2}$ 、 $k_{r C2}$ を定めた。なお、それぞれの対策において加減速対策に関する比例係数は、4章の「加減速時に発生する車酔いに対する対策」の予備実験で算出した値と同一とした。

5.3.1. 実験方法

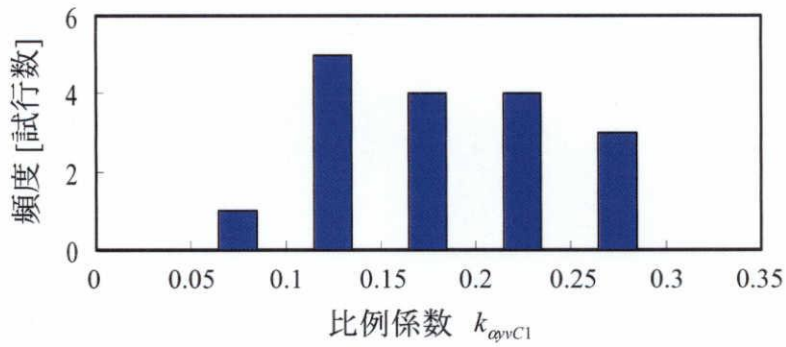
20歳前後の健康な男女8名を被験者として実験を行った。信号機が無くカーブが多い道路(5.4.2.1.3章に後述する実車走行実験と同一コース)を走行した。走行中に、考案した対策案C2または対策案C3を被験者の約60[cm]前方に設置した11[inch]の車載TVに表示し、映画を視聴させた。ただし加減速の対策の比例係数は決定済みなので、対策案C2および対策案C3では加減速対策は動作させずに、Yaw回転の対策、遠心加速度に対する対策のみ動作させて、比例係数を決定することとした。視運動刺激によって生じる視覚誘導自己運動感覚と、平衡感覚で知覚される車のYaw回転の感覚、遠心加速度の感覚が一致するように、背景映像の動き(比例係数)を被験者にポテンシオメーターで調整させた。調整は逆行を許し、被験者が十分な一致を感じるまで続けさせた。調整終了後にポテンシオメーター入力による比例係数 $k_{yaw\theta C1}$ 、 $k_{\alpha v C1}$ 、 $k_{yawv C2}$ 、 $k_{r C2}$ の値を記録した。なお、試行毎にポテンシオメーターを最小値または最大値に初期値した。試行数は比例係数 $k_{yaw\theta C1}$ 、 $k_{\alpha v C1}$ 、 $k_{yawv C2}$ 、 $k_{r C2}$ についてそれぞれ37、17、38、43回、合計135試行であった。

5.3.2. 結果

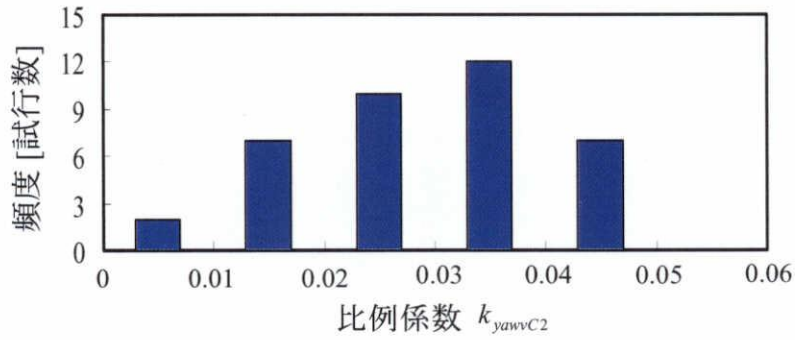
図5-11(a)に対策案C2の比例係数 $k_{yaw\theta C1}$ の分布を、図5-11(b)に対策案C2の比例係数 $k_{\alpha v C1}$ の分布を、図5-11(c)に対策案C3の比例係数 $k_{yawv C2}$ の分布を、図5-11(d)に対策案C3の比例係数 $k_{r C2}$ の分布をヒストグラムで示す。 $k_{yaw\theta C1}$ は 0.4118 ± 0.1214 (平均±標準偏差)、 $k_{\alpha v C1}$ は 0.1860 ± 0.06361 、 $k_{yawv C2}$ は 0.02887 ± 0.01066 、 $k_{r C2}$ は 0.3786 ± 0.1092 であり、個人差の大きな分布であった。



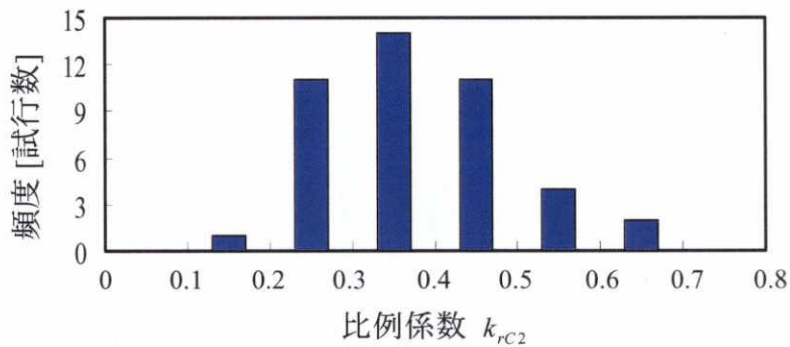
a) 対策案C2の比例係数 $k_{yaw\theta C1}$



b) 対策案C2の比例係数 k_{cpvc1}



c) 対策案C3の比例係数 k_{yawvC2}



d) 対策案C3の比例係数 k_{rC2}

図 5-11 対策案の比例係数の分布

5.4. 実車走行実験

5.4.1. 実験その1

車酔い低減対策1種類（対策案C1）の有効性を検証した。

5.4.1.1. 実験方法

5.4.1.1.1. 被験者

被験者は、これまでにめまいや難聴など耳鼻咽喉科疾患の既往のない20歳前後の健康男女49人（男性34名、女性15名）であった。実車走行実験は、あらかじめ被験者に実験の主旨、内容、手順、評価方法、予期される人体への影響などについて十分な説明を行い、書面による被験者の事前同意を得て行った。確認した項目は、

- ・ 実験中に車酔いが発症し不快感が生じる可能性があること
- ・ 被験者の希望により実験期間中であればいつでも参加の延期、中断ができること
- ・ その延期・中断によって不利益を被らないこと
- ・ 実験中に得た個人データを個人が特定できる形では公表しないこと

の4項目であった。被験者の動揺病不快感が強く実験を継続できない場合には、直ちに実験を中断した。

5.4.1.1.2. 実験装置

3.4.1.2章の右左折時の車酔い低減対策、4.4.2.1.2章の加減速時の車酔い低減対策の検証実験で使用した実験装置と同一の装置を使用した。4列シート10人乗りのミニバンタイプの車（全長5,380[mm]、幅1,880[mm]、高さ2,285[mm]で、2,693[cc]のガソリンエンジン車）を使用して実車実験を行った。1回の実験につき、1～5名の被験者を2～4列目シートに座らせて走行した。前席のヘッドレストの位置に5台の車載TVをそれぞれ天井から吊り下げ設置した。被験者から車載TVまでの距離は約60cmであった。車載TVは11[inch]（横24.4[cm]、縦13.8[cm]、水平解像度800[dot]、垂直解像度480[dot]）、水平視角は約23[deg]であった。TV映像（主映像）は、縦横8割（横20.5[cm]、縦11.5[cm]）に縮小して表示した。TV視聴は、DVDプレイヤーによる映画の再生とし、音声は車両の後方上部に取り付けられたステレオスピーカーから再生した。

5.4.1.1.3. 刺激（乗車条件と乗車コース）

以下の3つの乗車条件で車酔いを発生させ、動揺病不快感を比較した。

- a) 対策案C1を施したTV視聴

b) TV 視聴

c) 普通乗車(TV 視聴無し)

a)、b)のTV視聴条件では、被験者に車載TVで映画を視聴させた。使用した映画は、激しい動きや不快なシーンが無く、被験者が意識を集中しやすい恋愛映画や家族コメディ映画のようなストーリー性の高い映画とした。なお音声は日本語で、字幕が無い映画とした。c)の普通乗車条件では、被験者には特別な制約は課さず静かに乗車させた。普通に乗車しているように、車の外を自由に見ることを許可した。

乗車コースは、3.4.1.3章の右左折時の車酔い低減対策の検証実験の乗車コースと同一のコース(1周3分のコースを7周、計21分間走行)を使用した。なお、右左折時の実験では運転手にできるだけ等速に走行させたが、本実験では加速および減速のメリハリをつけた運転をさせた。

5.4.1.1.4. 動揺病不快感の測定と解析方法

3.4.1.4章の右左折時の車酔い低減対策、4.4.2.1.4章の加減速時の車酔い低減対策の検証実験の「動揺病不快感の測定と解析方法」と同一の手法を使用した。

5.4.1.1.5. 実験手順

3.4.1.5章の右左折時の車酔い低減対策の検証実験の実験手順と同一の実験手順とした。それぞれの試行では1~5人の被験者が車両の2~4列目シートに乗車した。実験走行経路の開始地点に到着するまで約15分要し、約10分間の休憩後実験を開始した。10分間の休憩中は車を停止し、映画を視聴させた。乗車条件ができる限り均等になる様に、被験者を各条件に割り当てた。実車実験は21分間であった。主観的な動揺病不快感を、走行開始直前10分、走行開始直前5分、走行開始時、その後1分毎に回答させた。被験者の不快感が強く実験中断を被験者が望んだ時には直ちに実験を中断した。各条件での試行数と、中断した試行数を表5-1に示す。なお、本実験は4.4.1章の実験その1(対策案B1)と同時にを行ったため、TV視聴条件、普通乗車条件に参加した被験者は、4.4.1章の実験その1に参加した被験者と同一である。

表 5-1 各条件での試行数（カッコ内は中断した試行数）

乗車条件	試行数
対策案 C1	43 (2)
TV 視聴	49 (5)
普通乗車	44 (0)
合計	136 (7)

5.4.2. 実験その 2

車酔い低減対策 2 種類（対策案 C2、対策案 C3）の有効性を検証した。

5.4.2.1. 実験方法

5.4.2.1.1. 被験者

被験者は、これまでにめまいや難聴など耳鼻咽喉科疾患の既往のない 20 歳前後の健康男女 35 人（男性 24 名、女性 11 名）であった。実車走行実験は、あらかじめ被験者に実験の主旨、内容、手順、評価方法、予期される人体への影響などについて十分な説明を行い、書面による被験者の事前同意を得て行った。確認した項目は、

- ・ 実験中に車酔いが発症し不快感が生じる可能性があること
- ・ 被験者の希望により実験期間中であればいつでも参加の延期、中断ができること
- ・ その延期・中断によって不利益を被らないこと
- ・ 実験中に得た個人データを個人が特定できる形では公表しないこと

の 4 項目であった。被験者の動揺病不快感が強く実験を継続できない場合には、直ちに実験を中断した。

5.4.2.1.2. 実験装置

5.4.1.1.2 の実験装置と同一の装置を使用した。

5.4.2.1.3. 刺激（乗車条件と乗車コース）

以下の 4 つの乗車条件で車酔いを発生させ、動揺病不快感を比較した。

- a) 対策案 C2 を施した TV 視聴
- b) 対策案 C3 を施した TV 視聴
- c) TV 視聴

d) 普通乗車(TV 視聴無し)

a)～c)の TV 視聴条件では、被験者に車載 TV で映画を視聴させた。使用した映画は、激しい動きや不快なシーンが無く、被験者が意識を集中しやすい恋愛映画や家族コメディ映画のようなストーリー性の高い映画とした。なお音声は日本語で、字幕が無い映画とした。

d)の普通乗車条件では、被験者には特別な制約は課さず静かに乗車させた。普通に乗車しているように、車の外を自由に見ることを許可した。

乗車コースは、5.4.1.1.3 章の乗車コースと同一のコースを使用した。なお、3.4.1.3 章の右左折時の実験では運転手にできるだけ等速に走行させたが、本実験では加速および減速のメリハリをつけた運転をさせた。

5.4.2.1.4. 動揺病不快感の測定と解析方法

動揺病不快感の測定と解析方法は、2.2.4 章と同一である。主観的な心理量である動揺病不快感を定量的に解析するために、評定尺度法によって不快感強度を序数尺度で測定した後、範疇判断の法則 [2-1] に基づいて距離尺度化を施した。0 (不快感なし)～10 (不快感・吐き気が強くこれ以上乗車できない状態) までの 11 段階で主観的に評価させ、実験中に感じる不快感の強さを 1 分間毎に口頭で回答させた。なお被験者には、0～10 の評定値で不快感をできるだけ等間隔に表現するよう指示した。また、不快感が強いために実験を中断した場合には、中断後の動揺病不快感は最大評定値の 10 として解析した。動揺病不快感の解析において、評定尺度は被験者毎の車酔いに対する感受性を調整 (詳細な手順は 5.5.2.2 章に後述) した後で、範疇判断の法則 (condition B) に基づいて等間隔な尺度である距離尺度 (間隔尺度) に変換 (詳細な手順は 2.3.3 章と同一) した。

5.4.2.1.5. 実験手順

それぞれの試行では 1～5 人の被験者が車両の 2～4 列目シートに乗車した。実験走行経路の開始地点に到着するまで約 15 分要し、約 10 分間の休憩後実験を開始した。10 分間の休憩中は車を停止し、映画を視聴させた。乗車条件ができる限り均等になる様に、被験者を各条件に割り当てた。実車実験は 21 分間であった。主観的な動揺病不快感を、走行開始直前 10 分、5 分、走行開始時、その後 1 分毎に回答させた。被験者の不快感が強くと実験中断を被験者が望んだ時には直ちに実験を中断した。各条件での試行数と、中断した試行数を表 5-2 に示す。なお今回の実験では、実験中に中断した被験者はいなかった。

表 5-2 各条件での試行数（カッコ内は中断した試行数）

乗車条件	試行数
対策案 C1	21 (0)
対策案 C2	20 (0)
TV 視聴	23 (0)
普通乗車	20 (0)
合計	84 (0)

5.5. 実車走行実験

5.5.1. 実験その1

5.5.1.1. 動揺病不快感の増強

評定尺度法によって得られた動揺病不快感を定量的に解析するために、範疇判断の法則に基づき等間隔な尺度である距離尺度（間隔尺度）に変換した。図 5-12 は、3 乗車条件における動揺病不快感の平均強度の時間推移を示す。図のそれぞれの点は、乗車時間の経過 1 分毎の平均強度を示す。3 条件とも、動揺病不快感は 21 分間の乗車時間にほぼ比例して増強した。動揺病不快感は、TV 視聴条件で最も強かった。対策案 C1 では、動揺病不快感が TV 視聴条件に比べて改善された。普通乗車条件では動揺病不快感が最も低かった。

各乗車条件での回帰直線の傾きと各対策の改善率を表 5-3 に示す。対策案 C1 の改善率は 25.6%であった。

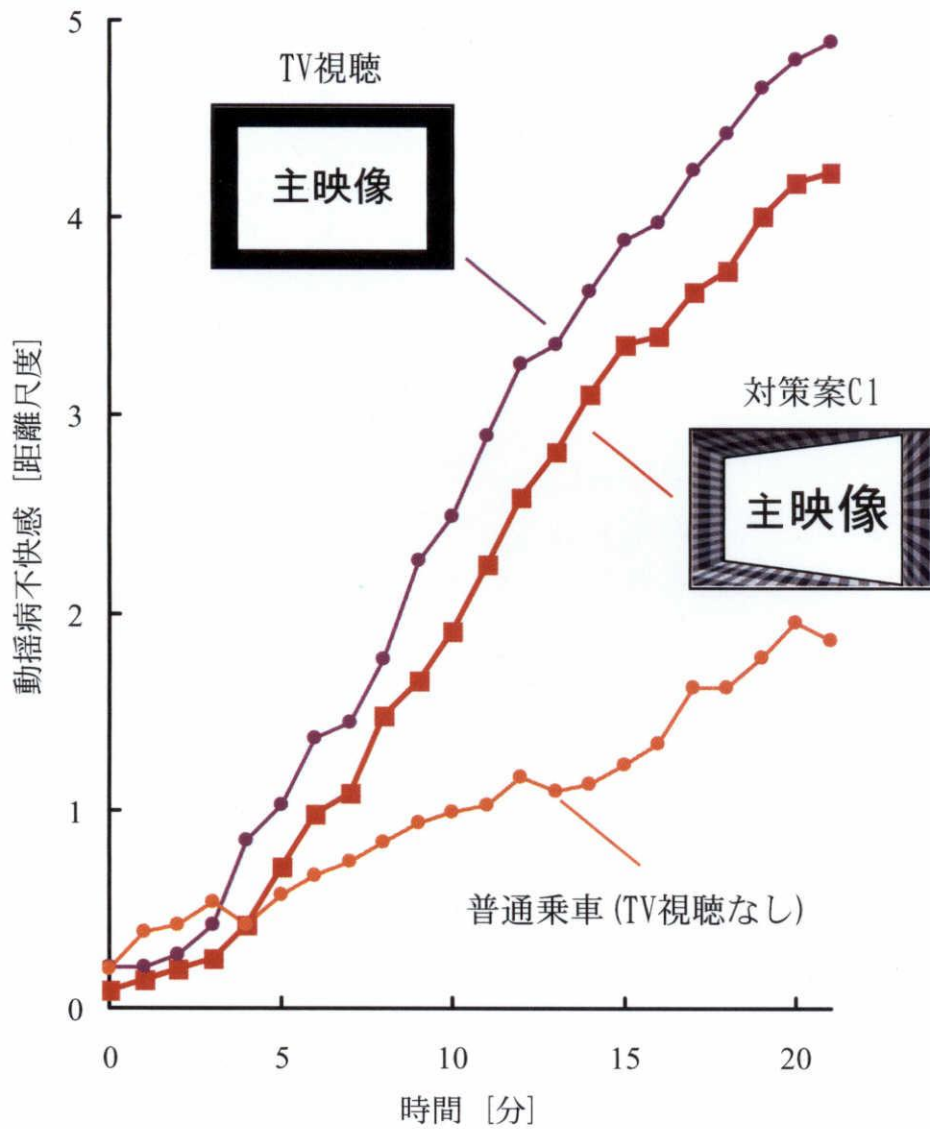


図 5-12 動揺病不快感の平均強度の時間推移

表 5-3 各乗車条件での回帰直線の傾きと改善率

乗車条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
対策案 C1	0.207	25.6
TV 視聴	0.246	—
普通乗車	0.092	—

5.5.2. 実験その2

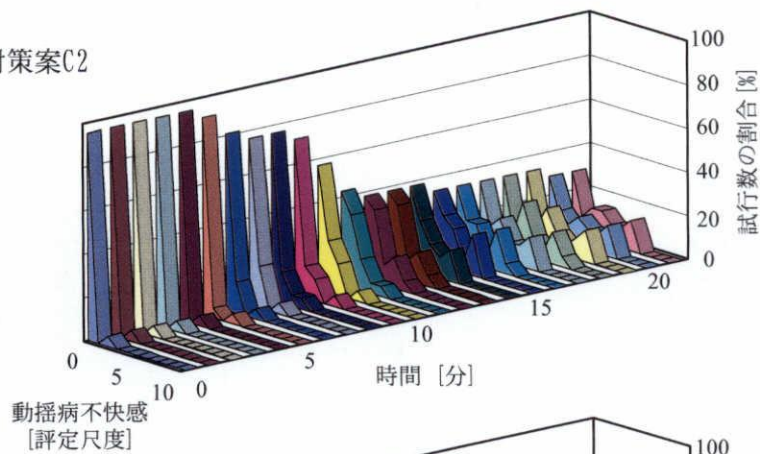
5.5.2.1. 車酔い発症の時間推移

動揺病不快感は、全ての条件下で乗車中次第に増強した。4条件それぞれについて、動揺病不快感の時間推移を図5-13のヒストグラムに示す。左奥から手前側の軸は評定尺度での動揺病不快感を示す。左手前から右側の軸は乗車時間を示す。4条件で試行数が異なるため、ヒストグラムを直接比較しやすいように縦軸は試行数ではなく試行数の割合で示している。

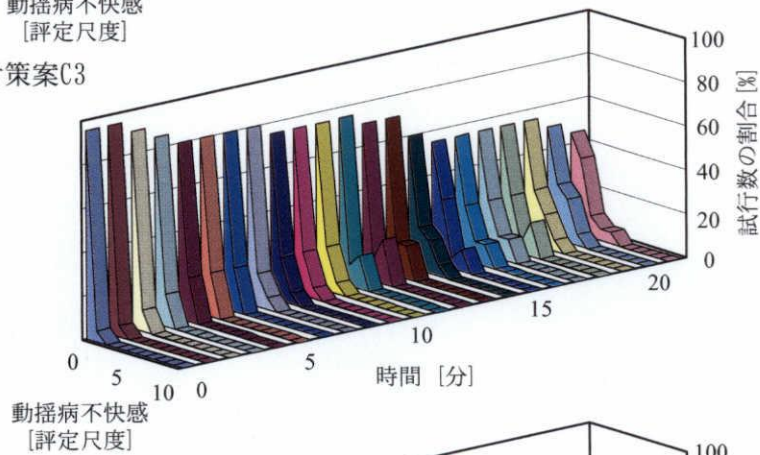
ほとんど全ての試行において乗車開始時刻(0分)では動揺病不快感は0であった。対策案C2条件では、全ての乗車時間を通して不快感が6以下であった。約29%の試行が21分経過(実験終了)しても不快感が0(不快感なし)のままであった。対策案C3条件では、全ての乗車時間を通して不快感が4以下と低い動揺病不快感であった。約45%の試行が21分経過(実験終了)しても不快感が0(不快感なし)のままであった。これに対して、TV視聴条件では、全ての乗車時間を通して不快感が8以下であったが、試行が21分経過しても不快感が0のままの被験者の割合は、対策案B2、対策案B3より低い約17%であった。2つの対策案に比べてTV視聴条件では動揺病不快感が強くなった。なお普通乗車条件では、全ての乗車時間を通して不快感が6以下で、約65%の試行が21分経過しても不快感が0のままであった。

Wilcoxonの順位和検定(両側検定)の結果、対策案C2条件では、TV視聴条件と比べて有意差は見られなかった($p>0.05$)。対策案C3条件では、乗車時間10分以降は $p<0.05$ で、TV視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が低減されたことが認められた。また、各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和をAUC法(Area Under Curve Method) [2-2]で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動をWilcoxonの順位和検定(両側検定)で検定した。対策案C2条件では、TV視聴条件と比べて有意差は見られなかった($p=0.60$)。対策案C3条件では、 $p<0.05$ でTV視聴条件に比べて有意に動揺病不快感が低減されたことが認められた。

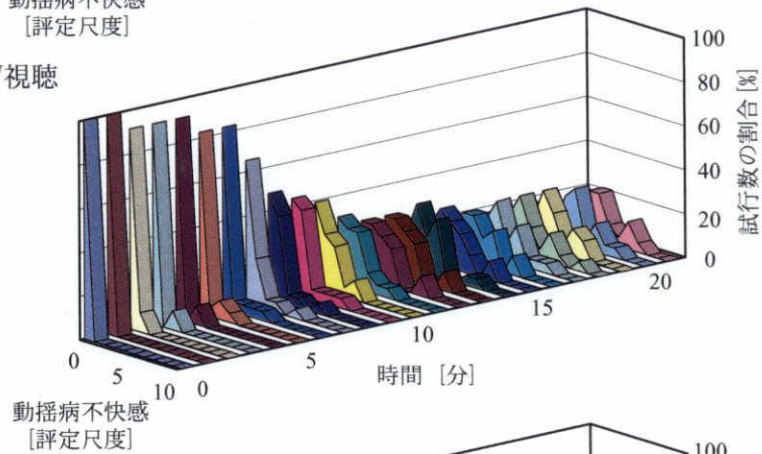
1) 対策案C2



2) 対策案C3



3) TV視聴



4) 普通乗車

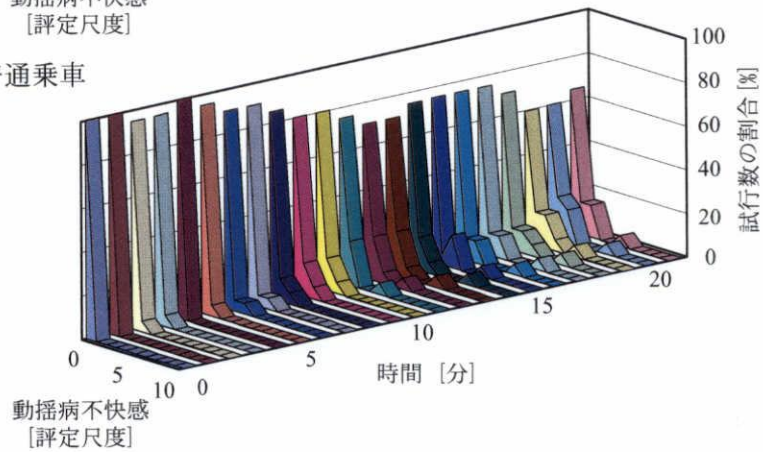


図 5-13 動揺病不快感の時間推移

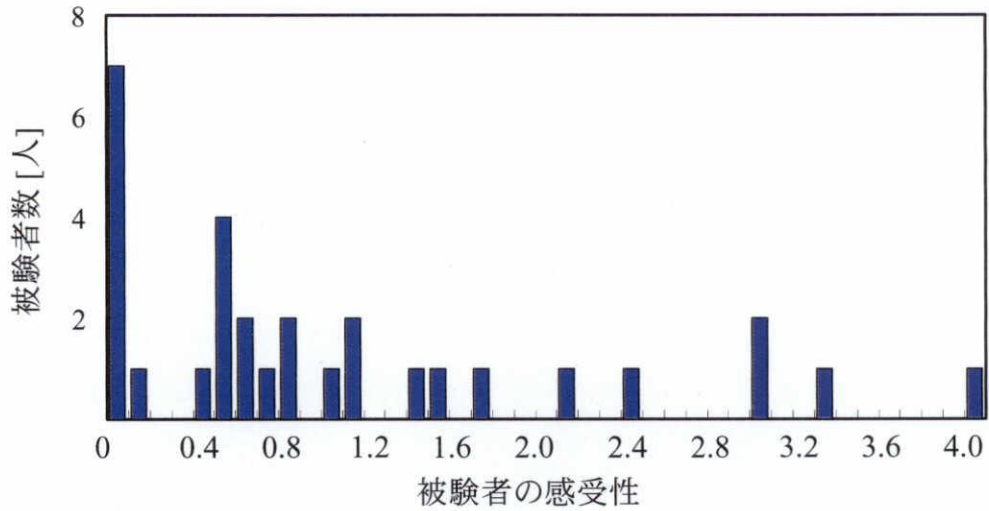
5.5.2.2. 車酔い感受性

車酔いに対する感受性は被験者により大きく異なるため、動揺病不快感を比較するためには、各乗車条件の間で被験者の車酔いの感受性の偏りをなくす必要がある。そこで 4.5.2.2 章と同様に、感受性補正を行った。

ほとんど全ての試行において不快感が直線的に増強しているため、各被験者の一試行毎に、横軸に乗車時間、縦軸に不快感強度を取って最小二乗法による回帰直線の傾きを算出した。ここで、乗車開始時刻（0分）では動揺病不快感は0（不快感なし）と想定されるため、原点を通る直線に回帰した。次に各乗車条件毎に回帰直線の傾きの平均値を算出し、各試行の傾きを前述した平均値で割り正規化することで、各試行の感受性を算出した。各被験者毎に、感受性の平均値を算出することで、被験者の車酔い感受性を表した。感受性1.0は、各被験者の車酔いのしやすさが、被験者の平均的車酔いのしやすさと同程度であることを示している。なお、Grubbs-Smirnov 棄却検定 [4-2] を用いて有意水準1%で飛び離れた感受性の試行のデータ、および乗車開始時刻に不快感が2以上に達しているデータを解析から除外した。図5-14は車酔いに対する被験者の感受性のヒストグラムを示す。図5-14上図のヒストグラムは、横軸に被験者の感受性を、縦軸にその感受性を示した被験者数を示している。35人の被験者間で、感受性は幅広く分布したが、7人の被験者は極めて感受性が低く（0.1未満）、21分走行後でも全くあるいはほとんど不快感がなかった。多数の被験者の感受性は0.4~1.2近傍を中心に2.0以上まで広がっていた。被験者4名は3以上という非常に高い感受性であった。図5-14下図のヒストグラムは、横軸に被験者の感受性を、縦軸に被験者の全試行の感受性の分布を示している。

全ての乗車条件に対してほとんど酔わない被験者（感受性が0.1未満）を感受性N(No)として解析から除外し、残りの試行数がほぼ3等分になるように被験者を感受性によって感受性L(Low)、感受性M(Middle)、感受性H(High)の3つのグループに分類した。3つのグループの境界線は0.8と1.2（図5-14下図に点線で示す）とした。4乗車条件についてそれぞれの感受性に分類した試行数を表5-4に示す。各乗車条件では、3つの感受性のグループの比が同一にはならなかったため、以降の解析では感受性LとMとHの比が24:24:18（Nを除く全試行数の比）となるように、各乗車条件・各時刻の評定値の分布に重み付けを行い車酔い感受性の偏りを補正した。

a) 被験者の感受性の分布



b) 被験者の全試行数の感受性の分布

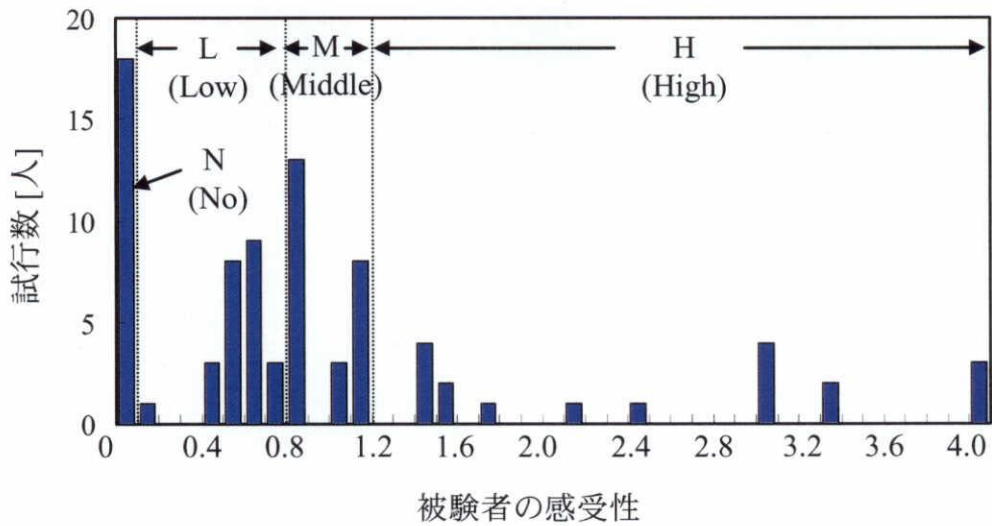


図 5-14 車酔いの感受性の分布

表 5-4 被験者の感受性によって分類された試行数

乗車条件	感受性 N	感受性 L	感受性 M	感受性 H
対策案 C2	4	6	5	6
対策案 C3	6	4	7	3
TV 視聴	2	10	6	5
普通乗車	6	4	6	4
合計	18	24	24	18

5.5.2.3. 動揺病不快感の評定尺度から距離尺度への変換

2.3.3 章の「動揺病不快感の評定尺度から距離尺度への変換」と同一の手法を使用した。図 5-15 に、評定尺度と各カテゴリーの不快感強度の平均値を距離尺度で表したときの関係を示す。本実験では、評定尺度の 0~1 の距離が最も大きかった。評定尺度 1~8 では距離尺度とほぼ線形の関係があった。

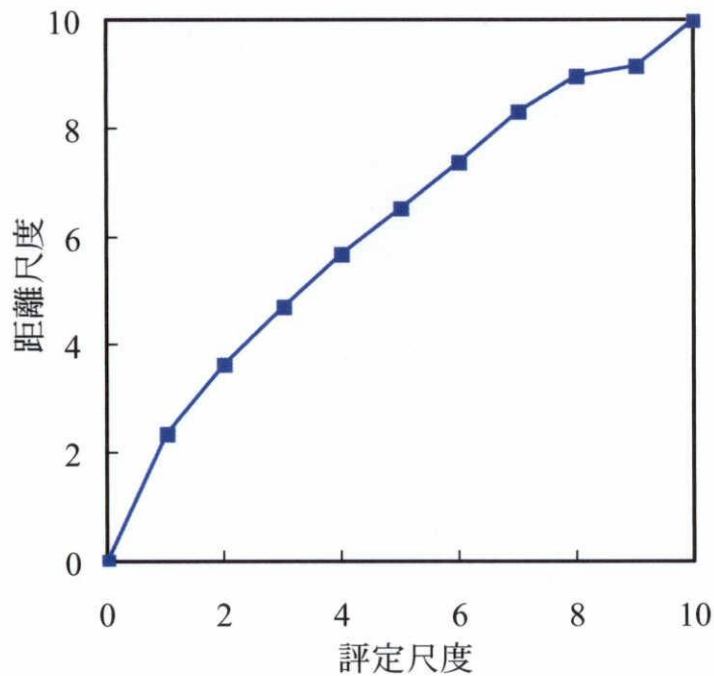


図 5-15 評定尺度と距離尺度の関係

5.5.2.4. 動揺病不快感の増強

図 5-16 は、4 乗車条件における動揺病不快感の平均強度の時間推移を示す。図のそれぞれの点は、乗車時間の経過 1 分毎の平均強度を示す。4 条件とも、動揺病不快感は 21 分間の乗車時間にほぼ比例して増強した。TV 視聴条件に比べて、対策案 C2 では動揺病不快感がやや改善され、対策案 B3 で動揺病不快感が顕著に改善された。

各乗車条件での回帰直線の傾きと各対策の改善率を表 5-5 に示す。対策案 C2 の改善率は 32.3%、対策案 C3 の改善率は 73.6%と高かった。

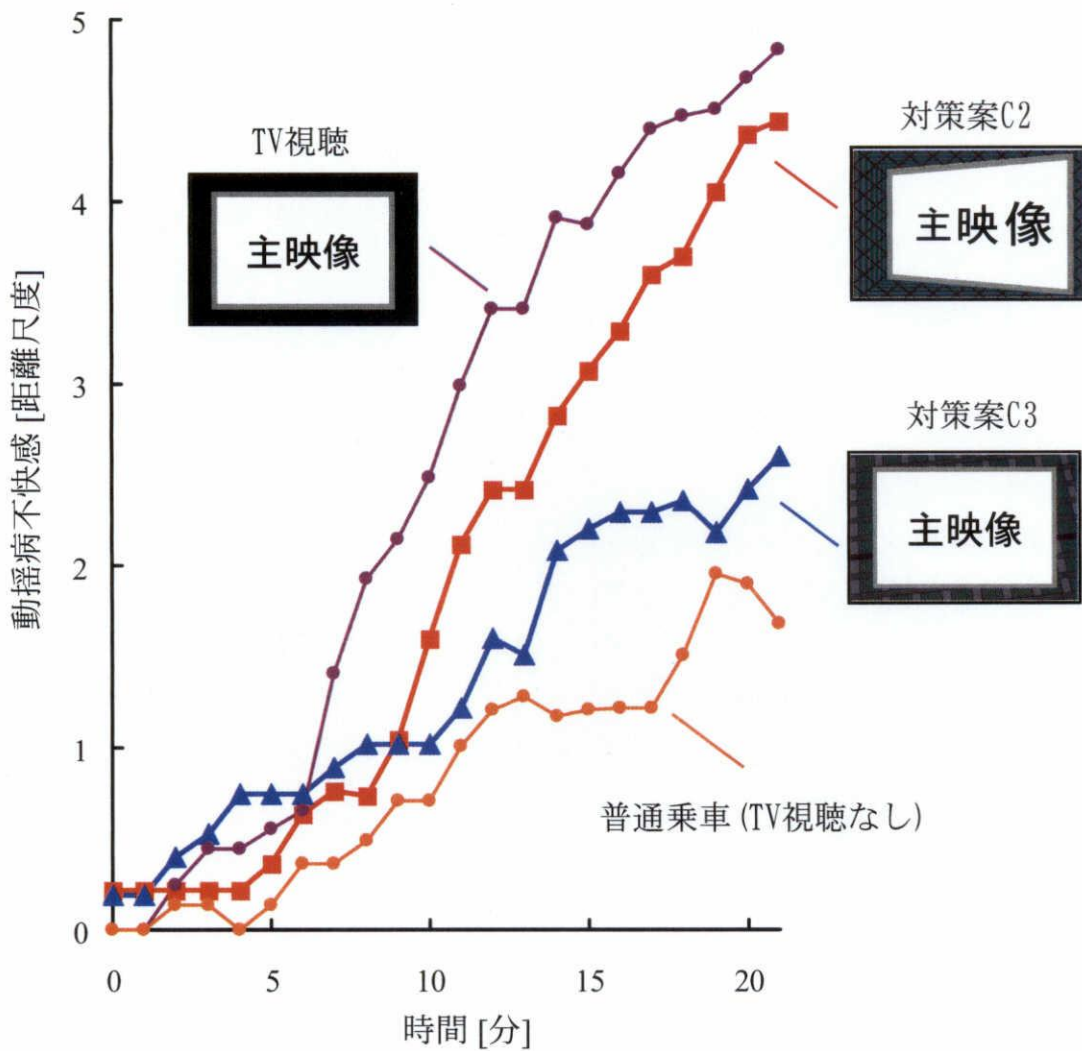


図 5-16 動揺病不快感の平均強度の時間推移

表 5-5 各乗車条件での回帰直線の傾きと改善率

乗車条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
対策案 C2	0.217	32.3
対策案 C3	0.142	73.6
TV 視聴	0.275	—
普通乗車	0.094	—

5.6. 考察

2章で述べたように、乗車中にTV視聴を行うと、視覚からはTVに映された映像世界での動きもしくは静止の情報が知覚されるため、平衡感覚によって知覚される運動感覚情報との矛盾が増大し車酔いが増強した。本章では、遠心加速度の影響を考慮して右左折および加減速に対する対策案を3種類考案し、実車実験によりその有効性を検証した。いずれの対策でも、視覚から車のYaw加速度、加減速、遠心加速度に一致した運動感覚を誘起し、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を小さくすることにより、車酔い低減効果を得ることが示された。特に対策案C3では、改善率が73.6%と顕著な車酔い低減効果が得られた。一般の道路では右左折と加減速が混在するため、両方の対策を備えた複合対策で顕著な車酔い低減効果が得られたことは重要なことである。

近江ら[3・3]は、映像に奥行き感がある時、サーキュラーベクションは主に背景と感じられる映像の動きによって発生すると報告した。対策案C3で使用した背景映像には模様の連続性があり、その中央の一部が主映像によって覆い隠されても、容易に背景であると認識ができ、このため車酔い低減効果が顕著に得られたと考えられる。対策案C2では、網状のテクスチャおよび枠状のテクスチャを背景と感じられるように主映像の周辺に背景映像として配置したために、視覚誘導自己運動感覚が誘起でき、車酔いが低減できたと考えられる。ただし、対策案C2では枠状の背景映像と網状の背景映像の2種類の背景映像が存在した。枠状の背景映像が、網状の背景映像の背景であると感じられた（すなわち網状の背景映像が枠状の背景映像に対して前景であると感じられた）場合には、サーキュラーベクションが誘起されにくく、このため車酔い低減効果が対策案C3より低くなった可能性がある。なお、実験その1で検証した対策案C1では、加減速の対策案B1と同様に図5-3に示した仮想空間の様にトンネル状に周辺映像を配置したために、周辺映像が主映像の手前に存在することとなった。すなわち、周辺映像が背景と認識されずに前景と認識されてしまい、車酔い低減効果が上がらなかったと考えられる。

対策案C3の車酔い改善率は、対策案C2の車酔い改善率より高かった。対策案C2では、Yaw角速度、前後加速度、遠心加速度という3種類の入力を用いて、それぞれ主映像を回転、枠状の背景映像を前後移動、網状の背景映像を左右移動させた。すなわち、3種類の入力を用いてそれぞれ個別の映像を動かして重畳したため、統合した運動感覚が誘起されにくく、このため高い車酔い低減効果が得られなかった可能性がある。一方、対策案C3では対策案C2と同じ3種類の入力を用いているが一枚の背景映像を動かした。このため統合した運動感覚が誘起され、対策案C2に比べて車酔い低減効果が高かったと考えられる。また、対策案C1の改善率は25.6%であった。対策案C2で改善率が上がらなかった理由と同様に、

対策案 C1 では、Yaw 角速度、前後加速度、遠心加速度という 3 種類の入力を用いて、それぞれ個別の映像を動かしていた。このため統合した運動感覚が誘起されにくく、高い車酔い低減効果が得られなかったと考えられる。なお、視覚誘導自己運動感覚は、視運動刺激の輝度にはほぼ比例して増強して誘起することが報告されている[4-5]。加減速対策の対策案 B3 で用いた背景映像は輝度が強く、視運動刺激として強すぎた可能性があったため、対策案 C3 では背景映像の輝度を落として使用した。このため対策案 C3 の改善率が上がったと考えられる。

右左折および加減速に対応した複合対策は、右左折に対する対策と加減速に対する対策それぞれを複合し、更に遠心加速度に対する影響を考慮した対策であった。このため、それぞれの対策で得られた改善率以上の効果を期待したが、対策案 C3 では 73.6%と右左折の対策（対策案 A1-2、対策案 A3-2）と同程度の改善率⁵、また対策案 C2 では 32.3%と改善率がやや低く、期待以上の改善効果が得られなかった。両対策には、遠心加速度に対する対策を付加したが、式(5-2)に示したように遠心加速度は Yaw 角速度の 2 乗に比例する。このため少しの Yaw 角速度の変化が遠心加速度に影響を与え、その結果対策案 C2 では背景映像の動きが急激に移動する、対策案 C3 では背景映像が急激に傾斜する、などノイズの影響を受けた可能性がある。対策案では、背景映像のなめらかな動きを実現するために、車から得られる遠心加速度にローパスフィルタ処理を施して高周波成分を落としたが、充分ではなかった可能性がある。ローパスフィルタによる時間遅れを考慮した上で、ローパスフィルタ処理の最適化を行えば背景映像の動きがなめらになり、車酔いが改善されると考えられる。

図 5-11 の比例係数の分布に示すように、平衡感覚と一致する自己運動感覚を誘導する視運動刺激の動きの大きさには個人差が大きい。例として、図 5-17 は図 5-11(a)の比例係数の分布を被験者毎に色分けした図である。個人内でのばらつきは比較的小さいが、個人間でのばらつきが大きく、最適な視運動刺激の大きさには個人差が大きいことを示している。本研究では、予備実験の結果を基に全被験者で一定の比例係数を用いて、各対策案の車酔い低減効果を調べた。被験者毎に比例係数を最適化した上で対策案を適用すれば、車酔い低減効果が更に改善されると考えられる。また、複合対策の比例係数は、4.3 章の加減速対策の予備実験で定めた比例係数と、5.3 章の複合対策の予備実験で定めた比例係数（Yaw 回

⁵加減速対策の実験と右左折対策の実験・複合対策の実験では、実験コースが異なっている。また右左折対策の実験と複合対策の実験では、運転の仕方（加減速に対するメリハリのつけ方）が異なっている。このため、異なる実験において各対策案で同じ改善率が得られたとしても、厳密には効果は異なる。

転、遠心加速度に対する比例係数) を流用した。それぞれの対策では比例係数を最適に定めたが、対策を複合した際には視運動刺激が強くなってしまった可能性がある。両者の相互作用を考慮して改め

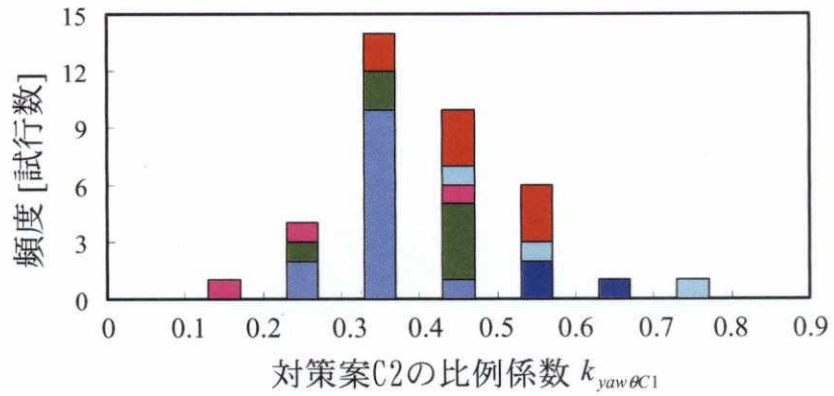


図5-17 対策案C2の比例係数の個人毎の分布

て最適な比例係数を定め直せば、更に車酔い低減効果が上がると考えられる。

6. 総合考察

乗車中にTV視聴を行うと、TV視聴しない普通乗車に比べて約2倍に車酔いが増強した。平衡感覚からは体が動いているという情報が伝えられるのに対して、視覚からは体の動きに対応した情報が伝えられないため、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾が生じて車酔いが増強したと考えられる。

本研究では、右左折に対する車酔い対策、加減速に対する車酔い対策、右左折および加減速が混在した場合の複合対策を考案し、その効果を検証した。考案した対策は、視覚から車の動きに一致した運動感覚を誘起し、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を小さくすることにより、車酔いを低減するというものである。いずれの対策でも、TV視聴により約2倍に増強した車酔いを約70%程度低減するという顕著な効果が得られた。このような大きな車酔い低減効果が得られた理由を以下に記す。

映像に奥行き感がある場合、視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）は主に背景と感じられる映像の動きによって誘起される[3-3]。本対策案では、TV映像（主映像）をディスプレイ中央部に表示し、TV映像の周りに背景と知覚できる映像を背景映像として配置し、車の運動情報を与えた。また背景映像には、模様の連続性があるテクスチャを使用したために、背景映像が主映像によってその一部を覆い隠されても、容易に背景であると認識できた。このため、車酔いが顕著に低減されたと考えられる。

Howard & Howard [3-5]は、前景に静止物が全く存在しない場合には、視運動刺激による視覚誘導自己運動感覚が顕著に減少したことを示し、前景と背景の相対運動の重要性を報告した。本対策案では、映像と背景映像の境界を分かりやすくするために主映像の周辺に枠を描画したが、主映像の周辺に枠があることで主映像が静止物であると認識されたと考えられる。このため、背景映像の視運動刺激により効果的に視覚誘導自己運動感覚が発生でき、車酔いが顕著に低減されたと考えられる。

サーキュラーベクションは、水平視角15度のみの視運動刺激でも発生することが報告されている[3-8]。本対策案で使用したディスプレイの水平視角は23度と、車載ディスプレイとしては比較的大きいため、十分にサーキュラーベクションが発生でき、車酔いが低減できたと考えられる。なお、通常車載ディスプレイとして使われている7インチワイドディスプレイ(横15.4[cm]、縦8.7[cm])を60[cm]の距離から視聴したとすると水平視角が約15度となり、十分な車酔い低減効果が期待できる。

Telford & Frost[4-4]は、前後方向のリニアベクションの誘起に中心視に対する視運動刺

激が必ずしも必要では無いことを示した。本研究で使用したディスプレイの水平視角は 23 度であり、中央部には主映像が表示され視運動刺激は中心視野の水平視角約 19 度の領域がマスクされていることになるが、加減速対策では背景映像の視運動刺激により平衡感覚との矛盾が小さい視覚誘導自己運動感覚を誘起することができ、その結果顕著な車酔い低減効果が得られたと考えられる。

複合対策案では、Yaw 角速度、前後加速度、遠心加速度という 3 種類の入力を用いて、一枚の背景映像を動かしたときに、顕著な車酔い低減効果が得られた。3 種類の入力を用いて一枚の背景映像を動かしたことで、統合した運動感覚が誘起されやすく、このため高い車酔い低減効果が得られたと考えられる。

本研究では、テクスチャを有する背景映像によって、視覚から車の動きに一致した運動感覚を誘起し、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾を小さくすることにより、車酔いを低減した。背景映像として、カメラで撮像した前方映像を使用することで車酔い低減対策が可能か考察する。Griffin & Newman [1-8] は、車の前方に取り付けたカメラで道路前方を撮影しながら、乗員がその映像を見ることができる表示装置 (6.5 インチ) を使用し、車酔いに対する効果を検証した。しかしながら車酔いを低減する結果は得られず、むしろ車酔いが悪化した。走行中には車に取り付けられたカメラが揺れるため、表示装置に表示される前方映像も揺れて表示される。このため、視覚－平衡感覚間の感覚情報の矛盾が減少どころか増加してしまい、視覚性動揺病が発生し、その結果車酔いが悪化したと考えられる。よって、車酔い低減対策の背景映像としてカメラで撮像した前方映像を使用することは困難と考えられる。また車酔い悪化の別の原因として、カメラの撮像画角が不適切であったと考えられる。カメラによる道路前方の撮像画角は、乗員が表示装置を見る際の表示画角とほぼ一致していたが、表示装置は、車の動きの適切な感覚情報を与えることができなかったと思われる。本研究では図 3-13 (対策案 A1-1、対策案 A3-1)、図 3-17 (対策案 A1-2、対策案 A3-2) に示したように、視運動刺激の速度すなわち各対策の比例係数の最適化が重要であることを示したが、カメラでは撮像画角によって視運動刺激の速度が変化する (カメラの撮像画角を広くすると視運動刺激の速度が遅くなり、逆に撮像画角を狭くすると視運動刺激の速度が速くなる) ため、撮像画角の最適化が必要であると思われる。対策案 A1-2、対策案 A3-2 では、乗員がディスプレイを注視して TV 映像に没入している場合は、実際のディスプレイの水平視角より表示画面を広く感じていると考えたが、カメラの前方映像を使用する場合にはカメラの撮像画角を広くして視運動刺激の速度を遅くする必要があったと思われる。またカメラの前方映像を使用する際の別の課題として、視運動刺激の大きさ

が車外の風景に依存してしまうという問題がある。すなわち、テクスチャによる背景映像では車外の風景によらず車の動きに応じて一定の視運動刺激を与えることができるが、カメラで撮像した前方映像を使用する場合には、車外の風景によって視運動刺激の強さが変化してしまい、視覚から車の動きに一致した運動感覚が誘起できない場合があると考えられる（例えば、車外に電柱や橋脚のようなエッジ成分を多く含む物体がある場合は強い視運動刺激を与えることができるが、野原のような平坦な風景では弱い視運動刺激しか与えることができない等）。更には、夜間にはカメラが使えないという課題もある。以上より、車酔い低減対策に使用する背景映像としては、カメラによる前方映像ではなくテクスチャによる背景映像が適切である。

本研究では、被験者の予断による動揺病不快感強度への影響を防ぐためにどの乗車条件が車酔い低減に効果があるかは説明せずに、「車載 TV 視聴が車酔いに与える影響を調べる」という説明を実車実験の前に被験者に対して行った。このため Placebo 効果（プラセボ・偽薬効果）対策として、乗車条件に車酔い低減効果の無い対策をあえて含めなかった。本研究では、図 3-13 に示すように比例係数が適切でない場合には、対策案 A1-1 では改善率が 13.6%と低く、また対策案 A3-1 では改善率が-13.3%と車酔いが逆に悪化した。これらの結果から、本研究では Placebo 効果は無かったと考えられる。

本研究では、乗車時間を 20 分程度としたところ、動揺病不快感強度は乗車時間を通してほぼ直線的に増強した。乗車時間を長くすると、どのように動揺病不快感に影響するか検討する。実車を使用した車酔いの先行研究[1-8][1-10][1-11]では乗車時間を 30 分としているが、いずれの実験でも乗車時間が約 20~25 分以降で動揺病不快感強度が飽和し始めた。本研究と先行研究では乗車コースが異なるものの、本研究でも乗車時間を長くすれば、先行研究と同様に動揺病不快感強度が直線的に増強し続けるのではなく、一定時間以降は飽和し始めると考えられる。なお、本研究では車酔いの低減対策の効果を改善率で定義したが、改善率は動揺病不快感強度の時間推移が直線近似できる範囲でのみ適用される値である。このため、長時間乗車時には動揺病不快感の時間推移の総和（面積）を使用するなど、新たな車酔い低減効果の評価尺度を定義する必要があるだろう。

更なる車酔い低減効果を得るための考察を以下に記す。

各対策の予備実験の比例係数の分布で示した様に、平衡感覚と一致する視覚誘導自己運動感覚を誘起する視運動刺激の動きの大きさには、個人差が大きい。個人毎に対策の比例係数を最適化することで、更なる車酔い低減効果が見込めると考えられる。なお実用上は、

一人一人のユーザーが比例係数を最適化する事は難しいと思われるので、あらかじめ数パターンの比例係数（例えば、ゆっくり、普通、早いの3段階等）を用意しておき、ユーザーに選択してもらうことが必要であろう。

Yaw 回転に対する対策では、背景映像が回転しているという効果をつけた場合に、車酔い低減効果が高かった。図 3-21 に示した背景映像の例の様に、ストライプの幅を変える等、背景映像のデザインを変えることで更に背景映像に回転しているという効果が付与できれば、車酔い低減効果が改善されると考えられる。

前後加速度、遠心加速度に対する対策では、加速度および遠心加速度にローパスフィルタ処理を施しノイズを低減した。処理の時間遅れが発生しない範囲でフィルタ処理の最適化を図り背景映像の滑らかな動きが実現できれば、車酔い低減効果が向上すると考えられる。

人間の視覚特性として、焦点を合わせた場合は注視点の周辺がぼけて見える。日常生活において、一番手前の物体に焦点を合わせた場合は、注視点の周辺のぼけた映像は背景として認識される。このため、車酔い低減対策においても主映像（映画）を注視した場合には、背景映像のテクスチャをぼかしたほうが背景と認識しやすい。映像に奥行き感がある場合、視覚誘導自己運動感覚（サーキュラーベクション）は主に背景と感じられる映像の動きによって誘起される[3-3]ため、背景映像をぼかすことで車酔い低減効果が向上すると考えられる。ただし、中央部分が鮮鋭な映像でその周辺がぼけた映像と接している場合、その境界をぼかすと周辺のぼけた映像が前景と認識されてしまうという報告があるため[6-1]、境界は鮮鋭にする必要がある。

本研究で、TV 視聴時の車酔いを約 70%以上改善するという顕著な効果が得られた。実用化に際しては、以下の項目等の検討が必要となる。

- ・ 車酔い低減効果を有しかつ先進性の感じられる背景映像のテクスチャの選定
- ・ 比例係数・車両が静止時の処理（ノイズ対策、傾斜対策）・および背景映像と主映像のサイズ、の最適化
- ・ センサー・グラフィック処理の最適化（ハードウェアの選定、ハードとソフトの処理分担の最適化）
- ・ 車載ディスプレイのサイズ変更時の効果検証、および市街地・高速道路・長距離走行での効果検証

リアシートエンターテインメントシステムとして車載 TV の普及が進む今日、車酔いの増強

を低減する本手法の実用化が望まれる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご懇切なるご指導、ご助言を賜りました三重大学 大学院 工学研究科 井須尚紀教授に深く感謝いたします。井須教授には、松下電器産業株式会社 パナソニック オートモーティブシステムズ社の社員である筆者に工学研究科博士後期課程に進む機会を与えて頂きました。実車実験の計画・実施および実験結果の考察にあたり終始熱心かつ適切にご指導・ディスカッションをして頂き、また本論文の執筆にあたりご懇切なるご指導を頂きました。心より感謝いたします。また本論文をまとめるにあたり、有益なご指導を頂きました三重大学 工学研究科 成瀬央教授、近藤利夫教授、河合敦夫准教授、榎井文人助教、ならびに田中みゆき事務官に深く感謝いたします。

本研究は、松下電器産業株式会社 パナソニック オートモーティブシステムズ社の業務として行ったものであり、在職中の修学の機会を与えて頂き、また様々なアドバイスを頂きました同社前 CTO 和田良一氏（現パナソニック モバイルコミュニケーションズ株式会社 副社長）、同社 CTO 宮川猛氏、同社先行開発センター所長 黒崎敏彦氏、同社先行開発センター グループマネージャー 松本俊博氏、同社先行開発センター チームリーダー 吉田崇氏、石田明氏、茨木晋氏に深く感謝いたします。

また実車実験にご協力いただきました三重大学 工学部の被験者の皆様、実車実験に実験者として協力して下さった三重大学 井須研究室 井奥大輔氏、浅野仁志氏、奥村友裕氏、荒木佑介氏、日高教孝氏、朴丹氏、辻仁志氏、小山哲弘氏、中西窓花氏、堂西幸紀子氏、杉浦友香氏、浜田悠生氏に深く感謝いたします。

本研究は、以上の方々を始めとする多くの方々のご支援のもと達成できたものであり、本研究に関わって下さった全ての方に深く御礼申し上げます。

最後に、会社と学業の両立を理解し協力してくれた両親、特に一番近くでいつも応援し支えてくれた妻 尚美に心より感謝します。

参考文献

- [1-1] Vogel, H., Kohlhaas, R. and Von Baumgarten, R.J.: Dependence of motion sickness in automobiles on the direction of linear acceleration. *Eur J Appl Physiol*, 48, pp.399-405, 1982.
- [1-2] Reason, J.T. and Brand, J.J.: *Motion Sickness*. Academic Press, London, 1975.
- [1-3] Guignard, J.C. and McCauley, M.E.: The accelerative stimulus for motion sickness, in G. H. Crampton(ed.), *Motion and Space Sickness*. CRC Press, Boca Raton, pp.123-152, 1990
- [1-4] Turner, M. and Griffin, M.J.: Motion sickness in public road transport: the effect of driver, route and vehicle, *Ergonomics*, 42, pp.1646-1664, 1999.
- [1-5] Turner, M. and Griffin, M.J.: Motion sickness in public road transport: the relative importance of motion, vision and individual differences. *Br J Psychol*, 90, pp.519-530, 1999.
- [1-6] Turner, M. and Griffin, M.J.: Motion sickness in public road transport: passenger behavior and susceptibility. *Ergonomics*, 42, pp.444-461, 1999.
- [1-7] Probst, T., Krafczyk, S., Büchele, W. and Brandt, T.: Visuelle Prävention der Bewegungskrankheit im Auto. *Arch Psychiatr Nervenkr*, 231, pp.409-421, 1982. (German)
- [1-8] Griffin, M.J. and Newman, M.M.: Visual field effects on motion sickness in cars. *Aviat Space Environ Med*,; 75, pp.739-748, 2004.
- [1-9] 安藤, 渡邊, 杉本, 前田: 前庭感覚インタフェース技術の理論と応用, 情報処理学会論文誌, 48, pp.1326-1335, 2007.
- [1-10] 加藤, 北崎: 後席用ディスプレイ注視時の車酔い発生メカニズムの一考察, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.50-05, pp.7-10, 2005
- [1-11] 加藤, 北崎: 車載ディスプレイ注視時の車酔いに対する映像の種類の影響, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.83-06, pp.9-12, 2006
- [2-1] Torgerson, W.S.: *Theory and Methods of Scaling*. John Wiley and Sons, New York, pp.205-46, 1958.
- [2-2] 丹後俊郎, 新版 医学への統計学, 朝倉書店, pp.176, 2004
- [2-3] Bock, O.L. and Oman, C.M.: Dynamics of subjective discomfort in motion sickness as measured with a magnitude estimation method. *Aviat Space Environ Med*, 53, pp.773-777, 1982.
- [2-4] Graybiel, A., Wood, C.D., Miller, E.F. and Cramer, D.B.Lt.: Diagnostic criteria for grading the

severity of acute motion sickness. *Aerospace Med*, 39, pp.453-455, 1968.

- [2-5] Reason, J.T. and Graybiel, A.: Changes in subjective estimates of well-being during the onset and remission of motion sickness symptomatology in the slow rotation room. *Aerospace Med*, 41, pp.166-171, 1970.
- [2-6] Wiker, S.F., Kennedy, R.S., McCauley, M.E. and Pepper, R.L.: Susceptibility to seasickness: Influence of hull design and steaming direction. *Aviat Space Environ Med*, 50, pp.1046-1051, 1979.
- [2-7] Mills, K.L. and Griffin, M.J.: Effect of seating, vision and direction of horizontal oscillation on motion sickness. *Aviat Space Environ Med*, 71, pp.996-1002, 2000.
- [2-8] Webb, N.A. and Griffin, M.J.: Optokinetic stimuli: motion sickness, visual acuity, and eye movements. *Aviat Space Environ Med*, 73, pp.351-358, 2002.
- [2-9] Isu, N., Yanagihara, M., Yoneda, S., Hattori, K. and Koo, J.: The severity of nauseogenic effect of cross-coupled rotation is proportional to gyroscopic angular acceleration. *Aviat Space Environ Med*, 67, pp.325-332, 1996.
- [2-10] Lackner, J.R. and Graybiel, A.: Some influences of vision on susceptibility to motion sickness. *Aviat Space Environ Med*, 50, pp.1122-1125, 1979.
- [2-11] Oosterveld, W.J., Graybiel, A. and Cramer, D.B.: Influence of vision on susceptibility to acute motion sickness studied under quantifiable stimulus-response conditions. *Aerospace Med*, 43, pp.1005-1007, 1972.
- [2-12] Bos, J.E., MacKinnon, S.N. and Patterson, A.: Motion sickness symptoms in a ship motion simulator: effects of inside, outside, and no view, *Aviat Space Environ Med*, 76, pp.1111-1118, 2005.
- [2-13] Golding, J.F., Markey, H.M. and Stott, J.R.R.: The effects of motion direction, body axis, and posture on motion sickness induced by low frequency linear oscillation. *Aviat Space Environ Med*, 66, pp.1046-1051, 1995.
- [2-14] Horii, A., Takeda, N., Morita, M., Kubo, T. and Matsunaga, T.: Motion sickness induced by sinusoidal linear acceleration in rats. *Acta Otolaryngol (Stockh)*, Suppl. 501, pp.31-33, 1993.
- [2-15] Matsunaga, T., Uetsuka, H., Tamaki, H., Furukawa, Y. and Miyoshi, T.: Changes in gastric EMG resulting from difference in direction of linear acceleration in rabbits. *ORL*, 40, pp.101-110, 1978.
- [2-16] Correia, M.J., Hixson, W.C. and Niven, J.I.: On predictive equations for subjective judgments of vertical and horizon in a force field. *Acta Oto-Laryngol*, Suppl. 230, pp.1-20, 1968.

- [2-17] Jaslow, H.: Human tilt perception in a dynamic environment. *Aviat Space Environ Med*, 50, pp.594-598, 1979.
- [2-18] Ormsby, C.C. and Young, L.R.: Perception of static orientation in a constant gravito-inertial environment. *Aviat Space Environ Med*, 47, pp.159-164, 1976.
- [2-19] Schöne, H.: On the role of gravity in human spatial orientation. *Aerospace Med*, 35, pp.764-772, 1964.
- [2-20] 本郷利憲ら, 標準生理学 第5版, 医学書院, pp.247-254, 2000
- [2-21] Spoendlin, H.H.: The ultrastructure of the vestibular sense organ. In: *The Vestibular System and Its Diseases*, edited by Wolfson R.J. Philadelphia, PA: University of Pennsylvania Press, pp.39-68, 1966
- [3-1] Fischer, M.H. and Kornmüller, A.E.: Optokinetisch ausgelöste Bewegungs-wahrnehmungen und optokinetischer Nystagmus. *Journal für Psychologie und Neurologie (Leipzig)*, 41, pp.273-308, 1930
- [3-2] Andersen, G.J.: Perception of self-motion: Psychophysical and computational approaches. *Psychological Bulletin*, 99, pp.52-65, 1986
- [3-3] Ohmi, M., Howard, I.P. and Landolt, J.P.: Circularvection as a function of foreground-background relationships, *Perception*, 16, pp.17-22, 1987
- [3-4] Hatada, T, Sakata, H and Kusaka, H: Psychophysical analysis of the “sensation of reality” induced by a visual wide-field display. *SMPTE Journal*, 89, pp.560-569, 1980
- [3-5] Howard, I. P. and Howard, A.: Vection: the contributions of absolute and relative visual motion, *Perception*, 23, pp.745-751, 1994
- [3-6] Brandt, T., Dichgans, J. and Koexig, E.: Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception, *Experimental Brain Research*, 16, pp.476-491, 1973
- [3-7] Post, R.B.: Circularvection is independent of stimulus eccentricity, *Perception*, 17, pp.737-744, 1988
- [3-8] Andersen, G.J. and Dyre, B.P.: Spatial orientation from optic flow in the central visual field, *Perception and Psychophysics*, 45, pp.453-458, 1989
- [3-9] Wood, R. W.: The “haunted-swing” illusion, *Psychological Review*, 2, pp.277-278, 1895
- [4-1] Graybiel, A. and Clark, B.: Validity of the oculogravic illusion as a specific indicator of otolith

function, *Aerospace medicine*, 36, pp.1173-1181, 1965

- [4-2] 丹後俊郎, 新版 医学への統計学, 朝倉書店, pp.65-68, 2004
- [4-3] Andersen, G.J. and Braunstein, M.L.: Induced self-motion in central vision, *Journal of Experimental Psychology*, 11, pp.122-132, 1985
- [4-4] Telford, L. and Frost, B.J.: Factors affecting the onset and magnitude of linear vection, *Perception & Psychophysics*, 53, pp.682-692, 1993
- [4-5] Sauvan, X.M. and Bonnet, C.: Properties of curveilinear vection, *Perception & Psychophysics*, 53, pp.429-435, 1993
- [4-6] Ohmi, M., Howard, I.P.: Effect of stationary objects on illusory forward self-motion induced by a looming display, *Perception*, 17, pp.5-12, 1988
- [4-7] Griffin, M.J. and Mills, K.L.: Effect of Frequency and Direction of Horizontal Oscillation on Motion Sickness. *Aviat Space Environ Med*, 73, pp.537-543, 2002.

- [6-1] Marshall, J.A., Burbeck, C.A., Ariely, D., Rolland, J.P., Martin, K.E.: Occlusion edge blur: a cue to relative visual depth, *J. Opt. Soc. Am. A*, 13, pp.681-688, 1996

発表論文リスト

1) 査読のある雑誌等

- [1] 森本明宏, 奥村友裕, 日高教孝, 朴丹, 荒木佑介, 榎井文人, 河合敦夫, 井須尚紀: “TV 視聴時の車酔い低減対策”, 情報科学技術レターズ, Vol.5, pp.323-326, 2006
- [2] 森本明宏, 井須尚紀: “乗車中の車載 TV 視聴が車酔い発症に与える影響”, 宇宙航空環境医学, Vol.45, 2008(印刷中)

2) 査読のある国際会議のプロシーディングス

- [1] A. Morimoto, N. Isu, T. Okumura, Y. Araki, A. Kawai, and F. Masui: “Image rendering for reducing carsickness in watching onboard video display”, IEEE ICCE 2008 Digest of Technical Papers, pp.315-316, 2008
- [2] A. Morimoto, N. Isu, D. Ioku, H. Asano, A. Kawai, and F. Masui, “Effects of reading books and watching movies on inducement of car sickness”, Proc. of FISITA 2008 World Automotive Congress (印刷中)
- [3] A. Morimoto, N. Isu, T. Okumura, Y. Araki, A. Kawai, and F. Masui, “Screen design of onboard displays for reducing car sickness”, Proc. of FISITA 2008 World Automotive Congress (印刷中)
- [4] A. Morimoto, N. Isu, T. Okumura, Y. Araki, A. Kawai, and F. Masui, “Reduction of car sickness caused by watching onboard display for rear-seat entertainment”, Proc. of 15th World Congress on ITS 2008 (印刷中)

3) その他 学会発表

- [1] 森本明宏, 浅野仁志, 井奥大輔, 朴丹, 榎井文人, 河合敦夫, 井須尚紀：“TV 視聴が乗り物酔いに及ぼす影響”, 信学会 ソサイエティ大会 2005 講演論文集, A-17-2, 2005

- [2] 朴丹, 井奥大輔, 浅野仁志, 森本明宏, 榎井文人, 河合敦夫, 井須尚紀：“呼気二酸化炭素分圧測定による動揺病強度の評価”, 信学会 ソサイエティ大会 2005 講演論文集, A-4-25, 2005

- [3] 森本明宏, 朴丹, 井須尚紀：“乗車中の TV 注視による車酔い不快感の増加”, 宇宙航空環境医学, vol.42, pp.145, 2005

- [4] 日高教孝, 森本明宏, 奥村友裕, 朴丹, 荒木祐介, 榎井文人, 河合敦夫, 井須尚紀：“呼気終末二酸化炭素分圧による動揺病強度推定法を用いた車酔い低減技術の評価”, FIT2006 第 5 回情報科学技術フォーラム, K057, 2006

- [5] 森本明宏, 井須尚紀：“乗車中 TV 視聴する際の車酔い低減対策”, 宇宙航空環境医学, vol.43, pp.174, 2006

- [6] 辻仁志, 森本明宏, 日高教孝, 朴丹, 小山哲弘, 榎井文人, 河合敦夫, 井須尚紀：“TV 視聴時の車酔いを低減する映像表示法”, 信学会 ソサイエティ大会 2007 講演論文集, A-20-15, 2007

- [7] 辻仁志, 森本明宏, 井須尚紀：“車載 TV 視聴時に生じる車酔いの低減対策”, 宇宙航空環境医学, vol.44, pp.102, 2007

- [8] 森本明宏, 辻仁志, 中西窓花, 杉浦友香, 堂西幸紀子, 榎井文人, 河合敦夫, 井須尚紀：“加減速に伴う車酔い発症に対処した車載 TV 表示法”, 映情学 2008 年年次大会 講演予稿集, 21-5, 2008

- [9] 中西窓花, 森本明宏, 辻仁志, 堂西幸紀子, 杉浦友香, 榎井文人, 河合敦夫, 井須尚紀：“車酔い対策を施した車載ディスプレイの開発”, 映情学 2008 年年次大会 講演予稿集,

21-6, 2008

4) 特許

[1] 出願日：2006/01/25

出願番号：特願 2006-015915

発明の名称：映像表示装置

発明者：森本明宏、井須尚紀

[2] 出願日：2007/03/28

出願番号：特願 2007-085087

発明の名称：映像表示装置

発明者：井須尚紀、森本明宏

[3] 出願日：2008/4/1

出願番号：特願 2008-095473

発明の名称：映像表示装置

発明者：井須尚紀、森本明宏

[4] 国際公開日：2007/8/2

国際公開番号：WO 2007/086431

発明の名称：VIDEO DISPLAY

発明者：MORIMOTO AKIHIRO, ISU NAOKI