

視覚運動刺激による映像酔いと回旋眼球運動 Motion Sickness from Visual Motion Stimulus and Torsional Eye Movements

氏家 弘裕¹, 阿部 聖二², 鵜飼 一彦², 木竜 徹³, 斎田 真也¹
Hiroyasu UJIKE¹, Seiji ABE², Kazuhiko UKAI², Toru KIRYU³, Shinya SAIDA¹

¹ 産業技術総合研究所, ² 早稲田大学, ³ 新潟大学

¹ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ² Waseda University, ³ Niigata University

Abstract The study investigates (i) the visual motion pattern that tends to elicit motion sickness and (ii) the correlation between subjective evaluations of the sickness and amounts of elicited eye movements. To do this, we showed observers six different types of optic flow corresponds to virtual body movements of rotation and translation along three orthogonal axes. The results showed that rotation motion along visual axis yielded the largest subjective score of motion sickness. Moreover, we found significant correlation between the subjective scores and extents of sustained type, but not transient type, of torsional eye movement produced with the visually rotating motion.

1. まえがき

近年の映像技術の進歩によって、私たちはさまざまな映像を視聴し、楽しむことが可能となってきた。しかし、その一方で、いわゆるポケモン事件での光感受性発作の誘引に見られるように、映像が時として健康への重大な影響を及ぼしかねないことも知られている。とりわけ、画面の大型化によって、誘導自己運動感覚（ベクション）を引き起こしたり、さらにめまいや吐き気などの症状を伴ういわゆる映像酔いを引き起こしたりする可能性が高まってきた。

映像酔いは、必ずしも高度な映像提示環境を必要とせず、大視野スクリーンに投影された映像や、あるいは家庭内の大型ディスプレイなどでも生じる可能性が十分にある。事実、本年7月8日には、松江市立第2中学校で、授業中に体育館でビデオ映像を見ていた生徒294名のうち、36名が映像酔いの症状を訴え、病院に運ばれるという事態が生じた。この事例では、手ぶれのある映像を大視野で提示したことが主な原因と考えられているが、映像酔いはいつでも起こりうることを端的に示した事例といえる。

映像酔いは、しかしながら、いわゆる乗り物酔いと同一動揺病^{[1]-[4]}として位置づけられるものであり、これによって身体に重篤なダメージを与えるものではないが、できればその発生を最小限に抑えておく必要がある。そのためには、その発生原因を明確にすることが必要であり、これにより予防措置を講じることが可能となる。さらに、科学的側面を考えると、発生原因を明確にすることで、身体運動の情報処理メカニズムを明らかにできる可能性がある。

映像酔いを含む動揺病の酔い症状の発生メカニズムについては、いくつかの仮説があり、現時点では1つに特定されていないが、少なくとも身体運動についての視覚情報と非視覚情報とが非整合な状況にあることで、酔いの症状が発生しやすいと考えられている。発生メカニズムとして、これまでに主張されてきた主な仮説として、感覚矛盾説^[5]、姿勢不安定説^[6]、感覚再配置説^[5]、空間識異常説^[7]、中毒説^[8]などがある。感覚矛盾説は、文字通り身体運動についての視覚情報と非視覚情報との矛盾が原因であるとする説である。しかし、矛盾がある状態で必ずしも映像酔いが起きないことや、この説だけでは、映像酔いの大きさがさまざまな条件により異なることを説明できないことなどから、他のさまざまな仮説が考え出されたといえる。

映像酔いの程度が状況により異なるのは、身体運動情報についての矛盾が原因である他に、さまざまな別の要因が影響しているためと考えられる。動揺病に影響する要因として、1つは、睡眠不足や疲労、喚起不全、低血糖、アルコール摂取など脳機能の低下を招く状態があげられる^[1]。この場合には、症状を増強する。また年齢も影響要因の1つである^[1]。幼少期にはほとんど動揺病は生じないが、6~10歳にかけて発生頻度が急上昇し、12歳頃までには成人と同程度になることが報告されている^[9]。さらにここでは、動きのある映像を静止して観察する場合に生じる、映像酔いという観点から考えると、1つは視覚的な身体運動情報が十分に伝達されるかどうかに関わる要因と、もう1つはその運動情報を予測できるかどうかに関わる要因とがあげられる。前者については、視覚特性として、映像の輝度、コントラスト、大きさや運動速度、運動ベクトル密度、観察時間などがある、また後者については、運動ベクトルの時空間連続性に依存する運動ベクトルの予測性と映像の文脈的必然性に依存する文脈的予測性とが考えられる。

このように映像酔いの基本的原因が、身体運動についての視覚情報と前庭系などの非視覚情報との矛盾であり、さらにこれを増強したり低減したりする要因として、視覚特性や運動ベクトル予測性、文脈的予測性などがあると考えられる。

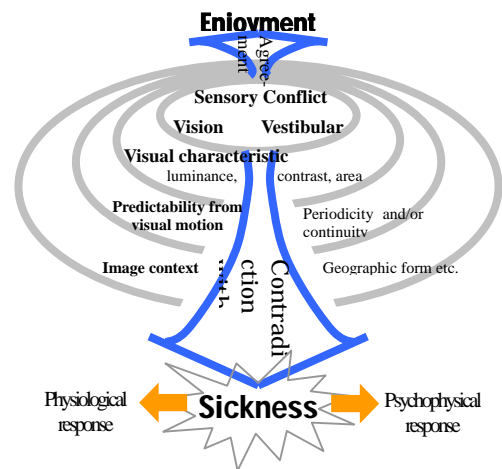


Fig. 1 Schematic model of developmental mechanism of motion sickness.

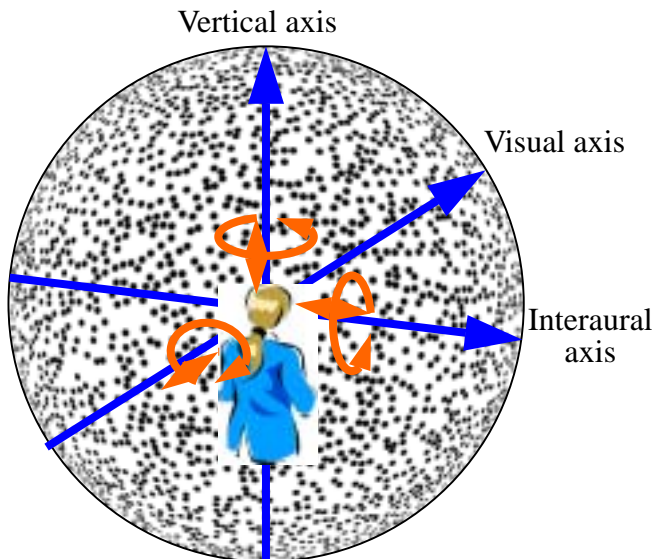


Fig. 2 Virtual environment for presenting visual stimulus motion. The visual motion simulated that observers were translated or rotated along one of three axes.

これを概念図として、Fig. 1 に示す。

本研究では、第 1 に、映像酔いの基本原因である感覚矛盾について、どのような非整合状態が映像酔いを生じやすいのかを明らかにすることを目的とする。そのために、身体運動を示すさまざまな視覚運動パターンによる映像酔いへの効果を明らかにする。第 2 に、映像酔い評価手法に向けて、映像酔いの基本原因と予測性などの高次の影響要因とを分離する方法について検討することを目的とする。そのために、情報矛盾による映像酔いを他覚的に測定する方法について、非視覚情報と連携の深い眼球運動の観点から検討する。

2. 実験 1

本実験では、複数の視覚運動パターンを観察者に提示し、各々についての映像酔いの主観評価値を計測した。

2.1 方法

観察者は 7 名（男性 3 名、女性 4 名、年齢 30~56 歳）であり、いずれも晴眼者または視力矯正が行われた。

実験では、観察者が一定の直径を有し内壁がランダムドットで覆われた球体の中央に位置し、ここを中心にして身体が平行運動したり回転運動したりしている状態を模擬した映像を提示した (Fig. 2)。模擬される球体内での観察者の運動は、直交する 3 軸（視線軸、両耳間軸、垂直軸）に対する往復平行運動または一方向回転運動（各々、ピッチ、ロール、ヨーに対応）とした。

刺激の運動は、往復平行運動単独では、各軸 6（または 7）種類の振幅・周波数の組合せ (Table 1)、一方向回転運動単独では、各軸 3 種類の速度 (Table 2) の合計 28 種類を用いた。さらに、平行×平行と平行×回転のような運動の組み合わせを行っており、軸間の組み合わせ数では、前者が 3 種類、後者が 9 種類である。ただし、平行、回転とも 3 種類の運動振幅や速度を用いており、組み合わせ総数では、108 となる。

刺激は、コンピュータ (Intergraph, Zx10) 上で OpenGL を用いて作成され、液晶プロジェクタ (Sony, VPL-FE100J) によりスクリーン (Toshiba Tesco, Pancake Window) に提示された。このスクリーンは、光学的距離が 12.5m となる位置に刺激を虚像として提示する。スクリーンの刺激提示領域は、82 × 67deg で、これは画素数で 1280 × 1024pixel に相当する。ス

Table 1 Conditions of simulated reciprocal translation of body movement along each of three axes

Interaural axis		Vertical axis		Heading axis	
Amplitude	Frequency	Amplitude	Frequency	Amplitude	Frequency
1.25	3.000	1.25	3.000	2.50	6.000
2.50	1.500	2.50	1.500	5.00	3.000/(1.500)
5.00	0.750	5.00	0.750	10.0	1.500
10.0	0.375	10.0	0.375	20.0	0.750
20.0	0.188	20.0	0.188	20.0	1.500
40.0	0.094	40.0	0.094	40.0	1.500
				80.0	1.500

Table 2 Conditions of simulated rotation of body movement along each of three axes

Interaural	Vertical	Heading
3.75	3.75	15.0
7.50	7.50	30.0
15.0	15.0	60.0

Table 3 Eleven scales of subjective scores

評価値	評価内容
0	全く異常なし
1	少し違和感を感じる
2	やや不快な感覚がある
3	時々めまいのような感覚がある
4	軽いめまいを感じる
5	めまいを感じる
6	めまいに加え気持ち悪くなりそうな感覚がある
7	めまいに加えやや気持ち悪い感覚がある
8	めまいに加え気持ちの悪さを感じる
9	めまいに加えひどく気持ち悪い
10	気持ち悪く、刺激を凝視できない (吐き気を感じる)

クリーン輝度は、白色部分で、15cd/m²であった。

各観察者は、刺激例を見て説明を受けた後、全ての運動種類（総数 135）をランダムな提示順で、1 試行ずつ行った。各試行では、まず静止したランダムドットパターンが 5 秒間提示され、次に動きのあるパターンが 15 秒間提示された。観察者は、この刺激を両眼視で観察し、観察終了後に映像酔いの大きさを、Table 3 の 11 段階の尺度にしたがって、口頭で実験者に伝えた。

2.2 結果と考察

軸ごとに単独の運動を模擬した場合には、視線軸に対する一方向回転で最も大きな尺度評価値となり、次に視線軸に沿う往復並進運動で大きな値となった (Fig. 3)。前者では、平均の主観評価値が 5 程度であり、観察中ずっとめまいを感じている状態、後者では、主観評価値が 3 程度であり、めまいのような感覚がある状態という結果であった。

提示された視覚運動パターンは、前者が回転運動、後者は拡大・縮小運動であり、その他は、いずれも並進運動であるた

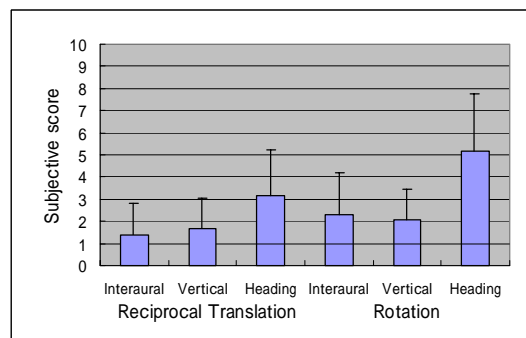


Fig. 3 Subjective score of motion sickness for simulating one of six different types of body movement.

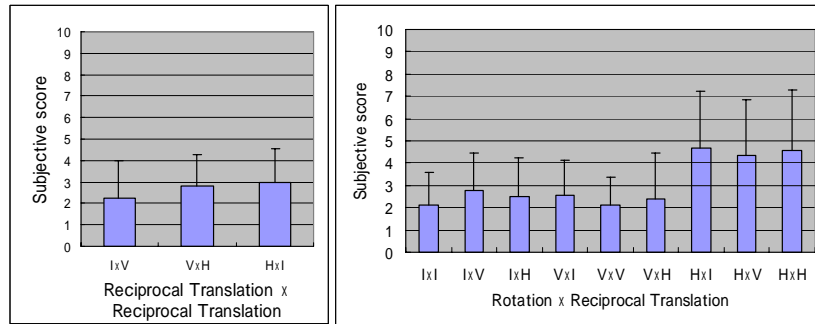


Fig. 4 Subjective score of motion sickness for simulating two combinations of six different types of body movement.

め、空間中での身体運動情報ではなく、視覚運動パターンによって、映像酔いの大きさが決定していると考えられる。

次に、二つの運動パターンを組み合わせた場合には、視線軸回りの一方向回転が加わった場合に、一様に大きな尺度評価値を得た (Fig. 4)。先に述べたとおり、軸ごとに単独の運動を模擬した場合でも、視線軸回りの一方向回転が大きな値となったが、組み合わせた場合にも、この運動パターンが映像酔いに寄与していることがわかる。しかし、値自体は、組み合わせによって増加するというはなかった。また、先に大きな値を示した視線軸に沿う往復平行運動の影響は、組み合わせの結果では見られなかった。

サイバー酔いに関する研究では、少ないながらも酔いに対する映像内容の影響が報告されており^[10]、そのうち運動パターンによる影響については、今回と同様の3軸に対する往復回転運動 (範囲 $\pm 60\text{deg}$, 速度 30deg/s) を提示した場合、20分の提示時間にわたって5分おきに酔いの評価尺度値を求めた結果、いずれの軸回りの運動でも、時間とともに評価値が上昇することが報告されている。この報告では、映像にリアルな風景を用いていること、長時間の観察での評価を行っていることなどから、本研究とは測定条件が異なるため、結果が異なると考えられる。本研究では、予測性など高次の認知判断に影響しない状態で、視覚運動パターンごとの基本的な映像酔いの大きさを調べたものである。これに対し、先の報告では、リアルな風景を用いているため、文脈的必然性からの予測に反するものであり、この点で映像酔いを増強した可能性がある。

3. 実験 2

本実験では、実験 1 で最も大きな映像酔いを誘引した視覚回転運動パターンを提示し、その時の主観評価値と回旋眼球運動量とを比較した。これにより、感覚の非整合性による基本的な映像酔いの大きさの客観的評価として、回旋眼球運動^{[11],[12]}の可能性を検討した。

観察者は 17 名 (男性 5 名, 女性 12 名, 年齢 20 ~ 53 歳) であり、いずれも晴眼者または視力矯正が行われた。

実験刺激は、実験 1 と基本的に同様であるが、本実験では、視線軸に対する回転運動のみ異なる 4 種類の速度で提示した。観察者は刺激観察後、11 段階の尺度評価を行った。また、刺激観察中に、観察者の回旋眼球運動計測を行った。

回旋眼球運動計測は、計測装置 (Arlington Research, ViewPoint Eye Tracker) の赤外線カメラを用いて、サンプリング時間 16.7ms で撮影された光彩パターンを、画像処理によりパターンマッチングすることで行われた。

3.2 結果と考察

測定結果の一例を、Fig. 5 に示す。これは刺激が右回転の場合で、縦軸の回旋眼球運動量は、正值側は、観察者にとって時計回りの値、負値は、反時計回りの値を示している。得られた回旋眼球運動の波形を見ると、少なくとも 2 種類の運動が見られる。一つは、刺激が回転運動中、それに応じて眼球運動位置が一定の偏位量を示すもの (持続性応答) である。さらに、一過性応答には、刺激運動方向に合わせて、まず急速な回旋を行い (急速相)、その後ゆっくりともとに戻る (緩徐相) ものと、刺激運動方向に合わせて、まず緩徐相が現れ、ある程度行ったところでもとに戻る際に急速相が現れるものがある。

ここでは、尺度評価値との相関を見るために、持続性応答と一過性応答とを別々の処理を行った。前者については、刺激回転中の回旋量の平均値と刺激静止中の回旋量の平均値との差を、後者については、刺激回転中の平均位置からの標準偏差を刺激静止中の標準偏差で正規化した値を、各々求め、主観評価尺度との比較を観察者ごとに行った。その結果、持続性応答成分と主観評価値の間には有意な相関が見られ ($R = 0.477$, $t(17) = 2.24$, $p < 0.05$) (Fig. 6a)、一過性応答成分と主観評価値の間には有意な相関が見られなかった ($R = 0.311$, $t(17) = 1.34$, $p > 0.05$) (Fig. 6b)。

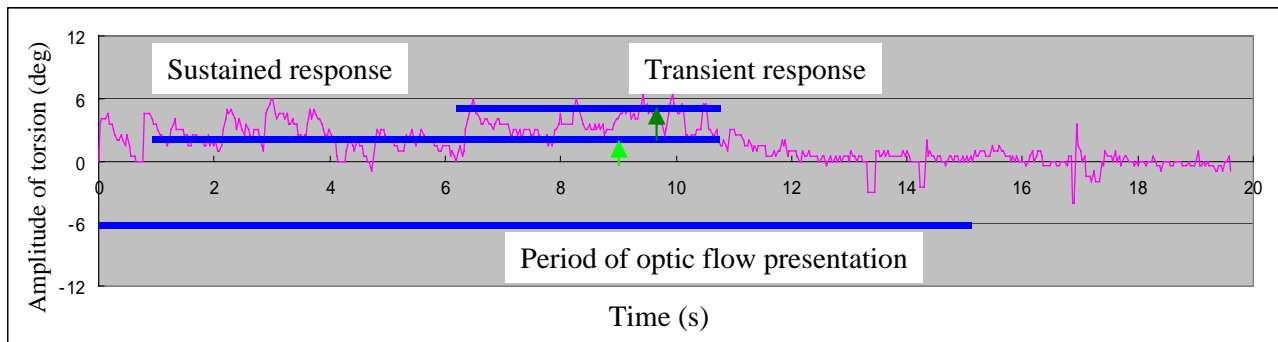


Fig. 5 Sample data of torsional eye movement. There were two types of responses, which were quantified in different manners.

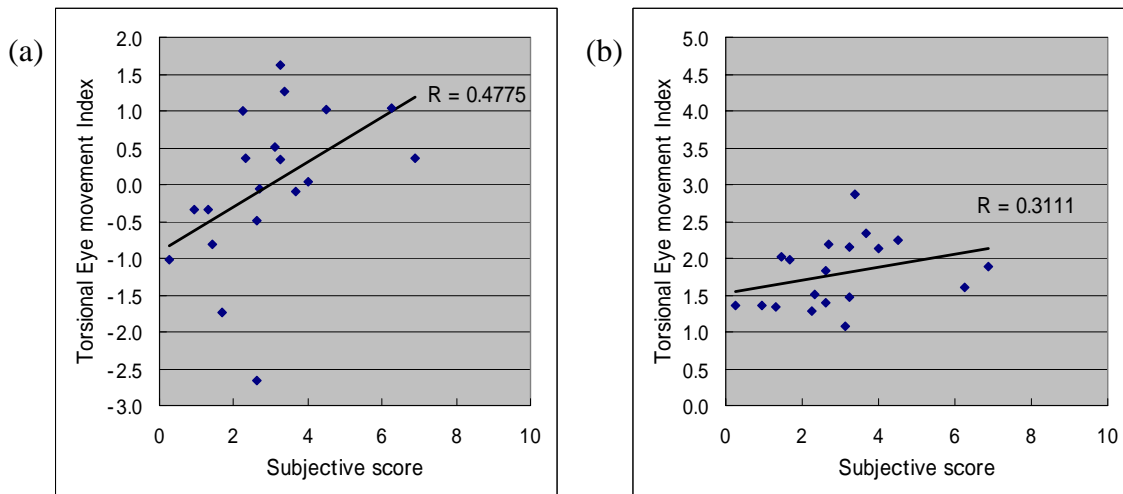


Fig. 6 Correlation between subjective score of motion sickness and torsional eye movement index of (a) sustained response and (b) transient response.

回旋眼球運動の持続性応答と一過性応答との間に、映像酔いの主観評価値との相関で相違が見られたことは、両者の間に機能的な違いがあることを示唆する。すなわち、持続性応答については、前庭系など非視覚系と協調しながら平衡機能に関わる可能性が考えられる。これに対し、一過性応答は、平衡機能には関わらずに、視覚システム内で網膜像を安定させる機能に関わっていることが示唆される。

なお、回旋眼球運動は不随意であるため、その持続性応答成分は、受けるべき要因の比較の少ない原初的な酔いと相関すると考えられる。これに対し、任意の映像では、主観評価値は予測性など他の要因による影響を受けた結果である。従って、回転運動による映像酔いに対しては、眼球運動量と主観評価値とを比較することでその間に関わる要因の影響を抽出することが可能であると考えられる。このように、さまざまな映像における原初的な酔いの大きさや予測性の要因の影響を映像パタンの特徴に基づいて抽出し解析する手法が確立されれば、さまざまな映像に対して、要因の影響を抽出しデータベース化することが可能になる。そして、これを用いて任意の映像における映像酔いの大きさを評価することが可能になるであろう。

ただし、この手法を確立するためには、視線軸回りの回転運動以外の視覚刺激に対する原初的な酔いの大きさに対応した計測値を明らかにする必要がある。その可能性として、現時点では、拡大・縮小運動に対する輻輳運動や、瞳孔変化、重心動揺などが考えられるが、これらを詳細に検討していくことが今後の課題である。

4. むすび

本研究により、以下の点を明らかにした。

1. 視覚回転運動は、十分に予測の利く状態において、短時間の観察でも、映像酔いを引き起こしやすい。
2. 視覚回転運動による映像酔いの主観評価値と、回旋眼球運動の持続性応答との間には相関関係がある。
3. 回旋眼球運動の持続性応答と一過性応答とは、各々平衡機能と網膜像安定機能とに関連する可能性がある。
4. 主観評価計測と眼球運動計測とを併用することで、映像酔いに影響する要因を分離できる可能性がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、実験補助および多大なデータの整理に努めていただいた喜多佳子氏、岡本清氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 高橋正紘：17章 動揺病，21世紀耳鼻咽喉科領域の臨床 8 めまい・平衡障害，小松崎篤(編)，497 / 503，中山書店(1999)
- [2] 坂田英治：めまいは怖い，講談社(1997)
- [3] 近江政雄：動揺病，視覚情報処理ハンドブック，日本視覚学会(編)，434 / 435，朝倉書店，(1998)
- [4] 井須尚紀：動揺病，新編感覚・知覚ハンドブック，大山正，今井省吾，和氣典二(編)，1350 / 1356，誠信書房，(1994)
- [5] J. T. Reason, J. J. Brand: Motion sickness, 103 / 128, Academic Press (1975)
- [6] G. E. Riccio, T. A. Stoffregen: An ecological theory of motion sickness and postural instability, Ecological Psychology, 3巻, 3号, 195 / 240 (1991)
- [7] M. Takahashi, M. Ogata, M. Miura: The significance of motion sickness in the vestibular system, Journal of Vestibular Research, 7巻, 2-3号, 179 / 187 (1997)
- [8] M. Treisman: Motion sickness: An evolutionary hypothesis, Science, 197巻, 4302号, 493 / 495 (1977)
- [9] M. Takahashi, I. Toriyabe, Y. Takei, J. Kanzaki: Study on experimental motion sickness in children, Acta Otolaryngol, 114巻, 3号, 231 / 237 (1994)
- [10] W. T. Lo, R. H. Y. So: Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes, Applied Ergonomics, 32巻, 1号, 1 / 14 (2001)
- [11] B. S. K. Cheung, I. P. Howard: Optokinetic torsion: Dynamics and relation to circularvection, Vision Research, 31巻, 7/8号, 1327 / 1335 (1991)
- [12] N. J. Wade, M. T. Swanston, I. P. Howard, H. Ono, X. Shen: Induced rotary motion and ocular torsion, Vision Research, 31巻, 11号, 1979 / 1983 (1991)