

## 身体および視野の振動が快適さに与える影響

## The Influence of Body and Vision Vibration on Subjective Comfort

長野 茂人<sup>†</sup> 河合俊岳<sup>‡</sup> 増田 修<sup>†</sup> 河合 敦夫<sup>†</sup> 井須 尚紀<sup>†</sup>  
 Shigeto Nagano Toshitake Kawai Osamu Masuda Atsuo Kawai Naoki Isu

## 1. はじめに

列車や自動車、航空機などの乗物に乗って一直線に前進している場合でも、乗物は揺れてロールやピッチ回転が複合した複雑な非周期的振動が生じる。一般に乗物の揺れは乗り心地を低下させる要因となるが、心地良い眠気を誘う刺激となることも多くの人々が経験しているところである。本研究では、身体や視野に加わる非周期的振動において、振動の回転軸方向の変動や身体-視野振動の時間差が乗り心地にどのように影響するかを検討した。回転軸方向が常に変動する振動や、回転軸をピッチあるいはロール軸に固定した振動を刺激に用いて、被験者の主観的な乗り心地と揺れの強さの感覚を心理学的に測定した。視覚刺激は乗物の内部視界および前方の窓から見える外部視界を3Dグラフィクスによって与え、身体と視野の振動に時間差を設けた。

## 2. 実験方法

## 2.1 被験者

本研究における実験は、三重大学大学院工学研究科実験倫理委員会の承認の下に実施した。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29名(男性19名、女性10名)を被験者に用いた。実験実施に先立って、実験の目的、方法、予期される影響、人権の保護に関することなどについて被験者に十分な説明を行った後、被験者から文書による同意を取得した。なお、動揺病の主症状(Graybiel et al. [1]の診断基準におけるMIII以上の状態)が見られた場合や被験者が中断を求めた場合には直ちに実験を中断することとしていたが、動揺病不快感が発生することはなかった。

## 2.2 実験システム

3D映像システムには反射型偏光方式を採用し、描画演算用コンピュータ4台、D-ILAプロジェクタ4台、および偏光用大型スクリーン(6.4 m Wide×2.4 m High)などによってシステムを構成して両眼立体視映像を描画した。

被験者頭部がスクリーンの手前3.3 mに位置するように、ロールとピッチの2軸の可動軸を持つモーションベース(川田工業(株)JoyChair-R1)を設置した。本装置に搭乗した被験者から見たスクリーンの視角は水平88 deg×垂直40 degとなった。被験者にヘッドフォンを装着させ、モーションベースの駆動音を遮断するとともに臨場感を高めるために走行感のある音楽を聞かせた。モーションベースおよび音環境の制御をコンピュータ1台によって行い、ワイヤレスマウスの操作によって描画演算用コンピュータ4台の動作と同期させた。

## 2.3 刺激

非周期的なロールとピッチの小振幅回転および両者の複合回転を振動刺激として与えた。白色雑音を2次の共振

フィルタに入力することによって非周期的振動波形を生成した。共振周波数1 Hz以下の非周期的振動(AV-L)と、1~2 Hzの非周期的振動(AV-H)を生成し、ロールおよびピッチ振動のパワー比が4:0, 3:1, 2:2, 1:3, 0:4となるように両振動を組合せた(共振周波数2種類×パワー比5種類=10種類)。なお、両振動の駆動信号生成に独立な白色雑音を用いることで、回転軸方向が常に変動する複合回転を得た。振動の持続時間は45秒間とした。

モーションベースに被験者を座らせて2点式シートベルトで腰部を拘束し、上記の非周期的振動を身体に与えた。被験者の頭部はヘッドレストに接触させなかった。視覚刺激として、等速直進時の外部視界と内部視界を重ね合わせた映像を3Dグラフィクスによって与えた。外部視界には16.67 m/s(時速60 km)で前方に直進した時の遠方風景を模擬した映像を、内部視界には非周期的振動が加わった乗物内部の視界を模擬した映像を用いた。内部視界の振動を身体運動刺激と一致させた刺激10種類のほかに、パワー比2:2の組合せで内部視界の振動を身体運動刺激より0.2, 0.4, 0.6 s先行させた刺激および身体運動刺激とは独立の信号を用いた刺激(共振周波数2種類×時間差4種類=8種類)を加えて、計18種類の刺激を用いた。なお、いずれの組合せの刺激においても、ヘッドフォンを通して音楽「ルージュの伝言」を聞かせ、被験者に走行感を与えるようにした。

## 2.4 計測法

各刺激で感じる「乗り心地」および「揺れの強さ感覚」をSchefféの対比較法を用いて測定した。1つ目の刺激と2つ目の刺激、2つ目の刺激と3つ目の刺激、というように連続する2つの刺激間で比較させ、その差異を-2~+2の5段階の序数尺度で答えさせた。同一刺激で生じる感覚が心理的連続体上で正規分布し、かつ任意の2刺激間での比較を同一の尺度で評定されると仮定して、範疇判断の法則および比較判断の法則に基づいて距離尺度化した。なお、同一刺激で生じる感覚の分布の標準偏差を単位として距離尺度を定めた。

## 2.5 実験手順

45秒間の非周期的振動を1刺激とし、15秒間程度の静止時間を置いて約60秒周期で振動刺激を繰り返した。10刺激を1セッションとし、1回の実験で4セッションを実施した。各セッション間には3~5分の休憩時間を取った。連続する2刺激間で「乗り心地」と「揺れの強さ感覚」の対比較を行わせ、1セッションで9比較、1回の実験で計36比較を行わせた。なお、乗り心地と揺れの強さ感覚を比較した結果は、15秒間程度の静止時間内に口頭で答えさせた。

18種類の各刺激が他の4種類の刺激と対をなすように、36種類の対について対比較を実施した。なお、各対の刺激が前後逆順で同数となるように刺激順序を配置した。

実験総数は60回で2,160比較を実施し、各刺激対あたり60試行の比較を行った。

<sup>†</sup> 三重大学工学部情報工学科 Faculty of Eng., Mie Univ.  
<sup>‡</sup> (株)本田技術研究所 Honda R&D Co., Ltd.

### 3. 結果

#### 3.1 乗り心地

距離尺度で表現した乗り心地を図1に示す。全てのロール-ピッチ振動のパワー比および身体-視野振動の時間差において、共振周波数の高いAV-Hが共振周波数の低いAV-Lよりも乗り心地が低下した。ロール振動やピッチ振動に比べて、両者の複合振動が乗り心地の高い結果となった。一方、身体-視野振動間に時間差を加えても乗り心地に違いが見られなかった。

#### 3.2 揺れの強さ感覚

全てのロール-ピッチ振動のパワー比および身体-視野振動の時間差において、共振周波数の高いAV-Hが共振周波数の低いAV-Lよりも揺れが強く感じられた(図2)。ロール振動やピッチ振動に比べて、両者の複合振動が弱い揺れに感じられた。一方、身体-視野振動間に時間差を加えても揺れの強さ感覚に違いが見られなかった。

#### 3.3 乗り心地と揺れの強さ感覚との相関

「乗り心地」と「揺れの強さ感覚」の各々についてSchefféの対比較で回答された序数を実験毎の順位(平均順位)に変換し順位相関係数を求めることによって、両者間の相関を調べた。各被験者の実験毎に順位相関係数を求めると-0.52±0.26(平均±標準偏差)となり、乗り心地の良さと揺れの強さ感覚との間に負の相関が見られた。身体-視野振動間に時間差があっても、乗り心地と揺れの強さ感覚のいずれにも差異は認められないが、比較対毎に乗り心地と揺れの強さ感覚の比較結果を見ると、順位相関係数は-0.48±0.30(平均±標準偏差)であり、比較対全体での相関と違いのない結果であった。

### 4. 考察

本実験では、非周期的振動をロールおよびピッチ回転の角速度の二乗の和が等しくなるように刺激の大きさを与えた。これは、刺激の周波数範囲において半規管系の出力が角速度に比例するからである[2]。一方、別の観点から見ると、刺激によって身体各部に加わる速度は角速度に比例するから、速度の二乗、すなわち運動エネルギーの次元で刺激の大きさを合わせたことになる。

実験の結果は、刺激の角速度を等しくしても、揺れの強さ感覚は周波数の高い振動が強く感じられることを示した。角加速度は周波数が高いと大きくなるので、角速度に加えて角加速度も揺れの強さ感覚に関与している可能性

が考えられる。非周期的振動AV-Lにはかなり低周波も含まれてはいるものの、刺激の周波数範囲での半規管出力は角速度に比例するので、高次中枢での処理だと考えねばならない。一方、耳石器が受容する加速度は、頭部のx, y方向については

$$\text{半径} \times \text{角加速度} + \text{重力加速度} \times \sin(\text{傾斜角})$$

となり、本実験の刺激条件では角加速度に比例する成分が大きく作用することになる。しかし、耳石器の動特性も刺激の周波数範囲では速度に比例した出力になるので、角加速度の積分、すなわち角速度に比例した出力を出すことになる。

上記のように角加速度が寄与している可能性も考えられるが、より合理的な解釈は頭部の振動特性にあると思われる。立位または坐位で振動を与えた時、頭部の振動は3Hz, 10Hzに共振周波数をもつ。そのため、周波数の低いAV-LよりもAV-Hの方が頭部振動の利得が高く、刺激の振幅比よりもAV-Hで頭部が大きく振動したと考えられる。すると、頭部の角速度もAV-Hの方が大きくなり、揺れの感覚が強くなったと考えられる。

さて、揺れの感覚はロールやピッチ振動に比べて複合振動が弱く感じられる結果が得られた。ロールやピッチ振動は1軸の回転の角速度のみであるのに対して、複合振動では2軸の角速度のベクトル和が角速度の大きさとなる。2つの角速度は独立に与えられているので、両者のピークが時間的に一致することはほとんど起こらない。そのため、短時間内での角速度の最大値を考えると、ロールやピッチ振動に比べて複合振動では小さい。揺れの実効値(揺れが小さい時も含めての二乗平均値)よりも、短時間区間での最大値の平均的な値で揺れの強さの感覚が決まると仮定すると本実験で得られた結果が説明できる[3]。閾値以上の二乗平均値が揺れの強さ感覚を決定すると仮定してもよい。強烈な印象だけが後に残るといふと同様に、刺激の強い部分で全体の感覚が決まるといふ解釈は不合理とは言えない。

### 参考文献

- [1] Graybiel A, et al, Diagnostic criteria for grading the severity of acute motion sickness, *Aerospace Med* 39: 453-455 (1968)
- [2] Wilson VJ, Melvill Jones G, *Mammalian Vestibular Physiology*, Plenum Press, New York (1979)
- [3] 井須尚紀 ほか, コリオリ刺激が誘起する回転感覚と錯覚, *Equilibrium Res*, 183-193 (2004)

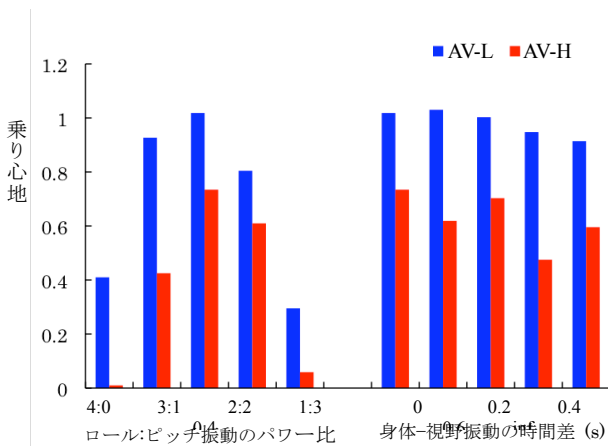


図1 乗り心地

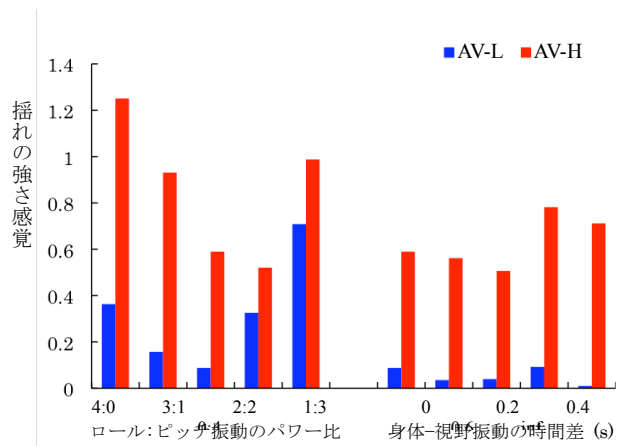


図2 揺れの強さの感覚