

# 鉛直振動暴露時の人体の共振現象

埼玉大学 正会員 松本泰尚  
サウサンプトン大学 グリフィン, M. J.

## 1. はじめに

現代の様々な環境での振動暴露に起因する、人間の健康・心理面への悪影響や活動の阻害等が指摘されている<sup>1)</sup>。振動暴露の悪影響を効率的に低減するには、人間の振動応答特性の把握が必要である。人間の振動応答特性は、大きく分けて心理的・生理的・機械的な側面があり、それらが複雑に関連しあう。これを踏まえ、個々の応答の理解を通じ、相互の関連を解明する立場から、本研究では、人間の振動応答特性把握の基礎的研究として、鉛直振動暴露時の人体の動的応答特性の解明を目的とした。特に、既往の研究で報告されている座位人体の共振現象<sup>2)</sup>が発生する 5 Hz 付近の振動数における上半身の応答を実験で計測し、実験結果の理論的考察のための人体動的応答のモデルを構築することを目的とした。

## 2. 被験者を用いた振動実験<sup>3) 4)</sup>

### (a) 実験及び解析方法

実験は、英国サウサンプトン大学音響振動研究所内の 1 m ストローク鉛直加振器を用いて行った。年齢 22-33 歳の 8 名の男性志願者が参加し、実験中の被験者の姿勢は、'快適かつ直立の座位'とした。入力振動加速度としては、0.5-20 Hz のバンドパスランダム信号を用い、振動レベルは  $1.0 \text{ ms}^{-2} \text{ r.m.s.}$ とした。この振動数領域は、全身振動暴露時に人体が全体系として応答する領域であり、用いた振動レベルは、自動車内で日常的に曝されるレベルとほぼ同程度である。座面での鉛直加速度及び鉛直反力、脊椎・骨盤計 7 点での水平(x)・鉛直(z)・回転( $r_y$ )加速度応答を測定した(図 1)。加速度応答は体表面で測定した。

計測結果より、動質量(座面鉛直反力/座面鉛直加速度)  $M(f)$  を求めた。

$$M(f) = S_{af}(f)/S_a(f) \quad (1)$$

ここで、 $S_a(f)$ は座面加速度のパワースペクトル密度、 $S_{af}(f)$ は座面加速度と座面反力とのクロススペクトル密度を表す。動質量は、身体各部位への鉛直振動伝達率(加速度応答/座面加速度)の質量を重みとした線形和に等しく、身体全体系としての動特性を表すと考えられる。動質量の大きさ最大の点を主共振とし、主共振振動数での身体の動的応答を、各測定点への振動伝達率の大きさと位相及び測定した初期位置を用いて変位応答として可視化した。

### (b) 被験者の動質量と主共振時の身体の変位応答

各被験者の動質量を図 2 に示す。動質量主共振は 4.75-5.75 Hz に見られ、既往の実験結果<sup>2)</sup>と一致する。図 3 は、1 名の被験者の主共振振動数(5.0 Hz)における脊椎・骨盤各測定点の座面に対する相対変位を、1/8 周期ごとに 1 周期にわたり、対応する座面変位とともに示す。応答を明確に示すため、図中の変位は入力を過大な正弦振動(振幅 0.05 m : 約  $49 \text{ ms}^{-2}$ )として求めた。図 3 より、主共振振動数で脊椎の曲げ振動が顕著なことがわかる。胸椎部は腰椎部に比べ曲げ振動が小さく、肋骨が胸椎の曲げを拘束していると考えられる。骨盤の回転振動も見られる。また、図 2 に見られる人体の高減衰性が、図 3 で各

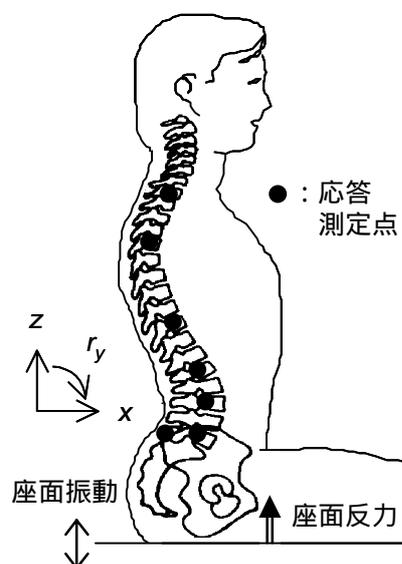


図 1 被験者と測定点

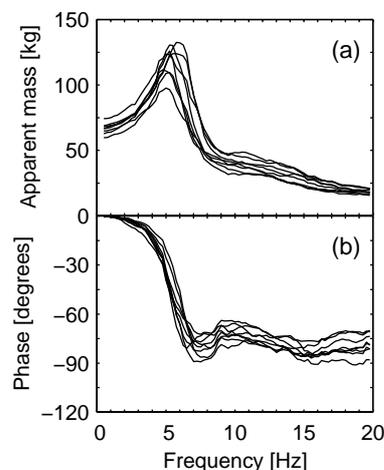


図 2 各被験者の動質量

キーワード：人間，動質量，振動伝達，振動モード

連絡先：〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255 Tel 048-858-3557 Fax 048-858-7374

測定点応答間の位相差として現れている。他の被験者の応答も、図3と同様の応答傾向を示した。

### 3. 座位人体の動的応答のモデル化<sup>4)</sup>

#### (a) 回転自由度を含む質量集中モデル

身体各部位の共振への寄与を明確に考察するため、モデルには簡易な集中質量モデルを用いた。実験結果を踏まえ、脊椎と骨盤は直列の質量・回転剛性・減衰系でモデル化した(図4(a)参照)。各質量の重心が振動伝達経路上に位置しないため、鉛直振動入力により質量の回転運動が発生する。人体構成

を踏まえた種々のモデル構成を、動的応答実験結果と比較し検討した。モデルの慣性・幾何パラメータは既往の測定結果<sup>5)</sup>より、剛性・減衰については、モデルと実験の動的応答の比較によるパラメータ同定により決定した。同定したパラメータに対し感度解析を行い、モデル各部位の主共振への寄与を考察した。

#### (b) 主共振に対応する振動モードと身体各部位の主共振への寄与

ここでは、実験結果中央値とより適合した図4に示すモデルの結果を示す。図4(b)は、非減衰として固有値解析より求めた、動質量主共振に対応する振動モードを示している。このモード形状は、臀部と大腿部の剛性に相当する鉛直バネ1による全身の鉛直振動、骨盤の回転振動に相当する剛体Bの回転、脊椎の曲げ振動に相当する剛体C・Dの回転、腹部内臓に相当する剛体Eの鉛直振動を含む。図4(b)の非減衰モードでは、全身鉛直振動と内臓鉛直振動は同位相となる。図5は、各剛性・減衰を、同定したパラメータから±10%変化させた場合の、動質量主共振振動数への影響を示す。図より、臀部と大腿部の剛性・減衰(図中1)及び内臓の鉛直振動(図中5)が、動質量主共振へ主要な寄与を及ぼすと考えられる。

### 4. まとめ

被験者を用いた振動実験により、鉛直振動暴露時の座位人体において、5 Hz 付近の動質量主共振振動数では、脊椎の曲げ振動が発生することを明らかにした。この知見は、長期間振動曝露に関連すると考えられている脊椎障害<sup>1)</sup>の理解に有用である。また、実験結果と比較して構築した質量集中モデルより、全身及び腹部内臓の鉛直振動、脊椎の曲げ振動、骨盤の回転振動を

含む、動質量主共振に相当する振動モードを抽出した。感度解析及び種々の構成のモデルとの比較により、特に全身及び内臓の鉛直振動が、動質量主共振により支配的な影響を及ぼすことを示した。モデルが簡易であることから、自動車などの座席の動特性試験に用いる人体ダミーへの応用などが検討されている。今後、本研究の立位人体への拡張や、動的応答と心理的応答との関係の理解に基づいて、歩道橋など橋梁の振動、交通や建設工事による周辺建物の振動、建設工事現場での振動などの、人間への影響を考慮した評価を検討することを考えている。

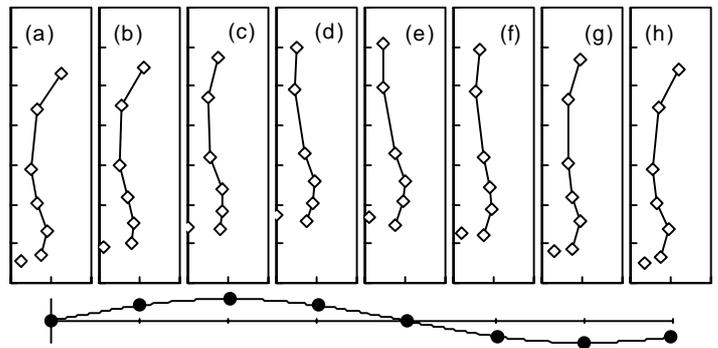


図3 主共振振動数における座面振動 1/8 周期ごとの脊椎と骨盤の測定点の座面に対する相対変位(1目盛 = 0.1 m)

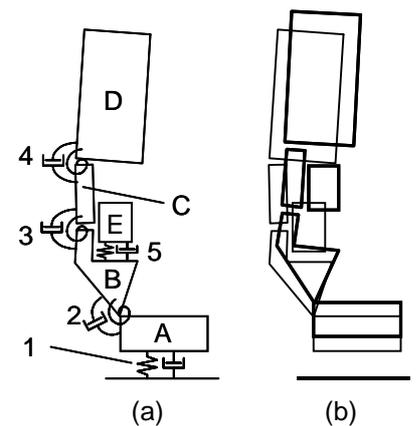


図4 (a)モデルと(b)動質量主共振に対応する振動モード(初期位置 —— ; モード形状 - - -)

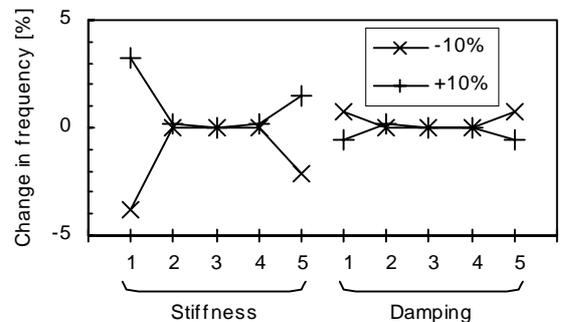


図5 パラメータ変化の主共振振動数への影響(横軸の数字は図4(a)の番号に対応)

参考文献 1) Griffin, M. J.: Handbook of Human Vibration, Academic Press, 1990. 2) Fairley, T. E., Griffin, M. J.: The apparent mass of the seated human body: vertical vibration. J. Biomechanics, 22, 81-94, 1989. 3) Matsumoto, Y., Griffin, M. J.: Movement of the upper-body of seated subjects exposed to vertical whole-body vibration at the principal resonance frequency. J. Sound and Vibration, 215, 743-762, 1998. 4) Matsumoto, Y.: Dynamic response of standing and seated persons to whole-body vibration: principal resonance of the body. PhD thesis, Univ. Southampton, England, 1999. 5) e.g. NASA: Anthropometric source book, volume I: anthropometry for designers. NASA Reference Publication 1024, 1978.