

ぜい弱な構造物の破壊に伴う触覚振動刺激生成モデルと踏み心地呈示技術の開発

Vibrotactile Stimulation Model for the Fracture of Fragile Structures and Vibrotactile Foot-Step Display

石川 俊 正 岡本 正吾 永野 光 正 山田 陽滋 (名古屋大学)

Shun ISHIKAWA, Shogo OKAMOTO, Hikaru NAGANO and Yoji YAMADA (Nagoya University)*

This study develops a vibrotactile stimulation method for the fracture of fragile structures. We synthesize the vibrotactile stimulus using the spectra of acceleration stimuli caused by the fracture. We develop a foot-step display that presents a synthesized tactile stimulus to human soles. The participants of the experiment could identify the virtual structures made of the paper, aluminum foil, and polypropylene film.

Key Words: Tactile display, Fragile structure, Vibratory stimulation, Foot sole

1. 緒言

外科手術や彫刻のハプティックシミュレーションでは、構造物や材料の破壊にともなう触覚刺激呈示が効果的である。例えば、骨の切断、外科メスによる切除、手術における針状器具の挿入などにともなう反力呈示方が研究されてきた [1, 2, 3]。しかし、破壊の際に反力が微小にしか生じない構造物においては、反力呈示では破壊の感覚を十分に呈示することができない。本論文では、破壊の際、反力よりもむしろ皮膚感覚が重要となる構造物のことをぜい弱な構造物と呼ぶ。このような構造物の破壊では、力覚よりもむしろ触覚が知覚的に支配的な情報である。しかしこれまでに、破壊にともなう触覚刺激の呈示法は例がなく、ほとんどの研究が力覚呈示に着目してきた。本研究は、ぜい弱な構造物の破壊にともなう触覚刺激の呈示を目指す。破壊は、その材料や破壊速度に依存して、異なる触覚刺激を生成する。そこで、本研究は、構造物を破壊する人間のアクティブな動作、特に速度に応じた刺激の呈示を目的とする。

本研究では触覚刺激を人間の手ではなく、足裏に呈示する。ここで、踏み心地に注目した理由は、現在研究されている触覚ディスプレイはほとんどが手への触覚刺激によるもので、足の触覚、つまり踏み心地に注目した研究は少ない。特に、物体の破壊にともなう、踏み心地の呈示は前例がない。われわれは、振動触覚刺激により、ぜい弱な構造物の破壊にともなう触覚刺激を足裏に呈示する。

2. 踏み心地呈示ディスプレイ

本研究で用いる触覚刺激呈示ディスプレイを図 1 に示す。このディスプレイは、振動触覚刺激によって、構造物の破壊にともなう触覚刺激を呈示する。このディスプレイは足裏全面に一樣な触覚刺激を呈示する。本研究では、この簡易なディスプレイを用いて、触覚刺激生成法の有効性を検証する。また、破壊時の反力が微小である、ぜい弱な構造物を想定しているため、反力を呈示する機構は装備しない。

*This work was in part supported by MEXT KAKENHI 22800030 and Hori Sciences and Arts Foundation. E-mail: see <http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/asi/>

振動触覚刺激子としてボイスコイル・スピーカ (23 W, 4 Ω) を用いた (図 1)。4 個のボイスコイルの上にアクリル製の天板が設置された。ボイスコイルを天板に押し付けて密着させるために、ボイスコイルを固定した中板の下には、バネを配置した。リニア型ポテンシオメータに布バンドにより、人間の足関節を固定した (図 2c)。足の位置および速度を、このポテンシオメータにより計測した。ポテンシオメータと、ボイスコイルは、リアルタイム Linux を搭載したコンピュータに接続され、5 kHz の周期で計測した。ボイスコイル用のアンプリファイアとして、MAX9704 (MAXIM Integrated Products, 10 W, class D) を用いた。

実験の参加者は椅子に座り、靴下を履いた状態で、天板の中央を踏んだ。ポテンシオメータで計測された速度に応じて、4. 節で述べる方法により決定される加速度刺激をコンピュータが生成する。この速度は、足がトップパネル上空 20 mm から 10 mm を移動する間の平均速度とした。ディスプレイは、足がトップパネルに接触する瞬間に、刺激の呈示を開始した。

足裏に呈示される加速度刺激を実現するため、ボイスコイルへの電圧値を、実験装置系の周波数応答特性に基づいて決定した。天板に 4.0 kg の負荷を掛け、装置が出力する加速度の周波数応答を計測した。この負荷の大きさは、実験参加者が椅子に座り、実験装置の天板を踏むときの足の力の大きさに近い。計測された周波数応答の線形補完により、ボイスコイルへの電圧指令値を決定した。また、ディスプレイの加速度出力は、電圧入力に対して概ね線形に変化した。

3. 振動波形の観察

刺激生成モデルの開発のために、ぜい弱な構造物の破壊にともなう加速度刺激を観察した。ぜい弱な構造物として使用した試料は円筒状で材料は紙、アルミホイル、ポリプロピレン (PP) フィルムの 3 種類である。これを円筒状にした (図 2a)。それぞれの材料の厚さは、80, 11, 30 μm である。円筒の直径は 40 mm で、高さは 20 mm である。触覚刺激呈示装置のアクリル製パネルの上に配置された構造物を、人が靴下を履いた足で破壊した。パネルの裏側、

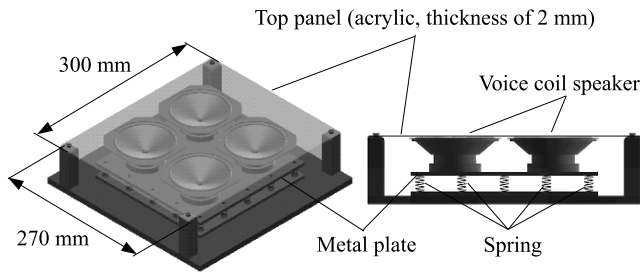


Fig.1 Foot step display based on voice-coil actuators

構造物直下に取り付けた加速度計が構造物破壊時の加速度を計測した(図 2b)．足に固定したりニア式ポテンシオメータで足の速度を測定した．足関節は、足裏が天板と水平になるように、布バンドを使用して金属板に固定した．

同じ構造物を破壊しても、足の速度によって、加速度刺激の大きさや、減衰までの時間が異なる．図 3 は、加速度刺激の振幅スペクトラムを示す．速度によって、振幅スペクトラムが大きく異なる．例えば、足の速度が 50 mm/s のときは、スペクトラムのピークは 20, 70, and 280 Hz 付近にあるが、足の速度が 200 mm/s のときは、ピークは 10, 40, and 180 Hz 付近に観察された．全体的な加速度の大きさは、速度が 200 mm/s のときの方が、50 mm/s のときよりも大きい．これらのデータは、破壊にともなう触覚刺激呈示のためには、速度に応じた、皮膚刺激を呈示する必要があることを示唆している．以上の加速度データは、構造物の破壊のみならず、触覚刺激呈示装置の天板の振動の影響も含むことに留意すべきである．

4. ぜい弱な構造物の破壊にともなう 振動触覚刺激合成モデル

振動触覚刺激においては、振幅スペクトラムが刺激の質を決定する．振動触覚は、周波数成分の位相にはほとんど影響を受けない [4, 5]．したがって、われわれは、踏み心地の呈示に関しても、振動刺激のスペクトラムに注目する．

構造物の破壊によって発生する加速度データの時系列を y_i ($i = 0, \dots, N - 1$) とする．加速度データの振幅スペクトラムを y_i の離散コサイン変換を計算することで得る．振幅スペクトラムは、

$$C_k = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cos\left(\frac{\pi k(i + \frac{1}{2})}{N}\right) \quad (k = 0, \dots, N - 1) \quad (1)$$

で得られる．ただし、 F は加速度データのサンプリング周波数であり、 $F = 5000$ Hz である． N は、サンプルの数であり、 $N = 2500$ である．

上述したように加速度センサで計測された加速度波形には、構造物の破壊に由来するもの以外の成分、主として天板の振動が含まれる．そこで、これらの加速度を分離するために、スペクトラムの減算を行った．天板上の構造物が破壊されたときに計測された加速度のスペクトラムを $C_{k,panel,obj}$ とする．構造物がない状態で、人間が天板を踏

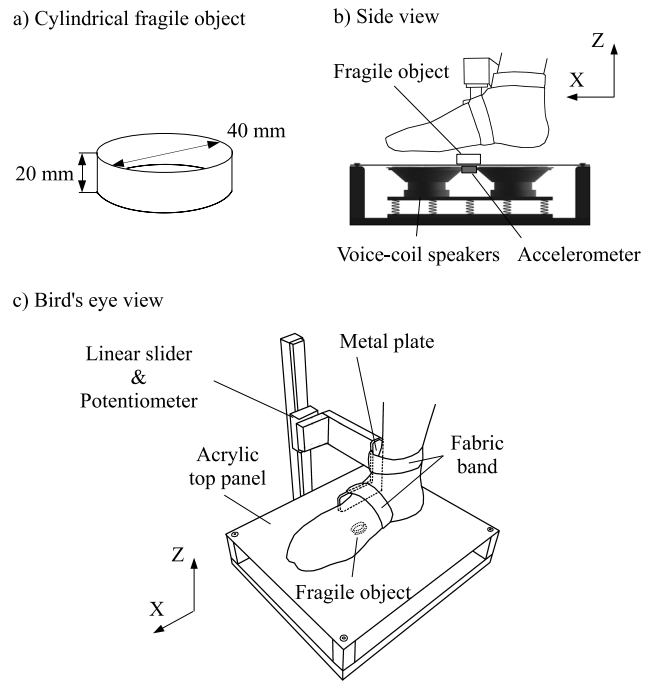


Fig.2 Observation of the acceleration stimuli due to the fracture of fragile objects a) Cylindrical fragile object b) Side view of the setup c) Bird's eye view of the observation setup

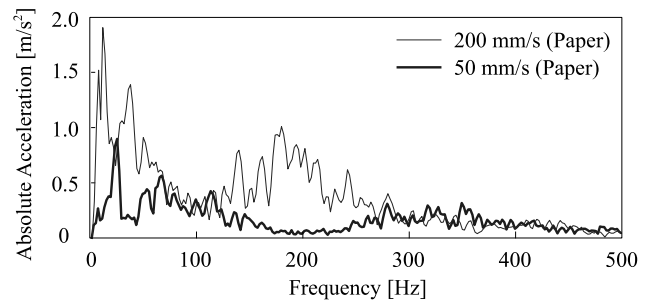


Fig.3 Spectra of accelerations caused by the fracture of paper-made cylinder

んだ時に計測された加速度のスペクトラムを $C_{k,panel}$ とする．われわれは、構造物の破壊に由来する加速度のスペクトラムを

$$\begin{cases} C'_k = |C_{k,panel,obj}| - |C_{k,panel}| \\ C'_k = 0 \quad \text{if } |C_{k,panel,obj}| - |C_{k,panel}| < 0 \end{cases} \quad (2)$$

によって決定した．

スペクトラムは破壊速度に依存する．この速度による違いを生成するために、あらかじめ計測されたスペクトラムを基に、速度に応じた刺激を合成する．速度 v のときの振幅スペクトラムは、

$$C'_k(v) = \left(\frac{|C'_k(v_{i+1})| - |C'_k(v_i)|}{v_{i+1} - v_i} (v - v_i) + |C'_k(v_i)| \right) \cdot \text{sign}(C'_k(v_{i+1})) \quad (3)$$

$$(v_i < v < v_{i+1}), \quad (k = 0, \dots, N - 1).$$

によって決定する．これは，速度 v のスペクトラムが，速度 v_i と v_{i+1} のスペクトラムの内挿によって決定されることを意味する．速度 v_i のスペクトラムは，あらかじめ計測される．これら v_i の値はそれぞれ $(v_1, v_2, v_3, v_4) = (50, 100, 200, 300 \text{ mm/s})$ である． $v > v_4$ か， $v < v_1$ の場合には， $C'_k(v)$ は，外挿によって決定された．このようなスペクトラムの合成は，周波数成分間の位相に関する情報を失ってしまうが，先に述べたように，位相情報は振動触知覚にほとんど影響を与えない．

$C'_k(v)$ は，逆 DCT によって，再び加速度の時系列データに変換される．逆 DCT は，

$$y'_i = \sum_{k=1}^{N-1} C'_k(v) \cos\left(\frac{\pi k(i + \frac{1}{2})}{N}\right) \quad (i = 0, \dots, N-1) \quad (4)$$

によって計算される．このようにして得られた y'_i が，速度 v における加速度刺激として，足裏に呈示される．

以上の方法により合成された加速度波形の例を図 4 に示す．図 4a は，天板上の紙製の構造物を，速度 100 mm/s で破壊した時に観測された加速度である．図 4b は，天板のみを，速度 100 mm/s で踏んだ時に観測された加速度である．図 4c は，図 4a と 4b の加速度の振幅スペクトラムを示す．この 2 種の振幅スペクトラムを，式 (2) に従って減じることで，構造物の破壊に由来する加速度の振幅スペクトラムが決定される．図 4d は，決定されたスペクトラムの逆 DCT を計算することで得られる加速度を示す．この加速度を，天板の振動などを含まない，構造物の破壊に由来する刺激とした．図 4d 中の， $t < 0$ の範囲の刺激は，ディスプレイの利用者には呈示されない． $t \geq 0$ の範囲の刺激が，呈示される．

刺激として用いられた円筒の材料は，紙・アルミホイル・PP. の 3 種類であった．われわれは，あらかじめ，これらの円筒が足で破壊されたときに発生する加速度を記録した．足の速度が，それぞれ， $(v_1, v_2, v_3, v_4) = (50, 100, 200, 300 \text{ mm/s})$ の時の加速度を記録した．記録された加速度は，上述の方法により，加速度刺激に変換された．加速度刺激を生成するための，参加者の足の速度 v は，実時間で計測された．速度は，足が天板の上方 20 mm から 10 mm の区間を移動する平均速度とした．計測された速度に基づいて，加速度刺激が合成された．加速度スペクトラムの合成は，式 (3) に従った．合成された刺激は，2. 節で述べた周波数応答の関係に従い，重み付けられ，ボイスコイルに与えられる電圧指令値に変換された．触覚ディスプレイは，参加者の足が天板に接触した瞬間に，この速度刺激を再生した．

5. 実験

本研究で開発した触覚刺激合成アルゴリズムを評価するために，呈示された仮想材料を人間がどの程度同定できるかを確認する実験を行った．

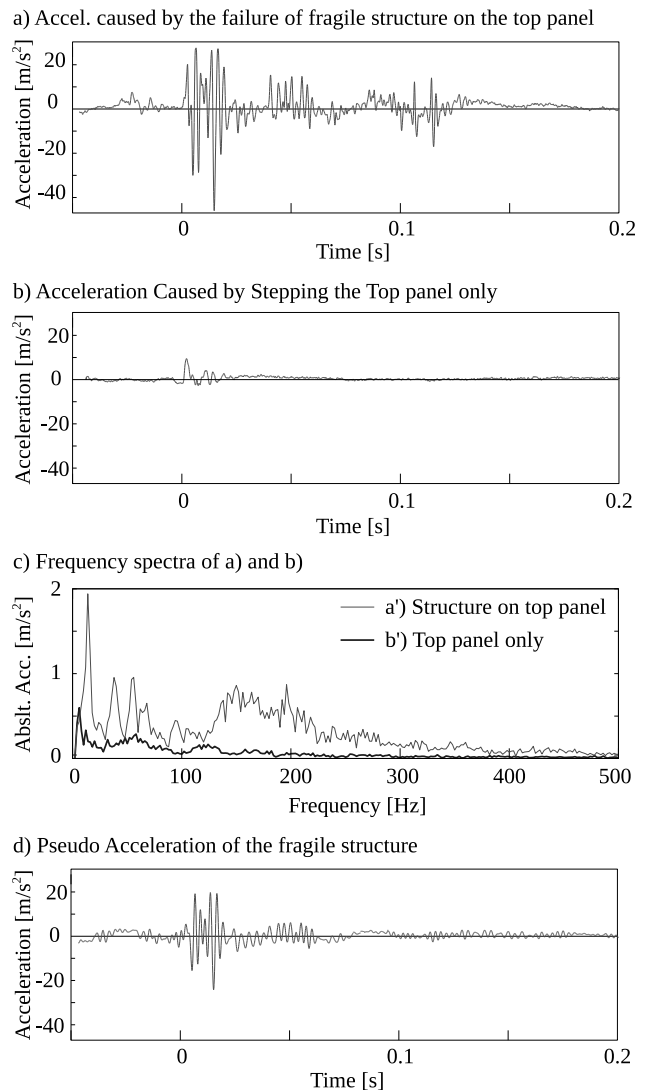


Fig.4 Example of synthesized acceleration data a) Acceleration acquired by the fracture of paper on the top panel at the contact speed of 100 mm/s b) Acceleration acquired when stepping the top panel at the contact speed of 100 mm/s c) Acceleration spectra of Figs. 4a and 4b d) Acceleration acquired by subtracting the spectrum of b from a in the frequency region

5.1 実験内容

参加者らは，著者らを除く，著者らの所属する研究室のボランティア学生 5 名であった．したがって，本実験は，予備実験に位置づけられる．参加者らは椅子に座り，足関節を，装置の金属板に固定した (図 2c)．初めに参加者らは，3 種類の円筒を踏んで破壊することを体験した．このとき参加者らは度の材料を踏んでいるのか教えられた．円筒は，天板の上，中心に配置された．参加者らは好きなだけ破壊を体験することが許された．試料を破壊する時の音や，ボイスコイル・スピーカからの音を遮断するため，実験中，参加者らは，ノイズキャンセル機能付きヘッドフォンを装着し，ピンクノイズを聞いた．

Table 1 Average answer ratios in Experiment 1 in the form of confusion matrix

		Presented stimuli		
		Paper	Alumi.	PP.
Answers	Paper	0.68*	0.14	0.04
	Alumi.	0.16	0.56*	0.36
	PP.	0.16	0.3	0.6

Table 2 Average answer ratios in Experiment 2 in the form of confusion matrix

		Presented stimuli		
		Paper	Alumi.	PP.
Answers	Paper	0.82**	0.04	0
	Alumi.	0.1	0.76**	0.26
	PP.	0.08	0.2	0.74*

実験 1 では、参加者らは、本物の円筒の破壊を体験した後、一切の教示を与えられずに、実験に参加した。参加者らは、紙、アルミホイル、PP.の中から、ランダムに呈示される仮想刺激を踏み、参加者らの感じた材料 3 種類の中から一つ選び、口頭で回答した。参加者らは、任意の速度で足を動かし、一つの仮想刺激を何度も体験することが許された。また、一つの仮想刺激を少なくとも、複数回体験することが推奨された。3 種類の刺激は、それぞれ、合計で 10 回呈示された。したがって、一人当たり、30 試行が行われた。

実験 2 では、まず初めに参加者らは、材料と仮想刺激の対応関係の教示を受けた。教示では、参加者らは仮想刺激を体験し、実験者は、それらの刺激に対応する材料を参加者らに教えた。参加者らは、それらの仮想刺激と材料の対応関係に慣れるまで教示を受けた。教示の平均時間は、一人当たり、およそ 3 分であった。教示の後、参加者らは、実験 1 と同じように、呈示された仮想刺激の種類を回答した。刺激の種類・呈示回数も、実験 1 と同じであった。

5.2 実験結果

表 1 に、実験 1 での回答率の平均を、表 2 に、実験 2 での回答率の平均を、混同行列の形で示す。表中の対各要素が、正答率である。ここで、正答とは、呈示された仮想材料と、参加者らが回答した材料の一致である。それぞれの材料について、正答率がチャンスレベル (0.33) よりも大きいかどうかを検定した。表中の * および ** は、それぞれ、有意水準 0.05 および 0.01 で有意差が確認されたことを意味する。正答率の傾向は、実験 1 と実験 2 で似ている。紙に対する正答率が最も高く、ついで、アルミホイルと、PP. であった。アルミホイルと PP. は、混同されることが多かった。

実験 1 と 2 の正答率に、差があるかどうかを確認するため、正答率に分散分析を適用した。その結果、実験 1 と実験 2 の正答率に有意な差は確認されなかった。

5.3 考察

実験 1 と 2 の両方で、紙に対する正答率は、アルミホイルと PP. に対するそれよりも大きかった。このことは、紙の同定は容易であった一方で、アルミホイルと PP. の同定は困難であったことを意味する。参加者らの内観報告によると、本物の円筒に関しても、アルミホイルと PP. の弁別は難しい。このことが、触覚呈示デバイスでの実験結果に反映された可能性がある。

実験 1 について、われわれは、一切の教示がなくとも、参加者らが材料の種類を同定することができることを期待していた。紙に関しては、この通りであった。しかしながら、実験 1 では、アルミホイルと PP. に関しては、参加者らはこれらの材料を高い確率で同定することができなかった。このことは単純に、触覚ディスプレイおよび、触覚刺激合成方法の有効性が向上されるべきことを示唆する。例えば、足の力や加速度に応じた刺激の生成など、ダイナミクスの欠如が、原因と考えられる。一方で、実験 2 では、教示の後、参加者らのアルミホイルと PP. に対する正答率は向上した。このことは、実験装置は、材料ごとに、何らかの違いを参加者らに呈示することができていたということの意味する。

6. 結言

本研究では、ぜい弱な構造物の、破壊にともなう触覚刺激の呈示方法を開発した。ぜい弱な構造物の破壊にともなう振動刺激の振幅スペクトラムを用いた触覚刺激合成モデルを開発した。われわれは、破壊にともなう振動触覚刺激を、さまざまな足の速度で構造物が破壊されたときに観察される加速度データの振幅スペクトラムから合成した。合成された触覚刺激を、人間の足裏に呈示するこ踏み心地ディスプレイを開発した。実験の参加者らは、このディスプレイにより呈示される、紙・アルミホイル・ポリプロピレンからなる円筒状構造物を同定することができた。

文献

- [1] 濱田友貴, 鍵山善之, 黒田嘉弘, 井村政孝, 大城理, “回転骨切り術シミュレータにおける弾塑性体衝撃破壊の力覚提示法,” 電子情報通信学会信学技報, pp. 47-52, 2010.
- [2] 大西謙吾, 横山泰典, 江尻純也, 永田和之, “外科メスによる切離タスクの力学的相互作用計測 簡易ハプティックレコーダによるタスクの可視化と作業結果の再現性,” Proceedings of the 2010 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2A2-G19, 2010.
- [3] 藤本英雄, 佐野明人, 坂口正道, 宮崎健太, 酒井英典, “高臨場注射シミュレーションシステムの開発,” Proceedings of the 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 1A1-N-104, 2010.
- [4] S. J. Bensmaïa and M. Hollins, “Complex tactile waveform discrimination,” Journal of the Acoustical Society of America, vol.108, pp. 1236-1245, 2000.
- [5] S. A. Cholewiak and Kwangtaek Kim and Hong Z. Tan and Bernard D. Adelstein, “A Frequency-Domain Analysis of Haptic Gratings,” IEEE Transactions on Haptics, vol.3, No.1, pp. 3-4, 2010.