

## [研究助成 (C)]

## 自身の運動にリンクした音情報提示における知覚的側面の解明

## Pereception of sound generated by self-movement

2197001



研究代表者

東京大学大学院 総合文化研究科 博士課程

遠藤 希美

## [研究の目的]

音を聞くという行為はわれわれの日常生活に欠かせないものである。例えば、話す、楽器を演奏する、ドアをロックするなど、運動に伴って音を発生させ、その音をフィードバックとして聞き、次の運動を逐次修正する。このメカニズムを応用した運動支援システムも開発されている。ここで、自身の運動に伴った音をどのように知覚するかを明らかにすることは、VRや電子楽器などの技術においてどのような音情報を呈示するか、よりクオリティの高いパラメータ設定に繋がるといえよう。

人間は音を知覚するとき、聴覚単体のみならず視覚や触覚といった他の感覚情報を手がかりにしている。楽器演奏や発話など、自身の運動によって音が生成される場合、その運動指令情報および体性感覚もまた知覚の重要な手がかりの一つであると考えられている。特に、音の大きさと運動の関係において、ボタン押しのような運動により生成された音（自己生成音）は、物理的に全く同じ大きさの音であっても、ただ音を聞く場合と比較し、小さく聞こえることがある（減衰効果：Weiss, et al., 2011）。また、知覚の一般的な注意を反映する脳波の聴覚誘発電位（AEP）のN1の振幅が減衰することが知られている（Horváth, 2015）。しかし、これまでの研究は、「ボタンを押すか・押さないか」という単純なパラダイムであった。日常生活場

面ではボタンを押すのみならず、手指の細かな制御が求められる運動や、逆に歩行のように半ば自動的に制御される運動もある。

特に、手指の細かな制御による音生成は、楽器演奏経験などに影響される可能性がある。ピアノの打鍵のコントロールのように、人間が力発揮によって音の強さを調整する場合、出力の大きさと音の強さは増加関数となる（Kinoshita, et al., 2007）。演奏家はこうした力-音圧関係を学習しているため、運動の強弱が音圧の大小の知覚に影響を及ぼす可能性は高い。こうした運動の特性および経験の違いによって、自己生成音の知覚の特性が変容することもあるだろう。そこで本研究は、手指の細かな運動制御による自己生成音知覚における運動出力の変化および経験の影響（研究1）、半ば自動的な運動である、歩行による自己生成音に対する知覚特性（研究2）を明らかにすることを目的とした。

## [研究の内容、成果]

## 研究1：手指の細かな運動制御による自己生成音知覚における運動出力の変化および経験の影響

研究1では発揮する力の大きさの異なる運動課題を行い、音圧知覚テストを組み合わせることにより、運動に伴う音の音圧知覚の関係を調べた。さらに、音楽家と音楽未経験者で比較し、

経験の度合いを検討した。

## 方 法

**実験参加者：**健康成人 18 名（一般群）とピアノ演奏家 18 名（演奏家群）が実験に参加した。音楽大学のピアノ専攻に在学または卒業している者を演奏家群とし，楽器演奏経験のない参加者を一般群とした。

**実験手続き：**実験参加者の基本的な課題は，2 つの音刺激（標準刺激と比較刺激）の大きさを比較することであった。標準刺激呈示から 1000 ms 後に比較刺激を呈示した。実験参加者には比較刺激が標準刺激より大きく聞こえたか小さく聞こえたかをコンピュータのキーボードを用いて回答するよう教示した。この手続きを運動あり条件および運動なし条件の 2 つの条件に対して行った。

運動なし条件は，運動あり条件で取得した視覚データを使用するため，必ず運動あり条件の後に行われた。全体の試行数は，運動要因 2 条件（運動あり・なし）×力発揮要因 2 条件（1 N・4 N）×比較刺激の音圧レベル 7 段階 ×10 試行で 280 試行であった。

**音圧弁別課題（運動あり条件）：**指の運動（圧センサを押す）に伴って標準刺激を呈示した後，比較刺激を呈示した。実験参加者はモニターの前に座り，右手の示指を圧センサ（USL06-H5-50N-D-FZ，テック技販）の上に乗せ，左手はコンピュータのキーボードの矢印キーの上に乗せた。圧センサのデータは専用のアンプ（DSA-03A，テック技販）で 5 Hz のローパスフィルタをかけた後 A/D 変換し PC で記録した。データの取得，音の呈示，視覚フィードバック呈示には MATLAB を用いた。

実験参加者には，モニター上に呈示されたターゲットに × 印の中心を合わせるように教示した。× 印は圧センサを押すことによって動いた。ターゲットに × 印が到達する，すな

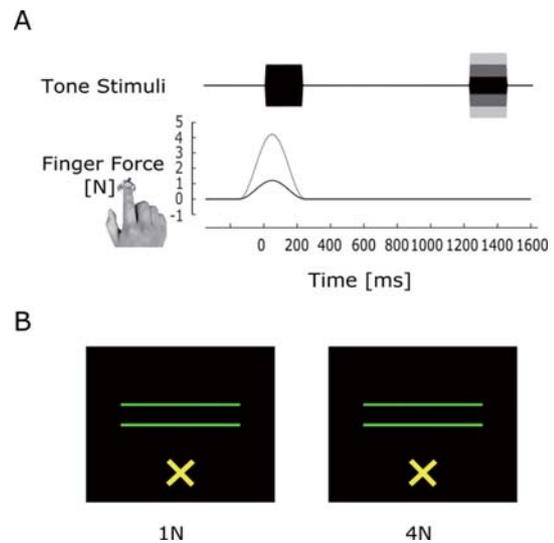


図1 1 試行の流れ (A)，呈示された視覚フィードバック (B)。

わち，圧センサの値が指定した閾値に達すると標準刺激が呈示された。標準刺激が呈示されたらすぐさま圧センサから指を離すよう教示した (図1)。

圧センサの閾値は 1 N と 4 N とし，これを力発揮要因の 2 条件とした。ディスプレイに呈示されるターゲットの高さは 1 N でも 4 N でも一定であった。

**音圧弁別課題（運動なし条件）：**実験参加者が圧センサを押さないこと以外は運動あり条件と同じであった。代わりに机上に右手を置いた。運動あり条件で記録した視覚フィードバックを呈示し，× 印がターゲットに到達すると標準刺激を呈示した。その 1000 ms 後に比較刺激を呈示した。

**刺激：**刺激は全て 250 ms の長さの 1000 Hz の純音であった。標準刺激の音圧レベルは 65 dB で一定であった。比較刺激の音圧レベルは，62 dB から 68 dB まで 1 dB ずつの 7 種類であった。刺激は全てヘッドフォンから呈示された。

**解析方法：**実験参加者個人の弁別能力，および標準刺激がどのくらいバイアスされたかを調べ

るため、実験心理学の古典的な指標である丁度可知差異 (JND) および主観的等価点 (PSE) を算出した。それぞれの比較刺激について、「比較刺激が標準刺激より大きい」と回答した確率を算出し、心理物理測定関数にあてはめた。得られた心理物理曲線から、比較刺激が大きい確率が 25% と 75% となる音圧レベルをそれぞれ算出し、その差分を 2 で除したものを JND、比較刺激が大きい確率が 50% になる音圧レベルを PSE とした。JND は数値が小さいほど弁別能力が高く、PSE は数値が大きいほど標準刺激を大きいと知覚していることを表す。JND と PSE について、運動ありなし 2 条件×力発揮 2 条件の 4 条件をそれぞれ実験参加者ごとに算出した。

得られた JND と PSE について、演奏家要因×運動要因×力発揮要因の 3 要因混合の分散分析を行った。結果の項には、紙面の都合上主要な結果のみ報告する。

## 結 果

各条件における JND の平均値を図 2A、PSE を図 2B に示す。JND では、演奏家要因に有意な主効果が確認され、演奏家は一般人と比較して弁別能力が高かった ( $F(1,32) = 8.87, p < 0.01$ )。運動要因にも有意な主効果が確認され、運動あり条件のほうが運動なし条件で JND が小さい値を示した ( $F(1,32) = 14.00, p < 0.01$ )。そのほかの有意な主効果および交互作用は確認されず、演奏家は弁別能力が高いこと、運動を伴うことで弁別能力が向上することが示された。PSE では、力発揮要因のみ有意な主効果が認められた ( $F(1,32) = 0.25, p < 0.01$ )。すなわち、音楽経験のありなしに関わらず強い力発揮あるいは × 印が速く移動するほど標準刺激を小さく知覚している可能性が示唆された。

## 考 察

本研究の目的は、手指の運動に伴って生成される音に対する知覚の特性を調べることで、およ

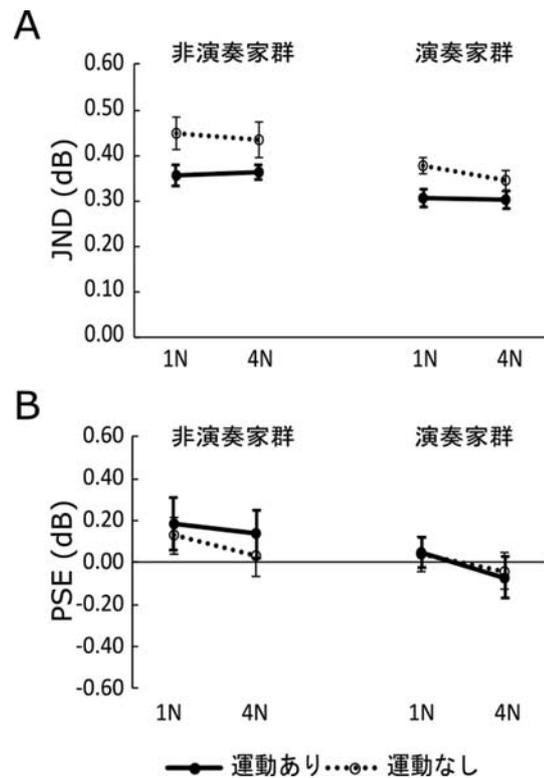


図 2 各条件における JND (A)、各条件における PSE (B)。PSE は標準刺激からの差分値を示す。エラーバーは標準誤差を示す。

びピアノの経験の影響を調べることであった。運動あり条件での JND は運動なし条件の JND より有意に数値が低かったことから、自身で音を生成することにより、弁別能力が高まることが示された。先行研究の自身の運動により生成された音は小さく知覚されるという結果とは異なる結果となった。これは生成する運動の様式が異なることに起因する可能性がある。先行研究では単純なボタン押しであるため自身の運動を細かく制御する必要がないが、本研究では細かな運動を制御する必要があったため、運動制御とそれに伴う体性感覚と聴覚との統合におけるあるプロセスが弁別能力を高めた可能性がある。ただし、1N と 4N 条件では統計的な有意差は見られないため、運動制御の度合いとの関連は今後の研究で追求する。

経験依存性について、ピアニスト群は一般群よりも JND が低かったことから、運動の有無に関わらず、ピアノ経験者は優れた弁別能力を

持っている可能性が高いことが示唆された。本研究では、日常的な動作やピアノ演奏を模擬した実験ではなく、より単純な実験室環境での実験であったことから、運動に伴う音知覚の経験依存性が低かった可能性がある。より実環境に近づけた状況を作り出し検討する必要がある。

また、運動の有無に関わらず、1 Nの方が4 Nよりも標準刺激を大きく知覚したことは、視聴覚の統合において何らかのプロセスが働いた可能性がある。移動速度と音の大きさの関係については、今後の検討課題である。

## 研究2：歩行によって生成される音に対する聴知覚

研究2では、歩行に伴う音に対する聴知覚がどのような特性を持つか明らかにすることを目的とした。歩行中に聴知覚判断課題を行うことは、二重課題となり通常歩行を妨げる可能性があった。そのため、AEPの一つであり、音圧の知覚およびその注意を反映しているといわれているN1振幅が(Näätänen & Picton, 1987)がどのように変調するかを調べた。

### 方 法

**実験参加者：**13名の健常成人が実験に参加した。うち2名は脳波の測定に不備があったため、解析から除外し、11名分のデータで解析を行った。

**実験手続き：**実験参加者はイヤホンを装着し、分離型トレッドミル上で歩行した。トレッドミルの速度は0.55 m/sであった。3分間の音刺激呈示なしでの歩行(音なし条件)の後、5分間、歩行に同期して音が呈示される状況下で歩行を行った(音あり条件)。歩行中に踵接地に同期した音をイヤホンから呈示した。この計8分間の歩行中の脳波を計測した。統制条件として、安静状態で音を聞く場合、実験者の歩行を観察しながら音を聞く場合の脳波を計測した。

**刺激：**刺激は200 msの長さの1000 Hzの純音

であった。音圧は被験者内で一定とした。

**脳波計測・解析：**脳波の測定は、脳波計(ANT Neuro, eego-sports)を用いた。サンプリングレートは500 Hz、基準電極は鼻尖とした。AEPは頭頂部で検出されるため、国際10-20法におけるCzから計測を行った。音の呈示開始をオンセットとし、オンセット前200 msからオンセット後400 msまでの区間を切り出し、加算平均処理を実施した。±100  $\mu$ Vを超えた試行は加算平均処理から除外した。加算平均回数は約300回であった。歩行中の脳波成分から、踵接地音から誘発される脳波成分を抽出するため、音呈示中の加算平均波形から無音歩行中の加算平均波計の差分を取った。安静条件・観察条件の平均波形および歩行条件の差分波形におけるN1成分を実験参加者ごとに検出した。刺激呈示前100 msから0 msをベースラインとし、刺激呈示後50-150 msに生じる陰性ピークをN1とした。得られたN1について、1要因3水準の分散分析を行い、有意な主効果が見られた場合はボンフェローニ法を用いて多重比較を行った。

### 結 果

歩行における音あり・音なしの全体平均波形とその差分波形を図3Aに示す。差分波形により、運動由来の成分を考慮した聴覚由来の波形を求めることができた。図3Bは歩行条件の差分波形、安静条件、観察条件の全体平均波形を示す。各条件におけるN1の振幅を図4に示す。分散分析の結果、有意な主効果が確認された( $F(2,20)=5.19, p<0.05$ )。多重比較の結果、歩行条件では安静条件よりもN1の振幅が有意に大きな値を示した( $p<0.05$ )。

### 考 察

研究2では、歩行による自己生成音における聴覚処理について調べることを目的とした。歩行条件において安静条件よりもN1の振幅が大

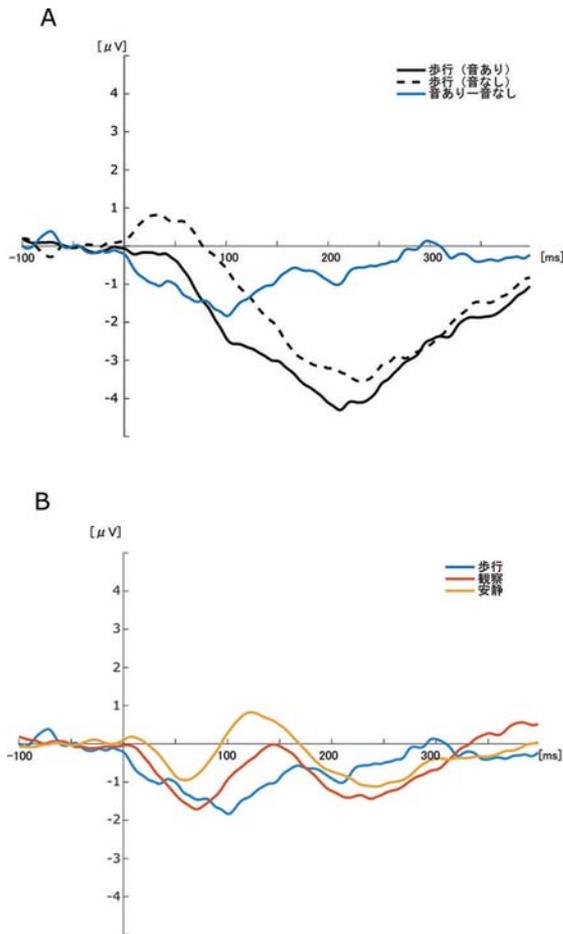


図3 平均波形と差分波形 (A), 条件間の比較 (B)。

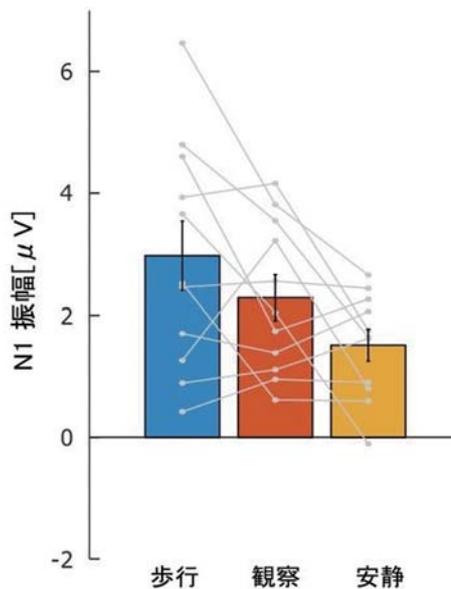


図4 N1 ピーク振幅の比較。エラーバーは標準誤差を示す。各点は実験参加者ごとの振幅値を示す。

きな値を示し、歩行による音はより安静時に聞く音よりも大きく知覚している可能性が示唆された。ボタン押し等の研究では運動中の N1 はむしろ減衰することから、半自動的な運動では他の随意運動と比較して異なる知覚メカニズムを持つ可能性がある。本研究でみられた増幅効果について、歩行の運動制御メカニズムの何がどこでどのように聴覚処理に影響をおよぼしているかは、今後の解析および実験で明らかにする。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究では異なる 2 つの観点から実験を行った。それぞれは独立して行われたものであるが、いずれの実験も、全ての運動に対して一律に音圧知覚に抑制がかかるのではなく、ある条件では自己生成音知覚の変調が生じなかったり、むしろ増幅する可能性すらあることが示唆された。今後、これらの知見を総合し、自己生成音知覚メカニズムについて統合的に説明できる仮説を生成し、検証していくことが課題となる。また、本研究は単純な実験室実験であったため、今後、VR 環境や実環境下での聴覚フィードバックシステム等への応用を目指す。

#### [成果の発表, 論文等]

遠藤希美, 金子直嗣, 渡邊克巳, 中澤公孝. 「歩行に基づく自己生成音に対する事象関連電位の変調」第 10 回 Society for Tokyo Young Psychologists, 2020 年 3 月, 東京.

Nozomi Endo, Naotsugu Kaneko, Katsumi Watanabe, Kimitaka Nakazawa. Modulation of auditory cortical response to self-generated sound by walking. FENS Forum 2020, July 2020, Glasgow.