

音の遅延条件が電子ドラム演奏に与える影響 The Effect of Sound Delay Conditions on Electronic Drum Performance

田中健^{*1,2}、樋田浩一^{*2,3}、上野佳奈子^{*1,2}
TANAKA Ken, TOIDA Koichi, UENO Kanako

*1 明治大学, *2 JST CREST, *3 明治大学大学院

*1 Meiji University, *2 Japan Science and Technology Agency, CREST, *3 Meiji University Graduate School

内容概要 電気音響システム使用時に生じる演奏音の遅延が、楽器演奏に及ぼす影響について検証することを目的とし、電子ドラムを用いた遅延検出実験を行った。実験は、単発の運動を行う実験とフレーズ演奏を行う実験を行った。単発の運動の実験では運動、音色の違い、ドラム演奏経験の有無が遅延検出に及ぼす影響について検証し、フレーズ演奏実験では、主観評価と演奏音の分析を行い、演奏音の遅延が演奏に及ぼす影響について検証した。実験の結果から、単発の運動の実験では、ドラム経験者は非経験者に比べて遅延検出の感度が高いことが示され、フレーズ演奏実験では多くの条件で遅延 50 ms から遅延の影響がみられ、一部の条件では 30 ms から影響がみられた。

1. はじめに

音楽演奏において、演奏者は、電気音響システムを介した演奏音を聴きながら演奏を行う場面がある。演奏音は、電気信号に変換されスピーカなどから出力されるが、デバイスを介して出力される演奏音に一切の遅延が生じない状態を作り出すことは不可能である。このため演奏者は、遅延を伴う演奏音を聴きながら演奏を行うことになる。音響システムを構築する場合には、演奏への支障をきたさない遅延範囲内で音響信号を生成することが望まれる。そこで我々は、身体運動と聴覚刺激の同時性判断に着目し、運動に伴う聴覚刺激の遅延弁別閾を調べてきた¹⁾。

演奏に対する遅延の影響について、プロの演奏家を対象とした研究²⁾では、楽器ごとに遅延を感じる遅延時間が数 ms から数十 ms まで幅があることが示された。遅延の検知限に着目した研究³⁾においては、楽器によって差はあるものの、複数の楽器で遅延 5 ms 以上で違いがわかると示され、演奏音の遅延による影響が報告された。

我々は、さまざまな人が任意の音場において演奏や音楽を楽しむことができる演奏視聴室として、境界音場制御の原理に基づく、多チャンネル音場再現システムの開発を進めている⁴⁾。この必要性能として、演奏時の遅延の許容範囲を検討している。バイオリン奏者 2 名による、アンサンブル演奏に関する研究⁵⁾では、遅延 20 ms で遅延を感じ、遅延 40 ms でアンサンブルの同期性が損なわれることが示された。本研究では、単独でのドラム演奏に着目した。ドラム演奏は、楽曲のテンポの形成を担当することや、演奏音のパルス性が高い特徴がある。このことから、ドラム演奏に対しては、演奏音の遅延が他の楽器に比べて影響しやすいと考えた。

本研究では、楽器特有の音色および運動の種類が遅延検出に及ぼす影響と、演奏音の遅延がドラム演奏に及ぼす影響を検証した。1 つ目の実験として、単発の運動に伴う聴覚刺激に対する遅れの判断(以下、同時性判断)を行う実験から PSS(主観的同時点 ; Point of Subjective Simultaneity)を算出し、遅延検出に

影響を及ぼす要因を把握した(以下、基本動作実験)。2つ目の実験では、電子ドラムを用いてフレーズを演奏し、ドラム演奏時の遅延の検出および演奏への影響を把握した(以下、演奏実験)。以上2つの実験から得られた知見をもとに、電子ドラム演奏時に許容される遅延時間を考察した。

2. 基本動作実験

2.1. 概要

基本動作実験では、運動の大きさや楽器の音色の違いが、遅延検出へ及ぼす影響を検討することを目的とした。実験は実験1と実験2に分かれる。実験1では、聴覚刺激としてパルス音とスネアドラム音(以下、スネア音)の2種類を条件にPSSを比較した。パルス音を用いた場合のPSSは、樋田らがキーボードの打鍵運動(図1(a))により同様の実験を行っており¹⁾、今回の打叩運動(図1(b))との差を比較した。実験2では、実験1と同様の実験をドラム経験者に対して行い、ドラム演奏経験の有無を条件に、PSSを比較した。

2.2. 手順

実験には、電子パッドを打叩することでパルス音またはスネア音が呈示される装置を用いた(図2)。聴覚刺激はエフェクタで遅延時間の制御を行い、ヘッドフォンを用いてモノラル信号で呈示した。聴覚刺激の遅延時間は既往の研究¹⁾を踏襲し、8水準(19~119 ms、14.3 ms 間隔)設定し、各水準を8回ずつランダムな順序で呈示、計64試行を1セッションとした。実験は2セッション行い、セッションごとに異なる音種を呈示した。音種の呈示は、順序効果を考慮して被験者半数ずつ呈示順序を変えた。

被験者は、椅子に座り、ヘッドフォンと目隠しをした状態で、右手でドラムスティックを持ち、実験者の合図を受けて1試行に一度だけ打叩した。ドラムスティックの持ち方、叩き方は指示を与えた後に練習を行い統制し

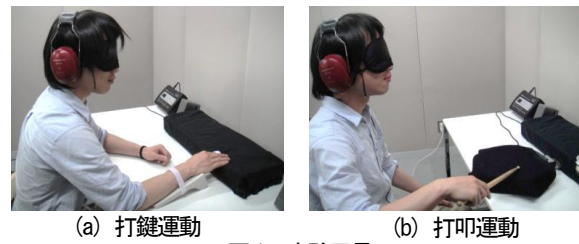
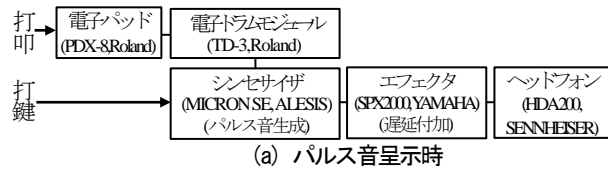
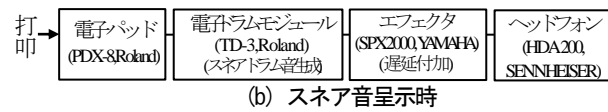


図1 実験風景



(a) パルス音呈示時



(b) スネア音呈示時

図2 実験システム系統図

た。被験者は、呈示された聴覚刺激が、自らの身体運動に対して、「遅れている」「遅れていない」の強制二者択一で回答した。以上の実験は、静穏環境を統制した防音室で行った。

実験1は、聴覚正常な右利き大学生15名(男性9名、女性6名、ドラム演奏経験無し)、実験2は、聴覚正常な右利き大学生5名(男性5名、ドラム演奏経験4年以上)を被験者とした。なお、実験1に参加した被験者1名は19 ms 以外の遅延時間で遅れに気づく確率が50%を超え、2名は全ての遅延時間で遅れに気づく確率が50%に満たなかったため、以降の解析対象から除外した。実験データは、聴覚刺激の遅延時間ごとに「遅れている」と回答した回数を記録し、その確率を計算した。被験者ごとにロジスティック曲線へのフィッティングを行い、非同時性判断の確率が50%となるPSSを求めた。

2.3. 結果と考察

実験1の結果から求めたロジスティック曲線を図3に示す。各条件のPSSは、打叩(パルス音)条件は73.8 ms、打叩(スネア音)条件は77.6 ms、既往研究で求められた打鍵(パルス音)条件¹⁾は89.1 ms、であった。条件間で多重比較を行った結果、有意差はみられなかった

(Tukey-Kramer's HSD, $p > 0.05$)。すなわち、運動および聴覚刺激の音種によって、遅延弁別閾値に有意差は生じない結果となった。しかし、運動の種類に着目すると、打叩運動の方が PSS は一様に短い傾向がみられた。

実験 2 の結果から求めたロジスティック曲線を図 4 に示す。各条件におけるドラム経験者の PSS は、打叩(パルス音)条件は 51.7 ms、打叩(スネア音)条件は 59.0 ms であった。各音種について、経験の有無による差の統計的検証をしたところ、両音種とも経験者、非経験者間の PSS に有意差($p < 0.05$)が確認された(パルス: $t(15)=2.139$, スネア: $t(15)=2.174$)。ドラム演奏経験者は、非経験者と比べ遅延の検出感度が高いことが示された。このことから、単発のドラム演奏であっても、演奏経験によって遅延検出感度は異なり、後天的な学習によって遅延の検出感度が高まる可能性が考えられる。

3. 演奏実験

3.1. 概要

演奏実験では、運動が連続する演奏時に遅延が及ぼす影響を把握するため、演奏音の遅延時間を制御した条件下で、複数のテンポでフレーズ演奏を行い、主観評価と演奏の録音、分析を行った。

3.2. 手順

図 5 に実験装置の系統図、図 6 に使用した電子ドラムを示す。ハイハット・スネア・バスドラムの電子パッドを叩くことで、音源モジュールから演奏音が生成される。演奏音は、エフェクタを用いて遅延時間を制御し、ヘッドフォンからモノラル信号で呈示した(図 6)。遅延水準は 4 水準(8、30、50、70 ms)とし、ランダムな順序で呈示した。各遅延水準で演奏を 2 回繰り返し、合計 8 試行を 1 セッションとした。実験は 3 セッション行い、セッションごとにテンポを切り替えた。テンポの条件は 120、150、180 bpm とした。

被験者は、8 拍分呈示されるメトロノーム音を合図に、図 7 に示す 8 小節のエイトビートを演奏した。各遅延水準の演奏終了後には、既往の研究⁵⁾を踏襲し、「遅延を感じた程度」と「演奏への支障を感じた程度」について、7 段階の評価を行った。また、遅延および支障の感じ方・演奏時に注意したこと・支障への対処法をフリーコメントで回答した。各テンポ条件の終了時には、テンポをどのように

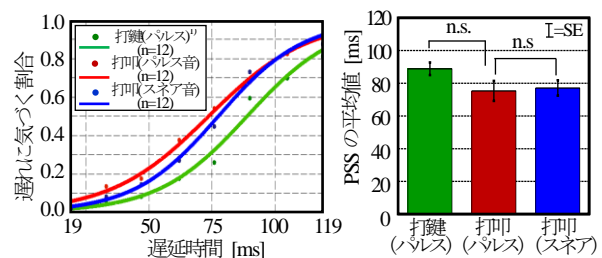


図 3 実験 1: 聴覚刺激の音色と運動の種類比較

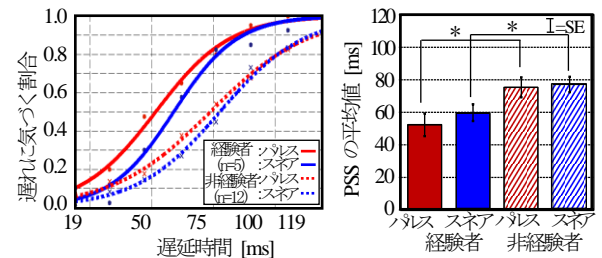


図 4 実験 2: ドラム演奏経験の有無による比較

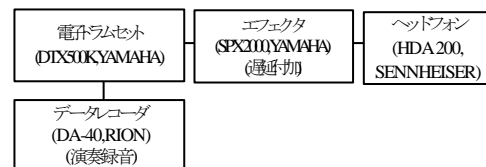


図 5 実験システム系統図

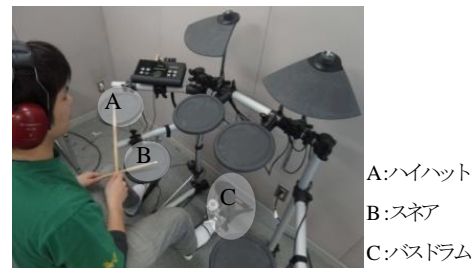


図 6 電子ドラムと部位の名称



図 7 実験で演奏したエイトビート

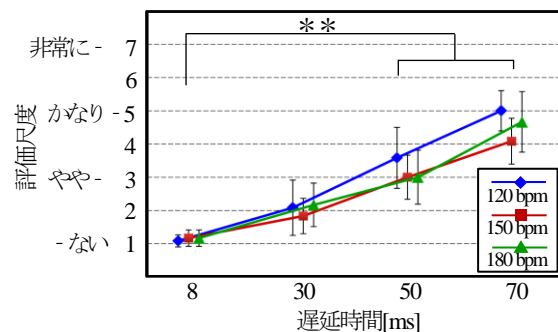
感じたかについても同様に回答した。以上の実験は、防音室内で行い、ドラム経験2年以上の大学生12名(男性11名、女性1名)を被験者とした。

3.3. 結果と考察

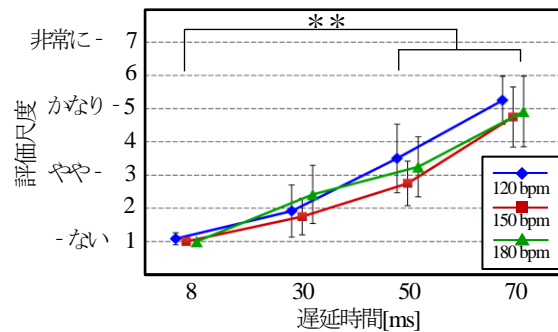
3.3.1. 主観評価

遅延を感じた程度・演奏への支障の程度の評価結果を図8、遅延と演奏への支障の感じ方についてのフリーコメントを表1に示す。評価項目ごとに、テンポと遅延水準を要因とした二元配置分散分析を行った結果、「遅延を感じた程度」、「演奏への支障を感じた程度」ともに遅延水準の主効果がみられた(遅延： $F=80.47$ 、支障： $F=76.48$ 、遅延及び支障： $p<0.01$ 、以下同様)。テンポの主効果はみられず($F=2.84$ 、 $F=1.50$ 、 $p>0.05$)、遅延水準との交互作用もみられなかった($F=1.08$ 、 $F=0.49$ 、 $p>0.05$)。各テンポ条件の遅延水準間で多重比較(Tukey-Kramer's HSD)を行った結果、すべてのテンポ条件において、遅延8msと50msおよび70msの間に有意差がみられた($p<0.01$)。このことから、遅延および演奏への支障の評価に有意差が生じるのは、テンポに関わらず遅延50ms以上であることが示された。

しかし、フリーコメントでは、遅延30msにおいても約半数の被験者が、「遅れているかは分からないが、演奏音に違和感がある」と回答し、180bpm条件では8名の被験者が、「違和感」または「明確な遅れ」を感じると回答した。また、演奏への支障についても、「演奏していて気持ち悪い」といった回答が数名から得られた。このことから、遅延30msにおいて、一部の被験者は演奏音に違和感を感じていた。既往の研究⁵⁾において、アンサンブル演奏を行った際に、遅延30msは殆どの被験者が、主観的に遅延を感じると回答している。このことから、遅延30msは演奏への支障を感じるほどではないものの、演奏音の遅延による影響が見られる遅延時間であると考えられる。



(a) 遅延を感じた程度



(b) 演奏への支障を感じた程度

図8 テンポ条件別の主観評価の平均と95%信頼区間

表1 テンポ条件ごとの主なフリーコメント

テンポ [bpm]	遅延時間 [ms]	遅延と支障の感じ方 (回答数)
120	30	遅れているか分からないが違和感がある(6) ハイハット等特定の部位に違和感がある(3) 演奏していて気持ち悪い(2)
	50	演奏音が遅れていると分かる(8) バスドラムが遅れて聞こえた(4) 演奏していて気持ち悪い(3)
	70	演奏音が遅れていると分かる(10) テンポの維持が困難(2)、不可能(2)
150	30	遅れているか分からないが違和感がある(7) スネア等特定の部位に違和感がある(4) 演奏していて気持ち悪い(4)
	50	演奏音が遅れていると分かる(6) 演奏音に違和感がある(4)
	70	演奏音が遅れていると分かる(7) 1打目の音が特に遅れて聞こえた(3) ハイハットの音がテンポ通りに揃わない(2)
180	30	演奏音が遅れていると分かる(4) 遅れているか分からないが違和感がある(4) 演奏していて気持ち悪い(1)
	50	遅れているか分からないが違和感がある(7) 演奏音が遅れていると分かる(4) 演奏がテンポより遅くなってしまう(2)
	70	演奏音が遅れていると分かる(8) 自分の音では無いように感じた(4) フレーズの演奏が困難(3)

3.3.2. 演奏時間の分析

フレーズの最初の音の開始から、最後の音の開始までの時間を求め、テンポどおり演奏を行った場合の演奏時間に対する割合を求めた。図9に、各遅延水準における12名の平均値と95%信頼区間をテンポごとに示す。表2に示す要因効果について三元配置分散分析を行った結果、3要因の主効果および被験者とテンポの交互作用が有意となった(表2)。図9では、遅延時間の増加に伴い、演奏のテンポが遅くなる傾向がみられた。各テンポ条件の遅延水準間で多重比較(Tukey-Kramer's HSD)を行った結果、全てのテンポ条件において、遅延8msと50msおよび70msの間に有意差がみられ($p < 0.01$)、150 bpmの条件では、8msと30msの間においても有意差がみられた($p > 0.05$)。このことから、演奏音の遅延の影響により演奏のテンポが遅くなり、遅延50ms(150 bpmについては30ms)で有意差が生じることが確認された。また、最もテンポの速い180 bpm条件は、他の2条件に比べ、演奏のテンポの低下の程度が大きい結果となった。

被験者とテンポの交互作用について、各テンポ条件における演奏時間のずれの割合を、被験者ごとに図10に示す。多くの被験者は、テンポが速くなるにつれ、右上がりの傾向を示している。しかし、より正確なテンポで演奏を行うことが出来ていた条件は、被験者によって異なっており、一部の被験者は150 bpmで最も正確なテンポで演奏を行っていた。このことから、被験者ごとに得意なテンポ、不得意なテンポが異なっており、演奏時間のずれに対するテンポの影響に対しては、被験者の個人差があるものと考えられる。

3.3.3. 演奏の乱れの分析

被験者の試行ごとに、スネアの打叩から次の打叩までの時間間隔を8小節分、計15間隔求めた。求めた間隔ごとに、テンポどおりの時間間隔との差の絶対値を積算した値(以下、拍のずれ)を、試行ごとに求めた。図11に、

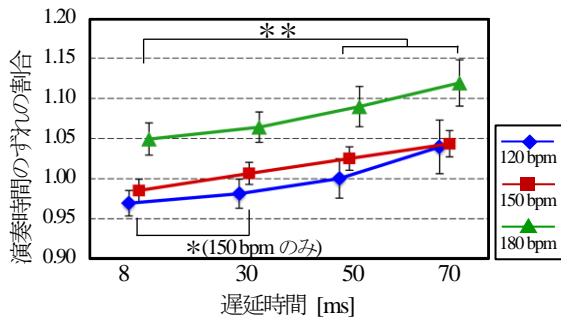


図9 演奏時間の分析

表2 三元配置分散分析の結果(演奏時間)

要因	F値	P値	寄与率 [%]
遅延水準	128.7	<0.01	14.1
テンポ	403.0	<0.01	29.5
被験者	60.05	<0.01	24.2
被験者×テンポ	28.37	<0.01	22.9
遅延水準×テンポ	1.56	0.15	0.3

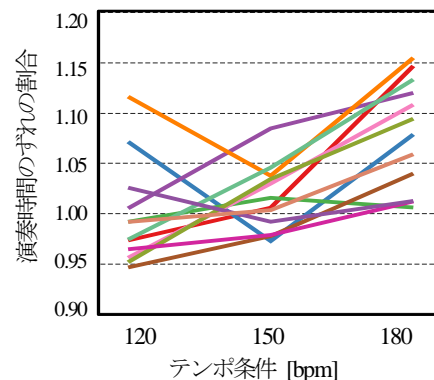


図10 被験者ごとの演奏時間のずれ

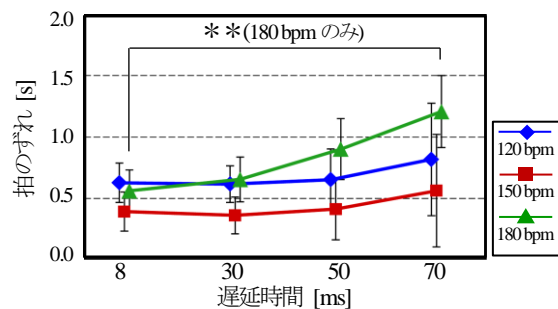


図11 拍のずれの分析

各遅延水準における12名の平均値と95%信頼区間を、テンポごとに示す。表3に示す要因効果について三元配置分散分析を行った結果、3要因の主効果、テンポと被験者および遅延水準の交互作用が有意にみられた(表3)。遅延水準70msにおいて、拍のずれが増加する傾向がみられ(図11)、180 bpmの条件では増加量が大きいことが確認された。各テンポ

条件の遅延水準間で多重比較を行った結果、180 bpm 条件のみ、遅延 8 ms と 70 ms の間に有意差がみられた ($p < 0.01$)。また、150 bpm 条件において拍のずれが最も低い傾向がみられた。各テンポ条件における、拍のずれを被験者ごとに図 12 に示す。150 bpm 条件は他の 2 条件に比べて、拍のずれが小さい傾向がみられたが、120 bpm、180 bpm において拍のずれが最小となる被験者も存在する。このことから、拍のずれに対するテンポの影響についても、演奏時間のずれと同様に、被験者の個人差があると考えられる。

4. 許容される遅延時間の考察

単発の運動での実験の結果、ドラム経験者の PSS は 50 ms 程度であった。演奏実験の結果、遅延 50 ms から遅延が知覚されることが示された。また、演奏音の分析の結果、遅延 70 ms まで演奏の乱れは生じないが、全ての条件で遅延 50 ms から演奏のテンポが遅くなることが確認された。本実験では、遅延 30 ms と 50 ms の間の水準が存在しておらず、この範囲で遅延の知覚や演奏への影響がみられる可能性も考えられる。このことから、アマチュアのドラム奏者について、電子ドラム演奏時の遅延時間は、30 ms 程度までは許容されるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、演奏音の遅延が電子ドラムの演奏に及ぼす影響について知見を得ることを目的とし、遅延検出実験を行った。単発の運動での実験の結果、ドラム経験者は非経験者に比べて、遅延の主観的な検出感度が高いことが示された。また、フレーズ演奏の実験の結果から、電子ドラム演奏時に遅延の影響が確認されたのは多くの条件で 50 ms (一部条件では 30 ms) であると示された。このことから、電子ドラム演奏時に許容される演奏音の遅延時間は 30 ms 程度までが望ましいといえる。

表 3 三元配置分散分析の結果(拍のずれ)

要因	F 値	P 値	寄与率 [%]
遅延水準	16.18	<0.01	26.2
テンポ	28.86	<0.01	8.5
被験者	12.73	<0.01	5.6
被験者×テンポ	19.97	<0.01	21.8
遅延水準×テンポ	2.07	0.02	2.3

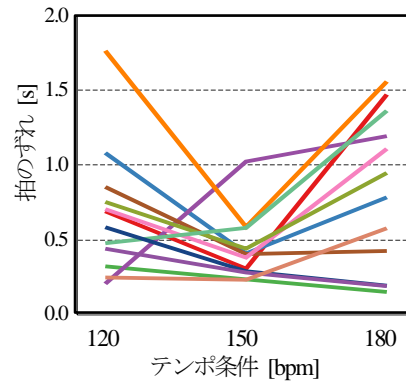


図 12 被験者ごとの拍のずれ

参考文献

- 1) 樋田浩一, 上野佳奈子, 嶋田総太郎, “身体運動に伴う遅延聴覚フィードバックの知覚順応”, 日本認知科学会第 29 回大会発表論文集, pp.404-407, 2012.
- 2) M. Lester, J. Boley, “The Effect of Latency on Live Sound Monitoring”, AES 123rd Convention, New York, Preprint, 2007.
- 3) 亀川徹 他, “演奏時における音声モニターの遅延時間の検知限とその影響について”, 日本音楽知覚認知学会研究資料, pp. 25-30, 2012.
- 4) 伊勢史郎, “聴空間共有を実現する音響樽の構想”, 日本音響学会講演論文集, 2011.09.
- 5) 長尾翼 他, “音の遅延条件がアンサンブル演奏に与える影響に関する検討”, 日本音響学会講演論文集, pp.997-998, 2012.03.