

研究報告

電氣的筋肉刺激 EMS を用いた体感音響装置の制作 Production of a Sensory Acoustic Device Using Electrical Muscle Stimulation

石津 寛

Kan ISHIZU

九州大学芸術工学部

School of Design, Kyushu University

城 一裕

Kazuhiro JO

九州大学芸術工学研究院

Faculty of Design, Kyushu University

概要

本研究では、電氣的筋肉刺激 EMS(Electrical Muscle Stimulation) を用いた体感音響装置を制作し、被験者を対象とした実機の体験とインタビュー調査からなる実験を行った。音の臨場感や没入感を増すことを目的とする体感音響技術の先行事例を踏まえ、音と同期した触覚刺激(振動)を身体に与えることで、音楽体験がどのように変化するかを確認することを目的としている。EMS を体感音響装置として用いた場合に音楽体験に対する没入感が増すという仮説の元、音と同期した EMS が聴覚の知覚強度を増加させることに着目し、音楽に合わせた筋肉運動に習熟している、ダンサー(2名)、ドラマー、ラッパーを被験者とした。その結果、意図した動きに対する電気刺激による阻害、音楽のリズムと電気刺激のリズムとのズレによる音楽への没入感の減少、ならびに、電気刺激を与える部位、強度、音楽ジャンルによる没入感向上の生む可能性が示唆された。

1. はじめに

本来音は聴覚刺激として知覚されるのと同時に、空気ならびに固体の伝搬振動として触覚刺激としても知覚されるものであり、この触覚刺激により音の臨場感や没入感を増すことを目的とする技術が体感音響である。体感音響技術は、1974年に公開された映画『Earthquake』において用いられた"sensurround"をその起源として(Marke 2019)、1980年代には"vibroacoustic therapy"(Rüütel 2018)として音楽療法で用いられた他、エンターテインメントの領域で幅広く活用されている(三上 2018)。体感音響技術にはさまざまな形状があり、4DXシアターなどのエンターテインメント施設で固定型として活用されているものの他にも、家庭で利用することを目的として開発された、椅子型の振動子から構成される emoti-chair(Rüütel 2018)、ボディースーツ

型の LIVEJACKET(Hashizume 2018)、バックパック型の SUBPAC(Drempetic 2017)などが存在しており、それらを活用することによる音楽と同期した触覚刺激による音楽体験の向上が示されている。

体感音響装置の多くはそのもの自体が震える振動子によって音楽を身体に提示するが、一方で、音楽と同期した電氣的筋肉刺激 EMS(Electrical Muscle Stimulation)による音楽体験についても、いくつかの先行研究において検討がなされている。例えば、EMSを用いて音楽に合わせて指先で無意識にリズムを刻ませることによって音楽への没入感が増上が示されており(三上 2018)、また別の研究(長嶋 2002)で、音楽と同期した EMS をダンサーに与えた際のパフォーマンスの変化が調査された。これらの先行研究により、EMS において使用されるパルスの種類やパルス幅を変更することが、新たな音楽体験の創出に寄与できる可能性が示唆されている。

1.1. Electrical Muscle Stimulation (EMS)

EMS は皮膚に貼った電極を介して末梢神経に電気を与え筋肉を収縮させる技術であり、医療分野を中心に活用されている。EMS による強制的な筋肉運動に対する行為主体性に関する研究(Kasahara 2019)では、事前に検出した筋電により、本来よりも時間を先行させて筋肉運動を行うように EMS を与えた場合、約 80ms までであれば行為の主体感を保持する可能性が示されており、近年では、EMS による知覚統合や運動の補助に関する研究が増加している(三上 2018, 中張 2016)。

2. 装置の開発

本研究では、既存の低周波治療器 omron HV-601T(omron 2018)と、Max for Live (Ableton 2021)を組み合わせ、EMS を用いた体感音響装置を開発した。Max for Live

上で、低周波治療器の電気刺激の BPM に合わせた音楽の再生と、オーディオ信号から検出したドラムの信号に同期し矩形波を出力するプログラムを制作した。その制作の過程を以下に記す。

2.1. 低周波治療器の電気刺激の利用

はじめに、電気刺激を出力する上で、音楽に対して身体の動きの伴う実験を行うことを考慮し、小型かつワイヤレスで操作可能である市販の低周波治療器 omron HV-F601T を選択した。その上で、HV-601T の出力する電気刺激に、任意の楽曲の BPM を合わせ、楽曲のキックドラムのタイミングと電気刺激のタイミングを一致させる Max for Live のプログラムを試作した。HV-601T から一定の時間間隔（指圧モード）で出力される電気刺激を、オーディオインターフェースを経由して音声信号として検出し、DAW(Digital Audio Workstation) ソフトの Ableton Live 11 suite 上で、前述のプログラムによって BPM と楽器の同期を実現している。



図 1: omron の電気刺激のオーディオ入力

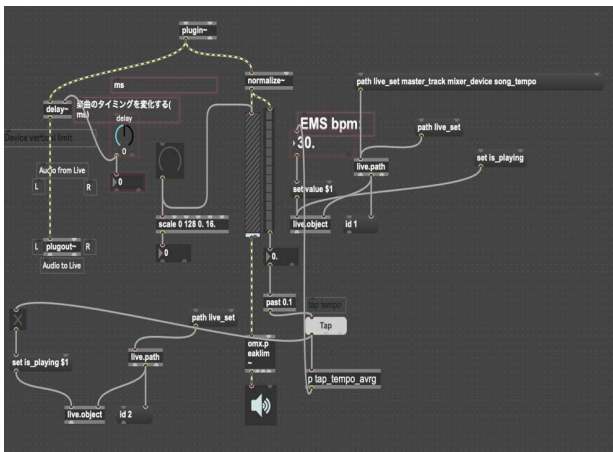


図 2: パッチの全体図

このプログラムにより、一定の間隔で出力される電気刺激に対して任意の楽曲を EMS と同期させて再生することが可能となった。一方で、電気刺激の間隔が不規則に変化する場合、BPM を検出できないため、楽曲と電気刺激との同期をはかることができないという結果となった。

2.2. アタック検出によるドラム検出の利用

楽曲からのキックドラムのタイミング検出の精度をより向上させるために、イコライジングに加えて、「Duck Call」というパッチ (<https://maxforlive.com/library/device/7758/duck-call>) を用いて、キックの音色に特化させたフォルマント検出を行なった。

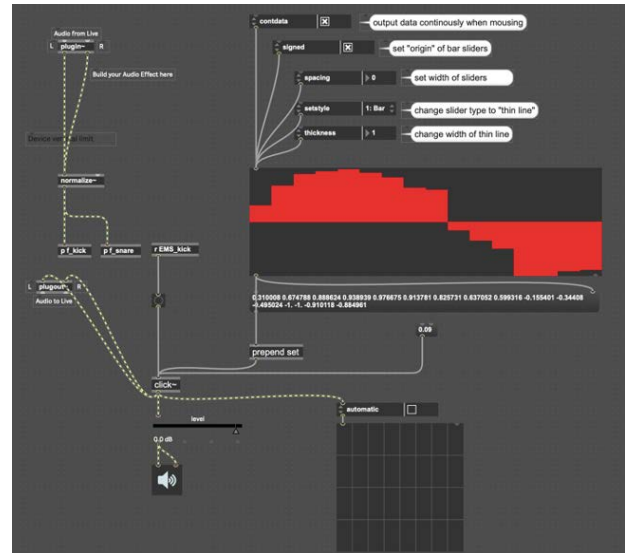


図 3: パルスを出力するパッチ

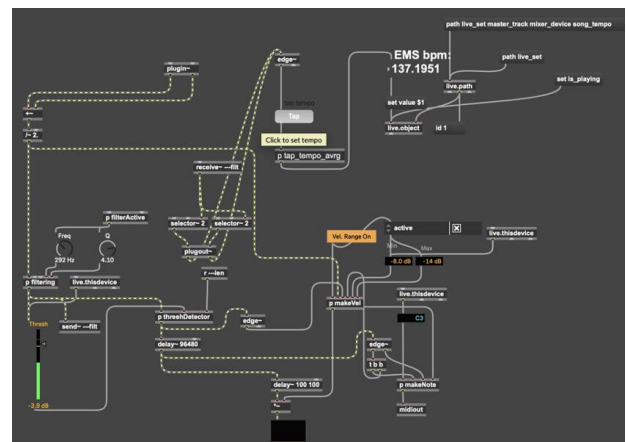


図 4: 「Duck Call」から必要な回路を抜き出したもの

この修正により、キックドラム検出の精度は上がったが、楽曲によってはドラムの音色自体が異なるため、全ての楽曲において正確な検出を行うことはできなかった。

3. 実験

音楽に合わせた筋肉運動に習熟している、ダンサー(2名)、ドラマー、ラッパーを被験者として、上記の開発した装置を装着した状態で、各々の特性に応じた身

体運動を行ってもらったとともに、インタビュー調査を行った。以下にその概要を記す。

3.1. ダンサー (ストリート)

ヒップホップをはじめとしたストリートダンスに習熟しているダンサーを対象に実験を行なった。実験では、任意の楽曲を被験者を選択してもらった上で、楽曲と同期した電気刺激を実験参加者の肩に与え、その状態で自由にダンスを踊ってもらった。

その結果、

- 「装置が大きい意識が音楽から外れてしまう。」
- 「電気刺激からハットの様な鋭い音と同じようなイメージを受けるため、電気刺激がキックに対応して提示されること自体に違和感がある。」
- 「電気刺激によってキックだけが強く感じられるようになっているが、リズムは低周波数帯域においてのみとっているわけではないため、リズムの知覚を阻害されてしまう。」

という意見を得た。その後、楽曲音楽を変更して数回、ダンスを踊ってもらったところ、

- 「皮膚に直接電気パッドを貼り付けるため長時間利用すると蒸れてしまう。」
- 「必要以上に筋肉が動かされるため、体力の消耗が激しくなる。」

という、長時間使うことによる問題点が見つかった。

その上で、電気パッドを装着する箇所を変更して再度楽曲に合わせてダンスを踊ってもらったところ、

- 「腰は痛みが少なく好ましい。」
- 「手につけると手が意図しないタイミングで動き、ダンスに集中できなかった。」

というように、電気刺激を与える箇所によって知覚が変化する、ということが確認された。中でも、

- 「手につけた際にダンスに集中できない」
- 「外的要因としての電気刺激によってダンスに気持ちが入らなかった」

と、装着する部位によっては、電気刺激によって身体の動きが大きく阻害されることがわかった。

また、広くダンス一般での活用法について尋ねたところ、

- 「電気刺激をキックよりも遅くすることで、音楽よりも早くリズムをとる傾向の強いダンス初心者動きを矯正することができるのではないかな。」
- 「ポップダンスのジャンルにおいて筋肉を弾くような動きが重要であるため、弾きづらい筋肉につけて練習で確認しながら用いることが有効的な練習方法となるかもしれない。」といった、活用の可能性が示唆された他、

- 「コンテンポラリーの人は感じ方が変わるかもしれないがストリートダンサーはリズムに外敵に干渉されると邪魔である。」
- 「逆に大きい刺激によって筋肉が強制的に大きく動く場合であれば、曲とマッチしていないナンセンスな動きが面白い動きや即興性に繋がる可能性はある。」

といった、他のジャンルのダンスでの活用に繋がる可能性が示された。

3.2. ダンサー (コンテンポラリー)

コンテンポラリーダンスをはじめとする身体表現に習熟したダンサーを対象に実験を行なった。実験では、任意の楽曲を被験者を選択してもらった上で、楽曲と同期した電気刺激を実験参加者の肩に与え、その状態で自由にダンスを踊ってもらった。

その結果、

- 「自分の意図する筋肉の動きと、EMS による筋肉の動きが互いに干渉し運動を阻害する。」
- 「聴覚によるリズムの知覚の速度と、触覚刺激によるリズム知覚の間に遅延があるように感じる。」
- 「電気刺激を与えた際に手足の動きがずれる。」

という意見を得た。そこで楽曲を停止し電気刺激に合わせてダンスを踊ってもらった結果、同様に手足のずれに関する意見が得られた。その上で、電気パッドを装着する箇所を変更して再び楽曲に合わせてダンスを踊ってもらったところ、

- 「胸を開く動きはダンスの動きにあっているため、背中に電気刺激を与えた場合にある程度音楽体験の向上が考えられる。」
- 「お尻に電気刺激を与えた場合、お尻を叩かれている感覚だった、膝でリズムをとる感覚に似ている。痛みもない。電気刺激がある方が気分は上がった。」

といった意見が得られ、大きい筋肉に電気刺激を与える際には痛みが少なく動きを阻害しないということがわかった。

また、広くダンス一般での活用法について尋ねたところ、

- 「触覚振動子よりもインパクトは強くクリックとしての効果は大きい。」
- 「ダンサー二人に同時電気刺激を流したりしたら演技のタイミングが合うのではないかな。」

という、ダンスパフォーマンスの補助装置としての活用可能性が示唆されたほか、

- 「複数の筋肉に電気が流れ、強制的に動かされる感覚はバレエのような、ゆっくりと体を伸ばす動きをするときの筋肉の感覚と類似している。」
- 「アフリカンなどの下半身のダンスだから動きを邪魔しない。」

といった、他のジャンルのダンスでの活用に繋がる可能性が示された。

3.3. ドラマー

ロックバンドでのドラム演奏に習熟したドラマーを対象に実験を行なった。実験では、任意の楽曲を被験者を選択してもらった上で、楽曲と同期した電気刺激を実験参加者の肩に与え、その状態で楽曲に合わせてドラムを演奏してもらった。その結果、

- 「手につけた時、電気刺激がきてからスティックがドラム当たるまでのタイミングにずれが生じ、電気刺激が楽曲と同期していると、楽曲とずれてドラムを叩くことになる。」

という意見が得られ、電気刺激による筋肉運動によってドラムを叩くタイミングが遅れることがわかった。

その上で、楽曲を止めた状態で電気刺激に合わせてドラムを演奏してもらったところ、

- 「フィルでずれてしまう。」
- 「電気刺激が有るときと無い時で、ドラムを叩くときの感覚が全く違う、使う筋肉が違うように感じる。」

といった、普段と異なる筋肉運動によって演奏の没入感が妨げられるという意見が得られた。

他の音楽ジャンルでの活用に関する意見を得るため、ヒップホップや jazz のドラムを叩いてもらうと、

- 「よれたビートではかなりリズムキープの妨げとなる。」
- 「jazz などのスウィングであってもクリックとしては問題なく使うことができた。」

という意見が得られた。

その後、電気パッドを装着する箇所を変更し、再びドラムを演奏してもらった結果、

- 「肩につけた場合クラッシュシンバルを叩くときに腕を上げないといけない、その時に EMS の刺激による筋肉運動の振幅に変化が出て邪魔になる。」
- 「手につけるとかなり邪魔に感じる。強制的にドラムを叩かされることに不快感を感じる」

といった意見が得られ、演奏に用いる筋肉に電気刺激を与えた場合に音楽体験が大きく阻害されることがわかった。

一方で、

- 「ドラムで使わない筋肉に使えば動きを阻害せずクリックとして有用だった。」

という意見が得られ、電気刺激を与える部位によってはクリックとして有用であることがわかった。

3.4. ラッパー

楽曲制作、ステージ上でのパフォーマンスに習熟したラッパーを対象に実験を行なった。実験では、任意のフリースタイルラップ用のビートを被験者を選択してもらった上で、楽曲と同期した電気刺激を実験参加者の肩に与え、その状態で自由にフリースタイルでラップをしてもらった。結果として、

- 「リズムがかなりとりやすく、一般的なクリックよりもわかりやすい。」
- 「肩が揺れるため、発声の妨げとなることがある。」
- 「リズムをずらしてフロウを出そうとすると、電気刺激が邪魔だった。」

という意見を得た。そこで、一般的なクリックよりもわかりやすかった理由を尋ねたところ、

- 「クリックは自分の声、発声、歌詞、喉の開きに意識したり、ピッチを気にしたりがリズムを忘れることになるが、体でリズムを取らされることでその問題を緩和できた。」

という回答が得られた。

その上で、楽曲を止めて電気刺激に合わせてラップをしてもらった結果、

- 「裏拍で鳴らした場合には、自分では意識してこなかった裏拍の韻に気付くことができた。」

という意見が得られ、被験者自身の歌詞に対する理解が深まる可能性が示された。

その後、再び楽曲を再生し、電気刺激を与える箇所を変化させてラップしてもらったところ、

- 「腹に電気刺激を与える場合は発声に悪影響が生まれる。」

といった意見が得られ、電気刺激を与える箇所によっては、発声が阻害されることがわかった。

また、電気刺激のラップパフォーマンスにおける活用法について質問したところ、

- 「クリックとして非常に効果が期待できる。刺激が弱ければ発声にも影響が出ない。」
- 「細かい刺激を与えれば強制的にビブラートを出せるのではないか。」

といった、電気刺激による新たな音楽に関する意見が得られた。

4. 考察

実験でのインタビューでは、全ての被験者が「リズムのずれを感じる」、「電気刺激による疲労を感じる」と述べている。以下その原因について、“音と電気刺激のイメージ”、“感覚刺激の伝達時間の差”、“既存の体感音響装置との違い”、“EMS と提示装置に対する物理的な不快感”という観点から考察する。

4.1. 音と電気刺激のイメージ

インタビューにおいて「電気刺激からハットののような鋭い音と同じようなイメージを受けるため、電気刺激がキックに対応して提示されること自体に違和感がある。」という意見があった。この原因としては、電気刺激と実際の音楽振動のイメージのずれ、周波数の不一致が考えられる。皮膚の周波数弁別に関する既存研究 (Yau 2010) によると、皮膚から知覚される周波数と、聴覚刺激の周波数が一致するときに感覚統合が強く現れることが示されており、今回の実験においての電気刺激と実際の音楽振動のイメージのずれ、周波数の不一致は音楽体験に負の影響を与えたといえる。

4.2. 感覚刺激の伝達時間の差

永井らは知覚刺激に対する反応時間について、聴覚、触覚、視覚の順に遅くなる、と報告している (永井 1986)。インタビューにおける「聴覚によるリズムの知覚の速度と、触覚刺激によるリズム知覚の間に遅延があるように感じる。」「電気に合わせようとすると、手足の動きが合わなくなり、下半身の動きに遅延が生じる。」という意見にみられる、聴覚によるリズム知覚とのずれは、この観点から説明することができる。

4.3. 既存の体感音響装置との違い

先行事例にあげた体感音響装置の多くは、広範囲の身体への刺激によって大きな振幅を実現している (Schmidt 2020)。一方、本実験では身体の一部だけに対してキックドラムと同期した電気刺激を与えている。あわせて、既存の装置の多くでは、入力された音声信号に対してローパスフィルターをはじめとした加工を行うことで、音楽のアタックやフォルマントの変化を時間的、周波数的に精密に再現しており、この点は低周波治療器からの矩形波のみを用いている本研究とは異なる。以上を踏まえると、刺激を与える部分の拡大、刺激信号の加工を行うことで、インタビューにおいて報告されたリズムのずれの知覚を改善できる可能性が考えられる。

4.4. EMS と提示装置に対する物理的な不快感

EMS を用いる上で解消が難しい問題として、電気刺激に伴う痛み、電気刺激による筋肉の疲労、パッドを長時間利用することによる蒸れ、パッドの消耗などが挙げられる。先行研究 (三上 2018) においても、「触覚刺激に集中してしまい、曲に対する没入感が減ったように感じた」という意見があり、やはり、電気刺激に対する不快感などが音楽体験を阻害することが分かった。これらは既存の体感音響装置にはなかった問題点

であり、現状の技術において解決することの困難なものである。一方で、今後音楽体験の没入感を増していく上では、これらの問題を解消するような EMS の開発が望まれる。

5. まとめ

本研究では、既存の大型・高価格の体感音響装置に対して、小型・低価格の体感音響装置として、EMS の活用を検討した。ただし、電気刺激の利用においては、刺激を与える筋肉部位の選択、ならびに安全性の担保において困難がある。研究の目的であった音の臨場感と没入感の増加に対しては、実験の結果、否定的な意見を得たが、これは開発した装置に起因するのか、身体の動きと音楽との同期に問題があるのか、現時点では確認することはできていない。今後、当初の目的の達成に向けて、安全性を担保した上で、複数の電気パッドの利用や、自作 EMS による刺激信号の多様化などを行っていきたい。

6. 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科研費 [JP23H00591] の支援を受け実施された。

7. 参考文献

- Ableton. 2021. "Ableton Live 公式ページ" <https://www.ableton.com/ja/live/max-for-live/>. Accessed February 12, 2024.
- Dremptic, C., and Potter, L. E. 2017. "Wearable bass tactile sound systems and immersion." Published November 28, 2017. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3152771.3156175>. Accessed February 12, 2024.
- Hashizume, S., Sakamoto, S., Suzuki, K. et al. 2018. "Live-jacket: Wearable music experience device with multiple speakers." Published May 30, 2018. https://digitalnature.slis.tsukuba.ac.jp/wp-content/uploads/2018/07/livejacket_hcii2018_preprint.pdf. Accessed February 12, 2024.
- J. M. Yau, A. I. Weber, and S. J. Bensmaia, "Separate mechanisms for audio-tactile pitch and loudness interactions," Published October 13, 2010. https://www.researchgate.net/publication/51614802_Separate_Mechanisms_for_Audio-Tactile_Pitch

and Loudness Interactions. Accessed February 12, 2024.

Kasahara, S., Nishida, J., and Lopes, P. 2019. "Preemptive action: Accelerating human reaction using electrical muscle stimulation without compromising agency." Published May 2, 2019. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300873>. Accessed February 12, 2024.

Marke B. 2019. "The Earthquaking, Subwoofing Magic of Sensurround." Published July 30, 2019. <https://daily.redbullmusicacademy.com/2019/07/earthquake-sensurround-cerwin-vega>. Accessed February 12, 2024.

三上紀一, 小川剛史. 2018. 「音楽体験向上のための電氣的筋肉刺激を用いた感情増幅手法の検討」, Published January 27, 2018. https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=repository_action_common_download&item_id=185541&item_no=1&attribute_id=1&file_no=1. Accessed February 12, 2024.

中張遼太郎. 2016. 「作業支援のための電氣的筋肉刺激による重量知覚制御」, Published May 23, 2016. <https://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/records/7459>. Accessed February 12, 2024.

永井大介, 長谷川賢一. 1986. 「聴覚・視覚刺激反応時間に関する研究」, 『昭和医学会雑誌』, 46(1), 27-33.

長嶋洋一, 赤松正行, 照岡正樹. 2002. 「電気刺激フィードバック装置の開発と音楽パフォーマンスへの応用」, Published May 18, 2002. <https://nagasm.org/ASL/paper/SIGMUS200205.pdf>. Accessed February 12, 2024.

omron. 2018. 「omron 公式ページ」 <https://www.healthcare.omron.co.jp/product/hvf/hv-f601t.html>. Accessed February 12, 2024.

Rüütel, E., Vinkel, I., and Laanetu, M. 2018. "Vibroacoustic Therapy and Development of a New Device: A Pilot Study in the Health Resort Environment." *Universal Journal of Public Health*, 6 (5), 240-246.

Schmidt, D., Schlee, G., Germano, A. M. C., and Milani, T. L. 2020. "Larger contactor

area increases low-frequency vibratory sensitivity in hairy skin." published February 3, 2020. <https://peerj.com/articles/8479/>. Accessed February 12, 2024.

Slynk. 2021. "Max for Live." published December 17, 2021. <https://maxforlive.com/library/device/7758/duck-call>. Accessed February 13, 2024.

石津 寛 (Kan ISHIZU)

2001 年福岡県出身. 2020 年より九州大学芸術工学部音響設計コースに進学. 来年度から九州大学芸術工学部音響設計コースに進学予定.

城一裕 (Kazuhiro JO)

1977 年生まれ. 博士 (芸術工学). 英国ニューカッスル大学 Culture Lab, 東京藝術大学芸術情報センター [AMC], 情報科学芸術大学院大学 [IAMAS] を経て, 2016 年 3 月より九州大学 大学院芸術工学研究院 音響設計部門 准教授. 専門はメディア・アート. 現在の主なプロジェクトには「Life in the Groove」, 「The SINE WAVE ORCHESTRA」, 「phono/graph」などがある.



この作品は、クリエイティブ・コモンズの表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際 ライセンスで提供されています。ライセンスの写しをご覧になるには、<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> をご覧頂るか、Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA までお手紙をお送りください。