

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 4 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18912

研究課題名（和文）渋滞の奏でる音楽 予兆検知に向けた交通流可聴化理論の構築

研究課題名（英文）Sound of traffic jam: Application of sonification on traffic flow analysis

研究代表者

塩見 康博（Shiomi, Yasuhiro）

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：40422993

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では微細な変化検知への有効性が示されている可聴化アプローチに着目し、その適用可能性に関わる基礎的な検討として、交通流データの可聴化による交通状態の識別可能性を検証した。また、可聴化された音環境が人間の行動にフィードバックすることで交通空間を制御する可能性を検討するため、背景音と歩行者・自転車交通流特性の関係を分析した。その結果、被験者は交通状態を音の印象として識別し、Breakdown直前の交通流データの判別において可視化よりも可聴化の方が高い精度での判別が可能であること、歩行者・自転車ともに楽曲によって群衆での交通流特性に差異が生じることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は交通と音の関係性を明らかにしたものである。とりわけ、可聴化というアプローチに着目した。可聴化とは数値データを音に変換する手法のことである。高速道路で渋滞が発生すると効率性が低下するのみならず、交通事故の危険性が高まる。それを制御するためには、渋滞が発生しそうな状況を検知し、それに応じてドライバーに運転行動を変容させ、渋滞を回避することが有効であると考えられる。前者に関しては、交通流データを可聴化することで、直感的に渋滞が発生しそうな状況を特定できることを明らかにした。また、後者に関して、背景音に応じて人間の行動に影響を及ぼすことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focused on the sonification approach that has been recently proven to be effective for detecting slight dynamical differences. As a basic study on its applicability, we verified the identifiability of traffic states by rendering sounds of traffic flow data. In addition, in order to examine the possibility of controlling the crowd flow in urban space by managing background sound environment, we analyzed the relationship between background sound and pedestrian/bicycle traffic flow characteristics. As a result of sensory experiment, the subjects can classify the traffic condition based on an impression of sound, and the identify the traffic state just before Breakdown. It is concluded that, the sonification approach can be utilized to detecting traffic states with higher accuracy than the visualization. Regarding the pedestrian/bicycle crowd flow, It is found that there were significant differences in traffic flow characteristics through the field experiments.

研究分野：交通工学

キーワード：可聴化 交通流 高速道路 歩行者 自転車 背景音

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高速道路ネットワークの拡充は渋滞の解消に寄与する一方で、従来はボトルネックとして顕在化していなかった分合流箇所などでの渋滞が多発することが予想される。渋滞が発生すると、交通流の効率性が著しく低下する(キャパシティドロップ)ため、高速道路のもつ機能を最大限に高めるためには、渋滞を未然に防止するためのプロアクティブな交通流マネジメントを行う必要がある。プロアクティブ交通流マネジメントを実現するためには、渋滞現象など交通現象の急変の予兆を高い精度で捉えることに加え、渋滞を回避するためドライバーに運転行動の変容を促す必要がある。

前者に関しては、研究代表者によるものも含めて、多くの研究蓄積があり、近年では深層学習の適用などにより、渋滞予兆検知の精度向上が図られている。しかしながら、交通流、とりわけ交通状態の遷移過程は時空間的に不確実な変動を伴う非線形性の強い現象であるため、その発生を予測するのは必ずしも容易なことではない。また、後者に関しては、コネクティッド車両を想定した場合、交通状況に応じた情報をドライバーに提供することができる。この場合、運転動作を妨げないという意味では聴覚的な情報提示が適していると考えられるが、言語による運転指示より、直感的に判断できる音響としての情報提示を行う方が効率的である可能性がある。

そこで、本研究ではデータの可聴化というアプローチに着目する。可聴化とは、数値データを音響データに変換し、聴覚を通じてデータ分析者に情報を伝達する手法である。The Sonification Handbook<sup>1)</sup>では、音による情報伝達(Auditory display)には、i) アラーム、警告といった何かが発生したことを伝える(Alerting function)、ii) 状態、モニタリングメッセージといった音で詳細を表現する(Status and progress indicating functions)、iii) 多次元データの全体像を捉える(Data exploration function)、iv) 娯楽・スポーツ・余暇活動としての音表現(Entertainment, sports, and leisure)の機能があるとされている。

このような特性を踏まえ、データ分析・データ探索手法として可聴化を活用した研究事例は近年増加傾向にある<sup>2)</sup>。例えば、カオス現象の分析<sup>3),4),5)</sup>、生体臨床医学<sup>6),7)</sup>、視覚障がい者とのコミュニケーション手法<sup>8),9)</sup>、データマイニング<sup>10)</sup>、宇宙科学<sup>11)</sup>、リハビリの補助<sup>12)</sup>など様々な分野で適用が試みられている。これは、人間の聴覚が時間的な変化に敏感である<sup>13)</sup>ため、時間変化を伴う現象を分析・理解するのに可聴化が適しているためであると考えられる。また、例えばリハビリへの応用を考えた場合、身体動作を可聴化し、その音を対象者にフィードバックする(すなわち、上述のiii)で得た結果をii)として利用する)ことで、自分自身の身体動作の状況と正常な動作の状況の差異を直感的に理解でき、動作の改善やコーチングに役立たせることができる、という利点も挙げられる。

これまで、交通流データに可聴化が適用された事例は筆者の知る限り存在しない。しかしながら、交通流現象は、

- ・時系列的な変動を伴う
- ・空間的な広がりを持つため、複数地点で観測されたデータを統合して活用する必要がある
- ・確率的な現象であり、その特徴量の特定が容易ではない

といった性質をもち、これらは可聴化が適用されてきた既往研究の事例と共通する特徴であると考えられる。とりわけ、交通状態と可聴化された音を直感的に対応させることが可能であるならば、交通状況の変動を音情報としてドライバーにフィードバックし、注意喚起することで運転行動の変容を促すシステムなどへの展開も期待できる。そのため、交通流、とりわけ Traffic breakdown に至る交通流のダイナミクスの分析において、可聴化を適用する意義は少なくないと考えられる。

### 2. 研究の目的

上述の背景を受け、本研究では、i) 交通流データの可聴化による渋滞予兆検知の可能性の検証、ii) 音環境による人間行動の変容効果の実証研究の2つに取り組む。なお、後者に関しては、本来であればドライバーの運転行動に対する効果を検証するのが望ましいが、実験設備の関係で実施が困難であったため、歩行挙動と自転車挙動への影響を検証することとした。具体的な内容は以下の通りである。

#### (1) 可聴化による渋滞予兆検知精度の検証

都市間高速道路単路部ボトルネックで発生する交通渋滞を対象とし、車両感知器パルスデータを可聴化し、交通状態(自由流、臨界流、Traffic Breakdown 発生直前の臨界流、渋滞流)の判別可能性を官能評価実験により検証する。

#### (2) 背景音が歩行者・自転車群集挙動に及ぼす影響の検証

まず、歩行者群集挙動に関しては、背景音がある条件下で隘路歩行実験を行い、歩行者の軌跡観測データからマクロな速度、密度、交通量の関係をグラフ化したものを背景音の特徴量と比較することにより、どのような楽曲が群集流動に影響を及ぼすか、を明らかにする。次に自転車群集挙動に関しては、自転車交通流の隘路となる自転車駐輪場の入り口付近で特徴の異なる背景音を流し、自転車の利用者が少なく自転車の移動が自由にできる状態(自由流)や、自転車の利用者が多く自転車の移動が自由ではなく周りに影響される状態(渋滞流)における自転車の移動軌跡をデータ化し、交通流のマクロ特性と背景音の特徴量の関係を明らかとする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 可聴化による渋滞予兆検知精度の検証

##### ① 用いるデータ

本研究は中国自動車道上り線宝塚西トンネル付近データを使用する。データは2010/3/16~23, 4/20~5/18, 7/15~9/14に収集された。車両感知器により個別車両データは車線別(片側3車線)・車両別の断面通過時刻, 走行速度, 車頭時間, 車長に関するデータが得られる。本研究では, 多くの既往研究により, 渋滞発生直前には交通量が追越車線に偏り, 大きい車群をきっかけに速度低下が発生すると指摘されていることを踏まえ, 本研究では渋滞予兆の検知という観点で追越車線データのみを利用する。

##### ② 可聴化の方法

音は高さ, 音量, 音色の3要素で表現されるため, 本研究では速度を周波数, 交通量を音量に対応させた可聴化を行う。交通流データを周波数と音量の数値データに変換した後, 音響プログラミング言語である Super Collider を用いて音に変換をする。具体的には, 速度・音量ともにロジスティック関数により, それぞれ周波数・音量にマッピングした。その際, 渋滞発生直前の交通状況の変動に対する感度を高めるようにパラメータを設定した。その上で, 図1に示す通り, 2地点の観測データに基づく可聴化音を, 地点間の距離を自由流速度で除した時間分だけずらして合成することで, 交通状態の空間的な変動が表現されるように音をデザインした。これによる交通状況とその音との対応関係は表1の通りとなる。なお, 可聴化した音は図2に示すQRコードのリンク先より視聴できるため, 適宜参照されたい。

##### ③ 評価実験

上述の可聴化システムで音へ変換した交通データから自由流, 臨界流, 渋滞流という交通状態を判別可能か評価する。その際, データ分析手順としてデータをグラフなどにより可視化し, 特徴量を読み取る方法がより一般的であることを鑑み, 可聴化と可視化の判別精度を比較する。

検証対象とする交通状態は, A: 渋滞発生時刻から85~90分前の自由流, B: 渋滞発生10~15分前の臨界流, C: 渋滞発生から30秒~5分30秒前の臨界流, D: 渋滞発生から10~15分後の渋滞流と設定した。

評価実験は2019/1/9~11に立命館大学びわこ・くさつキャンパスの交通工学に関する特段の知識を有していない学生63人が被験者として参加をした。被験者をAグループの31人とBグループの32人に分け, 前者には使用データの前半5日分を後者には後半5日分の音の印象評価と可聴化問題・可視化問題に回答してもらった。

#### (2) 背景音が歩行者・自転車群集挙動に及ぼす影響の検証

##### ① SD法に基づく背景音の選定

実験に用いる背景音を選定するため, まず実験設計者の主観による「テンポ」「明るさ」の2軸から各要素を大きく表すような楽曲をあらかじめ30曲選定した。その上で, 他者の感性も含めて楽曲の印象を決めるため, SD法に基づくアンケート調査を2019年6月に合計154名に対し実施した。その結果から, 楽曲の印象を表現する要素として「活発さ」と「安心感」を抽出し, それらに特徴的な楽曲5曲(天国と地獄/Jacques Offenbach, RatedX/Miles Davis, Satie: 3 Gymnopedies/Erik Satie, One O'clock Jump/Count Basie, The Entertainer/Billy Joel)を選定した。

##### ② 歩行者実験の概要

図3に示す隘路を模した環境下において, 歩行者実験を実施した。実験は2019年11月8日に実施し, 上述の5曲および無音条件下で50名が500秒間, 順に隘路を歩行する様子を上方よりビデオ撮影し, その歩行者の移動軌跡を数値化した。なお, 隘路は駅の改札口やイベント施設の出切り口を模するため, 横幅0.8mに設定した。

表1 時空間変動の可聴化の特徴付け

|                 | 周波数(速度) | 音量(交通量) | うなりの周波数 |
|-----------------|---------|---------|---------|
| 自由流             | 高い      | 大小がある   | 小       |
| 臨界流             | 不安定     | 大       | 大       |
| Breakdown直前の臨界流 | 不安定     | 大       | より大     |
| 渋滞流             | 低い      | 小       | 小       |

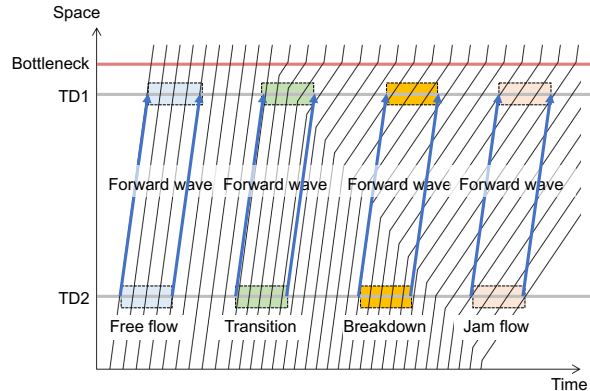


図1 データ取得地点と可聴化対象の関係



[https://www.youtube.com/channel/UCnjBRkp0fyDNVCtYR\\_-YgOA](https://www.youtube.com/channel/UCnjBRkp0fyDNVCtYR_-YgOA)

図2 可聴化された音の試聴URL

### ③ 自転車交通流調査の概要

図4に示す立命館大学びわこ・くさつキャンパス駐輪場入口において、スピーカーおよびビデオカメラを設置した。当該箇所では、授業開始前の時間帯に自転車利用者が集中する。特に、立命館大学正門前交差点は歩車分離制御がなされており、青開始時にまとまった需要が入口に到着し、混雑が発生する。2019年10月15日～11月5日かけて6日間、それぞれ背景音を上述の5曲、および無音に設定の上、自転車交通流の撮影を行った。撮影したビデオ画像に基づき、自転車の走行軌跡を数値化した。

### ④ マクロ交通流指標の抽出

移動軌跡データより、1秒単位の時刻ごとの、歩行者・自転車の頭部位置の画像上の座標値が取得される。これを射影変換により現地座標系に変換した。その上で、交通流の特長量を抽出するため、Edieの定義式を用いて、時々刻々の交通量  $Q$ 、交通密度  $K$ 、速度  $V$  の値を算出した。この値と背景音との関係の分析を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 可聴化による渋滞予兆検知精度の検証

#### ① 正答率の比較

図5に可視化問題・可聴化問題に対するそれぞれの正答率を交通状態A～D毎に比較した図を示す。これより自由流と渋滞流であるAとDの正答率は85%以上と総じて高く、可聴化問題と可視化問題に大きな差がないことがわかる。臨界流であるBとCは、可視化問題・可聴化問題ともにA・Dとの比較で正答率が63%～74%と低く、臨界流の判別は自由流・渋滞流より特徴が捉えにくいと考えられる。一方、可視化問題と可聴化問題を比較すると、B・Cともに可聴化の方が、正答率が高いことがわかった。

#### ② 回答内容の比較

表2、表3は正解に対してどのような回答がされたかを示したものであり、列に提示された交通状態を、行にそれらの交通状態に対する回答数を記している。これより、可聴化問題と可視化問題の間違え方に差があるということが言える。提示された交通状態がAの場合、可聴化問題ではBと間違える人が多い(のべ315回の回答中、29回)が、可視化問題ではBだけでなくCとも間違えやすかった(のべ315回の回答中、Bと誤答したのが21回、Cと誤答したのが19回)ことが言える。正解がCの場合、可視化問題の方がAやBと間違えやすかったといえる。これより、交通流を可聴化した場合の方が、状態の識別力が高い傾向にあることが確認された。

### (2) 背景音が歩行者・自転車群集挙動に及ぼす影響の検証

#### ① 歩行者

算出された  $Q$ 、 $K$ 、 $V$  より、密度-交通量曲線、および密度-速度曲線の関係式を推定した。その結果から、交通容量に相当する臨界領域を抽出し、その際の交通流量を背景音ごとに比較した。まず、分散分析の結果より、楽曲によって交通流量に有意な差異があることが分かった。また、この傾向について楽曲を特徴付ける因子との関係で整理した結果を図6に示す。これより、ばらつきはあるものの、活発さが増すほど流量が高くなり、安心感が増すほど流量が低下する傾向が確認された。今後は対象とする楽曲を増やし、詳細な傾向を検証する必要がある。



図3 隘路歩行実験の様子



図4 調査対象とした駐輪場入口の様子

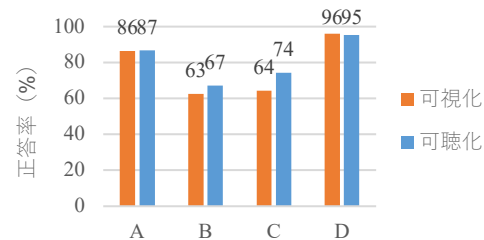


図5 可聴化と可視化の正答率の比較

表2 可聴化問題解答内訳

|      | A   | B   | C   | D   |
|------|-----|-----|-----|-----|
| Aと回答 | 273 | 37  | 4   | 0   |
| Bと回答 | 29  | 212 | 72  | 4   |
| Cと回答 | 8   | 63  | 234 | 11  |
| Dと回答 | 5   | 3   | 5   | 300 |

表3 可視化問題解答内訳

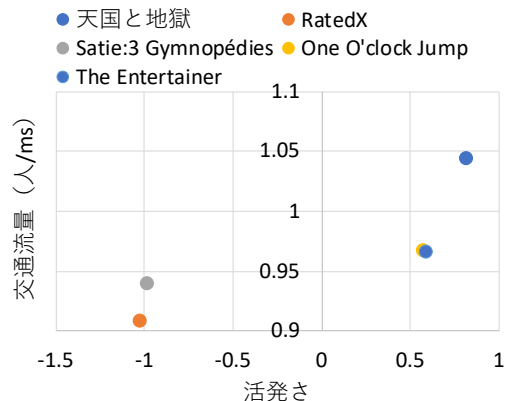
|      | A   | B   | C   | D   |
|------|-----|-----|-----|-----|
| Aと回答 | 272 | 31  | 13  | 1   |
| Bと回答 | 21  | 197 | 94  | 4   |
| Cと回答 | 19  | 84  | 203 | 7   |
| Dと回答 | 3   | 3   | 5   | 303 |

## ② 自転車

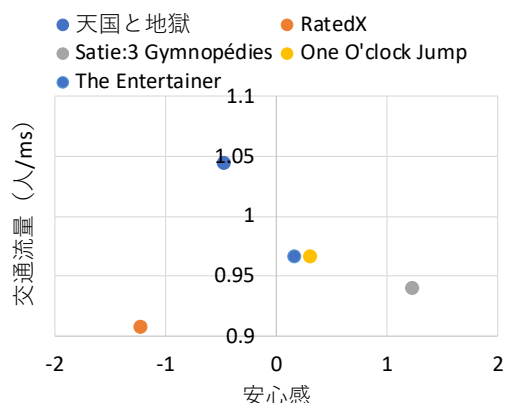
無音を含む各楽曲について、密度-速度曲線を推定し、臨界領域における速度について自由流時、臨界流時の平均速度の差異を検証した。その結果を図7に示す。多重比較の結果、楽曲によって平均速度に有意差があり、特に臨界流領域においてはテンポが高いほど、全体的に速度が大きくなる傾向にあることが確認された。

### 【参考文献】

- 1) Thomas Hermann, Andy Hunt and John G. Neuhoff: The Sonification Handbook, Logos Verlag Berlin, 2011.
- 2) Dubus, G., and Bresin, R.: A Systematic Review of Mapping Strategies for the Sonification of Physical Quantities. PLOS ONE, 8(12), 1-28., 2013
- 3) Kita, T: Sonification of bifurcation and chaos. Second Int. Conf. Innov. Comput. Inf. Control. ICICIC 2007 1-3, 2008.
- 4) 長嶋洋一：カオスに対する聴覚的なアプローチ(1). 電子情報通信学会技術研究報告. NLP, 非線形問題 111, 95-100. 2012.
- 5) 長嶋洋一：カオスに対する聴覚的なアプローチ(2). 信学技報. 2014.
- 6) Kaniwa, T., Terasawa, H., Matsubara, M., Rutkowski, T. M. and Makino, S. : EEG steady state synchrony patterns sonification. Asia-Pacific Signal Inf. Process. Assoc. Annu. Summit Conf. APSIPA ASC, 2012.
- 7) Vicinanza, D., Stables, R., Clemens, G. and Baker, M. : Assisted differentiated stem cell classification in infrared spectroscopy using auditory feedback. in The Proceedings of the 20th International Conference on Auditory Display, 2014.
- 8) Matsubara, M.: An Instrumented Ankle-Foot Orthosis with Auditory Biofeedback for Blind and Sighted Individuals IEEEMultimed, 1-1, 2015,
- 9) 松原正樹：身の回りを「聞こえる化」する視覚障害者のための可聴化技術. 情報処理 57, 262-265. 2016.
- 10) Halim, Z., Baig, R. and Bashir, S.: Sonification: a novel approach towards data mining. 2006 Int. Conf. Emerg. Technol. pp.548-553, 2006.
- 11) 野伸一郎, 外谷渉, 三浦昭, 海老沢研：宇宙科学データの可聴化プロジェクトの現状, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-11, 7-11, 2012.
- 12) 中川稔介, 寺澤洋子, 松原正樹, 井口正樹：足関節運動の可聴化における音デザインの評価. 情報処理学会研究報告, Vol.2016-AACA1 No.21, 2016.
- 13) 下條信輔, Christian Scheier, Romi Nijhawan, Ladan Shams, 神谷之康, 渡辺克巳：知覚モダリティを超えて：視知覚に及ぼす聴覚の効果, 日本音響学会誌 57 巻 3 号, pp.219-225, 2001.

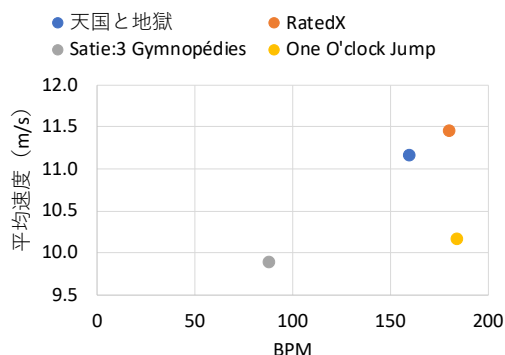


(a) 活発さと交通流量の関係

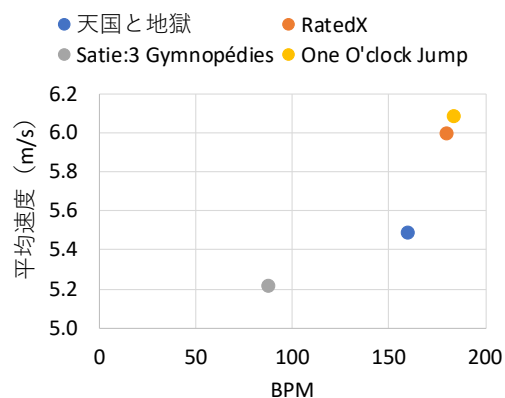


(b) 安心感と交通流量の関係

図6 楽曲の特長と歩行者交通流量の関係



(a) 自由流時



(b) 臨界流時

図7 楽曲のテンポと平均速度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>Yasuhiro Shiomi, Shiho Sakai and Hiroko Terasawa                                      | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>Intuitive Representation of Traffic Flow Dynamics: Application of Data Sonification  | 5. 発行年<br>2020年 |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation System (FISTS) | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-       |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>酒井紫帆, 塩見康博, 寺澤洋子  | 4. 巻<br>75                |
| 2. 論文標題<br>車両感知器パルスデータの可聴化による交通状態判別性能の評価  | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>土木学会論文集D3 (土木計画学)   | 6. 最初と最後の頁<br>I_625-I_636 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.2208/jscejipm.75.6_I_625">https://doi.org/10.2208/jscejipm.75.6_I_625</a> | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-                 |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yasuhiro Shiomi, Shiho Sakai, Hiroko Terasawa                                       |
| 2. 発表標題<br>Intuitive Representation of Traffic Flow Dynamics: Application of Data Sonification |
| 3. 学会等名<br>IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems (国際学会)              |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|                                 |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名<br>酒井紫帆, 塩見康博           |
| 2. 発表標題<br>SD法による可聴化した交通状態の印象評価 |
| 3. 学会等名<br>令和元年度交通科学研究会研究発表会    |
| 4. 発表年<br>2019年                 |

|                                 |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名<br>酒井紫帆, 塩見康博, 寺澤洋子     |
| 2. 発表標題<br>高速道路における車両感知器データの可聴化 |
| 3. 学会等名<br>日本音響学会2019年秋期研究発表会   |
| 4. 発表年<br>2019年                 |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>酒井紫帆, 塩見康博              |
| 2. 発表標題<br>交通流の可聴化による渋滞予兆検知の可能性の検討 |
| 3. 学会等名<br>土木学会関西支部年次学術講演会         |
| 4. 発表年<br>2019年                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>酒井紫帆, 塩見康博, 寺澤洋子              |
| 2. 発表標題<br>車両感知器パルスデータの可聴化による交通状態判別性能の評価 |
| 3. 学会等名<br>土木計画学研究発表会                    |
| 4. 発表年<br>2019年                          |

|                           |
|---------------------------|
| 1. 発表者名<br>酒井紫帆, 塩見康博     |
| 2. 発表標題<br>交通流の可聴化        |
| 3. 学会等名<br>第57回土木計画学研究発表会 |
| 4. 発表年<br>2018年           |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)              | 備考 |
|-------|--|------------------------------------|----|
| 研究協力者 | 寺澤 洋子<br>(Terasawa Hiroko)<br>(70579094) | 筑波大学・図書館情報メディア系・准教授<br><br>(12102) |    |
| 研究協力者 | 酒井 紫帆<br>(Sakai Shiho)                   | 立命館大学・理工学研究科・修士2回生<br><br>(34315)  |    |