

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

酒井 紫帆¹・塩見 康博²・寺澤 洋子³

¹ 学生会員 立命館大学 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: rv0052hs@ed.ritsumei.ac.jp

² 正会員 立命館大学准教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: shiomi@fc.ritsumei.ac.jp

³ 非会員 筑波大学助教 図書館情報メディア系

交通渋滞の有効な対策を実現するためには交通状態の急変予兆を検知し未然に防いでいくことが求められる。しかし、Traffic breakdown の予兆検知を試みた研究事例は少なくないものの、精度面で課題が残る。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、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する。具体的にはボトルネック箇所とその上流箇所の 2 地点の交通流データの速度を周波数、交通量を音量に変換をした。自由流、臨界流、Breakdown 直前の臨界流、渋滞流を可聴化したデータの聞き分けが可能か評価実験を行った。その結果、被験者は自由流、臨界流、渋滞流の音を区別して印象付けしていたことが判明した。加えて、渋滞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を示した。

Key Words: traffic flow, sonification, traffic breakdown, proactive management

1. はじめに

高速道路での交通渋滞による経済損失、排気ガスによる環境汚染は依然として重要な社会問題であり、生産性向上のためにも喫緊の課題である。その対策として、高速道路では交通渋滞を捉え、それに対応した情報提供などの交通マネジメント (Active traffic management) が行われている。しかしながら、より実効性の高い対策を実現するためには渋滞予兆を検知し未然に防ぐ Proactive traffic management への移行が求められている。

これまでも自由流から渋滞流への転移現象 (Traffic breakdown) の予兆検知を試みた研究事例¹⁾は少なくないものの、必ずしもその精度は高くはない。また、車群などの渋滞発生直前の特徴量を抽出する研究もなされているが、必ずしも明確ではないことが明らかとなっている²⁾。そこで本研究では、可聴化というデータ分析方法に着目する。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 Handbook³⁾では音は固有の特性を持っているとされ、以下の 4 点が挙げられている。

- i. アラーム、警告といった何かが発生したことを伝える
- 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

- iii. データ検索
- iv. 芸術・娯楽・スポーツ

上記の特徴のように、近年、音は音楽や警告音だけでなく、音の特徴を利用してデータ分析ツールとした可聴化の研究が増加してきている。カオス現象の分析⁵⁾⁶⁾、生体臨床医学⁸⁾⁹⁾、視覚障がい者とのコミュニケーション手法¹⁰⁾¹¹⁾、データマイニング¹²⁾、宇宙科学¹³⁾、リハビリの補助¹⁴⁾など様々な分野で適応が試みられている。

そのような中で現在、交通流の可聴化に取り組んでいる事例はない。しかしながら、交通流の現象論的特性を鑑みると、交通流への可聴化適応の意義は以下のようなことが挙げられる。

- i. データの可聴化は多次元のデータを非線形写像・次元圧縮可能
- ii. 可聴化は連続的なデータに対応した音表現が可能のため、時系列データの分析に向いている
- iii. 聴覚は視覚と比べて小さな変化やパターンを感知しやすい
- iv. 現象の理論的背景と音響との関係を直感的に理解できるため、状況認知が容易である

以上の点を踏まえ、本稿では交通流解析の文脈で可聴化を適用する意義と可能性について検討する。とりわけ、

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、渋滞に至る交通状態の判別可能性について、官能評価実験により検証する。

2. 可聴化研究の渋滞予兆検知との親和性

(1) 可聴化に関するレビュー

可聴化はデータを音へ変化させる手法であり、聴覚が視覚よりも時間変化の理解に優れているため時系列情報の表現に適しているとされている。1997年のSonification Report¹⁵⁾で定義が明確化された手法である。Thomas Hermannによる可聴化によるデータ分析の定義¹⁶⁾は以下のようになっている。

- i. 音は入力データの客観的な特徴や関係性を反映する
- ii. 音への変換はシステマティックである。データと音の変化の因果関係が明確に定義されている。
- iii. 可聴化は再現可能である。まったく同じデータと全く同じ制御によって生成された音は構造的に等しくならなければならない
- iv. 可聴化のシステムは他のデータを入力しても利用でき、同じデータを繰り返しても利用できる

このように、可聴化は音楽とは分離してデータ分析ツールとして確立しつつある。また、可聴化する際に変数となるのは、マッピング（音が鳴る）、ピッチ（周波数）、ボリューム、音色とされる。音色は複数の倍音が混ざりあうことで生み出される。例えば同じ周波数であってもピアノとギターの音が違って聞こえるのは、同じ周波数の中に混ざっている倍音の割合が変わってくることで違いが生まれるからである。

近年、可聴化の研究は多様な分野に適用されつつあり、その動向はレビュー論文としても整理されており、とりわけ、状態量のモニタリング、挙動検知、データ探索、感覚補完、視覚障害支援などの応用事例が報告されている¹⁷⁾。

モニタリングに適用された研究事例として、加庭ら¹⁸⁾は脳波の可聴化を試みている。特に定常状態誘発反応の発生、および伝搬のプロセスに着目し、脳波のチャンネル間の関連度合（コヒーレンス）を可聴化した。より具体的には、時系列信号間のコヒーレンスを倍音の振幅にマッピングし、コヒーレンスの周波数ビンと同じ数の正弦波の倍音列を生成し、脳波の相関の高い周波数ビンに対応する倍音は強く聞こえ、相関の低い周波数ビンに対応する倍音は弱く聞こえることで脳波の変化が音色になるように設定した。評価実験の結果、87%の精度で識別が可能であることを明らかにしている。そのほか、自己

複製能をもつ幹細胞への識別問題への適用事例¹⁹⁾もあり、上述のような可聴化の特性は、非線形に変化する現象、あるいは特定状況の検知に有効性があることが示されている。

このような可聴化によるモニタリングの有効性はアラート機能との対比が理解しやすい。通常のアラートは連続的に変化する変数に対して閾値を設定し、その値を超えた場合に警報音を発するものである。この場合、閾値の設定がアラートの精度を決定づけるものとなる。これに対し、可聴化を適用する場合には、変数が連続音としてマッピングされることとなる。そのため、可聴化変換は通常のアラートとは異なり、状態と状態の変化をもつ情報を提供することが可能となる。これは視覚的な情報提供が適さない状況に大きなアドバンテージがある。例えば、Hammerschmidt and Hermann²⁰⁾は運転時の瞬間燃費を可聴化し、ドライバーにフィードバックすることで視覚的な情報提供との比較で、より低燃費での走行が可能になることを明らかにしている。

(2) 渋滞予測研究のレビュー

交通流は不確実性・確率的な変動を伴う事象である。とりわけ、Traffic breakdown は非線形性が強い現象であるため、正確に予兆を検知し、その発生を予測するのは必ずしも容易なことではない。

交通状況の予兆検知に関して、Eleni et al²¹⁾は包括的なレビューを行い、ニューラルネットワークといった経験的計算知能ベースのアプローチに重点が置かれていることが述べられている。このような手法では分析対象に関する確かなデータを収集し、データの可視化などを通して対象となる現象に関する仮説を指定し、事象に影響を及ぼすと考えられる変量を探索的、あるいは統計分析に基づいて抽出し、統計モデル、あるいは機械学習などの手法を適用して予測を行うという検討プロセスを用いるのが一般的である。

例えば、塩見ら²²⁾はボトルネックでの速度変動における因果について、ボトルネック上流地点で観測されたある特定の交通流状態が下流のボトルネックへ到達することで速度低下などを誘発させるとの仮説のもと、この因果関係を明示的な考慮したニューラルネットワークによる速度変動予測モデルを構築した。その結果、全体的な予測精度は相関係数にして 0.95 以上と高いものの、Traffic breakdown につながる速度の急変の予測精度は 20 件中 6 件にとどまっている。この傾向は、近年の技術開発が目覚ましいディープラーニングを適応した事例も同様であり、Le et al²²⁾による予測結果をみても、（特に著者らは関心を払っていないものの）速度の急変時には 1 タイムステップの時遅れが生じていることが確認できる。

(3) 渋滞予兆検知における可聴化の意義

渋滞予兆検知に必要とされる精度，時間解像度，予測スパンは，その結果をどのように実務に応用するかによって異なると考えられる．たとえば，渋滞予兆に基づいて出発時刻情報提供や経路誘導を行う場合には時間解像度が荒くとも，長いスパンでの需要の変動傾向を捉えることができれば良い．その一方で，特定のボトルネックにおける交通状況の変動予兆を捉え，ドライバーに速度急変の注意喚起を行う，あるいはより先進的には自動走行車両の追従モードを切り替えるというような，ドライバーや乗員に一定の負荷を強いる場面への適用を考えると，予測スパンは短くとも，高い精度が要求される．本研究では後者への適用を想定する．このとき，可聴化の意義は以下の 2 点に集約される．

a) 渋滞予兆の特徴量の抽出

渋滞発生のきっかけとなる特徴量については，「サイズの大きい車群」という定性的な指標²²⁾は提示されているものの，渋滞発生との定量的な関係性は明らかとなっていない．また，取得されたデータと，そのデータ整理から車群の概念も含めた説明変数を抽出し，速度変動予測にニューラルネットワークを利用したモデル^リでも必ずしも高い精度が得られていないことは，抽出した特徴量に課題がある可能性が指摘できる．一方で，いわゆるディープラーニングなど手法では特徴量の抽出も自動化されるため，上述の課題は解決される可能性がある．

しかしながら，必ずしも特徴量は明確でなくても，人間が目みて直感的に犬と猫を判別できるのとは異なり，交通流データを可視化するなどして見比べても直感的に自由流・臨界流・渋滞直前時・渋滞流の判別ができるとは限らない．この場合，ディープラーニングなどの手法でも高い精度で予兆は検知できないと考えられる．翻って，本研究で着目する可聴化アプローチは，データを一定のルールに基づいて周波数に変換・圧縮する．これにより，もし直感的に交通状態の判別が可能であるならば，機械学習への適用により高精度な状態判別，予兆検知へと展開できるものと考えられる．

b) ドライバーへのフィードバック情報としての活用

上述の通り，本研究での予兆検知は速度の急変を捉え，ドライバーや乗員に情報として提供し，運転挙動の変容や乗員の注意を喚起するような活用方法を想定している．その場合，オンラインデータの可聴化により，交通状況やその急変予兆を直感的に理解できるのであれば，文字や図形などの視覚的な情報提供に代替できる可能性がある．とりわけ，運転時には視覚による情報収集は制限されるため，その適用可能性は高いものと考えられる．また，このような活用をアラートで行う場合，交通状況と対応するデータの関係に線型性を仮定し，それに対して閾値をプリセットする必要がある．そのため，i) 非線形

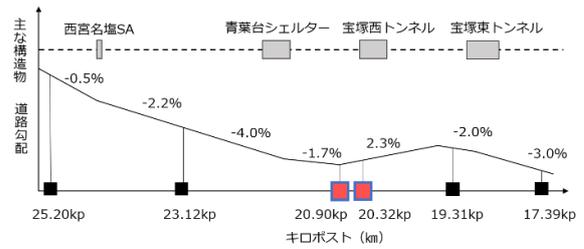


図-1 対象区間概要

な事象には対応しにくい，ii) アラート音と交通状況の関係性不明確となり直感的な理解が難しい，iii) 確実に交通状況の急変を検知できるよう安全側に閾値を設定した場合，過剰にアラートが発動することによる「オオカミ少年効果」が生じる，などの課題が想定される．本研究で取り組む可聴化アプローチは，これらの課題を克服することが可能となる．

以上を踏まえ，本研究では交通流データを可聴化と可視化でそれぞれ表現し，被験者による評価実験を通して，渋滞直前時を含む交通状態の判別の精度を比較検証する．

3. 使用データ概要

(1) 対象地と対象期間

本研究は図-1 に示す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．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．

塩見ら^リによると，対象区間ではボトルネック位置が日没前は 20.32kp，日没後は 20.9kp に変化する．これは，日没前は宝塚西トンネルで渋滞が発生しているが日没後はトンネルがボトルネックの要因ではなくなりサグ底の 20.9kp にボトルネックに移動したと考えられている．

本研究では 20.32kp がボトルネックとなり，日没前に長時間の渋滞が発生した 2010/4/25, 4/30, 5/2, 5/9, 8/1, 8/10, 8/12, 8/21, 8/22, 9/11 のデータを使用した．

(2) 使用データの処理

速度は時速 120km 以上時速 20km 以下をエラー値として取り除いた．

交通流の分析では一般的に 5 分間集計のデータを使用するが，車群のような 5 分間に变化するような交通流の特徴が捉えられないこともある．そこで本研究では微小の変化を捉えるために 1 秒間隔の 30 秒移動平均速度を使用する．移動平均をとるのはデータの外れ値の除去及び円滑化だけではなく，本研究の可聴化方法において途切れない音を作成するために 1 秒ごとに連続したデー

タが必要なためである。本研究の可聴化手法では速度と対応した交通量が必要なため、30 秒間の平均速度に合わせて交通量は 30 秒間に観測地点を通過する台数とした。

本研究では山岡ら²⁴⁾の渋滞発生基準を採用し、2 台連続して時速 40km 未満の車両が観測された時点が渋滞発生とした。

4. 可聴化システムの概要

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で交通量を音量に当てはめ可聴化する。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、SuperCollider という音声作成ソフトウェアで音へ変換をする。

(1) 音の設計

速度変化を式(1)により周波数 f に変換し速度が低下するほど音が低くなる。周波数変化範囲の 5% が時速 50km, 95% が時速 90km となるよう α を定めた。

$$f = \frac{f_{max}}{1 + \exp(\alpha(v - v_{center}))} + f_{min} \quad (1)$$

- f_{max} : 最大周波数 330(Hz)
- f_{min} : 最小周波数 110(Hz)
- v_{center} : 渋滞発生直前の速度 70(km/h)
- v : 30 秒移動平均速度(km/h)
- α : $\log 19/(-20)$

交通量変化を式(2)により音量 V に変換し交通量が多くなるほど音量が大きくなる。1 日の最大交通量前後となる 25(台/30s)が音量変化範囲の 95%になるよう α を定めた。

$$V = \frac{V_{max}}{1 + \exp(\alpha(Q - Q_{center}))} + V_{min} \quad (2)$$

- V_{max} : 最大音量 0.5
- V_{min} : 最小音量 0.05
- Q_{center} : 渋滞発生直前の交通量 20(台/30s)
- Q : 30 秒間交通量(台/30s)
- α : $\log 19/(-5)$

また、実時間の 1 秒のデータを 1/15 秒の音に変換した。

(2) 2 地点の交通流の可聴化

ボトルネックとなる 20.32kp とボトルネック上流地点の 20.9kp の速度と交通量の変化を可聴化することで渋滞の伝播及び渋滞直前の 2 地点の速度バランスの変化を捉えることを目標とする。

使用するデータは追い越し車線のみとする。交通量が増加するにつれて追い越し車線を走行していた車が走行

車線に戻らずに走行するため車群が形成されやすくなる。この車群がサグ部差し掛かると速度低下し、これが後方に伝播していき次第に渋滞が発生すると考えられている。このように渋滞発生の原因が追い越し車線にあることから、渋滞予兆の検知という観点で追い越し車線を利用することとした。

自由流の場合、20.9kp の交通量は一定時間後に 20.32kp に到達すると考えられる。本研究では 2 地点ともが自由流である渋滞発生時刻から 90 分前の 20.9kp の 5 分間平均速度を算出する。2 地点の距離差 0.58km を走行する時間分だけ、20.32kp の時刻をずらした。20.9kp の速度変化と一定時間後に時刻をずらした 20.32kp 速度変化をプロットすると、図-2 のように 2 地点の交通状態の変化がほぼ一致するようになる。しかし、渋滞発生直前になると図-3 のようにボトルネックである 20.32kp から速度が低下していき 2 地点の変化がずれてくる。

2 地点の交通流変化を可聴化したものを同時に流すとどちらの音も Sin 波のため、速度差は式(3)に従いなりを発生させる。うなりは $\cos\left(2\pi\frac{f_1-f_2}{2}t\right)$ が大きくなるほど周波数が大きくなる。

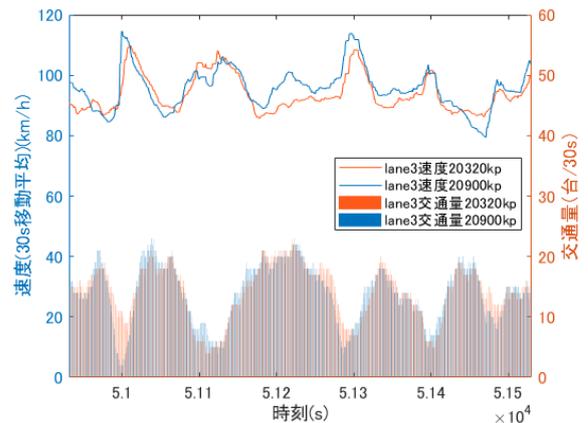


図-2 時刻をずらした 2 地点の交通流変化 (自由流)

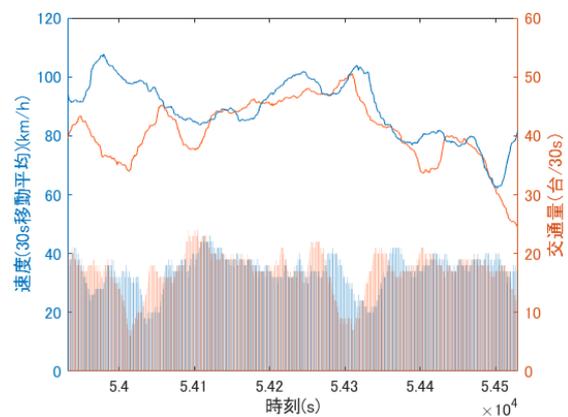


図-3 時刻をずらした 2 地点の交通流変化 (臨界流)

$$\begin{aligned} & \sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t) \\ &= 2 \sin\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t\right) \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right) \quad (3) \end{aligned}$$

f_1 : 20.32kp の周波数
 f_2 : 20.9kp の周波数
 t : 時間

自由流の場合、2 地点の速度変化はほぼ同じように変化するためうなりの周波数は小さい。一方、渋滞が発生し、ボトルネックの 20.32kp から速度が低下していくと 2 地点の速度間に大きな差が生まれうなりの周波数は大きくなる。

以上のような設定で 2 地点の交通流を可聴化した音の特徴付けしたものが表-1 のようになる。作成された音は YouTube²⁵⁾ 上にアップロードされているため適宜参照されたい。

5. 評価実験

可聴化された音の評価方法としては、寺澤ら²⁶⁾によると以下の 3 点が挙げられている。

- i. 外部観測：被験者の身体状態など客観的に計測可能な数値情報をもとに評価する
- ii. アンケート：大人数の被験者に対して理解度や満足度などあらかじめ決められた項目について評価する
- iii. 自由回答：データの可聴化を通じて理解したかどうかを測るために、被験者本人の内観を口述・回答してもらい評価する。

本研究では ii のアプローチを用いる。

評価実験では自由流、臨界流、渋滞流といった交通状態を把握可能か、加えて渋滞発生直前の交通流状態を把握することが可能かを評価するために行う。また、交通流データの分析において可聴化と可視化のどちらが向いているのかを評価する。

(1) 評価実験で使用するデータ

5 分間の速度と交通量データを使用する。交通流状態を自由流、臨界流、渋滞流に区分した。中でも臨界流に関しては渋滞発生直前となっているものはどのデータかを区別してもらうため、以下の 4 種類に区分した。

- 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

B と C を判別することは臨界流内での渋滞発生直前の交通流を判別することが可能かを評価することを意図している。

表-1 2 地点の交通流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
渋滞流	低い	小	小

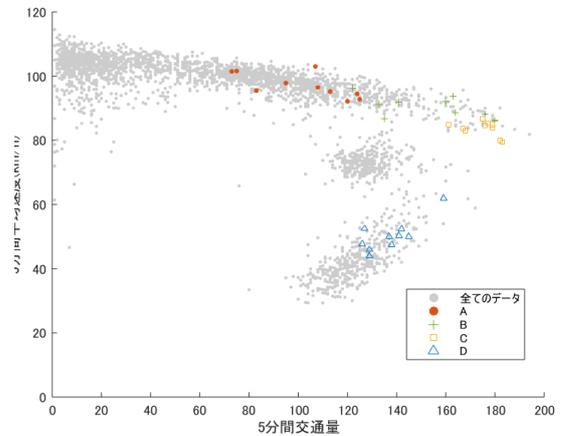


図-4 ABCD を示した QV 図

図-4 は上の条件で 10 日間のデータをプロットしたものである。これより、A, B, C, D の交通状態が違ってくるのがわかる。

(2) 評価実験内容

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学生 63 人が被験者として参加をした。評価実験では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。

音の印象評価では形容詞尺度を利用して、対象とするものの印象をとらえる手法である SD 法を使用した。本実験では A, B, C, D の音を順に聞き、11 個の 7 段階両極尺度を用いた質問に答えてもらった。使用した尺度は、「明るい-暗い」、「安定-不安定」、「速い-遅い」、「きめ細やか-粗い」、「重い-軽い」、「落ち着いた-激しい」、「迫力ある-もの足りない」、「はっきりした-ぼやけた」、「心地よい-不快」、「特徴ある-平凡な」、「やかましい-静かな」、「バラバラな-溶け合った」である。

可聴化問題と可視化問題は交通流データの分析において可聴化と可視化のどちらが向いているのかを評価することを意図とし、図-5 に従って行った。可聴化問題と可視化問題で使用するデータは全く同じものを用いた。どちらの問題も A, B, C, D に最も当てはまるものを選び出すという内容となっている。可聴化問題では 20 秒間の音を聞き A, B, C, D のいずれかを選び、可視化問題では 2 地点の速度及びに交通量変化を示したグラフを見て A, B, C, D のいずれかを選ぶ。

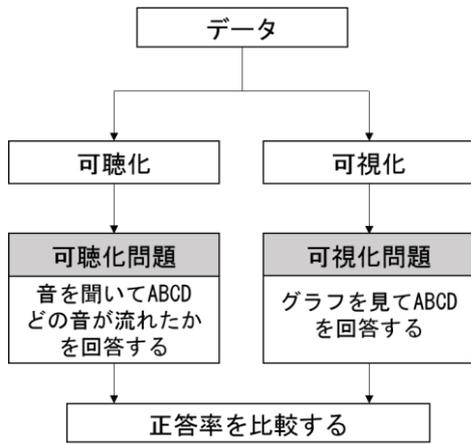


図-5 可聴化問題と可視化問題のフロー

6. 評価実験結果と分析

(1) 音の印象評価

回答は項目の左極（「明るい-暗い」ならば「明るい」）を基準として 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 の順に数値を与えて分析する。

個人ごとの音の印象を正規化するため、式(4)の min-max normalization を適用し、回答が 0~1 の間に収まるようにした。

$$Y = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (4)$$

- Y : 正規化された値
- X_{min} : 個人の回答の最小値
- X_{max} : 個人の回答の最大値
- X : 回答された値

質問項目ごとに平均値を求め、A, B, C, D ごとにリーダーチャートを描くと図-6 のようになった。

自由流である A や渋滞流の D ははっきりと分別できる値をとっている。臨界流である B・C は A・D とは区別できるが、全体的に似たような値をとっていることがわかる。

加えて、11 個の 7 段階両極尺度を用いた質問に関係性がないかを分析するために因子分析を行った。因子抽出法を最尤法、回転法をバリマックス法にして算出した。表-2 に因子負荷量を示す。

因子 1 はピッチ変動、うなりの周波数の変動、音量の変動に由来する項目の因子負荷量が多い。因子 2 は音の高さに対する印象の因子負荷量が多い。因子 3 は「迫力ある-物足りない」の項目のみ因子負荷量が大きくなった。以上より因子 1 を「安定の要素」、因子 2 を「音の明るさの要素」、因子 3 を「音量の要素」とする。図-7、図-8 は因子得点をプロットしたものである。図-7 より A

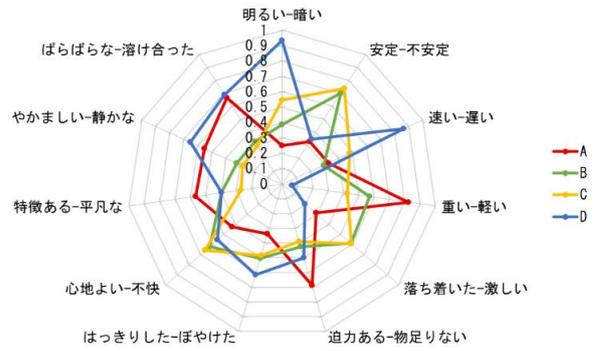


図-6 音の印象の平均

表-2 因子負荷量

	因子		
	1	2	3
ばらばらな-溶け合った	0.819	0.067	0.193
落ち着いた-激しい	-0.779	-0.207	-0.227
安定-不安定	-0.741	0.013	-0.034
やかましい-静かな	0.690	0.129	0.403
心地よい-不快	-0.664	0.323	0.005
特徴ある-平凡な	0.528	-0.226	0.266
明るい-暗い	-0.042	0.867	0.000
重い-軽い	-0.001	-0.866	0.258
速い-遅い	0.253	0.726	0.058
はっきりした-ぼやけた	-0.130	0.378	0.048
迫力ある-物足りない	0.334	-0.056	0.813

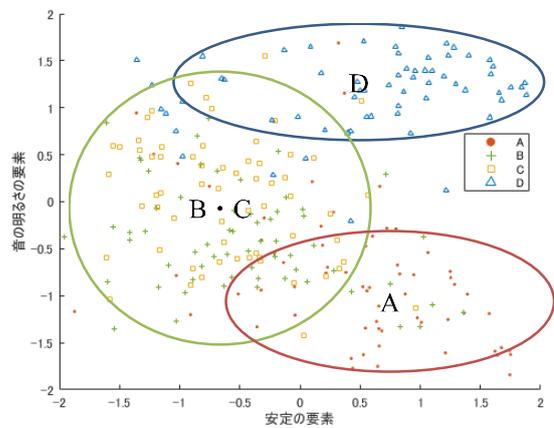


図-7 因子 1, 2 の因子得点

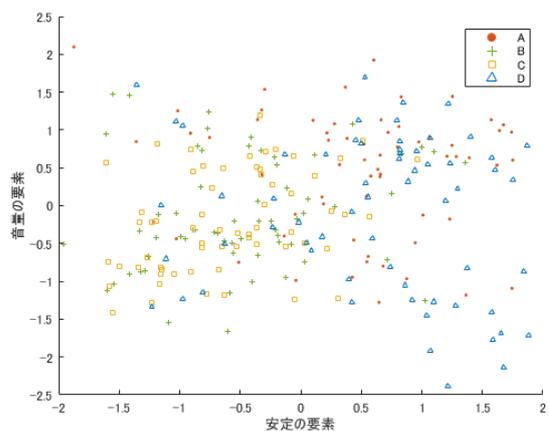
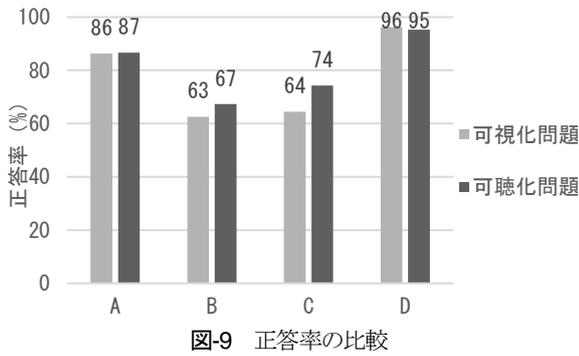


図-8 因子 1, 3 の因子得点



の印象は安定していて明るい、Dの印象は安定していて暗いとなっている。BとCの印象はほぼ同じでとなっており、不安定で音の明るさの印象はどちらでもないとなっている。図-8より被験者は音量の変化ではA、B、C、Dを区別していなかったと考えられる。

(2) 可聴化問題と可視化問題の比較

a) 正答率の比較

図-9より自由流と渋滞流であるAとDの正答率は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。

可視化でははっきりと区別がつく交通流は可聴化でも同様に区別がついていることがわかる。正答率だけを比較すると臨界流であるBとCは、可聴化問題の正答率の方が良いといえる。

図-10、図-11、図-12、図-13はA、B、C、Dの正答率をデータの日付ごとに比較したグラフである。

各日付の正答率についてt検定を行った結果、Cに関してのみ有意水準5%において有意差が確認された。すなわち、可視化との比較で可聴化の方が渋滞発生直前の状況を判別し易いといえる。

b) 回答内容の比較

表-3、表-4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る。表-5は可聴化問題と可視化問題の回答内訳をカイ二乗検定した結果である。AとCは確率値が0.1以下となっているので、内訳に差があると考えられる。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。正解がAの場合、可聴化問題ではBと間違える人が多いが可視化問題では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ことが言える。

表-6、表-7は正答率が低かった8/12の回答内訳を示している。可聴化問題ではBをAやCと間違え、CをBと間違えていることがわかる。可視化問題ではBとCの回答が逆転しBをCとCをBと間違えていることがわかる。

また、図-13、図-14、図-15、図-16は8/12のA、B、

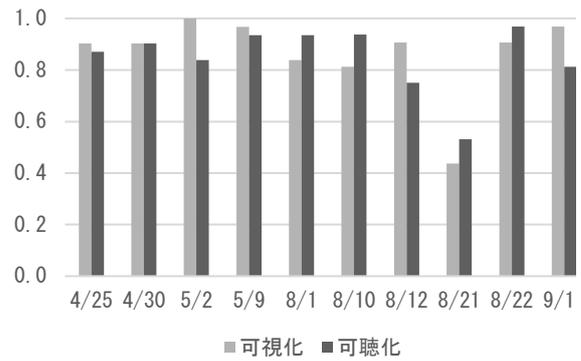


図-10 Aの正答率

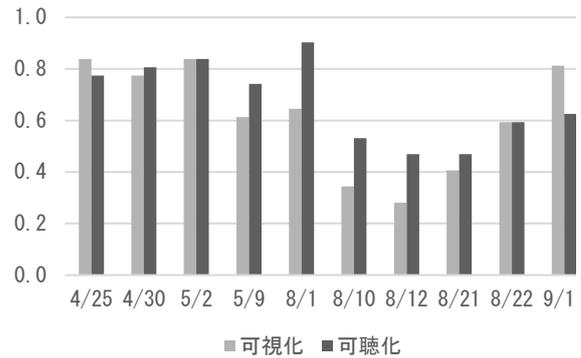


図-11 Bの正答率

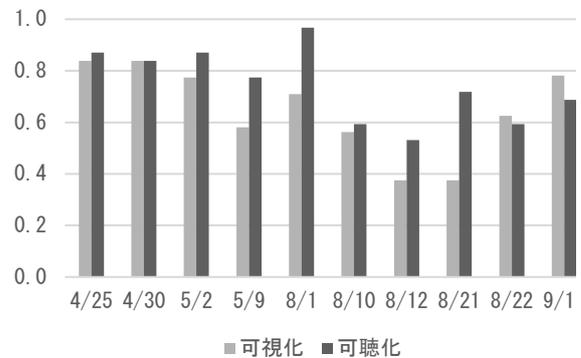


図-12 Cの正答率

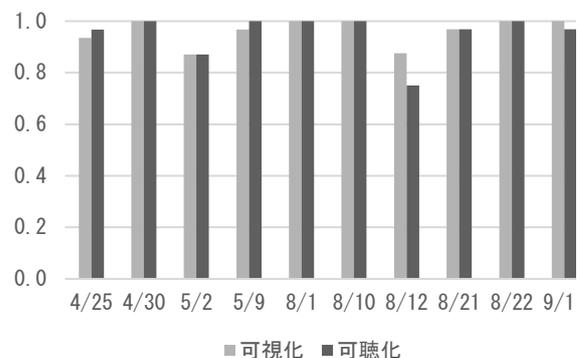


図-13 Dの正答率

表-3 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-6 可聴化問題解答内訳(8/12)

	A	B	C	D
Aと回答	24	7	1	0
Bと回答	5	15	11	1
Cと回答	1	8	17	7
Dと回答	2	2	3	24

表-4 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

表-7 可視化問題解答内訳(8/12)

	A	B	C	D
Aと回答	29	3	0	1
Bと回答	3	9	19	2
Cと回答	0	17	12	1
Dと回答	0	3	1	28

表-5 回答内訳の比較

	χ^2 の確率値
A	0.099
B	0.253
C	0.020
D	0.593

C, Dにおける、速度と交通量変化(上グラフ)と可聴化したデータの波形図(下図)を示したものである。音を波形図にすると音量やうなりによって特徴付けされることがわかる。また、Dより渋滞が20.9kpまで伝播しておらず完全に渋滞していない状態であったと推測される。これよりBとCは渋滞直前ではなかったためどちらの手法でも識別することが困難であったと考えられる。

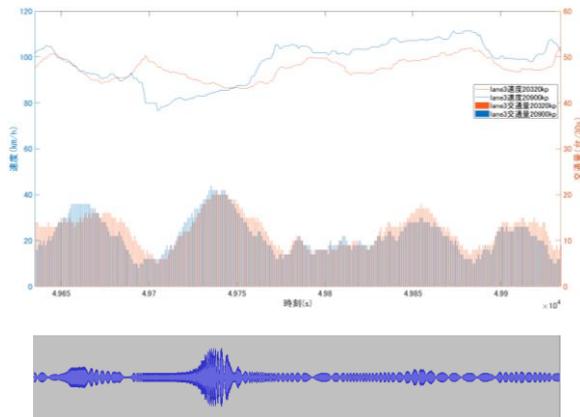


図-13 8/12のA

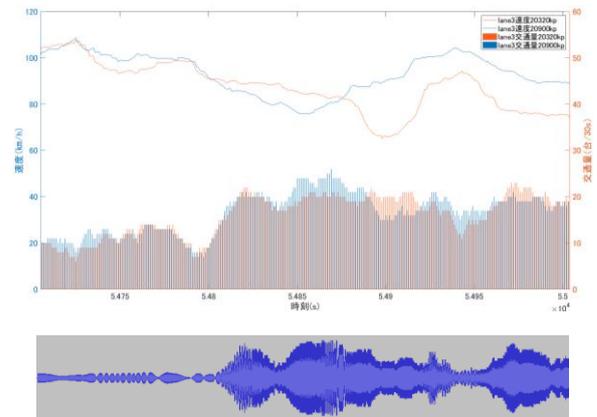


図-15 8/12のC

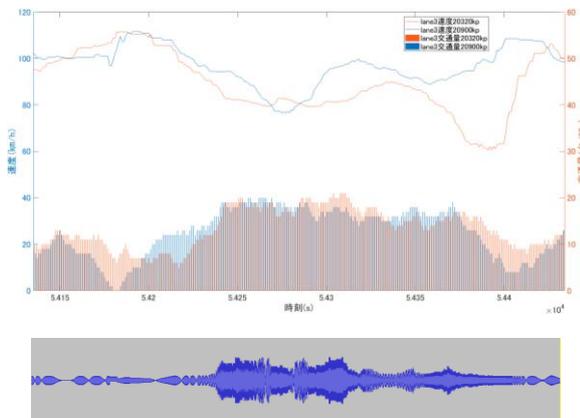


図-14 8/12のB

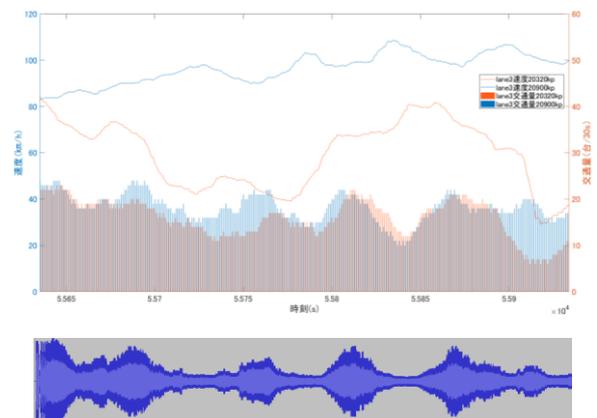


図-16 8/12のD

7. まとめと今後の課題

本研究では、自由流、臨界流、渋滞流の判断が可能な音への変換方法を確立すると共に可聴化した音の評価を行った。

交通流データを可聴化するための音設計は Sin 波を使用し実時間の 1 秒のデータを 1/15 秒の音に変換する。ロジスティック関数を使った変換式に速度変化をあてはめ周波数にし、同じように交通量変化を音量に当てはめた。ロジスティック関数を使うことにより渋滞発生前の交通状態を強調した音を作成した。交通流の可聴化方法としてボトルネック箇所とボトルネック上流部のデータを可聴化することで渋滞の伝播及び渋滞直前の交通流変化のずれを捉える方法である。

可聴化データの評価実験を行った結果、音の印象評価は「安定の要素」、「音の明るさの要素」、「音量の要素」に分けられた。被験者は「安定の要素」、「音の明るさの印象」から自由流、臨界流、渋滞流の印象付けをして聞き分けていたことが判明した。

可聴化問題と可視化問題の正答率は A, B, C が可聴化問題のほうが高く、D は可視化問題のほうが高い結果となった。その中でも、C の聞き分けのみ正答率の差が有意となり可聴化したデータの正答率が高いということがいえる。SD 法では B と C の音の印象違いは同じようだったのが問題において C は判別可能だったということが判明した。

以上のことから、本研究のデータの条件であれば可視化で判別しづらい交通流も可聴化することで判別しやすくなることが判明した。このことから、交通流を可聴化することは渋滞予兆の検知に貢献できると考える。

しかしながら、渋滞予兆の検知をするためには課題点も多い。その一つとして 10 日間の自由流、臨界流、渋滞直前の臨界流、渋滞流の一部の時間といった限定的なデータを使用しているという点である。本研究では被験者による評価実験のため膨大なデータの評価をすることは困難であった。しかしながら、日によって変化する交通流から渋滞予兆を検知するためには多量のデータを分析する必要がある。可聴化することは速度や交通量、地点ごとの変化のバランスといったデータの複数要素を波形のみに圧縮することが可能であるため、多種データを統合的に分析するのに適していると考えられる。今後は交通流データを可聴化したものを機械的な識別へ応用していくことにより、渋滞予兆の検知へつなげていく予定である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 17K18912 (挑戦的研究 (萌芽))「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」の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 塩見康博, 谷口知己, 宇野伸宏&嶋本寛. 個別車両データをを用いた単路部ボトルネックにおける速度変動予測と車線変更誘導による渋滞抑制効果の検証. 高速道路と自動車 56, pp.30-40, 2013
- 2) 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則:高速道路単路部をボトルネックとする渋滞発生特性に関する実証的研究, 高速道路と自動車, Vol.44, No.12, pp.27-34, 2001.
- 3) 邢健, 鶴元史, 石田貴志, 村松栄嗣: 渋滞を引き起こす交通流の車群特性分析, 土木計画学研究・講演集, CD-ROM, VOL.42, No.82, 2010.
- 4) Thomas Hermann, Andy Hunt, John G. Neuhoff : The Sonification Handbook. Logos Verlag Berlin. 2011
- 5) Kita, T : Sonification of bifurcation and chaos. Second Int. Conf. Innov. Comput. Inf. Control. ICICIC 2007 1-3 (2008). doi:10.1109/ICICIC.2007.530
- 6) 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
- 7) 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
- 8) Kaniwa, T., Terasawa, H., Matsubara, M., Rutkowski, T. M., Makino, S. : EEG steady state synchrony patterns sonification. Asia-Pacific Signal Inf. Process. Assoc. Annu. Summit Conf. APSIPA ASC . 2012
- 9) Vicinanza, D., Stables, R., Clemens, G. & 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
- 10) Matsubara, M. et al. An Instrumented Ankle-Foot Orthosis with Auditory Biofeedback for Blind and Sighted Individuals. IEEE Multimed. 1-1(2015). doi:10.1109/MMUL.2015.21
- 11) 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
- 12) Halim, Z., Baig, R. & Bashir, S. Sonification: a novel approach towards data mining. 2006 Int. Conf. Emerg. Technol. 548-553 (2006). doi:10.1109/ICET.2006.336029
- 13) 宇野伸一郎, 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
- 14) 中川稜介, 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
- 15) Kramer, G. et al : Sonification report: Status of the field and research agenda. Int. Community Audit. Disp.1999

- 16) Herman, T. : Taxonomy And Definition For Sonification And Auditory Display, in Proceedings of the 14th International Conference on Auditory Display, 1-8
- 17) Dubus, G., & Bresin, R. (2013). A Systematic Review of Mapping Strategies for the Sonification of Physical Quantities. *PLOS ONE*, 8(12), 1–28.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082491>
- 18) 加庭輝明, 寺澤洋子, 松原正樹, Tomasz M.Rutkowski, 牧野昭二 : コヒーレンス解析による定常状態誘発反応の可聴化. 日本音響学会講演論文集. 2012/9
- 19) Vicinanza, D., Stables, R., Clemens, G., & Baker, M. (2014). Assisted differentiated stem cell classification in infrared spectroscopy using auditory feedback. In The Proceedings of the 20th International Conference on Auditory Display. New York.
- 20) Hammerschmidt, J., & Hermann, T. (2017). EcoSonic: Auditory peripheral monitoring of fuel consumption for fuel-efficient driving. *Displays*, 47, 40–50.
<https://doi.org/10.1016/j.displa.2016.11.002>
- 21) Eleni I.Vlahogianni, Matthew G.Karlaftis, John C.Golias. Short-term traffic forecasting:Where we are and where we're going. *Transportation research PartC* 43. 2014
- 22) Li, Y., Yu, R., Shahabi, C., & Liu, Y. (2017). Diffusion Convolutional Recurrent Neural Network: Data-Driven Traffic Forecasting, 1–16.
<https://doi.org/10.15662/IJAREEIE.2015.0501067>
- 23) 邢健, 鶴元史, 石田貴志, 村松栄嗣: 渋滞を引き起こす交通流の車群特性分析, 土木計画学研究・講演集, CD-ROM, VOL.42, No.82, 2010.
- 24) 山岡努, 片倉正彦, 大口敬, 鹿田成則. 車両感知器パルスデータによる渋滞検出に関する研究. 土木計画学研究・講演集, No23-1, pp. 559-562, 2000
- 25) https://www.youtube.com/channel/UCnjBRkp0fyDnVcYR_-YgOA
- 26) 寺澤洋子, 松原正樹, 牧野昭二. 生命活動可聴化の現状と課題. 情報処理学会研究報告, Vol.2012-MUS-95 No.1

(?)

SONIFICATION OF TRAFFIC FLOW TOWARD DETECTION OF SIGN OF TRAFFIC BREAKDOWN

Shiho SAKAI, Yasuhiro SHIOMI and Hiroko TERASAWA

In order to realize effective countermeasures for congestion, it is required to detect signs leading to congestion and prevent them. However, although there are many research cases that tried to detect a sign of congestion, its accuracy is not high. This paper examines whether traffic flow analysis by sonification is a new method leading to high congestion prediction. The speed of the two points of the bottleneck part and its upstream part was converted into frequency change and the traffic volume was converted to volume change. In evaluation experiments, it was evaluated whether subjects were able to distinguish audible data of free stream, critical flow, critical flow before congestion, congestion flow. As a result, it turned out that the subject distinguished and impressed the sounds of free flow, critical flow, and congested flow. In addition, it was found that audible data is easier to distinguish traffic flow data immediately before congestion than visualized data.