

交通流の可聴化

酒井 紫帆¹, 塩見 康博²

¹非会員 立命館大学 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail: rv0052hs@kankyousystem.jp

²正会員 立命館大学 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail: shiomi@fc.ritsumeai.ac.jp

本研究は、交通流の状態推定・予兆検知・マネジメントに関する新たな方法論として、データ駆動型のアプローチである可聴化理論 (Sonfication) の適用可能性について検討する。可聴化とは、数値データを音響変換することであり、その意義は、i) 多次元のデータを容易に融合できること、ii) 現象を音響学的に解釈することで直感的な表現が可能であること、iii) 人間の聴覚は視覚との比較で優れたデータ分解能を持ち微少な変化を検知可能であること、にある。すなわち、各種交通流に関するデータを可聴化することで、交通現象の予兆検知やドライバーの運転行動変容に応用できる可能性がある。本稿では、定点観測データや移動体データを対象に、交通流を可聴化するための方法論を提案すると共に、その交通マネジメントへの適用可能性について考察する。

Key Words : *Sonficaltion, auditory display, traffic flow, sound-human interaction*

1. はじめに

欧米を中心に実務展開されつつあるアクティブトラフィックマネジメント (Active Traffic Management. 以下, ATM) は時々刻々と変動する交通状況を多様なデータに基づいて的確にとらえ、交通管理者から能動的にドライバーに働きかけをすることにより、渋滞の緩和・解消を図るものである¹⁾。従来、交通渋滞や交通事故などの事象を捉え、それに対応した情報提供を行うなどリアクティブ (Re-Active) なマネジメントが行われてきた。しかしながら、より有効な対策を実現するためには、渋滞や事故につながる予兆を捉え、未然に防ぐようにプロアクティブ (Pro-Active) なマネジメントへのステージへ移行が求められている²⁾。

このような交通流のマネジメントは必ずしも自動車交通流に限ったものではない。歩行者交通に関しても、例えば2001年に発生した明石歩道橋にて11名が死亡した事故³⁾や、2013年にインド中部のヒンズー寺院での巡礼中に115名が落命した事故⁴⁾は歩行者の群衆を適切にマネジメントすることで回避できた可能性がある。すなわち、歩行者交通に対しても現状把握、予測、マネジメントのサイクルを回していくためのデータ収集体系およびマネジメント体系を構築することの社会的重要性は高いといえる。

従来、交通流ダイナミクスのような不確実性・確率的な変動を伴う事象の予兆検知を行うためには、データ同

化などの手法を用いてシミュレーションベースで将来予測を行う⁵⁾か、あるいは、データオリエンテッドな手法、すなわち、i) 分析対象に関する的確なデータを収集し、ii) データの可視化などを通して対象とする事象に関する仮説を措定し、iii) 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、iv) 統計モデル、あるいは機械学習などの手法を適用して将来予測を行う、という検討プロセス⁶⁾を用いるのが一般的であった。また、近年では変量の抽出をシステム化するディープラーニングを適用した事例⁷⁾も少なくない。しかしながら、交通事故や自由流から渋滞流への相転移現象のような非線形な事象に対しても頑健に高い推定精度を得るのは必ずしも容易ではない。

また、たとえ高精度の予測が可能であったとしても、事象の予兆検知・予測結果をマネジメントに反映する際には、予測結果に対応した対処法をルールベースで用意しておき、動的な規制の実施や情報提供によりドライバーや歩行者の行動変容を促す必要がある。情報提供による行動意図を形成し、行動変容を実現するためには、当該者の習慣・信念・選好を前提とした上で規範意識・認知・態度に対する働きかけが必要となる⁸⁾。また、規制や強制力による行動変化を実行するにあたっては社会的な合意形成が必要不可欠となる。これらの点を総合して勘案すると、ドライバー・歩行者が無意識的・自発的に行動を変化させる心理的なアプローチが功を奏する可能性は否定できない。

以上のような現状認識に基づき、本研究ではデータ駆動型のアプローチである「可聴化理論」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（sonification）、聴覚を通じてデータ分析者に情報を伝達すること（auditory display）に関わる理論体系と定義できる⁹⁾。近年では、データの可視化と並び、データ分析の方法論として確立しつつあり、カオス現象の分析^{10), 11)}、生体臨床医学^{13), 14)}、視覚障害者とのコミュニケーション手法^{15), 16)}、データマイニング¹⁷⁾、宇宙科学¹⁸⁾など様々な分野での適用が試みられている。数値データを音響変換し、マネジメントに適用することの意義は以下の通りである。

- i) データの可聴化は、多次元時系列データを非線形写像・次元圧縮することに他ならず、モノラルの場合は1次元時系列データ、ステレオの場合は2次元時系列に変換可能であること
- ii) 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、状態認知が容易であること
- iii) 視覚との比較で人間の聴覚はデータ分解能が高く、微少な変化を感知しやすいこと
- iv) アラートなどのように不連続的に警告音を発するのではなく、連続的なデータに対応した音表現が可能であり、状態の変化過程を知覚しやすいこと
- v) 非言語的な表現方法であるのに加えて、音楽の情動性には普遍性があるため、聞き手を選ばずに柔軟な情報提供が可能であること

などが挙げられる。そこで、本稿では、可聴化理論の交通工学的文脈への適用可能性についての試論を目的とする。

本稿の構成は以下の通りである。まず、第1章では背景・目的を述べた。続く第2章において、可聴化に関する研究動向をレビューする。その上で、第3章にて交通工学の文脈で可聴化が寄与しうる状況、およびそれに関わる可聴化の考え方を整理し、第4章にて結論と今後の展望をまとめる。

2. 可聴化研究の現状

可聴化について、音響・芸術の分野では種々の取り組みがなされていたものの、自然科学の領域として学術体系化されたのは近年のことである。1989年に Buxton et al.¹⁹⁾によりデータの音響化の可能性が示されたのち、1992年に聴覚ディスプレイを科学的研究対象とするコミュニティである ICAD (International Community for Auditory Display) が設立され、その初期の成果が Kramer により1994年に整理される²⁰⁾。その後、1997年に Sonification を自然科学領域として定義付けした Sonification Report²¹⁾が発表され、以降の研究蓄積をベースに2011年には可聴化

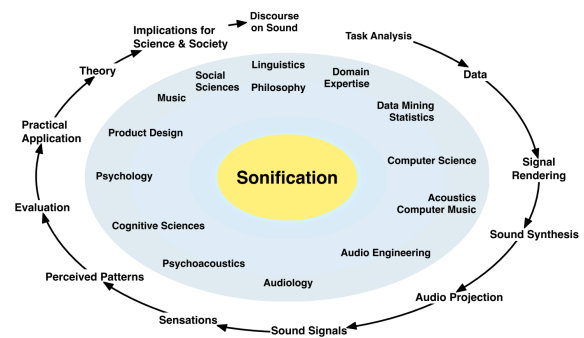


図-1 可聴化・聴覚ディスプレイに関わる研究分野連関図

や聴覚ディスプレイの理論的背景、音変換アルゴリズム、可聴化技術の分類、そして可聴化の実用展開事例について体系化された *Sonification Handbook*⁹⁾ が出版されている。

Dubus and Bresin による Sonification に関するレビュー論文²²⁾によると、2013年時点で734本の論文が出版されているとの記述がある。2015年には *Sound bytes* というタイトルでサイエンスライターの R. Cowen が可聴化について一般向けに紹介する記事²³⁾を *Scientific America* 誌に寄稿し、広く一般にアウトリーチされることになる（日本では「隠れたパターンを探し出すデータ可聴化」のタイトルで日経サイエンス誌上に翻訳記事が掲載されている）。2017年には Elsevier が出版する *Displays* という視覚表現技術を扱う学術誌において Sonification のスペシャルイシュー²⁴⁾が組まれており、この25年ほどの間に研究分野としての位置づけが明確化され、対象領域が拡大されつつあることがうかがえる。しかしながら、筆者の知る限りでは、交通工学の分野で Sonification が適用された事例は存在しない。

もとより、可聴化、および聴覚ディスプレイは学際的な領域であり、図-1に示す通り、その分析プロセスにおいてはデータサイエンスやコンピュータサイエンスに始まり、認知科学、心理学、社会科学、言語学などが一連のプロセスにおいて考慮されるべき学術分野とされている⁹⁾。同じく学際性の高い交通工学とも親和性が高いものと考えられる。

一方、マーケティングの分野では音と人間の相互作用に着目した研究は古くから取り組まれている。例えば、Milliman²⁵⁾はスーパーマーケットで流す BGM のテンポにより来店客の歩行速度が変わり、売り上げも異なることが実験により示されている。Caldwell and Hibbert²⁶⁾はレストランの BGM のテンポを速くすると、食べる速度が速く、そして滞在時間が短くなることを明らかとしている。また、Zampini and Spence²⁷⁾はポテトチップスを食べるときの噛砕音をモニタリング・加工して聴覚フィードバックすることにより、ポテトチップスの鮮度や食感が異なることを明らかとされている。ベッカーマン²⁸⁾はこれらの

知見を取りまとめ、マーケティング戦略としての「音」の重要性を述べている。

これら一連の音と行動の関係性はケルシュ²⁹⁾により脳科学的にその根拠が示されており、音楽を聴取するときの運動前野の賦活は音楽の情動価によって変化すること、そして知覚-運動連関は情動過程によって調整されることなどが明らかとされている。また、認知科学の分野においても、身体運動とそれに対応する遅れを伴う聴覚フィードバックを与えた後に、遅延のない状態を呈示すると、身体運動と知覚の順序関係に錯覚を起こすこと³⁰⁾などが示されている。

すなわち、音環境により人間の行動は無意識的に変容する可能性があり、これらの知見は交通マネジメントの分野における応用可能性についても十分に検討する余地があるものと考えられる。

3. 交通工学の文脈における可聴化の試案

音は大きさ・高さ・音色の3要素によって決定される。すべての音はフーリエ変換によりサイン波の合成として表現され、その時系列的な変化に対して聴覚ゲシュタルトを形成し、音の印象を決定づけることとなる。したがって、時系列変動を伴う現象については、それに関わるデータを非線形変換し、1次元空間に写像し、アンサンブルを形成することで音響化することが可能となる。すなわち、現象の変動と人間の音響知覚が連動し、変化を認識できるような非線形変換の手法を確立することが可聴化にとって最も肝要な点となる。以下では交通に関わるデータとその可聴化アルゴリズム、および交通マネジメントへの適用方法についての試案を述べる。

(1) 車両感知器データの可聴化

高速道路上では交通状況をオンラインで把握する目的で一定距離毎に車両感知器が設置されており、個別車両の到着タイミング、存在時間、走行速度などのデータが収集されている。この最もナイーブな音響変換方法として、到着タイミング、存在時間に応じて音響発生タイミングおよび長さ、また、走行速度を可聴範囲の周波数に変換する方法が考えられる。それらを車線・地点毎にアンサンブルすることにより、音データを作成することが可能となる。加えて、音量や音色、データ毎の音域などの調整や、ステレオの場合には音像定位を決定することで、事象の変動を認知可能な音響を生成することができる。

図-2 にその試行例を示す。これは中国自動車道上り線、宝塚西トンネル上流側、第1走行車線に設置された6地点の車両感知器（走行車線のみ）により収集された

走行速度 v を式(1)により周波数 f に変換し、6地点分を合成して無調音として可聴化したものである。

$$f = f_{min} + \frac{f_{max} - f_{min}}{v_{max} - v_{min}} \cdot (v - v_{min})$$

ただし、 f_{min} 、 f_{max} はそれぞれ音変換する際の最小周波数（440 Hz）と最大周波数（880 Hz）を表し、 v_{max} と v_{min} は観測データ内の最大速度（100 km/h）と最小速度（20 km/h）を表す。

図-2(a)は各地点の速度変動を観測地点毎に描画したものの（各点線は時速 60km/h に相当する）であり、図-2(b)はそれらを音響変換し、合成した際の波形を表している。また、図-2(c)は自由流状態である時刻断面 A におけるスペクトル強度分布、図-2(d)は渋滞流状態である時刻断面 B におけるスペクトル強度分布をそれぞれ示す。これより、渋滞流中は中間域の周波数成分が自由流時より大きく、また、全体的に凹凸の少ない形状になっていることが分かる。このように、音響により状態の差異を認知することが可能となる。

また、異なるアプローチとして、車頭時間や走行速度などの変動を一定間隔で集約し、フーリエ変換により周波数分解し、その上で対応する正弦波を合成することで音響データの作成する方法も考えられる。

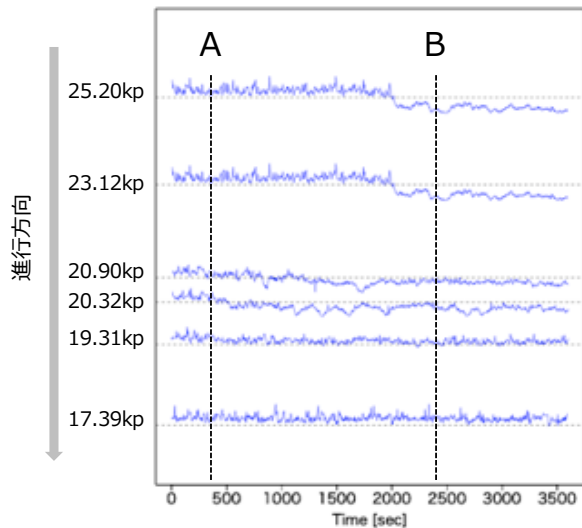
いずれの手法においても、車両感知器データを可聴化することの意義は、交通状態の変化を認知すること、あるいはその変動傾向から交通状態の急変を予測する、といった応用方法が適していると考えられる。聴覚により交通状態やその急変時の予兆の認知が可能であれば、その後は系列データを扱う Recursive Neural Network や Long Short Term Memory Network などの適用により、機械的な識別への応用も期待できる。

(2) 運転挙動データの可聴化

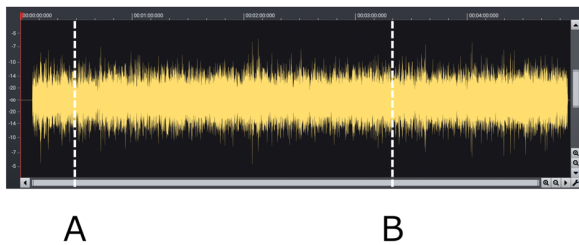
ドライブレコーダーや CAN データロガーなどにより走行中の運転挙動データの収集は容易である。これらのデータも時系列データであり、上述の手法により容易に音響変換することは可能である。

また、越膳らは個別車両の加速度変動をフーリエ変換し、その周波数に対するスペクトル強度の傾きの変動を指標化し、渋滞予兆インデックスとして定義している。また、予兆インデックスに対応した視覚情報を、スマホアプリを通じて可視化し、ドライバーに情報提供することで、渋滞の抑制に資する運転挙動へ誘導する効果を検証している。

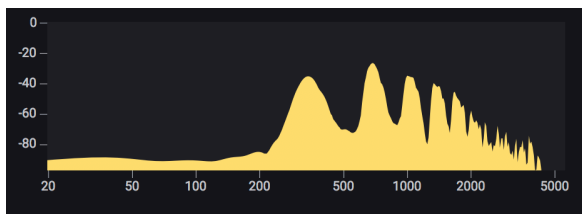
同様な手法で運転挙動特性の変動を可聴化し、ドライバーにフィードバック的に情報提供することで、過度な変動を抑制するような音環境を提示し、渋滞や事故の抑制に寄与するアプリケーションへと展開することは可能であると考えられる。とりわけ、運転時への情報提供と



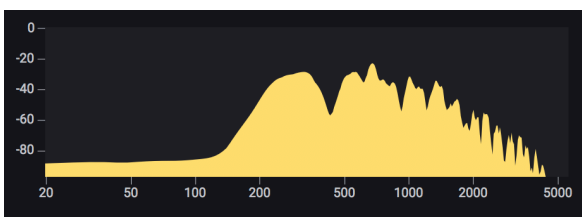
(a) 車両感知器設置地点の速度変動



(b) 合成音響の波形



(c) 渋滞発生前 A 地点におけるスペクトル強度の分布



(d) 渋滞発生後 B 地点におけるスペクトル強度の分布

図-2 車両感知器データの可聴化

いう意味では、視覚情報より音情報の方が適していると考えられ、その適用可能性は高いと言えよう。

音を与える心理効果は無意識な行動変容を促す効果があるとされている。そのため、たとえば、安定した運転を行っている場合には心地良い音響環境を形成し、運転挙動が不安定化するにつれて不快を感じるように無段階的に変調するように設計することで、適切な全体最適に資する運転挙動の変容へと寄与する可能性がある。

(3) 歩行行動の可聴化

第 2 章で述べた通り、音と人間の行動には大きな連関性があり、音を操作することで人間の行動を無意識的な変容に導く可能性がある。

例えば、個別の歩行者の歩行行動に伴う加速度変動を可聴化し、そのリズムを遅らせたり早めたりするエフェクトをかけた上で聴覚的にフィードバックすることで、歩行速度に影響を及ぼすことなどは検討に値する。また、群衆行動を対象にした場合、歩行者密度の変動をモニタリングし、それに対応した音環境を創造する一例えば、密度の高まりに応じてテンポが遅く、穏やかな音楽を流す、などことで、個別の歩行者の歩行速度を抑制し、全体としての流率に影響を及ぼすことも仮説として十分に検証する価値があると考えられる。

実際に、運動会の際には人間の情動を高めるような音楽をかけることがあるが、それにより興奮状態を醸し出しているものと思われる。そのような音楽は、決して高級デパートなどで流されることはないことを考えると、上記の仮説は一定の合理性があると考えられる。

4. 可聴化研究の現状

本稿では、可聴化、聴覚ディスプレイ、および聴覚フィードバックに関する研究レビューを行うとともに、交通工学分野での適用可能性について整理した。また、音響環境と運転行動・歩行行動に関わる仮説を措定した。

今後は交通データの可聴化アルゴリズムの具体化、あるいは仮説検証のための実験計画の策定などに取り組む予定である。

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. 英国におけるアクティブ・トラフィックマネジメント. *IBS Annu. Rep.* 87-92 (2016).
2. Abdel-Aty, M., Pande, A. & Hsia, L. The concept of proactive traffic management for enhancing freeway safety and operation. *ITE J. (Institute Transp. Eng.* **80**, 34-41 (2010).
3. 明石市民夏まつり事故調査委員会. 第32回明石市民夏まつりにおける花火大会事故調査報告. (2002).
4. Kotoky, A. Death toll from India temple stampede up to 115, search called off | Reuters. *Reuters* (2013).

5. Duret, A., Leclercq, L. & El Faouzi, N.-E. Data Assimilation Using a Mesoscopic Lighthill–Whitham–Richards Model and Loop Detector Data. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2560**, 26–36 (2016).
6. 塩見康博, 谷口知己, 宇野伸宏 & 嶋本寛. 個別車両データ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止効果の検証. *高速道路と自動車* **56**, 30–40 (2013).
7. Liu, Y., Zheng, H., Feng, X. & Chen, Z. Short-term traffic flow prediction with Conv-LSTM. *2017 9th Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process.* 1–6 (2017). doi:10.1109/WCSP.2017.8171119
8. Ajzen, I. The theory of planned behavior. *Organizational Behav. Hum. Decis. Process.* **50**, 179–211 (1991).
9. *The Sonification Handbook.* (Logos Verlag Berlin GmbH, 2011).
10. 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
11. 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).
12. 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).
13. 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).
14. 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).
15. 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
16. 松原正樹. 身の回りを「聴こえる化」する—視覚障害者のための可聴化技術—. *情報処理* **57**, 262–265 (2016).
17. 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
18. 宇野伸一郎, 外谷渉, 三浦昭 & 海老沢研. 宇宙科学データ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).
19. Buxton, W., Gaver, W. & Bly, S. The use on non-speech audio at the interface. *CHI* **89**, (1989).
20. Kramer, G. *Auditory Display: Sonification, Audification, And Auditory Interfaces.* (Addison Wesley Publishing Company, 1994).
21. Kramer, G. *et al.* Sonification report: Status of the field and research agenda. *Int. Community Audit. Disp.* (1999).
22. Dubus, G. & Bresin, R. A Systematic Review of Mapping Strategies for the Sonification of Physical Quantities. *PLoS One* **8**, 1–28 (2013).
23. Cowen, R. Sound Bytes. *Sci. Am.* **312**, 44–47 (2015).
24. Vickers, P., Worrall, D. & So, R. Special Issue on Sonification. *Displays* **47**, 1 (2017).
25. Milliman, R. E. Using Background Affect to Music Behavior of the Supermarket Shoppers. *J. Mark.* **46**, 86–91 (1982).
26. Caldwell, C. & Hibbert, S. A Play That One Again: the Effect of Music Tempo on Consumer Behaviour in a Restaurant. *Eur. Adv. Consum. Res.* **4**, 58–62 (1999).
27. Zampini, M. & Spence, C. THE ROLE OF AUDITORY CUES IN MODULATING THE PERCEIVED CRISPNESS AND STALENESS OF POTATO CHIPS. *J. Sens. Stud.* **19**, 347–363 (2004).
28. ベッカーマンジョエル & グレイタイラー. なぜ、あの「音」を聞くと買いたくなるのか—サウンド・マーケティング戦略. (東洋経済新報社, 2016).
29. ケルシュ S. 音楽と脳科学: 音楽の脳内過程の理解をめざして. (北大路書房, 2016).
30. Sugano, Y., Keetels, M. & Vroomen, J. The build-up and transfer of sensorimotor temporal recalibration measured via a synchronization task. *Front. Psychol.* **3**, (2012).

(2018. **. ** 受付)

SONIFICATION OF TRAFFIC FLOW

Shiho SAKAI and Yasuhiro SHIOMI