

## 二重スリット実験における量子の振る舞いの可聴化 Sonification of Quantum Behavior in Double-slit Experiments

島山 彩音<sup>†</sup>奥出 真理子<sup>†</sup>

Ayane Hatakeyama Mariko Okude

### 1. はじめに

量子力学は20世紀初頭に誕生した物理学の理論であり、その理解や応用について未解明な点が多く、今後の理論的発展が期待されている [1]。中でも二重スリット実験で観測される現象は、量子力学における波動性と粒子性の二重性を直感的に示す代表例として広く知られている。近年、二重スリット実験に対して「ダークフォトン理論」と呼ばれる新たな量子的解釈が提唱され、再び注目を集めている [2]。このような量子力学の理解を深める手法の一つとして、シミュレーションによる現象の視覚化が活用されている。こうした視覚化技術は、映像や音楽といった芸術分野や教育分野への応用についても検討が進められている [3][4]。

一方、物理現象に限らず、観測された現象を聴覚的に表現する手法に可聴化技術がある [5][6]。可聴化技術は、数値データや時間的に変化する情報を音響信号へと変換し、聴覚を通じてそのパターンや変化を認識することを目的としている。この技術により、視覚情報のみでは捉えにくいわずかなデータの変化を知覚できる可能性が期待される。

本研究は、量子力学の代表的な現象である二重スリット実験に着目し、実験において観測される量子の振る舞いを音響的に表現する手法を探索する。これにより、量子現象に対する直感的な理解を促す聴覚的表現の可能性を明らかにすることを目的とする。

### 2. 先行研究

量子物理現象の聴覚的表現に関する研究として、Yamadaらは、量子現象の微細な時間的変化を音楽的に表現することにより、聴覚的な体験を提供する可聴化手法を提案している [4]。彼らはまず、Rabi振動や単一原子の共鳴蛍光といった基礎量子系を対象とし、Wigner関数や多体量子シミュレータの出力に至るまで、多様な音響表現へのマッピング方法を示した。加えて、量子乱数に由来する真のランダム性を音色やリズムに反映させる「量子ランダム性の可聴化」の実験や、スクロール形式による楽譜表示を用いた即興演奏への応用も試みている。さらに、聴覚および視覚的手法を組み合わせた対話型のデモンストレーションにも取り組んでいる。このように、先行研究において、基礎的な量子系に関連する物理量の変化を可聴化する方法の実現可能性が示唆されている。殊に、二重スリット実験における量子の振る舞いを可聴化するためには、シュレディンガー方程式に基づく空間内における量子の存在確率の時間変化を音響的に表現する方法が課題となる。

量子シミュレーションにおいては、芸術的側面と科学的側面の双方から量子現象を視覚的に表現することを目的としたライブラリ Quantum-Art-Library (以下 QAL) が開発されている [3]。QAL は、シミュレーションにおける空間解像度、時間分解能、ならびに量子の初期条件 (位置や速度など) をパラメータとして指定可能であり、表現の自由度

を重視して設計されたライブラリである。そのため、量子の単なる可聴化にとどまらず、聴覚表現を考慮したシミュレーション環境の構築にも対応可能と考える。

そこで本研究では、QAL を用いた二重スリット実験のシミュレーションを通じて、空間内における量子の存在確率分布の時間変化に基づき音の流れを生成し、量子の振る舞いを音響的に表現する手法の検討を行う。

### 3. 可聴化方法

QAL は、設定された格子点数  $n$  および時間分解数  $step$  に基づき、 $n \times n \times step$  のスケールで量子シミュレーションを実行し、三次元配列として表現される存在確率を出力する。この存在確率から音響データを生成する一連の手続きを Fig.1 に示す。

初期データは複素数振幅を含む三次元配列で構成されているため、前処理として、各要素の絶対値を計算し、対応する確率振幅 (複素振幅のノルム) へと変換することで、実数値データへの変換を行う。また、全ての格子点を音響源にとると、情報量が過剰となり、音響表現の明瞭性が損なわれる可能性がある。そこで、 $n$  および  $step$  における確率値の標準偏差を算出し、その上位 1% に相当する値を閾値として設定する。この閾値を超える標準偏差を有する格子点、すなわち確率値の時間変動が顕著な格子点のみを音源として選定する。

次に、各格子点における存在確率を音の周波数に対応付ける音階マッピングを行う。今回、C4 (261.63Hz) から B4 (493.88Hz) までの 7 音階を用い、存在確率の値に基づいてこれらの音階に割り当てる。これにより、確率値が高い格子点ほど高音に、低い格子点ほど低音に対応する音響表現が得られる。

さらに、シミュレーション空間における所定の位置 1 箇所を聴取点として設定し、格子点の座標に基づいてパンニング処理を施すことで、音響信号にステレオ効果を付加する。本処理により、音源である格子点の位置に応じて、左右のスピーカーから出力される音の定位が変化し、空間的な広がりを伴う音響が生成される。

最後に、各  $step$  で生成された音響データを時間順に連結し、時系列の音響波形を構成する。この際、波形全体の最大振幅に基づいて振幅を  $\pm 1.0$  の範囲に正規化する。さらに、浮動小数点値を 16 ビット PCM 形式の振幅範囲 (-32768~+32767) に線形変換およびクリッピング処理を施して整数値に変換した後、音声ファイル形式 (WAV) として保存する。

### 4. 実験

#### 4.1 量子シミュレーション

QAL の設定パラメータを Table.1 に示す。空間座標は  $[X, Y]$  として示す。本実験では、QAL による二重スリット実験シミュレーションを参考に、格子点数  $n$  を 300、 $step$  を 300、量子の初期位置を  $[0, -15]$  に設定する。また、二重ス

<sup>†</sup> 茨城工業高等専門学校 National Institute of Technology, Ibaraki College

リットの位置は $Y = 0$ , 聴取点を二重スリットの中心  $[0, 0]$  に設定する.

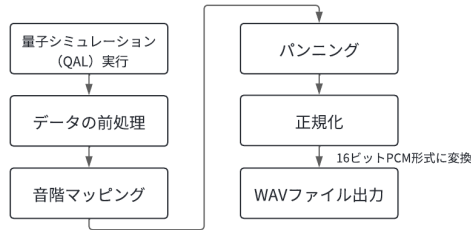


Fig.1 音響データ生成手続き

Table.1 QAL パラメータ

パラメータ	設定	意味
n	300	格子点数 (解像度 $300 \times 300$ )
step	300	出力フレーム数
p	$[0, -15]$	量子の初期位置
v	$[0, 80]$	量子の速度ベクトル

## 4.2 音階マッピング

C4 ~ B4 の7音階と存在確率との対応を Fig.2 に示す. 本実験では音源として正弦波形の純音 (単一音) を用い, 存在確率の閾値を満たしている場合は対応する音階にマッピングする. 閾値を満たさない場合は無音とする.

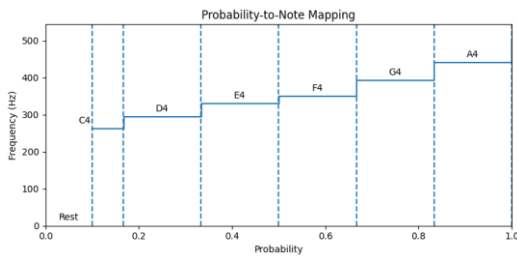


Fig.2 音階と存在確率との対応

## 4.3 パンニング

聴取点と各格子点の Y 座標に基づきパンニング係数を算出し左右チャンネルへのゲインを決定する. 聴取点との差を上下方向への最大振幅である最大パン幅で割って正規化し,  $-1$  (最左) ~  $+1$  (最右) の範囲にマッピングする.

## 5. 結果

シミュレーションの出力例を Fig.3 に示す. 出力座標におけるスリットの中心位置は  $[150, 150]$  である. さらに, *step* に沿って変化する実験空間内の量子の存在確率に基づいて生成された音響を発生する格子点の数を Fig.4(a), 対応する音響波形を Fig.4(b) にそれぞれ示す. 干渉縞を形成する波束がスリットを通過し, 互いに干渉して強め合うタイミングにおいて, 対応する格子点の数およびそれらの格子点から発せられる音響波形の振幅が増大する. その結果, 複数の格子点から発せられる音階が重畳し, 音域および音量の両面において聴覚的なピークを示している.

## 6. 考察

二重スリット実験における量子の存在確率から生成した音響データは, 干渉縞が形成されるタイミングで音量および音高の変化が顕著に現れ, 波束の強め合い・打ち消し合いをリズムおよび音色の揺らぎとして直感的に表現できることが確認できた.

しかしながら, 音響データの生成においていくつかの課題を残している. まず, 音源に単一音を用いたため, 高調

波構造や複雑な位相情報といった量子データ本来の豊かなスペクトル成分を十分に反映できていない. また, 上位 1% の変動点に限定した音源抽出は微細な変動成分を聴覚的に捉える可能性を排除している. さらに, パンニング処理を X 方向の定位に限定し, 三次元的な音像定位に対応していないため, より立体的な空間表現が必要と考える.

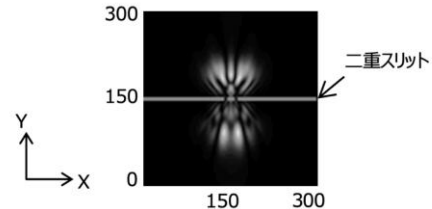
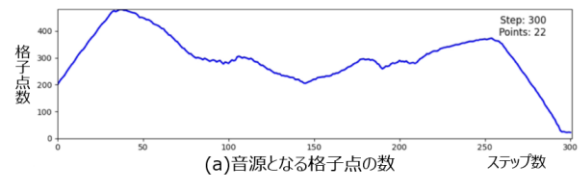
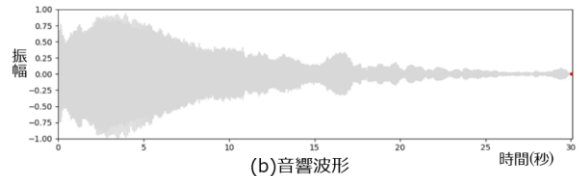


Fig.3 シミュレーション出力例



(a)音源となる格子点の数



(b)音響波形

Fig.4 格子点数と音響波形

## 7. おわりに

二重スリット実験において観測される量子の振る舞いを音響的に表現する方法として, 実験空間内の量子の存在確率の変化を振幅変動として音響データを生成する新しい表現手法を提案し, 実験によりその実現性を確認した. また, 今回の実験を通じて, 単一音では高調波情報の再現に限界があること, またパンニング処理では二次元格子における空間表現に限界があることがわかった. 今後は複数の音色の導入や三次元音響技術の活用といった手法の改良を図るとともに感性評価を通じた手法の検証を行う予定である.

### 参考文献

- [1] 伊藤正人: 量子力学がわかる, 技術評論社(2022).
- [2] Celso J. Villas-Boas, Carlos E. Máximo, Paulo J. Paulino, Romain P. Bachelard, Gerhard Rempe: Bright and Dark States of Light: The Quantum Origin of Classical Interference, Physical Review Letters (2025), <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.133603>(最終確認 2025-06-12).
- [3] 若月泰正, 脇田玲: 量子表現のためのクリエイティブ・コーディングツールキットの開発, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム, pp.241-245(2022).
- [4] Reiko Yamada, Eloy Piñol, Samuele Grandi, Jakub Zakrzewski, Maciej Lewenstein: Towards the Intuitive Understanding of Quantum World: Sonification of Rabi Oscillations, Wigner Functions, and Quantum Simulators, Mathematics and Computation in Music, pp.447-445(2024), <https://arxiv.org/pdf/2311.13313>(参照 2025-06-12).
- [5] 寺澤洋子: データ可聴化と音デザイン, 日本音響学会誌, 74(11), pp.618-623(2018).
- [6] データに秘められたメッセージを受け取るための「新しい表現」を探る, 筑波大学オープンコースウェア (2017), <https://ocw.tsukuba.ac.jp/discovery/researchers/terasawa/>(参照 2025-06-12).
- [7] Rafael de la fuente, Mark lamorena, Hudson: QMsolve: A Module for Solving and Visualizing the Schrödinger Equation, GitHub, <https://github.com/quantum-visualizations/qmsolve>(最終確認 2025-06-12).