

音楽構造理解のための基礎的分析：バッハ・コラールの特徴 量分析を通して

福知山公立大学 情報学部情報学科

32345035 川人すばる

指導教員 橋田光代 准教授

提出日 2026年1月16日

改訂日 2026年1月30日

1. はじめに

音楽というのは、基本的に数値として扱うのが難しく、主観的解釈に依存しがちな分野である。そんな楽曲分析において、音楽構造を数値的特徴量として表現することは、客観的・再現可能な形で検討するために重要である。特に、旋律・和声・リズムといった要素を定量化することで、楽曲間の類似性や差異を統計的に比較することが可能となる。本年度はバッハのコラールを対象とし、特徴量分析およびクラスタリングによる構造把握を試みた。研究動機としては、楽曲ごとの構造的差異をデータとして可視化・比較する手法に関心を持ったこと、および本研究で用いた分析手法が今後の音楽情報処理分野の研究にも応用可能であると考えたためである。本研究では、楽曲特徴量に基づくクラスタリングを通じて、バッハのコラールに内在する構造的な類型の存在と、過度な分類がもたらす問題点を明らかにすることを目的とする。

2. 分析手法

本研究では、以下の手順で楽曲特徴量の抽出および分析を行った。

2.1 特徴量抽出

楽曲の解析には Python を用い、music21 ライブライアリによって以下の特徴量を抽出した。抽出した特徴量を表 1 に示す。

本研究では、MIDI データから抽出可能な特徴量のうち、音高、リズム、和声の三要素に基づく特徴量を使用した。

本年度の研究では、解釈可能性を重視し、少数の代表的特徴量に限定して解析を行った。

2.2 使用したデータセット

使用したデータセットは、J.S. バッハのコラール曲集 Infinitebach[1] である。このデータセットは、無料で入手できるため、本研究で使用した。コラール（独: Choral、衆讃歌、衆賛歌）は、もともとルター派教会にて全会衆によって歌われるための賛美歌である。現代では、これらの賛美歌の典型的な形式や、類似した性格をもつ作品をも含めて呼ぶことが多い。[2]

2.3 分析環境とライブラリ

本研究では、楽曲特徴量の抽出および解析に Python を用いた。解析環境として、Python 3 系および以下の主要ライブラリを使用した。

2.4 楽曲解析ライブラリ (music21)

本研究における楽曲特徴量の抽出には、Python 用音楽解析ライブラリ music21 を使用した。

music21 は、MIDI ファイルや楽譜データを対象として、音高、リズム、和声などの構造的情報を解析可能なライブラリである。本研究では、MIDI 形式で提供されている楽曲データを入力とし、表 1 に示す特徴量を抽出した。これらの特徴量は、演奏表現ではなく楽曲構造そのものを捉える Symbolic 音楽解析に基づくものである。

2.5 データ処理および前処理 (pandas / numpy)

抽出した特徴量は、Python のデータ解析ライブラリ pandas および numpy を用いて表形式データとして整理した。

各楽曲を 1 行、各特徴量を 1 列とするデータフレームを作成し、欠損値の補完や数値処理を行った後、後続の解析に利用可能な形式 (CSV) として保存した。

2.6 標準化処理 (scikit-learn)

異なるスケールを持つ特徴量を同時に扱うため、機械学習ライブラリ scikit-learn を用いて標準化を行った。

本研究では、各特徴量を平均 0、分散 1 となるように変換する Z-score 正規化を適用した。これにより、特定の特徴量が解析結果に過度に影響することを防いだ。

2.7 主成分分析 (PCA)

高次元特徴量空間の構造を把握するため、scikit-learn に実装されている主成分分析 (PCA) を用いた。

PCA は、特徴量間の相関を考慮しつつ分散を最大化する直交軸（主成分）を求める手法であり、本研究では、高次元特徴量の低次元可視化、特徴量構造の把握、クラスタ分離に寄与する主軸の確認のために使用した。

特に、第 1 主成分 (PC1) および第 2 主成分 (PC2) に着目し、楽曲データの分布を散布図として可視化した。

2.8 クラスタリング (K-means)

楽曲特徴量に基づく分類を行うため、scikit-learn に実装されている K-means クラスタリングを用いた。

K-means 法は、データ点間の距離に基づいてあらかじめ指定した数のクラスタに分割する手法である。

本研究では、PCA によって得られた低次元空間および標準化後の特徴量空間を用いてクラスタリングを行い、楽曲の構造的な類似性を検討した。

2.9 可視化 (matplotlib)

解析結果の可視化には、Python の描画ライブラリ matplotlib を使用した。

主成分分析結果の散布図や、クラスタリング結果の色分け表示を行うことで、楽曲特徴量の分布およびクラスタ構造を直感的に把握した。

表 1: 抽出した特徴量一覧

特徴量	意味	どの性質を表すか
measures	小節数	曲の長さ
avg_chord_size	平均和音サイズ（同時発音数）	和声の厚み
seventh_ratio	7th 和音の割合	和声の複雑さ
pitch_mean	平均音高	全体の音域の中心
pitch_std	音高の標準偏差	メロディの動きの大きさ
pitch_range	最高音 - 最低音	音域の広さ
leap_rate	跳躍進行の割合	メロディの飛び方の多さ
smoothness	音程差の逆数的な指標	滑らかさ
up_rate	上行音程の割合	メロディの方向性（上昇か下降か）
dur_whole/half/quarter/ eighth/sixteenth	各音価の出現比率	リズムの構成（長音中心か短音中心か）
vel_mean	平均ベロシティ（強さ）	曲の平均的な音量
vel_std	ベロシティの変動	強弱表現の豊かさ
prog_unique	ユニークな和音進行数	ハーモニーの多様性
rn_seq_len	ローマ数字解析による進行列の長さ	和声進行の規模

3. 分析

本節では、全楽曲を対象としてクラスタリングを行い、バッハのコラール全体にどのような構造的傾向が存在するかを確認する。

3.1 全楽曲を対象としたクラスタリング

まず、全楽曲を対象にクラスタリングを行った。PCA による散布図を図 1a に示す。図 1a より、全楽曲は主に 2 つのクラスタに分かれて分布していることが確認できる。図 1a の左側、黄色で示された楽曲をクラスタ 0、右側、青色で示された楽曲をクラスタ 1 とする。また、クラスタごとの特徴量平均の比較を図 1b に、クラスタごとの Z-score (平均からの相対距離) を図 1c に示す。クラスタ 0 はクラスタ 1 に比べて、楽曲の長さ、音域の広さ、16 分音符の割合、和声進行の規模が高い値を示している。

3.2 クラスタ 1 に対する再クラスタリング

クラスタ 1 の構成曲の数を調べた所、約 400 曲含まれていた。そのため、さらに分類ができるのではないかと考え、クラスタ 1 のみを使い再びクラスタリングを行った。PCA による散布図を図 2a に示す。図 2a より、クラスタ 1 は主に 2 つのサブクラスタに分かれて分布していることが確認できる。図 2a の左側、黄色で示された楽曲をサブクラスタ 0、右側、青色で示された楽曲をサブクラスタ 1 とする。また、クラスタごとの特徴量平均の比較を図 2b に、クラスタごとの Z-score (平均からの相対距離) を図 2c に示す。

これらの結果から、サブクラスタ 0 と 1 の間にはリズム構成や楽曲規模に違いが存在することが確認できる。

3.3 過度な細分化の検証

サブクラスタ 1 を見た所、まだ約 300 曲含まれていた。さらに分類ができるのではないかと考え、クラスタ 1 のみを使い再びクラスタリングを行った。PCA による散布図を図 3a に示す。図 3a より、サブクラスタ 1 は主に 5 つのサブクラスタに分かれて分布していることが確認できる。また、クラスタごとの特徴量平均の比較を図 3b に、クラスタごとの Z-score (平均からの相対距離) を図 3c に示す。3 回目の分析では、Z-score の比較において一部のサブクラスタ間で差が見られたものの、特徴量平均を見ると、dur_sixteenth を含め多くの特徴量で数値差が小さいことが確認された。また、PCA 散布図では各クラスタ間の境界が明確でなく、データ点が重なり合って分布している。これらの結果から、本分析ではクラスタ数を増やし過ぎたことで構造的差異が十分に反映されていない可能性があり、クラスタリングの妥当性が低下していると判断した。

4. 結果と考察

本章では、第 4 章で得られた分析結果を踏まえ、バッハのコラールに見られる構造的特徴と、クラスタリング手法の有効性および限界について考察する。

全楽曲を対象としたクラスタリングの結果、バッハのコラールは主に 2 つのクラスタに分類された。これらのクラスタ間には、楽曲の長さ、音域、リズム構成、和声進行の規

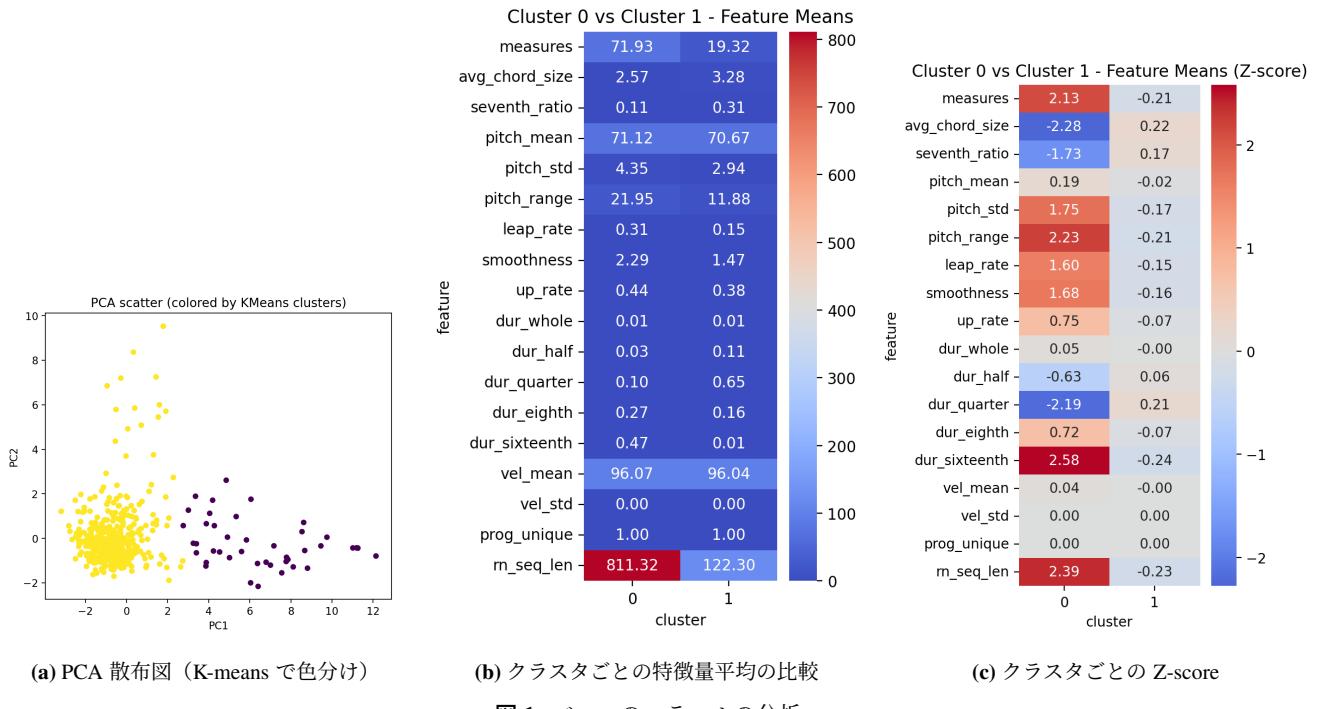


図 1: バッハのコラールの分析

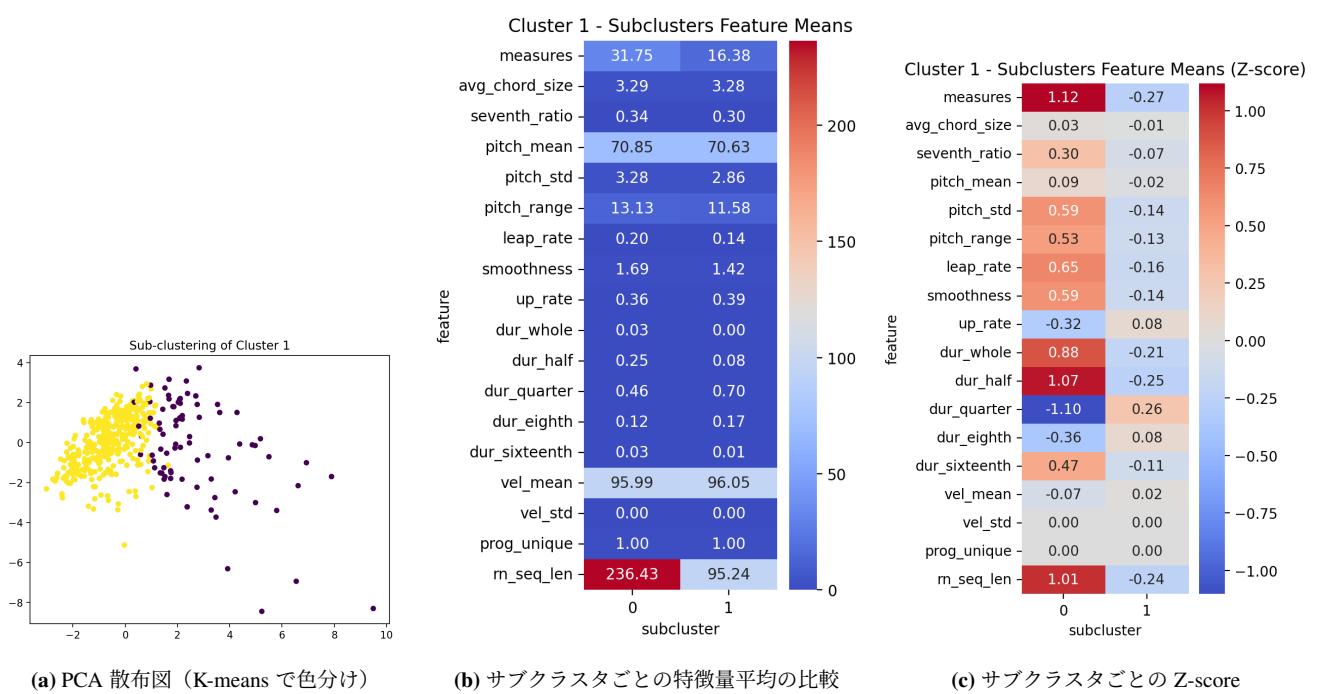


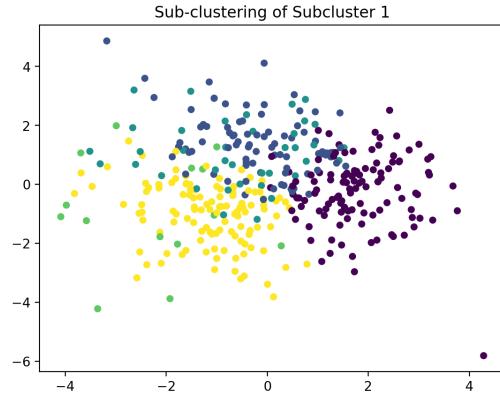
図 2: バッハのコラールの分析 (クラスタ 1 のみ)

模といった点で明確な差が見られた。この結果は、コレール曲の中にも構造的に複雑な楽曲群と、比較的単純な楽曲群が存在することを示している。

クラスタ 1 に対する再クラスタリングでは、リズム構成や楽曲規模の違いに基づくより細かな分類が可能であることが示された。特に、半音符と四分音符の使用割合の差は、コレール内部におけるリズム的性格の違いを反映していると考えられる。

本研究において、再クラスタリング後も一貫して同一クラスタに含まれた楽曲群は、音域やリズム構成、和声進行の点で共通した特徴を持っており、これらがバッハのコレールに典型的な構造を反映している可能性がある。

一方で、さらにクラスタ数を増やした分析では、クラスタ間の境界が不明瞭となり、特徴量の差異も小さくなる傾向が確認された。このことから、クラスタリングを行って構造的差異を適切に捉えられなくなる可能性があ



(a) PCA 散布図 (k-means で色分け)

Sub-subclusters of Subcluster 1 - Feature Means

	0	1	2	3	4
measures	14.89	18.48	15.37	32.29	14.72
avg_chord_size	3.26	3.31	3.31	3.27	3.27
seventh_ratio	0.29	0.33	0.33	0.30	0.29
pitch_mean	69.93	70.58	71.18	71.45	71.11
pitch_std	3.21	3.19	2.91	2.22	2.35
pitch_range	12.61	13.28	12.18	8.71	9.50
leap_rate	0.20	0.12	0.14	0.11	0.11
smoothness	1.71	1.35	1.40	1.22	1.21
up_rate	0.38	0.41	0.41	0.37	0.39
dur_whole	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
dur_half	0.08	0.06	0.07	0.18	0.09
dur_quarter	0.77	0.63	0.60	0.67	0.71
dur_eighth	0.11	0.27	0.22	0.06	0.16
dur_sixteenth	0.00	0.00	0.07	0.01	0.00
vel_mean	96.16	96.00	96.00	96.00	96.00
vel_std	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
prog_unique	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
rn_seq_len	84.23	117.22	90.08	185.07	80.49

(b) サブクラスタごとの特微量平均の比較

	0	1	2	3	4
measures	-0.27	0.38	-0.18	2.90	-0.30
avg_chord_size	-0.18	0.25	0.25	-0.14	-0.07
seventh_ratio	-0.22	0.34	0.40	-0.04	-0.16
pitch_mean	-0.36	-0.03	0.28	0.41	0.24
pitch_std	0.64	0.60	0.09	-1.19	-0.95
pitch_range	0.44	0.73	0.26	-1.24	-0.90
leap_rate	0.92	-0.36	0.03	-0.47	-0.59
smoothness	0.88	-0.20	-0.04	-0.60	-0.63
up_rate	-0.22	0.29	0.32	-0.33	-0.06
dur_whole	0.20	-0.09	-0.23	0.09	-0.06
dur_half	-0.04	-0.32	-0.18	1.36	0.16
dur_quarter	0.59	-0.52	-0.77	-0.23	0.08
dur_eighth	-0.53	0.86	0.39	-1.04	-0.11
dur_sixteenth	-0.35	-0.29	2.42	0.18	-0.26
vel_mean	0.14	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06
vel_std	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
prog_unique	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rn_seq_len	-0.30	0.61	-0.14	2.48	-0.40

(c) サブクラスタごとの Z-score

図 3: バッハのコラールの分析 (サブクラスタ 1 のみ)

り、分類数の設定には注意が必要であることが示唆された。

5. 各特微量の相関

1回目の分析の結果、楽曲の長さをクラスタリングに影響を与えていた可能性があると述べた。そのため、楽曲の長さが各特微量にどのような影響を及ぼしているのかを相関係数を用いて考えてみる。

図 4 に今回研究に使用した全楽曲を対象とした各特微量の相関係数を示す。特に 0.7 以上という強い相関がみられた 4 例

(1) measures ↔ rn_seq_len : $r \approx 0.90$

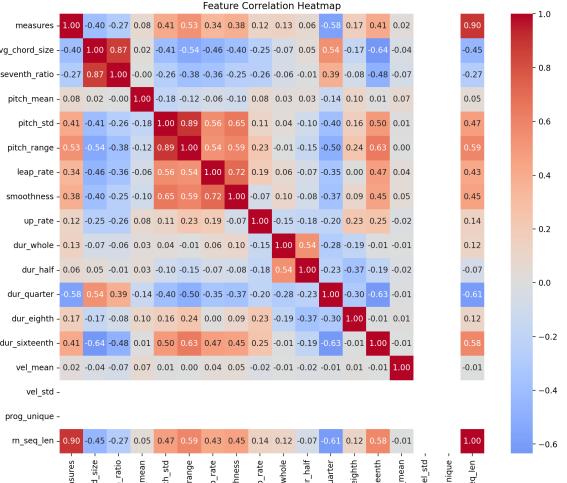


図 4: 各特微量の相関係数

表 2: 音高の標準偏差と音域の平均値

	pitch_std	pitch_range
	3.07	12.75

(2) pitch_std ↔ pitch_range : $r \approx 0.89$

(3) avg_chord_size ↔ seventh_ratio : $r \approx 0.87$

(4) leap_rate ↔ smoothness : $r \approx 0.72$

について考察する。

5.1 (1) 小説数とローマ数字和声進行列長の相関

(1) 小節数 (measures) とローマ数字和声進行列長 (rn_seq_len) の間に、0.90 と強い正の相関が確認された。これは、楽曲が長くなるほど和声進行の数も増加するという、構造的な依存関係を反映した結果である。そのため、この二つの特微量については、楽曲の長さを示す指標として重複していると考えられる。このことから、特微量として強い相関がみられる他の 3 例についても重複がある可能性が考えられたため、その可能性も考えつつ考察を行う。

5.2 (2) 音高の標準偏差と音域の相関

(2) 音高の標準偏差 (pitch_std) と音域 (pitch_range) の間に、0.89 と強い正の相関が確認された。これは、音域が広い楽曲ほど音高の分布も大きくなる傾向を反映している。この二つについて、全楽曲を対象に平均を取った表が以下の通りである。

表 2 より、音域幅は 12 音半、1 オクターブくらいであり、標準偏差が約 3 半音で、主に中心音付近で旋律が動いている、典型的なコラールであると分かる。この、12 音半というのは音域として狭く、標準偏差も 3 しかないことから端まで使うことはあるが滞在時間は短いことが分かる。つまり、バッハのコラールが比較的狭い音域内で均質に旋

表 3: 平均和音サイズと 7th 和音比率の平均値

avg_chord_size	seventh_ratio
3.22	0.29

律が展開されていることから強い相関がみられているよう見えるだけで、音域が狭くても標準偏差が大きいジャンルで実験すれば異なる結果となる可能性があるため、一般的にこの二つの特徴量に強い相関があるとは言えない。この相関に関しては別ジャンルの楽曲を分析することで、より明確になると考えられる。

5.3 (3) 平均和音サイズと 7th 和音比率の相関

(3) 平均和音サイズ (avg_chord_size) と 7th 和音比率 (seventh_ratio) の間に、0.87 と強い正の相関が確認された。これは、和音の厚みが増すほど、7th コードの使用頻度も高まる傾向を反映している。この二つについて、全楽曲を対象に平均を取った表を表 3 に示す。

のことから、バッハのコラールの平均和音は 3.22 音、7th 和音は全和音の約 29% を占めていることが分かる。バッハのコラールでは三和音が基本構造であり、7th 和音の使用は和声的な緊張や進行上の機能として現れるため、7th 和音の割合が増加すると平均構成音数も自然に増加すると考えられる。この二つの特徴量について考えた所、一般的な楽曲では 3 和音もしくは 7th 和音が多く使われる。実際に、バッハのコラールではこの 2 つしか使っていないと仮定すると

$$\text{avg_chord_size} = 3 \cdot p_3 + 4 \cdot p_4 \quad (p_3 + p_4 = 1)$$

という式が立てられるはずだと考えた。しかし、p4 に 7th 和音の割合を代入すると

$$3 \cdot (1 - 0.29) + 4 \cdot 0.29 = 3.29$$

となり、avg_chord_size = 3.22 とは小さい値となるため、バッハのコラールには 2 つ以下の音がなっている場所も存在していると考えられる。しかし、今回は 2 音や 1 音に関しての割合を調べていないので詳しい話は出来ないと、調べたところ、2 音や 1 音は和音ではないという話もあったので、今後の特徴量抽出では 2 音や 1 音に関しても調べ、平均和音サイズのコードも見直す必要があると考える。

5.4 (4) 跳躍進行率と滑らかさの相関

(4) 跳躍進行率 (leap_rate) と滑らかさ (smoothness) の間に、0.72 と強い正の相関が確認された。これは、跳躍進行が多いほど、メロディの滑らかさも増す傾向を反映している。ここで「滑らかさ」は旋律の移動幅の標準偏差 (ムラ) を、「跳躍進行率」は全音を超える移動の頻度をそれぞれ示している。

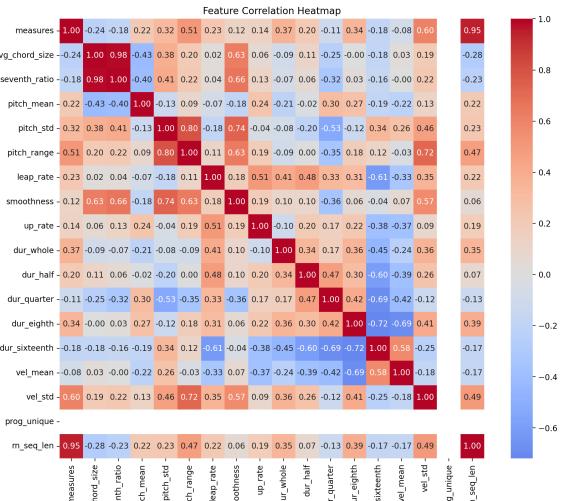


図 5: MAESTRO Dataset を用いた各特徴量の相関係数

一般に、跳躍進行が増えれば旋律の起伏は激しくなり、運動性は向上するが、バッハのコラールにおいてこの二つの指標が強く連動している点は注目に値する。これは、旋律が飛躍する際、その跳躍の「幅」や「頻度」が無秩序に現れるのではなく、和声的な枠組みの中で極めて統制されたバランス（様式的な一貫性）を持って配置されていることを示唆している。

6. The MAESTRO Dataset を用いた比較実証

leap_rate と smoothness の間の相関が高いことが、バッハのコラール特有の現象であるかを確認するため、The MAESTRO Dataset[3] を用いて同様の分析を行った。MAESTRO Dataset は、主に 19 世紀のピアノ曲を収録したデータセットであり、今回は 20 曲を用いた。プログラムに関しては、4. 分析と同様のものを使用する。

分析を行い、各特徴量の相関係数をまとめたのが図 5 である。バッハにおいて 0.72 であった leap_rate と smoothness の相関係数は、MAESTRO においては 0.18 という極めて低い値を示した。この相関の消失は、ロマン派以降の楽曲においては旋律の自由度が増し、和声の密度とは独立した形で装飾的な跳躍や複雑な音型が用いられるようになったことを反映している。対して、バッハのコラールにおいてのみ高い相関が維持されている事実は、四声体対位法という極めて厳格な制約下において、垂直的な響きと水平的な動きが高度に一体化している「バッハ様式」の構造的特異性を定量的に証明するものである。

7. まとめ

本研究では、バッハのコラール曲を特徴量に基づいてクラスタリングし、それぞれのクラスタの特徴を分析した。最初のクラスタリングでは、曲の長さや音域、リズムなどの特徴に基づいて 2 つのクラスタに分類された。さらに、

クラスタ 1 を再びクラスタリングすることで、より細かな分類が可能となった。その結果、サブクラスタ 1 に含まれる曲がバッハが作成するコラール曲の特徴を多く含んでいることが示された。しかし、過度なクラスタリングにより、クラスタ間の明確な境界が失われる可能性があることも示された。また、跳躍進行率と滑らかさの強い相関 (0.72) を確認し、それが他ジャンルでは見られないバッハ固有の厳格な様式美であることを対照実験によって明らかにした。

8. 今後の課題

今後の研究では、特微量の選択やクラスタリング手法の改善を検討し、より精度の高い楽曲分類を目指していく。特に、今回ではできなかった長さを除いた特微量解析もしていきたい。その際、特微量に対しては、楽曲分析を行っている先行研究を参考にし、より音楽的な意味合いを持つ特微量を多数選択、抽出し、分析に必要な特微量の取捨選択をすることが重要だと考えている。また、バッハが作成するコラール曲以外の楽曲も含め同様の分析を行い、比較研究を進めることで、楽曲の特徴や構造に関する理解を深めていきたいと考えている。研究で用いた The MAESTRO Dataset の実験は、データ数が多く実行に時間を要したので今回はバッハのコラールの特徴を裏付けるための実験に留めた。今後はデータ数を増やし、より信頼性の高い結果を得られるようにしたい。橋田准教授より、データセット (PEDB) への運用を提案されたため、今後の研究では PEDB を用いた分析も検討していく。

9. 参考文献

参考文献

- [1] jamesrobertlloyd: Jamesrobertlloyd/Infinite-Bach, <https://github.com/jamesrobertlloyd/infinite-bach> (2025).
- [2] : コラール, *Wikipedia* (2023).
- [3] Magenta: The MAESTRO Dataset, <https://magenta.withgoogle.com/datasets/maestro> (2018).