

## 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

|   |                               |      |         |
|---|-------------------------------|------|---------|
| 研究科・専攻  | 大学院 情報理工学研究科 情報・通信工学専攻 博士前期課程 |      |         |
| 氏 名   | 上田 慎也                         | 学籍番号 | 1331014 |
| 論 文 題 目   | 最適化を用いた多声音楽の楽曲分析に関する研究        |      |         |
| <p><b>要 旨</b></p> <p>楽曲分析とは、楽曲がどのように作られているかを調べることである。本研究は、コンピュータを用いて人間らしい楽曲分析を自動的に行うことを目的とする。自動的な楽曲分析が可能となれば、作曲技法の学習や自動演奏の表情付けなど様々な応用が期待できる。楽曲分析には、旋律の構造や和音構成など様々な要素があるが、本研究では動機（モチーフ）の分析に注目をする。</p> <p>モチーフとは、楽曲を構成する最小単位、つまり最小の意味のある音のかたまりである。一般に楽曲は、いくつかのモチーフに操作が加えられ、それらがつながって構成されると考えられている。特に、J.S. Bach に代表される多声音楽では、同じモチーフが各声部で頻繁に反復される特徴がある。モチーフ分析とは、楽曲をモチーフで分割することである。先行研究の整数計画法に基づくモチーフ分析では、モチーフ変換に対して同値関係を定義し、その同値類を用いたモチーフ分割問題を解くことでモチーフ分析を行っている。しかし、モチーフの形を変えない厳格な変換しか考慮していないため、人間の解釈とは異なる結果となっていた。</p> <p>本研究では、同値関係の拡張や同値類のクラスタリングをすることで、モチーフ分析の改良を試みた。前者では、厳格な変換のほかに、臨時記号を除いた音名の差を考慮した変換を定義し、新たな同値関係を定義することで同値類の拡張を行った。後者では、モチーフの音程の列をベクトルとして捉え、ウォード法を用いてクラスタリングすることでモチーフ類の拡張を行った。こうしてできた新しい同値類やモチーフ類を用いてモチーフ分割問題を解き、先行研究や専門家による分析結果と比較した。専門家の分析との部分的な一致や期待した結果が得られるなど、ある程度の改善が見られた。</p> |                               |      |         |

平成 26 年度電気通信大学大学院 修士論文

# 最適化を用いた多声音楽の楽曲分析に関する研究

指導教員 村松 正和 教授

平成 27 年 1 月 30 日

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 情報・通信工学専攻

1311014 上田 慎也

## 概要

楽曲分析とは、楽曲がどのように作られているかを調べることである。本研究は、コンピュータを用いて人間らしい楽曲分析を自動的に行うことを目的とする。自動的な楽曲分析が可能となれば、作曲技法の学習や自動演奏の表情付けなど様々な応用が期待できる。楽曲分析には、旋律の構造や和音構成など様々な要素があるが、本研究では動機（モチーフ）の分析に注目をする。

モチーフとは、楽曲を構成する最小単位、つまり最小の意味のある音のかたまりである。一般に楽曲は、いくつかのモチーフに操作が加えられ、それらがつながって構成されると考えられている。特に、J.S. Bachに代表される多声音楽では、同じモチーフが各声部で頻繁に反復される特徴がある。モチーフ分析とは、楽曲をモチーフで分割することである。先行研究の整数計画法に基づくモチーフ分析では、モチーフ変換に対して同値関係を定義し、その同値類を用いたモチーフ分割問題を解くことでモチーフ分析を行っている。しかし、モチーフの形を変えない厳格な変換しか考慮していないため、人間の解釈とは異なる結果となっていた。

本研究では、同値関係の拡張や同値類のクラスタリングをすることで、モチーフ分析の改良を試みた。前者では、厳格な変換のほかに、臨時記号を除いた音名の差を考慮した変換を定義し、新たな同値関係を定義することで同値類の拡張を行った。後者では、モチーフの音程の列をベクトルとして捉え、ワード法を用いてクラスタリングすることでモチーフ類の拡張を行った。こうしてできた新しい同値類やモチーフ類を用いてモチーフ分割問題を解き、先行研究や専門家による分析結果と比較した。専門家の分析との部分的な一致や期待した結果が得られるなど、ある程度の改善が見られた。

# 目次

|          |                        |           |
|----------|------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>はじめに</b>            | <b>4</b>  |
| 1.1      | 研究の背景と目的               | 4         |
| 1.2      | 本論文の構成                 | 4         |
| <b>2</b> | <b>基礎知識</b>            | <b>5</b>  |
| 2.1      | 音楽用語                   | 5         |
| 2.2      | モチーフ操作（変換）             | 6         |
| 2.3      | 同値関係と変換群               | 7         |
| 2.4      | 集合分割問題                 | 8         |
| 2.5      | ウォード法                  | 9         |
| <b>3</b> | <b>先行研究</b>            | <b>10</b> |
| 3.1      | モチーフの同値関係              | 10        |
| 3.2      | モチーフ分割問題               | 10        |
| <b>4</b> | <b>提案手法</b>            | <b>13</b> |
| 4.1      | 同値関係の拡張                | 13        |
| 4.2      | モチーフ類のクラスタリング          | 14        |
| <b>5</b> | <b>実験と考察</b>           | <b>15</b> |
| 5.1      | Invention No.1 BWV 772 | 15        |
| 5.2      | Invention No.3 BWV 774 | 21        |
| 5.3      | Invention No.8 BWV 779 | 26        |
| 5.4      | Let It Go（メロディ譜）       | 32        |
| <b>6</b> | <b>おわりに</b>            | <b>33</b> |
|          | 参考文献                   | 33        |

# 1 はじめに

## 1.1 研究の背景と目的

近年, 音楽情報処理という分野が大きな注目を集めている ([1], [2]). 音楽情報処理とは, 音楽を対象とした情報処理技術を扱う研究分野である. 1957年のコンピュータによって作曲された「イリアック組曲」から始まり, 今日に至るまで様々な研究がなされている. 研究テーマも自動作曲 [3] や和声解析 [4], ピアノの運指決定 [5] など多岐にわたっている. 特に 2000 年代に入ってから, 音楽のデジタル化, iPod 等のデジタルオーディオプレーヤーの普及に伴い, 人々が音楽に触れる機会が増え, 音楽情報処理の重要性が急速に高まっている.

楽曲がどのように作られているか調べることを楽曲分析 (アナリゼ) という. 音楽大学では重要な科目の一つとなっており, 作曲や演奏をする上で欠かせないものである. 楽曲分析には, 旋律 (メロディ) の構造や和音構成など様々な要素があるが, 本研究では動機 (モチーフ) の分析に注目をする. モチーフとは, 楽曲を構成する最小単位, つまり最小の意味のある音のかたまりである. 一般に楽曲は, いくつかのモチーフに操作が加えられ, それらがつながって構成されると考えられている. 特に, J.S. Bach に代表される多声音楽では, 同じモチーフが各声部で頻繁に反復される特徴がある. モチーフ分析とは, 楽曲をモチーフで分割することであり, モチーフを自動的に見出すことができれば, 楽曲構造の解明に役立つであろう.

楽曲分析に向けて旋律の区切りを示す先行研究としては, 音楽理論 Generative Theory of Tonal Music (GTTM) に基づく構造分析 [6] や整数計画法に基づくモチーフ分析 [7] がある. [6] は主に和声音楽を対象としており, 多声音楽を対象とする手法は確立されていない. [7] はコンピュータ分析による新たな知見を得ることを目的としているため, 人間の解釈とは異なる結果となっている. そこで本研究では, 多声音楽を対象とする [7] を改良し, コンピュータを用いて人間らしい楽曲分析をすることを目的とする. 自動的な楽曲分析が可能となれば, 作曲技法の学習や自動演奏の表情付けなど様々な応用が期待できる.

## 1.2 本論文の構成

本論文は, 本章を含めて 6 章から構成される. 第 2 章では, 本研究の理解のために必要な基礎知識について述べる, 第 3 章では, モチーフ分析の先行研究 [7] を紹介する. 第 4 章では, 先行研究 [7] を改良した提案手法について説明する. 第 5 章では, 先行研究と提案手法の実験結果を示し, 専門家の分析結果との比較, 考察をする. そして最後に第 6 章で, 本研究の総括をするという構成になっている.

## 2 基礎知識

### 2.1 音楽用語

ここでは、本論文で使用する音楽用語について説明する。

- 音名：絶対的な音の高さ（音高）
- 音程：二つの音の高さの隔たり（楽譜の左から見て上昇を+、下降を-とする）
- 半音：音程の最小単位（半音の差を1とする）
- 音階：音を高低の順番に並べたもの（例：図 2.1）
- 音価：音の長さ（例：表 2.1）
- 動機（モチーフ）：楽曲を構成する最小単位（例：図 2.2）
- 主旋律：メロディ
- 対旋律：主旋律に対する独立した旋律
- 主題：楽曲の中心となる旋律、動機を発展させたもの

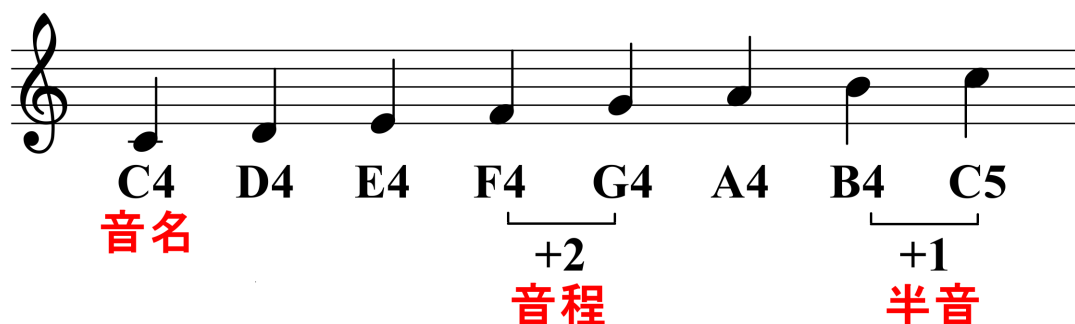


図 2.1: ハ長調の音階



図 2.2: ベートーヴェン「運命」の動機（モチーフ）

表 2.1: 音符の数値化の例

| 音符    | 音価 | 音符      | 音価  |
|-------|----|---------|-----|
| 16分音符 | 1  | 符点16分音符 | 1.5 |
| 8分音符  | 2  | 符点8分音符  | 3   |
| 4分音符  | 4  | 符点4分音符  | 6   |
| 2分音符  | 8  | 符点2分音符  | 12  |
| 全音符   | 16 |         |     |

## 2.2 モチーフ操作（変換）

あるモチーフに操作を加えてモチーフの形を変えることをモチーフ操作（変換）という。ここでは、代表的な4つの変換を定義する。

- 移高 ( $T_p$ ) : 原形音列の音高を  $p$  だけ変える ( $p \in \mathbb{Z}$ )
- 反行 ( $I$ ) : 原形音列の最初の音を基準に、上下反対の進行にする
- 逆行 ( $R$ ) : 原形音列の最終音から逆順に並べる
- 拡大・縮小 ( $A_r$ ) : 原形音列の音価を  $r$  倍する ( $r \in \mathbb{R}, r > 0$ )

例として、音列 (C4,D4,E4,F4) に対する各変換後の音高と音程の関係を図 2.3–2.6 に示す。

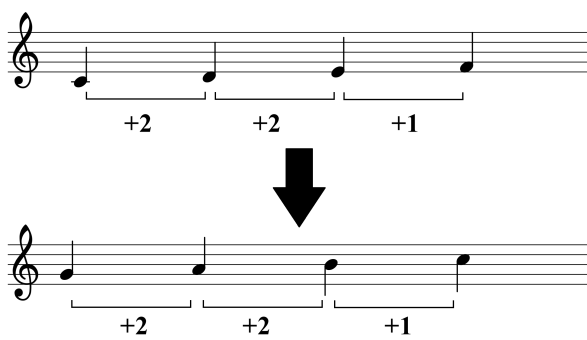


図 2.3: 移高  $T_7$  の例

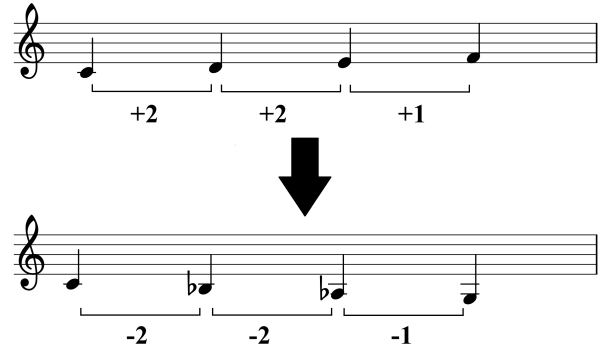


図 2.4: 反行  $I$  の例

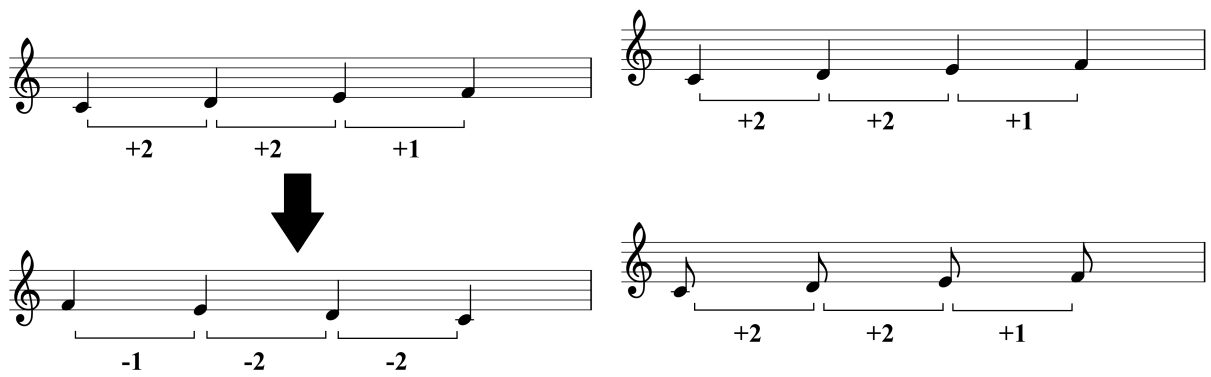


図 2.5: 逆行  $R$  の例

図 2.6: 縮小  $A_{\frac{1}{2}}$  の例

### 2.3 同値関係と変換群

定義 (同値関係). 集合  $S$  上の関係  $\sim$  が次の 3 つの性質を満たすとき, 関係  $\sim$  を  $S$  上の同値関係という.  $\forall x, y, z \in S$  に対し,

1. (反射律):  $x \sim x$
2. (対称律):  $x \sim y \Rightarrow y \sim x$
3. (推移律):  $x \sim y \wedge y \sim z \Rightarrow x \sim z$

定義 (同値類). 関係  $\sim$  を集合  $S$  上の同値関係とする.  $a \in S$  に対し,

$$C(a) = \{x \in S \mid a \sim x\}$$

を  $a$  の  $\sim$  に関する同値類という.

命題 2.1. 関係  $\sim, \simeq$  を集合  $S$  上の同値関係とする. 関係  $\approx := \sim \vee \simeq$  とするとき, 関係  $\approx$  も  $S$  上の同値関係である.

証明.  $\forall x, y, z \in S$  に対し,

1.  $x \approx x = (x \sim x) \vee (x \simeq x)$  であり,  $\sim, \simeq$  は同値関係であるから, 反射律を満たす.
2.  $\sim, \simeq$  が同値関係より,

$$x \approx y = (x \sim y) \vee (x \simeq y) \Rightarrow (y \sim x) \vee (y \simeq x) = y \approx x.$$

よって, 対称律を満たす.

3.  $\sim, \simeq$  が同値関係より,

$$x \approx y \wedge y \approx z = (x \sim y \wedge y \sim z) \vee (x \simeq y \wedge y \simeq z) \Rightarrow (x \sim z) \vee (x \simeq z) = x \approx z.$$

よって, 推移律を満たす.



□

**定義 (二項演算).**  $G$  を空でない集合とする. 変換  $f: G \times G \rightarrow G$  を  $G$  における二項演算といい,  $(a, b) \in G \times G$  に対応する  $G$  の元を  $a \cdot b$  と表記する.

**定義 (群).**  $G$  を空でない集合とする.  $G$  上の二項演算  $f: G \times G \rightarrow G$  が与えられていて, 次の3つの性質を満たすとき,  $G$  を群という.

1. (結合法則):  $\forall a, b, c \in G, a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$
2. (単位元の存在):  $\exists e \in G$  s.t.  $\forall a \in G, a \cdot e = e \cdot a = a$
3. (逆元の存在):  $\forall a \in G, \exists x$  s.t.  $a \cdot x = x \cdot a = e$

**定義 (変換群).** 変換  $f, g$  の合成を  $f \circ g$ , 逆変換を  $f^{-1}$  とする. 変換の集合  $G$  が次の2つの性質を満たすとき,  $G$  を変換群という.

1.  $f, g \in G \Rightarrow f \circ g \in G$
2.  $\forall f \in G, \exists f^{-1}$  s.t.  $f^{-1} \in G$

## 2.4 集合分割問題

集合分割問題とは, 与えられた集合の全ての要素をちょうど1回ずつ含む部分集合の組み合わせの中で, コストの総和が最小となるものを求める組み合わせ最適化問題である. 配送計画問題や施設配置問題, 乗務員スケジューリング問題など多くの現実的な問題への応用がある. この問題は NP 困難であることが知られているが, 最適化ソルバーの性能向上により数千の変数を扱う問題も解けるようになってきている. 以下に, 集合分割問題を 0-1 整数計画問題に定式化する.

$n$  個の要素からなる集合  $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ ,  $m$  個の部分集合  $M_j \subset N$  ( $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ ),  $M_j$  のコストを  $c_j$  とする. 集合分割問題は,  $n \times m$  行列  $A = (a_{ij})$  と  $m$  次元ベクトル  $x$  を用いて次のように定式化できる.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \sum_{j=1}^m c_j x_j \\ & \text{subject to} && \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j = 1 \quad (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}) \\ & && x_i \in \{0, 1\} \quad (\forall i \in \{1, 2, \dots, m\}) \end{aligned}$$

ただし,  $a_{ij}$  は  $N_i \in M_j$  ならば1, そうでなければ0をとる定数であり,  $x_j$  は  $M_j$  を選ぶならば1, そうでなければ0をとる 0-1 変数である.

## 2.5 ウォード法

データの集合をデータ間の距離（類似度）に基づいて複数の部分集合（クラスタ）に分けることをクラスタリングという。クラスタリングには主に、階層的クラスタリングと非階層的クラスタリングの二つの手法があり、ウォード法は階層的クラスタリングの一つである。階層的クラスタリングでは、クラスタ間の距離が小さいものを併合し、一つのクラスタになるまで処理を繰り返す。まとめると、以下のようなになる。

1. 個々のデータをそれぞれ孤立したクラスタとして初期状態を形成
2. 全てのクラスタ間の距離を計算し、最も近いクラスタ対を見つける
3. 最も近いクラスタ対を併合し、できた新しいクラスタと他のクラスタの距離を計算
4. 全体が一つのクラスタになるまで3を繰り返す

併合しない距離（閾値）を設定することで、クラスタ数を制御することもできる。例えば図2.7のように、5つの集合A-Eに対し、閾値をXとして階層的クラスタリングを行うと、3つのクラスタ（AとDの併合、EとBの併合、C）が生成される。

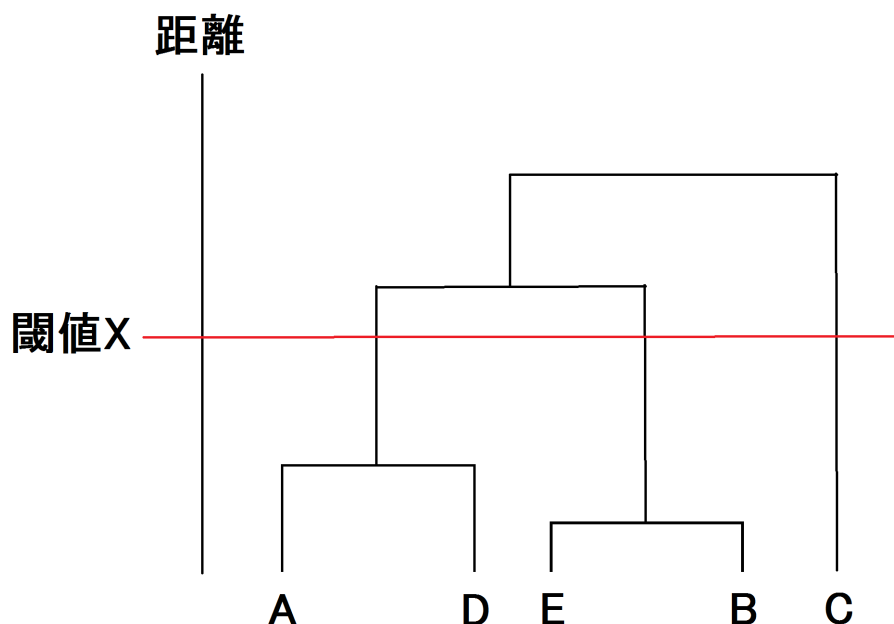


図 2.7: 階層的クラスタリングのイメージ

ウォード法では、二つのクラスタ  $C_1, C_2$  の距離  $D(C_1, C_2)$  を、 $n$ 次元ベクトル  $\mathbf{x} \in C_1, \mathbf{y} \in C_2$  を用いて以下の式で求める。

$$D(x, y) = \frac{|C_1||C_2|}{|C_1| + |C_2|} \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{y}_i)^2$$

ただし、 $|C|$  はクラスタ  $C$  の要素数であり、 $\bar{x}_i = \frac{1}{|C|} \sum_{\mathbf{x} \in C} x_i$  である。

### 3 先行研究

ここでは先行研究 [7] を紹介する. モチーフ間の同値関係を定義し, 同値類を用いたモチーフ分割を集合分割問題として定式化する.

#### 3.1 モチーフの同値関係

2.2 節のモチーフ変換  $T_p, I, R, A_r$  は, 変換の合成を演算とし, 恒等変換  $E$  を単位元とする変換群  $\mathcal{T}$  を生成する. なぜなら,

$$\begin{aligned}T_p \circ T_{-p} &= T_0 = E, \\R \circ R &= E, \\I \circ I &= E, \\A_r \circ A_{\frac{1}{r}} &= A_1 = E,\end{aligned}$$

であり,  $\mathcal{T}$  の要素は逆元を持つからである.

ここで,  $\mathcal{T}$  の要素による変換前後でのモチーフの関係を定義する.

**定義.** モチーフの全体集合を  $\mathcal{M}$  とする. モチーフ  $M_1, M_2 \in \mathcal{M}$  について,  $M_1$  が恒等変換  $E$  を単位元とする変換群  $\mathcal{T} = \{T_p, I, R, A_r\}$  のいずれかの元によって  $M_2$  に写されるとき,  $M_1$  と  $M_2$  は関係  $\sim$  をもつといい,  $M_1 \sim M_2$  と表記する.

**命題 3.1.** 関係  $\sim$  は同値関係である.

**証明.**  $\forall A, B, C \in \mathcal{M}$  に対し,

1.  $E(A) = A$  であるから,  $A \sim A$  が成り立つ.
2.  $\forall X \in \mathcal{T}, \exists X^{-1}$  s.t.  $X^{-1} \in \mathcal{T}$ .  
 $X(A) = B$  のとき,  $X^{-1}(B) = X^{-1} \circ X(A) = A$  であるから,  $B \sim A$  が成り立つ.
3.  $A \sim B \wedge B \sim C \Rightarrow \exists X, Y \in \mathcal{T}$  s.t.  $(X(A) = B) \wedge (Y(B) = C)$ .  
このとき,  $Y \circ X(A) = Y(B) = C$  となり,  $Y \circ X \in \mathcal{T}$  であるから,  $A \sim C$  が成り立つ.

□

#### 3.2 モチーフ分割問題

- 分割の条件

集合分割問題における  $N_i$  を分析楽曲の各音符,  $M_j$  を分析楽曲から得られるモチーフの候補とする. ただし,  $N_i$  は上段から下段へ, 最初の音から順に添字  $i$  を対応させ,  $M_j$  は一音から一定の音数までの連続する音符のリストを順に対応させる. 例えば, モチーフの最大音数  $NUM = 4$  とした場合, 図 3.1 のようになる.

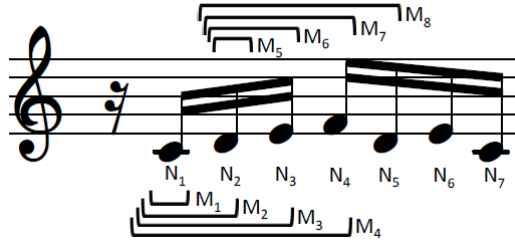


図 3.1:  $NUM = 4$  の場合のモチーフ候補の例

行列  $A$  の各行は各音符がどのモチーフに被覆されるかを表し, 各列は各モチーフがどの音符を含んでいるかを表す. 例えば  $NUM = 4$  の場合, 行列  $A$  は以下のように表される.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

この行列を用いて, 各音符  $N_i$  がある 1 つのモチーフ  $M_j$  に被覆されているという制約

$$\sum_{j=1}^m a_{ij}x_j = 1 \quad (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})$$

によって, 曲全体がモチーフ群によって分割されているという条件が表される.

- 目的関数

良いモチーフ分割とは, 分割に用いられるモチーフの長さが長く, 反復回数が多いことだと考える. これは, 分割に用いられるモチーフ類の数 (同値類の数) が固定されている場合には, 分割におけるモチーフの総数ができるだけ少ないことだと解釈できる. そこで, 同値類の数を固定した上で, 最小化すべき目的関数を分割に用いられるモチーフの総数として次のように設定する.

$$\sum_{j=1}^m x_j$$

これは, 集合分割問題において, 各モチーフのコスト  $c_i$  を全て 1 としたものに相当する.

- モチーフの種類数の制約

モチーフ候補の全体集合  $M$  の中で同じ種類のモチーフとしてみなせるモチーフの添字  $j$  を集めた同値類の全体集合  $C$  とする.  $C$  の各同値類  $C_k$  ( $1 \leq k \leq l$ ) について,  $X$  の中に  $C_k$  に属しているモチーフが存在するかどうかを変数  $y_k$  で表す. このとき, 同値類の数が  $P$  であることは,

$$\sum_{k=1}^l y_k = P$$

で表される. ただし,  $y_k$  と  $x_j$  との整合性をとるため,  $X$  の中で  $C_k$  に属しているモチーフの数モチーフの数  $\sum_{j \in C_k} x_j$  を用いて,  $y_k$  を次のように制約する.

$$y_k \leq \sum_{j \in C_k} x_j \leq Qy_k \quad (\forall k \in \{1, 2, \dots, l\})$$

ここで,  $Q$  は十分大きな定数であり,  $y_k = 0$  となる  $C_k$  に属するモチーフは用いられず,  $y_k = 1$  となる  $C_k$  に属するモチーフは 1 個以上用いられる.

- モチーフの反復回数数の制約

ある一定の音数  $U$  以上のモチーフの種類  $C_k$  の添字集合  $K_U$  に対し, 反復回数数の下限を  $R$  回とする.

$$\sum_{j \in C_k} x_j \geq Ry_k \quad (\forall k \in K_U)$$

これにより, 分割に使用される音数  $U$  以上のモチーフ類  $C_k$  について  $R$  個以上反復されることになる.

以上をまとめると, モチーフ分割問題は,

$$\text{minimize} \quad \sum_{j=1}^m x_j \quad (1)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j = 1 \quad (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^l y_k = P \quad (3)$$

$$y_k \leq \sum_{j \in C_k} x_j \leq Qy_k \quad (\forall k \in \{1, 2, \dots, l\}) \quad (4)$$

$$\sum_{j \in C_k} x_j \geq Ry_k \quad (\forall k \in K_U) \quad (5)$$

$$x_i \in \{0, 1\} \quad (\forall i \in \{1, 2, \dots, m\}) \quad (6)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad (\forall j \in \{1, 2, \dots, l\}) \quad (7)$$

となる.

## 4 提案手法

### 4.1 同値関係の拡張

先行研究 [7] では, モチーフの構造を変えない厳格な変換しか考慮していないため, 同一に見えるモチーフが異なるモチーフ類に分けられ, 上手く分割されない箇所が多く見られた. 例えば, 音列 (C4, D4, E4, F4) の反行形を考えた場合, 厳格な変換  $I$  では音列 (C4, B $\flat$ 3, A $\flat$ 3, G3) となる (図 2.4) が, 音列 (C4, B3, A3, G3) も反行形である (図 4.2) と考えるのが自然である. そこで音程ではなく, 臨時記号を除いた音名の差 (以下, 音差) を考慮した変換  $T'_p, I', R'$  を定義する. 音列 (C4, D4, E4, F4) に対する各変換後の音名と音程および音差の一例を図 4.1–4.3 に示す.

- 移高 ( $T'_p$ ): 原形音列の最初の音を  $p$  だけ変え, 音差を同じにする ( $p \in \mathbb{Z}$ )
- 反行 ( $I'$ ): 原形音列の最初の音を基準に上下反対の進行にし, 音差の符号を反転する
- 逆行 ( $R'$ ): 原形の最終音から逆順に並べ, 音差の列と符号を反転する

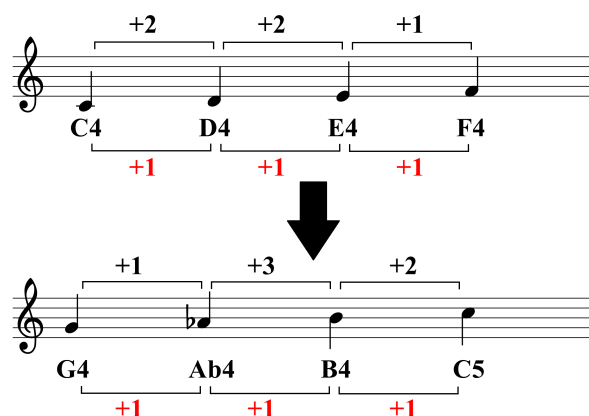


図 4.1: 移高  $T'_7$  の例

これらの変換に基づくモチーフ間の関係  $\simeq, \approx$  を定義する.

**定義.** モチーフの全体集合を  $\mathcal{M}$  とする. モチーフ  $M_1, M_2 \in \mathcal{M}$  について,  $M_1$  が恒等変換  $E$  を単位元とする変換群  $\mathcal{T}' = \{T'_p, I', R', A_r\}$  のいずれかの元によって  $M_2$  に写されるとき,  $M_1$  と  $M_2$  は関係  $\simeq$  をもつといい,  $M_1 \simeq M_2$  と表記する.

**命題 4.1.** 関係  $\simeq$  は同値関係である.

**証明.**  $\forall A, B, C \in \mathcal{M}$  に対し,

1.  $E(A) = A$  であるから,  $A \simeq A$  が成り立つ.

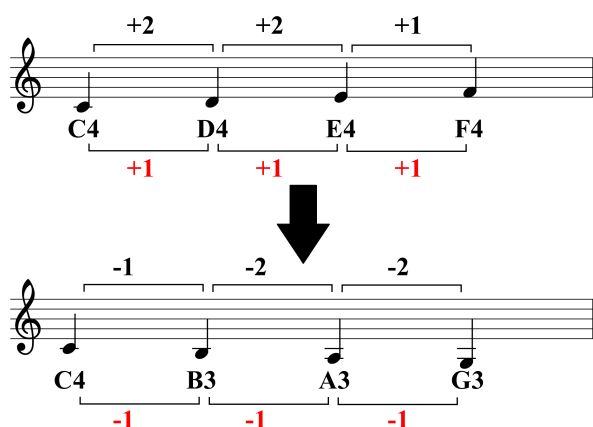


図 4.2: 逆行  $I'$  の例

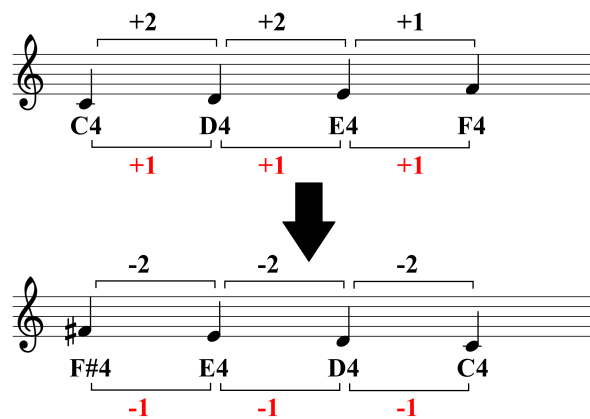


図 4.3: 逆行  $R'$  の例

2.  $\forall X \in \mathcal{T}', \exists X^{-1}$  s.t.  $X^{-1} \in \mathcal{T}'$ .

$X(A) = B$  のとき,  $X^{-1}(B) = X^{-1} \circ X(A) = A$  であるから,  $B \approx A$  が成り立つ.

3.  $A \approx B \wedge B \approx C \Rightarrow \exists X, Y \in \mathcal{T}'$  s.t.  $(X(A) = B) \wedge (Y(B) = C)$ .

このとき,  $Y \circ X(A) = Y(B) = C$  となり,  $Y \circ X \in \mathcal{T}'$  であるから,  $A \approx C$  が成り立つ.

□

命題 4.2. 関係  $\approx := \sim \vee \simeq$  とする. このとき  $\approx$  は同値関係である.

証明. 命題 2.1 より,  $\approx$  は同値関係である.

□

この同値関係  $\approx$  の同値類を用いてモチーフ分割問題を解く.

## 4.2 モチーフ類のクラスタリング

専門家の分析では同じグループに属しているモチーフでも, 概形や音数が異なるために同値関係の拡張では捉えられないものがあつた (図 4.4). そこで, モチーフ類間の距離を考え, 近いモチーフ類を併合することでモチーフ類を拡張する.



図 4.4: 同じグループとみなしたいモチーフの例

モチーフの最大音数  $NUM = n$  とするとき, 音程の列を  $n-1$  次元ベクトルで表す. ただし,  $i < n-1$  のベクトルに対しては,  $i+1$  成分から  $n$  成分まで 0 を付け足す. 例えば  $NUM = 7$  のとき, 音列 (C4, D4, E4, F4) の音程の列は (2, 2, 1) だが, (2, 2, 1, 0, 0, 0) とする. 同値関係  $\approx$  の同値類を初期状態としてワード法を適用し, 閾値を設定してモチーフ類のクラスタリングを行う. この新たに生成されたクラスタを  $C_k$  として, モチーフ分割問題を解く.

## 5 実験と考察

J.S. Bach の “Invention No.1 BWV 772”, “Invention No.3 BWV 774”, “Invention No.8 BWV 779”[8] の 3 曲に対して, 先行研究と提案手法および専門家の分析 [9] との比較実験を行った. また, ポピュラー音楽として, 2014 年の流行歌 “Let It Go” (メロディ譜) についても先行研究と提案手法の比較実験を行った. モチーフの同値類 (モチーフ類) 全体の集合  $C$  を各手法ごとに変更し, 3.2 節のモチーフ分割問題 (1)–(7) を LP ファイルに記述して, 非商用の整数計画ソルバー SCIP[10] を用いてモチーフ分割問題を解いた. 入力パラメータは表 5.1 のように与えた. 同値類 (モチーフ類) の数  $P$ , 十分大きな定数  $Q$ , 反復回数の下限  $R$  およびワード法の閾値  $T$  は全曲同じ値に固定し, モチーフの最大音数  $NUM$  は, 専門家の分析における最長のモチーフ音数 (Let It Go は筆者が設定) とした.

表 5.1: 入力パラメータ

| Invention No.1 | Invention No.3 | Invention No.8 | Let It Go    |
|----------------|----------------|----------------|--------------|
| $n = 455$      | $n = 494$      | $n = 596$      | $n = 173$    |
| $m = 3612$     | $m = 6825$     | $m = 7670$     | $m = 1023$   |
| $P = 10$       | $P = 10$       | $P = 10$       | $P = 10$     |
| $Q = 100000$   | $Q = 100000$   | $Q = 100000$   | $Q = 100000$ |
| $R = 0$        | $R = 0$        | $R = 0$        | $R = 0$      |
| $T = 0.125$    | $T = 0.125$    | $T = 0.125$    | $T = 0.125$  |
| $NUM = 8$      | $NUM = 14$     | $NUM = 13$     | $NUM = 6$    |

### 5.1 Invention No.1 BWV 772

解のモチーフ類と分割結果を図 5.1–5.4 に示す. 楽譜上に線が引かれている箇所はモチーフを表し, 数字はモチーフ類の番号を表す. ただし, 線が引かれていない音は 1 音のモチーフであり, モチーフ類 0 番に属する. 赤色のモチーフは, 専門家の分析と完全に一致したものの, 青色のモチーフは, 専門家の分析と一音のずれや違いなど近いものを表す.

- 専門家による分析 (図 5.5) :  
この曲の主題は, 1, 2 小節目に主旋律 A と対旋律 B が連なって提示されている. さらに A を見ると, 部分音型 a1, a2 からできていることが分かる. 主に A が抱える音型が使われており, A の動機的模倣 a が多く反復されている.
- 先行研究の結果 (図 5.2) :  
主題の 1, 2 小節目を見ると, 1 小節目の上段はモチーフ類 5 と 7, 下段は 6 に分かれており, 2 小節目は 0, 1, 6 から構成されている. これを専門家の分析と比較すると, 5 は a1, 7 は a2+B, 6 は A の一部に対応していることが分かる. 2 小節目は 1 小節目を移高したもので, 1 小節目と同様な分割になるのが自然だと考えられる. しかし, 厳



密な移高ではない（1小節目の第9音と第10音の音程が-1に対して、2小節目の第9音と第10音の音程は-2）ので、厳密な変換しか考慮していない先行研究では同様の音型と認識されていない。これは、7小節目上段の6と8小節目上段の8や15小節目下段の5,3と17小節目の9など他のところでも多く見られる。

- 同値関係の拡張の結果（図5.3）：

主題の1,2小節目を見ると、1小節目、2小節目ともにモチーフ類5と3から構成されている。1小節目と2小節目が同様な分割になっており、期待する結果が得られた。しかし、専門家の分析と比較すると、5はAに対応しているが1音足らず、3は1音ずれている。専門家の分析では主旋律となっている2小節目下段のAやAの動機的模倣となっている3小節目上段のa（反行形）は、1小節目のAと比べると同形とはいえない（第7音と第8音の音差が異なる）ので、同値関係と捉えられていないことに原因があると考えられる。また、3~5小節目上段や11~13小節目下段の6は5の形を含んでいるが、6が分割に選ばれている。これは、モチーフ類の6の要素がある程度多く、長いモチーフ類を選ぶほうがモチーフの総数を減らすのに有効だからだと考えられる。

- クラスタリングの結果（図5.4）：

主題の1,2小節目を見ると、1小節目の上段はモチーフ類2と5、下段は0と2に分かれており、2小節目は2から構成されている。1小節目と2小節目は同様な分割とならなかった。しかし、3小節目と4小節目および9~12小節目は専門家の分析と同様の分割が得られた。ただ、モチーフ類6,7,8は同じグループに属することを期待していた。



図 5.1: Invention No.1 の分割に使われた 10 種類のモチーフ（先行研究）

The image displays a musical score for J.S. Bach's Invention No. 1, divided into seven systems. Each system consists of a piano (left) and treble (right) staff. The score is annotated with numbers 1 through 9, indicating specific motifs or segments. Blue and red dots are placed above notes to highlight these segments. The first system (measures 1-3) shows motifs 5, 7, 6, 1, 6, 1, 1, and 6. The second system (measures 4-6) shows motifs 4, 4, 6, 5, 3, 1, 4, 4, 1, and 1. The third system (measures 7-9) shows motifs 6, 8, and 8. The fourth system (measures 10-12) shows motifs 5, 3, 2, 5, 1, 2, 6, 1, 2, and 4. The fifth system (measures 13-15) shows motifs 6, 1, 5, 1, 3, 3, 2, 1, 6, 5, and 3. The sixth system (measures 16-18) shows motifs 5, 4, 9, 9, and 8. The seventh system (measures 19-21) shows motifs 6, 5, 3, 6, 1, 5, 4, 2, 1, 5, 4, 1, 4, and 1.

図 5.2: Invention No.1 のモチーフ分割 (先行研究)

The image displays a musical score for J.S. Bach's Invention No. 1, illustrating the division of the main motif into segments of equal value (5, 6, 7, 8 notes) and their expansion. The score is in 4/4 time and features a complex rhythmic pattern of eighth and sixteenth notes. The motif is first shown in its original form, then expanded to 5, 6, 7, and 8 notes, and finally expanded to 8 notes with a different rhythmic grouping. The expansion is achieved by adding notes of the same value as those in the original motif.

図 5.3: Invention No.1 のモチーフ分割（同値関係の拡張）

The image displays a musical score for J.S. Bach's Invention No. 1, specifically focusing on the clustering of notes. The score is presented in seven systems, each with a treble and bass clef staff. Red and blue dots are placed above notes to indicate clusters. Numbers above the notes indicate fingerings. The clusters are: System 1 (measures 1-3), System 2 (measures 4-6), System 3 (measures 7-9), System 4 (measures 10-12), System 5 (measures 13-15), System 6 (measures 16-18), and System 7 (measures 19-21).

図 5.4: Invention No.1 のモチーフ分割 (クラスタリング)

The image displays a musical score for J.S. Bach's Invention No. 1, divided into seven systems. Each system consists of a treble and bass clef staff. The score is annotated with various labels indicating motif divisions and transformations:

- System 1 (Measures 1-3):** Treble clef has motifs labeled A and B. Bass clef has motifs labeled a1 and a2.
- System 2 (Measures 4-6):** Treble clef has motifs labeled a(反行形), a(反行形), b, a(反行形), a2(反), and a2(反). Bass clef has motifs labeled a1(拡大形), a, a1(拡大形), and a2(拡大形).
- System 3 (Measures 7-9):** Treble clef has motifs labeled A, A, and a(反行形). Bass clef has motifs labeled A, B, a(反行形), and a2(拡大形).
- System 4 (Measures 10-12):** Treble clef has motifs labeled a(反行形), a1(拡大形), a1(拡大形), and a1(拡大形). Bass clef has motifs labeled a(反行形), a2(拡大形), a(反行形), a(反行形), a(反行形), and a(反行形).
- System 5 (Measures 13-15):** Treble clef has motifs labeled a, a2(反), a2(反), a2(反), a2, a2(反), and a(反行形). Bass clef has motifs labeled b, a(反行形), a2(反), a2(反), and a(反行形).
- System 6 (Measures 16-18):** Treble clef has motifs labeled a, a(反行形), and a. Bass clef has motifs labeled a, a(反行形), and a.
- System 7 (Measures 19-21):** Treble clef has motifs labeled a, A, and a(反行形). Bass clef has motifs labeled a1(反の拡大形), a1(反の拡大形), a1(反の拡大形), A, a1(拡大形), and a1.

図 5.5: Invention No.1 のモチーフ分割 (専門家)

## 5.2 Invention No.3 BWV 774

解のモチーフ類と分割結果を図 5.6-5.10 に示す。楽譜上に線が引かれている箇所はモチーフを表し、数字はモチーフ類の番号を表す。ただし、線が引かれていない音は1音のモチーフであり、モチーフ類0番に属する。赤色のモチーフは、専門家の分析と完全に一致したものの、青色のモチーフは、専門家の分析と一音のずれや違いなど近いものを表す。

- 専門家による分析 (図 5.9) :  
この曲の主題は、1~3 小節目の主旋律 A と 4, 5 小節目の対旋律 B がセットとなって提示されている。さらに A を見ると、部分音型 a1, a2, a3 からできていることが分かる。A の音型が徹底的に使われており、曲全体が A のイメージ一色となっていることが確認できる。
- 先行研究の結果 (図 5.6) :  
主題の 1-5 小節目を見ると、1-5 小節目までモチーフ類 0, 1, 5 から構成されている。これを専門家の分析と比較すると、1 は a1 の一部、5 は a2+a3 に対応していることが分かる。専門家の分析では、小節の途中で分割されるところはあまり見られないが、先行研究では多く見られる。
- 同値関係の拡張の結果 (図 5.7) :  
主題の 1-5 小節目を見ると、1-5 小節目までモチーフ類 0, 1, 5 から構成されている。これは、先行研究の結果とほぼ変わらないものとなっている。変わったところは、1 音のモチーフや小節の途中で分割される箇所が減っているところである。これにより、専門家の分析とは異なるが、3 や 4 のような、意味のあるように見えるかたまりが増えた。
- クラスタリングの結果 (図 5.8) :  
主題の 1-5 小節目を見ると、1-3 小節目はモチーフ類 1 と 7, 4, 5 小節目は 2 と 7 から構成されている。これを専門家の分析と比較すると、7 が対旋律 B の音を含んでしまい、B は 2 によって三分割されていることが分かる。同値関係の拡張の結果における 5 と 6 が同じグループに属することを期待したが、そうはならなかった。

The image displays a musical score for J.S. Bach's Invention No. 3, divided into measures and annotated with numbers 1 through 9 to indicate motif segmentation. The score is written in G major (one sharp) and 3/8 time. It consists of 60 measures, with the first measure being a whole rest. The notation includes treble and bass clefs, stems, beams, and various musical symbols like slurs and accents. Some notes are highlighted in blue. The annotations are as follows:

- Measure 1: 1 (first note), 5 (second note)
- Measure 2: 1 (first note), 5 (second note)
- Measure 3: 1 (first note), 5 (second note)
- Measure 4: 1 (first note), 5 (second note)
- Measure 5: 1 (first note), 5 (second note)
- Measure 6: 6 (first note), 8 (second note)
- Measure 7: 6 (first note), 8 (second note)
- Measure 8: 6 (first note), 8 (second note)
- Measure 9: 6 (first note), 8 (second note)
- Measure 10: 6 (first note), 8 (second note)
- Measure 11: 6 (first note), 8 (second note)
- Measure 12: 6 (first note), 8 (second note)
- Measure 13: 6 (first note), 8 (second note)
- Measure 14: 6 (first note), 8 (second note)
- Measure 15: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 16: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 17: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 18: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 19: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 20: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 21: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 22: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 23: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 24: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 25: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 26: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 27: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 28: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 29: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 30: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 31: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 32: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 33: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 34: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 35: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 36: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 37: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 38: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 39: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 40: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 41: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 42: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 43: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 44: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 45: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 46: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 47: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 48: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 49: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 50: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 51: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 52: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 53: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 54: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 55: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 56: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 57: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 58: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 59: 2 (first note), 3 (second note)
- Measure 60: 2 (first note), 3 (second note)

図 5.6: Invention No.3 のモチーフ分割 (先行研究)

The image displays a musical score for J.S. Bach's Invention No. 3, illustrating the concept of motif division and expansion. The score is written in G major and 3/8 time, spanning 60 measures. It is presented in a two-staff system (treble and bass clef). The score is divided into systems of two staves each. The first system (measures 1-8) shows the initial motif in the treble clef. Subsequent systems show the motif being expanded and repeated in both hands, often with different fingerings and articulations. Red and blue markings highlight specific notes and fingerings throughout the piece.

図 5.7: Invention No.3 のモチーフ分割 (同値関係の拡張)



The image displays a musical score for J.S. Bach's Invention No. 3, specifically focusing on the motif segmentation (clustering) of the piece. The score is written for piano and is in 3/8 time, with a key signature of one sharp (F#). The notation is presented in a grand staff format, with the right hand (treble clef) and left hand (bass clef) parts clearly delineated. The score is divided into measures, with measure numbers 1, 7, 8, 15, 22, 29, 36, 43, 50, and 55 indicated at the beginning of their respective systems. The right hand part features a complex, rhythmic melody with frequent slurs and fingerings (1-5) that define the motifs. The left hand part provides a steady, rhythmic accompaniment, often using a simple bass line with fingerings (0-5) and occasional slurs. The overall structure of the piece is a 32-measure minuet, and this score covers the first 55 measures, ending with a double bar line. The notation includes various musical symbols such as slurs, ties, and fingerings, which are essential for understanding the motif segmentation and performance technique.

図 5.8: Invention No.3 のモチーフ分割 (クラスタリング)

The image displays a musical score for J.S. Bach's Invention No. 3, specifically focusing on the division of motifs. The score is written in 3/8 time and features a key signature of one sharp (F#). It is organized into ten systems, each consisting of two staves (treble and bass clef). The motifs are identified by letters (A and B) and numbers (a1, a2, a3), with some instances labeled as expanded forms (e.g., a1(拡大形)).

- System 1:** Motif A in the treble clef, motif a1 in the bass clef.
- System 2:** Motif B in the treble clef, motif a2 in the bass clef.
- System 3:** Motif a1(拡大形) in the treble clef, motif a2 in the bass clef.
- System 4:** Motif a in the treble clef, motif a2 in the bass clef.
- System 5:** Motif a in the treble clef, motif a2 in the bass clef.
- System 6:** Motif a in the treble clef, motif a2 in the bass clef.
- System 7:** Motif a1 in the treble clef, motif a2 in the bass clef.
- System 8:** Motif A in the treble clef, motif a in the bass clef.
- System 9:** Motif B in the treble clef, motif a1(拡大形) in the bass clef.
- System 10:** Motif a in the treble clef, motif a1 in the bass clef.

図 5.9: Invention No.3 のモチーフ分割 (専門家)

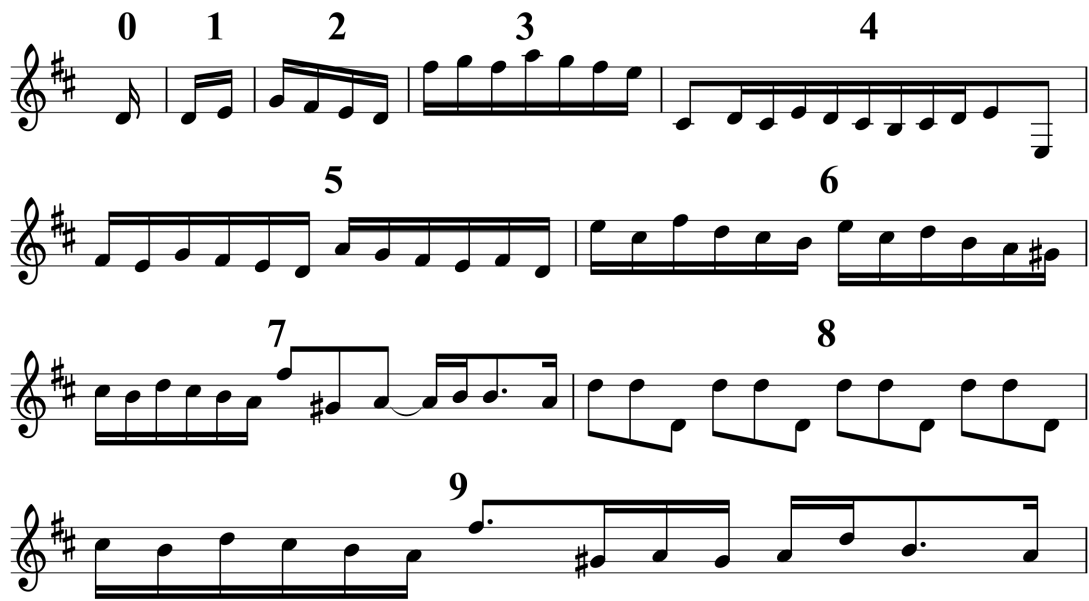


図 5.10: Invention No.3 の分割に使われた 10 種類のモチーフ (先行研究)

### 5.3 Invention No.8 BWV 779

解のモチーフ類と分割結果を図 5.11–5.14 に示す。楽譜上に線が引かれている箇所はモチーフを表し、数字はモチーフ類の番号を表す。ただし、線が引かれていない音は 1 音のモチーフであり、モチーフ類 0 番に属する。赤色のモチーフは、専門家の分析と完全に一致したもの、青色のモチーフは、専門家の分析と一音のずれや違いなど近いものを表す。

- 専門家による分析 (図 5.15) :  
この曲の主題は、1–12 小節目の 1 拍目までにわたり、主旋律 A と対旋律 B が先導し、独立した旋律 C, D が続いている。12 小節目からの後半部分は、新たに独立した旋律 E が付加されることで、変形または簡略化されて進んでいく。同じ旋律が異なる時点から開始するカノンのなつくりとなっているのが特徴である。
- 先行研究の結果 (図 5.12) :  
主題の 1–12 小節目を見ると、3 以外のモチーフ類から構成されている。専門家の分析と比較すると、5 小節目上段の 7 が C に対応しているが、下段の同形は異なるモチーフ類で分割されている。これは、厳密な移高ではない（上段の第 1 音と第 2 音の音程が +4 に対して、下段の第 1 音と第 2 音の音程は +3）ので、厳密な変換しか考慮していない先行研究では同様の音型と認識されていない。
- 同値関係の拡張の結果 (図 5.13) :  
主題の 1–12 小節目を見ると、0–4 と 8 のモチーフ類から構成されている。専門家の分析と比較すると、4 小節目～7 小節目の 4 と 10 小節目の 9 がそれぞれ C と D に近い。しかし、A と B は捉えられておらず、1 や 2 の連なりとして処理されている。

● クラスタリングの結果 (図 5.14) :

主題の 1-12 小節目を見ると, 0-6 と 9 のモチーフ類から構成されている. 専門家の分析と比較すると, 4-7 小節目の 4 は C に, 8 小節目の 5 は b に, 10 小節目の 6 は D に近い. 19, 20 小節目下段の 7 と 21-23 小節目上段の 8 は概形が似ており, 同じグループに属することを期待したが, そうはならなかった.



図 5.11: Invention No.8 の分割に使われた 10 種類のモチーフ (先行研究)

The image displays a musical score for J.S. Bach's Invention No. 8, presented in a two-staff format (treble and bass clefs). The score is divided into measures, with various musical notations including notes, rests, and fingerings. The key signature is one flat (B-flat), and the time signature is 3/4. The score is annotated with numbers 1 through 9, indicating specific motifs or segments. Red highlights are used in the right hand to emphasize certain notes or groups of notes. The score is organized into systems, with measure numbers 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 17, 21, 25, 29, and 32 marked at the beginning of their respective systems. The annotations and highlights are distributed across the score, with some motifs appearing in both hands and others primarily in the right hand.

図 5.12: Invention No.8 のモチーフ分割 (先行研究)

図 5.13: Invention No.8 のモチーフ分割 (同値関係の拡張)

The image displays a musical score for Invention No. 8 by J.S. Bach, illustrating the concept of 'clustering' (クラスタリング). The score is written for a single instrument, likely a harpsichord or keyboard, in 3/4 time and B-flat major. It consists of 32 measures. The right hand (RH) features a melodic line with various intervals and ornaments, while the left hand (LH) provides a rhythmic accompaniment with many sixteenth-note runs. Blue dots are placed above notes in both hands to indicate clusterings. Fingerings (1-5) and other performance markings are present throughout the piece.

図 5.14: Invention No.8 のモチーフ分割 (クラスタリング)

図 5.15: Invention No.8 のモチーフ分割 (専門家)



## 5.4 Let It Go (メロディ譜)

解のモチーフ類を図 5.16 に示す. 楽譜上の数字はモチーフ類の番号を表す. 分割結果については, 著作権の関係上, 省略する.

- 先行研究の結果：  
10 種類のモチーフ類中, 6 種類が 2 音以下のモチーフであった. これは, 3 音以上の同値関係にあるモチーフが少なかったからだと考えられる. ポピュラー音楽では, モチーフが厳密に反復されることは少ないので, 厳密な変換しか考慮していない先行研究でのモチーフ分割は難しいことが分かる.
- 同値関係の拡張の結果：  
先行研究の結果と同様に, 2 音以下のモチーフが多い. 先行研究の結果と異なる点は, 2 音のモチーフ類がまとまったことで, 3 音以上のモチーフが 1 種類増えている点である. ポピュラー音楽では, モチーフに対して音の追加やリズムを変えることが多いので, 同値関係の拡張だけでは捉えきれないことが分かる.
- クラスタリングの結果：  
先行研究や同値関係の拡張の結果と比較すると, 2 音以下のモチーフが少なくなっている. 8 小節目のモチーフ類 2 や 22 小節目の 4 など上手くいっているように見えるところもあるが, 全体的に分割が上手くできているとは言いがたい. イントロは, 前半 4 小節と後半 4 小節で同様の分割になることを期待したが, 先行研究と同値関係の結果より悪くなってしまった.



図 5.16: Let It Go の分割に使われた 10 種類のモチーフ (先行研究)

厳密なモチーフ変換だけでなく, 概形が同じモチーフもまとめるため, 同値関係の拡張やクラスタリングを行ったが, 期待する結果はあまり得られなかった. 原因の一つとして, クラスタリング時にモチーフのベクトルを同じ次元に合わせてしまったため, 音数が異なるモチーフ類間の距離が適切に測れなかったことが考えられる. この対策として, ユークリッド平方距離を用いるのではなく, 音の挿入や削除, 置換のコストで測る編集距離を導入することが考えられる. ポピュラー音楽に適用していくためにもクラスタリングの精度を上

げることとは今後の課題の一つである。ワード法だけでなく、他のクラスタリング手法も試す必要があるだろう。

専門家の分析では、1音と2音のかたまりをモチーフとしているものはなかったのに、これらのモチーフをなるべく少なくなるできると良い方向にいくと考えられる。入力パラメータやクラスタリングの閾値を変えることで結果も大きく変わってくるので、最適なパラメータを自動的に求められると良いだろう。モチーフの重なり（あるモチーフの最後の音と次のモチーフの最初の音が重なる）をどう表現するかも今後の課題である。また、専門家によって解釈が異なることもあり、主観的な評価だけではなく、定量的に評価する方法も考える必要がある。

## 6 おわりに

本研究では、同値関係の拡張やクラスタリングを行うことでモチーフ分析の改良を試みた。専門家の分析との部分的な一致や期待した結果が得られるなど、ある程度の改善が見られた。しかし、精度はまだまだ疑問が残る結果であり、特にポピュラー音楽に対しては顕著であった。今後の課題としては、パラメータ設定の自動化や定量的な評価方法の作成などが挙げられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご支援、ご指導を賜りました。謹んで御礼申し上げます。特に、指導教員である村松正和教授には、大変お世話になりました。高橋里司助教には、様々な視点からアドバイスをいただきました。また、村松・保木・高橋研究室の皆様には、心地良い研究環境を提供していただきました。最後に、今日に至るまで学生生活を支えてくださった、父母、祖母に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 後藤真孝, “音楽情報学 (<特集>新しい〇〇情報学)”, 情報処理 (情報処理学会誌), Vol.51, No.6, pp.661–668, 2010年06月15日
- [2] 後藤真孝, “未来を切り拓く音楽情報処理”, 情報処理学会研究報告, Vol.2013-MUS-99, No.33, 2013年5月12日
- [3] 嵯峨山茂樹, 中妻啓, 深山覚, 酒向慎司, 西本卓也, “日本語歌詞からの自動作曲”, オペレーションズ・リサーチ, 第54号9巻, pp.546–553, 2009年9月
- [4] 山口直彦, “非調構成音を含む和音への対応を目的とした Tonal Pitch Space の拡張”, 修士論文, 工学院大学大学院, 2011年

- [5] 上田慎也, “多旋律を含むピアノの運指最適化について”, 卒業論文, 電気通信大学, 2013 年
- [6] 浜中雅俊, 平田圭二, 東条敏, “音楽理論 GTTM に基づくグルーピング構造獲得システム”, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.1, pp.284–299, 2007 年
- [7] 田中翼, 藤井浩一, “整数計画法に基づく多声音楽のモチーフ分析—集合分割問題としての定式化—”, 情報処理学会研究報告, Vol.2014-MUS-104, No.22, 2014 年 8 月 27 日
- [8] J.S. Bach: “バッハ インベンション (解説付)”, 全音楽譜出版社, 出版年不明
- [9] 鵜崎庚一, “アナリーゼの技法 バッハ／インベンション”, 学研パブリッシング, 2012 年
- [10] Zuse Institute Berlin, SCIP (Solving Constraint Integer Programs), <http://scip.zib.de/>