

自動作曲への小節パターンの応用

Adaptation of the Musical bar patternizing for Automatic Composition

神谷 達夫

要旨

本論文は、楽曲の小節パターンの統計的性質を調査し、それを自動作曲に応用することを目的としている。本論文では、讃美歌 553 曲に含まれる 4 拍子の曲の小節がパターン化され、その統計的性質が自動作曲に応用された。

小節パターンの調査の結果、パターンの出現頻度はジップの法則(Zipf's Law)に従い、隣接する小節のパターンパターン間の距離は 15 半音の分布が最も多くなり、パターンの類似度は 0.8 が最も出現頻度の高くなることが分かった。また、楽曲を小節パターンの出現頻度の順序列で表現し、その自己相関関数から小節パターンの連続構造を調査した。その結果、讃美歌には 4 小節毎と 8 小節毎に相関性の強い構造のあることが確認され、楽節と考えられる構造が自己相関関数によって検出できることが確認された。

本論文では、得られた統計情報を基に計算機を用いて実験楽曲が作成された。実験楽曲は AHP を用いた聴覚評価により、楽曲として成立しているか判定された。判定の結果、実験楽曲は十分楽曲として成立しており、小節パターンを用いた方法による自動作曲の妥当性を示すことができた。

キーワード: 自動作曲、パターン化、小節、ジップの法則、讃美歌

Keywords: automatic composition, patternizing, musical bar, Zipf's Law, hymn

1. はじめに

旋律は音楽中に出現する音が相互に意味的に関連しつつ進行することによって構成されており、音の配置に規則性の存在することが知られている。この規則性を統計的に解明する試みは古くから行われており、特に情報理論を用いて規則性を説明する試みは近年盛んに研究されている⁽¹⁾。

古くは Youngblood(1960)はシューベルト、メンデルスゾーン、シューマンの作曲による曲やグレ

ゴリオ聖歌を情報理論的に分析している⁽²⁾。フランセ(1958)はメロディと和声の情報量を比較し、和声の情報量の方が少ないことを明らかにしている⁽²⁾。リズムの情報量に関しては Brawley(1959)の研究があり、分類されたリズム型のエントロピーが求められている⁽²⁾。近年では、旋律の特徴量を旋律輪郭(Melody Counter)として記述する方法が提案されている⁽³⁻⁵⁾。調性の認知に関しては Krumahansl^(6,7)や Akiyama⁽⁸⁾、Matsuda⁽⁹⁾らの研究が知られている。

情報理論的楽曲分析の応用として、分析結果に基づく作曲が古くから試みられており 1956 の Pinkerton による banal tune-maker などが一定の効果を上げていおり、初期の計算機を用いた本格的な自動作曲では Hiller と Isaacson(1959)が知られている⁽¹⁰⁾。近年では、旋律のエントロピーを様々な項目について計算し、エントロピーの低い項目による自動作曲を試みている⁽¹¹⁾。しかし、音楽は文章のように自己内包構造を持っており、単純に一方的に進行しない。そして、自己内包構造は一方的な連鎖過程からは十分に分析できないことが Chomsky(1956) により報告⁽¹⁰⁾されており、現実の作曲においては組み合わせた結果を評価し修正する必要がある。和声進行のような音楽理論を用いた作曲であってもその理論のみでは完全な楽曲を作ることはできず、モーツアルトやバッハが行ったとされる確率的な作曲法の場合や Banal Tune Maker による作曲においても、音楽として成立する楽曲を取り出すためには、聴覚評価による楽曲の良否の判断が必要である。したがって、人による作曲の場合、音楽理論による規則による音の組み立ての後に聴覚評価によるフィードバックがかけられていると考えられる。つまり、作曲者は作曲者の意図する音楽体系で使用可能な音の集合から音の順序列への変換によって楽曲を作成しており、いわゆる楽曲の良否は、なんらかの評価指標における良否判断の結果であると考えられる。

一方、曲としての面白さを考慮した作曲には予測可能な定型的な要素と、意外性を持った非定型な要素との組み合わせが必要であると考えられる。完全に規則性のある音の並びである場合、単一的で楽曲としての面白さが無くなると考えられる。逆に、全く規則的でない音を並べただけで音楽が成立しないということも明らかである。音の配置に全く規則性が無い場合、音楽ではなく雑音となり、完全に規則的な音の並びは音楽として成立しない。したがって、音楽としての曲は雑音と完全に規則的な音の並びの間にある。しかし、音の並びを音楽であると判断し評価する方法は確立されておらず、自動作曲の研究の多くが作曲結果の評価を人の感性評価に頼っている⁽¹²⁾。さらに、感性評価は人による評価の変動が大きく、この解決のために多数の被験者を必要とし、計算機による評価の自動化にも適していない。

一般的な音楽理論を用いた作曲法は、和声を考慮した小節の並びを作ることによって動機(モチーフ)を作り、それを小楽節、大楽節と発展させる方法である。この方法は初歩的な小さな曲を作る方法として効果を発揮し、この方法を理解すれば、音楽経験の乏しい者でも比較的短時間に作曲することができる。したがって、小節単位での作曲法は小さな曲の作曲法として非常に有効な手段であると

考えられる。本論文では、旋律輪郭による特徴抽出に見られるような従来のパターン化とは異なり、小節の持つ音楽的意味に注目した小節のパターン化により単旋律を分析する方法を提案した。そして、著者はこの方法により賛美歌の持つ音楽的特徴を分析し検討した。さらに、パターン解析の応用例として、分析された賛美歌の音楽的特徴を用いた実験音楽を作曲した。

2. 小節のパターン化解析

2.1 複数小節で構成された単旋律

音楽が拍子を持つ場合、通常小節は拍子に同期して設定される。この場合、一つの小節は強拍で始まり次の強拍の直前で終わることになる。一方、和声進行による作曲法の場合、小節第一音目を和声の基準に設定する場合が多く、音高の設定にも小節の構造が大きく影響している。したがって、単旋律における小節の構造には音価と音高の両方を決定する要素が含まれていると考えられ、本論文では小節をパターン化して単旋律楽曲を分析する方法を提案する。小節パターンによる楽曲分析は従来のヒューリスティックな要素を含むリズム型分類による方法よりも計算機による自動的な分析に適している。

複数の小節から構成されている単旋律に含まれる楽譜情報 N は小節 b^{μ} の集合として表現される。

$$N = \{b^{\mu_i}\} \quad \text{where } i \in N \quad (1)$$

この N は単旋律を構成する小節空間と考えられる。 N の推移閉包 N^* は楽譜記号の順序列を示し、 N^* の部分集合 $M \subset N^*$ の中で音楽的に意味を持つものを曲とする。 M は一曲の小節列を示し、単旋律は小節 b_j の順序列によって表現される。ただし、 n は 1 曲に含まれる小節数とする。

$$M = (b^{\mu_1}, b^{\mu_2}, \dots, b^{\mu_i}, \dots, b^{\mu_n}) \quad \text{where } i = \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (2)$$

つまり、複数の小節から構成されている単旋律の作曲とは、 N から M への写像と考えることができる。この写像を式(3)のように f とすると、作曲者の作曲行為は写像 f を具体化した行為であると考えられる。

$$f: N \rightarrow M \quad (3)$$

言語の場合、アルファベットの集合から言語への写像は文法という形で固定されたものなる。しかし、楽曲の場合、言語における文法に相当する写像 f は作曲者自身の解釈によって変動する。つまり、良い音楽の基準となる作曲写像 f は作曲者の作曲時点における基準によって決まり、作曲者によっても、あるいは同一の作曲者であっても時が違えば基準が異なると考えられる。

2.2 パターン化

小節 b_j は無音情報(休符)を含む音符情報および#, b などの音程を示す記号を示す音高情報の集合 P と音価情報示す集合 T のデジタル像として式(4)のように表現される。

$$b^{\mu_i} = \left[[p^{\mu_i}_j, t^{\mu_i}_j] \mid p \in P \wedge t \in T \right] \quad \text{where } j = \{1, 2, 3, \dots, n^{\mu_i}\} \quad (4)$$

ここで $[p^{\mu_i}_k, t^{\mu_i}_k]$ は音高と音価の対、 i は曲の中での順序づけられた小節番号を示し、 n^{μ_i} は i 番目の小節に含まれる音符数とする。

通常、小節の長さ(音価の合計)は頻繁に変化しないため、式(5)の関係が成立する。

$$\sum_{j=1}^{n^{\mu_i}} t^{\mu_i}_j \approx \text{const} \quad (5)$$

パターン比較のため、上の関係を利用し、1つの音符を一定音価 δ_t の連続と考え、小節を一定音価の音高音価対の連続した並びに変換する。

$$\left[p^{\mu_i}_j, t^{\mu_i}_j \right] = \left[p^{\mu_i}_j, \delta_t \right] \frac{t^{\mu_i}_j}{\delta_t} \quad (6)$$

さらに、旋律を移調しても同じ旋律として知覚される⁽¹³⁾ことが知られており、主音(tonica)の影響を排除したパターン化のため、音高を小節の最初の音高からの相対音高で表現することとした。音高は半音の幅を 1 とし、半音音高が上がる毎に 1 増加する自然数で表現されるものとし、 $p^{\mu_i}_1$ は小節 b^{μ_i} の最初の音高とする。小節の最初の音高からの音程 $q^{\mu_i}_k$ を式(7)のように求めると、小節パターン m^{μ_i} は式(8)のように表現される。ただし、音価に関して式(9)のような関係が成立するものとする。

$$q^{\mu_i}_k = p^{\mu_i}_k - p^{\mu_i}_1 \quad (7)$$

$$m^{\mu_i} = \left(\left[q^{\mu_i}_k, \delta_t \right] \mid k \in \{1, 2, \dots, \lambda\} \right) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{n^{\mu_i}} t^{\mu_i}_j \approx \text{const} = \delta_t \cdot \lambda \quad (9)$$

この変換は音高・音価の順列として表現される各小節を等間隔音価で標本化することに相当する。この標本間隔に相当する δ_t を単位音価とすると、式(8)の δ_t を省略することができ、小節パターンは

λ 次元のベクトルとして式(10)のように表現できる。

$$\mathbf{m}^{\mu_i} = (q^{\mu_i 1}, q^{\mu_i 2}, \dots, q^{\mu_i \lambda}) \quad (10)$$

通常の楽譜の最小音価が 64 分音符の音価であるため、64 分音符に相当する音価を δ_i とした。また、1 曲中は F が変動しないものとしてパターン化し、4/4 拍子の小節のみを取り扱ったため、 $\lambda = 64$ となる。一方、休符情報は Brooks⁽¹⁴⁾らが賛美歌に対して、休符を小節の冒頭にあるもの以外は前の音符の延長として分析・調査していることから、本研究でも前音高の継続として取り扱った。

3. 讚美歌における小節パターンの性質

3.1 小節パターンの出現頻度

賛美歌 553 曲の中、4 拍子が 4 小節以上存在する曲 345 曲を調査対象とし、小節をパターン化した。各小節パターンの出現順位と出現確率を求め、両対数軸上のグラフにプロットした(Fig.1)。その結果、両対数軸上でのパターンの出現順位と出現確率の間に直線的な関係のあることが認められた。直線の傾きは-0.91で相関係数が 0.97であった。このことから、小節パターンの出現頻度にもジップの法則⁽¹⁵⁾が成立していること確認された。ジップの法則は言語における単語出現数に代表される経験的に知られた法則であり、小節パターンの出現頻度は言語における単語の出現頻度と似た特徴を持っていると考えられる。

出現確率が 1%以上であるパターンは上位 10 種類である。特に上位 3 種類の出現頻度が高く、上位 3 種類で 24.4%を占める。しかし、順位が下がっても極端に出現確率は低下せず、出現確率が 0.1%を下回るのは 146 位のパターン以降となっている。音程の出現確率は、上位 10 種類で 99.3%を占めており、小節パターンは音程よりも規則性の小さいことが分かった。

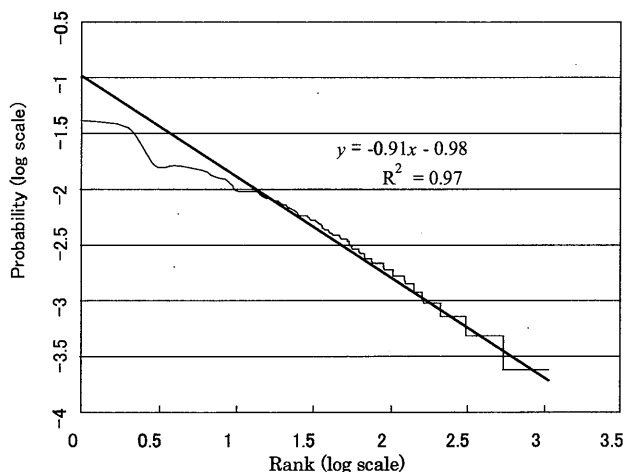


Fig.1 小節パターンの出現頻度

3.2 小節パターンのエントロピー

実際の讃美歌の電子楽譜データを前章で示した小節パターンに変換し、小節パターン出現頻度を求めた。この出現頻度からエントロピーを計算した結果、総パターン数は 1111 となり、エントロピーは 7.85 [bit] となった。総パターン数が 1111 パターンであるため、最大エントロピーは 10.1[bit] であるため、冗長度は 22.4% となる。賛美歌における主音からの音程の冗長度は 32.2% であり、フランス民謡の音高の冗長度⁽¹⁶⁾も同程度の冗長度であるため、小節パターンは音高と同程度の冗長度を持っている。

和声の冗長度は音高よりも低いことが報告されている⁽²⁾。単旋律の場合、和音を調べることはできないが、小節の始めの音が伴奏を付加した場合の和音を決定していると仮定して、賛美歌の小節開始音の冗長度を計算した。計算の結果、小節開始音高の冗長度は 33.6% となり、音程の冗長度より大きくなることが確認された。これは、和声の冗長度が音高の冗長度よりも大きくなることと同様の理由によると考えられる。また、和声の情報量が少ないということは和声進行に基づく作曲方法の妥当性を示しており、著者は和声進行に似た性質を示す小節開始音の並びを統計的手法により作成する作曲法が有効であると考えた。

3.3 パターン間距離と類似度

パターン化された小節は n 次元のベクトルとして表現される。小節間の距離を n 次元のベクトルのユークリッド距離とし、小節間距離を求めた。

小節ベクトルの演算では、次の式を満たすようなスカラー ξ が存在し、線形性は明らかであるため、内積が式(11)のように定義できる。

$$\xi = \mathbf{m}^\alpha \cdot \mathbf{m}^\beta \tag{11}$$

内積の定義が定義されると、ノルムは式(12)のようにして計算することができる。内積とノルムからベクトル間の距離が式(12)のように定義できる。

$$\|\mathbf{m}^\alpha\| = \mathbf{m}^\alpha \cdot \mathbf{m}^\alpha \quad \text{for } \forall \alpha \tag{12}$$

$$d(\mathbf{m}^\alpha, \mathbf{m}^\beta) = \|\mathbf{m}^\alpha\|^2 + \|\mathbf{m}^\beta\|^2 - \mathbf{m}^\alpha \cdot \mathbf{m}^\beta - \mathbf{m}^\alpha \cdot \mathbf{m}^\beta \tag{13}$$

ただし、小節パターンは実数ベクトルであるため、小節間の距離は式(14)のように計算できる。

$$d(\mathbf{m}^\alpha, \mathbf{m}^\beta) = \|\mathbf{m}^\alpha\|^2 + \|\mathbf{m}^\beta\|^2 - 2(\mathbf{m}^\alpha \cdot \mathbf{m}^\beta) \tag{14}$$

また、類似度(コサイン)は式(15)のように求めることができる。

$$s(\mathbf{m}^\alpha, \mathbf{m}^\beta) = \frac{|\mathbf{m}^\alpha \cdot \mathbf{m}^\beta|}{\|\mathbf{m}^\alpha\| \|\mathbf{m}^\beta\|} \tag{15}$$

内積として次の式(16)を用い、小節間の距離を定義した。この場合距離はユークリッド距離となる。

$$\mathbf{m}^\alpha \cdot \mathbf{m}^\beta = q^{\alpha_1} \cdot q^{\beta_1} + q^{\alpha_2} \cdot q^{\beta_2} + \dots + q^{\alpha_\lambda} \cdot q^{\beta_\lambda} \tag{16}$$

隣接する小節間の距離を上式により計算した結果、距離のヒストグラムは階級値 15 が最も頻度の高い (Fig.2)。また、この時の類似度(コサイン)は階級値 0.8 が最も多く、次いで 1 が多いヒストグラムとなった(Fig.3)。隣接する小節の類似度が 1 であるということは、同じ小節パターンが連続しているということを示しているため、同じ小節パターンから同じ小節パターンへの変化が 2 番目に多いことである。しかし、同じ小節パターンの連続では曲として成立しないため、類似度 0.8 程度の小節が連続することによって、曲が成立していると考えられる。類似度 0.5 以上の小節の連続は全体の 68.1% であり、讚美歌は小節パターンの類似度の高い小節の連続で構成されていることが確認された。

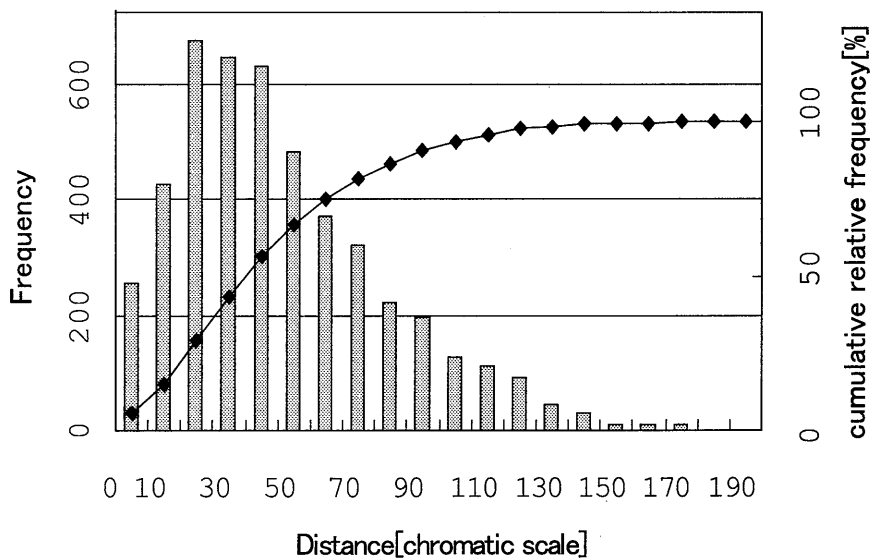


Fig. 2 隣接小節間のユークリッド距離

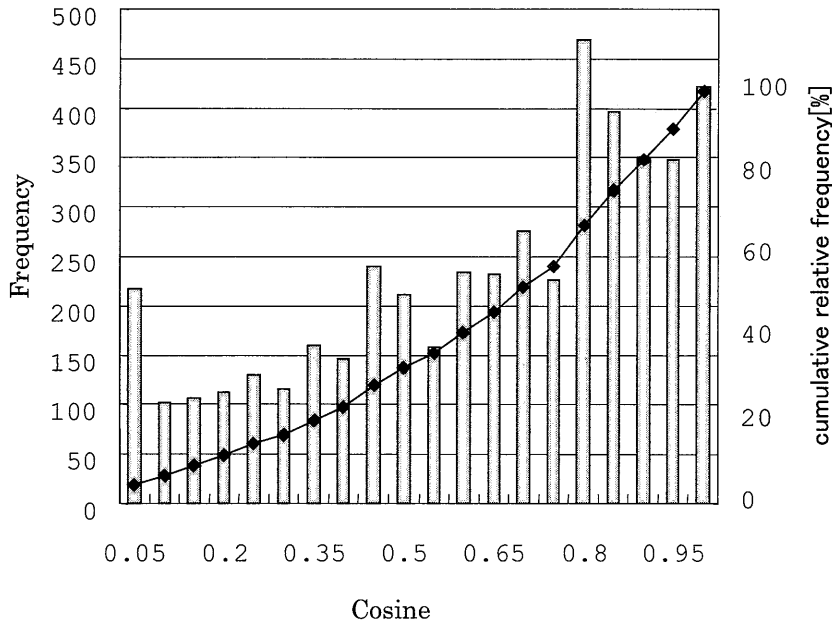


Fig.3 隣接小節間の類似度(コサイン)

3.4 楽節構造の検出

通常の楽曲には楽式が存在し、楽節に分解可能であると考えられる。賛美歌においても楽節が存在すると思われるため、本論文では小節パターンからの楽節の検出を試みた。

n 小節の曲は式(17)のように小節パターンの順列で表現できる。

$$\mathbf{M}_i = (\mathbf{m}^{\mu_1}, \mathbf{m}^{\mu_2}, \dots, \mathbf{m}^{\mu_i}, \dots, \mathbf{m}^{\mu_n}) \quad \text{while } i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (17)$$

いま、 \mathbf{m}^{μ_x} の出現確率を $p(\mathbf{m}^{\mu_x})$ とすると、1つの曲に対する小節パターンの出現確率の順序列が式(18)の P_i のように定義できる。

$$P_i = (p(\mathbf{m}^{\mu_1}), p(\mathbf{m}^{\mu_2}), \dots, p(\mathbf{m}^{\mu_i}), \dots, p(\mathbf{m}^{\mu_n})) \quad \text{while } i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (18)$$

本論文では P_i の自己相関関数を式(19)のように計算し、楽節を分析した。

$$r_t = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P_{k+t} \cdot P_k \quad \text{while } t \in \{0, 1, \dots, n-1\} \quad (19)$$

ただし、楽曲は有限長であるため、式(20)のようにパターンは巡回するとした。

$$k+t = \begin{cases} k+t & \text{while } k+t \leq n \\ \{(k+t-1) \bmod n\} + 1 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (20)$$

$t=0$ の時、自己相関関数は最大値 r_0 となる。2 番目に大きな自己相関関数の値を r_1 とすると、式 (21) のような関係が成立する。

$$r_0 > r_1 \geq r_x \quad x \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (21)$$

この l を対象とした賛美歌全てについて計算した。その結果、 l の出現頻度は $l=4, l=8$ にピークを持ったヒストグラムとなった (Fig.4)。この結果から、賛美歌においては 4 小節もしくは 8 小節毎に類似性を持った小節構造となっている曲が多く存在することが分かる。つまり、賛美歌は 4 小節あるいは 8 小節の楽節により構成されている場合が多いと考えられる。

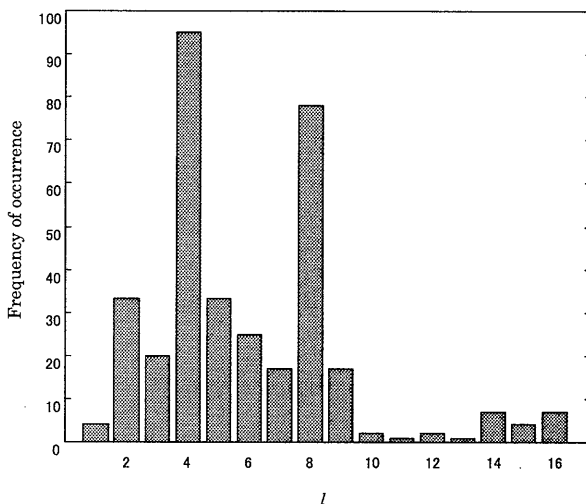


Fig.4 自己相関関数第 2 ピークの出現頻度

4. 実験楽曲の生成

4.1 実験楽曲作成の概要

賛美歌の小節パターン分析の応用例として、著者は実験楽曲の生成を試みた。作曲はモンテカルロ法による音符列の生成と、その評価の 2 段階に分かれている。

作曲の第 1 段階は統計情報に基づいたモンテカルロ法により小節開始音の順序列を生成することから始まる。次に、モンテカルロ法により小節開始音対応する小節パターンを割り当て、主音からの音程を音高とした音符列を生成する。最後に音符列に主音の情報を付加し調性を決定する。第 1 段階ではこれらの操作を繰り返し、 10^6 個の音符列を生成した。

第 2 段階は生成された音符列から、賛美歌の特徴に合致した曲を自動評価により選別した。本論文では、楽曲の最終音である終止音の特徴と、小節パターン間距離、小節間の類似度により楽曲を評価した。

4.2 小節開始音の音程の生成

4.2.1 音程の遷移確率

主音からの音程は半音上がるごとに1大きくなるとし、小節開始音が主音から音程 i 半音離れている場合の状態を S_i と表現する。ここで、 i は自然数である。

$N(S_o|S_i)$ を状態 S_i から状態 S_o に変化した個数とすると、状態 S_i から状態 S_o へ遷移確率は遷移確率は式(22)のように求められる。ただし、調査した曲中に含まれている主音からの音程の最小値を m 、最大値を M とする。

$$P(S_o|S_i) = \frac{N(S_o|S_i)}{\sum_{k=m}^M N(S_k|S_i)} \quad (22)$$

4.2.2 小節開始音列の発生

式(23)で求められた小節開始音の音程の遷移確率を用いて、モンテカルロ法により小節開始音列を生成する。状態 S_o から遷移する確率の合計は $\sum_{k=m}^M P(S_k|S_o) = 1$ となるため、 $0 \leq r < 1$ である任意の数 r を考え、式(23)を満たす最小の v を考える。 v は $m \leq v \leq M$ である。

$$\sum_{k=m+1}^v P(S_{k+1}|S_i) > r \quad (23)$$

ここで、 r を $0 \leq r < 1$ の範囲で一様に発生する乱数とすると、 v は小節開始音の遷移確率で重み付けされた整数乱数となる。賛美歌 552 曲中 426 曲の先頭の音が主音であった。このことから、小節開始音列の先頭は S_0 、すなわち $v_1 = 0$ とした。また、調査対象の賛美歌(4拍子の曲)における小節数は16小節の曲が最も多いため、生成する小節数は16小節と設定した。これらの操作により、小節開始音の順序列 ϕ が決定される。

$$\phi = (S_{v_1}, S_{v_2}, \dots, S_{v_n}) \quad (24)$$

4.3 小節パターンの割り当て

4.3.1 小節開始音ごとの小節パターン発生確率

小節の総パターン数を P_M とし、小節開始音 S_v の時に小節パターン \mathbf{m}^ξ が生成される頻度を $N(\mathbf{m}^\xi|S_v)$ と表記すると、小節開始音ごとの小節パターンの事後確率は式(25)のようになる。

$$P(\mathbf{m}^{\xi} | S_v) = \frac{N(\mathbf{m}^{\xi} | S_v)}{\sum_{k=1}^{P_M} N(\mathbf{m}^{\xi} | S_v)} \quad (25)$$

4.3.2 割り当て

小節開始音と同様に乱数により割り当てる小節パターンをモンテカルロ法により決定する。

$0 \leq r < 1$ の範囲で一様に発生する乱数 r と式(26)を満たす最小の ξ_v により、小節パターン \mathbf{m}^{ξ_v} を先頭音が S_v の小節に割り当てる。

$$\sum_{i=k}^{\xi_v} P(\mathbf{m}^{\xi_v} | S_v) > r \quad v \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (26)$$

小節パターンには、小節開始音からの音高差と音価情報が含まれているので、小節開始音列 ϕ に $\mu_v = \xi_v$ のように小節パターンを割り当てることにより、主音からの音程を音高とした相対音符列 Φ が式(27)のように生成される。

$$\Phi = (\mathbf{m}^{\mu_1}, \mathbf{m}^{\mu_2}, \dots, \mathbf{m}^{\mu_n}) \quad (27)$$

この相対音符列 Φ には主音からの音程のみが含まれており、調性は決定されていない。

4.4 調性

賛美歌 552 曲の楽譜より調性を判定した結果、二長調の曲が 111 曲と最も多かったため、主音を D と考え、楽曲を生成した。小節パターンの順序列を式(28)とする。二長調の主音を決定するための定数が d であるとする、音高情報の付加された小節パターンベクトル \mathbf{b}^{μ_i} は式(29)を用いて式(30)のように表現される。

$$\mathbf{m}^{\mu_i} = (q^{\mu_i 1}, q^{\mu_i 2}, \dots, q^{\mu_i \lambda}) \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (28)$$

$$p^{\mu_i k} = \begin{cases} q^{\mu_i k} + S_0 + d & \text{while } i=1 \\ q^{\mu_i k} + S_{v_i} + d & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (29)$$

$$\mathbf{b}^{\mu_i} = (p^{\mu_i 1}, p^{\mu_i 2}, \dots, p^{\mu_i \lambda}) \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (30)$$

この音高情報の付加された小節パターンベクトルに音価情報を付加して小節 b^{μ_i} を生成し、調性の決定された楽曲 M を構成する。

$$M = (b^{\mu_i}) \quad \text{where } i = \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (31)$$

4.5 楽曲の生成

小節開始音並びと小節パターンを生成するモンテカルロ法に使用する乱数の種を変化させ 10^6 曲を生成した。作曲された曲の集合を \mathbf{M} とする。

$$\mathbf{M} = \{M_i\} \quad \text{where } i \in \{1, 2, 3, \dots, 10^6\} \quad (32)$$

4.5 実験楽曲の自動評価

4.5.1 終止音による曲の評価

乱数により音高を決定しているため、必ずしも曲の最終音が主音とならない場合や、主音であっても4分音符以下の短い音符であったりして曲の終止感が無い。この問題の解決のため、終止音が乱数で発生した曲の中で終止音が主音であり、2分音符以上である曲の集合 \mathbf{M}_a を生成した。

$$f_1: \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{M}_a \quad (33)$$

4.5.2 主音からの音程分布による曲の評価

長音階は主音の階名がドであり、主音からの音程が $P1, M2, M3, P4, P5, M6, M7$ の音程の音で構成されている(P は完全音程、 M は長音程、数字は度数を示す)。一方、自然短音階の場合は主音の階名がラとなり、主音からの音程が $P0, M2, m3, P4, P5, m6, m7$ の音程で構成されている(m は単音程を示す)。したがって、主音から3度6度7度の音程に含まれる長音程と短音程の頻度の比を求めることにより、長調らしい曲であるか短調らしい曲であるかを判定することができる。本論文では長調曲の作曲を目標としたため、式(34)の γ が0.01未満の曲を選別し、集合 \mathbf{M}_a から集合 \mathbf{M}_b を生成した。

$$\gamma = \frac{n_{m3} + n_{m6} + n_{m7}}{(n_{M3} + n_{m3})(n_{M6} + n_{m6})(n_{M7} + n_{m7})} \quad (34)$$

ただし、 n_{m3} は最終音から長3度の音程にあたる音高を持つ1曲中に含まれる音符数であり、他の副え字も同様にその副え字の示す音程の出現数である。

$$f_2: \mathbf{M}_a \rightarrow \mathbf{M}_b \quad (35)$$

4.5.3 小節間類似度による曲の評価

小節間の類似度は0.8が最も多い。また、類似度が大きくなると短調な曲となり、小さくなると曲として成立していないことになる。今回の自動作曲では小節間の類似度の平均値が0.79より大きい曲のみを選別し集合 \mathbf{M}_c を生成した。

$$f_3: \mathbf{M}_b \rightarrow \mathbf{M}_c \quad (36)$$

4.5.3 小節パターン出現頻度自己相関関数による曲の評価

調査結果から、小節パターンの出現頻度の自己相関関数 r_t はその第2のピークを4小節と8小節に持つ曲が多い。本論文では自己相関関数 r_t の第2ピークが $t=4$ 、第3ピークが $t=8$ 、第3ピークが $t<4$ となるような曲を選別し、集合 M_d を生成した。

$$f_4: M_c \rightarrow M_d \tag{37}$$

曲生成実験の結果、集合 M_d には4曲の16小節単旋律を得ることができた。

4.6 聴覚評価

4.6.1 音響信号の生成

実験によって自動生成された曲を人に評価させるため、 M_d に含まれる曲を音響信号に変換した。音響信号への変換にはパーソナルコンピュータ用OSに搭載されているシンセサイザのピアノ音を利用した。音響信号への変換には、自動作曲された曲の再生速度を決定する必要がある。本論文では、自動作曲された曲の再生速度として、賛美歌553曲中に含まれる4拍子の曲の楽譜に記されたM.M値の平均値を用いた。M.M値の平均値は91.4となったため、音響信号変換時はM.M=91の再生速度を用いた。

評価対象曲は集合 M_d に含まれる2曲(Fig.4 曲A, Fig.5 曲B)と賛美歌18番、音高出現頻度を基に乱数により発生させた曲(曲C)の4曲とした。

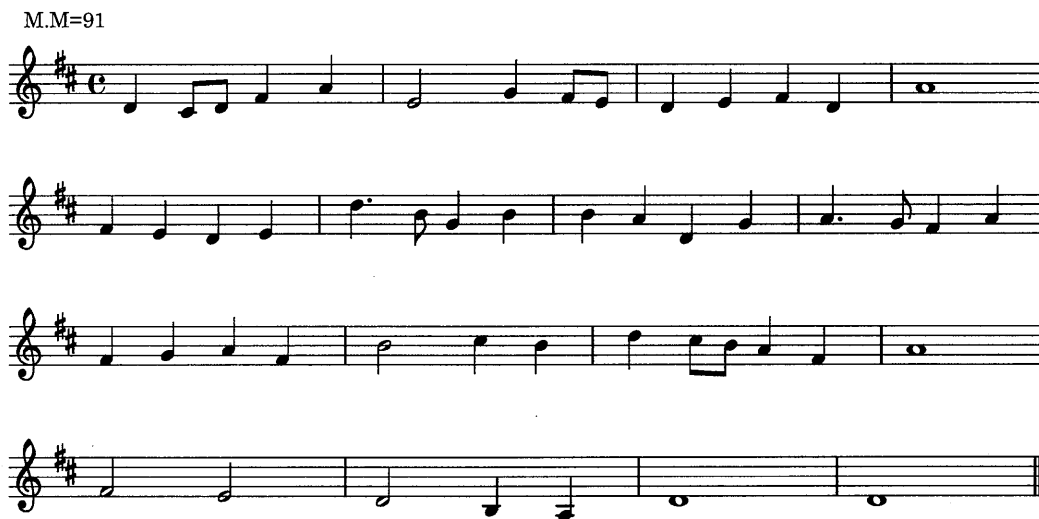


Fig.4 曲A



Fig.5 曲 B

4.6.2 AHP 評価

聴覚評価には AHP (Analytic Hierarchy Process) を用いた。AHP は人の主観判断による評価を数値化する方法として広く用いられている。本論文では被験者に楽曲の音響信号を聴取させ、被験者に評価シートを記入させることにより楽曲を評価した。

被験者は 19 歳から 28 歳までの男性 13 名 (22.9 ± 2.82 歳) であり、特別な音楽教育を受けていない。AHP に用いる評価指標は予備実験によって整合度が十分に低くなる評価項目を検討した結果決定した。評価項目は「メロディ」、「雰囲気」、「退屈しないか」、「自分の好みか」の 4 種類であり、AHP の総合評価にはこの 4 種類の 1 対比較と、各曲毎の 4 項目の 1 対比較を用いた。各評価値は 7 値とした。総合得点には評価項目で重み付けされた各曲一対比較のウェイトの合計を採用した。

4.6.2 評価結果

AHP による総合評価値の全被験者における平均値は小節パターンを用いた作曲による曲 2 曲 (曲 A, 曲 B) が上位となり、次に賛美歌 18 番、最も低い評価を受けたのが乱数を基に発生させた曲 (曲 C) となった (Fig.6)。

聴覚評価によって小節パターンにより作曲された曲が実際の賛美歌よりも高い評価を受け、十分楽曲として成立していることが確認された。このことは、小節パターンを用いた音符列の発生と写像 f_1, f_2, f_3, f_4 の合成写像 f_a は式(3)の作曲写像 f に近い意味を持つことを示していると考えられる。

$$f_a = f_1 \circ f_2 \circ f_3 \circ f_4 \quad (38)$$

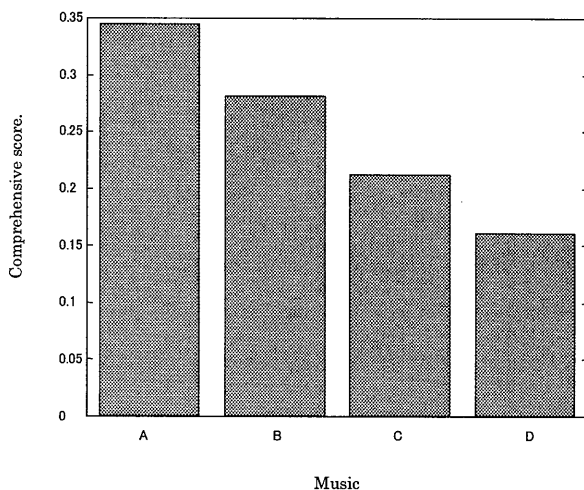


Fig.6 AHP により求めた総合評価値

5. まとめ

本論文では讃美歌単旋律を小節単位でパターン化し、その傾向について検討した。讃美歌 553 曲に含まれる 4 拍子の曲についてパターン化した小節を調査したところ、パターンの出現頻度はジップの法則に従うことが判明した。また、隣接する小節のパターンを比較した場合、パターン間の距離は 15 半音の分布が最も多くなり、パターンの類似度は 0.8 が最も出現頻度が高かった。楽曲を小節パターンの出現頻度の順序列で表現し、その自己相関関数から小節パターンの連続構造を調査した。その結果、讃美歌には 4 小節毎と 8 小節毎に相関性の強い構造のあることが確認され、楽節と考えられる構造が自己相関関数によって検出できることが確認された。

得られた統計情報を基に計算機を用いて実験楽曲を作成し、聴覚評価により楽曲として成立しているかを AHP により判定した。その結果、十分楽曲として成立しており、小節パターンを用いた方法による自動作曲の妥当性を示すことができた。

讃美歌には古くから知られている曲も多く含まれ、音楽の特徴を調査するための標準的な題材として適していると考えられるため、本論文では調査対象を讃美歌とした。しかし、本論文で用いた小節パターン化法は讃美歌以外のジャンルの曲にも有効であり、旋律の分析には効果を発揮するものと考えられる。

<参考文献>

- (1) Tatsuo Kamitani, Minoru Matsuda, "Key Characteristics of Hymns", *Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics*, Vol.11, No.5, pp. 464-468 (2007)
- (2) 梅本 堯夫, 音楽心理学, 誠信書房, pp.396-397 (1966)
- (3) W.J. Dowling, "Scale and Contour – two components of theory of memory for melodies", *Psychological Reviews*, 85-4, pp.341-354 (1978).
- (4) Youngmoo Kim, Wei Chai, Ricardo Garcia, Barry Vecroe, "Analysis of a Countour-based Representation for Melody", *Intn'l Symp. On Music Information Retrieval*, (2000).
- (5) A.L.Uitdenbogerd et al.: "Matching Techniques for Large Music Databases", *ACM Multimedia Conf.*, (1999)
- (6) C.L. Krumhansi and E.J. Kessler, "Tracing the dynamic changes in perceived tonal organization in a spatial representation of music keys", *Psychol. Rev.* 89, 334-368 (1982)
- (7) C.L. Krumhansi, "Cognitive Foundateion of Musical Pitch", (Oxford Press, 1990), p78
- (8) Kouichi Akiyama, Minoru Matsuda, Minoru Nakano, "The discrimination of tonality in Japanese popular songs-Feature vector and the entropy of pitch transition-", *The Journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol.44, No.11, 1988, pp.809-814.
- (9) Minoru Matsuda, Kouichi Akiyama, "Tonality discrimination and tonic identification from melodic motion of monodies", *The Journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol.52, No.4, 1996, pp.253-260.
- (10) 梅本 堯夫, 音楽心理学, 誠信書房, pp.401-408 (1966)
- (11) Darrell Conklin and Ian H. Witten, "Multiple Viewpoint Systems for Music Prediction", *Journal of New music Resarch*, Vol. 24, pp.51-73 (1995).
- (12) Sunjung Kim and Elisabeth Andre, "Composing Affective Music with a Generate and Sense Approach", *AAAI Press, Proceedings of Flairs 2004*
- (13) 梅本 堯夫, 音楽心理学, 誠信書房, pp94-95 (1966)
- (14) Brooks, Jr., F.P., A.L. Hopkins, Jr., P.G. Neumann, and W.V. Wright. "An Experiment in Musical Composition." *IRE Transactions on Computers*, EC-6, pp.175-182 (1957).
- (15) 横川 壽彦, ジップの法則(Zipf's Law), *日本知能情報フエジィ学会誌*, Vol.14, No.6, p. 604 (2002)
- (16) 梅本 堯夫, 音楽心理学, 誠信書房, pp.398-399 (1966)