

平成 23 年度 卒業論文

# 確率推論を用いた四声体和声の自動生成

指導教員 北原鉄朗専任講師

日本大学文理学部情報システム解析学科

鈴木峻平, 竹内俊雄, 佐藤桂亮

2012 年 2 月 提出

# 概 要

現代社会において、以前と比べ作曲ソフトウェアの充実や動画投稿サイトの繁栄によりとても親しみやすいものになっている。最近話題の VOCALOID などが例として上げられる。これらのソフトウェアにより作曲に対しての興味や感心が深まり作曲する機会が増えた。しかし、誰でも完璧な作曲はできるものではない。作曲ルールは複雑であり、そのルールに従い作曲することは素人には難しいからである。作曲を行う上での一つの専門知識として和声学がある。和声学の一つの学習法として、四声体和声は音楽大学でも広く扱われている。本研究では四声体和声を自動で生成するシステムを構築する。四声体和声の課題として、音楽的同時性と音楽的連続性の両立が挙げられる。本研究では、各事象の因果関係を条件付確率で表す確率推論モデルであるベイジアンネットワークを用いて行う手法を提案する。条件付確率表の成作法として、和声学から参考に作成したルールベース型と、既存の音楽データから情報を収集した事例ベース型の2種類の手法を試行する。その結果、両者の方法におけるメリットとデメリットが明らかになった。



# 目 次

目 次	iii
-----	-----

図 目 次	vii
-------	-----

第 1 章 序 論	1
1.1 本研究の背景 . . . . .	1
1.2 本研究の目的 . . . . .	2
1.3 本論文の構成 . . . . .	2
第 2 章 計算機による和声生成	3
2.1 和声学 . . . . .	3
2.1.1 和声学とは . . . . .	3
2.1.2 四声体和声 . . . . .	3
2.1.3 禁則 . . . . .	4
2.2 計算機による和声生成の代表的アプローチ . . . . .	5
2.2.1 禁則を用いたルールベースのアプローチ . . . . .	5
2.2.2 確率モデルに基づくアプローチ . . . . .	5
2.2.3 その他の手法でのアプローチ . . . . .	6
2.3 和声生成における課題 . . . . .	6
2.4 本研究についてのアプローチ . . . . .	7
2.4.1 ルールベース型 . . . . .	7

2.4.2	事例ベース	7
<b>第3章</b>	<b>システム構成</b>	<b>9</b>
3.1	処理の概要	9
3.2	ベイジアンネットワークのモデル	9
3.2.1	ルールベース型	11
3.2.2	事例ベース型の確率設定方法	13
<b>第4章</b>	<b>評価実験</b>	<b>15</b>
4.1	実験方法	15
4.2	ルールベースの結果	16
4.2.1	喜びの歌	16
4.2.2	グリーングリーン	16
4.2.3	大きな栗の木の下で	17
4.2.4	ちょうちょ	18
4.2.5	チューリップ	18
4.2.6	夕やけ	19
4.3	八長調以外を用いた場合	20
4.3.1	さくら	20
4.4	ルールベース型の結果全体の考察	20
4.5	事例ベース型の結果	21
4.5.1	喜びの歌 (1 オクターブ下)	21
4.5.2	ちょうちょ (1 オクターブ下)	21
4.5.3	夕やけ (1 オクターブ下)	22
4.5.4	大きな栗の木の下で (1 オクターブ下)	23
4.5.5	チューリップ (1 オクターブ下)	23
4.5.6	グリーングリーンとさくら	23

4.6	事例ベース型の実験の確認 . . . . .	24
4.6.1	喜びの歌 . . . . .	24
4.6.2	ちょうちょ . . . . .	25
4.6.3	夕やけ . . . . .	26
4.6.4	大きな栗の木の下で . . . . .	26
4.6.5	チューリップ . . . . .	27
4.7	事例ベース型の結果全体の考察 . . . . .	28
4.8	結果から得られたルールベース型と事例ベース型の特徴とその比較	28
4.8.1	ルールベース型 . . . . .	28
4.8.2	事例ベース型 . . . . .	29
第5章 結 論		31
参考文献		33



# 目 次

3.1	ベイジアンネットワーク	10
4.1	喜びの歌の楽譜	16
4.2	グリーングリーン of 楽譜	17
4.3	大きな栗の木の下での楽譜	17
4.4	ちょうちょの楽譜	18
4.5	チューリップの楽譜	19
4.6	夕やけの楽譜	19
4.7	さくらの楽譜	20
4.8	喜びの歌 (1 オクターブ下) の楽譜	21
4.9	ちょうちょ (1 オクターブ下) の楽譜	22
4.10	夕やけ (1 オクターブ下) の楽譜	22
4.11	大きな栗の木の下で (1 オクターブ下) の楽譜	23
4.12	チューリップ (1 オクターブ下) の楽譜	24
4.13	喜びの歌の楽譜	25
4.14	ちょうちょの楽譜	25
4.15	夕やけの楽譜	26
4.16	大きな栗の木の下での楽譜	27
4.17	チューリップの楽譜	27





# 第1章 序 論

本章では、本研究の背景、目的について述べ、本論文の構成を記す。

## 1.1 本研究の背景

現代社会において、作曲はとても親しみやすいものになっている。様々なソフトを使い、動画投稿サイトには毎日のようにオリジナルの曲がアップロードされ、多くの人が作曲に感心を持っている。しかし、作曲は簡単にできるものではない。その作曲をするための専門知識の一つに和声がある。和声の一形態として四声体和声がある。四声体和声とは、和声学において、ソプラノ・アルト・テノール・バスの4つの声部から構成される最も基本的な形態の1つである。一般的には、合唱などでよく使われている。バッハのコラールや弦楽四重奏など、様々な場面でこの形態が登場する。そのため四声体和声は、音楽大学での課題としても扱われている。特に、ソプラノ声部が与えられて残りの声部を付与するソプラノ課題と、バス声部が与えられて残りの声部を付与するバス課題は、その問題設定の明確さから、和声学の演習問題としてよく用いられる。このルールが他のジャンルと比べ禁則などのルールが定義されており、和声学における知見が豊富であるので扱いやすい。

## 1.2 本研究の目的

本研究では、「ソプラノ課題」を計算機で自動的に解く手法について検討する。四声体和声を計算機で生成するタスクを扱った研究として、すでにいくつかの研究が行われている。深山らは、隠れマルコフモデルを利用したコードネームからの四声体和声生成の手法を提案した [2]。三浦らは、和声学の禁則を実装し、許容解を列挙するシステムを実現した [3]。Allan らも隠れマルコフモデルを利用しているが、詳細な定式化は異なっている [10]。Phon-Amnuaisuk らは、遺伝的アルゴリズムと彼らが設定したルールベースでのシステムとで四声体和声の生成結果を比較した [9]。本研究ではベイジアンネットを用いて四声体和声を生成する手法を提案する。

## 1.3 本論文の構成

本論文は次の構成からなる。第2節では、和声学について説明し、それを用いた研究の例を述べ、本研究の課題や方針を記している。第3節では、ルールベースと事例ベース、2つのシステムの概要について説明し、ルール設定の方法、具体的な設定値について述べる。第4章では、両実験の評価実験の考察を行う。第5章では本研究の結論、また今後の研究について述べる。

## 第2章 計算機による和声生成

この章では和声学について説明し、どのようなルールがあり、それに基づきどのような研究がされてきたかを述べる。

### 2.1 和声学

#### 2.1.1 和声学とは

和声学は、「対位法」と共に、確立された音楽理論であり、対位法が任意の声部に含まれる音の接続関係を重視した理論であるのに対して、和声学は声部間で発生する「響き」を重視した学問である。対位法とは作曲技法の一つで、「2声部以上の旋律がそれぞれの美しさを保ちながら同時に鳴り響いてもバランスがとれている」という状態を作り出す技術を指す。対位法の技術を駆使した曲にはバッハが確立した「Fuga」という形式がある。対位法は「横の芸術技法」と呼ばれ、和声学は「縦の芸術技法」と呼ばれることもある。現在、日本の音楽大学では作曲を専攻する学生をはじめとして、多くの音楽大学学生が学んでいる。

#### 2.1.2 四声体和声

四声体和声の課題形式として、音楽大学ではバス課題とソプラノ課題が用いられている。

バス課題とは、与えられたバスパートに対して、禁則とよばれる多数のルールのどれにも違反しないようにして、テノール、アルト、ソプラノの上3声を配置す

るのが「バス課題」である。与えられたバス課題に対する回答は、禁則とよばれる和声学で規定される規則に違反さえしなければ正解とみなされる。すなわち正解（許容解）は一般には非常に多く存在する。

ソプラノ課題とは、与えられたソプラノパートに対してバス、テノール、アルトの下3声を配置するものである。実際の教育現場では、学習者はまずバス課題の回答作成能力の養成が求められる。バス課題にの回答作成を通して、調性音楽に関する基礎理論を規則の形で習得する。これに対して、ソプラノ課題はバス課題の応用問題的な位置づけであり、通常はバス課題の回答を作成できるレベルにまで達した学習者に対して課されるものである。また、バス課題ではソプラノパートが音楽的な動きをするように求められるが、ソプラノ課題ではソプラノパートが問題をして与えられているので、バスパートが音楽的な流れを構成するように求められることが多い。

### 2.1.3 禁則

和声学では、声部の進行に対する制約条件として「禁則」と呼ばれる規則群が規定されている。禁則は、和声学が成立した時代の音楽作品に共通に含まれる特徴を規則化したものであり、調性音楽の範囲内での最低限度の美しさを保つための条件とも解釈できる。禁則は和声学の教科書でルールで記述されているが、「禁じられる」「～しなくてはならない」などの、程度の強いと解釈できるものもあれば、「～させるのがよい」「～ことが多い」など、程度の弱いと解釈できるものもある。つまり、規則間には重要度の軽重があると考えられる [4]。しかし、和声学の教科書にはそれについて詳しく書かれていない。

## 2.2 計算機による和声生成の代表的アプローチ

### 2.2.1 禁則を用いたルールベースのアプローチ

三浦らの研究は、和声課題に対する許容解の生成システムの構築について述べ、対象を3和音に限定し、与えられたバス課題およびソプラノ課題に対する全許容解を生成することのできる「バス課題システム“BDS”」および「ソプラノ課題システム“SDS”」を提案している[4]。これらは禁則体系をアルゴリズムで表現することによって実現されている。更に、バス課題を評価する機能[6]や、ソプラノ課題を評価する機能[7]をつけている。

### 2.2.2 確率モデルに基づくアプローチ

深山らの研究は、コードネームが観測系列、四声体和声が隠れ状態系列である隠れマルコフモデルによって、コードネームからの四声体和声の生成を行う提案をした[2]。この研究は、確率統計モデルによるアプローチであり、既存の楽曲データベースからの確率パラメタの学習によって、作曲家のスタイルなどの明文化しにくい音楽的特徴を、詳細で大量のルールや複雑な評価関数の設計といった困難を回避しながら生成楽曲に繁栄できる可能性を試している。

北原らの研究は、ベイジアンネットワークを用いたコードネームからの自動ヴォイシングシステムを提案している[5]。メロディやヴォイシング進行を考慮した事例学習型のコード・ヴォイシングモデルを構築している。このモデルでは、音楽的同時性と音楽的連続性を「現在のコード」のヴォイシングを表すノードとメロディや前後のコードのヴォイシングを表すノードとの確率的な依存関係として表現し、確率推論によって音楽的同時性と連続性を両方満たすヴォイシングを得る手法を行っている。

川上らの研究は、隠れマルコフモデルを用いて与えられた旋律に自動で和声付

けを行なう手法を提案している [8]。2 種類の和声進行のモデル、いくつかの旋律生成のモデル、さらに *N-best* アルゴリズムによる和声付け複数候補抽出や、与えられた旋律の調性推定及び転調検出について述べている。

Allan らの研究では、観測メロディ系列と隠れた調和可能なメロディ系列から構成されている [10]。コードは各ビートに合わせて、遷移確率に関する一次マルコフ性を利用している隠れマルコフモデルによって、メロディからの四声体和声を生成する手法を行っている。

### 2.2.3 その他の手法でのアプローチ

S.Phon らの研究では、遺伝的アルゴリズム (GA) とルールベースの比較を行っている [9]。GA では、音楽情報 (ピッチ、間隔、時間、持続時間) を染色体として、適応度関数を利用して判断し繁殖させて、再生演算子を用いて生成している。ルールベースシステムでは、理論ベースの知識表現で実装し、カデンツ・プレカデンツ・ボディーセクション・前奏の手順で生成している。

## 2.3 和声生成における課題

四声体和声の生成において重要なことは、声部間の縦の繋がり音楽的同時性と声部内の横の繋がり音楽的連続性の両方を考慮することである [5]。声部間の繋がりを考えたとき、不協和音をとり音楽的同時性が満たされない場合、和音の響きが悪くなってしまう。前の音との繋がりを考えたとき、前後の音が離れすぎ音楽的連続性が満たされない場合、和音の繋がりが不自然になってしまう。この2つの条件のうち片方でも欠けると音楽理論に正しい曲が生成されない。

## 2.4 本研究についてのアプローチ

既存の研究では、禁則を用いる。である一方、本研究ではあえて禁則を軸におかずに、確率モデルのみによる和声生成を試みる。同時性と連続性を同時に考慮するため、同時性と連続性をノード間の確率的依存性として表現したベイジアンネットワークを用いる。

ベイジアンネットに用いる条件付確率表を2種類の方法で作成する。1つは、和声学を参考にしたルールベース型、もう1つは、楽曲からの学習データを用いた事例ベース型である。

### 2.4.1 ルールベース型

ルールベースでは、和声学を参考に出やすい音や協和音程をとりやすい音の確率高く、音が離れすぎている場合その音の確率を下げるように設定する。

同時性に関しては、協和音程である完全4度・5度や短3度・6度、長3度・6度などの協和性の高い音程の出現確率を高く設定する。これにより声部間で協和音程関係にある音に対して、確率が上がり協和音程をとりやすくなる。よって不協和音が選ばれにくくなる。

連続性に関しては、直前の音との音高差が離れれば離れるほど確率が低くなるように設定する。これにより前後で音同士が離れすぎるのを防ぎ、音楽的な流れを維持するような確率設定になる。これにより、不協和音程の2度・7度の音が出にくくなり協和音程が出やすくなる。

### 2.4.2 事例ベース

事例ベースでは、データの学習だけを行うことにより、条件付確率表を作成する。プロの作曲家によって作成された四声体和声の曲データから事例を学習すれ



ば、ルールベース型のような設定をしなくても同時性と連続性の両立は学習され、解決すると考えた。

## 第3章 システム構成

本章では、システムの概要を述べ、ベイジアンネットワークのモデルについて説明し、ルールベースと事例ベースの設定した具体的な確率設定について述べる。

### 3.1 処理の概要

ユーザがソプラノ声部の旋律を MIDI ファイルとして入力する。ソプラノ声部の音高（ノートナンバー）を  $S_1, S_2, \dots, S_N$  で表すこととする。すると、システムは残りの声部の旋律を時系列順に沿って決定する。アルト、テノール、バスの各声部における  $i$  番めの音高をそれぞれ  $A_i, T_i, B_i$  とすると、システムは、まず与えられた  $S_1$  を元に  $A_1, T_1, B_1$  を決定する。その後、決定済みの  $A_1, T_1, B_1$  と与えられた  $S_2$  を元に  $A_2, T_2, B_2$  を決定する。これを順次繰り返して  $A_N, T_N, B_N$  までの音符の音高が決定し、生成された旋律を MIDI 形式で出力して処理を終了する。通常のソプラノ課題と同様に、旋律のリズムは各声部で共通とする。すなわち、各声部の音符数および各音符における発音時刻・消音時刻はすべて等しいものとする。また、調は既知（現在の実装では八長調を前提）とし、簡単のため、白鍵のみで構成されているダイアトニックスケールの音のみ用いることとする。

### 3.2 ベイジアンネットワークのモデル

ベイジアンネットワークとは、本研究でいう同時性と連続性などの要素の因果関係を確率推論を用いて表す有向グラフである。個々の変数の関係に確率推論を

行い、複雑な関係で起こりうる確率を計算することが出来る。本研究では、パート間の関係や、音の前後の関係、更に各パートの音域が広いのでこの確率を全て計算し、同時性と連続性を両立させるのは複雑で困難である。よって、ベイジアンネットワークを選んだ。これにより、縦の繋がりだけでなく横の繋がりも考慮できるようになる。

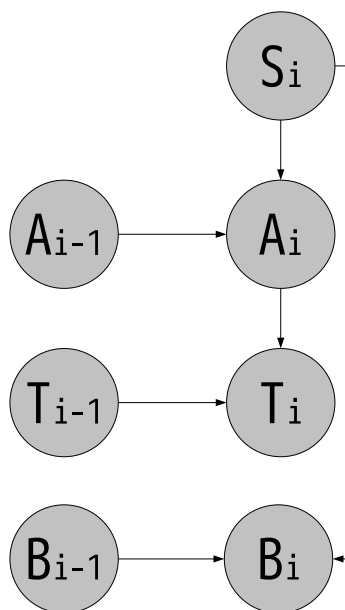


図 3.1: ベイジアンネットワーク

ベイジアンネットワークでは、与えられた  $S_i$  に対して、最ももってもらしい  $A_i, T_i, B_i$  を推論する。その際、各声部における直前の音符からの流れも考慮する。本来、過去の旋律からの流れや後続の音符への流れは、できるだけ広範囲に評価すべきだが、モデルの複雑さを抑えるため、直前の音符の音高  $A_{i-1}, T_{i-1}, B_{i-1}$  のみを考慮する。また、 $S_i, A_i, T_i, B_i$  は本来4つともが複雑に依存しあっていると考えられるべきであるが、モデルの複雑さを抑えるために、依存性を簡略化する。和声学では、ソプラノとバスを外声といい、この2パートが適切な関係を維持するこ

とが重要であると言われている [1]。また、ソプラノ、アルト、テノールは上 3 声としてひとまとめにして扱われることが少なくない [1]。そこで、バスがソプラノに依存して決まり、アルトがソプラノに、テノールがアルトに依存して決まるといようにモデル化する。以上の方針に基づいて設計したベイジアンネットワークを Fig. 1 に示す。

ここでは、ルールベース型の確率設定方法と事例ベース型の確率設定方法について述べる。

### 3.2.1 ルールベース型

$A_i, T_i, B_i$  に設定する条件付確率について述べる。 $A_i$  に設定される条件付確率  $P(A_i|A_{i-1}, S_i)$  を次のように定義する。

$$P(A_i|A_{i-1}, S_i) = P(A_i)^\alpha P(A_i|A_{i-1})^\beta P(A_i|S_i)^\gamma$$

ここで、 $P(A_i)$  は他の声部や過去の旋律に依存しない  $A_i$  の生起確率であり、次のように定める。

$$P(A_i) = \begin{cases} w_1 c_1 & \text{ノートナンバーがアルトの音域内} \\ 0 & \text{ノートナンバーがアルトの音域外} \end{cases}$$

ここで、 $w_1$  は当該調における音名の使用頻度に基づいた重み値 (C: 0.4, F/G: 0.3, E/A: 0.2, D/B: 0.1, それ以外: 0)、 $c_1$  は確率の合計を 1 にするための定数である。 $P(A_i|A_{i-1})$  は直前の音から離れすぎなくするもので、

$$P(A_i|A_{i-1}) = \begin{cases} c_2 & A_{i-1} \text{ と } A_i \text{ が 5 度未満} \\ 0.3c_2 & 5 \text{ 度以上 1 オクターブ未満} \\ 0.09c_2 & 1 \text{ オクターブ以上} \end{cases}$$

と定義する。 $P(A_i|S_i)$  は声部間の音程に基づき、次のように定義する。

$$P(A_i|S_i) = \begin{cases} 0 & A_i \text{ が } S_i \text{ より高い} \\ 1.3c_3 & A_i \text{ が } S_i \text{ より 4 度または 5 度下} \\ 1.1c_3 & 1 \text{ 度、3 度、6 度、8 度のいずれか} \\ 1.0c_3 & \text{それ以外} \end{cases}$$

$\alpha, \beta, \gamma$  は各確率の重要度を決めるパラメータで、現在は 1 としている。

$T_i$  に設定される条件付確率  $P(T_i|T_{i-1}, A_i)$  を次のように定義する。

$$P(T_i|T_{i-1}, S_i) = P(T_i)^\alpha P(T_i|T_{i-1})^\beta P(T_i|A_i)^\gamma$$

ここで、 $P(T_i)$  は他の声部や過去の旋律に依存しない  $T_i$  の生起確率であり、次のように定める。

$$P(T_i) = \begin{cases} w_1 c_1 & \text{ノートナンバーがアルトの音域内} \\ 0 & \text{ノートナンバーがアルトの音域外} \end{cases}$$

ここで、 $w_1$  は当該調における音名の使用頻度に基づいた重み値 (C: 0.4, F/G: 0.3, E/A: 0.2, D/B: 0.1, それ以外: 0),  $c_1$  は確率の合計を 1 にするための定数である。

$P(T_i|T_{i-1})$  は直前の音から離れすぎなくするもので、

$$P(T_i|T_{i-1}) = \begin{cases} c_2 & T_{i-1} \text{ と } T_i \text{ が 5 度未満} \\ 0.3c_2 & 5 \text{ 度以上 1 オクターブ未満} \\ 0.09c_2 & 1 \text{ オクターブ以上} \end{cases}$$

と定義する。 $P(T_i|A_i)$  は声部間の音程に基づき、次のように定義する。

$$P(T_i|A_i) = \begin{cases} 0 & T_i \text{ が } S_i \text{ より高い} \\ 1.3c_3 & T_i \text{ が } A_i \text{ より 4 度または 5 度下} \\ 1.1c_3 & 1 \text{ 度、3 度、6 度、8 度のいずれか} \\ 1.0c_3 & \text{それ以外} \end{cases}$$

$\alpha, \beta, \gamma$  は各確率の重要度を定めるパラメータで、現在は 1 としている。

$B_i$  に設定される条件付確率  $P(B_i|B_{i-1}, S_i)$  を次のように定義する。

$$P(B_i|B_{i-1}, S_i) = P(B_i)^\alpha P(B_i|B_{i-1})^\beta P(B_i|S_i)^\gamma$$

ここで、 $P(B_i)$  は他の声部や過去の旋律に依存しない  $B_i$  の生起確率であり、次のように定める。

$$P(B_i) = \begin{cases} w_1 c_1 & \text{ノートナンバーがアルトの音域内} \\ 0 & \text{ノートナンバーがアルトの音域外} \end{cases}$$

ここで、 $w_1$  は当該調における音名の使用頻度に基づいた重み値 (C: 0.4, F/G: 0.3, E/A: 0.2, D/B: 0.1, それ以外: 0),  $c_1$  は確率の合計を 1 にするための定数である。

$P(B_i|B_{i-1})$  は直前の音から離れすぎなくするもので、

$$P(B_i|B_{i-1}) = \begin{cases} c_2 & B_{i-1} \text{ と } B_i \text{ が 5 度未満} \\ 0.3c_2 & 5 \text{ 度以上 1 オクターブ未満} \\ 0.09c_2 & 1 \text{ オクターブ以上} \end{cases}$$

と定義する。 $P(B_i|S_i)$  は声部間の音程に基づき、次のように定義する。

$$P(B_i|S_i) = \begin{cases} 0 & B_i \text{ が } S_i \text{ より高い} \\ 1.3c_3 & B_i \text{ が } S_i \text{ より 4 度または 5 度下} \\ 1.1c_3 & 1 \text{ 度、3 度、6 度、8 度のいずれか} \\ 1.0c_3 & \text{それ以外} \end{cases}$$

$\alpha, \beta, \gamma$  は各確率の重要度を定めるパラメータで、現在は 1 としている。

### 3.2.2 事例ベース型の確率設定方法

独自の確率設定のルールを元に作る条件付確率表とは別に、プロの作曲家によって作られた音楽データを集計し、条件付確率表を作成する。

J.S Bach によるコラールの四声体和声の楽曲データから長調の曲で 16 分音符以下の長さの音符を使用しないという条件の元、曲を収集した。八長調以外の曲は八長調に移調して用いた。今回使用した曲数は 37 曲、ソプラノの音符の総数は 4583 個となった。これらのデータから 3.2 節で述べたベイジアンネットワークを WEKA を用いて学習した。

曲データの扱い方としては 4 つの声部が同時になっていないと集計が取れないので、4 分音符は 8 分音符 2 つの連続、2 分音符は 8 分音符 4 つの連続として扱い、すべての音符を 8 分音符とみなして集計を行った。これにより、同じノートナンバーの連続する確率が本来よりも高くなっている。その為、前の音との関係性で同じ音が連続する確率を 0.1 倍する設定にした。

## 第4章 評価実験

本章では、前章で述べたシステムにより四声体和声を生成する実験を行い、2つのアプローチによる差を考察する。

### 4.1 実験方法

八長調の曲をサンプルとして、実験を行う。

ルールベースでは、協和音程を重視したルール設定を行った。四声体和声のソプラノが取りうるノートナンバーの範囲である 60 ~ 81 でサンプルを入力し考察を行った。他のパートも同様に取りうるノートナンバーの範囲は、アルトは 55 ~ 76、テノールは 48 ~ 69、バスは 41 ~ 62 とする。

事例ベースの場合、オクターブの正規化を行っていないため、同じ音名であってもオクターブが違う場合、異なる確率が付与されている。この場合、音楽的に適切な出力を得るには、入力されるソプラノの音域が、事例データのそれとほぼ一致していることが重要である。そこで、事例ベースの場合、ソプラノパートのメロディーを 1 オクターブ下げて使用した。

[10]





図 4.1: 喜びの歌の楽譜

## 4.2 ルールベースの結果

### 4.2.1 喜びの歌

図 4.1 は喜びの歌の出力結果を楽譜にしたものである。この結果では、15 個中 10 個の和音が協和音程になっているため、比較的聞きやすい曲になっている。しかし、第 2 小節の第 3 音のミの和音がミ・レ・ド、第 2・4 音のファとレの和音がソとファのように不協和音程になっている

### 4.2.2 グリーングリーン

図 4.2 はグリーングリーンの出力結果を楽譜にしたものである。この結果では、18 個中 12 個の和音が協和音程をとっている。ソプラノがドとレの時に、不協和音程をとっていることが多い。他の部分はほとんどが協和音程になっている。



図 4.2: グリーングリーンの楽譜



図 4.3: 大きな栗の木の下での楽譜

### 4.2.3 大きな栗の木の下で

図 4.3 は大きな栗の木の下での出力結果を楽譜にしたものである。この結果では、13 個中 8 個の和音が協和音程をとっている。ソプラノがドとレの時に、不協和音程をとりやすくなっている。他の音は協和音程をとっている。他の部分では、協和音程をとっている。ただし、サブドミナントで終わっており、解決感がない終わり方をしている。これは、曲全体の流れを考慮していないモデルを用いてい

るからである。

#### 4.2.4 ちょうちょ





図 4.5: チューリップの楽譜



図 4.6: 夕やけの楽譜

#### 4.2.6 夕やけ

図 4.6 は夕やけの出力結果を楽譜にしたものである。この結果では、12 個中 9 個の和音が協和音程をとっている。この曲ではソプラノがミとラの時に、不協和音程が出てしまっている。

### 4.3 八長調以外を用いた場合

#### 4.3.1 さくら



図 4.7: さくらの楽譜

図 4.7 はさくらの出力結果を楽譜にしたものである。八長調以外の曲を入れた結果である。この結果では、14 個中 12 個の和音が協和音程をとっている。ただ、協和音程はとれているがソプラノ以外は八長調を基準として生成されているため八長調にしか対応できないシステムになっていることが分かった。

### 4.4 ルールベース型の結果全体の考察

全体的に約 2/3 の和音は協和音程を取るようになっているので、比較的聞きやすい曲になっている。しかし、不協和音が出てしまう場合がある。特に、ソプラノの 2 度の移動からのド・レ・ファの時に不協和音程をとってしまうことが多かった。更に、不協和音ではないがテノールとソプラノの音がオクターブの関係になっており、聞こえが単調になる場合があった。これらは、声部間の依存関係を簡略化したからだと考えられる。本来、4 つの声部は全てが複雑に依存しあってできて

いると考えられるが、簡単化のため、依存関係を大幅に省略した。そのため、ソプラノ・テノール間、アルト・バス間の音楽的同時性が十分に満たされなかったものと考えられる。

## 4.5 事例ベース型の結果

### 4.5.1 喜びの歌 (1 オクターブ下)

The image shows a musical score for four voices: Soprano, Alto, Tenor, and Bass. The music is in 4/4 time. The Soprano and Alto parts are written in treble clef, while the Tenor and Bass parts are written in bass clef. The key signature has one flat (B-flat). The score consists of four measures. In the first measure, all four voices enter with a half note. In the second measure, the Soprano and Alto continue with a half note, while the Tenor and Bass have a quarter rest. In the third measure, all four voices have a half note. In the fourth measure, the Soprano and Alto have a half note, while the Tenor and Bass have a quarter rest. The score ends with a double bar line.

図 4.8: 喜びの歌 (1 オクターブ下) の楽譜

図 4.8 は喜びの歌 (1 オクターブ下) の出力結果を楽譜にしたものである。15 個中 13 個の和音が協和音程となる。声部間で同じになる音や下のパートが上のパートよりも高くなることはなかった。

### 4.5.2 ちょうちょ (1 オクターブ下)

図 4.9 はちょうちょ (1 オクターブ下) の出力結果を楽譜にしたものである。13 個中 10 個の和音が協和音程をとっている。1 小節目のソプラノのミの音 2 つに対してアルトがデータスパースネスとなりシ がでてしまい不協和音になっている。



図 4.9: ちょうちょ(1 オクターブ下) の楽譜

#### 4.5.3 タヤけ (1 オクターブ下)



図 4.10: タヤけ (1 オクターブ下) の楽譜

図 4.10 はタヤけ (1 オクターブ下) の出力結果を楽譜にしたものである。12 個中 7 個の和音が協和音程をとっている。3 小節目の最初のアルトとテノールの音が同じラの音を取っている。

## 4.5.4 大きな栗の木の下で (1 オクターブ下)



図 4.11: 大きな栗の木の下で (1 オクターブ下) の楽譜

図 4.11 は大きな栗の木の下で (1 オクターブ下) の出力結果を楽譜にしたものである。11 個中 9 個の和音が協和音程をとっている。バスのノートナンバーが 48 と 49 しかでていない。これに関しては始めのソプラノのノートナンバーが 60 を取るとき、バスのノートナンバーは 48 を選択しやすく、48 から 49 のノートナンバーに移行しやすく、また 49 から 48 に移行しやすいことが原因であると考えられる。

## 4.5.5 チューリップ (1 オクターブ下)

図 4.12 はチューリップ (1 オクターブ下) の出力結果を楽譜にしたものである。13 個中 6 個の和音が協和音程を取っている。バスについてはソプラノの最初のノートナンバーが 60 なので、大きな栗の木の下でと同じような結果になっている。

## 4.5.6 グリーングリーンとさくら

グリーングリーンとさくらについては、1 オクターブ下げてしまうと曲全体の音域が下がりすぎてしまい、ソプラノの音域の下限であるノートナンバー 60 を下回





図 4.12: チューリップ (1 オクターブ下) の楽譜

る音が出てしまうので、使用できなかった。

## 4.6 事例ベース型の実験の確認

4.4 の実験では、1 オクターブ下げた曲を用いた実験を行ったが、これは、ソプラノの音域を事例データに合わせるためである。もしも、ソプラノの音域が事例データと合っていない場合、不協和音程が出やすくなると考えられる。そこで、そのことを実験で確かめる。

### 4.6.1 喜びの歌

図 4.13 は喜びの歌の出力結果を楽譜にしたものである。15 個中 5 個の和音が協和音程となる。1 小節めでは、テノールとバスが同じ音になりルールベースよりも聞きにくい曲になった。1 オクターブ下げなかったものと比較すると、曲調が変わっていて不協和音程をとる和音が多くなっている。



図 4.13: 喜びの歌の楽譜

## 4.6.2 ちょうちょ



図 4.14: ちょうちょの楽譜

図 4.15 はちょうちょの出力結果を楽譜にしたものである。13 個中 1 個の和音が協和音程をとっている。最後の小節でのみ協和音程があり、ほとんどが不協和音程になっている。1 オクターブ下げなかったものと比較すると、不協和音程とる和音が 9 個減ってしまっている。

### 4.6.3 タヤけ

The musical score for 'Tayake' is written in 4/4 time and consists of four staves: Soprano, Alto, Tenor, and Bass. The Soprano staff begins with a treble clef and a key signature of one sharp (F#). The Alto, Tenor, and Bass staves also begin with a treble clef and a key signature of one sharp. The Soprano staff contains a melody of eighth and quarter notes, while the other three staves provide a harmonic accompaniment with various note values, including quarter, eighth, and half notes. The piece concludes with a double bar line.

図 4.15: タヤけの楽譜

図 4.17 は夕やけの出力結果を楽譜にしたものである。12 個中 2 個の和音が協和音程をとっている。3 小節のはじめのアルトとテノールの音が同じ音になっている。1 オクターブ下げなかったものと比較すると、不協和音程とる和音が 5 個減っている。

### 4.6.4 大きな栗の木の下で

図 4.14 は大きな栗の木の下での出力結果を楽譜にしたものである。11 個中 3 個の和音が協和音程をとっている。ソプラノがシの時はすべて不協和音程をとっている。アルト、テノール、バスの音の間隔が近い音がでてしまっている。1 オクターブ下げなかったものと比較すると、不協和音程とる和音が 6 個減っている。



図 4.16: 大きな栗の木の下での楽譜



図 4.17: チューリップの楽譜

#### 4.6.5 チューリップ

図 4.16 はチューリップの出力結果を楽譜にしたものである。13 個中 8 個の和音が協和音程をとっている。1 小節の終わりと 2 小節のはじめのテノールとバスの音が同じになっている。1 オクターブ下げなかったものと比較すると、不協和音程とる和音が 2 個減ってしまっている。

## 4.7 事例ベース型の結果全体の考察

事例ベースでは、ソプラノを1オクターブ下げた曲と1オクターブ下げない曲を用いた結果、大きな違いが発見された。1オクターブ下の楽曲では、協和音程が多く曲の響きが綺麗になっているが、ソプラノの始まりの音次第でバスの音のパターンが決まってしまう、バスの音は2つか3つの音の繰り返しになってしまう場合があった。声部間の関係も下のパートが上のパートの音を越えてしまう場合や同じ音が多く出現してしまうことがあった。1オクターブ下げない曲では、各声部ごとに音の動きが多く発見され、声部間の関係も下のパート上のパートの音を越えることがなくなった。しかし、協和音程が少なくなってしまう、曲の響きが悪くなってしまった。

全体的に学習データの曲数が多くないために確率値が正しく選択されず、適切な音を選択されることが少なくなってしまった。これは、条件付き確率を求める際に、学習データの中で出現頻度がゼロだった場合、求める確率の値が全て等しくなってしまったからである。この場合、ノートナンバーがランダムに選択され、推論結果として出力されてしまうため音楽的に不自然な和音が形成されてしまうと考えられる。

## 4.8 結果から得られたルールベース型と事例ベース型の 特徴とその比較

### 4.8.1 ルールベース型

協和音程をとる確率値を高く設定している為、関係を簡略化した声部間以外では比較的協和音程をとり易くなっている。しかし、同じ音が連続する場合、パートごとに同じ音が連続して選択される可能性が十分に考えられる。更に、声部間の依存関係が設定されていないソプラノとテノールなどでは、不協和音程になる

ことも少なくなかった。また、オクターブが異なるが、同じ音名の音を取りユニゾンになることもあった。そのため、単調に聞こえる曲になり易い傾向があった。また、下のパートが上のパートの音と同じか、高くなる確率を 0 に設定しているため、パート間の音高が交差することはない。

#### 4.8.2 事例ベース型

ルールベース型と異なる特徴として、同じ音名でもオクターブが違えば確率値が全く異なり、違った曲調になることが挙げられる。また、同じ音の連続する確率を下げていたために単調な曲に聞こえる事は少ないが、必要以上に連続を避ける結果が出てしまう結果が見られた。直接的に確率を変更することをしていないために、下のパートが上のパートの音を上回ってしまう結果がいくつか見られた。



## 第5章 結 論

本章では、本研究で得られた成果および、今後に残された問題を総括する。

本研究では、ベイジアンネットワークを用いて四声体和声の生成を行う手法を提案した。和声学における知見が豊富であることから四声体和声に着目し、ソプラノ課題を行う和声生成システムを構築した。その課題として、音楽的同時性と音楽的連続性の両立がある。これを声部間と前後関係を考慮することを解決を試みた。具体的な方法として、ベイジアンネットワークを用いて、和声学を参考に協和音を重視したルールベース型の作成と、細かなルール設定をあえてせず既存の楽曲データから声部間のパターンを学習した事例ベース型を用いて双方の長所・短所を確認する為に比較した。

四声体和声の生成において、音楽的同時性と音楽的連続性の両立は非常に困難な課題であり、簡易的なルール設定では容易に解決できるものではないことが分かった。

ルールベースでは、協和音程を重視する手法でも四声体和声として近いものを生成することができた。しかし、用いたルールは前後と声部間の関係のみであり、コードネームや転回などの情報はまったく入っていない。設定した条件付確率においてもダイアトニックスケールのみ限定されている他、和声学の禁則（具体的には平行5度や連続1・8度など）を実現することは出来なかった。これらの規則は四声体和声の生成において非常に大事であるが、ベイジアンネットワークのモデルの関係により考慮することは困難だった。そのため、協和音程だけを取るという結果を得られなかった。



事例ベースでは、データ量の不足からルールベース型に比べ協和音程が選択されづらかった。しかし、メロディーの音の高低によっては現状のデータ数でもルールベース型より多くの協和音程を取る結果も見られた。この結果から禁則を具体的に入れなくてもデータさえ集まればある程度妥当な結果が得られるシステムだということが分かった。今後の課題としては、今回 16 分音符以下の長さの音符のみで生成された曲のみ収集したが、16 分音符も自動的に 8 分音符に修正するシステムにすることで、学習できる曲データも増えると考えられる。データが増えればノード関係を更に増やしてもデータスパースネスが起こりにくくなることが考えられるので、声部間の音のかぶりや下のパートが上のパートの音を越えるという問題も解消できると考えられる。

この結果より、ベイジアンネットワークのノードやアークを増やす必要があることが分かった。今後の研究では、ノードやアークの追加、和声学の禁則を条件付確率の決定ルールに追加するなどして更なる向上を目指していきたい。

## 参考文献

- [1] 島岡譲他, “和声 理論と実習 I”, 音楽之友社, 1982.
- [2] 深山 覚, 西本 卓也, 嵯峨山 茂樹, “隠れマルコフモデルによるコードネームからの4声体和声生成”, 音講論 (春), 3-1-5, pp.1037–1038, 2011.
- [3] 安井希子, 三浦雅展, “和声学におけるバス課題についての回答確認システムの構築とその評価”, 信学論, Vol.J84-D-II, No.6, pp.936–945, 2001.
- [4] 三浦雅展, “和声法学習支援システムの構築に関する研究”, 博士論文 (同志社大学), 2003.
- [5] 北原鉄朗, 勝占真規子, 片寄晴弘, 長田典子, “ベイジアンネットワークを用いた自動コードヴォイシング”, 情報処理学会論文誌, Vol.50, No.3, pp.1067–1078, 2009.
- [6] 三浦雅展, 下石坂徹, 斉木由美, 柳田益造, “バス課題システム BDS のユーザインタフェースの改善とその評価”, 音響学会 2000 年秋季研究発表会, pp.535–536, 2000.
- [7] 三浦雅展, 尾花充, 柳田益造, “ソプラノ課題回答確認システム“ SDS ”の構築とその評価”, 音響学会 2001 年秋季研究発表会, pp.723–724, 2001.
- [8] 川上隆, 中井満, 下平博, 嵯峨山茂樹, “隠れマルコフモデルを用いた旋律への自動和声付け”, 電子情報通信学会技術研究報告 SP, pp.25–32, 2000.

- [9] S.Phon-Amnuaisuk and G.A.Wiggins, “The Four-Part Harmonisation Problem: A comparison between Genetic Algorithms and a Rule-Based System”, *AISB’99 Symposium on Musical Creativity*, 1999.
- [10] M. Allan and C. K. I.Williams, “Harmonising Chorales by Probabilistic Inference”, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2004.

# 謝 辞

本論文を作成するにあたり、北原鉄朗専任講師から、丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。