

# 確率推論を用いた四声体和声の自動生成

鈴木 竹内 佐藤

# はじめに

自分が考えたメロディーに伴奏が自動でついたらうれしいと思ったことはないだろうか？

私たちはそんなソフトを作りたいと思い、この研究を始めた。



# 四声体和声

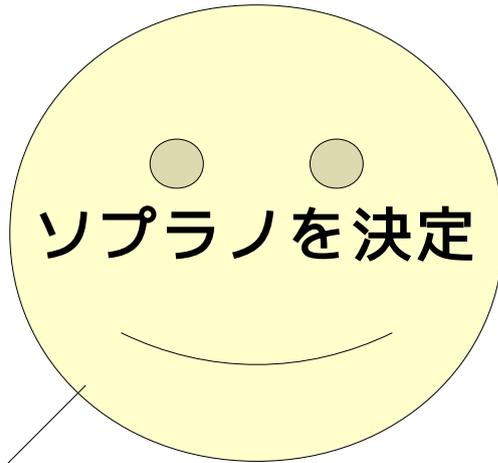
そこで伴奏のついたメロディーの一番基本的で有名なものとして、四声体和声に着目した。

・ 四声体和声とは…

ソプラノ、アルト、テノール、バスの4声部からなる演奏である。



ユーザー



この研究では、  
主旋律となるソプラノ  
をユーザーが入力す  
れば、他の3パート  
が自動的に決まるシス  
テムを作成した。



パート付けシステム



外声となる、バスを入れる

A musical score for piano, consisting of two staves: a treble clef staff on top and a bass clef staff on the bottom. The music is written in a simple, rhythmic style. The treble staff begins with a treble clef and contains a series of eighth notes, starting on G4 and moving up stepwise to D5. The bass staff begins with a bass clef and contains a series of eighth notes, starting on G3 and moving up stepwise to D4. The two staves are connected by a large brace on the left side. The music concludes with a double bar line at the end of the eighth measure.

内声となる、アルト、テノールを入れる

A musical score for piano accompaniment, consisting of two staves: a treble clef staff (top) and a bass clef staff (bottom). The music is written in a common time signature (C) and features a series of chords and melodic lines. The treble staff begins with a treble clef and a key signature of one flat (B-flat). The bass staff begins with a bass clef and a key signature of one flat (B-flat). The music is composed of several measures, with a double bar line at the end. The notes are primarily quarter and eighth notes, with some chords. The overall style is simple and educational, likely intended for a music lesson or a beginner's exercise.

# 四声体和声を題材にする利点

教育として用いられているものなので、理論が  
しっかりしている。

文献もたくさんあるので、これを題材にするなら  
取り組みやすいと考えた。

# 関連研究

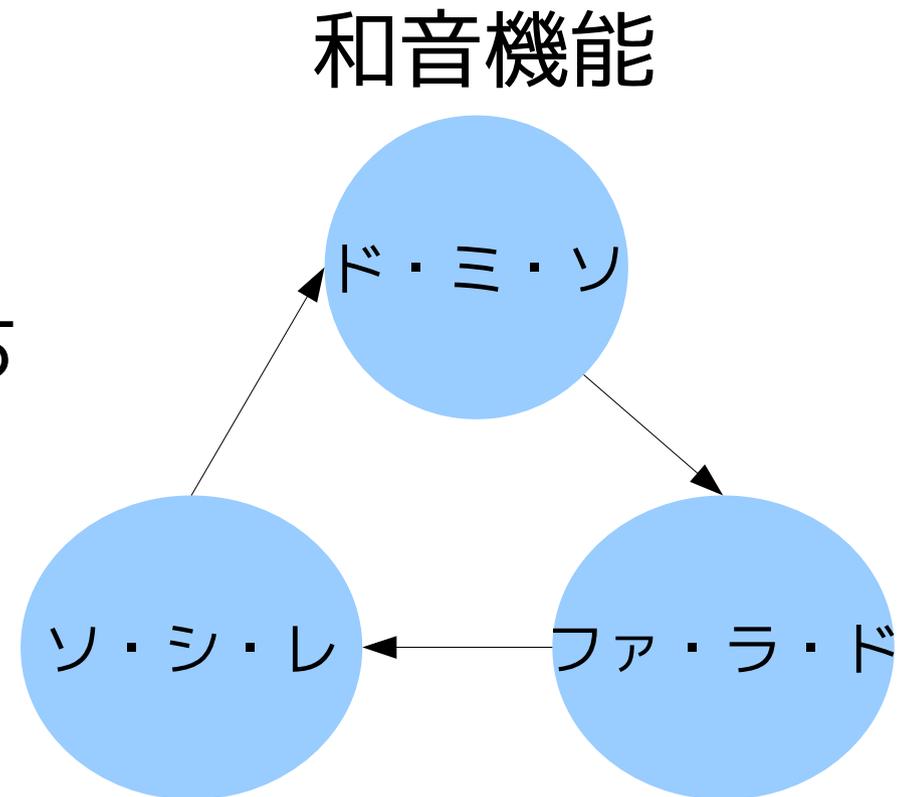
- ・ Harmonising Chorales by Probabilistic Inference ( 確率推論によるコラールの和声付け ) ( Moray Allan 他・2004 )
- ・ バス課題の自然さを考慮したバス課題の自動生成 ( 三浦他・2003 )

# Harmonising Chorales by Probabilistic Inference (Moray Allan 他・2004)

- ・ メロディが観測系列で、コードが隠れ状態系列である隠れマルコフモデルによってメロディから四声体和声の生成。

# バス課題の自然さを考慮したバス課題の自動生成 (三浦他・2003)

- ・ 和音機能と和音進行をもちいて、教科書にあるようなバス課題の自動生成。



# 四声体和声における課題

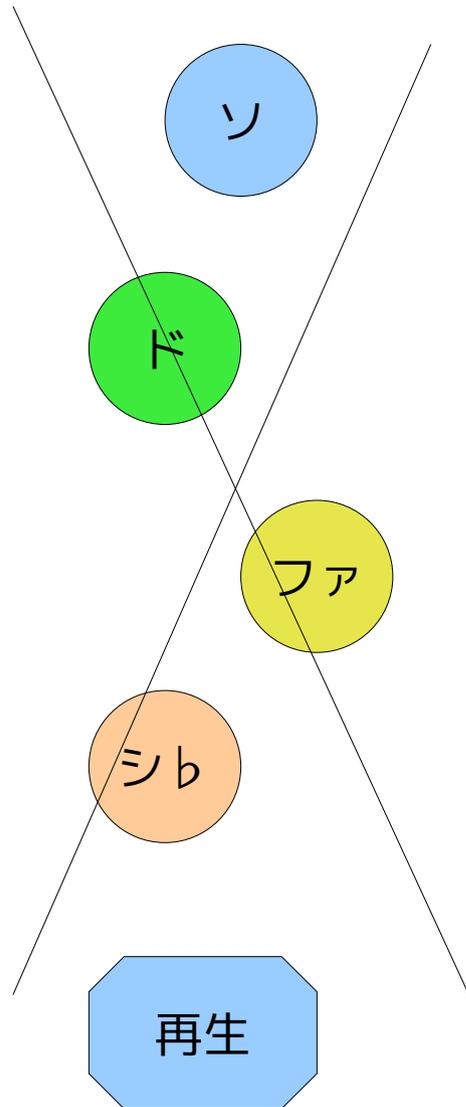
音楽的同時性

の両立

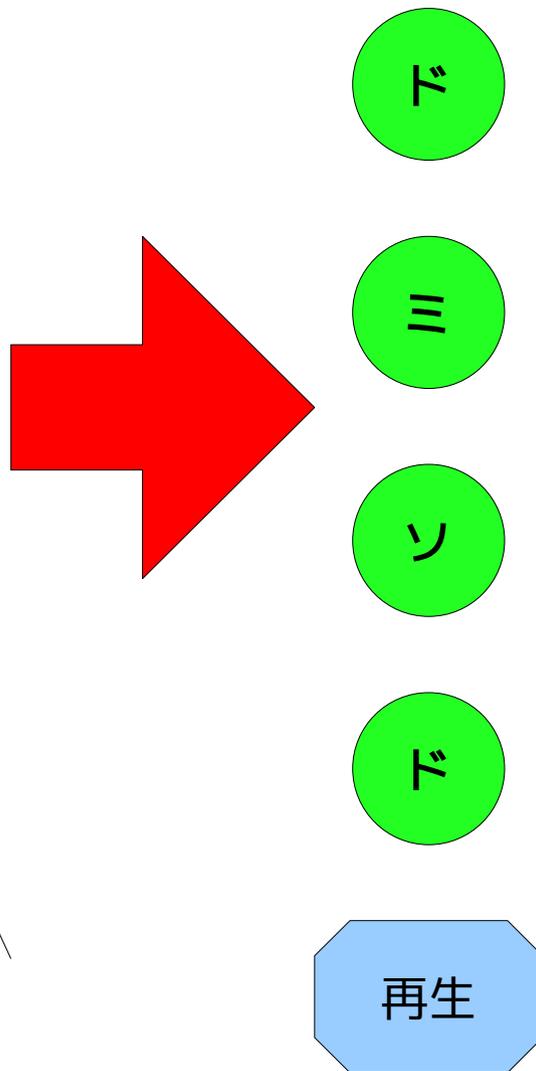
音楽的連続性

# 音楽的同時性とは

不協和音



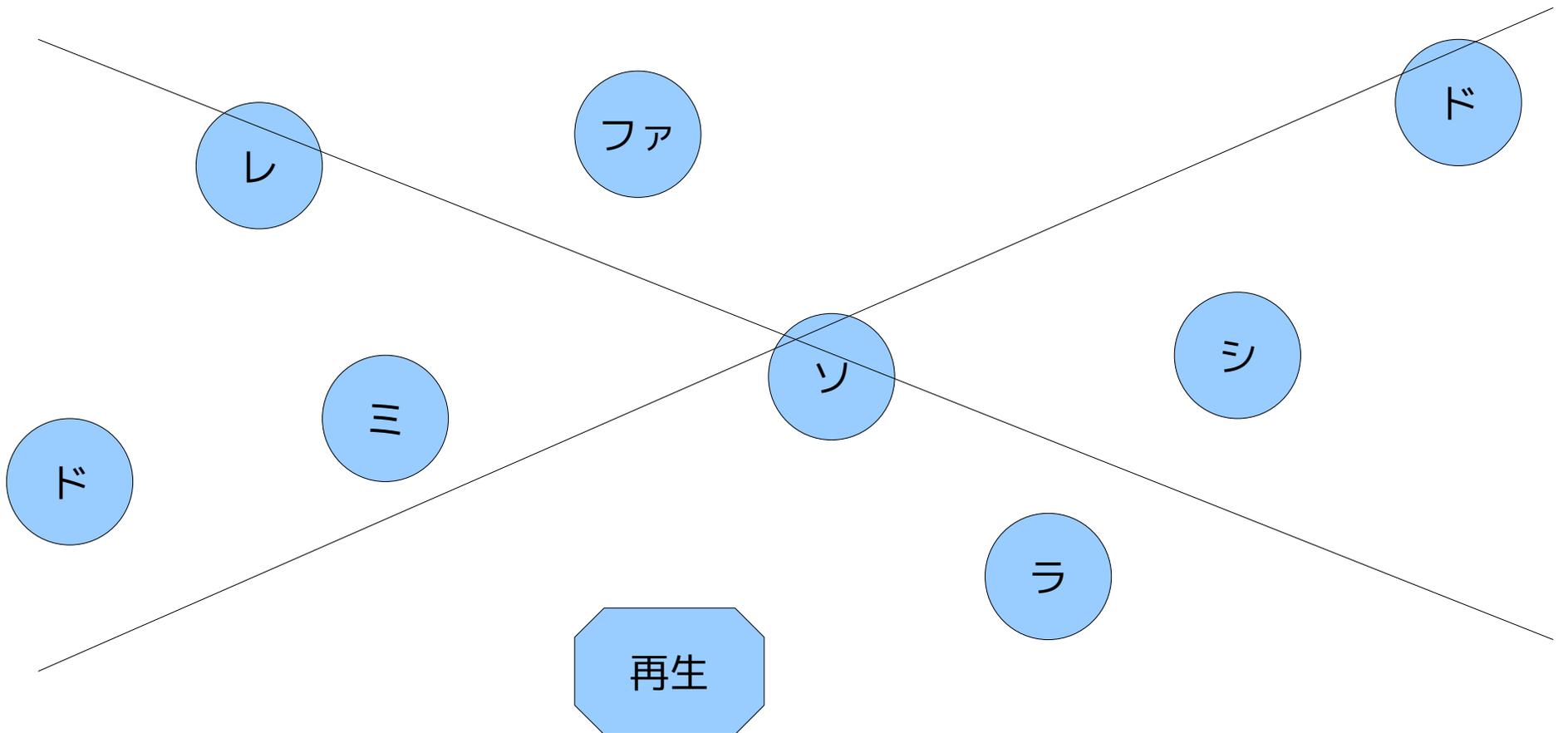
協和音



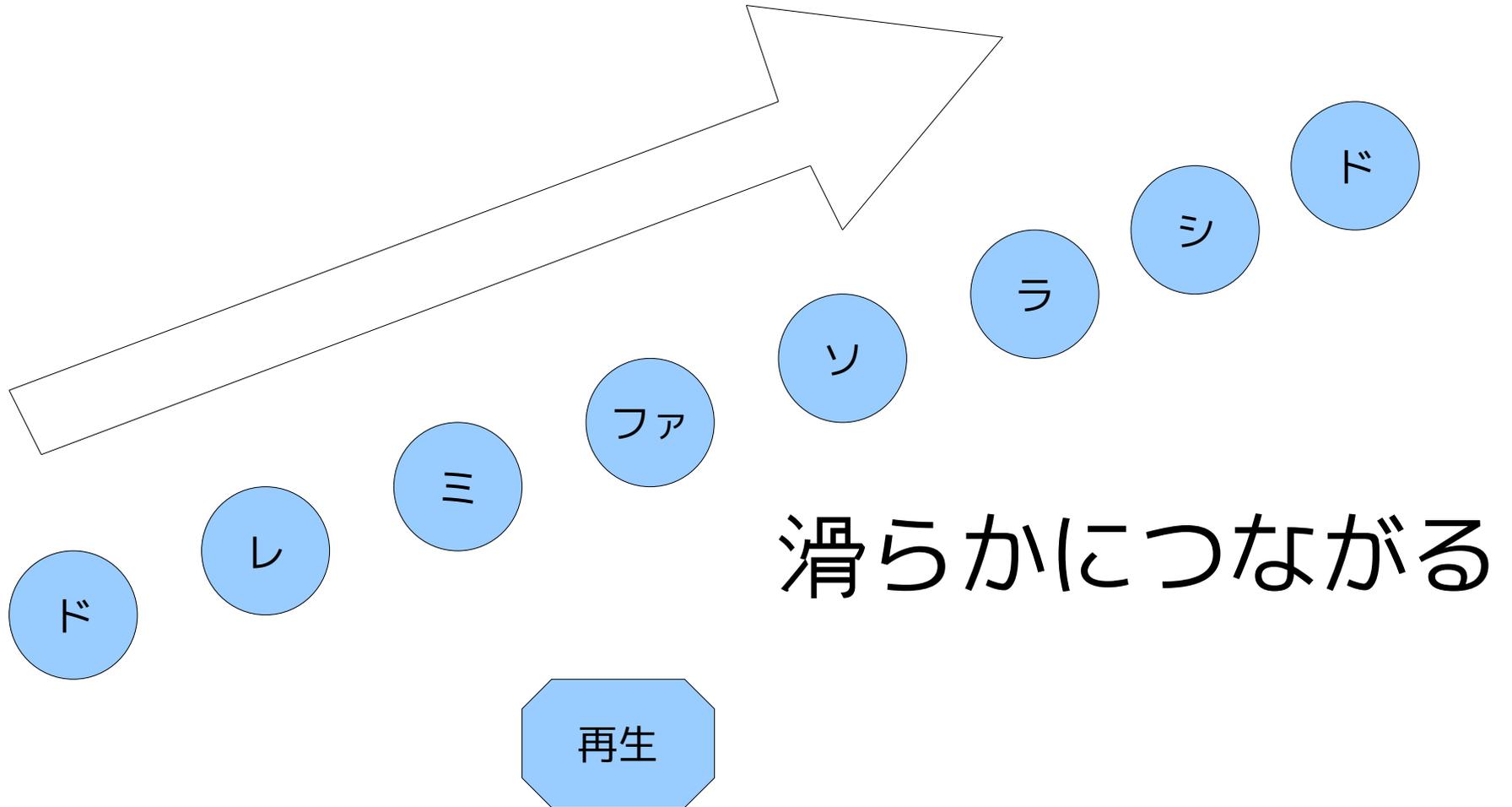
音を選ぶ際に、  
各パートごとの音で  
不協和音を  
生み出さないように  
すること。

# 音楽的連続性とは

同時性と違い、前後の和音の繋がりを比較し自然な音の流れを生み出すこと

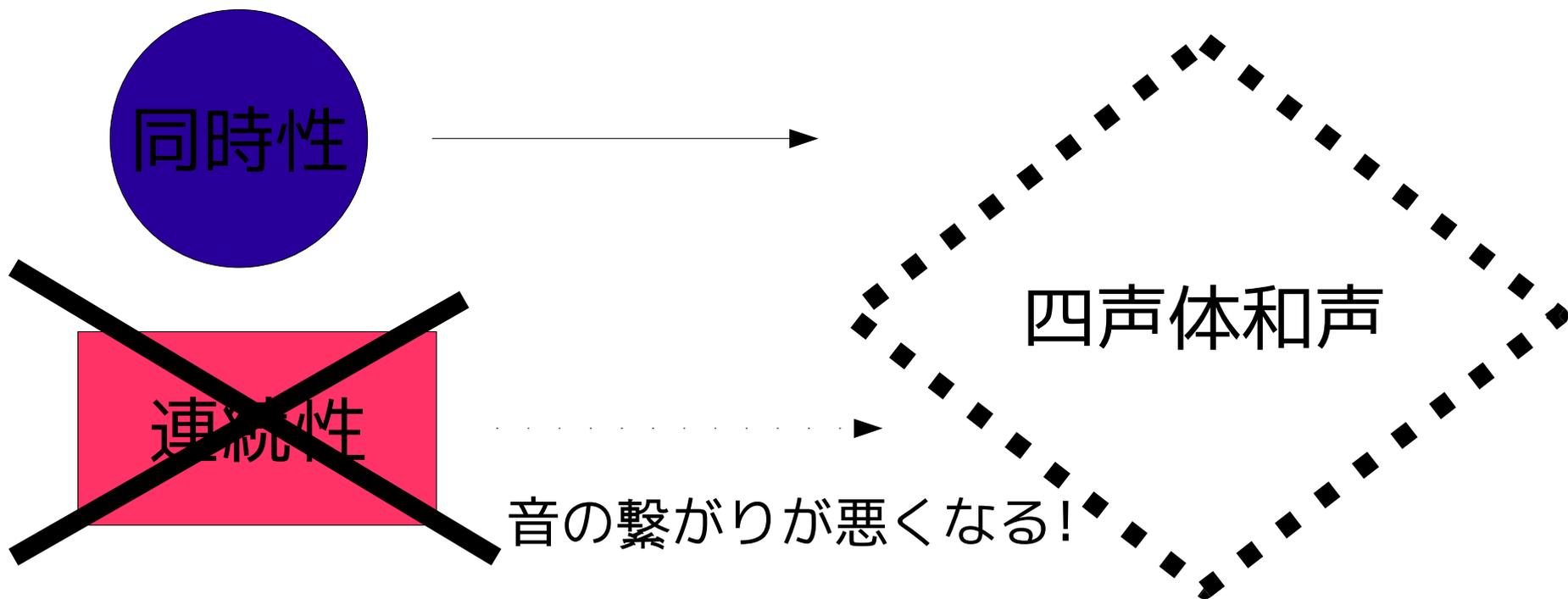


# 連続性が考慮されると



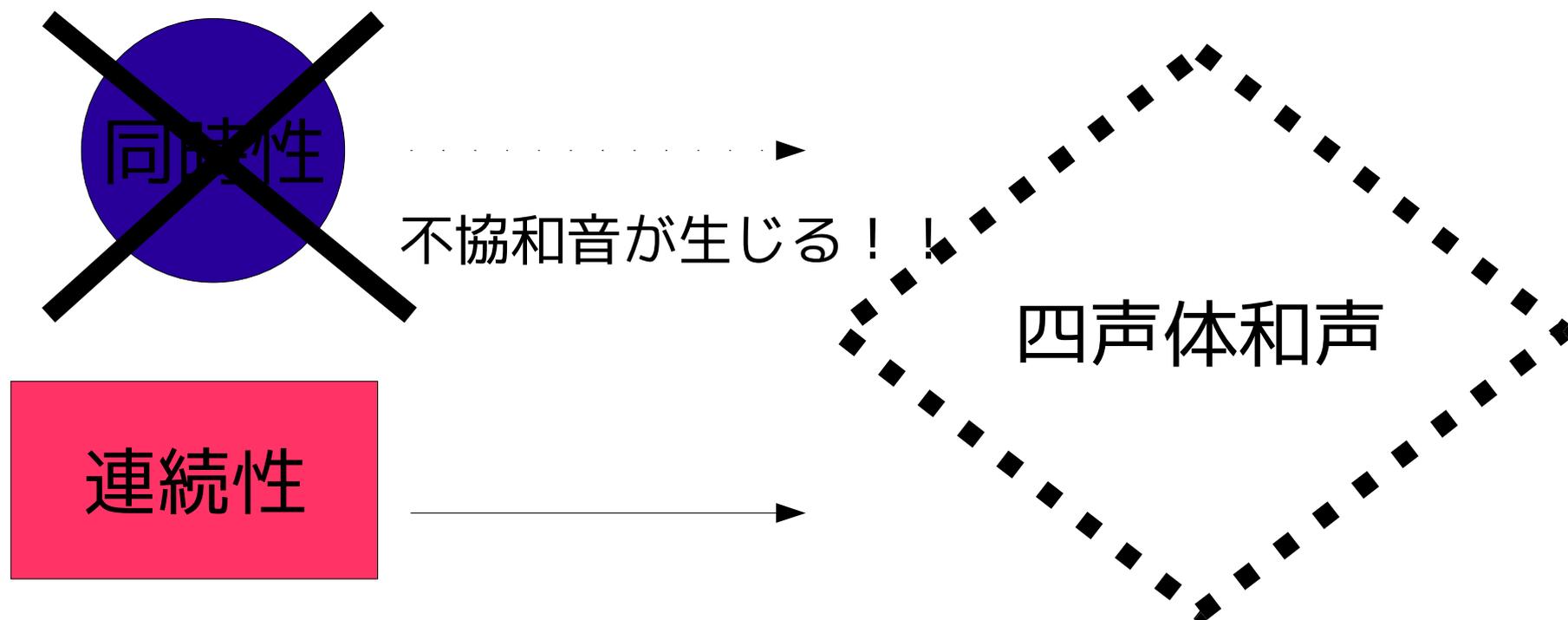
# 同時性だけ考慮すればよければ

ソプラノの音に対してアルト、テノール、バスの音を  
あらかじめ決めてしまえばよい？



# 連続性だけ考慮すればよければ

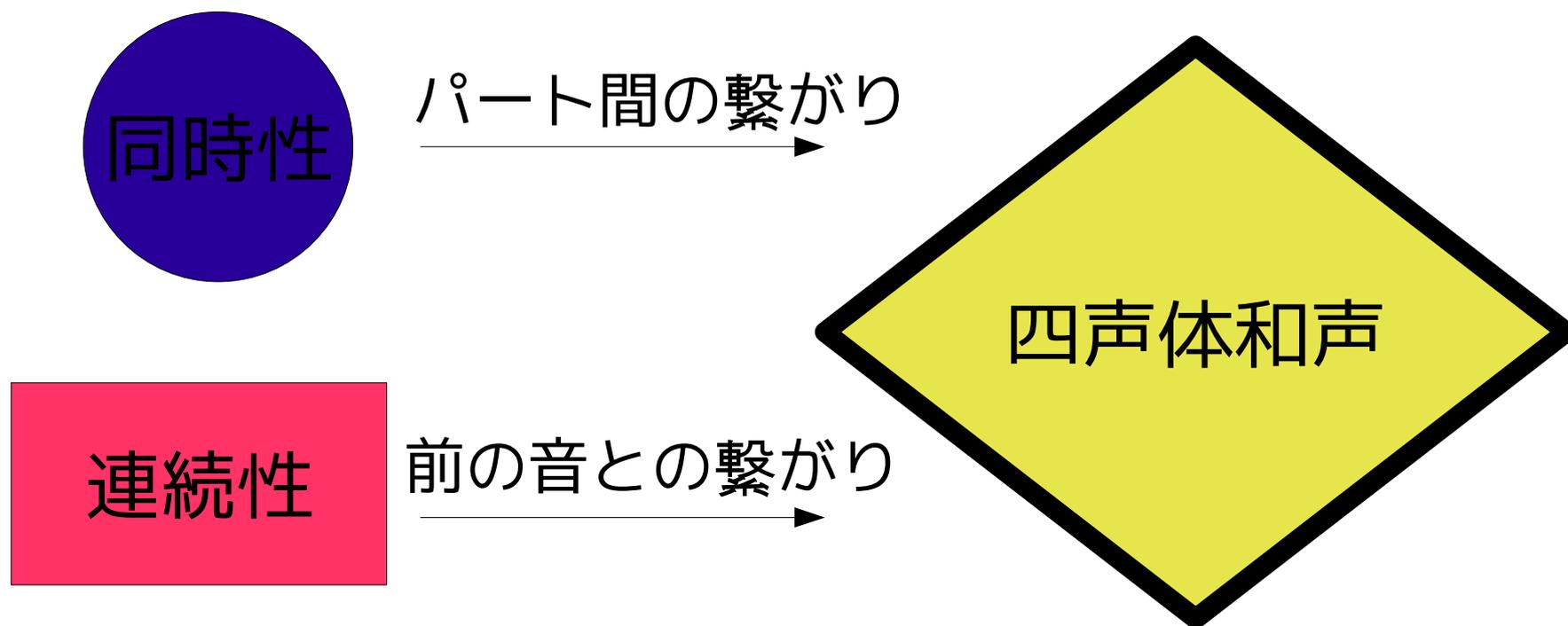
同じく一つ前の音に対して、  
現在の音に滑らかにつながる音を  
あらかじめ決めてしまえばよい？



# 両立の難しさ

この2つの条件を考慮し四声体和声の作成を行う。

ただしこれは全てのパート2オクターブくらいの音を取ると考えると、音符を決定する際に10,000パターンを越える組み合わせを考えなければならない



# 課題の解決

そこで、私たちは

**確率モデルの一種である  
ベイジアンネットワークを用いて  
ソプラノ課題を解決する手法**

を提案する。

# 音楽的同時性と連続性の両立

片方が欠けると不快な曲になってしまう。



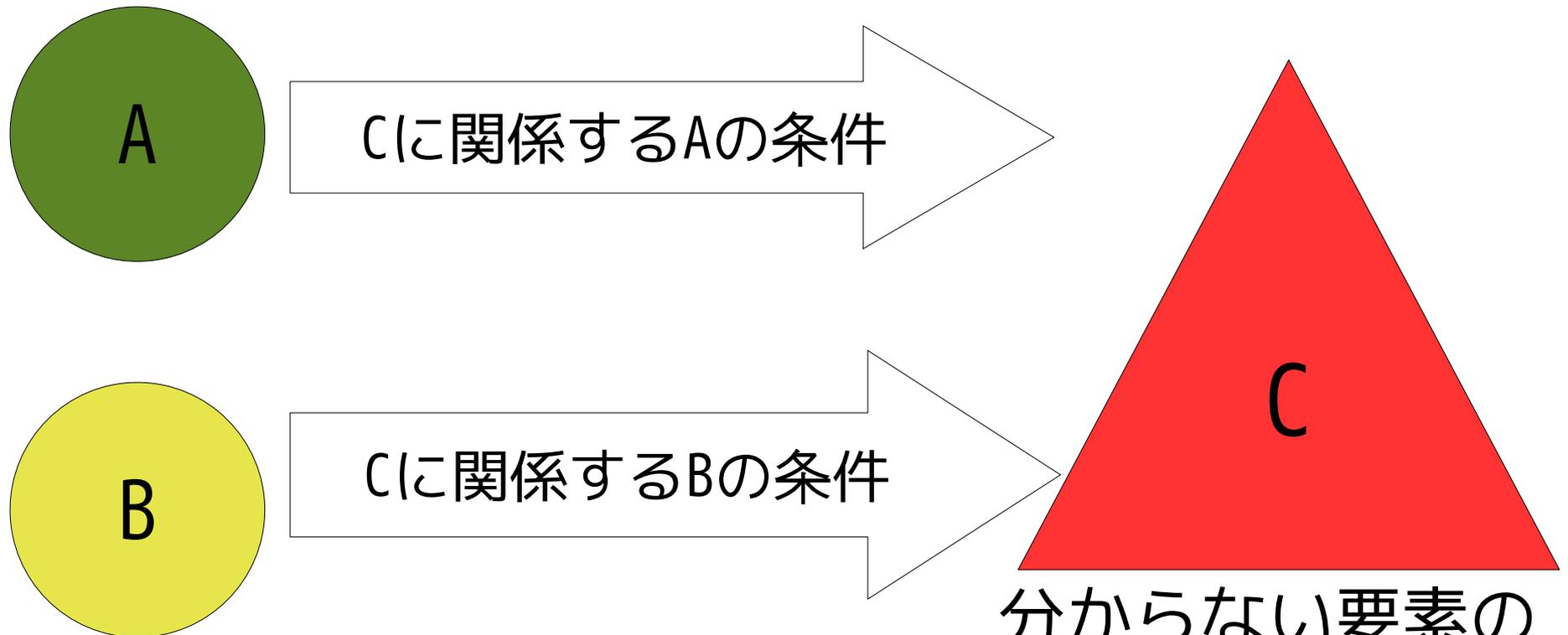
これを別々ではなく  
同時に考慮するのが望ましい



それを行える枠組みが  
ベイジアンネットワークである。

# ベイジアンネットワークとは

設定した事象の因果関係を要素（ノード）と矢印（アーク）によって表し、その関係を条件付き確率を用いて表したものの。



複数の分かっている要素

分からない要素の  
条件付確率を推論する

# ベイジアンネットワークを用いた例

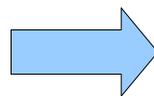
ユーザが入力

今日の天気

- ・ 晴れ
- ・ 曇り
- ・ 雨

洗濯物の量

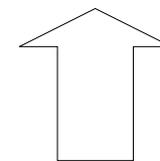
- ・ 多い
- ・ 少ない



BNが決定

洗濯

- ・ 屋外に干す 70%
- ・ 室内に干す 20%
- ・ 洗濯しない 10%



条件付確率表の中の一例

# 条件付き確率表

		屋外	屋内	洗濯しない
晴れ	多い	70%	20%	10%
晴れ	少ない	50%	30%	20%
曇り	多い	20%	50%	30%
曇り	少ない	20%	45%	35%
雨	多い	10%	30%	60%
雨	少ない	10%	10%	80%

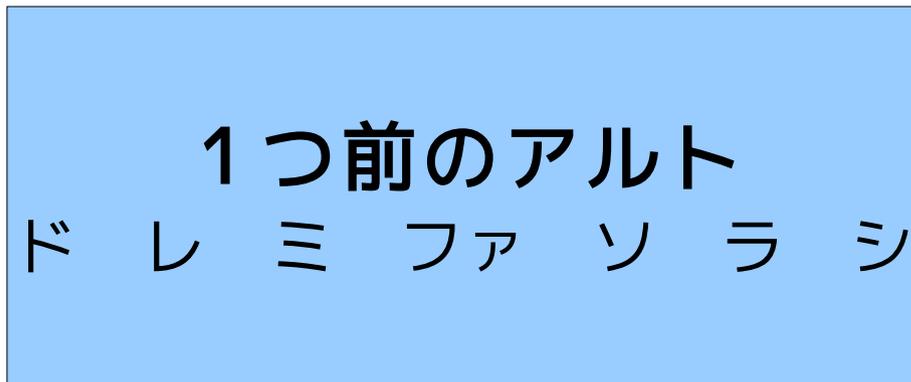
# 本研究を用いての例

アルトを選び出す場合



ファを選択

ドを選択



# なぜソが選ばれたか？

結果ソが選ばれる！

ソプラノ  
ド

1つ前のアルト  
ファ

## アルトの確率

ド . . . 20%

レ . . . 5%

ミ . . . 5%

ファ . . . 20%

ソ . . . 40%

ラ . . . 5%

シ . . . 5%

# 実際の条件付確率表

前の音

ソプラノの音

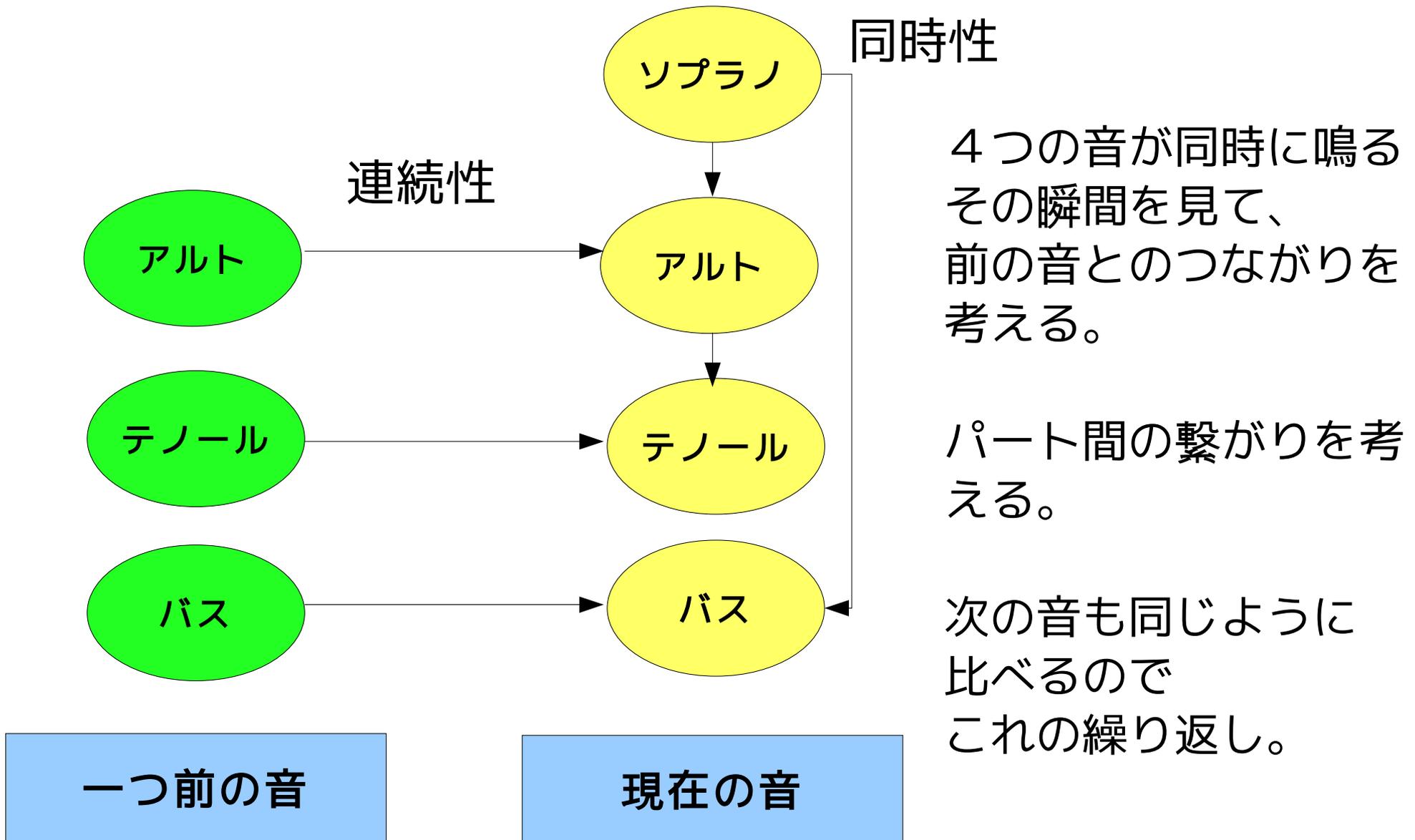
選ばれる音

Probability Distribution Table For a1

前の音	ソプラノの音	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
66	80	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
66	81	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	60	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	61	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	62	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	63	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	64	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.199	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.004	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
67	65	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	66	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.014	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	67	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.195	0.022	0.108	0.195	0.022	0.111	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022
67	68	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	69	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.049	0.01	0.088	0.147	0.46	0.07	0.01	0.029	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
67	70	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	71	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.046	0.015	0.076	0.35	0.046	0.193	0.046	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
67	72	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.021	0.007	0.035	0.007	0.063	0.035	0.118	0.312	0.007	0.313	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
67	73	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	74	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.333	0.072	0.185	0.033	0.176	0.007	0.098	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
67	75	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	76	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.033	0.011	0.011	0.056	0.011	0.011	0.255	0.056	0.234	0.011	0.078	0.122	0.011	0.011	0.011	0.011
67	77	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.146	0.016	0.073	0.016	0.407	0.016	0.016	0.081	0.016	0.016	0.016	0.016
67	78	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.004	0.037	0.258	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037
67	79	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.098	0.02	0.341	0.02	0.06	0.1	0.02	0.06	0.02	0.02
67	80	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
67	81	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
68	60	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
68	61	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
68	62	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
68	63	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
68	64	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
68	65	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.005	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047

Randomize    Ok    Cancel

# ベイジアンネットワークのモデルについて



# システム概要

ユーザー  
作ったソプラノを取り込む

メインシステム  
音楽データを  
ベイジアンネットワークに送り  
パートごとに音の選出をする

ベイジアンネットワーク  
確率データから  
音の決まっていない  
パートの確率値を  
それぞれ計算する

出力  
四声体和声での曲の再生

メロディー入力

↓  
確率計算

↓  
音の選出

↓  
出力

# 曲の前提条件

本研究はソプラノ課題を参考にした



- すべての音が同時にならなくてはいけない制約

さらに

- ソプラノの音域はC4～A5までの音に制限する
- ソプラノの調はハ長調とし  
ダイアトニックスケール(白鍵のみの音)にする

# 2つの確率データ

確率をルールとして決めるシステム

「ルールベース型」

と

確率をデータベースから学習させるシステム

「事例ベース型」

を比較する。

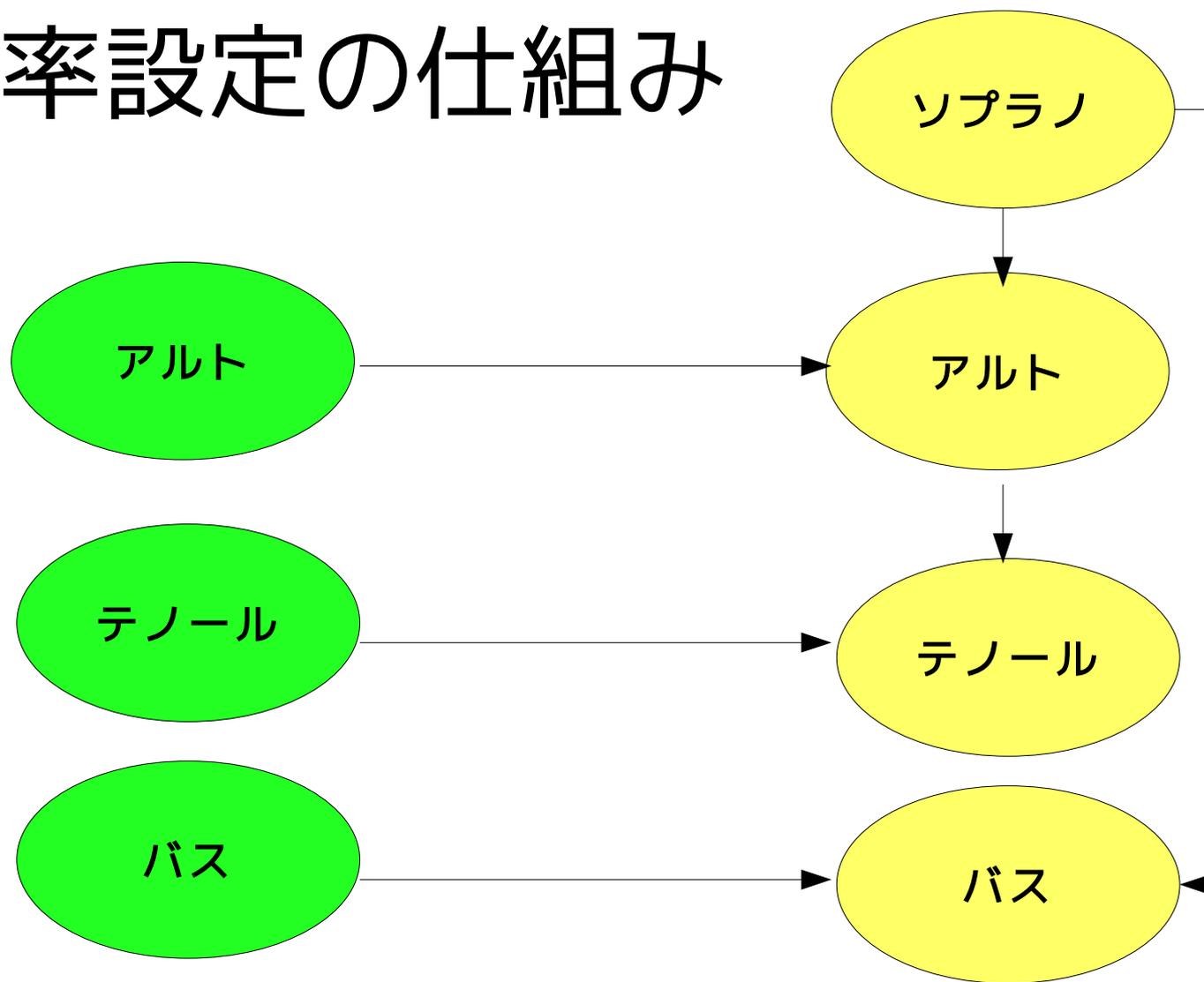
# 「ルールベース型」の狙い

ハ長調らしい音を出やすく

協和音程を出やすく

前後の音は離れすぎず

# 確率設定の仕組み



外声を意識しバスはソプラノと、  
内声を意識しアルトはテノールと関連付けられている

アルトを生成する場合

## 初期値設定

ド  
0.4

ファ,ソ  
0.3

ラ,ミ  
0.2

レ,シ  
0.1

## ソプラノとの関係

完全4度5度  
×1.3

長短3度6度  
×1.1

その他  
×1.0

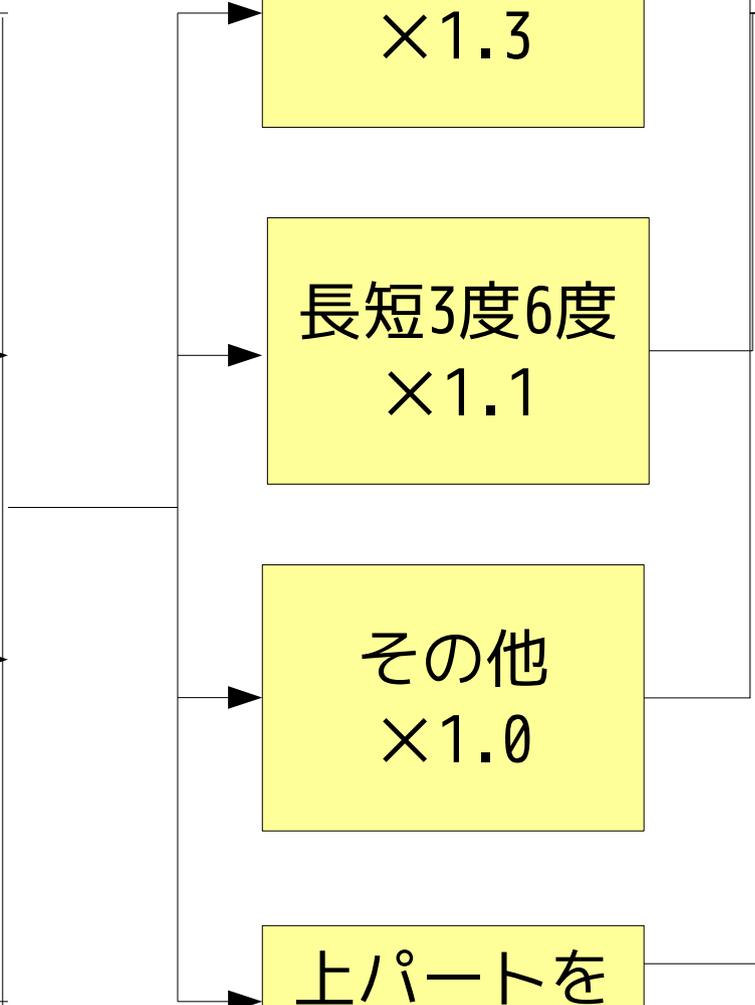
上パートを越す  
×0

## 前のアルトとの関係

前後の音程  
5度以上  
×0.3

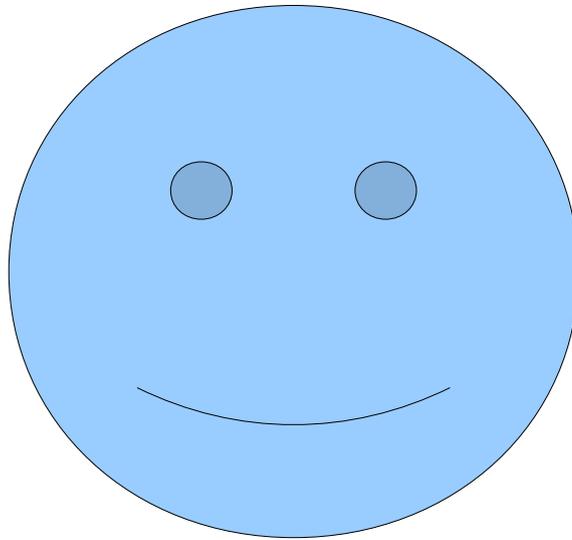
前後の音程  
1オクターブ以上  
×0.3

アルト



# 実験

例として喜びの歌を用いる。



# 結果の考察

♩ = 120

soprano

alto

tenor

bass

The image displays a musical score for four vocal parts: soprano, alto, tenor, and bass. The tempo is marked as ♩ = 120. The time signature is 4/4. The soprano part starts with a quarter note on G4, followed by quarter notes on A4, B4, and C5 in the first measure, then quarter notes on B4, A4, G4, and F4 in the second measure, quarter notes on E4, D4, C4, and B3 in the third measure, and a half note on A3 in the fourth measure. The alto part starts with a quarter note on G4, followed by quarter notes on A4, B4, and C5 in the first measure, quarter notes on B4, A4, G4, and F4 in the second measure, quarter notes on E4, D4, C4, and B3 in the third measure, and a half note on A3 in the fourth measure. The tenor part starts with a quarter note on G4, followed by quarter notes on A4, B4, and C5 in the first measure, quarter notes on B4, A4, G4, and F4 in the second measure, quarter notes on E4, D4, C4, and B3 in the third measure, and a half note on A3 in the fourth measure. The bass part starts with a quarter note on G3, followed by quarter notes on A3, B3, and C4 in the first measure, quarter notes on B3, A3, G3, and F3 in the second measure, quarter notes on E3, D3, C3, and B2 in the third measure, and a half note on A2 in the fourth measure.

上は出力結果を楽譜にしたものである。

# 良かった点

♩=120

The image shows a musical score for four voices: soprano, alto, tenor, and bass. The tempo is marked as ♩=120. The time signature is 4/4. The score consists of four measures. The soprano part starts with a half note G4, followed by quarter notes A4, B4, C5, D5, E5, F5, G5, and ends with a half note G5. The alto part starts with a half note F4, followed by quarter notes G4, A4, B4, C5, D5, E5, F5, G5, and ends with a half note F5. The tenor part starts with a half note E4, followed by quarter notes F4, G4, A4, B4, C5, D5, E5, F5, and ends with a half note E5. The bass part starts with a half note D3, followed by quarter notes E3, F3, G3, A3, B3, C4, D4, E4, and ends with a half note D4. The chords in each measure are: Measure 1: G4-A4-B4-C5 (D4), F4-G4-A4-B4 (D4), E4-F4-G4-A4 (D4), D3-E3-F3-G3 (D4). Measure 2: A4-B4-C5-D5 (E4), G4-A4-B4-C5 (E4), F4-G4-A4-B4 (E4), E4-F4-G4-A4 (E4). Measure 3: B4-C5-D5-E5 (F4), A4-B4-C5-D5 (F4), G4-A4-B4-C5 (F4), F4-G4-A4-B4 (F4). Measure 4: C5-D5-E5-F5 (G4), B4-C5-D5-E5 (G4), A4-B4-C5-D5 (G4), G4-A4-B4-C5 (G4).

コードネームを用いなくても、15個のうち10個の和音が協和音程になり、不協和音程が少なくなっているなので、不協和音は出にくくなっている。

# 悪い点

♩ = 120

The image shows a musical score for four voices: soprano, alto, tenor, and bass. The tempo is marked as ♩ = 120. The time signature is 4/4. The score consists of four measures. In the final measure, there is a dissonant chord where the soprano, alto, and tenor parts have notes that are a second apart (e.g., G4 and A4), and the bass part has a note that is a second below the soprano (F4), creating a 2-7 interval between the soprano and bass.

同時にミ・レ・ドやソとファが同時にがなってしまうような所が出てしまっている。

これは2度や7度の関係なので、不協和音程であり不協和音を生み出す原因である。

# 第2小節について

1 2 3 4

S

A

T

B

1 2 3 4

ソ フ ミ レ

ド ド ド ソ

ソ レ レ

ミ ド ド フ

# 悪い点

ソプラノ・テノール間でオクターブの関係になっており、聞こえが単調になっている。

ソプラノがミならテノールもミ、ソプラノがドならテノールもド、このようになっている部分が少し多い。

# 1小節について

The image shows a musical score for Soprano (S) and Tenor (T) parts. The Soprano part is on the top two staves, and the Tenor part is on the bottom two staves. The notes are circled in ovals. The Soprano part has four notes: G4, A4, B4, and C5. The Tenor part has four notes: G3, F3, E3, and D3. The notes are circled in ovals.

この小節は不協和音ではないが、「ミミファソ」とオクターブの関係の音が出てしまっている。

# 理由

パート間の依存関係を簡略化

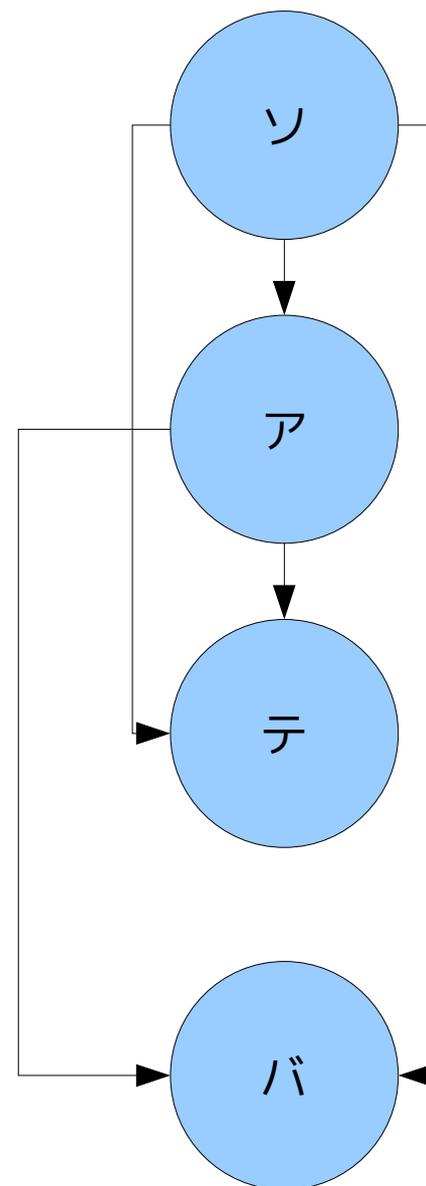
パート間では複雑に依存すべき依存関係を大幅に省略した。

よって . . .

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。

### 実現できない理由

- 確率設定がより複雑になる
- 事例ベースでのデータの取得方法などに問題点がある。事例ベースについては次のページから。



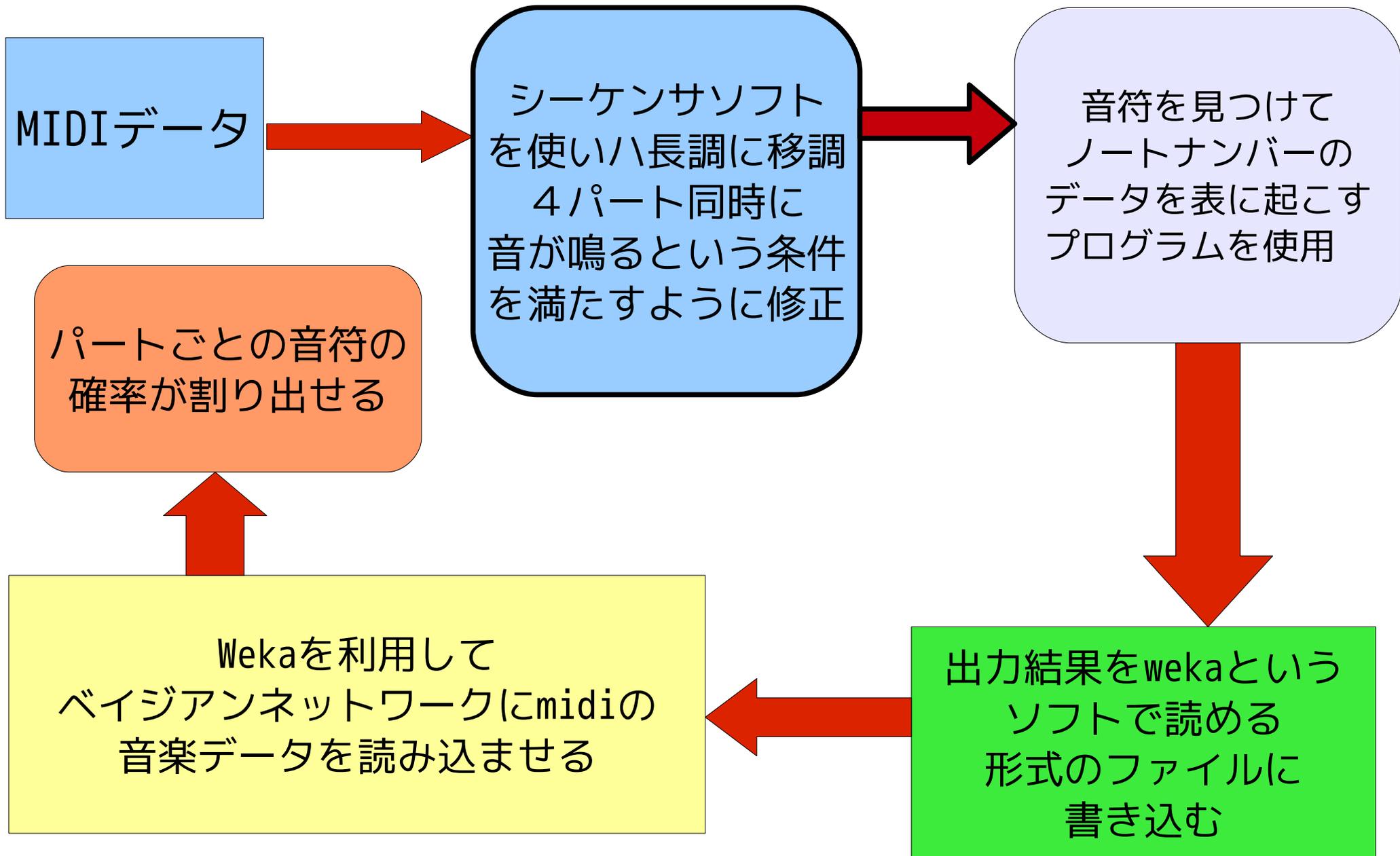
# 音楽データから確率統計を取る

## 事例ベース型の研究

流れとしてはルールベース型と同じ。  
使う確率データだけが別のもの。

既存の四声体和声の曲から  
確率データを学習するシステム。

# MIDIファイルのデータをWEKAに読み込ませる流れ



# 使用楽曲の条件

- 8分音符以上の音で構成されている
- 長調で構成された曲をハ長調に移調して使用

今回はJ.S Bachの37曲を使用

# 実験方法

ソプラノが1オクターブ以上の音域で多く収集できた。

そのため、実験はまずソプラノを1オクターブ下げたデータで行い、その後確認として通常のソプラノで行う。

# 喜びの歌（ 1 オクターブ下 ）の楽譜出力結果

The image displays a musical score for a song titled 'Joyful Song' (喜びの歌), presented one octave lower. The score is written for four vocal parts: Soprano, Alto, Tenor, and Bass. The time signature is 4/4. The music is organized into three measures. The Soprano and Alto parts feature a melodic line, while the Tenor and Bass parts provide a harmonic accompaniment. The key signature is one flat (B-flat major or D minor).

15個の和音のうち13個が協和音

# 結果の考察

協和音が多い。

しかし、すべて協和音にはなっていない。

データの増加とベイジアンネットワークの改良  
で解決すると考えられる。

# 喜びの歌の楽譜出力結果

The image displays a musical score for a four-part vocal setting of 'Joyful Song' (喜びの歌). The score is written in 4/4 time and consists of four staves: Soprano, Alto, Tenor, and Bass. The Soprano and Alto parts are in treble clef, while the Tenor and Bass parts are in bass clef. The music is composed of quarter and eighth notes, with a final cadence in the fourth measure of each part. The Soprano part starts on a high note and descends, while the Bass part starts on a low note and ascends.

- 1 5個の和音のうち5個の和音が協和音程を取っている。  
ルールベース型と比べ、不協和音が出易い。

# 結果の考察

学習する楽曲データの不足



確率値が算出できない所が発生



すべての音の確率が同じになる

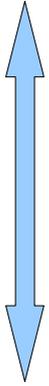


音がランダムで選ばれてしまい  
協和音程を選ばない事が多くある

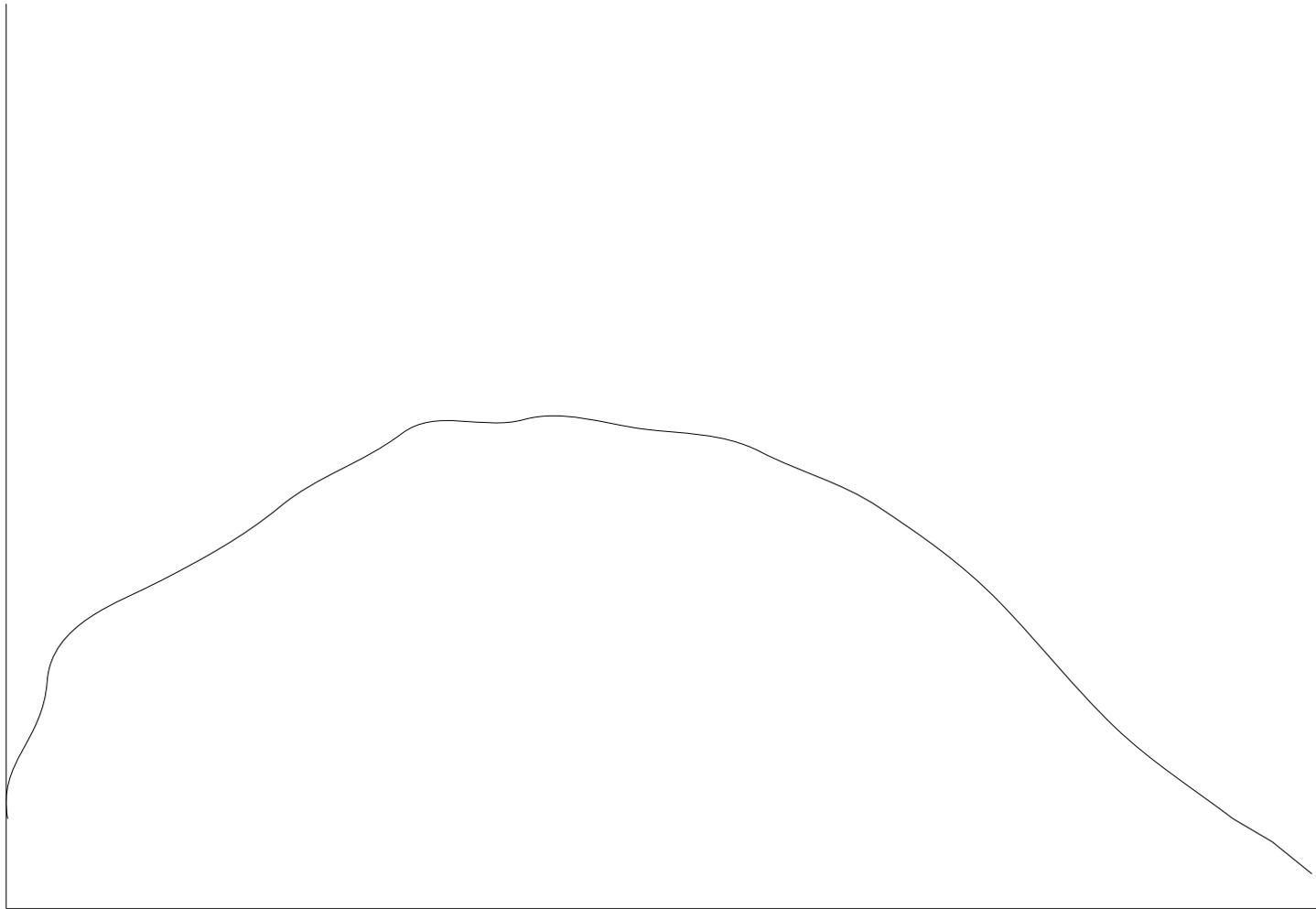
# データの偏り

確率データの量

多い



少ない



低い



高い

音域

ソプラノが低ければ、収集したデータは豊富だが  
ソプラノが高くと、データが存在しない場合がある



すると、ベイジアンネットワークの性質上  
データがないのですべての音の確率  
が均等になっている



よって、現段階ではランダムに音が選ばれてしまう

## 事例ベース全体の考察

問題を解決する為には、サンプルを増やす事が先決。

更にデータ量が増えれば、ベイジアンネットワークの関係性の追加が可能になるので実装する。

## 終わりに

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。

完璧ではないが四声体和声に近いものはできた。

不協和音を完全に取り除くことはできなかったが、改善点は見出せた。

今後はベイジアンネットワークの改良によって改善していきたい。

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.

三浦雅展, 下石坂徹, 齊木由美, 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.

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.

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.

S.Phon-Amnuaisuk and G.A.Wiggins, ``The Four-Part Harmonisation Problem: A comparison between Genetic Algorithms and a Rule-Based System'', \textit{AISB'99 Symposium on Musical Creativity}, 1999.

M. Allan and C. K. I.Williams, ``Harmonising Chorales by Probabilistic Inference'', \textit{Advances in Neural Information Processing Systems}, 2004.

島岡譲他, ``和声 理論と実習 I'', 音楽之友社, 1982.

深山 寛, 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

S.Phon-Amnuaisuk and G.A.Wiggins, ``The Four-Part Harmonisation