

# ネットワーク中心性を用いた核音の計量分析

中洲 貴一・小嶋 彩加・足立 潤治・森川 葵・河瀬 彰宏 (同志社大学文化情報学部)

**概要:** 従来の音楽学の理論的研究では、日本音楽の構造を把握するために、小泉文夫が提唱した核音とテトラコルド理論、柴田南雄が考案した骸骨理論が活用されてきた。骸骨理論は、楽曲の旋律構造を大局的に捉えられる利点があるものの、その基礎をなす核音の解釈が分析者によって一意に定まっていなかった。本研究では、従来研究において曖昧に解釈されてきた核音を厳密に定義し、核音の解釈の違いによって生じる分析上の問題点を計量的な観点から整理した。

**キーワード:** 日本伝統音楽、音組織、骸骨理論、ネットワーク分析

## Quantitative Analysis of Nuclear Tones Using Network Centrality

Kiichi Nakasu / Ayaka Kojima / Junji Adachi / Aoi Morikawa / Akihiro Kawase  
(Faculty of Culture and Information Science, Doshisha University)

**Abstract:** In theoretical studies of musicology, the nucleic-tone and tetracord theories proposed by Fumio Koizumi and the skeleton theory developed by Minao Sibata have been applied to understand the structure of Japanese music. The skeleton theory has the advantage of being able to grasp the melodic structure of a piece of music from a broad perspective. However, there is a problem that the interpretation of the nuclear tone, which forms the basis of the skeletal theory, is not uniquely determined by each analyst. In this study, the nuclear tones, which have been ambiguously interpreted in previous studies, are strictly defined, and the analytical problems caused by differences in interpretation of the nuclear tones are sorted out from a quantitative perspective.

**Keywords:** Traditional Japanese Music, Tone System, Skelton Theory, Network Analysis

### 1. はじめに

音楽学では、異文化の音楽を理論的に把握し、音楽の地域性や普遍性を明らかにするために、音組織という概念が用いられてきた。音楽学者の小泉文夫(1978)によると、音組織とは、「音の高さに関する理論を総括するもの」であり、音律、音階、旋法、調などを含む概念である[4]。

これまでに日本音楽の地域性や普遍的特徴を探るために、音組織に関する様々な指標や表現手法が考案されてきた。小泉(1958)は、日本音楽の定性的研究を通じて、核音と名付けた完全4度音程を構成する2つの音高と、核音間に位置する1つの中間音の3つの音高で構成される構造を発見した。小泉は、これをテトラコルド(e.g. 付録A)と命名し、日本音楽における最も重要な音組織であると結論付けた[2]。さらに、小泉(1969)は、わらべ歌の性質を捉えるために、歌詞や旋律の類似性から同一楽曲として類別される変型(variant)を採集して比較分析した。そして、テトラコルドに基づき、変型の旋律構造の共通点や相違点を整理した[3]。

作曲理論家の柴田(1978)は、テトラコルドを用いて旋律構造を峻別することの限界を指摘し、楽曲を構成する旋律を音高と音高間の推移関係に解体することで、旋律構造をネットワークとして表現する方法論を提案した。柴田は、この方法論を骸骨理論、ネットワーク表現を骸骨図と命名

し、これまで小泉のテトラコルド理論では把握できなかった日本音楽の旋律構造を視覚的に俯瞰して捉える道筋を示した[7]。

骸骨理論を利用した旋律の可視化・類型化の事例には、大塚(1993)による三味線音楽の旋律分析[6]や山下(2000)による日本歌謡曲の旋律分析[8]などがある。このようなネットワークモデルを導入した旋律の表現は、これまでに複数考案されており、近年は、Kroher and Díaz-Báñez(2019)によるフラメンコの旋律の推移関係を表現した事例[5]がある。しかし、いずれの事例においても、骸骨理論の基礎をなす核音の解釈が分析者によって異なり、旋律構造の比較分析には至っていない。実際に、骸骨理論を考案した柴田(1978)[7]も、(a)旋律上で隣接関係にある2つの音高間の音程が完全4度である音高を核音とする場合と、(b)旋律上で隣接関係になくとも、旋律の構成音が完全4度である全ての音高の組み合わせを核音とする場合の2通りの解釈を明示せずを使用している(e.g. 図2)。

以上のように、骸骨理論は、様々な音楽様式の音組織を視覚的に捉えるために運用されてきた。しかし、骸骨図における核音の解釈が分析者によって一意に定まっていなかったことから、骸骨理論の運用には、分析の再現可能性が担保されにくい問題があった。そこで、本研究では、柴田の骸骨理論と核音の解釈(a)(b)をそれぞれ厳密に定義し、核音

の解釈による分析結果の差異や問題点を計量的な観点から明らかにすることを目的とした。

## 2. 分析データの概要

小泉 (1958) によると、わらべ歌の音組織は、日本伝統音楽のなかで最も基本的な要素を示している [2]。そこで、本研究では、旋律構造の骨格をなす核音の基礎的な性質を捉えるために、日本伝統音楽の基盤となるわらべ歌を分析対象として扱った。具体的には、全国 47 都道府県のわらべ歌が掲載されている『日本わらべ歌全集』(柳原出版 1972–1992) に掲載された楽曲を用いた。

『日本わらべ歌全集』は、全 27 巻・39 冊から構成されており、各巻の楽曲は、17 種目の分類に基づき掲載されている。本研究では、小泉 (1969)[3] と同様に、子どもたちの自発的な遊びの中で育まれてきた歌に着目し、遊びを目的にした 7 種目を全巻から収集し、3,693 曲を分析対象として扱った (表 1)。なお、選定した分析対象には、47 都道府県の楽曲が含まれているが、「アイヌのわらべ歌」と「沖縄のわらべ歌」は、言語面と音楽面の双方の観点において、日本本土のわらべ歌と大きく異なることから、本研究の分析対象から除外した。

表 1 種目別の使用楽曲数

種目名	楽曲数
遊びのはじめ	374
手まり歌	1,008
お手玉歌	430
手遊び歌	637
鬼遊び歌	430
縄とび歌	414
外遊び歌	400
合計	3,693

## 3. 分析方法

### 3.1 音高の抽出

本研究では、3,693 曲のわらべ歌を MusicXML に変換した。XML パーサを通して各楽曲から<pitch>タグに含まれる音高データを MIDI ノート番号 (MIDI 規格で定められた整数値) へ変換した。そして、これを時系列に並べた音高ベクトル  $X = (x_k)_{k=1}^m$  を抽出した。ただし、要素  $x_k \in \mathcal{X}$  は、楽曲中の  $k$  番目の音高を示し、 $m$  は、楽曲中の音高数を表す。また、 $\mathcal{X}$  は、 $x_k$  が取り得る MIDI ノート番号の集合である。

### 3.2 音高ネットワークの構築

本研究では、任意の楽曲から生成した  $X$  中の音高を頂点集合  $V$ 、隣接する 2 つの音高  $(x_k, x_{k+1}) (1 \leq k < m)$  の順序対を要素にもつ弧集合  $A \subseteq V \times V$  と捉えることによって、ネットワーク  $G = (V, A)$  を構築した。

### 3.3 2通りの核音の解釈

本研究では、前述の 2 通りの核音の解釈 (a)(b) につい

て、ネットワーク  $G = (V, A)$  の構成要素を用いてそれぞれの核音を次のように定義した：

(a)  $|x_k - x_{k+1}| = 5 (1 \leq k < m)$  を満たす全ての  $(x_k, x_{k+1})$ 。

(b)  $|x_i - x_j| = 5$  を満たす  $x_i, x_j \in V$ 。

上記の (a)(b) の定義に基づき、各楽曲の骸骨図 (ネットワーク) を構築し、ネットワーク分析において培われた種々の分析を実施した。

### 3.4 骸骨図の構築例

ここでは、『日本わらべ歌全集』2 巻 (上) に掲載された《一つどせ下町中半の》を用いて、ネットワークの構築例を示す。図 1 の旋律の 20 音から生成した音高データの時系列ベクトル  $X$  は、次の通りである：

$$X = (x_k)_{k=1}^{20} = (65, 67, 67, \dots, 62, 62).$$

次に生成したベクトル  $X$  の音高を要素に持つ頂点集合  $V$  と、 $X$  の bigram を要素に持つ弧集合  $A$  を抽出する。頂点集合  $V$  と弧集合  $A$  から構築したネットワーク  $G = (V, A)$  を図 2 に示す。

図 2(a) は、解釈 (a) に基づくネットワークであり、推移関係にある音高のうち、完全 4 度をなす 2 つの音高 (65, 60), (67, 62) の頂点  $\{60, 62, 65, 67\}$  を核音として強調表示している。図 2(b) は、解釈 (b) の場合であり、構成音のうち、完全 4 度をなす任意の音高を核音として決定するため、解釈 (a) において特定した核音に加え、頂点  $\{72\}$  も核音として特定・強調表示している。



図 1 《一つどせ下町中半の》の楽譜

### 3.5 ネットワーク中心性の算出

本研究では、両解釈における核音の旋律構造上の位置付けを計量的な観点から捉えるために、各楽曲に対して次の 6 つのネットワーク中心性を計算した\*1：

- **次数中心性**：より多くの頂点と接続関係にある頂点を中心的と評価する指標。入次 (In Deg.) と出次 (Out Deg.) で区別して算出した。
- **媒介中心性**：頂点間の経路上に出現する頂点を中心的と評価する指標 (Between.)。
- **近接中心性**：他の頂点からの平均距離が比較的短い頂点を中心的であると評価する指標。入次 (In Close.) と出次 (Out Close.) で区別して算出した。
- **PageRank**：出次数に対して入次数が大きい中心的な頂点と接続する頂点を中心的と評価する指標。
- **固有ベクトル中心性**：隣接する頂点の中心性を加味し、

\*1 ただし、3 音旋律 (3 つの頂点のみで構成されるネットワーク) において、全ての音高が接続関係にある場合に、媒介中心性の値が 0 になるため、算出しなかった。

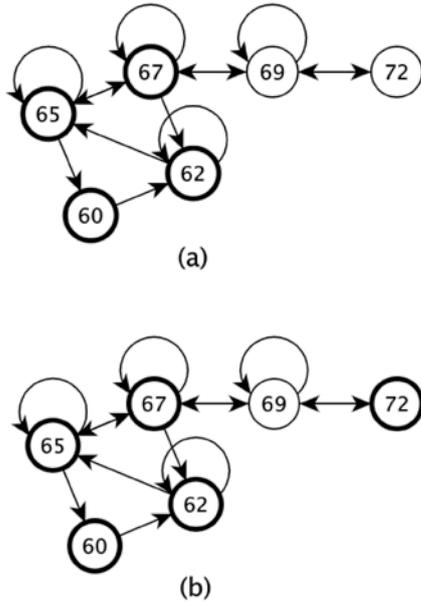


図2 図1の旋律から構築したネットワーク例

中心的な音高と隣接する頂点を中心的と評価する指標。入次 (In Eigen.) と出次 (Out Eigen.) で区別して算出した。

- **Katz 中心性**：全ての頂点に一定の中心性を付与し、中心的な音高と隣接する頂点を中心的と評価する指標。入次 (In Katz) と出次 (Out Katz) で区別して算出した。

### 3.6 中心性の比較

両解釈における核音と核音でない音高の中心性の差を明らかにするために、各楽曲から算出した中心性の値を2群に分けて、Mann-Whitney の  $U$  検定を実施した。 $U$  検定は、2群間の分布の差の有無を検証するノンパラメトリックな統計的仮説検定であり、 $p$  値が有意水準  $\alpha$  を下回る場合に、いずれかの群の観測値が他の群よりも大きい傾向にあると判断できる。独立した2群から無作為に抽出した観測値をそれぞれ  $X, Y$ 、観測値  $X$  が観測値  $Y$  よりも大きくなる確率を  $\pi$  とするとき、 $U$  検定の帰無仮説  $H_0$  は、次のように記述できる：

$$H_0 : \pi := P(X > Y) + \frac{1}{2}P(X = Y) = 0.5.$$

Divine et al.(2018) は、 $\pi$  の表現手法として、ROC 曲線によるグラフ表現を提案している。Mann-Whitney の  $U$  検定の比較対象である2群を従属変数、標本の観測値を独立変数に設定したROC 曲線を考えると、帰無仮説  $H_0$  は、 $\pi$  と曲線の下側面積 AUC (Area Under the Curve) が一致する状況 ( $\pi = \text{AUC}$ ) を意味する。したがって、ROC 曲線は、標本の観測値から2群を区別できるかを検証している点において Mann-Whitney の  $U$  検定と共通している [9]。

本研究では、有意水準  $\alpha = 0.05$  において、核音の中心性の値と核音以外の中心性の値を2群と見なして Mann-Whitney の  $U$  検定を実施した。

### 3.7 AUC の差の検定

解釈 (a)(b) による核音の振る舞いを比較するために、有意水準  $\alpha = 0.05$  において、帰無仮説  $H_0$  : 「解釈 (a) の AUC と解釈 (b) の AUC の値に差はない」と設定し、解釈間における AUC の差の検定を実施した\*2。

図3は、5音旋律における核音と核音でない音高を従属変数、次数中心性を独立変数に設定したROC 曲線の例であり、曲線の下側面積が AUC (核音の中心性の値が核音でない音高の中心性の値よりも大きくなる確率) に相当する。ここでは、前述の  $X$  と  $Y$  に対して、それぞれ核音の次数中心性の値と核音でない音高の次数中心性の値を設定した。したがって、図中の赤い実線と青い点線は、それぞれ解釈 (a) と解釈 (b) における比較結果を表している。

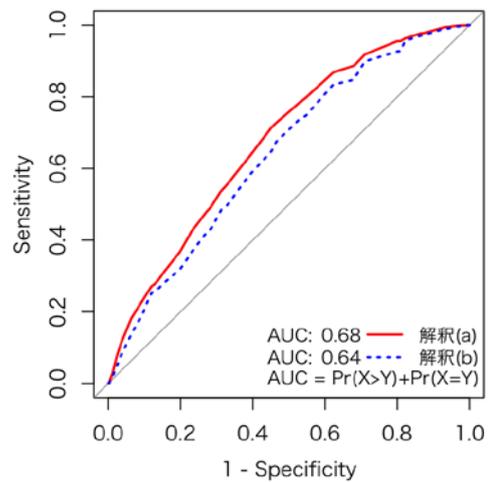


図3 5音旋律における入次数中心性のROC 曲線の例

## 4. 分析結果

### 4.1 構成音数別の集計結果

表2は、分析対象を構成音数別に集計した一覧である。表中の最右列は、構成音数ごとの楽曲数を示し、解釈 (a) および解釈 (b) が記載された列は、それぞれの解釈に応じて集計した構成音数ごとの楽曲数を示している。1曲あたりの平均音数は、全楽曲では4.19音、解釈 (a) と解釈 (b) ではそれぞれ4.39音と4.37音であった。

以降の比較結果では、核音のみによって構成される楽曲 (完全4度音程のみの旋律) と核音を一切含まない楽曲は、核音と核音でない音高が比較できないため除外した。また、核音を含む楽曲数が20曲以下である1音、2音、9音、

\*2 本研究では、統計解析ソフト R の pROC パッケージを用いて、AUC の差の検定を実施した。

表 2 構成音数別の楽曲数

構成音数	解釈 (a)	解釈 (b)	全楽曲
1 音	0	0	2
2 音	0	0	203
3 音	677	815	1,045
4 音	829	1,061	1,210
5 音	498	624	670
6 音	271	300	330
7 音	100	90	120
8 音	57	83	94
9 音	13	15	18
10 音	1	1	1
合計	2,446	2,989	3,693

10 音の各構成音数の楽曲についても計量的な観点から除外した。

#### 4.2 核音の中心的位置付け

両解釈における核音の中心的位置付けを明らかにするために、Mann-Whitney の  $U$  検定により検証した。また、核音と核音以外の中心性の値の関係について、有意差が確認された組み合わせに対して、核音の中心性の値が核音でない音高よりも大きくなる確率を AUC により算出した (表 3)。

表 3 において、 $AUC > 0.5$  を満たす場合と満たさない場合に対して、それぞれ表中に○と×を記載した。したがって、比較結果に○が記載されている場合は、核音の中心性の値が、核音でない音高よりも大きい傾向にあることを示している。

表 3 核音と核音でない音高の中心性の比較結果

解釈	中心性	3 音		4 音以上	
		$p$ 値	AUC > 0.5	$p$ 値	AUC > 0.5
(a)	In Deg.	$p < 0.0001$	○	$p < 0.0001$	○
	Out Deg.	$p < 0.0001$	×	$p < 0.0001$	○
	Between.			$p < 0.0001$	○
	In Close.	$p < 0.0001$	○	$p < 0.0001$	○
	Out Close.	$p < 0.0001$	×	$p < 0.0001$	○
	PageRank	0.0025	○	$p < 0.0001$	○
	In Eigen.	0.0137	○	$p < 0.0001$	○
	Out Eigen.	$p < 0.0001$	×	$p < 0.0001$	○
	In Katz	0.0005	○	$p < 0.0001$	○
	Out Katz	$p < 0.0001$	×	$p < 0.0001$	○
(b)	In Deg.	0.0002	○	$p < 0.0001$	○
	Out Deg.	$p < 0.0001$	×	$p < 0.0001$	○
	Between.			$p < 0.0001$	○
	In Close.	$p < 0.0001$	○	$p < 0.0001$	○
	Out Close.	$p < 0.0001$	×	$p < 0.0001$	○
	PageRank	0.0012	○	$p < 0.0001$	○
	In Eigen.	0.0453	○	$p < 0.0001$	○
	Out Eigen.	$p < 0.0001$	×	$p < 0.0001$	○
	In Katz	0.0024	○	$p < 0.0001$	○
	Out Katz	$p < 0.0001$	×	$p < 0.0001$	○

解釈 (a)(b) に関して、核音と核音でない音高の中心性の比較を行った結果、4 音以上の旋律において、使用した全ての中心性に有意差があることが明らかになった。また、有意差があった全ての中心性について、 $AUC > 0.5$  より、

核音の中心性の値が、核音でない音高よりも大きい傾向にあることが明らかになった。

3 音旋律においても、使用した 5 つの中心性指標において、有意差が確認された。ただし、有意差が確認された中心性のうち、 $AUC > 0.5$  であった指標は、入次数に着目した中心性 (In Deg., In Close., In Eigen., In Katz) と PageRank の計 5 指標であった。一方で、 $AUC < 0.5$  であった指標は、出次数に着目した中心性 (Out Deg., Out Close., Out Eigen., Out Katz) の 4 指標であった。よって、3 音旋律では、核音の解釈によらず、核音は、入次数に着目した中心性の値が大きくなる傾向にあり、核音でない音高は、出次数に着目した中心性の値が大きくなる傾向にあることがわかった。

#### 4.3 解釈 (a) と解釈 (b) の比較結果

表 4 は、解釈 (a)(b) における AUC の差の検定を実施した結果の一覧である。表中の○は、検定の結果に対して有意差が存在した組合せに対して、解釈 (a) の AUC の値が解釈 (b) の AUC の値よりも大きい場合 ( $AUC(a) > AUC(b)$ ) を示している。

表 4 より、3 音旋律では、入次数に着目した近接中心性 (In Close.) において、有意差が確認された。4 音旋律では、使用した全ての中心性指標において有意差が確認された。このことから、4 音旋律では、解釈 (a) が解釈 (b) よりも AUC の値が大きい傾向にあることがわかった。

5 音旋律では、PageRank を除く 5 つの中心性指標において有意差が確認された。このことから、5 音旋律は、4 音旋律と同様に解釈 (a) が解釈 (b) よりも AUC の値が大きい傾向にあることがわかった。

その一方で、6 音以上の旋律に関しては、全ての中心性指標において、解釈間の AUC に有意な差が見られなかった。

### 5. 考察

表 4 より、4-8 音旋律では、6 つの中心性指標において、核音の中心性の値が核音でない音高よりも有意に大きい傾向にあることが明らかになった。これらの結果は、核音の性質を「中心的な位置」および「他を従属せしめる主導的な要素」と捉えた小泉 (1958)[2] の主張と一致している。

3 音旋律の核音は、入次数に関する中心性の値が大きく、出次数に関する中心性の値が小さい傾向にあった。この結果から、3 音旋律の核音は、旋律中の他の音高から推移しやすい一方で、他の音高に推移しにくい位置付けにあることがわかった。

解釈 (a)(b) について、核音の中心性の値が核音でない音高よりも大きくなる確率 (AUC) を比較した結果、3-5 音旋律について両解釈の AUC に有意差が確認された。3 音旋律では入次数に着目した近接中心性、4 音旋律では全ての中心性、5 音旋律では PageRank を除く 5 つの中心性に

表4 解釈(a)と解釈(b)のAUCの比較結果

中心性	3音		4音		5音		6音以上
	p値	AUC(a)>AUC(b)	p値	AUC(a)>AUC(b)	p値	AUC(a)>AUC(b)	AUC(a)>AUC(b)
In Deg.	0.1734		$p < 0.0001$	○	0.0097	○	
Out Deg.	0.9795		0.0012	○	0.0163	○	
Between.			0.0024	○	0.0062	○	
In Close.	0.0154	○	0.0002	○	0.0049	○	
Out Close.	0.9704		0.0030	○	0.0062	○	
PageRank	0.4315		0.0022	○	0.0572		
In Eigen.	0.2837		0.0015	○	0.0283	○	
Out Eigen.	0.9814		0.0088	○	0.0257	○	
In Katz	0.2474		0.0004	○	0.0298	○	
Out Katz	0.9825		0.0036	○	0.0339	○	

において、解釈(a)のAUCが有意に大きいことが明らかになった。有意差がみられたAUCの大小関係は、いずれも解釈(a)のAUCが解釈(b)を上回る結果となった。これらのことから、3-5音旋律では、解釈(a)の方が核音の中心性の値が核音でない音高よりも大きくなることが明らかになった。したがって、5音以下の旋律では、解釈(a)による核音の方が、旋律構造において、より中心的な位置付けにあり、小泉(1958)[2]が提唱した核音の性質に合致しているといえる。

以上の結果から、核音は、解釈の仕方によらず、旋律構造において中心的な位置付けにある音高であることが明らかになった。ただし、解釈(a)(b)の運用上の差異として、5音以下の旋律では、解釈(a)の方が、旋律構造において中心的な位置付けにある音高を特定しやすいことが明らかとなった。これらのことは、5音以下の旋律が大半を占める日本伝統音楽において、核音の解釈によって、旋律構造における核音の重要度が異なってしまうことを示唆している。したがって、核音の解釈を定めずに、楽曲を分析してしまうと、日本音楽の音組織の解釈が揺らぐ問題が生じることが明らかとなった。

## 6. 結論

本研究では、日本音楽の分析に活用されてきた柴田南雄の骸骨図について、分析者によって一意に定まっていない2通りの核音の解釈を厳密に定義した。そして、ネットワーク中心性指標の観点から、それぞれの解釈における差異や問題点を計量的な観点から明らかにした。分析の結果、2通りの核音の解釈によらず、核音は、核音でない音高と比較して、旋律構造において中心的な位置付けにあることが明らかになった。

とくに、5音以下の旋律では、旋律上で隣接関係にある音高のみを核音と解釈した場合の方が、隣接関係を無視して解釈した場合よりも核音が中心的な位置付けにあることが明らかになった。このことは、核音の解釈の仕方によって、音組織の捉え方が異なってしまうことを示唆している。

本研究では、2通りの解釈に関わらず、旋律中の複数の核音を同等に位置づけて核音でない音高と比較した。しかし、新海(1994)は、音高推移の頻度から、旋律構造における複数の核音は、機能的に異なると考察している[10]。今後の課題として、骸骨理論においても、解釈による核音の機能的差異をより詳細に捉えるためには、核音間においても優劣を設定した上で比較分析する必要があると考えられる。

**謝辞** 本研究は、JSPS 科研費(18K18336, 21K12587)の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] 金光淳：社会ネットワーク分析の基礎。勁草書房，2003.
- [2] 小泉文夫：日本伝統音楽の研究1. 音楽之友社，1958.
- [3] 小泉文夫編：わらべうたの研究(研究編). わらべうたの研究会，1969.
- [4] 小泉文夫：日本の音:世界のなかの日本音楽. 青土社，1978.
- [5] Kroher, N. and Díaz-Báñez, J-M.: Modelling melodic variation and extracting melodic templates from flamenco singing performances, *Journal of Mathematics and Music*. 13(2), pp.150-170, 2019. <https://doi.org/10.1080/17459737.2019.1610194>
- [6] 大塚拜子：三味線の音高組織. 大阪大学, [博士論文], 1993.
- [7] 柴田南雄：音楽の骸骨のはなし. 音楽之友社，1978.
- [8] 山下邦彦：楯円とガイコツ(「小室哲哉の自意識」×「坂本龍一の無意識」). 太田出版，2000.
- [9] Divine, G. W., Norton, H. J., Barón, A. E., and Juarez-Colunga, E.: The Wilcoxon Mann Whitney procedure fails as a test of medians. *The American Statistician*. 72(3), pp.278-286, 2018.
- [10] 新海立子：小泉理論にみる核音の再検討. 音楽学, **40**(1), pp.16-29, 1994

## 参考資料

- 浅野健二・後藤捷一・平井康三郎：日本わらべ歌全集, (全27巻39冊), 柳原出版. 1972-1992.

## 付 録

## A.1 小泉文夫のテトラコルド理論

テトラコルド理論とは、音楽学者の小泉(1958)[2]が提唱した日本音楽を説明するための音型である。テトラコルドは、核音と呼ばれる完全4度音程を形成する2つの音高と1つの中間音の3音で構成される。完全4度音程における中間音の配置は、4通り考えることができ、それぞれの位置関係に対して名称が与えられている(表 A.1)。例えば、図 A.1 のようにラとレを核音とする完全4度音程があるとき、その中間音の候補はロシ、シ、ド、#ドの4通りとなる。

表 A.1 4種のテトラコルド

種類	名称	音程関係
1	民謡のテトラコルド	短3度+長2度
2	都節のテトラコルド	短2度+長3度
3	律のテトラコルド	長2度+短3度
4	琉球のテトラコルド	長3度+短2度

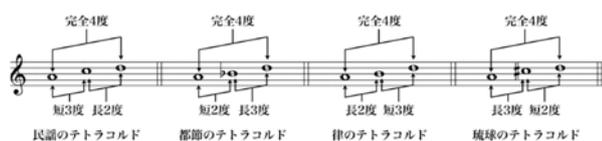


図 A.1 4種のテトラコルドの例