

## 感性工学的手法による和音性多層構造モデルの構築\*

☆坂本 櫻, 山崎 陽一 (関西学院大), 片平 建史 (早稲田大),  
長田 典子 (関西学院大)

## 1 はじめに

和音はメロディ, リズムと共に音楽を構成する3要素の一つとされており, 音の深みを増し, 表現の幅を広げる重要な役割を担っている。そのため, 和音知覚における音響的要因や文化的要因を明らかにする研究が多数行われてきた<sup>[1,2]</sup>。

その中でも, Cook ら<sup>[3]</sup>は, 和音の響きについて持たれているコードの質的特徴に基づき, 不協和 (Dissonance), 緊張 (Tension), モダリティ (Modality) の3つの要因を考慮する必要があることと, それらの要因がピッチの構造から予測可能であることを示した。一方で, 響きをすべて説明できるかについてまでは明らかにされていない。また, 和音の響きはピッチの構造に加えて音色も影響すると考えられるため, 響きの様相はより複雑なものであると考えられる。さらに, 一部のコードについてはピッチの構造のみでは和音の響きを十分に再現できないという報告もある<sup>[4]</sup>。そこで我々は, (1) 音色も考慮した和音の響きを構成する要因は何か, (2) 和音を構成する要因をピッチの構造のみで説明できるのか, の2点を明らかにするため, 感性工学的手法に基づき検討する。

感性工学は, 物理要因とそれらが喚起する感性的反応とを計測し, 得られた感性量を真値 (grandtruth) として物理量との関係をモデル化することで, 物理要因によって喚起される価値や印象を定量化し, 価値や印象をもたらす物理要因を求める技術である。本研究では, 前述の2つの問いについて検討するため, この手法を三和音の響きに適用することで和音の認知構造のモデル化を行った。具体的には, 印象評価実験による響きの構成要因の抽出と, 音響特徴量の抽出を実施し, それらの関係を重回帰分析によって明らかにした。

## 2 和音の響きの構成要因の抽出

## 2.1 目的

和音の響きを構成する要素を明らかにするために, 三和音聴取時の印象および感情を印象評価実験によって計測し, 因子分析を行う。

## 2.2 印象評価語の選定

印象評価実験に用いる評価語の選定は次のような流れで行った。まず自由記述実験により集まった評価語と先行研究により集まった評価語を合わせ, 同一と思われるものを削除した。次に, 適合度実験を実施し, 印象評価実験に適切な評価語データセットを作成した。その中で音響特徴量と直接結びつく「高い」, 「澄んだ」などの評価語を低次, 「落ち着いた」, 「明るい」といった評価語を高次に分類する。その後, 評価語間の類似度を測る距離測定実験を実施し, 多次元尺度構成法を用いて評価語の構造化を行った。多次元尺度構成法により取得された2次元座標からクラスタ分析を行い, それぞれのクラスタ内で重心に近い評価語を代表語として抽出した。

## 2.3 印象評価実験

低次印象空間, 高次印象空間, 感情空間を抽出するために印象評価実験を行った。参加者は, 健全な聴力を有した学生30名である。実験には, 4種類の楽器 (Piano, Violin, Trumpet (in B $\flat$ ), Clarinet (in B $\flat$ )), 5種類の主要な三和音 (Major, Minor, Dim, Aug, Sus4) の基本形の組み合わせである20種類の和音刺激を用いた。また, 音高による影響を取り除くため, 最低音をE $\flat$ 4, 最高音をE $\flat$ 5に固定した。これらの音刺激は4秒間の長さで統一し, 作曲ソフト MuseScore3 を用いて作成した。使用したサウンドフォントは Arachno SoundFont Version 1.0.sf2 である。なお, 音圧をRMS (Root Mean Square) の観点から統制するため,

\*Harmonic hierarchical structure modeling based on Kansei Engineering for ASJ 2024 Spring meeting, by Sakura Sakamoto (Kwansei Gakuin Univ.), Yamazaki Yoichi (Kwansei Gakuin Univ.), Katahira Kenji (Waseda Univ.), Nagata Noriko (Kwansei Gakuin Univ.).

Audacityにより振幅の正規化処理を行っている。実験刺激はPCで再生し、音響アンプ(nano iDSD, iFi audio)とヘッドホン(SONY MDR-CD900ST)を介して提示された。各和音刺激の聴取後、感情・印象それぞれについて評価を行った。感情評価においては、「快—不快」「覚醒—沈静」の程度を AffectGrid 法<sup>[5]</sup>により回答した。各刺激について、刺激聴取から回答までのセッションを4回ずつ繰り返した。印象評価では2.2で抽出された各評価語について、どの程度当てはまっているかを7段階のリッカート尺度により計測した。

## 2.4 因子分析

収集された主観評価データを用いて、因子分析により印象層を構成する評価軸を抽出した。なお、本研究では和音構造と関係した心理反応に着目した検討を行うために、予備検討により覚醒水準が異なることが明らかになったトランペットの刺激は除いて分析を行った。因子分析にはHADI7.10を利用し、抽出法は最尤法、回転法はPromax回転を採用した。また、因子数は平行分析によって決定した。その結果、低次印象層では協和(-)因子、強さ(-)因子、重厚因子の3因子、高次印象層では明るさ、陰気、美的、淡泊、刺激の5因子が抽出された。低次印象層の因子負荷量をTable 1、高次印象層の因子負荷量をTable 2に示す。

この結果、和音の響きは複雑な様相を持つことが明らかになった。特に、従来の研究でmodalityと呼ばれていた要因が、「明るさ」、「陰気」、「美的」など細かく分化され、個々

Table 2 因子負荷量 (低次印象層)

項目	協和(-)	強さ(-)	重厚
よどんだ	.821	-.073	.216
鈍い	.630	-.052	.238
溶け合わない	.553	-.345	-.185
複雑な	.543	-.009	.379
ものたりない	.429	.125	-.411
柔らかい	.038	.794	.017
溶け合う	-.304	.633	.332
浮かんだ	.041	.613	-.075
澄んだ	-.374	.530	-.105
弱々しい	.417	.457	-.384
重厚な	.211	.091	.830
低音にのびのある	.250	.144	.552

Table 1 因子負荷量 (高次印象層)

項目	明るさ	陰気	美的	淡泊	刺激
温かな	.902	.151	.072	-.126	.057
陽気な	.799	-.046	-.087	-.054	.281
明るい	.696	-.163	.051	-.032	.209
なごやかな	.621	.018	.363	.141	-.092
嬉しい	.603	-.207	.223	.161	.148
幸せな	.592	-.208	.287	.129	.126
寂しい	.119	.853	.049	.065	-.139
不安な	-.078	.818	-.191	-.031	.147
センチメンタルな	.092	.773	.191	.079	.009
憂鬱な	-.120	.748	-.119	.040	.060
暗い	-.279	.631	.090	.067	-.002
寒い	-.237	.527	.275	.287	.061
エレガントな	-.070	-.026	.748	-.032	.041
美しい	.176	-.048	.708	.034	.040
ゆったりした	.288	.224	.597	.054	-.392
深い	-.111	.271	.555	-.216	.188
豊かな	.380	.178	.487	-.225	.141
不思議な	-.274	.297	.329	-.014	.216
ドライな	-.234	-.032	.070	.784	.198
淡泊な	.148	.043	-.062	.774	-.021
つまらない	.176	.204	-.211	.572	-.071
刺激的な	-.111	.113	-.018	.048	.757
せかせかした	.177	.187	-.434	.086	.668
生き生きした	.403	-.125	.126	.018	.513

の様相を見る必要性が示唆された。

## 3 和音印象と音響特徴量との関係分析

### 3.1 目的

和音印象を構成する各因子を説明する音響特徴要素を調査するために、JMPを用いて重回帰分析を行う。

### 3.2 音響特徴量の抽出

印象評価実験に用いた和音刺激について、和音の響きの構成要因を説明する音響特徴量を抽出した。Cookらのモデルを補足する音響特徴要素を明らかにするために、彼らの提唱したピッチの構造に基づく音響特徴量に加え、音の主観的な聞こえ方に基づいて規格化された指標である音質評価指標と、上記の音響特徴量以外のスペクトルの帯域的情報に関する音響特徴量を算出した。

まず、ピッチの構造に基づく音響特徴量として、Cookらのモデルを用いて *dissonance*, *tension*, *modality* を和音構成音の音程から算出した。

次に、音質評価指標として、一般の音質評価において用いられている4つの指標 (*loudness*, *sharpness*, *roughness*, *fluctuation strength*) を採用した<sup>[6]</sup>。算出には MATLAB の Audio Toolbox を用いた。

さらに、上記の音響特徴量以外に、スペクトルの帯域的情報として、*Spectral centroids*, *Spectral flatness*, *Spectral skewness*, *Spectral spread*, *Spectral kurtosis*, *Spectral entropy*, *Spectral rolloff*, *Attack slope* を採用した。算出には MATLAB の MIR Toolbox を用いた。なお、楽器の音色は振幅包絡と呼ばれる振幅の時間変化を持ち、最大振幅 (*Attack*) に到達するまでとそれ以降 (*Delay*, *Sustain*, *Release*) で含まれる周波数成分が異なる。そのため、*Mean loudness*, *Mean roughness*, *Spectral flatness*, *Spectral spreads*, *Spectral kurtosis* の指標については *Attack* 区間における特徴量も算出した。

### 3.3 重回帰分析

印象層と感情層の各要素を目的変数、音響特徴量およびそれらの交互作用項を説明変数とし、AIC基準のステップワイズ法による変数選択に基づく重回帰分析を行った。印象層については各因子の因子得点を、感情層については4回分の評価の平均値を標準化したものを代表値とした。分析の結果を Table 3 に示す。なお、表中で説明された変数について、*Spectral* は表記の都合により省略している。表中のすべての要素において、説明力の高いモデル (調整済み  $R^2 > .7$ ) が得られた。また、「協和(-)」、「明るさ」、「陰気」、「快」については特にピッチの構造に関する情報がその形成に強く寄与しているが、他の要素についてはそれ以外の音響的特徴量の影響が大きいことが明らかになった。さらに、複数の項目において、交互作用の効果が有意であった。

和音の印象評価をモデル化した結果、ピッチの構造で十分に説明できる要因と、ピッチ構造に基づく特徴量だけで説明できない要因が明確に分かれた。特に、「重厚」、「覚醒」については、ピッチ構造に基づく特徴量は説明変数として採用されておらず、音質評価指標の *loudness* や、スペクトルの帯域情報の

Table 3 重回帰分析の結果

目的変数	説明変数	$\beta$	調整済み $R^2$
協和(-)	<i>tension</i>	0.709***	0.763***
	<i>modality</i>	-0.548**	
	<i>spreads</i>	-0.363*	
強さ(-)	<i>tension</i>	-0.661***	0.814***
	<i>Attack slope</i>	0.599**	
	<i>spreadsA</i>	1.096***	
	<i>Attack slope</i> · <i>spreadsA</i>	-0.947***	
重厚	<i>loudness</i>	1.093***	0.977***
	<i>flatness</i>	0.014	
	<i>meanLoudnessA</i>	0.072	
	<i>flatness</i> · <i>meanLoudnessA</i>	0.283**	
明るさ	<i>dissonance</i>	0.773**	0.974***
	<i>tension</i>	3.009**	
	<i>modality</i>	-16.374***	
	<i>tension</i> · <i>modality</i>	-17.463***	
陰気	<i>dissonance</i>	-0.926**	0.964***
	<i>tension</i>	-3.651***	
	<i>modality</i>	19.247***	
	<i>tension</i> · <i>modality</i>	20.411***	
美的	<i>tension</i>	-0.528***	0.946***
	<i>modality</i>	0.384***	
	<i>fluctuation strength</i>	0.841***	
	<i>kurtosisA</i>	0.239*	
淡泊	<i>tension</i>	0.266*	0.905***
	<i>modality</i>	-0.279**	
	<i>loudness</i>	-1.257***	
	<i>spreads</i>	-0.839***	
	<i>loudness</i> · <i>spreads</i>	-0.453**	
刺激	<i>modality</i>	-0.273*	0.832***
	<i>loudness</i>	-1.153***	
	<i>spreads</i>	-0.744**	
	<i>loudness</i> · <i>spreads</i>	-0.523**	
快	<i>dissonance</i>	-0.017	0.856***
	<i>tension</i>	-0.463**	
	<i>modality</i>	-3.580*	
	<i>dissonance</i> · <i>modality</i>	-4.078**	
覚醒	<i>loudness</i>	3.956***	0.842***
	<i>centroids</i>	13.170***	
	<i>skewness</i>	19.202***	
	<i>centroids</i> · <i>skewness</i>	7.064***	

\*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$

*Spectral flatness*, *Spectral centroids*, *Spectral skewness* が採用されていた。また、「強さ(-)」、「美的」、「淡泊」、「刺激」などの因子につい

ても、アタック区間の特徴量や、音質評価指標の fluctuation strength, loudness などの影響を強く受けていた。

交互作用については、「明るさ」、「陰気」、「快」において、ピッチ構造に基づいた特徴量の交互作用の効果が強く認められた。これは、我々が響きを知覚する際にピッチの構造に基づく要因を弁別的に捉えるのではなく、総体として捉えていることを示唆するものである。

以上の結果から、ピッチ構造に基づく特徴量に音質評価指標やスペクトルの帯域情報を加えることで、和音の響きの構成要素全体を網羅した説明が可能になると考えられる。また、響きを説明するためには、その弁別的に求められた要因の統合様式に関する検討の必要性が示唆された。

#### 4 協和度における心理評価値との比較

本研究で得られたモデルの妥当性を検討するため、協和度を対象として従来のピッチ構造に基づいた推定値および本研究で構築したモデルに基づく推定値を心理評価値と比較した。同一の音色における和音の違いを比較するためピアノにおける5種類の和音の推定値を算出し、順位を求めた結果を Table 4 に示す。

ここで、5種類の和音の間の協和度の心理評価値に差異が認められるかを一元配置分散分析により検討した。その結果として、和音の種類について主効果が認められた ( $F(3.07, 89.034)=22.350, p<.001$ )。さらに、和音間での具体的な差異を検討するため、Bonferroniの多重比較を行った。その結果、第一順位であった Major と第二順位の Sus4 の間で有意差が認められた ( $p<.01$ )。次に、Sus4 と第三順位である Minor の間では有意傾向が認められた ( $p<.1$ )。Minor と第四位順位である Dim との間には有意差が認められなかったが、第五順位である Aug との間には有意差が認められた ( $p<.05$ )。この結果から、コード間の協和感の大小関係は、

Major>Sus4>Minor≒Dim>Aug

であることがわかる。本モデルで推定した値と心理評価を比較した場合、第三順位と第四順位の和音の順位が逆になっているが、心理評価としてはこの間に差がないことから、本

Table 4 協和度の推定値の比較

	心理評価	推定値	
		C&F (2006)	本モデル
Major	1	1	1
Minor	3	1	4
Dim	4	5	3
Aug	5	3	5
Sus4	2	4	2

モデルにより協和度の順位を高い精度で推定できることがわかる

#### 5 まとめ

本研究では、和音印象の定量化に向け、感性工学的手法に基づく検討を行った。方法としては、まず自由記述実験により収集した評価語を用いて印象評価実験を行い、和音を聴取する際の音の捉え方の複雑な様相を明らかにした。次に、和音印象と音響特徴量の関係分析を行った。まず、ピッチの構造に基づく特徴量、音質評価指標、スペクトルの帯域的情報、アタック区間の音響特徴量を抽出した。和音印象を目的変数、音響特徴量を説明変数とした重回帰分析を行い、和音印象と音響特徴量の関係を調査した結果、印象層および感情層すべての要因において高い説明能力を持つモデルが得られた。さらに、モデルの妥当性を検討した結果、本モデルにより協和度の順位を高い精度で推定できることがわかった。これらのことから、感性工学的手法により和音印象の個々の様相を明らかにし、音響特徴量との対応を解明することの有効性が示唆された。

#### 参考文献

- [1] Arthurs, Y. *et al.*, *Psychology of Music*, 46(5), 662-681, 2018.
- [2] Lahdelma, I., Eerola, T., *Sci Rep* 10, 8693, 2020.
- [3] N. D. Cook, T. X. Fujisawa., *Empirical Musicology Review*, 1(2), 106-126, 2006.
- [4] Shimozono, T. *et al.*, *7<sup>th</sup> Forum Acusticum*, 50, 2014.
- [5] J. A. Russell *et al.*, *Journal of Personality and Social Psychology*, 57(3), 493-502, 1989.
- [6] 高田, *日本音響学会誌*, 75(10), 582-589, 2019.