

3 和音における調和性についての検討

—緊急地震速報のチャイム音による恐怖感情の喚起およびその低減についての考察—

Harmony of Trichords

塩崎 琢人[†], 椎名 乾平[‡]

Takuto Shiozaki, Kenpei Shiina

[†]横浜少年鑑別所, [‡]早稲田大学

Yokohama Juvenile Classification Home, Waseda University

takuto0610@suou.waseda.jp

概要

本研究では、3つの単音から成る3和音が持つ調和性に和音中に含まれるピッチ距離が影響を与えることを仮定した。55種類の和音について聴取実験を行い、実験参加者が和音の調和性を評定した数値について、ムーアペンローズの疑似逆行列を用いた分析を行い、各ピッチ距離が持つ調和性を係数として算出したところ、一般に不快な響きを生むとされるピッチ距離は和音全体の調和性に負の影響を及ぼすことが示唆された。本研究を応用することで、チャイム音のような音楽をより効果的に使用可能になると考えられる。

キーワード：和音、調和性、ピッチ距離

1. はじめに

近年、種々の研究によって、音楽が人間の感情に対して与える影響の解明が進むとともに、音楽や音の持つ影響を日常生活に応用しようとする取組が盛んに行われてきている。中でも、日常生活の中で耳にすることが多く、社会的な貢献性が高いと考えられるのが、危険な事態や場所を知らせるために用いられる警告音である。身近なものとしては、踏切の遮断機で流れる音や救急車のサイレンが挙げられる。前者は一般的に音楽において不快な響きとされる半音をぶつけた2和音をテンポに乗せて断続的に提示することで、不安感や緊張感を演出し、遮断機が閉じた踏切内に人や車が立ち入る事故を防止するために用いられている。また、後者は、一般的にはストレスを与えないとされる長三度の関係にある高低2音が繰り返される形になっているが、注意喚起を促すとされるビブラートを付加することで緊張感を生み出すなどそれぞれの音の性質が活用された形となっている。そして、こうした警告音の中でも、近年、耳にする機会が増えているのが、緊急地震速報発令の際にNHKが用いる警告のためのチャイム音(図1)である。



図1 Muse Scoreによって譜面化したNHK使用のチャイム音

このチャイム音は緊急地震速報の登場に伴い、地震発生時にテレビやラジオの視聴者に警戒を促すための音を作成する必要性を感じたNHKが東京大学の伊福部達氏に依頼を行う形で開発されたものである。伊福部(2012)は避難を促すチャイム音の条件として、①緊急性を感じさせるか、②不快感や不安感を与えないか、③騒音下でも聞き取りやすいか、④軽度の聴覚障害者でも聞き取れるか、⑤どこかで聞いた音と類似していないかの計5つを挙げ、これらの要素を含んでいると考えられる楽曲として、叔父であり作曲家の伊福部昭が手掛けた交響曲「シンフォニア・タブカーラ」を採用し、同曲の第3楽章冒頭に使用されている和音をベースに候補となる音を作成した後に、難聴者を含む19名を対象とした聴取実験による絞り込みを行い、チャイム音を完成させた。現在では、比較的大きな地震が発生した際に、テレビからチャイム音とともに警告のメッセージが流れる仕組みができており、住民の避難誘導などに貢献している。

緊急地震速報のチャイム音について、気象庁が2012年に実施した利活用状況調査では、「テレビから流れる速報によって安全な場所への避難ができた。」等、肯定的な意見が多く報告されており、地震発生の警告音として効果を発揮している様子が見えがえる。

一方で、同調査においては、緊急地震速報への要望として「音が強烈すぎて、心臓が悪い」、「音がかえってパニックを起こす場合がある」など必要以上

に恐怖を感じてしまうという旨の意見も報告されている。また、松井 (2020) らの行った調査によれば、発達障害を抱える人々は、そうでない人に比べ、災害時の警報を聞いた際に過剰に反応しやすい傾向が示唆される。これらのことから、チャイム音について、人によっては過度に不安や恐怖などのネガティブ感情を感じてしまう可能性が示唆される。

過度な恐怖感情は人間にとって不快だけでなく、緊急時の行動にも影響を与える可能性が示唆されている。Dolcos (2006) らは、fMRI を用いて人間の脳の活動を測定し、不安を与える刺激を提示した際に、実行機能の低下が引き起こされる可能性を明らかにした。以上のことから、警告音として一定の緊張感が必要であると考えられるものの、緊急地震速報のチャイム音が持つ必要以上に恐怖感を与えてしまうという特性は、冷静な判断が必要となる避難場面において不適切であり、改善が必要な点であるといえる。

2. 目的

図 1 に示したとおり、チャイム音は複数の単音が重ねられた和音の一種であると考えられる。つまり、チャイム音が与える必要以上の恐怖感や不安感を低減するためには、和音についての検討を行い、どのような要素が緊張状態に寄与するのかという仕組みを明らかにすることが有効であると考えられる。一般に、音楽においては、和音が心地よい響きを内包していれば、聴取する側には安心感が生まれ、逆に、不安定で不快な響きを内包していれば、緊張感が生まれる。また、ジャズ音楽において有名な $\text{II} \rightarrow \text{V} \rightarrow \text{I}$ 進行に代表されるように、多くの楽曲は、コード進行の中で緊張を与える和音と安心感を与える和音の双方を効果的に組み合わせられていく。つまり、和音の緊張感をコントロールするためには、調和性（心地よく聞こえる程度）に焦点を当てる必要があると推察される。藤澤 (2006) らは 3 つの音から構成される和音において、3 つの音のピッチ距離が等しくなる場合に和音が緊張的（不調和）な響きを持つと仮定し、長 3 度和音 (C,E,G) や短 3 度和音 (C,E \flat ,G) などをはじめとする主な 3 和音の緊張度（不調和の程度）を示す理論曲線を提案した上で、一般的な音楽理論との整合性が高いとして、同モデルの妥当性を主張した。そこで、本研究では、和音の緊張に影響するとされるにピッチ距離に注目して図 1 のチャイム音における恐怖感の低減を試みるこ

ととした。

3. 実験

1. 実験参加者：大学生 40 名（男性=19 名、女性=21 名、平均年齢 20.1 歳、SD=1.87）を対象として実験を行った。また、このうち習い事や部活・サークル等で音楽に従事していた経験を持つ参加者は 21 名であった。
2. 刺激：C を和音のルート音として固定したうえで、次にルート音と 2 音目の間隔を決定し、その上に最高音を重ねるという手法で C から同音の 7 度にあたる B までの範囲に存在する 12 音の組み合わせを行い、計 55 個の異なる音から構成される 3 和音を作成し、その上で、音域の偏りを避けるためにピッチ距離（半音=1）の合計を 3（構成音の数）で割った平均値の分だけ構成音の音高を下げ移調する処理（図 2 参照）を施した。なお平均値が整数にならないときはなるべく近い整数で近似した。この処理の結果、和音の平均音高がほぼ一定となる。結果を楽譜作成ソフト Muse Score に打ち込み、同ソフトのデモ演奏機能を使用してピアノの音色で提示した（図 3）。

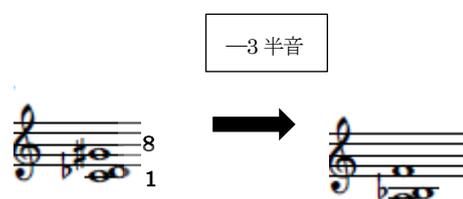


図 2 ピッチ距離の平均を用いた移調処理の例
左の和音のピッチ距離の平均は $(0+1+8)/3=3$

3. 手続き：教室に集まった参加者らに、今回の実験は和音を聴取したうえで、その調和性について評価を行うという内容であることを説明し、回答用紙の基本情報記入に当たっての注意点や調和性の定義を述べた後に、パーソナルコンピュータに接続した 2ch スピーカーを通して刺激の提示を行った。刺激の内訳は和音提示（4 秒間）→評価時間（3 秒間）→ホワイトノイズ提示（2 秒間）→次の和音に向けてのインターバル（1 秒間）が 1 ブロックとなっており、55 個の和音について、約 9 分

The image displays a musical score consisting of 55 numbered chords arranged in a single staff. The chords are numbered 1 through 55, with some numbers appearing on multiple lines (e.g., 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 33, 37, 42, 46, 50, 54). The chords are written in a single staff with a treble clef and a key signature of one flat (B-flat). The chords are primarily triads and dyads, with some more complex structures. The notation includes various accidentals (sharps, flats, naturals) and stems. The chords are numbered 1 through 55, with some numbers appearing on multiple lines (e.g., 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 33, 37, 42, 46, 50, 54). The chords are primarily triads and dyads, with some more complex structures. The notation includes various accidentals (sharps, flats, naturals) and stems.

図3 実験に使用した全和音
音高の平均値が1程度になっている。

間の提示を行い、参加者が各和音刺激について 1 (不調和) ~5 (調和) までの評定を記入した回答用紙を終了後に回収し、分析を行った。なお、図 3 に提示した和音刺激については、作成の際に組み合わせを行った順に番号 (C, C#, D=1 番、C, C#, E b =2 番・・・C, B b, B=55 番) を付してあるが、実験の際には、乱数発生によって無作為に並べ替えて提示を行った。

4. 結果

55 種類の和音の中で、調和性についての評定平均値は C をルート音とする長三和音 (C,E,G) において最大 (=4.64) となり、逆に最小の値 (=1.26) となったのは一音—二音間および二音—三音間の距離が双方とも 1 (半音) となる組みあわせ (C,C#,D) であった。

分析 1 一音—二音間および二音—三音間におけるそれぞれ 10 種類のピッチ距離をカテゴリーデータとみなして、調和性の評定平均値との関係性を調べた数量化 I 類においては、どちらの位置についても長三度 (ピッチ距離=4) のカテゴリースコアが最大となり、半音 (ピッチ距離=1) のスコアが最も低くなった。また、モデルによって算出された予測値と実測値 (評定平均値) との重相関係数は 0.88 で、偏相関係数は一音—二音間が 0.80、二音—三音間が 0.75 となった (表 1)。

表 1 数量化 I 類による分析の結果

カテゴリー	N	カテゴリー・スコア	レンジ	偏相関係数	
一音—二音	1	10	-0.90	1.76	0.8
	2	9	0.00		
	3	8	0.26		
	4	7	0.66		
	5	6	0.55		
	6	5	-0.06		
	7	4	0.32		
	8	3	-0.32		
	9	2	-0.36		
	10	1	-0.35		
二音—三音	1	10	-0.84	1.28	0.75
	2	9	0.13		
	3	8	0.39		
	4	7	0.44		
	5	6	0.25		
	6	5	-0.01		
	7	4	0.19		
	8	3	-0.17		
	9	2	-0.21		
	10	1	-0.23		
重相関係数				0.88	

分析 2 11 種類のピッチ距離が 3 和音中にどのように分布するかを調べ (図 4 参照)、その一覧表である 55 行 (刺激数) × 11 列 (ピッチ距離) の行列データ (付録) と和音の評定平均値との関係性を調べるためにムーアペンローズの疑似逆行列 (一般逆行列) による最小二乗法を実施した。

1 音-3 音=11
2 音-3 音=9
1 音-2 音=2



ピッチ距離(半音=1)										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1

図 4 3 和音中に含まれるピッチ距離の記述方法の例

結果、算出された各ピッチ距離にかかる係数 (調和性への影響) は完全 5 度 (ピッチ距離=7) において最大となり、最少となったのは数量化 I 類と同様に半音 (ピッチ距離=1) であった (表 2)。また、この係数ベクトルを表 3 に示す 55 × 11 の行列との掛け合わせることにより、55 種類の和音に関する調和性の予測値を算出し、実際の実験で得られた 55 種類の和音の調和性に関する評定平均値との相関係数を算出したところ、0.86 (p<.01) という数値が得られた。

表 2 疑似逆行列を用いて算出した各ピッチ距離の係数 (距離 1 = 半音) 係数が大きいほど調和度が高い。

距離	係数	
1	-0.21	半音
2	0.78	
3	1.04	短三度
4	1.25	
5	1.26	長三度
6	0.90	
7	1.32	四度
8	0.95	
9	0.98	
10	0.85	
11	0.53	五度

5. 考察

今回の実験における評定では長三和音やその転回形などの調和性が高いとされる傾向が確認され、長三度や完全5度などを調和する音程であるとする一般的な音楽の理論との整合性が高いことが示された。また藤澤 (2006) のモデルと比較を行ったところ、1音2音間および2音3音間のピッチ距離が一致する組み合わせである *sus4* (サスペンデッドフォー、両距離=5), *aug* (増5和音、両距離=4), *dim* (減3和音、両距離=3) の評定値が長三和音および短三和音の評定値を下回る結果となったことから、3音の間に存在するピッチ距離が等しくなった場合に不調和で緊張的な響きを生むとする同仮説の主張とも合致する結果であると考えられる。

数量化 I 類の結果、ピッチ距離は和音上での位置に関係なく調和性に影響を及ぼすことがわかった。

さらに一音と三音間のピッチ距離も影響力を持つことが予想されたため、3つのピッチ距離を用いて調和性を算出する回帰モデルを仮定し、ムーアペンローズの疑似逆行列 (一般逆行列) を用いて算出した回帰係数ベクトルを用いて予測値を算出したところ、*susu4, dim, aug* の調和性の予測値が長三和音・短三和音の値に比べて低くなるなど、一般的な和声学の理論および藤澤 (2006) のモデルと整合することが確認された (表2、付録)。

したがって、和音における調和性は種々のピッチ距離の和音上の分布によって定量的に評価できる可能性が示唆される。

そこで、上記のモデルを使用し、伊福部 (2012) のチャイム音における調和性の予測値を算出したところ 6.97 となり、さらに、実験の中で最も評定値が高くなった長三和音をチャイムの形式にアレンジし、同様に得点の算出を行った結果、8.0 という数値が得られた (図4)。尚、どちらの場合でも12ピッチ距離以上の係数は未調査のため使用されていない。

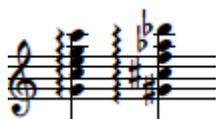


図4 チャイム音の形式にアレンジしたCを根音とする長三和音 (調和性予測値=8.0)

したがって、警告音に必要であると考えられる一定の緊張感を保ちつつ、現行のチャイム音よりも緊張を低減させるためには調和性の予測値が前者と後者の中間に位置するようピッチ距離の組み合わせを行い、和音を作成することが必要であろう。一例を図5に示す。

このモデルに基づけば、多数の音を組み合わせた和音における調和性をコントロールすることが可能となり、和音の効果をよりスムーズに生活上に適用することが可能になると思われる。今後は構成音におけるピッチや音楽的文脈の中での和音の役割の影響なども考慮したうえで、更なる和音の知覚に関する研究が進んでいくことが望ましい。

6. 課題と今後の展望

今回の研究では、和音の調和性について構成音間におけるピッチ距離の組み合わせの観点からの検討を試み、剰余変数を統制する目的で実験において使用した個々のピアノ音のピッチ (Hz) については全て 441Hz に固定した状態 (平均律) で参加者に提示した。しかしながら、仮にピッチを固定せず、それぞれの音に異なるピッチを与えた場合、和音の構成音間のピッチ距離にずれが生じ、和音が持つ調和性についての評定を変化させる可能性は十分に予想される。

また、今回の研究では、刺激作成の都合上、半音 (距離=1) をピッチ距離の最低値としたが、半音未満のピッチ距離 (0.5 半音等) の影響については検討できていない。今後、より精度の高い調和性の検討を行うためには、個々の構成音のピッチを調整した形や半音未満ピッチ距離を加えたパターンについても評定の対象とすべきであると考えられる。

さらに、今回の研究では、調和性について、個々の和音を独立したものと捉えての研究を進めてきたが、和音は本来、楽曲のメロディを彩るハーモニーとして用いられる側面が大きく、一般的に聴取される場合はいくつかのまとまり (コード進行) として知覚されることが多いものである。したがって、和音が持つ調和性についても、楽曲におけるコード進行中での和音の位置づけによって変化が生じる可能性があり、独立した和音における調和性の評定は和音の調和についての説明をするにあたって十分な妥当性を有してはいないとも考えられる。現に Arthurs & Timmers (2015) は和音の調和性についての評定が独立して提示された場合

と音楽的文脈の中で提示された場合とで変化したことを報告し、その結果から和音の調和性は様々な状況によって変化する流動的なものであるとする見解を示している。

以上のとおり、今回の研究の焦点である和音の知覚については、いまだに不確定な要素が多く、現段階でその全てを説明するには至っていない。そのため、今後も様々な研究の中で、ピッチや音楽的な文脈の面などを含めた上での和音の調和性についての検討が進められることで、和音、しいては音楽による人間の行動への影響の解明が進み、よりスムーズに効果的な形で我々の生活の中で音楽が活用されていくことが望ましい。



図5 適度な緊張感を生起させると考えられるチャイム音の候補（数字は予測値）

文献

- [1] Arthurs, Y., & Timmers, R. (2015) On the Fluidity of Consonance and Dissonance: The Influence of Musical Context. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*. Advance online publication.
- [2] Dolcos, F., & McCarthy, G. (2006) Brain systems mediating cognitive interference by emotional distraction. *Journal of Neuroscience*, 26, 2072-2079.
- [3] 藤澤隆史・Norman D.Cook・長田典子・片寄晴弘 (2006) 和音認知に関する心理物理モデル, 情報処理学会研究報告. MUS,[音楽情報科学] 66, 99-104.
- [4] 伊福部達 (2012) 緊急地震速報チャイムの誕生秘話, 2012年「音の日」記念講演より, *JAS Journal*, Vol.53 ,No2 (3月号) 2013, 4-10.
- [5] 石桁真礼生・末吉保雄・丸田昭三・飯田隆・金光威和雄・飯沼信義 (1998) 楽典—理論と実習, 音楽之友社; 音 A版.
- [6] 岩宮眞一郎 (2020) 図解入門 よくわかる 最新 音楽の仕組みと科学, 秀和システム.
- [7] 気象庁 (2012) 緊急地震速報等の利活用状況調査 結果 平成24年12月14日公表.
- [8] 松井温子・佐久間哲哉 (2020) 発達障害に伴う聴覚過敏と音環境に関する実態調査, 日本建築学会技術報告集, 第26巻, 第62号, 169-172.

付録 55 種類の和音における 11 種類のピッチ距離の分布表 (行は和音を示す)

	ピッチ距離(半音=1)											評定値	予測値
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.26	0.36
2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.54	1.61
3	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1.90	2.07
4	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2.26	2.28
5	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1.41	1.93
6	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1.44	1.99
7	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2.00	2.04
8	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1.90	1.70
9	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1.49	1.61
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1.44	1.17
11	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.74	1.61
12	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2.21	2.80
13	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	3.33	3.07
14	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	3.38	2.91
15	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	3.10	3.34
16	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2.72	2.61
17	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2.44	3.06
18	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2.08	2.57
19	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2.33	2.27
20	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1.54	2.07
21	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2.79	3.07
22	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	3.08	2.97
23	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	3.51	3.60
24	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	3.59	3.25
25	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	2.74	2.91
26	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	3.21	3.21
27	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	2.59	2.50
28	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1.85	2.99
29	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	3.33	2.92
30	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	4.64	3.60
31	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	2.77	3.44
32	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	3.67	3.48
33	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	3.69	2.99
34	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	3.13	3.07
35	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1.62	1.95
36	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	3.54	3.35
37	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	3.38	3.25
38	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	4.54	3.48
39	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	3.21	3.37
40	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	2.82	2.66
41	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2.10	2.00
42	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	3.05	2.62
43	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	2.62	2.91
44	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	2.54	2.99
45	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	2.64	2.66
46	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2.44	2.05
47	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	3.28	3.07
48	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	3.03	3.21
49	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	2.95	3.07
50	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1.46	1.71
51	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2.74	2.58
52	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	2.23	2.50
53	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1.72	1.61
54	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2.00	2.27
55	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1.38	1.17