

Title	改良TPSに基づいたGTTMにおけるCadential Retention
Author(s)	石輪, 悠貴
Citation	
Issue Date	2018-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/15210">http://hdl.handle.net/10119/15210</a>
Rights	
Description	Supervisor:東条 敏, 情報科学研究科, 修士

# 改良TPSに基づいた GTTMにおける Confidential Retention

北陸先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科

石輪 悠貴

2018年3月

修士論文

改良TPSに基づいた  
GTTMにおける Cadential Retention

1510005 石輪 悠貴

主指導教員 東条 敏

審査委員主査 東条 敏  
審査委員 Nguyen Minh Le  
白井 清昭

北陸先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科

提出年月: 2018年2月

## 概要

計算機科学の発展に伴い、音楽情報科学への関心が高まっている。その産業的応用として、作編曲の補助や自動作曲、楽曲間の類似度に基づいた音楽推薦などが挙げられるが、これらの応用は音楽理論や音楽知識に基づいた楽曲の自動解析を必要とする。従来の音楽理論は人間の経験則の集合体であり、計算機が理解するにはあまりにも主観的で曖昧である。計算論的音楽理論の研究では、音楽理論を計算機に実装するため、これらを数学的に再定義する試みがなされてきた。

Lerdahl と Jackendoff によって提案された A Generative Theory of Tonal Music (GTTM) は、最も有望な計算論的音楽理論のひとつであると考えられる。GTTM は西洋のクラシック調性音楽を対象としており、楽曲を階層構造として解析する理論である。この解析手法は Schenker が提唱した、聴者は楽曲中のすべてのピッチイベント(音符や和音)を相対的重要度による階層構造として整理しようとするという簡約仮説に基づいている。GTTM はグルーピング構造解析、拍節構造解析、タイムスパン簡約、プロロンゲーション簡約という4種類のサブ理論から構成され、そのそれぞれが楽曲を階層構造として表す。中でも、タイムスパン簡約とプロロンゲーション簡約の結果は木構造で表され、これは簡約仮説の考え方に適っており、かつ計算機にとって理解しやすい形式である。

GTTM の各サブ理論は、それぞれ主に構文規則と選好規則からなる。構文規則は階層構造の形式を厳密に定めるものであり、選好規則は実際の楽曲の内容に基づいて階層構造を構築する方法を記述するものである。選好規則についてはルール間の衝突が許容されており、複数の選好規則を同時に適用できない場合にどちらのルールを採用するかは解析者個人の判断に委ねられる。また、和声、対称性、類似性、安定性などに関するルールはその定義が曖昧である。GTTM はルールに基づいてはいるものの、これらの曖昧性のために、そのままの形で実装することは困難である。

本稿では GTTM の3番目のサブ理論であるタイムスパン簡約に着目する。タイムスパン簡約では、あるタイムスパン内にあるピッチイベントの構造的な重要度を選好規則に基づいて比較し、その中からヘッドを選び出す。タイムスパンは階層構造であるから、あるタイムスパンにおけるヘッド同士がその直上のレベルで再度比較され、全体としてピッチイベント同士の勝ち抜き戦のような格好となる。

浜中らは GTTM を数学的に再定義した exGTTM を提案し、これを Automatic Time-span Tree Analyzer (ATTA) として実装している。これにより、ユーザは各選好規則の優先度を調節することで半自動的にタイムスパン木を獲得できる。しかし、exGTTM は単旋律のみからなるモノフォニーしか扱うことができず、和声に関する選好規則が実装されていないため、プロロンゲーション簡約にも触れていない。和声に関するルールが未実装である理由は和声解析の難しさにある。このようなルールの中で最も重要なものが、和声進行において句読点の役割を持つカデンツという部分に高い構造的な重要度を与えてヘッドとして選び出す、タイムスパン簡約における Cadential Retention である。GTTM では、完全終止



(V → I), 偽終止 (V → vi), 半終止 (V) の 3 種類のカデンツを考える．Cadential Retention の実装については前述した和声解析の困難さに加えて, 2 つの和音からなるカデンツを特別にひとまとまりのイベントとして扱わなければならないという問題もある．

本研究では, ATTA から出力された和声情報を含まないタイムスパン木に対して修正を施す形で, Cadential Retention を自動的に適用する手法を提案する．提案手法において, Cadential Retention は次の 3 段階のプロセスに分けられる．まず, 和音列が楽譜上に C7 や Bdim などのコードネームとしてあらかじめ与えられているものと仮定して, 各和音にその調と和声機能を割り当てる処理を行う．次に, GTTM で定義されたカデンツの条件に従って, 和声進行の中からカデンツを発見する．最後に, 発見されたカデンツの部分に対して Cadential Retention を適用し, タイムスパン木を修正する．

提案手法における最初のステップである和声解析については, コードネーム列に対する和声解析手法が坂本らによって提案されている．この手法では, まず各コードネームに対して可能な調と音度の解釈を列挙する．例えば, C という和音に対しては I/C, IV/G, V/G, iii/a, vi/e という 5 通りの解釈を考える．これらの可能性を示すノードを連結してグラフを作り, 最短経路探索によって和声進行を推定する．ここで, 各パスのコストは Lerdahl によって提案された音楽理論 Tonal Pitch Space (TPS) において定義される和音間距離に基づく．和音間距離が小さければ小さいほど, その和音間の進行はより滑らかに感じられる．本研究では坂本らの和声解析手法を採用するが, その際 TPS に以下の改良を加える．まず, TPS ではベーシックスペースという方法で和音を表現するが, これについて四和音をより適切に表現するために山口らが提案した拡張を行う．次に, 短調の和声進行においてより適切にカデンツを発見するために, 松原らの提案に従って和声的短音階への限定を行う．本論文ではこれらの改良に基づいて和音間距離の再計算を行い, 和音間距離に不均等な変化が生じることを明らかにし, その影響を議論する．

また, 松原らはドッペルドミナント V/V に先行される半終止の扱い方を提案している．半終止は本来 V/I の和音単独で形成されるが, しばしば V/V に先行され, 完全終止と同様のドミナントモーションを持つことから, 松原らの手法ではこのような半終止を, 完全終止や偽終止と同様に 2 つの和音からなるカデンツとして扱う．本研究でもこの考え方を採用するほか, さらに局所的カデンツを提案する．本研究における局所的カデンツとは, 入力全体に対する和声解析の結果にかかわらず, 両和音の解釈を任意に選択することでカデンツの条件を満たし得る部分を指す．

本研究では以上の提案手法を実装し, exGTTM で解析された 127 フレーズのデータを用いて実験を行い, その結果としてカデンツ構造を反映したタイムスパン木を生成可能であることを示す．ただし, 音楽における解釈の多様性から, 現時点で提案手法に対して定量的な評価を行うことは難しく, また和音間距離の改良, 局所的カデンツの妥当性, タイムスパン木における構造レベルの決定といった課題が残る．しかしながら, 和声を考慮したタイムスパン木はこれまで自動獲得ができなかったものであり, 和声情報を含んだ新たな楽曲の解釈を示すことのできる手法を提案したことが本研究の成果である．

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	3
1.3	本稿の構成	3
<b>第2章</b>	<b>音楽理論</b>	<b>4</b>
2.1	音楽の基礎知識	4
2.1.1	音名と音程, ピッチクラス	4
2.1.2	音階と調	7
2.1.3	リズム構造	9
2.1.4	和音	12
2.1.5	和声機能とカデンツ	17
2.1.6	その他の音楽知識	20
2.2	A Generative Theory of Tonal Music (GTTM)	21
2.2.1	概要	21
2.2.2	グルーピング構造解析	23
2.2.3	拍節構造解析	30
2.2.4	タイムスパン簡約	35
2.3	Tonal Pitch Space (TPS)	46
2.3.1	概要	46
2.3.2	和音間距離計算に必要な概念	46
2.3.3	和音間距離	49
<b>第3章</b>	<b>計算論的音楽理論の実装に関する先行研究</b>	<b>53</b>
3.1	exGTTM: GTTM の数学的再定義と自動化	53
3.1.1	GTTM の再定義と自動解析の戦略	53
3.1.2	自動解析システムと公開データ	54
3.2	TPS に基づく和声解析	56
3.3	TPS と Cadential Retention 理論の改良	57
3.3.1	カデンツ探索を目的とした TPS の改良	57
3.3.2	TPS におけるベーシックスペースの拡張	59
3.3.3	Cadential Retention に関する理論の改良	60

<b>第 4 章</b>	<b>Cadential Retention の実装のための提案手法</b>	<b>62</b>
4.1	提案手法と実装システムの概要 . . . . .	62
4.2	和声解析 . . . . .	64
4.2.1	TPS の変更に伴う影響 . . . . .	64
4.2.2	和音間距離の計算と最短経路探索 . . . . .	67
4.3	カデンツ探索 . . . . .	74
4.3.1	本研究におけるカデンツの定義 . . . . .	74
4.3.2	カデンツ探索のアルゴリズム . . . . .	78
4.4	Cadential Retention . . . . .	80
4.4.1	カデンツのヘッドの選択 . . . . .	80
4.4.2	タイムスパン構造の組み替え . . . . .	82
4.4.3	TSRPR7 の適用 . . . . .	85
4.5	Time-spanXML におけるカデンツ構造の表現 . . . . .	87
<b>第 5 章</b>	<b>楽曲解析実験</b>	<b>90</b>
5.1	使用データ . . . . .	90
5.2	解析結果と考察 . . . . .	90
5.2.1	和声解析とカデンツ探索 . . . . .	91
5.2.2	Cadential Retention . . . . .	97
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>104</b>
<b>付録 A</b>	<b>実験に使用した楽曲一覧</b>	<b>108</b>

# 目次

2.1	音名と鍵盤，楽譜の関係	6
2.2	幹音からなる音階	7
2.3	3種類の短音階	9
2.4	五度圏	10
2.5	タイと連符の例	11
2.6	C major と A minor における三和音	13
2.7	C major と A minor における四和音	13
2.8	代表的な非和声音	15
2.9	和声機能間の進行可能性	18
2.10	男性終止と女性終止	19
2.11	GWFR を満たさないグルーピングの例	24
2.12	GPR1~3 の適用例 ([1] pp.47-48, 図 3.19 を基に作成)	26
2.13	GPR4 の適用例 ([1] p.49, 図 3.20 を基に作成)	26
2.14	GPR5 の適用例 ([1] p.50, 図 3.21 を基に作成)	27
2.15	GPR6 の適用例 ([1] pp.50-51, 図 3.22, 3.23 を基に作成)	27
2.16	Overlap の例 ([1] p.56, 図 3.25 より引用)	28
2.17	左 Elision の例 ([1] p.57, 図 3.26 より引用)	28
2.18	右 Elision の例 ([1] p.58, 図 3.28 より引用)	29
2.19	グループにおける和声的構造の模式図 ([1] p.31, 図 2.18 より引用)	30
2.20	拍節構造の例 ([1] p.23, 図 2.10 より引用)	31
2.21	MPR3 の適用例 ([1] p.77, 図 4.16 より引用)	33
2.22	MPR4 の適用例 ([1] p.79, 図 4.20 より引用)	34
2.23	MPR5 の適用例 ([1] p.83, 図 4.32 より引用)	34
2.24	タイムスパン簡約の例 ([1] p.144, 図 6.25 より引用)	36
2.25	グループ境界と拍が一致しないタイムスパン分割 ([1] p.148, 図 7.2 より引用)	38
2.26	弱起におけるタイムスパン分割 ([1] p.149, 図 7.6 より引用)	38
2.27	3拍子におけるタイムスパン分割方法	38
2.28	Fusion の例 ([1] p.154, 図 7.12 より引用)	40
2.29	Transformation の例 ([1] p.155, 図 7.13 を基に作成)	40
2.30	egg 記号 ([1] p.156, 図 7.14 より引用)	41
2.31	カデンツの条件 ii に基づく判断例 ([1] p.168, 図 7.23 より引用)	44

2.32	カデンツの条件 iii に基づく判断例 ([1] p.169, 図 7.24 より引用)	45
2.33	楽曲全体レベルのタイムスパン簡約 ([1] p.176, 図 7.28 より引用)	45
2.34	I/C のベーシックスペース	46
2.35	和音の五度圏 (C major)	47
2.36	調空間	48
2.37	調空間とトラス ([2] p.66, 図 2.23 を基に作成)	48
2.38	五度圏ルールの適用例 ( $\delta(I/C, iii/D)$ )	50
2.39	ベーシックスペース距離の計算例	51
2.40	調間距離	52
3.1	対話的 ATTA の実行画面	55
3.2	和声機能候補のグラフ表現 ([3] より引用)	57
3.3	三和音と四和音における構成音の補正 ([4] より引用)	58
3.4	半終止に対する Cadential Retention の例 ([4] より引用)	61
4.1	本研究で実装したシステムの入出力関係	63
4.2	改良 TPS における調間距離	67
4.3	和声解析グラフの例	73
4.4	カデンツとタイムスパンの関係	75
4.5	局所的カデンツの例	77
4.6	延長カデンツの例	79
4.7	最大タイムスパン	81
4.8	タイムスパン構造の組み替えが必要なカデンツの例 1	82
4.9	タイムスパン構造の組み替えが必要なカデンツの例 2	83
4.10	タイムスパン構造の組み替え過程	86
4.11	Time-spanXML の記述例	88
4.12	Time-spanXML におけるカデンツ構造の表現	89
5.1	和声解析結果 1 (F. Schubert, Moments Musicaux)	92
5.2	和声解析結果 2 (F. Chopin, The Preludes, Op.28-15)	93
5.3	和声解析結果 3 (G. F. Händel, Harmonious Blacksmith)	94
5.4	和声解析結果 4 (P. Tchaikovsky, Symphony No.6 “Pateticheskaya”, Op.74)	96
5.5	Cadential Retention の適用結果 1 (F. Chopin, The Preludes, Op.28-15)	99
5.6	Cadential Retention の適用結果 2 (R. Wagner, Tannhauser Overture)	100
5.7	Cadential Retention の適用結果 3 (G. Verdi, Aida Grand March)	101
5.8	Cadential Retention の適用結果 4 (G. Lange, Blumenlied, Op.39)	102
5.9	G. Lange, Blumenlied, Op.39 の楽譜	103

# 表目次

2.1	音名	5
2.2	音程の数え方	5
2.3	音名とピッチクラスの対応関係	7
2.4	音階中の音の機能名	8
2.5	音符と音価の関係	11
2.6	代表的な拍子	12
2.7	三和音の種類	13
2.8	四和音の種類	14
2.9	バークリーメソッドにおけるコードネーム	17
2.10	カデンツの種類	19
2.11	代表的なアーティキュレーション	20
2.12	代表的な強弱記号	21
3.1	exGTTM で再定義された PR	54
3.2	ドミナントの和音候補の拡張	59
3.3	山口らによるベーシックスペースの再定義	60
4.1	TPS の変更に伴う和音の解釈可能性の変化	65
4.2	カデンツの和声進行	74
4.3	ドッペルドミナントを考慮したカデンツの和声進行	76
4.4	Time-spanXML の要素	87
A.1	使用楽曲一覧	108

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

近年，計算機科学の発展に伴い，計算機上で音楽を扱うための音楽情報科学の研究が注目されている．その産業的応用として，作編曲の支援や自動作曲，楽曲の類似度に基づいた楽曲検索や推薦などが挙げられるが，その根底にあるのは計算機による楽曲の自動解析である．

人間は音楽理論の知識を基にして作曲や楽曲分析を行う．この音楽理論は時代や地域によって様々ではあるが，現在の音楽教育において最も広く普及しているのは，19世紀ごろまでに成立した西洋のクラシック音楽の理論体系である．音楽理論は音楽の構造や技法を説明する理論であるが，従来の音楽理論は経験則を基にしており，人間の主観や感性に頼った曖昧なものである．

一方，音楽は言語と同一の起源を持つと考えられており [5]，音楽には言語との間に次のような共通点を見出すことができる．まず，言語と音楽はどちらも聴覚を通じて伝達され，文書や楽譜として記録できる．また，言語が文章，文，句，単語などといった階層的な構造を持つと同様に，音楽も楽章，楽節，動機，音形などといった単位を持つ．さらに，音楽理論における和声進行のルールは言語における語順と同様の規則と考えることもできる．加えて，言語においては，例えば「私は大学にいる」という文の「私は」と「いる」のように，離れた位置にある語句同士が係り受けの関係を持つことができるが，音楽でも和声進行や旋律の動きにおいて同様の係り受け構造がある．このような共通点から，自然言語処理の知見を応用した音楽解析も研究されている．[6, 7]

しかし，言語解析と音楽解析の間には大きな違いもある．与えられた文章を解析する場合は，その文章が文法的に正しいかどうかを判断することが1つの目的となる．対して音楽においては，音楽理論という規則はあるものの，既存の音楽理論による制約を破ることで音楽が発展してきたこともまた事実であり，与えられた楽曲が音楽理論に合致するか否かを判断することよりも，その楽曲に対して何らかの解釈を与えることのほうが重要になる．また，音楽は言語と比較して，解釈の可能性が多様であり，楽曲の解釈が一意に定まらないことがほとんどである．

以上で説明したような音楽理論，あるいは音楽そのものにおける曖昧性は，計算機上で音楽理論に基づいた楽曲解析を実装することを困難にする．そこで，計算機による楽曲解析には大別して2通りのアプローチが考えられる．一方は，音楽理論に頼らずに統計的な手法を用いることである．もう一方は，計算機でも扱えるように音楽理論を数学的に再構

築することであり，それを試みるのが計算論的音楽理論の研究である．

現在，計算機への実装が有望視されている計算論的音楽理論として，Narmour が提唱した Implication–Realization Model [8] (I-R モデル) や，Lerdahl と Jackendoff が提唱した A Generative Theory of Tonal Music [1] (GTTM) が挙げられる．I-R モデルは，ある構造が個々の構成要素の総和以上の意味を持つというゲシュタルトの考え方に基づき，聴者の予測 (暗意) とその実現または裏切りによって，旋律中の隣接する音同士の間隔を説明する理論である．GTTM は，聴者が楽曲を階層構造として整理しようと試みるという簡約仮説に基づき，楽曲に対して 4 種類の階層構造を与えることで解析を行う理論である．本研究ではこの GTTM に着目する．

GTTM は手作業での楽曲解析を前提としており，その記述に曖昧性は残るものの，音楽理論の中では比較的厳密なルールの集合体として記述された理論である．Hamanaka らはこの GTTM の各ルールを数学的に再定義した exGTTM [9, 10] を提案し，その実装を行った．しかし，この exGTTM も未だ不完全であり，モノフォニー (単旋律) の楽曲しか扱うことができないことから，同時に複数の音が鳴ることで生まれる和音，および和音の進行がもたらす音楽の色彩的变化である和声を扱うルールの実装がなされていない．そのような未実装のルールの中でも最も重要なものが，和声進行において句読点のような役割を持つカデンツ (終止部) という部分に高い構造的な重要度を与える，Cadential Retention というルールである．

カデンツは特定の和声進行によって形成されるため，Cadential Retention の実装にあたっては，その前段階として和声解析が不可欠である．和声解析とは，楽曲の各時点における調と和音，および各和音の持つ機能を同定し，カデンツをはじめとした楽曲の和声的構造を獲得することである．音楽表層 (楽譜上の音符列) から和音を同定することには，和音の構成音と非構成音の区別，分散和音や省略された構成音の補完などといった困難がある．音楽家が知識と経験を駆使して行っているこの作業を自動化することは，音楽情報科学における大きな課題である．

一方で，近年ではジャズやポップスといったジャンルを中心に，和音記号があらかじめ記載されたリードシート (lead sheet) と呼ばれる形式の楽譜が広く利用されている．このようにあらかじめ和音を与えられている場合を対象にしてその和音の機能を推定する研究として，音楽理論 Tonal Pitch Space[2] (以下，TPS と記す) に基づいた Sakamoto ら [3] の研究がある．TPS は GTTM とは独立であるが，GTTM を補完する計算論的音楽理論であり，和音間および調間の距離を定量的に求めることでその遠近を論じることができる．隣接した和音間の距離が近ければその部分は安定的で心地よく，距離が遠ければその進行は不自然で違和感のあるものと解釈される．Sakamoto らはこの和音間距離をコストとした最短経路探索による和声解析手法を提案している．また，Matsubara ら [4] は Sakamoto らの手法に改良を加えた上でこれを利用し，カデンツの探索手法を提案しているが，Cadential Retention の計算機上への実装には至っていない．



## 1.2 研究の目的

本研究の主目的は、GTTMにおける Cadential Retention を実装し、和声情報を含んだ楽曲の解釈を自動的に獲得することである。本研究では、前述した exGTTM の解析器 [10] から出力された和声情報を含まない解析結果を入力とし、その結果に対して Cadential Retention を適用して修正を施すことでこれを実現する。

また、実装にあたっては Cadential Retention の理論、およびその準備段階となる和声解析やカデンツ探索について、先行研究を基にしつつ、数学的あるいは音楽的見地から再定義を行う。

なお、本研究で扱う楽曲は単旋律と和声からなるホモフォニーとし、和音の情報は入力として与えられた楽譜データにあらかじめ記載されているものと仮定する。その上で、本研究では Sakamoto らによる和声解析の手法 [3] および Matsubara らによるカデンツ探索の手法 [4] を参考にして理論を構築する。

## 1.3 本稿の構成

本稿の構成は次の通りである。

本章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、まず本研究で必要になる基礎的な音楽知識を説明し、次いで本研究で扱う GTTM と TPS の2つの計算論的音楽理論について述べる。

第3章では、GTTM と TPS の実装に関する先行研究について述べる。

第4章では、第2章および第3章で述べた内容を踏まえ、本研究で提案する Cadential Retention の実現方法について述べる。

第5章では、第4章で述べた手法を用いた楽曲解析実験とその結果について述べる。

最後に、第6章では本研究のまとめと今後の展望について述べる。

## 第2章 音楽理論

本章では、まず 2.1 節で本研究の前提知識となる一般的な音楽の知識について述べ、次いで本研究の目的である Cadential Retention の親理論である GTTM と、その実装に必要な和声解析に用いる TPS、以上 2 つの計算論的音楽理論についてそれぞれ 2.2 節と 2.3 節で解説する。

### 2.1 音楽の基礎知識

本節では、現在最も普及している 12 音からなる平均律を前提として、本研究で解説に用いる一般的な音楽理論に関する説明を行う。なお、本節における説明に関して、[11, 12, 13] を参考にしている。

#### 2.1.1 音名と音程、ピッチクラス

本節では、単音の呼び方および 2 音の関係について述べる。

なお、本節では解説中に「音階」という語を用いるが、音階と音名や音程の概念は密接に結びついており、どちらか一方を独立して解説することは困難である。音階については 2.1.2 節で詳述するが、ここで略説すると、音階とは音楽を構成するために用いられる音を、1 オクターヴの範囲内でその高さの順に並べたものである。

#### 音名

音の呼び方には絶対的なもの(音名)と相対的なもの(階名)の 2 種類があり、音名は物理的な音の高さ(ピッチ, *pitch*)に対応する。階名は音階中の位置関係によって決定され、ある音階において最も基本となる音(主音)をドとして、音階を構成する 7 つの音をドから始めて低い順にドレミファソラシ、とイタリア語で呼ぶのが一般的である。

音名は表 2.1 に示すように各国で様々な呼び名が使われるが、いずれにしてもこの表中の 7 つの音を幹音と呼ぶ。幹音は、ピアノの白鍵盤に対応する。本稿ではこれ以降、英米式の音名(ABCDEFG)を用いる。

音名と階名のどちらも、1 オクターヴ離れた音には同じ名前が与えられる。1 オクターヴ(*octave*)とは、2 つの音の周波数比が 1:2 となるような関係のことである。

表 2.1: 音名

日本式	ハ	ニ	ホ	ヘ	ト	イ	ロ
ドイツ式	C	D	E	F	G	A	H
英米式	C	D	E	F	G	A	B
イタリア式	Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si
フランス式	Ut	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si

## 音程

2つの音におけるピッチの差を音程 (*interval*) と呼ぶ。12音平均律において、音程の最小単位を半音と呼ぶ。

音程は、音階において自身と同じ音との関係を1度あるいは同度と呼び、その隣の音との関係を2度、2つ離れた音との関係を3度、…のように数え、1オクターヴは8度の音程に相当する。

また、例えば同じ2度であってもCとDの音程は半音2個分(これを全音と呼ぶ)であるのに対し、EとFの音程は半音1個分という違いがあり、これらをそれぞれ長2度、短2度と呼んで区別する。2度以外の音程についても同様であり、1オクターヴ以内の音程の数を表2.2にまとめる。なお、各音程について例示している2音は、完全1度を除いて、後者の方が高いものとする。また、短2度、短3度、…といった“短”の付く音程をまとめて短音程と呼び、同様に長音程、完全音程、減音程、増音程という呼び名がある。

表 2.2: 音程の数え方

音程	半音の数	名称	略記	例
1度	0	完全1度 (perfect 1st)	p1	CとC(同じ高さ)
2度	1	短2度 (minor 2nd)	m2	EとF
	2	長2度 (major 2nd)	M2	CとD
3度	3	短3度 (minor 3rd)	m3	DとF
	4	長3度 (major 3rd)	M3	CとE
4度	5	完全4度 (perfect 4th)	p4	CとF
	6	増4度 (augmented 4th)	+4	FとB
5度	6	減5度 (diminished 5th)	-5	BとF
	7	完全5度 (perfect 5th)	p5	CとG
6度	8	短6度 (minor 6th)	m6	EとC
	9	長6度 (major 6th)	M6	CとA
7度	10	短7度 (minor 7th)	m7	DとC
	11	長7度 (major 7th)	M7	CとB
8度	12	完全8度 (perfect 8th)	p8	CとC(1オクターヴ)

表 2.2 に示したものの以外にも，1 オクターヴを超える 9 度以上の音程を数えることも可能である．また，表中には減音程と増音程はそれぞれ 1 つずつしか示していないが，実際にはあらゆる度数に対して減音程と増音程を定義できる．これらは後述する変位の結果として現れる場合がある．減音程は完全音程より半音 1 つ分小さいか，短音程より半音 1 つ分小さい音程であり，増音程は完全音程より半音 1 つ分大きいか，長音程より半音 1 つ分大きい音程である．例えば，減 3 度は短 3 度より半音 1 つ分小さい，半音 2 つ分の音程である．

## 変位

ある音を半音を単位として上下させることを変位と呼び，変位された音を派生音と呼ぶ．幹音を半音上げた音にはシャープ記号 ( $\sharp$ )，半音下げた音にはフラット記号 ( $\flat$ ) を付けて， $C\sharp$ ， $E\flat$  などのように表記する．これらの派生音に対し，幹音であることを明示する場合にナチュラル記号 ( $\natural$ ) を用いる場合がある． $\natural$  は楽譜上で  $\sharp$  や  $\flat$  の効果を打ち消すために用いられる記号である．また， $C\sharp$  と  $D\flat$ ， $E\sharp$  と  $F$  などのように，音名が異なるが同じ音高を指すものを異名同音 (*enharmonic*) と呼ぶ．

ここで注意しなければならないのは，音程は幹音における 2 音の関係を基準に数えるということである．例えば， $D\sharp$  と  $E\flat$  は異名同音であり， $C$  との間の音程はどちらも半音 3 つ分に相当するが，これをそれぞれ増 2 度，短 3 度と数える．

以上の説明で，12 音平均律におけるすべての音に名前を与えられるようになった．ここで，ピアノの鍵盤および楽譜との対応を図 2.1 に示す．鍵盤の図からわかるように， $E$  と  $F$ ，および  $B$  と  $C$  の間には黒鍵盤が無く，これらの音程は短 2 度である．

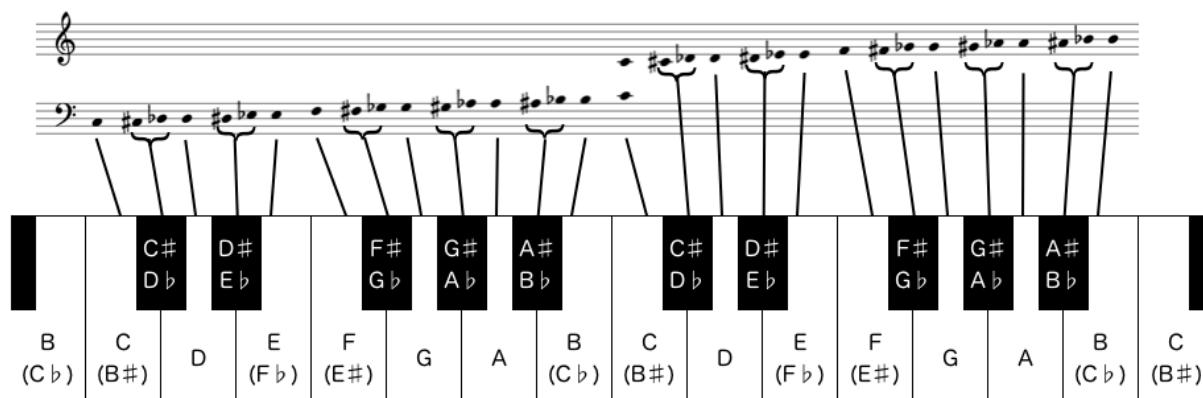


図 2.1: 音名と鍵盤，楽譜の関係

## ピッチクラス

ピッチクラス (*pitch class*) とは，同じ名前を持つ音，およびその異名同音を同じクラスに属するとみなす考え方である．12 音平均律の上では，あらゆる音は 12 個のピッチクラ

スのいずれかに属する．ピッチクラスはCを0, C $\sharp$ /D $\flat$ を1, ..., Bを11というように, 0~11の数字で表される．

以降, ピッチクラス  $n$  ( $n \in \mathbb{N}_0, 0 \leq n \leq 11$ ) のことを  $p_n$  と表記する．音名とピッチクラスの対応を表 2.3 に示す．

表 2.3: 音名とピッチクラスの対応関係

ピッチクラス	p0	p1	p2	p3	p4	p5
音名	C (B $\sharp$ )	C $\sharp$ D $\flat$	D	D $\sharp$ E $\flat$	E (F $\flat$ )	F (E $\sharp$ )
ピッチクラス	p6	p7	p8	p9	p10	p11
音名	F $\sharp$ G $\flat$	G	G $\sharp$ A $\flat$	A	A $\sharp$ B $\flat$	B (C $\flat$ )

## 2.1.2 音階と調

### 音階と調

2.1.1 節で述べたように, 音階 (*scale*) とは音楽を構成するために用いられる音を1オクターヴの範囲内でその高さの順に並べたものである．音階はその音の選び方によっていくつかの種類に分けられるが, ここでは最も一般的で, かつ本研究で対象とする長音階 (*major scale*) と短音階 (*minor scale*) の2種類のみを解説する．なお, 長音階と半音階を合わせて全音階 (*diatonic scale*) と呼び, 対して12個すべての音からなる音階を半音階 (*chromatic scale*) と呼ぶ．

音階はある音を基準に, その音から特定の音程だけ上の音の集まりによって構成される．最も単純な長音階と短音階は, 図 2.2 に示すように, それぞれCとAから始めて幹音を順に並べたものである．長2度を“W”, 短2度を“H” とすると, 長音階は最低音から順に WWHWWWH, 短音階は WHWWHWW という音程の並びで表される．

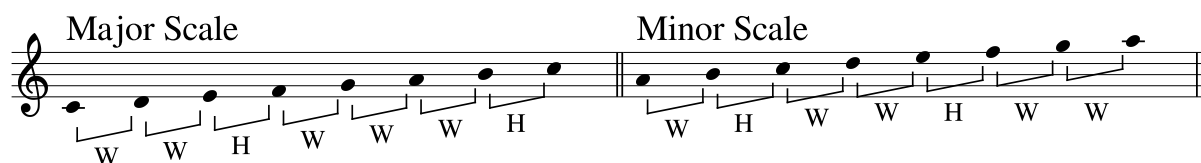


図 2.2: 幹音からなる音階

音階の始まりの音は12個の音のうちいずれを選んでもよく, 例えばDを起点とした長音階の構成音はD, E, F $\sharp$ , G, A, B, C $\sharp$ となり, Fを起点とした短音階の構成音はF, G, A $\flat$ , B $\flat$ , C, D $\flat$ , E $\flat$ となる．すなわち, 音階を作るときは隣接する音の間の音程が正しく保たれるように構成音を選ぶ．

音楽がある音(主音, *tonic*)を中心として構成されるとき, その音楽は調性 (*tonality*) を持つと言い, 調性を持った音組織を調 (*key*) と呼ぶ. 長音階は長調 (*major key*) を, 短音階は短調 (*minor key*) を, それぞれその音階の最低音を主音として形成する. また, それぞれの調はその主音の音名を冠して呼ばれ, 例えばCを主音とする長調はC major (ハ長調), Aを主音とする短調はA minor (イ短調) などと呼ばれる. 一般に, 長調は明るく, 短調は暗い印象を聴き手に与える. 調は楽曲を通して一定であることは稀で, 途中で他の調に変わることが多い. ある調から他の調へ移り変わることを転調 (*modulation*) と呼ぶ. また, 調に基づいた音楽を調性音楽 (*tonal music*) と呼ぶ.

長音階および短音階中の各音は, 主音から順にi度音, ii度音, …, vii度音と呼ぶ. このとき, 主音を1番目として, 各音が音階中の何番目の音に相当するかを音度 (*degree*) と呼ぶ. また, 各音は表2.4に示すような機能名で呼ばれることもある. このうち, 導音は主音に遷移しようとする力が強く, 解決を導く音という意味がある. 長調においては導音から短2度上行することで主音に移ることができ, 導音の働きはより強くなるが, 短調においては導音とその上の主音との間の音程は長2度であり, 長調と比較して導音の働きが弱い. この問題を解決し, 短調の導音に長調と同等の効果を与えるために, 短調において導音を半音高めた音階が用いられることがあり, この音階を和声的短音階 (*harmonic minor scale*) と呼ぶ. これに対し, これまで説明してきた短音階は自然的短音階 (*natural minor scale*) と呼ぶ. しかし, 和声的短音階ではvi度音と導音(vii度音)との音程が増2度となり, この2音間の進行が滑らかにならないという問題がある. この問題を解決するために用いられるのが旋律的短音階 (*melodic minor scale*) である. 旋律的短音階では, 上行するときはvi度音も半音高めることで導音への進行を滑らかにし, 下行するときは導音を高める必要がないため自然的短音階と同じ音を用いる. 以上3種類の短音階を, A minorを例として図2.3に示す.

表 2.4: 音階中の音の機能名

i 度音	主音 ( <i>tonic</i> )
iv 度音	下屬音 ( <i>subdominant</i> )
v 度音	属音 ( <i>dominant</i> )
vii 度音	導音 ( <i>leading tone</i> )

## 調間の関係

ある調に対して, その属音を主音とする調を属調 (*dominant key*), 下屬音を主音とする調を下屬調 (*subdominant key*) と呼ぶ. 長調の属調および下屬調は長調, 短調の属調および下屬調は短調である.

主音と属音の音程は半音7つ分(完全5度), 主音と下屬音の音程は半音5つ分(完全4度)であり, どちらの半音の個数も1オクターヴの音程に含まれる半音の個数12と互いに素であることから, 属調あるいは下屬調への遷移を12回繰り返すと元の調に戻る. これ

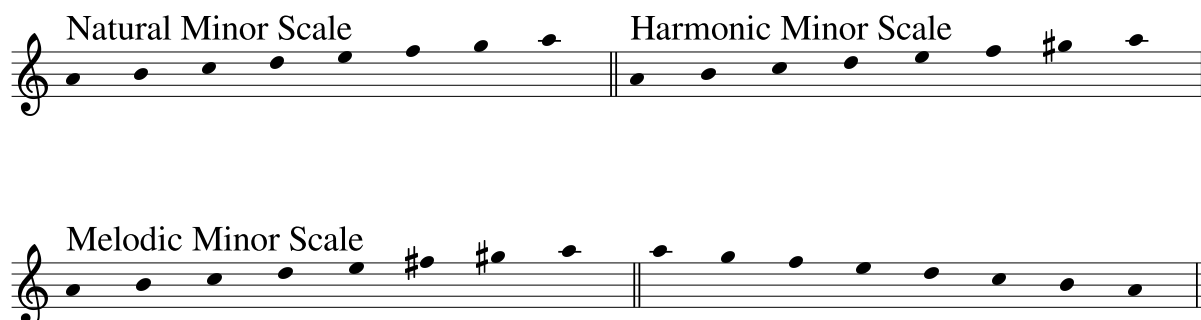


図 2.3: 3 種類の短音階

を円状に図示したものが、図 2.4 に示す五度圏 (*circle of fifths*) である。五度圏上では、属調が時計回りに、下屬調が反時計回りに並んでいる。

ある長調に対して同じ主音を持つ短調、あるいはある短調に対して同じ主音を持つ長調を同主調 (*parallel key*) と呼ぶ。例えば、C major と C minor, F major と F minor など互いに同主調の関係にある。また、ある長調に対して同じ構成音からなる短調、あるいはある短調に対して同じ構成音からなる長調を平行調 (*relative key*) と呼ぶ。例えば、C major と A minor, G major と E minor など互いに平行調の関係にあり、ある長調に対してその平行調の主音は短 3 度低い音になる。同主調の同主調、平行調の平行調はどちらも元の調と同一である。

以上のような調間の関係を踏まえて、ある調に対する近親調 (*related keys*) を定義する。近親調の範囲は厳密には定まっていないが、本研究では 2.3 節で述べる音楽理論 TPS[2] における定義を採用する。TPS において、近親調は上述した属調、下屬調、同主調、平行調に、さらに属調と下屬調それぞれの平行調を加えた 6 つの調を指す。例として、C major の近親調は G major (属調), F major (下屬調), C minor (同主調), A minor (平行調), E minor (属調の平行調), D minor (下屬調の平行調) の 6 つである。近親調は特に関係の深い調であり、転調は近親調間で行われることが多い。これに対して、自身と近親調を除いた他の調を遠隔調 (*distant keys*) と呼ぶ。

### 2.1.3 リズム構造

本節では、音楽の時間的側面を解説する。

まず、楽曲中に現れる、固有の高さと長さを持つ音をピッチイベント (*pitch event*)、ピッチイベントの始まりのことをアタック (*attack*) と呼ぶ。ピッチイベントは単音を指すことも、同時に発音される複数の音からなる和音を指すこともある。ピッチイベントは楽譜上で音符として表されるものであり、楽曲は音高と時間の 2 次元平面上にピッチイベントを並べたものと考えることができる。

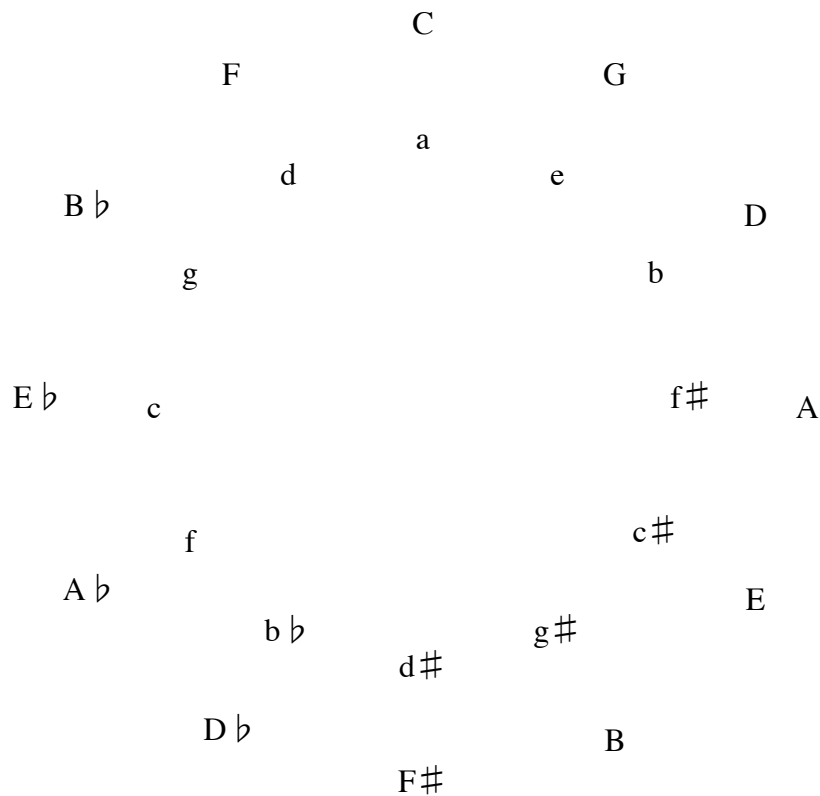


図 2.4: 五度圏

## 音価

あるピッチイベントの時間的な長さは音価 (*note value*) で表され、楽譜上では表 2.5 に示すように、音符の形状によって区別される。ただし、音価は相対的なものであり、表中では四分音符の音価を 1 とする。表からわかるように、各音符の音価は全音符の音価を 2 の累乗で割った値であり、理論上はさらに小さな音価の音符も存在する。また、音符や休符の右に付点 (*augmentation dot*) を付けると、その音符 (休符) の音価を  $3/2$  倍するという意味になる。

ある音価の分だけ音を鳴らさないことを休符で表す。休符の名称は、表 2.5 に示した同じ音価を持つ音符の名称において、“音符 (note)” を “休符 (rest)” に置き換えればよい。

同じピッチの音符を弧線で繋ぐと、2 つの音符の音価の和を音価とすることができる。この記号をタイ (*tie*) と呼ぶ。また、ある音符の音価の  $1/3$  や  $1/5$  などの音価を表現するには、3 連符や 5 連符などの連符 (*tuplet*) を用いる。タイと連符を図 2.5 に例示する。

なお、音価は楽譜上に書かれた概念的な長さであり、必ずしも物理的な音の長さ (*duration*) とは一致しないことに注意が必要である。実際には、楽譜上の指示、演奏者の解釈や表現などによって音の長さは変化する。



表 2.5: 音符と音価の関係

名称	音符	休符	音価
全音符 (Whole note)			4
二分音符 (Half note)			2
四分音符 (Quarter note)			1
八分音符 (Eighth note)			1/2
十六分音符 (Sixteenth note)			1/4
三十二分音符 (Thirty-second note)			1/8
付点二分音符 (Dotted half note)			3
付点四分音符 (Dotted quarter note)			3/2



図 2.5: タイと連符の例

## 拍と拍子

音楽において、拍 (*beat*) とはある一定の時間間隔の単位であり、等間隔で打たれる基本的なリズムを拍節 (*pulse*) と呼ぶ。拍は前述した音価の単位となる。拍には強調されるもの (強拍, *downbeat*) とそうでないもの (弱拍, *upbeat*) があり、強拍と弱拍の規則的な並びが拍子 (*meter*) を作る。ただし、強拍の強調とは物理的に音を大きくするという意味ではなく、心理的にその拍に重きが置かれるということである。また、拍節は音楽の時間的な流れに内在する概念であり、それぞれの拍は必ずしもピッチイベントのアタックと一致するとは限らない。1 拍の時間的な長さは楽曲の速度 (テンポ, *tempo*) によって定められ、テンポは *Andante* や *Allegro* などの速度標語か、BPM (beat per minute) の数値で指示されることが多い。

楽曲は通常、拍子を形作る強拍と弱拍の規則的なパターンの 1 周期分を単位として小節 (*measure*) に区切られ、楽譜上では縦線によって小節を区切る。拍子は 1 小節の中にどの長さの拍がいくつ入るかによって表され、1 小節の中に  $x$  分音符が  $y$  個入る拍子のことを  $y/x$  拍子と呼ぶ。表 2.6 に、代表的な拍子と 1 小節分の拍の強弱を示す。

楽曲の先頭を含め、ある旋律が小節の途中から始まることを弱起 (*anacrusis*) と呼ぶ。

表 2.6: 代表的な拍子

拍子	1 拍の単位	拍のパターン
2/4 拍子	四分音符	強 弱
3/4 拍子	四分音符	強 弱 弱
4/4 拍子	四分音符	強 弱 中 弱
2/2 拍子	二分音符	強 弱
6/8 拍子	八分音符	強 弱 弱 中 弱 弱

## 2.1.4 和音

和音 (*chord*) とは、ピッチの異なる複数の音が同時に鳴ることで生み出される音響である。和声 (*harmony*) とは、和音を継続的に連ねたものであり、特にクラシック音楽において各音度の上に形成される和音がそれぞれ役割を持つという考え方で説明されるのが機能 and 声 (*functional harmony*) である。和声を形成する和音の連ね方を和声進行と呼ぶ。

基本的な和音の作り方は、ある音を基準にしてその3度上の音を順に積み重ねていくことである。このとき、基準となった音のことを根音 (*root*) と呼び、その3度上の音を第3音、さらにその3度上の音を第5音、… のように呼ぶ。また、和音を伴奏としてその上に旋律が奏される場合などにおいて、和音と同時に鳴っていないながら和音を構成しない音を非和声音 (*nonchord tone*) と呼ぶ。

同時に鳴る複数の音が互いによく溶け合い、快く調和している状態を協和 (*consonance*)、そうでない状態を不協和 (*dissonance*) と呼び、そのような和音をそれぞれ協和音 (*consonance*)、不協和音 (*dissonance*) と呼ぶ。2音の関係を考えたとき、両者の周波数がより単純な整数比であるほどそれらの音は協和するとされるが、協和音と不協和音の境界は明確ではない。

なお、本研究では調の構成音のみからなる和音(ダイアトニック・コード, *diatonic chord*) を前提とするため、本節でもダイアトニック・コードのみを解説する。また、本節では短調の音階として自然的短音階と和声的短音階の2種類を想定する。

### 三和音

根音に3度上の音(第3音)と5度上の音(第5音)を重ねると、三和音 (*triad*) ができる。図 2.6 に、C major と A minor における三和音を示す。図中で各和音の下に記したローマ数字は和音記号であり、根音の音度に対応する。

三和音は、根音と第3音および第5音の間の音程によって、表 2.7 に示す4種類に分けられる。表中の音程は、根音からの音程を示す。和音記号において、長三和音と増三和音は大文字、短三和音と減三和音は小文字で表記し、かつ減三和音には $\circ$ 、増三和音には $+$ をそれぞれ右肩に付ける。

C major                      A minor (natural scale)                      A minor (harmonic scale)

I ii iii IV V vi vii°      i ii° III iv v VI VII      i ii° III+ iv V VI vii°

図 2.6: C major と A minor における三和音

表 2.7: 三和音の種類

名称	第 3 音	第 5 音	長調の和音	短調の和音	
				自然的	和声的
長三和音 (major triad)	M3	p5	I, IV, V	III, VI, VII	V, VI
短三和音 (minor triad)	m3	p5	ii, iii, vi	i, iv, v	i, iv
減三和音 (diminished triad)	m3	-5	vii°	ii°	ii°, vii°
増三和音 (augmented triad)	M3	+5	-	-	III+

#### 四和音以上の和音

三和音に根音から 7 度上の音 (第 7 音) を重ねると, 四和音 (*tetrad*) ができる. 図 2.7 に, C major と A minor における四和音を示す. 和音記号においては, 第 7 音を含むという意味で, 根音を表すローマ数字の右下に 7 を付けて表す. また, 四和音のことを七の和音と呼ぶこともある.

C major                      A minor (natural scale)                      A minor (harmonic scale)

I<sub>7</sub> ii<sub>7</sub> iii<sub>7</sub> IV<sub>7</sub> V<sub>7</sub> vi<sub>7</sub> vii<sub>7</sub>°      i<sub>7</sub> ii<sub>7</sub>° III<sub>7</sub> iv<sub>7</sub> v<sub>7</sub> VI<sub>7</sub> VII<sub>7</sub>      i<sub>7</sub> ii<sub>7</sub>° III<sub>7</sub>+ iv<sub>7</sub> V<sub>7</sub> VI<sub>7</sub> vii<sub>7</sub>°

図 2.7: C major と A minor における四和音

四和音も三和音と同様, 構成音間の音程によって分類される. これを表 2.8 に示す. 減七の和音と増七の和音には, 三和音と同様にそれぞれ ° と + を付けて表す. また, 導七の和音には ∅ を付けて表す.

なお, 和音記号の書き方は世界的に統一されたものが存在しない. したがって, 以上で説明したものも含め, 本稿における和音記号は音楽理論 TPS[2] における書き方を踏襲しつつも, 厳密には本研究で定義したものであることに注意されたい.

また, 属七の和音とは本来, v 度音 (属音) の上に形成される四和音を指す言葉である.

しかし，長三和音に根音から短7度上の音を加えた四和音は短調の音階を和声的短音階とすればv度音の上にしか形成されないことから，このような構成音間の音程を持つ和音を便宜上，属七の和音と呼ぶこととする．

表 2.8: 四和音の種類

名称	第3音	第5音	第7音	長調の和音	短調の和音	
					自然的	和声的
属七の和音 (dominant seventh)	M3	p5	m7	V <sub>7</sub>	VII <sub>7</sub>	V <sub>7</sub>
長七の和音 (major seventh)	M3	p5	M7	I <sub>7</sub> , IV <sub>7</sub>	III <sub>7</sub> , VI <sub>7</sub>	VI <sub>7</sub>
短七の和音 (minor seventh)	m3	p5	m7	ii <sub>7</sub> , iii <sub>7</sub> , vi <sub>7</sub>	i <sub>7</sub> , iv <sub>7</sub> , v <sub>7</sub>	iv <sub>7</sub>
減七の和音 (diminished seventh)	m3	-5	-7	-	-	vii <sup>o</sup> <sub>7</sub>
増七の和音 (augmented seventh)	M3	+5	M7	-	-	III <sup>+</sup> <sub>7</sub>
導七の和音 (half-diminished seventh)	m3	-5	m7	vii <sup>o</sup> <sub>7</sub>	ii <sup>o</sup> <sub>7</sub>	ii <sup>o</sup> <sub>7</sub>
短三長七の和音 (minor major seventh)	m3	p5	M7	-	-	i <sub>7</sub>

四和音にさらに根音から9度(1オクターヴと2度)上の音(第9音)を加えると，五和音(*pentad*)ができる．五和音は九の和音とも呼ばれる．五和音は長調・短調ともに，属七の和音に第9音を重ねたV<sub>9</sub>の和音がよく用いられる．長調のV<sub>9</sub>では第9音が根音から長9度上の音であるため長九の和音(major ninth)，短調では根音から短9度上の音であるため短九の和音(minor ninth)と呼ばれ，この両者を総称して属九の和音と呼ぶ．同様にして，五和音に第11音を重ねた六和音や，六和音に第13音を重ねた七和音を作ることでもできる．また，四和音以上の和音について，元となる三和音の構成音以外の構成音を付加音(*added tone*)と呼ぶ．

## 和音の転回

和音の構成音は，古典的な和声理論においては和音の種別や前後の和音との関係に応じた制限はあるものの，ある程度自由な順番で配置することができる．例えば，長三和音において第3音を第5音の上に配置しても構わない．

和音の構成音の配置において，和音の最低音を他の構成音と入れ替えることを転回(*inversion*)と呼ぶ．根音が最低音である形体を基本形と呼び，第3音，第5音，第7音を最

低音に置いた形体をそれぞれ第1 転回形，第2 転回形，第3 転回形と呼び，和音記号においては  $I^6$ ， $I_4^6$ ， $I_2^4$  のように表記する。

転回形の和音記号におけるアラビア数字は，数字付低音 (figured bass) という伝統が元になっている。数字付低音とは，あるピッチを指定し，それに何度上の音を重ねるかを指示する伴奏の記法である。例えば，第1 転回形では最低音となった第3 音から見て，その上の主音との音程は6 度であるから，右上に6 を付けて表す。

## 非和声音

非和声音は，その前後の和声音との繋がり方によって分類される。以下，代表的な非和声音を示す。また，それぞれの譜例を図 2.8 に示す。図中，赤色の音符が非和声音である。なお，順次進行 (*conjunct motion*) とは2 度離れた音への進行を指す。また，非和声音から和声音へ進行することを解決 (*resolution*) と呼ぶ。

経過音 (*passing tone*) ある和声音から別の和声音へ順次進行するとき，その間に入る非和声音。

刺繍音 (*neighbor tone*) ある和声音から非和声音へ順次進行し，元の和声音へ解決するとき，この非和声音。

先取音 (*anticipation*) 和音が変わる前に現れる後続和音の構成音。後続和音に移ることで自動的に解決する。

掛留音 (*suspention*) ある和音の構成音が後続和音に変わった後も持続し，不協和となるもの。通常，その後続和音中で解決する。

The image shows four musical examples in 4/4 time, each with a treble and bass clef staff. The first example, 'Passing tone', shows a melody in the treble staff moving from G4 to A4 to B4, with the A4 note highlighted in red. The second, 'Neighbor tone', shows a melody in the treble staff moving from G4 to A4 to G4, with the A4 note highlighted in red. The third, 'Anticipation', shows a melody in the treble staff moving from G4 to A4 to B4, with the A4 note highlighted in red. The fourth, 'Suspension', shows a melody in the treble staff moving from G4 to A4 to B4, with the A4 note highlighted in red. The bass staff shows chords for each example: a triad in the first, a triad with a red note in the second, a triad in the third, and a triad with a red note in the fourth.

図 2.8: 代表的な非和声音

## 和音記号と調

ここでは，本研究における調の情報を含めた和音記号の書き方を定義する。

和音記号においてその和音が属する調を明示する必要がある場合には、根音の音度を表すローマ数字の後にスラッシュに続けて調の主音を太字で書く。調の主音は長調であれば大文字、短調であれば小文字で書く。例えば、ii/F と書けば F major 上の ii の和音を、V<sub>7</sub>/b と書けば B minor 上の V<sub>7</sub> の和音を指す。

また、調を特定せずに調間の関係のみに注目したい場合もある。この場合は調の主音の代わりに、調の主音間の音程を太字のローマ数字で書き、ここでも長調と短調を大文字と小文字で区別する。例えば、I を D major とするとき、IV/IV と書けば G major 上の IV の和音を、III<sup>+</sup>/vii と書けば C $\sharp$  minor 上の III<sup>+</sup> の和音を指す。ここで、太字のローマ数字で表された音程は完全音程または長音程を指すものとし、長音程に対する短音程や完全音程に対する減音程を表す場合は b を、完全音程に対する増音程を表す場合は  $\sharp$  をローマ数字の左側に付ける。例えば、i を A minor とするとき、bIII は短 3 度上の C major、 $\sharp$ iv は増 4 度上の D $\sharp$  minor (または異名同音調の E $\flat$  minor) をそれぞれ指す。

いずれの書き方においても、スラッシュの左側に根音の音度と 7 や  $\emptyset$  などの付加情報を、スラッシュの右側に太字で調の情報を書くという基本方針は同じである。

## バークリーメソッド

バークリーメソッド (*Berklee method*) は、バークリー音楽大学で教えられている音楽理論である。ここでは、バークリーメソッドにおける和音の表記について述べる。ただし、前述したローマ数字による和音記号と同様に、バークリーメソッドによる表記法にもいくつかの流派があり、本稿で述べる記法以外の方法も用いられることに注意されたい。

バークリーメソッドでは和音をコードネーム (*chord symbol*) で表記する。コードネームは調の情報を持たず、和音の各構成音のピッチクラスにのみ注目した記法であり、根音の音名にその他の情報を付加することで和音を表現する。根音を C としたときの各種コードネームを表 2.9 にまとめる。なお、減七の和音の構成音における bb はダブルフラットといい、音高を半音 2 つ分下げる変位記号であり、よって Bbb は A の異名同音である。

コードネームによる表記は調を決定することなく和音を表現できるが、これは言い換えれば演奏者に調解釈の余地を残しているということである。例えば、表 2.8 に照らせば、FM7 というコードネームは I<sub>7</sub>/F, IV<sub>7</sub>/C, III<sub>7</sub>/d (自然的短音階に限る), VI<sub>7</sub>/a という 4 種類の解釈が可能である。調を考慮することなく和音の構成音を同定できることはもちろん、この調解釈を楽譜上で明示しないことによって自由な即興演奏の幅が広がるという利点があり、バークリーメソッド式の和音表記はジャズやポピュラー音楽を中心に利用されている。

なお、本研究で解析の対象としないダイアトニック・コードとして、長三和音や短三和音に根音から長 6 度上の音を重ねてできるシックスコード (C6 や Cm6) や、第 3 音の代わりに根音から完全 4 度上の音を用いるサスペンデッドコード (Csus4 や C7sus4) などが存在する。また、調の構成音以外を含むノンダイアトニック・コードもコードネームで表現される。

表 2.9: バークリーメソッドにおけるコードネーム

コードネーム	種別	構成音
C	長三和音	C, E, G
Cm	短三和音	C, Eb, G
Cdim	減三和音	C, Eb, Gb
Caug	増三和音	C, E, G#
C7	属七の和音	C, E, G, Bb
CM7	長七の和音	C, E, G, B
Cm7	短七の和音	C, Eb, G, Bb
Cdim7	減七の和音	C, Eb, Gb, Bbb
CM7+5	増七の和音	C, E, G#, B
C∅	導七の和音	C, Eb, Gb, Bb
CmM7	短三長七の和音	C, Eb, G, B
C9	長九の和音	C, E, G, Bb, D
C7-9	短九の和音	C, E, G, Bb, Db

## 2.1.5 和声機能とカデンツ

### 機能と声における和音の機能

機能と声において、各和音が持つ機能はトニック (*tonic*)、ドミナント (*dominant*)、サブドミナント (*subdominant*) の 3 種類に大別される。これらの機能の頭文字をとって、それぞれ T, D, S と略記する場合がある。

トニックは主和音とも呼ばれ、その調の主となる和音であり、主音上に形成される I の和音が該当する。また、I の和音とそれぞれ 2 つの構成音を共有する iii や vi の和音もトニックの機能を持つことがある。このように、構成音を共有することからある和音とほぼ同等の機能を求めて用いられる和音を代理和音 (*substitute chord*) と呼ぶ。

ドミナントは属和音とも呼ばれ、トニックを導く和音であり、属音上に形成される V の和音が該当するほか、V<sub>7</sub> や V<sub>9</sub> といった付加音を伴う形態で用いられることも多い。また、トニックの iii や vi と同様、ドミナントの V の代理和音として iii や vii<sup>o</sup> もドミナントの機能を持つことがある。ドミナントの和音からトニックの和音に進行することを解決 (*resolution*) と呼び、その進行そのものをドミナントモーション (*dominant motion*) と呼ぶ。

サブドミナントは下属和音とも呼ばれ、トニックを弛緩の機能、ドミナントを緊張の機能とすると、サブドミナントはトニックとドミナントの中間程度の緊張度を持つ。サブドミナントは下属音上に形成される IV の和音や、その代理和音としての ii や vi の和音が該当する。

さらに、属調におけるドミナント、すなわちドミナント (V) をトニックとしたときのドミナントという意味で、ドッペルドミナント (*double dominant*) という機能がある。これに

はV/V, V<sub>7</sub>/Vなどが該当する。ドッペルドミナントの主音はii度音となることから、ii度音上の長和音という意味でIIという記号も用い得るが、本研究では和音をダイアトニック・コードに限定する立場から、V/Vを用いる。ドッペルドミナントはサブドミナントの一種と見なされることもある。

また、特にドミナントやドッペルドミナントの和音については、根音を省略して用いることがある。これを根音省略形体 (*missing root*) と呼び、音度を表すローマ数字に斜線を引いてX<sub>7</sub>やX<sub>9</sub>/Vのように表記する。X<sub>7</sub>とvii°の構成音は同一である。

和声理論においては、各機能に対して後続する和音の機能が定められている。トニックはドミナントまたはサブドミナントへ、ドミナントはトニックへ、サブドミナントはトニックまたはドミナントへ進行することができる。これらの規則をまとめると、図2.9のようになる。ドッペルドミナントはドミナントへ進行し、この進行も解決と呼ぶ。また、I→viのように、同じ機能を持つ代理和音への進行も可能である。しかし、この規則は必ずしも守られているわけではなく、実際の楽曲にはドミナントからサブドミナントへの進行も現れる。

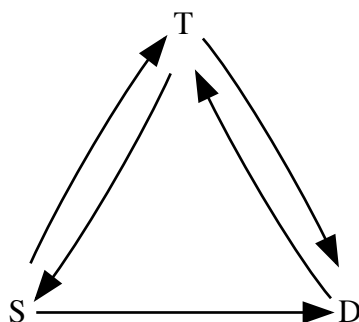


図 2.9: 和声機能間の進行可能性

なお、以上の説明は長調を前提としている。短調についても各和音について同様の機能が割り当てられるが、表 2.7, 表 2.8 に示したように長調と短調では各音度上に形成される和音の種類が異なるため、それによって和音記号を読み替えなければならない。

## カデンツ

カデンツ (*cadence*) は終止とも呼ばれ、特定の和声進行によって楽曲の終わりやフレーズの区切りを示すものであり、音楽において句読点の役割を持つものと考えることができる。カデンツには表 2.10 に示す 4 種類が存在し、それぞれに和声進行が定められている。しかし、これらの和声進行さえ満たせば必ずカデンツになるわけではなく、リズムの観点からフレーズの区切りとなる箇所において和声進行を満たす必要がある。このリズム的な条件については、和声進行の条件ほど厳密な定義はなされてこなかったが、2.2 節で解説する GTTM では、楽曲の時間的な階層構造を基にして、ある和音列がカデンツとなるための条件を定義している。



完全終止は、狭義には  $V_{(7)}$  と  $I$  がどちらも基本形である場合のみを指し、少なくとも一方が転回形である場合を不完全終止と呼んで区別する場合もある。半終止は他の3種類のカデンツと異なり、 $V$  の和音単独で形成される。変終止はアーメン終止と呼ばれることもある。

表 2.10: カデンツの種類

名称	和声進行	役割
完全終止 (authentic cadence)	$V_{(7)} \rightarrow I$	ピリオド
偽終止 (deceptive cadence)	$V_{(7)} \rightarrow vi$	カンマ
半終止 (half cadence)	$\rightarrow V$	カンマ
変終止 (plagal cadence)	$IV \rightarrow I$	ピリオド

カデンツには表 2.10 に示した区別の他に、男性終止 (*masculine ending*) と女性終止 (*feminine ending*) という区別も存在する。図 2.10 に示すように、カデンツを形成する2つ目の和音が1つ目の和音より強い拍にあるものを男性終止、1つ目の和音が2つ目の和音より強い拍にあるものを女性終止と呼ぶ。半終止については、 $V$  の和音とその先行和音より強い拍にあれば男性終止、そうでなければ女性終止である。

Masculine cadence

I      IV      ii<sub>7</sub>    V<sub>7</sub>    I

Feminine cadence

I      IV      ii<sub>7</sub>    V<sub>7</sub>    I

図 2.10: 男性終止と女性終止

なお、カデンツという用語はより一般的に、和音の機能であるトニック、ドミナント、サブドミナントの定型的な組み合わせを指す場合もある。この用法においては、カデンツはあるトニックから次のトニックまでの進行方法として以下の3種類が定められており、これらを連結することによってより大きな和声進行が形成される。

- i.  $T \rightarrow D \rightarrow T$
- ii.  $T \rightarrow S \rightarrow D \rightarrow T$
- iii.  $T \rightarrow S \rightarrow T$

## 2.1.6 その他の音楽知識

### アーティキュレーション

音楽において、アーティキュレーション (*articulation*) とは演奏の表情付けを指す。表 2.11 に、代表的なアーティキュレーションを示す。

スラーで示される音を滑らかに繋げる表現はレガート (*legato*) と呼ばれ、楽譜上に *legato* と書いて指示されることもある。また、楽器によってはスラー記号は特定の奏法を表すこともある。例えばヴァイオリンなどの擦弦楽器では弓の方向を変えずに演奏すること、トランペットなどの管楽器ではタンギングをせずに演奏することを意味する。

表 2.11: 代表的なアーティキュレーション

名称	記号	意味
スラー (slur)		音を滑らかに繋げて演奏する
テヌート (tenuto)		音の長さを保って演奏する
スタッカート (staccato)		1音ずつ短く切って演奏する
アクセント (accent)		その音を強調する



### 強弱の表現

音の強弱による演奏表現をダイナミクス (*dynamics*) と呼ぶ。代表的な強弱記号を表 2.12 に示す。このうち、*pp* から *ff* はその記号が書かれた時点から次の強弱記号による指示があるまでその効果が持続する。対して、*fp* や *sfz* は単一のピッチイベントにのみ効果がある。また、クレッシェンドとディミヌエンドはそれぞれ *cresc.*、*dim.* と書かれることもある。なお、強弱記号は絶対的な音量を示すものではなく、相対的な指示である。

### 楽曲の構造

旋律 (*melody*) は、時間とピッチの両方向に生じるゲシュタルト、すなわちピッチイベントの連続的なまとまりが何らかの音楽的内容を持ったものである。旋律はその長さによって名前が付けられている。まず、反復されるリズム的なパターンを音形 (*figure*) と呼ぶ。次いで、独立した楽想を持ち、旋律を構成する最小単位となるのが動機 (*motif*) であり、2小節で構成されることが多い。動機を繋げて4小節程度のまとまりを作ると楽句 (*phrase*) となり、その終わりにカデンツを伴うのが一般的である。楽句を繋げた楽節 (*period*) は8小

表 2.12: 代表的な強弱記号

名称	記号	意味
ピアノッシモ (pianissimo)	<i>pp</i>	とても弱く
ピアノ (piano)	<i>p</i>	弱く
メゾピアノ (mezzo piano)	<i>mp</i>	やや弱く
メゾフォルテ (mezzo forte)	<i>mf</i>	やや強く
フォルテ (forte)	<i>f</i>	強く
フォルティッシモ (fortissimo)	<i>ff</i>	とても強く
クレッシェンド (crescendo)		徐々に強く
ディミヌエンド (diminuendo)		徐々に弱く
フォルテピアノ (forte piano)	<i>fp</i>	強く, すぐに弱く
スフォルツァンド (sforzando)	<i>sfz</i>	その音を強く

節程度の長さで、単体で楽曲となることのできる最小単位とされる。ただし、これらの定義は理論家や時代によって異なっており、絶対的なものではない。

声部 (*voice*) とは、同じ音の動きをする 1 人以上の演奏者の集団を指し、転じてピアノ音楽などではそれぞれの独立した音の動きを指す。これは元々、合唱から生じた概念である。単一の声部のみからなる楽曲をモノフォニー (*monophony*)、モノフォニーに和声による伴奏を加えた楽曲をホモフォニー (*homophony*) と呼ぶ。また、同時に複数の旋律を持つ楽曲をポリフォニー (*polyphony*) と呼び、複数の旋律を組み合わせる技法が対位法 (*counterpoint*) である。ただし、和声を構成する各声部を旋律と見ることも可能であり、和声と旋律の間に明確な区別があるわけではないため、ホモフォニーとポリフォニーの境界も曖昧である。

## 2.2 A Generative Theory of Tonal Music (GTTM)

A Generative Theory of Tonal Music (GTTM)[1] は、Lerdahl と Jackendoff によって提唱された、西洋の調性音楽を対象とした音楽理論である。本節ではその全体像について述べる。

### 2.2.1 概要

簡約仮説

GTTM は Schenker[14] が提唱した簡約仮説 (*reduction hypothesis*) に基づき、楽曲を単純化してその骨格を取り出す過程を木構造で表現する。GTTM によって得られる構造は、十分な経験を持った聴者の音楽的直観を反映する。[1] によれば、簡約仮説とは“聴者は与え

られた楽曲中の全てのピッチイベントを，相対的な構造的な重要度に基づく階層構造として整理しようと試みる”というものである．なお，簡約の逆のプロセスは精緻化 (*elaboration*) と呼ばれる．GTTM では，この簡約仮説にさらに以下の2つの条件を加え，より厳しくした強簡約仮説 (*strong reduction hypothesis*) に基づいて楽曲を簡約する．

- ピッチイベントは厳密な階層構造の中で認識される．
- 構造的に比較的重要でないピッチイベントは，単なる挿入としてではなく，周辺により重要なピッチイベントとの間に特定の関係を持つものとして認識される．

## GTTM のサブ理論とルールシステム

GTTM は以下の4つのサブ理論から構成される．

**グルーピング構造解析 (grouping analysis)** 楽曲中に境界を設定し，楽曲をモチーフやフレーズなどのグループに分割する．グループ間には包含関係が生じ，楽曲全体に対して1つのグルーピング構造 (*grouping structure*) を出力する．

**拍節構造解析 (metrical analysis)** 楽曲中の拍の位置を推定する．ここでは拍の概念を拡大し，四分音符レベルの拍，二分音符レベルの拍，1小節レベルの拍，… のように階層的な拍節構造 (*metrical structure*) を出力する．

**タイムスパン簡約 (time-span reduction)** まず，グルーピング構造と拍節構造に基づいて楽曲をタイムスパンという範囲に分割する．続いてタイムスパン内のピッチイベントの構造的な重要度を比較し，より重要なピッチイベントのみを残すことで楽曲の簡約を行う．この操作を段階的に繰り返し，簡約の過程をタイムスパン木 (*time-span tree*) として出力する．

**プロロンゲーション簡約 (prolongational reduction)** プロロンゲーションとは，あるピッチイベントが鳴り終わった後も，心理的にはその音が響き続けているように感じられる効果を指す．ここでは和声の機能を考慮してタイムスパン木を修正し，プロロンゲーション木 (*prolongational tree*) を出力する．

以上のサブ理論において，それぞれの出力はいずれも階層構造である．それぞれのサブ理論は，構文規則 (*well-formedness rule*，以下 *WFR*) と選好規則 (*preference rule*，以下 *PR*) から構成される．*WFR* は，それぞれ出力とする階層構造の形式を定義するルールであり，必ず満足されなければならない．一方，*PR* は実際の楽曲の内容に基づいて階層構造を生成するためのルールだが，その記述は楽曲解析における一般的な傾向に留まっており，必ずしも満足されない．それは *PR* 間の衝突が許容されているためであり，解析においてどちらか一方の *PR* しか適用できない場合は，解析者個人の判断によって *PR* を選択し，それに基づいて階層構造を生成することとなる．また，*WFR* と *PR* の他にも例外的なルールとして変形規則 (*transformational rule*，以下 *TR*) がある．*TR* は *WFR* を満足できるように楽曲の表層を操作するためのルールである．

## 楽曲解析の概観

GTTM は与えられた楽曲を分析し，その結果を木構造として得るという点で，言語理論における生成文法による文の分析に通じるところがある．しかし，音楽は言語と異なり，通常，ある入力に対して複数の解釈が割り当てられる．GTTM における PR の衝突と選択は，ある楽曲に対して多様な解釈を与えることを可能にする．この意味で PR は楽曲解析において非常に重要な役割を果たしており，一方で言語理論には PR に対応するものが存在しない．Lerdahl らは，このことが音楽の生成理論と言語の生成理論の大きな違いであると述べている．

GTTM による解析の流れとしては，まず与えられた楽譜 (音楽表層, *musical surface*) からグルーピング構造解析と拍節構造解析を行う．次にグルーピング構造と拍節構造に基づいてタイムスパン簡約を行い，さらにタイムスパン木に基づいてプロロンゲーション簡約を行うという流れが基本となる．また，グルーピング構造解析，拍節構造解析，タイムスパン簡約は基本的に単一のピッチイベントのレベルからボトムアップに解析を進めていくのに対し，プロロンゲーション簡約ではタイムスパン木の根からトップダウンに処理を行う．しかし，後述するが PR の中にはマクロな視点や他の解析の結果を参照するものもあり，例えばグルーピング構造解析には構造の対称性やタイムスパン木の安定性に関する PR が存在する．したがって，部分的にトップダウンの方法を含んだり，各サブ理論による解析間でフィードバックを繰り返して解析結果を収束させたり，といったプロセスが必要となる．

以下の節では，GTTM のそれぞれのサブ理論について詳述する．ただし，本研究ではタイムスパン簡約を主に扱うため，その次のステップであるプロロンゲーション簡約については割愛する．

### 2.2.2 グルーピング構造解析

#### 構文規則

グルーピング構造解析の構文規則 (Grouping Well-Formedness Rule; GWFR) は以下の 5 つである．

**GWFR1** あらゆる連続した音 (ピッチイベントや打楽器の打音) の列はグループを構成でき，かつ，連続した音の列だけがグループを構成できる．

**GWFR2** 楽曲はグループを構成する．

**GWFR3** あるグループはより小さなグループを含むことができる．

**GWFR4** グループ  $G_1$  がグループ  $G_2$  の一部を含むならば， $G_1$  は  $G_2$  の全体を含まなければならない．

**GWFR5** グループ  $G_1$  がより小さなグループ  $G_2$  を含むならば,  $G_1$  は余すところなくより小さなグループに分割されなければならない.

以上の GWFR からわかるように, GTTM におけるグループとは時間的に隣接した複数のピッチイベントのまとまりである. また, ある楽曲はそれ全体を最大レベルのグループとして, 階層的により小さいグループに分割されることがわかる. なお, グループは楽譜の下にスラー記号を用いて表される.

図 2.11 に, GWFR を満たさない例を示す.  $G_1$  と  $G_2$  が重複していることや,  $G_4$  が  $G_2$  の途中から始まっていることは GWFR4 に, 6 番目の音符が  $G_2$  にも  $G_3$  にも含まれていないことは GWFR5 にそれぞれ反する.

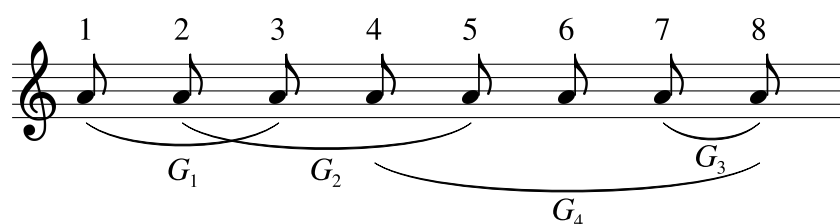


図 2.11: GWFR を満たさないグルーピングの例

## 選好規則

グルーピング構造解析の選好規則 (Grouping Preference Rule; GPR) は以下の 7 つである.

**GPR1** 非常に小さなグループを伴う解析は避けるべきである. グループは小さければ小さいほど好ましくない.

**GPR2 (Proximity)** 4 つの音符の列  $n_1n_2n_3n_4$  を考える. 他の条件がすべて同じならば,  $n_2$  から  $n_3$  への遷移は以下の場合にグルーピングの境界となり得る.

- a. (Slur/Rest)  $n_2$  の終わりから  $n_3$  のアタックまでの時間間隔が,  $n_1$  の終わりから  $n_2$  のアタック, および  $n_3$  の終わりから  $n_4$  のアタックまでの時間間隔より大きい.
- b. (Attack-Point)  $n_2$  と  $n_3$  のアタック間の時間間隔が,  $n_1$  と  $n_2$ , および  $n_3$  と  $n_4$  のアタック間の時間間隔より大きい.

**GPR3 (Change)** 4 つの音符の列  $n_1n_2n_3n_4$  を考える. 他の条件がすべて同じならば,  $n_2$  から  $n_3$  への遷移は以下の場合にグルーピングの境界となり得る.

- a. (Register)  $n_2$  から  $n_3$  への遷移が,  $n_1$  から  $n_2$ , および  $n_3$  から  $n_4$  への遷移よりも大きな音程を伴う.

- b. (Dynamics)  $n_2$  から  $n_3$  への遷移において音量が変化し,  $n_1$  から  $n_2$ , および  $n_3$  から  $n_4$  への遷移では音量が変化しない.
- c. (Articulation)  $n_2$  から  $n_3$  への遷移においてアーティキュレーションが変化し,  $n_1$  から  $n_2$ , および  $n_3$  から  $n_4$  への遷移ではアーティキュレーションが変化しない.
- d. (Length)  $n_2$  と  $n_3$  の音の長さが異なり,  $n_1$  と  $n_2$ , および  $n_3$  と  $n_4$  はそれぞれ音の長さが等しい.

**GPR4 (Intensification)** GPR2 と GPR3 による効果がより強く働く箇所は, 大きなレベルのグループの境界となり得る.

**GPR5 (Symmetry)** あるグループが, 長さの等しい2つのグループへ分割されるのが理想的である. この理想的な分割により近づけるようなグルーピング構造解析が好ましい.

**GPR6 (Parallelism)** 楽曲中の複数の部分が類似していると解釈されるならば, それらの部分は類似したグルーピング構造を形成するのが好ましい.

**GPR7 (Time-Span and Prolongational Stability)** より安定したタイムスパン簡約およびプロロンゲーション簡約に帰着するようなグルーピング構造が望ましい.

以下, それぞれの GPR について説明を加える. まず, GPR1 は知覚的に無意味な細かいグルーピング構造を防ぐことを目的としており, 実質的には非常に強い根拠がない限り単一のピッチイベントから構成されるグループを禁止するルールである. 2つのピッチイベントからなるグループも, ある程度の根拠を必要とする. 3つ以上のピッチイベントの列に対しては, GPR1 はほぼ効果を持たない.

GPR2 (Proximity) は隣接したピッチイベントの時間的關係に着目したルールであり, 連続した4つのピッチイベントを観察して, その2つ目と3つ目にグループの境界があり得るかを判断する. ここで, GPR2a (Slur/Rest) を考える際, ピッチイベントの終わりの考え方に注意が必要である. ここではピッチイベントの長さを音価ではなく物理的な音の長さとして考えるため, 楽譜上に書かれた音価だけではなく, 音符に付随するアーティキュレーションをも考慮しなければならない. また, スラーやテヌートなどの指示がない限り, ある音と次の音の間には休符がない場合でもごく小さな隙間が生じ, 音は音価分より短くなる. スラーについては, スラーの終端のピッチイベントのみ実際の音の長さが音価分より短くなる. よって, 2つのスラーが隣接している場合はその間に GPR2a を適用できる.

GPR3 (Change) は, ピッチイベントのある性質の変化を捉えるルールであり, GPR2 と同様に連続した4つのピッチイベントを観察する. GPR3a は音域の変化を調べる. このルールが適用されるということは, ピッチイベント  $n_2$  と  $n_3$  の間を境にして旋律の音域が移るということであり, ある1音だけピッチが突出しているような場合には適用されない. GPR3b, 3c, 3d はそれぞれ音量, アーティキュレーション, 音の長さがある箇所を境に変化する場合に適用され, こちらもある1音だけが異なる場合には適用されない.

以上の3つのGPRは局所的なルールであり、小さなレベルのグルーピング構造を獲得する際に用いられる。これらのルールを適用した例を図2.12 (W. A. Mozart, Symphony No.40 in G minor, K.550) に示す。GPR2とGPR3は適用可能な箇所にルール番号を付記し、GPR1も含めた総合的な判断によって選択されたグルーピング構造を表示している。1小節目と2小節目の間など、ルール番号が書いてあるにもかかわらずグループの境界となっていない箇所は、そのルールが適用されなかったことを表し、その理由となるのがGPR1である。

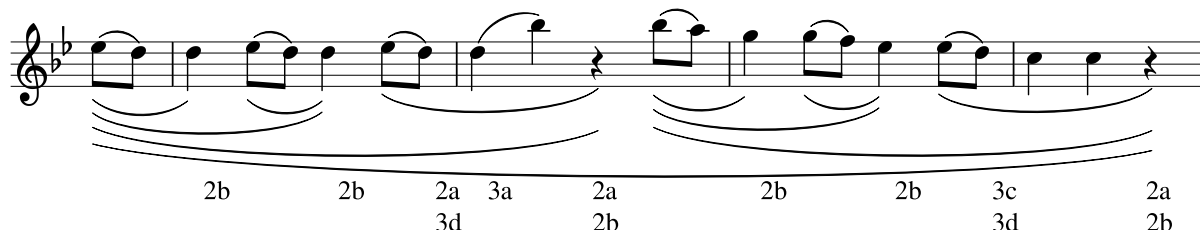


図 2.12: GPR1~3 の適用例 ([1] pp.47-48, 図 3.19 を基に作成)

GPR4以降は、より大きなレベルのグルーピング構造に関するルールである。まず、GPR4 (Intensification) はGPR2 (Proximity) とGPR3 (Change) の効果を参照し、これらのルールがより強く働く箇所に適用されるが、このことからGTTMにおける各ルールは独立した対等なものではないことがわかる。以下、図2.13を用いてGPR4の効果の説明する。図中、最小レベルのグループ境界はGPR2 (Proximity) によって決定されるが、その結果得られた5つのグループを上位レベルでどのように組み合わせるかについては局所的なルールでは説明できない。そこで、GPR4の適用を試みると、GPR2a (Slur/Rest) とGPR2b (Attack-Point) の両方が適用されているのは4拍目と5拍目の間のみであり、それ以外のグループ境界ではGPR2aのみが適用されることから、最小レベルの5つのグループはそれぞれ3つと2つでまとめ、上位グループを獲得できる。

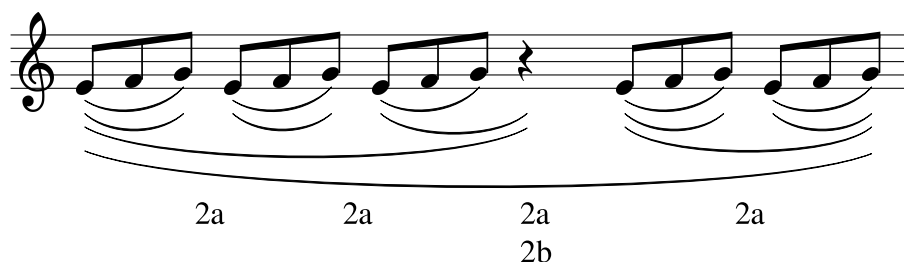


図 2.13: GPR4 の適用例 ([1] p.49, 図 3.20 を基に作成)

GPR5 (Symmetry) はグループをなるべく同じ長さに2分割することを要求するが、実際の解析においてはグルーピング構造を最小レベルからボトムアップに構築していく。よって、このルールはなるべく同じ長さの下位グループを選んでそれらを上位グループにまとめるルールとも言える。GPR5の適用例を図2.14に示す。図中、aはGPR5を問題なく適



用できているが、bは最小レベルの同等なグループが6つ存在し、中間レベルと最大レベルのどちらかにしかGPR5を適用できない。bのような場合、2通り示したグルーピング構造のどちらが好ましいかはGPR5だけでは判断できず、解析者は他のGPRを考慮に入れて一方を選択することになる。

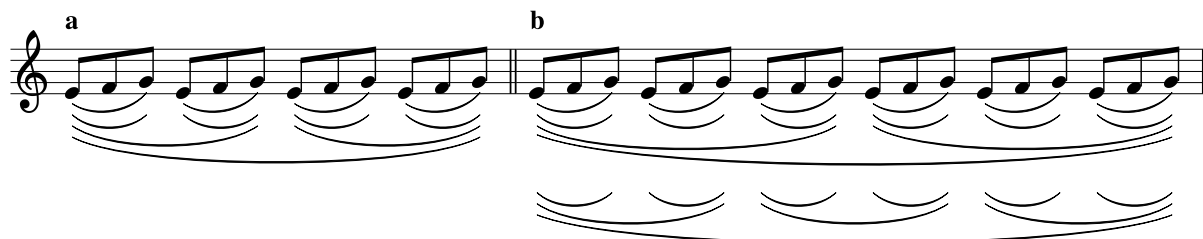


図 2.14: GPR5 の適用例 ([1] p.50, 図 3.21 を基に作成)

GPR6 (Parallelism) は楽曲中の類似したパターンに同様のグルーピング構造を与えるルールであり、例として図 2.15 の a, b のような場合に適用される。これらの例では局所的なルールである GPR2 (Proximity) と GPR3 (Change) を適用できる箇所がないが、上昇型の音形が繰り返されており、GPR6 によってグループ境界を置くことができる。しかし、c のように音形の反復と異なるリズムでスラーが与えられると、GPR2a (Slur/Rest) が優勢となることが GTTM の原著で例示されている。

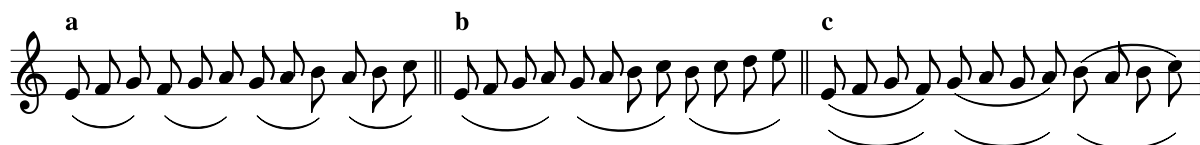


図 2.15: GPR6 の適用例 ([1] pp.50-51, 図 3.22, 3.23 を基に作成)

GPR7 (Time-Span and Prolongational Stability) は他の GPR とは異なり、別のサブ理論であるタイムスパン簡約およびプロロンゲーション簡約との相互作用に関するルールである。しかし、このルールが参照する簡約の安定性は具体的に定義されておらず、GPR6 における類似性とともにグルーピング構造解析において最も曖昧な部分である。

### 変形規則と根底的グルーピング構造

これまでグルーピング構造解析におけるルールを説明してきたが、現実の楽曲は必ずしも GWFR を満たすように解析できるわけではない。このような例外的な楽曲に対応するため、グルーピング構造解析においては、*Grouping Overlap* と *Grouping Elision* の 2 つの TR を定めている。

Overlap と Elision は、どちらもあるピッチイベントが同じレベルにおける複数のグループに属することで起こる。Overlap は、あるピッチイベントがあるグループの終わりである

と同時に，次のグループの始まりでもある場合に起こる．Elision は，あるグループの終わりが次のグループの始まりを上書きするか(右 elision)，あるいは逆にあるグループの始まりが前のグループの終わりを上書きする場合(左 elision)に起こる．それぞれの例を図 2.16 (W. A. Mozart , Sonata K.279) , 2.17 (F. J. Haydn , Symphony no.104) , 2.18 (F. Schubert , Unfinished Symphony) に示す．このようなグルーピング構造は前述した GWFR4 で禁止されているため，仮想的にピッチイベントを挿入することでこの状態を解消する．



図 2.16: Overlap の例 ([1] p.56 , 図 3.25 より引用)

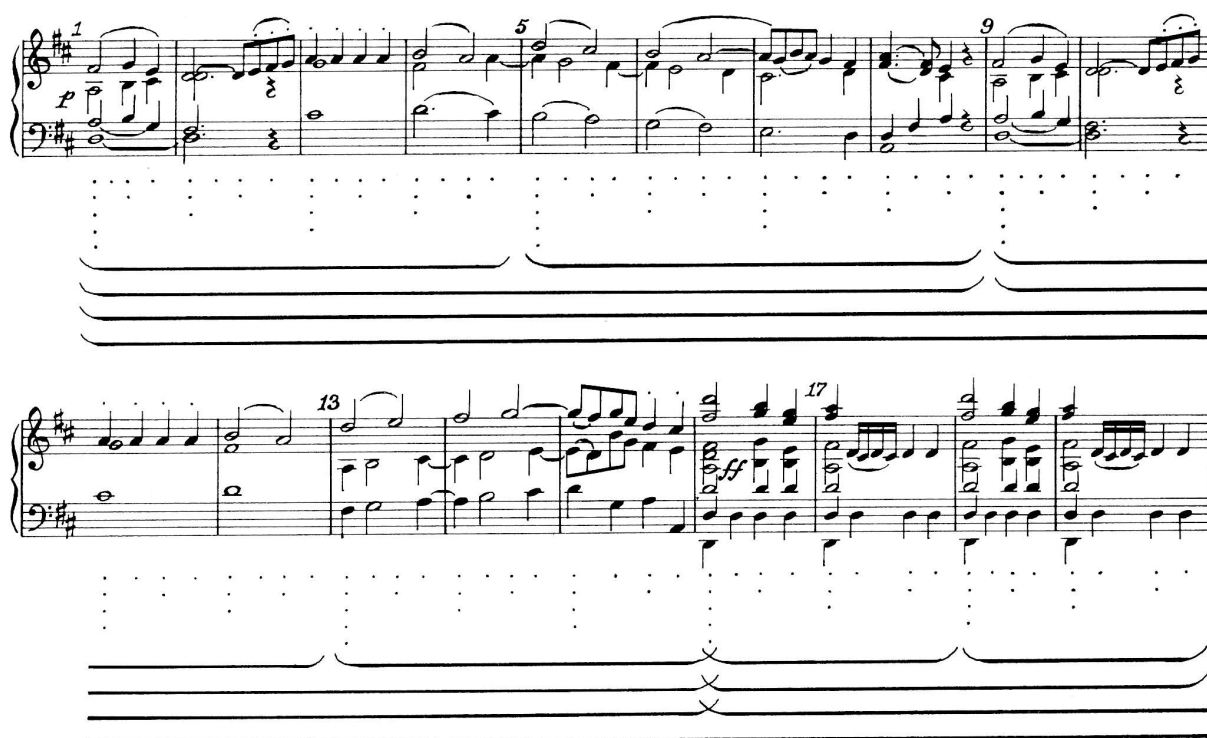


図 2.17: 左 Elision の例 ([1] p.57 , 図 3.26 より引用)

ここで，グルーピング構造を表層的グルーピング構造 (*surface grouping structure*) と根底的グルーピング構造 (*underlying grouping structure*) の 2 種類に分ける．表層的グルーピング構造は与えられた音楽表層に基づく構造であり，Overlap や Elision を含む可能性があ



図 2.18: 右 Elision の例 ([1] p.58, 図 3.28 より引用)

る．対して根底的グルーピング構造は仮想的なピッチイベントを補ったものであり，完全にGWFRを満たす．元からOverlapやElisionが存在しない楽曲であれば，それに対応する表層的グルーピング構造と根底的グルーピング構造は同一である．

TRは次の通りである．

**Grouping Overlap** 根底的グルーピング構造  $G$  において以下の条件を満たす隣接したグループ  $g_1, g_2$  を考える．

- $g_1$  はピッチイベント  $e_1$  で終わる．
- $g_2$  はピッチイベント  $e_2$  から始まる．
- $e_1$  と  $e_2$  は音楽表層において同一のイベントである．

このとき，表層的グルーピング構造  $G'$  は，以下を除いて  $G$  と同一である．

- $G'$  は， $G$  においてピッチイベント列  $e_1e_2$  があつた箇所に単一のピッチイベント  $e'$  を持つ．
- $e'$  は， $e_1$  および  $e_2$  と同一である．
- $G$  において  $e_1$  で終わるすべてのグループは， $G'$  において  $e'$  で終わる．
- $G$  において  $e_2$  から始まるすべてのグループは， $G'$  において  $e'$  から始まる．

**Grouping Elision** 根底的グルーピング構造  $G$  において以下の条件を満たす隣接したグループ  $g_1, g_2$  を考える．

- $g_1$  はピッチイベント  $e_1$  で終わる．
- $g_2$  はピッチイベント  $e_2$  から始まる．
- (左 elision)  $e_1$  は  $e_2$  と和声的に同一で，かつ強弱と音域において  $e_2$  より弱い．
- (右 elision)  $e_2$  は  $e_1$  と和声的に同一で，かつ強弱と音域において  $e_1$  より弱い．

このとき，表層的グルーピング構造  $G'$  は，以下を除いて  $G$  と同一である．

- $G'$  は， $G$  においてピッチイベント列  $e_1e_2$  があつた箇所に単一のピッチイベント  $e'$  を持つ．

- (左 elision)  $e'$  は  $e_2$  と同一である .
- (右 elision)  $e'$  は  $e_1$  と同一である .
- $G$  において  $e_1$  で終わるすべてのグループは ,  $G'$  において  $e'$  で終わる .
- $G$  において  $e_2$  から始まるすべてのグループは ,  $G'$  において  $e'$  から始まる .

### 構造的開始と構造的終止

ある程度大きなレベルのグループは楽曲の構造において楽句以上の規模に相当し , そのグループの中にはある和音から始まってカデンツで終止するという一連の和声的な動きが現れる . このようなグループにおいて , 始まりのピッチイベントを構造的開始 (*structural beginning*) , 終わりを表すカデンツを構造的終止 (*structural ending*) と呼び , これら 2 つのアタックを構造的アクセント (*structural accent*) と呼ぶ . 完全終止や偽終止は 2 つの和音からなるが , この場合は構造的終止はその両方のイベントを指し , その構造的アクセントは 2 つ目の和音のアタック , すなわち解決の瞬間において起こる . なお , 2.2.4 節でも述べるが , GTTM において変終止は完全終止の精緻化であると考える .

構造的開始 , 構造的終止ともに必ずしもグループの端にあたるとは限らない . グループが弱起 (*anacrusis*) で始まっていればその部分は構造的開始よりも前に現れる . また , 構造的終止の後にその展開 (*extension*) が続く場合もある . 以上の説明を図示すると図 2.19 のようになる .

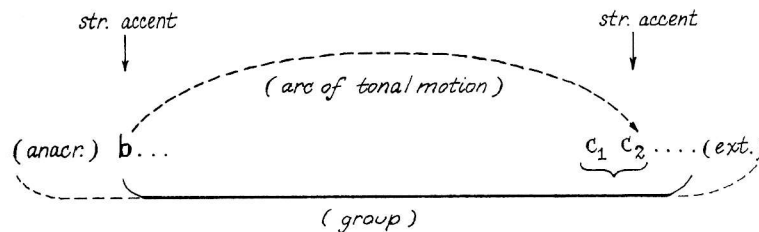


図 2.19: グループにおける和声的構造の模式図 ([1] p.31 , 図 2.18 より引用)

### 2.2.3 拍節構造解析

一般的な拍節の概念は 2.1.3 節で述べた通りである . GTTM では拍節に階層構造を導入しており , 一般的な拍のレベルだけではなく , 二分音符レベルや 1 小節レベルなど , 異なる間隔に拍を設定する .

実際の楽譜には拍子と小節が示されており , 楽譜を表すデータ形式である MusicXML[15] の登場によって , 計算機においてもそれらの情報を容易に扱うことができるようになった . 基本的な拍子であれば小節中の拍節構造は自明であるため , このレベルにおいては拍節構造解析の意義は薄い . しかし , GTTM の拍節構造解析は小節単位やそれ以上のレベルに

おける拍の強弱を論じることができる。また、この理論は聴者が楽曲を聴取してそれを構造化する過程、すなわち拍節の情報が明示されていない聴覚情報から拍節構造を獲得する過程のモデル化であると考えられる。実際の解析においては、各小節内の拍節構造については楽譜に与えられた拍子に依拠した構造を与え、それ以上のレベルについては後述するルールに基づいて解析を行うことが好ましいと考えられる。

拍節構造の例を 2.20 に示す。拍節構造はそのレベルにおける拍の位置にドットを置き、小さなレベルから順に上から下に並べて階層構造を表す。その結果、拍が強い箇所にはより多くのドットが現れる。ある拍節レベル  $L_i$  において強拍であるということは、その 1 つ上のレベル  $L_{i+1}$  において拍が存在するということである。

図 2.20: 拍節構造の例 ([1] p.23, 図 2.10 より引用)

## 構文規則

拍節構造解析の構文規則 (Metrical Well-Formedness Rule; MWFR) は以下の 4 つである。

**MWFR1** すべてのピッチイベントのアタックは、楽曲中のその位置における最小レベルの拍点に関連付けられなければならない。

**MWFR2** ある拍節レベルにおけるすべての拍は、すべてのより小さな拍節レベルにおいても拍でなければならない。

**MWFR3** 各々の拍節レベルにおいて、強拍は 2 拍ごと、または 3 拍ごとに置かなければならない。

**MWFR4** *tactus* レベル、およびその 1 つ上位の拍節レベルにおいては、拍は楽曲を通して等間隔に配置されなければならない。 *tactus* レベルより小さな拍節レベルにおいては、弱拍はその両隣の強拍の間に等間隔に配置されなければならない。

MWFR の解説にあたっては、まず *tactus* という用語を説明しなければならない。GTTM では階層的な拍節構造を考えるが、その中で実際に聴者が意識するのは 1~2 個の中間レベルである。このレベルは、指揮者が指揮棒を振る拍や、聴者がリズムに合わせて足踏みをする拍のレベルに相当する最も規則性の強いレベルであり、これを *tactus* と呼ぶ。

これを基に MWFR を見てみると、まず MWFR4 により 2 つの規則的な拍節レベルが要求され、それより大きなレベルでは不規則な拍の長さが許容され、小さなレベルではそれぞれの強拍から次の強拍までの間に規則性が要求される。MWFR1 における“その位置における最小レベル”とは、tactus より小さいレベルにおいては局所的な連符やそこだけに現れる細かい拍などの影響で拍の分割方法が位置によって異なる可能性を考慮したものである。

しかし、GTTM において具体的にどのレベルを tactus とするのかについては、1 分間に 40~160 拍で、最小レベルからそれほど離れないレベルとだけ [1] に書かれており、厳密な定義がなされていない。

## 選好規則

拍節構造解析の選好規則 (Metrical Preference Rule; MPR) は以下の 10 個である。

**MPR1 (Parallelism)** 複数のグループ、またはグループの一部が類似していると解釈されるならば、それらのグループは類似した拍節構造を持つことが好ましい。

**MPR2 (Strong Beat Early)** あるグループ内で最も強い拍が、グループ内の早いタイミングで現れるような拍節構造がわずかに好ましい。

**MPR3 (Event)** ある拍節レベル  $L_i$  において、ピッチイベントの開始点と一致する拍が強拍であるような拍節構造が好ましい。

**MPR4 (Stress)** ある拍節レベル  $L_i$  において、アクセントを伴う拍が強拍であるような拍節構造が好ましい。

**MPR5 (Length)** 以下のいずれかの開始点により強い拍が現れるような拍節構造が好ましい。

- a. より長いピッチイベント
- b. より長く続く音量
- c. より長いスラー
- d. より長く続くアーティキュレーションのパターン
- e. タイムスパン簡約の対応するレベルにおいてより長いピッチ
- f. タイムスパン簡約の対応するレベルにおいてより長い和音

**MPR6 (Bass)** 拍節的に安定したバス声部 (低音伴奏) が好ましい。

**MPR7 (Cadence)** 拍節的に安定したカデンツが強く好まれる。すなわち、カデンツの範囲内においては局所的な選好規則への違反を避ける。

**MPR8 (Suspension)** 掛留音がその解決よりも強い拍にあるような拍節構造が強く好まれる。

**MPR9 (Time-Span Interaction)** タイムスパン簡約との衝突を最小化するような拍節構造解析が好ましい。

**MPR10 (Binary Regularity)** 各々のレベルにおいて、強拍が1つおきに現れるような拍節構造が好ましい。

以下、それぞれのMPRについて説明を加える。まず、MPR1 (Parallelism) はGPR6と同様、類似性に関するルールであるが、グルーピング構造に着目しており、同様なグループは同様の拍節構造を持つことを要求している。また、このルールは具体的にどこを拍点として選ぶかについては言及していない。

MPR2 (Strong Beat Early) もグルーピング構造に言及したルールであり、あるグループに対してなるべく早い位置にそのグループ内で最も強い拍が現れることを要求する。このルールにおける“わずかに (weakly)”のように、PRの中にはその効果の強さに言及されたものも存在する。

MPR3 (Event) は、なるべく多くのピッチイベントのアタックが拍点と一致するような拍節構造を好むルールである。図2.21の例では、拍点にドット、ピッチイベントのアタックに拍点がない箇所にアスタリスク (\*) を置いて拍節構造の候補を示している。この場合、アスタリスクをなるべく少なくすることがMPR3の要求である。

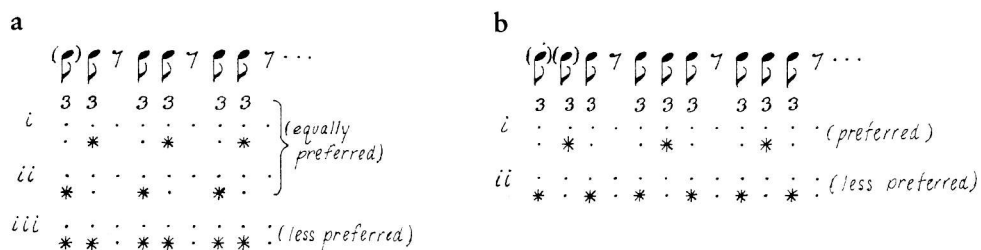


図 2.21: MPR3 の適用例 ([1] p.77, 図 4.16 より引用)

MPR4 (Stress) におけるアクセントとは、2.1.6 で示したアクセント記号や単音に対して働く強弱記号など、突出して強く演奏されるピッチイベントを指す。図2.22の例では、図2.21と同様に拍点にドット、アクセントを持ったピッチイベントのアタックに拍点がない箇所にアスタリスクを表示しており、ここでもアスタリスクがなるべく少ない拍節構造が好ましい。

MPR5 (Length) は、強拍に起こるピッチイベント、または強拍から始まる音量やアーティキュレーションの変化が、次の強拍までの間において最も支配的であることが好ましいとするルールである。ここで注目すべきことは、タイムスパン簡約の結果にも言及していることである。すなわち、音楽表層のみではなく、それを簡約して得られたより深層的な構造にも着目してピッチイベントや和音の長さを調べる必要がある。図2.23の例では、8分

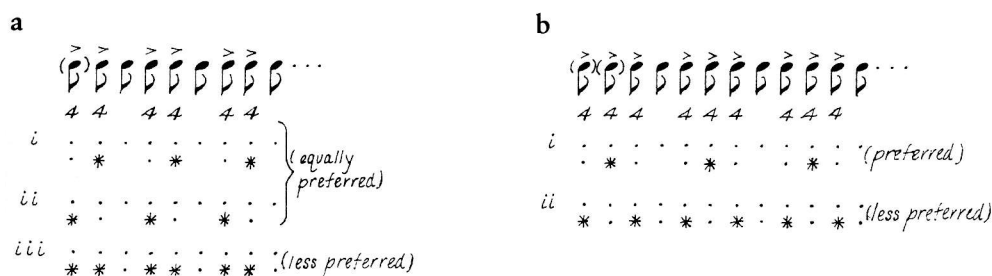


図 2.22: MPR4 の適用例 ([1] p.79 , 図 4.20 より引用)



図 2.23: MPR5 の適用例 ([1] p.83 , 図 4.32 より引用)

音符が並んだ音楽表層からは2分音符以上のレベルの拍点を決定できないが、タイムスパン簡約を行った4分音符レベルに注目すればMPR5eを用いることができる。

MPR6 (Bass)とMPR7 (Cadence)は拍節構造の安定性に言及しているが、これは局所的なMPRへの違反がなるべく少なくなるように拍節構造を選ぶべきという意味である。MPR6は旋律の安定性よりも低音伴奏の安定性を、MPR7はカデンツ以外の部分における安定性よりもカデンツの範囲内における安定性を、それぞれ優先すべきとするルールである。

MPR8 (Suspension)は非和声音の一種である掛留音に関するルールであり、掛留音の開始点はその解決よりも強い拍にあることが好まれる。すなわち、強拍に起こる不協和が後続する弱拍で解決するのが自然であると主張している。MPR6~8は複数の声部からなるホモフォニーやポリフォニーを前提としていることも特徴である。

MPR9 (Time-Span Interaction)はGPR7 (Time-Span and Prolongational Stability)と同様、タイムスパン簡約との相互作用に関するルールであり、サブ理論間のフィードバックの仕組みを必要とする。

MPR10 (Binary Regularity)はMWFR3で許可された2拍子と3拍子のうち、2拍子をより好ましいとするルールである。tactusレベル以下、およびtactusレベルの1つ上のレベルにおいては、MWFR4によってMPR10の効果は上書きされてしまうが、不規則な拍節構造が許容されるより大きなレベルにおいては、このルールは何らかの証拠がない限り、1拍おきに強拍を置くように促す効果を持つ。



## 変形規則

グルーピング構造解析における Overlap と Elision に関連して、拍節構造解析においても以下に示す Metrical Deletion という TR がある。

**Metrical Deletion** 以下のような拍節構造  $M$  を考える。

- i.  $M$  の拍節レベル  $L_i$  において隣接した拍  $B_1, B_2, B_3$  を考え、 $B_2$  はレベル  $L_{i+1}$  における拍でもある (すなわち、 $B_2$  は  $L_i$  における強拍である)。
- ii.  $B_1$  から  $B_2$  までのタイムスパンを  $T_1$ 、 $B_2$  から  $B_3$  までのタイムスパンを  $T_2$  と置く。
- iii.  $M$  は根底的グルーピング構造  $G$  と結びついている。 $T_1$  と  $T_2$  は左 Elision か Overlap のいずれかによって、どちらも  $G$  において表層的なタイムスパン  $T'$  と対応する。

このとき、表層的グルーピング構造  $G'$  に結び付けられる拍節構造  $M'$  は以下のようにして得られる。

- (a) 左 Elision の場合、 $B_1$ 、および  $B_1$  と  $B_2$  の間にあるすべての拍をすべてのレベルにおいて消去し、 $B_2$  を  $T'$  の開始点に結び付ける。
- (b) Overlap の場合、 $B_2$ 、および  $B_2$  と  $B_3$  の間にあるすべての拍をすべてのレベルにおいて消去し、 $B_1$  を  $T'$  の開始点に結び付ける。

グルーピング構造解析、拍節構造解析ともに、TR はどのような場合に適用するのかについて定式化が不十分であることは、Lerdahl からも認めているところである。

### 2.2.4 タイムスパン簡約

GTTM における簡約では、ピッチイベントを比較してより重要なものを残し、そうでないものを重要である方のピッチイベントに従属するものとする。このとき、重要である方をヘッド (*head*)、そうでない方をエラボレーション (*elaboration*) と呼ぶ。このプロセスは、ピッチイベント同士の勝ち抜き戦を行い、負けたイベント (エラボレーション) が勝ったイベント (ヘッド) に吸収されるようなものとイメージできる。簡約の過程は木構造で表現でき、それぞれのピッチイベントが1本の枝に対応し、ある枝から他の枝が分かれることでピッチイベント間の従属関係を示す。

タイムスパン簡約の例を図 2.24 (J. S. Bach, Chorale “O Haupt voll Blut und Wunden”) に示す。図中、最上段の楽譜が与えられた音楽表層であり、その上にタイムスパン木が描かれている。音楽表層の下に連なっている楽譜は簡約過程のレンダリングであり、下に行けば行くほどより大きなレベルの簡約を示している。

The image displays a complex musical score for piano, featuring a large tree diagram above the notation. The tree diagram is a fan-shaped structure with a root node 'a' at the top. It branches down through levels labeled 'b', 'c', 'd', 'e', 'e'', and 'f'. The notes are arranged in a hierarchical manner, with 'a' at the top and 'f' at the bottom. The piano score below consists of two staves (treble and bass clef) with various musical notations including notes, rests, and dynamic markings like 'f'. There are also some bracketed sections and a '16' marking at the bottom of the first system.

図 2.24: タイムスパン簡約の例 ([1] p.144, 図 6.25 より引用)

タイムスパン簡約において比較するピッチイベントの組み合わせはタイムスパン分割 (*time-span segmentation*) によって決定される。タイムスパン分割は前もって解析されたグルーピング構造と拍節構造に基づいて行われ、分割された各タイムスパンにおいて、そのスパン内に存在するピッチイベントの構造的な重要度を比較することで簡約を行う。

## タイムスパン分割

タイムスパン分割は以下の2つのルールによって行われる。ここでは構文規則と選好規則のような区別はなく、与えられたグルーピング構造と拍節構造に対してタイムスパン分割の結果は一意に定まる。

**Segmentation Rule 1** 楽曲中のすべてのグループはタイムスパンである。

**Segmentation Rule 2** 根底的グルーピング構造において、

- a. 最小の拍節レベルにおける各々の拍  $B$  はタイムスパン  $T_B$  を決定する。 $T_B$  は  $B$  から始まり、最小の拍節レベルにおける次の拍の直前までの範囲である。
- b. 拍節レベル  $L_i$  における各々の拍  $B$  は標準タイムスパン (*regular time-span*)  $T_B$  を決定する。 $T_B$  は  $L_i$  の直下の拍節レベル  $L_{i-1}$  において  $B$  を含むタイムスパンの開始点から、次の2つのうち、より早い方の直前までの範囲である。
  - (i) 拍節レベル  $L_i$  における  $B$  の次の拍  $B'$
  - (ii) グループ境界
- c. ある拍節レベルにおける拍  $B$  とその前の拍との間にグループ境界  $G$  が存在する場合、 $B$  は拡大タイムスパン (*augmented time-span*)  $T'_B$  を決定する。 $T'_B$  は  $G$  から標準タイムスパン  $T_B$  の終わりまでの範囲である。

このうち、Segmentation Rule 2b と 2c について、図 2.25 (L. v. Beethoven, Symphony no.9, 4th movement) を基に説明する。図中、最上段のタイムスパンは4分音符レベルで1拍ごとの規則的な分割がなされている。これがルール 2b の (i) にあたる。中段の2分音符レベルに注目すると、12小節目の4拍目にグループ境界が存在することから、12小節目の3拍目から始まる標準タイムスパンはこのグループ境界までとなる。これがルール 2b の (ii) にあたる。そして、12小節目の4拍目はルール 2c により、図中  $x$  で示された拡大タイムスパンに含まれることになる。ここで生じた不規則なタイムスパン分割は下段の1小節目レベルにも伝播し、12小節目に対応するタイムスパンは3拍分しかないのに対し、13小節目に対応するタイムスパンは12小節目の4拍目から始まる5拍分となる。

また、楽曲が弱起から始まる場合にも同様のルールが適用される。この例を図 2.26 (J. S. Bach, Chorale “O Haupt voll Blut und Wunden”) に示す。

なお、3拍子や6拍子、不規則なグルーピング構造などの理由である強拍から次の強拍までに2つの弱拍がある場合、そのタイムスパン分割には図 2.27 に示す2通りの方法が存

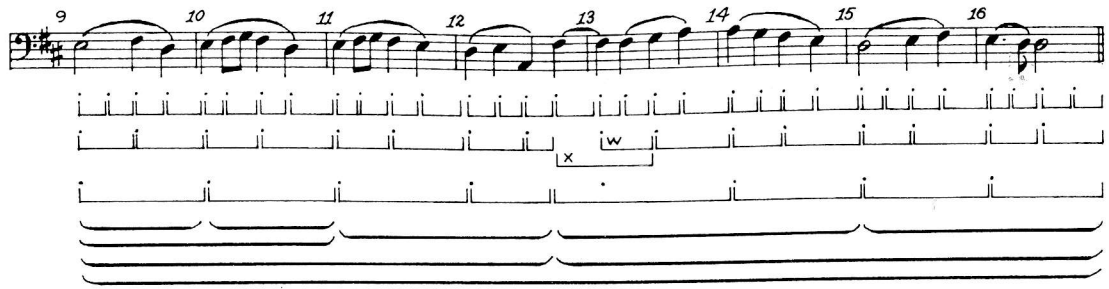


図 2.25: グループ境界と拍が一致しないタイムスパン分割 ([1] p.148 , 図 7.2 より引用)

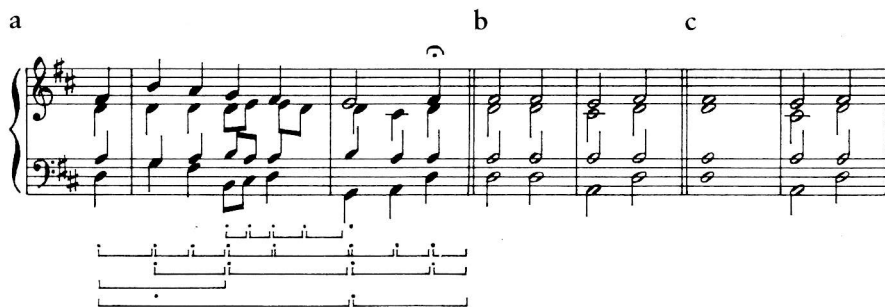


図 2.26: 弱起におけるタイムスパン分割 ([1] p.149 , 図 7.6 より引用)

在する．すなわち，3つのタイムスパンを含む上位のタイムスパンを直接作る方法(a)と，2つの弱拍をまずまとめた上で，1拍と2拍のタイムスパンを組み合わせる方法(b)である．以降に示すタイムスパン簡約におけるルールは，あるタイムスパンが3つ以上のタイムスパンを含むことができるという前提で一般化して書かれているが，本研究においては実装上，(b)の方法を用いる．よって，最下位レベル以外のすべてのタイムスパンは2つのタイムスパンに分割され，タイムスパン木は必ず二分木となる．

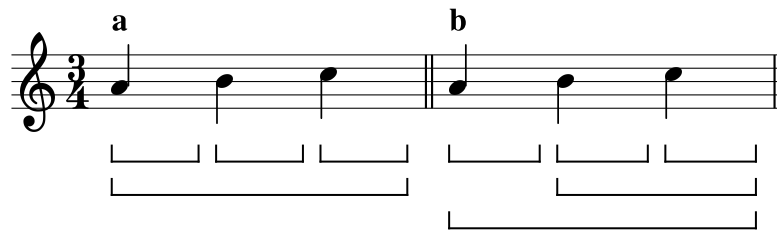


図 2.27: 3拍子におけるタイムスパン分割方法

また，ルール2で示されているように，タイムスパン簡約は表層的構造ではなく根底的構造に対して行われる．すなわち，OverlapやElisionが起こっている箇所に挿入された仮想的なピッチイベントも簡約の対象であり，音楽表層から見るとそのような箇所のピッチイベントからは2本の枝が伸びるように見える．

## 構文規則

タイムスパン簡約の構文規則 (Time-Span Reduction Well-Formedness Rule; TSRWFR) は以下の4つである。

**TSRWFR1** すべてのタイムスパン  $T$  について,  $T$  のヘッドとなるイベント  $e$  (またはイベント列  $e_1e_2$ ) が存在する。

**TSRWFR2**  $T$  が他のタイムスパンを含まない場合, すなわち  $T$  が最小レベルのタイムスパンである場合,  $e$  は  $T$  内に起こるイベントそのものである。

**TSRWFR3**  $T$  が直下のレベルにおけるタイムスパン  $T_1, \dots, T_n$  を含む場合, それらのタイムスパンのヘッドをそれぞれ  $e_1, \dots, e_n$  と置く。このとき, 以下のいずれかの方法で  $T$  のヘッドを選択する。

- a. **(Ordinary Reduction)**  $e_1, \dots, e_n$  のいずれかが  $T$  のヘッドとなり得る。
- b. **(Fusion)**  $e_1, \dots, e_n$  がグループ境界によって隔てられていない場合,  $e_1, \dots, e_n$  のうち複数のイベントの重ね合わせが  $T$  のヘッドとなり得る。
- c. **(Transformation)**  $e_1, \dots, e_n$  がグループ境界によって隔てられていない場合,  $e_1, \dots, e_n$  から選ばれた互いに協和するピッチの組み合わせが  $T$  のヘッドとなり得る。
- d. **(Cadential Retention)** final が  $e_n$  であり, penult が  $T_n$  の直前のタイムスパンのヘッドであるようなカデンツが  $T$  のヘッドとなり得る。このとき, penult をヘッドとするタイムスパンは  $T_n$  と同じレベルである必要はない。

**TSRWFR4**  $T$  のヘッド  $e$  に2つの要素からなるカデンツが直接従属する場合, カデンツの final が  $e$  に直接従属し, カデンツの penult は final に直接従属する。

TSRWFR1 によってすべてのタイムスパンがヘッドを持つこと, TSRWFR2 によってタイムスパン木の葉がピッチイベントになることが保証される。

TSRWFR3 は, 最小レベル以外のタイムスパン  $T$  におけるヘッドの選び方を4種類提示している。TSRWFR3a (Ordinary Reduction) が最も一般的なヘッドの選択方法であり,  $T$  の直下のタイムスパンにおけるヘッド  $e_1 \sim e_n$  からいずれか1つを選んで  $T$  のヘッドとする。

TSRWFR3b (Fusion) は,  $e_1 \sim e_n$  のうち複数の重ね合わせた和音を  $T$  のヘッドとする方法であり, 和音の構成音を時間的にずらして演奏される分散和音 (arpeggio) の簡約において用いられる。Fusion を用いた場合, タイムスパン木では図 2.28 (J. S. Bach, Cello Suite no.1, prelude) のように表される。

TSRWFR3c (Transformation) は,  $e_1 \sim e_n$  の構成音を組み合わせせて和音を作り, それを  $T$  のヘッドとする方法である。このルールは, あるタイムスパンにおける不協和音が後続のタイムスパンで解決する場合に用いられる場合がある。例えば, 図 2.29 (J. S. Bach, Chorale “O Haupt voll Blut und Wunden”) では, 11 小節目の3拍目における旋律の F の音

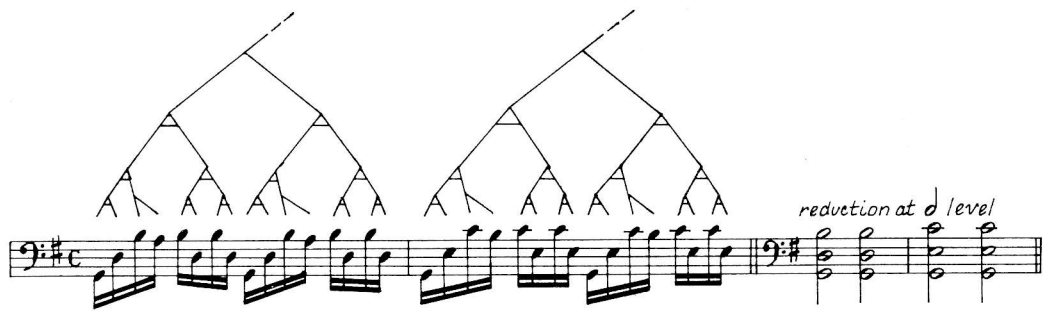


図 2.28: Fusion の例 ([1] p.154, 図 7.12 より引用)

が非和声音であり，この音は4拍目でEに解決する．この3拍目と4拍目はEmの和音の上であり，したがって2分音符レベルのタイムスパン簡約において，この2拍間のタイムスパンのヘッドはEmの和音とするのが好ましい．しかし，4拍目ではバス声部が既に次の音に進行しており，根音のEを持たない．そこで，より安定したヘッドを得るために，伴奏の3拍目と旋律の4拍目を組み合わせてEmの基本形を作り，これをヘッドとするのである．



図 2.29: Transformation の例 ([1] p.155, 図 7.13 を基に作成)

TSRWFR3d (Cadential Retention) はカデンツを含んだ簡約に関する特別なルールである．タイムスパン簡約において，2つの和音から形成される完全終止や偽終止は，その2つの和音がひとまとまりとなって重要な機能を持つと考える．このような場合に，2つの和音それぞれのヘッドのペアを $T$ のヘッドとするルールがTSRWFR3dである．このとき，カデンツの1つ目の和音を *penult*，2つ目の和音を *final* と呼ぶ．*final* は $T$ の直下のタイムスパンのうち最後のタイムスパン $T_n$ のヘッド $e_n$ でなければならない．また，*penult* は $e_1 \sim e_{n-1}$ の中から選ぶ必要はなく，下位のレベルにおけるピッチイベントでも構わないが，*penult* がヘッドであるようなタイムスパンは *final* ( $e_n$ ) を持つタイムスパン $T_n$ の直前に存在しなければならない．

ここで，*egg* 記号を導入する．TSRWFR3dによって2つのピッチイベントのペアがヘッドとなったとき，そのペアに従属するピッチイベント，すなわちそのペアからの分岐を表すのが*egg* 記号である．言い換えると，*egg* 記号で表された分岐はあるピッチイベントがカデンツ全体に対して従属することを示し，*egg* 記号のない分岐はカデンツの一方の要素

に対して従属することを示す．図 2.30(W. A. Mozart , Sonata K.331) の例では，8 小節目の 2 音目と 3 音目がそれぞれ penult と final となって完全終止を形成する．ここで，7 小節目のヘッドはこのカデンツ全体に従属するため egg 記号を伴うのに対し，8 小節目の 1 音目は penult のみに従属するため通常の記法が用いられる．

図 2.30: egg 記号 ([1] p.156 , 図 7.14 より引用)

TSRWFR4 は，TSRWFR3d (Cadential Retention) でヘッドとしたカデンツが他のピッチイベント  $e$  に従属する際の扱いを定めている．カデンツを構成する 2 つの和音を比較すると，penult(ドミナント)よりも final(トニック)の方が構造的に重要である．したがって， $e$  に直接従属するのは final であり，penult は final のエラボレーションとなる．

## 選好規則

タイムスパン簡約の選好規則 (Time-Span Reduction Preference Rule; TSRPR) は以下の9つである。

**TSRPR1 (Metrical Position)** タイムスパン  $T$  のヘッドの選択において、より強い拍にある方が好ましい。

**TSRPR2 (Local Harmony)** タイムスパン  $T$  のヘッドの選択において、以下が好ましい。

- a. 本質的により協和するもの
- b. 局所的なトニックとの関係がより近いもの

**TSRPR3 (Registral Extremes)** タイムスパン  $T$  のヘッドの選択において、以下がわずかに好ましい。

- a. より高い旋律のピッチ
- b. より低いバス声部のピッチ

**TSRPR4 (Parallelism)** 複数のタイムスパンがモチーフまたはリズムの観点から類似していると解釈されるならば、それらに対して同様のヘッドの選び方をするのが好ましい。

**TSRPR5 (Metrical Stability)** タイムスパン  $T$  のヘッドの選択において、より安定した拍節構造を導くものが好ましい。

**TSRPR6 (Prolongational Stability)** タイムスパン  $T$  のヘッドの選択において、より安定したプロロンゲーション簡約を導くものが好ましい。

**TSRPR7 (Cadential Retention)** タイムスパン  $T$  において以下の条件を満たすならば、その進行をカデンツとみなした上で、そのカデンツをヘッドとすることが強く好まれる。

- i. 完全終止、半終止、または偽終止の和声進行を形成するようなピッチイベントまたはイベント列  $(e_1)e_2$  が存在する。
- ii.  $e_2$  が  $T$  の終端に位置するか、または  $T$  の終端まで延長される。
- iii.  $T$  を含むより大きなグループ  $G$  が存在し、進行  $(e_1)e_2$  が  $G$  における構造的終止として機能する。

**TSRPR8 (Structural Beginning)**  $T$  を含むより大きなグループ  $G$  において、 $T$  のヘッドが構造的開始として機能する場合、より  $T$  の始点に近いものが  $T$  のヘッドとして好ましい。

**TSRPR9** 楽曲のヘッドの選択において、構造的開始よりも構造的終止が好ましい。



以下、それぞれの TSRPR について説明を加える。まず、TSRPR1~3 は局所的なルールである。TSRPR1 (Metrical Position) は拍節構造を参照し、より強い拍にあるピッチイベントがヘッドになりやすいとするルールである。

TSRPR2 (Local Harmony) は、そのピッチイベント単独の協和性 (a) と、局所的なトニックとの関係性 (b) という 2 つの観点からピッチイベントを選択するルールである。このうち、(a) はルール上は明確な言及がないが、GTTM の原著における解析例から、和音の転回形に関するルールであると推測される。すなわち、ある和音は基本形が最もヘッドになりやすく、転回するごとにヘッドとして選ばれにくくなる。また、(b) における局所的なトニックとは、現在考えているタイムスパン  $T$  を支配する調の主和音 (I/I または i/i) を指し、この和音に近い和音ほどヘッドになりやすいとするルールである。ここで、トニックに近いということを定量的に評価する方法は GTTM では与えられていないが、2.3 節で述べる TPS では、和音間距離に基づくこのルールの再定義がなされている [2]。

TSRPR3 (Registral Extremes) は、旋律はより高いピッチイベント、伴奏はより低いピッチイベントが重要であるとするルールだが、このルールの効力は比較的弱い。

TSRPR4 以降は、よりマクロな視点からヘッドを選択するルールである。まず、TSRPR4 (Parallelism) は、GPR6 や MPR1 と同様に、類似した部分に類似した構造を与えるルールである。

TSRPR5 (Metrical Stability) と TSRPR6 (Prolongational Stability) は、それぞれ拍節構造解析とプロロンゲーション簡約との相互作用に関するルールであり、各構造がより安定するようにタイムスパン木を構築することを要求する。GPR7 (Time-Span and Prolongational Stability) や MPR9 (Time-Span Interaction) と同様にサブ理論間のフィードバックを必要とし、GTTM の PR において実装が困難な部分である。

TSRPR7 (Cadential Retention) が本研究の対象である。このルールでは i. から iii. までの 3 つの条件を満たしたイベント列をカデンツとし、カデンツが 2 つの和音から形成されていればそれらをひとまとめにした上でヘッドとして選択するルールである。選好規則ではあるが、ルール中に “strongly” とあり、GTTM の原著においてこのルールが他の PR によって打ち消された例は見当たらない。

条件 i は和声進行に関する条件であり、ここで完全終止、半終止、偽終止の 3 種類がカデンツとして扱われることがわかる。変終止は完全終止 ( $V \rightarrow I$ ) の後に  $IV \rightarrow I$  と続くものであり、完全終止における I のエラボレーションとして扱われる。また、TSRWFR3d で述べられているように、完全終止と偽終止において、その penult となる  $e_1$  は必ずしも  $T$  の直下のタイムスパンのヘッドであるとは限らない。

条件 ii は和声進行の位置に関する条件であり、 $(e_1)e_2$  が  $T$  の終わりにあることを要求する。カデンツの役割は楽曲の区切りや終わりを示すことであり、 $(e_1)e_2$  が  $T$  の終わりに存在しないということは、たとえカデンツの和声進行と一致していたとしてもカデンツとしては機能しないということを意味する。ただし、 $e_2$  が  $T$  の終わりだけでなく、その和音が  $T$  の終わりまで持続していると考えられるならばカデンツとなり得る。

条件 iii は、2.2.2 節の最後に述べた構造的終止に関する条件である。 $T$  を含んだより上

位のグループ  $G$  を考え,  $(e_1)e_2$  が  $G$  における構造的終止であることを要求する. すなわち,  $T$  があるグループの終わりに位置していることはもちろん, そのグループにおいて  $T$  に先立ち, 構造的開始として機能するタイムスパンが存在することをも必要とするのである.

図 2.31(F. Chopin, A Major Prelude) は, 条件 ii を満たせずにカデンツとならない例である. 9~10 小節目の  $V_7/A$  (E7) から 11 小節目の  $I/A$  (A) への進行は完全終止の進行と一致するが, 12 小節目に  $V_7/b$  (F#7) が続くことにより,  $V \rightarrow I$  の進行は 9~12 小節目に対応するタイムスパンの終わりに位置しないことから, カデンツではないと判断される.

また, 図 2.32(F. Chopin, A Major Prelude) では条件 iii の働きを示している. この部分の和音は 1~2 小節目と 5~6 小節目が  $V_7/A$  (E7), 3~4 小節目と 7~8 小節目が  $I/A$  (A) であり,  $V \rightarrow I$  の進行が 2 回続く形となっている. この 2 つの進行はどちらも条件 ii を満たすが, 1~4 小節目はそれに先立つタイムスパンが存在しないため, 条件 iii を満たすことができない. 一方, 5~8 小節目は 8 小節目間のグループにおいてそれに先立つ 1~4 小節目が存在するため, この進行のみがカデンツとして判断される.

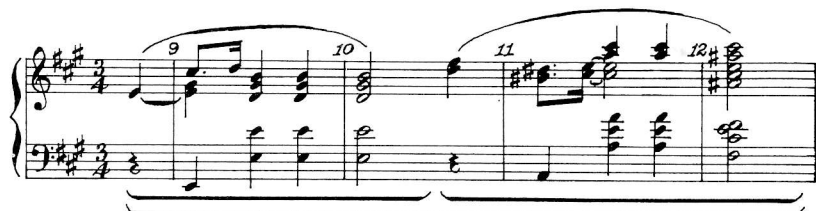


図 2.31: カデンツの条件 ii に基づく判断例 ([1] p.168, 図 7.23 より引用)

TSRPR8 (Structural Beginning) は  $T$  のヘッドが上位グループの構造的開始となる場合に, なるべく早い位置にあるピッチイベントをヘッド, すなわち構造的開始として選択するルールである. TSRPR9 は楽曲全体 (最大レベルのタイムスパン) のヘッドを選択する際のルールであり, 楽曲の構造的終止が楽曲全体を代表するピッチイベントであると主張している.

これらのルールを組み合わせると, カデンツは図 2.33 (L. Beethoven, First Symphony, 1 小節レベル以上のみ示す) に例示するように, TSRPR7 によってヘッドとなった後, 楽曲の途中のカデンツであればそれに対応する構造的開始に従属し, 楽曲の最後のカデンツであればその final が楽曲のヘッドとなるということが読み取れる.

The image displays a musical score analysis in three levels. The top level is the original notation in 3/4 time, showing a sequence of chords and melodic lines. The middle level, labeled "2-measure level reduction", shows the original notation with brackets underneath indicating two-measure units: mm. 1-2, 3-4, 5-6, and 7-8. The bottom level, labeled "4-measure level reduction", shows the original notation with brackets underneath indicating four-measure units: mm. 1-4 and 5-8. Annotations include "not a cadence" under the first two units and "5-8 cadence for 8-measure group" under the last two units.

図 2.32: カデンツの条件 iii に基づく判断例 ([1] p.169, 図 7.24 より引用)

The image displays a musical score analysis with a tree diagram above it. The tree diagram shows a hierarchical structure of time spans labeled with letters: 'a' at the top, branching into 'b' and 'b'', which further branch into 'c' and 'd'. 'c' branches into 'a'' and 'd'', while 'd' branches into 'e' and 'e''. The musical score below shows 13 measures of music. Annotations include brackets under the score and labels 'e' and 'e'' pointing to specific measures. The score includes chord symbols like [c] and [c] with a '2' above them.

図 2.33: 楽曲全体レベルのタイムスパン簡約 ([1] p.176, 図 7.28 より引用)

## 2.3 Tonal Pitch Space (TPS)

### 2.3.1 概要

Tonal Pitch Space (TPS) [2] は、GTTM の提唱者でもある Lerdahl が GTTM の後に提唱した、定量的な和声解析のための音楽理論であり、GTTM の曖昧な部分を補完するものであるが、GTTM とは独立した理論となっている。この理論ではピッチ間、和音間、および調間に定量的な距離を与え、隣接するピッチ間、和音間、および調間の距離が近ければ近いほどその進行は安定的で心地よく、距離が遠ければ遠いほどその進行は不自然で違和感のあるものと解釈される。

TPS は調性的な緊張と弛緩の構造や、GTTM における安定性の概念、プロロンゲーション簡約の補完などにも言及しているが、本節では、本研究における和声解析に利用した和音間距離に限定して解説する。

### 2.3.2 和音間距離計算に必要な概念

本節では、TPS における和音間距離の計算に用いられる TPS 独特の概念について解説する。なお、短調は自然的短音階を前提とする。

#### ベーシックスペース

TPS ではそれぞれの和音に対してベーシックスペース (*basic space*) を定義する。これについて、図 2.34 に示す I/C のベーシックスペースを例に説明する。

level <i>a</i> (root):	0											
level <i>b</i> (fifth):	0					7						
level <i>c</i> (triadic):	0		4		7							
level <i>d</i> (diatonic):	0	2	4	5	7	9		11				
level <i>e</i> (chromatic):	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

図 2.34: I/C のベーシックスペース

ベーシックスペースでは、12 音平均律における  $p_0 \sim p_{11}$  のピッチクラスについて、ある和音における重要度を表している。ベーシックスペースは 5 つのレベル  $a \sim e$  から構成され、 $a$  から順に root (根音)、fifth (根音と第 5 音)、triadic (三和音)、diatonic (全音階)、chromatic (半音階) と並んでおり、 $a$  が最も重要度の高いレベルである。それぞれのレベルは、 $a$  が根音、 $b$  が根音と第 5 音、 $c$  が和音の構成音、 $d$  が音階の構成音を持ち、最下レベルの  $e$  は 12 個すべてのピッチを持つ。図 2.34 の例では、I/C はパークリーメソッドでは C であり、その構成音は C ( $p_0$ , 根音)、E ( $p_4$ , 第 3 音)、G ( $p_7$ , 第 5 音) である。したがって、レベル  $a$  は  $p_0$  のみ、レベル  $b$  は  $p_0$  と  $p_7$ 、レベル  $c$  は  $p_0$ ,  $p_4$ ,  $p_7$  の 3 つをそれぞれ

持つ。また，この和音は C major の上にあり，その音階の構成音は和音構成音に D (p2)，F (p5)，A (p9)，B (p11) を加えた 7 音であり，それらがレベル  $d$  に置かれる。

## 五度圏

一般的な調の五度圏 (*regional circle of fifths*) については 2.1.2 節で説明した通りだが，TPS ではこれに加えて和音の五度圏 (*chordal circle of fifths*) を定義する。和音の五度圏は音階の構成音のみからなる五度圏であり，各音度上の三和音，またはその根音のピッチクラスが図 2.35 に示すように時計回りに 5 度ずつ並べられる。ここで，基本的に隣り合うピッチ間の音程は完全 5 度だが，長音階では vii 度音と iv 度音，自然的短音階では ii 度音と vi 度音の音程のみ減 5 度となることに注意が必要である。

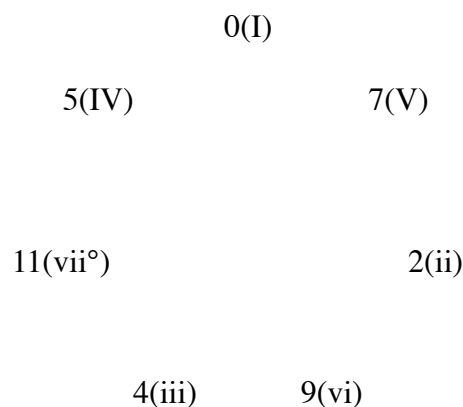


図 2.35: 和音の五度圏 (C major)

## 調空間

TPS では調を平面上に並べ，図 2.36 のような調空間 (*regional space*) を設定する。調空間において，縦方向に隣接する調は属調および下屬調の関係にあり，ある調の上にその属調，下にその下屬調が配置される。また，横方向に隣接する調は同主調または平行調の関係にあり，ある長調の左にその平行調，右にその同主調が配置される (短調に対しては逆に，左に同主調，右に平行調が配置される)。

この調空間ではある調から上に 3 つ，右に 2 つ移動すると元の調に戻る。あるいは縦方向に 12 回，または横方向に 8 回移動しても元の調に戻る (異名同音を同じものと扱う)。これらのことから，調空間は螺旋状のトーラスであることがわかり，その様子は図 2.37 に見ることができる。図中，赤色の矢印が縦方向，青色の矢印が横方向に 1 周する経路を示す。

			⋮				
	<b>d#</b>	<b>F#</b>	<b>f#</b>	<b>A</b>	<b>a</b>	<b>C</b>	<b>c</b>
	<b>g#</b>	<b>B</b>	<b>b</b>	<b>D</b>	<b>d</b>	<b>F</b>	<b>f</b>
	<b>c#</b>	<b>E</b>	<b>e</b>	<b>G</b>	<b>g</b>	<b>Bb</b>	<b>bb</b>
⋯	<b>f#</b>	<b>A</b>	<b>a</b>	<b>C</b>	<b>c</b>	<b>Eb</b>	<b>eb</b> ⋯
	<b>b</b>	<b>D</b>	<b>d</b>	<b>F</b>	<b>f</b>	<b>Ab</b>	<b>ab</b>
	<b>e</b>	<b>G</b>	<b>g</b>	<b>Bb</b>	<b>bb</b>	<b>Db</b>	<b>db</b>
	<b>a</b>	<b>C</b>	<b>c</b>	<b>Eb</b>	<b>eb</b>	<b>Gb</b>	<b>gb</b>
			⋮				

図 2.36: 調空間

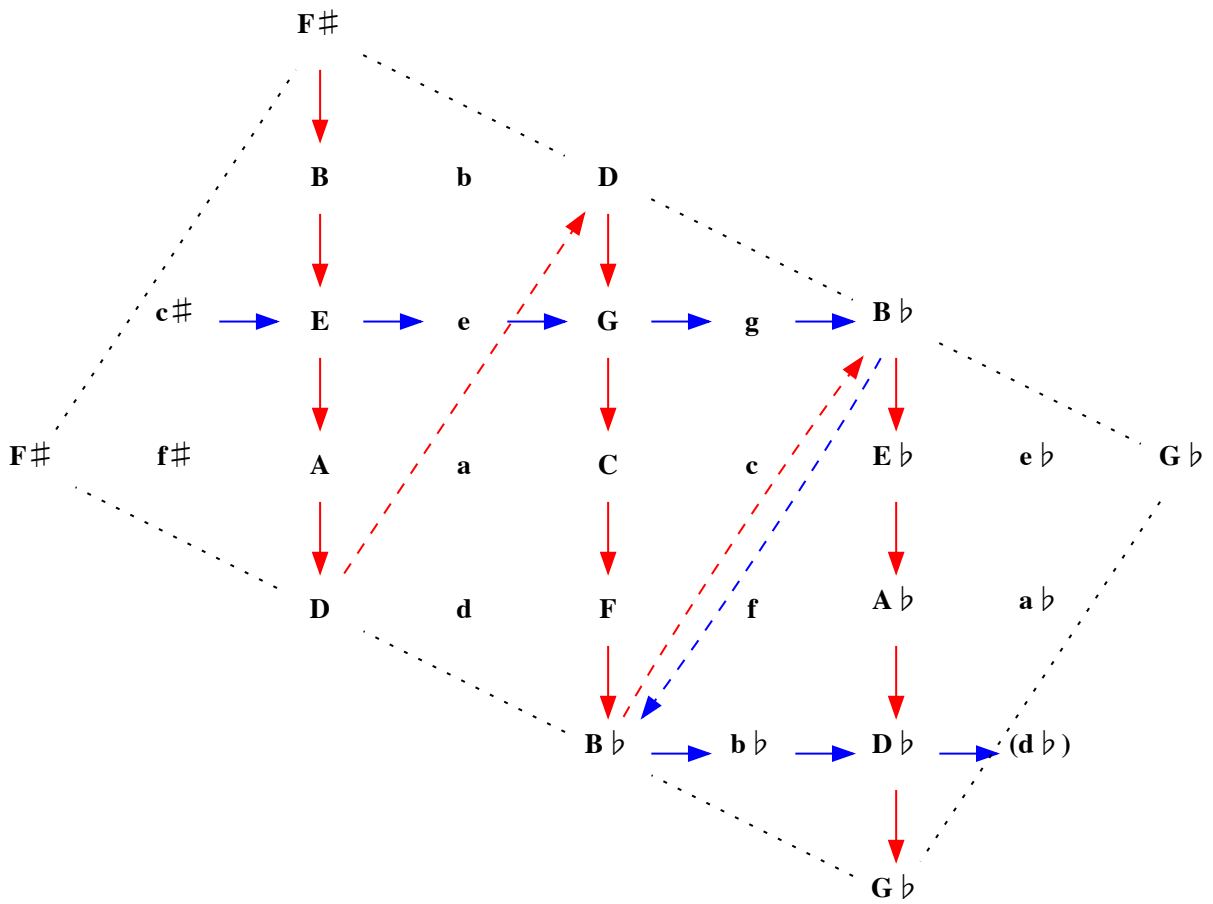


図 2.37: 調空間とトーラス ([2] p.66 , 図 2.23 を基に作成)

### 2.3.3 和音間距離

本節では和音間距離の計算方法について述べる．ただし，TPS の原著 [2] による定義は曖昧性や数学的不備といった問題がある．本節で説明する数式は TPS の原著に書かれたものではなく，坂本らの先行研究 [3] または本研究において再定義したものである．

和音  $x$  から和音  $y$  への距離を  $\delta(x, y)$  と置き， $x$  と  $y$  には和音記号を代入するものとする．

#### 近親調の和音間距離

和音  $x$  と  $y$  が属する調をそれぞれ  $R_x$  と  $R_y$  と置く．また，和音  $x$  のベーシックスペースを  $BS_x$  と置く． $R_x$  と  $R_y$  が同一か，または互いに近親調の関係にあるとき，和音間距離  $\delta(x, y)$  は以下の 2.1 式で与えられる．

$$\delta(x, y) = region(x, y) + chord(x, y) + basicspace(x, y) \quad (2.1)$$

以下，2.1 の各項について説明する．まず，第 1 項の  $region(x, y)$  は調の五度圏距離であり，以下の *regional circle-of-fifths rule* によって算出する．このルールはベーシックスペースを操作する方法を示したものであり， $BS_x$  のレベル  $d$  (diatonic) を  $BS_y$  に一致させるために必要な *regional circle-of-fifths rule* の最小適用回数が  $region(x, y)$  となる．これは，調の五度圏において，円周に沿って  $R_x$  から  $R_y$  へ到達するための最小ステップ数と同義である．

**regional circle-of-fifths rule** ベーシックスペースのレベル  $d$  (diatonic) におけるピッチクラスを，レベル  $e$  (chromatic) 上で右または左に 7 ステップ分 (12 の剰余) 動かす．

ベーシックスペースのレベル  $e$  上で 7 ステップということは，半音 7 つ分，すなわち完全 5 度だけ移動するということである．したがってこのルールは，レベル  $d$  を属調または下屬調のものに書き換えることを表す．また，この移動は 12 の剰余で考える．よって，例えば  $p7$  (G) を右に 7 ステップ動かすと  $p2$  (D) に到達する．

なお， $R_x$  と  $R_y$  が平行調であれば， $region(x, y) = 0$  である．平行調は調の構成音が同一であるため，*regional circle-of-fifths rule* を適用する必要がない．

第 2 項の  $chord(x, y)$  は和音の五度圏距離であり， $region(x, y)$  と類似した方法で算出される．ここでは以下の *chordal circle-of-fifths rule* を用い， $BS_x$  のレベル  $a$  (root) から  $c$  (triadic) までを  $BS_y$  に一致させるために必要な *chordal circle-of-fifths rule* の最小適用回数が  $chord(x, y)$  となる．これは和音の五度圏において，円周に沿って  $x$  の根音から  $y$  の根音へ到達するための最小ステップ数と同義である．

**chordal circle-of-fifths rule** ベーシックスペースのレベル  $a$  (root) ~  $c$  (triadic) におけるピッチクラスを，レベル  $d$  (diatonic) 上で右または左に 4 ステップ分 (7 の剰余) 動かす．

ここでも、レベル  $d$  上で 4 ステップという音程は 5 度に相当する。このルールにおいて注意しなければならないのは、 $R_x$  と  $R_y$  が同一または平行調でない場合は、それぞれのベーシックスペースのレベル  $d$  や和音の五度圏の内容が異なるということである。特に、和音  $x$  の構成音が調  $R_y$  の構成音でない場合が問題となる。このような場合の扱いについては原著では明文化されていないが、本研究では regional circle-of-fifths rule の適用時にレベル  $c$  以上の内容を補正し、その適用後のベーシックスペースに対して chordal circle-of-fifths rule を適用することとする。ここで、regional circle-of-fifths rule を 1 回適用するごとに 1 つずつピッチが入れ替わることから、ルールの適用前後のレベル  $d$  を比較することで補正すべきピッチクラスを同定可能である。例えば、 $\delta(I/C, iii/D)$  を考えると、両ルールを図 2.38 のように適用していくことになる。

また、和音の五度圏と対応していることからわかるように、実際の計算においては両和音の根音のみを比較しても問題ない。したがって、 $R_x$  の和音の五度圏を  $R_y$  の和音の五度圏に移した上で、五度圏の円周に沿った両根音の距離を数えることで  $chord(x, y)$  を計算可能である。

level $a$ (root):	0											
level $b$ (fifth):	0						7					
level $c$ (triadic):	0			4			7					
level $d$ (diatonic):	0	2		4	5		7	9			11	
level $e$ (chromatic):	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

1.  $BS_{I/C}$

level $a$ (root):	1											
level $b$ (fifth):	1						7					
level $c$ (triadic):	1			4			7					
level $d$ (diatonic):	1	2		4	6	7	9				11	
level $e$ (chromatic):	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

2. 1. に regional circle-of-fifths rule を右に 2 回適用した後

level $a$ (root):							6					
level $b$ (fifth):							6					
level $c$ (triadic):							6	9				
level $d$ (diatonic):		1	2		4	6	7	9			11	
level $e$ (chromatic):	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

3. 2. に chordal circle-of-fifths rule を左に 1 回適用した後 ( $BS_{iii/D}$ )

図 2.38: 五度圏ルールの適用例 ( $\delta(I/C, iii/D)$ )

第 3 項の  $basic\ space(x, y)$  はベーシックスペース距離である。これは両和音のベーシッ



クスペースを比較し，差分を取ることで計算する．従来の定義では， $BS_y$  にのみ存在するピッチクラス数を  $basic\ space(x, y)$  としていたが，この定義では三和音と四和音など両和音のベーシックスペースに含まれる総ピッチクラス数が異なる場合に  $basic\ space(x, y) \neq basic\ space(y, x)$  となってしまう，対称性が失われるという問題がある．本研究では  $BS_x$  にのみ存在するピッチクラスの数と  $BS_y$  にのみ存在するピッチクラスの数のうちより大きい方を  $basic\ space(x, y)$  として定義する．

図 2.39 にベーシックスペース距離  $basic\ space(I/C, iv/e)$  の計算例を示す．図中，一方のベーシックスペースにのみ存在するピッチクラスには下線を引いており，これを数えると  $basic\ space(I/C, iv/e) = 5$  となる．

level <i>a</i> (root):	0												
level <i>b</i> (fifth):	0												
level <i>c</i> (triadic):	0				4				7				
level <i>d</i> (diatonic):	0	2			4	<u>5</u>	7			9			11
level <i>e</i> (chromatic):	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
$BS_{I/C}$													
level <i>a</i> (root):												<u>9</u>	
level <i>b</i> (fifth):											<u>4</u>	<u>9</u>	
level <i>c</i> (triadic):	0				4				<u>9</u>				
level <i>d</i> (diatonic):	0	2			4	<u>6</u>	7			9			11
level <i>e</i> (chromatic):	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
$BS_{iv/e}$													

図 2.39: ベーシックスペース距離の計算例

### 遠隔調の和音間距離

$R_x$  と  $R_y$  が互いに遠隔調であるとき，和音間距離  $\delta(x, y)$  は 2.3 式で定義される調間距離 (*regional distance*)  $\Delta(R_1, R_n)$  を用いて，以下の 2.2 式で与えられる．なお，ここで  $T_R$  は調  $R$  の主和音 (I または i) である．また， $C(R)$  は調  $R$  の近親調の集合であり，2.1.2 節で述べた近親調の定義に従って 2.4 式で表される．

$$\delta(x, y) = \min\{\delta(x, T_{R_1}) + \Delta(R_1, R_n) + \delta(T_{R_n}, y) \mid R_1 \in C(R_x), R_n \in C(R_y)\} \quad (2.2)$$

$$\Delta(R_1, R_n) = \min\left\{\sum_{i=1}^{n-1} \delta(T_{R_i}, T_{R_{i+1}}) \mid R_{i+1} \in C(R_i)\right\} \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} C(\mathbf{I}) = \{\mathbf{i}, \mathbf{ii}, \mathbf{iii}, \mathbf{IV}, \mathbf{V}, \mathbf{vi}\} \\ C(\mathbf{i}) = \{\mathbf{I}, \mathbf{bIII}, \mathbf{iv}, \mathbf{v}, \mathbf{bVI}, \mathbf{bVII}\} \end{cases} \quad (2.4)$$

2.2 式の意味するところは，遠隔調にある和音は直接その距離を測らずに，調空間において近親調を辿りながら目的の和音まで到達する最短経路を探索し，その経路上における和音間距離の総和を求めることで和音間距離を導出するということである．第 1 項は和音  $x$  から  $R_x$  の近親調  $R_1$  の主和音まで，第 3 項は  $R_y$  の近親調  $R_n$  の主和音から和音  $y$  までの和音間距離であり，これは 2.1 式によって計算できる．第 2 項は  $R_x$  と  $R_y$  それぞれの近親調間の距離であり，調間距離はそれぞれの調の主和音同士の和音間距離と同義である．近親調はある調に対して 6 つ存在することから，遠隔調の和音間距離は  $R_1$  と  $R_n$  の  $6 \times 6 = 36$  通りの組み合わせから最小値を求めることで得られる．

ここで，第 2 項にあたる調間距離を図 2.40 にまとめる．各調は調空間に沿って配置しており，() 内の数字が  $\mathbf{I}$  または  $\mathbf{i}$  からの調間距離を表す．図中，凸型で囲った範囲は中心の調  $\mathbf{I}$  または  $\mathbf{i}$  の近親調を示す．

		VII (23)	vii (16)	II (14)				
	#i (23)	III (16)	iii (9)	V (7)	v (14)			
#IV (28)	#iv (21)	VI (14)	vi (7)	I (0)	i (7)	bIII (14)	biii (21)	
			ii (10)	IV (7)	iv (14)	bVI (16)	bvi (23)	
				bVII (14)	bvii (21)	bII (23)		

長調  $\mathbf{I}$  から各調への調間距離

		vii (23)	II (21)	ii (14)				
	III (23)	iii (16)	V (14)	v (7)	bVII (10)			
#iv (28)	VI (21)	vi (14)	I (7)	i (0)	bIII (7)	biii (14)	bV (21)	
			IV (14)	iv (7)	bVI (9)	bvi (16)	bI (23)	
				bvii (14)	bII (16)	bii (23)		

短調  $\mathbf{i}$  から各調への調間距離

図 2.40: 調間距離

以上をまとめると，和音間距離は以下の 2.5 式で定義される． $R_x \in C(R_y)$  と  $R_y \in C(R_x)$  の真偽は等価である．

$$\delta(x, y) = \begin{cases} region(x, y) + chord(x, y) + basicspace(x, y) & (R_x \in C(R_y)) \\ \min\{\delta(x, T_{R_1}) + \min\{\sum_{i=1}^{n-1} \delta(T_{R_i}, T_{R_{i+1}}) \mid R_{i+1} \in C(R_i)\} + \delta(T_{R_n}, y)\} & (R_x \notin C(R_y)) \\ & | R_1 \in C(R_x), R_n \in C(R_y) \end{cases} \quad (2.5)$$

## 第3章 計算論的音楽理論の実装に関する 先行研究

本節ではこれまでに提案されてきた，GTTM と TPS を計算機に実装する試みについて述べる．まず，3.1 節では，Hamanaka らの exGTTM[9] について述べる．exGTTM は，GTTM のルールを数学的に再定義し，各 PR に対して調節可能な優先度を割り当てることで半自動的な楽曲解析を可能にした理論である．次に，3.2 節では Sakamoto ら [3] が提案した，TPS で定義される和音間距離をコストとした最短経路探索による和声解析手法について述べる．最後に，3.3 節では Matsubara ら [4] が提案した，カデンツの発見を目的とした TPS と Cadential Retention 理論の改良について述べるほか，山口ら [16] による TPS の拡張についても触れる．

### 3.1 exGTTM: GTTM の数学的再定義と自動化

#### 3.1.1 GTTM の再定義と自動解析の戦略

2.2 で解説したように，GTTM におけるルールは音楽理論としては比較的厳密に書かれているものの，曖昧で定性的な記述が含まれていることや，PR の適用基準が解析者の判断に委ねられていることから，そのままでは計算機による自動解析に利用することができなかった．exGTTM (extended GTTM)[9] ではこれらの問題を解決するために，GTTM の各ルールを数学的に再定義して記述の曖昧性を解消するとともに，各 PR の優先度をパラメータとして導入することで PR の適用基準を明確にした．

exGTTM における各定義の詳細については文献に譲るが，再定義されたルールを表 3.1 に示す．基本的には各ルールが適用可能かどうかを 0 か 1 の値として得るか，あるいはルールが働く強さを 0~1 の実数値として得る形で定式化されており，この値にルールの優先度で重み付けを行って適用するルールを決定し，ボトムアップに解析を進めるという仕組みとなっている．また，ルールによっては優先度以外にも補助的なパラメータを持つものがあり，これらを調節することでルールの挙動を変更できる場合もある．

exGTTM で再定義されたのは GTTM における 4 つのサブ理論のうち，プロロンゲーション簡約を除いた 3 つ，すなわちグルーピング構造解析，拍節構造解析，タイムスパン簡約である．ただし，入力としてモノフォニーを前提としており，伴奏や和音に関係したルー

ルについては扱われていない。また，サブ理論間のフィードバックを必要とする PR や各種 TR も exGTTM の対象外である。

表 3.1: exGTTM で再定義された PR

サブ理論	再定義されたルール
グルーピング構造解析	GPR1 , GPR2a (Proximity: Slur/Rest) , GPR2b (Proximity: Attack-Point) , GPR3a (Change: Register) , GPR3b (Change: Dynamics) , GPR3c (Change: Articulation) , GPR3d (Change: Length) , GPR4 (Intensification) , GPR5 (Symmetry) , GPR6 (Parallelism)
拍節構造解析	MPR1 (Parallelism) , MPR2 (Strong beat Early) , MPR3 (Event) , MPR4 (Stress) , MPR5a (Length: Pitch) , MPR5b (Length: Dynamics) , MPR5c (Length: Slur) , MPR5d (Length: Articulation) , MPR5e (Length: Pitch in Time-Span Reduction)
タイムスパン簡約	TSRPR1 (Metrical Position) , TSRPR3a (Registral Extremes: Melody) , TSRPR3b (Registral Extremes: Bass) , TSRPR4 (Parallelism) , TSRPR8 (Structural Beginning) , TSRPR9

### 3.1.2 自動解析システムと公開データ

Hamanaka らは [9] において exGTTM を提案するとともに，これを実装した自動解析システム ATTA (Automatic Time-span Tree Analyzer) についても述べている。この ATTA において，入力は楽譜を扱うフォーマットである MusicXML [15] 形式で与え，解析の結果得られたグルーピング構造，拍節構造，タイムスパン木をそれぞれ GroupingXML , MetricalXML , Time-spanXML という独自の形式で出力する。各解析結果は階層構造であるため，XML 形式による表現が非常に適している。ユーザが楽譜を入力し，各 PR の優先度を設定すると，それに従った解析結果を得ることができる。

また，Hamanaka らは [10] において，ATTA をさらに改良した対話的な解析システムを開発した。このソフトウェアは exGTTM のウェブサイト [17] で公開されている。

対話的解析システムの実行画面のスクリーンショットを図 3.1 に示す。楽曲は楽譜ではなく，横軸を時間，縦軸をピッチとする平面上でピッチイベントを直線で表したピアノロールと呼ばれる形式で描画されている。このピアノロールは MIDI シーケンサの GUI に広く用いられる形式である。解析された各構造はこのピアノロールの画面に重ねて表示される。また，各種 XML ファイルの入出力機能を備えており，解析済みの GroupingXML

などのデータをインポートすることもできる。さらに、ユーザは優先度を調節するだけでなく、自動解析の結果を手動で修正することもできる。

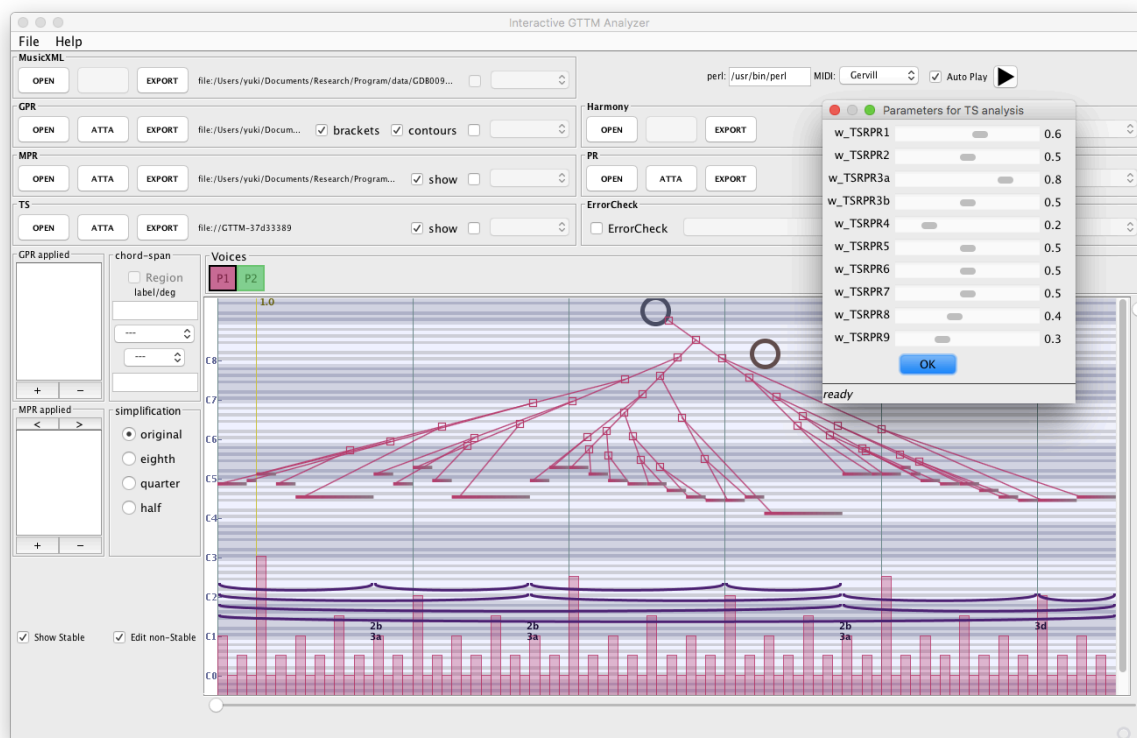


図 3.1: 対話的 ATTA の実行画面

また、[17]ではこのソフトウェアの他にも、クラシック音楽から切り出した300個のフレーズに対する解析結果が公開されている。これらのデータはGTTMの有識者が作成した正解データであり、前述した各種XML形式で作成されている。また、ATTAには実装されていないものの、プロロンゲーション木を表すProlongationalXMLや和声の情報を表すHarmonyXMLも設計されており、これらも正解データに含まれている。ただし、この正解データにおいても伴奏や和声に関係したPRは解析に用いられておらず、モノフォニーを入力とした、旋律のみに依拠した解析結果となっている。特にTime-spanXMLはその設計上、TSRWFR3で定義されたヘッ드의選択方法のうち、TSRWFR3a(Ordinary Reduction)以外の方法を用いた木構造を表現する能力がない。したがって、和声の情報を解析結果に含めるには、それを扱うルールの設定化に加えてXML形式の改良も必要となる。

本研究ではexGTTMで実装されていないルールのうち、最も影響力が大きいと考えられるTSRPR7(Cadential Retention)の実装を目的とし、その実装システムの実験にあたって[17]の公開データを利用する。

## 3.2 TPSに基づく和声解析

Sakamoto らは [3] において、TPS で定義される和音間距離に基づく和声解析の手法を提案した。

計算機による和声解析の手法としては、自然言語処理の知見を応用し、音楽理論における和声進行の規則を文法規則になぞらえる試みが存在する [6, 7]。これに対し、TPS における和音間距離はいかなる和音の組み合わせに対しても定量的な値を得られることから、和音間距離に基づけば大量の文法規則を設定することなく解析が可能となり、また和声の規則から逸脱するような進行に対しても何らかの結果を出力できるという利点がある。ただし、TPS 自体が比較的新しい音楽理論であることから、和音間距離にも改良の余地があり、音楽学的見地からさらなる検証を必要とするということは認識すべきである。

和音間距離に基づく和声解析は以下の手順で行われる。

1. 入力としてバークリーメソッド式のコードネーム列を受け取る。
2. 各コードネームに対して可能な調と音度の解釈を列挙し、それらをノードとして生成する。例えばコードネーム C を受け取った場合は、その解釈として I/C, IV/G, V/F, III/a, VI/e を生成する。
3. 隣接するコードネームから生成したノードからなる部分グラフが完全 2 部グラフとなるように各ノードを連結するパスを作り、図 3.2 のようなグラフを生成する。この図では入力として、コードネーム列  $C \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow C$  を例とする。
4. 各パスの和音間距離を TPS に基づいて計算し、コストとして割り当てる。なお、始端ノード S または終端ノード G とある和音を繋ぐパスのコストは 0 である。
5. 始端ノード S から終端ノード G までの最短経路を探索する。この経路上のノードに対応する和音記号を各和音の解釈として推定し、出力する。図 3.2 の例では、最短経路は  $I/C \rightarrow IV/C \rightarrow V/C \rightarrow I/C$  となる。

この手法は、和音間距離の総和が最小となる経路が最も適切な和声進行の解釈であるという仮定に基づく。Sakamoto らはこの仮定について、以下の 2 点から妥当性を評価している。

- 一般に、和音間距離は転調を含んだ和音間よりも転調を含まない和音間の方が小さくなる。したがって、和音間距離をコストとした最短経路探索によって得られるパスは、できる限り転調の少ない進行となることが期待される。転調の回数をなるべく抑えようとすることは、人間の調性認識にも沿った戦略である。
- V → I のようなカデンツを構成する和声進行に対して、比較的短い和音間距離が得られる。このことから、解析によって得られる最短経路はカデンツ構造を間接的に反映していると考えられる。

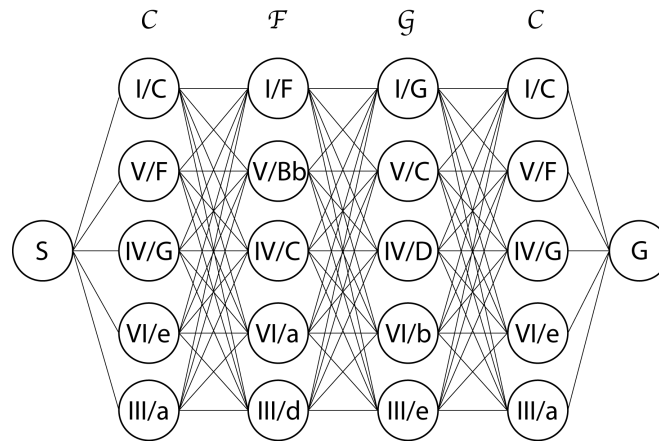


図 3.2: 和声機能候補のグラフ表現 ([3] より引用)

本研究では，この手法を Cadential Retention のために必要な和声解析のために用いる．ただし，和音間距離を計算する TPS，およびコードネームに対する解釈の可能性については，次の 3.3 節で述べる研究を参考に改良を行う．

### 3.3 TPS と Cadential Retention 理論の改良

Matsubara らは [4] において，より多くのカデンツを発見することを目的として，TPS と Cadential Retention の理論を改良した．また，山口らは [16] において，四和音やノンダイアトニックコードを適切に扱うために TPS におけるベーシックスペースの拡張を行った．本節ではこれらの研究について解説する．

#### 3.3.1 カデンツ探索を目的とした TPS の改良

Cadential Retention は GTTM のタイムスパン簡約において，カデンツを構造的に重要なものと見なし，ヘッドとして残すためのルールである．これを実装するためには，まず与えられた楽曲からカデンツを検出する必要がある．Matsubara ら [4] はより多くのカデンツを発見するために，TPS について以下の改良を行った．

- 短調の音階を和声的短音階に限定する．
- ドミナント機能を持つ和音の候補を拡大する．

この 2 つはどちらも，ドミナント機能を持つ和音をより多く発見することを目的としている．GTTM において Cadential Retention の対象となるカデンツは完全終止 ( $V_{(7)} \rightarrow I$ )，偽終止 ( $V_{(7)} \rightarrow VI$ )，半終止 ( $V$ ) の 3 種類であり，いずれもドミナントの和音  $V_{(7)}$  を含む．

したがって、ドミナントの和音の候補が増えればカデンツとなる和声進行の候補も増えることが期待できる。

2.1.2 節で述べたように、和声的短音階は短調においても導音の働きを長調と同等に強めることを目的とした音階であり、ドミナントからトニックへの進行(ドミナントモーション)が解決感を持つのはこの導音の働きが理由である。したがって、和声的短音階を前提とした和声解析を行うことで、カデンツに用いられる属七の和音としての V/i を発見できるようになる。しかし、和声的短音階を用いることによって TPS に生じる影響については [4] では触れられていないため、本研究ではこれを詳しく検討する。

ドミナント機能を持つ和音の候補については、図 3.3 を用いて説明する。この図では C major と A minor (和声的短音階) における三和音と四和音に対し、一部の構成音を人工的に補正してドミナントの和音と解釈する様子を示している。図中、白抜きの音符は省略された構成音と解釈して付け加えられたピッチ、× 記号で書かれた音符は非和声音と解釈されるピッチであり、これらの補正を行った和音はすべて  $v$  度音を根音とするドミナントとしての可能性が与えられる。この改良によって新たにドミナントの機能として解釈される和音を表 3.2 にまとめる。





<p>Major Scale (Triads)</p>  <p>C   Dm   Em   F   G   Am   Bm-5 I   ii   iii   IV   V   vi   <del>X</del>7 / C</p>	<p>Harmonic Minor Scale (Triads)</p>  <p>Am   Bm-5   Caug   Dm   E   F   G#m-5 i   <del>X</del>9   V   iv   V   VI   <del>X</del>7 / a</p>
<p>Major Scale (Tetrads)</p>  <p>CM7   Dm7   Em7   FM7   G7   Am7   Bm7-5 I7   ii7   iii7   IV7   V7   vi7   <del>X</del>9 / C</p>	<p>Harmonic Minor Scale (Tetrads)</p>  <p>AmM7   Bm7-5   CM7+5   Dm7   E7   FM7   G#dim i7   <del>X</del>11   V   iv7   V7   VI7   <del>X</del>9 / a</p>

図 3.3: 三和音と四和音における構成音の補正 ([4] より引用)

以上のような構成音の補正はその和音を表すベーシックスペースにも反映され、このとき省略された構成音もベーシックスペース上では存在するものと見なされる。すなわち、例えば  $vii_7^{\circ}/a$  を  $X_9/a$  として解釈し直すならば、その和音には  $V_9/a$  としてのベーシックスペースを与える。ここで、第 7 音以上の付加音は、ベーシックスペースのレベル  $c$  (triadic) に配置される。



表 3.2: ドミナントの和音候補の拡張

元の和音	補正後の和音	理由
$\text{vii}^\circ/\text{I}$	$\text{X}_7/\text{I}$	根音の省略
$\text{vii}_7^\circ/\text{I}$	$\text{X}_9/\text{I}$	
$\text{vii}^\circ/\text{i}$	$\text{X}_7/\text{i}$	
$\text{vii}_7^\circ/\text{i}$	$\text{X}_9/\text{i}$	
$\text{ii}^\circ/\text{i}$	$\text{X}_9/\text{i}$	根音と第3音の省略
$\text{ii}_7^\circ/\text{i}$	$\text{X}_{11}/\text{i}$	
$\text{III}^+/\text{i}$	$\text{V}/\text{i}$	非和声音としての iii 度音, および第5音の省略
$\text{III}_7^+/\text{i}$	$\text{V}/\text{i}$	非和声音としての iii 度音

### 3.3.2 TPS におけるベーシックスペースの拡張

山口ら [16] は, TPS をジャズ音楽理論に適用することを目的として理論の拡張を行った. 山口らは TPS の欠点として, 表現可能な和音の種類が限定されており, 特にジャズ音楽で多用される調の構成音以外を含んだノンダイアトニックコードを表現できないことを挙げ, その問題を解決するためにベーシックスペースを再定義した. また, TPS において第7音などの付加音がベーシックスペースのレベル  $c$  (triadic) に配置され, 第3音と同等の重み付けとなっていることも問題とした. 本研究では扱う和音をダイアトニックコードに限定しているため, ここでは後者の付加音の問題について述べる.

TPS のベーシックスペースは, ある和音に対して12のピッチクラスに重要度を与えるものである. したがって, あるレベルにおいて新たに置かれたピッチクラスは同じ重要度を持つべきである. 例えば, ある三和音を表すベーシックスペースにおいて, レベル  $d$  (diatonic) には調の構成音のうち和音に含まれない4つのピッチクラスが新たに追加され, これらは同等の重要度であるといえる. この観点から, ある四和音において第3音と第7音以上の付加音がどちらもレベル  $c$  に配置されるという従来の定義は音楽的に好ましくない. なぜならば, 第3音は主音との音程によって長和音か短和音かを決定し, 和音の基本的な印象を左右する重要な音であるのに対し, 第7音以上の付加音は省略可能で, その和音の機能に第3音ほど大きな影響を及ぼさないためである. また, 付加音は他の構成音と不協和の関係にあるため, 和音の安定感の観点からも重要度は低くあるべきと考えられる.

そこで, 山口らはベーシックスペースのレベル  $c$  (triadic) とレベル  $d$  (diatonic) の間に新たなレベルを追加し, 表 3.3 に示すような定義を行った. 本研究ではこの定義に従い, 第3音と第7音以上の付加音をベーシックスペース上で区別することとする.

表 3.3: 山口らによるベーシックスペースの再定義

レベル	説明
<i>a</i>	根音のみを含む
<i>b</i>	根音と第 5 音を含む
<i>c</i>	根音, 第 5 音, 第 3 音を含む
<i>d</i>	すべての和音構成音を含む
<i>e</i>	すべての調構成音を含む
<i>f</i>	すべてのピッチクラスを含む

### 3.3.3 Cadential Retention に関する理論の改良

Matsubara ら [4] は Cadential Retention について, ドッペルドミナントの和音を伴う半終止と局所的な終止という 2 つの概念を加えた. このうち, 局所的な終止については具体的な定義が不十分であり, 本研究でこの再定義を行うため, ここでは半終止の扱いについて述べる.

半終止は本来 V の和音単独で構成されるカデンツであるが, しばしば  $V/V \rightarrow V/I$  (または  $V/v \rightarrow V/i$ ) のようにドッペルドミナントの和音に続けて用いられる. ここで,  $V/I$  を  $I/V$  と考えれば, ドッペルドミナントからドミナントへの進行は完全終止におけるドミナントからトニックへの進行と同等な関係と考えることができる.

そこで, Matsubara らはこのような半終止について, 完全終止や偽終止と同様に 2 つのピッチイベントから構成されるカデンツとして扱うよう提案している. この際, 半終止であることを明示するために, egg 記号に縦線を加えた *half-egg* 記号を導入する. これを踏まえた解析例を図 3.4 (W. A. Mozart, Symphony No.40 in G minor, K.550) に示す. ここでは  $X_9/d \rightarrow V/g$  という進行がドッペルドミナントからドミナントへの進行と解釈され, このうち TSRPR7 (Cadential Retention) で定められたタイムスパンとグルーピング構造に関する条件を満たしたものを 2 つの和音からなる半終止として扱っている.

Matsubara らは [4] において, 上述した理論の改良を基に Cadential Retention のアルゴリズムを以下のように提案した.

1.  $V \rightarrow I, VI \rightarrow I$ , または  $V/V \rightarrow V/I$  の進行を満たすような連続したピッチイベント  $e_1, e_2$  を発見し, 両イベントを含む最小のグループを A と置く. 和声機能は Sakamoto ら [3] の手法を用いて, Viterbi アルゴリズムにより解析する. ただし, 以下の場合にはカデンツと見なさない.
  - A の終端と  $e_2$  の終端が一致しない.
  - A の終端と, A の上位グループ B の終端が一致しない.
2.  $e_1$  と  $e_2$  を束ねて A のヘッドとし, 対応する egg 記号を与える. このヘッドを B において単独のイベントとして扱う.



## 第4章 Cadential Retentionの実装のための提案手法

本節では、2章と3章で述べた内容を基に、本研究で提案、および実装した Cadential Retention の手法について述べる。まず、4.1 節で提案手法全体を概説し、次いで手法の各部分に関する詳細を 4.2 節以降で述べる。

### 4.1 提案手法と実装システムの概要

本研究では、3.1 節で述べた exGTTM によって解析された和声の情報を含まないタイムスパン木に対し、Cadential Retention のルールに基づいた修正を施すことで和声の情報を反映したタイムスパン木を生成する手法を提案する。Cadential Retention の適用は、以下に示す 3 段階のプロセスによって行われる。

1. 和声解析: MusicXML に書かれた和音の情報を読み取り、3.2 節で述べた Sakamoto らの手法に基づいて和声解析を行い、各和音の機能を推定する (4.2 節)。
2. カデンツ探索: exGTTM の出力である GroupingXML と Time-spanXML からそれぞれ楽曲のグルーピング構造とタイムスパン木を読み取り、1. で解析した和声情報と組み合わせてカデンツとなる和声進行を発見する (4.3 節)。
3. Cadential Retention: 2. で発見したカデンツの部分に対して Cadential Retention を適用し、修正したタイムスパン木を Time-spanXML 形式で出力する (4.4 節)。なお、4.3.1 節で定義する局所的カデンツについては、考慮する場合としない場合の 2 通りの結果を出力する。

なお、本研究で実装したシステム (以下、本システム) では Time-spanXML のほか、和声解析の結果と修正したタイムスパン木の画像出力も行っている。本システムの入出力関係を図 4.1 にまとめる。図中、楕円のノードは入出力データ、長方形のノードは処理を表す。

入力として用いる MusicXML は `<chord>` タグを用いて書かれたコードネームがモノフォニーに付随したものと仮定し、複数のパート (時間を共有する複数の五線) を検出した場合は楽譜上で最も上に書かれたパートのみを解析の対象とする。なお、本システムは python3.4.4 で実装した。

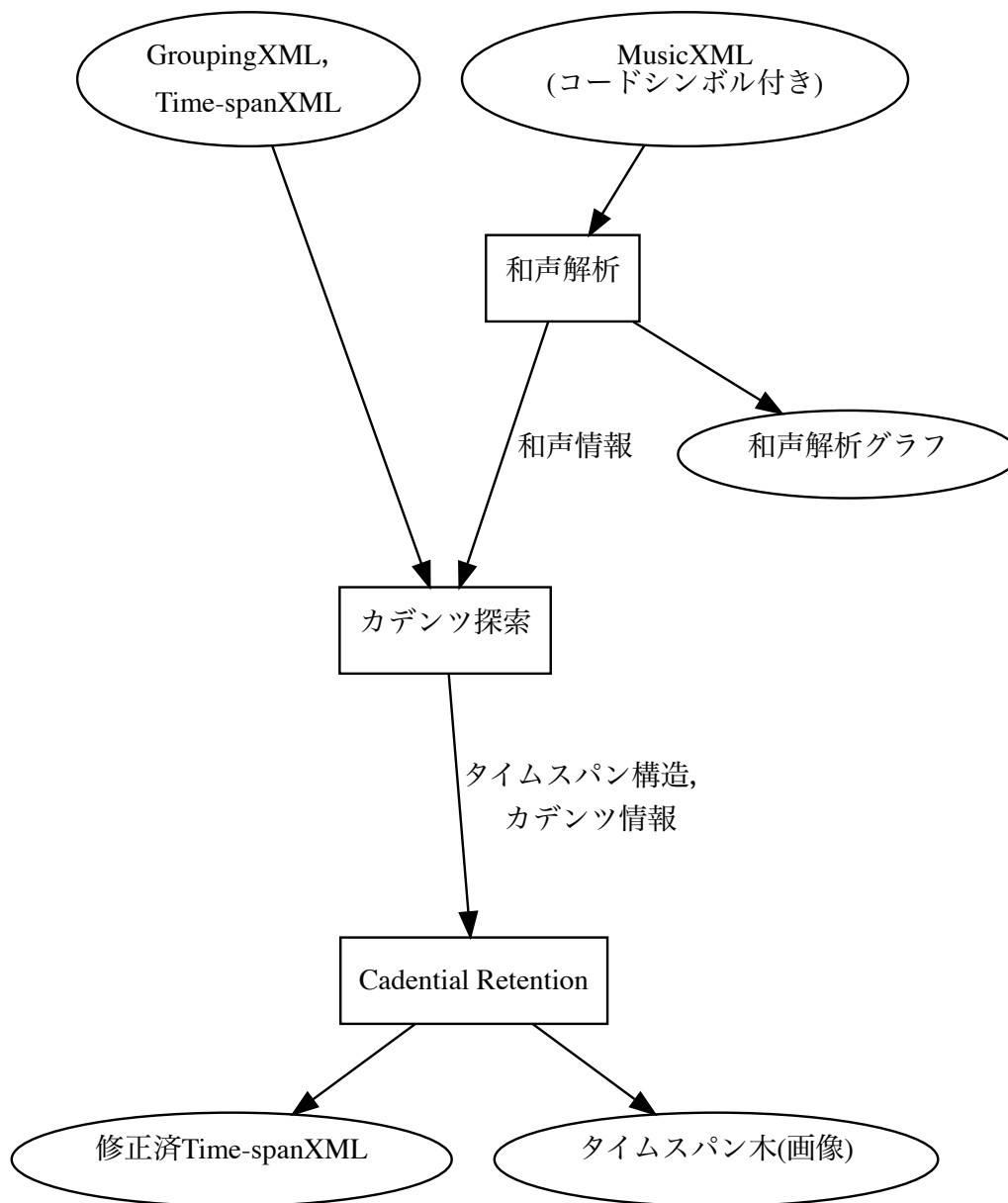


図 4.1: 本研究で実装したシステムの入出力関係

## 4.2 和声解析

本研究では，3.2 節で述べた Sakamoto らの和声解析手法と，3.3.1 節および 3.3.2 節で述べた TPS の改良を組み合わせるとして和声解析を行う．すなわち，Sakamoto らの手法で利用する TPS について以下の変更を加える．

- 短調の音階を和声的短音階とし，それに基づいて和音の解釈の候補を挙げる．
- 和音構成音の補正によって新たに得られるドミナント機能を持つ和音を解釈の候補に追加する．
- 各和音を表すベーシックスペースにレベルを追加する．

以下，4.2.1 節で以上の変更によってもたらされる変化について検討し，次いで 4.2.2 節で本研究における和声解析の計算方法をまとめる．

### 4.2.1 TPS の変更に伴う影響

#### 和音解釈の候補の変化

短調の音階を和声的短音階としたことと，ドミナント機能を持つ和音の候補を拡大したことにより，パークリーメソッド式の表記で与えられた各和音に対して割り当てられる音階と調の解釈の可能性が変化する．表 4.1 に，各種和音とそれに対応する解釈の可能性を示す．ここで，記号の欄には根音を C としたときのコードネームを示しており，和音の解釈は入力音の根音を主音とする長調を I として書いている．また，和音の解釈において下線を引いたものは，構成音を補正してドミナント機能を持つ和音と解釈し直したものを表す．

本研究では和音をダイアトニックコードに限定するため，表 4.1 に示した和音はすべてその調の構成音のみからなる．表からわかるように，増三和音，減七の和音，増七の和音，短三長七の和音の 4 種類については，自然的短音階を用いた従来の解釈では該当するダイアトニックコードが存在しなかった．和声的短音階を用いると，カデンツに用いられる V の和音を正しく属七の和音と認識でき，さらに解釈が存在しなかった 4 種類の和音についても解釈の候補を与えられるようになるという利点がある．

なお，増三和音と減七の和音に対する解釈の候補については補足が必要である．増三和音はそれぞれの構成音同士が長 3 度 (半音 4 つ分) の音程であり，半音階を 3 等分するように構成音を選ぶことで成立する和音である，したがって， $III^+/i$  の構成音は  $III^+/iii$ ， $III^+/\sharp v$  と同一である．例えば，Caug というコードネームが与えられた場合，その構成音は C，E，G $\sharp$  であり，C $\sharp$  minor，F minor，A minor の 3 通りの調において  $III^+$  となり得る．

同様に，減七の和音は互いに短 3 度 (半音 3 つ分) の音程を持つ 4 つの構成音からなり，半音階を 4 等分するように構成音を選ぶことで成立する和音である．したがって，Cdim7

表 4.1: TPS の変更に伴う和音の解釈可能性の変化

和音	記号	従来の解釈	新しい解釈
長三和音	C	I/I , III/vi , IV/V , V/IV , VI/iii , VII/ii	I/I , III/vi , IV/V , V/IV , V/iv
短三和音	Cm	i/i , ii/bVII , iii/bVI , iv/v , v/iv , vi/bIII	i/i , ii/bVII , iii/bVI , iv/v , vi/bIII
減三和音	Cdim	ii°/bvii , vii°/bII	ii°/bvii , $\cancel{X}_9/bvii$ , vii°/bII , $\cancel{X}_7/bII$ , vii°/♯i , $\cancel{X}_7/♯i$
増三和音	Caug	(なし)	III <sup>+</sup> /♯i , V/♯i , III <sup>+</sup> /iv , V/iv , III <sup>+</sup> /vi , V/vi
属七の和音	C7	V <sub>7</sub> /IV , VII <sub>7</sub> /ii	V <sub>7</sub> /IV , V <sub>7</sub> /iv
長七の和音	CM7	I <sub>7</sub> /I , III <sub>7</sub> /vi , IV <sub>7</sub> /V , VI <sub>7</sub> /iii	I <sub>7</sub> /I , IV <sub>7</sub> /V , VI <sub>7</sub> /iii
短七の和音	Cm7	i <sub>7</sub> /i , ii <sub>7</sub> /bVII , iii <sub>7</sub> /bVI , iv <sub>7</sub> /v , v <sub>7</sub> /iv , vi <sub>7</sub> /bIII	ii <sub>7</sub> /bVII , iii <sub>7</sub> /bVI , iv <sub>7</sub> /v , vi <sub>7</sub> /bIII
減七の和音	Cdim7	(なし)	vii <sub>7</sub> °/♯i , $\cancel{X}_9/♯i$ , vii <sub>7</sub> °/iii , $\cancel{X}_9/iii$ , vii <sub>7</sub> °/v , $\cancel{X}_9/v$ , vii <sub>7</sub> °/bvii , $\cancel{X}_9/bvii$
増七の和音	CM7+5	(なし)	III <sub>7</sub> <sup>+</sup> /vi , V/vi
導七の和音	C∅	ii <sub>7</sub> °/bvii , vii <sub>7</sub> °/bII	ii <sub>7</sub> °/bvii , $\cancel{X}_{11}/bvii$ vii <sub>7</sub> °/bII , $\cancel{X}_9/bII$
短三長七の和音	CmM7	(なし)	i <sub>7</sub> /i
長九の和音	C9	V <sub>9</sub> /IV	V <sub>9</sub> /IV
短九の和音	C7-9	VII <sub>9</sub> /ii	V <sub>9</sub> /iv

というコードネームが与えられた場合の調解釈は C♯ minor , E minor , G minor , B♭ minor の 4 通りとなる .

これらの調解釈の拡張は , 特にドミナント機能の可能性を考える上で重要である . III<sup>+</sup> を V に置き換えるということはコードネームに示された根音と実際の根音が一致しないということであり , vii<sub>7</sub>° を  $\cancel{X}_9$  に置き換えるということは示された和音に含まれないピッチを実際の根音と見なすということである . ここで , コードネームはそれぞれの構成音をどの高さで演奏するのかを指定しないため , 増三和音と減七の和音についてはどの構成音が第何音にあたるのかを確定できない . この性質から , これらの和音は転調の際に有用な和音でもあり , したがって可能な調解釈をすべて考慮に含めることが必要だと考えられる .

## 和音間距離の計算方法に関する理論的注意

短調の音階を和声的短音階としたことにより，TPS における和音間距離  $\delta(x, y)$  (2.5 式) の計算に必要な regional circle-of-fifths rule を適用できなくなる場合がある．これは長調と短調の間の  $region(x, y)$  を求める場合に生じる問題である．和声的短音階は自然的短音階から vii 度音を半音高めたものであるから，長調の構成音を半音階上でいくらシフトしても和声的短音階の構成音とは一致しない．したがって，長調と短調の間で regional circle-of-fifths rule を適用するためには，一方を平行調に置き換えて考えるか，あるいは短調を一時的に自然的短音階として考えるなどの調整が必要である．しかし，これらはいくまで regional circle-of-fifths rule の定義の問題であり，実質的には調の五度圏上で 2 つの調の位置を比較すれば  $region(x, y)$  を計算できるため，この点においては影響はない．

また，これに伴って chordal circle-of-fifths rule の適用にも影響が生じるが， $chord(x, y)$  も実質的に和音の五度圏上で 2 つの和音の位置を比較することで計算可能である．本システムではこれらの五度圏距離について，ベーシックスペースを用いずに計算を行っており，その内容については 4.2.2 節で述べる．

## 和音間距離および調間距離の変化

短調の音階を和声的短音階としたことと，ベーシックスペースにレベルを追加したことにより，和音間距離の要素であるベーシックスペース距離  $basic\ space(x, y)$  に変化が生じる．ここでは異なる調の主和音同士の距離で表される調間距離  $\Delta(R_x, R_y)$  について述べる．

まず，ベーシックスペースにおけるレベルの追加について，山口ら [16] は triadic レベルと diatonic レベルの間に追加されたレベルに特に名前を与えていなかったが，本研究では和音の構成音を含むという意味で *chordal* レベルと呼ぶこととする．

chordal レベルにはすべての和音構成音が含まれるため，chordal レベルは triadic レベルに含まれる 3 つのピッチクラスをすべて含む．したがって，たとえ 2 つの和音がともに三和音だったとしても，両者のベーシックスペースの triadic レベルにおいて差異が存在すると， $basic\ space(x, y)$  の値は chordal レベルの追加によってその差異の数だけ増加する．

調間距離においては両者の主和音を比較するため，主和音の構成音のうち共有されないピッチの数だけ調間距離が増加することになる．例えば，C と G の距離は 2，C と e の距離は 1，それぞれ増加する．

次に，短調の音階が和声的短音階になったことにより，ベーシックスペースの diatonic レベルに変化が生じる．これにより， $R_x$  と  $R_y$  の少なくとも一方が短調であれば，その調間距離が影響を受ける．近親調の範囲においては，長調と短調の主和音のベーシックスペース距離は 1，短調の主和音同士のベーシックスペース距離は 2，それぞれ増加する．ただし，例外として同主調の主和音同士のベーシックスペース距離については，短調の vii 度音が半音高められたことにより長調の vii 度音と一致することから距離は 1 減少し，これが chordal レベルの追加による増加分と相殺される．



以上の変化を踏まえて、各調への調間距離を再計算して調空間にまとめると図 4.2 のようになる。図 2.40 と同様に、中心の調の近親調を凸型で囲って示す。

		VII (27)	vii (20)	II (18)				
	#ii (27)	III (18)	iii (11)	V (9)	v (16)			
#IV (32)	#iv (25)	VI (16)	vi (9)	I (0)	i (7)	bIII (16)	biii (23)	
			ii (14)	IV (9)	iv (16)	bVI (18)	bvi (25)	
				bVII (18)	bvii (25)	bII (27)		

長調 I から各調への調間距離

		vii (27)	II (25)					
	III (25)	iii (18)	V (16)	v (11)	bVII (14)	bvii (21)		
#iv (32)	VI (23)	vi (16)	I (7)	i (0)	bIII (9)	biii (16)	bV (25)	
		ii (21)	IV (16)	iv (11)	bVI (11)	bvi (18)	bI (27)	
				bII (20)	bii (27)			

短調 i から各調への調間距離

図 4.2: 改良 TPS における調間距離

図 4.2 と従来の TPS における調間距離 (図 2.40) とを比較すると、基本的に距離が増加していることがわかる。また、短調 i を中心に考えると、ii と bvii への最短経路が変化していることがわかる。これは、すべての調間距離が一様に増加したわけではなく、増加の様子に偏りがあることが原因である。しかし、ii については従来の経路 (i → v → ii) に沿った場合の調間距離  $\Delta(i, ii)$  は 22 であり、新たな距離 21 との差は軽微である。実際に遠隔調の和音間距離を求める場合は、それぞれの調だけでは調空間における最短経路は確定せず、和音の音度や構成音により強く影響されることから、このような経路の変化自体による悪影響は考えづらい。

ただし、近親調間の距離の差は従来の調空間では  $\Delta(I, ii) - \Delta(I, i) = 3$  であったのに対し、以上の変更を加えた調空間では  $\Delta(I, ii) - \Delta(I, i) = 7$  まで広がっている。また、長調と短調で属調・下屬調間の距離が異なっていたり、従来は等しかった同主調間と平行調間の距離に差が生じたりといった意図しない影響も見られる。このように、全体として従来の調空間に比べてねじれが大きくなっていることから、人間の音楽的直観との比較による検討は今後必要になると考えられる。このことは、TPS の和音間距離自体のさらなる検証や改良と並んで、今後の課題である。

## 4.2.2 和音間距離の計算と最短経路探索

本節では、本研究で実装した和音間距離の計算と和声解析について述べる。

## 和音間距離

2.3 節で解説したように，近親調間の和音間距離  $\delta(x/R_x, y/R_y)$  は 3 つの項の和によって表される．以下，本システムに実装したそれぞれの項の計算方法を述べる．

まず，調の五度圏距離  $region(x, y)$  は以下の 4.1 式で求められる．これは調の五度圏上において，円周に沿って隣り合った調の距離を 1 としたときの両和音の調の距離である．ただし，ここで  $ind(S, e)$  は順序集合  $S$  における要素  $e$  のインデックスを得る関数であり， $p_R$  は調  $R$  の主音のピッチクラスを表す整数である．短調については同主調のピッチクラスを用いるため，ピッチクラスに同主長調との主音のピッチクラスの差である 3 を足して計算を行う．集合  $\mathbb{R}$  はピッチクラスを調の五度圏の順に沿って並べているため，この集合におけるインデックスを比較することで五度圏上の距離を求めることができる．

$$\begin{aligned}
 region(x, y) &= \min\{d_r(x, y), d_r(y, x)\} \\
 d_r(x, y) &= (ind(\mathbb{R}, p'_{R_x}) - ind(\mathbb{R}, p'_{R_y})) \bmod 12 \\
 p'_R &= \begin{cases} p_R & (R \text{ is a major key}) \\ (p_R + 3) \bmod 12 & (R \text{ is a minor key}) \end{cases} \\
 \mathbb{R} &= \{0, 7, 2, 9, 4, 11, 6, 1, 8, 3, 10, 5\}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

ここで， $region(x, y) = d_r(y, x)$  ならば五度圏を  $R_x$  から  $R_y$  へ時計回りに， $region(x, y) = d_r(x, y)$  ならば反時計回りに辿ったことを表している．次の  $chord(x, y)$  の計算に利用するため，時計回りならば  $dir = True$ ，反時計回りならば  $dir = False$  としてこの方向を記録しておく．

和音の五度圏距離  $chord(x, y)$  については以下の手順で計算を行う．

1. 長調と短調を構成するピッチクラスの集合  $\mathbb{C}_M, \mathbb{C}_m$  をそれぞれ 4.2 式で定義する．

$$\begin{aligned}
 \mathbb{C}_M &= \{0, 7, 2, 9, 4, 11, 5\} \\
 \mathbb{C}_m &= \{0, 7, 2, 8, 3, 11, 5\}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

2. 調  $R_x$  が長調であれば  $\mathbb{C}_M$  の，短調であれば  $\mathbb{C}_m$  の各要素  $n_i$  に対し，4.3 式を適用して得られた  $n_{x,i}$  の集合を  $\mathbb{C}_{R_x}$  と置く．ここで  $i$  はインデックスであり，要素の順序を保って計算する．

$$n_{x,i} = (n_i + p_{R_x}) \bmod 12 \tag{4.3}$$

3.  $\mathbb{C}_{R_x}$  を以下の手順で操作して  $\mathbb{C}_{R_y}$  を得る．

- i.  $\mathbb{C}_{R_y} = \mathbb{C}_{R_x}$  と置く．
- ii.  $region(x, y) > 0$  ならば， $\mathbb{C}_{R_y}$  の各要素  $n_{y,i}$  に対して 4.4 式を適用し，得られた  $n'_i$  の集合を  $\mathbb{C}_{imp}$  と置く．全要素を計算したら， $\mathbb{C}_{R_y} = \mathbb{C}_{imp}$  と置き直す．

$$n'_i = \begin{cases} (n_{y,(i-1) \bmod 7} + 7) \bmod 12 & (dir = True) \\ (n_{y,(i-6) \bmod 7} - 7) \bmod 12 & (dir = False) \end{cases} \tag{4.4}$$

iii. ii. を  $region(x, y)$  の値の回数だけ繰り返す .

4.  $R_x$  が長調かつ  $R_y$  が短調ならば 4.5 式 ,  $R_x$  が短調かつ  $R_y$  が長調ならば 4.6 式を適用する .  $R_x$  と  $R_y$  がどちらも長調またはどちらも短調ならばこの手順を無視する .

$$n_{y,j} = (n_{y,j} + 1) \bmod 12$$

$$j = \begin{cases} (1 + region(x, y)) \bmod 7 & (dir = True) \\ (1 - region(x, y)) \bmod 7 & (dir = False) \end{cases} \quad (4.5)$$

$$n_{y,j} = (n_{y,j} - 1) \bmod 12$$

$$j = \begin{cases} (5 + region(x, y)) \bmod 7 & (dir = True) \\ (5 - region(x, y)) \bmod 7 & (dir = False) \end{cases} \quad (4.6)$$

5. 4.7 式により  $chord(x, y)$  を求める . ここで ,  $p_x$  は和音  $x$  の根音のピッチクラスを表す整数である .

$$chord(x, y) = \min\{d_c(x, y), d_c(y, x)\}$$

$$d_c(x, y) = (ind(\mathbb{C}_{R_x}, p_x) - ind(\mathbb{C}_{R_y}, p_y)) \bmod 7 \quad (4.7)$$

このうち , 手順 3. は TPS における regional circle-of-fifths rule の適用に対応する . また , 手順 4. は長調と短調の和音を比較する場合に和声的短音階における vii 度音の変位を補正するための計算である . これらの計算によって  $\mathbb{C}_{R_x}$  と  $\mathbb{C}_{R_y}$  がそれぞれ  $R_x$  と  $R_y$  の構成音を正しく含み , かつ 4.7 式で五度圏距離を得られるようにインデックスが整理される . また , 手順 5. は調の五度圏距離と同様に , 五度圏上で時計回りと反時計回りの距離のうち , より短い方を選択するための計算である .

ベーシックスペース距離  $basicspace(x, y)$  についてはビット演算を用いて計算を行う . まず , ベーシックスペースの各レベルを 12 ビットの 2 進数で与える . このとき ,  $pn$  が左から  $n$  ビット目に対応し , ベーシックスペースのあるレベルにおいてそのピッチクラスが存在すれば 1 , 存在しなければ 0 を格納する . ここで , 和音  $c$  のベーシックスペース  $BS_c$  の各レベルを表すビット列をレベル  $a$  (root) から順に  $l_{c,1}, l_{c,2}, \dots, l_{c,6}$  と置く . 例として ,  $BS_{V_7/c}$  は 4.8 式に示す 6 つのビット列で表される .

$$l_{V_7/c,1} = 0x0000000010000$$

$$l_{V_7/c,2} = 0x001000010000$$

$$l_{V_7/c,3} = 0x001000010001$$

$$l_{V_7/c,4} = 0x001001010001$$

$$l_{V_7/c,5} = 0x101101011001$$

$$l_{V_7/c,6} = 0x111111111111$$
(4.8)

ベーシックスペース  $BS_x$  ,  $BS_y$  が与えられたとき ,  $basicspace(x, y)$  は以下の 4.9 式で求められる . 両ベーシックスペースに含まれるピッチクラスの総数が異なる場合を考慮し ,  $BS_x$  に固有のピッチクラスと  $BS_y$  に固有のピッチクラスの数と比較してより多い方をベーシックスペース距離として選択する .

$$basicspace(x, y) = \max\{d_b(x, y), d_b(y, x)\}$$

$$d_b(x, y) = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=0}^{11} \frac{(l_{x,i} \text{ XOR } l_{y,i}) \text{ AND } l_{x,i} \text{ AND } 2^j}{2^j} \quad (4.9)$$

遠隔調の和音間距離の計算に必要な調間距離  $\Delta(R_1, R_n)$  については , 図 4.2 に示した I 調および i 調から 24 種類すべての調への距離をあらかじめ格納しておき ,  $R_1$  と  $R_n$  の主音のピッチクラスの差と , 両調が長調であるか短調であるかという情報をもとに対応する調間距離の値を取り出すように実装している . この距離はダイクストラ法を用いて以下の手順で計算する .

1. I からその近親調への調間距離を前述した手順によって計算する . 互いに近親調である調  $R_x$  と  $R_y$  の調間距離は主和音同士の和音間距離であるから , 次の 4.10 式で求められる .

$$\begin{aligned} \Delta(R_x, R_y) &= \delta(T_{R_x}, T_{R_y}) \\ &= region(T_{R_x}, T_{R_y}) + chord(T_{R_x}, T_{R_y}) + basicspace(T_{R_x}, T_{R_y}) \end{aligned} \quad (4.10)$$

2. 24 個の各調  $R$  をノードとして生成し , 現最小コスト  $\Delta'_R$  と確定コスト  $\Delta_R$  をともに  $\infty$  で初期化する .
3. 各ノードについて , すべての近親調と辺で連結し , 調間の関係に基づいて手順 1. で計算した調間距離をそれぞれの辺のコストとして割り当てる . ここで , 調  $R_1$  と  $R_2$  を繋ぐ辺を  $e_{R_1, R_2}$  , そのコストを  $d_{R_1, R_2}$  と置く . 以上により , 24 個のノードが各々 6 つの辺を持つ無向グラフが生成される .
4.  $\Delta'_I = 0$  とする .
5. 確定コスト  $\Delta_R$  が  $\infty$  (コストが未確定) である調の中から現最小コスト  $\Delta'_R$  が最小である調  $R$  を選び ,  $\Delta_R = \Delta'_R$  としてそのコストを確定する .
6. 手順 5. で選んだ調  $R$  の近親調のうち , コストが未確定であるすべての調  $R'$  について 4.11 式を適用する .

$$\Delta'_{R'} = \min\{\Delta'_{R'}, \Delta_R + d_{R, R'}\} \quad (4.11)$$

7. すべての調のコストが確定するまで (すべての  $\Delta_R$  が  $\infty$  でなくなるまで) 手順 5. と 6. を繰り返す . この確定コストが長調 I から各調  $R$  への調間距離  $\Delta(I, R)$  である .
8. I を i に置き換えて手順 1.~7. を繰り返し , 短調 i から各調  $R$  への調間距離  $\Delta(i, R)$  を求める .

## 最短経路探索

本システムでは、和声解析における最短経路探索を Viterbi アルゴリズムで実装した。これについて、図 4.3 (F. Chopin, Grande Valse Brillante, Op.18) に例示した和声解析グラフを用いて説明する。図の上方には入力であるコードネームが記載されており、その下にそれぞれのコードネームに対応する音度と調の解釈の可能性を示すノードが連なる。なお、本システムで出力するこのような和声解析グラフにおいては文字表示の都合上、 $X_7$  のような根音省略形体の和音記号について、根音 (root) を引いたものという意味で  $V7 - R$  のように記法を変更するので注意されたい。

グラフは以下の手順で生成する。入力されたコード列を  $c_1, c_2, \dots, c_n$  と置く。

1. 始端ノード  $S$  を生成し、 $i = 1$  と置く。
2. 表 4.1 より、コードネーム  $c_i$  について可能なすべての和声機能 (音度と調) の解釈をノードとして生成する。ここで各和声機能を  $h_{i,1}, h_{i,2}, \dots, h_{i,m_i}$  と置く。
3. 自然数  $j, k$  ( $1 \leq j \leq m_{i-1}, 1 \leq k \leq m_i$ ) のすべての組み合わせについて、 $h_{i-1,j}$  と  $h_{i,k}$  のノードを連結するパス  $e_{i,j,k}$  を生成し、そのコストは和音間距離  $\delta(h_{i-1,j}, h_{i,k})$  と設定する。ただし  $i = 1$  の場合のみ、始端ノード  $S$  と各  $h_{i,k}$  のノードを連結するパス  $e_{1,1,k}$  を生成し、そのコストを 0 に設定する。
4.  $i$  を 1 増やし、 $i > n$  になるまで手順 2. と 3. を繰り返す。
5. 終端ノード  $G$ 、および各  $h_{n,j}$  ( $1 \leq j \leq m_n$ ) のノードと  $G$  を連結するパス  $e_{n+1,j,1}$  を生成し、そのコストを 0 に設定する。

最短経路は以下の手順で探索する。

1. 始端ノード  $S$  に到達するための最小コスト  $d_{0,1} = 0$  と置き、 $i = 1$  と置く。
2. すべての自然数  $k$  ( $1 \leq k \leq m_i$ ) について、 $h_{i,k}$  のノードに到達するための最小コスト  $\delta_{i,k}$  を 4.12 式により求める。ここで、 $m_i$  は和音  $c_i$  に対応するノードの数であり、始端ノード  $S$  ( $i = 0$ ) と終端ノード  $G$  ( $i = n + 1$ ) については  $m_0 = m_{n+1} = 1$  とする。また、パス  $e_{i,j,k}$  のコストを  $d_{i,j,k}$  とする。

$$\delta_{i,k} = \min\{\delta_{i-1,j} + d_{i-1,j,k} \mid 1 \leq j \leq m_{i-1}\} \quad (4.12)$$

3. 手順 2. で求めた最小コスト  $\delta_{i,k}$  と、その最小コストを導いたノード (インデックス  $j$ ) を記録しておく。
4.  $i$  を 1 増やし、 $i > n + 1$  になるまで手順 2. と 3. を繰り返す。
5. 手順 3. で記録したノードを、終端ノード  $G$  から始端ノード  $S$  まで順に辿る。このとき現れた経路が  $G$  から  $S$  への最短経路であり、順序を反転させれば  $S$  から  $G$  への最短経路となる。

図 4.3 において、最短経路として選択されたノードには色を塗り、それらを繋ぐパスを実線、それ以外のパスを破線で表している。また、各ノードには始端ノード S からそのノードまでの最小コストを括弧内に示している。この図から、全体的に Eb major の和声進行として解釈されていることがわかる。4 つ目の Eb7 と 5 つ目の Edim はどちらも Eb major 上の和音ではないが、これらの和音にはそれぞれ候補の中で唯一 Eb major の近親調である Ab major と f minor が選ばれており、前述したアルゴリズムによって、可能な転調の解釈の中で最も自然なものが選ばれていると言える。

本システムでは Cadential Retention を適用するための解析の経過として、和声解析の結果をこのような視覚的表現で出力する。なお、図中の青色で示したノードはカデンツとして発見された和音を示しており、これについては次の 4.3 節で解説する。

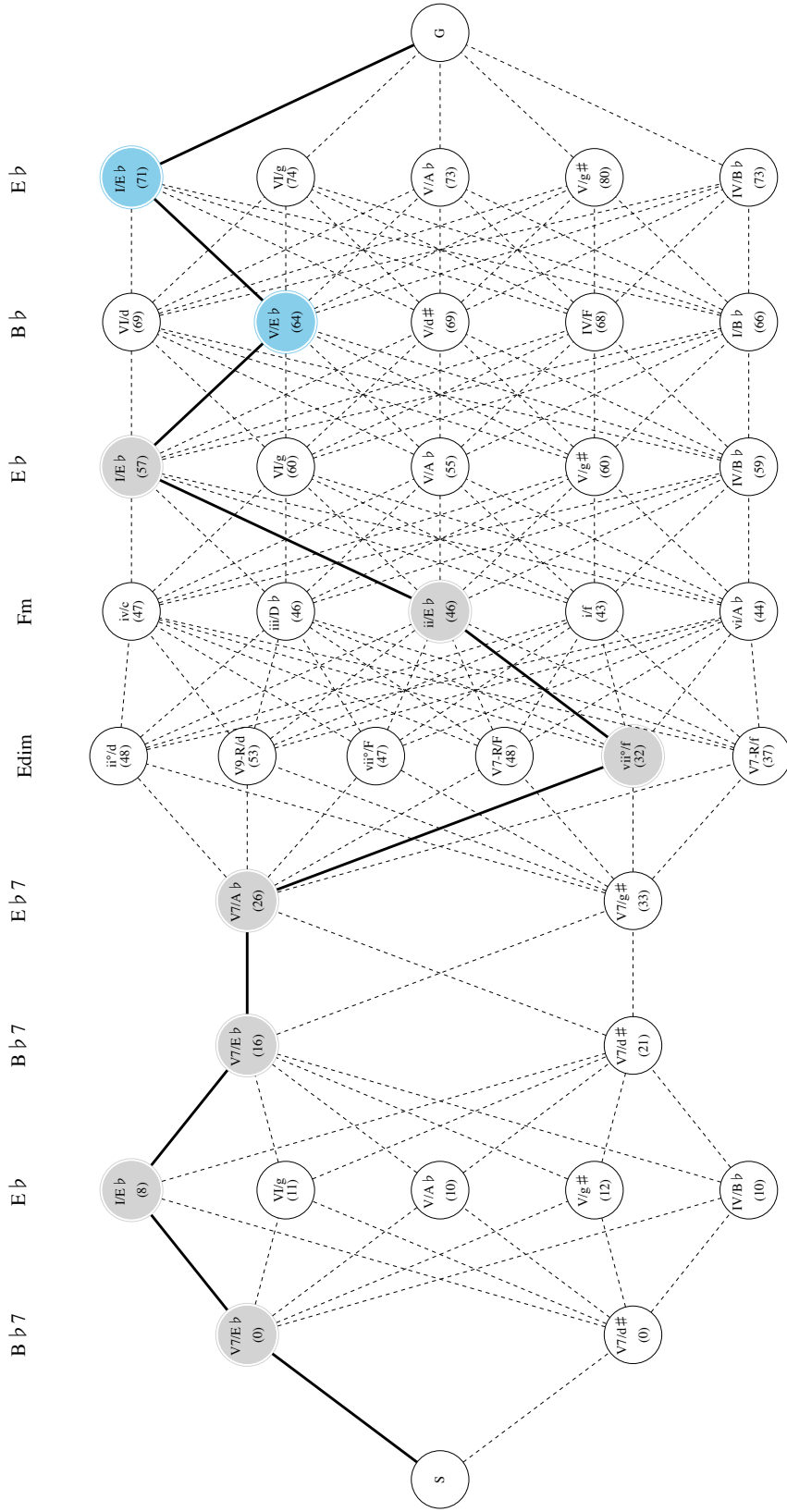


図 4.3: 和声解析グラフの例.

## 4.3 カデンツ探索

本節では，入力された GroupingXML および Time-spanXML と 4.2 節で述べた和声解析の結果を用いて，楽曲中のカデンツを探索する手法について述べる．以下，4.3.1 節で本研究におけるカデンツの定義をまとめ，4.3.2 節でその探索アルゴリズムを解説する．

### 4.3.1 本研究におけるカデンツの定義

#### GTTM における定義

2.2.4 節で述べたように，GTTM においてある和声進行がカデンツとして認識されるためには TSRPR7 で定められた 3 つの条件を満たす必要がある．これを以下に再掲する．なお， $T$  は現在注目しているタイムスパンである．

- i. 完全終止，半終止，または偽終止の和声進行を形成するようなピッチイベントまたはイベント列  $(e_1)e_2$  が存在する．
- ii.  $e_2$  が  $T$  の終端に位置するか，または  $T$  の終端まで延長される．
- iii.  $T$  を含むより大きなグループ  $G$  が存在し，進行  $(e_1)e_2$  が  $G$  における構造的終止として機能する．

条件 i. において，それぞれの終止に対応する和声進行は表 4.2 の通りである．半終止は  $V$  の和音単独から形成されるため，どの和音が先行しても構わない．

表 4.2: カデンツの和声進行

カデンツの種類	長調の進行	短調の進行
完全終止	$V/I \rightarrow I/I$	$V/i \rightarrow i/i$
	$V_7/I \rightarrow I/I$	$V_7/i \rightarrow i/i$
偽終止	$V/I \rightarrow vi/I$	$V/i \rightarrow VI/i$
	$V_7/I \rightarrow vi/I$	$V_7/i \rightarrow VI/i$
半終止	$\rightarrow V/I$	$\rightarrow V/i$

ここで重要なのは，条件 ii. と iii. においてタイムスパン  $T$  に関する記述がなされていることである．すなわち，ある和声進行がカデンツとして機能するか否かは，その和声進行を含んだ各レベルのタイムスパンに対して個別に判断しなければならない．例えば，図 4.4 では 2 小節レベル以上のタイムスパン構造を示しており，これらのタイムスパンはすべて同じ範囲を指すグループに対応するものとする (Segmentation Rule 1)．図中のすべての和音が C major 上のものだとすれば，青色で示した 4 小節目の和音進行  $G7 \rightarrow Am$  は  $V_7/C \rightarrow vi/C$  となり，偽終止の和声進行を満たす．この和声進行は 3~4 小節目を支配するタイムスパンにおいては条件 ii. と iii. を満たしてカデンツとなるが，その上位である 1~4



小節目のタイムスパンでは条件 iii. を満たさないため，これ以上のレベルではカデンツとしての機能が失われる．一方，赤色で示した 7~8 小節目の和音進行  $G \rightarrow C$  は  $V/C \rightarrow I/C$  となり，完全終止の和声進行を満たす．この和声進行は 7~8 小節目と 5~8 小節目に対応する両方のタイムスパンにおいて条件 ii. と iii. を満たし，1~8 小節目を支配する最上位のタイムスパンではそれより大きなグループが存在しないことから条件 iii. を満たせない．

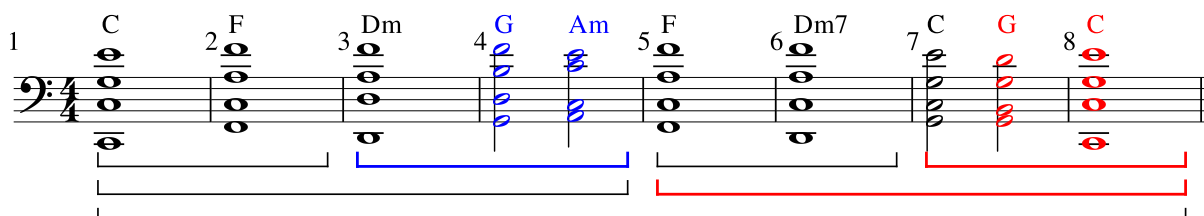


図 4.4: カデンツとタイムスパンの関係

ここで，あるタイムスパン  $T$  においてカデンツの条件を満たし， $T$  を含んだ直上のタイムスパン  $T'$  においてカデンツの条件を満たさないような和声進行を， $T$  を含み，かつ  $T$  より大きい最小のグループ  $G$  に対するカデンツと呼ぶこととする．したがって，例えば図 4.4 において，4 小節目の  $G \rightarrow Am$  は 1~4 小節目に対するカデンツ，7~8 小節目の  $G \rightarrow C$  は 1~8 小節目に対するカデンツである．すなわち，TSRPR7 に示された条件はカデンツとなる和声進行がヘッドとして選択されるための条件であり，その条件を満たさなくなった最小のタイムスパンに相当するグループ  $G$  こそが，その和声進行がカデンツとして機能する最大範囲であると解釈する．

### 半終止の拡張

本研究では，3.3.3 節で述べた Matsubara ら [4] の研究で提案された，ドッペルドミナントを伴う半終止を 2 つの和音からなるカデンツとして扱う手法を採用する．また，このドッペルドミナントについては，3.3.1 節で述べたドミナント機能を持つ和音候補の拡張を行い，五和音以上や根音省略形体も含めて属調上で  $v$  度音を根音とする和音ならばすべてドッペルドミナントとして扱う．表 4.2 に上述の拡張を行ったものが表 4.3 であり，これが本研究においてカデンツとなり得るすべての和声進行である．

なお，ドミナント機能を持つ和音候補の拡張は，本研究では半終止に先行するドッペルドミナントに限っている．これは古典和声理論において，完全終止や偽終止を構成できるドミナントの和音が  $V$  と  $V_7$  に限定されているためであり，それ以外の  $v$  度音を根音とする和音は確かにドミナントの機能を持つものの，和声進行の区切りや終わりとしてのカデンツを構成する和音としては扱わないこととする．また，半終止の  $V/I$  ( $V/i$ ) についても同様に古典和声理論に倣い，三和音  $V$  以外の和音は認めないこととする．半終止の先行和音についてはこのような制限がないため，完全終止や偽終止に比べてより自由度の高いドミナントモーションを許容する．

表 4.3: ドッペルドミナントを考慮したカデンツの和声進行

カデンツの種類	長調の進行	短調の進行
完全終止	$V/I \rightarrow I/I$	$V/i \rightarrow i/i$
	$V_7/I \rightarrow I/I$	$V_7/i \rightarrow i/i$
偽終止	$V/I \rightarrow vi/I$	$V/i \rightarrow VI/i$
	$V_7/I \rightarrow vi/I$	$V_7/i \rightarrow VI/i$
半終止 (1 和音)	$\rightarrow V/I$	$\rightarrow V/i$
半終止 (2 和音)	$D/V \rightarrow V/I$	$D/v \rightarrow V/i$
	$(D \in \{V, V_7, X_7, V_9, X_9, V_{11}, X_{11}\})$	

### 局所的カデンツ

本研究では，局所的カデンツ (*local cadence*) を次のように定義する．

局所的カデンツ (**local cadence**) カデンツを構成しない和音列  $c_1, c_2$  について，和声解析の結果にかかわらず  $c_1$  と  $c_2$  の和声機能 (音度と調) の解釈を任意に選択することでカデンツの条件を満たすことが可能である場合，この和音列を局所的カデンツとする．

この定義の意味するところは，入力された和声進行全体を考えるとカデンツではないが，前後の文脈を無視してその一部分に別の調解釈を考えるとカデンツになり得るような和声進行について，一般のカデンツに準じた扱いをしたいということである．

例として，R. Wagner, Tannhauser Overture の冒頭の楽譜とその和声解析結果を図 4.5 に示す．3~4 小節目の  $E_b \rightarrow F_m$  は和声解析の結果  $I/E_b \rightarrow ii/E_b$  と解釈されているが，和声解析で選ばれなかった解釈の可能性として，和声解析グラフに赤色で示した  $V/A_b \rightarrow vi/A_b$  がある．この楽曲は 4 小節目の 2 拍目と 3 拍目の間にフレーズの切れ目があり，この  $E_b \rightarrow F_m$  はカデンツの条件 ii. と iii. を満たしている．よって，前後の文脈を無視してこれらの和音に  $A_b$  major 上の和音としての解釈を与えれば，偽終止の和声進行を満たすため，これを局所的カデンツとして扱う．

1 Eb 2 Cm 3 Eb Ab Eb 4 Fm 5 F 6 Bb7 7 Eb Cm Eb 8 Eb Bb

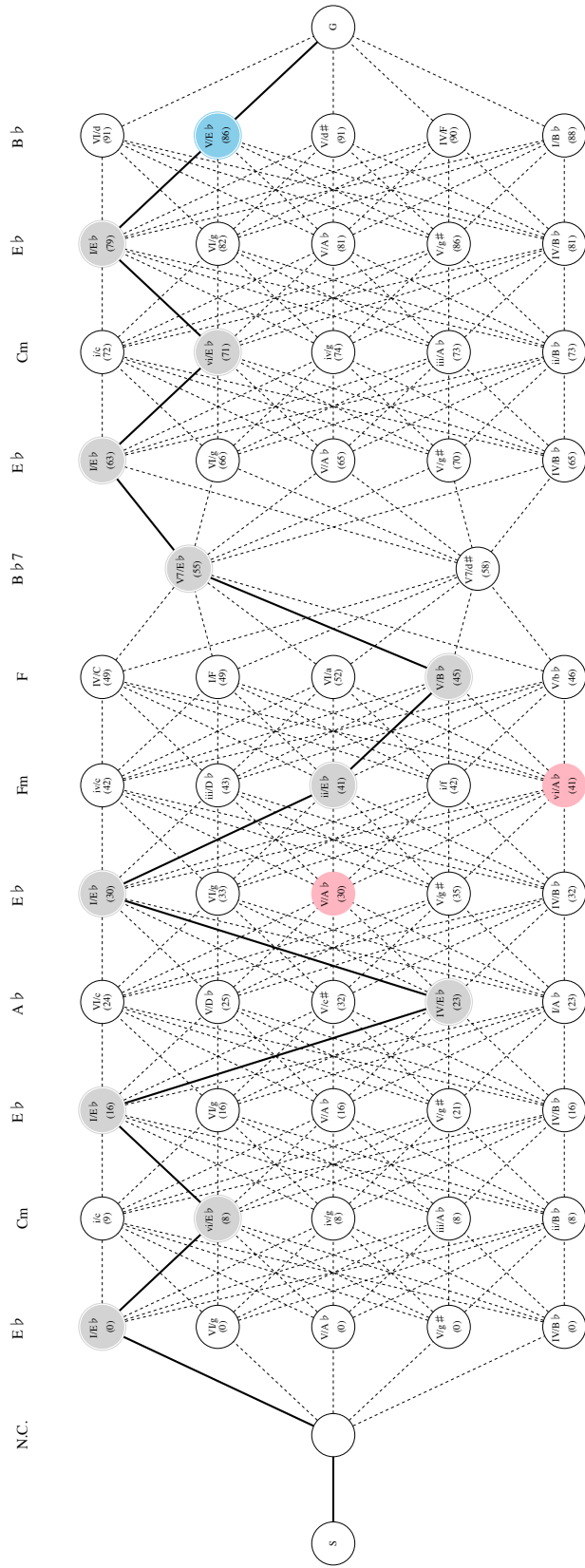


図 4.5: 局所的カデンツの例

局所的カデンツは和声解析の結果に則った通常のカデンツと同列に扱うことはできないが、その和音進行自体の持つ効果は前後の文脈を考えなければ通常のカデンツと同等であり、タイムスパン簡約において何らかの形で局所的カデンツを上位レベルまで残すことによって表現できる楽曲の解釈があると考えられる。

ただし、現状では個々の局所的カデンツについて、簡約においてヘッドとして残すべきか否かを判断するための具体的で明確な基準を欠いており、その妥当性については今後検討する必要がある。しかしながら、本システムによって局所的カデンツを考慮したタイムスパン木を得られることは、より多様な解釈を獲得できるという点で価値のあることと考えられる。

### 4.3.2 カデンツ探索のアルゴリズム

本研究で提案するカデンツ探索の手順を以下に示す。なお、楽曲中の和音を先頭から順に  $c_1, c_2, \dots, c_n$  と置く。

1. 表 4.3 に示した和声進行を持つ和音列  $c_{i-1}, c_i$  を和音列の先頭から順に探索する。ただし、両和音は 1 つ以上の旋律音のアタックをその範囲内に含むことを条件とする。このとき、和声解析で推定されなかった和声機能の候補も参照し、和声解析の結果が表 4.3 に示した和声進行のいずれかに合致するならば通常のカデンツ、それ以外の和声機能の候補を用いて表 4.3 に示した和声進行を形成できるならば局所的カデンツの候補とする。なお、1 和音からなる (ドッペルドミナントが先行しない) 半終止については、 $c_i$  が V となる和音列を探索する。和音列が発見されなかった場合は探索を終了する。
2. 和音列  $c_{i-1}, c_i$  について、 $c_{i-1}$  から  $c_i$  への遷移を含み、かつ  $c_i$  からその直後の和音  $c_{i+1}$  への遷移を含まない最小のタイムスパン  $T_i$  を探索する。このようなタイムスパンが見つからなかった場合は手順 1. に戻って次の候補を探索する。
3. タイムスパン  $T_i$  の範囲を含み、 $T_i$  より大きい最小のグループ  $G_i$  を探索する。
4. タイムスパン  $T_i$  とグループ  $G_i$  の終端を比較し、両者が一致すれば和音列  $c_{i-1}, c_i$  とタイムスパン  $T_i$  をカデンツとして登録する。このとき、 $c_{i-1}$  が penult、 $c_i$  が final となる。ただし、1 和音からなる半終止については  $c_i$  のみをカデンツとする。この後、手順 1. に戻って次の候補を探索する。
5. 手順 4. で  $T_i$  と  $G_i$  の終端が一致しなかった場合は、 $T_i$  の直上のタイムスパン ( $T_i$  の範囲を含み、 $T_i$  より大きい最小のタイムスパン)  $T'_i$  について手順 3. と 4. をもう一度行う。手順 4. においてカデンツを登録できるか、または楽曲全体に対応するタイムスパンに到達するまでこれを繰り返す。その後、手順 1. に戻って次の候補を探索する。

TSRPR7で示された3つの条件i., ii., iii.については, 手順1., 2., 4. がそれぞれ対応する. まず手順1. では和声進行の条件を満たす和音列を探索するが, ここで局所的カデンツの候補も同時に探索する. ただし, タイムスパン簡約は旋律を対象に行うため, カデンツを構成する和音が鳴っている間に旋律音のアタックが起こらない場合はタイムスパン木においてカデンツを表す枝を生成できず, Cadential Retention を適用できない. したがって,  $c_{i-1}$  と  $c_i$  の少なくとも一方において, その和音への遷移の瞬間も含めてその和音が鳴っている間に旋律音のアタックが存在しなければ, Cadential Retention を適用するためのカデンツの候補にはならないことに注意が必要である.

手順2. では手順1. で発見した和音列  $c_{i-1}, c_i$  があるタイムスパンの終端にあるか否かを判断し, 終端である場合はそのようなタイムスパンの中で最小のもの  $T_i$  を選択する. ここで,  $c_{i-1}$  の始まりと  $T_i$  の始端との時間的關係には制約がなく,  $c_{i-1}$  は  $T_i$  よりも前から持続している場合もあれば,  $T_i$  の始点または範囲内のある時点から始まる場合もある. 前者の場合は,  $c_{i-1}$  の和音自体は以前から持続しているが, カデンツの構成要素として機能するのは  $T_i$  の範囲に入ってから部分のみであると解釈される.

手順4. でタイムスパン  $T_i$  とグループ  $G_i$  の終端が一致するという事は,  $G_i$  が  $T_i$  と, それに先行する1つ以上のタイムスパンを含んでいるということである.  $c_i$  が  $T_i$  の終端にあることは手順2. で確認済みであるから, これはすなわち和音列  $c_{i-1}, c_i$  が  $G_i$  における構造的終止として機能するという事を意味する.

また, 手順5. は TSRPR7 の条件 ii. における, “ $T$  の終端まで延長される” という部分に対応する. 図4.6(J. Offenbach, Orphée aux Enfers Overture) の例では, 8小節目の和音列  $A7 \rightarrow D$  ( $V_7/D \rightarrow I/D$ ) について, 手順2. で発見したタイムスパン  $T_i$  (図中, 赤色で示す) では条件 iii. を満たせないが,  $T_i$  を含むより上位のタイムスパンの中でカデンツの条件を満たすものが存在すればこの和音列をカデンツとして扱うことができる. 図中では青色のタイムスパンが条件を満たす. このように, 手順2. で発見したタイムスパン  $T_i$  より上位のタイムスパンにおいてカデンツの条件を満たすものを, 本研究では延長カデンツ (*prolonged cadence*) と呼んで区別することとする.

図 4.6: 延長カデンツの例

## 4.4 Cadential Retention

本節では，4.3 節で述べた手法によって発見したカデンツの情報を用いて，TSRPR7 (Cadential Retention) を適用してタイムスパン木を修正する手法について述べる．

本システムでは，Cadential Retention を 3 段階の処理によって実現する．まず，カデンツを構成する各和音の範囲内のピッチイベントから，それぞれの和音を代表してカデンツのヘッドを構成するピッチイベントを同定する．次に，2 つの和音からなるカデンツについてその両方のピッチイベントをひとまとまりのヘッドとして表現するために必要なタイムスパン構造の組み替えを行う．その後，入力された Time-spanXML から読み取ったタイムスパン木において TSRPR7 を適用する．すなわち，カデンツを表すピッチイベントと周辺のピッチイベントとの従属関係を必要に応じて入れ替え，カデンツがその機能を保つ限り，タイムスパン木の上位レベルまでカデンツの枝を持ち上げる．以下，4.4.1 節でカデンツのヘッドとなるピッチイベントの選択について，4.4.2 節でタイムスパン構造の組み替えについて，4.4.3 節で TSRPR7 の適用について，それぞれ述べる．

### 4.4.1 カデンツのヘッドの選択

まず，GTTM の原著 [1] において楽曲中のどこからどこまでをカデンツとするのかが明確に定義されていないため，本研究ではカデンツの範囲を以下に示すピッチイベント  $e_l$  から  $e_r$  までとして独自に定義する．ここで，タイムスパン  $T_i$  は 4.3.2 節で述べたカデンツ探索の手順において和音列  $c_{i-1}, c_i$  とともに登録したタイムスパン，すなわちこのカデンツが TSRPR7 の適用を受けてヘッドとなる最小のタイムスパンを指す．

- $e_l$  は  $T_i$  の始端にアタックを持つピッチイベントか，和音  $c_{i-1}$  への遷移以降にアタックを持つ最初のピッチイベントのうち，よりアタックが遅い方のピッチイベントである．
- $e_r$  は  $T_i$  の範囲内で最後のピッチイベントである．

以上の定義より，タイムスパン  $T_i$  は和音列  $c_{i-1}, c_i$  からなるカデンツの範囲全体を含む最小のタイムスパンと言い換えることができる．また，カデンツの範囲のうち，penult の和音が鳴っている範囲と final の和音が鳴っている範囲をそれぞれ penult の範囲，final の範囲と呼ぶこととする．

ただし，延長カデンツについては final の範囲に延長部分が含まれていることに注意が必要である．ここでは延長部分を，カデンツの範囲のうち TSRPR7 の条件 ii. を満たす最小のタイムスパンに含まれない範囲と定義する．

ここで，2 つの和音  $c_{i-1}, c_i$  から構成されるカデンツについて，そのヘッドを構成するピッチイベントの選び方を考える．本研究で扱うタイムスパン簡約は旋律のピッチイベントを対象としており，ある和音が鳴っている間に旋律のピッチイベントは複数存在できる

ため，その中からどのピッチイベントを用いてカデンツのヘッドを構成するのかを決定しなければならない．

TSRWFR3dの記述から，カデンツの final となるピッチイベント  $e_f$  は，TSRPR7 を適用するタイムスパンの直下における最後のタイムスパンのヘッドであることがわかる．

一方，penult となるピッチイベント  $e_p$  は TSRWFR3d の記述から確定することはできない．そこで，最大タイムスパン (*maximal time-span*) の概念を導入してヘッドを選択することとする．最大タイムスパンとは [18] で提案された概念であり，あるピッチイベントをヘッドとして持つ最大のタイムスパンの長さである．例えば，図 4.7 においてピッチイベント  $e_1 \sim e_4$  の最大タイムスパンは，4 分音符の長さを 1 とすると  $e_1$  から順に 4, 0.5, 1, 2 である．図中，それぞれのピッチイベントに対応する最大タイムスパンの範囲を青色で示す．

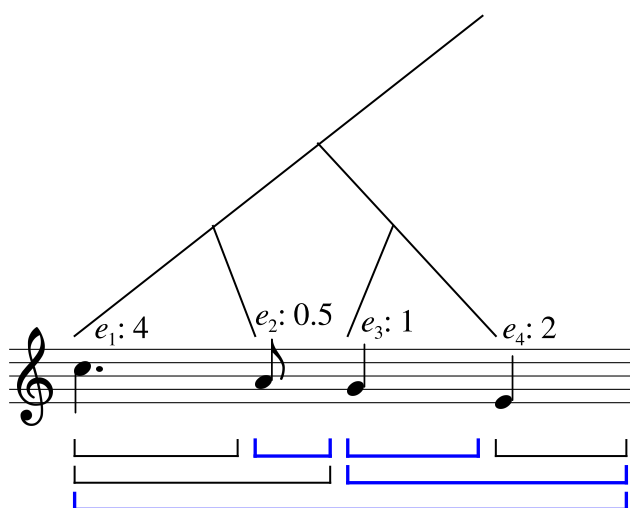


図 4.7: 最大タイムスパン

また，final のピッチイベントも同様に最大タイムスパンを用いて定義することもできるため，本研究では両者を以下の 4.13 式で定義する．ここで， $E_p$  と  $E_f$  はそれぞれカデンツの penult と final の範囲内にアタックを持つピッチイベントの集合， $mts(e)$  はピッチイベント  $e$  の最大タイムスパンである．ただし延長カデンツの場合， $E_f$  は final の範囲のうち延長部分のピッチイベントを含まないものとする．

$$\begin{aligned}
 e_p &= \arg \max_{e \in E_p} \{mts(e)\} \\
 e_f &= \arg \max_{e \in E_f} \{mts(e)\}
 \end{aligned}
 \tag{4.13}$$



## 4.4.2 タイムスパン構造の組み替え

### 組み替えの必要性

タイムスパン木において、和音列  $c_{i-1}, c_i$  からなるカデンツは、それぞれの和音の範囲を代表するピッチイベントのペアをヘッドとして表現される。このとき、そのカデンツを含む最小のタイムスパン  $T_i$  がカデンツの範囲と完全に一致していれば直接  $T_i$  のヘッドを  $e_p$  と  $e_f$  のペアにすればよい。しかし、カデンツの範囲が  $T_i$  の途中から始まっている場合は、 $T_i$  の中で  $c_{i-1}$  に先行する部分をカデンツに従属させる必要がある。規則的なグルーピング構造であれば、カデンツが弱拍から始まる男性終止の場合にこの問題が生じる。

例えば、図 4.8 (F. J. Haydn, String Quartet Op.3 No.5 Serenade) のカデンツ周辺において、(a) は本来のタイムスパン構造を示す。5~6 小節目の完全終止 D7→G は TSRPR7 の適用を受けて、4 小節目の 4 拍目から曲の最後までまでのタイムスパン (図中、赤色で示す) のヘッドとして選ばれる。しかし、カデンツの開始点は 5 小節目の 3 拍目であり、このとき 4 小節目の 4 拍目から 5 小節目の 3 拍目手前までの範囲をこのカデンツに従属させなければならない。そこで、カデンツの penult に相当する 5 小節目の 3 拍目から 6 小節目の手前までの部分と final に相当する 6 小節目全体のタイムスパンを含む新しいタイムスパン (図中、青色で示す) を導入し、図中 (b) のようにタイムスパン構造を変更すると、この従属関係を表現することができる。

図 4.8: タイムスパン構造の組み替えが必要なカデンツの例 1

また、延長カデンツにおいても final の範囲のみを支配するタイムスパンが存在しないことにより同様の問題が生じる。カデンツの延長部分はカデンツ全体に従属するものではなく final の拡張であり、final のヘッド  $e_f$  に従属するべきと考えられる。この場合も図 4.9 (J. Offenbach, Orphée aux Enfers Overture) に示すように、青色で示したタイムスパンを新たに導入して図中 (a) の構造を (b) のように変更することで、final の範囲におけるピッチイベントの従属関係を適切に表現できる。



The figure shows a musical score in 2/4 time with a key signature of one sharp (F#). The melody is in the treble clef, and the bass line is in the bass clef. Chords are indicated above the staff: 1 A7, 2 D, 3 G, 4 D, 5 A7, 6 D, 7 E7, 8 A7D. Below the score, two diagrams labeled (a) and (b) show brackets representing time spans. Diagram (a) shows a large bracket under measures 1-8 and smaller brackets under measures 1-2, 2-3, 3-4, 5-6, and 7-8. Diagram (b) shows a large bracket under measures 1-8, a smaller bracket under measures 1-2, and a blue bracket under measures 7-8.

図 4.9: タイムスパン構造の組み替えが必要なカデンツの例 2

以上のような場合にカデンツやその周辺のピッチイベント間の従属関係を表現するために、本研究では以下の手順でカデンツ周辺のタイムスパン構造を組み替える。ここで、最下位レベル以外のタイムスパンはすべて 2 分割されることを前提とし、タイムスパン  $T$  を直接含むタイムスパンを  $T$  の上位タイムスパン、 $T$  に直接含まれるタイムスパンを  $T$  の下位タイムスパンと呼ぶこととする。さらに、2 つの下位タイムスパンのうち、時系列上で先に現れる方を下位先行タイムスパン、後に現れる方を下位後続タイムスパンと呼ぶ。また、 $T_i$  は前節で述べた通り、カデンツの範囲全体を含む最小のタイムスパンである。

#### 延長カデンツに対するタイムスパン構造の組み替え

まず、延長カデンツの場合は final の範囲全体のみを含むタイムスパンを次の手順で作る。

1. 以下のように  $T_a \sim T_c$  の指すタイムスパンを初期化する。
  - カデンツの final である和音  $c_i$  の範囲内において最初のピッチイベントのアタックを始端とする最大のタイムスパンを探索し、これを  $T_b$  と置く。
  - $T_b$  の上位タイムスパンを  $T_c$  と置く。 $T_b$  は  $T_c$  の下位後続タイムスパンである。
  - $T_c$  の下位先行タイムスパンを  $T_a$  と置く。 $T_a$  は  $T_b$  の直前のタイムスパンとなる。
2.  $T_c$  の上位タイムスパンを  $T_d$  と置く。
3.  $T_c, T_d, T_i$  の構造的関係に応じて以下のいずれかを実行する。
  - (a)  $T_d$  と  $T_i$  が同一である場合
    - 1) カデンツの final 全体のみを範囲とする新たなタイムスパン  $T_f$  を導入する。

- 2)  $T_f$  の下位先行タイムスパンに  $T_b$  , 下位後続タイムスパンに  $T_i$  の下位後続タイムスパンを設定する . また ,  $T_i$  の下位先行タイムスパンに  $T_a$  , 下位後続タイムスパンに  $T_f$  を設定する .
  - 3)  $T_f$  のヘッドを final のヘッド  $e_f$  とし , 処理を終了する .
- (b)  $T_d$  と  $T_i$  が同一でなく ,  $T_c$  が  $T_d$  の下位先行タイムスパンである場合
- 1)  $T_d$  の下位先行タイムスパンを  $T_c$  から  $T_b$  に置き換える .
  - 2)  $T_b$  のヘッドが final のヘッド  $e_f$  であれば  $e_f$  を , そうでなければ  $T_d$  の下位後続タイムスパンのヘッドを , 新たに  $T_d$  のヘッドとして設定する .
  - 3)  $T_b$  と  $T_c$  をともに  $T_d$  に更新し , 手順 2. に戻る .
- (c)  $T_d$  と  $T_i$  が同一でなく ,  $T_c$  が  $T_d$  の下位後続タイムスパンである場合
- 1)  $T_d$  の下位後続タイムスパンを  $T_c$  から  $T_a$  に置き換える .
  - 2)  $T_a$  のヘッドが penult のヘッド  $e_p$  であれば  $e_p$  を , そうでなければ  $T_d$  の下位先行タイムスパンのヘッドを , 新たに  $T_d$  のヘッドとして設定する .
  - 3)  $T_a$  と  $T_c$  をともに  $T_d$  に更新し , 手順 2. に戻る .

手順 3. の (b) または (c) を経て手順 2. に一旦戻ってきた後は ,  $T_c$  は  $T_a$  と  $T_b$  のうち最後に更新された方のタイムスパンを指すことになる .

### タイムスパンの途中から始まるカデンツに対するタイムスパン構造の組み替え

$T_i$  の途中から penult の範囲が始まるカデンツに対して , カデンツの範囲全体のみを含むタイムスパンを次の手順で作る . 前述した延長カデンツに対する処理と類似しているが , 初期化やヘッドの選び方に違いがある .

1. 以下のように  $T_a \sim T_c$  , および  $T_f$  の指すタイムスパンを初期化する .
  - カデンツの penult である和音  $c_{i-1}$  の範囲内において最初のピッチイベントのアタックを始端とする最大のタイムスパンを探索し , これを  $T_b$  と置く .
  - $T_b$  の上位タイムスパンを  $T_c$  と置く .  $T_b$  は  $T_c$  の下位後続タイムスパンである .
  - $T_c$  の下位先行タイムスパンを  $T_a$  と置く .  $T_a$  は  $T_b$  の直前のタイムスパンとなる .
  - カデンツの final の範囲全体に相当するタイムスパンを  $T_f$  と置く .
2.  $T_c$  の上位タイムスパンを  $T_d$  と置く .
3.  $T_c, T_d, T_i$  の構造的関係に応じて以下のいずれかを実行する .
  - (a)  $T_d$  と  $T_i$  が同一である場合
    - 1) カデンツ全体のみを範囲とする新たなタイムスパン  $T_n$  を導入する .

- 2)  $T_n$  の下位タイムスパンが  $T_b$  と  $T_f$ ,  $T_i$  の下位タイムスパンが  $T_a$  と  $T_n$  となるようにタイムスパンの包含関係を設定する.
  - 3)  $T_n$  および  $T_i$  のヘッドを,  $T_b$  と  $T_f$  のヘッド, すなわち  $e_p$  と  $e_f$  のペアとし, 処理を終了する.
- (b)  $T_d$  と  $T_i$  が同一でなく,  $T_c$  が  $T_d$  の下位先行タイムスパンである場合
- 1)  $T_d$  の下位先行タイムスパンを  $T_c$  から  $T_b$  に置き換える.
  - 2)  $T_b$  のヘッドが penult のヘッド  $e_p$  であれば  $e_p$  を, そうでなければ  $T_d$  の下位後続タイムスパンのヘッドを, 新たに  $T_d$  のヘッドとして設定する.
  - 3)  $T_b$  と  $T_c$  をともに  $T_d$  に更新し, 手順 2. に戻る.
- (c)  $T_d$  と  $T_i$  が同一でなく,  $T_c$  が  $T_d$  の下位後続タイムスパンである場合
- 1)  $T_d$  の下位後続タイムスパンを  $T_c$  から  $T_a$  に置き換える.
  - 2)  $T_d$  のヘッドが  $T_b$  のヘッドと同一のピッチイベントである場合は, その代わりに  $T_a$  のヘッドを新たに  $T_d$  のヘッドとして設定する.
  - 3)  $T_a$  と  $T_c$  をともに  $T_d$  に更新し, 手順 2. に戻る.

実際の楽曲では, 以上の手順において繰り返し処理が必要になるような複雑な構造がカデンツ部分に現れることは考えづらいが, 理論上はあるタイムスパンの範囲内でどの時点からカデンツ, あるいは延長カデンツにおける final が始まっても適切にタイムスパン構造を操作できるようにアルゴリズムを構築している.

図 4.10 に, このアルゴリズムを適用してタイムスパン構造を組み替える様子を示す. 図中 (1) が入力された変更前のタイムスパン構造であり, (4) に向けて順に操作を行う.

#### 4.4.3 TSRPR7 の適用

前節で述べた方法によって組み替えたタイムスパン構造では, あるカデンツに対して必ずその範囲全体に相当するタイムスパンが存在する. このタイムスパンを  $T_c$  と置き, 以下の手順によって TSRPR7 を適用する.

1. カデンツが 2 つの和音から構成されるならば,  $T_c$  のヘッドを  $e_p$  と  $e_f$  のペアとする ( $T_c$  が前節で新たに導入したタイムスパンである場合は既に設定されている). カデンツが 1 つの和音からなる半終止ならば,  $T_c$  のヘッドを  $e_f$  とする.
2.  $T_c$  の上位タイムスパンを  $T$  と置く.
3.  $T$  の上位タイムスパンが存在しないか, あるいは  $T$  が  $T$  の上位タイムスパンの下位先行タイムスパンであれば処理を終了する.
4.  $T$  のヘッドを  $T_c$  のヘッドで上書きする.

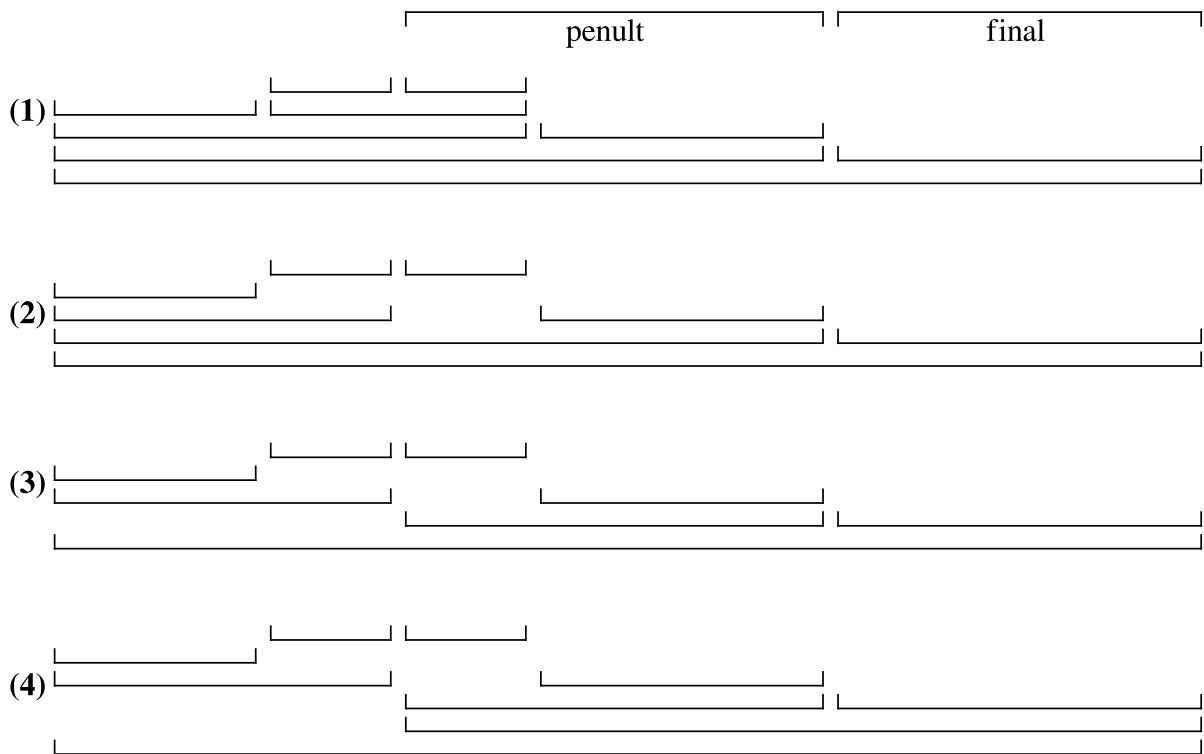


図 4.10: タイムスパン構造の組み替え過程

5. カデンツが2つの和音から構成される場合は、 $T$  の下位先行タイムスパンがカデンツ全体に対して従属することを示すために egg 記号をマークする。

6.  $T$  をその上位タイムスパンと置き換えて手順 3. に戻る。

手順 3. におけるどちらかの条件を満たした場合、そのカデンツはそれ以上カデンツとして機能しないことを意味する。このとき、Cadential Retention の後処理として、TSRPR8 (Structural Beginning) と TSRPR9 の適用を考えなければならない。TSRPR8 はあるタイムスパンがより大きなグループにおいて構造的開始として機能するならばそのヘッドとしてより早い位置にあるピッチイベントを選好するルールであり、TSRPR9 は楽曲全体のヘッドとしてその構造的終止を選好するルールである。

手順 3. において、 $T$  が  $T$  の上位タイムスパンの下位先行タイムスパンであるという条件を満たした場合は、カデンツの定義より  $T$  はあるグループの先頭のタイムスパンであることを意味する。構造的開始はカデンツを含むような大きなレベルのグループにおいてカデンツを構造的終止としたときにそれに対応するものであるから、 $T$  のヘッドとして選ばれたピッチイベントは、さらに大きなレベルのグループにおいて構造的開始として機能すると考えることができる。そこで、カデンツよりも早い位置にある  $T$  の下位先行タイムスパンのヘッドを  $T$  のヘッドとすることで TSRPR8 を適用する。

手順 3. において、 $T$  の上位タイムスパンが存在しないという条件を満たした場合は、 $T$

が楽曲全体に相当するタイムスパンに到達したことを意味する．この場合は TSRPR9 を適用するために， $T$  のヘッドをカデンツの final とする．

## 4.5 Time-spanXML におけるカデンツ構造の表現

exGTTM [9] から出力される Time-spanXML は，タイムスパン木の表現形式であるが，TSRWFR3a で定義された Ordinary Reduction，すなわち 2 つのピッチイベントを比較してその一方をヘッドとする簡約方法しか表現できない．本研究では Cadential Retention によって 2 つのピッチイベントのペアをヘッドとすることや，そのペアに従属する枝に egg 記号を付加することを XML 形式で適切に表現するために，Time-spanXML 形式の拡張を行う．

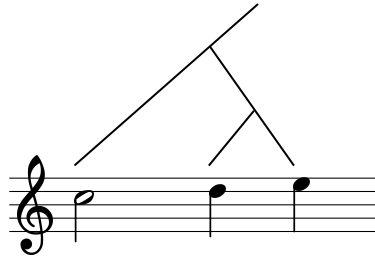
まず，従来の Time-spanXML 形式について解説する．Time-spanXML で用いられる要素を表 4.4 にまとめる．

表 4.4: Time-spanXML の要素

要素名	説明
ts	あるタイムスパンを表す．タイムスパンの両端の位置を表す leftend 属性と rightend 属性，および長さを表す timespan 属性を持ち，これらの値は四分音符の音価を 1.0 とする小数で表される．
head	ts 要素の子要素となり，タイムスパンのヘッドを表す．
chord	head 要素の子要素となり，ヘッドを構成する音符のラッパーである．ピッチイベントの長さを表す duration 属性を持ち，ts 要素の各属性と同じく四分音符の音価を 1.0 とする小数で表される．
note	chord 要素の子要素となり，ヘッドを構成する音符を表す．音符は id 属性で表される．
primary	ts 要素の子要素となり，ts 要素で表されたタイムスパン $T$ の下位タイムスパンのうち， $T$ のヘッドが含まれる方を指す．別の ts 要素を子要素に持つ．
secondary	ts 要素の子要素となり，ts 要素で表されたタイムスパン $T$ の下位タイムスパンのうち， $T$ のヘッドが含まれない方を指す．別の ts 要素を子要素に持つ．

ここで，chord 要素については，将来的に単音以外のピッチイベントを表現するために設定されているものと思われる．現状では旋律として同時に 1 つのピッチしか存在しないもののみを考えているため，1 つの chord 要素に含まれる note 要素は 1 つだけである．

この Time-spanXML による簡単なタイムスパン木の表現の例を図 4.11 に示す．primary 要素や secondary 要素を子要素に持たない ts 要素は，タイムスパン木における葉に相当する．



```

<ts leftend="0.0" rightend="4.0" timespan="4.0">
  <head><chord duration="2.0"><note id="P1-1-1" /></chord></head>
  <primary>
    <ts leftend="0.0" rightend="2.0" timespan="2.0">
      <head><chord duration="2.0"><note id="P1-1-1" /></chord></head>
    </ts>
  </primary>
  <secondary>
    <ts leftend="2.0" rightend="4.0" timespan="2.0">
      <head><chord duration="1.0"><note id="P1-1-3" /></chord></head>
      <primary>
        <ts leftend="3.0" rightend="4.0" timespan="1.0">
          <head><chord duration="1.0"><note id="P1-1-3" /></chord></head>
        </ts>
      </primary>
      <secondary>
        <ts leftend="2.0" rightend="3.0" timespan="1.0">
          <head><chord duration="1.0"><note id="P1-1-2" /></chord></head>
        </ts>
      </secondary>
    </ts>
  </secondary>
</ts>

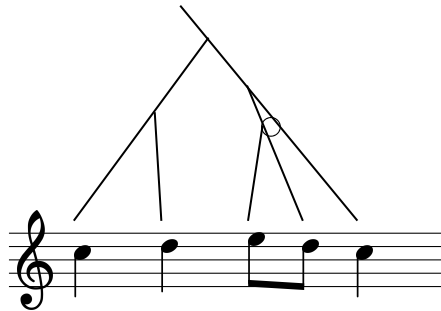
```

図 4.11: Time-spanXML の記述例

本研究では，この Time-spanXML において，2つのピッチイベントのペアをヘッドとするタイムスパンを表す `ts` 要素の子要素に対して以下の拡張を行う．

- `head` 要素に `bound` 属性を付加し，その値には通常のカデンツであれば “non-local”，局所的カデンツであれば “local” を設定する．
- `head` 要素には子要素の `chord` 要素を 2つ持たせ，これらの `chord` 要素に `func` 属性を付加し，その値はカデンツの `final` のピッチイベントを表す方に “final”，`penult` のピッチイベントを表す方に “penult” をそれぞれ設定する．
- `secondary` 要素に `symbol` 属性を付加し，その値には従属先のカデンツが完全終止または偽終止であれば “egg”，半終止であれば “half-egg” を設定する．

以上を基に，カデンツ構造を表現した例を図 4.12 に示す．



```

<ts leftend="0.0" rightend="4.0" timespan="4.0">
  <head><chord duration="1.0"><note id="P1-1-5" /></chord></head>
  <primary>
    <ts leftend="2.0" rightend="4.0" timespan="2.0">
      <head bound="non-local">
        <chord duration="1.0" func="final"><note id="P1-1-5" /></chord>
        <chord duration="0.5" func="penult"><note id="P1-1-4" /></chord>
      </head>
      <primary>
        <ts leftend="2.5" rightend="4.0" timespan="1.5">
          <head bound="non-local">
            <chord duration="1.0" func="final"><note id="P1-1-5" /></chord>
            <chord duration="0.5" func="penult"><note id="P1-1-4" /></chord>
          </head>
          <primary>
            <ts leftend="3.0" rightend="4.0" timespan="1.0">
              <head><chord duration="1.0"><note id="P1-1-5" /></chord></head>
            </ts></primary>
            <secondary>
              <ts leftend="2.5" rightend="3.0" timespan="0.5">
                <head><chord duration="0.5"><note id="P1-1-4" /></chord></head>
              </ts></secondary></ts></primary>
            <secondary symbol="egg">
              <ts leftend="2.0" rightend="2.5" timespan="0.5">
                <head><chord duration="0.5"><note id="P1-1-3" /></chord></head>
              </ts></secondary></ts></primary>
          </primary>
        </ts></primary>
      </ts></primary>
    </ts></primary>
  </ts></primary>
  <secondary>
    <ts leftend="0.0" rightend="2.0" timespan="2.0">
      <head><chord duration="1.0"><note id="P1-1-1" /></chord></head>
      <primary>
        <ts leftend="0.0" rightend="1.0" timespan="1.0">
          <head><chord duration="1.0"><note id="P1-1-1" /></chord></head>
        </ts></primary>
        <secondary>
          <ts leftend="1.0" rightend="2.0" timespan="1.0">
            <head><chord duration="1.0"><note id="P1-1-2" /></chord></head>
          </ts></secondary></ts></secondary></ts>
    </ts></secondary>
  </ts></secondary>
</ts>

```

図 4.12: Time-spanXML におけるカデンツ構造の表現

## 第5章 楽曲解析実験

本節では，4節で述べた提案手法を実装したシステムを用いた実験について述べる．まず，5.1節で実験に使用した楽曲データについて述べ，次いで5.2節で実験結果を紹介し，その考察を行う．

### 5.1 使用データ

図4.1に示した通り，本システムは和音の情報を含んだMusicXMLと，それをexGTTMで解析したGroupingXML，およびTime-spanXMLを入力とする．3.1節でも述べたように，exGTTMはモノフォニーを前提としているため，本システムに入力するXMLも和音の情報を用いずに解析されたデータである．

本研究では実験用のデータとして，[17]で公開されているクラシック音楽から切り出した300フレーズ分のMusicXMLとexGTTMによるその解析結果のうち，松山による[19]にコードネーム付きの楽譜が掲載されている127フレーズ分のデータを用いた．なお，付録Aにその一覧を示す．

コードネームは各フレーズのMusicXMLに対して，オープンソースの楽譜作成ソフトウェアであるMuseScore ver.2.1.0 [20]を用いて手作業で入力した．4節において図で例示した楽譜は，このようにして作成したデータの一部を用いている．

### 5.2 解析結果と考察

本節では，本システムによる楽曲の解析結果を示し，その考察を述べる．和声解析とCadential Retentionの2つの観点から解析結果を評価するために，5.2.1節で和声解析とカデンツ探索，5.2.2節でCadential Retentionにそれぞれ着目する．

ただし，1節や2.2.1節でも述べたように，音楽は言語と違ってある楽曲に対して多様な解釈が考えられることがここで問題となる．ある一楽曲の解析結果に対して個人の音楽的直観による定性的な評価を与えることはある程度可能ではあるが，唯一の正解が存在しないことから，多くの楽曲の解析結果を総合して定量的な評価を与えることは現時点では困難である．したがって，ここでは基本的に代表的な解析結果を紹介し，個々の結果に対して解説や考察を行うこととする．



## 5.2.1 和声解析とカデンツ探索

### TPS の改良に伴う影響

本研究における和声解析を評価するにあたってまず考えなければならないのは、4.2.1 節で述べた TPS の改良に伴う影響である。特に、和音間距離の変化や、それによる調空間のねじれの増大が和声解析に悪影響を及ぼしていないかを検討する必要がある。そこで、本研究で TPS に加えた和声的短音階への限定、ドミナント機能を持つ和音候補の拡大、ベーシックスペースへのレベルの追加の3種類の改良について、それぞれの有無を切り替えて 127 フレーズの和声解析を行い、その結果を比較した。

このうち、ドミナント機能を持つ和音候補の拡大は与えられたコードネームに対する和声機能の解釈の候補にのみ影響し、和音間距離には直接関係がない。また、従来の自然的短音階から和声的短音階へ変更すると和音間距離への影響はあるものの、同時に和声機能の候補も変化するため、両音階に基づいた解析結果が異なっていた場合に距離の変化と候補の変化の影響を分離することが難しい。なお、和声機能の候補の変化は解析結果の差に大きく現れており、TPS の改良によって特に短調におけるドミナントモーションをより多く発見可能になった。

和音間距離の変化による影響については、ベーシックスペースへのレベル追加の有無に関する比較に基づいて論じる。短音階の種類とドミナント和音の拡張の有無の2条件を揃えて、ベーシックスペースのレベル構造のみを変化させた解析結果を比較したところ、127 フレーズのうち 10 フレーズにおいて解析によって得られた和声進行に相違が見られた。しかし、その結果の相違から解析精度の向上や低下といった一般的な傾向を見出すことはできず、レベルの追加による影響の現れ方は前後の文脈によるという評価の域を出ない。一般論として、ベーシックスペースのレベルを増やすということは、従来のベーシックスペースに比べてある和音の主音、第5音、第3音の相対的な重要度がさらに増すことになり、その結果として距離を計測する和音間でこれらの音が共有されている場合とそうでない場合の距離の差が増大するということと言える。

また、レベルの追加による解析結果の変化は、ごく局所的な転調を伴った調性的に不安定な部分に生じたものが大半であり、このような部分がアルゴリズムの調節によって影響を受けやすいのは自然なこととも言える。直接的に和声進行の区切りであるカデンツの発見に影響するものは見られなかったことから、Cadential Retention を目的としたカデンツ探索という観点に限れば、和音間距離の変化によって生じる悪影響は考えられない。

### 解析結果と考察

以下、3種類の改良を加えた TPS に基づいた代表的な解析結果をいくつか示し、それらの解説を行う。和声解析グラフにおいて、実線で繋いだノードが和声解析で推定された和声機能を示しており、青色のノードは通常のカデンツ、赤色のノードは局所のカデンツを示す。

図 5.1 は F. Schubert , Moments Musicaux の解析結果である . このフレーズは基本的に F minor だが , 途中にある F7→Bbm の進行のために部分的に転調している . 解析結果を見ると , 最後の C7→Fm が完全終止 V<sub>7</sub>/f → i/f と解釈されている . これは短調を和声的短音階と見なし , C7 を F minor 上の和音と認識できるようになったことで発見できたカデンツである .

しかし , 前半 4 小節の最後に現れる同様の C7→Fm については Fm が iii/D<sub>b</sub> と解釈されており , V<sub>7</sub>/f → i/f は局所的カデンツとして発見されてしまっている . これは , 直後の D<sub>b</sub> 以降の部分転調に Fm の解釈が引きずられていることが原因と考えられるため , 与えられた和音列をひとまとまりにして解析するだけでなく , GTTM で解析されるグルーピング構造に基づいて小部分に分割し , その局所的な和声解析の結果を組み合わせることで改善できる可能性がある .

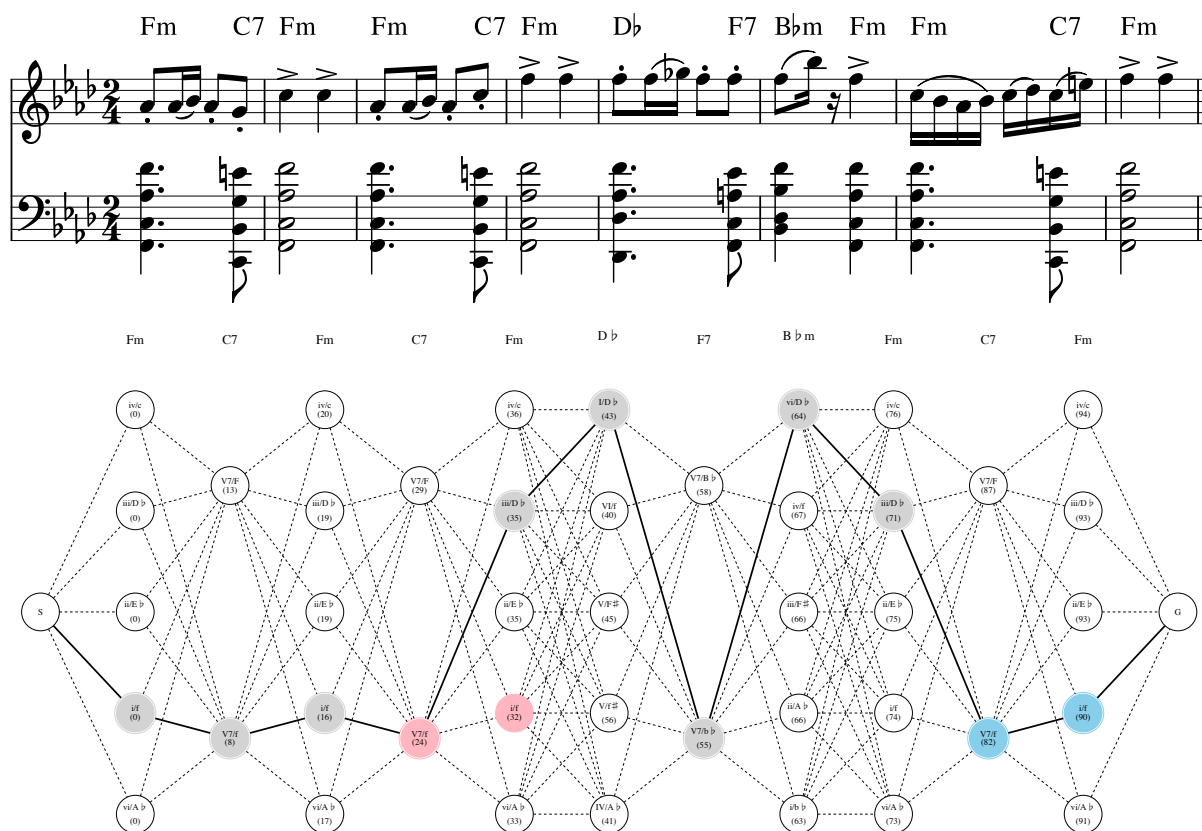


図 5.1: 和声解析結果 1 (F. Schubert , Moments Musicaux)

図 5.2 は F. Chopin , The Preludes , op.28-15 の解析結果である . このフレーズは V<sub>7</sub>/D<sub>b</sub> と I/D<sub>b</sub> のみからなっており , 和声機能のみを見ればすべての Ab7→D<sub>b</sub> が完全終止の進行である . しかし , タイムスパンとグルーピングの構造に関する条件と組み合わせることで , グループの構造的終止として機能するものだけをカデンツとして選び出すことができる .



図 5.3 は G. F. Händel , Harmonious Blacksmith , HWV430 の解析結果の一部である . このフレーズは E major だが , 和音の多くが属調の B major にも当てはまる . 最初の E から 6 番目の B (2 小節目の 3 拍目) までをすべて E major とする解釈と B major とする解釈を比較すると , その和音間距離の総和はどちらも 43 で等しいため , ドッペルドミナントの F#7 に引きずられて B major と解釈されている . ただし , その後に現れる A の和音が B major に合致しないことから , B major のまま解釈を続けるとコストが増大するため , F#7 に続く B の和音から調解釈が E major に切り替わったと考えられる . その結果 , ドッペルドミナントを伴う半終止  $V_7/B \rightarrow V/E$  の発見には成功しているものの , それ以前の部分に対する和声解析については改良の余地が残る .

このケースでは , より大域的な視点で上位グループを支配する調との関係を参照することで最初の部分も E major としての解釈が可能となる可能性があるが , そのような解析を行うためには , GTTM のサブ理論間の安定性に関する PR と同様なフィードバックの仕組みが簡約と和声解析の間で必要になる .

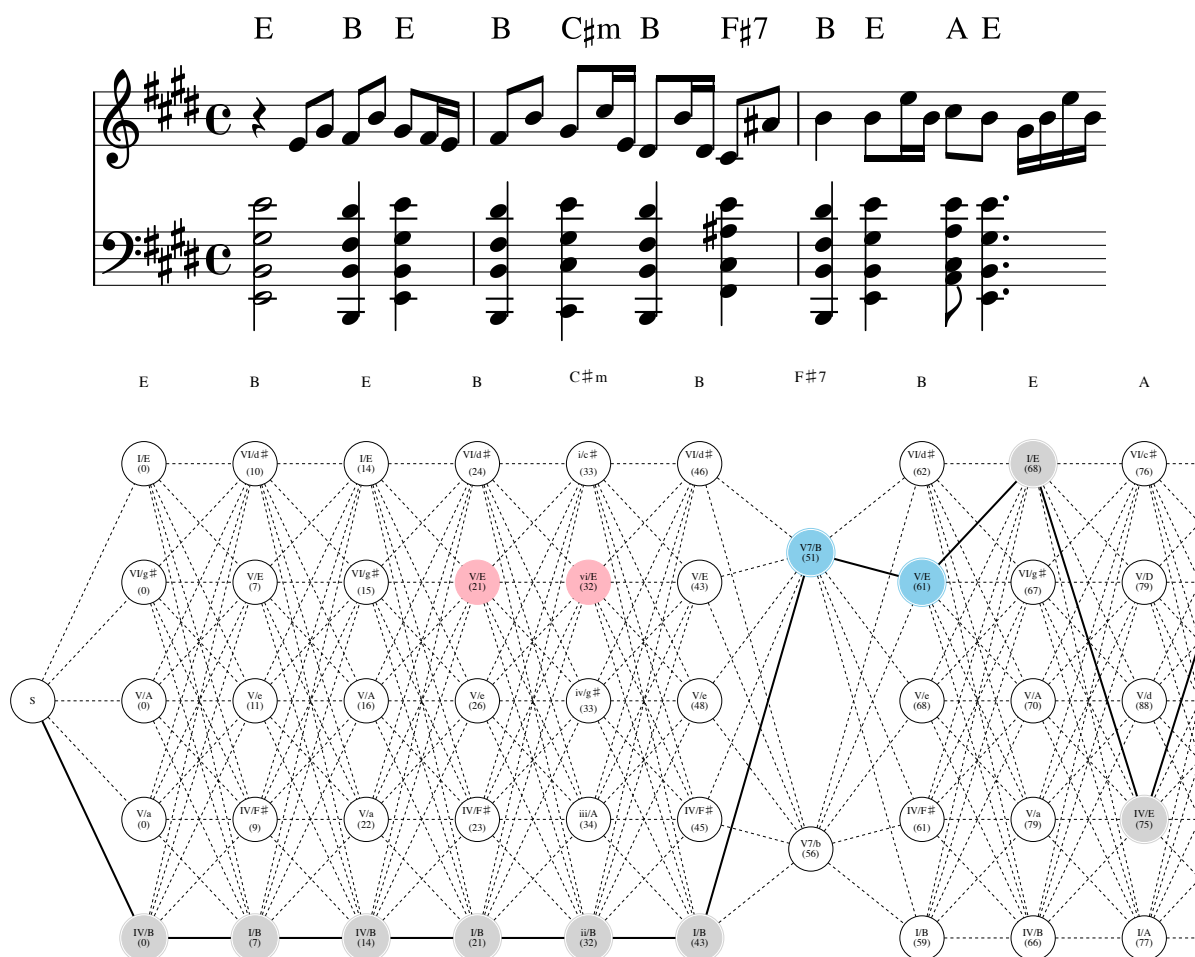


図 5.3: 和声解析結果 3 (G. F. Händel , Harmonious Blacksmith)

図 5.4 は P. Tchaikovsky, Symphony No.6 “Pateticheskaya”, Op.74 の解析結果である。ここでは局所的カデンツが 2 つ発見されている。1 つ目は D の和音単独からなる局所的半終止として解釈されているが、これは本研究で提案した局所的カデンツの定義上、グループの最後にある長三和音が他の種類の局所的カデンツとしての条件を満たさなければ、それが必ず局所的半終止となるためである。これは局所的終止の条件が緩すぎるようにも考えられ、音楽学的見地から検討が必要と思われる。

2 つ目は  $C\sharp dim \rightarrow D$  が根音省略形体のドッペルドミナントを伴う局所的半終止  $X_7/d \rightarrow V/g$  として解釈されている。この部分はフレーズ中の一区切りと考えることが可能であり、そのような直観を反映できていると言える。ここで、和声解析で推定された進行は  $X_7/D \rightarrow I/D$  であり、完全終止を構成するドミナントの候補から根音省略形体が排除されていることで代わりに局所的終止としての解釈が生じたということになる。

なお、局所的カデンツの解析例として、4.3.1 節で例示した R. Wagner, Tannhauser Overture (図 4.5) も参照されたい。

局所的カデンツは解釈の幅を広げるといって意義のあることと考えるが、本研究の実験で発見された局所的カデンツの中には、図 5.1 に示した F. Schubert, Moments Musicaux の例のように、和声解析のさらなる改良によって、推測された和声機能に基づいた本来のカデンツとして認識されるべきと思われるものもある。また、4.3.1 節でも述べたように、局所的カデンツの妥当性や簡約における扱い方についても検討の必要がある。

Musical score for Symphony No. 6, Op. 74, showing a sequence of chords: D, G#dim, D, A7, D, F#dim, Em, C#dim, D, G#m7-5, D, A7, D. The score includes a treble clef staff with a melodic line and a bass clef staff with a bass line.

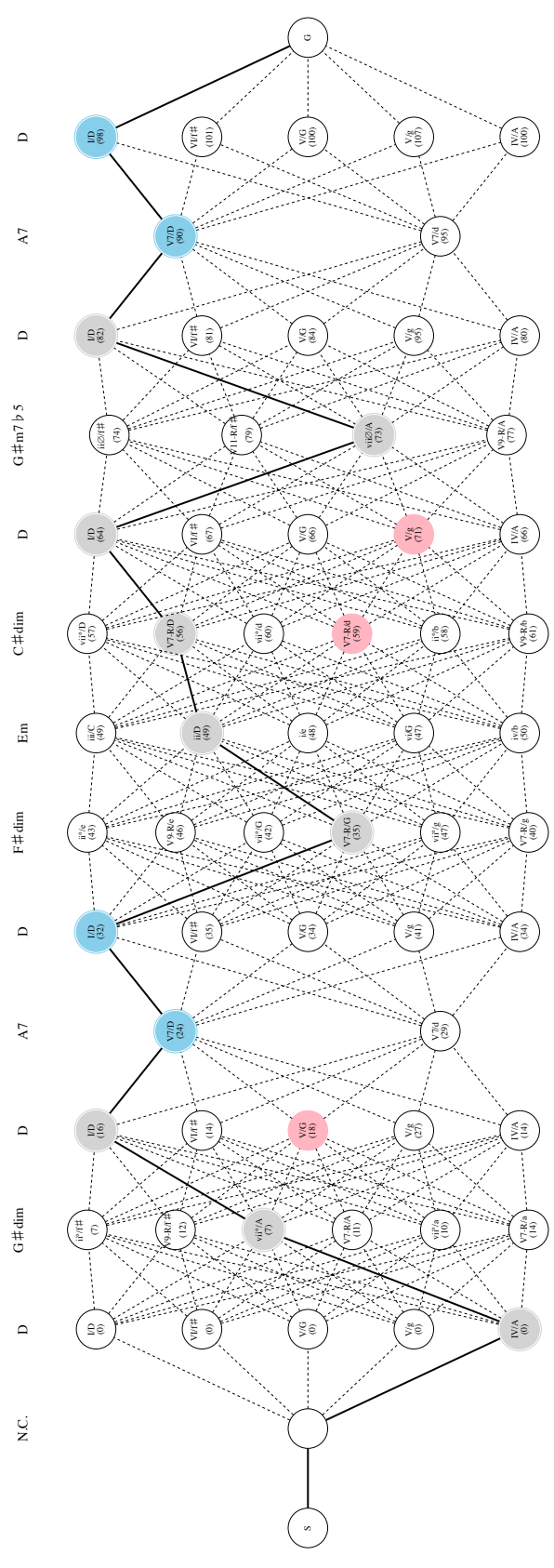


图 5.4: 和声解析結果 4 (P. Tchaikovsky, Symphony No.6 “Pateticheskaya”, Op.74)

## 5.2.2 Cadential Retention

本節では Cadential Retention の適用によるタイムスパン木の修正結果をいくつか示し、その解説を行う。タイムスパン木においてはカデンツのヘッドに対応する枝を、通常のカデンツは青色、局所的カデンツは赤色で示している。また、楽曲は exGTTM の解析器でも用いられているピアノロール形式で概形を示している。

図 5.5 は F. Chopin, *The Preludes*, op.28-15 の解析結果である。図 5.2 に示したように、このフレーズには 4 箇所の完全終止  $V_7/D^b \rightarrow I/D^b$  が認識されている。このうち、2 つ目と 4 つ目のカデンツは penult と final のペアに対して従属する他のピッチイベントを持つため、そのイベントを示す枝への分岐には egg 記号を伴う。一方、1 つ目と 3 つ目のカデンツが機能するのは 2 小節レベルのグループのみであり、それ以上のレベルではカデンツの条件を満たさなくなることから、これらのカデンツには egg 記号が付随しない。

また、最後のカデンツは TSRPR9 によってその final が楽曲全体のヘッドとなっており、その他のカデンツは TSRPR8 によってそれぞれ対応する構造的開始のピッチイベントに従属している様子が見られる。

図 5.6 は R. Wagner, *Tannhauser Overture* の解析結果である。図 4.5 に示したように、このフレーズは中間部に局所的偽終止が認識されており、これを通常のカデンツと同等に扱った結果が図 5.6(b) である。局所的カデンツを考慮しない場合は、(b) において赤色で示した局所的カデンツの枝に従属する部分は Cadential Retention の影響を受けないため、(a) の構造を保つことになる。

この局所的カデンツの penult は 3 小節目の途中から始まっている。そこで、penult と先行する  $IV/E^b$  の間でタイムスパンが分かれるように構造を組み替えることで、カデンツの範囲のみに対応するタイムスパンを生成し、penult と final をひとまとめにする木構造を実現できている。

また、最後のピッチイベントはフレーズ全体に対して機能する、ドッペルドミナントに先行されない半終止である。このような半終止は 2 つのピッチイベントをひとまとめにする必要がないため、単にカデンツとしての機能を果たす限り上位レベルまでヘッドとして選び続けられれば良い。この場合は入力全体に対するカデンツであるから、TSRPR9 により全体のヘッドとなっている。

図 5.7 は G. Verdi, *Aida Grand March* の解析結果である。このフレーズは前半部分の最後がドッペルドミナントを伴う半終止  $V_7/B^b \rightarrow V/E^b$  となっており、これを完全終止や偽終止と同様に 2 つの和音からなるカデンツとして扱った様子が見られる。

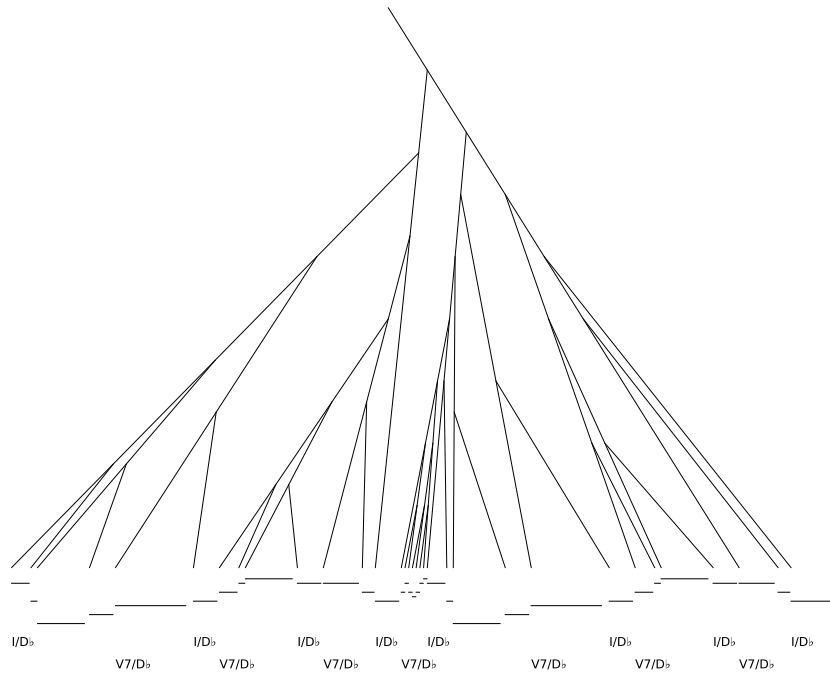
図 5.8 は G. Lange, *Blumenlied*, Op.39 の解析結果である。図 5.9 に示した楽譜の通り、このフレーズは弱起から始まっている。解析結果からは最初の  $V_7/F \rightarrow I/F$  が完全終止として認識されていることがわかるが、これは 1 小節目の 6 拍目から始まる延長カデンツとなっている(図 5.9 に該当するタイムスパンを示す)。このカデンツは弱起によってグループの境界と和音の境界がずれているために検出されたと思われる、本来の規則的なリズム構造であれば TSRPR7 の条件 iii. を満たさず、カデンツとならないはずの部分である。この

ような弱起を含むフレーズにおけるカデンツ探索では、弱起部分の扱いについて改良の余地が残る。

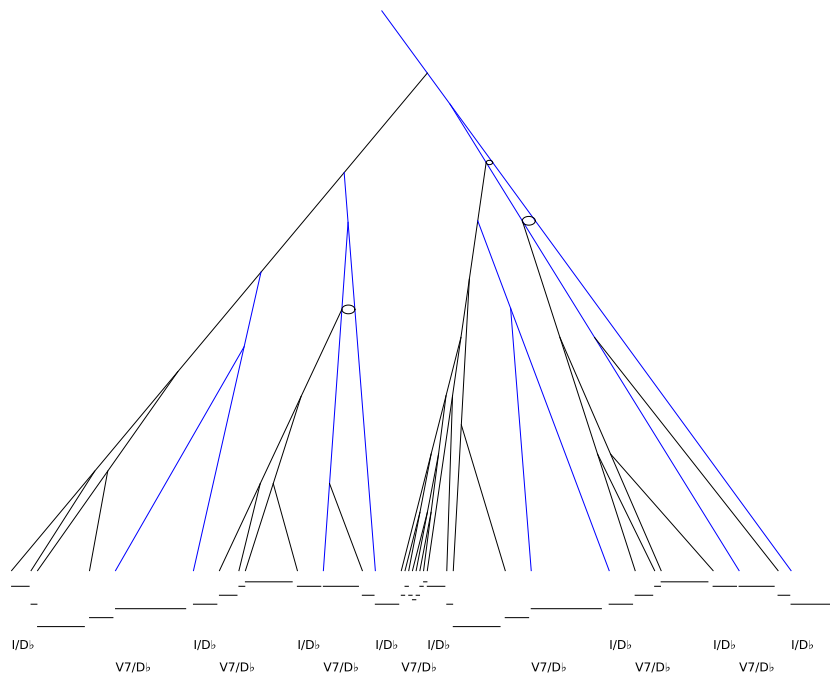
以上、代表的な解析例を示してきたが、全 127 フレーズの解析結果から、発見できたカデンツについては Cadential Retention を想定通りに適用でき、カデンツ構造を反映したタイムスパン木を生成できているように思われる。しかし、前述したカデンツ探索と弱起の問題に加えて、タイムスパン木における各分岐の構造レベルが未決定であるという問題が残っている。構造レベルはある分岐がどの拍節レベルに対応するかを示すものであり、タイムスパン簡約の結果を適切なリズムでレンダリングするために必要になるほか、GTTM における最後のサブ理論であるプロロンゲーション簡約においてトップダウンの解析を行うためにも構造レベルの情報が必須である。

構造レベルはタイムスパン分割の時点で各タイムスパンに正しく与えておき、Cadential Retention において 2 つのピッチイベントのペアをヘッドとする場合にその penult と final の結合点に特別なレベルを与えるべきと考えられる。具体的には、Segmentation Rule 2b で決定される標準タイムスパンにはそれを決定した拍節レベルと同じ値の構造レベルを与え、その標準タイムスパンを含む拡大タイムスパンには 0.5 大きい構造レベルを与える。そして、2 つのピッチイベントからなるカデンツ全体に相当するタイムスパンについては、それが従属する先の上位タイムスパンより 0.5 小さい構造レベルを与えて他の規則的なタイムスパンと差別化するという方法が考えられる。しかし、exGTTM の解析器において弱起を含む場合のタイムスパン分割が正しく行われておらず、今回の実験に用いたデータでは計算された理論上の構造レベルと実際に入力される構造との整合性を確保できないことから、構造レベルの決定を見送った。



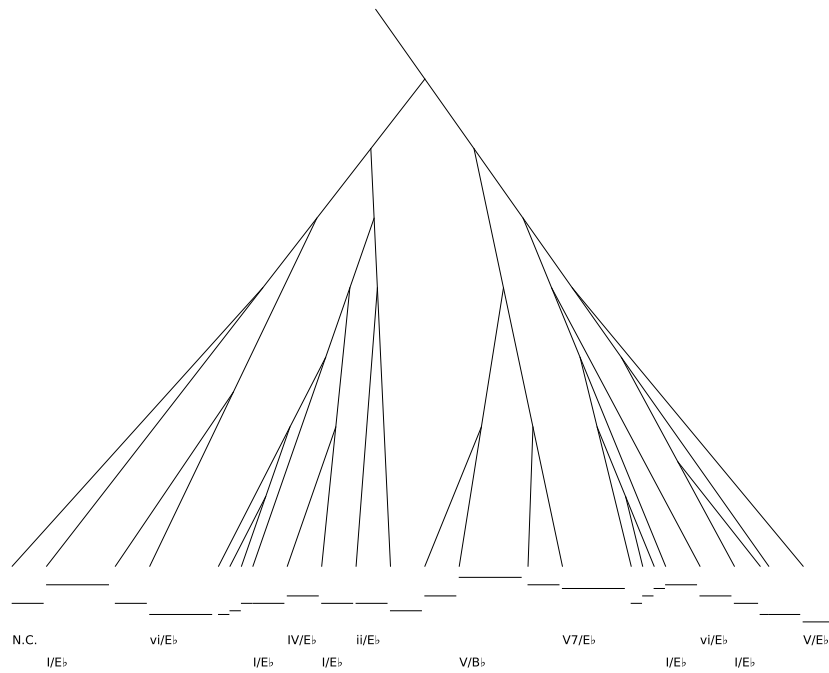


(a) 適用前

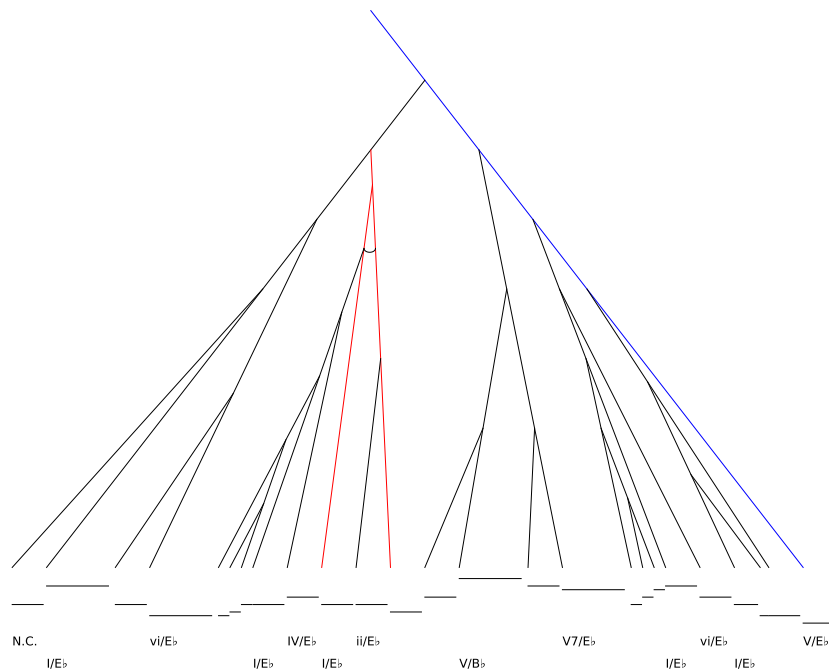


(b) 適用後

図 5.5: Cadential Retention の適用結果 1 (F. Chopin , The Preludes , Op.28-15)

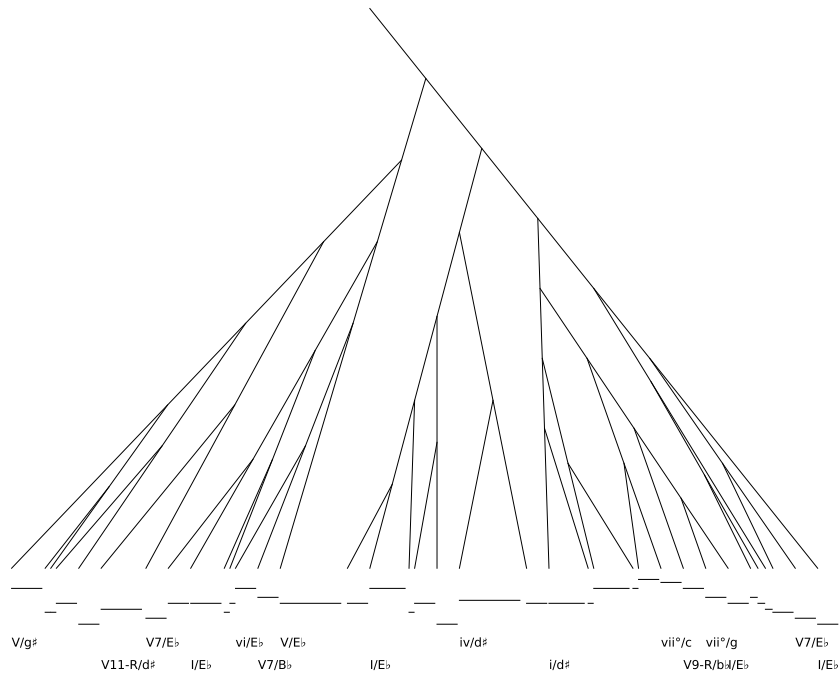


(a) 適用前

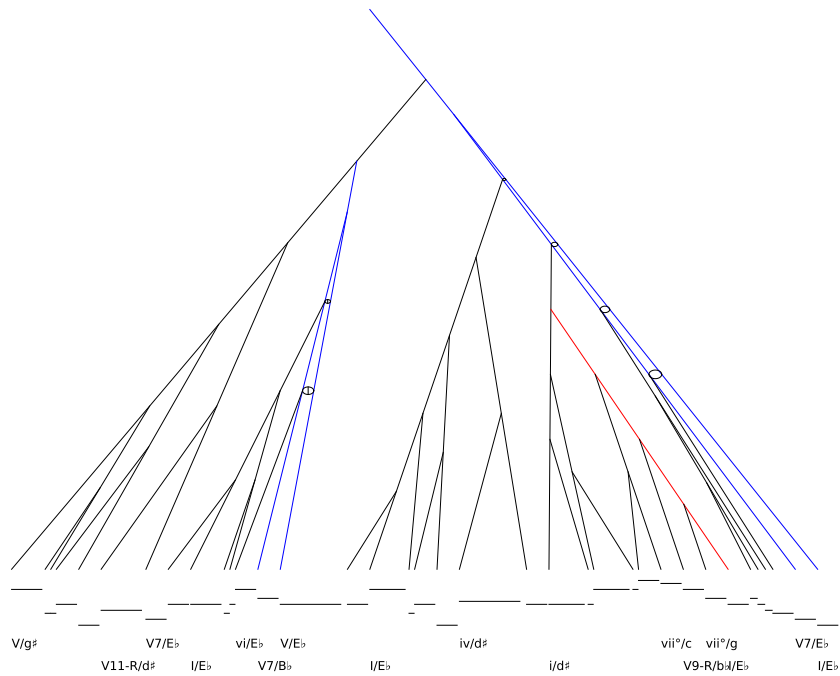


(b) 適用後

図 5.6: Cadential Retention の適用結果 2 (R. Wagner , Tannhauser Overture)

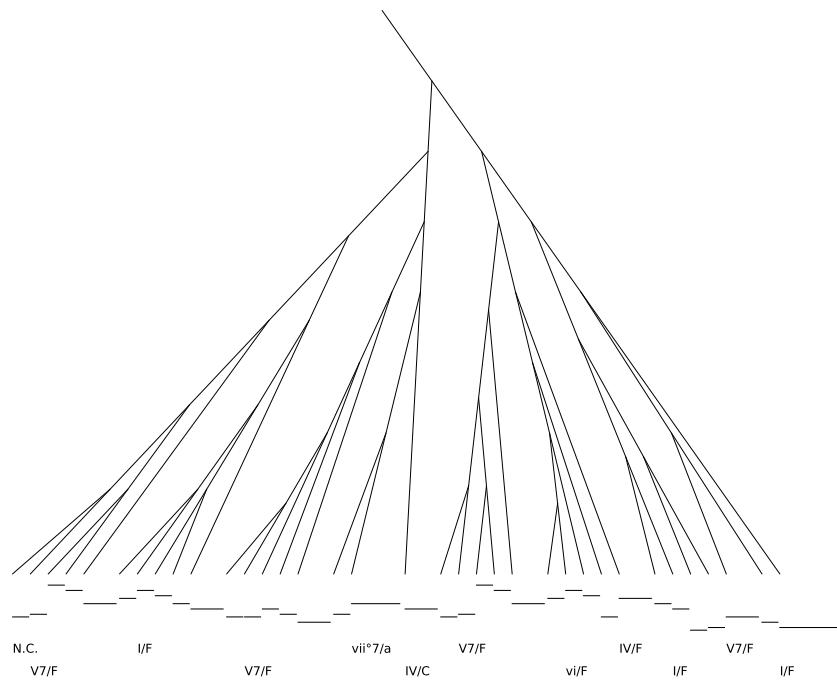


(a) 適用前

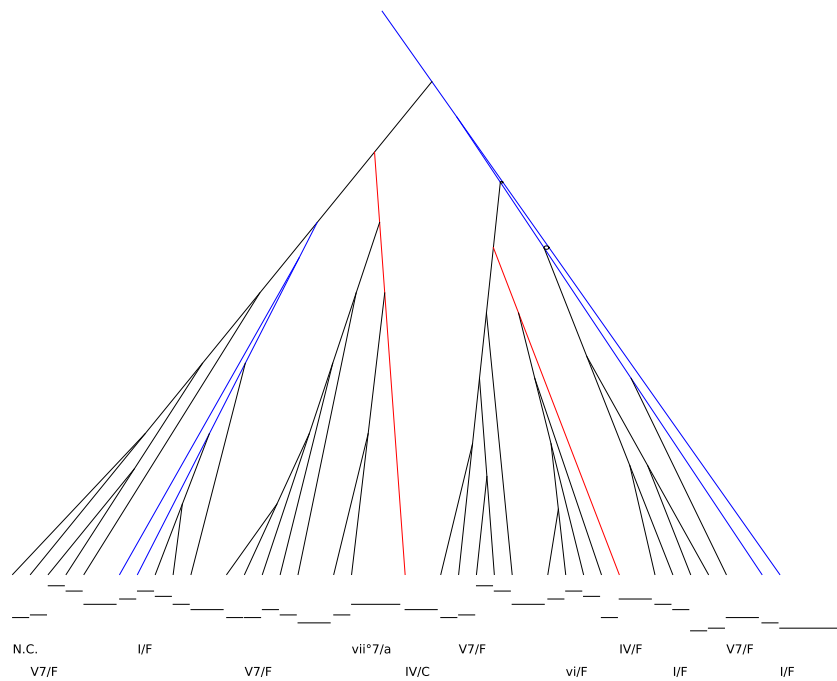


(b) 適用後

図 5.7: Cadential Retention の適用結果 3 (G. Verdi , Aida Grand March)



(a) 適用前



(b) 適用後

図 5.8: Cadential Retention の適用結果 4 (G. Lange , Blumenlied , Op.39)

C7    F    C7    Fdim7F    C7    Dm B $\flat$     F    C7    F

図 5.9: G. Lange , Blumenlied , Op.39 の楽譜

## 第6章 結論

本研究では、音楽理論 GTTM [1] における Cadential Retention を実装し、和声情報、特にカデンツの構造を含んだ楽曲解釈の自動獲得を実現した。本研究では先行研究 exGTTM [9] の解析器から出力された和声情報を含まないタイムスパン木に対して Cadential Retention を適用するため、exGTTM による事前の解析は必要になるものの、Cadential Retention を自動化する手法を提案、実装したことが本研究の主たる成果である。

Cadential Retention の実装にあたっては、先行研究 [3, 4] を基に、Cadential Retention の前段階となる和声解析やカデンツ探索を含めて理論の再構築を行った。和声解析は [3] で提案されている通り、音楽理論 TPS [2] で定義される和音間距離を用いた最短経路探索によって行ったが、短調のカデンツをより多く発見するための和声的短音階への限定、および四和音を構造的に正しく表現するためのベーシックスペースへのレベルの追加を行い、それらの改良に基づいて和音間距離、調間距離を再計算した。カデンツ探索については従来の GTTM に、[4] で提案されたドッペルドミナントを伴う半終止、および本研究で独自に定義した局所的カデンツの2種類の拡張を行い、与えられた楽曲の和声進行とグルーピング構造、およびタイムスパン構造を基にしてカデンツを発見する手法を提案した。

本研究で実装した Cadential Retention のシステムについては、exGTTM で解析済みの 127 フレーズのデータを用いて実験を行い、発見されたカデンツについては正しく Cadential Retention を適用できていることを確認した。

音楽における解釈の多様性から、ある楽曲の解釈について唯一の正解を定めることはできず、現状では本研究の提案についての定量的な評価が困難である。しかしながら、これまで獲得できなかったカデンツ構造を含む楽曲の解釈を得られるようになり、より多様な解釈を示すことが可能になったことには価値があると考えられる。

今後の課題として、和声解析とカデンツ探索の改良や、本研究で提案した局所的カデンツの妥当性や扱い方についてのさらなる検討、タイムスパン木における構造レベルの決定が挙げられる。

和声解析の改良については、TPS における和音間距離そのものの改良と、それを用いた解析プロセスの改良の2つのアプローチが考えられる。前者は [13] でも指摘されている通り、近親調の和音間距離における各項の重み付けや新たな項の検討が考えられる。また、本研究で行った TPS の改良に伴う調空間のねじれについても、音楽学的、心理学的な検討が必要である。後者についてはドミナントからサブドミナントへの進行や、ある構成音の限定進行が不可能な和声進行に対してコストにペナルティを与える方法が考えられる。限定進行とは、和声学において特定のピッチが次に進行する先が制限されているものであ

り，Vの第3音は短2度上行して主音に到達しなければならない， $V_7$ の第7音は2度下行してiii度音に到達しなければならない，などが代表的である．和音間距離は対称性を持つため，このような一方向のペナルティを加えることは和声解析に有用だと思われる．また，表層的な和音列だけではなく，和声解析と簡約を組み合わせることで改善が可能と考えられる．

局所的カデンツについては，導入することで音楽的直観を反映できると思われる楽曲もあり，局所的カデンツ自体は楽曲に新たな解釈を与えるという点で意義のあるものだと思われる．しかし，現状ではCadential Retentionにおいて通常のカデンツと同様に扱っており，その発見や簡約の方法について何らかの制約が必要でないか，今後検討する必要がある．

タイムスパン木における構造レベルを決定するためには，タイムスパン簡約の前段階となるタイムスパン分割の正しい実装が必要と考えられるため，本研究では構造レベルの決定を見送った．

また，本研究では和音の情報として楽譜に示されたバークリーメソッド式のコードネームを用いているが，将来的には楽譜上の音符から直接和音列を獲得する手法が必要になると考えられる．この実現のためには，非和声音，分散和音，構成音の省略など多くの解決すべき問題がある．

将来的な展望としては，まずCadential Retentionを実装したことで，GTTMの最後のステップであるプロロンゲーション簡約への足がかりとなることが考えられる．また，和声情報を含んだタイムスパン木を基にすることで，自動編曲や楽曲間の類似度計算などの応用についても新たな知見を得られることが期待される．

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心なご指導とご助言をいただきました本学 東条敏教授に深く感謝の意を表するとともに，ご指導をいただきました本学 Nguyen Minh Le 准教授，白井清昭准教授に感謝いたします．また，有益なご助言をいただきました筑波大学 松原正樹助教に感謝いたします．最後に，多大なご支援をいただきました本学 保健管理センター 佐々木恵准教授に深謝いたします．

## 参考文献

- [1] Fred Lerdahl and Ray Jackendoff. *A Generative Theory of Tonal Music*. The MIT Press, 1983.
- [2] Fred Lerdahl. *Tonal Pitch Space*. Oxford University Press, 2001.
- [3] Shoki Sakamoto, Sean Arn, Masaki Matsubara, and Satoshi Tojo. Harmonic analysis based on Tonal Pitch Space. In *2016 Eighth International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE)*, pp. 230–233, oct 2016.
- [4] Masaki Matsubara, Takafumi Kodama, and Satoshi Tojo. Revisiting Cadential Retention in GTTM. In *2016 Eighth International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE)*, pp. 218–223, oct 2016.
- [5] Nils L. Wallin, Björn Merker, and Steven Brown. *The Origins of Music*. The MIT Press, 2000.
- [6] 西田昌史, 東条敏, 佐藤健. HPSG を用いた楽曲の和声解析. 情報処理学会研究報告 Vol.2002-MUS-47, pp. 127–134, 2002.
- [7] Takeshi Fukunari, Sean Arn, and Satoshi Tojo. CCG analyzer with Tonal Pitch Space for non-classical chords. In *2016 Eighth International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE)*, pp. 239–246, oct 2016.
- [8] Eugene Narmour. *The Analysis and Cognition of Basic Melodic Structures: The Implication-Realization Model*. The University of Chicago Press, 1990.
- [9] Masatoshi Hamanaka, Keiji Hirata, and Satoshi Tojo. ATTA: Automatic Time-span Tree Analyzer Based on Extended GTTM. In *Proceedings of the 6th International Conference on Music Information Retrieval Conference (ISMIR2005)*, pp. 358–365, sep 2005.
- [10] Masatoshi Hamanaka and Satoshi Tojo. Interactive GTTM Analyzer. In *Proceedings of the 10th International Conference on Music Information Retrieval Conference (ISMIR2009)*, pp. 291–296, oct 2009.
- [11] 島岡譲ほか. 和声 理論と実習. 音楽之友社, 1964.



- [12] 山縣茂太郎. 新訂 音楽通論. 音楽之友社, mar 1958.
- [13] 東条敏, 平田圭二. 音楽・数学・言語-情報科学が拓く音楽の地平. 近代科学社, may 2017.
- [14] Heinrich Schenker. *Der Freie Satz*. Vienna, Universal Edition, 1935.
- [15] MusicXML for Exchanging Digital Sheet Music. <http://www.musicxml.com>. 2018年1月23日アクセス.
- [16] 山口直彦, 菅村昇. 非調構成音を含む和音への対応を目的とした TPS (Tonal Pitch Space) の拡張-ジャズ音楽理論への適用を目指して-. 情報処理学会研究報告 Vol.2011-MUS-89 No.10, pp. 1-6, feb 2011.
- [17] Masatoshi Hamanaka. GTTM – Generative Theory of Tonal Music / Masatoshi Hamanaka. <http://gttm.jp/gttm/>, 2009. 2018年1月23日アクセス.
- [18] Satoshi Tojo and Keiji Hirata. Structural Similitiry Based on Time-Span Trees. In *Proceeding of CMMR2012*, pp. 645-660, 2012.
- [19] 松山祐士. プロフェッショナル・ユース コード付 クラシック・メロディ・ファイル. ドレミ楽譜出版社, sep 2001.
- [20] Free music composition and notation software — MuseScore. <https://musescore.org>. 2018年1月23日アクセス.

## 付録A 実験に使用した楽曲一覧

本研究の実験に用いた楽曲の一覧を表 A.1 に示す。左端の番号は GTTM のデータベース [17] におけるインデックスである。

表 A.1: 使用楽曲一覧

#	曲名	作曲者
1	Waltz in E flat “Grande Valse Brillante” Op.18	F. Chopin
2	Moments Musicaux	F. Schubert
3	Bagatelle “Für Elise” WoO.59	L. Beethoven
4	The Preludes Op.28 No.15	F. Chopin
5	Turkish March	L. Beethoven
6	Blumenlied Op.39	G. Lange
7	Nocturne	F. Chopin
9	String Quartet in F major Op.3 No.5 Serenade	F. J. Haydn
10	Wiegenlied	J. Brahms
11	Solvejgs Lied	E. Grieg
12	Anitras Dans	E. Grieg
13	Traumerei	R. Schumann
14	Menuett No.2 in G maj	L. Beethoven
15	Aida Grand March	G. Verdi
16	William Tell Overture	G. Rossini
18	Thais Meditation	J. Massenet
19	Tannhauser Overture	R. Wagner
20	La Traviata Brindisi	G. Verdi
21	Plaisir d’Amour	J. Martini
22	Ellens Gesang III Op.52-6 D.839	F. Schubert
23	Die Meistersinger von Nurnberg Prelude	R. Wagner
24	Orphée aux Enfers Overture	J. Offenbach
25	L’Arlesienne Suite No.2 Farandole	G. Bizet
26	Overture No.3 BWV.1068 Air on a G string	J. S. Bach

次ページに続く

#	曲名	作曲者
27	Peer Gynt Suite No.1 Op.46 Morgenstemning	E. Grieg
28	Le carnaval des animaux Le Cygne	C. Saint-Saëns
30	3 Gymnopedies No.1	E. Satie
31	Sinfonie Nr.9 d moll Op.125 4.Satz An die Freude	L. Beethoven
32	The Nutcracker Suite Op.71a No.8 Waltz of the Flowers	P. Tchaikovsky
33	Swan Lake Op.20 No.9 Finale	P. Tchaikovsky
34	Water Music in D major HWV349 No.11 Alla Hornpipe	G. F. Händel
35	Ombra mai fú HWV40	G. F. Händel
36	Estudiantiana Op.191	E. Waldteufel
37	Sonate für Klavier Nr.48 C dur Op.30-1 Mov.1	F. J. Haydn
38	Sonate für Klavier Nr.15 C dur K.545 Mov.1	W. A. Mozart
39	Andante C dur	F. J. Haydn
40	Alpengluhen Op.193	T. Oesten
44	Rosamunde Op.26 D.797 Intermezzo No.3	F. Schubert
45	Gianni Schicchi O mio babbino caro	G. Puccini
54	Suite HWV430 Air mit Variationen Harmonious Blacksmith	G. F. Händel
56	Le Coucou	L. C. Daquin
57	Waves of the Danube	I. Ivanovici
58	Waltzes No.6 Op.64-1 Des dur Valse du Petit Chien	F. Chopin
59	Schwanengesang No.1 Op.72-4 D.957-4 Ständchen	F. Schubert
60	Má Vlast Moldau	B. Smetana
61	Album für die Jugend Op.68-10 Frohlicher Landmann	R. Schumann
66	The Nutcracker Suite Op.71a No.2 March	P. Tchaikovsky
68	12 Etudes E dur Op.10-3	F. Chopin
69	Kanon und Gigue D dur	J. Pachelbel
70	BWV147-6 Wohl mir, dass ich Jesum habe	J. S. Bach
71	Messiah HWV56 23.Hallelujah	G. F. Händel
72	Préludes 1 La fille aux cheveux de lin	C. Debussy
73	Pavane pour une infante défunte	M. Ravel
74	8 Humoresky Op.101-7 B.187 Ges dur	A. Dvořák
75	Sicillienne Op.78	G. Fauré
76	Salut d'amour Op.12	E. Elgar
77	Violinkonzert e moll Op.64 1.Satz	F. Mendelssohn
78	Le quattro stagioni Concerti Nr.1 E dur RV.269 La Primavera	A. Vivaldi
79	Eine kleine Nachtmusik G dur K.525 1.Satz	W. A. Mozart

次ページに続く

#	曲名	作曲者
80	Symphonie Nr.40 g moll KV.550 1.Satz	W. A. Mozart
81	Symphony No.9 Op.95 From the New World Mov.2	A. Dvořák
82	An der schönen Blauen Donau Op.314	J. Strauss II
83	Radetzky-Marsch Op.228	J. Strauss I
86	Pomp and Circumstance Op.39 No.1	E. Elgar
89	12 Etudes c moll Op.10-12	F. Chopin
90	Impromptus D.935 Op.142-3 B dur	F. Schubert
93	Sechs Gesänge Op.34-2 Auf Flügeln des Gesanges	F. Mendelssohn
94	Csikos Post	H. Necke
96	Lieder ohne Worte Heft 5 Op.62-6 Frühlinglied	F. Mendelssohn
97	Les Patineurs Op.183	E. Waldteufel
98	Sonate für Klavier Nr.8 c moll Pathétique Op.13 2.Satz	L. Beethoven
99	3 Valses No.7 Op.64-2 cis moll	F. Chopin
100	Sonate für Klavier Nr.11 A dur K.331 K6.300i Mov.1	W. A. Mozart
101	Violinromanze Nr.2 F dur Op.50	L. Beethoven
102	Polonaisen 3 Militaire A dur Op.40-1	F. Chopin
103	Carmen Habanera	G. Bizet
104	Ein Sommernachtstraum Wedding March Op.61-9	F. Mendelssohn
106	Toy Symphony	L. Mozart
107	Liebesträume 3 Nottornos S.541 R.211 As dur	F. Liszt
108	Walkürenritt Ride of the Valkyries	R. Wagner
109	Sonate für Klavier und Violine Nr.5 F dur “Frühling” Op.24	L. Beethoven
110	L’Arlésienne Menuett	G. Bizet
111	The Bridal Chorus from the opera Lohengrin	R. Wagner
112	Madama Butterfly Un bel di vedremo	G. Puccini
113	Concert for piano and orchestra No.1 Op.23 Mov.1	P. Tchaikovsky
114	Symphony No.1 Op.68 C major	J. Brahms
116	Pièces de clavecin “Tambourin”	J. P. Rameau
117	Symphony No.4 A major Op.90	F. Mendelssohn
129	Ungarische Rhapsodie S.244 Nr.2 cis moll	F. Liszt
130	The nutcracker suite Op.71a “Trepak”	P. Tchaikovsky
135	Peer Gynt Suite No.1 Op.46 Åses Død	E. Grieg
136	Concert for Flute & Harp K.299 Mov.1	W. A. Mozart
138	Horn Concert No.1 D major	W. A. Mozart
139	Les saisons Op.37bis No.6 “Barcarolle”	P. Tchaikovsky

次ページに続く

#	曲名	作曲者
141	Rondo brillante “Aufforderung zum Tanz” Op.65	C. M. Weber
146	5 Mazurka No.5 Op.7-1 B dur	F. Chopin
153	La cinquantaine	G. Marie
154	Le Coucou	L. C. Daquin
166	Symphony No.7 A major Op.92 Mov.1	L. Beethoven
168	Light Cavalry Overture	F. Suppe
170	Sonate für Klavier Nr.8 c moll “Pathetique” Op.13 1.Satz	L. Beethoven
179	Pizzicato Polka	J. Strauss II
180	Symphony No.6 “Pateticheskaya” Op.74	P. Tchaikovsky
183	24 Caprices for Solo Violin No.24 Quasi Presto	N. Paganini
186	Annen-Polka Op.117	J. Strauss II
203	Quartet D major 3 Nocturne	A. Borodin
205	Peer Gynt Suite Nr.2 Op.55 I dovregubbens hall	E. Grieg
206	Die Fledermaus Overture Op.367	J. Strauss II
208	Goldberg-Variationen Aria BWV988	J. S. Bach
211	Sonate für Klavier Nr.8 c moll “Pathetique” Op.13 3.Satz	L. Beethoven
215	Ungarische Tänze Nr.1 WoO.1	J. Brahms
216	Valse No.10 Op.69-2 h moll	F. Chopin
217	Valse No.14 Op.posth e moll	F. Chopin
224	Ungarische Tänze WoO.1 Nr.5 fis moll	J. Brahms
225	Ein Sommernachtstraum Notturmo Op.61-7	F. Mendelssohn
230	Scheherazade Op.35	N. Rimsky-Korsakov
237	The nutcracker suite Op.71a “Dance of the reed-flutes”	P. Tchaikovsky
239	L’Arlesienne Suite No.1 Prelude	G. Bizet
242	Symphony No.8 Op.88 Mov.3 Allegretto grazioso	A. Dvořák
249	Konzert für Klavier und Orchester Nr.5 Es dur Op.73 1.Satz	L. Beethoven
250	Symphony No.39 E flat major K.543	W. A. Mozart
251	Konzert für Klavier und Orchester Nr.21 C dur K.467 Mov.2	W. A. Mozart
255	Adagio G minor	T. Albinoni
258	Winterreise D.911 Op.89 Der Lindenbaum	F. Schubert
263	The nutcracker suite Op.71a “Miniature overture”	P. Tchaikovsky
266	Valse brillante Op.34-1	F. Chopin
267	Woodland Sketches Op.51-1 To a Wild Rose	E. MacDowell

以上