

創作ノート

アルゴリズム作曲環境プログラム OpenMusic を用いた交響曲の作曲

今堀 拓也

Takuya IMAHORI

概要

本稿は筆者作曲「交響曲第1番」において、アルゴリズム作曲環境プログラム OpenMusic を用いた作曲過程についての創作ノートである。

筆者の「交響曲第1番」(以下「本作品」)は、2024年11月24日に初演される、演奏時間約24分の単一楽章のオーケストラ作品である。この作品の作曲にあたっては、OpenMusic を用いて全体の時間を決めてそこからテンポと拍数を割り振って各主題提示部の発生時間の配分、また主題ごとに使用される和音が計算されている。そのうちのいくつかは微分音を含んだものとなっており、周波数移動と比率圧縮の技法が用いられている。

本作品の先行事例として、時間配分を計算した音楽作品、和音構造を周波数移動によって決定した音楽作品の作例を挙げ、それらを踏まえて本作品に生かした手法について述べる。

Composing a Symphony Using the Algorithmic Composition Environment Program OpenMusic This paper serves as a creative note on the compositional process of the author's Symphony No. 1, which was composed using the algorithmic composition environment program OpenMusic.

Symphony No. 1 is a single-movement orchestral work approximately 24 minutes in duration, set to premiere on November 24, 2024. In composing this piece, OpenMusic was employed to determine the overall duration, allocate tempo and time signatures, and distribute the onset timing for thematic sections. Additionally, the program was used to calculate the chords for each theme, some of which incorporate microtones. Techniques such as frequency shift and ratio compression were applied in these calculations.

This paper also references prior examples of music that utilized calculated time distributions and chord structures determined through frequency shift. Building upon these precedents, the methods adopted and adapted for the creation of this work are discussed in detail.

1. 先行事例

1.1. 時間配分を先に計算して作曲した先行例

Jonathan Harvey のテープ音楽作品 *Mortuos Plango, Vivos Voco* (1980年)は、総作品時間8分58秒(538秒)を黄金分割に基づいて8つのセクションに分割し、全体の時間が構成される [Dirks 2007]。 $538 \times 0.618 = 332.484$ で約333秒(5分33秒)となり、Harvey は0秒から333秒までに6つのセクション、333秒から538秒までに2つのセクションを設けている。

Karlheinz Stockhausen のテープ音楽作品 *Telemusik* (1966年 注：日本のNHK電子音楽スタジオで制作された)は、時間配分をフィボナッチ数列に基づく秒数によって分割している。フィボナッチ数列は数字が多くなるほど黄金比に近づく性質を持っている。[松平 2019,A]

各セクションの始まりには、鐘や鈴、木魚など、日本の打楽器によるアタック音が置かれる。これらの音は、作品の構成を明確に指し示すとともに作品に統一感を与える。(後略) [松平 2019,B]

1.2. 周波数移動に基づいて和音を決定した先行例

同じく Stockhausen の *Mixtur* オーケストラ、4つのサイン派発振器、4つのリング変調器のための(1964年)は、オーケストラの各楽器群にリング変調をかけた音をスピーカーで再生する、作曲家にとって初めてのライブエレクトロニクス作品である。[松平 2019,D]

リング変調では、元の音源と変調波の、和と差の周波数を持つ2つの音が出力される。例えば、300Hzの音を200Hzの音でリング変調をかければ、 $500\text{Hz}(=200+200)$ と $100\text{Hz}(=300-200)$ の音を得られる。元の音源と変調するサイン波の周波数の比が単純であれば、変調をかけた音は元の音源と共和する音程となるが、その比が複雑になると元の音源と不協和な音程関係となり、半音階に含まれない音も頻出するため、元の音源が、金属的でねじれた音色へと変調されることになる。[松平 2019,E]

Stockhausen は、*Mikrophonie II* 12人の歌手、 Hammond・オルガンまたはシンセサイザー、4つのリング

表 1: 「テレムジーク」の楽器とセクションの時間 [松平 2019,C] より引用

楽器名	秒数
柀	13
木柱	21
木魚	34
鈴	55
磬子	89
鐘	144

変調器、テープのための (1965 年), Mantra ウッドブロックとアンティーク・シンバルを伴う 2 人のピアニストのための (1970 年) でもリング変調器を用いて作曲している。特に Mantra は、

多様性、即興性を重視し、直感音楽に到達した 1960 年代の作風から一転して、確定された記譜に戻った、シュトックハウゼンの大きな転機となる作品。ここから 30 年以上、彼の作風の主流となる「フォルメル技法」の始まりを示す点でも、重要な意味を持っている。[松平 2019, F]

大きく本作品を特徴づけるのが、ピアノの音色を電子的に変容させるリング変調器である。リング変調は『ミクストゥール』、『ミクロフォニー II』でも使用されていたが、『マントラ』では、それらの作品以上に精妙な効果を上げている。ある時は、ピアノの音色をガムラン音楽のように変化させ、またある時は、伝統的なピアノの持続音にヴィブラート風な効果（原注：正確にはトレモロ）を加えるなど、リング変調を伴うピアノが、変幻自在な音色を持つ 1 つの新しい楽器であるかのように処理されているのだ。変調波とピアノの音程関係の協和度と、リング変調の効果の複雑さがリンクする特徴もうまく生かすことで、メロディー

を主体とした音楽に、独特な「和声法」を適用することにも成功している。[松平 2019, G]

上記のように Stockhausen は、Mantra においてリングモジュレーターを用いることにより、半音階に基づくフォルメルと呼ばれる十二音技法を発展させたセリーを用いながらも、半音階に縛られない新たな音律を作品に取り入れた。

Gérard Grisey の室内オーケストラ作品 Moduration (1976-77 年 注：この作品を含む 6 曲が連続して演奏され、Les espaces acoustiques という 90 分の一つの作品となる) は、リングモジュレーターによる和音の変調を模して、電子機器を使わずに生のオーケストラで複雑なピッチを指定する和音が頻発する。[Baillet 2003, A]

この（訳注：部分 A の）プロセスは、交互に現れる 2 つのオブジェクト間における対称的収束の最初の試みを構成している。これらのオブジェクトのうち最初のは和音 A であり、(ミを基音としたスペクトルの) 非調和性から調和性へと進化し、その音域が徐々に縮小していく (図 1 参照)。和音 A の低音域と高音域の音の連続が、それぞれファを基音とした協和音スペクトルと、ファを基音とした協和音の逆方向形 (「サブハーモニクス」) を形成していることが確認される。(中略) 第二のオブジェクトは第一のものと類似しており、リングモジュレーターのモデルに基づいて、和音 A から生成された音で構成される和音 B である。そのため、これもまた非調和性から調和性へと移行する。(筆者訳)

Stockhausen がリングモジュレーターを用いてスピーカーから変調された音を鳴らしたのに対し、Grisey は生のオーケストラ楽器でリングモジュレーター風のピッチを模倣することにより、新たな調律を作品に取り入れている。

2. 実践

2.1. 時間配分の計算とセクションの分割

OpenMusic 上でテンポと小節数を導き出し、これを MusicXML ファイルとして出力し、楽譜浄書ソフトウェア Sibelius で読み込み、改めて練習番号の割り振りを行った。

当初の制作過程として総作品時間を 40 分 (2400 秒) と決め、それを黄金比 0.618 で掛けて 2 分割し、さら

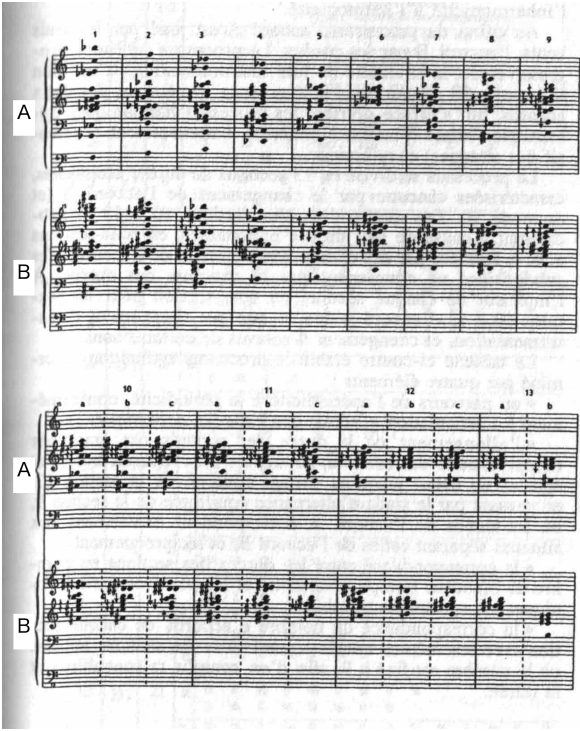


図 1: Grisey: Modurations のパート A とパート B の和音の一覧.[Baillet 2003, B] より引用

表 2: 2400 秒を黄金比で再帰的に 2 分割した時の秒数

	分割後の長さ (秒)	分割後の長さ (秒)
2分割	1483.2	916.8
4分割	916.6176	566.5824
8分割	566.469677	350.147923
16分割	350.07826	216.391417
32分割	216.348365	133.729895

にそれらを再帰的に 2 分割していき、全体を 32 分割した。(表 2)

これらの数値は、それぞれの分割したセクションの正確な時間となる。単位は秒である。

次に、これらの数値を、テンポ四分音符あたり 144, 128, 112, 96, 80, 72, 64, 48 という数列を正順, 逆順, 正順, 逆順に並べたものを用意し、それぞれの拍数を計算した。この際、1 拍に満たない長さは切り捨てとした。その計算結果は表 3 のとおりである。

実際の計算では小数点以下 5 桁までが用いられているが、本表では小数点以下 2 桁まででそれ未満は切り捨てて記した。

これにより得られた拍数を、仮に 4/4 拍子での小節数とその端数の拍子に割り振り、楽譜上に記した。実

表 3: 秒数を割り振ったセクションごとにテンポを指定して求められた拍数

セクション番号	秒数	テンポ (四分音符単位)	拍数
1	133.74	144	320
2	82.66	128	176
3	82.66	112	154
4	51.08	96	81
5	82.66	80	110
6	51.08	72	61
7	51.08	64	51
8	31.57	48	25
9	82.66	48	66
10	51.08	64	51
11	51.08	72	61
12	31.57	80	42
13	51.08	96	81
14	31.57	112	58
15	31.57	128	67
16	19.51	144	46
17	82.66	144	198
18	51.08	128	108
19	51.08	112	95
20	31.57	96	50
21	51.08	80	68
22	31.57	72	37
23	31.57	64	31
24	19.51	48	15
25	51.08	48	40
26	31.57	64	31
27	31.57	72	37
28	19.51	80	26
29	31.57	96	50
30	19.51	112	36
31	19.51	128	41
32	12.05	144	28

際の作曲においては拍子を任意に変更しながら書き進めたが、総拍数は変更しないようにした。

こうして 32 分割されたそれぞれのセクションに指定されたテンポでの拍数を導き出したが、実際に本作品では 16 分割までの長さを採用した。これは 24 分 20 秒 (1460 秒) にあたる。上記の計算の過程で切り捨てが発生しているため、40 分 (2400 秒) を正確に黄金比で割った 1483.2 秒よりも 23.2 秒短くなっている。

このようにして、本作品の全体時間を 24 分 20 秒とし、それを黄金比で再帰的に 16 分割したセクションの長さが得られた。

本作品では、全体の黄金分割点にあたる最初の 8 つのセクションを、それぞれ 8 個の主題提示部とした。セクション 9 から 16 までは、そこまでに提示した主題をもとにした展開部とし、その後半部の黄金分割点となるセクション 12 の終わりで、音響的なクライマックスを構築した。

実際の演奏でどこまで正確に楽譜通りのテンポで演奏できるかが難点であるが、これについてはテンポの入れ替わりの時に共通のパルスを持たせて接続するようにした。すなわち、セクション 1 のテンポ 144 での 16 分音符のパルスは、次のセクション 2 のテンポ 128 での 9 連 16 分音符のパルスと等しい。このような等伯のパルスを置くことで、指揮者が実際にテンポの変化を体感的に獲得できるよう配慮した。

2.2. 微分音を含む和音の計算

OpenMusic では音高をセントの精度で表す。すなわち、C4 のドは MIDI ノートナンバーでは 60 だが、OpenMusic では 6000 と表す。これを MIDI セントと呼称する。以下、音高について説明する時、MIDI セントという用語が出てくる際は、上記のことを意味する。なお、OpenMusic 上のピッチの計算は全て A4=440Hz に基づく平均律である。

2.2.1. 周波数移動による和音

本作品では、完全4度の堆積、完全5度の堆積、長7和音の堆積を第2主題として提示し、それらの和音のそれぞれの音高の周波数の上下の差を求めた。E1 (2800) を基音とする完全4度体積和音の各音の周波数は、表4の通りである。

表 4: E1 (2800) を基音とする完全4度体積和音の各音の周波数

番号	MIDIセント	周波数
12	8300	987.76
11	7800	739.98
10	7300	554.36
9	6800	415.30
8	6300	311.12
7	5800	233.08
6	5300	174.61
5	4800	130.81
4	4300	97.99
3	3800	73.41
2	3300	55.0
1	2800	41.20

表4内の番号とは、和音の一つ一つの音を下から数えた数である。小数点3桁以下切り捨てた。

次に、最低音をその和音の2音目に移高し、それに先ほどの音高の上下の周波数の差を足したものを、MIDI

セント単位に直したものが表5である。これを再帰的に11回繰り返す。(表5)

表 5: 完全4度堆積和音に周波数の差を足した数(単位 MIDI セント)

番号	原型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	8300	8324	8356	8396	8450	8520	8608	8718	8856	9024	9226	9464
11	7800	7936	8058	8168	8276	8388	8508	8642	8800	8982	9194	9440
10	7300	7526	7726	7904	8068	8226	8384	8548	8726	8926	9152	9408
9	6800	7096	7364	7604	7826	8032	8230	8428	8634	8856	9098	9368
8	6300	6650	6974	7272	7546	7802	8044	8280	8518	8764	9028	9314
7	5800	6192	6562	6908	7232	7538	7824	8100	8374	8650	8940	9244
6	5300	5724	6132	6518	6886	7236	7568	7886	8198	8510	8826	9156
5	4800	5248	5686	6106	6512	6902	7276	7636	7990	8338	8698	9046
4	4300	4768	5226	5674	6112	6538	6950	7352	7744	8132	8518	8908
3	3800	4282	4758	5228	5690	6146	6594	7032	7464	7890	8314	8740
2	3300	3792	4282	4768	5252	5734	6208	6680	7148	7612	8074	8538
1	2800	3300	3800	4300	4800	5300	5800	6300	6800	7300	7800	8300

横列1段目の番号は移高を行った回数である。



図 2: 表 5 の MIDI セントに基づく和音 (8 分音)

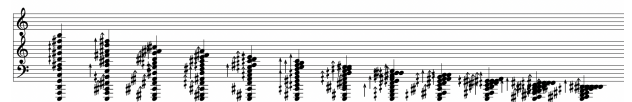


図 3: 図 2. の和音の最初の最低音を基準に移調した和音 (8 分音)

引き続き最低音を再帰的に完全4度ずつ高く移高し、12個の和音を算出する。微分音を含む和音の音程は徐々に狭くなってくる。また、この同じ音程を使いながら、最低音あるいは最高音を基準として和音を移調させることも可能である(図3)。

完全5度堆積、長7和音堆積についても同じように求める。これらの和音は、セクション8で第8主題として弦楽器のピッツィカートで提示される。長7和音堆積は展開部の練習番号10Aで用いられる。実際の演奏では、セントを8分割し、近似値の8分音で演奏するようにした。特に木管楽器は運指を書き込んで8分音が出るように指示してある。

2.2.2. セント単位での圧縮

E2を基音とした第16倍音までの自然倍音をMIDIセントで求めたのち、一番上と一番下のMIDIセントの差を求め、2番目以降をその比率で和音の各音程を掛けていくと、周波数移動とは別のプロセスを経ながらも、似たような微分音程を含みながら段々と音程の狭い和音が得られる。(表6, 図4, 図5)

表6: 自然倍音を音程の比率で圧縮した数(単位 MIDI セント)

原型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16	8800	8800	8800	8800	8800	8800	8800	8800	8800	8800	8800	8800	8800	8800	8800
15	8688	8716	8732	8744	8753	8760	8767	8772	8777	8781	8785	8788	8792	8795	8797
14	8568	8626	8660	8684	8703	8718	8731	8742	8752	8761	8769	8776	8783	8789	8795
13	8440	8530	8583	8620	8649	8673	8693	8710	8725	8739	8751	8763	8773	8783	8792
12	8302	8427	8499	8551	8591	8624	8651	8676	8697	8716	8733	8748	8763	8776	8788
11	8152	8314	8409	8476	8528	8571	8607	8638	8666	8690	8713	8733	8751	8769	8785
10	7986	8190	8309	8393	8458	8512	8557	8597	8631	8662	8690	8716	8739	8761	8781
9	7804	8053	8199	8302	8382	8448	8503	8551	8593	8631	8666	8697	8725	8752	8777
8	7601	7900	8076	8200	8297	8376	8442	8500	8551	8597	8638	8676	8710	8742	8772
7	7368	7726	7935	8084	8199	8293	8373	8442	8503	8557	8607	8651	8693	8731	8767
6	7102	7527	7775	7951	8088	8199	8293	8376	8448	8512	8571	8624	8673	8718	8760
5	6786	7290	7584	7793	7955	8088	8199	8297	8382	8458	8528	8591	8649	8703	8753
4	6400	7000	7351	7600	7793	7951	8084	8200	8302	8393	8476	8551	8620	8664	8744
3	5902	6627	7050	7351	7584	7775	7935	8076	8199	8309	8409	8499	8583	8660	8732
2	5200	6100	6627	7000	7290	7527	7726	7900	8053	8190	8314	8427	8530	8626	8716
1	4000	5200	5902	6400	6786	7102	7368	7600	7804	7986	8152	8302	8440	8568	8688

表6:



図4: 表6のMIDIセントに基づく和音(8分音)

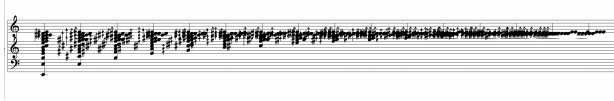


図5: 図4の最初の和音の最低音を基準に移調した和音(8分音)

これも最低音あるいは最高音を保持しながら移調して用いた。(図4)

これは本作品のセクション5において上方圧縮された状態から徐々に広がっていく。つまり図3-1とは逆の順序で出現する。そして原形和音に達したのち、下方圧縮に向かって徐々に音高が低く音程が狭くなっていく。これは図5に基づく。

セクション12ではB2を基音とした和音に移調され、下方圧縮された状態から原形和音に達するまで用いられる。セクション15では再びE2を基音とし、下方圧縮された状態から原形和音に達するまで用いられ、他の要素と同時に重なって現れる。

3. まとめ

時間配分については、黄金比を用いることにより、ソナタ形式による本作品全体の統一感を、聴取体験としても感覚的に得られるよう配慮した。

和音については、オーケストラの大人数によって同時発音数を確保しつつ、また和音の推移のテンポや木管楽器の運指など実際の楽器特性に則した演奏可能性に配慮しながら、和音の根拠を確保し、微分音を含んだ可能性について探求が出来たと言える。

4. 謝辞

本創作ノートの執筆にあたり議論していただいた小坂直敏氏に感謝します。

5. 参考文献

- 松平敬, シュトックハウゼンのすべて, アルテスパブリッシング, pp. 97-100, 2019, A
- 松平敬, シュトックハウゼンのすべて, アルテスパブリッシング, p. 98, 2019, B
- 松平敬, シュトックハウゼンのすべて, アルテスパブリッシング, p. 100, 2019, C
- 松平敬, シュトックハウゼンのすべて, アルテスパブリッシング, pp. 88-90, 2019, D
- 松平敬, シュトックハウゼンのすべて, アルテスパブリッシング, p. 89, 2019, E
- 松平敬, シュトックハウゼンのすべて, アルテスパブリッシング, pp. 135, 2019, F
- 松平敬, シュトックハウゼンのすべて, アルテスパブリッシング, pp. 138-139, 2019, G
- Jérôme Baillet, Gérard Grisey Fondements d'une écriture, L'Harmattan, pp. 116, 2003-135, A
- Jérôme Baillet, Gérard Grisey Fondements d'une écriture, L'Harmattan, P. 117, 2003, B
- Patricia Lynn Dirks, An Analysis of Jonathan Harvey's "Mortuos Plango, Vivos Voco", eContact! 9.2, 2007 https://econtact.ca/9_2/dirks.html



この作品は、クリエイティブ・コモンズの表示 - 非営利
- 改変禁止 4.0 国際 ライセンスで提供されています。
ライセンスの写しをご覧になるには、<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> をご覧頂くか、Creative Commons,
PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA までお手紙をお送りく
ださい。