

論 文

三上達也先生の学位論文  
「編曲システム MUSAS の問題解決における  
知識とその構造に関する研究」の概説

亀井 且有・井上 和夫

Outline of Prof. Mikami's Doctoral Dissertation  
“MUSAS” (Music Arrangement System)

Katsuari KAMEI, Kazuo INOUE

Abstract

One of the authors of this article, Prof. Inoue was a supervisor of him when Prof. Mikami was a graduate student in master's and doctoral courses. Prof. Kamei was an assistant professor then and helped his research in Inoue Lab.

This article gives an outline of Prof. Mikami's doctoral dissertation entitled “A Study on Knowledge and Its Structures for Problem Solving in MUSAS (Music Arrangement System).”

In the history of the artificial intelligence study, it was a time of the interval of the second golden age represented by expert systems and the second glacial epoch to come from now on when he described his doctoral dissertation. Although it was in such times, he adopted a problem of music arrangement as a doctoral study theme and expert systems as a solver to solve structures of “human creation.” The problems he treated are not yet solved in the current artificial intelligence studies and the fruitful results in his doctoral dissertation before the quarter of century are still fresh and interesting for all artificial intelligence researchers.

The authors want all readers of this article to know how he expected his dream in music to artificial intelligence and how he challenged to its difficult problems, and then want to do this article with the time when we remember Prof. Mikami.

May his soul rest in peace.

## I. はじめに

まずはじめに、筆者と三上先生の間係を述べる。井上は三上先生が修士、博士院生時代の研究指導教授であり、学位論文の主査であった。亀井は井上和夫研究室で当時助手を務め、三上先生の先輩になる。

さて、三上達也先生が学位論文「編曲システム MUSAS (Music Arrangement System) の問題解決における知識とその構造に関する研究」を執筆した 1980 年代後期から 1990 年代初期は、一般によく言われる人工知能の第 2 黄金時代から第 2 氷河期に転落する時代であった。コンピュータが開発されて以来、人々はコンピュータを使って人間と同じように考えることのできる頭脳を作れるのではと期待し、その研究が大きく進んだ第 1 黄金期が 1950 年代～1960 年代である。しかし、実際には現実的な問題を解くことができないことがわかり、一気にその研究が低迷した時代(第 1 氷河期)が 1970 年代である。さらに、人間の頭脳の模倣はできなくても、限られた分野・領域の知識を扱うことにより現実的な問題解決が可能であるというエキスパートシステム、あるいは知識工学の出現により、人工知能研究は 1980 年代に第 2 黄金期を迎える。しかしここでもまた、現実問題の解決可能なエキスパートシステムの開発は非常に限られた分野のみであったため、人工知能研究者は再度落胆する時代(第 2 氷河期)が訪れる。エキスパートシステムに代表される第 2 黄金時代とこれからおとずれる第 2 氷河期を予感させる時代の狭間の時代に三上先生は「編曲システム MUSAS」を研究し、学位論文を執筆したことになる。

このような時代背景を考えれば、人間が物事を創造する能力の解明までを視野に入れ、その仕組みを解き明かすための具体的な問題として編曲問題を取り上げ、その解決法としてエキスパートシステムを採用した三上先生の人工知能への夢を感じさせる壮大な研究テーマと人工知能研究者としての不屈の精神に頭がさがる想いである。

本論文では、三上先生の学位論文「編曲システム MUSAS の問題解決における知識とその構造に関する研究」を概説することにより、多くの方に院生時代の三上先生がいかにか人工知能に期待し、困難な研究に取り組まれたかを知っていただきたいのと共に彼を偲ぶ機会としたい。

以下、三上先生の学位論文の概説を行うが、学位論文の構成を崩さないために、原文通りの章構成とした。

## II. 学位論文「編曲システム MUSAS の問題解決における知識とその構造に関する研究」概説

図 1 に学位論文の表紙、図 2 に著者に当てた三上先生直筆の署名を示す。学位論文は B5 版 94 ページから成っており、学位論文としては当時の標準的なボリュームとなっている。以下に学位論文の概説を述べる。

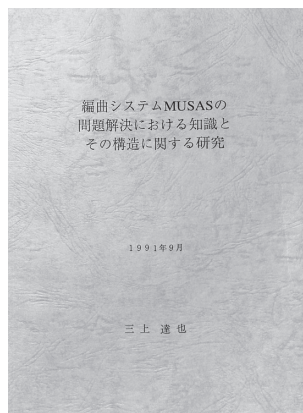


図 1：学位論文表紙

著者謹呈  
亀井 且有様  
一九九二年一月  
三上 達也

図 2：三上先生直筆の署名

## 第 1 章 序論

### 1.1. コンピュータ支援音楽

コンピュータ支援音楽の創成期にはランダム数値列を用いた作曲等が研究された時期もあり、当時は何かよくわからないが、とにかくコンピュータから吐き出されたシーケンスデータによる演奏を聴いて、人々は近づきつつある未来の情報化社会に期待と不安を抱いていたようである。

作曲のような創作活動の本質である感覚／感性／感情／情動／動機といった問題は、一部分のプロセスの模倣だけでは依然としてなぜそのメロディが頭の中に浮かんだのかという根源の部分が空白のままなので作曲とは考えにくい。

では、全く意味が無いかと言うと、このような創作活動の模倣を繰り返し試みることによって、人間の知的な、時には感情的な情報処理活動のプロセスが、感情そのものには入り込めないものの、次第に明らかになってくると考えられる。すなわち、人間の意思決定のプロセスは一見論理的であるかのように見えるが、実際にはかなり感情的に決定されているということが見えて来る。つまり、そうした人間の思考であるとか行動の部分的なプロセスがわかることにより、例えばヒューマンインタフェースの構築であるとか、ある種のソフトウェアのアルゴリズムの改善等に利用できると考えられる。

本研究は、解決すべき問題を音楽の編曲に求めているが、この編曲という問題には大きく分けて、

- 音楽理論による規則性のある論理的な意思決定問題
- 深く追求すれば人間の聴覚の構造にまで関係する音楽的感性にあたる感覚的な意思決定問題

の 2 つの側面が存在する。前者の性格が強いのは、コード選択の問題であり、後者の性格が強いのは、メロディ解釈、ハーモニー生成およびパートメロディの作曲である。

## 1.2. 音楽における認知科学の研究

省略

## 1.3. 音楽における人工知能の研究

人工知能の研究は、1950年代にコンピュータの発明とほぼ同時期に、定理の証明、ゲーム、知能ロボットの試作等として始まった。近年、パーソナルコンピュータを始めとするコンピュータが飛躍的に増加あるいは普及し、技術的な課題に対する研究も進み、いまや残っている課題は人の知的な情報処理プロセスだけと言っても過言ではない。

人工知能研究の成果がこれ程切実に期待されたのはこの40年になろうとする歴史の中でも初めてのことである。その期待に火をつけた大きな要因のひとつに E. A. Feigenbaum の率いていたスタンフォード大学が開発した DENDRAL の成功とその後の彼の提唱した知識工学が挙げられる。その Feigenbaum は、現在もおコンピュータに人間並の高度な問題解決能力を与えるためには圧倒的な知識量が必要だとの持論を追求し、知識ベースシステム（エキスパートシステム）の大規模化を提唱し研究を進めている。特定の領域の専門家が持っている専門知識は大別すれば以下の二つに分けることができる。

- A 1. text knowledge
- 2. heuristics

また、別の観点からは、

- B 1. facts
- 2. rules

本研究で対象とした問題の編曲では、A 分類では、音楽理論的に決定できる部分が 1. text knowledge になる。また、好みを反映できるハーモニーを選ぶような感覚的な部分は理論だけでは決定し得ず、経験に頼らねばならない部分が 2. heuristics と考えられる。B 分類では、音または音の集合が 1. facts に、その音や音の集合よりコードを決定する操作が 2. rules にあたる。

## 1.4. 本論文の構成

省略

## 第2章 編曲システムの基本構成

### 2.1. 緒言

編曲に関するコンピュータ支援システムの萌芽は、その初期の頃のコンピュータによる作曲

中心の時代の音楽理論的な音楽形成過程に見ることが出来る。以後、メロディの決まっているものに対する伴奏付けあるいはコード選択がその主流となり、現在では自動で編曲するというよりも、編曲者あるいは作曲者を支援するための、データベースを持つ対話型の作／編曲助手といった実用的なシステムが主流となっている。

編曲システム MUSAS は、狭義の編曲という知的なプロセスをコンピュータ上に実装しコンピュータ自身に全処理を任せてしまう自動編曲システムである。しかしながら、その目的はあくまでも人間の知的な解釈あるいは判断等の意思決定プロセスの認知科学的な分析とそれを人工知能として実現するという統合研究である。

本研究の対象である編曲という問題を解決するための知識には、大別すると2種類の知識、すなわち論理的知識と感性的知識が考えられる。前者は、一定の規則により論理的記述が可能であるような論理的な知識群である。例を挙げれば、その区間のメロディに対して適切なコードを決める際の候補コードの生成における協和、不協和、テンションに関する音楽的美にあたるような知識やコードプログレッションに関する知識、あるいはハーモニー生成におけるヴォーシングやテンションに関する知識である。また、後者は人間の持つ個人の感性、感情のような、なぜそうなるかが説明できない知識群である。例を挙げれば、生成された候補コードの中から最終的にどのコードを選ぶか、あるいは生成された各パートメロディがこれで良いかを評価するような音楽的美観とでもいうべき知識群である。

## 2.2. 編曲問題

### 2.2.1. 編曲の定義

編曲に対しては明確な定義というもの存在せず、音楽理論書にあるように「音楽の3要素である、リズム、メロディ、ハーモニーを変形すること」という抽象的な概念が存在するだけである。これでは解くべき対象となる問題が明確では無いので、本研究では独自に次に示す編曲の定義を導入する。

本研究における編曲の定義：

「与えられた単音のオリジナルメロディに対して、適切なコードを選び4パートメロディを生成すること」

編曲者は編曲問題に対して様々な角度から分析し検討を加える。そのプロセスは単純に一方向の流れだけではなく、仮定し検討し再度仮定し直すというような複雑な繰り返しであり、最終決定にはその個人の感性という Fuzziness が大きく関わっているものと考えられる。図3に編曲者の編曲プロセスの例を示す。

編曲者の図3に示した複雑なプロセスは直ちにコンピュータ上に表現できるものではない。そこで、このプロセスをなるべく異ならないようにコンピュータで扱えるように整理すると、以下の3つのサブプロセスと最終的な音楽的美感を満足させる決定プロセスとに分けられる。

- (1) 与えられた単音のオリジナルメロディを適当な区間（例えば1小節等）に区切り、その区間メロディを分析し解釈を与える。
- (2) 得られた解釈のもとに機能コードのような基本的なコード付けを行い、さらに全体のコードの流れを見直し理論的検証を行いながらさらにより良い響きを持ったコードと置き換える。
- (3) 得られたコードプログレッションと単音のオリジナルメロディからヴォイスングを行い、4 ヴォイスを持つ4パートメロディであるハーモニーを生成する。

図4は上述の整理したプロセスを反映させた基本的な編曲システムのプロセスの概要である。左右の矩形内はそれぞれのサブプロセスを表し、中央の楕円内はそれぞれのサブプロセスで得られる情報あるいは生成物を表している。サブプロセスは、それぞれがまとまった知識ベースシステムであるが、さらに階層的にいくつかのサブプロセスに分けられることになり、それらもまた個別に知識ベースシステムとなっている。

## 2.2.2. 専門家による編曲プロセス

省略

## 2.3. 編曲システムの基本構成

### 2.3.1. メロディの分析

与えられたオリジナルメロディは五線譜表記では直接コンピュータで扱えないので記号表記に変換されなければならない。図5に五線譜による表記、その音名、本章での記号表記をそれぞれ示す。音楽で用いられる音の高さはそれぞれ名前が付けられているので、コンピュータのような記号処理システムにとっては好都合である。

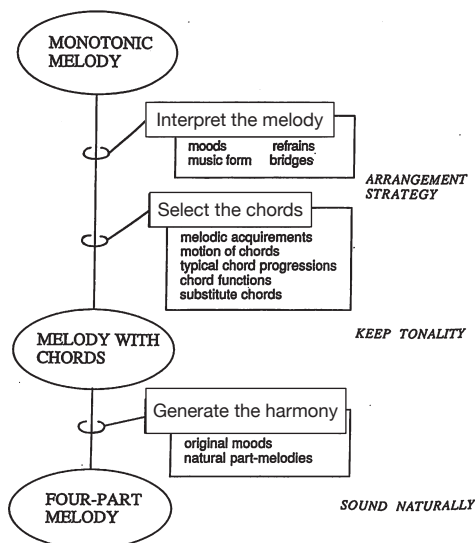


図3：編曲者の編曲プロセス

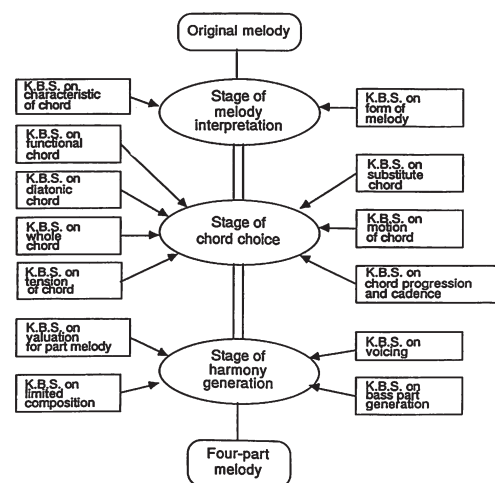


図4：編曲システムのプロセス

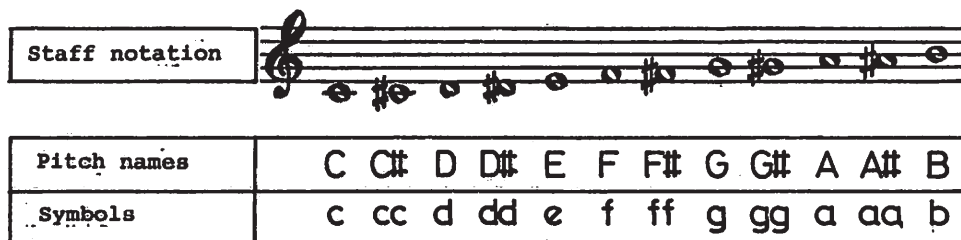


図5：五線譜による表記とその音名の記号表記

### 2.3.2. 基本機能コードの決定

機能コードとは全曲を通しての調性を与える特殊な機能を有するコードであり、トニック (tonic: I)、サブドミナント (subdominant: IV)、ドミナント (dominant: V) の3種類が存在する。

### 2.3.3. コードプログレッションに関する検証

音楽理論では、機能コードを含む全てのコードには、他のコードに進行する際の進み易さともいべきモーション (motion) が存在する。

### 2.3.4. アドヴァンストコードの決定

本研究では、アドヴァンスコードを生成するために13個のIF-THENルールを作成した。以下にその一例を示す。

IF           ある区間*i*の機能コードが [cM]  
               かつ  
               Passing notes (d) が存在する  
 THEN       区間*i*のアドヴァンストコードは [cM9] である

### 2.3.5. ハーモニー生成

2.3.4節で得られた4声のアドヴァンストコードを用いて4パートメロディとなるようにハーモナイズするのがハーモニー生成のためのヴォイスングを実行する部分である。

本システムでは、オリジナルメロディを第1パート（最高音部）に指定し和声の密集配置 (closed voice) を得るヴォイスングを行う。オリジナルメロディを第1パートに指定しているのは、人間は最高音部によりその曲のメロディを感じ取るので、原曲のイメージを残しておきたいからである。

## 2.4. プロトタイプシステムによる編曲の実験結果とその可能性

本論文で、編曲の対象としたオリジナルメロディは、山田耕筰作曲の「赤とんぼ」と滝廉太郎作曲の「花」である。「赤とんぼ」のオリジナルメロディを五線譜上で書くと図6となり、



これを記号化したものが図7の最上段である。なお、図中の○印で表わされている部分は無音であることを示している。

まず、図7の2段目の基本機能コードに経過音とみなして取り除いておいた Skelton notes を加えて、その組み合わせにより図7の最下段に示されるアドヴァンスコードを得る。また、ヴォイスイングは先に述べた和声の密集配置 (closed voicing) を採用した。図8はオリジナルメロディを第1パートに指定して closed voicing を実行した結果である。(a) はその記号による表現であり、(b) は五線譜上での表現である。これらの結果を見る限り、人間の耳に奇異に聞こえるハーモニーではなく、一番ベーシックなハーモニーとなっていて、このシステムの基本的な構成法の妥当性が示された。



図6：オリジナルメロディ「赤とんぼ」の五線譜表記

Symbolized melody	g c c o o d	e g c a g o
Basic functional chords	cM	cM
Advanced chords	cM9	cM6

a c c o d o	e o o o o o	e a g o o a
dm7	cM	cM
dm7 .	cM	cM6

c a g a g e	g e c e d c	c o o o o o
cM	g7 cM dm7	cM
cM6	g7 cM dm7	cM

図7：「赤とんぼ」の記号表記



1st part		
2nd part	g c c o o d	e g c a g o
3rd part	e g g o o b	c e g g e o
4th part	c e e o o g	g c e e c o
	g c c o o e	e g c c g o

a c c o d o	e o o o o o	e a g o o a
f a a o c o	c o o o o o	c g e o o g
d f f o a o	g o o o o o	g e c o o e
c d d o f o	e o o o o o	e c g o o c

c a g a g e	g e c e d c	c o o o o o
g g e g e c	f d g c c a	g o o o o o
e e c e c g	d b e g a f	e o o o o o
c c g c g e	b g c e f d	c o o o o o

図8 (a)：編曲システムにより得られた4パートメロディ（記号表記）



図8 (b)：編曲システムにより得られた4パートメロディ（五線譜表記）

## 2.5. 結言

本章では、編曲システムの構成のアウトラインと各部分における具体的な処理を述べ、プロトタイプシステムにより構造の簡単な曲ではあるが編曲が行なえることを示した。

## 第3章 コード選択問題

### 3.1. 緒言

編曲問題には、編曲者が異なっても結果に大きな差異が現れない比較的ロジカルな側面と編曲者個人の個性あるいは感性といったものが大きく現れるあいまいで感覚的な側面とが存在している。

本章では、上述の編曲問題のうち、比較的ロジカルであると考えられる基本的なコードの選択問題に関する議論を行う。具体的には、編曲者の経験的知識に存在しているあいまい性 (Fuzziness) を数値化し、階層的に扱うことにより、第2章で述べたプロトタイプシステムで解決しえなかったスタンダードジャズのコード選択が可能であることを示す。

### 3.2. コード選択ステージにおける問題とその解決に用いられる知識

本節では、オリジナルメロディに対しての適切なコードの生成という問題と生成されたコードが適切なコードプログレッションを形成するかどうかという問題を扱う。この2つの問題は、調性を正しく感じさせるコードプログレッションを作るためにもっとも重要な問題である。

#### 3.2.1. コード選択における問題

このプロセスを解決すべき小問題とそこで利用される知識という観点から整理するならば以下のようなになる。

- 1) 部分メロディを構成しているそれぞれの音があまり不協和にならないようなコードを生成する問題
- 2) より良いコードプログレッションを作る問題

1) の問題に関して、まず不協和とはどのようなことであるかが問題となる。ここで利用される知識を以下に示す。

- a) 調性を失いたくないため、基本的にはなるべく機能コードの中から選択したい
- b) 機能コードが選択できない場合でも、ダイアトニックコードを含む編曲者が経験的に知っている頻出するコードから選択したい
- c) コード構成音の中でもメロディに対するむすびつきの強さがある

2) に関して編曲者は個性的なコードプログレッションを作るものだが、ここでは以下のような知識を利用する。

- d) コードのモーション、終止感（cadence）に関する知識
- e) 感覚的かつ経験的に得られた個性的ないくつかのコードプログレッションの類型パターンの知識

### 3.2.2. コード選択ステージ

省略

### 3.2.3. オリジナルメロディからのコード選択

MUSAS では、オリジナルメロディの音からコードを選択する方法として、各拍子の先頭にある音はその単位区間（例えば1小節）のコード選択に重要な骨格音（Skelton notes）として捉え、それらの音より基礎コードを選ぶ。残りの音は経過音（Passing notes）として、後のコードの改善に使う。

図9はコードの分類の包含関係を示したものである。調性を強く感じさせるのは図中のより上位にあるコード群である。機能コードが最上位にあるが、これらの中には、トニック機能、サブドミナント機能、ドミナント機能の各コードが含まれる。この機能コードが適切に配置されると曲の調性が強く感じられる。

より現代的な響きを持つ代理コードというものが存在するが、代理コードを使うと調性に関しては多少弱まる。次にダイアトニックコード群は、曲の調に応じたスケールの上になつた4音のコードである。このように、曲が調性を保つためには機能コードが最重要で、それにダイアトニックコードが続く。この知識は、各知識ベースそのものに優先順位をつけ表現している。これらのコードの分類を表1に示す。

編曲者がコードを決める際には、オリジナルメロディのその区間に対して一応のコードを仮定し、それぞれの音が仮定されたコード構成音のどれにあたるかをも考え合わせている。当然、

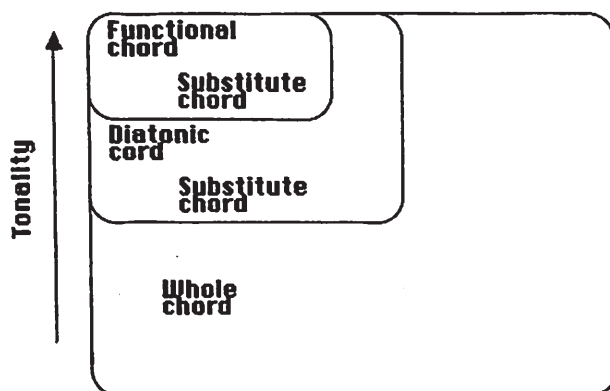


図9：コードの分類と包含関係

表 1 : コードとプライオリティ

Priority	Chords				
Level 1	C	C6			
	F	F6			
	G	G7			
Level 2	CM7	Am7	Em7	C7	Cm7
	FM7	Dm7	F7	Ddim7	
	Fm7	Bm7-5	D7		
	D7	E7	A7		

オリジナルメロディの音はそのコードの根音にあたれば、そのコードの評価値は高くなる。しかしながら、編曲者はその「評価値」なるものをある基準で計算しているとは考えられず、多くの場合経験的かつ感覚的に処理していて、明文化するのは困難である。

本研究では、コード構成音評価をシミュレーションすることで数値化し解決する。その知識の表現形式は、以下の通りである。

chord (priority, chordname,  
[[root, grade], [3rd, grade], [5th, grade], [additional, grade]])

また、実際の機能コード CM7 では次のように表現される。

chord (1, 'CM7', [[c, 10], [e, 9], [g, 8], [b, 7]])

ここで、priority はコードの優先順位を表し、1 が最優先で順次 2、3 となる。また、root、3rd に続く grade はその数値が大きいほど協和性が増し、10 が最高値である。この grade を用いて、そのコードの評価値を以下の式で与える。

$$\text{評価値} = \frac{\sum G}{10 \cdot N} \times 100$$

N : 拍子の数, 4 拍子の局なら

G : 各音のそのコードノートに対する  
評価値

基本的には、この評価値の高いコードがその単位区間のオリジナルメロディに対してより適切であると考えられるが、先述したようにコードプログレッションの問題もありこのまま決定するわけにはいかない。

### 3.2.4. コードプログレッションからのコード選択

コードが連結されると、そこには自ずから前後のつながりの良し悪しが出る。これは、聴き手のそれまでの経験にかなり左右される問題であり、かつ編曲者の戦略を大いに反映でき腕の見せ所ではあるが、基本的にはスムーズに流れる方がよい。このコードのつながりの前後関係をモーションといい、機能コードのモーションと5度圏に従うモーションとが存在する。

機能コードは、それぞれある特定の機能コードに対して進行しようとするモーションを持つが、その強さは同じではない。一番強いモーションは、ドミナント機能コードからトニック機能コードへのモーションである。前に述べたが、この機能コード群は、調性を決定するために重要なコードで、言い替えるならば、終止感を得るためのコードと考えられる。機能コードが正しく配置されれば、曲の調整は保たれる。

以下に、ドミナント～トニックケーデンス（V7～I）とサブドミナント～ドミナント～トニックケーデンス（IV～V7～I）を例として示す。

$$\begin{aligned} V7 \sim I & \quad : G7 \sim C \\ IV \sim V7 \sim I & \quad : F \sim G7 \sim C \end{aligned}$$

MUSAS に表現されている機能コードのモーションは全部で6種類ある。5度圏に従うモーションとは、「人間にとって完全5度（音程差3.5音）下降するコードプログレッションが一番自然な流れとして聴こえる」ということに基づいた知識である。完全5度下降を続けていくと、12音階にあるすべてのコードが次々に現われ、最後にはもとのコードに戻る。この2つのモーションに関する知識を用いて、3.2.2節で述べた方法によって生成された複数のコードの絞り込み、あるいは、生成されなかった区間に対するコードの生成を行う。

### 3.3. シミュレーション結果

提案システムによるオリジナルメロディからのコード選択およびコードプログレッションからのコード選択の検証のためにシミュレーションを行った。図10に前者、図11に後者のコード選択法を示す。

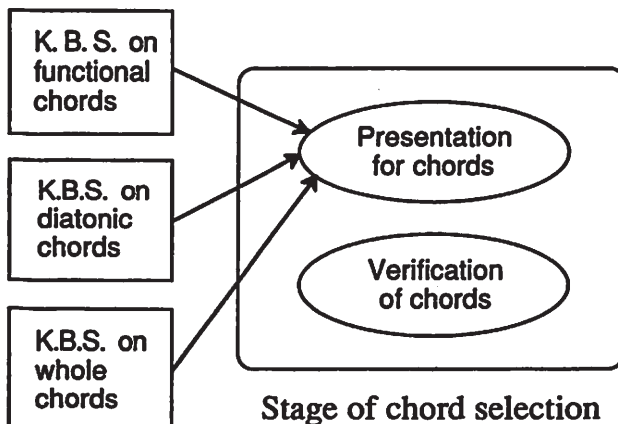


図 10：オリジナルメロディからのコード選択法

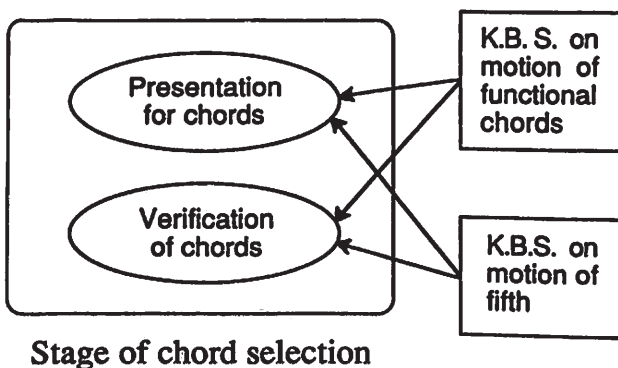


図 11：コードプログレッションからのコード選択法

### 3.3.1. オリジナルメロディからのコード選択によるシミュレーション結果

使用した曲は Take the "A" train で、3.2.3 節で述べた各コード構成音の grade を 4 種類用意して行なった。図 12 はこのうちで一番良い結果を示したもので、各 grade は root、3rd、5th、additional の順に 10・9・8・7 であった。これは人間のハーモニー感覚に照らし合わせても妥当と言える。

bar		1	2	3	4
original melody		a.a.a.a.a.a.a.a	a.e.e.e.e.a.c.c	e.tg.tg.tg.tg.tg.tg	tg.tg.tg.tg.tg.tg.tg
original chord		C	C	D7	D7
評	レベル1	90~100 80~ 70~ 60~	G, G7 C, C8	C, C8	
	レベル2	90~100 80~ 70~ 60~	E7, E7 CM7, C8, C#7 A7, A#7	CM7, E7 E7, E7 C#7, C#7 C#7	E7 D7-5, Ddim, F#7
bar		5	6	7	8
original melody		a.a.a.a.a.a.a.a	a.tg.b.e.g.tf.f.tc	c.e.e.e.e.e.e.e	e.e.e.e.e.e.e.e
original chord		Dm	G7	C	C#7
評	レベル1	90~100 80~ 70~ 60~	E, E8 C8	G7	C, C8
	レベル2	90~100 80~ 70~ 60~	F#7, F7, A7, A#7 D7, D#7 B#7-5	B#7-5	CM7, E7 E7, E7 E7, E7, F#7 A7, (E#7)
bar		9	10	11	12
original melody		e.e.e.e.e.e.e.e	a.c.c.c.c.c.c.c	a.f.f.f.a.a.c.c	e.e.e.e.e.e.e.e
original chord		C7	F	F	F
評	レベル1	90~100 80~ 70~ 60~	G, C8 F, F8 C	[C8], E, E8	C8 F, F8
	レベル2	90~100 80~ 70~ 60~	CM7, C7, E7, E#7 A7, A#7 F#7	A#7 F#7, E7 CM7, C7, C#7, D7, E#7 F#7, (C#7)	F#7 E7, [A#7], E#7 D7, E#7, E#7
bar		13	14	15	16
original melody		e.e.e.e.e.e.e.e	a.c.c.c.c.c.c.c	e.e.f.f.a.a.c.c	e.e.e.e.e.e.e.e
original chord		F	D7	D7	D#7
評	レベル1	90~100 80~ 70~ 60~	E, E8 C8	[C8], E, E8	C8 F, F8
	レベル2	90~100 80~ 70~ 60~	F#7, E7, A7, A#7 D7, D#7 B#7-5	A#7 F#7, F7 CM7, C7, D7, D#7, C#7 F#7, (C#7)	A7, A#7 F#7 D7, F7, D#7

root=10, 3rd=9, 5th=8, 7th=7

図 12：オリジナルメロディからのコード選択によるシミュレーション結果



### 3.3.2. コードプログレッションからのコード選択によるシミュレーション結果

図 13 は、同じくジャズのスタンダードである Satindoll のシミュレーション結果である。これを見ると前後のコードの両方ともから推論されるコードがあればコードプログレッションに関しては一番いいのだが、どちらか一方からしか推論できないところもある。例えば、2小節目と3小節目などがそうである。これは2度の転調と考えられる。

bar		2		3		4		5	
original chord		Dm7	G7	Em	A7	Em7	A7	D7	
from the previous	func.	C F G7	C Dm7 G7	C F G7					
	5th	C7 Cm7	Gm7	C7 Cm7	A7 Am7	DM7 D7	A7 Am	Dm7 D7	
from the backward	func.	C Dm7 F G7	C	C	C	C	C	C	
	5th	D7	B7 Bm7	E7 Em7	B7 Bm7	E7 Em	A7 Am	Ab7 Abm7	

bar		6		7		8		9	
original chord		Db7		C	Bb7	A7		Dm	G7
from the previous	func.	G7			ALL				C Dm7 G7
	5th	Gm7		Gb7 Gbm7	Bb	Ab7 Abm7		Dm7 D7	Gm7
from the backward	func.	C Dm7 F G7		C	C	C Dm7		C Dm7 F G7	C Dm7
	5th			F7 Fm7	E7 Em7	A7 Am		D7	A7 Am7

図 13 : コードプログレッションからのコード選択によるシミュレーション結果

### 3.4. 結言

本章では、編曲システム MUSAS のコード選択問題における課題を明らかにし、その解決策として評価値を導入した。また、オリジナルメロディからのコード生成とコードプログレッションからのコード生成について、その妥当性の検証のためのシミュレーションを行った。その結果、従来のプロトタイプシステムではコード付けの出来なかったようなポップス系の曲に対しても、適切なコードを選択できる可能性を示した。

## 第4章 メロディ解釈問題

### 4.1. 緒言

本章では、MUSAS が意思決定を行うための全体的な編曲戦略に影響するメロディ解釈のうち、その基本と考えられる2つの異なったメロディの類似性評価の問題を取り上げる。メロディ情報の表現としては、Fuzzy 理論におけるメンバーシップ関数を導入し、実験結果よりメロディの類似性について議論する。

### 4.2. 2メロディ間の類似性を評価するための音楽情報の表現

#### 4.2.1. 音楽の形式

西洋の12音音階の調性音楽 (tonal music) においては、曲の構造を抽象化するとき形式 (form) を利用することが多い。例えば、ソナタ形式の A-B-A' であるが、現在我々が耳にする音楽もその多くは A-A'-B-A" のような典型的な形式を持っているものである。

編曲という問題に絞れば、編曲者が実際に編曲する際どのように形式を利用するのかの例をあげれば、

- 1) サビの部分は盛り上げるために、より緊張感の高いハーモニーにしよう
- 2) 同じ意味で中・低音域のメロディをダイナミックに躍動感をもたせよう
- 3) 最後の A" はサビとのコントラストを際立たせるためにシンプルなハーモニーにしよう  
等である。

MUSAS が現在ターゲットにしているスタンダードジャズにおいては一般的には次の3種類の形式がある。

- 1 A-B-C
- 2 A-A'-B-A"
- 3 A-B-A-C

#### 4.2.2. 2メロディ間の類似性

メロディの類似関係を決定させる基礎となる知覚的要因、すなわち、人間にとって2つのメロディが似て聴こえるというのは、それらのメロディにどのような類似の特徴があるのだろうか

か。メロディを特徴付ける要因を列挙してみれば、

- a. メロディを構成する音高
- b. メロディを構成する音数
- c. 出現する音高の順序
- d. リズム

となる。このうち a、c、d を総合して考えれば、メロディの輪郭を形成するものである。さらに、メロディの輪郭を大きく変えない限りにおいては、b の音の数も輪郭をより詳細に形付ける要因として働くことは、容易に理解できる。

#### 4. 2. 3. Fuzzy 集合論を応用した音楽情報の表現

扱うメロディのデータをシンボリックなメロディデータに限定すれば、4.2.2 節で述べたように 2 つのメロディの類似性を表すためにどのような音楽情報の表現を考えたらよいのであろうか。本研究ではパターン認識の手法のひとつであるテンプレート法を応用する。このテンプレート法の領域的フレキシビリティに、さらに Fuzzy 集合の適合度 (grade) の概念を融合させたものが、図 14 に示すメロディの類似という情報の表現である。

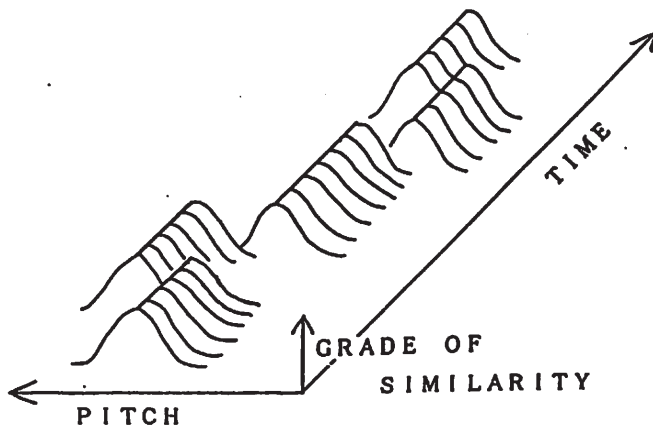


図 14：メンバーシップ関数によるメロディの類似性のファジィ表現

#### 4. 3. スタンダードのメロディにおける類似性に関する実験

##### 4. 3. 1. ジャズのスタンダードのメロディ

ジャズのスタンダードのメロディはいくつかの中心となるフレーズが 4.2.1 節で述べたような形式を形作る。図 15 は Here's that rainy day という曲のメロディである。ここでは、16 小節を 2 回繰り返して 32 小節でテーマは完結しているが、繰り返す最初の 8 小節は全く同じメロディである。これを視覚的にはっきりさせるためピッチ表現したものが図 16 である。同図より繰り返しのフレーズパターンが存在することがわかる。

Handwritten musical score for "Here's that rainy day". The score consists of six staves of music. Above the notes, various chords are written in a handwritten style:

- Staff 1: Fm, C7(onE), Ab7(onEb), D7, DbM7, Cm7, Bbm, Bbm7
- Staff 2: Gm7-5, C7, FM7, Cm7 / F7 /
- Staff 3: 1. Bbm7, Eb7, AbM7, DbM7
- Staff 4: Gm7-5, C7, FM7, Gm7-5, C7
- Staff 5: 2. Bbm7, Gm7, C7, Am7, Abdim
- Staff 6: Gm7, C7, FM7, Gm7-5, C7

図 15 : Here's that rainy day の五線譜表現

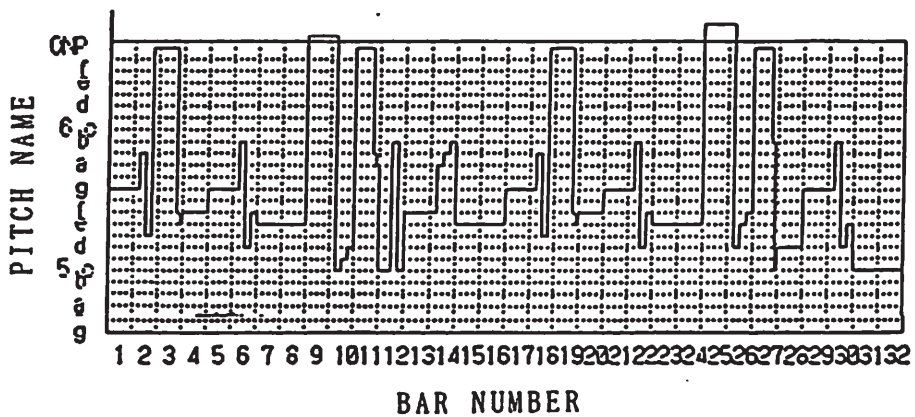


図 16 Here's that rainy day のピッチ表現

### 4.3.2. 類似度としてのメンバーシップ関数の定義

メロディの類似性発見のための音楽情報の表現として、4.2.3節で述べた fuzzy 化したテンプレートを考える。重要となるのは音高と時間の両方に存在する fuzziness の与え方である。人間のメロディの知覚／認知において2メロディ間の類似の大きな要因はメロディの輪郭にあると考えられるので、それを考慮しここでは基準メロディから15音（3半音）以上離れると音高は類似度ゼロとし、時間的には3/4拍以上離れると類似度ゼロとした。これを図示したものが図17である。基準メロディより1/2音および1音の音程の音の類似度をそれぞれG1およびG2で与え、メンバーシップ関数を決定する。同様に、時間についても1/4拍と1/2拍の類似度をそれぞれG1およびG2で与え、メンバーシップ関数を決定する。

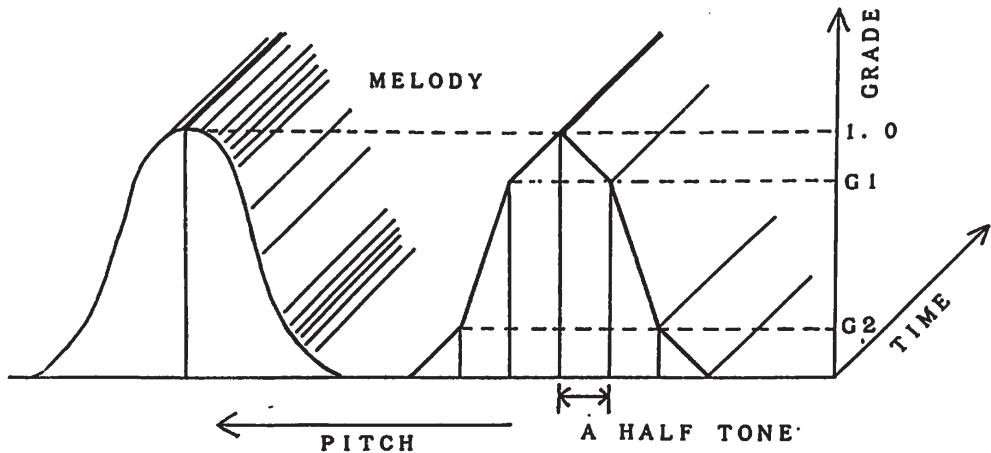


図 17：メンバーシップ関数による類似度の定義

### 4.3.3. 類似度の計算

4小節のような単位区間の比較メロディの基準メロディに対する類似度は、比較メロディを1/4拍に離散化した後に計算を行う。この場合、メロディの離散化とは、例えば4分音符を同じ音高の16分音符4個に等価変換することである。その離散化された比較メロディの16分音符一つひとつの基準メロディに対する類似度の平均をもって単位区間の類似度SGと定義する。

$$SG = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i$$

ただし、単位区間において

$g_i$ ：1/4拍に離散化した比較メロディの*i*番目の基準メロディに対する類似度

SG：単位区間の比較メロディの基準メロディに対する類似度

$n$ ：離散化した比較メロディの16分音符の個数

#### 4.3.4. 実験結果

類似度評価実験では、Take the “A” train と Here's that rainy day の 2 曲を用いた。また、図 18 に典型的な 5 つのメンバーシップ関数の形状を示す。図 19 に Take the “A” train の類似度を示す。1-2 すなわち最初の 8 小節と次の 8 小節は全く同じメロディであることがわかる。さらに 1-4 (2-4) も 0.9 以上の高い値でかなり似たメロディである。一方、図 20 に示す Here's that rainy day では、1-3 は同一のメロディで、他の組み合わせではあまり似たメロディがない。

以上より、結論として言えることはスタティックなスタンダードのテーマのようなメロディの音楽形式を決定するだけであれば、メンバーシップ関数の形状と類似とみなす類似度の閾値の関係をそれほど厳密に考えなくても良いと考えられる。しかし、例えば、よりダイナミックなメロディである即興演奏のフレーズの類似性を扱うような場合であれば、メンバーシップ関数の形状の決定は大変重要な問題となる。

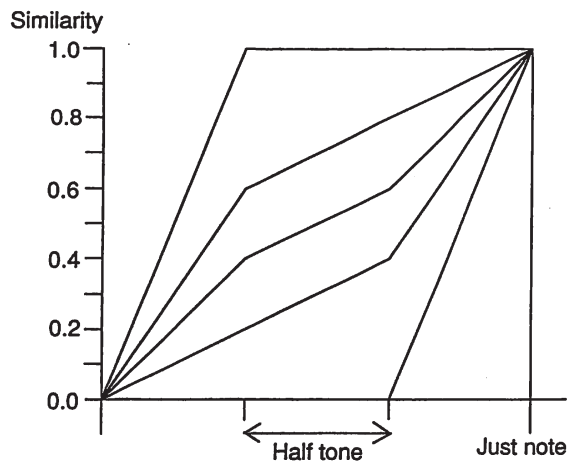


図 18：典型的な 5 つのメンバーシップ関数の形状

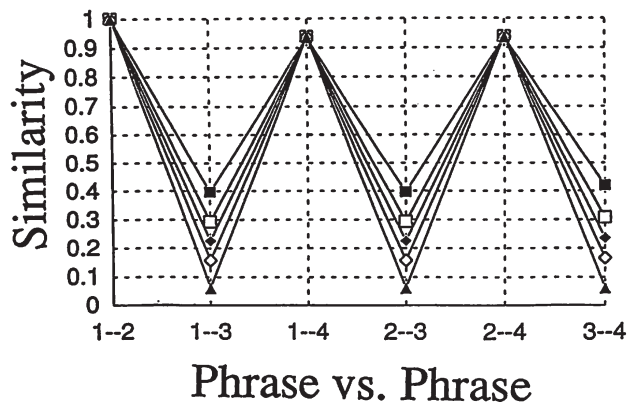


図 19：Take the “A” train の小節間での類似度

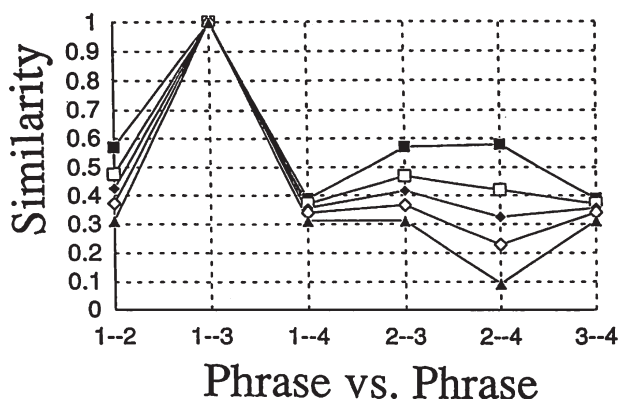


図 20 : Here's that rainy day の小節間での類似度

#### 4. 4. 結言

本章では、MUSAS のメロディ解釈ステージにおいて、音楽形式を発見する基礎的な情報を与える 2 つの異なったメロディの類似性について、パターン認識の手法のひとつであるテンプレート法と Fuzzy 理論の適合度の概念を融合させた類似度による評価法を提案した。

このようなジャズのスタンダードのテーマのような繰り返しなどの構造が明確なメロディの音楽形式を決定するだけであれば、メンバーシップ関数の形状と、類似とみなす類似度の閾値の関係をそれほど厳密に考えなくても良いと考えられる。しかし、例えば、よりダイナミックなメロディである即興演奏のフレーズの類似性を扱うような場合であれば、メンバーシップ関数の形状の決定は大変重要な問題となる。

### 第 5 章 ハーモニー生成問題

#### 5. 1. 緒言

ハーモニー生成問題は、コード選択問題あるいはメロディ解釈問題のような分析的な問題ではなく、どちらかと言えば、与えられたオリジナルメロディと選択されたコードプログレッションを用いて 4 パートメロディの残りの 3 つを生成することが中心的な課題となる。

本章では、ハーモニー生成問題に対して実際の編曲者が行う編曲の中でも基本となる基礎技術程度のハーモニー生成法を提案し、シミュレーションを行い、検討を加える。

#### 5. 2. ヴォイスイング

与えられた単音のオリジナルメロディと前章のコード選択によって得られたコードから、オリジナルメロディのリズムを変化させずに 4 声のハーモニーを生成する。4 パートメロディを得るには、与えられた単音のメロディと選択されたコードからヴォイスイングを行うことが必要となる。ヴォイスイングとは、複数のパートメロディを得てハーモニーを形成するために、適切



なコードの転回を行なうことを言う。このコードの転回とはコードを構成している音の配置を換えることをいう。ヴォイスングにはオープンヴォイス（和声の開離配置）を得る方法とクローズドヴォイス（和声の密集配置）を得る方法とがある。クローズドヴォイスとは同時に出された2音以上の和音の中の最高音と最低音の音程が1オクターブを越えないものをいう。

本研究で用いる方法は、クローズドヴォイスングを行うための基礎技術というべきメカニカルな方法であり、編曲者を目指す人々が音楽理論で教えられる程度の教科書的知識を用いたハーモニー生成法である。

### 5.3. ハーモニー生成

#### 5.3.1. 基礎となる4パートメロディ

基本的なハーモニー生成を行うためには、まず、与えられた単音のオリジナルメロディと選択されたコードを用いて基礎となる4パートメロディを生成する。その方法をルールとして表現すれば以下のようになる。

RULE1: 第1パートにオリジナルメロディがくるように各コードを転回する

RULE2: ノンコードトーン（コードに含まれない音）が存在する場合は転回形の内で1st ヴォイスがメロディより高く一番近い転回形を採用し、その1st ヴォイスとメロディのノンコードトーンを交換する

上記ルールを「赤とんぼ」に適用した結果、図21に示す4パートメロディを得た。このクローズドヴォイスングを用いたハーモニー生成法は、前述した通り編曲者がハーモニーを作るための単なる基礎技術であり、このままでも聴けないことはないが、やはり自然につながっていると感じられないところがある。

#### 5.3.2. バスパートを重視した4パートメロディの生成

前節で基礎的な4パートメロディは得られたが、このままではハーモニーとしては幼稚なものである。そこで、より自然に安定して聴こえるハーモニーを得るためにさらに音楽理論の経験的知識を加える。

4パートメロディにおいてバスパートは第4パートであるが、これはメロディのイメージを決定付ける第1パートのみしか考慮していないで、正しいコードフィーリングを持つとは言えない。そこで次に示すようなルールを用いて、第1パートがメロディとなるようにヴォイスングがなされた4パートメロディに対してバスパートを生成する。

<b>ORIGINAL MELODY</b>	g c c - - d e g c a g - a c c - d - e - - - -			
<b>CHORDS</b>	cM9	cM6	dm7	cM6
<b>NOTES (INVERTED)</b>	g c c - - d e g c a g - a c c - d - e - - - -			
<b>(BASS PART)</b>	e a a - - b c e a g e - f a a - c - c - - - -			
	c g g - - g a c g e c - d f f - a - a - - - -			
	a e e - - e g a e c a - c d d - f - g - - - -			
	e a g - - a c a g a g e g e c e d c c - - - -			
	cM6	cM6	g7 cM6 dm7 cM6	
	e a g - - a c a g a g e g e c e d c c - - - -			
	c g e - - g a g e g e c f d a c c a a - - - -			
	a e c - - e g e c e c a d b g a a f g - - - -			
	g c a - - c e c a c a g b g e g f d e - - - -			

図 21: 「赤とんぼ」の4パートメロディ生成結果

- RULE1: 各コードに対する転回形のうち最初の音はそのコードのルートである行をバスパートとして第4パートにする
- RULE2: 第1パートがバスパートとして選択されたら、バスパートは第1パートより1オクターブ下げてバスパートとする
- RULE3: 残りのパートのそれぞれ高い方から第2パート、第3パートとする

これらのルールは、いわば、編曲者の経験的知識をルール化して得たものであるが、編曲者の知識として整理すると以下のように表される。

- 1) 第1パートのメロディが聴取者に一番強く印象付けられる
- 2) バスパートが正しいコードフィーリングを出すためには、少なくともその小節を支配するコードに対する最初の音はルートであることが必要である
- 3) ハーモニーの低音部では音程が小さい音を重ねない方が良い（低音部では近い音の重なりは濁りとしか聴こえない）

上述の3つのルールによる4パートメロディを図22に示す。

#### 5.4. 結言

本章では、編曲問題におけるハーモニー生成問題を取り上げ、基本的なヴォイスングを施し4つのヴォイスを持つハーモニーの基礎となる4パートメロディを得た後、より良いハーモニーを形成するために音楽理論の教科書的知識とともに編曲者の経験的知識を加え、バスパートを考慮した4パートメロディを生成した。生成されたハーモニーは、第1の特徴として原曲の持つイメージを保っていた。また、第2の特徴として自然で安定したハーモニーとして聴取者に聴こえるようにバスパートが考慮されていた。

4-PART MELODY	1ST PART	g	c	c	-	-	d	e	g	c	a	g	-	a	c	c	-	d	-	e	-	-	-	-
	2ND PART	e	a	a	-	-	b	a	c	g	e	c	-	d	f	f	-	a	-	a	-	-	-	-
	3RD PART	a	e	e	-	-	e	g	a	e	c	a	-	c	d	d	-	f	-	g	-	-	-	-
	4TH PART	c	g	g	-	-	g	c	e	a	g	e	-	f	a	a	-	c	-	c	-	-	-	-
		e	a	g	-	-	a	c	a	g	a	g	e	g	e	c	e	d	c	c	-	-	-	-
		a	e	c	-	-	e	a	g	e	g	e	c	f	d	a	c	c	a	a	-	-	-	-
		g	c	a	-	-	c	g	e	c	e	c	a	d	b	g	a	a	f	g	-	-	-	-
		c	g	e	-	-	g	c	a	g	a	g	e	g	e	c	e	f	d	c	-	-	-	-

図 22：バスパートを考慮して生成された 4 パートメロディ

## 第 6 章 結論

### 6. 1. 総括

本論文では、音楽における編曲を解くべき対象の問題として設定し、認知科学的な考察を加えながら人間の編曲者の編曲プロセスを分析し、音楽理論あるいは専門家による経験的な知識を規則として整理し、人工知能の枠組みを応用して、編曲を自動的に行うシステム MUSAS: Music Arrangement System の構築に関して基本的な核となるプロトタイプシステムを提案し、さらに編曲プロセスの主要な 3 プロセス、すなわち、コード選択、メロディ解釈、ハーモニー生成についてシミュレーションを行い考察した。

### 6. 2. 今後の課題

本論文を締めくくるにあたって、本研究の成果を踏まえて、残された課題は以下の通りである。

- [1] 複数解に対する解の絞り込み方法の検討
- [2] システムの評価
- [3] 類似性に関する分析的研究

今後も、本研究で提案した MUSAS を通して、少しでも人間の知能の本質に近づくように研究の努力を継続するとともに、現実世界に存在する様々な問題に対して研究的挑戦を続ける所存である。

## Ⅲ. おわりに

著者は本論文を執筆するにあたり、再度、三上先生の学位論文を読み返した。三上先生が学位論文で扱った研究内容あるいは研究の方向性は現在の人工知能、現代流にいうと計算知能 (Computational Intelligence) においても未だ解決しておらず、四半世紀前の研究であるにもかかわらず、今でも新鮮で大変興味深い内容となっている。

あらためて、三上先生の人工知能研究に対する先見性を心より称え、ご冥福をお祈りいたします。