

論文添付票

平成 4 年度

1 冊	事務室受領年月日	平成5年1月8日
論文題目 (外国文の場合は活字体にて明瞭に記入し、その訳文を書きそえること。)		
自己組織化モデルの和音知覚への適用 — 適応過程としての和音知覚 —		
平成 3 年 4 月	進学・再入学 学士入学・転学部	第 4 類 心理学 専修課程
学生証番号		氏名

このドキュメントは、参考資料として公開されています。
原本と比較すると、謝辞およびプログラムリストが削除されています。

著作権はそらパパにあり、放棄されていません。

参考サイト：そらまめ式自閉症療育ブログ
<http://soramame-shiki.seesaa.net/>

<要約>

和声の諸問題の中で、心理学的な関心の対象となっているものの一つに「協和」がある。協和についてはこれまでに音楽理論を基礎に、数学・物理学的理論・心理学的・脳神経学的理論など多くの説明がなされてきたが、決定的な理論はまだ確立されていないのが現状である。この協和と、和音のパターン認識について、コホネンの提唱した自己組織化などの適応アルゴリズムを使用し、計算論的な観点からの説明を試みた。

大きく分けて2種類のコンピュータ・シミュレーションが行われた。

第1の実験では、協和感の発達を音程への純粋な順応過程、つまり「頻雑に聞く音程を協和的に感じるようになる過程」ととらえ、単純な適応アルゴリズムによってその過程をシミュレートすることを試みた。システムは音源・聴神経・音程計算ユニット・順応システムの4段階からなり、神経細胞の能力に即した最小限の前提で構成されたモデルを構築した。このようなモデルにより、協和感の発達をシミュレートすることに成功した。

第2の実験では、コホネンの提唱した学習ベクトル量子化(LVQ)アルゴリズムを使い、各種和音のパターン認識学習をさまざまな条件下で行うと同時に、

同じシステム系列上で協和感の発達をも処理しようと試みた。システムには第1の実験の4段階に加え、自己組織化ニューラルネットが組み込まれた。実験の結果、ネット上にマップが形成され、学習は成功したが、マップの全体像は学習のたびに大きく異なった。また、協和感の発達を並行して処理しようとの試みはうまく行かず、和音認識と協和感の発達が異なったシステムで処理されている可能性を示唆する結果となった。

本実験の結果、今まで複雑な計算能力などの恣意的な前提に頼っていたきらいのあった協和感の発達について、新しい観点からかなり単純な説明を行うことができた。また、自己組織化アルゴリズムの一つの応用例を示すこともできた、と考えるものである。

<序論>

本論文は、和音の知覚のうち、協和感の発達と和音のパターン認識について、計算論的適応モデルの適用を試みるのが目的である。序論では、協和に関する知見と、コホネンの提唱した自己組織化アルゴリズムについて概観した。

1、協和の定義

高さの異なる2個またはそれ以上の音を同時に鳴らしたときに響く音を和音といい、和音の連結を和声という。和声の諸問題については、それが音楽的に非常に重要な要素であるにも関わらず、心理学的には十分に解明されていない点が多い。

その問題の一つに「協和」がある。音楽の友社「新音楽辞典」によると、協和の音楽理論的定義は以下の通りである。

[協和] consonance

2声以上の和音をなすものが、快く調和して響く状態をいう。完全1、8、5、4度、長短3、6度が協和音程とされている。(以下略)

[協和音程] consonant interval

各種の音程*1のうちで、音程を構成する2音がよく調和するものをいう。

(中略) 協和音程は調和の度合によって、完全協和音程と不完全協和音程とに分けられる。

完全協和音程 (perfect consonant interval) は、音程を構成する振動数の比が簡単で、よく調和する音程である。その種類と振動数の比は次のとおりである。

完全1度 1:1

完全8度 2:1

完全4度 4:3

完全5度 3:2

不完全協和音程 (imperfect consonant interval) は、音程を構成する2音が、比較的によく調和するが、まったく溶け合うというほどでもないもの。完全協和音程にくらべて、振動数の比がやや複雑になる。(中略)

長3度 5:4

短3度 6:5

長6度 5:3

短6度 8:5

*1 音程・・・2音間の高さの隔たりを示すもので、2音が同一であるものを1度、音名で1つ離れるごとに2度、3度・・・と数える。例えばハとホの音程は3度となる。それぞれの音程は、それらを構成する全音と半音の数によって、さ

らに長・短・完全・増・減音程などに分けられる。また、全音3つ分にあたる音程（増4度または減5度）のことを、「三全音」と呼ぶこともある。

[不協和（音）] dissonance

同時に響く2つ以上の音が<協和>しない状態にあることをいう。<協和>と<不協和>は対概念ではあるが、不協和とは協和度の漸減が到達する状態にほかならず、この相対的関連性のゆえに協・不協和の境界を明確に規定することは困難である。（以下略）

[不協和音程] dissonant interval

2音がよく調和しない音程の総称。振動数の比が単純でなく、いっしょに鳴らすと濁った響きになる。（中略）

長2度	9:8, 10:9	短2度	16:15
長7度	15:8	短7度	16:9
増4度	45:32	減5度	64:45

以上のほかすべての増、減和音は不協和音程である。

協和については以上のような定義がされているが、「協和とは、調和していることである」というのは、やや同語反復的である。また、一言で「協和」といっても、「滑らかさ」「融合度」「快-不快」など、基準によって異なった判断がなされる (Malmberg, C. E. 1918, Guernsey, M. 1928) ことも分かっている。従って、協和の実験では、その判断基準を厳密に定める必要がある。

ところで、ここでは協和・不協和の理論的根拠の1つとして振動数の比があげられているが、これだけでは厳密性に欠ける。というのは、音程の基礎となる音階に多くの種類がある中で、上記の振動数の比は純正律*2 の場合にのみ成り立つものだからである。現在最も一般的に使用されている12平均律*3 ではこれらの振動数の比は完全1度・完全8度を除いて、すべて近似値となる。

*2 純正律・・・音階音をすべて純正5度（振動比 3:2）と純正長3度（振動比 5:4）によって導き出した、和声理論的にもっとも純粋だとされる音律体系。理論的には整然としているが、転調が不可能なことなどの問題があり実用的でないため、現代音楽ではほとんど使用されていない。

*3 12平均律・・・近似的な音階を平均して実用的に簡便なものとしたものを平

均律といい、オクターブを振動比 $1:\sqrt[12]{2}$ で12等分する12平均律は、現代の主流音階となっている。音楽学者エリスの提唱した音程単位セントで表すと、12平均律のすべての半音の音程は100セント、オクターブの音程は1200セントである。

厳密に言えば、協和の問題を考える際、このような純正律と平均律の関係を常に考慮する必要があるが、音楽心理学では必ずしも両者の区別を厳密に行わない実験も多い。しかし、両者を区別して行なわれた実験 (e. g. Faist, 1897) でも、統計的に意味のあるほどの差は出てこない。このように、純正律に基づいた音楽理論が12平均律でも成立する事実は、聴覚に音程の弁別感があることを推測させる。平均律での「協和音程」が厳密にはすべて複雑な振動比になっている事実や、小学校などにある調律の不正確なピアノでも、「協和音程」は大抵の人には協和的に聞こえるといった経験と照らしてみても、人間にとっての協和感が、振動比の厳密な数学的調和を要求するものでないことは間違いなさそうである。

2、協和の研究史

協和を理論的に説明しようという試みは、古くピタゴラスにまで遡り、以降、

多くの方面から研究がなされてきているが、決定的な理論はまた確立されていない。ここでは協和の研究史に触れ、同時にその問題点についても考えてみる。

(1) 数学的協和説

2音の振動数の数学的關係から協和を考える理論であり、ピタゴラス (Pythagoras) が唱えた、協和度は2音の振動数比の単純さに比例するという説がその草分けである。また、同じく数学的理論といわれる、オイラー (Euler, L. 1739) の無意識計算説は、人間は無意識に振動数の關係を数えており、その計算が少なくて済む協和音には快を感じるという理論である。

これらの数学的理論はその性質上、音程の微妙なずれが数学的協和關係を崩壊させてしまう、という問題を孕んでいる。しかしこの問題は先に述べたように、ある程度の幅をもった音程の弁別閾を想定すれば解決されると思われる。

(2) 物理学的協和説

音の持つ物理学的特性から協和を説明しようという説で、ヘルムホルツ (Helm

holtz, H. v. 1862) の共通部分音理論がその代表である。

彼は、基底膜の生理学的研究から、ヒトの聴覚システムに複合音の倍音成分を検知する能力があることを発見した。そして、うなり*4 が少なく共通部分音の多い音程ほど協和的に聞こえるとした（共通部分音とは、2音の倍音列*5 中の共通音のことである）。この理論は、音楽理論における協和・不協和音程の分類を説明することも可能であり、妥当性の高い理論といわれる。近年、プロンプとロベルト (Plomp & Lovelt, 1965) や亀岡と厨岡 (Kameoka & Kurigaoka, 1969a; 1969b)、スレイメイカ (Slaymaker, F.H. 1970) などによって再検討され、純音間の協和感は周波数比ではなく周波数差の関数であること、複合音の協和感は純音としての倍音の集合体として考えることが可能であることなどが示されている。

*4 うなり・・・振動数の近い2つの音の波が同時に起きた際、合成波の振幅が周期的に変動する現象をいい、耳には周期的な音の大きさの変化として感じられる。純物理的な現象であり、変化の周期は2音の周波数の絶対差に等しい。

*5 倍音列・・・基音に対して整数倍の振動数を持つ上音をいう。一般に楽器の生ずる音には豊富な倍音が含まれており、これが豊かな音色を構成している。倍音を含んだ音は複合音と呼ばれ、基音だけからなる純音と区別される。倍音は基

音との振動比によって第2倍音、第3倍音・・・などと呼ばれる。このような倍音を低次の倍音から順に表したものが倍音列である。



図0-1 ハ音と重音とした場合の倍音列

物理学的協和説と呼ばれるものには他にクリューガー (Krueger, F. 1910) の差音*6 説 (発生する差音の数が多いと、うなりや中間音を生じ、粗く不快な不協和音になるという理論) や、アービン (Irvine, D. B. 1946) の音色説 (楽音の波形をみた場合、短い波長を持った斉一的なものが協和的に聞こえ、波長が不斉一で基本振動数の小さいものは不協和的に聞こえるという理論) がある。

これらの物理学的理論は、ヒトに物理的な情報処理能力を仮定することで協和を説明しており、ヒトと理論の接点がある点で数学的モデルよりも進んだ理論である。しかし、実際にそのような処理がどのようになされるかという問題に対してこれらの理論はほとんど答えていない。

*6 差音・・・うなりと似た面を持った音。振動数が大きく異なる2音を同時に鳴らすと、聴覚器官が共鳴し、振動数の差を周波数とする派生的な音=差音が聞

こえてくる。例えば400Hzと450Hzの純音からは、50Hzの差音が聞こえる。差音は生得的な原因で現れるものであり、うなりのように物理的なものではない。

(3) 心理学的協和説

ここでは、実験に基づいた音楽心理学的な協和説をやや詳しく検討した。

・シュトゥンプ (Stumpf, C. 1897) の理論

彼は、心理的な音の融合を協和の本質と考え、うなりや不快感などの随伴現象をしりぞけた。彼のいう融合とは、2音の感覚内容が厳密に1つに知覚されることである。彼は実験を行い、8項目からなる融合の法則を定めた。

この説の最大の問題は、融合と協和を同一視した点にある。協和に関する評定基準には融合度以外に、滑らかさ・一致度・快さ・柔らかさなどがあり、融合度がそれらを代表するものであるというコンセンサスは現在のところない。

・オグデン (Ogden, R. M. 1909) の理論

彼の説は獲得遺伝説、またはハーモニック説と呼ばれる。彼によると、協和感

の成立は生得的および獲得的な傾性によるものである。ある音の結合を頻雑に聞かしていると、聴覚機構が変容して、その音の結合を協和音として聞くようになり、その聴覚機構の変容は遺伝していく。ではなぜ、特定の結合音だけがこのような傾性を成立させるのかといえば、それらの結合音が単独で頻雑に聞かれるのみでなく、部分音としても多く含まれているからである。部分音の豊富な1つの楽音に含まれる部分音は、オクターブや5度が圧倒的に多く、不協和音程はごくわずかである。したがって、部分音としても頻雑に聞かれる協和音程は種族的な傾性にまで発展するが、協和度の低い音程は、せいぜい後天的に音楽の慣用として協和的とされるに過ぎないという。この説の最大の問題は獲得遺伝的な考えにあるが、脳の可塑性の大きさを考えれば必ずしも獲得遺伝を仮定する必要はないのではないか、と思われる。

・ムーア (Moore, H. T. 1914) の理論

彼は、特定の音程を聞かせ続けると、協和音程の場合は協和感が減少し、不協和音程の場合には逆に協和感が増大していくことを見いだした。彼の説では、協和とは聴覚機構が反復によって外界からの物理的刺激関係に対して適応することである。その場合、単純な関係に対して適応するよりも、複雑で統合が困難な音

程に適応できたときの方が大きな快感を生じる。この根拠として、彼は、音楽史的に5度から3度へ、さらにより複雑な音程が開拓されてきた点をあげている。

・ランディン (Lundin, R. W. 1953) の理論

彼の唱える文化説によると、音楽的な行動は後天的に獲得されたものであるが、それは個人の生活している文脈の中で形成されるものである。この場合に音楽的文化として個人に影響する条件としては、家族、学校、その他の音楽的環境が広く含まれる。この文化説の根拠として彼は協和判断に個人差・年齢差があること、同じ音程を聞かせつづけることで協和判断が短時間で変容しうること、不協和音でも曲の位置によって協和的に聞こえることなどをあげている。

彼の説は、従来のように協和を音の振動数比との関係で考えず、一切を後天的な文化の影響に帰した点に特徴がある。しかし、彼のいう文化とは非常に曖昧であり、雑然とした条件をすべてこの語で代表させているという問題がある。

オグデンやムーア、ランディンらの説は、協和感の発達を後天的な影響による適応の過程であるとした点で画期的なものである。楽音の部分音にはいわゆる「協和音程」が多く含まれており、普段の生活で頻雑に耳にする。その結果、よ

く耳にする「協和音程」を「快」と感じる、という説明は、聴覚の適応過程として非常に自然な印象を受ける。この論文ではいくつかの適応モデルを使って協和感の発達を模擬実験するわけであるが、モデルの構築にあたっては理論的根拠をこれらの説に求めた部分が大きかった。

3、協和に関する実験的知見

(1) 協和の順位と判断の基準

協和の順位については、さまざまな方法による研究がなされている。

完全協和3音程が上位にくる点ではどれも一致しているが、3度などの和音の順位が研究者によって特に大きく異なっている。このような違いの生じる原因としては、音源の違い、方法の違い、判断基準・尺度の違い、被験者の素養や年齢・文化の違いなどが考えられるが、このうち、音源の違いによる協和判断の変動は小さく、判断基準の変化による影響は大きい (Malmberg, C. E. 1918) ことが分かっている。

表0-1 協和の順位 [MALMBERG 1918]

研究者	年代	測定道具	方法	基準	C, C, C, G, C, F, C, E, C, A, C, E, ♭C, A, ♭C, G, ♭C, B, ♭C, D, C, B, C, D, ♭											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Franco of Cologne	12世紀		理論的	快	1	2	2	3	4	3	4	5	5	5	5	5
Euler	1739		数学的	快	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Helmholtz	1863	多様	上音の一致 唸り	滑らかさ	1	2	3	5	4	6	7	8	9	8	10	11
Stumpf	1883	パイプ オルガン	分析	融合	1	2	3	5	4	6	7	8	9	8	10	11
Faist	1897	パイプ オルガン	1) 直接 2) 分析	融合 融合	1	2	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5
Meinong and Witasek	1897	バイオリン	対比較	融合	1	2	3	5	6	9	4	7	8	10		
Lippe	1899		理論的	リズムの一 致	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Buch	1900	パイプ オルガン 調子測定器	分析	融合	1	2	3	3	3	4	4	4		5	6	
Krueger	1903	音叉	分析	滑らかさ	1	2	3	4	3	6	5	5	4	7		
Pear	1911	調子測定器	対比較	融合	1	2	3	4	5	7	6		8	9	10	11

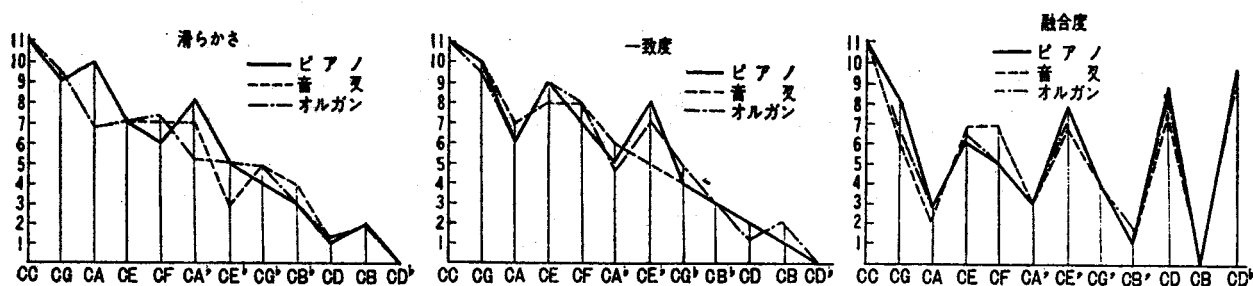


図0-2 音源と判断基準の差異が協和判断に及ぼす影響 (マルンバーグの
実験結果) [MALMBERG 1918]

これをみると、融合度による判断は他の基準による判断とかけ離れている。一方、同様の実験を行ったガーンゼイ (Guernsey, M. 1928) の場合、「融合」「滑らかさ」での判断が似ているのに対し、「快」の判断ではかなり異なった結果が出、しかも音楽的教養の高い被験者でその傾向がより強く見られた。この結果から彼は、協和判断は個人の精神的構えや採用している判断尺度に大きく依存する

とし、心理的な協和度の最も妥当な判断基準は「快」であると考えた。

(2) 音程の弁別閾

和音の弁別が必ずしも厳密な周波数比に基づくものではなく、正確な協和音程から少しずれていても、人間の耳には「協和的」に聞こえる。このような聴覚特性のおかげで、周波数比に誤差を含んだ平均律が実用的な音律体系として成立できるのである。実際、振動数比を少しずつ変化させて非音楽的な音程の協和感を調べた実験でも、協和感の変化は漸变的なものであり、必ずしも振動数比の単純な点が最高値を示さない (Guthrie, E. R., & Morrill, H., 1928)。これらのことから、和音の音程の知覚には弁別閾が存在することが推測される。ピーターソンとスミス (Peterson, J. & Smith, F. W., 1930) によると、その弁別閾は音楽的被験者で約30セント (注:半音=100セント)、非音楽的被験者でその倍以上であった。

(3) 協和感の発達

協和感は生得的なものであるか、それとも後天的に発達してくるものであるか

は、協和とは何かという問題とも深く関る本質的問題である。この問題に対して、これまでになされてきた実験の結果は、協和感が発達してくるものであることを示している。例えばこの種の最初の研究とされるバレンタイン (Valentine, C. W. 1913) の実験では、6歳から14歳までの被験者にピアノで和音を弾いて聞かせ、好きか嫌いかを答えさせた。この結果、協和感は9歳ごろから急速に発達することが分かった。また、音楽的に豊富な経験を持つグループでは、更に早く6~7歳で既に不協和音に対する嫌悪がみられた。

表 0-2 和音に対する好悪の発達 (VALENTINE 1913)

年 齢	6	7	8	9	10	11	12	13	成人
児 童 数	15	24	25	27	27	24	22	31	
長3	36	37	44	36	33	41	35	37	36
短3	38	35	35	42	38	36	20	25	29
8	26	29	37	42	31	42	22	31	27
長6	20	22	35	42	31	40	28	32	27
短6	32	36	36	29	33	25	28	37	24
4	34	35	26	36	36	37	25	-2	17
増4	28	40	28	33	23	17	5	12	17
5	22	41	35	22	29	35	0	11	15
長2	32	42	20	16	6	9	-11	-5	-11
短7	24	30	40	28	18	0	3	2	-18
長7	28	35	26	21	9	-20	-20	-25	-35
短2	16	30	20	4	4	-5	-35	-32	-41
8協和音平均	27.0	33.1	34.5	35.0	31.7	33.5	20.4	22.9	24.0
4不協和音平均	25.0	35.6	26.5	17.2	9.2	-4.0	-15.8	-15.0	-26.2

同様の実験はダッシール (Dashiell, J. F. 1917) や城戸 (1926)、高野 (1929) などによっても行われているが、どれも、協和感が年とともに発達していくということが示されている。

4、和音知覚と自己組織化モデル

ニューラルネットモデル上での学習アルゴリズムの一つに「自己組織化」がある。本論文ではコホネンの提唱した「学習ベクトル量子化 (Learning Vector Quantization, 以下LVQと略)」の自己組織化アルゴリズムを使用した。

LVQでは、パターン認識がその主な課題となる。サンプルとして入力されるデータは多次元の固有パラメータを持っている。一方、ニューラルネットは限られた (入力データのパラメータの持つ次元より小さい) 広がりしか持っていない (通常は脳細胞を模して2次元であることが多い)。つまり、入力データの位相的關係を保持しつつ、多次元の情報圧縮し、限られた次元のニューラルネット上で学習を成立させることが、LVQの目標となるわけである。

このために、ニューラルネットの各ニューロンは、データと同次元の「適応変数 (adaptive parameters)」を持っており、初期状態ではランダムな値が当てはめられている。ここにサンプル入力が入ってくると、入力と最も近い適応変数を持ったニューロンが反応し、その周囲のニューロンも巻き込む形で入力に対して適応する (適応変数が入力に対して、より近い値に変更される)。

この操作を繰り返していくと、特定の入力に反応するニューロンが固定化し、

特定の入力がネットの特定の位置に定位するようになる。この状態を、ニューラルネットのマッピングが完成した、という。この際、類似した入力に対応するニューロンの位置は近くなり、異なった入力に対応するニューロンの位置は遠くなる。すなわち、入力データの持つ位相的關係 (topological relations) がニューラルネット上に再現されるのである。次にコホネンの示している学習例をみる。サンプル入力は5次元のデータを持つ32種類のパターンで、それぞれAから6までの番号がふられている。

Table 0-3 Input data matrix

Item																																
Char.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	1	2	3	4	5	6
ξ_1	1	2	3	4	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
ξ_2	0	0	0	0	1	2	3	4	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
ξ_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	3	3	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
ξ_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	1	2	3	4	2	2	2	2	2	
ξ_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

このサンプルを数学的に最適な樹形図で表すと次のようになる。

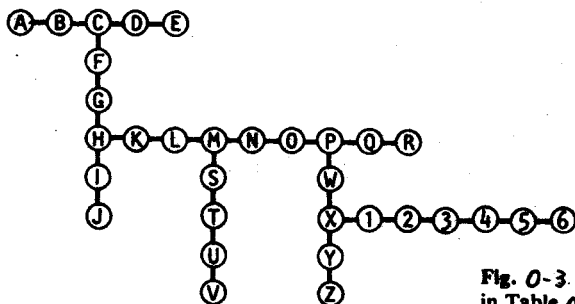


Fig. 0-3. Minimal spanning tree of the data in Table 0-3

このサンプルを実際にLVQで学習させ、10×7でマッピングしたものが次の

図である。最適な位相関係がかなり正確に再現されていることが分かる。

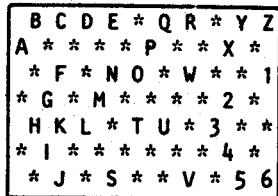


Fig. 0.4 Self-organized map of the data in Table 0-3

このように、LVQは入力としてサンプル入力だけを要求し、正解のようなものを付加する必要がない。このため、外部からの刺激に適応し、さらに認識能力を向上させていくといった知覚システムのモデルとして大きな可能性を秘めているといえる。

本論文は、以上のような視点に立ち、和音知覚のうち、協和感の発達と和音のパターン認識について、考察するため、まず単純な順応モデルを使い、次に自己組織化モデルを使用して、その過程をシミュレートしたものである。

< 実験 A >

実験 A では、単純な順応モデルによって「協和感」の発達を説明することを目的として、3種類の実験を行った。なお、実験はすべてコンピュータによるシミュレーションで行った。使用したプログラミング言語は Turbo PASCAL v6.0a、NEC製コンピュータ PC-9801VX21 の MS-DOS 上で実行された（以下全実験で同じ）。

・ Experiment 1

オグデンのいうように、倍音を豊富に含んだ楽音には、オクターブや5度といった通常我々が「協和的である」と感じる音程関係が、倍音列中の部分音にも多く含まれている。このことから、部分音から音程を抽出する能力のみを主たる前提とした聴覚システムを想定し、協和感の発達は音程に対する順応、つまり「頻雑に聞く音程を協和的だと感じるようになる」過程である、という仮説をたて、これを検証した。

a. Algorithm

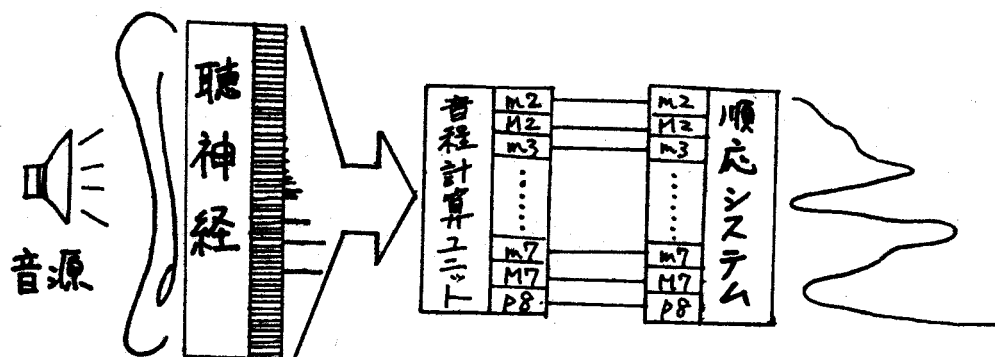


図1-1: 実験A-1におけるアルゴリズムの概略

アルゴリズムの概要は図1-1の通り。システムは、音源・聴神経・音程計算ユニット・順応システムの4段階で構成されている。

音源によって発生される音は、ノコギリ波、矩形波、三角波の3種類の波形それぞれに、単音と短2度からオクターブまでの12種類の音程を用意した。つまり、 $3 \times (1 + 12)$ で39種類である。複合音どうしの音程関係は平均律的であるが、倍音列の振動数比は正確に計算されるため、倍音列中に含まれる音程関係は純正律的なものとなる。これは、ピアノなどの鍵盤楽器で和音を発生させたのと同じ状態であると考えてよい。

聴神経は、特定の振動数帯域に反応する多数の聴覚ニューロン（1次元配列）で構成した。ニューロンは2を底とする振動数の対数に比例した弁別閾を持ち、ピアノの鍵盤のような配置で整然と並べられた。そして、入力された複合音に含

まれる基音・倍音の振動数に対応するニューロンが、音圧の平方根に比例した大き
きさで反応するようにした。結果的に、聴神経は複合音の対数的なスペクトル分
析を行なうことになる（ヒトの聴覚システムでこれに類似した処理が行なわれる
ことは知られている。また、著者の予備実験で、自己組織化モデルによってこの
ような機能をニューラルネット上に容易に構築できることも示された）。なお、
ニューロンの反応の大きさを音圧の平方根に比例させた点については、ウェーバー
の法則などの精神物理学的な知見に拠ったものである。

音程計算ユニットは、本実験では1オクターブの範囲で自由に音程の計算がで
きるものとした。ここでいう音程計算とは、任意の2つの聴神経間の距離を計算
する能力をいう。したがってこの能力の中には、相対音感（基音の振動数にかか
わず、オクターブや5度といった相対的な音程を抽出する能力）も含まれる。

最後の順応システムは、特定の音程の入力に反応し、内部変数の「協和感」を
増減させていくようなニューロンの集合（1次元配列）構成した。1回の刺激に
よる「協和感」の増加率は、音程を構成する2音の入力の強さの相乗平均に比例
させた。

あるニューロンの「協和感」が増加すると、側抑制により、他のニューロンの
「協和感」は減少すると考えるのが自然である。本アルゴリズムでは、順応した

ニューロンの両隣り以外の全ニューロンの「協和感」を同じ割合で減少させた。

この際、「協和感」の増加分と減少分の合計が等しくなるように調整した。

以上のアルゴリズムをまとめると、楽音（複合音による単音・和音）の中に含まれる全ての音程関係を抽出し、それぞれの音程に対して順応度を増加させていく、という単純な適応アルゴリズムである。

b、Procedure

設定できる条件は、順応システムのニューロンの音程弁別閾、倍音列の上限を何倍音まで採用するか、3種類の波形（単音・和音は別扱いとしているため実際には6種類）の発生率、和音の12種類の音程の発生率である。

・条件1

弁別閾は半音の $\frac{1}{3}$ 、16倍音まで採用、各波形の発生率は、単音ノコギリ波15%、単音矩形波8%、単音三角波50%、和音ノコギリ波15%、和音矩形波・和音三角波各6%で計100%。また和音の各音程の発生率は、短2度5%、長2度6%、短3度8%、長3度9%、完全4度10%、三全音2%、完全5度12%、短6度9%、長6度8%、短7度6%、長7度5%、オクターブ20%で計100%。

次のような根拠から、条件1を標準条件とみなした。まず、音程の弁別閾は、ピーターソンとスミスの実験で示された30セントに近い半音の1/3 (33セント) とした。次に、波形の発生率では、最も頻雑に耳にするであろう「音声」を模した単音三角波を50%と高く設定した。和音の各音程の発生率については、後述の実験2と類似した予備実験を行い、その結果をもとに決定したものである。

条件2以降は、この標準条件を統制条件とし、一部の条件を変化させることによって設定した。それぞれの実験は3000試行行われ、その結果おこった、順応システムの配列要素の値の増減を、協和感の発達とみなした。

・条件2

採用する倍音の上限を8倍音、32倍音とした。

・条件3

音程の弁別閾を半音 (100セント)、半音の1/2 (50セント)、半音の1/4 (25セント)、半音の1/5 (20セント) の4段階に変化させた。

・条件4

和音をまったく発生させず、単音のみを発生させた。各波形の発生率は、単音ノコギリ波30%、単音矩形波20%、単音三角波50%、その他0%とした。

・条件5

単音に含まれる部分音程をみるため、単音ノコギリ波だけを100%発生させた。その他は条件1、2、3と同じとし、条件1、2、3との相違をみた。

c、Result

条件1の結果は図1-2の通り。実線で結んだ「o」が音階音程（ピアノの鍵盤上で発生可能な音程）、「'」が半音より小さい微小部分を含む非音階音程（ピアノでは発生不可能な音程）に対する「協和感」である。

協和感はオクターブにおいて最も発達し、次いで完全5度、完全4度、短6度、長6度、長3度、短3度の順となった。長2度、短7度までは辛うじて協和感は正であるが、短2度、長7度、三全音は負となった。

非音階音程に対しては過半数が負の協和感を獲得したが、8種類だけは正となった。これは非音階音程全体の約1/4であった。

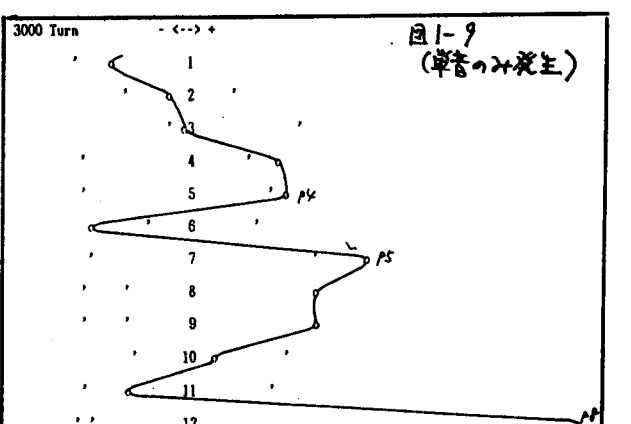
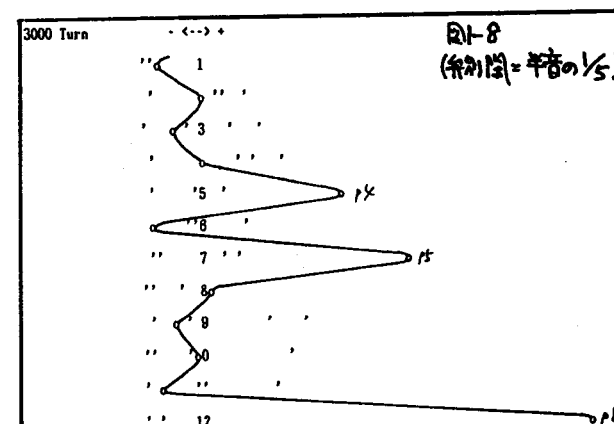
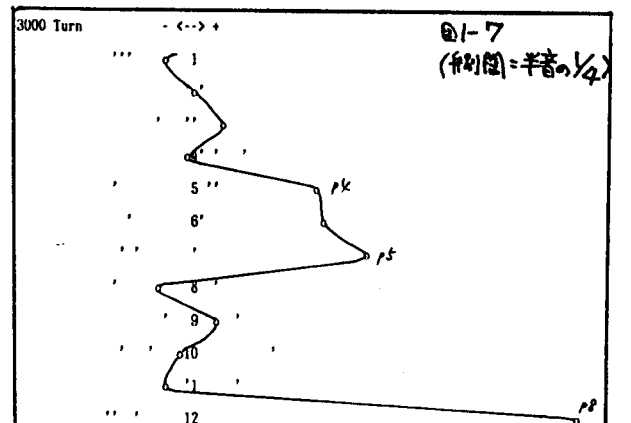
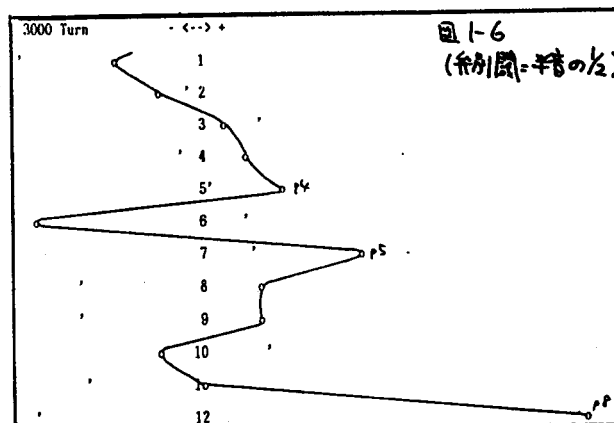
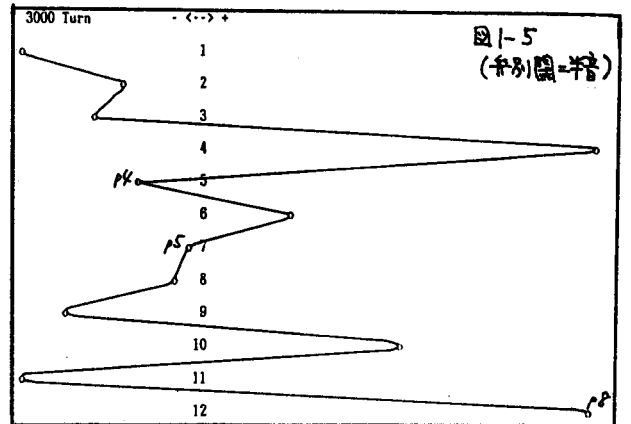
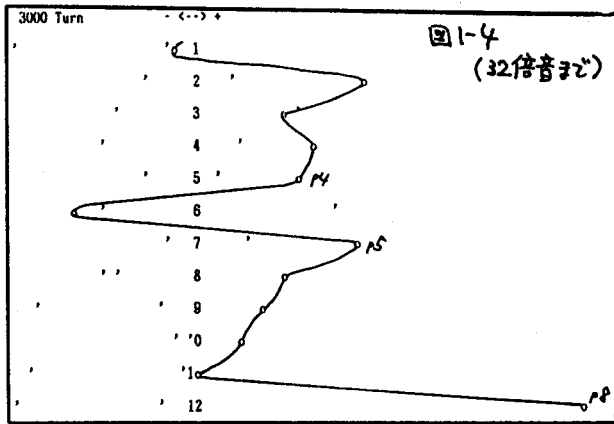
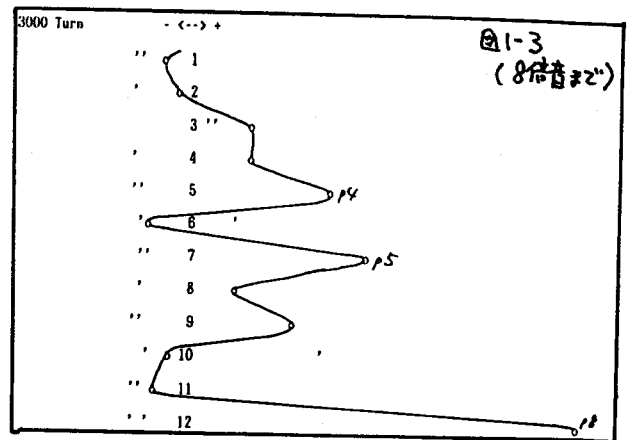
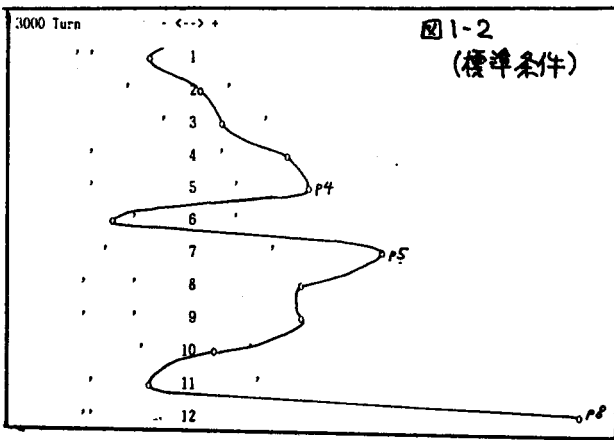


図1-2~1-9: 実験A-1の結果... 各行に並んだ数字は各音階音程と半音の数で表している。中でも、p4(完全4度)、p5(完全5度)、p8(完全6度=オクターブ)には目印としてある。その行にある「0」の点の位置が、その音程に対してどのような協和感が覚えたかを示している。点の右にある数字は、その音程を「協和的だ」と感じようとする協和感が覚えたことを示している。なお、「0」の点は半音未満の音程を含む非音階音程に対する協和感を示している。

条件2では(図1-3・4)、8倍音までの場合、協和感の順位がオクターブ、完全5度、完全4度、長6度、[短3度・長3度]、短6度の順となり、理論上不協和とされる音程すべての協和感が負となった。また、32倍音までの場合、協和感の順位はオクターブ、長2度、完全5度、長3度、完全4度、短6度、短3度、長6度、短7度、長7度の順となり、短2度・三全音の協和感が負となった。

条件3では(図1-5・6・7・8)、弁別閾を半音にした場合、オクターブと完全4度、長3度、短7度に対する強い協和感の発達がみられたが、全体としては3000回の試行を経ても協和感は未発達なままであった。弁別閾が半音の1/2の場合、条件1とかなり似通った協和感が発達した。弁別閾が半音の1/4と、条件1よりも細かくなると、協和感の分布が非音階音程にまで広く分散し、音階音程に対する協和感がかえって未発達なままとなっただけでなく、理論上不協和とされる三全音に対する協和感がかなり発達するという結果も見られた。協和感が発達しない、という傾向は弁別閾を半音の1/5とすると更に強まり、完全協和3音程以外の音階音程に対する協和感はほとんど発達しなかった。

条件4では(図1-9)単音しか発生させなかったにもかかわらず、結果は条

件1と非常に似通ったものとなった。協和の順位はオクターブ、完全5度、短6度、長6度、完全4度、長3度、短7度となり、長短2度・短3度・長7度・三全音の協和感が負となった。

条件5では波形が1種類であるため、結果すなわち単音ノコギリ波の倍音列上に存在する各音程の大きさである。他の条件を条件1と同じにした場合の協和順位は、オクターブ、完全5度、完全4度、長3度、短3度、長6度、短6度、短7度となった。これは条件4、さらには条件1に近い結果であり、また音楽理論や過去の知見とも合致した結果である。その他の条件でも、先に行なった各種の波形や和音によるものと同じ結果が得られた。

d、Discussion

倍音列上の部分音に含まれる各音階を抽出し、それに適応してだけで、協和感が獲得できる、という仮説は支持された。仮に和音を聞く機会がなく、単音ばかりを聞く環境であったとしても、その単音に豊富に倍音が含まれてさえいれば、オクターブや5度・4度を協和的と感じ、2度や7度や三全音を不協和と感じる「適切な」協和感が獲得されうることも示された。

本アルゴリズムで最も重要な役割を果たしているのは、音程計算ユニットである。このユニットの存在を仮定するだけで、過去の理論でいわれたような周波数比の計算や波形の比較といった複雑かつ恣意的な計算能力を仮定することなく、実際に近い協和感を獲得することができたのである。音程の計算は、その前の段階で音のスペクトルが対数的に分析されていさえすれば、単純な引き算の繰り返しであり、また、ヒトに音程を識別する能力が備わっているという仮定は比較的自然なものである。その能力を倍音列上の部分音の音程認識にまで拡張することによって、他に特別な能力を仮定しなくとも、協和感を発展させるのに必要な情報を抽出することができるのである。（後の実験3により、音程計算ユニットはさらに単純化される）

また、平均律的な協和感の発達のためには、あまりにも細かな音程の弁別能力はかえって邪魔になるという興味深い結果も、条件3の実験によって示された。人の音程の弁別閾は30セントから60セントであるとされているが、本実験でもその範囲に含まれる条件で行った実験で、最も「人間的」な協和感が発達した。これは逆にいえば、一般的に言われている協和順位が、聴覚の能力や限界に依存していることを示唆している。

条件4・5で、単音のみでも適切な協和感が発達することが示されたため、本

実験は「オクターブへの協和感が発達するのはオクターブの和音をよく聞くためである」という類の循環論に陥ることを避けることができた。しかし、和音の聞かれる環境をはじめから設定するのはやや恣意的である。したがって実験2では、本実験を拡張し、世代が進むにつれて音環境そのものが変化していくという、音楽史的なシミュレーションを行うことにした。

・ Experiment 2

a. Algorithm

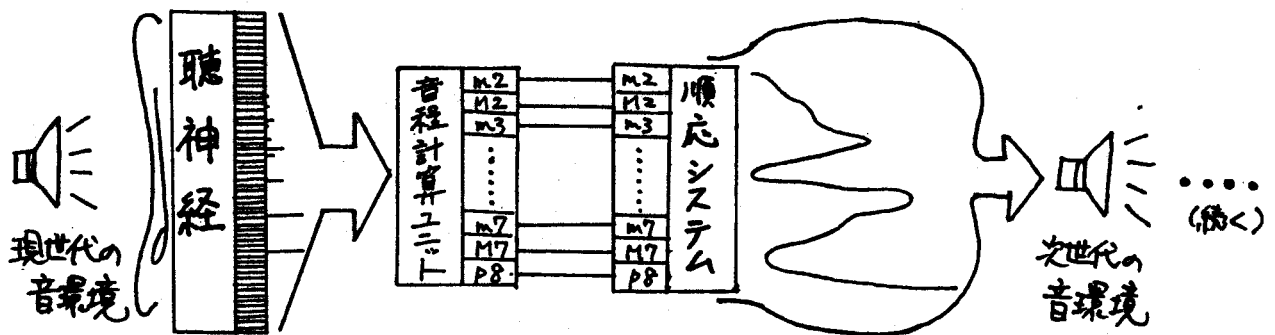


図2-1: 実験A-2のアルゴリズムの概略

簡単にいえば、実験1のシステムに「世代」の概念を追加したものである（図2-1）。

システム1での「音源」は、「音環境」に代えられているが、発生する和音の

各音程の割合が世代が進むごとに変動していく、という点を除けばシステム1の「音源」と同じものである。各世代はその時点での音環境にさらされながら「協和感」を発達させていく。この点もシステム1とまったく同じである。

協和感の発達が終わると、今度はその世代が次の世代のための「音環境」を作り出していく番となる。次世代の「音環境」は、現在の「音環境」と、その世代が獲得した「協和感」とを比較し、そのバランスを取ることで形成される。

まず、協和感発達の過程で、まったく現れなかった音程と、すべての順応過程で現れた音程を仮定し、その協和感を計算する。そして、前者を「協和感発達0%」、後者を「協和感発達100%」とおき、その間を均等に目盛る。こうすれば、実際に獲得された各音程への協和感に対し、具体的な「協和感発達度」を決めることができる。

次にこのようにして求めた協和感発達度と、現在の音環境での各音程の発生率とを比較する。現在の音環境よりも協和感が発達した音程は、次の音環境でその音程の出現率を増加させる。その逆なら、次の世代での出現率を減少させる。

このようにして音環境を変化させていき、世代が進むにつれ、どのような音環境が形成されていくかをみた。

b、Procedure

実験1の要素に加え、「協和感」発達のプロセスを1世代あたり何試行おこなうか、を設定可能とした。なお、本実験の場合、和音の各音程の発生率は世代とともに変化するため、設定できるのは第1世代の音環境である。

・条件1

第1世代では、和音の各音程の発生率を、オクターブ100%、他はすべて0%とした。つまり、第1世代は単音あるいはオクターブの和音しか耳にする機会がないことになる。1世代あたりの試行数は300とした。また各波形の発生率と音程の弁別閾は実験1の標準条件と同じとした。

・条件2

最初の音環境を非現実的なものにするとうどうなるか、という実験として、第1世代の和音の各音程の発生率を、短2度・長7度・三全音がそれぞれ33.3%であるように設定した。これらは最も不協和とされる音階音程である。

その他の条件は条件1と同じとした。

c. Result

条件1での、主な音程の発生率の推移は図2-2のようになった。発生率はおおよそ20世代で安定した。初期設定で100%の発生率だったオクターブは、第2世代で既に85%程度まで減少し、その後漸減して20%弱の発生率で安定した。また、完全5度は12%程度、完全4度は10%前後で安定し、不協和音程の中でも特に三全音はほとんど発生率が上昇せず、2%~3%の範囲で安定した。

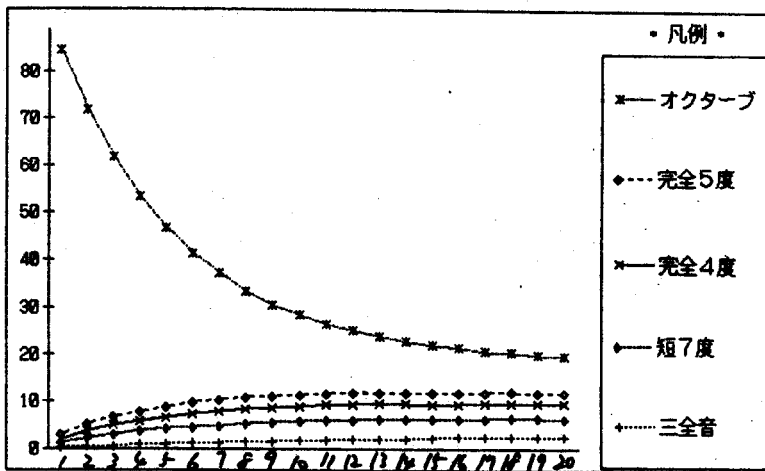


図2-2

実験A-2, 条件1の結果
縦軸は各世代ごとの特定の音程の発生率%を意味し、横軸は世代を意味する。

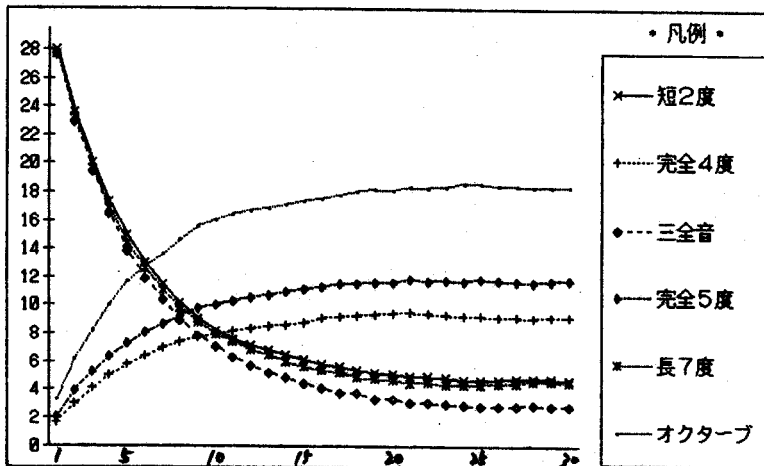


図2-3

実験A-2, 条件2の結果
内容は図2-2と同じ。

条件2 (図2-3) では、発生率は約30世代で安定した。初期設定で33.3%だった各不協和音程は、ほぼ第6世代でオクターブよりも低い発生率となり、第10世代あたりで全ての協和音程よりも低い発生率となった。安定後の各音程の発生率を条件1と比較するとほとんど差がなかった。

d、Discussion

西洋音楽の音楽史をみると、多声音楽の始まりは9世紀ごろ、グレゴリオ聖歌を定旋律とした「オルガヌム」の稚拙な試みからであった。オクターブや平行4度などから始まったオルガヌムだが、12世紀には5度、6度や3度などが駆使されるようになった。その後、17世紀のバロック音楽で2度や7度などの不協和音も効果的に使われるようになった。さらに19世紀後半以降、ヴァーグナーなどの新ロマン派の作曲家は半音階法によって調性音楽の限界を追究し、シェーンベルクの十二音技法に至って、無調性音楽が生まれた。

本アルゴリズムによる各音程の発生率は、収束した。これは、音楽に対する美意識が純粋に協和感の発達に依存するのならば、(各和音の使用率のバランスとしての) 音楽形式には、落ち着くべき最終的な姿が存在する可能性を示している。もちろん、音楽活動というのは創作の世界であり、協和的な音楽がすなわち優れ

た音楽とはいえない。また、あえて不協和音を駆使することで何かを表現する、ということもある。それがヴァーグナーの半音階法であり、シェーンベルクの十二音技法だったとも言えよう。しかし、彼らの活躍した時代の次に訪れたのが新古典派であったことから、彼らの試みは「安定」からの一時的な逸脱であり、大きな歴史の流れからみれば、調性にのっとり、協和音を中心に多様な和音をバランスよく使った音楽が徐々に形成されてきた点は疑いない。そのような巨視的な音楽史の流れを本実験は示しているのではないだろうか。

条件2では、不自然な音環境から始めたにも関わらず、条件1と同一の、自然な音環境へと収束した。発生率が安定するためにかかった世代数の絶対値に大きな意味はないが、条件2の音環境が安定するのに条件1の約1.5倍の世代数を必要とした、という相対関係には多少の意味があるように思う。すなわち、音環境がいずれ安定するという結果については初期の音環境に無関係に保証されるが、安定にかかる時間は影響を受けるのである。

和音観を含めた西洋音楽的な音楽観が世界の主流を占めるようになった原因としては、もちろん西洋諸国の海外進出が大きい。しかしそれだけではなく、それが最も協和感の発達に素直に対応した理論を持っていたことも大きかったのではないだろうか。条件2の結果は、西洋音楽を輸入し、それを取り込んでいった日

本などの非西洋諸国の音楽史を類推させる。

(なお、ここでは西洋音楽が最上のものであるとか、無調性音楽が無価値なものであるとか、そのようなことを言いたいのではないことを断っておく)

・ Experiment 3

実験1と2では、音程計算ユニットを無条件の前提とした。システムの他の部分が生物学的に妥当だと思われる程度の簡単な処理をしているのに対し、このユニットはやや複雑な計算を行っており、そのためにこのシステム全体が恣意的なものに陥ってしまう危険性を孕んでいた。そこで本実験では、この音程計算システムを側抑制とA/Dコンバータの組み合わせによって構築することにより、システム全体の生物学的妥当性を向上することを目指した。

a. Algorithm

システムは、実験1のシステムと同じである、音程計算ユニットの内部構造が変更されている(システム図は省略)。音程計算ユニットの処理は次の通り。

まず、聴神経から全ての出力はA/Dコンバータを通され、0または1の信号

に変換される。どちらに変換されるかは、最も出力の強い「基音」が1に変換される確率を100%、無音状態が1に変換される確率を0%として、出力の強さに比例した確率でランダムに決定される。その結果、くし形のスペクトル情報が算出される(図3-1)。

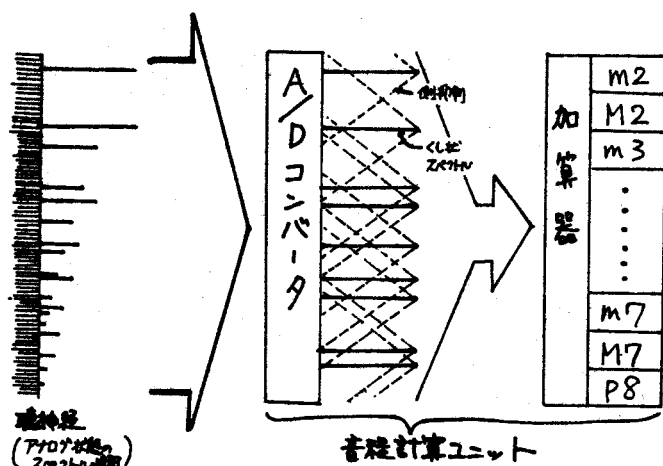


図3-1
実験A-3における
音程計算ユニットの
概略図

続いてスペクトルの存在するニューロンを中心に左右のニューロンに側抑制をかけるわけであるが、側抑制の大きさはニューロンからの距離に従って線形的に減少するものとする。その結果、スペクトルが密な部分では反応が小さくなり、粗な部分では反応は大きなままとなる。この反応の強弱によって音程の大小を示そう、というのがこのユニットの考え方である。側抑制を受けた後のニューロンの反応は、その強さごとに集められ、「特定の強さの反応を示したニューロンの数」が、特定の音程が含まれている割合としてアナログ的に出力され、次の順応システムに送られるわけである。

b、Procedure

設定できる条件は実験1の諸条件に加え、側抑制量が0となるニューロン上の距離である。予備実験の結果を踏まえ、この値は1オクターブに固定した。

本実験はこのアルゴリズムで実験1と同じ結果を出せるか、を知ることが目的であるので、実験1の条件1から3までと同じ条件下で実験を行った。

c、Result

すべての条件で、実験1と非常に近い結果がみられた。多くの非音階音程に対する協和感がマイナスの発達を見せた点において、むしろ実験1よりもきれいな結果であった。順応の過程で、オクターブに対する順応量が突出して大きくなった点だけが実験1と異なる点であった。結果のうち、条件1によるものを図3-2に示した。図では、オクターブへの順応量だけを1/3にしてある。

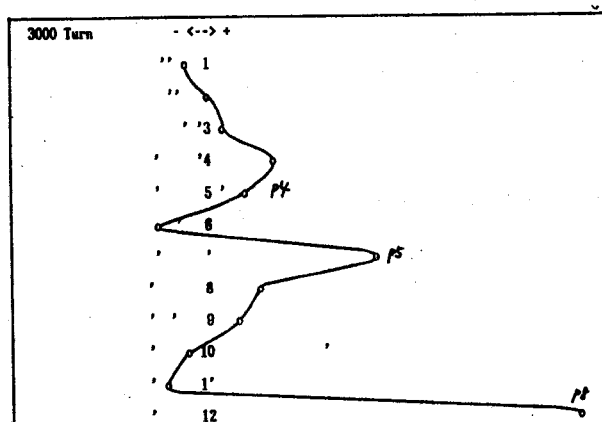


図3-1

実験A-3. 条件1の結果

実験A-1の結果と同く、「0」が音階
音程に対する協和感の発達を元として
いる。

d、Discussion

実験1で想定したシステムのうち、音程計算ユニットという、一見恣意的で複雑な計算を行う必要があるように思われた部分を、側抑制とA/Dコンバータという神経細胞にも容易に行える処理の集積として表現することができた。この結果は、本システムの生物学的妥当性を大きく向上させるものであると思われる。本アルゴリズムによる音程計算は、実験1のものに比べるとかなり大雑把なものであり、近似的な計算しかできないはずである。それでも同レベルの精度で処理ができたということは、楽音の持つ情報の冗長度がかなり高く、半音の数分の1程度の精度で音程を処理するには、情報のかなりの部分を落としても問題ない、ということを示している。これは逆にいえば、ヒトがその程度の精度でしか音程を処理していないということであり、ヒトの聴覚システムの能力の限界を示している、とも考えられる。

なお、オクターブの協和感が突出して発達した点については、もともと最も発達の著しかった音程なのだからさして問題ではないと思われる。あえて説明するとすれば、側抑制をまったく受けないスペクトルが全てオクターブとみなされるというアルゴリズム上の問題があった。

<実験B>

コホネンの提唱する自己組織化モデル、LVQによって、パターン認識としての和音の識別学習を試みた。さらに、実験Aの結果を踏まえ、識別された和音に対する協和感を同時並行的に発達させることを試みた。

a. Algorithm

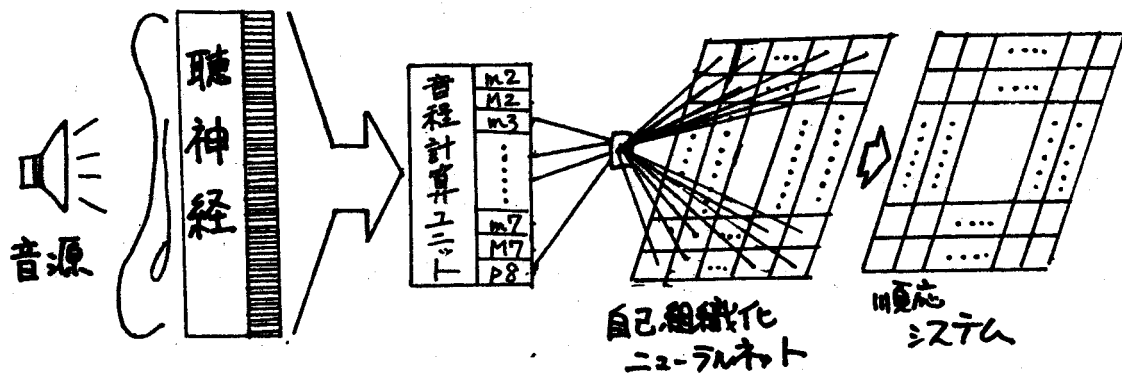


図4-1: 実験Bに対するアルゴリズムの概略。

このアルゴリズムは、音源・聴神経・音程計算ユニット・自己組織化ニューラルネット・順応システムの5段階に分けられる(図4-1)。

聴神経、音程計算ユニットは実験A-1と同じものがある。音程計算ユニットを実験A-3で使用したものにしなかったのは、実際には本実験と実験3は平行して行われていたため、実験A-3の音程計算ユニットが妥当かどうかは本実験開

始時点では確定していなかったためである。

音程計算ユニットによって算出された音程情報のうち一部が抽出され、次の自己組織化ニューラルネットに送られる。音程計算ユニットの分解能は実験Aを参考に半音の1/3（約33セント）とした。何種類の音程を抽出するかが、自己組織化モデルでいう「入力データの次元数」にあたる。本プログラムではオクターブ、5度、4度など主要な音階音程を4～10種類程度抽出することとした。

多次元の音程情報としてニューラルネットに入力される情報は、ただちに各ニューロンの適応変数と比較され、位相的距離が計算される。その距離 d は、入力データを $s(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 、適応変数を $a(b_1, b_2, \dots, b_n)$ とすると、

$$d = |a_1 - b_1| + |a_2 - b_2| + \dots + |a_n - b_n|$$

で表される。 d が最小となるニューロンが反応し、そのニューロンの持つ適応変数は、さらに入力データに近づくよう変更される。これがニューロンの順応であり、隣接するニューロンも同様の順応を行う（その割合は中央のニューロンの1/2とした）。なお、ニューラルネットは脳細胞を模して2次元とした。

このような過程を繰り返すと、やがて特定の入力に反応するニューロンが固定化し、学習が成立する。学習が成立したニューラルネットにデータを入力し、反応したニューロンの位置がそのデータの認識されている場所であるとみなし、こ

の繰り返しによってニューラルネットのマッピングを解釈した。

最後の順応システムは、ニューラルネットと1対1対応のある2次元の配列である。順応システム上のニューロンはそれぞれ内部変数として「協和感」というパラメータを持っており、ニューラルネットからの刺激によってその値が増加するしくみである。刺激を受けたニューロン隣接するニューロンの協和感は、増加量と減少量の総量が一致するような形で、側抑制原理により減少させた。

b、Procedure

次のような設定を操作することで、各種条件を設定した。

- 1：ニューラルネットの大きさ（最大30×30まで）
- 2：上下・左右をつなげてループ状のニューラルネットとするかどうか
- 3：音程計算ユニットから出力される各次元の情報を、全体に対する相対的な割合であらわすか、絶対的な強さで表すか
- 4：ニューラルネットにおいて、反応したニューロンに隣接するニューロンを、入力データに近づけるか（上のアルゴリズムで説明した方法）、逆に遠ざけるか（側抑制のイメージに近い）

5：和音の各音程の発生率（実験A-1と同じもの）

6：ニューラルネットに送られる音程情報の内容（次元数と、短2度からオクターブまでの音階音程12種類のうち、どの音階音程を出力するか）

なお、採用する倍音の上限は16倍音まで、ニューラルネットで反応したニューロンの順応の大きさは40%（入力データとの距離dを40%縮める）とした。また各波形の発生率は、単音ノコギリ波・単音矩形波各5%、単音三角波10%、和音ノコギリ波50%、和音矩形波・和音三角波15%とし、これらは変更しなかった。

なお、和音の発生率が実験Aの標準条件よりも高くなっているのは、本実験が和音のパターン認識を主な目標としているためであった。

予備実験や経験的事実から、次の設定を実験Aと同様「標準条件」とみたてた。

1：11×7

2：左右をループさせる

3：相対値を使う

4：近づける

5：実験Aの標準条件と同じ

6 : 完全 8・5・4 度、長・短 3 度、長・短 6 度、短 7 度の 8 次元

ネットの大きさはニューロンの数が入力される情報の種類 (39 種) の約 2 倍程度になるよう設定した。左右をループさせたのはラクミック (Ruckmick, C. A.) の「音の鐘」に見られる音高のらせん関係から連想したもので、オクターブと 1 度を類似の音程とみるような学習が成立することを期待したものであった。入力データを相対データとしたのは、予備実験で、絶対データを使うと矩形波や三角波に対する学習がうまく進まなかったためであった。設定 4 を「近づける」設定にしたのは、LVQ を提唱したコホネンの方法を踏襲したものである。

・条件 1

標準条件での学習を何度か繰り返すことで、このアルゴリズムから一般にどのような学習が成立するかをみた。手続き数 5000 回の学習を 5 回、30000 回の学習を 3 回行った。

・条件 2

上下左右をループさせた場合を条件 2-1、どちらもループさせない場合 (そ

れ以外の条件は標準条件と同じ。以下の条件も同じ) を条件 2-2 とし、左右の
みをループさせる標準条件との違いをみた。なお、実験は5000回の学習を5回行っ
た(以下の条件でも同じ)。

・条件 3

音程計算ユニットから出力される各次元の情報を、絶対的な強さで出し、情報
を相対的な割合で出す標準条件との違いをみた。既に予備実験の結果、この条件
下では標準条件ほどきれいな学習効果がみられないことが分かっていたが、他の
条件を一定にして改めて学習を試みたものであった。

・条件 4

音程計算ユニットから出力される情報量を増減させ、情報量が学習に与える影
響をみた。条件 4-1 では次元を10次元(標準条件+短2度・三全音)とし、条
件 4-2 では4次元(完全8・5・4度、長3度のみ)とした。

・条件 5

ニューラルネットで、入力データに反応したニューロンに隣接するニューロン

を入力データから「遠ざける」設定とした。これは標準条件とまったく逆の動作である。このような条件を設定したのは、実際のニューロンは「側抑制」によって組織的な情報処理を行っている場合が多いこと、またこのようなアルゴリズムならば反応したニューロンが周囲から際立つためにむしろ学習効率がよくなるのではないかと考えたためであった。

・条件6

ニューラルネットの大きさを変化させた。条件6-1では 10×6 、条件6-2では 9×5 、条件6-3では 12×8 とし、それぞれ5000回の学習を3回行った。

・条件7

学習に理想的な環境として、全ての種類の和音、波形が均等に聞かれるという環境を設定し、標準条件とどの程度学習効率が違ってくるかをみた。各波形の発生率は、単音の3波形がそれぞれ3%、和音の3波形がそれぞれ30.33%、和音の各音程の発生率はすべて8.33%とした。

c、Result & Discussion

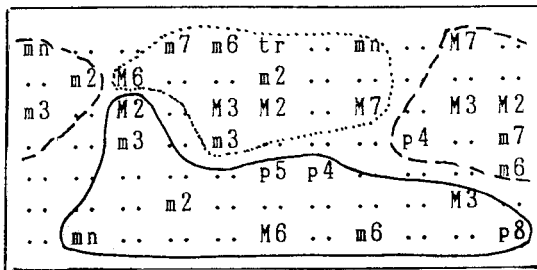
	分離度(%)	dsum	学習到達度
条件1	77.00	115.79	0.6643
同(30000回)	75.21	100.80	0.7461
条件2-1	73.85	118.88	0.6212
2-2	77.44	96.58	0.8018
条件3	66.67	99.29	0.9621
条件4-1	71.28	118.23	0.6029
4-2	80.00	80.23	0.9971
条件5	48.21	78.01	0.6182
条件6-1	73.50	130.13	0.5649
6-2	61.54	153.43	0.4010
6-3	79.49	85.46	0.9301
条件7	76.92	93.59	0.8219

表4: 実験Bの結果。分離度は全入力の5識別したものの割合(大きいほどよい)、dsumは全入力に対する対応したニューロンとdの合計(小さいほどよい)、学習到達度は(分離度/dsum)

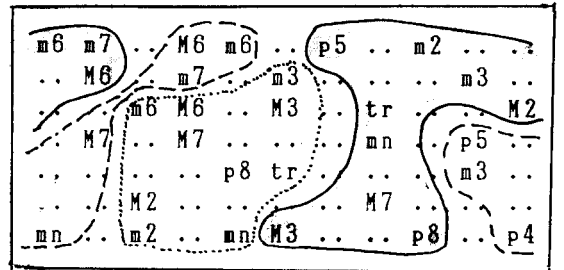
実験の結果は表4の通り。学習結果の典型例をいくつか図4-2にあげた。

実験の結果、まず分かったことは、ニューラルネット上に形成されるマップが学習を行うたびに異なる、という事実であった。同じ波形の和音がまとまったグループを形成することや、転回関係にある音程（短3度と長6度など、一方の音をオクターブだけ移動することで入れ代わる2音程）が隣接する傾向があること、完全協和音程は比較的孤立した位置にくること、などの共通の特徴はあるものの、マップの全体については学習結果ごとの類似度が極めて低く、特定の和音がどの位置に来るかを予想することはまったく不可能であった。

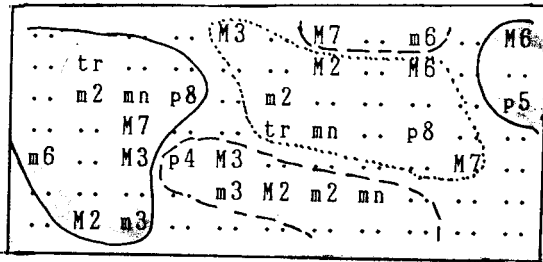
協和度の発達については、期待されたような結果は出ず、協和度が高いとされている音程に対して協和感が発達したということにはなかった。これは、アルゴリ



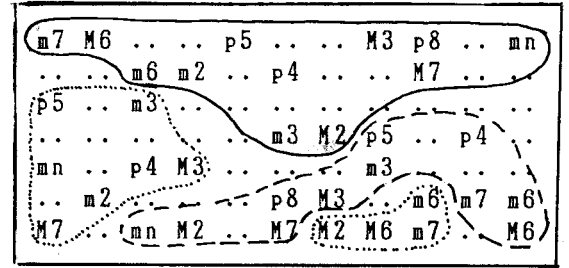
条件1: 5000回



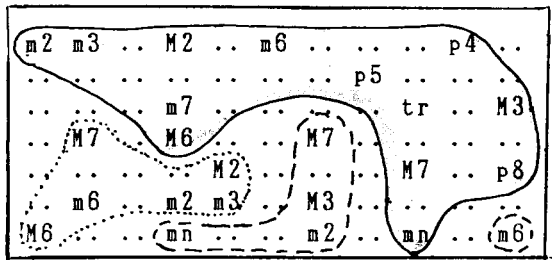
条件1: 30000回



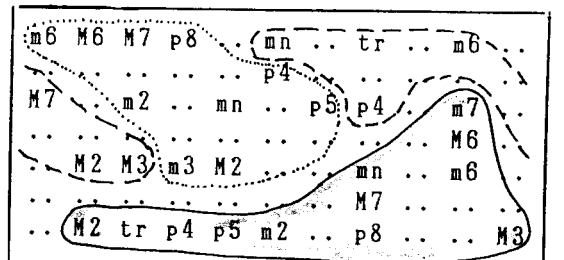
条件2-1: Y方向もループ



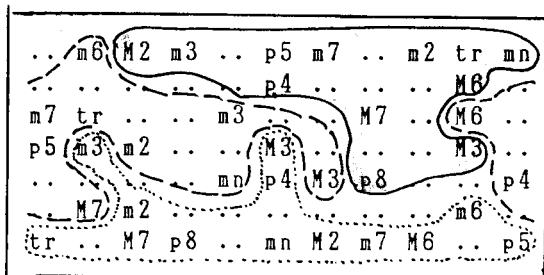
条件2-2: ループなし



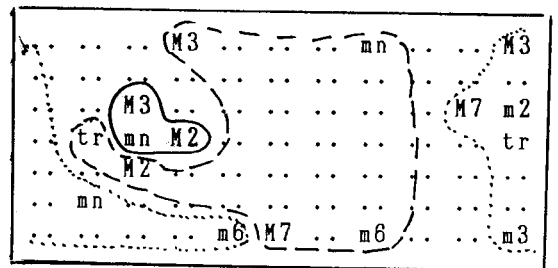
条件3: 音程情報 = 絶対値



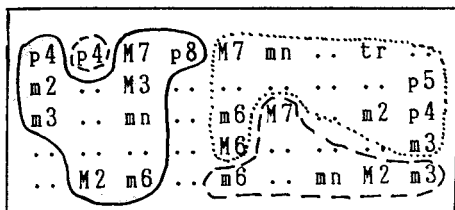
条件4-1: 情報 = 10次元



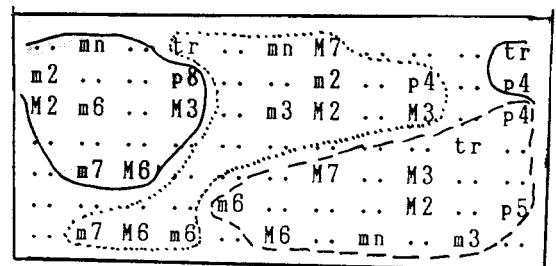
条件4-2: 情報 = 4次元 (分離度92%)



条件5: 隣接ニードを避ける



条件6-2: マップ = 9x5



条件7: 環境の理想化

図4-2: 実験B1により形成されたマップの例。

○はノギリ波、◇は矩形波、
 ◎は三角波のグルーブを意味し、中に書かれている文字が特定の音程が定めた位置を
 表している。読み方は、mn=単音、p=「完全」、M=「長」、m=「短」、数字が音程を表している。
 (例: m6=短6度)。なお、trは三全音のこと。

ズム上の問題が大きかったと思われる。実験Aのシステムにおける順応システムは楽音から抽出された音程に対して順応したのに対し、本システムの場合は認識された1つの音程に対して順応しただけであるため、単に頻出する入力に対応するニューロンが順応するだけであった。さらに、マップが狭すぎたことも悪い方向に働いた。上下わずか7マスで行き止まりのマップ（標準条件の場合）に側抑制が働いた結果、協和感が正の行と負の行が整然と並んでしまったのである。そして、偶然負の行に協和音程が定位すると、その音程に対する協和感も負になってしまう、という結果となったのである。マップの上下もループ状にしてマップに行き止まりをなくした条件2-1ではこの問題は起こらず、頻出する音程と協和感の対応関係はきれいに現れた。しかしやはり単なる対応関係であり、不協和音程に対する協和感には負になる、といった期待された結果にはならなかった。

パターン認識学習と協和感の発達を同時に処理しよう、というのはやはりやや無謀な試みだったようである。やはりこの両者は学習（順応）の過程では別々に処理され、ある程度の発達してから統合される、と考えたほうがよさそうである。

このように、順応システム部分の結果からは特に見られるものがなかったため、以後の条件ごとの結果は自己組織化マップの部分にのみ言及することにした。

・条件1

先にも述べたとおり、形成された8種類のマップはすべて異なったものになった。学習の成果は、分離度（特定の和音への反応を形成したニューロンの数の、入力データの種類39に対する割合。これが大きいほどそれぞれの和音が混同されず別々に認識されていることになる）と、 $dsum$ （入力データと反応ニューロンの位相的距離 d を全入力39種類について積算したもの）でみた。分離度は大きいほど、 $dsum$ は小さいほど、学習は成功した、と考えることができる。パターン認識学習である以上、学習の成否の最も重要な指標は分離度である。ただ、 $dsum$ の値に配慮した目安として、（分離度/ $dsum$ ）の平均を出し、これを「学習到達度」と呼ぶことにした。

手続き数5000回での分離度の平均は77.00%、30000回では75.21%と、大きな違いはなかった。ただ、学習到達度でみると前者が0.6643、後者が0.746となり、やや成績は向上している。これは、5000回の手続き以降もまだ学習に余地のあることを示していると考えられる。形成されたマップの特徴をみると、三角波の各音程が形の整った小さなグループを形成する傾向がみられた。全体的に、各音程がマップ内に均等に分散し、分離度も比較的高いきれいなマップが形成されたといっていっただろう。

・条件2

標準条件の左右方向のループに加え、上下にもループさせた条件2-1での分離度は73.85%、どちらもループさせない条件2-2では77.44となった。学習到達度でみても0.621と0.802となっており、条件2-2方がいい成績である。

マップの端をループ状にすれば、実質的なニューラルネットのマップの大きさは2マス分程度小さくなると考えることができる（両端のニューロンが互いに影響しあうようになるため）。このため、分離度などの成績が 条件2-2>標準条件>条件2-1 の順になったのだと考えることができる。

・条件3

分離度は66.67%と、予備実験での結果と同じく、標準条件と比べかなり悪い成績であった。一方d s u mが70足らずと小さかったため、学習到達度は0.962と、意外にも標準条件よりも高くなった。

これは、三角波のように発生される部分音が少ない波形で、和音の音程ごとのスペクトルの違いが小さく、多くの和音が1つのニューロンに集中することになったためであると考えられる。図4-2の条件3のマップを見てみると、ノコギリ波の各音程がマップに広く分布し、13種類全ての音程が識別されている。その一

方、矩形波と三角波の領域は非常に小さく、多くの音程が混同されている。つまりマップの大部分は、部分音が多く音程ごとの違いの大きいノコギリ波に占有され、ノコギリ波同士の競合が少なくなったために $dsum$ が小さくなったのだと考えられる。

この条件では部分音の大小が波形によって大きく異なるため、音程よりも波形による違いのほうが大きい。このような情報の量的差違が学習の大きな手掛かりになったらしく、波形ごとのグループ化が、標準条件よりもはっきりと見られた。

・条件4

分離度は条件4-1で71.28%、条件4-2で80.00となった。学習到達度については、単純な積算では次元数が多くなるほど $dsum$ も大きくなり標準条件と比較できないため、次元数10の条件4-1では $dsum$ を0.8倍し、次元数4の条件4-2では $dsum$ を4倍して計算した。その結果、学習到達度は条件4-1で0.603、条件4-2で0.997となった。

この結果が、本実験で最も意外な結果であった。情報量が少ないはずの条件4-2で標準条件以上の高い分離度がみられたのである。分離度は平均で80%、最も成功した場合は39種類の入力が36のニューロンに定位し、分離度は90%を超

えた。この定位ニューロン36というのは、予備実験を含めた150回以上の学習試行の中でも最高の値であった。このことは、和音の識別に必要な情報は意外と少なく、むしろその情報の質の高さが学習の成否を握る大きな鍵となっていることを示している。条件4-2で採用した、完全協和音程中心の情報は、どの入力データにも広く含まれていたために質の高いものになっていたのだと思われる。

・条件5

分離度は48.21%と極端に低く、 $dsum$ が78.01と標準条件の3/4程度であったにもかかわらず、学習到達度も0.616とかなり低い水準となった。

この条件では、条件3以上に極端な波形ごとのグループ化が起こり、ノコギリ波はわずか3ないし5つのニューロンに集中して定位する結果となった。

本条件はコホネンの方法に反し、側抑制の原理によって自己組織化を図ったわけであるが、やはりこの方法ではパターン認識能力は不十分であった。類似した別の入力は、コホネンの方法では隣接する別のニューロンに定位することが可能である。一方この条件では、隣接したニューロンの適応変数はかえって入力とかけ離れたものになっていくため、類似した入力は同じニューロンに定位せざるをえない。この辺りが、この条件での学習が失敗した理由であろう。

・条件6

分離度は条件6-1から順に73.50%、61.54%、79.49%となった。一方学習到達度は、順に0.565、0.401、0.930となった。

学習到達度でみると、予想通り、マップが大きくて容量に余裕があるほど、学習は容易となっている。しかし分離度でみると、条件6-1では標準条件とあまり変わりがなかった。12×8の大きなマップを使った条件6-3でも80%に届かなかったことからみても、39種類程度のパターン(=和音)の識別には10×6程度のマップで十分役に立つ、ということが示されたといえるだろう。

・条件7

分離度は76.9%、学習到達度は0.8219となった。

すべてのパターンを均等に入力したほうが、パターン認識学習は容易に進むだろう、と考えてこの条件を設定したのだが、確かにdsumが小さくなり学習到達度は向上した一方で、分離度の成績は向上しなかった。

この結果は、本実験で音程計算ユニットから出力される情報では、これ以上の分離度は望めない、という情報の質の問題であるように思われる。分離度が変わらなかったことよりも、入力情報の発生率以外は標準条件と同じであるのに、d

sumが約20%も減少したという結果の方をむしろ重視すべきであろう。つまり、条件7の環境は、標準条件での環境に比べ和音認識学習に適した環境であることは間違いない。実験Aでは音環境は結果にほとんど影響を与えなかったが、本実験ではそれなりの影響があることが示された、といえるだろう。

現代に生きている我々はさまざまな和音を耳にすることができる。例えば、中世ヨーロッパに生きていた人々よりもずっと、不協和音程など比較的珍しい音程に触れる機会が多いはずである。このような環境の違いは、標準条件と条件7の違いを類推させる。更に推理を働かせれば、我々は中世ヨーロッパ人よりもずっと恵まれた環境の中で、すぐれた和音知覚能力を育てている、と言えるのではないだろうか。

<General Discussion>

和音認識や協和感の発達に適応モデルを適用しよう、という当初の試みは、大方において成功したといえるだろう。特に実験Aにおいて、協和感の発達を単純な順応過程とみなし、音程計算を主軸とした簡単なモデルでその過程をシミュレートすることに成功した。この結果によって、協和感の発達という問題に新しい視点を投げかけることができた、と自負するところである。実験1では音程計算ユニットという前提がやや恣意的であるという問題点があったが、A/Dコンバータと側抑制原理によってユニットを書き換えた実験3によって、その問題点も払拭されたといえるだろう。

協和感の発達については、これまでの理論では不自然かつ恣意的な能力を想定していたり（例えばオイラーの無意識計算説など）、曖昧な用語が多用されているために説得力に欠けていたり（例えばランディンの文化説など）と、問題が多かった。これは、協和感というものが非常に複雑な能力である、という考えが無意識のうちに働いていたためではないだろうか。本実験では、協和感の発達を音刺激に対する純粋な順応過程の一種であるにとらえた。その結果、アルゴリズム上の前提を最小限に抑え、しかも神経細胞に即した能力で構成された、かなり単

純なモデルによって協和感の発達をシミュレートすることに成功したわけである。

ガーンゼイなどは、協和感について、精神的構えや尺度に依存した「快」の尺度を想定し、協和感を理性的、意識的なものと考えていたが、本実験の結果をみる限り、協和感は環境によって自動的、無意識的に形成される部分が大きく、それ以外の部分をあえて仮定する必要はないと言える。個人や教養の違いによってみられう協和感の違いも、周囲の音環境の違いで十分説明できると思われる。これはランディンの文化説とやや近い考え方であり、ランディンの文脈ではかなり曖昧であった「文化」という概念を、限定的な音環境で置き換えた考え方である。

ちなみに、倍音列に存在する音程と協和感との関係は、実は西洋音楽理論では古くから言われてきたことである。例えば長3度が協和音程とされるのは、第4倍音と第5倍音の間に長3度があるからである、などのように。しかしこれは倍音の強さや発生頻度などを考慮しない大雑把な考えであった。本実験は、こういった音楽理論上の協和説を補強するという面も持っていると考えている。

また、実験2では、音楽史上の和音使用の変遷を「音環境の変化」とみることで、各種の和音がバランスよく多様化していく過程をもシミュレートすることができた。もちろん、これがすなわち音楽史と同じものである、とは言えないであろうが、巨視的な音楽史の流れについての手掛かりとして、このような結果を今

後活用していけるだろう。

自己組織化モデルを使用した実験Bについては、ある程度決まった形のマップが形成されるのではないかという期待があったが、その期待は裏切られた。学習を行うたびに異なったマップが形成され、位相的關係についてもいくつかの傾向はみられたものの、全体としては変動が激しく、入力されたデータが本来持っている位相的關係がどのていど再現されたかについては余りはつきりとは分からなかった。しかし、入力されたデータの7割から8割は別のものとして認識されており、パターン認識学習としての和音の識別はある程度成功したと言えるだろう。

ただ、逆にいえばこのような自己組織化によるニューラルネットでは、初期条件と入力される情報の順序やバランスによって、形成されるマップが大きく異なってくるのは当然のことである。その可塑性の高さからいって、異なったマップが形成されるからと言って学習が失敗したということには決してならない。

この結果は、視覚や聴覚のパターン認識について、特定のパターンと脳皮質の一般的な対応を求めていこう、という大脳生理学的関心に警鐘を鳴らすものである、と著者は考える。パターン認識能力は、外部からの入力によって成立して行くものである以上、コホネンのいうLVQそのものではなくても、それに近いよ

うな自己組織化のアルゴリズムによって形成される可能性は高いだろう。だとすれば、特定のパターンと皮質上のニューロンとの対応は被験体ごとに異なってくることになり、ある被験体の脳皮質上のパターン認識マップが描けたからといって、それが他の被験体の直接の参考にはならないことになる。このような前提に立った上で、概括的なパターン間の位相的關係をみる、といったマクロな立場での研究が、むしろ効率的だと言えるのかもしれない。

さらに進めて考えると、仮に自己組織化が脳皮質発達の主要な原理であるとなれば、脳皮質の特定の領域と機能を対応させるような大脳生理学的研究は、その視点がミクロになればなるほど被験体間の誤差に悩まされ、無意味化していく可能性を秘めている、と言えるのではないだろうか。確かに脳の大きな機能領域の分布は現在までに確かめられてきている。しかし、より細部に至っては生得的に固定されているというよりは、脳が構造的に持っている可塑性によって、生後、環境に最適な形で発達してくるものであることも事実である。したがって、成体の脳皮質に完成された「機能マップ」をみるよりも、未発達な脳に用意されている「機能発達アルゴリズム（そのヒントとして自己組織化という考えをみることができよう）」を調べることの方が、有意義でありかつ効率もいいのではないだろうか。これはやや大胆な推測ではあるが、本実験の結果はこの考えを支持

するものである。

ただ、本実験で使用したLVQについては、著者自身がそのモデルについてやや研究不足であり、実験に費やせる時間も短かったため、形成されたマップについて詳しく検討できなかつたことも事実である。本来ならば、入力データについて数学的に最適な位相的關係を計算し、それと学習結果を比較すべきであった。

また、実験BではLVQによる自己組織化と並行して協和感の発達を処理しようとしたわけであるが、こちらはうまく行かなかつた。これは、実験Aでの協和感発達のアルゴリズムをうまく実験Bのシステムに持ち込むことができなかつたというアルゴリズム上の問題が一番大きかつたが、別の見方をすれば、自己組織化のシステムと協和感を発達させるシステムを直列に連結した、そのシステム全体に問題があつたのではなからうか。協和感は自己組織化によるパターン認識学習が成立した後、ようやく発達してくるものである、と考えれば、実験Aの結果をそのまま持ち込めることになる。

全体として、比較的新しい考え方である自己組織化の可能性の一面を示せたこと、協和感の発達について新しい見方を提示することができたこと、この2点が本実験の最も大きな成果である、と考えるものである。