

解説



計算機の音楽音響学への応用†

中村 勲†

1. はじめに

音楽は楽曲的側面と音響的側面をもっている。作曲者によって書かれた楽譜をもとに、演奏者が自分なりの解釈をして、楽器という道具を用いて演奏する。楽器から発生する音響に演奏会場の音響効果が加わって、聴衆の耳に伝達され、音楽として鑑賞される。音楽の音響学的側面を研究するのが音楽音響学であるが、計算機の出現とともに、この分野への応用も始まった。まず、その初期の研究のいくつかを紹介した後、楽器音の分析の代表的な技法とその応用例、続いて楽音合成の諸方式とその応用例について解説し、最後に音楽音響情報処理について述べる。

2. 初期の研究

1957年にベル研究所の M. Mathews は IBM 704 を用いて、音の波形は三角波のみであったが、自動演奏用の MUSIC I というプログラムを完成した¹⁾。この年は、イリノイ大学で L. Hiller と L. Isaacson²⁾ が計算機による作曲として、最初の有名な作品「弦楽4重奏のためのイリアック組曲」を完成した年でもある。さらに Mathews は 1958年に IBM 7094 を用いて4声で16種の波形の出る MUSIC II を、1960年には unit generator という概念を入れて、その組み合わせで音響波形を合成する MUSIC III を完成、次いで1963年にマクロアセンブラを用いた MUSIC IV を完成して、Science 誌に「楽器としてのデジタルコンピュータ」³⁾ を発表した。MUSIC IV は、その後発表された多くの楽音合成、自動演奏プログラムの源泉となっている。

各種の楽器音の分析は、計算機の利用以前からアナログ的にバンドパスフィルタを用いる方法、ヘテロダイン分析、すなわちソナグラムによる方法などが行わ

れてきた⁴⁾。楽音のアナログ的合成は1960年に RCA の H. Olson⁵⁾ が電子音楽合成装置を製作し、楽器音の属性を周波数、強度、持続時間（立上がり、定常状態、立下がり）、ポルタメント、音色、ビブラート（振幅変調、周波数変調）、およびこれらの偏差で規定して合成を試みている。1962年から1965年に H. Fletcher⁶⁾⁻⁸⁾ はピアノ、パイプオルガン、バイオリン属について、部分音ごとの時間変動を計測し、その結果をもとに100個の正弦波発振器を用い再合成し、聴取実験を行って、それらの楽器音の性質を明らかにしている。

このころより計算機を利用した楽器音の分析合成、自動演奏、作曲などの研究が、アメリカ各地で始まった。1966 Fall Joint Computer Conference において、Computer in Music というセッションがもたれ、ベル研の M. Mathews, J. Pierce, イリノイ大学の L. Hiller, J. Beauchamp, D. Freedman, H. Brün など⁹⁾ が論文を発表している。

1967年に W. Strong と M. Clark¹⁰⁾ がオーケストラ用の木管楽器トランペット、トロンボーン、チューバ、フレンチホルン、オーボエ、イングリッシュホルン、バズーン、フルート、クラリネットの分析を行い、各倍音を一つのスペクトル包絡と、三つの時間包絡で制御し、それを加えて木管楽器の音を合成した。また別な研究¹¹⁾でスペクトル包絡と時間包絡のどちらが重要な役割を果たしているかを調べるために興味深い処理方法を用いた。異なった木管楽器の間で両者を交換し、聴取者にどちらの楽器の音に聴こえるかを問うた。かかる研究は計算機を用いての合成が可能となったので、初めて成しえたものである。その結果は独特な形のスペクトル包絡をもつオーボエ、クラリネット、バズーン、チューバ、トランペットなどの楽器では、スペクトル包絡のほうが優位であるが、そうでないフルート、トロンボーン、フレンチホルンなどの楽器では、時間包絡も同じくらい重要であることが分かった。また D. Freedman¹²⁾ もトランペット、サキソ

† Computer Application in Musical Acoustics by Isao NAKAMURA (Department of Computer Science and Information Mathematics, University of Electro-communications).

†† 電気通信大学電気通信学部情報工学科

ホン、バズーン、クラリネット、バイオリンについて、立上がり部分の精密な分析を行った。1969年に Mathews とその協力者たち¹³⁾は、大部分が FORTRAN で書かれた MUSIC V についての解説書「コンピュータ音楽の技術」を出版し、J. Risset¹⁴⁾ は多くの楽器音のフーリエ分析結果に基づき、MUSIC V を用いて合成した「コンピュータ合成音のカタログ」を発表した。その後、多くの分析、合成の方法と、それら結果が発表されている。

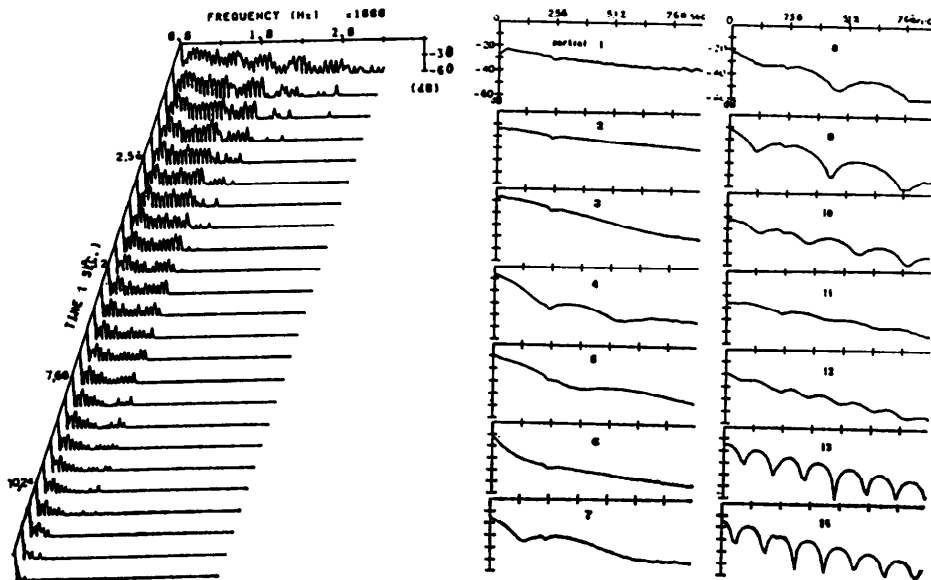
3. 楽器音の分析

現在楽器音の分析を行う目的は、大きく分けて二つある。第1は楽器の音色の物理的性質を求めることであり、第2は分析合成を行う手段として用いることである。前者は楽器の発音機構に関連し、楽器自体の製作とか改良に利用されるが、一方楽音を規則合成するのにも役立つ。後者すなわち分析・再合成は情報圧縮あるいは音色の改変に役立つ。情報圧縮としては、記録システムの記憶容量を減少させることもあるが、伝送システムの帯域圧縮あるいは高品質低速伝送に応用される。アナログ的な音響信号は AD 変換器によって、デジタル信号に変換される。以下デジタル信号処理として、楽器音の分析に用いられるいくつかの技法について述べる。

3.1 離散的フーリエ変換 (DFT: Discrete Fourier Transform)

これは信号の時間領域での表現を周波数領域での表現に変換するものの一つである。1965年 J. Cooley と J. Tukey が FFT (Fast Fourier Transform) のアルゴリズムを発表して以来、この算法を利用した多くの研究が行われてきた。

楽器音分析への応用として、山口・安藤の方法¹⁵⁾について述べる。連続楽器音波形中の区間 T を波形の基本周期の整数倍 (4ないし8波) でピッチ同期させて、各フレームを決定する。実際の分析では、2基底の FFT アルゴリズムに適合するように、サンプル数を 2^n 個とし、区間 T のサンプルデータに時間窓 (ハミング窓を使用) を掛け、これに対し DFT の計算を行う。区間 T の計算の終了後は、1ないし2波シフトした次の区間 T について同様な計算を行う。この操作を楽器音の立上がりから、減衰過程まで行って1音の分析を完了する。山口、安藤¹⁶⁾は、この短時間スペクトル分析法を用いて 11 種の楽器の分析を行っている。さらにピアノ音のように、基本波周波数の整数倍から、少しずつずれている非調和スペクトルをもつものに対しては、次の方法を提案している。信号の基本周波数とピッチ同期したサンプリング周波数で AD 変換された波形の数波 (たとえば8波) に対してブラ



(a) スペクトルの時間変化 (b) 各部分音の時間変化
 図-1 DFT による分析例 (ピアノ音 G₁)

ックマン—ハリス窓を掛け、その窓長の数倍の零値を加えたサンプルを用いて DFT を行えば、周波数分解能は向上する。この方法を用いて筆者ら¹⁷⁾が行ったピアノ音の分析の一例を示す。図-1(a)は無響室で録音されたアプライトピアノの第 11 鍵 (G_1 , 49.00 Hz) のスペクトルの時間変化、図-1(b)は各部分音別の振幅レベルの時間変化を示す。2.5 秒付近に現れている波形変化は録音系の雑音であるが、全体としてピアノ音の複雑な時間変化が良く分かる。

3.2 位相ボコーダ (Phase Vocoder)

楽器音においてはビブラートのようにピッチが変動する場合があるが、これを扱うための一つの分析法であり、また再合成にも用いられる。楽器音の周波数帯域を部分音別にいくつかの帯域に分割するフィルタバンクを形成するものである。それぞれのチャンネルに対し、まず 2 チャンネルに分け、一方には $\sin 2\pi n f_0 t$ を掛け、他方には $\cos 2\pi n f_0 t$ を掛け、それぞれにローパスフィルタを通すヘテロダイン的な手法によって値を求め、両者の 2 乗和の平方根と逆正接を計算して、変動する振幅および位相 (もしくは周波数) を求めるものである。J. Moorer¹⁸⁾ はテナーサキソホンなどの基本波と各倍音の振幅と周波数を求めた。この分析合成方式について、M. Dolson¹⁹⁾ の詳しい解説が *Computer Music Journal* に載っている。

以上の 2 種類の分析法は、あらかじめモデルを設定せずに行う分析法の代表的な例である。このままでは分析によって冗長成分を除去して情報圧縮を行う能力はあまり高くない。次に音声の分析合成で用いられているモデルを設定し、そのモデルを規定する比較的少数のパラメータを最適推定することによる分析合成法を述べ、楽器音に応用した例を示す。

3.3 線形予測符号化 (LPC: Linear Prediction Coding)

この分析合成法の分析部分は、波形データをパラメータ化するのに用いる時間変動フィルタ係数を得ることにある。音響波形の現時点の標本値は、過去のいくつかの標本値の線形 1 次結合で近似されるという点に着目した分析法で、入力波形より線形予測係数 α パラメータと残差を求めることである。これは出力が回帰して次の出力を作るというモデルであるから AR (Autoregressive) モデル、あるいは伝達関係が極だけで記述されるから、全極モデルともいうが、一般的には伝達関係が極と零点をもつとした ARMA (Autoregressive Mean-average) モデルを用いる場合もある。

音声の場合、残差は有声音に対してパルス列、無声音に対してランダム雑音となるが、楽器音の場合は、一般的に相当高い次数をとっても残差に多くの情報が含まれている²⁰⁾ので、合成系においては駆動音源として残差そのものを用いなくならず、現在のところ情報圧縮はなかなか困難な状態である。音響スペクトルの最ゆう推定という方法は音響波形の線形予測と双対をなすものであり、最ゆう推定も楽器音分析に応用される。また α パラメータの欠点の改善と最ゆうスペクトルのパラメータ符号化の効率の向上のために提案された偏自己相関 (PARCOR: Partial auto-correlation) 係数 k パラメータを求める PARCOR 分析は広義の LP 分析の代表的な方法である。小嶋²¹⁾ は AR モデルを用い最ゆう推定法によるピアノ音の立上がり時におけるパワースペクトルの時間変化を求めた。管楽器は音声と発声機構が類似しているので、LP 分析合成を適用しやすく、尺八音に応用した例²²⁾ もあるが、一般的に楽器の発音機構は多種多様なので、それぞれについて適当な分析合成法を見出さなければならぬのが現状である。

4. 楽音合成の諸方式

楽器音の分析結果に基づいた再合成の方法、音楽合成プログラムやシンセサイザの構成に使われる楽音合成の方法などを大別して、9 つの方式について述べる。(1) 加算合成方式、(2) 線形予測分析合成方式、の 2 方式は分析結果に基づいての再合成、あるいは規則合成に用いられる。(3) 部分線形合成は分析合成の一方式で、情報圧縮に用いられる。(4) 減算合成方式は古典的かつ簡易な方法である。(5) 波形呼出し合成方式は古くから用いられている方式であるが、最近記憶素子が低価格になったので実時間合成に実用化されている。次に非線形的な手法を用いる合成として、(6) 変調合成方式、(7) 波形形成合成方式があり、特殊な手法を用いる合成として、(8) 時間領域ホルマント合成方式がある。これらはずかなパラメータで、波形やスペクトルを容易に制御できる特徴をもっているが、楽器音の合成に対しては理論的あるいは実験的な根拠が乏しいので、聴感によって係数を求めねばならない。(9) 音響モデルによる合成方式は一般には楽器音ごとに異なる方法を用いる。

これら各種の方式を分類して解説した論文としては、J. Moorer (1977)²³⁾、中村 (1981)²⁴⁾、G. DePoli (1983)²⁵⁾、J. Gordon (1985)²⁶⁾、中村 (1987)²⁷⁾ などがある。

4.1 加算合成方式

アナログ的には、最初に Hammond オルガンに採用された方式で、正弦波の倍音を重ね合わせて楽音を合成するものである。コンピュータの普及によって、1960年代後半から楽器音の分析が盛んに行われるようになり、それで得られたパラメータをもとに再合成が行われてきた。各パーシャル（部分音）の振幅エンベロープの時間的変化と、各パーシャルの周波数の時間変動を用いて合成する。波形合成を行う場合は位相も考慮する。DFT あるいは位相コーダによって得られた信号に対する合成方式である。場合によっては規則合成にも適用される。筆者²⁹⁾が行ったピアノ弦の振動の理論的モデルによる加算合成の例を図-2 に示す。これで再合成したものと、原音との比較についても多くの研究が行われている。

4.2 線形予測分析合成方式

線形予測分析で得られた結果に基づいて合成する方式で、主として IIR (Infinite Impulse Response) フィルタを用い、時には後述する減算方式で用いる FIR (Finite Impulse Response) フィルタも合わせて用い

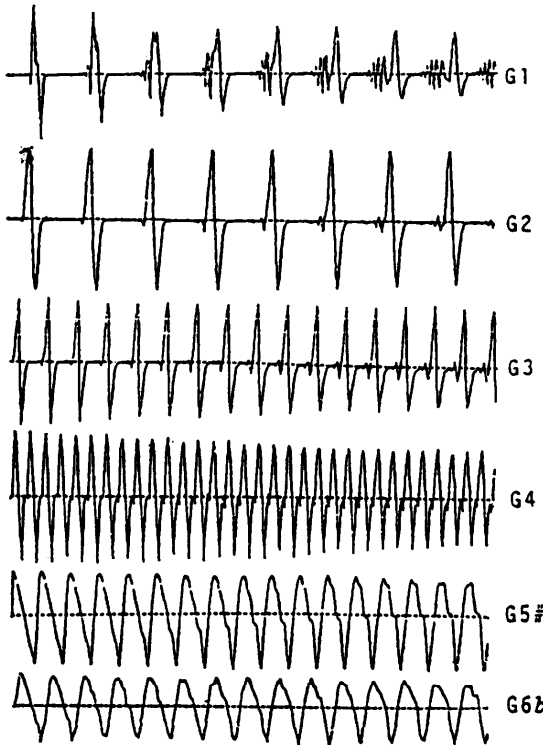


図-2 加算合成による波形例 (ピアノ弦振動による響板駆動力)

る。音声合成と同様に音源としてパルスとノイズを切り替えて用いた例も報告されている。

4.3 部分線形合成方式

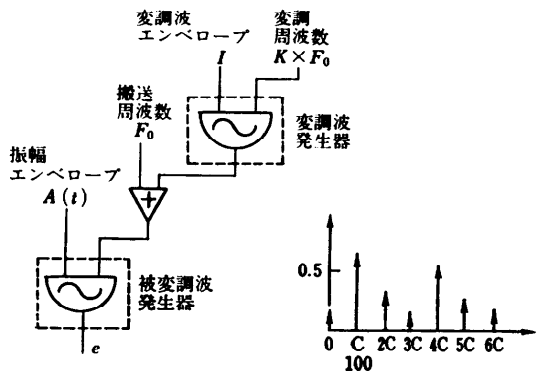
この方式は分析合成方式の一種で、楽音の波形を部分的に線形な波形で置き換え、情報圧縮を行ったものを再生して、近似的に元の波形を合成する方式である。DFT によって得られた各スペクトルの時間変動について本方式によって情報圧縮を行い、加算合成方式を用いて再合成する場合もある。

4.4 減算合成方式

この方式はアナログ的には電子オルガンに用いられたもので、矩形波、三角波、のこぎり波などの多くの倍音を含む波形から、フィルタをとおして希望の倍音構成を作り上げるものである。たとえば音源波形としては、のこぎり波はストリング系に、矩形波は木管系に適している。入力波形やフィルタの特性を時間的に変えて、音色を変化させるものなどがある。デジタルフィルタとしては FIR フィルタを用いる。

4.5 波形呼出し合成方式

記憶装置の中に、必要とする任意の波形の表を入れておいて、それを繰り返し呼び出して使用するもので、そのサンプリングの仕方によって求めるピッチの波形が得られる。MUSIC V に採用された方式で、デジタル方式として、ハードウェア化が行われている。ROM の中に正弦波の表を入れておき、そのパーシャルを合成していけば、加算合成方式と同様になり、倍音が多く含まれる波形よりフィルタを用いて、必要なスペクトルを作り出していけば、減算合成方式と同様になる。また楽器音の波形をもとにした表を、周波数を変えて呼び出していくことも可能である。ま



(a) 方式 (b) スペクトルの一例
図-3 周波数変調合成方式

た RAM に外部から音の波形を取り込んで、これを再生したり、場合によってはピッチを変えて再生したりすることも行われている。

4.6 変調合成方式

複雑な楽器音のスペクトルを単純な構成によって作り出す方法の一つで、広義の非線形合成方式の一種である。各種の変調方式があるが、1973年に Chawning²⁹⁾ が発表した周波数変調合成が最初で、FM 合成の名で知られており、現在実用化されている。図-3(a)に、その例を示す。この図は MUSIC V の記号を用いて表したものである。出力信号は

$$e = A(t) \sin(2\pi F_0 t + I \sin 2\pi K F_0 t)$$

となる。K=1 で、F₀=100 Hz、I=4 の場合のスペクトルを図-3(b)に示す。一般に搬送波、変調波ともオーディオ領域にある。この方式で金管楽器、木管楽器、打楽器の音色のシミュレーションが行われている。さらに

$$e = A(t) \sin [2\pi f_0 t + I_1 \sin 2\pi (f_1 + S)t + I_2 \sin 2\pi (f_2 + S)t]$$

の形の変調によって、ピアノ音を合成している。また、

$$e = A(t) \sin [2\pi f_0 t + I_1 \sin (2\pi f_1 t + I_2 \sin 2\pi f_2 t)]$$

の形の2段変調についても検討されている。

FM 合成の変形とみられるいくつかの方式が提案されており、金管楽器、木管楽器、打楽器の音色を作り出している。また特殊な波形を用いた変調合成、2変数の関数による変調合成、振幅変調合成、リング変調合成(乗算合成)、線形スweep合成なども試みられている。FM 変調合成で歌声を合成した例も報告されている。

4.7 波形形成合成方式

非線形合成方式の一種で FM 合成と同様に、多くのスペクトルをもつ楽音を経済的に作り上げる方式である。単一の正弦波が非線形歪みをもった伝達関数を通った場合、あるいは非線形プロセッサによって処理された場合に、波形歪みを生じ、高調波が現れる。非線形プロセッサの後にフィルタを用いてもよい。この方式で金管楽器、打楽器などの楽音が得られている。図-4 は J. Beauchamp³⁰⁾ がコルネットとサクソホンの楽器音合成に用いた方法で、MUSIC 4 BF で書かれているが VFMULT は非線形プロセッサ(テーブル参照ゼネレータ)である。

図-4 は J. Beauchamp³⁰⁾ がコルネットとサクソホンの楽器音合成に用いた方法で、MUSIC 4 BF で書かれているが VFMULT は非線形プロセッサ(テーブル参照ゼネレータ)である。

4.8 時間領域ホルマント合成方式

Kaegi と Tempelaars³¹⁾ の VOSIM (VOice SI-

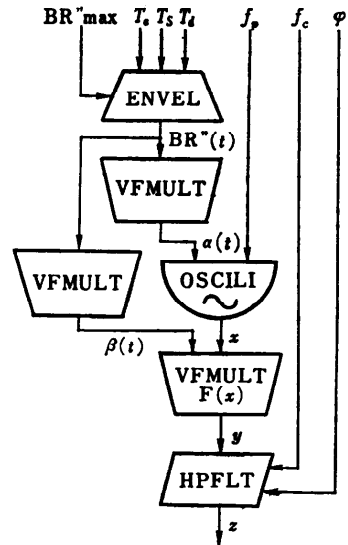
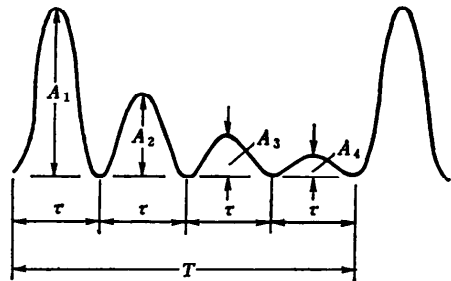
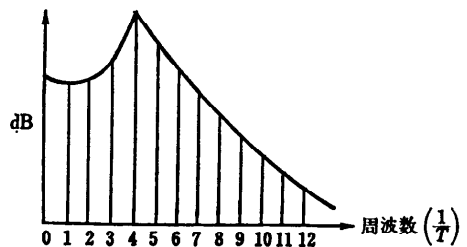


図-4 波形形成合成方式例 (コルネット, サクソホン)



(a) 波形



(b) スペクトル

図-5 VOSIM

Mulation) は、時間的には図-5(a)のような sin² パルスの振幅を変えたものの連続の繰り返して、図-5(b)のようなホルマント特性を得て、各種の楽音合成を行っている。また Rodet³²⁾ の FOF (FOrmant wave Function) は、図-6のような振動波形の、各バ

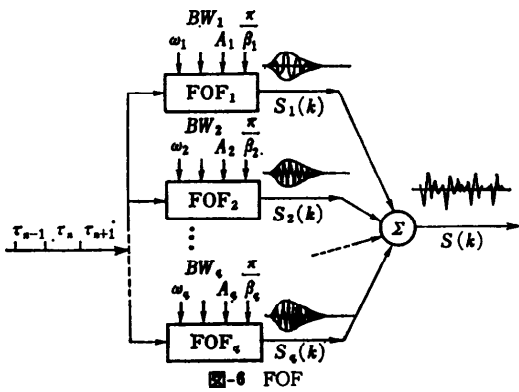
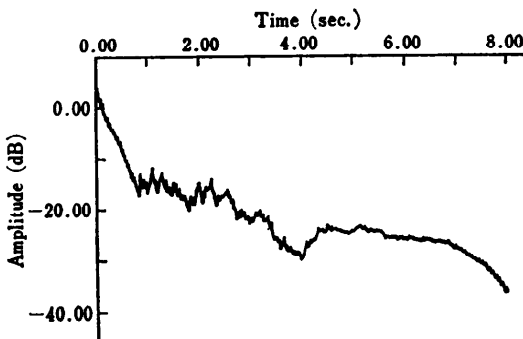
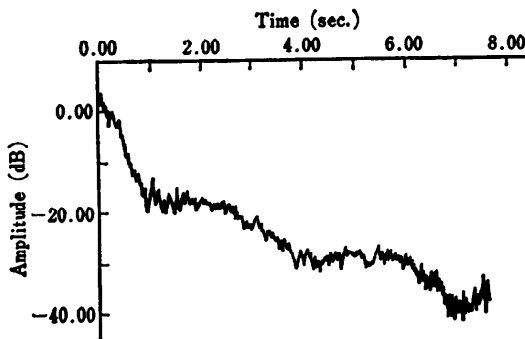


図-6 FOF



(a) 駆動点における響板の振動速度 (シミュレーション)



(b) 音圧 (実測)

図-7 音響モデルによる合成波形例 (ピアノ C、振幅包絡線の時間特性)

ラメータを変えたものを重ね合わせることによって、種々のホルマント特性を得ている。この方式を用いて、歌声の合成が行われている。

4.9 音響モデルによる合成方式 (シミュレーション合成方式)

これは今まで述べた方式と異なって、ある単一の楽器の音色を、その発音機構に従って作り出す方式であ

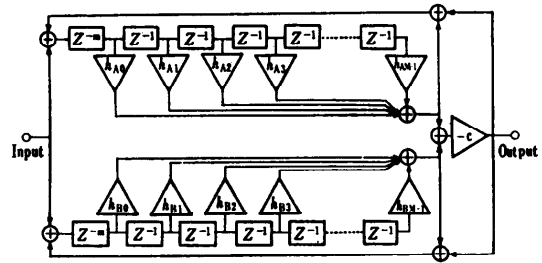


図-8 音響モデルによる合成方式例 (2本弦のピアノシステム)

る。筆者³³⁾が行ったピアノのシミュレーションによる駆動点の速度波形と実測の音圧波形の包絡線を図-7に示す。直接シミュレーションでは、多くの計算時間を要するので、高速化するためにシミュレーションに従って作られた IIR フィルタを用いる筆者ら³⁴⁾の方法 (図-8)、また Beauchamp の発音機構に従った波形形成の方法 (図-4) なども、見方によっては、この方式に属するものである。他に撥弦楽器とドラムのシミュレーションが発表されている。

5. 音楽音響情報処理の過去、現在、未来

コンピュータミュージックは楽音合成、自動演奏³⁵⁾、作曲より成り立っている。コンピュータミュージックの研究は、アメリカのベル研究所およびイリノイ大学あたりから始まり、現在、スタンフォード大学の CCRMA (Center for Computer Research in Music and Acoustics)、およびフランスの国立研究機関 IRCAM (Institute for Research Coordination in Acoustics and Music) が研究の中核になっている。これらの名称でも分かるように、アメリカ、ヨーロッパでは音楽と音響学が常に結びついていて、研究手段としてコンピュータが応用されてきている。一方コンピュータミュージックの講義は、イリノイ大学においては 1958 年に始められて現在も続いており、音楽学部の大学院のカリキュラムに入っている。スタンフォード大学、MIT を初めとしていくつかの大学で行われており、1974~1975 年の資料ではユタ大学、アイオワ州立大学の計算機科学科のカリキュラムにも入っている。日本では、昭和 63 年度 (1988 年) 電気通信大学大学院情報工学専攻のカリキュラムに「音響音楽情報処理特論」として初めて開講されることになっている。

さて音楽音響情報処理という立場に立つと、楽器音の分析は単なる楽器の研究や、楽音の合成の手段であるばかりではなく、楽音の情報特徴量 (たとえば邦楽

器と洋楽器の音色の差違と共通点)の抽出というような問題にも発展し、これらの解明も重要なテーマとなってくる。楽曲の情報にせよ、演奏の情報にせよ、常に楽器をとおして、音響というメディアで伝達される。千住、大串³⁶⁾の研究によれば演奏者の意図が聴取者に十分に伝えられるという結果が出ているが、それぞれの情緒を運ぶ情報特徴量はなにかということは、音楽の知覚、認知^{37), 38)}とも関係し、生理学、心理学にも及ぶ問題である。

これまで計算機は人工知能として、知識情報処理を取り扱ってきたが、将来は感性情報処理を取り扱う人工情緒ともいべきシステムを構築していく必要がある。人間の左脳は主として分析的な機能を持ち、右脳は主として総合的機能をもつ。音楽は主として右脳で処理されるが、音楽の訓練や知識が高度になると知覚処理の優位性が左脳に移行する³⁹⁾ともいわれている。したがって音楽音響情報処理にとって左脳の機能をシミュレートしようとする、計算機のソフトウェアばかりではなく、ハードウェアをも含むシステムとしての研究が必要となり、将来は左脳と右脳のように機能分担する人工頭脳の研究にも発展するであろう大問題である。

(楽音の合成についての詳細な文献は、筆者の過去に発表した三つの解説^{24), 27), 35)}を参考にされたい。)

参 考 文 献

- 1) Roads, C.: Interview with Max Mathews, *Computer Music J.*, 4(4), pp. 15-22 (1980).
- 2) Hiller, L.: *Music Composed with Computers - A Historical Survey*, in the *Computer and Music*, ed. Lincoln, H. B., Cornell University Press, pp. 42-96 (1970), 柴田南雄・徳丸吉彦他訳, コンピュータと音楽第4章, カワイ楽譜 (1972).
- 3) Mathews, M. V.: *The Digital Computer as a Musical Instrument*, *Science*, 142, pp. 553-557 (1963).
- 4) 安藤由典: 楽器の音響学, 音楽之友社 (1971).
- 5) オルソン, H. F. (平岡訳): 音楽工学, 誠文堂新光社 (1969).
- 6) Fletcher, H., Blackham, E. D. and Stratton, R.: *Quality of Piano Tones*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 34(6), pp. 749-761 (1962).
- 7) Fletcher, H., Blackham, E. D. and Christensen, D. A.: *Quality of Organ Tones*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 35(3), pp. 314-325 (1963).
- 8) Fletcher, H., Blackham, E. D. and Geertsen, O. N.: *Quality of Violin, Viola, Cello, and Bass-Viol Tones. I*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 37(5),

- pp. 851-863 (1965).
- 9) Foerster, H. V. and Beauchamp, J. W. ed.: *Music by Computer*, John Wiley (1969).
- 10) Strong, W. and Clark, M.: *Synthesis of Wind-Instrument Tones*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 41(1), pp. 39-52 (1967).
- 11) Strong, W. and Clark, M.: *Perturbation of Synthetic Orchestral Wind-Instrument Tones*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 41(2), pp. 277-285 (1967).
- 12) Freedman, M. D.: *Analysis of Musical Instrument Tones*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 41(4), pp. 793-806 (1967).
- 13) Mathews, M. V.: *The Technology of Computer Music*, M. I. T. Press, Cambridge (1969).
- 14) Risset, J. C.: *An Introductory Catalogue of Computer-Synthesized Sounds*, Bell Tele. Labs. (1969).
- 15) 山口公典, 安藤繁雄: デジタル信号処理による自然楽器音の分析, 音響学会誌, 33(5), pp. 233-241 (1977).
- 16) 山口公典, 安藤繁雄: 短時間スペクトル分析法の楽器音への適用, 音響学会誌, 33(6), pp. 291-300 (1977).
- 17) 中村 勲, 岩岡聰一郎, 中野年章: スペクトル的に見たピアノ音の特性 (ピアノ音の分析に関する研究第1報), 音響学会講演論文集, pp. 391-392 (1967-10).
- 18) Moorer, J. A.: *The Use of the Phase Vocoder in Computer Music Applications*, *J. Audio Eng. Soc.*, 26(1/2), pp. 42-45 (1978).
- 19) Dolson, M.: *The Phase Vocoder: A Tutorial* *Computer Music J.*, 10(4), pp. 14-27 (1986).
- 20) 鈴木誠史: 楽音のデジタル処理とその応用に関する諸問題—圧縮・記録・再生, 電気四学会連合大会講演論文集 (シンポジウム), 4, pp. 115-118 (1980).
- 21) 小嶋 卓, 松井英一: ピアノ音の分析, 電子通信学会電気音響研究会資料, EA 76-9 (1976).
- 22) Toyama, F. M.: α Parameters in the Transient of the Bamboo Tone, Shakuhachi, by LP Method and Its Synthesis, 10th Intern. Cong. Acoust., Sydney, K-5.1 (1980).
- 23) Moorer, J. A.: *Signal Processing Aspects of Computer Music: A Survey*, *Proc. IEEE*, 65, pp. 1108-1137 (1977).
- 24) 中村 勲: 楽音のデジタル合成, 音響学会誌, 37(11), pp. 558-562 (1981).
- 25) De Poli, G.: *A Tutorial on Digital Sound Synthesis Techniques*, *Computer Music J.*, 7(4), pp. 8-26 (1983).
- 26) Gordon, J. W.: *System Architectures for Computer Music*, *ACM Computing Surveys*, 17(2), pp. 191-233 (1985), (金岡訳, 計算機音楽のシステム構造, コンピュータサイエンス '85, 共立出版, 1987.2).

- 27) 中村 勲: 音楽・楽音・コンピュータ, bit 別冊
コンピュータと音楽, pp. 54-64 (1987).
- 28) 中村 勲: ピアノ音の特性 (ピアノの音響学的
研究第4報), 音響学会誌, 38(8), pp. 454-460
(1982).
- 29) Chowning, J. M.: The Synthesis of Complex
Audio Spectra by Means of Frequency Modu-
lation, J. Audio Eng. Soc., 21, pp. 526-534
(1973).
- 30) Beauchamp, J. W.: Synthesis by Spectral Am-
plitude and 'Brightness' Matching of Analyzed
Musical Instrument Tones, J. Audio Eng. Soc.,
30(6), pp. 396-406 (1982).
- 31) Kaegi, W. and Tempelaars, S.: VOSIM-A
New Sound Synthesis System, J. Audio Eng.
Soc., 26, pp. 418-425 (1978).
- 32) Rodet, X.: Time-Domain Formant-Wave-Func-
tion Synthesis, Computer Music J., 8(3), pp.
9-14 (1984).
- 33) 中村 勲: 発音機構のシミュレーション (ピア
ノの音響学的研究第2報), 音響学会誌, 37, pp.
65-75 (1981).
- 34) 中村 勲, 岩岡聡一郎, 園谷 毅: ピアノ音合成
のためのデジタルフィルタの特性改善, 電子情
報通信学会春季全国大会, SA-7-3 (1988).
- 35) 中村 勲: 計算機の自動演奏プログラム, 音響
学会誌, 41(6), pp. 407-411 (1985).
- 36) Senju, M. and Ohgushi, K.: How Are the
Player's Ideas Conveyed to the Audience?,
Music Perception, 4(4), pp. 311-323 (1987).
- 37) ローダラー, J.G. (高野, 安藤訳): 音楽の科
学[音楽の物理学, 精神物理入門], 音楽之友社
(1981).
- 38) ドイツェ, D. (寺西, 大串, 宮崎監訳): 音楽の
心理学, 上, 下, 西村書店 (1987).
- 39) クリッチェリー, M., ヘンスン, R. A. 編 (拓
植, 梅本, 桜林監訳): 音楽と脳, I, II, サイ
エンス社 (1983).

(昭和63年4月4日受付)