CQ BOOKS

コンピュータサウンドの世界

長嶋 洋一 著

CQ出版社

CQ BOOKS

楽しく学ぶ〈音楽〉と〈エレクトロニクス〉

コンピュータサウンドの世界

長嶋 洋一 著





CQ出版社

〈本書の内容〉

録音技術やディジタル技術の登場で音楽は大きく変わりました. 本書は, まず, アンプ, オシレータ, フィルタなど, サウンドエレクトロニクスの要素技術を整理したあと, 「サウンド記録」と「ディジタル化＝サンプリング」を検討します. そして, シンセサイザ, MIDI, 音源LSI, デスクトップミュージックなどについて詳説し, 最後にメディア・アートなど, 最先端の話題に迫ります. サウンドエレクトロニクスからコンピュータミュージックまでの広範な世界が, これ一冊で楽しく学べる, 待望の入門書です.

カバーデザイン　赤道社
(写真協力・ローランド株式会社)

楽しく学ぶ〈音楽〉と〈エレクトロニクス〉

コンピュータサウンドの世界

長嶋 洋一 著

CQ出版社

コンピュータサウンドの世界
長嶋 洋一 著
CQ出版社

CQ BOOKS

楽しく学ぶ〈音楽〉と〈エレクトロニクス〉

コンピュータサウンドの世界

長嶋 洋一 著

CQ出版社

イントロダクション

本書は「サウンド」を題材にしながら、エレクトロニクス技術のポイントを、専門用語をできるだけ使わずに解説しています。目に見えない「電気」と「音」の姿が具体的にイメージできるように工夫されていますから、サウンドエレクトロニクスからコンピュータミュージックまでの広範な世界を楽しみつつ学んでいきましょう。

読者対象としては「文系」の、専門的な予備知識のない方々を想定しています。もちろん、機械系や化学系など、比較的エレクトロニクスに縁の薄い理系の方々にとっても、最終的には「電子工学のセンス」を得ることができる、という意味で役立つことでしょう。スタートラインとしては、中学校の理科で学んだ「オームの法則」(加減乗除)程度で十分です。

本書は以下のような構成で、いろいろな基本的要素技術を少しずつ紹介・検討していきます。「積み上げ」方式で、次第に高度な話題になっていきますので、いきなり最後に行かずに、最初の章から順に進んでください。

◎第1章＝サウンドエレクトロニクスの基礎は、サウンドエレクトロニクスを構成する要素技術について、わかりやすく整理することからスタートします。「アンプ」「オシレータ」などの基本用語を、サウンドエレクトロニクスの視点から理解しましょう。

◎第2章＝エフェクタ（特殊効果）では、カラオケやバンドの音楽などで身近に接している「サウンド効果」について、エレクトロニクス的に原理から解明していきます。この用語をマスターすれば、テレビや映画で接するサウンドもひと味ちがって新鮮に聞こえてくるでしょう。

◎第3章＝サウンド記録とサンプリングでは、まず「アナログ記録」から「ディジタル記録」へ、というサウンド録音の歴史をふりかえり、現代のサウンド

エレクトロニクスの基本である「ディジタルサウンド」の本質に迫ります。ここでは同時に、アナログとディジタルの理屈も納得できるようになるでしょう。また、MP3など、なにかと話題になっているサウンドファイルの仕組みにメスを入れます。

◎第4章＝MIDIと電子楽器では、シンセサイザ、電子楽器、という、まさにサウンドエレクトロニクスの「業界」の技術を全般的に網羅し、さらにインターネット上などでよく見かけるようになった、「MIDI規格、GM音源、SMF形式」などの概念を整理します。

◎第5章＝コンピュータミュージックでは、パソコンの普及とともに一般的になったデスクトップミュージック(DTM)をはじめとして、さまざまなコンピュータミュージックを紹介していきます。

◎第6章＝センサとメディア・アートでは、ちょっとハイレベルになりますがサウンドエレクトロニクスのシステムと人間との接点を検討・紹介します。多くのセンサ技術をはじめ、人間とコンピュータが「対話」するインタラクティブ・アートについても研究します。サウンドエレクトロニクスの先端領域では、人間とのヒューマンインターフェースを重視している、という事実に注目したいと思います。

各章の末尾には、実験しながら体験的に理解できることをねらって、簡単な「電子工作」のコラムも用意しました。興味のあるテーマではこれらの電子工作に挑戦してみることをお勧めします。さらに巻末には、新種のパフォーマンス楽器をいくつも生み出した筆者の「電子工作ワークベンチ」を写真で紹介しています。自宅の机を電子工作デスクに変身させる一例として参考にしていただければ幸いです。

1999年 春

著者

コンピュータサウンドの世界 ◎目次

イントロダクション ……2

第1章
サウンドエレクトロニクスの基礎

アンプ ……8
オシレータ……13
「音」の三要素……15
タイマとカウンタ ……19
フィルタ……23
エンベロープとモジュレーション ……28
◆コラム◆電子工作に挑戦しよう……32
◆補足◆ディジタルICの基礎はゲート ……33

第2章
エフェクタ（特殊効果）

ディレイ ……36
エコーとリバーブ ……37
コーラス ……40
ビブラート……42
楽器「テルミン」 ……44
トレモロ ……47
オートパン……48
ディストーション ……49
◆コラム◆アンプを作ろう……54

第3章
サウンド記録とサンプリング

サウンドの記録と音楽 ……58
アナログ方式のサウンド記録 ……60
ディジタル方式のサウンド記録媒体 ……61
メカニズムのないディジタル記録 ……64
A-D（アナログ-ディジタル）変換 ……67
D-A（ディジタル-アナログ）変換 ……70

ピッチチェンジャー ……73
サウンドファイル・フォーマット ……74
実験・各種サウンドファイル（AIFF/WAV/AU/MP3）…77
◆コラム◆オシレータを作ろう ……93

第4章
MIDIと電子楽器
シンセサイザ ……96
電子楽器 ……100
MIDI規格 ……106
GM音源 ……110
SMFとカラオケ ……113
◆コラム◆カウンタを作ろう ……115

第5章
コンピュータミュージック
ディジタル信号処理とDSPチップ ……120
ソフトシンセサイザ ……126
シーケンサとDTM ……128
いろいろなコンピュータミュージック ……132
◆コラム◆フィルタを作ろう ……143

第6章
センサとメディア・アート
センサの活用 ……148
サウンド・インスタレーション ……154
環境音楽シンセサイザ ……158
インタラクティブ・アート ……160
◆コラム◆ディジタル音源に挑戦しよう ……167

おわりに ……173

◆付録◆写真でみる「電子工作」ワークベンチ ……174

さくいん ……178

第1章

サウンドエレクトロニクスの基礎

◎

アンプ
オシレータ
音の三要素
タイマ／カウンタ
フィルタ
エンベロープ
モジュレーション

◎

<コラム>電子工作に挑戦しよう

アンプ=エレクトロニクスの基本中の基本

サウンドエレクトロニクスに限りませんが、電子回路のもっとも基本的な要素となるのが「アンプ」(増幅器)です。エレクトロニクスの応用システムでアンプを持たないものは、本質的には存在しません。そして、アンプの動作の概念を理解すると、地球環境問題とも通じる「エネルギーと情報」という重要なテーマが見えてきます。アンプは全てのスタートラインなのです。

実際に「アンプキット」を製作実験する例は、次章のコラムにありますので、ここではすでにアンプがある、という前提で、その動作を理解してみましょう。**図1.1**は、ウォークマンのイヤフォン端子から信号を取り出して右側のアンプ(キットの基板)に入力し、そのアンプ出力を手前のスピーカーにつないだ、という実験風景です。また、**図1.2**は、イヤフォンをアンプの入力に接続した実験の様子です。イヤフォンは音を聞くだけでなく、このようにマイクとしても使えるのです。厳密には「整合」していないので、マイクのような良好な特性は得られませんが、口に近づけたイヤフォンに向かって話すと、ちゃんとスピーカーから声が出てきます。



スピーカーとは、電気のエネルギーを、コーン紙を振動させて空気振動に変換し、最終的に「音」にする装置です。イヤフォンも原理的にはまったく同じものです。そして、反対に音を電気信号に変換する「マイク」も、音のエネルギーを電気のエネルギーに変換する、という意味では、同じ原理に基づいてい

図 1.1　アンプにウォークマンの出力をつなぐ

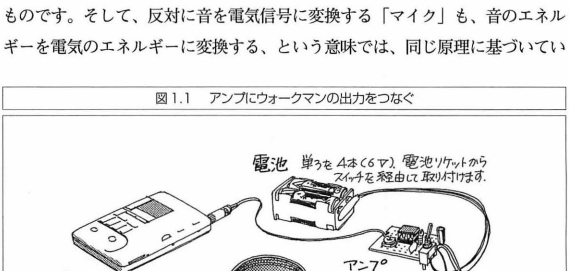
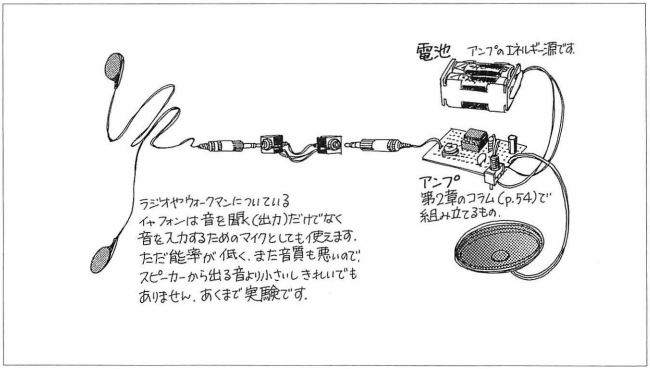


図1.2　イヤフォンをマイク代わりにアンプの入力につなぐ



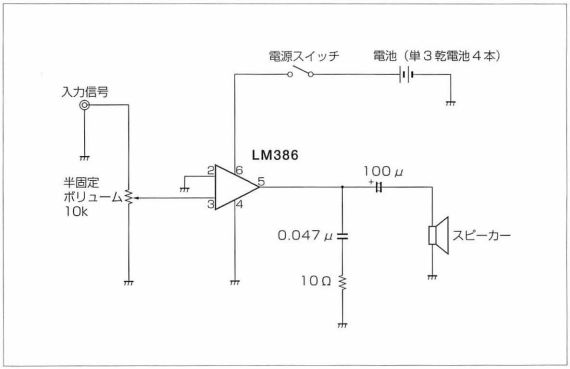
るわけです。ですから、音質などで多少の無理はあるものの、イヤフォンをマイクとして使うことも、逆にマイクから音を出すこともできるわけなのです。

そして重要なのは、いずれの実験風景でも、アンプの電源として乾電池がある、ということです。アンプには、動作のためのエネルギー源として、乾電池やACアダプターのような、いわゆる「電源」がつねに必要です。音のエネルギーが電気に変わり、アンプでこれを「増幅」して、増幅された電気のエネルギーがふたたび音に変わります。その全体を支えているのが、電源のエネルギーというわけです。なお、電池のエネルギーの起源をさらに溯ると、発電所からの電気エネルギーを利用した工業生産システムになり、この元は、化石燃料の火力発電にしても水の循環を利用した水力発電にしても、結局は太陽から地球に供給されたエネルギーということになります。原子力発電のエネルギー源となると、太陽や地球を生み出した宇宙そのものにその起源を求めることになります。

・アンプは小さな信号を大きな信号にする

さて、この実験に使ったアンプキットの回路図は、**図1.3**のようなものです。部品の詳しい解説は省略しますが、回路の構成としては、入力信号が半固定抵抗(ボリューム)を経て(ボリュームの移動接点の上下の抵抗比に応じて入力信号も減衰する)、これがアンプICであるLM386の入力ピン(3ピン)に入ります。

図1.3　秋月電子の「ミニパワーアンプキット」標準回路(A)





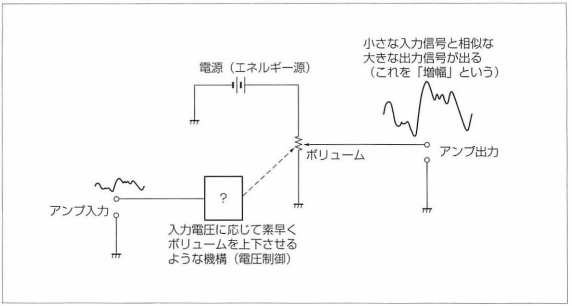
そしてLM386によって「増幅」された出力が、出力ピン(5ピン)から出てきて、これがスピーカーにつながっている、ということです。

そこでこの「増幅」について、もう少し考えていきましょう。アンプというのは、小さな信号を大きな信号に「増幅する」ということです。「信号」とは、電圧(基準となるGNDからの電位差のこと)の変化の幅、というようなものです。増幅とは、電圧の変化の振幅を拡大する働きなのです。それでは、電圧の変化レベルを拡大するためのエネルギー源は何でしょう。もちろん、回路図にある要素を考えると、それは電池(電源)から供給されているわけです。そして確認したいのは、「アンプは発電器ではない」という事実です。たとえば、「オーディオ用のハイパワーアンプで100ワット（W）の出力」などといいますが、この場合でも、アンプは100Wのエネルギーを生成しているのではなくて、電源から供給されているたとえば200Wのエネルギーを消費しながら、最大で100W分の「エネルギー変化」に変換している、ということです。この違いは重要なポイントです。

・アンプのエネルギー源が電源

図1.4は、この様子をあらわしたイメージ図です。アンプの入力としては、GNDとの間に小さな電圧変化として入力信号が与えられます。そして、この入力信号の変化に応じて、いわばボリュームを超高速で変化させるような「電

図1.4　アンプ（増幅）の原理イメージ図



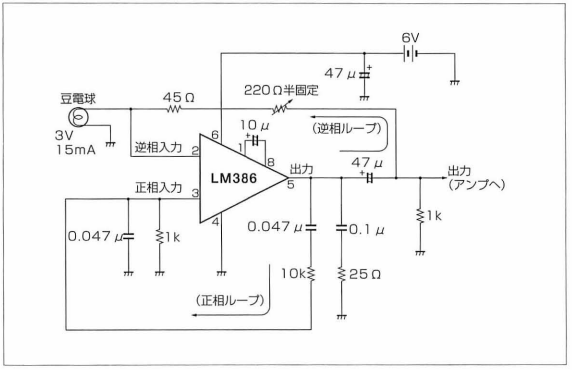
圧制御機構」をブラックボックスとして見ると、まさにこれが「アンプ」の動作の本質です。このボリュームには、電源からのエネルギーが供給されていますから、最大ではゼロから電源電圧までの振幅の変化が出力信号として得られます。この図からあきらかなように、アンプの出力としては、電源から供給される以上のエネルギーを得ることは不可能です。

実際には、このようにボリューム(可変抵抗)を使った場合には、オームの法則にしたがった電流が流れて、その電力はほとんどが熱エネルギーとなって失われてしまいますから、これでは電圧変化は得られても、オーディオアンプのように電力の変化とはなりません。スピーカーを駆動するアンプは、電圧と電流の両方の変化を増幅する「電力増幅器」なのです。しかし、「増幅」の基本的なイメージとして、この図を理解しておくことは重要です。

このような視点からアンプを眺めてみると、これは技術史が築いてきた「人間の力の拡大」と同じ図式であることがわかります。たとえば、太い送水管のバルブを、人間の小さな手で開け閉めすることで、何万トンという水圧を制御できる機構というのも、**図1.4**のアンプの「制御」という図式とまったく同じです。あるいは、油圧ジャッキでクルマを持ち上げるというのも同じで、人間の力を技術によって拡大しているわけです。エレクトロニクス技術も、やはり生身の人間がもっている能力を拡大するために、いろいろと発展してきたのです。

そしてもう一つ、今世紀後半から人類史を変貌させてきた「情報」という視点から、再び**図1.4**を見てみましょう。人間は他の人間とともに生きていく生

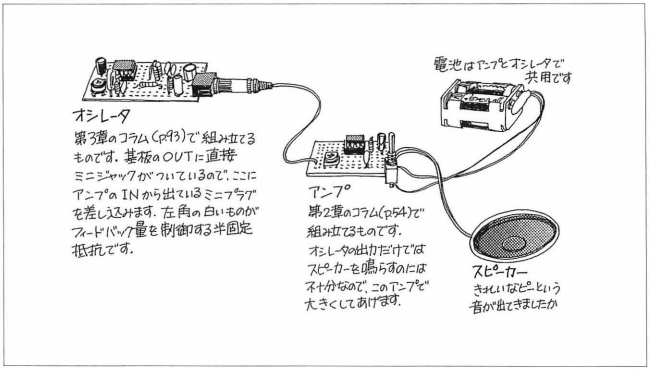
図1.5　秋月電子「LM386アンプ／オシレータ」キットによるウィーンブリッジ発振回路



物ですから、他人とコミュニケーションしなければなりません。近くにいる相手には声をかければいいのですが、大声でも届かない相手や見えないほど遠い相手と情報交換するために、歴史的には「のろし」「手旗信号」「伝書鳩」「花火」「伝令」「飛脚」などの手段が使われてきました。そして、今世紀になって、無線(電波、赤外線)と有線(電話線、通信線、光ファイバ等)での「情報通信」という技術が発明されたことで、人類の文明は飛躍的に発展しました。人間の活動範囲と可能性を大きく拡大した通信技術ですが、その基本はやはり、この「アンプ」なのです。**図1.4**の入力と出力の部分には、他の古い伝達手段に比べて、格段にロスが少なく信頼性の高い「信号線」を使うので、原理的にはいくらでも延ばすことができます。つまり、アンプは、情報通信の本質的な基礎技術なのです。

そして、アンプは電源のエネルギーの範囲内で仕事をする、というポイントを再確認しましょう。つまり、コンピュータ技術が世界中を覆って、21世紀はますます情報活性の時代となるわけですが、このあらゆる「情報」は、それ自体がエレクトロニクスのシステム内で機能するために、電源のエネルギーを消費している(電源のエネルギーを利用すること自体が、電子回路の動作の本質)という事実です。一方では「地球環境」問題で環境破壊などともに、エネルギー消費型の文明が問題となってきています。しかし、多くの恩恵を与えてくれている情報化そのものが、本質としてエネルギー消費型の技術である、と

図 1.6　オシレータ回路の動作実験



いうトレードオフは、頭に置いておきたいものだと思います。

オシレータ

つぎに登場する基本要素は、「オシレータ」(発振器)です。「アンプ」は、入力信号と比例して拡大(増幅)された出力信号を得る、というのが目的でした。これを「線形」な回路(入出力が比例関係にある回路)といいます。ところが発振回路は、「**非線形回路**」の横綱ともいえる、まったく異なった動作をするものです。その基礎にはアンプがあり、オシレータもまた、エレクトロニクスのほとんど全ての領域で活躍しています。アンプとオシレータがわかれば、「原理としてはもう十分」と断言してしまいたいほどです。

具体的に「オシレータ・キット」を製作実験する例は、第3章のコラムにありますので、ここではすでにオシレータを作った、という想定で、その動作を検討してみましょう。なお、オシレータ回路の出力で直接スピーカーを駆動するのはちょっと苦しいので、前に紹介したアンプとスピーカーの部分はそのまま使用して、別にオシレータの出力をここに与えてみます。

図1.5はオシレータのキットの回路図、**図1.6**はすでに作ったアンプに、左側のこのオシレータを接続して実験している風景です。電源はアンプのための乾電池を共用しています。それでは、ちょっと複雑になりましたが、この**図1.5**

のオシレータ回路の動作原理を理解してしまいましょう。

まず、アンプ回路と同じ部分を確認して、ここでの検討から除外します。電源のラインには、47 μFの電解コンデンサを入れています。これは、電源電圧を安定させるためのものです。また、アンプ出力の5ピンから右に出ているラインのうち、出力側の四つの部品(抵抗とコンデンサ、二つずつ)は、基本的にたんなるアンプでも必要なので、これもオシレータとは関係ありません。

そして、残った部品とその回路構成が、オシレータの本質そのもの、エッセンスとなっています。このアンプLM386の入力端子には、「正相」「逆相」という、二つが用意されています。3ピンは正相入力端子で、ここからの入力信号は、そのまま相似形で増幅されて出力されます。ところが、2ピンの逆相入力端子から入力された信号は、拡大された上に極性(プラス・マイナスの方向)が逆に出力される、という違いがあります。

このオシレータは「ウィーンブリッジ発振回路」と呼ばれる有名な回路です。きれいなサイン波を簡単に出力するために、たったこれだけのシンプルな回路に、じつは二つの重要なエレクトロニクス的テクニックが盛り込まれています。ちょっと混乱するかもしれないので、問題を切り分けて考えてみましょう。

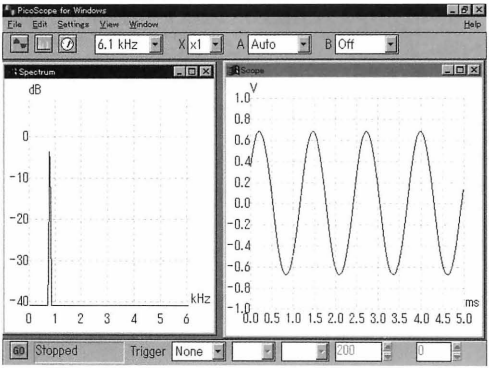


まず、出力ラインから半固定抵抗を経て2ピンの逆相入力に戻ってくる、というループがあります。これを「フィードバック（帰還）」ループといいます。逆相なので、正式には「**ネガティブ・フィードバック**(負帰還)」です。せっかくのアンプの出力を逆相で入力に戻す、つまり、増幅した信号を打ち消す方向に加えるということで、アンプとしては損をすることになります。しかし、この帰還量を半固定抵抗で制御することで、アンプ動作のゲイン（増幅率）の調整ができるのです。さらに、ここでは豆電球がついていますが、これがサイン波形のようななめらかな変化を生み出すために機能します。

・発振は正帰還

そして発振回路で重要なのが、**図1.5**の回路図ではICの下側にある、3ピンの正相入力への帰還ループです。これは正式には、「**ポジティブ・フィードバック**(正帰還)」です。これはどういう動作をするのでしょうか。電源が入った瞬間、この入力端子には信号がありませんが、電源投入をきっかけとして、何らかの電気的変動(ノイズ)があったとします。その信号はハイゲインのアンプで拡大されて、この帰還ループを経由して、正相入力に戻ってきます。そして、再びその信号が増幅されて出力に出て、これがまた戻ってきます。

図1.7　オシレータ回路の出力信号をオシロスコープで測定した画面



結果として、どうなるでしょうか。

カラオケのマイクをスピーカーに近づけたときに、ピーという大きな音で鳴る「ハウリング」という現象があります。ハウリングは、まさにこの発振回路の動作そのものです。いったん起きた電気的振動は拡大されて、電源電圧の制限で飽和するまで大きくなり、あとは安定に持続します。これが、発振回路の動作の本質です。なお、この正帰還ループに入っている2ペアの抵抗とコンデンサは、じつはこのオシレータの発振周波数（後述）を決めるものです。

どうでしょう。最初に**図1.5**を見て、だいぶアンプより複雑になったな、と身構えた方もいるでしょう。しかし、こうやって要素に分けて整理してみると、**図1.5**の回路にはまったく無駄がなく、それぞれの部品が重要な仕事を担当して、全体として素晴らしい機能を実現しているのがわかります。これが、サウンドエレクトロニクスの一つの究極です。「オシレータを制する者はサウンドエレクトロニクスを究める」です。じつは、たった500円のキットなのですが、これでいろいろと遊ぶことができます。

「音」の三要素＝①音量、②ピッチ、③音色

アンプでは入力された音が大きくなっただけでしたが、オシレータでは、ごく原初的ですが、「音」が生成されました。そこで、この「音」について整理しておくことにしましょう。音に関する物理的な理解、ということになりますが、あまり身構えずに気楽にいきましょう。日常的に耳にしているあらゆるサウンドに共通のことなのですから。

まず最初に、**図1.7**を見てみましょう。これは、**図1.5**のオシレータ回路の出

力信号（アンプに行っている部分）を、オシロスコープという測定器で計測した様子です。実際には、パソコンに接続するオシロスコープ装置によって計測したデータを画面に表示して、そのハードコピーを取っています。ここでは回路の二つの半固定抵抗を調整して、鳴っている音が「なるべく丸い音色」（フルートのような柔らかい音色）になるように調整したところです。画面中央に左右二つの表示ウインドウがありますが、まずは右側の「オシロスコープ」画面を見てみましょう。この波打った信号波形は、高校の数学で出てくる「サイン関数」そのものの変化で、この信号を「**サイン波**(正弦波)」といいます。サイン波はあらゆる信号の基本で、家庭のコンセントから得ている交流電源(AC)も、このサイン波と同じように変化しています。等速で回転する円盤上の1点の時間的移動を、円盤と同じ平面上の無限遠点から見た振動(「単振動」という)の波形です。



・丸い音と四角い音

このような周期的な信号変化の繰り返しを発生するのがオシレータ回路の働きです。この変化はそのままアンプで相似形として拡大されて、スピーカーを駆動し、それが空気振動として私たちの鼓膜を振動させます。鼓膜の振動はさらに聴覚神経を刺激して脳に伝わり、最終的に「音」として知覚されます。つまり、ここで見ている信号は、私たちの脳に伝わり知覚される「音」の情報とほとんど変わらないものなのです。この図のような計測結果を電気信号として分析するだけで、慣れてくると、その音が人間にどう聞こえるか、ということを的確に予測することも可能になります。

たとえば、**図1.8**は、オシレータ回路の二つの半固定抵抗をいろいろと回して、「ちょっと耳障りな音に聞こえる」状態での、出力信号を計測したデータの様子です。この内容については後で検討しますが、「音」についてある程度理解すると、このようなグラフだけで、その鳴っている音を予測したり、想像して頭に鳴らしたりすることも簡単です。「音を目で聞く」という、ちょっと面白い世界だと思いませんか。

・ピッチの高い音は周波数が高い

さて、**図1.7**の右側のグラフでは、縦軸は信号の大きさ(レベル)を表しています。これは日常的な概念で、このレベルの大小の変化が、アンプやスピーカーを経て、「音」という空気振動の強さになります。そして、横軸にある「ms」

というのは、ミリ秒、つまり時間をあらわす軸です。この図の例では、だいたい0.5msから3.0msぐらいの時間で2周期の変化をしています。すると、「1周期の時間は約1.25ms」となります。このように、「周期」という量(時間：単位は「秒」)というのは、「信号の繰り返しをしている1回分に相当する時間」ということになります。

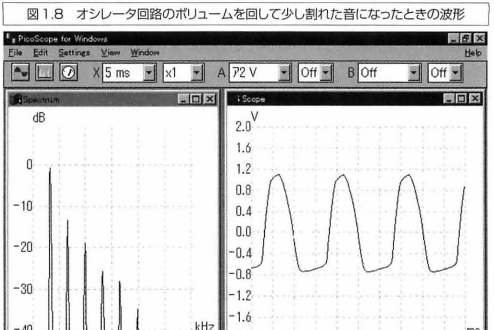
そして、音の高さ(ピッチ)に相当する量として、「**周波数**」という用語があります。サウンドエレクトロニクスでは、周波数による表現は基本中の基本です。この例では、1周期が1.25ms、すなわち0.00125秒なので、この逆数をとって(1÷0.00125)、この信号の周波数は800ヘルツ(Hz)である、という言い方をします。この意味は、1秒間に800回の振動を繰り返している、ということになります。周波数の単位であるヘルツ(Hz)とは、「時間の逆数」を表す、無次元の量(回数)です。**ピッチの高い音は**時間あたりの繰り返し回数、つまり**周波数が高い**、という関係にあります。周波数が決まれば、時間(周期)は その逆数で対応しているので、この両者は同じ現象を二つの方法で表現しているだけ、という点に注意しましょう。人間の聴覚としては、一般に数10Hzから15kHz(注)程度が聞こえる、といわれています。CDなどのディジタルオーディオの性能を決めているのも、この音響生理学的な学説によるものですが、最近では「もっと高い周波数を聞くと、意識しないのに脳内が活性化される」などという学説も登場して、学会では議論になっているところです。

さて、**図1.7**の右側のグラフが基本的なサイン波の信号であり、ここから約800Hzの周波数である、というところまで「読める」ことを確認したうえで、左側のグラフを見てみましょう。これは「スペクトル」のグラフというもので、信号に含まれる高次の周波数成分の強さを示したものです。といっても、この波形はサイン波ですので、だいたい800Hzのところ(横軸がkHzと周波数になっている)に一つだけピークがある、というシンプルなものです。このように、スペクトルのグラフでは、その周波数のサイン波成分の強さが示されるように

(注)周波数や時間の単位に添えられている指数表示の記号は、以下のようになります。

T(テラ) 1000000000000倍
G(ギガ) 1000000000倍
M(メガ) 1000000倍
k(キロ) 1000倍
m(ミリ) 1000分の1
μ(マイクロ) 1000000分の1
n(ナノ) 1000000000分の1
p(ピコ) 1000000000000分の1

図1.8　オシレータ回路のボリュームを回して少し割れた音になったときの波形





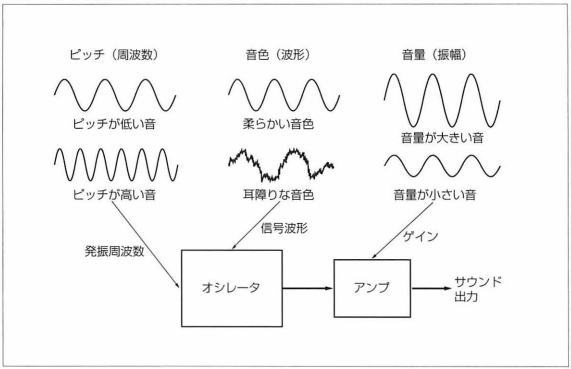
なっています。

ところが、半固定抵抗を少し回して、耳に聞こえる音がちょっとだけ割れたような印象の、**図1.8**の計測結果と比較してみましょう。まず右側の信号波形を見ると、サイン波よりも少しだけ上下の対称性が崩れていること、少しだけ周期が長くなって、およそ700Hzあたりのピッチであることなどがわかります。そして、左側のスペクトルのグラフを見ると、数本のピークが、等間隔に登場しています。これは、いちばん左側でレベル(縦軸は、デシベル（dB）による相対的なレベルとなっている)が最大の「基本波」に対して、2倍、3倍、4倍…という整数倍の周波数成分のサイン波も持っている、ということを意味しています。そのつもりで音を聞いてみると、たしかに基本波のピッチは下がっているのに、どこかキンキンと高い成分の音が聞こえてきます。

・音色の正体が信号波形

これが、「**音量**」「**ピッチ**(周波数)」と並んで音の三要素となる「**音色**」の正体です。つまりこのグラフによって、サウンドエレクトロニクスのもっとも基本的な「信号波形とスペクトル成分と音色」という、音響学でも歴史の長い「美しい事実」をかいま見た、ということです。グラフでいえば、右側の波形を分析した結果が左側のグラフなのですが、音を生成するときには、左側のような成分を合成した結果として、右側のような波形を得る、という関係となっ

図1.9　「音の三要素」の実現



ています。ICがたった1個の、500円のオシレータ・キットでも、いろいろな「音」を発生する、もっとも簡単な一種の「シンセサイザ」として機能している、という事実を知れば、なぜか楽しくなります。

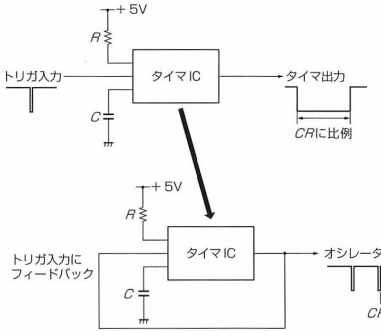
タイマとカウンタ

サウンドエレクトロニクスのシステム構成としては、すでに紹介した音の三要素を考えると、**図1.9**がもっとも基本的な構成となります。つまり、オシレータとアンプがあればサウンドは出てきますが、このオシレータの発振周波数をピッチとして与え、オシレータの信号波形を音色として与え、さらにアンプのゲインとして音量を与える、ということになります。この考え方はシンセサイザにも通じるもので、サウンドエレクトロニクス技術がアナログからディジタルに発展しても継承されています。

さて、ここでは**図1.9**のうち、もっとも上流になるオシレータのピッチの部分の実現について、さらに別の例を紹介していきましょう。すでに検討した「アンプの出力を入力に帰還させる」という方式のオシレータの最大の欠点は、動作が不安定でピッチや出力の誤差が大きい、という点にあります。

そこで登場するのが、「タイマIC」を利用したオシレータです。タイマICの機能は、もともと「一定時間を計測する」というもので、**図1.10**のように、

図1.10　タイマICを利用したオシレータ



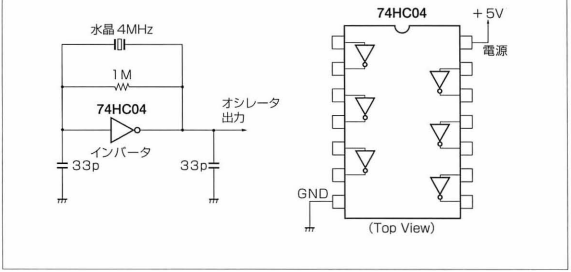
外付けの抵抗*R*とコンデンサ*C*とによって決まる「**時定数**(じていすう)」に比例した時間を生成するものです。入力に、動作の起点となる「**トリガ**」と呼ばれるパルス信号を入力すると、そこから時定数に応じた一定時間の幅の出力パルス信号が一発だけ出ます。

このタイマICの動作原理を利用すると、出力信号をトリガ入力にフィードバックすることで、*CR*の時定数によって周期を設定したパルス列を生成する、という、より動作の安定したオシレータが簡単に作れます。出力のパルスはとても幅の狭いものですが、これはつぎに紹介するカウンタによって、どうにでもなります。このオシレータは、いわばアナログ半分、ディジタル半分のような回路なのですが、ここからいよいよディジタルのシステムに発展していくスタートラインとなるわけです。

・水晶発振(クオーツ)は正確な発振周波数が得られる

サウンドエレクトロニクスの実際のシステムの場合には、このようなタイマICがそのまま使われることはほとんどありません。その理由は、やはり発振周波数の安定度と精度の限界にあります。そこでほとんどのシステムで用いられているのが水晶発振回路、いわゆる「クォーツ」回路ということになります。

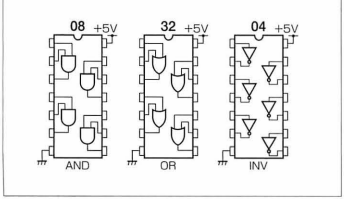
図 1.11　水晶発振回路



水晶振動子という部品は、水晶の結晶が正確な発振周波数を提供するために、セラミック振動子とともに、ほとんど全てのディジタルシステムの基準クロック信号源となっています。

水晶発振回路を作るのは、とても簡単です。**図1.11**はそのもっとも簡単な実現例です。このIC(74HC04)はディジタルICですが、これ以降、本書に登場する全てのディジタルICでは、このように電源端子とGND端子については、いちいち記述しない、という一般ルールにしたがうことにします。ディジタルICはこの「04」のように（頭の74HCなどはよく省略する）、一つのパッケージに同じ論理回路がいくつも入っています。04は六つのインバータ（論理反転回路）があり、回路図のインバータを実際に作るときには、ICの中のどれを使ってもかまいません。この例では、4MHzの水晶振動子を使ったクォーツ精度のクロックオシレータ回路となっているわけです。ディジタルICの多くは**図1.12**のように、電源端子とGND端子が同じ場所にある点にも注意しましょう。この08は論理積（アンド）、32は論理和（オア）という、いずれも代表的なICです（p.34参照）。

図 1.12　代表的なディジタルIC



さて、このディジタルクロック信号を受けると、すぐに簡単なディジタル信号発生回路が構成できます。新たに加わるのは、「**フリップフロップ**」と

図1.13　フリップフロップICの機能ブロック

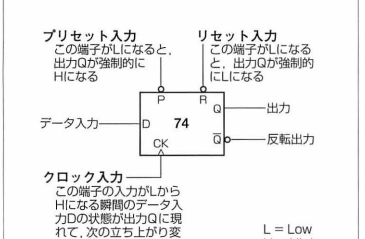
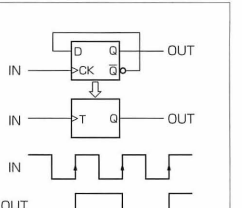


図1.14　フリップフロップICのQ出力をDに接続すると，出力周期が入力周期の2倍になる



「**カウンタ**」というICです。フリップフロップとは、**図1.13**のような機能ブロックのIC（74というICには、これが二つ入っている）です。ここでは詳しい検討は省略しますが、このフリップフロップを**図1.14**のように接続したブロックの動作を考えると、入力クロック信号の「立ち上がり」の変化点で出力が交互に切り替わるために、入力と出力の周波数の関係は、ちょうど半分になります。これを「分周回路」といいます。さらに、入力クロックのHigh側とLow側の長さが等しくない場合でも、出力クロックはぴったり50%ずつの波形（矩形波という）になります。

・分周回路で半分の周波数を得る

ところで、この分周回路によって入力クロック信号の周波数が半分になる、というのは、サウンドエレクトロニクスにおいてはとても重要です。というのも、「ピッチが半分の音」というのは、「オクターブ下の音」という人間の聴覚の特徴と密接に関係しているからです。つまり、人間の耳にとっては、400Hzの音と450Hzの音（たった50Hzの差）よりも、400Hzの音と800Hzの音（2倍の比）のほうが、親しいというよりも「同じ」ように聞こえる、という事実があるのです。そして、この倍数関係というのは、「音色」に深く係わる「倍音」の関係そのものです。

そして、**図1.14**のような構成のフリップフロップを4段にわたって連結し、さらに1パッケージにそれを2ブロック格納したのが、393というカウンタICです。これはあくまで簡易型（非同期システム）なのですが、この動作を検討

図1.15　カウンタIC「393」の等価回路とピン配置

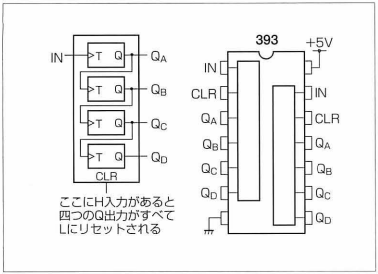
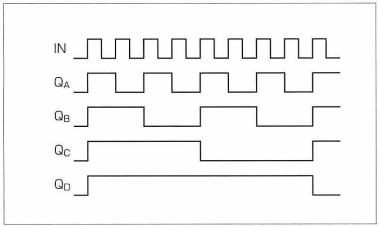


図1.16　393の入力クロックに対する出力信号



してみましょう。**図1.15**が393の等価回路とピン配置で、入力クロックに対する出力信号が**図1.16**のように出てきます。これは、サウンドエレクトロニクスの視点から見ると、どうなるでしょうか。

パイプオルガンという楽器があります。西洋クラシック音楽の世界では「王様」と呼ばれる巨大な楽器です。その音は、鍵盤を演奏したときに出る基準の音の「8フィート」という音栓（ストップ）だけでなく、1オクターブ上の4フィート、2オクターブ上の2フィート、3オクターブ上の1フィート、1オクターブ低い16フィート、などという音栓をミックスすることで音色を形成しています。ところで**図1.16**のクロックを見ると、これはまさにそのストップごとに対応して出てくる音のピッチと同じ関係になっています。つまり、カウンタによってもっとも簡単な「電子オルガン」を作ることができるわけです。本書ではこれ以上深入りできませんが、実際にある時代の電子オルガンはこの構成で設計されていたのです。

フィルタ

音の三要素の中で「音色」に関するエレクトロニクス技術としては、「フィルタ回路」が一つの中心となります。ここでは電子部品の機能の基礎を確認しながら、簡単なフィルタによる「音色の生成」について検討してみましょう。

・三つの基本パーツ＝①抵抗、②コンデンサ、③コイル

図1.17　オームの法則=流れる電流は電圧に比例し、抵抗に反比例する

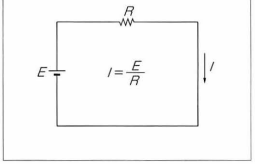


図1.18　コンデンサ

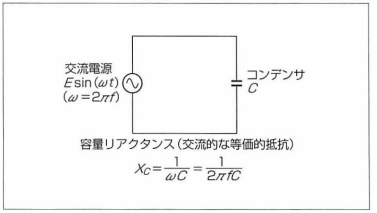
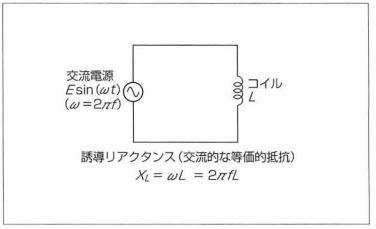


図1.19　コイル





まずスタートラインは、電子回路の三つの基幹部品、つまり抵抗、コンデンサ、コイルについての確認です。いずれも概念的には中学や高校の理科で学んでいることですが、ここでも数学的な難しいことには深入りせずに、「定性的な理解」だけで進めていきましょう。

「**抵抗**」は、**図1.17**の「オームの法則」が全てです。抵抗とは、供給された電圧Eに対して、結果として電流Iを流すだけの抵抗成分Rを持っている、ということです。ここでは直流の電池となっていますが、基本的に抵抗は交流でも同じ効果を持つ、と考えていきます。

「**コンデンサ**」は、直流を流さない部品です。基本的には「電極が絶縁されて向き合う」というものですから当然です。その性質は、**図1.18**のように交流が供給されて、はじめて意味をもってきます。つまり、コンデンサの交流回路での等価的抵抗成分（リアクタンスという）は、コンデンサの容量Cに反比例し、さらに回路の周波数fにも反比例します。極端には直流回路では、周波数がゼロで等価的抵抗は無限大になっているのです。

「**コイル**」はこの逆で、電磁石のように電線を巻いたものですから、直流では理想的には抵抗ゼロとなります。この性質も**図1.19**のように交流回路で表面化します。コイルはコンデンサと逆に、コイルの値Lに比例し、さらに回路の周波数にも比例するような等価的抵抗成分をもちます。電磁石では、電源の

図1.20　3端子回路

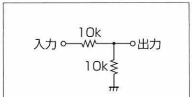


図1.22　3端子回路の一方の抵抗をコンデンサに変えたもの(左)と、コイルとコンデンサ(右)に変えたもの

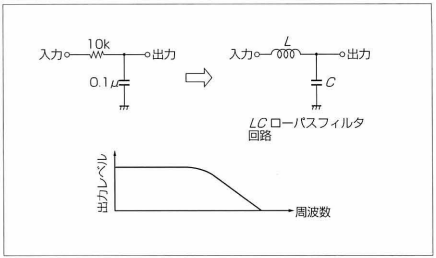
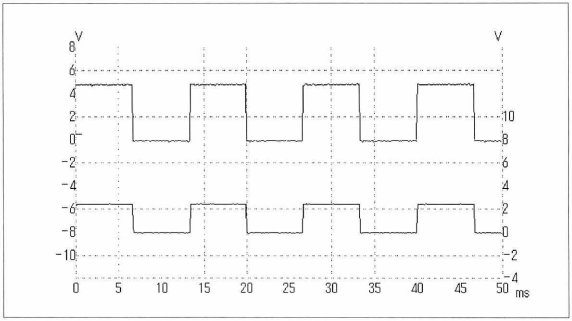


図1.21　図1.20の入力に加えた電圧は分圧される

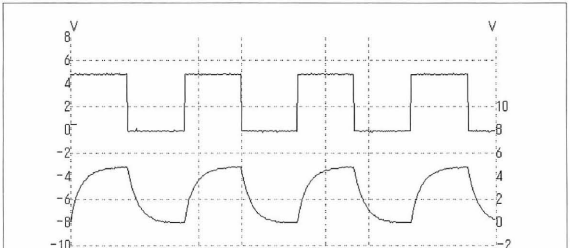


変動を打ち消すような逆方向の磁界を発生する働きがありましたから、交流回路ではその変化になるべく抵抗するのです。

・抵抗、コンデンサ、コイルの組み合わせで音色が変わる

これらの基本素子を組み合わせることで、交流回路での「フィルタ」を構成することができます。ここでは、実際に筆者が計測したデータとともに整理してみましょう。まず、**図1.20**のような回路を考えます。これは、共通のGNDと入力、出力、というもっとも基本的な「3端子回路」で、入力の電圧が、二つの等しい抵抗によって「分圧」されているものです。この回路の入力に、実際にある矩形波信号を与えて、その出力を計測したのが、**図1.21**のグラフで

図1.23　図1.22のように一方の抵抗をコンデンサに替えると、出力波形が下段のように丸まってくる



す。上段が入力の信号で、電圧の縦軸は左側にあります。下段の出力の縦軸は右側ですから、たしかに入力の0V-5Vが半分になって分圧されているのがわかります。



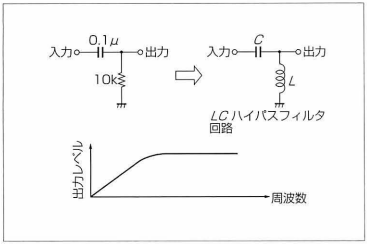
・低い周波数を通すローパスフィルタ

これに対して、**図1.22**の左上の回路のように、一方の抵抗をコンデンサに交換した場合、入出力の信号波形は**図1.23**のようになりました。上段はまったく同じ入力ですが、下段の出力はかなり滑らかに丸まっています。これだけ波形が変わってくれば、サウンドとしてもかなり変化していることが予想できます。これが「**ローパスフィルタ**」と呼ばれるもので、回路図をよく眺めてみると、その動作は簡単に理解できます。つまり、入力を分圧している二つの素子のうち、コンデンサだけが交流的に抵抗成分が変わります。そして、コンデンサは周波数が高いほど抵抗成分が小さくなるので、入力信号のうち周波数成分の高いものほど、出力でなくGNDに捨てられてしまうのです。その結果、出力では周波数が高域になるほどレベルが相対的に低下して、**図1.22**の下図のような特性となります。この効果は、抵抗RをコイルLにすれば、さらに増強されます。

・高い周波数を通すハイパスフィルタ

また、**図1.24**の左上の回路のように、別のほうの抵抗をコンデンサに交換した場合、入出力の信号波形は**図1.25**のようになりました。今度は、下段の

図1.24　片方の抵抗をコイルに変える



出力は入力よりも急激に変化しています。この波形の変化も、サウンドをかなり変貌させます。これが「**ハイパスフィルタ**」と呼ばれるものです。コンデンサは周波数が高いほど抵抗成分が小さくなるので、ここでは入力信号のうち周波数成分の高いものほど通過して、そのまま出力に現れます。逆に周波数成分の低いものは抵抗成分に分圧されて、レベルが相対的に低下し、全体としては**図1.25**の下図のような特性となります。この効果も、抵抗RをコイルLにすれば、さらに増強されます。

このローパスフィルタとハイパスフィルタには、じつは誰でも日常的に接しています。テレビやステレオやウォークマンにある「音質調整」や「低音増強(ブースト)」という機能は、じつはこの回路とまったく同じように、抵抗とコンデンサの回路を入れるかどうか、という程度のものなのです。より本格的には、このフィルタ回路をアンプに組み込んだ「アクティブフィルタ」という回路を用いるのですが、動作原理はここで検討したものと変わりません。自分の愛用しているサウンド機器の音色を好みに応じて変えたかったら、抵抗とコンデンサのたった2個の部品を使う、というのがスタートです。

図1.25　図1.24の波形

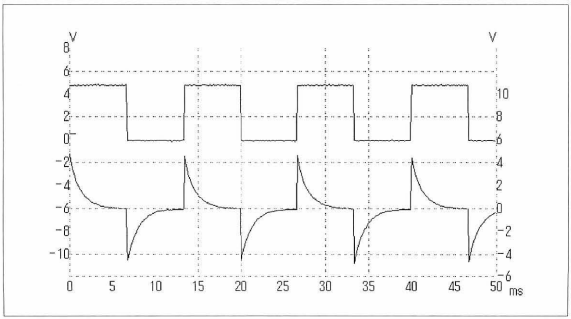
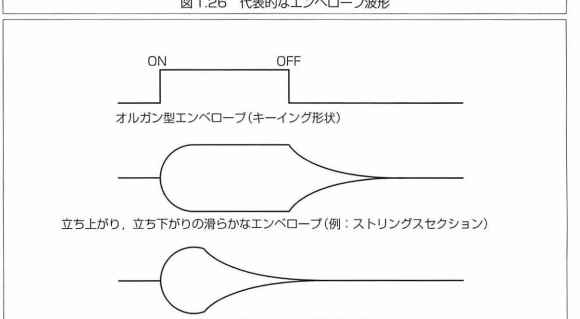


図 1.26　代表的なエンベロープ波形



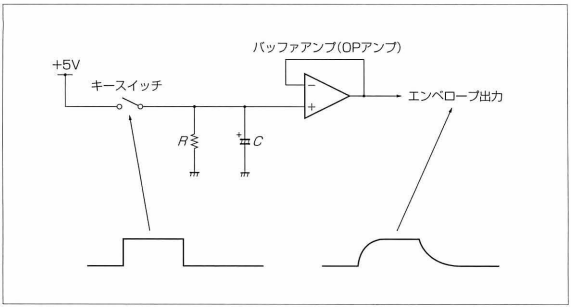
エンベロープとモジュレーション

音の三要素のうち、カウンタでピッチ(周波数)を作る、フィルタで音色(波形)を作る、という部分を検討してきました。いよいよ残ったのは、音量(レベル)です。もっとも、すでにアンプについては紹介していますから、アンプのボリュームを上げ下げして全体の音量を調整するのは、ここでの対象ではありません。音楽や音響の場合に重要なのは、音量が「時間的変化」するところで、この時間的な音量の変化する様子（電圧の時間的変化曲線）を「エンベロープ」といいます。

・音量の時間的変化がエンベロープ

図1.26はこのエンベロープ形状の代表的なものの例です。いちばん上の方形波のような波形は、単純にスイッチをONにするとHighレベル(“H”と表記する)、OFFにするとLowレベル（“L”と表記する）になる、という「キーイング」状態の信号の様子で、これをそのままエンベロープとすれば、残響のないオルガンのような時間的音量変化となります。また、中段のエンベロープは、ONによって次第に最大レベルに滑らかに近づいていき、OFFになるとまた滑らかにゼロに近づく（漸近という）、というエンベロープの例です。これは、たとえばシンセサイザでは「ストリングスセクション」という名前の、オ

図1.27　もっとも基本的なエンベロープジェネレータ(持続音タイプ)



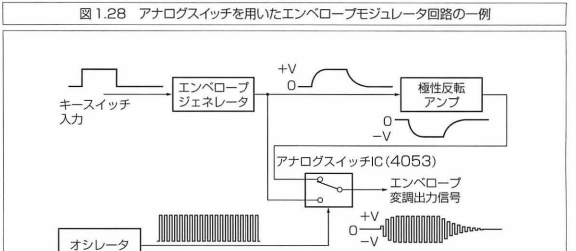
ーケストラのバイオリンパートが一斉に持続音を鳴らすパートのようなところでよく用いられています。そしていちばん下のエンベロープは、ONで立ち上がったあとで、最大レベルから自動的にゼロに減衰していくもので、OFFの情報に関係しない、というものです。これは楽器では打楽器や木琴など、打撃して発音するタイプのものに相当しています。このエンベロープは、音楽では生き生きとしたリズムを生み出す原動力となります。

それでは、このエンベロープはどのように作ればいいでしょうか。このヒントは、すでに「フィルタ」のところに出ています。**図1.27**を見てみましょう。この図で右側にあるのは、OPアンプ(オペアンプ)という万能ICを用いた「ボルテージフォロワ」というアンプ回路で、ゲインは1倍ですが、入力の電圧を安定に出力するためのバッファアンプというだけです。つまり、この回路のエンベロープ電圧の生成には直接は関係しません。関係するのはその入力側の部分で、ON/OFFを作るキースイッチのところに、並列に抵抗RとコンデンサC(ここでは大容量の電解コンデンサというタイプ)が入っています。

この回路の動作の中核となるのは、コンデンサCの機能です。ここであらためて**図1.18**を思い出してみましょう。コンデンサとは向かい合った電極に電気(正式には「電荷」という電気を帯びたもの)を貯える、という機能を持っています。そこで、**図1.27**でキースイッチがOFFの状態でしばらくいると、コンデンサに充電された電荷は抵抗を経由してGNDに放電されて0となり、OPアンプの入力端子の電圧も0となっています。これが初期状態です。

そしてキースイッチをONにします。すると、コンデンサの両端には瞬間的

図1.28　アナログスイッチを用いたエンベロープモジュレータ回路の一例



には0から＋5Vへと急激な電圧変化が起きます。ところが、コンデンサは貯えられた電荷が0だったので、上昇する電圧による電荷はまずはコンデンサの電極に充電されることで、なかなか＋5Vに移行しないで、滑らかに上昇することになります。これは言い換えれば、0から＋5Vへの急激な電圧変化、というのは相当に高い周波数領域の成分を持った一種のノイズ的な「信号」なのですが、これがGNDとの間に入ったコンデンサの「交流的な等価抵抗」が周波数が高いほどゼロに近いために、GNDに逃げてしまってアンプの入力端子に到達しない、ということなのです。



この結果、キースイッチをONにしてから滑らかに上昇した電圧は、やがて+5Vに飽和したところで止まり、ここではコンデンサが満タンに充電された状態となります。このコンデンサの機能は、ローパスフィルタの別な一面なのですが、数学的には入力の電圧を「積分」したような出力が得られるために、積分回路とも呼ばれています。

・エンベロープは時定数で決まる

そしてここから、キースイッチをOFFにすると、今度は逆の現象が起こります。つまり、OPアンプの入力部分の等価的抵抗は非常に大きいので実質的にはここには電流が漏れず、コンデンサの両端の電圧は抵抗Rを経由してGNDに放電されていきます。この時間的特性は、抵抗Rとコンデンサの容量Cとの積（時定数：CR）によって決定されます。そこで十分に大きな時定数をとると、あたかもホールで楽器を演奏した残響のような、自然な減衰特性のエンベロープ電圧を得ることができます。この特性は数学的には「指数関数」的

な変化で、ある時間で半分になった場合、同じ時間でさらにまた半分になる、というように「減衰する比が時間的に一定」という性質を持っています。これは自然界ではとても多い変化特性で、人間の聴覚にとっても自然なものです。

さて、**図1.27**のような簡単な回路で、自然な時間的変化のエンベロープ信号が得られたとすると、すでに紹介したオシレータ回路の信号にこの音量変化を適用して、具体的なサウンドを生成したくなってきます。じつはこれまた、簡単な回路によって実現できます。ここで新たに登場するのは、「アナログスイッチ」というICで、その名の通り、制御入力電圧（0Vと＋5V）とに応じて、入力信号を切り替えたものが出力として得られる、という機能を持ちます。

・エンベロープの時間的変化を加えるのが変調

図1.28は、アナログスイッチICの4053という定番ものを用いて、オシレータからの信号（サウンドに対応した周波数で変化する信号）に、**図1.27**で得られたエンベロープを作用させた回路の例です。このように、時間的音量変化のないクロック信号にエンベロープの時間的変化をつける回路のことを「**変調回路**」とも呼びます。これは、クロック信号の振幅としてエンベロープの電圧を刻々と乗算している回路、ということもできます。

ここではキースイッチのイベントのときにしかエンベロープの変化が作用しませんが、これとは別に、連続的に変化する信号を作用させるようなサウンドエレクトロニクスのテクニックもあり、その場合にも「変調（モジュレーション）」という言い方をします。たとえば、次章で紹介する「トレモロ」とは、ここでのエンベロープの代わりに連続的な低い周波数の波形によって音量変化をつける変調のことです。

たったこれだけの回路によって、スイッチそのままで断続的・電気的なサウンドだったオシレータの出力は、弦を弾いたような自然な立ち上がり、あるいは残響のような自然な減衰によって、驚くほどイメージの改良された「音」となってきます。ここにフィルタを作用させていろいろな「音色」を作り、さらに後述するようなピッチ生成の部分の機構を盛り込めば、もう十分に「楽器」と呼べるようなサウンドジェネレータが出現します。音の三要素をそれぞれ整理してみれば、難解だと思われているサウンドエレクトロニクスも、次第に霧が晴れてきて、そこには素晴らしい世界が広がっていることに驚くことでしょう。

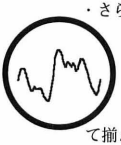
電子工作に挑戦しよう

次章以降のコラムでは、サウンドエレクトロニクスの基礎となるいくつかの回路を実際に製作実験した例を紹介していきます。ここでは、その準備として、工具とキットについて整理しておきましょう。

・用意したい工具

電子工作をするには、「工具」が必要です。まず最低限、必要なのは以下のようなものです。

・ハンダ付けのための工具…ハンダごて、こて台、ハンダ
・部品の足を切ったり配線材料を切るための工具…ニッパー、カッター
・さらにあれば便利な工具…ラジオペンチ、ピンセット、ドライバーセット、ハンダ吸い取りリボン



工具はいろいろとあれば便利ですが、あまり最初から気合いを入れて揃えなくても大丈夫です。別々に揃えるよりも「電子工作用ツールボックス」のように、一式がバッグに入ったセットが便利でしょう。

一つだけ注意する点として、ハンダごては「20Wか30W程度」の小型のものが必要です。大型・大容量のハンダごてでは部品が熱で壊れてしまい、「大は小を兼ねる」ことは絶対にありませんので注意しましょう。筆者はいつも、25W程度のもの1本で全てを製作しています。また、ハンダは「ヤニ入りハンダ」という、太さ1mm程度の細いものを使いましょう(ツールセットには付いています)。ハンダ付けが初めての人は、いきなり本番のキットで始めないで、適当なユニバーサル基板(200円程度)とか、部品取り用のジャンク基板で練習してから取りかかるほうがいいでしょう。

・部品の極性を間違えずに取り付ける

「電子工作キット」の中には、いろいろなものが入っています。まず、回路図

コラム①

や製作手順などが印刷された「マニュアル」は、後々まで取っておくべき、重要な情報源です。そして、細かいいくつもの部品と、これら部品を取り付ける「プリント基板」が入っています。プリント基板の銅箔には、手を触れないようにしましょう。手の油が付着すると、ハンダが付きにくくなったり錆びたりします。

キットの製作は、マニュアルに書かれた手順で、「必要な部品を順に正しい場所に取り付けていく」ということだけです。部品によっては、極性があって向きを正しく取り付ける必要があるものもあります。本書ではあまり個別に解説できませんが、部品には

・抵抗
・半固定抵抗(ボリューム)
・コンデンサ
・電解コンデンサ(極性あり)
・コイル
・ダイオード(極性あり)
・発光ダイオード(LED、極性あり)
・トランジスタ(向きあり)
・IC(向きあり)
・電源用3端子レギュレータIC(向きあり)

などがあります。

キットのマニュアルには、たいていの場合、それぞれの見分け方と、数値の読み方などが細かく書かれています。「間違えて取り付けた部品を外す」というのはとても大変なので、あわてずに時間をかけても正しいものを正しい位置に、正しい向きで取り付けます。これがキット製作のポイントです。また、一部の部品でハンダ付けしたあとにカットしたリードを、「ジャンパ線」として使うこともありますので、切ったリードは何か入れ物に入れてとっておきましょう。先にジャンパ線をICソケットの下に付けておく、というように、手順を無視すると製作できない場合もありますから、部品の取り付け手順もマニュアルで確認しておきます。

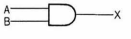
補足●ディジタルICの基礎はゲート

ディジタルIC（正確にいうとディジタル論理＜ロジック＞IC）を構成する基本的な論理単位をゲートといいます。このゲートは、**図1.29**に示すように、アンド（AND）、オア（OR）、インバータ（INV）＜またはノット（NOT）＞、ナンド（NAND）などがあり、これらのゲートを組み合わせることで、あらゆる回路を構成することができます。また、トランジスタ回路の動作はNANDそのものなので、NANDゲートICは、（××）00と命名されており、この00によって、図に示したように、他の基本ゲートをすべて作ることができます。

図1.29　各種の基本ゲート

●アンド（AND）

08



IN		OUT
A	B	X
L	L	L
H	L	L
L	H	L
H	H	H

・ともに"H"入力のときのみ出力は"H"

$X = A \cap B$

●オア（OR）

32



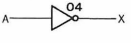
IN		OUT
A	B	X
L	L	L
H	L	H
L	H	H
H	H	H

・いずれかが"H"入力ならば出力は"H"
（ともに"L"入力のときのみ出力は"L"）

$X = A \cup B$

●（インバータ（INV）／ノット（NOT））

04



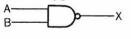
IN	OUT
A	X
L	H
H	L

・出力は入力の反対

$X = \overline{A}$

●ナンド（NAND）

00



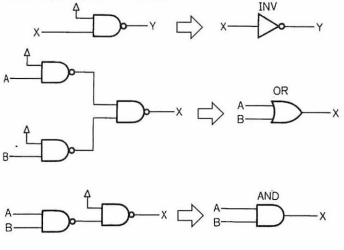
IN		OUT
A	B	X
L	L	H
H	L	H
L	H	H
H	H	L

・ともに"H"入力のときのみ出力は"L"

$X = \overline{A \cap B}$

$X = \overline{A} \cup \overline{B}$

●NANDで他の基本ゲートを作る



第2章

エフェクタ

特殊効果

◎

ディレイ
エコー／リバーブ
コーラス
ビブラート
テルミン
トレモロ
オートパン
ディストーション

◎

<コラム>アンプを作ろう

ディレイ

前章では、「音の三要素」に対応した、サウンドエレクトロニクスのもっとも基礎の部分について、具体的な実現例をまじえて紹介してみました。あまりに初歩的なもので、サウンドを実験して鳴らしてみても、電気的な音すぎて面白くない、と思う方もいるでしょう。

しかし、大昔、ラジオやテレビが「真空管」によって作られていた時代、ようやく世の中に「トランジスタ」という新しい主役が登場したころ、あるいはさらに初めて「IC」というデバイスが登場した頃には、一線級のエンジニアが、ここで紹介したようないろいろなサウンドエレクトロニクス技術を実験し、新しい方式を検討し、そこから多くの電子楽器やサウンドシステムが生まれてきたのです。本書でも、この数十年の流れを駆け足で追うかたちとなります。

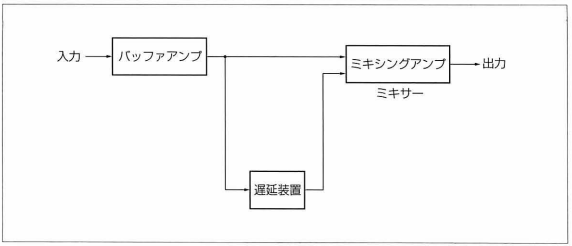
本章では、とりあえずピッチがついて、何かの音色で鳴っている、というサウンドにいろいろな「特殊効果（エフェクト）」を与える、というテクニックの中から、代表的な5種類（①ディレイ、②コーラス、③ビブラート、④トレモロ、⑤ディストーション）を取り上げて検討していきます。なお、カラオケなどでお馴染みの「エコー」や「リバーブ」などの残響効果もエフェクトですが、この二つは「ディレイ」という効果の一つの応用例ですので、ディレイの項目の中で紹介します。



「エフェクタ」というのは、サウンドに対する特殊効果（エフェクト）を加える機能ブロックの総称ですが、楽器屋さんに行くと単独のエフェクタとしての製品も数多く出ている、という意味で広範な応用領域を持つのが、「ディレイ」と呼ばれる一群のエフェクタです。これは文字通り「**遅延**」ということで、信号に対する時間的な遅延を与える、というものです。

図2.1は、このディレイのもっとも基本的な構成のブロック図です。すでに基本的なアンプについては紹介しましたが、ここで登場する「バッファアンプ」というのは、たんに入力信号を受けて下流に供給し、下流の処理の影響を上流に及ぼさないためのもの、という程度に理解しておけば十分です。また「ミキシングアンプ」というのは、複数の入力信号をミックスした合計が一つの出力になる「**ミキサー**」という、これも一種のアンプ回路です。そしてバッファの出力はそのままミキサーに入るルートと、ここでは「遅延装置」というブロッ

図2.1「ディレイ」の基本的構成



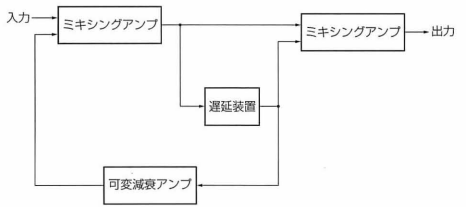
クに供給されるルートの両方を駆動しています。

この「遅延装置」の部分には、エレクトロニクス技術のいろいろなテクニックを応用して、多数の方式が考案されてきました。もっとも原始的には、テープレコーダ（カセットでなくオープンリールを想定してみましょう）でテープが走行していて、録音ヘッドの部分に入力を与えて、ちょっとその下流に再生ヘッドがある、というものが代表的です。入力信号は記録され、テープ上を数センチ移動して再生されるまでの「遅延」を受けます。もちろん、このような「装置」でなく、システムの一部として「遅延回路」を構成したり、最近では「遅延IC」というたった一つのチップで実現されるようになっています。こう整理してみると、「ディレイ」とは、すでに知っているアンプの部分を除けば、目新しいのは「遅延装置」というブラックボックスだけということになります。ここではあまりブラックボックスの実現技術については深入りしません。そこで、ディレイについての考察とは、この「遅延時間」によって、人間の耳に聞こえるサウンドがどのような効果を受けるのか、ということになります。検討の対象は「時間」です。

エコーとリバーブ

まず、「遅延時間」が数秒ぐらいのケースを想像してみましょう。音速は秒速340 mほどですから、約1km離れた山に向かって「ヤッホー」と叫ぶと、5～6秒ほど遅延して同じ声が返ってきます。この両者は、もはや同じ音とは思えないほど時間的に分離していますから、**図2.1**の構成で遅延が5～6秒もあると、ミキサーで足し合わせても、なんの効果もありません。これは私たちが日

図2.2 「エコー」の基本的構成



常的に経験している例としては、携帯電話や、テレビで海外からの同時中継をしている場面と同じです。電波は音速よりもずっと速いのですが、多くの衛星回線と通信回線を経由し、情報の欠落を避けるために意図的に遅延させた情報でノイズを補っているために、ちょうど海外の特派員との会話は、1秒程度の遅れとなっています。



・入力に1秒以下の信号を与えるエコー

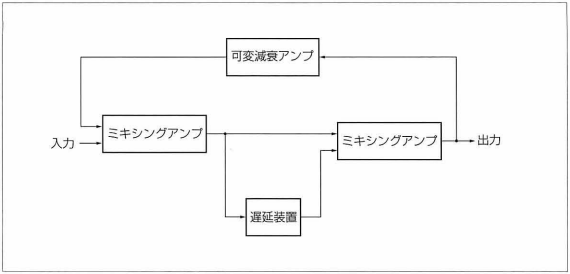
ところが、遅延時間を1秒とか0.5秒のオーダにすると、状況は一変します。**図2.2**は、1秒とかコンマ何秒、というオーダの遅延装置とともに、その出力を一定の割合で減衰させるようなアンプ（イメージとしてはボリュームのようなもの）で、入力にミックスして戻した、というシステムです。これが、カラオケなどで身近な「**エコー**」のもっとも簡単な実現例です。紙面の文字からこのサウンドをお伝えするのは難しいのですが、入力されたサウンドが、

・そのまま出力に出る
・遅延時間の経過後に出力に出る
・遅れたものがやや小さくなり、さらに遅延時間の経過後に出る
・…以下、さらに繰り返される

という動作の結果がどうなるかは、容易に想像できるでしょう。まさにこれは、よく響く山間部での「やまびこ」現象そのものです。

なお、出力から入力に戻す部分のアンプは、もしゲインが1倍以上であれば、入力はどんどん大きく加算されて、ついには飽和して発振器のような状態（ハウリング）になります。減衰を大きくすれば、エコーの少ないデッドな部屋、

図2.3　「リバーブ」の基本的構成



減衰を小さくすれば聖堂の響きのような印象と、ちょっとした変更でサウンドのイメージはだいぶ変わります。

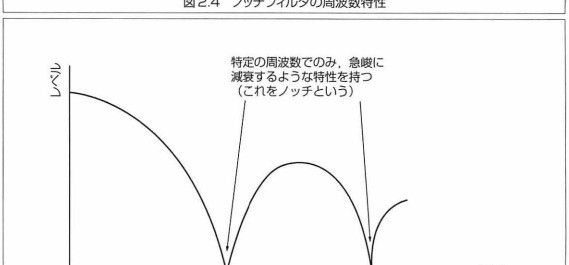
・入力に遅延／減衰信号を与えるリバーブ

そして、**図2.3**のように、元の入力信号と遅延された信号をミックスした全体を、減衰アンプを経て入力にミックスしてやると、いわゆる「**リバーブ**」のような効果となります。これはエコーよりも、全体にさらに豊かな時間遅れの響きが加わるもので、信号になったつもりでこの流れを追いかけると、なかなか面白い体験ができると思います。なお、実際のホールのような残響では、この図のような簡単な構成とは違う機構（プリディレイと呼ばれる、最初に壁に当たった反射音のシミュレーション成分）が必要になります。

そして、**図2.1**の「フィードバックのないディレイ」がエフェクタとして機能してくるのは、もっと遅延時間の短いオーダでのこととなります。遅延時間が0.1秒よりも短く、数十ミリ秒のオーダになると、入力された音と遅延された音とは、ちょうど部屋の中の壁からの反射のような不思議な効果となります。「ダブリング効果」などともいわれるもので、聞いた感じが「複数の音」でなく「一つの音の音色的な効果」へと変化してくるのです。そして、10ミリ秒、つまり100分の1秒かそれ以下の遅延時間となると、音色そのものを劇的に変化させることになります。

回路の紹介と理論的な解説は省略しますが、このような遅延時間オーダでのディレイは、入力の信号に対して、**図2.4**のような「**ノッチフィルタ**」と呼ばれる一種のフィルタ回路と同じように機能します。遅延時間に応じて、特定の

図2.4　ノッチフィルタの周波数特性



周波数の部分で急激に減衰がある、という特徴のために、サウンドの音色に関係した重要な周波数がここにきた場合には、音色をかなり変化させることになります。人間の「声」では、じつは声帯から咽頭の部分の複雑な共鳴機構が、このノッチフィルタにも似た特性のフィルタを構成しているために、このディレイをうまく使うことで、「音声合成」のようなサウンドを生み出すこともできるのです。

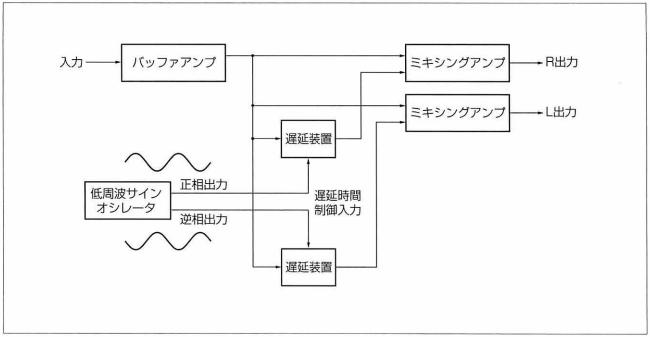


コーラス

ディレイの「遅延時間」は、ある動作においては所定の値に設定するものでしたが、これを時間的にゆっくりと変動させてみると、サウンドは驚くほど豊かなものとなります。これが一般に「コーラス」と呼ばれるエフェクタの一群です。

図2.5は、**図2.1**のディレイ回路を発展させたコーラス回路の一例で、出力としてステレオ（R、L）を得る基本的なタイプです。ここでは遅延装置がダブルになり、その遅延時間が外から制御されるようになっています。この制御時間として、共通の低い周波数（たとえば数Hz程度のゆっくりした変化）のオシレータの出力を利用します。このオシレータの信号波形としては、急激な変化は耳障りになるので、一般にサイン波を使います。また、二つの遅延装置に対しては、同じ低周波オシレータの出力を「逆相」にして供給します。逆相というのは「位相(波形の時間的ずれ)を反対にする」ということで、一方の出力はそのまま、もう一方には「反転アンプ」を入れることで簡単に得られます。

図2.5　「コーラス」の基本的構成



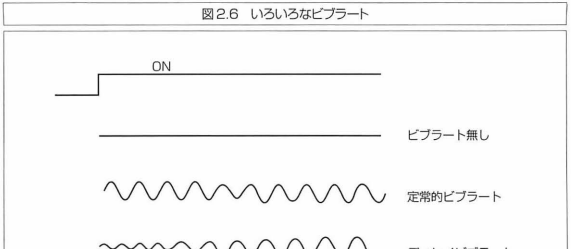
・遅延時間などをゆるやかに変化させるコーラス

このような構成のコーラス回路では、入力された音色は**図2.4**のようなノッチフィルタの特徴周波数が、つねに滑らかに時々刻々と変化する、という複雑な「**動的フィルタ**」となるのですが、全体としてみると、音色が豊かにうねるような独特な特殊効果のかかったサウンドとなります。たとえば、オーケストラの弦楽パートとか合唱で、多数の楽器や人が「ユニゾン」で一つの音を厚く鳴らしている、という状況と同じです。このようなユニゾンでは、それぞれの奏者は同じピッチを正確に演奏していても、各自の音は位相も微妙な音質もゆらぎをもったばらつきがあり、その微妙な相違を全体としてまとめることで、一人の演奏を拡声したのでは実現できない「豊かな分厚さ」を得ています。このコーラス回路では、その雰囲気をこんな簡単な構成で実現するのです。ちょっと気をつけてみると、カラオケの伴奏の音でも、かなり多くの音色にコーラスが使われていますし、歌った声にもエコーとともにコーラスをかけられる場合もあるようです。

ディレイを応用した、コーラスと似たような効果のエフェクタには、この他にも

・フェイズシフター（フェイザー）
・フランジャー
・ジェットマシーン

図2.6 いろいろなビブラート



・ステレオ（超低周波数）

などがあります。いずれも基本的には「ディレイ」の技術の延長です。一見複雑そうにみえるいろいろなサウンドを生み出すのに使われているのが「元の音を時間的にちょっと遅らせて混ぜる」という、この簡単なディレイの技術なのです。



ビブラート

ディレイ系のエフェクタが、入力としてあらゆるサウンドが混じったものを対象としたのに対して、ここでは二つ、もっとも古典的なエフェクトとして、「周波数」と「音量」の時間的変化だけを使った例を紹介しましょう。

・なめらかに変化する低周波で変調するビブラート

まずは「ビブラート」です。これはオシレータそのもののピッチの部分を、コーラスと同じような「なめらかに変化する低周波オシレータ」で連続的に変調する、という一種のモジュレーションの例です。ビブラートを具体的にどう実現するか、ということには、ここでは深入りしません。オシレータの回路方式ごとに、そのピッチ（周波数）設定部分にどのような制御が可能か、というのは回路技術としてもなかなか高度です。ここで個々に紹介する紙幅はないので、実例の一つとして「テルミン」というユニークな楽器を紹介しますが、その前に、まずはここで「ビブラートの種類」を整理しておきましょう。

図2.6は、一般的な「ビブラート」の様子を示したものです。一番上は、その音をスタートさせる、たとえば鍵盤をONした、というタイミングです。そ

のすぐ下にあるのが、ビブラートのかかっていない音のイメージです。実際には一定のピッチで周期的に振動しているのですが、ここでは1本の太い直線で表現しています。これは、ブザーのような音になります。

そしてその下が、一定の低周波オシレータによって「周波数変調」（FM）をかけたサウンドの例です。これは、ちょっと昔の電子オルガンで「ビブラート」というスイッチを入れると、このような信号が出ていたので、「よくある」サウンドです。ビブラートというのは、元々のサウンドのピッチに対して数パーセント程度のゆらぎがあるだけなのですが、平坦な音にちょっとこのモジュレーションがかかるだけで、「音楽」の素材としての表現力は驚くほど向上します。実際、バイオリンでもフルートでも、あるいは歌声でも、演奏表現の最初のステップとして、あらゆる音楽のサウンドで活躍するのがビブラートです。

・ディレイビブラートで不自然さをなくす

ところで、**図2.6**の定常的なビブラートですが、これをずっと何度も聞いていると、次第にどことなく「不自然さ」が気になってきます。その最大の原因は、「音の立ち上がり」の部分にあります。つまり、バイオリンでもフルートでも、本当の楽器のビブラートというのは、**図2.6**のいちばん下のように、立ち上がり時にはほとんどかかっていないビブラートが、息を吹き込んだり弓を弾いたりするのにつれて、次第に深いビブラートになっていくからです。突然に音が出た瞬間から深いビブラートがかかっている、というのは、生身の人間にはやろうとしてもなかなか出来ないほど不自然なことなのです。

そこで、電子楽器のビブラートは、このように立ち上がり時にはゼロから次第に深くなるビブラート、あるいはちょっと経過してから始まるビブラート（**ディレイビブラート**）という機能を提供してくれます。機械の作るものですから毎回ハンで押したように同じなのですが、このビブラートがかかったメロディーは、かなり人間の心をくすぐる「いいサウンド」となります。テレビのクラシック音楽番組の演奏や、身近な電子楽器を触ってみて、このあたりに注目してみると「ピッチの変動」というシンプルな要素ながら、ビブラートの深さに納得できると思います。

楽器「テルミン」

さて、ここで関連して、一つだけ、面白い楽器の例を紹介して、少しエレク

トロニクス的にも検討してみたいと思います。**図2.7**の「テルミン」という楽器です。テルミンという楽器は、もともとロシアのテルミン博士が発明した電子楽器で、二つのアンテナに手を近づけて、ピッチと音量をコントロールして「演奏」するという、20世紀が生んだユニークな楽器です。これはその簡易版を筆者が解析して改造したものです。すでにオシレータの原理を理解したわけですから、ここで「トランジスタによる回路」の例と合わせて、ちょっと中身を調べてみましょう。

この簡易テルミンの回路図は、**図2.8(a)(b)(c)**のように、全体は三つのブロックから構成されています。まず、**図2.8(a)**ですが、長く引き延ばすロッドアンテナが取り付けられたトランジスタ1個による発振回路となっています。トランジスタ2SC1815というのはもっともポピュラーな汎用のもので、入力端子がベース(B)、出力端子がコレクタ(C)、基準端子がエミッタ(E)と考えておきましょう。定性的な理解でいいのです。ザッと眺めておけば、この回路はコレクタCからの出力が後段の[A]に行き、同時にコンデンサとコイルを組み合わせたフィードバックループでベースBに戻っている、ということから、立派な発振回路となっていることを見抜きましょう。そして、ベースに付いたボリュームとアンテナ(に近づいた手の動き)によって、その周波数が変化する、というものです。ただし、この出力[A]ですが、人間の可聴範囲をはるかに遠く越えた1MHz付近の周波数(人間が聞こえる最高周波数といわれる20kHzのさらに50倍も高い)で、絶対にこれは音としては聞こえません。電波でいえば、AMラジオの周波数です。

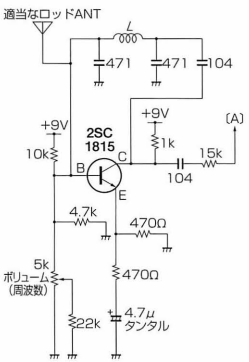


つぎに**図2.8(b)**を見てみましょう。なんとこれは、**(a)**の回路とほとんどそのまま同じです。違いといえば、アンテナが無いこと、そして周波数調整用のボリュームが半固定抵抗になっていることだけです。つまり、この発振回路は、変化しない固定的な、約1MHzの信号を発生するための発振回路です。この出力は[B]となります。

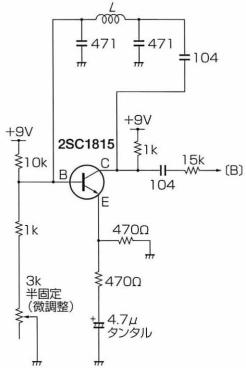
・二つのオシレータの出力をミックスする

そして、二つの発振回路からの[A]と[B]の信号を受けるのが、**図2.8(c)**の回路です。ここでは、単純に[A]と[B]の信号は直結して、トランジスタのベースB入力に入っています。また、出力のコレクタCから入力のベースBに戻るループについては、47 k Ωととても大きな抵抗なので、これは発振回路にはなりません。つまりこの回路は、たんなるアンプです。入力が二つありますから、

図2.8　簡易テルミンの回路図

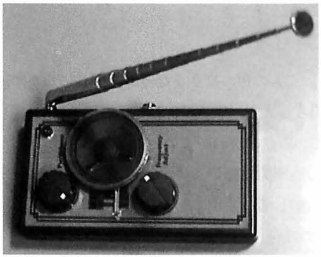


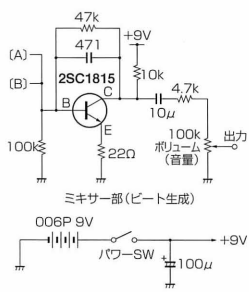
(a) 可変周波数発振部



(b) 固定周波数発振部

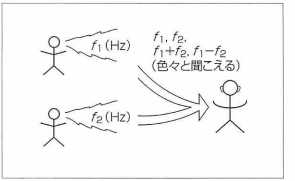
図2.7　3石の「簡易テルミン」





(c) ミキサー部と電源

図2.9　ビート発生のようす



これは「ミキサー回路」です。複数の信号は、こうやって単純に混ぜてアンプの入力に入れれば、両者をミックスした出力が得られます。

ところで、[A]と[B]の入力は、それぞれ約1MHzという、まったく人間に聞こえない電波帯域の信号でした。それをミックスして、もうトランジスタの出力はボリューム調整を経て、ギターアンプなどにつながるジャックとなっています。これで音は出るのか、ちょっと不安です。しかし、じつはこれだけでなんと音が出ます。高校でやった三角関数の「和積の公式」を思い出してください。別に数学として証明しなくても、「**二つの周期的信号をミックスすると、それぞれの周波数の和、それぞれの周波数の差、という新しい成分の周波数も得られる**」という事実だけ、知っておきましょう。これは何も難しいことではありません。オルガンでもピアノでもギターでも、楽器を使って(じつは人間が二人いれば、その声でも)簡単に実験できることなのです。一緒に空間に放出された音は、それだけで空間で自然にミキシングされるわけです。



・ビートを利用する

この現象を、**図2.9**に示しました。二人の声の高さをなるべく同じにします。鍵盤なら、隣の鍵盤同士を同時に鳴らします。すると、鳴っているそれぞれの音だけでなく、グワグワと「唸っている」のがわかるでしょう。これは、両方の周波数よりもかなり低い周波数の周期的振動で、「音」としてピッチを感じられませんが、たしかに周期的に振動している現象が確認できます。つまり、ここで得られたのは、ビート(唸り)の成分なのです。

そこで、テルミンです。二つのトランジスタ発振回路は、まったく人間に聞こえない、1MHz付近の信号をそれぞれ発生しているのですが、一方は固定的な周波数、そしてもう一方は、アンテナに近づいた人間の手、というわずかなコンデンサ成分の影響で、ほんのちょっとだけ、ピッチが変化します。すると、この両者の「差」の周波数が、ちょうど人間の可聴帯域あたりに来ると、テルミンの「音」として、これだけが聞こえてくれる、という仕組みなのです。固定と可変の二つのオシレータ、そして二つのオシレータから出てくる「差音」

の効果を利用した、という、わかってみればなんでもない、しかし素晴らしい発明だと思います。

このテルミンでは、アンテナから手を遠く離すと、一定のピッチとなって**図2.6**のいちばん上のような状態になります。きわめて「電子音」的な、味気ないサウンドです。しかしアンテナに手を近づけてゆらゆらと動かすと、今度はそのニュアンスに応じた深さと速さで、自在なピッチ変化の「演奏」をすることができます。テルミン奏者がもっとも得意なクラシックのレパートリーはバイオリンの独奏曲なのですが、まさにそういうニュアンスに適した楽器です。原理的にはトランジスタを3個使っただけで、どんな大掛かりな電子楽器よりも自然な「演奏」のできるテルミンは、いろいろな示唆に富んだユニークな存在だと思います。

トレモロ

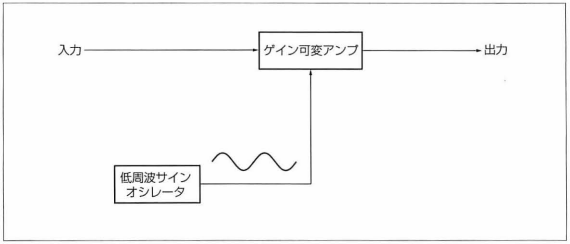
ビブラートと並んで、クラシックの演奏表現の用語として歴史の長いのが「トレモロ」というエフェクタです。これは、ビブラートと違ってソースは単一のオシレータに限らないのですが、サウンドの「音量」に関して、コーラスと同じような「なめらかに変化する低周波オシレータ」で連続的に変調する、という一種のモジュレーションです。変化特性でいえば、**図2.6**のビブラートの様子とまったく同じようなもので、これが音量に対して作用している、ということです。

なお、音量が小さい部分でもゼロにはならないものを一般に**トレモロ**といいます。ゼロまで周期的にカットする場合には「**レピテイション**」と呼ぶ場合もありますが、元の持続的なサウンドとは別に「リズム」的な意味が生まれてくるので、ここでは対象としては外しておきましょう。

・音量をなめらかに変化する低周波で変調するトレモロ

トレモロのエフェクトを実現するためには、**図2.10**のような機構が必要となります。入力から出力に至るアンプの部分に、「ゲインを刻々と変化できるような制御入力がある」というタイプが必要となります。たとえば低周波オシレータの出力が普通の電圧であれば、このアンプとしては「電圧制御増幅器(**VCA**)」と呼ばれる特殊なICを使うことで、比較的簡単に構成できます。さらにアマチュア的には、「ゲインを可変できるアンプ」でなく、「容易に抵抗値

図2.10 「トレモロ」の基本的構成



を可変できる素子」として、

・CdS（硫化カドミウムセル：受光量で抵抗値が変化）

・フォトトランジスタ

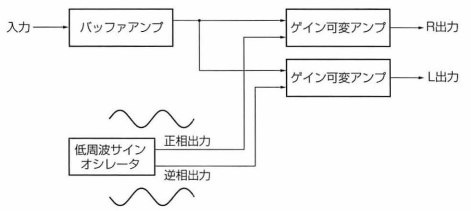
などを利用して、その外に普通のアンプを用いる、というテクニックもあります。いったん光を経由する場合には、入力信号に応じた光量を出すように、普通の発光ダイオード（LED）を使うことができますから、この簡易方式でも十分にトレモロ効果が得られます。



オートパン

また、トレモロとほとんど同じ構成の応用としては、**図2.11**のような「オートパン」というエフェクタもあります。これは、最近ではサウンドが基本的にモノラルからステレオになって、コーラスなどのエフェクトによる「広がり感」が一般的になってきた状況と対応して登場したものです。モノラル入力のサウンドに、トレモロと同じようになめらかな低周波オシレータの出力で音量モジュレーションをかけているだけなのですが、コーラスと同様に、オシレータの逆相出力で対称的な2系統にして、ステレオのR、Lとして出力しているところがポイントです。このエフェクタによって、入力された音はステレオの中で左右になめらかに「音像」が移動する音（出力）に変わります。このステレオ定位のことを「**パンポット**」といいます。そこで、このエフェクトによって、いわばステレオのバランス調整ボリュームをなめらかに左右に振っているような効果となります。

図2.11　「オートパン」の基本的構成



・動的な広がりをもたせるオートパン

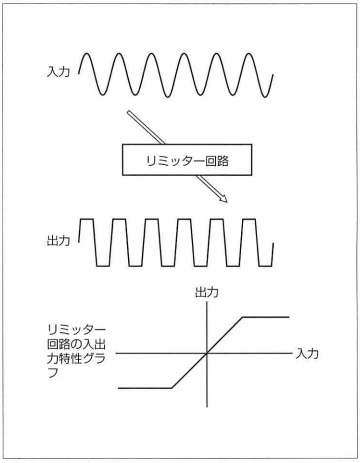
しかし、これはサウンド入力の全体にただ作用させたのでは、文字通りステレオのバランスにしかなりません。効果として面白いのは、多数のオシレータのそれぞれに、このオートパンを別個に（タイミング、速さ、深さなど）かけてやるというテクニックです。これは、ちょうどパーティ会場で多くの人々がガヤガヤとしているような雰囲気になり、音色的な分厚さを生み出すコーラス効果とはまた別の、独特な厚みと「動的な広がり」を生み出します。ハードウェアとして実際に実現するには、ちょっと手間がかかるのですが、第4章で触れるMIDIを活用すると、この効果は簡単に実験してみることができます。

ディストーション

本章で紹介する5種類のエフェクタの最後は、「ディストーション」という、エレキギター人種には必須のアイテムです。これも歴史が長いもので、昔から「**ファズ**」「**リミッター**」「**コンプレッサー**」などとともに、とくにロック系の音楽には欠かせないエフェクタになっています。その目的はただ一つ、「音を歪ませる」ことにあります。

サウンドエレクトロニクスというと、高品質なハイファイで美しい音を忠実に…と思ってしまいますが、音楽にはいろいろなスタイルとともに、いろいろなサウンドの美学があります。今世紀のロック音楽の一つの美学は、「歪んだギターの音」の美しさにあります。そして、いかにサウンドを歪ませるか、という追求は絶え間なく続いています。

図2.12　リミッター回路



・波形の山を切り取るリミッター

それでは、まずは**図2.12**の「**リミッター回路**」の例を見てみましょう。入力の信号波形は普通のなめらかな波形ですが、リミッター回路を通した出力波形は、見た目だけでも大きく変化しています。これはサウンドとしては、「音色」の点で非常に変化していることになります。よく眺めてみると、入出力の波形の周波数は同じです。つまり、時間軸方向にはなにもエフェクトを受けていません。つまり、音の三要素のうち、「音量」方向に加工することで、「音色」にも変化を与えるという手法です。



リミッター回路の動作とは、**図2.12**の下にある「入出力特性」グラフで説明できます。つまり、入力が一定のプラスマイナスの範囲内であれば、普通にそのまま相似形の波形が出力されます。この部分の動作は「線型」（入力に比例した出力）です。ところが一定のレベルを越えたものは、プラス側もマイナス側もそのまま一定値にクリップ（強制的に固定）されて、波形の上下の「山」の部分が台形のように切り取られます。これが出力波形の正体です。

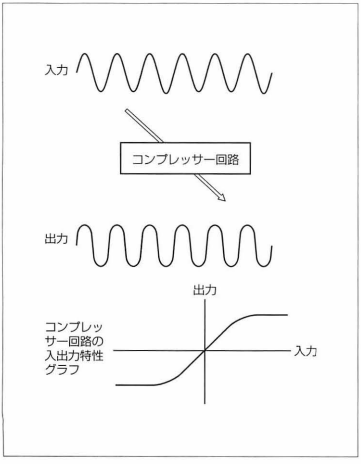
このリミッターを通すことで、入力信号はどのように変化するでしょうか。基本的な周波数としては同じものが出力に現れていますから、たとえば入力の「ドレミ」は出力でも「ドレミ」と聞こえます。そして波形が鋭く切り取られている部分は、高い周波数成分の一種のノイズのようになりますから、これが基本ピッチの周辺にたくさん出ることで、倍音の豊富な金属的なサウンドに変化することになります。

・マイルドに飽和させるコンプレッサー

つぎに、「**コンプレッサー**」というエフェクタも、リミッタと似たような動作をします。**図2.13**はその様子を示したもので、基本的にはリミッタと良く似た入出力特性ですが、出力信号をクリップさせる境界付近がやや違っています。ここでは直線と直線とで急激に変化するのでなく、「なめらかに飽和する」ようになっています。そこで、出力波形もリミッターほど尖ったエッジにはなりません。どちらかというと「マイルドに歪ませる」というものですが、全体的な音量の変化を常時フルスケールに持ち上げる効果があるために、アンサンブルの中で特定の楽器のサウンドを「厚めに」持ち上げるのによく使います。このコンプレッサーの動作を簡単に実験するには、なるべく小型のトラジスタラジオをフルボリュームで鳴らして、電源とかアンプとかスピーカーの性能限界で歪む（限界に近いほど飽和するので、その飽和のしかたはリミッターというよりはコンプレッサーに近い）様子を聞いてみればわかります。

さて、物理的な原理（弦の振動、空気の共鳴など）の楽器音に対して、あえて音を歪ませるのにはわけがあります。ガット弦のクラシックギターの柔らかい音色は心なごませるものですが、ギター弦の振動だけでは、あまり倍音は豊富ではありません。ところがこれをマイクで拾って、ここで紹介するようなディストーション系のエフェクタを通すと、音が歪むことで、非常に高い周波数成分の豊富な音色となります。ここに、前述のコーラス系のエフェクタとか、フィルタによって音色の加工をすると、素材となる倍音成分が多いために、加工の効果が高まる、というのが重要な動機なのです。

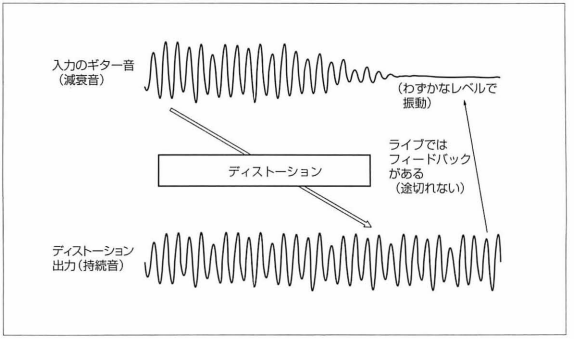
図2.13　コンプレッサーの動作



・ハイゲインのアンプで歪ませるファズ

「ファズ」というエフェクタは、このタイプの祖先にあたる、歴史の長いものですが、これは基本的には「ひたすらハイゲインのアンプで歪ませる」という動作をします。もち

図2.14　ディストーションの動作



ろんアンプは電源電圧以内の出力しか出ませんから、ハイゲインによって波形は大きく歪みます。そして、信号波形のわずかな上下が出力のフルスケールに振れることで、元々の信号の周波数よりもずっと高い領域までが出力に現れて、元のサウンドのピッチ感がなくなるほど（実際には消えませんが）に設定したものをファズと呼んでいます。



そして、これらリミッタ、コンプレッサー、ファズ、などのエフェクタを機能的に統合したものとして「ディストーション」があります。基本的にはまったく同じ、「入力信号を増幅してクリップさせて歪ませる」ということなのですが、アンプの特性、クリップの様子、歪みかたなどをパラメータとして総合的に制御できるものを最近ではディストーションとしてまとめているようです。

図2.14はこのディストーションの動作を、サウンドエレクトロニクス的な意味合いから検討するための図です。ここでは代表的なギターの例ですが、一般にギターの音は上段のように、弦を弾くといずれは減衰して音が消えるタイプのサウンドです。ところが、これをディストーションによって持ち上げてやると、リミッターやファズと同等の「音色を豊かにする」という機能とともに、コンプレッサーと同等の「全体のレベルが飽和領域に持ち上がる」という機能によって、実際の弦の振動がかなり小さくなるところまで、あたかも「持続音楽器」のようなエンベロープとしてサウンドが持続することになります。いわばこのエフェクタは、音の三要素の中のエンベロープ（音量の時間的変化）の

領域で、元のサウンドのキャラクタを大きく変化させることになるのです。そして図のように、弦の振動が小さくなっていよいよサウンドが消えるか、という領域では、ライブの演奏であればこのディストーションの出力がアンプからギターの弦を共鳴によって振動させるために、完全にゼロにならず、無限に長いフレーズを生み出すことも容易です。まさに、楽器の個性そのものを変貌させてしまうエフェクタというわけです。原理は単純なものですが、これらのエフェクタが楽器そのものを、さらに音楽スタイルを変化させ、進展させている、と思うと興味はつきません。

アンプを作ろう

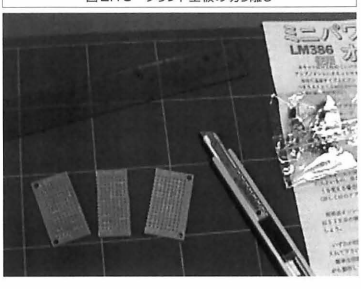
最初のテーマは、第1章の冒頭に登場した、エレクトロニクス回路技術のもっとも基礎である「アンプ」です。具体的には、筆者がいつも愛用している、秋葉原の「秋月電子通商」のキット「LM386ミニパワーアンプ/オシレータキット」(500円)を使いました。秋葉原でもっとも人だかりしているので有名なこのお店ですが、店頭に行けない場合には通販で利用できます。

これは、たった1個のICと数個の部品しかない簡単なものですが、その動作を本当に理解してみると、エレクトロニクス技術の全般にわたる重要な概念がタップリと含まれています。慣れた筆者の場合、以下の「製作」の所用時間は5分もかかっていません。初めての方は何時間かかっても構わないので、自分の手で納得しながら進めましょう。



さて、このキットは、秋月電子のキットの中ではちょっと異色です。というのも、あまりに簡単な回路であるために、マニュアルの「部品表」が省略されていて、初めての人は抵抗値を判別できませんし、部品を取り付ける実体配置図も載っていません。ただし他のキットはもっと親切ですので心配せずに、ここでは以下に従って製作してみましょう。また、このキットはLM386というICの応用可能性を体験するために、ゲインの異なるアンプや、さらに2種類の「オシレータ」にも使えるように、プリント基板が3回路分に分かれていて、部品もかなり余分に入っていますので注意してください。ここでは、もっとも標準的な応用回路(A)を作ることにします。

図2.15　プリント基板の切り離し



まず、プリント基板に3種類の回路が別々に用意されているので、カッターで線のところから切り離します(**図2.15**)。8ピンのICであるLM386を基板に直接ハンダ付けしないで、キットに付属した8ピンのICソケットを取り付けます。キットに

コラム ②

図2.16　キットの完成

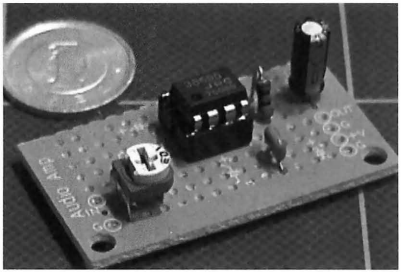
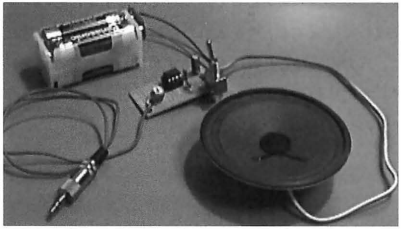


図2.17　スピーカーとジャックをつなぐ



はこのソケットが一つしか入っていないので、3分割したそれぞれの基板を完成させるためには、別に8ピンICソケットを用意してそれぞれに取り付け、ICを差し替えて使うことになります。筆者はキットとあわせて、LM386を10個(600円)単位で通販で入手しました。この回路(p.10の**図1.3**)では、抵抗は10Ω(カラーコード：茶黒黒金)だけなので、他の抵抗は残しておきます。あと半固定抵抗(103)、セラミックコンデンサ(473)、電解コンデンサ(100 μF)を取り付けると、もうキットは完成です(**図2.16**)。全ての部品を差し込んでからハンダ付けをするよりも、いくつかの部品を単位としてハンダ付けしてリードをカットするほうがスッキリするでしょう。

部品の取り付け位置は写真を参考にして、電解コンデンサの向きは、基板のシルク印刷の「＋」とコンデンサの「－」を参考にします。

電源は、ここでは単3電池を4本(6V)として、電池ソケットからスイッチを経由して取り付けます。また、回路図にあるように、どんなものでもいいので、出力として小型のスピーカーを取り付けます。サウンドエレクトロニクスですので、「音」の最終出口として、スピーカーは必須です。信号入力の部分は、第1章の最初の実験ではウォークマンから信号を与えたので、ここではミニプラグを取り付けてみました。全ての部品の取り付けが終わったら、いきなり電源を入れずに、最後に必ず製作の目視チェックをしましょう(**図2.17**)。

一部の高度なキットでは、この後に「調整」という作業がありますが、たい

コ ラ ム ②

ていの入門的なキットでは、部品の過不足チェックとハンダ付けの目視検査ぐらいで、もうOKです。あとは運を天に任せて、電源を接続してスイッチを入れるだけです。ただしこのとき、いつでも瞬間的に電源を切れるように身構えておいて、電源を入れても正常に動作しなかったときには、とりあえずすぐさま電源を切るようにします。動作しない場合、何かの部品が逆向きに取り付けられているとか、電源の極性を逆につないでしまった、などということがほとんどなのですが、異常に気づいてほんの一瞬で電源を切れば、素子破壊や電源の故障にまでは至りません。正常に動作していないのにそのまま電源を接続しておくと、やがてどこかの部品から臭い煙が出てきたりすることがありますが、こうなるともう修復不可能となってしまいます。

さて、このアンプキットは、次章以降のコラムで紹介する製作実験のところでも、サウンドをチェックする実験アンプとして活用していく予定のものです。しかしこのキットは、完成して電源スイッチを入れただけでは何も起きません。アンプを動作させるには、入力の信号も必要になりますから、次章ではオシレータを作りましょう。アンプにくわえてオシレータがそろうと、いよいよ「サウンドエレクトロニクス」の楽しい旅路のはじまりです。



・㈲秋月電子通商
＜通販部・本社＞〒158-0095 東京都世田谷区瀬田5-35-6
(電話＆FAX：03-3251-1779)
＜秋葉原本店＞　〒101-0021 東京都千代田区外神田1-8-3野水ビル1F/2F
＜ホームページ＞ http://www1.tomakomai.or.jp/akizuki/

第3章
サウンド記録とサンプリング

◎

サウンドの記録と音楽
アナログ方式のサウンド記録
ディジタル方式のサウンド記録媒体
メカニズムのないディジタル記録
A-D変換
D-A変換
ピッチチェンジャー
サウンドファイル・フォーマット
実験・各種サウンドファイル（AIFF/WAV/AU/MP3）

◎

<コラム>オシレータを作ろう

サウンドの記録と音楽

前章では、「音の三要素」に続いて、サウンドエレクトロニクスの一つの基礎である「音の加工」という側面からエフェクタを紹介しましたが、本章では、「サウンド記録」にスポットをあてます。「音の記録」はアナログの時代を経て、現在では完全にディジタルの時代になりました。このディジタル化になくてはならないのが、サンプリングの技術と、それを支えるコンピュータ／エレクトロニクス技術なのです。

・録音技術の登場が音楽の世界を変えた



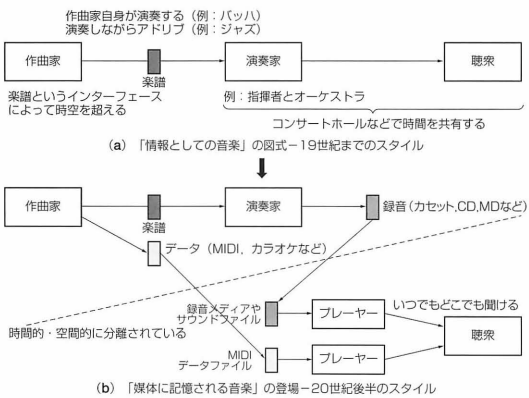
20世紀のエレクトロニクス技術は、人類の歴史とともに歩んできた「音楽」を、本質から激変させました。それまでの音楽は全て、「演奏」する人とともに、そこに「音楽を聴く」人がいました。クラシックなどでは「演奏」する人とはまた別に「作曲」する人がいますが、演奏しながらアドリブでいわば作曲するジャズのスタイルは、オルガンを即興で弾いていたバッハの時代からあるものです。

ところが**図3.1**のように、今世紀になって「録音」という、サウンドを記録する技術が登場しました。その結果、音楽の世界では、それまでは演奏家と聴衆が一緒にいる、つまり「ライブ」しかなかったのに対して、いったん録音した音楽を、あとでいつでもどこでもプレーヤーで「再生」して楽しむ、という新しいスタイルが登場したのです。これは時代とともに消えてしまう名手の名演奏を記録として残す、という重要な意義もありますが、演奏家の生演奏を体験する機会を奪う、という大きな弊害も生みました。

そして最近では、人間の演奏家そのものを省略して、作曲家がスタジオでコンピュータとシンセサイザを使って「作曲」したデータが、通信カラオケやインターネットのデータとしてそのまま配布される時代となりました。この話題は次章以降で検討しますが、こうなると職業的演奏家もかなり苦しいことになってしまいます。音楽の重要な楽しみの一つは「名演奏家の素晴らしい生演奏」にあるはずなのに、音楽を手軽に楽しむためのエレクトロニクス技術がこの可能性を失わせるとしたら、とても悲しいことだと思います。

さて、本書はこのような音楽学的な感傷にふける本でもなく、またオーディオマニアのように「ハイファイ（高品質オーディオ）」を目指して、DATだ

図3.1「録音」技術登場以前と以後で音楽は大きく変化した



CDだMDだMPEGだ、と録音メディアとか録音方式などに深入りする本でもありません。そこで、サウンドエレクトロニクスとしては「サウンドの記録」という点に絞って、その本質を検討していきましょう。

サウンドをメディアに「記録」するということをエレクトロニクスの視点から分類すると、**図3.2**のようないろいろなスタイルがあります。ここでは、分類の基準として、電気信号となっているサウンド情報が、アナログであるかデジタルであるか、という軸と、記録されたメディアに関して機械的なメカニズムが含まれているかどうか、という軸を設けました。マルチメディアの世界では、サウンドの情報は映像情報に比べれば相当に少ない、といわれていますが、それでもサウンドや音楽は本質的に「時間」というデータ量を拡大させる軸を持つので、その記録は大容量との戦いで発展してきました。そして、映像の記録であるフィルムやビデオと同じように、主として磁気的な媒体を中心とし、構造としては「回転」「テープ」という機構とともに、いろいろな方法が考案されてきたことがわかります。

図3.2　サウンド「記録」のためのいろいろな媒体

	機械的メディア	電子的メディア
アナログ記録	レコード オープンリールテープ カセットテープ ビデオテープ（VHS、S-VHS、Hi-8）	アナログメモリ
ディジタル記録	HDR （ハードディスクレコーディング） CD（コンパクトディスク） DAT（ディジタルオーディオテープ） MD（ミニディスク） ディジタルビデオテープ DVD（ディジタルビデオディスク）	SRAM（バックアップ付き） フラッシュメモリ サウンドファイル（aiff、au、wav、MP3）をWebからダウンロードしてプレーヤーソフトで再生する Webのムービー系コンテンツのサウンドトラック（QuickTime、Shockwave） Webのストリーム再生オーディオ

アナログ方式のサウンド記録



・レコード

エレクトロニクス技術からみて、20世紀の大部分の期間では、電気信号となったサウンドを記録するための方法は、アナログ（連続的な時間とともに連続的な電圧の変化がある、という意味で、詳しくはつぎに検討します）しかありませんでした。**図3.2**の上半分がこれに相当します。最初にエジソンが発明した「蓄音機」から、すでにほとんど消えてしまったSPやLPの「レコード」までは、「回転体にサウンドを物理的に記録する」という手法が取られました。レコードの溝に沿って動く「レコード針」の振動を電磁誘導としてピックアップが検出してサウンドの信号に変換していたわけです。これはレコードと針が常時「擦れ合い」ながら使用しますから、記録媒体、再生媒体ともにその寿命はとても短いという欠点があり、時代とともに消えていきました。一部のオーディオマニアの間でレコードの音が復権しているのですが、主流になることはもうありません。

・テープ

そしてアナログ時代の後半には、磁気テープにサウンド情報を「磁化」情報として記録する、という新しい技術が登場しました。ここではソニーが先駆者です。メーカが原盤をプレスするレコードと違って、一般のユーザが自分の好きなサウンドを「録音」することもできる、という新しい音楽の楽しみ方が登

場したことになります。オープンリールテープからカセットテープを使った「ラジカセ」に進化し、そしてこれまたソニーの「ウォークマン」の登場によって、現在まで続く「いつでもどこでも音楽を楽しむ」という新しいスタイルが文化として定着することになりました。VHSやHi-8などのビデオテープはサウンドとともに映像も記録できますが技術的にはカセットテープの発想と同じ領域で、それほど飛躍的なアイデアの発明というものではないでしょう。

この「テープ方式」の欠点は大きく二つあります。一つは、磁気テープの磁性劣化と、カセットのメカニカル機構やテープ素材の経年変化による寿命です。筆者も個人的にエアチェックなどで集めたカセットテープのライブラリが2000本近くあり、「聴く暇がないけど老後の楽しみに」と冗談でいっていたのですが、これは記録媒体の寿命があり、実現はむずかしそうです。

そしてもう一つは、テープという構造から「**シーケンシャルアクセス**」、つまりある情報を捜すには先頭からそこまで「早送り」、あるいは最後から「巻き戻し」ていく、という必要があることです。ビデオデッキに、早送りしながらサウンドを補正してちゃんと聞こえる機能とか、テープカウンタ表示を消した高速巻き戻し機能、などのセールスポイントを散見するということは、この本質的な欠点が多くのユーザにとって不満であることの反映だと思います。

・メカニズムなしのアナログ電子記録

再生機構にメカニカルな部分があれば、油が切れて回転が悪くなったり摩耗による寿命があります。そこで、サウンド信号がまだアナログの時代にも、なんとかこれを「**電子的**」に記録できないか、という検討は色々と進められてきました。そして「**アナログメモリ**」というデバイスでは、短時間であれば簡単な記録ができるようになりました。これは、BBDと呼ばれるICで、アナログ電圧を時間的に細かくスライスして（時間軸方向にはディジタル化しているということになります）、その刻々の電圧を「電荷」という量として、小さなコンデンサに充電する、というような原理によります。あまり本書ではBBDに深入りできませんが、一時期はアナログ的なエフェクタとして主役を演じたICです。

ディジタル方式のサウンド記録媒体

そして、**図3.2**の下半分は、サウンドの電気信号をディジタル化して記録する、という新しい原理に基づくものです。ディジタルの本質として、「情報と

してはコピーを繰り返しても劣化しない」「データの圧縮／伸張などの情報加工が容易」といった特徴があるために、図のような色々な方式が目的に応じていろいろと発明されています。ここでは、アナログ方式と同じようにメカニズムの有無という区分をしていますが、情報が具体的にディジタル記録されている「媒体」（メディア）というのは、ここでは本質的なことではなくなりました。つまり、サウンドをどのようにディジタルデータ化するか、という「サウンドファイル」（データ表現方式と圧縮技術）に重点が移りつつあります。

パソコンのデータ記憶媒体も、8インチ／5インチ／3.5インチのフロッピーディスクに始まり、ハードディスク、MO（光磁気ディスク）、CD-ROM、メモリカートリッジ、バックアップテープ、メモリカード、さらにはPD、ZIP、Jaz、CD-RW、DVD-RAMなどと百花繚乱の状況にあります。

そして、いずれの媒体であっても、物理的・機構的な互換性は無いものの、中身のディジタルデータは同じです。メディアと同じことが、ディジタルのサウンド記録においても起こっているということなのです。そして、ぽちぽちパソコンからフロッピーディスクという媒体が消えようとしている（iMacがその先べんとなりました）ように、物理的な媒体は時代とともに淘汰されていきますが、ディジタル情報として記録されたサウンドは、インターネット上のデータなどとして永遠に残る、ということです。そこで、本章の後半では、この「サウンドのディジタル記録方式」について、具体的な実験をまじえて検討することにして、ここではざっと、図の中からよく聞かれるキーワードを概説しておきましょう。



・HDR（ハードディスク・レコーディング）

パソコンの「録音」機能でマイク等からサウンドを録音する場合には、つぎに紹介する「A-D変換」（アナログのサウンド情報をディジタル化する）を行いながら同時にこれを、パソコンのメモリに記録していきます。ところがパソコンのメモリは電源を切ると消えてしまうので、つぎに「メモリに記録したデータをファイルとして保存する」いう操作を行う必要があります。また、録音に使えるパソコンのメモリはそれほど多量ではないので、たとえば2～3分の音楽をまるまる、というような分量のレコーディングは困難です。

このHDRというのは、刻々と入力するサウンドを同時にそのままハードディスク上のファイルとして記録してしまう手法で、ミュージシャンの世界では数年前から全てHDRが常識となっています。この場合、たとえばパソコンに

4GBのHDドライブを増設すれば、CD音質（後で詳しく紹介します）で同時に8チャネルのサウンドトラックを連続15分ほど録音することができます。最近では「Jaz」ドライブなど、ハードディスク部分をカートリッジのように持ち運びできるものも登場して、「高性能サウンドデータの可搬メディア」として持ち歩くミュージシャンも多くなっています。

・CD（コンパクトディスク）

一般の音楽用CDというのは、多くの種類があるCDの中では「CD-DA」（CDディジタルオーディオ）と呼ばれる一つのジャンルです。CDにはこのほかに、

- CD-ROM（CD Read Only Memory）：データ格納専用
- ミックスCD-ROM：データを第1トラックに入れ、以降のトラックにはCD-DAのサウンドが入る
- CD-I（CD Interactive）：対話的マルチメディア作品を実現する規格
- CD-ROM/XA（CD-ROM/eXtended Architecture）：ビデオまで含める
- フォトCD
- CD-R（Recordable CD）：化学的機構を利用して一度だけ書き込みできるCD
- CD-RW（Read/Write CD-R）：読み書きできるCD-R

などがあります。とくにCD-Rは、現在の全てのディジタル記録メディアの中でもっとも情報安定度が高い（音楽CDが40年に対して70年の寿命。フロッピーの寿命は2年といわれる）こともあり、爆発的に成長しています。

パソコンの周辺機器としての「CD-Rライタ」も普及とともに低価格化し、誰でも気軽に大量のデータのバックアップや、CD-R化されたプライベートなコンテンツ、自分で作曲・録音した音楽作品のオリジナルCDなどをデスクトップで簡単に制作できる時代となり、CD-R記録が可能な家庭用CD装置も登場しました。

ところが、一般にパソコンのCD-Rドライブは音楽CD（CD-DA）の読み書きに対応できるために、一つのCD-ROMドライブで音楽CDを読み出しながら別のCD-Rドライブで書き込んだり、いったんディジタル録音してCD-Rライタで書き込みすれば、完全に市販のCDと同一のCDが制作できてしまい、著作権上の大きな問題となっています。市販CDには「一度だけコピーできる」等の不正コピー管理情報が盛り込まれているために、市販のディジタルオーディオ

機器同士を接続しての「市販CDの複製」はできないのですが、CD-Rに関係したツールを使ってパソコンで制作する場合には、この情報を無視して無制限に著作権侵害の不正コピーCDを作れてしまうのが現状なのです。

・DAT、MD、DVD

CDに続く新しいディジタル媒体としては、DAT(Digital Audio Taperecorder)、MD(Mini Disc)、DVD(Digital Video Disc)など、日本が世界をリードしています。DATはCD(44.1kHz)よりも高いサンプル周波数(48kHz)を売り物に、安価な小型テープに大容量のディジタルサウンドを無圧縮で記録する、というもので、音楽の専門家の間では現在でも世界標準となっています。しかし、磁気テープの信頼性の点で、その将来性には暗雲が漂っているようにも見えます。

MDは、これまたソニーが提唱した規格で、小型の光磁気ディスクによる安定性と堅牢さ（周囲の磁気などでデータが消えない）、そして独自のATRAC方式というサウンド情報圧縮方式によって、CDに比べて数倍の情報密度を実現したために、世界の中で日本だけで爆発的に成長しています。オーディオマニアは、人間の聴覚の鈍感な部分では大幅にサウンド情報を欠落させているこの手法に批判的ですが、実用的な範囲では、ほぼCDと同等のクォリティのサウンドを実現できるために、若い世代ではもっとも標準的なサウンドメディアとなっています。



DVDは、サウンドだけでなく動画をそのままディジタル化するための規格として鳴り物入りで登場しましたが、マルチメディア時代の一つの本命となる部分なだけに、電気メーカ各社の思惑が絡んで、なかなか大ヒットという状況になりません。これはもう少し、状況を見る必要がありそうです。後から出てきた規格だけに、サウンド記録としての性能ももっとも高度なものですが、「CDより上の性能規格を決めても、どうせ人間にそこまでの違いは聞こえない(CD品質で十分)」という議論もあるようです。

メカニズムのないディジタル記録

図3.2の右下の領域には、サウンドをディジタル記録する中で、機械的な機構を用いない、という最新のメディアが勢揃いしています。この部分については、重要なポイントは「ディジタル化の手法」になりますので、本章の後半でじっくり検討しますから、ここでは外見的な形態についてざっと紹介しておく

だけにしましょう。

HDRのところで述べたように、アナログのサウンドをパソコンで「録音」する場合には、「A-D変換」（アナログのサウンド情報をディジタル化する）したデータをパソコンのメモリに記録します。そこで、メカニズムを使わずにこの情報を保持したり伝達していくには、以下のような方法がとられます。

・電源を切ってもデータの消えないメモリに格納する
　（バッテリバックアップしたSRAMカートリッジやSRAMの入ったICカード）
　（不揮発タイプの「フラッシュメモリ」カード）
・サウンドファイルをインターネット等で配信・転送する
　（ファイル形式としては、AIFF、AIFC、AU、MP3、WAVなど）
　（いわば、インターネット上に情報を貯える）
・ムービーファイルのサウンドトラックとしてサウンドを格納する
　（QuickTimeムービー、Shockwaveムービー等の圧縮技術を利用）
・インターネットのストリーム転送により、データを蓄積せずに聞く
　（RealAudio等の、ストリーム再生オーディオの技術による）

このうち、最近インターネットの世界で話題となっている「MP3」など、サウンドファイル（AIFF、AIFC、AU、MP3、WAVなど）に関する部分については、あとで具体的な実験とともに検討しますので、ここではそれ以外の項目について簡単に紹介しておきます。

・ムービー系コンテンツとサウンド

インターネットでは「静止画」の表示、サウンドファイル（後述）の再生、というマルチメディアの素材に続いて、「音楽と同期した動画」（ムービー）という領域に進展しています。この技術を使って、動画データの部分をゼロとしたムービーデータとして、サウンド情報を手軽に扱う手法としては、QuickTimeとShockwaveがポピュラーです。

QuickTimeとは、Apple社が昔からMacintoshで実現してきたマルチメディア技術の一つの根幹で、その秀逸性は、現在ではWindowsでもQuickTimeムービーに標準で対応していることからも明らかです。基本的には、動画部分は「静止画データのコマ送り」として、またサウンド部分は「圧縮された専用フォーマット」としてデータファイル中に格納し、動画とサウンドとの同期機能も組

み込んでいます。

インターネットのブラウザでは、プラグインモジュールとしてQuickTimeに対応しているために、どのような環境（マシンの機種、OSの種類）であっても、QuickTimeムービー形式で音楽データを制作しておけば、ホームページのBGMなどが必ず鳴ってくれる、という状況にあります。ただしサウンドの品質としては、高性能というよりは比較的ローレベルです。

Shockwaveとは、Macromedia社のマルチメディア・コンテンツ制作支援（オーサリング）ツールの「Director」で制作したムービーファイルを、インターネット上で用いる場合の名称です。

Directorは、複数のサウンドトラック、多数の動画チャネル、さらにユーザの操作（マウスやキーボード）との対話的機構を効率的に組み合わせた高度なコンテンツを制作できるツールで、市販のCD-ROM版ゲームやマルチメディア百科事典などのコンテンツのほぼ全ての制作に使用されている、「プロの標準ツール」です。「Javaを超える表現のためにはShockwaveが必須」というのが、マルチメディアの世界でのプロの常識であり、Macromedia社が無償公開している「Shockwaveプレイヤーのプラグイン」をブラウザにインストールしないユーザのほうが珍しい、というほどに普及しています。



そこで、音楽データをShockwaveデータ化（独自方式による圧縮）してコンテンツとして置くのは、サウンドの配布形式としては有効です。単純なサウンドの再生だけでなく、たとえばマウスのクリックで音楽再生を切り替えたり、というような利用方法には、Shockwaveの活用は現在のところもっとも強力な手法となっています。

・ストリームオーディオ

サウンドファイルやムービーファイル中のサウンドデータ、という形式は、いずれもその音楽を聞くために、まずは「データを手元にダウンロードする」「ダウンロードしたデータをファイル化して記録する」「このファイルをプレイヤーソフト（プラグイン）によって再生する」というステップが必要です。これは、あとでこのファイルをまた聞きたいときには便利である一方で、記録したファイルをどんどんコピーして配布されて著作権が侵害される、という、データ制作者側にとっての大きなデメリットも持ちます。

そこで、「手元にデータを保存しないで、インターネットから刻々とデータを受け取ってサウンドとして再生する」という、電話のような方式でサウンド

再生を実現するのが、「ストリームオーディオ」と呼ばれる手法です。ユーザはまず、ストリームオーディオを再生するための専用のプレイヤーソフトを入手してインストールする必要があります。

ストリームには、サウンドの品質や回線性能に応じて各種の規格が提案されつつ乱立しているので、まだスタンダードは無い（主流は“RealAudio”がメジャー、ただしまだ予断を許さない）状況です。一般にインターネットでの情報伝送の品質としては、あまり確実な性能は保証されていないので、サウンド情報のパケットが遅れたりしても音楽再生に違和感がないように、情報をいったん蓄積して整理するための時間を置いていることが多いようです。

ストリームオーディオで十分な品質のディジタルサウンドを聞くためには、28.8kbps程度のダイヤルアップ回線ではやや苦しく、64kbpsとか128kbps以上の専用線接続が推奨されています。ストリームオーディオを配信するためには、刻々とサウンドデータをA-D変換し、さらにリアルタイムに専用形式の情報に圧縮しながら変換する「エンコーダ」、そして多数のユーザがこの情報をアクセスしてきたときに配信するためにデータを蓄積しつつ配信する「サーバ」、というような環境が必要となります。

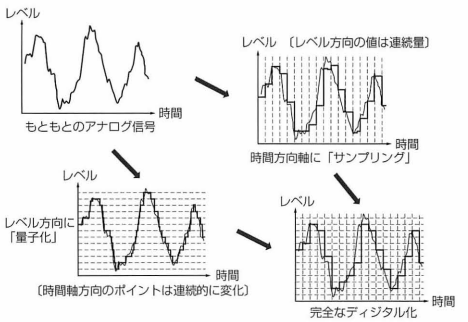
そこで、「聞く」のはまあ容易ですが、個人のパソコンで簡単にストリームオーディオを「配信する」というのは、ちょっと大変でしょう。筆者もあるコンサートで「インターネット中継」をしたことがありますが、会場のエンコーダのマシンから大学のサーバに電話を2回線連続接続して、さらに大学のWebサーバへの接続制限を設けたり、とスタッフは大変でした。

A-D（アナログ-ディジタル）変換

すでにアナログとディジタルという用語が何度も登場してしまいましたが、ここでその概念をきちんと整理しておきましょう。じつはこの確認によって、サウンドエレクトロニクスが「人間の感覚」をもとに設計されている、という面白い事実も見えてくるでしょう。

アナログとディジタルの関係をもっとも整理しやすいのは、アナログ信号をディジタル情報に変換する「A-D変換」の動作を検討することです。**図3.3**は、この様子をわかりやすく示したもので、左上のもともとのアナログ信号波形が、最終的には右下のディジタル情報を示す波形に変換されます。ここに、図のように二つのルートがあり、じつはA-D変換には二つの要素が同時に反映されて

図3.3　アナログ-ディジタル変換のようす





いる、という重要な事実が隠れています。ここで登場する用語は「量子化」と「離散化」で、いずれも「**サンプリング**」という概念に基づいています。

・時間でとびとびに取る離散化

まず、アナログ信号が**時間軸方向にサンプリング（離散化）**される、という右上のルートを眺めてみましょう。ここでは、入力アナログの電圧（レベル）は、連続的にどんな細かい値も表現できます。前述のBBDというICは、この動作を行っています。イメージ的には、小学校の理科に出てくる温度計（ガラス管の中の赤い棒の上下を見る）を、たとえば10秒おきにカメラで定期的に撮影した、というような記録になります。時間的に離散的な情報とすることで、元のアナログ信号の連続的な時間ごとの情報が大幅に圧縮されますが、サンプリングする合間の時間に変化した情報は失われることで、誤差が生じてきます。

・信号レベルでとびとびに取る量子化

また、入力から左下のルートで、**レベル方向にサンプリング（量子化）**される、というほうはどうでしょうか。こちらは、出力として得られるレベルは、とびとびのどこかに代表させることで情報を圧縮していますが、当然のことながら、その間のレベルが表現できないので、これも誤差（量子化誤差）となり

ます。これはイメージ的には、たとえば小数点以下を四捨五入して整数で表示するディジタル温度計を、ビデオカメラで連続撮影したような記録になります。この場合、ある温度の境界付近で風のゆらぎでハタパタと細かく温度表示が上下する瞬間もあります。

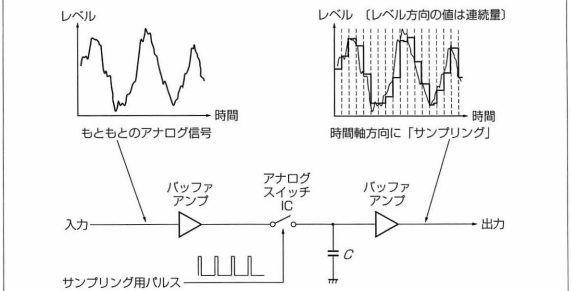
この両方を同時に作用させたのが、一般にエレクトロニクスの世界でディジタル情報として扱っているものです。図から明らかなように、時間軸でも等間隔に切り刻み、さらにレベル方向でも等間隔の値に代表させていますから、入力の滑らかな変化は完全に失われて、情報としてみれば劇的に圧縮されることになります。たとえばCD(コンパクトディスク)の場合、「サンプリング周波数44.1kHz」という規格ですが、これは時間軸方向に、毎秒44100ポイントごとの情報としてサウンドを表現していることを意味しています。またCDは「16ビット・リニア」という規格なのですが、これはレベル方向には、信号の値を65536段階にして表現しているわけです。

同じようにディジタル化の規格を見ると、たとえば「電話品質」のサウンドでは、サンプリングは5kHz～8kHz程度、量子化は8ビット程度です。これは音質としては周波数帯域がCDの5分の1以下、データはなんと256ステップしかないことになります。電話でオーディオのような品質で音楽を楽しめないわけは、この性能の違いにあります。なお、世界的にはまったく無名ながら日本で急速に普及しているMD(ミニディスク)ですが、これは離散化方向も量子化方向も、人間の聴覚の鈍感な帯域でデータを荒く処理する、という複雑な情報圧縮をしています。これによってCDとほぼ同じような情報を、より小型のメディアに記録することに成功したのです。

・A-D変換に必須のサンプル&ホールド回路

図3.4は、A-D変換の前半を構成する「**サンプル&ホールド**（S&H）」という回路ブロックの構成例です。実際のS&H機能は改良されてより複雑になっていますが、この回路でも実際に動作します。入力のアナログ信号はバッファアンプを経て、アナログスイッチに入ります。このアナログスイッチは、制御入力がOFF状態のときにはとても大きな等価抵抗（インピーダンス）で、事実上は完全にOFFとなります。そして、システムのサンプリング周波数に応じたパルスで定期的にONとなります。すると、その瞬間の入力電圧がアナログスイッチの出力の小容量コンデンサに瞬間的に充電され、その後はスイッチがOFFとなって、この電圧が保持（ホールド）される、という仕組みです。これ

図3.4　サンプル&ホールド(S&H)回路の仕組み





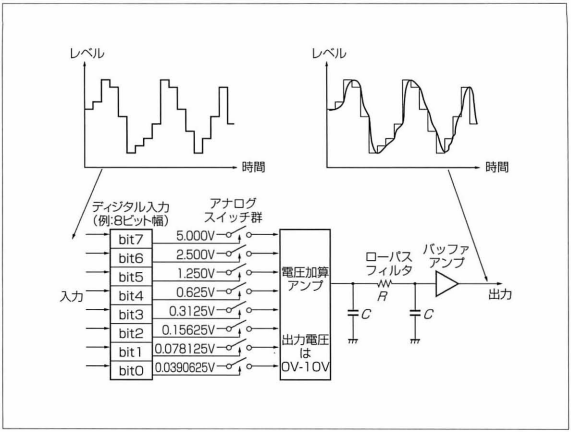
によって、入力アナログ電圧は、サンプリング周波数に応じた周期で「固定」されて、後段の「その電圧をディジタル情報に変換する」(この部分の回路例は省略する) ブロックに行きます。なお実際のA-D変換では、つぎに紹介する「**サンプリング定理**」のために、さらにこの上流に「サンプリングフィルタ」と呼ばれるローパスフィルタが入っています。この仕組みはつぎのD-A変換のブロックでも同じものを使いますので、そこで紹介しましょう。

D-A (ディジタル-アナログ) 変換

サウンドをディジタル情報としてシステム内部で取り扱う部分は、本書の第5章のメインテーマです。ここではその出口、つまり、ディジタル情報をアナログのサウンド信号に変換する「D-A変換」ブロックの動作について検討してみましょう。

図3.5は、D-A変換回路を構成した一例です。サウンドエレクトロニクスの本格的な製品で、ここまで単純なものはありませんが、この回路も実験してみるときちんと動作するエッセンスとなっています。ディジタル情報としての入力は、システムの動作に応じて、サンプリング周期ごとに、図の入力情報として与えられます。ここでは簡単のために8ビット分解能 (精度) としていますので、サウンドの情報は0から255までの256段階で表現されています。そこで、

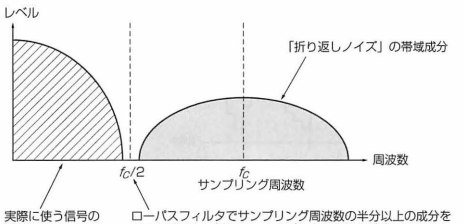
図3.5　D-A変換回路の例



このディジタル情報を対応するアナログ電圧に変換するためには、ディジタルの各ビットの重みに対応した電圧を足し合わせてやればよいことなります。図の回路はまさにそのままで、入力情報の各ビットに対応したアナログスイッチで、ビットに対応する電圧をオンオフして、その全体を電圧加算アンプに入力しています。この例では、アナログ出力を0Vから10Vという範囲にしているので、最上位ビットに対応するのは、半分の5V、次のビットはその半分の2.5V、などとなっています。最下位ビットは全体の256分の1という微小な電圧なので、実際にはこの部分の精度を確保するための回路テクニックが必要となります。

この電圧加算アンプの出力電圧は、サンプリングのタイミングごとに電圧が急激に変化しているので、そのままの電圧を信号にしてしまうと非常にノイズが多く、元のサウンドとはまったく違って歪んだものとなっています。そこで図のように、その後段にローパスフィルタを通します。ローパスフィルタとは平滑回路でもありますから、ここでコンデンサの充電・放電によって急激な変化成分（高域）がカットされて、なめらかなアナログ信号を得ることができます。

図3.6　サンプリング定理と折り返しノイズの除去

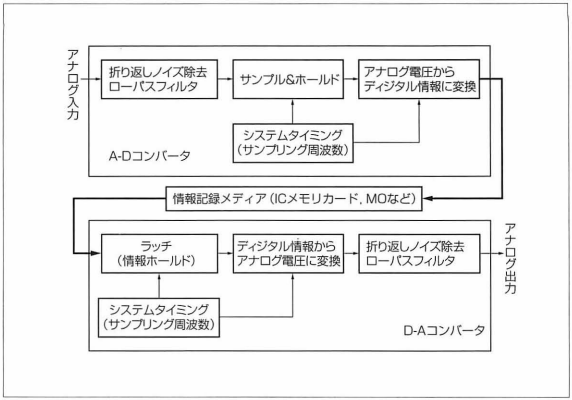


・CDのサンプリング周波数がなぜ44.1kHzなのか

ここで、A-D変換の入力部分のフィルタとも共通する「サンプリング定理」について紹介しておきましょう。これは、**「0Hzからf Hzまでの周波数帯域の信号を表現するには、サンプリング周波数は2f Hz以上にしなければならない」**というものです。言い換えると、たとえば10kHzのサンプリング周波数のディジタル-アナログのシステムがあれば、このシステムで取り扱う信号は0-5kHzの成分しか正しく表現されない、ということです。ここで、CDのサンプリング周波数が44.1kHzであることを思い出しましょう。これは、CDが22kHz程度まで正確に表現できていることになります。これは、人間の聴覚は15kHzから20kHzまでである、という音響学的な定説とよく対応しています。

図3.6は、この様子を示した図です。サンプリング定理より、入力信号の周波数成分のうち、サンプリング周波数の半分より下の成分が、サンプリング周波数を中心として、その上下に「折り返しノイズ」と呼ばれる成分として分布します。そこで、A-D変換の入力側では、サンプリング周波数の半分の周波数よりも高い成分の信号をカットするのに、ローパスフィルタを使っています。また、D-A変換の出力側でも、サンプリング動作に伴う折り返しノイズの高域成分が出てくるので、同じ特性のローパスフィルタが必要になる、というわけです。

図3.7　アナログ信号のディジタル処理



ピッチチェンジャー

ここまで紹介してきた、アナログとディジタルの全体をまとめてみると、**図3.7**のようなシステムになります。**図3.2**の中であまりふれなかった「ディジタル記録の電子的メディア」である、ICメモリカード（バッテリでバックアップしたメモリIC）や、フラッシュメモリなどの活躍は、この図によってはっきりしてきます。つまり、あるところで記録したサウンドを別のところに移動する（録音と再生）ときに、まったく可動部のない、そしてアナログのように情報が劣化しないでコピーのできる方法というのは、このようなスタイルとなります。

つぎに述べる、いろいろなサウンドファイルをインターネット等によって伝達するというのは、この「情報記録メディア」として、いわば地球上の情報資源の総体をこのメディアとして利用する、というような視点となるわけです。インターネットによるグローバルな情報環境が本当に理想的に充実した場合には、誰も自分の手元にサウンド情報を「記録」させた媒体を持つ必要がなくなります。聞きたいときにはインターネットからデータを呼び出して聞いて楽しみ、それでサウンド本来の姿のように、そのまま消えてしまってかまわない（おそらくこのときに、たとえば1曲1回あたり10円、などの課金を支払うシス

テムが必要）という時代に近づいているのです。

・サンプリング周波数を変えて再生するピッチチェンジャー

さて、この図から、サンプリングに関係した面白い例を一つだけ紹介しておきましょう。**図3.7**の上のシステムと下のシステムは、同じディジタル化された情報記録メディアを共有していますが、システムタイミングは同じである必要はありません。そこで、たとえば20kHzのサンプリングで記録されたディジタル情報を10kHzで再現してみると、これは1オクターブだけ低く、テンポが半分のサウンドとして聞こえます。つまり、テープの早送りやスローモーションのようなことがおこるわけです。

この機能を簡単に実現したおもちゃが「ピッチチェンジャー」というものです。**図3.7**のようなシステムで、入力系と出力系のサンプリング周波数を変えることで、言葉とか音質の特徴を残しながらも、ピッチを変えて再生しています。厳密には、テンポを変えずにピッチチェンジをするにはいくつかの回路技術が必要となりますが、その基本原理はだいたいこの手法が中心となっています。テープの回転数を変えるのはかなり大変ですが、まったく情報を劣化させずにピッチを変えられるというのは、ディジタル化の一つの大きなメリットなのです。



サウンドファイル・フォーマット

それでは、サウンド情報をディジタル化してサウンドファイルとする、という、インターネット時代となって注目されている状況について、ここで実験しながら詳しく検討してみましょう。コンピュータ用語が多くなり、やや専門的になる部分については、軽く読み流してください。まず最初に、全体についてざっと眺めておくことにします。

コンピュータの世界では、静止画の画像ファイルについては、

・Windowsパソコンの画像ファイル：BMPファイル

・Macintoshの画像ファイル：PICTファイル

・UNIXマシンの画像ファイル：RGBファイル

などのように、それぞれ固有の規格があります。これは、画面をそのままスクリーンショット（スナップショット）として画像データ化するための標準形式で、データの圧縮などをしていない、普遍性の高い形式として、コンピュータ

(OS) ごとに固有のデータ形式をもっています。ところがインターネットの時代となると、画像コンテンツの互換性で問題があることと、データ転送にはこれら「画素データをそのままファイル化した」冗長な規格は適していないために、画像情報を圧縮したデータフォーマットとして、

・GIFファイル
・JPEGファイル

という2種類の代表的な規格で統一されました。いずれの画像データも、各種のツールで簡単に相互変換することができ、GIFかJPEGにしておけば、全てのコンピュータで同じように画像を見ることができます。

これに対して、サウンドの世界でも同様に、コンピュータごとの標準的なサウンド情報のデータ形式としては、

・Windowsパソコンのサウンド：WAVファイル
・Macintoshのサウンド：AIFFファイル（別に「Macサウンド」というものもある）
・UNIXマシンのサウンド：AIFFファイル（あるいはAUファイル）

というような固有の規格があります。後述するように、WAV規格とAIFF規格は、画像ファイルの「画素ごとに正直にデータを並べる」というものと同様に、サウンドデータの圧縮をしていないもので、

・モノラル/ステレオ（ステレオならデータ量はモノラルの2倍）
・データ幅（8ビット/16ビット：量子化のビット幅）
・サンプリング周波数（48kHz、44.1kHz、32kHz、22.05kHz、16kHz、11.025kHz、8kHz等）

など、データ量とサウンドのクォリティによっていくつもの組み合わせを指定するようになっています。たとえば、音楽CDと同じ規定としてよく使われる、

・ステレオ
・データ幅16ビット
・サンプリング44.1kHz

というように設定したWAVファイルとAIFFは、管理情報の「ヘッダ領域」のわずかな違いだけで実質的にはほぼ同じサイズのファイルとなり、サウンドを表現する部分の「生データ」の部分はまったく同一です（ツールで簡単に相互変換できる）。このようすは次節で実際に実験によって検証してみましょう。

そしてインターネット上のコンテンツを考えた場合には、JPEG圧縮した画像データに比べてあまりにサウンドデータが巨大になるために、情報を圧縮し

た共通規格として使われるようになったものとして、

・AIFCファイル

・AUファイル

・MP3ファイル

という三つの規格が登場してきました。AIFCファイルは、圧縮モード（Compression）をサポートしたAIFFの上位互換として登場してきましたが、歴史が古いだけ圧縮効率がいま一つで、あまり主流となっていません。そこで、本書では以降はAIFCファイルには触れないことにします。

これに対して、AUファイル・フォーマットは、データ幅やサンプリング周波数やステレオ/モノラルについて各種の組み合わせを指定するとともに、「CCITT μ-law方式」と呼ばれる、サウンドファイルのための強力なデータ圧縮のON/OFFを指定することができ、一般にAUファイルといえば、このデータ圧縮を用いたファイルのことを指します。Javaでは画像としてGIFとJPEGの両方をサポートしていますが、初期バージョンのJava（最大公約数的なこれに対応させておけば全てのJava環境が対応している）の扱うサウンドファイルとしては、



・モノラル

・データ幅16ビット

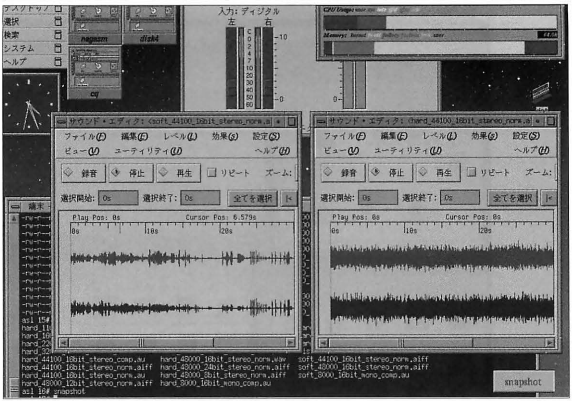
・サンプリング8kHz

・CCITT μ-law方式圧縮

と指定されたAUサウンドのみを認識する、としてJavaの世界がスタートしたこともあり、もっともスタンダードなサウンドファイルのフォーマットは、この設定によるAUファイルとして定着しつつあります。

MP3というのは、「MPEG1オーディオレイヤー3」という、MPEG規格の中でサウンド情報を圧縮するための規格で、人間の聴覚の鈍感な帯域ではデータ量を大幅に圧縮する、というMDに似た、非線型の情報圧縮を行っています。たとえば音楽CDをそのまま非圧縮でデータ化したファイル（WAVやAIFF）に対して、聴感上はまったく同じに聞こえるクォリティのMP3ファイルは、10分の1から11分の1程度のデータ量にまで圧縮されるといわれています。AIFFやWAVファイルとMP3ファイルとの変換のためのコンバータソフトは、各種のフリーウェアを容易に入手することができ、またMP3ファイルを再生して音楽を聞くための「MP3プレーヤソフト」も多種のフリーウェアやシェアウェアが出回っています。

図3.8　二つのサウンドファイル（softとhard）



しかしこの一方で、市販の音楽CDをMP3データ化して無料で配布する、という「著作権侵害サイト」が世界中に開設されてしまったために、現在は大きな問題となっています。著作権の問題が解決されないまま、MP3データをパソコンから転送して、機械的機構をまったく持たずに高品質オーディオとして楽しめる「MP3ウォークマン」も市販され、MP3を巡る状況はますます注目されてきている状況です。

実験・各種サウンドファイル（AIFF/WAV/AU/MP3）

ここでは、筆者が実際に各種のサウンドファイルを実験してみた内容を紹介したいと思います。いくつかの代表的なサンプルについては、筆者のWeb

```
http://nagasm.org/ASL/sound/
```

に置いてあります。ダウンロードして聞き比べることもできますので、興味のある読者は試してみてください。

まず、最初のスタートラインとなるのが、**図3.8**の画面です。これは、筆者が作曲のメインマシンとして活用している（第6章参照）、シリコングラフィクス社のIndyというコンピュータの画面で、実験のサンプルとなる二つのサウンドファイルを作成したところです。また**図3.9**は、このIndyとWindowsパ

図3.9　Macintosh上でMP3ファイルを作成中



ソコンとともに筆者が活用している、Macintoshの画面（MP3ファイルを作成しているところ）です。このように、異なったコンピュータ環境を日々活用しているだけに、筆者もサウンドファイルの動向には関心がある、というわけです。

図3.8の画面にある二つの波形ウインドウにあるのが、ここで実験した二つのサウンドファイルです。左側を「soft」、右側を「hard」と名付けましたが、見てわかるように、softは二人の人間の静かな会話サウンドで、途中に無音の「間（ま）」も入っています。いっぽうhardのほうは、複数のロックを重ねたサウンドで、常時やかましく鳴っている、というものです。両者のデータは正確に30秒ジャスト、という同一の長さにしてありますが、このサウンドの性格の違いが、あとで「圧縮」の差となって現れてくることになります。

以下、筆者の実験を追いかけるために、**図3.10**のリストを常に参照してください。ここで必要な情報は、それぞれの行の左端に便宜的につけた参照番号と、あとは右端の長いデータファイル名、そしてその左にあるのが、それぞれのサウンドファイルのデータサイズ（単位は「バイト」）です（これら以外の情報はUNIXの管理情報ですので無視して結構です）。説明の便利のために、同じファイルが重複して何度か登場していますが、同じ名前のファイルは（参

図3.10　実験したサウンドファイルのリスト

参照番号	UNIXの管理情報				データサイズ	データファイル名
01	-rw-r--r--	1	root	user	5760124	hard_48000_16bit_stereo_norm.aiff
02	-rw-r--r--	1	root	user	5760000	hard_48000_16bit_stereo_norm.data
03	-rw-r--r--	1	root	user	5760044	hard_48000_16bit_stereo_norm.wav
04	-rw-r--r--	1	root	user	5760124	hard_48000_16bit_stereo_norm.aiff
05	-rw-r--r--	1	root	user	2880062	hard_48000_16bit___mono_norm.aiff
06	-rw-r--r--	1	root	user	5760124	hard_48000_16bit_stereo_norm.aiff
07	-rw-r--r--	1	root	user	8640062	hard_48000_24bit_stereo_norm.aiff
08	-rw-r--r--	1	root	user	5760062	hard_48000_12bit_stereo_norm.aiff
09	-rw-r--r--	1	root	user	2880062	hard_48000__8bit_stereo_norm.aiff
10	-rw-r--r--	1	root	user	5760124	hard_48000_16bit_stereo_norm.aiff
11	-rw-r--r--	1	root	user	5292058	hard_44100_16bit_stereo_norm.aiff
12	-rw-r--r--	1	root	user	3840062	hard_32000_16bit_stereo_norm.aiff
13	-rw-r--r--	1	root	user	2646062	hard_22050_16bit_stereo_norm.aiff
14	-rw-r--r--	1	root	user	1920062	hard_16000_16bit_stereo_norm.aiff
15	-rw-r--r--	1	root	user	1323058	hard_11025_16bit_stereo_norm.aiff
16	-rw-r--r--	1	root	user	960058	hard__8000_16bit_stereo_norm.aiff
17	-rw-r--r--	1	root	user	5292058	hard_44100_16bit_stereo_norm.aiff
18	-rw-r--r--	1	root	user	5292024	hard_44100_16bit_stereo_norm.au
19	-rw-r--r--	1	root	user	2646026	hard_44100_16bit_stereo_comp.au
20	-rw-r--r--	1	root	user	5292058	hard_44100_16bit_stereo_norm.aiff
21	-rw-r--r--	1	root	user	5292058	soft_44100_16bit_stereo_norm.aiff
22	-rw-r--r--	1	root	user	960058	hard__8000_16bit_stereo_norm.aiff
23	-rw-r--r--	1	root	user	480060	hard__8000_16bit___mono_norm.aiff
24	-rw-r--r--	1	root	user	480026	hard__8000_16bit_stereo_comp.au
25	-rw-r--r--	1	root	user	240027	hard__8000_16bit___mono_comp.au
26	-rw-r--r--	1	root	user	240027	soft__8000_16bit___mono_comp.au
27	-rw-r--r--	1	root	user	5292058	hard_44100_16bit_stereo_norm.aiff
28	-rw-r--r--	1	root	user	5033097	hard_44100_16bit_stereo_norm.lzh
29	-rw-r--r--	1	root	user	5022285	hard_44100_16bit_stereo_norm.zip
30	-rw-r--r--	1	root	user	5027251	hard_44100_16bit_stereo_norm.sit
31	-rw-r--r--	1	root	user	5291891	hard_44100_16bit_stereo_norm.cpt
32	-rw-r--r--	1	root	user	481241	hard_44100_16bit_stereo_norm.mp3
33	-rw-r--r--	1	root	user	5292058	soft_44100_16bit_stereo_norm.aiff
34	-rw-r--r--	1	root	user	4352562	soft_44100_16bit_stereo_norm.lzh
35	-rw-r--r--	1	root	user	4368710	soft_44100_16bit_stereo_norm.zip
36	-rw-r--r--	1	root	user	4437119	soft_44100_16bit_stereo_norm.sit
37	-rw-r--r--	1	root	user	4714626	soft_44100_16bit_stereo_norm.cpt
38	-rw-r--r--	1	root	user	481233	soft_44100_16bit_stereo_norm.mp3

照番号は別ですが）同一ですので注意してください。

・基本サウンドのレコーディング

まず最初に行ったのは、**図3.8**のIndy上で、標準添付されたsoundeditorというツールを使っての、サウンドのレコーディング（アナログサウンドのサンプリング）です。Indyは標準状態では、DATと同じ最上性能の、

・ステレオ
・データ幅16ビット
・サンプリング48kHz

という機能でサウンドをディジタル化し、標準的にはAIFFフォーマットでサウンドファイル化します。これ以外のファイルは、これも標準添付されたsoundfilerというツールで簡単にファイル変換（コンバージョン）します。

図3.10の01にある

```
01  -rw-r--r--  1 root  user   5760124   hard_48000_16bit_stereo_norm.aiff
```



というファイルが、ここでのスタートラインで、「hard」という、長さが30秒間のサウンドファイルを作ったところ、サイズが約5.7MBということになりました。これはインターネットで何かのデータをダウンロードしたことのある人ならわかりますが、かなり大きなデータです。ネットスケープ一式ほどの巨大なソフトに匹敵するサイズで、たった30秒のサウンドにしかならないのです。

そして、データ変換ツールによって、

・ステレオ
・データ幅16ビット
・サンプリング48kHz

という条件をまったく同一にしたまま、「サウンドの生データ」というメニューで変換したものが、

```
02  -rw-r--r--  1 root  user   5760000   hard_48000_16bit_stereo_norm.data
```

というファイルであり、同様に「WindowsのWAV(RIFF)ファイル」というのが

```
03  -rw-r--r--  1 root  user   5760044   hard_48000_16bit_stereo_norm.wav
```

というファイルです。いずれもサイズはほとんど同じ、約5.7MBです。これらは圧縮していないタイプですから、当然ながらサイズはほぼ同じです。

さて、それぞれのファイル形式についてはつぎに検討しますが、ここで電卓片手に、「サウンドの生データ」という

```
02  -rw-r--r--  1 root  user   5760000   hard_48000_16bit_stereo_norm.data
```

について調べておきましょう。このファイルは、一般にどのコンピュータでも「鳴らす」ことのできない単純なデータ列ですが、研究用途では使うことがあります。ここで必要な情報は、

・サウンドはきっちり30秒間
・ステレオ
・データ幅16ビット
・サンプリング48kHz

ということです。順に計算してみましょう。

まず、サンプリングが48kHzということは、「毎秒48000ポイント」の離散化で、サウンドをデータ化するということですから、30秒であれば

48000×30＝1440000

ポイントのデータが並んでいます。ところでステレオですので、実際のデータはこの2倍、つまりRとLのそれぞれに必要なので、

1440000×2＝2880000

個のデータとなります。そして、データ幅が16ビットということは、1バイトというのは8ビットですから、1ポイントごとに2バイト必要ということで、

2880000×2＝5760000

というのが、全体のデータ量ということになります。当然ですが、

```
02  -rw-r--r--  1 root  user   5760000   hard_48000_16bit_stereo_norm.data
```

というのが、まさにこれに相当しているわけです。また、「soft」を録音した

```
21  -rw-r--r--  1 root  user   5292058   soft_44100_16bit_stereo_norm.aiff
```

と見比べてみるとわかりますが、hardであってもsoftであっても、つまりサウンドの中身がなんであれ、データのサイズはまったく変わりません。極端には、「30秒間の無音」というファイルを作ってみても、まったく同一のサイズとなります。

・AIFFサウンドファイルの構造

さて、それでは、この「生データ」に対して、コンピュータの世界（ここでは、データを圧縮する必要性のそれほどない、インターネット以外の意味）でほぼ標準である、AIFFについて簡単に紹介してみましょう。AIFFとは、Audio Interchange File formatのことで、そのデータ形式には、**図3.11**のような規定があります。この図をパッと見てその仕掛けがわかる人というのはまずいないでしょう。



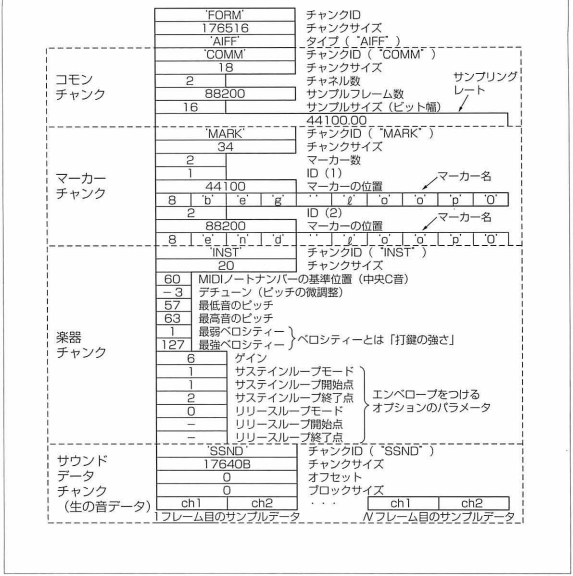
本書ではあまりこの細部に立ち入るわけにはいきませんので、ざっと解説するにとどめましょう。AIFFファイルでは、先頭の4バイトに“FORM”という4文字、つぎに「チャンク（データのかたまり、という意味）のサイズ」、続いて“AIFF”という4文字、という先頭データがあり、これに続いて「コモン・チャンク」「マーカー・チャンク」「楽器チャンク」という一連の定義ブロックがあり、その後に「サウンド・データ・チャンク」という、サウンドデータそのものを並べたデータブロックがある、という構造です。いちばん最後にある生のサウンドデータ部分以外が、AIFFファイルに固有の「ヘッダー情報」のようなものなわけです。各チャンクには定型サイズというものはなく、

・チャンクのID
・そのチャンクのサイズ
・そのチャンクの実際のデータ

という構造をした、可変サイズの柔軟な構造となっています。

AIFFファイルの規定では、モノラルとステレオだけでなく、あまり使われませんが**図3.12**のような「マルチチャネル」の仕様も決まっています。そして、実際のサウンドデータの並びについては、**図3.13**のように、時間ごとにそれぞれのチャネルのデータが順に並んでいく（ステレオのR、Lのデータがばらばらに入れ子になっているものの、連続的にレコーディングするのに適している）規定です。また、データそのものの定義としては、モトローラ系のCPUを意識して（AIFFは元々はMacintosh系なので当然です）、**図3.14**のように「MSBファースト」（上位バイト→下位バイト、の順）となっています。つ

図3.11　AIFFの構造



まり、インテル系のCPUでは、いちいち上位と下位を交換して処理していくことになります。

このくらいで、AIFFの詳しい定義についてはおしまいにしましょう。これらの情報は、筆者もYAHOO.COMで簡単に検索できましたので、より詳しく知りたい人は、インターネットで捜してみてください。ここでの例としては、

```
01  -rw-r--r--  1 root  user   5760124   hard_48000_16bit_stereo_norm.aiff
02  -rw-r--r--  1 root  user   5760000   hard_48000_16bit_stereo_norm.data
```

ということで、AIFFのヘッダーは両者の差から「124バイト」である、ということがわかりました。

図3.12　AIFFマルチチャネル仕様

	channel 1	2	3	4	5	6
stereo	left	right				
3channel	left	right	center			
quad	front left	front right	rear left	rear right		
4channel	left	center	right	surround		
6channel	left	left center	center	right	right center	surround

図3.13　AIFFマルチチャネルのサウンドデータの並び

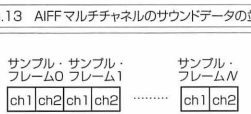


図3.14　AIFFデータはMSBファースト





・WAVサウンドファイルの構造

それでは続いて、「WindowsのWAV(RIFF)ファイル」というメニューで変換した、

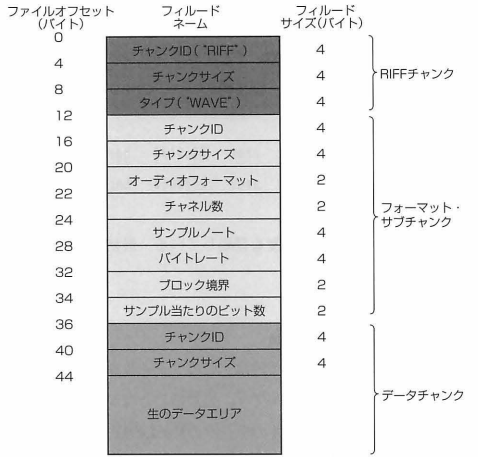
```
03  -rw-r--r--  1 root  user   5760044   hard_48000_16bit_stereo_norm.wav
```

について紹介します。これはWindowsで標準となっているファイル形式ですが、じつはサウンドだけのものではありません。マイクロソフトが規定しているのは「RIFF(Resource Interchange File format)ファイル」という一群のファイルで、ここには

・インターレースAVデータのAVIファイル
・ビットマップデータのRDIファイル
・MIDIデータのRMIファイル
・カラーパレットのPALファイル
・アニメーションカーソルのANIファイル
・ムービーデータのRMNファイル

なども同等に含まれているようです。これらはいずれも、**図3.15**のファイル

図3.15　WAVファイルフォーマット



のヘッダー部分の先頭の4バイトが“RIFF”という文字列になっています。そして、続くチャンクサイズのあとの4文字が“WAVE”となっている場合が、ここで扱っているサウンドファイル（WAVファイル）ということです。

詳しい解説は省略しますが、このWAVファイルの場合には、**図3.15**からわかるように、最後の生データの前につくヘッダーサイズは、44バイトと固定サイズになっています。たしかに、

```
02  -rw-r--r--  1 root  user   5760000   hard_48000_16bit_stereo_norm.data
03  -rw-r--r--  1 root  user   5760044   hard_48000_16bit_stereo_norm.wav
```

と並べてみるとそうなっています。これで、生サウンドデータと、AIFFとWAVとの関係は、なんとなく見えてきたことになります。サウンドデータそのものを、ちょうど画像ファイルで画面の画素ごとに正直に持っているような

ものなのです。

・モノラル、ビット幅、サンプリング周波数の影響

さて、それでは再びスタートラインのAIFFに戻って、ステレオ/モノラル、データの量子化ビット幅、そしてサンプリング周波数について検討しておきましょう。ここではまず、**図3.10**のリストの中から、

```
04  -rw-r--r--  1 root  user   5760124   hard_48000_16bit_stereo_norm.aiff
05  -rw-r--r--  1 root  user   2880062   hard_48000_16bit___mono_norm.aiff
```

を調べます。上段は何度も登場している、最初にレコーディングした、

・ステレオ

・データ幅16ビット

・サンプリング48kHz

のデータです。そして下段は、このファイルを、変換ツールで「モノラル」に設定して作ったファイルです。当然のことながら、サイズは約半分になっています。これは、ステレオのデータのRかLの片方を抜き出したものではなくて、このツールの場合には、RとLを足し算して2で割った、つまり「平均」のデータとなっています。パソコン用の簡易ツールでは、片方だけを抜き出すものもあります。ヘッダのサイズが共通ですから厳密には半分ではありませんが、ほぼ半分のデータ量となります。インターネットの場合、データが半分つまり転送時間が半分ということで、影響が大きいので、ステレオでなくモノラルにすることもよくあります。



つぎに、「データ幅」を変えた実験結果を見てみましょう。ここでは、

```
06  -rw-r--r--  1 root  user   5760124   hard_48000_16bit_stereo_norm.aiff
07  -rw-r--r--  1 root  user   8640062   hard_48000_24bit_stereo_norm.aiff
08  -rw-r--r--  1 root  user   5760062   hard_48000_12bit_stereo_norm.aiff
09  -rw-r--r--  1 root  user   2880062   hard_48000__8bit_stereo_norm.aiff
```

がその結果となります。データ幅を「24ビット」にした07の場合、元々の録音は16ビット精度ですから、これを無理に24ビットに拡張した場合には、下位部分に8ビットの「0」が並ぶだけで、データの精度としてはまったく変化

ありませんが、1サンプルのデータを2バイトでなく3バイトで表現するので、全体のサイズはさらに大きく、1.5倍の約8.6MBとなりました。

また、08とデータ幅をちょっとはんぱな「12ビット」と指定したところ、ヘッダの部分にわずかに変化がありましたが、全体としては16ビット幅と変わりませんでした。これは、データ幅は8ビット単位なので、12ビットとした場合には、下位4ビットに「0」を入れるだけで、精度は12ビットでもデータ量としては16ビットと同じように処理するためです。

さらに、09とデータ幅を「8ビット」とすると、これは約半分のデータ量、と劇的に減ります。当然のことですが、データの量子化精度として、16ビット幅のデータの上位8ビットだけを採用したからです。こうなると、はっきりと耳で聞いてわかるような、音質の劣化となって現れます。

つぎに、サンプリング周波数を変えての実験です。ここでは、

```
10  -rw-r--r--  1 root  user   5760124   hard_48000_16bit_stereo_norm.aiff
11  -rw-r--r--  1 root  user   5292058   hard_44100_16bit_stereo_norm.aiff
12  -rw-r--r--  1 root  user   3840062   hard_32000_16bit_stereo_norm.aiff
13  -rw-r--r--  1 root  user   2646062   hard_22050_16bit_stereo_norm.aiff
14  -rw-r--r--  1 root  user   1920062   hard_16000_16bit_stereo_norm.aiff
15  -rw-r--r--  1 root  user   1323058   hard_11025_16bit_stereo_norm.aiff
16  -rw-r--r--  1 root  user    960058   hard__8000_16bit_stereo_norm.aiff
```

というデータがそれぞれ対応しています。ファイル名の48000とか11025という数字が、毎秒のサンプル数となっています。電卓で計算してみると分かりますが、ヘッダ部分の影響でわずかに誤差があるものの、全体のデータ数は、サンプリング周波数ときちんと比例関係にあります。これは、ここまでの検討で明らかでしょう。これらのデータのいくつかは、筆者のWebページにサンプルとして置きましたので、聞き比べてみてください。

・AUファイルのデータ圧縮

つぎに、「AUファイル」について紹介します。これは元々、SunやNeXTなどの、UNIXワークステーションによく使われたファイル形式です。詳しいファイル構造については省略しますが、AUファイルの最大の特徴は、AIFFやWAVにない「データ圧縮」をサポートしていることです。筆者が同じデータ

で実験してみたところ、AUファイルは48kHzサンプリングというのをサポートしていないようだったので、44.1kHzで比較して、

```
17  -rw-r--r--  1 root  user   5292058   hard_44100_16bit_stereo_norm.aiff
18  -rw-r--r--  1 root  user   5292024   hard_44100_16bit_stereo_norm.au
19  -rw-r--r--  1 root  user   2646026   hard_44100_16bit_stereo_comp.au
```

というようになりました。つまり、18の「非圧縮」の場合には、17のAIFFと、ヘッダの定義程度の違いしかありません。これに対して、AUで標準に採用している「CCITT μ-law（ミューロウ）方式」と呼ばれるデータ圧縮を使用したほうでは、ちょうど半分程度にまでデータ量が圧縮されています。この圧縮アルゴリズムはかなり数学的に難解なので詳しくは省略しますが、だいたい8ビットのμ-lawで12ビット精度、12ビットのμ-lawで16ビット精度に匹敵する音質が得られる、とされています。



また、聴感上はだいぶ異なる「hard」と「soft」という二つのサウンドに対して、サンプリングを8kHzまで下げ、さらにモノラルへと最小データを求めてみたAIFFファイルの実験では、

```
20  -rw-r--r--  1 root  user   5292058   hard_44100_16bit_stereo_norm.aiff
21  -rw-r--r--  1 root  user   5292058   soft_44100_16bit_stereo_norm.aiff
22  -rw-r--r--  1 root  user    960058   hard__8000_16bit_stereo_norm.aiff
23  -rw-r--r--  1 root  user    480060   hard__8000_16bit___mono_norm.aiff
```

となりましたが、これに対応したAUファイルの実験では、

```
24  -rw-r--r--  1 root  user    480026   hard__8000_16bit_stereo_comp.au
25  -rw-r--r--  1 root  user    240027   hard__8000_16bit___mono_comp.au
26  -rw-r--r--  1 root  user    240027   soft__8000_16bit___mono_comp.au
```

というような結果となりました。ここからわかることは、AUファイルの場合には、

・圧縮によってデータサイズが機械的に、生データの約半分になる
・サウンドファイルの性質には依存しないで機械的に圧縮する

ということです。

さて、ところで、「データの圧縮」といえば、パソコンの世界では色々な「データ圧縮ツール」の定番があります。そこで、これについても実験してみたのが、**図3.10**のリストの残りの部分です。まだ「MP3」については紹介していませんが、とりあえず、「hard」と「soft」の両方について、

- Windowsの定番ツール“WINZIP”（ZIPファイル）
- Windowsの定番ツール“LHA”（LZHファイル）
- Macintoshの定番ツール“StuffIt”（SITファイル）
- Macintoshの定番ツール“CompactPro”（CPTファイル）

を作ってみました。よく眺めてみてください。

```
27  -rw-r--r--  1 root  user   5292058   hard_44100_16bit_stereo_norm.aiff
28  -rw-r--r--  1 root  user   5033097   hard_44100_16bit_stereo_norm.lzh
29  -rw-r--r--  1 root  user   5022285   hard_44100_16bit_stereo_norm.zip
30  -rw-r--r--  1 root  user   5027251   hard_44100_16bit_stereo_norm.sit
31  -rw-r--r--  1 root  user   5291891   hard_44100_16bit_stereo_norm.cpt
32  -rw-r--r--  1 root  user    481241   hard_44100_16bit_stereo_norm.mp3

33  -rw-r--r--  1 root  user   5292058   soft_44100_16bit_stereo_norm.aiff
34  -rw-r--r--  1 root  user   4352562   soft_44100_16bit_stereo_norm.lzh
35  -rw-r--r--  1 root  user   4368710   soft_44100_16bit_stereo_norm.zip
36  -rw-r--r--  1 root  user   4437119   soft_44100_16bit_stereo_norm.sit
37  -rw-r--r--  1 root  user   4714626   soft_44100_16bit_stereo_norm.cpt
38  -rw-r--r--  1 root  user    481233   soft_44100_16bit_stereo_norm.mp3
```

ここからわかるのは、

- サウンドデータはビットマップの画像データに比べて、いずれのソフトでも、ほとんど圧縮されていない（ランダム性が高い）
- 圧縮ソフトの方式によって、それぞれわずかに圧縮度が違う
- 「hard」と「soft」とでは、圧縮度が異なる（おそらく「無音領域」などを活用して、softがより圧縮された）
- MP3はとてつもなく強烈にデータを圧縮している（しかし、こうして見るとAUもなかなかよくデータ圧縮している）

ということです。これが、いまインターネットでMP3が爆発的に拡大している最大の理由、というのがこのリストから明確になりました。

・MP3：インターネット時代のサウンドファイルの新標準

さて、いよいよサウンドファイルの話題の最後として、MP3にやってきました。これはすでに述べたように、インターネットの世界では著作権違反の不法コピーの流通という難しい問題も抱えているのですが、ここでは純粋に技術的な視点から検討してみることにしましょう。

MP3の特徴は、サウンドファイルのデータ形式よりも、サウンド情報の圧縮アルゴリズムにあります。その手法について、個々に詳しく検討するのは、完全に本書のレベルを超えるものとなりますので、ここではインターネットからいくつか検索した情報から筆者の解釈した特徴を、エッセンス的にポイントとしてまとめておくにとどめます。



まずMP3の基本方針として、対象のサウンド情報については、CDで扱った周波数帯域と量子化ビット数を「最大限に十分なもの」と位置付けます。つまり、DVDなどで「24ビット量子化、96kHzサンプリング」と仕様が拡大されているのは、実用上は意味がない、と切って捨てています。そして、この範囲のサウンド（CDとして聞こえるサウンド）のクォリティをなるべく保った上で、人間の聴覚特性を活用して、以下のような手法を駆使して、データの圧縮を行っています。

まず、入力されたサウンドを、32バンドのサブバンドに分割して、周波数帯域ごとに異なった処理を行うために、**FFT**（高速フーリエ変換）をします。そして、人間の聴覚にある「**マスキング効果**」を利用します。これは、ある周波数の音を聞いているときに、その近くの周波数でレベルの小さな音に対しては、人間はとても鈍感である、という事実を利用します。たとえば、目覚し時計のベルが鳴っているときには、その陰で聞こえていたラジオの小さな音はマスキングされるので、こういうサウンド情報はばっさりと落とします。許容できる（人間が気付かない）マスキング効果を25dB（4ビット）程度として、さらに周波数帯域ごとに異なる人間の聴覚上の感度も加味します。

人間の聴覚が、連続しているサウンドのパターンに次第に鈍感になる特性も利用して、マスキング効果の処理は、全体の最初と最後との両方を考慮しながら、つぎつぎとやってくる連続的なサウンドに対して処理を行います。また、データは圧縮ソフト“LHA”でも採用しているように、「**ハフマン符号化**」と

いう手法を最大限に活用して、もっとも無駄のない、それでいて再現性のあるデータに変換します。JPEG画像はGIF画像に比べてデータ圧縮度が高いですが、元に復元することができません（非可逆）。しかしMP3は高圧縮度ながら、ちゃんと元に復元することができる（可逆）のです。

MP3のほかにも、サウンドファイルの圧縮手法については、

・AAC方式（MPEG2、MPEG4の方式の一つ）
・ATRAC方式（ソニーのMDの方式）
・TwinVQ（MPEG4のためにNTTが提案）
・QDesign（AAC相当、カナダQDesign社）

など、続々と新しい手法が提案され、登場しています。これらはいずれも、著作権違反にならないように、フォーマットに不正コピー防止策が盛り込まれています。しかし、いくら素晴らしい方式が提案されても、インターネットの世界で多くの人が「標準」として採用していくかどうか、というのは別問題です。

MP3の場合には、ファイル形式からデータ圧縮のアルゴリズムまで、C言語のソースプログラムとして完全に公開されています。これが、世界中で多くの研究者や愛好家が飛びつき、フリーウェアやシェアウェアで豊富なツール類が提供されている原動力になっています。著作権違反の問題と、MP3の技術的なユニークさ/優秀さ、というのは別問題であり、今後もしばらくは「インターネットのサウンドファイルの一つの標準」として活躍することになりそうです。

・Webのサンプル・サウンドファイルについて

ということで、筆者のWebサイト

```
http://nagasm.org/ASL/sound/
```

には、以下のサウンドファイルをサンプルとして置いています。興味のある方は、どうぞ自分の耳で聞き比べてみてください。

```
11  -rw-r--r--  1 root  user   5292058   hard_44100_16bit_stereo_norm.aiff

12  -rw-r--r--  1 root  user   3840062   hard_32000_16bit_stereo_norm.aiff

13  -rw-r--r--  1 root  user   2646062   hard_22050_16bit_stereo_norm.aiff
```

```
14  -rw-r--r--  1 root  user   1920062   hard_16000_16bit_stereo_norm.aiff

15  -rw-r--r--  1 root  user   1323058   hard_11025_16bit_stereo_norm.aiff

16  -rw-r--r--  1 root  user    960058   hard__8000_16bit_stereo_norm.aiff

24  -rw-r--r--  1 root  user    480026   hard__8000_16bit_stereo_comp.au

32  -rw-r--r--  1 root  user    481241   hard_44100_16bit_stereo_norm.mp3

38  -rw-r--r--  1 root  user    481233   soft_44100_16bit_stereo_norm.mp3
```



コラム ③

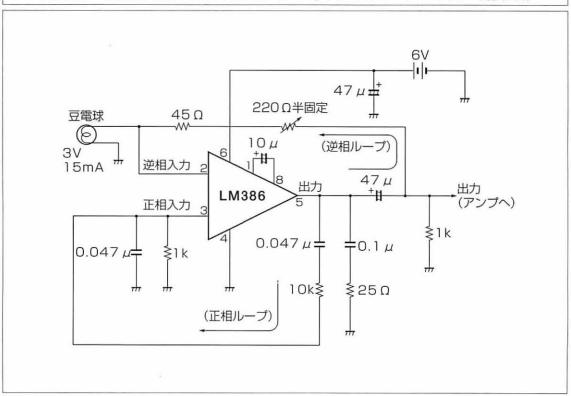
オシレータを作ろう

ここでは、前章で製作実験した秋月電子のアンプキットの別機能を使って、オシレータを作って動かして、実際に体験してみましょう。なお、オシレータ回路の出力でそのままスピーカーを駆動するのはちょっとつらいので、前章で製作したアンプとスピーカーの部分はそのまま使用するとして、もう1セット、今度は3枚にカットした別の基板を使って、LM386などの部品を補充しています。つまり、ここで製作したオシレータの出力を前章のコラムで作ったアンプの入力として与えるようにしています。

秋月電子のキットをオシレータとする回路には、「ウィーンブリッジ正弦波発振器」と「矩形波発振器」という2種類があります。ここでは、前者のウィーンブリッジ発振回路を作ることにします。この回路で信号を歪ませると、矩形波発振器とほぼ似たような出力も得られるからです。

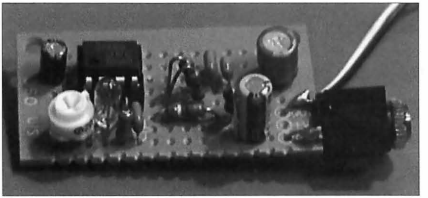
図3.16（**図1.5**と同じです）は、秋月電子のマニュアルにあった回路図をもとに、実際に筆者が製作したほうのバージョンの回路図です。というのも、秋月のキットでは、抵抗やコンデンサの値はキットごとにかなりアバウトに指定

図3.16　秋月電子「LM386アンプ/オシレータ」キットによるウィーンブリッジ発振回路



コ ラ ム ③

図3.17 オシレータ基板に部品を取り付けたところ



されている場合が多く、実際に使用する部品の値というのは、製作するたびに(キットを購入した時期ごとに)異なることが少なくないからです。これはじつは重要なことで、一部の回路では抵抗値やコンデンサの静電容量などにとくに厳密な指定をすることもありますが、たいていの電子回路では、数値はある程度のオーダの誤差の範囲内でほぼ動いてくれる、つまり「マージン」があるのが特徴です。たとえばある回路に200Ωという指定があり、たまたま手元に220Ωしかない場合、筆者は迷うことなく220Ωで済ませます。±10%程度は誤差のうちなのです。



基板にそれぞれ必要な部品を取り付けると、**図3.17**のように、とても小型にできます。筆者はアンプの入力に、ミニプラグの付いたケーブルを用意しているので、ここではオシレータの出力にじかにミニジャックを取り付けて、簡単に抜き差しできるようにしました。あとは電池をつなげば、もう動作します。第1章で紹介した「オシレータ」の記事を追いかけて、実際にその動作を体感してみましょう。

第4章

MIDIと電子楽器

◎

シンセサイザ
電子楽器
MIDI規格
GM音源
SMFとカラオケ

◎

<コラム>カウンタを作ろう

シンセサイザ

サウンドエレクトロニクスとか、コンピュータサウンドという言葉で多くの人が最初に連想するのが、シンセサイザに代表される電子楽器でしょう。本章ではいよいよ、その中身の秘密に迫っていきましょう。アナログ信号であるサウンドを作り出すシンセサイザの歴史は、そのままエレクトロニクス技術の歴史と同じ歩みで進展してきました。そして現代の、カスタムLSI(DSP)を駆使しディジタル化されたシンセサイザまで、ある意味でエレクトロニクスの先端技術の展示場のような世界でもあります。

次章で紹介する「コンピュータ上の仮想シンセサイザ」の登場で、電子楽器は新しい世代に移行しつつあり、ある部分はアナログ電子楽器と同様に、次第にその歴史を終えていく運命にあります。しかし、基本的なアイデアとその発展の歴史をここで整理しておくことは、サウンドエレクトロニクスからコンピュータサウンドへと発展していく状況の理解として、重要な意義があります。



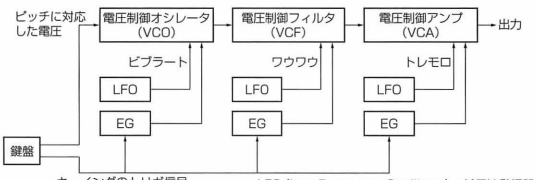
すでに第1章では、「**ピッチ・音量・音色**」という音の三要素を検討し、鍵盤などの演奏による音量の時間的変化である「**エンベロープ**」も紹介してきました。そして、これらの要素を組み合わせた、もっとも初期のアナログシンセサイザ（ムーグ博士の「ミニムーグ」が古典的名機）は、**図4.1**のようなシステム構成になっています。このシステムの動作を、それぞれのブロックの機能とともにしっかりと理解してみましょう。

まず最初に、鍵盤ブロックがあります。ここでは、それぞれの鍵盤ごとにそのピッチに対応した異なる制御電圧を発生するのがもっとも重要な機能です。この時代のシンセサイザは「単音楽器」で、鍵盤で和音を弾くことがなかったので、単純には鍵盤ごとに異なった抵抗をつけて、その抵抗値に対応した電圧を取り出し、12等分平均律ではピッチは鍵盤の位置に対して指数関数的に対応しているので、鍵盤ごとに等間隔の電圧を「指数変換回路」に通すことで、この制御電圧を得ていました。また鍵盤ブロックではこれとともに、「鍵盤のON/OFF」という演奏情報も取り出して、信号として出力しています。

・VCOとVCF

鍵盤からのピッチ制御電圧を受けるのが、**電圧制御オシレータ（VCO）**です。

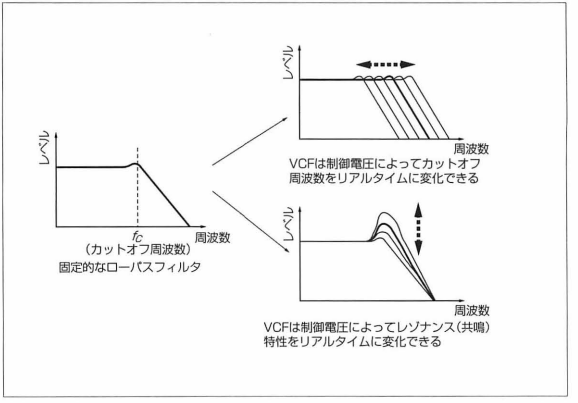
図4.1　代表的なアナログシンセサイザのシステム構成



ここでは、後段のフィルタで豊富な音色変化を作るために、倍音を多く含んだ、鋸歯状波、方形波、三角波などの波形を生成しています。また、数Hz程度の超低周波オシレータ（**LFO**）の電圧も同時に与えることで、ピッチが細かく振動して、音楽的には「ビブラート」の効果を得ることもできます。LFOのスピードやデプス（かかり具合）なども、全てパネルに並んだボリュームでコントロールします。そして、鍵盤のキーイングによって、同時にエンベロープジェネレータ(**EG**)もトリガして、音の立ち上がり時のピッチ変化をつけることもできます。このEGについては、つぎに詳しく紹介しましょう。このVCOは、音の三要素の中では「ピッチ（周波数）」の生成部分ということになります。

VCOの出力を受けて、つぎにあるのが**電圧制御フィルタ(VCF)**のブロックです。これは音の三要素では「音色」の制御を担当する、シンセサイザの心臓部ともいえるブロックです。すでにフィルタで音色の特性が変化することは述べてきましたが、全て「静的」なものでした。つまり、固定的なフィルタでは、音色を時間的に変化させることはできません。本書ではVCFの具体的な回路技術については深入りしませんが、複数のアンプを組み合わせた高度なテクニックによって実現されています。代表的なVCFの特性としては、**図4.2**のようなものがあります。まず、ローパスフィルタの音色的効果の基本となる「カットオフ周波数」を、制御電圧によって移動することができます。これは、たとえばトランペットのような吹奏楽器の雰囲気には必須の要素で、うまくエンベロープを作った制御電圧でこのカットオフ周波数を動かすと、人間の話し声のような雰囲気を作ることもできます。また、LFOで周期的に動かすと、ギター

図4.2　アナログシンセサイザのVCFの特徴



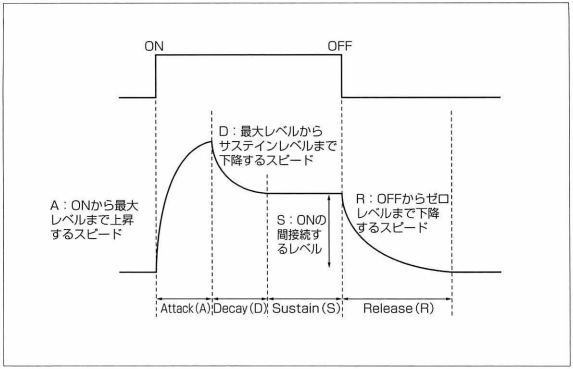


の古典的なエフェクトである「ワウワウ」のような効果を実現できます。また、フィルタのカットオフ周波数付近の特性を大きく持ち上げることができるのも重要な特徴で、このレゾナンス（共鳴）特性の制御によって、いろいろな楽器に特有の「クセ」をつけたり、大きく持ち上げてそのまま発振させてしまうこともできます。このVCFによる音色上の特徴は、ロックやポピュラーの世界ではいくつもの「定番」的なサウンドとして受け継がれています。ディジタル方式でなかなか実現できない場合には、アナログシンセサイザの音色をそのままサンプリングして記録した音を混ぜて再生することまで行われているのです。

・ADSRによる複雑なサウンドの生成

そして、VCFで音色に関する時間的変化を受けたサウンドは、電圧制御アンプ（**VCA**）のブロックにきます。ここは、ゲインを電圧で制御するアンプであり、すでに簡易型のエンベロープを紹介したように、最終的なサウンドのエンベロープを形成する機能を持ちます。ここにもEGとともにLFOがあり、この低周波信号による持続的な音量変化は、第2章で紹介した「トレモロ」効果そのものとなります。また、エンベロープジェネレータEGでは、**図4.3**のような、「**ADSR**」と呼ばれる時間的変化特性を発生して、より複雑なサウンドを

図4.3　アナログシンセサイザの代表的なエンベロープ(ADSR)



生成することができます。以下、ADSRのそれぞれを簡単に整理します。**A**(attack)では、鍵盤ONから指数関数的に音量が上昇して、最大レベルに到達するまでの「スピード」を指定します。**D**(decay)では、アタックによって最大レベルに到達すると自動的に指数関数的に減衰する「スピード」を指定します。**S**(sustain)では、ディケイによって減衰しても鍵盤がONである期間に、ここで指定する「レベル」まで漸近して持続するように指定します。**R**(release)では、鍵盤がOFFされたあとで、サステインレベルからゼロまで指数関数的に減衰していく「スピード」を指定します。

このADSRによって、たとえばオルガンのようなエンベロープは

・サステインレベルを最大にする

・リリーススピードで残響的効果を与える

ということで実現できます。また、ギターのような減衰音であれば

・サステインレベルをゼロにする

・ディケイスピードで減衰特性を指定する

というように対応できます。

図4.1のように、アナログシンセサイザではVCO、VCF、VCAのそれぞれのブロックに別々のEGを持つことで、音色と音量とで異なった時間的変化特性を設定すると、非常に多くのサウンドのバリエーションが得られることになりました。単純なオシレータに比べて、その表現能力は飛躍的に拡大し、多くの

音楽家に影響を与えて、この音楽史的な影響は現代にまで続いています。

電子楽器

さて、ミニムーグに代表されるシンセサイザを紹介したところで、今世紀の新しい「楽器」の流れを概観してみることにしましょう。**図4.4**は、シンセサイザよりも前の「電気楽器」から含めて、電子楽器に至る流れを技術的な視点から整理したものです。メーカごとに製品ごとに固有名詞があまりに多くて混乱しがちですが、サウンドエレクトロニクス技術という視点から今世紀の楽器の発展を眺めてみると、その様子はとてもシンプルに整理できてしまいます。

・物理的振動を音源にした電気楽器

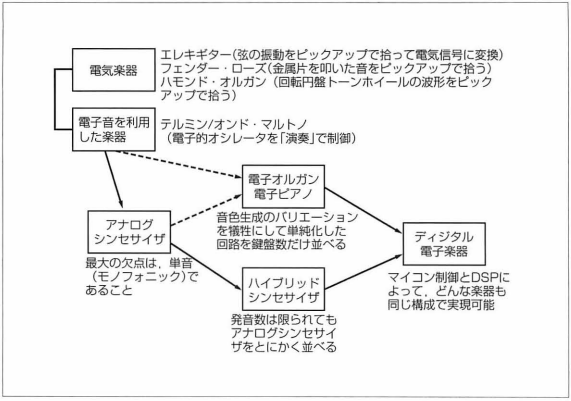


まず、「**電気楽器**」のグループを検討してみましょう。たとえば古典的なエレキギターの場合、弦の振動をピックアップで電磁誘導としてひろって、この電気信号をアンプでサウンドにしています。つまり、物理的な振動をサウンド源としていて、ここにオシレータなどの電子回路がないので、ここでは分類上は電気楽器となります。すでにジャズやポピュラー音楽の分野で標準的なサウンドとして定着した「フェンダー・ローズ」という楽器は、鍵盤ごとにアクションが音叉のような金属片を叩き、これをピックアップで拾っていますから、原理としてはこれも電気楽器です。また、同じくジャズやロックの世界で固有名詞となっている「ハモンド・オルガン」の本来のものは、トーンホイールと呼ばれる、周囲にサイン波形の刻まれた円盤を鍵盤の数だけ並べて等速で回転させ、その周囲に並べたピックアップでサウンドを拾いますので、これも電気楽器となります。

・電子的オシレータを音源にした初期の電子楽器

そして、第2章で紹介した「テルミン」という楽器は、電子的オシレータのビートをサウンド源としていますから、もっとも初期の「**電子楽器**」ということになります。同じような原理のオンド・マルトノという楽器とともに、現代のクラシック音楽の分野で正式に認知されています。この流れの延長にあるのが、上で紹介したアナログシンセサイザということになります。音の三要素に対応したブロックを、それぞれ「制御電圧」という統一されたコントロール体系で支配することで、サウンドの可能性を飛躍的に拡大した電子楽器です。た

図4.4 サウンドエレクトロニクス（電子楽器）の歴史的変遷



だし鍵盤楽器でありながら、単音（モノフォニック）楽器である、という欠点がありました。鍵盤を前にすれば、演奏家はつい和音を弾きたくなりますし、ピアノやオルガン（ただ「オルガン」といった場合には、音楽の世界では一般的に楽器の王様「パイプオルガン」のことをいう）という音楽スタイルは本質的に複音（ポリフォニック）ですから、この課題はかなり重要なものでした。

・電子オルガン／電子ピアノ

そこで、電子楽器の歴史は、技術的にはここで大きく二つの流れに分岐して、それぞれ並行して同時に発展していきました。まず、**図4.4**の上の方向は、「ピアノやオルガンのようにポリフォニックを実現する」という目標を優先した流れです。ここでは、アナログシンセサイザの高度なサウンド生成機能を犠牲にして、民生機器としてのコストに見合うような設計技術が駆使されました。

図4.5はその一例で、「トップオクターブ方式」と呼ばれる電子オルガンの代表的なシステム構成です。オルガンは和音を演奏するので、個々のピッチがアナログシンセサイザのように精度が悪かったり時間的／温度的変化などで変動しては困ります。そこで、マスターオシレータとして水晶振動子を利用した高精度の基準クロック信号をまず発生します。この周波数は厳密に計算されていて、それぞれ異なる整数で「分周」すると、12等分平均律の12音の最高音域

のピッチが生成されるようになっています。この12本の信号は、多数のフリップフロップ（p.22の**図1.14**）を並べた回路に供給され、正確にオクターブ下のピッチを12音それぞれにつぎつぎと生成します。

そして、ここから出力される多数の信号は、音色を形成するために、音色スイッチごとに複数の信号をミックスする回路網に供給されます。たとえば、パイプオルガンで明るい音色を作る場合には、鍵盤としては「C3」（第3オクターブのC音。これをパイプの長さに対応して「8フィート」と呼ぶ）を弾いているときにも、その音の要素としては、オクターブ下の「16フィート」(C2)、完全5度上の「5と3分の1フィート」(G3)、オクターブ上の「4フィート」(C4)、1オクターブと長3度上の「3と5分の1フィート」(E4)、等々の多数の信号もミックスして、その合成信号を鍵盤スイッチで最終ミキシングアンプに供給しているのです。このように複雑な構成では、もはや個別のエンベロープ回路を持つのはコスト的に大変なので、全体としてリバーブをかける程度のエフェクトしかありませんでした。



また、**図4.6**は、同じような時代の「電子ピアノ」のシステム構成例です。電子ピアノでは、エンベロープとして個別に減衰音の特性を持つというのが楽器の性質としては至上命題となりますから、図のように、鍵盤の数だけのエンベロープ発生回路によるエンベロープ変調が必要になります。そのため、音色生成回路では、入力クロック信号にわずかなIC回路で波形を変形させる、といった程度の加工しかできないものでした。ただし、この時代の電子ピアノや電子オルガンは、図からあきらかなように、「全ての鍵盤の数だけの音が同時に出る」という機能を持っています。これは現代の電子楽器では、全てのものが失っている機能です。これは、試しに街の楽器屋さんに行って、両腕で同時に30鍵とか40鍵の鍵盤を押してみたり、ペダルで音を延ばしたままつぎつぎに音を重ねていくとわかります。

・マイコンによるポリフォニックシンセサイザ

やがて、**図4.4**の下のほうの流れも登場してきました。ここは、いわゆる「マイコン」、つまり「マイクロコンピュータ」という、エレクトロニクス技術の進歩の上では一つのエポックといえる主人公の登場を待たなければなりませんでした。マイコン技術によって、アナログシンセサイザを複数（といっても、6音とか8音のポリフォニックが限度）並べた「ポリフォニックシンセサイザ」が登場することになりました。そして、この流れは、電子楽器のディジタル化

図4.5　古典的電子オルガン（トップオクターブ方式）のシステム構成

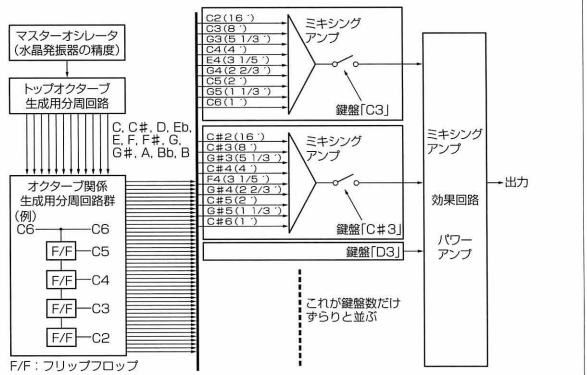
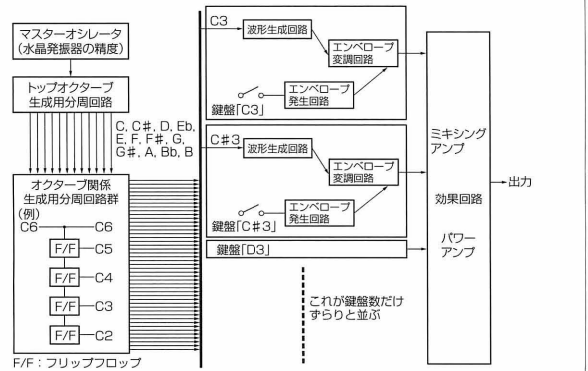


図4.6　古典的電子ピアノ（全鍵発音可能）のシステム構成例



を一気に加速する画期的な発展のスタートラインとなったのです。

図4.7は、このようなポリフォニックシンセサイザの代表的なシステム構成図です。この例では8音ポリフォニックということで、同じ構成のシンセサイザ回路が8個、まるまる含まれています。そして重要なのが、システムの左上にある「マイコンシステム」のブロックです。ここには、中枢となるマイクロプロセッサ（CPU）、CPUのプログラムや固定データを格納した読み出し専用メモリ(ROM)、そして一時的なデータを格納する読み書きメモリ(RAM)、という3種類の構成要素が並んでいます。そして鍵盤はCPUの入力ポートの一つとして接続され、どの鍵盤スイッチが押されているか、という状態検出（スキャン）は、全てCPUのソフトウェア（プログラム）として実行されます。鍵盤スイッチが押された/離された、というイベントはCPUによって処理され、8チャネルのどのシンセサイザにその発音動作をさせるか、という割り当て機構（アサイナーという）も、CPUのソフトウェアに含まれています。



ここで、とても重要な点が登場しました。この例では8チャネルということで、それまでの電子楽器にはなかった「同時発音数」という概念が登場したことです。これは現代の全ての電子楽器にまで継承している、新しい概念です。これは技術的にいえば、「ある楽音生成ブロックは、鍵盤などのイベントが発生するまで、自分が何の音を生成するかわからない」ということになります。すでに紹介した古典的な電子オルガンや電子ピアノでは、そのブロックが鳴らすピッチは鍵盤に対応して決まっていたのですが、このシステムではCPUから、D-Aポートを経由して鳴らすピッチに対応した電圧が与えられるまで、自分はどの鍵盤に対応するのかわからない、という複数のチャネルが並んでいるのです。この点は頭に置いておきましょう。

・ディジタル方式電子楽器

さて、そしていよいよ**図4.4**の電子楽器の歴史は最終段階に至ります。これがディジタル方式の電子楽器というもので、ここに来て、多彩な楽器のバリエーションが技術的にはまったくシンプルに統合されてしまいました。**図4.8**はその一つの例ですが、じつは現在の電子楽器というのは、おおざっぱにいえば、どんなものもこのシステム構成になっている、というかなり本質的なシステム図なのです。

システムの中心が、全体を制御するマイコンシステム（CPU、ROM、RAM）というのは変わりません。そして、楽器のタイプごとに演奏者との接点となる

図4.7　ハイブリッド方式ポリフォニック（複音）シンセサイザのシステム構成例

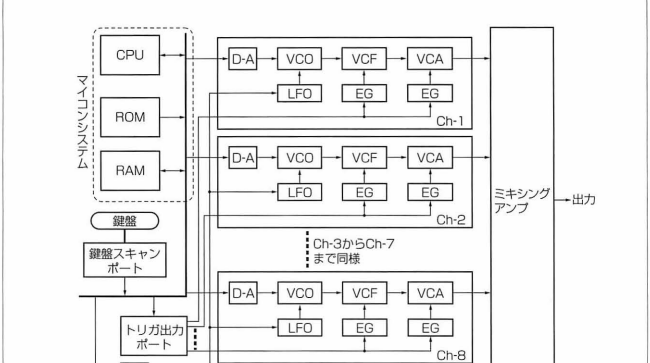
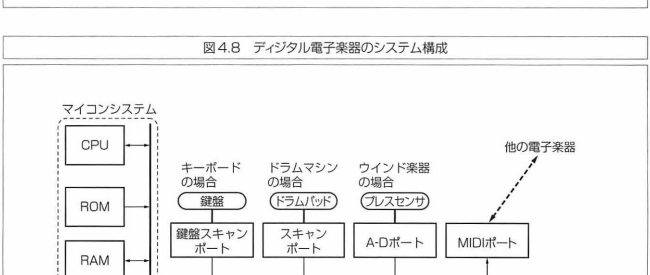


図4.8　ディジタル電子楽器のシステム構成



部分は、全てマイコンシステムにとって、「CPUのポート」ということになります。たとえば鍵盤楽器であれば、鍵盤（単純なON/OFFだけでなく、それぞれの鍵盤を打鍵する速さや離鍵の速さ、さらにそれぞれの鍵盤を押し込む圧

力なども検出可能）に対する操作はCPUの入力ポートから取り込まれた段階で、もうディジタル情報化しています。ドラムキットの電子楽器版では、それぞれの太鼓に相当するドラムパッドへの打撃をセンシングして、CPUのポートから取り込みます。吹奏楽器スタイルの電子楽器であれば、指使いのスイッチ情報と息センサの情報を利用しています。ギターシンセの場合には、それぞれの弦を弾く強さや弦のピッチ、あるいは押さえたフレットの位置をCPUが取り込みます。

結局、楽器としての演奏情報は楽器の外見によって変わるのですが、全てCPUへの情報として取り込まれてしまえば、まったく技術的には同等のものとなります。そして、後述する「MIDI」によるシリアル通信もまた、CPUのポートでやりとりする情報であり、システムとしては区別のないものです。

・音源LSI（DSP）

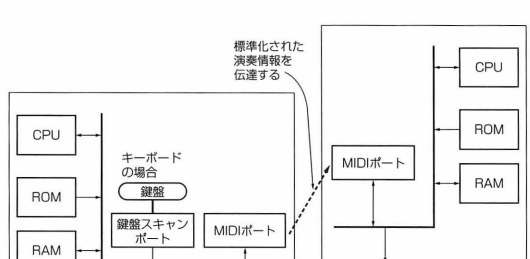


そして、アナログ時代やハイブリッド時代にはいろいろな方式が提案されてきた「楽音合成」の部分は、全て「音源LSI」というカスタムLSI（市販されない、楽器メーカのオリジナル設計のLSI）が担当します。オルガン系でもピアノ系でも、ギターでもサックスでも何の音色でも、システムとして区別はありません。たった1個の音源LSIで、同時発音数も48音とか64音とか、十分な数のサウンドを同時に得ることができます。つまり、最近の電子楽器というのは、外見はいろいろですが、中身を開けると、全て**図4.8**のようなシステムで、極端にはまったく同じプリント基板で使いまわしできてしまうのです。違いは、音色の生成に関するデータの入ったメモリと、あとはCPUのプログラムが少し違うだけです。工業生産的にはとても便利な標準化が徹底して進んでいるのですが、音楽をする者から見ると、これはちょっと夢がなくて淋しいかもしれません。この音源LSI（一般的にいえば、ディジタル信号処理プロセッサ：DSP）については次章で検討しますので、ここではその存在だけを「ブラックボックス」として確認しておくことにしましょう。

MIDI規格

図4.8のように電子楽器のシステムが標準化されてくるとともに、音楽の演奏情報をマイコンで処理できることから、複数の電子楽器を接続して一緒に鳴らす、という要請が出てきました。これが、MIDI（musical instruments digital

図4.9　MIDIキーボードと音源モジュール



(a) MIDIキーボード
(音源がなく自分では音が出ない)

(b) MIDIモジュール
(鍵盤などの演奏入力装置がない)

interface、ミディ）の生まれた元々の要因です。もう一度**図4.8**を眺めてみると、たとえば鍵盤型の電子楽器の場合、鍵盤というマイコンのインターフェースを「演奏」した情報は、CPUによって処理され、音源LSIやMIDIポートに渡されます。また一方で、MIDIポートから入力された「演奏情報」によって、自分の音源LSIを一緒に鳴らすこともできます。ということは、これらの音楽演奏情報が標準化されていれば、合奏や情報交換が実現できるのでは、というのは自然な発想です。

・音楽演奏情報の標準化

図4.9は、その代表的な例を示したものです。左側は「**MIDIキーボード**」と呼ばれる製品で、外見は鍵盤があって電子鍵盤楽器のように見えますが、内部には音源のブロックを持っていませんから、これだけではサウンドはまったく出ない、という変わった楽器です。また右側は「**MIDI音源モジュール**」と呼ばれる製品で、こちらは外見はただの小型の箱というだけで、極端にはスイッチ一つありません。とても楽器には見えないのですが、リアパネルには「MIDI入力コネクタ」と「サウンド出力端子」が揃っていて、音源としてサウンドを生成するブラックボックスとなっています。この両者を図のように接続

すると、MIDIキーボードでの「演奏」情報がディジタル通信としてMIDI音源モジュールに転送され、ここにめでたく素晴らしいサウンドでの「演奏」が実現する、というものです。

さて、それではMIDI規格では何を取り決めているのでしょうか。この規格は世界中の電子楽器メーカやソフトハウス、音楽関連業界の企業などが参加していて、ビデオテープがVHSとベータとHi-8とディジタルビデオで争ったり、DVD-RAMが足並みを揃えずに発進しないのに比べると、世界中で見事に歩調を揃えたケースの実例となっています。**図4.10**は、厳密なものではありませんが、MIDI規格を概念的にまとめたイメージです。異なるメーカの電子楽器同士を接続しても電気的なトラブルで故障を起こさないためのハードウェア的な規格、シリアル通信としてのプロトコル、そしてその上の階層には、情報としてのメッセージ規約などが明確に規定されています。1本のMIDIケーブルで、同時に16種類の異なる楽器（それぞれが128音ポリフォニックとして動作可能）の音楽演奏情報を転送できることになっています。16パートの異なる楽器群（それぞれ刻々と音色を変更していくのは自由）、そのそれぞれに和音演奏を許す、という規約は、よほど巨大なフルオーケストラの交響曲でもないかぎり、カラオケの伴奏などでは十分に機能する規約です。



・一つのMIDIで16種の楽器

そして16種類の各チャネルごとには、**図4.11**のように、さらにメッセージが定義されています。これを見ると、MIDI規格はもともと鍵盤楽器の演奏情報の転送を意識して定義されていた、ということが明白です。そのため、同じチャネルの6本の弦に個別のピッチ変化（チョーキング演奏）をするギターとか、吹奏楽器の息のニュアンスなどについては、表現が困難なものもあります。実際の電子楽器としては、ほとんどの製品で対応されていない、「それぞれの鍵盤を離すときのスピード」とか「それぞれの鍵盤を弾いたあとでさらに押し込む圧力」などというニュアンスまで、1985年頃から明確に定義されていることには驚かされます。

・転送スピードは31.25kbps

MIDI規格は、シリアル通信としては転送速度が**31.25kbps**とそれほど速くなく、最近ではインターネット上をリアルタイムにMIDI情報そのものをパケットに包んで転送できるようになりました。通信回線の遅延はあるものの、地

図4.10　MIDI規格の概要

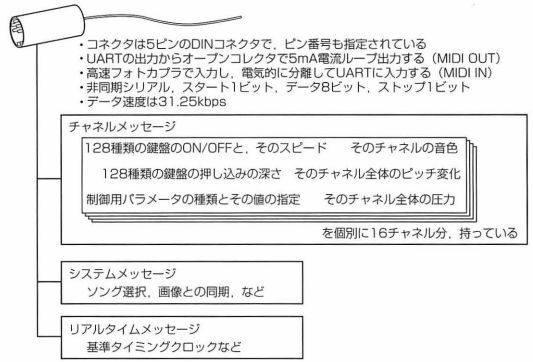
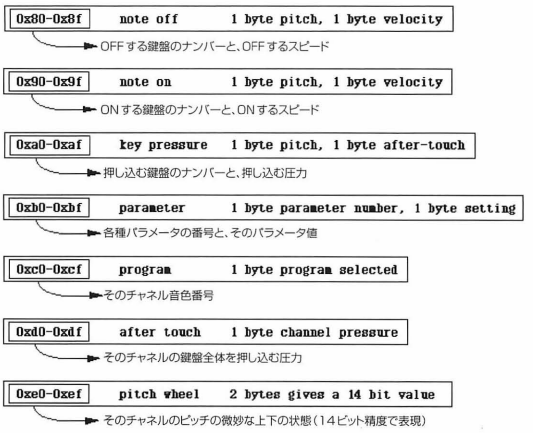


図4.11　MIDIチャネル・メッセージ一覧



球規模でセッション音楽演奏を楽しめる時代になりつつあります。いずれ、より高速な規格も登場してくると思われますが、カセットテープがなくならないように、MIDI規格も「安定した標準規格」として、しばらくは続いていくだろうといわれています。いたずらに高速化しなくても、普通の音楽演奏情報（カラオケのオーケストラ伴奏程度）であれば、MIDIで十分だからです。

GM音源

MIDI規格の登場によって、それまでは電子楽器メーカごとに別々に定義されていた演奏情報と電気的規格が統一されて、どんなメーカの製品をつないでも使える、というユーザにとって歓迎すべき時代が到来しました。ところが、そこですぐに表面化してきた問題がありました。もう一度、**図4.11**を見てみましょう。この中の「program」という情報は、各チャネルごとに設定できる音色の指定、という内容ですが、MIDIではこの番号が7ビット、つまり0から127までの数値である、としか決めていません。そこで、たとえば「音色番号ー1番」と指定しても、ある電子楽器はピアノの音、ある電子楽器はフルートの音、というように別々の音色が設定されてしまいました。これでは、せっかく作った音楽演奏データをどこかに持っていってそこの電子楽器で聴く、ということができません。



・同じサウンドを得るためのGM規格

そこで、MIDI規格のさらに上層に位置する「MIDI音源の標準規格」として登場したのが、**GM**(general MIDI)**規格**です。同様な発想で特定企業が提唱するGSとかXGとかいうものもありますが、世界標準はGMだけです。このGM規格の中心は「音色番号の統一」ですが、その他にも、演奏表現のニュアンスの拡大、色々なパラメータ特性を切り替える機構、複数の音色バンクを切り替えて、メーカ特有の音色も使用できる機能など、いろいろとあります。最近では、1台で複数のパートを鳴らすことのできるたいていの電子楽器が、GM対応となっていますから、この状態に設定しておけば、ほとんど同じようなサウンドを得ることができます。ただしこれは、電子楽器メーカにしてみれば、独自の素晴らしい音色を提供する、というメーカとしてのアイデンティティを奪われることにもなり、苦しいところでもあるようです。

図4.12は、このGM規格による「音色番号とその音色名」の表です。MIDI

図4.12　GM規格による音色番号と対応する音色名のリスト

1.Accou grand piano	33.Acoustic bass	65.Soprano sax	97.FX rain
2.Bright piano	34.Fingered bass	66.Alto sax	98.FX soundtrack
3.Electric grand piano	35.Picked bass	67.Tenor sax	99.FX crystal
4.Honky-tonk piano	36.Fretless bass	68.Baritone sax	100.FX atompsphere
5.Elec piano 1	37.Slap bass 1	69.Oboe	101.FX brightness
6.Elec piano 2	38.Slap bass 2	70.English horn	102.FX goblins
7.Harpsichord	39.Synth bass 1	71.Bassoon	103.FX echo drops
8.Clavi	40.Synth bass 2	72.Clarinet	104.FX star theme
9.Celesta	41.Violin	73.Piccolo	105.Sitar
10.Glockenspiel	42.Viola	74.Flute	106.Banjo
11.Music box	43.Cello	75.Recorder	107.Shamisen
12.Vibraphone	44.Contrabass	76.Pan flute	108.Koto
13.Marimba	45.Tremolo strings	77.Blow bottle	109.Kalimba
14.Xylophone	46.Pizzicato strings	78.Shakuhachi	110.Bagpipe
15.Tubular bells	47.Orchestral harp	79.Whistle	111.Fiddle
16.Dulcimer	48.Timpani	80.Ocarina	112.Shanai
17.Drawbar organ	49.String ensemble 1	81.Square wave	113.Tinkle bell
18.Percussive organ	50.String ensemble 2	82.Sawtooth wave	114.Agogo
19.Rock organ	51.Synth strings 1	83.Caliope	115.Steel drums
20.Church organ	52.Synth strings 2	84.Chiff	116.Woodblock
21.Reed organ	53.Choir ahh	85.Charang	117.Taiko drum
22.Accordian	54.Choir oohh	86.Voice	118.Melodic tom
23.Harmonica	55.Synth voice	87.Fifth's	119.Synth drum
24.Tango accordian	56.Orchestral hit	88.Bass&lead	120.Reverse cymbal
25.Nylon string guitar	57.Trumpet	89.New age	121.Guit fret noise
26.Steel string guitar	58.Trombone	90.Warm	122.Breath noise
27.Jazz guitar	59.Tuba	91.Polysynth	123.Seashore
28.Clean elec guitar	60.Muted trumpet	92.Choir	124.Bird tweet
29.Muted elec guitar	61.French horn	93.Bowed	125.Telephone ring
30.Overdrive guitar	62.Brass section	94.Metallic	126.Helicopter
31.Distortion guitar	63.Synth brass 1	95.Halo	127.Applause
32.Guitar harmonics	64.Synth brass 2	96.Sweep	128.Gunshot

データとしては、番号は7ビット表現で0～127という数値を使うのですが、伝統的にMIDIの音色番号（プログラムチェンジ）では、1～128という言い方をしているので、取り扱っているデータに1を足して「音色番号」とする、という業界内部の常識に注意しましょう。

さて、MIDI規格、そしてGM規格と標準化が進むと、電子楽器といっても「標準音源」という部分（鍵盤とか弦などの楽器屋的なノウハウは不要）では、

どのメーカも市場に参入することが容易になってきます。そして、パソコンとMIDI音源との関係も大きく変化してきました。**図4.13**はこの様子を示したものです。(a)はもっとも初期、パソコンからのMIDI演奏情報は、パソコンの拡張スロットに入れた「MIDIインターフェース」という増設カードによってMIDIとなり、ここにつぎつぎとMIDI電子楽器をイモヅル式につないで「合奏」しました。

・GM規格と標準音源モジュール

これが、GM規格とともに標準化された音源モジュール（内部に多数のパートの音源機能を持っているもの）によって、(b)のようにすっきりとシステム化されるようになりました。見た目は(a)よりもだいぶシンプルになってしまっているので、これではサウンドも貧弱ではないか、と思うのは素人の発想です。メーカの技術力の進展もあって、じつは(a)のスタイルよりも(b)のスタイルのほうが、

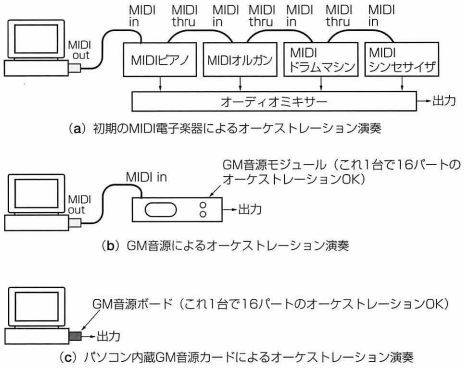


・システム全体のコストが大幅に安い
・各楽器のセッティングをいちいちしなくてもよい
・アンサンブルのサウンド品質も、より向上している

というような、欠点のない改良をもたらしてしまいました。唯一、(a)のスタイルの最大のメリットは「鍵盤」「コントローラ」などの、人間の生演奏のインターフェースを持っていることだけです。ところが、次章で紹介するように、パソコンに向かって音楽する（作曲、アレンジ、カラオケ等）というスタイルの人にとって、特定の楽器の演奏技術を修得する必要がないので、まったく(b)のスタイルでいい、ということになったのです。

そして、サウンドエレクトロニクスの進展は、楽器メーカの提供するGM音源モジュールを活用した(b)のスタイルで留まることはありませんでした。パソコンの世界では標準となっている「サウンドブラスタ」のような音源ボードが、(c)のように、パソコンのMIDIインターフェースカードの代わりに用いられるようになりました。このシステムの内部といえば、**図4.8**とまったく同等の構成となっています。ボードとかICカードのようにコンパクトですが、中身は完全に一つの電子楽器なのです。ここまでくると、システムの内部では音楽演奏情報としてMIDIを使っているものの、どこにもMIDIケーブルが見当たらない、一見するとMIDIがブラックボックスの中に入りかけていることがわかります。規格として標準化の中心で活躍してきたMIDIは、ここにきて空

図4.13　進化するパソコンとMIDI音源の関係



気のような存在（見えないけれど必要な存在）になってきたのです。

SMFとカラオケ

リアルタイムに音楽演奏情報を伝えるMIDI規格からは、MIDI音源として標準的な演奏を再現するための音色配置などを規定したGM規格とともに、自動演奏のための**SMF**(スタンダードMIDIファイル)という規格も生まれました。これは、前章の**図3.1**（p.59）でいえば、「作曲」と「音楽聴取」とを時間的空間的に分離して、音楽をいつでもどこでも「再生」するために必須のものです。

SMF規格そのものは、**図4.14**のようにいろいろな規約の集大成として定義されていて、最大公約数的なMIDIによる音楽自動演奏データを標準化するためのプラットフォームになっています。初期はフロッピーやCD-ROMに入った「音楽データ集」として出ていたのですが、その後、パソコン通信やインターネット上でのデータ公開、あるいは通信カラオケも現在では全てこのSMFデータをダウンロードしてGM音源を使って自動演奏する、というビジネス分野での標準化が浸透しています。

図4.14　スタンダードMIDIファイル(SMF)の規約の一部

ヘッダーチャンクの書式　〈chunk type〉〈length〉〈format〉〈ntrks〉〈devision〉

トラックデータの書式
〈track data〉 = 〈MTrk event〉 +
〈MTrk event〉 = 〈delta-time〉〈event〉
〈event〉 = 〈MIDI event〉 | 〈system event〉 | 〈meta- event〉

[Chunk] チャンク
SMFのファイル機能を定義するために、シーケンスを構成する要素として「チャンク」という概念を用いる。シーケンスファイルは、ヘッダのチャンクと、複数のトラックに応じたデータを持つトラックチャンクから標準化された構造で構成される。この「MThd」とか「MTrk」という4バイトのキャラクタデータは、予約されたSMF独自の規定で、これに続くデータ長は32ビットと決められている。このデータ長により、それぞれのチャンクのデータは必要に応じた可変長データとなる。

[Track] トラック
楽曲というのは単一のパートから構成されていることはほとんどなく、メロディと伴奏、あるいはピアノとベースとドラム、あるいはオーケストラのように、複数のパートが同時に演奏される。そこでの各パートのかたまりを、トラックという概念で複数にわたって処理する。

[Squence] シーケンス
時間的情報とともに一連のMIDI情報を並べたデータのことで、このデータにしたがって自動再生すると元の音楽演奏が再現される。たとえば、楽譜で「一つの音符」と記述されている音楽演奏情報は「ノートオン、一定の時間、ノートオフ」という三つの情報のシーケンスと等価である。

[デルタタイム]
MIDI規約では、「それぞれのMIDIイベントの間の相対時間」あるいは「起点から各MIDIイベントまでの絶対時間」という、MIDIイベントの集合から実際の楽曲を構成するための「時間」の概念がない。そこでSMFでは、「次のMIDIイベントまでの相対時間」を定義するために、デルタタイムという概念を使用する。これは、システムに固有のベースで刻まれるクロック数でいくつ、というカウント値として使用する。時間データは、「同時」を表す最小クロックから「数分」以上にまで幅広いダイナミックレンジを持っているために、あるビット幅のデータとして定義すると、小さい時間に対して無駄があまりにも大きいために、可変長形式の定義を用いる。これがデルタタイムである。



シンセサイザに代表される電子楽器は、もともと「それまでの楽器にないサウンド」を作るものとして音楽家を魅了してきました。ところが多数の電子楽器をいくつも接続して音楽演奏するために考案されたMIDI規格が普及してみると、今度は楽器としてのサウンドの個性でなく、どの電子楽器でも「同じサウンドが鳴る」という安心感に比重が移ってきました。そしてGM音源やSMF規格がほとんど全てを支配する現在では、「クセのあるサウンド」というのは、ビジネス的にはまったく支持されなくなり、一部の本当のクリエイティブな音楽愛好家だけの狭い世界を形成してきました。

もともと楽器というのは、工業的に大量生産したり、標準化していつでもどれでも同じ音が出る、というような性格のものではないのですから、これは当然のことなのかもしれません。エレクトロニクス技術とともに発展した電子楽器は、GM音源でついに爛熟の終焉を迎えて、コンピュータによる新しい世代へと移っていくことになりました。この様子を、次章で検討していくことにしましょう。

コラム④

カウンタを作ろう

ここでは、ディジタル回路のもっとも簡単な実例として、カウンタ回路によって**方形波の音源**を作ってみることにしましょう。市販のキットとしては手頃なものが見当たらなかったので、個別部品を入手して製作することになりますが、基本的な部品ばかりですので、実験としてはとても簡単です。また、製作例としては、一般にはユニバーサル基板にハンダ付けをしていくのですが、ここではもっとも簡単な、実験ボードによる試作回路として製作してみました。実験のための環境の例として参考にしてみてください。

さて、まずは回路図です。今回使用するICは、いずれもTTLと呼ばれる「ロジックIC」ですが、新しく入手する方は「ハイスピードCMOS」という、「74HCシリーズ」のものにしましょう。使うのは、

・74HC04
・74HC08
・74HC393　2個

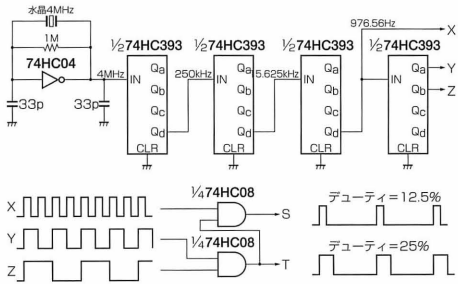
の3種類です。ICの内部等価回路とピン配置については、第1章の**図1.11**（p.21）、**図1.12**（p.21）、**図1.15**（p.23）にあります。また、**図1.16**（p.23）、のあたりの解説も、あらためて参考にしてください。**図4.15**が、ここで製作するカウンタ音源回路の回路図です。

この実験回路の動作としては、まず74HC04と水晶振動子によるオシレータ回路によって、高精度な基準クロックの4MHzを作ります。そして、1パッケージに2個の「4ビットカウンタ」の入った74HC393を使って、1ブロックあたり16分周、ということでつぎつぎとクロックを分周して、可聴帯域にまで落としていきます。なお、電子楽器のように音階をつける場合には、ここの部分を工夫していきますが、本書では省略します。

そして3個のカウンタによって、16×16×16=4096分周すると、約977Hzとなるので、これをサウンド信号Xとします。さらにXを分周した信号Y、もう1段分周した信号Zも作ります。このX、Y、Zの関係は、図のようになっています。この3種類も、デューティ比（High側とLow側との時間の比）が50%のサ

コ ラ ム ④

図4.15　カウンタによる方形波音源実験回路





ウンドとして音源に利用できます。デューティ50%の場合の方形波をとくに「矩形波」と呼んでいます。

矩形波はアナログ時代には、オーボエなどの音色に似ているのでそのまま使われましたが、ちょっと音源としては倍音が不足していて淋しいので、ここでアンドゲート74HC08を使って、矩形波だけから新しい音色の波形を作ってみましょう。図のように、2入力アンドゲートに、Zとともに X、またはYを入れているだけです。アンドゲートとは、「ともにHigh入力の期間だけ出力がHighになる」という動作をしますから、図のS、Tの波形は容易に想像がつくでしょう。信号Sではデューティ12.5%、信号Tではデューティ25%の波形が得られます。S、Tいずれも、信号の周期としてはもっとも長いものが「基音」（ファンダメンタル）になりますので、ここでは、信号Zと信号Sと信号Tの三つが、「同じピッチで音色（波形）が異なる音」というグループになります。電子オルガンでは、まさにこの3種類を音色タブレットで切り替えていた時代があります。

図4.16は、実験用ブレッドボードにこの回路を組んでみたところです。現実的な回路としては、このように無駄に長い配線というのは安定動作の妨げとなりますから、あくまで実験的に仮組みするための道具ですが、簡単なテスト

図4.16　カウンタを実験用ブレッドボードで組む

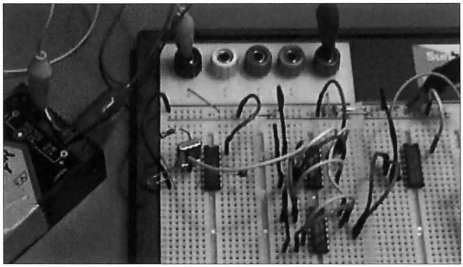


図4.17　図4.15のZ地点での波形

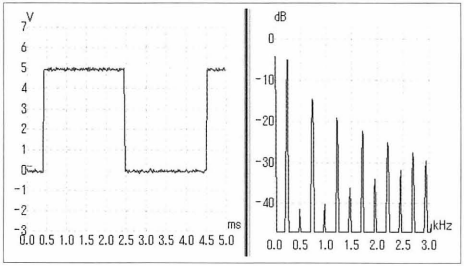
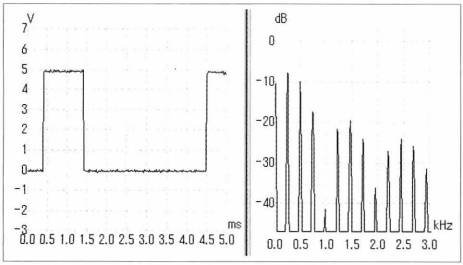


図4.18　図4.15のT地点での波形



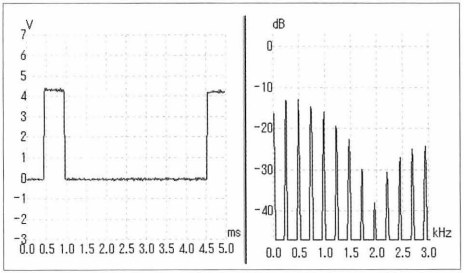
には重宝します。

そして、**図4.15**の実験回路の信号波形を実際に測定したデータを紹介しておきましょう。**図4.17**は、**図4.15**のZ地点の波形の様子で、ここではデューティ50%の矩形波になっています。画面右側のスペクトルグラフを見ると、1倍、3倍、5倍、7倍、9倍などの「奇数次倍音」だけが強く出ているのがわかりますが、これが矩形波の音色がオーボエに似ている、という一般的解釈と一致しています。

図4.18は**図4.15**のT地点の信号波形の様子で、デューティが25%になっています。スペクトルを見ると、だいぶ矩形波とは様子が変わってきます。これは実際に実験して耳でたしかめてみましょう。

コ ラ ム ④

図4.19　図4.15のS地点での波形





そして**図4.19**は**図4.15**のS地点の信号です。デューティは1/8の12.5%、そしてスペクトルとしては、整数次倍音がそろって出てきているのがわかります。この調子で同じ周波数でデューティを小さく、パルス幅を限りなく細くしていくと、いわゆる「インパルス」となって、この場合には全ての倍音成分を等しく含むノイズ、ということになります。ディジタルの波形は、サウンドの理論を簡単に検証できるのが楽しいところです。

第5章

コンピュータミュージック

◎

ディジタル信号処理とDSP
ソフトシンセサイザ
シーケンサとDTM
いろいろなコンピュータミュージック

◎

<コラム>フィルタを作ろう

ディジタル信号処理とDSP

前章では、シンセサイザから始まった電子楽器の歴史が、サウンドエレクトロニクス技術、そしてコンピュータ技術の進展によって標準化され発展してきた様子を追いかけてみました。そして最終段階では、GM音源モジュールにしてもパソコン内蔵GM音源カードにしても、サウンドを作り出す心臓部として、DSP(ディジタル信号処理プロセッサ)という専用LSIが全てを引き受けていることにもふれました。

そこで本章では、あまり専門的なところに深入りせずに、このDSPの動作と中身を追いかけて、イメージだけでも理解してみることを目標にします。音源LSIというのはメーカのノウハウの塊ですから、たとえばこれを設計できるように理解するというのはかなり難しいですが、アナログシンセサイザの各ブロックの動作、あるいは「音の三要素」のディジタル的な実現、という視点でみると、それほど謎めいたことをしているわけではありません。ただ、LSIチップ上に数十万個のトランジスタがぎっしりと集積されているだけなのです。そして、このDSPに追いつきつつある新しい技術が早くも登場してきています。この技術についてもふれましょう。

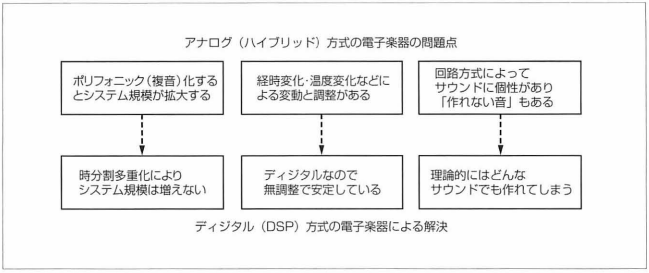


それでは前章を受けて、ディジタル信号処理技術を活用したディジタル方式の電子楽器の特徴を検討しておきましょう。**図5.1**はそのもっとも代表的なポイントをまとめたものです。なお、この図ではアナログ方式は欠点ばかりで、ディジタル方式は全てにおいて優れている、というように読めてしまいますが、決してそうではありません。この点は後でふれたいと思います。

・アナログ音源方式の限界

まず、電子楽器として「**ポリフォニック化**」(複音化)と「**マルチティンバー**」(複数の音色チャネルを持って同時にオーケストレーションできる機能)を求められるようになると、アナログ方式、あるいはアナログ音源を多数並べてマイコン制御、というハイブリッド方式では、すぐに限界に突き当たりました。極端にいえば、1音の楽器を10音ポリにすると10倍の部品が必要になるのですから、当然のことです。ところがディジタル方式の場合、後で紹介する「**時分割多重化**」というテクニックを駆使することで、同じシステムで10音で

図5.1 アナログ方式の問題点とディジタル方式による解決



も30音でも同時に作れる、というようなシテスムを実現できるようになりました。最初の1音を作るためにも巨大なLSIを必要とするのですが、そのLSIをたった1個使うだけで32音とか48音が出れば、トータルとしてはコストパフォーマンスで圧勝するのです。

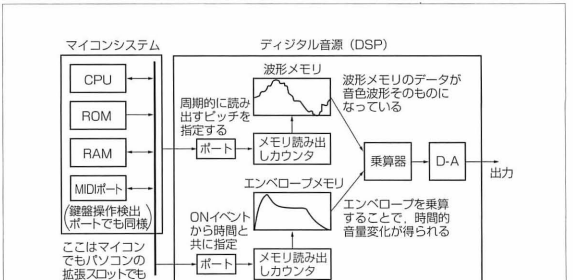
つぎに、アナログ方式では温度変化やアナログ部品の経年変化によって変動があるので、調整が必要な部分が出てきます。人間の聴覚はピッチの部分はかなり敏感なので、チューニングの部分をアコースティックピアノと同じように定期的に「調律」していた時代には、それ以上の普及が困難だったのです。ところが、水晶発振方式のディジタルであれば、クォーツ精度のピッチが無調整で保証されていますから、この改良は劇的なものとなりました。

そして、アナログ方式の時代にはそれぞれの回路方式ごとの「クセ」のある音色を「楽器の個性」として求めていたのですが、GMのような標準化の時代になると、これも足かせとなりました。ディジタル方式の場合には、極端にはどんなサウンドでも、サンプリングしたデータをメモリから読み出して鳴らせますので、これもディジタル方式のメリットとなります。実際にプロの現場では、ビンテージものとなった昔のアナログシンセサイザの音（単音）を一つ一つサンプリングしたデータを用意して、これをMIDIで鳴らす「**サンプラー**」という電子楽器で活用する、というのが常識となっています。

・DSPシステムのしくみ

さて、それでは実際のDSP（音源LSI）とは、どのようなものなのでしょうか。これは、各楽器メーカのノウハウの塊の世界ですから、特定のシステムに

図5.2　もっとも簡単なディジタル音源(DSP)





ついて述べるというわけにはいきませんが、一つの例として紹介してみることにしましょう。ここでは、「音の三要素」をそのまま実現するDSPを設計する立場になって、馬鹿正直にシステムを構成してみます。実際のプロの現場はこんな単純なものではありませんが、理工系の大学院生あたりの研究課題としては、FPGA（自分の手元で簡単なLSIを作れる半導体デバイス）を活用して、オリジナルの「音源LSI」を作ってみる、という面白いテーマになるかもしれません。

図5.2は、もっとも初歩的なディジタル音源(DSP)のシステム例です。左側にあるCPU以下のマイコンシステムというのは、音源にとってはコントローラであって、電子楽器のマイコンシステムでも、パソコンの拡張スロットから見たパソコンそのものでも、まったく同等です。MIDIから音を鳴らす情報が来るのか、鍵盤を見ていて演奏イベントによって制御されるのかどうかも、音源にとっては関係のないことです。この制御システムから音源に与えられるのは、ここではたった2種類のポートに書き込まれる情報だけです。

まず、音の三要素のうちの一つ、メロディーや和音の元になる「ピッチ」については、ピッチ指定ポートへの数値情報として与えられます。これは、「メモリ読み出しカウンタ」へのパラメータとなり、このデータに応じたカウンタ動作が行われる、というものです。そして、このカウンタがピッチに応じたスピードで周期的に読み出すのが「**波形メモリ**」です。ここには、音の三要素のうちの「音色」に対応して、出したいサウンドの波形をメモリしています。こ

れをピッチに応じたカウンタ出力で周期的に読み出すことで、連続的なサウンドが得られます。ある楽器をサンプリングした波形を用意すれば、システムの能力に応じて（量子化ビット数とサンプリング周期）、その楽器そのもののようなサウンドが得られます。

そしてもう一方のポートでは、サウンドのONイベントによって、音の三要素のうちの「音量」の時間的変化である**エンベロープ**を生成します。この例では、エンベロープ特性もメモリに記憶しておいて、時間とともにこのメモリを読み出すカウンタを進めています。その結果、時間とともに変化する音量データが得られます。

そして、波形メモリとエンベロープメモリからの出力は、後段の乗算器によって乗算されて、「ピッチのついたある音色波形信号が時間的に音量変化」する、というサウンドが得られます。あとはこれをD-A変換のICに与えれば、晴れてアナログ電圧として、このサウンドが生成される、ということになります。技術的にはいくつかの重要なポイントをあえて省略した荒いシステムですが、原理的にはこれでディジタル音源を構成できてしまいます。ただし、このシステムでは、回路規模が大きいのにたった1音しか発生することができません。そこで、「時分割多重化」のテクニックが必要になってきます。

・時分割多重化とパイプライン処理

さて、**図5.2**のディジタル音源をポリフォニック化したのが**図5.3**のシステムです。一見するとかなり複雑になったように見えますが、このシステムの中で回路規模がとても大きいブロックとは、じつは

・メモリ読み出しカウンタのブロック
・乗算器のブロック
・累算器のブロック

です。ポートとかメモリの部分は、複数になってもそれほどシステムを肥大させないので、この違いはあまり気にしなくていいのです。すると、わずかのシステム追加ということになりますが、これだけで複数のチャネルで、異なった音色、異なったピッチ、時間的に変化する音量（エンベロープ）のサウンドを「同時に」生成できてしまうのです。このように、機能ブロックを時間的に分割した処理時間（**タイムスロット**という）ごとに、別々のデータを流して共用する技術を「時分割多重化」といいます。

この**図5.3**のシステムの動きを**図5.4**によってもう少しだけ追いかけてみまし

ょう。この動作こそ「パイプライン処理」の本質そのものです。パイプラインというのは、時分割多重化した機能ブロックがつぎつぎに縦につながっていて、タイムスロットごとにそれぞれ別個のデータが次段に流れていき処理をうける(時分割多重処理を受ける)、というものです。つまり、機能ブロックは1セットしかないのに、同時に複数の(多重化された)別個のデータを処理していける、というのがパイプライン処理の特徴です。図5.3のシステムでは省略されていますが、じつは各ブロックの出力部分には、システムのタイミングでその出力を保持しておく「ラッチ」(ディジタル情報の一時的メモリと考えていい)があります。そして、システムのタイミングごとに、各ブロックの出力はつぎのタイミングまで保持されて、次段の入力情報として利用されるようになっています。

最上段は、各発音チャネルごとに切り替えられたピッチに対応したデータによって、波形メモリから読み出された波形データの情報ラインです。そのつぎの段は、各発音チャネルごとに切り替えられた時間的変化に対応して、エンベロープメモリから読み出されたエンベロープ(音量)データの情報ラインです。これらは同じタイミングでアクセスされると、メモリによって結果が出てくる時間(遅延時間)が異なりますが、タイムスロットとして規定された処理時間の最後には確実に確定して、これがラッチされて後段に行きます。この両者の結果を乗算するのは、3段目の乗算器の部分ですが、タイムスロットとしては、一つ後ろにずれてきます。そして乗算器の遅延を吸収して、最後にラッチされた乗算結果(この発音チャネルのこの瞬間のサウンドデータ)は、最下段の累算機のつぎのタイムスロットに入力されます。



このように処理していると、全体としてあるチャネルに注目すると、最初の情報を与えてからずいぶん手間がかかると思うでしょうが、問題はそれぞれの情報の別のタイミングの部分です。たとえば乗算器は、あるタイムスロットで1チャネルの演算をすると、つぎのタイムスロットでは2チャネルの演算処理をしていて、遊んでいるヒマがありません。図をよく眺めると、全ての情報がびっしりと埋まっていて、多数のチャネルの情報処理をしているのですが、メモリも乗算器も累算器も、たった一つしかありません。これが「パイプライン処理」の真髄なのです。

各チャネルの出力をそのままD-A変換してサウンドにするためには、非常に高速なD-Aコンバータが必要になってしまいますが、このシステムのように累算器を設けて、全発音チャネルを1周する間を累算してまとめてD-A出力して

図5.3　時分割多重化によるポリフォニック・ディジタル音源(DSP)

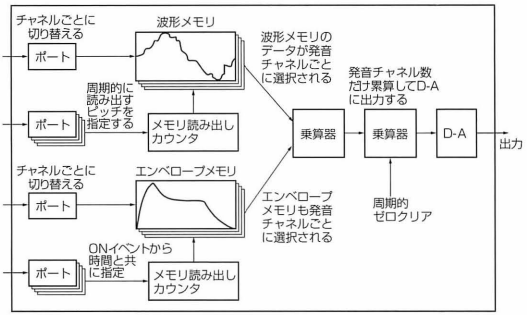
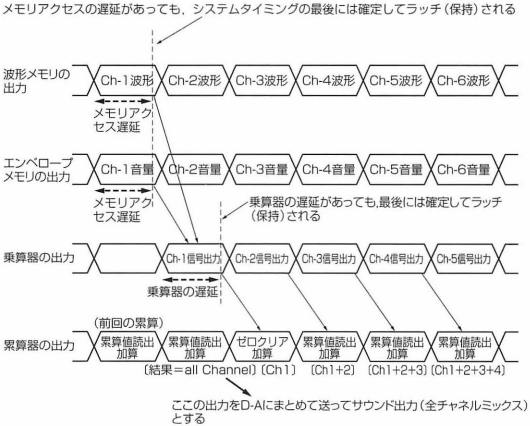


図5.4　時分割多重化によるパイプライン処理の様子



やれば、ローコストな普通のD-Aコンバータで良好なサウンドを得ることができます。このように、DSPは、サウンドを合成するのに必要な演算ブロックとともに、パイプライン処理によって極限まで効率を上げた緻密なシステムなのです。専業メーカの技術力を駆使した高度なテクノロジーの結晶ですが、うまく活用すると、他の手法では絶対に得られない性能を引き出すことができる、サウンドエレクトロニクスの世界における最終兵器のような存在というわけです。

ソフトシンセサイザ

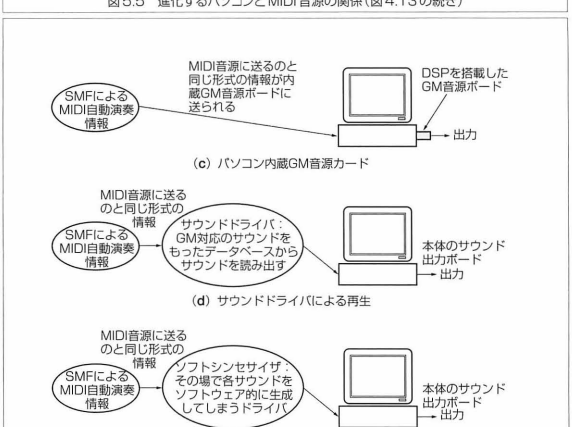
さて、半導体テクノロジーの進化によって、メーカのノウハウが詰め込まれた専用LSIが作られるようになりました。そのLSIも高速化・微細化によって大規模なDSPまで実現できるようになり、電子楽器の進化はDSP搭載タイプのシステムで極限まで発展した、と思われてきました。ところが最近になって、この情勢はさらに変化してきています。つまり、パソコンの中枢のCPUの急激な性能向上により、それまでソフトでは不可能（だからコストをかけてもDSPチップを作っていた）といわれてきたサウンドの生成そのものまでが、これまでは自動演奏のホストであったパソコン自体で、何のハードウェアも必要とせずに実現できるようになってきたのです。



・GM音源→サウンドドライバ→ソフトシンセサイザ

図5.5は、前章の**図4.13**（p.113）の続きです。(c)のGM音源（DSPによるもの）を搭載したボードやカードをパソコンに入れる、という最新のスタイルですが、ここではこれがスタートラインとなります。そして(d)では、GM音源ボードがまず不要となります。これは、パソコンの内蔵サウンドポートに、GM対応のMIDI形式の情報をそのまま音源として「再生」するという機能で、自動演奏の場合には、実際に音が出るよりもかなり前に**SMF**（Standard MIDI File）データを読み取ることで、GM対応のサウンド情報のデータベースから、演奏によって合成されるサウンドをあらかじめ読み出して加算しておく、というものです。自動演奏ソフトから見れば、外部にMIDI音源を持っているものとの違いを感じない（ただしMIDI鍵盤を弾く人にとっては、処理による遅れが耐えられない）ものです。また(e)では、たんなる再生だけでなく、実際にパソコンのソフトウェアとして、刻々と変化するサウンドそのものを、まさに

図5.5　進化するパソコンとMIDI音源の関係（図4.13の続き）



DSPチップ内のサウンド情報処理と同じように「シンセサイズ」してしまう（再生でなく合成）という究極のスタイルです。これが時代のトレンドであり、世界中からいろいろなソフトシンセサイザが発表されてきています。

もちろん、コストをかけた専用ハードのDSPと比べれば、いくら現在の最速パソコンを使ったとしても、ソフトシンセサイザの能力は、大人と子供のような差があります。しかし、サウンド関連のDSP技術はほぼ飽和領域に近づいているのに対して、パソコンの処理能力はまだまだ向上していますし、ソフトウェア技術も発展を続けています。したがって、中期的（長期的などという視点は、このエレクトロニクスの世界にはない）にいえば、サウンドエレクトロニクスは、ソフトウェア領域に確実にシフトしていくでしょう。

もちろん、人間との接点である鍵盤などのメカニカルな部分、あるいは実際に空気を振動させるパワーアンプとスピーカー周辺、そして複数の要素を自在に組み合わせてシステムを構築する部分では、ハードウェアがなくなることはありません。それになによりソフトを作ろうにも走らせようにも、その土台となっているパソコンはハードウェア技術の産物なのですから。

・ソフトウェアシンセサイザとインターネット

一つだけ、ソフトウェアシンセサイザの例を紹介してみましょう。**図5.6**は「VocalWriter」というシェアウェアで、筆者がインターネットでダウンロードしたソフトの画面例です。一見すると、つぎに紹介する「シーケンサ」の一種ではないか、と思われるかもしれませんが、これは優れたソフトシンセサイザなのです。画面の中では「Vocals」と「Karaoke」というトラックがポイントで、たんなるGM音源だけでなく、このソフトは複数パートのボーカルが歌詞をつけて「歌う」ところまで、リアルタイムに合成しています。この他にも、非常に多くのソフトシンセサイザが発表され、インターネットによって瞬時に世界中に提供されています。シェアウェアの考え方も定着して、世界を相手に多数のユーザがいることで、従来に比べてソフトウェアの単価もとても安価になってきました。ソフトウェア開発者とユーザとの世界的な「いい関係」が生まれてきたと思います。



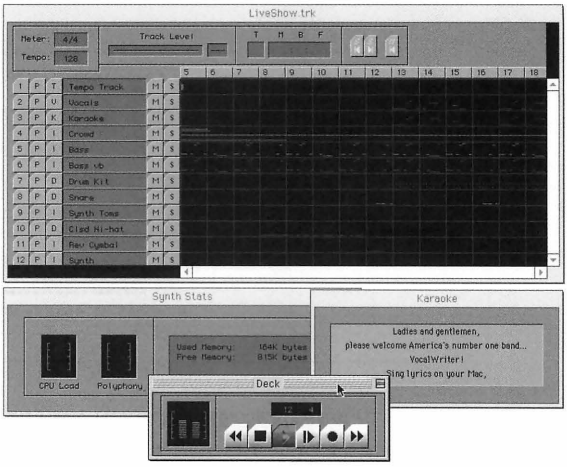
シーケンサとDTM

さて、ここまで筆者があえてふれなかった話題があります。前章でGMとSMFを紹介したところで、すでに「自動演奏」が何度も登場していますが、この機能を担当するのが「シーケンサ」と呼ばれるシステムです。本書ではMIDI以前の歴史的シーケンサは省略して、MIDIシーケンサの世代から紹介していきましょう。

・MIDIシーケンサ

前章の**図4.11**（p.109）にあったように、MIDIの音楽演奏情報というのは、「いま鍵盤をONにした」「いまペダルを踏んだ」「いま音色を切り替えた」「いまピッチの変動値が40になった」「いま鍵盤をOFFにした」というような、音楽演奏の瞬間瞬間に起きる「イベント」でしかありません。逆にいえば、「バイオリン奏者が力を込めて弓を弾き続けている最中」「トランペットに精一杯、息を吹き込み続けている最中」とかの、「持続している」緊張状態を伝えることは不可能です。そして、時間の経過とともに、刻々とMIDIイベントを記録して、そのデータを編集して、あとでMIDIメッセージとして再生する、という機構があれば、表現可能な範囲でMIDIデータの音楽演奏を取り扱えること

図5.6　VocalWriterの画面

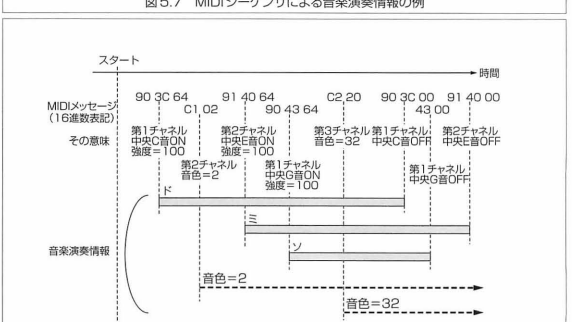


になります。

元々のシーケンサとは、マイコン搭載の単独の機器として、多数のMIDI機器を組み合わせて自動演奏（多くは楽器の演奏の伴奏パート）を実現する一種の電子楽器でした。しかし、パソコンが一般化するとともに、その画面の持つ表現能力を生かした多くのシーケンスソフト（今ではこれをシーケンサという）の登場によって、単体のシーケンサはほとんど消滅しました。**図5.7**は、全てのMIDIシーケンサに共通する、その動作の概要図です。ここでは、時間軸に沿って、いちばん上に16進数表記で書いたような情報が刻々と流れていきます。逆にいえば、MIDIには厳密な意味での「同時」というのは、ありません。いっせいに多くのパートが同時にアタックの効いた演奏をする、という「表現」は、理論的には不可能です。

また、「一つの音」にはONとOFFがありますが、MIDIではそれぞれはまったく別のイベントとして表現されています。そこで、たとえばある音のONを送って、MIDI音源から音が鳴り出したところでMIDIケーブルを抜いて、OFFを伝えないようにすると、その音は消えることなく鳴り続けることになっています（このようなトラブルに備えた安全機構も定義されている）。そして、

図5.7　MIDIシーケンサによる音楽演奏情報の例





MIDIチャネルごとの音色の変更の情報は、音源に対しては「ここからはこの音色番号」と指定しますから、新しい情報が来るまではその音色が保持されます。

図5.8は、このような一般的なシーケンスソフトの一つの画面例で、上半分にはMIDI情報にかなり近いイベントリストの形で、音楽演奏情報を編集できるようになっています。また画面の下半分はテープデッキとミキサーのイメージのコントロール部分で、各チャネルの音量バランスやテンポの調整、そして自動演奏のスタートとストップを制御できます。**図5.9**は、同じシーケンスソフトの「楽譜表示モード」のスクリーン例で、古典的な楽譜のスタイルに近い表現ができるようになっています。ただしこのソフトの場合には、小節内の音符を「タイ」記号でつなぐと、その両方の音符の長さに相当する新しい音符に表示が強制的に書き換わってしまうために、音楽的な情報入力手段としてはまったく使えません。このあたりは、「ただ楽譜を見たまま入力して楽しむ」というレベルのユーザを対象としているので、仕方ないのかもしれません。

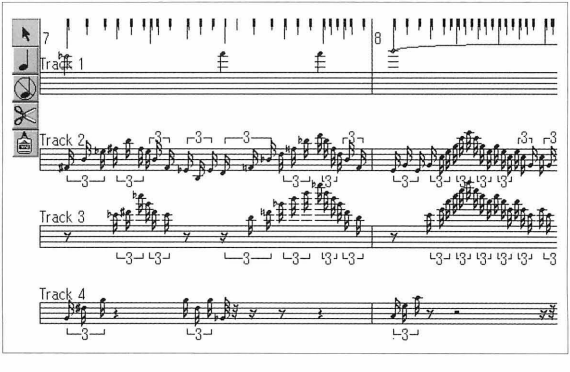
・シーケンサとGM音源によるデスクトップミュージック

このようなシーケンサとGM音源（単体でもソフトウェア音源でも同じ）とを組み合わせると、いわゆるDTM(デスクトップミュージック)を楽しむことができます。これは、自分でシーケンスデータを打ち込んだり、パソコン通信や

図5.8　シーケンスソフトの画面例(MIDIリスト)



図5.9　シーケンスソフトの楽譜表示モード



インターネットからシーケンスデータを入手したりして、自分のシーケンサで「再生」させて楽しむものです。ただBGMとして聞くだけでなく、特定のパートをOFFにした「マイナスワン」演奏でカラオケとして使ったり、複数のメンバーでそれぞれのパートのデータをインターネットで持ちよって一つの曲に仕上げる、というような楽しみ方もあります。シーケンスデータでの音楽

というのは、CDやMDに入った音楽（サウンド）と違って、部分的にではあるものの自分で「手を加える」という余地のあるところが最大の魅力です。

いろいろなコンピュータミュージック

できているCDを買ってきて聞く、というのは一つの音楽の楽しみ方ですが、インターネットなどからSMFデータをダウンロードしてGM音源で聞くだけなら、これもほとんど同じことです。そして、SMFデータをシーケンサに取り込んで、自分なりにアレンジしたり共同で作曲するとなると、少し「参加」するという度合いが増えてきます。ただしこの場合でも、完成したデータを聞く段階になれば、シーケンサのスタートボタンを押すだけですから、たんなる自動再生になってしまいます。最近ではパソコンでこのサウンドを簡単にCDに焼くことができますが、そうなれば最初の例と同じことになります。ここまでが、日本で一般に「コンピュータミュージック」といわれている世界です。



・コンピュータが開く新しい音楽の世界

ところで、研究者／作曲家として活動する筆者の場合、もう一歩、踏み出したコンピュータミュージックを求めています。世界的には、この用語は「コンピュータを活用した音楽／コンピュータによる新しい可能性を盛り込んだ音楽」の追求といったニュアンスが強くなります。日本ではとても少ないものの、海外では大学の作曲科を出てコンピュータの大学院を出た研究者とか、情報系の大学を出て音楽大学で活動している作曲家など、両方のフィールドを専門に持つ人々が、この先端領域を開拓しています。ここでは、このような新しい分野について、筆者の活動事例を含めて紹介してみましょう。

図5.10は、すでに紹介したいわゆるDTM（打ち込み音楽）をスタートラインとして、コンピュータミュージックとしての発展の姿をいくつかの例として示したものです。いずれも、世界中のそれぞれの専門家が研究を進めて、コンピュータ上のツール（ソフトウェア）を公開したり、作品としてコンサートで発表したりしています。筆者もメンバーとなっている、ICMA(International Computer Music Association)の国際会議ICMC(International Computer Music Conference)では、毎年この分野の先端が集まって発表されています。

・サウンド＋グラフィックス

図5.10　いろいろなコンピュータミュージック

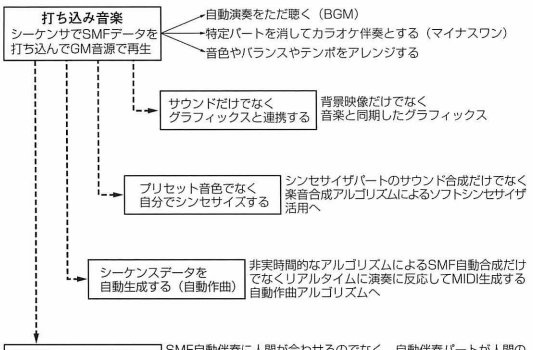
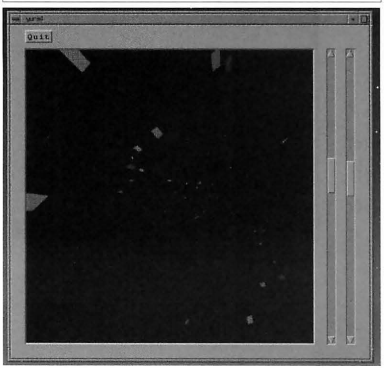


図5.11　MIDI情報に応じて動く三次元CGソフトの例



まず、マルチメディア時代を反映して、パソコンでもサウンドとともにグラフィックスを利用したい、というのは誰でも考えることです。SMFデータの自動演奏をBGMとして聞くのなら、一緒にイメージ映像も動画かアニメーションで出てくれればいっそう豊かな表現になります。ただし、サウンドと映像がそれぞれ勝手に流れているのでは、まるでカラオケのイメージ映像ですから、ここはシーケンスデータに対応（同期）したグラフィックスが欲しいところです。以下の例は、筆者の開発した、このようなソフトウェアの例です。これらは、筆者のホームページでソースプログラムを

公開していますから、環境があれば誰でも入手して、オリジナルを改良することができます。

図5.11は、筆者がコラボレータ（共同制作者）である、グラフィックアーティストの由良泰人さんと共同で開発した、三次元CGソフトの例です。動いていない写真ではわかりにくいのですが、画面の遠くから多数の「板」が回転しながらこちらに近づいてくるというCGで、入力されたMIDI情報に応じてその回転（方向、速度）と、視点の移動が変化するものです。こんな簡単なCG（三次元CGが簡単に実現できるOpen-GLという環境を利用してC言語で開発している）でも、じっと眺めていると「宇宙酔い」してしまいました。また、**図5.12(a)(b)(c)**も、同じ由良さんとの共同作品で、三次元CGによって複数の立体を表現しつつ、入力MIDI情報によって、



図5.12　MIDI情報により複数の立体が変化する三次元CG作品



(a) 平面状から立体へのモーフィング



(b) 球状に変化

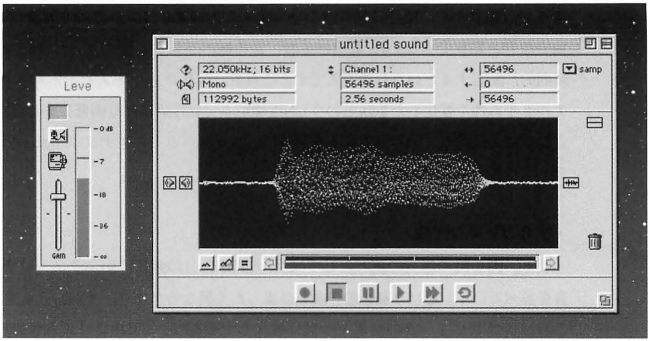


(c) 球体から円錐へモーフィング

・各立体の回転（*x,y,z*）
・視点との距離（ズーミング）
・立体を構成する各セルの色変化
・立体同士の変形（モーフィング）の速度

などをリアルタイムに変更していきます。**(a)**は平面状から立体へのモーフィングを開始した瞬間、**(b)**はこれが球体に変化した様子、そして**(c)**はそこから

図5.13　サウンド情報を加工できるSoundEffect



円錐にモーフィングしている最中の様子です。ソフトウェアの構成としては、リアルタイムに刻々三次元CGを描画するルーチンと、MIDI情報を受けてこのCGのパラメータを変化させるルーチンの共同動作となるような仕組みです。これらのCGは、たんなる動きとして眺めているだけでは単調なものですが、音楽演奏と同期して規則正しく動く様子を見ていると、生き生きとしてくるから不思議なものです。

・サウンド合成

つぎに、**図5.10**の第二の流れとして、あらかじめGM音源のように与えられた音色を「使う」のでなく、シンセサイザの自由さの原点に戻って、ディジタル信号生成アルゴリズムを駆使した「楽音合成」に重点を置く、というアプローチがあります。これは、簡単には「シンセサイザ」機能をもったMIDI音源を使うことになりますが、さらにオリジナリティを追求することもできます。**図5.13**は、パソコン上でサウンド情報をいろいろに加工できるSoundEffectというシェアウェアで、ここで生成したサウンドを音楽の素材としてシーケンサのサウンドトラックに利用することができます。**図5.14**は多種のオシレータにAMやFMのモジュレータのソースを持ち、さらに各種のエフェクタも持っているSoundSculptorというシェアウェアで、これも昔は大型計算機で一晩かかったサウンド情報の演算を一瞬で済ませてしまいます。

図5.15は、筆者の開発した「グラニュラシンセシス」のサウンド合成ソフ

トウェアの画面です。グラニュラシンセシスとは、持続した周期的振動というタイプの音でなく、10ミリ秒程度に細分化された「グレイン」という要素(単独では音と知覚できない)を非常に多数、ある種のランダム性をもって空間的時間的に配置するという音源方式です。これを、シリコングラフィックスのリアルタイム性を強化したIRIXというUNIX環境下でC言語により開発しました。ここでは、生成しているサウンドを同時に三次元スペクトルアナライザ表示ソフトに与えています。

・アルゴリズム作曲

また、**図5.10**の第三の流れとしては、「人間が自分の頭に浮かぶイメージで音を並べていく」という従来の作曲とはまったく異なるアプローチがあります。これは、コンピュータの登場で一気に拡大した発想で、「**アルゴリズム作曲**」と呼ばれているユニークな視点です。本当は、この内容だけで本が1冊書けるほどに深い世界なのですが、本書ではちょっとそのサワリだけを紹介しましょう。興味のある方は、ここで題材として紹介する“MAX”というソフトウェア（Macintosh用のみしかない）を入手して体験してみてください。



まず最初に、MAXの「プログラミング」の様子を簡単に紹介します。**図5.16(a)**は、MAXの「パッチ」と呼ばれるプログラムの一例です。このようなグラフィカルな部品を並べて線で結べば、それでオリジナルのソフトウェアが完成してしまいます。この図では、「notein」という部品（オブジェクトという）によって、入力されたMIDI情報のうち、「鍵盤のON/OFF」に関する情報が抽出されます。そして、この情報は「noteout」につながっているので、そのままMIDI出力（スルー）されます。そして同時に、鍵盤の位置（ピッチ）が鍵盤状のオブジェクトによってリアルタイム表示され、鍵盤を弾いた強さ（ベロシティ）がスライダーによって表示されています。**図5.16(b)**はこの逆に、「makenote」というオブジェクトで鍵盤のON-OFFの時間差（デュレーションという）を設定しつつ「noteout」によってMIDI出力します。ピッチを鍵盤状、強さをダイヤル状、音の持続時間であるデュレーションをスライダ状のオブジェクトで「入力」できますから、この画面をマウスでクリックしたりドラッグするだけで、接続したMIDI音源でサウンドを「演奏」できます。つまり、このパッチは一種の「自由な演奏のできる電子楽器」となっています。

そして、**図5.17**のパッチは、もっとも基本的な「自動作曲」アルゴリズムの例です。同じ音楽を何度でも「再生」する自動演奏でなく、毎回、ある規約

図5.14　オシレータ、AM/FMモジュレータ、各種エフェクタをもつSoundSculptor

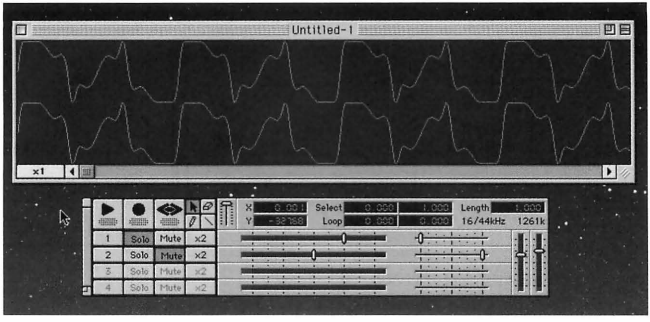


図5.15　筆者が開発した「グラニュラシンセシス」サウンド合成

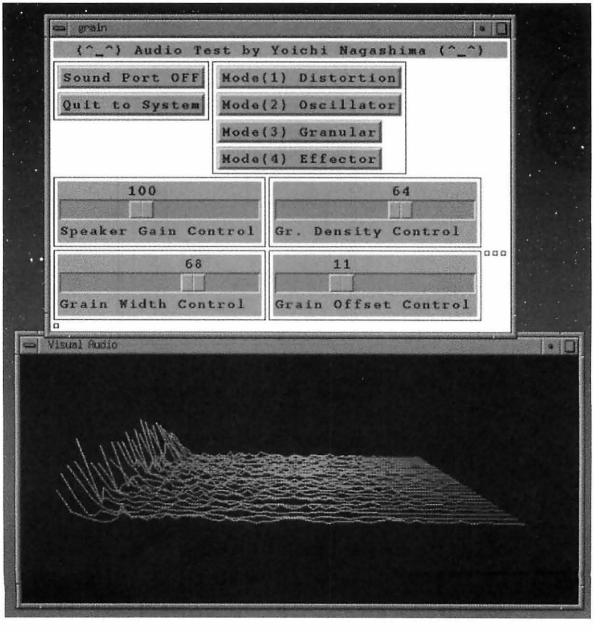
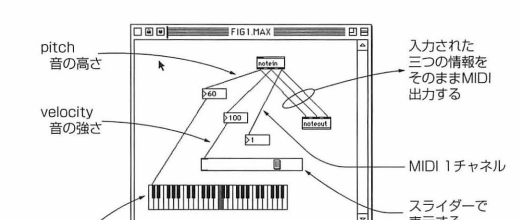
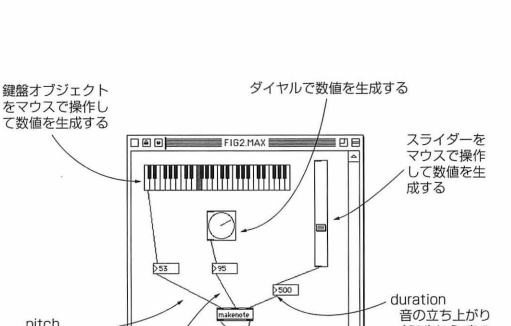


図5.16　MAXプログラミング



(**a**) MAXのパッチ・プログラム

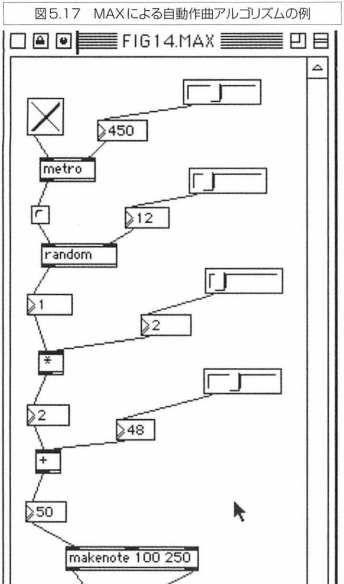




(**b**) MAXのパッチ・プログラム((**a**)の逆)

の下で異なった音楽を「生成」する自動作曲である、という点に注意しましょう。ここでは「metro」オブジェクトによって、一定間隔のトリガ（図では450ミリ秒ごと）を発生し、これで「random」を叩きます。図では「random」

図5.17　MAXによる自動作曲アルゴリズムの例

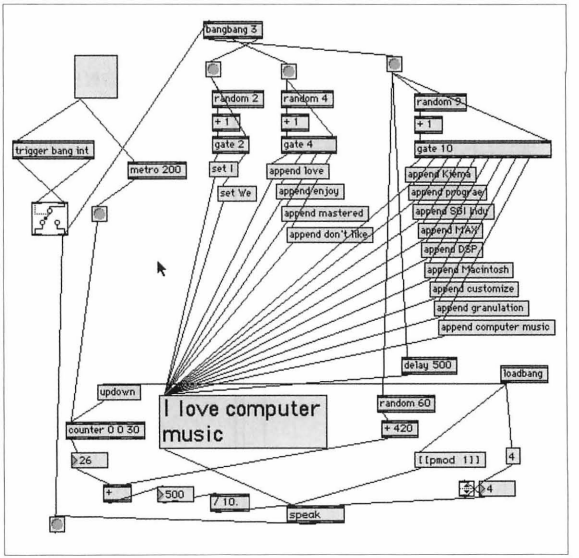


に12という数値を供給しているので、毎回、0から11までの乱数が発生します。ここに2を乗算し（それぞれの音は全音の音程となり、全体は「全音音階」になる）、さらに音域として48を足して、これをMIDI演奏情報として出力しています。その結果、この自動作曲システムからは、毎回ランダムなサウンドが、しかし音楽的にはWhole Tone Scaleという「音組織」にしたがった特有の響きのサウンドとして自動生成されます。そして、画面内のスライダをマウスで変化させれば、膨大な組み合わせによる「その場限り」の音楽がいくらでも生成されていきます。これが「アルゴリズム作曲」の本質をよく表した最小の実例です。**図5.18**のパッチでは、基本的には同じ乱数によって、主語と動詞と目的語をランダムに選択して組み合わせた文字列を生成しています。そして、これをMIDI出力でなく、MAX内の「speak」というオブジェクトによって「話す」ことで、自動読み上げ作文のサウンドを生成しています。この「speak」オブジェクトは千野秀一さんのオリジナルですが、インターネットで公開されて、世界中の音楽愛好家が活用しています。

・知的伴奏システムをネットで結び地球規模の同時セッション

そして、**図5.10**の最後の流れとしては、MIDIの自動演奏システムをたんなる伴奏としない、というアプローチや「セッション」に発展させる方向があります。システムが人間（独奏者）の音楽演奏情報を「聞いて」、それに合わせて伴奏のテンポや音量や表情付けを変化させて追従する、という「知的伴奏システム」で、本格的な情報処理技術のテーマとなるものです。これと関連して、

図5.18　自動読み上げ作文のサウンドを生成するMAXパッチ





複数のシステムがネットワーク（ここではMIDIよりも拡大される）を利用した「セッション」について、少しだけ紹介しておきましょう。

図5.19は、筆者のコンピュータの画面上で走っている実験ソフトの例です。これは、RMCP(Remoto Music Control Protocol)というシステムを活用したもので、ネットワーク接続された多数のコンピュータを使ったセッションを実現する研究の一環で開発したものです。RMCPは早稲田大学の後藤真孝さん（現・電総研）が提唱・開発したもので、筆者はこの意味では共同研究のコラボレーションをさせていただきました。RMCPは、コンピュータ内をバックグラウンドで走っている「サーバ」と呼ばれるソフトウェアが、裏でMIDIキーボードの情報を受けたり、MIDI音源に演奏情報を送ったりしています。そして、コンピュータ上のソフトウェア（クライアントという）はこのサーバと通信することで、さらにネットワーク上の他のコンピュータで走っているソフトウェアと「対話」することができる、というものです。

図5.19　RMCPシステムの活用例

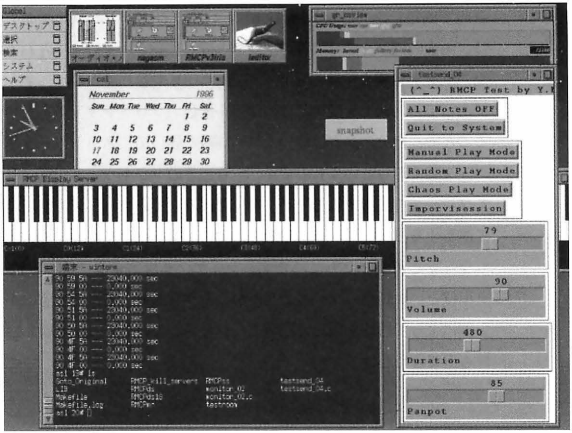


図5.20　マウスの位置に応じたサウンド情報を生成するImprovisession

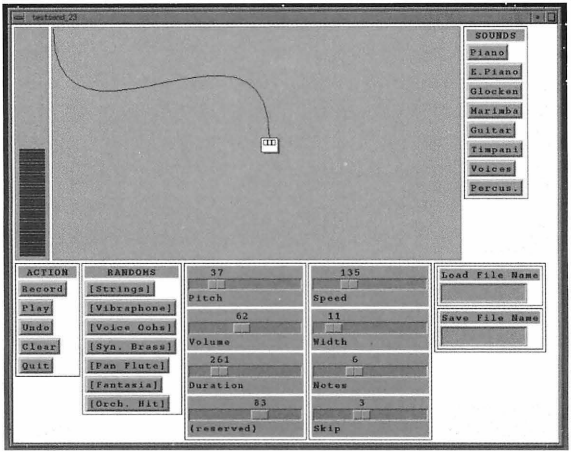


図5.20は、このソフトウェアを発展させて、同じようにIRIX上で筆者がC言語で開発した“Improvisession”というプログラムの動作画面です。ここでは、画面内のマウスは実際のマウスと同じに動き、その上下左右方向に対応したサウンド情報を生成します。普通のMIDI楽器と違うのは、ネットワークを経由して、何人でも同時にこの情報を配信（ブロードキャストという）していることで、自分の演奏は他の人にも同時に届いて、ネットワーク越しに「セッション」できるというものです。さらにこのソフトウェアでは、乱数に基づいてフレーズを演奏するモード、自分で組み立てたフレーズを簡易自動演奏として演奏するモードもあり、RMCPの能力から、たとえば地球の裏側の人とのセッションも可能となっています。シーケンサはあくまで個人単位、SMFデータ単位という音楽のツールでしたが、こうなると、音楽そのものがインターネットによって地球を包んで同時セッションしていく、という新しい展開の可能性も出てきたわけです。



コラム⑤

フィルタを作ろう

コンピュータサウンドで「フィルタ」といえば、アナログシンセサイザのVCFの特徴的な音がもっとも印象的なものです。本当は、ここでVCFを作って「アナログシンセを製作！」とでもいいたいところなのですが、じつはVCFはかなり専門的な回路ですので、本書ではこの製作にまでは深入りしません。

そこで、第1章で紹介した受動フィルタ（抵抗やコンデンサ等の受動部品だけで構成するフィルタ）を、実際に実験回路に使用して耳で確かめてみる、というところに留めておきましょう。ある意味では、アナログ回路技術のほうが、誰でも同じものを作れるディジタル回路技術よりもずっと難しい、という一例なのです。

この実験で使う信号は、前章のカウンタ音源回路（**図4.15**：p.116）で作られた「信号S」です。デューティ12.5%というパルス状のために、高次倍音成分を多く含んでいるので、フィルタの効果が耳で検証しやすいものです。ここで実験するのは、**図5.21**のような簡単なものです。フィルタというのは技術的な壁が高いので、ここではこの程度としておきましょう。**図5.21**にあるように、抵抗とコンデンサだけのローパスフィルタ回路で、さらに抵抗は共通の1kΩにしています。そして、何も入れないものも含めて、104、474、105というそれぞれの容量での変化を実際に測定してみました。

図5.21　ローパスフィルタの効果と比較実験

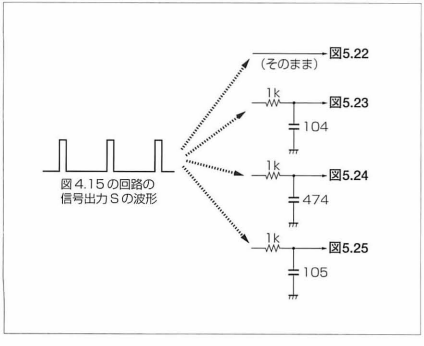


図5.22は、**図4.19**（p.118）、と同じ「素通し」のままの波形です。右側のスペクトル分布については、周波数帯域をより広げてありますので注意してください。ここに、**図5.21**のように1kΩと104（10×10^4pf＝0.1

コラム ⑤

図5.22 素通しの波形

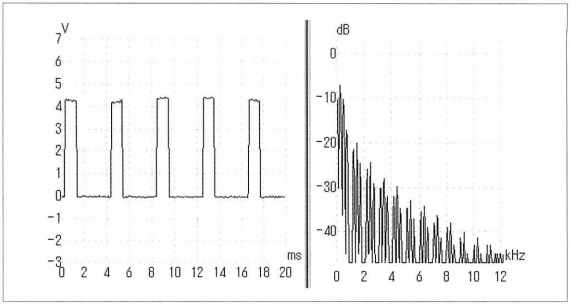
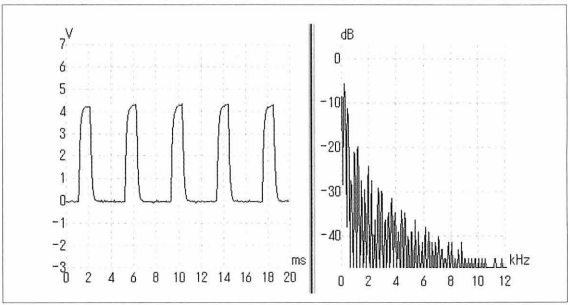


図5.23 ローパスフィルタを通した波形①





μF）のコンデンサによるローパスフィルタを入れると、**図5.23**のように波形がやや丸くなり、スペクトルも高域でより減衰するようになります。サウンドとして耳にすると、この変化は目に見た通り、音色がやや「丸く」なって聞こえます。

図5.24では、コンデンサが約5倍、474（47×10^4pF=0.47 μF）となって、波形は三角波に近くなってきます。スペクトルの傾向もかなり変化が現れてきて、素通しのサウンドと交互に切り替えて聞くと、その音色の違いがよくわかります。**図5.25**はコンデンサがさらに倍増した105(10×10^5pF=1 μF)ですが、こう

図5.24　ローパスフィルタを通した波形②（コンデンサ容量5倍）

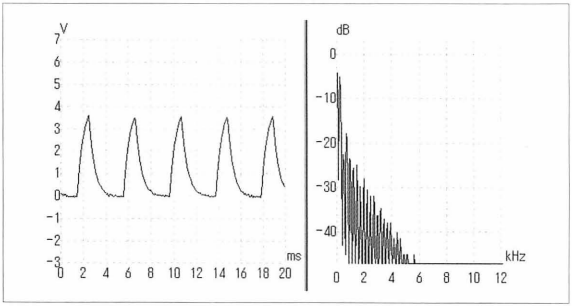
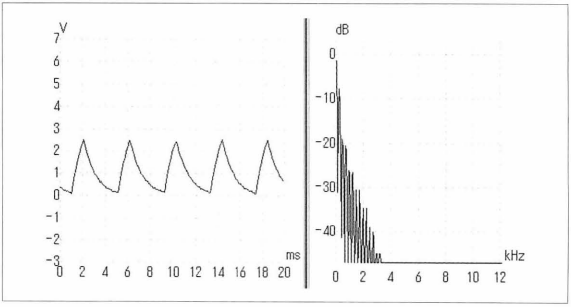


図5.25　ローパスフィルタを通した波形③（コンデンサ容量10倍）



なってくると、全体の信号レベルもかなりGNDにバイパスされてきて、レベル自体が低下してきます。このように、フィルタは周波数帯域ごとにゲインの違うアンプですから、周波数特性の違いだけでなくレベルの違いを発生してしまうことにも注意する必要があります。

フィルタの周波数特性が外付けの抵抗値の比で設定できて、ゲインなどは一定になっている「フィルタモジュール」という専用のICを用いれば、この問題点は解決できます。**図5.26**はこの専用フィルタモジュールを並べて筆者が製作したあるフィルタ応用回路の例です。回路図は複雑なので省略しますが、

コラム ⑤

図5.26　専用フィルタモジュールを使った回路基板の例

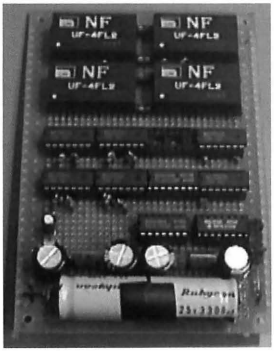
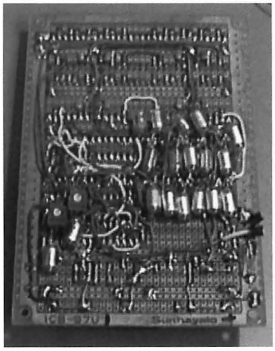


図5.27　専用フィルタモジュール回路基板の裏面





基板の裏を見ると、**図5.27**のように、モジュールICの裏には何も部品が付いていないでスッキリとしています。しかし周辺のOPアンプ部分のために、空中配線で多数の抵抗とコンデンサが鈴なりになっています。実際的なフィルタ回路を製作する場合には、配線を最短にすることも重要なので、このような世界へ突入してしまいます。

SENSOR & MEDIA ART

第6章

センサとメディア・アート

◎

センサの活用
サウンド・インスタレーション
環境音楽シンセサイザ
インタラクティブ・アート

◎

<コラム>ディジタル音源に挑戦しよう

センサの活用

前章では、電子楽器の音源LSI(DSP)、あるいはパソコンのソフトウェアでサウンドを生成する機能について、そしていろいろなコンピュータミュージックのスタイルについて紹介してきました。しかし、**図5.10**（p.133）は、コンピュータミュージックとしては、デスクトップ（ソフトウェアのみで実体のない仮想的な世界）に限定されたものです。そこで本書の最後に、コンピュータ・エレクトロニクス・システムと外界との接点となる「センサ」を取り込んで、さらに拡大しつつあるコンピュータミュージックの世界についてふれましょう。ここでも、筆者のいくつかの製作例を並べます。センサというと大変な技術のように思えてしまいますが、秋葉原でも日本橋でも、多くの「センサキット」が提供されている現代は、ある意味で誰でも手軽にこのキットを活用して、「メディア・アートの作家」としてデビューできる時代です。コンピュータミュージックの世界でもっとも重要なのは、システムの可能性を広げるアイデアとセンス、ということです。



・自然とともに変動する量を音楽にする

図6.1は、本章で紹介するコンピュータミュージックの世界をまとめたものです。ここでのキーポイントは、コンピュータ・エレクトロニクスの領域（音源とかソフトウェアとかパソコンなど）が、人間や自然界からの情報を取り入れるためのセンサ技術とそのインターフェースにあります。サウンドエレクトロニクスという視点では、システムからの「出力」は、サウンドとして得られる音響ですが、その「入力」としては、ここまではMIDI経由の電子キーボードやパソコンのマウスのドラッグやクリック程度だったわけです。そこで、もともとの演奏スタイルを考えれば、システムと人間との接点としての「新しい楽器」となるようなセンサが期待されてきます。そしてセンサという新しい入力インターフェースを自然界に開放すれば、たとえば「大気汚染濃度の音楽」というような、自然とともに変動する量を音楽にする、というような「アルゴリズム作曲」は容易に思い付きます。これらの全ての基本は、センサにあるわけです。

センサとは、ここでは「物理的情報を電気的情報に変換するデバイス」という程度に幅広く定義しておきましょう。すると、これまでに検討してきたサウ

図6.1　コンピュータミュージックの展開

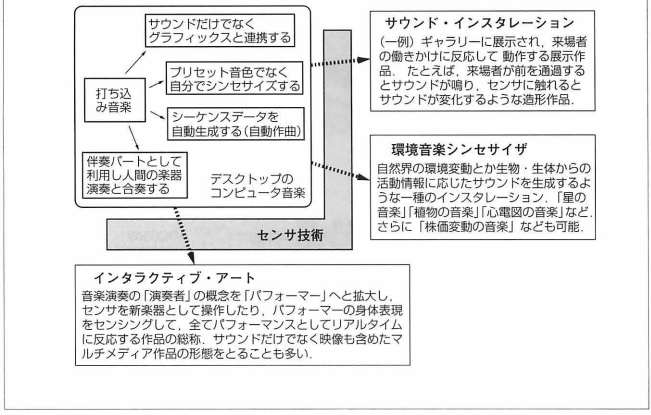
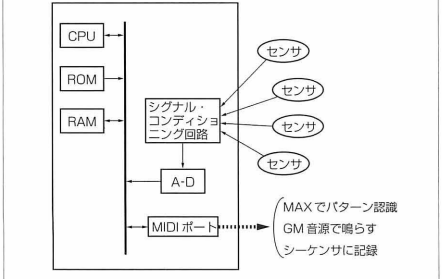


図6.2　MIDIセンサシステムの一例



ンドエレクトロニクスのシステムは、**図6.2**のようなものとすることで、MIDIという共通インターフェースを利用して、あらゆるセンサを使用できることになります。つまり、カードサイズのマイコンを利用して、いろいろなセンサの電気的信号を同じ形式（一般には「電圧」に変換）にする「シグナル・コンディショニング」回路を通って、あとはこの電圧をA-D変換して、MIDI情報として送信すればいいことになります。

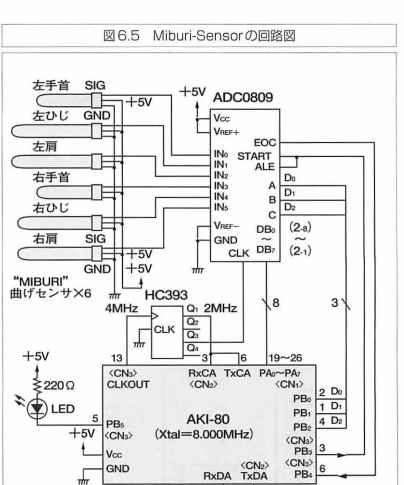
図6.3 「曲げセンサ」のセンシング部分



図6.4 Miburi-Sensorの外観



図6.5 Miburi-Sensorの回路図

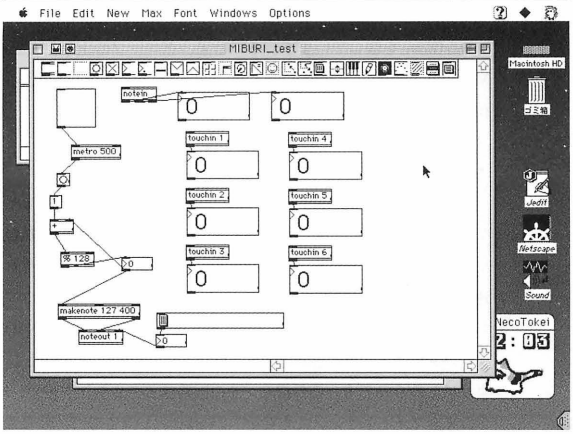




・曲げセンサ

これを筆者の実例で紹介しましょう。**図6.3**は、ある装置に使われている「曲げセンサ」のセンシング・モジュール部分（グリップ部分を除く）です。これは、サポーターなどで肘とか手首に密着させると、その関節の曲げの角度に応じた電圧が出力されるように、内部に超小型のOPアンプ回路が入っているものです。センサ部分には、曲げによって抵抗値が変化する、薄い一種の導電プラスチック板が入っていて、モジュール内部のIC回路によって、この抵抗値の変化を0Vから＋5Vまでの電圧に変換して出力するようになっています。そして**図6.4**は、このセンサ部分を接続して使うためのオリジナル「Miburi-Sensor」の外観です。内部にマイコン回路とA-Dコンバータ、単三電池4本まで入っていて、6個の

図6.6　Miburi-SensorのMAXパッチによるテスト



曲げセンサ情報と外部からのMIDI情報をマージ（統合）してMIDI出力します。**図6.5**は、このマシンの回路図で、カードマイコンは秋月電子のキットAKI-80を使っています。この出力のMIDI情報は**図6.6**のようなMAXパッチでテストすることができ、実際の作品でも**図6.7**のようなMAXパッチとして使用しています。もともとは両手首、両ひじ、両肩の合計6箇所の曲げをセンシングするものですが、たとえばこれをひざの裏側に固定することで、スクワットのようなダンスをセンシングすることもできました。

・PowerGlove

図6.8は、初代ファミコンの外部コントローラとしてアメリカから上陸したPowerGloveという製品を改造した、MIDIコントローラとして使用できるセンサです。もともとPowerGloveは、それぞれの指の曲げ状態(薬指と小指は共通)を検出する曲げセンシング、超音波を利用してテレビの枠に取り付けたセンサから画面内の上下左右の方向センシング、さらにドップラー効果を利用してボクシングのパンチ(突き)と引き、という動作のセンシングを行うものです。しかしここでは、PowerGloveに内蔵されたマイコンが、接続された相手がファミコンであると安心してグローブの状態（*X,Y,Z*方向の移動とそれぞれの指の

曲げ情報）を送信するように、センサシステムに内蔵されたオリジナルのマイコンシステム（AKI-80）がうまくファミコンの動作をエミュレーションして、PowerGloveを騙しています。その結果、グローブの上下左右と指の情報をMIDIとして得ることができるので、あとの情報処理はMAXによって、個々の作品に対応して制作していけるのです。

・SNAKEMAN

図6.9は、大阪・難波のインド民芸品店で仕入れた太鼓の胴体に、日本橋のジャンク屋で見つけたマイクのパイプを組み合わせた、SNAKEMANと名付けたセンサです。このパイプの両端の間に赤外線ビームが走り、それを遮断する速度に応じたMIDI情報が出力されます。このセンサ部分は、じつはキットとして売られている「赤外線センサ」を改造して、たんなるON/OFFでなく、マイコンによってその遮断時間をカウントしてMIDIの連続値として出力するようにしたものです。赤外線センサの回路はとてもシンプルで、赤外LEDからの光をフォトトランジスタで受けている、というもので、外来光やノイズなどの誤動作を避けるために、ずっと連続センシングするのでなく、ディジタル的にタイミングをとってLEDを発光させ、そのときの受光データを検出しているところが工夫されています。このセンサも、多くの作品やインスタレーションで活躍しています。



・入手可能な各種センサ

このように、簡単なマイコンシステムを介在させるだけで、あらゆるセンサをシステムの入力手段として活用できます。そして、そのセンサ部分そのものが、エレクトロニクス技術の進展とともに、誰でも気軽に利用できるようになってきているのです。たとえば、**図6.10**は、大阪・日本橋の共立電子というパーツ屋で入手できた、超小型の**加速度センサIC**です。電源を与えるだけで加速度に比例した電圧が得られるもので、いろいろな応用が考えられます。また**図6.11**は、秋葉原の秋月電子にあった、ディジタル温度計／湿度計のキットです。**温度センサ**というのはたんに温度だけでなく、たとえば気流の流れている部分で**流量センサ**としても使えるなど、これも簡単な改良で応用できる可能性を秘めています。筆者はこのセンサと、**半導体気圧センサ**とを実験して、雅楽の楽器「笙」のブレスを検出するセンサを実験しているところです。**図6.12**の微小静電容量計キットなどは、テルミンなどの人体との微小な近接状態

図6.7　Miburi-Sensorを実際の作品で利用したパッチ

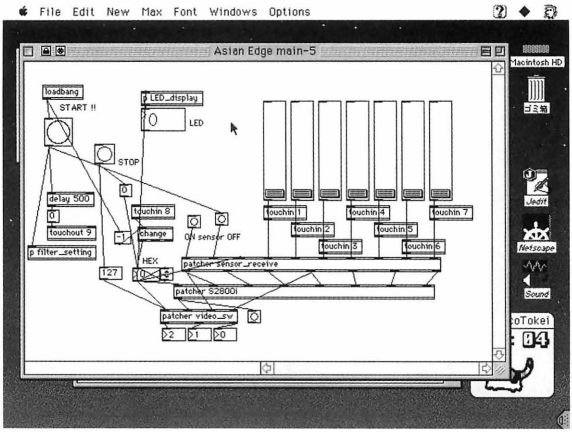


図6.8　PowerGloveの活用

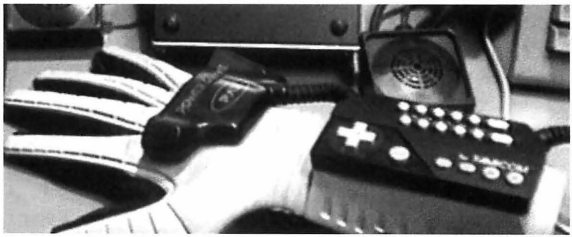


図6.9　SNAKEMANセンサ



を繊細にセンシングするために有効です。**図6.13**の**超音波距離センサ**は、カメラの自動焦点システムで利用されているもので、かなりの精度で数m先までの距離を正確に測定できます。さらに**図6.14**の**人体赤外線**（焦電）センサは、防犯システムで使用されているものですが、これも来場者の接近をセンシングするインスタレーションには好適です。また**図6.15**の衝撃センサは、いわば簡単なピックアップマイクですが、これも各種の衝撃検出によく使われています。センシング対象とこのセンサとを結びつける「メカニカル機構」がカギとなります。

サウンド・インスタレーション



インスタレーションというのは、造形作品の中で、たとえば展示しているギャラリーへの来場者の接近をセンサで検知して光が変化したり、動きが変わったりするようなタイプのものです。「参加型」「体験型」などということもできます。そして、サウンド・インスタレーションというのは、そのようなインスタレーションの中で、とくにサウンドエレクトロニクスを活用したものをいいます。最近ではサウンドスケープ（音風景、環境音）に対する関心が高いので、サウンドインスタレーション作品と呼べるものは、なにもギャラリーだけでなく、公園とか街頭で見かけることもできます。歩行者の歩みに応じたサウンドの鳴る歩道橋とか、風見鶏によって検出した風の動きに応じたサウンドを鳴らすモニュメントなどもその一種です。

図6.16は、もともとコンピュータミュージックの新しい作品のために筆者が「作曲の一部」として製作したセンサ「タッチセンサ」です。メカニックな印象となるように、裸の基板の上に、電源、MIDI処理のためのマイコン、センサ回路などとともに16個5列、合計80個のLEDを並べてあります。5個の大きなフィン（発熱器）付きの抵抗器がセンサとなっていて、ここに触れた人体の誘導電圧を拡大してタッチの情報を検出します。この情報はMIDIで送られるだけでなく、5列のLEDを4種類の動きのモードで点灯する、イルミネーション表示システムにもなっていて、このセンサ（新楽器）自体が、一種のインスタレーション作品なのです。

・メディア・インスタレーション

図6.17は、すこし話が長くなりますが、サウンド・インスタレーションと

図6.10　加速度センサIC



図6.11　ディジタル温度計/湿度計キット



図6.12　微小容量計キット

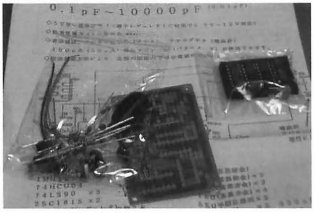


図6.13　超音波距離センサ



図6.14　人体赤外線センサ

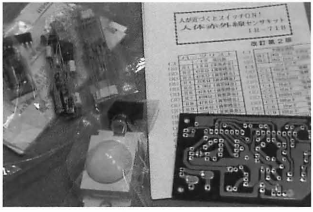


図6.15　衝撃センサ



図6.16　「作曲の一部」として製作したタッチセンサ



図6.17　メディア・インスタレーションの例:
AudibleDistance（可聴化する間）

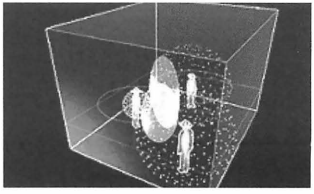


図6.18　画像センサ部分を開発中の筆者の机上風景



いうよりもメディア・インスタレーションとしてもなかなか面白い実例です。この作品「AudibleDistance」（可聴化する「間」）は、メディア・アート作家の前林明次さんの作品で、現在、東京オペラシティにあるNTTの新しい美術館ICC (Intercommunication Center)で常設展示されていますから、皆さんも実際に「体験」することができます。この作品は図のように、暗い会場スペース内で来場者（プレーヤ）が3人グループとなって、以下のような面白い体験をする、というものです。

ほとんど面識のなかった筆者のところに突然に前林さんの電子メールでこの作品の企画が届いたのは、1997年の始めでした。ICCのビエンナーレという作品コンテストの企画審査で、世界中の9人の作家とともに唯一の日本人として残った前林さんから届いたイメージは**図6.17**のようなもので、



- プレーヤはHMD(Head Mount Display)とヘッドフォンをつける
- 各プレーヤはHMDの三次元CGを見てヘッドフォンからの三次元サウンドを聞く
- 各プレーヤは場内をうろうろする
- 各プレーヤの心拍をセンシングする
- あるプレーヤは、他の二人の心拍に同期したCGとサウンドを体験する
- 各プレーヤの位置と視線の向きをセンシングして、CGとサウンドに反映させる

というようなものでした。ハリウッドのモーションキャプチャというシステムを使えば容易に実現できますが、それだと数億の予算が必要となります。ところが各作家に割り当てられた予算はこれより一桁以上少なく、筆者が担当した「センシングシステム全て」でいえば、なんとかエレクトロニクス技術を駆使して、ハリウッドと似たシステムを100分の1以下の予算で実現すること、という条件となりました。

・ビエンナーレの準グランプリに輝いたAudibleDistance

限られた開発期間もあって、システム開発の検討から製作までの経緯もなか

図6.19　画像センサのパネル部分

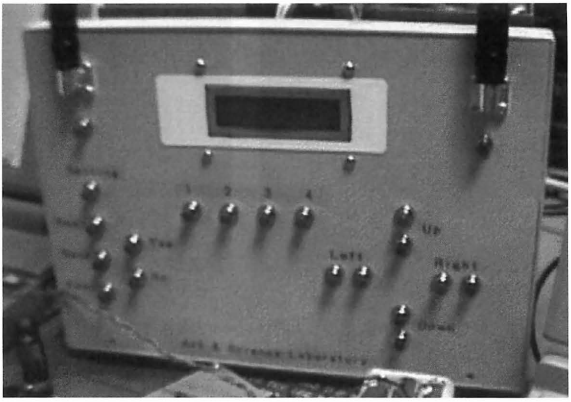


図6.20　プレーヤがかぶるHMDとヘッドフォン



なかスリリングなものでした。**図6.18**は画像センサ部分のシステムを開発中の、筆者の自宅自室の机の上の風景です。右側にあるCCDカメラを会場の上空5mに設置して、ここからの画像をリアルタイムに画像認識する方法で、3人のプレーヤのリアルタイム追従を実現しました。まず、CCDカメラからのビデオ信号はパソコンの拡張ラックに入れる画像認識ボードに与えられ、さらに画像フレームメモリ内の輝点の位置を高速に検出する専用の「エッジ検出ボード」も利用しました。全体のシステムはMS-DOSパソコン上のC言語プログラムとして開発しました。**図6.19**がそのパネル部分で、この液晶パネルを使って、最終的にはパソコン部分をボードとして内部に入れてしまい、電源ONで自動スタートするシステムとなりました。

図6.20はプレーヤがかぶるHMDとヘッドフォンで、これによって来場者は

図6.21　頭の位置や向きをセンシングする小型ワイヤレスモジュール



図6.22　心拍をとらえる耳たぶセンサ





仮想的な空間内に他の二人のプレーヤの位置とそれぞれからの心拍に同期したサウンドを体験します。当然のことながら、位置だけでなくその頭の向きをセンシングして、視線が移動すれば映像も音像も対応して移動する必要があります。**図6.21**がそのための仕掛けで、この小型ワイヤレスモジュールは画像センシングシステムからそれぞれ無線で制御されて、三つを束ねた赤外線LEDを時分割的に点灯します。このLEDはプレーヤのHMDに取り付けられていて、前頭部と後頭部、という2個所で別々に光ります。**図6.22**は心拍センシングのためのセンサ部分で、耳たぶにクリップ状に取り付けた「LED-フォトトランジスタ」というペアで、耳たぶの血流の影の濃度が心拍と同期して変化する部分をセンシングし、この情報もワイヤレスでメインシステムに送ります。これらの位置情報と心拍情報は全てマージ(統合)され、三次元CGと三次元音響の生成システムにMIDIで送りました。センサからのパターン認識は、ここでもMAXが活躍しているのです。

このセンサシステムは1997年10～12月のピエンナーレ期間中の2カ月の連続運転にもトラブルなしで耐えて、前林さんの作品は「準グランプリ」を受賞しました。そして1998年4月からICCの常設展示作品となり、もう丸1年、稼働しています。興味のある方は、どうぞ筆者の特製センサを身につけて「体験」してみてください。

環境音楽シンセサイザ

サウンドエレクトロニクス、あるいはコンピュータサウンドのシステムが外

図6.23　筋電位などをセンシングする
生体センサ装置BioMuse

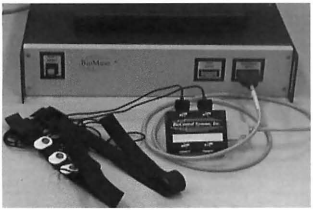


図6.24　筋肉の動きで発生する
微弱電圧を検出する電極バンド



界との接点として「センサ」を持った場合、そのセンシングの相手はなにも人間である必要はありません。コンピュータミュージックの先端の研究と作品が集まるICMC(International Computer Music Conference)という国際会議に筆者は毎年のように参加していますが、ここには、作品部門としてコンサート形式だけでなく、インスタレーション形式という分野が確立しています。そして、会場では「その場の風に応じた音楽を生成するシステム」とか、「来場者の動きや働きかけに応じたサウンドが流れるシステム」などが楽しめます。大阪芸大の上原先生のインスタレーション作品では「ガイガーカウンタを用いて、その場に宇宙から降り注ぐ宇宙線をセンシングしてサウンドを鳴らす」というものもありました。

・生物の情報をセンシングする生体センサによる新楽器

自然界の情報だけでなく、植物や動物、そしてもちろん人間の生命活動の情報をセンシングする、というアプローチもかなりの歴史があります。**図6.23**はBioMuseという装置で、人間の「筋電位」などをセンシングする生体センサ装置です。このシステムでは、**図6.24**のような電極バンドを、導電ジェルをべたべた塗りながら取り付けて、筋肉の動きとともに発生する生体の微弱電圧を検出します。このシステムはパソコンと接続されて、標準的にMIDI情報も出す、というかなり高価な装置です。

そこで筆者は、またまたエレクトロニクスとマイコン技術を駆使して、**図6.25**のようなセンサを製作しました。これはMiniBioMuseと名付けたもので、このケースの中にセンサ回路からMIDI出力のマイコンまで入っているので、BioMuseには必要だった外付けのパソコンが不要です。そしてコストは、BioMuseの約100分の1となりました。これには、BioMuseの開発者で世界的

図6.25　MiniBioMuse

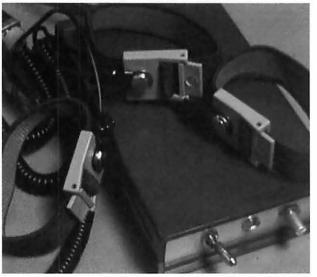
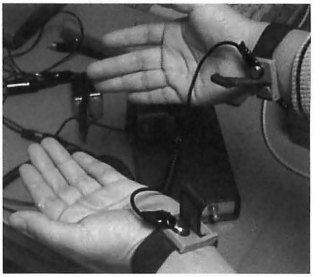


図6.26 静電気破壊防止バンドの電極を利用したセンサ



なComputer Musicの研究者のAtau Tanaka氏も絶賛してくれました。**図6.26**はそのセンシング部分です。これは、パソコンの増設メモリについてくる静電気破壊防止バンドの電極を流用しています。**図6.27**は、このセンサのために、筆者の友人で、生体センサ専門家の照岡正樹さんが電子メールで送ってくれた回路図で、このまま作ると無調整で動いたスグレモノです。



このセンサは、「新楽器」として筆者のComputer Music作品で実際にステージでも使っていますが、また一方では、高齢化社会の福祉分野で、身体障害者のための意志伝達手段として応用できないか、と検討しているところです。人間とシステムが優しくコミュニケーションする、という可能性が期待されている分野でもあります。

インタラクティブ・アート

さて、最後の実例として、筆者も作家としていくつもの作品で実験しつつ発表している「インタラクティブ・アート」をとりあげましょう。これは、広い意味ではコンピュータ音楽の一種ですが、サウンドだけでなくグラフィカルな要素も活用し、さらに人間の演技のようなパフォーマンスと即興にスポットを当てた作品というジャンルになります。もともと、音楽の歴史ではオペラとかミュージカルも同じものですから、考え方として別に目新しいものではありませんが、エレクトロニクス技術、コンピュータ技術、センサ技術などをライブという厳しいリアルタイム環境で駆使する、という意味では、とてもエキサイティングなものです。

図6.27　電子メールで送られた生体センサ用回路

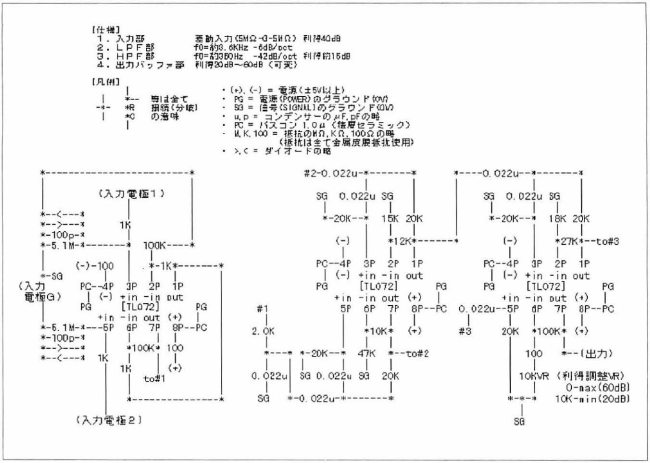
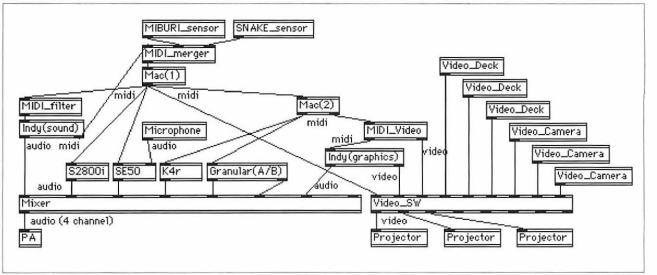


図6.28　AsianEdgeのシステム図



・グラニュラ合成方式の特製音源システム（2台）

・MIDI制御で各種（カラー、テストパターン）ビデオ信号を発生

・MIDI制御で8入力8出力のビデオ信号をスイッチングするマシン

を使っています。そこに上記の2台のIndyワークステーション、さらに2台のPowerBook上を走るMAXパッチ、そしてステージ上のパフォーマの姿を撮影する3台のビデオカメラ、さらにコラボレータの映像作家・由良泰人さん制作のBGVが3本（MIDIでライブスイッチング）、というのがおよそのシステムとなっています。



ここではシーケンサ的な「固定的再生」を避けるために、サウンド系のIndyは一種のサンプラーとして機能して、パフォーマーの身振りによる「演奏」がサウンドをつぎつぎと生成起動していきます。また、背景映像、リアルタイム三次元CG、パフォーマー自身を映したCCDカメラ映像、なども身振りの

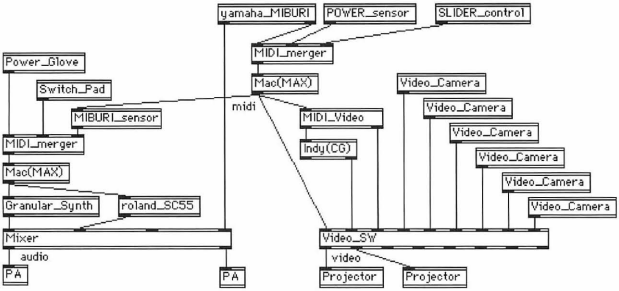
図6.29　インタラクティブ・アートの演奏風景①



図6.30　インタラクティブ・アートの演奏風景②



図6.31　Johnnyのシステム図



「演奏」で切り替えられていきます。**図6.29**と**図6.30**でその雰囲気を想像してみてください。背景ビデオ映像とともにパフォーマンスする様子の映像が、またライブ制御でスクリーンにも登場する様子が伝わるでしょうか。

図6.31は、同じ1996年秋に「日獨メディア・アート・フェスティバル」で発表した作品「Johnny」のシステム図で、同じ手法でロックな路線を追いかけたパフォーマンスを行いました。ここでは、ステージ上にセンサを持ったパフォーマーだけでなく、ライブ映像制御の由良さんとライブ音響制御の筆者も、それぞれセンサを持って立ちました。その場でないと伝わらない（CDやビデオでは無理）タイプの公演です。ここは、身振りセンサを身に付けたダンサーが基本的に音楽と映像を駆動し、さらに両脇の二人もそこにリアルタイムの変化を加える、一種のマルチメディア版の「セッション」を目指したものです。

図6.32は、1997年10月に行われた神戸山手女子短期大学公開講演会を担当し、後半のコンサートで筆者が発表した三つの新作のうちの一つ、「The Day is Done」の楽譜からのものです。システムは図のように、6台のPowerBookをずらりと並べて、一人のパフォーマーはこれらを一種の打楽器のようにめまぐるしくクリックする、という「演奏」を行いました。それぞれのMacからは、MAXのパッチによるspeechオブジェクトを利用して、内蔵音源から各種のサウンドが生成されます。**図6.33**は楽譜のつぎのページのステージと会場セッティングの様子で、この会場（ジーベックホール）の、客席を囲んだ空間音響システムによって多数のPowerBookからのサウンドが空間を移動するように設

図6.32 「The Day is Done」の楽譜から

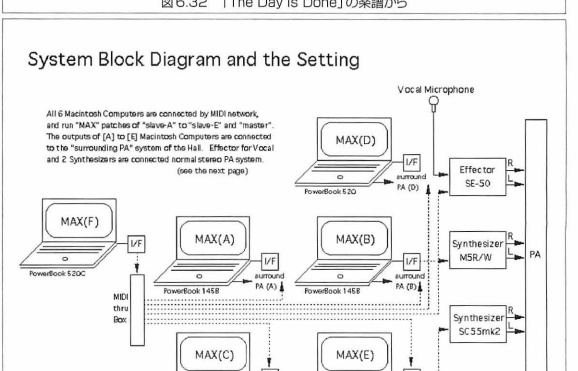




図6.33 「The Day is Done」のステージと会場セッティングの様子

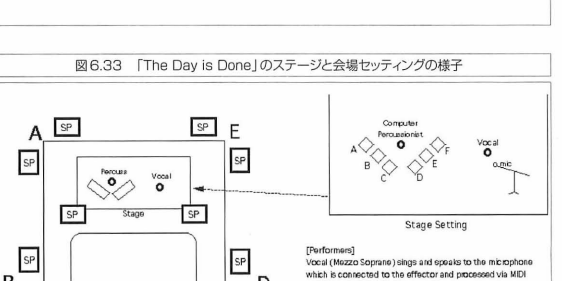


図6.34　「Atom Hard Mothers」のシステム図

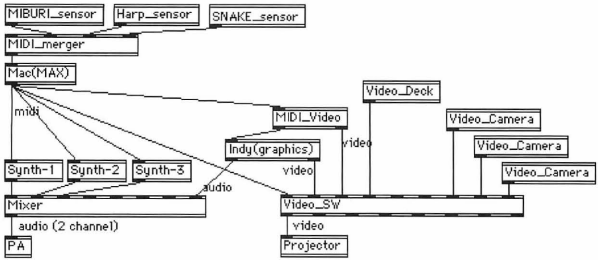


図6.35　光の弦を弾く「ハープセンサ」



図6.36　「ハープセンサ」を
クラシック・ハープのように演奏する



図6.37　「Atom Hard Mothers」の演奏風景



計されています。

・時間とともに性格を変える楽器

図6.34は、1997年11月の「コンピュータ・ミュージック・アンデパンダン」コンサートで発表した新作「Atom Hard Mothers」のシステム図です。同じようなシステムですが、ここでは背景音楽パートにあらかじめサウンド信号処理のテクニックを駆使して制作したCD-Rを使いました。これとともに、MAXによるアルゴリズム作曲の背景音響パートが、ライブパフォーマンスを行う二人のパフォーマーからセンシングされる情報により変化して音楽を進めていく、という構想の作品です。また、**図6.35**は、この作品のために新しく制作した「ハープセンサ」で、FA用の光ファイバセンサを16セット使って、水平方向3本、垂直方向13本の「光の弦」を弾く、というパフォーマンスを実現しました。クラシック・ハープ的に演奏（**図6.36**）するだけでなく、あるシーンではこの枠組みが一つのプレートとなった打楽器のようにも演奏できます。センサからのMIDI情報は同じものなのですが、それを受けて解釈するMAXの部分で音楽の進行とともに解釈を変えていくことで、容易に「時間とともに性格の変貌する楽器」を実現できるわけです。**図6.37**は、この作品の演奏風景です。



このようなインタラクティブ・アートは、従来の古典的な作曲に比べて、素材となるサウンド、音楽の組み立て、時間的支配の方法などの自由度がとても高いので、新しいアイデアを盛り込むためのチャンスとして積極的に挑戦している、というところです。

コラム⑥

ディジタル音源に挑戦しよう

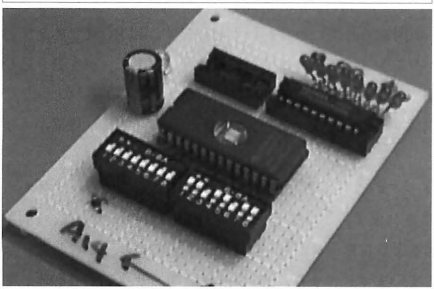
さて、章ごとの合間にいくつか紹介してきた「電子工作」の最後として、せっかくですから「ディジタル音源」に挑戦することにしましょう。もっとも、電子キーボードのように音階が出るとかポリフォニック、というのは本書のレベルを越えてしまうので、あくまでディジタル方式でサウンドを生成する、というのが目標となります。そして、前章までに製作したシステムの延長上にあるような製作例となるようにしてみましょう。

ここで新しく登場する部品は、たった二つです。ただし、いずれもディジタル回路の根幹に関わる重要な部品です。筆者がそのテストのために作った基板（**図6.38**）を見るとわかりますが、一つはEPROMというメモリ、そしてもう一つは74HC574というラッチICですが、ここではこのICだけで「D-Aコンバータ」を構成しています。それぞれのICのピン配置と機能、そしてプログラミング等についてここで詳細に述べることはできませんので、この製作例に挑戦する人は、拙著『Java & AKI-80』（CQ出版社）を参照してください。なお、秋月電子のEPROMライタキットを使ってこの製作例と同じEPROMをプログラムしたい人は、書き込みのためのインテルHEXファイルが、

```
http://nagasm.org/ASL/CQ.TXT
```

というテキストファイルとして筆者のWebに置いてありますので、これをダウンロードしてそのままお使いください。

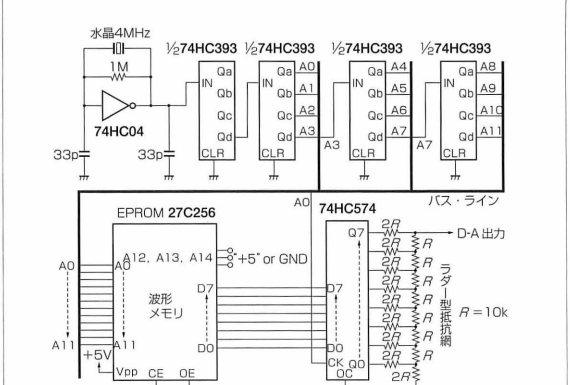
図6.38　EPROMとラッチIC



さて、**図6.39**は、本書の中でもっとも複雑な製作例となる、ディジタル方式のサウンド発生器の回路図です。もっとも、すでに第4章でこの回路図の上半分を製作していれば、それほど急に複雑になることもありませ

コラム ⑥

図6.39 ディジタル方式サウンド発生器



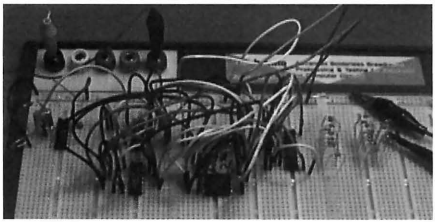


ん。回路図の約束としては、太い「**バス・ライン**」が登場している点にだけ、注意しましょう。ここでのバスというのは、1本の太いラインで複数の信号線を「相乗り」させているもので、それぞれバスから出入りしている信号名が対応しているところ同士を接続する、という約束です。

ここでは上記のように、多数のサウンド要素となる波形データの格納されたEPROM（メモリ）が用意されている、という前提です。EPROMライタ、という簡単な装置とパソコンで、このメモリに任意のサウンドデータを書き込むこともできます。電車や駅の自動音声は、現在では全て、この回路図と同じ原理のタイプで音声合成をしています。テープなどの摩耗する機械的機構が不要なシステムです。

波形メモリのアドレスのうち、下位12ビットが74HC393のカウンタ列からの出力で順に読み出されます。じつはサンプルのEPROMの場合には、1周期を256アドレスで回るようなデータが16個（4ビット）のグループとして、全部で8グループ入っています。つまり、256ワード周期のサウンド波形として

図6.40　図6.39の回路をバラックで組む



見ると、たった1個のEPROMに、128個もの異なったサウンド素材を盛り込んでいることになります。

そして、波形メモリの出力データは74HC574で「ラッチ」（保持）されて、さらにこのICのドライブ能力を活用して、そのまま「ラダー型」と呼ばれる接続の抵抗網に供給されます。ここでは詳しく解説できませんが、これがもっともシンプルなD-Aコンバータの回路です。抵抗値はRと$2R$しかありませんので、同じパーツとして袋単位で入手した抵抗を直列にして$2R$を作ります。抵抗値は10kΩとか20kΩ程度で、とにかく揃ったものであればOKです。

これだけではどのような出力が出てくるかわからないと思いますので、とりあえずこの回路を筆者が**図6.40**のようにバラックで組んで、実際にD-A出力の部分を計測した波形を以下に紹介します。これは、回路図で接続先の書いていないEPROMの3本の上位アドレス（A12、A13、A14）を「+5Vに接続」「GNDに接続」のいずれに組み合わせるか、で変えられるようになっています。電子楽器であれば、このような上位アドレスを切り替えて、音色波形ブロックを切り替えているのと同じです。

図6.41は、「A12＝GND」「A13＝GND」「A14＝GND」のときの信号波形です。これは、最初の256ワードが最大振幅のサイン波で、つぎのサイン波は振幅を7/8にして…というように次第に振幅を減衰させたような波形として並べています。昔の電子オルガンにあった「レピテイション」というような、周期的な振幅変化のサウンドとなります。

図6.42は、「A12＝＋5V」「A13＝GND」「A14＝GND」のときの信号波形です。これは、最初は普通のサイン波で、そこから次第に2倍の周波数のサイン波とミキシングしていく、そのミキシング比をなめらかに増やしていくような変化となっています。サウンドとしては、基音だけのサイン波と、2倍音のサイン波との間をモーフィング（次第になめらかに変容）しているような効果に

コ ラ ム ⑥

図6.41　A12＝GND、A13＝GND、A14＝GNDのときの信号波形

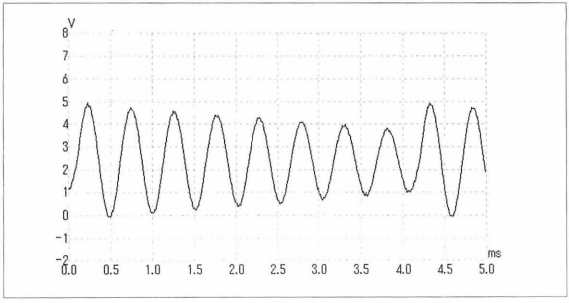
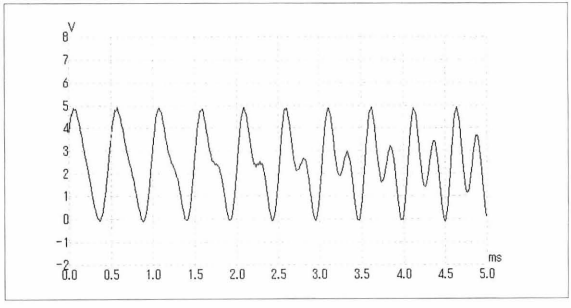


図6.42　A12＝+5V、A13＝GND、A14＝GNDのときの信号波形





なっています。

図6.43は、「A12＝GND」「A13＝＋5V」「A14＝GND」のときの信号波形です。これは、最初は普通のサイン波で、そこからPWM変調（パルス幅変調）のように、一周期の長さを縮めながら、余った時間はゼロとして持続して、サウンドとしてはピッチを変化させずに音色を変化させた例です。この変化を周期的に行うと、「デチューン」効果のような、分厚い音を簡単に作ることができます。

図6.44は、「A12＝＋5V」「A13＝＋5V」「A14＝GND」のときの信号波形で

図6.43　A12＝GND、A13＝＋5V、A14＝GNDのときの信号波形

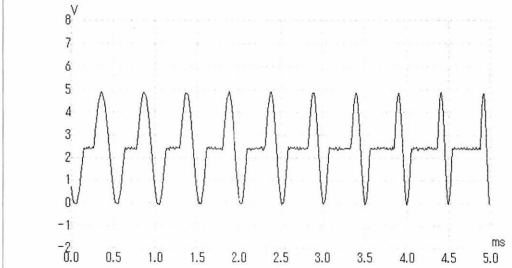
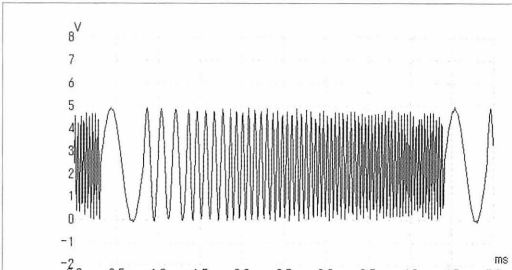


図6.44　A12＝＋5V、A13＝＋5V、A14＝GNDのときの信号波形



す。これは、最初を周波数 f のサイン波とすると、つぎの同じ時間に2周期のサイン波を2fというピッチで詰め込み、つぎには3fを3周期…というように、16倍音までの整数倍音成分につぎつぎとシフトしている、という独特のサウンドです。このまま持続音として繰り返し聞いているとあまりそう聞こえませんが、じつはこのサウンドに減衰音系のエンベロープをかけて適当なピッチのレンジを選ぶと、そのサウンドは「鉄腕アトムの足音」そのものになります。筆者もこのサウンドを実験してみて驚いたのですが、鉄腕アトムの足音はこんな仕掛けで作っていたのです。

コ ラ ム ⑥

図6.45 A12＝＋5V、A13＝＋5V、A14＝＋5Vのときの信号波形

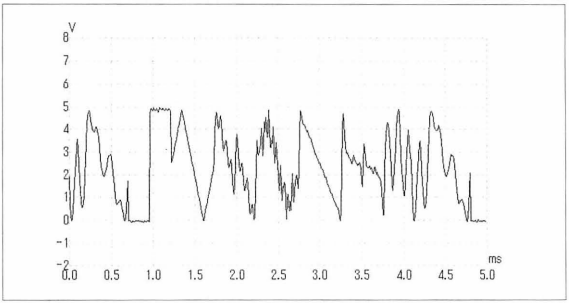




図6.45は、「A12＝＋5V」「A13＝＋5V」「A14＝＋5V」のときの信号波形です。じつはこの部分は、この波形のように上位アドレスをカウンタ出力で回してしまうと、サウンドとしては聞けたものになりません。じつはこの最上位ブロックには、定常的な256ワードの波形データとして、いろいろな自然楽器の有名な波形データを並べているのです。この図の中には、バイオリン、オーボエ、サックス、ボイス、アナログシンセ、などという音色で呼ばれる波形が入っています。これを定常的にサウンドとして聞くためには、A8-A11の上位アドレスをカウンタ393から外して、＋5VかGNDに固定します。その組み合わせの数だけの波形が入っています。ということで、ちょっとこの最後の製作例はハードな内容ですが、このあたりを理解して、電子工作の範囲をさらにマイコンまで広げてみると、「世界に一つしかないオリジナル電子楽器」を製作するのも夢ではなくなります。コンピュータエレクトロニクス技術の発展が、熱心な音楽愛好家や電子工作ホビーストに大いなる夢と可能性を提供してくれているのです。

おわりに

簡単な電子工作から始まって、LSIやDSPの話、パソコンなどのソフトウェアの話、そしてサウンド・インスタレーションからメディア・アートなど、最新のコンピュータミュージックの世界まで駆け足で紹介してきました。いずれも筆者の専門の世界（この世界を究めたくて、サラリーマンから独立してしまったほどです）なので、まだまだ語り足らないのですが、興味を持っていただける部分があれば幸いです。本書の続編として、さらに実際的な製作例などを掘り下げた本の企画もありますので、そちらも参照してください。また、筆者も編集委員の一人として深く関わった、

bit別冊、『コンピュータと音楽の世界』、共立出版

という本が1998年7月に出版されています。これは過去10年の最新の研究状況などが盛り込まれたもので、こちらもお薦めします。

サウンドというのは、視覚情報よりも人間の感情にストレートに響く、重要な情報です。そして、コンピュータエレクトロニクス技術の進展とともに、専門的な部分はブラックボックス化されるようになりましたので、音楽愛好者がいろいろとアイデアを飛翔させるための環境が、いまほど充実している時代はありません。興味がある皆さんの、この世界へのアプローチを期待しています。

付　録

図A　筆者自宅の電子工作ワークベンチ（通常はふつうのパソコンデスクにみえる）



写真でみる「電子工作」のワークベンチ

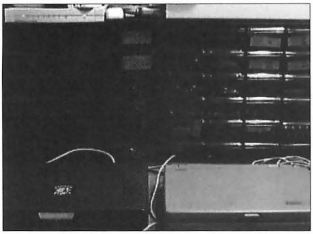
参考までに、実際に筆者の実例を紹介しながら、「電子工作」の雰囲気をお伝えしましょう。

図Aは、筆者の自宅の机の上の風景です。このシンプルな作業場で、研究も開発も執筆も通信も全て行っています。この机の上で製作された多くの特注マシンが、国内はもとより海外のあちこちで活躍しているのです(注)。

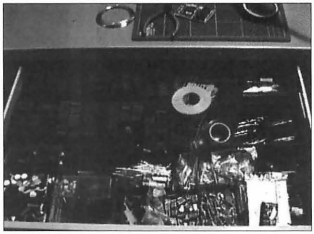
図Bは机の正面の部品棚、**図C**と**図D**は、この事務机の引き出しの中身です。ちょっと普通の事務机とは違いますね。そして、電子工作をするときにはパソコンを閉じてスペースを開け、ここに工具を並べて作業します(**図E**)。先日、フランス在住の作曲家(IRCAMという国立の研究機関に在籍)の友人から、「腕時計のように手首に取り付けたバンドで、MIDIの情報を送るコントローラを

(注)筆者が音楽情報科学の分野で開発・製作した特製マシンの製作例について興味のある読者は、拙著『Java＆AKI-80』(CQ出版社)を参照してみてください。

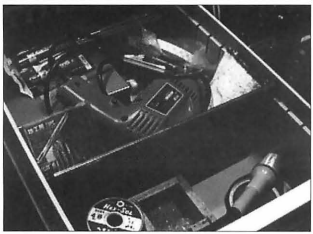
図B　机正面にある部品棚



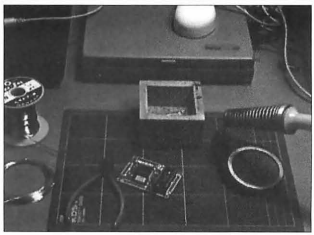
図C　事務机とは大違いの引き出しの中身①



図D　引き出しの中身②



図E　電子工作のときはパソコンを閉じてスペースをつくる



作って欲しい」というリクエストがありました。そこで、さっそくこの「電子工作」を開始しました。

まず最初の作業は、秋葉原での部品の探索です。腕時計サイズで10個程度の情報を送るとなると、とてもスイッチを並べるわけにはいきません。結局、ガード下のいつものパーツ屋さんで、小型のテンキー(600円)を入手しました(**図F**)。また、腕に巻くベルトの部分については、自転車のチェーンにズボンの裾を巻き込まれないための、マジックテープのバンドを御徒町に近いバッタ屋で発見して解決しました(500円)。これをハサミで切って短くして、アロンアルファでテンキーの裏に張り付けると、予想外にうまくいきました。**図G**は、文字通り、日曜日のまる一日の「日曜大工」で完成した、このマシンの外観です。電池駆動の小型軽量なものとなりました。

ただしこのマシンの場合には、内部に**図H**のようにマイコン回路の入った複

付　録

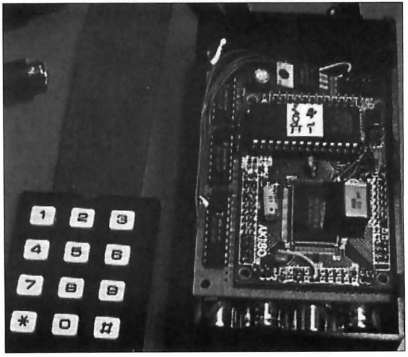
図F　小型のテンキー



図G　日曜大工で完成した新種のパフォーマンス楽器の外観



図H　マシン内部のマイコン回路



図I　ソフトウェアの開発はノート・パソコンで



雑なもので、開発の途中ではハンダ付けのハードウェアだけでなく、**図I**のように2台のパソコンを同時に動員したソフトウェアの開発も必要となります。ここでその詳細について深入りすることはできませんが、このような複雑なシステムであっても、机上の「電子工作」できてしまう、という雰囲気を感じていただけたでしょうか。ちなみにこのマシン、すでにフランスに渡って、この作曲家のヨーロッパ公演ツアーで活躍しています。

さくいん

【あ】
アナログスイッチ……31
アナログメモリ……61
アルゴリズム作曲……136
アンド……21、34
アンプ（増幅器）……8
アンプIC……9
アンプキット……54、93
イヤフォン……8
インタラクティブ・アート……160
インバータ……21、34
ウィーンブリッジ発振回路……14
エコー……38
エネルギー……9
エフェクタ……36
演奏……58
エンベロープ……28
エンベロープジェネレータ（EG）……97
エンベロープメモリ……123
オートパン……48
オア……21、34
オクターブ……22
オシレータ（発振器）……13、93
音の三要素……18
音の高さ（ピッチ）……17
オブジェクト……138
折り返しノイズ……72
音楽CD……75
音楽演奏情報……107
音源モジュール……112
音色……18
音声合成……40
オンド・マルトノ……100
音量……18

【か】
カウンタ……22
カットオフ周波数……97
記録……59
矩形波……116
グラニュラシンセシス……136
ゲート……34
ゲイン（増幅率）……14
コーラス……40
コイル……24
コンデンサ……24
コンピュータミュージック……132、148
コンプレッサー……51

【さ】
再生……58
サイン波（正弦波）……16
サウンド・インスタレーション……154
サウンドドライバ……126
サウンドファイル……74
作曲……58
サンプラー……121
サンプリング……68
サンプリング定理……72
サンプル&ホールド（S&H）……69
シーケンサ……129
周期……17
周波数……17
周波数変調（FM）……43
シンセサイザ……96
時定数……20
時分割多重化……123
水晶発振回路……20
ストリームオーディオ……67
スピーカー……8
スペクトル……17
積分回路……30
センサ……148
センサキット……152
増幅……10
ソフトシンセサイザ……126

【た】
タイマ……19
タイムスロット……123
遅延……36
遅延時間……37
超低周波オシレータ（LFO）……97
テープ……60
抵抗……24
テルミン……44、100
ディジタルIC……34
ディジタル音源……167
ディジタル信号処理プロセッサ（DSP）……106
ディストーション……49、52
ディレイ……36
ディレイビブラート……43
デューティ比……115
電圧制御アンプ（VCA）……98
電圧制御オシレータ（VCO）……96
電圧制御増幅器（VCA）……47
電圧制御フィルタ（VCF）……97
電気楽器……100
電子オルガン……101
電子楽器……96
電子工作キット……32
電子ピアノ……102
同時発音数……104
特殊効果（エフェクト）……36
トップオクターブ方式……101

トランジスタ……44
トレモロ……47、98

【な】
ネガティブ・フィードバック（負帰還）……14
ノッチフィルタ……39

【は】
ハードディスク・レコーディング……62
ハイパスフィルタ……27
ハウリング……15
波形メモリ……122
ハフマン符号化……91
ハモンド・オルガン……100
ハンダ付け……32
バッファアンプ……36
パイプライン処理……124
バンボット……48
非線形回路……13
ビート（唸り）……46
ビブラート……42、97
ピッチチェンジャー……74
フィルタ回路……23
フェイズシフター……41
フェンダー・ローズ……100
フリップフロップ……21
分周回路……22
プログラムチェンジ……111
変調回路……31
方形波……115
ボリューム……9、10
ボルテージフォロワ……29
ポジティブ・フィードバック（正帰還）……14
ポリフォニック……120
ポリフォニックシンセサイザ……102

【ま】
マイク……8
マイコン……102
マスキング効果……90
マルチティンバー……120
ミキサー……36
ミニムーグ……96
メッセージ……108

【や】
ユニゾン……41

【ら】
ラッチ……124
離散化……68
リバーブ……39
リミッター……50
量子化……68
レコード……60
レゾナンス……98
ローパスフィルタ……26、71、143
録音……58

【わ】
ワウワウ……98

【アルファベット、他】
A（attack）……99
A-D変換……67
ADSR……98
AIFFファイル……75、82
AKI-80……151
AUファイル……75、88
BMPファイル……74
BioMuse……159
CD（コンパクトディスク）……63
CD-R……63
CPTファイル……89
D（delay）……99
D-A変換……70
DAT……64
DSP（ディジタル信号処理プロセッサ）……120
DTM（デスクトップミュージック）……130
DVD……64
Director……66
EPROM……167
FFT（高速フーリエ変換）……90
GIFファイル……75
GM（general MIDI）規格……110
HMD（Head Mount Display）……156
ICC（Intercommunication Center）……156
ICMC（International Computer Conference）…159
IRCAM……174
JPEGファイル……75
LZHファイル……89
MAX……136
MD……64
MIDI……106
MP3……76、90
MP3ウォークマン……77
OPアンプ（オペアンプ）……29
Open-GL……134
PICTファイル……74
PWM変調（パルス幅変調）……170
PowerGlove……151
QuickTime……65
R（release）……99
RGBファイル……74
RMCP（Remoto Music Control Protocol）……140
S（sustain）……99
SITファイル……89
SMF（スタンダードMIDIファイル）……113
Shockwave……66
WAV（RIFF）ファイル……75、84
ZIPファイル……89
μ-law（ミューロウ）方式……88

長嶋　洋一
(ながしま　よういち)

1958年茨城県生まれ。京都大学理学部卒業。河合楽器を経て、
1991年ASL(Art&Science Laboratory)長嶋技術士事務所を開設。
1993年独立開業。技術士(科学技術庁登録の技術コンサルタント)
として企業の経営／技術指導や人材育成業務に従事するとともに、
音楽情報科学(Computer Music)の研究者・作曲家としても活躍中。
イメージ情報科学研究所研究員、静岡大学・京都芸術短期大学・
神戸山手女子短期大学・国立長野高専講師。IEEE・ACM・情報処理学会・
電子情報通信学会・音楽知覚認知学会・ICMA・JACOM・日本技術士会等
各会員。Nifty-Serve SubSysOP(FMIDI)、技術士(情報工学・電気電子)。

Eメール　nagasm@computer.org
ホームページ　http://nagasm.org

著書

『マイコン技術者スキルアップ事典』、CQ出版社
『プロ電子技術者のコモンセンス』、CQ出版社
『Java & AKI-80』、CQ出版社
『はじめて学ぶノイズ対策』、工業調査会
『はじめて学ぶ情報セキュリティ』、工業調査会
『電子回路とノイズ対策がわかる本』、工業調査会
『Java活用情報発信マニュアル』、新技術開発センター
『研究技術開発成果促進マニュアル』(共著)、アーバンプロジュース
『技術コンサルタント入門』(共著)、日本能率協会
『新製品開発がわかる事典』(共著)、時潮社
『コンピュータと音楽の世界』(共著)、共立出版

コンピュータサウンドの世界

© Yoichi Nagashima 1999

1999年5月15日　初版発行

定価はカバーに表示してあります。
乱丁・落丁本はご面倒でも小社宛お送りください。
送料小社負担にてお取り替えいたします。

著　者　長嶋洋一
発行人　蒲生良治
発行所　CQ出版株式会社
東京都豊島区巣鴨1-14-2
編集部　TEL30-5395-2447　FAX03-5395-2100
販売部　TEL03-5395-2141　FAX03-5395-2106

DTP　株式会社赤道社
印刷・製本　共同印刷株式会社
Printed in Japan


CQ
BOOKS

CQ BOOKS既刊・近刊

エレクトロニクス／コンピュータ／コミュニケーション／メディア…進展するデジタル革命を読み解くための最新技術への入門書シリーズです.

現代エレクトロニクス　常識中の常識
電気電子の基礎や画像・通信・コンピュータのツボを理解する
高木誠利 著　240頁　定価2,100円(税込)

情報系SOHOのすすめ
インターネット時代の体験的独立論
小暮裕明 著　205頁　定価1,575円(税込)

つくるGIFアニメーション
ホームページに動きを与える
土井 淳／山田治男 共著　271頁　定価1,575円(税込)

DTPとデジタル印刷
パソコンで進む本づくり革命の基礎知識
小澤 靖 著　173頁　定価1,575円(税込)

回路の回り道
ASIC設計のセンスを磨く散策のとき
小林芳直 著　184頁　定価1,680円(税込)

お話・カラー画像処理
デジタル写真はあなたをだます
洪 博哲 著　160頁　定価1,890円(税込)

ISBN4-7898-2006-8

C3055 ¥1600E

CQ出版社

定価：本体1,600円（税別）

9784789820066

1923055016002



CQ BOOKS

サウンドエレクトロニクスの基礎から
現代メディア・アートまで…
工作&実験をまじえ楽しく解説!