

# 高速 A-D, D-A 変換器を持つデータ処理機 TOSBAC-3400 のプログラミング例 (1)

菅原 正巳・勝山ヨシ子・八十島 久・尾崎 睿子

国立防災科学技術センター第3研究部

## Programming Examples of a Data Processor (TOSBAC-3400) with High-Speed Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters

(Report I)

By

M. Sugawara, Y. Katsuyama, H. Yasoshima and E. Ozaki

*National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo*

### Abstract

#### 1. Music by Computer.

A table of sine function

$$A \sin (2\pi I/N), \quad (I=0, 1, 2, \dots, N-1)$$

is stored into the core memory, where  $A$  is the amplitude,  $I$  the relative address and  $N=2^{10}$  the constant (putting  $N=2^{10}=1,024$ ). If the digital-to-analog conversion of relative address

$$I \equiv [ka] \pmod{N}, \quad (k=0, 1, 2, \dots)$$

is continued one by one with time interval of  $\Delta t$ , where  $a$  is constant, and  $[ ]$  the Gauss' symbol, then sinusoidal waves with amplitude  $A$  and cycle  $a/N\Delta t$  are gotten. By this way music with harmony and rhythm can be played by computer, where harmony is made by addition and rhythm is made by using several tables of sine function with different amplitudes.

#### 2. Digital Recording and Reproduction of Sound.

The analog-to-digital converter works with sampling intervals of  $55 \mu s$  at its highest speed, but the magnetic tape unit takes  $150 \mu s$  per word to read and write and  $40 ms$  per record to start and stop. So two buffers are prepared in the core memory, and the data obtained by analog-to-digital conversion and stored in buffer are picked up alternatively and are packed in one word (24 bits) in pairs. After picking up and packing, they are written on magnetic tape. Finally the obtained sampling interval is  $110 \mu s$ , that is  $18 kc$  in frequency. Reproduction is easier than recording. In this way the voice and music can be recorded and reproduced with high fidelity.

### 1. は し が き

1.1 昭和41年10月, 国立防災科学技術センターのデータ処理機 TOSBAC-3400 の被露式の際の公開実演で, A-D, D-A 変換器を利用した音声のデジタル録音, および D-A 変換器を利用した電子計算機による音楽を行なった. この実験は66年度の電子計算機ショーで, 当

方作成のプログラムを用いて一般に公開されたから、ご存知の方が多いと思う。

1.2 この実験は A-D, D-A 変換器を利用する実時間解析のためのソフトウェア開発の演習のためと、A-D, D-A 変換器の性能のデモンストレーションとを兼ねて計画したものであった。われわれは音声についてはしろうとであったから、その意義をあまり考えなかったが、電子計算機による音楽が公開されたのは、昭和41年9月のアメリカの音声学会が最初だそうで、しかも、その音楽とわれわれの音楽の両方を聞いた人が、われわれの方が美しい音を出すと言ってくれた。また音声の数値録音については、音声の専門家が高性能のテープレコーダを持参して、われわれの計算機で録音、再生を試み、バイオリン、フルート、ピッコロ等、種々の楽器の音を入れ、また、種々の雑音を録音、再生して、その録音精度がよいことを認めてくれた。

以上のような次第であるから、電子計算機の音楽や、数値録音のあらましについて記録して置くことに、いくらかの意義があると考えられる。

1.3 われわれの計算機に付置された A-D 変換器は 30 kc/s, マルチプレクサは 100 kc/s, D-A 変換器は 140 kc/s であって、A-D は 8 チャネル, D-A は 2 チャネルである。ただし以上の性能は、それぞれの機器の性能であって、計算機と連動するときは、種々の制約によって性能が落ちる。たとえば A-D 変換器が最大の能力を発揮するのは、1 チャネルで、A-D 変換した結果を逐次磁心記憶装置に格納する場合である。このときの A-D は約 18 kc/s の能力を示す。D-A については、磁心記憶装置の中の数値を逐次 D-A するときが、最高の能力を示し、これが約 50 kc/s である。われわれの計算機の磁心記憶容量は 16,000 語であるから、上記の最高性能を出すとき、A-D 変換は 1 秒足らずしか続かないし、D-A 変換では 0.3 秒程度である。

外部記憶装置を使ったり、計算機で処理したりしながら、A-D, D-A 変換をすれば、それぞれの機能により、種々の制約が生ずる。計算機の演算時間のほかに I/O 機器の性能、I/O の動作開始、終了に要する時間や、優先度制御装置の応答の速さ等を考慮しなければならない。

1.4 高速の A-D, D-A 変換器が設置されて、それをどのように使いこなすかが大問題であった。高速であっても、周期的なものであればシンクロスコープで観察できる。その点から言えば、過渡的現象や破壊現象などをとらえることが望ましいが、実験設備が大変である。A-D, D-A の性能にほぼ見合って、しかも身近な有り合わせの機械で実験できるものということから、音声を扱うことにした。

## 2. 電子計算機による音楽

2.1 電子計算機で音を出すには、D-A 変換で階段状に出した電圧で波形を作り、その電圧波形をスピーカで音に変えればよい。

1,000 c/s 程度までの音を出すとし、1,000 c/s の音の波形を 10 区間程度に分けて階段波形で出すとすれば、D-A 変換は 100  $\mu$ s 程度の間隔ですればよいことになる。

TOSBAC-3400 の演算時間は、固定乗除算が約  $50 \mu\text{s}$ 、そのほかに浮動小数点演算に時間がかかるが、それらを除けば 1 演算約  $5 \mu\text{s}$  である。したがって D-A 変換を  $100 \mu\text{s}$  で行なうことを目指せば、乗除算なしにして、約 20 ステップの命令が使える。

計算機で振幅  $a$ 、周波数  $f$  の正弦波を作るには、アナログ計算機におけるフィードバック方式にならない、次の式を用いればよい。

$$x_n = (2 \cos 2\pi f \Delta t) x_{n-1} - x_{n-2}, \quad n \geq 2,$$
$$x_0 = 0, \quad x_1 = a \sin 2\pi f \Delta t.$$

ただし  $\Delta t$  は D-A 変換の間隔である。

残念ながらこの方式は乗算を含むので利用できない。

もちろんこの方式で正弦波を作り、磁気テープに格納し、磁気テープから取り出しながら D-A 変換して音を出すこともできるが、それでは面白くない。磁心記憶装置の中だけのやりくりで、波形を作りながら音を出したい。

2.2 最初に試みたのは、磁心記憶装置の中に種々の音程の音の 1 波長分の波形を作って置く方法であった。われわれの計算機が設置されたのは昭和 41 年 3 月で、A-D, D-A 変換器が動き出したのは 4 月であったが、5 月には上記の方法で、計算機が歌をうたい出した。

八十島ははじめ、波形に工夫を加えて、よい音を出そうとした。正弦波はやや単調な音を出すので、波形をかえて高調波を入れた方が低音部では感じのよい音が出るが、高音になるといやな音になる。高音になるにしたがって正弦波に近づけなければいけないらしい。音声は専門でないし、歌以外にも仕事が多いので、結局正弦波を用いることにした。

2.3 波形を作って置く方法の欠点は、高音部になると音程が狂うことである。たとえば  $50 \mu\text{s}$  ごとに D-A 変換をするとすれば、磁心記憶装置内の 1 波長のくり返しを行なう以上、音波の周期は  $50 \mu\text{s}$  の整数倍に限られる。したがって、高音になると、音程の狂いが目立つのは原理的にやむをえない。

これを救う一つの方法は、高音に対しては数波長分の波形を入れて置くことである。これによれば  $50 \mu\text{s}$  の分数倍で近似できるから、最良近似の分数を選ぶことにより、音程ははるかに正確になるであろう。しかしともかく近似にすぎない。

音階が有理数比になっていれば、この方法で正確な音が出るはずである。そこでピタゴラス音階を試みてみたが、平均律になれたわれわれには、何とも不思議な感じで、実用になりそうもない。ピタゴラス音階による新曲の作曲がまず必要であろう。

2.4 乗算なしで正確な音程を出す方法として、のこぎり波を出す方法を考えた。

$a$  ずつ加えていって、ある限界  $h=2^k$  をこせば、 $h$  を引く。これをくり返せば、周期  $h\Delta t/a$  の波が出る。 $h$  を引く所は、マスクを作って置いて論理積をとればよい。これで高い周波数まで、正確な音程で音が出る。

ここまで来て欲が出て、のこぎり波より三角波にしたくなった。その後、のこぎり波、三角

波を実験してみたが、のこぎり波は高音部で音質が悪いようである。三角波は正弦波と変わらない。

三角波の場合は、限界に当たった所で、折り返せばよい。ところが折り返すことになる、少し命令が長くなる。何とかならないかと工夫するうちに、任意の波形を、正確な音程で出すことができることに気がついた。

2.5 任意の波形の1波長分を、波長を  $n$  等分した分点ごとの関数値で与える。これを磁心記憶装置内の  $a$  番地から  $a+n-1$  番地にまでつめて置く。 $n$  としてはたとえば、 $2^{10}=1,024$  をとる。 $a$  番地から始めて、 $m$  番目ごとの番地をとり、その内容を  $\Delta t$  の間隔で D-A 変換する。 $a+n-1$  番地より外にとび出したら、法 (mod.)  $n$  でもとに戻ってくり返す。

つまり、のこぎり波のときに D-A 変換すべき変数値に対して行なったと同じ操作をアドレスに対して行ない、番地（それが変数になる）に対する関数値を D-A 変換するのである。

この方法により周期  $n\Delta t/m$  の波を作ることができる。

以上では簡単のため  $m$  を整数として説明したが、 $m$  は任意の数でよろしい。その場合は最後にアドレスを決定する所で整数にすればよい。われわれは簡単のため、

小数部分を切り捨てた。 $n=1,024$  にとってあれば、切り捨ての誤差は1波長の  $1/1,024$  以下である。その誤差の影響が関数値に及ぶわけであるが、われわれの D-A 変換器が符号を含み12ビットであり、正弦波の山と谷の近くでは変数値の誤差は関数値にきかないのだから、 $1/1,024=2^{-10}$  の誤差を気にする必要はない。

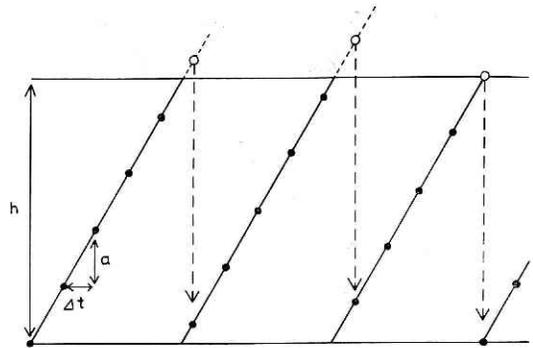


図-1

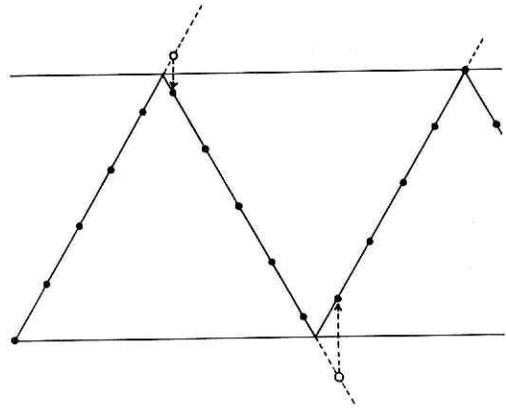


図-2

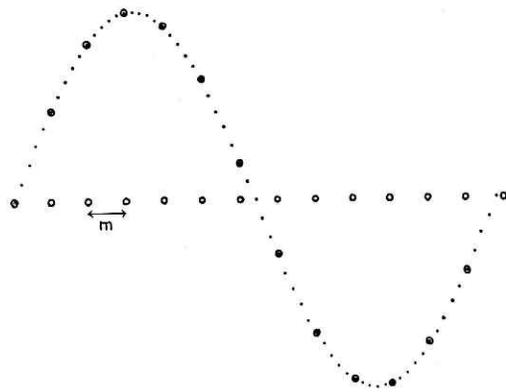


図-3

この方法で広い音域にわたって、正確な音程が出せることになった。

2.6 以上の方法でメロディーが出るようになったから、そこで欲が出て、リズムもハーモニーも出そうということになった。あとは手間の問題である。

リズムの方は、振幅の異なる波形を用意して置いて、強弱に合わせて適当な波形を選べばよい。前述したように乗算は使えないのである。振幅の異なる波形は多数あった方が、それだけ変化が多いわけであるが、10:7:4のもの3種類を用いることにした。このようなことは音楽を聞いてみて定めた。

2.7 ハーモニーについては2通りの方法が考えられる。われわれの計算機システムには D-A 変換器が2チャンネルついている。そこでそれぞれのチャンネルに高音用、低音用のスピーカをつなぎ、高音、低音を別々に出す方法である。他の一つの方法は、数値の所で加算を行ない合成波の電圧を D-A 変換する方法である。どちらも可能であるが、電子計算機ショーで行なったのは、後者である。

ハーモニーをつけると、毎回の命令のステップ数が少し長くなって、D-A 変換は約 130  $\mu$ s ごとに行なわれる。ただしハーモニーといっても、2音を出すもので、音の数を増せばそれだけ命令が長くなって D-A 変換の間隔が開く。そこで2音で我慢することにした。したがって2音だけですむように、適当に編曲をする必要があった。

2音だけでも、ハーモニーをつけた効果は絶大で、音を出す実験から音楽の域に変わった感がある。

2.8 さらに欲をいえば、音を順次強くしたり、弱くしたりできればよいのであるが、乗算が使えないので、うまくいかない。D-A 変換器を出てからアナログ機構を工夫する方法もあるが、それを考えの外に置いた。あくまで計算機で作った波形がそのまま音楽になることをねらったのである。

### 3. 数値録音の方法

3.1 数値録音とは、結局なるべく短い間隔で A-D 変換を行ない、得られたデータを磁気テープにしまう方法である。

磁気テープが速ければ問題がないが、われわれの所にあるのは 28.8 kc/s (キロキャラクタ) であって、1語の読み書きに 150  $\mu$ s かかる。さらに磁気テープの始動、停止に合計 40 ms かかるから、A-D 変換器の最高性能 55.6  $\mu$ s 間隔で読み込んだデータをそのまま磁気テープにしまうことはできない。

たとえば、磁心記憶装置内に読み込んだデータを三つ日ごとにとって磁気テープにしまうことを考える。55.6  $\times$  3 = 166.8 ( $\mu$ s) であるから1語しまうのについて 16.8  $\mu$ s の時間のゆとりがつく。これでテープの始動、停止の 40 ms を浮かせるには約 2,400 語分をまとめればよい。しかし磁気テープにしまう1語に対し、A-D 変換は3語いるのだから 2,400  $\times$  3 = 7,200 語を

まとめなければならない。A-D 変換してコアにしまう部分と、コアにしまったものを三つ目ごとに磁気テープにしまう部分とバッファを2個用意しなければならないとなると16,000語のわれわれの計算機の限界に近くなって、少々危険である。

3.2 以上のことは時間関係の説明のために述べたもので、われわれはまずデータ2個を1語にバッキングすることを目指した。A-D 変換器は符号を含め11ビット、われわれの計算機の1語は24ビットであるから、データ2個を1語につめるにはちょうどよい。

ただし、データ2個を1語にしてもA-D 変換にかかる時間  $55.6 \times 2 = 111.2 (\mu s)$  より磁気テープへの書き込みの  $150 \mu s$  の方が長い。そこで半分を捨てて、データを1個おきに、2個ずつ1語につめ込み、それを磁気テープにしまうことにした。

この場合4個のデータをA-D 変換するのに対し、1語が磁気テープに書き込まれるから、A-D 変換の  $55.6 \times 4 = 222.4 (\mu s)$  に対し、書き込み  $150 \mu s$  で、1語につき約  $70 \mu s$  のゆとりができる。これで磁気テープの動作の  $40 ms$  をかせぐには語数で560語、A-D 変換の個数で2,240個をまとめればよいことになる。バッファが二ついるが、16,000語の磁心記憶容量で十分である。実際にはもう少しゆとりがほしいから、A-D 変換で5,000個ばかりをまとめることにしている。

このほかに、計算機本体がA-D 変換されて磁心記憶装置内にあるデータを一つおきにうるぬいて、2個を1語につめこむ作業があるが、これに要する時間は短い。

3.3 動作はつぎのように行なわれる。

- (1) A-D 変換をしてその結果を  $a_0$  (または  $a_1$ ) 番地から、 $(a_0+n-1)$  番地まで順次つめよという命令を出す。この命令は I/O チャンネルで実行されるから、計算機の本体は直ちに次の段階に移る。
- (2) 前の段階でA-D 変換され、 $a_1$  (または  $a_0$ ) 番地から  $(a_1+n-1)$  番地につめられているデータを一つおきにとり、2個ずつ1語につめ込んで整理する。データを整理しながらつめていけばよいから、新たなバッファは不要である。
- (3) 整理が完了したら、磁気テープに書き込む命令を出す。この命令は I/O チャンネルで実行される。I/O チャンネルは2チャンネルあり、A-D 変換器と磁気テープとは別のチャンネルにつないであるから、併行して動作が行なわれる。
- (4) 本体は磁気テープに書き込みの命令を出すと、直ちに次のA-D 変換の命令を出して置く。そうすると  $n$  個をA-D 変換せよという命令の実行の終了とともに、次のA-D 変換の命令が実行に移されることによって、A-D 変換が休みなく続けられる。

3.4 問題はA-D 変換命令のつなぎの所である。5,000個ずつのデータをA-D 変換する場合、A-D 変換のつなぎ目は約  $280 ms$  ごとにくる。1秒に3~4回のごとであるから、数値録音のためにはさしつかえない。しかしA-D 変換された結果をよく見ると、どこでA-D 変換命令が出たか、そのつなぎ日がわかる。

それに関しては、命令の中の細部の時間関係を追跡する必要があったが、A-D 変換する個数  $n$  として

$$n \equiv 3 \pmod{4}$$

の奇数を用いれば、A-D 変換命令のつながりの間隔が、A-D 変換の間隔と全く同一になることがわかった。

$n$  が奇数であれば、A-D 変換された 0 から  $(n-1)$  番目の  $n$  個のうち、0 番目、2 番目、……、 $(n-1)$  番目が拾われ、奇数番が捨てられる。最初の 0 番目と、最後の  $(n-1)$  番目が拾われることで、つながりがうまくいく。

3.5 数値録音したデータを再生するのは簡単である。バッキングをほどこき、順次 D-A 変換して行けばよい。D-A 変換は短い時間でできるので、適当な無効命令を入れて、時間間隔を A-D 変換に合わせる手間だけである。

3.6 以上は、なるべく早く A-D 変換を行なうことを目的とした。しかし正確な時間間隔で A-D, D-A 変換を行なうには、水晶発振器からパルスを出し、その割り込みで、A-D, D-A 変換を行なう方がよい。その場合は、毎回 A-D, D-A 変換命令が出される。割り込みを用いると、優先度制御装置の動作時間を毎回見込む必要もあり、現在、われわれの所では  $200 \mu\text{s}$  が最小の時間間隔である（水晶発振器の性能にもよる）。この場合は磁気テープの速さは問題にならない。

(1967年12月20日原稿受理)