

## 第1章

# DSPプログラミングの 第一歩

DSP (Digital Signal Processor) が登場してから、もう四半世紀以上が過ぎました。筆者が最初に扱ったDSPは、テキサス・インスツルメンツ社(以降TI社と略す)のTMS32010(写真1.1)<sup>注1.1</sup>でした。このDSPは5 MIPSの処理能力を持っていましたが、本書で取り上げているDSPの一つであるTMS320C6416Tは8,000 MIPSの処理能力を持っているので、半導体技術の驚異的な進歩には目を見張るものがあります。

処理能力の向上ともなって、DSPの応用分野も飛躍的に広がっています。身近なところでも携帯電話をはじめ、デジタル・カメラ、デジタル・ビデオ・カメラなどにも使われています。

そのため、これからDSPのプログラミングを始めたいと考えている方も多いかと思います。本書では、TI社から発売されているDSK (DSPスタータ・キット)を使って、デジタル信号処理のプログラムを作っていきます。

このDSKは、DSPが搭載されたボードだけではなく、C/C++コンパイラも付属し、さらにDSPが搭載されたボードには2チャンネルのA-D/D-A変換器が搭載されているので、デジタル信号処理システムを簡単に作ることができます。これを使って、アナログ信号の処理をDSPで行い、その結果を再びアナログ信号に直して、音として聞いたり、波形を観測したりということもできるので、これからデジタル信号処理のプログラミングを始めようと考えている人にもうってつけではないかと

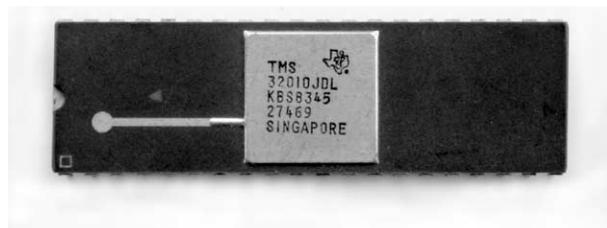


写真1.1  
TMS32010(セラミック・パッケージ)

注1.1：セラミック・パッケージで、1985年当時1個20,000円だった。

思います。

なお、本書の中で色々な略号が出てきますが、これらについては基本的に最初に出てきたところで説明します。しかし、本書を最初から順には読まないケースもあり、また後の方を読んでいて略号の説明がどこにあったのかわからなくなるケースもあります。さらには、ある程度一般的になっている略号については説明していないケースもあります。そこで、本章の最後に、本書の中に出てくる略号をまとめておきます。

## 1.1 DSPスタータ・キットの概要

本書で扱う DSP スタータ・キット(以下 DSK と略す)は2種類です。一つは浮動小数点演算用のハードウェアを内蔵している TMS320C6713B が搭載されている C6713 DSK で、もう一つは浮動小数点演算用のハードウェアは内蔵していませんが、それ以外の処理能力は TMS320C6713B よりもさらに高い TMS320C6416T が搭載されている C6416 DSK です。各 DSK の主な仕様を表 1.1 に示します。

写真 1.2 に、C6713 DSK の外観を示します。C6416 DSK も、ボードのサイズだけでなく IC やコネクタ等の配置もこれとほぼ同じです。写真 1.3 には、C6416 DSK に搭載されている TMS320C6416T の写真を示します。

このボードでは、DSP と外部メモリのインターフェースやホスト・ポート・インターフェース用の信号、その他に DSP からの信号がボード上のコネクタに接続されているので、ハードウェアを拡張することも可能です。

DSK には、Code Composer Studio (以下 CCS と略す) というアプリケーション・プログラム開発用の統合環境が付属してきます。その中には C/C++ 言語のコンパイラも含まれているので、この上で C/C++ 言語ベースでプログラムを開発することが可能です。また、この CCS には DSP/BIOS と呼ばれるリアルタイム OS も付属しており、複雑な多重割り込みを持つようなシステムを簡単に作成したり、リアルタイムでデバッグしたりということも可能です。

なお、本書ではプログラミングに焦点を当てて書いているため、DSK 自身についてはあまり説明を行っていません。そこで、DSK についてもっと詳しいことを知りたい読者のために、C6713 DSK について詳しい解説がある書籍[参考文献1]) を章末に示しておきます。

表 1.1 本書で扱う DSK の仕様 (2008 年 4 月 1 日時点)

項目	C6713 DSK	C6416 DSK
搭載されている DSP	TMS320C6713B	TMS320C6416T
クロック周波数	225 MHz	1 GHz
最大処理能力	1,800 MIPS/ 1,350 MFLOPS	8,000 MIPS
搭載されている外部メモリ	16 M バイト	16 M バイト
アナログ信号入出力用 IC	TLV320AIC23	TLV320AIC23
PC とのインターフェース	USB	USB

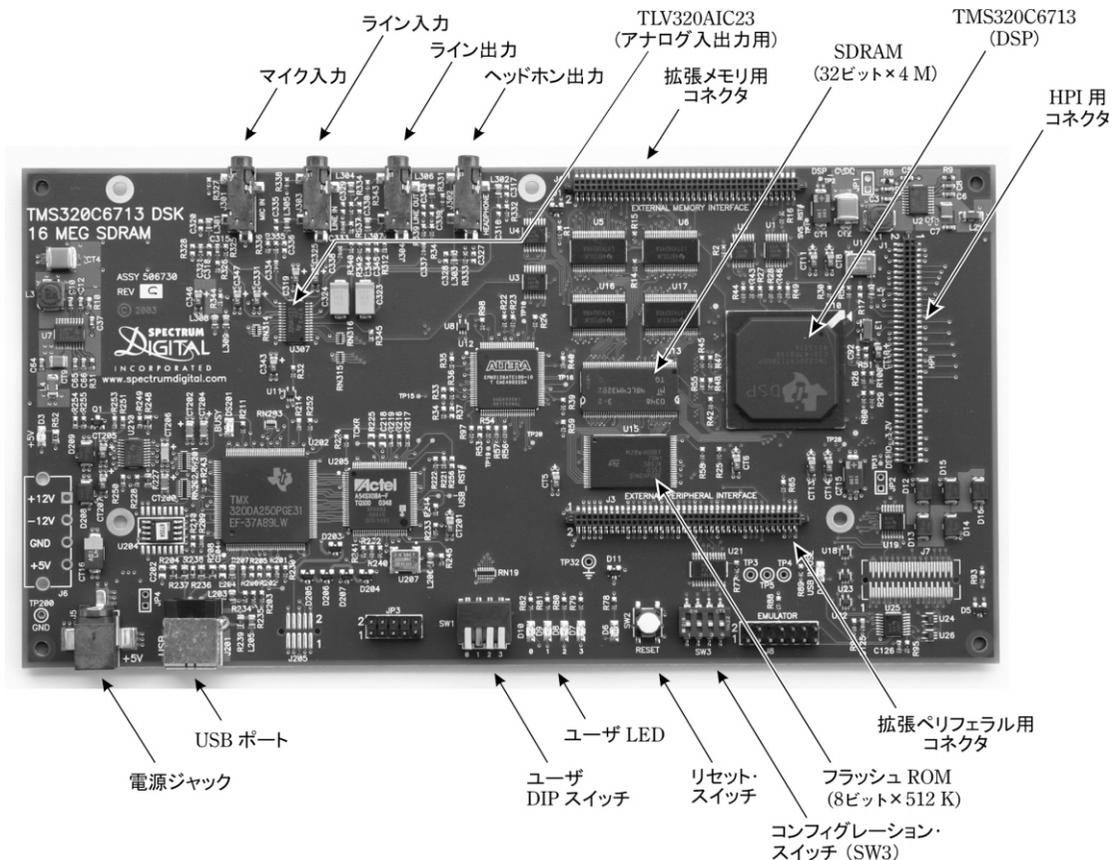


写真1.2 C6713 DSK ボード (rev. C)

写真1.3  
C6416 DSK ボードに搭載されている  
TMS320C6416T



## 1.2 TMS320C6000シリーズのDSP

TMS320C6000シリーズのDSP (以下C6xと略す)の最初の製品は、1997年に発表されています。C6xの大きな特徴は、設計段階でのコンセプトです。プログラム開発を従来のようなアセンブリ言語



これはDSPではなくRISCプロセッサではないかという感想を持ったくらいです。

しかし、今回使用するもう一つのC6416は、画像処理や通信などのアプリケーションに特化した特殊命令やSIMD (Single Instruction Stream Multiple Data Stream) 型の命令<sup>注1.4</sup>などのように、汎用のCPUが持っていないような命令も備えています<sup>4)</sup>。

なお、C6xの内部構造に関しては優れた解説書<sup>5)</sup>がすでに発行されていますので、詳しいことはそちらにゆずります。

## 1.3 DSPのプログラミング——アセンブリ言語からC言語へ

従来のDSPのプログラミングといえばアセンブリ言語というのが相場でした。Cコンパイラも発表されていましたが、アセンブリ言語で開発したプログラムに比べると、実行効率が非常に悪く、また実行コードのサイズも大きくなるということで、どうしてもアセンブリ言語に頼らざるを得ない状態でした。

しかし、C6xはVLIWアーキテクチャを採用しており、最大で8個の命令を並行して同時に実行することができます。また、C6xはパイプライン処理を採用しているため、分岐、ロード、ストアの各命令が、遅延分岐、遅延ロード、遅延ストアになっており、遅延スロットの数もそれぞれ異なっています。以上のことから、C6xのプログラムをアセンブリ言語で開発する場合に、実行効率を上げ、しかも実行コードのサイズを小さくするように最適化を行うのは、使用するDSPを熟知していないかぎり、至難のわざです。

また、前の節で書いたように、C6xはC言語でプログラムを開発することを前提にアーキテクチャが設計されています。そのため、C言語でプログラムを作成しても、アセンブリ言語で作成されたものに匹敵する実行スピードが得られるようになりました。

したがって、DSPの持っている性能を最大限に引き出す場合を除いて、多くの場合はC言語でプログラムを作成しても十分に実用的なプログラムを作成できる時代になりました。DSPのプログラムを開発する際の“アセンブリ言語の壁”は、もう過去のものといってよいでしょう。また、それに伴って、プログラミングを行うという立場にかぎって考えれば、DSPの中身を詳しく知る必要はなくなったといっても過言ではないでしょう。

## 1.4 DSPと汎用CPU

本格的な商業ベースのDSPが世の中に現れたのはNECの $\mu$ PD7720が世界初で、1980年のことです。DSPが誕生した経緯やその後の動向については、技術的なこと以外も含めて、直接開発に関わった元NECで現在首都大学の西谷教授による解説記事<sup>6)</sup>に詳しく載っています。その開発にあたっては、

注1.4：たとえば、32ビットのレジスタを四つに分け、それぞれ8ビット同士のデータの乗算を一度に行う、つまり4組の乗算を一度に行う命令など。

高速のハードウェア乗算器を内蔵することが大きなポイントであったということです。

筆者が最初に使ったDSP<sup>注15</sup>はTI社のTMS32010<sup>7), 8)</sup>で、高速の乗算器を内蔵しており、乗算を1クロック(200 ns)で実行できるというのが大きなセールス・ポイントでした。

このように、DSPが世の中に出てきた当時は、乗算を高速に実行できるということが、汎用のCPUと比べてときの大きな特徴でした。もちろん、その乗算器を有効に働かせるため、乗算器にデータを転送するスピードを上げるために改良型ハーバード・アーキテクチャ<sup>注16</sup>を採用して複数のバスを持たせたり、並列動作を取り入れたり、クロックを上げるためパイプライン処理を取り入れたりすると、高速化のための工夫が各所に取り入れられ、汎用CPUとはかなり異なったアーキテクチャでした。

しかし、LSIの集積度が急速に向上するにつれて、汎用CPUでも高速化のためパイプライン処理を取り入れ、高速の乗算器などを内蔵するようになり、複数の演算器で並列処理するようなことが当たり前前の時代になってきました。

一方、本書で取り上げているC6713やC6416を含むC6xシリーズのDSPの命令体系を見ると、1.2節でも書いたようにRISCプロセッサの特徴を取り入れたものになっています。さらに、C6xシリーズのもっとも高性能な“C64x+コア”ではスーパーバイザ(特権)モードも取り入れており、こうなるともう汎用CPUと区別がつきません。

このように、汎用CPUもDSPもそれぞれお互いの長所を取り入れて発展してきており、現在ではあえて両者を区別する必要はないのではないかと思います。

## 1.5 本書のプログラムを作成するにあたって

本書で示しているプログラムは、基本的にC++言語を使って書きました。そのため、プログラムの書法もC++流になっています。C++流の主な点を、次に示します。

たとえば、`#define`による定数の定義は、どうしても`#define`を使わなければならない場合を除いて使いません。その代わりに、定数の宣言の際には`const`を使っています。また、`#define`によるマクロの定義もC言語ではよく使いますが、ここでは使わず、インライン関数を使っています。また、ヘッダ・ファイルをインクルードする際のスタイルも、標準ライブラリを使う際はC++のスタイルを採用しています。たとえば、`<math.h>`とは書かずに`<cmath>`と書いています。

さらに、ポインタもできるだけ使わないようにしています。そのため、関数で処理した結果を呼び出し側に戻す場合には参照を使っています。

その他、C++言語では、変数や定数の定義はどこで書いてもかまわないので、たとえばfor文では、次のような書き方を使っています。

注15：筆者は最初、 $\mu$ PD7720のEPROMバージョンである $\mu$ PD77P20の使用も考えていたが、プログラム・メモリが内蔵のため、すべて手作りという環境では手を出しにくかった。その後TI社より、プログラム・メモリが外付けのTMS32010が発表され、結局はそれが筆者の最初に使ったDSPとなった<sup>8)</sup>。

注16：ハーバード・アーキテクチャとは、メモリ空間がデータ用とプログラム用に分離しているようなアーキテクチャで、そのためバスもデータ・バスとプログラム・バスに分離されている。

```
for (int n=0; n<N; n++) ……
```

ただし、大部分のプログラムではクラスを新たに作るということはありません。もちろん、クラス(class)を新たに作った方がプログラムを作りやすくなる場合や、全体の見通しがよくなる場合には、クラスも使っています。しかし、本文の中でも説明しているように、作成したクラスもあまり本格的なものにはしていないので、クラスのごく基本的なことがわかっているならば、プログラムを読むのは問題ないと思います。

DSKでプログラムを作成する際にいちばん厄介なのは、デジタル信号処理の部分ではなく、DSPのMcBSP<sup>注1.7</sup>とA-D/D-A変換器やフィルタなどが集積されたICであるTLV320AIC23とのインターフェースの部分です。そこで、このインターフェースの部分ブラック・ボックスとして扱えるように、クラスを作成しました。本書では、このクラスはすでに与えられているという前提でプログラムの説明を行っています。そのため、インターフェース部分に対するクラスについては、本文ではなく付録で簡単に説明するに留めています。

また、プログラムのスタイルも、できるだけシンプルに、しかもわかりやすくなるよう気を付けました。というのは、C6713やC6416はデジタル信号処理のスピードを上げるためのSIMD型の並列演算命令を持っており、それをC/C++言語のレベルでも利用することができます。そのような並列演算命令を使えば、実行効率のよいプログラムを書くことができます。また、コンパイラが実行効率のよい実行コードを生成できるように、コンパイラに色々な情報を与えるためのプラグマ(#pragma)も提供されています。

しかし、SIMD型の並列演算命令やプラグマを使うことによって、色々と細かなプログラミング上のテクニックが必要になるため、できたプログラムも読みにくくなります。また、DSPが変われば、命令や対応するプラグマも変わってくる可能性があります。そこで、本書では、並列処理命令やプラグマは使わないでプログラムを作成しました。

## 参考文献

- 1) 山口 晶大；「はじめてのDSP活用大全」, CQ出版社, 2006年.
- 2) Ray Simar；「米TIのDSP, MPUに先駆けて最大8命令のVLIWを採用」, 日経エレクトロニクス, 1997年6月16日号, No.691, pp.135-146, 日経BP社, 1997年.
- 3) John L. Hennessy, David A. Patterson著, 富田, 村上, 新實 訳；「コンピュータ・アーキテクチャ」, 新装1版, p.191, 日経BP社, 1994年.
- 4) “TMS320C6000 CPU and instruction set reference guide”, 文献番号：SPRU189F, Texas Instruments, 2000年.
- 5) 服部 基保；「TMS320C6000活用ハンドブック」, CQ出版社, 2007年.
- 6) 西谷 隆夫；「DSPの誕生とその発展(前編, 後編)」, Fundamentals Review, 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ, 前編：Vol.1, No.4, pp.17-29, 2008年4月, 後編：Vol.2, No.1, pp.9-21, 2008年7月.
- 7) “TMS32010 User’s Guide”, 文献番号：SCJ1104, 日本テキサスインスツルメンツ, 1984年.
- 8) 三上直樹；「アナログ信号のデジタル処理を実現するTMS32010評価システムの製作」, トランジスタ技術, 1986年8月号, pp.461-470, CQ出版社, 1986年.

---

注1.7：多チャンネル対応のバッファ付きシリアルポート。