

アナログ/デジタル変換入門

— 原理と回路実装 —

理学博士 和保 孝夫 著

コロナ社

ま え が き

今日、情報処理はデジタル化されている。一方、人間が認識できる情報はアナログである。また、デジタル機器間で情報を通信するために必要な電気信号や、電波、光などもアナログである。そのため、デジタルとアナログを相互に変換する装置が必要になる。具体的には、アナログ/デジタル (A/D) 変換器およびデジタル/アナログ (D/A) 変換器と呼ばれるもので、両者を合わせてデータ変換器とも呼ばれる。本書では、A/D 変換および D/A 変換を初めて学ぶ学生やエンジニアを対象として、原理と回路実装の基礎をできるだけわかりやすく説明する。

デジタル情報処理の応用が広がれば広がるほど、デジタルとアナログのインタフェースとしてのデータ変換器の重要性も高まる。いま注目されている IoT (internet of things) や、センサネットワーク、ロボット、自動運転などでも、温度、圧力、加速度などの物理量をセンサで電気信号に変換し、マイクロコントローラに読み込ませるためには、アナログをデジタルに変換する A/D 変換器が必要である。また、コントローラの処理結果に基づきアクチュエータを駆動するためには、デジタルをアナログに変換する D/A 変換器が必須である。AI (artificial intelligence) も豊富なネット情報を活用する必要がある、それを支える高速情報通信網には高性能データ変換器が組み込まれている。これらの応用範囲が拡大すると、データ変換器に対する要求性能が一層高度化し、高性能化により新しい応用分野が開けていく、というダイナミックな展開が当分続くであろう。

このように重要な役割を担っているデータ変換器の研究開発は、実際、ここ 20 年ほどの間で急速に進んだ。CMOS 集積回路技術の飛躍的な進歩により、従来は実現が困難であった変換方式が見直されたり、デジタル技術を駆使したア

ナログ回路の校正手法が導入されるなど、新しい魅力的なアイデアが次々と提案され、回路実装により優れた性能が実証されてきた。マイクロコントローラのI/Oに埋め込まれたIPコアも考えると、われわれの身の回りには無数のデータ変換器が散りばめられているといっても過言ではない。

英語で書かれたものを含めて、本分野に関する良書は少なくない。また、集積回路に関する国際会議や専門論文誌では、データ変換器に関する話題が多く取り上げられている。さらに、ネット検索をすれば、断片的ではあるが、多くの有益な情報が得られる。セミナーやチュートリアルも頻繁に開催されている。それでも、データ変換器の技術基盤は回路設計から信号処理技術、システム応用まで、幅広い分野と密接に関連しているため、多くの仕事を抱えるエンジニアにとって、系統的に学ぶには敷居が高いテーマではなかっただろうか。

本書では、最先端の話題にも配慮しながら、この分野の全体像を把握できるように題材を選び、体系的に整理して述べた。これからデータ変換器の研究開発を進めようとしている若手研究者だけではなく、データ変換器のユーザとして、新しい装置やシステムを開発しようとしているエンジニアも念頭に置き、執筆を進めた。データ変換器の基本を知ることは、データシートに記載された仕様の「行間」を読み解き、目的とする装置やシステムを効率良く設計・開発することに資すると考えたためである。もちろん、CMOS集積回路や情報通信技術を学んでデータ変換器に興味を持った学生諸君がこの分野をさらに深く学ぶための手引きとなり、基本的なアナログCMOS回路と最先端データ変換器のギャップを埋めるために役立つことも期待している。

本書の執筆にあたっては、これまでの多くの方々との議論を参考にさせていただきました。また、私の研究室の卒業生には原稿準備の段階で有益なコメントをいただきました。さらに、編集にあたりコロナ社の皆様にはたいへんお世話になりました。この場をお借りして、皆様に深い感謝の意を表したいと思います。

2019年2月

和保孝夫

目 次

1. はじめに

1.1 データ変換器の役割	2
1.2 データ変換器の動作原理	4
1.2.1 A/D 変換器	4
1.2.2 D/A 変換器	9
1.2.3 A/D 変換器に内蔵された D/A 変換器	11
1.3 性能と技術動向	13
1.4 本書の目的	18

2. A/D 変換の基本原則

2.1 サンプリング	21
2.1.1 サンプリング定理と折り返し	21
2.1.2 オーバーサンプリングとアンダーサンプリング	33
2.1.3 ジッタと SNR	36
2.1.4 S/H 信号	39
2.2 量子化	41

3. 基本回路ブロック

3.1 サンプル/ホールド回路	47
3.1.1 基本回路	47

3.1.2	S/H 回路の出力波形	51
3.1.3	非理想要因	53
3.1.4	各種回路	60
3.1.5	ブートストラップスイッチ	65
3.1.6	熱雑音	70
3.1.7	消費電力	73
3.1.8	ジッタ	75
3.2	コンパレータ	78
3.2.1	オペアンプを利用したコンパレータ	79
3.2.2	多段コンパレータ	85
3.2.3	ラッチ付きコンパレータ	87

4. D/A 変換器

4.1	基本動作	93
4.2	性能指標	96
4.2.1	スタティック性能	96
4.2.2	ダイナミック性能	99
4.3	抵抗ラダー D/A 変換器	100
4.3.1	電圧分圧型	100
4.3.2	電流加算型	105
4.4	容量 D/A 変換器	108
4.4.1	電圧分圧型	108
4.4.2	電荷シェア型	111
4.4.3	ハイブリッド型	112
4.5	電流切替型 D/A 変換器	113

5. ナイキスト型 A/D 変換器

5.1	性能指標	118
5.2	フラッシュ型	122
5.3	フォールディング・インターポレーション型	127
5.4	逐次近似 (SAR) 型	135
5.4.1	動作原理：2分探索アルゴリズム	135
5.4.2	容量 DAC を用いた 2分探索アルゴリズムの実現	138
5.4.3	消費エネルギー	142
5.4.4	冗長性の導入	151
5.5	2ステップ型/サブレンジング型/アルゴリズムミック型	155
5.6	パイプライン型	158
5.7	積分型と時間領域型	165
5.7.1	積分型	166
5.7.2	時間領域型	170
5.8	タイムインターリーブ型	173

6. オーバーサンプリング型 A/D 変換器

6.1	基本的な考え方	179
6.2	1次 $\Delta\Sigma$ 変調器	186
6.3	2次 $\Delta\Sigma$ 変調器	193
6.4	多段 $\Delta\Sigma$ 変調器	199
6.5	多ビット $\Delta\Sigma$ 変調器	202
6.6	連続時間 $\Delta\Sigma$ 変調器	206
6.7	デシメーションフィルタ	213
6.8	D/A 変換器	219

7. 技術動向

7.1 性能指標：FOM	224
7.2 低消費電力アンプ	229
7.2.1 インバータ利用アンプ	231
7.2.2 電流スイッチ付きダイナミックアンプ	234
7.2.3 自己飽和型ダイナミックアンプ	236
7.3 ハイブリッド A/D 変換器	239
7.3.1 パイプライン化 SAR	239
7.3.2 ノイズシェイピング SAR	242
7.4 デジタル支援技術	245
7.4.1 フォアグラウンド校正	247
7.4.2 バックグラウンド校正	254
7.4.3 ま と め	257
引用・参考文献	258
索 引	272

1 | はじめに

「集積回路に搭載された素子数は1年半から2年で倍増する」というムーア則に象徴されるように、プロセッサやメモリに代表されるデジタルLSIの回路規模は年々飛躍的に拡大し、その性能も飛躍的に改善された。その結果、従来、アナログ領域で行われてきた信号処理の大部分をデジタル領域で処理できるようになり、アナログ回路はしだいにデジタル回路に置き換えられてきた。アナログ回路と比較してデジタル回路は設計が容易で、雑音にも強く、プログラムの書き換えで多様な機能に対応できるため、装置の小型化、低コスト化も進んだ。一方、自然界の情報はアナログ量で表されている。人間が認識できる情報もアナログ量である。したがって、デジタルとアナログを相互に変換する装置が必要になる。

本章では、まず、このような装置、すなわち**アナログ/デジタル変換器**および**デジタル/アナログ変換器**が果たしている役割について説明する。前者は**A/D変換器**または**ADC** (analog-to-digital converter)、後者は**D/A変換器**または**DAC** (digital-to-analog converter) と呼ばれることも多い。以下ではこれらの名称を使う。つぎに、これらの動作原理、および、性能、技術動向について簡単に説明する。最後に、これらを踏まえて本書の狙いを述べ、この分野を学んでいく上での指針を示すことにしたい。A/D変換器とD/A変換器は技術基盤を共有しており、一つの話題としてまとめて議論される場合も多く、両者は合わせて**データ変換器** (data converter) と呼ばれる。

1.1 データ変換器の役割

近年用いられている典型的な信号処理システムのブロック図を図 1.1 に示す。アナログ入力信号が A/D 変換器でデジタル信号に変換され、デジタル信号処理プロセッサ (digital signal processor, DSP) で所望の信号処理が施された後、D/A 変換器で再びアナログ信号に変換される。スマートフォン (スマホ) を例にとると、画面をタッチした信号や音声信号が A/D 変換器でデジタル化され、内部の DSP で処理された後に、その出力が D/A 変換器で高周波アナログ信号に変換され、アンテナを介して電波として情報が基地局に送られる。また、自動車を例として考えれば、エンジンやタイヤの状況をモニタするためのさまざまなセンサがついていて、それらが温度や回転数などの物理量を電気信号に変換する。それらはアナログ量であり、A/D 変換器によりデジタル化され、自動車に搭載されたプロセッサで適切に処理された後、燃料供給系統やブレーキ系統を制御するための信号を生成する。ここでは、プロセッサのデジタル出力を D/A 変換器でアナログ信号に変えて、アクチュエータに伝える。



図 1.1 信号処理システムのブロック図

このような信号処理系が広く利用されるようになった背景にデジタル回路である DSP の飛躍的な性能改善があることはいままでもないが、それだけではなく、データ変換器自体の性能向上にも注目する必要がある。データ変換器の歴史は古く、アルゴリズムの提案を含めると 16 世紀頃に遡るといわれている^{1)†}。実際に現在のような半導体を用いたデータ変換器が開発されたのは、トランジスタの発明に続く IC 技術が進展した 1960 年代である²⁾。数多くの変換アルゴ

† 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

リズムが提案され、さまざまな用途に応用されてきた。素子のスケールダウンに伴い、かつては専用ラックに収められていた A/D 変換ユニットが IC パッケージに収まるようになり、低価格で高性能な A/D 変換が可能になった。最近では、さらに小型化、高性能化されたデータ変換器がコア回路としてユニット化され、マイクロコントローラにも搭載されるようになった。ユーザは気づかないが、われわれの身の回りには数え切れない数の A/D、D/A 変換器が存在し、重要な役割を果たしている。広い応用分野からの要求条件をただ一つの方式で満足できるような、「万能」変換方式は存在せず、それぞれの応用に必要な要求性能を満足するためのさまざまな変換方式が提案され、適材適所で利用されている。言い換えれば、それだけ広い範囲でデータ変換器が利用されるともいえる。

情報処理分野でのデジタル化が進む一方で、自然界の情報は相変わらずアナログの物理量である。その境界にあるのがデータ変換器である。幾何学的に考えれば、デジタル信号処理のボリュームが増えると、図 1.2 に示すように、境界の表面積も増えることになる。これはデータ変換器の活躍領域が増えることを暗示する。近い将来、大規模なセンサネットワークや **IoT** (internet of things)、スマートハウス/ソサエティなど、さまざまな領域で **AI** (artificial intelligence) の手法も駆使して、大量のアナログ情報を的確に処理できる高効率システムが開発されるものと考えられる。そこでは、高速・低消費電力デジタルプロセッサだけでなく、アナログとデジタルのインタフェースとしての高性能 A/D、D/A 変換器が必要となり、その役割がますます重要になると考えられる。

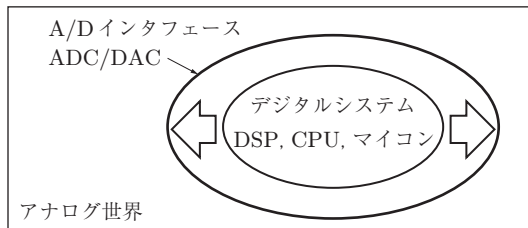


図 1.2 アナログ/デジタルインタフェースの拡大

1.2 データ変換器の動作原理

この節では、A/D 変換器および D/A 変換器の動作原理について簡単に説明する。

1.2.1 A/D 変換器

A/D 変換器の原理を説明するために、物の長さをデジタルで表すことを考えてみよう。図 1.3 に示すように、物体 A の長さを 3 ビットのデジタルに変換するには、あらかじめデジタルコードが割り振られた物差しを用意し、物体 A の長さがどの区間に対応するのかを調べればよい。この例では 110 と名づけられた区間がそれに相当するため、それがデジタル出力となる。このような物差しを用意し、アナログ入力に対応するデジタルコードを出力するのが、A/D 変換である。デジタルコードとして 2 進符号を用いるとすれば、アナログ入力を電圧 V_{in} 、 N ビットのデジタル出力を $D_1D_2 \cdots D_N$ としたとき

$$V_{ref} (D_1 2^{-1} + D_2 2^{-2} + \cdots + D_N 2^{-N}) = V_{in} + V_Q \quad (1.1)$$

が成り立つ。 V_{ref} は入力のフルスケール電圧に相当する量で、参照電圧 (reference voltage) と呼ばれる。 V_Q は丸め誤差に相当する量で、量子化誤差 (quantization error) と呼ばれる。また、この式のように、アナログ量を N ビットで表現したとき、 N をビット分解能、あるいは単に分解能と呼ぶ。連続的に変化するアナログ量が、物差しにつけた目盛りで区切られた区間のうちの、どれに属する

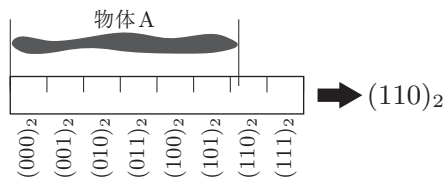


図 1.3 A/D 変換器の原理

かを定める手続きを量子化と呼ぶ。また、それぞれの区間にデジタル符号を対応させ、量子化により決まった区域に対応する符号を出力することを符号化と呼ぶ。

デジタル値は、量子化された離散的な量を表すだけでなく、時間的にも離散化されているという特徴がある。すなわち、アナログ信号としては時間的に連続して変化する量を、あらかじめ設定した時間間隔で拾い上げ、それらの値だけをデジタル値に変換する。これをサンプリング（標本化）と呼び、通常は一定の時間間隔で拾い上げる。以上のように、A/D 変換では、「標本化」「量子化」「符号化」が基本的な信号操作である。標本化と量子化は、通常、この順で処理されることが多い。その理由は、 N ビットに分解する量子化のほうが、単に信号を拾い上げるだけの標本化と比較して複雑で、時間を要する場合が多いためである。

図 1.4 は A/D 変換器の回路記号を示している。アナログ入力値とともに、量子化のために必要な参照電圧と、標本化のためのクロック信号 V_{clk} を入力する。

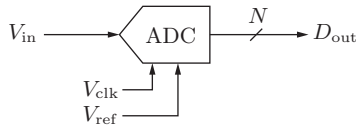


図 1.4 A/D 変換器の回路記号

アナログ値をデジタル化したとき、最下位ビット 1 ビットに相当する電圧 V_{LSB} は

$$V_{\text{LSB}} = \frac{V_{\text{ref}}}{2^N} = V_{\text{ref}} \times 1\text{LSB} \quad (1.2)$$

で与えられる。ここで、 $1\text{LSB} = 1/2^N$ とした。LSB は最下位ビット (least significant bit) のことである。このとき、量子化誤差 V_Q は

$$-\frac{1}{2}V_{\text{LSB}} < V_Q \leq \frac{1}{2}V_{\text{LSB}} \quad (1.3)$$

索引

【あ】	
アイドルトーン	189
アクイジション時間	52
アナログ/情報変換	35
アナログ/デジタル変換器	1
アパチャ時間	51
アルゴリズムック型	
A/D 変換器	157
泡エラー	125
アンダーサンプリング	34
アンチエイリアシング機能	210
アンチエイリアシング	
フィルタ	30
【い】	
一般化非 2 進探索	
アルゴリズム	154
移動平均	214
インターポレーション	131
インターポレーション	
回路	133
【え】	
エラーフィードバック型	245
エイリアシング	28
エンコーダ	122
【お】	
オーバーサンプリング型	
A/D 変換器	180
オーバーサンプリングする	33
オーバーサンプリング比	33, 182

オーバードライブ電圧	57
オフセット	82
オフセット誤差	98, 120
オペアンプ	60
オペアンプシェア	230
温度計コード	9
【か】	
カウンタ	166
確率論的モデル	43
カスコード接続	113
下部電極	81
カラム A/D 変換器	170
カレントスターブ VCO	171
完全差動型コンパレータ	84
【き】	
キックバックノイズ	89
逆フーリエ変換	32
共重心レイアウト	110
【く】	
櫛型フィルタ	214
グリッチ	95
クロック信号	5
クロックフィードスルー	52
【け】	
ゲイン誤差	98, 120
決定論的モデル	43
減衰抵抗	106
減衰容量	110

【こ】	
校正	246
国際固体回路会議	13
コンパレータ	8, 78
【さ】	
最下位ビット	5, 94
サイクリック温度計	
コード	131
サイクリック型	157
再構成フィルタ	94
最上位ビット	94
雑音伝達関数	189
雑音フロア	46
サブレンジング型	
A/D 変換器	155
残渣アンプ	158
参照電圧	4, 5
サンプリング	5, 21
サンプリング周期	6
サンプリング周波数	6
サンプリング定理	28
サンプリングレート	6
サンプル / ホールド回路	7, 47
サンプルモード	47
【し】	
時間/デジタル変換器	170
ジッタ	36, 75, 212
弱反転状態	232
出力参照雑音	71
ジュール熱	142

準安定性	92	ダイナミックアンプ	234	電荷再配分型 D/A 変換器	138
冗長性判定	164	ダイナミック型		電荷シェアモード	111
冗長性表現	152	コンパレータ	88	電荷注入	56
上部電極	81	ダイナミック共通ソース		電流切替型 D/A 変換器	113
ショットキーダイオード	62	アンプ	237		
シリアル型 D/A 変換器	242	ダイナミックソース		【と】	
シリアルサンプリング	50	フォロワ	238	動的要素マッチング	114, 204
シングルスロープ	169	ダイナミックレンジ	74, 196	等分配則	72
信号帯域幅	28	タイムインターリーブ型		トッププレート	
信号対雑音比	45, 99	A/D 変換器	173	サンプリング	149
信号対歪雑音比	99	ダウンコンバージョン	35	トラック/ホールド回路	48
信号対量子化雑音比	45	多相デシメーション		トランスミッションゲート	54
信号遅延時間	102	フィルタ	217	ドループ	52
信号伝達関数	189	多段コンパレータ	86		
		多段 $\Delta\Sigma$ 変調器	199	【な】	
【す】		多ビット/ステップ	151	ナイキスト	28
スイッチトエミッタ		多ビット $\Delta\Sigma$ 変調器	202	ナイキスト周波数	28
フォロワ	62	ダミーゲート	58	ナイキスト条件	28
スイッチトオペアンプ	235	単調性	101	ナイキストレート	28
スイッチトソースフォロワ	64			内挿	131
スイッチ分離 DAC	148	【ち】		内挿回路	133
スキュー	75	逐次近似型 A/D 変換器	135		
スプリアス	174	逐次近似レジスタ	136	【に】	
スプリアスフリー				入力参照	76
ダイナミックレンジ	99			入力フィードスルー	52
スプリットキャパシタ		【つ】			
DAC	146	ツリー型 DEM	205	【ね】	
スルーブット	159			熱雑音	70
		【て】			
【せ】		抵抗ラダー	101, 122	【の】	
静電エネルギー	142	デグリッチ	96	ノイズシェイピング	185
性能指標	15, 224	デジタル/アナログ変換器	1	ノンオーバーラップ	
積分型 A/D 変換器	166	デジタル信号処理		クロック	50
積分非線形性	97, 120	プロセッサ	2		
セグメント化	107	デシメーション比	214	【は】	
セトリング誤差	52	デシメーションフィルタ		パイプライン型	
セトリング時間	51		183, 213	A/D 変換器	158
ゼロクロッシング	131	データ変換器	1	パイプライン化逐次近似	
線形領域	53	デッドゾーン	193	(SAR) 型 A/D 変換器	240
		デュアルスロープ	169		
【た】		デルタ関数	31	ハイブリッド	
ダイオード接続	114	電圧制御発振器	171	A/D 変換器	239
ダイオードブリッジ	61	電荷共有方式	141		

バスゲート	54	フーリエ変換	25				
バックグラウンド校正	246	プリチャージ	89		【よ】		
パブルエラー	125	フリッカ雑音	70	容量ミスマッチ	151		
パラレルサンプリング形式	50	分解能	4		【ら】		
パワースペクトル密度	70				ラッチ付きコンパレータ	87	
バンド帯域周波数	100				ラプラス変換	23	
		【へ】				【り】	
【ひ】		閉ループ S/H 回路	60			離散化	21
比較器	8, 78	並列比較型 A/D 変換器	123			離散時間型	206
比較モード	89	ペDESTAL	51			リセットモード	89
ヒステリシス	88					量子化	5
非線形誤差	96	【ほ】				量子化器	78
ビット分解能	4	補償	246			量子化誤差	4, 41
非同期方式	138	補正	246			量子化雑音	44
微分非線形性	96, 119	ホールドモード	47			リングアンプ	232
標準化	5, 21					リング発振器	171
		【ま】				【る】	
【ふ】		間引きフィルタ	183, 213			ループ遅延	211
フォアグラウンド校正	246					ループフィルタ	200
フォトニック A/D 変換器	38	【み】					【れ】
フォールディング回路	128	ミキシング	35			レイテンシ	126, 159
フォールディング型		ミッシングコード	120			レーザトリミング	102
A/D 変換器	127					レーザトリミング技術	245
フォールディング・		【め】				レンガ壁特性	33
インターポレーション型		メインロープ	25			連続時間型	206
A/D 変換器	131	メタスタビリティ	92				【わ】
不確定性関係	42	メモリ効果	88			ワラスツリー	125
復元	27						
符号化	5	【ゆ】					
ブートストラップスイッチ	65	有効ビット数	15, 46				
フラッシュ型 A/D 変換器	122	ユニティゲイン周波数	85				
ブリアンプ	88	ユニティゲインバッファ	49				

【A】		【C】		DAC	1
A/D 変換器	1	C 級アンプ	232	DCS アンプ	237
ADC	1	CIC フィルタ	216	DEM	114, 204
AI	3	CT 型	206	DNL	96, 119
				DR	196
【B】		【D】		DR プロット	196
BG 校正	246	D/A 変換器	1	DSP	2
				DT 型	206

— 著者略歴 —

1973年 早稲田大学理工学部物理学卒業
1975年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了（物理学及び応用物理学専攻）
1975年 日本電信電話公社（現在の日本電信電話株式会社）電気通信研究所勤務
1978年 理学博士（早稲田大学）
1999年 上智大学教授
現在に至る

アナログ/デジタル変換入門 — 原理と回路実装 —

Introduction to Analog-to-Digital Conversion — Principle and Circuit Implementation —

© Takao Waho 2019

2019年3月28日 初版第1刷発行



検印省略

著者 和保孝夫
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10
発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131 (代)
ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00918-7 C3055 Printed in Japan

(新井)G



＜出版者著作権管理機構 委託出版物＞

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088、FAX 03-5244-5089、e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。