スーパーオーディオ

正会員 海老塚 伸一†

現在のデジタルオーディオの流れは多岐にわたり、各ポジションでより精緻な進化を遂げている。データ圧縮とクオリティの共存技術 (AAC)、伝送レートを抑さえ明瞭な音声信号を扱う技術 (MPEG-4) 等が上げられるが、もう一つの大きな流れは「より精細な原音の再生」を目指したダイレクトストリームデジタル (DSD) 技術である。本稿では、これまでのデジタルオーディオに付随する概念を大きく超えた高ダイナミックレンジ (120dB)、広範な周波数特性 (100kHz) を有する音声信号再生が可能となる「スーパーオーディオCD (SACD)」を例に、権利保護を含む各種構成技術について解説する。また、コンテンツ制作の技法を具体的に解説しながら、本技術の今後の可能性について述べる。

キーワード：SACD, DSD, $\Delta\Sigma$ 変調, PSPウォータマーク, 1ビットストリーム

1. 概要

ダイレクトストリームデジタル (DSD) とは、従来のPCM方式とは異なるまったく新しい発想と先進のテクノロジーから生まれた次世代のデジタル録音、再生フォーマットである。CDにおけるこれまでのPCMシステムは、録音、再生時にさまざまなフィルタや補正を加えることが必要であったが、DSDはCDの64倍となる2.8224MHzサンプリングのオリジナル1ビット・パルス信号を用いるため、アナログローパスフィルタを通すだけというシンプルなシステムで再生できる。そのため限りなく原形波、つまり原音に近い音を再生することが可能となる。DSDが生み出す100kHzをカバーする幅広い周波数特性と、120dB (可聴範囲) にも及ぶダイナミックレンジは、自然界に存在するすべての音を記録できるほどの無限の可能性を秘めている。

これまでのPCMシステムは、入力信号がサンプリング周波数の半分の周波数を超えないよう、サンプリング周波数が44.1kHzのとき、フィルタは22.05kHz以上をカットしなければならなかった。また、録音時のオーバサンプリングによる大部分を削除する複数次のデジタルフィルタや、再生時の補完デジタルフィルタによって生じる再量子化ノイズが避けられないことから、サンプリングレートをあげればフィルタリングする難しさは減少するものの、サンプリングレートを単純にあげることで上記問題を解決することはできなかった。

こうした問題がヒントとなり、現行の処理法を利用して削減や補完の過程をなくすことで、デジタル信号の録音方法、すなわちDSDが開発された。

表1 CD/SACD比較表

項目	SACD (シングルレイヤ)	CD
直径	12cm	12cm
厚さ	1.2mm	1.2mm
再生面	片面再生	片面再生
符号化方式	1ビットDSD	16ビットリニアPCM
サンプリング周波数	2.8224MHz	44.1kHz
データ容量	4.7GB	780MB
最小ビット長	0.40 μ m	0.83 μ m
トラック間隔	0.74 μ m	1.6 μ m
レーザー波長	650nm	780nm
再生周波数範囲	DC~100kHz	DC~20kHz
ダイナミックレンジ	120dB以上 (可聴帯域)	96dB
記録可能時間	109分	74分
追加機能	テキスト, グラフィックス, ビデオ	テキスト

2. 用語解説

2.1 Super Audio CD (SACD)

SACDは、ソニーとフィリップスで共同開発した光ディスクの規格で、1999年にリリースされた高音質CDフォーマットである。レーザーを利用する原理は従来のCDと同じであるが、PCM方式ではなく、オーバサンプリングで使用される $\Delta\Sigma$ 変調器の出力を直接扱うDSD (Direct Stream Digital) 方式で記録される。記録方式は、サンプリング周波数2.8224MHz、1ビットストリームである。論理上はダイナミックレンジ120dB、周波数特性100kHz以上の音質を実現する。その場の空気感までも再現できるなど、限りなく原音に近い音楽を再生することが可能である。ディスクはCDと同じ12cmサイズで、容量4.7GByteに高密度化されている。単層構造 (シングルレイヤ) ディスク、高密度を2枚貼り合わせて大容量化した二層構造 (デュアルレイヤ) で、従来の

†ゼネラル通商株式会社

"Super Audio CD" by Shinichi Ebizuka (Chief Engineer, General Traders, Co., Ltd., Tokyo)

図1 ディスクバリエーション

図2 ピックアップ

CDプレーヤも再生できる層を貼り合わせたハイブリッドディスクに分類される。記録時間は、単層ディスクに2ch記録時で最大109分、2ch/6ch同時記録で最大74分程度。収録可能トラック数は最大で255、各トラックごとに255ポイントまでのインデックス設定可能。著作権保護として物理的複製を困難にするPSP (Pit Signal Processing) という4つのコピープロテクションが用意されている。

2.2 オーバサンプリング (Over Sampling)

オーバサンプリングとは、A/D変換の際、サンプリング周波数の整数倍の高い周波数でA/D変換を行い、デジタル信号処理でデータを間引き、本来のサンプリング周波数のデータに変換することである。A/D変換時、折り返しノイズを防ぐための前処理回路(アンチエイリアシングフィルタ)で簡素化ができる。

最高変換周波数とナイキスト周波数が接近していて、ア

ンチエイリアシングフィルタとして極めて急峻なフィルタが要求されるが、アナログフィルタでは実現が難しいため、信号に悪影響を与える。

本来のサンプリング周波数より高い周波数でA/D変換を行うと、ナイキスト周波数も高い方へ移動し、ゆるやかな特性のアナログフィルタで済み、信号の影響も少なくなる。

本来のナイキスト周波数以上の信号成分を除去し、データをいくつか置きに間引きし、デジタル信号処理では信号に悪影響を与えない高い周波数の信号を除去できる特徴を利用している。またこの時、A/D変換時のデータより量子化ビット数の多いデータに変換できる。さらに、ノイズシェイピング技術を併用して量子化ビット数を増やすことができる。

2.3 $\Delta\Sigma$ (デルタシグマ)変調器 (Delta Sigma Converter)

$\Delta\Sigma$ 変調器とは、非常に高い周波数でアナログからデジタルへ変換するオーバーサンプリング処理でよく使われる回路である。1ビットコンバータと積分器を組合せたもので、アナログ入力を積分器にかけ、その出力をコンバータによりビットストリームに変換する。この時デジタル出力をアナログ変換して積分器にフィードバックし、前の出力との誤差が最小になるビットストリームを生成する。これで生成されたビットストリームをそのまま記録すれば、誤差を最小限に抑えたアナログ信号への変換が可能である(SACD方式)。

従来のCDでは、ここからさらにデジメーション(間引き)フィルタなどのデジタルフィルタにかけ、44.1kHz/16bのデータに変換して、再生時には逆に間引かれたデータの補完処理が必要になるため、連続的なはずの音声のレベル変化が一定間隔に丸められてしまい、デジタル化特有の雑音や歪み(量子化ノイズ)の原因となっていた。DSDは、余分な加工プロセスを省き、限りなく原音に忠実な鮮度・純度を保つことができる。

2.4 ビットストリーム (1bit Stream)

ビットストリームは、サンプリング周波数2.8224MHz (64fs/1fs=44.1kHz) という高速標本化により、原音に対して間引きや補完の非常に少ない、極めてアナログに近い特性で記録、保存が可能である。

ローパスフィルタだけの単純な回路でアナログ信号に復元できるシンプルなプロセスで、音に影響を与えるデバイスや回路などを極力排除できる。

量子化に伴うノイズは、高次(7次)の $\Delta\Sigma$ 変調(ノイズシェイピング)回路で可聴帯域外へ追いやられ、優れた周波数特性100kHzや可聴帯域のダイナミックレンジ120dBを実現している。

2.5 Direct Stream Digital (DSD)

DSDは、従来のPCM (Pulse Cord Modulation) 方式とは異なり、音声信号の大小を1ビットのデジタルパルスの密度(濃淡)で表現する方式。最大の特徴は、回路構成がとて

もシンプルに実現できることである。最近のデジタル録音ではオーバーサンプリングA/D変換器が使われるが、このA/D変換器の最初の部分でアナログ信号が1ビットデジタル信号に変換される。DSD方式は、A/D変換された1ビット信号をそのまま記録する方法。再生も極端に言えばアナログフィルタを通すだけのシンプルなシステムとなる。

2.6 サンプル周波数 (Sampling Frequency)

サンプリング周波数とは、オーディオ信号やビデオ信号などのように、時間とともに絶えず変化する信号をデジタル信号にする際に、1秒当たりいくつのデータを抽出するかを表す数値。サンプリングレートともいう。

デジタル信号そのものについて言う場合、1秒当たりいくつのデータで構成されているか(いくつのデータで1秒なのか)を表す。したがって、デジタル信号をD/A変換してアナログ信号にする場合も、これと同じレートにて変換する。

2.7 ナイキスト周波数 (Nyquist Frequency)

ナイキスト周波数とは、サンプリング周波数のちょうど半分の周波数のことで、0Hzからこの周波数までを指してナイキスト帯域とも呼ばれる。デジタル信号で表現(変換)可能な最高周波数を意味する。A/D変換の際、これを超える周波数のアナログ信号がA/D変換に入力されたとき、変換されたデジタル信号は折り返し雑音が混在してしまうので、アナログ信号の段階でナイキスト周波数を超える周波数を除去する処理が必要となる。

2.8 折り返し雑音 (Aliasing Noise)

サンプリング周波数が48kHzのとき、ナイキスト周波数は24kHzとなるが、25kHzの信号が入力されると、変換された信号には23kHzの信号として現れる。ナイキスト周波数を中心に折り返した周波数にノイズが入り、本来存在しないはずの信号が含まれる。アナログ信号の段階で除去するフィルタが必要になり、このフィルタをアンチエイリアシングフィルタと言う。これを簡略化する手段としてオーバーサンプリングを使用する。

2.9 量子化ノイズ (Quantizing Noise)

量子化ノイズは、A/D変換のとき、分解能(アナログをデジタルのレベル値に分割するための性能)のために完全にデジタル化できずに生じたノイズ。分解能が高いほど少なくなる。

2.10 ノイズシェーピング (Noise Sharping)

ノイズシェーピングは、A/D変換のとき、ナイキスト周波数帯域全体で一様に分布している量子化ノイズを、低い周波数では少なく、高い周波数では多くなるように分布を変化させる技法。

オーバーサンプリングと併用して、後で切り捨てられる高い周波数帯域に量子化ノイズを移動させ、低い周波数帯域ではA/D変換器の量子化ビット数より多いビット数のデータが得られる。高精度のA/D変換器は不要になり、製造が

図3 CD/SACDフォーマット

容易になる。

2.11 Pit Signal Processing (PSP)

SACDには、4つのコピープロテクションがある。高密度層に記録されているコンテンツは暗号化され、復号の鍵はPSPインビジブルウォーターマークの中に埋め込まれている。PSPインビジブルウォーターマークは、特殊な信号処理を施すことによってSACDで検出できる、人の目には見えないウォーターマークのこと。SACDマークは、SACDのライセンスを受けていないドライブで違法にコンテンツが読出せないようにディスクを再生するために、不可欠な情報が暗号化されているマークである。

PSPビジブルウォーター（透かし）は、インビジブルウォーターマークを形成した場合とは多少異なるが、ピットに特殊な信号処理を施すことで、ディスク上に紙幣の透かし模様の絵を描くことができる。

前者3つのツールは、プレーヤが検出して再生制限やアクセス制限をしたのとは異なり、直接消費者の視覚に訴えるためのツールである。これはオプションで、透かしのないSACDも存在する。

3. 実際のSACD制作におけるレコーディング

DSDレコーダは、 $\Delta\Sigma$ 変換器と呼ばれるノイズシェーピング型1ビットA/D変換器で、2.8224MHzサンプリングの1ビット信号に変換され、ハードディスクに記録される。 $\Delta\Sigma$ 変換器は、アナログ信号を1ビットに量子化すると同時に、1ビット量子化器の変換誤差を入力にフィードバックし、量子化ノイズの周波数分布を変えている。初期型のDSD録音再生システムは、ソニーがプロトタイプとして少量生産したハードディスクベースのブラックボディ機で、全部で8システムが作られ全世界に分配されている。初期のDSD録音や、アナログからDSD変換されたSACDは、この機種で行われた。その後、ソニーは機能および音質改善したシルバーボディのDSD録音機を20台製造した。また、

図4 マルチフォーマット

図5 2chフォーマット

dCS (データコンバージョンシステムズ) からは、DSD対応のA/D変換器 (dCS-904)、D/A変換器 (dCS-954)、PCM信号の相互互換とDSD信号の変換に対応したDDコンバータ (dCS-972) を開発。GENEXが最新のマルチフォーマットレコーダ (GX9500) でDSD記録を可能としている。EMMもDSD録音専用のA/D、D/A変換器を開発し、アメリカソニーではリファレンスとして使用している。DSD録音機は、L・R/WCを独立して入力し、SDIF-3と呼ばれるフォーマットであり、SDIF-2という標準なソニーのフォーマットをベースにしている。フィリップスも独自のプロトタイプを開発し、PCベースの最大8チャンネルマルチトラックDSD録音機を保有しているが、AUGANと共同開発に至った。ソニーは次のステップとしてマルチチャンネルシステムを開発し、「SONOMA」と呼ばれるDSD編集およびマスタリングシステムであるが、ダイレクトに録音するときもある。他社のシステムはDSD録音だけでなく、192kHz/24のPCM録音が可能である。SDCDとDVD Audioを視野に入れて録音する場合は便利である。レコーディングスタジオでは、音質的に定評ある高品質アナログコンソールを用いて収録およびトラックダウンを行う。また、ホール等にての収録は音中車 (音声継車) や、小型ミキサを使用する。DSD対

応のデジタルコンソールが市場にまだ存在しないこともアナログコンソールを使う要因であるが、音質を徹底的に追求した結果においてもアナログコンソールを使用する。周りの環境特にモニタシステムはSACD対応の100kHzを考慮に入れて設計した。DSDシステムは、ラックマウント移動型で各スタジオに移動できるシステムになっており、アナログコンソールのアウトをダイレクトに収録する。

3.1 マスタリング

DSD編集作業からのマスタリングはソニック ソリューションズのDSD対応システムを使う。ソニック ソリューションズに専用のインタフェースを搭載して、2チャンネルシステムとして編集を行う。そして、マルチチャンネル対応として「SONOMA」を稼動型として配備している。周辺環境はもとより、モニタシステムにおいてもSDCD対応を考慮している。DSD信号はPCMと異なり、最も情報量の多い源流とも言える信号列のため、整数比のダウンサンプリング、オーバーサンプリングを組合せると、完全に同期を取った状態で、実用化されているデジタルオーディオフォーマットに変換することができる。DSD信号は2.8224MHzであるが、1/64にてCD規格の44.1kHzになり、また5倍のオーバーサンプリングを行い、1/294にて48kHz/24、1/147にて96kHz/24、1/441にて32kHz/24、1/143、25/1、1/56にて44,056kHzとなる。DSD信号を可能な限り特性を保ちながらCDフォーマットに変換するためには、既存の44.1kHz/24のマルチビットに変換し、SBMにて16ビットに丸める方法でもDSDの高音質を感じることはできる。しかし、さらにアナログ信号に近づけるために、SBM Direct方式を採用して可能にした。SBM Directでは、DSDで録音された音楽信号を超高精度デシメーションフィルタにより44.1kHz/64bの非常に高い分解能を持つ信号に変換し、64ビットの信号を超高精度ノイズシェーピング回路により44.1kHz/16bに変換する。このようにDSDデジタルは、SACDだけでなく、貴重なアナログマスタをDSD変換し保存することによって劣化を防ぎ、フォーマット変換が簡単で対応しやすいメリットがある。

3.2 オーサリングおよびディスク製造

オーサリングは、ソニー製のシステムで行われる。そのシステムはウィンドウズベースNTで、編集済みの音源ファイルを統合して必要な情報を書込む。タイトル表示の入力もできる。完了したオーサリング結果は、AITやDLTと呼ばれるデジタル磁気テープ媒体に完パケマスタとして記録される。そしてディスクカッティング、メタルスタンパプレスと呼ばれるディスク製造工程にまわる。

オーサリングが完了した完パケマスタには、ウォータマークが記録されていない。ウォータマークを出力するシステムは、ブラックボックスで正式に認可されたSACDのプレス工場 (スタンパ製造過程) に貸し与えている。現在SACDを製造できるプレス工場は、日本、アメリカのソニーとオランダのフィリップス、そして最近ドイツのSONO-

図6 DSD収録フォーマットコンバート

PRESが加わった。マルチチャンネル収録は、DST（ダイレクト・ストリーム・トランスファ）と呼ばれるDSD信号を圧縮するために開発された技術で、ディスク内に効率よくデータを記録し、およそ1/2の圧縮率で情報圧縮されたデータを完全に復元できることが特徴で、2チャンネルとマルチチャンネルのサウンドを1枚のディスクにCDと同等の記録時間で収録できる。

4. 今後の課題

PCM方式は、データが規則的に区切られているため、DSPなどによるフェード、デジタルエフェクトが非常に簡単である。DSD方式は、データの区切りがないことや、 $\Delta\Sigma$ 変調器によるノイズ分布の管理など、簡単にはDSP処理ができない。

今後の課題として、デジタル領域での信号処理技術の開発である。ソニーではDSD用の信号処理ICを完成させ、録音機や編集機のプロトタイプを製作した。

マルチチャンネル収録システムもGENEX、「dCS」等を使用してDSDにて収録を試験的に行っている。SACDの今後は、SACDプレーヤの普及が鍵を握る。初期型は50万円もしたが最近では8万円前後のものも出始めた。ハイブリッドタイプの普及も考えられるが、わざわざハイブリッドを買わなくてもSACDプレーヤが安くなれば買い換える。しかし、SACDプレーヤのみでも高音質は充分に楽しめるが、SACDの魅力が極限まで楽しむには、ワイドレンジの高音質プレーヤのみならずスピーカ、アンプ等を買換える必要に迫られる。かたやDVD Videoはプレイステーション2などで普及したが、DVD Audioも再生互換が問題となる。

今後のDSD/DVDデジタル技術の発展、進歩を期待したい。

(2001年6月25日受付)

海老塚 伸一

日本工学院卒業。国産コンソールメーカーにて、10年間設計開発に従事。ゼネラル通商にて、スタジオシステム設計に従事し、現在に至る。