デジタルオーディオ技術への符号理論の応用

正会員 田 中 邦 磨[†]

1. ま え が き

エジソン以来行われて来たように、オーディオ信号をアナログ信号として記録・再生すると、例えば磁気記録の場合はテープの塗りむら、非直線性、磁気ヘッドのギャップロス、形状効果などの影響で音質に制限を受けていた。オーディオ信号をデジタル的に記録するようになってから、音質は飛躍的に向上すると共に、テープの消費量の削減による機器の小型化、操作性の向上が達成された。しかも、これらの機器は安価なデータ記録装置としてコンピュータ分野にも応用されている。

デジタルオーディオ機器の主要技術は高密度記録技術で、記録密度の向上により機器の小型化、高性能化が達成されている。しかし、記録密度を向上すると記録媒体上の微小なごみ、傷等の影響で再生データに誤りが発生し易くなる。したがって、誤り訂正符号の採用により、データ誤り率を実用範囲に抑制することにより、機器の実用化を図っている。

2. オーディオ装置に使用されている 誤り訂正符号

デジタルオーディオ機器は一般に記録密度が高いので、誤り発生パターンはバースト状である。したがって、バースト誤りを訂正することを主眼に誤り訂正符号が構成されている。大きく分けると、単純パリティ、リードソロモン符号、CRC を組合せて使用している。

以下に、実際の機器に使用されているものを列挙する。

CD	2重符号化リードソロモン符号
DAT	リードソロモン符号の積符号
8ミリビデオ	単純パリティとCRCの組合せ
業務用録音機	リードソロモン符号とCRCの組合せ、または単純パリティとCRCの組合せ

以下の章では、最初にオーディオデータの性質とそれを利用した誤り修正の説明を行い、続いて各機種に利用されている誤り訂正符号に関して説明する。

3. オーディオデータの性質¹⁾

オーディオデータは隣接するサンプルとの間に高い相関を持っているので、必ずしも完全に誤りを訂正できなくても、そのサンプルが誤っているとの情報が得られれば、近隣のサンプルから、誤ったサンプルの元の値に近い値を算出することができる。これを誤り修正と呼んでいる。誤り修正の方法には高次内挿も考えられるが、直前のサンプルと直後のサンプルの値の平均値を使用する平均値内挿がよく使用されている。

平均値内挿を有効に行うには、隣接するサンプルが同時に誤る可能性を極力下げることがある。デジタルオーディオ記録再生装置は記録密度が高いので、小さなごみ傷でも同時に多数のデータが誤る。したがって、誤り発生パターンはバースト誤りが通常である。第1回総論で述べられたように、媒体上のデータの配列を工夫して、復号時にバースト誤りの影響が小さくなるようにしている。ここでは誤り修正を行い易くするために、偶数サンプルと奇数サンプルを極力離して1つのバースト誤りで偶数、奇数両方のサンプルが同時に誤る可能性を減少させるデータ配列をシャフリング、1符号語が中で同時に誤るシンボル数を減らすための方策をインタリーブと、区別して呼ぶことにする。

誤り修正では元のサンプル値と修正サンプル値との

[†] 帝京技術科学大学 情報工学科

“Introduction to Coding Theory (14), Application of Coding Theory to Digital Audio” by Kunimaro Tanaka (Teikyo University of Technology, Chiba)

差が修正雑音になる。修正雑音の量は記録してあるオーディオの周波数により異なる²⁾。

図1はオーディオ周波数を標準化周波数で標準化した周波数で示した修正雑音の例である。高い周波数の方が、修正の誤差が大きくなるので、 S/N が劣化する。

図1 正弦波における修正雑音の周波数特性

る。楽器でいうと、ピッコロのような高い音より、ピアノ、パイプオルガンの低域の音の方が修正による雑音の発生量が少ない。また、音楽の内容によっても雑音の検知限が異なり、ロックのような音楽の方がクラシック音楽より修正雑音が検知されにくいという実験

図2 CIRCの符号器、復号器

図3 CIRCの訂正能力とC1, C2シンボルの配置図

結果がある。

4. CD(Compact Disc)

4.1 CDの概要

CDでは半導体レーザから出射したレーザビームを対物レンズで約 $1\mu\text{m}$ に絞り、それでディスク上に記録したピットを読取り、再生を行っている。再生は1ビームで行われるので、バースト誤りに対する対処はインタリーブ長を長くして行っている。CDではCross Interleaved Reed Solomon Code (CIRC)と称する誤り訂正符号を用いている。CIRCは2重符号化リードソロモン符号で、C1符号、C2符号はそれぞれ $GF(2^8)$ の上の(32, 28), (28, 24)リードソロモン符号である。図2にCIRCの符号化回路と復号回路を示す³⁾。符号化においては最初にC2符号化を行い、続いてインタリーブを行った後、C1符号化を行っている。再生ではその逆の操作を行っている。

図3にCIRCの訂正能力とC1, C2シンボルの配置を示す⁴⁾。図において、横軸はフレーム数を、縦軸はフレーム内のシンボルに対応している。各符号語を構成しているシンボルを黒丸で示し、直線で結んである。誤り訂正可能なバースト長が1.5mm、誤り修正の可能な長さが8.5mmと充分長い値になるようにインタリーブ、シャフリングを施してある。

図4に誤り訂正能力を示す³⁾。

CIRCの復号方法にはいろいろ提案されているが、この図はスーパーストラテジーと称するものを使用した場合の訂正能力である。媒体の平均的なシンボル誤り率は 10^{-4} であるが、 10^{-3} でも充分実用になる値まで誤りが訂正される。

図4 C1, C2のランダム誤り訂正能力

5. D A T⁵⁾

DATには回転ヘッド方式のR-DATと固定ヘッド方式のS-DATとがある。ここでは現在市場に普及しているR-DAT方式に関して解説する。

R-DATはビデオテープレコーダと同様に回転ヘッド方式であるために記録密度が高く、 114Mbit/inch^2 (bit per inch²)という高密度である。DATには $GF(2^8)$ のリードソロモン符号が採用され、データには図5に示すように2トラックで完結するシャフリングが掛けている。

C1符号、C2符号共、以下に示す原始多項式 $G(x)$ の根 α を原始元とするガロア体上のリードソロモン符号である。

$$G(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1 \quad (1)$$

C1符号の生成多項式 $G_p(x)$ は

$$G_p(x) = (x + \alpha^0)(x + \alpha^1)(x + \alpha^2)(x + \alpha^3) \quad (2)$$

C2符号の生成多項式 $G_q(x)$ は

$$G_q(x) = (x + \alpha^0)(x + \alpha^1)(x + \alpha^2)(x + \alpha^3)(x + \alpha^4)(x + \alpha^5) \quad (3)$$

図5 2トラック完結型のデータ配置

図6 R-DATのランダム誤りに対する復号特性

図7 R-DATの最大誤りに対する復号特性

である。

誤り訂正能力の一例を図6に示す。図からわかるように、シンボル誤り率が最悪で 10^{-2} 以下であれば充分実用になる。

図7に長大誤りに対する誤り訂正能力を示す。幅方向で測って、誤り訂正可能な誤りの大きさは約0.3mm、誤り修正の可能な誤りの大きさは約1mmの長さである。

6. 8ミリビデオ⁶⁾

6.1 誤り訂正符号

ビデオテープレコーダはヘリカルスキャン記録方式であるので、ヘッドドラムにテープを巻き付け、半周分プラスオーバーラップ分にビデオ信号を記録する。8ミリビデオの場合、このビデオトラックをさらに巻き付け角30°分伸ばして、その部分にデジタルオーディオを記録している。最近、1サンプル16ビットの規格が作成されたが、ここでは最初に作成された8ビット/サンプルのフォーマットで、NTSCの場合のデジタルオーディオに使用している誤り訂正符号に関して説明する。

図8に1フィールド分のデータ構成を示す。横に132フレームある。1フレーム内はデータ8ワード、パリティ2ワード、CRC16ビット、さらに同期3ビット、アドレス1ワードの合計107ビットにより構成されている。ここで1ワードは8ビットである。使用している誤り訂正符号は単純パリティ P 、 Q とCRCを組合せたクロスインタリーブ符号である。

CRCの生成多項式 $G(x)$ は

$$G(x)=x^{16}+x^{12}+x^5+1 \quad (4)$$

$$P=\sum_{i=1}^8 W \pmod{2} \quad (5)$$

$$Q=\sum_{i=1}^8 W+P \pmod{2} \quad (6)$$

である。

図8 1フィールド分のデータ構成

図9 8ミリビデオのシャフリング

図9にオーディオデータのシャフリングに関して概念的に説明する。最初にA図に示すように、横方向44バイトの箱を作成し、縦に3段重ね、それを横に10列並べる。次に右チャンネルのオーディオデータと左チャンネルのオーディオデータを組みにして、A図に示すように配置する。次にそれらをB図に示すように箱単位でならべかえを行うことにより、図8のデータ配列になる。実際には上記処理は一挙動で行う。

図10に P 、 Q パリティを作成する説明図を示す。 $W_0 \sim W_7$ により P パリティを、 $W_0 \sim W_7$ と P パリティにより Q パリティを作成する。図中黒丸は P パリティの符号語のシンボルを、白丸は Q パリティの符号語のシンボルを示し、各々の符号語はシンボルを直線で結んで示している。直線の横の数字は各々のシンボルを拾って行く場合のフレーム間隔を示す。図に示す

図 10 P, Q パリティの生成

図 11 P, Q パリティの関連図

ような組合せでパリティを作成すると、次に1つ右隣のシンボルの組合せでパリティを作成するというように、順次右方向に移動しながら作成していく。そのまま行くとそのフレームの右端に付き当たる。したがって、1フレームの右端と左端を合わせた円筒状のものを考えて、さらに右の方に行く。このようにして1周すると全部のP, Qパリティを作成することができる。

図11にP, Qパリティ関連図を示す。図中1つの円は1ワードを示す。この図ではQパリティの符号語を水平な線に置き換えている。したがって、Pパリティの符号語の組合せは、図10の傾斜の差の分だけ斜めの線になる。各符号語のシンボルは線で結んであるが、記録の際は別々のフレームに属するものである。あるフレームが誤るとそのフレームに付加してあ

図 12 P, Q 復号の回数と誤り訂正能力

図 13 ランダム誤りに対する誤り訂正能力

るCRCで誤りの状態は検知されているので、各々のシンボルには正誤の情報は添付してあると考えることができる。P, Qは単純パリティであるので、1つの符号語の中で誤りが1個の場合は訂正は可能であり、2個以上の場合は訂正を行うことができない。つまり図中A, Dのシンボルが誤った場合はPパリティでは訂正することができない。しかし、Qパリティで2回に分けて証正することが可能である。A, B, Dのシンボルが誤った場合には、最初にDをQパリティで訂正し、次にA, B, シンボルをPパリティで訂正することが可能である。しかし、A, B, C, Dの4シンボルが誤った場合には訂正することは不可能である。

以上のように本誤り訂正符号では、P, Qパリティを多数回復号することにより訂正能力を向上できる。

6.2 誤り訂正能力

図12は復号回数による誤り訂正能力の変化を示す図である。横軸は復号の回数を、縦軸は誤り訂正能力の指標として、訂正できるバースト誤りの長さをフレームの数で示している。図により、復号が3回までは訂正能力が向上しているが、それ以上では頭打ちになっている。図13にランダム誤りに対する誤り訂正能力を示す。通常発生する誤りの平均誤り率は 10^{-4} であるので十分な訂正能力を示している。なお ρ は符号の相関係数で、平均バースト長 L_p は

$$L_p = \frac{1}{1-\rho}$$

の関係がある。したがって $\rho=0$ は誤りが完全ランダムの場合に対応する。

7. 業務用録音再生装置

CD、音楽放送番組の作成に業務用録音再生装置が用いられる。大別すると、マルチチャンネル録音機と2チャンネル録音機がある。ここでは業務用として特徴的なマルチチャンネル録音再生装置に関して説明を行う。マルチチャンネル録音機は主としてポップス系の音楽の収録に用いられる。マルチチャンネル録音再生装置の記録フォーマットにはPD(Prodigi)方式とDASH(Digital Audio Stationary Head)方式がある。マルチチャンネル記録としてはPD方式の方が特徴的なフォーマットであるので、説明はPDフォーマットについて行う。

7.1 マルチトラック固定ヘッド記録での誤り特性⁷⁾

マルチチャンネル録音機では、各々の楽器を独立に記録する関係から固定ヘッド方式マルチトラック記録になっており、各チャンネル毎に各々の記録トラック

を割り当てている。

PD方式の場合、トラックピッチが約 $500\mu\text{m}$ 、1ビットの長さが約 $0.8\mu\text{m}$ である。いまま簡単のために、ごみ、傷が正方形であるとし、いろいろな大きさの傷が無作為に発生すると考えると、あるビットが誤った場合、同一トラック内でバースト状に誤りが発生する確率が高く、隣のトラックが同時に誤る確率は非常に小さい。したがって、誤り訂正符号を記録するのに1符号語の各シンボルを各々別のトラックに配分し、テープの幅方向に分散して記録している。DASH方式の場合は、1チャンネル/1トラックで記録しているので、長いインタリーブを施している。

7.2 マルチチャンネル録音再生装置の記録フォーマット

図14にマルチチャンネル録音再生装置のデータフォーマットを示す。PDフォーマットの場合、8チャンネルを1セットとしているので、8、16、24、32チャンネルの組合せが可能である。本図は1セット分のデータフォーマットである。

本データフォーマットはセミセパレート方式と称して、各チャンネルのオーディオデータは独立にトラック単位で記録を行い、パリティトラックにリードソロモン符号として作成した検査シンボルを記録している。図中、1つの四角はオーディオ1サンプル分2バイトのデータを示す。横の行は各トラックに対応している。誤り訂正符号は図中縦の列方向に構成しており、1列が1符号語になっている。誤り訂正符号は符号効率が良く、しかも符号化・復号化回路が簡素という理由から $GF(2^4)$ のリードソロモン符号を採用している。原始多項式 $G_p(x)$ は

$$G_p(x) = x^4 + x + 1 \quad (8)$$

であり、生成多項式 $G_g(x)$ は

		Sample ↓												
Channel 1	SYNC	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11	1-12	CRCC
Channel 2	SYNC	2-1	2-2	2-3	2-4									CRCC
Channel 3	SYNC	3-1	3-2											CRCC
Channel 4	SYNC	4-1											4-12	CRCC
Channel 5	SYNC	5-1											5-12	CRCC
Channel 6	SYNC											6-11	6-12	CRCC
Channel 7	SYNC									7-10	7-11	7-12		CRCC
Channel 8	SYNC								8-8	8-9	8-10	8-11	8-12	CRCC
Parity 1	SYNC	$\Sigma a_i \quad a_i$												CRCC
Parity 2	SYNC	Σa_i												CRCC

図14 マルチチャンネル録音機データフォーマット

図 15 マルチチャンネル録音機のランダム誤りに対する訂正能力

$$G_9(x) = (x+1)(x+\alpha) \quad (9)$$

である。これにインタリーブおよびシャフリングを掛けて記録している。

本記録フォーマットでは CRC でイレージャを作成できるので、1 ブロックで 2 トラックまでの誤りを訂正することができる。

図 15 はランダム誤りに対する誤り訂正能力である。(a) 図は平均バースト長をパラメータに、(b) 図ではビット誤り率をパラメータにしている。生の誤り率の比較的悪い例である平均バースト長 200 ビット、誤り率 10^{-4} の場合でも訂正後の誤り修正の平均発生頻度は 1 日に 1 回以下であり、充分に実用的なレベルである。

図 16 は大きな寸法の誤りに対する誤り訂正能力である。(a) は誤り修正が可能な最大の誤り寸法、(b)、(c) は誤り訂正が可能な最大の誤り寸法である。いずれの場合もこの誤りの近傍には他の誤りは発生していないと仮定して計算してある。

7.3 パンチイン、パンチアウト

マルチチャンネルに必要な機能としてパンチイン、パンチアウト機能がある。ポップス系の音楽を収録する場合、オーケストラの全楽器の収録は同時には行わず、各パート毎に別々に行う。通常はリズムを規定するものを最初に記録して、それを元に各々のパートを演奏し、各々のトラックに順番に記録する。全パートの録音が完了したら、最後に各トラックよりの再生音を適宜合成して音楽を作成する。途中の段階では、それ以前に記録した音楽に合わせて奏者は演奏を行い、当該トラックへの収録を行う。しかし、通常は演奏ミスなどがあり、1 回の演奏でそのパートの収録を完了

図 16 マルチチャンネル録音機の長大誤りに対する訂正能力

図 17 オーバダビング

することは不可能である。すでに録音した部分は変更できないので、再度そのトラックのみ収録を行う。次の回の演奏では、問題のない箇所では記録を行わず、問題の箇所の直前で録音再生装置を再生状態から記録状態に変更して新しい演奏を記録し、問題の部分を過ぎたら再度再生状態に戻すことにより、他の部分での演奏ミスの発生確率を最小に押えている。再生から記録に入る部分をパンチイン、記録から再生に戻る部分をパンチアウトと称している。

セミセパレートフォーマットでパンチイン、パンチアウトを行うには、オーバダビングしたオーディオデータに従って、パリティトラックの内容を変更する必

要がある。図 17 において、B 部はあらかじめ記録してある部分で、それに A 部をオーバーダビングする。その際、それに対応する C 部を再記録している。

8. む す び

デジタル録音再生装置に用いられている誤り訂正符号に関して述べた。デジタル録音再生装置の場合、データ記録の場合と違って、誤り修正の手段が使用できるため、必ずしも訂正後の誤り率を極端に低くする必要は少ない。以上の観点から、開発された機器に使用されている誤り訂正符号はリードソロモン符号と CRC の組合せ、単純パリティと CRC の組合せ、リードソロモン符号どうしの組合せに分類できる。

【参 考 文 献】

- 1) 今井：“誤り訂正符号化技術の要点”，pp. 213-219，日本工業技術センター（1986）
- 2) 立木，石田，大西，千葉：“PCM録音機における誤り制御

の検討”，信学技報，電気音響研究会，EA77-42（Nov. 1977）

- 3) 佐古，小高，古谷：“CD用 ECC，CIRC の訂正能力について”，信学技報，情報理論研究会，IT82-12（May 1982）
- 4) 今井：“誤り訂正符号化技術の要点”，p. 187，日本工業技術センター（1986）
- 5) DAT Conference：“Digital Audio Tape Recorder Conference Recommended Design Standard <R-DAT>”
- 6) 8 mm Conference，“Report on Audio Working Group”（1983）
- 7) K. Tanaka, M. Ozaki, T. Inoue, T. Furukawa：“Application of Generalized Product Code for Stationary-Head Type Professional Digital Audio Recorder”，Trans. Inst. Electron. & Commun. Eng. Jpn. Sect. E

たなか くにまる
田中 邦麿 昭和 37 年，千葉大学工学部電気工学科卒業。同年，三菱電機(株)に入社。テレビジョン受像機の設計，家庭用ビデオテープレコーダの開発，PCM 録音再生装置の開発，光ディスク装置の開発に従事。平成 3 年より，帝京技術科学大学情報工学科教授。現在，情報記録工学の研究に従事。工学博士。正会員。

金色の石に魅せられて

佐藤 勝 昭 著

「金ではない物質が何故金色に輝くのか」という疑問から出発した黄銅鉱，黄鉄鉱の研究が，光エレクトロニクス，光マグネティクスなど最先端の技術と深く結び付いていることを電子の世界の話を交えてわかりやすく紹介している。本書は，物理とその周辺の問題を一般向けの科学教養としてやさしく解説した「ポピュラーサイエンスシリーズ」の一卷として刊行されたもので，最近話題のカルコパイライト系半導体を取上げている。

第 1 章，2 章では，天然の鉱石の中でも特徴的な色をもつ黄銅鉱，黄鉄鉱に対する疑問がその後展開される研究のきっかけであることを述べるとともに，物質の色をミクロの立場から科学するための手段を紹介している。

第 3 章，4 章では，量子力学や固体物理学の基礎知識を

もとに，物質の光に関する性質が物質の中での電子のはたらし，および電子の持つエネルギーと深く関わっていることを述べている。さらに，光の吸収と放出と色との関係についても解説している。

第 5 章，6 章では，本書の重要なテーマである黄銅鉱，黄鉄鉱が金色に輝く謎を解く上で進められた研究内容を，著者の経験をもとに紹介している。主に金色の石の人工結晶づくりとカルコパイライト型半導体の仲間について述べている。

第 7 章，8 章では，光マグネティクスおよび光エレクトロニクスに重要な磁界による光の制御，電気を光あるいは光を電気に変換する現象について解説し，カルコパイライト系半導体の応用の可能性を述べている。

本書は，素朴な自然への疑問から出発した研究と最先端技術との深い結び付きを「新素材探求の旅」と題し紹介することで，読者の自然に対する疑問，好奇心を喚起している。

紹介 椎木正敏(日立)

裳華房刊（1990 年 11 月 5 日発行），四六判，144 頁，定価 1,133 円（税込）