

## 畳み込み・リードソロモン接続符号の 繰り返し復号法による性能向上に関する検討

平良文紀レンゾ† 平安名常寛† 和田 知久†

† 琉球大学大学院理工学研究科 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地  
E-mail: †{renzo,tsunenori}@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp, †wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

あらまし 日本の地上波向けデジタル放送サービス (ISDB-T) 規格で、“畳み込み・リードソロモン接続符号” が用いられている。その接続符号の復号法において、繰り返し復号法を行なう事により性能の向上が可能であると報告されている。本稿では、畳み込み・リードソロモン接続符号の繰り返し復号器を設計するにあたり、復号アルゴリズムにおける種々のパラメータを変える事で、その性能向上の評価を行なった。シミュレーションにより、変調方式 16QAM、畳み込み符号化率 1/2、繰り返し復号回数 5 回での BER を測定した結果、約 0.47[dB] の SN 比の改善が確認出来た。  
キーワード ビタビ復号法, 接続符号, 繰り返し復号法, バイトインターリーブ, ISDB-T

## Performance improvement by an iterative decoding of Viterbi-Reed-Solomon code

YoshinoriRenso TAIRA†, Tsunenori HENNA†, and Tomohisa WADA†

† Department of Information Engineering, University of the Ryukyus Senbaru 1, Nisihara, Okinawa,  
903-0213 Japan

E-mail: †{renzo,tsunenori}@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp, †wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

**Abstract** Reed-Solomon-Convolutional Concatenated Codes is used by the digital terrestrial broadcasting standard of Japan (ISDB-T). This paper presents an iterative decoding algorithm for concatenated codes consisting of a Reed-Solomon and a convolutional code, focusing on the code of the ISDB-T standard. A new procedure is proposed to define the feedback signal from the output of the Reed-Solomon decoder to the input of the convolutional decoder that provides a significant improvement over existing solutions. Simulations show that proposed algorithm provides large reductions in the bit error rate compared with the classic decoder (e.g. about 0.47dB at BER=10<sup>-4</sup> for the fifth iteration).

**Key words** Viterbi Algorithm, Concatenated Codes, iterative Decoding, Interleave, ISDB-T

### 1. ま え が き

デジタル放送や、デジタル無線通信では、ワイヤレスでデジタル通信を行っており、空間を伝送路として使用している。空間には、明確な伝送路がないので電波は四方八方に拡散してゆくため、受信する電波は非常に弱い上、空間は共用スペースである事から外来ノイズも多い。そのため情報が欠落する可能性が非常に高い通信である。したがって、誤り訂正が重要な技術となる。日本の地上波向けデジタル放送サービス (ISDB-T) 規格では、誤り訂正符号化方式として“畳み込み・リードソロモン接続符号”が用いられている。奈良先端科学技術大学院大学の村田らが、畳み込み・リードソロモン接続符号の繰り返し復号法によって、性能の向上が可能である事を示した [1]。今回、

畳み込み・リードソロモン接続符号の繰り返し復号器を設計するにあたり、種々のパラメータを変える事で、その性能向上の評価を行った。

本稿では、2 節において ISDB-T 規格における送受信系の概要を示す。3 節では接続符号で用いられている外符号及び内符号を説明する。4 節では、従来の代表的な繰り返し復号の概要について述べ、5 節で従来の復号方式と提案手法アーキテクチャについて説明する。6 節ではシミュレーションによる結果を示し、提案手法の評価を行なう。7 節でまとめを行なう。

### 2. ISDB-T 送受信システム

#### 2.1 送信系

デジタル放送では、通常エンコーダなどから出力された 0、

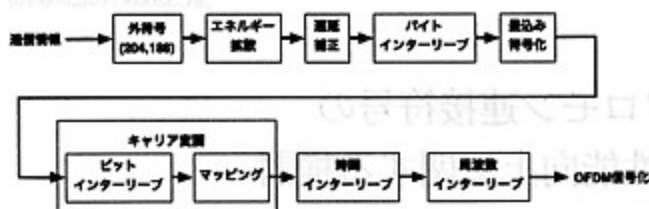


図1 ISDB-T規格対応：送信系

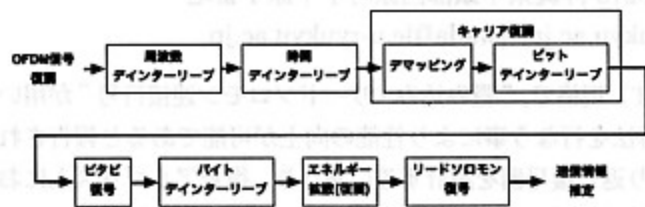


図2 ISDB-T規格対応：受信系

1 信号をそのまま伝送する事はしない。それは、伝送中に1と0を取り違える誤りが発生すると、圧縮処理をしているために画質音質に大きな劣化が生じ、安定に信号を復元・再生する事が出来なくなるからである。

限られた帯域とエネルギーを有効に活用して安定に受信するために、送信側ではエンコーダから出力されたデジタル信号にあらかじめ誤り訂正符号処理を行う事によって冗長な情報を付加し、伝送中に発生した誤りを受信側で訂正する。地上デジタル放送では、畳み込み符号(内符号)とリードソロモン符号(外符号)の2種類の誤り訂正を組み合わせ、高い訂正能力を確保している。これを接続符号化と呼ぶ。また、この2種類の誤り訂正の間には、畳み込み符号で発生する連続した誤りを分散させて、リードソロモン符号の訂正能力を高めるために“インターリーブ”という処理を行っている。図1参照。

## 2.2 受信系

図2にISDB-T規格に対応した受信系を示す。送信側で伝送符号化された情報は、受信側で受信された後、復調・復号処理される。受信データは、送信側で符号化される際の処理順番と逆の処理をうけることにより、所望のデータに復号される。その際、伝送路中で付加されたノイズやひずみが除去される。リードソロモン符号(外符号)の復号法には、計算量が少ないとして1965年に提案されたBM(Berlekamp-Massey)アルゴリズムが、現在でもその復号法として応用されている。一方、畳み込み符号(内符号)の復号法としては、1967年にビタビによって提案されたビタビ復号が、現在でも応用上重要とされている。

## 3. 接続符号

接続符号は一般的には、2つの符号(内符号と外符号)を並列に並べて配置しており、(内符号(n,k)×外符号(N,K))として書く場合が多い。ここで、nは内符号のビット長、kは内符号の情報ビット長、Nは外符号のシンボル長、Kは外符号の情報シンボル長である。図3に接続符号の概略図を示す。

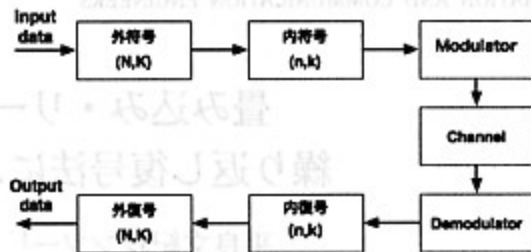


図3 接続符号

接続符号では、内符号と外符号の組み合わせでいろいろな特性をもつ符号を設計しやすいところに特徴がある。通常、内符号にはビット単位で処理を行なうランダム誤り訂正符号が用いられ、外符号には $GF(2^k)$ を元とするシンボル誤り訂正符号が用いられることが多い。代表的な構成例として、

- 内符号にBCH符号、外符号にRS(リードソロモン)符号
- 内符号に畳み込み符号、外符号にRS符号

がある。また、これらの符号の間にはインターリーブが用いられる。これにより、シンボルの順序を変え、互いの訂正能力を向上させる事が出来る。

接続を直接では無く、並列に並べた構成をとるのが、近年話題のターボ符号である。

### 3.1 外符号

ISDB-T規格では、外符号としてTSP毎に短縮化リードソロモン符号(204,188)が用いられている。この符号は、リードソロモン(255,239)符号において入力データバイトの前に51バイトの00<sub>HEX</sub>を付加し、符号化後に先頭51バイトを除去することによって生成する。符号の元として $GF(2^8)$ を用いており、 $GF(2^8)$ を定義する原始多項式に次式 $p(x)$ を用いる。

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

また生成多項式 $g(x)$ には次式が使われる。

$$g(x) = \prod_{i=0}^{2t-1} (x - \alpha^i) \quad (2)$$

(N,K)リードソロモン符号の符号間最小距離は $d = N - K + 1$ である。この最小距離 $d$ と訂正能力 $t$ は $d \geq 2t + 1$ の関係を満たす。

### 3.2 内符号

リードソロモン符号を代表としたブロック符号では、一定の長さを持つ情報に対して符号化をブロック単位で行なうが、内符号に用いられている畳み込み符号では、現時点での符号化を行なう際、過去の数ビットを用いる。すなわち、情報に対して時間的な依存性が伴うような符号化を行なっていく。一般に、この時間的な依存性が長ければ長いほど誤りに対して強くなり、それを表す指標として拘束長 $\eta$ が用いられる。ISDB-T規格では、拘束長=7の畳み込み符号器が用いられている。

## 4. 繰り返し復号法

繰り返し復号法は、1993年に、Berrou, Thitimajshimaに

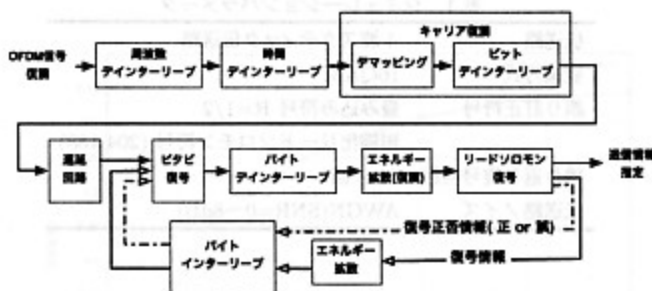


図4 提案手法：受信器ブロック図

よって発表されたターボ符号の復号法として用いられている。ターボ符号は2つの再帰的組織畳み込み符号を、並列に接続した符号化器から構成されている。復号器側には、それぞれの符号に対する軟入力軟出力復号器があり、これら復号器の間で軟出力を繰り返しやり取りし、最終的な出力を得る。この繰り返し復号の過程で、復号の信頼性を高めていくのが、繰り返し復号法の特徴である。

## 5. 復号器アーキテクチャ

先で述べたターボ符号の繰り返し復号法では、復号器間で軟出力を繰り返しやり取りする必要がある。この軟出力情報の事を対数尤度比 (log-likelihood ratio) と呼ぶのだが、現在のISDB-T 規格対応の受信器では、回路規模や計算時間等を考慮し、畳み込み符号の復号には回路規模が小さくすむ“ビタビ復号”、リードソロン符号の復号には計算時間が少ない“BM アルゴリズム”が採用されている。どちらの復号法も出力は硬判定出力であり、軟判定出力を用いるためには、大幅な回路の変更が必要とされる。

本稿では、軟出力情報を用いず、従来通りの復号法を応用した繰り返し復号アルゴリズムを提案する。図4に提案手法の復号器アーキテクチャのブロック図を示す。

### 5.1 リードソロン復号器

#### 5.1.1 従来手法

従来のリードソロン符号の復号処理は以下に示す5段階の処理からなる。

1. エラーシンドロームの計算
2. 謝り位置多項式の導出
3. 謝り位置の計算
4. 誤り値の計算
5. 誤りの訂正

リードソロン復号処理で最初に行なわれる計算はシンドローム演算である。シンドロームは、受信多項式に生成多項式(2)の根を代入する事で得られる。したがって、受信多項式を  $r(x)$ 、シンドロームを  $S_i$  とすると式(3)の様に定義される。なおシンドロームは生成多項式の根の数だけ存在し、誤り訂正能力を  $t$  とすると、 $2t$  個のシンドロームが存在する。

$$S_i = r(\alpha^i) \text{ with } i \in [0 \dots 2t - 1] \quad (3)$$

その後、シンドローム演算で求めたシンドローム値を用い

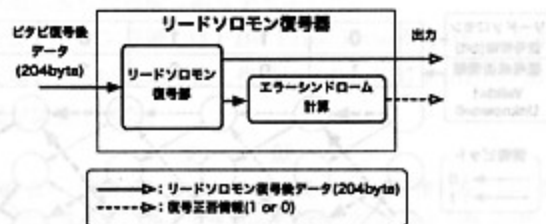


図5 リードソロン復号器

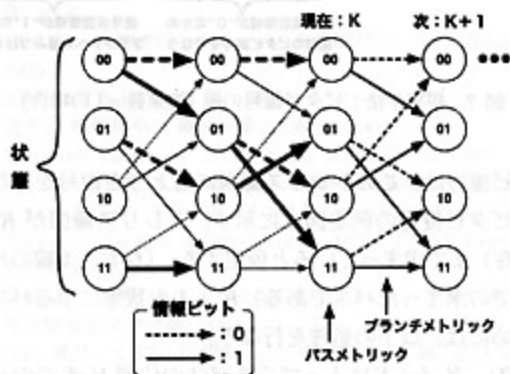


図6 ビタビ復号の例 (拘束長=3の場合)

て、誤り位置多項式の導出を行なっていくのだが、その代表的な導出アルゴリズムとして、Berlekamp-Massey アルゴリズムや Peterson アルゴリズムなどがある。

#### 5.1.2 提案手法

提案手法では、従来の5段階の復号処理が終わった後、再びシンドローム演算を行なう。これにより、シンドローム値がゼロになった場合は“訂正成功”、そうで無かった場合は“訂正失敗”と判断し、それぞれに対応した訂正成否情報を復号データ系列と共に出力する。図5にリードソロン復号器のブロック図を示す。

## 5.2 畳み込み復号器

### 5.2.1 従来手法

畳み込み符号の復号に際しては最尤復号が行なえるビタビアルゴリズムがよく知られている。

畳み込み符号器の出力は内部シフトレジスタの状態に依存するため、内部シフトレジスタをノードとした木構造の符号として表現出来る。この木符号では、入力情報ビットに応じて2つに枝分かれしながら広がっていく。よってこの枝の数は符号化する情報ビットの長さに依存し、これを  $K$  とするとその数は  $2^K$  となる。実際に符号化された符号化ビットは、この  $2^K$  個の枝を辿った一つのパスとして表現できる。よって、受信側ではそのパスを正しく選ぶことができれば、情報ビットを正しく得ることができる。

木符号では、木が深くなるにつれ、同じ内部シフトレジスタをもつノードも複数でてくる。また、同一のノード(状態)から出て行く枝に対応する符号化出力は常に同じである。よって、これらの同一のノードをまとめる事で、符号器の状態とその遷移の過程を視覚化する目的で利用されるのが、トレリス線図である。

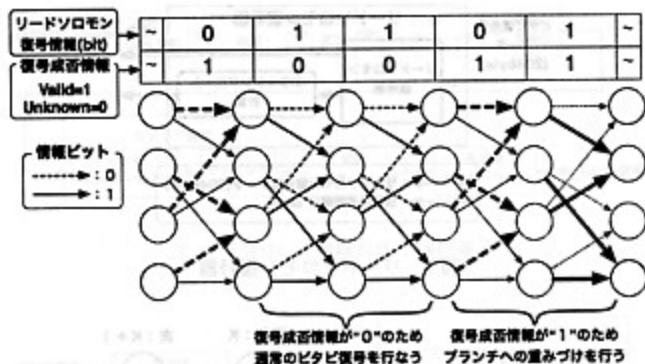


図7 提案手法：ビタビ復号の例 (拘束長=3 の場合)

ビタビ復号は、このトレリス線図にもとづき復号を行なっていく。ビタビ復号の例を図6に示す。トレリス線図が  $K$  の位置 (現在) まで求まっていると仮定する。(なお、太線のパスが現在までの求まったパスである)  $K+1$  の状態に至るパスを求めるためには、以下の処理を行なう。

1. (加算) 各ノードに入ってくるパスの位置  $K$  までのパスメトリックに、それぞれのブランチメトリックを加える
2. (比較) 各ノードごとに、ノードに入ってくる複数のパスのメトリックスを比較する
3. (選択) メトリックスの蓄積がもっとも小さいものを、位置  $K+1$  のパスメトリックにする (生き残りパスと呼ぶ)

上記の処理を繰り返すと、やがて四つの生き残りパスのある時点以前のパスが全て同じものになる。ビタビ復号では、この状態をデータがデコード出来たものと判断する。

### 5.2.2 提案手法

提案手法では、従来のビタビ復号のアルゴリズムに加えて、リードソロモン復号器からの“復号情報 (204 × 8bit)”及び“復号成否情報 (204byte)”を利用し、復号を行なっていく。リードソロモン復号器からの出力は、バイトインターリーブ等を通り、ビタビ復号器へと入力される。これにより、この復号補助情報を利用し、1バイト単位 (8bit) で正しいトレリス線図のパスをビタビ側へ教える事が可能となる。

図7に提案手法でのビタビ復号の例を示す。リードソロモン復号器から出力された復号補助情報は、図7で示す様にトレリス線図とのビット情報単位での対応づけが行なわれる。トレリス線図においてノード間を繋ぐブランチは、それ自体で“0”か“1”の値を持つ。復号補助情報を元に、ブランチの値を強制的に指定し、より確かなパスを通る確率を高くする事で訂正能力の向上を図っている。具体的な復号処理は、復号補助情報によって正しいブランチの値が分かったと仮定した場合、間違っただけのブランチに正の値の重みを加算する (この重み値を“重みパラメータ”と呼ぶことにする)。ビタビ復号では最終的に、パスメトリックの値が最も小さいパスを選択するため、重みを加算されたブランチを含むパス (間違っただけのパス) は、パスの取捨選択によって消えていく。ちなみに、復号成否情報が“訂正失敗 = 0”である場合、ブランチの値を指定する事ができないため、従来通りの復号処理を行う。

表1 シミュレーションパラメータ

伝送路	1波スタティック伝送路
変調方式	16QAM
誤り訂正符号	畳み込み符号 $R=1/2$ 短縮化リードソロモン符号 (204,188)
繰り返し復号回数	0~5回
伝送路ノイズ	AWGN(SNR=0~8dB)

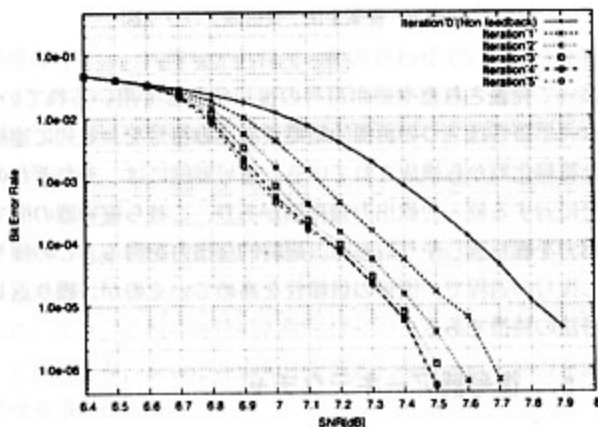


図8 繰り返し復号法

## 6. シミュレーション評価

### 6.1 シミュレーション環境及びパラメータ

シミュレーションでは、ISDB-T規格に準じた送信系及びそれに対応した受信系をC言語を用いて作成し評価した。なお、今回のシミュレーションにおいては、送信側からの出力を周波数インターリーブ出力までとしており、それ以降のOFDMフレーム化やIFFT等の処理は省略している。設定した各種パラメータを表1に示す。

### 6.2 シミュレーション結果

シミュレーションでは以下の項目に対し評価を行なった。

- 繰り返し回数による訂正能力向上への影響
- 復号補助情報に応じた重みパラメータの影響

図8に繰り返し復号法での性能向上の度合いを、BERグラフを用いて示す。従来通りの復号法 (Iteration 0) と比べると、繰り返し復号法によるSN比の向上が確認できる。図9では、BERを  $1.0E-04$  で固定した際の、繰り返し回数によるSN比の改善結果を示す。提案手法にて、5回の繰り返し復号を行なう事によって、最大0.47[dB]のSN比向上が確認できた。

提案手法では、ブランチメトリックの値に重みパラメータを加算することにより、トレリス線図にて選ばれる生き残りパスの操作を行ない、より正しい確率の高いパスを選ばせるという処理を行なっている。ブランチメトリックは  $-16 \sim 16$  という値を取る。この値は、受信信号が復調回路にて復調される際に、ビット毎に確率計算される事によって決まるソフトビット情報に依存する。ビタビ復号への入力として、このソフトビット情

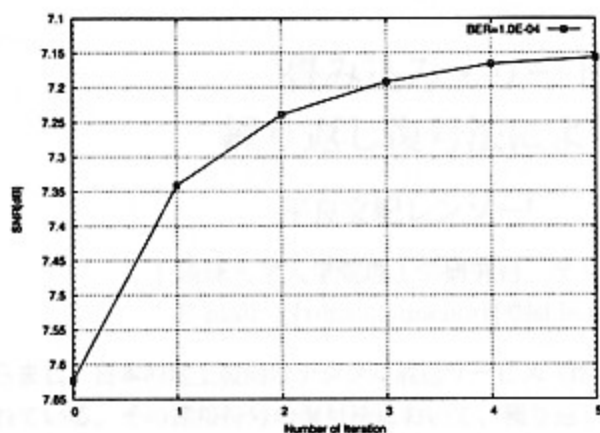


図9 繰り返し回数 vs SNR

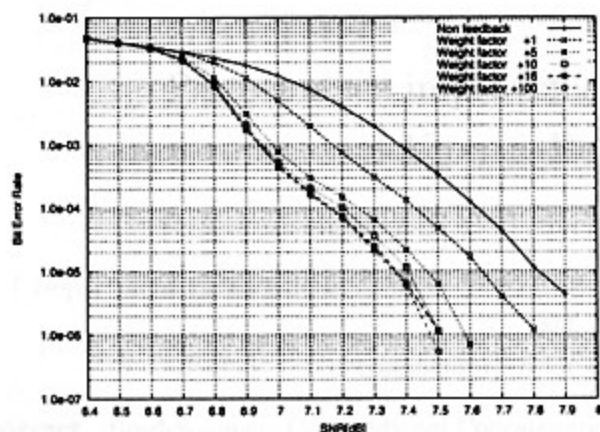


図10 重みパラメータによる性能変化 (繰り返し回数=5 固定)

報が与えられ、二つのソフトビット情報を足し合わせる事で、ブランチメトリックの値が決定する。

シミュレーションでは、重みパラメータの値を100という大きな値に設定し評価を行ってきたが、実装にともない、ビットの制約が発生するため、加算値の制限を行なう事での性能の変化を調べてみた。その結果を図10に示す。重みパラメータ値をブランチメトリックと同様の16に設定し、4bitでの制限をかけた場合でも、5回の繰り返し復号で生じる性能誤差は約1.5%であった。

## 7. まとめ

本稿では、ISDB-T規格で採用されている畳み込み・リードソロモン接続符号の繰り返し復号法を提案した。従来の繰り返し復号法の様に、軟判定情報をフィードバック要素として用いる繰り返し復号法と違い、硬判定出力されたリードソロモン復号の訂正可否情報を用いた復号アルゴリズムを提案する事により、従来の復号器で用いられている復号アルゴリズムの多少の変更

で、繰り返し復号が可能である事を示した。

シミュレーション評価では、Bit Error Rateを $1.0E^{-4}$ を基準とした場合、5回の繰り返し復号により、約0.47[dB]のSN比の改善が確認できた。

## 文 献

- [1] 村田 真一, 岡田 実, "ISDB-T受信機の誤り訂正復号器における繰り返し復号法", 電子情報通信学会総合大会, B-5-156, 2008.
- [2] 井上 徹, "実践 誤り訂正技術", 株式会社トリケップス, 東京, 1996.
- [3] 西村 芳一, "デジタル・エラー訂正技術入門", CQ出版社, 東京, 2006.
- [4] 石井 聡, "無線通信とデジタル変復調技術", CQ出版社, 東京, 2005.
- [5] ARIB STD-B31 1.5 版, "地上デジタルテレビジョン放送の伝送方式 標準規格", 電波産業会, 東京, 2003.
- [6] Meritxell Lamarca, Josep Sala, Alfonso Martinez, "Iterative Decoding Algorithms for RS-Convolutional Concatenated Codes", A:Procs. of 3rd International Symposium on Turbo Codes and Related Applications. ENST Brest, 2003, p.543-546.
- [7] 萩原 春生, 大橋 正良, "ターボ符号/連接符号化・繰り返し復号", 電子情報通信学会誌, 2001.
- [8] 金田 喜共, "OFDM通信におけるエラー訂正能力向上に関する研究", 琉球大学工学部, 2002.
- [9] イエルン ユステセン・トム ホーホルト 著, 阪田省二郎・栗原正純・松井一・藤沢匡哉 訳, "誤り訂正符号入門 A Course In Error Correcting Codes", 森北出版株式会社, 2005.