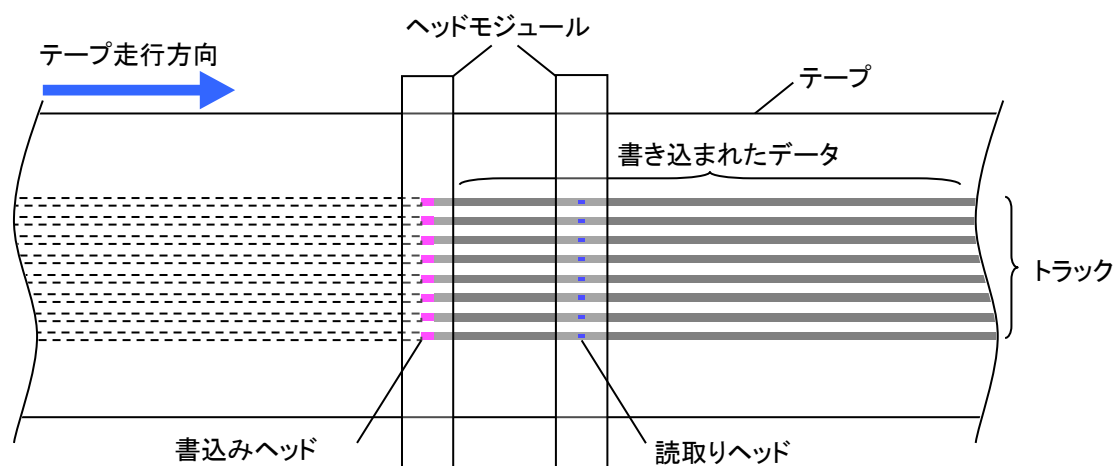


5 テープストレージの信頼性を支える技術

デジタルデータを記録するテープストレージは、記録されたデータを記録した通りに読み取ることを求められている。テープカートリッジには、ユーザーデータが容量 1TB あたりに約 8 兆個ものビットとして記録されているが、そのうちの 1 ビットたりとも間違えずに正確に記録し、再び読み取ることが期待されている。密閉された堅牢な箱の中でできるだけ衝撃を与えないようにして使用されているハードディスクに比べ、ドライブからカートリッジを取り出して持ち運び、長い間倉庫の棚で保管するような使い方を前提としたテープストレージには、ユーザーデータを間違いなく記録・再生するというユーザーの期待に応える為に、高い信頼性を実現する様々な機能が備えられている。ここでは LTO テープドライブに使われている技術を例に説明する。

5.1 書き込んだデータをすぐにその場でチェックする Read While Write 機能

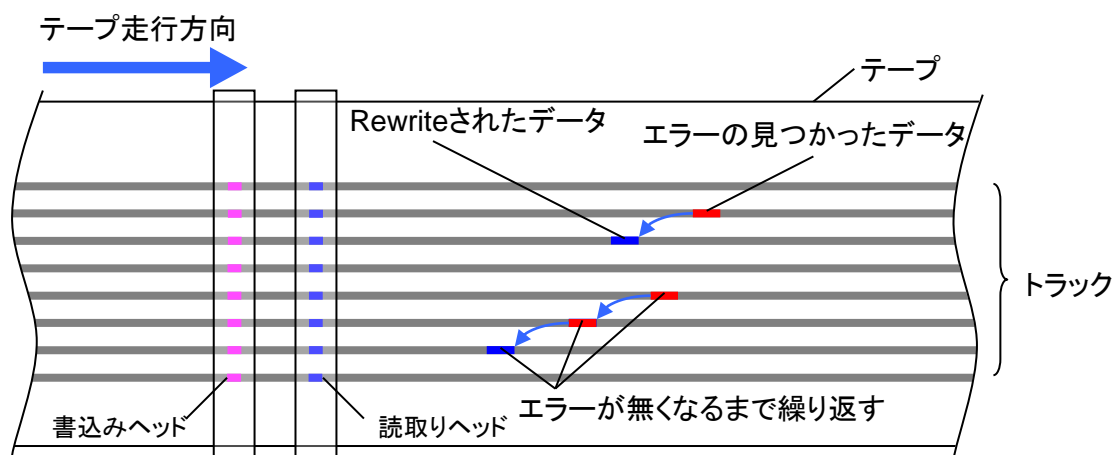
データを書き込む時には、ユーザーデータがテープメディアに読取りが可能な状態で確実に書き込まれることが最も重要である。テープドライブは、テープにデータを書き込んだ直後に今書いたデータがテープから読み取れるかを確認している。この機能を「Read While Write」と呼ぶ。日本語で直訳すると、「書込み中同時読取り」となる。この機能は図 1 の例に示す、書込み用ヘッドの直後に読取り用ヘッドを備え付けたヘッドモジュールによって実現されている。



<図 1 LTO のヘッド>

Read While Write 機能で直前のヘッドが書き込んだデータを読み取ることができた場合、そのデータは間違いなくテープメディアに記録されていることを確認できたことになる。一方、読取りが失敗した場合、テープドライブは書き込みになんらかの問題があったと判断し、読み取れなかったデータをもう一度書き直す。これを Rewrite 機能と呼ぶ。

Rewrite する時にも工夫がある。図 2 の例では 8 本のトラックに同時にデータを書き込んでいるが、テープドライブはこのように同時に書き込むトラック数と同じ数のヘッドの対を備え、並列にデータを書き込むことで、高速な書き込み速度を実現している。8 本のトラックを同時に書き込むので、8 セットのデータのうち 1 セットでも読み取れなかった場合に Rewrite が発生するが、この複数のヘッドを持つという特徴を最大限に生かし、Rewrite の際には先程書き損じたヘッドとは別のヘッドで改めてデータの書き込みを試みる。Rewrite の際にも Read While Write 機能は有効であるので、この Rewrite でも読み取れなかった場合には再度 Rewrite を繰り返す。この場合は、さらに別のヘッドを使って書き込みを試みることになる。



<図 2 LTO の Rewrite のイメージ>

ここで、何らかの理由でテープメディアの一部のエリアにデータを書き込むことができなくなり、トラックのうちの一つが問題のエリアを通過する場合を考えてみる。書き込みヘッドの切り替えを行わなければ、問題が発生しているエリアを通過するトラックには何度 Rewrite をしてもデータを書き込むことが出来ない。そしてテープが走行を続け問題のない部分に到達するまで、Rewrite が繰り返されることになってしまう。テープが無駄に走行した結果、全体の容量やパフォーマンスにも悪い影響を与えることになる。テープドライブでは、書き込みヘッドを次々と切り替えることで、たとえトラックの一本が書き込みできない状況にあったとしても、効率よく Rewrite を実行し、容量やパフォーマンスへの影響を出る限り小さくしている。

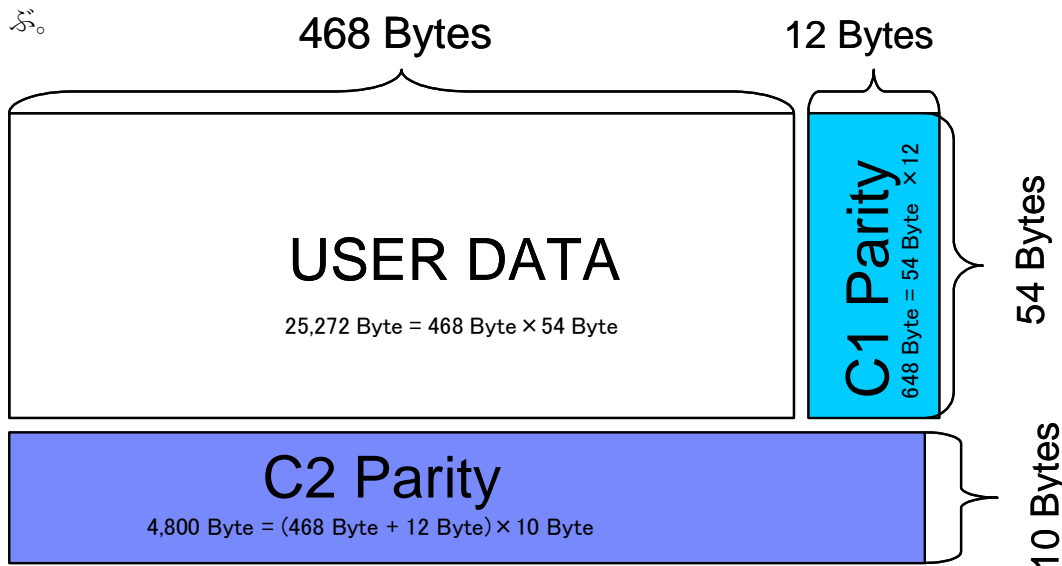
このようにして、テープドライブはユーザーデータが確実に読み取れるようテープメディアに記録されていることを、書込みと同時に検証している。

5.2 データ読取りにおける技術 (ECCの強力なエラー訂正能力)

先述のような技術を使って確実にテープメディアに書き込むことができたユーザーデータだが、長期間に渡る保管や高温・高湿・埃などの環境条件、衝撃（テープカートリッジをうっかり落としてしまう）などの外的要因により、記録された磁気信号の読取りが困難になる可能性は捨てきれない。

そのような場合でも、記録したデータを正確に読み取るための機能の一つが ECC (Error Correction Code : 誤り訂正符号) である。デジタルデータを扱うストレージにはテープドライブに限らずいろいろな種類の ECC が使われているが、例として説明する LTO の ECC には非常に強力なエラー訂正能力がある。理論的には、書き込まれているデータの 15% が正しく読み取れなくなっても、データを訂正して再生する能力がある。

ECC は図 3 のように、ユーザーデータに加えて、ユーザーデータから計算したパリティ (Parity) と呼ばれる計算値を使って訂正を行う。規格が公開されている LTO 1 を例にすると、25,272 バイト (横 468 バイト、縦 54 バイト) のユーザーデータに対して、横列に計算した C1 パリティ 648 バイト (横 12 バイト、縦 54 バイト) と、C1 パリティ分も含めて縦列から計算した C2 パリティ 4,800 バイト (横 480 バイト、縦 10 バイト) の 2 種類のパリティが付加される。縦・横それぞれの列の中で複数個のデータが読取り出来なくても、同じ列の読取り可能なデータから計算することで、読み取れなかったデータを算出 (再生) することができる。この、パリティを含めたデータのひとかたまりを、サブデータセットと呼ぶ。

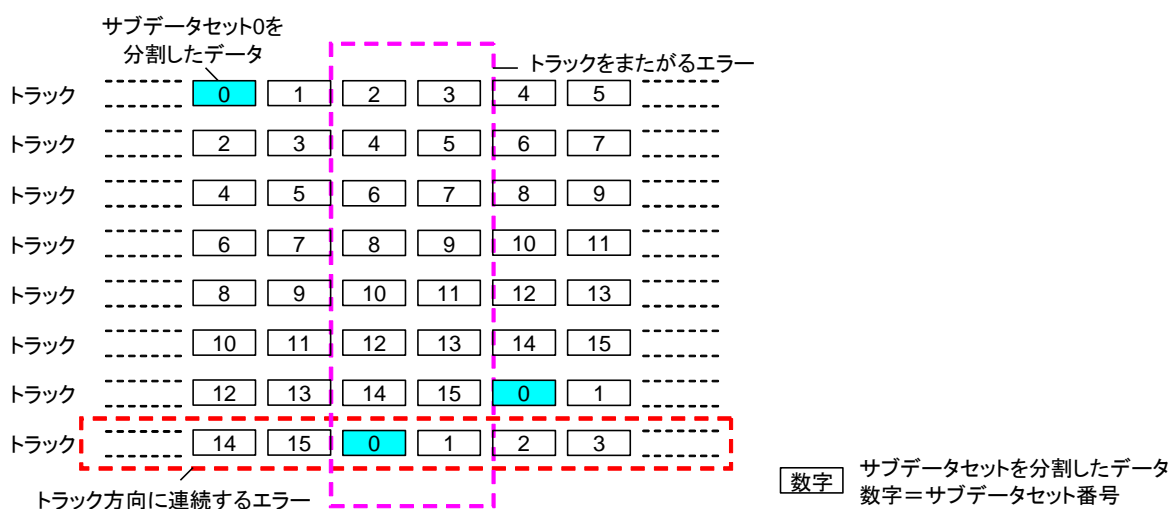


<図 3 LTO の誤り訂正用 ECC(LTO 1 の例)>

5.3 データ読取りにおける技術（ECCを補うインターリーブ）

ECCはエラーで読み取れなかったデータを強力なエラー訂正機能で算出（再生）するが、訂正できるバイト数はこのサブデータセットの縦・横それぞれの列の中で上限がある。つまり、読取りができないデータが複数の列に散らばっている場合には、それぞれの列でECCを使って読めなかったデータを算出することができるが、同じ数の読取りエラーが全て同じ列で発生してしまった場合には、ECCで算出できる限度を超えてしまい、結果的にデータは読み取れなくなってしまう。物理的なダメージによりテープメディアに小さな傷がついてしまった場合を考えると、傷の周辺に記録されているデータにエラーが集中してしまい、LTOの強力なECCでも訂正できないことが考えられる。

そこで、テープドライブはこのサブデータセットのデータを一箇所にまとめて記録するのではなく、テープメディア上を縦横両方向に広く分散させて書込みを行うことで、物理的なダメージによる読取りエラーの発生率を低減させる、インターリーブという手法を用いている。その様子を図4に示す。



<図4 LTOのインターリーブの様子>

図4に示している小さな四角形がサブデータセットを分割した一つのパーツである。ここでは0から15の番号をつけた16個のサブデータセットを細かいパーツに分割したうえで、分散させて記録している様子を示している。このように分散させて記録することで、横方向（トラック方向）に傷がついても、縦方向に傷がついても、同じサブデータセットのパーツができるだけ含まれないようにしている。さらに、傷ついてしまったパーツについては先述の強力なECCで読めなくなったデータを算出することで、結果としてデータ全体を

見た場合の読取りエラーに対する信頼性を向上させている。

このようにテープドライブは、書込みデータを確実にテープメディアに書き込むための工夫に加え、書き込まれたデータに多少の損傷が生じていても正しいデータを読み取るための工夫を備えた結果、可搬媒体というデータ保全の面では困難を伴う性質を持ちながら、ユーザーデータの記録・保管・再生に対して高い信頼性を提供することを実現している。