



# Compact Disc

AAFC例会資料

2015/04/26

大塚 祐司

## CDについて

1982年に夢のデジタルサウンドとして登場したCDですが、昨今では、高性能電子デバイスの開発やデジタル化理論の進展等によりハイレゾ音源などが登場し、さすがのCDも色褪せた感があります。

しかし、今でもオーディオメディアの主流であることは間違いなく、多くのユーザーに愛用されています。登場から33年、基本規格策定から34年となるCDですが、そこには当時の最新の理論やテクノロジーが込められていました。

今では、あまりにも日常に溶け込んでいるために何も疑問を持たないで使っているCDですが、その基本的な仕組みを理解されている方は意外に少ないようです。

銀色に輝くCDの透明な樹脂層の下には、微細な凹凸の列が渦巻き状に最内周から最外周に向かって連なっています。その総延長は約5Kmといわれています。そして、最大74分もの音声信号がデジタル情報で収録されていることは、皆さんよくご存じかと思えます。

では、DCに左右の音はどのように記録されているのでしょうか？

もっと根本的な部分として、微細な凹凸の繰り返しで0,1のデジタル信号を記録・再生する仕組みは・・・、疑問だらけでは？

若い頃から毎日のように手にしているのに、今さらCDのことなんて、気恥ずかしくてヒト（子供や孫）には聞けないですよ。

実は、当方も左右の音がどのようにCDに入っているのかが知りたくなり、自分なりに調べてみました。答えに辿り着くまで苦労しましたが、その過程で意外な！や「じえ、じえ、ジェ～」が数多くありました。

本日は、AAFC21年目の最初の正規例会ですので、皆さんの記憶に残るような内容にしようと、CDのこういった面にスポット当てたプレゼンを計画しました。

CDにまつわるミステリーツアーの如く、その仕組みや工夫の数々を「今さら」ですが、紹介させていただきます。

# Compact Disc

1970年代、オーディオ分野における音声信号のデジタル化がPCM録音機器等で実現され、それに続き、楽曲の市販メディアにおけるデジタル化として、1982年にCDが登場した

## CDの特徴

- ・メディアの構造、材質、音声信号の処理、記録、再生方法を「規格」で厳密に規定
- ・非接触再生、回転速度が変動（線速度が一定）
- ・アナログディスクの弱点をほぼ克服
  - ・埃、キズに強く、変形やノイズが発生しにくい
  - ・小型で取扱いが簡便（ランダム選曲等）
  - ・連続再生時間が長い
  - ・再生される限り、一定水準の音質レベルを保持

CD最大の特徴である音声信号のデジタル化とは・・・

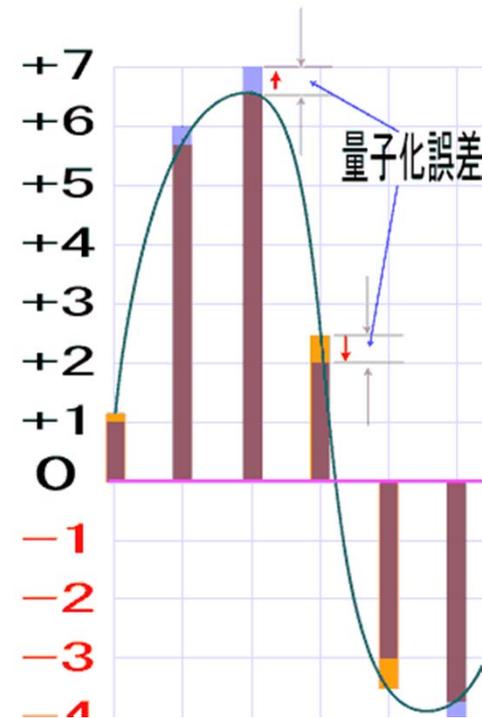
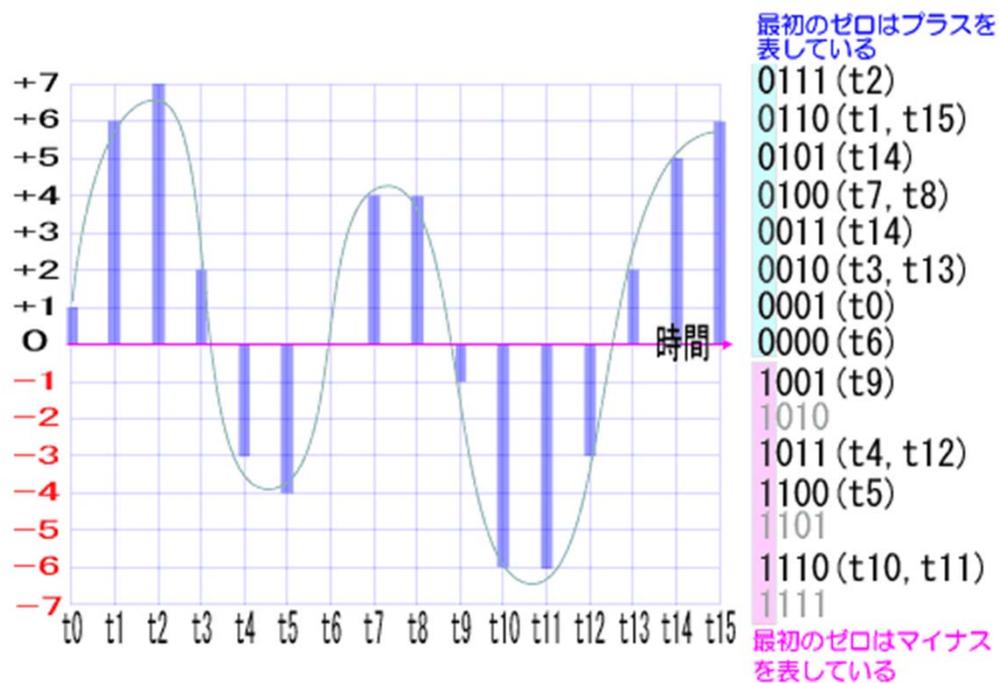
標本化：波形を一定間隔(標本化周波数)で区分する

量子化：各区分に対し予め定められた近似値を割当て

符号化：量子化の値を2進数に変換

\* 標本化、量子化の高密度化⇒変換精度向上＝情報量増加

デジタル化⇒音楽を聴いて楽譜を書き起こすイメージ



CD最大の特徴である音声信号のデジタル化とは・・・

CDの場合

- ① 1秒間を1/44100(44.1KHz)に区切り、標本化する
- ② 標本毎に対応する値を16bit(65536段階: -2の15乗(-32768)から2の15乗-1(=32767)までの)で決める  
波形の最大振幅を±1Vとし、2Vの電圧変化を  
65536段階で区分(1段階当たり 0.0000305V)
- ③ 標本電圧を0.0000305で割り、その値を2進数に変換  
(例)

$$1.5V \div 0.0000305V = 49180.327 \text{ (0.327は量子化誤差で無視)}$$

$$49180 = 11000000 \ 00011100 \text{ (2進数: デジタル情報)}$$

$$\text{因みに} 49180 \times 0.0000305 = 1.49999V$$

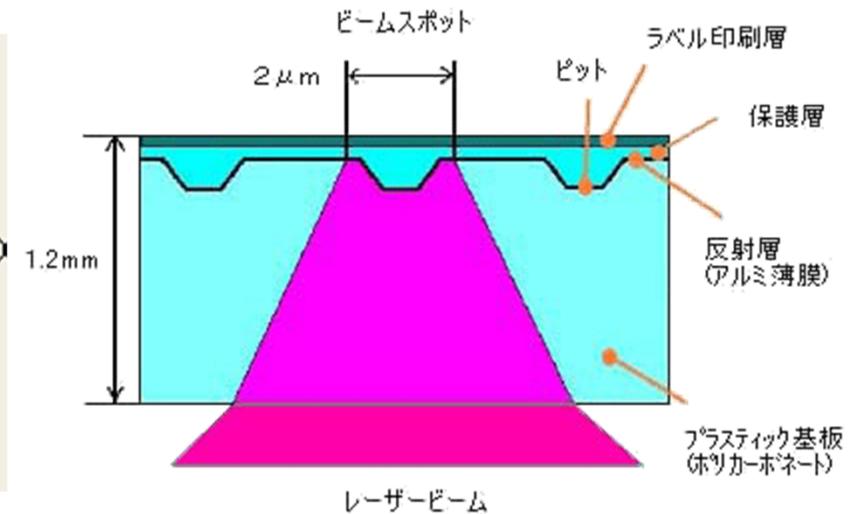
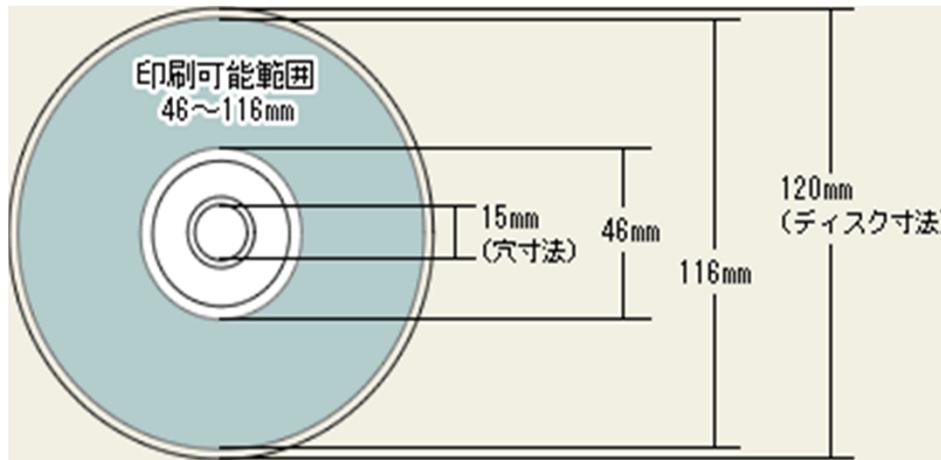
ダイナミックレンジは1bit当たり6dBとされ、16bitでは96dB  
(オーケストラの最大音量のDレンジは約80dB)

# CDの主な規格

- ①直径12cm(8cm)のポリカーボネート製円盤
- ②内周から外周に渦巻き状に信号を連続記録
- ③44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録
- ④780nmのレーザー光線で再生

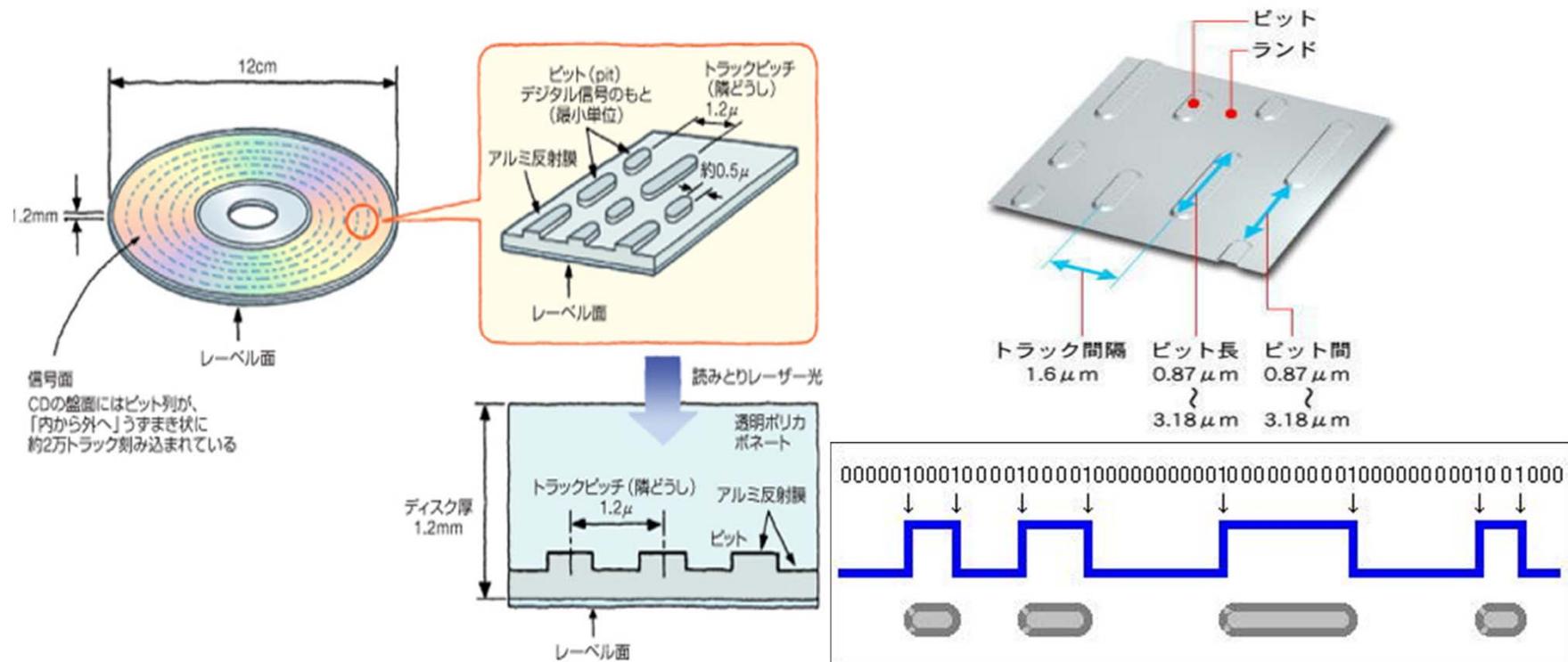
1: 直径12cm(8cm)のポリカーボネート製円盤

・厚さ1.2mmの中にラベル印刷層、保護層、反射記録層、樹脂層がある



## 2: 内周から外周に渦巻き状に信号を連続記録

- ・最内周から外周淵に向かい、最長5Kmほどの長さで、ピットとランド(凹凸)が連続
- ・ピットの幅は $0.5\mu\text{m}$ 、間隔は $1.6\mu\text{m}$ 、高さ $0.11\mu\text{m}$ 、長さ $0.87-3.18\mu\text{m}$ の9種類

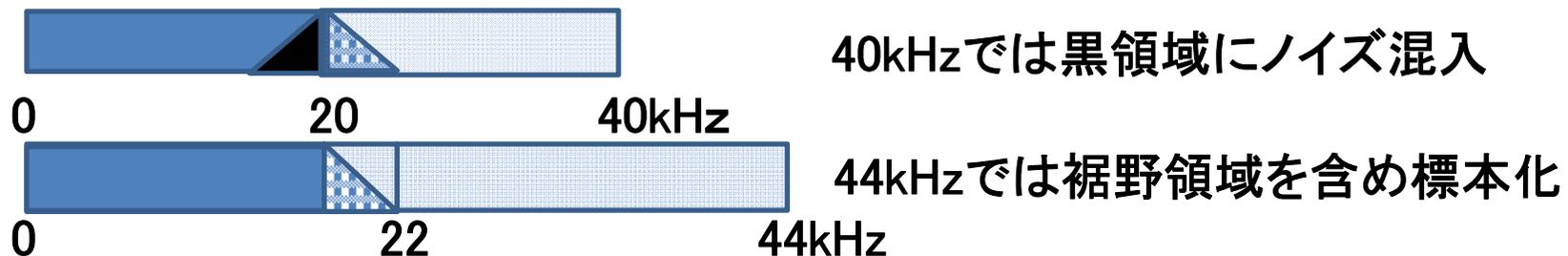


## 2: 内周から外周に渦巻き状に信号を連続記録

- ・CDは波長780nmの赤色レーザーで読取られる
- ・ピット、ランドの境で反射された光量の変化を利用
  - ・波長780nmのレーザー光は樹脂層内では屈折率(1.55)の関係で500nm( $780\text{nm} \div 1.55$ )に縮小する
  - ・ピットの高さは $0.11 \mu\text{m}$ (110nm)で、これは波長500nmの1/4波長(125nm)に近い値になっている
  - ・ランドで反射した光はピット面に到達時、ピットの高さ分を往復しており、ピット面の反射光と約1/2波長のズレが生じ、波の山と谷が干渉し光量が変化
  - ・完全な1/2波長のズレは、山と谷が干渉し打消されるが、CDでは完全に打消されない(残光あり)
  - ・この現象を利用し、反射光が減少・増加した瞬間を「1」と認識し、それ以外は「0」と認識する

### 3: 44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録

- ①音楽信号を44.1kHzで(44100/1秒毎に)標本化し、16bit(65536段階)で量子化(ダイナミックレンジ96dB)
- ・標本化定理で1/2周波数の22.05kHzまで再生可能
  - ・実は20kHzまでをより綺麗に再生するための工夫
  - ・20kHz以上をカットするフィルターを通してても、それ以上の信号は徐々に減衰する(山の裾のイメージ)
  - ・標本化周波数40kHzでは、裾野部分が再生できず40kHzとの差の周波数成分がノイズとなる  
【ノイズ発生周波数の例 :  $40-21=19\text{kHz}$ 、 $40-22=18\text{kHz}$ 】
  - ・20kHzで折返してくる様から「折返しノイズ」と言われる



3:44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録

②CDからデジタルデータを正確に読出すために、CD化の前に、以下の5段階の前処理が行われる

★【データのグループ化】6標本を1グループとし、標本毎に16bitを8bit(1Byte)ずつ前後2分割して取扱う

★【分散配置】本来のデータの順番を崩して、一定の規則に沿ってデータを離ればなれに並び変える

★【修復用ビット生成】読取りエラー修復用の追加データ(凡長ビット)を分散配置データを元に生成する

★【管理情報追加】収録曲のトラック情報や経過時間など再生状態を管理するための情報を追加する

★【文字列変換】ビットとランドの境目を確実に読取るため、ビット長さやビット間隔を示す文字列をビット加工や読取りが容易な文字列に変換する

### 3: 44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録 分散配置のイメージ

一定の領域にダメージが発生しても、元の時間軸に並び替えると、ダメージ部分は細かく分散してしまう(修復できる可能が高まる)

元のデータ

1-1	<del>1-2★</del>	1-3	1-4	1-5
2-1	<del>2-2★</del>	2-3	2-4	2-5
3-1	<del>3-2★</del>	3-3	3-4	3-5
4-1	4-2	4-3	<del>4-4★</del>	4-5
5-1	5-2	5-3	<del>5-4★</del>	5-5

分散データ  
(CD格納)

1-1	5-5	2-1	4-5	3-1
3-5	4-1	2-5	5-1	1-5
<del>1-2</del>	<del>5-4</del>	<del>2-2</del>	<del>4-4</del>	<del>3-2</del>
3-4	4-2	2-4	5-2	1-4
1-3	2-3	3-3	4-3	5-3

3:44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録  
 エラー修復用凡長bitのイメージ  
 実際のデータの他に、誤り訂正に利用する情報として「凡長bit」を原データを元に生成する

1752	17■2	?
元データ	読み込みデータ	判読不能
1752 15	17■2 15	17(15-1-7-2)2
元データ・凡長	読み込みデータ	総和より減じて判読
1752 15 38	■7■2 15 38	1752
元データ・凡長	読み込みデータ	連立の解より判読
<p>実際にはより複雑で高度な数式でエラーを訂正</p> <p>凡長符号15:1+7+5+2      38: 1・1+2・7+3・5+4・2</p>		

### 3:44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録

#### 文字列変換の必要性

- ・標本によっては「1」が連続する2進数が含まれる
- ・ビットとラントの境目を「1」と捉えるため「1」が連続するビットの作込みは工作精度や読取精度的に困難では、どうするか・・・

- ・14bitの文字列(16384種類)の中で「1」が連続しない文字列を選び、8bit毎に全データを14bitの文字列に置換
  - ・同時に「0」の連続は2～10個以内という条件も設定
- この処理を「EFM: Eight to Fourteen Modulation」という

- ・EFMでビットの長さと同隔(ラントの長さ)は9種類

【14bit化後のビットとラントの種類: 1と0の出現パターン】

1001,10001,100001,1000001,10000001,100000001,

1000000001,10000000001,100000000001

# 3:44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録 実際のデータ加工について

データのグループ化 (6標本: 16bit × 6標本 × 2ch = 192bit: 24Byte)

L①(8bit+8bit)R①(8bit+8bit)、L②R②、L③R③、L④R④、L⑤R⑤、L⑥R⑥

分散配置化 (各chごとに奇数番台と偶数番台を集約)

L①L③L⑤、R①R③R⑤、L②L④L⑥、R②R④R⑥

訂正用C2凡長bitの生成 (構成される各情報を基に生成: 4Byte追加)

L①③⑤、R①③⑤、C2①②③④、L②④⑥、R②④⑥

訂正用C1凡長bitの生成 (C2凡長bitを含め全情報より生成: 4Byte追加)

L①③⑤、R①③⑤、C2①~④、L②④⑥、R②④⑥、C1①②③④

**【C1、C2の訂正手法をソース; CIRS: Cross-Interleaved Reed Solomon と呼ぶ】**

管理情報の追加 (サブコードとして1Byte追加) 総計24+4+4+1=33Byte

S①、L①③⑤、R①③⑤、C2①~④、L②④⑥、R②④⑥、C1①~④

### 3: 44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録 文字列変換(EFM化)について

- ・ 下記のS①～C1④まで、8bit毎に14bitの文字列に変換  
S①、L①③⑤、R①③⑤、C2①～④、L②④⑥、R②④⑥、C1①～④
- ・ 各14bit情報の境目に3bitのマージン(隙間)を設ける
- ・ 先頭に24bitの同期パターンと3bitのマージンbitを追加



同期パターン

サブコード

6標本中奇数番台LR各3標本

C2エラー修正用凡長bit

6標本中偶数番台LR各3標本

C1エラー修正用凡長bit

このデータ形態(588bit)を1フレームとし、CDでは無音部分を含め、最初～最後まで全てこのデータ形態を繰返す

### 3:44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録 サブコードについて

- 各フレーム内1 Byte (8bit) のサブコードは1 bit毎P~Wに区分

1フレーム内8bit: P Q R S T U V W

第1フレーム	同期	サブ	LR奇数情報	C2凡長	LR偶数情報	C1凡長
第2フレーム	同期	サブ	LR奇数情報	C2凡長	LR偶数情報	C1凡長
《第3~96フレーム》						
第97フレーム	同期	サブ	LR奇数情報	C2凡長	LR偶数情報	C1凡長
第98フレーム	同期	サブ	LR奇数情報	C2凡長	LR偶数情報	C1凡長

- 98フレーム毎に **1ブロック** とし1/75秒分の情報として処理
- サブコードは、1ブロック分のデータ(P~W各98bit)でおのこの意味をなす情報として読取る
- 同期bitは各フレームの読取り位置を揃えるための目印

### 3:44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録

#### サブコードについて(つづき)

- ・サブコードを構成するP~Wの8チャンネルには以下の情報が格納される
- ・P: CDのデータ領域は読み込み開始(リードイン)、本体データ、読み込み終了(リードアウト)の3領域に大別されており、Pチャンネルには各領域を区別する情報や本体データ領域内では無音部分と曲部分の区分情報を格納する
- ・Q:トラック(曲)番号、経過時間等の他にコピー可否、製造国、権利者等の管理情報が格納される  
リードイン領域では最初に読込まれるTOC情報を収録  
TOC: Table Of Contents: 収納曲数、総収録時間等
- ・R~W: 画像や文字情報を格納する予備領域として設定され、後に曲のタイトル情報の収納などに利用

3:44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録

③CD1枚当たり、リードイン、本体データ、リードアウト領域は各1回ずつで、この間をひと括りの情報として扱う

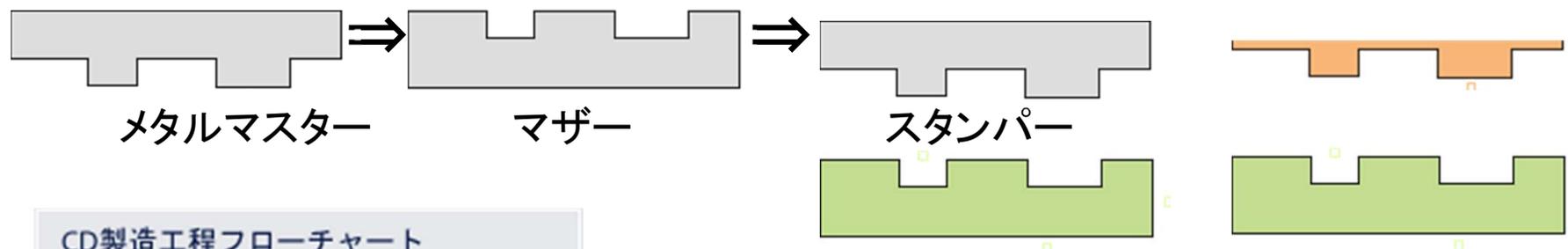
最短曲長は4秒、最大99トラック(曲)の収納が可能

#### ④CDの製造過程

③までの工程で加工されたデータがCDに書込まれる

- 1) ガラス円盤の表面にレジスト剤(感光剤)を塗布
- 2) デジタル化されたデータをレーザー光線で照射【書込み】
- 3) レジスト剤を洗浄しピット(窪み)を現像【データ固定】
- 4) 現像面をメッキ化しメタルマスターを製造しガラス板と分離
- 5) メタルマスターを元にマザー盤⇒さらにスタンパーを製造
- 6) スタンパーにプラスチックを射出して信号面を形成
- 7) 信号面にアルミニウムの反射膜、保護膜を形成
- 8) 保護膜上にタイトル、曲名等のラベルを印刷して完成

# 3:44.1kHz、16bit、2chのデジタル信号74分記録



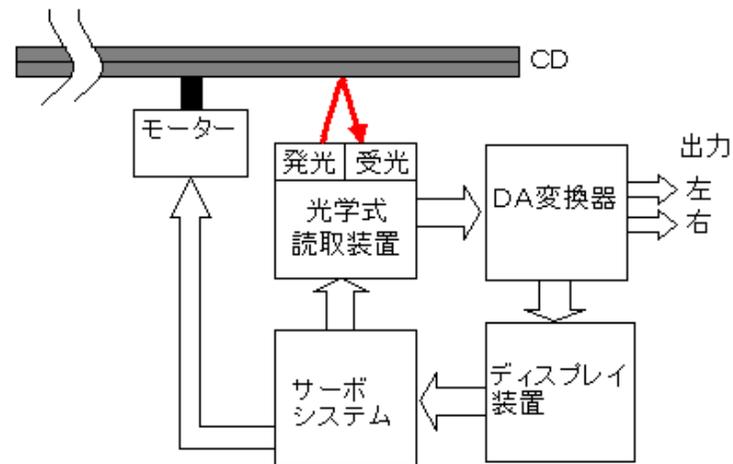
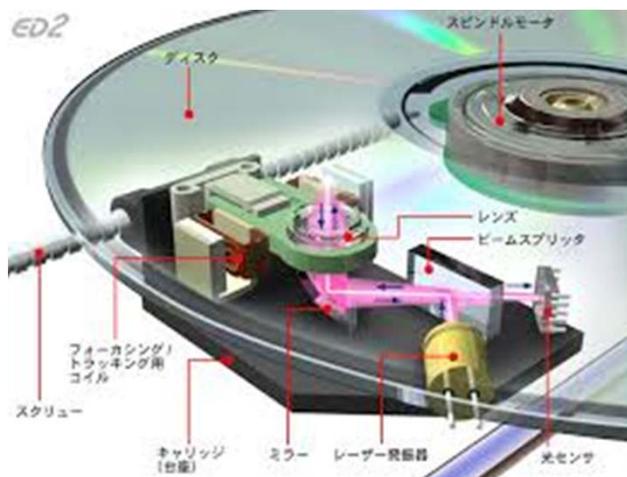
## CD製造工程フローチャート

- I STEP01 基盤成形
- I STEP02 反射膜形成
- I STEP03 工程検査
- I STEP04 保護膜コーティング
- I STEP05 欠陥検査
- I STEP06 レーベル印刷
- I STEP07 外観検査
- I STEP08 包装・梱包
- I STEP09 出荷検査



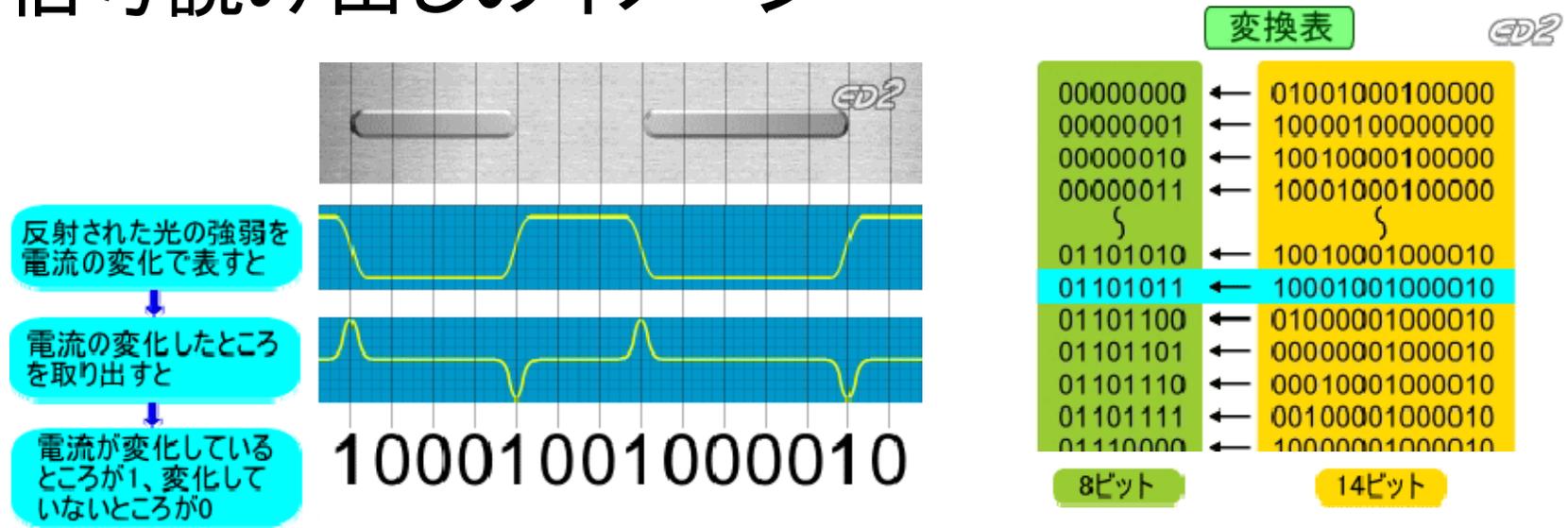
## 4: 780nmのレーザー光線で再生

- ① CDに記録された情報は、波長780nmの赤色レーザーを照射し、その反射光で読取る
- ② 最内周のTOC(トラック数、収録時間等)情報が自動的に読取られ、再生トリガーを受けて再生に移行
- ③ 再生は線速度一定(1.2m/s~1.4m/s)のため、最内周459rpm~最外周198rpmまで回転数は徐々に減速
- ④ 1秒間の音楽情報として1,411.2Kbpsが読出されるが、実際には4,321.8Kbpsの読取りが必要



# 4 : 780nmのレーザー光線で再生

## ⑤信号読み出しのイメージ



- 反射された光の強弱を電圧の変化で捉え、電圧の変化した部分を1、それ以外を0に変換
- 読み出された14ビットのデータは、変換表に沿って、8ビットのデータに置き換えられる

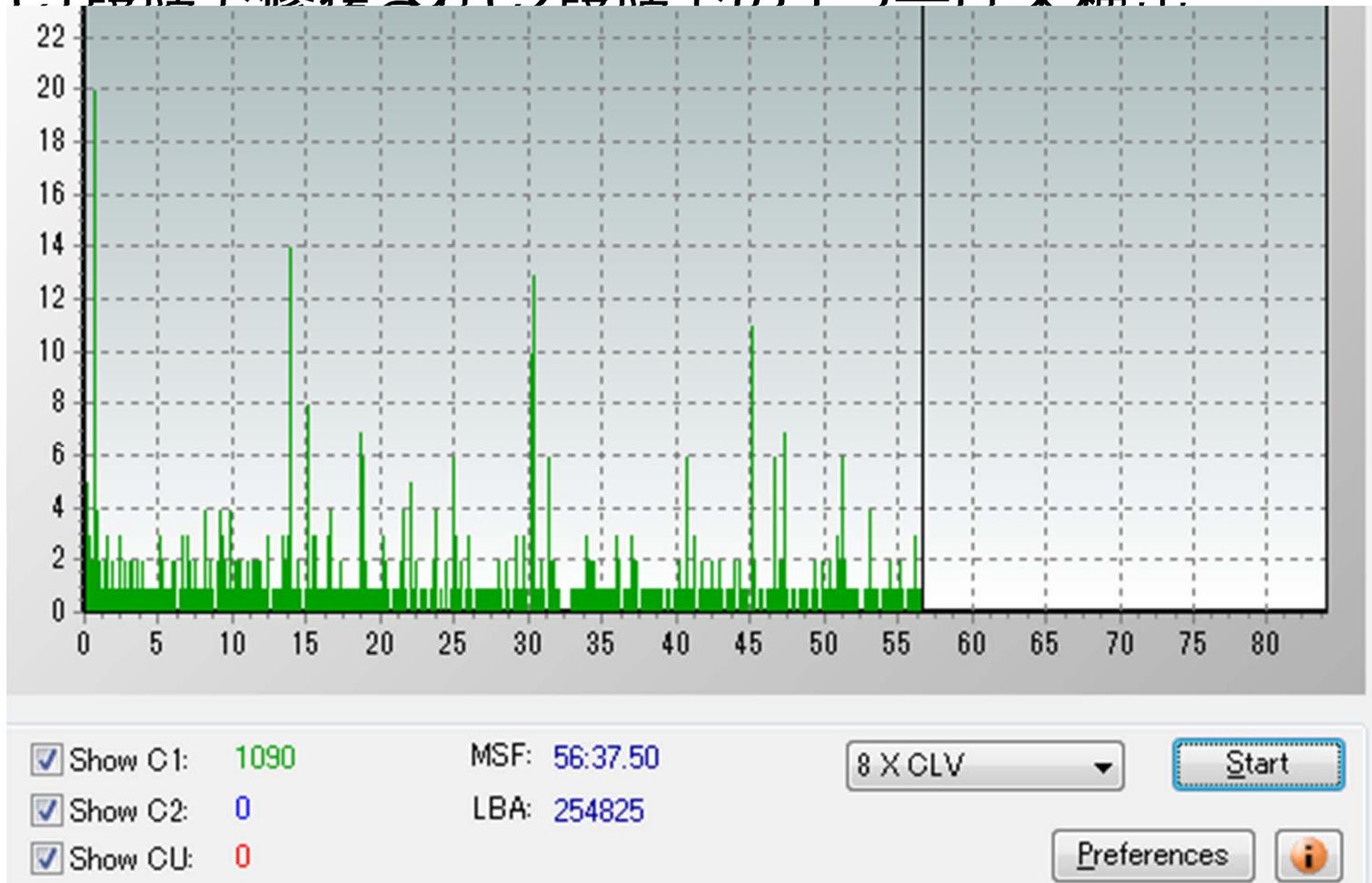
#### 4: 780nmのレーザー光線で再生

- ⑥ 読取られたデータは、メモリーに蓄積され、データ加の逆の手順をたどり、本来のデータに復元される
- ⑦ この過程で、読取りエラーが発生した場合、訂正用凡長bitのC1, C2bitにより正しく復元される
  - ・ CDは本来、平均で10の5乗bit中に1bit程度のエラー(約0.07秒に1bit)が発生するといわれてる
  - ・ C1、C2凡長bit: CIRCにより10の9~10乗bit中1bit(約12~118分に1bit)程度に抑制される
- ⑧ C1, C2凡長bitでの復元が不可の場合、エラー前後の正常部分の平均値をデータに代用する  
(楽曲の連続性を優先し、原則、再読込みは行わない)
- ⑨ 再構築されたデータは、水晶制御の時間精度で読出され、楽曲部分はD/A変換を経て出力される

4: 780nmのレーザー光線で再生

エラー発生数と訂正結果の例

約56分間にC1段階で1090個のエラーが検出されたが全てC1段階で修復されC2段階でのエラーは未検出



#### 4: 780nmのレーザー光線で再生

- ⑩ D/A変換とは、44.1kHzで標本化され、16bitで量子化されたデジタル信号に基づいて、アナログの音声信号を作り出す工程
- ⑪ 各標本ごとに量子化値16bit(65536段階)に応じた電圧を発生させる(デジタル出力はこの段階で出力)
- ⑫ ⑪で発生した電圧は、1/44100秒の間、値が一定の階段状の電圧変化のため、ローパスフィルターを通して、連続した滑らかな電圧の変化に丸める
- ⑬ D/A変換後、アナログ回路で規定出力レベルに整えて、出力される

CDでは、収録曲を順番に再生するだけでなく、選曲や再生順序の入替え等がリモコン操作で容易にできるなど、登場当初から利便性が考慮されている

## その後の展開

夢のデジタルオーディオの担い手として登場したCDは、その後、各種の改良手法が考案されているが、基本となる規格は今でも登場当時のままである

### ・主な改良策

- ①ICチップの高密度化(製造コスト削減)
- ②光変換によるデジタルとアナログ回路の分離
- ③デジタルフィルターで周波数の高次化(4倍、8倍)
- ④デジタル情報読出し時の1bit化( $\Delta \Sigma$ )
- ⑤D/A変換時のデータ補正・補完(K2、 $\alpha 24$ 、レガートリンク等)
- ⑥読出しクロックの高精度化
- ⑦CD回転の安定化(VRDS、スタビライザー等)
- ⑧CD材質の変更(ガラス基板等)

さて、どれほど音質改善に寄与しているのでしょうか？

## エピローグ

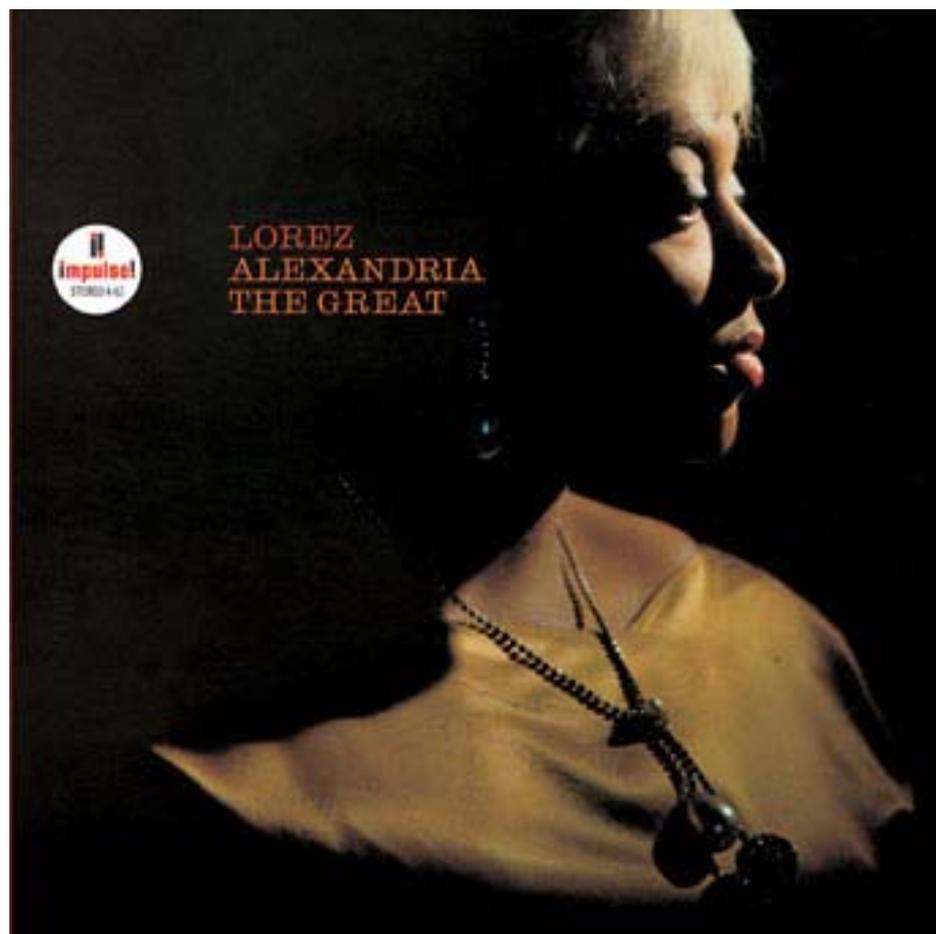
30年以上に亘り、オーディオ用メディアとして君臨するCDですが、この登場が皮肉にも趣味としてのオーディオを衰退させる遠因となったような気がします。

誰もが容易に高水準の楽曲を聴くことができるようになった反面、レコードほど趣味性を発揮できる余地がなくなることが、あまりにも完成度の高い規格として時代を突き抜けて登場した故のCDの功罪なのでは。

もし、ソニーやフィリップスが、商魂逞しく先々を視越し、あえて改良・発展の余地を残していたら、もしマニアが手を出せる領域や仕組みが盛り込まれていたら、その後の展開も変わったかも知れません。

今では「たかがCD」ですが、中身を知れば「されどCD」これだけのことを軽々とこなし、我々に日々の糧を提供してくれるCDが愛しくなりませんか。

CDP-111 1983年登場 SONYの第二世代機  
各種音質改善対応が図られる以前の機種で、初代機に  
近い性能で登場当時のCDの音質を今も聴かせる



ロレス・アレキサンドリア

マイ・ワン・アンド・  
オンリー・ラブ

1928年シカゴ生まれ