

オペレーティングシステム

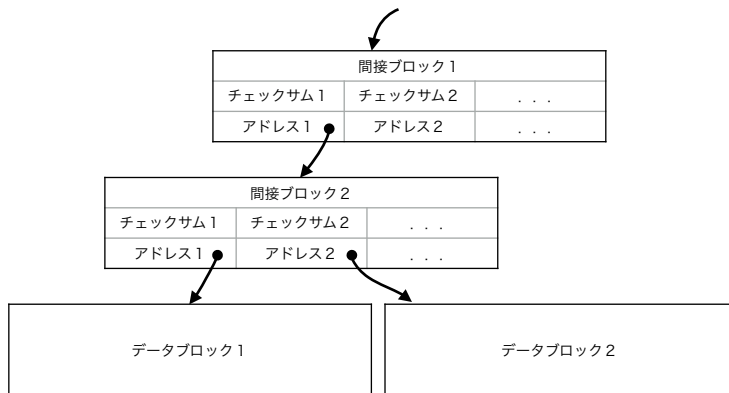
第17章 ZFS

<https://github.com/tctsigemura/OSTextBook>

ZFS の特徴

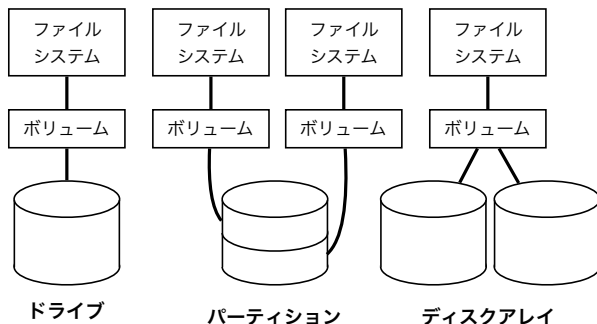
- 2005 年にサン・マイクロが OpenSolaris に実装して公開
- オープンソースで開発が続いている (FreeBSD 等でも使用可)
- 大きな主記憶, 高速マルチプロセッサが前提 (8GiB, 64bit CPU)
- COW (Copy On Write) でデバイスに書き込む。
(デバイスのブロックを上書きしないので前状態を維持)
- Uberblock を書き込みと同時に新しい状態になる。
(Uberblock はファイルシステム管理データの根)
- チェックサムにより高い信頼性を確保 (次ページ)
- 一瞬で**スナップショット**や**クローン**を作成
(COW の手法を使用し違いの出たブロックだけコピーし変更)
- ボリュームの代わりにストレージプールを使用 (後のページ)
- ファイルサイズ等の制約が事実上無い ($Zetta = 2^{70}$)
(ファイルサイズ $2^{64}B$, ストレージプールサイズ $2^{70}B$)
- ミラーや RAID-Z 等が装備され信頼性・可用性が向上
- データ圧縮, 重複除去機能があり (ディスク I/O を少なくする)

全ブロックにわたるチェックサム



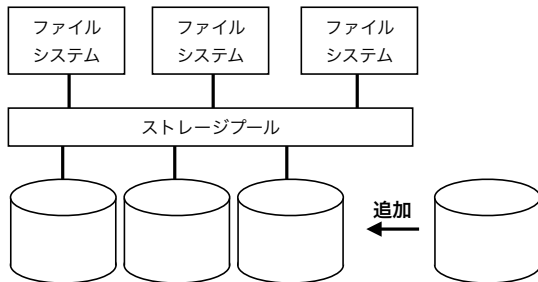
- ブロックポインタがチェックサムを持つ。
- メタデータだけでなく普通のデータにもチェックサムあり。
- チェックサムの不整合が見つかった場合、データの 2 重化（ミラー）がされていれば、自動的にミラーからデータを修復する。

従来の方式のボリューム



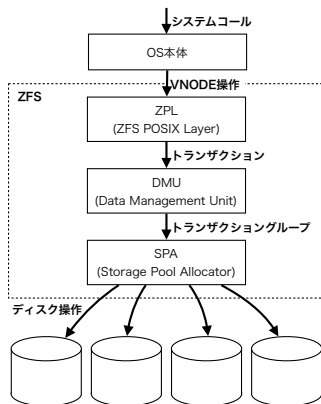
- ファイルシステムの初期化以前にボリュームを決定し、
- 後でサイズの変更などはできない。

ZFS のストレージプール



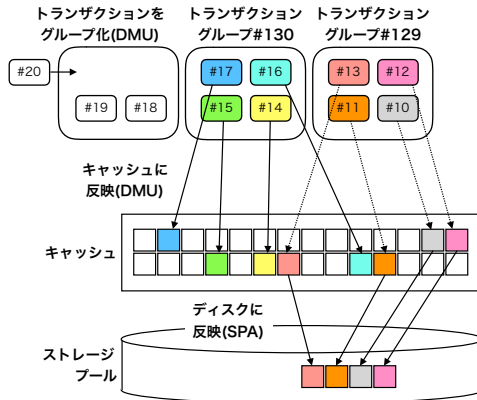
- ストレージプールは沢山のデバイスを収容する.
- ファイルシステムからの要求に応じてブロックを割り付ける.
- C 言語プログラムの `malloc()` や `free()` に似ている.
- ストレージプールに後でデバイスを追加することも可能.

ZFS のソフトウェア構成 (1)



1. システムコールは、OS カーネル本体がVNODE 操作に変換する。
2. ZPL は VNODE 操作を ZFS のトランザクションに変換する。
3. DMU は複数トランザクションを**トランザクショングループ**にする。
4. SPA は、DMU がトランザクショングループをキャッシュに書込み終わると、キャッシュの内容をデバイスに反映させる。

ZFS のソフトウェア構成 (2)



3. DMU は複数トランザクションをトランザクショングループにする。
4. SPA は、DMU がトランザクショングループをキャッシュに書き込み終わると、キャッシュの内容をデバイスに反映させる。(バースト)

ストレージプールの構造 (概要)

ボ リ ュ ム ラ ベ ル

デ バ イ ス 内 部 の 構 造

VL_1 (256KiB)
VL_2 (256KiB)
ブートコード (3.5MiB)
データ領域
VL_3 (256KiB)
VL_4 (256KiB)

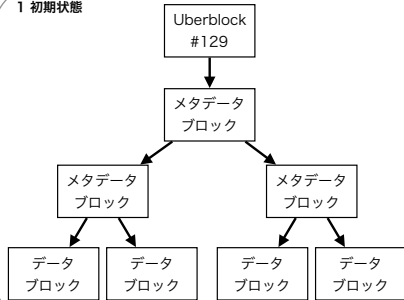
VL_n : ボリュームラベル

デバイス情報など 名前/値ペア (128KiB)	
Uberblock[0]	(1KiB)
Uberblock[1]	(1KiB)
Uberblock[2]	(1KiB)
...	
Uberblock[127]	(1KiB)

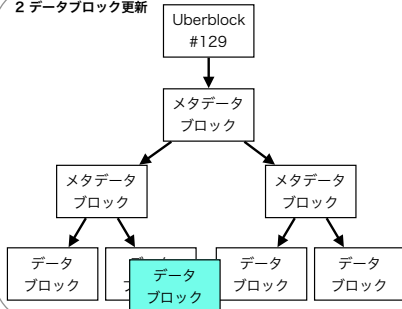
- デバイス（ディスク）の4箇所と同じボリュームラベルを書く。
- ボリュームラベルには128個のUberblockを格納できる。
- Uberblockはトランザクショングループ番号を含んでいる。
- Uberblockはトランザクショングループ番号を128で割った余りの位置に書く。

ストレージプールの更新 (1)

1 初期状態



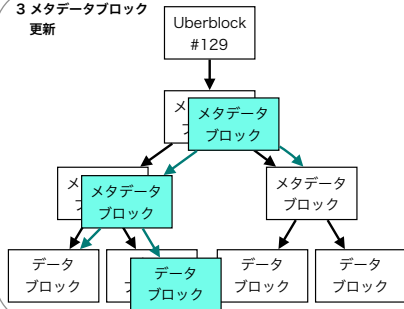
2 データブロック更新



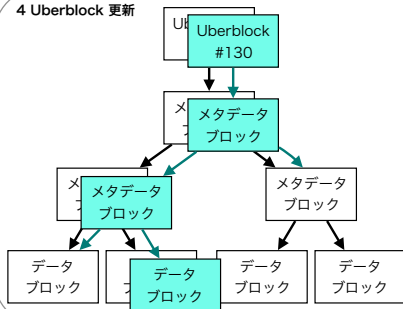
1. Uberblock を起点とする木構造でブロックが記録されている。
2. 変更するには、新しいブロックを確保し内容を書き込む (COW)。

ストレージプールの更新 (2)

3 メタデータブロック更新



4 Uberblock 更新



3. メタデータブロックも COW で更新する.
4. Uberblock を新しい領域に書き込む.
(トランザクショングループ番号が最新の Uberblock が有効)
(古い世代のブロックは解放され、再利用される.)

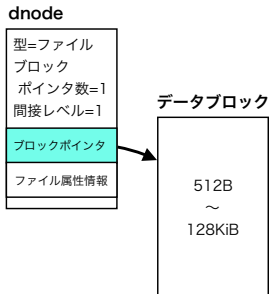
ブロックポインタ

図中でブロックを指していた**矢印**を表現するデータ構造を**ブロックポインタ**と呼ぶ。ブロックポインタはデータ多重化のために最大3組のアドレスを記録できる。ブロックポインタの内容は以下の通り。

- **サイズ**：ブロックの大きさに関する情報
- **チェックサム**（64 ビット）：ブロックのチェックサム（最大3個）
- **ブロックのアドレス**：ブロックのストレージプール内での格納位置に関する情報（最大3個）（デバイス、デバイス内アドレス）
- **タイムスタンプ**：ブロックを作成したトランザクショングループの番号（ブロックが削除される時にスナップショットと比較）
- **その他**：チェックサム計算に使用するアルゴリズムの種類、データ圧縮に使用するアルゴリズムの種類、圧縮後のサイズなど...

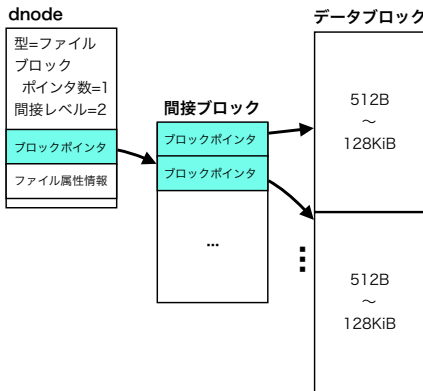
Dnode (基本)

あらゆるオブジェクトを表現する 512 バイトのデータ構造である。USF の i-node に似ているが、ファイル、ディレクトリだけでなく、ファイルシステム、スナップショット、クローンなども表現する。



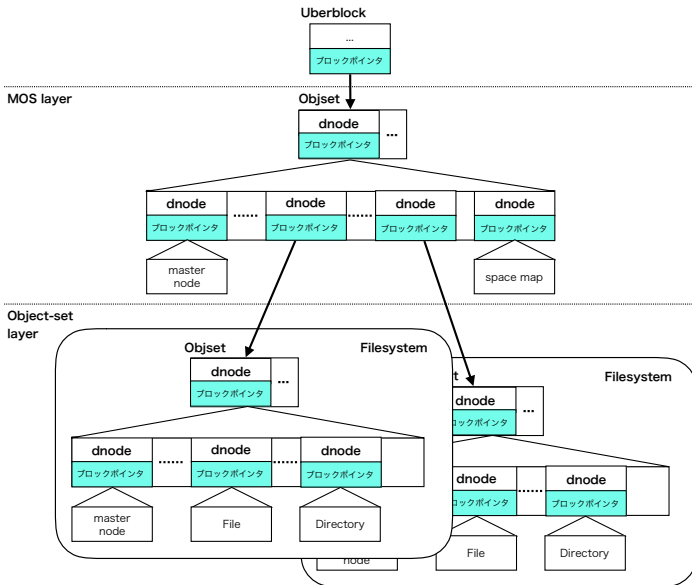
- dnode は三つ以内のブロックポインタを格納することができる。
- dnode は表現するオブジェクトに応じたデータを格納する領域を持っている。(この領域はブロックポインタと共用になっている)

Dnode (データが大きい場合)

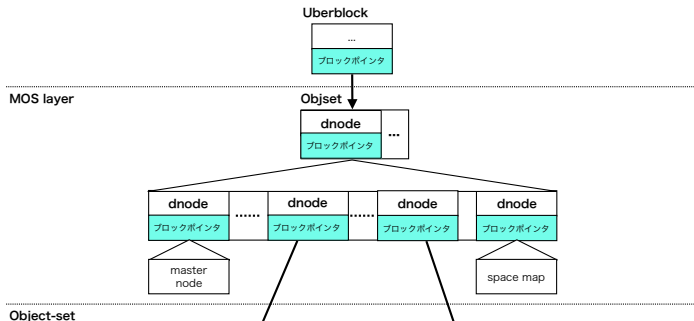


- データの大きさが 128KiB 以内の場合は直接参照 (前ページの図)
- 大きさが 128KiB を超える場合は間接ブロック (上の図))
- 128KiB の間接ブロックはブロックポインタを最大 1Ki 個格納できる.
- $128KiB \times 1Ki = 128MiB$ より大きなデータを表現する時は, 多重の間接ブロック (最大 6 レベル) を用いる. (2^{64} バイト以上)

ストレージプールの全体像

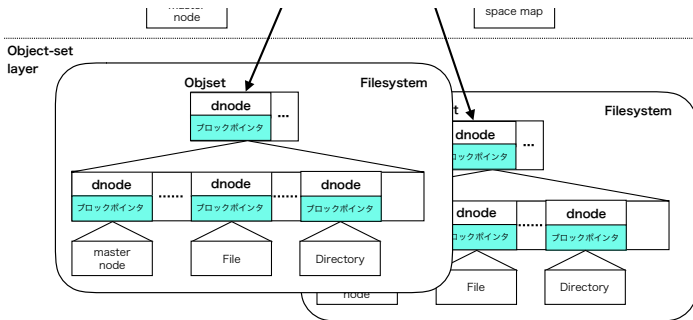


MOS (Meta Object Set) layer



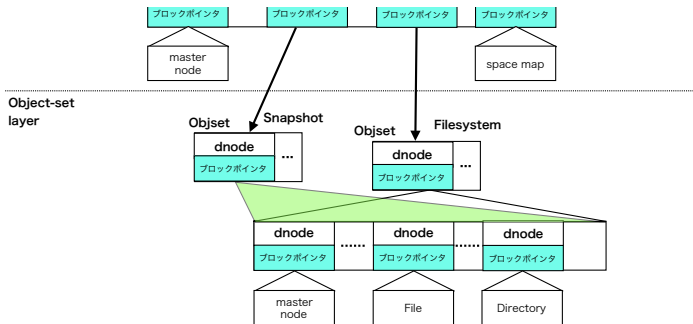
- Objset は dnode の配列を管理する。
- 配列には、ストレージプール全体に関する情報や、ファイルシステムやスナップショット等の一覧が格納される。
- master node はストレージプールのコンフィグ、プロパティなど。
- space map はストレージプール内のブロックの割付を管理する。

ストレージプールの全体像 (Object-set layer)



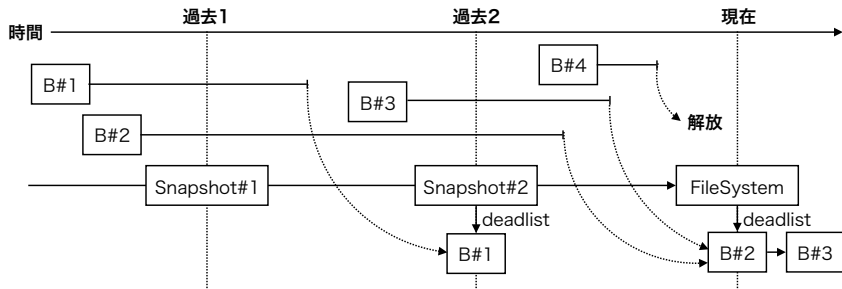
- ファイルシステムは Objset の dnode 配列で表現する。
- dnode リストが UFS の i-node リストに相当する。
- master node は root ディレクトリの dnode 番号などの情報。
- 図は、通常ファイルの例とディレクトリファイルの例

スナップショットの作成



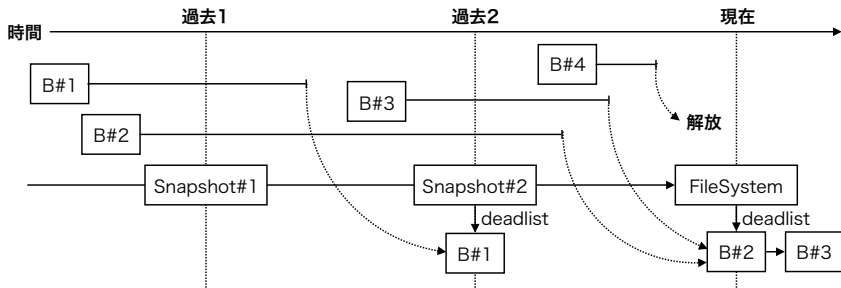
- ファイルシステムを表す Objset のコピーを作る。
- MOS layer の dnode 配列に登録する。
- スナップショットは一瞬で作成できる。
- 変更がないデータブロックは共用する。
- 内容が書き換わると COW で必要最小限のブロックのコピーを作る。

スナップショットと deadlist



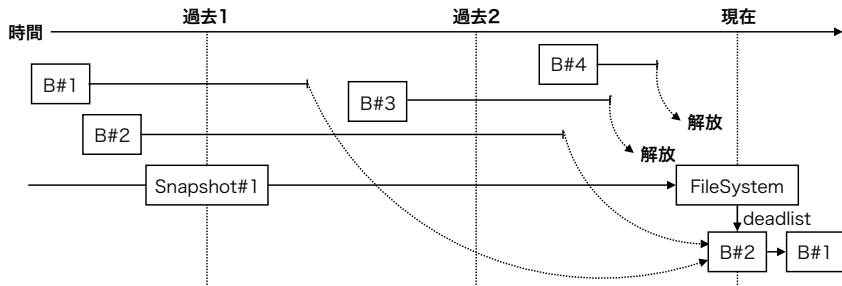
- ファイルシステム (FileSystem) は時間とともに変化する.
- ある瞬間の状態を保存したものがスナップショット.
- B#N と続く線はブロックとブロックの寿命を表す.
- Snapshot#N はスナップショットを表す.
- deadlist は使用されなくなったが解放できないブロックのリスト

ブロックの解放 (1)



- B#1 は Snapshot#1 で使用されているので解放できない。
- B#2 と B#3 もスナップショットで使用されているので解放できない。
- B#4 はスナップショットで使用されていないので解放できる。
- 解放できないブロックは deadlist に格納される。

ブロックの解放（2）



- Snapshot#2 を削除した状態.
- B#1 と B#2 は Snapshot#1 で使用されているので解放できない.
- B#3 は Snapshot#2 が削除されたので解放できる.
- B#1 と B#2 は FileSystem の deadlist に格納される.

ZFS は大きな主記憶と高速な CPU を前提に設計されている。
以下の特徴を持つ。

- COW (Copy On Write) を用い既存のブロックを上書きしない。
- COW のお蔭でシステムのクラッシュでも壊れない構造を実現。
- デバイス上の全てのデータについてチェックサムを持つ。
- スナップショットやクローンを一瞬で作ることができる。
- ボリュームの代わりにストレージプールを使用する。
- ストレージプールに後で新しいデバイスを追加可能。

練習問題（1）

次の言葉の意味を説明しなさい。分からない言葉は調べなさい。

- COW (Copy On Write)
- メタデータ
- チェックサム
- スナップショット
- クローン
- ボリューム
- ストレージプール
- ZPL (ZFS POSIX Layer)
- DMU (Data Management Unit)
- SPA (Storage Pool Allocator)
- VNODE

練習問題（2）

- Uberblock
- ブロックポインタ
- Dnode
- MOS (Meta Object Set) layer
- Object-set layer
- space map
- master node

練習問題（3）

- トランザクショングループ番号は 64 ビットです。毎秒 100 トランザクショングループを処理したとして、トランザクショングループ番号がオーバーフローするまでに約何年かかるか計算しなさい。
- ZFS で使用できるチェックサム計算アルゴリズムについて調べなさい。
- ファイルを表現する dnode が間接レベル 2 の時、最大のファイルサイズは何バイトになるか計算しなさい。
- ブロックにリンクカウントを設け、スナップショットからの参照数を管理することで、ブロックの解放を判断するアイデアの利点と問題点を挙げなさい。