Software Defined Storage における
最適なデータ可用性/保護の実装検討と提言

日本アイ・ビー・エム株式会社

■ 執筆者Ｐｒｏｆｉｌｅ ■

1995年　日本アイ・ビー・エム株式会社　入社
2016年　現在システムズ・ハードウェア事業本部所属
クラウドマイスター上席エンジニア

斎藤　彰宏

1989年　日本アイ・ビー・エム株式会社　入社
2016 年　現在システムズ・ハードウェア事業本部所属
ストレージ・テクニカル・セールス

南　聖二

1997年　日本アイ・ビー・エム株式会社　入社
2016年　現在システムズ・ハードウェア事業本部所属
Software Defined Infrastructureテクニカル・セールス

岡野　一恵

2012年　日本アイ・ビー・エム株式会社　入社
2016年　現在システムズ・ハードウェア事業本部所属
公共/通信事業担当システムズアーキテクト

倉前　裕成

■ 論文要旨 ■

Software Defined Storage(SDS)は、コモディティサーバーを利活用する事で、新しい時代の IT 基盤におけるストレージ機能を実現する技術分野である。市場からの注目度が高く、著しい速度での技術革新が進んでいる。一方で従来のストレージ専用機器と比較してデータ可用性/保護について不十分な点があり、高信頼性が求められる企業の基幹・勘定系システムへの導入には大きな障壁がある。筆者らはこれまで実業務における SDS の設計・導入で多くの試行錯誤を繰り返しており、その中で蓄積された実績と経験を踏まえ、データ複製技術等の適切な活用で、SDS のデータ可用性/保護に関する不足は補える事を、障害分析(CFIA)と実機での概念実証により証明した。読者の皆様が本論文を SDS 導入設計の検討の手引書として利用いただく事により、SDS の導入を円滑かつ適正に実施いただくための手助けになる事を企図している。

■ 論文目次 ■

１．はじめに ……《 4》
２．Software Defined Storage (SDS)の概要……《 4》
２．１　Software Defined Storage(SDS)の定義
２．２　Software Defined Storage(SDS)の優位点
２．３　Software Defined Storage(SDS)の課題点
３．SDS のデータ可用性/保護機能 の評価……《 8》
３．１　ディスク及びノード冗長性の構造
３．２　Snapshot(Point In Time Copy) の構造
３．３　SDSとストレージ専用機器のデータ可用性/保護の分析と評価
４．SDS のデータ可用性/保護充足方法と概念実証……《 10》
４．１　Asynchronous/Synchronous Replication
４．１．１　Asynchronous/Synchronous Replication の実機検証結果と考察
４．２　ネットワーク経由ファイルバックアップ
４．２．１　ネットワーク経由ファイルバックアップの実機検証結果と考察
４．３　イメージバックアップ
４．３．１　イメージバックアップの実機検証結果と考察
５．SDS のバックアップのデータ可用性/保護充足方法の評価……《 17》
５．１　SDSのデータ可用性・保護充足手法の分析と評価
５．２　SDSのデータ可用性・保護充足手法の選択決定基準
６．まとめ……《 19》

■ 図表一覧 ■

図 1 SNIAの定義するSDSの全体像[７] ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 5》
図 2 左：本論文におけるSDSの全体像　右：ストレージ専用機器の全体像・・《 6》
図 3 左：SDSの冗長イメージ　右：ストレージ専用機器の冗長イメージ・・・・・《 8》
図 4 左:Redirect-On-Write方式　右:Copy-On-Write方式・・・・・・・・・・・・・・・・・《 9》
図 5 左:Clone/スプリットミラー方式 右: COW with background copy方式・・《 9》
図 6 左：SDSのReplication 右：ストレージ専用機器のReplication・・・・・・・・《 11》
図 7 Asynchronous Replication検証環境・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 12》
図 8 ネットワーク経由ファイルバックアップ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 14》
図 9 ネットワーク経由ファイルバックアップ検証環境・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 14》
図 10 イメージバックアップ・・《 16》
図 11 イメージバックアップ検証環境・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 16》
表 1　2016年11月時点で入手可能なSDS製品・技術例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 6》
表 2　コモディティサーバーにおける価格例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 7》
表 3　ストレージ専用機器における価格例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 7》
表 4　SDSデータ可用性/保護機能の構成要素障害影響分析による評価・・・・・・・《 10》
表 5　Asynchronous Replication検証結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 12》
表 6　バックアップメディアの適性比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 13》
表 7　ファイルバックアップ時間概算（縦：容量　横：テープドライブ数）・《 13》
表 8　ネットワーク経由ファイルバックアップ検証結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 14》
表 9　イメージバックアップ時間概算（縦：容量　横：テープドライブ数）・《 16》
表 10　イメージバックアップの実機検証結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・《 17》
表 11　SDS データ可用性/保護充足手法の構成要素障害影響分析による評価・・《 18》
表 12　SDS データ可用性/保護方法に関するアーキテクチャ決定アセット・・・・《 18》

１．はじめに

Software Defined Storage (SDS)は 2016 年現在、市場において注目度の高い技術分野の一つである．市場調査では半数以上の企業で SDS の導入を検討しており［１］、今後の SDS 市場の年間平均成長率（CAGR）を 30%以上と予測している［２］．SDS の導入を検討している企業が SDS に最も期待するのは、ストレージ基盤コストの削減であり、従来のストレージ専用機器の置き換えとして、コストパフォーマンスの良いコモディティサーバーを利用する実装を SDS として検討するケースが多い［１］。一方で SDS におけるデータ可用性/保護機能は、ストレージ専用機器と比較すると不足しているとの指摘も多いのも事実である［３］［４］。データ可用性/保護は、ストレージに求められる最も重要な基本要件の一つであり、この点に不安がある限り、重要なデータを SDS に配置する事にはリスクが伴う。現時点での SDS 採用は非基幹業務での利用が中心だが［５］［６］、今後の企業や官公庁の基幹・勘定系システムにおける SDS の導入検討において、大きな障壁になると考えられる。

筆者らは、多くのお客様において SDS の導入や設計を行っており、その経験から SDS のデータ可用性/保護実装には不十分な点もあるが、設計において適切なデータ可用性/保護を実装する事で、基幹・勘定系システムにも利活用可能と考えている。ただし従来のストレージ専用機器では、現場に長年の設計ノウハウやアセットが蓄積されているのに比べて、歴史の浅い SDS ではそれらが不足している事も実感している。筆者らは SDS の導入を検討される読者の方にとって有用な情報になるように、実際のプロジェクトで有効性が実証された手法について、設計ノウハウとアセットを本稿にまとめる事にした。

本論文では、まず SDS の定義と期待される効果について解説・検証する。SDS の定義は本論文の主テーマではないが、2016 年時点では、SDS の定義について大多数の人が納得する市場コンセンサスが確立されてないため、本論文における SDS の定義を明確にする目的がある。この定義はこれから SDS を学ぼうとする読者の皆様にも有用な情報と考える。次に SDS が実装しているデータ可用性/保護機能を従来のストレージ専用機器と比較分析・評価し、課題点を明確化する。次に SDS のデータ可用性/保護の充足手法を提言し、その構造と概念実証の結果、また実装検討で必要な考慮点をまとめる。最後に提言した充足手法が課題を解決している事を評価し、実設計における手法選択の基準を提案する。

なお、SDS は立ち上げ時期にあるため技術進歩が極めて早く、特定の技術・製品やバージョンを前提とした場合、適時更新が難しい論文では内容が早々に陳腐化する事は避けられない。また意図せずに特定の宣伝広告に繋がる事で、読者の有用性を損ねる可能性が高い事から、当論文では可能な限り特定の技術・製品に特化した記述を避けている。本稿は筆者らの個人的な見解であり，所属する団体，組織の意見を代弁するものではない。

２．Software Defined Storage (SDS)の概要

２．１　Software Defined Storage(SDS)の定義

ストレージの業界標準団体である SNIA（Storage Networking Industry Association）では以下の５つの機能を有するストレージを SDS と定義している［７］。SNIA の定義における SDS の全体像は図 1 に示す。

①自動化:ストレージの運用を自動化し、運用の複雑性やコストを低減できる。
②標準化されたインターフェース：
　ストレージの管理や活用に関わる操作を標準的な API で操作できる。
③仮想化されたデータパス
　ブロック、ファイル、オブジェクトの様な多様なインターフェースをサポートできる。
④拡張性:可用性やパフォーマンスに影響なく、柔軟にストレージインフラを拡張できる。
⑤透過性:ストレージ利用者自身がリソース使用率やコストをモニタリングし管理できる。

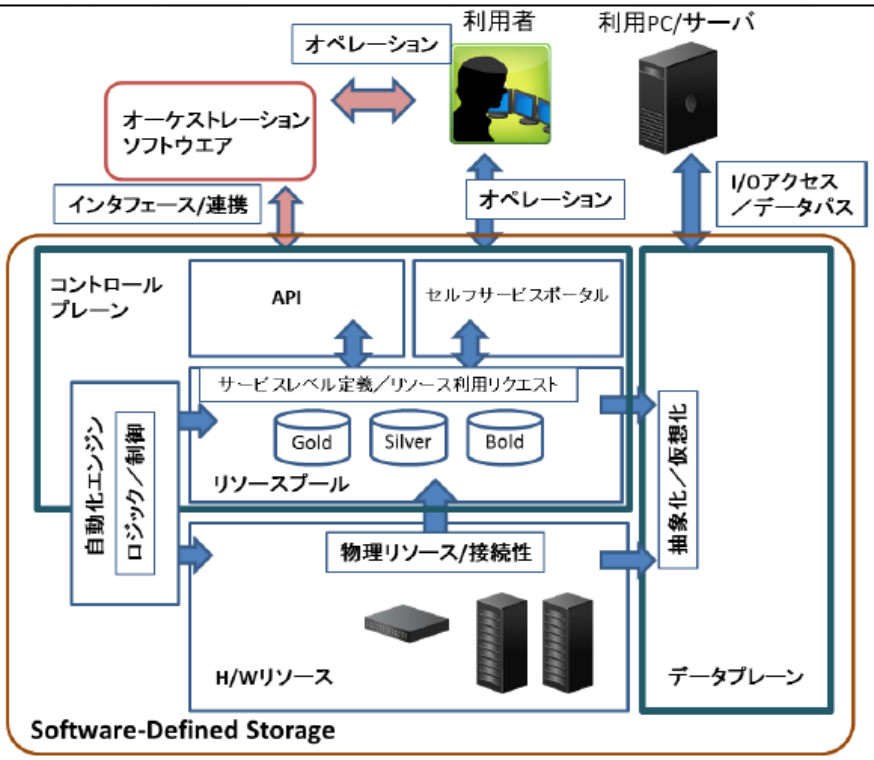


図 1 SNIA の定義する SDS の全体像[７]

このSNIA の SDS 定義では、ソフトウェア実装のストレージだけではなく従来ストレージ専用機器として提供されてきた製品・技術も含め広範囲のストレージ技術が「SDS」に分類される。調査会社である IDC では SNIA の定義を限定する形で「容易に入手可能な（カスタマイズされていない）コンポーネントによって構成されたコモディティハードウェアを前提とし、その上に搭載されたソフトウェアスタックによってストレージ機能のフルセットを提供するプラットフォーム」を SDS と定義している[１]。またアイティメディア株式会社のエグゼクティブエディターである三木泉は SDS を「利用者がやりたい事を最短距離で実現できるようにするための、データの利用方法」として、機能とユースケースで SDS を定義している[８]。このように 2016 年現在において SDS の定義は、識者の間でも十分なコンセンサスが得られてないのが実情である。本稿ではそれぞれの定義の最大公約数的な見解を SDS として定義する事とする。SNIA の定義における全体像から「コントロールプレーン」「データプレーン」「自動化エンジン」「H/W リソース」という要素を採用した上で、IDC の定義である「コモディティハードウェア」を前提とする。三木泉の定義である「データの利用方法」については「コントロールプレーン」の機能と解釈する事で、図 2 左のように定義を簡素化した。図 2 右は従来ストレージ専用機器における実装を比較として記載する。

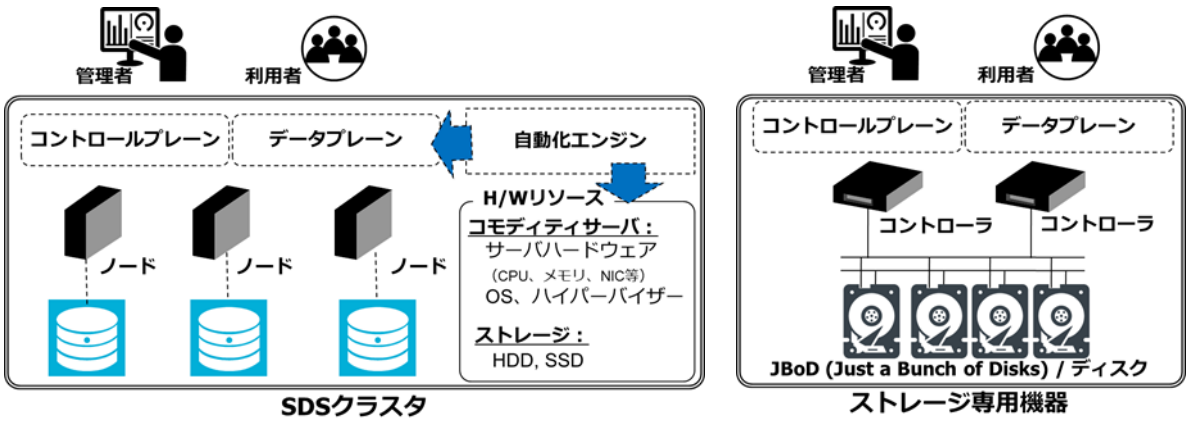


図 2 左：本論文における SDS の全体像　右：ストレージ専用機器の全体像

2016 年 11 月時点で入手可能な SDS 製品・技術例を表 1 に列挙する。なお OSS は Open Source Software, GLP は GNU General Public License, LPGL は GNU Lesser General Public License , AL は Apache License, CDDL は Common Development and Distribution License, BSD は Berkeley Software Distribution License の略語である。

表 1　2016 年 11 月時点で入手可能な SDS 製品・技術例

製品名	提供ベンダー/開発主体	ライセンス	参照文献
Gluster FS	Gluster,RedHat	OSS LGPL2	[9]
Ceph	Inktank,RedHat	OSS GPL3	[10]
Cloudian	Cloudian	Proprietary	[11]
ZFS	Oracle	CDDL	[12]
GPFS (Spectrum Scale)	IBM	Proprietary	[13]
Spectrum Accelerate	IBM	Proprietary	[14]
Amage	クリエーションライン株式会社	Proprietary	[15]
Hadoop Distributed File System	ASF, Cloudera, Pivot, Hortonworks, WANdisco, Intel	OSS AL2.0	[16] [17]
LeoFS	楽天技術研究所	OSS AL2.0	[18]
OneFS distributed file system	EMC,Dell,Isilon Systems	Proprietary	[19] [20]
MapR FS	MapR Company	Proprietary	[21]
Open AFS	IBM	IBM Public License	[22]
Riak Cloud Storage	Basho Technologies	Proprietary	[23]
Sheepdog	NTT,TaopBao	OSS GPL2	[24]
SWIFT	The OpenStack Foundation	OSS AL2.0	[25]
TahoeLAFS	TahoeLAFS Software Foundation	OSS GPL 2+	[26]
Nexenta	Nexenta Systems	Proprietary	[27]
XtreemFS	Contrail E.U. project, the German MoSGrid project and the German , project "First We Take Berlin"	OSS BSD	[28]
VMware Virtual SAN	VMware	Proprietary	[29]
Maxta Storage Platform	Maxta	Proprietary	[30]
ProphetStor fedeleter	ProphetStor	Proprietary	[31]
Nutanix Distributed	Nutanix	Proprietary	[32]

File System			
SANSymphony	Datacore	Proprietary	［３３］
HPE StoreVirtual VSA	Hewlett-Packard	Proprietary	［３４］
FREESTOR	FalconStor	Proprietary	［３５］
StorMagic virtual SAN	StorMagic	Proprietary	［３６］

２．２　Software Defined Storage(SDS)の優位点

前述のように SDS の導入を検討している企業が、SDS に最も期待するのはストレージコストの削減である事が市場調査によって判明している［１］。ビッグデータ活用など企業・官公庁におけるデータ容量は増加の一途をたどっており、市場調査によると 2019 年の出荷ストレージ容量は 2014 年の 5 倍に達すると予測されている［４２］。ストレージ容量単価の抜本的なコストダウンを早々に行わなければ、近い将来においてストレージコストの増大を企業・官公庁の IT 予算で賄いきれなくなる危険性がある。従って企業・官公庁における SDS へ期待とはストレージコスト削減への期待という面が大きいと考える。

SDS のコスト削減効果を確認するために、ストレージ専用機器と SDS のコモディティサーバーの調達コスト比較を行った。IDC による 2015 年の市場調査結果［３７］［３８］において国内で高いシェアを有するストレージ専用機器ベンダーとコモディティサーバーベンダー、各３社から同一容量(物理容量 48TB) の見積もりを取得した。ストレージ専用機器については、デュアルコントローラ搭載可能なローエンド機種である事、コモディティサーバーは 2CPU ソケット型のラックマウントサーバーで冗長化のための 2 台構成を選定条件とした。また SDS ソフトウェアは OSS 技術を利用する想定としている。結果はコモディティサーバーの平均は 292 万円(表 2)、ストレージ専用機器の平均は、597 万円(表 3)で約 2 倍の価格差となった。SDS は有償製品を選択する事も一般的である事を考慮すると価格に変動幅はあるが、SDS がストレージ専用機器を調達コストで下回るケースは多いと考えられる。

表 2　コモディティサーバーにおける価格例

	A 社	B 社	C 社
価格	240 万円(120 万円×2 台)	196 万円(98 万円×2 台)	440 万円(220 万円×2 台)
仕様 (1 台)	CPU:E5-2609×1 Memory:32GB HDD: 6TB SATA×4	CPU:E5-2603×1 Memory:32GB HDD:6TB SATA×4	CPU:E5-2603×1 Memory:32GB HDD:6TB SATA×4

表 3　ストレージ専用機器における価格例

	D 社	E 社	F 社
価格	528 万円(528 万円×1 台)	980 万円(908 万円×1 台)	284 万円(284×１台)
仕様 (1 台)	Memory:12GB Dual Controller HDD: 6TB SATA×8	Memory:64GB Dual Controller HDD: 6TB SATA×8	Memory:8GB Dual Controller HDD: 6TB SATA×8

２．３　Software Defined Storage(SDS)の課題点

前述のように SDS の導入を検討している企業では、データ可用性/保護の不安を SDS 導入における重要課題と考えている事が、市場調査によって判明している［３９］。従来のストレージ専用機器は企業の基幹・勘定系システムで長年利用されてきた実績があり［４０］、ベンダーとユーザー双方において、実証された設計ノウハウとアセットの蓄積がある。一方で SDS の大部分はこの数年で開発された技術であり、データ可用性/保護における実績や

ノウハウは、ベンダーとユーザー双方に少ない事も SDS に対する不安感を増す主要因の一つと筆者らは考えている 。2015 年における IDC の民間企業に対する市場調査ではストレージ機器を選定する上での最重要評価基準を「信頼性」とする回答が約 50%と圧倒的に高く、２位以下の「操作容易性」「性能」「拡張性」などを大きく上回っている［４１］。

前述の通り、ストレージコストの容量単価を削減する事は企業・官公庁において急務であるが、SDS の信頼性に関する不安を払拭できなければ、今後基幹・勘定系システムで SDS が採用される事、また従来のストレージ専用機器から SDS への置き換えによるストレージコスト削減効果を企業・官公庁が享受するのは極めて難しいと筆者らは考える。

３．SDS のデータ可用性/保護機能 の評価

本章では、まず SDS に標準的に実装されているデータ可用性/保護機能について整理する。現在の SDS に実装されているデータ可用性/保護機能は大きく２つに分類される。一つは「ディスク及びノード冗長性」、もう一つは「Snapshot(Point In Time Copy)機能」である。

３．１　ディスク及びノード冗長性の構造

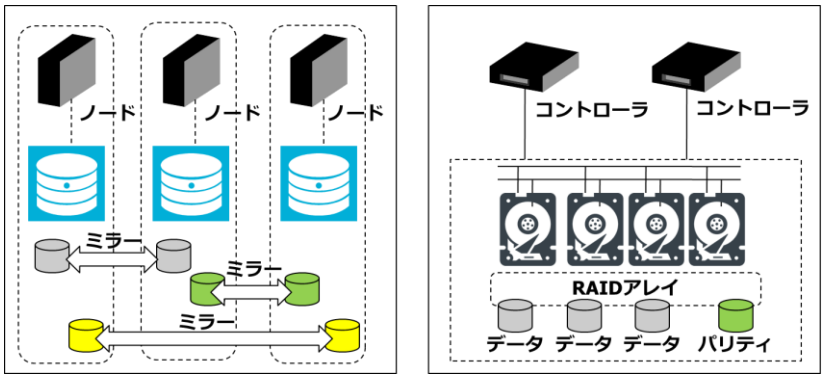


図 3 左：SDS の冗長イメージ　右：ストレージ専用機器の冗長イメージ

SDS を構成するディスクやノードが障害で失われた時に、データロストを回避しサービスを継続提供する機能は、「ノード冗長性」として大部分の SDS に実装されている。ノードに収納されたデータは、他ノードにもコピー（ミラー）されており、１ノードが障害で失われても、他のノードのデータによって業務の継続が可能である。データの冗長度合いは、２ノード（２ノード間でのデータ複製）が主流だが、３ノード（３ノード間でのデータ複製）やパリティを含めたストライピング（データとパリティを複数ノードに分散配置）を実装する場合もある。一方でストレージ専用機器では、コントローラの冗長と、ディスクの障害については RAID(Redundant Arrays of Independent Disks) 及び内部経路冗長として実装される事が一般的である。

３．２　Snapshot(Point In Time Copy) の構造

Snapshot(Point In Time Copy)機能とは、特定時点でのファイル、ディレクトリなどのデータの状態を抜き出して保管する事で、データ保護を行う機能であり、大部分の SDS では Redirect On Write (ROW) 方式が実装されている。ROW は Snapshot をデータに対するポインタの変更のみで行い追加変更ファイルは別ボリュームに追記してゆく事で、データ保持を提供する技術である。同技術はデータのコピーが不要のため、性能とコストの両面で

は優れている(図 4)。ストレージ専用機器の Snapshot 機能は、ROW の他に Copy On Write(COW)(図 4), Clone/Split Mirror(図 5), Copy On Write with Background Copy(COW with Background Copy)(図 5)が一般的である[４３]。COW は Snapshot 時点ではポインタのみをコピーし、その後のデータ変更に対しては変更前データを別ボリュームにコピーする事で Snapshot 時点のデータ状態を保持している。ROW と COW に共通する欠点は Snapshot データが、元データの一部もしくは全てを利用する構造のため、元データが障害で失われた場合には Snapshot から元データを復旧する事は不可能である。従って ROW と COW は、オペレーションミスなどの論理障害に有効なデータ保護対策であり、故障などの物理障害に有効な保護対策ではない。Clone/Split Mirror と COW with Background Copy は、方式に違いはあるが、元データを複製する点は同一であり、元データが障害などで利用不能となった場合にも元データを復旧できる。従ってこの２つの方式は、オペレーションミスなどの論理的な障害と故障などの物理障害の双方に有効な保護対策である。

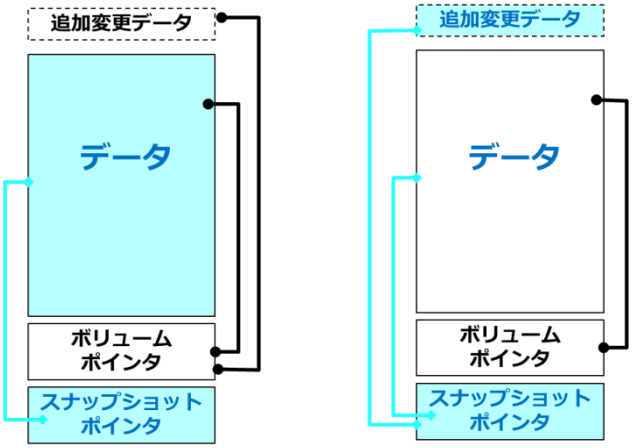


図 4 左:Redirect-On-Write 方式　右:Copy-On-Write 方式

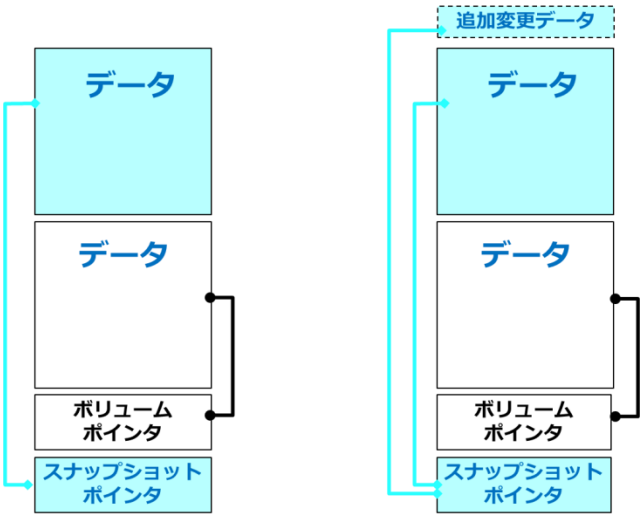


図 5 左:Clone/スプリットミラー方式 右: COW with background copy 方式

３．３　SDS とストレージ専用機器のデータ可用性/保護の分析と評価

SDS とストレージ専用機器のデータ可用性/保護の実装の分析と評価を行う。比較の方法として特定保護対象への影響度を分析する構成要素障害影響分析手法（CFIA：Component

Failure Impact Analysis）を利用した[４４]。分析結果は表 4 の通りであり、SDS のデータ可用性/保護レベルは一部のストレージ(ROW,COW)と同等であり、網掛け部分の特定の障害発生パターンにおいては、システムにおいて致命的な問題となる「修復不能な完全データロスト」の発生が不可避である。

表 4　SDS データ可用性/保護機能の構成要素障害影響分析による評価

コンポーネント / 項目			コントローラ / SDSノード		コントローラ / SDSノード構成部品				ストレージ			
			単体障害	複数障害	CPU	Memory	ネットワーク	電源	ディスク(単体障害)	ディスク(複数障害)	電源	データ破損
SDS (ROW)	検知	検知アクション	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	回復	自動回復の方式	3	1	3	3	3	3	5	1	5	1
		手動回復の方式	5	3	5	5	5	5	5	1	5	1
		回復時間の目安	5	2	5	5	5	5	5	1	5	1
	影響	影響範囲	4	3	5	5	5	5	5	1	5	1
ストレージ専用機器 (ROW)	検知	検知アクション	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	回復	自動回復の方式	3	1	3	3	3	3	5	1	5	1
		手動回復の方式	5	3	5	5	5	5	5	1	5	1
		回復時間の目安	5	2	5	5	5	5	5	1	5	1
	影響	影響範囲	4	3	5	5	5	5	5	1	5	1
ストレージ専用機器 (COW)	検知	検知アクション	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	回復	自動回復の方式	3	1	3	3	3	3	5	1	5	1
		手動回復の方式	5	3	5	5	5	5	5	1	5	1
		回復時間の目安	5	2	5	5	5	5	5	1	5	1
	影響	影響範囲	4	3	5	5	5	5	5	1	5	1
ストレージ専用機器 (Clone /SplitMirror)	検知	検知アクション	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	回復	自動回復の方式	3	1	3	3	3	3	5	1	5	1
		手動回復の方式	5	3	5	5	5	5	5	2	5	2
		回復時間の目安	5	2	5	5	5	5	5	2	5	2
	影響	影響範囲	4	3	5	5	5	5	5	2	5	2
ストレージ専用機器 (COW with Background Copy)	検知	検知アクション	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	回復	自動回復の方式	3	1	3	3	3	3	5	1	5	1
		手動回復の方式	5	3	5	5	5	5	5	2	5	2
		回復時間の目安	5	2	5	5	5	5	5	2	5	2
	影響	影響範囲	4	3	5	5	5	5	5	2	5	2

検知アクション	
1	なし
2	内部ログ
3	人的検知(ユーザー)
4	人的検知(オペレーター)
5	ストレージ管理機能

自動回復の方式	
1	自動回復なし
2	
3	縮退稼働
4	
5	冗長部品切り替え

回復時間の目安	
1	～ 72時間
2	～ 24時間
3	～ 12時間
4	～ 30分
5	瞬時

手動回復の方式	
1	手動回復不可
2	データリストア(長時間)
3	即時にシステムを停止しH/Wを交換
4	システム稼働中にH/Wを交換
5	手動回復必要なし

影響範囲	
1	完全データロスト
2	前回Snapshot時点までデータ回復
3	HW交換完了までサービス停止
4	縮退、サービス停止なし
5	影響なし(TCP再送程度)

４．SDS のデータ可用性/保護充足方法と概念実証

前章の検討の結果として明確化した SDS のデータ可用性/保護における課題を充足するために３つの方法を提案する。一つ目は、SDS 自体の複製機能を使う方法(Asynchronous/Synchronous Replication)。２つ目はネットワーク経由ファイルバックア

ップを利用する方法。３つ目は分散ノード構造を利用してイメージバックアップを取得する方法である。なお本章の概念実証の環境図には、具体的な製品・技術名を一部に記載しているが、これは宣伝を意図した記載ではなく、読者が SDS 導入に際して同様の検証を行う際に、比較対象として利用する有用性に配慮した上での記載意図である。

４．１　Asynchronous/Synchronous Replication

データが保存された SDS クラスターとは別に構築した SDS クラスターに対して、データの複製を行う機能は Replication と呼ばれ、一部の SDS で実装されている[４５] [４６] [４７] [４８]。元データの SDS クラスターが利用不能となる障害や災害発生時は、この Replication 機能によってデータを同一拠点あるいは別拠点に構築した別の SDS クラスターに複製を取得しておく事でデータの保護を行う事が可能である[４９]。元データと常に完全に同一の複製を取得する方式を Synchronous(同期) Replication と呼び、元データへの変更の反映を非同期に反映する方式を Asynchronous (非同期) Replication と呼ぶ。Replication は SDS の機能を利用した有力なデータ可用性/保護充足方法として筆者らは推奨する。注意点として図 6 において、Site A と Site B が別の場所に配置される場合には、SDS に対する追加/変更データが全てサイト間の WAN 上を流れるため、通信帯域不足が生じる可能性がある。特に Synchronous Replication を利用した場合には Site B の SDS クラスターへのデータ追加/変更データが反映されるまで Site A も反映が完了しないため、通信帯域不足によりパフォーマンス劣化が発生する危険性も存在する[４９]。またこの方法で Replication 可能なデータは、Site A の最新データに限定され、特定の日次のデータを保護する目的には利用できない。世代管理を実施する場合は、対向のクラスターにおいて Snapshot を使用するなど、複数方式を併用する必要がある。Replication は SDS のコントロールプレーンにおいて実装されている場合がある。SDS のコントロールプレーンで実装された Replication 機能を利用する場合は、SDS の仮想化機能に対する配慮が必要になる。これは、コントロールプレーンでの Replication ではボリュームごとに Replication を行うが、SDS は複数のボリュームを束ねてデータプレーン上での仮想的ストレージを提供する場合があるためである。特に Asynchronous Replication では、この整合性が確保されるよう、Replication を適切に制御する必要があり、特にデータボリュームと SDS の規模が大きくなるほど、この整合性確保のための調整が困難になる傾向がある。

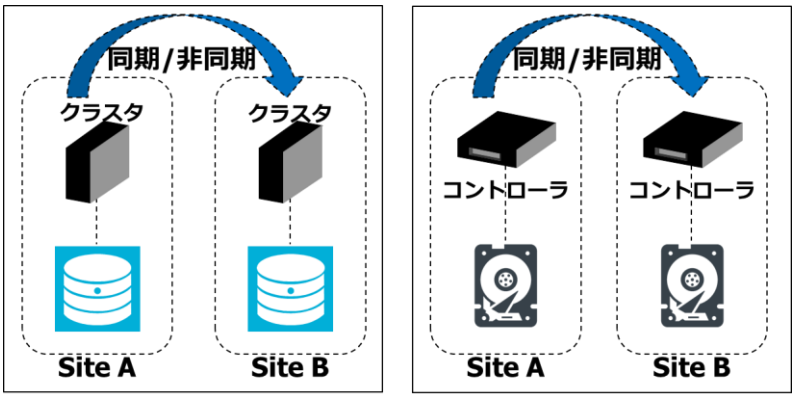


図 6 左：SDS の Replication 右：ストレージ専用機器の Replication

４．１．１　Asynchronous/Synchronous Replication の実機検証結果と考察

筆者らは、ネットワーク経由の Asynchronous Replication の実機検証を行った。検証環境の詳細は図 7 に示す。本検証では WAN 越しに遠隔地の SDS クラスターに対し Replication を行う想定のもと、WAN エミュレータによって遅延のある細い回線を再現し、クラスター間接続のネットワークとして使用している[５１]。検証結果から転送スレッド数が転送のパフォーマンスに大きな影響を与える事が分かった。この検証環境では表 5 の通り、標準設定の 4 スレッドから 8 スレッドへの変更では転送性能が 6 倍弱と顕著な改善効果が確認できた。8→32 スレッドへの変更で 3 倍弱と改善の効果が緩やかになった事から 32 スレッドでの転送を最適値として採用した。この転送スレッドの増加が性能改善に効果的な理由は、WAN 環境のネットワークの遅延に依る所が大きい。同一 LAN におけるネットワークの遅延は一般的に 1ms 程度であるのに対して WAN 環境では 10ms 以上になるのが一般的である。遅延によって個々のネットワーク転送における待ち時間増加は不可避のため、できるだけ多くの転送セッションを並行に実行する事で、転送効率を向上させるのが効果的である。Replication 機能が実装された SDS の大部分では転送セッション数の調整が可能であるため、実機検証に当たっては導入予定 WAN 環境の遅延をできるだけ正確に再現した上で、最適な性能になる転送セッション数を見つける事が重要になる。従ってこの方式を採用する場合には事前の実機検証が必須と考えるべきである。

またセッション数増加による性能改善効果については、SDS に実装された転送単位が大きく影響する事が分かっている。本検証での SDS は 64KB 単位のブロックとして転送が可能のためセッション増加による性能向上効果が顕著だったが、一部の SDS ではファイル単位の転送のみが実装されている。このような SDS の場合は動画のような大ファイル・オブジェクトの Replication では並列転送の効果が低い可能性がある。従って本検証を行う場合は、実利用環境のファイルサイズに近い環境を実機検証で用意する事を強く推奨する。

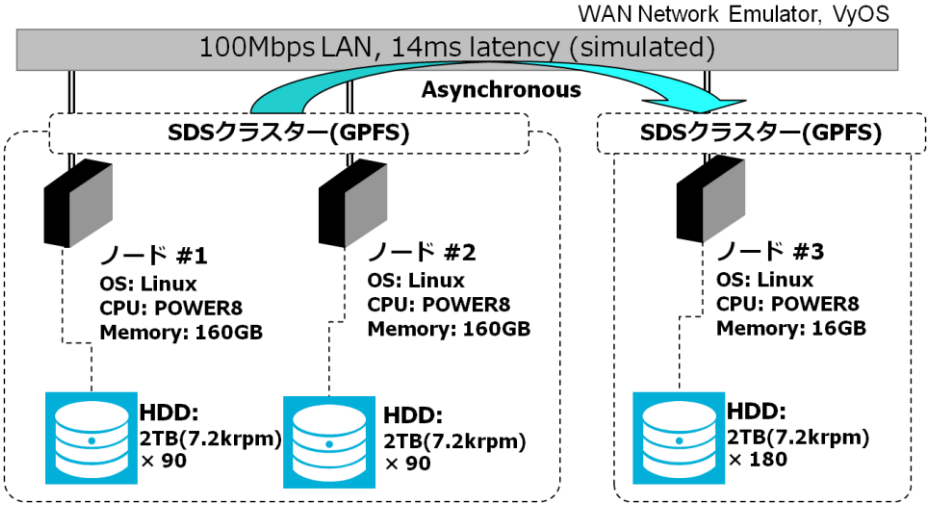


図 7 Asynchronous Replication 検証環境

表 5　Asynchronous Replication 検証結果

転送スレッド数	遠隔クラスタへの転送速度
4	0.35 MB/s (2.8Mbps)
8	2.08 MB/s (16.6Mbps)

32	6.13 MB/s (49.0Mbps)

筆者らの経験上、実機検証前に机上でサイジングをする場合の考慮点は以下の 3 点である。一つ目は Synchronous の場合データ更新量と同等程度の回線帯域を用意する必要があり、Site A における定常的なデータ更新量の想定が必要である。Asynchronous の場合は回線帯域要件は緩和されるが、過度に回線帯域が不足した場合、更新情報を記録するバッファが溢れて Replication の整合性が崩れてしまう等、SDS の実装に応じた運用上の制約が生じる事を考慮する必要がある。2 つ目は必要な実効転送帯域に対し回線の帯域及び遅延の特性を踏まえ、必要十分なスループットを実現する転送コネクション数を張るように、パラメータを設定する必要がある。転送コネクション数の決定には、格納ファイルのサイズと SDS の転送方式の考慮が必要である。ただしセッション数確定にはネットワーク遅延、SDS の転送単位、SDS に収納されたファイル・オブジェクトサイズ、また圧縮効率など多数の変動要素があるため前述のように実機検証を強く推奨する。実機検証前の暫定的な机上サイジングとしては、必要な実効転送帯域の 2 倍程度の WAN 回線を想定する事を筆者らは目安にしている。3 つ目に一部の SDS は、Asynchronous Replication 実施時に変更差分をスキャンする実装の場合がある。 SDS を採用する場合は、スキャンに要する時間やスキャン処理負荷を含めたサイジング等の設計での配慮が必要である。

４．２　ネットワーク経由ファイルバックアップ

バックアップサーバーから SDS データプレーン経由でファイルのデータ複製を取得する方法である(図 8)。バックアップ媒体はテープに限らず、ハードディスク、光学ディスク、半導体メディアなど様々なメディアから選択できるが、2016 年現在においてはテープメディアが適性上優位(表 6)として選択される事が多い[５３]。大部分の SDS は主インターフェース、もしくは補助インターフェースとして CIFS、NFS などの汎用ファイル共有プロトコルを提供しているため、ネットワーク経由でのファイルバックアップを実装可能である。

表 6　バックアップメディアの適性比較

	可搬性	最大 メディア容量	容量単価 (市場参考価格)	長期保管における故障率
テープメディア(LTO7)	◎	◎6TB	◎(¥3,000/TB)	◎低い
ハードディスク(SATA)	△難あり	◎8TB	◎(¥4,000/TB)	△
光学ディスク(Blu-RAY)	◎	△100GB	◎(¥2,500/TB)	◎低い
半導体メディア(SSD)	◎	◎15TB	△(¥60,000/TB)	○

表 7　ファイルバックアップ時間概算（縦：容量　横：テープドライブ数）

TB	1 ドライブ	2 ドライブ	4 ドライブ	16 ドライブ	160 ドライブ
10	139 時間	69 時間	35 時間	9 時間	1 時間
100	1389 時間	694 時間	347 時間	87 時間	9 時間
1000	13889 時間	96451 時間	334898 時間	290710 時間	25235 時間

表 7 は、ネットワーク経由ファイルバックアップにおいてのデータ複製時間の概算だが、バックアップ対象のファイルサイズを 750KB 程度と想定した場合には、経験上、複製速度は 20MB/s 程度が上限になる。10TB のデータを 9 時間で複製するためには 16 テープドライブでの並列複製が必要、100TB のデータを 9 時間で取得するには 160 テープドライブ並列複製が必要になる。数十ドライブ以上のテープドライブ並列はシステムの実装上、現実的ではなく、また仮に多数のテープドライブを準備できたとしても、データを格納したスト

レージからの読み出し能力の上限に先に達する可能性が高い。従って大容量の SDS で運用中にフルバックアップを取得するのは現実には極めて難しい。 大容量の SDS では、運用中に増分からフルバックアップを自動生成できる図 8 のネットワーク経由の永久増分・合成フルバックアップ機能[４０] が適している。2016 年時点で多くのバックアップソフトウェアやソリューションにも同機能が実装されている事から、筆者らは SDS の有力なデータ可用性・保護方法として推奨する[５４] [５５] [５６] [５７] [５８] [５９] [６０] 。

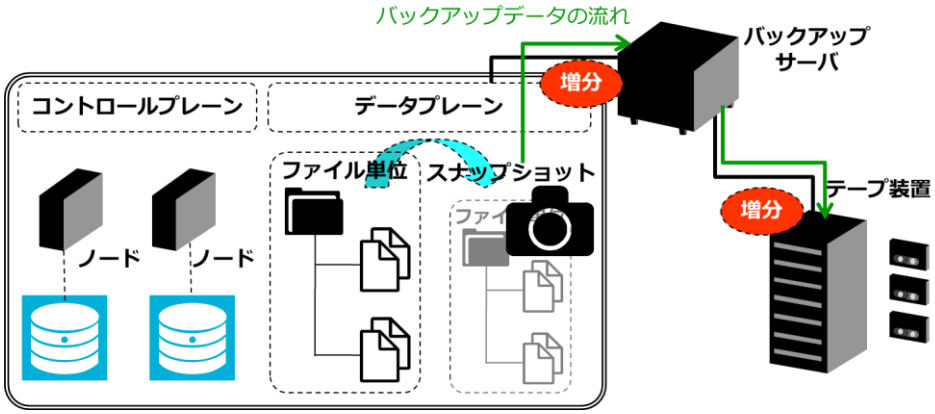


図 8 ネットワーク経由ファイルバックアップ構造

４．２．１　ネットワーク経由ファイルバックアップの実機検証結果と考察

SDS におけるネットワーク経由のファイル増分バックアップの実機検証を行った。検証では増分量を全データの 10%と想定した。バックアップ環境の詳細は図 9 に示す。

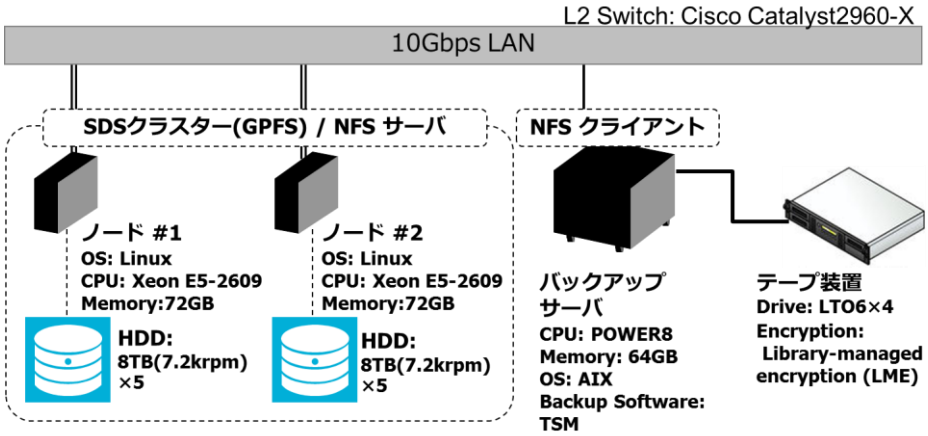


図 9 ネットワーク経由ファイルバックアップ検証環境

本検証では 2 テープドライブまでは顕著な複製速度向上が確認でき、約 40MB/s でのバックアップが可能だった。2 ドライブ以上に複製した場合は、SDS からのファイル読み込み性能がボトルネックになり性能向上結果は得られなかった。

表 8　ネットワーク経由ファイルバックアップ検証結果

LTO6 ドライブ数	テープへの転送速度	変更ファイル検知スキャン速度
1 ドライブ	13,749.56 (KB /s)	2,223.37 (ファイル/秒)
2 ドライブ	41,230.60 (KB /s)	5,375.18 (ファイル/秒)
4 ドライブ	41,703.88 (KB /s)	6,394.00 (ファイル/秒)

この結果から、本方式でバックアップを取得する場合には、SDS からのファイル読み込み性能の確保が必須である事が分かる。SDS データプレーンのネットワーク共有プロトコルでのファイル読み込みが 40MB/s 程度である場合は、2 テープドライブ構成でのバックアップは価格対性能のバランスが良いバックアップ速度が期待できる。それ以上のバックアップ速度が必要な場合は、まず SDS データプレーンからのファイル読み取りを 40MB/s 以上に性能向上した上で、20MB/s 当たり 1 ドライブの目安でテープドライブを追加する事で、机上での概算サイジングが可能である。机上サイジングの注意点は３点で、一つ目は SDS データプレーンを通して大量のデータ読み込みを行うため、バックアップサーバーと SDS データプレーン間の通信帯域がボトルネックにならないように十分な通信帯域を用意する事。２つ目は、一部のバックアップソリューションは転送開始前に前回バックアップからの変更検知スキャンが必要のため、その時間を考慮する事である。本検証環境ではバックアップ対象のファイル数は数万ファイルで、変更ファイルのスキャンは秒間 5000 ファイルのためスキャンは 1 分以内に完了し、複製時間に大きな影響を与える事はなかったが、1000 万ファイル以上の多ファイルを格納する SDS では、スキャン時間への考慮が必要である。最後はファイルサイズの問題で今回検証した環境では１ファイル 750KB という条件で検証を行ったが、平均ファイルサイズが本検証と大きく変わる場合は、考慮が必要である。筆者らの経験上、平均ファイルサイズが 100KB 以上であれば、本検証結果と大きなズレはないと推測するが、平均ファイルサイズが 100KB 以下の場合はバックアップ性能は、本検証での結果以下の性能になる可能性が高い。

４．３　イメージバックアップ

バックアップサーバーから SDS のデータプレーンを通して、スナップショット先のボリュームを raw デバイスとしてマッピングし、データ複製を取得する方法である(図 10)。一部の SDS では主インターフェース、もしくは補助インターフェースとして iSCSI, Fibre Channel などのブロックレベルのストレージプロトコルを提供しているため、ブロックデバイスのイメージバックアップを実装可能である。イメージバックアップは複製速度が速い一方で、増変更分のみのバックアップは困難で毎回フルバックアップ取得が前提になる点が特徴である。イメージバックアップにおける大容量データの複製ではテープドライブを増やす事で、取得速度を高める必要がある。表 9 は、イメージバックアップにおいてのデータ複製時間の概算だが、筆者らの経験上、複製速度は１テープ当たり 200MB/s 程度が上限になる。10TB のデータを 9 時間で複製するためには 2 テープドライブ並列複製が必要、100TB のデータを 9 時間で取得するには 16 テープドライブ並列複製が必要になる。

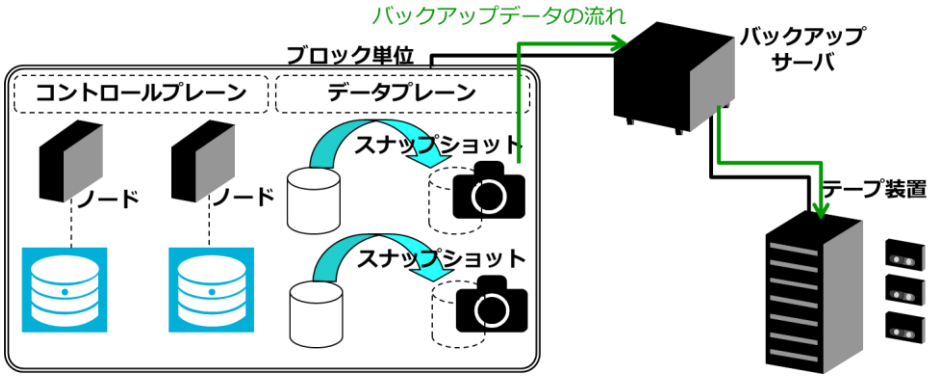


図 10 イメージバックアップ

前述のように、数十ドライブ以上のテープドライブ並列はシステム実装上現実的とは言えないため、100TB 以上の環境では運用中にイメージバックアップで複製を取得するのは極めて難しい。データ格納が 100TB 以下の場合において有力な SDS のデータ保護方法として推奨する。なお複数のボリュームを束ねて単一の仮想的なストレージとして提供する SDS の場合は、ブロックレベルのデータ複製で SDS の構成情報と不整合を発生させないように、I/O の一時保留や変更ブロックの追跡等が必要である。なお一部の SDS 製品・技術では構成情報を含めて格納データ出力するイメージバックアップに類似した機能を実装している。この場合は、整合性は SDS 側で確保されるため上記の考慮の必要はない。

表 9　イメージバックアップ時間概算（縦：容量　横：テープドライブ数）

TB	1 ドライブ	2 ドライブ	4 ドライブ	16 ドライブ	160 ドライブ
10.0	13.9 時間	6.95 時間	3.5 時間	0.9 時間	0.1 時間
100.0	138.9 時間	69.5 時間	34.8 時間	8.7 時間	0.9 時間
1,000.0	1388.9 時間	694.5 時間	347.3 時間	86.8 時間	8.7 時間

４．３．１　イメージバックアップの実機検証結果と考察

筆者らは図 11 の環境でイメージバックアップの実機検証を行った。本検証環境においては、準備した 5 テープドライブまでは性能向上が確認でき、約 1,200MB/s でのバックアップが可能であった(表 10)。ただし 5 ドライブの時点で性能向上率は若干鈍化しており、それ以上のドライブ追加は、顕著な性能向上結果は得られないと考えられる。

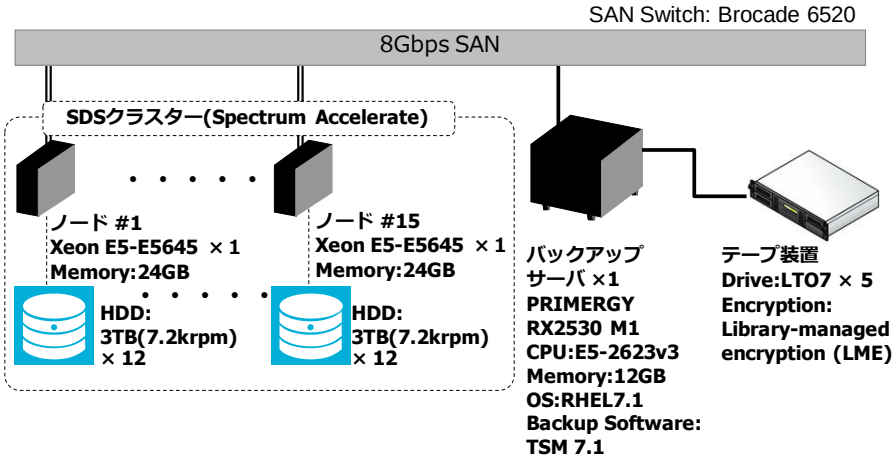


図 11 イメージバックアップ検証環境

イメージバックアップでは SDS データプレーンからの高速ファイル読み込みが前提である。SDS データプレーンからのファイル読み取り性能が 300MB/s 程度の場合は LTO7 １テープドライブが適切、それ以上の場合の性能が期待できる場合には LTO7 １ドライブ当たり 200～300MB/s 程度の目安が適切である。実機検証環境では読み取り性能 1200MB/s に対して LTO7 5 ドライブでの複製による性能向上が実証できた。それ以上の複製速度が必要な場合は、SDS データプレーンからの読み取りを 1200MB/s 以上に向上した上で、バックアップサーバーとテープドライブを増強・追加する事が必要である。 実機検証前の机上サイジングにおける注意点は３点で、一つ目は SDS データプレーンを通して大量のデータ読み込みを行うため、バックアップサーバーと SDS データプレーン間の通信がボトルネックにならないように,十分な通信帯域を用意する事。２つ目はバックアップサーバーのリソースがボトルネックにならないように、I/O 帯域だけではなく CPU やメモリにも余裕を持ったサイジングを行う事である。３つ目はこの方法ではバックアップサーバーは、SDS からの読み込みとテープ装置への書き込みの両方を同時に行うため、転送速度の 2 倍の負荷がかかる点である。転送速度の向上には物理サーバーの物理追加（スケールアウト）が効果的である。

表 10　イメージバックアップの実機検証結果

項番	ドライブ数	ドライブ番号	各処理速度 (MB/秒)	全体の処理速度 (MB/秒)
1	1	1	281,534	281.53
2	5	1	201.495	1,199.73
		2	258.585	
		3	246.449	
		4	257.848	
		5	235.355	

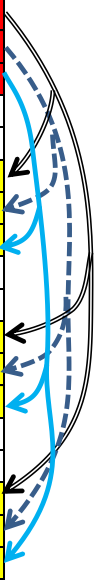
５．SDS のバックアップのデータ可用性/保護充足方法の評価

５．１　SDS のデータ可用性/保護充足手法の分析と評価

３章で用いた構成要素障害影響分析手法（CFIA）により、前章の SDS データ可用性/保護の充足手法の評価を行う。各評価基準は表 4 と同一である。

表 11　SDS データ可用性/保護充足手法の構成要素障害影響分析による評価

項目 ＼ コンポーネント			コントローラ / SDSノード		コントローラ / SDSノード構成部品				ストレージ			
			単体障害	複数障害	CPU	Memory	ネットワーク	電源	ディスク（単体障害）	ディスク（複数障害）	電源	データ破損
SDS (ROW)	検知	検知アクション	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	回復	自動回復の方式	3	1	3	3	3	3	5	1	5	1
		手動回復の方式	5	3	5	5	5	5	5	1	5	1
		回復時間の目安	5	2	5	5	5	5	5	1	5	1
	影響	影響範囲	4	3	5	5	5	5	5	1	5	1
SDS + Replication	検知	検知アクション	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	回復	自動回復の方式	3	1	3	3	3	3	5	1	5	1
		手動回復の方式	5	3	5	5	5	5	5	2	5	2
		回復時間の目安	5	2	5	5	5	5	5	2	5	2
	影響	影響範囲	4	3	5	5	5	5	5	2	5	2
SDS + ネットワークファイルバックアップ	検知	検知アクション	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	回復	自動回復の方式	3	1	3	3	3	3	5	1	5	1
		手動回復の方式	5	3	5	5	5	5	5	2	5	2
		回復時間の目安	5	2	5	5	5	5	5	2	5	2
	影響	影響範囲	4	3	5	5	5	5	5	2	5	2
SDS + イメージバックアップ	検知	検知アクション	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	回復	自動回復の方式	3	1	3	3	3	3	5	1	5	1
		手動回復の方式	5	3	5	5	5	5	5	2	5	2
		回復時間の目安	5	2	5	5	5	5	5	2	5	2
	影響	影響範囲	4	3	5	5	5	5	5	2	5	2



前述の通り SDS の標準的なデータ可用性/保護機能には、特定の障害パターンで完全データロストが発生するという欠点があった。前章ではその欠点を補完するための充足方法を提言したが、表 11 網掛け部分の SDS の課題であったディスク複数同時故障とデータ破損時の完全データロストが、各充足方法では解決している事が分かる。この結果で各方法による SDS データ可用性/保護能力充足の有効性を示す事ができた。

5．2　SDS のデータ可用性/保護充足手法の選択決定基準

SDS を含むストレージのデータ可用性/保護の実装検討は、システム設計に大きく影響を与えるため、導入プロジェクトの早期に検討・決定すべき事項である。しかし前述のように SDS のデータ可用性/保護については、検討のノウハウやアセットが不足しているため、現状では上流工程でシステム設計を担当する IT アーキテクトが設計判断を行うのが非常に難しい。システム設計段階で間違った実装を選択した場合、その後の構築・導入の局面において、その修正に大きな負担がかかる。あるいは修正が行えないまま欠陥のあるシステムが完成するリスクも高くなる。筆者らは IT アーキテクトがシステム設計で適切なアーキテクチャ選択を行う事ができるように、表 12 の SDS データ可用性/保護の選定基準アセットを試作した。SDS について実装レベルまでの知識を得るのが困難な IT アーキテクトも、本アセットを利用する事でシステム設計局面において、SDS のデータ可用性/保護充足の必要性と手法の方向性を考慮する事ができる。

表 12　SDS データ可用性/保護方法に関するアーキテクチャ決定アセット

対象分野	Software Defined Storage	(トピック)Software Defined Storage の非機能要件設計
決定事項	SDS におけるデータ可用性/保護方法の決定	
要件記述	SDS には標準でデータ可用性/保護機能が実装されているが、障害の発生パターンによっては完全データロストが発生するため、適切な充足手段を追加する必要がある。	

決定の前提	SDS を基幹業務もしくは基幹業務と同レベルの信頼性が必要な業務で実装するケース 特に完全データロストが絶対に許容できない場合
比較案	A. Asynchronous/Synchronous Replication B. ネットワークファイルバックアップ(永久増分・合成フルバックアップ) C. イメージバックアップ (raw デバイスバックアップ)
代替案	SDS に替えストレージ専用機器の採用、もしくは障害時完全データロスト可能性の許容
決定基準	1. 実装コスト比較　A>B>C　(A が優位, C が劣位) 2. 実装容易性　B>C>A　(B が優位, A が劣位) 3. 保護データの世代管理　B>>C>A　(B が著しく優位, A が劣位) 4. 業務性能影響　B=C>>A　(B,C が優位, A が劣位)
実装前提	A: SDS 自体が Asynchronous/Synchronous Replication 機能を実装している事 B: SDS のデータプレーンがファイル共有プロトコルを実装している事 C: SDS のデータプレーンがブロックレベルのストレージプロトコルを実装している事

６．まとめ

SDS は、現在非常に注目を集めており、今後の成長が期待される技術分野である<1 章>。特に注目を集めているのはコモディティサーバーを利用した実装であり、ストレージコスト削減効果が期待できる。一方で、SDS のデータ可用性/保護技術については不足と考える人が多い<2 章>。代表的な SDS のデータ可用性/保護技術は「ディスク及びノード冗長性」と「Snapshot(Point In Time Copy)機能」だが、どちらの方法にも障害時の完全データロストの可能性が存在する<3 章>。「Asynchronous/Synchronous Replication」「ネットワークファイルバックアップ」「イメージバックアップ」は、SDS の標準的なデータ可用性/保護技術の欠点を充足する有効な方法であり、その実現性・有効性は実機による概念実証で確認できた<4 章>。これらの充足方法を適切に選択する事により SDS のデータ可用性/保護機能の不足を充足する事が可能である<5 章>。

クラウドコンピューティングなど IT 基盤が大きなイノベーション時期に差し掛かっている中、ストレージにも「Software Defined Storage」という大きな技術転機が訪れている。しかし過去において、技術イノベーションが市場に受け入れられない事や、受け入れられるまで長い時間が必要だったケースは数多く存在する。例えばサーバー仮想化技術は 1960 年代には既に有効性が認められ、製品・技術として実用化されていたにも係わらず、クラウド基盤におけるスタンダードな技術として普及するまでに 40 年以上の年月が必要だった。同じように SDS という技術イノベーションの有効性が認められ、製品・技術として確立したとしても、それが市場に受け入れられ、早期の普及に繋がるかは別問題である。SDS においてはデータ可用性・保護の課題と不安の克服が普及の分水嶺になると筆者らは考えている。本論文が取り上げた SDS のデータ可用性/保護充足に関する設計ノウハウやアセットは、筆者らが実際のプロジェクトで SDS を設計・構築する際に実施した検討と検証に基づいており、また各プロジェクトでサービスインに成功した実績のある知見と経験である。SDS 市場の活性化・普及のためには、このような現場ノウハウを一部の関係者だけで内部蓄積するのではなく、オープンな知見として多くの技術者の方に広く活用いただく事が必要と考え、本論文を執筆した。読者の皆様が今後 SDS の導入を検討する際に、本論文が少しでもその手助けになれば幸いである。

参考文献

［１］IDC Japan, 国内Software-Defined Storageの需要動向を発表,2016年8月29日

［２］ReportsnReports, Global Software Defined Storage Market 2016-2020,2016

［３］三木 泉, TechTargetジャパン IT INSIDER No.49 Software Defined Storageに対する10の誤解,アイティメディア株式会社,2015

［４］Konstantin Shvachko, Hairong Kuang, Sanjay Radia, and Robert Chansler, The hadoop distributed file system. In Mass Storage Systems and Technologies (MSST), 2010 IEEE 26th Symposium on, pages1-10. IEEE, 2010.

［５］Jeff Barr, Attila Narin, and Jinesh Varia, Building fault-tolerant applications on aws. Amazon Web Services, 2011.

［６］Mayur R Palankar, Adriana Iamnitchi, Matei Ripeanu, and Simson Garnkel, Amazon s3 for science grids: a viable solution? In Pro-ceedings of the 2008 international workshop on Data-aware distributed computing, ACM, 2008.

［７］ストレージネットワーキング・インダストリ・アソシエーション日本支部, ソフトウェア・ディファインド・ストレージ（SDS）の基礎と技術動向,2015

［８］三木 泉, Scality SDS Day 2015 Tokyo「ユーザーにメリットのないSDSなんていらない」,アイティメディア株式会社,2015

［９］Red Hat Inc., GlusterFS Documentation, http://gluster.readthedocs.io/en/latest/,2016/11/7

［１０］Inktank Storage, Inc. Ceph Architecture http://docs.ceph.com/docs/jewel/architecture/,2016/11/7

［１１］Cloudian, HyperStore Operating Environment, http://www.cloudian.com/operating-environment/,2016/11/7

［１２］OpenZFS project,http://www.open-zfs.org/wiki/Main_Page,2016/11/7

［１３］IBM Corp, http://www-03.ibm.com/systems/storage/spectrum/scale/,2016/11/7

［１４］IBM Corp, http://www-03.ibm.com/systems/storage/spectrum/accelerate/,2016/11/7

［１５］Creationline, Inc., The most affordable price in the market, The first offer of Japan-made Scale-Out NAS, which has allowed for high-speed computing of big amounts of data like video pictures. Available for one-fourth offering price of existing products. http://www.creationline.com/en/news/3132,2013,2016/11/7

［１６］The Apache Software Foundation, http://hadoop.apache.org/,2016/11/7

［１７］Tom White, Hadoop: The Definitive Guide: The Definitive Guide, O'Reilly Media, 2009.

［１８］Leo Project, http://leo-project.net/leofs/, 2016/11/7

［１９］EMC, EMC Isilon OneFS: A Technical Overview, EMC, 2013.

［２０］EMC, Hadoop on emc isilon scale-out nas, http://www.emc.com/collateral/software/white-papers/h10528-wp-hadoop-on-isilon.pdf, 2012, 2016/11/7

［２１］MapR Company, https://www.mapr.com/products/mapr-fs, 2016/11/7

［２２］OpenAFS Foundation, http://www.openafs.org/, 2016/11/7
［２３］Basho Technologies, http://docs.basho.com/riak/cs/2.1.1/, 2016/11/7
［２４］NTT, https://sheepdog.github.io/sheepdog/, 2016/11/7
［２５］Swift, https://wiki.openstack.org/wiki/Swift, 2016/11/7
［２６］TahoeLAFS Software Foundation, https://www.tahoe-lafs.org/trac/tahoe-lafs, 2016/11/7
［２７］Nexenta, https://nexenta.com/products, 2016/11/7
［２８］Contrail E.U. project, http://www.xtreemfs.org/, 2016/11/7
［２９］VMware, http://www.vmware.com/jp/products/virtual-san.html, 2016/11/7
［３０］Maxta, http://www.maxta.com/products-2/, 2016/11/7
［３１］ProphetStor, http://www.prophetstor.com/product/federator-sds/, 2016/11/7
［３２］Nutanix, http://www.nutanix.jp/products/, 2016/11/7
［３３］DataCore, https://www.datacore.com/products/SANsymphony.aspx, 2016/11/7
［３４］Hewlett-Packard, https://www.hpe.com/jp/ja/storage/storevirtual.html, 2016/11/7
［３５］Falconstor, http://falconstor.com/file?id=1185, 2016/11/7
［３６］StorMagic, http://stormagic.com/svsan/, 2016/11/7
［３７］福冨 里志,加藤 慎也,下河邊 雅行,国内サーバー市場 2016年～2020年の予測：2015年第4四半期,IDC Japan, 2016
［３８］森山 正秋,宝出 幸久, 国内エンタープライズストレージシステム市場 2015年第4四半期の分析,IDC Japan, 2016
［３９］鈴木 康介,国内Software-Defined Storageの需要動向調査,IDC Japan, 2016
［４０］Gartner,http://www.mainframezone.com/storage/backup-recovery-business-continuity/tape-a-collapsing-star,2016/11/7
［４１］IDC, Customer Storage Priorities — Breaking down Storage Tradeoffs, July 2015
［４２］森山 正秋, 宝出 幸久,国内ディスクストレージシステム市場 2014年の分析と2015年～2019年の予測, IDC Japan,2015
［４３］Alan Radding, スナップショット技術ガイド,JSDFデータ・マネジメント・ソリューション部会/Storage Magazine 2009年10月号, 2009
［４４］手嶋 透, 妥当な可用性を見いだす現場のワザ：落ちないシステムの作り方：妥当な可用性を見いだす現場のワザ, 日経SYSTEMS 2011/03号, 2011
［４５］Sean Quinlan and Sean Dorward, Venti: A new approach to archival data storage. In FAST ’02: Proceedings of the 1st USENIX Conferenceon File and Storage Technologies, page 7, 2002
［４６］TIS株式会社, 分散ファイルシステムのWAN越え同期レプリケーションの検証,2014
［４７］Exagrid, Comparing exagrids byte-level data de-duplication to block level data de-duplication, http://www.bmrturkey.com/downloads/exagrid/Data%20De-duplication%20Methodologies.pdf, 2010.
［４８］Andrew Tridgell, Paul Mackerras, et al, The rsync algorithm, 1996.
［４９］桑田喜隆,梶波崇,山田大輔,三浦広志, 分散オブジェクトストレージのバックアッ

プ方法に関する検討, 人工知能学会 第13回知識流通ネットワーク研究会,2014
［５０］Athicha Muthitacharoen, Benjie Chen, and David Mazieres. A low-bandwidth network file system.SIGOPS Oper.Syst.Rev., 35(5):174-187, October 2001. ISSN 0163-5980. doi: 10.1145/502059.502052. URL http://doi.acm.org/10.1145/502059.502052.2016/11/7
［５１］Efe Philip Osazee-Obazee, Data Management in an Elastic Storage Enviroment,Helsinki Metropolia University of Applied Sciences,2015
［５２］NetApp, Open systems snapvault (ossv) best practices guide.https://communities.netapp.com/servlet/JiveServlet/previewBody/4791-102-2-13466/tr-3466.pdf,2016/11/7
［５３］P. Armangau and S.R. Dunham, Computer data storage backup with tape overflow control of disk caching of backup data stream, April 15 2003. URL http://www.google.com/patents/US6549992. US Patent6,549,992,2016/11/7
［５４］W. Curtis Preston, Storage Magazine 2010年3月号,バックアップアプリの主要新機能, 2010
［５５］CA Technologies, http://www.arcserve.com/~/media/Arcserve/Files/TechnicalDocuments/asbu-r165-synthetic-full-fs.pdf, 2016/11/7
［５６］Symantec, http://eval.veritas.com/ja/JP/downloads/pro/nbu6_bro.pdf, 2016/11/7
［５７］Symantec, https://www.symantec.com/region/jp/beadviser/fd-03.html, 2016/11/7
［５８］富士通, http://www.fujitsu.com/jp/products/computing/storage/software/sf-tsm/, 2016/11/7
［５９］IBM, http://www.ibm.com/support/knowledgecenter/ja/SSSR2R_6.4.0/com.ibm.itsm.ve.doc/c_ve_backup_incrforever.html, 2016/11/7
［６０］Dell, http://www.dellsw.jp/support/netvault_lesson/nvls200405.html, 2016/11/7