

ログベースディザスタリカバリシステムにおける ログ適用高速化方式の評価

渡辺 聡 鈴木 芳生 水野 和彦 藤原 真二

日立製作所中央研究所 〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280

E-mail: {satoru.watanabe.aw, yoshio.suzuki.rf, kazuhiko.mizuno.pq, shinji.fujiwara.yc}@hitachi.com

あらまし 広域災害対策として遠隔地にデータをバックアップするディザスタリカバリシステムでは、メインサイトが被災した場合に、リモートサイトを代替システムとして使用する。しかし、代替システムとしての用途だけでは、平常時にリモートサイトが有効に活用されない問題がある。そこで、平常時から、リモートサイト側でデータ集計処理などを実行することが考えられる。しかし、従来、リモートサイトをバックアップ以外の目的に使用すると、リモートサイト側で実行するログ適用処理に遅延が生じ、データのバックアップに障害が生じる可能性があった。本研究では、ストレージ装置に対する IO 要求の並列化、および、IO のシーケンシャル化技術を用いてログ適用処理を高速化した。これらの技術による性能向上率を明らかにするために、4 つの異なる実装方式で評価を行い、ログ適用処理の性能を 5.2 倍に向上できることを示した。本技術を用いることにより、リモートサイトの有効活用が可能になる。

キーワード ディザスタリカバリ, ログ適用処理, リモートバックアップ

Evaluation of Speed-up Methods of Database Redo Processing for Log-based Disaster Recovery Systems

Satoru Watanabe Yoshio Suzuki Kazuhiko Mizuno and Shinji Fujiwara

Hitachi, Ltd., Central Research Laboratory 1-280 Higashi-koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8601 Japan

E-mail: {satoru.watanabe.aw, yoshio.suzuki.rf, kazuhiko.mizuno.pq, shinji.fujiwara.yc}@hitachi.com

Abstract For high availability of computer systems, online remote backup systems called disaster recovery systems are becoming common mainly in enterprise mission-critical systems. In disaster recovery systems, the remote site is used as the substitute system when the main site collapses due to hurricanes, earthquakes, and so on. The remote site is seldom used, and there is wastage of the computer resources. The purpose of this paper is to enable effective use of the remote site in normal times. For this purpose, it is needed to speed up the database redo processing in log-based disaster recovery systems. We used parallelization technique and sorting log technique to speed up the redo processing. We developed four prototypes by different implementation methods and speeded up the redo processing by 5.2 times. These techniques enable effective use of the remote site.

Keyword disaster recovery, database redo processing, remote backup

1. 背景

企業活動において情報システムの果たす役割が増大し、情報システムのリスク管理が企業の重要な課題になっている。リスク管理を怠る代償は大きく、災害などで情報システムが停止した場合、1 時間あたり数億円の機会損失が生じると言われている [1][2]。そのため、災害に備えてメインサイトの遠隔地に設置したリモートサイトにデータをバックアップするディザスタリカバリ (DR) システムが注目を集めている。特に金融システムの停止は他の企業の活動にも重大な影響を及ぼすことから、米国証券取引委員会 (SEC) は金融機関に対する情報システムのリスク管理規制の導入を

検討している [3]。また、日本国内においても、経済産業省によって情報システムの災害対策ガイドラインが策定され、企業情報システムの災害対策が求められている [4]。

現在、企業の情報管理においてデータベースが重要な役割を果たしている。そのため、データベースのデータ保護は特に重要な課題である。データベースの DR システムでは、ログベースの DR 方式が広く用いられ、商用データベースにおいても製品化されている [5]。ログベースの DR 方式では、データベースが管理するデータ本体とデータ更新ログのうち、データ更新ログだけをリモートサイトにコピーし、データ本体はリモー

トサイト側のログ適用処理で回復する。

従来、リモートサイトは、災害などでメインサイトに障害が生じた場合の代替システムとして使用されていた。しかし、代替システムとしての用途だけでは、平常時にシステムリソースが有効に活用されない問題がある。そこで、リモートサイト側でデータ集計などの処理を実行することで、平常時からシステムリソースを有効に活用することが考えられる。

しかしながら、ログ適用処理と並行してリモートサイトを使用すると、処理能力が不足し、ログ適用処理の遅延によるシステム障害が生じる可能性がある。そこで、ログ適用処理の遅延回避を目的として、ログ適用処理の高速化に向けた技術開発を行った。例えば、ログ適用処理を2倍に高速化できれば、夜間にログ適用処理を実行し、残りの時間にリモートサイトを活用することが可能になる。

以降の構成は次の通りである。2章で関連研究について述べる。3章でリモートサイト活用の課題について述べ、ログ適用高速化の目的を示す。4章で高速化の基本方針を説明し、5章でプロトタイプの実装方式を説明する。6章で評価結果を示し、7章でまとめる。

2. 関連研究

データベースが管理するデータを遠隔地にバックアップする方式として、Dual Input 方式や Remote Mirrored Disk 方式などがある[6]。[6]において、導入の容易性や性能などの観点から方式の比較が行われ、本研究が対象とするログベースの DR 方式が有力と結論されている。[7]において、ログベースの DR 方式の実験システムが開発され、実装方式の違いによる性能特性が評価されている。ログベースの DR 方式の実装方式としては、データ更新ログを同期コピーする 2-Safe 方式と、データ更新ログを非同期コピーする 1-Safe 方式がある。1-Safe 方式は、性能上のペナルティは少ないがデータ消失の可能性がある。一方、2-Safe 方式は、データ消失の可能性はないが性能上のペナルティが大きい[8][9]。リモートサイト側で実行するログ適用処理は、1-Safe、2-Safe の両方式で共通であり、本研究の高速化はどちらの実装であっても利用可能である。

ログ適用処理の改良に関しては、[10]において、低オーバヘッドでログ適用処理を並列化する技術が提案されている。[11]では、ログ並べ替え技術によりストレージに対する IO をシーケンシャル化することで、ログ適用処理を高速化している。[11]では、ソフトウェア RAID を用いた評価結果が示されている。我々は、ハードウェア RAID の環境において、並列化とログ並べ替えの両方の技術を4つの方式で実装し、評価を行った。

3. リモートサイト活用法と課題

3.1. リモートサイト活用法

リモートサイトの活用法として、リモートサイト側でのデータ参照と、外部媒体バックアップの2つが考えられる。図1に示すように、リモートサイト側でのデータ参照では、リモートサイト側に DB サーバを設置し、管理端末からの指示に従い、データを参照する。リモートサイト側のデータは、メインサイトが被災した場合に使用するデータであるため、更新はできない。しかし、データの参照は可能であり、例えば、データ集計のための参照処理をリモートサイト側で実行することができる。なお、図1では、ログ適用処理を行なう専用装置 (DB ヘッド) と、DB サーバを別の機器に実装する例を示したが、これらの機器を1つにまとめても良い。

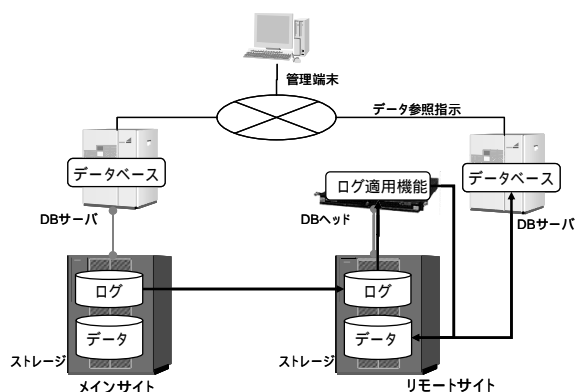


図1 リモートサイト活用法1

外部媒体バックアップでは、図2に示すように、リモートサイト側にテープドライブなどの外部媒体を設置し、リモートサイト側で外部媒体にデータをバックアップする。メインサイト側で、外部媒体にデータをバックアップする場合、メインサイトの業務処理を一旦停止し、バックアップイメージを作成するなどの処理が必要になる。リモートサイト側でバックアップ処理をすることで、メインサイトの業務実行への影響なく、外部媒体にデータをバックアップできる。

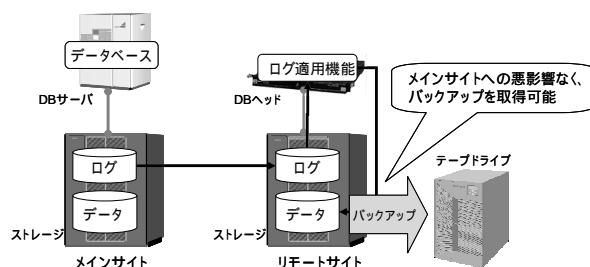


図2 リモートサイトの活用法2

3.2. リモートサイト活用の課題

ログベースの DR 方式では、以下のようにして、リモートサイト側にメインサイトと同じデータを作成する。

1. 運用開始の段階で一度だけ、メインサイトのデータをリモートサイトにコピーする
2. メインサイトで出力されるデータ更新ログを逐次リモートサイトにコピーする
3. リモートサイト側でデータ更新ログの内容をデータに反映するログ適用処理を実行する

ログベース DR 方式のシステムリソースの消費量については、[7]において評価が行われている。ログ適用は軽量の処理であり、リモートサイトのサーバの負荷は小さい。一方、ストレージには、メインサイトのデータ更新と同等の負荷がかかる。

そのため、図 3 に示すように、メインサイト側でストレージの IO 性能がネックになるケースでは、リモートサイトのストレージにも高い負荷がかかる。特に、メインサイトとリモートサイトに同一ストレージを設置し、メインサイトでデータ更新だけを実行した場合には、メインサイトのデータ更新とログ適用処理の性能が同等になると考えられる。

このような状況で、リモートサイトをデータ参照や外部媒体バックアップに使用すると、ストレージの処理能力の不足によりログ適用処理に遅延が生じる可能性がある。そのため、本研究では、ログ適用処理の高速化方式を検討し、高速化方式を実装した場合の性能向上率を明らかにすることを課題とした。

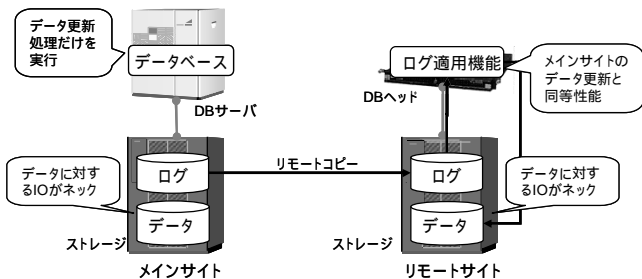


図 3 メインサイトとログ適用の性能が同等のケース

4. ログ適用高速化技術

4.1. 高度化の基本方針

ログ適用処理にタイムスタンプを埋め込み、日立製サーバと SANRISE 9570V を用いたシステム上で動作させ、ログ適用処理の処理時間の内訳を調べた。データ、および、トランザクションは 6 章に示すものを使用した。図 4 に示すように、ログ適用処理は、ログ読み込みステップ、ログ解析ステップ、および、データ更新ステップから構成され、処理時間の内訳はそれぞれ 1%、4%、95%であった。

ログ読み込みステップはログファイルからログバッファにログを読み込むステップであり、ログを順に読むシーケンシャルアクセスであることから処理時間の割合は小さい。また、ログ解析ステップは、ログ適用に必要なログだけを抽出するステップであり、DB へ

ッドのメモリ上の操作であることから、この処理時間の割合も小さい。処理時間の割合が全体の 95%を占めるデータ更新ステップは、さらに次の 3 つの処理に分けられる。

1. 更新対象のデータ領域（ページ）をストレージから DB バッファに読み込む処理
2. ログの内容をページに反映する処理
3. ログの内容を反映したページをストレージに書き戻す処理

2 番目のログの内容をページに反映する処理は DB ヘッドのメモリ上の操作であり、処理時間の割合はログ適用ステップの約 2%で小さい。1 番目の処理と 3 番目の処理において、ストレージに対するデータ入出力の処理時間が大きいことが、データ更新ステップの処理時間が大きい要因である。

さらに、データ入出力の Read と Write の処理時間の割合を IO トレースにより調べた。その結果、図 4 に示すように、Read の処理時間が 92%を占めていた。これは、Write 処理では、ストレージキャッシュにデータを書込み即座に回答を返すキャッシュ Write 機構が働くのに対し、Read 処理では、(キャッシュミスの場合には、)ハードディスクドライブからデータを読み込む必要があるためである。そこで、本研究では、データ更新ステップのデータ入出力のうち、主にストレージから DB バッファにページを読み込む処理の高速化技術を検討した。

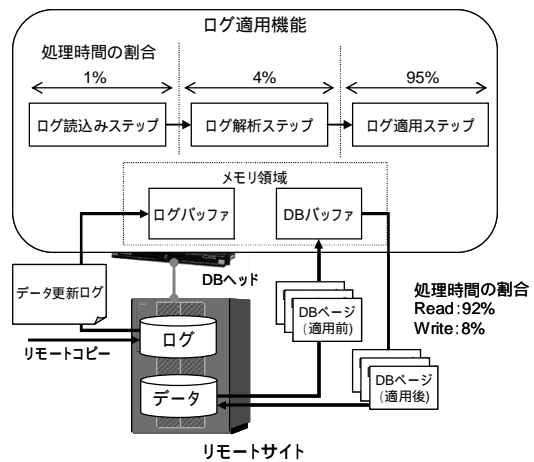


図 4 ログ適用の処理フロー

4.2. 高度化技術の検討

図 5 に示すように、ログ適用ステップの高速化技術として、以下に示す(1)ログ並べ替え、(2)ログ適用プロセスの並列化の、2 つの技術を検討した。

高速化技術(1)：ログ並べ替え

ログ並べ替えステップを設け、ログバッファに格納されているログをページ番号順にソートする。ページ番号は、ロジカルブロックアドレス (LBA)

の順に付与されることから、ページ番号による並べ替えにより、ストレージに対する IO がシーケンシャルになる。ストレージの性能はランダムアクセスよりシーケンシャルアクセスの方が高いこと、および、SANRISE はシーケンシャルアクセスを検出して、データをキャッシュに先読みする機構を有することから、ログ並べ替えにより高速化が可能である。なお、並べ替えによりログの適用順序が変更されるが、今回評価に用いた日立製データベース HiRDB では、同一ページに対するログの適用順序を守れば正常にデータを回復でき、異なるページのログは順序を変更して適用できる。

高速化技術(2)：ログ適用プロセスの並列化

DB バッファにページを読み込み、ログの内容を反映するログ適用プロセスを複数個起動し、データの入力を並列に実行する。ストレージ装置は並列して IO を処理できるため、ログ適用プロセスの並列化により高速化が可能である。

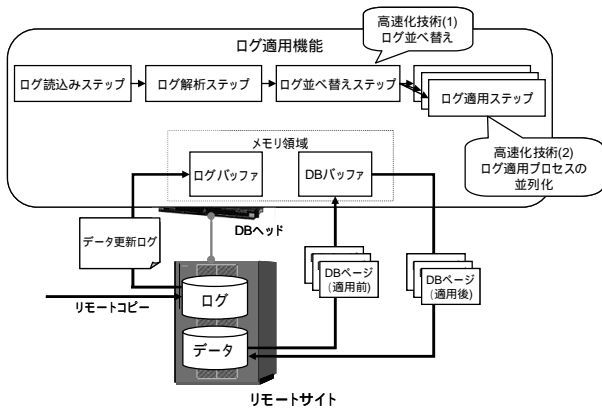


図 5 ログ適用処理の高速化技術

5. プロトタイプの実装方式

表 1 に示す 4 つの方式で、プロトタイプを実装した。各方式の詳細は以下の通りである。

表 1 実装方式

方式	LBAレベルスケジューリング			物理レベルスケジューリング
	1プロセス1ストリーム	マルチプロセス マルチストリーム	マルチプロセス 1ストリーム	
概要	ソートしたログを1プロセスで適用	ログバッファのログを等分して各プロセスに振り分け	ログバッファから順にログを取り出して適用	ソートしたログを、複数のIOプロセスでログ適用を実行
	IOパターン	IOパターン	IOパターン	IOパターン
	LBA	Time	Time	Time

1. LBA レベルスケジューリング

ログをページ番号順にソートし、ストレージの LBA (ロジカル・ブロック・アドレス) 順にシーケンシャルな IO を発行する。ソートしたログをログ適用プロセスに振分ける方法で以下の 3 つのバリエーションがある。

(i) 1 プロセス 1 ストリーム方式

- ・ ログ適用プロセスを 1 個だけ起動し、全てのログを 1 つのプロセスに振分ける
- ・ データ領域に対して 1 ストリームのスパースなシーケンシャル IO が発行される

(ii) マルチプロセスマルチストリーム方式

- ・ ログ適用プロセスを複数個起動し、ソートしたログをプロセスの個数に等分して振分ける
- ・ データ領域に対して、プロセスの個数分のスパースなシーケンシャル IO が発行される

(iii) マルチプロセス 1 ストリーム方式

- ・ ログ適用プロセスを複数個起動し、IO が完了するごとに 1 つずつログをログ適用プロセスに振分ける
- ・ データ領域に対して、1 ストリームのスパースなシーケンシャル IO が発行される

2. 物理レベルスケジューリング

RAID ディスクでは、複数のドライブに分散してデータが格納される。LBA レベルスケジューリングでは、IO 要求がドライブで競合する可能性がある。IO 要求の競合を回避するため、物理レベルスケジューリングでは、ドライブ数分のログ適用プロセスを起動し、ログ適用プロセスとドライブを対応付ける。RAID のストライピング方式を事前に調べておき、ソートしたログを、ドライブごとに分類してログ適用プロセスに振分ける。物理レベルスケジューリングでは、ドライブごとにスパースなシーケンシャル IO が発行される。

6. 評価

6.1. 評価環境

図 6 に示す評価環境を用いてログ適用高速化方式の評価を行なった。メインサイトは DB サーバとストレージから構成され、サーバとストレージはファイバチャネル (FC) スイッチを介して接続されている。リモートサイトでも DB サーバとストレージが FC スイッチを介して接続されている。メインサイトとリモートサイトのストレージは転送距離を拡大するためのチャネルエクステンダを介して接続されている。リモートサイトの FC スイッチには FC アナライザが接続され、これによりストレージに対する IO のトレースを取得できる。表 2 に示すように、DB サーバと DB ヘッドには日立 H9000V rp2400 を使用し、ストレージには SANRISE9570V を使用した。

表 3 に示すように、メインサイトの DB サーバではデータベース (HiRDB) が動作し、データベースに負荷を与えるトランザクション実行ツールが動作する。トランザクション実行ツールはデータベースシステムの標準ベンチマークである TPC-C[12]を模して作成されたツールである。データ更新ログはリモートサイトに同期コピーされ、評価環境の DR システムは、2-Safe 方式で動作する。データを格納したロジカルユニットの容量は 35GB であり、実際のデータの容量は約 30GB である。また、DB ページのサイズは 4KB とし、データは 3D+1P の 4 個のドライブで構成される RAID5 のロジカルユニットに格納した。

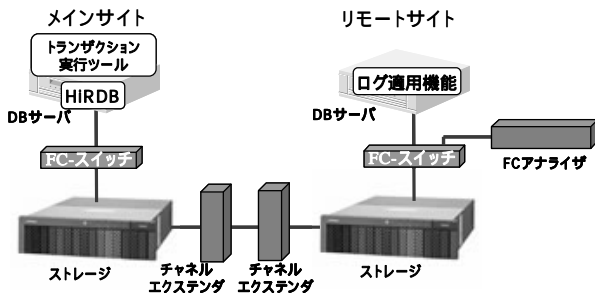


図 6 評価環境

表 2 ハードウェア構成

DB サーバ	H9000V rp2400 , 650MHz, 2Way, メモリ 1GB
ストレージ	SANRISE9570V キャッシュ 1GB 3D+1P 構成の RAID5 の LU にデータを格納 (容量 35GB)

表 3 ソフトウェア構成

データベース	HiRDB SingleServer V7.0
トランザクション実行ツール	TPC-C を模したツール Warehouse 数 : 250、データサイズ : 30GB. トランザクション比率 : neworder:25%, payment:13%, orderstatus:58%, delivery:2%, stocklevel:2%
ログ適用機能	ログ適用機能のプロトタイプ

6.2. 評価方法

5 章に示した方式で実装したプロトタイプのうち、並列化技術を用いる方式では、ログ適用のプロセス数がパラメータになる。但し、物理レベルスケジューリングのログ適用プロセス数は、データを格納しているドライブの個数により決定され、今回の評価環境におけるログ適用プロセス数は 4 である。そこで、物理レベルスケジューリングと LBA スケジューリングの効果を比較するため、表 4 に示すように、並列化技術を用いる方式では、ログ適用プロセス数 4 と 10 で評価を行った。

ログ並べ替え技術では、並べ替えるログの容量 (ソート領域容量) がパラメータになる。これを変更した場合の効果を評価するため、表 4 に示すように、並べ替えなしから 256MB までの範囲で評価を行った。

表 4 評価パラメータ

実装方式	LBA レベルスケジューリング			物理レベルスケジューリング
	1 プロセス 1 ストリーム	マルチプロセス マルチストリーム	マルチプロセス 1 ストリーム	
高速化技術				
並列化	×			
ログ適用プロセス数	1	4,10	4,10	4
ログ並べ替え				
ソート領域容量	並べ替えなし、64MB、128MB、256MB			

ログ適用処理のスループットを測定するため、メインサイトで 512MB のログを生成し、リモートサイトにログをコピーした後に、ログ適用機能を起動して、512MB のログの適用に要した時間を測定した。なお、ログのコピーとログ適用を並列して実行した場合にも、ログ適用の性能は同等になることを確認している。

6.3. 評価結果

評価に用いた IO のパターンを説明するため、1 プロセス方式で 256MB のログを並べ替えてログ適用した場合の、データアクセスの IO トレースを図 7 に示す。図 7 に示すように、35GB の領域に格納された約 30GB のデータに対して、シーケンシャルなアクセスが行われる。ストレージから DB バッファにページが Read され、ログの内容が反映されたページは、DB バッファが満杯になったタイミングで Write される。DB バッファは、LRU 方式で管理されており、Write は Read に遅れて実行される。なお、4.1 節で述べたように、ストレージキャッシュにデータを書き込んで即座に回答を返すキャッシュ Write 機構が働くため、Write は高速に実行される。そのため、ログ適用処理の性能に大きく影響するのは、DB バッファにページを読み込む

Read 処理である。

256MB のログには、ログレコードが約 68 万個含まれていた。各ログレコードには更新対象のページ番号と更新内容が記載されている。同じページを更新対象にするログレコードがあるため、更新対象のページの総数は約 13.5 万ページであった。1 ページは 4KB であるので、更新対象のページの合計容量は約 540MB であり、これはデータ容量 30GB の 1.8% に相当する。図 7 では、IO が連なっているように見えるが、実際はスパークンシャル IO が発行されている。

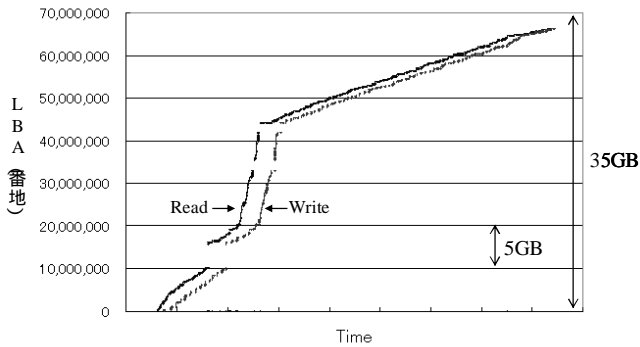


図 7 データアクセスの IO トレース

ログ適用処理のスループット性能を図 8 に示す。図 8 の縦軸は 1 プロセス方式で並べ替えなし場合の性能を 1 とした性能の倍率、横軸はソートするログの容量である。図 8 では、1 プロセス方式をダイヤ型で、マルチプロセス 1 ストリーム方式を四角で、物理スケジューリング方式を三角でプロットしている。また、マルチプロセスマルチストリーム方式の性能を、点線で示している。

ソートするログの容量が増えるほど IO がランダムアクセスからシーケンシャルアクセスに近づき、性能が向上する。10 プロセス 1 ストリーム方式では、最大 5.2 倍に性能向上した。また、ログ適用プロセス数が増加するほど、IO の並列度が上がり、性能が向上する。10 プロセス 1 ストリーム方式の並べ替えなしの性能は、1 プロセス方式の並べ替えなしの性能の 2 倍であった。但し、マルチプロセスマルチストリーム方式の性能は、1 プロセス方式の性能より低い。これは、マルチプロセスマルチストリーム方式でログ適用をすると、全体として IO がシーケンシャルにならないため、並べ替えの効果を打ち消してしまうためと考えられる。

物理レベルスケジューリングの性能は、4 プロセス 1 ストリーム方式と同等であった。但し、図 9 に示すように、ストレージのドライブ利用率は、物理レベルスケジューリングの方が高い。これは、ストレージ装置に、LBA 順のシーケンシャルアクセスを高速に処理する機構があり、LBA レベルスケジューリングによる IO 処理が効率良く実行されるためである。

メインサイト側では、大量の IO を並べ替えて IO を発行することはできない。一方、リモートサイト側では、IO の並べ替えが可能であり、ログ適用を高速に実行できる。マルチプロセス 1 ストリーム方式を用いることで、ログ適用の性能がメインサイトの性能を上回り、リモートサイトの有効活用が可能になる。なお、評価環境のメインサイトでは、データの参照と更新の両方が実行されており、その性能は、図 8 の倍率 1 の性能と同等であった。本環境では、マルチプロセス 1 ストリーム方式により、メインサイトの 5.2 倍の性能でログ適用できた。

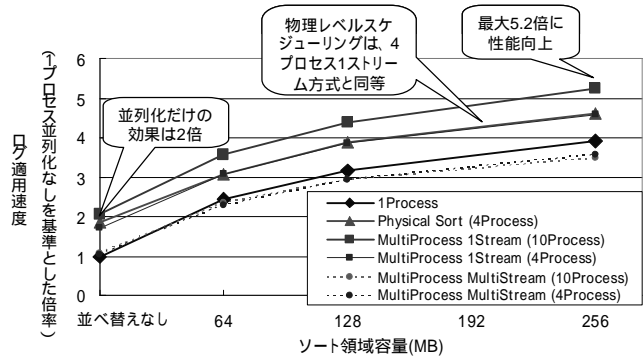


図 8 ログ適用のスループット性能

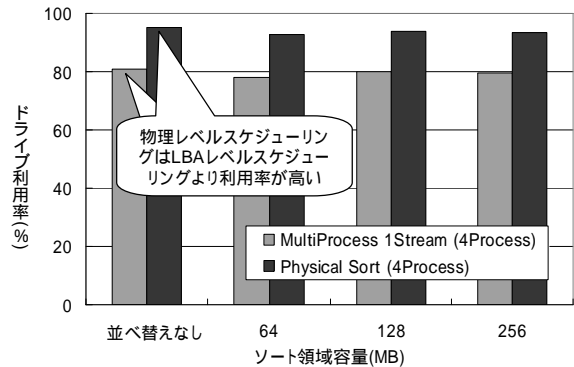


図 9 ドライブ利用率

7. まとめ

企業情報システムのリスク管理のニーズ増大を受け、遠隔地にデータをバックアップするディザスタリカバリシステムが注目されている。ディザスタリカバリシステムでは、メインサイトが被災した場合にリモートサイトを代替システムとして使用する。しかし、代替システムとしての用途だけでは、システムリソースが有効に活用されない問題がある。そこで、リモートサイト側でデータ集計処理や外部媒体バックアップをすることで、システムリソースを活用することが考えられる。これを実現するため、リモートサイト側で実行するログ適用処理の高速化に向けた技術開発を行った。ストレージ装置に対する IO 要求の並列化、および、IO のシーケンシャル化技術を 4 つの方式で実装

した。性能評価の結果、マルチプロセス1ストリーム方式により、ログ適用処理の性能を5.2倍に向上できた。本技術を用いることにより、リモートサイトの有効活用が可能になる。

8. 謝辞

本研究の一部は、文部科学省リーディングプロジェクト e-Society 基盤ソフトウェアの総合開発「先進的なストレージ技術」で技術開発された成果が反映されています。研究の推進にあたり東京大学生産技術研究所喜連川教授にご助言いただきました。感謝いたします。

文 献

- [1] Michael Peterson, Kris Newton, “1998 DATABASE OPERATING PRACTICES –HighAvailability and Data Protection-”, Strategic Research Corporation (1998.8).
- [2] Steven R. Christiansen, Lawrence L. Schkade, “Financial And Functional Impacts Of Computer Outages On Business”, University of Texas working paper #CRIS-87-01, (http://www.uta.edu/infosys/CITM/Working_Papers/wp_8701.htm).
- [3] “Interagency Paper on Sound Practices to Strengthen the Resilience of the U.S. Financial System ”, 米国証券取引委員会(SEC)勧告 (2003.4.7), (<http://www.sec.gov/news/studies/34-47638.htm>).
- [4] 経済産業省 企業における情報セキュリティガバナンスのあり方に関する研究会報告書(平成 17 年)(<http://www.meti.go.jp/press/20050331004/20050331004.html>).
- [5] 日立製作所, スケーラブルデータベース HiRDB Version 8 製品パンフレット(No:CA-567),(2006.6).
- [6] D.L.Burkes, R.K.Treiber, “Design Approaches for Real-Time Transaction Processing Remote Site Recovery”, Comcon Spring '90. 'Intellectual Leverage'. Digest of Papers. Thirty-Fifth IEEE Computer Society International Conference, pp. 568-572, Feb. 1990.
- [7] Christos A. Polyzois, Hector Garcia-Molina, “Evaluation of Remote Backup Algorithms for Transaction- Processing Systems”, ACM Transactions on Database Systems, Vol.19, No.3, pp. 423-449, Sep. 1994.
- [8] Lyon, J. “Design considerations in replicated database systems for disaster protection”, IEEE Comcon. IEEE New York, 428-430, 1988.
- [9] Garcia-Molina, H., Polyzois, C.A., “Issues in disaster recovery”, IEEE Comcon. IEEE, New York, 222-230, 1990.
- [10] Mohan C., Treiber K., Obermarck R., “Algorithms for Management of Remote Backup Data Base for Disaster Recovery”, Data Engineering, 1993. Proceedings. Ninth International Conference, IEEE, pp.511-518, Apr. 1993.
- [11] 合田和生, 喜連川優, “データベース再編成機構を有するストレージシステム”, 情報処理学会論文誌データベース, Vol.46 No.SIG 8(TOD 26), pp.130-147(2005.6).
- [12] Transaction Processing Performance Council, “TPC Benchmark C, Standard Specification, Revision 5.1”, December 2002.