

10 μ 秒オーダーの低レイテンシ I/O デバイスを用いたデータベースの性能評価

藤原 真二¹ 千田 理路² 金子 勇³

10 μ 秒オーダーで I/O が可能な低レイテンシ I/O デバイスが実用化されてきた。これらのデバイスが、数ミリ秒の I/O 時間を想定して設計された既存のシステムに与える影響は大きい[1]。今回、低レイテンシ I/O デバイスとして 3D XPoint 技術を採用したインテル® Optane™ DC SSD を用い、同デバイスを搭載したサーバ上で日立リレーショナルデータベース HiRDB を評価した。オンライントランザクション業務を想定した更新トランザクション性能を評価し、従来型 NVMe SSD 比で 2.4 倍の処理性能を確認した。また、すべての表データが DB バッファに常駐しているオンメモリ時と比べて 7 割以上の処理性能であることを確認した。

1 はじめに

10 μ 秒オーダーで I/O が可能な低レイテンシ I/O デバイスが実用化されてきた。これらのデバイスが、数ミリ秒の I/O 時間を想定して設計された既存のシステムに与える影響は大きい[1]。

数ミリ秒の I/O 時間と数百ナノ秒のメモリアクセス時間のギャップを解消するためには頻繁にアクセスするデータをメモリ上のバッファにキャッシュする必要がある。従来のデータベースでは、DB バッファのヒット率を上げるために、メモリの増設やデータのアクセス特性に応じた DB バッファチューニングが必要であった[2][3]。一方、メモリの大容量化に伴い、全データをメモリに常駐したインメモリデータベース[4][5]の実用化も進んでいる。しかし、メモリのビットコストは I/O デバイスと比較して高く、1 台のサーバ搭載可能なメモリ容量にも上限がある。そのため、増加し続けるデータをメモリ上で処理し続けるのは困難である。

近年、3D XPoint 技術を採用したインテル® Optane™ DC SSD や Z-NAND™ 技術を採用した Samsung Z-SSD など、レイテンシが 10~20 μ 秒程度の I/O デバイスが実用化されてきた[6][7]。実用段階に入った低レイテンシ I/O デバイスは、I/O 時間が 10~20 μ 秒と極めて短い。そのため、データベースの処理時間が 100 μ 秒以上かかるケースにおいては、DB バッファのヒット率が低い状況でもヒット率が高いケースと比較して遜色のない性能を確保することが可能であると考える。

今回、低レイテンシ I/O デバイスとして 3D XPoint 技術を採用

したインテル® Optane™ DC SSD を用い、同デバイスを搭載したサーバ上で日立リレーショナルデータベース HiRDB を評価した。

2 低レイテンシ I/O デバイスとその適用領域

PCIe バスを通じて不揮発ストレージをアクセスする NVMe Express (NVMe) インタフェースが NVMe Express, Inc. で標準化されている[8]。NVMe は不揮発メモリのような低レイテンシかつ広帯域の I/O デバイスをアクセスするのに適したインタフェースである。現在、広く普及している NAND 型 Flash を搭載した SSD (NAND SSD) も従来の SATA/SAS インタフェースに加え、NVMe インタフェースにも対応しつつある。これらの NAND SSD の I/O レイテンシは 100 μ 秒オーダーである。

これに対して、実用化されている低レイテンシ I/O デバイスの性能は表 1、表 2 のとおりであり 10 μ 秒オーダーのレイテンシと 2~3 GB/秒のシーケンシャルアクセス性能を実現している。

表 1 インテル® Optane™ SSD DC P4800X

	Read	Write
シーケンシャル(MB/秒)	2400	2000
ランダム(IOPS)	550K	500K
レイテンシ(μ 秒)	10	10

(出典：インテル®ホームページ)

表 2 Samsung SZ985 Z-NAND™ SSD

	Read	Write
シーケンシャル(MB/秒)	3200	3000
ランダム(IOPS)	750K	170K
レイテンシ(μ 秒)	20	16

(出典：Samsung ホームページ)

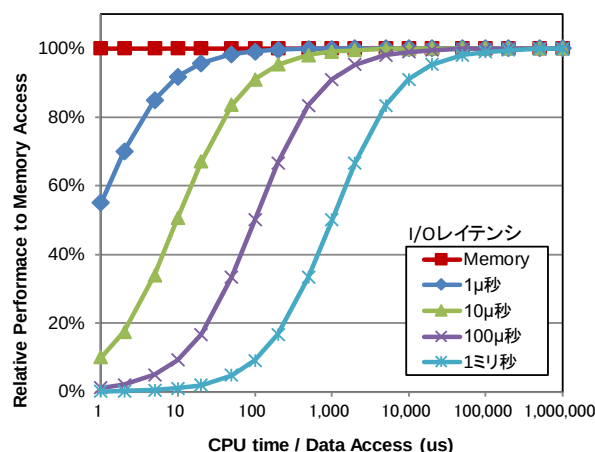


図 1 対オンメモリ相対性能

図 1 はデータがすべてオンメモリに載っているときの性能を基準としたときの I/O レイテンシが性能に与える影響を机上で評価したグラフである。横軸が 1 回の I/O で取得したデータを処理する CPU 時間、縦軸がオンメモリとの相対性能である。メ

¹ 正会員 日立製作所 IoT・クラウドサービス事業部 / 首都大学東京 システムデザイン研究科 shinji.fujiwara.yc@hitachi.com

² 非会員 日立製作所 IoT・クラウドサービス事業部 riro.senda.jy@hitachi.com

³ 非会員 日立製作所 IT プロダクツ統括本部 isamu.kaneko.zd@hitachi.com

モリアクセスのレイテンシは 0.1μ 秒として計算している。例えば、1 回のデータアクセスで 100μ 秒の CPU 時間を使う処理の場合、 100μ 秒の I/O レイテンシのデバイスでは、対オンメモリで

$$(100 \mu \text{ 秒} + 0.1 \mu \text{ 秒}) / (100 \mu \text{ 秒} + 100 \mu \text{ 秒}) = 50\%$$

と約半分の性能となる。一方、 10μ 秒の低レイテンシ I/O デバイスを適用した場合、対オンメモリ性能は

$$(100 \mu \text{ 秒} + 0.1 \mu \text{ 秒}) / (100 \mu \text{ 秒} + 10 \mu \text{ 秒}) = 91\%$$

とオンメモリの 9 割の性能が維持できることが期待できる。このように、 10μ 秒オーダーの低レイテンシ I/O デバイスは I/O 当たりの CPU 処理時間が数十～数百 μ 秒となるアプリケーションに適用するとその効果が発揮できる。

なお、本評価は CPU の空き時間をタスク切り替えにより別タスクで使うことは考慮していない。そのため、I/O レイテンシが 100μ 秒や 1 ミリ秒のケースでは、タスク切り替えを適用することにより相対性能が向上する。しかし I/O レイテンシが 10μ 秒以下の場合、タスク切り替えのオーバーヘッドが I/O レイテンシよりも大きくなってしまいうために、その効果は見込めない。

以上の机上評価を踏まえ、本論文では、 10μ 秒の I/O レイテンシを示すインテル® Optane™ DC SSD を低レイテンシ I/O デバイスとして用い、データベースの性能に与える影響を評価・検証した。

3 データベースの評価

今回、DB サーバ 1 台のシングル構成及び DB サーバ 2 台で二重化を実施した HA(High Availability)構成の評価を実施した。

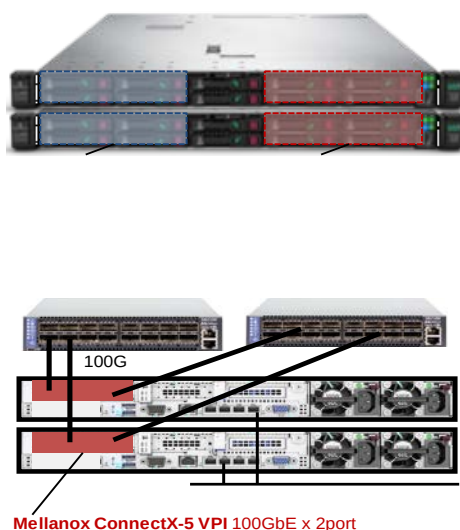
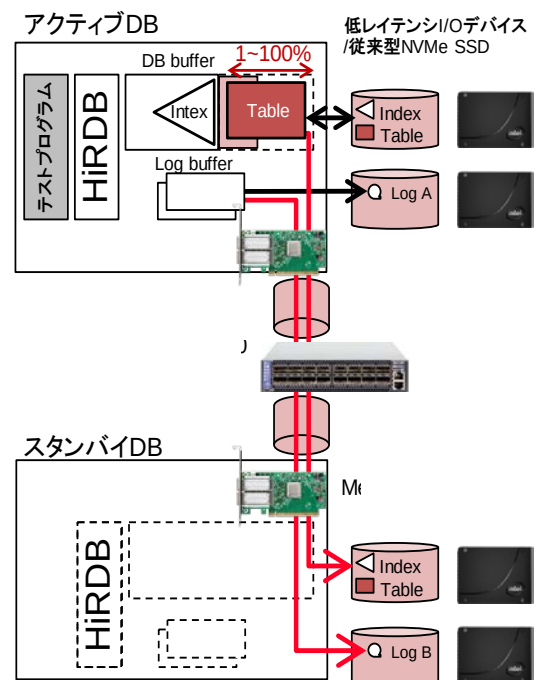
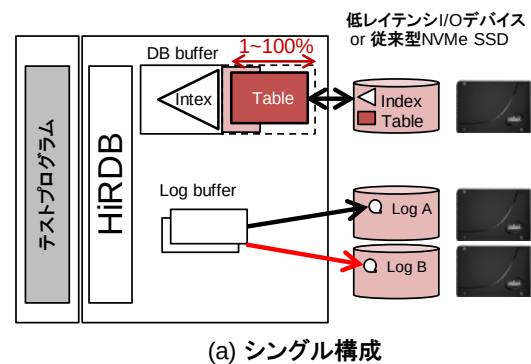


図2 ハードウェア構成

3.1 ハードウェア構成

図 2 に評価に用いたハードウェア構成を示す。AP サーバおよび DB サーバはオンボードの 1GbE で接続された日立アドバンストサーバ「HA8000V/DL360 Gen10」を用いた。本サーバには、8 コアのインテル® Xeon® Silver 4110 プロセッサを 2 個、メモリは 96GB 搭載した。低レイテンシ I/O デバイスとしては 375GB のインテル® Optane™ DC SSD を、従来型 NVMe SSD としては 1TB の 3D NAND 型 NVMe SSD を 4 台ずつ搭載した(図 2(a))。従来型 NVMe SSD のレイテンシは 100μ 秒オーダーである。OS は Red Hat Enterprise Linux 7.4 でサーバ内蔵の M.2 SATA-SSD にインストールした。2 台のサーバはオンボード 1GbE および 100GbE Dual Port のネットワークカードおよび 100GbE スイッチでそれぞれ接続した(図 2(b))。サーバの BIOS の電力およびパフォーマンスオプションは性能優先の設定とした。



3.2 システム構成

図 3 に評価システム構成を示す。図 3(a)のシングル構成では 2 台のサーバに、テストプログラムと HiRDB を実装した。テストプログラムとは、検索や更新トランザクションを発行する性能評価アプリケーションである。DB サーバに搭載されている低レイテンシ I/O デバイス及び従来型 NVMe SSD にはそれぞれ、索引や表、ログ A、ログ B を格納した。HiRDB では信頼性の向上のため、ログを複数のデバイスに二重書きしている。索引はすべてメモリ上の DB バッファに載せ、表に割り当てる DB バッファサイズを表のデータ量の 1%~100%まで変化させた。

図 3(b)の HA 構成は、アクティブ DB とスタンバイ DB の 2 台の構成で評価した。評価用のテストプログラムはアクティブ DB と同一のサーバに配置した。HA 構成では NVMe over Fabrics を用いてデータを二重化した。すなわち、アクティブ DB のディスクにデータを書き込む際には、NVMe over Fabrics を用いて、スタンバイ DB の SSD にアクティブ DB と同一の内容を書き込む。NVMe over Fabrics は NVM Express, Inc. で標準化が実施されているインタフェースであり、イーサネットやファイバチャネルを用いてリモートサーバの NVMe デバイスをアクセスする [9]。今回の評価では、表 1 に示した低レイテンシ I/O デバイスの性能を阻害しないようにするため、ネットワークとして RDMA 機能を備えた 100Gb イーサネットを適用した。具体的には、Mellanox Connect X-5 VPI (100Gb Dual Port)と Mellanox SN2100 スイッチ(100Gb, 16 port)を用いて評価を実施した。

3.3 評価方法

評価方法を図 4 に示す。評価に用いる表として SID (主キー)、C1, Data1 の 3 列からなる表を 10 表作成した。それぞれの表には、SID をキーとする索引を設定した。ページサイズは、索引が 8KB、データが 24KB である。それぞれの表に 50 万件、合計で 500 万件 (24GB) のデータをロードした。索引のサイズは 10 表の合計で 155MB であった。

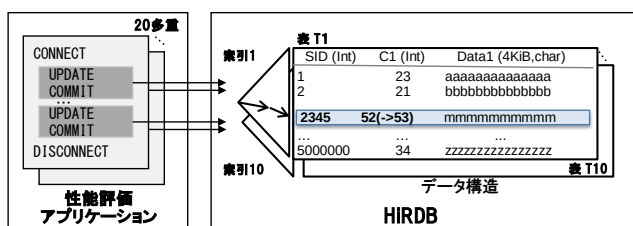


図 4 評価方法

評価用のテストプログラムから、これらのテーブルに SID を指定した 1 件検索または 1 件更新のトランザクションを 20 多重で実行し、1 秒間当たりのトランザクションスループット (tps: transaction per second) を測定した。測定では、テストプログラムと HiRDB の接続は維持したまま、1 件検索または 1 件更新ごとに COMMIT を発行した。

評価においては、低レイテンシ I/O デバイスの特性を考慮し、データベースの設定パラメータの見直しを実施した。例えば、DB のダーティバッファを遅延書き込みするデフォードライト機能を OFF にした。遅延書き込みはダーティな DB バッファをあらかじめストレージに書き込むことで、トランザクション実行中にダーティページの書き出しが発生することを抑える役割を果たす。しかし、低レイテンシ I/O デバイスでは、ダーティページの書き出し処理の影響は小さく、むしろ、遅延書き込みに起因する DB バッファ排他待ちの発生の影響のほうが大きい。この他、排他処理におけるスピン待ちの回数やスリープ時間の調整などを実施した。

4 評価結果

4.1 シングル構成

図 5 および図 6 にシングル構成における検索及び更新トランザクションの性能評価結果のグラフをそれぞれ示す。横軸がデータ領域の DB バッファヒット率、縦軸がトランザクションのスループット(tps)である。青の実線が低レイテンシ I/O デバイスを用いた場合、赤の破線が従来型 NVMe SSD を用いた場合の性能を示す。

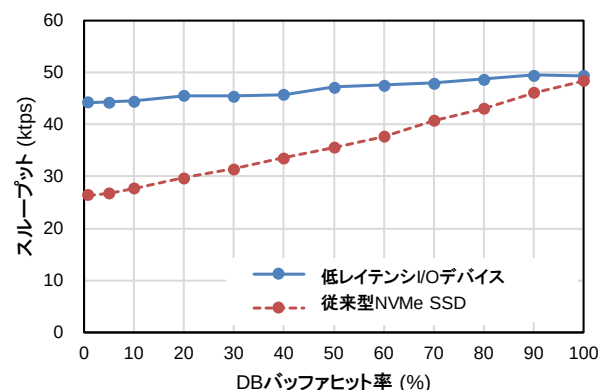


図 5 検索トランザクション性能

図 5 に示す検索トランザクション性能では、グラフ右端の 100% ヒットのオンメモリ構成では SSD への I/O が発生しないため、いずれの SSD でもほぼ同等のスループットとなる。一般的に DB バッファサイズを小さくしてヒット率が低下するにつれ、SSD からのデータ READ が増加し、性能が低下する。しかし、低レイテンシ I/O デバイスを用いた場合には、DB バッファヒット率 1% 時においても 44ktps と 100% ヒットのオンメモリ構成の約 9 割の性能が得られた。これに対して、従来型 NVMe SSD を用いた場合には、DB バッファヒット率 1% 時において、26ktps と 100% ヒット時の 54% の性能に低下した。

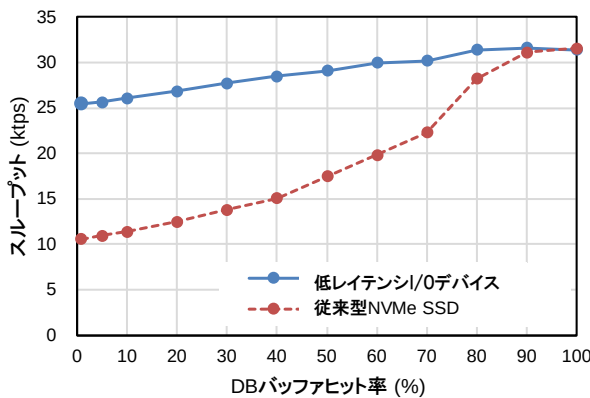


図 6 更新トランザクション性能

図 6 に示す更新トランザクションでは、DB バッファヒット時には更新ログ WRITE (2 回) の I/O が発生する。DB バッファミス時には、①ダーティページ追い出しのためのデータ WRITE、②更新行取得のためのデータ READ、③更新ログ WRITE (2 回) の計 4 回の I/O が発生する。低レイテンシ I/O デバイスの場合には、DB バッファヒット率 1% 時においても 25ktps と 100% ヒットのオンメモリ構成の 8 割以上の性能が得られたが、従来型 NVMe SSD の場合には、DB バッファヒット率 1% 時において、11ktps と 100% ヒット時の約 34% の性能に低下した。

本評価結果から、低レイテンシ I/O デバイスを適用した場合、DB バッファヒット率を 1% としても、100% ヒットのオンメモリ構成と比較して、8 割程度の性能が確保できることが確認できた。また、I/O レイテンシが 100 μ 秒オーダーの従来型 NVMe SSD と比較して、検索トランザクションで 1.7 倍、更新トランザクションで 2.4 倍の性能を確認できた。

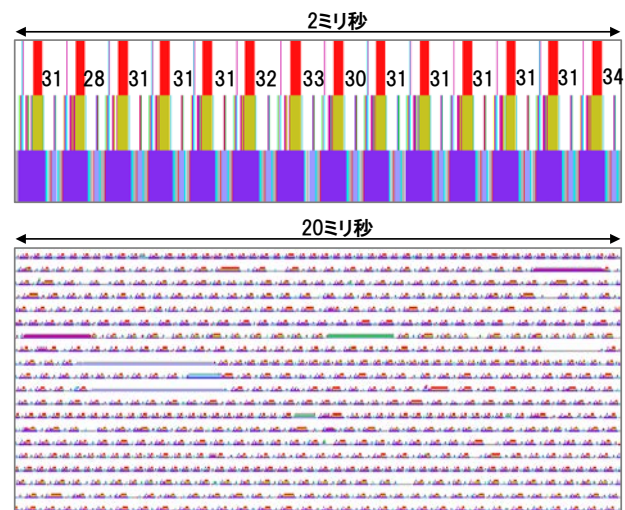
上記評価結果に対して、I/O 処理時間短縮の観点から、トランザクション処理の実行トレースを取得して検証を実施した。

図 7 は検索トランザクションにおける実行トレースである。トレースは、低レイテンシ I/O デバイスおよび従来型 NVMe SSD についてそれぞれ取得した。測定条件は、DB バッファヒット率 1% で、トランザクションの多重度は 1 多重及び 20 多重とした。トレースの横軸は経過時間を示す。20 多重のトレースはトランザクション毎のトレースを 20 個、縦に並べて表示している。各トレースの最下段は OS から見た全体の実行時間である。DB 処理が紫色、クライアントとの通信処理が灰色である。2 段目は DB 処理を示し、3 段目が I/O 処理を示す。最上段の赤色が SSD からの READ を示し、数値が I/O 処理時間 (μ 秒) を示す。

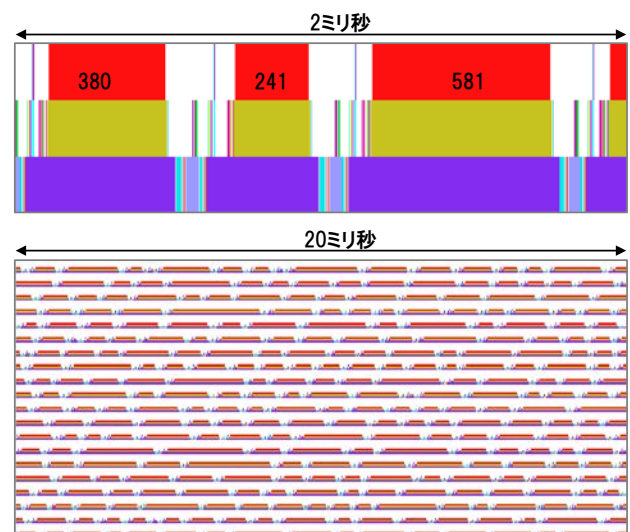
1 多重の検索トランザクションの処理内訳を見ると、DB バッファミスに起因するデータページの READ が全体の処理時間に占める割合が低レイテンシ I/O デバイスでは約 2 割であるの

に対して、従来型 NVMe SSD の場合には、5 割以上となっている。そのため、100% ヒットでデータページの READ が発行されないオンメモリ構成と比較した場合、前者は 2 割の性能低下にとどまり 8 割の性能が確保できるのに対して、後者は 5 割以下の性能に低下する。また、SSD からの 24KB のデータページ READ 時間が低レイテンシ I/O デバイスの場合は 30 μ 秒強で安定しているのに対して、従来型 NVMe SSD では、数百 μ 秒で大きくばらついており、トランザクション処理のレイテンシ性能が安定しない。

さらに、20 多重のトレースグラフ全体を見ると、低レイテンシ I/O デバイスが全体的に排他処理や通信処理ネックになっているのに対して、従来型 NVMe SSD のトレースグラフは READ を示す赤色が目立っており、I/O 処理ネックになっていることが確認できる。



(a) 低レイテンシ I/O デバイス



(b) 従来型 NVMe SSD

図 7 検索トランザクション実行トレース

20 多重時の CPU 処理時間は、排他処理や通信処理を含めて約 400 μ 秒であった。一方、I/O 時間は、低レイテンシ I/O デバイスが約 30 μ 秒、NVMe SSD が約 400 μ 秒であった。図 1 の机上見積りの計算式から、DB バッファヒット率 1% 時の低レイテンシ I/O デバイスおよび従来型 NVMe SSD のオンメモリ相対性能は、それぞれ 93%、50% と推定でき、この推定値は、図 5 で示した値と合致した。

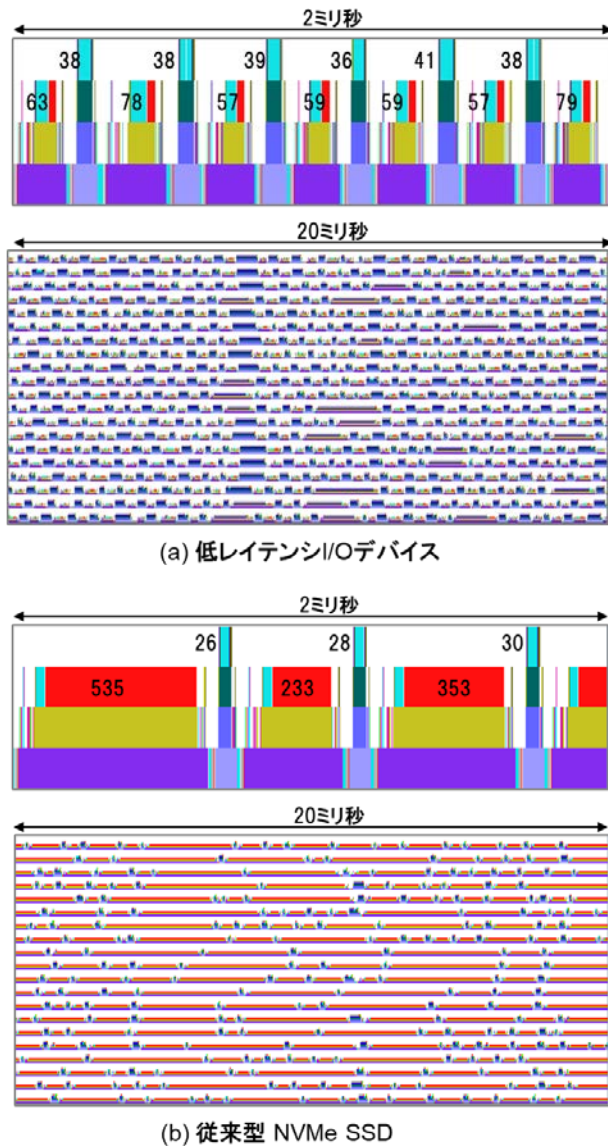


図 8 更新トランザクション実行トレース

図 8 は更新トランザクションにおける実行トレースである。測定条件は、検索トランザクションと同様、DB バッファヒット率 1% で、トランザクションの多重度は 1 多重及び 20 多重とした。トレースの横軸は経過時間を示す。各トレースの最下段は OS から見た全体の実行時間である。紫色が DB 処理、灰色がクライアントとの通信処理を示す。2 段目は DB 処理のトレースである。更新トランザクションの場合、COMMIT 時に更新ログを出力する。このため、黄色で示す UPDATE 処理と青色で示す COMMIT 処理の 2 つの DB トレースで 1 トランザクションを表す。UPDATE 処理の 3 段目は I/O 処理を示す。水色が WRITE、赤色が READ を示す。各 I/O 処理に示されている数値は当該箇所における I/O 処理時間の合計 (μ 秒) である。前節で述べたように、UPDATE 処理では、まず DB バッファ確保のため、ダーティページの追い出しが実行され、その後、更新ページの READ が実行される。COMMIT 処理の 3 段目はログライタの層であり、実際のログ出力は 4 段目で示している。HiRDB では信頼性確保のため、ログを 2 重書きするため、2 回の WRITE が実行されている。今回の更新トランザクションでは 1 回のログ出力量は 2KB 程度である。

低レイテンシ I/O デバイスの場合は UPDATE 処理の I/O に要する時間は、WRITE と READ の合計で 70~80 μ 秒、COMMIT 処理に要するログ WRITE は 2 回の合計で 60 μ 秒程度と安定している。その結果、更新トランザクションに占める I/O 時間は全体の 1/4 程度にとどまる。一方、従来型 NVMe SSD では、WRITE 時間は 30~40 μ 秒程度と安定しているのに対して、READ 時間は数百 μ 秒と検索トランザクションと同様、大きくばらつき、更新トランザクションに占める I/O 時間は全体の半分以上となる。さらに、従来型 NVMe SSD では READ と WRITE を多重で同時実行すると READ の応答時間が長時間化する傾向がある。そのため、20 多重実行のトレースを見ると、READ 時間がさらに増加し、長いもので数ミリ秒要していることがわかる。一方、低レイテンシ I/O デバイスの場合は、20 多重実行でもその応答性能には大きな変化はない。

本評価結果から、低レイテンシ I/O デバイスを適用した場合は、DB バッファミスに伴う I/O 処理時間がトランザクション処理全体に占める割合が 1~2 割程度と小さいため、100% ヒットのオンメモリ構成の性能の 8 割程度を確保できることが分かった。そのため、DB バッファヒットの有無に依存しない安定した性能を確保することができる。さらに、従来型 NVMe SSD では READ と WRITE が多重で混在すると READ 処理時間が長大化し、そのばらつきが大きくなる傾向があったが、低レイテンシ I/O デバイスでは READ と WRITE が多重で混在しても I/O 処理性能は大きく影響を受けない。そのため、更新トランザクションを多重に実行しても安定した性能を確保することができる。

4.2 HA 構成
検索トランザクションではディスクに対する書き込みが発生しないため、HA 構成の評価は更新トランザクションのみを対象とした。シングル構成との比較のため、ログのみをローカルに二重書きするシングル構成での評価も実施した。4.1 節のシングル構成との違いは、評価用のテストプログラムを DB と

同一サーバに配置した点である。

図 9 に評価結果を示す。トランザクションの多重度は 20 である。青の実線がシングル構成、赤の実線が HA 構成の結果を示す。いずれも I/O デバイスには、低レイテンシ I/O デバイスを利用した。灰色の破線は、従来型 NVMe SSD を利用した HA 構成の評価結果である。

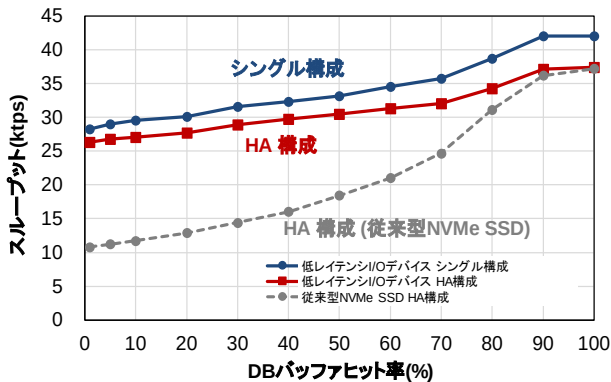


図 9 HA 構成における更新トランザクション性能

低レイテンシ I/O デバイスを用いた評価結果では、HA 構成のスループットはシングル構成の 88~93% となり、スタンバイ DB へのデータの複製のオーバーヘッドが 1 割程度であることを確認した。また、DB バッファヒット率を 1% としても、100% ヒットのオンメモリ構成と比較して 70% の性能を示した。これに対して、従来型 NVMe SSD を用いた HA 構成では、DB バッファヒット率が 1% の時は性能が 30% に低下する。

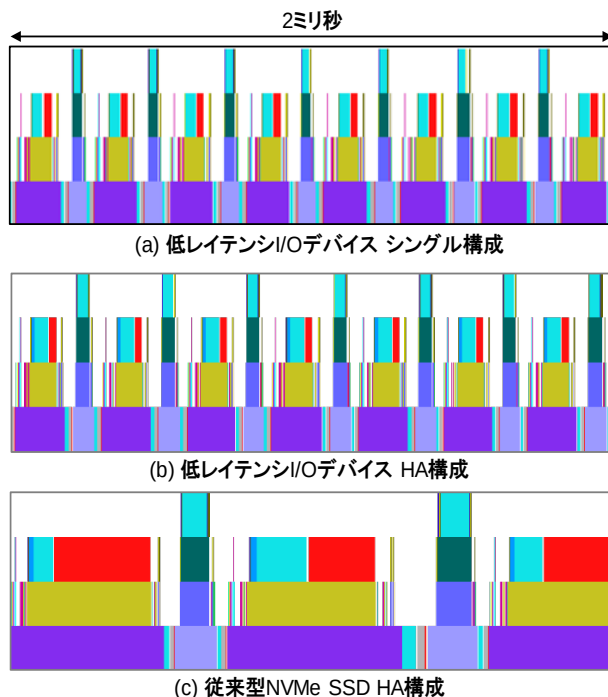
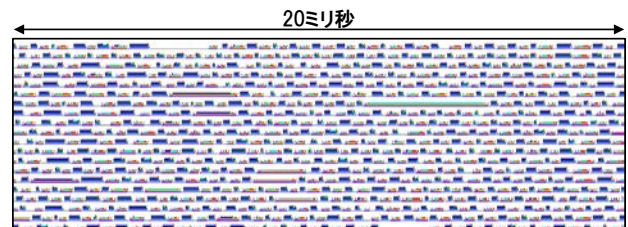
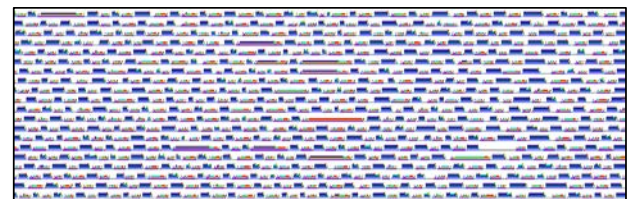


図 10 更新トランザクション実行トレース (1 多重)

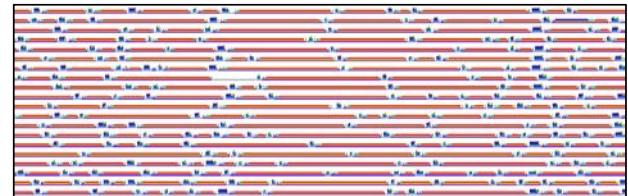
図 10 に DB バッファヒット率を 1% としたときの、1 多重実行時のトレースを示す。(a) が低レイテンシ I/O デバイスを用いたシングル構成、(b) が低レイテンシ I/O デバイスを用いた HA 構成、(c) が従来型 NVMe SSD を用いた HA 構成である。(a) のシングル構成と (b) の HA 構成の違いは、スタンバイ DB へのデータページの書き込み追加と、ローカルに書き込んでいたログの 1 つをスタンバイ DB への書き込みに変更する点である。これらの 2 つの処理のオーバーヘッドはトランザクション処理全体の 1 割程度であるため HA 構成はシングル構成の 9 割の性能を確保できた。一方、従来型 NVMe SSD ではシングル構成の評価と同様に I/O デバイスのレイテンシが大きく、DB バッファヒット率が小さい場合、性能低下の影響が大きい。



(a) 低レイテンシ I/O デバイス シングル構成



(b) 低レイテンシ I/O デバイス HA 構成



(c) 従来型 NVMe SSD HA 構成

図 11 更新トランザクション実行トレース (20 多重)

図 11 に DB バッファヒット率を 1% としたときの、20 多重実行時のトレースを示す。(a)(b) の低レイテンシ I/O デバイスを用いた評価結果では、1 多重実行時と同様に I/O のレイテンシは主たる性能阻害要因とはなっていない。一方、(c) の従来型 NVMe SSD では、4.1 節の評価と同様に READ と WRITE を多重で実行したことに伴う、READ の応答時間の長時間化が大きな性能の阻害要因となっている。

本評価結果から、データを二重化した HA 構成において、低レイテンシ I/O デバイスを適用した場合、シングル構成と比較して 9 割の性能を確保し、また、100% ヒットのオンメモリ構成の性能の 7 割程度を確保できることが分かった。

5 まとめ

10 μ 秒オーダーの低レイテンシ I/O デバイスとして、インテル® Optane™ DC SSD を用いたデータベースのトランザクション性能評価を実施した。シングル構成では、DB バッファヒット率が 1% の時でも 100% ヒット時の性能に対して 8 割以上の性能を確認できた。これは、DB バッファミスに伴う I/O 処理時間がトランザクション処理全体に占める割合が 1~2 割程度と小さいためである。HA 構成では、シングル構成に対して 9 割の性能を確認した。また、DB バッファのヒット率が 1% の時でも、100% ヒット時に対して 7 割の性能を確認した。このことから、DB バッファチューニングに要するコストや DB バッファに必要なメモリコストを大幅に削減することが可能となる。

今回の評価はベア環境で測定を実施した。今後、広く普及しつつある仮想環境に関しても同様の評価を行い、適用範囲の拡大を図る。

今回評価したトランザクションは、1 回あたりの処理時間が数百 μ 秒であった。そのため、図 1 のグラフに示した通り、これ以上の低レイテンシ I/O デバイスを適用してもその効果は限定的である。しかし、1 回のデータアクセスに伴う処理がより小さい Key Value Store やインメモリデータベースで用いるデータの永続化デバイスとしては、メモリスロットに装着することができる DIMM タイプの不揮発メモリなど、より低遅延の I/O デバイスの適用が効果的であると推測できる。

参考文献

- [1] L. Barroso, M. Marty, D. Patterson and P. Ranganathan, “Attack of the Killer Microseconds”, Communication of the ACM Vol.60, No. 4, pp. 48-54, 2017.
- [2] W. Effelsberg and T. Haerder, “Principles of Database Buffer Management”, ACM Transactions on Database Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 560-595, 1984.
- [3] D. Shasha and P. Bonnet, “Database Tuning: Principles, Experiments, and Troubleshooting Techniques”, Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [4] D. DeWitt, R. Katz, F. Olken, L. Shapiro, M. Stonebraker, and D. Wood, “Implementation techniques for main memory database systems”, Proc. of SIGMOD '84, pp. 1-8, 1984.
- [5] H. Garcia-Molina and K. Salem, “Main Memory Database Systems: An Overview”, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 4, No. 9, pp. 509-516, 1992.
- [6] Intel Newsroom, “Intel and Micron produce breakthrough memory technology”, <https://newsroom.intel.com/news-releases/intel-and-micron-produce-breakthrough-memory-technology/>, July, 2015.
- [7] Samsung Newsroom, “Samsung Electronics Launches 800-Gigabyte Z-SSD™ for HPC Systems and AI Applications”, [https://news.samsung.com/global/samsung-electronics-](https://news.samsung.com/global/samsung-electronics-launches-800-gigabyte-z-ssd-for-hpc-systems-and-ai-applications)

launches-800-gigabyte-z-ssd-for-hpc-systems-and-ai-applications, Jan, 2018

- [8] NVM Express, “NVM Express Revision 1.3”, http://nvmexpress.org/wp-content/uploads/NVM_Express_Revision_1.3.pdf, May, 2017.
- [9] NVM Express, “NVM Express over Fabrics Revision 1.0”, http://nvmexpress.org/wp-content/uploads/NVMe_over_Fabrics_1_0_Gold_20160605-1.pdf, Jun, 2016.
- [10] E. F. Codd. A relational model for data for large shared data banks. *Comm. ACM*, 13(6): 377-387, 1970.

商標について:

HITACHI, HIRDBは、株式会社日立製作所の商標または登録商標です。インテル, Xeon, Optaneは、アメリカ合衆国および / またはその他の国における Intel Corporation の商標です。その他記載の会社名, 製品名は、それぞれの会社の商標もしくは登録商標です。尚、個々のコンテンツにおいて、個別に商標が示されている場合、又はそれを示すコンテンツにリンクしている場合には、当該情報が優先されます。