ICM研究会

2022/07/08

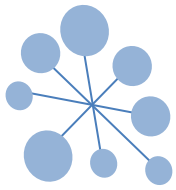
[奨励講演] vhost-userにおけるキャッシュ作用の究明に向けた包括的評価

○竹谷 大地† 川島 龍太†

中山 裕貴†† 林 經正†† 松尾 啓志†

† 名古屋工業大学大学院

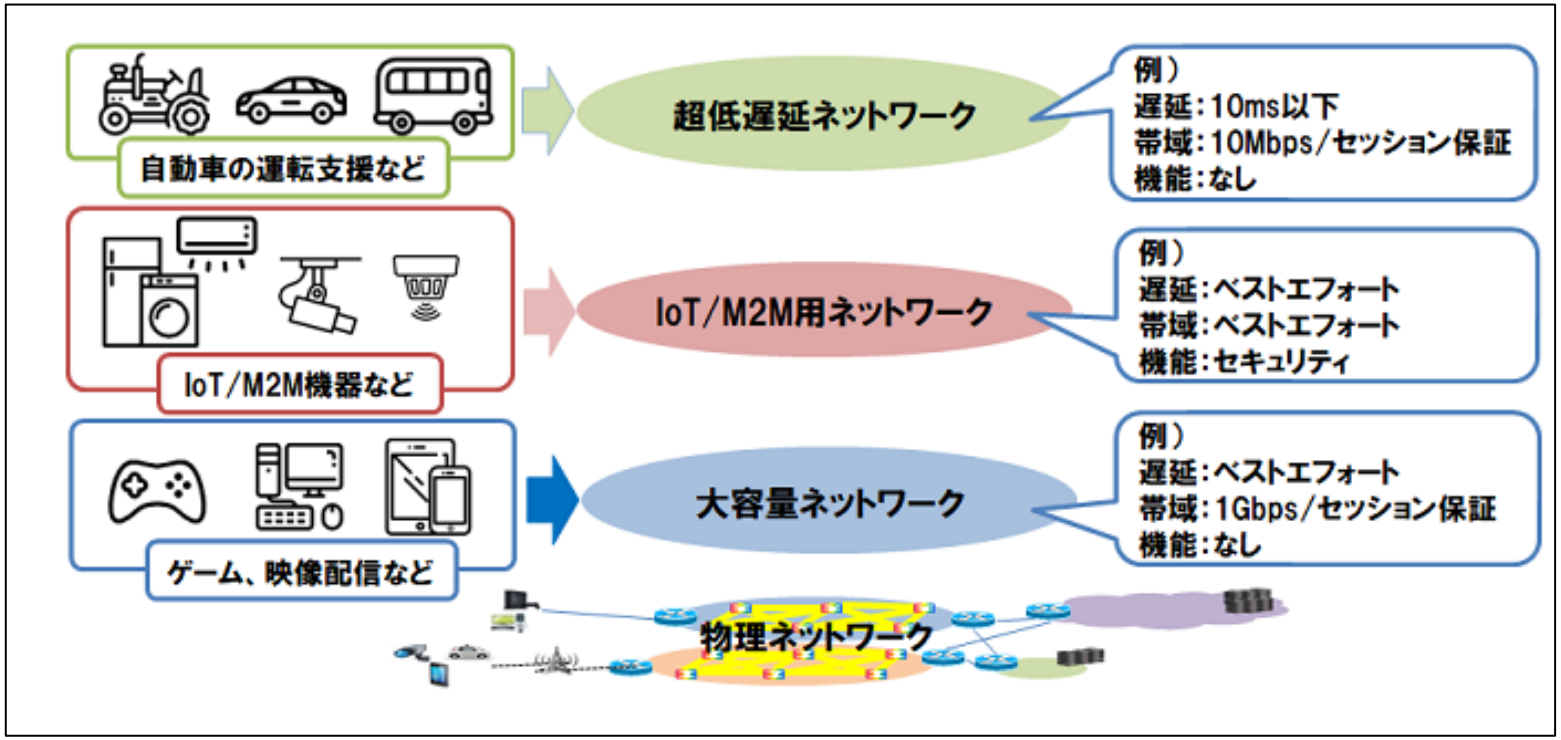
†† 株式会社ボスコ・テクノロジーズ



目次

- 研究背景
- 関連研究
- 評価内容
  - 使用するプログラム
  - 評価項目
- 評価結果
  - キャッシュ利用効率と性能の相関関係
  - 性能向上を実現した要因の特定
  - 仮想I/Oの更なる性能向上に必要な仕様の検討

クラウドネイティブなネットワーク



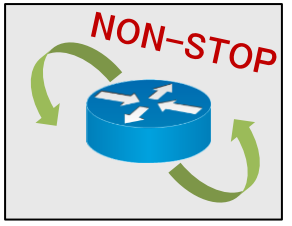
† NTT 研究開発.「ネットワークスライシング技術～5G時代、お客様の要件を満たす新しいネットワークの構築を目指して～ 」.
https://www.rd.ntt/research/NW99-324.html

- コアネットワークの運用を自動化
- 迅速, 柔軟な構成変更

パケット処理性能が低い
（6Gにおける性能要求の10分の1）

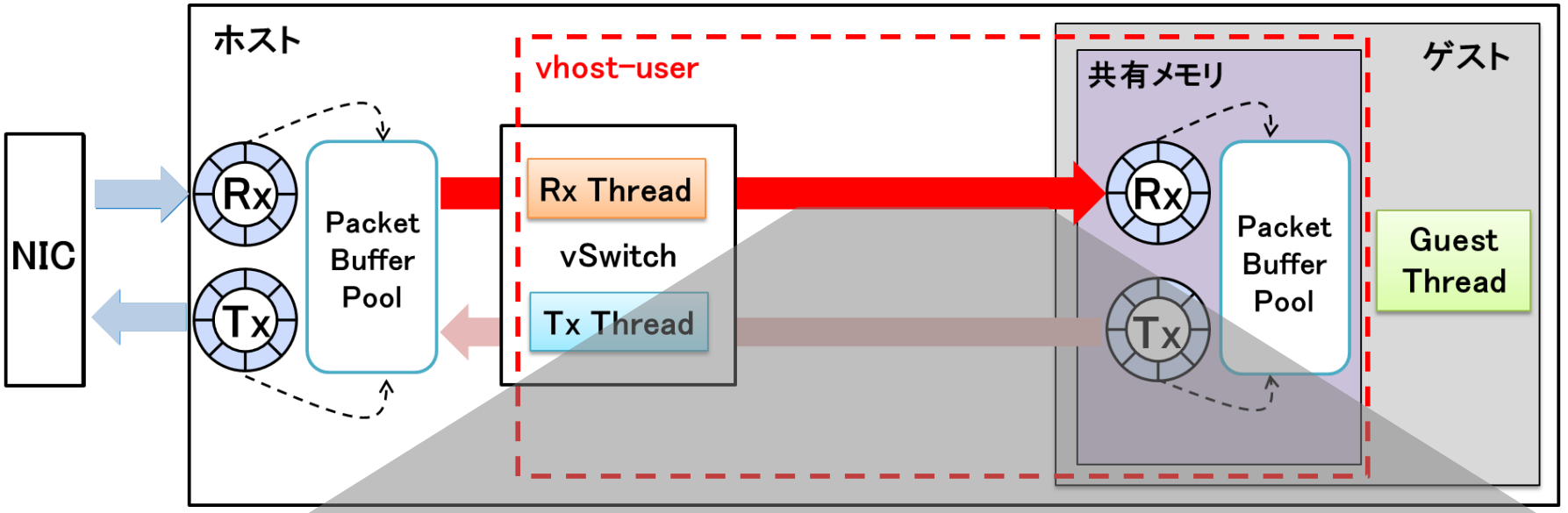
Cloud-Native Network Function

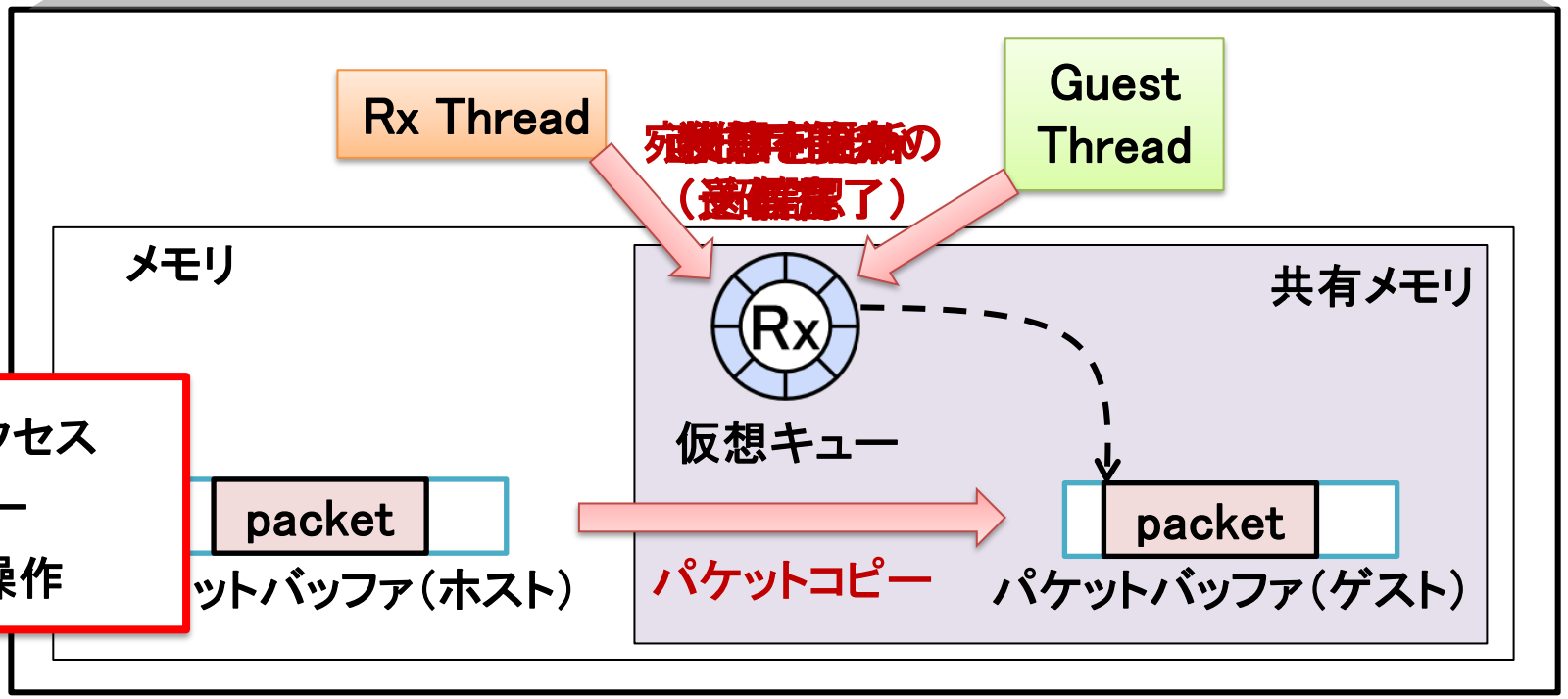
マルチテナント化が可能



機能更新時も継続稼働

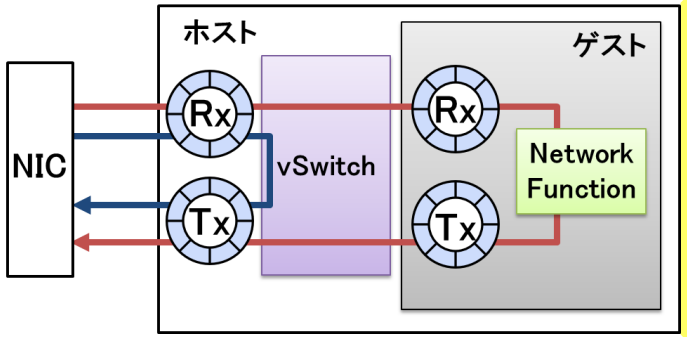
仮想環境におけるパケット処理

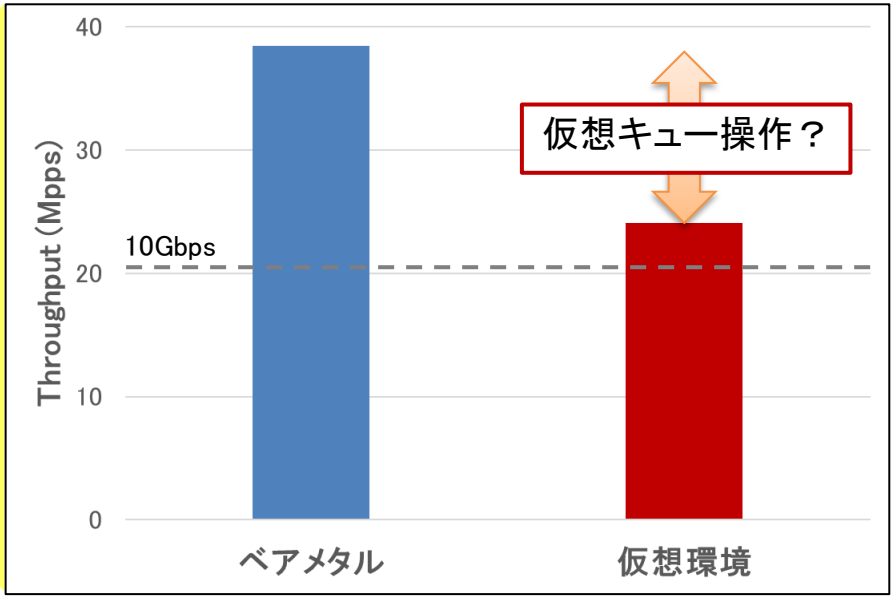




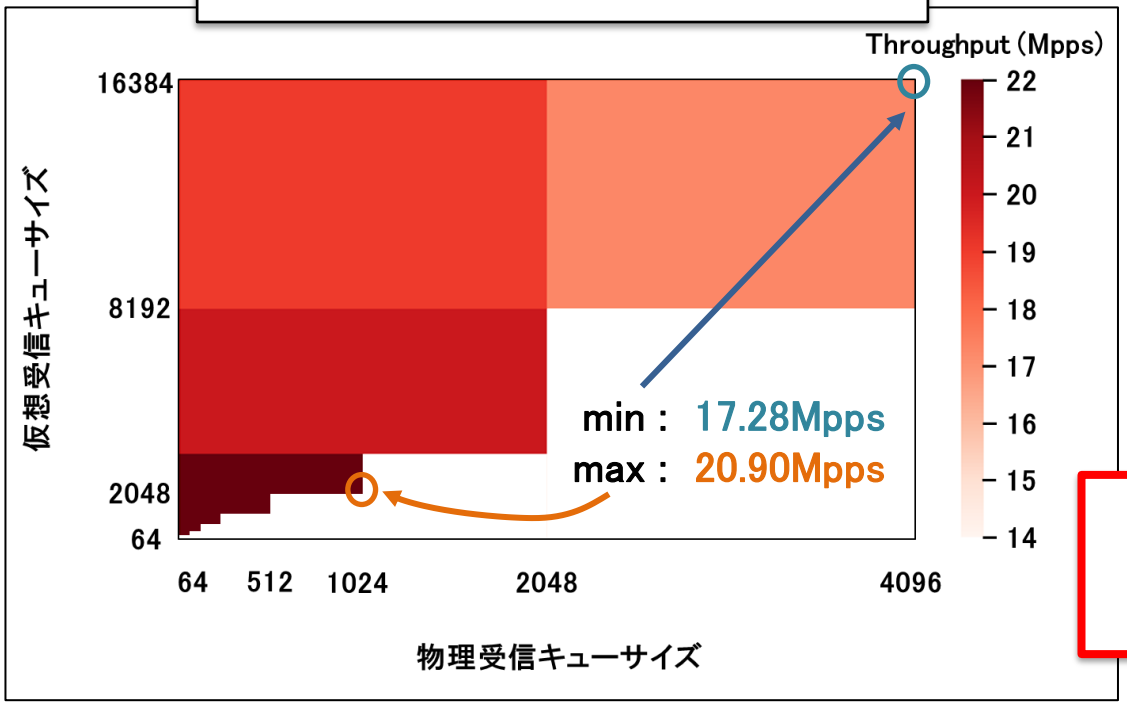
多数のメモリアクセス
- パケットコピー
- 仮想キュー操作

ベアメタルとのI/O性能差





仮想キューサイズによる性能差

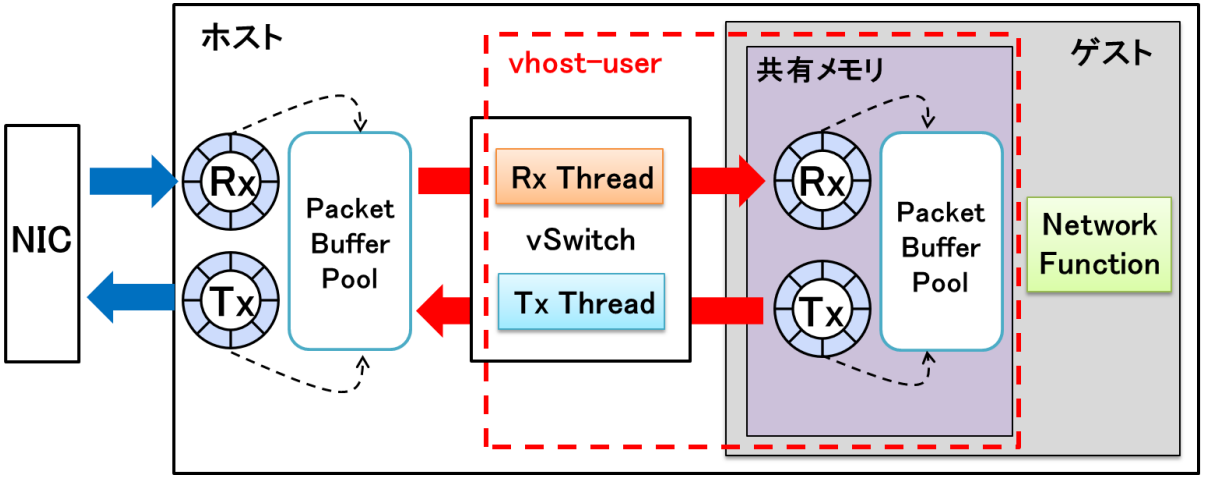


† R. Kawashima, “Software Physical/Virtual Rx Queue Mapping toward High-Performance Containerized Networking”, IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021

仮想受信キューサイズ	L1 Miss Latency
1024	5.1ns
8192	5.7ns

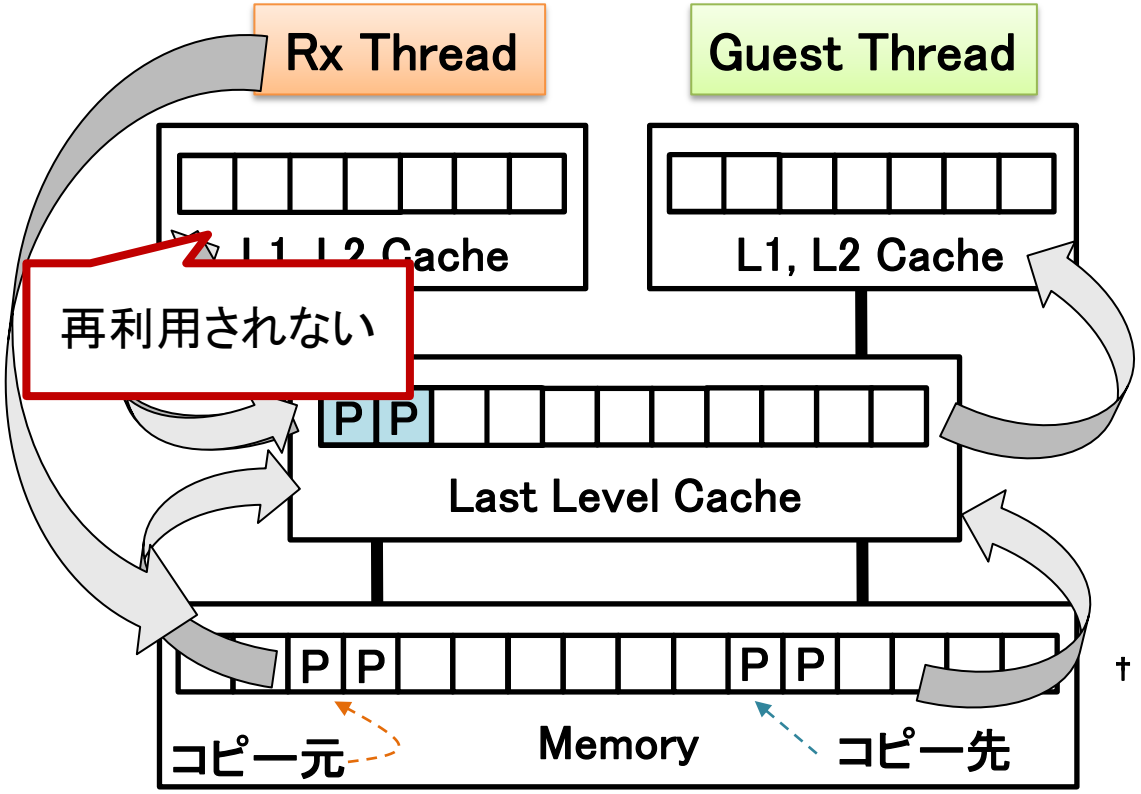
キャッシュ利用効率が
更なる性能向上の鍵？

パケットコピーによるキャッシュ汚染解消



Non-temporal命令

- キャッシュを利用しない load/store
- メモリに対して直接処理を実行



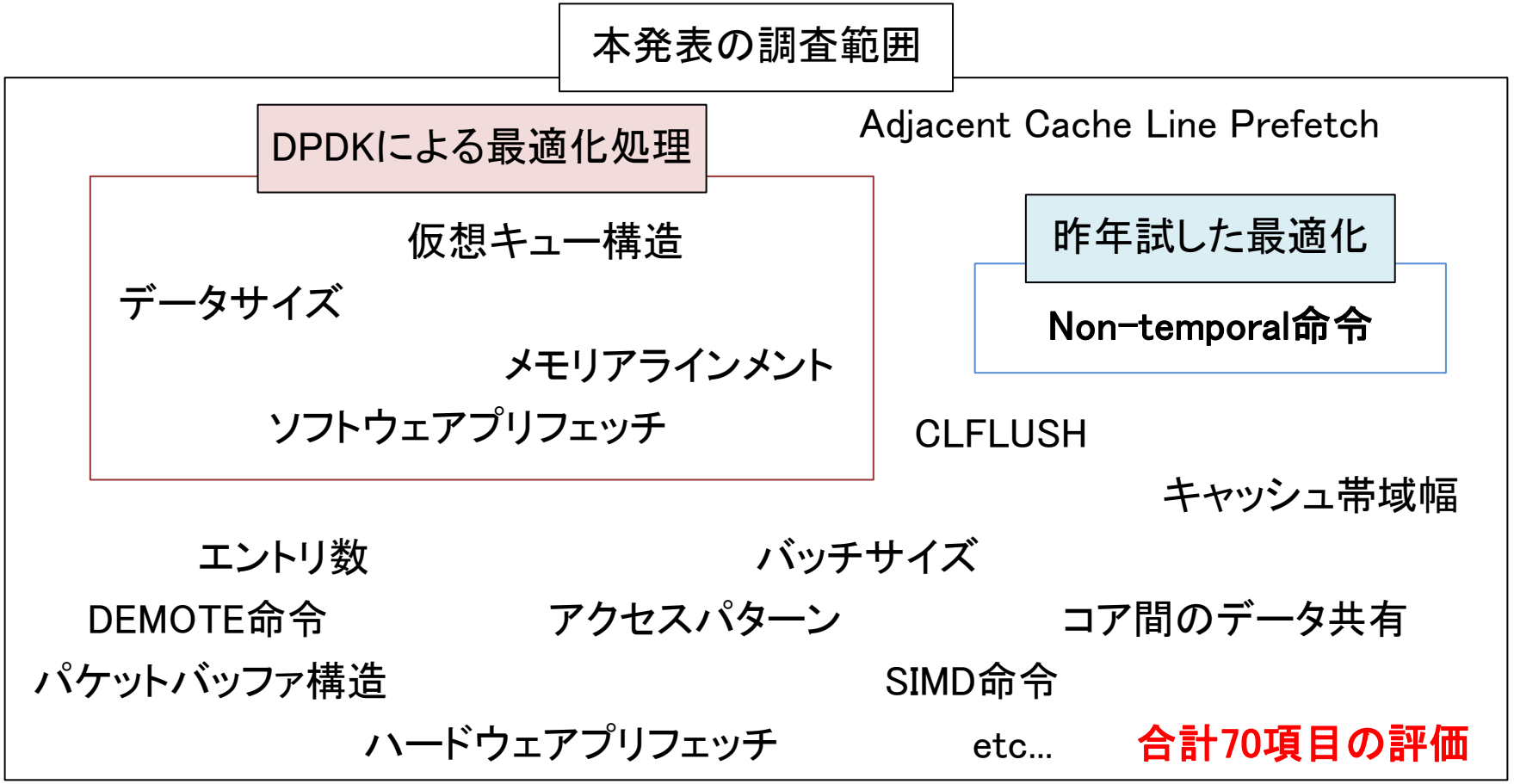
○ キャッシュヒットレートの向上
× スループットは変化せず

- Rxスレッドはボトルネックではなかった？
- メモリアクセス等の要因に相殺された？
- キャッシュ汚染の影響は小さい？

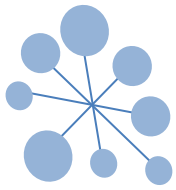
† 竹谷他，“仮想 I/O のキャッシュ汚染解消に向けた Non-Temporal命令の有効性評価”，信学技報 (ICM2021-16)

本発表の位置付け

- 仮想I/O性能とキャッシュ利用効率の関連性を解明



- ベアメタルと同等の性能を実現可能か
- 仮想I/Oのボトルネックはどこか

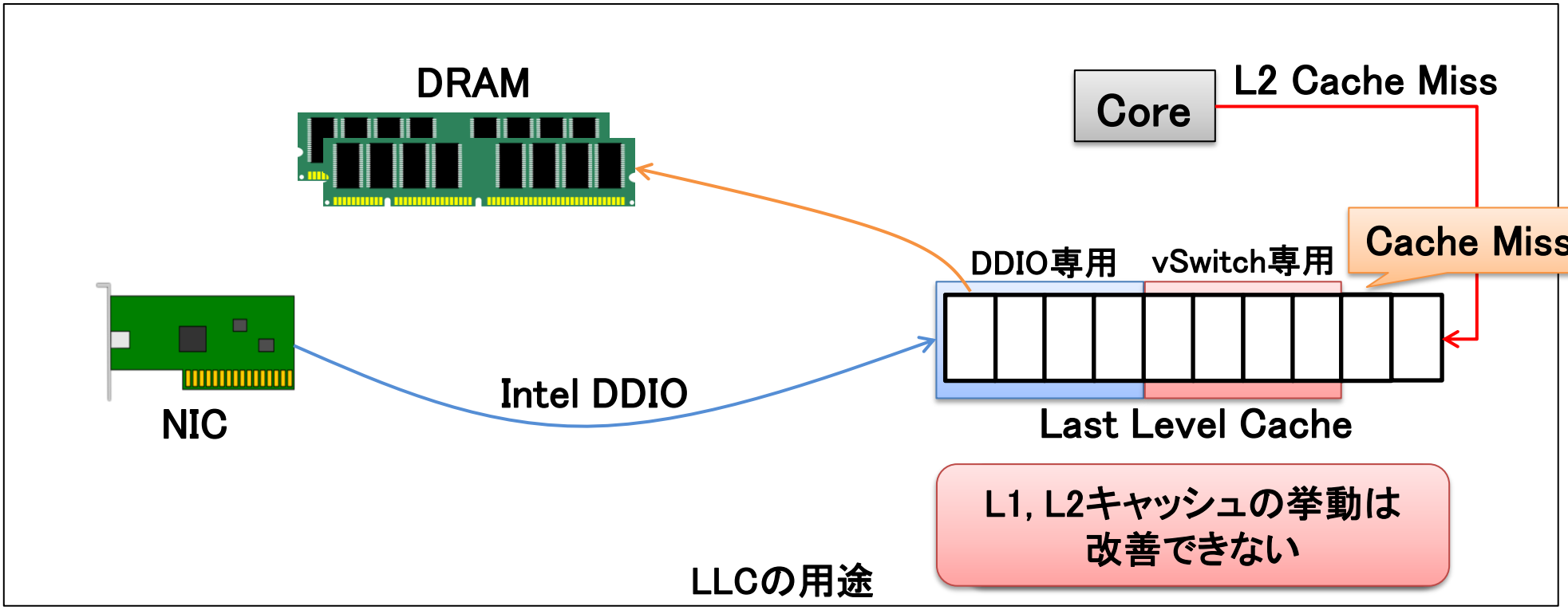


目次

- 研究背景
- **関連研究**
- 評価内容
  - 使用するプログラム
  - 評価項目
- 評価結果
  - キャッシュ利用効率と性能の相関関係
  - 性能向上を実現した要因の特定
  - 仮想I/Oの更なる性能向上に必要な仕様の検討

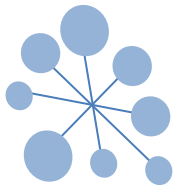
ベアメタル環境におけるLLCの制御

- アプリケーションごとにLLCを排他的に割り当て
  - パケットと他コアのキャッシュデータとのLLC競合を防止



† A. Farshin, A. Roozbeh, G.Q.M. Jr., and D. Kostić,
"Reexamining direct cache access to optimize i/o intensive applications for multi-hundred-gigabit networks", USENIX ATC 20

†† S. Thomas, R. McGuinness, G.M. Voelker, and G. Porter,
"Dark packets and the end of network scaling", ANCS '18

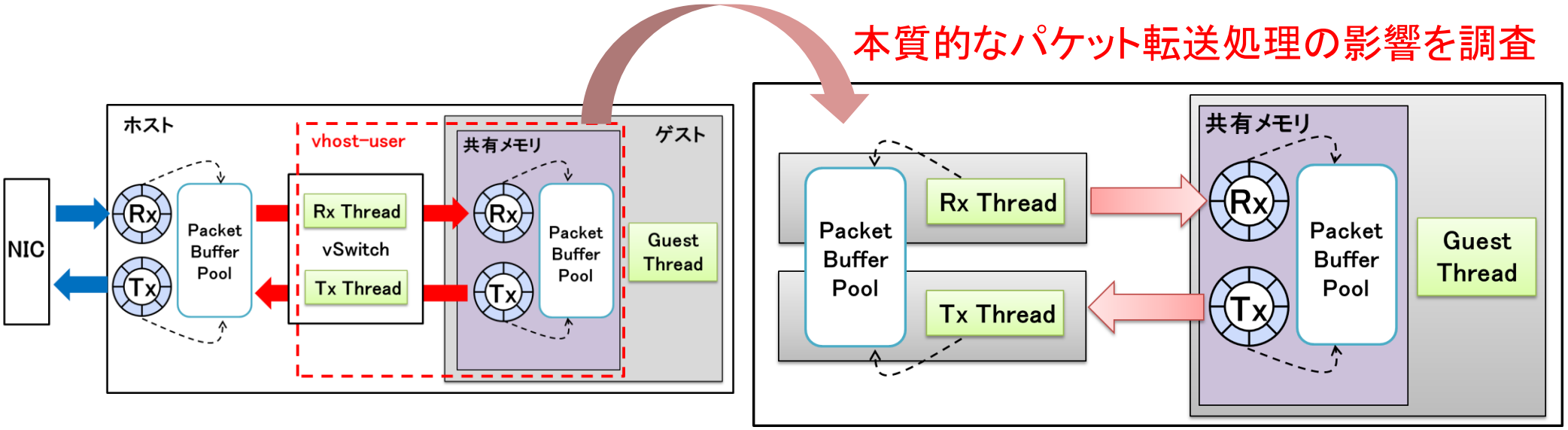


目次

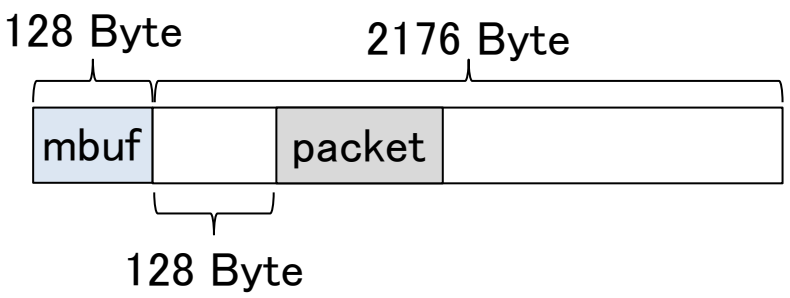
- 研究背景
- 関連研究
- **評価内容**
  - 使用するプログラム
  - 評価項目
- 評価結果
  - キャッシュ利用効率と性能の相関関係
  - 性能向上を実現した要因の特定
  - 仮想I/Oの更なる性能向上に必要な仕様の検討

vhost-user（DPDK）のモデル化

本質的なパケット転送処理の影響を調査

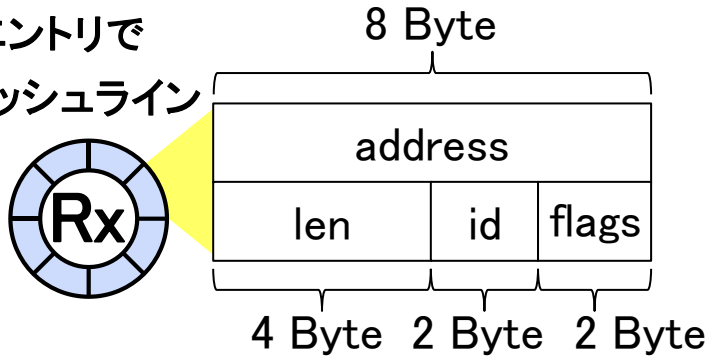


パケットバッファの構造



キャッシュラインの使用本数

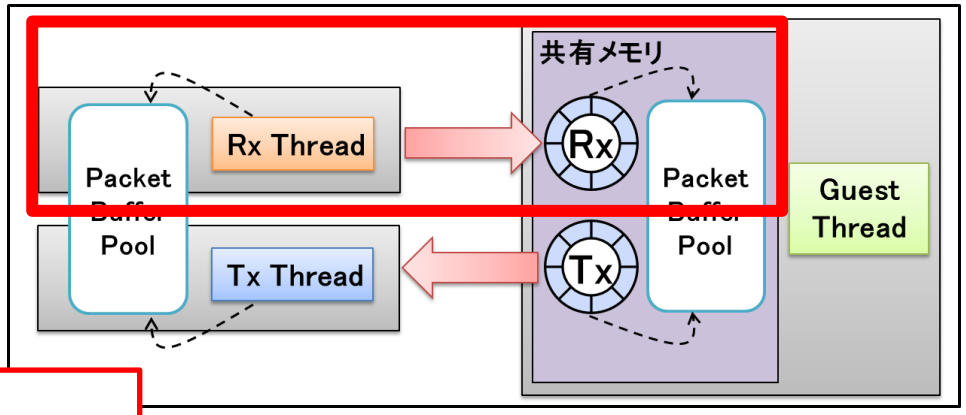
4つのエントリで
1本のキャッシュライン



パケット処理性能（64Byte）：約14Mpps

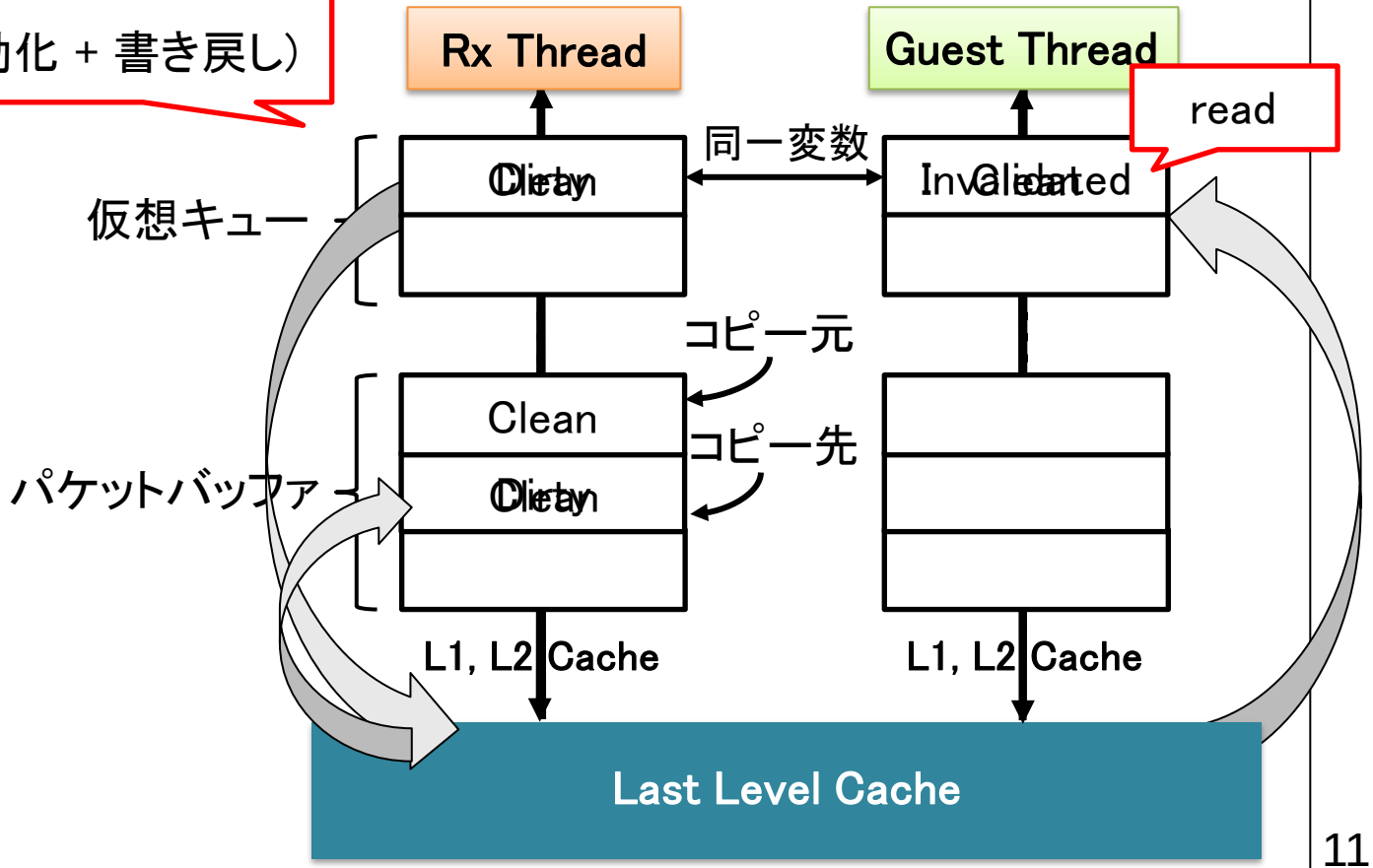
DPDKを再現した実装

プログラムにおけるキャッシュの挙動



RFO
（無効化 + 書き戻し）

Dirty：LLCとの一貫性がない
Clean：LLCとの一貫性がある



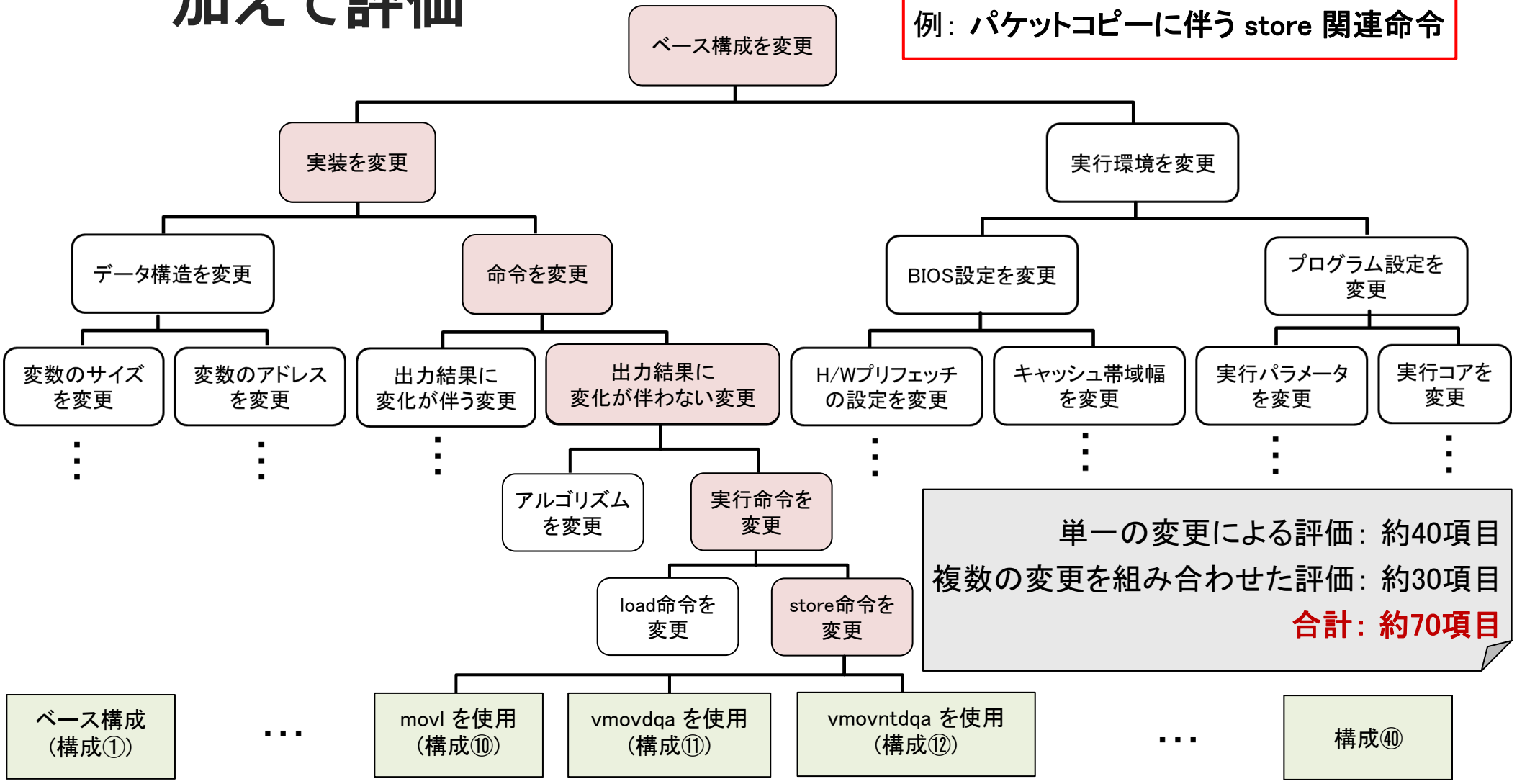
送信フロー

1. 送信可能か確認
2. パケットをコピー
3. 仮想キューを更新
4. 受信したアドレスを取得

評価項目

- DPDKを模した「ベース構成」に様々な変化を加えて評価

例：**パケットコピーに伴う store 関連命令**



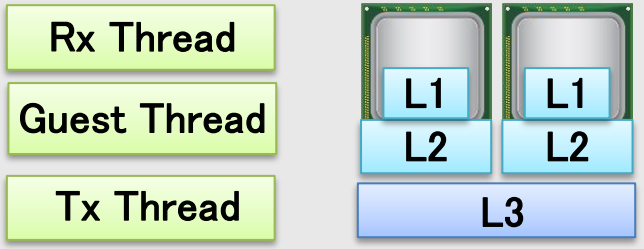
単一の変更による評価：約40項目
複数の変更を組み合わせた評価：約30項目
合計：約70項目

DPDK相当

先行研究

キャッシュ作用の解析手順

1. 各スレッドにおけるキャッシュと性能の相関を調査



2. ベース構成との性能差を生じさせた要因を特定

Non-temporal命令？

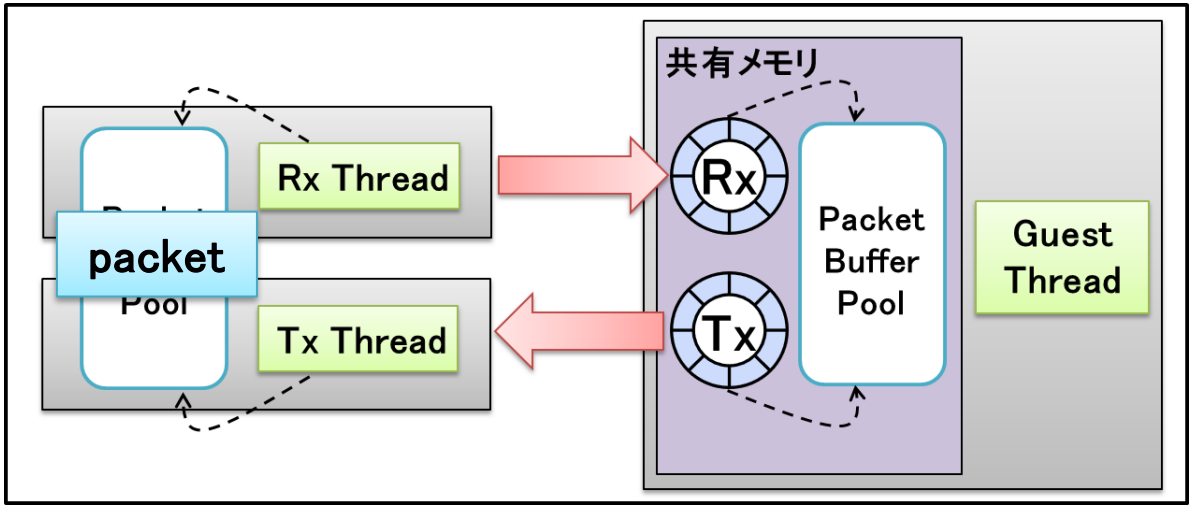
CLFLUSH？

プリフェッチ？

...

3. 更なる性能向上の実現について検討

評価環境

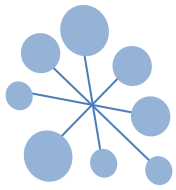


CPU	Intel Core i9-7940X CPU @ 3.10GHz 14 コア (HT 無効)
L1i Cache	32KB 8-way
L1d Cache	32KB 8-way
LFB Entries	10
L2 Cache	1024KB 16-way
Last level Cache	19712KB 11-way
memory	DDR4 2666MT/s
OS	AlmaLinux 8.5
perf	v4.18.0

測定イベントの一例

- スループット
- L1, L2, L3キャッシュへの総アクセス回数
- L1, L2, L3キャッシュの総ミス数
- プリフェッチ効率
- LFBによるストールサイクル数
- RFO（Read For Ownership）etc...

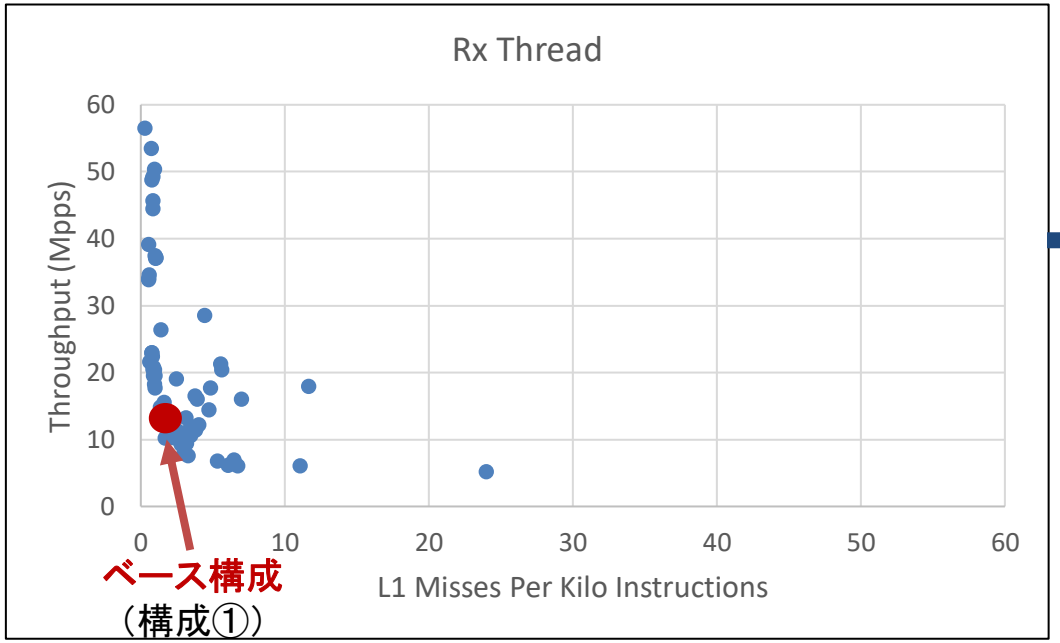
合計約20種類

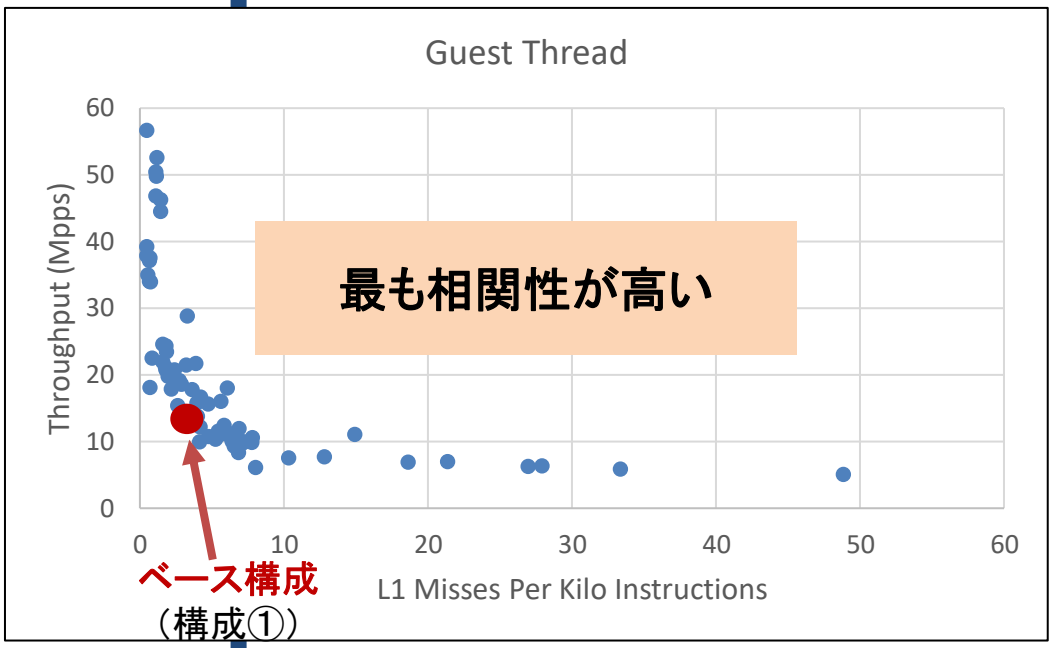


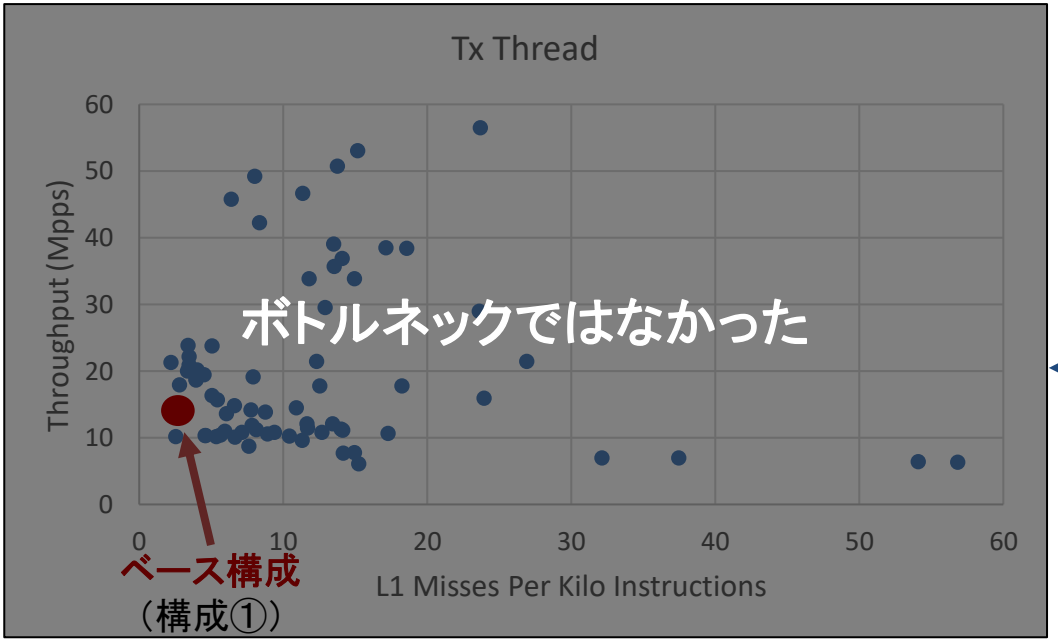
目次

- 研究背景
- 関連研究
- 評価内容
  - 使用するプログラム
  - 評価項目
- **評価結果**
  - キャッシュ利用効率と性能の相関関係
  - 性能向上を実現した要因の特定
  - 仮想I/Oの更なる性能向上に必要な仕様の検討

1．各スレッドにおける相関関係

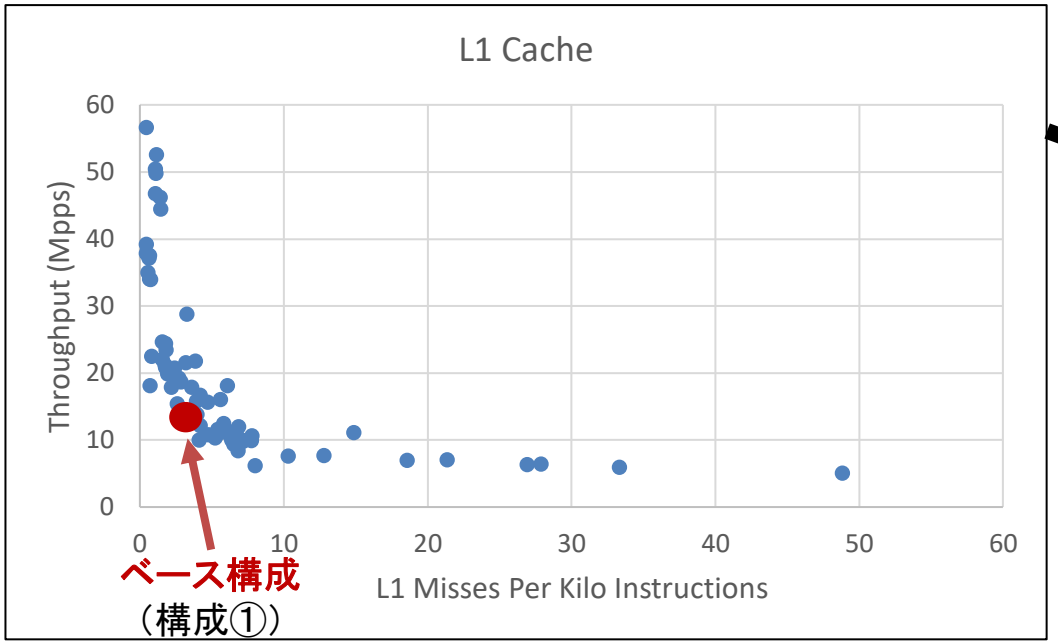


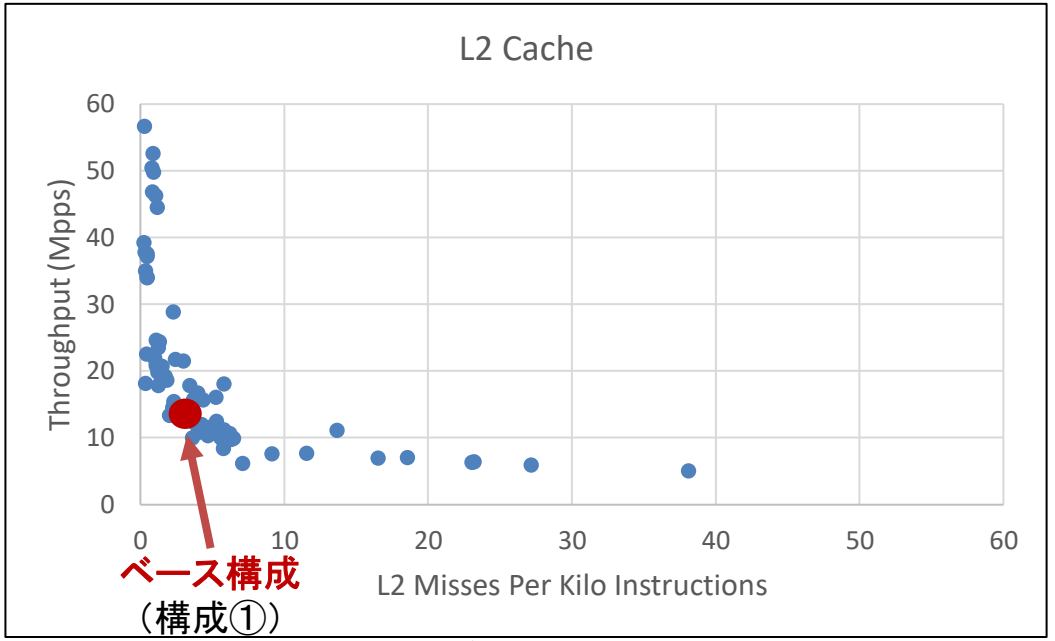


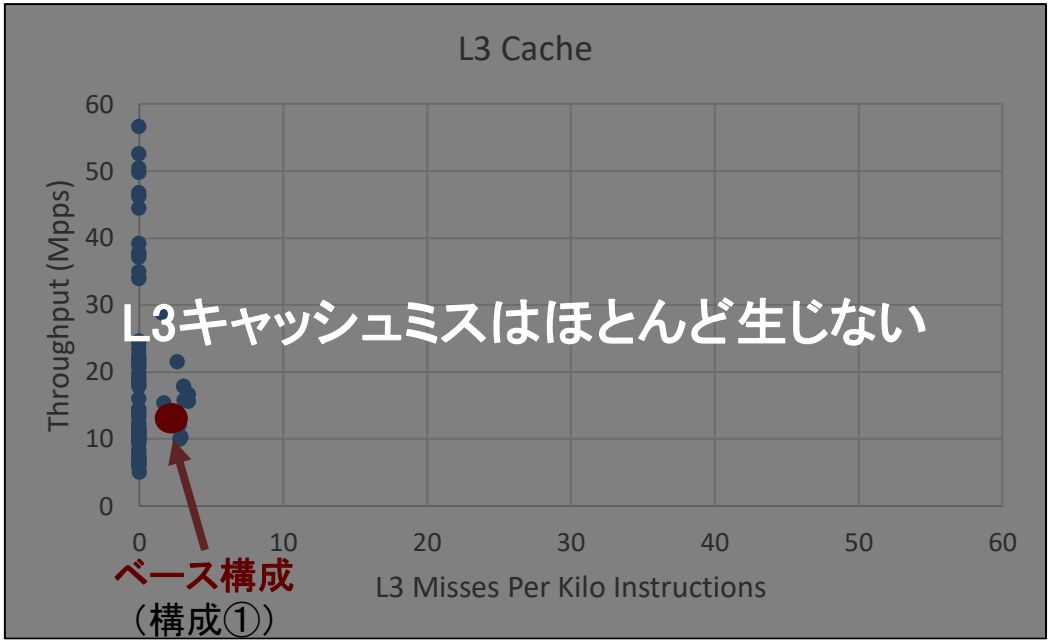


- 4～5倍の性能を実現
- ミス数と性能に指数的な関係

1．L1/L2/L3キャッシュの相関関係

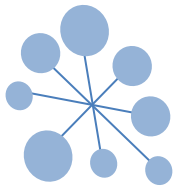






L3キャッシュミスはほとんど生じない

L1, L2キャッシュの利用効率改善が必須

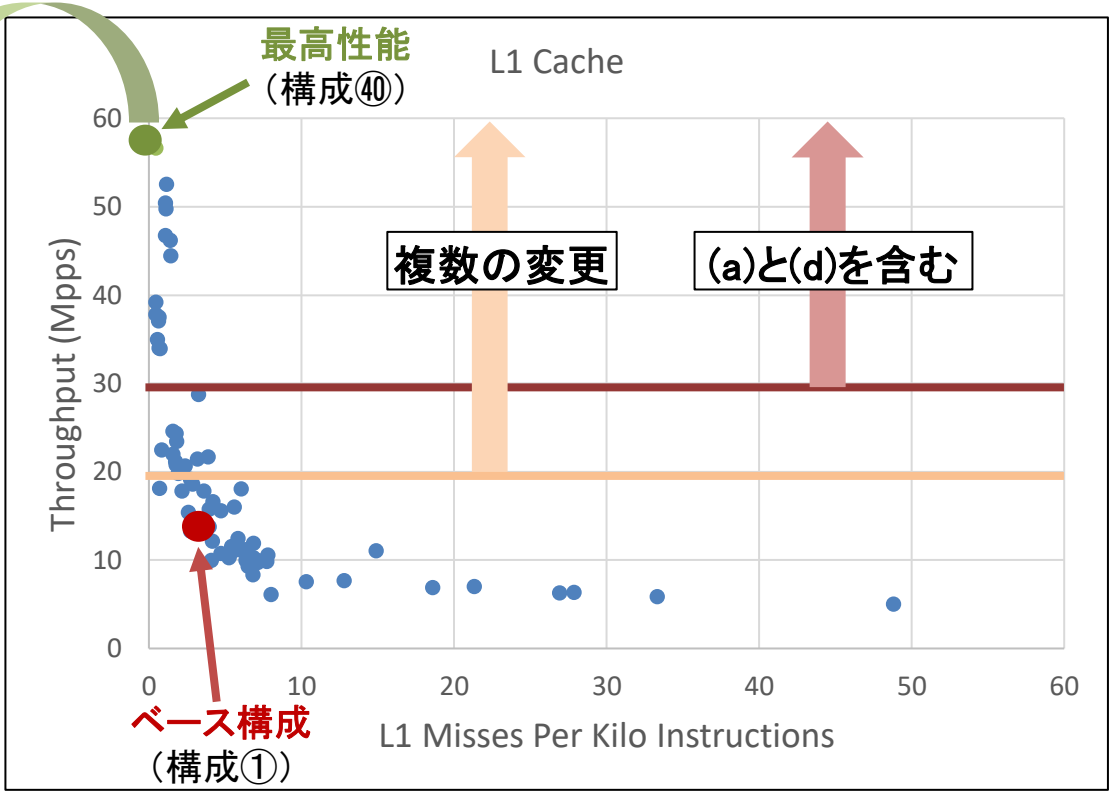


目次

- 研究背景
- 関連研究
- 評価内容
  - 使用するプログラム
  - 評価項目
- **評価結果**
  - キャッシュ利用効率と性能の相関関係
  - 性能向上を実現した要因の特定
  - 仮想I/Oの更なる性能向上に必要な仕様の検討

2. 最高性能を実現した因子

因子	概要
(a)	他 CPU コアと共有する変数が全て異なる キャッシュライン上に格納されるように配置
(b)	パケットコピー時に Non-temporal 命令を使用
(c)	Virtqueue における各エントリのサイズを 16B から 8B に縮小
(d)	Mbuf ヘッダのサイズを 128B から 0B に縮小
(e)	パケットデータ格納用領域を 2176B から 64B に縮小
(f)	ハードウェアプリフェッチを無効化



・最適化手法の組み合わせが重要
・30Mpps以上の実現には(a), (d)が必須

(a), (d)を対象に性能向上の要因を分析

2.（a）による性能向上

同一キャッシュラインに格納
（ベース構成）

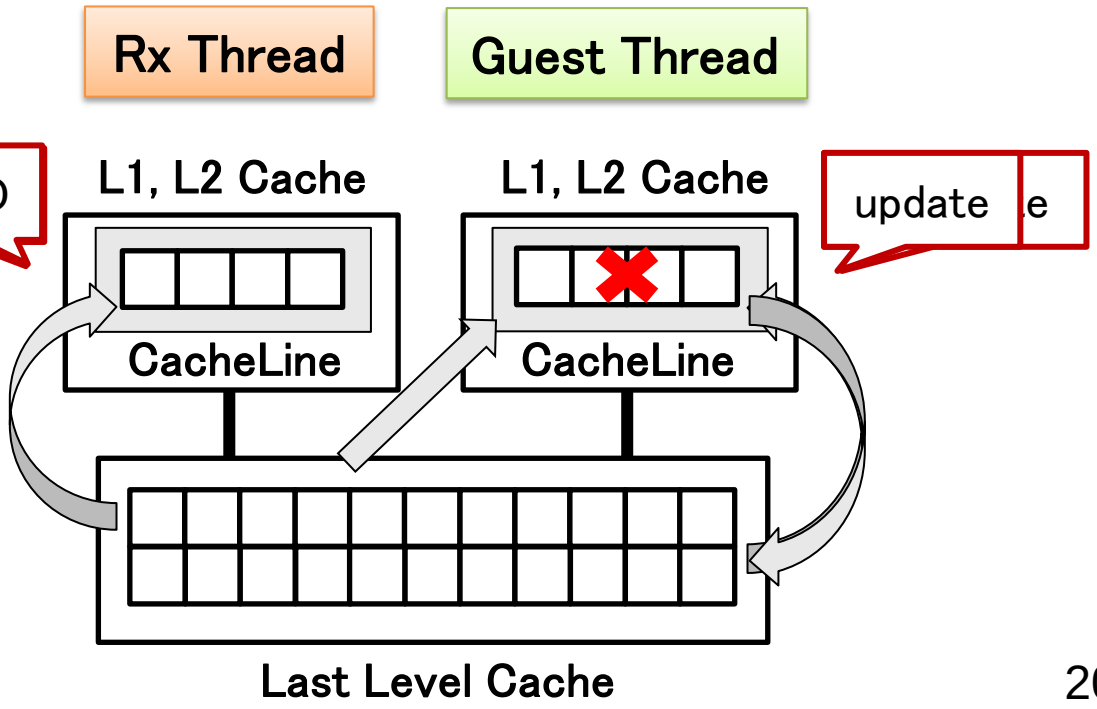
```
struct vq {
  int32_t last_avail_idx;    // Rxが更新
  int32_t last_used_idx;    // Guestが更新
  packed_desc descs[256];
};
```

異なるキャッシュラインに格納
（ベース構成 + a）

```
struct vq {
  int32_t last_avail_idx;    // Rxが更新
  packed_desc descs[256];
  int32_t last_used_idx;    // Guestが更新
};
```

因子	概要
(a)	他 CPU コアと共有する変数が全て異なる キャッシュライン上に格納されるように配置

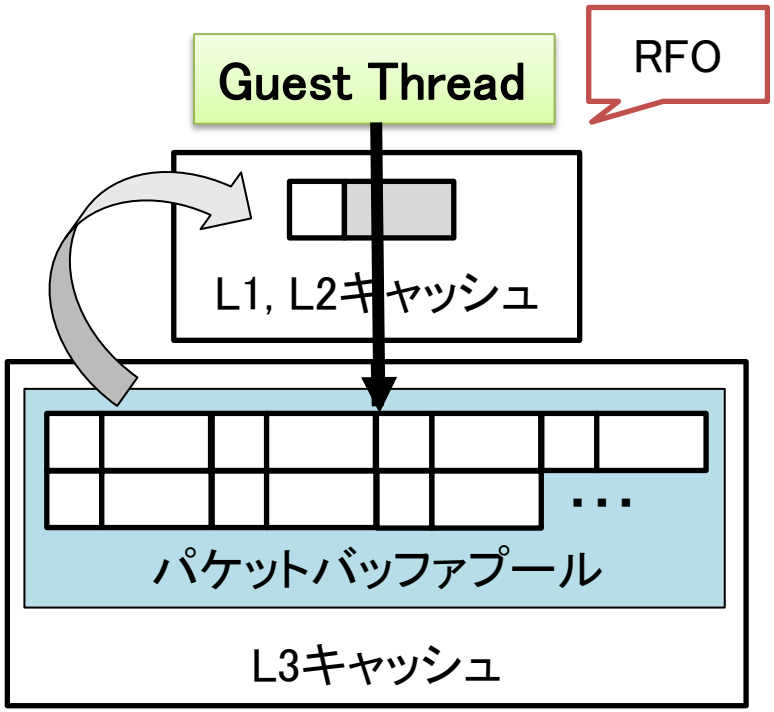
	base	(a)
L1 Misses / Kilo Instructions	4.1	3.6
L2 Misses / Kilo Instructions	3.6	3.5
Offcore RFO (cycles / packet)	206.4	1.4
Throughput (Mpps)	13.5	17.8

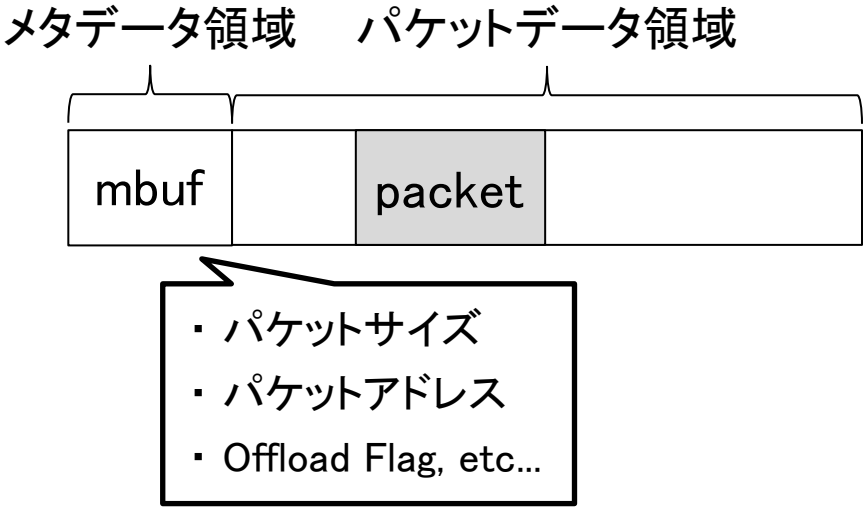


- False Sharingの排除で高速化
- キャッシュ汚染の影響は少ない

2.（d）による性能向上

因子	概要
(d)	Mbuf ヘッダのサイズを 128B から 0B に縮小





Mbufヘッダ更新の度に
- RFOを発行
- キャッシュミス

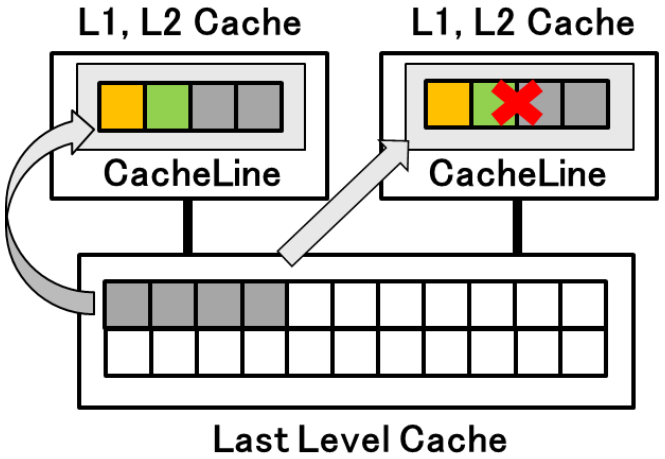
	書き込みのみ	プリフェッチ＋書き込み	書き込まない	(d)
Throughput	13.5 Mpps	17.3 Mpps	20.8 Mpps	20.8Mpps

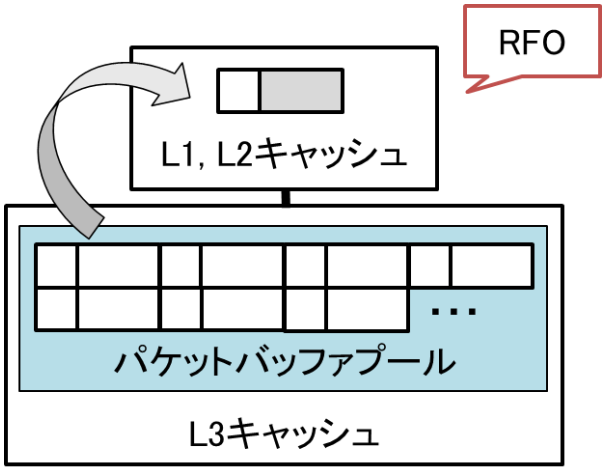
約4Mpps（キャッシュミス）

約3.5Mpps（書き込みレイテンシ）

2.（a）と（d）のまとめ

因子	概要
(a)	他 CPU コアと共有する変数が全て異なる キャッシュライン上に格納されるように配置
(d)	Mbuf ヘッダのサイズを 128B から 0B に縮小



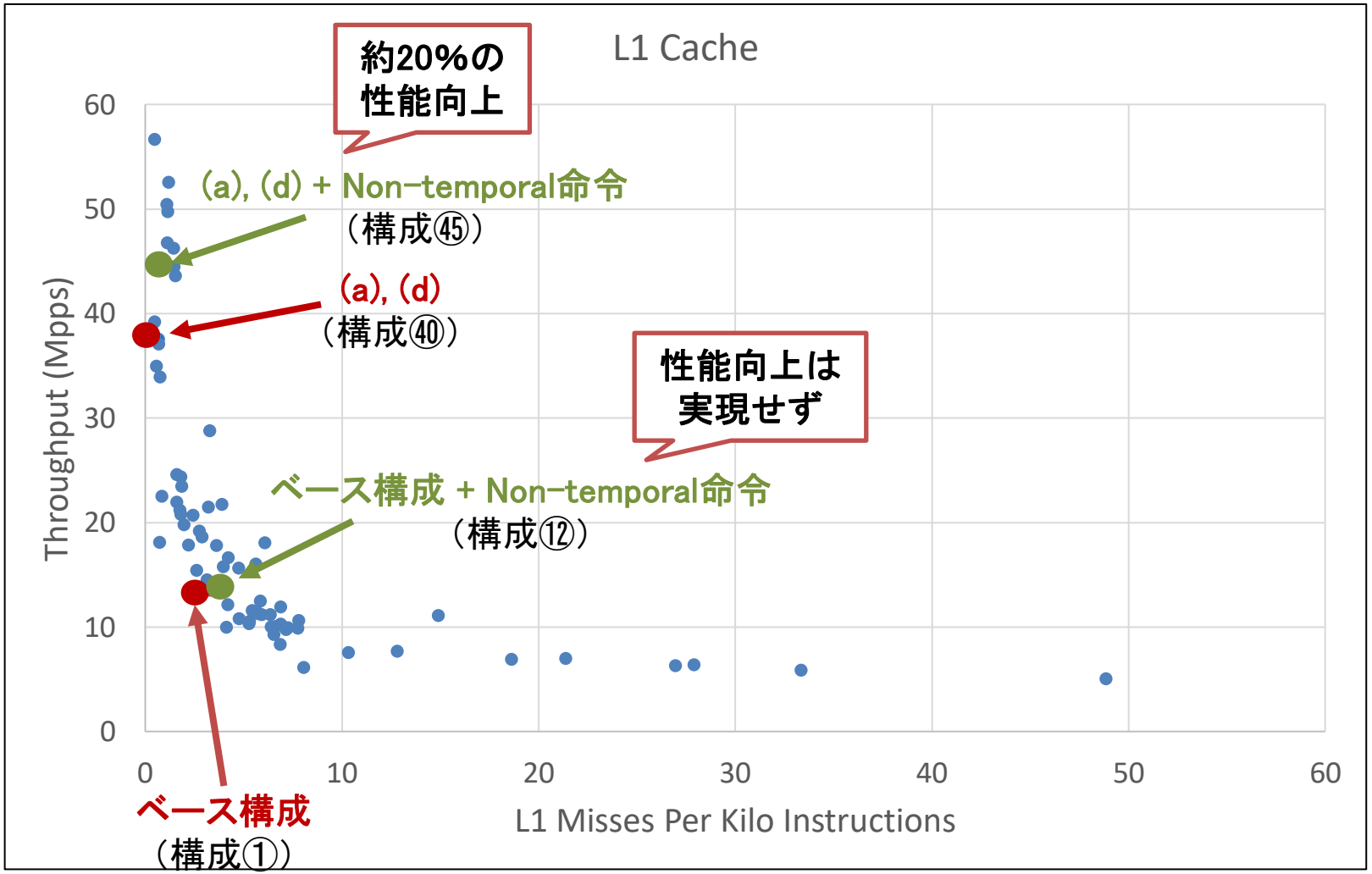


	base	(a)	(d)	(a)&(d)
L1 Misses / Kilo Instructions	4.1	3.6	1.8	0.7
L2 Misses / Kilo Instructions	3.6	3.5	1.1	0.5
Offcore RFO (cycles / packet)	**206.4**	1.4	2.8	1.5
Throughput (Mpps)	13.5	17.8	20.8	**37.5**

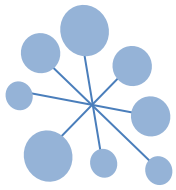
組み合わせによる効果が絶大

- **他コアとのキャッシュラインの共有を回避**
- **書き込みで生じるRFOを抑制**

Non-temporal命令による効果の変化



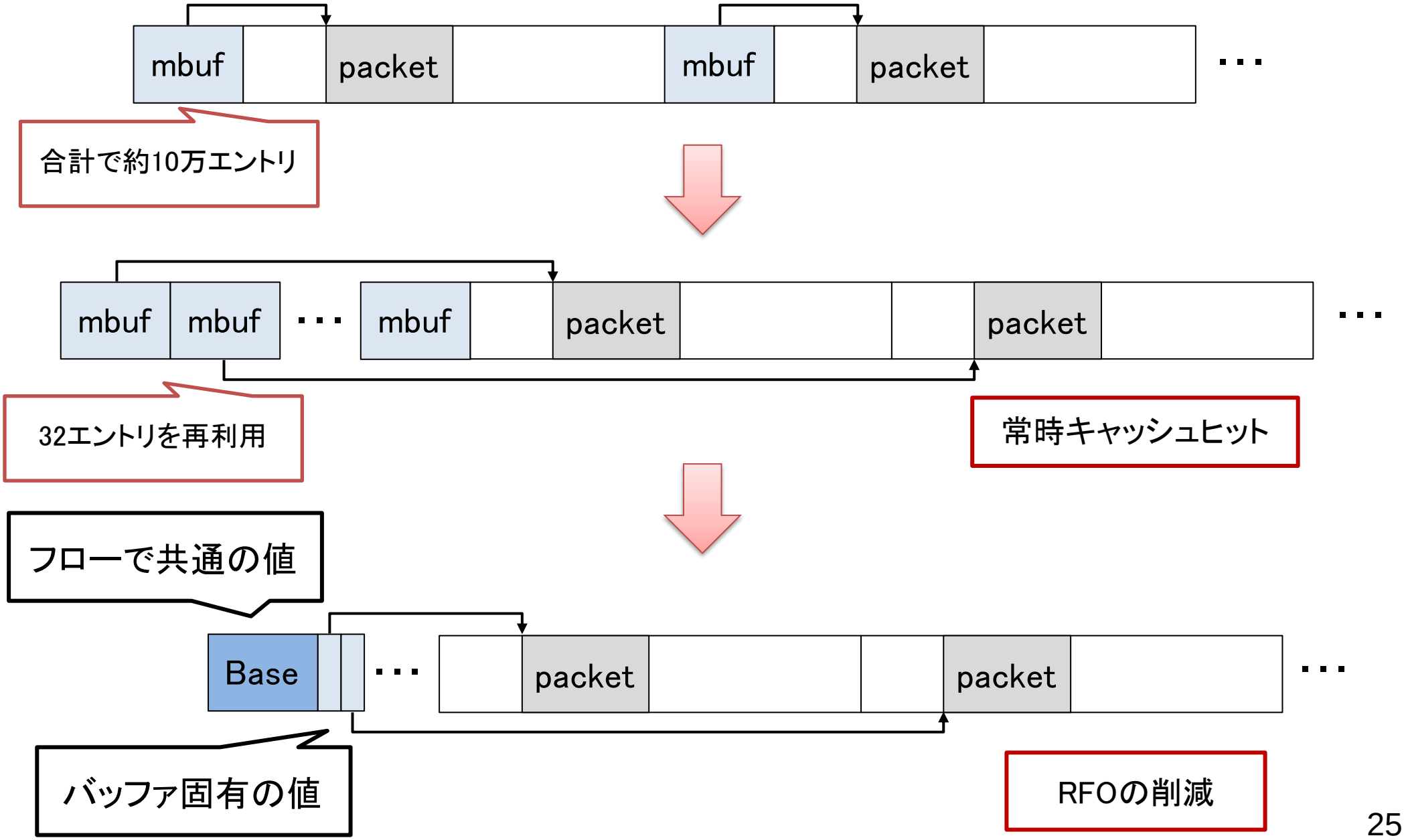
RFOによって性能向上が妨げられていた

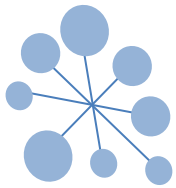


目次

- 研究背景
- 関連研究
- 評価内容
  - 使用するプログラム
  - 評価項目
- **評価結果**
  - キャッシュ利用効率と性能の相関関係
  - 性能向上を実現した要因の特定
  - 仮想I/Oの更なる性能向上に必要な仕様の検討

Mbufヘッダへの書き込みを削減





まとめと今後の課題

- **vhost-userにおけるキャッシュに着目した調査を実施**
  - 性能向上のカギは**キャッシュ**であった
    - Rx, Txスレッド ではなく Guestスレッド
    - L1, L2キャッシュミスの削減が重要
  - キャッシュ利用効率の改善により**50Mpps超**の性能を実現
    - アドレス共有による**False Sharing**の排除, **RFO**の排除
    - 複数の組み合わせによる**相乗効果**が重要
  - キャッシュ汚染の解消による性能向上も確認
    - ベース構成では**RFOによる速度低下が大きい**
    - RFOを解消して初めてキャッシュ汚染解消による性能向上がみられる
- **今後の課題**
  - 組み合わせによる相乗効果の考察
  - 性能向上を実現するシステム構成の検討