

# www データベース技術

## 参考教科書

H. Garcia-Morina, J. D. Ullman, and J. Widom.  
Database System Implementation.  
Prentice Hall, 2000, ISBN 0-13-040264-8  
Chapter 6, 7

森下 真一

# 予定

wwwデータベース技術

- 4/11, 4/18, 4/25 森下  
毎回レポート課題を出します  
2005年5月末までにレポートを提出  
(提出先 [moris@k.u-tokyo.ac.jp](mailto:moris@k.u-tokyo.ac.jp) )
- 5/9, 5/16, 5/23 高木

# 問合せの代数

# 関係

wwwデータベース技術

属性            例        name, department, weight

レコード        属性の値の線形リスト  
(Tom, IS)    (Paul, Physics)

関係            レコードの集合  
R(name, department)

$R(\text{name, department}) = \{ (\text{Tom, IS}), (\text{John, IS}), (\text{Paul, Physics}) \}$

name	department
Tom	IS
John	IS
Paul	Physics

レコード  $t = (\text{Tom, IS})$

$t[\text{name}] = \text{Tom}$

$t[\text{name, department}] = (\text{Tom, IS})$

# Bags と 集合 意味論

wwwデータベース技術

## Bags 意味論

name	score
Tom	32
Tom	29
Tom	32
John	45
John	48

## 集合意味論

name	score
Tom	32
Tom	29
John	45
John	48

{ (Tom,32), (Tom,29), (Tom,32), (John,45), (John,48) }

# 問合せの代数

wwwデータベース技術

- 和 交わり 差
- 重複削除
- 選択
- 射影
- 積
- ジョイン (Natural, Equi-, Theta-)
- dangling レコード
- セミジョイン アウタージョイン
- グループ分け

# 和 交わり 差

wwwデータベース技術

おなじ属性をもつ関係 R と S

Bags意味論での定義

和  
(Union)  $R \cup S$

各レコード r は R と S に出現する  
回数の和だけ、r は  $R \cup S$  に出現

交わり  
(Intersection)  $R \cap S$

各レコード r は R と S に出現する回数  
で少ない方の回数だけ  $R \cap S$  に出現

差  
(Difference)  $R - S$

各レコード r は R と S に出現する  
回数の差だけ  $R - S$  に出現

$$R = \{0, 1, 1, 1, 3, 3\} \quad S = \{1, 2, 2, 3, 3, 3\}$$

$$R \cup S = \{0, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 3\}$$

$$R \cap S = \{1, 3, 3\}$$

$$R - S = \{0, 1, 1\}$$

# 和 交わり 差

wwwデータベース技術

## Bags 意味論

$$R = \{0, 1, 1, 1, 3, 3\} \quad S = \{1, 2, 2, 3, 3, 3\}$$

$$R \cup S = \{0, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 3\}$$

$$R \cap S = \{1, 3, 3\}$$

$$R - S = \{0, 1, 1\}$$

## 集合意味論

$$R = \{0, 1, 3\} \quad S = \{1, 2, 3\}$$

$$R \cup S = \{0, 1, 2, 3\}$$

$$R \cap S = \{1, 3\}$$

$$R - S = \{0\}$$



# 重複削除

wwwデータベース技術

関係 R 中の重複したレコードを除く演算  $\delta(R)$

R		$\delta(R)$	
a	b	a	b
1	2	1	2
2	3	2	3
2	3		

SQL では DISTINCT が重複を除去

SQL での UNION, INTERSECT, EXCEPT は集合意味論  
R UNION S は  $\delta(R \cup S)$  に対応

以降は bags 意味論。 必要におうじて重複除去して集合意味論。

# 問題

wwwデータベース技術

$$R = \{ (1,1), (1,1), (1,1), (1,2), (2,1), (2,1), (2,2), (2,2), (2,2) \}$$

$$S = \{ (1,1), (2,1), (2,1), (2,1), (2,2) \}$$

R と S の和、差、交わりを求めよ

得られた和、差、交わりの重複を除去せよ

# 選択 (Selection)

関係 R から条件 C をみたすレコードを選択  $\sigma_C R$

条件 C の中では、たとえば

- (1) 数式演算 (四則など) や文字列処理演算
- (2) 比較演算 (<, >, 等)
- (3) 命題論理の結合子 (AND, OR, NOT)

a	b
0	1
2	1
2	1
3	1
3	5

$\sigma_{a>1} R(a,b)$

a	b
2	1
2	1
3	1
3	5

$\sigma_{a>1 \text{ AND NOT}(a+b>5)} R(a,b)$

a	b
2	1
2	1
3	1

# 射影 (Projection)

関係 R のレコードを属性リスト L へ射影  $\pi_L R$

L の属性としては

- (1) 関係 R の属性そのもの
- (2) R の属性から、 $a+b \rightarrow x$  のように属性をつくってもよい

$\pi_{a+b \rightarrow x, a+c \rightarrow y} R(a, b, c)$

a	b	c
1	2	3
2	1	2
3	2	5
5	0	3

x	y
3	4
3	4
5	8
5	8

Bags  
意味論

# 問題

R(a,b,c)

a	b	c
0	0	0
0	0	1
0	1	0
0	1	1
1	0	0
1	0	1
1	1	0
1	1	1

以下の演算結果を示せ

$$\sigma_{a=0 \text{ OR } b=0 \text{ OR } c=0} R(a,b,c)$$

$$\sigma_{a*b*c=0} R(a,b,c)$$

$$\sigma_{a+b=1 \text{ OR } b+c=1} R(a,b,c)$$

$$\sigma_{a+b=2 \text{ OR } b-c=1} R(a,b,c)$$

$$\sigma_{a*b=0 \text{ OR } b*c=0} R(a,b,c)$$

# 積 (Product)

wwwデータベース技術

関係 R、S からレコードを選択し連結したレコードの全体  $R \times S$

同一名の属性 a が R と S に現れる場合 R.a, S.a と改名

R

a	b
1	2
2	3
2	3

S

a	c
4	5
5	6

$R \times S$

R.a	b	S.a	c
1	2	4	5
1	2	5	6
2	3	4	5
2	3	5	6
2	3	4	5
2	3	5	6

Bags 意味論

# ジョイン(Join)

wwwデータベース技術

複数の関係に、積・選択・射影を適用してつくる関係

Natural (Equi-)Join  $R \bowtie S = \pi_L(\sigma_C(R \times S))$

条件 C は R と S に共通する属性 a,b,... を等しいとみなす

R.a=S.a AND R.b=S.b AND ...

属性リスト L は a,b,...

属性の重複、たとえば R.a と S.a は一つにまとめる

R

a	b
1	2
2	3
2	4

S

a	c
1	5
2	6

R  $\bowtie$  S

a	b	c
1	2	5
2	3	6
2	4	6

# Natural Join の例

wwwデータベース技術

R

a	b
1	2
2	3
2	4

S

a	c
1	5
2	6

R × S

R.a	b	S.a	c
1	2	1	5
1	2	2	6
2	3	1	5
2	3	2	6
2	4	1	5
2	4	2	6

$R \bowtie S$

$= \pi_{R.a \rightarrow a, b, c}(\sigma_{R.a=S.a}(R \times S))$

a	b	c
1	2	5
2	3	6
2	4	6

$\sigma_{R.a=S.a}(R \times S)$

R.a	b	S.a	c
1	2	1	5
2	3	2	6
2	4	2	6



# 問題

wwwデータベース技術

R(a,b,c)

a	b	c
1	1	1
1	2	1
2	1	2
2	2	2

R(c,d,f)

c	d	f
1	1	1
1	2	1
2	1	2
2	2	2

R(f,g,a)

f	g	a
1	1	2
1	2	2
2	1	1
2	2	1

以下の演算結果をしめせ

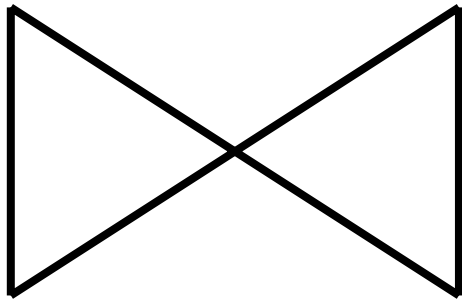
$R(a,b,c) \bowtie R(c,d,f)$

$R(c,d,f) \bowtie R(f,g,a)$

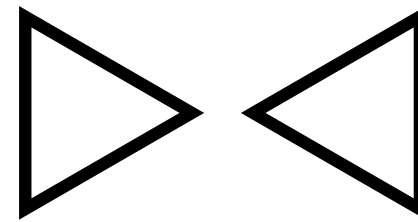
$( R(a,b,c) \bowtie R(c,d,f) ) \bowtie R(f,g,a)$

# ジョイン記号の代用

wwwデータベース技術



正しい ジョイン記号



Windings 3 の wv で代用

# Theta Join

wwwデータベース技術

## 一般的なジョイン

$$\text{Theta-Join } R \bowtie_c S = \sigma_c(R \times S)$$

関係  $R \times S$  の属性にたいする条件  $C$  をつくる

研究当初は  $x \theta y$  (ただし  $\theta = >, <, \dots$ ) の条件だけを

扱ったので Theta- ( $\theta$ ) とよばれる

# Theta Join の例

wwwデータベース技術

R

a	b
1	2
2	3
2	4

S

a	c
1	5
2	6

R × S

R.a	b	S.a	c
1	2	1	5
1	2	2	6
2	3	1	5
2	3	2	6
2	4	1	5
2	4	2	6

$\sigma_{b+c>8}(R \times S)$

R.a	b	S.a	c
2	3	2	6
2	4	1	5
2	4	2	6

# dangling レコードとジョイン

wwwデータベース技術

R	S	R $\bowtie$ S																							
<table border="1"><thead><tr><th>a</th><th>b</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td></tr></tbody></table>	a	b	1	2	2	3	2	4	<table border="1"><thead><tr><th>a</th><th>c</th></tr></thead><tbody><tr><td>3</td><td>5</td></tr><tr><td>2</td><td>6</td></tr></tbody></table>	a	c	3	5	2	6	<table border="1"><thead><tr><th>a</th><th>b</th><th>c</th></tr></thead><tbody><tr><td>2</td><td>3</td><td>6</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td><td>6</td></tr></tbody></table>	a	b	c	2	3	6	2	4	6
a	b																								
1	2																								
2	3																								
2	4																								
a	c																								
3	5																								
2	6																								
a	b	c																							
2	3	6																							
2	4	6																							

R の (1,2) は S の中で属性 a が一致するレコードがない。  
dangling レコードと呼ぶ。 他の例 (3,5)  $\in$  S。

R から dangling レコードを除く操作

セミジョイン

R  $\bowtie$  S に dangling レコードを残す操作

アウトージョイン

# dangling レコードの例

wwwデータベース技術

遺伝子観測量のデータ

微量に出現しているため観測がむずかしい遺伝子が多い

R

遺伝子ID	肝臓
1	0.5
3	0.2
4	0.3

S

遺伝子ID	肺
2	0.6
3	0.2
5	0.4

R  $\bowtie$  S

遺伝子

ID	肝臓	肺
3	0.2	0.2

# 問題

wwwデータベース技術

R(a,b,c)

a	b	c
1	1	1
1	2	1
2	1	2
2	2	2

R(c,d,f)

c	d	f
1	1	1
1	2	1
2	1	2
2	2	2

R(f,g,a)

f	g	a
1	1	2
1	2	2
2	1	1
2	2	1

以下の2つの関係の間では、どれが dangling レコードであるか？

$(R(a,b,c) \bowtie R(c,d,f))$  と  $R(f,g,a)$

# セミジョイン (semi-join)

wwwデータベース技術

R  $\bowtie$  S で分かる R の dangling レコードを除く操作

$$R \ltimes S = \pi_L (R \bowtie S)$$

L は R の属性のリスト ( $\ltimes$  はフォント msbm5 の n)

R

a	b
1	2
2	3
2	4

S

a	c
3	5
2	6

R  $\bowtie$  S

a	b	c
2	3	6
2	4	6

R  $\ltimes$  S

a	b
2	3
2	4



# 問題

wwwデータベース技術

R(a,b,c)

a	b	c
1	1	1
1	2	1
2	1	2
2	2	2

R(c,d,f)

c	d	f
1	1	1
1	2	1
2	1	2
2	2	2

R(f,g,a)

f	g	a
1	1	2
1	2	2
2	1	1
2	2	1

以下のセミジョインを計算せよ

$(R(a,b,c) \bowtie R(c,d,f)) \ltimes R(f,g,a)$

# 問題

wwwデータベース技術

$R(a,b) \times R(b,c)$  が bags 意味論と集合意味論では異なる関係を生成するような関係  $R(a,b)$  と  $R(b,c)$  の例を述べよ。

# アウトージョイン (outer-join)

wwwデータベース技術

R  $\bowtie$  S に dangling レコードを追加した関係

R  $\bowtie_{\text{outer}}$  S

dangling レコードに null 記号 ( $\perp$ ) を補うことで情報の欠落をふせぐ

R

a	b
1	2
2	3
2	4

S

a	c
3	5
2	6

R  $\bowtie$  S

a	b	c
2	3	6
2	4	6

R  $\bowtie_{\text{outer}}$  S

a	b	c
2	3	6
2	4	6
1	2	$\perp$
3	$\perp$	5

# アウトージョインの例

wwwデータベース技術

R

遺伝子ID	肝臓
1	0.5
3	0.2
4	0.3

S

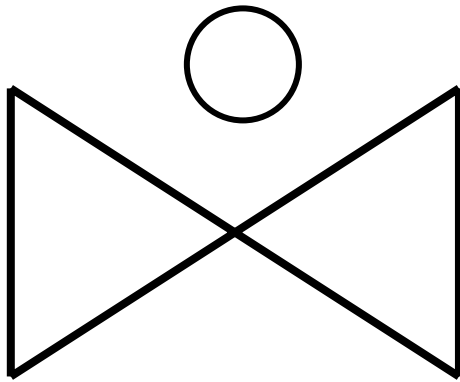
遺伝子ID	肺
2	0.6
3	0.2
5	0.4

$R \triangleright \triangleleft_{\text{outer}} S$

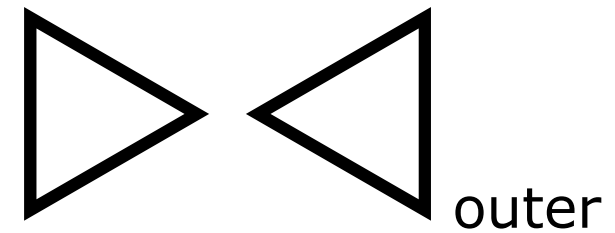
遺伝子ID	肝臓	肺
1	0.5	⊥
2	⊥	0.6
3	0.2	0.2
4	0.3	⊥
5	⊥	0.4

# アウタージョイン記号は...

wwwデータベース技術



正しい  
アウタージョイン記号



代用品

# 問題

R(a,c)

a	c
1	1
1	1
2	2
2	2

R(c,f)

c	f
1	1
1	1
2	2
2	2

R(f,a)

f	a
1	2
1	2
2	1
2	1

上の3つの関係をアウトージョインした結果を求めよ

# グループ分け (Grouping) と集約 (Aggregation)

wwwデータベース技術

3件以上お店のある地域で、一番安いラーメンの価格は？

name	district	price
1	Tokyo	650
2	Tokyo	550
3	Tokyo	750
4	Tokyo	850
5	Yokohama	850
6	Yokohama	550
7	Yokohama	600
8	Chiba	600
9	Chiba	450

SQL文

```
SELECT district, MIN(price) AS min  
FROM R  
GROUP BY district  
HAVING COUNT(name) > 2
```

# グループ分けと集約

wwwデータベース技術

3件以上お店のある地域で、一番安いラーメンの価格は？

name	district	price
1	Tokyo	650
2	Tokyo	550
3	Tokyo	750
4	Tokyo	850
5	Yokohama	850
6	Yokohama	550
7	Yokohama	600
8	Chiba	600
9	Chiba	450

R1 =

$\gamma_{\text{district}, \text{MIN}(\text{price}) \rightarrow \text{min}, \text{COUNT}(\text{name}) \rightarrow \text{count}} R$

district	min	count
Tokyo	550	4
Yokohama	550	3
Chiba	450	2

$\pi_{\text{district}, \text{min}} (\sigma_{\text{count} > 2} R1)$

district	min
Tokyo	550
Yokohama	550



# グループ分けと集約

wwwデータベース技術

$\gamma_L R = \gamma_{\text{district}, \text{MIN}(\text{price}) \rightarrow \text{min}, \text{COUNT}(\text{name}) \rightarrow \text{count}} R$

L の元は

- グループ分けの対象となる属性(複数可)

district と soup (スープの種類)でグループ分けなど

- 属性を引数とする集約演算子

MIN(price), MAX(price), AVG(price),  
SUM(price), count(name) など

# 問題

wwwデータベース技術

以下の問合せを演算をもちいて表現せよ

3件以下お店のある地域で、一番高いラーメンの価格は？

各地域におけるラーメンの平均価格は？

# 問合せの代数： ソート

wwwデータベース技術

$$\tau_{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n} R$$

R の元を属性  $a_1$  の値でソートする。  
 $a_1$  で同一のレコードは  $a_2$  でソートし、 $a_n$  まで使って  
辞書式順序でソート。

ソートは問合せの実行スピードを上げるのに利用

$$\tau_{a, b, c} R$$

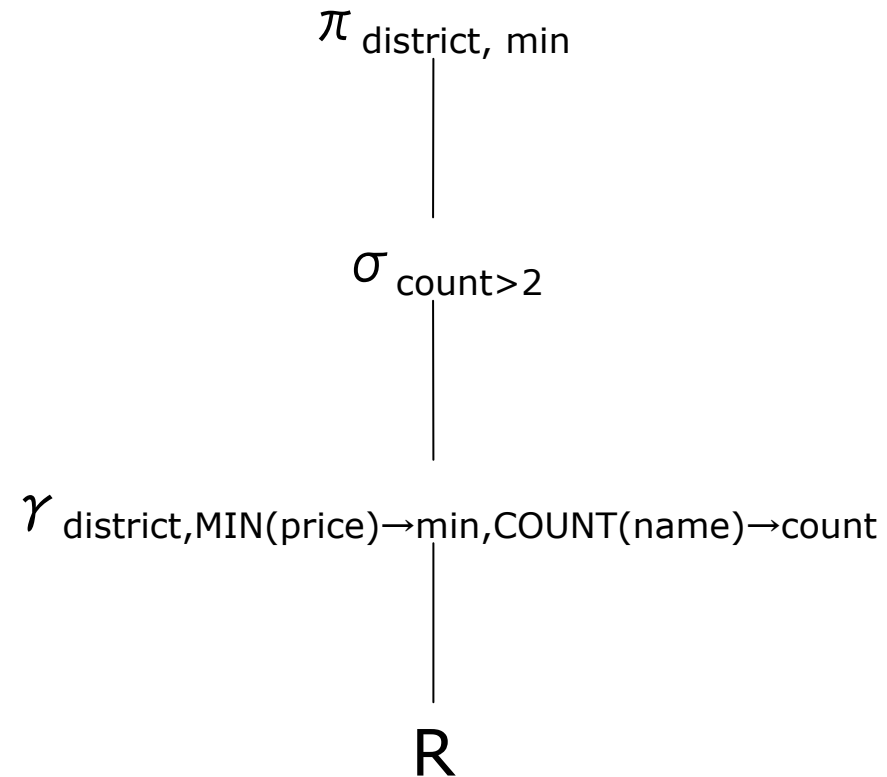
a	b	c
2	1	3
3	1	2
2	1	4
2	0	5

a	b	c
2	0	5
2	1	3
2	1	4
3	1	2

# 問合せ木 (Expression Tree)

wwwデータベース技術

$\pi_{\text{district, min}}(\sigma_{\text{count} > 2}(\gamma_{\text{district, MIN(price) \rightarrow min, COUNT(name) \rightarrow count}}(R)))$



# 問合せ木

wwwデータベース技術

R

a	b
1	2
2	3
2	4

S

a	c
1	5
2	6

$\sigma_{a>1 \text{ AND } c>5} R \bowtie S$

a	b	c
2	3	6
2	4	6

# 問合せ木

wwwデータベース技術

R.a	b	S.a	c
1	2	1	5
1	2	2	6
2	3	1	5
2	3	2	6
2	4	1	5
2	4	2	6



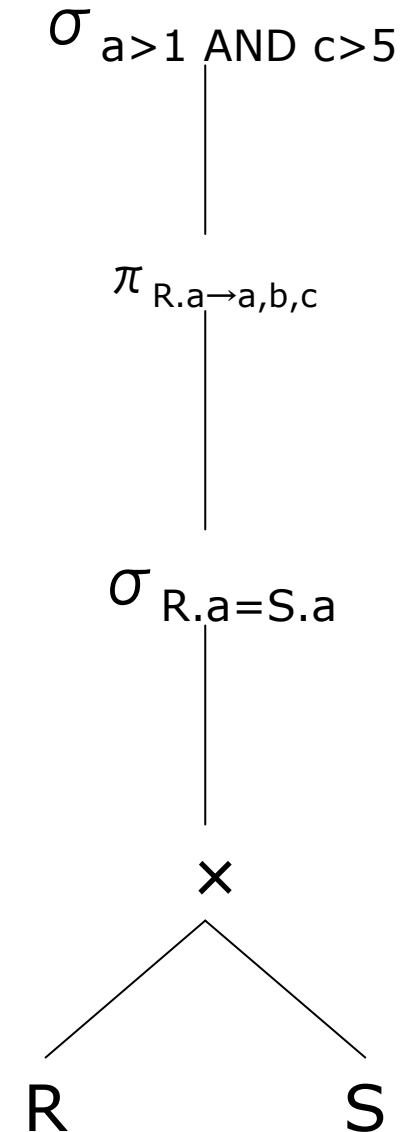
R.a	b	S.a	c
1	2	1	5
2	3	2	6
2	4	2	6



a	b	c
1	2	5
2	3	6
2	4	6



a	b	c
2	3	6
2	4	6



# 問合せ木の改良

wwwデータベース技術

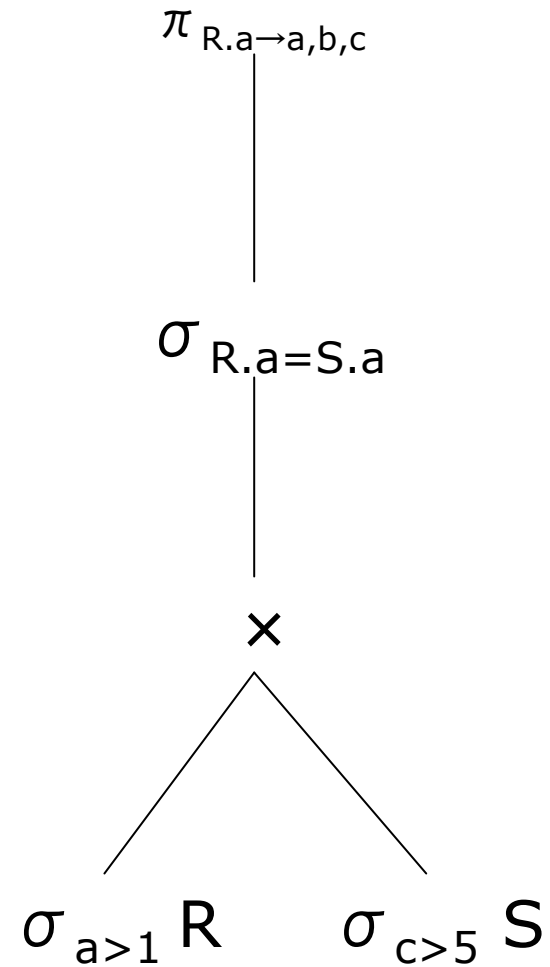
a	b	c
2	3	6
2	4	6

R.a	b	S.a	c
2	3	2	6
2	4	2	6

R.a	b	S.a	c
2	3	2	6
2	4	2	6

a	b
2	3
2	4

a	c
2	6



選択を最初に行う

# 問合せの代数の実装



# 講義順序

wwwデータベース技術

まず基本演算の実装

$\cup$     $\cap$     $-$     $\delta$     $\sigma$     $\pi$     $\triangleright\triangleleft$     $\gamma$

つづいて演算を複数組み合わせた問合せの実装

$\sigma_{a>1 \text{ AND } c>5} R \triangleright\triangleleft S$

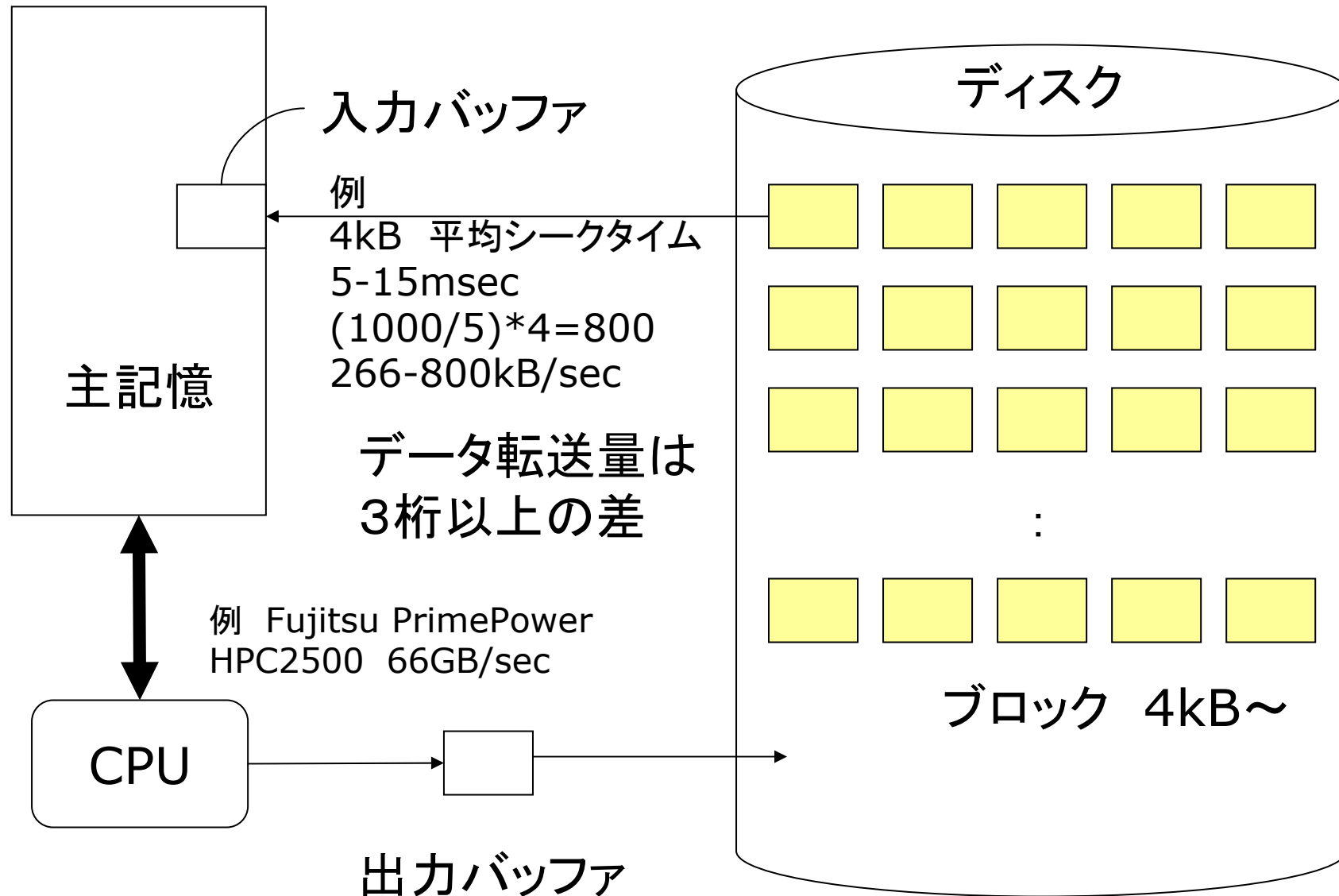
$R(a,b,c) \triangleright\triangleleft R(b,c,d) \triangleright\triangleleft R(b,d,e) \triangleright\triangleleft R(c,d,f)$

$R(a,b) \triangleright\triangleleft R(b,c) \triangleright\triangleleft R(c,d) \triangleright\triangleleft R(d,a)$

$\pi_{a,e,f}(R(a,b,c) \triangleright\triangleleft R(b,c,d) \triangleright\triangleleft R(b,d,e) \triangleright\triangleleft R(c,d,f))$

# ディスク ブロック バッファ データ転送ボトルネック

wwwデータベース技術



# 実装の方針

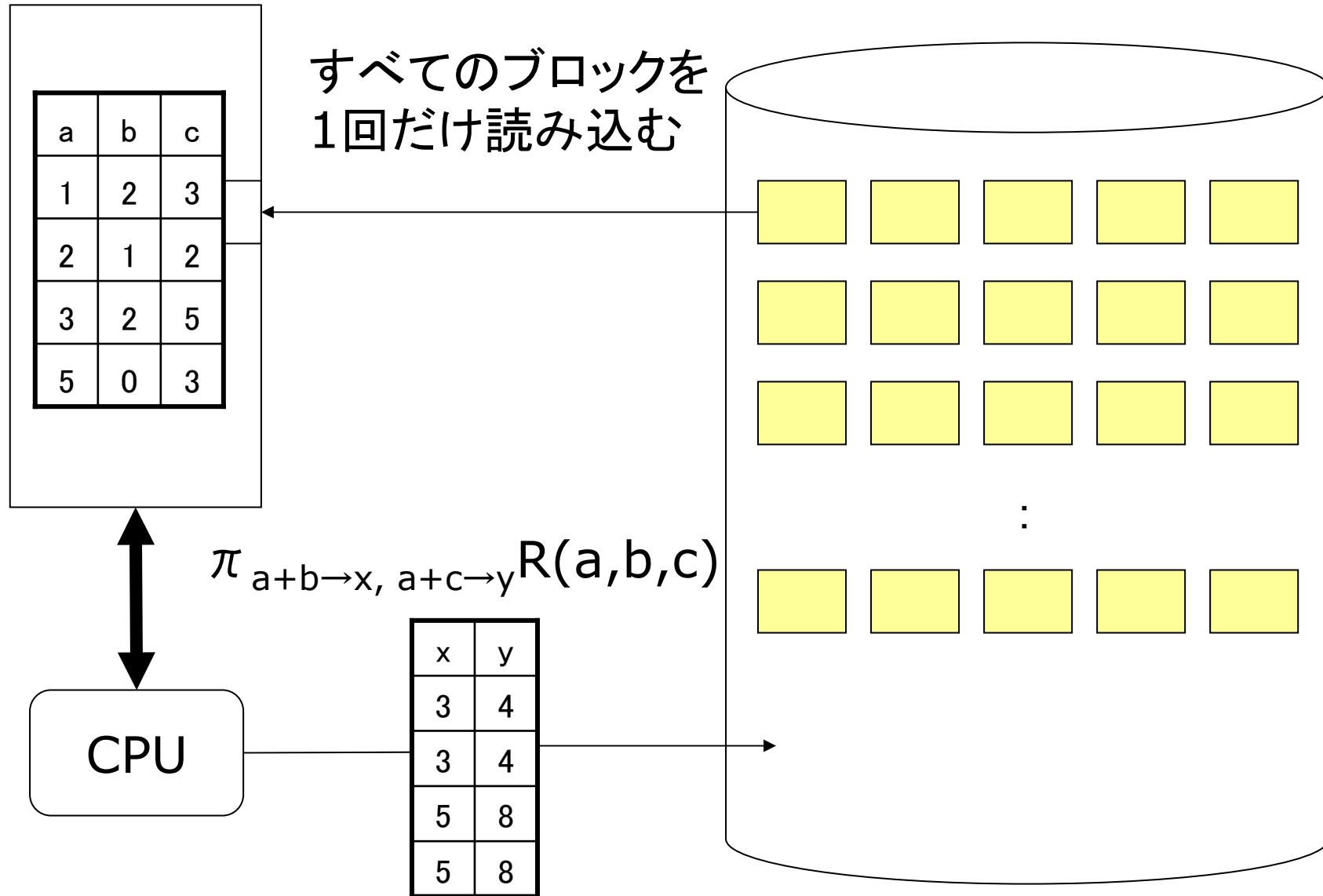
wwwデータベース技術

データベース(DB)読み込み回数をへらしたい

- 1回だけDBを走査すればよい容易な場合あり
  - 1回目でデータを高速に処理できるように前処理
    - データベースをソート
    - ハッシュ表を生成
    - インデックスを生成
- 2回目の読み込みで結果を書き出す

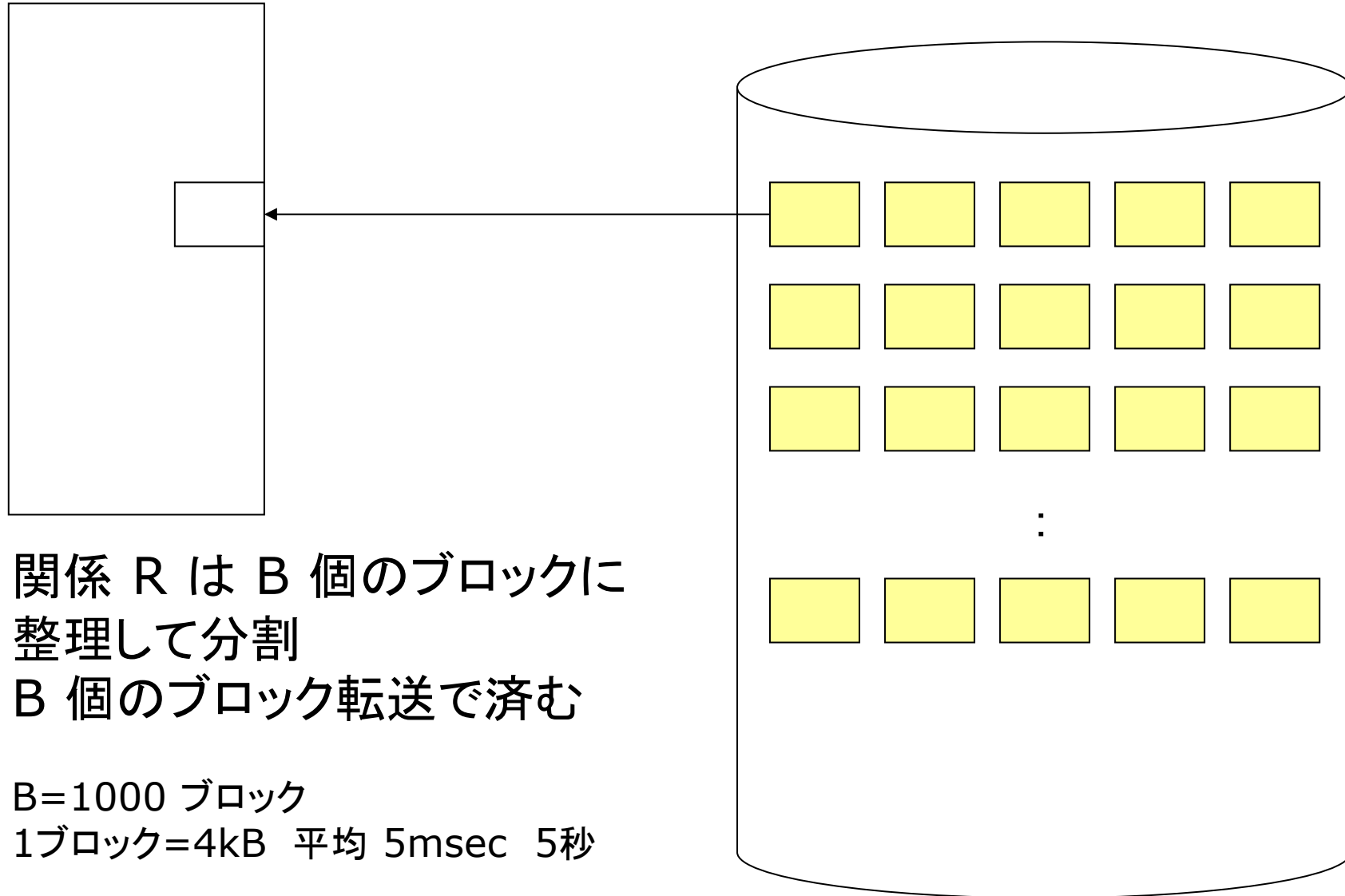
# DBは1回だけ走査 選択 $\sigma$ 射影 $\pi$

wwwデータベース技術



# DBは1回だけ走査 選択 $\sigma$ 射影 $\pi$

wwwデータベース技術

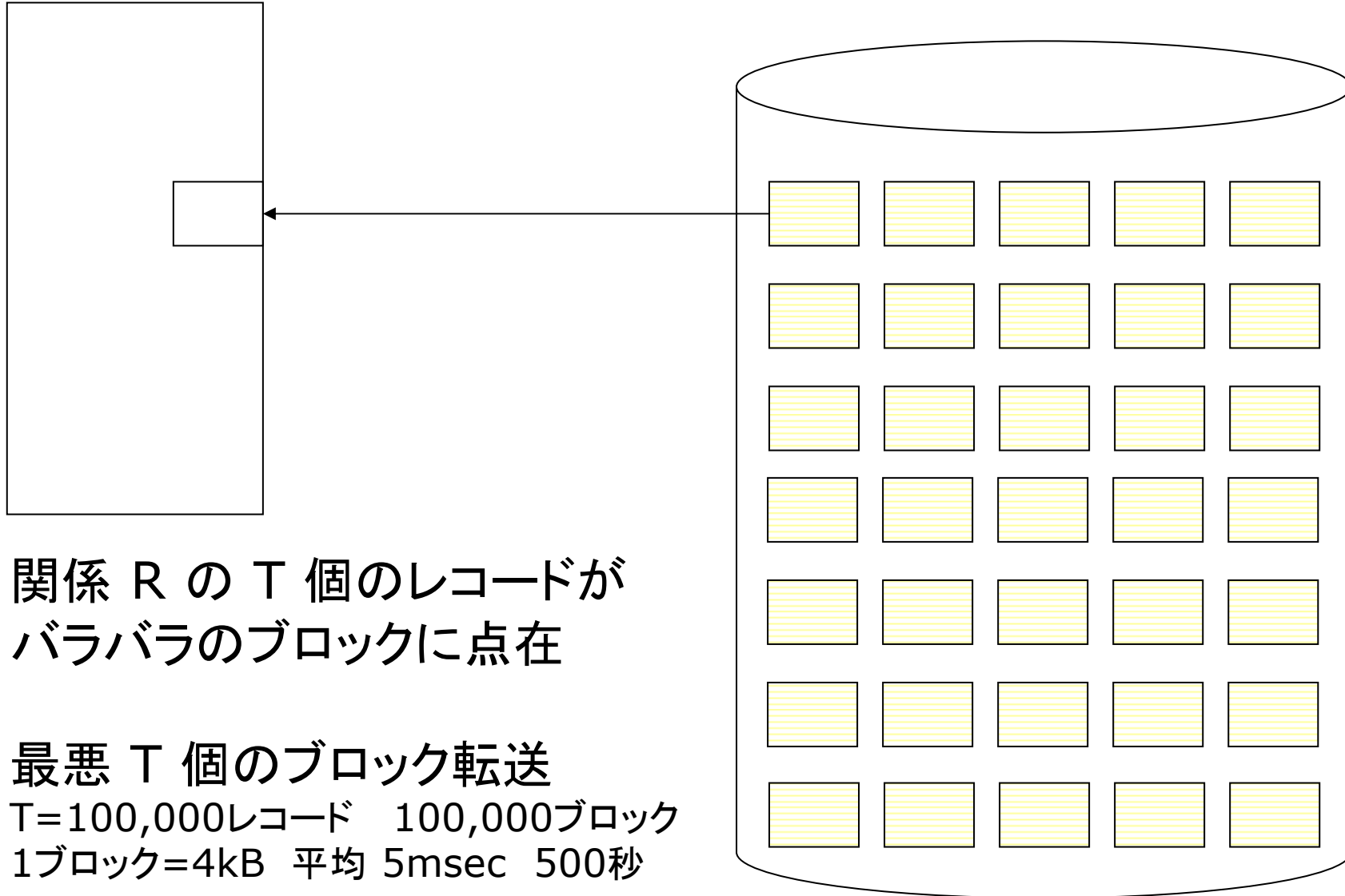


関係 R は B 個のブロックに  
整理して分割  
B 個のブロック転送で済む

B=1000 ブロック  
1ブロック=4kB 平均 5msec 5秒

# DBは1回だけ走査 選択 $\sigma$ 射影 $\pi$

wwwデータベース技術

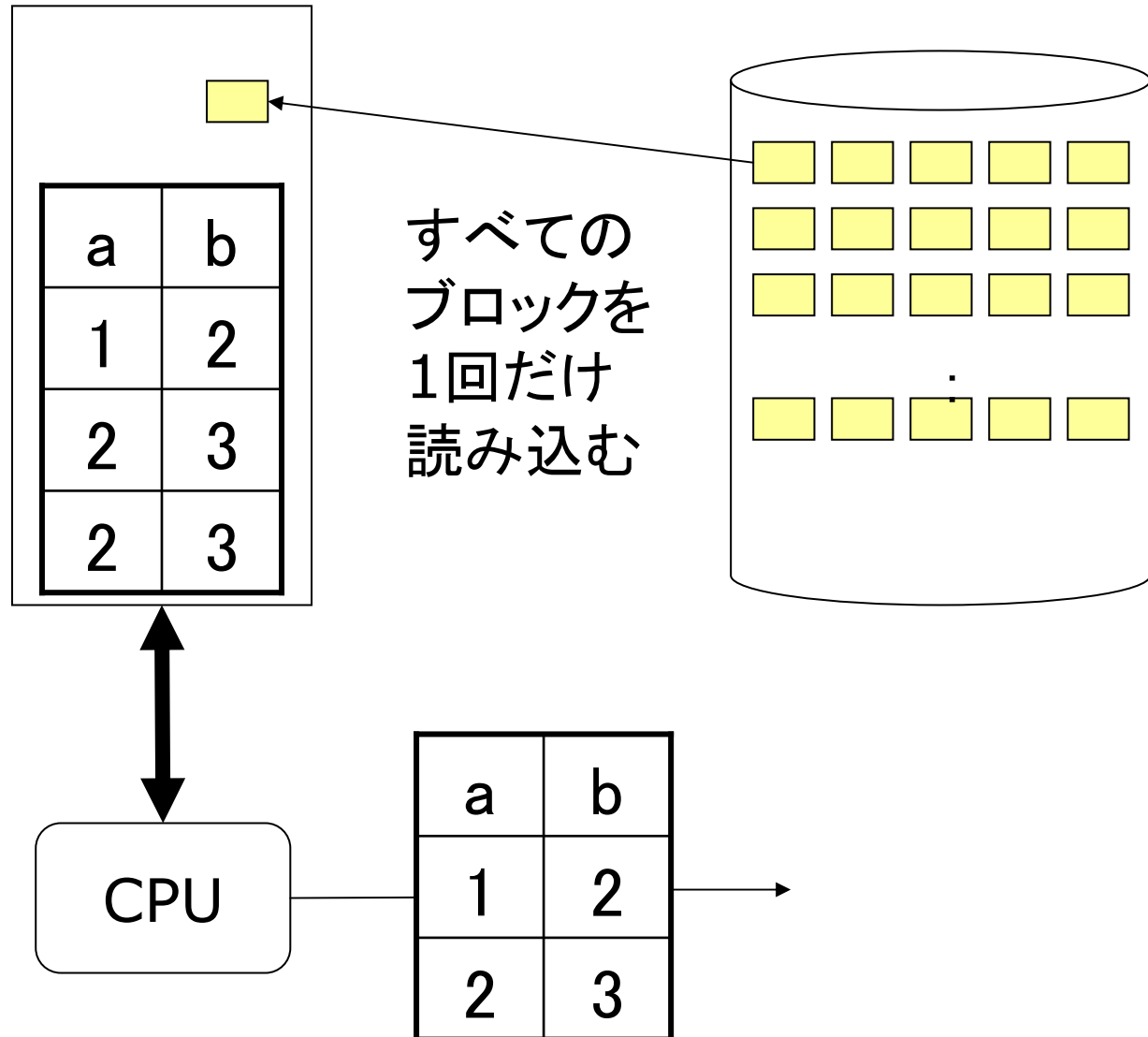


# DBは1回だけ走査 重複削除 $\delta$

wwwデータベース技術

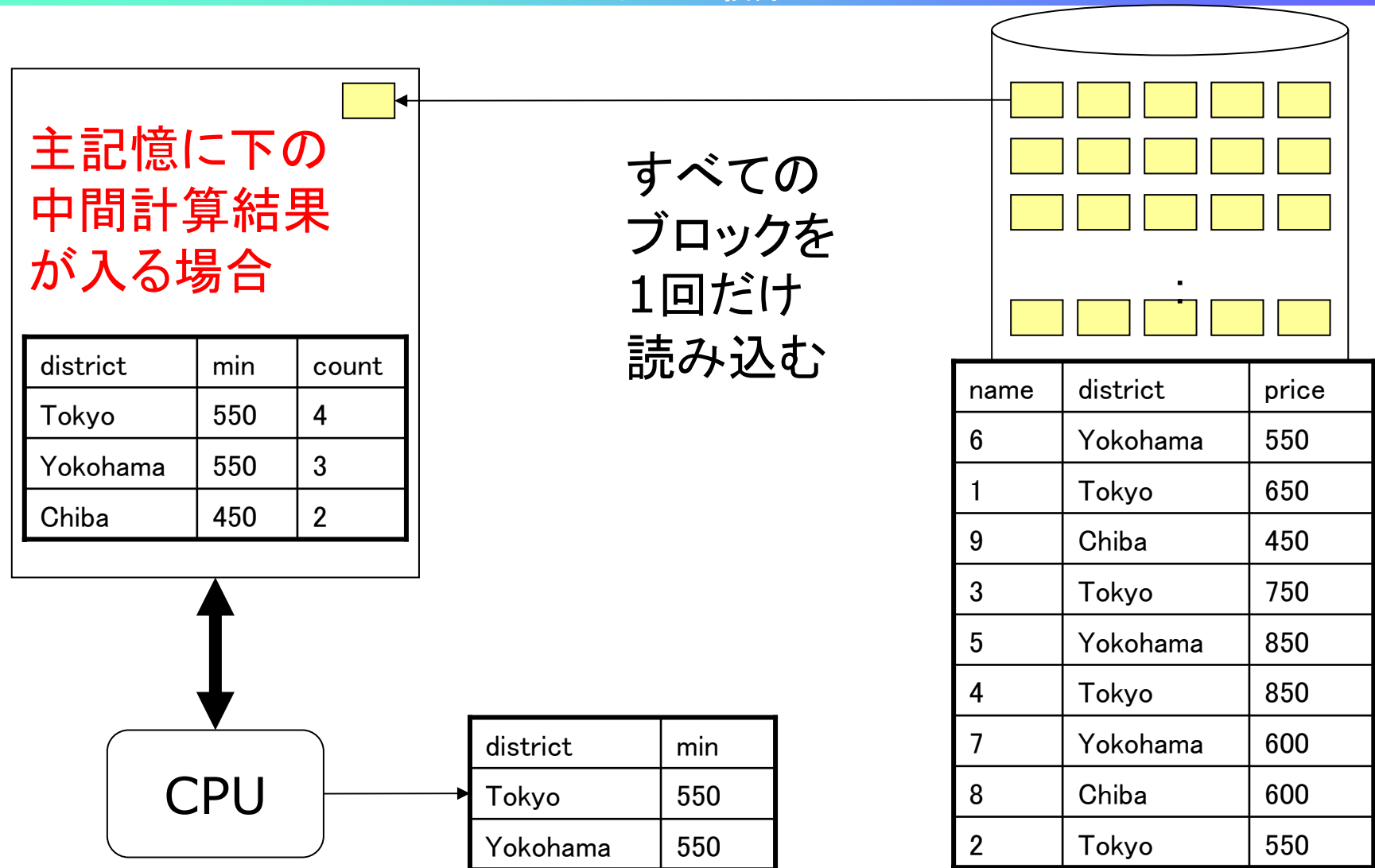
十分な主記憶があり  
既に読んだレコードか  
否かの判定を高速に  
実行できる場合

ハッシュ表や  
平衡2分木で  
管理できる



# DBは1回だけ走査 集約 $\delta$

wwwデータベース技術



$$\pi_{\text{district, min}}(\sigma_{\text{count} > 2}(\gamma_{\text{district, MIN(price)} \rightarrow \text{min}, \text{COUNT(name)} \rightarrow \text{count}} R))$$



# DBは1回だけ走査 和 交わり 差

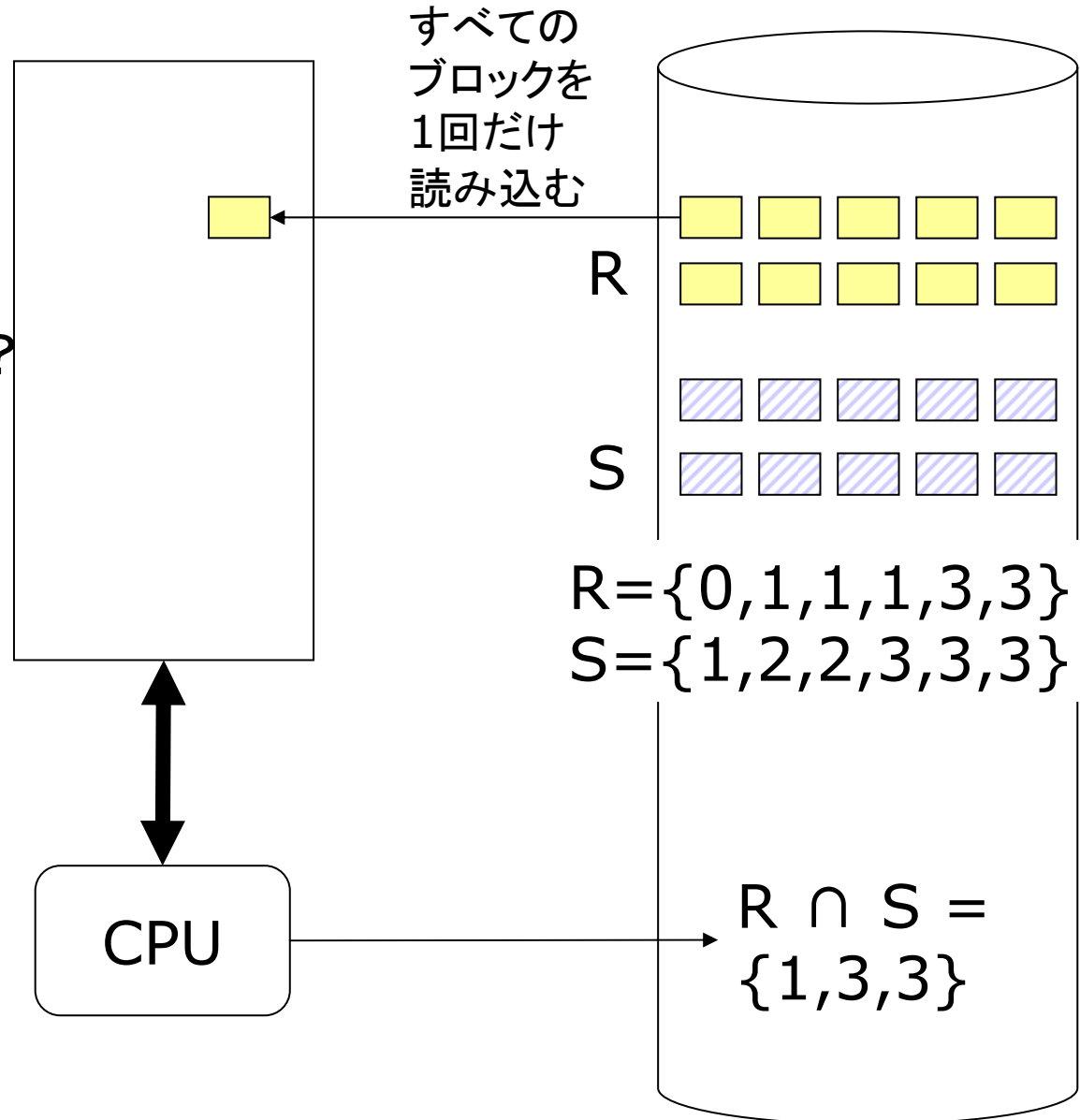
wwwデータベース技術

$R \cup S$  はブロックを  
コピーすればよい

$R \cap S$ 、 $R - S$  は？

Rのレコードの頻度表  
が入る場合

レコード	Rでの 頻度	Sでの 頻度
0	1	0
1	3	1
3	2	3



# DBは1回だけ走査 積

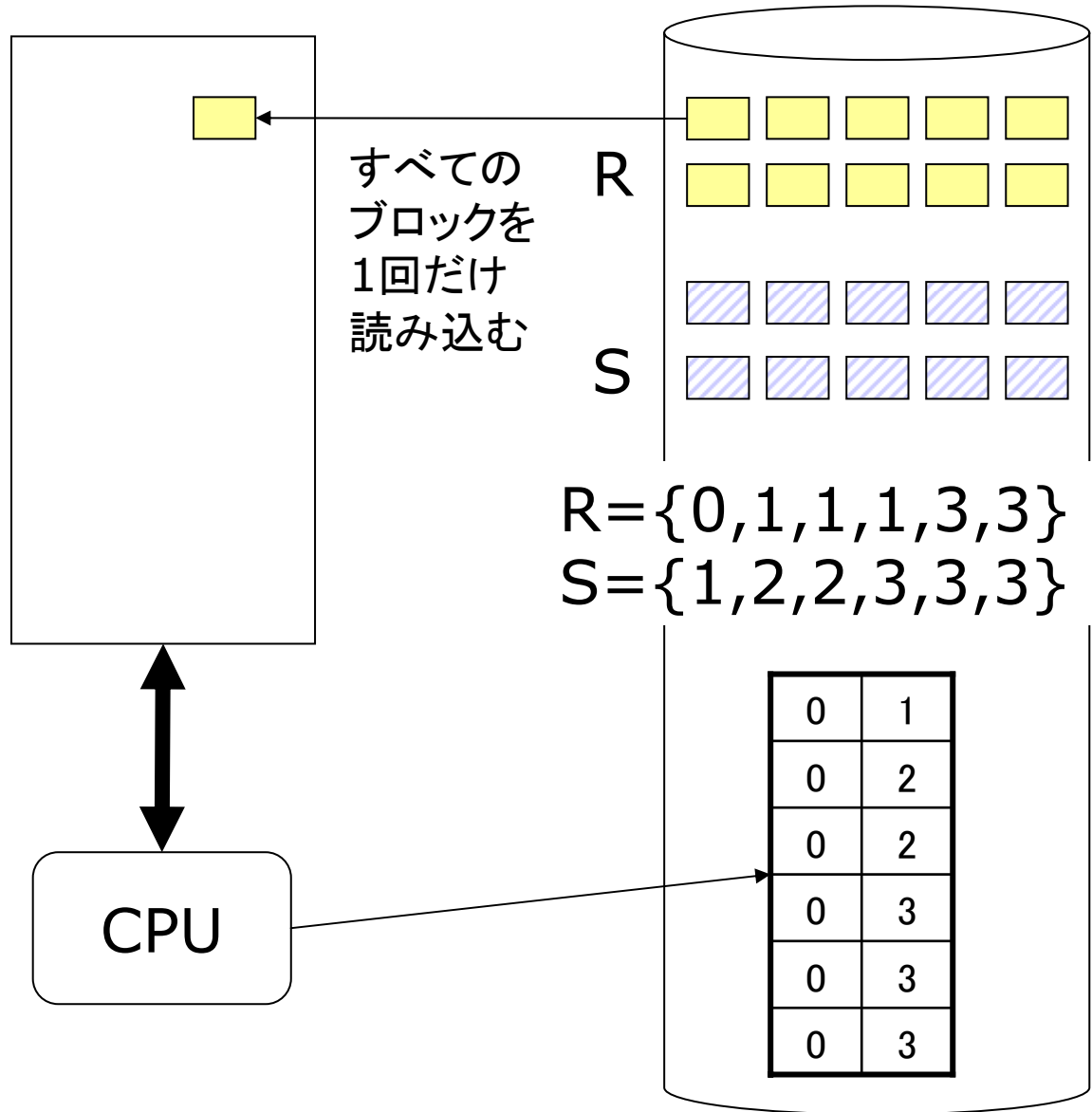
wwwデータベース技術

R もしくは S が  
主記憶に入る場合

R が入る場合、まず  
R を主記憶に格納

$R = \{0, 1, 1, 1, 3, 3\}$

Sの各レコードに対し  
Rの各レコードを連結  
すればよい



# DBは1回だけ走査

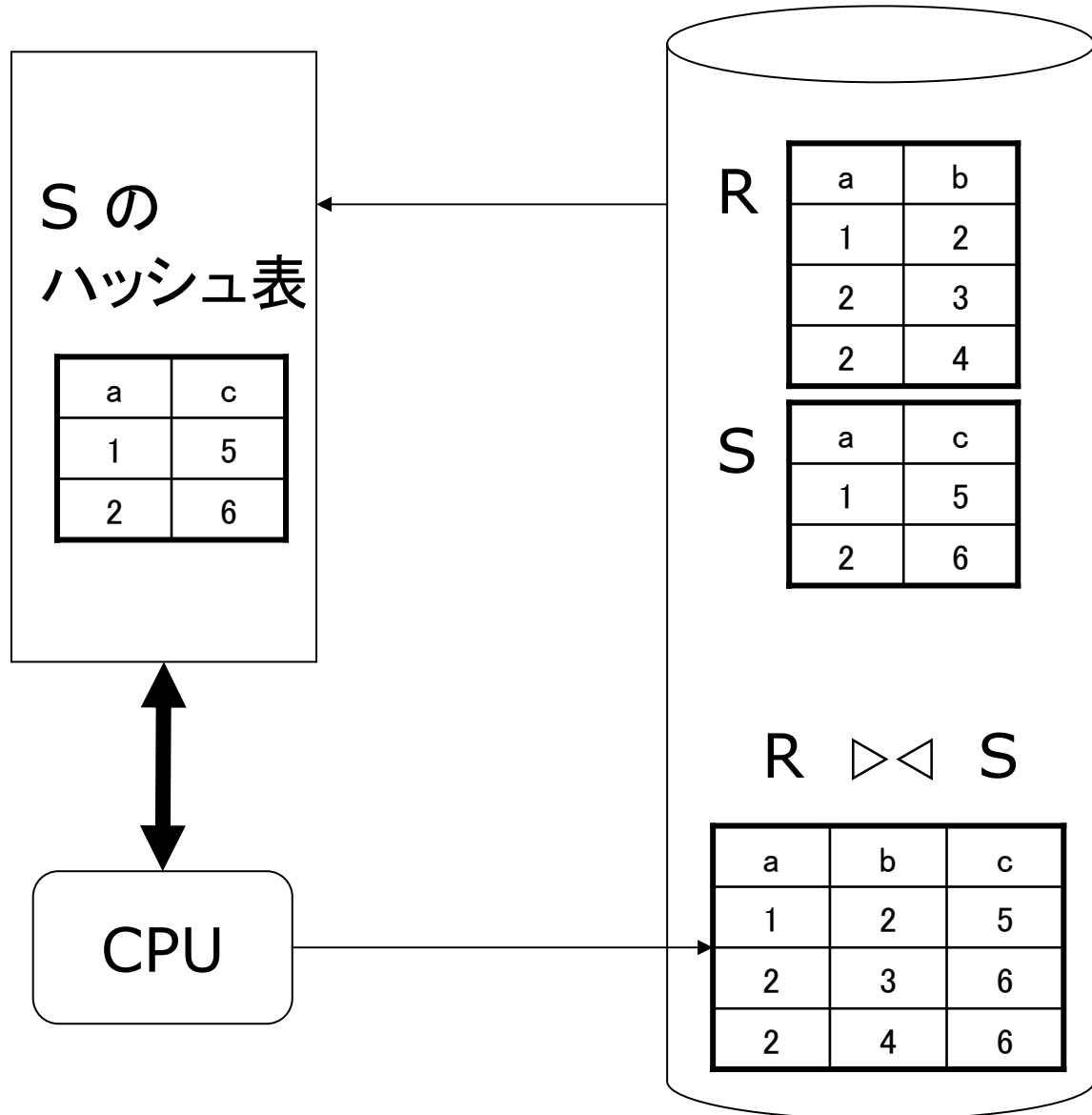
# Natural Join

wwwデータベース技術

R か S をすべて  
主記憶に格納でき、  
属性 a の値をもつ  
レコードを高速に  
検索できる場合

ハッシュ表や平衡2分木

R の各レコードを読み、  
ハッシュ表を参照

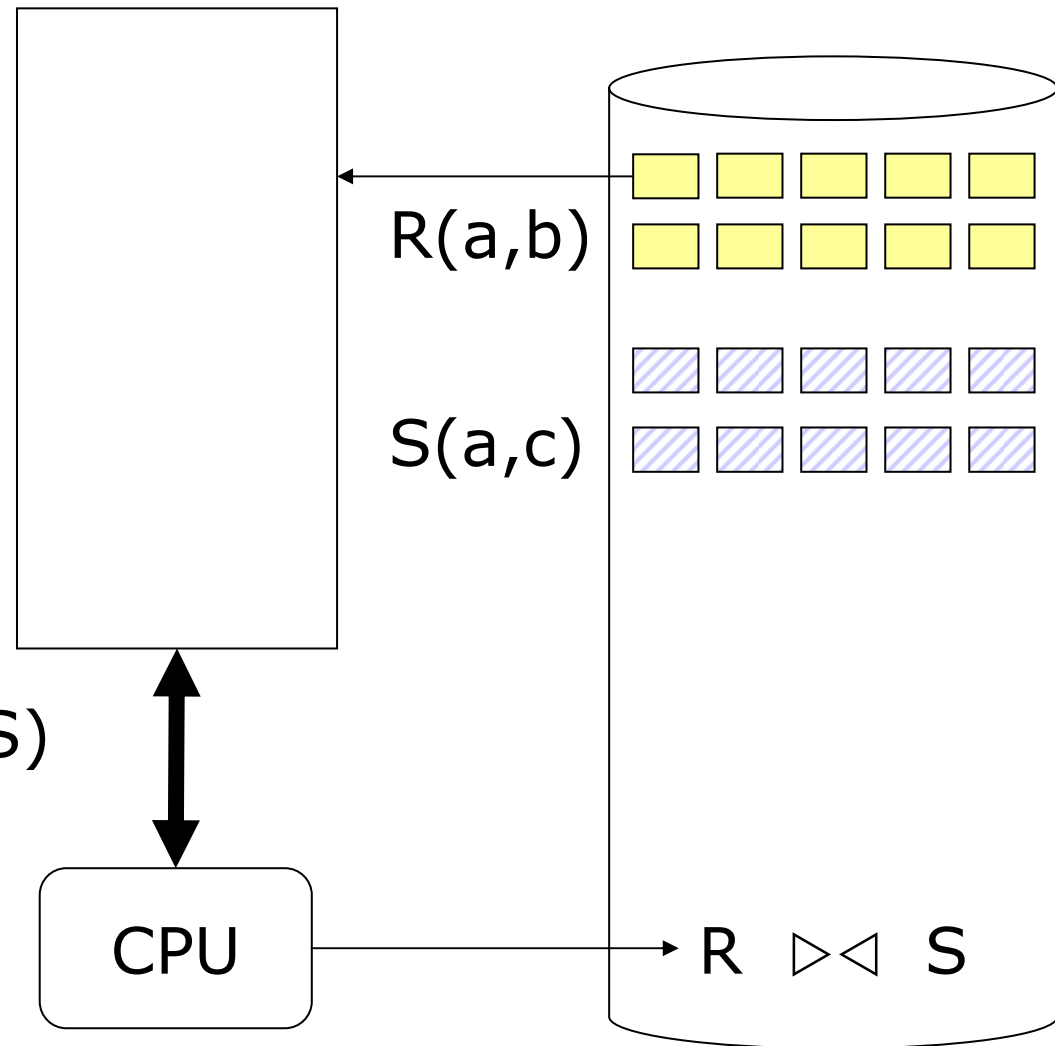


# Nested-Loop Join

R、S どちらも主記憶に  
格納できない場合

```
for s ∈ S do
  for r ∈ R do
    r と s が属性 a で一致
    するならば、r と s を
    融合したレコードを出力
```

RとSのブロック数  $B(R), B(S)$   
 $B(R) \times B(S)$ 個のブロックが  
読み出される



# ブロックを考慮した Nested-Loop Join の工夫

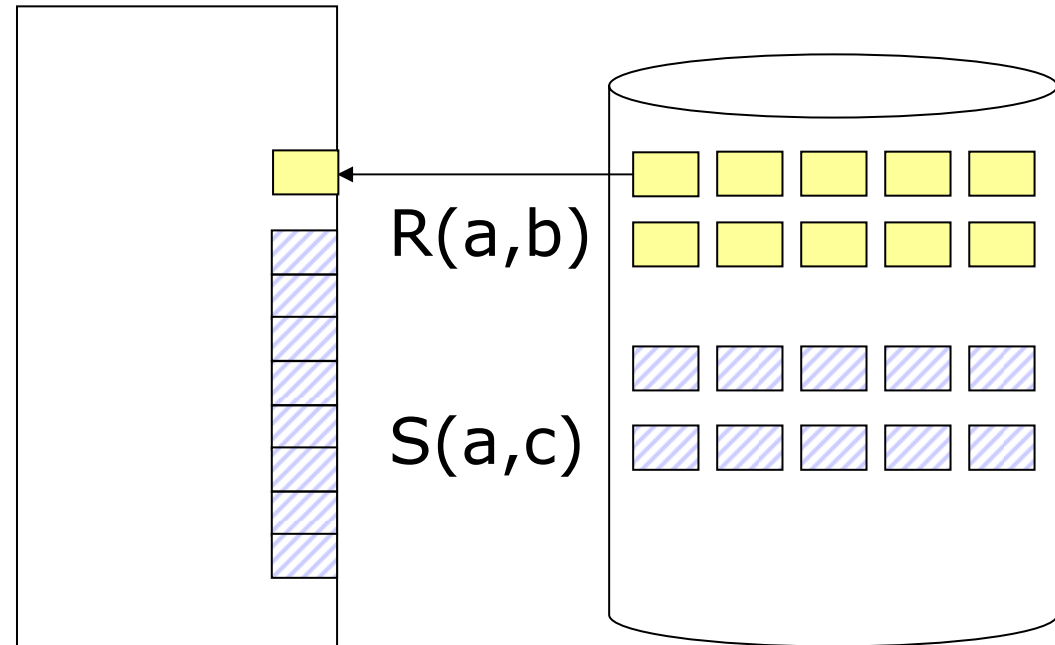
wwwデータベース技術

外のループ

S はブロック単位に  
主記憶にできるだけ、  
例えば  $M-1$  ブロック読む。  
属性  $a$  で高速検索。

内のループ

R もブロック単位に読み、  
属性  $a$  が一致する S の  
レコードを高速検索



ブロック数  $B(R), B(S)$

ブロック読み出し総回数

$$B(S)/(M-1) \times (M-1 + B(R))$$

$$= B(S) + B(S)B(R)/M-1 \doteq B(R)B(S)/M$$