具体的な講義の項目

- イントロダクション
- データベースのモデル
- 関係データベース（関係代数、関係論理）
- 正規化
- 問い合わせ言語
- トランザクション処理
- データベースの内部構造
- データベースの問い合わせ処理
- その他（オブジェクト指向DB、アクティブDB等々）

関係演算アルゴリズムとコスト

- 関係代数演算を対象
  - 基本操作の記述
    - 関係データベース処理のアセンブラ
- コストの見積もり
  - 比較回数（CPUコスト）とディスクI/O
  - 関係 Rのサイズとして
    - R のタプル数を {R}
    - R のディスクページ数を |R|

関係データベース演算の種類(1)

- 1 入力演算 (Unary Operations)
  - 選択演算 (Selection)
  - 射影演算 ([Delta] Projection)
  - 集約演算 (Aggregation)
  - 整列 (Order-by)
  - 重複除去 (Duplication Elimination)
  - グループ化 (Group-by)

関係データベース演算の種類(2)

- 2 入力演算 (Binary Operations)
  - 結合演算 (Join)
  - 準結合演算 (Semi-Join)
  - 集合積演算 (Intersection)
  - 集合差演算 (Difference)
  - 集合和演算 (Union)
  - 直積演算 (Cartesian Product)
  - 商 (Division)

選択演算アルゴリズムとコスト

- 選択演算 (Selection)
  - Index なし
    - 比較回数: {R}
    - ディスク I/O 回数: |R|
  - Index あり
    - B-tree Index の比較回数、ディスク I/O:
      - Tree の深さ + 1: Tree の深さは $\log_F\{R\}$
    - ハッシュ Indexの比較回数、ディスク I/O:
      - 定数回

射影演算アルゴリズムとコスト

- 射影演算 (Projection)
  - ただし、重複除去は行なわない
    - デルタ射影: Delta Projection
  - Index の効果はなく、全スキャン
  - タプルアクセス回数:
    - {R}
  - ディスク I/O 回数:
    - |R|

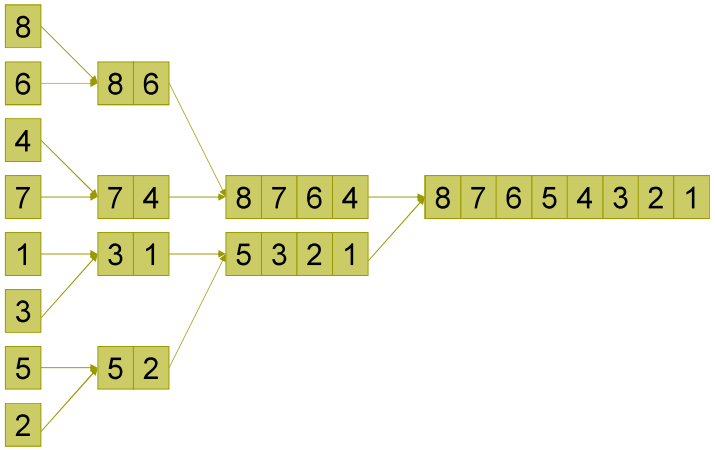
集約整列演算アルゴリズムとコスト

- 集約演算 (Aggregation)
  - Index の効果はなく、全スキャン
    - 比較回数: {R}
    - ディスク I/O 回数: |R|
- 整列演算 (Order-by)
  - メモリ上に乗る場合
    - 一般のソートアルゴリズム
      - クイックソート、マージソート、ヒープソート、etc

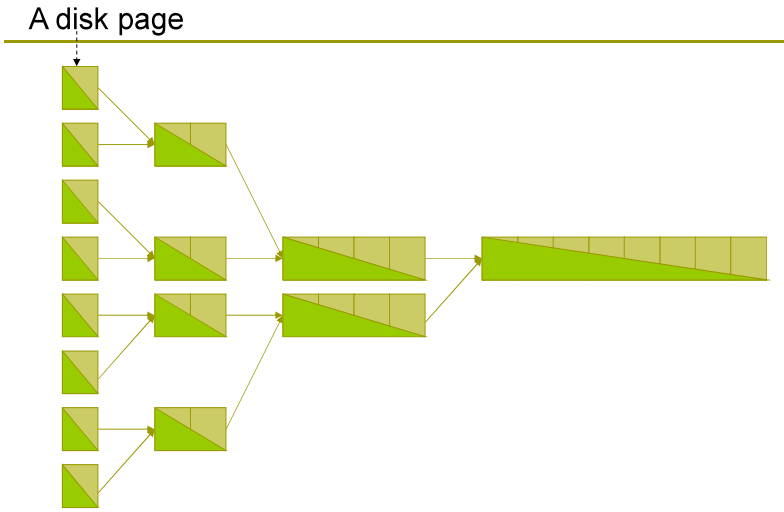
整列演算アルゴリズムとコスト

- メモリ上に乗らない場合の整列演算 (外部ソート)
  - ディスクアクセスを前提とするとクイックソートは適さない
    - 最初に Logical Key で分割
    - → サイズが一定でない
  - マージソートが多用される傾向 ← 最初の分割は物理的
    - n-way マージした各段をディスクに格納
  - 2-way マージソートを前提にした場合のコスト
    - 比較の回数: $\{R\} \log_2 \{R\}$
      - ディスク I/O: 2 $|R| \log_2 |R|$
      - 各段で読み出した後、結果を格納

2-way マージソート



2-way ページマージソート



重複除去アルゴリズムとコスト(1)

- 重複除去 (Duplication Elimination)
  - 入れ子ループ (Nested Loop)
    - 1 つの対象に対して、同じ値のものを探す
    - 対象毎に全部をスキャン
    - 比較回数：{R}({R} - 1)/2
      - ({R} - 1)、({R} - 2)、...、1 の和
    - ディスク I/O：|R|(|R| + 1)/2
      - 最後に結果をディスクに書き込む
      - メモリが十分ある場合：|R|

重複除去アルゴリズムとコスト(2)

- ソート (Sort)利用
  - ソートした後で、頭から重複しているか見ていく
  - マージソートを前提（整列演算を参照）
    - 比較の回数：{R}(log{R}+1)
      - ソートのコストとその後の1回スキャンのコスト
    - ディスク I/O ：|R|(2 log|R|+1)
      - 各段で読み出した後、結果を格納
- ハッシュ (Hash)利用
  - 同じハッシュバケットの中で同じ値を除去
    - ハッシュコリジョンが無いとすれば 1 回スキャンで OK
  - 比較の回数：{R}
  - ディスク I/O： 2|R|

グループ化演算 (Group-by)（1）

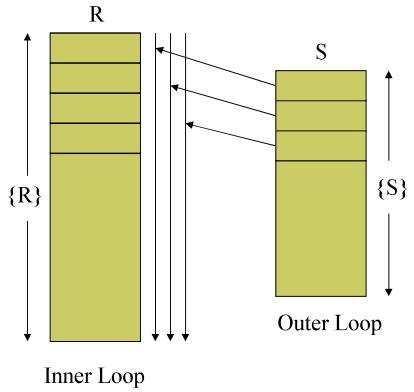
- 入れ子ループ (Nested Loop)
  - 1 つの対象に対して、グループになるものを探す
  - 対象毎に全部をスキャン（重複除去と同様）
  - 比較回数：
    - {R}({R} - 1)/2
      - ({R} - 1)、({R} - 2)、...、1 の和
  - ディスク I/O：
    - |R|(|R| + 1)/2
      - 最後に結果をディスクに書き込む

グループ化演算 (Group-by)（2）

- ソート (Sort)
  - ソートした後で、頭から見ていく
  - マージソートを前提（重複除去と同様）
    - 比較の回数：{R}(log{R}+1)
      - ソートのコストとその後の1回スキャンのコスト
    - ディスク I/O ：|R|(2 log|R|+1)
- ハッシュ (Hash)
  - 同じハッシュバケットの中でグループ化
  - ハッシュコリジョンが無いとすれば（重複除去と同様）
    - ハッシュ関数の適用、比較の回数：{R}
    - ディスク I/O： 2|R|

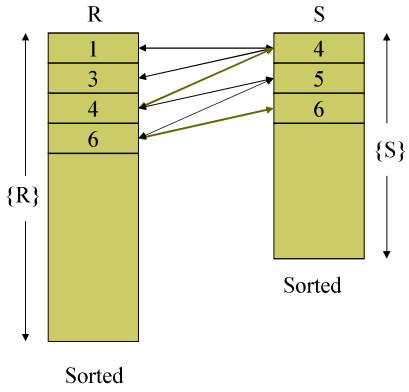
結合演算 (Join) （1）

- 入れ子ループ結合 (Nested Loop Join)
  - 全てのタプルの組み合わせの比較
  - 比較回数：{R} ×{S}
  - ディスク I/O：|R| × |S|



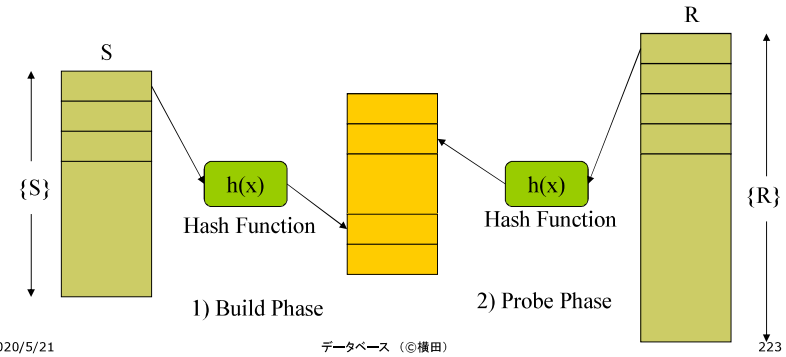
結合演算 (Join) （2）

- ソートマージ結合 (Sort Merge Join)
  - 先頭のタプル同士の比較
  - 比較の回数：{R}(log{R}+1) + {S}(log{S}+1) -1
  - ディスク I/O ： |R|(2 log|R|+1) + |S|(2 log|S|+1)



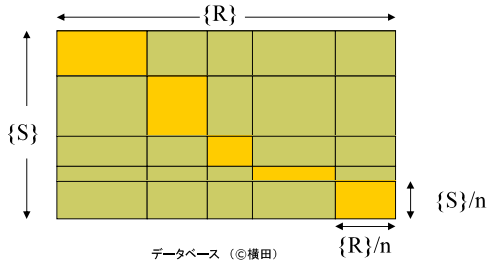
結合演算 (Join) （3）

- ハッシュ結合 (Hash Join)
  - 等結合のみ（θ 結合はだめ）
  - 両方の関係のタプルに同じハッシュ関数適用



結合演算 (Join) （4）

- R と S の全タプルがメモリ上に乗る場合
  - 比較の回数: {R}/n × {S}/n × n = ({R}×{S})/n
    - バケット数 n が十分大きい場合:{R}
  - ハッシュ関数の適用の回数:{R} + {S}



ちょっと考えてみよう（10－1）

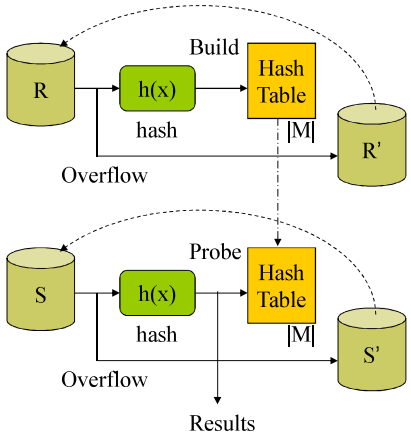
- 結合演算のコスト比較（イメージをもってもらうため）
  - R の Cardinality 1024
  - S の Cardinality 256
  - 全てメモリ上に乗るとして、
  - 入れ子ループ結合での比較回数は何回になるでしょう
  - ソートマージ結合での比較回数は何回になるでしょう
  - ハッシュ結合でRでProbe するとした場合の比較回数とハッシュ適用回数は何回になるでしょう

結合演算 (Join) （5）

- メモリに乗り切らない場合のハッシュ結合アルゴリズム
  - 単純ハッシュ結合 (Simple Hash Join)
  - GRACEハッシュ結合 (GRACE Hash Join)
  - ハイブリッドハッシュ結合 (Hybrid Hash Join)}
- 以下のコスト算出での前提
  - ハッシュテーブルに使えるメモリ量:|M|
  - 属性値は均等に分散
  - |R| > |S|

単純ハッシュ結合（1）

- ハッシュテーブルに入りきらない部分をディスクに格納
  - オーバーフロー分が無くなるまで繰り返す
  - R も S も（同じハッシュテーブルを使うため）
- 繰り返しの回数（期待値）:
  - L = |R|/|M|　（≧ 1）



スキップ

単純ハッシュ結合（2）

- CPUコスト：ハッシュ適用回数と比較回数
  - 1 回目
    - ハッシュ適用回数：{R} + {S}
    - 比較回数：{S}/L
  - i = 1,…, L 回目
    - ハッシュ適用回数：
      - {R} - (i -1)×{R}/L + {S} - (i - 1)×{S}/L
    - 比較回数：
      - {S}/L

スキップ

単純ハッシュ結合（3）

- 全体としてのハッシュ適用回数：
  - L×({R}+{S}) – (L× (L-1))/2×({R}/L + {S}/L)
    = (L + 1)/2 ×({R} + {S})
    = (|R| + |M|) × ({R} + {S}) /2 |M|
- 全体としての比較回数：
  - ({S}/L) × L = {S}

スキップ

単純ハッシュ結合（4）

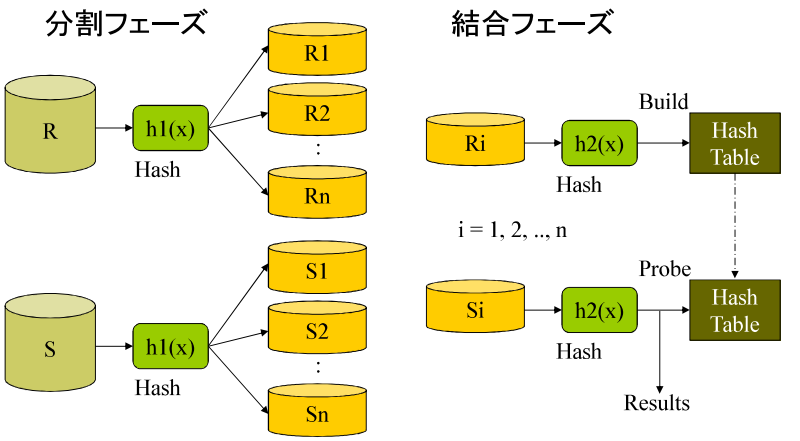
- ディスクI/O
  - 1 回目
    - 読みだし：(|R| + |S|) 回
    - 書き込み：(|R| - |M| + |S| - |S|/L) 回
      - あるいは、|M| = |R|/L より(|R| +|S|) – (|R| + |S|)/L 回
  - 2 回目以降 i 回目
    - 読みだし：((|R| + |S|) - (i - 1) ×(|R| + |S|)/L 回
    - 書き込み：((|R| + |S|) - i ×（|R| + |S|)/L 回

スキップ

単純ハッシュ結合（5）

- 全体（1 回目から L 回目までの和）
  - 2L × (|R| + |S|) - (L (L + 1)/2+(L (L - 1)/2 (|R| + |S|)/L
  - = L (|R| + |S|)
  - = |R| (|R| + |S|)/|M|

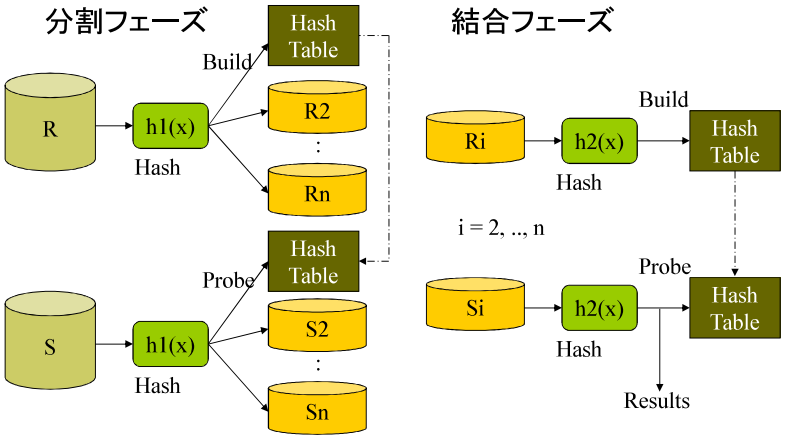
GRACEハッシュ結合（1）



GRACEハッシュ結合（2）

- コスト
  - ディスク I/O 回数: 3(|R| + |S|)
  - 比較回数:Σ{S_i } =（{S}/n）×n = {S}
    - 結合フェーズでもハッシュ結合を使うとして、
  - ハッシュ適用回数:
    - 分割フェーズ: {R} + {S}
    - 結合フェーズ:Σ(R_i + S_i)= {R} + {S}
  - 全体:2({R} + {S})

ハイブリッドハッシュ結合（1）



ハイブリッドハッシュ結合（2）

- コスト
  - ディスク I/O 回数：
    - 3(|R| + |S|) - 2 (|R| + |S|)/L= (3 - 2|M|/|R|) × (|R| + |S|)
  - 比較回数とハッシュ適用回数
    - GRACE と同じ

	ディスクI/O	ハッシュ適用	比較回数
Simple	|R|(|R| + |S|)/|M|	(|R|+|M|)({R}+{S}) /2|M|	{S}
GRACE	3(|R| + |S|)	2({R} + {S})	{S}
Hybrid	(3-2|M|/|R|)(|R|+|S|)	2({R} + {S})	{S}

ディスク I/O の比較

- Simple Hash 結合と GRACE Hash 結合
  - |R|/|M| < 3 より
    - |R| < 3|M| の時は、Simple Hash が得
    - それ以外の時（普通）は、GRACE Hash が得
- Simple Hash 結合と Hybrid Hash 結合
  - |R|/|M| < (3-2 |M|/|R|) より
    - |R| < 2|M| の時は、Simple Hash が得
    - それ以外の時は、Hybrid Hash が得
- GRACE Hash 結合と Hybrid Hash 結合
  - 常に 3 > (3-2|M|/|R|) : Hybrid Hash が得
  - ただし実現方法は GRACE Hash の方が簡単

ちょっと考えてみよう（10－2）

- 製造元関係（商品番号、商品名、製造元）と商品分類関係（商品分類、商品名）を、商品名でハッシュ結合処理する場合を考える。製造元関係と商品分類関係のページ数をそれぞれ100、50とし、商品分類関係でビルドし、製造元関係でプローブする。
  1. ハッシュテーブルに使えるページ数を10とした場合の、Simpleハッシュ結合、GRACEハッシュ結合、Hybrid ハッシュ結合のディスク I/O数はそれぞれ何回になるでしょうか
  2. GRACEハッシュ結合より Simple ハッシュ結合のI/Oが少ないのはハッシュテーブルに使えるメモリ量がどのような場合でしょうか
  3. Hybridハッシュ結合より Simple ハッシュ結合のI/Oが少ないのはハッシュテーブルに使えるメモリ量がどのような場合でしょうか

割り算 ($R_a[X] \div R_b[Y]$)

- 直接法
  - ソート利用：R_aのXをマイナー、X_cをメジャーでソートし、R_bも Xでソートする
    - 例：R_a[販売員] ÷ R_b[販売員]
      - 商品名が変る毎に販売員を付き合せ最後まで行ったら商に追加
  - ハッシュ利用：R_bに対応したハッシュテーブルH_1と商の候補のハッシュテーブルH_2 に R_bに対応した bit を用意
    - R_aをハッシュしH_1のエントリを調べ、H_2の bit を立てる
- 間接法
  - 集約演算を使う：R_aをGroup-ByしR_bと同じCountか調査
    - 予めR_aを R_b で Semi-Join しておく

ソートを利用した割り算の例

販売実績関係 [R_a]

販売員	商品名
田中	17‘CRT
田中	15‘TFT
田中	3.5‘ HDD
田中	600dpi LPR
鈴木	15‘TFT
鈴木	3.5‘ HDD
鈴木	600dpi LPR
佐藤	17‘CRT
佐藤	15‘TFT
佐藤	3.5‘ HDD

ソート

マイナー　メジャー

販売員	商品名
佐藤	15‘TFT
鈴木	15‘TFT
田中	15‘TFT
佐藤	17‘CRT
田中	17‘CRT
佐藤	3.5‘ HDD
鈴木	3.5‘ HDD
田中	3.5‘ HDD
鈴木	600dpi LPR
田中	600dpi LPR

販売員関係 [R_b]

販売員
佐藤
鈴木
田中

結果

商品名
15‘TFT
3.5‘ HDD

ハッシュを利用した割り算の例

販売実績関係 [R_a]

販売員	商品名
田中	17‘CRT
田中	15‘TFT
田中	3.5‘ HDD
田中	600dpi LPR
鈴木	15‘TFT
鈴木	3.5‘ HDD
鈴木	600dpi LPR
佐藤	17‘CRT
佐藤	15‘TFT
佐藤	3.5‘ HDD

H_1

佐藤	1
鈴木	2
田中	4

H_2

	佐藤	鈴木		田中
15‘TFT	1	1		1
600dpi LPR		1		1
17‘CRT	1			1
3.5‘ HDD	1	1		1

集約演算を利用した割り算の例

販売実績関係 [R_a]

販売員	商品名
田中	17‘CRT
田中	15‘TFT
田中	3.5‘ HDD
田中	600dpi LPR
鈴木	15‘TFT
鈴木	3.5‘ HDD
鈴木	600dpi LPR
佐藤	17‘CRT
佐藤	15‘TFT
佐藤	3.5‘ HDD

```
SELECT    商品名, COUNT(販売員)
FROM      販売実績
GROUP BY  商品名
```

商品名	COUNT(販売員)
17‘CRT	2
15‘TFT	3
3.5‘ HDD	3
600dpi LPR	2

ちょっと考えてみよう（10－3）

- 下記の SQL は、semi-join と最終結果の商品名を選んでいません

```
SELECT    商品名, COUNT(販売員)
FROM      販売実績
GROUP BY  商品名
```

semi-join を含み、最終結果を選ぶように書き換えてみましょう

結合、割り算以外の 2 入力関係演算

- 準結合(Semi-Join)
  - 等結合の結果が一方の関係のみ
    - Nested Query に対応
  - 基本的なコストは等結合と同じ
    - ハッシュテーブルを小さくできる
  - 使われ方
    - 集合演算に利用
    - 分散データベース等で転送データを絞り込む時に用いられる

結合、割り算以外の 2 入力関係演算

- 集合積
  - 全ての属性に対する等結合または準結合
    - コストは等結合と同じ
- 集合和
  - 2 つの関係の Concatenation 後の重複除去
  - または一方の関係と集合差との Concatenation

結合、割り算以外の 2 入力関係演算

- 集合差
  - 全ての属性に対する Anti-Semi-Join
    - Anit-Semi-Join:
      - Semi-Join の結果に含まれないタプルを選択
    - Semi-Join の処理の中に組み込むことが可能
      - Semi-Join で捨てるタプルを残し、残すタプルを捨てる
  - コストは等結合と同じ

問い合わせ木のコスト最適化

スキップ

- 演算適用の順番を変えることでコストが変る
- 関係代数式の変形
  - $\sigma_{c1 \wedge c2}(R) = \sigma_{c1}(\sigma_{c2}(R))$
  - $\sigma_{c1}(\sigma_{c2}(R)) = \sigma_{c2}(\sigma_{c1}(R))$
  - $\{x1, x2, \ldots, xn\} \subseteq \{y1, y2, \ldots, ym\}$ なら
    $\Pi_{x1, x2, \ldots, xn}(\Pi_{y1, y2, \ldots, ym}(R)) = \Pi_{x1, x2, \ldots, xn}(R)$
  - $\Pi_{x1, x2, \ldots, xn}(\sigma_c(R)) = \sigma_c(\Pi_{x1, x2, \ldots, xn}(R))$
  - 条件 c が属性 $\{y1, y2, \ldots, ym\}$ を参照するなら
    $\Pi_{x1, x2, \ldots, xn}(\sigma_c(R)) = \sigma_c(\Pi_{x1, x2, \ldots, xn, y1, y2, \ldots, ym}(R))$

スキップ

問い合わせ木のコスト最適化

- 条件c1が R_1の属性のみを参照するなら
  - $\sigma_{c1}(R_1 \times R_2) = \sigma_{c1}(R_1) \times R_2$
  - $\sigma_{c1}(R_1 \bowtie_{c2} R_2) = \sigma_{c1}(R_1) \bowtie_{c2} R_2$
- 射影と集合演算
  - $\sigma_c(R_1 \cup R_2) = \sigma_c(R_1) \cup \sigma_c(R_2)$
  - $\sigma_c(R_1 \cap R2) = \sigma_c(R_1) \cap \sigma_c(R_2)$
  - $\sigma_c(R_1 - R2) = \sigma_c(R_1) - \sigma_c(R_2)$

スキップ

問い合わせ木のコスト最適化

- $\Pi_{x1, x2, \ldots, xn}(R_1 \times R_2)$
  $= \Pi_{y1, y2, \ldots, ym}(R_1) \times \Pi_{z1, z2, \ldots, zk}(R_2)$
- $\Pi_{x1, x2, \ldots, xn}(R_1 \bowtie_c R_2)$
  $= \Pi_{y1, y2, \ldots, ym}(R_1) \bowtie_c \Pi_{z1, z2, \ldots, zk}(R_2)$
- 条件cが{u1, …, up}と{v1, …, vq}を参照するなら、
- $\Pi_{x1, x2, \ldots, xn}((R_1 \bowtie_c R_2)$
  $= \Pi_{y1, y2, \ldots, ym, u\_1, \ldots, u\_p}(R_1) \bowtie_c \Pi_{z1, \ldots, zk, v1, \ldots, vq}(R_2)$
- $\Pi_{x1, x2, \ldots, xn}((R_1 \cup R_2)$
  $= \Pi_{x1, x2, \ldots, xn}(R_1) \cup \Pi_{x1, x2, \ldots, xn}(R_2)$

スキップ

問い合わせ木のコスト最適化の例

- 「商品分類が Computer に属する GELL の商品で、秋葉原支店での販売価格が 100,000 円以下の商品の商品名と秋葉原支店での在庫を出力せよ」
- SQLで記述

```
SELECT  製造元.商品名, 秋葉原支店.在庫
FROM    製造元, 商品分類, 秋葉原支店
WHERE   製造元.商品名 = 商品分類.商品名
AND     製造元.製造元 = 'GELL'
AND     商品分類.商品分類 = 'Computer'
AND     製造元.商品番号 = 秋葉原支店.商品番号
AND     秋葉原支店.販売価格 ≦ 100,000
```

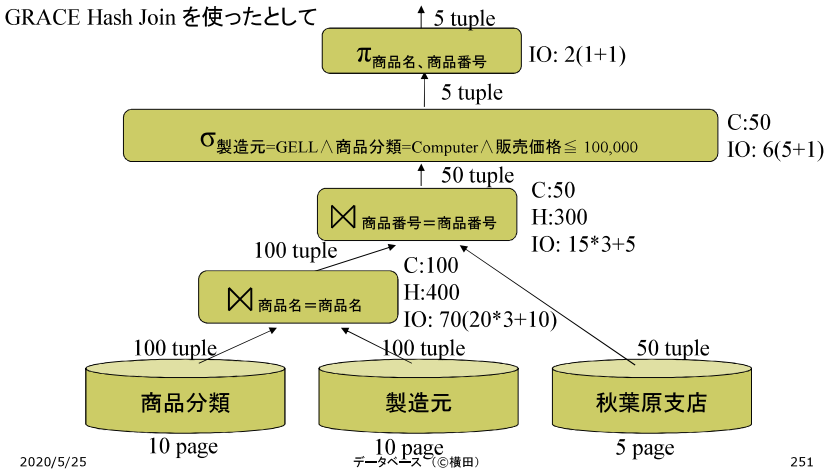

スキップ

関係代数表現（実行スケジュール）の例

1. 先に結合してから絞り込む
   - $\Pi_{商品名, 在庫}(\sigma_{製造元=GELL \wedge 商品分類=Computer \wedge 販売価格 \leqq 100,000}$
     $((商品分類 \bowtie_{商品名} 製造元) \bowtie_{商品番号} 秋葉原支店))$
2. 選択して絞り込んでから結合する
   - $\Pi_{商品名, 在庫}((\sigma_{商品分類 = Computer}(商品分類)$
     $\bowtie_{商品名} (\sigma_{製造元 = GELL}(製造元)))$
     $\bowtie_{商品番号} (\sigma_{販売価格 \leqq 100,000}(秋葉原支店)))$
- 絞込み（選択率）を予測した最適実行スケジュール
  - ディスク I/O、ハッシュ・比較回数が最小になるように
- 上の例だと 2 の方が良い

スキップ

先に結合してから絞り込む



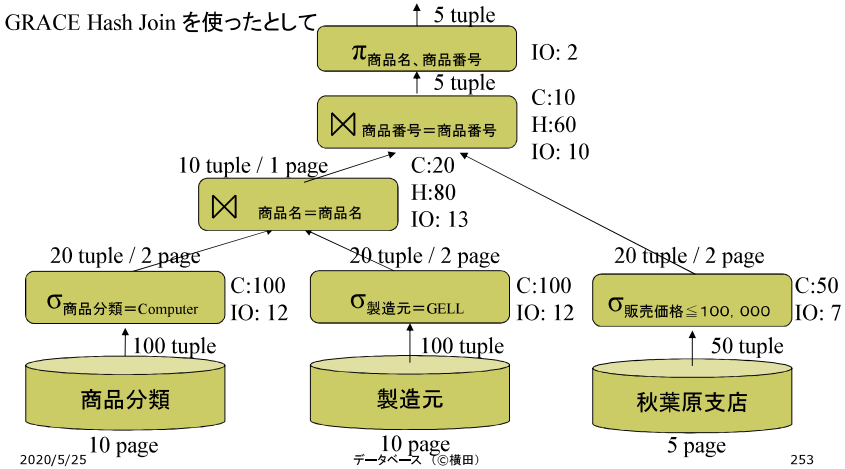
スキップ

先に結合してから絞り込む

- 比較(C):
  - 100 + 50 + 50 = 200
- ハッシュ(H):
  - 400 + 300 = 700
- I/O
  - 70 + 50 + 6 + 2 = 128

スキップ

選択して絞り込んでから結合する



スキップ

選択して絞り込んでから結合する

- 比較(C):
  - 100 + 100 + 50 + 20 + 10 = 280 (vs. 200)
- ハッシュ(H):
  - 80 + 60 = 140 (vs. 700)
- I/O
  - 12 + 13 + 7 + 13 + 10 + 2 = 57 (vs. 128)