

アルゴリズムとデータ構造④

～ 分割統治法 ～

鹿島久嗣

分割統治法

分割統治法：

アルゴリズム設計指針の1つで、問題を小問題に分割して解く

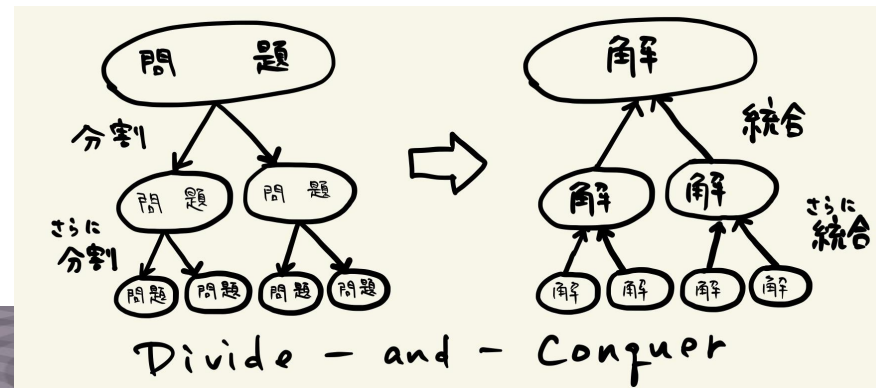
- 特定の問題に対するアドホックな個別の解法ではなく、多くの問題に適用可能なアルゴリズムの一般的な設計指針

— 分割統治法、動的計画法、...

- 分割統治法：

— 元の問題を、同じ構造をもった小さな問題に分割

— 小さな問題の解を統合して元の問題の解を得る

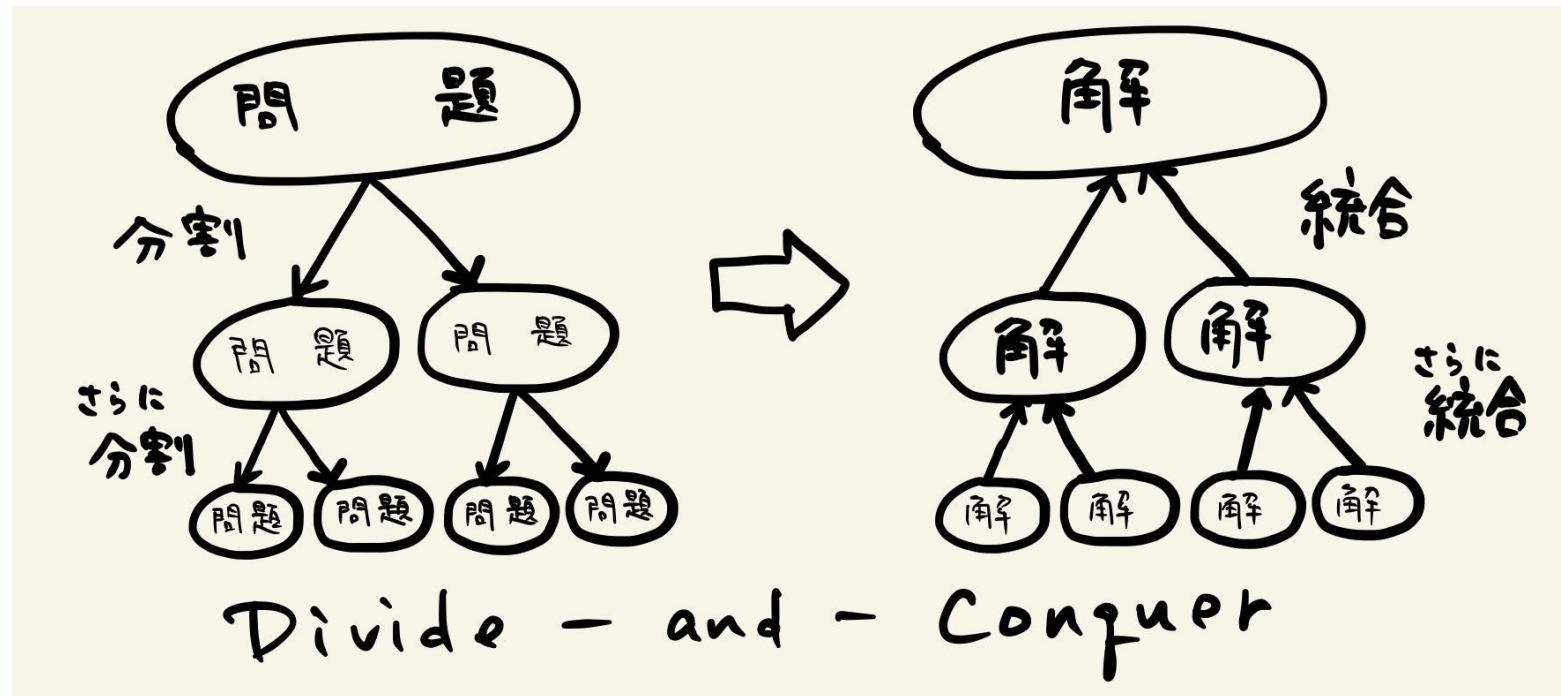


アルゴリズム設計指針の1つで、問題を小問題に分割して解く

■ 分割統治法 (Divide-and-conquer) :

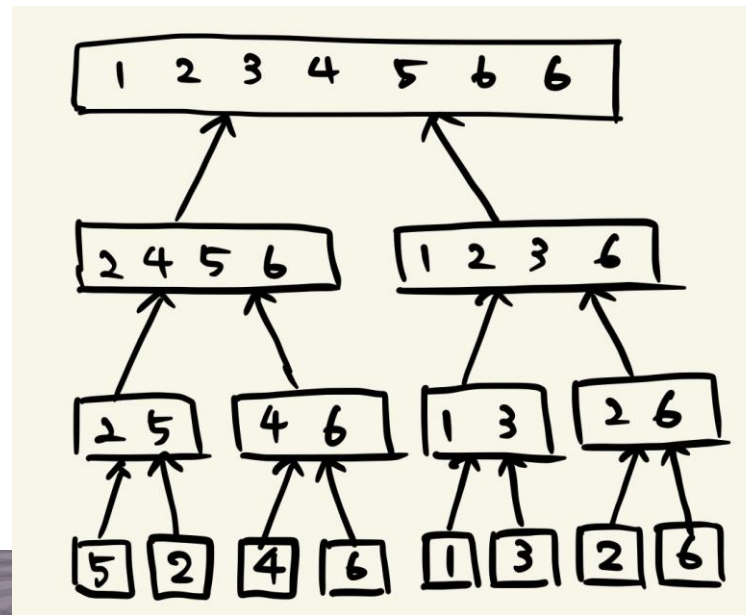
一分割：元の問題を、同じ構造をもった小さな問題に分割

- 統合：小さな問題の解を統合して元の問題の解を得る



分割統治法の例： マージソート

- 入力された配列を前後に分割し、それぞれに対してマージソートを適用する
 - 再帰的に行うことで、サイズ1の配列まで到達する
 - 逆向きに統合して解を構成する
- 例：配列 $(5, 2, 4, 6, 1, 3, 2, 6) \rightarrow (5, 2, 4, 6)$ と $(1, 3, 2, 6)$



マージソート：

マージソートの計算量は $O(n \log n)$

- $n = 2^k$ として $O(n \log n)$
 - 実用的には次に紹介するクイックソートが速い
- 計算量評価の再帰式：

$$T(n) = \begin{cases} O(1) & (n = 1) \\ 2T(n/2) + O(n) & (n \geq 2) \end{cases} = O(n \log n)$$

再帰 統合

マージソート：

マージソートの計算量は $O(n \log n)$

■ 計算量評価の再帰式：

$$T(n) = \begin{cases} O(1) & (n = 1) \\ 2T(n/2) + O(n) & (n \geq 2) \end{cases}$$

■ $T(n) = 2T(n/2) + cn = 2\left(T\left(\frac{n}{2^2}\right) + c\frac{n}{2}\right) + cn$

$$= 2\left(2\left(\dots\left(2\left(\underbrace{T\left(\frac{n}{2^k}\right)}_c + c\frac{n}{2^{k-1}}\right) + c\frac{n}{2^{k-2}}\right)\dots\right) + c\frac{n}{2}\right) + cn$$

$$= c2^k + \underbrace{cn + \dots + cn}_k = O(n \log n)$$

分類定理（簡易版）：

計算量の再帰式から計算量を導く定理

- $T(n)$ の漸化式から $T(n)$ のオーダーを導く
- 定理： 大きさ n の問題を大きさ $\frac{n}{b}$ の問題 a 個に分割した

$$\text{—つまり、 } T(n) = \begin{cases} c & (n = 1) \\ aT\left(\frac{n}{b}\right) + cn & (n \geq 2) \end{cases}$$

$$\text{—このとき： } T(n) = \begin{cases} O(n) & (a < b) \\ O(n \log n) & (a = b) \\ O(n^{\log_b a}) & (a > b) \end{cases}$$

クイックソート

クイックソート： 分割統治法にもとづく高速なアルゴリズム

- 最もよく用いられる、分割統治に基づくソートアルゴリズム
- 平均計算量 $O(n \log n)$ だが、最悪では $O(n^2)$ かかる
 - ただし、実用的には速い
 - その場でのソートが可能
- アルゴリズム $\text{QuickSort}(A, p, r)$
 1. $(A, q) \leftarrow \text{Partition}(A, p, r)$: 分割点 q をみつけて分割
 2. $\text{QuickSort}(A, p, q)$
 3. $\text{QuickSort}(A, q + 1, r)$

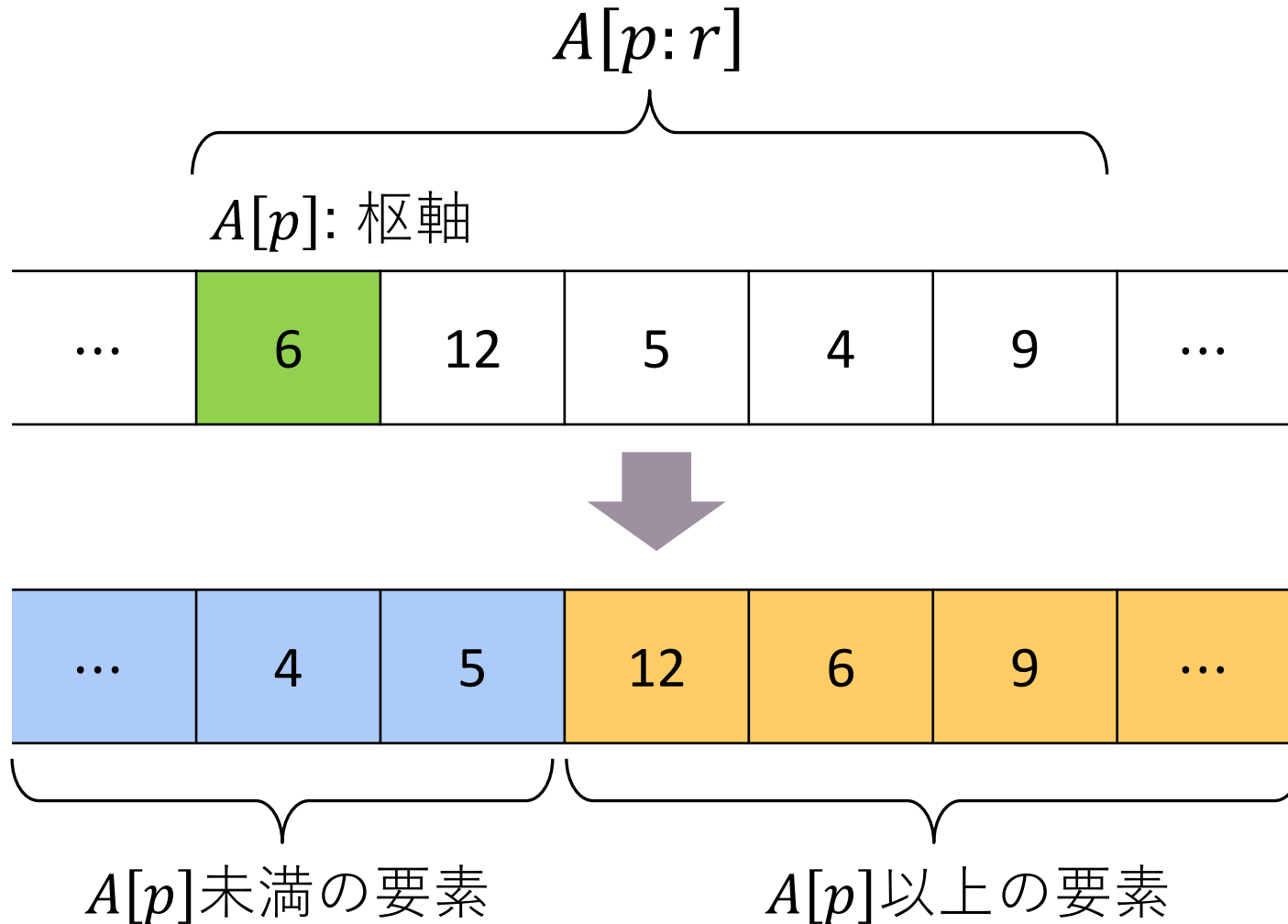
分割したそれぞれについて
クイックソートを適用

p : 配列中でソートする部分の先頭
 r : 配列中でソートする部分の末尾

分割関数 Partition(A, p, r) :

基準となる要素（枢軸）との大小比較で2グループに分割

- $A[p:r]$ を $A[p]$ 未満の要素と、 $A[p]$ 以上の要素に分割



分割関数 Partition(A, p, r) :

基準となる要素（枢軸）との大小比較で2グループに分割

- クイックソートではある数との大小で要素を2群に分割する
 - 比較対象の要素 $A[p]$: 枢軸(pivot)とよぶ
- $A[p:r]$ を $A[p]$ 未満の要素と、 $A[p]$ 以上の要素に分割
 - $A[p]$ 未満の要素が新たに $A[p:q]$ となる
 - $A[p]$ より大きい要素が新たに $A[q + 1:r]$ となる
 - 2つのインデックス i, j を使って配列 $A[p:r]$ を操作 :
 1. $j = r$ から左に走査して枢軸未満の要素を発見する
 2. $i = p$ から右に走査する
 3. 枢軸以上の要素を発見したら両者を入れ替える
 4. 両者が出会うまで繰り返す ($O(r - p)$)

ぶつかったところが q

クイックソートの計算量： 「平均で」 $O(n \log n)$ を実現できる

- 最悪の場合：
 n 個の要素が $n - 1$ 個と1個に分割されたとすると $O(n^2)$
 - 1回の分割でサイズが定数個しか減らない場合
- 最良の場合：
 n 個の要素が $\frac{n}{2}$ 個 2セットに分割されたとすると $O(n \log n)$
 - 分割定理で $a = b$ の場合
 - 定数分の1のサイズに分割される場合
- 最悪の場合を避けるために：ランダムに枢軸を選択
 - 問題例に依存しない平均計算量を達成できる

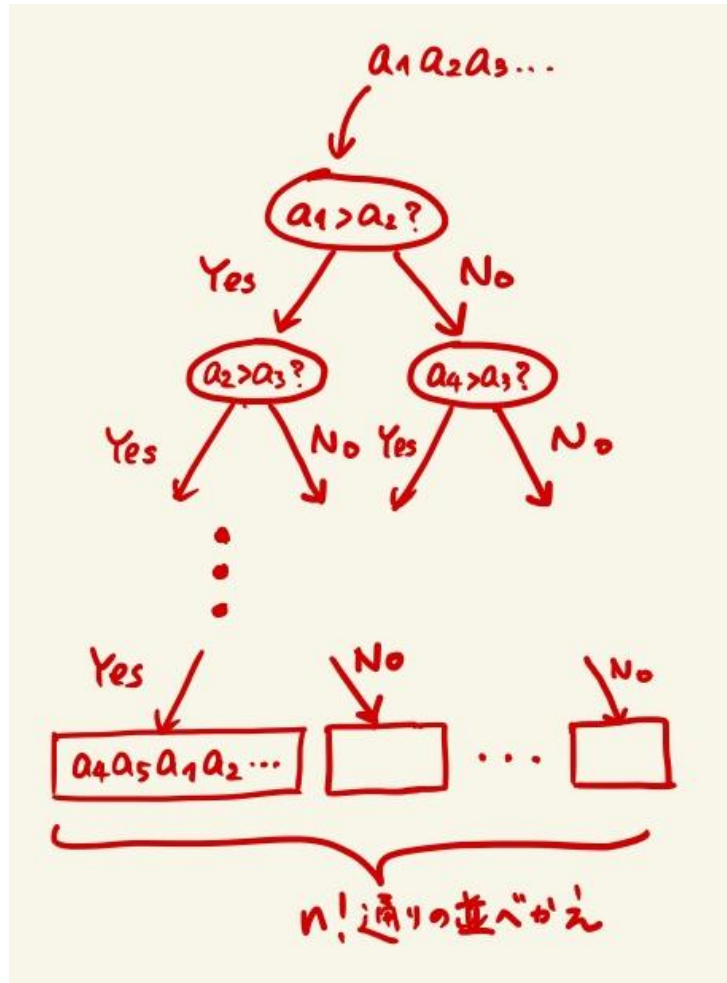
ソートの計算量の下界

ソートの計算量の下界：

$O(n \log n)$ より小さい計算量は達成できない

- ソートのアルゴリズムは最悪計算量 $O(n \log n)$ が必要
- n 個の要素はすべて異なるとすると、ソート後に得られる列の可能性は $n!$ 通り
- ソートは2つの数の比較を繰り返すことで動く
- ソートの流れを2分木で書くことにする：
 - 各頂点で2つの数を比較して分岐
 - 葉は、ある特定の並べ替えに対応
 - 全ての並べ替えが可能であるために葉が $n!$ 個は必要
 - これを実現するためには少なくとも木の高さが $O(n \log n)$

ソートの計算量の下界： $O(n \log n)$ より小さい計算量は達成できない



この高さがどう頑張っても
 $O(n \log n)$ になることを示す

一番下では、とある並び替えが得られる

ソートの計算量の下界：

$O(n \log n)$ より小さい計算量は達成できない

- 全ての可能な並び替えが得られるためには、最下段の要素が少なくとも $n!$ は必要
- 図の高さがちょうど h （完全2分木）とすると、最下段の要素（葉）の数は 2^h
 - 逆に 2^h 個の葉をもつ木で最も低いのが完全2分木
- よって、 $2^h \geq n!$ でないといけない
- 対数をとると
$$h \geq \log n! \geq \log(n/e)^n = n \log n - n \log e = O(n \log n)$$
 - なお、Stirlingの公式 $n! \geq \sqrt{2\pi n}(n/e)^n \geq (n/e)^n$

木の高さが比較回数
(= 計算量) に対応

順序統計量

順序統計量：

小さい方から k 番目の要素は線形時間で発見可能

- 順序統計量：小さい方から k 番目の要素
 - 自明なやり方：ソートを使えば $O(n \log n)$
 - 工夫すれば $O(n)$ で可能：
 - 平均的に $O(n)$ で見つける方法
 - 最悪ケースで $O(n)$ で見つける方法
- の二つのやり方を紹介する

平均 $O(n)$ の順序統計量アルゴリズム： クイックソートと同じ考え方で可能

- $(A, q) \leftarrow \text{Partition}(A, p, r)$ を実行した結果：
 1. $k \leq q$ であれば、求める要素は $A[p:q]$ にある
 2. $k > q$ であれば、求める要素は $A[q+1:r]$ にある—再帰的にPartitionを呼ぶことで範囲を限定していく
- 平均的には問題サイズは半々になっていく：

$$T(n) = T\left(\frac{n}{2}\right) + O(n) = O(n)$$

注：クイックソートでは $2T\left(\frac{n}{2}\right)$ だった

分割のコスト

平均 $O(n)$ の順序統計量アルゴリズム： クイックソートと同様に最悪ケースで $O(n^2)$ にかかってしまう

- $(A, q) \leftarrow \text{Partition}(A, p, r)$ の結果：

配列 $A[p, r]$ を枢軸以下／以上の要素に分け、 q の前後に分割

 1. $k \leq q$ であれば、求める要素は $A[p:q]$ にある
 2. $k > q$ であれば、求める要素は $A[q+1:r]$ にある—再帰的にPartitionを呼ぶことで範囲を限定していく
- 平均的には問題サイズは半々になっていくので $O(n)$

$$T(n) = T\left(\frac{n}{2}\right) + O(n) = O(n)$$

注：クイックソートでは $2T\left(\frac{n}{2}\right)$ だった

- 最悪ケースでは問題サイズは定数しか減らないので $O(n^2)$
- 問題サイズが確実に比率で減っていくようにしたい

最悪 $O(n)$ の順序統計量アルゴリズム： うまく「だいたい真ん中」をとってくる

- $\text{Order}(A, k)$: A の中から k 番目に小さい要素を見つける
 1. A を5個ずつのグループに分け、各グループをソートして中央値（3番目の値）を見つけ、これらを集めて T とする（定数個の要素のソートは定数時間でできることに注意）
 2. T の中央値 m をみつける $\text{Order}(T, \lfloor n/10 \rfloor)$
 3. A を m より小さいもの（ S_1 ）、同じもの（ S_2 ）、大きいもの（ S_3 ）に分割する
 4. (i) $k \leq |S_1|$ ならば $\text{Order}(S_1, k)$ を実行
(ii) $|S_1| < k \leq |S_1| + |S_2|$ ならば m は目的の要素
(iii) $k > |S_1| + |S_2|$ ならば
 $\text{Order}(S_3, k - (|S_1| + |S_2|))$ を実行する。

最悪 $O(n)$ の順序統計量アルゴリズム： うまく「だいたい真ん中」をとってくる

■ $\text{Order}(A, k)$: A の中から k 番目に小さい要素を見つける

1. A を5個ずつのグループに分け、各グループをソートして中央値（3番目の値）を見つけ、これらを集めて T とする（定数個の要素のソートは定数時間でできることに注意）

2. T の中央値 m を見つける $\text{Order}(T, \lfloor n/10 \rfloor)$

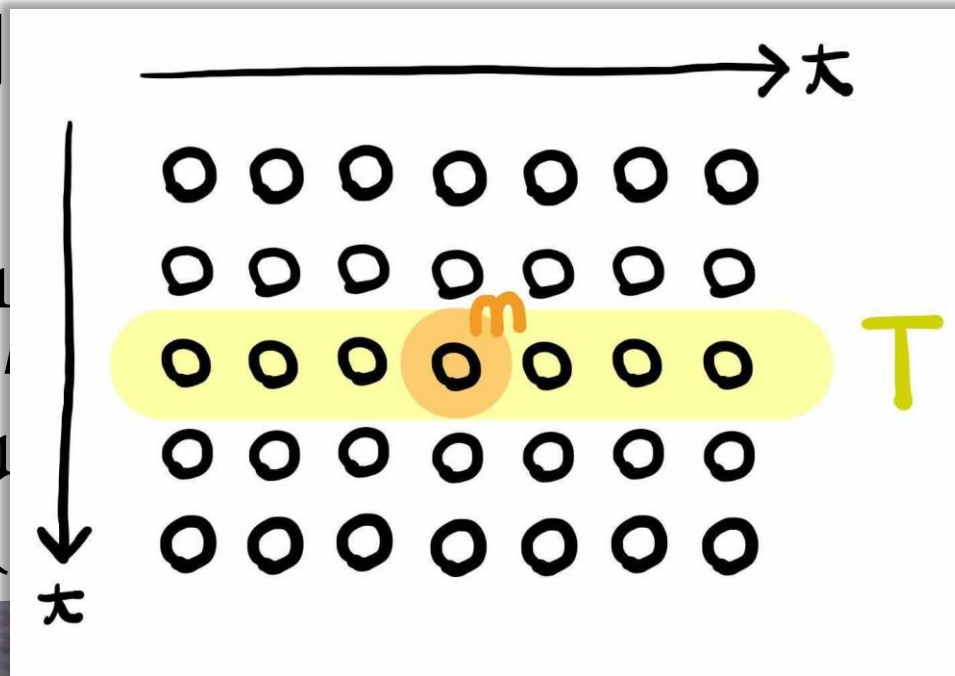
3. A を m より小さいもの（ S_1 ）、 m （ S_2 ）、大きいもの（ S_3 ）に分ける

4. (i) $k \leq |S_1|$ ならば $\text{Order}(S_1, k)$

(ii) $|S_1| < k < |S_1| + |S_2|$ ならば m

(iii) $k > |S_1| + |S_2|$ ならば $\text{Order}(S_3, k - |S_1| - |S_2|)$

$\text{Order}(A, k)$



目的の要素

する。

最悪 $O(n)$ の順序統計量アルゴリズム： 計算量の漸化式

ステップ2

- $T(n) = O(n) + T\left(\left\lfloor \frac{n}{5} \right\rfloor\right) + T\left(\left\lceil \frac{3}{4}n \right\rceil\right) = O(n)$
 - ステップ4の分岐で (i) $\text{Order}(S_1, k)$ が選ばれたとする
 - 中央値 m 以上の要素が少なくとも $\frac{1}{4}n$ 個ある
 - したがって中央値より小さい要素数は最大 $\frac{3}{4}n$ 個
- 直観的には「各グループの中央値を集めた中の中央値は概ね全体の中央値になっている」
 - 全体を分割した小グループのそれぞれの中央値をあつめてその中央値をとると、おおむね全体の中央値が取れるはず

最悪 $O(n)$ の順序統計量アルゴリズム： 計算量の漸化式

- $T(n) = O(n) + T\left(\left\lfloor \frac{n}{5} \right\rfloor\right) + T\left(\left\lceil \frac{3}{4}n \right\rceil\right) = O(n)$

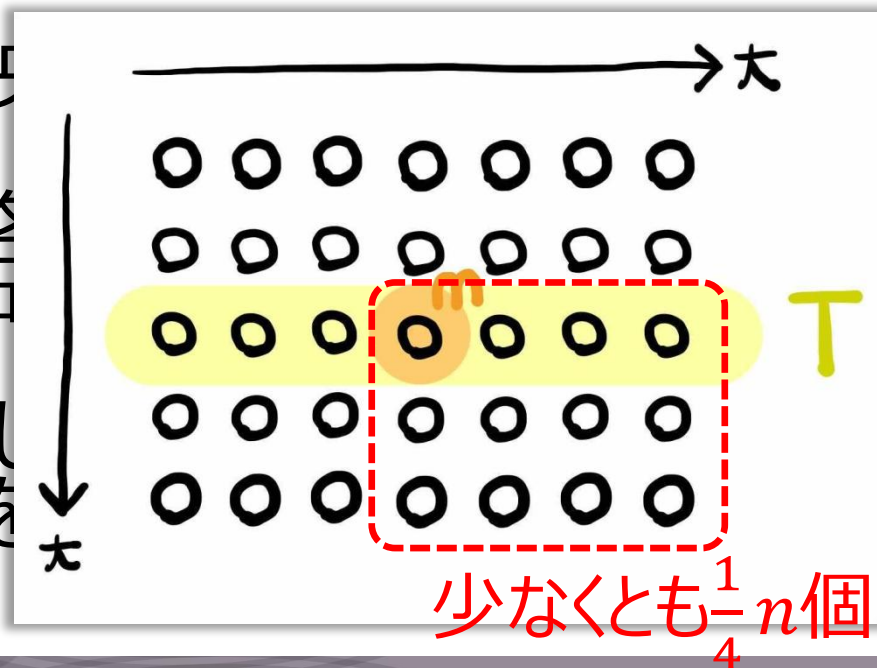
—ステップ4の分岐で (i) $\text{Order}(S_1, k)$ が選ばれたとする

- 中央値 m 以上の要素が少なくとも $\frac{1}{4}n$ 個ある

したがって中央 → 大 $\frac{3}{4}n$ 個

■直観的には「各概ね全体の中

一 全体を分割し、その中央値を



最大 $\frac{3}{4}n$ 個
た中の中央値は

中央値をあつめて
中央値が取れるはず

最悪 $O(n)$ の順序統計量アルゴリズム： 計算量の導出

- 定理： $s_1 + s_2 + \cdots + s_d < 1$ として

$T(n)$

$$= \begin{cases} c & (n \leq n_0) \\ T(s_1 n) + T(s_2 n) + \cdots + T(s_d n) + c' n & (n > n_0) \end{cases}$$

とすると、 $T(n) \leq \frac{cn}{1-(s_1+s_2+\cdots+s_d)} = O(n)$

- 今回のケースでは $s_1 = \frac{1}{5}$, $s_2 = \frac{3}{4}$ であり、👉 の定理を使うと
 $T(n) = O(n)$