

# I222:計算の理論

担当:上原隆平

テキスト:

「計算可能性・計算の複雑さ入門」

渡辺治著, 近代科学社

# I222: Theory of Computation

- by Prof. Ryuhei UEHARA
- **Text:**
- **"Introduction to Computability and Computational Complexity"**  
by Osamu Watanabe, Kindai-Kagaku-sha  
(in Japanese)

# 1. 問題とアルゴリズム

## 1.1. 問題とは, アルゴリズムとは, そして手に負えない問題とは

### 問題とは何か

= 関数の計算問題 : 入力  $\rightarrow$  出力  
(数値計算だけでない)

### ソート問題

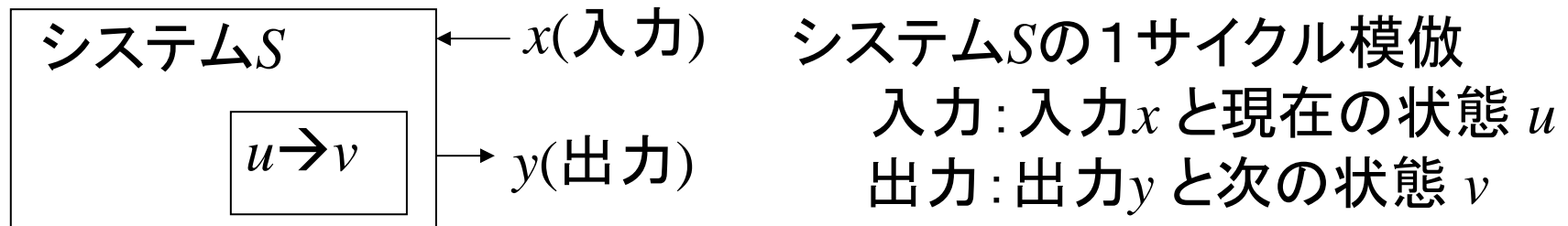
入力: 自然数の列  $a_1, a_2, \dots, a_n$

出力: 入力列を小さい順に並べた列  $a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_n}$ .

入力と出力が数学的に明確に定義されていること

~~出力: 最高の料理法~~

### 例1.1. コンピュータシステムの働き



$(x, u)$ を $(y, v)$ に対応させる関数  $f_S$  の計算問題

# Chap. 1 Problems and Algorithms

## 1.1. What are problems and algorithms? Intractable problems?

### Problem

= Problem of computing a function: input  $\rightarrow$  output  
(not only numerical computation)

### Sorting Problem

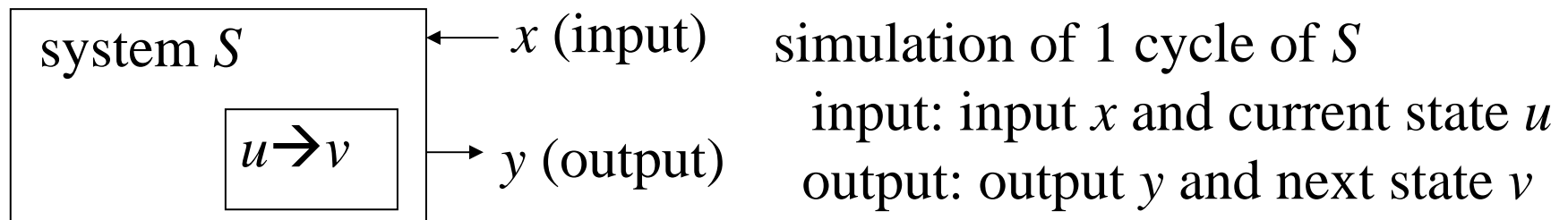
input: sequence of natural numbers  $a_1, a_2, \dots, a_n$

output: increasing order  $a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_n}$ .

Input and output must be mathematically defined

~~output: the best recipe~~

### Example: Performance of a computer system



problem of computing a function to map  $(x, u)$  to  $(y, v)$

**仮定:** どんな入力に対しても関数は何か値を返す  
 たとえば, 異常入力に対しては ? を返す  
 = 全域関数の立場

システム  $S$  が入力  
 10 に対して停止し  
 ないなら  $f_S(10)=?$   
 と定義

### 問題を解くアルゴリズム (algorithm)

入力に対して問題が規定している出力を求める方法.

何を求めるか      の違い  
 如何に求めるか

### 2次方程式の根計算問題

入力: 有理数  $a, b, c$

出力:  $ax^2+bx+c=0$  を満たす  $x$  の一つ

出力が何かは明確だが, 出力を求める方法は?

「アルゴリズム = 方法」

→ アルゴリズム = プログラムとして実現できる計算方法

**Assumption**: system returns some value for any input

e.g. ? is returned for an abnormal input

= standpoint of total function

### Algorithm for solving a problem

a method for computing an output specified in the problem.

What to be computed?

How to compute?

> **difference**

Problem of calculating a root of a quadratic equation

input: rational number  $a, b, c$

output: an  $x$  that satisfies  $ax^2+bx+c=0$

Output is clearly defined but how can we find it?

"Algorithm = method"

→ algorithm = a method that can be realized as a program

## 難しい問題とやさしい問題

→計算の複雑さ

前半の講義では、「計算不可能な問題」を扱う

手に負えない問題(intractable problems)

「計算可能性の理論」

「帰納関数論」

### 例1.2. 計算不可能な問題の例

停止問題(停止性判定問題)

入力:プログラム $A$ (1入力) とそれへの入力  $x$

出力: $A$  へ  $x$  を与えて実行させると停止するか?

停止するならYES, しないならNO.

この問題は計算不可能であることが証明できる

→後述

## Hard and Easy Problems

→ Complexity of Computation

First half of the lecture deals with "incomputable" problems

### intractable problems

"Theory of Computability"

"Theory of Recursive Functions"

### Example 1.2. Incomputable problems

Halting Problem (Problem of deciding halting)

input: a one-input program  $A$  and an input  $x$

output: whether does it terminate if  $x$  is given to  $A$ ?

YES if it terminates and NO otherwise.

We can prove that this problem is incomputable

→ to be explained later



## プログラムを作るのは“難しい”が、計算は“やさしい”問題

- ・コラッツの予想は正しいか？

入力: なし

出力: Yes か No

コラッツの予想:  
どんな自然数でも  
「偶数ならば2で割り、奇数  
ならば3倍して1を加える」  
ことを繰り返すと1になる

## 計算可能であっても難しい問題

- ・計算時間がかかり過ぎる
- ・多量のメモリーが必要である
- ・計算コストを考えた上での計算可能性  
→「計算の複雑さの理論」 → 後述

## 事実上計算不可能の基準

= 多項式時間で計算することが不可能

→ 手に負えない問題

(多項式時間は手に負える問題の基準ではないことに注意)

否定的な結果を示すための基準

A problem that can be easily programmed but can be computed easily

- Is Collatz Problem true?

input: nothing

output: Yes or No.

**Collatz Problem:**  
Iterating “ $\div 2$  if it is even,  
and  $\times 3+1$  if it is odd”  
always returns 1 for any  
positive integer.

### Computable but hard problems

- too much time for computation
- too much space for storage
- computability based on computation cost  
→ "Theory of computational complexity" → later

### Criterion on practical incomputability

= impossible to be computed in polynomial time

→ intractable problems

(Note that polynomial time is not the criterion to be tractable.)

## NP問題

- (1) 解を教えてもらえば, それが解の条件を満たしているか否かは簡単にチェックできる.
- (2) しかし, 解の候補数が(入力のサイズに関して)指数関数的に増大するので, 「一つ一つの候補をチェックする」という単純なプログラムでは, 時間計算量が指数関数的に増大してしまう.  
1950年代から研究開始

### 例1.3. 箱詰め問題(bin packing problem)

- ・  $n$  個の棒状の荷物: 長さは  $a_1, a_2, \dots, a_n$
- ・ 長さがそれぞれ  $b$  の  $k$  個の箱にうまく収まるように詰めることができるか?

単純な方法では, 少なく見積もっても指数関数的な時間がかかってしまう.

## ***NP Problem***

- (1) Given a solution to the problem, it can be easily checked whether it satisfies the condition for solution.
- (2) But, a simple program checking every solution candidate takes exponential time since the number of candidates grows exponentially.

The study starts in 1950's.

### **Example1.3. Bin packing problem**

- $n$  items of lengths  $a_1, a_2, \dots, a_n$
- Is it possible to pack all the items into  $k$  boxes of length  $b$ ?

A simple algorithm takes at least exponential time.

## $P \neq NP$ 予想

「代表的なNP問題は多項式時間では解けない。」

例1.4. どんな多項式も指数関数よりは緩やかに増加する.

$p(n)$ を任意の多項式,  $e(n)$ を任意の指数関数とすると

→十分大きな  $n$  に対して,  $p(n) \ll e(n)$  が成り立つ.

(例) 十分大きな  $n$  については  $n^{10000} \ll 1.00000001^n$

### 定義1.2.

- (1) その問題を解くプログラムが存在しない問題を, (計算不可能という意味で) 手に負えない問題という.
- (2) その問題を多項式時間以内で解くプログラムが存在しない問題を, (計算困難という意味で) 手に負えない問題という.

## $P \neq NP$ Conjecture

Any representative  $NP$  problem cannot be solved in polynomial time.

**Example 1.4.** Any polynomial function grows more slowly than an exponential function.

Let  $p(n)$  be any polynomial function and  $e(n)$  be any exponential function

→ for sufficiently large  $n$ ,  $p(n) \ll e(n)$ .

e.g.,  $n^{10000} \ll 1.0000001^n$  for sufficiently large  $n$ .

### **Definition 1.2.**

- (1) A problem for which there is no program to solve it is called "intractable" in the sense that it cannot be computed.
- (2) A problem for which there is no program to solve it in polynomial time is called "intractable" in the sense that it is hard to be computed.

## 1.2. 準備

### 1.2.1. 集合, 関数, 述語など

#### (1) 数

特に断らない限り, 自然数(0を含む)のみを扱う.

$x$  が実数のとき,  $[x]$  で  $x$  の整数部を表す(切り捨て)

#### (2) 集合

標準的な記号:  $A \cup B, A \cap B, \bar{A}, A \subseteq B$

$A \times B$ :  $A$  と  $B$  の要素の順序対全体の集合

$\|A\|$ : 集合  $A$  の要素数

原則として, 大文字アルファベットで集合を表す. 例外は  
 $\Gamma$  我々のプログラミング言語で文字として許される記号

$\Sigma$   $\{0, 1\}$

$\mathbb{N}$  自然数の全体(0を含む)

## 1.2. Preparation

### 1.2.1. Set, function, predicate, and etc.

#### (1) Number

Only natural numbers (including 0) are considered.

$[x]$  represents the integral part of  $x$  (rounding off)

#### (2) Set

standard notations:  $A \cup B, A \cap B, \bar{A}, A \subseteq B$

$A \times B =$  a set of all pairs of elements of  $A$  and  $B$

$\|A\|$ : number of elements of the set  $A$

In principle, sets are denoted by capital letters.

Exception:  $\Gamma$  symbols used in programs

$\Sigma \quad \{0, 1\}$

$\mathbb{N}$  a set of all natural numbers (including 0)



$X$ : 任意の有限集合

$X$ 上の文字列 =  $X$ の各要素を“文字”とみなし, その文字  
を有限個(0個を含む)並べて得られたもの

文字列の長さ = 文字列を構成する文字の数

$|x|$ : 文字列  $x$  の長さ

文字列 0100 の長さは4.

長さ0の文字列を空列といい,  $\varepsilon$  という記号で表す.

$\Sigma^*$ : 0 と1を並べてできる文字列全体の集合(空列を含む)

辞書式順序(もどき): 長さ優先の辞書式順序

$x, y$ :  $\Sigma^*$  上の文字列

$x < y \Leftrightarrow$  (a)  $|x| < |y|$ , あるいは,

(b) 文字列  $x, y$  で最初に異なる文字を  $x_i, y_i$  とするとき

$$x_i < y_i.$$

(例)  $101 < 0011 < 0100$

通常の辞書式順序との違いは何か?

なぜ, このような順序を導入するのか?

$X$ : any finite set

strings on  $X$  = a finite sequence of elements of  $X$  (each element of  $X$  is regarded as a "letter")

length of a string = the number of letters in the string

$|x|$ : length of a string  $x$

the length of a string "0100" is 4.

A string of length 0 is called an empty string, denoted by  $\epsilon$ .

$\Sigma^*$ : a set of all strings consisting of 0 and 1 (including empty string)

**(Pseudo-)Lexicographical Order**: (with length preferred)

$x, y$ : strings on  $\Sigma^*$

$x < y \Leftrightarrow$  (a)  $|x| < |y|$ , or,

(b) for the first different letters in  $x$  and  $y$  be  $x_i, y_i$ ,

$x_i < y_i$ .

(example)  $101 < 0011 < 0100$

What is the difference from usual lexicographical order?

What is the reason of introducing such an order?

## 論理記号

## 用例

$P \wedge Q$

$P \vee Q$

$\neg P$

$P \rightarrow Q$

$P \leftrightarrow Q$

$\exists x \in L[R(x)]$

$\forall x \in L[R(x)]$

$\exists_{\infty} x \in L[R(x)]$

$\forall_{\infty} x \in L[R(x)]$

## 意味

 $P$  かつ  $Q$  $P$  または  $Q$  $P$  でない $P$  ならば  $Q$  $P$  ならば  $Q$  かつ  $Q$  ならば  $P$  $L$  に属するある  $x$  で  $R(x)$  $L$  に属する任意の  $x$  で  $R(x)$  $R(x)$  となる  $x$  が  $L$  の中に無限個ある $L$  の中の有限個を除いたすべての  $x$  で  $R(x)$

## Logic symbols

### example

$$P \wedge Q$$

meaning

$P$  and  $Q$

$$P \vee Q$$

$P$  or  $Q$

$$\neg P$$

not  $P$

$$P \rightarrow Q$$

if  $P$  then  $Q$

$$P \leftrightarrow Q$$

if  $P$  then  $Q$  and if  $Q$  then  $P$

$$\exists x \in L[R(x)]$$

for some  $x$  in  $L$ ,  $R(x)$  holds

$$\forall x \in L[R(x)]$$

for any  $x$  in  $L$ ,  $R(x)$  holds

$$\exists_{\infty} x \in L[R(x)]$$

there are infinitely many  $x$  in  $L$  with  $R(x)$

$$\forall_{\infty} x \in L[R(x)]$$

for any  $x$  except finitely many elements in  $L$ ,  
 $R(x)$  holds

## 命題論理式

命題変数と論理記号( $\wedge, \vee, \neg$ )から成る式

例:  $F(X_1, X_2) = [X_1 \vee X_2] \wedge \neg X_1$

## 真偽値の割り当て

与えられた命題論理式の各命題変数に真偽値を代入すること。  
上の例では,

$(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)$

の4通りの割り当てが存在。(0:偽, 1:真)

## 命題論理式の分類

**リテラル**: 命題変数あるいはその否定

**和項**: リテラルをORでつないだ項

**和積式**: 和項をANDでつないだ式

**二和積式**: 和積式の形の命題論理式で, しかも各和項がちょうど2個のリテラルからなるもの

**三和積式**: 和積式の形の命題論理式で, しかも各和項がちょうど3個のリテラルからなるもの

**拡張命題論理式**: 論理記号として,  $\rightarrow, \leftrightarrow$  も許したもの

## Propositional Logic Expression

Expression consisting of propositional variables and logic symbols  $\wedge, \vee, \neg$  e.g.  $F(X_1, X_2) = [X_1 \vee X_2] \wedge \neg X_1$

## Truth assignment

Assigning truth value to each propositional variable in each logic expression. e.g. there are 4 different assignments (0,0), (0,1), (1,0), (1,1) for the expression above. (0: false, 1: true)

## Classification of propositional expressions

**literal:** logic variable or its negation

**sum term:** term in which literals are connected by OR

**sum-multiply expression:** expression in which sum terms are connected by AND

**2-sum expression:** logic expression in the sum-multiply form and each sum term consists of exactly two literals

**3-sum expression:** logic expression in the sum-multiply form and each sum term consists of exactly three literals

**extended logic expression:** one that may include  $\rightarrow, \leftrightarrow$  as well.

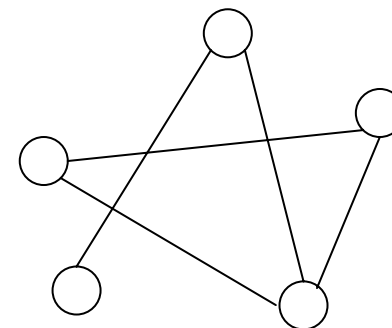
## グラフの表現

グラフの各頂点に1から順に番号をふる。

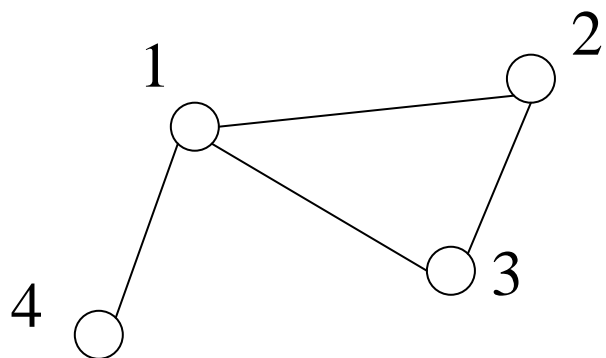
グラフの辺:  $(i, j)$

グラフの表現  $G = (n, E)$

$n$ : 頂点数,  $E$ : 辺の集合



無向グラフの例:

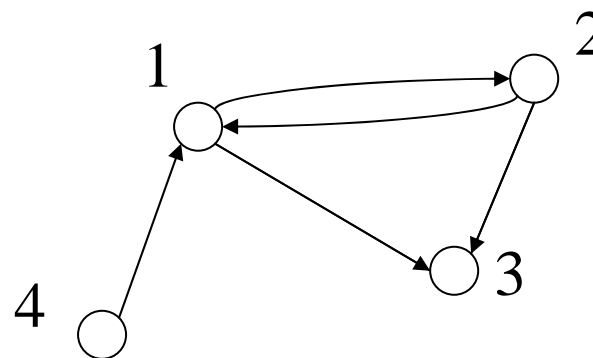


$E = \{(1,2), (1,3), (2,3), (1,4)\}$

$G = (4, \{(1,2), (1,3), (2,3), (1,4)\})$

例えば(1,2)と(2,1)は区別しない

有向グラフの例:



$E = \{(1,2), (2,1), (1,3), (2,3), (4,1)\}$

$G = (4, \{(1,2), (2,1), (1,3), (2,3), (4,1)\})$

辺の向きを区別する

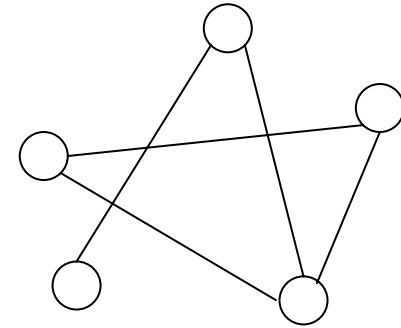
## Expression of a graph

graph vertices are numbered sequentially

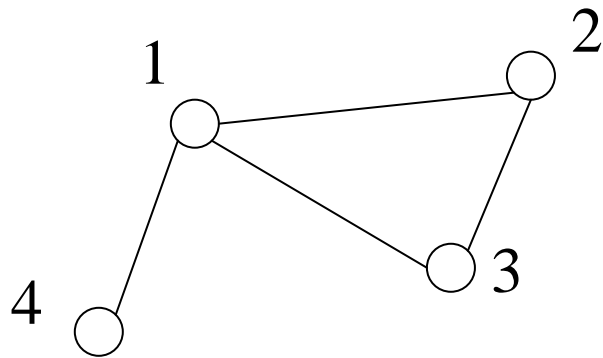
graph edge:  $(i, j)$

expression of a graph  $G = (n, E)$

$n$ : number of vertices,  $E$ : set of edges



Example of a graph:

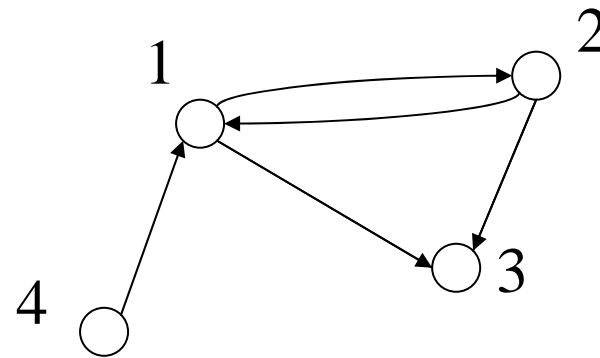


$E = \{(1,2), (1,3), (2,3), (1,4)\}$

$G = (4, \{(1,2), (1,3), (2,3), (1,4)\})$

Do not distinguish  $(1,2)$  from  $(2,1)$

Example of a directed graph:



$E = \{(1,2), (2,1), (1,3), (2,3), (4,1)\}$

$G = (4, \{(1,2), (2,1), (1,3), (2,3), (4,1)\})$

$(1,2)$  and  $(2,1)$  are different arcs



## 1.2.2. アルゴリズムの記述方法

### PASCAL風の手続き型プログラミング言語

例: 2進表現で与えられた自然数を通常 of 自然数に変換

1. prog TR(input x: string on  $\Sigma$ ): integer;
2. label LOOP;
3. var n: num; c: string;
4. % 単にstringと型指定したときはstring on  $\Gamma$ 型を意味する.
5. begin
6.   if  $x \neq 0 \wedge \text{head}(x) = 0$  then LOOP: goto LOOP: end-if;
7.   % 2進表記でないものが入力されると無限ループに入る.
8.   n:=0;
9.   while  $x > \varepsilon$  do %  $\varepsilon$ は空列を表す定数
10.     c:=head(x);
11.     if c=1 then n:=2\*n+1
12.       else n:=2\*n end-if;
13.     x:=right(x)
14.   end-while;
15.   halt(n)
16. end.

## 1.2.2. Algorithm Description

PASCAL-like procedural programming language

Ex. Conversion from a binary natural number into an ordinary one.

```
1.  prog TR(input x: string on  $\Sigma$ ): integer;
2.  label LOOP;
3.  var n: num; c: string;
4.  % string implies a type of string on  $\Gamma$ .
5.  begin
6.    if  $x \neq 0 \wedge \text{head}(x) = 0$  then LOOP: goto LOOP: end-if;
7.    %if non-binary expression is input then goto infinite loop
8.    n:=0;
9.    while  $x > \varepsilon$  do %  $\varepsilon$  is a constant for an empty string
10.     c:=head(x);
11.     if c=1 then n:=2*n+1
12.       else n:=2*n end-if;
13.     x:=right(x)
14.   end-while;
15.   halt(n)
16. end.
```

**注意事項:**

- ・入出力に関する記述は省く.
- ・TR: プログラム名 ( )内が入力変数とその型指定,  
( )の右が出力の型
- ・ $f_{TR}$ : プログラムTRが計算する(部分)関数
- ・正常終了と無限ループ
  - ・出力が得られるのはhalt文で正しく停止するときのみ.
  - ・出力が得られない場合, プログラムが計算する関数値は未定義とみなす.

$$f_{TR}(001) = \perp$$

**Remarks:**

- description concerning input and output are omitted.
- TR: program name (input variable and its type declaration)  
the type of output follows
- $f_{TR}$ : the (partial) function computed by the program TR
- normal termination and infinite loop
  - Output is obtained only when it terminates correctly by a halt sentence.
  - When an output is obtained, the function value computed by the program is considered as "undefined"

$$f_{TR}(001) = \perp$$

## 変数の型

自然数型: num型

文字列型: string型

文字列を構成する“文字”として許される記号 $0, 1, 2, \dots, a, b, \dots$ の全体を $\Gamma$ とする.

## 文字列型データの基本演算

$\text{head}(x)$   $x$  の最初の1文字

$\text{right}(x)$   $x$  の2文字目から右の部分

$\text{tail}(x)$   $x$  の最後の1文字

$\text{left}(x)$   $x$  の先頭から最後の2文字目までの部分

$x \# y$   $x$  と  $y$  の接続

$x \leq y$  長さ優先の辞書式順序による大小比較

ただし,  $\text{head}(\varepsilon)=\text{right}(\varepsilon)=\text{tail}(\varepsilon)=\text{left}(\varepsilon)=\varepsilon$

## Types of variables

natural number type: type num

string type:

Let  $\Gamma$  be a set of all symbols  $0, 1, 2, \dots, a, b, \dots$  used in strings

## Elementary operations on strings

$\text{head}(x)$  the first letter of  $x$

$\text{right}(x)$  the part of  $x$  after its first letter

$\text{tail}(x)$  the last letter of  $x$

$\text{left}(x)$  the part of  $x$  before its last letter

$x \# y$  concatenation of  $x$  and  $y$

$x \leq y$  comparison based on lexicographic order with length preferred

where,  $\text{head}(\varepsilon)=\text{right}(\varepsilon)=\text{tail}(\varepsilon)=\text{left}(\varepsilon)=\varepsilon$