

# 暗号の仕組み

情報科学の世界 2  
2021 年度前期  
佐賀大学工学部 只木進一

- ① 近代以前の暗号
- ② 暗号の要素
- ③ 鍵の共有方法
- ④ RSA(Riverst-Shamir-Adleman) 暗号

# atbash 暗号：旧約聖書

- 人類が秘密を持つようになって以来、暗号が出現
- 宗教団体が弾圧を逃れるために、重要情報を暗号化
- 旧約聖書：紀元前 5 世紀
  - 重要な都市名のアルファベットを置き換え

# スパルタの暗号: scytale 暗号

- 戦争の際にも暗号が必要
  - 前線に作戦を指令
  - 前線の状況を司令部に報告
  - 文書を持った兵士が走る・乗馬
- scytale 暗号: 紀元前 5 世紀
- 皮に書いた文字を円筒に巻き付ける
- 数文字毎に読み解く

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%82%AD%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%83%AC%E3%83%BC>

# Caesar の暗号

- 紀元前 1 世紀
- アルファベットの先頭から鍵の文字列に置き換える
- 残りは、鍵の終端の後ろに残ったアルファベットを順番に対応させる
- 例: 鍵 JULISCAER

a b c d e f g h I j k l m n o p q r s t u v w x y z  
J u l I s c a e r t v w x y z b d f g h k m n o p q

## 上杉暗号: 16 世紀

- いろはを数字にコード化

	七	六	五	四	三	二	一
一	ゑ	あ	や	ら	よ	ち	い
二	ひ	さ	ま	む	た	り	ろ
三	も	き	け	う	れ	ぬ	は
四	せ	ゆ	ふ	ゐ	そ	る	に
五	す	め	こ	の	つ	を	ほ
六	ん	み	え	お	ね	わ	へ
七	nan	し	て	く	な	か	と

# 近代以前の暗号の弱点

- 文字の置き換えが固定
- 文字の出現頻度から推測できる
  - 英語で一文字の単語: "a" と "I"
  - 二文字単語が推測できる: "an"、"in"、"if"
  - いまでは、単語の出現頻度も知られている

# 暗号方式と暗号鍵

- 暗号の方式
  - どういう方法で文字を置き換えるのか
  - 暗号の鍵
  - 何文字ずらす
  - 何文字置きに読む



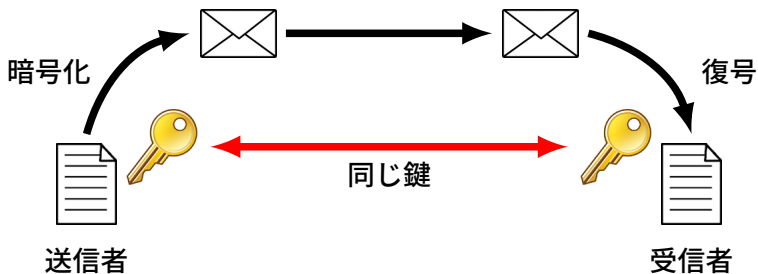
# 基本的用語

- 符号化、暗号化：Encode, Encipher, Encrypt
  - 平文テキスト (plain text) を暗号テキスト (cipher text) にする
- 復号化：Decode, Decipher, Decrypt
  - 暗号テキストを平文テキストに戻す

cipher /'saɪfə(r)/ a secret way of writing, especially one in which a set of letters or symbols is used to represent others.

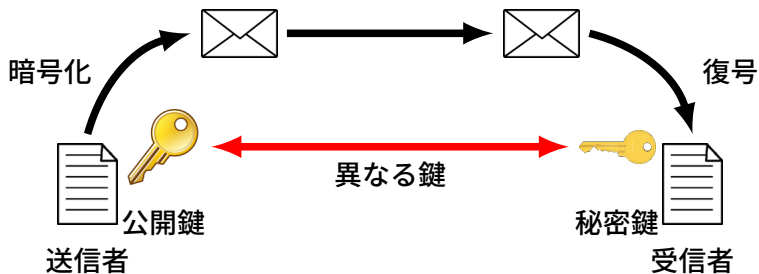
# 鍵の共有方法：共通鍵方式/共有鍵様式

- 鍵を送信者と受信者が共有する方法
  - 符号化と復号化で同じ鍵
  - どうやって鍵を送る？



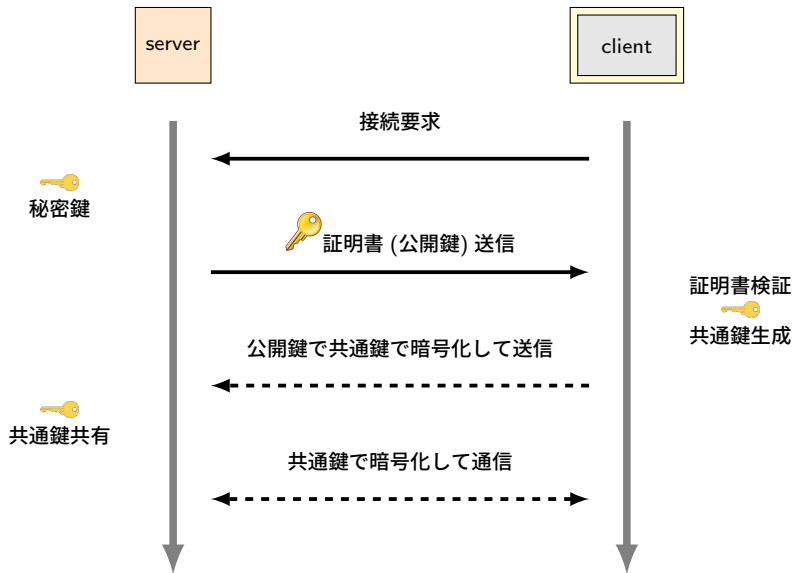
# 鍵の共有方法：公開鍵鍵様式

- 鍵を送信者と受信者が異なる方法
  - 符号化と復号化が異なる鍵
  - 一方向にしか送れない



# SSL : Secure Socket Layer

- HTTPS で利用している暗号化方式
  - 現在は TSL (Transport Layer Security) を使用
- 公開鍵と共通鍵を併用
- Web の証明書提示



## 復号できない暗号：パスワード

- ユーザが入力したものを符号化し、保存しているものと比較
- 攻撃手法
  - ユーザ名、名前、生年月日、英単語などをヒントに
  - 総当たり

# RSA(Riverst-Shamir-Adleman) 暗号

- 整数論という数学の応用
- 因数分解が困難であることに基づく
- 公開鍵暗号に利用される
- James H. Ellis (1969) 及び Clifford Cocks(1973) が理論的基礎を発見したが、長く秘密にされていた
- 1977 年に RSA が公表。

# 整数の合同 : Congruence

- 二つの整数  $a$  と  $b$ 。ある整数  $m$  で除した余りが等しい
  - $a$  と  $b$  は法  $m$  について合同 :  $a \equiv b \pmod{m}$
- 例 :  $m = 5$

$$7 \equiv 2 \pmod{5}$$

$$8 \equiv 3 \pmod{5}$$

$$11 \equiv 1 \pmod{5}$$

$$3 \equiv 3 \pmod{5}$$



# 整数の合同 : Congruence

- $a \equiv a' \pmod{m}$  かつ  $b \equiv b' \pmod{m}$  ならば  
 $ab \equiv a'b' \pmod{m}$

$$a = n_a m + a'$$

$$b = n_b m + b'$$

$$\begin{aligned} ab &= (n_a m + a') (n_b m + b') \\ &= (n_a n_b m + n_a b' + n_b a') m + a' b' \end{aligned}$$

- 例 :  $m = 7$

$$8 \equiv 1 \pmod{7}$$

$$10 \equiv 3 \pmod{7}$$

$$\begin{aligned} 8 \times 10 &= 80 = 7 \times 11 + 3 \\ &\equiv 3 \pmod{7} \end{aligned}$$

# Fermat の小定理

- $p$  を素数、 $a$  を  $p$  と互いに素とする:  $a \not\equiv 0 \pmod{p}$
- このとき:  $a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$
- 例を示す:  $p = 11$ 、 $a = 3$

$$3^2 \equiv 9 \pmod{p}$$

$$3^4 \equiv 81 \pmod{p} \equiv 4 \pmod{p}$$

$$3^8 \equiv 16 \pmod{p} \equiv 5 \pmod{p}$$

$$\begin{aligned} 3^{10} &\equiv (3^2 \times 3^8) \pmod{p} \equiv 45 \pmod{p} \\ &\equiv 1 \pmod{p} \end{aligned}$$

- $\pmod{p}$  のみに注目し、演算を簡素化

## Fermat の小定理 : 応用

- $p$  と  $q$  を素数、 $a$  を  $pq$  と互いに素とする
- このとき:  $a^{(p-1)(q-1)} \equiv 1 \pmod{pq}$
- 例 :  $p = 5$ 、 $q = 7$ 、 $a = 11$

$$11^2 \equiv 121 \pmod{35} \equiv 16 \pmod{35}$$

$$11^4 \equiv 256 \pmod{35} \equiv 11 \pmod{35}$$

$$11^8 \equiv 16 \pmod{35}$$

$$11^{16} \equiv 256 \pmod{35} \equiv 11 \pmod{35}$$

$$\begin{aligned} 11^{4 \times 6} &= 11^{16+8} \equiv (11 \times 16) \pmod{35} \\ &\equiv 1 \pmod{35} \end{aligned}$$

# 秘密鍵と公開鍵

- 受信者

- 二つの大きな素数  $p$  と  $q$  を生成し、秘密鍵とする。
- $m = pq$
- $\phi(m)$  :  $m$  と互いに素である 1 以上  $m$  以下の自然数。今は  $(p-1)(q-1)$
- $k$  :  $\phi(m)$  と互いに素である適当な自然数

- $m$  と  $k$  を公開鍵とする

# 送信者によるメッセージ暗号化

- $m$  は  $L$  ビットであるとする
- メッセージ  $M$  を  $L - 1$  ビット毎の語に区切る

$$M = a_0a_1 \cdots a_n$$

- 各語を変換

$$b_i \equiv a_i^k \pmod{m}$$
$$M' = b_0b_1 \cdots b_n$$

- $M'$  を送信

# 受信者による復号

- $kv - \phi(m)u = 1$  の適当な解  $(u, v)$  を得る

$$\begin{aligned} b_i^v &\equiv a_i^{kv} \pmod{m} \equiv a_i^{1-\phi(m)u} \pmod{m} \\ &\equiv (a_i \pmod{m}) \left( a_i^{\phi(m)} \pmod{m} \right)^u \\ &\equiv (a_i \pmod{m}) (1 \pmod{m})^u \\ &\equiv a_i \pmod{m} \end{aligned}$$

- 復号完了

## 例

- 秘密鍵 :  $p = 13, q = 11, \phi(m) = 120$
- 公開鍵 :  $m = 143, k = 7$
- $m$  は 8 ビット
  - 7 ビット毎の語に分離
- $kv - \phi(m)u = 1$  の解  $(u, v) = (6, 103)$

# 数学的裏付けのある暗号

- 確実に符号化・復号化ができる
  - 数学的に保証されている
- 方式は公開／鍵は非公開
- 素数への因数分解が困難
  - 今のところ有効なアルゴリズムなし
- コンピュータの高速化によって、長い鍵が必要になっている