End-to-End セキュリティを担保する 4
セキュリティエンジニアリング特論 第 6 回

栗原 淳

兵庫県立大学大学院

2024-11-07

はじめに

はじめに

第 3–5 回では

- End-to-End (E2E) セキュリティの原則と必要性
- JavaScript で AES を使った暗号化の作法
- JavaScript で公開鍵暗号 (RSA/楕円曲線) を使った暗号化の作法と暗号化の運用方法

を勉強した.

今回は，第 5 回の最後に懸案事項だった
「データのやり取りしてる相手って本当に正しい相手？」
を保証する方法を学んでいく.

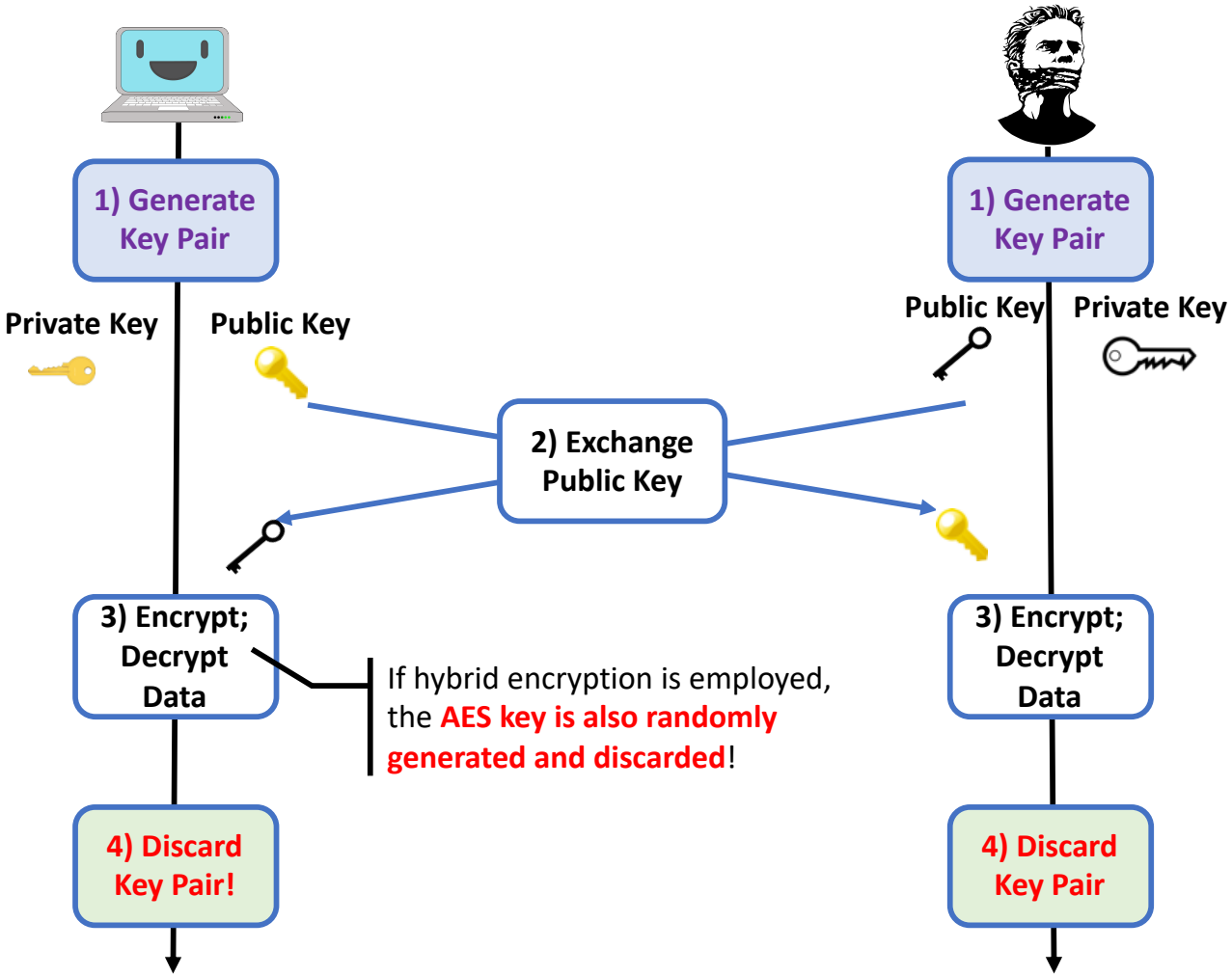
前回のおさらい: Ephemeral Scheme

公開鍵暗号化の Ephemeral Scheme での運用

公開鍵・秘密鍵ペアを都度生成，1 回限りの暗号化・復号で使い捨てることで，Perfect Forward Secrecy[1] を担保する運用方法．

Perfect Forward Secrecy を守ることで，End-to-End 暗号化の強固な運用が可能に．

[1] 長期的に保存されているマスター秘密鍵の漏洩や，一部の暗号化データがクラックされたとしても，それ以外の過去に暗号化されたデータは復号されてしまうことはないという概念．



Ephemeral Scheme のイメージ

まずはじめに，「送られてきた Ephemeral な公開鍵は，本当に自分がやりとりしたい相手の公開鍵か?」の確認が必須．[2]

[2] 意図しない相手の公開鍵で暗号化して機密データを漏らさぬように，ということ．

というわけで，「E2E で安全にデータをやり取りする」ための基礎部分の最後のピースを今日は学ぶ．

この講義で最終的に学びたいこと

- 本人確認やデータの改ざん防止を担保する方法
  - データ毎に固有の「指紋」を生成する「ハッシュ」
  - 「共通鍵」を使った改ざん防止方法「MAC」[3]
  - 「公開鍵」を使った本人確認・改ざん防止方法「電子署名」[4]
- そしてそれら全てを組み上げた運用方法

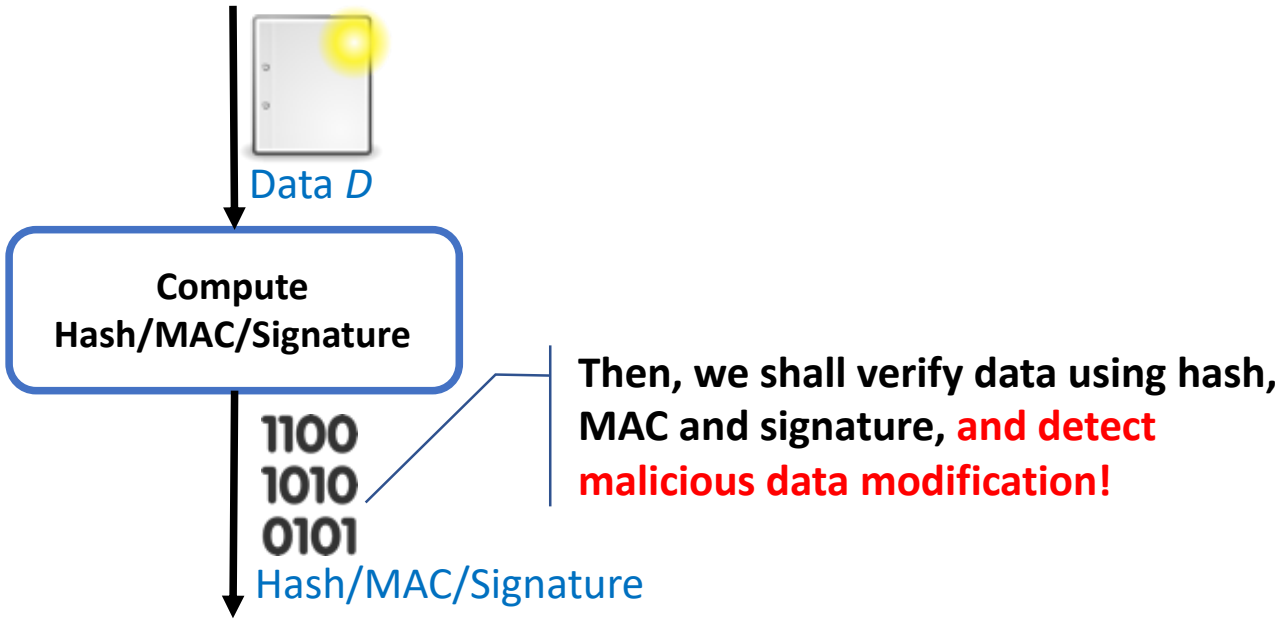
[3] HMAC (RFC2104 https://tools.ietf.org/html/rfc2104)

[4] RSASSA PKCS#1-v1.5/PSS (PKCS#1 RFC8017 https://tools.ietf.org/html/rfc8017), ECDSA (FIPS PUB186-4 https://csrc.nist.gov/publications/detail/fips/186/4/final)

サンプルコードの準備

準備

説明を聞きつつ手を動かすため，まず環境準備．今回は，JavaScript (Node.js) を使って手元でデータの Hash/MAC/署名をいじってみる．そしてその効果を実感する．



※サンプルコードはブラウザでも動く．
src/commands-browser.html を開くとこれから Node.JS で試すデモが開発者コンソールで実行される．適宜試したり比較すると良い．

※前回のコードの公開鍵に署名をつけたりして Ephemeral Scheme を作ってみると良い．

環境

以下の環境が前提:

- Node.js (≥ v22) がインストール済．pnpm が使えること．[5]
- ブラウザとして，Google Chrome (系ブラウザ)，もしくは Firefox がインストール済み
- Visual Studio Code や WebStorm などの統合開発環境がセットアップ済みだとなお良い．

[5] インストールコマンド: `sudo npm i -g pnpm`

JavaScript プロジェクトの準備

1. プロジェクトの GitHub リポジトリ [6] を Clone

```
$ git clone
https://github.com/junkurihara/lecture-security_engineering.git
$ cd sample-06
```

2. 依存パッケージのインストール

```
$ pnpm install
```

3. ライブラリのビルド

```
$ pnpm build
```

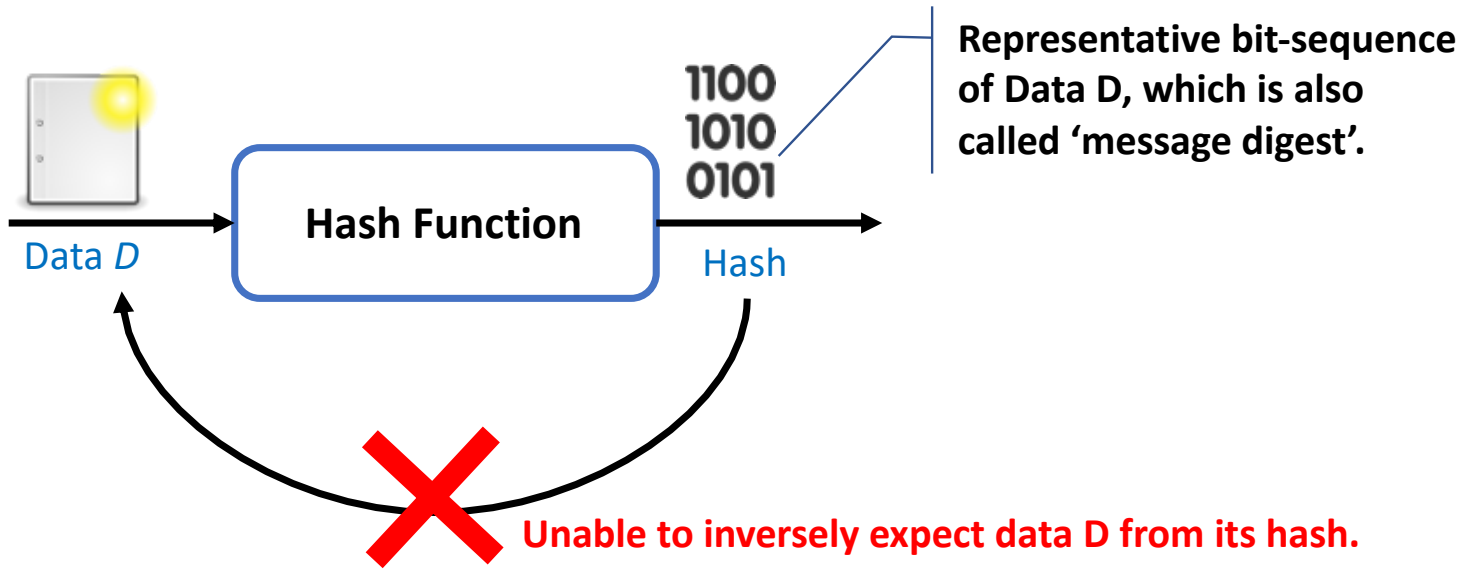
[6] https://github.com/junkurihara/lecture-security_engineering

Hash

Hash および Hash 関数とは

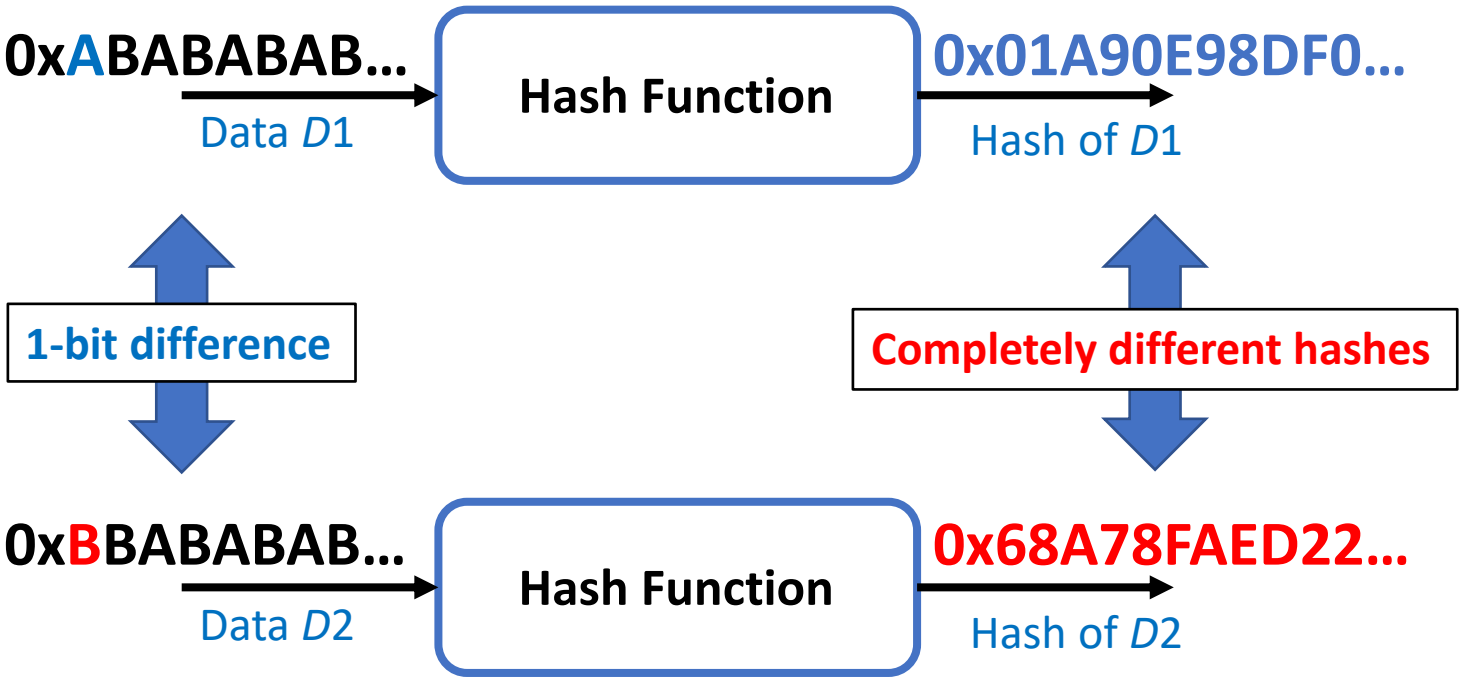
Hash および Hash 関数

あるデータに対し，そのデータを「代表するビット列」を計算する不可逆の関数を「Hash 関数」．導出したビット列を「Hash」[7] と呼ぶ．



[7] あるいは Hash 値，Message Digest

1 ビットでもデータが異なれば，全く違う Hash が導出される．



Hash および Hash 関数の役割

同じくデータ固有のビット列を導出する Checksum と似ているが，その用途はより強力で多岐にわたる．

- **Checksum**
  - 通信路上などでのデータの (偶発的な) エラー検知

  ⇒ データから一意に導ける値・高速な処理が可能なことが必須

- **Hash**
  - データのエラー・改ざん検知
  - Hash をデータ実態の代替として署名を生成
  - 多数のデータの索引作成[8]
  - データの重複検出

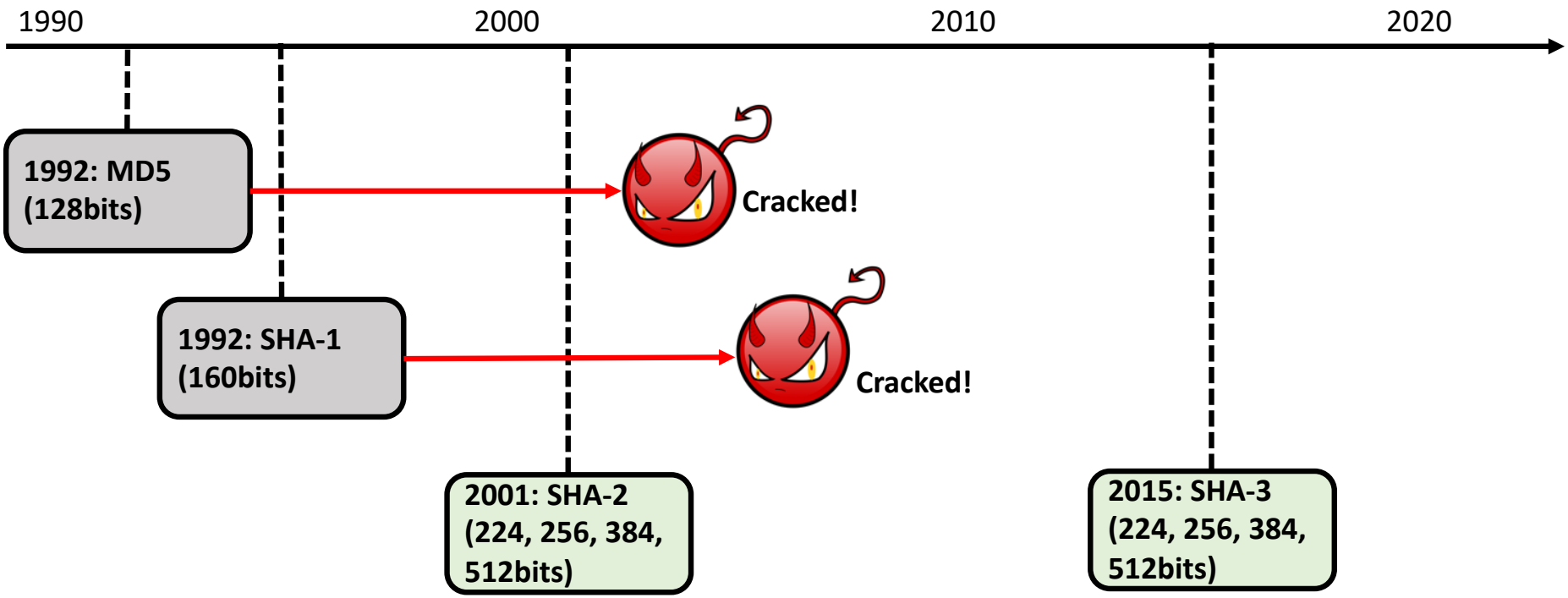
  ⇒ 別のデータ同士で同じ Hash を得ることが困難なことが必須

Checksum ⊆ **Hash** と言える．

[8] Hash Table

Hash 関数の種類

MD5, SHA-1, SHA-2 (SHA-224, 256, 384, 512), SHA-3 という Hash 関数がよく知られている．SHA シリーズは全て NIST[9] でまず標準化．



MD5，SHA-1 は，「同じ Hash を生成するデータが割と簡単に見つけられる[10]」という致命的な欠陥が発見されている．

[9] NIST FIPS 180-4 (SHA-1, SHA-2), FIPS 202 (SHA-3), MD5 は RFC 1321

[10] 「衝突」と呼ぶ．MD5 の場合は，2^{20} 程度の計算量でクラック可能．

Hash 関数の選択について

- 理由がなければ SHA-2 シリーズ以降のものを選択する．
  - bit 長は長いほど，衝突するデータが見つけづらい (=強固)
  - ただし，bit 長が長いほど，計算が重くなる
- SHA-1/MD5 は，基本的に互換性の担保のためだけに利用する．但し，Checksum として使う分には概ね問題ない．何が何でも使うな，というわけではない．

IE/(旧)Edge こぼれ話

X.509 の公開鍵証明書などはまだ SHA-1 が利用されている場合が多々ある．しかし，IE および EdgeHTML を利用した旧バージョンの Edge では互換性の担保を全て無視して SHA-1 のネイティブサポートを全打ち切りしているので，X.509 公開鍵証明書などを JavaScript からネイティブ API を通して扱えない．

JavaScript でデータの Hash を生成してみる．

```
% pnpm execute gen-hash 'hello hash world!' // デフォルトの hash 関数は'SHA-256'
<Computed Hash>
70c6b0c909b7a3b4932e6e6d27c6e3c8106b7b9487a4ab9fb27d698b0bee601d // 'SHA-256' で計
算した hash
=======

% pnpm execute gen-hash 'hello hash world!!' // 1 文字増やす
<Computed Hash>
c1a548f16bc6cd013fb76f59c982c6dbc57d390d9a470e09b35d716c7716ab47 // 全く違う hash
=======

% pnpm execute gen-hash 'hello hash world!' -h 'SHA3-256' // -h で hash 関数指定
<Computed Hash>
cb352b3d82d5911b99774fcf534bfd024fc58ef58fb67db14f504931da9a333d
=======
```

ちなみに bash だと，以下で SHA-256 の hash をチェック可能．

```
% echo -n 'hello hash world!' | shasum -a 256
70c6b0c909b7a3b4932e6e6d27c6e3c8106b7b9487a4ab9fb27d698b0bee601d  -
```

Hash 生成のコードはこんな感じ．
今回も手前味噌で恐縮だが jscu[11] を利用している．

hash 生成 (src/test-apis.js)

```
// hashName = 'SHA-256', 'SHA-384', 'SHA-512', 'SHA-1', 'SHA3-256', etc...

const jscu = getJscu(); // jscu オブジェクト取得
const binary = jseu.encoder.stringToArrayBuffer(data); // string を uint8array に

return jscu.hash.compute(binary, hashName); // hash 値の promise を返す
```

Node.js, ブラウザ共に全く同じコードで動作．SHA3 もサポート．

[11] https://github.com/junkurihara/jscu

本人確認の技術

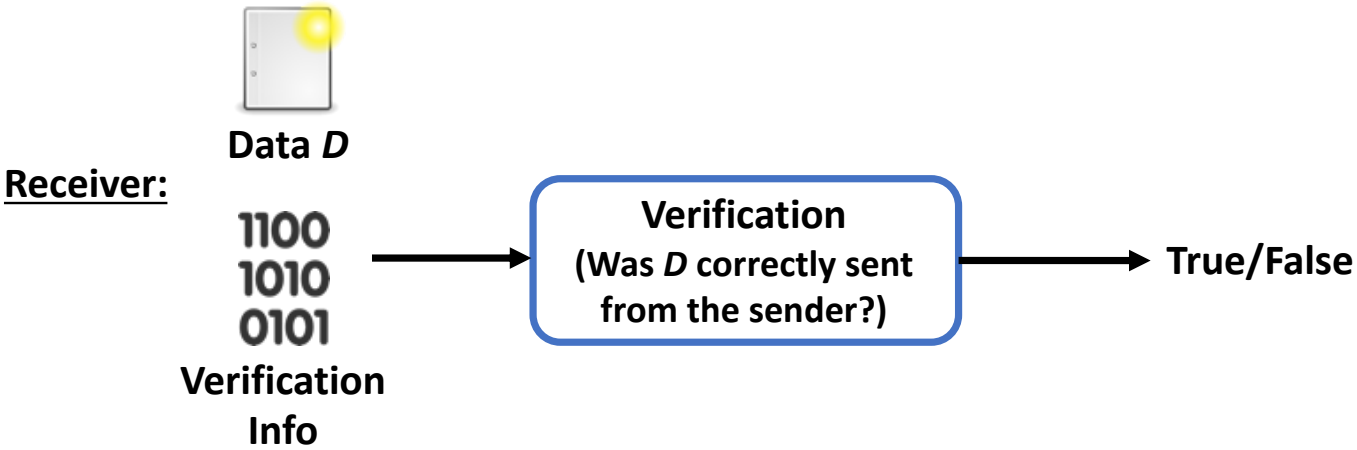
「正しい相手から正しく送信されてきたデータか」？

いわゆる「データの真正性と送信元の確認方法」には，大まかに２つの方法がある．

- Message Authentication Code (MAC)
- 署名 (電子署名)

両者とも，送信するデータから MAC/署名という検証用データを生成，元データに付与する形で送信．

受信したデータと，MAC/署名とを突合して，「送信元は意図している相手か？」「データは改ざんされてないか？」を検証．

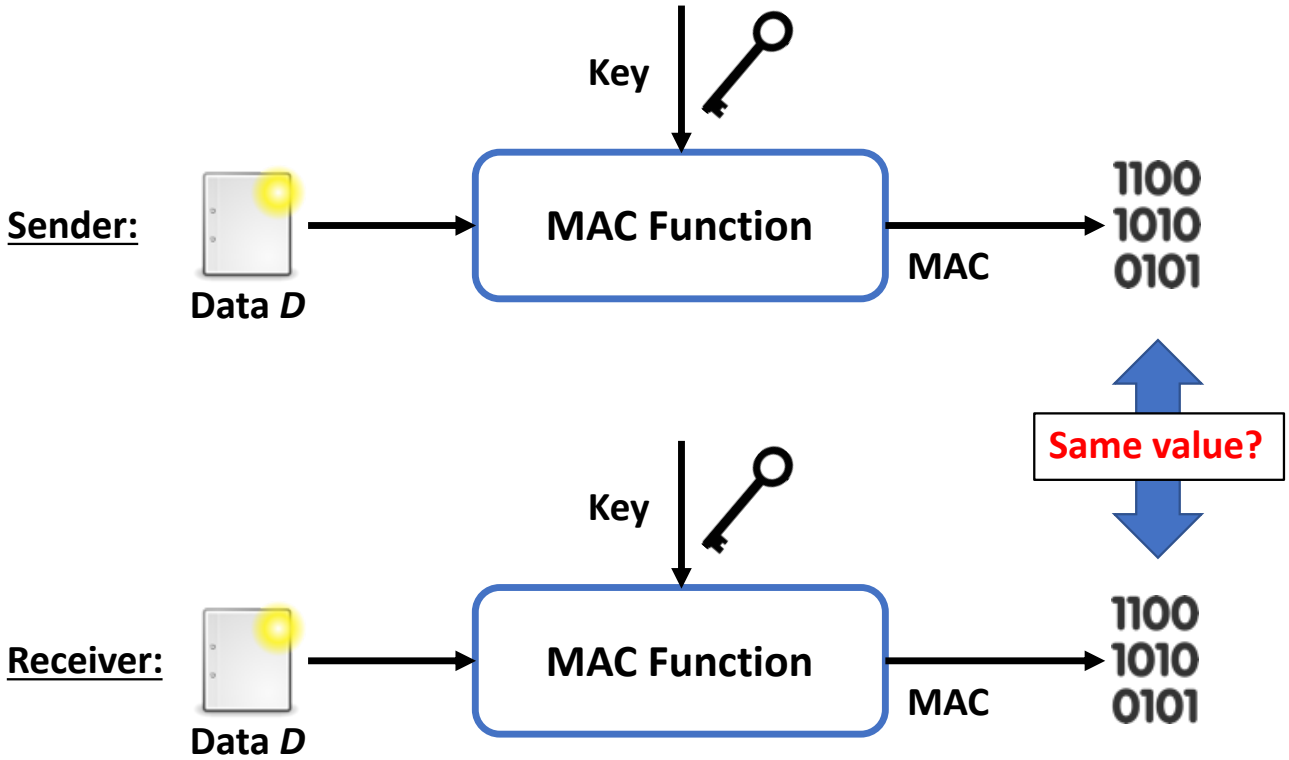


MAC・署名の中身に突っ込む前に，それぞれのざっくりとした定義と pros/cons を説明する．

Message Authentication Code (MAC)

MAC によるデータ真正性と送信者の確認

- 送信側・受信側で共有する鍵を使ってデータ・鍵固有のバイナリ (MAC) を生成する方法.
- 受信側で，送信側と同一の MAC が作れるかどうかをチェック.



MAC の特徴:

- 同じ鍵でも，データが異なれば出力される MAC も異なる．
- 同じデータでも，鍵が異なれば出力される MAC も異なる．

$$\Downarrow$$

すなわち，受信側で同一の MAC が作れることを確認できれば，

- 鍵を共有する相手から
- 途中の改ざんなしで送られたデータであること

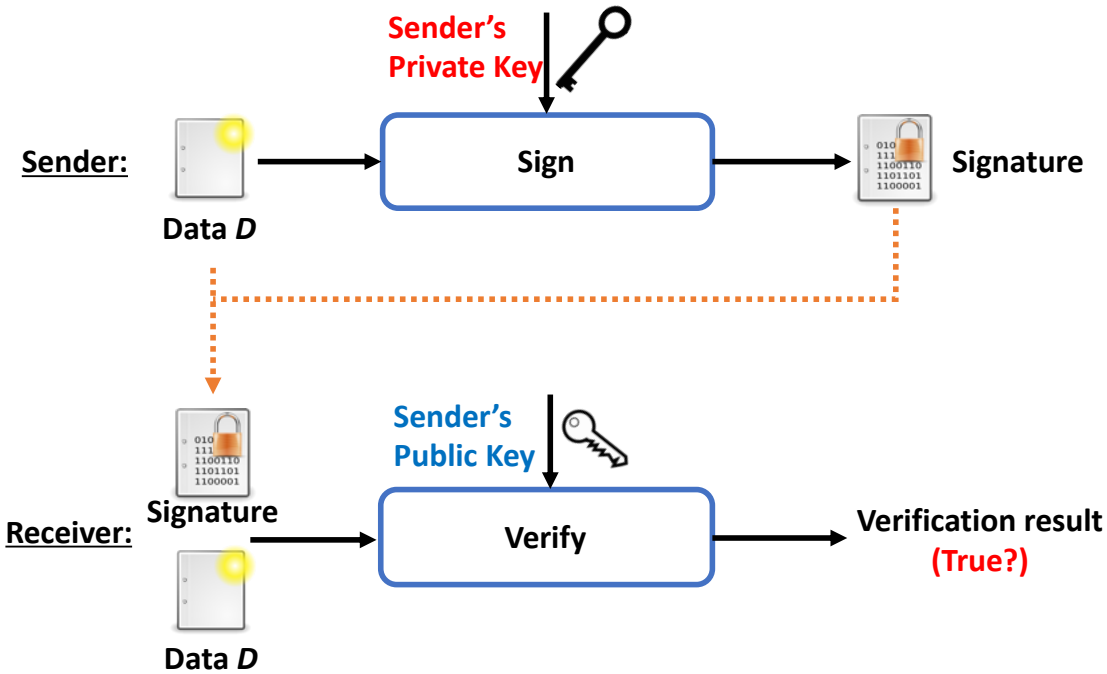
が保証される．

署名 (電子署名)

公開鍵・秘密鍵ペアをベースとした技術[12]：

署名によるデータ真正性と送信者の確認

- 送信側は公開鍵・秘密鍵ペアを保有．
- 送信側は，データと自分の秘密鍵から署名を生成．
- 受信側は，受信データ，署名と公開鍵の間の一貫性をチェック．



署名の特徴:

- データが改ざんされていたら，検証が失敗 (false が出力)．
- 意図する相手の秘密鍵[13] で署名が作られていなければ，検証が失敗．
- MAC と違って，秘密の情報 (=鍵) を事前共有しなくて良い

⇓

すなわち，署名技術は，

- 意図する送信者から
- 途中の改ざんなしで送られたデータなことを
- 事前の秘密情報の共有なしで

保証する．[14]

---

[13] 自分が入手している公開鍵の対となる秘密鍵

[14] 検証用の公開鍵は，信頼できる手段で入手済み，あるいはプリインストールされていると仮定

MAC と署名の pros/cons

じゃあ署名だけで MAC は不要では？…そういうわけにはいかない．

	Pros	Cons
MAC	・一般的に高速[15] ・生成する MAC サイズは小さい[16]	・鍵の事前共有が必要
署名	・鍵の事前共有が不要	・一般的に非常に遅い・重い ・生成する署名サイズは一般的に大きい[17]

⇒ AES/公開鍵暗号の関係と全く一緒で，使い所を考えて組み合わせて使う，もしくは場合に応じて使い分ける．

[15] AES (CMAC) とか Hash (HMAC) とかを構成要素としているため．

[16] 通常 128–512bits 程度．

[17] ECDSA は小さく，256–512bits 程度．RSA 系は非常に大きく通常 2048bits 以上．

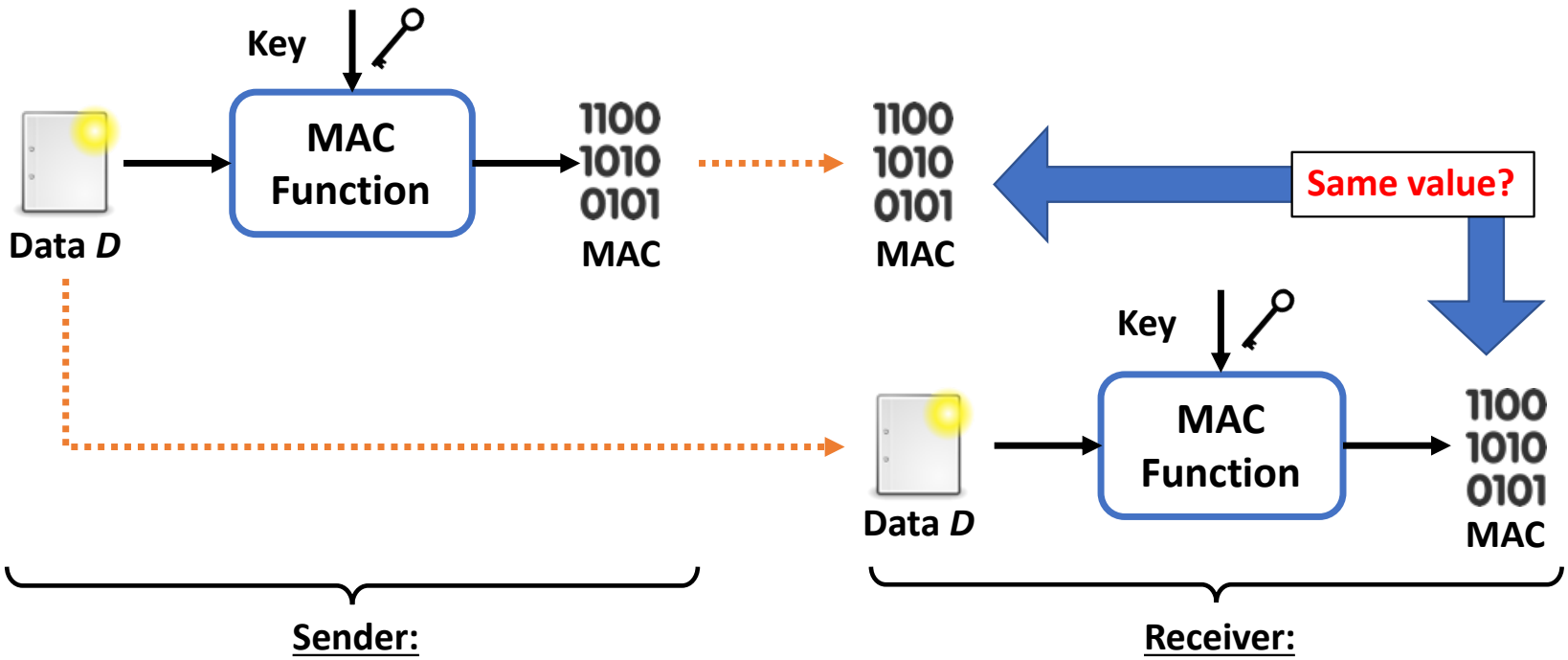
共通鍵を使った改ざん検知・本人確認: MAC

Message Authentication Code (MAC) 事始め

MAC を使った改ざん検知&本人確認手続き

送信側，受信側で秘密の鍵 (バイナリ列) を共有．

1. 送信側はデータと一緒に，データと鍵から生成した MAC を送信．
2. 受信側は，鍵と受信したデータから，受け取った MAC と同じものが作れるかどうかをチェック．



MAC を作る標準手法のバリエーション．

- HMAC; Hash-based Message Authentication Code
- CMAC; Cipher-based Message Authentication Code
- GMAC; Galois Message Authentication Code
- etc.

今回は，JS で一番使いやすいと思われる HMAC を取り上げる．

HMAC; Hash-based MAC

HMAC (RFC2104)[18]

- 鍵付き Hash[19] と呼ばれる，Hash 関数ベースの MAC 生成方法．
- HDKF (RFC5869) などの標準技術や，AWS Signature v4[20] 等，各所で利用されている．

[18] https://tools.ietf.org/html/rfc2104

[19] Keyed Hash

[20] AWS S3 にクライアントから REST API 経由でアップロードする時に一時的に生成する MAC

「鍵」と「データ」をまとめて Hash 関数に入れる，と考えると，

- 鍵・データ両者が正しくないと，正しい Hash も生成不能 (=MAC 検証失敗).
- MAC から鍵・データの情報を逆算することはできない.

という特徴をイメージしやすい.

JavaScript で HMAC を実行してみる

```
// HMAC 用の Hex 鍵を生成．鍵長は使う hash のサイズと等しい．
% pnpm execute gen-hex-key 32

<Generated Hex Key>
6c9a34e979fc7701330ec75a1bc6acb589ebaf831c7941e042c9ded0b2741d8f
=======

// HMAC を生成．デフォルトは SHA-256 で実行．-h で変更可．
% pnpm execute gen-hmac 'hello hmac world!'\
-k '6c9a34e979fc7701330ec75a1bc6acb589ebaf831c7941e042c9ded0b2741d8f' // Hex 鍵

<Computed HMAC with SHA-256>
862e28454f635541ce194d3e4919327c9823830cb7174286aaced5fc61e96a46
=======

// HMAC を検証
% pnpm execute verify-hmac 'hello hmac world!'\
-k '6c9a34e979fc7701330ec75a1bc6acb589ebaf831c7941e042c9ded0b2741d8f'\ // Hex 鍵
-m '862e28454f635541ce194d3e4919327c9823830cb7174286aaced5fc61e96a46' // Hex HMAC

<Verification result of given HMAC>
true
=======
```

```
// データが書き換わると検証が失敗
% pnpm execute verify-hmac 'hello hmac world!?'\ // ?を追加
-k '6c9a34e979fc7701330ec75a1bc6acb589ebaf831c7941e042c9ded0b2741d8f'\
-m '862e28454f635541ce194d3e4919327c9823830cb7174286aaced5fc61e96a46'

<Verification result of given HMAC>
false
=======

// HMAC が書き換わっても検証が失敗.
% pnpm execute verify-hmac 'hello hmac world!'\
-k '6c9a34e979fc7701330ec75a1bc6acb589ebaf831c7941e042c9ded0b2741d8f'\
-m '862e28454f635541ce194d3e4919327c9823830cb7174286aaced5fc61e96a47' //最後を書換

<Verification result of given HMAC>
false
=======
```

もちろん鍵が書き換わっても検証が失敗する.

コードの中身はこんな感じ．

HMAC 生成 (src/test-apis.js)

```
const jscu = getJscu();

// hex string や string を uint8array に.
const binaryData = jseu.encoder.stringToArrayBuffer(data);
const binaryKey = jseu.encoder.hexStringToArrayBuffer(key);

// Promsie を返す. hash = 'SHA-256', etc...
return jscu.hmac.compute(binaryKey, binaryData, hash);
```

HMAC 検証 (src/test-apis.js)

```
const jscu = getJscu();

// hex string や string を uint8array に.
const binaryData = jseu.encoder.stringToArrayBuffer(data);
const binaryKey = jseu.encoder.hexStringToArrayBuffer(key);
const binaryMac = jseu.encoder.hexStringToArrayBuffer(mac);

// Promise を返す. hash = 'SHA-256', etc...
return jscu.hmac.verify(binaryKey, binaryData, binaryMac, hash);
```

検証は，「受信側でも MAC を生成→チェック」でも OK．

その他の MAC (JS じゃビミョー…)

CMAC; Cipher-based MAC (NIST SP800-38B[21])

共通鍵暗号 (e.g., AES) の CBC モードを Hash 関数がわりに使用して MAC を計算する．「前のブロックの暗号文を使って次のブロックを暗号化する」という特徴を応用．

GMAC; Galois MAC (NIST SP800-38D[22])

共通鍵暗号 (e.g., AES) の Galois Counter Mode (GCM) で暗号化と同時に生成される MAC．高速に計算できる代数演算[23] を Hash 関数がわりに使用して MAC を計算する．GMAC 単独で利用可．

※ CMAC/GMAC 共々暗号化と同時に計算されることが多く，単独で利用するケースはあまり見かけない．

---

[21] https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-38b.pdf

[22] https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-38d.pdf

[23] $\mathbb{F}_2[x]/(x^{128}+x^7+x^2+x+1) = \mathbb{F}_{2^{128}}$ 上の乗算

と，「標準技術」で「広く利用されている」MAC アルゴリズムはあるが，JS のネイティブ API[24] でサポートされている MAC は，現状 HMAC のみ…

CMAC, GMAC が使いたかったら自力実装 or npmjs.com で見つけて利用する．

[24] WebCrypto API, Node.js Crypto

公開鍵を使った改ざん検知・本人確認: 署名

署名 事始め

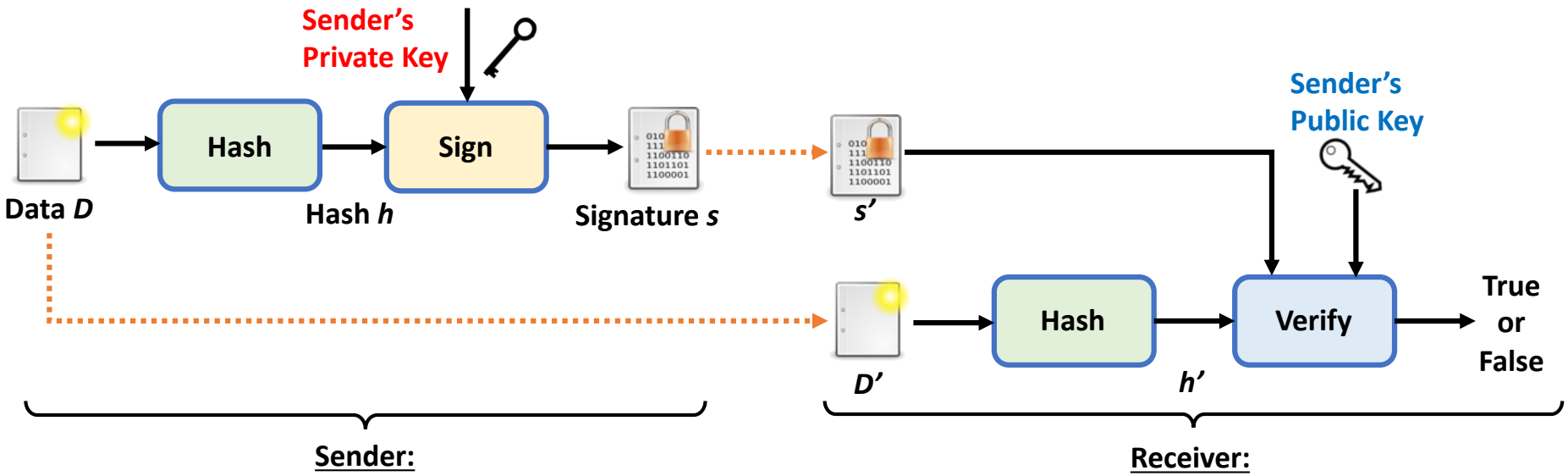
署名 (電子署名) を使った改ざん検知&本人確認手続き

受信側は，送信側の公開鍵を予めプリインストール．

- 送信側の処理:
  1. データ D を Hash 関数で短縮[25]，hash $h = Hash(D)$ を導出．
  2. hash h に対して秘密鍵 SK で署名 $s = Sign(h, SK)$ を生成．
     データ D と署名 s とを一緒に受信側へ送付．
- 受信側の処理:
  1. データ D の hash $h = Hash(D)$ を導出．
  2. hash h と署名 s の一貫性を，公開鍵 PK で検証．
     $Verify(h, s, PK) \in \{\text{True}, \text{False}\}$

[25] データ D そのものに直接署名を施すのは計算量的・データ量的に大変 (e.g, 元データと同じかそれ以上の大きさの署名を作る羽目になる) なので，データの hash に対して署名を施す．

ざっくりフロー図.



このフローは，以下のように考えるとイメージがつきやすい[26]

1. 送信側は，hash h を秘密鍵で暗号化して s を生成.
2. 受信側は，s を公開鍵で復号して h' を入手.
   命題「$h' = Hash(D')$」が成立するか検証.

[26] ただし，常に正しい表現ではないので注意．RSA 署名のみに当てはまる例外.

署名生成方式の標準方式のバリエーション.

- RSA 暗号をベースとした手法:
  - RSASSA PSS
  - RSASSA PKCS#1-v1.5
- 楕円曲線暗号をベースとした手法:
  - ECDSA
- etc.[27]

JS で使いやすい RSASSA PSS & PKSC#1-v1.5 と ECDSA について取り上げる.

[27] Digital Signature Algorithm; DSA (FIPS PUB 186-5 `https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.186-5.pdf`) など

細かく説明する前に…

署名において一番やばいのは，「誰かが自分を騙って署名を作ることができる」などという状況．それを防ぐためには，署名においても「公開鍵サイズの正しい選択」が重要．

前回の復習

暗号化において AES-128bits と同程度の強度の公開鍵サイズは，

- RSA: $\geq$ 3072bits
- ECC: $\geq$ 256bits

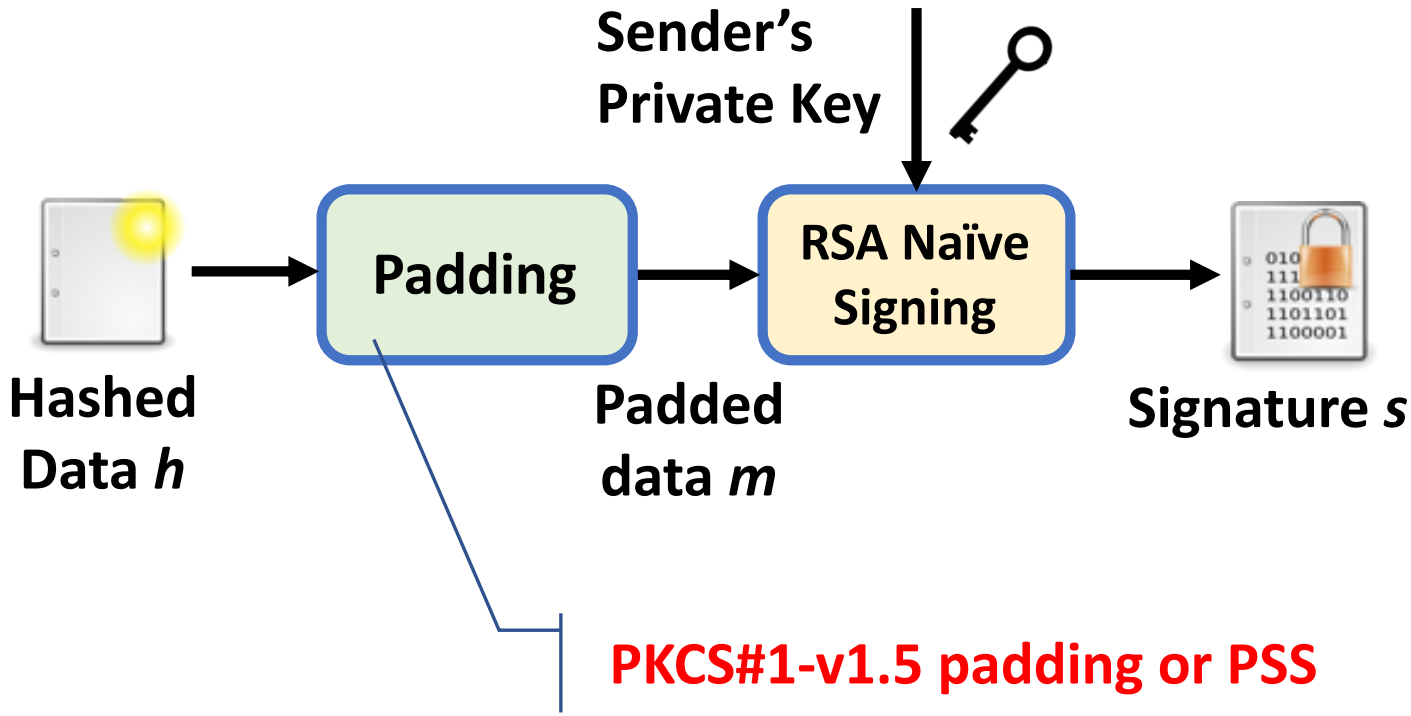
程度．

署名についても暗号化に求めるものと同程度，あるいはそれ以上の鍵サイズを担保して，公開鍵から秘密鍵を作られる (i.e., 自分を騙られる) ことを防ぐ．

RSASSA; RSA Signature Scheme with Appendix

RSASSA PKCS#1-v1.5 と，RSASSA PSS の違い

暗号化と同様に，$h = Hash(D)$ に対して署名を作る際，
鍵長に合わせたパディングが必要．そのパディングの方法が違う．



RSASSA PKCS#1-v1.5 (RFC8017[28])

- RSAES PKCS#1-v1.5 の署名版．PCKS#1 の v1.5 で標準化．SSL/TLS を含め，現在でも広く使われている．
- hash $h = Hash(D)$ を DER エンコードしたデータ T に，公開鍵長まで以下のようなパディングを付与．

$$m = \texttt{0x00}||\texttt{0x01}||\text{RandomSequence}||\texttt{0x00}||T$$

- RSASSA PKCS#1-v1.5 は，hash ではなく生の短いデータに対して署名を生成すると，署名からその元データを戻せちゃうという脆弱性[29] が知られている．本人確認の意味なし．
- PCKS#1 v2.2 (RFC8017) では，「仕様通りに hash 使っていればとりあえず問題ないが，今後何があるか分からないので RSASSA-PSS を使うほうが無難」と記載．

[28] https://tools.ietf.org/html/rfc8017

[29] Y. Desmedt et al., “A Chosen Text Attack on the RSA Cryptosystem and Some Discrete Logarithm Schemes,” in *Proc. CRYPTO 1985*, pp.516–522, 1985.，他．J. Coron (CRYPTO 1999) 等．

RSASSA-PSS (Probabilistic Signature Scheme, RFC8017[30])

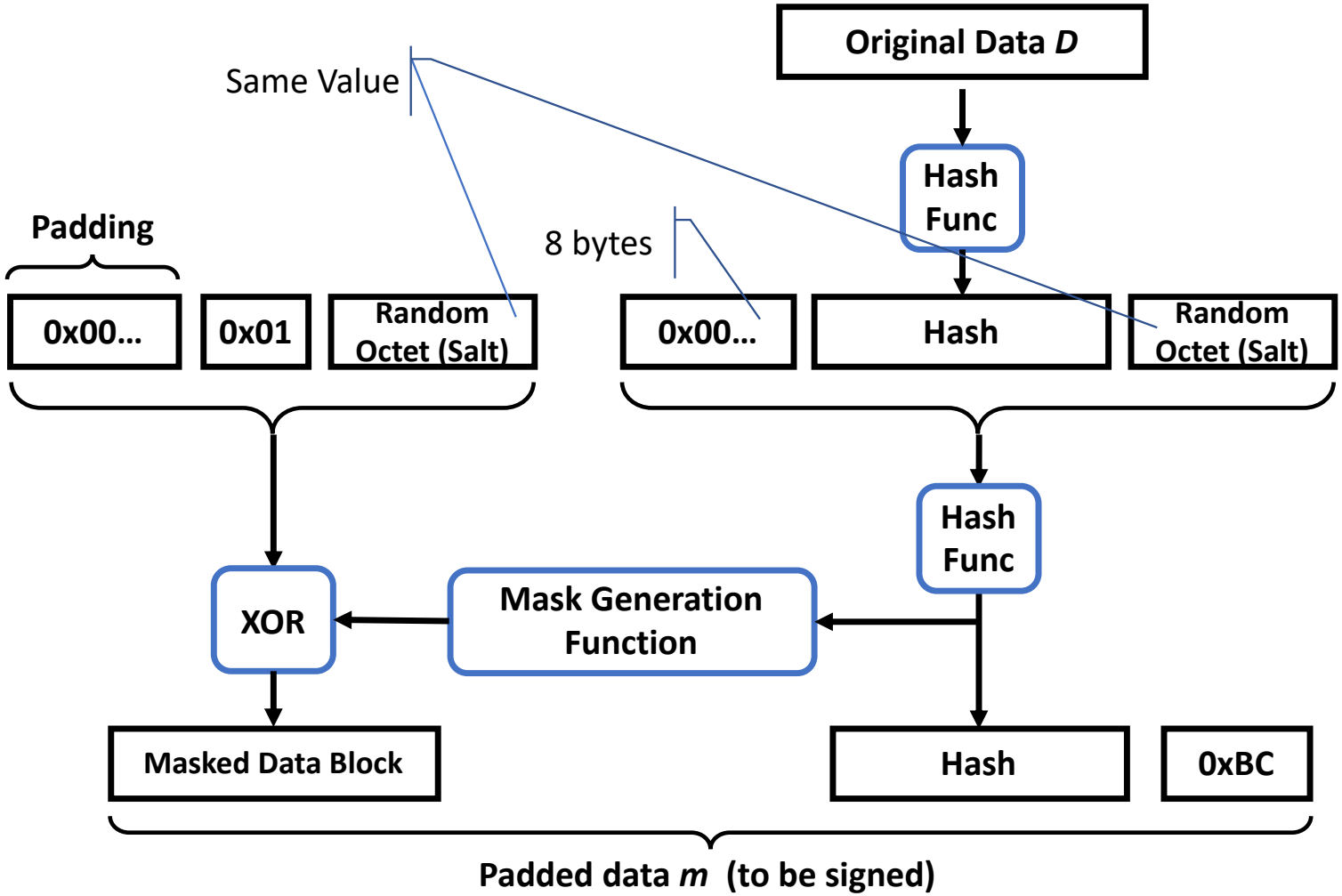
- RSAES OAEP の署名版．RFC3447/PKCS#1 v2.1 (2003 年) で標準化策定．
- 署名対象データ D に対して，乱数成分 (RandomSalt) を加えつつ Hash 関数を 2 重掛けし，Padded data m を作っている．

$$h = Hash(Hash(D), \texttt{RandomSalt}),$$
$$m = \texttt{MaskedDataBlock}||h||\texttt{0xBC},$$

  MaskedDataBlock はヘッダ．
- RSASSA PKCS#1-v1.5 からの乗り換えが進みつつあるものの OAEP 同様に未対応の暗号ライブラリも多い．ただし，RFC 標準的には，可能なら PSS を利用することを推奨．

[30] https://tools.ietf.org/html/rfc8017

PSS のイメージ図



元データ D に加え，padded data m があれば Salt などを逆計算可能．

JavaScript で RSASSA-PSS を実行してみる

では，RFC 推奨となっている PSS を試す．

```
% pnpm execute gen-rsa-key // RSA 鍵ペアの生成. -b でビット数指定.
<Generated RSA Public Key>
30820122300d06092a864886f70d01010105000... // 公開鍵
<Generated RSA Private Key>
308204be020100300d06092a864886f70d01010... // 秘密鍵
=======

% pnpm execute sign-rsa-pss 'hello rsa-pss world!'\ // RSASSA-PSS 署名生成
  -s '308204be020100300d06092a864886f70d0...' // 秘密鍵
<Generated RSASSA-PSS Signature>
6e7c4632f62e354f0ac40f65c92cd3e5bec5f6f... // 生成された署名
=======

% pnpm execute verify-rsa-pss 'hello rsa-pss world!'\ // RSASSA-PSS 署名検証
  -p '30820122300d06092a864886f70d0101010...'\ // 公開鍵
  -t '6e7c4632f62e354f0ac40f65c92cd3e5bec...' // 受け取った署名
<Verification Result of RSASSA-PSS Signature>
true // 署名検証結果
=======
```

使う hash 関数は-h オプションで切り替えられる．

コードの中身はこんな感じ．
鍵生成は前回と一緒なので省略．

署名生成 (src/test-apis.js)

```
const jscu = getJscu();

// uint8array へ変換
const binaryData = jseu.encoder.stringToArrayBuffer(data);
const privateKeyDer = jseu.encoder.hexStringToArrayBuffer(privateKeyHex);

const privateKey = new jscu.Key('der', privateKeyDer); // DER を読込

// hash = 'SHA-256', saltLength = 32
return jscu.pkc.sign(
  binaryData,
  privateKey,
  hash, // データを縮めるための hash 関数名
  {name: 'RSA-PSS', saltLength}
);
```

RSASSA でも，Hash 生成は署名生成 API 内部に含まれていることに注意．別途 Hash 生成しなくてよい．これは JS に限らないことが多い．

署名検証 (src/test-apis.js)

```
const jscu = getJscu();

// uint8array へ変換
const binaryData = jseu.encoder.stringToArrayBuffer(data);
const publicKeyDer = jseu.encoder.hexStringToArrayBuffer(publicKeyHex);
const signature = jseu.encoder.hexStringToArrayBuffer(signatureHex);

const publicKey = new jscu.Key('der', publicKeyDer);  // DER 鍵を読込

// hash = 'SHA-256', saltLength = 32
jscu.pkc.verify(
  binaryData,
  signature,
  publicKey,
  hash, // データを縮めるための hash 関数名
  {name: 'RSA-PSS', saltLength}
);
```

RSASSA-PSS は，Node.js Crypto/WebCrypto 共にネイティブサポートされている．（WebCrypto はブラウザ次第）
しかし他の環境だと，OAEP 同様，PSS に未対応なライブラリも多く注意が必要．(最近まで OpenSSL も未対応だった)

ECDSA; Elliptic Curve Digital Signature Algorithm

ECDSA (NIST FIPS 186-4[31])

- ECDH の署名版[32]．NIST FIPS 186-3 (2009 年) で標準化．
  Bitcoin blockchain にも使われていて，また注目度が上がった．
- RSASSA とは異なり，事前の padding に気を使う必要がない．
  アルゴリズム内部で hash h を生成・利用している．すなわち，

$$\texttt{Signature} = \mathit{SignECDSA}(D, SK),$$
$$\{\texttt{True}, \texttt{False}\} \ni \mathit{VerifyECDSA}(\texttt{Signature}, D, PK),$$

  という直接の API がアルゴリズムレベルで提供される．[33]
- OpenSSL をはじめほとんどの現代的な暗号ライブラリが実装をサポートしている．

[31] https://csrc.nist.gov/publications/detail/fips/186/4/final

[32] 正しい表現ではないが，イメージでそう捉えて欲しい．

[33] RSASSA も，普通のライブラリでは直接 Sign/Verify 可能な API が提供されるが，その実態は RSA のナイーブな署名生成・検証アルゴリズムのラッパー．

RSASSA と ECDSA の比較．(一般論．実装にもよる．)

	Pros	**Cons**
RSASSA	・署名検証が高速．ECDSA と比較してもかなり速い．	・署名サイズが大きい．公開鍵長に等しい (e.g., 3072bits)． ・署名生成がかなり低速．
ECDSA	・署名サイズが小さい．公開鍵長の倍 (e.g., 512bits (256bits key))．	・署名生成・検証共に同じくらい低速．

どっち使えばいいかは利用環境に応じて選択したほうがいい．常に ECDSA を使えばいいとかそういうわけではない．

JavaScript で ECDSA を実行してみる

```
% pnpm execute gen-ecc-key // ECC 鍵ペアの生成. -c で楕円曲線パラメタ設定.
<Generated ECC Public Key>
3059301306072a8648ce3d020106082a8648ce3d03010703... // 公開鍵

<Generated ECC Private Key>
308193020100301306072a8648ce3d020106082a8648ce3d... // 秘密鍵
=======

% pnpm execute sign-ecdsa 'hello ecdsa world!'\ // ECDSA 署名生成
  -s '308193020100301306072a8648ce3d020106082a8648c...' // 秘密鍵

<Generated ECDSA Signature>
58e5d15be4e71f7e6fbd4662cdb31eca463ed855114ef8357bed9.... // 生成された署名
=======

% pnpm execute verify-ecdsa 'hello ecdsa world!'\
  -p '3059301306072a8648ce3d020106082a8648ce3d03010...'\ // 公開鍵
  -t '58e5d15be4e71f7e6fbd4662cdb31eca463ed855114ef...' // 受け取った署名
<Verification Result of ECDSA Signature>
true // 署名検証結果
=======
```

使う hash 関数は-h オプションで切り替えられる.

コードの中身はこんな感じ．
鍵生成は前回と一緒なので省略．

署名生成 (src/test-apis.js)

```
const jscu = getJscu();

// uint8array へ変換
const binaryData = jseu.encoder.stringToArrayBuffer(data);
const privateKeyDer = jseu.encoder.hexStringToArrayBuffer(privateKeyHex);

const privateKey = new jscu.Key('der', privateKeyDer); // DER を読込

// hash = 'SHA-256'
return jscu.pkc.sign(
  binaryData,
  privateKey,
  hash, // データを縮めるための hash 関数名
);
```

署名検証 (src/test-apis.js)

```
const jscu = getJscu();

// uint8array へ変換
const binaryData = jseu.encoder.stringToArrayBuffer(data);
const publicKeyDer = jseu.encoder.hexStringToArrayBuffer(publicKeyHex);
const signature = jseu.encoder.hexStringToArrayBuffer(signatureHex);

const publicKey = new jscu.Key('der', publicKeyDer);  // DER 鍵を読込

// hash = 'SHA-256'
jscu.pkc.verify(
  binaryData,
  signature,
  publicKey,
  hash // データを縮めるための hash 関数名
);
```

RSASSA-PSS と異なり，Salt が不要になり，API がよりシンプル！

ECDSA は，Node.js Crypto/WebCrypto 共に（大体）ネイティブサポートされている．
ただし，パラメータによっては実装されていない可能性があるので注意．ブラウザ差異だけではなく，仕様にない可能性も．[34]

[34] JavaScript では曲線’P-256K’ がネイティブではサポートされていないので，Bitcoin blockchain の ECDSA は動作しない．jscu では pure js で補っている．

MAC/署名の運用について

署名検証のブートストラップの問題

Q: 署名の検証用の公開鍵が正しいことはどうやって保証するの？

⇒ 現状ではこの問題に対して仮定なしで OK な万能の解は未知．
どこかに仮定，信頼するという起点を置いた暫定解がある感じ．

暫定解 1: Trust Anchor

End ごとに，検証用の公開鍵をアプリケーション・端末に固定で事前に埋め込んでおく．そこだけは起点として無条件に信頼して使う．

※ SSH とか GitHub で行う「ホスト・サービスへの公開鍵の登録」，というのはこの Trust Anchor の登録になる．

暫定解 2: PKI に頼る

さらに Verisign とかに検証用の公開鍵に署名してもらって，公開鍵証明書を作る．公開鍵証明書自身はオンラインで取得するが，その Verisign の署名の検証は Trust Anchor…(Verisign を信頼の起点にする)．

解 2 は，Verisign の鍵 1 つを Trust Anchor にすればいいので鍵を埋め込むような手間がかからないが，お金がかかる [35]．

[35] 賛否あるだろうが，Let's encrypt (`https://letsencrypt.org/`) を使えば無償でいける．ただし Let's encrypt は厳密な本人確認とかせずに署名つけてくれるので…

署名・MAC の使い分け

処理の重さで使い分けるのが鉄則.

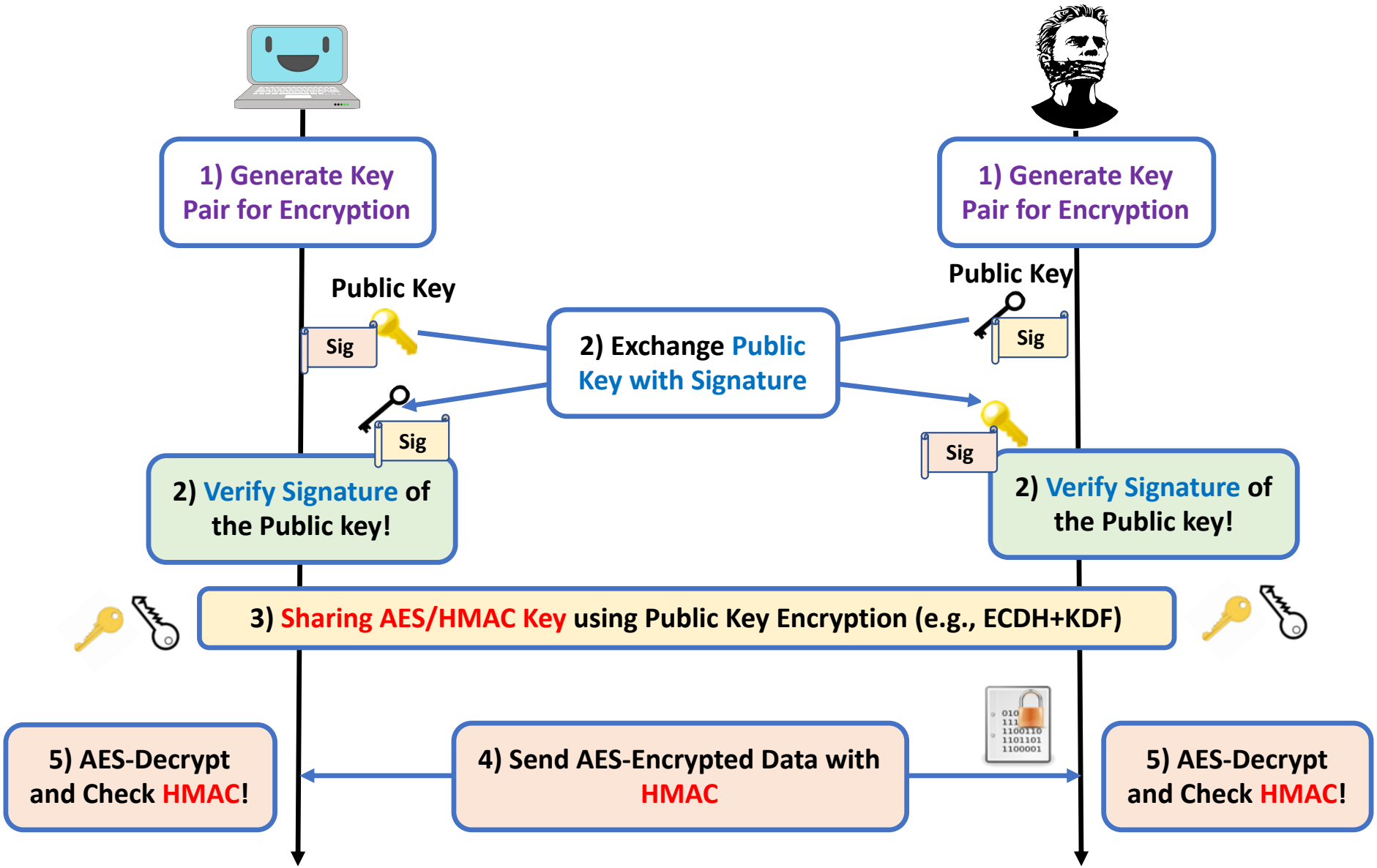
- 暗号化されたデータのやり取りの手続きで，署名はエンド間でのイニシエーションに使う
- MAC はエンド間でなんども繰り返すような本人確認・データ整合性確認に使う

例えば:

1. 署名を付与して，ECDH-ephemeral の公開鍵を交換.
2. ECDH-ephemeral + KDF で HMAC/AES 暗号化の事前共有鍵を生成.
3. 以降の大規模データのやり取りは AES 復号と同時に HMAC で本人確認を実施.

図にすると

(両者で署名検証専用の公開鍵をオフラインで交換している前提)



まとめ

まとめ

- データの真正性・本人確認のためのテクニックついて学んだ．
  - Hash: SHA-2 以降のものを使おう．
  - MAC:
    - 共通鍵ベースの本人確認手法．動作が軽い．
    - JS だととりあえず HMAC を使う．
  - 署名:
    - 公開鍵ベースの本人確認手法．MAC と比べると動作が重い．
    - RSASSA: 使うなら RSASSA-PSS がおすすめ．
    - ECDSA: 大体どの環境でも使える．
- 署名はエンド間のやり取りイニシエーション，MAC はその後のデータのやり取りに使うと良い．

次回からは

今回の知見を生かしつつ，最新の認証方式の標準規格「FIDO2 WebAuthn」についてじっくり触れてみる．