

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

2025-11-13

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。

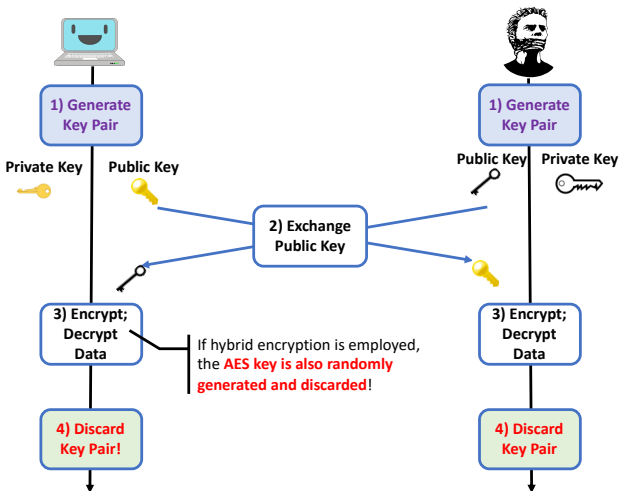
前回のおさらい: Ephemeral Scheme

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

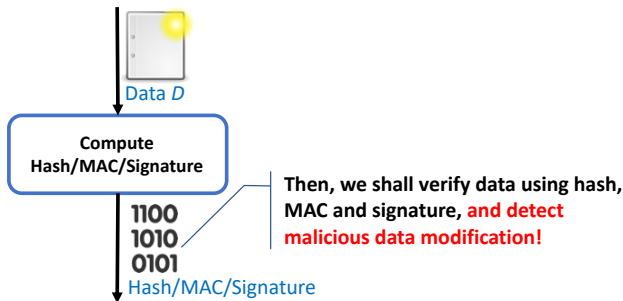
³HMAC (RFC2104 <https://tools.ietf.org/html/rfc2104>)

⁴RSASSA 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．

以下の環境が前提:

- Node.js ($\geq v22$) がインストール済. pnpm が使えること.⁵
- もしくは Rust, Cargo がインストール済み.
- 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: `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
```

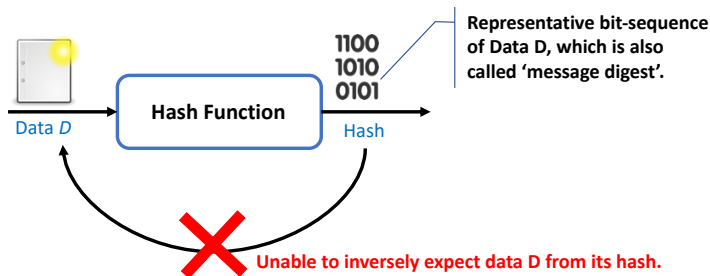
⁶https://github.com/junkurihara/lecture-security_engineering

Hash

Hash および Hash 関数とは

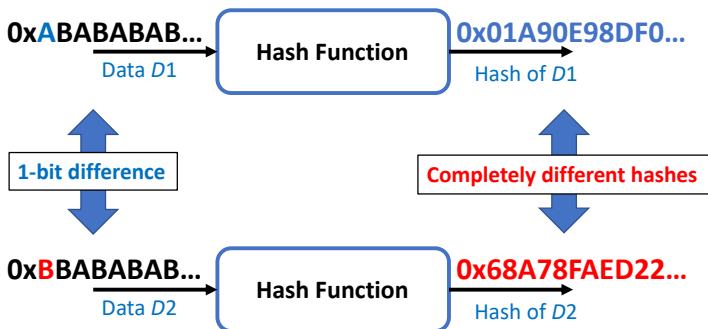
Hash および Hash 関数

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

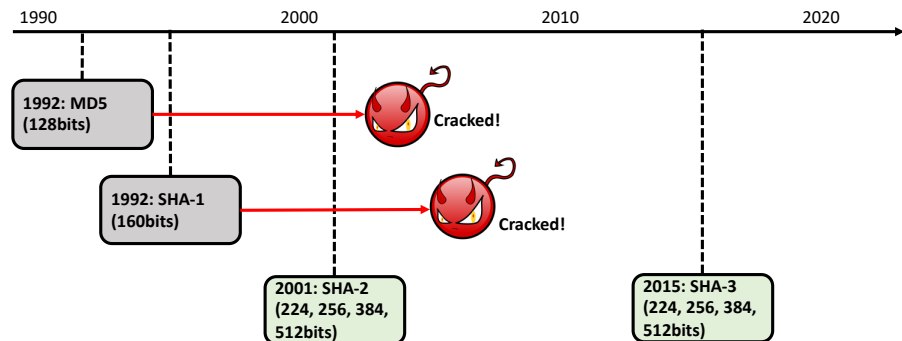
⇒ 別のデータ同士で同じ Hash を得ることが困難なが必須

Checksum \subseteq Hash と言える。

⁸Hash 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 NIST⁹ 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。

⁹NIST 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.

```
% npm 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
=====

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

% npm 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 jscu¹¹ 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」？

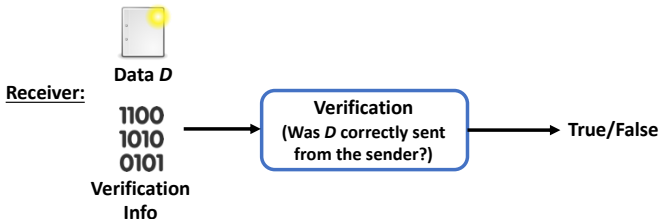
いわゆる「データの真正性と送信元の確認方法」には、大まかに2つの方法がある。

- 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．

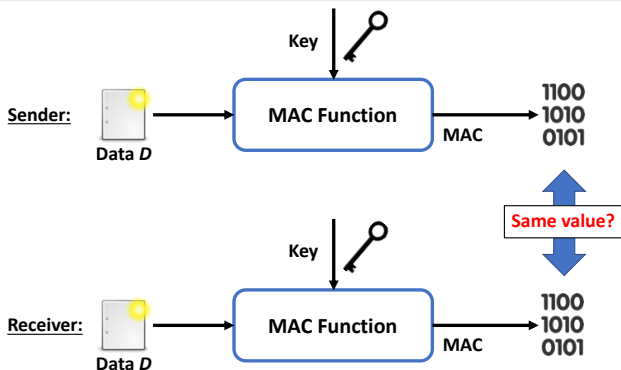


MAC・署名の中身に突っ込む前に，それぞれのざっくりとした定義と pros/cons を説明する．

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．



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，

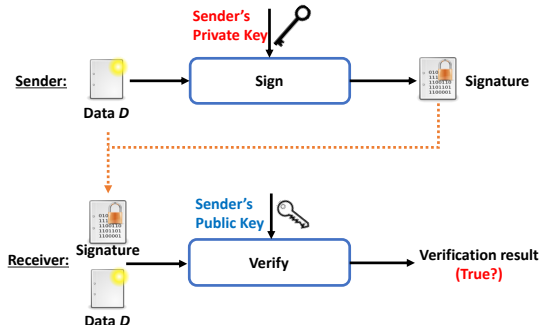
- 鍵を共有する相手から
 - 途中の改ざんなしで送られたデータであること
- が保証される．

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	<ul style="list-style-type: none">• 一般的に高速¹⁵• 生成する MAC サイズは小さい¹⁶	<ul style="list-style-type: none">• 鍵の事前共有が必要
署名	<ul style="list-style-type: none">• 鍵の事前共有が不要	<ul style="list-style-type: none">• 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に、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。

¹⁵AES (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。

¹⁷ECDSA は小さく、256–512bits 程度。RSA 系は非常に大きく通常 2048bits 以上。

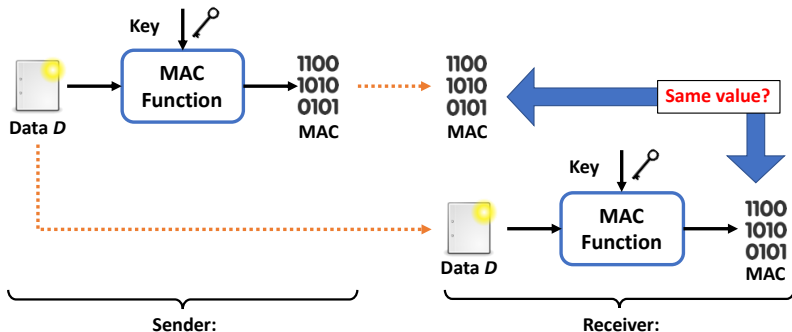
共通鍵を使った改ざん検知・本人確認: MAC

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 Hash¹⁹ 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 v4²⁰ 等, 各所で利用されている.

¹⁸<https://tools.ietf.org/html/rfc2104>

¹⁹Keyed Hash

²⁰AWS 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);

// Promise 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 SP800-38B²¹)

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 SP800-38D²²)

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 API²⁴ 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.

²⁴WebCrypto 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:

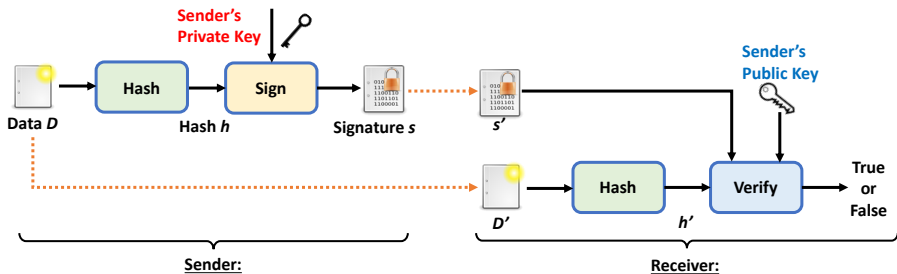
- 1 データ D を Hash 関数で短縮²⁵, hash $h = Hash(D)$ を導出.
- 2 hash h に対して秘密鍵 SK で署名 $s = Sign(h, SK)$ を生成.
データ D と署名 s とを一緒に受信側へ送付.

■ 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.
 $Verify(h, s, PK) \in \{True, False\}$

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「 $h' = \text{Hash}(D')$ 」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.

²⁷Digital 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: $\geq 3072\text{bits}$
- ECC: $\geq 256\text{bits}$

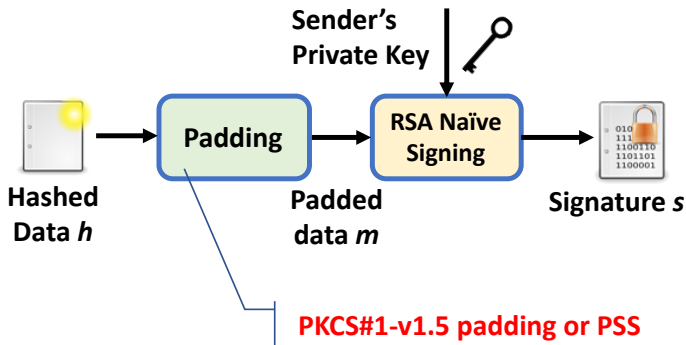
程度.

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， $h = \text{Hash}(D)$ 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 (RFC8017²⁸)

- RSAES PKCS#1-v1.5 の署名版. PKCS#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.
- $\text{hash } h = \text{Hash}(D)$ 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.

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

- 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.
- PKCS#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>

²⁹Y. 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, RFC8017³⁰)

- **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.

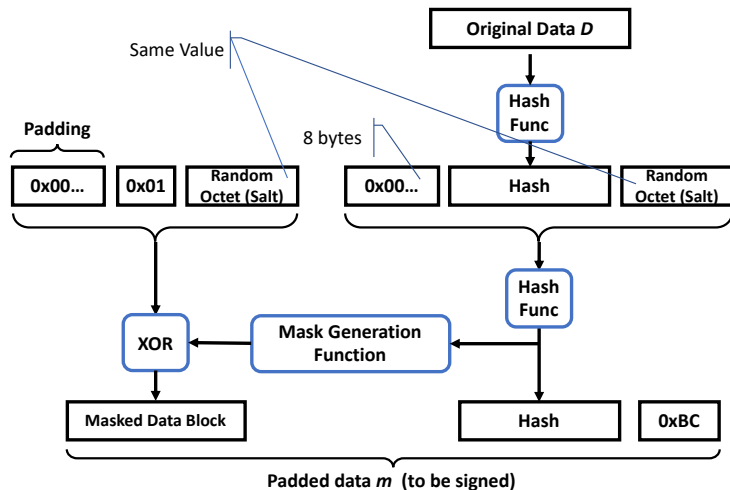
$$h = \text{Hash}(\text{Hash}(D), \text{RandomSalt}),$$
$$m = \text{MaskedDataBlock} || h || 0x\text{BC},$$

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．

```
% npm 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
```

```
=====
```

```
% npm 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
```

```
=====
```

```
% npm 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になので省略.

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 鍵を読み込

// 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 186-4³¹)

- 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,

$$\begin{aligned} \text{Signature} &= \text{SignECDSA}(D, SK), \\ \{\text{True}, \text{False}\} &\ni \text{VerifyECDSA}(\text{Signature}, D, PK), \end{aligned}$$

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.

³³RSASSA 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	<ul style="list-style-type: none">・署名検証が高速. ECDSA と比較してもかなり速い.	<ul style="list-style-type: none">・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	<ul style="list-style-type: none">・署名サイズが小さい. 公開鍵長の倍 (e.g., 512bits (256bits key)).	<ul style="list-style-type: none">・署名生成・検証共に同じくらい低速.

どっちを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 鍵を読み込

// 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、仕様がない可能性も。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せず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。

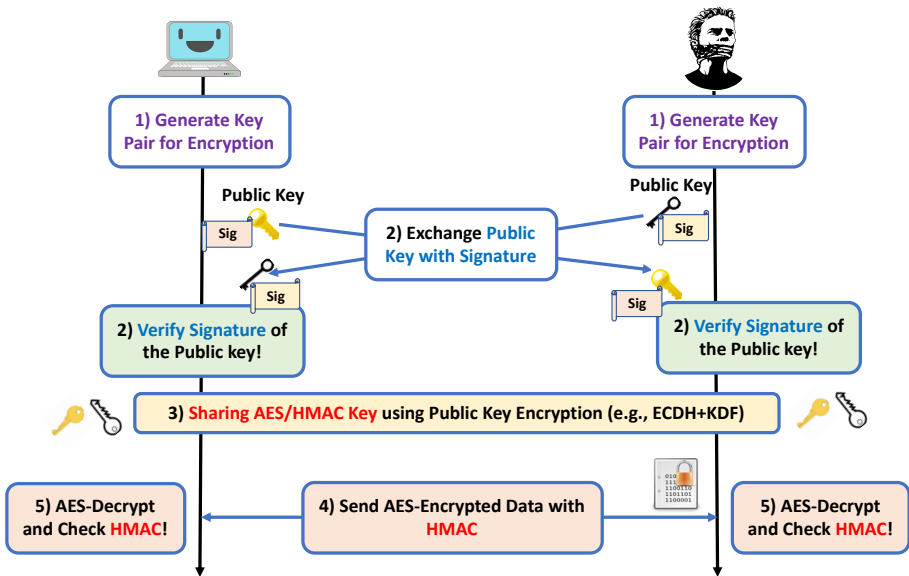
- 暗号化されたデータのやり取りの手続きで、**署名はエンド間でのイニシエーション**に使う
- MAC はエンド間でなんども繰り返すような本人確認・データ整合性確認に使う

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について学んだ.
 - 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．