

JavaScript による End-to-End セキュリティ

第 3 回 公開鍵暗号はどうやって使えばいいのか？ 編

PNG になってるのは **PDF** に修正しとくこと

栗原 淳

2019 年 10 月 17 日

はじめに

はじめに

第1回と第2回では

- End-to-End (E2E) セキュリティの原則と必要性
- Web サイトでの E2E セキュリティ実践のため、JavaScript で暗号 (AES) を正しく・安全に利用する方法

を勉強した。

ところで、AES(共通鍵暗号) とは別に、「公開鍵暗号」というのが存在する。

公開鍵暗号って？

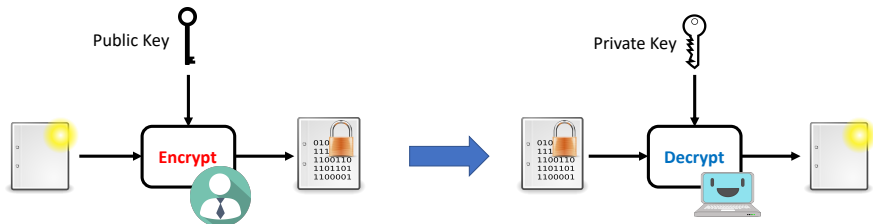
既知だと思うが、まずざっと定義しておく。

定義: 公開鍵暗号

以下のステップで暗号化・復号が行われる暗号方式のこと

- 1 特殊な数学的条件を満たす鍵ペア「公開鍵 PK と 秘密鍵 SK 」を生成
- 2 PK は公開、 SK は秘匿
- 3 データ D を PK によって暗号化して、暗号化データ X を生成
- 4 X は SK によってデータ D に復号される。

暗号化・復号の鍵を分けて、暗号化の鍵を公開してしまうことでパスワードなどの共有が不要になる。



Anyone can encrypt information only with public key without knowing private key!

Only the private key owner can decrypt the information encrypted under its paired public key.



⇒ AES などにはない、非常に強力な暗号化の概念。現代のセキュリティインフラはこれで成り立っていると言っても過言ではない。

今回は正しく・安全に公開鍵暗号を使っていくためのお話。

この講義で最終的に学びたいこと

- 公開鍵暗号はどういうものか。AES と比べた pros/cons。
- RSA 暗号と楕円曲線暗号¹の違い。
- AES と公開鍵暗号を組み合わせるデータを暗号化するために。

細かい話もするが、数式は使わない。

「イメージ」と「コードの流れ&その流れの必要性」をつかめるようにする。

¹楕円曲線 Diffie-Hellman を取り上げる

この講義の対象と事前準備

対象:

- 暗号・セキュリティ技術に興味がある初学者
- Web に暗号技術を導入したい Web 系のエンジニア

必須ではないが触って楽しむのには必要な事前準備:

- Bash, Git が使えるようになっていること
- Node.js, npm, yarn が使えるようになっていること
- Google Chrome 系ブラウザ and/or Firefox が利用可能なこと

公開鍵暗号の使い方 事始め

公開鍵暗号の種類

公開鍵暗号の定義「特殊な数学的条件を満たす鍵ペアを生成」



この「数学的条件」に複数の種類が存在。

JavaScript に限らず、各種環境で利用可能な代表的な公開鍵暗号：

- 素因数分解に関する条件
→ **RSA 暗号**
- 楕円曲線上の離散対数に関する条件
→ **楕円曲線暗号 (Elliptic Curve Cryptography)²**

この2つの使い方、注意ポイントを今回は取り上げる。

²今回は便宜上 Elliptic Curve Diffie-Hellman; ECDH を楕円曲線暗号と呼んでいく。

RSA Cryptography

言わずもがな、公開鍵暗号の代表的な手法

- 1977 年、Rivest-Shamir-Adleman の 3 名により発明。2000 年に特許期間満了 (現在特許フリー)。暗号化以外に「署名」の手法への応用も有名。
- RFC 8017 (PKCS#1 v2.2)、ANSI X9.31、IEEE 1363、CRYPTREC 等、各所で標準に採用。
- 公開鍵長は 1024–4096bits が標準的に使われている。³
- 暗号化・署名の際には、元のデータにパディングが必要。**パディング方法によりセキュリティが大きく左右される。**⁴

³原理的には無限に伸ばせる。

⁴RSA-OAEP(暗号化)、RSA-PSS(署名) が現状ベターな方法。これを話す。

楕円曲線暗号のさわり

Elliptic-Curve Cryptography

楕円曲線という数の世界での「離散対数」を使った方式の総称⁵

- 1985 年頃、Victor Miller、Neal Koblitz により独立に考案。
- Diffie-Hellman(DH)⁶ を楕円曲線上で実行するのが ECDH、DSA⁷ を楕円曲線上で実行するのが ECDSA。
- RFC8442、CRYPTREC、IEEE P1363 等で標準化。TLS や Bitcoin など多方面で利用。
- 公開鍵長は 256–521bits (Compact form) が標準的に使われている。
- ECDH は「ECDH-Ephemeral」という方法で実行することで、普通に使うより**安全性が大きく向上する**。⁸

⁵ 普通に離散対数問題を使うより、楕円曲線上でやることで安全性を担保する鍵長が短くなる。

⁶ RFC2631 <https://tools.ietf.org/html/rfc2631>

⁷ NIST FIPS 186-4 <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.186-4.pdf>

⁸ Forward Secrecy(第 1 回のスライド参照) を担保する。

AES と比べた公開鍵暗号の Pros/Cons

何でもかんでも公開鍵暗号、で良さそうな気もしてくるが…

	Pros	Cons
AES	<ul style="list-style-type: none">・ 安全性を担保する鍵長が短い (128bits～)・ 一般的に高速・ SoC での最適化も望める⁹	<ul style="list-style-type: none">・ パスワードなどの事前共有が必要
公開鍵暗号	<ul style="list-style-type: none">・ パスワードなどの秘密情報の事前共有が不要	<ul style="list-style-type: none">・ 安全性を担保する鍵長が長い (RSA: 2048bits～)・ 一般的に非常に遅い・重い

⇒ 使い所を考えて組み合わせて使う、もしくは場合に依じて使い分けないと**実用に耐えないシステム・サービスが出来上がる**。

⁹Intel AES-NI

安全性を担保する鍵長が大きく違うのはどういうこと？

AES と比べた RSA・楕円曲線暗号の公開鍵のビット長比較¹⁰。
横1行がだいたい同じくらいの安全性と言われる。

AES	RSA	楕円曲線
128	3072	256–383
192	7680	384–511
256	15360	512–

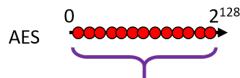
AES に比べて、楕円曲線で倍、RSA に至っては 24 倍以上の鍵長を使わないと、同じくらいの安全性を担保できない。

鍵長が長いほど、暗号化・復号がどんどん重く・遅くなっていく…

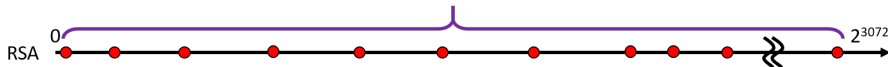
¹⁰Recommendation for Key Management, Special Publication 800-57 Part 1 Rev. 4, NIST, 01/2016. <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-57-part-1/rev-4/final>

「AES-128 が、RSA-3072 と同じくらい」というイメージは、以下のように説明できる。

- AES: 数値 = $0, 1, \dots, 2^{128} - 1$ のうち、どれか 1 つが鍵。
- RSA: 特殊な条件を満たす数 = 素数 2 個の積 (合成数) を選んで、公開・秘密鍵を求める。



Equivalent number of key candidates

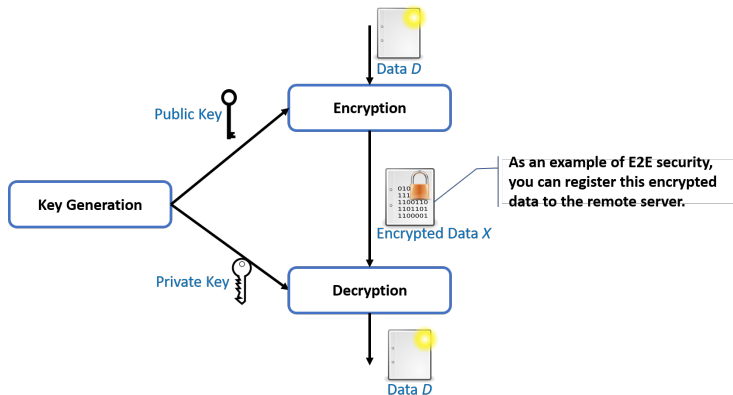


総当たりした時に「当たる」確率を揃えるには、RSA はその分巨大な数まで候補にしないとならない。

サンプルコードの準備

準備

細かく暗号化の説明を聞きつつ、手を動かすため、まず環境準備。
今回は、JavaScript (Node.js) を使って手元で公開鍵暗号化・復号。



前回・前々回使った「リモートサーバに登録する」というところは、簡略化のため端折ってる。興味があれば、前回のコードを公開鍵暗号に拡張して、E2E セキュリティしてみよう！

以下の環境が前提:

- Node.js (> v10) がインストール済。yarn が使えること。¹¹
- 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。

¹¹ インストールコマンド: `npm i -g yarn`

JavaScript プロジェクトの準備

- プロジェクトの GitHub リポジトリ ¹² を Clone

```
$ git clone https://github.com/zettant/e2e-security-03  
$ cd e2e-security-03/sample
```

- 依存パッケージのインストール

```
$ yarn install
```

- ライブラリのビルド

```
$ yarn build
```

¹²<https://github.com/zettant/e2e-security-03>

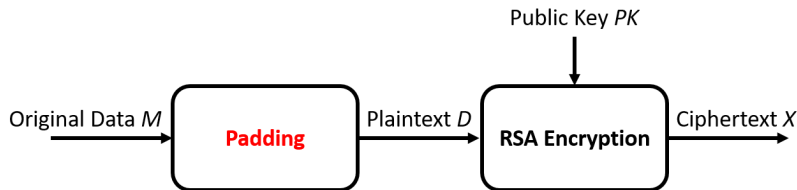
RSA 暗号を使ってみよう

RSA 暗号を使うためのお作法

RSA 暗号化の制限

データ D と、公開鍵 PK とが、同じビット長でなければならない

⇒ RSA 暗号化の前には、まず元データへのパディング¹³が必要。



RSA 暗号化には、前処理としてのパディングの選択が最重要のお作法。

¹³ 長いデータの場合は切断…

RSA 向けに主として 2 種類のパディング方法が知られている。¹⁴

- PKCS#1-v1.5 Padding
- Optimal Asymmetric Encryption Padding (OAEP)

¹⁴ 共に PKCS#1 (RFC8017) で標準化。 <https://tools.ietf.org/html/rfc8017>

- RSA 暗号化と組み合わせると、RSAES-PKCS1-v1_5。
- 元データ M に、公開鍵長まで以下のようなパディングを付与。

$$D = 0x00 \parallel 0x02 \parallel \text{RandomSequence} \parallel 0x00 \parallel M$$

- 暗号化データを任意に改変でき、復号者に復号成功・失敗を確認させられる時、**元データを復号される脆弱性**が知られている。¹⁵
- PKCS#1 v2.2 (RFC8017) で「後方互換性のため以外では使用するな」と明示的に記載。CRYPTREC においても推奨暗号方式リストからドロップ。¹⁶

基本的に使うな

¹⁵1998 年の Bleichenbacher's Attack。2018 年、現代の Internet でも未対策ホスト・サービスが大量なことが発表されている (ROBOT Attack)。

¹⁶<https://www.cryptrec.go.jp/method.html>

Optimal Asymmetric Encryption Padding (OAEP)¹⁷

- RSA 暗号化と組み合わせて、RSA-OAEP、もしくは RSAES (RSA Encryption Scheme) - OAEP と呼ぶ。
- 元データ M とランダムシードに対して、All or Nothing Transform (AONT) を実行し、 D を公開鍵ビット長まで膨らませる。

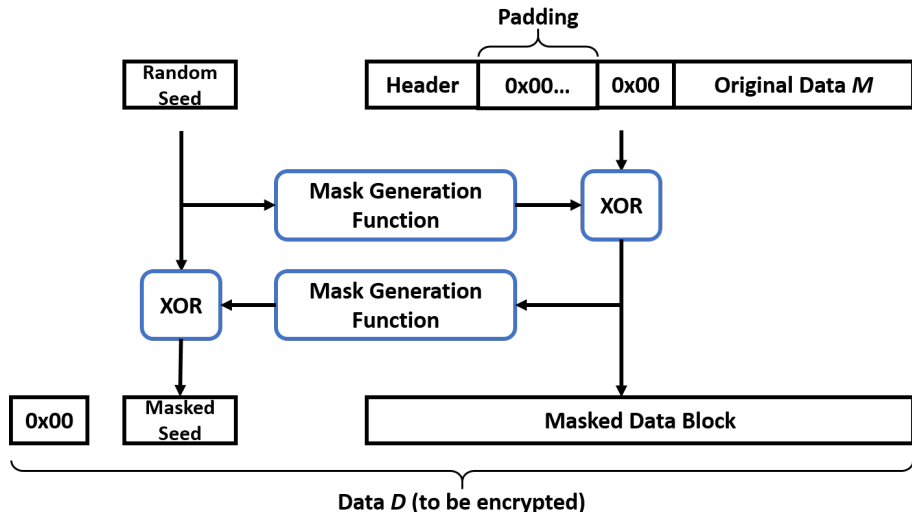
$$D = \text{AONT}(M, \text{RandomSeed})$$

- PKCS#1-v1.5 Padding の脆弱性は潰されている。実用の上ですぐに致命的な脆弱性は知られていない。PKCS#1 v2.2 (RFC8017) では、**新規アプリは OAEP を利用することと明記。**

今は RSA なら OAEP 使っとけば間違いない

¹⁷M. Bellare and P. Rogaway, "Optimal Asymmetric Encryption," in Proc. EUROCRYPTO 1994, pp. 92–111, LNCS 950, 1994.

参考: OAEP のイメージ図



逆変換は Masked Seed, Masked Data Block が両方揃えば可能。

JavaScript で RSA-OAEP 暗号化をしてみよう

RSAES-OAEP は、WebCrypto API(ブラウザ) でも、Node.js Crypto でもネイティブサポートされている。¹⁸

¹⁸RSAES-PKCS1-v1_5 もサポートされている。

RSA-OAEP による公開鍵暗号化のコードはこんな感じ。

楕円曲線暗号 (ECDH) を使ってみよう

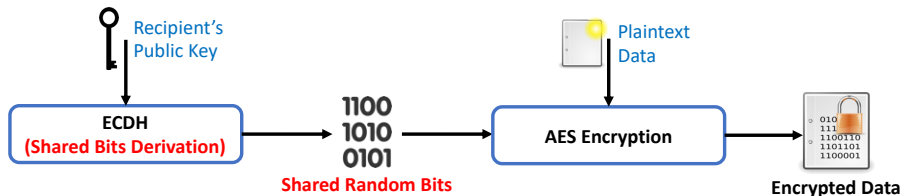
楕円曲線暗号を使うためのお作法 その1

今まで ECDH を公開鍵暗号って呼んでいてすみませんでした…

Elliptic-Curve Diffie-Hellman (ECDH)

ECDH 自身は、データの暗号化ではなく、公開鍵・秘密鍵を使って送受信者間で秘密裏にランダムビット列を共有するための方法。

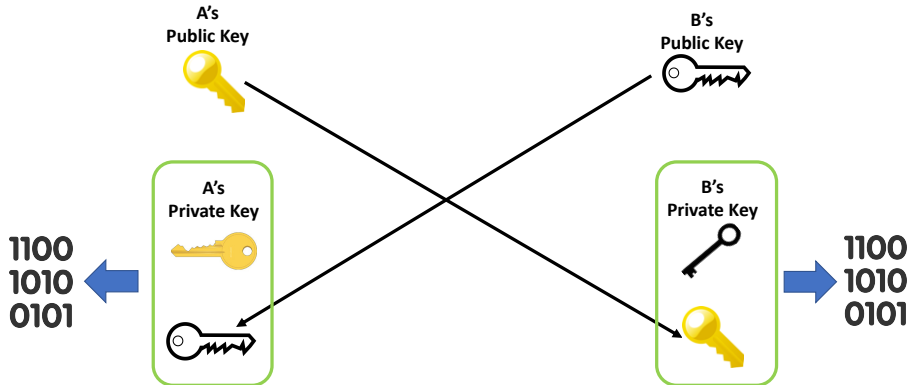
⇒ 共有したランダムビット列を鍵 (の種) として用いて、AES とかでデータを暗号化。



この流れ全体で「公開鍵暗号」の体を為す。

というわけで、まずはこの「共有ランダムビット列」の導出の話。

(EC)DH における共有ランダムビット列の導出の流れ:



Just by simply exchange the public key each other, one can calculate the shared random bits from the other's public key and its own private key.

送信者 (A) と受信者 (B) が、互いに公開鍵を交換するだけで同じビット列を秘密裏¹⁹に共有できる。

¹⁹ 秘密鍵は一切表に出てこないことに注目

ちょっとフォーマルに書くと:

ECDH の特徴²⁰

2つの公開鍵・秘密鍵ペア: (PK_1, SK_1) と (PK_2, SK_2) で、

$$\begin{aligned}\text{SharedRandomBits} &= \text{ECDH}(PK_1, SK_2) \\ &= \text{ECDH}(PK_2, SK_1).\end{aligned}$$

すなわち ECDH では、鍵ペアを持っているもの同士なら、相手の公開鍵から共有ビット列が導出可能。

共有ビット列の長さは、公開鍵長 (Compact form) と一緒。

²⁰EC でない DH も同様。

JavaScript で ECDH 共有ビット列導出をしてみよう

ECDH の共有ビット列導出は、WebCrypto API(ブラウザ) でも、Node.js Crypto でもネイティブサポートされている。²¹

²¹[ブラウザ] encrypt などというわかりやすい API ではなく、deriveBits(ビット導出)。[Node.js] ECDH オブジェクト生成。

ECDH 共有ビット列導出のコードの中身はこんな感じ。

楕円曲線暗号を使うためのお作法 その2

前回の「AES を使うために」で学んだことの復習。

前回の復習

マスターシークレット (=ECDH 共有ビット列) を元に AES 暗号化を行うためには、**マスターシークレットから作る鍵のランダム具合の向上、鍵の総当たりの困難化**を施すと良い。

⇒ 共有ビット列に対して鍵導出関数を利用することで担保する。

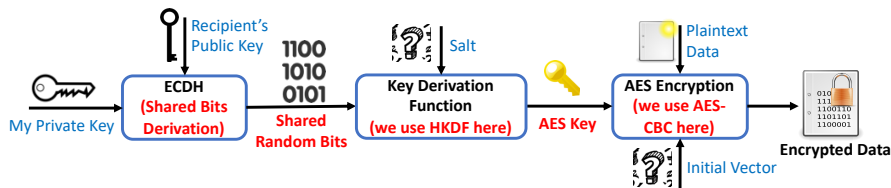
- HKDF (RFC5869)
- Concat KDF (RFC8039)²²
- etc....

今回は HKDF を使う。

²² JOSE 向けに標準化された鍵導出関数 <https://tools.ietf.org/html/rfc8037>

JavaScript で ECDH から AES 暗号化してみよう

ECDH, HKDF, AES を組み合わせて、「公開鍵暗号化」してみる。



このフローでは、**実際のデータの暗号化は AES に任せている**。



RSA 暗号化と違い、一度に暗号化できるデータサイズが公開鍵のサイズ以下などと制限されることはない。²³

²³ただし、通常この場合も共有ビット列を使って暗号化するデータは、「別の AES 暗号化用の鍵 (すなわち 256bits 以下)」とすることが多い。後述する。

実行してみる。

ECDH, HKDF, AES を組み合わせた暗号化のコードはこんな感じ。

より実用的な公開鍵暗号の運用

ここまでの振り返り

ここ迄、以下の2つの「単純な」公開鍵暗号のやり方を学んだ。

- RSA-OAEP による暗号化
- ECDH, KDF, AES の組み合わせによる暗号化

ただ、この単純なやり方だと、次のような制限がある。

- 複数宛先向けの暗号化でめちゃくちゃ効率が悪い。
※あるデータを、 n 人の宛先向けに暗号化すると、トータルの暗号化データは元のデータの n 倍 (以上)。
- 秘密鍵 SK が漏洩すると、何もかも終わり。

これを踏まえて、ここでそれらの実用的な対策を学ぶ。

1 公開鍵暗号による AES 暗号鍵のカプセル化

⇒ 複数宛先向けに効率のいい公開鍵暗号化。

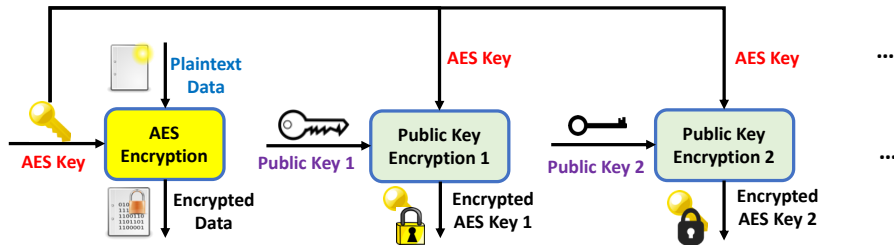
2 Perfect Forward Secrecy

⇒ 秘密鍵が漏洩しても、過去の暗号化データはクラック不能。

公開鍵暗号による、AES 暗号鍵のカプセル化

Hybrid Encryption, Key Encapsulation

- データの暗号化はランダム鍵 K を使った AES 暗号化²⁴
- K のみを宛先ごとに公開鍵暗号化



²⁴ 共通鍵暗号化

- 比較的小さい AES の鍵 K のみ、宛先毎の公開鍵で暗号化。
- 鍵に比べて非常に大きい(であろう) **データ部分の暗号化は、宛先に依らず共通化**してしまう。

誰宛でもまず同じ AES 暗号化データを送りつけといて、その AES の鍵だけを復号を許可したい人の公開鍵で暗号化するようなデータへのアクセス制御への応用。

AES 暗号化データ自体は誰宛でも共通なので、CDN に載せて公開配信とかしちゃうとめちゃくちゃ再利用性が高まってよい。²⁵

²⁵ インターネット配信向けの DRM なんかもこういう考え方がよく使われている。

RSA-OAEP と AES を使って「複数人宛のデータ暗号化」を試してみよう。

RSA-OAEP+AES のコードの中身はこんな感じ。

Perfect Forward Secrecy

より安全な暗号化のために。

(Perfect) Forward Secrecy

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。



ハイブリッド暗号化の際、公開鍵・秘密鍵を使い捨てる
Ephemeral Scheme の利用

Ephemeral Scheme のイメージ

ECDH を使った暗号化では、Ephemeral Scheme を使うのが推奨される²⁶。

ECDH-Ephemeral (ECDHE)²⁷

- 送信先の相手を問わず、毎回違う共有ビット列が生成される。
⇒ 「今使った」共有ビット列や秘密鍵が盗まれても過去のデータは解読不能。
⇒ **Forward secrecy が担保可能。**
- 毎度毎度、まず Ephemeral 公開鍵を送らなければならない、通信コストは高い。

²⁶ RSA 暗号を使った場合の Ephemeral Scheme を標準の手法は知る限りない…単純に巨大な公開鍵を送るコストが高いことと、RSA-4096 で AES-256 の鍵を暗号化するなど、無駄の多さが理由か？

²⁷ TLS で利用されるスキームだと思って良い <https://tools.ietf.org/html/rfc8422>

まとめ

まとめ

お疲れ様でした。

- 公開鍵暗号化の際のお作法を学んだ。
 - RSA: パディングには **OAEP** を使う (**RSAES-OAEP**)。
 - ECDH: 導出した共有ビット列は**鍵導出関数を通してから** AES の鍵として利用する。
- より実用的な公開鍵暗号化の運用について触れた。
 - **ハイブリッド暗号化**: 複数人向け、量的に効率的な暗号化。
 - **Ephemeral Scheme**: Perfect Forward Secrecy を担保して万一の鍵漏洩に備える。
- 上記について、JavaScript のコードを実行/中身を覗いてみた。

以下バックアップ

直接 Concat KDF を暗号化の鍵にするか、あるいは Concat KDF の結果を AESKW の鍵として Content Encryption Key を暗号化するのに使う。

ECDH Ephemeral (ECDHE)

