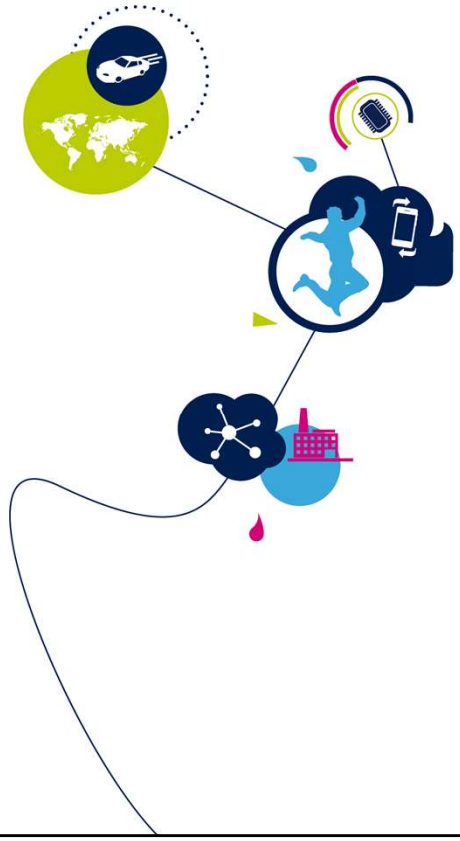
STM32WB – AES

Advanced Encryption Standard ハードウェアアクセラレータ

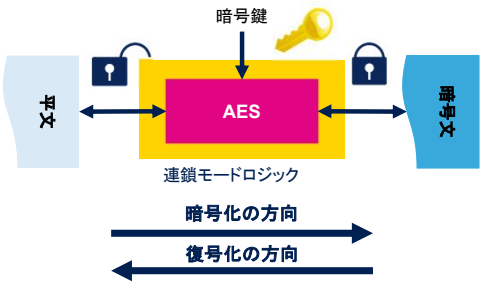
1.0 版



life.augmented

STM32 の Advanced Encryption Standard ハードウェアアクセラレータのプレゼンテーションにようこそ。ここでは、暗号アプリケーションで広く使用されている AES インタフェースの機能の説明を行います。

概要



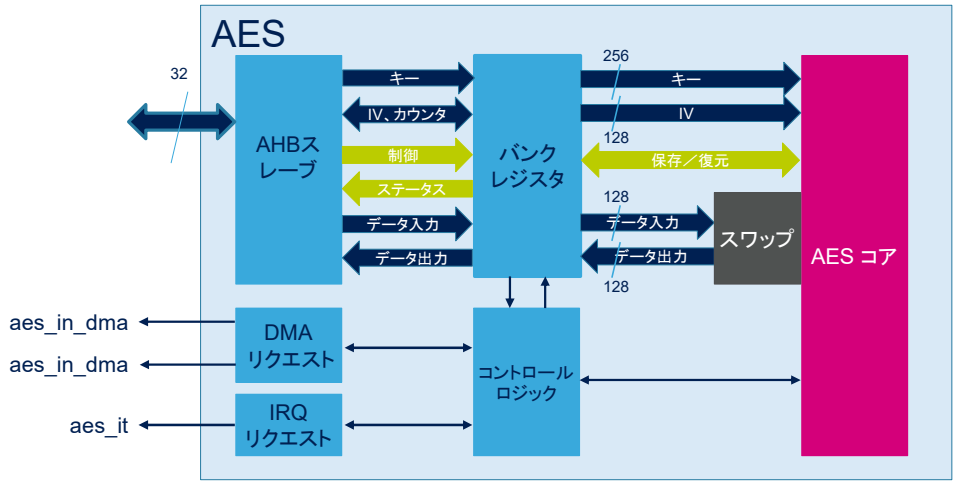
- 平文と呼ばれる元のテキストを暗号文と呼ばれる読み取り不能テキストにセキュアな暗号鍵を用いて変換
  - CPU または DMA によって使用されるハードウェアアクセラレータとして設計
- 多くの標準動作モードと 2 種類の鍵サイズ（128bit または 256bit）に対応

アプリケーション側の利点

- データの機密性と真正性を保護
- CPU処理時間の低減

AES アルゴリズムは、128bit 長か 256bit 長の秘密暗号鍵を用いて情報の暗号化と復号化を行うための対称ブロック暗号です。暗号化では、暗号文と呼ばれる判読不能なフォーマットにデータを変換し、復号化では、平文と呼ばれる元のフォーマットに暗号文を変換します。
AES ペリフェラルには、AES アルゴリズムが NIST FIPS 197 準拠で実装されており、処理時間についてはソフトウェアライブラリよりも高効率です。AES ペリフェラルは複数の連鎖モードに対応しており、モードに応じて、データの機密性またはデータの機密性および真正性を保護します。

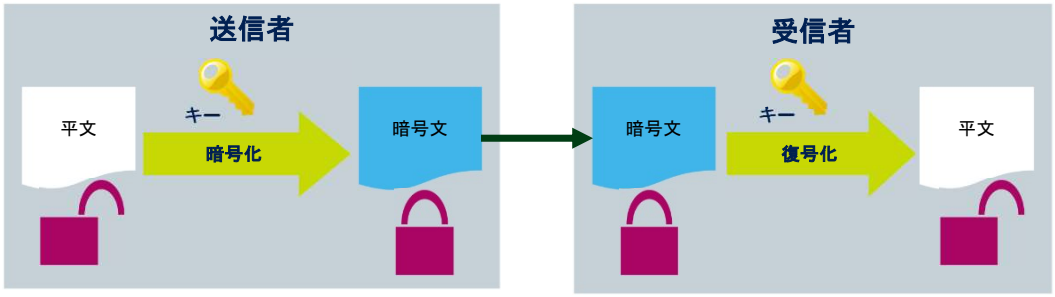
AES ブロック図



平文データを暗号文に暗号化したり、その反対に暗号文を平文に復号化したりするには、すべてをソフトウェアで行うと大きな負荷となる集中的な演算が必要となります。AES ハードウェアアクセラレータによって、
AES コアの中で暗号化と復号化の処理が行われ、CPU の負荷が軽減されます。
AES ブロックは AHB スレーブの1 つです。CPU が AES ブロックにデータ、鍵、初期化ベクトルをメモリマップドレジスタに書き込んだ後に読み出して結果を取得するか、2 本の DMA チャネル（1 本は AES へのデータの書き込み、もう1 本は結果の読み出し）によってデータの移動が保証されます。
AES がより優先順位の高い別メッセージを処理する必要がある場合は、ソフトウェアで元のメッセージをサスペンドする事が可能で、その後レジュームする事が出来ます。
AES コアは、データ処理を担当するユニットです。そのロジックは、1、8、16、32bit データのスワッピングに対応しています。
内部データパスは、データと初期値には 128bit 幅、鍵には 256bit 幅です。128bit 鍵にも対応しています。

AES を用いた機密性保護

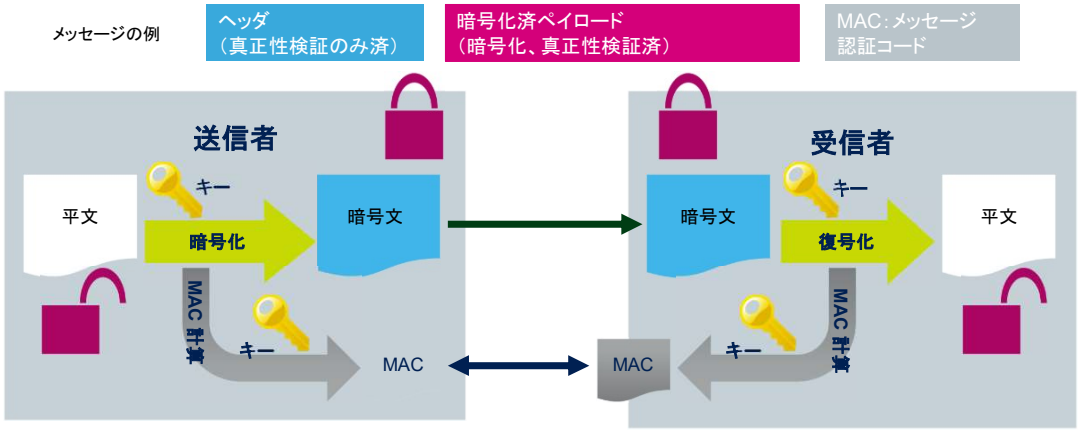
- 暗号化とは、平文と呼ばれる元データを、暗号文と呼ばれるランダムで読み取り不能に見える形式に変換する方法。
- 第 1 の目的:データの機密性の保護



AES の暗号化と復号化のアルゴリズムは、セキュアネットワークルータ、ワイヤレス通信、ならびに、セキュアスマートカード、セキュアビデオ監視システム、セキュア電子会計トランザクションを含む暗号化データストレージなどのさまざまなアプリケーションに適しています。
送信者は、秘密鍵を用いて平文メッセージを暗号化します。受信者は、同じ秘密鍵を用いてそのメッセージを復号化します。
したがって、AES は対称鍵に基づいており、同じ鍵が暗号化と復号化の両方に使用されます。

AES を用いた認証済み暗号化

- メッセージの機密性の保護に加えて、受信者は、メッセージが本物であり転送中に変更されていないどうかについても知りたいケース。
  - これは、メッセージ認証コード（MAC）計算と呼ばれる追加処理で達成。



暗号文にメッセージ認証コードを追加することにより、受信者は、そのメッセージが期待される送信者が元となっていることの確認が可能となります。
AES ブロックは、データ暗号化の中で MAC の生成が可能です。

AES 機能（1/3）

- NIST FIPS 197 に準拠した AES アルゴリズムの実装
- NIST によって標準化された 6 種類の AES 連鎖モード:
  - 128bit ブロックを処理する「ブロック」暗号モード
    - 1) 電子コードブック（ECB）
    - 2) 暗号ブロック連鎖（CBC）
  - あらゆるデータサイズを処理する「ストリーム」暗号モード（メッセージがモジュロ 128bit である必要は無い）
    - 3) カウンタモード（CTR）
  - MAC 計算を用いた特殊ストリーム暗号である「認証済み」暗号モード
    - 4) ガロアカウンタモード（GCM）
    - 5) GCMの1種であるガロアメッセージ認証コードモード（GMAC）
    - 6) CBC-MAC付きカウンタ（CCM）

life.augmented

米国標準技術研究所（NIST）は、暗号化規格を規定する連邦情報処理規格（FIPS）広報を発行しています。
ブロック暗号モードは、暗号化するデータがバッファに格納されている場合に便利です。
ストリーム暗号モードは、（ブロックレベルでは無く）ビットレベルで効率的にデータの暗号化や復号化を行うために便利です。このモードにはキーのスケジューリングが不要です。
認証済みモードは、（有効化されている場合に）暗号化されたデータとともにメッセージ認証コード（MAC）を生成するために用いられます。

AES 機能(2/3)

- 3 種類の AES 動作モード:
  - モード 1:暗号化
  - モード 2:暗号化のための鍵導出(ECB と CBCのみ)
  - モード 3:復号化

AES は 3 種類の動作モードを特徴としています。

- モード 1:平文暗号化
- モード 2:電子コードブック(ECB)または暗号ブロック連鎖(CBC)の暗号化鍵連鎖ECB または CBC の連鎖モードでモード 3 を選択する前に使用する必要があります。AES アクセラレータを有効化する前に、AES キーレジスタに格納された値に基づいて、新しいキーが鍵導出によって導出されます。
- モード 3:暗号文復号化

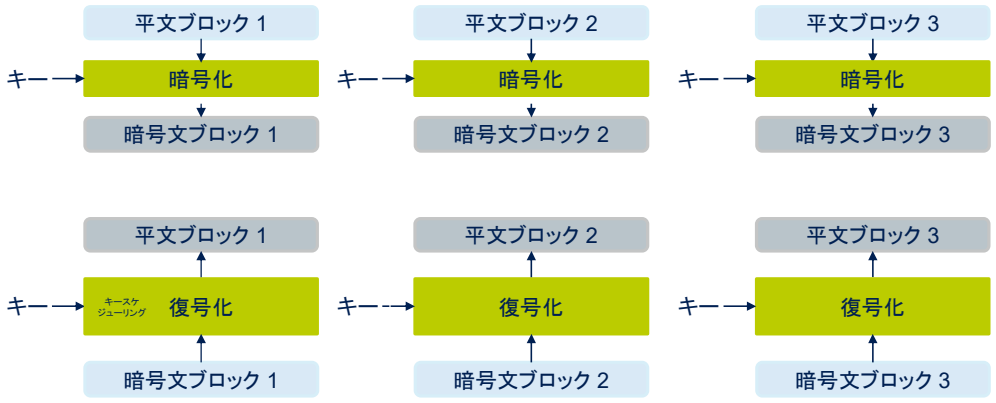
AES 機能(3/3)

- 128、256bit キーと 128bit データブロックの処理に対応
  - メッセージサイズがブロックサイズの倍数ではない場合に、ECB モードと CBC モードではciphertext stealing techniquesをソフトウェアによって実装する必要あり。
- 1、8、16、32bit データをサポートするデータスワッピングロジック
- 優先順位の高い別のメッセージを処理する必要がある場合に、メッセージをサスペンド
- DMA 機能:2チャネル(1チャネルは受信データ、1チャネルは送信データ用)

life.augmented

AES キーの長さは 128bit か 256bit です。
データスワッピングは、128bit データブロック内の 1、8、16、32bit のスワッピングに対応しています。
サスペンド/レジュームメカニズムによって、処理するメッセージの優先度に応じたプリエンプションが可能です。
サイズがブロックサイズ(128bit)の倍数ではないメッセージを管理する場合、ソフトウェアは、NIST 特別広報 800-38A の付録に記載されているものなどのciphertext stealing techniquesを実装する必要があります。

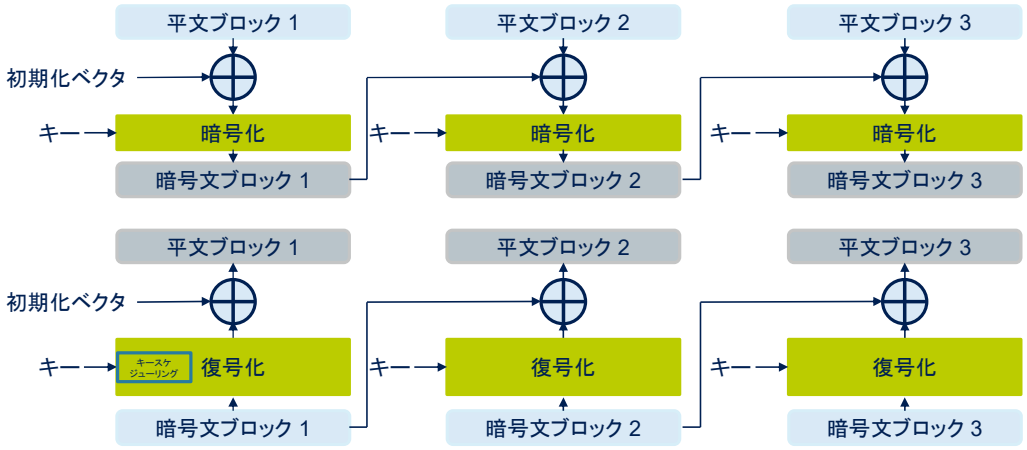
ECB（電子コードブック）



life.augmented

ECB は最も単純な動作モードです。連鎖操作も特別な初期化ステージもありません。メッセージはブロックに分割され、各ブロックが個別に暗号化または復号化されます。
ECB の復号化では、最初のラウンドの復号化のキーを、暗号化の最終ラウンドのキーから導出する必要があります。これは、復号化を行う前に、暗号化の完全なキースケジュールが必要となるためです。

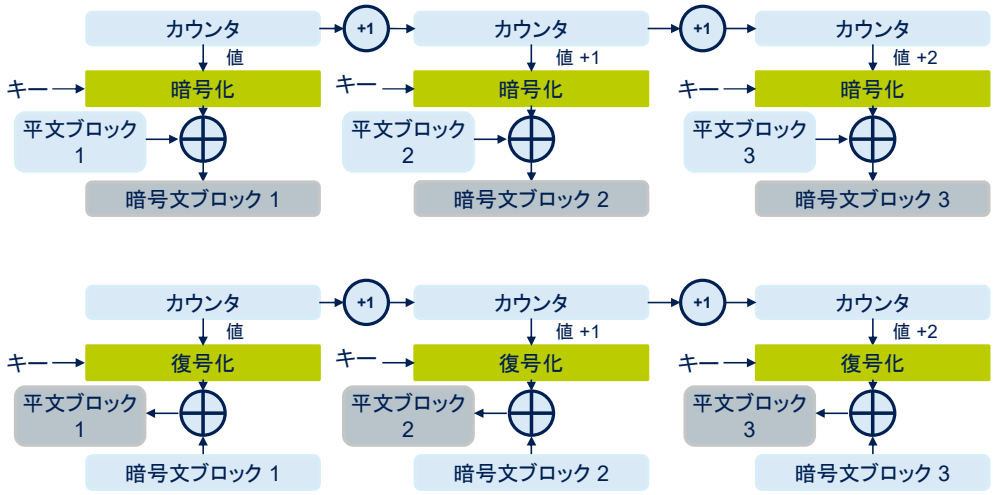
暗号ブロック連鎖（CBC）モード



⊕ 排他的論理和

CBC モードでは、平文の各ブロックが前の暗号文ブロックと XOR されてから暗号化されます。各メッセージを一意にするために、最初のブロック処理時に初期化ベクタが使用されます。
CBC の復号化では、最初のラウンドの復号化のキーを、暗号化の最終ラウンドのキーから導出する必要があります。これは、復号化を行う前に、暗号化の完全なキースケジュールが必要となるためです。

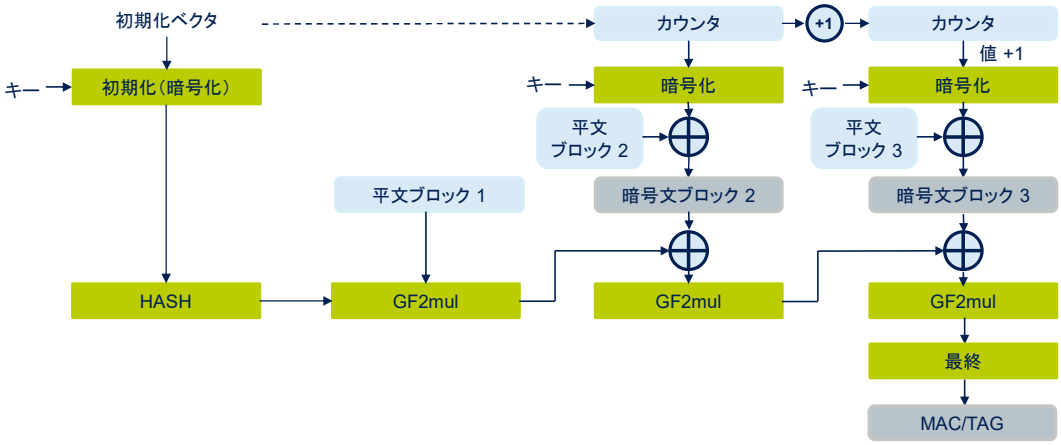
カウンタ(CTR)モード



⊕ 排他的論理和

カウンタ(CTR)モードでは、AES コアを使用してキーストリームを生成します。キーは、その後平文との排他的論理和をとって暗号文を得ます。
この連鎖スキームでは、キーストリームまたはカウンタブロックの生成に AES コアが暗号化モードで必ず使用されるため、ECB モードや CBC モードとは異なり、CTR の復号化にキースケジューリングは必要ありません。

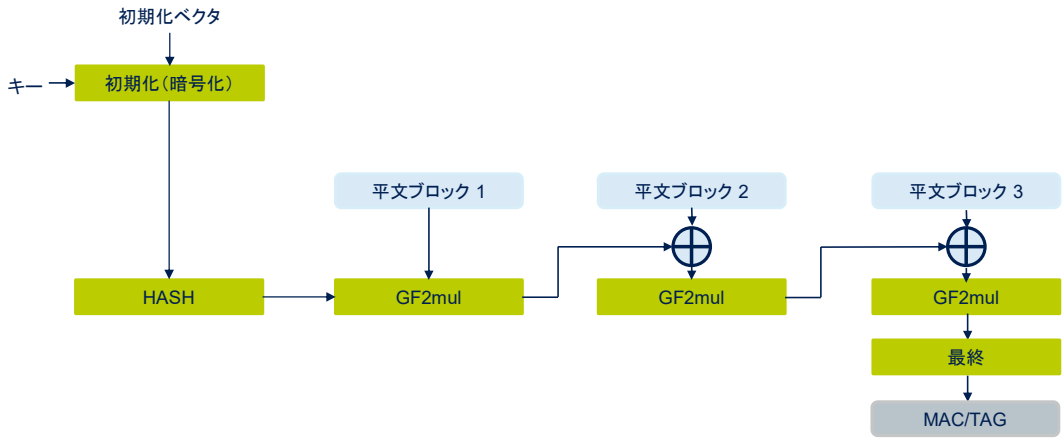
ガロア／カウンタモード（GCM）



⊕ 排他的論理和

ガロア／カウンタモード（GCM）では、平文メッセージが暗号化されている間に、並列でメッセージ認証コード（MAC）が計算され、対応する暗号文とその MAC（認証タグとも言います）が生成されます。AES の機密性のあるカウンターモードをベースとして、加算と乗算を繰り返しタグを生成します。最初に初期化ベクトルが必要です。
GCM メッセージの一部（ここではブロック 1）は暗号化されないことがあります（認証済みヘッダと呼ばれます）。

ガロアメッセージ認証コード（GMAC）モード

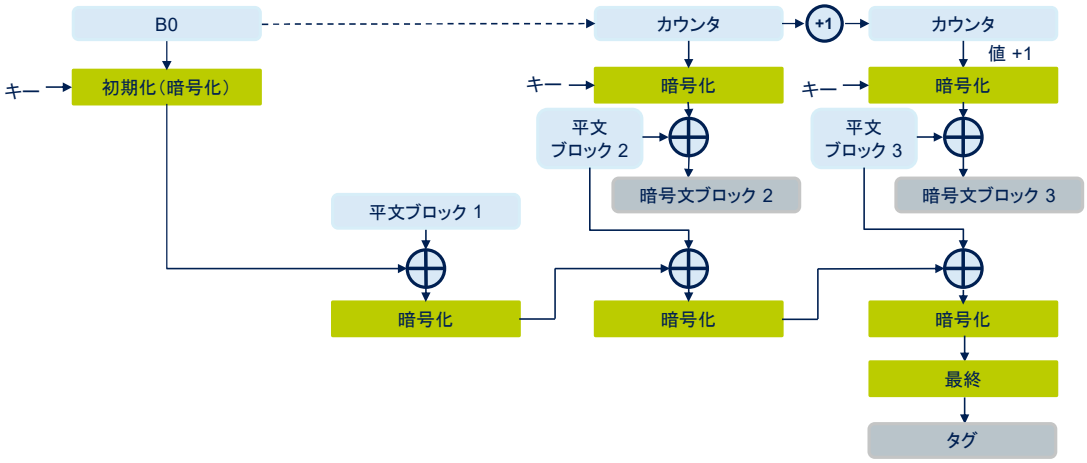


⊕ 排他的論理和

life.augmented

ガロアメッセージ認証コード（GMAC）を使用すると、メッセージの認証と、対応するメッセージ認証コード（MAC）の生成が可能となります。
平文の認証済みヘッダのみが含まれるメッセージ（すなわち、ペイロードなし）に適用されることを除けば、GMAC は GCM と似ています。
ペイロードフェーズが使用されないことを除くと、手順と設定は GCM とすべて同じです。

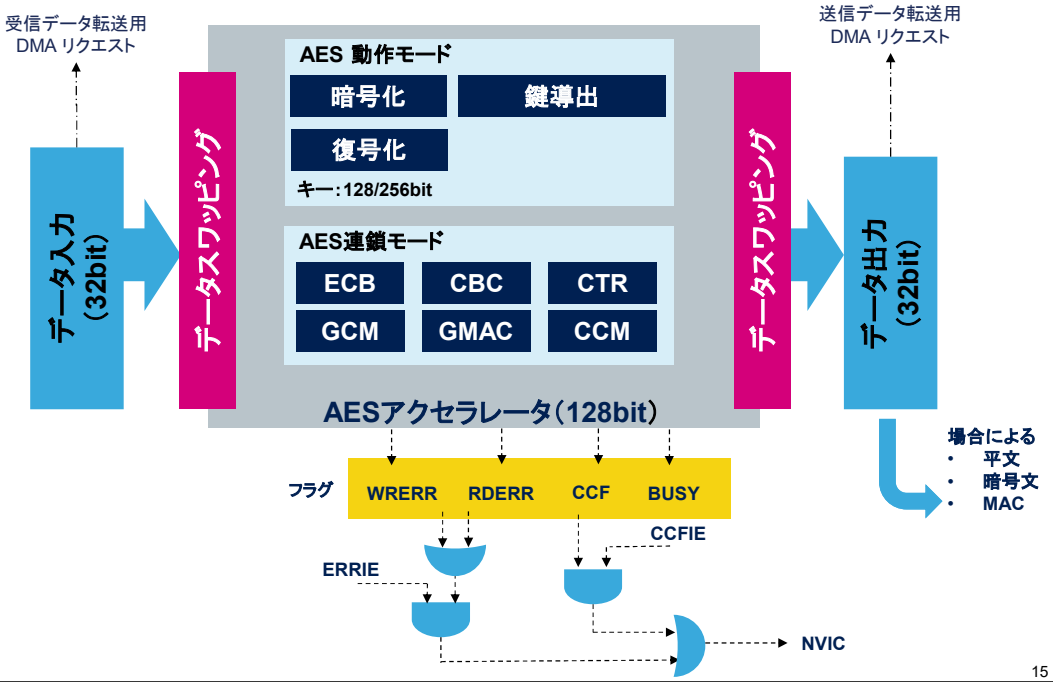
CBC-MAC 付きカウンタ(CCM)モード



⊕ 排他的論理和

暗号ブロック連鎖-メッセージ認証コード付きカウンタ(CCM)モードでは、平文メッセージのペイロード部が暗号化されている間に、並列でそのメッセージ全体に対するメッセージ認証コード(MAC)が計算され、対応する暗号文と対応する MAC(タグとも言います)が生成されます。
CCM モードは、AESの機密性のあるカウンターモードをベースとして、CBC を使用してメッセージ認証コードを計算します。初期値が必要です。
CCM 規格では、最初の認証ブロック(規格では B0 と呼ぶ)に対して特定の暗号化規則を定義しています。具体的に言うと、最初のブロックにはフラグ、ノンス、ペイロード長(単位:バイト)が含まれています。
CCM 連鎖モードは、GCM のように平文の認証済みデータのみで構成されたメッセージ(すなわち、ヘッダのみでペイロードなし)に適用することもできますが、こうすることは NIST が推奨していません。CCM をこのように使用することは CMAC とは呼ばれない(GCM/GMAC とは異なります)ことに注意してください。CMAC は、SP800-38B に規定されている別種の NIST モードです。

AES アクセラレータブロック図



AES アクセラレータのこの単純化されたブロック図には、左側のデータ入力から右側のデータ出力へのデータパスが示されています。
AES アクセラレータは、データスワッピングオプションを使用して、または使用せずに、128bit または 256bit 長の暗号化キーを用いて 128bit データブロックを処理します。
エラーフラグブロックは、次の 2 種類のフラグを介して AES アクセラレータの動作をチェックします。
計算フェーズまたは入力フェーズ中に予期しない読出し操作が検出されたときに、AES ステータスレジスタに読出しエラーフラグ（RDERR）がセットされます。
出力フェーズまたは計算フェーズ中に予期しない書込み操作が検出されたときに、AES ステータスレジスタに書込みエラーフラグ（WRERR）がセットされます。
AES 制御レジスタのエラー割込み有効（ERRIE）ビットが事前にセットされていた場合、これら 2 種類のエラーフラグの 1 つがセットされたときに割込みを生成できます。
計算完了フラグ（CCF）ビットは、計算が完了したときに、ハードウェアによってセットされます。CCF 割込みイネーブルビットが事前にセットされていた場合、割込みが生成されます。
BUSY フラグは GCM モードのみで使用され、
暗号化モードの場合に、優先順位の高いメッセージが GCM ペイロードフェーズ中に現在のメッセージに割り込めることを示します。

AES 処理時間(1/2)

- 処理時間
  (AHB クロックサイクルユニットの 128bit データブロック当たり)

キー長	動作モード	アルゴリズム	入力フェーズ	計算フェーズ	出力フェーズ	合計
128bit	モード 1:暗号化	ECB、CBC、CTR	9	38	4	**51**
	モード 2:鍵導出	-	-	59	-	**59**
	モード 3:復号化	ECB、CBC、CTR	9	38	4	**51**
256bit	モード 1:暗号化	ECB、CBC、CTR	13	58	4	**75**
	モード 2:鍵導出	-	-	82	-	**82**
	モード 3:復号化	ECB、CBC、CTR	13	58	4	**75**

life.augmented

ここには、各種のキーサイズとアルゴリズムに対する処理時間が示されています。

AES処理時間(2/2)

- 処理時間
  (AHB クロックサイクルユニットの 128bit データブロック当たり)
  - 注:ヘッダ内に1データブロック、ペイロード内に1データブロック(GCM、CCM)

キー長	動作モード	アルゴリズム	初期フェーズ	ヘッダフェーズ	ペイロードフェーズ	タグフェーズ	合計
128bit	モード 1:暗号化 モード 3:復号化	GCM	64	35	51	59	**209**
		CCM	63	55	114	58	**290**
	-	GMAC	64	35	-	59	**158**
256bit	モード 1:暗号化 モード 3:復号化	GCM	88	35	75	75	**273**
		CCM	87	79	162	82	**410**
	-	GMAC	88	35	-	75	**198**

life.augmented

ここには、各種のキーサイズとアルゴリズムに対する処理時間が示されています。

割込みと DMA

割込みイベント	説明
AES 計算完了フラグ	計算が完了したときにセットされます。
AES 読出しエラーフラグ	(計算フェーズまたはデータ入力フェーズで)AES Data Out レジスタからの予期しない読出し操作が検出されたときにセットされます。
AES 書込みエラーフラグ	(計算フェーズまたはデータ出力フェーズで)AES Data In レジスタへの予期しない書込み操作が検出されたときにセットされます。

- DMA 機能:2チャネル(1チャネルは受信データ、1チャネルは処理済みの送信データ用)
  - 入力用 DMA リクエストチャネル:INPUT フェーズ中、AES Data In(AES_DINR)レジスタにワードを書き込む必要があるたびに、AES は DMA リクエスト(AES_IN)を開始します。
  - 出力用 DMA リクエストチャネル:OUTPUT フェーズ中、AES Data Out(AES_DOUTR)レジスタからワードを読み出す必要があるたびに、AES は DMA リクエスト(AES_OUT)を開始します。

life.augmented

ここでは、ネスト化されたベクタ割込みコントローラで割り込みをトリガ可能なイベントである、AES 計算完了、AES 読出しエラー、AES 書込みエラーの概要を示します。
ダイレクトメモリアクセスリクエストは、受信データと送信データの両方に対して内部で生成されます。DMA チャネルは、32bit データサイズで、メモリからペリフェラルモードまたはペリフェラルからメモリモードに設定する必要があります。

低電力モード

モード	説明
RUN	有効
SLEEP	RCC で無効
低電力 RUN	有効
低電力 SLEEP	RCC で無効
STOP 0 / STOP 1	停止。ペリフェラルレジスタの内容は保たれます。
STANDBY	パワーダウン状態です。ペリフェラルは、STANBY モード終了後に再初期化する必要があります。
SHUTDOWN	パワーダウン状態です。ペリフェラルは、SHUTDOWN モード終了後に再初期化する必要があります。

life.augmented

ここでは、各低電力モードにおける AES アクセラレータのステータスの概要を示します。
デバイスが STOP モードのときには、AES の動作はできません。

関連ペリフェラル

- このペリフェラルに関連した以下のペリフェラルトレーニングを参照してください。
  - RCC（AES クロック制御、AES イネーブル／リセット）
  - 割込み（NVIC）
  - ダイレクトメモリアクセス（DMA）コントローラ

life.augmented

これは、AESアクセラレータに関連したペリフェラルのリストです。詳細については、必要に応じてこれらのペリフェラルトレーニングを参照してください。

参照

- 詳細と追加情報については、以下を参照してください。
  - 米国標準技術研究所（NIST）
    - SP800-38A：Ciphertext Stealing for CBC Mode
    - SP800-38A：Recommendation for Block Cipher Modes of Operation
    - SP800-38D：Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC
    - SP800-38C：CCM Mode for Authentication and Confidentiality
    - AES Algorithm Validation Suite (AESAVS)
  - UM0586：STM32 暗号ライブラリ

詳細については、弊社ウェブサイトから入手可能なアプリケーションノートとユーザマニュアルを参照してください。