

はじめに

この文章は RISC-V の命令マニュアルを @shibatchii が RISC-V アーキテクチャ勉強のためメモしながら訳しているものです。原文は <https://riscv.org/specifications/> にある riscv-privileged-v1.10.pdf です。

原文のライセンス表示

"The RISC-V Instruction Set Manual, Volume II: Privileged Architecture, Version 1.10", Editors Andrew Waterman and Krste Asanovi#c, RISC-V Foundation, May 2017.

Creative Commons Attribution 4.0 International License

この日本語訳のライセンスも原文のライセンスを引き継いで  
RISC-V 命令セットマニュアル 第二巻：特権付きアーキテクチャ、文書 1.10 版 日本語訳 @shibatchii  
Creative Commons Attribution 4.0 International License  
です。

<https://github.com/shibatchii/RISC-V>  
に置いてあります。

英語は得意でないので誤訳等あるかもしれません。ご指摘歓迎です。  
Twitter: @shibatchii

Google 翻訳、Bing 翻訳、Webilo 翻訳、Exclite 翻訳 を併用しながら翻訳し、勉強しています。

まずは意味が分からないところもあるかもしれませんが、ざっくり訳して2周位回ればまともになるかなと。  
体裁とかは後で整えようと思います。

文章は以下の様に色分けしてます。

黒文字：翻訳した文書。

赤文字：@shibatchii コメント。わからないところとか、こう解釈したとか。

青文字：RISC-V にあまり関係なし。訳した日付とか、集中力が切れた時に書くヨタ話とか。

2018/09/28 @shibatchii

RISC-V 命令セットマニュアル第2巻：特権付きアーキテクチャ  
特権アーキテクチャバージョン 1.10  
ドキュメントバージョン 1.10

警告！ このドラフト仕様は、RISC-V 財団によって標準として承認される前に変更される可能性があります。  
編集者はこの仕様の今後の変更が順方向互換になるよう意図していますが、  
この仕様書の実装が将来の標準に準拠しない可能性があります。

編集者：アンドリュー ウォーターマン 1、クレステ アサノビッチ 1,2  
1 SiFive Inc.,  
2 カリフォルニア大学バークレー校 EECS 学科 CS 課  
andrew@sifive.com、krste@berkeley.edu  
2017 年 5 月 7 日

アルファベット順の仕様全バージョン貢献者（訂正があれば編集者に連絡してください）：

クレステ・アサノビック、リマス・アヴィジエニス、ジェイコブ・バッハマイヤー、アレン・バウム、パオロ・ボンツィーニ、ルスラン・ブーキン、クリストファー・セリオ、デビッド・キスナー、アンソニー・コールター、パーマー・ダッペルト、モンテ・ダリムプリ、デニス・ファーガソン、マイク・フライシンガー、ジョン・ハウザー、デヴィッド・ホーナー、オロフ・ヨハンソン、リー・ユンサップ、アンドリュー・ルトミルスキー、ジョナサン・ノイシェファー、リシュユール・ニヒル、ステファン・オレア、アルバート・ウー、ジョン・オースターハウト、デビッド・パターソン、コリン・シュミット、ウェズリー・タープストラ、マット・トーマス、トミー・ソーン、レイ・ヴァンデウォーカー、メガン・ワックス、アンドリュー・ウォーターマン、レイノード・ザンディク

このドキュメントはクリエイティブコモンズ帰属 4.0 国際ライセンスの下で公開されています。

このドキュメントは、「RISC-V 特権仕様バージョン 1.9.1」を次のライセンスの下でリリースした派生物です：(c) 2010-2017 アンドリュー・ウォーターマン、ユンサップ・リー、リマス・アヴィジエニス、デビッド・パターソン、クレステ・アサノビック クリエイティブコモンズ帰属 4.0 国際ライセンス。

次のように引用してください：「RISC-V 命令セットマニュアル、第2巻：特権アーキテクチャ、バージョン 1.10」、編集者アンドリュー・ウォーターマンとクレステ・アサノビック、RISC-V 財団、2017 年 5 月。

配布条件はこれですね。<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>  
制限が少ない大変良いですね。

--2018/10/12

## 序文

これは、RISC-V 特権アーキテクチャ提案のバージョン 1.10 です。

バージョン 1.9.1 からの変更点：

- このドキュメントの以前のバージョンは、元の作者が作成したクリエイティブコモンズ帰属 4.0 国際ライセンスの下でリリースされました。このドキュメントの今後のバージョンは、同じライセンスでリリースされる予定です。
  - シャドー CSR アドレスに関する明示的な規則は、CSR スペースを再利用するために削除されました。  
シャドー CSRs は、必要に応じて追加することができます。
  - mvendorid レジスタには、財団が提供するコードとは対照的に、コアプロバイダの JEDEC コードが含まれるようになりました。  
これにより、財団からの冗長性とオフロード作業が回避されます。 ←JEDEC コードってなんじゃろ？
  - 割り込み可能なスタック規律は単純化されています。
  - 監督者モードとユーザモードで使用されるベース ISA を変更するためのオプションのメカニズムが mstatus CSR に追加されました。misa の以前に Base と呼ばれていたフィールドは、整合性のために MXL に改名されました。
  - mstatus の追加の拡張状態のステータスフィールドを要約するために XS を使用することを明確にしました。
  - mtvec および stvec CSRs には、オプションのベクタ割り込みのサポートが追加されています。
  - mip CSR の SEIP ビットと UEIP ビットは、外部割り込みのソフトウェア注入をサポートするために再定義されています。
  - mbadaddr レジスタはより一般的な mtval レジスタに含まれています。これにより、命令エミュレーションの速度を上げるために不正な命令フォルトで不良命令ビットを取り込むことができます。
  - 仮想メモリ構成を sptbr (now satp) に移行する過程の一環として、マシンモードのベースと境界の変換と保護のスキームが仕様から削除されました。  
ベースとバインドされたスキームのモチベーションのいくつかは PMP レジスタでカバーされていますが、mstatus で利用可能なまま残っていれば、後で役立ちます。
  - M モードのみ、または M モードと U モードの両方で U モードトラップをサポートしていないシステムでは、medeleg レジスタと mideleg レジスタは存在しませんでした。以前はゼロを返していました。
  - 仮想メモリページ違反は、物理メモリアクセス例外とは別の mcause 値を持つようになりました。  
ページ違反例外は、PMA および PMP チェックによって生成された例外を委任することなく、  
S モードに委任できるようになりました。
  - オプションの物理メモリ保護 (PMP) 方式が提案されています。
  - 監督者の仮想メモリ構成は、mstatus レジスタから sptbr レジスタに移動されました。
- したがって、sptbr レジスタは satp (監督者アドレスの転送と保護) に名前が変更され、広がった役割が反映されます。

↑レジスタ名は整理しとかないとどれがどれかわからなくなりそう。

- 改善された SFENCE.VMA 命令のために、SFENCE.VM 命令が削除されました。
- mstatus ビット MXR は sstatus を介して S モードにさらされています。
- sstatus の PUM ビットの極性は、MXR を含むコードシーケンスを短縮するために反転されています。  
ビットの名前が SUM に変更されました。
- ページテーブルエントリのハードウェア管理 Accessed ビットと Dirty ビットはオプションです。簡単な実装では、ソフトウェアをトラップして設定することができます。
- カウンタネーブル方式が変更されたため、S モードはカウンタの U モードへの可用性を制御できます。
- S モードでの再帰的仮想化サポートに焦点を当てているため、H モードは削除されています。
- エンコーディング空間は予約されており、後で再利用することができます。
- S モード仮想メモリ管理操作をトラップして仮想化パフォーマンスを向上させるメカニズムが追加されました。
- 監督者バイナリインターフェイス (SBI) の章が削除され、別の仕様として維持することができます。

## バージョン 1.9.1 の序文

これは、RISC-V 特権アーキテクチャ提案のバージョン 1.9.1 です。

バージョン 1.9 からの変更点：

- 解説セクションへの多数の追加と改良。
- 設定文字列の提案を変更して、デバイスツリースtringやフラット化されたデバイスツリーなどのさまざまなフォーマットをサポートする検索プロセスを使用します。
- misa は、ベースおよびサポートされている ISA 拡張の変更をサポートするように、オプションで書き込み可能になりました。misa の CSR アドレスが変更されました。
- デバッグモードとデバッグ CSRs の説明が追加されました。
- ハードウェアパフォーマンス監視スキームを追加しました。  
既存のハードウェアカウンタの処理を簡素化し、カウンタの特権バージョンと対応するデルタレジスタを削除しました。
- ユーザーレベルの割り込みがある場合の SPIE の説明が修正されました。

↑ misa ってなんだっけ。後で確認

-- 1 ページ空き、次ページへ

内容

序文

|  |    |
|--|----|
| 1 はじめに   | 1  |
| 1.1 RISC-V ハードウェアプラットフォームの用語。                            | 1  |
| 1.2 RISC-V 特権ソフトウェアスタック用語。                               | 2  |
| 1.3 特権レベル。   | 3  |
| 1.4 デバッグモード。   | 5  |
| 2 制御およびステータスレジスタ (CSR)                                   | 7  |
| 2.1 CSR アドレスマッピング規則。                                     | 7  |
| 2.2 CSR リスト。   | 9  |
| 2.3 CSR 分野の仕様。   | 13 |
| 3 マシンレベルISA、バージョン 1.10                                   | 15 |
| 3.1 マシンレベルの CSR。   | 15 |
| 3.1.1 マシン ISA レジスタ <code>misa</code> 。                   | 15 |
| 3.1.2 マシンベンダ ID <code>mvendorid</code> レジスタ。             | 18 |
| 3.1.3 マシンアーキテクチャ ID <code>marchid</code> レジスタ。           | 18 |
| 3.1.4 マシン実装 ID <code>mimpid</code> レジスタ。                 | 19 |
| 3.1.5 ハート ID <code>mhartid</code> レジスタ。                  | 19 |
| 3.1.6 マシンステータスレジスタ ( <code>mstatus</code> ) 。            | 19 |
| 3.1.7 <code>mstatus</code> レジスタの特権およびグローバル割り込みイネーブルスタック。 | 20 |



|   |    |
|---|----|
| 3.1.8 mstatus レジスタのベース ISA 制御。                | 21 |
| 3.1.9 mstatus レジスタのメモリ特権。                     | 22 |
| 3.1.10 mstatus レジスタの仮想化サポート。                  | 22 |
| 3.1.11 mstatus レジスタの拡張コンテキスト状態。               | 23 |
| 3.1.12 マシントラップベクトルベースアドレスレジスタ (mtvec)。        | 26 |
| 3.1.13 マシントラップ委任レジスタ (medeleg と mideleg)。     | 27 |
| 3.1.14 マシン割り込みレジスタ (mip と mie)。               | 28 |
| 3.1.15 マシントイマレジスタ (mtime と mtimecmp)。         | 30 |
| 3.1.16 ハードウェアパフォーマンスモニタ。                      | 31 |
| 3.1.17 カウンタインーブルレジスタ ([m   h   s] counteren)。 | 32 |
| 3.1.18 マシンスクラッチレジスタ (mscratch)。               | 33 |
| 3.1.19 マシン例外プログラムカウンタ (mepc)。                 | 34 |
| 3.1.20 マシン要因レジスタ (mcause)。                    | 34 |
| 3.1.21 マシントラップ値 (mtval) レジスタ。                 | 35 |
| 3.2 マシンモード特権命令。                               | 37 |
| 3.2.1 環境呼び出しとブレークポイント。                        | 37 |
| 3.2.2 トラップリターン命令。                             | 37 |
| 3.2.3 割り込みを待ち。                                | 38 |
| 3.3 リセット。                                     | 39 |
| 3.4 マスカブルでない割り込み。                             | 39 |
| 3.5 物理メモリ属性。                                  | 39 |
| 3.5.1 メインメモリと I / O と空レジスタの比較。                | 41 |
| 3.5.2 サポートされているアクセスタイプ PMAs。                  | 41 |
| 3.5.3 原子性 PMAs。                               | 41 |
| 3.5.4 メモリオオーダー PMAs。                          | 42 |
| 3.5.5 一貫性とキャッシュ可能性の PMAs。                     | 43 |
| 3.5.6 冪等性 PMAs。                               | 44 |
| 3.6 物理メモリ保護。                                  | 44 |

↑冪等性 (とうべきせい) 「大雑把に言って、ある操作を 1 回行っても複数回行っても結果が同じであることをいう概念である。」って。なんか難しい言葉やね。初めて聞いた。プログラムでいうといつも同じ答えが出るってこと。あたりまえじゃんと思うけど、割り込み処理が入って意図せずメモリ内容買い換えられちゃったりすると崩れちゃう。

|        |                                 |    |
|--------|---------------------------------|----|
| 3.6.1  | 物理メモリ保護の CSRs。                  | 45 |
| 4      | 監督者レベル ISA、バージョン 1.10           | 49 |
| 4.1    | 監督者 CSRs。                       | 49 |
| 4.1.1  | 監督者状態レジスタ (sstatus)。            | 49 |
| 4.1.2  | sstatus レジスタのベース ISA 制御。        | 50 |
| 4.1.3  | sstatus レジスタのメモリ特権。             | 51 |
| 4.1.4  | 監督者トラップベクタベースアドレスレジスタ (stvec)。  | 51 |
| 4.1.5  | 監督者割り込みレジスタ (sip and sie)。      | 52 |
| 4.1.6  | 監督者タイマとパフォーマンスカウンタ。             | 53 |
| 4.1.7  | カウンタイネーブルレジスタ (scounteren)。     | 53 |
| 4.1.8  | 監督者スクラッチレジスタ (スクラッチ)。           | 54 |
| 4.1.9  | 監督者例外プログラムカウンタ (sepc)。          | 54 |
| 4.1.10 | 監督者原因登録 (scause)。               | 54 |
| 4.1.11 | 監督者トラップ値 (stval) レジスタ。          | 55 |
| 4.1.12 | 監督者アドレス変換および保護 (satp) レジスタ。     | 56 |
| 4.2    | 監督者命令。                          | 58 |
| 4.2.1  | 監督者メモリ管理フェンス命令。                 | 58 |
| 4.3    | Sv32 : ページベースの 32 ビット仮想メモリシステム。 | 59 |
| 4.3.1  | アドレッシングとメモリ保護。                  | 59 |
| 4.3.2  | 仮想アドレス変換プロセス。                   | 62 |
| 4.4    | Sv39 : ページベースの 39 ビット仮想メモリシステム。 | 62 |
| 4.4.1  | アドレッシングとメモリ保護。                  | 63 |
| 4.5    | Sv48 : ページベースの 48 ビット仮想メモリシステム。 | 63 |
| 4.5.1  | アドレッシングとメモリ保護。                  | 64 |
| 5      | ハイパーバイザー 拡張、バージョン 0.0           | 65 |
| 6      | RISC-V 特権命令セットのリスト              | 67 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 7 プラットフォームレベル割り込みコントローラ (PLIC) | 69 |
| 7.1 PLIC の概要。                  | 69 |
| 7.2 割り込みソース。                   | 69 |
| 7.2.1 ローカル割り込みソース。             | 70 |
| 7.2.2 グローバル割り込みソース。            | 71 |
| 7.3 割り込みターゲットとハートコンテキスト。       | 71 |
| 7.4 割り込みゲートウェイ。                | 71 |
| 7.5 割り込み識別子 (ID)。              | 72 |
| 7.6 割り込みの優先順位。                 | 72 |
| 7.7 割り込みが有効。                   | 73 |
| 7.8 割り込み優先度しきい値。               | 73 |
| 7.9 割り込み通知。                    | 74 |
| 7.10 割り込みクレーム。                 | 74 |
| 7.11 割り込み完了。                   | 75 |
| 7.12 割り込みの流れ。                  | 75 |
| 7.13 PLIC コア仕様。                | 76 |
| 7.14 PLIC へのアクセスの制御。           | 76 |
| 8 マシン設定説明                      | 77 |
| 8.1 設定文字列検索手順。                 | 77 |
| 9 ヒストリー                        | 79 |
| 9.1 UC Berkeley における研究資金。      | 79 |

## 第1章

### 前書き

これは、RISC-V の特権付きアーキテクチャ記述文書の草案です。  
フィードバックを歓迎します。  
変更は最終リリース前に発生します。←行われます。位の意味か

このドキュメントでは、RISC-V 特権アーキテクチャについて説明します。特権命令やオペレーティングシステムの実行、外部デバイスの接続に必要な追加機能など、ユーザーレベルの ISA を超えた RISC-V システムのあらゆる側面をカバーしています。

---

私たちの意思決定に関する解説は、この段落のように書式化されており、読者が仕様書そのものに興味があればスキップすることができます。

↑ riscv-spec-v2.2 にはこれ書いてなかったような。字下げしてあるところは経緯なので、飛ばしても OK だよって。あ、いや、すまん、書いてあった。

---

ここでは、このドキュメントで説明している特権レベルの設計全体を、ユーザーレベルの ISA を変更することなく、おそらく ABI を変更することなく、まったく異なる特権レベルの設計に置き換えることができます。

特に、この特権仕様は、既存の一般的なオペレーティングシステムを実行するように設計されており、従来のレベルベースの保護モデルを具体化しています。

代替の特権的な仕様は、他のより柔軟な保護ドメインモデルを具体化することができます。

### 1.1 RISC-V ハードウェアプラットフォームの用語

RISC-V ハードウェアプラットフォームには、他の非 RISC-V 互換コア、固定機能アクセラレータ、さまざまな物理メモリ構造、I / O デバイス、およびコンポーネントが通信できるようにする相互接続構造とともに、1 つまたは複数の RISC-V 互換プロセッシングコアを含めることができます。

コンポーネントが独立した命令フェッチユニットを含む場合、コンポーネントはコアと呼ばれます。

RISC-V 互換のコアは、マルチスレッド化により、複数の RISC-V 互換ハードウェアスレッドまたはハートをサポートしている可能性があります。←可能性があります。より サポートする場合があります。ぐらい？

RISC-V コアには、追加の特殊な命令セット拡張機能や追加されたコプロセッサが追加されている場合があります。

コプロセッサという用語は、RISC-V コアに接続されたユニットを指し、ほとんどが RISC-V 命令ストリームによってシーケンスされますが、追加のアーキテクチャ状態および命令セット拡張、および場合によってはプライマリ RISC-V 命令ストリームに対するいくつかの限定された自律性を含みます。

我々は、非プログラマブルな固定機能ユニットまたは自律的に動作することができますが、特定のタスクに特化されたコアのいずれかを指すように用語アクセラレータを使用しています。

RISC-V システムでは、多くのプログラム可能なアクセラレータが、専用の命令セット拡張および/またはカスタマイズされたコプロセッサを備えた RISC-V ベースのコアになると期待しています。

RISC-V アクセラレータの重要なクラスは I / O アクセラレータであり、メインアプリケーションコアから I / O 処理タスクの荷をおろします。←I/O 処理タスクを切り離す 位の意味か

RISC-V ハードウェアプラットフォームのシステムレベルの構成には、シングルコアマイクロコントローラから数千ノードの共有メモリの manycore サーバーノードのクラスタまでが含まれます。

小さなシステム・オン・チップでも、開発努力(作業)をモジュール化したり、サブシステム間の安全な分離を提供するために、マルチコンピュータおよび/またはマルチプロセッサの階層として構成することができます。←構造化される可能性があります。

このドキュメントでは、ユニプロセッサまたは共有メモリマルチプロセッサ内で動作する各ハードウェア（ハードウェアスレッド）が認識できる特権アーキテクチャに焦点を当てています。

-- 2018/10/14

1.2 RISC-V 特権ソフトウェアスタックの用語

このセクションでは、RISC-V のさまざまな可能な特権ソフトウェアスタックのコンポーネントを説明するために使用する用語について説明します。

図 1.1 は、RISC-V アーキテクチャでサポート可能なソフトウェアスタックのいくつかを示しています。

左側には、アプリケーション実行環境（AEE）上で実行される単一のアプリケーションのみをサポートするシンプルなシステムが示されています。

アプリケーションは、特定のアプリケーションバイナリインタフェース（ABI）で動作するようにコード化されています。

ABI には、サポートされているユーザーレベルの ISA と、AEE と対話する一連の ABI 呼び出しセットが含まれています。

AEE は、AEE の詳細を柔軟に適用できるように、アプリケーションから AEE の詳細を隠しています。←遮蔽している

同じ ABI を複数の異なるホスト OSs にネイティブに実装することも、異なるネイティブ ISA を持つマシン上で実行されるユーザー・モード・エミュレーション環境でサポートすることもできます。



図 1.1：さまざまな形式の特権実行をサポートする異なる実装スタック

私たちのグラフィカルな表記法は、白いテキストの黒いボックスを使用して抽象的なインターフェイスを表し、インターフェイスを実装するコンポーネントの具体的なインスタンスからそれらを分けます。

中央の構成は、複数のアプリケーションのマルチプログラム実行をサポートできる従来のオペレーティングシステム（OS）を示しています。

各アプリケーションは、ABI を介して AEE を提供する OS と通信します。

アプリケーションが ABI 経由で AEE とインタフェースするのと同様に、RISC-V オペレーティングシステムは、監督者バイナリインタフェース（SBI）を介して監督者実行環境（SEE）とインタフェースします。

SBI は、ユーザーレベルおよび監督者レベルの ISA と、一連の SBI ファンクションコールを備えています。←組み合わせて構成されています。

すべての SEE 実装で単一の SBI を使用することで、単一の OS バイナリイメージを任意の SEE で実行することができます。SEE は、ローエンドのハードウェアプラットフォームで単純なブートローダと BIOS スタイルの IO システムにすることができ、またはハイエンドサーバにハイパーバイザが提供する仮想マシンを使用して、またはアーキテクチャシミュレーション環境でホストオペレーティングシステム上の薄い転送層を使用することができます。←シントランスレーションレイヤー

ほとんどの監督者レベルの ISA 定義では、SBI と実行環境および/またはハードウェアプラットフォームが分離されておらず、新しいハードウェアプラットフォームの仮想化および構築が複雑になります。

右端の構成は、複数のマルチプログラミングされた OSs が単一のハイパーバイザによってサポートされる仮想マシンモニタ構成を示しています。各 OS は SBI を介して SEE を提供するハイパーバイザと通信します。ハイパーバイザは、ハイパーバイザバイナリインターフェイス (HBI) を使用してハイパーバイザ実行環境 (HEE) と通信し、ハードウェアプラットフォームの詳細からハイパーバイザを分離します。

ABI、SBI、および HBI はまだ進行中ですが、SBI が S モード OS によって再帰的に提供されるタイプ 2 ハイパーバイザのサポートに優先順位を付けるようになっています。

RISC-V ISA のハードウェア実装では、通常、さまざまな実行環境 (AEE、SEE、または HEE) をサポートするために、特権 ISA 以外の追加機能が必要になります。

1.3 特権レベル

いつでも、RISC-V ハードウェアスレッド (ハート) は、1 つまたは複数の CSR (コントロールおよびステータスレジスタ) のモードとしてエンコードされた権限レベルで実行されています。3 つの RISC-V 特権レベルが現在表 1.1 に示すように定義されています。

| レベル | エンコーディング | 名前            | 略語 |
|-----|----------|---------------|----|
| 0   | 00       | ユーザー/アプリケーション | U  |
| 1   | 01       | スーパーバイザ(監督者)  | S  |
| 2   | 10       | 予約            |    |
| 3   | 11       | マシン           | M  |

表 1.1：RISC-V 特権レベル。

特権レベルは、ソフトウェアスタックのさまざまなコンポーネント間で保護を提供するために使用され、現在の特権モードで許可されていない操作を実行しようとすると、例外が発生します。これらの例外は、通常、トラップを基になる実行環境に持ち込みます。←トラップを発生させます。

マシンレベルは最高の特権を持ち、RISC-V ハードウェアプラットフォームの唯一の必須の特権レベルです。マシンモード (M モード) で実行されるコードは、マシン実装に対する低レベルのアクセス権を持つため、通常は本質的に信頼されています。M モードは、RISC-V 上の安全な実行環境を管理するために使用できます。ユーザモード (U モード) および監督者モード (S モード) は、それぞれ従来のアプリケーションおよびオペレーティングシステムの使用を意図しています。←対象としています。

タイプ 1 ハイパーバイザをサポートするように設計された以前のハイパーバイザモード (H モード) は削除され、そして、第 5 章で説明したタイプ 1 とタイプ 2 の両方のハイパーバイザに適した拡張 S モードを使用してハイパーバイザのサポートに焦点を当てているため、予約されているエンコードスペースが必要です。

H のエンコーディング空間は、将来の使用のために予約されており、様々な状態記録者のビット位置の後方互換性のない変更を回避するために予約されています。

ビットポジションは、異なる Type-1 ハイパーバイザのサポート、または可能であれば付加的な安全な実行モードのために将来再利用される可能性があります。

各特権レベルには、オプションの拡張子とバリエーション(変形、異形)を持つ特権 ISA 拡張のコアセットがあります。

たとえば、マシンモードでは、アドレス変換とメモリ保護のためのいくつかのオプションの標準バリエーションがサポートされています。

また、第 5 章で説明したように、監督者モードを拡張してタイプ 2 ハイパーバイザの実行をサポートすることもできます。

表 1.2 に示すように、インプリメンテーションでは、実装コストを削減するために、1 つから 3 つの特権モードを削減することができます。

この説明では、コードが書き込まれる特権レベルを、それが実行される特権モードから分離しようとしませんが、2 つは頻繁に結びついています。

たとえば、監督者レベルのオペレーティングシステムは、3 つの特権モードを持つシステム上で監督者モードで実行できますが、2 つ以上の特権モードを持つシステム上の従来の仮想マシンモニタでは、ユーザモードで実行することもできます。

いずれの場合も、同じ監督者レベルのオペレーティングシステムバイナリコードを使用し、監督者レベルの SBI にコード化し、監督者レベルの特権命令および CSR s を使用できるようにすることを期待しています。

ゲスト OS をユーザモードで実行する場合、すべての監督者レベルのアクションは、より高い特権レベルで実行されている SEE によってトラップとエミュレートされます。

| レベル数 | サポートされるモード | 使用目的                           |
|------|------------|--------------------------------|
| 1    | M          | シンプルな組み込みシステム                  |
| 2    | M, U       | 安全な組み込みシステム                    |
| 3    | M, S, U    | Unix ライクなオペレーティングシステムを実行するシステム |

表 1.2：サポートされている特権モードの組み合わせ

すべてのハードウェア実装は、M モードを提供する必要があります。これは、マシン全体に自由にアクセスできる唯一のモードであるためです。

最も単純な RISC-V 実装では、M モードのみが提供されますが、不正または悪意のあるアプリケーションコードに対する保護は提供されません。

オプションの PMP 設備のロック機能は、M モードのみが実装されていても、ある程度の保護を提供することができます。

多くの RISC-V 実装は、アプリケーションコードからシステムの残りの部分を保護するために、少なくともユーザーモード (U モード) もサポートします。

監督者・モード (S モード) を追加すると、監督者・レベルのオペレーティング・システムと SEE の間の分離が可能になります。

ハートは通常、あるトラップ (例えば監督者コールまたはタイマー割り込み) が通常より特権モードで動作するトラップハンドラへの切り替えを強制するまで、U モードでアプリケーションコードを実行します。

ハートはトラップハンドラを実行し、最終的に U モードで元のトラップされた命令の実行後に実行を再開します。

特権レベルを上げるトラップは垂直トラップと呼ばれ、同じ特権レベルに留まるトラップは水平トラップと呼ばれます。

RISC-V 特権アーキテクチャは、異なる特権層へのトラップの柔軟なルーティングを提供します。

水平トラップは、特権レベルの低いモードで水平トラップハンドラに制御を戻す垂直トラップとして実装できます。

-- ABI,AEE,SBI,SEE とかの略語はどこかで表にしよう。

## 1.4 デバッグモード

実装はまた、オフチップデバッグおよび/または製造テストをサポートするためのデバッグモードを含むことができます。デバッグモード（Dモード）は、Mモードよりもさらに多くのアクセス権を持つ追加の特権モードと考えることができます。個別のデバッグ仕様の提案では、デバッグモードでの RISC-V ハートの動作について説明します。デバッグモードでは、Dモードでしかアクセスできないいくつかの CSR アドレスが予約されます。また、プラットフォーム上の物理メモリ領域の一部を予約することもできます。

-- 2018/10/21



-- 1 ページ空き、次ページへ

## 第2章

### 制御およびステータスレジスタ（CSR）

システムの主要なオペコードは、RISC-V ISA 内のすべての特権命令をエンコードするために使用されます。

これらは2つの主要なクラスに分けることができます：

これらは、アトミックにリード・モディファイ・ライト・コントロールおよびステータス・レジスタ（CSRs）、およびその他のすべての特権命令です。

このマニュアルの第1巻で説明されているユーザーレベルの状態に加えて、実装には追加のCSRsが含まれ、ユーザレベルのマニュアルに記載されたCSR命令を使用して権限レベルのいくつかのサブセットによってアクセス可能です。

この章では、CSR アドレス空間をマッピングします。

以下の章では、特権レベルによる各CSRsの機能、および一般に特定の特権レベルと密接に関連するその他の特権命令について説明します。

CSR と命令は1つの特権レベルに関連付けられていますが、それらはまた、すべての上位の特権レベルでアクセス可能であることに注意してください。

#### 2.1 CSR アドレスマッピング規則

標準のRISC-V ISA は、最大4,096のCSRに対して12ビットの符号化空間（csr [11 : 0]）を設定します。

表2.1に示すように、CSR アドレスの上位4ビット（csr [11 : 8]）を使用して、CSRの読み取りおよび書き込みアクセシビリティを特権レベルに従ってエンコードします。

上位2ビット（csr [11:10]）は、レジスタが読み/書き（00,01,10）か読み取り専用（11）かを示します。

次の2ビット（csr [9 : 8]）は、CSRにアクセスできる最低の特権レベルをエンコードします。

---

CSR アドレス規約では、CSR アドレスの上位ビットを使用して、規定のアクセス特権をエンコードします。

これにより、ハードウェアのエラーチェックが簡素化され、より大きなCSRスペースが提供されますが、CSRのアドレス空間へのマッピングが制限されます。

実装により、特権レベルでは、許可されていないCSRアクセスを低特権レベルでトラップして、これらのアクセスを傍受することができます。

この変更は、特権の低いソフトウェアにとっては透過的でなければなりません。

存在しないCSRにアクセスしようとすると、不正な命令例外が発生します。

適切な権限レベルを持たないCSRにアクセスしたり、読み取り専用レジスタを書き込んだりすると、不正な命令例外も発生します。

読み出し/書き込みレジスタには、読み出し専用ビットが含まれている場合があります。この場合、読み出し専用ビットへの書き込みは無視されます。

| CSR アドレス  |       |       | 16 進        | 使用とアクセシビリティ        |
|-----------|-------|-------|-------------|--------------------|
| [11:10]   | [9:8] | [7:6] |             |                    |
| ユーザー CSRs |       |       |             |                    |
| 00        | 00    | XX    | 0x000-0x0FF | 標準 読み／書き           |
| 01        | 00    | XX    | 0x400-0x4FF | 標準 読み／書き           |
| 10        | 00    | XX    | 0x800-0x8FF | 非標準 読み／書き          |
| 11        | 00    | 00-10 | 0xC00-0xCBF | 標準 読み取り専用          |
| 11        | 00    | 11    | 0xCC0-0xCFF | 非標準 読み取り専用         |
| 監督者 CSRs  |       |       |             |                    |
| 00        | 01    | XX    | 0x100-0x1FF | 標準 読み／書き           |
| 01        | 01    | 00-10 | 0x500-0x5BF | 標準 読み／書き           |
| 01        | 01    | 11    | 0x5C0-0x5FF | 非標準 読み／書き          |
| 10        | 01    | 00-10 | 0x900-0x9BF | 標準 読み／書き           |
| 10        | 01    | 11    | 0x9C0-0x9FF | 非標準 読み／書き          |
| 11        | 01    | 00-10 | 0xD00-0xDBF | 標準 読み取り専用          |
| 11        | 01    | 11    | 0xDC0-0xDFF | 非標準 読み取り専用         |
| 予約 CSRs   |       |       |             |                    |
| XX        | 10    | XX    | 予約          |                    |
| マシン CSRs  |       |       |             |                    |
| 00        | 11    | XX    | 0x300-0x3FF | 標準 読み／書き           |
| 01        | 11    | 00-10 | 0x700-0x79F | 標準 読み／書き           |
| 01        | 11    | 10    | 0x7A0-0x7AF | 標準 読み／書き デバッグ CSRs |
| 01        | 11    | 10    | 0x7B0-0x7BF | デバッグモードのみ CSRs     |
| 01        | 11    | 11    | 0x7C0-0x7FF | 非標準 読み／書き          |
| 10        | 11    | 00-10 | 0xB00-0xBBF | 標準 読み／書き           |
| 10        | 11    | 11    | 0xBC0-0xBFF | 非標準 読み／書き          |
| 11        | 11    | 00-10 | 0xF00-0xFBF | 標準 読み取り専用          |
| 11        | 11    | 11    | 0xFC0-0xFFF | 非標準 読み取り専用         |

表 2.1 : RISC-V CSR アドレス範囲の割り当て。

表 2.1 はまた、標準と非標準の使用の間に CSR アドレスを割り当てる規則を示しています。  
非標準的な使用のために予約された CSR アドレスは、将来の標準拡張によって再定義されません。

私たちは、シャドー CSRs のための CSR スペースの明示的な割り当てを廃止し、他の CSRs を割り当てた方がより柔軟になるようにしました。

シャドー CSRs は、適切な R / W 空間に追加することができます。

カウンタは、現在の仕様では唯一のシャドーされた CSR です。

シャドー CSRs は読み取り／書き込み・アドレスを提供し、より高い特権レベルでより低い特権レベルで読み取り専用のレジスタを変更することができます。

1 つの特権レベルで既に読み取り／書き込みシャドウ・アドレスが割り当てられている場合は、より高い特権レベルであれば、同じレジスタへの読み取り／書き込みアクセスに同じ CSR アドレスを使用できます。

効果的な仮想化では、仮想化された環境内で可能な限り多くの命令をネイティブに実行する必要があり、特権アクセスは仮想マシンモニタ[1]にトラップします。

より低い特権レベルで読み取り専用の CSRs は、より高い特権レベルで読み書き可能にされている場合、別の CSR アドレスにシャドーイングされます。

これにより、許可された低特権アクセスのトラップを回避しながら、不正アクセスのトラップを引き起こします。←発生させます。

マシンモード標準の読み書き可能な CSR 0x7A0-0x7BF は、デバッグシステムで使用するために予約されています。

実装は、これらのレジスタへのマシンモードアクセスで不正な命令例外を発生させるべきです。←必要があります。

## 2.2 CSR リスト

表 2.2-2.5 に、現在 CSR アドレスが割り当てられている CSRs の一覧を示します。

タイマー、カウンタ、および浮動小数点 CSRs は、標準的なユーザレベルの CSR であり、N 拡張によって追加されたユーザトラップレジスタも追加されています。

他のレジスタは、次の章で説明するように、特権コードによって使用されます。

すべての実装ですべてのレジスタが必要というわけではないことに注意してください。

| 番号            | 特権  | 名前            | 説明                                |
|---------------|-----|---------------|-----------------------------------|
| ユーザトラップ設定     |     |               |                                   |
| 0x000         | URW | ustatus       | ユーザ状態レジスタ。                        |
| 0x004         | URW | uie           | ユーザ割り込み有効レジスタ。                    |
| 0x005         | URW | utvec         | ユーザトラップハンドラのベースアドレス。              |
| ユーザトラップ処理     |     |               |                                   |
| 0x040         | URW | uscratch      | ユーザトラップハンドラのためのスクラッチレジスタ。         |
| 0x041         | URW | uepc          | ユーザ例外プログラムカウンタ。                   |
| 0x042         | URW | ucause        | ユーザトラップの原因。                       |
| 0x043         | URW | utval         | ユーザのアドレスまたは命令が不正。                 |
| 0x044         | URW | uip           | ユーザ割り込み保留中。                       |
| ユーザ浮動小数点 CSRs |     |               |                                   |
| 0x001         | URW | fflags        | 浮動小数点発生例外。                        |
| 0x002         | URW | frm           | 浮動小数点動的丸めモード。                     |
| 0x003         | URW | fcsr          | 浮動小数点制御および状態レジスタ(frm + fflags)。   |
| ユーザカウンタ/タイマ   |     |               |                                   |
| 0xC00         | URO | cycle         | RDCYCLE 命令のサイクルカウンタ。              |
| 0xC01         | URO | time          | RDTIME 命令のタイマ。                    |
| 0xC02         | URO | instret       | RDINSTRET 命令の命令リタイヤカウンタ。          |
| 0xC03         | URO | hpmcounter3   | パフォーマンス監視カウンタ                     |
| 0xC04         | URO | hpmcounter4   | パフォーマンス監視カウンタ                     |
|               |     | :             |                                   |
| 0xC1F         | URO | hpmcounter31  | パフォーマンス監視カウンタ                     |
| 0xC80         | URO | cycleh        | cycle の上位 32 ビット、RV32I のみ         |
| 0xC81         | URO | timeh         | time の上位 32 ビット、RV32I のみ。         |
| 0xC82         | URO | instreth      | instret の上位 32 ビット、RV32I のみ。      |
| 0xC83         | URO | hpmcounter3h  | hpmcounter3 の上位 32 ビット、RV32I のみ。  |
| 0xC84         | URO | hpmcounter4h  | hpmcounter4 の上位 32 ビット、RV32I のみ。  |
|               |     | :             |                                   |
| 0xC9F         | URO | hpmcounter31h | hpmcounter31 の上位 32 ビット、RV32I のみ。 |

表 2.2：現在割り当てられている RISC-V ユーザーレベルの CSR アドレス。

| 番号         | 特権  | 名前        | 説明                     |
|------------|-----|-----------|------------------------|
| 監督者トラップ設定  |     |           |                        |
| 0x100      | SRW | sstatus   | 監督者状態レジスタ。             |
| 0x102      | SRW | sedeleg   | 監督者例外委任登録。             |
| 0x103      | SRW | sideleg   | 監督者割り込み委譲レジスタ。         |
| 0x104      | SRW | sie       | 監督者割り込み有効レジスタ。         |
| 0x105      | SRW | stvec     | 監督者トラップハンドラのベースアドレス。   |
| 0x106      | SRW | scountern | 監督者カウンタ有効。             |
| 監督者トラップの処理 |     |           |                        |
| 0x140      | SRW | sscratch  | 監督者トラップハンドラのスクラッチレジスタ。 |
| 0x141      | SRW | sepc      | 監督者例外プログラムカウンタ。        |
| 0x142      | SRW | scause    | 監督者トラップの原因。            |
| 0x143      | SRW | stval     | 監督者の不良アドレスまたは命令。       |
| 0x144      | SRW | sip       | 監督者割り込み保留中。            |
| 監督者保護と翻訳   |     |           |                        |
| 0x180      | SRW | satp      | 監督者のアドレス変換と保護          |

表 2.3 : 現在割り当てられている RISC-V 監督者レベルの CSR アドレス。

-- scratch register ってなんだろう。scratch って削るとか、引っ掻くっていうみだよね。

| 番号         | 特権  | 名前         | 説明                     |
|------------|-----|------------|------------------------|
| マシン情報レジスタ  |     |            |                        |
| 0xF11      | MRO | mvendorid  | ベンダー ID。               |
| 0xF12      | MRO | marchid    | アーキテクチャ ID。            |
| 0xF13      | MRO | mimpid     | 実装 ID。                 |
| 0xF14      | MRO | mhartid    | ハードウェアスレッド ID。         |
| マシントラップ設定  |     |            |                        |
| 0x300      | MRW | mstatus    | マシン状態レジスタ。             |
| 0x301      | MRW | misa       | ISA と拡張機能              |
| 0x302      | MRW | medeleg    | マシン例外委譲レジスタ。           |
| 0x303      | MRW | mideleg    | マシン割り込み委譲レジスタ。         |
| 0x304      | MRW | mie        | マシン割り込み許可レジスタ。         |
| 0x305      | MRW | mtvec      | マシントラップハンドラのベースアドレス。   |
| 0x306      | MRW | mcounteren | マシンカウンタ有効。             |
| マシントラップの処理 |     |            |                        |
| 0x340      | MRW | mscratch   | マシントラップハンドラのスクラッチレジスタ。 |
| 0x341      | MRW | mepc       | マシン例外プログラムカウンタ。        |
| 0x342      | MRW | mcause     | マシントラップ原因。             |
| 0x343      | MRW | mtval      | マシンのアドレスまたは命令が不正。      |
| 0x344      | MRW | mip        | マシン割り込み保留中。            |
| マシンの保護と翻訳  |     |            |                        |
| 0x3A0      | MRW | pmpcfg0    | 物理メモリ保護構成。             |
| 0x3A1      | MRW | pmpcfg1    | 物理メモリ保護構成、RV32 のみ。     |
| 0x3A2      | MRW | pmpcfg2    | 物理メモリ保護構成。             |
| 0x3A3      | MRW | pmpcfg3    | 物理メモリ保護構成、RV32 のみ。     |
| 0x3B0      | MRW | pmpaddr0   | 物理メモリ保護アドレスレジスタ。       |
| 0x3B1      | MRW | pmpaddr1   | 物理メモリ保護アドレスレジスタ。       |
|            |     | :          | :                      |
| 0x3BF      | MRW | pmpaddr15  | 物理メモリ保護アドレスレジスタ。       |

表 2.4：現在割り当てられている RISC-V マシンレベルの CSR アドレス。

| 番号                       | 特権  | 名前             | 説明                                 |
|--------------------------|-----|----------------|------------------------------------|
| マシンカウンタ/タイマ              |     |                |                                    |
| 0xB00                    | MRW | mcycle         | マシンサイクルカウンタ。                       |
| 0xB02                    | MRW | minstret       | マシン命令 - 退役カウンタ。                    |
| 0xB03                    | MRW | mhpmcounter3   | マシン性能監視カウンタ。                       |
| 0xB04                    | MRW | mhpmcounter4   | マシン性能監視カウンタ。                       |
|                          |     | :              |                                    |
| 0xB1F                    | MRW | mhpmcounter31  | マシン性能監視カウンタ。                       |
| 0xB80                    | MRW | mcycleh        | mcycle の上位 32 ビット、RV32I のみ。        |
| 0xB82                    | MRW | minstreth      | minstret の上位 32 ビット、RV32I のみ。      |
| 0xB83                    | MRW | mhpmcounter3h  | mhpmcounter3 の上位 32 ビット、RV32I のみ。  |
| 0xB84                    | MRW | mhpmcounter4h  | mhpmcounter4 の上位 32 ビット、RV32I のみ。  |
|                          |     | :              |                                    |
| 0xB9F                    | MRW | mhpmcounter31h | mhpmcounter31 の上位 32 ビット、RV32I のみ。 |
| マシンカウンタ設定                |     |                |                                    |
| 0x323                    | MRW | mhpmevent3     | マシン性能監視イベントセクタ                     |
| 0x324                    | MRW | mhpmevent4     | マシン性能監視イベントセクタ                     |
|                          |     |                |                                    |
| 0x33F                    | MRW | mhpmevent31    | マシン性能監視イベントセクタ                     |
| デバッグ/追跡レジスタ (デバッグモードと共有) |     |                |                                    |
| 0x7A0                    | MRW | tselect        | デバッグ/追跡トリガレジスタの選択。                 |
| 0x7A1                    | MRW | tdata1         | 最初のデバッグ/追跡トリガデータレジスタ。              |
| 0x7A2                    | MRW | tdata2         | 第 2 のデバッグ/追跡トリガデータレジスタ。            |
| 0x7A3                    | MRW | tdata3         | 第 3 のデバッグ/追跡トリガデータレジスタ。            |
| デバッグモードレジスタ              |     |                |                                    |
| 0x7B0                    | DRW | dcsr           | デバッグ制御および状態レジスタ。                   |
| 0x7B1                    | DRW | dpc            | デバッグ PC。                           |
| 0x7B2                    | DRW | dscratch       | デバッグスクラッチレジスタ。                     |

表 2.5 : 現在割り当てられている RISC-V マシンレベルの CSR アドレス。

## 2.3 CSR フィールドの仕様

以下の定義および略語は、CSR 内のフィールドの動作を指定する際に使用されます。

予約済み書き込み無視、読み込み無視値 (WIRI) ← リードした値は無視してねってこと

読み取り専用と読み取り/書き込みレジスタの中には、将来の使用のために予約された読み取り専用フィールドがあるものもあります。これらの予約済みの読み取り専用フィールドは、読み取り時に無視する必要があります。これらのフィールドへの書き込みは、CSR 全体が読み取り専用でない限り、無効です。この場合、書き込みによって不正な命令例外が発生する可能性があります。これらのフィールドは、レジスタ記述で WIRI とラベル付けされています。

予約済み書き込みは値を保持し、無視値を読み込みます (WPRI)

一部の読み取り/書き込みフィールド全体は、将来の使用のために予約されています。← some はいくつか、whole は全体 約合ってるかな

ソフトウェアはこれらのフィールドから読み取った値を無視し、同じレジスタの他のフィールドに値を書き込むときにこれらのフィールドに保持されている値を保持する必要があります。←予約されてるのて読んだ値は無視してね。書いた時に書き換わっちゃダメよってことかな。

これらのフィールドは、レジスタ記述で WPRI と表示されます。

---

ソフトウェアモデルを簡素化するために、CSR 内の以前に予約されたフィールドの将来互換性のある将来の定義は、非原子的な読み取り/修正/書き込みシーケンスが CSR の他のフィールドを更新するために使用される可能性に対処しなければなりません。←対処する必要があります。

あるいは(また)、元の CSR 定義では、サブフィールドをアトミックにしか更新できない(アトミックにのみ更新できるように)ことを指定しなければならず、中間値が合法(有効)でない場合に問題となる 2 命令のクリアビット/セットビットシーケンスが一般的に必要となる可能性があります。← うーん、いまいちわからん

書き込み/読み取り 専用(のみ)の有効値 (WLRL)

いくつかの読み取り/書き込み CSR フィールドは、可能なビットエンコーディングのサブセットのみの動作を指定し、その他のビットエンコーディングは予約されています。

ソフトウェアは、そのようなフィールドに正当な値以外を書き込むべきではなく、最後の書き込みが正当な値でないか、別の操作(例えばリセット)からレジスタが書き込まれていない限り、レジスタを正しい値に設定します。

これらのフィールドは、レジスタの説明で WLRL というラベルが付けられています。

---

ハードウェアの実装では、サポートされている値を区別するのに十分な状態ビットを実装するだけで済みますが(実装する必要があります)、読み込み時にサポートされている値の完全な指定されたビットエンコーディングを常に返す必要があります。

命令がサポートされていない値を CSR フィールドに書き込もうとすると、実装は許可されますが、不正命令例外が発生させる必要はありません。

ハードウェア実装は、最後の書き込みが不正な値であったときに CSR フィールドの読み込みで任意のビットパターンを返すことができますが、返される値は前回書き込まれた値に依存します。



すべての値を書き込み、有効値を読み取り（WARL）

いくつかの読み取り/書き込み CSR フィールドは、ビットエンコーディングのサブセットに対してのみ定義されますが、読み取られるたびに正しい値を返すことを保証しながら任意の値を書き込むことができます。

CSR の記述に他に副作用がないと仮定すると、サポートされている値の範囲は、希望の設定を書き込んだり、その値が保持されているかどうかを調べることによって判断できます。

これらのフィールドは、レジスタの説明で WARL というラベルが付けられています。

実装では、サポートされていない値の WARL フィールドへの書き込みに関する例外は発生しません。

実装は、特定の不正な値が書き込まれた後、常に確定的に同じ正当な値を返す必要があります。

-- 2018/10/28

第 3 章

マシンレベル ISA、バージョン 1.10

この章では、マシンモード（M モード）で使用可能なマシンレベルの操作について説明します。これは、RISC-V システムで最高の権限モードです。

RISC-V ハードウェア実装では、M モードのみが必須(唯一)の特権モードです。

M モードは、ハードウェアプラットフォームへの低レベルアクセスに使用され、リセット時に最初に入力されるモードです。

M モードは、ハードウェアに直接実装するにはあまりにも困難または高価な機能を実装するためにも使用できます。

RISC-V マシンレベルの ISA には、サポートされている他の特権レベルとハードウェア実装のその他の詳細に応じて拡張された共通のコアが含まれています。

3.1 マシンレベルの CSR

このセクションで説明するマシンレベルの CSR に加えて、M モードコードはより低い特権レベルですべての CSR にアクセスできます。

3.1.1 マシン ISA レジスタミサ

ミサ CSR は、ハートでサポートされている ISA を報告する XLEN ビットの WARL 読み書きレジスタです。

このレジスタはどの実装でも読み込み可能でなければなりませんが、misa レジスタが実装されていないことを示すために 0 の値が返されるため、別個の非標準メカニズムによって CPU 能力を判断する必要があります。

↑ゼロが返されると misa レジスタが実装されていないことがわかる。

|                 |        |         |    |                         |   |
|-----------------|--------|---------|----|-------------------------|---|
| XLEN-1          | XLEN-2 | XLEN-3  | 26 | 25                      | 0 |
| MXL[1:0] (WARL) |        | WIRI    |    | Extensions[25:0] (WARL) |   |
| 2               |        | XLEN-28 |    | 26                      |   |

図 3.1 : マシン ISA レジスタ（ミサ）。

MXL（Machine XLEN）フィールドは、表 3.1 に示すようにネイティブベースの整数 ISA 幅をエンコードします。

MXL フィールドは、複数のベース ISA 幅をサポートする実装では書き込み可能です。

M モードの有効 XLEN、M-XLEN は MXL の設定で与えられ、ミサがゼロの場合は固定値です。

MXL フィールドは、リセット時に常にサポートされている最も広い ISA バリエーションに設定されます。

| MXL | XLEN |
|-----|------|
| 1   | 32   |
| 2   | 64   |
| 3   | 128  |

表 3.1 : ミサの XML フィールドのエンコーディング

-----

ベース幅は返されたミサ値の符号による分岐と、場合によっては 1 つだけ左にシフトと、符号による 2 つ目の分岐をすることによって、迅速に確認できます。

↑ここは **sign** を符号とするか、なにか目印、標識のような意味にするかでちょっと迷う。

これらのチェックは、マシンのレジスタ幅（XLEN）を知らずにアセンブリコードで記述することができます。

ベース幅は  $XLEN = 2MXL + 4$  で与えられます。

ミサがゼロの場合は、即値 4 をレジスタに置き、レジスタを一度に 31 ビットだけ左にシフトすることによって、ベース幅を見つけることもできます。

1 回シフトした後にゼロになると、マシンは RV32 になります。

2 回シフトした後にゼロになると、マシンは RV64、それ以外の場合は RV128 になります。

MXL がサポートされている XLEN よりも小さい値に設定されている場合、すべての演算は、設定された XLEN よりも上位のソース・オペランド・レジスタ・ビットを無視し、サポートされている最も広い XLEN をデスティネーション・レジスタに埋めるために結果を符号拡張する必要があります。

-----

実実装では、実装で定義された動作を避けるために、常に、基本ハードウェア・レジスタ全体を定義された値で埋める必要があります。

拡張フィールドは、アルファベット 1 文字あたり 1 ビットのビットを有する標準拡張の存在を符号化する（ビット 0 は拡張子「A」の存在を符号化し、ビット 1 は拡張子「B」を符号化し、「Z」を符号化するビット 25 まで符号化する））。

"I"ビットは RV32I、RV64I、RV128I ベース ISA に設定され、"E"ビットは RV32E に設定されます。

拡張機能は、実装がサポートされている ISA を変更できるようにする書き込み可能なビットを含むことができる WARL フィールドです。

リセット時に、拡張フィールドにはサポートされている拡張機能の最大セットが含まれている必要があり、両方が利用可能であるなら、私は E より上を選ぶべきです。

"G"ビットはエスケープとして使用され、標準拡張名のより大きなスペースに拡張することができます。

-----

G は組み合わせ IMAFD を示すために使用されるため、ミサ CSR には冗長であるため、追加標準拡張が存在することを示すビットを予約します。

"U"ビットと "S"ビットは、それぞれユーザモードとスーパーバイザモードがサポートされている場合に設定されます。

非標準の拡張があれば "X"ビットがセットされます。

-----

misa CSR は、CPU 機能の基本カタログをマシンモードコードに公開します。

マシンモードでは、他のマシンレジスタを調査し、ブートプロセスの一部としてシステム内の他の ROM ストレージを調べることで、より、より詳細な情報を得ることができます。

各特権レベルで利用可能な機能を決定するために、CPU レジスタを読み取る代わりに、低い特権レベルで環境呼び出しを実行する必要があります。

これにより、仮想化レイヤーはあらゆるレベルで観察される ISA を変更でき、ハードウェア設計に負担をかけることなく、より豊富なコマンドインターフェイスをサポートします。

| ビット | 文字 | 説明                     |
|-----|----|------------------------|
| 0   | A  | 原子の拡張                  |
| 1   | B  | ビット演算拡張用に仮予約           |
| 2   | C  | 圧縮拡張                   |
| 3   | D  | 倍精度浮動小数点拡張             |
| 4   | E  | RV32E ベース ISA          |
| 5   | F  | 単精度浮動小数点拡張             |
| 6   | G  | 追加の標準拡張機能が存在           |
| 7   | H  | 予約                     |
| 8   | I  | RV32I/64I/128I ベース ISA |
| 9   | J  | 動的に翻訳された言語拡張のために仮予約    |
| 10  | K  | 予約                     |
| 11  | L  | 10 進浮動小数点数の拡張のために仮予約   |
| 12  | M  | 整数乗算/除算拡張              |
| 13  | N  | サポートされているユーザーレベルの割り込み  |
| 14  | O  | 予約                     |
| 15  | P  | パック SIMD 拡張の仮予約        |
| 16  | Q  | 四倍精度浮動小数点数の拡張          |
| 17  | R  | 予約                     |
| 18  | S  | 監督者モードの実装              |
| 19  | T  | トランザクションメモリ拡張用に仮予約     |
| 20  | U  | ユーザーモードの実装             |
| 21  | V  | ベクター拡張のために仮予約          |
| 22  | W  | 予約                     |
| 23  | X  | 標準以外の拡張機能が存在           |
| 24  | Y  | 予約                     |
| 25  | Z  | 予約                     |

表 3.2：ミサの拡張フィールドのエンコード。将来使用するために予約されているすべてのビットは、読み込み時にゼロを返す必要があります。

3.1.2 マシンベンダー ID レジスタ mvendorid

mvendorid CSR は、コアのプロバイダの JEDEC 製造元 ID を提供する XLEN ビットの読み取り専用レジスタです。このレジスタは、どの実装でも読み込み可能でなければなりません、フィールドが実装されていないこと、または非商用実装であることを示すために値 0 を返すことができます。

|        |   |   |       |
|--------|---|---|-------|
| XLEN-1 | 7 | 6 | 0     |
| バンク    |   |   | オフセット |
| XLEN-7 |   |   | 7     |

図 3.2：ベンダー ID レジスタ（mvendorid）。

JEDEC 製造者 ID は、通常、各バイトの最上位ビットに奇数パリティビットを有する 0x7f に等しくない 1 バイト ID によって終端される 1 バイト連続コード 0x7f のシーケンスとして符号化されます。  
mvendorid は、バンクフィールドの 1 バイトの連続コードの数をエンコードし、オフセットフィールドの最後のバイトをエンコードして、パリティビットを破壊します。  
たとえば、JEDEC 製造元 ID 0x7f 0x7f 0x7f 0x7f 0x7f 0x7f 0x7f 0x7f 0x7f 0x7f 0x7f 0x7f 0x8a（12 個の継続コードの後ろに 0x8a）は、mvendorid フィールドに 0x60a としてエンコードされます。  
↑ 0x60a は 0x7f の数が 12、16 進で 0xc。8a の最上位パリティを飛ばすと 0x0a、0xc をパリティの位置から上に詰めると 06a。うーん、合ってるだろうか。

以前はベンダー ID は RISC-V 財団によって割り当てられた番号でしたが、これは JEDEC が製造者 ID 標準を維持する作業を複製しています。  
執筆時点では、JEDEC にメーカー ID を登録するには 1 回限りの 500 ドルのコストがかかります。

3.1.3 マシンアーキテクチャ ID レジスタ marchid

marchid CSR は、ハートのベースマイクロアーキテクチャをエンコードする XLEN ビットの読み取り専用レジスタです。このレジスタはどの実装でも読み込み可能でなければなりません、フィールドが実装されていないことを示す値 0 を返すことができます。  
mvendorid と marchid の組み合わせは、実装されているハートマイクロアーキテクチャのタイプを一意に識別する必要があります。

|            |   |
|------------|---|
| XLEN-1     | 0 |
| アーキテクチャ ID |   |
| XLEN       |   |

図 3.3：マシンアーキテクチャ ID レジスタ（marchid）。

オープンソースのプロジェクトアーキテクチャ ID は、RISC-V 財団によってグローバルに割り当てられ、ゼロ以外のアーキテクチャ ID とゼロの最上位ビット（MSB）を持っています。  
商用アーキテクチャ ID は、各商用ベンダーによって個別に割り当てられますが、MSB が設定されていて、残りの XLEN-1 ビットにゼロを含めることはできません。  
↑ 残りの XLEN-1 ビットにゼロを含めることはできません って All 1 なん？ ID 区別できんじゃないって思ったけど、ここは XLEN-1 は 0 にしてはダメってことだと思う。

その目的は、アーキテクチャー ID が、特定の組織ではなく開発が行われるレポに関連するマイクロアーキテクチャーを表すことです。  
オープンソース設計の商業的製作では、元のアーキテクチャ ID を保持する必要があります。（ライセンスによって必要となる可能性があります）  
これにより、断片化やツールサポートのコストを削減するだけでなく、帰属を提供するのに役立ちます。  
オープンソースのアーキテクチャー ID は財団によって管理されるべきであり、リリースされ機能しているオープンソースプロジェクトにのみ割り当てられるべきです。  
商用アーキテクチャー ID は、登録されたベンダーによって個別に管理することができますが、ベンダーがクローズドソースとオープンソースの両方のマイクロアーキテクチャーを使用したい場合には、オープンソースアーキテクチャー ID（MSB セット）とは別の ID が必要です。

次の実装フィールド内で採用された規約は、組織を含む同じアーキテクチャ設計のブランチを分離するために使用できます。  
ミサレジスタはまた、構成文字列が存在する場合、デザインの異なるバリエーションを区別するのに役立ちます。

3.1.4 マシン実装 ID レジスタ mimpid

mimpid CSR は、プロセッサ実装のバージョンを一意にエンコードします。  
このレジスタはどの実装でも読み込み可能でなければなりませんが、フィールドが実装されていないことを示すために値 0 を返すことができます。  
実装の値は、RISC-V プロセッサ自体の設計を反映するものであり、周囲のシステムではありません。  
↑この文は Google 翻訳と Bing 翻訳で真逆の訳をする。多分こっちの Google 翻訳が正しいと思う。

|        |   |
|--------|---|
| XLEN-1 | 0 |
| 実装     |   |
| XLEN   |   |

図 3.4 : マシン実装 ID レジスタ (mimpid) 。

-----  
このフィールドのフォーマットは、アーキテクチャーのソースコードのプロバイダーに委ねられていますが、先行または後続の 0 を持たない 16 進文字列として標準ツールによって印刷されることがよくありますが、人間の可読性を容易にするために、インプリメンテーション値をニブル境界で整列されたサブフィールドで左揃えにすることができます。（すなわち、最も重要なニブルから下に埋められる）

3.1.5 ハート ID レジスタ mhartid

mhartid CSR は、コードを実行するハードウェアスレッドの整数 ID を含む XLEN ビットの読み取り専用レジスタです。  
このレジスタは、どの実装でも読み込み可能でなければなりません。  
ハート ID は必ずしもマルチプロセッサシステムでは連続して番号付けされるとは限りませんが、少なくとも 1 つのハートはハート ID がゼロでなければなりません。

|        |   |
|--------|---|
| XLEN-1 | 0 |
| ハート ID |   |
| XLEN   |   |

図 3.5 : ハート ID レジスタ (mhartid) 。

-----  
特定のケースでは、正確に 1 つのハートが（例えばリセット時に）いくつかのコードを実行することを保証する必要がある場合があります。したがって、1 つのハートには既知のハート ID がゼロである必要があります。  
効率のために、システム実装者は、システムで使用される最大の hartID の大きさを減らすことを目指すべきです。

3.1.6 マシンステータスレジスタ (mstatus)

mstatus レジスタは、RV32 では図 3.6、RV64 と RV128 では図 3.7 のようにフォーマットされた XLEN ビットの読み書き可能レジスタです。  
mstatus レジスタは、ハートの現在の動作状態を追跡し、制御します。  
mstatus レジスタの制限されたビューは、それぞれ S レベルおよび U レベルの ISA に sstatus および ustatus レジスタとして表示されます。

|    |         |         |          |      |     |      |      |      |      |     |      |     |      |    |   |   |
|----|---------|---------|----------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|-----|------|----|---|---|
| 31 | 30      |         |          |      |     |      |      | 23   | 22   | 21  | 20   | 19  | 18   | 17 |   |   |
| SD | WPRI    |         |          |      |     |      |      | TSR  | TW   | TVM | MXR  | SUM | MPRV |    |   |   |
| 1  | 8       |         |          |      |     |      |      | 1    | 1    | 1   | 1    | 1   | 1    |    |   |   |
|    |         |         |          |      |     |      |      |      |      |     |      |     |      |    |   |   |
| 16 | 15      | 14      | 13       | 12   | 11  | 10   | 9    | 8    | 7    | 6   | 5    | 4   | 3    | 2  | 1 | 0 |
|    | XS[1:0] | FS[1:0] | MPP[1:0] | WPRI | SPP | MPIE | WPRI | SPIE | UPIE | MIE | WPRI | SIE | UIE  |    |   |   |
| 2  |         | 2       |          | 2    |     | 2    |      | 1    | 1    | 1   | 1    | 1   | 1    | 1  | 1 | 1 |

図 3.6：RV32 のマシンモードステータスレジスタ (mstatus)

|        |         |         |          |          |     |      |      |      |      |     |      |     |     |     |      |    |
|--------|---------|---------|----------|----------|-----|------|------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|------|----|
| XLEN-1 | XLEN-2  | 36      | 35       | 34       | 33  |      | 32   | 31   |      | 23  | 22   | 21  | 20  | 19  | 18   | 17 |
| SD     | WPRI    |         | SXL[1:0] | UXL[1:0] |     |      | WPRI |      |      | TSR | TW   | TVM | MXR | SUM | MPRV |    |
| 1      | XLEN-37 |         | 2        | 2        |     |      | 9    |      |      | 1   | 1    | 1   | 1   | 1   | 1    | 1  |
| 16     | 15      | 14      | 13       | 12       | 11  | 10   | 9    | 8    | 7    | 6   | 5    | 4   | 3   | 2   | 1    | 0  |
|        | XS[1:0] | FS[1:0] | MPP[1:0] | WPRI     | SPP | MPIE | WPRI | SPIE | UPIE | MIE | WPRI | SIE | UIE |     |      |    |
|        | 2       | 2       | 2        | 2        | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1   | 1    | 1   | 1   | 1   | 1    | 1  |

図 3.7：RV64 と RV128 のマシンモードステータスレジスタ (mstatus)

3.1.7 mstatus レジスタの特権とグローバル割り込みイネーブルスタック

割り込み許可ビット、MIE、SIE、およびUIE は、特権モードごとに提供されます。  
これらのビットは、現在の特権レベルで割り込みハンドラに関するアトミック性を保証するために主に使用されます。  
ハートが特権モード  $x$  で実行されている場合、 $x\text{ IE} = 1$  のとき割り込みが有効になります。  
低特権モードの割り込みは常に無効になりますが、高特権モードの割り込みは常に有効です。  
より高い特権レベルのコードは、より低い特権レベルに制御を委譲する前に、割り込みごとのイネーブルビットを使用するご選択された割り込みを無効にすることができます。

$x\text{ IE}$  ビットは、mstatus の下位ビットに配置され、単一の CSR 命令でアトミックにセットまたはクリアすることができます。

ネストされたトラップをサポートするために、各特権モード  $x$  には、割り込みイネーブルビットと特権モードの 2 つのレベルのスタックがあります。  
 $x\text{ PIE}$  は、トラップの前に割り込みイネーブルビットの値を保持し、 $x\text{ PP}$  は前の特権モードを保持します。  
 $x\text{ PP}$  フィールドは  $x$  までの特権モードしか保持できないため、MPP は 2 ビット幅、SPP は 1 ビット幅、UPP は暗黙的にゼロです。  
トラップが特権モード  $y$  から特権モード  $x$  に移されると、 $x\text{ PIE}$  は  $x\text{ IE}$  の値に設定されます。 $x\text{ IE}$  は 0 に設定されます。 $x\text{ PP}$  は  $y$  に設定されます。

低特権モードでは、通常、エントリ（エントリ）時に割り込みが禁止された状態で、上位の特権モードでトラップ（同期または非同期）が行われます。  
上位レベルのトラップハンドラは、スタックされた情報を使用してトラップを処理して戻り、または、中断されたコンテキストに直ちに帰ってこない場合、割り込みを再び有効にする前に特権スタックを保存し、スタックごとに 1 つのエントリだけが必要です。

MRET、SRET、または URET 命令は、それぞれ M モード、S モード、または U モードのトラップから戻するために使用されます。  
 $x\text{ RP}$  命令を実行するとき、 $x\text{ PP}$  が値  $y$  を保持すると仮定すると、 $x\text{ IE}$  は  $x\text{ PIE}$  に設定される。特権モードは  $y$  に変更されます。 $x\text{ PIE}$  は 1 に設定されます。 $x\text{ PP}$  は U（ユーザーモードがサポートされていない場合は M）に設定されます。

---

スタックがポップされると、サポートされている最低限の割り込み特権モードがスタックの最下部に追加され、無効なエントリがポップされる原因となるエラーを捕捉するのに役立ちます。

xPP フィールドは、サポートされている特権モード（x および x より小さい実装された特権モードを含む）だけを格納できるようにする必要がある WLRL フィールドです。

---

マシンが U モードと M モードのみを提供する場合、MPP の 00 または 11 のいずれかを表すためにハードウェア記憶ビットは 1 つだけが必要です。

ユーザーレベルの割り込みは、オプションの拡張であり、ISA 拡張文字 N が割り当てられています。  
ユーザーレベルの割り込みを省略すると、UIE ビットと UPIE ビットはゼロに固定されます。  
他のすべてのサポートされている特権モード x では、x IE と x PIE はハードワイヤードであってはなりません。  
↑ [ここ](#)も Google 翻訳と Bing 翻訳で真逆の意味に翻訳される。Bing 翻訳は否定形に弱いのかな。

---

ユーザーレベルの割り込みは主に、M モードと U モードのみのセキュアな組み込みシステムをサポートすることを目的としていますが、ユーザーレベルのトラップ処理をサポートする Unix ライクなオペレーティングシステムを実行するシステムでもサポートできます。

---

以前 mstatus で H モードサポートのために割り当てられていたフィールドは、現在 WPRI フィールドとして予約されています。既存の実装との後方互換性を低下させるために、これらのフィールドを削除した後は、レジスタを圧縮しませんでした。

### 3.1.8 mstatus レジスタのベース ISA 制御

RV64 および RV128 システムの場合、SXL および UXL フィールドは、それぞれ S モードおよび U モードの XLEN の値を制御する WARL フィールドです。  
これらのフィールドの符号化は、表 3.1 に示すミサの MXL フィールドと同じです。  
S モードおよび U モードで有効な XLEN は、それぞれ S-XLEN および U-XLEN と呼ばれます。

RV32 システムの場合、SXL および UXL フィールドは存在せず、S-XLEN = 32 および U-XLEN = 32 です。

RV64 および RV128 システムの場合、S モードがサポートされていない場合、SXL はゼロにハードワイヤードされます。それ以外の場合は、S-XLEN の現在の値をエンコードするのは WARL フィールドです。  
特に、S-XLEN = M-XLEN となるように SXL を実装することがあります。

RV64 および RV128 システムの場合、U モードがサポートされていない場合、UXL はゼロに固定配線されます。それ以外の場合は、U-XLEN の現在の値をエンコードするのは WARL フィールドです。  
特に、U-XLEN = M-XLEN となるように UXL を実装することができます。

どのモードでも XLEN がサポートされている XLEN よりも小さい値に設定されると、すべての演算は、設定された XLEN より上のソース・オペランド・レジスタ・ビットを無視しなければならず、サポートされている最も広い XLEN をデスティネーション・レジスタに埋めるために結果を符号拡張する必要があります。

---

ハードウェアの複雑さを軽減するため、アーキテクチャでは、低特権モードで XLEN 設定が次の高位特権モード以下であることを確認しません。  
実際には、このような設定はほとんど常にエラーになりますが、この場合でもマシンの動作は明確に定義されています。



### 3.1.9 mstatus レジスタのメモリ特権

MPRV (Modify PRiVilege) (権限の変更)ビットは、すべての特権モードでロードおよびストアが実行される特権レベルを変更します。MPRV = 0 の場合、変換と保護は正常に動作します。

MPRV = 1 の場合、現在の特権モードが MPP に設定されているかのように、読み込みと保存のメモリアドレスは変換され、保護されます。

命令のアドレス変換と保護は影響を受けません。

U モードがサポートされていない場合、MPRV は 0 にハードワイヤードされます。

MXR (Make eXecutable Readable) (実行可能ファイルを読めるようにする) ビットは、ロードが仮想メモリにアクセスする際の特権を変更します。

MXR = 0 の場合、読み込み可能とマークされたページからの読み込みのみが成功します (図 4.15 の R = 1)。

MXR = 1 の場合、読み取り可能または実行可能 (R = 1 または X = 1) のいずれかのマークが付けられたページからの読み込みは成功します。

ページベースの仮想メモリが有効でない場合、MXR は効果がありません。

S モードがサポートされていない場合、MXR は 0 にハードワイヤードされます。

---

MPRV および MXR 機構は、ミスアラインされた読み込みおよび保存などの欠落したハードウェア機能をエミュレートする M モードルーチンの効率を改善するために考案されました。

MPRV は、ソフトウェアでアドレス変換を実行する必要性を排除します。

MXR を使用すると、実行専用とマークされたページから命令語をロードできます。

簡単にするため、MPRV と MXR は特権モードに関係なく有効ですが、通常の使用ではマシンモードの短いシーケンスに対してのみ有効になります。

SUM (スーパーバイザユーザメモリアクセス許可) ビットは、S モードの読み込み、書き込み、および命令フェッチが仮想メモリにアクセスするための特権を変更します。

SUM = 0 のとき、U モードでアクセス可能なページへの S モードメモリアクセスは、エラーになります。(図 4.15 の U = 1)。

↑ここは Bing 翻訳の方が正しい。Google 翻訳だと最後の fault を飛ばす。うーん。

SUM = 1 の場合、これらのアクセスは許可されます。

ページベースの仮想メモリが有効でない場合、SUM は効果がありません。

SUM は S モードで実行されていないときは通常無視されますが、MPRV = 1 かつ MPP = S のときには有効です。

S モードがサポートされていない場合、SUM は 0 にハードワイヤードされます。

### 3.1.10 mstatus レジスタの仮想化サポート

TVM (トラップ仮想メモリ) ビットは、スーパーバイザ仮想メモリ管理操作の代行受信(インターセプト)をサポートします。

TVM = 1 の場合、S-mode で実行中に satp CSR を読み書きしようとするか SFENCE.VMA 命令を実行しようすると、不正な命令例外が発生します。

TVM = 0 の場合、これらの操作は S モードで許可されます。

S モードがサポートされていない場合、TVM は 0 にハードワイヤードされています。

---

TVM メカニズムは、ゲストオペレーティングシステムを U モードで古典的に仮想化するのではなく、S モードで実行できるようにすることで、仮想化の効率を向上させます。

このアプローチは、ほとんどの S モード CSRs へのアクセスをトラップする必要性を排除します。

satp アクセスと SFENCE.VMA 命令をトラッピングすると、シャドウページテーブルを遅延読み込みするのに必要なフックが提供されます。

TW (タイムアウト待機) ビットは、WFI 命令のインターセプトをサポートします (3.2.3 項を参照)。

TW = 0 のとき、WFI 命令は S モードで許可されます。

TW = 1 の場合、WFI が Smode で実行され、実装固有の制限時間内に完了しない場合、WFI 命令は不正な命令トラップを引き起こします。

制限時間は常に 0 にすることができ、この場合 TW = 1 のときに WFI は S モードで常に不正な命令トラップを引き起こします。

S モードがサポートされていない場合、TW は 0 にハードワイヤードされます。

WFI 命令をトラップすると、現在のゲストで無駄にアイドルングするのではなく、別のゲスト OS に切り替えることができます。

TSR（トラップ SRET）ビットは、スーパーバイザ例外リターン命令 SRET のインターセプトをサポートします。  
TSR = 1 のとき、S モードで実行中に SRET を実行しようとする、不正な命令例外が発生します。  
TSR = 0 のときは、S モードで許可されます。  
S モードがサポートされていない場合、TSR は 0 にハード配線されます。

SRET をトラッピングすることは、それを提供しない実装で拡張仮想化機構（第 5 章参照）をエミュレートするために必要です。

3.1.11 mstatus レジスタの拡張コンテキスト状況

実質的な拡張をサポートすることは、RISC-V の主な目標の 1 つです。したがって、変更されていない特権モードのコード、特にスーパーバイザレベルの OS が任意のユーザーモードの状態拡張をサポートできるようにする標準インターフェイスを定義します。

今日まで、浮動小数点 CSR およびデータレジスタ以外の追加の状態を定義する標準的な拡張はありません。

FS [1 : 0]読み取り/書き込みフィールドと XS [1 : 0]読み取り専用フィールドは、浮動小数点ユニットの現在の状態、および他のユーザモードの拡張をそれぞれ示す設定と追跡によってコンテキストの保存と復元のコストを削減するために使用されます  
FS フィールドは、CSR fcsr および浮動小数点データレジスタ f0~f31 を含む浮動小数点ユニットのステータスをエンコードし、XS フィールドは、追加のユーザモード拡張および関連するステートのステータスをエンコードします。  
これらのフィールドは、状態の保存または復元が必要かどうかを迅速に判断するためのコンテキスト切り替えルーチンによってチェックできます。  
保存または復元が必要な場合は、通常、プロセスを効果的に最適化するために追加の指示と CSRs が必要です。

この設計では、ほとんどのコンテキストスイッチが浮動小数点ユニットまたはその他の拡張のいずれかまたは両方で状態を保存/復元する必要がないため、SD ビットによる高速チェックが可能になると予想しています。

FS フィールドと XS フィールドは、表 3.3 に示されているものと同じステータスエンコーディングを使用し、4 つの可能なステータス値はオフ、イニシャル、クリーン、およびダーティです。

| 状態 | FS の意味 | XS の意味                                |
|----|--------|---------------------------------------|
| 0  | オフ     | すべてオフ                                 |
| 1  | イニシャル  | いずれもダーティではないか、クリーンではダーティでない、いくつかはクリーン |
| 2  | クリーン   | いくつかダーティ                              |
| 3  | ダーティ   |                                       |

表 3.3：FS [1 : 0]および XS [1 : 0]ステータスフィールドのエンコード

S モードを実装せず、浮動小数点ユニットを持たないシステムでは、FS フィールドはゼロにハードワイヤードされています。

新しい状態を必要とする追加のユーザー拡張がないシステムでは、XS フィールドはゼロにハードワイヤードされます。  
状態付きのすべての追加拡張は、XS 状態に相当する mstatus にローカルフィールドを追加します。  
XS フィールドは、表 3.3 に示すように、すべての内線番号のステータスの要約を表します。

XS フィールドは、すべてのユーザー拡張ステータスフィールドにわたって最大ステータス値を効果的に報告しますが、個々の拡張機能はXS とは異なるエンコードを使用できます。

SD ビットは、FS フィールドまたは XS フィールドのいずれかが、拡張されたユーザーコンテキストをメモリに保存する必要があるダーティ状態の存在を示すかどうかを要約する読み取り専用ビットです。  
XS と FS の両方がゼロにハードワイヤードされていると、SD も常にゼロになります。

拡張の状態がオフに設定されている場合、対応するステートを読み書きしようとする命令は例外を発生させます。  
ステータスがイニシャルの場合、対応する状態は初期の定数値を持つ必要があります。  
状態がクリーンの場合、対応する状態は初期値と異なる可能性があります、コンテキストスワップに格納されている最後の値と一致します。  
ステータスがダーティの場合、対応するステートは、最後のコンテキスト保存以降に変更されている可能性があります。

コンテキスト保存中に責任ある特権コードは、その状態がダーティの場合にのみ対応する状態を書き出す必要があり、その後、その状態をクリーンにリセットすることができます。  
コンテキスト復元時には、状態がクリーン（復元時にダーティであってはならない）の場合にのみコンテキストをメモリからロードする必要があります。  
ステータスがイニシャルの場合、セキュリティホールが発生しないようコンテキストを復元時に初期の定数値に設定する必要がありますが、これはメモリにアクセスせずに行うことができます。  
たとえば、浮動小数点レジスタはすべて即値 0 に初期化できます。

FS および XS フィールドは、コンテキストを保存する前に特権コードによって読み取られます。  
FS フィールドは、ユーザコンテキストを再開するときには特権コードによって直接設定され、XS フィールドは個々の拡張のステータスレジスタに書き込むことによって間接的に設定されます。  
ステータスフィールドは、特権モードに関係なく、命令の実行中に(も)更新されます。

ユーザーモード ISA への拡張には、追加のユーザーモード状態が含まれることが多く、この状態は基本整数レジスタよりもかなり大きくなる可能性があります。  
拡張機能は、一部のアプリケーションでのみ使用することも、単一のアプリケーション内で短期間だけ必要とすることもあります。  
パフォーマンスを向上させるために、ユーザモード拡張は、ユーザモードソフトウェアがユニットを初期状態に戻すか、またはユニットをオフにすることを可能にする追加の命令を定義することができます。  
**↑使わない時はそのユーザーモードを OFF にできる。例えばそのブロックのクロックを止めたり、電源を OFF したりできるってこと。**

たとえば、コプロセッサを使用する前に構成する必要があり、使用後にコプロセッサを“未構成”することができます。  
未構成状態は、コンテキスト保存の初期状態として表されます。  
未構成と次の構成（状態をダーティに設定する）の間で同じアプリケーションが実行中のままである場合、すべての状態がユーザープロセスに対してローカルであるため、実際に未構成命令で状態を再初期化する必要はありません。すなわち、初期状態は、コンテキスト・リストア時にコプロセッサ・ステートがすべての未構成時ではなく一定値に初期化されるだけでよいです。

ユニットをディスエーブルしてオフ状態にするユーザモード命令を実行すると、後続の命令が再びオンになる前にユニットを使用しようとする、不正な命令例外が発生します。  
ユニットをオンにするユーザモード命令は、そのユニットが別のコンテキストによって使用されている可能性があるため、ユニットの状態が適切に初期化されていることを保証しなければなりません。（確認する必要があります。）

FS の設定を変更しても、浮動小数点レジスタの状態は変化しません。  
特に、FS = オフを設定しても状態が破壊されることはなく、FS = イニシャルが内容をクリアするように設定することもあります。  
オフに設定すると、他の拡張機能が状態を保持しないことがあります。（保持できません。）

表 3.4 に、FS または XS ステータスビットのすべての可能な状態遷移を示します。  
標準の浮動小数点拡張は、ユーザモードの構成解除または無効/有効命令をサポートしていないことに注意してください。

|                           |             |                       |                  |             |
|---------------------------|-------------|-----------------------|------------------|-------------|
| 現在の状態<br>動作               | オフ          | イニシャル                 | クリーン             | ダーティ        |
| 特権コードでのコンテキスト保存時          |             |                       |                  |             |
| 保存状態？<br>次の状態             | いいえ<br>オフ   | いいえ<br>イニシャル          | いいえ<br>クリーン      | はい<br>クリーン  |
| 特権コードでのコンテキスト復元時          |             |                       |                  |             |
| 復元状態？<br>次の状態             | いいえ<br>オフ   | はい、イニシャルに(へ)<br>イニシャル | はい、メモリから<br>クリーン | N/A<br>N/A  |
| 状態を読み出すための命令を実行           |             |                       |                  |             |
| 動作？<br>次の状態               | 例外<br>オフ    | 例外<br>イニシャル           | 例外<br>クリーン       | 例外<br>ダーティ  |
| コンフィグレーションを含むステートの変更命令を実行 |             |                       |                  |             |
| 動作？<br>次の状態               | 例外<br>オフ    | 実行<br>ダーティ            | 実行<br>ダーティ       | 実行<br>ダーティ  |
| 未構成ユニットへの命令実行             |             |                       |                  |             |
| 動作？<br>次の状態               | 例外<br>オフ    | 実行<br>イニシャル           | 実行<br>イニシャル      | 実行<br>イニシャル |
| ユニットを無効にする命令を実行           |             |                       |                  |             |
| 動作？<br>次の状態               | 実行<br>オフ    | 実行<br>オフ              | 実行<br>オフ         | 実行<br>オフ    |
| ユニットを有効にする命令を実行           |             |                       |                  |             |
| 動作<br>次の状態                | 実行<br>イニシャル | 実行<br>イニシャル           | 実行<br>イニシャル      | 実行<br>イニシャル |

表 3.4：FS および XS の状態遷移。

-- 2018/11/24

拡張状態を初期化、保存、復元するための標準的な特権命令は、状態を不透明なオブジェクトとして扱うことによって、拡張された拡張状態の詳細から特権コードを隔離するために提供されます。

多くのコプロセッサ拡張は、制限されたコンテキストでのみ使用されます。これにより、ソフトウェアがユニットの設定を安全に解除するか、実行時にユニットを無効にすることさえできます。

これにより、大規模なステートフルコプロセッサのコンテキストスイッチオーバーヘッドが削減されます。

浮動小数点状態を他の拡張状態から分離し、浮動小数点ユニットが存在する場合、浮動小数点レジスタは標準呼び出し規約の一部であるため、ユーザモードソフトウェアは浮動小数点ユニットを無効にすることが安全であるかどうかを知ることができません。

XS フィールドは、追加されたすべての拡張状態の要約を提供しますが、コンテキストの保存と復元のオーバーヘッドをさらに削減するために、拡張で追加のマイクロアーキテクチャビットが維持される可能性があります。

SD ビットは読み出し専用であり、FS または XS ビットのいずれかがダーティ状態（すなわち、SD = (FS == 11) OR (XS == 11)）を符号化するときに設定されます。

これにより、特権コードは、整数レジスタセットと PC 以外のコンテキスト保存が不要になったときを素早く判断することができます。

浮動小数点ユニットの状態は、標準命令（F、D、および/または Q）を使用して常に初期化、保存、および復元され、特権付きコードは FLEN を認識して各 f レジスタに予約する適切な領域を決定する必要があります。

スーパーバイザレベルの OS では、追加のユーザモードの状態は、追加のコンテキストを一定の最大サイズの不透明なオブジェクトとして扱う SBI 呼び出しを使用して初期化、保存、復元する必要があります。  
SBI の初期化、保存、および復元の実装では、コプロセッサ内のマイクロアーキテクチャ状態を初期化、保存、および復元するために、インプリメンテーション依存の特権命令が追加で必要になる場合があります。

すべての特権モードは FS と XS ビットの 1 つのコピーを共有します。  
複数の特権モードを持つシステムでは、スーパーバイザモードでは通常、スーパーバイザレベルのセーブされたコンテキストに関してステータスを記録するために FS ビットと XS ビットを直接使用します。  
他のより特権のあるアクティブモードは、対応するバージョンのコンテキストで拡張状態を保存して復元する際に、より慎重でなければなりません。

任意の合理的なユースケースでは、ユーザとスーパーバイザレベル間のコンテキストスイッチの数は、他の権限レベルへのコンテキストスイッチの数よりはるかに多いはずです。(上回る必要があります。)  
コプロセッサは、割り込みによってユーザレベルのコンテキストスワップが発生しない限り、非同期割り込みを処理するためにコンテキストを保存および復元する必要はないことに注意してください。

3.1.12 マシントラップベクトルベースアドレスレジスタ (mtvec)

mtvec レジスタは、ベクトルベースアドレス (BASE) とベクタモード (MODE) で構成されるトラップベクタの構成を保持する XLEN ビットの読み/書きレジスタです。

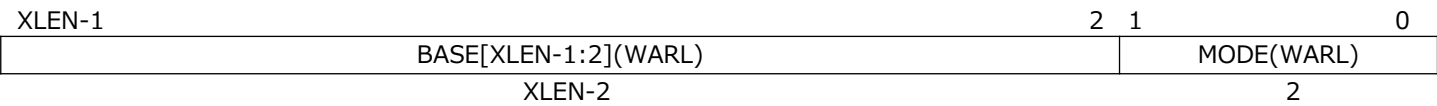


図 3.8：マシントラップベクタベースアドレスレジスタ (mtvec)。

mtvec レジスタは常実装する必要がありますが、ハードワイヤードの読み取り専用値を含めることができます。  
mtvec が書き込み可能な場合、レジスタが保持できる値のセットは実装によって異なる可能性があります。  
BASE フィールドの値は常に 4 バイトの境界に揃えなければならない、MODE 設定は BASE フィールドの値に追加の配置制約を課す可能性があります。

トラップベクタベースアドレスの実装にはかなりの柔軟性があります。  
一方では、多数の状態ビットを持つローエンドの実装に負担をかけることは望ましくありませんが、一方で、より大きいシステムでは可用性を可能にしたいと考えています。(柔軟性を許可することを希望しています。)

| 値  | 名前    | 説明                                |
|----|-------|-----------------------------------|
| 0  | ダイレクト | すべての例外は pc を BASE に設定             |
| 1  | ベクター  | 非同期割り込みは、pc を BASE + 4 *cause に設定 |
| ≥2 | —     | 予約                                |

表 3.5：mtvec MODE フィールドのエンコーディング

MODE フィールドのエンコーディングを表 3.5 に示します。  
MODE = ダイレクトの場合、マシンモードに入るすべてのトラップが、PC をベースフィールドのアドレスに設定します。  
MODE = ベクターの場合、マシンモードへの同期例外はすべて PC をベースフィールドのアドレスに設定しますが、割り込みは PC をベースフィールドのアドレス+割り込み要因番号の 4 倍に設定します。

たとえば、マシンモードタイマ割り込み（表 3.6 を参照）は、PC を  $\text{BASE} + 0x1c$  に設定します。  
MODE = ベクターを設定すると、ベースに追加のアラインメント制約が課されることがあり、最大  $4 * \text{XLEN}$  バイトのアラインメントが必要です。

---

ベクタ割り込みが有効にされると、ユーザモードのソフトウェア割り込みに対応する割り込み要因 0 は、同期例外と同じ場所にベクトル化されます。

この曖昧さは、実際には発生しません。これは、ユーザモードのソフトウェア割り込みが無効になっているか、権限の低いモードに委任されているためです。

---

リセットおよび NMI ベクタの場所は、プラットフォーム仕様に記載(指定)されています。

### 3.1.13 マシントラップ代理レジスタ（medeleg と mideleg）

デフォルトでは、任意の特権レベルのすべてのトラップはマシンモードで処理されますが、マシンモードハンドラはトラップを MRET 命令（3.2.2 項）で適切なレベルにリダイレクトできます。  
パフォーマンスを向上させるために、実装は medeleg および mideleg 内の個々の読み取り/書き込みビットを提供して、特定の例外および割り込みを低い特権レベルで直接処理する必要があることを示します。  
マシン例外委譲レジスタ（medeleg）およびマシン割り込み委譲レジスタ（mideleg）は、XLEN ビットの読み取り/書き込み・レジスタです。

3 つの特権モード（M / S / U）を持つすべてのシステムでは、medeleg または mideleg にビットを設定すると、S モードまたは U モードの対応するトラップが S モードトラップハンドラに委任されます。  
U モードトラップがサポートされている場合、S モードは、sedeleg レジスタと sideleg レジスタに対応するビットを順番に設定して、U モードで発生するトラップを U モードトラップハンドラに委任することができます。

2 つの特権モード（M / U）と U モードトラップをサポートするシステムでは、medeleg または mideleg にビットを設定すると、U モードの対応するトラップが U モードトラップハンドラに委任されます。

M モードのみ、または M モードと U モードの両方を持つが U モードトラップをサポートしていないシステムでは、medeleg と mideleg レジスタは存在してはいけません。（存在しません）

---

1.9.1 以前のバージョンでは、これらのレジスタは存在していましたが、M モードでのみまたは N システムなしの M / U でゼロに固定配線されていました。

これらのケースでは、ミサレジスタが存在するかどうかを示すので、ゼロを返す必要はありません。

トラップが特権の低いモード x に委任されると、x 原因レジスタにトラップ原因が書き込まれます。  
x epc レジスタには、トラップを取った命令の仮想アドレスが書き込まれます。  
mstatus の xPP フィールドは、トラップ時にアクティブ特権モードで書き込まれます。  
mstatus の x PIE フィールドには、トラップ時にアクティブな割り込みイネーブルビットの値が書き込まれます。  
mstatus の x IE フィールドがクリアされます。  
mcause および mepc レジスタと mstatus の MPP および MPIE フィールドは書き込まれません。

実装は、委譲ビットを 1 つにハードワイヤしてはなりません。すなわち、委任可能なトラップが委任されていないことをサポートしなければなりません。

実装では、デリゲート可能なトラップをサブセット化することを選択できます。サポートされている委託可能なビットは、どのビット位置が 1 を保持しているかを見るために、medeleg または mideleg の値を読み戻します。

トラップは、より特権モードから低特権モードに移行することはありません。  
たとえば、M モードが S モードに不正な命令トラップを委譲し、M モードソフトウェアが後で不正命令を実行すると、S モードに委譲されるのではなく、M モードでトラップが取られます。

対照的に、トラップは水平に取られてもよい。(取られることがあります)  
同じ例を使用して、M モードが不正な命令トラップを S モードに委譲し、S モードソフトウェアが後で不正命令を実行すると、トラップは S モードで取られます。(行われます)



図 3.9：マシン例外委譲登録 medeleg。

medeleg は、表 3.6 に示すすべての同期例外に対して割り当てられたビット位置を持ち、ビット位置のインデックスは mcause レジスタに返された値と等しくなります。(すなわち、ビット 8 を設定することにより、ユーザモード環境呼出しをより低い特権のトラップハンドラに委任することができます)。



図 3.10: マシン例外の委任登録 mideleg。

mideleg は個々の割り込みのトラップ委譲ビットを保持し、ビットのレイアウトは mip レジスタのものと一致します。  
(すなわち、STIP 割り込み委譲制御はビット 5 に位置します)。  
いくつかの例外は、特権の低いモードでは発生することができず(発生しません)、対応する x edeleg ビットはゼロにハードワイヤードされるべきです。(する必要があります。)  
特に、medeleg [11]と sedeleg [11 : 9]はすべてゼロに固定されています。

3.1.14 マシン割り込みレジスタ (mip および mie)

mip レジスタは、保留中の割り込みに関する情報を含む XLEN ビットの読み/書き・レジスタです。一方、mie は、割り込みイネーブル・ビットを含む対応する XLEN ビットの読み/書き・レジスタです。  
この CSR アドレスによって、低特権ソフトウェア割り込み (USIP、SSIP)、タイマ割り込み (UTIP、STIP)、および mip の外部割り込み (UEIP、SEIP) に対応するビットだけが書き込み可能です。  
残りのビットは読み取り専用です。

mip レジスタと mie レジスタの制限されたビューは sip / sie として表示され、uip / uie はそれぞれ S モードと U モードで登録されます。  
割り込みが mideleg レジスタにビットをセットすることによって特権モード x に委任された場合、x ip レジスタに表示され、x ie レジスタを使用してマスク可能です。  
それ以外の場合、x ip と x ie の対応するビットはゼロにハードワイヤードされているように見えます。

| XLEN-1  | 12   | 11   | 10   | 9    | 8    | 7    | 6    | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    | 0    |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|         | WIRI | MEIP | WIRI | SEIP | UEIP | MTIP | WIRI | STIP | UTIP | MSIP | WIRI | SSIP | USIP |
| XLEN-12 | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |

図 3.11：マシン割り込み保留レジスタ (mip)。

MTIP ビット、STIP ビット、UTIP ビットは、マシン、スーパバイザ、ユーザタイマ割り込みのタイマ割り込み保留ビットにそれぞれ対応します。  
MTIP ビットは読み出し専用で、メモリマップされたマシンモードタイマコンペアレジスタへの書き込みによってクリアされます。  
UTIP ビットと STIP ビットは、低レベルの特権レベルにタイマー割り込みを送るために M モードソフトウェアによって書き込まれます。  
ユーザおよびスーパバイザソフトウェアは、それぞれ AEE および SEE へのコールにより、UTIP および STIP ビットをクリアすることができます。

| XLEN-1  | 12   | 11   | 10   | 9    | 8    | 7    | 6    | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    | 0    |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|         | WPRI | MEIE | WPRI | SEIE | UEIE | MTIE | WPRI | STIE | UTIE | MSIE | WPRI | SSIE | USIE |
| XLEN-12 |      | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |

図 3.12：マシン割り込み許可レジスタ（mie）。

M モード、S モード、U モードの各タイマ割り込みには、それぞれ MTIE、STIE、UTIE という名前の別々のタイマ割り込みイネーブルビットがあります。

各下位特権レベルには、独立した(個別の)ソフトウェア割り込み保留ビット（SSIP、USIP）があります。これは、関連するまたはそれ以上の特権レベルでローカルハートで実行されているコードから CSR アクセスによって読み書きすることができます。マシンレベルの MSIP ビットは、メモリマップ制御レジスタへのアクセスによって書き込まれ、これはリモートハートがマシンモードのプロセッサ間割り込みを提供するために使用されます。より低い特権レベルのためのプロセッサ間割り込みは、それぞれ AEE または SEE への ABI および SBI コールを介して実装され、それは最終的に受信側ハートの MSIP ビットへのマシンモード書き込みをもたらす可能性があります。ハートは、同じメモリマップ制御レジスタを使用して、独自の MSIP ビットを書き込むことができます。

私たちは、適切なモードで動作している場合、ハートが独自の SSIP または USIP ビットを直接書き込むことを許可しますが、他のハートが仮想化され、より高い特権レベルによって予定されている可能性があります。この理由から、ABI と SBI の呼び出しによってプロセッサ間割り込みが提供されています。マシンモードのハーツは仮想化されておらず、MSIP ビットを設定することで他のハートに直接割り込みをかけることができます。通常、プラットフォーム仕様に応じてメモリマップ制御レジスタへのキャッシュされていない I / O 書き込みを使用します。

mip の MEIP フィールドは、マシンモード外部割り込みが保留中であることを示す読み出し専用ビットです。MEIP は、第 7 章で指定されている標準プラットフォームレベルの割り込みコントローラなど、プラットフォーム固有の割り込みコントローラによって設定およびクリアされます。mie の MEIE フィールドは、設定時にマシンの外部割り込みを有効(可能)にします。

mip の SEIP フィールドには、単一の読み書きビットが含まれます。SEIP は、外部割り込みが保留中であることを S モードに示すために、M モードソフトウェアによって書かれることがあります。さらに、プラットフォームレベルの割り込みコントローラは、スーパーバイザレベルの外部割り込みを生成することができます。ソフトウェア書き込み可能ビットと外部割り込みコントローラからの信号の論理和は、スーパーバイザへの外部割り込みを生成するために使用されます。SEIP ビットが CSRRW、CSRRS、または CSRRC 命令で読み取られると、rd 宛先レジスタに返される値には、ソフトウェア書き込み可能ビットと割り込みコントローラからの割り込み信号の論理和が含まれます。ただし、CSRRS 命令または CSRRC 命令のリード・モディファイ・ライト・シーケンスで使用される値は、ソフトウェア書き込み可能な SEIP ビットのみであり、外部割り込みコントローラからの割り込み値は無視されます。

SEIP フィールドの動作は、上位の特権層が外部の割り込みをきちんと模倣できるように設計されており、実際の外部割り込みを失うことはありません。その結果、CSR 命令の動作は通常の CSR アクセスから少し変更されています。

MIP の UEIP フィールドは、ユーザモード割り込みのための N 個の拡張が実装されているとき、ユーザモードの外部割り込みを提供します。SEIP と同様に定義されます。



mie CSR の MEIE、SEIE、および UEIE フィールドは、それぞれ M モード外部割り込み、S モード外部割り込み、および U モード外部割り込みをそれぞれ有効にします。

非マスク可能割り込みは、NMIトラップハンドラを実行するときにその存在が暗黙的に知られている(認識される)ので、mipレジスタを介して見ることはできません。(表示されません)

すべての様々な割り込みタイプ（ソフトウェア、タイマ、外部）に対して、特権レベルがサポートされていない場合、関連する保留中および割り込み可能ビットは、それぞれ mip および mie レジスタでゼロにハードワイヤードされます。したがって、これらはすべて効果的に WARL フィールドです。

これらのレジスタの上位ビットには、プラットフォーム固有のマシンレベルの割り込みソースを追加することができますが、ほとんどの外部割り込みはプラットフォーム割り込みコントローラを経由してルーティングされ、MEIP 経由で配信されることが期待されます。(配線されます。)

割り込み  $i$  は、ビット  $i$  が mip と mie の両方に設定されている場合、および割り込みがグローバルにイネーブルされている場合に行われます。

デフォルトでは、ハートの現在の特権モードが M より小さい場合、または現在の特権モードが M で mstatus レジスタの MIE ビットが設定されている場合、M モード割り込みはグローバルにイネーブルされます。

しかし、mideleg のビット i がセットされている場合、hart の現在の特権モードが委譲特権モード (S または U) に等しく、そのモードの割り込み許可ビット (mstatus の SIE または UIE) が設定されている場合、または現在の特権モードが委譲特権モードよりも小さい場合、割り込みはグローバルに有効とみなされます。

同じ特権レベルの複数の同時割り込みとトラップは、次の優先順位の低い順に処理されます。：外部割り込み、ソフトウェア割り込み、タイマー割り込み、次にすべての同期トラップがあります。

### 3.1.15 マシントイマレジスタ (mtime と mtimecmp)

プラットフォームは、メモリマップされたマシンモードレジスタ mtime として公開されるリアルタイムカウンタを提供します。mtime は一定の頻度(周波数)で実行されなければならず、プラットフォームは mtime のタイムベースを決定するためのメカニズムを提供しなければなりません。(必要があります)

mtime レジスタは、すべての RV32、RV64、および RV128 システムで 64 ビット精度を持ちます。

プラットフォームは、64 ビットのメモリマップされたマシンモードタイマコンパレジスタ (mtimecmp) を提供し、mtime レジスタに mtimecmp レジスタの値以上の値が含まれている場合に、タイマ割り込みがポストされます。

割り込みは、mtimecmpレジスタを書き込むことによってクリアされるまでポストされたままです。

割り込みは、割り込みが許可され、MTIE ビットが mie レジスタに設定されている場合にのみ行われます。

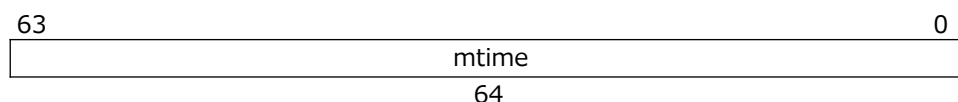


図 3.13: マシンタイムレジスタ (メモリマップ制御レジスタ)。

タイマ機能は、動的な電圧および周波数スケーリングによってエネルギーを節約するために、非常に可変なクロック周波数で動作する最新のプロセッサをサポートするサイクルカウンタではなく、ウォークロック時間を使用するように定義されています。

↑ wall-clock(壁クロック)って RTC とか場合によって周波数(周期)が変わらないクロックのことだと思う。

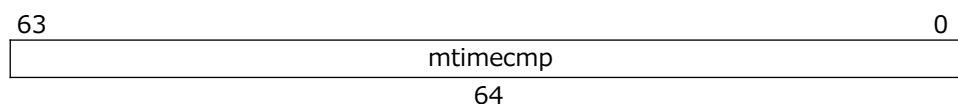


図 3.14：マシン時間比較レジスタ（メモリマップ制御レジスタ）。

正確なリアルタイムクロック（RTC）は、（水晶または MEMS 発振器を必要とする）比較的高価であり、システムの残りの部分がパワーダウンしても実行する必要がありますので、通常、プロセッサとは異なる周波数/電圧領域に位置するシステムには 1 つしか存在しません。

したがって、RTC はシステム内のすべてのハートによって共有されなければならず、RTC へのアクセスは潜在的に電圧レベルシフトとクロックドメイン交差のペナルティを招くことがあります。

したがって、mtime を CSR よりもメモリマップされたレジスタとして公開する方が自然です。

より低い特権レベルには独自の timecmp レジスタはありません。

代わりに、マシンモードソフトウェアは、次のタイマー割り込みを mtimecmp レジスタに多重化することによって、ハート上に任意の数の仮想タイマを実装できます。

シンプルな固定周波数システムでは、サイクルカウントとウォールクロックの両方に単一のクロックを使用できます。

RV32 では、mtimecmp へのメモリマップ書き込みはレジスタの 1 つの 32 ビット部分のみを変更します。

次のコードシーケンスは、comparand の中間値のために、タイマー割り込みを誤って生成することなく、64 ビットの mtimecmp 値を設定します。：

```
# New comparand is in a1:a0.
li t0, -1
sw t0, mtimecmp      # No smaller than old value.
sw a1, mtimecmp+4    # No smaller than new value.
sw a0, mtimecmp      # New value.
```

図 3.15：レジスタが強く順序付けられた I / O 領域にあると仮定して、RV32 の 64 ビットの時間比較値を設定するためのサンプルコード。

### 3.1.16 ハードウェアパフォーマンスモニタ

M モードには、基本的なハードウェアパフォーマンス監視機能が含まれています。

mcycle CSR は、過去の任意の時間以来、ハートが実行したサイクル数のカウントを保持します。

minstret CSR には、ハートが退職(引退)した命令の数が過去の任意の時間からカウントされます。

↑retired をどう訳すか。実行がすでに終わったぐらいでいいのかな。

mcycle レジスタと minstret レジスタは、すべての RV32、RV64、および RV128 システムで 64 ビットの精度を持ちます。

ハードウェアパフォーマンスモニタには、29 個の追加イベントカウンタ mhpcounter3-mhpcounter31 が含まれています。

イベントセクタ CSRs mhpmevent3-mhpmevent31 は、どのイベントが対応するカウンタを増加させるかを制御する WARL レジスタです。

これらのイベントの意味はプラットフォームによって定義されますが、イベント 0 は「イベントなし」を意味するために予約されています。すべてのカウンタを実装する必要がありますが、カウンタと対応するイベントセクタの両方を 0 にハードワイヤリングするのが法的な実装です。

↑leagal をどう訳すか。法的というより、正当なとか適切な。とかかな。

これらのカウンタはすべて、RV32、RV64、および RV128 で 64 ビットの精度を持ちます。

RV32 のみでは、mcycle、minstret、および mhpcounter の CSR の読み取りによって 32 ビットが返され、一方、mcycleh、minstreth、および mhpcounternh CSR の読み取りは、対応するカウンタのビット 63-32 を返します。

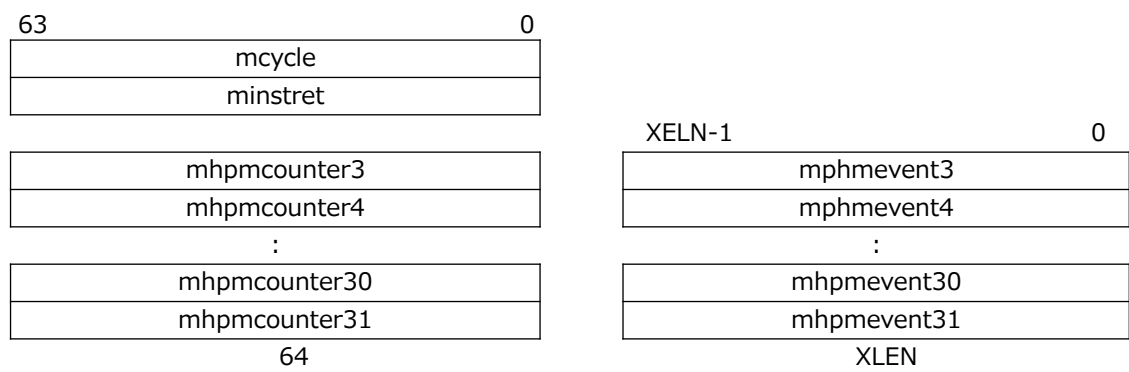


図 3.16：ハードウェアパフォーマンスモニタカウンタ。

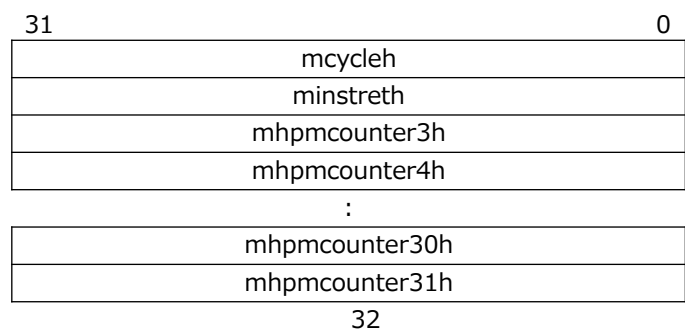


図 3.17：上位 32 ビットのハードウェアパフォーマンスモニタカウンタ、RV32 のみ。

RV128 システムでは、mcycle、minstret、および mhpmmcounter の 64 ビット値は、読み込み時に 128 ビットに符号拡張されます。

-----

RV128 システムでは、符号付き 64 ビット値と符号なし 64 ビット値の両方が正準形式で保持され、ビット 63 はすべての上位ビット位置で繰り返されます。

↑63bit 目が符号拡張されるということ

カウンタは RV128 でも 64 ビットの値であるため、カウンタ CSR は符号拡張拡張不変量を保持して読み込みます。

実装は、カウンタのより少ないビットを実装することを選択することができ、（例えば、263 命令が実行される）ラップアラウンドを経験する可能性は低く、それによって符号拡張回路を実際に実装する必要がなくなる。

↑この例では 263 まで数えられれば良いので 9bit512 まで数えられるカウンタで OK

3.1.17 カウンタインーブルレジスタ ([m | h | s] counteren)

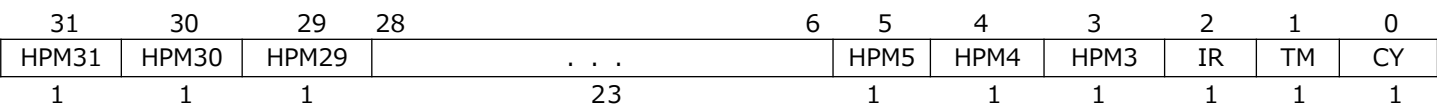


図 3.18：カウンタインーブルレジスタ（mcounteren と scounteren）。

カウンタインーブルレジスタ mcounteren および scounteren は、ハードウェアパフォーマンスモニタリングカウンタの可用性を、次に低い特権モードに制御します。

mcounteren レジスタの CY、TM、IR、または HPMn ビットがクリアされている場合、S モードまたは U モードで実行中に、cycle、time、instret、または hpmmmcounter レジスタを読み込もうとすると、不正な命令例外が発生します。

これらのビットの1つがセットされると、次の実装された特権モード（実装されている場合はSモード、それ以外の場合はUモード）で対応するレジスタへのアクセスが許可されます。

Sモードが実装されている場合、Uモードで実行している間は、scounteren レジスタの同じビット位置がこれらのレジスタへのアクセスを同様に制御します。

Sモードがカウンタ・レジスタへのアクセスを許可され、対応するビットが scounteren に設定されている場合、Uモードもそのレジスタにアクセスすることができます。

レジスタ mcounteren と scounteren は、UモードとSモードが実装されている場合に実装する必要がある WARL レジスタです。いずれのビットにもハードワイヤードの値0が含まれている可能性があります。これは、対応するカウンタへの読み込みによって、特権レベルの低いモードで実行されているときに例外が発生することを示します。

---

カウンタインーブルビットは、最小限のハードウェアで2つの一般的な使用例をサポートします。  
 高性能タイマとカウンタが不要なシステムの場合、マシンモードソフトウェアはアクセスをトラップし、ソフトウェアのすべての機能を実装できます。  
 高性能タイマとカウンタを必要とするが、基盤となるハードウェアカウンタの難読化には関係(考慮)しないシステムでは、カウンタを低特権モードに直接さらす(公開する)ことができます。

cycle、instret、および hpmcounteren の CSRs は、それぞれ mcycle、minstret、および mhpmpcounteren の読み取り専用のシャドウです。

time CSR は、メモリマップされた mtime レジスタの読み取り専用の影(シャドウ)です。

---

実装は、time CSR の読み込みをメモリマップされた mtime レジスタへのロードに変換するか、または mxcounteren の TM ビットを0にハードワイヤリングし、M-mode ソフトウェアでこの機能をエミュレートすることができます。

### 3.1.18 マシンスクラッチレジスタ (mscratch)

mscratch レジスタは、マシンモードで使用するために専用の XLEN ビットのリード/ライトレジスタです。通常は、マシンモードハートローカルコンテキスト空間へのポインタを保持するために使用され、Mモードトラップハンドラへのエントリ時にユーザレジスタとスワップされます。



図 3.19：マシンモードスクラッチレジスタ。

---

MIPS ISA は、オペレーティングシステムで使用するために2つのユーザーレジスタ (k0 / k1) を割り当てました。  
 MIPS スキームは、迅速かつ簡単な実装を提供しますが、使用可能なユーザー・レジスタを減らし、さらに特権レベルやネストされたトラップに拡張されません。  
 潜在的なセキュリティホールを回避し、確定的なデバッグ動作を提供するために、ユーザーレベルに戻る前に両方のレジスタをクリアする必要があります。

RISC-V ユーザー ISA は、多くの可能な特権システム環境をサポートするように設計されているため、ユーザーレベルの ISA には OS 依存の機能を感染させたくありませんでした。

RISC-V CSR スワップ命令は、値を mscratch レジスタにすばやく保存/復元できます。

MIPS デザインとは異なり、OS はユーザコンテキストの実行中に mscratch レジスタに値を保持することができます。

3.1.19 マシン例外プログラムカウンタ (mepc)

mepc は、図 3.20 のように書式設定された XLEN ビットの読取り/書込みレジスタです。  
mepc (mepc [0]) の下位ビットは常にゼロです。  
16 ビット命令アライメントを持つ命令セット拡張をサポートしない実装では、2 つの下位ビット (mepc [1 : 0]) は常にゼロです。

-----  
mepc レジスタは、命令アドレス不一致の例外を発生させる PC 値を保持することはできません。

mepc は、有効な物理アドレスと仮想アドレスをすべて保持できる必要がある WARL レジスタです。  
すべての可能な無効アドレスを保持できる必要はありません。  
実装は、無効なアドレスパターンを mepc に書き込む前に他の無効なアドレスに変換する可能性があります。

トラップが M モードになると、mepc には例外が発生した命令の仮想アドレスが書き込まれます。  
それ以外の場合、mepc は実装によって書き込まれることはありませんが、ソフトウェアによって明示的に記述されることがあります。

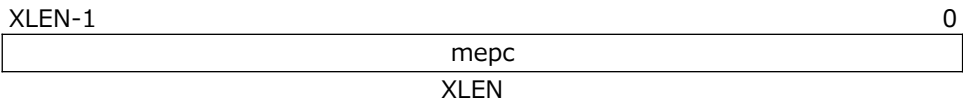


図 3.20：マシン例外プログラムカウンタレジスタ。

3.1.20 マシン要因レジスタ (mcause)

mcause レジスタは、図 3.21 に示すようにフォーマットされた XLEN ビットの読み書き可能レジスタです。  
トラップを M モードにすると、トラップの原因となったイベントを示すコードが mcause に書き込まれます。  
それ以外の場合、mcause は実装によって書き込まれませんが、ソフトウェアによって明示的に書き込まれることがあります。

トラップが割り込みによって発生した場合、mcause レジスタの割り込みビットがセットされます。  
例外コードフィールドには、最後の例外を識別するコードが含まれています。  
表 3.6 に、可能なマシンレベルの例外コードを示します。  
例外コードは WLRL フィールドなので、サポートされている例外コードを保持することのみが保証されています。

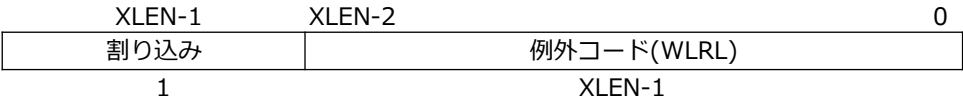


図 3.21：マシン要因レジスタ mcause。

-----  
特権命令例外と不正命令コード例外を区別しません。  
これにより、アーキテクチャが簡素化され、インプリメンテーションによってどのより高い特権の命令がサポートされているかが詳細に隠されます。(非表示になります。)  
トラップをサービスする特権レベルは、これらを区別する必要があるかどうか、もしそうであれば、与えられたオペコードを違法 (不当) または特権として扱うべきかどうかに関するポリシーを実装できます。

-----  
割り込みは、mcause レジスタ値の符号で単一の分岐を持つ他のトラップと分離することができます。  
左にシフトすると、割り込みビットを除去し、例外コードをスケーリングしてトラップベクタテーブルにインデックスすることができます。

| 割り込み | 例外コード | 説明             |
|------|-------|----------------|
| 1    | 0     | ユーザーソフトウェア割り込み |
| 1    | 1     | 監督者ソフトウェア割り込み  |
| 1    | 2     | 予約             |
| 1    | 3     | マシンソフトウェア割り込み  |
| 1    | 4     | ユーザータイマ割り込み    |
| 1    | 5     | 監督者タイマ割り込み     |
| 1    | 6     | 予約             |
| 1    | 7     | マシンタイマ割り込み     |
| 1    | 8     | ユーザー外部割り込み     |
| 1    | 9     | 監督者外部割り込み      |
| 1    | 10    | 予約             |
| 1    | 11    | マシン外部割り込み      |
| 1    | ≥12   | 予約             |
| 0    | 0     | 命令アドレス不整列      |
| 0    | 1     | 命令アクセス障害       |
| 0    | 2     | 違法(違反)命令       |
| 0    | 3     | ブレークポイント       |
| 0    | 4     | 読み込みアドレス不整列    |
| 0    | 5     | 読み込みアクセス障害     |
| 0    | 6     | 保存/AMO アドレス不整列 |
| 0    | 7     | 保存/AMO アドレス障害  |
| 0    | 8     | Uモードからの環境呼び出し  |
| 0    | 9     | Sモードからの環境呼び出し  |
| 0    | 10    | 予約             |
| 0    | 11    | Mモードからの環境呼び出し  |
| 0    | 12    | 命令ページ障害        |
| 0    | 13    | 読み込みページ障害      |
| 0    | 14    | 予約             |
| 0    | 15    | 保存/AMO ページ障害   |
| 0    | ≥16   | 予約             |

表 3.6 トラップ後のマシン要因レジスタ (mcause) の値

## 3.1.21 マシントラップ値 (mtval) レジスタ

mtval レジスタは、図 3.22 に示すようにフォーマットされた XLEN ビットの読み書きレジスタです。

トラップを M モードにすると、mtval に例外固有の情報が書き込まれ、ソフトウェアがトラップを処理する際に役立ちます。それ以外の場合、mtval は実装によって書き込まれることはありませんが、ソフトウェアによって明示的に書き込まれることがあります。

ハードウェアブレークポイントがトリガされるか、命令フェッチ、読み込み、または保存アドレスの不整列、アクセス、またはページフォルトの例外が発生すると、mtval にはフォルトのある実効アドレスが書き込まれます。

不正な命令トラップでは、mtval はフォールト中の命令の最初の XLEN ビットで記述されます。

その他の例外については、mtval はゼロに設定されますが、将来の標準では、他の例外に対して mtval の設定を再定義すること(可能性)があります。

---

mtval レジスタは、前の仕様の mbadaddr レジスタを置き換えます。

不正なアドレスを提供することに加えて、レジスタは不正な命令トラップをトリガした（そして将来他の情報を返すために使用されるかもしれない）不良命令を提供できるようになりました。

命令ビットを返す(返す)と命令エミュレーションが加速され、不正命令をエミュレートしようとするときに存在する可能性のある競合も取り除かれます。

---

ページベースの仮想メモリが有効な場合、物理メモリアクセスの例外の場合でも、mtval にはフォールト仮想アドレスが書き込まれます。

この設計は、ほとんどの実装、特にハードウェアページテーブルウォーカーを持つ実装のデータパスコストを削減します。

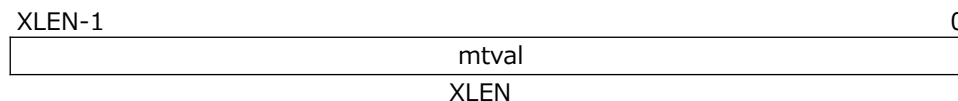


図 3.22：マシントラップ値レジスタ。

可変長命令を持つ RISC-V システム上の命令フェッチアクセス障害の場合、mtval は、命令の先頭を指し示す間に、障害の原因となった命令の部分へのポインタを含みます。

オプションで、mtval レジスタを使用して、不正命令例外（mepc がメモリ内のフォルト命令を指し示す）でフォルト命令ビットを返すこともできます。

この機能が提供されていない場合、mtval は不正な命令フォルトでゼロに設定されます。

この機能が提供されている場合、不正な命令トラップの後で、命令が XLEN ビットを超えない限り、mtval には障害発生命令全体が含まれます。

命令が XLEN ビットより短い場合、mtval の上位ビットはゼロにクリアされます。

命令の長さが XLEN ビット以上の場合、mtval には命令の最初の XLEN ビットが格納されます。

---

mtval でフォールト中の命令をキャプチャすると、命令エミュレーションのオーバーヘッドが減少し、命令が不整列された場合にいくつかの部分的な命令のロードが回避される可能性があります、そして、読み込みがデータレジスタに命令をフェッチするために使用されたときにデータキャッシュミスまたは低速のキャッシュされていないアクセスが発生する可能性があります。

動的翻訳システムで発生する可能性があるように、他のエージェントが命令メモリを操作している場合は、原子性の問題もあります。

必要なのは、命令全体（または少なくとも最初の XLEN ビット）がトラップを取る前に mtval にフェッチされることです。

これは実装を制限するものではなく、命令のデコードを試みる前に命令全体をフェッチし、ソフトウェアハンドラの複雑さを避けることができます。

mtval の値が 0 の場合、その機能がサポートされていないか、不正なゼロ命令がフェッチされたことが示されます。

mepc が指す命令メモリからの読み込みを使用して、これらの 2 つのケースを区別することができます（または、実行時に適切なトラップ処理をインストールするためにシステム設定情報を調べることができます）。

mtval は、有効なすべての物理アドレスと仮想アドレスと値 0 を保持できる必要がある WARL レジスタです。

可能なすべての無効なアドレスを保持する必要はありません。

実装は、無効なアドレスパターンを mtval に書き込む前に他の無効なアドレスに変換する可能性があります。

障害のある命令ビットを返す機能が実装されている場合、mtval は 2N 未満のすべての値も保持できる必要があります、N は XLEN のうち小さい方とサポートされる最長命令の幅です。

## 第2巻：RISC-V 特権アーキテクチャ V1.10

### 3.2 マシンモード特権命令

#### 3.2.1 環境呼び出しとブレークポイント

--ここまで。これ以降はこれから翻訳。 @shibatchii