

招待講演

Rust から広がる

プログラム**検証**・**テスト**の新展望



松下 祐介 京都大学 情報学研究科 五十嵐・末永研

2024.6.13 情報処理学会 プログラミング研究発表会



Rust は人類を
ソフトウェア開発の
新時代へと導く



自己紹介



PLDI 2022 にて

松下 祐介 ソフトウェア科学者



現在 京都大学 情報学研究科
学振PD研究員 @五十嵐・末永研

2024 東大院 情報理工 CS専攻 博士号取得 @小林研

2019 東大 理学部情報科学科 卒業 @小林研
卒業研究 **RustHorn** 

現実のソフトウェア開発に役立つ科学的アイデア

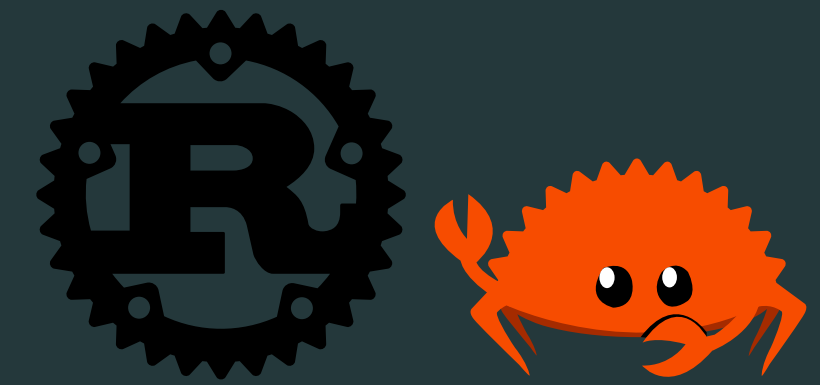
Rust 所有権

預言 未来

白熱する

Rust プログラミング言語

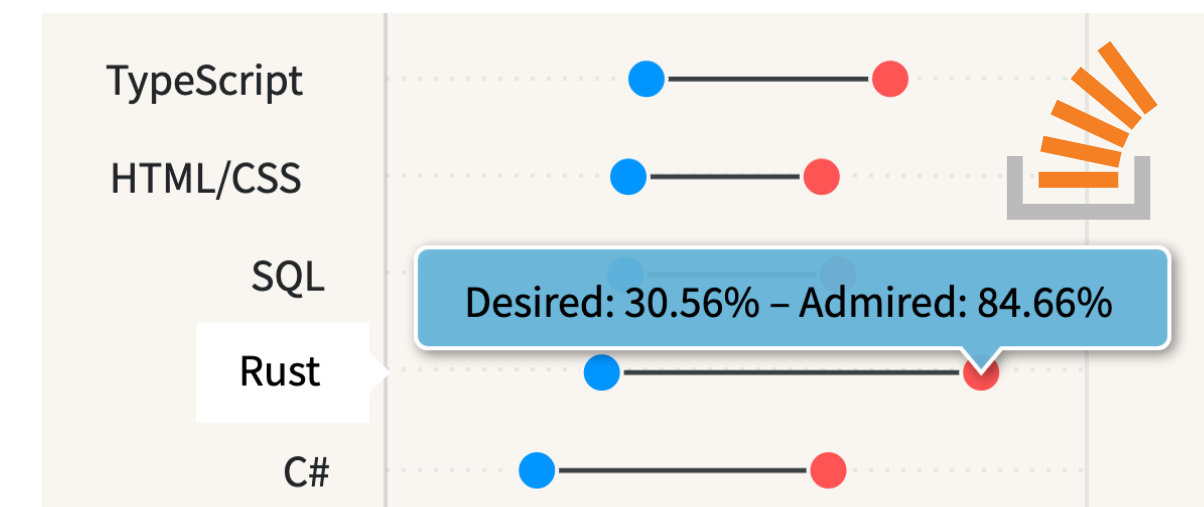
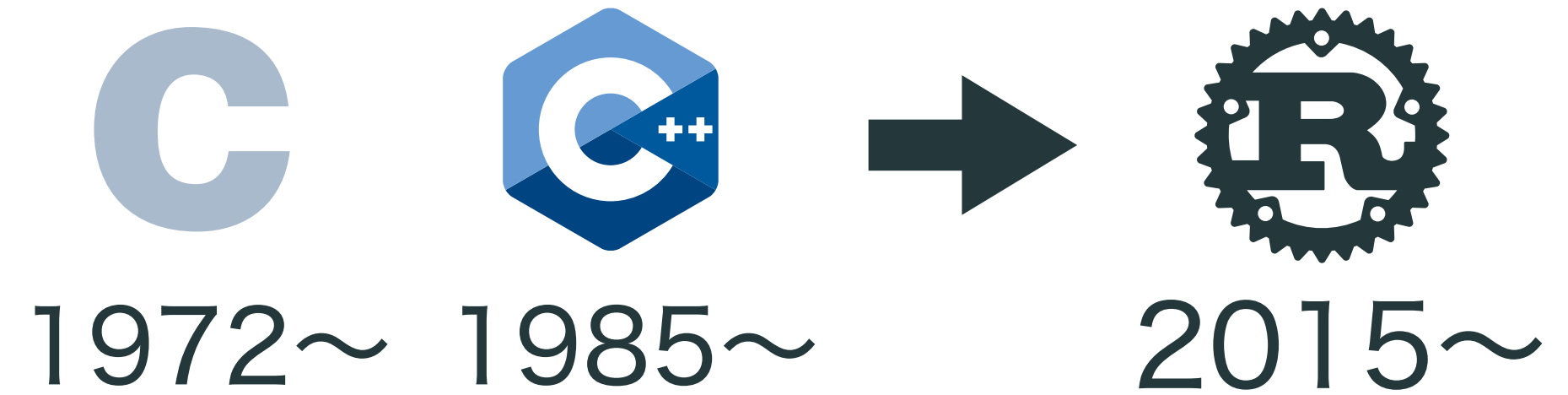
Rust プログラミング言語が今熱い



効率的で信頼できるソフトウェアを
誰もがつくれる言語

はじめる

[バージョン 1.78.0](#)



<https://survey.stackoverflow.co/2023/>

8年連続 最も“愛される”言語



<https://trends.google.com/trends/explore?date=2015-04-01%202024-03-31&q=%2Fm%2F0dsbpg6>

年々高まる Rust への関心

なぜRustか？

パフォーマンス

Rustは非常に高速でメモリ効率が高くランタイムやガベージコレクタがないため、パフォーマンス重視のサービスを実装できますし、組み込み機器上で実行したり他の言語との調和も簡単にできます。

信頼性

Rustの豊かな型システムと所有権モデルによりメモリ安全性とスレッド安全性が保証されます。さらに様々な種類のバグをコンパイル時に排除することが可能です。

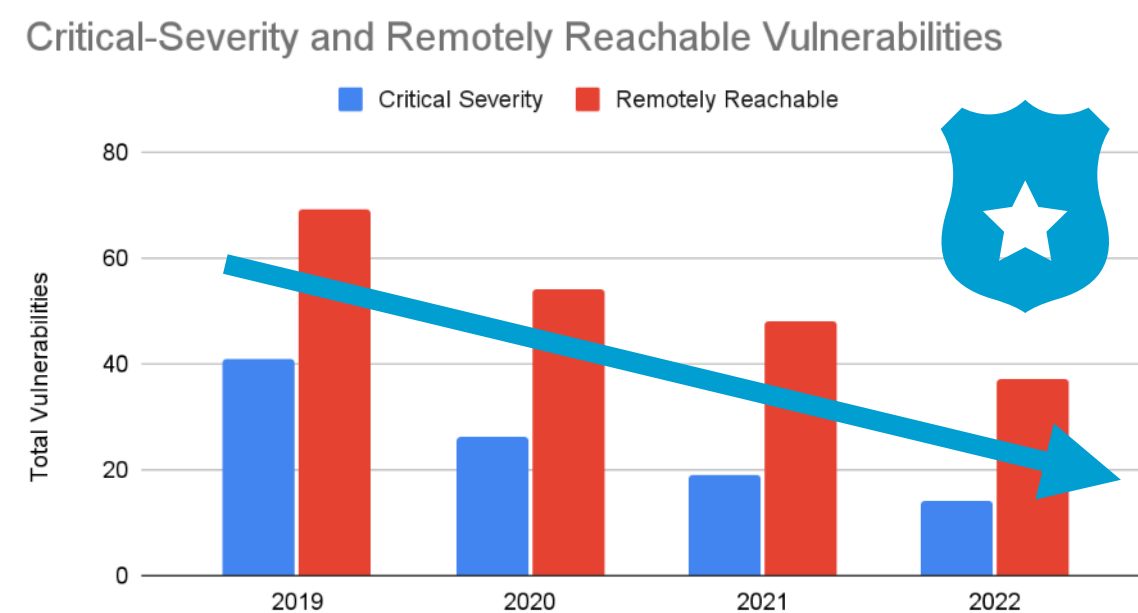
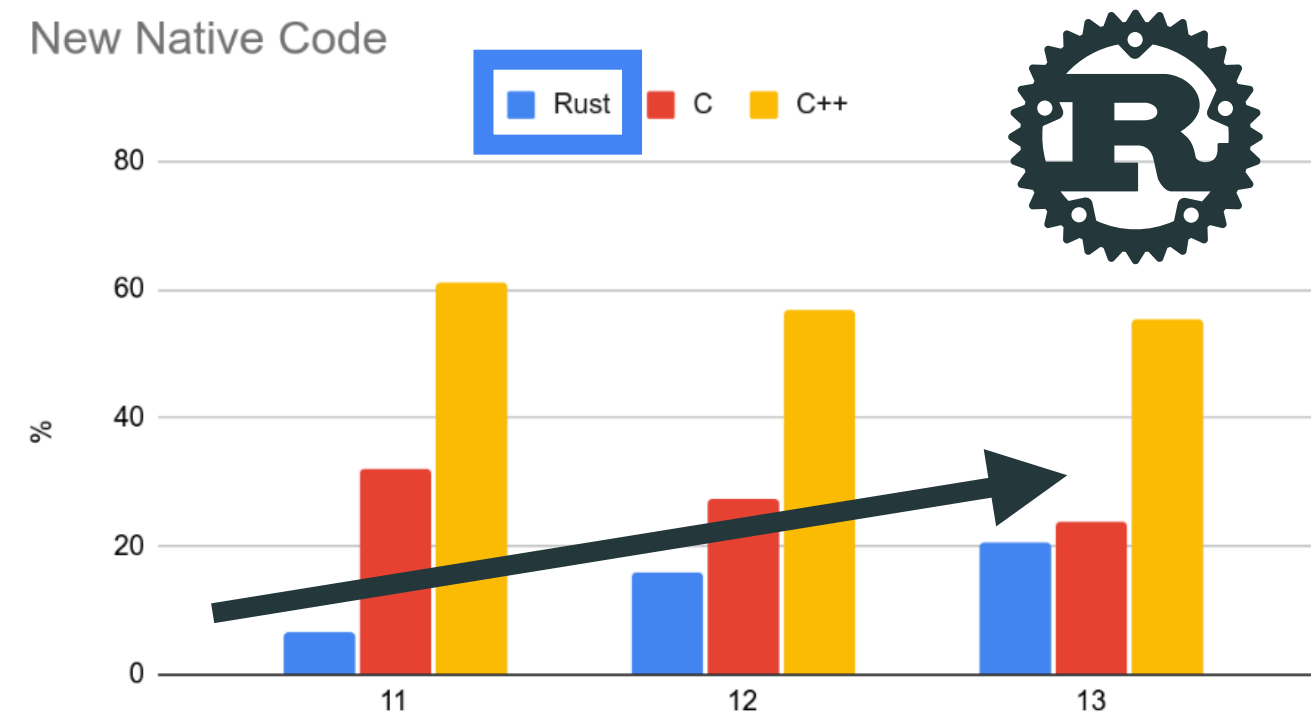
生産性

Rustには優れたドキュメント、有用なエラーメッセージを備えた使いやすいコンパイラ、および統合されたパッケージマネージャとビルドツール、多数のエディタに対応するスマートな自動補完と型検査機能、自動フォーマッタといった一流のツール群が数多く揃っています。

<https://www.rust-lang.org/ja/>

高性能 × 安全性 × 開発効率

Rust がもたらす安全性



<https://security.googleblog.com/2022/12/memory-safe-languages-in-android-13.html>

Android は Rust を採用 → 脆弱性減

aws
Firecracker

Secure and fast microVMs for serverless computing

VIEW ON GITHUB

- Rust 81.4%
- Python 16.4%
- Shell 1.8%
- Other 0.4%

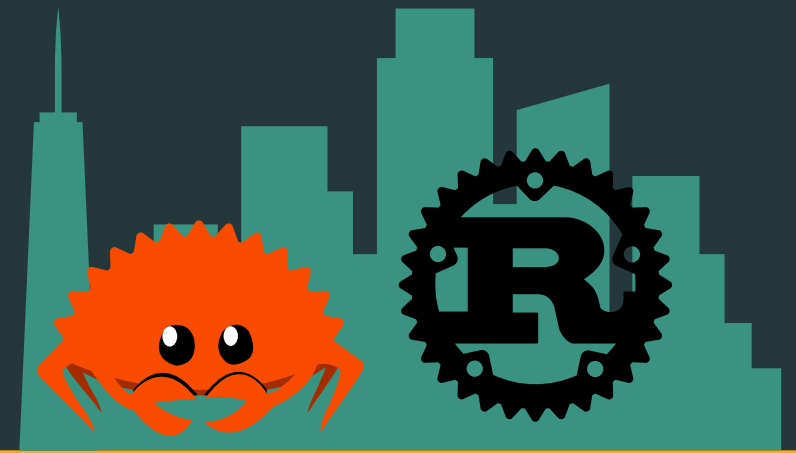
<https://firecracker-microvm.github.io/>

- Rust 95.6%
- Python 1.9%
- C 1.7%
- Shell 0.5%
- Dockerfile 0.1%
- Starlark 0.1%
- Other 0.1%

<https://github.com/google/crosvm>

現代の VM は Rust で開発 → 安全

Rust 製の色々なソフトウェア



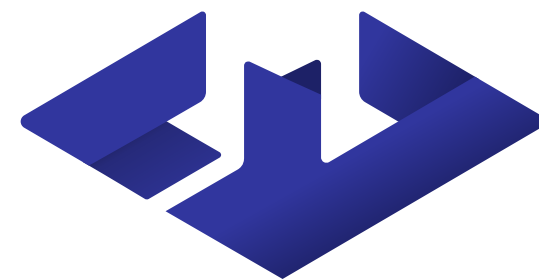
Firefox Browser

<https://www.mozilla.org/en-US/firefox/new/>



<https://servo.org/>

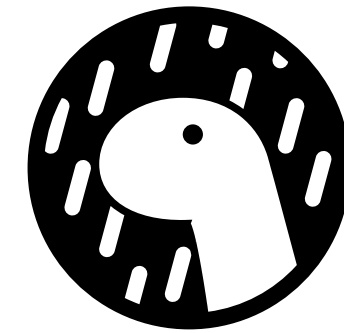
Web ブラウザ描画エンジン



B A T
A cat clone with wings

コマンドラインツール

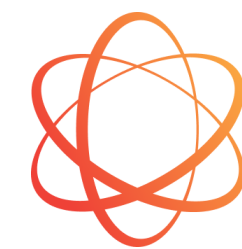
<https://github.com/sharkdp/bat>



Deno

<https://deno.com/>

JavaScript 処理系



APACHE
DATAFUSION™

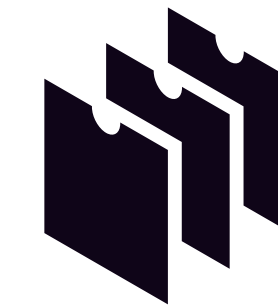
<https://datafusion.apache.org/>

SQL 処理系



<https://sui.io/>

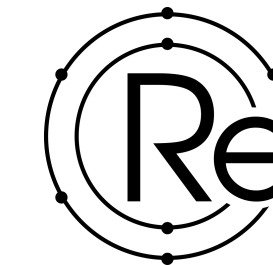
スマートコントラクト



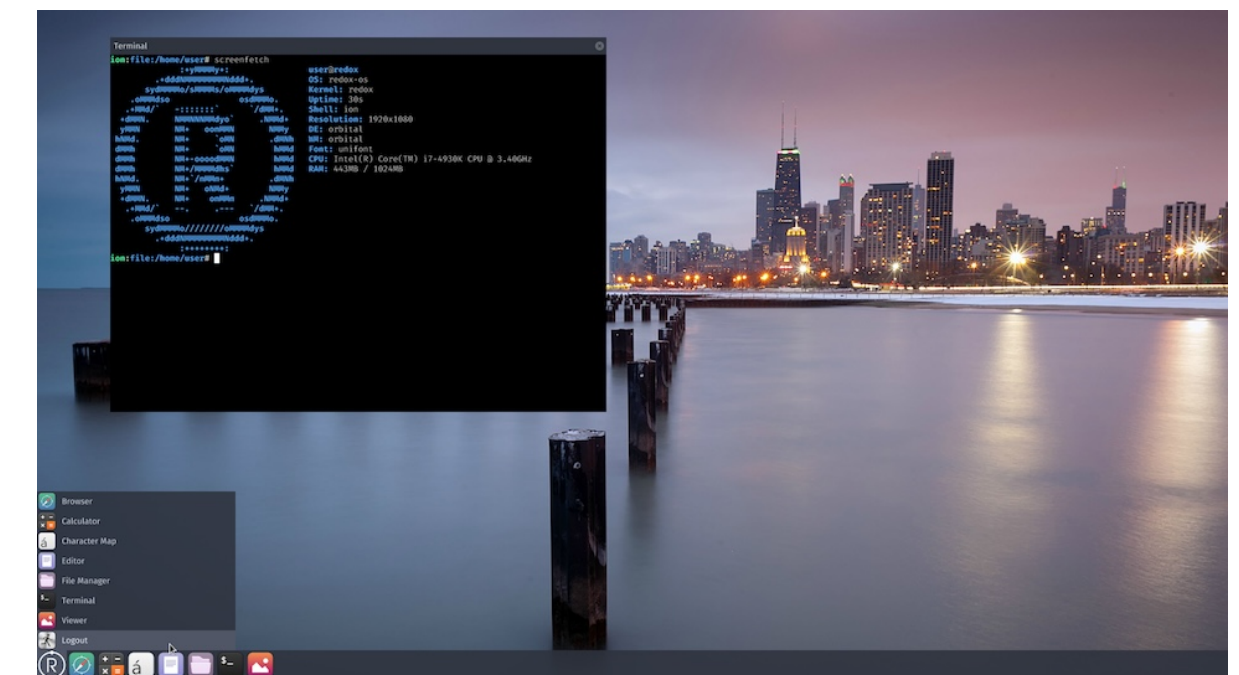
Wasmer

<https://wasmer.io/>

Wasm 処理系



Redox OS



<https://www.redox-os.org/>

オペレーティングシステム

産業の Rust への期待



<https://foundation.rust-lang.org/>

Rust 財団 2021年誕生



世界のビッグテックが出資

Google Contributes \$1M to Rust Foundation to Support C++/Rust “Interop Initiative”

Google's generous contribution of \$1M USD will help the Rust Foundation make meaningful contributions to improve the state of interoperability between the Rust and C++ programming languages.

2024.2

<https://foundation.rust-lang.org/news/google-contributes-1m-to-rust-foundation-to-support-c-rust-interop-initiative/>

Google が C++/Rust 相互運用の改善に向けて100万ドルを寄付

\$1M Microsoft Donation to Fund Key Rust Foundation & Project Priorities

Announcing the allocation of a recent \$1M donation from Platinum Member Microsoft to support Rust Foundation and Rust Project priorities .

2024.5

<https://foundation.rust-lang.org/news/1m-microsoft-donation-to-fund-key-rust-foundation-project-priorities/>

Microsoft が Rust の課題全般の解決に向けて100万ドルを寄付

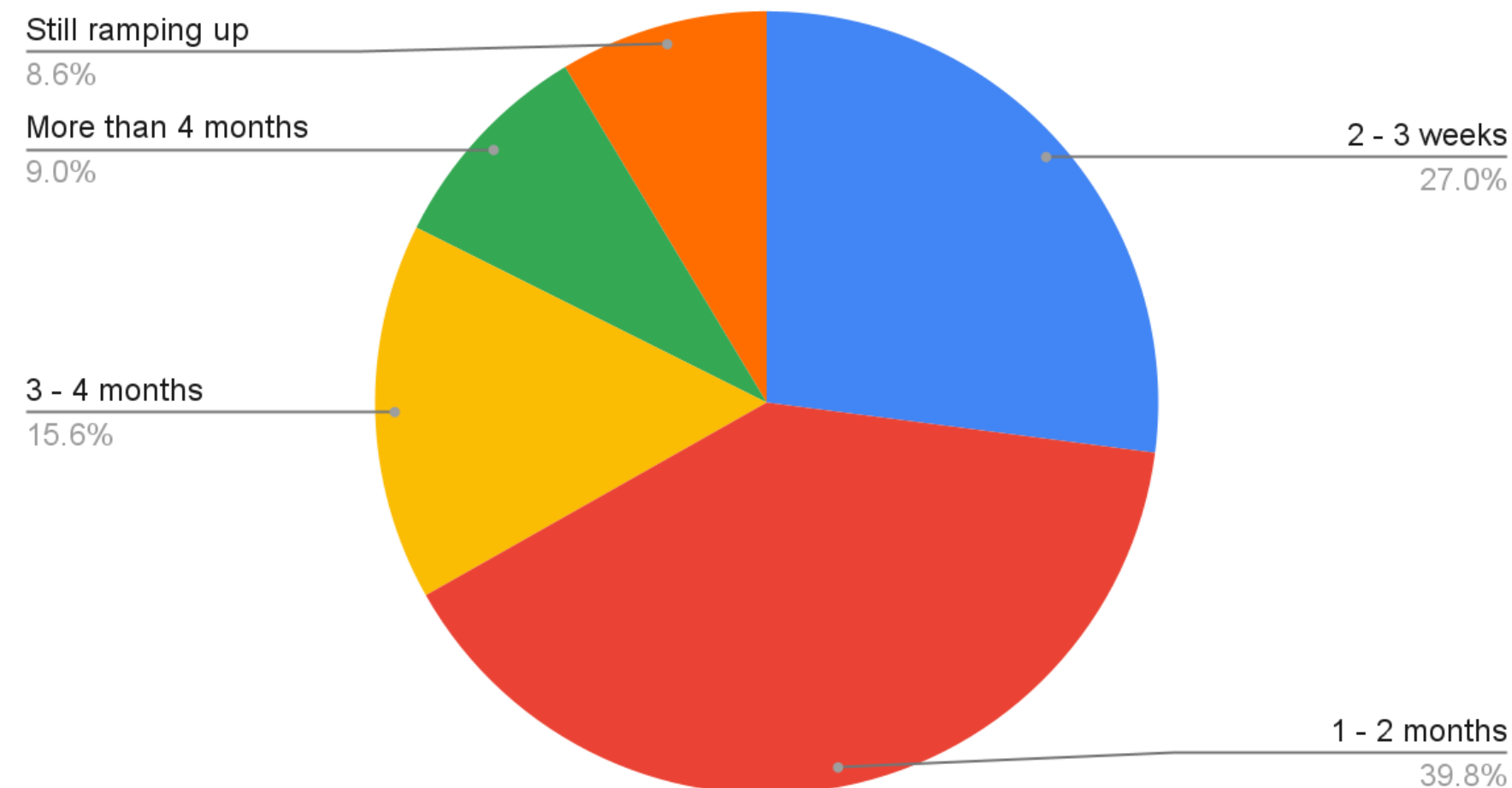
Rust に対する現場の声



1,000人以上の Google エンジニアに対するサーベイ

<https://opensource.googleblog.com/2023/06/rust-fact-vs-fiction-5-insights-from-googles-rust-journey-2022.html>

Time until confident writing Rust



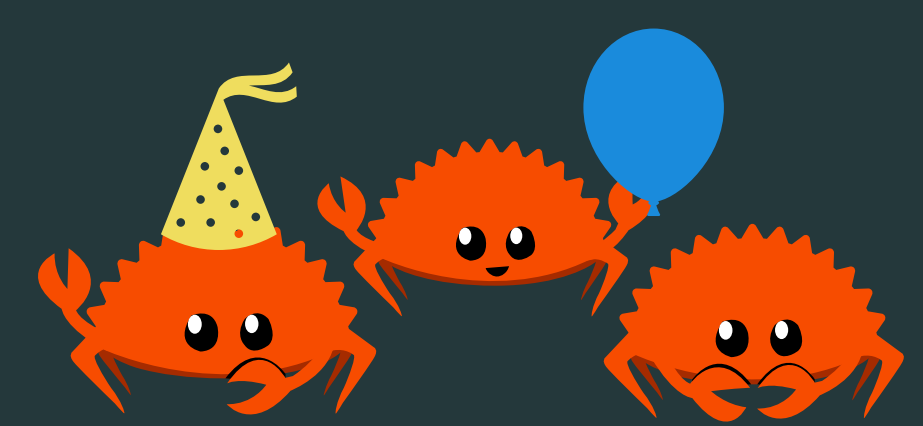
2ヶ月で 2/3以上が Rust 開発に自信

4ヶ月で 1/2以上が Rust で
他の言語より生産性を感じた

8割以上が Rust で
他の言語より正しさに自信

1/2以上が Rust は
レビューが非常に簡単と感じた








活発な Rust コミュニティ



Leadership council

Charged with the success of the Rust Project as whole, consisting of representatives from top-level teams






Members

 Eric Holk GitHub: eholk Compiler team	 Eric Huss GitHub: ehuss Dev tools team
 Jack Huey GitHub: jackh726 Language team	 James Munns GitHub: jamesmunns Launching pad
 Mara Bos GitHub: m-ou-se Library team	 Mark Rousskov GitHub: Mark-Simulacrum Infrastructure team
 Josh Gould GitHub: technetos Moderation team	

Language team

Designing and helping to implement new language features

Members

 Niko Matsakis GitHub: nikomatsakis Team leader	 Tyler Mandry GitHub: tmandry Team leader
 Josh Triplett GitHub: joshtripllett	 Felix Klock GitHub: pnkfelix
 Scott McMurray GitHub: scottmcm	



<https://www.rust-lang.org/community>

熱心なコントリビュータ達

Closed Resolve `await` syntax #57640
cramertj opened this issue on Jan 16, 2019 · 512 comments

mzji commented on Jan 18, 2019 · edited

Could postfix macro (i.e. `future.await!()`) still be an option? It's clear, concise, and unambiguous:

Future	Future of Result	Result of Future
<code>future.await!()</code>	<code>future.await!()? </code>	<code>future?.await!()</code>

Also postfix macro requires less effort to be implemented, and is easy to understand and use.

👍 36 ❤️ 23

chpio commented on Jan 18, 2019 · edited Contributor

Also postfix macro requires less effort to be implemented, and is easy to understand and use.

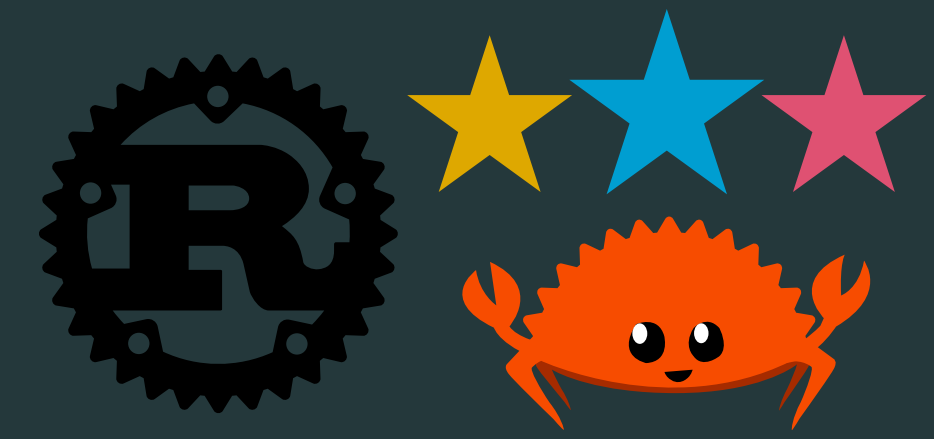
Also it's just using a [common lang feature](#) (or at least it would look like a normal postfix macro).

novacrazy commented on Jan 18, 2019 · edited

<https://github.com/rust-lang/rust/issues/57640>

言語設計についてオープンな議論

Rust はなぜ人気か



高性能

直接のメモリ操作

GCがデフォルトでない

直接の並行制御

同期方法の指定

自由なメモリ順序

C/C++ と比べて

安全性

実用的な所有権型

メモリ/スレッド安全性
の軽量な自動**検証**

借用・unsafe・

内部可変性で柔軟に

同等に高性能

圧倒的に安全

開発効率

モダンな言語機能

パターンマッチ トレイト
衛生的マクロ クロージャ

便利な開発ツール

パッケージマネージャ
テスト自動化 IDE 連携

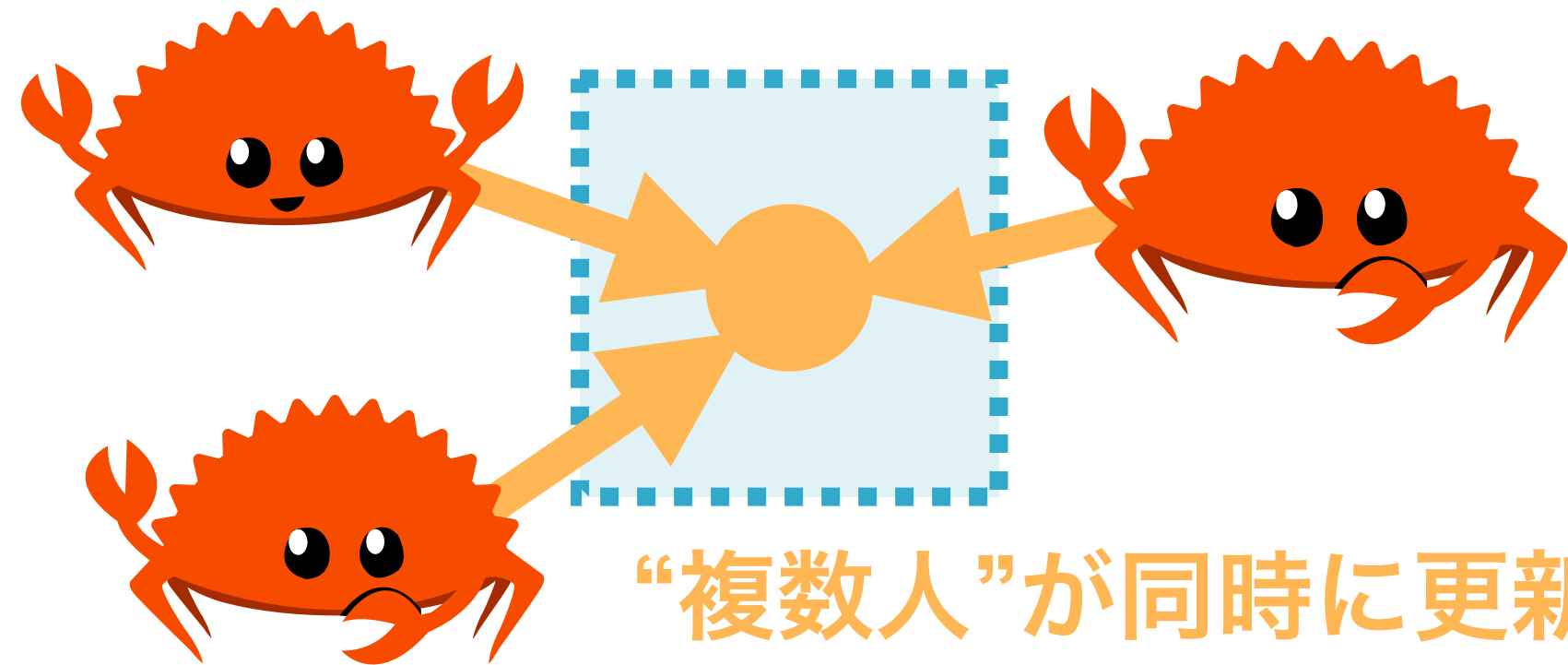
かなり快適

Rust は
所有権型を実用化 &
現実の開発を**革新**

Rust が広めた 所有権型の考え方

背景 メモリは難しい

記憶装置=メモリ



アクセス競合

ある箇所での更新が
予期せぬ影響をもたらす

メモリは深刻な脆弱性の原因

Use after free ダングリングポインタ
バッファオーバーラン/リード



CVE	Vendor	Product	Type
CVE-2019-7286	Apple	iOS	Memory Corruption
CVE-2019-7287	Apple	iOS	Memory Corruption
CVE-2019-0676	Microsoft	Internet Explorer	Information Leak
CVE-2019-5786	Google	Chrome	Memory Corruption
CVE-2019-0808	Microsoft	Windows	Memory Corruption
CVE-2019-0797	Microsoft	Windows	Memory Corruption

<https://googleprojectzero.blogspot.com/p/0day.html>

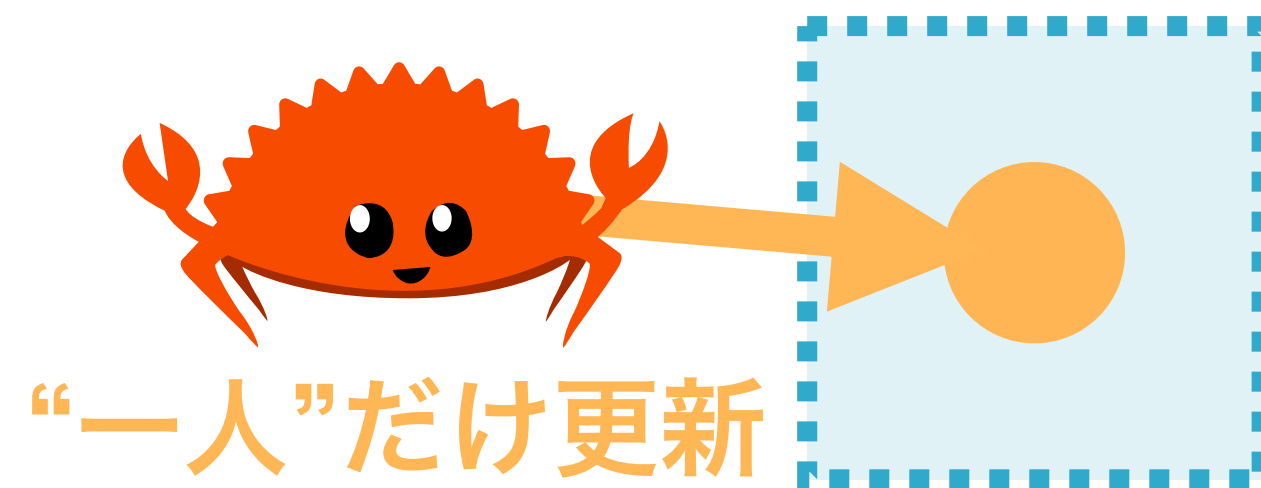
ゼロデイ攻撃の約7割がメモリ破壊

共有 xor 可変 — 所有権のもたらず保証

所有権 = メモリの特定領域へのアクセス権

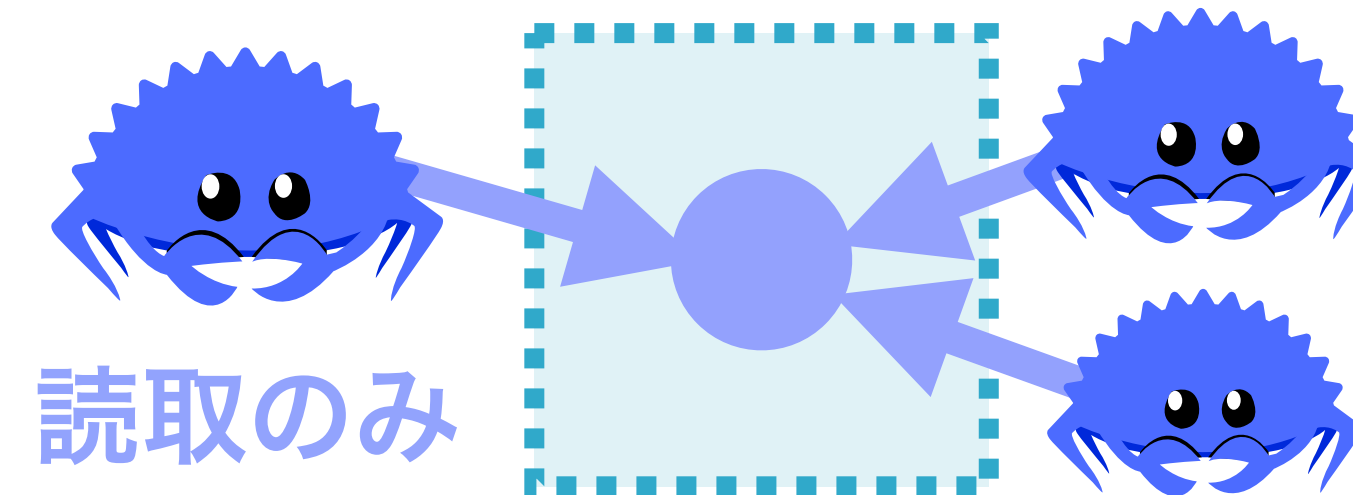
各領域について常に

専有 かつ 可変



xor

共有 かつ 不変



アクセス競合がない 安全 

昔から所有権の動的検査はごく一般的

Mutex [Dijkstra '65] · Reader-Writer ロック [Courtois+ '72]

Rust の**所有権型**

型に**所有権**情報 共有 xor 可変 を**静的に検証**

アクセス競合がない メモリ/スレッド**安全** 

プログラマに優しい 自動 & 軽量 の静的**検証**

アカデミックな研究

リージョン型 [Tofte&Talpin '97]

所有権型 [Clarke+ '98]

Cyclone [Grossman+ PLDI'02]

独自進化



初めて本格的に実用化



Rust

2015~

ソフトウェア科学の画期

成功の鍵

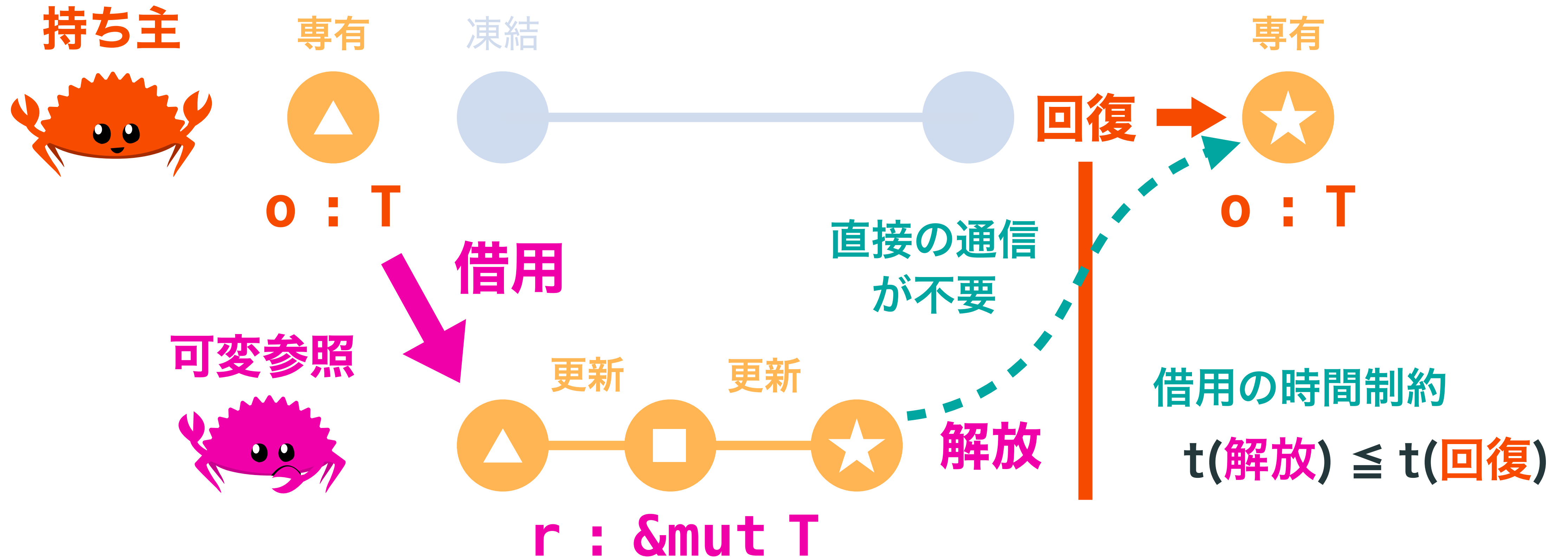
借用

unsafe

内部可変性

Rust の鍵#1 借用の基本アイデア

借用 = 所有権を一時的に借りること

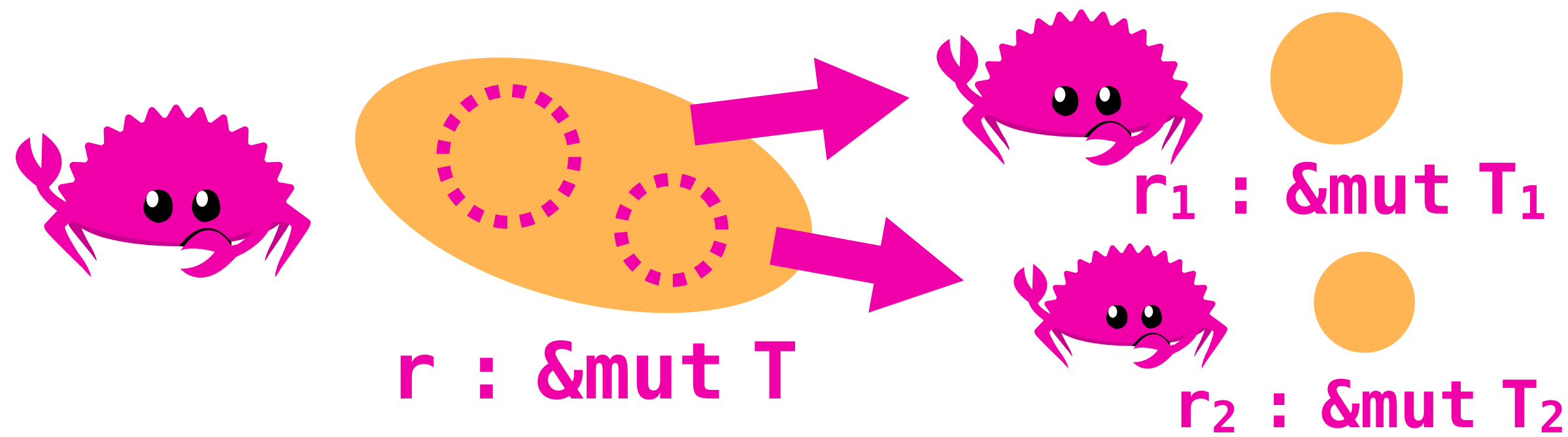


Rust の鍵#1 借用の色々なパターン

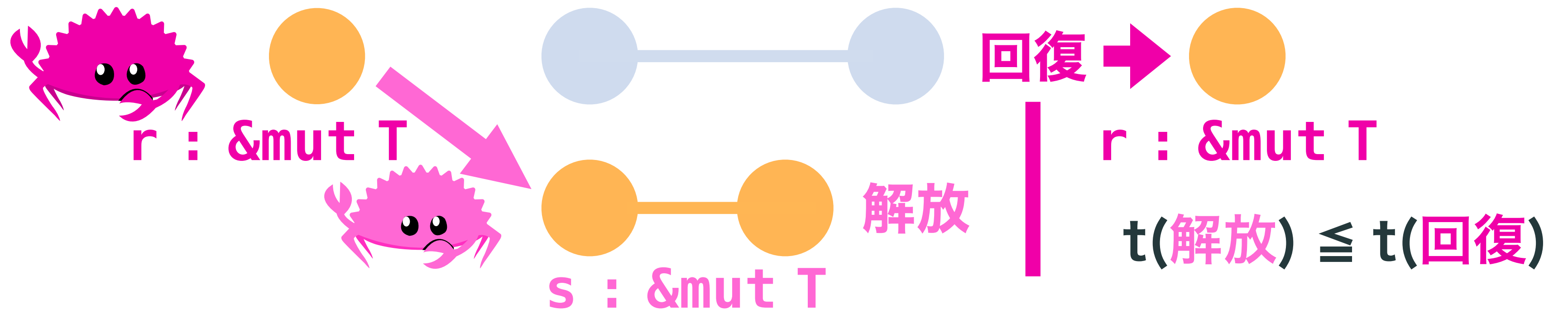
共有借用



借用の分割



再借用



Rust の鍵#1 借用検査

借用検査 = 借用の制約の自動静的検証

発展途上

特に $t(\text{解放}) \leq t(\text{回復})$

前世代

スコープ基準

$t(\text{解放}) = \text{スコープ終了}$

既存研究に直接由来

Cyclone [Grossman+ '02]

現世代

非字句的ライフタイム

$t(\text{解放})$ を生存解析で推論

ライフタイム = 連続する
プログラムポイントの区間



Niko Matsakis

次世代？

制御可能な借用検査

可変参照型で借用元を管理

自己借用への対応

```
fn new_widget(&self, name: String) -> Widget {  
    let name_suffix: &'name str = &name[3..];  
        // --- borrowed from "name"  
    let model_prefix: &'self.model str = &self.model[..2];  
        // ----- borrowed from "self.model"  
}
```

<https://smallcultfollowing.com/babysteps/blog/2024/06/02/the-borrow-checker-within/>

Rust の鍵#2 **unsafe** による拡張

unsafe = **型検査**で安全性を保証できない操作

特に 所有権検査を受けない **生ポインタ** `*mut T` の操作

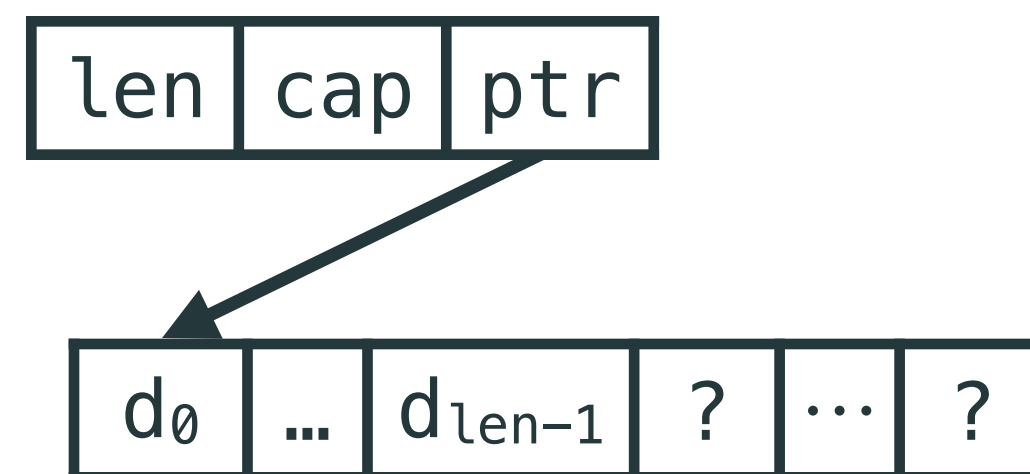
限界のある自動検査に対する**バックドア**

重要パターン **unsafe** 実装を **safe な型**でカプセル化 


例

動的配列型

```
struct Vec<T> {  
    len : uint,  
    cap : uint,  
    ptr : *mut T  
}
```



要素への可変参照を取得

```
fn index_mut(v : &mut Vec<T>,  
            i : uint) -> &mut T {  
    assert!(i < v.len); 動的な境界検査  
    unsafe { v.ptr.offset(i) }   
}
```

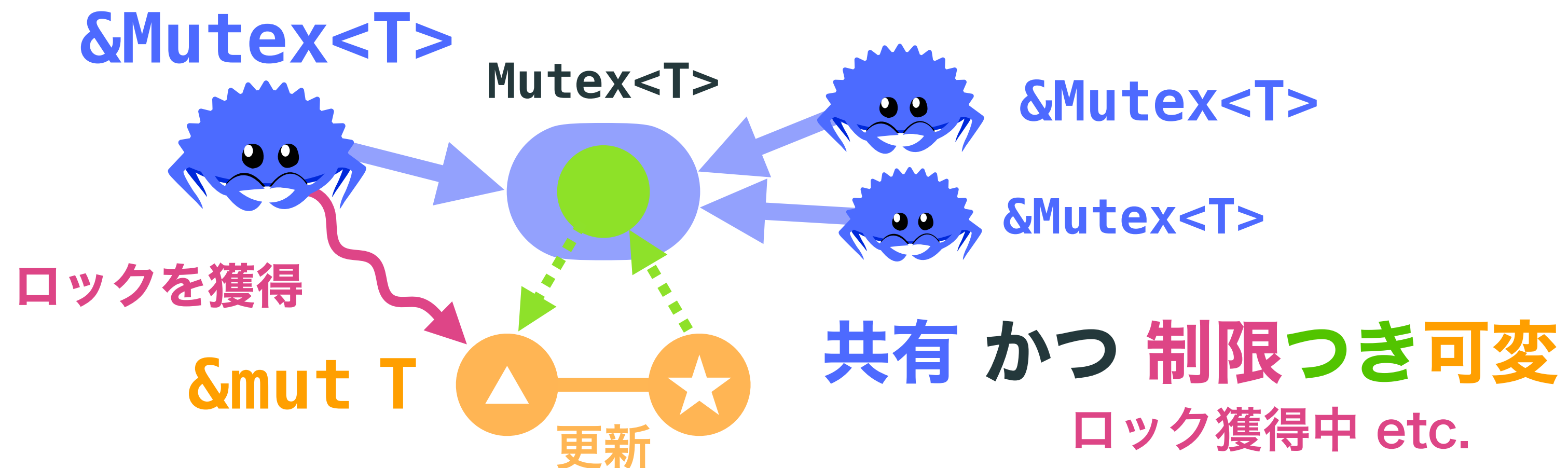
Rust の鍵#3 内部可変性で共有 and 可変

内部可変性 = 共有中に制限つきで許される可変性

原則 共有中はデータが不変 `&int` `&Vec<int>` `&String`

特定の型のみ内部可変性を持つ `&Mutex<T>` `&RefCell<T>`
`&RwLock<T>` `&Cell<T>`

例

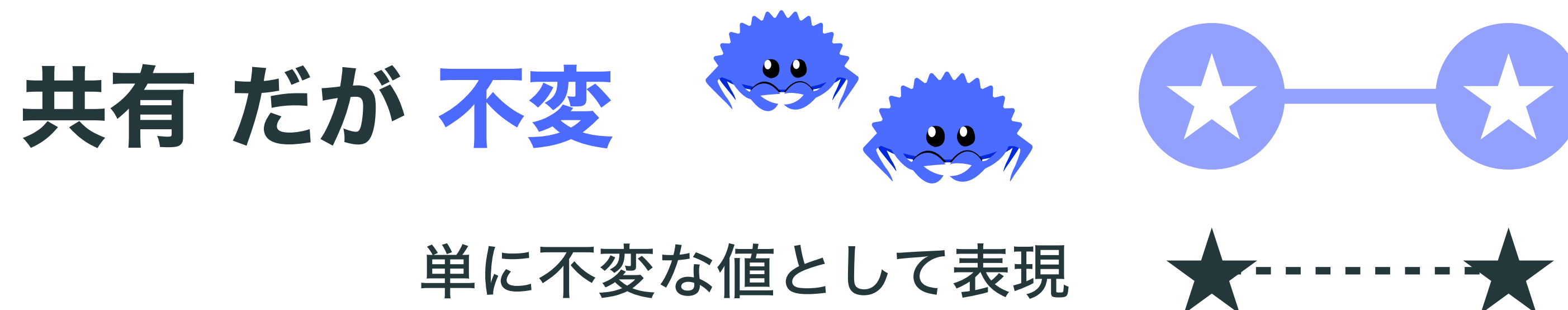


Rust 所有権型 まとめ

Rust の**所有権型**は
借用 & unsafe & 内部可変性
の力で**柔軟**な操作を実現

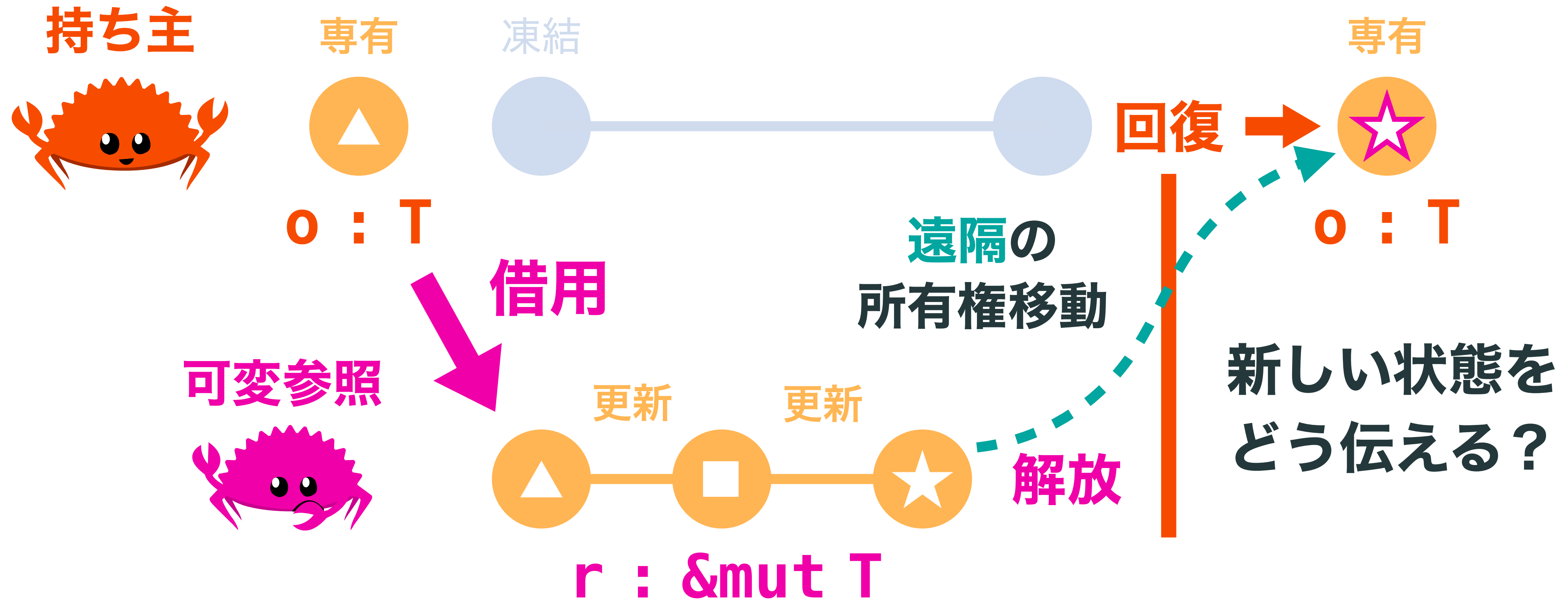
RustHorn が見つけた 預言のアイデア

所有権は世界を“関数型”にする



借用の難しさ

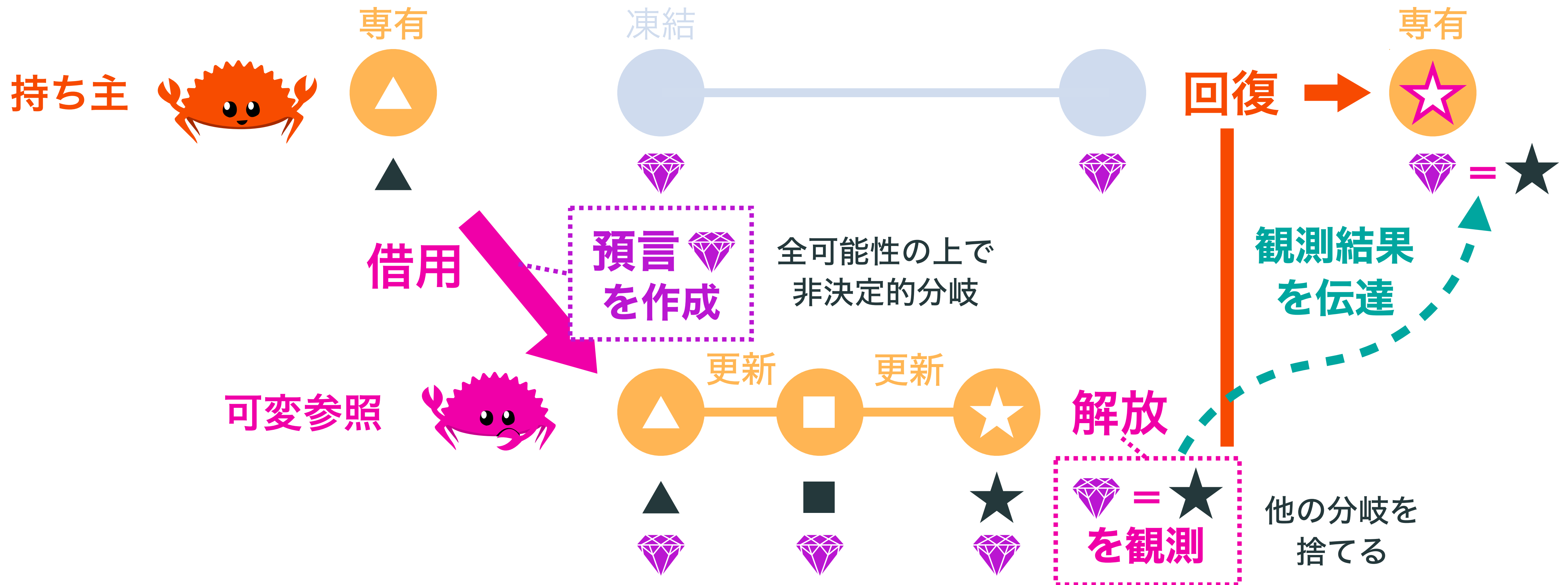
借用は遠隔の情報伝達を許すから難しい





借用も一般に関数型で表現可能

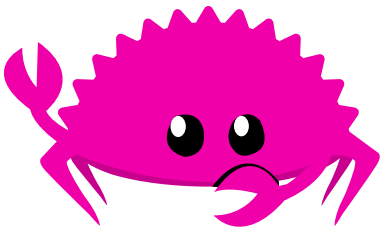
最終的な値を“**預言**” 



預言で与える借用操作の仕様


単純な更新

```
[ True ]
```



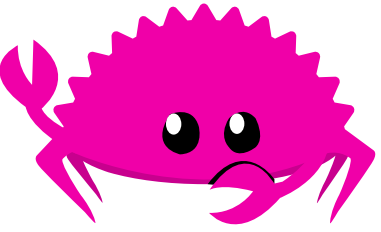
```
fn push(v : &mut Vec<T>, a : T)
```

```
[  $\overset{\text{預言}}{\wedge} v = *v ++ [a]$  ]
```

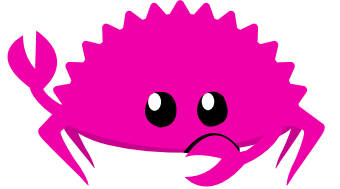


借用の分割


```
[ i < v.len ]
```






```
fn index_mut(v : &mut Vec<T>, i : uint) -> &mut T
```



```
[ *res = *v[i]  $\wedge$   $\overset{\text{大預言}}{\wedge} v = *v \{ i \leftarrow \overset{\text{小預言}}{\wedge} res \}$  ]
```

 get

  set 

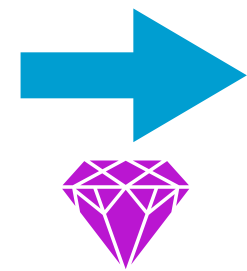
RustHorn と後継研究



全自動検証器 RustHorn

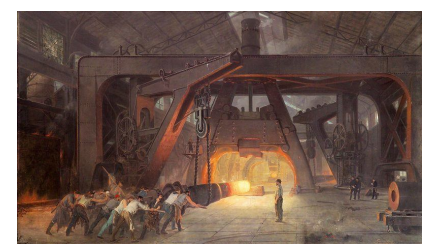
[松下+ ESOP'20/TOPLAS'21]

Rust



制約付きホーン節

一階述語論理 + 最小不動点

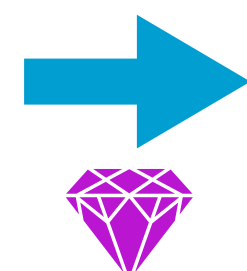


半自動検証器 Creusot

<https://github.com/creusot-rs/creusot>

[Denis+ ICFEM'22]

注釈付き Rust



Why3 

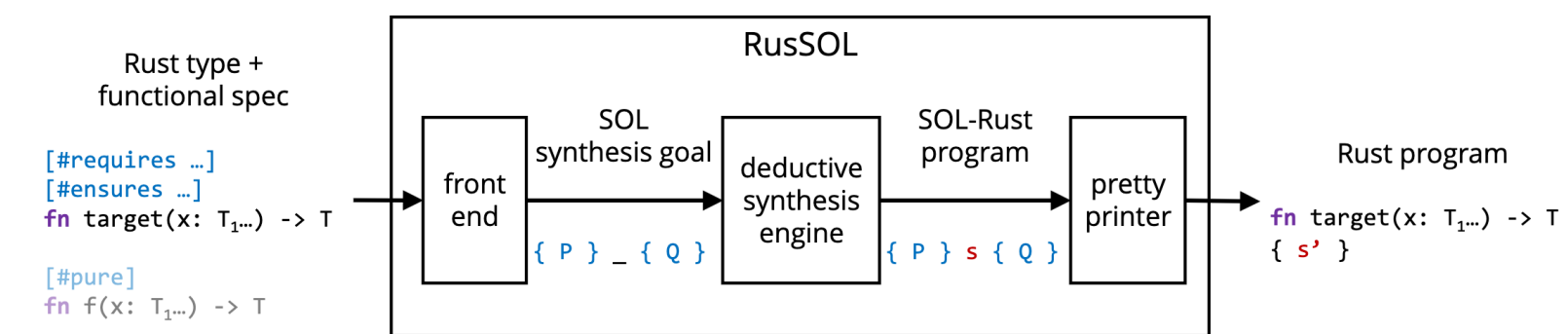
<https://gitlab.inria.fr/why3/why3>

応用例 Rust 製 SAT ソルバの検証

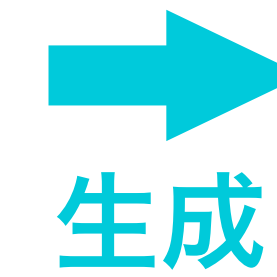
<https://github.com/sarsko/CreuSAT>

プログラム生成器 RusSQL

[Fiala+ PLDI'23]



関数的仕様




Rust



意味論的基礎 RustHornBelt

[松下+ PLDI'22 卓越論文賞]

預言  による表現の正しさを
分離論理 Iris 上の意味論で広く **証明**

Coq で機械化



預言の力で借用は
綺麗な関数型の世界で
表現できる

Rust から広がる

テスト・検証の現在と未来

安全性のためのテスト・検証

ソフトウェアの**安全性**は現実的な問題

バグの発見 — **厳密な証明** の両方が大事
テスト 検証

ファジング

有界モデル検査

実行時検証

演繹的検証

ストレステスト

コンコリックテスト

静的型検査

性質ベーステスト

記号実行

モデル検査

半自動検証

バグの発見 **厳密な証明**

Rust 向けのテストの現在

Rust インタプリタ Miri

<https://github.com/rust-lang/miri>

一種の**サニタイザ**の機能

unsafe Rust の**“浅い”**アクセス競合を検出

Stacked Borrows [Jung+ POPL'20] が理論的基礎

現実の多くの
バグを発見

- [Debug for vec_deque::Iter](#) accessing uninitialized memory
- [Vec::into_iter](#) doing an unaligned ZST read
- [From<&\[T\]> for Rc](#) creating a not sufficiently aligned reference
- [BTreeMap](#) creating a shared reference pointing to a too small allocation
- [Vec::append](#) creating a dangling reference
- [Futures](#) turning a shared reference into a mutable one
- [str](#) turning a shared reference into a mutable one
- [rand](#) performing unaligned reads
- The Unix allocator calling [posix_memalign](#) in an invalid way
- [getrandom](#) calling the [getrandom](#) syscall in an invalid way

課題 “**深い**”アクセス競合の検出

例 `&mut Vec<T>` とその要素への参照 `&mut T`

C/C++・LLVM 同様の
unsafe Rust のテスト

 **kani** 有界モデル検査

<https://model-checking.github.io/kani/>

Crux-mir 記号実行

<https://github.com/GaloisInc/crucible/>

Loom 並行プログラムのテスト

<https://github.com/tokio-rs/loom>

課題 Rust の**所有権**制約の検査

& **所有権**を活かした**効率化**

未来への提案#1 unsafe 境界の動的検査

unsafe → **safe** の境界を動的検査

所有権型の保証を実行時に厳密に証明 &
所有権型が既に付いている部分は検査をスキップ

例

```
fn push(v : &mut Vec<T>) {  
    v.reserve_for_push();  
    unsafe { write(v.ptr.offset(v.len), a); v.len += 1; }  
}
```

生ポインタ操作

所有権型 T の中身は
検査をスキップ

Vec の不変条件の
成立を動的検査

Rust 向けの検証の現在

safe Rust の検証

預言  ベース

 RustHorn [松下+ '20/'21]

 Creusot [Denis+ '22]

純粹関数化 可変借用の操作に制限

 Electrolysis [Ullrich '16]

 Aeneas [Son+ '22]

課題 内部可変性の上手な扱い

unsafe Rust の検証

 RustBelt [Jung+ POPL'18]

分離論理 Ir^* [Jung+ POPL'15] で

unsafe 実装のメモリ/スレッド安全性を検証

例 Mutex, RwLock, Rc, Arc, ...

拡張 弱メモリ [Dang+ POPL'20]
 預言  [松下+ '22]

制限 低レベルな規則 証明が煩雑

課題 unsafe Rust の高レベル検証

未来への提案#2 高度な**篩型**付き Rust

Rust の**所有権型** + 値に関する**述語**

可変借用は**預言**  で表現 **借用検査**は動的な条件を考慮

内部可変性の追跡には**幽霊状態**を利用

Nola [松下 博論'24] が**意味論**的基礎となる

例

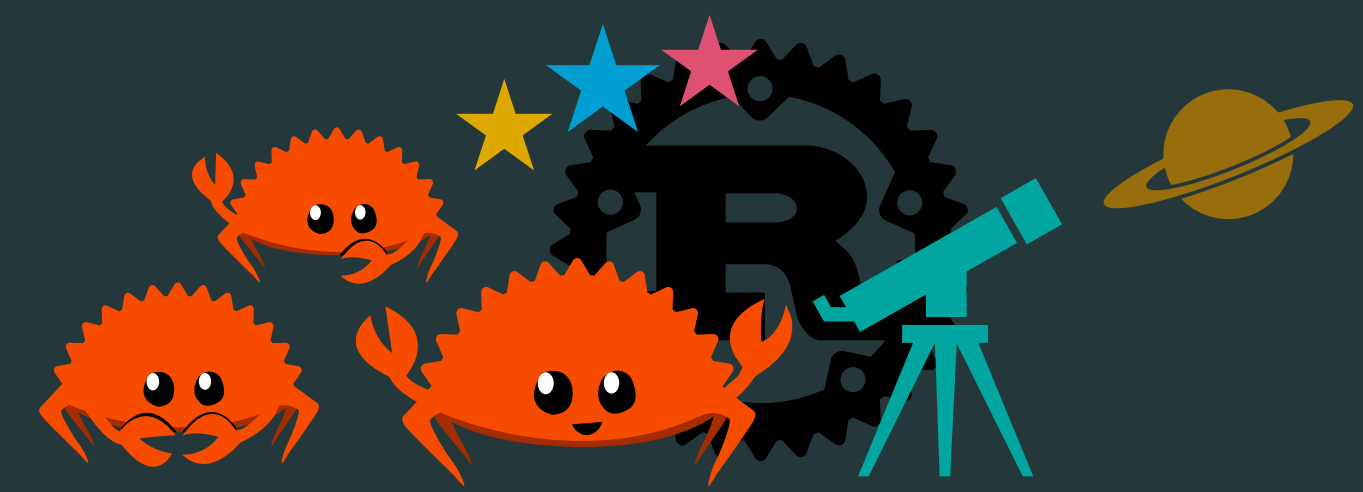
```
struct Vec<T> {  
    len : uint,    cap : uint,  
    ptr : Box<[T; len, cap]>  
}  
                動的な値に依存
```

```
fn index_mut(v : &mut Vec<T>, i : uint @  
    i < v*.len) -> res : &mut T @  
    *res = v*.ptr[i] &&                動的な条件  
    v^.len = v*.len && v^.cap = v*.cap &&  
    v^.ptr = v*.ptr{i <- ^res}  
{ &mut v.ptr.offset(i) } 預言の自動推論
```

テスト・検証の現在と**未来** まとめ

所有権を活かした
テスト・**検証**はまだまだ
探究の余地がある

最後に



Rust は
所有権型を実用化 &
現実の開発を革新

預言の力で借用は
綺麗な関数型の世界で
表現できる

Rust の所有権型は
借用 & unsafe & 内部可変性
の力で柔軟な操作を実現

所有権を活かした
テスト・検証はまだまだ
探究の余地がある

Rust から広がる輝く未来を
切り開いていこう



Rust は人類を
ソフトウェア開発の
新時代へと導く

