JavaCardにおける形式的技法適用例

永宮 悠大

群馬大学大学院工学研究科情報工学専攻 藤田研究室

Email : nagamiya@comp.cs.gunma-u.ac.jp

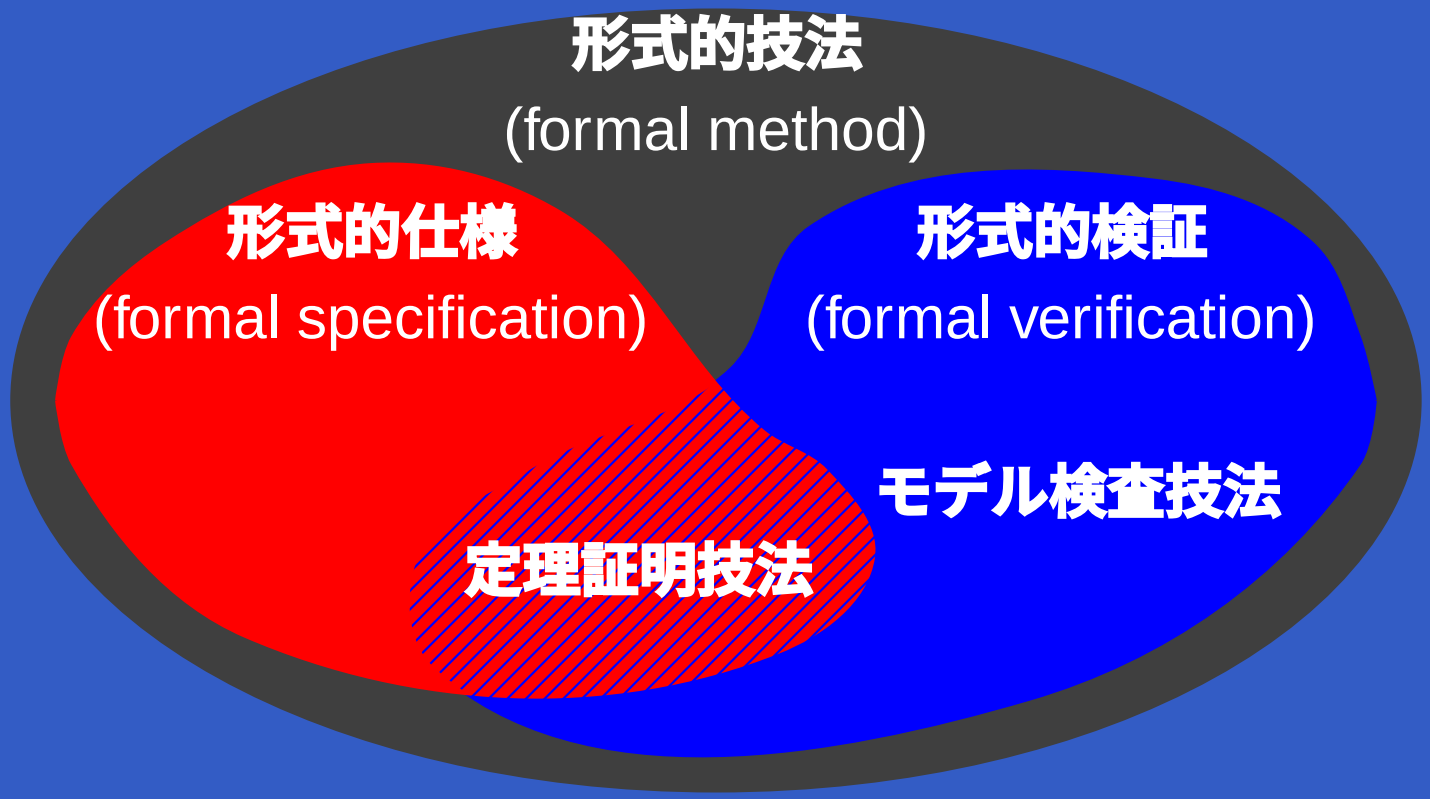
概要

1. 形式的技法とは?
2. なぜ形式的技法が必要か?
3. Java の形式化と検証
4. JavaCard の形式化と検証
5. まとめと今後の課題

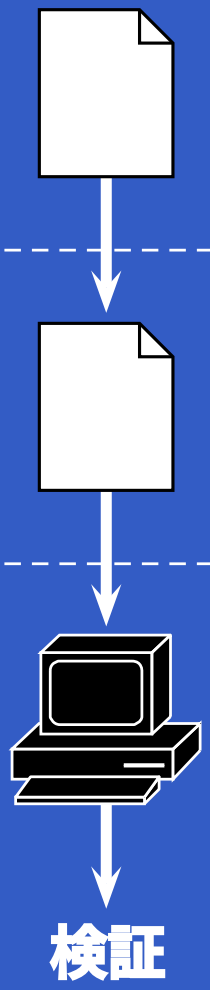
1. 形式的技法とは?

形式的技法 (formal method):

論理学を基盤としたシステムの設計・検証技法



形式的仕様記述



自然言語で記述した設計仕様

- 曖昧さが生じる

論理式で記述した仕様

- システムについての性質を論理的な枠組で議論できる
- その性質を証明することができる

形式化した仕様

- 証明がコンピュータで処理できる形になる

検証

定理証明技法のフレームワーク

- 設計仕様 R を「同値な」形式的仕様 ϕ_R に変換
- ϕ_R を実装するプログラム P を記述
- $P \vdash \phi_R$ を証明

モデル検査技法のフレームワーク

- システムを状態遷移モデル $\mathcal{M}$ にモデル化
- 検証したい性質 ϕ を記述
- $\mathcal{M} \models \phi$ を証明

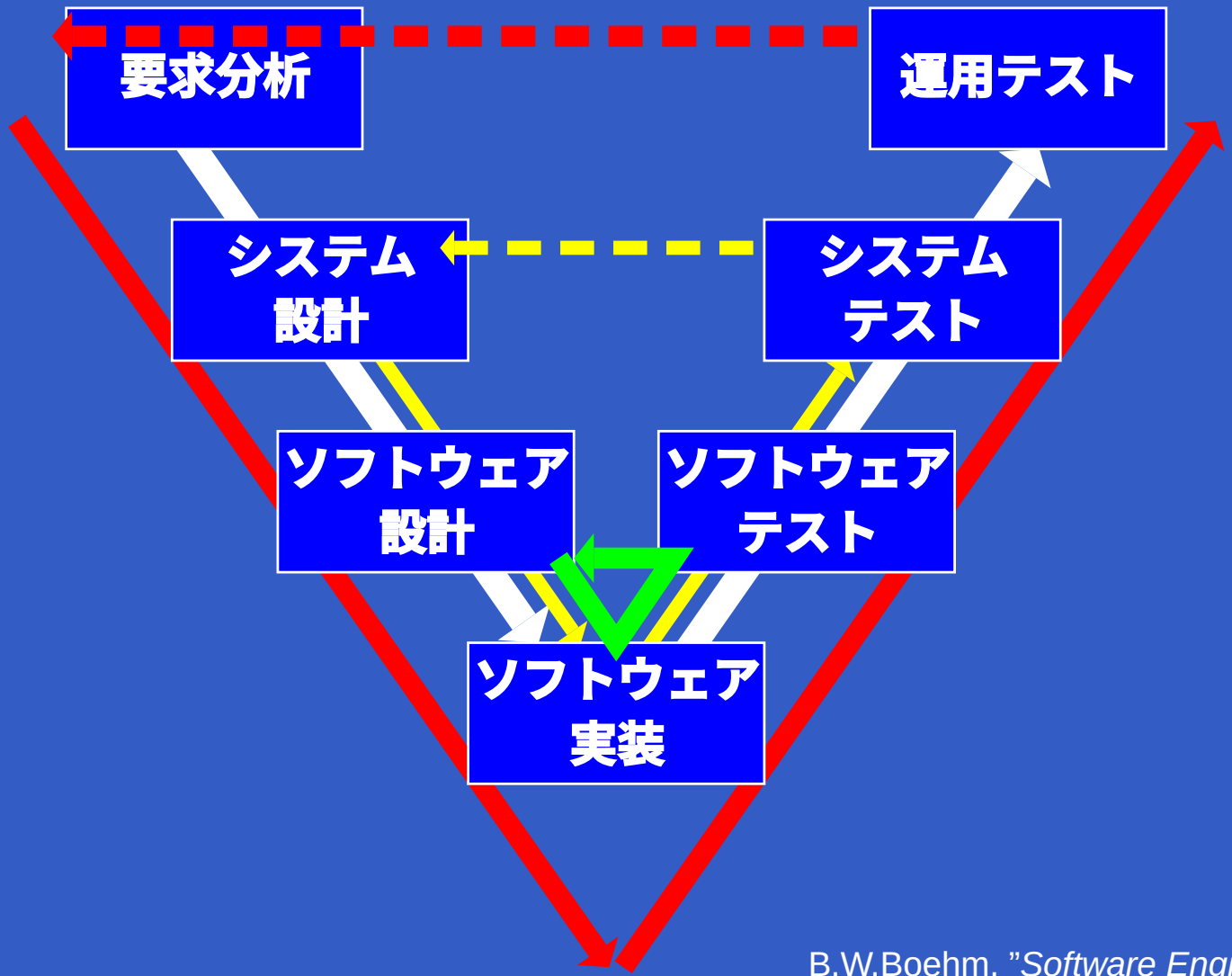
定理証明技法 vs モデル検査技法

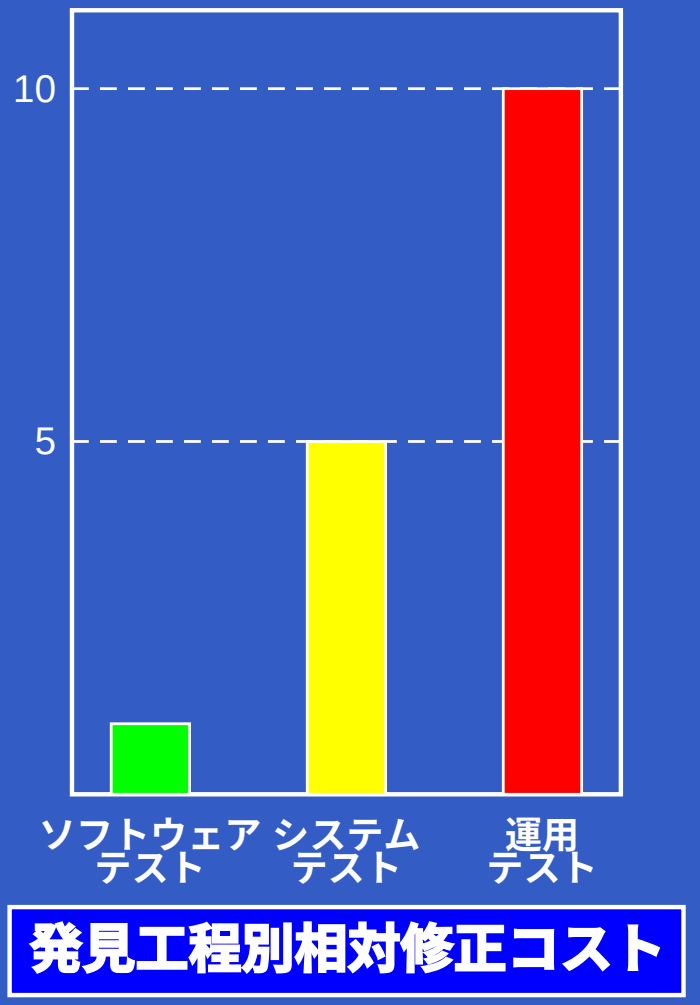
	定理証明技法	モデル検査技法
検証方法	論理的証明	全数検査
用意するもの	ソースコード 形式的仕様	状態遷移モデル 検証したい性質
自動化のレベル	半自動	全自動
誤りの原因究明	×	○ (反例が出力)
対象	逐次的 停止する	並列的 停止しない
適用できる工程	上流	上流
仕様品質の向上	○	×

2. なぜ形式的技法が必要か?

- 増大するリコール問題
  - 携帯電話の回収騒動 (2001 年)
    - SO502iWM　3 万台回収
    - SO503i　42 万台回収
    - P503i　23 万台回収
  - Pentium CPU の FDIV エラー (1994 年)
    - 浮動小数点除算の結果が正常と異なる
    - 対象 CPU の無償交換
- 顕在化する手戻りの発生

手戻りとコストの関係





B.W.Boehm, ”*Software Engineering*”, IEEE Trans. on Comp, 1976

機能安全に関する国際規格IEC61508

安全とは:

- **本質安全**:
  ハザード (危険の原因) を取り除く措置で得られる安全
- **機能安全**:
  ハザードの存在を認めリスクを軽減する措置で得られる安全

対象:

- **人命が関わったり人が負傷する可能性のあるシステム**
- **障害によって社会に多大な損害が出るシステム**

認証機関:

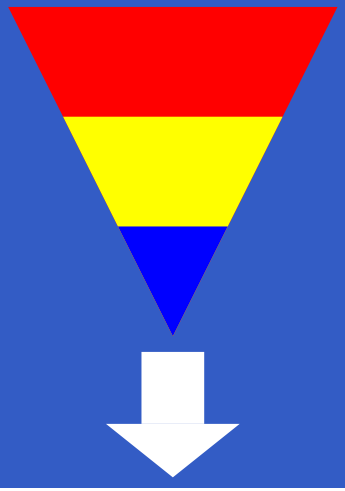
- Sira(**イギリス**)，TÜV(**ドイツ**)

機能安全の考え方

被害の大きさ

発生確率

受容度



受容されない領域

条件付き受容領域

受容できる領域

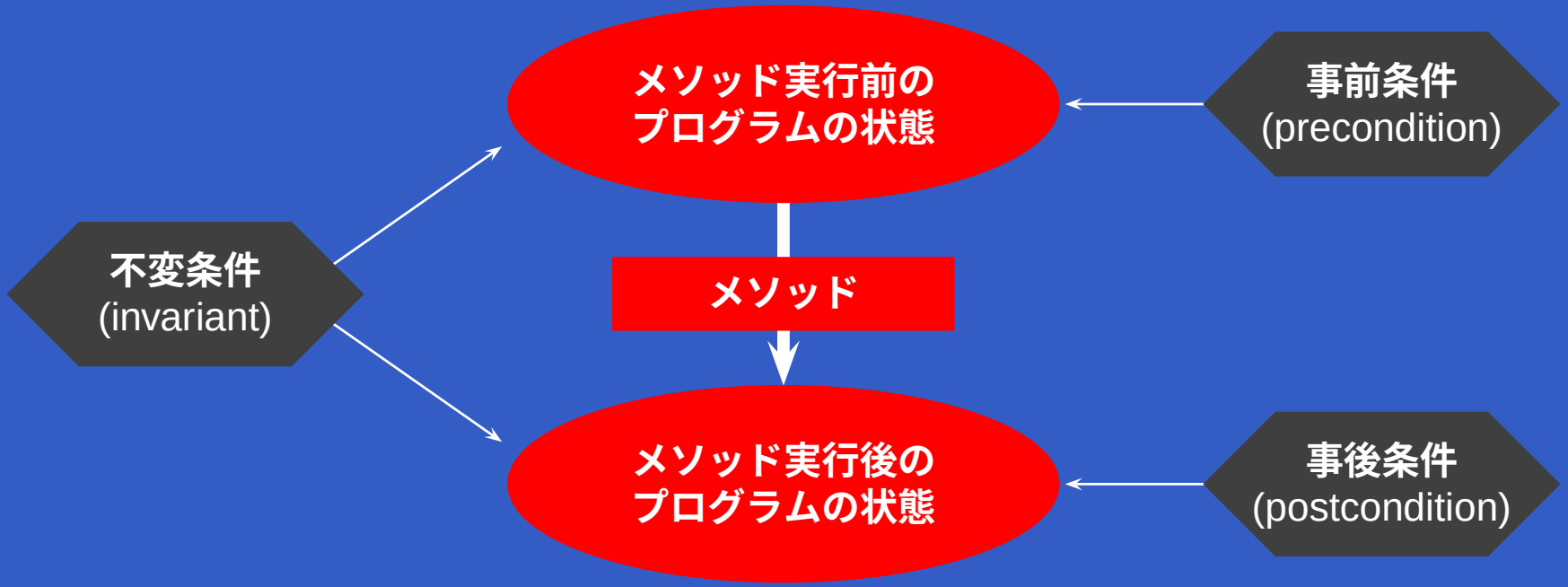
	SIL1	SIL2	SIL3	SIL4
アサーション・プログラミング	R	R	R	HR
構造化技法	HR	HR	HR	HR
準形式的技法	R	R	HR	HR
形式的技法	-	R	R	HR

R: 推奨 HR: 強く推奨 NR: 推奨しない

3. Javaの形式化と検証

- **形式的仕様記述言語**
  - JML(Java Modeling Language)
- **定理証明技法**
  - Krakatoa + Coq，LOOP + PVS，
    Bali + Isabelle/HOL，・・・
- **ソースコードの静的検査**
  - ESC/Java，ChAsE，Calvin，・・・
- **型検査**
  - JVM **のバイトコード検証**

Java Modeling Language

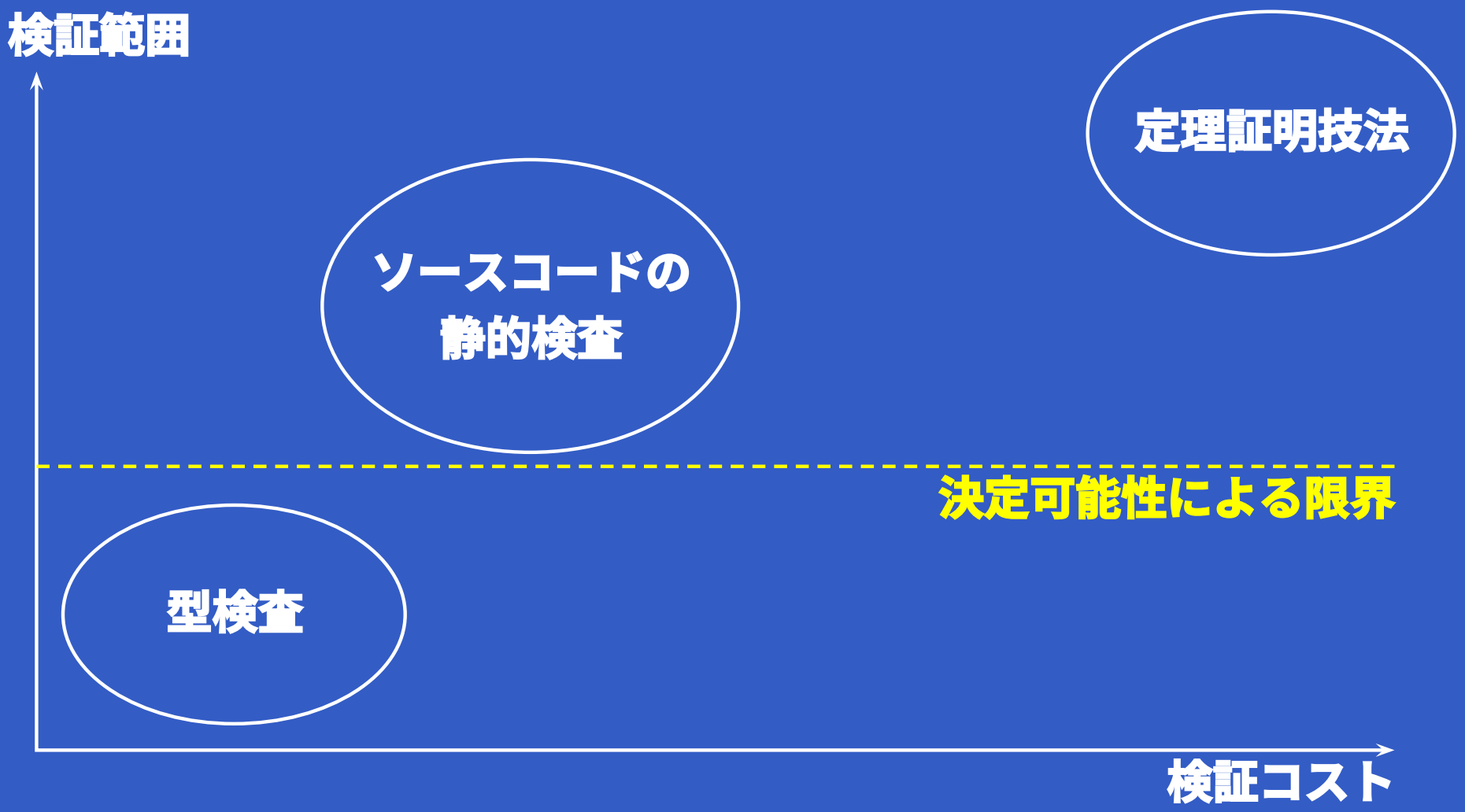



```
/*@  public normal_behavior
  @  requires x >= 0;
  @  ensures  \result >= 0 && \result * \reslt <= x
  @           && x < (\result + 1) * (\result + 1);
  @*/
public static int sqrt(int x){}
```

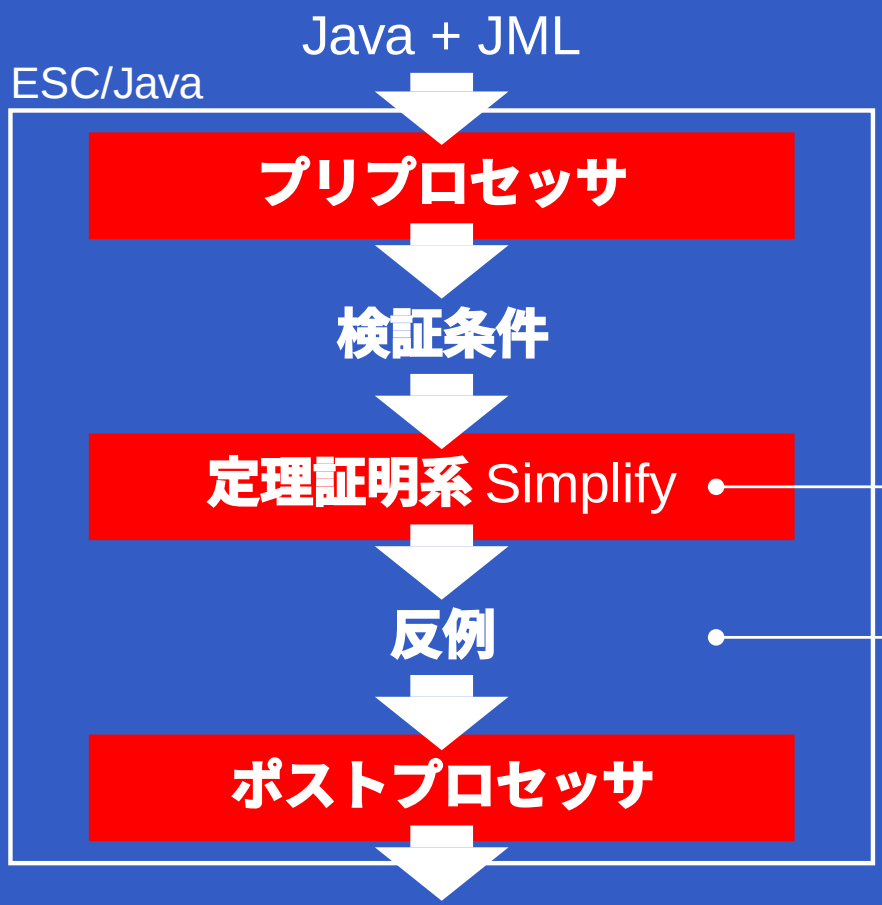
事前条件

事後条件

Java の検証の種類と性質

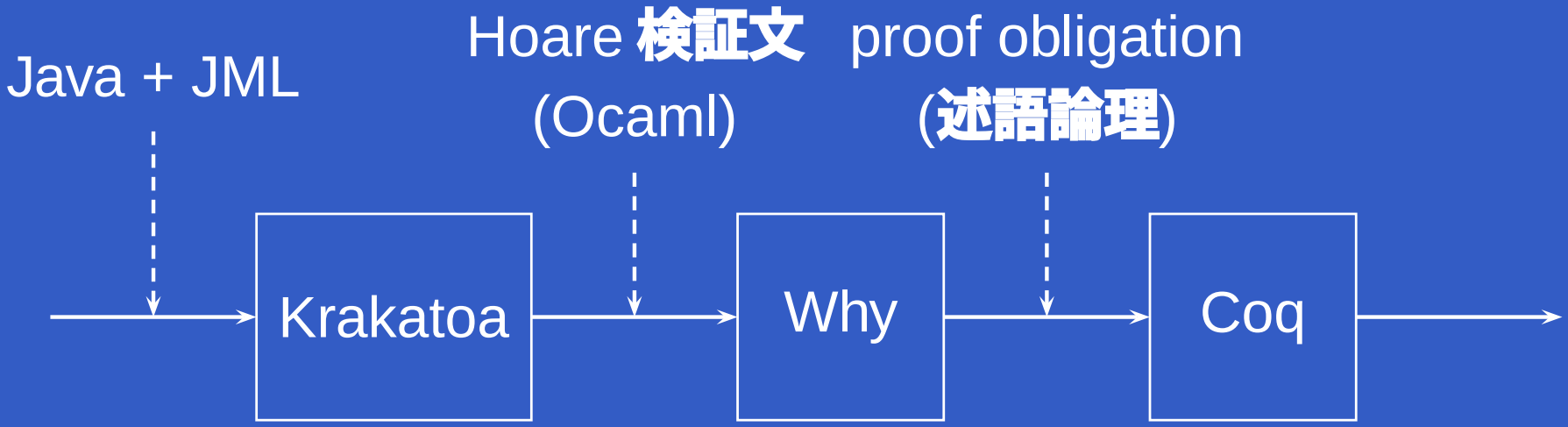


ESC/Java による誤りの検出



11: Warning: Possible null dereference (Null)
14: Warning: Postcondition possibly not established (Post)

Krakatoa による検証



- Krakatoa: Java/JML **ソース** $\mapsto$ Hoare **検証文**
- Why: Hoare **検証文** $\mapsto_{\text{Hoare}}$ proof obligation
- Coq: proof obligation **を対話的に証明**

4. JavaCard の形式化と検証

JavaCard:

- SunMicrosystems 社が開発した Java 実行環境を持つ IC カード
- Java アプリケーションを複数個書き込むことができる

JavaCard の利用例:

- 電子マネー，クレジットカード，身分証，· · ·

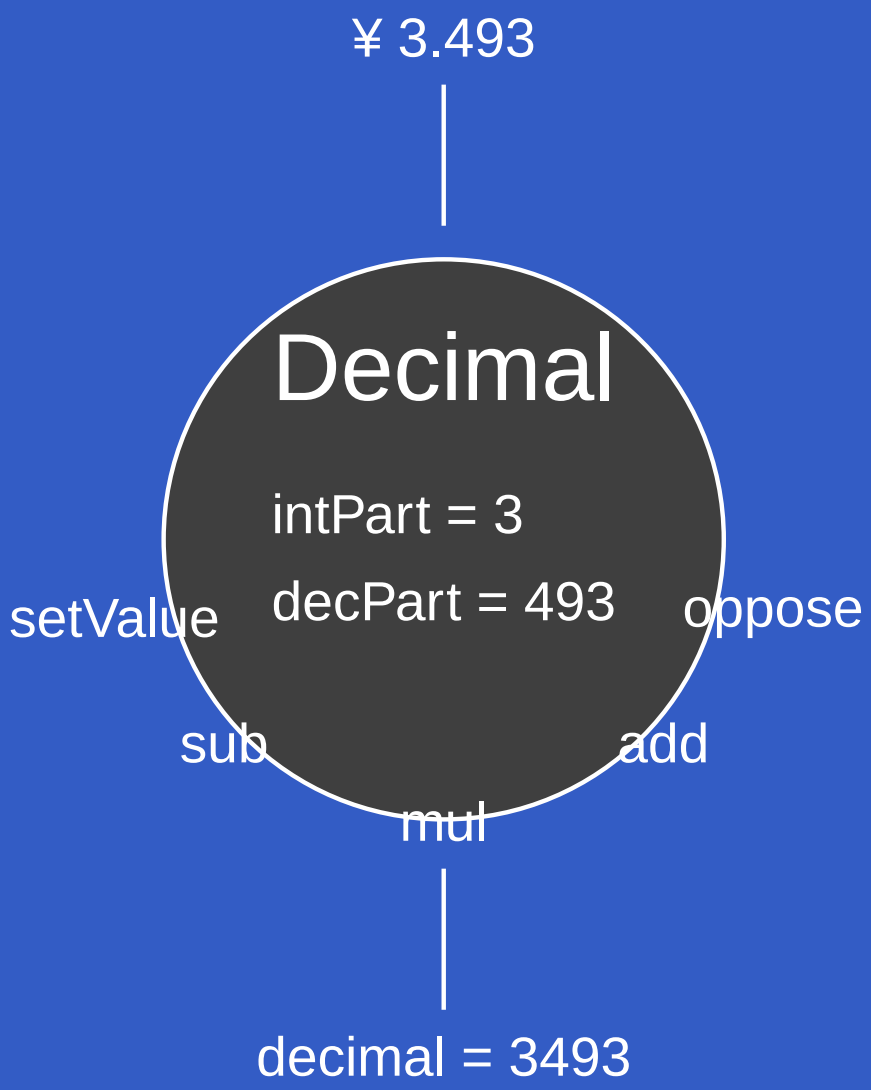
形式的技法の必要性:

- 高い信頼性が要求される
- JCVM はバイトコード検証機能を持たない

Gemplusの電子マネー

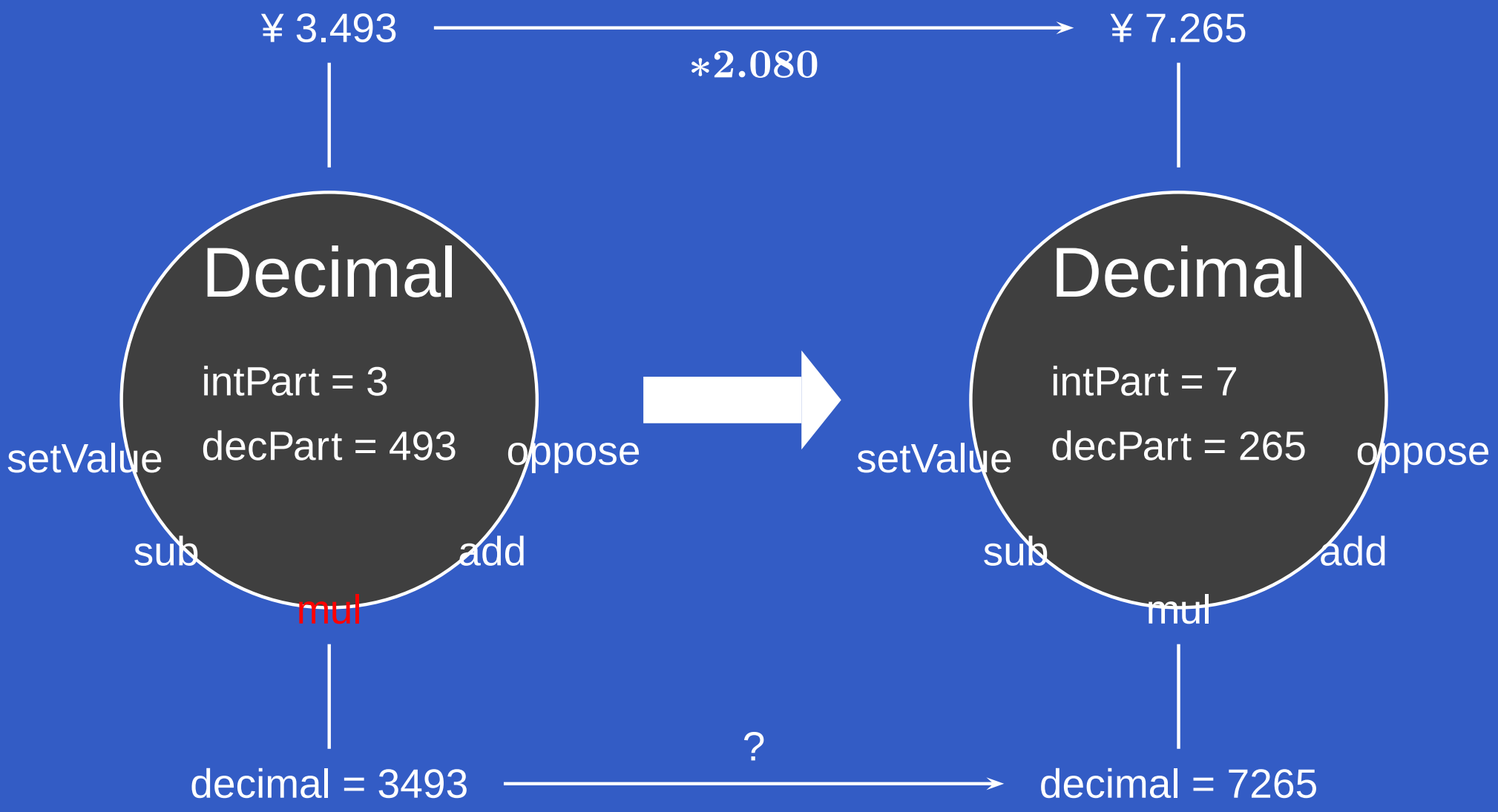
- JavaCardの検証の現実的な例として開発されたアプリケーション
- 入金，出金，外貨両替
- アプレット間通信
- 本人認証(IDとパスワード)
- ロイヤリティ・ポイント

Decimalクラスによる残高の表現



- **浮動小数点型は存在しない**
- intPart **と** decPart **は** short **型の変数**
- decPart **の有効桁数は** 3 **桁**
- `0 <= decPart && decPart < PRECISION`
- PRECISION **は** short **型の定数値** 1000
- `decimal <- intPart * PRECISION + decPart`

mul メソッドの実装と仕様を考える



浮動小数点を使わない少数の掛け算

$$a.b * e.f = a * e + a * 0.f + 0.b * e + 0.b * 0.f$$

- a と e は intPart に対応，b と f は decPart に対応
- 始めの三つの掛け算は add メソッドを用いて計算

```
for (short i = (short)0; i < e; i++) {
    add(a,b);
}
```

$a.b$ を e 回加える

```
for (short i = (short)0; i < a; i++) {
    add(0,f);
}
```

$0.b$ を a 回加える

- $0.b * 0.f$ (rest-part) はどうやって計算する?

rest-partの計算

- b と f は1000未満なので $0.b * 0.f = (b * f)/10^6$

  $0.999 * 0.999 = 0.998001$

  $= 998001/10^6$

- decPartの有効桁数は3桁なので $\lfloor (b * f)/10^3 \rfloor$ を計算すればよい

  $\lfloor 998001/10^3 \rfloor = \lfloor 998.001 \rfloor$

  $= 998$

- 計算結果をdecPartに格納

rest-partの実装における問題点

```
add(0, ((b * f)/1000));
```

- b と f は short 型でも b * f の計算結果が short 型の範囲を越える可能性がある

```
add(0, ((b/1000) * (f/1000)));
```

- Java では (b * f)/1000 と (b/1000) * (f/1000) が等しくならない可能性がある (丸め誤差)
  例. (347/10) * 10 == 340

⇒ B.Jacobs らが解決策を考案

Jacobsのアルゴリズム

$$
\begin{aligned}
& (a * b)/1000 \\
= & ((a_1\ a_2\ a_3) * b)/1000 \\
= & \begin{pmatrix} & 100 * a_1 * b \\ + & 10 * a_2 * b \\ + & a_3 * b \end{pmatrix} /1000 \\
= & \begin{pmatrix} & (c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & 0 & 0) \\ + & & (c'_1 & c'_2 & c'_3 & c'_4 & 0) \\ + & & & (c''_1 & c''_2 & c''_3 & c''_4) \end{pmatrix} /1000 \\
= & \left(\begin{pmatrix} & (c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 & 0) \\ + & & (c'_1 & c'_2 & 0 & 0 & 0) \\ + & & & (c''_1 & 0 & 0 & 0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} & (c_4 & 0 & 0) \\ + & (c'_3 & c'_4 & 0) \\ + & (c''_2 & c''_1 & c''_4) \end{pmatrix} \right) /1000 \\
= & \begin{pmatrix} & (c_1 & c_2 & c_3) \\ + & (& c'_1 & c'_2) \\ + & (& & c''_1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} & (c_4 & 0 & 0) \\ + & (c'_3 & c'_4 & 0) \\ + & (c''_2 & c''_1 & c''_4) \end{pmatrix} /1000 \\
= & \begin{pmatrix} & d_1 \\ + & d_2 \\ + & d_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} & e_1 \\ + & e_2 \\ + & e_3 \end{pmatrix} /1000
\end{aligned}
$$

mul メソッドの実装

```
private void mul(short e, short f) {
    short a = intPart;
    short b = decPart;

    intPart = (short) 0;
    decPart = (short) 0;

    for (short i = (short) 0; i < e; i++) {
        add(a, b);
    }
```

$a * b + 0.b * e$

```
    for (short i = (short) 0; i < a; i++) {
        add((short) 0, f);
    }
```

$a * 0.f$

```
    short a1 = (short) (b / 100);
    short a2 = (short) ((b - a1 * 100) / 10);
    short a3 = (short) (b - a1 * 100 - a2 * 10);

    short d1 = (short) ((a1 * f) / 10);
    short d2 = (short) ((a2 * f) / 100);
    short d3 = (short) ((a3 * f) / 1000);
    short gross = (short) (d1 + d2 + d3);

    short e1 = (short) ((a1 * f - d1 * 10) * 100);
    short e2 = (short) ((a2 * f - d2 * 100) * 10);
    short e3 = (short) (a3 * f - d3 * 1000);
    short rest = (short) (e1 + e2 + e3);

    add((short) 0, (short) (gross + (rest / 1000)));
}
```

$0.b * 0.f$

mul メソッドの仕様

```
/*@  requires 0 <= f && f < PRECISION &&
  @           0 <= e && e <= MAX_DECIMAL_NUMBER &&
  @           (e+1) * (intPart+1) < MAX_DECIMAL_NUMBER;
  @  modifies decimal
  @  ensures  decimal =
  @            e * \old(intPart) * PRECISION
  @            +
  @            \old(intPart) * f
  @            +
  @            e * \old(decPart)
  @            +
  @            (f * \old(decPart)) / PRECISION;
  @  signals(Exception e) false;
  @*/
```

検証結果

ESC/Java:

- Decimal クラス全体を検証
- いくつかの事後条件で Simplify エラーによる証明失敗

Krakatoa:

- mul メソッドを検証
- いくつかの proof obligaiton が証明できなかった
  - LOOP では証明されている [Jacobs, 2004]

5. まとめと今後の課題

まとめ:

- ESC/Java と Krakatoa で JavaCard の具体例を検証
- 形式的技法は安全性・信頼性を重視するシステムで必要

今後の課題:

- Krakatoa による mul メソッドの検証
- 定理証明系によるフィードバック
- 抽象化のレベルと信頼度のレベルの対応付け
  - ESC/Java と Krakatoa の中間?

Thank You!