7 ソフトウェア工学

Software Engineering

モデル検査

MODEL CHECKING

1　モデル検査の概要

並行システム：相互排他，デッドロック，スタベーションなどの現象

➡ 入出力関係に着目した「停止性＋部分正当性」のみでは正当性を言えない

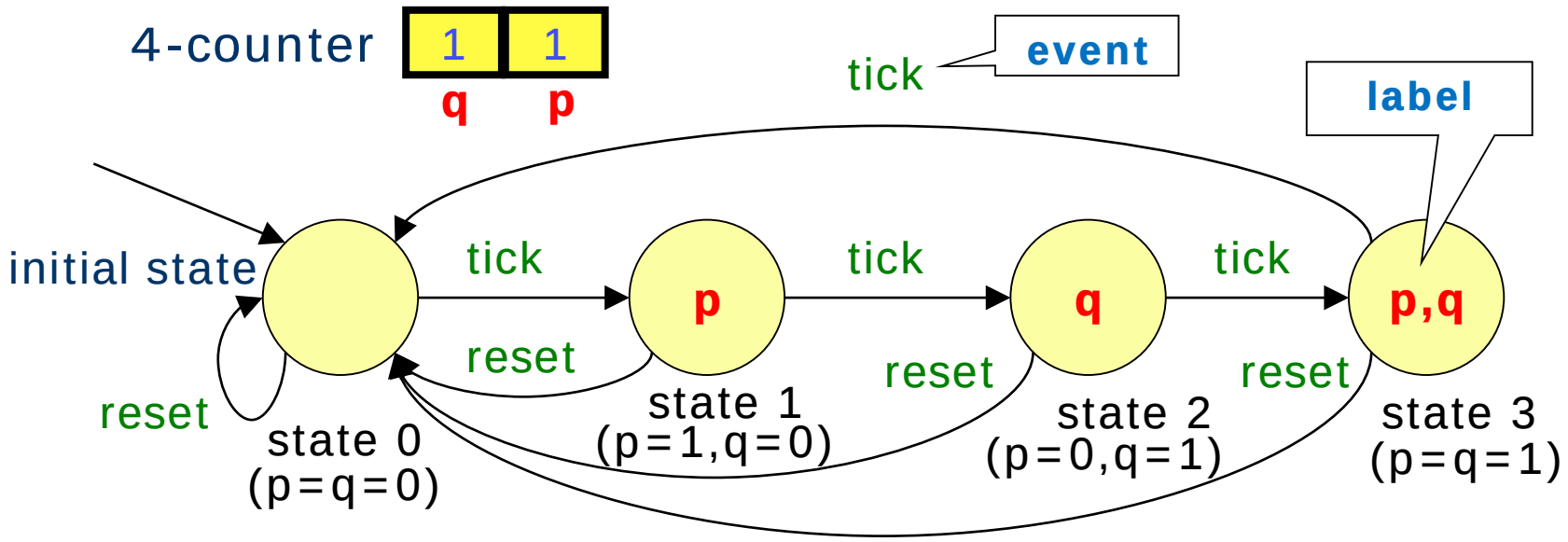
➡ 振る舞い（途中の状態遷移）の考慮の必要性
behaviors

➡ モデル検査：有限状態遷移系の振る舞いの検証を自動で行う技術
model checking

モデル　＝　有限状態遷移系：状態数が有限個の状態遷移系
finite state transition system

検　査　＝　検　証：システムが期待される性質(仕様)を満たすことの確認
verification　　properties (specifications)

モデル：状態遷移系



状態遷移系は次の4項目からなる.

- 状態（ノード）の有限集合
- 初期状態の集合（ふつうは1個の初期状態）
- 遷移関係（イベントに対応する有向辺の集合．イベントが状態遷移を引き起こす）
- ラベル（各状態で真(=1)となる原子命題の集合．これにより状態を区別）

状態数は数百万くらいはOK

検証できる主な性質

モデル検査では，状態遷移系の振る舞いについて，主につぎの2つの性質を検証する

- 安全性 (safety)

「悪いことは決して起こらない」

例：このエレベータは，ドアが開いたまま昇降することは決してない

- 活性(liveness)

「良いことはいつか必ず起こる」

例：緊急停止ボタンを押したら，いつか必ず停止する

「0.5秒以内に」というようなリアルタイム性を調べられることも

なにが「悪いこと」で，なにが「良いこと」かは，応用目的にあわせて設計者が決定

モデル検査の実施手順

モデル検査はつぎの3ステップで実施する

(1) モデリング：システムを状態遷移系として表現

(2) 性質の記述：検査したい性質を具体的に表現

(3) モデル検査：モデル検査器で自動検査

(1) モデリング

- システムの振る舞いを表すモデル（状態遷移系）を記述する.
- 記述には一般に，モデル記述言語を用いる.
- モデル記述言語の分類
  - プロセス代数に基づく数理的な言語
    process algebra
  - プログラミング言語風の言語

(2) 性質の記述

- システムが満たすべき（検査したい）性質を具体的に記述する.
  property
- 記述には一般的に，時間の概念を扱う時相論理を用いる.
  temporal logic
- 時相論理として，LTLとCTLがよく知られている.

  LTL (Linear Temporal Logic)　　CTL (Computation Tree Logic)

【LTL の例】 **G**(Req → **F** Ack)

Reqが真になると，その後いつか必ずAckが真になる

It is **globally (always)** true that
　　if Req is true then in **future** Ack will be true.

(3) モデル検査

モデルが，与えられた性質を満たすかどうか，自動的に検査する．

モデル検査器
model checker

- 性質が成り立つ場合：検査終了
- 性質が成り立たない場合：反例（エラートレース）を出力
  counterexample (error trace)

モデル検査アルゴリズムの基本原理

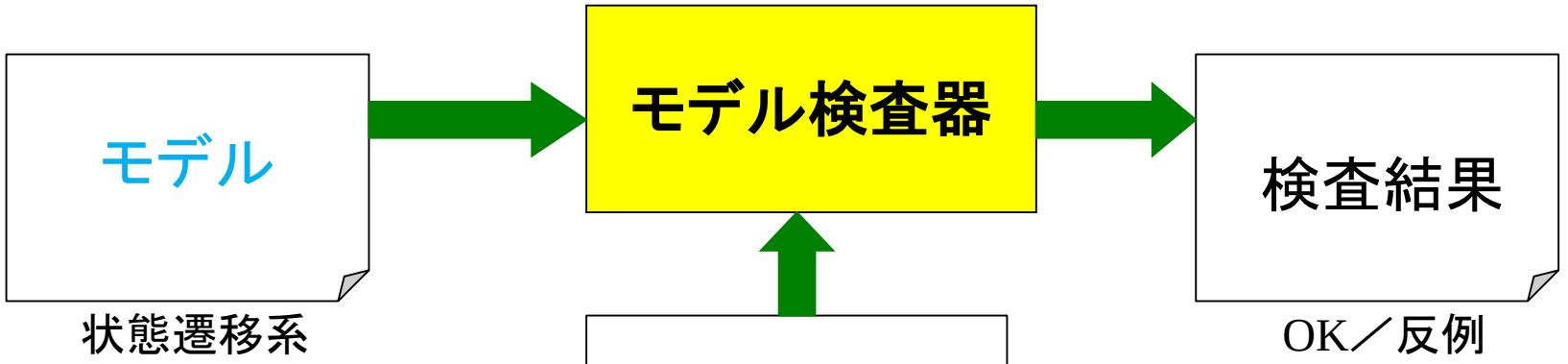
➡ すべての入力とすべての状態遷移列について
振る舞いを網羅的に検査

モデル検査器の例

- SMV, NuSMV
  - カーネギーメロン大学
  - IEEE Futurebus+ standardのバグ発見
- SPIN
  - ベル研究所
  - ACM Software System Award受賞
- LTSA
  - ロンドン王立大学
  - FSP言語(プロセス代数), アニメーション
- Java PathFinder (JPF)
  - NASA
  - Javaのバイトコードの検査

きょうの授業では
これを紹介

モデル検査器の概要



【モデル記述言語】

•プロセス代数

•プログラミング言語風言語

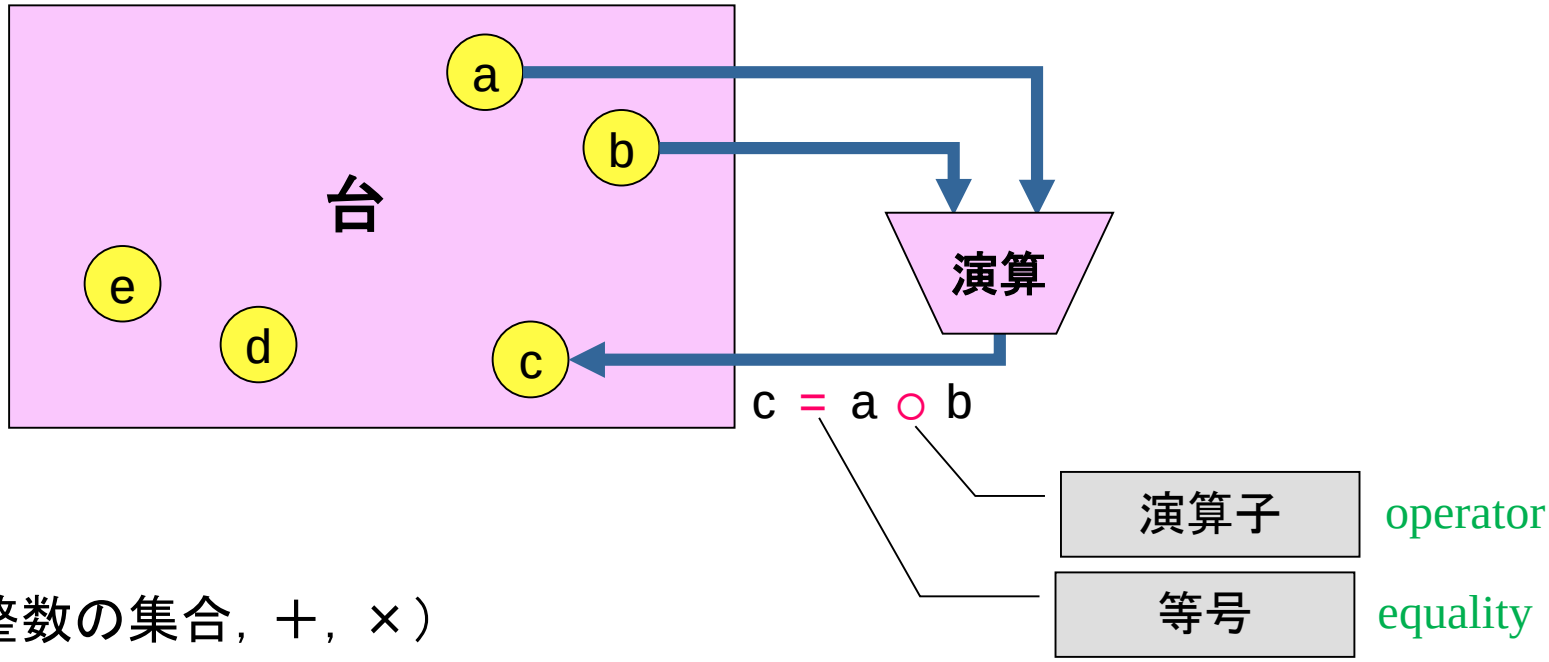
【性質記述言語】

•時相論理

２　逐次プロセスのモデリング

代数：　要素の集合（台）およびその上での演算の集まりからなる計算系

algebra　　universe　　operation

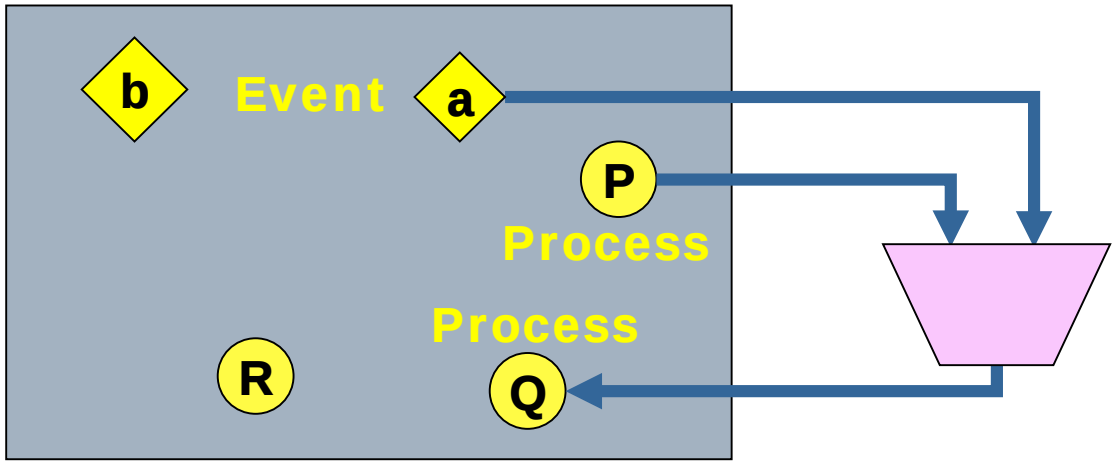


例：（整数の集合，＋，×）

process algebra

プロセス代数

プロセス代数：プロセスやイベント等の集合を台とし，
プロセス合成などの演算を定義した代数



演算子の例
→ ：アクション接頭辞
| ：選択
|| ：並列合成

Q = a → P

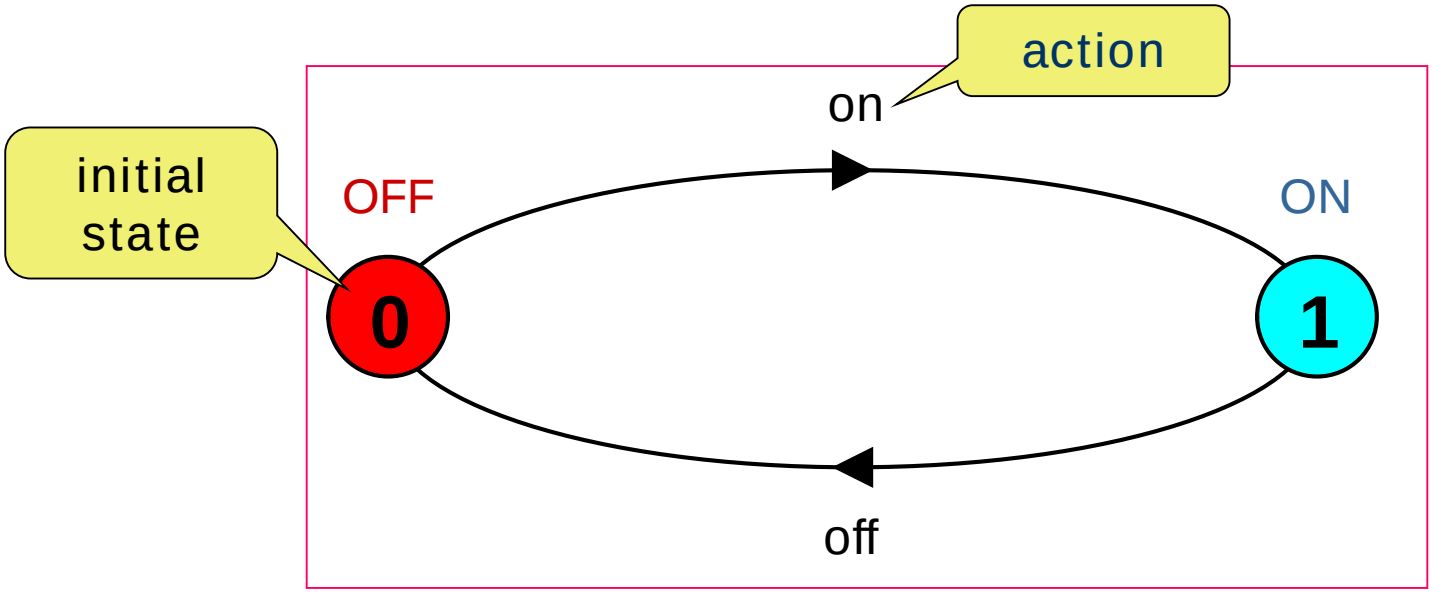
action prefix

アクション接頭辞

(a → P)

最初にアクション **a** を実行し，つぎにプロセス **P**と同じ振る舞いをするプロセス.

スイッチの例(1)



プロセス ＝ 実行可能なアクションの列（トレース）の集合

OFF = {on→off→on→off→on→off→ ..... }

ON = {off→on→off→on→off→on→ ..... }

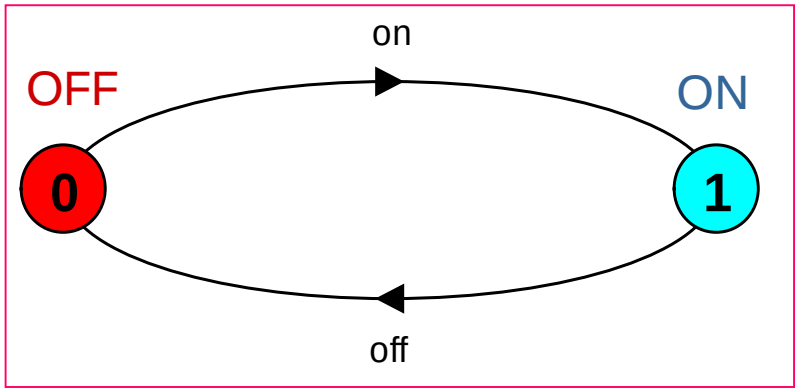
(FSP: Finite State Processes)

スイッチの例(2) FSPによる記述

```
SWITCH = OFF,
OFF    = (on → ON),
ON     = (off → OFF).
```

プロセス名（大文字）

アクション名（小文字）



代入によってより簡潔な表現を得る

```
SWITCH = OFF,
OFF    = (on →(off → OFF)).
```

```
SWITCH = (on → off → SWITCH).
```

（→ は右結合演算子）

choice

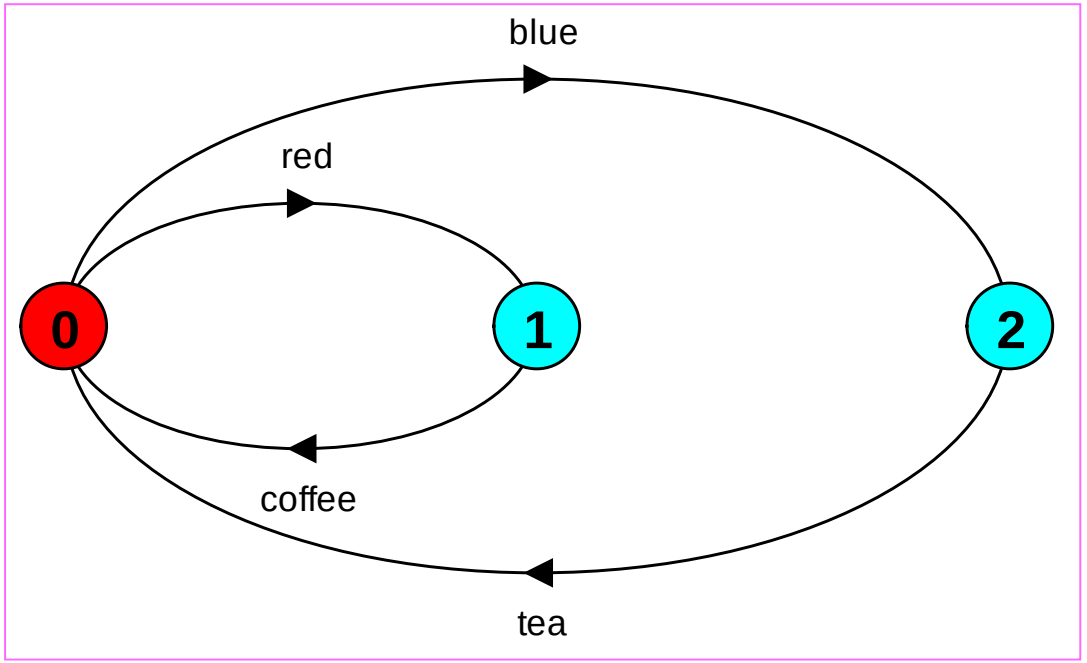
選択

(a → P | b → Q)

最初にアクション **a** ,**b** のいずれかを実行する.
そのアクションが **a** ならつぎにプロセス **P** を実行し,
b ならつぎにプロセス **Q** を実行するプロセス.

自動販売機の例

ボタンの色で飲み物を指定




```
DRINKS = ( red → coffee → DRINKS
         | blue → tea → DRINKS
         ).
```

３　並行プロセスのモデリング

プロセスの並列合成

(P||Q)

プロセス P と Q の並行実行を表すプロセス.

交換則:　(P || Q) = (Q || P)

結合則:　(P ||(Q || R)) = ((P || Q)|| R)
= (P || Q || R).

action interleaving

アクションのインタリーブ

プロセス間で共有されないアクションはインタリーブされる

かゆいところをかく

会話する

```
ITCH     = (scratch → STOP).
CONVERSE = (think → talk → STOP).

|| CONVERSE_ITCH = (ITCH || CONVERSE).
```

共有アクション無し

並列合成は || で書き始める

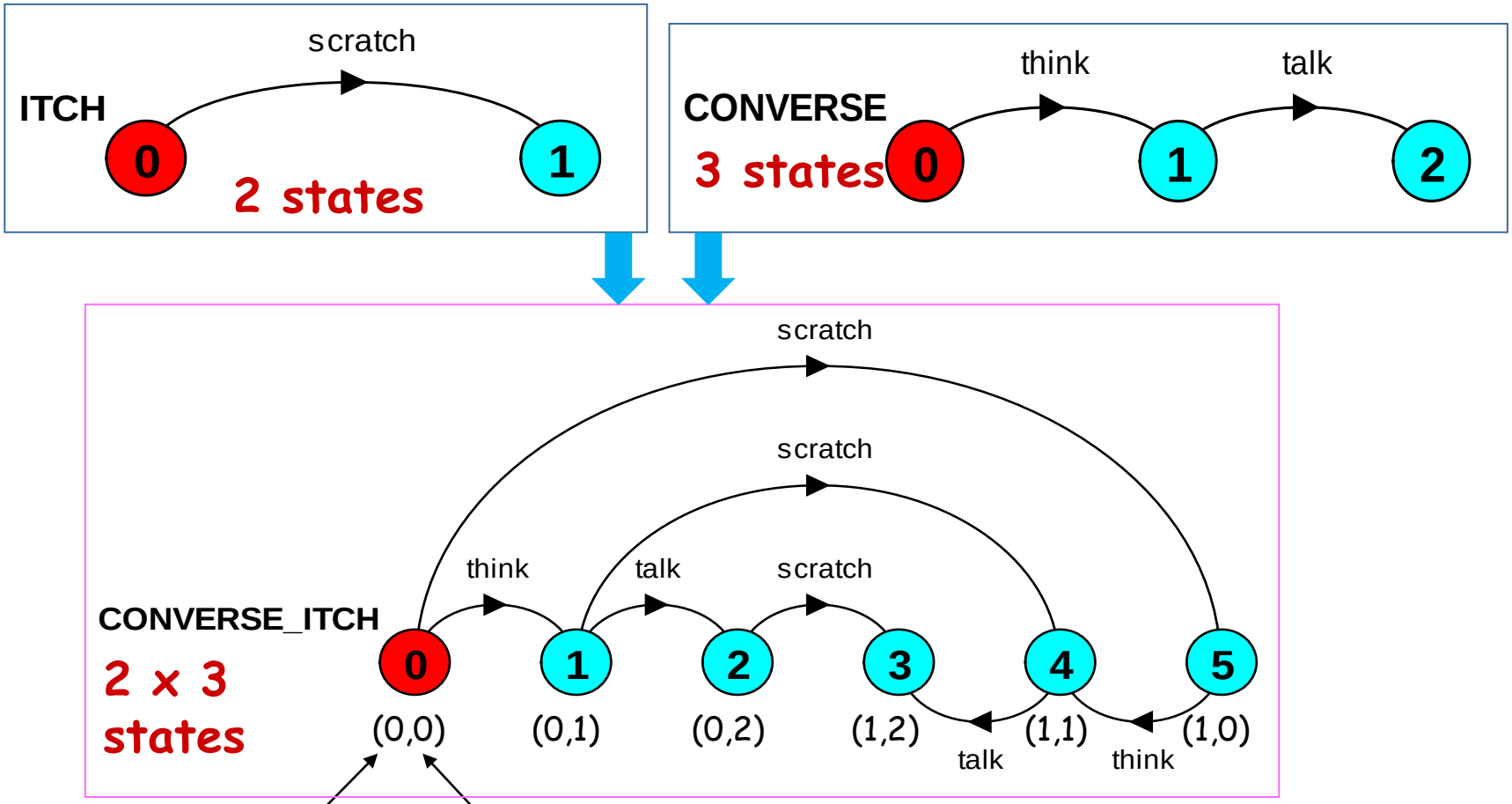
インタリーブで可能となるトレース

```
CONVERSE_ITCH = { think → talk → scratch
                  think → scratch → talk
                  scratch → think → talk }
```

インタリーブで不可能なトレース

```
talk → think → scratch
talk → scratch → think
scratch → talk → think
```

並列合成の結果



Pの状態pとQの状態qの組(p,q)が，P||Qの状態となる

共有アクションによるインタラクションと同期

共有アクション：並列合成されたプロセスがもつ共通のアクション
shared action

共有アクションで，プロセスの**インタラクション**（相互作用）をモデル化
interaction

共有アクションは，それを共有する全プロセスにおいて同時に**同期**実行
synchronization

インタラクションの例

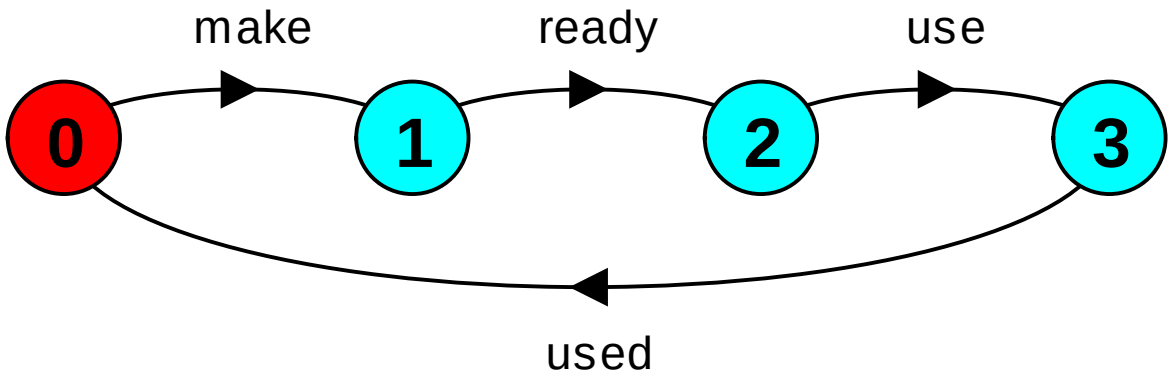
共有アクション
ready, used

```
MAKER = (make → ready → used → MAKER).
USER  = (ready → use → used → USER).

|| MAKER_USER = (MAKER || USER).
```

3 状態
3 状態

3 × 3 状態?



4 状態

インタラクションは
振舞いを制約する

演習問題 7

二人のユーザーを表すプロセス USER_A, USER_B,
共有資源を表すプロセス RESOURCE,
それらを並列合成したプロセス RESOURCE_SHARE
が, つぎのように定義されている.

```
USER_A                  = (a_acquire -> a_use -> a_release -> USER_A).

USER_B                  = (b_acquire -> b_use -> b_release -> USER_B).

RESOURCE                = IDLE,
                IDLE  = (a_acquire -> BUSY  |  b_acquire -> BUSY),
                BUSY = (a_release -> IDLE   |  b_release -> IDLE).

|| RESOURCE_SHARE  = (USER_A || USER_B || RESOURCE).
```

ユーザーAが資源を獲得(a_acquire)しているときにはユーザーBは資源を獲得(b_acquire)できない仕組みになっていることを説明しなさい.
また, これら4つのプロセスの状態遷移系をそれぞれ描画しなさい.