Title	定理証明によるファイアウォールサーバの検証
Author(s)	矢竹，健朗
Citation	
Issue Date	2007-09-06
Type	Presentation
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/8255
Rights	
Description	北陸先端科学技術大学院大学 21世紀COEシンポジウム「検証進化可能電子社会」 = JAIST 21st Century COE Symposium “Verifiable and Evolvable e-Society”，開催：2007年9月6日～7日，開催場所：キャンパス・イノベーションセンター東京 国際会議室(1F)，2007年9月6日（木），「JAIST-COE/AIST-CVS シンポジウム：形式検証技術―現状と安心電子社会への適用」発表資料

定理証明によるファイアウォールサーバの検証

2007.9.6

北陸先端科学技術大学院大学
矢竹健朗
k-yatake@jaist.ac.jp

形式検証の必要性

- 情報システムの社会インフラ化。
  - システムの欠陥が社会に甚大な被害をもたらす。

  ➔システムの正しさを保証することが必要
- 問題点：システム検証はテスト主導。
  - 入力データは一般に無限。
  - 100%のカバレッジを実現することは不可能。

  ➔厳密な数学理論に基づく網羅的な検証が必要。

定理証明によるシステム検証

- 定理証明
  - 最近、産業界でも注目されつつある網羅的検証技術の一つ。
  - データに関する網羅的な検証が可能。
    - 「任意のnについて 1+2+…+n = n*(n+1)/2」
    - 「任意の入力データについてシステムが正しく動作する」
  - 定理証明器：証明の計算機支援

手計算による証明

0からnまでの和を求める関数の定義
(Sum(0) = 0) ∧
(Sum(n+1) = n + 1 + Sum(n))

「Sum(n) = n*(n+1)/2」の証明
（証明）
nに関する帰納法を適用する。
(1) n=0のとき
（左辺）=Sum(0)=0
（右辺）=0*(0+1)/2 = 0
(2) nのとき成り立つと仮定
n+1のとき
（左辺）=Sum(n+1)
=n+1+Sum(n)
=n+1+n*(n+1)/2

nの偶奇で場合分け
(2-1) n=2mのとき
（左辺）=2m+1+2m*(2m+1)/2
=2m+1+m*(2m+1)
=(2m+1)(m+1)
（右辺）=(n+1)*(n+2)/2
=(2m+1)*(2m+2)/2
=(2m+1)(m+1)
(2-2) n=2m+1のとき
（左辺）=2m+2+(2m+1)*(2m+2)/2
=2(m+1)+(2m+1)(m+1)
=(m+1)(2m+3)
（右辺）=(n+1)*(n+2)/2
=(2m+2)*(2m+3)/2
=(m+1)(2m+3)　　（証明終）

定理証明器による証明

```
- Define `(Sum(0) = 0) ∧
          (Sum(n+1) = n + 1 + Sum n)`;
  (* Sumの定義 *)

- g `!n. Sum n = n * (n + 1) / 2`;
  (* ゴールの設定 *)
> Initial goal:
    !n. Sum n = n * (n + 1) / 2

- e (Induct_on `n`);
  (* nに関する帰納法の適用 *)
> OK..
  2 subgoals:
   Sum (n+1) = (n+1) * (n+1+1) / 2
   ------------------------------------------
     Sum n = n * (n + 1) / 2

   Sum 0 = 0 * (0 + 1) / 2
```

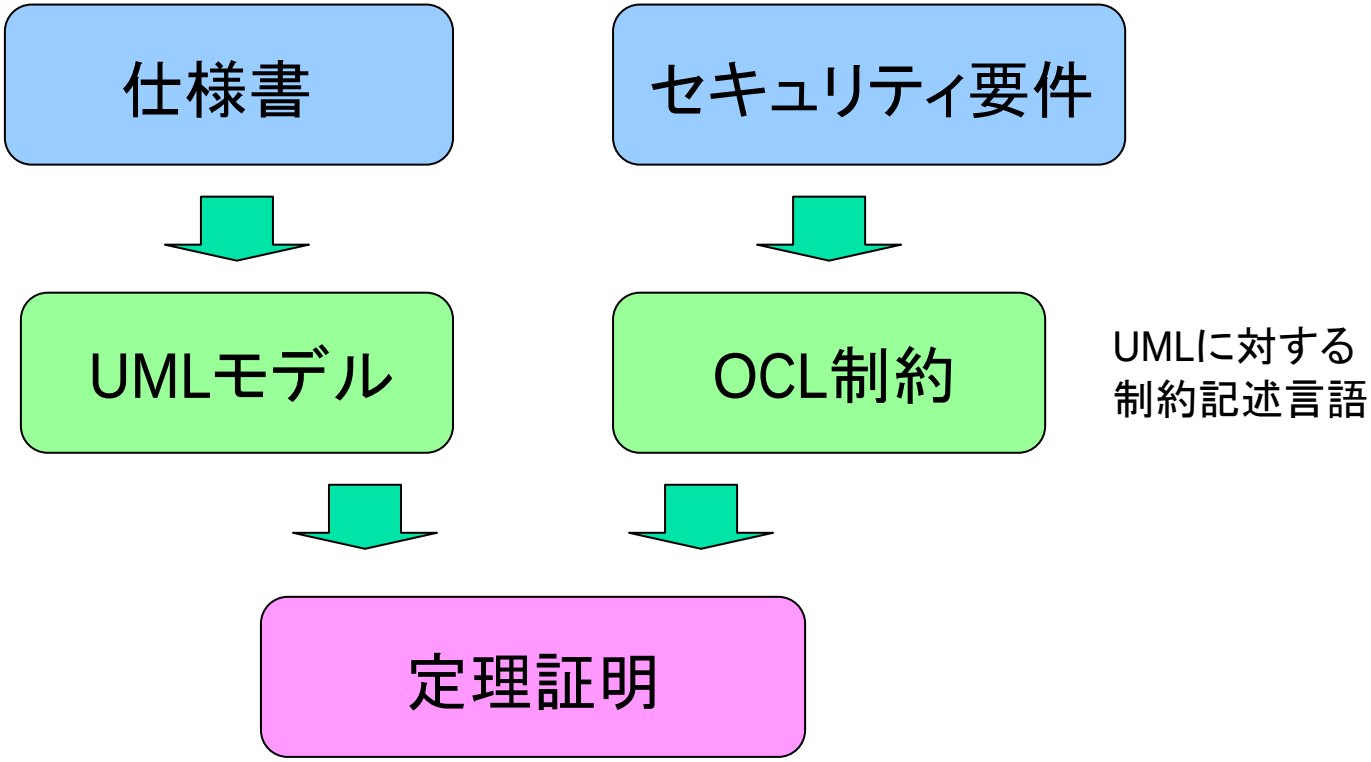
```
- e (RW_TAC arith_ss [Sum]);
  (* Sumの定義による書き換え *)
> OK..
Goal proved.
|-  Sum 0 = 0 * (0 + 1) / 2

Remaining subgoals:
   Sum (n+1) = (n+1) * (n+1+1) / 2
   ------------------------------------------
     Sum n = n * (n + 1) / 2

- e (RW_TAC arith_ss [Sum]);
> OK..
  1 subgoal:
  n + 1 + n * (n + 1) / 2 = (n + 1) * (n + 2) / 2
  ------------------------------------------
  Sum n = n * (n + 1) / 2
- ...
```

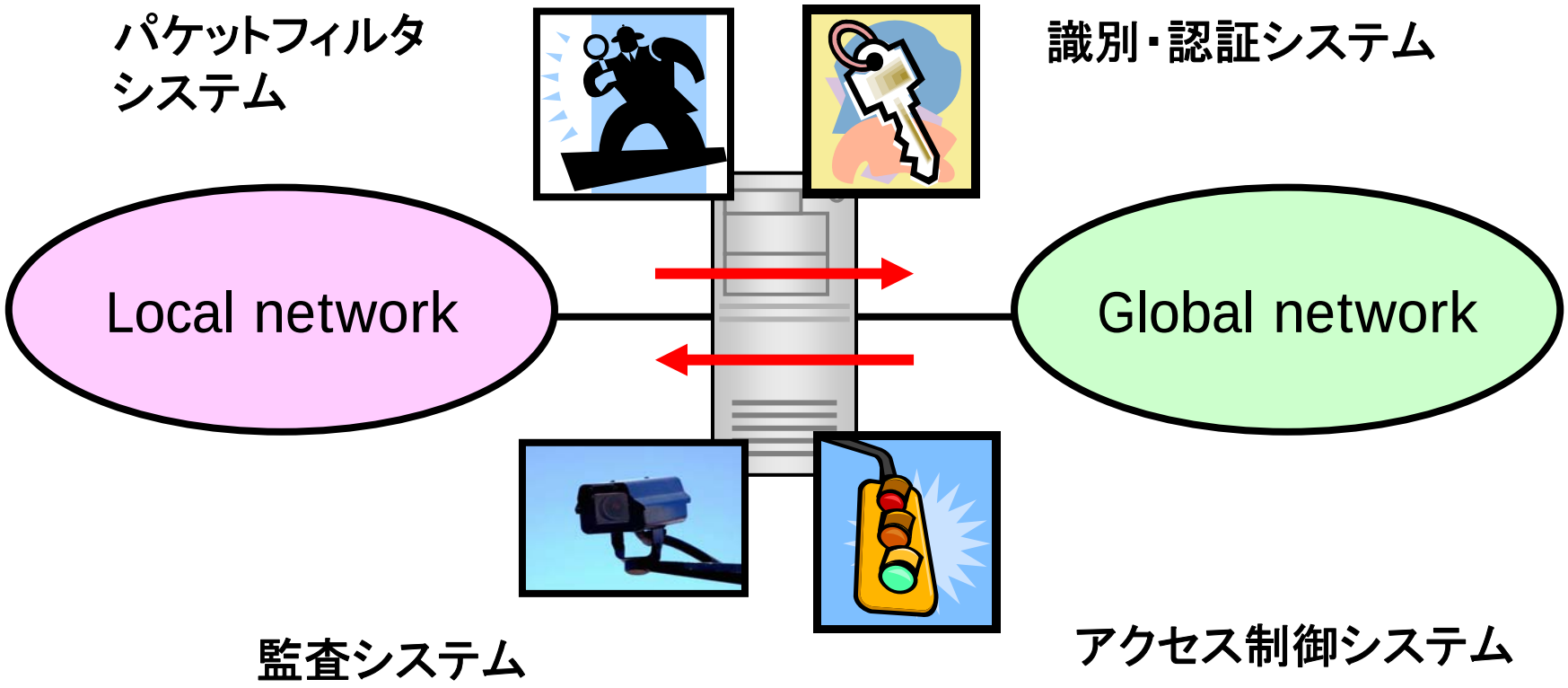
ファイアウォールの検証

CISCO PIX Firewall
A4 5枚程度



UMLに対する
制約記述言語

ファイアウォールの仕様



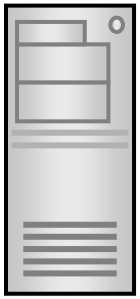
フィルタルール照合

Match?

Packet

Src=(30,1100)
Dst=(250,80)
Prot=TCP

FW



IP=200
Ports={1200,1210,1220}

Filter rule

SrcIP={10,20,30}
SrcPort=
{1050,1070,1100}
DstIP={250}
DstPort={80}
Prot={TCP}

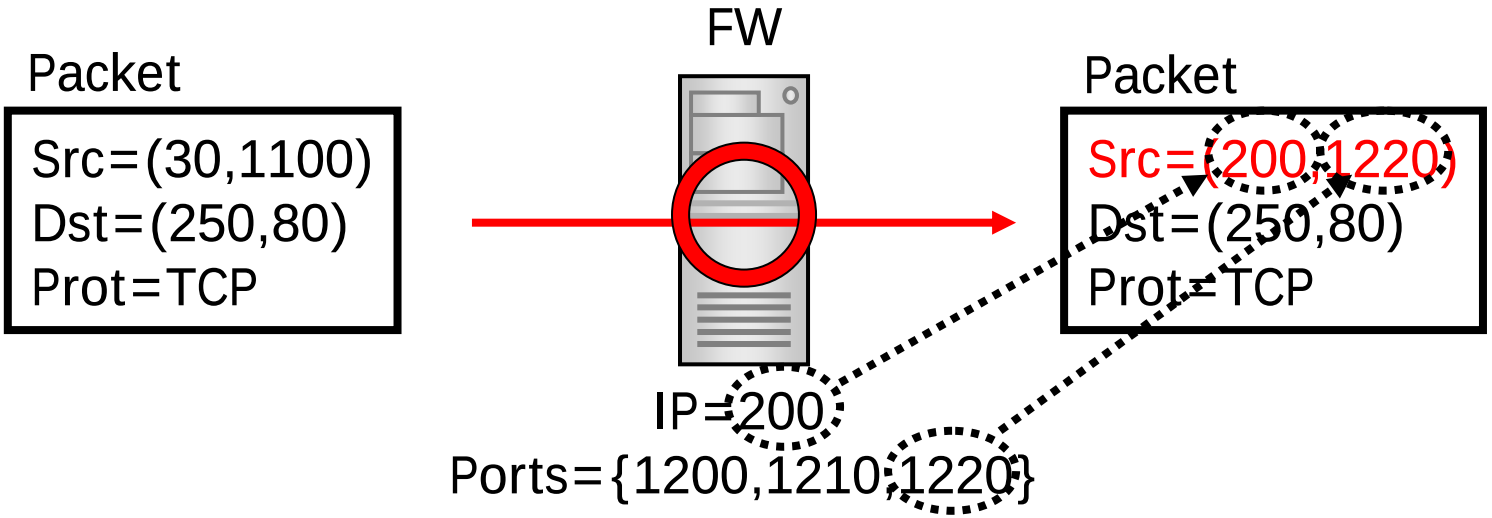
Connection table

(20,1070)-(250,80)
(10,1050)-(250,80)
Emp

NAT table

(20,1070)→(200,1200)
(10,1050)→(200,1210)
Emp

NAT（ネットワークアドレス変換）



Connection table

(20,1070)-(250,80)
(10,1050)-(250,80)
(30,1100)-(250,80)

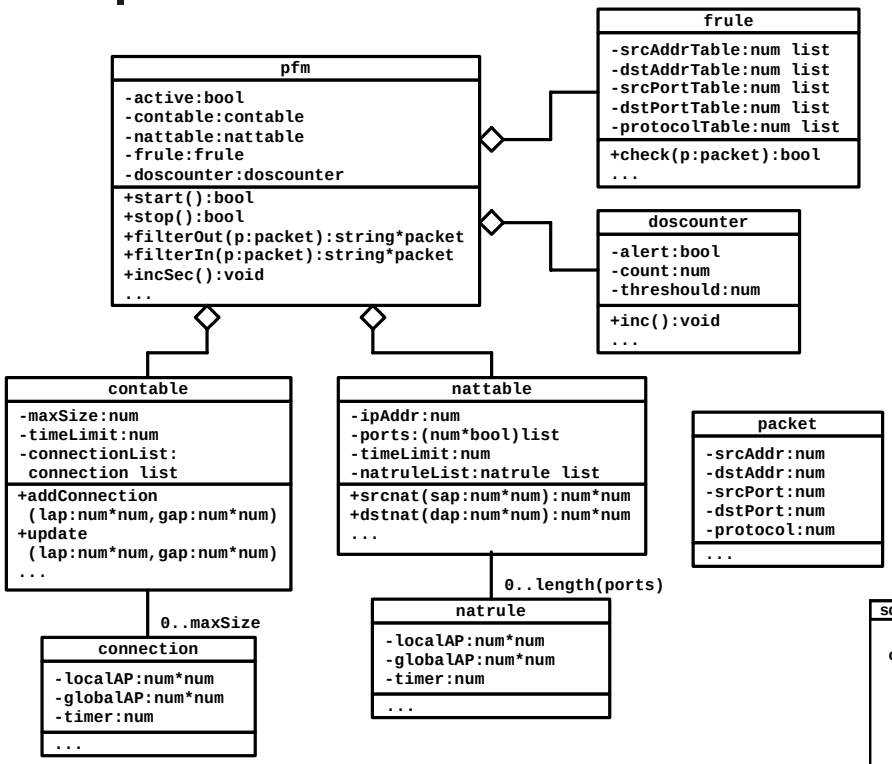
NAT table

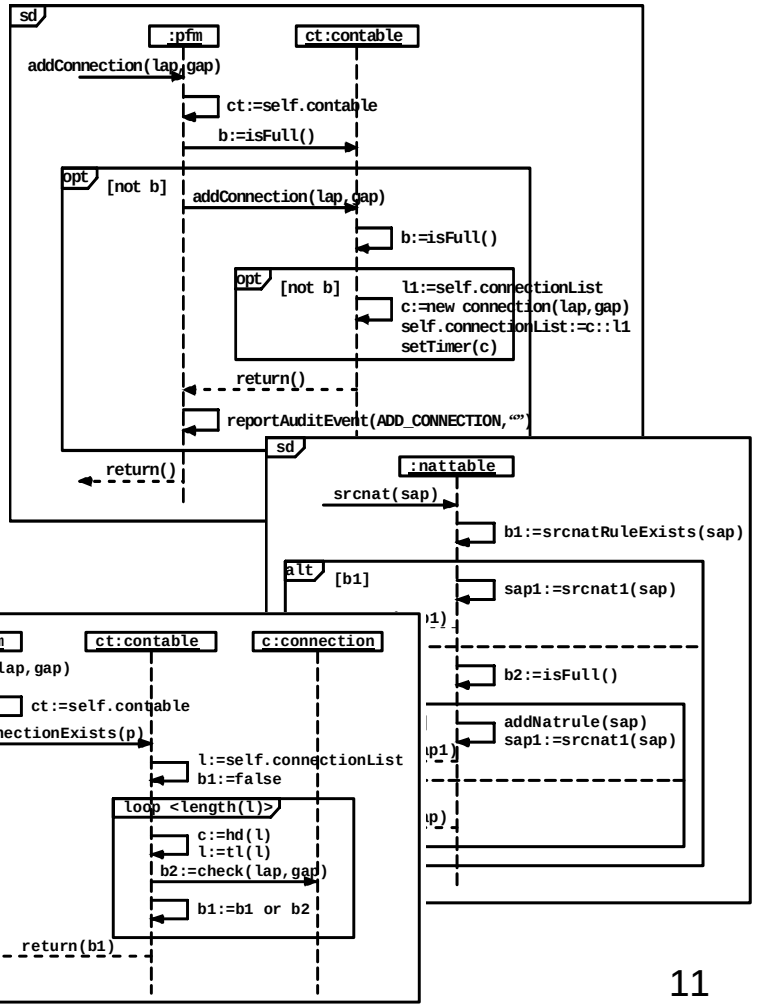
(20,1070)→(200,1200)
(10,1050)→(200,1210)
(30,1100)→(200,1220)

セキュリティ要件

- フィルタルール照合の正当性
  - 新規のアウトバウンドパケットはフィルタルールを満たさない場合、必ず廃棄される。
- アドレス変換の正当性
  - パケットが外部ネットワークに送出されるとき、送信元IPアドレスが必ずFWの公開アドレスに書き換えられる。

UMLによるモデル化





クラス図：5枚
シーケンス図：27枚

UMLによるモデル化

	クラス	属性	メソッド	API
パケットフィルタ	8	35	102	18
識別・認証	4	20	54	23
監査	4	13	37	10
アクセス制御	1	4	8	2
サブシステム統合部	2	10	66	50
ファイアウォール	19	82	267	50

OCLセキュリティ要件

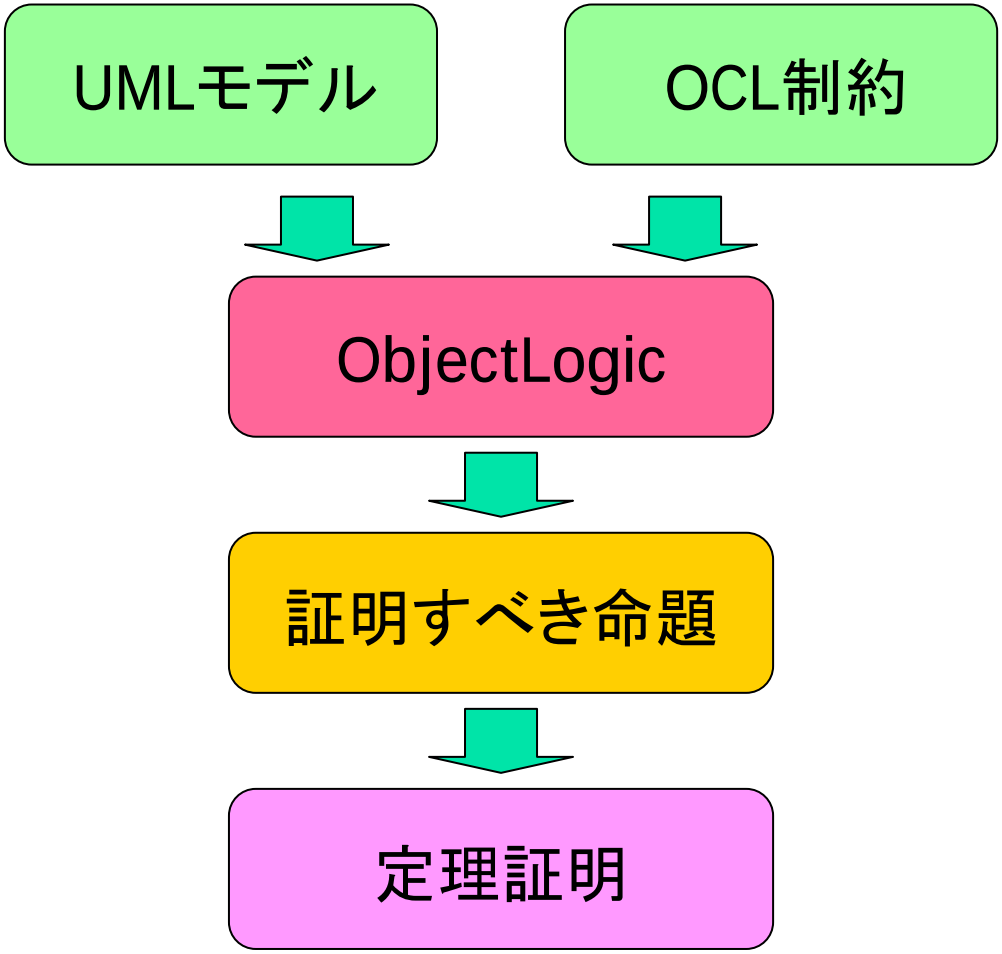
フィルタルール照合の正当性

```
pfm::filterOut(p:packet):packet
pre: not (isValidPacket(p))
post: result=null
```

アドレス変換の正当性

```
pfm::filterOut(p:packet):packet
post: not (result=null) implies
   (result.srcAddr=pfm.getIpAddr())
```

UMLモデルの検証



定理証明

フィルタルール照合の正当性

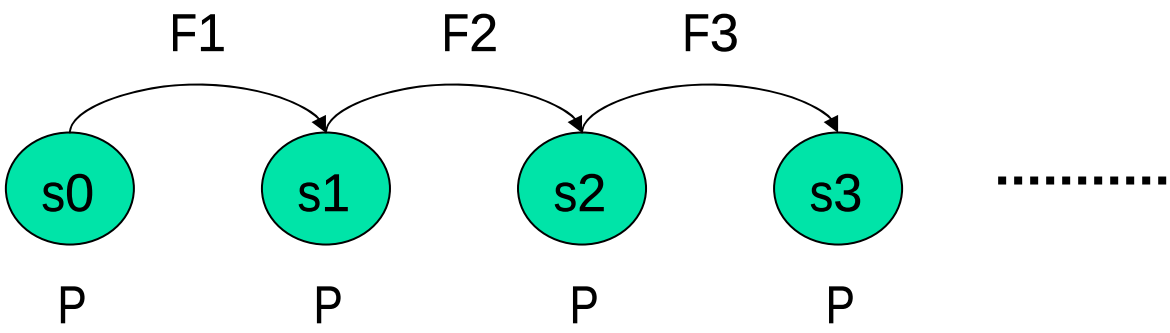
```
|- ∀pfm p s.
  let (p',s') = pfm_filterOut pfm p s in
    packet_ex p s ⇒
    ¬(pfm_isValidPacket pfm p s) ⇒ (p'=packet_null)
```

アドレス変換の正当性

```
|- ∀pfm p s.
      let (p',s')= pfm_filterOut pfm p s in
        Inv pfm s ∧¬(p'=packet_null) ⇒
          (packet_get_srcIpAddr p' s' = pfm_getIpAddr pfm s)
```

定理証明の有効性

- 網羅性。
  - データ、パス
- 不変表明の発見によるシステム内部制約の発見。
  - 不変表明:システムの実行中、常に成立している性質。
  - 定理の前提条件として必要になることが多い。
  - テストでは発見しにくい。



不変表明の例

- 接続表とアドレス変換表の一貫性。
  - 接続が存在するならば、その内部アドレスに対応するアドレス変換規則が必ず存在する。

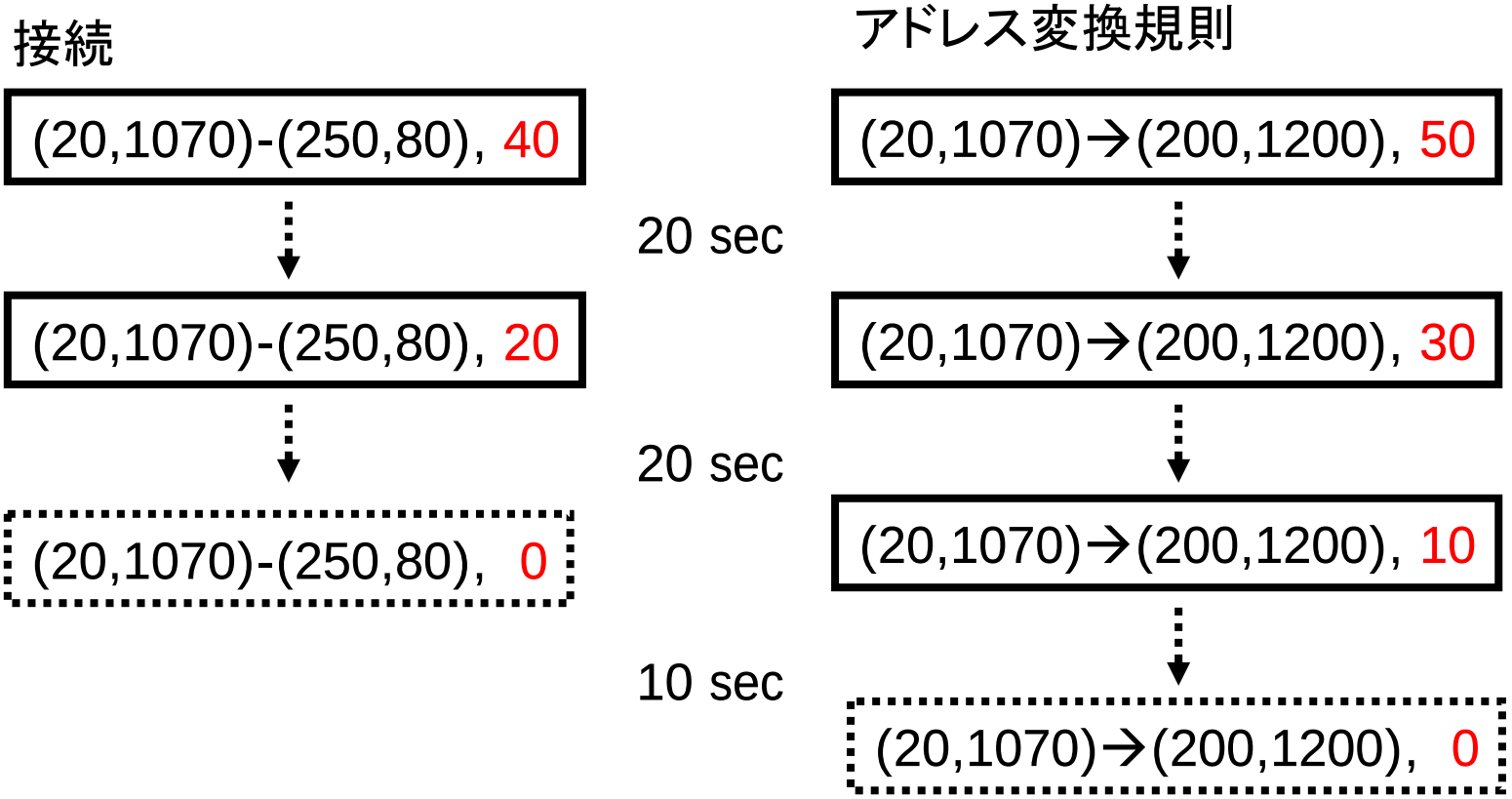
接続表

(20,1070)-(250,80), 20
(10,1050)-(250,80), 30
(30,1100)-(250,80), 35

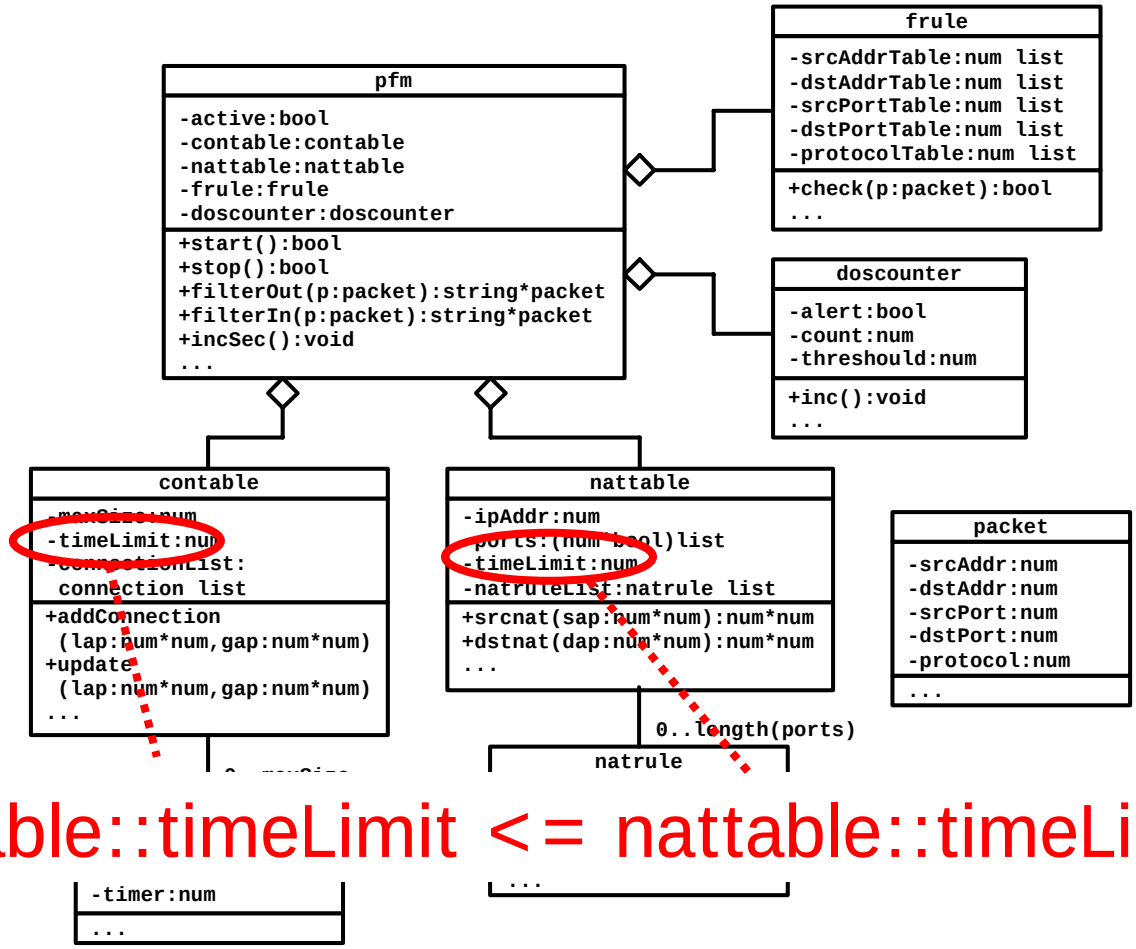
アドレス変換表

(20,1070)→(200,1200), 30
(10,1050)→(200,1210), 40
(30,1100)→(200,1220), 45

内部制約の発見

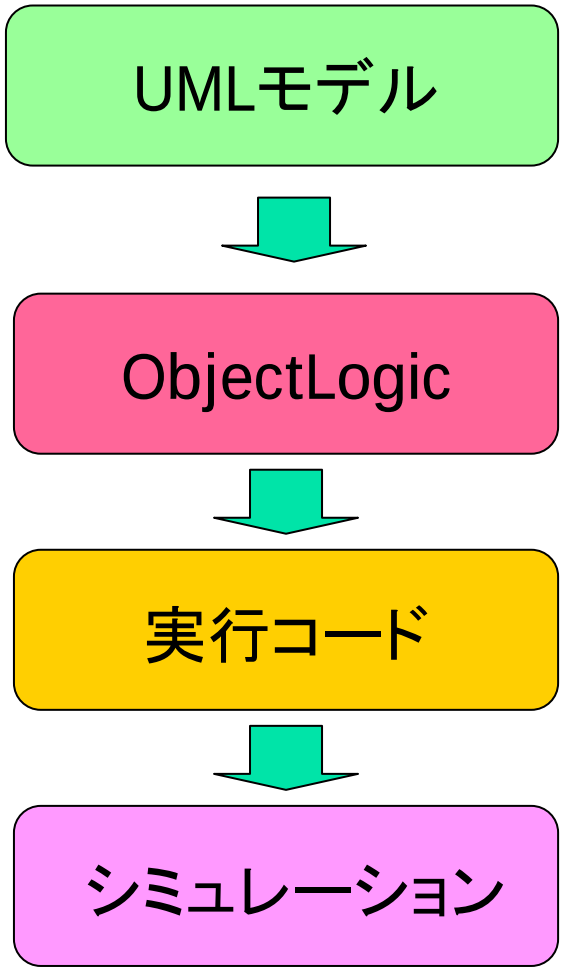

接続
(20,1070)-(250,80), 40
(20,1070)-(250,80), 20
(20,1070)-(250,80), 0
20 sec
20 sec
10 sec
アドレス変換規則
(20,1070)→(200,1200), 50
(20,1070)→(200,1200), 30
(20,1070)→(200,1200), 10
(20,1070)→(200,1200), 0

内部制約の発見



contable::timeLimit <= nattable::timeLimit

シミュレーション



シミュレーションの有効性

- 簡単な誤りの発見。
  - 明らかに許可されるべきパケットが廃棄。
    ➔ if文のthenとelseの処理が逆。
  - 新規パケットを送信したのに接続表が変化していない。
    ➔ メソッド呼び忘れ。
- 高コストの定理証明の前に予め簡単な誤りを除去しておける。

➔検証プロセス全体としてコストを削減。

シミュレーションの様子

```
- val (pfm,s) = new_pfm store_emp;
...
- val (_,s) = pfm_setIpAddr pfm 200 s;
- val (_,s) = pfm_setPorts pfm [1200,1210,1220] s;
...
- val (_,s) = pfm_setFilterRules pfm SA [10,20,30] s;
- val (_,s) = pfm_setFilterRules pfm SP [1050,1070,1100] s;
...
- val (b,s) = pfm_start pfm s;
...
- val (p,s) = new_packet 20 1070 250 80 TCP s;
...
- val (msg,p,s) = pfm_filterOut pfm p s;
> msg = “pass: new connection” : string
...
- pfm_getConnections pfm s;
> val it  = [((20,1070),(250,80),300)] : ((int*int)*(int*int)*int) list
- pfm_getNatrules pfm s;
> val it  = [((20,1070),(200,1200),500)] : ((int*int)*(int*int)*int) list
- packet_getInfo p s;
> val it  = ((20,1200),(250,80),0) : (int*int)*(int*int)*int
- val (p,s) = new_packet 20 1070 250 53 TCP s;
...
- val (msg,p,s) = pfm_filterOut pfm p s;
> msg = “drop: rule not match” : string
...
```

パケットフィルタの生成

コンフィギュレーションの設定

フィルタルールの設定

パケットフィルタの起動

パケットの生成

アウトバウンドフィルタの適用（許可）

パケットフィルタ、
パケットの状態の表示

パケットの生成

アウトバウンドフィルタの適用（廃棄）

まとめ

- 定理証明による実用的なファイアウォールサーバの検証。
  - ファイアウォールの仕様書、セキュリティ要件を、UMLモデルとOCL制約に直し、それが正しいことを定理証明により検証した。
- 定理証明の有効性
  - データ、パスに関する網羅性。
  - 不変表明の発見による内部制約の発見。