OPNET によるモデリングと性能評価方法

Introduction of Modeling and Performance Evaluation Using OPNET

山田博司[†]

Hiroshi Yamada[†]

Summary

ネットワークシミュレーションツールの OPNET について、モデリング、利用方法に関する基本事項を説明する。対象として、ネットワークシステムの設計・管理、及び、プロトコル・ネットワークの研究開発を担当し、OPNET を利用している、または、これから利用してみようと考えているエンジニアを想定する。まず、OPNET の背景となる仮想 NW 環境の概念と OPNET ツールの全体像について述べる。次に、OPNET を用いたルーティングアーキテクチャ評価の基本的な方法を述べる。最後に、プロトコルモデル開発用ツールである OPNET Modeler の基本的な使い方について解説する。

Key words

OPNET, シミュレーション, IP ネットワーク, プロトコル

1. ま え が き

IP (Internet Protocol) ネットワーク (以後 NW と記す) サービスは、様々なプロトコルの上で動作している。大きな IPNW であれば、使用するルーティングプロトコルは、一つではない。例えば、IGP (Interior Gateway Protocol) として、あるエリアでは OSPF (Open Shortest Path First) を採用し、別のエリアでは EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol) を利用する場合もある。このとき、両エリア間でプレフィックス (prefix) を交換するために再配布 (redistribution) を設定しているかもしれない。また、外部とのプレフィック

ス情報交換と内部への展開に BGP (Border Gateway Protocol) を利用し、入出力に対する自組織ポリシーを満足するよう属性値を設定する場合もある。加えて、iBGP (interior BGP) のセッション数削減のためにルートリフレクタ (Route Reflector, 以後 RR と記す) やコンフェデレーション (confederation) を導入する場合も多い。また、MPLS (Multi-Protocol Label Switching) を導入し、RSVP-TE (Resource ReSerVation Protocol-Traffic Engineering) により NW のリソースを有効利用する場合もある。このように、IPNW 上で様々なパケット転送サービスを提供するためには、様々なプロトコルの設定が必要であり、その複雑さはますます増大している。この複雑さを踏まえた上で、NW のルーティング設計、容量設計、使用率や遅延など性能の評価をすることが強く求められている。

プロトコル自体も、その動作は複雑である。RFC (Request For Comments) で定義される複雑な状態遷移に従ってプロトコルは動作する。また、NW サービスを良好に、かつ、矛盾なく行う上で必要な様々な情報を含む制御パケットが交換される。プロトコル性能評価では、複雑な状態遷移、パケットメッセージシーケンス、流通する情報内容を正確に考慮しなければ、プロトコル性能を正しく評価することができない。自律分散処理を特徴とする IPNW の評価では、プロトコル動作、交換情報を正確にモデル化することが不可欠である。

このように、NW、プロトコルの設計・開発では、複雑さを避けて通ることはできない。NW 全体を見る視点で、より“精度 (fidelity)”の高いモデルを用いて、NW、プロトコルの設計・評価を行うことが重要になっている。設計・評価法の一つとして、離散シミュレーション (Discrete Event Simulation, 以後 DES と記す) があり、OPNET [1], QualNet [2], ns2 などのツールが利用されている。本論文では、米国を中心に、企業、政府・

[†] 日本電信電話株式会社 NTT サービスインテグレーション基盤研究所、武蔵野市
NTT Service Integration Laboratories, NTT Corporation, Musashino-shi, 180-8585 Japan

軍事関係、大学などで広く利用されている OPNET ツールについて取り上げる。

本論文では、2. で OPNET の基本的な考え方、全体像を示す。3. では、仮想 NW 環境の概念を示す。4. では、NW モデルの構成方法の基本について述べる。5. では、プロトコルモデル作成方法の基本について概説する。最後に、OPNET を用いた性能評価について整理する。

2. OPNET の基本的な考え方と OPNET ツールの紹介

OPNET は、OPNET Technologies 社によって開発されたツールであり、NW 管理・設計に携わる NW 技術者、プロトコル開発にかかわる研究開発者にとってデファクトスタンダードなツールである。米国を中心に、世界で利用されている。米国 Cisco 社[3]では、OPNET と自社ツールを組み合わせ、NAPAS (Network Application Performance Analysis Solution) [4] というコンサルティングサービスを提供している。

OPNET には、プロトコル開発用として、DES モデリング機能を有する Modeler ツールがある。Modeler は、プロトコル設計評価のための階層的なオブジェクト指向の DES モデリングツールである。ここで述べる階層とは、NW、ノード、プロセスの 3 階層を意味する。個々の階層に対応したモデリング用エディタが完備されており、C 言語により、プロトコルの詳細動作のプログラミングを行う。RFC 準拠の豊富なプロトコルモデルライブラリがあり、モデリングにおいて有用な様々な API が完備している。

OPNET には、Modeler 以外にも、NW 設計・管理用の様々なツールがある。NW、及び、アプリケーション(以後 AP と記す)性能評価のための総合管理製品である Service Provider Guru Network Planner (以後 SP Guru と記す)、WDM (Wavelength Division Multiplexing) ネットワーク設計用の Service Provider Transport Network Planner、これら二つの層を関連づける SWIM (SP Guru/WDM Guru Integrated Modeling) というツールがある。NW 運用には、コンフィギュレーションとトラフィックの情報管理データベースである VNE サーバという製品が用意されている。また、wireless, MPLS, IPv6 など扱うスペシャルモジュール群が用意され、Modeler とともに用いて、詳細なプロトコルモデル作成が可能である。AP 性能分析用には、AP のメッセージシーケンス測定、ボトルネック分析を行う ACE ツールなど、ほかにも多数の製品がある。

本論文では、主に、DES ツールである Modeler に関する基本事項の説明とケーススタディを扱う。また、詳細なプロトコル評価より、むしろ、実 NW 全体の性能

評価に関心のある NW エンジニア向けに、SP Guru の中で、NW モデル設計上有用な機能についても、以下に簡単に紹介する。

SP Guru では、Modeler におけるノード、プロセスモデリング編集機能をオフにし(プロトコル作成、カスタマイズは不可)、DES エンジンのみを利用し、NW エディタで作成した NW モデルのシミュレーションが可能である。加えて、下記に述べる NW 管理上必要な機能を新たに追加している。

まず、コンフィギュレーション情報のインポート機能がある。NW モデルを構成する場合、大きく二つの方法がある。一つは、パレットからノード、リンクオブジェクトモデルを選択、画面上に構成し、各ノードの属性値を設定、NW として DES が実行できるようにモデリングする方法である。後述のケーススタディにおいて説明する。一方、コンフィギュレーション情報のインポート機能では、主要ルータベンダ (Cisco IOS, Juniper JUNOS [5] など) のコンフィギュレーション情報を読み込み、自動的に NW モデルを構成、設定パラメータ値をノードオブジェクトの属性値に適切にアサインする。ほかにも、VNE サーバ上のコンフィギュレーションデータからのインポートが可能である。対象 NW のコンフィギュレーションデータが入手できる場合や、コンフィギュレーションの記述に慣れている場合は、コンフィギュレーションインポートは便利な方法である。

次の機能は、フローアナリシス機能である。DES では、ルーチングプロトコルによるメッセージ情報交換をシミュレーションしてルーチングテーブル (Routing Information Base, 以後 RIB と記す) を作成するが、フローアナリシス機能では、コンフィギュレーション情報から DES のようにメッセージ交換をシミュレーションしないで、計算により RIB を作成する。ルーチングプロトコル別の RIB、管理用重み付け (administration weight) を考慮して得られる IP 転送用の RIB (フォワーディングテーブル)、エッジ間の経路などを算出する。DES と比較した場合、収束時間、故障時の RIB 再構成動作の確認をすることはできないが、DES より短い時間で RIB を構成できる点がメリットである。ルーチングプロトコル動作の過渡状況ではなく、NW の定常時の Reachability や回線使用率のみを把握したい場合には、フローアナリシスは便利な方法である。

また、ネットドクター機能も有用である。ノードモデルに設定された属性値をもとに、Python で記述したルールエンジンにより、コンフィギュレーション設定の誤りを検出する機能である。実 IPNW の問題では、設定誤りが原因である場合が多く、設定誤りを見つけることは重要である。ルールとは、例えば、ルーチングプロトコルを動作させるために必要な設定上の規則を意味する。

図1 仮想NW環境[6]

NW上に同じIPアドレスが存在してはならないという簡単なものから、OSPFであれば、参照帯域の設定は、NW全体で統一しなければならないというものである。これらについては、文献[6]のチュートリアルも参考にしてほしい。

3. 仮想NW環境の考え方

OPNETのコンセプトを理解するには、仮想NW環境のコンセプトを理解すると分かりやすい。実NWやトラフィックの実体（ノード、トラフィックフローデータなど）を、図1のように、コンピュータ上のオブジェクトへマッピングし、実環境に近い状況をコンピュータ上で再現する。実ルータの設定パラメータは、OPNET上のルータオブジェクトの属性値に、実ルータ上の動作処理は、OPNET上のルータオブジェクトで動作するプロセスモデルに相当する。このように、実体の特性を抽象化して、オブジェクトとしてマッピングし、構成されたコンピュータ上のNWモデルを仮想NW環境と呼ぶ。

仮想NW環境を用いたNW管理のワークフローは、以下のようになる。(1)現状のコンフィギュレーションデータから仮想NW環境（以後ベースラインNWモデルと呼ぶ）を構成する。(2)コンフィギュレーションの誤りチェックを実行する。(3)DESを実行し、ベースラインNWモデルのRIBやリンク使用率の確認、APのレスポンス特性などの性能分析を行う。(4)ベースラインNWモデルと比較するための様々なシナリオ、コンフィギュレーションモデルを作成する。(5)作成したシナリオモデルを仮想NW上で構築し、What-if testを実行する。(6)複数のシナリオの中から、最終的なNW設定を決定し、そのコンフィギュレーション内容を実NW環境に適用する。以上のように効率良く体系化されたNW管理を可能とする。

4. ケーススタディ1：NWモデルの作成

NWシミュレーションでは、対象とするNWのコンフィギュレーション設定に従って、NWモデルを構築する必要がある。ここでは、大規模なIPNWでよく見られるコンフェデレーションを導入した場合を事例に、NWモデルの作成ポイントについて説明する。本章では、NWモデルの作成方法の基本とIOSコンフィギュレーションと属性値との関係について理解することを目標とする。

ケーススタディで扱うネットワーク構成

(1) ASを複数のAS（65000, 65001, 65002）で分割したコンフェデレーションによるNW構成を考える（図6）。AS65000では、ルータリフレクタ（RR）を構成し、そのクライアント（RRC）は、RRとiBGPセッションを張る。

(2) 分割されたASでは、それぞれOSPFが動作している。

(3) 外部AS（200, 300）とは、AS65000のNWと接続し、自NWが外部AS間のトランジットNWにならないように、eBGPのAS Path属性を設定する。

(4) トラフィックフローは、（AS65001, 65002, 200, 300）のルータ間をメッシュで設定する。

[Step 1] OPNETを起動し、新規プロジェクトを作成する。OPNETの初期画面からFile→Newを選択すると、Wizard画面が現れる。以後、「→」はプルダウンメニューの操作手順を示す。プロジェクト名、シナリオ名の入力が必要で、次にNWトポロジーの構築方法が求められる。先に示したインポート機能を用いる場合もあるが、白紙上にNWを作成する場合は、Create empty scenarioを選択する。次にNWの規模を選択する。ノード間距離を考慮するためのものであり、世界地図、地域図などの様々なスケールが用意されているが、ロケーションを考慮せず接続状況のみを白紙に描きたい

場合は、Logicalを選択する。次に、NWで使用する技術の選択画面が現れ、今から作成するNWモデルが使用する技術を選択する。これによりNWエディタとパレット画面(図2)が開く。一度、プロジェクトを作成した後に再度、NWエディタを開くには、File→Openで当該プロジェクトを選択する。

[Step 2] パレットは、モデルライブラリを示す。パレットから必要なオブジェクトを取り出し、エディタ上でNWを構成する。ルータ、スイッチなどの機器から構成されるノードモデル、イーサネットリンクやPPP(Point-to-Point Protocol)回線などのリンクモデル、アプリケーションやMPLSなどの様々なパラメータ設定を容易にするユーティリティモデル、MPLS LSP(Label Switched Path)など論理パスを扱うパスモデル、IPトラヒックフローなどを扱うデマンドモデルがある。ノードモデルでは、ベンダ別、主要プロトコル別に分類されている。

ベンダモデルは、一般モデルをもとに、インタフェース数、処理能力パラメータ(例えば、Backplane transfer rate, Datagram switching rateなど)をベンダ製品のスペックに合わせて構成されたものである。ノードモデルを構成するモジュール構成、各種プロトコル動作を記述したプロセスモデルは、一般のものと同じである。また、モデル名が例えばrouter_atm_fe4_slip3_dcという場合は、ATM(Asynchronous Transfer Mode)インタフェースを一つ、Fast Ethernet/Ethernetのインタフェースを四つ、シリアルインタフェースを三つ備えたルータノードであることを示す。これらを参考にNW設計上必要なノードを選択する。

リンクモデルから、ノード間を接続するリンクモデルを選び、接続するノード間で接続する。注意として、必

ずそれぞれのインタフェースのプロトコルに一致するリンクモデルを用いて接続しなければならない。また、各インタフェースにアドレスを具体的に設定した場合、リンクオブジェクトを介して接続されるノードのインタフェースとの間で、IPサブネットとして矛盾なく、インタフェース同士を接続しなければならない。リンクオブジェクトの属性値(Edit Port)から、リンクオブジェクトを接続しているノードとそのインタフェースが表示されるので、この情報をもとに確認する。図3の場合、node_5のIF15とnode_10のIF17がリンクモデルで接続されていることを示す。この設定を間違えると、画面上はノードがつながっているように見えるにもかかわらず、パケットが疎通しないというエラーが起きる。

以上の動作を繰り返してノード間にリンクを接続し、自分が想定するNWモデルを構成する。ただし、この段階では、単純にノード間がリンクで接続されただけで、ルーティングプロトコルやIPアドレスは設定されておらずNWとしては機能しない。

[Step 3] NW設計上一番重要なルーティングの設定を行う。実際の機器に行うのと同様、IPアドレスのインタフェースへの設定に始まり、様々なルーティングプロトコルのパラメータを、ノードオブジェクトの属性値として設定していく。ここでは、Cisco IOSのコンフィギュレーションとの比較をしながら、コンフィギュレーションパラメータとOPNETの属性値との関係を明確にする。

[Step 3.1] インタフェースの設定

例えば、インタフェースIF15に、IPアドレス(192.0.4.1)、サブネットマスク(255.255.255.0)を設定する場合、Cisco IOSでは、以下のように設定する。

```
interface IF15
ip address 192.0.4.1 255.255.255.0
```

これに対応するOPNETのルータオブジェクトの設定は、IP>IP routing parameter>Interface Information属性値で行う。なお、属性値は、トリート構造になっており、「>」を使って記述する。Interface Information設定画面には、Name, Status, Address, Subnet mask, MTU(Maximum Transmission

図2 NWモデル編集エディタの画面例

図3 リンクオブジェクトの属性値表示画面(Edit Port)

Unit) などの設定項目があり、各項目について、Name (IF15), Address (192.0.4.1), Subnet mask (255.255.255.0), MTU (IP) と設定する。ほかにも、ルーティングプロトコル, ATM や FR (Frame Relay) を扱う場合の Sub-interface, データ圧縮を定義する Compression, ルートマップなどポリシーの定義を行う Routing instance, MPLS VPN (Virtual Private Network) を考慮した場合の VRF (VPN routing and forwarding) などの設定項目があり、対象とする NW コンフィギュレーションに応じて設定を行う。同様の操作を各インタフェースに対して行う。注意点として、リンクオブジェクトで対向するノードのインタフェースとのアドレスの関係、リンクオブジェクトのプロトコルと MTU を矛盾なく設定することが重要である。Loopback address の設定も同様に行う。

[Step 3.2] ルーティングプロトコルの設定(OSPF 編)

NW にルーティングプロトコルとして、OSPF を設定する場合、Cisco IOS では、例えば、以下の例のように設定する。

```
router ospf 100
timers spf 20 40
auto-cost reference-bandwidth 155000
network 10.11.100.4 0.0.0.0 area 0
network 10.11.14.0 0.0.0.255 area 0
```

これは以下を意味する。(i) プロセス番号 100 の OSPF を起動させる。(ii) shortest path first を実行する上でのタイマ値、delay, holding をそれぞれ 20, 40 に設定する。(iii) リンクコスト算出に用いる参照帯域を 155 Mbit/s に設定する。(iv) 設定している 10.11.100.4/32, 10.11.14.0/24 の NW に所属するインタフェースで OSPF を実行させ、エリア番号を 0 と設定する。NW 上の同じプロセス番号をもつ全 OSPF ルータにおいて、タイマ値と参照帯域を一致させておくことは、いうまでもない。

OPNET の OSPF 属性値との対応は以下のようになる。IP Routing Protocols>OSPF Parameters から OSPF のパラメータ設定画面が表示される。ここで、OSPF に必要な様々なパラメータを設定することができる。SPF Calculation Parameters, Reference Bandwidth, Network Information などのプロパティを用いて、タイマ値、参照帯域、NW を設定する。加えて、IP のインタフェース設定画面上で、OSPF が動作する各インタフェースのルーティングプロトコルを OSPF と設定した後、OSPF 属性値の設定画面の Interface Information テーブルを開く。OSPF を動作させるインタフェースに対し、Status を enabled, Area を 0.0.0.0, Tag Number を 100 に設定する。

以上が、IOS の記述から OPNET のルータオブジェクトの属性値への設定する方法である。

[Step 3.3] ルーティングプロトコルの設定(BGP 編)

大きな NW を扱う場合 BGP は不可欠である。NLRI (Network Layer Reachability Information) や Neighbor など、様々な設定が必要になる。例えば、コンフェデレーション設定では、Cisco IOS の場合、

```
router bgp 65000
no synchronization
bgp router-id 100.0.0.1
bgp confederation identifier 100
bgp confederation peers 65001, 65002
```

と設定をする。この設定では、コンフェデレーション ID は 100, 分割した AS において、自 AS の BGP AS 番号は 65000, Peer 関係の Sub AS は、それぞれ 65001, 65002 である。非同期設定とし、Router ID は、100.0.0.1 となる。

OPNET の属性値設定では、IP Routing Protocols >BGP Parameters から Global Properties を選択、Confederation Configuration で Confederation の設定(ID を 100, peers を 65001, 65002)を行い、Address Family Properties の中の Synchronization を Disabled に、最後に IP>IP routing parameters で Router ID (100.0.0.1) と Autonomous Number (65000) を設定する。

次に NLRI の設定を行う。Cisco IOS では、network コマンドで、例えば以下のように記述する。

```
network 192.0.1.0 mask 255.255.255.0
```

OPNET では、Address Family Properties の中の Network Reachability Information の中で Address (192.0.1.0), Subnet mask (255.255.255.0), 及びルートマップ項目の設定を行う。Neighbor 属性値の設定では、具体的に iBGP, eBGP のセッション相手を設定する。Cisco IOS では、以下のように設定される。

```
neighbor 192.0.1.1 remote-as 200
neighbor 192.0.1.1 update-source IF16
neighbor 192.0.1.1 next-hop-self
neighbor 192.0.1.1 filter-list 1 out
neighbor 100.0.0.3 remote-as 65000
neighbor 100.0.0.3 update-source LB0
neighbor 100.0.0.3 next-hop-self
```

これは、eBGP, iBGP セッションを一つずつ設定している事例である。図 4 は、上記 Neighbor 属性値の設定に対する OPNET の BGP の属性値の設定画面例を示

図4 BGPの属性値の例

す。AS200のNWのうち192.0.1.1のIP addressをもつインタフェースとの間にeBGPセッションを設定、自ASからのNLRIなどの情報はIF16を通じて更新し、自ASのプレフィックスのnext hopは、このノードであることを示す。番号1で定義されたFilter ListをAS200へ出ていくプレフィックス情報に対して適用する。OPNETでは、BGP Parameters>Neighborsプロパティの中で、Address (192.0.1.1), Remote AS (200), Neighbor Propertiesの中のUpdate Source (IF16), Next Hop Self (Enabled)で設定を行う。Route Filterの設定は、Neighbors>Address Family Parameters>Route Filters>Send Path Listで1と設定する。例えば、Route Filterとして、AS Path Listにおいて、自AS番号以外のAS番号をもつプレフィックス情報を他のASに通知しないためのFilterをかける場合、Cisco IOSでは、

```
ip as-path access-list 1 permit ^$
```

と記述する。OPNETでは、Global Properties>AS Path Listプロパティの中で、Match Expression (^\$), Action (Permit)と設定する。OPNETのBGPは、IPv6, VPNv4/v6などのAddress familyも対応している。

以上、Cisco IOSのコンフィギュレーションとの対比で属性値設定方法の説明をした。NW設計経験者であれば、NWモデル作成において、コンフィギュレーション情報を属性値に設定していく様子が、実践的であることが理解できたと思う。

NW設定の可視化は、View→Visualize Protocol Configurationから、IP Routing Protocols(IPv4, IPv6), BGP Peers, OSPF Area Configurationを選択することで、画面上に設定状態を表示できる。この情報は初期段階の誤り発見に役立つ。更に詳細な誤りを検出するにはネットドクター機能が便利である[6]。大きなNWでは、コンフィギュレーション情報を取り込

み、NWモデルを自動構築するインポートモジュールやVNEサーバを利用する方法が有効である。シミュレーション後にRIBを確認するためには、ルータノードの属性値であるReportsプロパティで、該当するルーティングプロトコルに対し、Exportを指定する。なお、IOSコマンドとOPNETでのサポート状況の詳細については、OPNETのホームページで確認できる(注: ユーザIDとパスワードが必要)。

[Step 4] トラフィックフローの設定

NW管理設計のためには、Cisco Netflowなどを用いたプレフィックス間の交流トラフィック(以後、デマンドトラフィックと記述する)量の測定が必要になる。あるリンク容量を増大させると、ルーティングプロトコルに従って、転送ルートが変化する可能性があるため、NW全体を見てリンク容量設計を行う必要がある。測定されたデマンドトラフィックをモデル上にインポートすることも可能である。ここでは、様々な要因(ユーザ数の推移、新規サービス開始など)を考慮して推定されたデマンドトラフィックを考える。推定デマンドトラフィックを考慮したトラフィックシナリオを、モデル上に展開する方法について述べる。更に、RIB作成のために必要な制御パケットを厳密にシミュレーションするが、転送されるデータパケットに関しては、下記に示すトレースパケットに代表させ、リンクの使用率などを算出する、ハイブリッド型DESについて説明を行う。これは、すべてのパケットごとにシミュレーションする詳細なDESに比べると精度は落ちるものの、転送ルートと各リンクにかかる負荷を短時間で推定可能な、解析手法とDESを組み合わせた方法である。

デマンドトラフィックオブジェクトは、発着アドレス、設定した時間間隔でのビットレート(bit/s)、パケットレート(packet/s)の時系列データなどを属性値としてもつ。DES上では、発着アドレスから、bit/s, packet/sの情報をもつトレースパケットを送信する。これを受け取ったリンク、ノードオブジェクトは、統計量としてこの分のトラフィック量(送受信トラフィック量、リンク使用率)を計算する。各ノードではこのトラフィック量に応じて簡単な待ち行列モデルによる待ち時間情報を統計量として計算する。厳密なDES動作によって構築されたRIBに従い、着アドレスノードまでトレースパケットは送達される。

具体的にデマンドトラフィックを設定する。NWのすべてのエッジルータを選択し、Traffic→Create Traffic Flows→IP Unicast...を選択すると、Traffic Create画面(図5)が開く。ここでは、簡単のためにすべてのエッジルータ間でフルメッシュに設定された、デマンドトラフィックフローを考え、すべて同じトラフィック量をもつものとする。図5にあるように、

図5 Traffic Create 画面

図6 デマンドトラフィックの経路(ルート)の一例

Intensity, ToS, Protocolを設定できる。Create ボタンを押すと、画面に青色点線で、デマンドトラフィックフローのオブジェクトが現れ、トラフィックが設定されたことを示す(図6)。

[Step 5] シミュレーション(What-if test)の実行

DES → Choose Individual Statistics から測定項目を設定し、Run Discrete Event Simulation でシミュレーションを実行する。各リンクの使用率、RIB、デマンドトラフィックの経由するルートなど、設定した統計量を確認する。経由ルートの表示(Protocols → IP → Demands → Display Routes for Configured Demand...)では、DESの終了時点におけるトラフィックフローのルートが示される(図6では、青色の太い点線で、矢印により「ルート」と示したものがこれに相当する)。設定した測定項目は、DES →

Results → View Results から確認、グラフ表示ができる。

以上、OPNET のモデルライブラリを用いた NW モデルの構成、DES 実行に関する方法のポイントについて簡単に説明した。ほかにも多くの機能をもつノードオブジェクトがあり、それぞれ DES を実行するための設定方法があるが、ここでは割愛する。OPNET のライブラリにあるプロトコル機能をカスタマイズする場合、新規に開発するプロトコルについて評価する場合は、自らモデルを構築する必要がある。

5. ケーススタディ 2：プロセスモデルの作成

プロセスモデルの基本的な作り方を説明するため、トラフィックソースモデルの一例として、5.1 で示す簡単な機能をもつパケット送信・受信モデルを考える。次に、5.2 でノードモデル作成について述べる。更に、5.3 で、プロセスモデルの作成ポイントについて説明する。特に、プロセスモデル間の親子関係、ICI の使い方について説明し、デバックモードで動作させ、エラーを検出、対処する事例を示す。

5.1 ケーススタディで扱うモデル

(1) プロセスモデルの概念の説明が目的であるため、TCP, IP, MAC などのプロトコル内部処理の説明には踏み込まず、単純にパケットを送受信するプロセスモデルのみをここでは扱う。

(2) 送信側のマネージャプロセスは、複数の子プロセスを生成、これを管理する。生成された子プロセスは、それぞれ、生存時間中パケットを送信するトラフィックフローに相当する。子プロセスは生存終了時間に到達すると、マネージャプロセスに、そのプロセス番号とプロセスの終了を割込み通知する。

(3) 受信側は、到着したパケットを受信する機能をもつ。

5.2 ノードモデルの作成

ノードモデルを構築する場合、ノードモデルエディタから、Process, Queue, Transmitter, Receiverなどを意味するモジュールを、プロトコルレイヤ構成に従って組み合わせ、それぞれのモジュール間を矢印で結び、ノードモデルを構築する。各モジュール間の情報流通方法には、(a) パケット、(b) 割込み、(c) ICI (Interface Control Information, 説明は後述) の3種類がある。ノードモデル中の矢印はパケットの通り道を意味する。Interfaces → Node Interfaces から、ノードモデルに関するプロパティを設定できる。複数のシミュレーションモデルと協調シミュレーション(co-simulation)を行う場合やトレース時間をもとにシミュレーションをする場合、OPNET と外部プログラムを連携する必要がある。

図7 送受信ノードのノードモデル

る。この場合、ESYS(External SYStem) API 用モジュールを用いてノードモデル設計する。co-simulation など外部プログラムとの連携は、基本事項の範疇を超えるのでここでは説明しない。

図7にケーススタディで扱う送信側ノードモデル構成を示す。Process, Transmitter, Receiver モジュールを組み合わせた単純なモデルである。Process モジュールでは、下記で作成するプロセスモデル (hy_magazine_source_mgr) が動作するように属性値を設定する。

5.3 プロセスモデルの作成

プロトコルや制御手段を評価する場合、本質となるコントロールプレーンの処理動作をできる限り忠実にモデル化する必要がある。そのためには、(i) 考慮すべきプロトコルの状態遷移図、(ii) 状態遷移するタイミング、(iii) 交換する情報内容とその交換手段、を明確にモデル化することが重要である。モデル化のワークフローは、以下ようになる。(1) 検討対象のプロトコルについて十分分析する。(2) 状態遷移図を作成する。(3) 作成した状態遷移図をもとに、OPNET 上で状態遷移図を作成する。(4) 遷移条件や定数などを定義する。(5) 具体的な動作をプログラミングする。(6) コンパイルリンクし、デバッグを利用してバグを検出する。問題があれば、(5)に戻って修正し、モデルを完成させる。

[Step 1] OPNET 上で状態遷移図を作成

この単純なケーススタディモデルは、パラメータの初期化を行う Init 状態、待機状態の wait 状態、及び、パケットを送信するトラヒックフローを生成する子プロセス (hy_magazine_simple_source) を起動する spawn 状態、同プロセスの終了管理を行う clear 状態の四つの状態から構成される。プロセスモデルの状態遷移図を、図8に示す。この管理プロセスから起動される子プロセスの状態遷移を図9に示す。説明上分かりやすくするために、両図中で、状態名には下線を引いている。また、(遷移条件マクロ名)/遷移時の動作関数、の形式で遷移条件と動作を示す。子プロセスは、初期化 (Init 状態)の後、generate 状態でパケットを生成、送信する。子プロセスの生存時間は、属性値で設定した確率分布に従う。子プロセスの生存中は、属性値で設定された確率分布に従う送信間隔でパケットを送出する。生存時間が

図8 マネージャプロセスモデルの状態遷移

図9 子プロセスモデルの状態遷移

終了すると、stop 状態に遷移、マネージャプロセスに終了を告げる。

状態には、Unforced (赤色)と Forced (緑色)の2種類がある。Unforced では、状態遷移時点で、状態に入る際に定義した処理 (enter exec) を行い、DES カーネルからの割り込み待機状態になる。割り込み受信後直ちに、状態を出る際に定義した処理 (exit exec) を行う。一方、Forced では、状態に入る際に、enter exec を行い、DES カーネルからの割り込み信号を待つことなく直ちに exit exec を実行、状態を出る。今回、親プロセスは、wait 状態のみ、子プロセスはすべて Unforced である。wait 状態では、遷移条件に相当する DES カーネルからの割り込みを待つ。親プロセス内で定義した、次の子プロセスの起動スケジュールによる割り込み通知があった場合は、spawn 状態へ遷移する。生成した子プロセスからの割り込み通知の場合、clear 状態へ推移する。

次に、遷移を示す矢印には、実線と点線がある。実線は、確定的にこの線に沿って状態が遷移することを示し、点線は、状態遷移条件が真の場合に、その矢印に沿って状態が遷移することを示す。したがって、ある状態から複数の状態のいずれかへ遷移する可能性がある場合、それぞれについて、遷移条件を定義する。タイマ終了、パケット到着、内部割り込みなどが遷移のトリガとなる。状態遷移図は、検討対象のプロトコル動作を分析し、どの

ような状態が考えられ、どのようなトリガのときに何を行うか、次にどの状態に推移するかを Forced/Unforced 状態モデルと実線/点線による矢印によって表現する。

[Step 2] HB (Header Block)の構築

プロセスモデルエディタには、ヘッダ情報、変数、関数を定義するテキスト画面がある。[Step 1]で定義した状態遷移条件の具体的なマクロ定義のほかに、必要な include file の宣言、このプロセスモデル内で用いる割込みコード値の定義、FB (Function Block) で定義する関数の宣言などを HB で定義する。変数については、SV (State Variables)、TV (Temporary Variables) で定義し、HB で宣言した関数のプログラムを FB で記述する。

[Step 3] プロトコル動作のプログラミング

enter/exit exec、及び FB では、OPNET の API を利用し、C 言語を用いて、検討対象となるプロトコル動作をプログラミングする。ここでは、プロセスモデルの親子関係と ICI の概念を中心にパケット処理、割込み処理に関する OPNET API について説明する。

[Step 3.1] プロセスモデルの親子関係を表現する API

セッションの全体管理と個々のセッションのパケット送受信動作の記述を、一つのプロセスモデルで記述すると複雑になり、モデリングを理解、拡張する上で、効率的でない。OPNET では、図 10 に示すように子プロセスを起動 (invoke) させることができる。生成される子プロセスの管理と個々のセッション動作を示す子プロセスを別々にモデリングする方が、プログラム上管理しやすい。子プロセスの作成は、以下の API を利用して記述する。

(i) `op_pro_create` (プロセス名、引数情報へのポインタ) でプロセスハンドルを作成する。

(ii) `op_pro_invoke` (プロセスハンドル名、`op_pro_argmem_access()` でアクセス可能な情報へのポインタ) で、子プロセスを起動する。

例えば、今回のモデルでは、マネージャプロセスが

図 10 プロセスの親子関係[6]

spawn 状態に入ったときに、以下の記述で子プロセスを起動させる。

```
flow_prohndl = op_pro_create
    ("hy_magazine_simple_source", OPC_NIL)
```

プロセス名が `hy_magazine_simple_source` の子プロセスハンドル (`flow_prohndl`) を定義する。次に、

```
op_pro_invoke (flow_prohndl,
    flow_ptc_mem_ptr) ;
```

で、情報共有する構造体 (`flow_ptc_mem_ptr`) を引数として子プロセスを起動する。プログラム中で用いる構造体の定義は、HB の中、または、ヘッダファイルを作成して定義する。プロセス間の情報共有を可能とするための API も用意されている。

(iii) `op_pro_argmem_access` API を用いて、子プロセスは、親プロセスの指定した情報へアクセスできる。この事例では、子プロセスは、`flow_ptc_mem_ptr` にアクセス可能であり、親プロセスと情報共有できる。

(iv) `op_pro_modmem_install` API を用いて、同じモジュール内の他のプロセスと共有できる情報を指定する。

(v) `op_pro_modmem_access` API を用いて、(iv) でインストールされた共有情報にアクセスできる。

[Step 3.2] パケット処理と ICI 処理の API

プロセス間の情報交換手段は、主に、パケットと ICI による方法がある。パケットによる情報交換は、パケットフィールドを用いる。これに情報を付与し、受け手がアクセスすることで情報を得る。一方、内部のプログラム間の割込み処理による情報交換では、パケットではなく ICI を用いる。この事例では、`magazine_ici` を定義する。OPNET では、パケット、ICI について、それぞれ構造を定義するエディタがある。図 11 は ICI エディタの例で、`invoked_pro_id` という名前の属性値 (integer タイプ) 一つから構成される ICI を定義している。

主なパケット処理に関する API を、以下に示す。

(i) `op_pk_create_fmt` (パケットフォーマット) で、パケットを生成する。

図 11 ICI エディタ画面(一部)

(ii) `op_pk_nfd_set` (パケットポインタ, フィールド名, 値)で, パケットのフィールドに値を設定する.

(iii) `op_pk_send` (パケットポインタ, 送信先の Stream Index(ノードモデル上で, 次に送信するモジュールへの矢印の ID))でパケットを送信する.

(iv) 受け側は, `op_pk_get` (パケットを受け取った矢印の ID)により, パケットポインタを受信する.

(v) `op_pk_nfd_access (get)` (パケットポインタ, フィールド名, 値)で, パケットのフィールドの設定値を取得する.

(vi) `op_pk_destroy` (パケットポインタ)で, パケットを廃棄する.

ICI は, パケットに似たデータオブジェクトであり, プロパティにデータを入力できる. 様々な割込みに付随させて, この情報を割込み先に通知する. 主な ICI 処理に関する API を以下に示す.

(i) `op_ici_create` (フォーマット名)で ICI を作成する.

(ii) `op_ici_attr_set` (ICI のポインタ, 属性値名, 属性値)で, 必要な情報を設定する.

(iii) `op_ici_install` (ICI のポインタ)で ICI 情報をインストール(通知可能に)する.

(iv) 割込み処理を実施する.

(v) 割込みを受けた側は, `op_intrpt_ici ()`で ICI ポインタを取得する.

(vi) `op_ici_attr_get` (ICI のポインタ, 属性値名, 属性値)で, 属性値のデータを取得する.

(vii) `op_ici_destroy` (ICI のポインタ)で ICI を廃棄する.

ケーススタディモデルでは, 子プロセスの終了時に, 親プロセスに対し, ICI を用いて子プロセスのプロセス番号の通知を行い, `generate` 状態から `stop` 状態に移移する. ICI の定義と実行は以下を行う.

(a) `magazine_ici` とそのプロパティを定義する.

```
ici_ptr = op_ici_create ("magazine_ici");
```

(b) プロパティの設定値としてプロセス ID をセットする.

```
op_ici_attr_set (ici_ptr, "invoked_pro_id",
P_to_C_mem_ptr->pro_id);
```

(c) 親プロセスへの割込みに付随して ICI 情報が送信できるようにする. `op_ici_install (ici_ptr);`

[Step 4] プロセスモデルのコンパイル

プロセスモデルを構築後, コンパイルを行う. メニューの `Compile Code`, または, コンパイルアイコンからコンパイルを実行する. 図 12 は, 誤りがあった場合の事例である. コンパイルを失敗すると `Compilation failed` を示す画面が開き, エラー箇所を示すリストが表示される. これをもとに, 誤りを探す. 今回は, `clear` 状態で用いた変数 `flow_invoked_info_ptr` が変数として定義されていないことを示すエラーである. TV (Temporary Variables) 内にこれを定義し, 再度コンパイルすると, `Done` と表示された画面が開き, コンパイルが成功する.

[Step 5] ネットワークモデル上での実行とデバッグ

モデル上利用するすべてのプロセスモデルをコンパイルリンクし, NW シミュレーションとして動作することを確認する. OPNET のデバッガツール (OPNET simulation Debugger: ODB) を利用する. 扱うケーススタディの NW モデルは, 図 13 のように非常に単純なモデルである. `magazine_node` では, トラヒックフロー動作を行う複数の子プロセスが発生し, 生存時間中, パケットを `sink_server` に送信する単純なモデルである.

5.4 ODB (OPNET デバッガ) の動作

シミュレーション実行画面で, 図 14 のように ODB 使用を宣言する. シミュレーションを実行するとコンパイルリンク処理がなされ, 0 時点の DES の最初のイベン

図 13 ケーススタディの NW モデル

図 12 コンパイルエラーのときの表示例(一部)

トを待つ状況まで処理が進む。コンソール画面の「ODB>」の部分に、ODB コマンドを用いて、DES のイベントの進行を制御できる。また、プログラム中にラベルを定義できる。ラベルを指定してシミュレーションを実行させると、プログラム中で指定した情報をコンソール画面に表示できる。今回、magazine というラベルを以下のようにプログラム中で定義した。

```
ltrace_flow_source_mgr_active=
op_prg_odb_ltrace_active ("magazine") ;
```

ラベルを指定し、30 シミュレーション時点までイベントを進めるための ODB コマンドは以下ようになる。

```
ODB>ltrace magazine (magazine ラベルを指定)
ODB>tstop 30 (30 時点でイベントをストップ)
ODB>c (30 時点までシミュレーションを実行)
```

プログラム上にエラーがあると、実行途中で以下のような画面が現れる。コンソール画面にも、Program Fault, Program Abort の画面が表示される。

このエラー解決のかぎは、画面 (図 15) とコンソール画面 (図 16) で示された情報である。今回の Program Abort の直接原因は、Invalid Memory Access であることが読み取れ、その場所は、magazine_node オブジェクトの中の Process モジュールであることを、また、op_pro_invoke コマンドに問題があることを画面は示している。コンソール画面では、Function として、hy_magazine_simple_source [init enter execs] と記述がある。これは、親プロセスが起動した子プロセス (hy_magazine_simple_source) の初期状態 (Init

状態) で、親プロセスと共有する情報メモリに、アクセス処理の部分に問題があることを示す。エラー表示内容から、問題は、親プロセスが、共有情報メモリを正しく引数として定義しているかどうかの問題があると推測できる。実際、親プロセスを確認すると、

```
op_pro_invoke (flow_prohndl, OPC_NIL) ;
```

とコーディングされており、子プロセスがアクセスするメモリポインタを示していなかった。これを、

```
op_pro_invoke(flow_prohndl,flow_ptc_mem_ptr);
```

と修正することで、エラーは解消される。DES は実行され、図 17 のような、経過時点におけるアクティブフロー総数の計測とこの結果のグラフを作成できる。これは、ある時点で同時に動作している子プロセスの数を意味する。sink_server における受信パケット数など、これ以外にも検討に必要な統計量を登録、測定可能である。

ODB には、逐次イベント処理結果をトレースするコマンドや、プロセス、ノードなどのオブジェクト番号を表示するコマンドなど、様々用意されており、これらを用いてモデルの誤りを検出、修正することができる。

図 14 ODB 実行を指定する画面 (一部)

図 15 エラー表示画面

```
<<< Program Fault >>>
* Time:      09:54:58 %i 4 08 2008
* Product:   modeler
* Package:   process (hy_magazine_simple_source) at module
* Function:  hy_magazine_simple_source [init enter execs]
* Error:     program abort -- Invalid Memory Access
```

図 16 エラー表示したコンソール画面

図 17 アクティブフロー数の推移

紙面の関係で、統計量、プロセスモデルインタフェースの設定、その他重要な API についての説明は割愛するが、基本的には、上記で示したワークフローに従って、ノード、プロセスモデルを作成する。オンラインマニュアルから API や ODB の詳細を知ることができる。カスタマイズしたプロトコルを OPNET 上のライブラリモデル、例えば、IP プロトコルモジュールと整合性をとって動作させるには、IP モジュールの内部動作と IP のプロトコル動作をよく理解した上で、モデルを作成する必要がある[6]。

6. む す び

OPNET のモデリング、利用方法に関する基本内容について説明した。IPNW 上のプロトコル性能評価では、コントロールプレーンを表現する「NW 上の各ノードが、どのような情報を、どのようなタイミングで交換し、それに対応して、どのような状態遷移をして、動作を行うか？」を明確にすることが不可欠である。また、様々な NW 構成の上で、検討対象のプロトコルが動作することを証明しなければならない。OPNET モデリングはこれを可能とする。また、NW 管理ツールとして、実際のコンフィギュレーションに応じて NW モデルを構築、様々な設定、障害、トラヒックシナリオをもとに What-if test の実行環境を構築できる。

OPNET のホームページには、有用な参考資料が豊富にある（注：一部アクセスにアカウント、パスワードが必要）。また、NW モデリングには、コンフィギュレーションの知識は必須である。Cisco のホームページ [3] など、コンフィギュレーション事例も豊富で参考になる。[7]、[8]は、参考書であり、[8]は OPNET の練習問題集

である（ただし記載されているバージョンは、現在のものより古い）。

ここで記述した内容は OPNET の基本事項のごく一部である。OPNET で実践的なプロトコルモデルを作成するには、モデル構築の経験を積むことが重要なことはいうまでもない。最後に、これから OPNET を用いてプロトコルや NW のモデリングを試みようとする人に少しでもお役に立てば幸いである。

[注意事項]

文章中に記載されているシステム名、商標名は、その開発元の商標または登録商標であり、この資料では、解説説明を行う目的でのみ、商品名などを記載している。その商標権を侵害する意思、目的のないことをここに、申し述べておく。OPNET のモデル紹介は Ver.12 をもとに解説をしている。OPNET のバージョンは、毎年上がるため、今回の説明部分について、別バージョンでは、変更されている場合もあることを御了承頂きたい。

文 献

- [1] OPNET Technologies, Inc., <http://www.opnet.com>
 - [2] Scalable Network technologies, <http://www.qualnet.com/>
 - [3] Cisco Systems, <http://www.cisco.com/>
 - [4] Cisco Network Application Performance Analysis (NAPA) Solution, http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/netmgtsw/product_promotion0900aecd8039e064.html
 - [5] Juniper networks, <http://www.juniper.net/>
 - [6] 山田博司, “OPNET を用いたネットワーク・プロトコルの性能評価について,” 信学技報, NS2008-5, 2008.
 - [7] L. L. Peterson and B. S. Davie, Computer Networks — A System Approach, 3rd ed., Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2003.
 - [8] E. Aboelela, Computer Networks — A Systems Approach, 3rd ed., Network Simulation Experiments Manual, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2003.
- (URL は、執筆時 (7 月 28 日)確認のものである。)

(平成 20 年 5 月 14 日受付, 7 月 28 日再受付)

山田 博司(正員)

▶ 昭 60 名大・理・数学卒。同年日本電信電話株式会社通信研究所入所。通信ネットワークの性能評価・シミュレーションモデリング技術の研究開発に従事。平 8 東京工業大学・博士 (工学)。2000, 2002, OPNET-WORK Distinguished Paper Award, 平 19 年度ネットワークシステム研究賞受賞。