

ペトリネットは便利な道具

Petri Nets: Book and Tool Review by Naoshi UCHIHIRA (Toshiba Corp.), Kunihiko HIRAIISHI (Japan Advanced Institute of Science and Technology) and Mikio AOYAMA (Niigata Institute of Technology).

内平 直志¹ 平石 邦彦² 青山 幹雄³

1 (株) 東芝

2 北陸先端科学技術大学院大学

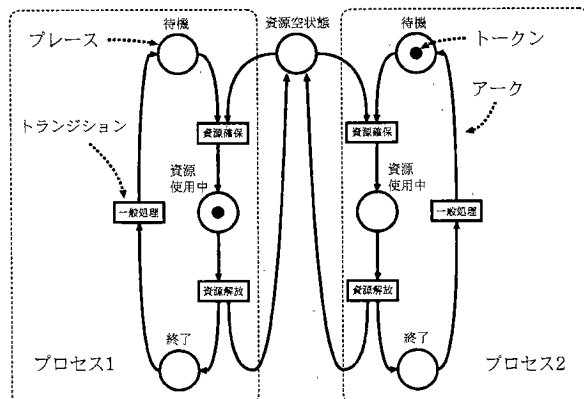
3 新潟工科大学

1. プロローグ

読者の皆さんは複雑な並行システムを開発する際にどんな道具を使いますか？ 筆者は、タイミングが難しい部分を「ペトリネット」を使ってビジュアルにモデル化し、頭の中を整理し、開発メンバー間でモデルのレビューを行ってからコーディングに入ります。ベーシックなペトリネットはたいへん単純な構造なので、1時間もあれば習得できます。さあ、皆さんも使ってみませんか？

2. 道具としてのペトリネット

ペトリネットは並行システムのモデル化言語であり、今から30年以上前にドイツのC. A. Petri博士によって提案された。ペトリネットは、単純明快な図式表現をもち、シミュレーション実行できるだけでなく、形式的な意味が明確なためにさまざまな数学的解析が可能である。ゆえに、実務家および理論家の両方から便利な道具として利用されている。本稿では、道具と



ペトリネットで2つのプロセスの共有資源に対する排他制御をモデル化した例。ペトリネットは4つの要素（プレース、トランジション、アーク、トークン）から構成される。プレースはシステムの状態、トランジションとアークは状態遷移、トークンの置かれたプレースが各プロセスの現在の状態を表している。

図-1 ペトリネットの例

しての使い方を説明し、関連する書籍やツールを紹介する。

2.1 理論家の道具

ペトリネットは、有限オートマトンより表現力の高い計算モデルとしてそれ自体理論的研究の対象であるが、その基本的な性質は現在までにほぼ解明できている。近年は、ペトリネットの直観的なわかりやすさと一般性により、ほかの並行計算モデルの分類や解析の道具として用いられることが多い。具体例としては、資源の概念を表現できるペトリネットの能力に着目して、線形論理の解釈の道具として用いられている。最近のペトリネットの理論的研究では、実際のシステムのモデル化に使われる高水準ペトリネットの解析手法および大規模なペトリネットの効率的解析手法の2つの方向が活発である。

2.2 実務家の道具

システム的设计者は、ペトリネットを設計図の1つとして使う。システムの状態がイベントの生起により離散的に変化し並行性を有するシステムが適用対象である。具体的には、生産システム、通信システム、シーケンス制御システム、分散処理システム、オペレーティングシステム的设计に利用実績がある。実際には、すべてをペトリネットで設計するわけではなく、並行処理のタイミングの設計が難しい部分に使う。設計図としては、ベーシックなペトリネットでは表現力が不十分なので、細かい遷移条件を記述できる高水準ペトリネットを用いることが多い。オブジェクト指向分析設計で使われる最近話題の統一モデリング言語 (UML: Unified Modeling Language V1.0) においても、アクティビティダイアグラムとしてペトリネットが採用されている。ペトリネットで記述した設計図は、シミュレーションや種々の解析手法を用いて設計者の意図通り動くか否かをチェックできるとともに、そのまま設計ドキュメントとして利用できる。ペトリネット

ト以外にも並行システムのモデル化言語には、通信型拡張状態遷移図 (Statechartなど)、I/Oオートマトン、プロセス代数など多数あるが、並行性を直観的に把握できる図式表現により、ペトリネットを選択する設計者は多い。また、設計図としてではなく、設計したシステムあるいは既存のシステムの性能評価を目的としたモデル化の言語として利用する場合もある。この場合、遷移に要する時間を定数や確率分布で記述できる時間ペトリネットや確率ペトリネットが利用される。

3. 書 籍

3.1 入門書／教科書

- 1) 村田忠夫: ペトリネットの解析と応用, 近代科学社 (1992) .
- 2) J. L. Peterson: *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*, Prentice-Hall (1981) (市川惇信, 小林重信訳: ペトリネット入門, 共立出版, 1984) .
- 3) W. Reisig: *Petri Nets: An Introduction*, EATCS Monographs on Theoretical Computer Science, Vol.4, Springer-Verlag (1985) (長谷川健介, 高橋宏治訳: ペトリネット理論入門, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1988) .
- 4) 奥川峻史: ペトリネットの基礎, 共立出版 (1995) .
- 5) 椎塚久雄: 実例ペトリネット, コロナ社 (1992) .

文献1) は、ペトリネット研究の第一人者であるイリノイ大学の村田忠夫教授による教科書である。Proceedings of the IEEEに掲載され、年間で最も優秀なサーベイ論文としてIEEE G. Flunk Prize Awardを受賞した氏の論文がベースとなっている。基本的概念／定義の説明に加えて、ペトリネットのさまざまな特性の解析方法を詳しく解説し、著者の研究成果である高水準ペトリネットの論理プログラムへの応用も紹介している。コンパクトかつ解答付きの演習問題が豊富であり、入門書・教科書としては最適である。

文献2) は、ペトリネット研究の1970年代までの成果を網羅しており、理論研究の古典的教科書である。今となっては若干内容が古い部分もあるが当時としては名著といえる。とくに、ペトリネットの並行計算モデルとしての位置づけ、言語理論との関係などに関しては、類書にはない解説がある。

文献3) は、ドイツ流のペトリネット理論の教科書。ネットのグラフ的な扱い、インバリエント解析、構造を制限した特殊なクラスの解析などについて、数学的に厳密な形で記述している。

そのほかにも、日本語の入門書・教科書としては文献4), 5) がある。文献4) は、時間ペトリネット、確率ペトリネット、高水準ペトリネットなど主要な拡張

ペトリネットの定義とその基礎的性質を整理し、比較的最近の話題とともに紹介している。文献5) は、時間・確率ペトリネットを中心に、豊富な実例とともに解説している。また、著者のグループが開発したペトリネット・ツールについても紹介している。

3.2 高水準／確率ペトリネット

高水準ペトリネットと確率ペトリネットの定番であるカラーペトリネットと一般化確率ペトリネットの解説書を紹介する。いずれも、各モデルの提唱者により執筆された本である。これらのモデルを使う人は、もっていたほうがよいであろう。

- 6) K. Jensen: *Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use, Vol.1-Vol.3*, EATCS Monographs on Theoretical Computer Science, Springer-Verlag, 1992 (Vol.1) , 1995 (Vol.2) , 1997 (Vol.3) .
- 7) M. Ajmone Marsan, G. Balbo, G. Conte, S. Donatelli, G. Franceschinis: *Modeling with Generalized Stochastic Petri Nets*, John Wiley & Sons (1995) .

文献6) はカラーペトリネットに関する3部作の解説書。1冊目はカラーペトリネットの体系的な解説書。カラーペトリネットの定義、モデル化の方法、解析方法、支援ツール、応用事例を網羅している。2冊目は、カラーペトリネットの構造的な特性とネット理論に基づく解析方法、インバリエントの計算を体系的に解説。時間カラーペトリネットについても紹介している。3冊目はつい最近出版され、カラーペトリネットの19の実用レベルの適用事例に関して詳しく紹介している。

文献7) は、一般化確率ペトリネットの基礎と応用に関する本。一般化確率ペトリネットとは、数学的なモデルとしての時間／確率ペトリネットを実際のシステムのモデル化に使えるように一般化したものである。本書の後半で、一般化確率ペトリネットで計算機システム、生産システムなどをモデル化し性能解析を行う事例が紹介されている。

3.3 ペトリネットの応用

- 8) 離散事象システム研究専門委員会 (編): ペトリネットとその応用, 計測自動制御学会 (1992) .
- 9) 熊谷貞俊, 薦田憲久: ペトリネットによる離散事象システム論, コロナ社 (1995) .
- 10) A. A. Desrochers and R. Y. Al-Jaar: *Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems: Modeling, Control and Performance Analysis*, IEEE Press (1995) .
- 11) W. Reisig: *A Primer in Petri Net Design*, Springer-

Verlag (1992) .

12) 青山幹雄, 内平直志, 平石邦彦: ペトリネットの理論と実践, 朝倉書店 (1995) .

文献8) は, 国内におけるペトリネット研究の中心となってきた計測自動制御学会の離散事象システム研究会のメンバが執筆, 前半はペトリネットの全体的な解説, 後半は理論と応用に関するトピックスを掲載している. 応用事例が豊富であり, ペトリネットの応用に関するハンドブックとして便利である.

日本におけるペトリネットの応用の研究に関しては, 生産システムやシーケンス制御システムを対象としたものが活発であり, 世界的にも優れた研究成果がある. 文献9) は, それらの活動の牽引者である著者が, 生産システム, シーケンス制御系への応用を中心に, ペトリネットの基礎理論から応用事例, ツールまで解説した本である. 同様の応用分野を扱った文献10) では, 生産システムや制御システムの具体的な例題を使って時間ペトリネットや確率ペトリネットによるモデル化と性能評価の方法を示している.

システムおよびソフトウェアの設計者にお勧めの本としては文献11), 12) がある. 文献11) は, システム設計者およびプロジェクトマネージャ向けのペトリネットを用いたシステム設計法の入門的教科書である. 講習会用のテキストを発展させたものなので, 厳密性より直観的理解を優先している. 解答つきの問題も豊富である. 文献12) では, システム・ソフトウェア設計におけるペトリネットの利用の観点から, 理論および実践的応用の最新成果が幅広くまとめられている.

4. ツール

ペトリネットを利用する実務家にとって, ペトリネット作成・実行・解析ツールは不可欠である. 簡単なツールを自作してもよいが, 最近は便利なフリーソフトウェアがインターネット経由で入手可能なので, それらを利用されることをお勧めする. 下記に代表的なものをいくつか挙げる. これらのフリーソフトウェアは必ずしも安定的に公開されているわけではないので, 最新の情報は, <http://www.daimi.aau.dk/PetriNets/tools/db.html> を参照されたい. ここには, 有料ツールを含めて30以上のツールが紹介されている.

• Design/CPN: デンマークのAarhus大学のK. Jensenを中心とするペトリネット研究グループが開発したカラーペトリネットの作成・実行・解析ツール. 数年前までは, 米国のソフトウェア会社から数百万円で販売していたが, 最近フリーソフトになった. 近年,

学会発表などで, カラーペトリネットおよび本ツールを利用した応用研究が目立ち, デファクトスタンダード的な感がある.

<http://www.daimi.aau.dk/designCPN/>

• GreatSPN: イタリアのTorino大学において前述の文献7) の著者らのグループによって開発された一般化確率ペトリネットの作成, 実行, 解析ツール. トークンの滞留時間の分布を示すなど性能評価に便利である. 非営利組織に対してのみフリーで配布.

<http://www.di.unito.it/pub/WWW/PEgroup/GreatSPN/>

• Cabernet: イタリアのPolitecnico di Milanoで開発されたリアルタイムシステムのモデル化に適したツール. トークンに付随するデータおよびトランジションの発火条件がC++で記述できる点と発火に要する時間が記述できる点が特徴である. ただし, GreatSPNのような性能評価の機能はない.

<ftp://ftp-se.elet.polimi.it/dist/Cabernet/>

• PEP: ドイツのHildesheim大学のEike Bestらの研究グループで開発しているツール. PEPの内部表現はペトリネットだが, ユーザに対してはペトリネット表現以外にも並行プログラミング言語や状態遷移表現を提供している. 解析機能としては, 到達可能性解析, デッドロック解析, 時間論理のモデル検査法などがある. PEPの特徴はほかの解析ツールへのインタフェースを提供している点であり, 最近ではCarnegie Mellon大学のSMV (Symbolic Model Verifier) およびBell研究所のSpin (分散システムの検証ツール) へのインタフェースが追加された. 計算機支援検証の玄人好みのツールである.

<http://www.informatik.uni-hildesheim.de/~pep/HomePage.html>

• PROD: 高水準ペトリネットの1つである述語/トランジションネットの解析ツールであり, フィンランドのヘルシンキ工科大学で開発している. 到達可能性解析を効率的に行う専用ツールであり, 作図機能とかGUIはない. ただし, 最近話題の半順序法 (stubborn set method, sleep set method) や時間論理のモデル検査機構が実装されており, 解析/検証エンジンとしてほかのツールにない魅力がある. 改良も継続的に行われている. 自作のペトリネットツールの解析エンジンとして活用することもできる.

<http://topos.hut.fi/~petrinet/prod.html>

• PETRI Maker: 実際の設計に使うというより, ペトリネットの勉強のために簡単な作図/シミュレーションツールを入手し, ちょっと動かしてみたいという人にはPETRI Makerがおすすめである. フランスのAngers大学で開発されたものでWindows環境で稼働

する。

<http://www.istia.univ-angers.fr/~pmaker/>

5. そのほか参考情報

ペトリネットに関する論文は、多種多様な分野の論文誌および会議録に掲載されている。これは、ペトリネットがさまざまな分野で便利な道具として使われていることを表している。ペトリネット専門の国際会議にはICATPN (International Conference on Application and Theory of Petri Nets) とPNPM (International Workshop on Petri Nets and Performance Models) があり、前者はSpringer社のLecture Notes in Computer Scienceシリーズとして、後者はIEEE Computer Societyから論文集が発行されている。この2つをみていけばペトリネットの理論と応用の主な最新動向が把握できる。国内の関連学会には、計測自動制御学会の離散事象システム研究会と電子情報通信学会のコンカレント工学研究会があり、これらに参加すれば国内のペトリネット研究のアクティビティに触れることができる。

また、高水準ペトリネットの標準化に関しては、ISO/IEC JTC1/SC7/WG11において作業が進んでいる。標準化によりツール間のデータの互換性や解析エンジンの共有化が促進されれば、実務家にとっては朗報である。最新情報は、<http://www.daimi.aau.dk/PetriNets/standard/>を参照。

なお、これまで紹介した国内外のペトリネットの会議、書籍、ツールの最新情報はペトリネットメイリングリストで入手できる。本稿の筆者の一人の青山が国内のメイリングリストを管理している（国内のメイリングリストに加入すれば自動的に国外のペトリネットメイリングリストの情報が転送される）。参加希望の方はmikio@csd.ts.fujitsu.co.jpまでメールを送ればよい。

本稿が新たにペトリネットを勉強したい／使いたいという人の参考になれば幸いである。

(平成9年9月8日受付)



内平 直志 (正会員)

1959年生。1982年東京工業大学理学部情報科学科卒業。同年東京芝浦電気(株)(現(株)東芝)入社。現在、同社研究開発センターS&S研究所主任研究員。ペトリネットや時相論理を用いた並行プログラムの高信頼化技術の研究開発に従事。1986年度情報処理学会論文賞受賞。ACM会員。

e-mail:uchi@ssel.toshiba.co.jp



平石 邦彦 (正会員)

1985年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻修了。同年富士通(株)入社。1993年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。工学博士。システム工学、とくに、離散事象システム、並行計算モデルに関する研究に従事。電子情報通信学会、計測自動制御学会、IEEE各会員。

e-mail:hira@jaist.ac.jp



青山 幹雄 (正会員)

1980年岡山大学大学院工学研究科修士課程修了。同年富士通(株)入社。1986~88年米国イリノイ大学客員研究員。1995年より新潟工科大学情報電子工学科教授。ソフトウェア開発方法論、開発支援環境、ソフトウェアプロセス、コンポーネントウェアなどに興味をもつ。1993年情報処理学会研究賞受賞。電子情報通信学会、ソフトウェア科学会、IEEE、ACM各会員。e-mail:mikio@csd.ts.fujitsu.co.jp