

## PNPM' 93/ToulouseとPN' 93/Chicago報告

[ペトリネットと性能モデル]と[ペトリネットの応用と理論] 両国際会議報告

奥川 峻史

京都産業大学工学部情報通信工学科  
603 京都市北区上賀茂本山

あらまし 10月19-22日にフランス・ツールーズで開催された、5th International Workshop on Petri Nets and Performance Models( PNPM'93/Toulouse )と、6月21-25日にUSA・シカゴで開催された、14th International Conference on Application and Theory of Petri Nets( PN'93/Chicago )の両国際会議の概略について報告し、最近のペトリネットの研究動向と、ツールの開発状況について述べる。

和文キーワード ペトリネット 応用と理論の動向 性能モデル ペトリネット・ツール

## Reports on PNPM' 93 and PN' 93/Chicago

[Petri Net and Performance Model] and [Application and Theory of Petri Net]

S h u n j i O K U G A W A

Department of Information & Communication, Kyoto Sangyo University  
Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603, Japan

Abstract Reports are given on 5th International Workshop on Petri Nets and Performance Models( PNPM'93 )held in Toulouse of France during October 20-22, and on 14th International Conference on Application and Theory of Petri Nets( PN'93 )held in Chicago during June 23-25. Also given are current tendency of Petri Net researches and developments of Petri Net tools.

英文 key words application and theory of Petri Net performance models tools

# 1 はじめに

ドイツのC. A. Petriによって1962年に提唱されたペトリネットは、グラフィック視覚的ツール、シミュレーションツール、数学的方法論の三つの機能を併せもっており、並行的、非同期的、分散的、非決定的、確率的な動作をする情報処理システム、すなわちコンピュータ・アーキテクチャ、非同期回路、VLSI設計システム、ソフトウェア、通信プロトコル、通信ネットワーク、マルチメディア、リアルタイムシステム、オフィスオートメーション、製造・工業制御システム(FMS)、オペレーションズリサーチなどの記述・解析・検証ツールとして非常に有力なものであり、今後ますますその重要性は増すと考えられる。

従来、ペトリネットの研究は大学での理論的な研究が先行していたが、最近では実際の問題に応用されることが多くなり、発表論文数も企業からのものが40%と増えてきている。応用例はFMSが一番多いが、最近オブジェクト指向的な発想でソフトウェアをネットモデル的なアプローチで設計する事例が多くなってきている。

ペトリネットに関する国際会議には、1980年から毎年開催されてきている International Conference on Application and Theory of Petri Nets (PN)と、1985年から隔年開催されてきている International Workshop on Petri Nets and Performance Models (PNPM)がある。

本報告では、10月19-22日(19日はチュートリアル)にフランス・ツールーズで開催された(5th)PNPM'93/Toulouseと、6月21-25日(21-22日はチュートリアル)にUSA・シカゴで開催された(14th)PN'93/Chicagoの両国際会議の概略と、それらに関連して、最近のペトリネットの研究動向と、ペトリネット・ツールの開発状況について述べる。

## 2 ペトリネット国際会議の開催地・年

表1に、ペトリネット国際会議の、過去および近未来の開催地を示す。すでにPNPM'89が京都で開催されている。さらに、まだ正式に決まっ

たわけではないが、PN'96が京都で開催される可能性が大きい。

表1 ペトリネット国際会議開催地・年

	PNPM	PN
1980		仏・ストラスブルグ
1981		独・バートホネフ
1982		伊・ヴァレナ
1983		仏・ツールーズ
1984		デンマーク・オーフス
1985	伊・トリノ	フィンランド・エスポ
1986		英・オックスフォード
1987	USA・マディソン	西・サラゴサ
1988		伊・ベニス
1989	京都	独・ボン
1990		仏・パリ
1991	豪・メルボルン	デンマーク・オーフス
1992		英・シェフィールド
1993	仏・ツールーズ	USA・シカゴ
1994		西・サラゴサ
1995	USA・ノース キャロライナ	伊・トリノ
1996		京都 ?

## 3 両会議の国別参加者数

各国の研究者の数を示す1つの尺度であるので、表2にPNPM'93/ToulouseとPN'93/Chicagoの国別参加者数を示す。

表2 1993年の会議の国別参加者数

国	PNPM	PN
フランス	51	15
ドイツ	11	18
イタリア	9	12
USA	8	65
日本	4	8
スペイン	3	3
韓国	3	4
オランダ	2	4
カナダ	2	10
フィンランド	2	3
デンマーク	1	4
ベルギー	1	1

オーストラリア	1	1
オーストリー	1	
チェコ	1	
アルバニア	1	
英国		4
スイス		2
ポルトガル		1
ロシア		1
メキシコ		1
台湾		1
計	101	158

## 4 PNPМ'93のチュートリアルと論文タイトル

### (1) チュートリアル

- ・カラーペトリネット(CPN)
- ・CPNの構造解析
- ・時間PN(TPN)と確率PN(SPN)
- ・一般化および決定的確率ペトリネット(GSPN and DSPN)
- ・確率 Well-Formed カラーペトリネット(SWN)
- ・凸面幾何学と線形代数技術
- ・TPNのための再帰的展開方程式

### (2) 論文タイトル<sup>(1)</sup>

提出論文57編の中から25編が採択され、3編の招待論文と合わせて28編の論文発表があった。

#### invited paper

- ・Quantitative Evaluation of Discrete Event Systems: Models, Performances and Techniques

#### session 1: Extended Models

- ・Queueing Petri Nets: a Formalism for the Combined Qualitative and Quantitative Analysis of Systems
- ・Definition of the Model "Stochastic Timed Well Formed Coloured Nets"
- ・A Reactive Real-Time Systems Modelling and Programming Aid Tool Based on the Synchronous Petri Nets Formalism

#### session 2: Analysis

- ・Towards a Simplified Building of Timed Petri Nets Reachability Graph
- ・Decidability of the Strict Reachability Problem for TPN's with Rational and Real Durations
- ・On the Structural and Behavioural Characterization of P/T Nets
- ・Conflict Sets in Coloured Petri Nets

#### tool session

座長：大阪大学熊谷貞俊教授。

#### invited paper

- ・Constructive Modelling and Design, Basic Research within the European QMIPS-Project

#### session 3: Product Form Solutions

- ・Computational Algorithms for Product Form Solution Stochastic Petri Nets
- ・Algorithms for Product Form Stochastic Petri Nets: A New Approach
- ・A Characterisation of Independence for Competing Markov Chains with Applications to Stochastic Petri Nets

#### session 4: Performance Bounds

- ・Operational Analysis of Timed Petri Nets and Application to the Computation of Performance Bounds
- ・A General Iterative Technique for Approximate Throughput Computation of Stochastic Marked Graphs
- ・Computing Bounds for the Performance Indices of Quasi-Lumpable Stochastic Well-Formed Nets

#### session 5: Non Markovian Models

- ・Analysis of Deterministic and Stochastic Petri Nets
- ・A Characterization of the Stochastic Process Underlying a Stochastic Petri Net
- ・Sensitivity Analysis of Markov Regenerative Stochastic Petri Nets

### invited paper

- The Implications of Industrial Systems' Complexity on Methodologies for System Design and Evaluation

### session 6: Methodology 1

- Synthesis of GSPN Models for Workload Mapping on Concurrent Architectures
- Aggregation and Reduction Techniques for Hierarchical GCSPNs
- Parallel Architectures with Regular Structure : a Case Study in Modelling using Stochastic Well-Formed Coloured Petri Nets

### session 7: Methodology 2

- Fast Simulation of Rare Events in Stochastic Petri Nets
- Automated Time Scale Decomposition and Analysis of Stochastic Petri Nets
- A Methodology for Formal Expression of Hierarchy in Model Solution

### session 8: Application

- On Scalable Net Modelling of OLTP
- Validation and Performance Analysis of Network Algorithms by Coloured Petri Net
- GSPN Modelling Methods for Performance and Dependability Evaluation of a Real-Life Flexible Manufacturing System

## 5 PN'93のチュートリアルと論文タイトル

### (1) チュートリアル

#### 入門1,2

基本ネットシステム、プレイス・トランジションネット、高水準ネット、時間・確率ネット、GSPN入門、ペトリネットのレベル

#### 上級(理論)

並行モデルの分類、ペトリネットと他モデルとの関係、プロセス代数とそのモデル

#### 上級(実際)

ペトリネットと論理、ファジィペトリネット、ルールベースシステムの編集

### 事例研究

非同期回路の設計、通信プロトコルのシミュレーション、事務プロセスの仕事フロー解析、異種マルチプロセッサの信頼性モデル化

### (2) 論文タイトル<sup>(2)</sup>

提出された102編の論文のうち26編が採用された。これらの論文の他に、3編の招待論文と、別に6編のプロジェクト論文を加えて、合計35編の論文発表が行われた。

- Groupware and Concurrency Modeling (invited paper: C.Ellis(コロラド大学))
- Bridging the Gap between Place-and Floyd-Invariants with Applications to Pre-emptive Scheduling
- Interval Timed Colored Petri Nets and their Analysis
- Hierarchies in Colored GSPNs
- Analysis of Place/Transition Nets with Timed Arcs and its Applications to Batch Process Control
- Liveness and Home States in Equal Conflict Systems
- Shortest Paths in Reachability Graphs
- A Unified Approach for Reasoning about Conflict-Free Petri Nets
- Applications of Qualitative and Quantitative Structural Analysis of Net Models (invited paper: M.Silva(サラゴサ大学))
- A subset of Lotos with the Computational Power of Place/Transition-Nets
- Integrating Software Engineering Models and Petri Nets for the Specification and Prototyping of Complex Information Systems
- A Client-Server Protocol for the Composition of Petri Nets
- Integration of Specification for Modeling and Specification for System Design
- Linear Time Algorithm to Find a Minimal Dead-lock in a Strongly Connected Free-Choice Net

- An Efficient Algorithm for Finding Deadlocks in Colored Petri Nets
- Construction of S-invariants and S-components for Refined Petri Boxes
- Colored Petri Nets Extended with Place Capacities, Test Arcs and Inhibitor Arcs
- Variable Reasoning and Analysis about Uncertainty with Fuzzy Petri Nets
- Exploiting T-Invariant Analysis in Diagnostic Reasoning on a Petri Net Model
- Petri Nets with Continuous-State Marking Processes(invited paper: K.S.Trivedi(デューク大学))
- New Priority-Lists for Scheduling in Timed Petri Nets
- Distributed Simulation of Timed Petri Nets: Exploiting the Net Structure to Obtain Efficiency
- On Well-Formed Nets and Optimal Firing Test
- Taking Advantages of Temporal Redundancy in High-Level Petri Nets Implementations
- Marking Optimization of Stochastic Timed Event Graphs
- Transient Analysis of Deterministic and Stochastic Petri Nets
- Analysis of Dynamic Load Balancing Strategies Using a Combination of Stochastic Petri Nets and Queueing Networks
- Compositional Liveness Properties of EN-Systems
- Synthesis of Net Systems

## 6 ペトリネット・ツール

実際の大規模で複雑なシステムを記述・解析・検証するためには、グラフィックエディタ、テキストエディタ、解析プログラムなどからなるペトリネット・ツールが必要不可欠である。

両会議でデモンストレーションされたペトリネット・ツールの概略を以下に示す。

PNPM'93では、PESIMからDesign/CPNまでの11ツールが、PN'93ではDSPNexpress 以下9ツール

が展示された(DSPNexpress, GreatSPN および Design/CPNの3ツールは両方で展示)。以下、各ツール名の次に開発代表者名(E-mailアドレス)を示す。言語はほとんどCまたはC++であり、対象とするマシンはSUN(一番多い), HP, DEC, IBMである。大学には無料で頒布してくれるものも多い。

### • PESIM

チェコ共和国 Brno工科大学の M. Ceska  
(ceska@dcse.fee.vutbr.cz)

プレイス・トランジションPN(P/T)とそのサブクラスであるマークグラフ(抑止アークによる拡張可能)、およびSPNを対象とする。

### • RPTS

フランス・ツールーズのCNRSの Y. Atamna  
確率時間ペトリネット(STPN)を対象とする。

### • DyQNtool+

オランダの Twente大学の B.R.Haverkort  
(haverkor@cs.utwente.nl)

SPNと待合せ回路網(QN)を結合したダイナミックQNの概念に基づく。

### • UltraSAN

USA・アリゾナ大学の W.H.Sanders  
(whs@ece.arizona.edu)

ペトリネットの確率的拡張である SAN  
(stochastic activity networks)に基づく。

### • ASA+

フランス・ツールーズの VERILOG の  
B.Algayres(lloret@verilog.fr)  
高水準TPN・SPNを対象とする。

### • MISS-RdP

フランス・ツールーズのIXI(Ingenierie  
Concourante et Systemes d'Information)  
Timed Stochastic Interpreted PN を対象とし、ペトリネットはマルコフ仮定を避けるため、モンテカルロ・シミュレーションで解析される。

・ PETRILAM

フランス・ラーンズ (Reims) のマイクロエレクトロニクス技術応用研究所のF.Gellot Weighted PN を対象とする。

・ DELSYS

フランス・ナンテール (Nanterre) の SOFRETEN SPNを対象とし、数値計算はマルコフ過程および半マルコフ過程に基づく。

・ DSPNexpress

ベルリン工科大学の C.Lindemann (lind@cs.tu-berlin.de) 決定確率ペトリネット (DSPN) による解析の強力なツールで、マシンはSun, DEC, HP いずれでもよい。ソフトウェアライセンス合意書と QIC150フォーマットのストリーマテープを送れば、大学関係者には無償で頒布してもらえる (筆者も最近使用を開始)。

・ GreatSPN

イタリア・トリノ大学 のG.Chiola (chiola@di.unito.it) GSPN および TPN を対象としている。マシンはSunで、大学には無償でインターネットを通じて頒布してもらえる。

・ Design/CPN

USA・メタソフトウェアの R. Seltzer (selzer@metametasoft.com) CPN を対象とする。

・ ExSpect

オランダ・Eindhoven 工科大学の L. Somers (wsinlou@win.tue.nl) 階層カラーTPNを対象とする。

・ SANDS/CO-OPN

ジュネーブ大学 の B.Didier (buch@cui.unige.ch) structured algebraic nets を対象とする。

・ PROD

ヘルシンキ工科大学 のK.Varpaaniemi (Kimmo.Varpaaniemi@hut.fi) P/Tネットの到達可能性解析のためのツールで、マシンはSunで、saturn.hut.fi( IPアドレス 192. 26.133.104)サイトから、ftpで無償で入手できる。ログイン名は anonymous、パスワードはIPアドレス、ディレクトリは/pub/prod である。

・ MARS

パリ第6大学 の C. Girault 高水準CPNを対象とする。

・ ASE

オッタワのカールトン大学の C.M.Woodside(cmw@sce.carleton.ca) ASE(Activity Sequence Network)を対象とする。

・ Compositional Petri Nets Environment

ウラジオストックのロシア科学アカデミ N. Anisimov(anisimov@iapu2.marine.su)

## 7 ペトリネットの国際研究活動

ペトリネットによる性能評価に関連した国際会議はPNPMの他に、International Conference on Modeling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation があり、1992年に英国・エディンバラで開かれ、1994年5月4-6日にオーストリア・ウィーンで開催される。

"Petri Net Newsletter" という情報誌が、ドイツの学会から年3回発行されている (最新号はNo. 44)。希望者は年20マルクを添えて、Gesellschaft für Informatik, Godesberger Allee 99, D-5300 Bonn 2, Germanyへ申込みればよい (加入者は現在約850人)。

さらに、ペトリネット電子メールグループが、デンマーク・オーフス大学計算機科学科で維持管理されており、文献、コンピュータツール、学会情報に対して大変便利である (現在のところ会費無料。会員は30か国、約380名)。参加希望者は、PetriNets-request@daimi.aau.dkに電

子メールを送ればよい。

## 8 ペトリネット研究の最新動向

### (1) 時間および確率ネット

伊・トリノで1985年に開催された第1回国際会議は、まだPNPMとは呼ばれておらず、「時間ペトリネットに関する」国際会議であった。

この第1回以後、PNPMはずっと時間・確率ペトリネットに重点を置いてきたし、また実際の応用も時間・確率ペトリネットによる性能評価が大変多くなってきている。動的なシステム性能評価のためには、プレイスやトランジションにおける遅延、すなわち時間の概念の導入が有用であり、遅延時間が決定的に与えられる(決定的)時間ネット((deterministic) timed net; TPN)と、遅延が確率的に規定される確率(stochastic)ネットがある。

後者は、トランジションの発火が指数分布関数に従う確率ペトリネット(SPN)、指数分布発火率をもつ時間トランジションと発火遅延ゼロの即時発火トランジションの両方をもつ一般化確率ペトリネット(GSPN)、一般分布推移遅延をもつ拡張確率ペトリネット(ESPN)、決定的遅延と確率遅延の両方をもつ決定確率ペトリネット(DSPN)に分類される。SPNは連続時間マルコフ連鎖(CTMC)や待ち行列網(queueing network; QN)と対応するから、システム性能が行列方程式により代数的に求められる。

### (2) 高水準ネット

トークンにカラーを付けて、各カラートークンにある種の属性をもたせ、システム内に数種類の要素を動きまわらせることにより、モデル化が容易になる場合が多い。発火規則は各カラーそれぞれに独立に定めればよい。モデル化能力は一般のペトリネットと同じであるが、より簡潔な表現が可能になる。このカラーペトリネット(CPN)や、同様の簡約表現である述語(predicate)・トランジション・ネット(Pr/T)などを、高水準ネット(HLPN)と呼んでいる。

通常のペトリネットをアセンブリ言語によるプログラミングとすれば、HLPNは高級言語によるプログラミングである。

### (3) 階層型HLSPN

シミュレーションや性能評価にSPNを使用する例が圧倒的に多いし、実際の大規模なシステムの解析に、CPN、Pr/TなどのHLPNを併用したHLSPNを利用する事例も増えてきている。

大規模で複雑なシステムでは、システムを基本的なサブモジュールに分割し、各サブモジュールに対するペトリネットを要素とする階層構成を採ることにより、記述・解析が容易になる。これもプログラミングと同様である。

HLSPNを階層構成化したペトリネットの利用が多くなってきている。

### (4) 他のツールとの関係

ネット指向パラダイムは、オブジェクト指向+ネット理論と考えられ、ネット理論は、グラフ理論・ペトリネット理論などの幾何学的アプローチと、時相論理(temporal logic)とプロセス代数(process algebra)などの代数的アプローチに分類される<sup>(6)</sup>。なお、実用指向のプロセス代数にLotusがある。また最近ファジ理論を導入したファジペトリネット(FPN)も導入されている。

### (5) 応用事例

最初の触れたように、応用例は製造・工業制御システム(FMS)が一番多いが、最近オブジェクト指向的な発想でソフトウェアをネットモデル的なアプローチで設計する事例が多くなってきている<sup>(6)</sup>。

VLSI設計およびコンピュータ・アーキテクチャの分野においては、アービタなどの非同期回路の設計、異機種マルチプロセッサシステムの性能解析、メモリ共有型マルチプロセッサシステムのキャッシュ・コンシステンシ・プロトコル、データフロー計算機のモデル化、パイプラインの設計などに対する応用が発表されている。

この分野での日本の研究は、東京工業大学の米田友洋先生らによる、TPNによる非同期回路の検証の研究がある。

## 9 おわりに

ペトリネットは最初に触れたように、視覚的工具、シミュレーションツール、数学的方法論の三つの機能を併せもっており、単にVLSI設計分野での狭義のコンカレント工学だけでなく、最近広い範囲で重要性が認識されつつある広義のコンカレント工学を支援する有力なツールともなる。

ペトリネットは理論的にも底が深く、実際の応用もまだまだ不十分である。しかし、最近情報処理学会誌<sup>(6)</sup>および電子情報通信学会英文論文誌の特集号<sup>(7)(8)</sup>が発行され、さらに電気学会論文誌の特集号<sup>(9)</sup>と電子情報通信学会英文論文誌の特集号<sup>(10)</sup>が企画されるなど注目を浴びつつある。

さいわい、今回のPN'93/Chicagoの組織委員長として大きな貢献をされた村田忠夫教授（イリノイ大学シカゴ校（UIC）, IEEEフェロー, 1991年IEEE Donald G. Fink賞授賞、飛騨高山出身）が、7月から1年間、大阪大学基礎工学部に客員教授として在日中である。ペトリネット研究の第一人者が日本におられる絶好の機会を契機に、日本での研究がますます活発化することを、大いに願うものである。

## 参考文献

- 1) Proc. of 5th International Workshop on Petri Nets and Performance Models, IEEE Computer Society Press, 1993.
- 2) M. Ajmone-Marsan (Ed.): Application and Theory of Petri Nets 1993, Lecture Notes in Computer Science 691 (Springer-Verlag, 1993).
- 3) 村田忠夫：ペトリネットの解析と応用（近代科学社, 1992）。
- 4) 椎塚久雄：実例ペトリネット——その基礎からコンピュータツールまで（コロナ社, 1992）。
- 5) 米田友洋：ペトリネットに基づく検証方式、6th Karuizawa Workshop on Circuits and Systems, pp.363-368 (April 1993). など。
- 6) 特集：ネット試行パラダイムを求めて、情報処理, Vol.34, No.6, pp.692-777 (1993.6).
- 7) Special Section on Application of Petri Nets to Concurrent System Design, IEICE Trans. on Fundamentals, E75-A, 10, Oct. 1992.
- 8) Special Section on Nets-Oriented Software Specification and Design, IEICE Trans. on Fundamentals, E76-A, 10, Oct. 1993.
- 9) ペトリネット特集、電気学会論文誌, 114-C, 9, Sept. 1994 (ゲストエディタ：椎塚久雄 (工学院大)、申込締切日1994.1.25)。
- 10) Special Section on Net Theory and its Applications, IEICE Trans. on Fundamentals, E77-A, 10, Oct. 1994 (ゲストエディタ：渡辺敏正 (広島大)、寄稿締切日1994.3.1)