The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	時間制約付きカラーペトリネットで記述されたワークフローからのスケジュール導出
Author(s)	山口, 昭; 岡野, 浩三; 谷口, 健一
Citation	電子情報通信学会技術研究報告. SS, ソフトウェアサイエンス. 2002, 101(629), p. 23-30
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27444
rights	Copyright © 2002 IEICE
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.
SS2001-42 (2002-01)

時間制約付きカラーペトリネットで記述されたワークフローからのスケジュール導出

山口 昭† 岡野浩三† 谷口健一†

† 大阪大学 大学院基礎工学研究科 情報数理系専攻
〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
(電話) 06-6850-6606, (Fax) 06-6850-6609

E-mail: †{a-yamagu,okano,taniguchi}@ics.es.osaka-u.ac.jp

あらまし
本研究ではワークフローを記述するための，時間制約付きカラーペトリネットを提案する．この時間制約付きカラーペトリネットを用いて，作業の中断再開およびそれにともなう経過累積作業時間を表現でき，時間制約を持つグループワークを自然に表現することができる．また，コラボレートワークを行う各作業者向けのスケジュールを，時間制約付きカラーペトリネットで記述されたグループ全体のワークフローから導出する方法を提案する．スケジュール導出は，ペトリネットの可到達木を作成して行う．提案する方式に基づくグループウェアの概要についても述べる．

キーワード コラボレートワーク，ワークフロー，時間ペトリネット，スケジュール導出，可到達解析

Deriving Work Schedules from Workflow Description in Coloured Petri-nets with Time Constraints

Akira YAMAGUCHI†, Kozo OKANO†, and Kenichi TANIGUCHI†

† Department of Informatics and Mathematical Science, Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-8531, Japan
(Phone) +81-6-6850-6606, (Fax) +81-6-6850-6609

E-mail: †{a-yamagu,okano,taniguchi}@ics.es.osaka-u.ac.jp

Abstract
This paper proposes coloured Petri-net model with time constraints suitable for describing workflows. Using the coloured Petri-net model with time constraints (timed CPN), we can represent suspend and resume of a task and elapse work time. We can, thus, naturally represent groupwork with time constraints. Also we give a method to derive each worker's work schedule from a workflow in our timed CPN. The method uses a reachability analysis of the nets. We also explain a simple groupware system using our approach.

Key words collaborate work, workflow, timed Petri-net, work schedules, reachability analysis

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

1. はじめに

ペトリネットは Workflow Management Coalition [7] で指定されているワークフロープリミティブ(順序関係，並列関係，条件分岐，繰り返し) を表現することが可能である [1].

グループワークの実際の動作を表現するためには，ペトリネットに時間の概念を導入しなければならない．これまで様々な時間ペトリネットが提案されている．

例えば，文献 [3] の 5 章に時間付きカラーペトリネットが紹介されている．このモデルではグローバルクロックを用意し，時間を表すトークンを導入している．時間トークンはタイムスタンプの役割をしており，発火可能な条件として，束縛されているトークンのすべてのタイムスタンプが現在のグローバルクロック値以下であることがさらに制約として与えられている．

中山らはこの時間付きカラーペトリネット [3] を用いて，飲食店の業務をモデリングし，その評価を行っている [4]．山口らは，時間ペトリネットを用いてワークフローの動的変更を表すモデルを提案し，動的変更方式の性能評価を行っている [5]．Abdulla らはトークンに “age” という実数値を持たせた時間付きペトリネットに対する被覆性の検証方法を提案している [9].

実際のグループワークでは，作業できない時間帯があったり，ある作業中に他の作業 (協調作業など) を優先させることがある．しかしながら上記などの時間ペトリネットを用いたワークフローでは，このようなグループワークの動作を自然に表現することができない．なぜなら，トランジションの発火をアトミックに扱っており，発火の途中で中断することができず,「作業の中断再開およびそれにともなう各作業毎の経過累積作業時間の表現ができない」からである．そこで本稿では，新たな時間制約付きカラーペトリネットを提案する．また，それを用いたコラボレートワークのためのワークフロー記述の例について述べる．

提案する時間制約付きカラーペトリネットでは，トランジションの発火途中で発火を停止し，時間の経過にともないまた発火を再開したり，他のトランジションを発火したりすることができる．それをワークフローに適用すると，作業中にその作業を停止し，時間の経過にともないまた作業を今までの経過作業時間を保存したまま再開したり，他の作業を行ったりすることに対応する．そのためグループワークの動作をより正確に表現することができる．

ワークフロー記述では各作業者を表すプレースがあり，作業を表すトランジションと双方向アークで接続することで，作業と作業者を関連づけする．また，作業者を表すプレースのトークンには，グローバルクロックをカラーの一部として持たせ，そのクロックに対する制約条件を与えることで作業の締め切りを表現することができる．また，そのトークンには各トランジションの発火状態延べ時間をカウントするクロック，トランジションにかかわらない発火状態延べ時間をカウントするクロック，作業者が作業のできる時間帯，をカラーの一部として持たせる．そのためこのワークフローは，各作業者の一日の作業時間を制限するような表現も可能であり，グループの動作を現実に近い形で表現することができる．

さらに本稿は，このワークフローから作業者各自の作業スケジュールの導出についても扱い，そのスケジュール導出機能を持つグループワークシステムについても述べる．各自のスケジュールは，その日に行う作業やその作業時間帯，協調作業のできる時間帯などである．また，スケジュール導出は可到達木を作成して行う．提案した時間制約付きカラーペトリネットの可到達木を作成し，可到達性を満たす発火系列をスケジュールとする．可到達木の状態爆発を防ぐために，5. で述べるようにワークフローモデルを限定し，可到達木作成の工夫も行っている．

2. ではカラーペトリネットについて述べる．3. では提案する時間カラーペトリネットについて述べる．4. では時間カラーペトリネットを用いたワークフローの記述例を挙げる．5. ではスケジュール導出について，さらにその機能を持つシステムについて述べる．6. でまとめる．

2. カラーペトリネット

ペトリネット [2] の拡張の一つにカラーペトリネット (CPN) [3] がある．Design/CPN [6] のような総合ツールも知られている．

[定義 2.1] [構文]

(非階層的な)CPN は次の 9 項組 $\langle \Sigma, P, T, A,$

NII-Electronic Library Service

$N, C, G, E, I\rangle$ である．Σ はカラー集合と呼ばれる有限集合であり，型 (すなわちトークン) の集合である．P, T, A は通常のペトリネットと同様に，プレース集合，トランジション集合，アークの集合を表す．N は個々のアークに対し，始点と終点を与えるノード関数の集合である(注1)．C はカラー関数であり，個々のプレースに対し，そこに存在するトークンを表す関数である．G は個々のトランジションに付与されるガード関数である．関数の引数は T の要素である．E は個々のアークに付与されるアーク表現式である．関数の引数は A の要素であり，値域はアークの始点または終点ノードであるプレースが保持可能なトークンのマルチ集合である．I は初期マーキングを与える． □

Design/CPN では，Σ や G, E, I を関数型プログラム言語MLのサブセットの記述で与える．

(非階層的な)CPN の動作の意味定義は以下のように与えられる．

まず，Var(t) を，(1) $G(t)$ に含まれる変数，(2) t に入次または出次するアークに付与されたアーク表現式に含まれる変数の集合とする．$E(x_1, x_2)$ をプレースまたはトランジション x_1 から x_2 に向かうアークに付与されたアーク表現式をすべてのアークについて集めたものとする．

[定義 2.2] [トランジション t の束縛]

トランジション t の束縛は Var(t) 上の次の関数 b である．

（1） Var(t) 中のすべての変数 v について $b(v)$ は v の型である．

（2） その束縛 b で $G(t)$ を真にする．

B(t) は t のすべての束縛とする． □

[定義 2.3] [マーキング，ステップ]

トークンエレメントは $p \in P, c \in C(p)$ を満たす2項組 (p, c) であり，束縛エレメントは $t \in T, b \in B(t)$ を満たす2項組 (t, b) である．

マーキングはトークンエレメント上のマルチ集合であり，ステップは束縛エレメントの非空マルチ集合で与えられる．また，初期マーキング M_0 は $(I(p))(c)$ で与えられる． □

式 $E<b>$ で "b の束縛のもとで E を評価する式" を表すものとする．

[定義 2.4] [発火可能]

(注1)：ここでは，Jensen の定義に合わせる．

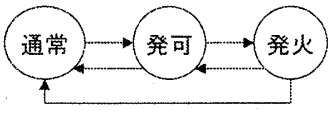

図1 トランジションの状態遷移

ステップ Y がマーキング M で発火可能となるのは次の性質が成り立つときかつそのときに限る．

$\forall p \in P : \sum_{(t,b)\in Y} E(p,t)<b> \leqq M(p)$．すなわち，$Y$ により必要なトークンが発火条件を満たした上で十分な数だけマーキング M に存在することが必要かつ十分である． □

[定義 2.5] [発火]

ステップ Y がマーキング M_1 で発火可能であれば，ステップ Y は発火してもよい．このときマーキングは次の M_2 に変化する．

$\forall p \in P : M_2(p) = (M_1(p) - \sum_{(t,b)\in Y} E(p,t)<b>) + \sum_{(t,b)\in Y} E(t,p)<b>$

最初の和項が取り除かれるトークンであり，2番目の和項が追加される項である． □

[定義 2.6] [発火系列]

発火系列は，マーキングとステップの交代系列であり，以下のように表せる．$M_1[Y_1 > M_2[Y_2 > M_3[Y_3 \ldots M_n[Y_n > M_{n+1}$． □

3. 時間制約付きカラーペトリネット

1. で述べたとおり，ここではより表現力の高い時間制約付きカラーペトリネットを提案する．カラーペトリネットから拡張した点を次に示す．

(1) トランジションは次の3つの状態を持つ．
- 通常状態
- 発火可能状態
- 発火状態

各状態は図1のように遷移する．

- トランジションは始めは通常状態にある．
- トランジションの入力プレースにトークンが移動すると，制約条件が許すならば発火可能状態に遷移する．
- 発火可能状態にあるときはいつでも発火状態に遷移できる．遷移しない場合は発火可能状態のまま時間が経過する．
- 発火状態にあるときはいつでも発火可能状態に遷移できる．遷移しない場合は発火状態

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

のまま時間が経過する．発火可能状態と発火状態の違いは後に述べる．

– 制約条件が満たされないと，発火可能状態または発火状態から通常状態に戻る．

制約条件は次に述べる gt, wt, tt に対する時間制約条件である．

(2) 全てのトークンはグローバルクロック gt をカラーの一部として持つ．

(3) 全てのトークンは，各トランジション t_i 毎の発火状態延べ時間をカウントするクロック wt_i をカラーの一部として持つ．

(4) 各トランジションには時間 lt_i を指定しなければならない．そして，あるトランジション t_k が発火状態になると，そのトランジションの入力プレースのトークンのカラーの wt_k によって，その t_k の発火状態延べ時間がカウントされる．lt_k の時間の間発火状態にあると発火が完了しトークンが移動する．

(5) トークンに，トランジションにかかわらず発火状態にあった延べ時間をカウントするクロック tt をカラーの一部として持たせる．

(6) wt_i，tt は，次の条件でリセットされる．

wt_i: wt_i を持つトークンによりトランジション i の発火が完了したとき

tt: 指定された時間が経過したとき (指定されない時はリセットされない)

発火可能状態は，制約条件を満たし入力プレースにトークンが存在するが wt_i はカウントされない．逆に発火状態では，制約条件を満たし入力プレースにトークンが存在し，wt_i がカウントされる．

4. ワークフロー記述

ここでは，3. で提案した時間カラーペトリネットを用いたワークフローの記述例について述べる．時間制約付きカラーペトリネットのトランジションはワークフロー上での作業を表す．プレースにはワークフローの進行状況を表すプレースと，作業者を表すプレースがある．ワークフローの進行状況はマーキングによって表現できる．作業者を表すプレースと作業を表すトランジションを双方向アークで接続することで，作業と作業者を関連づける．作業者を表すプレースのトークンは次のことを表すカラーを持つ．

- gt：時刻
- wt_i：作業者が行った各作業の作業時間
- tt ： 作業者が行った作業の作業時間の合計
- Workabletime： 作業者の作業できる時間帯

トランジションの各状態は，次の作業の状態を表す．

- 通常状態：その作業を行えない (作業できない時間帯であるか，他の作業を行っている)．
- 発火可能状態：その作業を行える (作業できる時間帯であり，他の作業を行っていない) が，作業中ではない．
- 発火状態：その作業の作業中である．

実際のグループワークの動作では，作業を行える時間帯であってもまだその作業を行わないことがある．発火可能状態はその状態を表す．

ここからはワークフローの図2を例として説明する．作業1〜作業6までのトランジションがグループワークの作業を表す．プレースA，B，Cは作業者A，B，Cを表し，それぞれ彼らが行う作業と双方向アークで接続されている．作業5はA，Cと関連づけられており，作業5はA，Cの協調作業であることを表す．トランジション t_L の制約条件 [$gt \leq 9$] はワークフロー上の全ての作業の締め切りを表す (ワークフロー上の全ての作業を時刻9までに終らせなければならない)．

プレースAのトークンカラーWorkabletimeの値が $\{(9 \leq gt \leq 11),(13 \leq gt \leq 18)\}$ であるとする．このとき作業者Aが作業1を行う場合，図3のように動作できる．0時から9時までは作業できない時間帯なので，トランジション作業1は通常状態にある．9時からは作業できる時間帯なので発火状態に移るが，11時からは作業できない時間帯なので通常状態に戻る．13時からトランジション作業1は再開し，15時で作業1の4時間分の作業を終えるので，トランジション作業1は発火を完了する．このようにして，作業者が作業できる時間帯にのみ作業を行い，そうでないときは作業を中断する動作を表現できる．

プレースCは作業5と作業6に関連づけられており，作業5と作業6は並列関係にある．そ

NII-Electronic Library Service

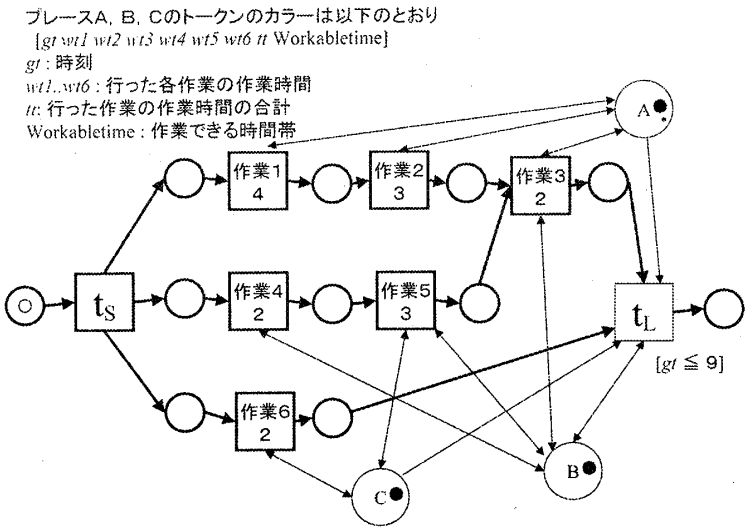

図 2　ワークフローの例

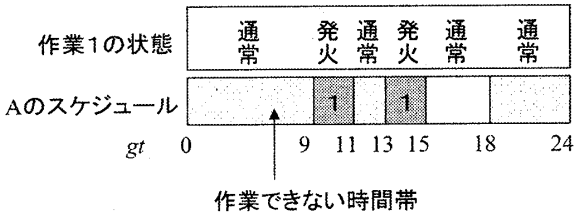

図 3　作業を中断して再開する場合

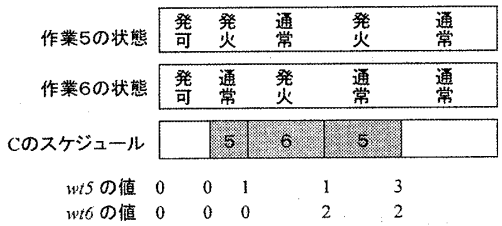

図 4　作業を中断して他の作業を行う場合

のため，作業者Cは図4のように動作できる．作業者Cは作業5を3時間の内の1時間だけ作業し，途中で作業6を行う．そして作業6が終了すると作業5を再開する．作業5の作業中はトランジション作業5が発火状態にある．その間プレースCのトークンカラーの wt_5 の値が増加する．そして作業6の作業中は wt_5 の値は変化せず，作業5を再開するとトランジション作業5は発火状態になるので再び増加する．このようにして，作業を中断して他の作業を行う場合を表現できる．

「他の作業者との協調作業のために時間を空けることはできるが，一日に3時間しか作業しない」といったような状況を表すために，カラーの一部である tt を利用する．プレースCのトークンカラーの tt を24時間毎にリセットするように指定しておき，また，Workabletimeが $\{(9 \leq gt \leq 18), (33 \leq gt \leq 42), (tt \leq 3)\}$ であるとする．作業者Cは図5のように動作できる．始めに作業6を行い終了する．次に作業5を行うが，「一日に3時間しか作業しない」ので作業5の3時間の内の1時間を行い．その日の作業は終了する．二日目になると作業5の残りを行う．tt はトランジション作業6，作業5が発火状態にある間は増加する．しかし，$(tt \leq 3)$ の制約のために，トランジション作業5は発火途中で通常状態に戻る． tt は24時間毎にリセットされるので二日目 (gt の値が24～48) になると作業5が発火状態になることができる．作業5は残りの2時間で発火完了となる．このようにして，「一日に3時間しか作業しない」ような場合の動作を表現できる．

5. ワークフローのグループウェアへの適用

ここでは先のワークフロー記述を適用した簡単なグループワークシステムについて説明する．このシステムはコラボレートワークを行うグループの作業を支援するもので，スケジュール導出と進捗管理の機能を持つ．図6のように，グループは一人の管理者と複数の作業者からなる．各作業者は情報 (作業者の空き時間帯，進捗情報) を管理者に送り，管理者はその情報からワークフローを作成，システムに入力する．

NII-Electronic Library Service

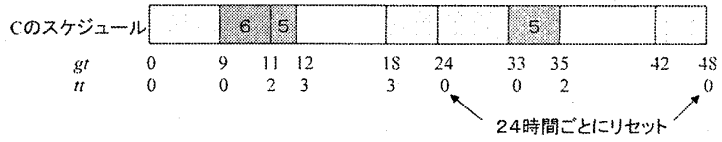

図 5　1日に3時間しか作業を行わない場合

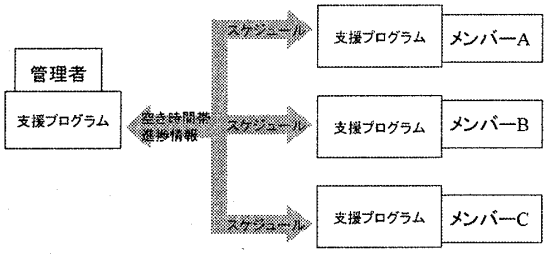

図 6　ワークフロー記述を適用したシステム

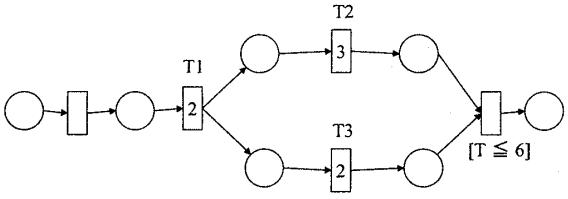

図 7　ペトリネットの例

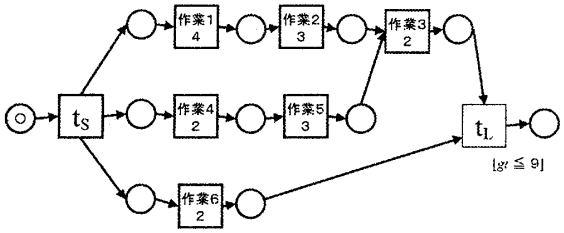

図 9　ペトリネット $\overline{P}$

システムはワークフローから各作業者のスケジュールを導出し，それらを各作業者へ送る．

スケジュール導出には可到達解析を用いる．提案した時間制約付きカラーペトリネットの可到達解析を行い，可達性を満たす発火系列をスケジュールとする．

5.1 可到達木

可到達解析によってスケジュール導出を行うために，ワークフローを次のように限定する．

- ワークフローを表すペトリネットは，1ソース, 1シンクでなければならない．
- ワークフローモデルから，作業者を表すプレースとそれにつながるアークを取り除いたものをペトリネット $\overline{P}$ とする．その $\overline{P}$ のシンクからソースを，アークとトランジションを用いてつなげたペトリネットが安全活性な自由選択ネット [10] でなければならない．

今回試作したグループウェアでは，簡単のためスケジュール導出の際のワークフローに作業の選択を考慮していない．よって，今回試作したシステムでは $\overline{P}$ は結果的に閉路の無いマークグラフに限定している．例に対する $\overline{P}$ は図9のようになる．

このような $\overline{P}$ では各トランジションは一度しか発火しないので，可到達木のノードは各トランジションの発火時間の組とする．可到達木では，時間が1単位時間進むたびに新たなノードが作成される．例えば，図7のようなペトリネットの可到達木は図8のようになる．

$\overline{P}$ 上のトランジションの発火の制約条件は，元のワークフローモデルの作業者を表すプレースの Workabletime, tt から得られる．また，同じ作業者のプレースと接続されているトランジションは，同時には発火状態になれない．

以上の $\overline{P}$ の動作をふまえて，可到達木を作成する．状態爆発をさける方法は，5.3 で述べる．

5.2 スケジュール導出

スケジュール導出における入出力は次のようになる．

- 入力：
  - ペトリネット $\overline{P}$
  - 各作業トランジションに対する作業者プレースを返す対応関数 f
  - 各作業者の Workabletime から得られるトランジションの発火条件 (gt, tt に対する制約条件．tt は，gt が24時間に相当するクロック数経過するたびにリセットされる)．
- 出力：各作業についての開始時刻と終了時刻 (以下に示すパス決定の基準が反映されている)．

上記の入力から可到達木を得る．例えば図7

NII-Electronic Library Service

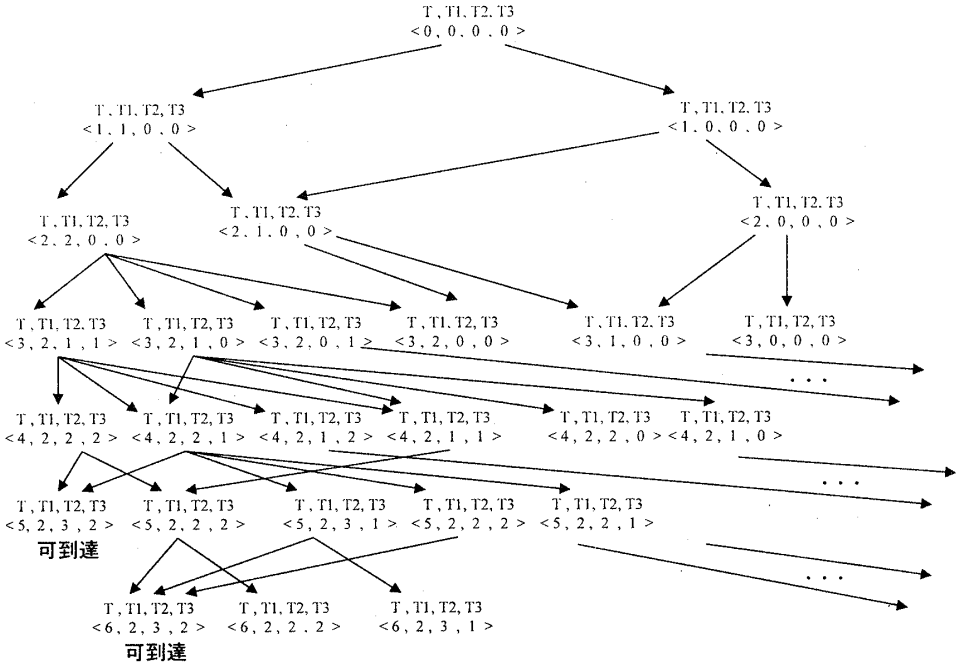

図 8　可到達木

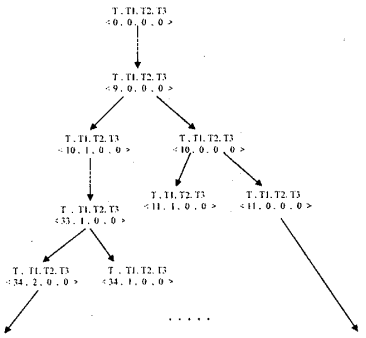

図 10　グループワークにおける特性条件を考慮した可到達木

において，対応関数 f が $f(T1)$ =A, $f(T2)$ =A, $f(T3)$ =B であり，作業者 A の Workabletime が $(9 \leq gt \leq 18)$,$(33 \leq gt \leq 42)$,$(tt \leq 1)$ であるとき，可到達木は図 10 のようになる．

得られた可到達木から，以下の基準 (複数適用可) でパスを決定する．

- 短時間優先: パスの中で経過時間が最小のものを選ぶ．
- 協調優先: 協調作業トランジションが次の基準でよい位置にあるパスを選ぶ
  - 協調作業がより好ましい時間帯にスケジューリングされている (午前中など時間帯指定を行う)
  - 途中で他の作業が入らない (協調作業トランジションの発火途中で，それを行う作業者の行うべき他の作業トランジションが発火することはない)
- ゆとり優先: 順序関係にある作業間に指定された時間空いたものを選ぶ

決定されたパスから，出力である各作業についての開始時刻と終了時刻を得る．

このスケジュール導出法の利点は，この解析木をいったん作っておけば直後の作業に影響のでる作業遅れの際, 新たな候補パスを簡単に見つけられることである．

5.3　アルゴリズムの改善

可到達木のノード数を削減するために以下の改善が考えられる．

- 作業における特性条件の導入
- 時間リージョンの導入
- 可変量子時間の導入

作業における特性条件は，可到達木を作成するときに次のような条件を加えることである．

- 作業途中で他の作業が入らない．
- 一度作業が開始されると，指定された時間以上続かなければならない．

時間リージョンは時間オートマトン [8] のリージョングラフなどで採り入れられている考え方で，「以降の振る舞いが異ならない」時間領域をすべて同一状態にまとめてしまう方法である．これを導入すればノード数が減ることが期待できる．

NII-Electronic Library Service

可変量子時間は以下のアイデアにもとづく．単位時間を一つに固定せず，それぞれの時刻帯に応じた単位時間を設定するという方法である．例えば，13-17 時は 30 分を単位時間とし，それ以外の時間帯は 1 時間を単位時間とするなどということが考えられる．図 10 は単位時間を 1 時間とした場合である．

5.4 進捗管理

システムは，各作業者から送られてきた進捗情報を，管理者が入力したワークフロー上に反映する．管理者は，ワークフロー上のトークンのマーキングから作業の進捗状況を判断できる．

5.5 スケジュール再導出

作業者や作業数などに変更があった場合は，ワークフローの再入力によって，スケジュールの再導出を行える．この場合，今まで行われてきた作業の状態も反映できる．

一方，作業遅れの場合にはワークフローの再入力を必要とせずにスケジュールの再導出を行える．作業遅れが発生しそうなときは，作業者が管理者にその旨と必要な推定残り時間とともに報告する．管理者は可到達木から新たなパスを探す．そのパスは次のような条件を見たさなけらばならない．

- 遅れそうな作業が開始するまでのパスは以前と同じ．
- 締め切り時刻に間に合う．
- 遅れそうな作業の後に推定残り時間の分の余裕がある (つまり，遅れそうな作業の作業者の制約条件を満たしつつ，その作業者が行うべき他の作業の wt が増加していない)．

そのようなパスが見つかればそれから新しいスケジュールを導出する．

5.6 スケジュールの表示

グループの作業者の支援プログラム上に表示される内容について述べる．図 11 のように，一人の作業者が行う作業，そのスケジュール (開始，締め切り時刻)，協調作業の時間帯，作業の資料などが表示される．作業者がどの作業を行うかを複数の候補から選べるように表示する

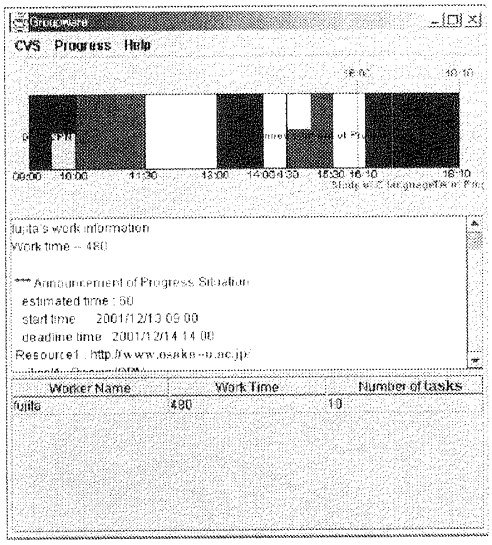

図 11 スケジュールの表示

6. あとがき

本稿では，ワークフロー記述に適した時間ペトリネットモデルとそれをもちいた各作業者のスケジュール導出法について述べた．また，その技法を用いたグループウェアについても述べた．今後の課題は，スケジュール導出の効率化と，このグループウェアを実装し，本手法の評価を行うことである．

文　献

[1] W. M. P van der Aalst: "The Application of Petri Nets to Workflow Management," The Journal of Circuits, Systems and Computers, pp. 21–66, 1998.

[2] V. P. Silva, T. Murata and S. M. Shatz: "Protocol Specification Design using an Object-based Petri net Formalism," International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 97–125, 1999.

[3] K. Jensen: "Coloured Petri nets Vol.I, Vol.II," Springer-Verlag, 1992.

[4] 中山直樹，山口真悟，葛 崎偉，田中 稔: "カラーペトリネットによるワークフローのモデリングおよび評価"，電子情報通信学会技術研究報告，CAS, Vol. 99, No. 416, pp. 41–48, 1999.

[5] 山口真悟，葛 崎偉，田中 稔: "時間ペトリネットを用いたワークフローの動的変更の性能評価"，電子情報通信学会技術研究報告，CAS, Vol. 99, No. 416, pp. 49–56, 1999.

[6] "Design/CPN Online," http://www.daimi.aau.dk/designCPN/

[7] "WfMC について"，http://www.wfmc.gr.jp/wf2.htm

[8] R. Alur and D. L. Dill: "Automata for modeling real-time systems," LNCS 443, pp. 322–335, 1990.

[9] P. A. Abdulla and A. Nylen: "Timed Petri Nets and BQOs," LNCS 2075, pp. 53–70, 2001.

[10] 村田忠夫，"ペトリネットの解析と応用"，近代科学社，1992.

NII-Electronic Library Service