JSAI Technical Report
SIG-PPAI-9401-?

創発的計算のためのモデル CCM による動的なグラフ彩色*

Dynamic Graph Coloring using CCM — A Model for Emergent Computation

金田 泰
Yasusi Kanada

新情報処理開発機構 (RWCP) つくば研究センタ
Tsukuba Research Center, Real World Computing Partnership
kanada@trc.rwcp.or.jp

Abstract

Real world computing systems are complex systems that is open to the continually varying environment. Conventional software development methods inherently cannot deal such situations. CCM (Chemical Casting Model) is a model of nondeterministic, or random, computation, which is based on local information. CCM is developed toward establishing a software development methodology based on *emergent computation*. CCM is a production system with locally computed evaluation functions. A method of coloring vertices of dynamically changing graphs, or a method of radio-wave assignments to moving stations, is explained, and the results of experiments are shown in the present report. Dynamic coloring can be performed using the same production rule and evaluation function as static coloring, and the results can be evaluated using basically the same method and tools.

実世界の計算システムは刻々と変化する環境に対してひらかれた複雑なシステムであり，従来のソフトウェア開発法では根本的に対処できないとかんがえられる．CCM (Chemical Casting Model) は，**創発的計算**にもとづくソフトウェア開発法の確立をめざして開発した，局所情報にもとづく非決定的 (ランダム) な計算のモデルである．CCM は局所的に計算される評価関数をともなうプロダクション・システムである．この報告では，CCM にもとづく計算言語 SOOC による動的に変化するグラフ頂点の彩色 (移動放送局への電波のわりあて) の方法と実験結果とをしめす．SOOC によれば，静的なグラフ彩色とおなじプロダクション規則と評価関数とをつかうだけで，動的な彩色をおこなうことができ，基本的におなじ方法と道具とをつかって結果を評価できる．

1. はじめに

実世界の計算システムは刻々と変化する環境に対してひらかれた複雑なシステムである．このような状況ではつねに予測不能な変化がおこる可能性があるため，閉じた完全なシステム仕様を記述することはできない．また，複雑であるということは問題が非線形である，またはうまくモジュール分解あるいは分割統治することができないということを意味する．ところが，従来のシステム開発法とくにソフトウェア開発法は閉じた仕様の存在を仮定していて，かつ本来は線形 (単純) なシステムにだけ適用できるはずのモジュール分解を基本としている．したがって，実世界のシステム開発には限界があるとかんがえられる [Kan 92a, Kan 94a].

金田 [Kan 92a, Kan 94a] はこのような状況のもとでの創発的計算 [For 91] にもとづくソフトウェア開発法の確立をめざして，化学反応系とのアナロジーにもとづいた化学的キャスティング・モデル (Chemical Casting Model, CCM) という計算モデルを提案している．上記のような状況のもとでは問題解決のために必要な情報をあらかじめ完全にあつめることはのぞめない．また，閉じた完全な情報をもとにした従来のシステム開発法は環境の変化によわいとかんがえられる．そこで，CCM においては局所的・部分的な情報だけによる計算をめざしている．CCM はエキスパート・システムの開発などにつかわれているプロダクション・システムをもとにしているが，従来のそれとはちがって局所秩序度という一種の評価関数をとりいれ，非決定的 (ランダム) な制御法をとりいれている．プロ

* この報告の第 2 〜 3 章の内容は金田 [Kan 94b] などにもとづいている．

ダクション規則と局所秩序度とは，いずれも局所的な情報だけにもとづいて適用される．この研究は人工生命とはめざすものがちがうが，創発的計算をめざしている点や確率的な方法をつかっている点などで，ある種の人工生命の研究とつうじているとかんがえている．

この研究はまだ初期段階にあるため，これまでCCMによっておもに古典的な制約充足問題や最適化問題への適用をこころみてきた．制約充足問題に関しては，すでに *N* クウィーン問題 [Kan 92a, Kan 93b, Kan 94a] とグラフ彩色問題 [Kan 92b, Kan 93c] について報告した．また，最適化問題に関しては，巡回セールスマン問題についてその初期の結果を報告した [Kan 93a].

この報告では，CCM の動的な問題への適用をこころみている．すなわち，CCM にもとづく計算言語 SOOC による動的に変化するグラフ頂点の彩色 (移動放送局への電波のわりあて) の方法と実験結果とをしめす．SOOC によれば，静的なグラフ彩色とおなじプロダクション規則と評価関数とをつかうだけで，動的な彩色をおこなうことができ，基本的におなじ方法と道具とをつかって結果を評価できる．第 2 章では CCM についてかんたんに説明し，第 3 章では CCM にもとづく静的な制約充足問題の解法と性能評価法について説明する．第 4 章でその解法を動的なグラフ頂点の彩色問題に適用し，その結果とくに性能評価結果をしめす．最後に第 5 章で結言をのべる．

2. 計算モデル CCM

この章では化学的キャスティング・モデル (CCM) についてかんたんに説明するが，CCM については金田 [Kan 93a] などでも説明しているので，ここでは最小限の説明をするにとどめる．

まず，CCM の構成要素についてかんたんに説明する (**Figure 1** 参照)．CCM はプロダクション・システムにもとづくモデルである．古典的なプロダクション・システムにおいてはデータを格納する領域のことを作業記憶とよんでいるが，CCM においてもこれを**作業記憶** (working memory) とよぶ．そして，プロダクション・システムにおける規則ベースすなわちプログラムに相当するものを**キャスタ**とよぶ[注2].

作業記憶にふくまれるべき**オブジェクト** (object) あるいは**データ**として**原子** (atom) がある．原子はデータの単位であり，内部状態をもつ．原子どうしを**リンク** (link) によって結合できる．リンクは無向でも有向でもよい．無向のリンクは化学結合に似ている．

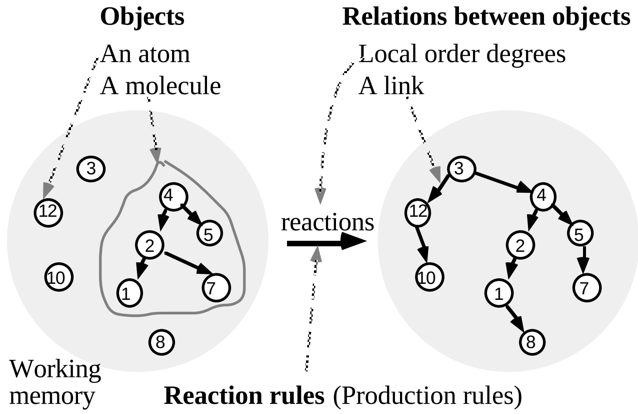

Figure 1: Components of the Chemical Casting Model

キャスタは反応規則と局所秩序度とで構成される．**反応規則** (reaction rule) はシステムの局所的な変化のしかたをきめる規則であり，ユーザが定義する．ここで「局所的」ということばは，その反応規則が参照する原子数がすくないということを意味する[注3]．反応規則は前向き推論によるプロダクション規則として記述する．したがって，つぎのようなかたちをしている．

$$\mathrm{LHS} \rightarrow \mathrm{RHS}.$$

反応規則の左辺 LHS および右辺 RHS には原子とマッチする 1 個または複数個のパタンがあらわれる．反応規則は化学反応式に相当するものだといえる．後述する 2 つの問題をはじめとして，おおくの単純なシステムにおいては反応規則は 1 個だけ存在する．しかし，複数の変化のしかたをみとめるより複雑なシステムにおいては複数個の反応規則が存在する．

局所秩序度 (local order degree) は局所的な “組織化” あるいは “秩序化” の程度をあらわす一種の評価関数であり，作業記憶の局所的な状態が “よりよい” ほどおおきな値をとるように，ユーザが定義する．局所秩序度は負号をつけた一種の**エネルギー** (化学反応系とのアナロジーからすると原子間の結合エネルギーのようなもの) とかんがえることができる．

反応はつぎの 2 つの条件をみたすときにおこる．第 1 の条件は左辺のすべてのパタンのそれぞれにマッチする原子が存在することである．第 2 の条件は反応に関係する (規則の両辺にあらわれる) 原子に関する局所秩序度の和が反応によって減少しないことである．そして，いずれかの反応規則と原子のくみあわせが上記の 2 条件をみたしているかぎり，反応はくりかえしおこる．これらの条件をみたすくみあわせが存在しなくなると実行は中断する．

[注2] CCM は不完全な情報や計画にもとづく計算のためのモデルなので，完全な計画を意味するプログラムということばのかわりにキャスタということばを使用する．

[注3] CCM においては，化学反応系のように (物理的な意味での) 距離の概念が導入されていないから，局所的ということばは距離がちかいということを意味しない．

ただし，一般には上記の 2 つの条件をみたすくみあわせは複数個存在する．条件をみたすくみあわせが複数個生成される原因としては，ひとつの規則の条件部をみたす原子の組が複数個存在するばあいと，複数の規則についてその条件部をみたす原子の組が存在するばあいとがある．いずれのばあいでも，これらのくみあわせのうちのいずれがどのような順序で，あるいは並列に反応するかは非決定的である (たとえばランダムにきめられる) .

3. CCM による静的な制約充足

この章では，CCM にもとづく静的な制約充足をとく方法を，金田 [Kan 93c] もとりあげているグラフの頂点の彩色問題を例としてかんたんに説明する．

CCM においては，局所的にみて “よりよい” 状態はなにかということを局所秩序度が定義し，近傍の状態への遷移のしかたを反応規則が規定する (反応規則によって近傍が定義される)．局所秩序度の平均値を**平均秩序度** (average order degree) とよぶ[注4]．すると，システムは平均秩序度を最大化する方向に確率的 (stochastic) に動作する．したがって，“よりよい” 状態としてよりおおくの制約がみたされた状態をとれば制約充足問題をとくことができるし，より最適化された状態をとれば最適化問題をとくことができる．

システムを動作させるにはなにが局所的にみてよりよいかがわかっていさえすればよいから，大域的にみてなにが最適であるかがわかっていなくても，なにがしかの解をもとめることができる．ただし，古典的な制約充足問題や最適化問題のばあいに，この方法ですべての制約をみたすことができるかどうか，あるいは大域最適解に到達できるかどうか，またそれらの状態で停止するかどうかは，ただちには結論づけることができない．なぜなら，局所最大点のようなものにとらわれる可能性もあるし，有限時間で解がもとめられる保証もないからである．

グラフの頂点の彩色問題は，グラフの頂点をあらかじめきめられた数の色にぬりわける問題である (以後，かんたんにするために色数は 4 色に固定する)．グラフの隣接頂点は同色にならないようにぬる．平面グラフのばあいは，グラフの頂点を地図の領域に対応させグラフの辺を地図の領域境界と対応させることによって，地図の彩色問題と対応づけることができる．すなわち，おなじキャスタで地図の彩色問題をとくことができる．たとえば，**Figure 2** にしめす 5 頂点からなるグラフを彩色する問題は，同図にしめした 5 領域の地図の彩色問題と等価である．なお，頂点内にしるされた c1, c2, c3, c4 は色をあらわしている．

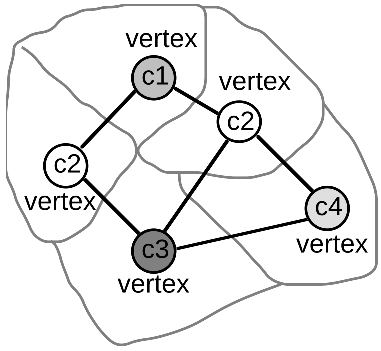

Figure 2: A graph vertex coloring problem

つぎに，グラフ彩色問題をとくためのシステムについて，つまり反応規則と局所秩序度について説明する．反応規則はただひとつあればよいが，その定義を視覚言語のかたちで **Figure 3** にしめす．この規則は，隣接する (リンクで結合された) ひとくみの 2 頂点をあらわす原子を (ランダムに) 選択して，そのうちの一方の頂点の色を 4 色のなかから選択してランダムにぬりかえる規則である[注5]．この反応規則のより詳細な意味については金田 [Kan 93c] が説明しているので，ここでは説明を省略する．

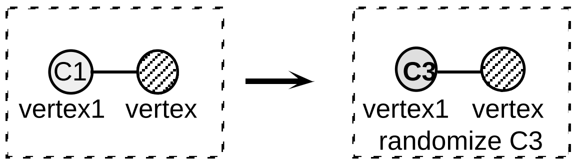

Figure 3: An example rule for graph coloring

つぎに局所秩序度の定義をしめす．2 個の頂点 x, y のあいだの局所秩序度をつぎのように定義する．

$$o_{vv}(x, y) = 1 \;\; \textbf{if}\; x.neighbor = y \;\textbf{and}\; x.color \neq y.color$$
$$0 \;\; \textbf{otherwise}$$

この定義は，頂点 y が x の隣接点であってかつ両者の色がひとしくなければ局所秩序度は 1，そうでなければ 0 という意味である．すなわち一般的な表現をすれば，2 個のオブジェクト間の局所秩序度は，その間の制約がみたされていれば 1，みたされていなければ 0 と定義する．他の制約充足問題についても，すべての制約が 2 個のオブジェクトの関係として表現できれば，このような方法で問題を表現することができる [Kan 93b]．このように定義したとき，平均秩序度は 0 と 1

[注4] 著者のこれまでの報告や論文においては局所秩序度の総和である大域秩序度という量をつかってきた．この報告においては，ひらかれた状況のもとでもあつかいやすい平均秩序度をつかう．ただし，平均のとりかたにはさまざまあることに注意する必要がある．

[注5] 反応規則の右辺にあらわれる randomize C3 という表現が，反応規則の両辺にあらわれる頂点 vertex1 のあたらしい色の選択をランダムにおこなうことをあらわしている．

のあいだの値をとり，すべての制約がみたされた状態において 1 になる．したがって，システムの性能はどれだけはやく平均秩序度が 1 に到達するかで評価することができる．

このような反応規則と局所秩序度とをつかうことによってやさしいグラフ彩色問題をとくことができる．**Figure 4** は上記の方法を米国本土の地図のぬりわけに適用したときの平均秩序度の変化をしらべた例である [Kan 93c]．246 回の反応で平均秩序度は 1 になっている，すなわち解に到達している．ここでは，平均秩序度は局所秩序度の総和 (大域秩序度) からもとめている．10 回の測定の平均をとると，反応回数は 940 回だった．反応回数 940 回がはやいかどうかに関しては金田 [Kan 94b] が議論している．また，このような平均秩序度の時系列はマルコフ連鎖とみなせることがわかっている [Kan 92b, Kan 93a].

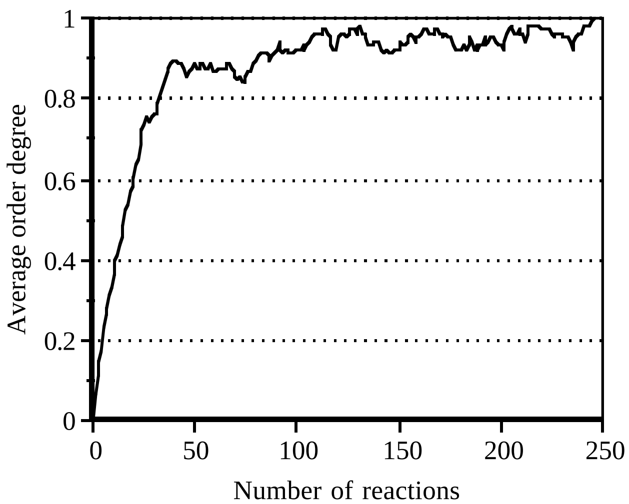

Figure 4: Measured average order degrees in graph coloring

上記の方法には，Figure 3 にしめした単純な反応規則をつかうかぎりは計算にむだがおおく，解がもとめられるまでに時間がかかりすぎるという問題点があるが，反応規則の記述時に**触媒**というパタンを反応規則にくわえることによって，この問題点を解決することができる [Kan 93c, Kan 94a]．また，このほかに反応規則の合成 [Kan 93c, Kan 94a] あるいは記号的ランダム・トンネリング [Kan 94b] という方法によっても，類似の効果をえることができる．

4. CCM による動的なグラフ彩色

この章では，CCM にもとづく動的なグラフ彩色問題の例とその解法および実験についてのべる．

4.1 移動放送局問題 — 動的なグラフ彩色

この節では，グラフ問題の動的な環境への拡張のひとつのかたちとして，移動放送局への電波のわりあて (以下，移動放送局問題とよぶ) についてかんがえる (**Figure 5** 参照)．この問題に関しては Szegedy and Vishwanathan [Sze 93] などからヒントをえた．

この問題では，何個かの移動放送局があたえられ，その個数は時間とともに変化する．移動放送局としては，たとえば自動車に積んだアマチュア無線や市民無線の (インテリジェントな) トランシーバをかんがえればよい．各放送局がつかえる周波数の数はかぎられていて，通常は放送局の数よりすくないものとする．各局はそれぞれみずから選択した周波数で，きめられた範囲内の適当な出力の電波を断続的にだし，近傍の各局と交信する．近傍におなじ周波数の電波をだす局があると混信するので，これをできるだけ，さけなければならない．どうすれば混信がさけられるか，という問題である．この問題は，放送局をグラフの頂点とし周波数の数を色数とすれば，動的に変化する平面上のグラフの頂点彩色問題とみなすことができる．

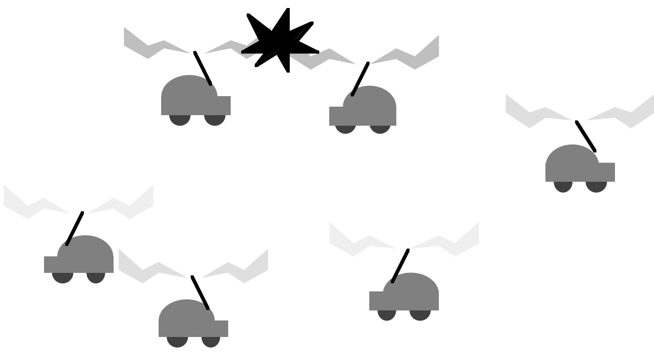

Figure 5: Moving radio stations problem

この問題を形式的に定義するには，時間とともに変化する量はどれで変化しないものはどれであるかを明確にする必要がある．また，変化するもの，たとえば局数やその移動のしかたなどについては，それがどのように (たとえばどのような確率過程にしたがって) 変化するかなどの条件をあたえる必要がある．しかし，ここではあえてこのような情報はあたえない．それは，CCM にもとづいてこの動的なグラフ彩色をおこなうのにそれらの情報はかならずしも必要がないし，それらの条件をつかって問題をとけばその解法はそれらの条件がなりたたなくなったときにはつかえなくなってしまうとかんがえられるからである．

上記のような設定のもとで CCM にもとづくシステムを動作させるには，基本的には第 3 章でしめしたのとおなじ反応規則と局所秩序度とをつかえばよい．ただし，よりよい性能をえるために Figure 3 の反応規則のかわりに **Figure 6** にしめした反応規則をつかうことも，あわせてかんがえることにする．Figure 6 の

規則は，ある頂点 vertex1 を (ランダムに) 選択して，その一方の頂点の色を 4 色のなかから選択してランダムにぬりかえるという点で Figure 3 の規則とひとしい動作をする．ただし，この規則のなかには vertex1 に隣接する (リンクで結合された) すべての頂点が記述されている (図では “...” によってそれらが表現されている)．それは，この規則を適用するかどうかをきめるときにこれらの頂点の局所秩序度を計算にいれるためである[注6]．静的なグラフ彩色にこの規則をつかうこともでき，それで大半のばあいは解をもとめることができる．しかし，この規則をつかうと永遠に解がもとまらないばあいがある．すなわち，平均秩序度の局所最大点におちいるばあいがある．

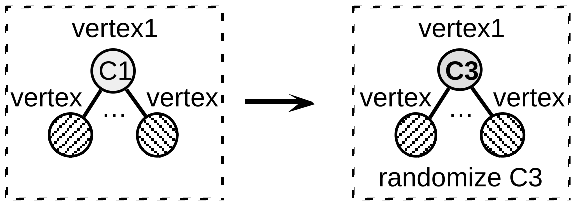

Figure 6: Another example rule for graph coloring

4.2 動的なグラフ彩色の実験

前節ではかなり抽象的に問題を記述したが，この節では実験をおこなうために，具体的な設定をあたえる．まず，空間を 1 × 1 のおおきさの正方形にかぎり，移動のしかたはランダムにきめた初速度だけできまるようにする．実験の途中でくわえる放送局については，くわえるときに初速度をきめる．放送局が正方形の辺に到達すると，弾性衝突してはねかえる (反射する)．電波は無指向性であり，どの放送局も出力は時間に依存せず一定であるとする．この仮定にもとづいて放送局をあらわす原子のあいだにリンクをはる．すなわち，リンクは動的に更新される[注7]．これらの制限は実験を容易にするためにくわえただけであり，これらを変化させるようにしても反応規則や局所秩序度に変更をくわえる必要はない．

このような条件のもとで，CCM にもとづく計算言語 SOOC (Self-organization-Oriented Computing) [Kan 93b] によりシステムを記述した．Macintosh 上の処理系で動作させている．計算過程を観察するために，グラフィクス表示をおこなうようにした．画面の例を **Figure 7** にしめす．実際にはカラーで表示するが，ここでは印刷の関係で白黒としてある．

画面左 (図では下) のウィンドウが 1 × 1 の正方形をあらわしている．そのなかに放送局の位置を円でしめし，周波数を円内のパタン (実際は色) でしめしている．また，干渉しうる局のあいだに線分をひいている．この線分は，放送局をあらわす原子どうしのあいだのリンクを同時にあらわしている．ふとい線分がひいてあるのが，実際に干渉がおこっている場所である．円がうごくので，表示は一定の時間間隔で更新している．表示の更新は計算とは基本的に独立におこなっている．ただし，現在の実装においてはすべてを単一プロセスで計算しているので，完全に独立というわけではない．

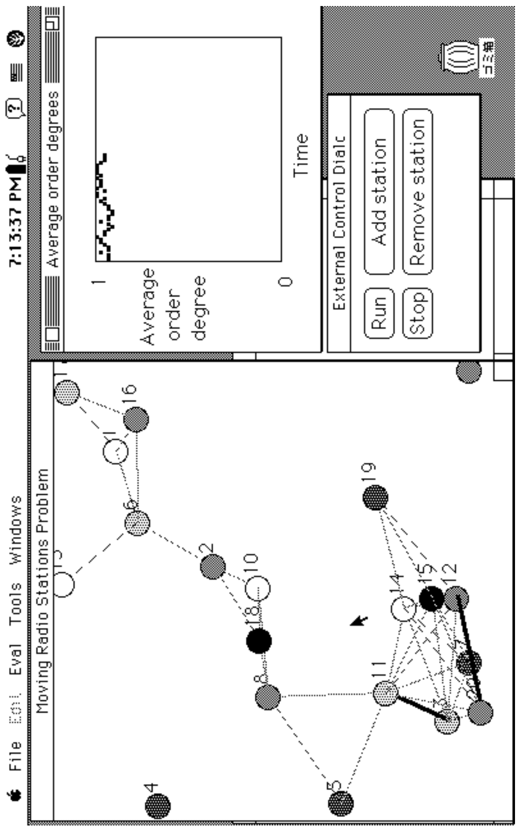

Figure 7: Graphics display of the radio-wave assignment simulator on Macintosh

右上のウィンドウは平均秩序度の時系列をあらわしている．平均秩序度は左のウィンドウの表示のタイミングで測定している．

右下のウィンドウには 4 個のボタンがあるが，“Add station” とかかれたボタンによってあらたな放送局をくわえる．その位置と初速度はランダムにきめる．“Remove station” とかかれたボタンによってランダムに選択した放送局をとりさる．“Stop,” “Run” とかかれたボタンは，実行を一時停止あるいは再開するためのものである．

4.3 動的なグラフ彩色の評価

システムの性能は，平均秩序度がどれだけ 1 にちか

注6 金田 [Kan 92b, Kan 93c] はより単純なグラフ彩色の反応規則を記述している．Figure 3 の規則はそれに最大限の (可変個の) 触媒をくわえたものということができる．

注7 リンクの更新は Lisp プログラムによっておこなわれる．これは CCM の外部 (環境) でおこる現象とみなされる．

いかによって評価することができる．したがって，ラフにいえば静的な問題とおなじ平均秩序度という量によって評価できる．ただし，静的な問題のばあいには 1 に到達するまでの時間が問題だったのに対して，動的な問題においては 1 に到達して変化しなくなるということがないから，平均秩序度の時間平均の値によって評価することになる．

例として，3 つの反応規則のそれぞれをつかい，局数 20，周波数 5 個という条件のもとで一定間隔ごとに平均秩序度をもとめた結果を **Figure 8** にしめす．使用規則は，Figure 6 の規則 (Variable catalyst rule)，Figure 3 の規則 (Single catalyst rule)，触媒をふくまない規則 (Figure 3 において vertex1 でないほうの頂点とそれへのリンクをなくしたもの, No catalyst rule) である．触媒をふくまない規則は周辺の頂点を考慮にいれないまったくランダムな彩色をおこなう．測定は放送局を計 250 回微小に移動させるごとにおこない，平均秩序度は局所秩序度の総和からもとめている．

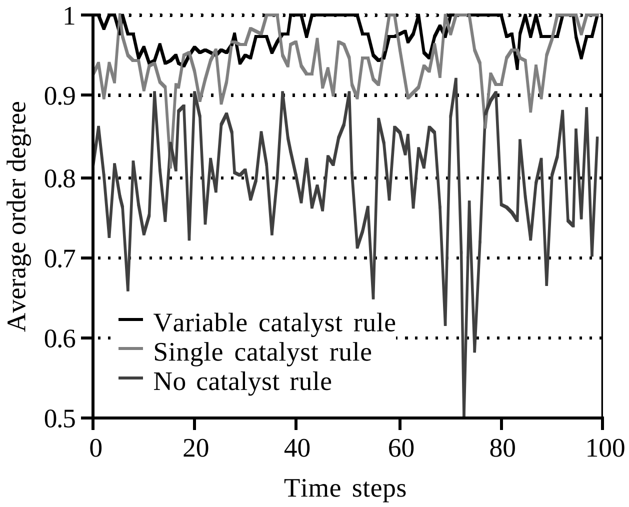

Figure 8: Time series of average order degrees in moving radio stations

このような測定を 5 回おこなって平均秩序度の平均をもとめたところ，その結果は **Table 1** のようになった．触媒をふくまない規則にくらべると他の 2 個の規則の性能はあきらかによい．他の 2 個の規則のなかでは Figure 6 の規則のほうがよいことがわかる．

Table 1: Average order degrees in moving radio stations

Reaction rule	Average order degree	Standard deviation
Variable catalyst rule	0.973	0.008
Single catalyst rule	0.953	0.011
No catalyst rule	0.802	0.003

5. 結言

この報告では，CCM にもとづく計算言語 SOOC による動的に変化するグラフ頂点の彩色 (移動放送局への電波のわりあて問題) の方法と実験結果とをしめした．SOOC によれば，静的なグラフ彩色とおなじプロダクション規則と評価関数とをつかうだけで，動的な彩色をおこなうことができ，基本的におなじ方法と道具とをつかって結果を評価できる．

ただし，静的なばあいと動的なばあいとで，おなじ規則をつかうのが最善というわけではない．また，ここにはさまざまな未解決の問題がある．たとえば，どのようにして平均秩序度をもとめ，どのようにして時間平均をとるか (時間平均をどのように定義するか) が重要な問題になるであろう．また，えられた平均秩序度の値の大小の比較はできるとしても，その絶対値がどれほどであればどれだけよいかが評価できるようにする必要がある．

参考文献

[For 91] Forrest, Stephanie, ed.: *Emergent Computation*, MIT Press, 1991.

[Kan 92a] 金田 泰：コンピュータによる自己組織系のモデルをめざして，*第 33 回プログラミング・シンポジウム報告集*，1992.

[Kan 92b] 金田 泰：自己組織系としての計算システム ― ソフトウェア研究への 2 つの提案 ―，*夏のプログラミング・シンポジウム報告集*，1992.

[Kan 93a] 金田 泰：プロダクション規則と局所評価関数による最適化，*計測自動制御学会第 11 回システム工学部会研究会*，1993.2.

[Kan 93b] 金田 泰，廣川 真男：プロダクション規則と局所評価関数による制約充足問題の解法，*情報処理学会記号処理研究会*，1993.3.

[Kan 93c] 金田 泰，廣川 真男：プロダクション規則と局所評価関数にもとづく計算モデル CCM による問題解決法の特徴，*SWoPP '93 (情報処理学会人工知能研究会)*，1993.8.

[Kan 94a] Kanada, Y., and Hirokawa, M.: Stochastic Problem Solving by Local Computation based on Self-organization Paradigm, *27th Hawaii International Conference on System Sciences*, 1994.

[Kan 94b] 金田 泰：プロダクション規則の合成による記号的ランダム・トンネリング ― 計算モデル CCM* による制約充足と最適化 ―，*計測自動制御学会システム第 14 回工学分科会研究会 "組合せ問題とスケジューリング問題の新解法,"* 1994.4.

[Sze 93] Szegedy, M., and Vishwanathan, S.: Locality Based Graph Coloring, *25th ACM Symposium on Theory of Computing*, pp. 201–207, 1993.