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 (i.e., avarage order degree) 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
Introduction

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，かつトップ・ダウンな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．

金田 [Kan 92a, Kan 94a] はこのような状況のもとでの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，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 クウィーン問題とグラフ彩色問題について報告した．また，最適化問題に関しては，巡回セールスマン問題と整数計画問題についてその初期の結果を報告した．

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．

2. 計算モデル CCM
Computation Model CCM

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．CCM はプロダクション・システムにもとづくモデルである (**Figure 1** 参照)．古典的なプロダクション・システムと同様に CCM においてもデータを格納する領域のことを作業記憶 (**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．

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．

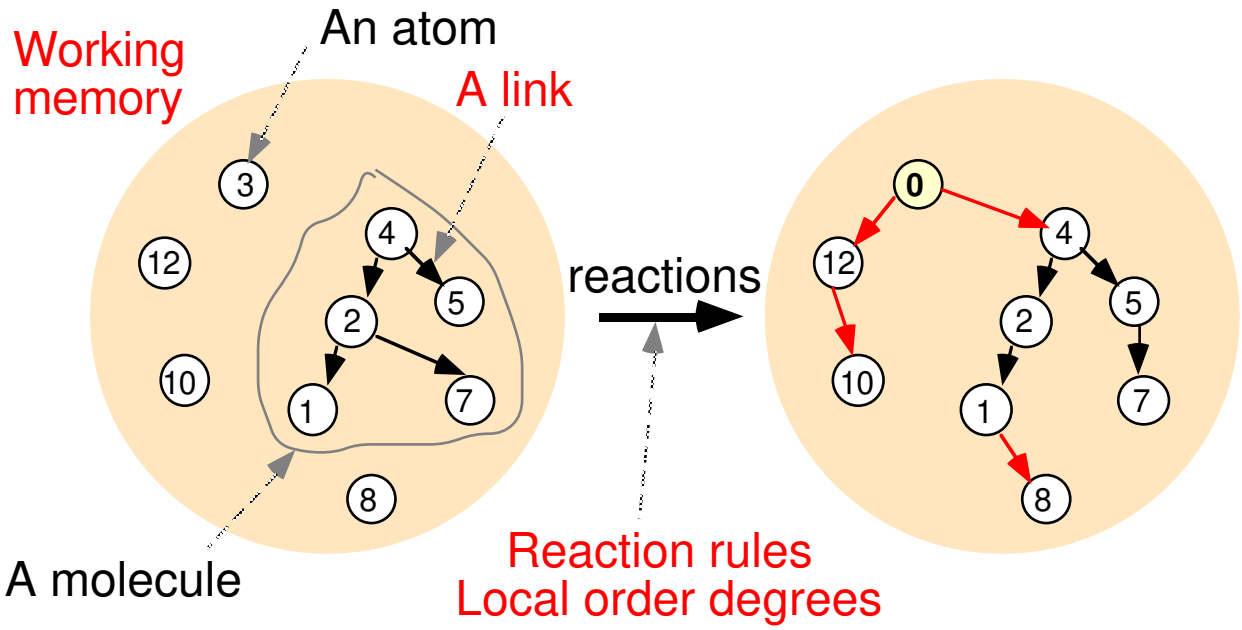


Figure 1: Components of the Chemical Casting Model
CCM is a production system with local evaluation functions, which is called local order degrees.

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．反応規則はつぎのようなかたちの，前向き推論によるプロダクション規則として記述する．

LHS → 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．

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．

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．それ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
Static Constraint Satisfaction using CCM

CCM にもとづく静的な制約充足をとく方法を，グラフの頂点の彩色問題を例として説明する．

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．局所秩序度の平均値を平均秩序度 (**average order degree**) とよぶ．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がとけるし，より最適化された状態をとれば最適化問題がとける．

グラフの頂点の彩色問題 (**graph vertex coloring problem**) 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．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．

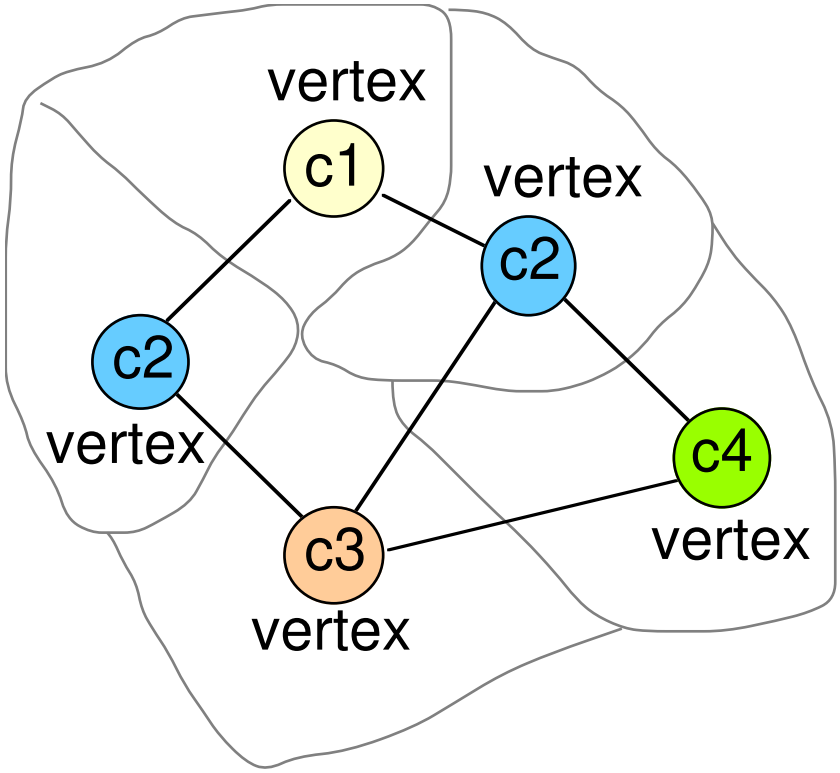
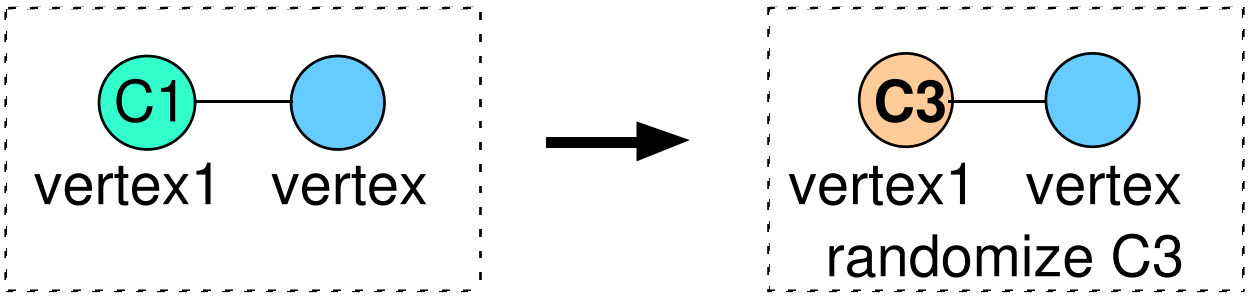


Figure 2: A graph vertex coloring problem
This graph vertex coloring is equivalent to the coloring of the map drawn in this figure.

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．



LHS RHS

Figure 3: A reaction rule for graph coloring (single catalyst rule) This production rule randomly selects two vertices, which are linked together, and repaints one of them with a randomly selected color (C3). A reaction rule is activated only when the sum of local order degrees of the matched data is increased by the reaction (activation). The vertex that is not changed by the reaction is called a *catalyst*. This rule has a catalyst.

つぎに局所秩序度 (**local order degree**) 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．

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

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．このように定義したとき，平均秩序度は 0 と 1 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 / 地図の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彩色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．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．10 回の測定の平均をとると，反応回数は 940 回だった．平均秩序度の時系列はマルコフ連鎖 (**Markov chain**) とみなせることがわかっている.

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 (**catalyst**) というパタンを反応規則にくわえることによって，こ

の問題点を解決できる．また，このほかに「反応規則の合成」によっても類似の効果がえられる．

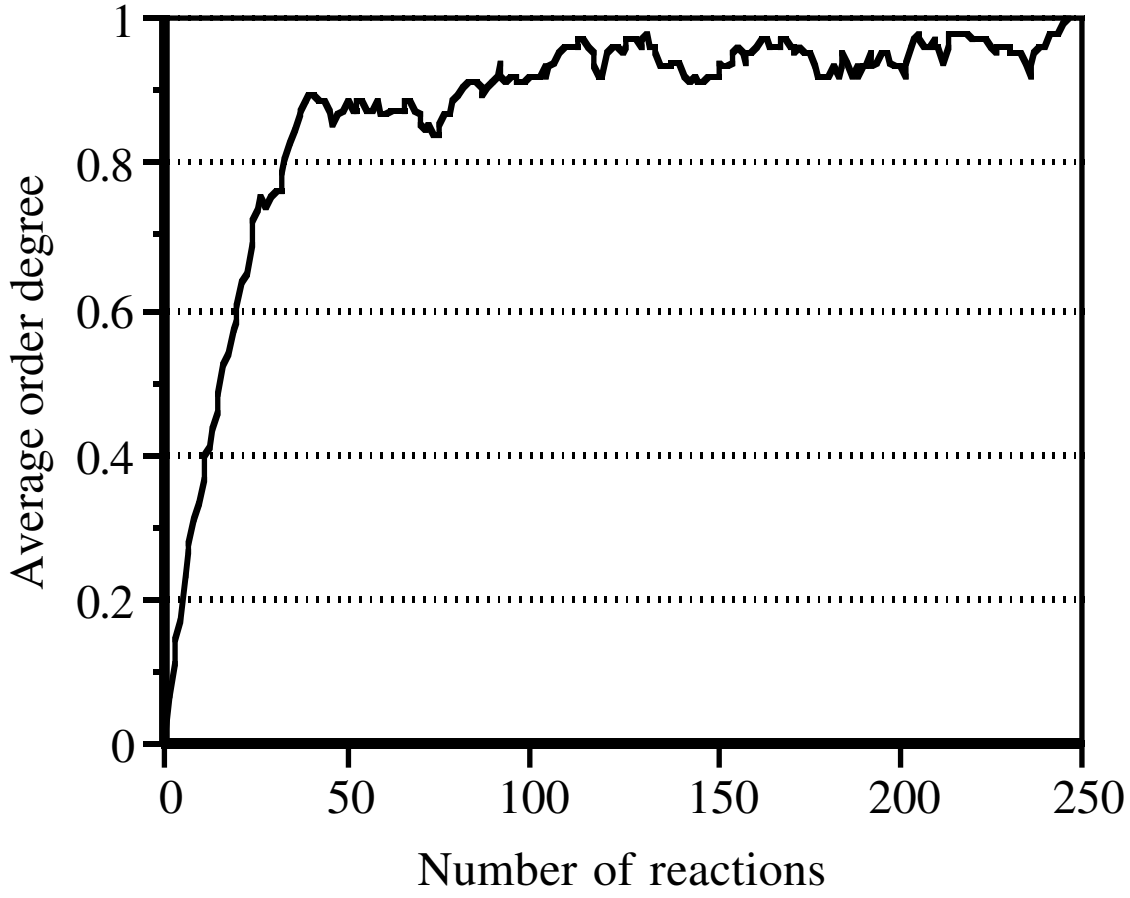


Figure 4: Measured average order degrees in USA mainland map coloring The map is initially colored with only one color, thus, the initial avarage order degree is 0.

4. CCM による動的なグラフ彩色
Dynamic Graph Coloring using CCM

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
Moving radio stations problem — a dynamic coloring

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 (移動放送局問題とよぶ) についてかんがえる (**Figure 5** 参照)．

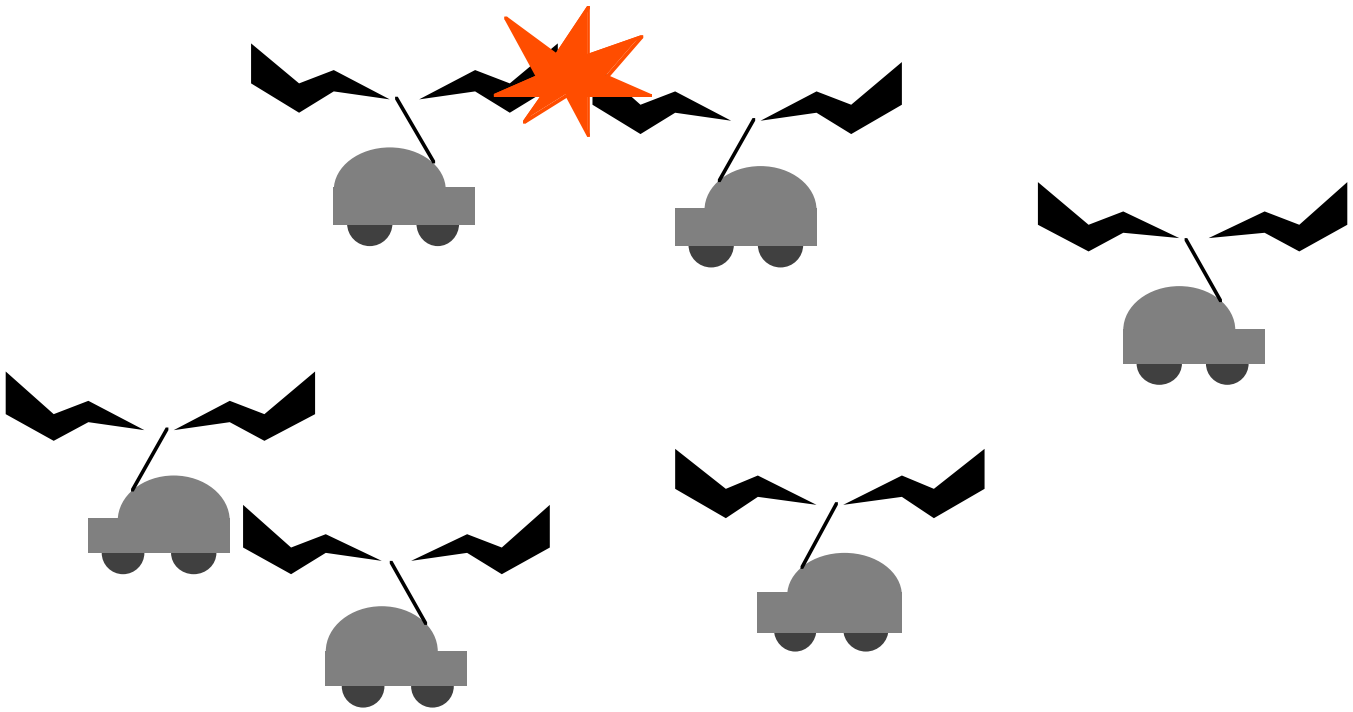


Figure 5: Moving radio stations problem
The colors in this figure shows the frequencies of the radio waves. If stations broadcasting waves of the same frequency come closer, a conflict occurs. A state with less conflict is better. This problem can be regarded as a dynamic coloring problem.

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．

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．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．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．

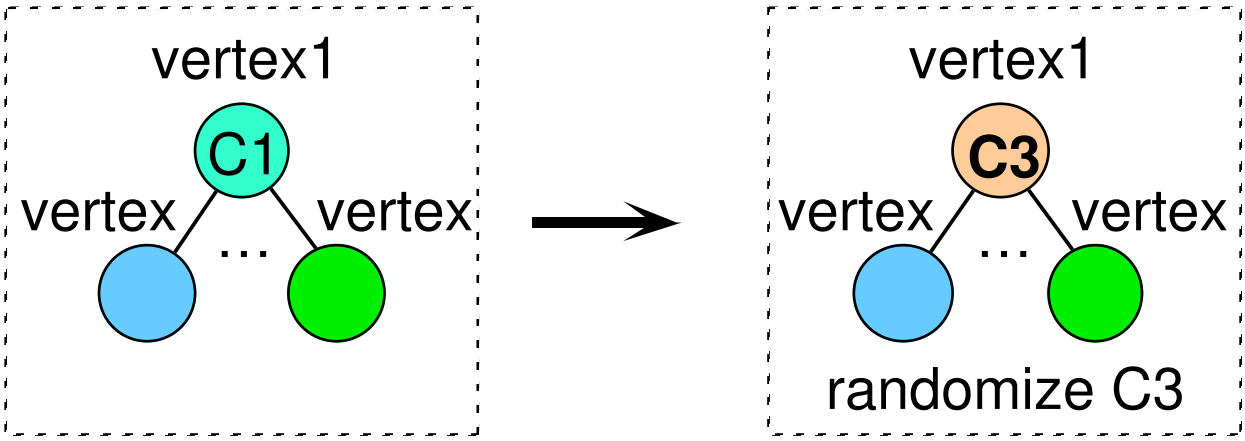


Figure 6: Another reaction rule for graph coloring (variable catalyst rule) This rule has variable number of catalysts. (The number of catalysts is equal to the number of edges of the vertex that matches to vertex1 .)

4.2 動的なグラフ彩色の実験 (デモの説明) Experiment on dynamic graph coloring (Explanation of the demonstration)

前節ではかなり抽象的に問題を記述したが，ここ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だとする．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．これらの条件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) によりシステムを記述し，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している．

画面左のウィンドウが 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，周波数を円内の色でしめしている．また，干渉しうる局のあいだに線をひいている．この線は放送局をあらわす原子間のリンクを同時にあらわしている．ふとい線がひいてあるのが，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．

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
Evaluation of dynamic graph coloring

システムの性能は，平均秩序度がどれだけ 1 にちかいかによって評価できる．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って，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．

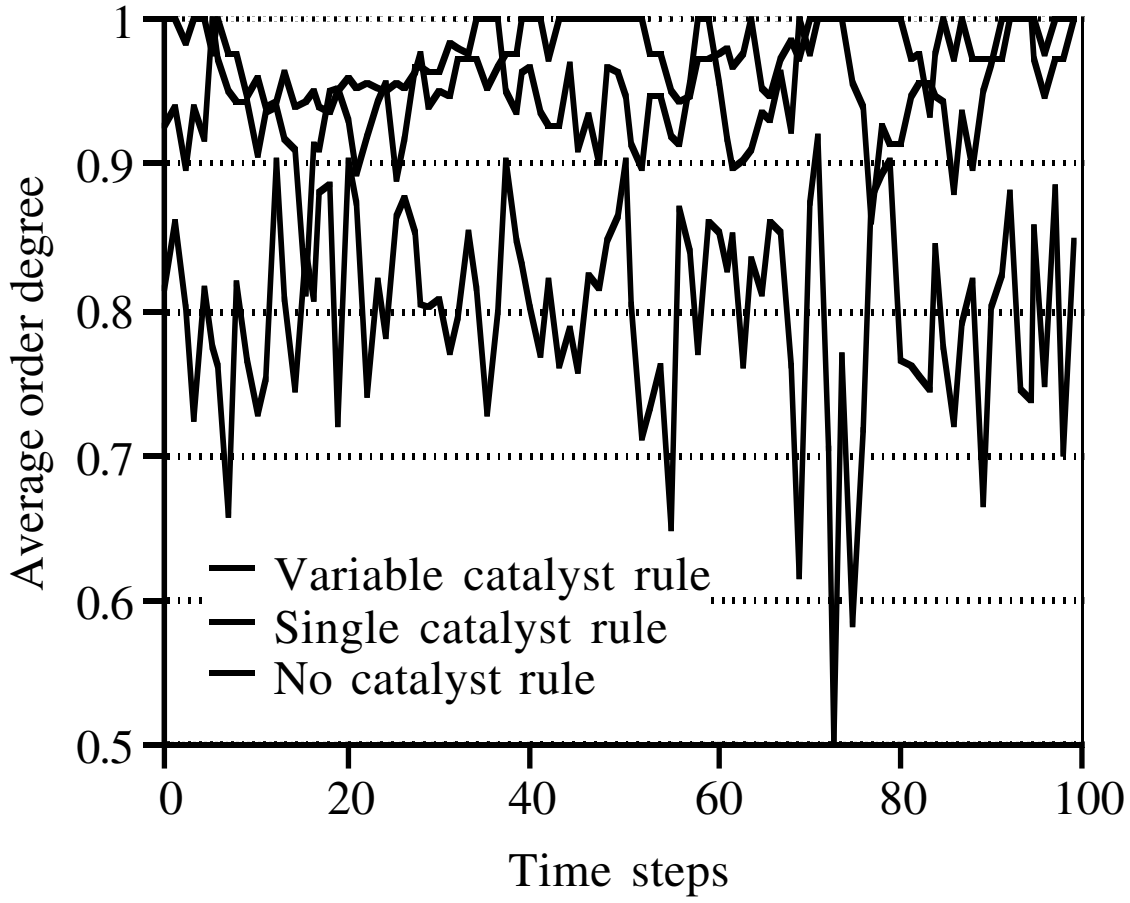


Figure 8: Time series of average order degrees in moving radio stations The variable catalyst rule performs the best among the three reaction rules.

使用した 3 つの規則は，

- ❏ Figure 6 の規則 (Variable catalyst rule) と
- ❏ Figure 3 の規則 (Single catalyst rule) と
- ❏ 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) と

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．測定は放送局をあわせて 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．

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．それらのなかでは Figure 6 の規則のほうがよい．

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
Concluding Remarks

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，平均秩序度というおなじ手段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．