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 による問題解決法とその特徴

新情報処理開発機構　つくば研究センタ

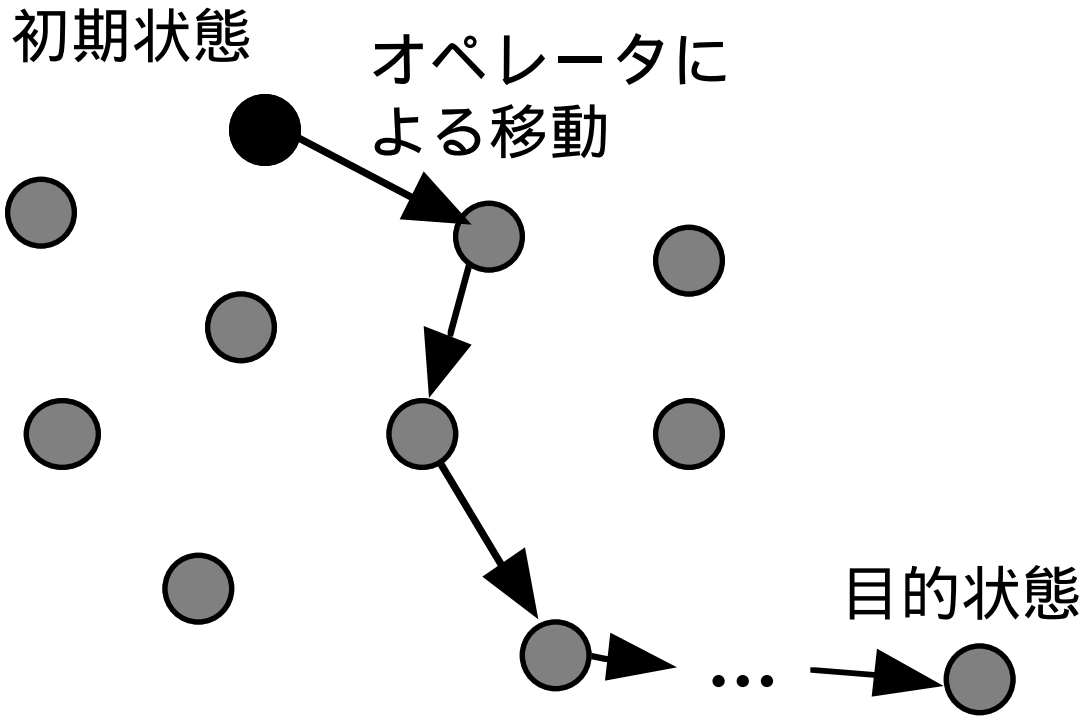
金田　泰

目次

- 解探索としての問題解決 — 従来の解探索法の問題点
- 化学的キャスティング・モデル (CCM) による解探索法
  - その概要
  - CCM の概要
  - 例題： 彩色問題
- CCM による解探索の特徴
  - 探索グラフの強連結性
  - 反応規則の可逆性と対称性
  - 局所度とバイアス強度の変化法 (触媒の使用)
- 他の探索法との比較
  - 分散的探索法との比較

解探索としての問題解決のわくぐみ

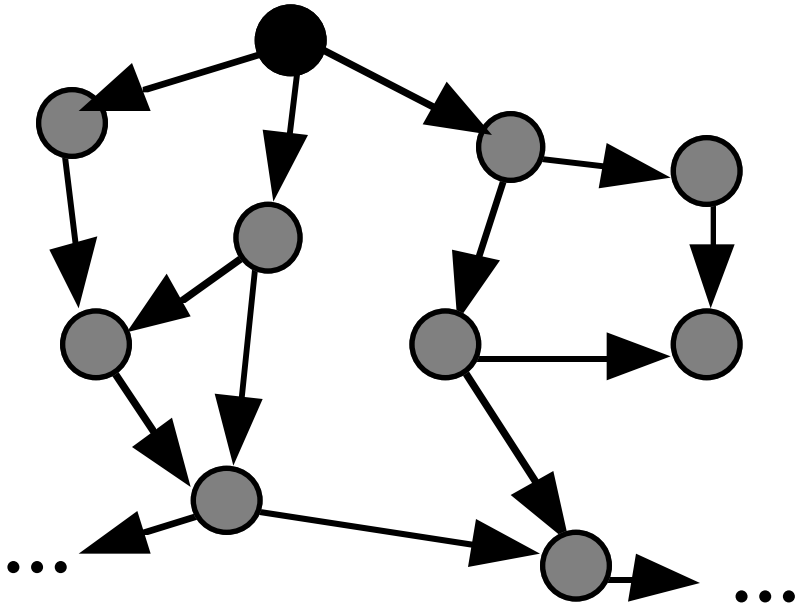
- コンピュータによる問題解決 — 解の探索としてとらえる．
- 状態空間とオペレータ



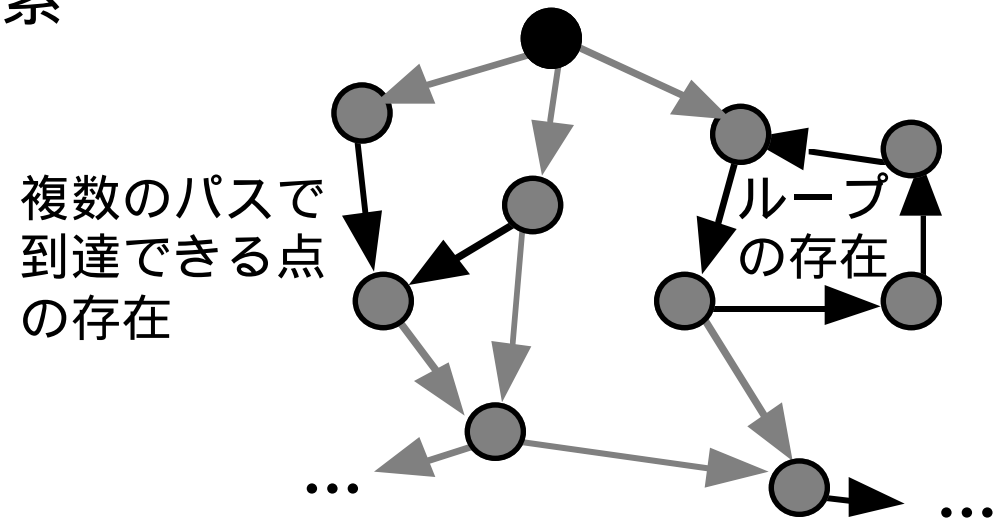
  - 協調分散探索においては，かならずしも適切なわくぐみではない．
  - しかし，これにかわる適切なわくぐみがないので使用する．

探索グラフ

- 定義
  - 状態空間の各点のなかで，オペレータによって移動可能なものどうしを有向辺でむすんだグラフ．



- 従来の解探索法のおおくは探索グラフとして木をつかう．
  - 従来法はバックトラックによる系統的網羅的な探索が基本．
  - 木構造でないと系統的網羅的探索のために都合がわるい．



従来の解探索法に関する３つの問題点

- 木をつかうことの問題点
  - 探索グラフをすなおに表現すると木にならないばあいでも木をつくる — 柔軟性をうしなう．
- 網羅的探索の問題点
  - 網羅的探索が基本でも，くみあわせ爆発をさけるにはヒューリスティック探索にならざるをえない．
  - 網羅的探索をあきらめるなら，バックトラックをつかう必然性はない．
- 系統的探索の問題点
  - 系統的探索のためには探索順序を指定する必要がある (論理型言語でも).
  - 探索順序が固定化されて，柔軟で効率的な探索がむずかしい．

目次

- 解探索としての問題解決 — 従来の解探索法の問題点
- 化学的キャスティング・モデル (CCM) による解探索法
  - その概要
  - CCM の概要
  - 例題： 彩色問題
- CCM による解探索の特徴
  - 探索グラフの強連結性
  - 反応規則の可逆性と対称性
  - 局所度とバイアス強度の変化法 (触媒の使用)
- 他の探索法との比較
  - 分散的探索法との比較

CCM による解探索法の概要

- 基本方針
  - 完全な手順や全体的な計画 (完全な仕様) にもとづく探索はやめる．
  - 局所的な計算にもとづいて探索する．
- 探索グラフ上の酔歩 (random walk) を基本とする．
  - 探索グラフは一般のグラフでよい．
  - 網羅的・系統的探索はめざさない．
- より有望なオペレータへのバイアスをかける．
  - ランダムに探索グラフを歩行するだけでは天文学的な時間がかかる．
  - バイアスをかけることによって高速化をはかる．
  - バイアスは評価関数によってきめる．
    - 評価関数は局所的に (少数のデータによって) 計算する．
    - 非手続き的 (非データフロー的) に計算する．

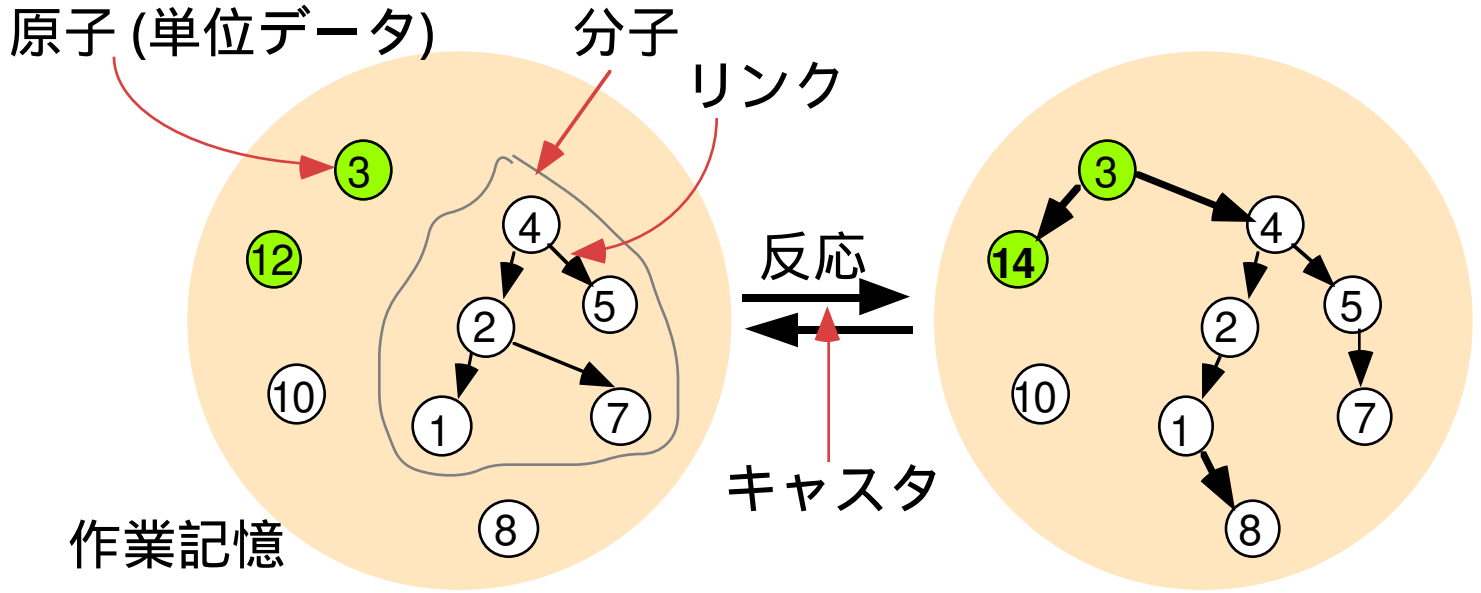
CCM とはなにか？

CCM の概要 — 1

- CCM は自己組織的な情報処理のための計算モデルである．
  - CCM = 化学的キャスティング・モデル (Chemical Casting Model)．
  - 化学的：化学反応系とのアナロジにもとづく計算モデル．
  - キャスティング：“プログラミング” や “計算” にかわることば．

CCM の構成要素

CCM の概要 — 2



- キャスタ (プログラム)
  - 局所秩序度： 原子 (間) に定義される局所的な評価関数．
  - 反応規則： 作業記憶の局所的な変化のしかたをきめる規則．
    - 前向き推論によるプロダクション規則．
    - 化学反応式に相当する．
    - 反応規則を具体化したものがオペレータ．

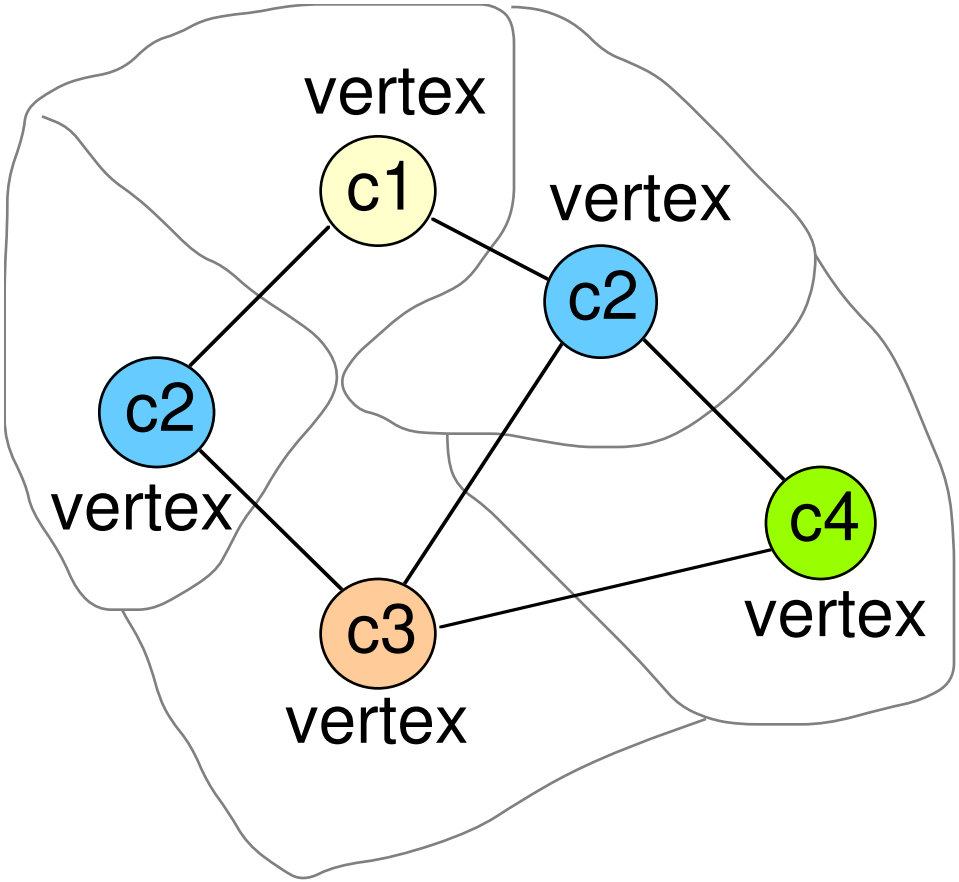
計算の方法

CCM の概要 — 3

- 適用すべき反応規則とオブジェクトは非決定論的に (乱数をつかって) 選択する．
- 反応規則は，適用すべきオブジェクトの局所秩序度の和が増加する時だけ適用する．
- しかるべき条件がなりたつまで反復適用する．
  - 停止条件は，反応可能な原子がなくなること，
    または規則左辺を一定回数しらべても反応がおこらないこと．

例題： 彩色問題

- グラフの頂点を N 色にぬりわける問題．
- 地図の彩色問題ともみなせる．

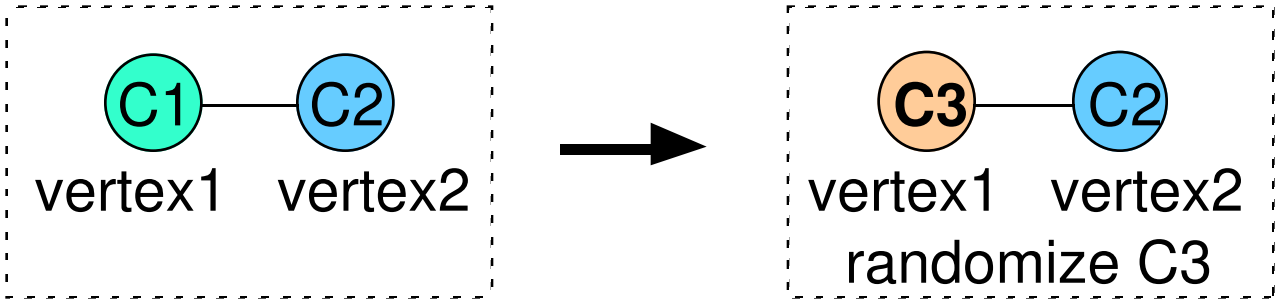


このグラフは探索グラフではない．

彩色問題のキャスタ

CCM による彩色問題の解法 — 1

■ 反応規則 (唯一)



左辺 (条件部)　　右辺 (動作部)

東大　佐藤　譲　による

■ 局所秩序度 (評価関数)

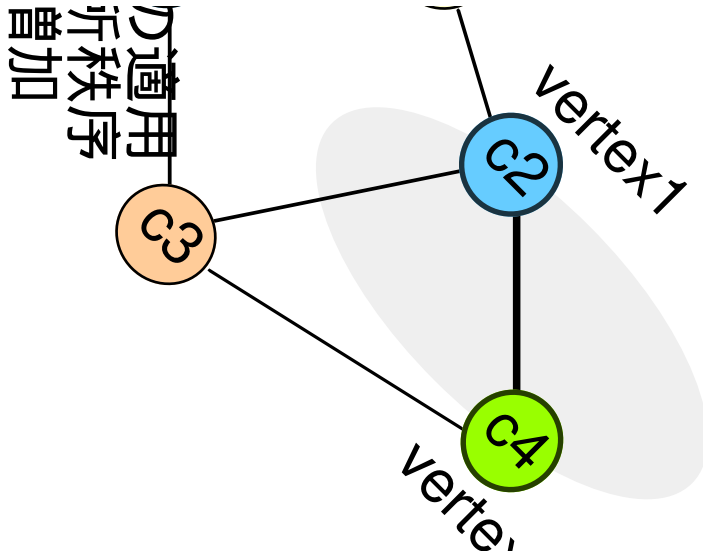
$$o_{vv}(x, y) = \begin{cases} 1 & \textbf{if } x.neighbor = y \textbf{ and } x.color \neq y.color \\ 0 & \textbf{otherwise} \end{cases}$$

◆ 頂点 x, y が隣接していて異色なら 1 , そうでなければ 0 .

彩色問題における計算

CCM による彩色問題の解法 — 2

■ 反応規則の適用

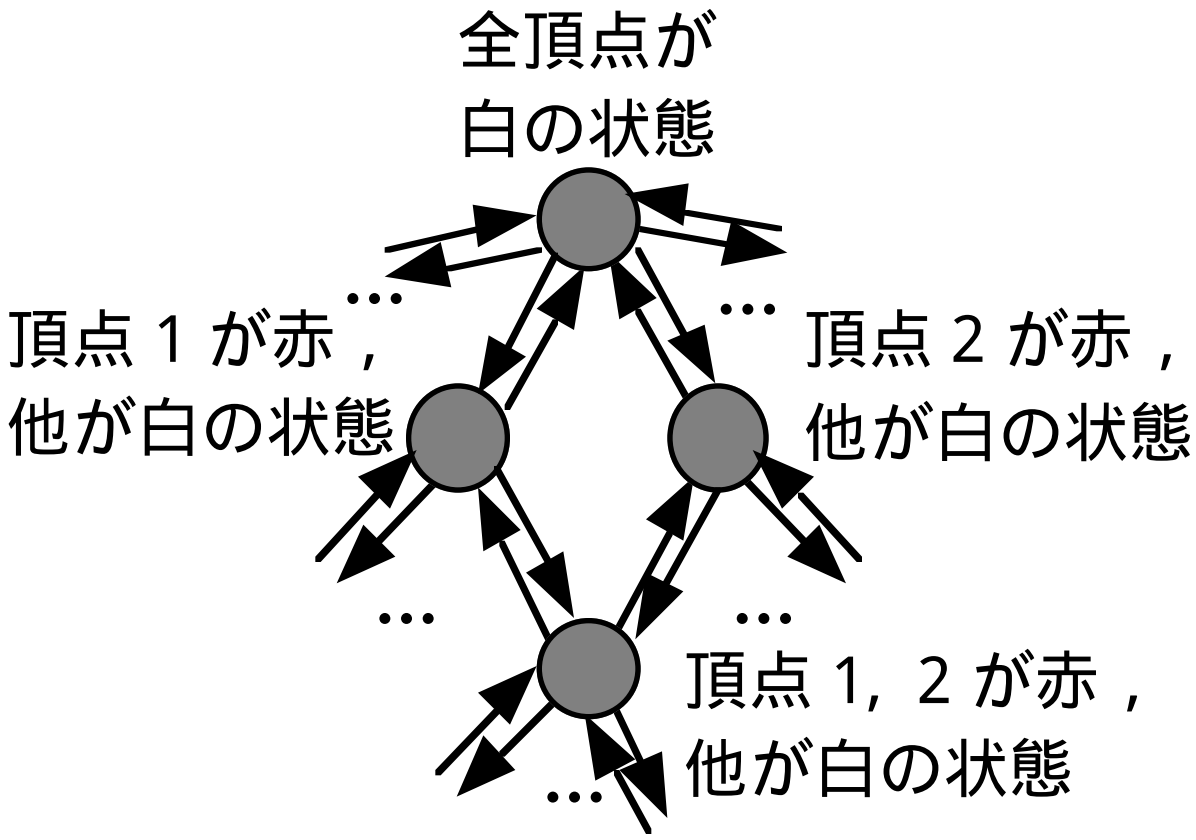


■ 探索のすすみかた

◆ 反応は周辺の頂点の局所秩序度を低下させうる．したがって，

- 解にむかって単調に探索するわけではない (競合がおこる)．
- かならず解に到達するともいえない．

彩色問題の探索グラフ



米国本土 48 州の地図の 4 色ぬりわけ *

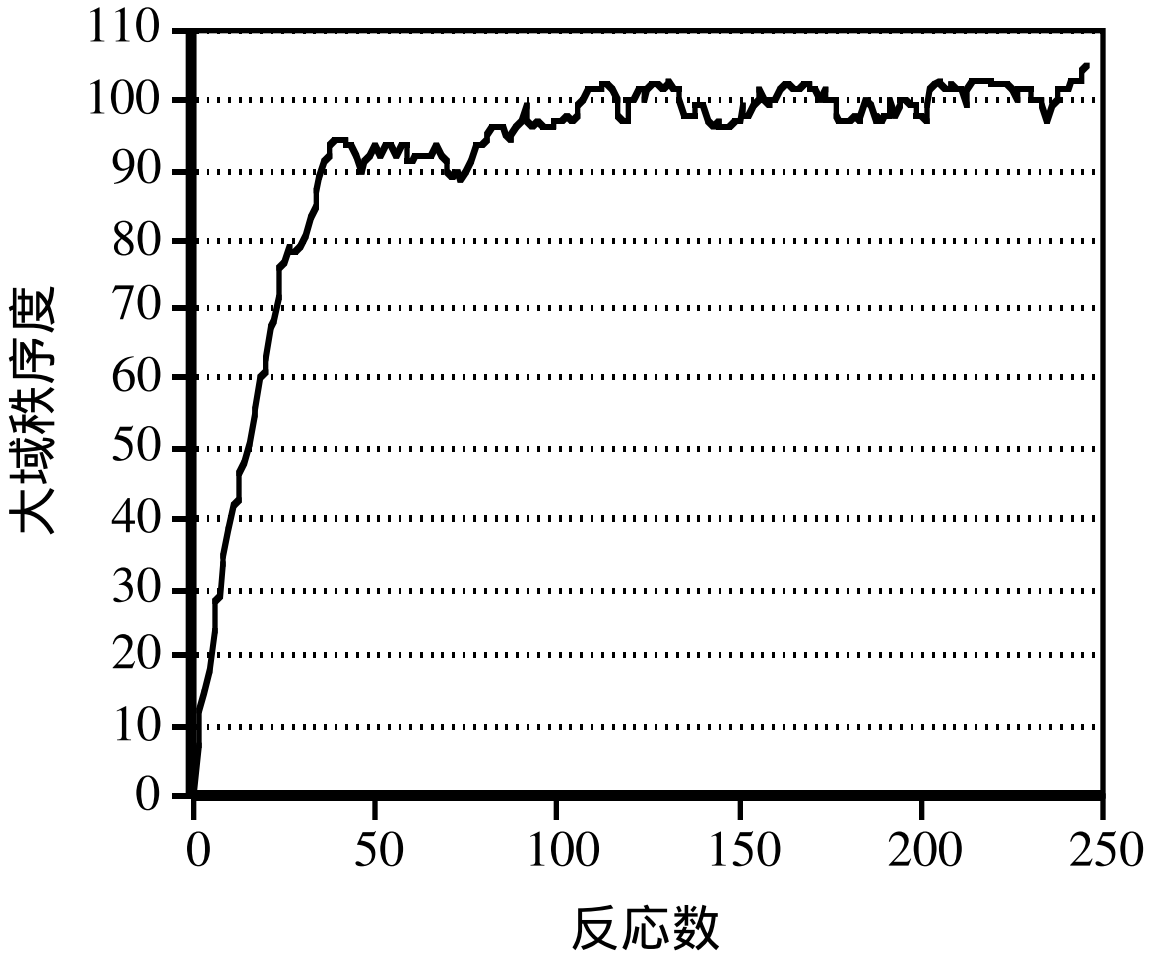
彩色問題の実行結果 — 1

- この地図をグラフに変換すると 48 頂点，105 辺になる．
- Macintosh Common Lisp 上の SOOC-92 処理系において測定 (Quadra 700 上) .
  - SOOC = Self-Organization-Oriented Computing (Casting).
- 測定値 (100 回平均)
  - 総反応回数は 940 .
  - 規則左辺のマッチング回数は 34729
    (不成功におわるばあいもふくむ) .
  - 実行時間は 6.01 秒 .

大域秩序度とその変化例 *

彩色問題の実行結果 — 2

- 大域秩序度の定義
  - 局所秩序度の作業記憶全体にわたる和．
- 米国地図彩色問題における大域秩序度
  - 解のとき最大値 105 (辺の総数) をとる．
  - 全州が同色のとき最小値 0 をとる．

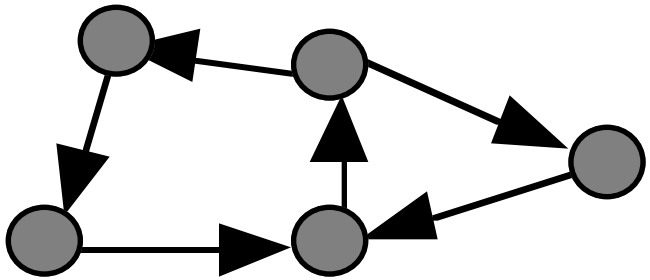


目次

- 解探索としての問題解決 — 従来の解探索法の問題点
- 化学的キャスティング・モデル (CCM) による解探索法
  - その概要
  - CCM の概要
  - 例題： 彩色問題
- CCM による解探索の特徴
  - 探索グラフの強連結性
  - 反応規則の可逆性と対称性
  - 局所度とバイアス強度の変化法 (触媒の使用)
- 他の探索法との比較
  - 分散的探索法との比較

探索グラフの強連結性

CCM による解探索の特徴 — 1

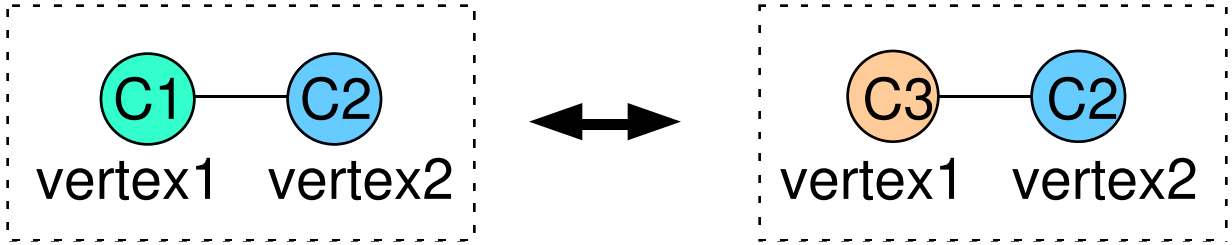


- 有向グラフの強連結性とは
  - 任意の 2 頂点について双方向のパスが存在すること．
- CCM では探索グラフは強連結であってよい．
  - 従来の解探索法では強連結 (ループあり) であってはならない．
  - 彩色問題の探索グラフは強連結．
- CCM では探索グラフは強連結であるのがよい (?)
  - 強連結であれば，探索グラフ内の任意の点を初期状態として解に到達可能 — 袋小路がない．
    - ただし，バイアスなし，または局所秩序度が適切に定義されているという条件のもとで．

反応規則の可逆性

CCM による解探索の特徴 — 2 (反応規則の性質 1)

- 可逆な規則の定義
  - 右辺を条件部，左辺を動作部として適用できるように定義された規則．
- 可逆な規則の例
  - すなおに定義すると可逆になる (?)

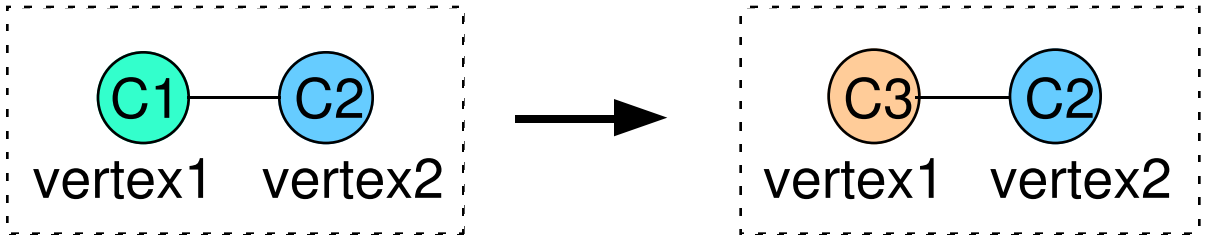


- 可逆な規則がゆるされるのが特徴
  - 従来のプロダクション・システムでは可逆な規則は排除されていた．
    - 実行がループするのがさけられないため．
    - その結果，柔軟性をうしなう．
  - CCM においては規則が可逆でもかまわない．
    - ランダムさのため，ループしない．
    - 評価関数のため，実行は不可逆にすることができる．

反応規則の対称性

CCM による解探索の特徴 — 3 (反応規則の性質 2)

- 辺対称な規則の定義
  - 規則の左辺と右辺とを交換しても等価な規則．
- 辺対称な規則の例



- 辺対称な規則がゆるされるのが特徴
  - 従来のプロダクション・システムでは辺対称な規則は排除されていた．
  - 可逆性とおなじ理由でゆるされる．
- マッチング対称性については省略する (予稿参照)．

局所度とバイアスのつよさを変化させる方法

CCM による解探索の特徴 — 4

- 計算で参照する情報の局所性や，酔歩に対するバイアスのつよさを変化させることができる．
- 局所度とバイアスのつよさを変化させる方法
  - 触媒の使用 (以下説明) .
  - 規則の合成 (予稿参照) .
- 以下，触媒についてだけ説明する．

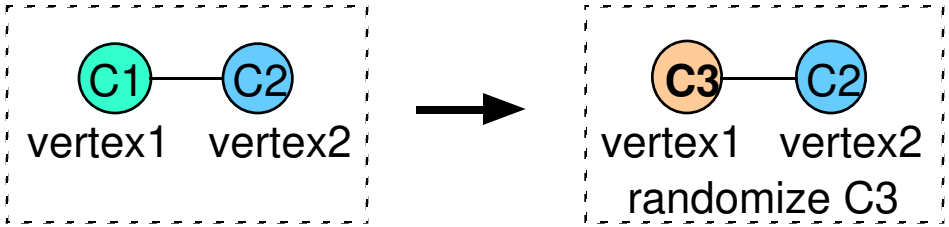
触媒

■ 触媒の定義

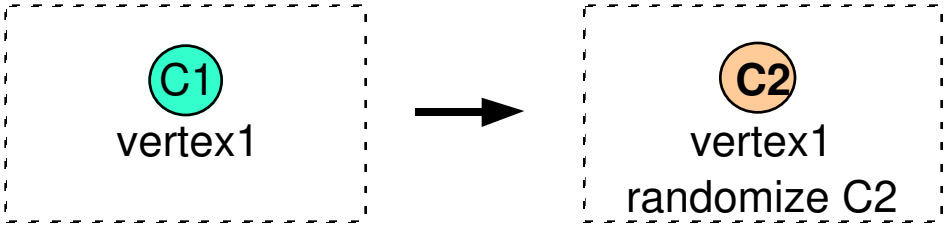
- ◆ 反応によって変化しないが，秩序度の計算にだけ参加するデータ (にマッチするパタン) .

■ 触媒をふくむ (ふくまない) 規則の例

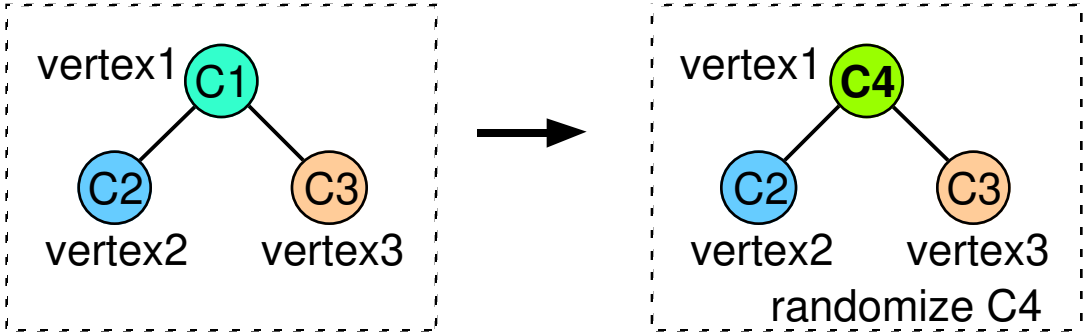
- ◆ 1 個の触媒をふくむ規則



- ◆ 触媒をふくまない規則



- ◆ 2 個の触媒をふくむ規則

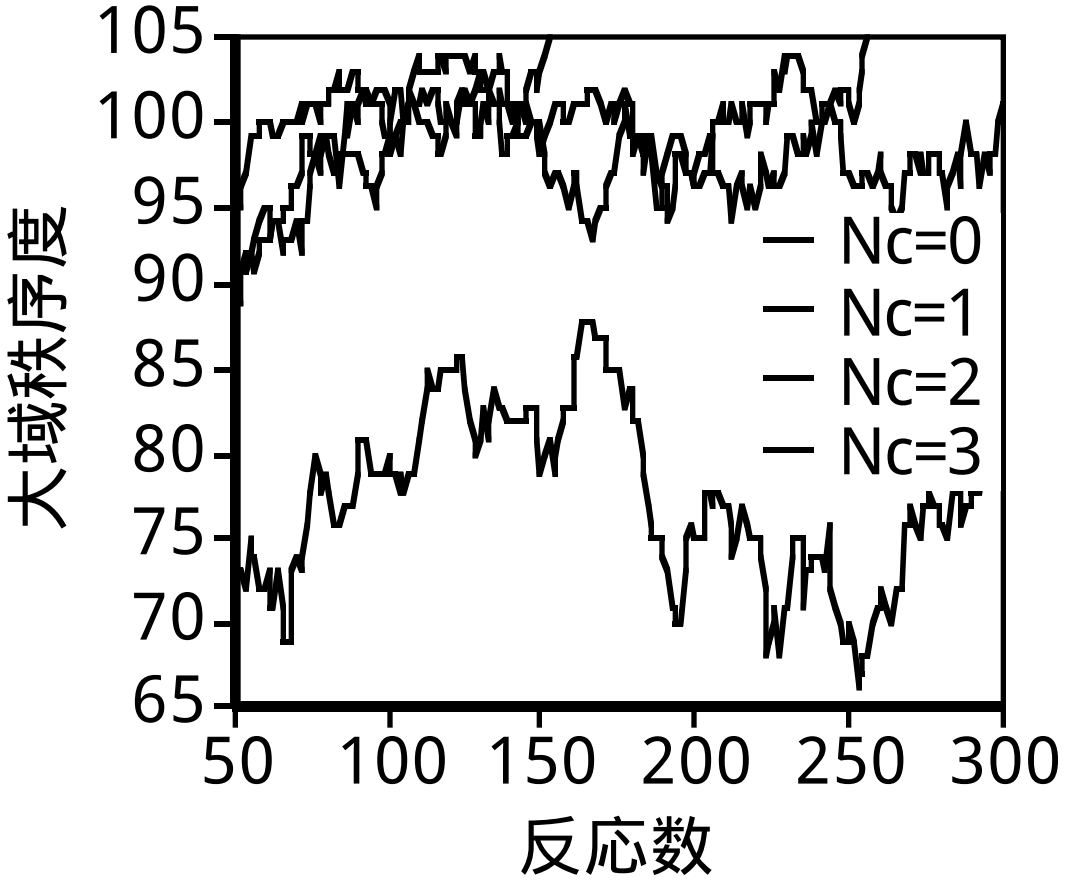


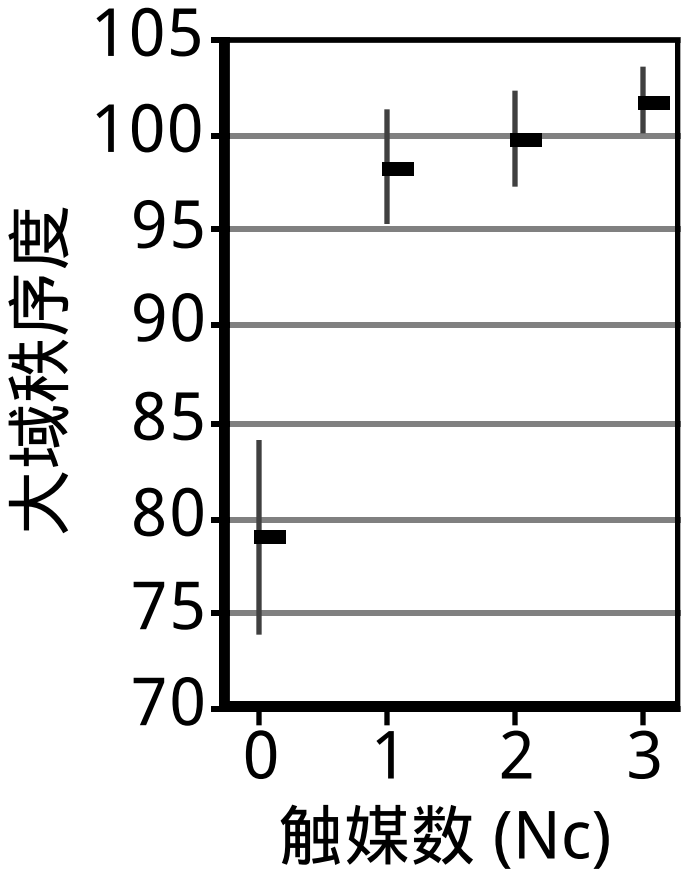
触媒数の変化と局所度・バイアスのつよさ

- 触媒数を変化させると，規則 (計算) の局所性が変化し，酔歩に対するバイアスのつよさが変化する．
  - 触媒をふくまない規則
    - もっとも局所的．
    - バイアスのつよさも最小 (彩色問題では 0)．
    - 計算が局所最大点におちいらない．
  - 触媒をくわえていと規則はしだいに
    - 非局所的になる (より多数のデータを参照する)．
    - バイアスはつよくなる．
    - 計算が局所最大点におちいりやすくなる．
  - すべての原子が反応に関与する極限
    - この解探索法はやまのぼり法にちかくなる．

触媒数の変化と大域秩序度の平均値・分散との関係 *

- バイアスのつよさは，探索過程における大域秩序度の平均値によって表現できる (?)
- 触媒数 *Nc* と大域秩序度との関係





目次

- 解探索としての問題解決 — 従来の解探索法の問題点
- 化学的キャスティング・モデル (CCM) による解探索法
  - その概要
  - CCM の概要
  - 例題： 彩色問題
- CCM による解探索の特徴
  - 探索グラフの強連結性
  - 反応規則の可逆性と対称性
  - 局所度とバイアス強度の変化法 (触媒の使用)
- 他の探索法との比較
  - 分散的探索法との比較

分散的探索法との比較 — 1

- 分散協調的な解探索法
  - 複数のエージェントが局所的な知識をもとに，協調的に探索する．
- エージェントの粒度
  - 分散協調的な解探索法においては粗粒度
    - エージェントは通常はマクロな存在 (粗粒度プロセス) .
  - CCM による解探索においては細粒度
    - 個々の反応やそれがあつまったものをミクロなプロセス or エージェントとかんがえる．
    - “エージェント” は協調したり競合したりしながら探索する．

分散的探索法との比較 — 2

- エージェントの実装
  - 分散協調的な方法におけるエージェント
    - 通常は手続き的に実装される．
    - 情報隠蔽 (オブジェクト指向) によるかたい殻をもつ．
  - この研究がめざす “エージェント”
    - ミクロなレベルから非手続き的に記述される．
    - 自己組織される (生成したり消滅したりし or 創発する)．
    - “エージェント” どうしの境界も不確定 (殻がない)．
- 認識論的エージェント
  - 従来のエージェントは存在論的 (ontological) — プログラム上に実在．
  - この研究がめざすのは認識論的な (epistemological) エージェント
    — ものの見方に依存する存在．
    - 存在論から認識論へという方向は人工生命などの研究とも共通 (?)

まとめ

- 計算モデル CCM による解探索法とその特徴を説明した．
- この方法ではバイアスつき酔歩を基本として解探索する．
  - 木構造でない探索グラフ (典型的には強連結グラフ) を探索する．
  - 網羅的系統的探索によらず，非決定的 (確率的) な方法で探索する．
  - バイアスは局所秩序度によってかける．
- この方法では局所的な情報にもとづいて解探索する．
  - 局所的に作用する反応規則と局所秩序度とによる．
  - 手順的な情報や全体的な計画なしに解探索できる．
- 反応規則は可逆性，辺対称性などの性質をもちうる．
- バイアスのつよさや規則の局所度を変化させることができる．
  - 触媒または規則の合成をつかう．
  - 適応的・自己組織的探索，並列探索などの柔軟な解探索の可能性．

結論 — 2

- CCM では探索を人間が過剰に制御することをやめて，局所的な情報を参照する規則や評価関数と確率的な方法とをつかう．
- 認識論的エージェント
- すなおな定義

CCM による探索における 3 つの問題のあつかい *

- 木をつかうことの問題点: 木である必要はない.
  - 酔歩をつかう — 探索グラフにループがあっても探索はループしない.
  - 網羅的系統的探索をめざさないので, 複数のパスは問題にならない.
- 網羅的探索の問題点: それはめざさない.
  - 問題の全制約をみたす解がかならずもとめられるとはかぎらない.
  - 計算が有限時間で停止する保証はえられないであろう.
  - 全制約をみたすことが不可能な問題でもあつかえる可能性がある.
  - 準最適解が木探索より高速にもとめられる可能性がある.
- 系統的探索の問題点: それはめざさない.
  - バックトラックによるオーバヘッド (過去の状態の記憶など) がない.
  - ユーザは探索順序を指定する必要がない.
  - システム側が探索順序を (部分的に) 制御できる.
    - 並列探索, 適応的・自己組織的探索に有利.

CCM による彩色問題の解法 — 0 *

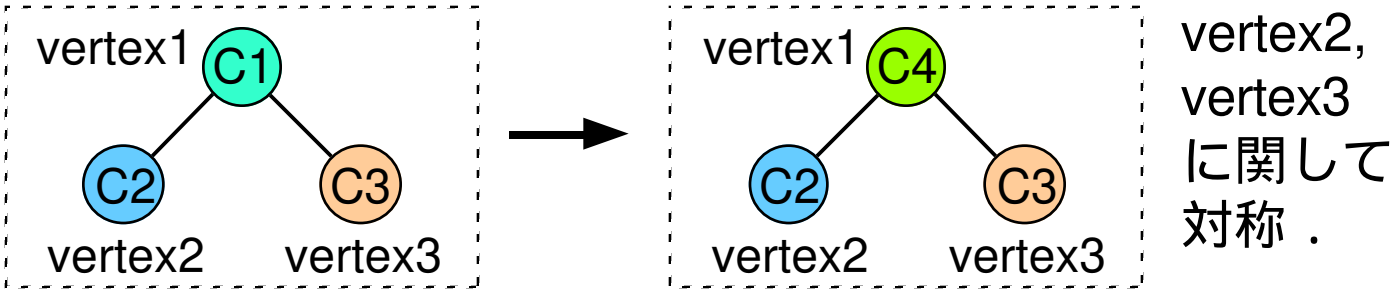
- 概要
  - キャスタを計算言語 SOOC-92 とその処理系によって記述・解決することができる．
    - SOOC = Self-Organization-Oriented Computing (Casting).
  - ここでは視覚言語と SOOC をつかいわけて説明する．
- データ構造 (元素)

```
(defelement vertex
        color                ; 内部状態として色 (color) をもつ．
    (* neighbor))            ; 任意個の隣接点へのリンク (neighbor) をもつ
                             ; (“*” によって任意個であることをあらわす)．
```

反応規則のマッチング対称性 *

CCM による解探索の特徴 — 5

- マッチング対称な規則の定義
  - 規則にあらわれるラベル (識別子) や変数をあるやりかたで系統的に置換したときに同一の規則がえられるような規則 .
- マッチング対称な規則の例 :

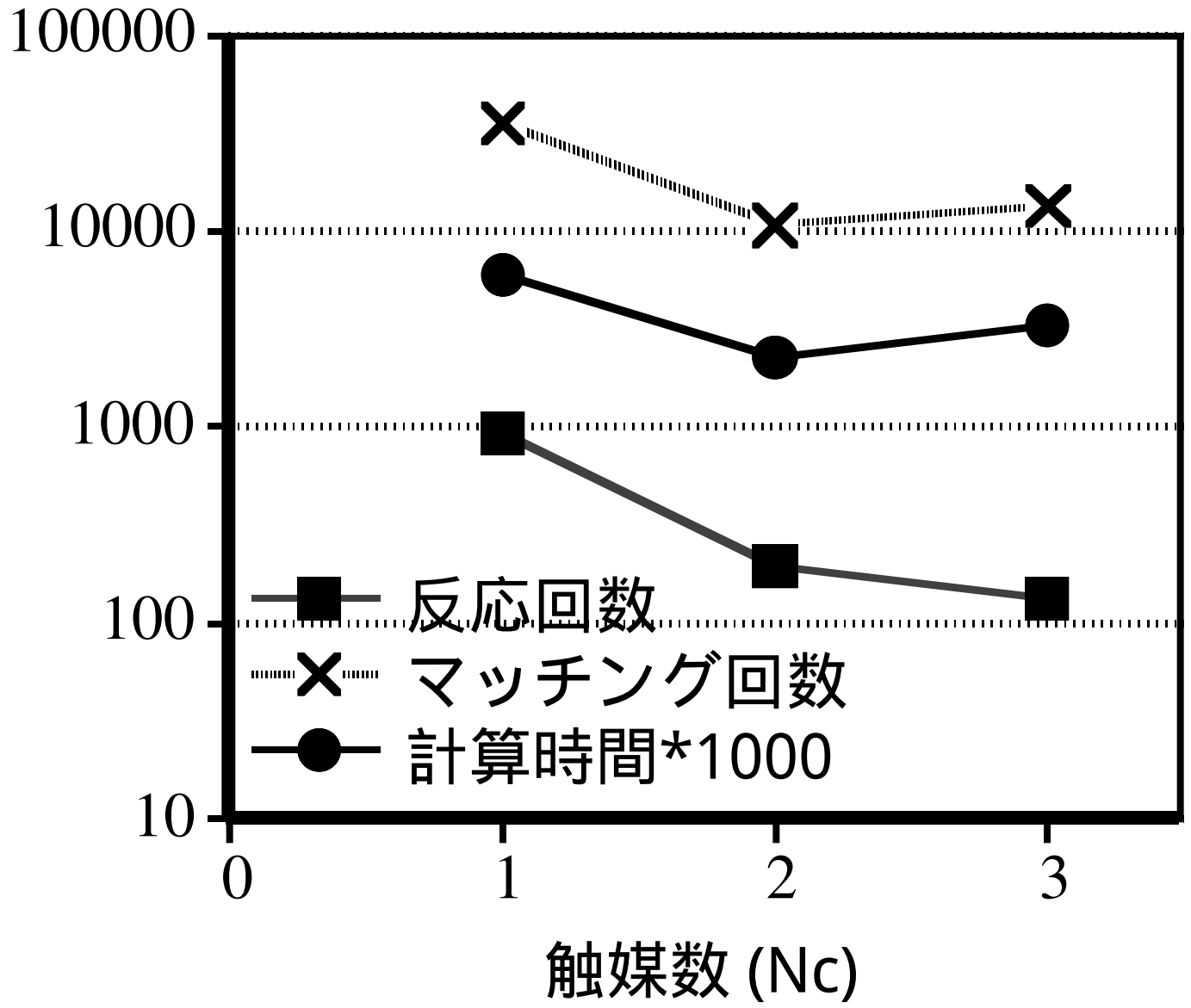


可逆性・辺対称性がもたらす性質 *

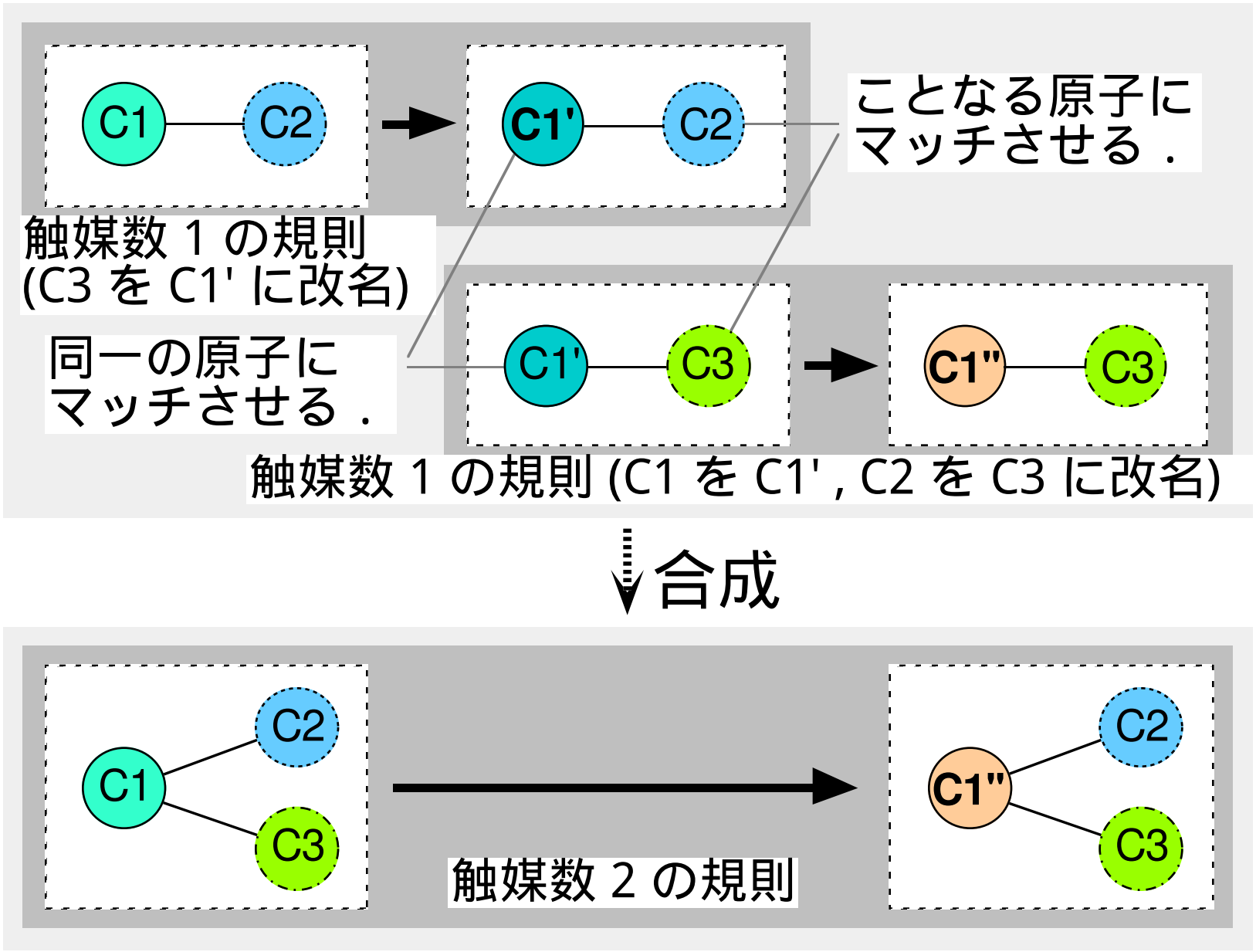
CCM による解探索の特徴 — 3.5

- 可逆性および辺対称性は探索グラフの強連結性をうみだす．
  - 全規則がいずれかの性質をもてば，全オペレータについて逆のオペレータも存在することになる．
  - 連結であることと強連結であることは同値になる．
- 可逆性および対称性は少数の規則でより多数のオペレータを定義することを可能にする．
  - 1 個の規則の適用範囲をひろげる．
  - キャスタの単純化につながる (?)
    - 前記の彩色問題や N クウィーン問題などにおいても，キャスタを構成する規則は唯一．

触媒数と計算時間などとの関係 *



規則の合成 *


C1
C2
C1'
C2
ことなる原子に
マッチさせる .
触媒数 1 の規則
(C3 を C1' に改名)
同一の原子に
マッチさせる .
C1'
C3
C1"
C3
触媒数 1 の規則 (C1 を C1' , C2 を C3 に改名)
合成
C1
C2
C3
触媒数 2 の規則
C1"
C2
C3

非分散的探索法との比較 — 1 *

- やまのぼり法
  - CCM は局所的情報だけをつかう — 基本的にはやまのぼりではない．
- ニューラル・ネットとの比較
  - ニューラル・ネットは基本的にはやまのぼりをするが CCM は局所的．
  - 知識表現が記号的であるという点においてことなる．
- 遺伝的アルゴリズム (GA) との比較
  - 確率的な方法であるという点では共通．
  - GA においては大域的な評価関数がつかわれるが CCM は局所的．
  - CCM のほうがはるかに自由な知識表現をあつかえる．
  - 自明なちがい: CCM においては複数の解を同時にあつかわない．
    - CCM をつかってある種の GA を記述することは可能．

非分散的探索法との比較 — 2 *

- (逐次) 制約プログラミングとの比較
  - CCM は 2 値的な制約充足を基本としているわけではない．
    - 制約が部分的にしかみたせない問題もあつかえる．
  - バックトラックをつかわず，確率的な方法であるという点でことなる．

今後の課題 *

- 理論的な課題
  - 開放系や並列性・分散性がうまくあつかえるわくぐみをつくること．
  - CCM による解探索の性質をさらに解明すること．
  - 探索グラフや規則の構造と探索のふるまいとの関係，バイアスのつよさや局所度とそれとの関係をあきらかにすること．
- SOOC の処理系に関する課題
  - バイアスのつよさや局所度を自動調整する機構を実現すること．
  - 並列処理系を実現すること．
- 応用に関する課題
  - より複雑な問題に挑戦すること．
  - 創発的ふるまいをしめす例題をみつけること．