

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19500200

研究課題名（和文） 組合せ最適化問題に対する高性能メタ戦略の開発と評価

研究課題名（英文） Development of High Performance Metaheuristics for Combinatorial Optimization Problems and Its Evaluations

研究代表者 片山 謙吾 (KATAYAMA KENGO)  
 岡山理科大学・工学部・准教授  
 研究者番号：80309541

## 研究成果の概要：

組合せ最適化問題の代表例である最大クリーク問題(MCP)および2次割当問題(QAP)、通信・ネットワーク関連の問題であるノード配置問題(NPP)に対する高性能なメタ戦略アルゴリズムの開発と評価を行った。MCP においては、最近開発した強力な局所探索法を反復局所探索法および Memetic アルゴリズムの枠組みに導入した高性能メタ戦略を開発し、その性能を評価した。その結果、既存アルゴリズムとの比較において高い探索性能を有することを明らかにした。また QAP および NPP に対しても同様のアプローチが可能であり、高性能な反復局所探索法を開発した。その他、バイオインフォマティクス分野におけるアミノ酸配列のマルチプルアライメントのアルゴリズムとして、クリークを考慮した解構築法を開発した。加えて、関数最適化問題に対するメタ戦略である Particle Swarm Optimization 法やメタ戦略に導入を試みるための学習法の検討などを通して、本研究課題をより洗練化するための模索も同時に行った。以上の研究成果は学術論文誌、国際会議、国内で開催の学会・研究会等で発表した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学，ソフトコンピューティング

キーワード：組合せ最適化，メタ戦略，進化計算，局所探索，最大クリーク問題，ノード配置問題，2次割当問題

## 1. 研究開始当初の背景

組合せ最適化問題に対するメタ戦略アプローチは局所探索を拡張した解法が一般的に多い。そのため、局所探索法の性能を高め、

より洗練化された、局所最適解からの脱出法との組合せにより、さらに高性能なメタ戦略を設計することが可能と考えられる。この観点から、より大きな近傍を効率的に探索可能

とする可変深度探索にもとづく局所探索法、および対象問題に対して有効に働く局所最適解からの脱出方法の設計を通して、高性能なメタ戦略アルゴリズムの開発を目指した。

## 2. 研究の目的

上記の背景をもとに、組合せ最適化問題の代表例である最大クリーク問題(MCP)、ノード配置問題(NPP)、2次割当問題(QAP)に対して、より高性能なメタ戦略を構成する一備品である局所探索法を中心に、可変深度探索にもとづく解法の設計、および、より洗練化された、局所最適解からの脱出法(Kick法)の設計によって、高性能メタ戦略の開発を研究目的とする。以下では、主要な結果を得たMCPに対するメタ戦略アルゴリズムを中心に記述する。

## 3. 研究の方法

代表的な組合せ最適化問題の一つである最大クリーク問題を対象にして、MCPの探索空間内の地形を解析した上で、その結果にもとづき設計したMemeticアルゴリズム(MA)を提案した。本研究では局所探索にもとづくメタ戦略アルゴリズムの設計を行うため、その局所探索法によって到達可能な局所最適解群が探索空間中にどのように分布するかを調査することは高性能な解法を設計する上で非常に重要な検討事項の一つと考えられる。

提案法MAの探索性能を評価するために、DIMACSベンチマークのMCPグラフ群を対象にして、MCPに対する最先端の進化計算手法である、SinghらによるHeuristic based Steady-State Genetic Algorithm (HSSGA)、ZhangらのEvolutionary Algorithm with Guided Mutation (EA/G)、BattitiらによるReactive Evolutionary Algorithm (R-EVO)、SolnonらによるAnt Colony Optimizationの報告結果と比較検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 地形解析結果

MAで保持される解群は局所最適解の集合である。また、MAは問題領域の知識を積極的に利用することから、探索空間における局所最適解の分布の形状(地形)を考慮することで、さらに高性能なMAを設計できる可能性がある。

ある対象問題の探索空間内の形状(地形)が真の最適解に向かって一つの大きな谷とな

るような構造は、一般に、大谷構造(big valley structure)と呼ばれている。対象問題が大谷構造のような構造化された空間を持つならば、探索の集中化と多様化の相反する探索戦略をバランス良く有するメタ戦略によって最適解への接近が可能であると考えられている。その観点から、組合せ最適化問題に対するメタ戦略の解法の多くでは、探索空間内の形状が大谷構造の仮定のもとで、アルゴリズムの設計がなされている場合が多い。

地形解析の結果、DIMACSベンチマーク問題例群の多くのMCPグラフにおいて、局所探索法によって導かれる局所最適解群は、多くの場合、真の最適解との間に相関がないことを明らかにした。例えば、問題例keller6の結果は、その代表例であり、最適解との評価値の差が小さくなればなるほど、最適解と局所最適解の距離は遠く地形を確認した。これは、局所最適解群が真の最適解に向かって分布する、いわゆる大谷構造とは異なる探索空間上の構造を示唆しており、このような探索空間内を最適解に向けて探索することは容易ではないことを確認した。

### (2) 提案法MA

提案するMAは、上述の地形解析の結果を受け、交叉操作を利用せず、より広範囲の探索を実現する突然変異操作と解集団の多様性に配慮した選択操作を採用し、MCPに対して我々の提案しているk-opt局所探索法(k-opt Local Search, KLS)によって、効果的なMA探索を実現する。

上述のように、MCPの多くの問題例では大谷構造とは異なる探索空間の構造を示唆しており、非常に悲観的なことに、最適解と局所最適解との評価値の差が小さくなればなる程、最適解との距離が離れる傾向を多くのグラフで観測した。ここで、逆説的に捉えた場合を考える。本解析結果に反するように設計された進化計算法(大谷構造を前提とした進化計算法)の場合には、最適解が存在する領域とは異なる領域に探索をすすめる傾向が強くなり、最適解の算出は困難になると予測される。従って、最適解の算出をMAによって目指す場合、大谷構造を前提としたアルゴリズム設計とは異なる方針を採らざるを得ないと考えられる。その方針の一つは、探索の多様性を十分に高めることである。これとは相反して、例えば一様交叉のような単純な交叉操作は、多様性を弱める方向に働く傾向があるため、MCPの多くの問題例に対しては有効な操作として捉えることは難しい。上、局所最適化の能力に乏しいことから、局所探索法の代替にもなりにくい。加えて、得られる局所最適解同士が同じ頂点を共有し

ない傾向が強いため、何らかの工夫を施さない限り、良好な評価値の実行可能解を生成することは期待できない。なお、既存研究では、一様交叉にもとづき、解の実行可能性を保つ方法が提案され、一定の成果が報告されているが、MCP に対する最近の進化計算研究の進展により、そのような単純な交叉操作によって十分な性能を得ることは困難であることが明らかにされつつある。

以上を踏まえ、提案する MA では、交叉操作を排除し、広範囲の領域へ探索を導く突然変異操作と解集団の多様性を高める選択操作、および、できるだけ良好な局所最適解（クリーク）の算出を目指し、KLS によって探索の集中化を具備する。よって提案法は、探索の多様化を突然変異と選択操作が行い、強い集中化は交叉ではなく、KLS によって実現する。

局所探索過程の方法として、我々の提案している KLS を利用する。KLS は巡回セールスマン問題とグラフ分割問題に対して Lin と Kernighan によって示された可変深度探索のアイデアを MCP に応用した局所探索法である。これは、比較的大きな近傍を効率的に探索する近傍探索であり、MCP に対して効率的に良好な結果を算出可能であることが知られている。

突然変異の方法として LEC-Kick 法を提案する。MCP に対する突然変異操作の最も簡単な方法の一つは、与えられたクリークからランダムに幾つかの頂点を削除する方法である。しかしながら、削除する頂点数を予め適切に決定することは一般に困難である。以下では、ユーザによる、そのようなパラメータ設定を必要としない突然変異操作 LEC-Kick 法について簡単に述べる。

グラフ  $G=(V,E)$  において、現在得られた局所最適解（クリーク）CC の頂点群と最低 1 頂点以上隣接する頂点集合から、隣接する数が最も少ない頂点  $v$  を選択する。頂点  $v$  となる候補が複数個存在する場合は、それらの候補群からランダムに 1 頂点を選択する。次いで、頂点  $v$  とそれに隣接する CC の頂点群とで新たなクリークを構成する。以上の処理は、地形解析の結果を受けたものであり、突然変異後のクリークは、与えられた CC に隣接した、比較的広範囲の領域に生成されるようになる。

選択の方法として、次の方法を実施する。地形解析の結果より、MCP は大域最適解と局所最適解、および局所最適解同士に相関が見られない場合が多いため、解同士の距離を考慮し、解集団内に多様性を持たせる必要があ

ると考えられる。そこで、本 MA における次世代の解群の選択操作として次の方法を用いる。本選択の基本方針として、現世代の子集団  $P_c$  と親集団  $P_p$  の中から、クリークサイズ  $|CC|$  の大きい解群を  $P_c$  の解優先で選び次世代の  $P_p$  とする。その際、 $|CC|$  が同値となる各解とのハミング距離が  $d$  以下の解を含まないように次世代集団を構成することで、良質の解群を保持しつつ、集団の多様性を維持する。なお、 $d$  はユーザによって設定可能であるが、MA 探索に最適な、または合理的な  $d$  の値を予め決定することは容易ではない。我々は、ユーザによるパラメータ設定の削減に配慮し、各世代の集団中の各解に対する突然変異によって各 CC から削除された頂点数の平均値を  $d$  とする。

### (3) 実験結果

提案法 MA の探索性能を評価するために、DIMACS ベンチマークの MCP グラフ群を対象にして、MCP に対する最先端の進化計算手法である、Singh らによる Heuristic based Steady-State Genetic Algorithm (HSSGA)、Zhang らの Evolutionary Algorithm with Guided Mutation (EA/G)、Battiti らによる Reactive Evolutionary Algorithm (R-EVO)、Solnon らによる Ant Colony Optimization の報告結果と比較検討した。以下に、ベンチマークグラフ 37 例題 (ACO との比較では 36 例題) の結果を MA と比較して良好な（もしくは等しい）場合の結果を示す。なお、Best は最良解、Avg は解評価値の平均値での比較の結果を与えており、数字の大きい方が良い結果となる。

#### ■ HSSGA との比較結果

MA		HSSGA	
Best	Avg	Best	Avg
36/37	33/37	29/37	14/37

#### ■ EA/G との比較結果

MA		EA/G	
Best	Avg	Best	Avg
36/37	35/37	31/37	19/37

#### ■ R-EVO との比較結果

MA		R-EVO	
Best	Avg	Best	Avg
37/37	35/37	32/37	27/37

## ■ACO との比較結果

MA		ACO	
Best	Avg	Best	Avg
34/36	33/36	34/36	22/36

以上の結果より、MA は、他の進化計算手法に比べ、Best および Avg で良好な結果を算出していることがわかる。なお、計算時間についても平均的に良好なクリーク（少なくとも同等以上の良好なクリーク）を効率よく算出できることを確認しており、提案法 MA の有効性を明らかにした。

（詳細については、片山謙吾，貞松政史，南原英生，成久洋之，`最大クリーク問題に対する進化的アルゴリズム，” 情報処理学会論文誌，vol. 49，no. 11，pp. 3715--3724，2008. を参照されたい。）

### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

①片山謙吾，貞松政史，南原英生，成久洋之，`最大クリーク問題に対する進化的アルゴリズム，” 情報処理学会論文誌，vol. 49，no. 11，pp. 3715--3724，2008. 査読：有

②Kengo Katayama，Masashi Sadamatsu，and Hiroyuki Narihisa，`Iterated k-opt Local Search for the Maximum Clique Problem，” LNCS 4446，Springer-Verlag，pp. 84--95，2007. 査読：有

③Kengo Katayama，Hiroshi Yamashita，and Hiroyuki Narihisa，`Variable Depth Search and Iterated Local Search for the Node Placement Problem in Multihop WDM Lightwave Networks，” Proc. of the 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2007)，pp. 3508--3515，Singapore，September 25--28，2007. 査読：有

〔学会発表〕（計 3 件）

①林孝志郎，片山謙吾，南原英生，成久洋之，`分割階層型 Particle Swarm Optimization，” 進化計算研究会 進化計算シンポジウム 2007 講演論文集，北海道 洞爺湖，pp. 31--34，Dec. 27--28，2007.

②貞松政史，片山謙吾，南原英生，成久洋之，`最大クリーク問題に対する Memetic アルゴリズム，” 進化計算研究会 進化計算シンポジウム 2007 講演論文集，北海道 洞爺湖，pp. 95--98，Dec. 27--28，2007.

③山下浩司，片山謙吾，南原英生，成久洋之，`ノード配置問題に対する Memetic アルゴリズム，” 進化計算研究会 進化計算シンポジウム 2007 講演論文集，北海道 洞爺湖，pp. 99--102，Dec. 27--28，2007.

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

片山 謙吾 (KATAYAMA KENGO)  
岡山理科大学・工学部・准教授  
研究者番号：80309541

#### (2) 研究分担者

#### (3) 連携研究者