

# ハイブリッドメタ戦略

今堀 慎治

難しい組合せ最適化問題に対する実用的な解決策の一つにメタ戦略（メタヒューリスティクス）がある。近年、様々な最適化問題に対してメタ戦略アルゴリズムが提案され、その有用性が広く認知されてきた。ハイブリッドメタ戦略とは、メタ戦略に既存の最適化手法を組み合わせた枠組みであり、より高い実用性を目指した解法の総称である。メタ戦略と組み合わせて用いられる最適化手法として、動的計画法、線形計画法、分枝限定法などがある。

## 1. はじめに

応用上重要な組合せ最適化問題の多くは、非常に難しい（NP 困難族に属する）ことが知られている。さらに、情報技術の急速な発展に伴い、非常に規模の大きい問題例を扱う必要性が高まってきた。このような背景のもと、厳密な最適解を常に追求することは現実的でなく、精度の良い近似解を求めるための手法である。ヒューリスティクスやメタ戦略が広く普及してきた。代表的なヒューリスティクスとして、局所探索法（local search）や欲張り法（greedy method）が挙げられる。メタ戦略としては、アニーリング法（simulated annealing）、タブー探索（tabu search）、遺伝アルゴリズム（genetic algorithm）などがある。特にメタ戦略は、一般に最適性や解の精度の保証はできないが、多くの問題に対し少ない計算時間で精度の良い近似解を求めるという高い実用性を有している。

ハイブリッドメタ戦略（hybrid metaheuristics）は、メタ戦略と既存の最適化手法を組み合わせた枠組みであり、解法の高速度や高精度化を実現するための工夫がなされている。本稿では、(1)複数のメタ戦略を組み合わせた手法、(2)既存の最適化手法を利用した高性能メタ戦略、(3)メタ戦略を用いた効率的な厳密解法、の

それぞれに対し、各手法の特徴を簡単に述べる。詳細は文献[1]～[6]を参照してほしい。

## 2. ハイブリッドメタ戦略

### 2.1 複数のメタ戦略を組み合わせた手法

メタ戦略に含まれる多くの手法は、探索の集中化と多様化を実現することで質の良い近似解の発見を目指す。その実現法はバリエーションに富み、各手法の特徴を生み出している。例えば、(単純な) 遺伝アルゴリズムは、交叉、淘汰、突然変異という操作によって解集合を集団として改善する手法であり、解の多様化の能力は高いが集中化の能力にやや欠ける部分がある。一方、局所探索を基本とする手法の多くは、いかに解の多様化を実現するかが課題となる。

このような状況において、より性能の良い解法を設計するためのアイデアの一つが、複数のメタ戦略を組み合わせて新たな解法を構築することであり、メタ戦略に関する研究の比較的早い段階からこの種の解法が提案されている。代表的な手法に、遺伝アルゴリズムに局所探索法を組み合わせた手法である遺伝的局所探索法がある（現在では、この手法を遺伝アルゴリズムと呼ぶことも多い）。また、アニーリング法やタブー探索に再スタート機能を組み込んだ手法も標準的である。

なお、これらの手法をハイブリッドメタ戦略の中心的なものとする人もいるが、上述のような手法はメタ戦略に含まれるものであり、次に述べる手法（既存の最適化手法を利用した高性能メタ戦略）こそがハイブリッドメタ戦略であるとする人も多い点に注意が必要である。

### 2.2 既存の最適化手法を利用した高性能メタ戦略

メタ戦略の一部として既存の最適化手法を利用した解法の提案が行われ、多くの最適化問題に対して成功を収めている。以下では3つのアイデアを紹介する。

1. 大半のメタ戦略アルゴリズムでは、まず初期解（もしくは初期解集合）の生成を行う。これをランダム

いまほり しんじ

東京大学 大学院情報理工学系研究科  
〒113-8656 文京区本郷7-3-1

ムに行うのではなく、欲張り法や（緩和問題に対する）数理計画法を用いて、質の良い解を構築する。良質な初期解（集合）から探索を開始することで、特に大規模な問題例に対して、短時間で精度の良い近似解を求められる場合が多い。ただし、初期解としての有望性は目的関数値のみでは測れないこともあり、問題の性質の理解が重要な鍵となる。

2. 多くのメタ戦略は近傍探索を基本とし、効率的に近傍解を評価できるか否かがアルゴリズム全体の効率を大きく左右する。近傍解同士が類似した構造を持つという特徴に着目し、近傍解に共通する部分構造に対する前処理や、適切な順序での近傍解評価などのテクニックを用いて高速に近傍解を評価するというアイデアは、多くの問題・近傍構造に対して有効である。さらに、扱いやすい構造を有する非常に大きい（入力の指数サイズの）近傍を設計し、近傍内の最良解（もしくは改善解）を高速に見いだす技法も有望である。この枠組みは超巨大近傍（very large-scale neighborhood）と呼ばれ、グラフ理論分野の成果の活用などが見られる。

3. 与えられた最適化問題の実行可能領域において効率的な探索を行うことが難しい場合、実行可能領域とは異なる探索空間を準備し、その中で探索を行う局所探索法やメタ戦略が提案されている。探索空間から実行可能領域への写像を定義する必要があり、解の評価に時間がかかるという欠点があるが、制約が複雑なスケジューリング問題など、問題によっては非常に有効であることが知られている。この種の手法では、数理計画法や動的計画法などの最適化手法を用いて、探索空間の解から元の最適化問題の実行可能解を生成することが多い。

### 2.3 メタ戦略を用いた効率的な厳密解法

これまでに紹介した手法は、メタ戦略が解法の中心的な役割を果たし、良質な近似解を高速に求めることを目的とするものであった。これに対し、分枝限定法などの厳密解法にメタ戦略を融合することで、（計算時間の理論的な保証はできないが）短時間で厳密な最適解を求める手法も提案されている。これらの手法は、ハイブリッドメタ戦略の範疇には入らないと考えられることもあるが、メタ戦略と既存の最適化手法を組み合わせ合わせた手法であり、実用上も重要なためここで紹介する。

初めに、分枝限定法（branch and bound method）を用いて最小化問題を解くことを考える。分枝限定法では、分枝操作によって元問題の子問題を生成し、各子問題の評価を行う。この評価の際に、子問題に対する最適値の下界と、元問題に対する最適値の上界を用いることが多い。このため、良質な暫定解（最適値の上界を与える）を見いだすことは重要であり、この用途にメタ戦略を用いた分枝限定法が提案されている。

上述の利用法が最頻出かつ重要であるが、分枝限定法の他の部分におけるメタ戦略の貢献も報告されている。分枝限定法において子問題の探索順序は重要な要素であり、アルゴリズム全体の計算時間に大きな影響を与える。深さ優先探索や幅優先探索を用いた分枝限定法が最も基本的ではあるが、より高度な探索順序の決定を行うことでアルゴリズムの効率化に成功することも多い。この種の手法の中には、遺伝アルゴリズムなどのメタ戦略を用いたものもある。

分枝限定法以外にも、列生成法（column generation method）、切除平面法（cutting plane method）、分枝価格法（branch and price method）などの中で、ヒューリスティクスやメタ戦略を用いた手法が提案されている。未だ研究途上ではあるが、いくつかの最適化問題に対して有効性が示されている。

### 参考文献

- [1] R. K. Ahuja, Ö. Ergun, J. B. Orlin and A. P. Punnen, A Survey of Very Large-Scale Neighborhood Search Techniques, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 123, 75-102, 2002.
- [2] C. Blum, M. J. Blesa Aguilera, A. Roli and M. Sampels (eds.), *Hybrid Metaheuristics : An Emerging Approach to Optimization*, Springer, 2008.
- [3] J. Puchinger and G. R. Raidl, Combining Metaheuristics and Exact Algorithms in Combinatorial Optimization: A Survey and Classification, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3562, 41-53, Springer, 2005.
- [4] E. G. Talbi, *Metaheuristics : From Design to Implementation*, Wiley, 2009.
- [5] 久保幹雄, J. P. ペドロソ, メタヒューリスティクスの数理, 共立出版, 2009.
- [6] 柳浦睦憲, 茨木俊秀, 組合せ最適化—メタ戦略を中心として—, 朝倉書店, 2001.