

ウイルス感染に基づく進化型計算手法の性能向上に関する研究 (1)

三 沢 英 貴

Hidetaka MISAWA : A Study on the Improvement in Performance of Virus Evolutionary Algorithm (1)

鳥取短期大学研究紀要 第64号 抜刷

2011年12月

〈研究ノート〉

ウイルス感染に基づく進化型計算手法の性能向上に関する研究 (1)

三 沢 英 貴

Hidetaka MISAWA : A Study on the Improvement in Performance of Virus Evolutionary Algorithm (1)

VEA とは、ウイルス進化説に基づく確率的な計算手法であり、様々な組合せ最適化問題に適用されている。VEA は短時間で解の改善を実現するが、局所解に陥る可能性が極めて高い。本稿では VEA の欠点を改善し、性能を向上させるための試作的な手法である同時感染型 VEA と個別感染型 VEA について述べる。各手法は、VEA に局所解を回避する機能または局所解脱出機能の付加を図ったものである。数値実験を行った結果、問題の規模によっては、同時感染型 VEA が優れた解を得ることが確認された。

キーワード：組合せ最適化 メタ・ヒューリスティック手法 進化型計算手法 ウイルス感染

1. 諸言

企業活動における様々な場面で発生する問題は、多くの場合、組合せ最適化問題 (Combinatorial Optimization Problem) に帰着する¹⁾。代表的な組合せ最適化問題としては、巡回セールスマン問題 (TSP : Traveling Salesman Problem) や配送経路決定問題 (VRP : Vehicle Routing Problem) 等が存在するが、対象とする要素数の増加に伴い、解のパターンが膨大となり、実用的な時間内に最適解を得ることが非常に困難となる^{2),3)}。そのため、近年では実用的な時間内に準最適解を得るためのメタ・ヒューリスティック手法が複数提案されている^{4),5)}。

近年では、メタ・ヒューリスティック手法の中でも生物の進化の過程を模倣した進化戦略 (ES : Evolution Strategy) と魚や蟻のように群れを成す生物の行動原理を模倣した群知能手法 (Swarm Optimization) が注目されている^{6),7)}。ES の代表的な手法としては、遺伝的アルゴリズム (GA :

Genetic Algorithm) やウイルス感染に基づく進化型計算手法 (VEA : Virus Evolutionary Algorithm) 等が存在し、様々な問題に応用されている^{8),9)}。

本研究では、生物はウイルスの感染によって進化したという考えを数学的に模倣した確率的な探索手法である VEA に焦点を定める。VEA は、その探索過程において、多数の実行可能解を作成し、それらの中で最も優れた解の部分情報をウイルスとして他の解へ感染させることにより、短時間で解を改善する性能を持つ。しかし、他のメタ・ヒューリスティック手法と比較した場合、解の探索領域が狭く、局所解¹⁰⁾ に陥る可能性が高いという欠点を持つ。

そこで、VEA が持つ欠点を改善し、その性能を向上させるため、最も優れた解のみならず、最も劣悪な解の部分情報もウイルスとして扱う手法を試みる。2種類のウイルスを考える場合、各ウイルスの感染タイミングを同時に扱う手法と個別に扱う手法の2通りが考えられるため、VEA を含めた3通りの手法に対して数値実験を行う。また、本稿は TSP に対する効率的解法を提案するものではなく、VEA の性能を向上させるための試作的な手法につ

いて述べたものである。

2. 組合せ最適化

組合せ最適化問題とは、有限個の解集合から最適解を1つだけ得る問題であり、電力会社における発電機の起動停止計画問題や工場の生産管理におけるスケジューリング問題のように企業活動の様々な場面において、扱われる問題である^{11), 12)}。本章では、組合せ最適化問題の特性について、その代表的な問題である TSP を例として述べた後、組合せ最適化問題の効率的解法の1つである VEA について述べる。

(1) TSP

TSP は、複数の都市を1度ずつ訪問し、初めての都市へと戻るまでの巡回経路の総移動コスト（距離または時間）が最小となるものを求める問題である。さらに、同じ都市を2回以上通過することはできず、経路についても同様の制約がある。また、TSP には都市間の往路と復路で移動コストが等しい対称型 TSP と非対称型 TSP が存在する。都市数 N に対しての巡回経路のパターンは、それぞれ $(N-1)!/2$ 、 $(N-1)!$ となり、都市数の増加に伴って実用的な時間内に全パターンの総移動コストを算出することが不可能となる。図1にTSPの巡回経路の例を、表1に都市数と巡回経路パターンの関係を示す。

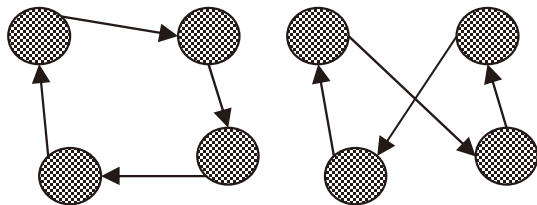


図1 巡回経路の例（4都市 ●：都市）

表1 都市数と巡回経路パターンの関係

都市数	対称型	非対称型
10	$(10-1)! = 9!$	$(10-1)!/2 = 9!/2$
30	$(30-1)! = 29!$	$(30-1)!/2 = 29!/2$
50	$(50-1)! = 49!$	$(50-1)!/2 = 49!/2$

(2) ウイルス進化説と VEA

ウイルス進化説は、ある生物に感染したウイルスがその生物の遺伝子と融合した後、他の生物に感染することにより、進化がなされてきたという仮説であり、ダーウィン進化だけでは説明のつかない加速度的な進化に対する1つの可能性として研究されている¹³⁾。つまり、「ウイルスによる遺伝子の水平移動」が、ウイルス進化説の中核であり、この考えを数学的に模倣した確率的な探索手法が VEA である。

VEA は、任意（対象問題の性質により異なる）の方法で作成した解の集団（対象問題の実行可能解集団）において、最も優れた解の部分情報を優性ウイルスとして扱う。これを任意の確率で他の解に感染させること（優性感染）で新たな解を作成し、新たな集団とする。VEA では、この一連の処理を世代と呼び、世代を重ねることにより、集団全体を効率的に進化させる。しかし、優性ウイルスが急速に他の解へ浸透することにより、世代を重ねるにつれて集団内の解の性質が似通ってしまい、局所解に陥る可能性が極めて高くなるという欠点を持つ。VEA のイメージを図2へ示す。

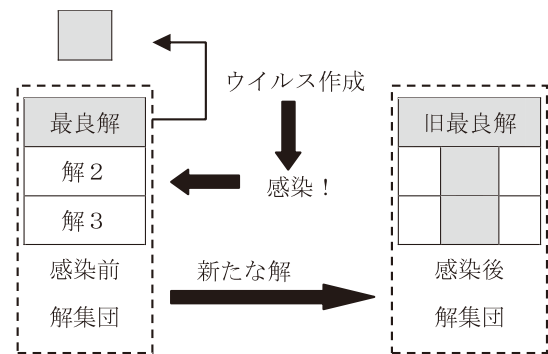


図2 VEA のイメージ

3. 劣性感染を考慮した VEA

本章では、前章2節で述べた VEA の欠点を改善し、性能を向上させるための試作的な手法について述べる。VEA は、優性ウイルスのみを用いた感染処理を軸として解の探索を行うが、本研究では、優

性ウイルスとその対になるウイルス(劣性ウイルス)を利用した手法を扱う。優性と劣性のウイルスを扱う場合、その感染タイミングから2通りの手法を考えることができる。以下、各手法についてTSPに対する適用を例として述べる。

(1) 試作手法 1 同時感染型 VEA

1) 処理手順

同時感染型 VEA(以下、同時感染型)は、優性ウイルスと劣性ウイルスを集団に対して同時に感染させる手法である。これにより、探索過程において局所解に陥ることを回避する機能を VEA に付加する。全体の処理手順を次に示す。

- [手順 1] 現世代の個体集団作成
- [手順 2] ウイルスの作成
- [手順 3] 感染 (同時感染)
- [手順 4] 突然変異
- [手順 5] [手順 2] へ戻る (次世代へ)

以上の手順を定められた世代数繰り返す、得られた最良解を対象問題の解として扱う。次項以降、各手順の詳細について述べる。

2) 現世代の個体集団作成

個体とは、対象問題の実行可能解を表現したものであり、その表現方法は対象問題に依存する。本研究では、TSPを手法の性能検証に用いるため、巡回する都市の番号を個体の構成要素とする。また、初期世代の個体は都市番号が重複しないよう、一様乱数を用いてランダムに作成する。

個体 =

3	4	6	1	5	2	7
---	---	---	---	---	---	---

上記の個体は、左から順に巡回する都市の並びを表しており、都市3から出発して都市7まで行き、都市3へと戻る巡回経路を意味している。同様の考えに基づいて個体をM個体作成し、それらを初期の個体集団とする。ここで、Mは問題の規模に応じて決定する実験的パラメータである。

3) ウイルスの作成

本研究では、現世代の個体集団の中で最上位の評価値を持つ個体の部分情報を優性ウイルスとし、最

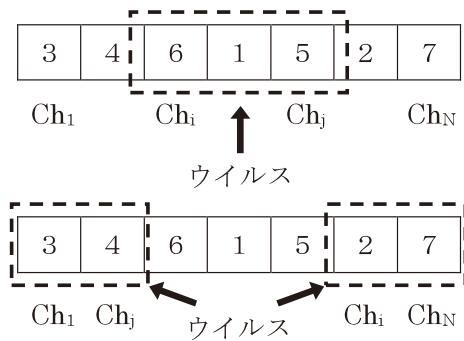


図3 ウイルス作成例(上側: $i < j$ 下側: $i > j$)

下位の評価値を持つ個体の部分情報を劣性ウイルスとする。ここで、評価値とは各個体から算出される巡回経路の総移動コストであり、値が小さいほど優れているものとする。また、ウイルスとして扱う部分情報は、個体が持つ巡回経路の情報を Ch_1 から Ch_N までとしたとき、ランダムに選択した異なる2点(選択順に Ch_i, Ch_j)によって決定する。 i と j の関係性からウイルス作成のパターンは、2通り存在する(図3)。

4) 感染 (同時感染)

感染とは、ある特定の個体から作成したウイルスデータを集団内の他の個体に上書きする処理である。ウイルスが感染した個体は、ウイルスを作り出した個体の特徴の一部を有する個体へ変化する。同時感染型では、優性と劣性のウイルスの同時感染を考慮しているが、ウイルスの一部(大きさや都市番号)が重複した場合、優性感染を優先させる。同時感染の例を図4に示す。また、感染後は都市番号の重複や削除が発生し、個体が実行不可能な解となる

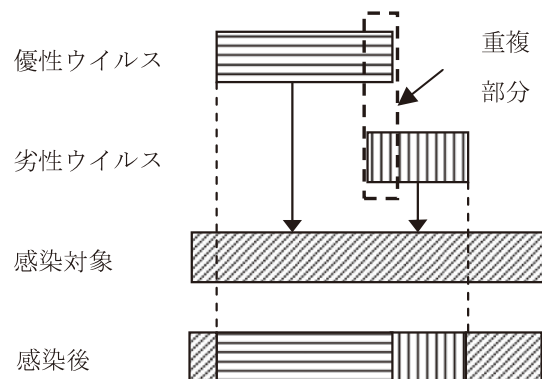


図4 同時感染の例

可能性が存在するが、GAにおける交叉手法の1つである順序交叉¹⁴⁾の考えを応用することで、実行可能性を保持している。

現世代を T とした場合の感染確率は、優性感染確率を $P_{VS}(T)$ 、劣性感染確率を $P_{VR}^k(T)$ とする。 $P_{VS}(T)$ は、全個体に対するパラメータであり、文献9)を参考に決定する。 $P_{VR}^k(T)$ は式(1)により決定し、個体によって変化する確率である。

$$P_{VR}^k(T) = \frac{Ind_k(T)}{EVAL_{VR}(T)} \quad (k=2, \dots, M-1) \quad (1)$$

ここで、 $EVAL_{VR}(T)$ は劣性ウイルス元の個体の評価値を意味し、 $Ind_k(T)$ は集団内で k 番目に優れている個体の評価値を意味している。また、感染確率の組み合わせによっては、優性感染や劣性感染のみが発生することも考えられる。劣性感染のみの場合、VEAの利点を保護する理由から、感染処理を実行しない。

5) 突然変異

感染した個体に対して確率 P_m で突然変異を適用する。突然変異は、進化戦略において、局所解脱出の可能性を持たせる処理であり、その手法としては転座を適用した¹⁵⁾。具体的には、個体の持つ都市番号の情報をランダムに2点選択し、互いに入れ替える処理である。また、突然変異確率 P_m は実験的パラメータである。

(2) 試作手法2 個別感染型 VEA

1) 処理手順

個別感染型 VEA(以下、個別感染型)は、優性ウイルスと劣性ウイルスを集団に対して個別に感染させる手法である。しかし、劣性感染は解を改悪させる処理であるため、優性感染と同様に扱うことは難しい。そこで、基本的には優性感染のみを利用し、集団に属す多くの解が局所解に陥ったと判断されたタイミングに限り、劣性感染を行う。つまり、同時感染型とは異なり、VEAに局所解からの脱出機能を付加することを目的とした手法である。全体の処理手順を次に示す。

- [手順1] 現世代の個体集団作成
- [手順2] ウイルスの作成
- [手順3] 局所解判定
- [手順4] 感染(個別感染)
- [手順5] 突然変異
- [手順6] [手順2]へ戻る(次世代へ)

以上の手順を定められた世代数繰り返し、得られた最良の解を対象問題の解として扱う。次項以降、同時感染型と異なる部分(手順3, 手順4)について詳細に述べる。

2) 局所解判定

個別感染型では、集団が局所解に陥ったタイミングに限って劣性感染を行う。そのため、集団が局所解に陥ったと判定する基準が必要となる。判定には、集団内の個体の評価値間における非類似率 $P_{sim}(T)$ とその基準値である W を用いる。 $P_{sim}(T)$ は、式(2)により算出され、この値が W を下回った場合、集団に対して劣性感染を行う。

$$P_{sim}(T) = 1 - \frac{EVAL_{VS}(T)}{AVG_{GR}(T)} \quad (2)$$

ここで、 $EVAL_{VS}(T)$ は世代 T における優性ウイルス元の個体の評価値であり、 $AVG_{GR}(T)$ は集団の平均評価値を意味する。また、基準値である W は実験的パラメータである。

3) 感染(個別感染)

個別感染型の優性感染は、その感染方法や感染確率について同時感染型と同様とする。他方、劣性感染は局所解判定の結果により、感染の可能性が発生する。劣性ウイルス自体は、同時感染型と同様の考えにより作成されるが、局所解に陥った世代の集団から作成された劣性ウイルスを感染させることに意味はなく、避ける必要がある。そこで、初期世代以外は、前世代の集団から作成された劣性ウイルスを用いて劣性感染を行う。

同時感染型の劣性感染は、優性感染の補助という位置づけであり、その確率が增大しないよう、個体によって変化させる必要があった。しかし、個別感

感染型の劣性感染は局所解からの脱出機能としての役割を持つため、全個体に対する確率 $P_{VR}(T)$ を、式(3)により決定する。ただし、エリート保存¹⁶⁾の観点から集団内で最良の評価値を持つ個体に対しては感染処理を禁止する。

$$P_{VR}(T) = 1 - \frac{EVAL_{VS}(T)}{EVAL_{VR}(T-1)} \quad (3)$$

ここで、 $EVAL_{VS}(T)$ は世代 T における優性ウイルス元の個体の評価値を、 $EVAL_{VR}(T-1)$ は世代 $(T-1)$ における劣性ウイルス元の個体の評価値を意味する。

また、劣性感染後の集団の評価値は、十分に低下すると考えられる。そのため、劣性感染後の一定世代は局所解判定処理と劣性感染を禁止する。禁止世代については、実験的パラメータとする。

4. 数値検証

(1) パラメータの設定および実験結果

試作手法の性能検証するため、TSPのベンチマーク問題3種 (bayg29, berlin52, eil101)¹⁷⁾ を用いて数値実験を行った。実験の繰り返し回数は50回、実装にはVC++6.0を利用した。実験に利用した各種パラメータを表2へ、対象としたベンチマーク問題の内から1種 (berlin52) へ試作手法を適用した場合の最良評価値と集団の平均評価値の推移を図5と図6へ示す。また、50回の繰り返しにおいて、最終世代に最も多く得られた最良評価値について各

表2 各種パラメータ

	VEA	同時感染型	個別感染型
個体数	100 個体		
優性感染確率	0.9		
最終世代	1000 世代		
基準値			0.3
劣性禁止世代			15 世代
突然変異確率	0.15		

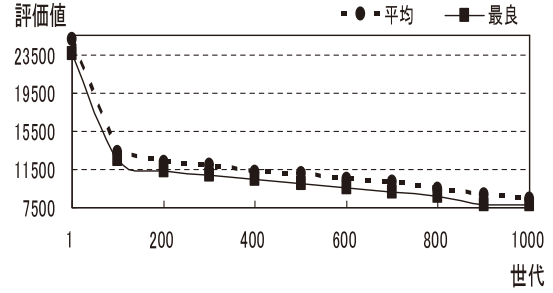


図5 数値実験結果 (同時感染型)

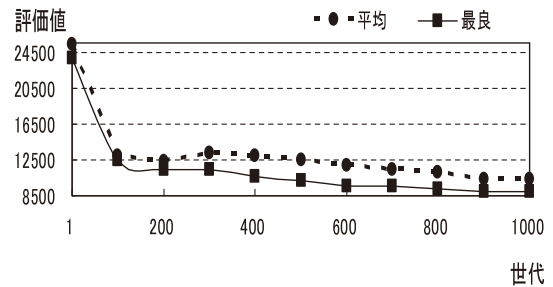


図6 数値実験結果 (個別感染型)

表3 最良評価値の比較

	bayg29	berlin52	eil101
VEA	8950	7775	696
同時感染型	8930	7744	736
個別感染型	8971	8939	889

表4 最優評価値の取得回数

	bayg29	berlin52	eil101
VEA	24	32	45
同時感染型	26	18	5
個別感染型	0	0	0

手法 (VEA, 同時感染型, 個別感染型) を比較した結果を表3へ、各手法の中で最も優れた評価値を得た回数 (最優評価値の取得回数) についての比較結果を表4へ示す。

(2) 考察

図5と図6より、いずれの手法においても100世代までの間に最良評価値と集団の平均評価値が大きく改善された後、小さな改善が繰り返されていることが分かる。この結果は、50回の繰り返し実験に

において大きな変化なく得られており、残りの問題に対する適用についても同様の推移が得られている。つまり、ランダムに作成した初期解に左右されず、安定した解の探索が行われていると考えることができる。本実験では、突然変異確率 0.15 としているが、その他の確率 (0.05, 0.10) についても実験した結果、大きな変化は得られなかった。

図 5 から、最良評価値と集団の平均評価値の改善の推移が非常に似通った動きをしていることが分かる。さらに、100 世代以降 900 世代までの間、改善率は小さいが着実に値を改善していることが分かる。これは、同時感染により探索領域を広げながら解の探索が行われた結果である。しかし、900 世代以降は評価値の改善が見られなかった。原因としては、集団全体の進化が挙げられる。つまり、世代を重ねるにつれて集団内の個体の評価値間における差異が減少し、同時感染の発生確率が極めて低くなってしまったと考えられる。

図 6 の 200 世代以降 400 世代までの間において、集団の平均評価値が改悪されていることが分かる。同時期の最良評価値の値は大きく変化せず、400 世代以降に改善されている。この結果から、局所解に陥った場合のみ劣性感染を行うという個別感染型の特徴を確認することができる。しかし、同時感染型と比較した場合、全体的に評価値の改善率が低く、得られる解の精度も低い。原因としては、次の内容が考えられる。第一は同時感染型同様、集団全体の進化による個体の評価値間における差異の減少であろう。個別感染型では、劣性感染を局所解脱出機能と位置付けているが、世代を重ねるにつれて劣性ウイルス元の個体が進化することにより、劣性感染の効果が低下し、解の改善が停滞してしまう。第二は、劣性感染後の劣性感染禁止期間である。本実験では、その値を予備実験から設定したが、この期間を長くした場合、VEA と同等の探索を行い、短くした場合には VEA の特徴が弱まってしまう。

また、表 3、表 4 からは同時感染型が複数の問題において VEA を上回る解を得ているが、問題の規

模が大きくなるにつれて VEA が最も優れた解を得る回数が増加していることが分かる。

同時感染型は、問題の規模が小さい場合は、探索領域を広げ、効率的に解を探索する可能性が大きい。しかし、問題の規模が大きくなるにつれて探索領域の広がり方も複雑化し、その性能が不安定となる。他方、個別感染型は集団の進化が劣性感染に大きな影響を与え、探索を妨害してしまう結果となった。

(3) 今後の展望

両手法に対して得られた最大の問題は、集団の進化に伴って劣性感染の効果が低下することである。解決策としては、劣性ウイルス元の見直しが考えられる。しかし、どのタイミング（世代）における個体が劣性ウイルス元として相応しいかを判断することは非常に困難であると言える。そこで、VEA の性能を改善させるための他の可能性について考える。1 つは世代における優性ウイルスのパターンを増加させる手法、もう 1 つは感染後の改善率に従って優性ウイルスを変化させる手法である。現在、それぞれの手法についての検討を進めており、数値検証が終了次第、報告予定である。

5. 結言

本稿では、進化戦略の 1 つである VEA の性能を改善するため、同時感染型 VEA と個別感染型 VEA の 2 通りの試作手法について述べた。同時感染型は、探索領域を広げることを目的とした手法であるため、問題の規模によっては VEA より優れた解を得る可能性が大きい。しかし、個別感染型は、局所解脱出機能として位置づけた劣性感染が、優性感染の影響を大きく受けたため、結果的に VEA の特徴を破壊してしまうこととなった。劣性感染を利用して解の探索領域を広げるという方向性は、確かに存在する。しかし、探索過程において作成した多くの劣性ウイルスの中で、対象問題や世代ごとに最も適したものを調べる必要があり、非常に困難であ

る。今後は、前述したような他の可能性について検討していく予定である。

参考文献

- 1) B. コルテ, J. フィーゲン (著), 浅野孝夫, 平田富夫, 小野孝男, 浅野泰仁(訳)『組合せ最適化』, シュプリンガー・ジャパン株式会社, 2007.
- 2) 藤沢克樹, 梅谷俊治『応用に役立つ 50 の最適化問題』, 朝倉書店, 2009, pp. 33~35.
- 3) B. Crevier, J. F. Cordeau, and G. Laporte, "The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes", *European Journal of Operational Research* Vol. 176, issue. 2, 2007, pp. 756~773.
- 4) Colin R. Reeves (著), 横山隆一, 奈良宏一, 佐藤晴夫, 鈴木昭男, 萩本和彦, 陳洛南(訳)『モダンヒューリスティックス』, 丸善株式会社, 1997, pp. 21~67.
- 5) 佐藤泰司, 奈良宏一『システム工学の数理手法』, コロナ社, 1997, pp. 264~268.
- 6) M. Dorigo and T. Stutzle, "Ant Colony Optimization", The MIT Press, 2004.
- 7) 筒井茂義「cAS: カンニングアントを用いた ACO の提案」, 『人工知能学会論文誌』, Vol. 22, No. 1, 2007, pp. 29~36.
- 8) 伊庭齊志『進化論的計算手法』, オーム社, 2005, pp. 7~37.
- 9) 中谷直司, 金杉昭徳, 近藤邦雄「ウイルス進化論に基づく進化型アルゴリズム」, 『情報処理学会論文誌』, Vol. 40, No. 5, 1999, pp. 2346~2355.
- 10) 伊庭齊志『進化論的計算手法』, オーム社, 2005, pp. 17~18.
- 11) H. Misawa, Y. Fujii, T. Weiche and M. Kanezashi, "A Solution method for the Unit Commitment Using Modern heuristics", *Proceedings of the 6th International Conference of Industrial Management*, 2002, pp. 281~286.
- 12) V. V. ヴァジラーニ (著), 浅野孝夫 (訳)『近似アルゴリズム』, シュプリンガー・ジャパン株式会社, 2007, pp. 81~84.
- 13) 中原英臣『進化論』, ナツメ社, 1999, pp. 158~169.
- 14) 白石洋一 (訳)『組合せ最適化アルゴリズムの最新手法—基礎から応用まで—』, 丸善株式会社, 2002, pp. 118~119.
- 15) 電気学会 応用調査専門委員会『進化技術ハンドブック』, 近代科学社, 2010, pp. 30~32.
- 16) 電気学会 応用調査専門委員会『進化技術ハンドブック』, 近代科学社, 2010, pp. 32-34.
- 17) <http://elib.zib.de/pub/Packages/mp-test-data/tsp/tsplib/tsplib.html>