

並列分散遺伝的アルゴリズムの有効性*

Effectiveness of the availability of Parallel Distributed Genetic Algorithms

三木 光範¹, 廣安 知之¹, 畠中 一幸², 吉田 純一³

Mitsunori MIKI, Tomoyuki HIROYASYU, Kazuyuki HATANAKA, Jun-ichi YOSHIDA

¹ 同志社大学工学部知識工学科 (〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3)

² 同志社大学大学院工学研究科知識工学専攻 (現 富士通株式会社)

³ 同志社大学大学院工学研究科知識工学専攻 (〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3)

Parallel distributed genetic algorithms (PDGA) show better performance in addition to linear-speedup than canonical GA (CGA). However, the detailed analysis of the excellent performance of PDGA has not been performed, and it is uncertain that PDGA outperforms CGA for realistic optimum problems. In this paper, PDGA and CGA applied to solve a typical structural optimization problem to investigate the effectiveness of PDGA. The results of the numerical experiments show that PDGA outperforms CGA for a realistic optimum problems. It is found that PDGA maintains the diversity of the individuals with multiple sub-populations, and the building blocks which are growing in the different sub-populations are combined by the migration.

Key Words: Optimization, Evolutionary Strategy, Genetic Algorithms, Parallel Processing, Truss Structure

1. 緒言

大規模複雑化する問題の有力な解法として、近年、進化的戦略を用いる方法が注目されている。進化的戦略とは、生物の営みを工学的にモデル化した手法の総称である。代表的なものに遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms:GA) があげられる⁽¹⁾。

GAでは、母集団と呼ばれる解の集合体に「評価」、 「選択」、 「交叉」及び「突然変異」と呼ばれる遺伝的操作を行うことにより最適解を探索する。GAは、以下の特徴を持っている⁽²⁾。

1. 設計変数を直接操作せずに、コード化した状態で扱う。
2. 一点探索ではなく、多点探索である。
3. サンプルングによる探索で、ブラインドサーチである。
4. 決定論的規則ではなく、確率的オペレータを用いる探索である。

GAを最適化に用いることにより、従来の手法では最適化困難な複雑な問題が解けることが判明した。し

かしながら多点探索を行うため、計算コストが大きくなる。

そのため、GAの計算を並列に処理する研究が行われてきた^(3, 4, 5)。それらは負荷分散の方法によって分類される^(7, 8)。大域的並列化モデルでは、GAの処理で最も時間がかかるとされる目的関数の評価を並列に処理する方法である。この方法は実装が比較的容易であり、解析の部分に時間がかかる問題に対して効果的である。しかしながらこれは解析の並列化のため、従来の単一母集団を使用するGA (Canonical GA)で問題となる早熟収束 (Premature convergence)の問題が残る。そこで本研究では別のアプローチとして、並列分散GA (PDGA)^(3, 4)に注目した。

並列分散GAにおいて母集団は複数のサブ母集団に分割され、移住と呼ばれる解交換操作が行われる。この方法において分割された母集団は、並列計算機の各プロセッサで並列に処理される。この場合プロセッサ間通信は移住の時のみ生じ、並列処理による計算時間の短縮効果は大きい。また、母集団を分割し移住を行うことにより、計算時間の短縮だけでなく、GA特有の早熟収束が回避できる。

しかしながらこれまでの研究では、実問題に適用されておらず、解の品質向上のメカニズムが解明されていないこと、さらには分轄母集団数が解に与える影響が不明であることなどから、さらなる研究が必要であると思われる。こうした観点から本研究においては、並列分散GAの解の高品質化の原因を明らかにする目

* 原稿受付 2000年6月20日, 改訂年月日 2000年7月31日, 発行年月日 2000年8月31日. ©2000 日本計算工学会.
Manuscript received, June 20, 2000; final revision, July 31, 2000; published, August 31, 2000. Copyright ©2000 by the Japan Society for Computational Engineering and Science.

的で、実問題の一つである構造物最適化問題を対象に単一母集団のGAと並列分散GAの比較を行った。

2. 一般的な並列分散GA

並列分散モデルにおいて母集団は、複数のサブ集団に分割される。そのため、島モデル (Island Model) と呼ばれることもある。分割されたサブ集団は、並列処理を行えるよう各プロセッサに分配される。そしてプロセッサは受け持ったサブ集団について各々逐次GAを行う。そして一定期間ごとにプロセッサ間で個体の交換を行う。これを移住 (Migration) と呼ぶ。並列分散GAの概念図を Fig.1 に示す。移住以外での通信が無いいため、並列処理による計算時間の短縮効果は大きい。また、母集団を分割し移住を行うことにより、計算時間の短縮だけでなく、GA 特有の早熟収束が減少できるという報告がなされている。

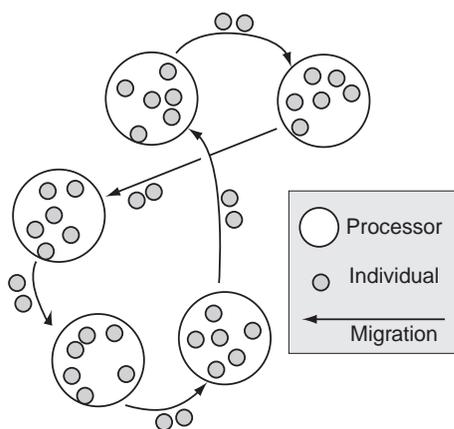


Fig.1 Coarse-grained parallel model

移住をする世代の間隔を移住間隔 (Migration interval) で表し、分割母集団内の個体数に対する、移住する個体の割合を移住率 (Migration rate) で制御する。

並列分散GAにおいて「移住の頻度」「移住先の選択法」「移住個体の選択法」等、移住スキームが重要になる。「移住の頻度」については各分割母集団が一斉に移住を行う「同期移住」や、各母集団が個別の判断により移住を行う「非同期移住」がある。本研究で用いている「ランダムリング移住」は、同期型移住においてよく利用されるスキームである。これは各分割母集団を一巡するリングをランダムに作成し、リング上の隣り合う分割母集団間で個体の交換を行う方法である。

3. 対象とする最適化問題

本研究では問題として、離散的要素からなるトラス構造物を取り上げた。構造物のトポロジー最適化において各部材の座屈や応力などを考慮する場合、問題の非線形性が増し、従来方法では最適化が困難になる。そのためこれらの分野に適用される進化戦略の改善に

期待が高まっている。構造物最適化に進化手法を適用した例として、山川⁽⁹⁾や尾田⁽¹⁰⁾などがあげられる。本研究では、これらの研究のように構造物の最適化に特化したルールを用いていない点異なる。

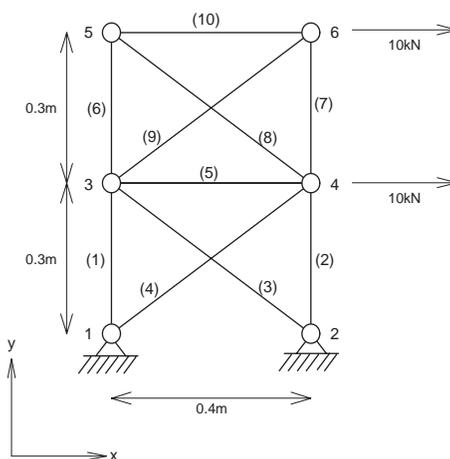


Fig.2 6 nodes 10 members truss

最適化の対象とするトラス構造物を Fig.2 に示す。各部材の材料は、簡単のため線形弾性体を使用しているが、全体の変形には幾何学的非線形性を考慮した。節点の数は6、部材の数は10である。節点1および2は単純支持とする。節点4および6にはそれぞれ右向きに10kNの水平過重が作用する。このトラス構造物について、最小体積となる部材断面積を求める。制約条件として全体制約条件と局所制約条件を考える。局所制約条件は部材の引っ張り応力が40MPa以内であることと、座屈破損が生じないことである。全体制約条件は、節点6のX方向の変位が0.03m以内とする。適合度関数は目的関数と、節点の変位と部材の破損状況による制約条件から構成される。またトラスの構造解析には、任意の非線形現象が取り扱える、オブジェクト指向に基づく構造解析手法⁽¹¹⁾を用いた。

設計変数にはトラスの断面積を用いる。1部材断面積あたり12ビットを使用する。これより設計変数の値域は1~4096mm²となる。したがって1つのトラスは120ビットで表される。コード化には隣り合う符号同士のハミング距離が一定となるGray Codeを用いた。最小化すべき評価関数を式1に示す。

$$H = w_v V + P_L + P_G \quad (1)$$

$$P_G = \begin{cases} W_d \times d^2 & \text{if } (d > d^*) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_L = \sum_{k=1}^N P_k \quad (3)$$

$$P_k = \begin{cases} 1 & \text{if } ((\sigma_n > \sigma_0) \text{ or } (L_k > L_k^*)) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 V はトラス構造物の総体積、 w_V 、 w_d は重み係数、 d^* は節点 6 の変異の上限値、 P_G 、 P_L はそれぞれ全体制約と局所制約に関するペナルティ関数である。 σ_k は引張強度、 L_k は部材 k の座屈荷重である。 d の値は 0.03 であり、 w_V および、 w_d は経験的に 600、1000 とした。全体制約条件はトラス構造物全体に関わる制約条件で、節点 6 の変位 d が d より小さいならペナルティは 0、 d^* 以上であれば変位の 2 乗の w_d 倍がペナルティとして架せられる。局所制約は、圧縮または伸長に関する条件を満たしていない部材の数がペナルティとなる。適合度関数 F は式 1 の逆数で表され、式 5 の形となる。

$$F = \frac{1}{H} = \frac{1}{w_V V + P_L + P_G} \quad (5)$$

4. 使用した並列計算機

本研究で使用した並列計算機は、64 プロセッサを有する米国 nCUBE 社製の nCUBE2E である。この計算機は分散メモリ型の並列計算機で、各プロセッサは、ハイパーキューブの相互結合網で結合されている。n 次元のハイパーキューブ結合は 2^n 個で構成され、1 つのプロセッサは隣接する n 個のプロセッサと直接結合されている。そのため全情報交換を n 回で行うことが可能である。プログラムを作成するにあたり使用した言語は、プロセッサ間通信のための関数が追加された nCUBE C++ である。

5. 計算時間と解の精度

5.1 各種パラメータ設定と計算条件 以下の条件下で、データの採取を行った。

1. 分割母集団数を 2^n ($n:0 \sim 6$) とする。
2. 選択方法は「ルーレット選択 + エリート保存戦略」とする。
3. 交叉率は 0.6、交叉方法は 1 点交叉とする。
4. 突然変異率は染色体長分の一とする。
5. 500 世代を迎えた時点で最高適合度を示した個体を解とする。

これらの設定の下で母集団の分割数を変化させ、それによる解の精度、最適解への収束の様子について考える。GA では初期値が収束した後に及ぼす影響が大きいため、本研究では 1 つのパラメータ設定の組み合わせについて、異なる初期値から 10 通りのデータを採取し、それらの試行平均をもとに議論を行った。

5.2 計算時間の短縮 分割母集団数と、10 回の試行平均時間の関係を Fig.3 に示す。図中「理想的時間」は 1 プロセッサでの結果を分割母集団数で割った理想時間を示している。図よりどの分割数においても、試行平均時間は理想時間に極めて近い値を示している。分割数が 8 以下の場合には、試行平均時間を理想時間

で割った並列化効率は、80% 以上の非常に高い値となる。このことより並列分散 GA は、並列コンピュータ上に実装するのに非常に適した最適化手法であると言える。

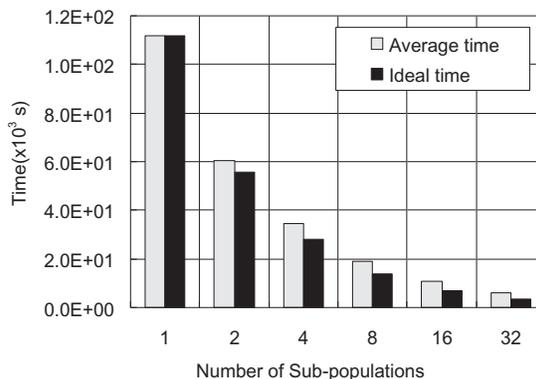


Fig.3 Effect of parallelization

5.3 信頼性の向上と解の高品質化 母集団を分割して GA を行った場合に、解にどのような影響が現れるかについて考える。そのため母集団の初期状態が異なる 10 状態について、CGA と総母集団数が等しく分割数が異なる並列分散 GA を適応し、解の精度、収束の様子がどのように異なるのかを調査した。

Fig.4 は CGA と移住を行わない並列分散 GA について比較を行った図である。横軸に分割母集団数、縦軸にトラス構造物の総体積を示している。また図中、左端が CGA についての結果を示している。図より並列分散 GA を用いた場合には、試行平均値、試行最良値ともに CGA より良好な結果であることがわかる。また並列分散 GA を用いることにより、試行最良値と試行最悪値の差が、CGA より狭まっているのがわかる。これより、母集団を分割することにより解の信頼性が向上していると言える。

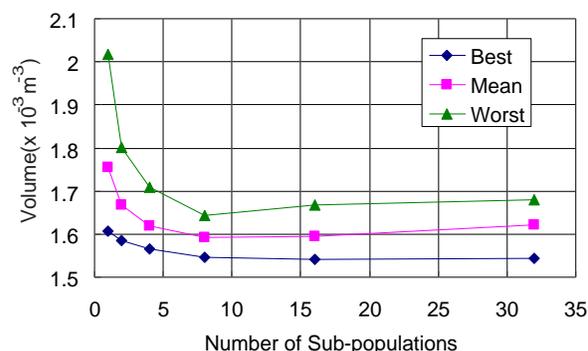


Fig.4 Effect of the number of sub-populations (Without migration)

Fig.5は移住間隔50世代, 移住率30%のパラメータ設定下で並列分散GAを行い, Fig.4と同様の図を表したものである. 移住を行った場合には, 移住を行わなかった場合より解の信頼性が向上し, さらに解の品質も向上している. これより同じ初期母集団に対し, 適切な移住間隔と移住率を与えた並列分散GAを適用した場合には, 移住を行わない並列分散GA以上に高品質で安定した解が得られることが判明した. 次節でそれについての原因を考える.

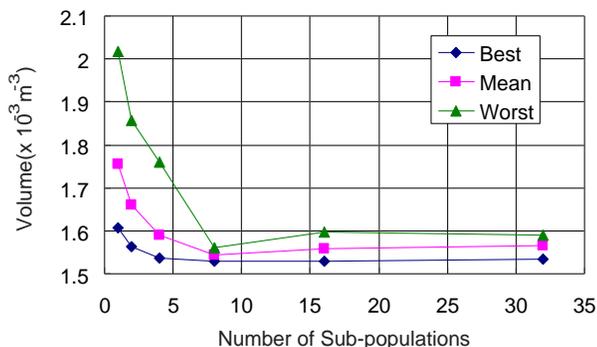


Fig.5 Effect of the Number of Sub-populations (With migration)

最適解の形状を Fig.6 に記す. この時トラスの総体積は $1.506 \times 10^{-3} (m^3)$ となった. この解では部材5が消滅し, 節点4に負荷された水平荷重は部材4によって支持されている.

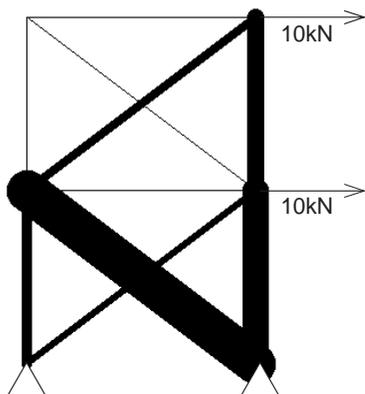


Fig.6 Distribution of sectional areas

以上より同じ初期母集団に対してGAを適用する場合には, 適切な移住間隔, 移住率を設定した並列分散GAが最も良い結果が得られることが判明した.

6. 分轄した母集団の効果

同じ初期母集団に対し, CGA, 移住無し並列分散GA, 移住あり並列分散GAを適用し, 得られた解およ

びその生成過程について考えてみる. 並列分散GAを行なうにあたり分割数は8とした. また, 移住を行ったものについて移住間隔と移住率は, それぞれ50世代および0.3とした. Fig.7は, 初期母集団における適合度に関する上位8個体の断面積分布を示したものである. 紙面中央から右向きに, 適合度に関する上位8個体を順に表示し, 中央から左向きに, トラスの部材番号を示している. また, 上方向に断面積を示している. これより初期母集団がランダムに生成されているのが分かる.

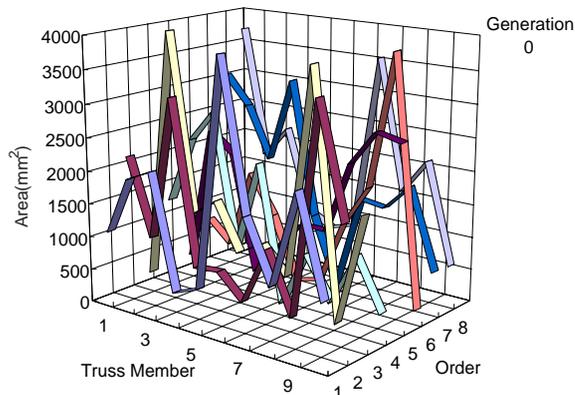


Fig.7 Best-8 Solutions(Generation:0)

Fig.8およびFig.9は並列分散GAにおいて, 第一回目の移住が行われる直前の世代の様子を示している. 並列分散GAについては母集団全体から見た上位8個体ではなく, 分割母集団内の最高降適合度を持つ個体を並べた. 同一の初期母集団について適用されたにも関わらず, CGAと並列分散GAでは結果が大きく異なっている.

CGAによって得られた上位8個体の形状はどれも類似している. 一方並列分散GAでは, 分割母集団のエリート個体は性質の異なる個体であることがわかる.

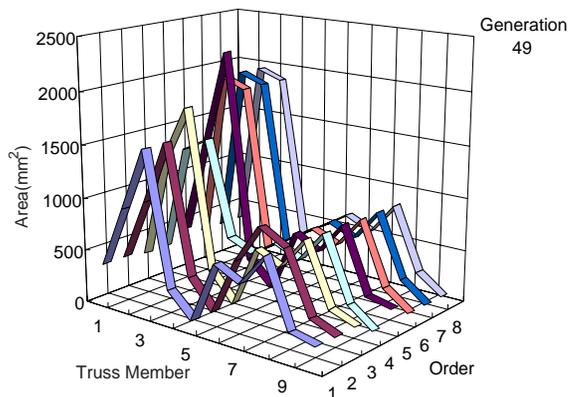


Fig.8 Best-8 Solutions(CGA:Generation 49)

これは個体が影響を与えられる範囲が, その個体が

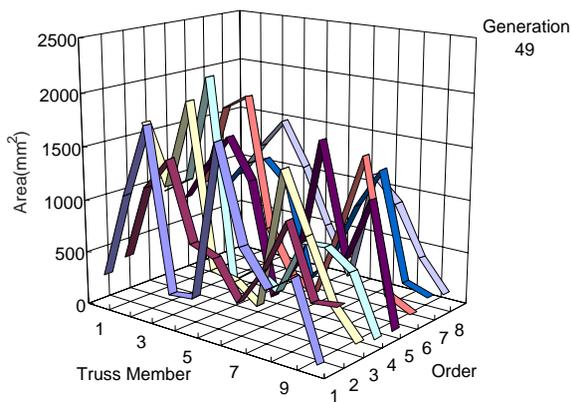


Fig.9 Best-8 Solutions(PDGA:Generation 49)

存在する母集団のみであることが原因となっている。したがって母集団を分割した場合には、各母集団ごとに異なる性質を持つ個体が生成できる。反対に単一母集団で世代交代を繰り返すと、ある適合度の高い個体の子孫のみが生き残り、その結果、多様性が失われる。これより分割母集団を用いた場合には単一母集団と比較して、解の多様性が保持できると言える。

Fig.10からFig.12はそれぞれCGA、移住無しの並列分散GA、移住ありの並列分散GAの最終世代での解の状態を示している。大域的最適解と比較を行なうため、個体番号0として最適解となった個体の断面積分布を示す。

Fig.10のCGAによる結果では、トラスの総体積は $1.875 \times 10^{-3} (m^3)$ となった。これは最適解 $1.506 \times 10^{-3} (m^3)$ と比較すると精度の悪い解であり1.25倍の体積がある。また、断面積の分布の状態も最適解と異なっている。上位8個体の形状が類似していることから世代数を増加させても、最適解を得るためにはかなりの世代数が必要となると考えられる。

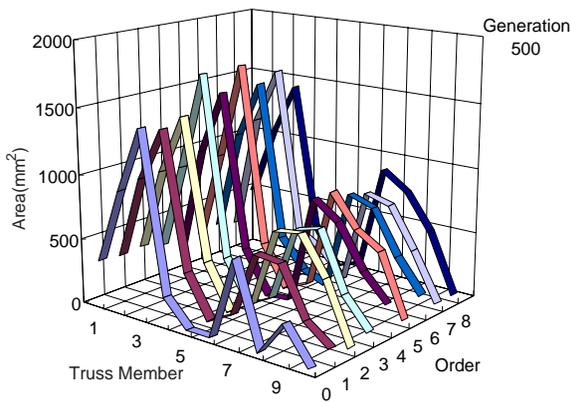


Fig.10 Best-8 Solutions(SGA:Generation 500)

移住無しの並列分散GAでは母集団を分割したことによって、各母集団ごとに異なる最適解が生成された。

この場合、分割母集団1が最も高い適合度を示し、その総体積は $1.6235 \times 10^{-3} (m^3)$ であった。これは最適解と比較して1.08倍の体積であるが、その断面積分布は最適解にかなり類似している。そのため世代数を増加させれば、最適解にたどり着く可能性は十分にある。しかし最適解を得るために必要なのは分割母集団1のみであり、これはたまたま分割母集団の初期値が良好だったことに起因する。このため移住なし並列分散GAは単一母集団GAより良い解を得ることができるとしても、かなり初期依存性が残る。

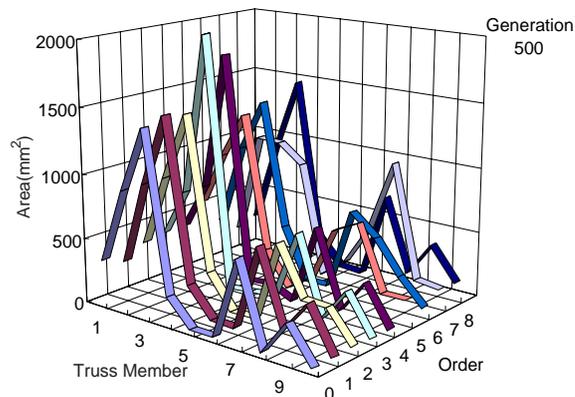


Fig.11 Best-8 Solutions(PDGA:without migration)

移住あり並列分散GAではさらに良い解がえられた。トラスの総体積は最適解の1.02倍と非常に近い値であり、トラスの断面積分布も最適解に非常に類似している。また移住を行わない場合と異なり、どの分割母集団においてもほぼ同様の解が得られている。これは移住により、ある母集団で生成された高い適合度を持つ個体が母集団全体に広がり、その結果、最適解付近の十分な探索が行われ、解の品質が向上したものと思われる。

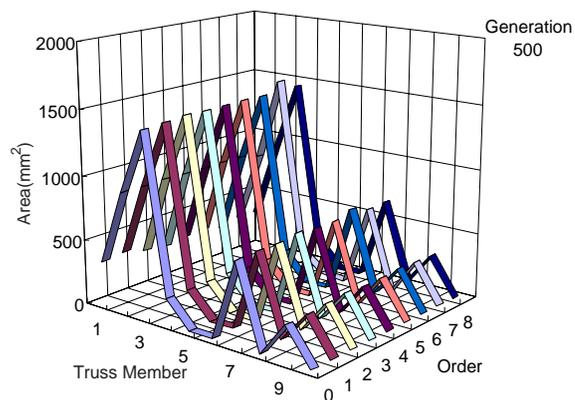


Fig.12 Best-8 Solutions(PDGA:with migration)

7. 結言

構造物最適化問題を対象に総個体数の等しい単一母集団の GA と並列分散 GA を適用し, その探索過程を比較することにより, 以下の事柄が判明した.

1. 母集団を分割し並列処理を行なうことにより, ほぼ線形的な速度向上がみられた.
2. 母集団を分割し個別に進化させることにより, CGA と比較して解の信頼性が向上した.
3. 適切なパラメータ設定の上で移住を行うことにより, 解の信頼性と品質が向上した.
4. 並列分散 GA における解探索能力の向上の原因は, 分割母集団において解の部品が構成され, それが移住によって組合わさることである.

参考文献

- (1) J.H.Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems.*, University of Michigan Press, Ann Arbor. 1975.
- (2) D.E.Goldberg, *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning.* Addison-Wesley, Reading, Mass. 1989.
- (3) Reiko Tansue, *Distributed Genetic Algorithms, Proc.3rd International Conf. Genetic Algorithms.* Morgan Kaufmann, 1989, pp.434-439.
- (4) Theodore C.Belding, *The Distributed Genetic Algorithm Revisited, Proc.6th International Conf. Genetic Algorithms.* Morgan Kaufmann,(1995) pp.114-121.
- (5) T.Starkweather, D.Whitley and K.Mathias, *Optimization using Distributed Genetic Algorithms, Parallel Problem Solving from Nature,* Springer Verlag, 1991, pp.176-183.
- (6) Jose'L.Riberio,Filho and Philip,C.Treleaven, *Genetic-Algorithm Programming Environments, COMPUTER,* 1994, pp.28-43.
- (7) Cantu-Paz,E. A survey of parallel genetic algorithms, *Calculateurs Paralleles. Vol. 10, No. 2,* 1998.
- (8) Johgno NANG and Kazuhiro Matsuo, *A Survey on the Parallel Genetic Algorithms, 計測と制御 第33巻 第6号,* 1994, pp.500-509.
- (9) 稲川智一, 荒川雅生, 山川宏, *遺伝的アルゴリズムを用いた2次元構造物の最適トポロジーに関する研究, 日本機械学会論文集 (A 編), 61巻, 587号,* 1995-7, pp.2901-2908.
- (10) 尾田十八, 小石照之, *進化的セルラ・オートマトンによる構造最適化の研究, 日本機械学会論文集 (A 編), 64巻, 628号,* 1998-12, pp.2883-2888.
- (11) M.Miki and Y.Murotu :Object-Oriented Approach to Modeling and Analysis of Truss Structures, *AIAA Journal, Vol.33, No.2,* 1994, pp.348-354.