

多親組換え法を用いた Saving 手法組込み型 GA による輸送経路の最適化

The Optimization of Transportation course by GA incorporated with Saving-Method.

相浦 宣徳^{**}、佐藤 馨一^{***}、唐澤 豊^{****}、嘉松 孝友^{*****}

Nobunori AIURA, Keiichi SATOH, Yutaka KARASAWA and Takatomo KAMATSU

1. はじめに

戦後の経済成長に伴い、我が国においては都市部への人口の集中が進み、都市化が進展してきた。労働の場、居住地を都市またはその近郊地に求め人々が集まり、商的な財の輸送及び人々の生活に伴う通勤、通学または私的な輸送が盛んになり、それが過度化し様々な「都市交通問題」が発生した。

近年においては、CO₂、NO_x 等による環境破壊が社会的問題として大きく取り上げられ、貨物輸送車による非効率的な財の移動がその最たる発生原因とされている。それに対し、国、自治体単位での様々な施策が検討・実施され、なかでも輸・配送の効率化は、都市交通問題に深く関係する都市物流システムに対する規制・誘導等のソフト面からの改善施策[4]として重視されている。同様に企業においても施策の遵守と共に企業努力として、輸・配送の効率化が進められ、それに伴い輸・配送の効率化を支援するツールの開発が各ソフトウェアメーカーに依って盛んに展開されている。

本研究では、“配送計画支援ソフト”等様々な名称で市場に出荷されているツールの心臓部ともいえる輸送経路の探索ロジックに着目し、より効率的で且つ現実的な探索ロジックを構築、提案することを目的としている。さらには、輸・配送の効率化から交通量の削減、しいては都市交通問題の解決に微力ながら寄与することを目標としている。

現在は研究の初期段階として、巡回セールスマン問題 n 人 M 都市(以下 TSP(n/M))をベースとした探索ロジックの有効性を検討中であり、その効率的な探索方法を本論文において提案する。

2. 問題設定

TSP(n/M)の定義は、ある都市を出発した n 人のセールスマンが M 都市を分担して訪問し出発点に戻る巡回経路で、 n 人の中で最大の巡回距離をもつセールスマンの巡回距離を最小にするものを求める問題である。本研究では、セールスマンを輸送車両として捉え探索ロジックの構築の基礎とする。

しかしながら、TSP(n/M)は NP 完全問題であることが確認されており、ボルツマン・マシン等の様々な最適化技法による解法が提案されているが[1]、本研究における調査では実用面において満足できる結果は得られてはいなかった。

そこで本研究では、TSP(n/M)において質の高い近似解を高速に得ることを課題として、以下のアプローチにより TSP(n/M)の解法を行う。また、基礎となる最適化技法として組合せ最適化問題に対して大域的な探索能力を持つGAを適用する。

①多親組換え法のGA交叉操作への適応。

②セービング手法[3]のGAへの組み込み。

③適応度に関する検討

3. GA による TSP(n/M)へのアプローチ

(1) GA と TSP(n/M)の歴史

GAにおいて、染色体の組換えにより新しい個体を生成する交叉は、最も重要な役割を果たす遺伝的オペレータである。そこでここでは、すでに提案されている TSP(n/M)を対象にしたGAの代表的なコード化と交叉手法[5]を挙げ考察を行う。都市名を遺伝子として、巡回する順番に都市名を列挙した文字列を染色体とするコード化をパス表現という。このパス表現と最も原始的であるといわれる一点交叉を用いた場合、「すべての都市を一回ずつ訪問する」という制約を満たしていない“致死遺伝子”を生成してしまう可能性が非常に高い。

この致死遺伝子の生成を抑制するために提案されたのが、順序表現を用いた一点交叉、パス表現を用い

*キーワード 経路選択、最適化技法

**正員 工博 神奈川大学工学部経営工学部経営工学科
(横浜市神奈川区六角橋三丁目 27 番 1 号、

Tel 045-481-5661、Fax 045-413-6565)

***フェロー 工博 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
(札幌市北区北 13 条西 8 丁目、Tel 011-706-6209、Fax 011-706-2296)

****正員 工博 神奈川大学大学院工学研究科経営工学専攻
(横浜市神奈川区六角橋三丁目 27 番 1 号、

Tel 045-481-5661、Fax 045-413-6565)

*****正員 修(工) コンパックコンピュータ (株)

(東京都杉並区上荻 1-2-1、Tel 03-5349-7301、Fax 03-5349-7473)

た部分写像交叉である。しかし、どちらも致死遺伝子を生成しないことは保証されているが、「親の形質を適切に子に継承する」という”形質遺伝性”を重視していないため、突然変異のみからなるランダムサーチと同程度の性能しか示さないことが知られている[5]。

致死遺伝子の生成を抑制し、形質遺伝性を重視したパス表現を用いたサブツアー交換交叉が山村ら[2]によって提案されている。サブツアー交換交叉とは、子孫に遺伝すべき”有用な部分的に成功しているサブツアー”を破壊せずに次世代に伝えるという交叉法である。しかしこれは、遺伝子の集合が一致する範囲の探索に多くの計算量を必要とするという問題を抱えている。

そこで、これまでに挙げた以下の問題点を解決するために本研究で提案する手法が、パス表現を用いた多親組換え法である。多親組換え法は、親の構造から得られる有用な情報である”ある都市に来る前にはどの都市にいたのか、次に巡回すべき都市はどの都市なのか”を効率的に次世代に継承することを目的に、”どの都市とどの都市とが結合しているか”を多数の親からトレンドとして得るという発想から考案された。また、多数の親から情報を得ることにより、進化過程において環境に適応した遺伝子情報をよりの確に伝えることが可能となる。

- ①致死遺伝子生成の抑制
- ②形質遺伝性の重視
- ③計算量の減少

(2) 多親組換え法の適用

多親組換え法は、2つのプロセスによって構成されている。まず選択された複数の親の構造から可能な限りの情報を継承した子、つまり形質遺伝性を重視した子を生成するために”リンク行列表”というテーブルを作成する。次いで、この作成されたリンク行列表を用いて”多親組換えアルゴリズム”によって1つの子を生成する。以下に、リンク行列表と多親組換えアルゴリズムについて具体的に述べる。

(a) リンク行列表

多親組換え法では、親の構造から得られる有用な情報は”どの都市とどの都市とが結合しているか”であると考え。簡述すると、ある都市に来る前にはどの都市にいたのかという情報と、次に巡回すべき都市はどの都市なのかという情報である。各親から得られるこの情報をリンク情報といい、総ての親のリンク情報を記録してあるのがリンク行列表である。ここで以下のような染色体構造をもつ親1のリンク情報は表1のようになる。

親1： E B D A C F

表 1 親1によるリンク情報

都市	A	B	C	D	E	F
A	0	0	1	1	0	0
B	0	0	0	1	1	
C	1	0	0	0	0	1
D	1	1	0	0	0	0
E	0	1	0	0	0	1
F	0	0	1	0	1	0

これは、総ての都市に対し、対象都市を行、前後に巡回する都市を列として、結合の記録として1を加えることにより作成される。たとえば、都市名Bの場合についてみると、前後の都市の都市名がD,Eであるため、2行目の4列目と5列目に1が加わる。TSPおよびTSP(n/M)の場合、染色体の先頭と最後はつながっているものと考え、先頭の都市に向かう結合は最後の都市となり、最後の都市から出る結合は先頭の都市になることに注意されたい。このように作成された各親のリンク情報を総て組合せたものがリンク行列表である。たとえば、以下のような染色体構造をもつ4つの親から作成されるリンク行列表は表2のようになる。行列の要素が大きいほど、その行番号の都市と列番号の都市のリンクが強いことを示す。

親1： E B D A C F
 親2： E B C A F D
 親3： F E B D C A
 親4： A B E C F D

表 2 親1-4によるリンク行列表

都市	A	B	C	D	E	F
A	0	1	3	2	0	2
B	1	0	1	2	4	0
C	3	1	0	1	1	2
D	2	2	1	0	1	2
E	0	4	1	1	0	2
F	2	0	2	2	2	0

(b) 多親組換えアルゴリズム

このリンク行列表を用い、1つの子を生成する多親組換えアルゴリズムを示す。

- Step.1. リンク行列表の最も大きい値をもつ要素の行番号を”出発点”とし、列番号を”現在の都市”とする（同じ値の要素が複数存在する場合はランダムに選択される）。
- Step.2. 現在の都市を巡回リストに加え、現在の都市の行要素から最も大きい値をもつ列番号を次の巡回都市として、現在の都市とする（同じ値の要素が複数存在する場合は、列要素の値の和が小さい方を現在の都市とする。更に列要素の和が等しい場合にはランダムに選択する）。
- Step.3. リンク行列表から、巡回リスト中の都市の行

列を削除する。

Step.4. 未訪問の都市が存在すればStep2に戻る。未訪問の都市が存在しなければ終了し、巡回リストが新しく生成された個体となる。

Step3において、他都市に比べ現在の都市とのリンクが強い都市を優先的に選択することによって、のちにそのような都市が弱いリンク先と結合することを確率的に防いでいる。

また、多親組換えアルゴリズムは、アルゴリズム中にランダム性を含んだ確率アルゴリズム (Random Algorithm) であるため、必ずしも同じ子が生成されるとは限らないことに注意されたい。表 2 に基づき生成される可能性がある子としては以下の3子が想定される。実際にはStep. 1 またはStep.3におけるランダム選択により、これらの内1つが子として生成される。

子候補 1: E B D F C A

子候補 2: E B D F A C

子候補 3: B E F D A C

(3) セービング手法の GA への組み込み

(a) セービング手法

輸・配送計画において、様々な輸送経路の中から近似的に最適な経路を選び出す実用的な手法として、セービングが挙げられる。セービング手法は、輸送経路探索ロジックの類型として考えられる代表的な①ルート型、②ダイヤグラム型、③ヒューリスティック型の中の③に分類され[3]、前述の”輸・配送の効率化を支援するツール”の多くがこの手法をベースとし、改良を加え使用している。

セービング手法は、2カ所の輸送先に対し別々に輸送するのではなく、1つのルートとして輸送することにより効率の向上を図ることにその原理がある。

図 1 に示すネットワークに対し、各ノードを2つ選び図 2 の様に、別々に輸送した場合の距離(または費用)と1つのルートとして輸送した場合の距離(または費用)の差をセービング値として算出する。これを全てのノードの組合せについて行った後、セービング値の大きいノードの組合せに対しリンクを行い、最終的に輸送ネットワークを作成するものである。通常、輸送物量と輸送手段の積載制限により、各ルートの長さを制限する。

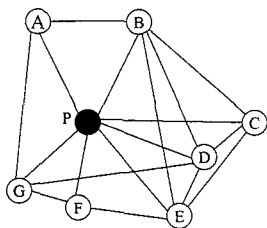


図 1 全ネットワーク図

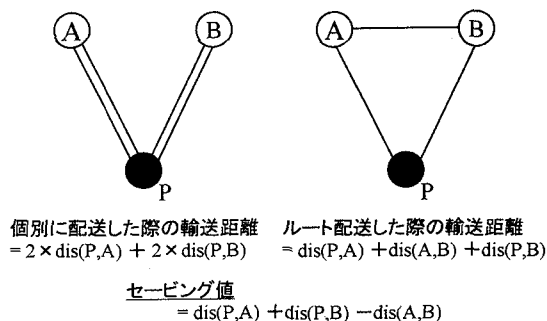


図 2 セービング値の算出

(b) セービング手法の GA への組み込み

図 3 をGAによる探索途中のネットワークと仮定する。これを前述のパス表現に従い表現すると次の様に表すことが出来る。

P A B P C E D F P G P

基準都市Pを出発し、都市A,Bを巡回後都市Pに戻る。これをルート1とし、同様に都市Pを出発し、都市C, E, D, Fを巡回後都市Pに戻るルート2、都市Pを出発し都市Gを巡回後都市Pに戻るルート3が表現されている。

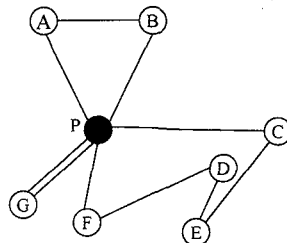


図 3 探索途中のネットワーク

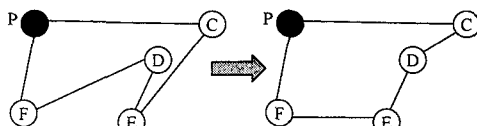


図 4 セービングによるルート補正

都市Pを出発し、都市C, E, D, Fを巡回後都市Pに戻るルート2においてE, Dの巡回順序を入れ替えることにより、巡回距離の短縮及び現実的なルートの作成が期待できる (図 4 参照)。

そこで本論文では、GA操作による探索中に作成されるルートに対しセービング手法により補正することにより、探索効率の向上、現実的な解の算出等を狙う。更には、セービング手法をGAに組み込んだ際の効果が未知数なことから、導入効果の有無を併せて検証する。

また、導入検討段階において、GA操作のどのタイミングで補正を行うかについて議論がなされ、最終的に①総ての遺伝子への処理および突然変異時に併せてルート補正を行う②突然変異の2次的な扱いの2点についてシミュレーションをした結果、交叉後に①総ての遺伝子への処理を行うことが収束速度面において、より有効であることが確認された。しかしながら、①総て

の遺伝子への処理を採用した場合、多親組換え法の利点である形成遺伝性の破壊が発生することから、②突然変異の2次的な扱いを採用する。

(4) 適応度に関する検討

(a) 考慮すべき事項

研究の初期段階において、本論文でベースとするTSP(n/M)の適応度について様々な議論がなされた。また事前調査では、現実に輸・配送計画を立案する際には、①運行車両の最小化、②各運行車両の巡回距離の平準化等が重視されていることが現役運行管理者に対するインタビューにより確認されている。

①運行車両の最小化は、使用車両台数が輸送費用により強く影響することに起因する経営上の課題であり、「多少無理をしても車両台数を抑えたい」が大半の意見である。また、②各運行車両の巡回距離の平準化は「運転者の心情を考慮して各車両の巡回距離を同程度にしたい」という管理上の課題によるものである。

本研究では最終目的として「より効率的で且つ現実的な探索ロジックを構築、提案する」を掲げていることから、経営上および管理上の課題である上記2項目を満足する適応度を備えることは必要不可欠である。

しかしながら、●本論文で基盤としているTSP(n/M)には車両台数を決定する積載量の概念が無い点、●都市座標・都市間距離を0-1間の乱数発生に依存しているために、もう一方の車両台数決定条件と考えられる各車両の最大巡回距離の設定が困難である点等から、①運行車両の最小化を総巡回距離の最小化により代替する。これは、本論文において総巡回距離の最小化を実現することが将来的には車両台数の最小化の実現に大きく寄与すると考えるためである。

(b) 適応度の算出

本研究では、上記に従い数式1-3を目的関数として適応度に反映させ、得られた解に基づき各々の妥当性について検討する。ここで、数式1では総走行(巡回)距離の最小化のみ、数式2では各走行(巡回)距離の平準化のみを狙うのに対し、数式3では、各走行(巡回)距離の平準化を前提に総走行(巡回)距離の最小化を狙っている。

①総走行(巡回)距離の最小化

$$\text{Minimize}(\sum_{i \in I} \text{Dis}_i) \quad \text{数式 1}$$

②各走行(巡回)距離の平準化

(以下、最長最短巡回距離差の最小化)

$$\text{Minimize}(\text{Max}_{i \in I}(\text{Dis}_i) - \text{Min}_{i \in I}(\text{Dis}_i)) \quad \text{数式 2}$$

③最長巡回距離をもつ巡回者の巡回距離の最小化

(以下、最長巡回距離の最小化)

$$\text{Minimize}(\text{Max}_{i \in I}(\text{Dis}_i)) \quad \text{数式 3}$$

・車両台数(巡回者数) $i \in I = \{1, \dots, I\}$

Dis_i : 車両台数*i*の走行(巡回)距離

4. 最適輸送経路の探索

(1) 探索条件および使用データ

本論文で提案する解法の有効性を検証(Sim_1)するために表3~表5に示す条件により、最長巡回距離の最小化を目的関数とするTSP(n/M)を、①サブツアー交換交叉(Sim_1_①)、多親組換え法を使用した②セービング無し(Sim_1_②)、③セービング有り(Sim_1_③)の3方法により解き、得られた結果について比較する。

また、適応度に関する検証(Sim_2)を目的に、多親組換え法およびセービング有りを前提に、①Sim_1と同様に数式3により最長巡回距離の最小化を目的関数とした場合(Sim_2_①)、②数式1を目的関数とした場合(Sim_2_②)、③数式2を目的関数とした場合(Sim_2_③)、各々により求められた解に基づき各々の妥当性について比較検証する。

表3 シミュレーションパターン

要因	水準
都市数	30,40,50
巡回者数	5
淘汰率	0.2,0.3,0.4,0.5
突然変異率	0.03,0.06,0.09

表4 都市条件

要因	条件
都市座標	0.0-1.0間の乱数発生
都市間距離	都市座標による直線距離

表5 GAのコーディング方法

GA操作	コーディング方法	適用パターン
コード化	パス表現 (都市数+巡回者数+1)	全共通
初期集団の発生	ランダム発生 (初期遺伝子数:300)	全共通
適応度	数式3	Sim_1_①-③ Sim_2_①
	数式1	Sim_2_②
	数式2	Sim_2_③
交叉	サブツアー交換交叉	Sim_1_①
	多親組換え法	Sim_1_②-③ Sim_2_①-③
突然変異	突然変異率によるビット交換	Sim_1_①-②
	セービング手法による補正 + 突然変異率によるビット交換	Sim_1_③ Sim_2_①-③
終了判定	最大世代数を設定(1,000世代)	全共通

(2) 結果

解法の有効性検証を目的としたシミュレーション

(Sim_1)結果を表 6に、適応度に関する検証を目的としたシミュレーション(Sim_2)結果を表 7に示す。なお、これらは、巡回者数:5、都市数:30~50の各組合せに対し、淘汰率4通り×突然変異率3通りの12通りを10回ずつ試行した際の平均値を示したものである。

(3) 考 察

(a) 多親組換え法およびセービング手法組み込み評価

本論文で提案する多親組換え法およびセービング手法の導入効果を表 6に基づき評価する。

表 6シミュレーション結果(Sim_1)

巡回者数	都市数	サブツアー交換交叉	多親組換え法	
			セービング無	セービング有
		Sim_1_①	Sim_1_②	Sim_1_③
5	50	2.6370	2.4658 (93.5%)	1.9692 <79.9%>
	40	2.3220	2.0488 (88.2%)	1.7739 <86.6%>
	30	1.8343	1.5667 (85.4%)	1.5448 <98.6%>

注) 表内0は対 Sim_1_①比率, <>は対 Sim_1_②比率を示す。
サブツアー交換交叉(Sim_1_①)による解に比して、多親組換え法を用い(Sim_1_②)求めた解は約6.5~14.6%削減されている。更にはセービング無し(Sim_1_②)とセービング有り(Sim_1_③)の比較では、セービング有りにおいて、約1.4%~20.1%の削減効果が得られている。これら2点から、多親組換え法およびセービング手法の導入による効果は明らかであるといえる。

(b) 適応度の評価

3(4)で検討課題として取り上げた適応度に関する評価を表 7に基づき行う。総巡回距離の最小化(数式 1)および最長最短巡回距離差の最小化(数式 2)の一方を目的関数とした Sim_2_②、Sim_2_③では、当該指標では明らかに最良値(表内列 No.(5)、(9))を示しているが、他指標においては満足を得るものではない。Sim_2_②、Sim_2_③で求められた経路の多くは各々図 6、図 7に代表される。図 6では1巡回者が大半の都市を巡回し、他の巡回者は1または2都市のみを巡回することにより総走行距離を短縮している。図 7では、各巡回者が

経路の交差を繰り返し、同程度の距離で巡回することにより最長最短巡回距離差を短縮している。図 6、図 7いずれの場合も、3(4)の観点からは現実的とは判断できない。

これに対し、最長巡回距離の最小化(Sim_2_①)による解は、表内列 No.(2),(3)に示されるように Sim_2_②、③両者のトレードオフバランス上の中間的位置付けを取っている。また、図 5に示される経路からその妥当性が確認できる。

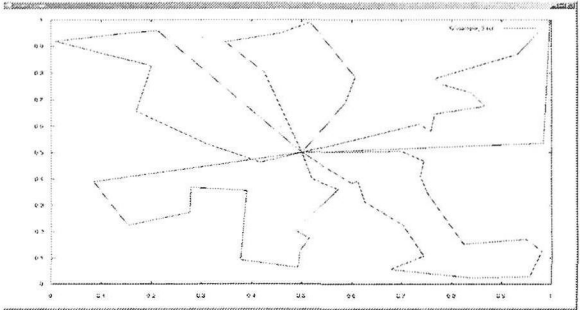


図 5 Sim_2_①による代表的経路

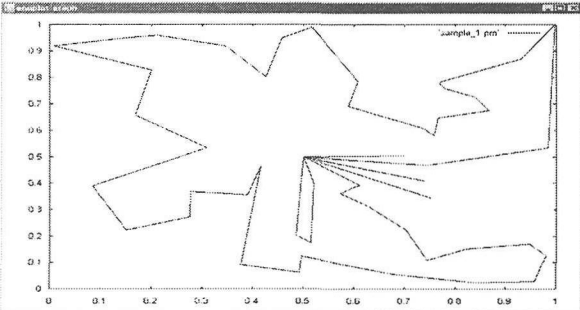


図 6 Sim_2_②による代表的経路

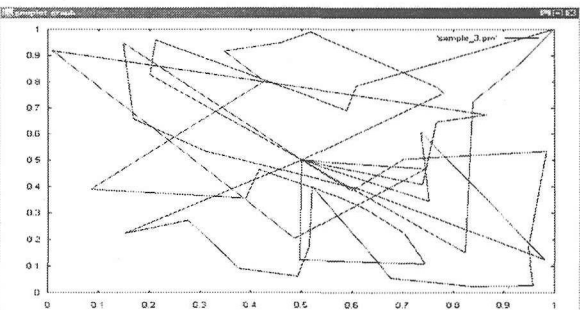


図 7 Sim_2_③による代表的経路

表 7シミュレーション結果(Sim_2)

巡回者数	都市数	多親組換え法(セービング有)								
		Sim_2_① (最長巡回距離)			Sim_2_② (総巡回距離)			Sim_2_③ (最長 - 最短)		
		最長巡回距離	総巡回距離	最長 - 最短	最長巡回距離	総巡回距離	最長 - 最短	最長巡回距離	総巡回距離	最長 - 最短
5	50	1.9692	8.9820	0.4633	6.4247	7.1912	6.3330	3.0231	15.0457	0.0308
	40	1.7739	8.3046	0.4163	3.1093	6.6111	3.0176	3.0377	15.0769	0.0383
	30	1.5448	7.1285	0.3215	5.3507	5.8364	5.2590	2.2025	10.9792	0.0156
列No.		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)

注) 1.表内0は目的関数を示す。 2.表内網掛けは目的関数値を示す。

(c) 探索面からの考察

本モデルでは計算効率の向上を目的として、組合せ最適化問題に対して大域的な探索能力を持つ遺伝的アルゴリズムを適用した。その際の収束過程を図 8 に示す。これは、淘汰率を{0.2, 0.3, 0.4, 0.5}、突然変異率を{0.03, 0.06, 0.09}と変化させ、各々10回、計120回の探索を行った結果に対し分散分析を施し、信頼率95%で適応度に対する最適条件として有意であると判定される淘汰率0.3、突然変異率0.09の組合せにより探索した際の収束を示したものである。GAは偶然性を利用するため、主たる設定項目である淘汰率、突然変異率等の設定によっては十分な探索がなされない可能性があることから、上記のように各値を変化させ試行した。

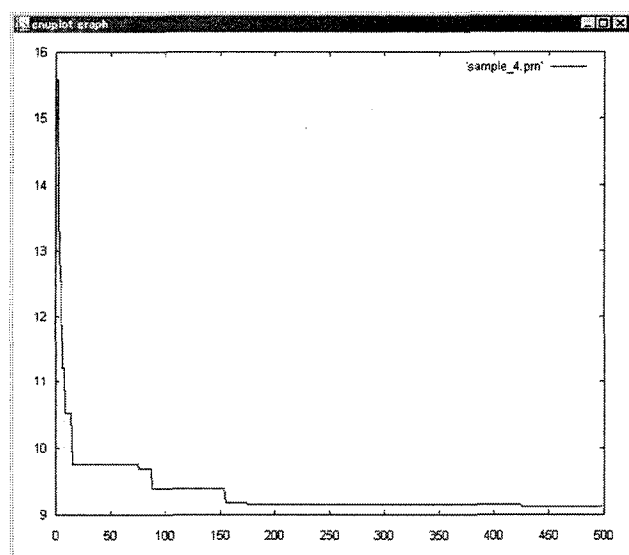


図 8 収束過程

また、最適経路選定までの探索時間は、CPU: Pentium III 600MHz相当、Memory: 256Mbの環境下において、約120秒であり、本研究で比較対象としたサブツアール交換交叉を用いた探索では約900%の探索時間を要した。

5. おわりに

輸送経路のより効率的で且つ現実的な解を得るための探索ロジックの構築を目的とする研究の初期段階として、本論文では多親組換え法及びセービング手法を組み込んだGAによるTSP(n/M)の解法を提案し、その有効性を示した。しかしながら、課題として適応度算出方法および適応度に反映させる目的関数についての検討を残している。また、今後の展開としては、TSP(n/M)の各巡回都市における車両制限、車両の積載条件等を考慮したモデルへの発展とその解法の構築等が挙げられる。

参考文献

- [1] Y. KARASAWA, Y. MATUSDA, N. AIURA and T. KAMATSU, "A Solution Method for The Traveling Salesman n Person M Town Problem (TSP(n/M)) Using The Genetic Algorithm", Technical Proceedings of Transportation Research Forum, pp.778-786
- [2] 山村雅幸, 小野貴久, 小林重信, "形質遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムに基づく巡回セールスマン問題の解法", 人工知能学会, Vol.7, No.6, 1992
- [3] 唐澤豊, "物流概論", 1989, 有斐閣ブックス
- [4] 高橋洋二, 高田邦道, 岐美宗, 苦瀬博仁, 岩尾詠一郎, 嶋野崇文, 根本敏則, 片山真登, 百合本茂, "都市物流システム改善の新たな取り組み", 土木計画学研究・講演集No. 21 (1) スペシャルセッション, 1998年11月, pp627-634
- [5] 嘉松孝之, "遺伝的アルゴリズムを用いた巡回セールスマン(n/M)問題の一解法", 神奈川大学大学院工学研究科平成8年度講演論文集 pp.313-316, 1997年3月
- [6] 北野宏明, "遺伝的アルゴリズム", 1993.6.3, 産業図書

多親組換え法を用いた Saving 手法組込み型 GA による輸送経路の最適化*

相浦 宣徳^{**}、佐藤 馨一^{***}、唐澤 豊^{****}、嘉松 孝友^{*****}

本論文は、輸・配送経路探索の最適化によりロジスティクス全体の効率化を狙うものであり、輸・配送計画支援ツールの心臓部といえる輸送経路の探索ロジックに着目し、より効率的でかつ現実的な解を得る探索ロジックを構築、提案することを目的としている。具体的には、巡回セールスマン n 人 M 都市問題に対する GA の適応を基本とし、さらなる効率化の実現を狙い、現存する「輸・配送計画支援ソフト」等に幅広く用いられている Saving 手法の GA への組込みを提案し、評価するものである。

The Optimization of Transportation course by GA incorporated with Saving-Method.

Nobunori AIURA, Keiichi SATOH, Yutaka KARASAWA and Takatomo KAMATSU

In this paper, we give a solution for traveling salesman n person M town problem (TSP(n/M)) which is an extension of traveling salesman problem (TSP) by the genetic algorithm (GA). TSP(n/M) is a generalized problem of the ordinary traveling salesman to a problem when n person exists. Here, we propose a new algorithm named multi-parents exchange method that generates one offspring from several parents. Moreover, we propose a new method by combining this algorithm with the Saving Method is a method in the area of The Transportation Planning.