

Title	共同物流網の構築ならびに運用手法に関する研究
Author(s)	小野山, 隆
Citation	大阪大学, 2007, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/929
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

共同物流網の構築ならびに
運用手法に関する研究

2007年7月

小野山 隆

共同物流網の構築ならびに
運用手法に関する研究

提出先 大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月 2007年7月

小野山 隆

研究業績

A. 学術論文誌論文

1. T. Onoyama and S. Tsuruta: “Validation Method for Intelligent Systems”, *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, Vol.12, No.4, pp.461-472 (2000).
2. 小野山隆, 久保田仙, 前川拓也, 薦田憲久: “巡回輸送を含む共同物流網の計画のための混合整数計画問題モデル化とダミー荷物を用いた高速解法”, *電気学会論文誌 C*, Vol.127, No.1, pp.31-36 (2007).
3. 小野山隆, 前川拓也, 久保田仙, 鶴田節夫, 薦田憲久: “マルチステージ GA による共同物流網における配送計画作成手法”, *電気学会論文誌 C*, Vol.127, No.9 (2007) (採録決定).

B. 国際会議

1. S. Kubota, T. Onoyama, K. Oyanagi, and S. Tsuruta: “TSP Solving Method for Interactive Repetitive Simulation of Large-scale Distribution Networks”, in *Proc. of the 1999 IEEE Int'l Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'99)*, Vol.3, pp.533-538 (1999).
2. T. Onoyama, S. Kubota, K. Oyanagi, and S. Tsuruta: “GA Applied Method for Interactively Optimizing a Large-scale Distribution Network”, in *Proc. of the IEEE Region 10 Conf. 2000 (TENCON2000)*, Vol.2, pp.253-258 (2000).
3. T. Onoyama, S. Kubota, K. Oyanagi, and S. Tsuruta: “Concept of Validation ant Its Tool for Intelligent Systems”, in *Proc. of the IEEE Region 10 Conf. 2000 (TENCON2000)*, Vol.1, pp.394-439 (2000).
4. T. Onoyama, S. Kubota, K. Oyanagi, and S. Tsuruta: “Implementation Method of a Validation tool for Intelligent Systems”, in *Proc. of the 45th Int'l. Wissenschaftliches Kolloquium (IWK2000)*, pp.781-786 (2000).
5. S. Tsuruta, S. Kubota, T. Onoyama, and K. Oyanagi: “Knowledge-based Approach for Validating Intelligent Systems”, in *Proc. of the 45th Int'l. Wissenschaftliches Kolloquium (IWK2000)*, pp.769-774 (2000).

6. T. Onoyama, S. Kubota, K. Oyanagi, and S. Tsuruta: "A Method for Solving Nested Combinatorial Optimization Problems -A Case of Optimizing a Large-scale Distribution Network -", in *Proc. of the 2000 IEEE Int'l Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2000)*, pp.340-345 (2000).
7. T. Onoyama, S. Kubota, K. Oyanagi, and S. Tsuruta: "Knowledge-embedded Multi-stage Genetic Algorithm for Interactive Optimizing a Large-scale Distribution Network", in *Proc. of the 14th Int'l Florida Artificial Intelligence Research Society Conf. (FLAIRS2001)*, pp.166-170 (2001).
8. T. Onoyama, S. Kubota, Y. Taniguchi, and S. Tsuruta: "Proposal and Evaluation of Selfish-Gene with Limited Allowance Type GA for Solving Constraint TSP", in *Proc. of the 15th Int'l Florida Artificial Intelligence Research Society Conf. (FLAIRS2002)*, pp.237-241 (2002).
9. S. Tsuruta and T. Onoyama: "Knowledge-based Validation Method for Validating Intelligent Systems", in *Proc. of the 15th Int'l Florida Artificial Intelligence Research Society Conf. (FLAIRS2002)*, pp.226-230 (2002).
10. T. Onoyama, T. Maekawa, S. Kubota, Y. Taniguchi, and S. Tsuruta: "Intelligent Evolutional Algorithm for Distribution Network Optimization", in *Proc. of the 2002 IEEE Int'l Conf. on Control Applications and Int'l Symposium on Computer Aided Control Systems Design (CCA/CACSD2002)*, pp.802-807 (2002).
11. T. Onoyama, T. Maekawa, S. Kubota, Y. Taniguchi, and S. Tsuruta: "Constraint pre-checking and Gene build-in delaying GA for Optimizing Large-scale Distribution Networks", in *Proc. of the 2003 IEEE Int'l Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2003)*, pp.796-801 (2003).
12. T. Onoyama, T. Maekawa, and N. Komoda: "High-speed Planning Method for a Cooperative Logistics Network Using Mixed Integer Programming Model and Dummy Load", in *Proc. of the Int'l Conf. on Information Systems, Logistics and Supply Chain 2006 (ILS2006)*, (in CD-ROM) (2006).
13. T. Onoyama, T. Maekawa, S. Kubota, and K. Norihisa, "GA Applied VRP Solving Method for a Cooperative Logistics Network", in *Proc. of the 11th IEEE Int'l Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA2006)*, pp.1101-1106 (2006).
14. T. Onoyama, T. Maekawa, S. Tsuruta, and N. Komoda: "Long-distance Transportation Network Planning Method Using Selfish Constraint Satisfaction Type GA", in *Proc. of the 2007 IEEE Int'l Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2007)* (2007, to appear).

C. 学会講演

1. 前川拓也, 小野山隆: "GA を用いた幹線物流網スケジューリング作成手法の検討", 1999 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, 情報システム 1, p.186 (1999).

2. 久保田仙, 前川拓也, 小野山隆: “配送スケジューリング問題の解法検証方式”, 情報処理学会第 60 回全国大会講演論文集, Vol.2, pp.167-168 (2000).
3. 久保田仙, 小野山隆, 前川拓也: “対話的大規模物流網最適化に対する GA の適用方式”, 情報処理学会第 61 回全国大会講演論文集, Vol.2, pp.27-28 (2000).
4. 前川拓也, 久保田仙, 小野山隆: “GA による時間枠制約付き配車計画作成方式”, 2001 年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, p.62 (2001).
5. 小野山隆, 前川拓也, 久保田仙, 薦田憲久: “巡回輸送を含む共同物流網の計画のための混合整数計画問題モデル化とダミー荷物を用いた高速解法”, 電気学会情報システム研究会資料, IS-05-54, pp.1-5 (2005).
6. 小野山隆, 前川拓也, 久保田仙, 薦田憲久: “共同物流網構築のための配車計画作成手法”, 電気学会情報システム研究会資料, IS-06-14, pp.1-6 (2006).
7. 小野山隆, 前川拓也, 久保田仙, 鶴田節夫, 薦田憲久: “利己的制約充足型 GA による幹線物流網構築手法”, 電気学会情報システム研究会資料, IS-06-42, pp.1-5 (2006).

内容梗概

本論文は、筆者が 1983 年から現在まで日立ソフトウェアエンジニアリング（株）ならびに 2005 年から現在まで大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻在学中に行ってきた、共同物流網の構築ならびに運用手法に関する研究成果をまとめたものである。

近年の多品種少量生産や、少量多頻度納入の増大は物流効率の悪化をもたらしている。この問題の解決には、一つのサプライチェーンに属するメーカーと、その部品サプライヤによる物流の共同化が有効な手段として注目されている。しかし、共同物流網はデポ配送網や、幹線輸送網、複数の部品サプライヤを巡回して直接工場への輸送を行う巡回輸送網など、多くのサブネットワークから構成され複雑な構造を持っている。さらに、共同物流には各企業の利害が絡むため、単に数理的な最適解がそのまま受け入れられることはほとんどない。担当者はシステムに組み入れられていない様々な条件まで考慮するために、多面的な評価・調整を行う必要がある。このため物流網の構築から物流計画の作成までの一貫した計画作成を実現できる、人間の判断・介入が可能な構築手法が必要である。

このような背景を踏まえ、本研究では、効率的な共同物流網を構築するために、共同物流網全体の構築手法、および、デポの配送計画と幹線輸送の計画作成手法を提案する。まず、共同物流網の構造レベルでの構築を、高速・高精度で行うためには、デポ経由の輸送と巡回輸送が併用される物流網の正確なモデル化が必要である。さらに、応答性を確保するためには、整数変数を用いないモデルが必要である。つぎに、運用レベルでのデポ配送網の計画作成という課題に取り組む。デポ配送網の定常的な車両運用と備車の併用という輸送形態に対応するためには、日々の輸送荷量の変動による備車の発生と、その費用の評価が必要である。また、時間制約の強弱に関わらず安定した精度の実現が必要である。さらに、幹線輸送の計画作成という課題に取り組む。幹線輸送は、広域輸送、複数デポ、集荷配送混在輸送などの特徴があり、多数の制約条件が課される。このため、強制制条件下でも効率の落ちない計画作成手法が必要である。

これらの課題に対して、まず、混合整数計画法を用いた正確な物流網のモデル化と、ダミー荷物を用いた高速・高精度解法を提案する。つぎに、デポ配送計画に対しては、荷量の変動を遺伝子評価に組み込むと共に、時間制約の強弱に関わらず精度を保てる GA によ

る解法を提案する。さらに、幹線輸送に対しては、強制約条件下でも集団の多様性を保ち精度と応答性能の両立を図る GA による解法を提案する。

本論文は全 6 章から構成され、その内容は以下の通りである。

第 1 章は、共同物流網構築の背景と研究の方針を述べる。

第 2 章では、本研究の対象となる共同物流網の構造と特徴を示すと共に、物流網構築を、2 段階で行う構築手法を提案し、その実現上の課題を概観する。共同物流網の構築を、数理的なモデルによる「構築フェーズ」だけでなく、運用レベルの計画まで作成する「スケジューリングフェーズ」まで行うことで、人間の多面的な評価・調整を実現する。そして、その実現上の課題を明らかにする。

第 3 章では、本研究が対象とする共同物流網の数理的モデルを考案する共に、精度と応答性能の両立を実現する高速解法を提案する。デポ経由の輸送と巡回輸送が混在する共同物流網を混合整数計画により正確にモデル化する。整数変数に代わり実変数のダミー荷物量を用いることで、高速な解法を構築する。また、実験により提案手法の精度と応答性能を検証し、手法の有効性を評価する。

第 4 章では、共同物流網の中のデポ配送網の計画作成手法として「マルチステージ GA による共同物流網の配送計画作成手法」を提案する。定常運行と備車を併用する配送計画に対応した、荷量の変動を遺伝子評価に反映する GA のモデルを作成する。時間制約優先型の GA と積載量制約優先型 GA を個別に実行するマルチステージ GA を適用し、ベンチマーク問題により、有効性の評価を行う。

第 5 章では、幹線輸送計画の作成手法として「利己的制約充足型 GA による幹線輸送計画作成手法」を提案する。幹線輸送計画作成の定式化を図る。強制約条件下での効率的な解の探索を実現するために、各遺伝子が他の遺伝子の制約違反を無視して、利己的な制約充足を優先する利己的制約充足型 GA を導入し、実験による評価により、有効性の評価を行う。

最後に、第 6 章では、結論として本研究で得られた成果を要約し、今後に残された課題について述べる。

目次

第 1 章 序論.....	1
1.1 研究の背景と課題.....	1
1.2 関連研究.....	6
1.3 本論文の方針.....	8
1.4 本論文の構成.....	10
第 2 章 共同物流網の特徴と構築運用手法.....	13
2.1 緒言.....	13
2.2 共同物流網の構造と特徴.....	14
2.3 共同物流網の構築運用手法.....	19
2.4 共同物流網の構築運用の課題.....	21
2.5 結言.....	23
第 3 章 巡回輸送を含む共同物流網の計画手法.....	25
3.1 緒言.....	25
3.2 共同物流網構築問題のモデル化.....	26
3.3 混合整数計画問題のダミー荷物を用いた高速高精度解法.....	30
3.4 共同物流網構築問題への適用と評価.....	33
3.5 結言.....	37
第 4 章 マルチステージ GA による共同物流網における配送計画作成手法.....	39
4.1 緒言.....	39
4.2 共同物流網におけるデポ配送計画作成問題.....	40
4.3 マルチステージ GA による配送計画作成手法.....	44
4.4 ベンチマーク問題による実験.....	52
4.5 共同物流網の配送計画問題への適用.....	56
4.6 結言.....	59
第 5 章 利己的制約充足型 GA による幹線輸送計画の作成手法.....	61
5.1 緒言.....	61
5.2 幹線輸送計画作成問題.....	62

5.3 利己的制約充足型 GA を用いた幹線輸送計画作成手法	67
5.4 ベンチマーク問題による実験	76
5.5 幹線物流網構築問題での実験と評価	80
5.6 結言	81
第 6 章 結論	83
6.1 本研究のまとめ	83
6.2 今後の課題	84
謝辞	86
参考文献	87

第 1 章

序論

1.1 研究の背景と課題

物流効率は、単に経済面だけでなく交通事故や渋滞などの都市問題、CO₂やNO_xといった環境面からも重大な課題である[1][2]。しかし、日本の物流は俗にロジスティクスの先進国であるアメリカに比較すると生産性は3分の1で、価格は2倍とされているように、効率面で問題を抱えている。図 1.1 は日本の物流の90%以上を占めるトラック輸送の積載率を示しているが、1990年以降50%を切る水準が続いている。また、東京区部での小型トラックの積載率は20%を割る事態にまで陥っている[3][4]。

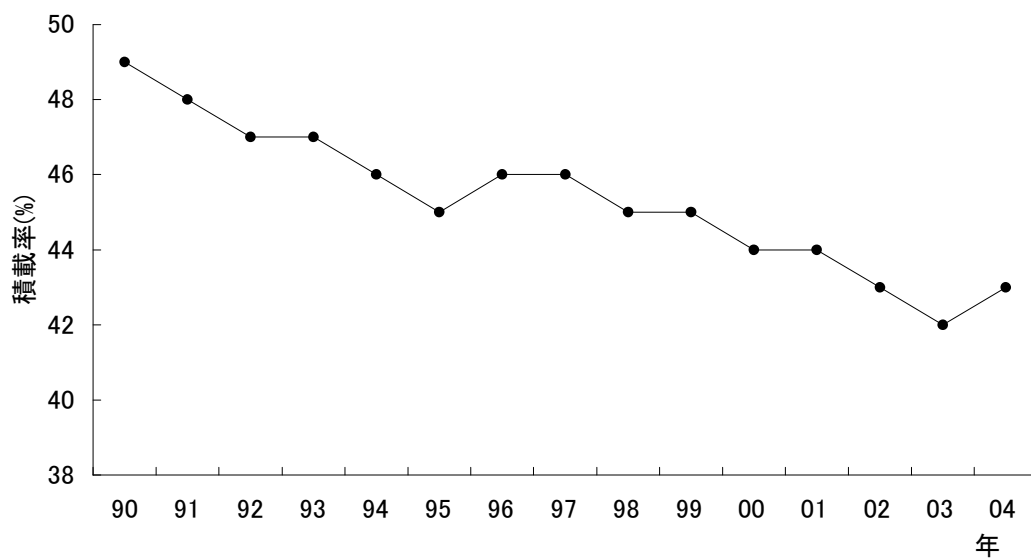


図 1.1 日本のトラック輸送の積載率 (文献[4]より)

このような物流効率の悪化は、商品の高付加価値化を目的とした賞味期限の短縮や製品ライフサイクルの短期化、また、コンビニエンスストアの増加に見られる様な消費生活の24時間化、さらには、企業の系列構造の崩壊やJIT(Just In Time)[5]での製品納入などの商習慣など、社会変化の影響が大きい[6][7][8]。

図 1.2 は実際の電子機器メーカーでの部品サプライヤから工場への輸送状況を示しているが、積載率が40%以下で200km以上の低積載率・長距離輸送の車両が全体の50%を占めている。これが物流コスト増大の大きな要因となっている。このように、企業の生産活動においても、物流費用の原価に占める割合が上昇し、その対策が求められている。このため企業は物流効率の向上を図っているが、一企業だけでは効率向上には限界がある。そこで、複数の企業による物流共同化が、この限界を打破するために試みられている[9][10]。物流の共同化は、全く業態の異なる企業でのデポ（物流センタ）の共用から、企業間での物流部門の統合まで様々な方式が試みられている[11]。

本研究では、図 1.3 に示す様に一つのサプライチェーン[12][13][14]に属するメーカーと、その部品サプライヤによる共同物流網の構築を取り上げる。従来の部品サプライヤの企業単位での物流最適化から、より広範な部品の調達物流網全体での最適化を目指している。

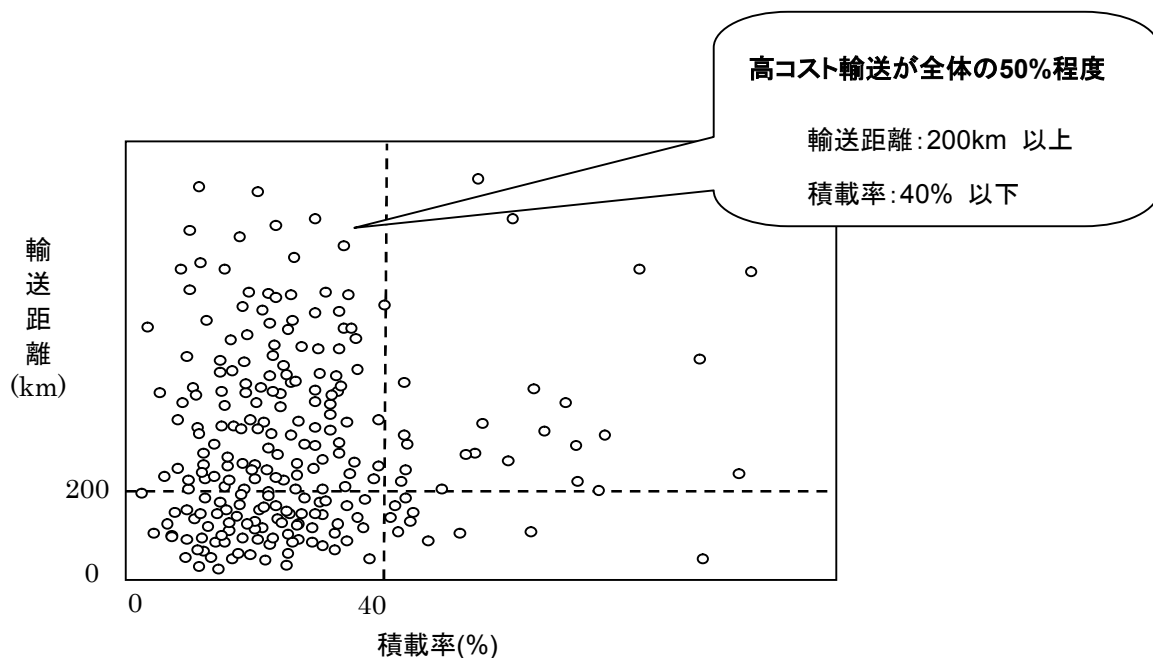


図 1.2 調達物流網の輸送状況

共同物流の運用を成功させるためには、すべての参加企業にとって個別物流に比べてコスト面でのメリットが必要である。つまり、個別物流に比べて車両の積載率向上を実現して、必要な車両台数を削減することが必要である。しかも、部品の納入サイクルなどの物流のサービス性についても低下は許されない。このような物流の変革に当たって、デポの保有車両の増車や、担当する部品サプライヤの多少の拡大程度の物流網の小規模な改造であれば、旧来の物流費用を援用して、その変更のコスト面の効果を推定することができる。しかし、新しいデポを設置して、部品サプライヤ個別の輸送を共同化するような大規模な変革では、物流コストの評価に利用できるデータがなく、費用効果を求めることは大きな課題であった。このため、物流網全体の最適化を行うためには図 1.4 に示すような多面的な観点からコスト評価を行い意思決定する必要がある。

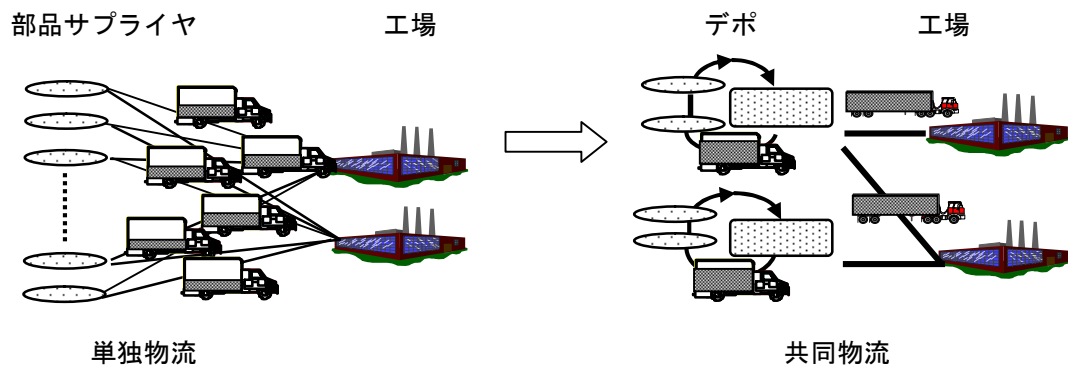


図 1.3 調達物流の共同化

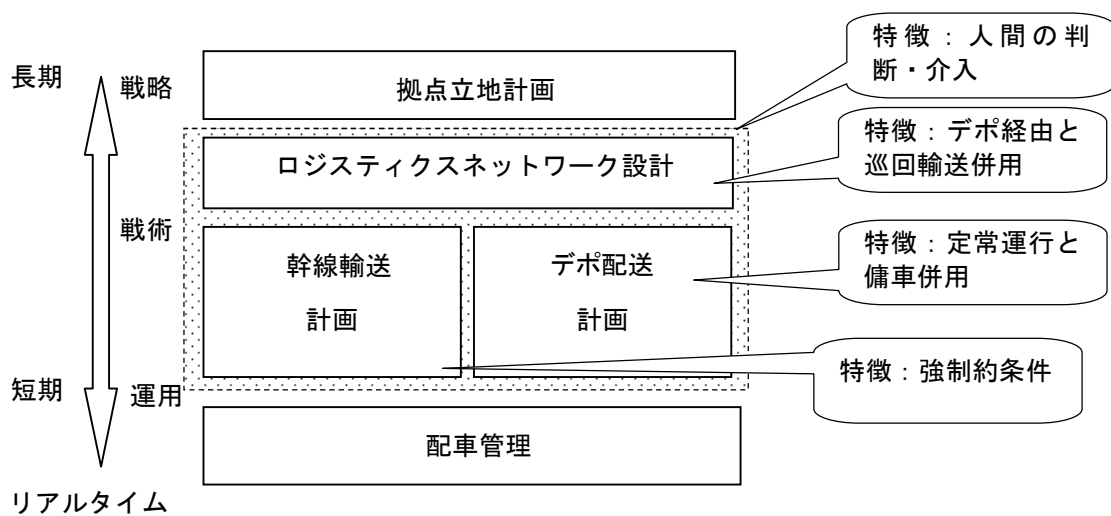


図 1.4 共同物流網における意思決定の分類

物流の最適化は、対象となる意思決定のレベルにより、長期の戦略レベルのものから、中期の戦術レベル、また、運用レベルのものに区分できる。長期の戦略的な意思決定の支援には、拠点立地計画[15][16]の作成やロジスティクスネットワーク設計[17][18][19]が属する。また、中期での戦術的な意思決定支援には、デポや工場などの物流拠点間の輸送車両のルートや、輸送頻度などを決定する幹線輸送計画[20][21][22]、また、デポの車両の運行計画を作成するデポ配送計画[23][24][25]が含まれる。さらに、リアルタイムでの運用レベルの意思決定支援は、物流 EDI(Electronic Data Interchange) [26][27]による情報共有で得られるデータを基にした、日々の車両への荷物の割当てや、車両の動態を管理する配車管理[28]が挙げられる。

戦略レベルの意思決定には、拠点立地計画とロジスティクスネットワーク設計が挙げられる。デポや工場などの拠点立地を最適化する拠点立地計画は、顧客から最も近い施設への距離の合計が最小となる立地を求めるメディアン問題[29][30][31]や、顧客から最も近い施設への距離の最大値が最小となる立地を求めるセンタ問題として定式化される[32]。さらに、施設の容量制約の有無により、CFLP(Capacitated Facility Location Problem)[33]と SFLP(Simple Facility Location Problem)[34]に分類される。CFLP, SFLP 共に、混合整数計画[35]としてモデル化されるものである。したがって、この拠点立地計画は NP(Non-deterministic Polynomial time)困難な問題であり、厳密解を求めるためには分岐限定法[36][37]などの列挙法が用いられるが、Lagrange 緩和[38][39]を利用した効率的な近似解法も提案されている。しかし、現実の物流では、顧客と施設の距離だけを考慮して拠点を自由に選択することはできず、サービス性や土地価格や地理的な条件などの複雑な条件を考慮する必要がある。このため拠点立地は、つぎに説明するロジスティクスネットワークの設計と共に進める必要がある。

ロジスティクスネットワークの設計では、必要なものを、必要な量、必要な時に、輸送と納入ができるかというサービスレベルの制約の下で、ロジスティクスネットワーク全体の数理的な最適化を行う。具体的には、生産工場と部品調達先の選定、デポの開設・閉鎖、工場やデポなどの物流拠点間の幹線輸送能力を最適化する。さらに、1 ヶ月程度の期間毎のデータを元に、ロジスティクスネットワークの形状だけでなく、期間毎の生産量や在庫量、輸送量を決定する多期間に拡張したロジスティクスネットワークのモデルも戦術レベルでの意思決定に用いられる[12][17]。このようなロジスティクスネットワークのモデルは、基本的には最小費用流問題[40][41][42]を元にした数理モデルが用いられる。しかし、実際の物流網の設計では、デポの開設・閉鎖や、デポ経由か直送かなどの代替輸送手段の選択など、択一的な判断が要求されるため、実変数だけを用いてモデル化することは困難

であり、混合整数計画問題としての定式化が必要になる。さらに、物流には多数の企業の利害に関係するために、数理的な最適解が、そのまま受け入れられることはほとんど無く、担当者は様々な条件を考慮して多面的な評価・調整を行う必要がある。このため、実用的な精度と応答性能の両立が課題として挙げられる。

デポ配送計画問題は、デポと配送先間の輸送を行う車両のルートとスケジュールを決定する VRP(Vehicle Routing Problem)[23][43][44][45]に属する問題である。配送計画の作成は、車両の積載量制約や、納入時刻などの時間制約を充足した上で、車両のルートやスケジュールを最適化する。大規模な物流網には、JIT など時間制約の厳しいサブネットワークや、デポでの蓄積を前提とした輸送で、時間制約は厳しくないが積載率の向上の求められるものなど、多様な運用形態のものが含まれている。さらに、調達物流網では輸送の安定性が重視されるため一定期間、車両の運行ルートとスケジュールは固定して運用される。部品サプライヤからの出荷量の増減に対しては、臨時の備車に対応する。このような多様な条件下で、通常の車両だけでなく備車も含めた計画の精度と応答性能の確保が必要である。

幹線輸送計画は、デポや工場などの物流拠点間の輸送のルートやスケジュールを決定する問題であり、基本的には VRP に分類される問題である。この幹線輸送はデポを中心とした配送計画と比べて、大型車両による長距離・大量輸送が中心であり、効率化により大きなコスト削減が期待できる領域でもある。しかし、一般の配送計画が単一デポの輸送網で、デポから顧客への配送だけ、もしくは、顧客からデポへの集荷だけの単方向の輸送を扱うのに対して、幹線輸送は複数デポで、さらに、1 台の車両で集荷と同時に配送を行うなど輸送形態は一般に複雑である。また、幹線輸送は工場の生産と直結すると共に、多数のデポの配送計画と関連するため、多くの時間制約が課される。このため、デポの配送計画作成に比べて自動化は遅れ、現状でも多くの物流会社において手作業で計画が作成されることが多い。このように、制約条件が多い中で実用的な精度と共に、人間による評価・調整に応じられる対話的利用可能な応答性能の実現が求められる。

運用レベルの意思決定の配車管理は、物流 EDI で得られた輸送の要求に対して、車両の手配と荷物へのディスパッチを行う。また、JIT など時間制約が厳しい物流網に対しては、GPS(Global Positioning System)を用いた車両の動態管理により、車両運行の遅延を監視することも行われている。

本論文では、物流効率の高い共同物流網を構築するために、実用的な精度と応答性能の両立を図るロジスティクスネットワークの設計手法、定常的な車両運用と備車が併用されるデポ配送計画の作成手法、および、多数の制約条件が課せられている幹線輸送網の効率

的な計画手法の実現を課題として取り上げる。

1.2 関連研究

本節では、物流網の構築における、ロジスティクスネットワークの構築と、デポ配送計画の作成、ならびに、幹線輸送網の計画作成に関する関連研究について概観する。

1.2.1 ロジスティクスネットワークの構築手法

いわゆる戦略・戦術レベルでのロジスティクスネットワークの構築では、生産計画に対応した部品の調達計画作成や、車両、人員などのリソースのサブネットワークへの割り当てを行う。従来、この物流網の構築には、最小費用流問題をベースとしたモデルが用いられている。さらに、期間の概念を導入したモデルも提案されている[12]。これらのモデルは、線形計画法を基に構築されたものであり、大規模な問題でも実用的な応答性能を実現することができる。しかし、これらの方式は実変数だけの線形計画法によるモデルであり、デポ経由の輸送とデポを経由しない輸送が混在するなどしている複雑な物流網を正確に表現することはできない。荷物の輸送を、すべてデポ経由の輸送と見なして計画を立てる手法も用いられているが、デポを経由しない輸送の割合が多い場合にはコスト評価の精度が落ちてしまう。また、逆にデポを経由しない輸送手段で輸送可能なものは、すべてデポを経由しない輸送に割り当て、残りの荷量の輸送だけをデポ経由での輸送に割り当てる手法も提案されている[46]。しかし、デポ経由で輸送する荷量が全体に占める割合が大きければ、ある程度正確な評価が行える。しかし、全体の輸送荷量が少ない場合には、誤差が大きくなってしまうという問題点がある。

物流網の構築手法として、混合整数計画を用いたモデルも提案されている[20][47]。この方式はデポ経由での輸送と、代替輸送手段が混在するような構造が複雑な物流網や、デポの開設や閉鎖などの判断にも利用できるが、実用的な応答性能を確保することが困難である。また、物流網を複数のデポを有する VRP として捉え、タブーサーチ[48]などのメタヒューリスティクス[49][50]を適用する手法も試みられている[51]。しかし、全国規模の大規模な物流網に適用した場合には、対話的な応答性能を実現することが難しい。さらに、共同物流網の構築には、参加企業の利害が絡むため、人間の専門家による多面的な評価・調整が必須である。このため、単に数理的な最適性だけでは判断できない運用性なども含めて、計画を多面的に評価する必要がある。したがって、精度と応答性能の両立という課

題への取り組みが必要である。

1.2.2 デポ配送計画の作成手法

デポを中心とした荷物の輸送は VRP[23][43][44]として定式化され、多くの解法が提案されている[52][53][54][55][56][57].

整数計画法[58]をベースにモデル化して分岐限定法や多面体アプローチ[59]などの数理的な技法により厳密解を求める手法も提案されている[52][60][61]. しかし、時間制約などの制約条件の導入が複雑であり、また、配送先の拠点数が多くなると実用的な応答性能を得ることはできない。このため、実用的な近似解法が求められる。

スイープ法[62]やセービング法[53]は比較的単純なヒューリスティクスを用いる高速な解法であるが、人間の専門家レベルの精度を得ることができず、適用は困難である。スイープ法では、車両の配送区域の分割を、デポを中心とする扇形に行っていたが、この分割を一般化割当問題[29]を解くことにより最適化し、分割されたエリア内の車両毎の運行順序を巡回セールスマン問題[62]により決定する一般化割当法[15]も提案されている。巡回セールスマン問題に対しては Lin Kernighan 法などの効率的な解法[63][64]が知られている。しかし、一般化割当問題は NP 困難な問題であり実用的な応答性能の実現が課題である。

また、配送計画問題を制約充足問題[65]として捉え、制約伝搬と分岐限定法を適用するアプローチも提案されている[54][66]. この解法は制約違反となる解の候補を効率よく解空間から削除することで、効率的な解の探索を実現している。しかし、制約条件が弱い場合、たとえば、時間制約がほとんどない物流網に対しては、効果が低いという課題がある。

VRP の車両一台ずつのルート作成は、巡回セールスマン問題に該当する問題である。このため巡回セールスマン問題の解法である 2-Opt 法[67][68][69][70]を複数車両間での、部分ルートの交換に拡張し、これを VRP に適用する解法も提案されている[17]. つまり、二つの車両間での部分ルートの交換による近傍探索を用いるものであり、準最適解への短時間での収束を実現している。しかし、この解法は時間制約が厳しい問題では、部分ルート交換時の時間制約充足のため、計算効率が上がらないという課題がある。

GRASP(Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)[71]を初期解の生成に用い、その初期解に、あるルートから別のルートへ配送先一つだけに移した状態を基本近傍として用いるタブーサーチを適用する解法も提案され、高精度な解を得ることができる[72]. しかし、GRASP やタブーサーチのパラメータ設定が複雑であるという課題が残されてい

る.

二つの個体間で車両単位のルート交換を行う交叉や、一つの配送先をルートから取り去り、他のルートに挿入する突然変異という比較的単純な遺伝的操作を用いる GA(Genetic Algorithm)[55]も提案され良好な解を得られているが、時間制約の導入が困難であると共に、解の収束が遅く、対話的な利用が困難であるという課題がある。スウィープ法の解を初期解として用いる GA も、時間制約付きの VRP の解法として提案されている[56]。さらに、2-Opt 法のようなルートの部分的な交換を、複数台の車両ルート間に拡張した Cross-opt 近傍などの局所探索[17]をタブーサーチや SA(Simulated Annealing)法[48]に適用する解法[57][73][74][75][76]も提案されている。これらの解法は、日々の日量に対応した最適性の高い計画を作成することはできる。しかし、事前に定常運行ルートを定め、毎日の荷量の変動により備車で対応するケースでは、荷量の変動に対しても安定して運用できる配送計画を求めることが課題である。

1.2.3 幹線輸送網の計画作成手法

幹線輸送の計画作成も、基本的には VRP に属する問題であるが、前節で述べたデポ配送計画と比べると長距離、マルチデポ、集荷配送混在輸送など複雑な運用が要求される。

幹線輸送網の計画手法としては、物流網を多品種流のネットワーク設計問題として捉える手法が提案されている[20][47]。この手法では、長距離輸送主体の幹線輸送では車両が現実に走行するルートは限定されるため、あらかじめ実行可能なルートをすべて生成しておく。必要なルートの選択を混合整数計画問題として定式化する。そして、そのモデルを、Lagrange 緩和を利用した分岐限定法などを適用して解くが、時間制約など、現実の制約条件を導入すると、モデルの規模が増大して現実的な応答性能の実現が難しい。また、実用規模の幹線輸送網で、実行可能なルートの生成も課題として残されている。

幹線輸送網を、マルチデポ型の配送計画問題として捉え、タブーサーチを適用する解法も提案されている[51][77]。これは車両ルート間での部分ルートの交換を局所最適化に用いるものである。しかし、この手法でも時間制約や、集荷配送同時輸送などの条件を入れると、実行可能解の生成が困難になるという問題がある。

1.3 本論文の方針

前節までに述べた「共同物流網の構築」、「デポ配送網の計画作成」、「幹線輸送網の計画

作成」の課題を踏まえて、共同物流網の構築運用手法の確立を図る。図 1.5 は、上記課題に対する本研究の位置づけを整理した図である。以下、図 1.5 に従い、本研究の方針について説明する。

まず、戦略・戦術レベルでの共同物流網の構築を行うためには、デポなどの物流拠点の配置と輸送手段の選択が必要である。さらに、人間による多面的な評価・調整が必須である。このため、共同物流網を対象として応答性能と精度の両立を実現するデポ経由の輸送と代替輸送手段である巡回輸送が混在する共同物流網の数理モデルと高速な解法を提案する。評価実験により、提案解法で実用的な精度と応答性能の両立が図れ、共同物流網の構築に有効であることを示す。

つぎに、デポ配送網の計画作成という課題に取り組む。調達物流網のデポ配送計画には、安定した運行を行うため車両ルート・スケジュールを固定した運用が求められ、定常的な車両運行と備車が併用される。また、デポ配送網には、JIT のような強い時間制約が課されるものや、デポでの蓄積を前提として時間制約はほとんど課されないものが含まれている。このため、デポ配送計画に必要とされる要件を明らかにして定式化すると共に、共同物流網に含まれている多数のデポ毎の配送計画を実用的な時間内で作成するために、マル

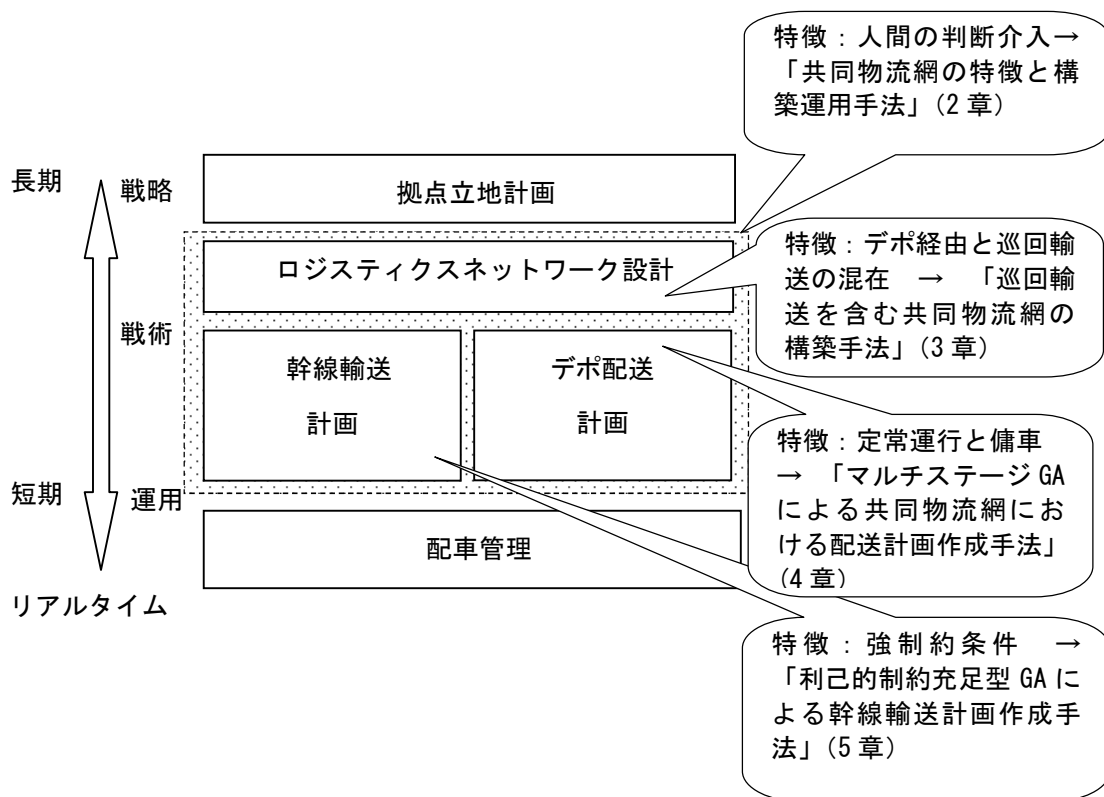


図 1.5 提案内容の共同物流網構築の中での位置付け

チステージ GA を提案する。提案した手法をベンチマーク問題により精度と応答性能を評価して、提案手法の有効性を示す。

さらに、共同物流網を構成するデポや工場などの物流拠点間の大型車両による長距離・大量輸送を行う幹線輸送網の計画作成という課題に取り組む。多数の制約条件が課されている幹線輸送網の計画作成問題の定式化を図り、その解法として、遺伝子の再構成時に、遺伝子全体での制約充足は無視して、局所的な制約だけ利己的に充足する利己的制約充足型 GA を提案する。利己的な制約充足を優先することで、GA の集団の多様性を保ち、解の精度向上を図る。ベンチマーク問題を利用した提案解法のパラメータ決定などの実験結果を示すと共に、幹線輸送計画問題での実験と評価により精度と応答性能を評価し、提案解法が有効であることを示す。

1.4 本論文の構成

本論文では、2 章以降を以下のように構成する。

2 章では、本研究の対象となるメーカーと部品サプライヤが一体となった部品調達共同物流網の構造と特徴を示すと共に、共同物流網の構築を 2 段階で行う構築運用手法と、その実現上の課題について、文献[78][79][80][81]に基づき論述する。共同物流網の構築を、数理的モデルによる「構築フェーズ」だけでなく、運用レベルの計画まで作成する「スケジューリングフェーズ」まで行うことで、人間の多面的な評価・調整を可能とする。そして、この構築運用手法実現上の課題を整理して示す。

3 章では、共同物流網の戦略・戦術レベルの計画作成に要求される巡回輸送を含む共同物流網の計画手法について、文献[82][83][84]で公表した結果に基づき論述する。まず、最小費用流モデルによる線形計画法の共同物流網のモデルと、混合整数計画問題によるモデルを比較検討する。つぎに、実用的な応答性能を実現するための、高速解法を提案する。さらに、実験により提案解法の精度と応答性能を検証し、実用規模の共同物流網に適用可能であることを示す。

第 4 章では、2 章で示した共同物流網中のデポ配送網の計画作成手法について、文献[85][86][87][88][89]に基づき論述する。定常的な車両運行と備車を併用して、日々の荷量の変動に対しても安定した配送計画を作成するために、まず、日々の荷量変動を組み込んだデポ配送計画問題の定式化を図る。つぎに、JIT のような強い時間制約のある場合にも、またデポ経由の輸送など時間制約の弱い場合にも、専門家レベルの精度と、対話的な応答性能を実現する計画作成手法を提案する。さらに、ベンチマーク問題による評価実験によ

って提案方式と既存方式を比較評価し、提案方式の有効性を明らかにする。

第 5 章では、幹線輸送網の計画作成手法について、文献[90][91][92][93]に基づいて論述する。まず、複数デポ、集荷配送同時輸送などの特徴のある幹線輸送計画問題の定式化を図る。つぎに、多数の制約条件が課せられている本問題に対応する GA を用いた解法を提案する。さらに、評価実験により、提案方式が幹線物流網の構築に有効であることを示す。

第 6 章では、結論として本論文で得られた成果を要約し、今後の課題を述べる。

第 2 章

共同物流網の特徴と構築運用手法

2.1 緒言

本章では、本論文が対象とする共同物流網の構造とその特徴、さらに、その構築運用手法を提案し、その実現に当たっての課題を整理する[78][79][80][81].

今日、物流の効率化は単に経済面だけでなく、都市問題や環境問題の側面からも重要な課題となっている[1][2]. 企業は、物流効率化のために様々な取り組みを行っているが、製品ライフサイクルの短期化や輸送エリアの拡大などの影響のため、物流効率は悪化しているのが現状である。このため、企業個別での物流の最適化から、より広範囲な企業が参画する物流共同化が、物流効率向上の有力な手段として注目されている[11].

本論文では、一つのサプライチェーンに属するメーカーと、その部品サプライヤによる部品調達の共同物流を取り上げる。この部品の調達物流も従来は各部品サプライヤが個別に工場へ部品を納入していたが、多品種少量生産の増大や製品ライフサイクルの短期化などの影響によって物流効率が悪化している。このため、部品サプライヤとメーカーが一体となった物流共同化が進められているが、すべての参加企業が利益を得るためには共同物流網の効率的な運用が必要である。このため広範な調達物流網全体での最適化を実現するために、効率的な物流網の構築運用手法が求められている。

本章では、まず、共同物流網の特徴を示す。つぎに、多数のサブネットワークから成り、かつ、参加企業の利害が絡むため、人間による多面的な評価・調整が求められる共同物流網の構築運用手法として、数理的なモデルによる「構築フェーズ」と、運用レベルの計画まで作成する「スケジューリングフェーズ」の 2 段階での計画作成手法を提案する。さらに、その実現上の課題を明らかにする。

以下、2.2 節で対象とする部品調達の共同物流網の構造と特徴を明らかにする。つぎに、2.3 節でこの共同物流網の構築運用手法を示し、2.4 節で、その手法の実現上の課題を整理する。

2.2 共同物流網の構造と特徴

2.2.1 共同物流網の構造

本論文で対象としている共同物流網は、部品サプライヤからメーカーの工場への部品輸送を行い、図 2.1 に示すように部品サプライヤ、工場、デポをノードとするネットワークである。

調達物流には、約 1,000 社の部品サプライヤと 50 程度の工場が含まれているが、この共同物流は、約 100 社の部品サプライヤと 3 工場が参加し、四つのデポを設けて開始されている。今後、順次参加企業の拡大を図り、最終的には、800 社程度の部品サプライヤと 40 程度の工場の参加を目指している。また、20 程度のデポを設け、一つのデポで 100 程度の部品サプライヤを担当することを想定している。

この共同物流網は、部品サプライヤからデポへの輸送を行うデポ配送網と、デポと工場間などの輸送を行う幹線輸送網、また、複数の部品サプライヤを 1 台の車両で巡回して、デポを経由せずに直接工場に輸送を行う巡回輸送網など、互いに関連する多数のサブネッ

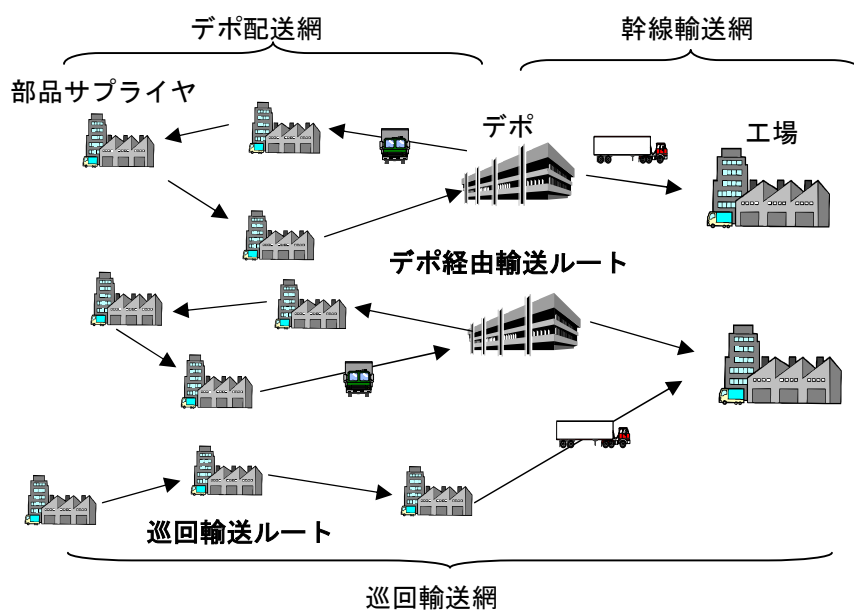


図 2.1 共同物流網の構造

トワークから構成されている。部品サプライヤから出荷された部品の工場への輸送は、つぎの2種類のルートで行われる。

(1) デポ経由輸送ルート

これはデポ配送網により部品サプライヤからデポに部品を集積し、つぎに、幹線輸送網の大型車両で工場に部品を輸送するルートである。

(2) 巡回輸送ルート

これは1台の大型車両で複数の部品サプライヤを巡回して、デポを経由せずに直接工場に部品を輸送するルートである。

巡回輸送ルートは、部品の供給能力が一定以上の部品サプライヤの中で、その出荷時間の制約と、車両の走行距離の制約を基に、1台の車両で巡回可能な部品サプライヤの組合せを求めて設定される。実際の運用では、遠距離の部品サプライヤを一つの巡回輸送ルートにまとめると、出荷時間の制約充足が困難になるため、地理的に近い部品サプライヤで出荷量が多いものが一つの巡回輸送ルートにまとめられている。部品サプライヤからの部品輸送を、デポ経由ではなく、この巡回輸送で行う条件は以下の通りである。

(1) 部品サプライヤから工場への輸送量が基準量以上あること。

(2) 巡回輸送する車両の積載量が一定以上確保できること。

たとえ、一つの部品サプライヤから、工場への出荷量が、基準量を超えていても、他の部品サプライヤの出荷量が少なく、車両の基準積載量に達しない場合には巡回輸送は行わずデポ経由での輸送を行う。

2.2.2 共同物流網の特徴

ここで対象としている共同物流網の特徴は以下の通りである。

(1) 短い製品ライフサイクル

対象としている物流網で輸送する部品のサイズは小さく、また製品のライフサイクルが数ヶ月程度と短い。この短い製品ライフサイクルに合わせて共同物流網の能力を調整する

必要があるため、大規模なデポを固定的に設けるのではなく、中小規模のデポの開閉、能力増強等に対応している。このため、短い製品ライフサイクルに合わせた物流網の調整・再構築が必要である。

(2) デポ経由輸送と巡回輸送の混在

部品サプライヤから工場への輸送には、デポ経由の輸送と、いくつかの部品サプライヤを1台の車両で巡回して、そのまま工場へ納入する巡回輸送が併用されている。出荷量の多い部品サプライヤは、この巡回輸送によりデポを経由せずに直接工場に部品を納入する。この共同物流網では、巡回輸送で扱われる荷量は全輸送量の30%程度にも達している。また、出荷量の多い部品サプライヤには巡回輸送を用いるため、デポ集荷輸送では部品サプライヤを訪れる定期運行の車両は1日1台に限られている。

(3) 多数のサブネットワークと多様な運用形態

共同物流網にはサプライヤからデポへのデポ配送網や、デポから工場への幹線輸送網、また巡回輸送網など互いに関連する多数のサブネットワークが含まれている。形態の異なる物流網が属すると共に、様々な企業が参加しているため、JITでの輸送が求められるものや、デポでの蓄積を前提として輸送時間の制約が弱い積載率の向上が必要なものなど、条件の異なった輸送が混在している。

2.2.3 デポ配送網

デポ配送網では、図2.2に示すように多数の部品サプライヤからデポへの、複数の車両による部品輸送を行う。対象としている共同物流網では、一つのデポの担当する部品サプライヤ数は100程度を想定している。このデポ配送網の特徴は、以下の通りである。

(1) 定常的な車両運行

対象とする物流網の一部には、JITなどの条件も課されている。また、日々の荷量の変動により、配送計画を変更すると、部品サプライヤへの到着時間や工場への納入時間が変わり、部品サプライヤの出荷計画や工場の生産計画に影響が出てしまう。このため、車両の運行ルートやスケジュールは固定して運用されている。

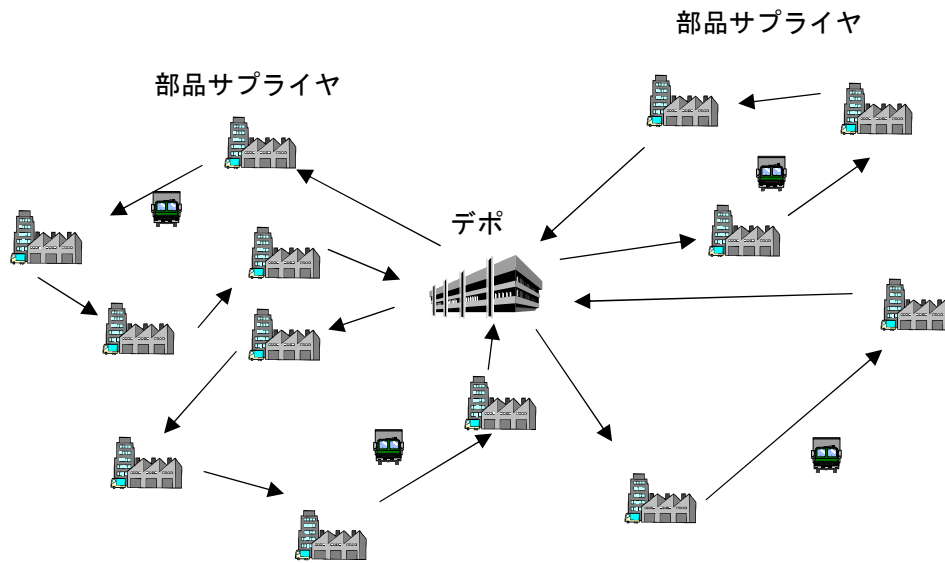


図 2.2 デポ配送網

(2) 備車の併用

車両の運行ルートとスケジュールは固定されて運用されているが、部品サプライヤからの部品出荷量や工場への部品納入量は毎日変動する。特に、工場での生産周期に合わせて輸送される部品もあるため、一つの部品サプライヤからの出荷荷量の変動幅が 100%にも及ぶことも多い。このように出荷荷量が大きく変動し、あらかじめ決められている車両では積載しきれない場合には、臨時に車両を備車して輸送を行っている。安定した輸送を実現するために、備車車両も定期的に運行する車両と同一のルートを実行することを原則として運用されている。

(3) 備車コスト

毎日定期的に運行する車両のコストに比べ、臨時に備車すると、車両のコストは 3 倍以上にもなる。このため、全体のコスト削減には、毎日定期運行する車両台数の削減と共に、備車車両台数の削減が必要である。

(4) 多様な運用形態

デポ配送網の中には、デポでの蓄積を前提として時間制約のほとんど無いものや、JIT のような時間制約の厳しいものなど、多様な運用形態のものが含まれている。

2.2.4 幹線輸送網

幹線輸送網では、図 2.3 に示すように全国に分散している工場とデポの間の輸送を行う。また、各デポで、デポ配送網と連絡している。幹線輸送を行う車両は、デポを出発して、いくつかの工場とデポを巡回した後、元のデポに戻る。対象としている共同物流網では、デポと工場を併せて 50 から 100 程度を想定している。この幹線物流網の特徴をまとめると以下の通りである。

(1) 広域輸送

工場やデポは、日本全国に分散している。幹線輸送は、この広域・長距離での輸送を大型車両で行う。

(2) 輸送時間制約

デポと工場間の部品輸送は、デポ配送網のスケジュールや工場の生産計画との同期が要求されている。このため幹線輸送には多数の時間制約が課せられている。

(3) 集荷配送混在輸送

部品をデポから一方的に工場に送るだけでなく、工場で作成された（半）完成品を別の

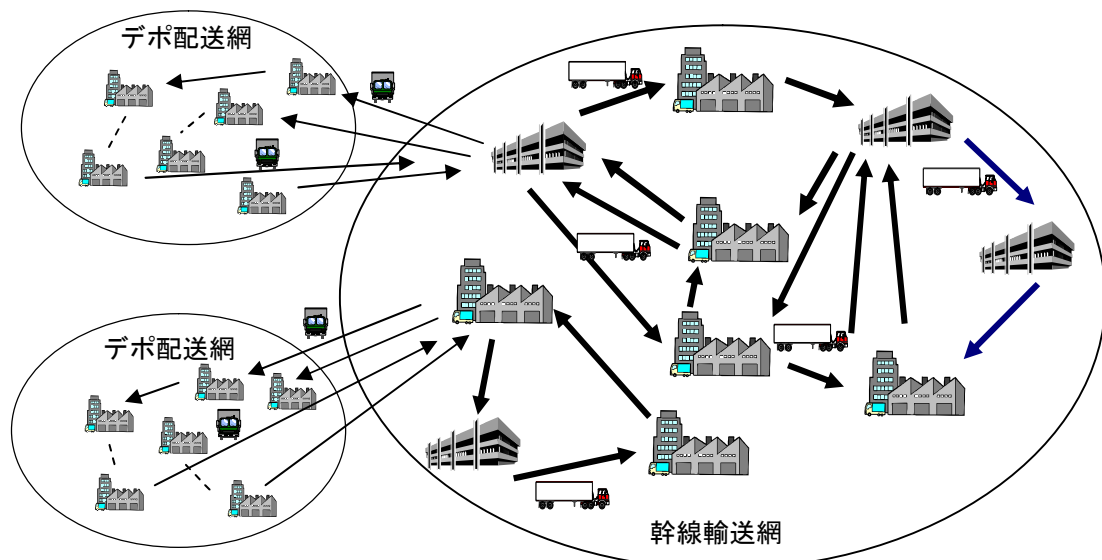


図 2.3 幹線輸送網とデポ配送網の構成

工場で部品として利用する。このため、通常のデポから顧客先までの輸送を行う配送計画問題とは異なり、集荷と配送を一台の車両で同時に行う。

(4) 複数デポと非デポ経由輸送

幹線物流網には、集荷物流網と異なり、車両は複数のデポに配置されている。デポを出発した車両は、いくつかの工場やデポを巡回して、元のデポに戻る。この巡回路の途中で、荷物の積み降ろしを行い、一部の荷物は途中の巡回拠点間でデポを経由せずに直接輸送される。

2.3 共同物流網の構築運用手法

本研究で対象としている部品調達の共同物流網は、メーカーとその部品サプライヤによる物流共同化であり、従来の部品サプライヤ個別での物流最適化に代わり、より広範な調達物流網全体での最適化を目指している。この共同物流網には、デポ配送網やデポと工場間の幹線輸送網、さらに巡回輸送網など、多数のサブネットワークが含まれていて、それぞれ特性も異なりその構築は複雑な問題である。このような複雑な物流網の構築は、通常いくつかのフェーズに分けて段階的に行われる[17][78][94]。また、デポ配送網や幹線輸送網の計画作成は、VRPに属する問題であり、実用的な応答性能を得るためにはヒューリスティクスに基づく近似解法の利用が必須である。このようなヒューリスティクスに基づく解法を利用する場合には、単に最終の結果だけを見ても、解の正しさを確認することは人間の専門家にとっても困難な問題であり、多角的な情報の提供や解の正しさを裏付ける詳細な説明情報が必須である[79][80]。このヒューリスティクスに基づく近似解法の検証手法[95][96][97]を共同物流網構築にも応用し、共同物流網の構築を、図 2.4 に示すように「構築フェーズ」と「スケジューリングフェーズ」の二つのフェーズで行う方式を提案する。

戦略や戦術レベルの意思決定に該当する構築フェーズでは、数理的な最適化により、生産計画に対応した調達計画の作成や、デポなどのリソースの配置や能力、さらには、車両や人員などのリソースのサブネットワークへの割当て、また、各部品サプライヤからの輸送手段の決定などを行う。つぎに、スケジューリングフェーズでは、運用レベルの物流スケジュールまで作成して、数理的なモデルだけでは判定できない運用性や、使用車両台数に基づく、より詳細なコストの評価を行う。

共同物流網の構築は、物流効率向上の有力な手段である。しかし、物流の共同化には各企業の利害が絡むため、単に数理的な最適解がそのまま受け入れられることはほとんど無

い. デポ毎の負荷の公平化や、庸車コスト削減のための発注先輸送会社の集中化、部品サプライヤの納入条件の調整など、担当者はシステムに組み入れられていない様々な条件を考慮するために多面的な評価・調整を行う必要がある。つまり、デポの開設閉鎖や集荷能

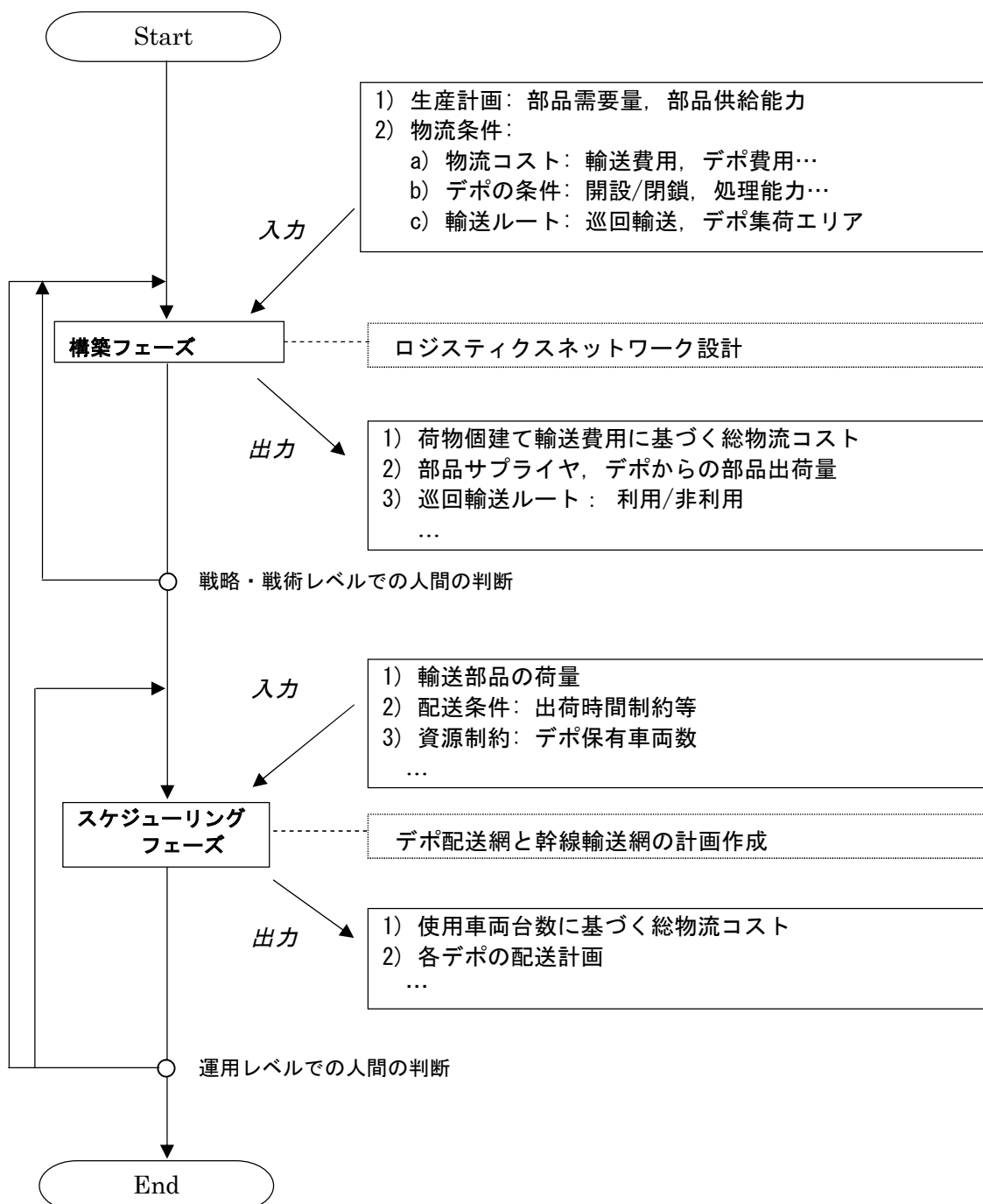


図 2.4 共同物流網の構築手順

力、また幹線輸送力などの物流網の構築フェーズの計画作成と共に運用性の評価や、より正確な物流コストを把握するために、スケジューリングフェーズでの各輸送ルート of 物流計画の作成までのプロセスを繰り返し行う必要がある。

2.4 共同物流網の構築運用の課題

2.4.1 構築段階での課題

2.3節で述べたように、共同物流網の構築で人間による多面的な評価・調整を行うためには、図2.4に示した構築フェーズとスケジューリングフェーズを繰り返す必要がある。このプロセスによる共同物流網構築を実現するためには、以下の技術的課題の解決が必要である。

(1) 応答性能の確保

構築フェーズでは、まず、生産計画に基づき、デポの開設・閉鎖や、幹線輸送の能力などの条件を設定して、数理モデルを解く。つぎに、その解を人間の専門家が多面的に評価して調整を行う。一つの解を人間が評価・調整するには、スケジューリングフェーズでも、運用レベルの計画作成まで必要なケースもあり、30分近く要することも多い。この数理モデルによる解の作成と、人間による評価・調整のプロセスを円滑に行うためには、少なくとも数分で解を求められる応答性能が求められる。複雑な物流網の構築に整数計画法を用いる手法も提案されているが、要求される応答性能の実現が困難である。このため、整数変数を用いない共同物流網のモデル化が必要である。

(2) 専門家レベルの精度の確保

戦略・戦術レベルの計画を作成する構築フェーズには、少なくとも人間の専門家と同レベルの高い最適性が求められる。従来、大規模な物流網全体の構築には、多品種流の最小費用流問題によるモデル化が用いられている[40][41][42]。このモデルは巡回輸送を意識せずに部品サプライヤから工場への輸送は、すべてデポを経由した輸送として計算するものである。全輸送量に占める巡回輸送の割合が小さければ、すべてデポ経由の輸送として扱っても大きな誤差は出ない。しかし、ここで対象としている共同物流網では、巡回輸送が全体の30%程度を占めているため、大きな誤差の要因となる。また、これとは逆に巡回輸送で輸送可能な荷物は、すべて巡回輸送を用い、残荷量だけをデポ経由に割り当てるアプロ

一チも提案されている[46]。しかし、この手法では巡回輸送を行える部品サプライヤからの調達を、他のサプライヤからの調達よりも無条件に優先してしまうなどの問題が生じてしまう。専門家レベルの精度を確保するためには、巡回輸送もデポ経由の輸送も区別しないモデル化が必要である。

2.4.2 デポ配送計画作成の課題

共同物流網におけるデポ配送計画作成を実現するためには、以下の技術的課題の解決が必要である。

(1) 備車も含めた総コストの削減

共同物流網の運用には、定常的な車両運行と備車が併用される。このため、定常運行する車両運行だけを最適化すると、備車台数が逆に増加し、全体のコストも増大してしまう。このため、単に定常運行する車両の運用コストを低減するだけでなく、輸送量の増減に対しても、ある程度安定して運用できる配送計画の作成が必要である。つまり、荷量の変動に対して、ある程度適応可能な余裕を持った定常運行する車両の計画を作成し、備車も含めた総コストを削減することが求められる。

(2) 時間制約の強弱によらない精度の確保と対話的な応答性能の両立

専門家は、運用性などコスト以外の要因も考慮して計画を作成するため、単純にコストだけで評価すると、最適解と比べ10%程度コストの高い計画を用いていることもある。このような複数のデポからなる大規模な共同物流網全体のコスト見積もりや運用性を評価するためには、必ずしも最適解が要求されるわけではないが、評価に大きな狂いを出さないためには、少なくとも人間の専門家レベルと同等以上の精度が求められる。しかも、共同物流網には、デポでの蓄積を前提とした時間制約の弱いものや、JITでの運用が求められる時間制約の強いサブネットワークが含まれている。時間制約が強い場合に有効な手法を、時間制約の弱い場合に適用しても、短時間で準最適解を得ることは困難である。逆に、時間制約が弱い場合に有効な手法を、時間制約の強い場合に適用しても良好な解を得ることは困難である。時間制約の強弱に関わらず、安定して専門家レベルの精度を実現できる解法が要求される。

2.4.3 幹線輸送計画作成の課題

複雑な運用が要求されると共に、多数の制約条件が課されるという特徴のある共同物流網中の幹線輸送の計画作成には、以下の技術的課題の解決が必要である。

(1) 多数の制約条件下での実用的な精度

スケジューリングフェーズでは、必ずしも最適解が要求される訳ではないが、人間の専門家と同程度の精度は要求される。しかし、幹線輸送網をマルチデポの VRP として捉える手法[82][83]では、時間制約や集荷配送同時輸送などの条件を入れると、すべての制約を充足する実行可能解の生成が困難であり、実用的な応答時間内で精度を確保することが困難である。

(2) 実用的な応答性能

幹線輸送の計画は、工場での生産計画や各デポの集荷物流網との同期など、様々な調整が必要である。このため、少なくとも1時間以内には解が求められる応答性能が必要である。しかし、幹線輸送網を整数計画法によりモデル化する手法では、現実的な規模の輸送網に対しては、実用的な応答性能の実現が難しい。

2.5 結言

本章では、本論文が対象とするメーカーと部品サプライヤによる部品調達の共同物流網の構造と、短い製品ライフサイクルに伴う運用形態やデポ経由輸送と巡回輸送の混在などの特徴を示した。さらに、人間の多面的な評価・調整を実現するための構築フェーズとスケジューリングフェーズ2段階での構築運用手法を提案し、その実現上の技術的課題として、構築段階の計画作成での専門家レベルの精度と応答性能の両立と、デポ配送網の計画作成での備車も含めた総コスト削減と、時間制約の強弱によらない安定した精度の実現を挙げた。さらに、幹線輸送計画作成での多数の制約条件下での実用的な精度と、対話的な応答性能の実現を挙げた。ここで、提示した技術的課題を解決する手法を、3章から5章で提案する。

第 3 章

巡回輸送を含む共同物流網の計画手法

3.1 緒言

本章では，共同物流網構築のための計画手法の確立という観点から，巡回輸送を含む共同物流網の正確なモデル作成と，構築フェーズを円滑に行える応答性能を得られる解法の実現という課題に取り組む[82][83][84].

2.3 節で説明したように，人間の判断・介入を可能とする「構築フェーズ」，「スケジューリングフェーズ」の 2 段階での共同物流網の構築には，精度と共に応答性能の確保が重要な課題である．構築フェーズに該当する物流網の計画作成は，従来，多品種流の最小費用流問題[41]をベースとした手法や，混合整数計画を用いた手法[20][47]等が提案されているが，応答時間と精度の両立を図ることは困難な問題である．

本章では，デポ経由の輸送と巡回輸送が混在する共同物流網における計画作成手法を提案する．提案手法では，巡回輸送車両の積載量下限制約を正確に表すために，混合整数計画問題を適用する．これにより，デポ経由の輸送も巡回輸送も対等に扱う共同物流網の正確なモデルを作成する．つぎに，整数変数に変えてダミー荷物を導入して，混合整数問題を解く代わりに，実変数だけの線形計画問題を解く高速な解法を提案する．これにより，応答時間と精度の両立を図る．

まず，3.2 節において，共同物流網の特徴とその計画作成における技術的課題を明らかにする．3.3 節において，共同物流網のモデルを提示し，3.4 節において応答性能と精度の両立を図る解法を提案する．3.5 節において実験による評価を行い，提案手法の有効性を示す．

3.2 共同物流網構築問題のモデル化

3.2.1 共同物流網構築問題

共同物流網は、図 3.1 に示すように部品サプライヤから工場まで、デポ経由での輸送と巡回輸送の二つの経路を併用して部品の輸送を行う。この物流網の構築には、工場の需要量や、部品サプライヤの供給能力、デポや幹線輸送能力等の制約を充足した上で、デポ集荷輸送費や、巡回輸送費、幹線輸送費、デポ費の合計を最小とする計画が求められる。2.2.2 項に示したように、巡回輸送が併用されるため、単純な最小費用流によるモデル化では、専門家レベルの精度を実現することができない。また、整数変数を用いた数理モデルでは数分という応答性能を実現することが困難である。この応答性能と専門家レベルの精度を両立する計画手法を提案する。

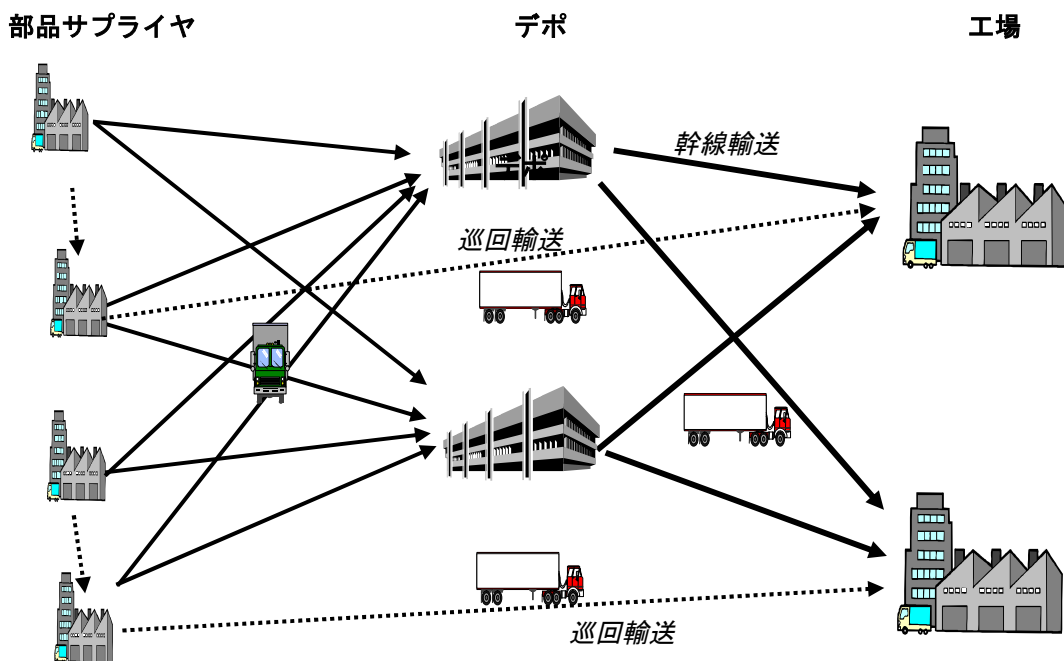


図 3.1 共同物流網

3.2.2 最小費用流によるモデル化

図 3.1 のデポ経由輸送と巡回輸送が混在した共同物流網の最小費用流によるモデルを図 3.2 に示す。このモデルは、部品サプライヤからデポを経由して工場に輸送するルートと、

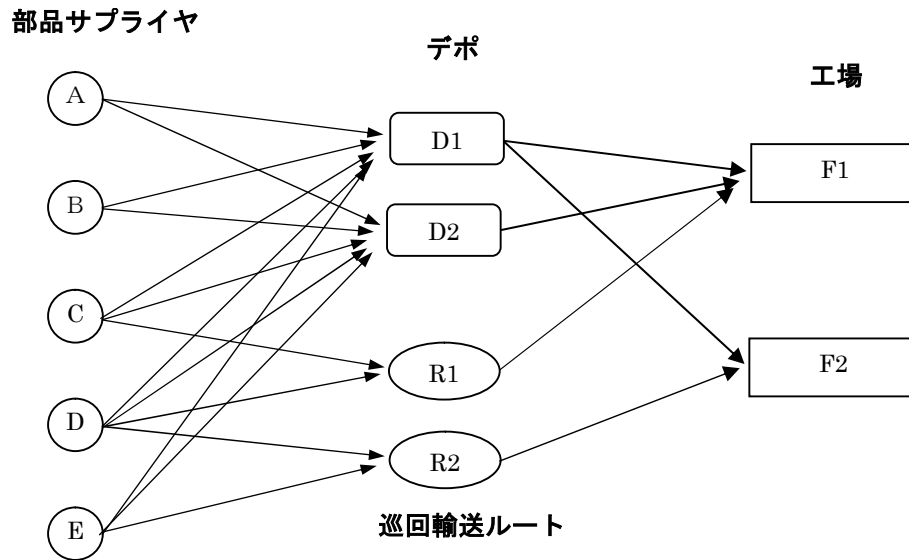


図 3.2 共同物流網の最小費用流によるモデル

部品サプライヤから巡回輸送で工場に輸送するルートから構成されている。部品サプライヤから工場に輸送を行う巡回輸送ルート R1 や R2 は、デポ D1 や D2 と同じ構造で表現されている。つまり、一つの巡回輸送ルートを仮想的なデポとして扱いかい、巡回輸送ルートを走行する車両の積載量の上限と下限の制約条件を課している。

この最小費用流によるモデルを以下の記法を用いて記述する。

$G=(N, A)$: ノードの集合 N とアーク集合 A から構成されるネットワーク

S : 部品サプライヤの集合

C : デポの集合

F : 工場の集合

$N = S \cup C \cup F, S \cap C \cap F = \Phi$

D : 部品サプライヤとデポを結ぶアークの集合

M : デポと工場を結ぶアークの集合

E : 部品サプライヤと工場を結ぶアークの集合

$A = D \cup M \cup E$

P : 部品の集合

v^p : 部品 p の単位量あたりの荷量 (容積)

- su_i^p : サプライヤ i の部品 p の最大供給量 ($i \in S, p \in P$)
 dm_k^p : 工場 k での部品 p の需要量 ($k \in F, p \in P$)
 c_{ij}^p : 部品 p の単位量あたりのノード i から j への輸送コスト ($i, j \in N, p \in P$)
 d_i^p : デポ i での部品 p の単位量あたりの処理コスト ($i \in C, p \in P$)
 cu_i : デポ i の取り扱い荷量 (荷物容積) 上限 ($i \in C$)
 t_{ij} : デポ i と工場 j 間の輸送量上限 ($i \in C, j \in F$)
 x_{ij}^p : 部品 p のノード i から j への輸送量を表す実変数 ($i, j \in N, p \in P$)
 T : 巡回輸送ルート of 集合
 S_t : 巡回輸送ルート t に含まれる部品サプライヤの集合 ($t \in T$)
 f_t : 巡回輸送ルート t の納入先工場 ($t \in T, f_t \in F$)
 y_{ij}^{pt} : 巡回輸送ルート t による部品 p のノード i から j への輸送量を表す実変数
 ($i \in C, j \in F, t \in T, p \in P$)
 t_0 : 部品サプライヤの巡回輸送出荷基準量
 t_1 : 巡回輸送車両の基準積載量
 t_2 : 巡回輸送車両の最大積載量

このとき、巡回輸送ルート t による輸送コストは式(3.1)で表される。

$$C_t = \sum_{p \in P} \sum_{i \in S_t} c_{if_t}^p \cdot y_{if_t}^{pt} \quad \forall t \in T \quad (3.1)$$

したがって、目的関数は次の式(3.2)で表され、制約条件は式(3.3)から式(3.8)で表現される。

Objective:

$$\sum_{p \in P} \left(\sum_{i \in S} \sum_{j \in C} (c_{ij}^p + d_j^p) \cdot x_{ij}^p + \sum_{j \in C} \sum_{k \in F} c_{jk}^p \cdot x_{jk}^p \right) + \sum_{t \in T} C_t \quad \rightarrow \quad \min \quad (3.2)$$

Subject to:

$$\sum_{j \in C} x_{ij}^p + \sum_{t \in T} y_{if_t}^{pt} \leq su_i^p \quad \forall i \in S, p \in P \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in C} x_{jk}^p + \sum_{i \in T} \sum_{i \in S_i} y_{ik}^{pt} = dm_k^p \quad \forall k \in F, p \in P \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in S} x_{ij}^p = \sum_{k \in F} x_{jk}^p \quad \forall j \in C, p \in P \quad (3.5)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in S} v^p \cdot x_{ij}^p \leq cu_j \quad \forall j \in C \quad (3.6)$$

$$\sum_{p \in P} v^p \cdot x_{jk}^p \leq t_{jk} \quad \forall j \in C, k \in F \quad (3.7)$$

$$t_1 \leq \sum_{p \in P} \sum_{i \in S_i} v^p \cdot y_{if_i}^{pt} \leq t_2 \quad \forall t \in T \quad (3.8)$$

式(3.3)は、部品サプライヤの供給能力の制約を表し、式(3.4)の制約はメーカーの工場での需要量がすべて充足されていることを示している。式(3.5)は、デポでのフロー制約を示し、式(3.6)はデポの処理能力の制約を示している。式(3.7)はデポと工場間の幹線輸送能力の制約を表し、式(3.8)が巡回輸送ルートに対する荷量の制約条件である。つまり、巡回輸送ルートには式(3.6)のデポの処理能力の制約と同じように、式(3.8)に示すように輸送量の上限制約が課されている。さらに、巡回輸送ルートには荷量の下限の制約条件も課されている。

この最小費用流のモデルでは、すべての巡回輸送ルートに基準積載量(t_1)以上の荷量が無ければ解が存在しなくなってしまう。また、逆に式(3.8)の基準積載量の制約条件を緩和すると、輸送コストの低い巡回輸送が無条件に優先されてデポ輸送が用いられなくなってしまう。この問題点を回避するために、つぎに、混合整数計画をベースとしたモデルを示す。

3.2.3 混合整数計画によるモデル化

共同物流網の巡回輸送を、整数変数を用いた混合整数計画問題としてモデル化する。これは、図 3.3 に示すように各巡回輸送ルートが利用されているか、利用されていないかの二つの背反する状態を含めてモデル化するものである。このモデル化のために、まず巡回輸送ルートの積載量の条件を、0-1 変数 $z_t (t \in T)$ を用いて次の式(3.9)で表現する。

$$t_1 \cdot z_t \leq \sum_{p \in P} \sum_{i \in S_i} v^p \cdot y_{if_i}^{pt} \leq t_2 \cdot z_t \quad \forall t \in T \quad (3.9)$$

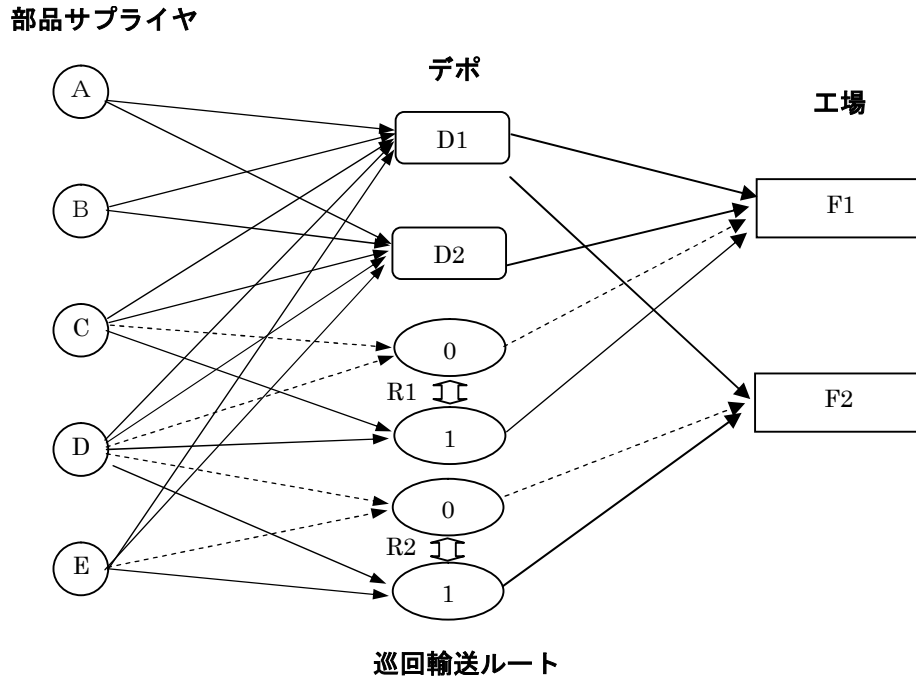


図 3.3 混合整数計画による共同物流網のモデル化

つまり、 z_t が 1 の場合にのみその巡回輸送ルートで輸送が行われ、0 の場合にはその巡回輸送ルートは使用されない。目的関数は式(3.10)となる。

$$\sum_{p \in P} \left(\sum_{i \in S} \sum_{j \in C} (c_{ij}^p + d_j^p) \cdot x_{ij}^p + \sum_{j \in C} \sum_{k \in F} c_{jk}^p \cdot x_{jk}^p \right) + \sum_{t \in T} C_t \quad \rightarrow \quad \min \quad (3.10)$$

この方法により、巡回輸送を含めたモデルを構築することができ、最小費用流によるモデルと異なり、必ず解は存在する。しかし、後に実験結果を示すが、整数変数を用いるため目標とする応答性能を実現することが困難である。つぎに、応答性能と精度の両立を図るために、整数変数を用いないモデル化と解法を提案する。

3.3 混合整数計画問題のダミー荷物を用いた高速高精度解法

目標とする応答性能を確保するため、整数変数を用いない巡回輸送のモデルを提案する。これは、図 3.4 に示すように各巡回輸送ルートに、部品サプライヤからの荷量だけでなく、

図 3.4 中の d1 や d2 のようにダミーの荷量も加えるものである。巡回輸送ルート上の荷量が基準輸送量に達しない場合には、ダミーの荷物を巡回輸送ルートで運ぶものである。このダミー荷物を含むモデルを解き、もし、ダミー荷物の荷量が 0 で無い場合には、その巡回輸送ルート上の荷量が基準輸送量に達していないと判断できる。つまり、式(3.9)の整数変数に代えて、各巡回輸送ルート上の積載量の積載量下限への不足量を現す実変数 w_t を導入する。この実変数 w_t を用いて巡回輸送の輸送量の条件を式(3.11)で表す。これは巡回輸送ルート上の車両の荷物量が下限に満たない場合には、ダミーの荷物を w_t だけ車両に積載し、その輸送コストを目的関数に加える。このダミーの荷量に対する輸送コストは通常の荷物に対する輸送コストよりも大きな値を設定する。

$$t_1 \leq \sum_{p \in P} \sum_{i \in S_i} v^p \cdot y_{if_i}^{pt} + w_t \leq t_2 \quad \forall t \in T \quad (3.11)$$

このモデルをまとめると以下の通りである。ここで、 α はダミーの荷物輸送に対するコストであり、 c_{ij}^p より十分に大きな値とする。このとき、目的関数は式(3.12)で表される。

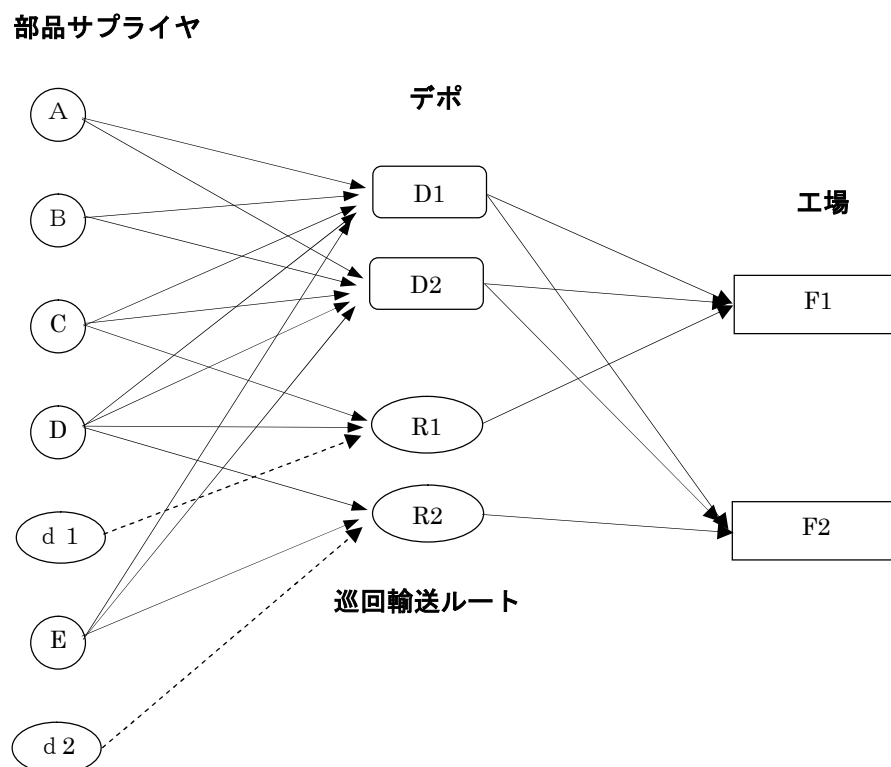


図 3.4 ダミーロードを用いた共同物流網のモデル化

Objective:

$$\sum_{p \in P} \left(\sum_{i \in S} \sum_{j \in C} (c_{ij}^p + d_j^p) \cdot x_{ij}^p + \sum_{j \in C} \sum_{k \in F} c_{jk}^p \cdot x_{jk}^p \right) + \sum_{t \in T} C_t + \sum_{t \in T} \alpha \cdot w_t \rightarrow \min \quad (3.12)$$

また、0-1 変数を用いた制約式(3.9)の代わりに、式(3.11)を用いる。このモデルを図 3.5 に示す処理により解き、巡回輸送を含めた共同物流網の評価を行う。

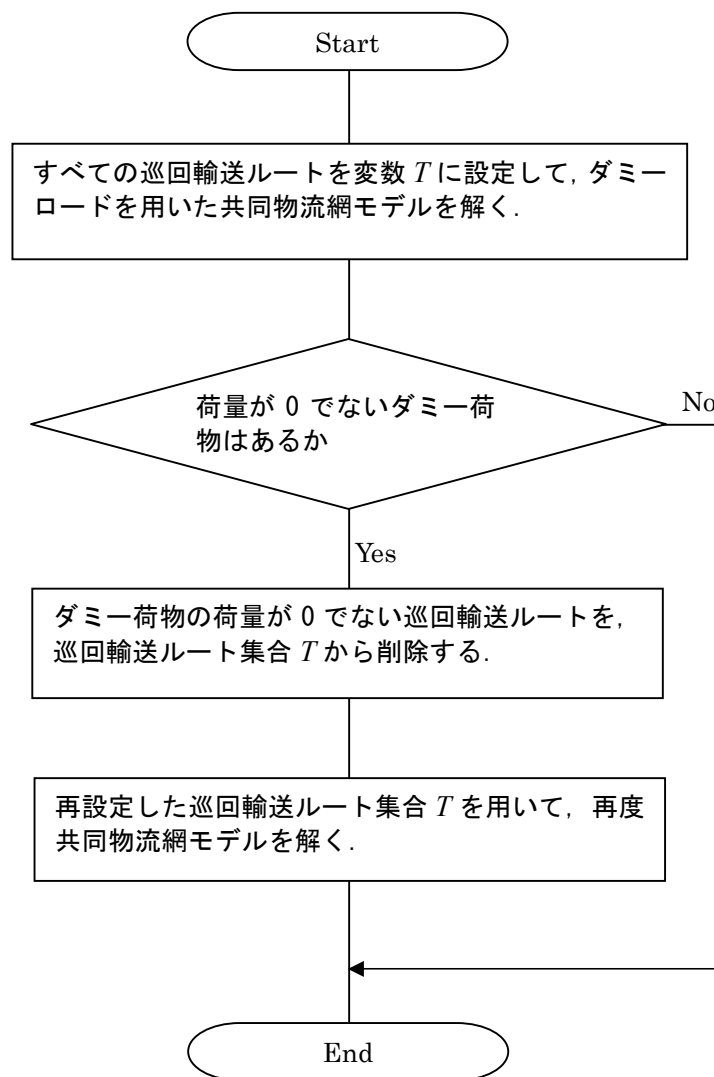


図 3.5 高速高精度解法の処理フロー

- (1) あらかじめ設定されている巡回輸送ルートの集合 T を用いて、ダミー荷物を含んだ上記のモデルを解く。
- (2) 輸送荷量が基準積載量に満たない巡回輸送ルートを求める。つまり、ダミー荷物の荷量が 0 でない巡回輸送ルートを求める。
- (3) (2) で求めた、基準積載量に満たない巡回輸送ルートを巡回輸送ルートの集合 T から削除する。
- (4) 新しく算出した巡回輸送ルートの集合 T を用いて、再度、上記のモデルを解き、巡回輸送を含めた輸送コストを求める。

3.4 共同物流網構築問題への適用と評価

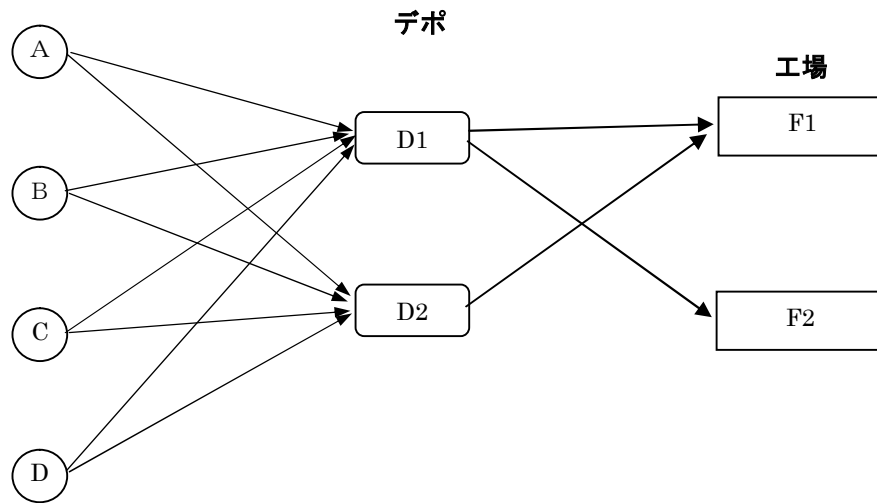
3.4.1 評価実験

まず、提案解法と混合整数計画法を用いるモデルで同一の物流構造を算出できるかを検証するために、四つのサプライヤと、二つのデポ、二つの工場、五つの巡回輸送ルートからなり、1 種類の部品だけを輸送する図 3.6 に示す単純な構造の物流網で比較評価を行った。この物流網は、混合整数計画によるモデル化では、実変数 23、整数変数 5、制約式は 23 であり、ダミー荷物を用いた提案手法によるモデル化では、実変数は 28、制約式は 23 である。

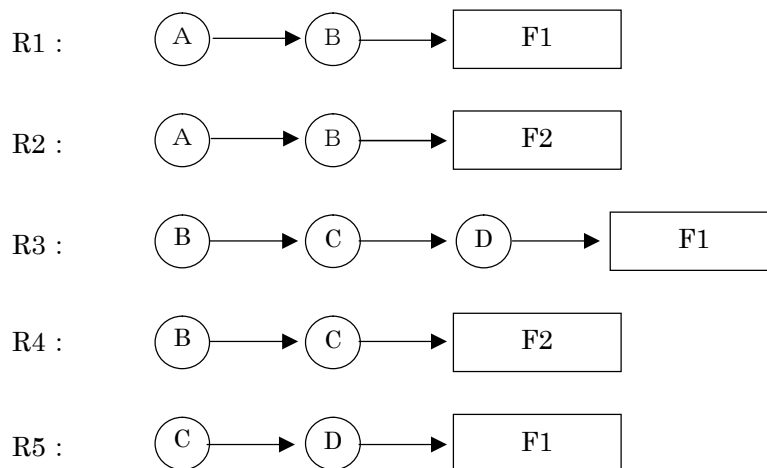
混合整数計画によるモデルを解くと、四つの巡回輸送ルートの中の 1 ルートだけ利用され、残り 4 ルートは閉鎖される。提案解法では、ダミー荷物に該当する五つの実変数の中で 1 変数だけが 0 となり、残りの 4 変数の値は正となった。この 4 変数に対応する巡回ルートの輸送量上限に 0 を設定して、この 4 ルートを閉鎖して再度計算を行った。この結果は混合整数計画での解と同一であった。このことから、ダミー荷物を用いた解法は、共同物流網における巡回輸送ルートの選択に対しては、混合整数計画によるモデルと同等の能力を持っていると言える。

つぎに、本研究の対象としている調達共同物流の開始時での規模に当たる 80 サプライヤと、4 つのデポ、3 工場からなる共同物流網の構築に、提案手法を適用した。荷物種別は 20 種類設定し、巡回輸送ルートは、200 ルート設定している。計算には、Pentium4(2GHz)のプロセッサと 1GB のメモリを実装した PC を用いた。実験では、以下の三つの解法の応答性能とコストの精度を評価した。

部品サプライヤ



(a) 物流網



(b) 巡回輸送ルート

図 3.6 物流網と巡回輸送ルート

(1) デポ経由近似法

巡回輸送を無視し、実際には巡回輸送される荷物も、すべてデポ経由で輸送されるとして作成した最小費用流問題によるモデル化である。

(2) 整数変数法

これは 3.2 節で説明した通り、各巡回輸送ルートの利用の有無を整数変数で表す混合整

数計画に基づくモデルである。

(3) 提案解法

これは 3.4 節で提案したように、上記の整数変数法の整数変数に代えて、ダミー荷物の荷量を表す実変数を導入する解法である。まず、すべての巡回輸送ルートを使用するとしてモデルを解き、ダミー荷物の荷量を求める。つぎに、ダミー荷物の荷量が 0 でない巡回輸送ルートを閉鎖して、再度解を求める手法である。

3.4.2 応答性能の評価

評価対象の物流網を各方式でモデル化した場合に、各モデルに含まれる実変数、整数変数(0-1 変数)と制約式の数と、それぞれのモデルの求解に要する時間を表 3.1 に示す。デポ経由近似法の場合には、1 分以内に解が求まっている。これに対して、整数変数法では応答時間は 1 時間を超えているが、提案解法では解法内部での繰り返し処理を含めても 3 分に収まっている。

表 3.1 モデル規模と応答時間

方式	実変数	整数変数	制約条件	応答時間 (分)
デポ経由近似法	6,640	0	4,892	0.8
整数変数法	18,640	200	9,272	83
提案解法	18,840	0	9,272	2.4

3.4.3 コストの評価

各方式で求めたコストの評価値を表 3.2 に示す。整数変数法と提案解法は、先の図 3.6 の場合と同じく、両者は同一の物流構造を算出している。これに対して、デポ経由近似法では、他の手法で求めた解に比較して 10%以上高いコストを算出している。この誤差は、巡回輸送とデポ経由輸送のコストの差のためである。巡回輸送はデポ集荷に比べて、大型車両を用いるため、各車両の積載量が十分に確保できる場合には、単位荷量当りの輸送コストは低い。また、デポの利用コストも生じない。対象とする物流網では全体の荷量の約 30%が巡回輸送で運ばれているため、この大きな誤差が生じている。

人間の専門家が、この物流構造（解）の見直しをした結果、コストの評価値は 14,396 と整数変数法や提案解法に比較して、さらに 3%近く低減した。専門家は、あらかじめ設定されていた部品サプライヤの時間枠制約と、車両の走行距離の制約条件を部分的に緩和した。これにより巡回輸送を行う車両が 1 日より多くの部品サプライヤを巡回できるようになり、デポ経由の輸送の一部が巡回輸送で代替され、コストが低減している。具体的には、専門家は 10 のサプライヤの出荷時間枠の拡大と、11 台の巡回輸送車両の走行距離の制約を緩和が可能であると判断して、この 11 台の車両のルートに、それぞれ巡回先の部品サプライヤを一つずつ追加する巡回輸送ルートの見直しを行っている。

表 3.2 各解法の精度

方式	コスト	精度 (%)
デポ経由近似法	16,801	11.3
整数変数法	14,784	0
提案解法	14,784	0

3.4.4 問題規模と応答性能

さらに、提案解法の有効性を評価するために、巡回輸送ルートが無い場合から 200 ルート設定されている場合までの応答性能を、提案解法と整数変数法で比較評価した。計算結果を確認したところ、両解法で算出された物流構造は一致している。応答性能の評価結果を図 3.7 に示す。巡回輸送ルートの数が 20 より少ない場合には提案解法よりも、混合整数計画を用いた整数変数法の応答時間の方が短い。これは、この規模の問題では整数変数法でも 10 秒程度で解が得られるため、線形計画法のモデルの評価を 2 回繰り返す提案解法よりも応答時間が短くなっている。しかし、巡回輸送ルート数が 100 の場合には提案解法の応答時間は 1 分以内であるが、整数変数法では応答時間は 15 分を超えている。さらに、巡回輸送ルート数が増えると、この差はさらに拡大して行く。整数変数法では、目標とする対話的な応答性能を実現できるのは、巡回輸送ルート数が 50 程度までに限られている。これに対して提案解法では、ルート数が 200 の場合でも目標とする応答性能を実現できている。

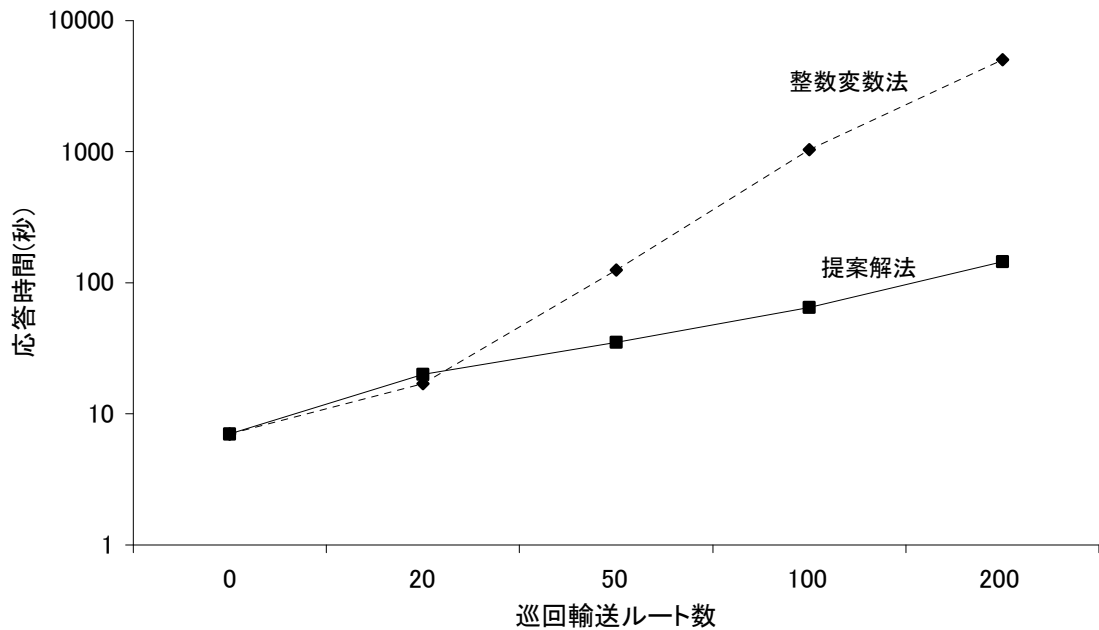


図 3.7 巡回輸送ルート数と応答時間

3.5 結言

本章では、人間による多面的な評価と調整が要求される共同物流網の構築で、精度と応答性能の両立を実現する解法を提案した。巡回輸送とデポ経由の輸送が混在する共同物流網のモデルを混合整数計画問題としてモデル化した。さらに、巡回輸送の車両の積載量下限制約の判定にダミー荷物を用いることで、整数変数を用いないモデルへの変換と高速な解法を提案した。ダミー荷物が積載された巡回輸送ルートを、輸送ルートから削除して、再度評価することで、高精度かつ高速な解法を実現した。提案解法を、実験により評価した結果、実用規模の問題に対しても 1 時間に 2, 3 回の対話処理を実現できている。また、コストの評価でも人間の専門家と同等の精度を得られることを示した。本章の成果は、日立ソフトウェアエンジニアリング（株）で行った、電子機器メーカーとその部品サプライヤによる共同物流網の構築に活用された。

本手法は実際の共同物流網の条件下では、実験により、混合整数計画による手法と同等の精度を得られることを確認している。さらに、本手法の適用可能な条件を明確にし、その数学的な証明が今後の課題として残されている。また、本章で示した構築フェーズの計画手法と、スケジューリングフェーズの計画手法の連携方式の検討が必要である。構築フェーズで作成した計画に基づき、デポ配送計画や、デポと工場間の幹線輸送の計画作成が

必要である。さらに、スケジューリングフェーズで作成した運用レベルの計画での使用車両台数に基づき、コスト評価を行い、構築フェーズでの荷物個建て費用に基づくコスト評価の妥当性を検証することも必要である。

第 4 章

マルチステージ GA による共同物流網における配送計画作成手法

4.1 緒言

本章では，共同物流網中のデポ配送網の計画作成問題の定式化と，GA を用いた解法の構築という課題に取り組む[85][86][87][88][89].

調達物流の効率化には，一つのサプライチェーンに属するメーカーと，部品サプライヤの物流共同化は有力な手段である．この共同物流網を運営するためには，すべての参加企業にコスト面でのメリットが必要である．つまり，単独での物流に比べて輸送コストの低減，つまり，車両の積載率を向上し，輸送に要する車両台数を削減することが必要である．しかし，共同物流におけるデポ配送計画作成には，2.4.2 項で説明したように，時間制約の強弱によらず精度を確保することと同時に，通常車両だけでなく，備車も含めた総コストを削減できる，安定した運用を行える計画作成が求められる．

この共同物流網でのデポ配送網の計画作成は，VRP[23][43]に分類される問題であり，既に，様々な解法が提案されている[52][53][56][57]．これらの解法は，毎日の荷量に対応した最適性の高い計画を作成することができるが，最適性と同時に運用の安定性を実現することは困難な課題である．

本章では，通常車両と備車が併用されるデポ配送網の計画作成に GA を用いた手法を提案する．総コストの削減するために，備車も含めたコスト評価を個体の適応度評価に適用する．さらに，時間制約の強弱に関わらず精度を確保するために，時間制約の強い場合に有効な手法と，弱い場合に有効な手法を，それぞれ組み込んだ GA をそれぞれ実行するマルチステージ GA を適用する．

まず，4.2 節において共同物流網におけるデポ配送計画の特徴と，その計画作成上の技

術的課題を明らかにし、その定式化を図る。4.3節において、GAを適用した解法を提案する。4.4節において、ベンチマーク問題に提案解法を適用し、4.5節において、荷量変動する共同物流網での配送計画問題での評価実験を行い、提案解法の有効性を示す。

4.2 共同物流網におけるデポ配送計画作成問題

4.2.1 デポ配送計画の特徴と技術的課題

共同物流網の構築と運用には、共同物流網に含まれる複数のデポの配送計画の作成が必要である。2章で説明したように、デポの配送網では定常的な車両運行と、備車を併用した運用が行われている。このため、荷量の変動を考慮せずに、単純な最適解で定常的に運行する車両台数だけ削減すると、備車が増えて、総コストが逆に増大してしまうという問題が生じてしまう。また、多数の企業が参加し運用形態の異なるデポもあるため、JITでの輸送が求められるものや、デポでの蓄積を前提とした時間制約の弱い配送網もある。共同物流網の効率向上には、時間制約の強弱に関わらず高い精度が求められる。時間制約の弱い場合に有効なヒューリスティクスを、制約の強い部分に適用しても、良好な結果が得られない。また、NI(Nearest Insertion)法[62]などの時間制約の強い場合に有効なヒューリスティクスは、時間制約の弱い場合には、必ずしも良好な結果を示さない。時間制約の強弱に関わらずに、対話的な利用が可能な時間内に安定して専門家レベルの精度を実現できる解法が求められる。

4.2.2 デポ配送計画問題の定式化

2章で示したように共同物流網には、デポと工場間の幹線輸送と共に、部品サプライヤからデポへの部品輸送を行うデポ配送網が含まれている。デポ配送は、図4.1に示すようにデポから出発する複数の車両が、それぞれ複数の部品サプライヤを巡回して行われ、この計画作成はVRPに分類される問題である。

この共同物流網中の、デポ配送計画の作成問題を以下のように定式化する。

(1) 車両

最大積載量 Q の車両 M 台でデポと配送先（部品サプライヤ）間の輸送を行う。

(2) 配送先

図 4.1 のように、1 から N の整数で配送先（部品サプライヤ）を表し 0 でデポを表す。

(3) 輸送量

配送先の輸送量の増減を評価するために、 W 日間の配送先 i から d 日目にデポへ輸送する荷量 q_i^d と W 日間の平均荷量 q_i を与える。 q_i は式(4.1) の通りである。

$$q_i = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^W q_i^j \tag{4.1}$$

(4) 時間制約

配送先 i には、 $[e_i, l_i]$ という時間枠が与えられている。 配送先 i に到着する車両は遅くとも時間 l_i までに到着しなければならない。 また、車両は時刻 e_i よりも早く到着しても、 e_i まで荷積みや荷下ろしの作業を待たなければならない。

(5) 車両ルート

車両はデポを出発して、いくつかの配送先に、それぞれ 1 回だけ立寄りデポに戻る。つまり、1 台の車両のルートは $\langle 0, v_1, v_2, \dots, v_n, 0 \rangle$ という整数の列で表される。 このルートを $r = \langle v_1, v_2, \dots, v_n \rangle$ と表記する。

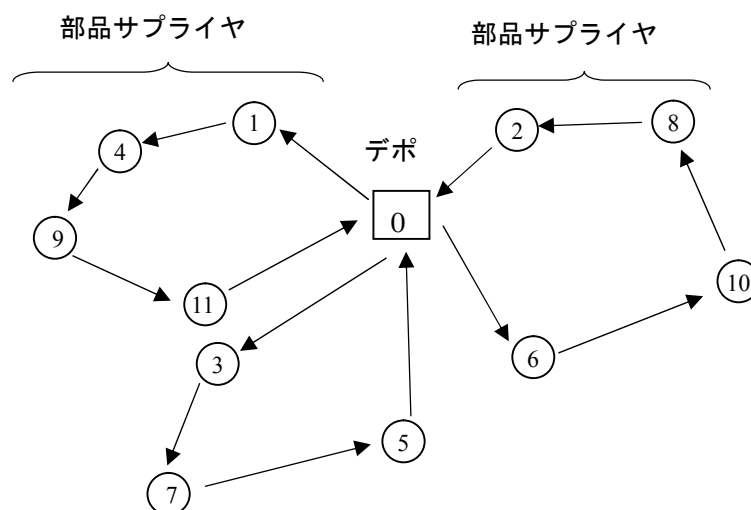


図 4.1 デポ配送網

一つのルートを1台の車両が走行する場合に必要なコストは、車両1台あたりの固定費と、このルートの運行コストの合計である。ここで、 $c(i,j)$ で配送先*i*と*j*の間を1台の車両が移動するのに要するコストとする。このとき1台の車両がルート*r*を運行するのに要するコストは式(4.2)で表現される。

$$vc(r) = c(0, v_1) + c(v_1, v_2) + \dots + c(v_n, 0) \quad (4.2)$$

(6) 配送計画

配送計画は、すべての配送先を、それぞれ1台の車両だけが訪問するルートの集合である。つまり、式(4.4)から式(4.7)の条件を満足する式(4.3)に示す車両ルートの集合である。

$$\sigma = \{r_1, r_2, \dots, r_m\} \quad (m \leq M) \quad (4.3)$$

$$\bigcup_{i=1}^m spl(r_i) = Suppliers \quad (4.4)$$

$$spl(r_i) \cap spl(r_j) = \emptyset \quad (i \neq j) \quad (4.5)$$

$$q(r_i) \leq Q \quad (4.6)$$

$$e_i \leq a_i \leq l_i \quad (i \in Suppliers) \quad (4.7)$$

ただし、 $spl(r)$ はルート*r*に含まれる配送先の集合を表し、*Suppliers*は配送先すべての集合を表す。また、ルート*r*は配送される荷量を $q(r)$ で表す。

式(4.4)は、すべての配送先への配送が行われることを表し、式(4.5)は2台以上の車両が同一の配送先を訪れることがないことを示し、式(4.6)は使用車両数が保有車両数以下であることを表している。式(4.7)の a_i は配送先*i*への車両の到着時刻を表し、配送先への車両の到着時刻が時間制約を充足していることを表している。

(7) 評価

配送計画 σ の実行に要する総コストは、 σ に含まれている車両の固定費と、その運行に比例する運行コスト、さらに、積載量制約を充足できない場合に必要な、臨時の備車の固定費と、その運行コストである。この配送計画 σ の総コストはつぎのように表される。通常の車両1台あたりの固定費を α とし、備車の場合の固定費を β とする。このとき、 m を σ に含まれるルート数とすると、通常輸送のコスト $Nc(\sigma)$ は式(4.8)で表現される。

$$Nc(\sigma) = \alpha \cdot m + \sum_{r \in \sigma} vc(r) \quad (4.8)$$

つぎに、日々の荷量の変動により必要となる備車に必要な総コスト $Tc(\sigma)$ を求める。この $Tc(\sigma)$ を算出するために、各ルートに含まれる配送先の荷量を日付毎に集計し、そのルートを実行する車両の積載量上限を超過するか否かを判定する。積載量が超過した場合には、その超過荷量の輸送に必要な備車の固定費と、運行コストを求める。このコストを、日付毎、ルート毎に集計する。備車車両も、通常の車両と同一のルートを実行するので、備車に要する総コストは式(4.9)で表現される。

$$Tc(\sigma) = \sum_{r \in \sigma} \sum_{d=1}^W \beta \cdot t_r^d + \sum_{r \in \sigma} \sum_{d=1}^W vc(r) \cdot t_r^d \quad (4.9)$$

ただし、 t_r^d は d 日目に車両ルート r で、超過荷量の輸送に必要な備車台数であり、ガウス記号を用いると式(4.10)で表される。

$$t_r^d = \left\lceil \left(\sum_{c \in spl(r)} q_c^d \right) / Q \right\rceil \quad (4.10)$$

このとき、総コスト $T(\sigma)$ は式(4.11)で表される。

$$T(\sigma) = W \cdot Nc(\sigma) + Tc(\sigma) \quad (4.11)$$

共同物流網におけるデポ配送計画作成は、配送先と輸送量、時間制約を与え、総コスト $T(\sigma)$ を最小とするルートの集合 σ を求める問題である。このモデルでは、配送計画 σ の総コスト算出に、各部品サプライヤの平均出荷荷量だけでなく、日々変動する出荷荷量も組み込んでいる。これにより出荷荷量の増減の多い配送先同士が同一ルートに組み込まれ、備車台数が多くなるなどの問題点を回避し、安定した運用が可能な配送計画の作成を狙っている。

4.3 マルチステージ GA による配送計画作成手法

4.3.1 デポ配送計画問題解法のコンセプト

共同物流網におけるデポ配送計画作成は、応答性能の面で、厳密解法の適用は非現実的である。よって、メタヒューリスティクス適用により、短時間で実用解を得ることを目指す。本問題は前節で説明したように、作成した配送計画の車両台数や、車両の走行距離を直接評価に用いる一般的な VRP と異なり、日々の荷量の変動により必要となる備車コストも評価に含める。このため、たとえば、車両間での部分ルート交換を行う Cross-opt のような近傍探索を単純に適用しても、定常運行する車両台数や走行距離の短縮と、備車も含めた総コスト削減という目標が一致しないため、必ずしも短時間で良好な解を得ることができない。このため、交叉や突然変異には、定常車両のコスト削減を行うヒューリスティクスを組み込み、個体の適応度の算出にだけ、備車も含めた総コストを用いる GA を適用する。さらに、時間制約厳しい場合にも弱い場合にも、共に、短時間で GA の収束を図るために、時間制約充足に有効なヒューリスティクスを用いる GA と、積載量制約の充足に有効なヒューリスティクスを組み込んだ GA を順次実行するマルチステージ GA を提案する。

4.3.2 マルチステージ GA

対象としている共同物流網では、時間制約と積載量制約の 2 種類の制約の充足が必要であるが、JIT のような厳しい時間制約が課されている場合には、積載量制約の充足を優先する解法を適用しても、時間制約を充足する短時間で良好な解を得ることは困難である。逆に、時間制約の解決を優先する手法を、殆ど時間制約の無いケースに適用しても、効果を上げられない。また、時間制約の充足を図る手法と、積載量制約の充足を優先する手法を単純に組み合わせても、4.4 節での実験に示すように、必ずしも良好な結果を得られない。

GA の計算効率を上げる手法として、同一の GA を複数の計算機上で同時に実行する並列計算が知られている[98]。ここでは、複数の異なる GA を一つの問題に適用することで、計算効率の向上を図る。具体的には、積載量制約の充足を優先する GA による解法と、時間制約の充足を優先する時間制優先型 GA を組み合わせる図 4.2 に示すマルチステージ GA を提案する。具体的には、つぎの 2 種類の GA を、必要とされる応答時間内に計算できる世代数個別に実行して、良い方の解を選択する。

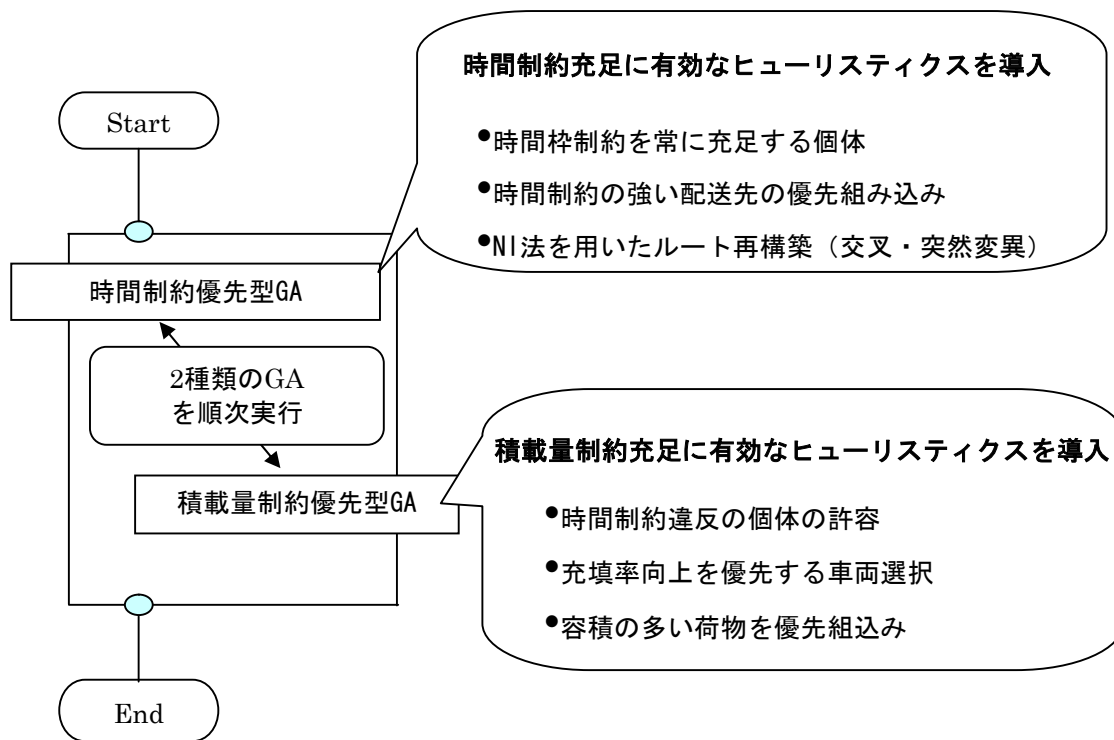


図 4.2 マルチステージ GA

(1) 時間制約優先型 GA

これは、JIT のように時間制約が厳しい場合に有効なヒューリスティクスを用いた GA による解法である。たとえば、突然変異や交叉での個体の再構築時にも、時間制約を充足するルートを優先する。また NI 法のように車両の走行距離の増分が最小となる再構成を行う。さらに、初期解を含め、すべての世代で時間制約を充足する個体だけで集団を構成し、時間制約が支配的な制約条件である場合に、短時間で良好な解への収束を図る。

(2) 積載量制約優先型 GA

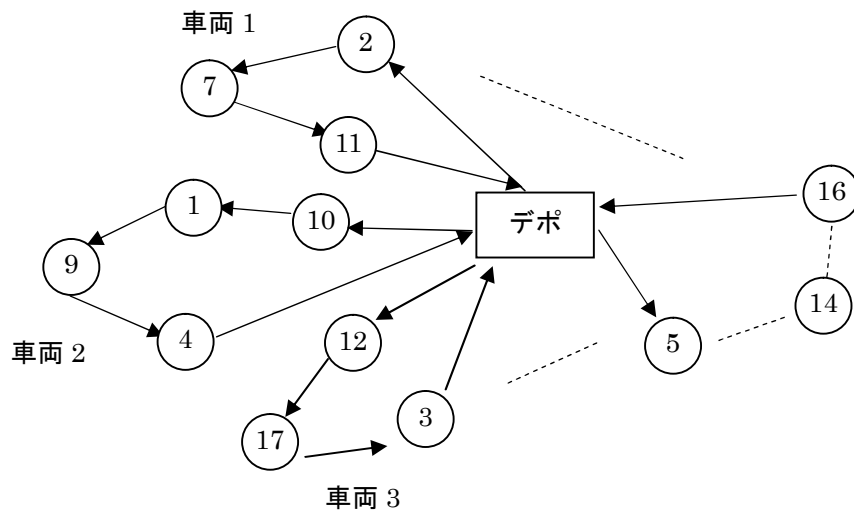
この GA は、時間制約よりも積載量制約が支配的な制約である場合に有効なヒューリスティクスを用いたものである。たとえば、輸送荷量の多い配送先のルートへの組み込みを優先したり、積載率の向上を優先したルートの再構築を行う。また時間制約に違反した個体の生存も許容し、一定世代間隔で制約違反個体の修復を行う。

ここでは、二つの異なる GA が、それぞれ得意とする局面で、その効果を発揮すること

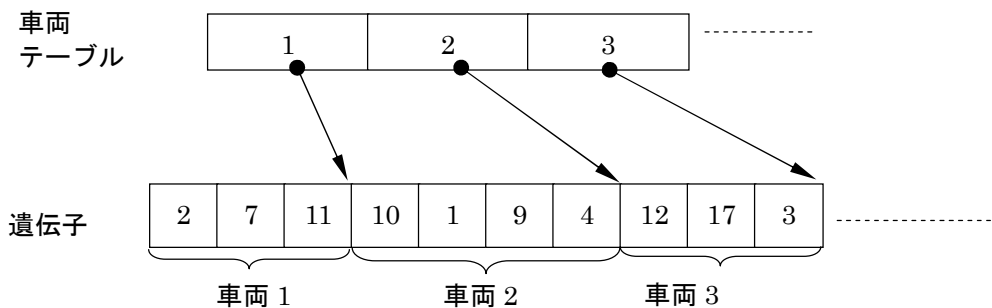
で、単独の GA を同じ時間だけ実行するよりも精度の高い解を得ることを狙っている。

4.3.3 遺伝子の構造

デポ配送計画問題の解には、どの車両がどの配送先に行くかという配送先のクラスタリングと、各クラスタ内で車両がどのような順序で巡回するかという二つの情報が含まれていなければならない。ここでは、この二つの情報を 1 個体に納めるため、図 4.3(a)に示す配送ルートを図 4.3(b)の遺伝子構造で表現する。一つの遺伝子は、すべての車両の配送先の ID の並びであり、車両ルートの区切りは車両テーブルで管理する。



(a) 配送ルート



(b) 遺伝子構造

図 4.3 配送ルートと遺伝子構造

4.3.4 GAによる計画作成アルゴリズム

上記2種類のGAで対話的な応答性能を保証するために、実験により、必要な応答時間内に実行可能なGAの世代数 N_A 、時間制約優先型GAの実行世代数 N_T 、積載量制約優先型GAの実行世代数 N_L を求める。ここで、 $N_A=N_T+N_L$ である。図4.2の時間制約優先型GAと、積載量制約優先型GAを、それぞれ実行世代数を N_T と N_L として以下のステップに従い実行する。

Step 1. 初期個体を発生させる。

Step 2. 実行世代数を設定する。

Step 3. 各個体の表す配送計画 σ の適応度を求める。

Step 4. 適応度が上位の個体を選択して次世代に残す。

Step 5. 交叉処理を行う。

Step 6. 突然変異処理を行う。

Step 7. 積載量制約優先型GAの場合には、一定世代毎に個体の時間制約違反の修復を行う。

Step 8. 終了世代数に到達していれば終了する。

Step 9. Step 3に戻る。

4.3.5 個体の適応度

通常便だけでなく、臨時の備車のコストを個体の適応度に組み込むために、図4.4に示す各サプライヤの平均出荷量と日付毎の実出荷量を用いる。交叉、突然変異での個体の再構成時には、車両の積載量制約は各サプライヤの平均出荷量を用いる。これに対して、各個体の適応度の算出には、日付毎の輸送量を用いる。つまり、車両毎、日付毎の実出荷量を参照し、車両の積載量上限に納まるか否かを判定する。もし、車両の積載量上限を超過する日があれば、1台備車が発生する。このようにして式(4.11)の通り、備車のコストを総コスト $T(\sigma)$ に算入する。さらに、積載量制約優先型GAでは、時間制約違反を犯している個体にペナルティを付与する。具体的には配送先への最遅到着時間 l_i に車両到着が遅れた場合に、遅延時間に相当するコスト評価にペナルティ率を掛けたものをコスト評価に参入する。そして、このようにして求めた各個体のコストの逆数を各個体の適応度として用いる。

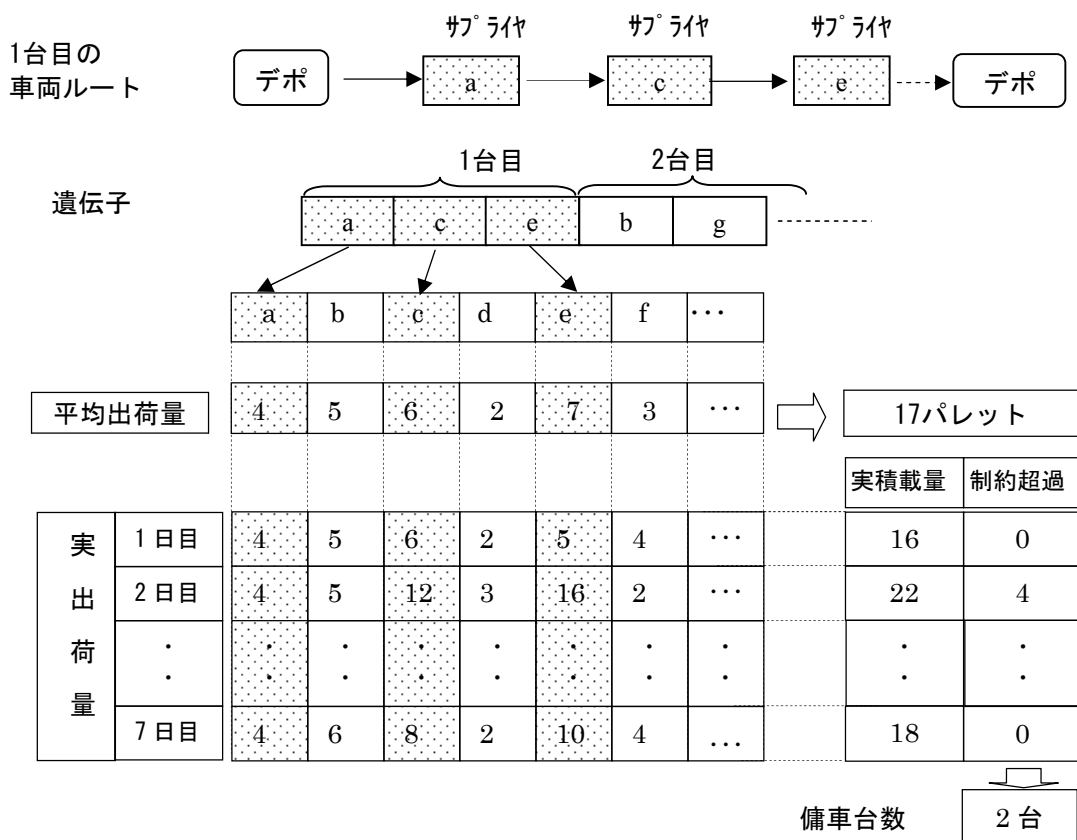


図 4.4 荷量の変動と遺伝子の評価

4.3.6 交叉

交叉は図 4.5 に示す次の手順により二つの親個体から、一つの子個体を構築する。

- Step 1. 一方の親個体から、車両の切れ目をランダムに選択し交叉点とする。
- Step 2. 交叉点より前方にある車両ルートの子個体にコピーする。
- Step 3. 子個体に含まれていない、配送先だけを巡回するルートが、もう一方の親個体があれば、その車両ルートの子個体にコピーする。
- Step 4. 子個体に含まれていない配送先を以下の方法により子個体に追加する。

時間制約優先型 GA の場合には、未割り当ての配送先を、二つ目の親個体に現れる順序で、積載量制約と時間制約を充足できるルートで、走行距離の増分が最小になる位置に追

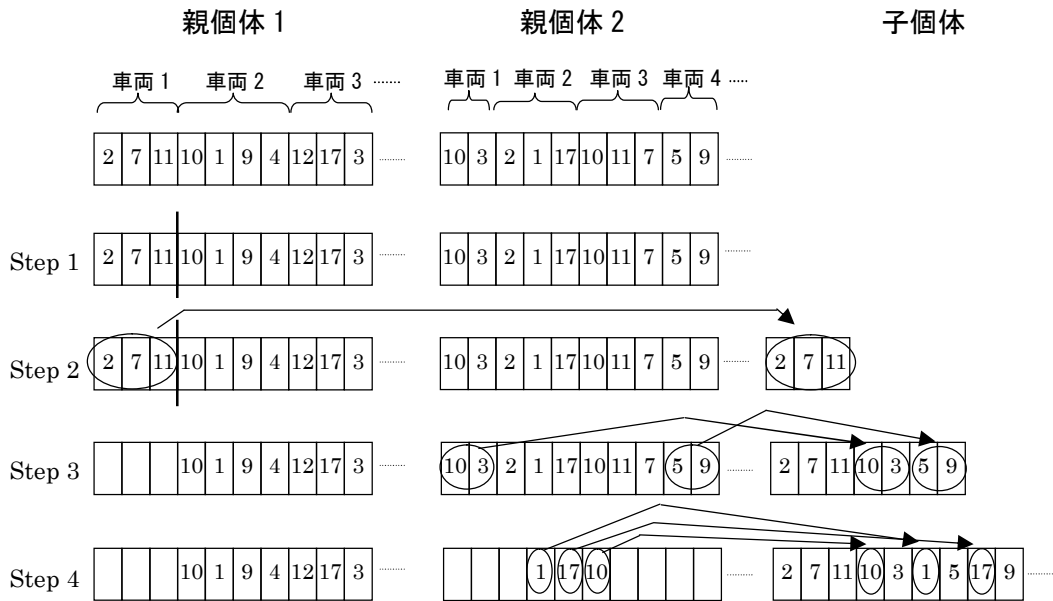


図 4.5 交叉処理

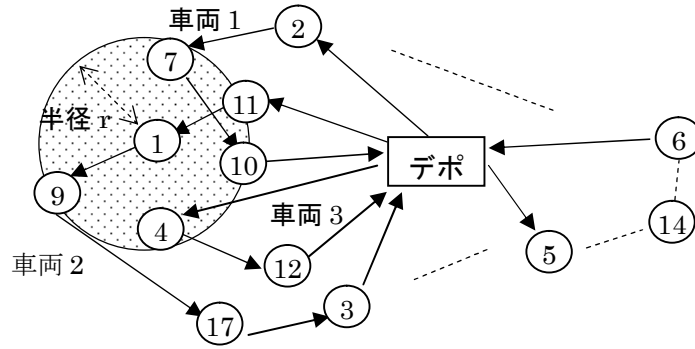
加する。もし、既存ルートに追加できない配送先が残った場合には、新しい車両を追加する。積載量制約優先型 GA では、残っている配送先を、荷量の順にソートし、積載量制約を充足できる既存ルートの中で、積載率が最も高くなる車両に追加する。

4.3.7 突然変異

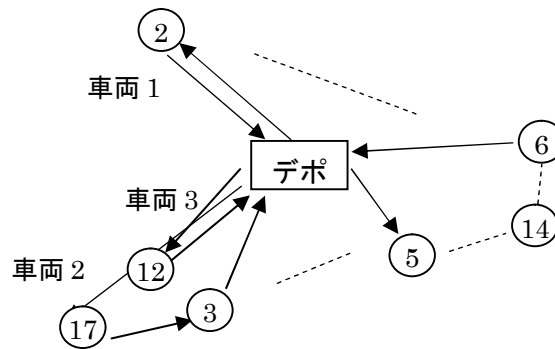
準最適解を得るには、局所最適に落ち込んだ場合に、そこからの脱出を可能とするために、解の一部を破壊して再構築する必要がある。このため、次の 2 種類の突然変異を適用する。

(1) 拠点近傍破壊型突然変異

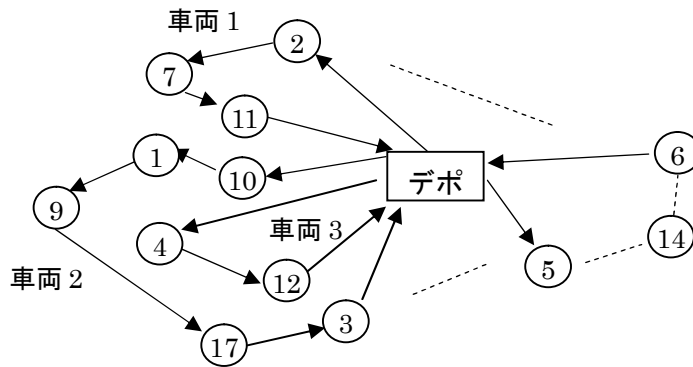
任意に配送先を一つ選び、この配送先とデポの距離の $1/3$ を上限とした値 r をランダムに選択する。つぎに、選択した配送先を中心として半径 r の近傍内に含まれている配送先をすべての車両ルートから削除して再挿入する。図 4.6 の例では、まず配送先 1 が選択され、その周囲半径 r の近傍に含まれている配送先 1, 4, 7, 9, 10, 11 が選択される(図 4.6(a))。つぎに、これらの配送先が遺伝子から除去される(図 4.6(b))。最後に、除去された配送先



(a) 拠点と近傍



(b) 半径 r 内の配送先の除去



(c) 除去配送先の再挿入

図 4.6 拠点近傍破壊型突然変異

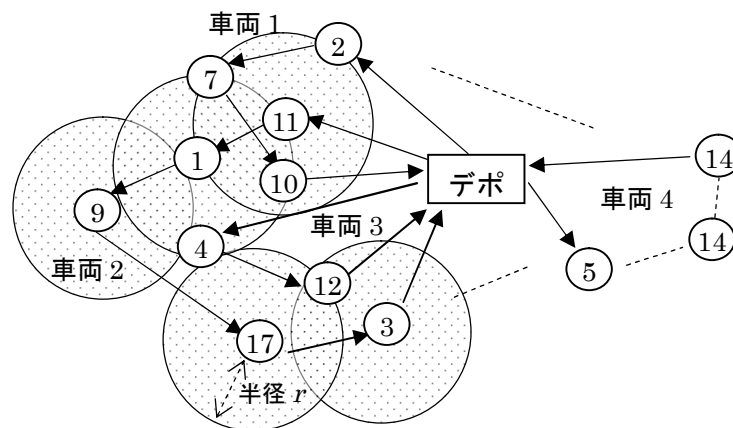
が再挿入され、全体が再構成される(図 4.6(c)).

この再挿入は、時間制約優先型 GA では、既存のルートの中で時間制約を充足し、かつ、距離の増分が最小になる車両のルートに挿入する。また、積載量制約優先型 GA では、既

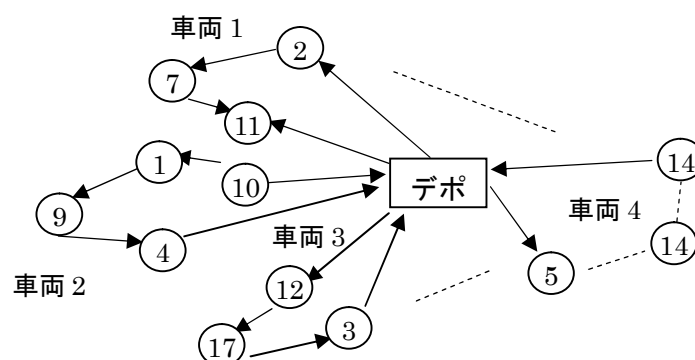
存の車両の中で、積載率が最も高く、かつ、その配送先への荷物を積載可能な車両のルートに追加する。もし、既存ルートに追加できない配送先が残れば、新たな車両を割り当てて制約条件の充足を図る。

(2) 車両単位破壊型突然変異

この型の突然変異では、まず、任意に1台の車両を選び、この車両の巡回するデポから最も遠い配送先とデポの距離の $1/5$ を上限とした値 r をランダムに選択する。選択した車両が巡回する配送先毎に半径 r の近傍を作成し、それらの近傍内に含まれている配送先をすべての車両ルートから削除する。つぎに、削除した配送先を拠点近傍破壊型突然変異と同じ方法で再挿入する。先の拠点近傍破壊型突然変異よりも、より広範な、車両ルートの



(a) 車両単位での配送先除去



(b) 再挿入後の配送ルート

図 4.7 車両単位破壊型突然変異

再編成を行う。図 4.7 に示す車両単位破壊型突然変異の例では、まず、車両 2 が選択され、車両 2 の巡回する拠点 11,1,9,17,3 からそれぞれ半径 r の近傍が選択される(図 4.7(a))。この近傍に含まれている車両 1 と車両 3 の巡回する配送先がすべて除去され、車両 4 のルートだけが保存される。つぎに、削除された車両 1 から車両 3 の配送先が再挿入されて、ルートの再構成が行われる(図 4.7(b))。

積載量制約優先型 GA では、時間制約違反の個体の生存も許容している。しかし、このような個体の生存を無条件に許すと、当然、時間制約は充足されなくなってしまう。このため、一定世代毎に時間制約違反を犯している個体の修復を行う。これは制約違反のある車両ルート前方から、順次、最遅時間よりも遅く到着している配送先を除去する。もし、最早時間よりも早く到着している場合には、その配送先での待ち時間を挿入する。車両ルートから除去した配送先は、時間制約を充足する車両ルートに挿入する。もし、制約が充足できる既存の車両ルートが無ければ、新しい車両を追加する。

4.4 ベンチマーク問題による実験

4.4.1 実験方法

提案解法を評価するために、まず、時間制約付きベンチマーク問題[99]を用いて、必要とする応答性能と精度を実現できる各 GA の個体数、交叉率、突然変異率と実行世代数を決定する。つぎに、日々の出荷荷量の変動しないベンチマーク問題で、提案解法と他の解法を比較する。対象としている共同物流網の想定規模はデポ数 20 程度で、各デポには 100 程度の部品サプライヤから輸送が行われる。このため、最適解が既に算出されている、配送先の数が 100 のベンチマーク問題で実験を行う。時間制約が厳しい問題 (R101)と弱い問題 (R107)を用いる。なお、計算には、Pentium4(2GHz)のプロセッサと 1GB のメモリを実装した PC を用いた。

(1) 個体数の決定

図 4.8 に時間制約優先型 GA と積載量制約優先型 GA の集団の個体数を 10 から 500 まで変え、解が収束する 3,000 世代の計算を行った場合の、ベンチマーク問題 R101 と R107 の精度を示す。個体数が 50 以下の場合には、時間制約優先型 GA と積載量制約優先型 GA の解は、最適解に比べて、それぞれ 8%と 10%以上悪い。また、個体数を 200 以上の場合には、個体数 100 の場合から解の改善は見られない。したがって、個体数は 100 とする。

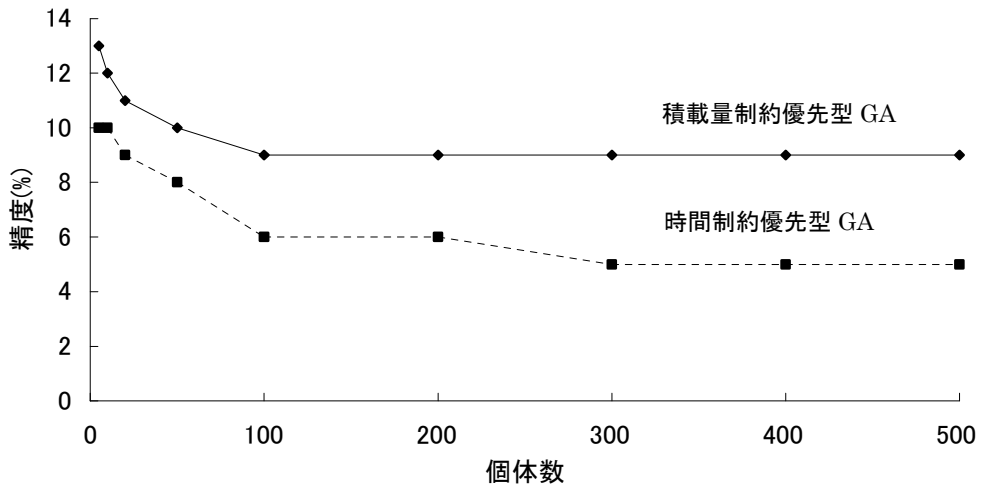


図 4.8 個体数と精度

(2) 突然変異率と交差率

図 4.9 と図 4.10 に、突然変異率と、交差率を変えた場合の時間制約優先型 GA と積載量制約優先型 GA の精度をそれぞれ示す。突然変異率と交差率の組合せを変えて評価した結果、どちらの GA も突然変異率を 10%、交差率を 20%とした場合に最も精度が高くなった。突然変異率と交差率を、これ以上大きくしても、精度の変化は見られない。したがって、時間制約優先型、積載量制約優先型 GA、共に、突然変異率は 10%、交差率は 20%とする。

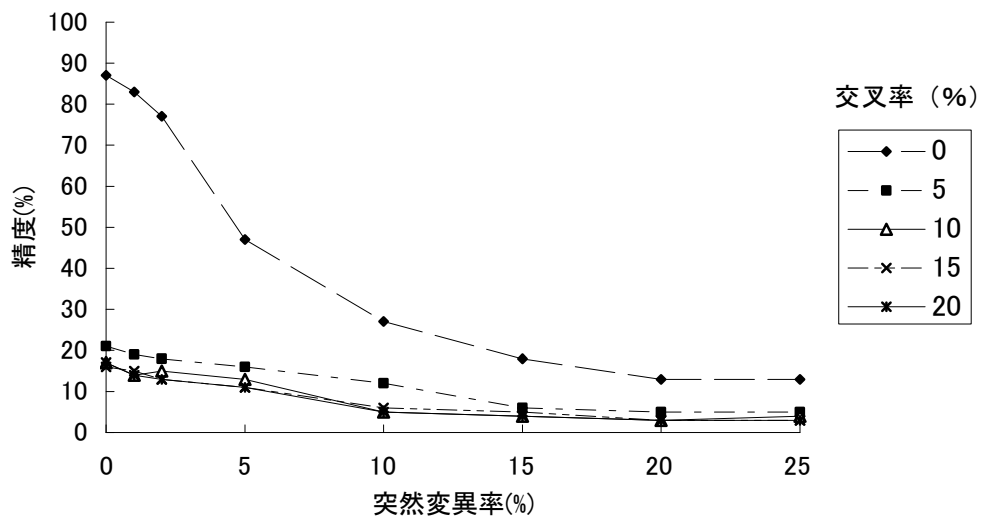


図 4.9 時間制約優先型 GA の突然変異率と交差率

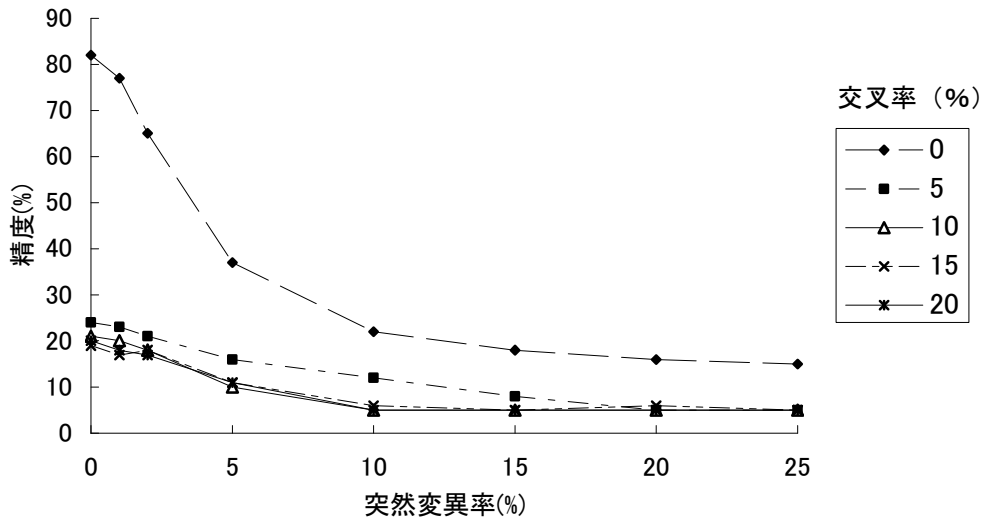


図 4.10 積載率制約優先型 GA の突然変異率と交叉率

(3) 実行世代数

図 4.11 に時間制約優先型 GA と積載量制約優先型 GA で、それぞれ時間制約の厳しい問題(R101)と、弱い問題(R107)を解いた場合の収束状況を示す。交叉率は 20%、突然変異率は 10%、積載量制約優先型 GA での時間制約違反の修復世代間隔は 10 世代とした。時間制約優先型 GA の実行世代数が 400 世代以下では、最適解と比較して 2%を超える誤差があり、500 世代で収束している。また、時間制約の弱い問題では、積載量制約優先型 GA の実行世代数が 300 世代以下では 7%を超える誤差があり、400 世代で収束している。

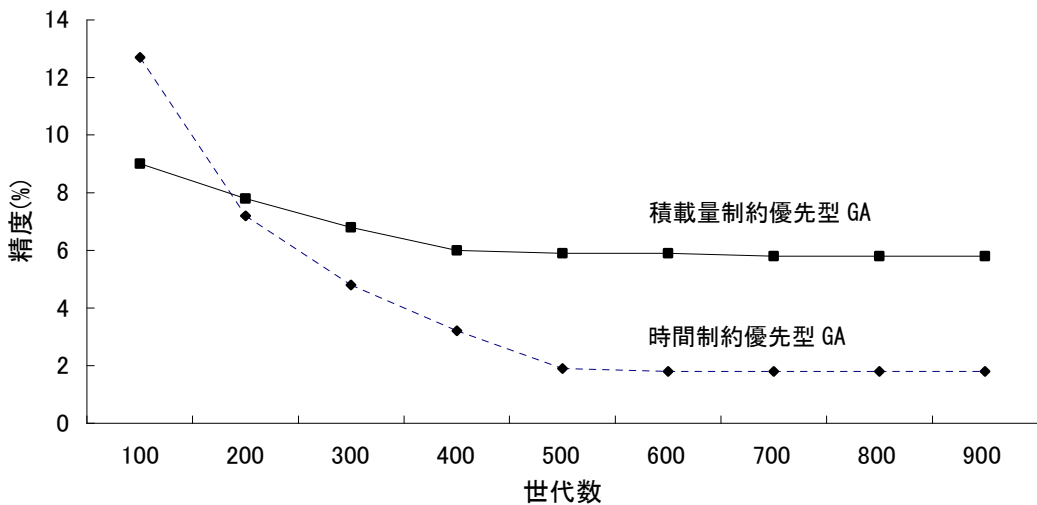


図 4.11 2 種類の GA の実行世代数と精度

ところで、対象としている共同物流網では最終的には 20 程度のデポの利用を想定している。また、一つのデポの担当する部品サプライヤ数としては 100 程度を想定している。このため、一つのデポの配送計画作成を 1 分程度で行えないと、目標とする応答性能を得られない。配送先の数が 100 のベンチマーク問題で実験した結果では 1 分内に計算可能な世代数は 1,000 世代であった。この 1,000 世代を上記の収束状況から、時間制約優先型 GA と積載量制約優先型 GA それぞれに 500 世代ずつ割り当てることで、目的とする応答性能と精度を実現する。以下、これをマルチステージ法と呼ぶ。

4.4.2 ベンチマーク問題による精度の比較

つぎの四つの解法で時間制約の厳しいベンチマーク問題 2 問(R101, R102)と、弱い問題 2 問(R107, R108)を解き、ベンチマーク問題の最適解との誤差を評価した。

(1) 時間制約優先法

これは時間制約優先型 GA だけを 1,000 世代実行するものである。

(2) 積載量制約優先法

これは積載量制約優先型 GA だけを 1,000 世代実行するものである。

(3) 混合法

これは時間制約優先型 GA と積載量制約優先型 GA の突然変異と交叉を等確率で行う GA を 1,000 世代実行するものである。時間制約違反の修復は毎世代行う。

(4) マルチステージ法

これは時間制約優先型 GA と積載量制約優先型 GA を各 500 世代実行し、良好な解を選択する。時間制約違反の充足は 10 世代毎に行う。

表 4.1 に各解法の精度を示す。時間制約が強い場合には、時間制約優先法では平均誤差は 2%以内に納まり、最大誤差も 2.4%である。しかし、時間制約が弱い場合には、平均誤差が 9%にも達している。これに対して、積載量制約優先法は時間制約が厳しい場合には、平均誤差が 10%を超えている。しかし、時間制約が緩い場合には平均誤差は 5.5%に納まっている。上記二つの解法を単純に組み合わせた混合法の解は、時間制約が強い場合には、積載量制約優先法よりは良いが、時間制約優先法よりも 2%近く誤差が大きい。逆に、時間制約が弱い場合には、時間制約優先法よりは良いが、積載量制約優先法よりも誤差が大きい。これに対して、時間制約優先型 GA と積載量制約優先型 GA を組み合わせたマルチス

表 4.1 ベンチマーク問題での精度検証

問題 手法	強時間制約		弱時間制約	
	R101	R102	R107	R108
時間制約優先型	1.9%	1.8%	8.9%	9.1%
積載量制約優先型	12.7%	13.5%	4.9%	5.5%
混合法	3.7%	3.5%	6.1%	7.2%
マルチステージ法	1.9%	1.8%	5.3%	6.0%

ステージ法では、時間制約が厳しい場合でも緩い場合でも平均誤差は 6.0%内に納まっている。

4.5 共同物流網の配送計画問題への適用

提案解法で作成した配送計画が、対象としている共同物流網で安定して運用できるか否かを評価するために、部品サプライヤからの毎日の出荷量が平均出荷量に対して、以下の 3 通りの幅で変動する場合の評価を行った。配送先の配置と平均出荷量はベンチマーク問題 (R102) のものを用いている。各ケースとも、毎日の荷量は変動幅内で一様に分布している。

(a) 変動幅 25%

これは、部品サプライヤからの出荷量が安定していて、平均輸送量に対して、日輸送量が上下それぞれに 25%変動するケースである。

(b) 変動幅 50%

これは、対象としている共同物流網で、よく生じる日輸送量が上下それぞれに 50%まで変動するケースである。

(c) 変動幅 100%

工場での生産周期に合わせて、数日に一度、まとめて輸送を行い、それ以外の輸送量は 0 になるなど、変動幅が 100%に及ぶケースである。

この 3 ケースについて、100 サプライヤからデポへの配送計画を以下の 5 通りの手法で作成し、それぞれの解のコストと共に、車両不足による備車の必要台数を評価した。

(1) 平均荷量スケジュール法

各部品サプライヤの1週間の日出荷量の平均を用いて配送計画を作成する。

(2) 平均+20%荷量スケジュール法

各部品サプライヤの1週間での日出荷量の平均よりも20%多い荷量を用いて配送計画を作成する。

(3) 最大荷量スケジュール法

各部品サプライヤの日出荷量の最大量を用いて配送計画を作成する。

(4) 最適解スケジュール法

ベンチマーク問題の最適解を配送計画として用いた場合に必要な備車台数を求めコストを評価したものである。

(5) 提案解法

これは、4.3節で提案した解法であり、交叉や突然変異での車両ルートの再構成時には、平均荷量を用い、個体の適応度の算出には備車台数を含めた総コストを用いる。

表 4.2 に荷量変動幅が 25%, 50%, 100% の場合の、各解法でのスケジュール結果の総コスト、および、通常輸送に用いる車両数と、臨時の備車台数を示し、この結果のグラフを図 4.12 に示す。最大荷量スケジュール法では、当然車両の不足は発生しないが、どの荷量の変動幅の場合にも総コストが最も大きくなっている。変動幅が 25% の場合には、平均荷量でスケジュールした場合よりも、通常運行する車両台数が 14 台多く、総コストも 3.1% 大きいだけであるが、変動幅が 100% の場合には、提案解法と比較して通常運行する車両台数は 119 台多く、総コストも 12% 以上高くなってしまっている。最適解スケジュール法は、変動幅が 25% と小さい場合には、平均荷量スケジュール方と比べて、備車台数は 3 台多いが、通常運行する車両は 7 台少なく、総コストは 3% 少ない。しかし、変動幅が 50% の場合には、必要な備車台数が 23 台と、提案解法に比較して 13 台多くなってしまう。さらに、変動幅が 100% と大きい場合には備車が 49 台必要となり、提案解法と比較して総コストが 6% 大きくなってしまっている。

これに対して、毎日の荷量変動を、GA の個体の適応度算出に繰り返し込んでいる提案解法では、変動幅が 25% と小さい場合には、平均荷量でスケジュールした場合と比べて総コストは 0.6% 大きく、最適解を用いた場合よりも 3.1% 大きい。しかし、変動幅が 50% の場合には、最適解を用いた場合に比べても総コストは少ない。また、平均荷量でのスケジュールよりも 3.9% 総コストは低く、平均+20% 荷量でスケジュールした場合と同等のコストを実現している。さらに、変動幅が 100% の場合には、他の方式に比べて 6% 以上コストは低

くなっている。現実の物流費用としても、備車は一日あたり 10 万円程度の費用が生じるので、変動幅が 100%の場合には、平均+20%荷量に比べて提案解法の結果は、1 週間で 100 万円程度の費用削減効果があることを示している。図 4.12 に示すように、提案解法は荷量の変動幅が少ない場合にも、他の解法と同等の解を実現している。さらに荷量の変動幅が大きい場合には、提案解法は他の解法よりも良好な解を求められている。

表 4.2 荷量変動時の安定性評価

(a) 荷量変動幅 25%

手法	総コスト	通常便数	備車台数
平均荷量スケジュール法	15,829	133	3
平均+20%荷量スケジュール法	15,852	147	1
最大荷量スケジュール法	16,317	147	0
最適解スケジュール法	15,478	126	6
提案解法	15,975	133	4

(b) 荷量変動幅 50%時の安定性評価

手法	総コスト	通常便数	備車台数
平均荷量スケジュール法	20,494	133	18
平均+20%荷量スケジュール法	19,718	147	10
最大荷量スケジュール法	21,756	196	0
最適解スケジュール法	19,878	126	23
提案解法	19,721	147	10

(c) 荷量変動幅 100%時の安定性評価

手法	総コスト	通常便数	備車台数
平均荷量スケジュール法	28,269	133	43
平均+20%荷量スケジュール法	27,861	147	37
最大荷量スケジュール法	31,859	287	0
最適解スケジュール法	27,912	126	49
提案解法	26,160	168	23

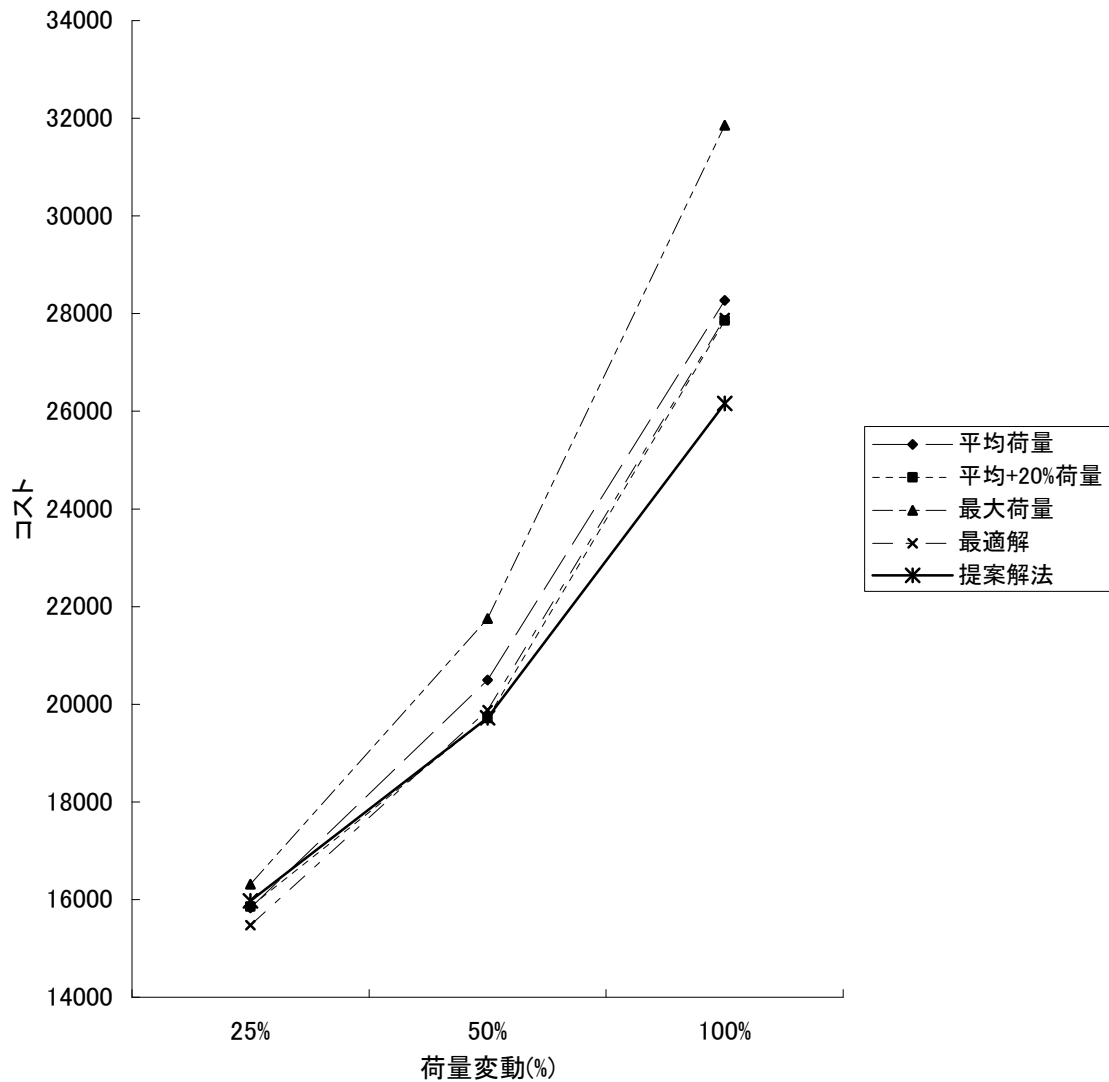


図 4.12 荷量変動時の安定性

4.6 結言

本章では、共同物流網におけるデポ配送計画作成への適用を目的とした GA を用いた VRP の解法を提案した。人間による多面的な評価・調整を実現するための対話的応答性能と、時間制約の強弱に関わらず安定した専門家レベルの精度の確保を両立するために、マルチステージ GA を提案した。さらに、共同物流網での通常車両と備車を併用した運用に対応するために、GA の個体評価に平均荷量だけでなく、変動する日々荷量の影響を遺伝子の適応度算出に組み込んだ。

実験による評価では、提案解法は安定した運用を実現する解を算出している。また、専

門家レベルの精度を実現すると共に、共同物流網に含まれる複数のデポの配送計画の作成と、その評価を1時間に2,3回行える性能を実現している。これにより、共同物流網構築におけるスケジューリングフェーズへの適用と、運用時の計画作成への適用が可能である。提案手法は日立ソフトウェアエンジニアリング（株）において開発した戦略的物流シミュレーションシステムに活用されている。

共同物流への参加企業は今後増大し、一つのデポの担当する部品サプライヤの数とデポ数がさらに増加する見通しである。このため、さらに計算効率を上げ、より大規模な問題への対応は、今後の課題として残されている。また、提案手法は、ヒューリスティクスに基づく近似解法を利用している。近似解法を実用に用いるに当たっては、精度や応答性能の安定性が求められ、実際の共同物流網のデータを用いた検証は必須である。しかし、物流網の拡大に伴い、検証の必要な配送先の配置パターンも増加し、その検証負荷の軽減が求められている。

第 5 章

利己的制約充足型 GA による幹線輸送計画の作成手法

5.1 緒言

本章では，共同物流網中における幹線輸送計画作成の課題を明らかにし，その定式化と解法の構築という課題に取り組む[90][91][92][93]．

デポや工場間を結ぶ幹線輸送は大型車両による長距離輸送であり，効率化できれば大きなコスト削減効果が期待できる．しかし，2.4.3 項で説明したように，幹線輸送には多数の時間制約が課される共に，1 台の車両で，部品の集荷と配送を同時に行うなど複雑な運用が行われている．このような幹線輸送網の計画作成手法としては，マルチデポの VRP をベースとした解法[51][77]や，多品種流の最小費用流問題を元にした解法[20][47]が提案されているが，精度と応答性の両立は困難な課題である．

本章では，複雑な構造を持ち，多数の制約条件が課されている幹線輸送網の計画作成で効率的に解の探索を行うために，各遺伝子が他の遺伝子の制約違反を無視して，利己的に制約充足を行う利己的制約充足と，一定世代毎に制約違反の修復を行う利己的制約充足型 GA を提案する．さらに，一つの車両で巡回不可能な拠点の組合せをあらかじめ求め，GA の実行時の制約チェックを効率化する制約条件の事前チェックを導入する．これにより，精度と応答性能の両立を図る．

まず 5.2 節において幹線輸送の特徴と，その輸送計画作成上の技術的課題を明らかにする．5.3 節において GA を用いた幹線輸送の計画作成手法のコンセプトと実現方式を明らかにする．5.4 節で VRP のベンチマーク問題を用いた解法のパラメータ決定を行い，その実験結果を示し，5.5 節で幹線輸送計画問題での実験と評価を示す．

5.2 幹線輸送計画作成問題

5.2.1 幹線輸送計画作成問題の特徴と技術的課題

幹線輸送網は、2章で示したように、大型車両による広域・長距離の輸送を行うが、工場の生産計画との同期や、デポ配送網との連絡が必要なため、多くの時間制約が課されている。また、複数のデポを有する複雑なネットワークとなっている。1台の車両はデポを出発後、いくつかの工場とデポを巡回して、荷積みと、荷下ろしを繰り返して元のデポに戻る。デポ配送網では、図 5.1(a)に示すように、部品サプライヤからデポへの一方向の輸送であったが、幹線輸送網では、図 5.1(b)に示すように、デポで積載した荷物が工場に運ばれると共に、工場で車両に積載された荷物がデポに運ばれる双方向の輸送が行われる。また、荷物 4 のように車両の巡回途中の工場間での、デポを経由しない直接の輸送も行われるなど、デポ配送網に比較して複雑な運用が行われている。

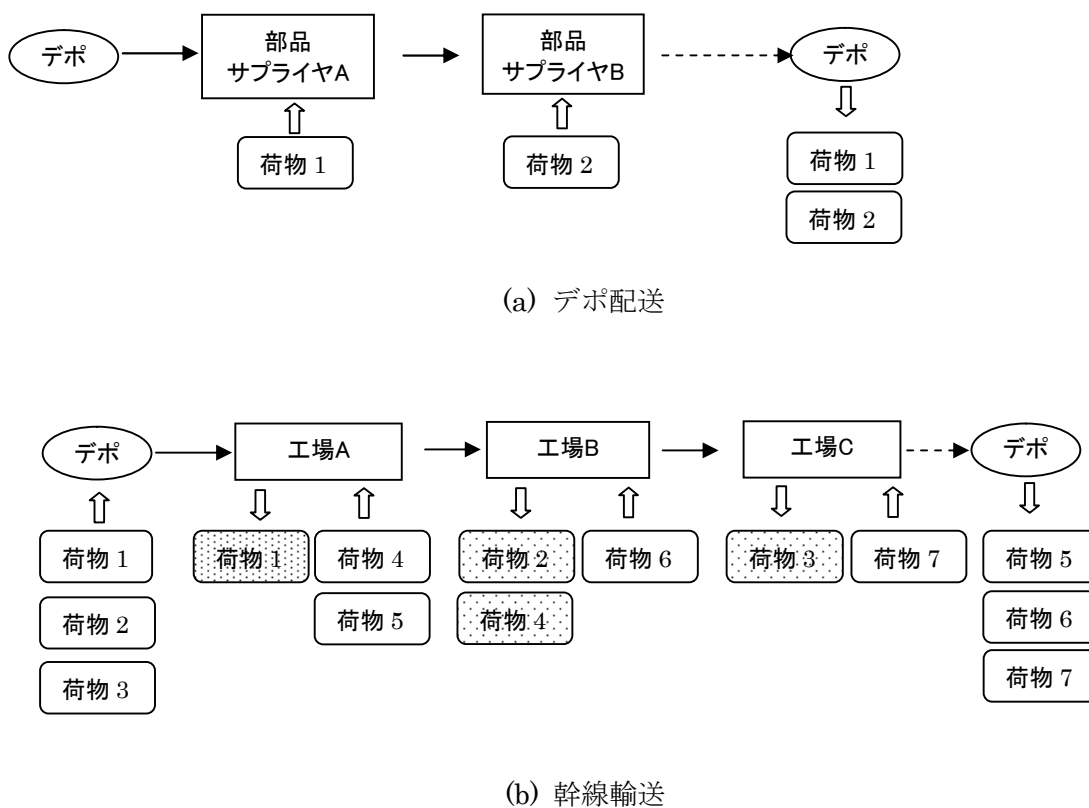


図 5.1 デポ配送と幹線輸送

幹線輸送計画の作成では、車両の巡回する拠点毎で、時間制約だけでなく積載量制約の充足を図る必要がある。このため、単純にマルチデポの VRP 問題の解法を適用しても、実行可能解の生成が困難なため、人間の専門家レベルの精度を得られないという問題がある。また、整数計画法によるモデルを幹線輸送に適用しても、共同物流網構築に必要な対話的な応答性能が得られないという課題がある。共同物流網の構築と運用のためには、この二つの課題を解決する幹線輸送計画の作成手法が求められる。

5.2.2 幹線輸送計画問題の定式化

複数の車両により複数の配送先への輸送を行い、デポを経由しない直接輸送を含む集荷配送混在型の幹線輸送計画問題を以下のように定式化する。

(1) 車両

幹線輸送は、すべて同一の積載量の車両で行われる。この車両の最大積載量は Q とし、その車両 M 台で輸送を行う。

(2) 荷物

$\{L_i\}_{i=1..N}$ で輸送する荷物を表す。

(3) 荷積み荷下ろし作業

$\{w_1, \dots, w_N, w_{N+1}, \dots, w_{2N}\}$ で荷物の荷積み作業と荷下ろし作業を表す。ただし、 w_{2i-1} は荷物 L_i の荷積み作業、 w_{2i} は荷物 L_i の荷下ろし作業を表す。

(4) 荷量

荷積み・荷下ろし作業 w_i で荷積みもしくは荷下ろしする荷物量を Q_i で表す。ただし、荷積み作業での荷量は正、荷下ろし作業の荷量は負の値とする。つまり式(5.1)が成り立つ。

$$Q_{2i} = -Q_{2i-1}, \quad Q_{2i-1} > 0, \quad Q_{2i} < 0 \quad (5.1)$$

(5) 輸送拠点

$\{P_i\}_{i=1..P}$ でデポと工場からなる輸送拠点の集合を表す。また、荷積み、もしくは、荷下

ろし作業 w_i を行う輸送拠点を $Pl(w_i)$ と表す.

(6) 時間枠

荷積み・荷下ろしの作業 w_i には, $[e_i, l_i]$ という時間枠が与えられている. 作業 w_i が割り当てられた車両は拠点 $Pl(w_i)$ に遅くとも時間 l_i までに到着しなければならない. また, 車両は時間 e_i よりも早く到着しても, e_i まで荷積みや荷下ろしの作業開始を待たなければならない.

(7) 拠点保有車両台数

輸送拠点 P_i は M_i 台の車両を保有し, 総車両台数は式(5.2)のように M 台である.

$$\sum_{i=1}^P M_i = M \quad (5.2)$$

(8) 車両ルート

車両は一つのデポを出発して, いくつかの輸送拠点 (工場とデポ) を巡回して, 荷積み・荷下ろし作業を行い, 出発したデポに戻る. つまり, 1 台の車両ルートは, 式(5.3)のように, その車両が行う次の荷積みと荷下ろしの作業の列で表される.

$$W_i = \langle w_{i_1}, w_{i_2}, \dots, w_{i_n} \rangle \quad (5.3)$$

ただし, $Pl(w_{i_1}) = Pl(w_{i_n})$, また, n はこの車両に割り当てられている荷積みと荷下ろし作業の総数である.

(9) 走行時間

$t(P_i, P_j)$ で車両が拠点 P_i と P_j の移動に要する時間を表す. このとき, 車両の走行時間 $tm(W_i)$ は式(5.4)で表される.

$$tm(W_i) = \sum_{j=1}^{n-1} t(Pl(w_{i_j}), Pl(w_{i_{j+1}})) + t(Pl(w_{i_n}), Pl(w_{i_1})) \quad (5.4)$$

(10) 輸送計画

輸送計画 ω は、式(5.5)に示すように車両ルートの集合であり、式(5.6)、(5.7)の制約条件を満足する.

$$\omega = \{W_1, W_2, \dots, W_m\} \quad (5.5)$$

$$\bigcup_{i=1}^m Wrk(W_i) = WORK \quad (5.6)$$

$$Wrk(W_i) \cap Wrk(W_j) = \emptyset \quad (i \neq j) \quad (5.7)$$

ただし、 $Wrk(W_i)$ は車両ルート W_i に含まれる荷積み荷下ろし作業の集合を表し、 $WORK$ は荷積み荷下ろし作業全体の集合を表す. 式(5.6)と式(5.7)は、すべての荷積み・荷下ろし作業は、かならず一つの車両ルートにだけ割り当てられなければならないことを示している. さらに、 ω に含まれている W_i は以下の(a)から(e)の制約を満足しなければならない.

(a) 車両台数制約

各デポを始発とする車両台数は、デポの保有する車両台数 M_i を超えてはならない.

(b) 時間制約

作業 w_i の割り当てられた車両ルートを W_j とするとき、その車両の $Pl(w_i)$ への到着時刻を a_i^j と表記する. この時、到着時間は式(5.8)に示すように、 l_i を超えてはならない. また、 e_i より早くてもいけない.

$$e_i \leq a_i^j \leq l_i \quad (5.8)$$

(c) 車両走行時間制約

一つの車両ルートの走行に要する時間は式(5.9)に示すように、一定時間 $Tmax$ 以内でなければならない.

$$tm(W_i) < Tmax \quad (5.9)$$

(d) 集荷配送順序制約

一つの荷物の荷積みと荷下ろし作業は、同一の車両に、この順序で割り当てられていなければならない。つまり、式(5.10)の制約条件が充足される必要がある。

$$w_{2j-1} \in W_i \rightarrow w_{2j} \in \text{after}(W_i, w_{2j-1}) \quad (5.10)$$

ただし、 $\text{after}(W_i, w_k)$ で車両ルート W_i 中の w_k 以降の列を表す。

(e) 積載量制約

車両はデポを出発して輸送拠点を巡回して、荷積みと荷下ろしを繰り返す。この巡回の途中で車両の積載量は常に 0 以上 Q 以下でなければならない。つまり、車両ルート i 中のどの荷積み荷下ろし作業を行った時点でも式(5.11)の積載量制約を充足しなければならない。

$$0 \leq \sum_{k=1}^j Q_k \leq Q \quad (1 \leq j \leq n) \quad (5.11)$$

ただし、 n は車両ルート i に割り当てられた荷積み・荷下ろし作業の総数である。

(11) 評価

配送計画の評価は、車両の総走行時間（距離）で行われることが多い。しかし、実際の運用においては、車両の走行時間（距離）の増大よりも、車両台数の増加がコスト増加の最大の要因である。このため、ここでは総走行時間だけでなく、使用車両台数も含めたコスト評価を行う。ここで、 α で車両一台あたりの固定費を表し、 $c(P_i, P_j)$ で集配送先 P_i と P_j 間を車両が移動するのに要するコストを表す。このとき、1台の車両が、ルート W_i を運行するのに必要なコスト $tc(W_i)$ は式(5.12)で表現される。

$$tc(W_i) = \alpha + \sum_{j=1}^n c(Pl(w_{i_j}), Pl(w_{i_{j+1}})) + c(Pl(w_{i_n}), Pl(w_{i_1})) \quad (5.12)$$

したがって、輸送計画 ω の運行に要する総コスト $tc(\omega)$ は式(5.13)となる。

$$tc(\omega) = \sum_{i=1}^m tc(W_i) \quad (5.13)$$

5.3 利己的制約充足型 GA を用いた幹線輸送計画作成手法

5.3.1 幹線輸送計画問題解法のコンセプト

複雑な構造を持ち、制約条件が厳しい幹線輸送計画作成に、近傍探索を基にした解法を適用しても、実行可能解の生成が困難なため、短時間で解の収束を実現することが困難である。このため、図 5.2 に概要を示す利己的制約充足型 GA による解法を提案する。この解法は利己的制約充足、制約事前チェック、制約違反修復の三つのアイデアからなっている。この手法の詳細を以下説明する。

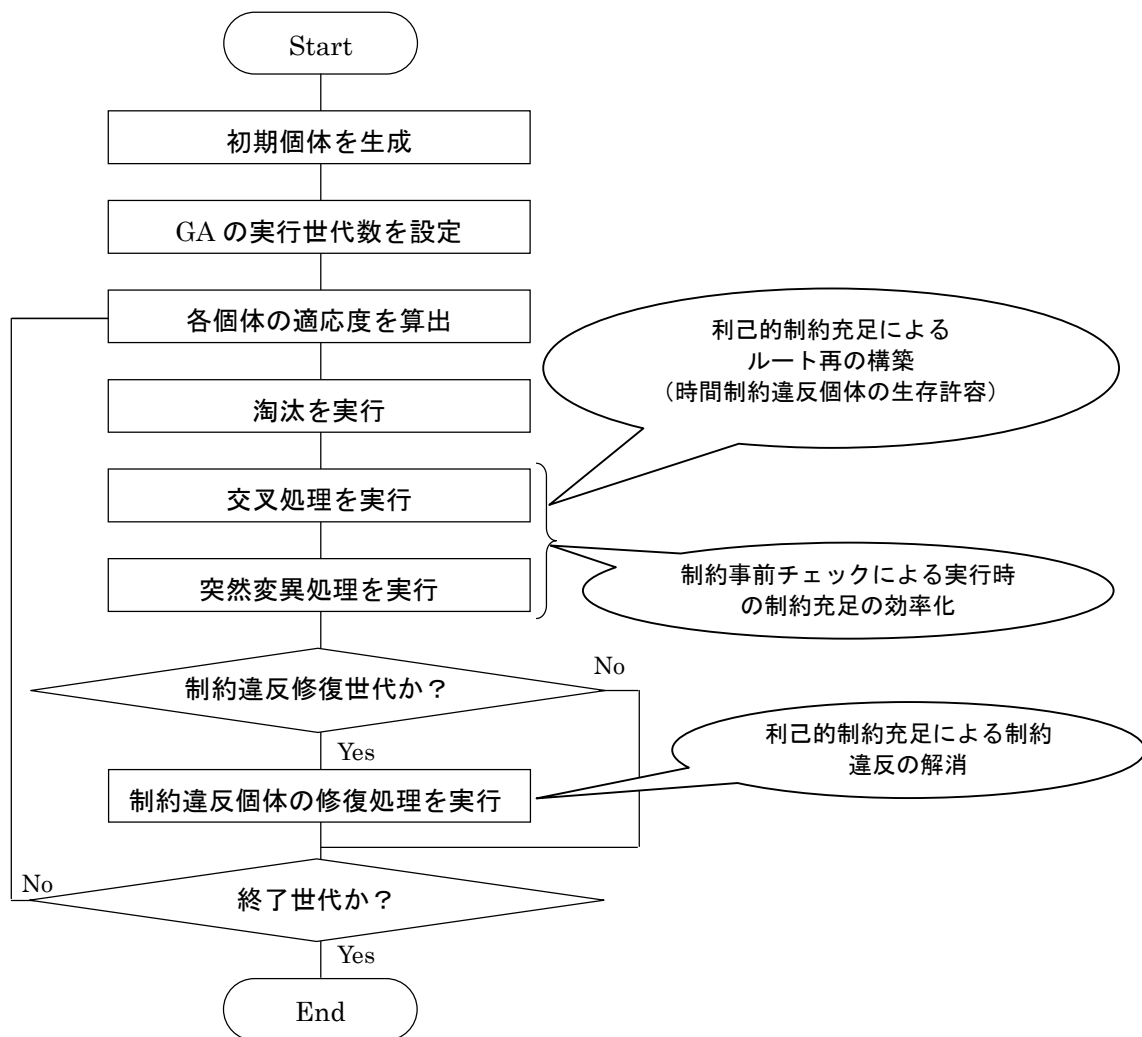
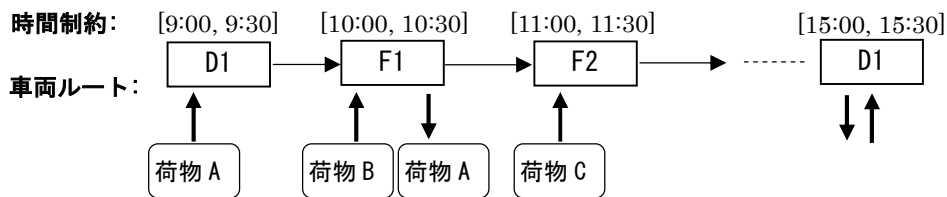


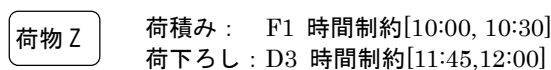
図 5.2 利己的制約充足型 GA による幹線輸送計画の作成

5.3.2 利己的制約充足

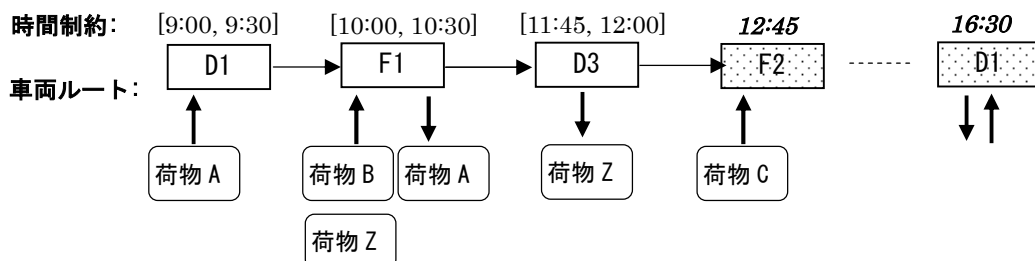
幹線輸送計画問題は、通常のデポを中心とした配送計画問題に比較して、制約条件が多く、その充足が困難な問題である。制約条件が多いため、Cross-Opt のような部分ルート
の交換による最適化を適用しようとしても、制約をすべて充足した実行可能解の生成は困難である。また、NI 法などの挿入法によるルート構築を交叉や突然変異に利用した GA を適用するにしても、単純にすべての制約条件を充足しようとする、制約充足のために計算時間を要すると共に、集団の多様性が失われローカルミニマムに陥る危険性が増大する。このため、制約違反した個体の生存も許容する利己的制約充足型 GA を提案する。具体的には、幹線物流網構築の GA による解法として、各遺伝子は、その遺伝子に直接関連する時間制約の充足だけを優先し、他の遺伝子の時間制約まで大域的に充足することはしない。図 5.3 の例は、すべての制約が充足されている車両ルートへの、新たな荷物 Z の追加を示している。



(a) 挿入前ルート



(b) 挿入荷積み・荷下ろし作業



(c) 挿入後ルート

図 5.3 利己的制約充足

図 5.3(a)の車両ルートに、図 5.3(b)の荷物 Z の荷積み・荷下ろし作業を追加すると、荷物 Z に関する制約条件、つまり、拠点 F1 と D3 での時間制約だけ優先して充足される。この挿入の影響により、図 5.3(c)に示す様に車両ルート後方の拠点 F2 と D1 での荷積み、荷下ろし作業の時間制約は充足されなくなってしまう。

そして、このような制約違反の個体の生存を許容するが、世代毎に各構成遺伝子の構成順序が変わることなどにより、世代が代わると大域的な制約違反を犯していた個体にも制約充足の機会が与えられる。また、特定の世代で個体中の制約違反の修復を行う。こうして、各構成遺伝子の利己性を認め、つまり局所的な制約充足だけを図り、特別な世代以外は大域的な制約充足を行わないことで、GA 処理の高速化を図り、集団の多様性を維持する。これにより、より最適かつ大域的に制約を満足させる可能性を高め、高い最適性と応答性能の両立を図るものである。

5.3.3 制約事前チェック

GA でローカルミニマムを回避し、最適性の高い解を得るためには、十分な個体数と世代数の計算が必須である。しかし、幹線輸送問題を表現するためには比較的長い染色体が必要であり、そのため GA の交差や突然変異に要する計算時間が長くなってしまう。さらに、多数の複雑な制約条件のチェックを GA に計算時に行うために、人間の専門家が必要とする応答性能を実現できない。この問題を解決するために、制約事前チェック法を提案する。

これは、幹線輸送計画に課せられている制約条件をあらかじめ解析し、一つの車両ルート上に混載可能な荷物の組み合わせを制限し、交叉や突然変異での車両ルートの再構築の計算効率を向上させる。つまり、図 5.4 に示すように、時間制約や、荷量制約や拠点の地理的位置を調べ、同一車両では巡回できない拠点をあらかじめ求める。つまり、デポ D1 と D3 の間に、工場 F2 には立ち寄ることができるので、排他ノードテーブル Xnode の対応するエントリに True を設定する。逆に、デポ D1 と D3 の間に工場 F3 は立ち寄れないので False を設定する。一般の配送計画問題では、あらかじめ地理的な条件により排除できる組み合わせは少ないが、本問題では拠点が全国に分散しているため、一台の車両で巡回できる組み合わせは限定できる。本手法により GA 実行時の計算時間が短縮を図り、応答性を向上させる。

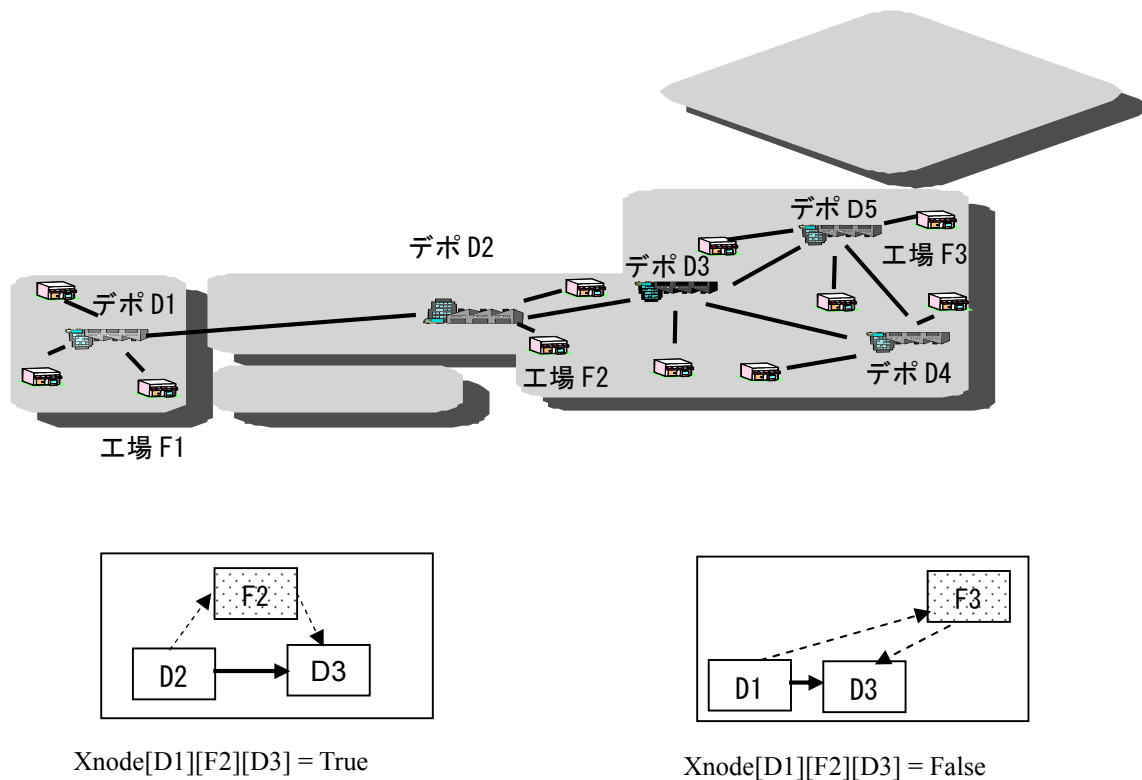


図 5.4 地理的条件によるルートへの制約

5.3.4 制約違反のペナルティ化と修復

幹線輸送問題の主要な制約条件は、時間制約と車両の積載量制約の二つである。時間制約の違反が生じた場合、車両ルート前方から、順次、制約に違反している荷物の荷積みと荷下ろし作業を除去していくことで、その車両ルートの時間制約違反を取り除くことができる。これに対して、積載量制約の違反は、デポを経由しない車両ルートの途中の拠点間での直接輸送があるため、車両ルート中の各区間での荷量のチェックが必要である。このため時間制約違反ほど単純には違反の解消を行うことができない。このため、ここでは時間制約だけを利己的な制約充足の対象とする。

また、制約条件の利己的な充足だけを図り、時間制約違反を犯している個体の生存を無条件に許すと、当然、単に積載量制約だけが充足され、時間制約は守られなくなってしまう。このため、時間制約の充足を図るために、時間制約に違反している個体には、その時間制約に遅延した時間に応じたペナルティを個体の適応度に加味する。具体的には、遅延時間に相当するコスト評価にペナルティ率を掛けたものをコスト評価に加算する。

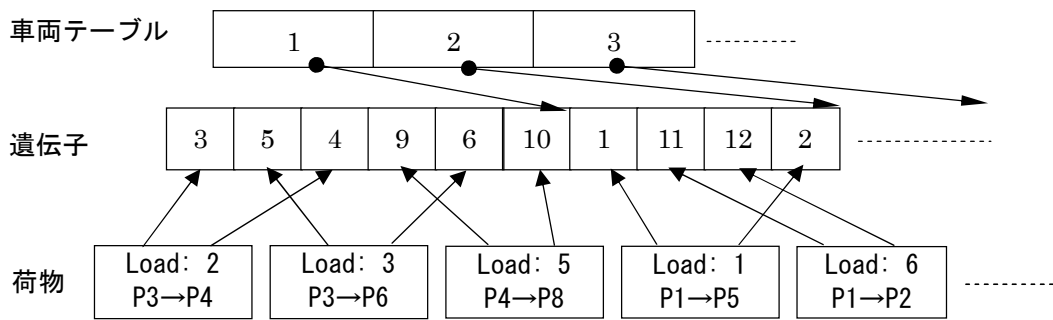
さらに、一定世代毎に時間制約違反を犯している個体の修復作業を行う。これは、制約違反のある車両ルート前方から、順次、時間制約に違反している荷積みと荷下ろし作業を除去して、制約の修復を図る。すべての車両ルートの時間制約の充足を図った後に、除去した荷物の荷積みと荷下ろし作業を、利己的でなく、大域的に時間制約を充足できる車両ルートに追加する。もし、制約を充足する既存車両ルートが無ければ、新しい車両ルートの追加を行う。

5.3.5 遺伝子の構造

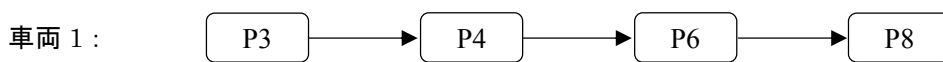
幹線輸送計画問題の解には、荷物の荷積みと荷下ろし作業をどの車両に割り当てるか、つまり、各車両の担当する荷積みと荷下ろし作業のクラスタリングと、クラスタ分けされた荷積みと荷下ろし作業を、各車両でどのような順序で行うのかという二つの情報が含まれていなければならない。表 5.1 に示す荷物を例にして、遺伝子の構造を説明する。荷物には出発拠点と到着拠点が登録されていると共に、5.2.2 項で説明したように荷積み・荷下ろし作業の ID も対応している。この例では、荷物 1 は、拠点 P1 から P5 に輸送され、その荷積み作業の ID は 1、荷下ろし作業の ID は 2 である。また、荷物 2 は拠点 P3 から P4 へ輸送され、荷積みと荷下ろし作業の ID は 3 と 4 である。遺伝子は、図 5.5(a) に示すように、荷積み作業と荷下ろし作業の ID のシーケンスである。また、一つの個体に、すべての荷積み・荷下ろし作業の ID が含まれ、車両毎の区切りは車両テーブルで管理される。図 5.5(a) の 1 台目の車両には荷物 2, 3, 5 が割り当てられ、それぞれの荷物に対応する荷積み作業の ID 3, 5, 9 と荷下ろし作業の ID 4, 6, 10 が遺伝子の 1 台目の車両部分に割り当てられている。荷物 2 は拠点 P3 から P4 に、荷物 3 は P5 から P6 に、荷物 5 は P4 から P8 に運ばれるので、図 5.5(a) の 1 台目の車両ルートは、図 5.5(b) のルートとなる。

表 5.1 荷物と荷積み作業・荷下ろし作業の対応

荷物	出発拠点	到着拠点	荷積み作業	荷下ろし作業
1	P1	P5	1	2
2	P3	P4	3	4
3	P3	P6	5	6
4	P5	P9	7	8
5	P4	P8	9	10
6	P1	P2	11	12



(a) 遺伝子表現



(b) 車両ルート

図 5.5 遺伝子表現と車両ルート

5.3.6 利己的制約充足型 GA のアルゴリズム

利己的制約充足型 GA は、大域的な制約充足は無視して局所的に制約充足を行うため、制約に違反した個体も集団中に発生する。このため、制約違反を犯している遺伝子の修復を一定世代間隔で行う必要がある。したがって、つぎに示すように、通常の淘汰、交叉、突然変異などの遺伝的操作に加えて、制約違反個体の修復処理を加えた GA の処理を実行する。

Step 1. 初期個体を発生させる。

Step 2. 実行世代数を設定する。

Step 3. 各個体の表す配送計画 σ に対して適応度を求める。

Step 4. 適応度が上位の個体を選択して次世代に残す。

Step 5. 交叉処理を行う。

Step 6. 突然変異処理を行う。

Step 7. 積載量制約優先型 GA の場合は、一定世代毎に個体の時間制約違反の修復を行う。

Step 8. 終了世代数に到達していれば終了する。

Step 9. Step 3 に戻る。

以下、この各ステップの詳細を説明する。

5.3.7 個体の適応度

個体の評価には、式(5.12)に示した総コスト $tc(\omega)$ を用いる。さらに、式(5.7)の時間制約に違反している個体にペナルティを加算する。到着時刻が l_i に遅れた場合、遅延時間に相当するコスト評価に、ペナルティ率を掛けた値を、個体のコスト評価に算入する。そして、このようにして求めた各個体のコストの逆数を GA での個体の適応度として用いる。

5.3.8 交叉

GA を用いて、幹線物流網の計画問題の解法を構築するため、利己的 NI 法と呼ぶ作業の遺伝子への挿入法を適用する。これは時間制約のある作業を輸送計画に挿入するときには、その挿入する作業の時間制約だけを満足する位置に NI 法で挿入する。つまり、この作業の挿入による輸送計画中の既存作業への影響は考慮しない。交叉は、図 5.6 に示す次の手順により二つの親個体から、一つの子個体を構築する。

- (1) 一方の親個体から、交叉点をランダムに選択する。
- (2) 交叉点より、前方にある作業列を子個体にコピーする。
- (3) 子個体に含まれていない作業だけを含む車両ルートがもう一方の親子対にあれば、その車両ルートの子個体にコピーする。

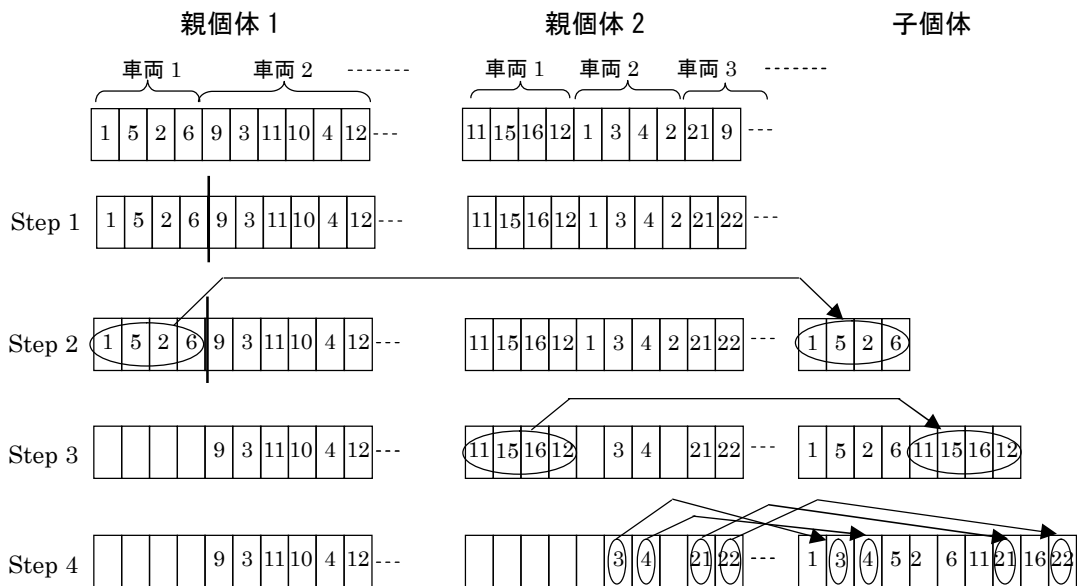
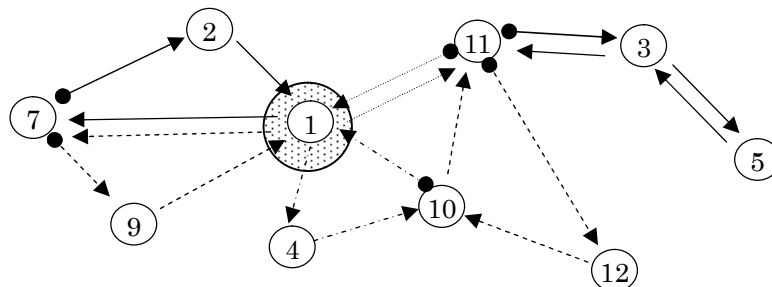


図 5.6 交叉

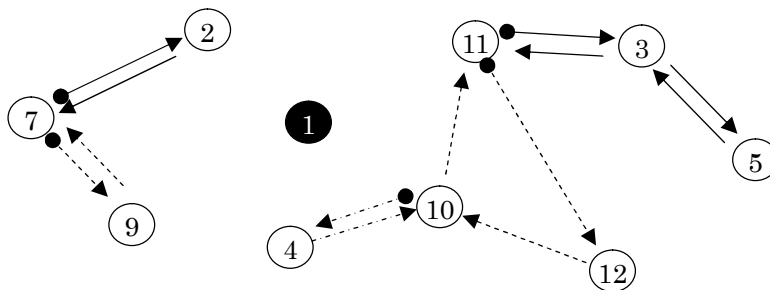
(4) 子個体に含まれていない，作業を利己的 NI 法により，子個体に挿入する．もし，既存の車両の中に，制約条件を充足できるものがない場合には新しい車両を割り当てる．

5.3.9 突然変異

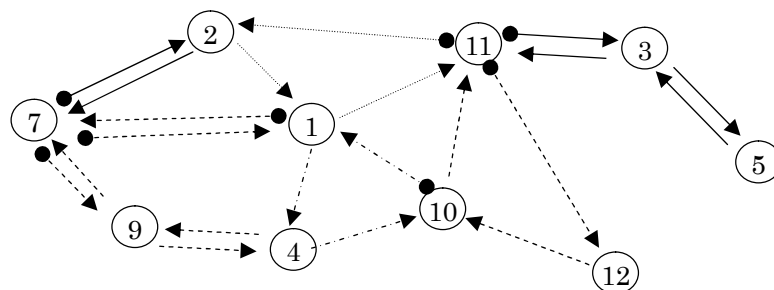
突然変異は，図 5.7 に示す手順で行う．まず，一つの拠点を選ばずランダムに選択する(図 5.7(a))．つぎに，その拠点での荷積みと荷下ろし作業を遺伝子から，一度すべて削除する(図 5.7(b))．そして，削除した荷積みと荷下ろし作業を，利己的 NI 法により再挿入する(図 5.7(c))．この削除と再挿入のプロセスは荷物単位で行う．つまり，荷物の荷積み作業か荷下ろし作業



(a) 拠点(デポまたは工場)の選択



(b) 荷積み・荷下ろし作業の削除



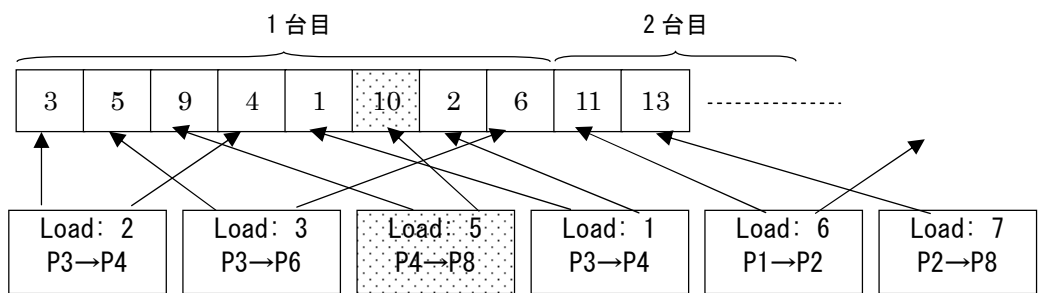
(c) 削除した作業の再挿入

図 5.7 突然変異

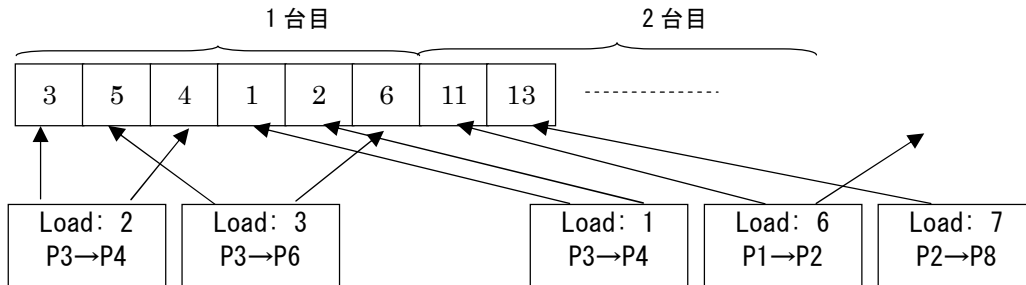
の一方を削除した場合には、対応する、もう一方の作業も削除する。対応する荷積みと荷下ろしは、常に1台の車両に割り当てる。

5.3.10 修復

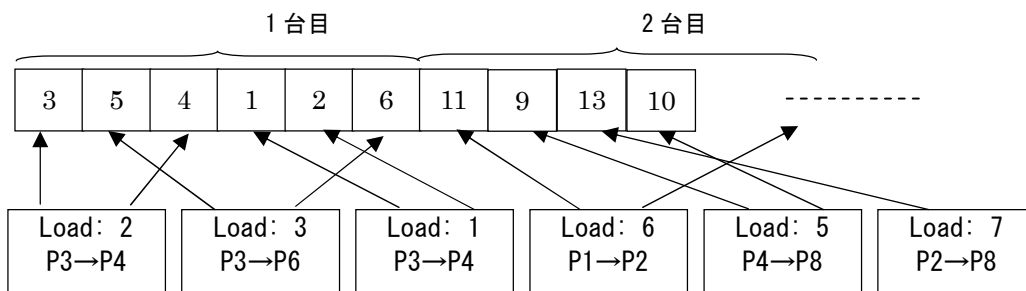
利己的制約充足により生じた時間制約違反のある個体の修復を、図 5.8 に示すように、つぎの2ステップで行う。



(a) 時間制約違反のある遺伝子



(b) 時間制約違反の荷積みに下ろし作業を除去した遺伝子



(c) 除去した荷積み荷下ろし作業の再挿入後の遺伝子

図 5.8 時間制約違反個体の修復

(1) 時間制約違反の荷物の除去

輸送計画中の、すべての車両ルートについて時間制約に違反している荷物があれば、その荷物を車両ルートから除去する。たとえば、図 5.8(a)の Load:5 の荷下ろし作業が、時間制約に違反していた場合、図 5.8(b)に示すように、Load:5 の荷積みと荷下ろし作業を遺伝子中から除去する。

(2) 除去荷物の再挿入

除去した荷物を、すべての制約を充足できる車両ルートに再挿入する。たとえば、図 5.8(c)に示すように Load:5 を 2 台目の車両に挿入する。もし、すべての制約が充足できる車両ルートがない場合には、新しい車両を追加して、制約の充足を図る。

5.4 ベンチマーク問題による実験

5.4.1 実験方法

上記提案解法を評価するために、まず、最適解が既に求められている時間制約付きの VRP ベンチマーク問題[99]を用いて、個体数や交叉率、突然変異率などの GA のパラメータと、時間制約違反に対するペナルティの値と、時間制約違反の個体の修復を行う世代間隔の最適な値を決定する。つぎに、このベンチマーク問題で、提案解法である利己的制約充足型 GA と、時間制約も含めてすべての制約条件を常に充足する大域的制約充足型 GA の精度を比較する。さらに、次節で幹線輸送計画問題での評価を行う。

ここで対象としている共同物流網では、幹線輸送網に属する工場とデポの数は最大で 100 を想定している。このため、時間制約違反のペナルティと制約違反の修復世代間隔を決定するために配送拠点数が 100 のベンチマーク問題を用いる。

(1) 実行世代数の決定

図 5.9 に個体数を 10 から 1000 まで変えた場合に、30 分以内で計算可能な世代数での計算結果と、ベンチマーク問題の最適解を比較した精度を示す。交叉率と突然変異率はそれぞれ 10%と 5%して計算している。個体数が 50 以下の場合には、最適解との差は 5%を超えている。また、個体数が 500 以上の場合にも誤差は 5%を超えている。個体数が 50 以下の場合には解集団の多様性が失われ、ローカルミニマムに陥っていると考えられる。また、個体数が 500 以上と多い場合には、30 分以内で計算可能な世代数が少なくなり、十分に収束していないと考えられる。この結果から、GA の個体数は 100 とする。

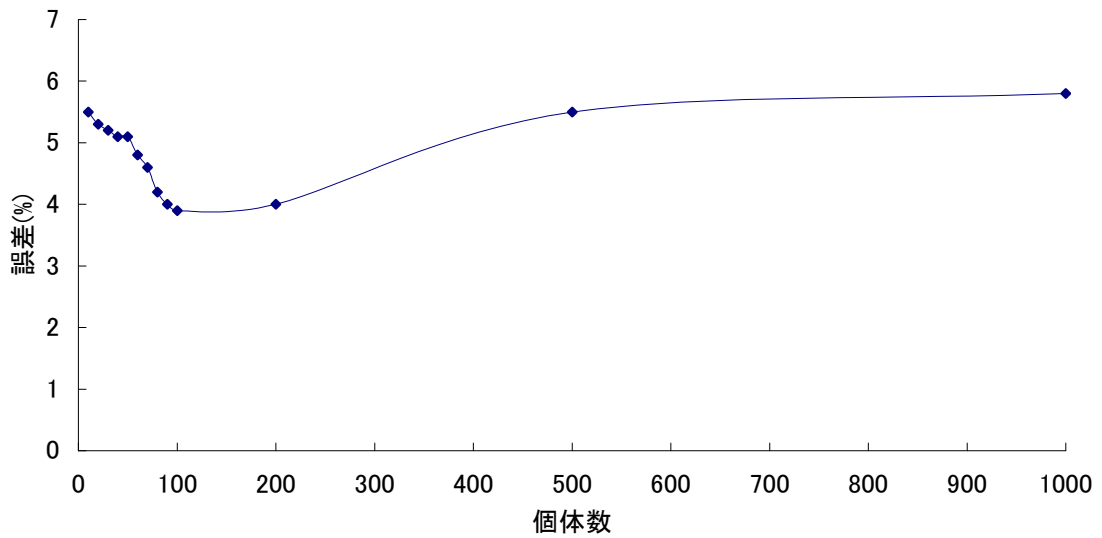


図 5.9 個体数と精度

(2) 交叉率と突然変異率の決定

図 5.10 に交叉率と突然変異率を、それぞれ 0% から 20% まで変えた場合の解の精度を示す。突然変異率と交叉率の組合せを変えて評価した結果、突然変異率を 5%、交叉率を 10% とした場合に最も精度が高くなった。突然変異率と交叉率を、これ以上大きくしても精度の変化は見られない。したがって、突然変異率は 5%、交叉率は 10% とする。

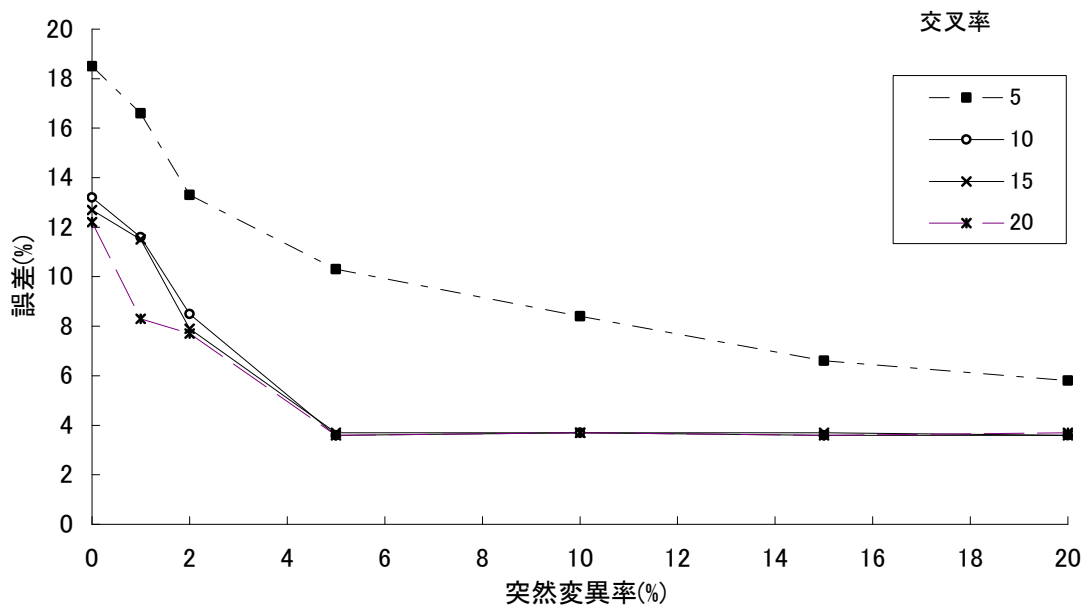


図 5.10 交叉と突然変異率

(3) 時間制約違反のペナルティ係数

図 5.11 に、拠点への最遅到着時間に遅れた場合に、その遅延時間に掛けるペナルティ係数の値を変えた場合の解の精度を示す。ペナルティを全く与えなかった場合には、精度は 10%を超えている。3 より大きな係数を与えると誤差は 5%以下に収まっている。5 から 10 の係数を指定した場合には、精度は 2.4%から 2.7%と、3%以下に収まっている。この結果から、ペナルティ係数は 5 とする。

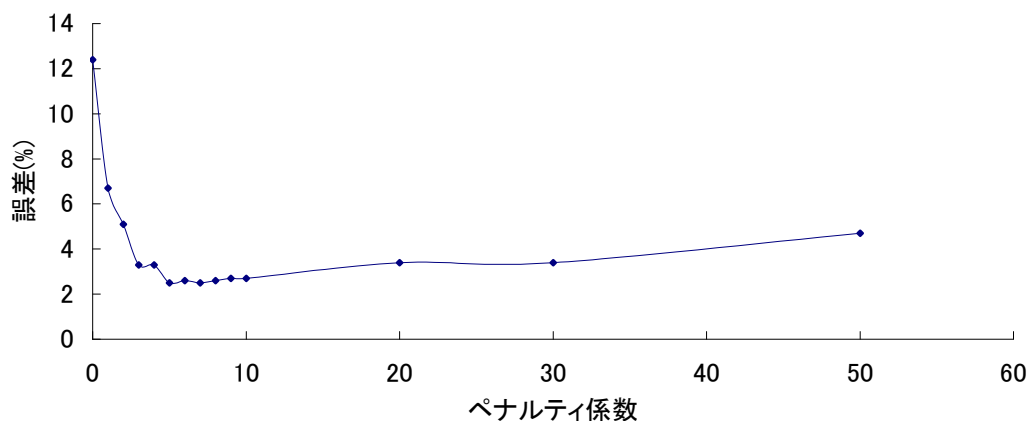


図 5.11 ペナルティ係数と精度

(4) 時間制約違反の修復間隔

図 5.12 に、修復間隔世代数を変えた場合の、解の精度の変化を示す。修復間隔が 2 世代以下の場合には、誤差は 3%を超える。精度は修復間隔が 5 世代から 10 世代のときに最小となり、それより広くなると誤差が 3%を超える。これにより、修復間隔は 10 世代とする。

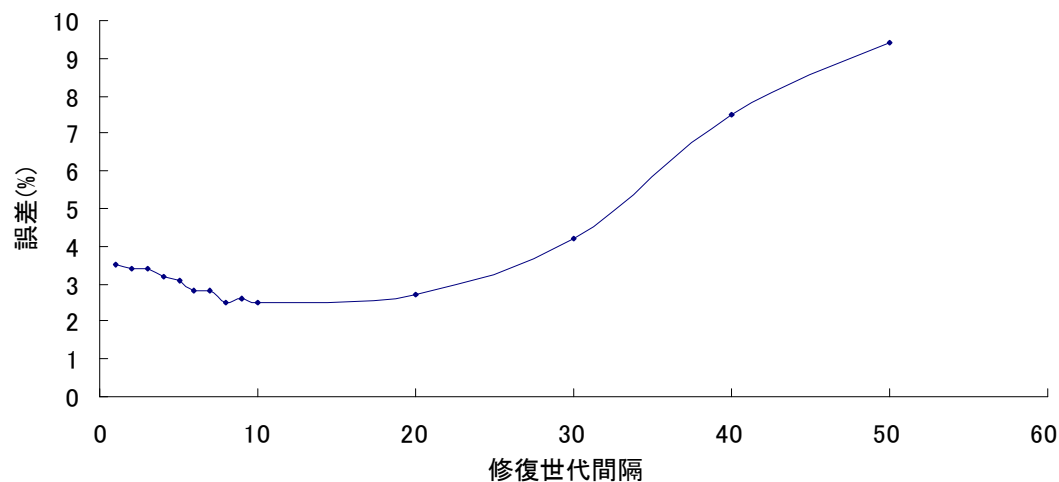


図 5.12 修復世代間隔と精度

5.4.2 ベンチマーク問題による精度の評価

提案解法を、最適解が与えられている時間制約付きの VRP ベンチマーク問題に適用して、精度の検証を行った。実験では、利己的制約充足型 GA と制約事前チェック法の効果を評価するために以下の 2 通りの手法でベンチマーク問題を解いている。

(1) 大域的制約充足型 GA

これは、すべての制約条件を充足した個体で、GA の個体集団を構成する手法である。

(2) 利己的制約充足型 GA

これは、3 章で提案した利己的制約充足型 GA を用いて、GA の個体集団を構成する解法である。

両手法で、解が収束している 1,000 世代計算を行った場合の解の精度を表 5.2 に示す。つぎに、ベンチマーク問題で設定されている各配送先の時間枠を 3 分の 1 に短縮した問題での、各解法の精度を表 5.3 に示す。ベンチマーク問題の場合には、両解法とも誤差は 5% 以下であるが、時間制約が厳しい場合には、提案解法は 2.7% の精度であるが、大域的な制約充足では誤差は 6% を超えている。

表 5.2 ベンチマーク問題での精度検証

方式	世代数	精度
大域的制約充足型 GA	1,000	4.8%
利己的制約充足型 GA	1,000	2.5%

表 5.3 強時間制約時の精度

方式	世代数	精度
大域的制約充足型 GA	1,000	6.7%
利己的制約充足型 GA	1,000	2.7%

5.4.3 応答性能の評価

1 台の車両のルートで巡回が不可能な拠点の組み合わせを、あらかじめ算出する制約事前チェックの効果を評価するために、先の強時間制約の問題で、事前チェックを行った場合と行わなかった場合の 5 分以内に計算可能な世代数を表 5.4 に示す。事前チェックを行うことで 820 から 1,045 と計算可能な世代数が 225 世代増大し、精度も 0.3%改善している。

表 5.4 制約条件事前チェックの効果

方式	世代数	精度
制約事前チェックなし	820	2.9%
制約事前チェックあり	1,045	2.6%

5.5 幹線物流網構築問題での実験と評価

提案解法の効果を、実際の幹線網構築と同じ条件で評価する。すなわち、集荷配送荷物が混在し、複数のデポが設置されている広域の幹線物流網で評価する。この評価用物流網は、工場 70 カ所と、車両を配置したデポ 30 カ所の合計 100 拠点から構成される。さらに、この物流網で輸送する荷物を 500 個設定し、それぞれの荷物に出荷拠点、納入先拠点、荷量と出荷・納入の時間枠を設定している。図 5.13 に、この問題での解の収束状況を示す。表 5.5 に、提案手法で 30 分以内に計算ができる 300 世代での計算結果を示す。提案解法は、大域的な制約充足を行う GA に比較して 10%コストの低い解を得られている。

表 5.5 幹線物流網構築時の精度

方式	コスト
大域的制約充足型 GA	13,512
利己的制約充足型 GA	12,132

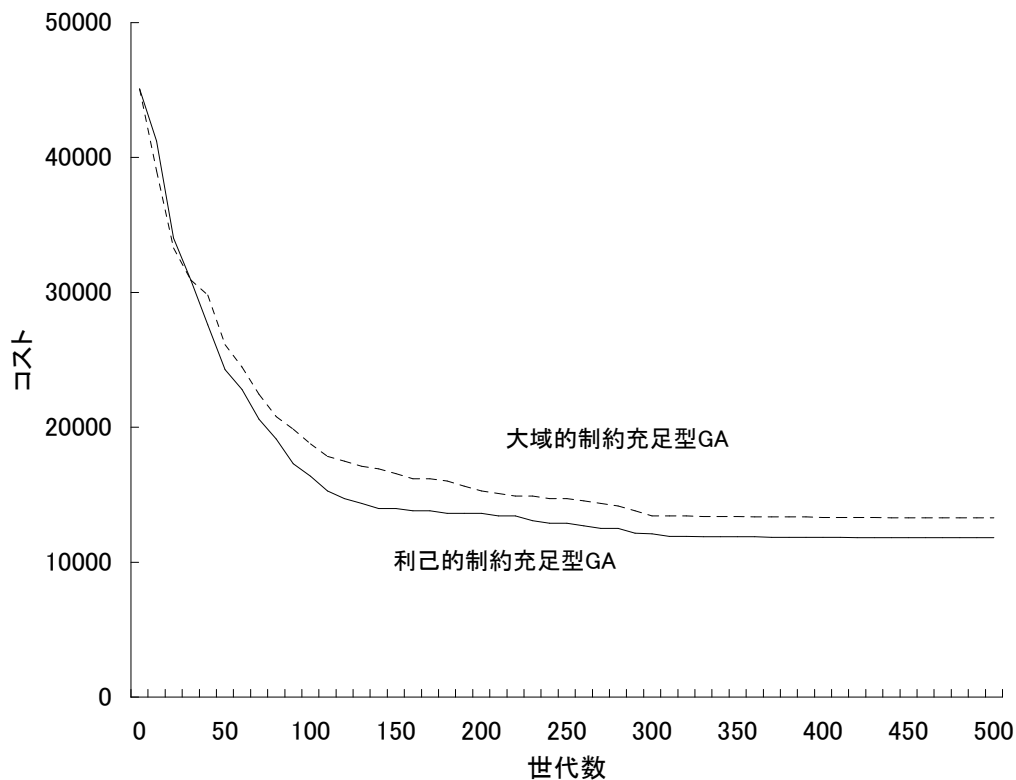


図 5.13 解の収束状況

5.6 結言

本章では、共同物流網の構築運用に要求される幹線輸送計画作成の課題を明らかにし、複雑な運用が行われるため多数の制約が課される問題で、専門家レベルの精度と対話的利用が可能な応答性能を実現する解法を提案した。多数の制約が課されている中で、GA 集団の多様性を保持するために利己的制約充足を提案した。車両ルートへの荷物挿入を、その荷物の時間制約の充足を優先し、大局的な制約充足は考慮せずに行う。この利己的な制約充足のため生じる制約に違反している個体には、適応度の算出で制約違反のペナルティを課すと共に、一定の世代間隔で制約違反の修復を行う。また、幹線輸送の拠点は日本全国に分散しているという特徴に基づき、地理的な条件から実行不可能な経路をあらかじめ算出する制約事前チェックを導入した。この二つの手法を導入することにより、精度と応答性能の両立を実現した。本章の成果は、日立ソフトウェアエンジニアリング（株）で行った電子機器メーカーと、その部品サプライヤによる共同物流網の構築に活用された。

ここでは、幹線輸送をデポ配送とは独立した問題として扱ったが、幹線輸送はデポ配送

との同期が必要であり，互いに深く関係している．このため，幹線輸送の作成とデポ配送計画の作成を個別に実行するだけでなく，共同物流網全体の最適化を進めるためには，互いにネストした問題として捉えた解法の構築が課題として残されている．

第 6 章

結論

6.1 本研究のまとめ

本論文では、共同物流網の構築運用について、構築時の計画手法、および、運用のためのデポ配送計画と幹線輸送計画作成手法についての研究成果を、以下の 5 章に分けて述べた。

1 章では、共同物流の背景である物流問題について論じると共に、共同物流網構築に求められる意思決定を分類し、戦略レベルから運用レベルまでの物流網の構築・運用手法についての研究動向と課題を整理した。その結果に基づき、巡回輸送を含む共同物流網の構築手法、デポ配送計画の作成手法、および、幹線輸送計画の作成手法の三つを課題として取り上げ、それぞれの解決方針を示した。

2 章では、一つのサプライチェーンに属するメーカーと部品サプライヤによる共同物流の特徴をまとめる共に、共同物流網の構築を 2 段階で行う構築運用手法を提案した。共同物流網の構築を、数理モデルによる構築フェーズだけでなく、運用レベルの計画作成を行うスケジューリングフェーズまで行うことで、人間による多面的な評価・調整を可能とする。さらに、この構築手法実現上の課題を整理した。

3 章では、共同物流網の構築において要求される、デポ経由の輸送と巡回輸送が混在する物流網の数理モデルについて述べた。巡回輸送を正確に表現できる数理モデルと、高速解法を提案した。提案手法では、巡回輸送の適用条件を正確に表現するために、混合整数計画問題としてモデル化した。さらに、この巡回輸送の車両の積載量下限制約の判定にダミー荷物を用いることで、整数変数を実変数に置き換え高速な応答性能を実現した。実用規模の問題での実験により、提案手法の応答性能とコスト算出の精度を評価して、提案手法の有効性を確認した。

4章では、共同物流網におけるデポ配送網の計画手法について述べた。定常的な車両運行と備車が併用されるデポ配送網の計画問題を定式化し、時間制約の強弱に関わらず安定して精度を確保できるGAを用いた計画作成手法を提案した。提案したGAでは、部品サプライヤからの出荷荷量の変動を個体の適応度評価に組み込む。さらに、時間制約が強い場合に有効なヒューリスティクスを用いた時間制約優先型GAと、弱い場合に有効な積載量制約優先型GAを組み合わせるマルチステージGAを適用し、時間制約の強弱に関わらず安定した精度と応答性能を実現した。ベンチマーク問題での実験により、提案手法の精度と応答性能を評価して、その有効性を確認した。

5章では、共同物流網における幹線輸送網の計画作成について述べた。複雑な運用と工場での生産計画との同期のため、多数の時間制約が課されている幹線輸送網の計画作成問題を定式化し、その計画手法として利己的制約充足型GAによる解法を提案した。利己的制約充足型GAは、車両ルート構築時に新たに追加する部分に関する時間制約だけ充足し、大局的な制約条件は考慮しない。また、幹線輸送の拠点は全国に分散しているため、地理的な特徴から走行不可能な車両ルートをあらかじめ算出する制約事前チェックを行うことで、GAでの車両ルート構築時の計算効率を向上させた。実験による評価で、提案方式の精度と応答性能の有効性を確認した。

6.2 今後の課題

最後に今後の課題について述べる。

(1) 共同物流網の拡大に対応した構築運用手法

共同物流の効果を上げるためには、参加企業（部品サプライヤ）の拡大が必須の条件である。しかし、本論文で取り上げた物流共同化は、単に部品サプライヤの輸送だけを共同化したものであり、デポも幹線輸送とデポ配送の載せ換え機能しかなく、倉庫としての保管は行えない。このため、参加企業は輸送時の部品の荷姿と共に、出荷リードタイムの標準化など、多くの要件を満たす必要がある。この参加企業の負担の軽減のために、デポでの一定の保管機能の追加の検討も始められている。また、共同物流の規模拡大に伴い、デポの拡充と巡回輸送削減も検討されている。

したがって、共同物流網の構築・運用手法にも、単に輸送だけでなく、デポでの在庫も含めた物流の最適化や、デポの開設や閉鎖などの判定への対応なども求められている。さらに、近年、地球温暖化対策に向けたCO₂削減など、企業にも環境対策の強化が求められ

ている。このため、共同物流網の計画作成でも、コスト面の評価だけでなく、環境面からの評価も求められる。したがって、デポでの在庫機能の導入による、より高度な最適化の実現と、環境側面まで含めたトータルな最適性の向上を実現する研究開発が今後の課題として残る。

(2) 構築フェーズとスケジューリングフェーズの連携

2章で述べたように共同物流網の構築は、構築フェーズだけでなくデポ配送網や幹線輸送網の運用レベルの計画まで作成するスケジューリングフェーズが必要である。3章以下で、構築フェーズとスケジューリングフェーズ、それぞれの計画作成手法を述べた。しかし、物流網の構築は構築フェーズからスケジューリングフェーズというトップダウンの方向だけでなく、逆に、スケジューリングフェーズで得られる正確なコスト評価や、運用性の評価を構築フェーズにフィードバックすることも必要である。つまり、構築フェーズでの荷物個建て費用に基づく計画作成の妥当性を、運用レベルの計画作成により得られる使用車両台数に基づくコスト評価で検証すると共に、使用車両台数からコスト算出を行い、部品サプライヤ、メーカーへの費用分配と、そのコストの構築フェーズへのフィードバックの実現が課題として残る。

謝辞

本研究の全過程を通じ、懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 薦田憲久教授に心から感謝申し上げます。

本研究をまとめるにあたって貴重なお時間を割いて頂き、丁寧なるご教示を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 藤原融教授, 西尾章治郎教授に謹んで深謝いたします。

大学院博士後期課程において、マルチメディア工学全般に関して、親切なるご指導とご助言を賜りました大阪大学情報科学研究科マルチメディア工学専攻 岸野文郎教授, 下條真司教授, 秋吉政徳准教授に深く感謝申し上げます。

日立ソフトウェアエンジニアリング (株) 前澤裕之 執行役常務には、筆者が大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士後期課程に入学する上で様々な便宜を図っていただきました。深く感謝申し上げます。

本研究は、日立ソフトウェアエンジニアリング (株) において、社内外の多くの方々のご指導とご協力を得て行ったものが元となっています。元専務取締役 川崎淳博士と、元執行役社長 小川健夫氏 (現相談役)、元研究部長 小柳和子博士 (現情報セキュリティ大学院大学教授) には、本研究の機会を与えていただきました。深く感謝申し上げます。

2 章, 4 章および 5 章に関して、様々なご助言と多大なるご支援をいただきました(株) 日立製作所システム開発研究所 鶴田節夫博士 (現東京電機大学教授) に深く感謝申し上げます。

また、研究を進めるにあたり日々様々なご支援とご配慮を頂きました日立ソフトウェアエンジニアリング (株) 研究部の先輩, 同僚, 後輩の方々に心から御礼申し上げます。

最後に、いつも暖かく励ましてくれた、母と妻に感謝します。

参考文献

- [1] 苦瀬博仁：“物流と社会問題”，計測と制御, Vol.37, No.3, pp.166-169 (1998).
- [2] ジェイアール貨物リサーチセンタ：“日本の物流とロジスティクス”，成山堂書店 (2004).
- [3] 谷本伸一：“グローバル物流の新動向”，オペレーションズ・リサーチ, Vol.48, No.6, pp.402-408 (2003).
- [4] 物流問題研究会(監修)：“数字で見る物流 2006”，(社)日本物流団体連合会 (2006).
- [5] 中山清孝, 秋岡俊彦：“トヨタ生産方式の基本的な考え方”，オペレーションズ・リサーチ, Vol.42, No.2, pp.61-65 (1997).
- [6] 苦瀬博仁：“ロジスティクス・システムの変化と最適化のための新たな課題”，オペレーションズ・リサーチ, Vol.48, No.6, pp.409-414 (2003).
- [7] 塩見英治, 齊藤実(編著)：“現代物流システム論”，中央経済社 (1988).
- [8] 高橋輝男：“物流・配送システムの動向と展望”，計測と制御, Vol.37, No.3, pp.153-156 (1998).
- [9] 池隆一：“配送スケジュールを活用した日雑地域卸の共同物流総合管理システム”，オペレーションズ・リサーチ, Vol.39, No.3, pp.136-141 (1994).
- [10] 根本敏則, 味水佑毅：“情報通信技術を活用した輸送の共同化”，オペレーションズ・リサーチ, Vol.48, No.6, pp.415-421 (2003).
- [11] 波形克彦, 梅津尚夫：“実例でわかる「共同物流」によるコスト削減の具体策”，経林書房 (1997).
- [12] 久保幹雄：“実務家のためのサプライ・チェーン最適化入門”，朝倉書店 (2004).
- [13] C.J. Vidal and M. Goetschalckx: “A Global Supply Chain with Transfer Pricing and Transportation Cost Allocation”, *European Journal of Operational Research*, Vol.129, pp.134-158 (2001).
- [14] S. Tayur, R. Ganeshan, and M.J. Magazine (Eds): “*Quantitative Models for Supply Chain Management*”, Kluwer Academic Publishers (1999).
- [15] 増井忠幸, 百合本茂, 片山直登：“ロジスティクスの OR”，槇書店 (1998).

- [16] 黛登志雄: “OR のロジスティクスへの適用”, オペレーションズ・リサーチ, Vol.42, No.5, pp.305-308 (1997).
- [17] 久保幹雄: “ロジスティクス工学”, 朝倉書店 (2001).
- [18] 後藤一孝: “ロジスティクス・ネットワークの最適化と実行系システムのデータ連携”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2005 年春季研究発表会アブストラクト集, pp.192-193 (2005).
- [19] 松川公司: “実務者から見た「ロジスティクスネットワーク設計」のニーズと課題”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2005 年春季研究発表会アブストラクト集, pp.188-189 (2005).
- [20] 毛利裕昭, 久保幹雄, 森雅夫: “幹線配送計画問題”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 1995 年秋季研究会アブストラクト集, pp.128-129 (1995).
- [21] 前川拓也, 小野山隆: “GA を用いた幹線物流網スケジュール作成手法の検討”, 1999 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol.情報システム 1, p.186 (1999).
- [22] 栗山聡, 細田高道, 吉本一穂: “ロジスティクスにおける輸送効率化手法とその事例”, オペレーションズ・リサーチ, Vol.42, No.5, pp.309-312 (1997).
- [23] G. Laporte: “The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms”, *European Journal of Operational Research*, Vol.59, pp.345-358 (1992).
- [24] 山口裕人: “配送スケジューリングシステムの開発”, オペレーションズ・リサーチ, Vol.39, No.3, pp.125-130 (1994).
- [25] 前川拓也, 久保田仙, 小野山隆: “GA による時間枠制約付き配車計画作成方式”, 2001 年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, p.62 (2001).
- [26] 水流正英: “物流 EDI – 大競争時代を生き残るために”, 運輸政策研究機構 (1998).
- [27] 物流 EDI 推進委員会: “物流 EDI 標準 JTRN” 物流 EDI 推進委員会発行 (2006).
- [28] 権守直彦, 伊藤彰朗, 仲川弘之, 新田哲哉, 伏木匠: “業務用車両(B2B)対応車載情報ビジネス”, 日立評論, Vol.84, No.8, pp.21-26 (2002).
- [29] 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・フェアラーク東京 (2005).
- [30] 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・フェアラーク東京 (2002).
- [31] 両角光男: “施設配置計画評価のためのメディアン問題と最短路問題解析算法の効率化”, 日本建築学会計画系論文報告集, No.347, pp.55-65 (1985).
- [32] 鈴木勉, M.S. Daskin: “P-ノードセンター問題の新解法: アルゴリズムと計算結果”,

- オペレーションズ・リサーチ, Vol.45, No.9, pp.428-436 (2000).
- [33] 反町洋一(編): “線形計画法の実際”, 産業図書 (1992).
- [34] Y. Ohsawa: “Location-allocation Models of Some Traffic Facilities”, *Geographical Analysis*, Vol.21, No.2, pp.134-146 (1989).
- [35] T.C.HU(著), 伊理正夫 (監訳): “整数計画法とネットワークフロー”, 培風館 (1975).
- [36] 今野浩, 鈴木久敏 (編): “整数計画法と組合せ最適化”, 日科技連出版社 (1982).
- [37] 茨木俊秀: “組合せ最適化の理論”, 電子情報通信学会 (1979).
- [38] 米田清: “ラグランジュ緩和法によるスケジューリング”, システム/制御/情報, Vol.41, No.4, pp.130-138 (1997).
- [39] 黒田充, 村松健児(編): “生産スケジューリング”, 朝倉書店 (2002).
- [40] ダンツィーク(著), 小山昭雄(訳): “線形計画法とその周辺”, ホルト・サウンダーズ (1983).
- [41] 茨木俊秀, 福島雅夫: “FORTRAN77 最適化プログラミング”, 岩波書店 (1991).
- [42] 西川禎一, 三宮信夫, 茨木俊秀: “岩波講座 情報科学 19 最適化”, 岩波書店 (1982).
- [43] J. Bramel and D. Simchi-Levi: “The Logic of Logistics”, Springer-Verlag (1997).
- [44] M.Gendreau, G.Laporte, and J.Y.Potvin: “Vehicle Routing: Modern Heuristics”, *Local Search in Combinatorial Optimization* (E. Aarts and J.K Lenstra Eds.), Princeton University Press, pp.311-336 (1997).
- [45] 園川隆夫, 伊藤謙治: “生産マネジメントの手法”, 朝倉書店 (1996).
- [46] 佐藤芳光, 船越亘, 宮崎知明: “大規模部品調達ルート最適化問題へのハイブリッド解法の導入事例”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2004 年春季研究発表会アブストラクト集, pp.344-345 (2004).
- [47] 毛利裕昭, 久保幹雄, 森雅夫: “幹線配送計画問題 (非分割財の場合)”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 1996 年春季研究発表会アブストラクト集, pp.294-295 (1996).
- [48] S.M.Sait, H.Youssef (著), 白石洋一(訳): “組合せ最適化アルゴリズムの最新手法”, 丸善 (2002).
- [49] 長尾智晴: “最適化アルゴリズム”, 昭晃堂 (2000).
- [50] 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).
- [51] J. Renaud, G. Laporte, and F.F Boctor: “A Tabu Search Heuristics for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem”, *Computer & Operations Research*, Vol.23, No.3, pp.229-235 (1996).
- [52] P. Toth and D. Vigo: “Exact Solution of the Vehicle Routing Problem”, *Fleet*

- Management and Logistics* (T.G Cranic and G. Laporte Eds.), Kluwer Academic Publishers, pp.1-31 (1998).
- [53] 石田啓一: “物流システム構築のための技法”, 計測と制御, Vol.37, No.3, pp.162-165 (1998).
- [54] B.D. Backer and V. Furnon: “Solving Vehicle Routing Problems Using Constraint Programming and Metaheuristics”, *Journal of Heuristics*, Vol.6, No.4, pp.1381-1231 (2000).
- [55] F.B. Pereica, J. Tavares, P. Machado, and Ernesto Costa: “GVR: a New Genetic Representation for the Vehicle Routing Problem”, in *Proc. of the 13th Irish Int'l Conf. on Artificial Intelligence and Cognitive Science (AICS2002)*, pp.95-102 (2002).
- [56] S.R. Thangiah, K.E. Nygard, and P.L. Juell: “GIDEON: A Genetic Algorithm System for Vehicle Routing with Time Windows”, in *Proc. of the 17th IEEE Conference on Artificial Intelligence Applications (CAIA'91)*, pp.322-328 (1991).
- [57] M. Gendreau, H. Alain, and G. Laporte: “A Tabu Search Heuristics for the Vehicle Routing Problem”, *Management Science*, Vol.40, No.10, pp.1276-1290 (1994).
- [58] H.グリーンバーグ(著), 真鍋龍太郎(訳): “整数計画法”, 培風館 (1976).
- [59] 茨木俊秀: “最適化の手法”, 共立出版 (1993).
- [60] Y. Karuno, H. Nagamochi, and T. Ibaraki: “Vehicle Scheduling on a Tree to Minimize Maximum Lateness”, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol.39, No.3, pp.345-355 (1996).
- [61] 毛利裕昭, 久保幹雄, 森雅夫, 矢島安敏: “分割配送路問題—ラグランジュ緩和を利用した解法について—”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会論文誌, Vol.39, No.3 (1996).
- [62] 山本芳嗣, 久保幹雄: “巡回セールスマン問題への招待”, 朝倉書店 (1997).
- [63] S. Lin and B.W. Kernighan: “An Effective Algorithm for the Traveling Salesman Problem”, *Operations Research*, Vol.21, No.2, pp.498-516 (1972).
- [64] S. Arora: “Polynomial Time Approximation Schemes for Euclidean TSP and Other Geometric Problems”, *Journal of the ACM*, Vol.45, No.5, pp.753-782 (1995).
- [65] V. Kumar: “Algorithms for Constraints Satisfaction Problems: A Survey”, *AI Magazine*, Vol.13, No.1, pp.32-44 (1992).
- [66] 羽鳥彰一, 降旗勝夫: “制約論理プログラミングによるタンクローリーの配車計画”, オペレーションズ・リサーチ, Vol.42, No.5, pp.317-320 (1997).

- [67] 茨木俊秀: “離散的最適化とアルゴリズム”, 岩波書店 (1993).
- [68] 又吉光邦, 名嘉村盛和, 宮城隼夫: “改良 2-opt 法を組み込んだ遺伝的アルゴリズムによる QAP の解探索”, 電気学会論文誌 C, Vol.124, No.9, pp.1896-1906 (2004).
- [69] S. Kubota, T. Onoyama, K. Oyanagi, and S. Tsuruta: “TSP Solving Method for Interactive Repetitive Simulation of Large-scale Distribution Networks”, in *Proc. of the 1999 IEEE Int'l Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC'99)*, Vol.3, pp.533-538 (1999).
- [70] T. Onoyama, S. Kubota, K. Oyanagi, and S. Tsuruta: “GA Applied Method for Interactively Optimizing a Large-scale Distribution Network”, in *Proc. of the IEEE Region 10 Conf. 2000 (TENCON2000)*, Vol.2, pp.253-258 (2000).
- [71] T.A. Feo, M.G.C. Resende, and S.H. Smith: “A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Maximum Independent Set”, *Operations Research*, Vol. 42, No. 5, pp. 860-878 (1994).
- [72] 久保幹雄, 毛利裕昭: “配送計画支援システム METRO とその適用事例”, オペレーションズ・リサーチ, Vol.41, No.8, pp.429-435 (1996).
- [73] G.A.P. Kindervater and M.W.P. Savelsbergh: “Vehicle Routing: Handling Edge Exchanges”, *Local Search in Combinatorial Optimization* (E. Aarts and J.K Lenstra Eds.), Princeton University Press, pp.337-360 (1997).
- [74] B. Russell and V. H. Pascal: “A Two-stage Hybrid Local Search for the Vehicle Routing Problem with Time Windows”, *Transportation Science*, Vol. 38, No. 4, pp. 515-530 (2004).
- [75] J.H. Hooker and N.R. Nataraj: “Solving a General Routing and Scheduling Problem by Chain Decomposition and Tabu Search”, *Transportation Science*, Vol.29, No.1, pp.30-44 (1995).
- [76] L. Golden, E.A. Wasil, J.P. Kelly, and I.Chao: “The Impact of Metaheuristics on Solving the Vehicle Routing Problem: Algorithms, Problem Sets, and Computational Result”, *Fleet Management and Logistics* (T.G Cranic and G. Laporte Eds.), Kluwer Academic Publishers, pp. 33-56 (1998).
- [77] S.R. Thangiah, and S. Salhi: “Genetic Clustering: An Adaptive Heuristic for the Multidepot Vehicle Routing Problem”, *Applied Artificial Intelligence*, Vol.15, No.4, pp. 361-383 (2001).
- [78] T. Onoyama, S. Kubota, K. Oyanagi, and S.Tsuruta: “A Method for Solving Nested

- Combinatorial Optimization Problems – A Case of Optimizing a Large-scale Distribution Network –”, in *Proc. of the 2000 IEEE Int’l Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC2000)*, pp.2467-2472 (2000).
- [79] T. Onoyama and S. Tsuruta: “Validation Method for Intelligent Systems”, *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, Vol.12, No.4, pp.461-472 (2000).
- [80] 久保田仙, 前川拓也, 小野山隆: “配送スケジューリング問題の解法検証方式”, 情報処理学会第 60 回全国大会講演論文集, Vol.2, pp.167-168 (2000).
- [81] T. Onoyama, S. Kubota, K. Oyanagi, and S. Tsuruta: “Implementation Method of a Validation tool for Intelligent Systems”, in *Proc. of the 45th Int’l. Wissenschaftliches Kolloquium (IWK2000)*, pp.781-786 (2000).
- [82] 小野山隆, 久保田仙, 前川拓也, 薦田憲久: “巡回輸送を含む共同物流網の計画のための混合整数計画問題モデル化とダミー荷物を用いた高速解法”, 電気学会論文誌 C, Vol.127, No.1, pp.31-36 (2007).
- [83] T. Onoyama, T. Maekawa, and N. Komoda: “High-speed Planning Method for a Cooperative Logistics Network using Mixed Integer Programming Model and Dummy Load”, in *Proc. of the Int’l Conf. on Information Systems, Logistics and Supply Chain 2006 (ILS2006)*, (in CD-ROM) (2006).
- [84] 小野山隆, 前川拓也, 久保田仙, 薦田憲久: “巡回輸送を含む共同物流網の計画のための混合整数計画問題モデル化とダミー荷物を用いた高速解法”, 電気学会情報システム研究会資料, IS-05-54, pp.1-5 (2005).
- [85] 小野山隆, 前川拓也, 久保田仙, 鶴田節夫, 薦田憲久: “マルチステージ GA による共同物流網における配送計画作成手法”, 電気学会論文誌 C, Vol.127, No.9 (2007) (採録決定).
- [86] T. Onoyama, T. Maekawa, S. Kubota, and K. Norihisa: “GA Applied VRP Solving Method for a Cooperative Logistics Network”, in *Proc. of the 11th IEEE Int’l Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA2006)*, pp.1101-1106 (2006).
- [87] T. Onoyama, S. Kubota, K. Oyanagi, and S. Tsuruta: “Knowledge-embedded Multi-stage Genetic Algorithm for Interactive Optimizing a Large-scale Distribution Network”, in *Proc. of the 14th Int’l Florida Artificial Intelligence Research Society Conf. (FLAIRS2001)*, pp.166-170 (2001).

- [88] T. Onoyama, T. Maekawa, S. Kubota, Y. Taniguchi, and S. Tsuruta: “Intelligent Evolutional Algorithm for Distribution Network Optimization”, in *Proc. of the 2002 IEEE Int'l Conf. on Control Applications and Int'l Symposium on Computer Aided Control Systems Design (CCA/CACSD2002)*, pp. 802-807 (2002).
- [89] 小野山隆, 前川拓也, 久保田仙, 薦田憲久: “共同物流網構築のための配車計画作成手法”, 電気学会情報システム研究会資料, IS-06-14, pp.1-6 (2006).
- [90] T. Onoyama, T. Maekawa, S. Tsuruta, and N. Komoda: “Long-distance Transportation Network Planning Method Using Selfish Constraint Satisfaction Type GA”, in *Proc. of the 2007 IEEE Int'l Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2007)* (2007, to appear).
- [91] T. Onoyama, S. Kubota, Y. Taniguchi, and S. Tsuruta: “Proposal and Evaluation of Selfish-Gene with Limited Allowance Type GA for Solving Constraint TSP”, in *Proc. of the 15th Int'l Florida Artificial Intelligence Research Society Conf. (FLAIRS2002)*, pp.237-241 (2002).
- [92] T.Onoyama, T.Maekawa, S.Kubota, Y.Taniguchi, and S.Tsuruta: “Constraint Pre-checking and Gene Build-in Delaying GA for Optimizing Large-scale Distribution Networks”, in *Proc. of the 2003 IEEE Int'l Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC2003)*, pp.796-801 (2003).
- [93] 小野山隆, 前川拓也, 久保田仙, 鶴田節夫, 薦田憲久: “利己的制約充足型 GA による幹線物流網構築手法”, 電気学会情報システム研究会資料, IS-06-42, pp.1-5 (2006).
- [94] H.J. Sebastian: “Strategic Planning of Distribution Networks for Letter and Parcel Mail using Optimization Models”, in *Abstract of the 19th Int'l Workshop on Complex Systems Modeling jointly with the 6th Int'l Symposium on Knowledge and Systems Sciences (CSM/KSS'05)*, pp.20-21, (2005).
- [95] S. Tsuruta, S. Kubota, T. Onoyama, and K. Oyanagi: “Knowledge-based Approach for Validating Intelligent Systems”, in *Proc. of the 45th Int'l. Wissenschaftliches Kolloquium (IWK2000)*, pp.769-774 (2000).
- [96] T. Onoyama, S. Kubota, K. Oyanagi, and S. Tsuruta: “Concept of Validation ant Its Tool for Intelligent Systems”, in *Proc. of the IEEE Region 10 Conf. 2000 (TENCON2000)*, Vol.1, pp.394-439 (2000).
- [97] S. Tsuruta and T. Onoyama: “Knowledge-based Validation Method for Validating Intelligent Systems”, in *Proc. of the 15th Int'l Florida Artificial Intelligence*

Research Society Conf. (FLAIRS2002), pp.226-230 (2002).

[98] 染谷博司: “グリッド環境に適した遺伝的アルゴリズムによる最適化”, 統計数理,
Vol.52, No.2, pp.381-391 (2004).

[99] M.M Solomon: “VRPTW Benchmark Problems”,
<http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm> (2005).