

輸送用梱包材リユースシステムの配送計画立案システムに関する研究

石原良晃

1. はじめに

本研究は、輸送用梱包材のリユースシステムを対象とした配送計画立案に関する基礎的知見を得ることを目的としている。近年、地球環境保護の観点から、廃棄物のリサイクル、循環型社会の形成が強く叫ばれ、製造業に対しても拡大生産者責任の考えに基づく対応が求められている。また、法的規制も強化され、「循環型社会形成推進基本法」（平成13年1月施行）をはじめ、「廃棄物処理法」、「資源有効利用推進法」、「グリーン購入法」、「容器包装リサイクル法」、「家電リサイクル法」、「建設資材リサイクル法」、「食品リサイクル法」、「自動車リサイクル法」などが、制定・施行されている[1]。それらに対応して、各製造業は、リユース・リサイクルシステムの構築し始めている。トオーショウ・ロジテック株式会社（本社：広島市）では、Z E ソリユースシステムと呼ばれる輸送用梱包材を回収し、再生処理を行いリユースするシステムを構築している[2]。そこで、本研究では、回収・再生拠点間の配送計画を対象として、輸送機器の空きスペースを有効に利用し、回収された製品および再生された製品の配送を実現するため、配送計画問題を数値計画モデルに定式化して配送計画を立案するためシステムを構築し、その有効性を明らかにする。

以下、2. では、静脈物流の現状と従来の研究として、日本の各製造業で実施されているリユース、リサイクルの現状と静脈産業、静脈物流に対して行われてきた従来の研究および動脈物流用配送計画に関する研究の静脈物流への応用についてまとめる。3. では、本研究で対象とする静脈物流用配送計画モデルを構築し、4. では、静脈物流用配送計画モデルの解法について説明し、数値例を用いて有効性を明らかにした後、5. でまとめと今後の課題について述べる。

2. 静脈物流の現状と従来の研究

2. 1 日本におけるリユース・リサイクルの現状

自動車産業では、重量比約75%のリサイクルを達成し、新型車については約90%のリサイクル可能率を目標としている。図1に自動車産業におけるリサイクルシステムの一例を示す[3]。自動車産業では、使用済み自動車を販売店、中古業者、自治体を経由して、ユーザから回収し、解体業者、シュレッダー業者、再生メーカーが、中古部品のリユース、原材料のリサイクルを行っている。金属等の原材料へのリサイクルについては、従来からリサイクルシステムが存在し機能しているが、自動車に多用されている樹脂部品は、シュレッダーダストとして埋め立て・焼却処理がなされ、リサイクルは進んでいなかった。しかし、各自動車メーカーは、バンパー回収・リサイクルシステムを構築し、修理のために交換されたバンパーを回収し、自動車用樹脂部品などにリサイクルしている。特に、トヨタ自動車では、2001年度に国内で約65万5千本（全販売店発生量の69%）の使用済みバンパーを回収し、そのうちTSOP（トヨタスーパーオレフィンポリマー）を用いたバンパーについては原材料への再生処理後、再度、バンパーの生産に用いられている[4]。家電産業では、「家電リサイクル法」の制定に合わせて、特定4品目（テレビ、冷蔵庫、洗濯機、エアコン）のリサイクルを開始している。金属の原材料へのリサイクル、有害物質の適正な処理を主な目的として実施されている[5]。これに加えて、パーソナルコンピュータの回収・再資源化を開始ようとしている[6]、[7]。また、建設業では、建設廃材の再資源化が行われている。しかし、自動車、家電産業等における原材料へのリサイクルのほとんどは、元の製品の生産には利用されず、他品目へ転用されているのが現状であり、再度同じ製品に利用させるのが望ましい姿であると考えられる。また、循

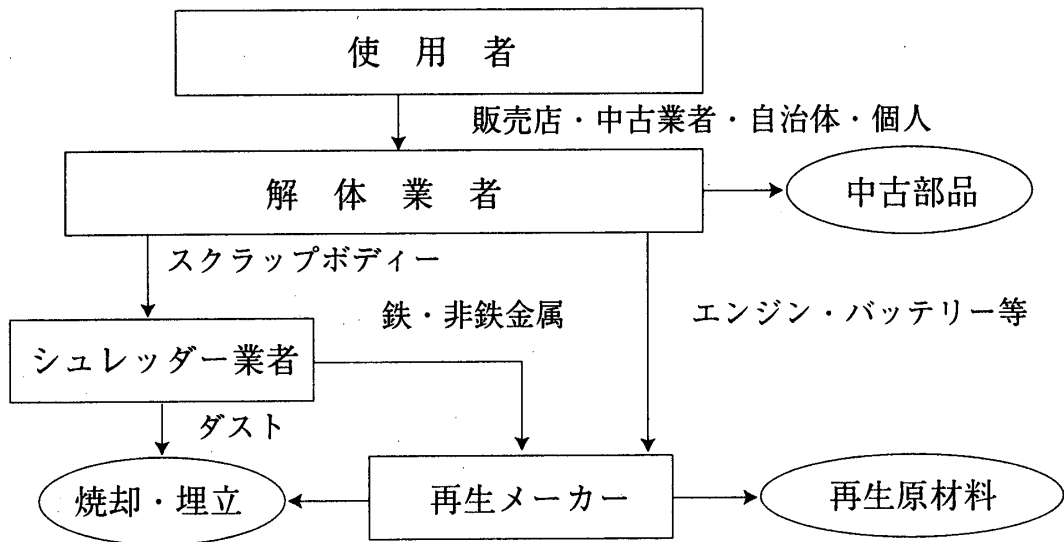


図1 自動車産業におけるリサイクルの一例

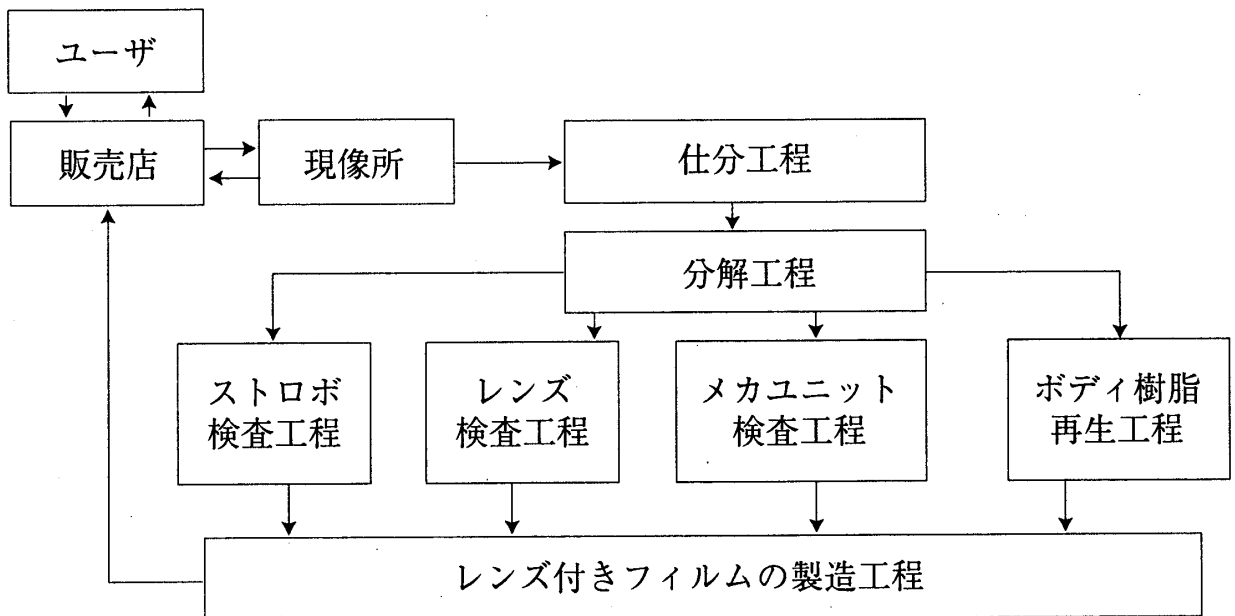


図2 レンズ付きフィルムの循環型生産の概念図

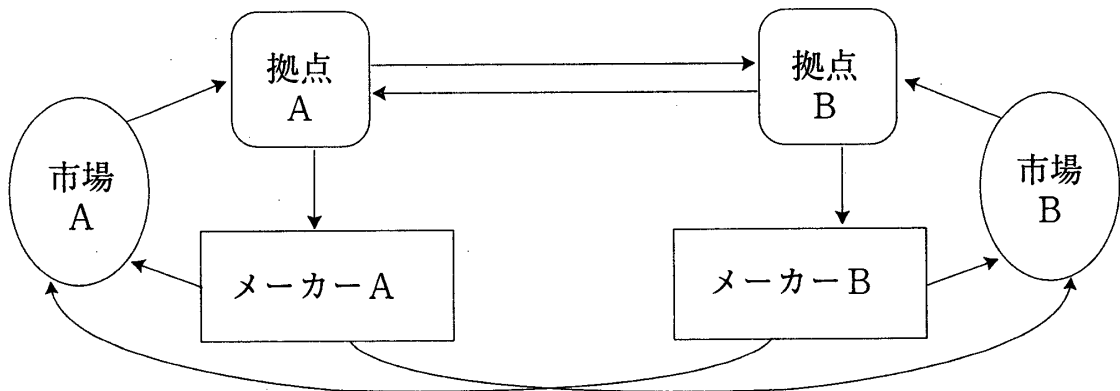


図3 輸送用梱包材のリユースシステムの概念図

環型生産が実施されている製品には、レンズ付きフィルム、コピー機等があり、部品レベルでの再利用が行われている。富士フィルムでは、レンズ付きフィルムを写真店からラボ（現像所）に回収するシステムを用いてリサイクルセンターに回収し、製品ごとに仕分け、分解・検査を行い、製品の製造工程に部品として供給している[8]。図2にレンズ付きフィルムの循環型生産の概念図を示す。また、富士ゼロックスでは、使用済みのコピー機を回収し、回収されたコピー機の状態により分類した上で、製品を分解し、部品を検査・修理して再使用できる部品を生産ラインに投入している。これらの取り組みは、部品レベルでのリユースを実施している点で、注目されている[9]。本研究で対象とするシステムは、輸送用梱包材のリユースシステムである。トオーショウ・ロジテック株式会社では、ZEソリユースシステムと呼ばれる輸送用梱包材を回収し、再生処理を行いリユースするシステムを構築している。対象とする輸送用梱包材リユースシステムは、全国に約50の回収・再生拠点を設置し、廃棄された梱包材を顧客から回収、再生し、各メーカーに納入している。輸送コストを削減するため、ZEマッチングシステムというトラックの空きスペースを利用するシステムを提案している。この方法は、従来の求車求荷システムとは輸送費に関する点で違いがあり、空きスペースを使用する際の費用は、距離、重量により決定される変動費の部分のみである。このシステムは、従来各メーカーが自社で使用していた通いかごのように自社の輸送ルートの帰り便で輸送用梱包材を回収し再利用するのではなく、数多くの輸送用梱包材使用メーカー、輸送業者が参加し運用されるオープンなシステムである。輸送用梱包材のメーカーへの再納入期間は、回収依頼後約1ヶ月を目処に実施されている。図3に輸送用梱包材のリユースシステムの概念図を示す。

廃棄された製品をリユース、リサイクルする上での問題点として、製品の回収方法が挙げられる。特に、顧客からの製品の回収はリユース・リサイクルシステムを構築する上で大きな問題となり、自動車、レンズ付きフィルム、コピー機などは、従来からあるシステムを利用、または、従来からのシステムに新たな機能を付け加えることで、安定した回収を実施できた点が、リサイクルシステ

ムを構築できた要因と考えられる。家電製品など顧客からの回収が困難な製品については、法的な規制を導入した上で、新たな回収システムが構築された。本研究で対象としている輸送用梱包材のリユースシステムでは、輸送用梱包材に認識コードを印刷または添付し、顧客からの回収依頼を受け、輸送業者が回収するシステムを構築している。また、リユース・リサイクルシステムのもうひとつの問題点として、リサイクルされた原材料の使用用途があげられる。リサイクルされた原材料の多くが、他の製品の生産に利用され、元の製品の生産にはバージン原材料が用いられている。リサイクル原材料の用途が、原材料の劣化等によって、制限させるため、新たな用途の開発、同一製品への再利用可能な再生技術の開発などの必要性がある。また、現時点では、リサイクルされた原材料の価格が、バージン原材料の価格に影響され、リサイクルコストの面で問題となることがある[10]。そのため、リユース・リサイクルシステムを構築するためには、リユース部品、リサイクル原材料を積極的に利用する社会システムを構築する必要がある。本研究で対象とする輸送用梱包材のリユースシステムでは、リユース品の価格を新品の80~90%に設定し、輸送コストを削減するための施策として、ZEマッチングシステムを採用している。

2.2 静脈物流に関する従来の研究

静脈物流に関する研究は、近年注目されてきた研究分野であり、特定の国や地域、産業、製品で具体的に実施されているリユース・リサイクルシステムを対象としたケース・スタディから数多くの研究がなされている。Fleischmann et al.[11]は、静脈物流に関するさまざまなケース・スタディから、静脈物流ネットワークの一般的な特徴を明らかにした上で、対象とする製品により異なるタイプの静脈物流ネットワークが構築されていることを明らかにした。また、静脈物流の一般的な特徴としては、次のような点を挙げている。

- (1) 静脈物流を構成する活動には、回収、検査・分別、再生処理、廃棄、再生品の配送の5つがある。
- (2) 静脈物流ネットワークは、おおまかに3つの段階に区別される。回収段階、再生段階、再

配送段階の3つである。

- (3) 再生段階で、単一の施設で再生処理が行なわれる製品と、複数の施設を用いて再生処理が行なわれる製品が存在する。
- (4) クローズド・ループ型の静脈物流の場合では、物流ネットワークの設計がより複雑になる。
- (5) 使用済み製品のリユース・リサイクル可能性が、再生品需要よりもシステムに与える影響が大きく、同時に、再生品の配送に関する時間制約より、廃品の回収に関する時間制約が比較的ゆるやかな傾向にある。
- (6) 廃品の回収に関する不確実性（時間、量、品質）が、静脈物流システムに特に大きな影響を与える。

静脈物流と動脈物流の相違点としては、

- (1) 動脈物流では、原材料などの供給は、システムのニーズに対応してコントロール可能であるが、静脈物流では、製品の回収量は、外的変数であり、また予測困難なものである。
- (2) 静脈物流における回収拠点数が、動脈物流における納入拠点数に比べ非常に多い。これは、少量多頻度回収をもたらす。
- (3) 動脈物流における製品の配送段階と、静脈物流における再生品の配送段階との違いは、比較的小さい。

などが挙げられている。

また、静脈物流ネットワークの分類について、集中化の程度、再生処理の複雑性、動脈物流との関係、オープン・ループもしくはクローズド・ループ、業界の協力などの観点と製品特性、サプライチェーン特性、設備特性から次の3種類に分類し、以下のような特徴を指摘している。

- (1) 原材料リサイクルネットワーク (Bulk Recycling Network)
設備の集中化、オープン・ループ、
原材料リユース、高設備投資、
規模の経済性
- (2) 組立製品・再生産ネットワーク (Assembly Product Remanufacturing Network)
設備の分散化、クローズド・ループ、
動脈物流の拡張、部品リユース、
回収量の不確実性、高操業コスト
- (3) 製品再使用ネットワーク (Re-usable Item

Network)

クローズド・ループ、既存のネットワーク
の拡張、製品リユース

本研究で対象とする輸送用梱包材のリユースシステムは、回収拠点および再生拠点が全国に50箇所配置されており、再生設備は分散している。また、再生処理が簡単なため、再使用製品ネットワークに分類されると考えられる。ただ、廃棄された梱包材の回収ネットワークは、梱包資材の回収のために新たに構築されたものであり、既存のネットワークを拡張していない点が、(3)の分類と異なる。

従来行われてきた研究は、Fleischmann et al. [12]によると、主として廃棄された製品の回収拠点、再生拠点の配置に関する研究と、再生産された製品、部品、原材料の需要と廃棄された製品の回収を考慮した在庫管理問題・生産計画問題に関する研究に分類される。回収拠点、再生拠点の配置問題に関しては、以下のような研究がある。

Barrows et al. [13] は、オランダの建設廃棄物から発生する汚染された土砂をリサイクルするシステムを対象としている。土砂のリサイクルシステムは、大量の汚染された土砂を大規模な再処理施設で処理する必要があるため、複数の企業が協力し、再処理施設を運営し、また、リサイクルされた土砂を社会インフラの建設に利用する必要がある。そこで、土砂の発生拠点と発生量を所与として、最適な回収拠点および再生処理施設の数と能力の決定するため、設備配置問題を混合整数計画モデルに定式化し、近似解を求めるシステムを提案している。

Louwers et al. [14] は、ヨーロッパにおける廃棄されたカーペットのリサイクルシステムを対象としている。ヨーロッパにおけるカーペット産業は化学企業と協力し、使用済みカーペットからナイロンファイバーなどの有価資源をリサイクルするシステムを構築している。使用済みカーペットが、複数の発生拠点（家庭、オフィス、カーペット販売店、航空産業、自動車産業など）から発生するため、地域ごとに廃棄されたカーペットの事前処理（粉碎・ペレット化）を行うリサイクルセンターを設置し、処理されたカーペットを化学工場に運搬し処理するシステムを構築している。そのため、リサイクルセンターの位置と能力を決定

するため、連続型の設備配置モデルを構築し、すべてのコストを処理量に対して変動するものとして、非線形計画問題に定式化し、最適解を求めている。

Jayaraman et al. [15] は、一般的な製品及び有害な廃棄物を対象とした静脈物流に関する混合整数計画モデルを構築している。そのモデルでは、廃棄物の発生地点から、集積拠点、再生拠点への輸送コストを最小にするとともに、集積拠点、再生拠点の設置に関して固定費が必要と考え、集積拠点、および再生拠点の数をできるだけ少なくすることを考えている。また、同時に、その混合整数計画モデルを解くためのヒューリスティクスを提案している。

また、Jayaraman et al. [16] は、循環型生産システムにおける静脈物流について明らかにするため、動脈物流および静脈物流を同時に考慮し、再生および回収拠点の位置と、再生量、輸送量、在庫量を最適にする混合整数計画モデルを構築している。

Krikke et al. [17] は、オランダにおけるコピー機のリサイクルシステムを対象として、回収拠点を所与として、パーツの検査、交換を行なう前処理拠点、再生拠点の配置に関する混合整数計画モデルを構築している。

Kroon and Vrijens [18] は、再使用可能なコンテナの静脈物流に関する研究を行い、必要に応じて荷主にコンテナを貸し出し、運搬終了後、デポにコンテナを回収するシステムについてデポの配置問題を数理計画モデルとして構築している。

再生された製品、部品、原材料の需要と廃棄させた製品の回収を考慮した在庫管理・生産計画問題に関する研究には、以下のようなものがある。

Fleischmann et al. [19] , Fleischmann and Kuik [20] は、廃棄された製品の回収量が確率的に変動する場合の在庫管理について、製品需要量、廃品回収量がポアソン分布に従う場合の在庫管理法を提案し、廃品回収量の挙動が在庫管理システムに与える影響について明らかにしている。

Minner [21] は、従来のサプライチェーンモデルに廃棄された製品のリサイクル、生産工程で発生した副産物のリユースを付け加えて、緩衝在庫の設定に関して在庫保管費を最小にするための非線形計画モデルを提案している。

石原[22]は、廃棄された製品の原材料へのリサイクルを考慮した生産・在庫システムについて、廃品の回収量と製品の需要量の変動が、加工待ち資材在庫点および再生済み資材在庫点の挙動に与える影響を明らかにしている。

石原[23]は、自動車産業におけるバンパーの回収・リサイクルシステムを対象として、補修用バンパーの需要と、廃棄バンパーの供給が1対1に対応する関係を考慮して、修理要求に対して行われる補修部品の調達方式の違いが廃棄部品回収時期に影響し、加工待ち原材料在庫点の在庫量、原材料市場からの調達量の挙動に影響を与えることを明らかにしている。

石原[24]は、リユース・リサイクルシステムにおける廃品回収量の不確実性により、製品生産工程における部品および原材料の過不足が発生するため、再生および新品部品、または、再生原材料およびバージン原材料への調達指示方式として、再生資材引っ張り型発注モデル、再生資材供給型発注モデル、引っ張り型分割モデルを提案し、挙動解析を行い、再生資材引っ張り型および再生資材供給型発注モデルでは、再生化率の上昇に伴い新品供給工程への要求が行われない現象が発生するため、新品供給工程がある程度の安定した要求を必要とする場合には試用できないことを明らかにした。また、引っ張り型分割発注モデルは、製品需要量と廃品回収量の変動が、再生済み資材在庫点において累積し、挙動が不安定になることが明らかになった。そこで、再生済み資材在庫点の挙動を安定させるため、再生量調整型分割発注モデルを提案している。

2. 3 静脈物流用配送計画と従来の研究

動脈物流用配送計画立案に関する研究は、従来から盛んに行われており、主として、輸送機器の経由ルートを決めるための手法が数多く提案されている。動脈物流における配送計画は基本的に以下のような仮定の持つとされる[25]。

- (1) デポと呼ばれる特定の地点を出発した運搬車が顧客を経由し、再びデポに戻る。
- (2) デポに待機している運搬車の台数、最大稼働時間、最大積載量は既知である。
- (3) 各顧客の位置は既知であり、各顧客の需要も事前に与えられている。

表1 動脈物流と静脈物流における配送計画の特徴

	動脈物流	静脈物流
納期	厳しく設定、厳守	比較的緩やかに設定、目標
配送量	全量配送、輸送機器調達	部分配送可、輸送機器所与
分割配送	不可、1台の輸送機器が担当	可能、複数の輸送機器利用可

- (4) 各顧客の需要は、1台の運搬車によって処理される。
- (5) 地点間の移動時間、移動距離、移動費用は既知である。
- (6) 1つのルートに含まれる顧客の需要量の合計は、運搬車の最大積載量を超えない。
- (7) 運搬車の台数、各運搬車の稼働時間は、それぞれの上限を超えない

これら仮定の下で、移動費用、移動時間、運搬車の台数などを最小にする運搬車のルートを決する問題である。この基本形の配送計画問題に実際の問題を解くときに発生するさまざまな条件を付加した配送計画問題も数多く存在する。配送計画問題の解法としては、分枝限定法、Lagrange緩和法、動的計画法などの厳密解法と、大規模問題を解くための近似解法が数多く提案されている。

しかし、静脈物流を対象とした配送計画に関する研究は、最近注目され始めたばかりである。静脈物流用配送計画を立案するため、動脈物流用の手法をそのままでは採用できない。表1に動脈物流と静脈物流における配送計画の特徴を示す。動脈物流では、製品を販売店に納入する際の納期を満足させるため、輸送機器を割り当てているのが一般的である。しかし、静脈物流では、輸送コストを削減するため、納期に関しては動脈物流ほど重視されていない。また、配送量に関しても、動脈物流では、全量配送を実施するための配送計画（輸送機器数、輸送量）が要求されるが、静脈物流では、輸送費用を削減するため、できるだけ安く利用できる輸送機器のみを使用すると考えられることから、輸送機器数を所与として、配送要求量の繰越を許すような計画を立案することになると考えられる。また、動脈物流の配送では、1拠点間の配送を1台の輸送機器が担当することを前提としているが、静脈物流では、1拠点間の配送に対して、複数の輸送機器が、配送量を分割して配送することが可能と考えられる。そのため、従来の動脈物流に関する研究に新たな条件を付け加

え、静脈物流に対応した配送計画立案に関する研究を進めることが必要となる。

2. 4 輸送用梱包材のリユースネットワーク

本研究で対象とする輸送用梱包材のリユースネットワークでは、以下のような点について研究を進める必要がある。

- (1) 回収・再生拠点の最適配置問題
- (2) 再生拠点選択問題
- (3) 配送計画問題

回収・再生拠点は、製品を効率的に回収・再生し、かつ輸送費用を削減するため、適切に配置する必要がある。再生拠点選択については、再生拠点の処理能力、輸送手段・輸送費用の関係から常に変化するため、回収された製品の再生拠点をダイナミックに変更していく必要がある。回収された製品の配送は、輸送機器の空きスペースを使用して実施されるため、適切な輸送機器に配送を割り当てる必要がある。本研究では、輸送機器の空きスペースを使用した配送計画の立案を対象として研究を進める。

3. 静脈物流用配送計画モデルの構築

3. 1 対象とするリユースシステム

回収・再生拠点間の製品の輸送は輸送機器の空きスペースを使用し、輸送機器本来の輸送目的(目的地、輸送量、納期等)に影響を及ぼさないように、配送量を割り当て実施される。輸送機器数、輸送機器の種類より、輸送費が変動しないものとし、システム全体における配送量を最大化するように、輸送機器に配送を割り当てることを考える。図4に本研究で対象とする回収・再生拠点間の配送計画モデルの概念図を示す。

3. 2 モデルの前提条件

静脈物流用配送計画モデルを構築するにあたり、以下のような前提条件をおく。

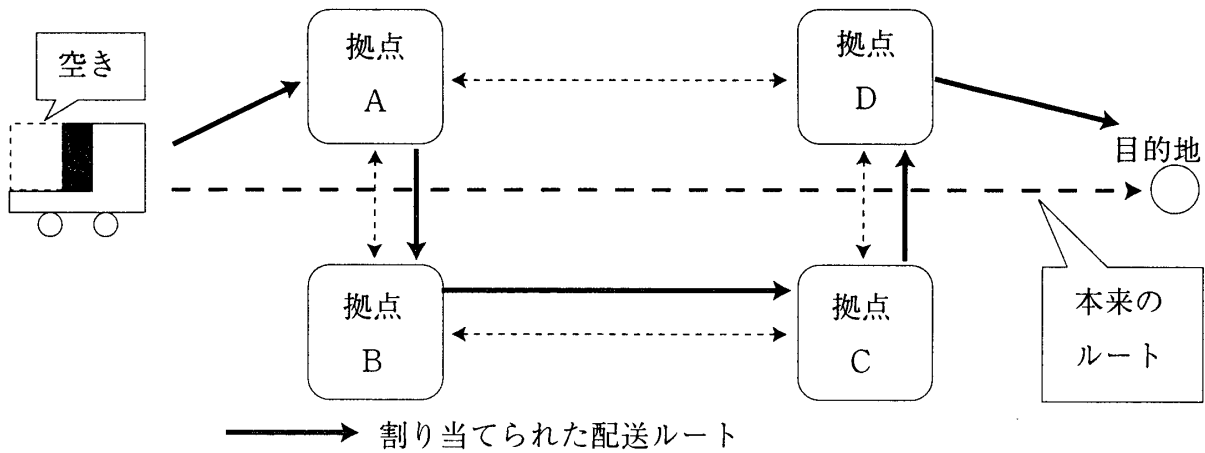


図4 回収・再生拠点間の配送計画モデルの概念図

- (1) 回収・再生拠点間の配送要求量を所与とする。
- (2) 使用する輸送機器によって輸送費は変化しない。
- (3) 配送要求量の次期への繰り越しを認める。
- (4) 輸送機器の本来の出発時間および到着時間を遵守する。
- (5) 配送要求量を分割し、複数の輸送機器が同一拠点間の輸送を行なうことを認める。
- (6) 拠点間の移動時間に関するデータはデータベース化されており、予め輸送機器の利用可能ルートを求めることが可能であるものとする。

3.3 記号の説明

回収・再生拠点に関して以下のような記号を設定する。

N : 拠点数

t_{ij} : 拠点*i*から拠点*j*への移動に必要な時間

D_{ij} : 拠点*i*から拠点*j*への配送要求量

W_{ij} : 拠点*i*から拠点*j*へ運搬することに対する単位あたりの優先度を示すウェイト

輸送機器に関して以下のような情報が、輸送業者から提供されるものとする。

K : 輸送機器の台数

C^k : 輸送機器*k*の積載可能量

T^k : 輸送機器*k*の利用可能時間

v_0^k : 輸送機器*k*の現在位置

v_E^k : 輸送機器*k*の目的地

輸送機器*k*に関する情報(C^k 、 T^k 、 v_0^k 、 v_E^k)を用いて、下記の条件を満足する輸送機器の利用可能ルートをデータベースから抽出する。

$$t_{v_0^k, v_1^k} + \sum_{i=1}^{M^k-1} t_{v_i^k, v_{i+1}^k} + t_{v_{M^k}^k, v_E^k} + \sum_{i=1}^{M^k} g_i \leq T^k \quad (1)$$

ここで、 M^k は、輸送機器*k*の配送ルート上で経由する拠点の数、 g_i は、拠点*i*における作業時間、 v_i^k ：輸送機器*k*が*i*番目に訪問する拠点の番号である。この条件を満足するすべてのルートをデータベースから抽出し(\overline{M}_r^k 、 $v_i^{k,r}$ を求める)、その利用可能ルートの総数を R^k とする。

\overline{M}_r^k : 輸送機器*k*が*r*番目のルートを採用した場合に訪れる拠点数

$v_i^{k,r}$: 輸送機器*k*が*r*番目のルートを採用して配送した場合に*i*番目に訪問する拠点の番号

S_r^k : 輸送機器*k*が*r*番目のルートを採用した場合に配送可能となる拠点間輸送の集合で、以下のように表される。

$$\{(v_1^{k,r}, v_2^{k,r}), \dots, (v_1^{k,r}, v_{\overline{M}_r^k}^{k,r}), (v_2^{k,r}, v_3^{k,r}), \dots, (v_2^{k,r}, v_{\overline{M}_r^k}^{k,r}), \dots, (v_{\overline{M}_r^k-1}^{k,r}, v_{\overline{M}_r^k}^{k,r})\} \in S$$

$P_{ij}^{k,r}$: 輸送機器*k*が*r*番目のルートを採用して配送した場合に求められる拠点*i*から拠点*j*への配送量 (変数)

X_r^k : 輸送機器*k*が*r*番目のルートを採用しての配送することを示す0-1変数。

以上の記号を用いて、回収・再生拠点間の配送計画モデルを構築する。

3.4 配送計画モデルの定式化

各輸送機器が複数の拠点間輸送を行うことを考え、以下のように定式化する。

目的関数は、拠点間配送の優先度を考慮し、総配送量の最大にするものとする。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{i \neq j} W_{ij} \cdot X_r^k \cdot P_{ij}^{k,r} \rightarrow \text{最大化} \quad (2)$$

配送要求量に関する制約：各輸送機器の拠点間配送量の総和は、拠点間配送要求量以下であることを示す制約

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} X_r^k \cdot P_{ij}^{k,r} \leq D_{ij} \quad (i=1, \dots, N, j=1, \dots, N, i \neq j) \quad (3)$$

輸送機器の積載可能量に関する制約：各輸送機器が、選択した配送ルート上の各拠点で、資材の積載可能量を満足することを示す制約

$$\sum_{i=1}^j \sum_{m=j+1}^{\overline{M}_r^k} X_r^k \cdot P_{v_i^{k,r} v_m^{k,r}}^{k,r} \leq D \quad (k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k, j=1, \dots, \overline{M}_r^k - 1) \quad (4)$$

輸送機器の利用可能ルートに関する制約：各輸送機器が、データベースから抽出された利用可能ルートの中からひとつだけ選択することを示す制約

$$\sum_{r=1}^{R^k} X_r^k = 1 \quad (k=1, \dots, K^k) \quad (5)$$

$$X_r^k \in \{0, 1\} \quad (k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k) \quad (6)$$

配送量の非負制約：

$$P_{ij}^{k,r} \geq 0 \quad (k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k, (i, j) \in S_r^k) \quad (7)$$

$$P_{ij}^{k,r} = 0 \quad (k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k, (i, j) \notin S_r^k) \quad (8)$$

上記の(2)～(8)式を回収・再生拠点間の配送計画モデルと呼ぶ。

3. 5 配送計画モデルの混合整数計画問題への再定式化

3. 4で定式化された配送計画モデルは、非線形計画モデルであり、一般的に解くことが非常に困難である。そこで、配送計画モデルを混合整数計画問題に変換するため、以下の記号を導入する。

$\delta_{ij}^{k,r}$ ：輸送機器 k が r 番目のルートを採用した場合に配送可能となる拠点間輸送を示す係数、つまり、

$$\delta_{ij}^{k,r} = \begin{cases} 1 & (i, j) \in S_r^k \\ 0 & (i, j) \notin S_r^k \end{cases} \quad (9)$$

この係数を用いて、変数 $P_{ij}^{k,r}$ と変数 X_r^k の積を解消するため、以下のような制約条件を追加する。

$$\delta_{ij}^{k,r} \cdot P_{ij}^{k,r} \leq V \cdot X_r^k \quad ((i, j) \in S_r^k, k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k) \quad (10)$$

ここで、 V は非常に大きな正数とする。この制約条件は、輸送機器 k が、配送ルート r を選択した場合のみ ($X_r^k = 1$)、配送ルート上の配送量が非負の値をとることができるというものである。この制約条件を導入し、配送計画モデルを混合整数計画問題に変換する。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{i \neq j} W_{ij} \cdot \delta_{ij}^{k,r} \cdot P_{ij}^{k,r} \rightarrow \text{最大化} \quad (11)$$

配送可能量に関する制約：

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} \delta_{ij}^{k,r} \cdot P_{ij}^{k,r} \leq D_{ij} \quad (i=1, \dots, N, j=1, \dots, N, i \neq j) \quad (12)$$

各輸送機器の配送ルートに関する制約：

$$\delta_{ij}^{k,r} \cdot P_{ij}^{k,r} \leq V \cdot X_r^k \quad ((i, j) \in X, k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k) \quad (13)$$

$$\sum_{r=1}^{R^k} X_r^k = 1 \quad (k=1, \dots, K) \quad (14)$$

$$X_r^k \in \{0, 1\} \quad (k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k) \quad (15)$$

各輸送機器の積載量に関する制約：

$$\sum_{i=1}^j \sum_{\overline{m}=j+1}^{\overline{M}_r^k} \delta_{v_i^{k,r} v_{\overline{m}}^{k,r}}^{k,r} \cdot P_{v_i^{k,r} v_{\overline{m}}^{k,r}}^{k,r} \leq C^k \cdot X_r^k \quad \left(\begin{array}{l} k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k \\ (v_i^{k,r} v_{\overline{m}}^{k,r}) \in S_r^k, \overline{m}=1, \dots, \overline{M}_r^k - 1 \end{array} \right) \quad (16)$$

配送量の非負制約：

$$P_{ij}^{k,r} \geq 0 \quad (k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k, (i, j) \in S_r^k) \quad (17)$$

$$P_{ij}^{k,r} = 0 \quad (k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k, (i, j) \notin S_r^k) \quad (18)$$

上記の(11)～(18)式を用いて、配送計画を立案する。

4. 静脈物流用配送計画モデルの解法と数値例

4. 1 Dantzig-Wolfe分解原理に基づく再定式化

3. 5で定式化した配送計画モデルをDantzig-Wolfeの分解原理[26]に基づく問題に変形する。Dantzig-Wolfeの分解原理は、大規模線形計画問題

を解くための手法として、大規模線形計画問題の制約条件の特徴から、線形計画問題を主問題と子問題に分割し、子問題で求められる端点解を用いて主問題を最適化するものである。近年、混合整数計画問題の解法として、このDantzig-Wolfe分解原理と分枝限定法を組み合わせた分枝価格法 (Branch and Price) と呼ばれる解法が提案されている [27]-[30]。

まず、配送計画モデルの制約条件 (13), (15), (16), (16), (18)式を満足する集合を

$$Q = \left\{ \begin{array}{l} P_{1,2}^{k,r} \\ P_{1,3}^{k,r} \\ \vdots \\ P_{N,N-1}^{k,r} \\ X_r^k \end{array} \right\} \in R^{N(N-1)+1} \quad \left. \begin{array}{l} (13)式 \\ (15)式 \\ (16)式 \\ (17)式 \\ (18)式 \end{array} \right\} \quad (19)$$

とすると、配送計画モデルは、

目的関数

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{j \neq i} W_{ij} \cdot \delta_{ij}^{k,r} \cdot P_{ij}^{k,r} \quad \longrightarrow \text{最大化} \quad (20)$$

制約条件

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} \delta_{ij}^{k,r} P_{ij}^{k,r} \leq D_{ij} \quad (i=1, \dots, N, j=1, \dots, N, i \neq j) \quad (21)$$

$$\sum_{r=1}^{R^k} X_r^k = 1 \quad (k=1, \dots, K) \quad (22)$$

$$[P_{1,2}^{k,r}, \dots, P_{N,N-1}^{k,r}, X_r^k]^T \in Q_r^k \quad (k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k) \quad (23)$$

となる。

Q_r^k は、 $X_r^k=1$ のとき、有界な凸体であり、任意の点 H_r^k は端点の凸結合で表され、 $X_r^k=0$ のときは、1つの点のみで表される。 \bar{H}_r^k を $X_r^k=1$ のときの任意の端点とし、端点数が L_r^k 個とすると、

$$H_r^k = \sum_{l=1}^{L_r^k} \bar{H}_r^{k,l} \lambda_l^{k,r}, \sum_{l=1}^{L_r^k} \lambda_l^{k,r} = 1, \lambda_l^{k,r} \geq 0 \quad (24)$$

以上のことから、配送計画モデルを以下のように変形する。

[主問題]

目的関数

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} \sum_{l=1}^{L_r^k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{j \neq i} (W_{ij} \cdot \delta_{ij}^{k,r} \cdot \bar{P}_{ij,l}^{k,r}) \cdot \lambda_l^{k,r} \quad \longrightarrow \text{最大化} \quad (25)$$

制約条件

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} \sum_{l=1}^{L_r^k} (\delta_{ij}^{k,r} \cdot \bar{P}_{ij,l}^{k,r}) \cdot \lambda_l^{k,r} \leq D_{ij} \quad (i=1, \dots, N, j=1, \dots, N, i \neq j) \quad (26)$$

$$\sum_{l=1}^{L_r^k} \lambda_l^{k,r} = \gamma_r^k \quad (k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k) \quad (27)$$

$$\sum_{r=1}^{R^k} \gamma_r^k = 1 \quad (k=1, \dots, K) \quad (28)$$

$$\gamma_r^k \in \{0, 1\} \quad (k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k) \quad (29)$$

$$\lambda_l^{k,r} \geq 0$$

$$(k=1, \dots, K, r=1, \dots, R^k, l=1, \dots, L_r^k) \quad (30)$$

[部分問題]

目的関数

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{j \neq i} (W_{ij} \cdot u_{ij}) \cdot \delta_{ij}^{k,r} \cdot P_{ij}^{k,r} - v_k - w_r \quad \longrightarrow \text{最大化} \quad (31)$$

制約条件

$$\delta_{ij}^{k,r} \cdot P_{ij}^{k,r} \leq V \quad ((i, j) \in S_r^k) \quad (32)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{j+1}^M \delta_{v_i^{k,r} v_j^{k,r}}^{k,r} \cdot P_{v_i^{k,r} v_j^{k,r}}^{k,r} \leq C^k \quad ((v_i^{k,r} v_j^{k,r}) \in S_r^k, j=1, \dots, M_r^k-1) \quad (33)$$

$$P_{ij}^{k,r} \geq 0 \quad ((i, j) \in S_r^k) \quad (34)$$

$$P_{ij}^{k,r} = 0 \quad ((i, j) \notin S_r^k) \quad (35)$$

ここで、 u_{ij} , v_k , w_r はそれぞれ、配送可能量に関する制約、配送ルートに関する制約、凸制約に関する制約のシンプレックス乗数である。

4. 2 計算手順

まず、各拠点間の移動時間に基づいて、経路可能なルートを求めてデータベース化しておく。次に輸送機器の空き情報 (利用可能時間、積載可能量、輸送機器の現在位置、最終目的地) に基づいて、各輸送機器の利用可能なルートを作成したデータベースから抽出し、配送計画問題の入力情報とする。配送要求量と輸送機器の利用可能ルートを入力情報として、配送計画問題の解を求めるため、配送計画モデルの主問題の整数条件を緩和し、解を求め、整数条件を満足しない変数について、分枝操作を行ない、最適解を探索する。図5に静脈物流用配送計画モデルの計算手順を示す。

上記の方法を用いて配送計画を立案するため、簡単なシステムを試作し、数値実験を試みた。

4. 3 数値例

表2に拠点間移動時間、表3に拠点間配送要求

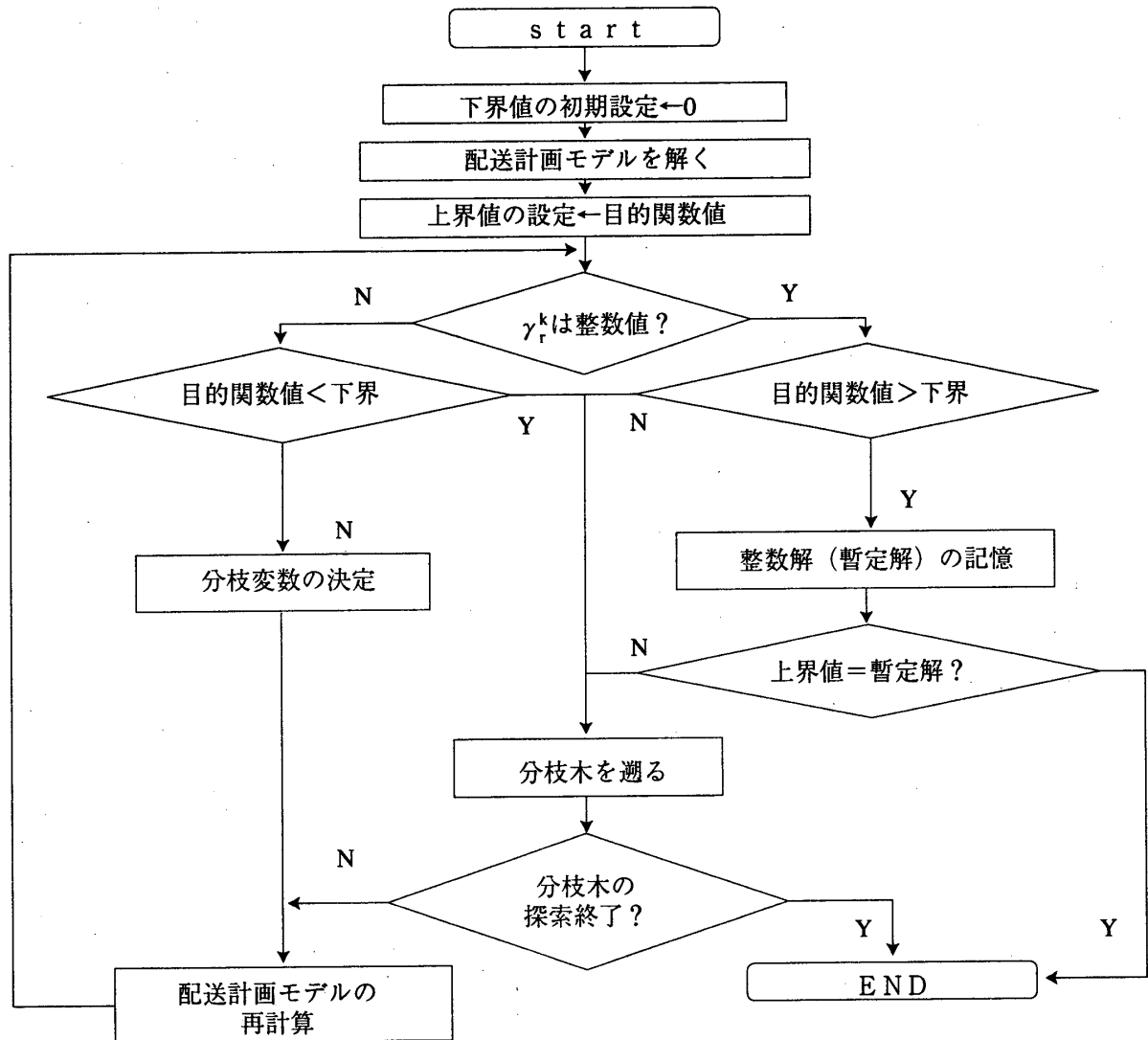


図5 静脈物流用配送計画モデルの計算手順

表2 拠点間の移動時間

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
No.1		2.5	0.9	4.0	3.1
No.2	2.5		3.0	6.0	5.4
No.3	0.9	3.0		3.1	3.2
No.4	4.0	6.0	3.1		4.2
No.5	3.1	5.4	3.2	4.2	

表3 拠点間の配送要求量

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
No.1		500	300	400	200
No.2	100		100	300	100
No.3	200	100		300	200
No.4	100	200	100		200
No.5	300	500	100	400	

表4 輸送機器の利用可能時間と利用可能ルート数

機器No	利用可能時間	ルート数	機器No	利用可能時間	ルート数
No.1	13.9	9	No.6	11.6	5
No.2	12.4	1	No.7	15.6	14
No.3	12.5	4	No.8	20.7	4
No.4	15.0	14	No.9	21.7	15
No.5	9.8	2	No.10	12.6	4

表5 実行結果の一例

機器	利用経路	配送量					
No.1	2->3->5	2->3	100	3->5	200	2->5	100
No.2	1->3	1->3	300				
No.3	5->4	5->4	300				
No.4	3->1->5	3->1	100			1->5	200
No.5	3->4	3->4	300				
No.6	1->4	1->4	300				
No.7	4->3->1->2	4->3	100	4->2	100	4->1	100
		3->1	100	1->2	200		
No.8	5->4	5->4	100				
No.9	1->2	1->2	300				
No.10	5->1	5->1	300				
総配送量		3200					

表6 拠点数、輸送機器数を変化させた場合の計算結果の一例

拠点数	輸送機器数	目的関数値	計算時間(秒)
5	5	1700	0.0
5	7	2600	0.1
5	10	3200	0.3
5	12	3800	1.2
8	5	1600	0.0
8	7	2600	0.1
8	10	3800	0.2
8	12	4800	0.7
8	18	6100	28.7
10	5	1700	0.0
10	7	2700	0.1
10	10	3800	0.3
10	12	5500	0.5
10	18	7500	11.3

量、表4に輸送機器情報の入力データの一例を示す。表5にこの入力データに対する実行結果を示す。表6に拠点数、輸送機器数を変化させた場合の計算結果の一例を示す。表6から、拠点数、輸送機器数、輸送機器数の利用可能ルート数の増加に伴って、計算時間の増大する様子がわかる。また、拠点数に対して輸送機器数が非常に大きい場合に、計算時間が増大することがわかる。

4.4 静脈物流用配送計画立案情報システム

本研究で構築した静脈物流用配送計画立案情報システムは、以下のようなシステムから構成される。図6に本研究で提案した静脈物流用配送計画立案情報システムの概念図を示す。

(1) 拠点間移動可能ルートデータベース更新シ

テム

拠点間移動可能ルートデータベース更新システムは、新たな拠点情報の追加に対して、利用可能なルート更新するシステムである。

(2) 移動可能ルート抽出システム

輸送機器情報（現在位置、目的地、利用可能時間）を入力情報として、輸送機器が利用可能なルートを拠点間移動可能ルートデータベースから抽出するシステムである。

(3) 配送計画立案システム

輸送機器の利用可能ルート情報、拠点間の配送要求量情報を入力情報として、3.5で定式化した配送計画モデルを解くシステムである。

(4) 配送要求量更新システム

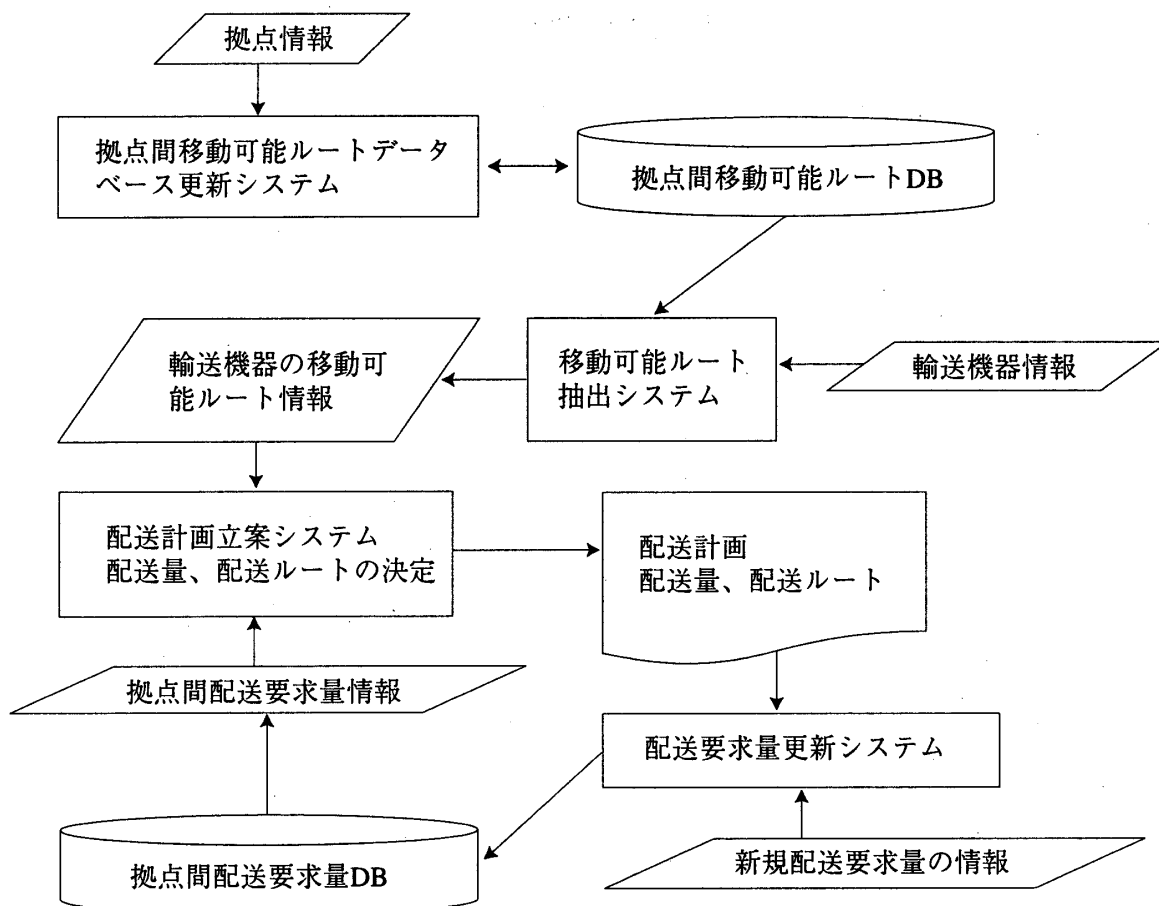


図6 静脈物流用配送計画立案情報システムの概念図

配送済み量と新たな回収量から配送要求量データベースを更新するシステムである。

5. まとめ

本研究では、輸送用梱包材のリユースシステムを対象とした静脈物流用配送計画立案システムに関して以下のことを明らかにした。

- (1) 静脈物流に関する現状と研究に関して調査し、静脈物流の特徴を明らかにした。
- (2) 輸送用梱包材のリユースシステムに対する静脈物流用配送計画モデルを定式化した。
- (3) 定式化した静脈物流用配送計画モデルを用いて数値実験を行い、その特徴を明らかにした。

今後の課題としては、

- (1) 輸送機器の利用可能ルートを選択方法に関する検討
 - (2) 複数の輸送機器による中継を考慮した配送計画の立案に関する検討
- などが挙げられる。

謝辞

平成14年度、15年度の2年間、トオーショウ・ロジテック株式会社から「輸送用包装材リユースのための静脈物流プラットフォームの研究」として助成を受けた。ここに記して、深甚の謝意を表します。

広島大学経済学部入学以来、平木秀作先生にご指導、ご鞭撻をいただきました。ここに記して、深甚の謝意を表します。

広島修道大学、坂口通則先生には、広島修道大学大学院のゼミナールでご指導、ご鞭撻をいただきました。トオーショウ・ロジテック株式会社、島田正春氏、迫田勲氏、元マツダ株式会社 長村俊則氏、愛媛大学、徐祝淇氏、広島大学、宿元明氏には、静脈物流研究会において貴重な資料とご意見、ご説明をいただきました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- [1] 財団法人クリーン・ジャパン・センター、「循

- 環型社会実効元年」(2001)
- [2] トオーショウ・ロジテック株式会社ホームページ、[hppt://www.tosho-h.co.jp](http://www.tosho-h.co.jp)
- [3] 財団法人中国産業活性化センター、「循環型社会の構築を目的とした自動車静脈系システム調査報告書」(1999)
- [4] トヨタ自動車ホームページ、<http://www.toyota.co.jp/index.html>
- [5] 永田勝也監修、「家電製品のリサイクル100の知識」、東京書籍(2001)
- [6] 松下電器産業、「環境報告書2003年度版」
- [7] 富士通、「富士通グループ環境経営報告書2003年度版」
- [8] 富士フィルムホームページ、<http://www.fujifilm.co.jp/indexf.html>
- [9] 富士XEROXホームページ、<http://www.fujixerox.co.jp/>
- [10] 吉川弘之、IM研究会、「逆工場 見えてきた製造業のこれからの10年」、日刊工業新聞社(1999)
- [11] M.Fleischmann, J.M. Bloemhof- Ruwwaard, R. Dekker, E van der Laan, J. A. E. E. van Nunen, and L. N. van Wassenhove, "Quantitative models for reverse logistics: A review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 103, pp.1-7 (1997)
- [12] M.Fleischmann, H. R. Krikke, R. Dekker and S. D. P. Flapper, "A Characterisation of Logistics Network for Product Recovery", *Omega*, Vol.28, pp.653-666 (2000)
- [13] A. I. Barrows, R. Dekker and V. Schonlten, "A two-level network for recycling sand: a case study", *European Journal of Operational Research*, Vol.110 pp.199-214 (1998)
- [14] D. Louwers, B. J. Kip, E. Peters, F. Souren and S. D. P. Flapper, "A facility location allocation model for re-using carpet materials", *Computer and Industrial Engineering*, Vol.36, No.4, pp.1-15 (1999)
- [15] V. Jayaraman, R. A. Patterson and E. Rolland, "The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures", *European Journal of Operational Research*, Vol. 150, pp.128-149 (2003)
- [16] V. Jayaraman, V. D. R. guide Jr. and R. Srivasrava, "A closed-loop logistics model for remanufacturing", *Journal of the Operational Research Society*, Vol.50, pp.497-508 (1999)
- [17] H. R. Krikke, A. Harten and P. C. Schuur, "Business case Océ: reverse logistics network re-design for copiers", *OR Spektrum*, Vol.21, No.3, pp.381-409 (1999)
- [18] L. Kroon and G. Vrijens, "Returnable containers: an example of reverse logistics", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.25, No.2, pp.56-68 (1995)
- [19] M. Fleischmann, R. Kuik and R. Dekker, "Controlling inventories with stochastic item returns: A basic model", *European Journal of Operational Research*, Vol. 138, pp. 63-75 (2002)
- [20] M. Fleischmann and R. Kuik, "On optimal inventory control with independent stochastic item returns", *European Journal of Operational Research*, Vol.151, pp.25-37 (2002)
- [21] S. Minner, "Strategic safety stocks in reverse logistics supply chain", *International Journal of Production Economics*, Vol. 71, pp. 417-428 (2001)
- [22] 石原良晃、「リサイクルを考慮した生産・在庫システムの設計」, 日本経営工学会平成12年度秋季大会予稿集, pp.200-201 (2000)
- [23] 石原良晃, "廃棄部品のリサイクルを考慮した生産・在庫システムの設計", 日本経営工学会平成13年度春季大会予稿集, pp.189-191 (2001)
- [24] 石原良晃, "リサイクルを考慮した生産・在庫システムの設計", 日本ロジスティクスシステム学会誌, Vol.3, No.2, pp.7-15 (2003)
- [25] 久保 幹雄、田村 明久、松井 知己編、「応用数理計画ハンドブック」、第16章、pp.983-1080、朝倉書店 (2000)
- [26] G.B.Dantzig and P. Wolfe, "Decomposition principle for linear programs", *Operations Research*, Vol.8, pp.101-111 (1960)
- [27] G.Desaulniers, J.Desrosiers, I. Ioachim, M. M. Solomon, F. Soumis and D.

- Villeneuve , "A unified framework for deterministic time constrained vehicle routing and crew scheduling problems" , In T . G . Vranic and G . Laporte , editors , Fleet management and Logistics , chapter 3 , pp.57 -93, Kluwer Academic Publishers (1998)
- [28] C . Barnhart , E . L . Johnson , G . L . Nemhauser, M. W. P. Savelsbergh and P. H. Vance , "Branch - and - price : Column Generation for solving huge integer programs" , Operations Research, Vol.46, No.3, pp.316 -329 (1998)
- [29] M. W. P. Savelsbergh, "A branch-and-price algorithm for generalized assignment program" , Operations Research, Vol.45, No.6, pp.831 -841 (1997)
- [30] F. Vanderbeck, "On Dantzig-Wolfe decomposition in integer programming and ways to perform branching in a branch - and - price algorithm" , Operations Research, Vol.48, No.1, pp.111. 129 (2000)