

博士論文

静脈物流の効率化・低炭素化に関するポテンシャル評価



2022年3月

北九州市立大学大学院

国際環境工学研究科 環境システム専攻

大久保 伸



# 目次

目次 .....	i
要旨 .....	iii
第1章 序論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 研究の概要 .....	7
参考文献 .....	22
第2章 既往研究の整理と本研究の位置づけ .....	23
2.1 既往研究の整理 .....	23
2.2 研究の目的 .....	25
2.3 本論文の構成 .....	27
参考文献 .....	28
第3章 処理拠点の変更可能性に着目した輸送の低炭素化と循環圏形成の検討 .....	31
3.1 はじめに .....	31
3.2 市内産業廃棄物処理施設の余力の推定 .....	32
3.3 処理拠点の変更可能割合の算定 .....	38
3.4 処理先拠点の変更に伴う産業廃棄物輸送の循環圏の変化と低炭素化 .....	46
3.5 まとめ .....	49
参考文献 .....	50
第4章 輸送機関の選択要因と輸送費用の規定要因分析 .....	51
4.1 はじめに .....	51
4.2 使用するデータ .....	52
4.3 数量化理論第Ⅱ類を用いた輸送機関の選択要因の分析 .....	55
4.4 モーダルシフト可能量の推計 .....	57
4.5 輸送費用を目的関数とした重回帰分析 .....	61
4.7 まとめ .....	63
参考文献 .....	64
第5章 処理業者の実績データに基づく輸送効率化のポテンシャル評価 .....	65
5.1 はじめに .....	65
5.2 分析の枠組み .....	66
5.3 輸送費用最小化を指向した最適化計算 .....	69
5.4 搬出頻度緩和による輸送効率化ポテンシャルの評価 .....	71
5.5 搬出頻度緩和を考慮した輸送費用最小化計算 .....	75
5.6 その他副次的な効果 .....	76
5.7 まとめ .....	77
参考文献 .....	78

第 6 章 結論 .....	79
6.1 各章のまとめ.....	79
6.2 本論の結論 .....	81
6.3 今後の課題 .....	81
謝辞 .....	83

## 要旨

本研究は、静脈物流、特に廃棄物等の輸送問題に着目し、経済、環境面からの体系的なアプローチにより、輸送効率化や低炭素化に関するポテンシャル評価を行ったものである。

廃棄物等の資源循環や適正処理は、各種政策の導入により、これまで着実に進捗している状況にある。一方で、資源循環や適正処理のため、処理が広域化している一面もある。今後も、廃棄物の発生抑制等に伴う廃棄物の減量化により施設の集約化に加え、地域循環共生圏の構築に伴い、広域的に廃棄物の処理が進んでいくことが予測される。これら広域化を支えるための廃棄物の輸送、いわゆる静脈物流を、社会インフラとして維持していくことは重要である。ここで社会的な情勢に目を向けてみると、地球温暖化対策における脱炭素化が喫緊の課題であり、化石燃料の使用の抑制があらゆる局面で求められている。さらに、人口減少、少子高齢化に伴う労働人口減少により、担い手不足が指摘されている。しかしながら、静脈物流の分野として、これら問題への対策は、十分に講じられていない。また、研究的な観点からも、地域や廃棄物の種類を限定した研究にとどまっており、静脈物流を全体観として定量的に分析した事例は少ないことから、法規制下における廃棄物輸送の最適化やその限界性を明らかにしていく研究が求められる。

そこで本研究では、輸送のロット単位のデータを用いて、①輸送距離の短縮化、②車両から鉄道、船舶へのモーダルシフト、③輸送重量のロット拡大に伴う車両の大型化、船舶の利用の3つの切り口において、経済性や環境負荷（特に二酸化炭素の排出量）の観点での体系的評価により、静脈物流における輸送効率化方策について述べる。

第1章では、本研究の背景として静脈物流の輸送効率化の必要性を述べた上で、各種資料を整理し、静脈物流の実態と課題を整理した。

第2章では、既往研究を用いて、これまでの研究の進展と残課題を整理し、本研究の目的と位置づけを整理し、本稿の構成を示した。

第3章では、行政が保有する産業廃棄物処理施設情報に加えて処理の実績情報を入手し、これらの情報から施設の受入余力を推計した。次に、排出事業者のアンケート調査結果から廃棄物の処理先変更可能性を把握した。そこで、受入余力と処理先変更可能割合を制約条件に加えた、輸送トンキロ最小化を目的とした輸送問題を計算した。その結果、市内の処理施設は燃え殻を対象とする処理施設を除き十分な余剰能力があることを示した。また、処理先の変更の可能性という観点では、廃油、廃酸、廃アルカリなど処理先の変更が難しい廃棄物がある一方で、動植物性残さ、鉍さい、木くずなど変更しやすいものがあることを示した。さらに、輸送トンキロ最小化計算の結果、最大で二酸化炭素排出量を現状から51%減少の効果を得た。

第4章では、静脈物流の特性に応じた、すなわち、廃棄物の種類別といった個別の問題として整理するのではなく、輸送に影響を及ぼす項目を変数として盛込み、輸送機関の選択要因や輸送費用のモデルとして一般化した。さらに、輸送費用を目的関数とする重回帰分析を行った。その結果、鉄道へのシフトを考える際には輸送費用ではなくコンテナ利用や遠方輸送など排出形態が問題である一方、船舶は輸送費用がネックとなっていることを示した。

第5章では、モーダルシフトによる輸送効率化を考える際は、搬出する頻度をコントロールして、輸送機関に応じたロットの確保が必要であることが想定される。ゆえに、1次輸送で回収された廃棄物が集約される地点である、積替保管・中間処理後以降の2次輸送を対象として、納期の制約が小さいという静脈物流の本質的な特徴に注目し、搬出頻度緩和による輸送効率化のポテンシャルを検討した。これにより、輸送費用の28.1%削減効果が見込めることを示した。

第6章では、各章における成果を述べた上で、本研究で得られた成果の用途について、主体別に提案を行った。さらに、本研究の総括とともに、今後に向けた検討課題を提示した。

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

廃棄物の処理は、時々の時代背景が示す課題に応じるように対策を講じ、資源循環の促進や適性処理の確保に努めてきた。図 1-1 は、我が国における循環分野の法の整備状況の変遷を示している。戦後から 1970 年代にかけては公衆衛生の向上や公害対策が主な課題となっていたが、ここ最近では、循環型社会形成への対策として、各種リサイクル法の整備が盛んに行われている<sup>1)</sup>。

年代	主な課題	法律の制定
戦後～1950年代	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境衛生対策としての廃棄物処理</li> <li>衛生的で、快適な生活環境の保持</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>清掃法（1954）</li> </ul>
1960年代～1970年代	<ul style="list-style-type: none"> <li>高度成長に伴う産業廃棄物等の増大と「公害」の顕在化</li> <li>環境保全対策としての廃棄物処理</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>生活環境施設整備緊急措置法（1963）</li> <li>廃棄物処理法（1970）</li> <li>廃棄物処理法改正（1976）</li> </ul>
1980年代	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物処理施設整備の推進</li> <li>廃棄物処理に伴う環境保全</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広域臨海環境整備センター法（1981）</li> <li>浄化槽法（1983）</li> </ul>
1990年代	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物の排出抑制、再生利用</li> <li>各種リサイクル制度の構築</li> <li>有害物質（ダイオキシン類含む）対策</li> <li>廃棄物の種類・性状の多様化に応じた適正処理の仕組みの導入</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物処理法改正（1991）</li> <li>産業廃棄物処理特定施設整備法（1992）</li> <li>パーゼル法（1992）</li> <li>環境基本法（1993）</li> <li>容器包装リサイクル法（1995）</li> <li>廃棄物処理法改正（1997）</li> <li>家電リサイクル法（1998）</li> <li>ダイオキシン類対策特別措置法（1999）</li> </ul>
2000年～	<ul style="list-style-type: none"> <li>循環型社会形成を目指した3Rの推進</li> <li>産業廃棄物処理対策の強化</li> <li>不法投棄対策の強化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>循環型社会形成推進基本法（2000）</li> <li>建設リサイクル法（2000）</li> <li>食品リサイクル法（2000）</li> <li>廃棄物処理法改正（2000）</li> <li>PCB特別措置法（2001）</li> <li>自動車リサイクル法（2002）</li> <li>産廃特措法（2003）</li> <li>廃棄物処理法改正（2003～06、10）</li> <li>小型家電リサイクル法（2013）</li> </ul>

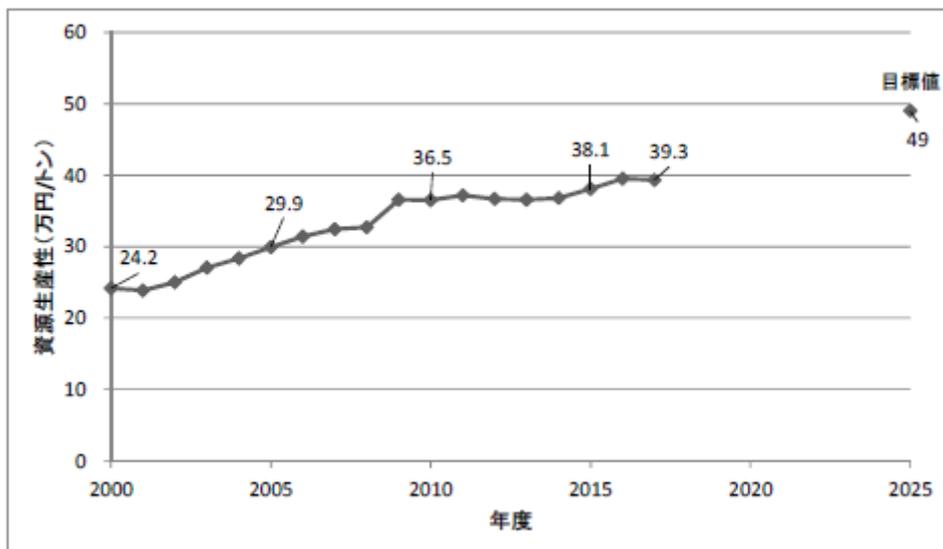
引用) 環境省：日本の廃棄物処理の歴史と現状

図 1-1 法制度の歴史（戦後～現在）

これら法整備やそれに基づく各種対策による効果については、循環型社会形成促進基本計画<sup>2)</sup>において、モノの流れを示す物質フローの3つの断面である「入口」、「循環」、「出口」において代表する指標として「資源生産性」、「循環利用率」、「最終処分量」の3つの指標を数値目標として定め、進捗管理がなされている。これらの指標については、毎年取りまとめられ進捗の報告がなされている。以下では、これら指標の概要と状況を述べる。

### 1.1.1 資源生産性

資源生産性とは、GDPあたりの天然資源等投入量で計算される指標であり、少ない天然資源でどれだけ大きな豊かさを生み出しているかを総合的に表す指標である。すなわち、各産業がより少ない天然資源で生産活動を向上させているか、人々の生活がいかにより物を有効に使っているかなどを定量的に図っている。図 1-2 は、資源生産性の推移を示しており、これまでは増加傾向を示していたが、直近 2017 年度は微減し、39.3%となる。



引用) 中央環境審議会循環型社会部会：第四次循環型社会形成推進基本計画の進捗状況の第1回点検結果について<sup>3)</sup>

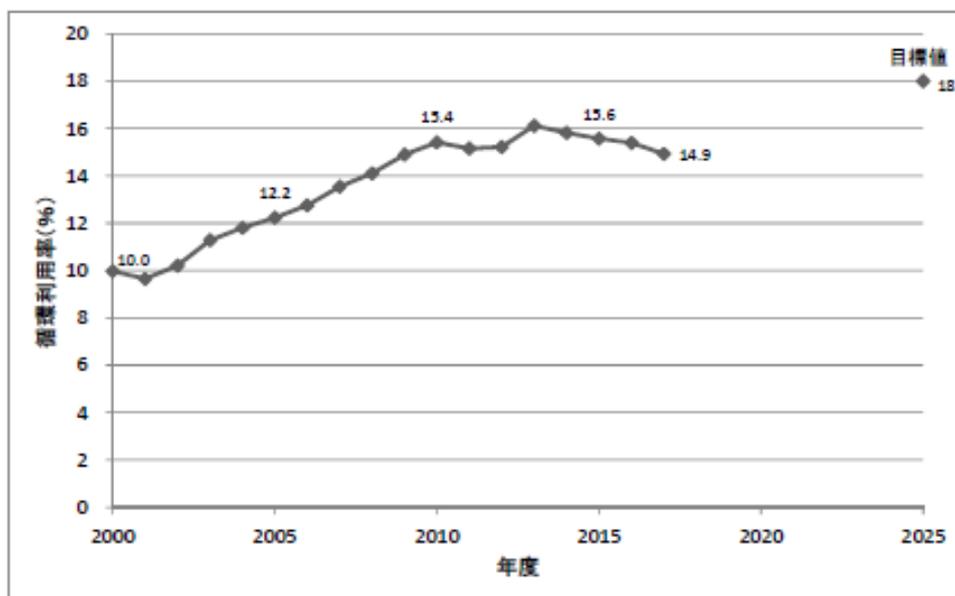
図 1-2 資源生産性の推移

### 1.1.2 循環利用率

循環利用率は、排出された廃棄物がどれだけ循環利用されたかを図る「出口側」と循環利用されたものが、社会経済活動にどのくらい使われたかを図る「入り口側」の2つの側面からの指標としている。

#### (1) 入り口側

入り口側の循環利用率とは、天然資源投入量と循環利用量を分母に、循環利用量を分子にとった指標であり、循環利用されたものが、どのくらい社会経済に投入されたかを示すものである。この指標の推移をみると、2010年度までは増加傾向を示していたが、循環利用量の減少に加えて、天然資源投入量の増加により、直近では減少に転じ、2017年度は、14.9%となっている。

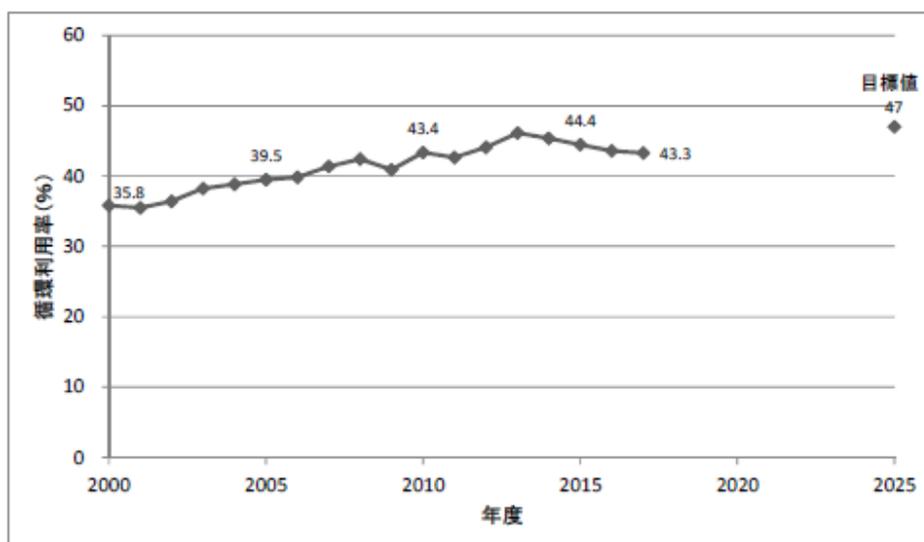


引用) 中央環境審議会循環型社会部会：第四次循環型社会形成推進基本計画の進捗状況の第1回点検結果について<sup>3)</sup>

図 1-3 入り口側の循環利用率の推移

(2) 出口側

出口側の循環利用率は、廃棄物等の排出量あたりの循環利用量として計算される指標である。この指標は、廃棄物発生量の減少とともに、循環利用量も減少していることからここ数年は減少傾向を示している。2017年度は43.3%となる。



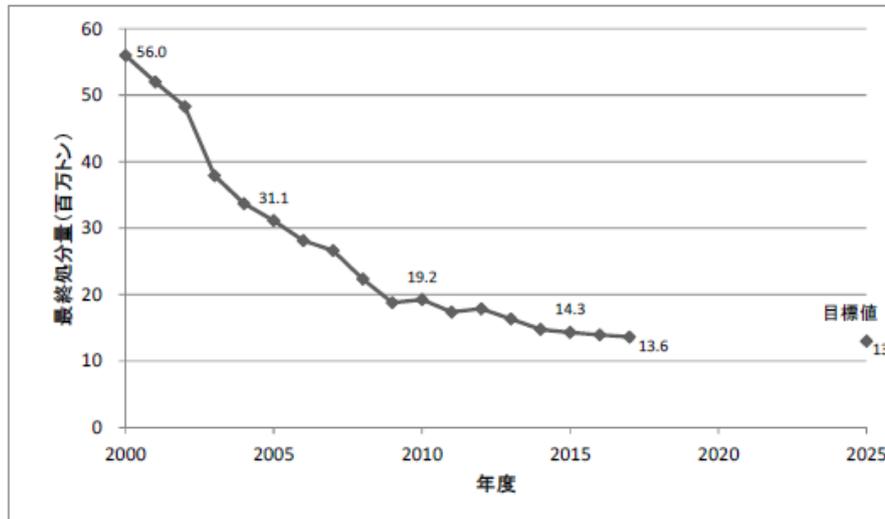
引用) 中央環境審議会循環型社会部会：第四次循環型社会形成推進基本計画の進捗状況の第1回点検結果について<sup>3)</sup>

図 1-4 出口側の循環利用率の推移

1.1.3 最終処分量

最終処分量は、廃棄物の最終処分場の確保という課題に直結した指標であり、廃棄物の埋立量としている。図 1-5 最終処分量は、減少傾向が継続しており、2017年度では13.6百万トン

となっており、廃棄物の発生抑制、減量・減容化に加えて循環利用が進んでいることが伺える。



引用) 中央環境審議会循環型社会部会：第四次循環型社会形成推進基本計画の進捗状況の第1回点検結果について<sup>3)</sup>

図 1-5 最終処分量の推移

このように、直近では高止まり若しくは下げ止まりの傾向がみられるものの、各種対策により循環型社会の形成が進捗度合いは、指標により確認出来る。しかしながら、最終処分量でみるように、現状の技術では廃棄物をゼロにすることを実現することは難しい。このため、廃棄物等の循環利用並びに適正処理を実施する体制の整備は、引き続き講じていく必要がある。ところで、廃棄物処理を面的な観点で見ると、廃棄物の発生場所において処理が完結することはほとんどない。したがって、廃棄物の発生場所から廃棄物の処理施設先までを繋ぐ輸送が必要になる。この一連の処理プロセスを人体の血液循環になぞらえて、調達・生産から消費にわたる流れを「動脈物流」と呼ぶのに対し、消費されたものが不要となったものが排出し輸送されて、再資源化、適正処分するまでを「静脈物流」と一般に呼ぶ。この輸送を担い、事業として行う業者のことを収集運搬業者というが、収集運搬業者は、静脈物流を支える必要なインフラの一つといえる。

第四次循環型社会形成推進基本計画<sup>2)</sup>は、概ね2025年までに循環型社会の形成のために、国が講ずべき施策を示しているものであり、「多種多様な地域循環共生圏形成による地域活性化」、「適正処理の更なる推進と環境再生」、「適正な国際資源循環体制の構築と循環産業の海外展開の推進」、「ライフサイクル全体での徹底的な資源循環」、「万全な災害廃棄物処理体制の構築」といった個別の対策に対して包括的な「持続可能な社会づくりとの統合的取組」があり、それらを支える基盤となるものとして「循環分野における基盤整備」という7つの柱で構成されている。これら取組みの中には、「広域」というキーワードが散りばめられている。例えば、セメント、鉄鋼、非鉄精錬、製紙等の動脈産業やエコタウン、リサイクルポート等の高度なりサイクル技術を有する静脈産業の集積地との間で“広域”的な循環や地域でリサイクルすること

ができない循環資源の“広域”的なリサイクルを促進、製品系循環資源や枯渇性資源を含む循環資源については、より“広域”での循環を念頭に、廃棄物処理法の広域認定制度・再生利用認定制度を適切に活用に加えて、人口減少による平常時の廃棄物の発生量の減少、廃棄物処理や資源循環の担い手の不足等を背景に廃棄物処理施設の“広域”化・集約化などの記載がある。すなわち、広域輸送の役割が静脈物流に求められており、その役割はより一層重要になる。他方、パリ協定に基づき我が国は、2030年度までに2013年度比で46.0%の温室効果ガスの削減する目標を掲げている<sup>4)</sup>。さらに、第203回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説で2050年脱炭素化社会の実現を目指す宣言がなされる<sup>5)</sup>など、社会情勢の急激な変化として、地球温暖化対策としての脱炭素対策があらゆる局面で求められる状況にある。ただ、現在の静脈物流は、化石燃料を使用する車両に依存しているため、鉄道・船舶など二酸化炭素排出の少ない方法へ変更や輸送回数を減らす、輸送先を変えるなどに加えて、車両の燃費向上やEV化などのハード的な対策を講じていくことも必要になる。さらに、将来の人口減少・少子高齢化による労働人口の減少に伴い、人手不足に陥り事業を継続できなくなることも懸念されている<sup>6)</sup>。特に、静脈物流を担う企業は、従業員数で30人未満の中小企業が9割であることに加え、最低賃金も十分に確保できない面もあることから、約4割の廃棄物処理事業者で人材の確保が難しいことを課題として挙げている<sup>7)</sup>。

これらを受けて、国では輸送効率化に資する各種施策を展開している。その一つとして、車両から鉄道・船舶への輸送機関の転換（モーダルシフト）がある。特に2014年から2017年には納期の制約が少ないという特性に着目して、循環資源を対象とした事業を展開している<sup>8)</sup>。しかし、業界団体である全国産業資源循環連合会の調査では、収集運搬における二酸化炭素排出量は2019年で48.7万t-CO<sub>2</sub>と推計しており、直近年としては減少しているものの2013年と比較するとわずかに上昇している（表1-1）。また、図1-6から輸送機関についてみると、鉄道による輸送を利用しているが1.4%と低く、さらに、船舶を利用は2.7%に留まっている<sup>9)</sup>ことから十分な対策効果が挙げられていない。

表 1-1 産業廃棄物処理業における二酸化炭素排出量の推移

排出源（業種）	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
収集運搬業	42.6	42.6	42.1	42.8	43.8	45.7	47.0	49.8	48.9	49.6	49.3	52.0	48.7
ガソリン	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4
軽油	41.7	41.6	41.2	41.9	42.9	44.8	46.1	48.9	48.1	48.8	48.6	51.2	48.1
その他	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2
中間処理業	419.2	407.3	386.5	408.4	408.7	419.8	423.9	434.7	442.3	453.9	466.9	485.6	471.6
焼却	451.9	439.3	418.9	443.0	445.5	456.7	463.8	477.5	485.2	499.4	513.0	530.0	515.2
コンポスト化	4.6	4.7	5.0	5.5	5.3	5.3	5.3	5.2	4.9	5.0	5.1	5.3	5.9
発電	-12.6	-11.8	-12.5	-14.6	-16.6	-16.5	-18.1	-19.8	-20.8	-21.6	-22.1	-22.9	-22.6
熱回収	-24.6	-24.9	-24.9	-25.6	-25.5	-25.8	-27.1	-28.2	-26.9	-28.8	-29.1	-26.8	-26.9
最終処分業	29.0	26.6	23.9	24.7	26.7	27.5	28.8	29.6	25.5	27.7	19.8	21.4	19.1
有機性汚泥	11.5	9.8	9.9	10.1	10.4	10.4	10.5	10.9	9.8	13.1	11.2	10.6	9.7
紙くず	9.8	9.3	7.5	7.5	8.2	9.1	9.3	8.9	7.8	7.6	2.4	2.1	2.5
木くず	5.4	5.3	4.2	4.7	5.6	5.3	5.8	6.1	5.3	4.1	3.8	6.5	5.1
その他	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	3.3	3.7	2.5	2.9	2.4	2.3	1.8
小計（低炭素社会実行計画の目標対象活動）	490.8 (1.03)	476.5 (1.00)	452.5 (0.95)	475.9 (1.00)	479.2 (1.01)	493.0 (1.04)	499.7 (1.05)	514.1 (1.08)	516.7 (1.09)	531.2 (1.12)	536.0 (1.13)	559.0 (1.17)	539.3 (1.13)
業務部門	68.2	67.3	61.4	61.7	68.0	72.4	71.8	70.4	69.1	69.2	68.0	65.1	63.1
電気	27.3	27.0	24.9	26.1	30.7	35.4	35.7	34.9	34.2	34.0	33.4	32.5	32.8
軽油・重油・ガス等	40.9	40.4	36.5	35.6	37.3	37.0	36.1	35.6	34.9	35.2	34.6	32.6	30.3
合計	559.0 (1.04)	543.8 (1.01)	513.9 (0.96)	537.6 (1.00)	547.2 (1.02)	565.4 (1.05)	571.4 (1.06)	584.5 (1.09)	585.8 (1.09)	600.4 (1.12)	604.0 (1.12)	624.1 (1.16)	602.4 (1.12)

※ 小計、合計の括弧は2010年度の排出量を1とした時の比率である。

引用) 公益社団法人全国産業資源循環連合会：低炭素社会実行計画の進捗状況について

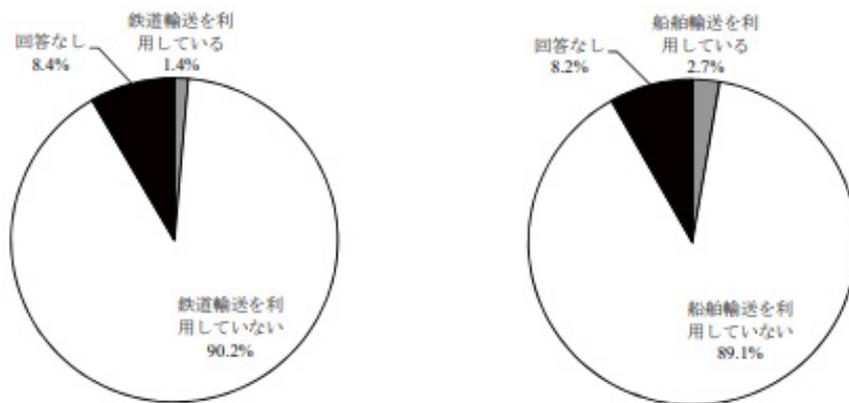


図 25 (左) 鉄道輸送の利用状況 (右) 船舶輸送の利用状況

引用) 公益社団法人全国産業資源循環連合会：低炭素社会実行計画の進捗状況について

図 1-6 車両輸送以外の運搬手段の利用状況

## 1.2 研究の概要

### 1.2.1 研究で対象とする範囲

#### (1) 物質フローからみた静脈物流

本研究で対象とする静脈物流について、図 1-7 の廃棄物の処理フローと輸送の関係を用いて定義する。人体の血液循環になぞらえて、調達から生産、流通、使用・消費の流れを動脈物流というのに対して、廃棄物等の発生から、回収、再資源化、中間処理、最終処分されるまでの流れを静脈物流と呼ばれていることはこれまで述べてきた通りだが、静脈物流を細分化してみると、廃棄物等の排出場所から中間処理されるまでの輸送と再生原料に向かうまでの輸送（輸送①、輸送②及び輸送③）を「1次輸送」と、また、中間処理後物の最終処分や再生原料に向かうまでの輸送（輸送⑤、⑥、⑦）を「2次輸送」がある。このように、静脈物流は輸送に加えて、積換保管、中間処理、最終処分を含む概念であるが、本研究では輸送を中心に、研究を行うものである。

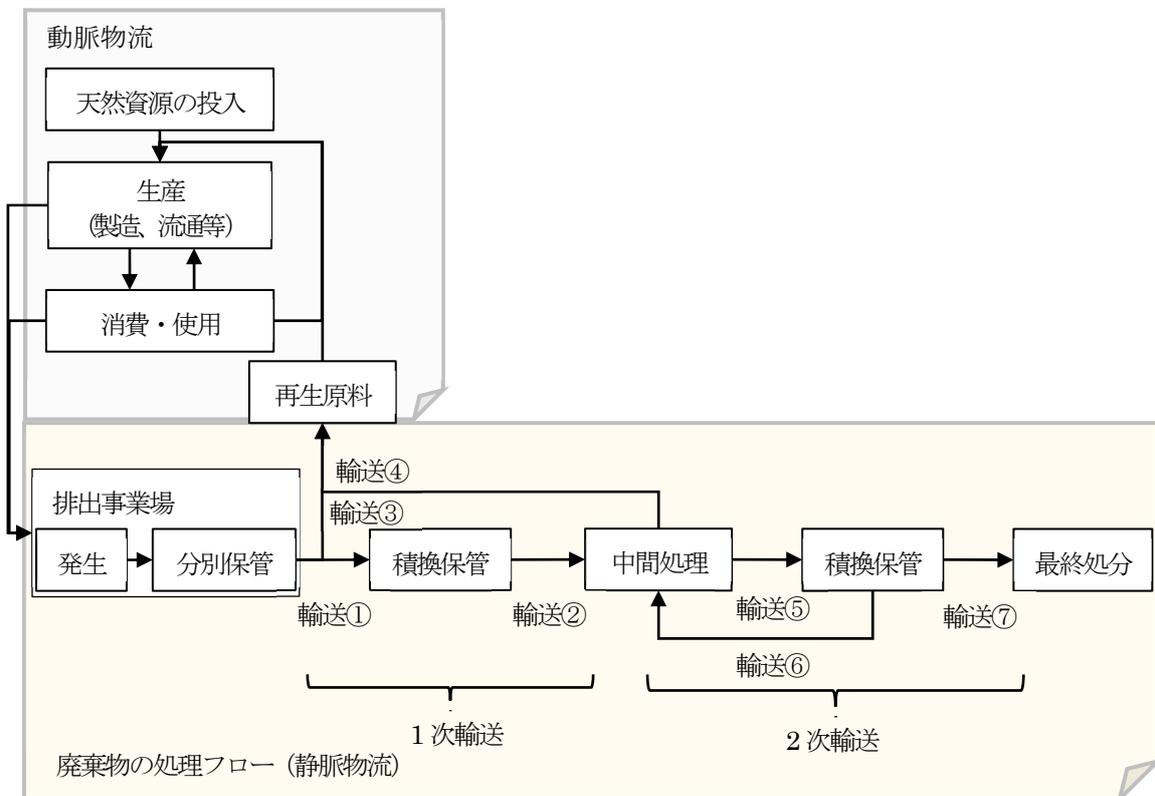


図 1-7 廃棄物の処理フローでみる静脈物流の範囲

#### (2) 対象とする廃棄物

また、静脈物流が対象とする荷は、廃棄物処理法で規定する廃棄物に加えて、循環型社会形成推進基本法で挙げる、「一度使用され、若しくは使用されずに収集され、若しくは廃棄された物品又は製品の製造、加工、修理若しくは販売、エネルギーの供給、土木建築に関する工事、農畜産物の生産その他の人の活動に伴い副次的に得られた物品」いわゆる有価物を加えた廃棄物等がある。

廃棄物には、事業活動に伴って排出された産業廃棄物と、それ以外の一般廃棄物があると廃棄物処理法で定義されている。一般廃棄物には、事業活動に伴って生じた廃棄物であって産業廃棄物に該当しないものを事業系一般廃棄物、家庭から排出される廃棄物を家庭系一般廃棄物と区別して呼ばれることが通例である（図 1-8）。2.1 で論じたように、家庭系一般廃棄物の研究の数と比較して、事業活動に伴うものは少ないことから、本研究では、産業廃棄物、事業系一般廃棄物に加えて、事業活動に伴って排出される有価物を取扱うこととした。

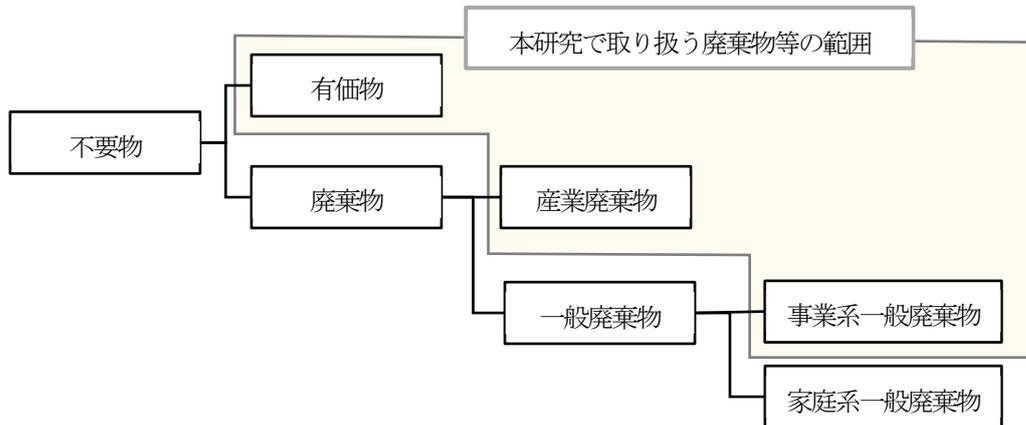
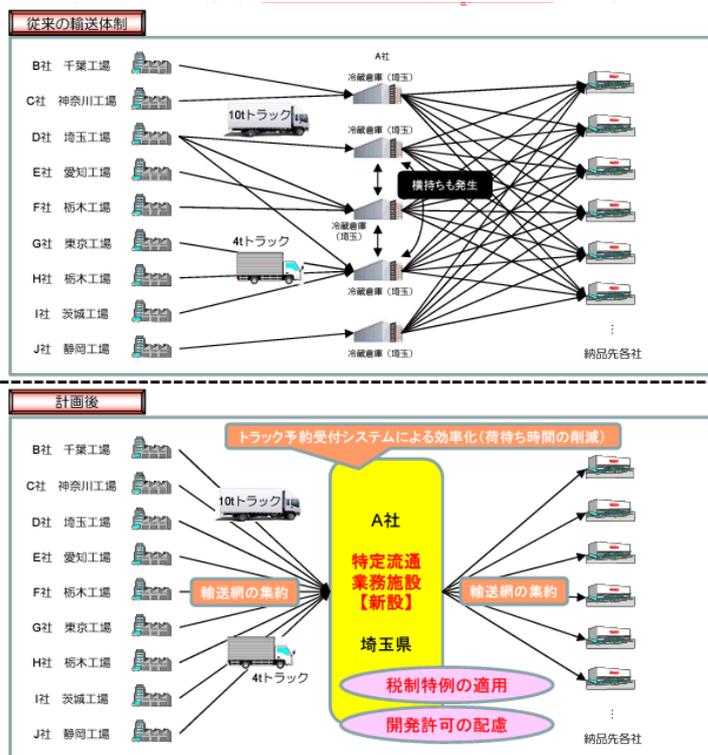


図 1-8 廃棄物の分類

物流分野（特に動脈物流を中心）では、物流総合効率化法に基づき、流通業務（輸送、保管、荷さばき及び流通加工）を一体的に実施するとともに、「輸送網の集約」、「モーダルシフト」、「輸配送の共同化」等の輸送の合理化などが進められている。以下にこれら取組みの対策の概略に加えて、動脈物流と静脈物流の違いを論じた上で、廃棄物処理法で輸送時に課せられている規定を示すことで、静脈物流に関する研究を進めていくことの意義を述べる。

### (3) 輸送網の集約

輸送網の集約とは、物流拠点を複数の事業者等で集約を行うことで、車両に積載する荷物の速やかな確保を行うことで、ドライバーの待機時間を減少させるなどの効果が得られる対策である。

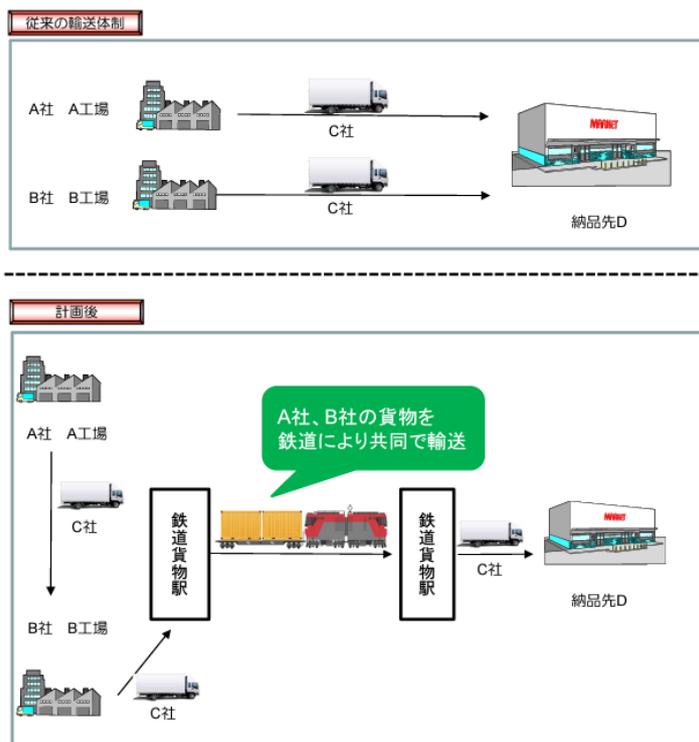


引用) 国土交通省：「総合効率化計画」認定申請の手引きより

図 1-9 輸送網の集約化のイメージ

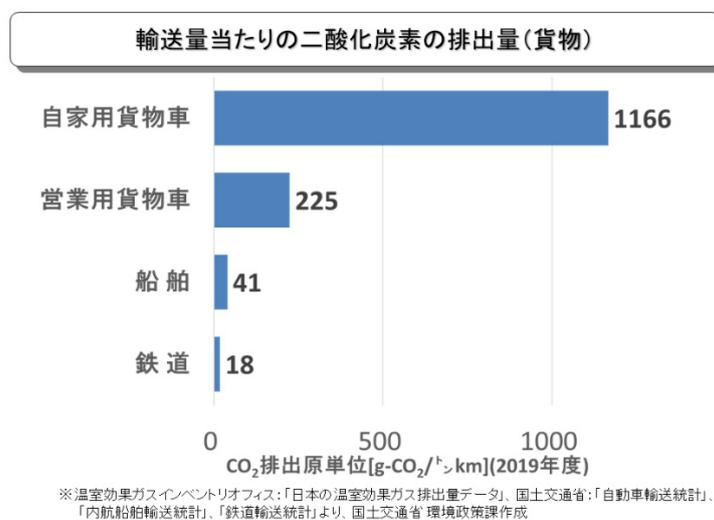
### (4) モーダルシフト

モーダルシフトとは、図 1-10 に示すように、トラックなどの車両から、環境負荷の小さい鉄道や船舶などに変更することで輸送の効率を高める取組みである。輸送機関別の輸送量トンキロあたりの二酸化炭素排出量の原単位(図 1-11)と比較してみると、営業用貨物車で 225g-CO<sub>2</sub>/トンキロであり、船舶は約 1/5、鉄道は約 1/13 となることから、輸送機関を変更することで、二酸化炭素削減効果を得られる。



引用) 国土交通省：「総合効率化計画」認定申請の手引きより

図 1-10 モーダルシフトのイメージ

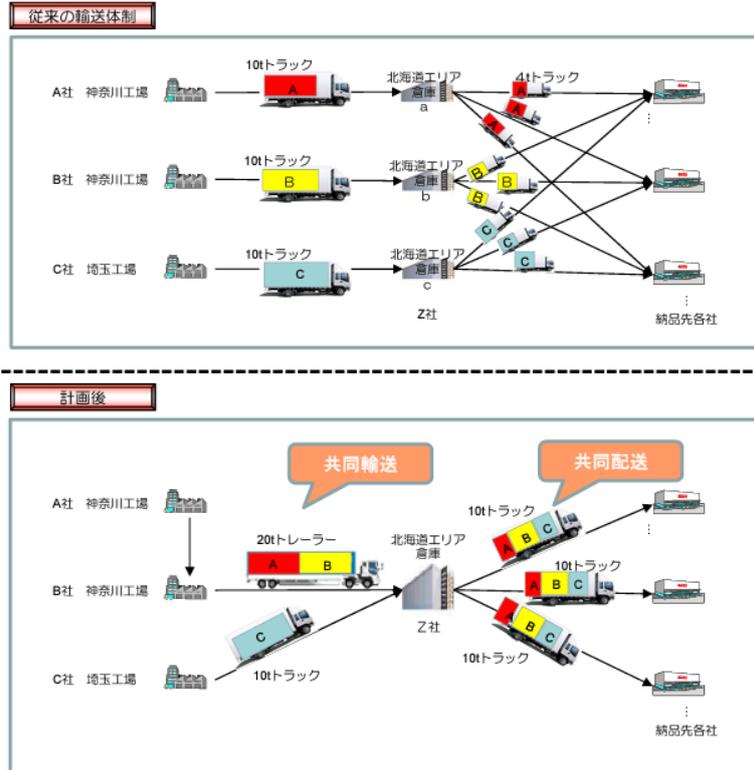


引用) 国土交通省総合政策局環境政策課：運輸部門における二酸化炭素排出量より

図 1-11 輸送機関別の輸送トンキロあたりの二酸化炭素排出量原単位

### (5) 輸配送の共同化

輸配送の共同化とは、単独事業者で輸配送をする場合には積載率が低いままで目的まで運ぶことがある。そこで、輸配送先が同じである事業者が複数連携し共同で輸配送することで、積載率の向上などにより、輸送効率を上げる取組みである。



引用) 国土交通省：「総合効率化計画」認定申請の手引きより

図 1-12 輸配送の共同化の輸送体制

#### (6) 動脈物流と静脈物流の違い

動脈物流は、荷主事業者からみて荷が価値を有するものであるのに対して、静脈物流は、荷が不要物、すなわち廃棄物であることが本質的に異なる点である。このため、動脈物流においては、荷主事業者の一定の関与のもとで、輸送効率化対策を物流事業者側で行うことができる。一方で、静脈物流は荷が不要物であることから、適正に処理してくれればそれで良いとされ、荷主事業者の関与が薄いことが特徴であり、物流事業者の独断で輸送効率化がなされる可能性がある。例えば、複数の事業者の廃棄物を混載するなどして、廃棄物の排出事業者が不明確な状態で、不法投棄などの不適正処理を生む懸念があり、そうした事案は毎年発生している<sup>10)</sup>。そのため、静脈物流における荷主事業者（排出事業者）に対して、廃棄物処理法上で排出事業者責任の規定し、それを実効させるために必要な規則や基準を定め、制度的に排出事業者の関与を求めている。こういったことから、現行の法制度下において、強い制約がかかった状況下において実施できる静脈物流独自の輸送効率化策の検討をしていく必要がある。

以下に、動脈物流及び、静脈物流に係る制度上の違いを、特に輸送効率化に対して制約と推察される点に着目して述べる。

動脈物流において事業を行おうとする場合は、貨物自動車運送事業法に基づいた事業運営が必要であり、営業所、最低車両台数、事業用自動車、車庫、休憩・睡眠施設、運行管理体制、資金計画、法令遵守といった審査基準を満たすことで、許可の取得が可能になる<sup>11)</sup>。他方、静脈物流にはこれに加えて、廃棄物処理法で規定する許可の取得や処理基準等の順守が追加され

る。ただし、処分業者が処理に付帯する業務として収集運搬を行う場合は、貨物自動車運送事業法に基づく許可は不要としている<sup>12)</sup>、<sup>13)</sup>。

静脈物流が受ける廃棄物処理法には、事業活動に伴って生じた廃棄物は自らの責任で処理することが原則とされているものの、自ら処理できない場合は、他社に委託して処理することが認められている。ただし、廃棄物を委託処理する場合には、廃棄物処理法に示す、委託基準に従う必要がある。加えて、廃棄物の処理時には、保管基準、収集運搬などに関する基準が定められており、これにも従う必要がある。ここで、これら基準のうち、輸送効率化を検討する上で留意すべき事項について述べる。廃棄物を排出する事業者が廃棄物を保管する場合は、周囲に囲いを設けること、野外的場合には、法令に定める保管量や保管の高さの制限がかかる。このため、船舶や鉄道に変更するために必要なロットを拡大しようとした場合には、法律に示す基準に従った範囲での保管となり、無制限に保管することは許されない。また、収集運搬を委託する場合には、排出する廃棄物の種類を運べる許可を保有する業者を選択しなければならない。すなわち、廃プラスチック類だけを運搬する許可を有する業者には、廃プラスチック類の運搬の委託は出来るものの、汚泥など他の物の委託は出来ないことを示している。このため、他社の廃棄物と共同輸送をする場合は、他社が出す廃棄物の種類と、委託する収集運搬業者が保有する許可の内容が合致していなければならず、事前の調整が必要であり、共同輸送を難しくしている要件であると推察する。また、収集運搬業者が積替え保管する場合は、排出事業者に課された基準に、予め運搬先が決まっていることなど追加要件がある。こういったことから、静脈物流の輸送効率化を検討する場合は、これらの基準を逸脱しない範囲で対策を検討しなければならない。さらに、収集運搬業を広域的に実施する場合は、廃棄物を受取る場所と運搬先の所管自治体から許可を得る必要があることから、収集運搬業者の大規模化の制約となる面があると推察する。

**表 1-2 収集運搬時等にかかる基準の例**

排出事業者にかかる保管基準	周囲に囲いを設ける 野外保管の場合は、保管量、保管高さを法の定める高さを超えない など
排出事業者にかかる委託基準	許可を保有し、処理する廃棄物を事業の範囲にもつ業者に委託 など
収集運搬に係る基準	積替え保管は、あらかじめ運搬先が決まっている場合のみ 性状が変化しないうちに搬出する 保管する量は、平均的な搬出量の7倍を超えない など
収集運搬業の許可	受取る場所と運搬先の所管自治体から許可をえること

このような制約は、表 1-3 に示すように鉄道輸送において具体的に反映される。廃棄物を鉄道輸送する場合は、決められたコンテナ利用が求められていることに加え、混載が認められていない。このため、事業者ごとに専用のコンテナを用意してコンテナに見合うロットの確保が必要になり、鉄道輸送を難しくしていると考えられる。したがって、利用事例は、内田ら<sup>14)</sup>が示しているが、一般廃棄物を対象とした川崎市で見られる程度である。ただし、川崎市では専用のコンテナを整備し、一般廃棄物の焼却灰等の安定的な廃棄物量を確保出来たことと、市内に線路網があり活用しやすかったという特異な事例でもある。

**表 1-3 廃棄物等の貨物運送にかかる条件（廃棄物にかかる箇所のみを抜粋）**

<p>(臨時の約束)</p> <p>第3条 次の各号に掲げる貨物は、当社が運輸上の支障がないと認めて特に承諾した場合に限り、その承諾した条件により運送の引受けをします。この場合、その貨物を運送するために特に要した費用は、荷主の負担とします。</p> <p>(1) 車扱貨物</p> <p>イ 貴重品、汚損品類、一般廃棄物類及び産業廃棄物類（以下両者を併せていうときは「廃棄物類」といいます。）、動物、死体及び遺骨</p> <p>(2) コンテナ貨物</p> <p>イ 貴重品及び汚損品類、廃棄物類、動物、死体及び遺骨 (荷造包装)</p> <p>第7条 廃棄物類については、飛散、流出又は悪臭漏れの恐れのあるものは、容易に破損し又は漏れることのないように包装し、又は容器に充填するものとします。</p> <p>(積載方法)</p> <p>第7条の2</p> <p>2 廃棄物類（ポリ塩化ビフェニル類（廃棄物）を除きます。）の当社所有コンテナへの積載は、特に認めたものを除き、形式が「W」で始まるコンテナ（以下「Wコンテナ」といいます。）のうちW18F形式以外のものに行うものとします。</p> <p>3 ポリ塩化ビフェニル類（廃棄物）及びポリ塩化ビフェニル類（廃棄物）用貨物積付用品のコンテナへの積載は当社所有W18F形式コンテナに行うものとします。</p> <p>(取扱制限)</p> <p>第44条 次に掲げるものは、混載コンテナ貨物（以下「混載貨物」といいます。）とすることはできません。</p> <p>ア 汚損品類、廃棄物類、動物、死体及び遺骨</p>
--

引用) JR 日本貨物鉄道株式会社：貨物運送約款、2016

## 1.2.2 静脈物流の実態

### (1) 産業廃棄物の広域移動状況

環境省では、廃棄物広域処分場の計画策定のための基礎資料とするため、廃棄物の種類別に移動状況を都道府県間のマトリックス表で整理し、毎年度公表<sup>10)</sup>している。その結果を用いて、都道府県庁間の距離<sup>11)</sup>により、廃棄物の種類別に都道府県外処理量（区域外処理量）と輸送距離の状況を考察する。具体的には、都道府県間移動量に都道府県庁間距離を乗じた値に、総移動量を除すことで輸送距離を算出した。全廃棄物種類における区域外処理量と輸送距離の年度による推移を図 1-13 に示す。区域外処理量は増加傾向を示しており、2019 年度には約 4.6 千万 t が都道府県間を超えて処理されている。また、輸送距離も 2011 年までは減少傾向を示していたものの、直近は微増傾向であり、2019 年の輸送距離は約 150km となる。このことより、廃棄物の資源循環、適正処理のために処理の広域化が進んでいることが伺える。

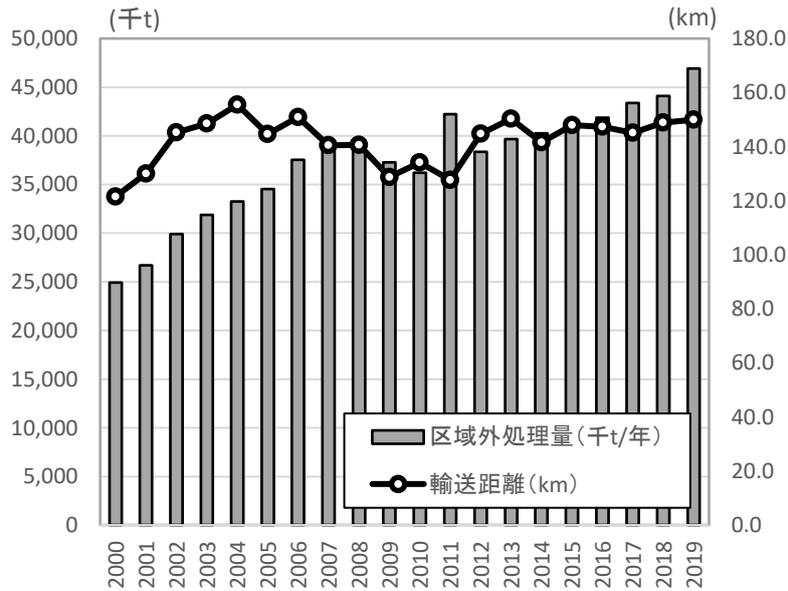


図 1-13 産業廃棄物の区域外処理量と輸送距離の経年変化

区域外処理量を廃棄物種類別にみると（図 1-14）、がれき類、汚泥、ばいじん、廃プラスチック類、ガラス陶磁器くず、鉱さい、木くずの順となっており、これら 7 つの廃棄物の種類で、区域外処理量の 8 割強を占める。

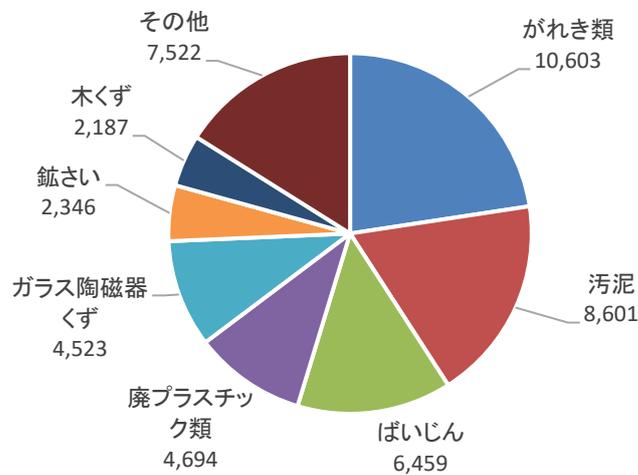
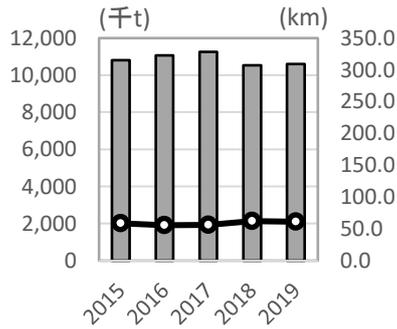
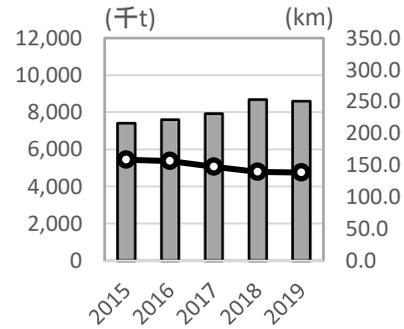


図 1-14 産業廃棄物の種類別の区域外処理量の割合（2019 年度）

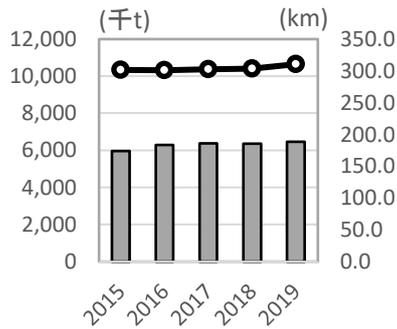
さらに、廃棄物種類別に区域外処理状況を分析すると、がれき類は、区域外処理量は多いものの輸送距離は 50km と短くなる。一方で、ばいじん、鉱さいは、それぞれ 310km、220km と平均輸送距離よりも長く輸送される廃棄物もある（図 1-15）。これらの状況は直近 5 年で見ても概ね維持している状況にある。



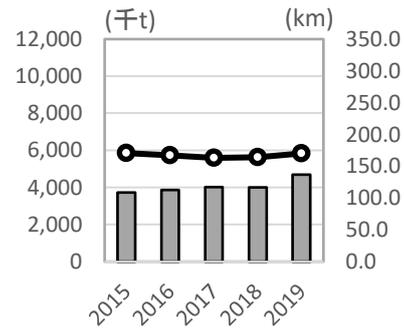
がれき類



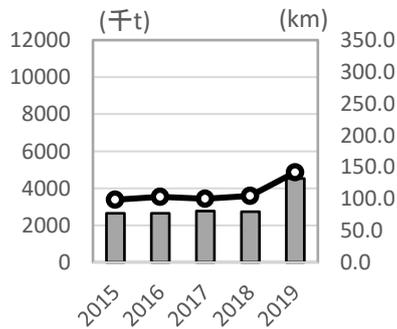
汚泥



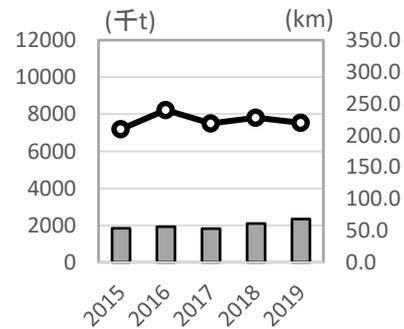
ばいじん



廃プラスチック類



ガラス陶磁器くず



鋳さい

図 1-15 区域外処理量上位 6 品目の直近 5 年の動向

図 1-16 に 2019 年度における廃棄物種類別の区域外処理量と輸送距離を示す。ゴムくずとばいじんの輸送距離は長くなるものの、区域外処理量としてはゴムくずは少量である一方、ばいじんは区域外処理量ととても多く、500km を超える輸送量も一定程度確認出来る。このように廃棄物種類によって、処理量や輸送距離に特徴がみられることから、講じる施策や優先順位を特徴に合わせて検討する必要がある。

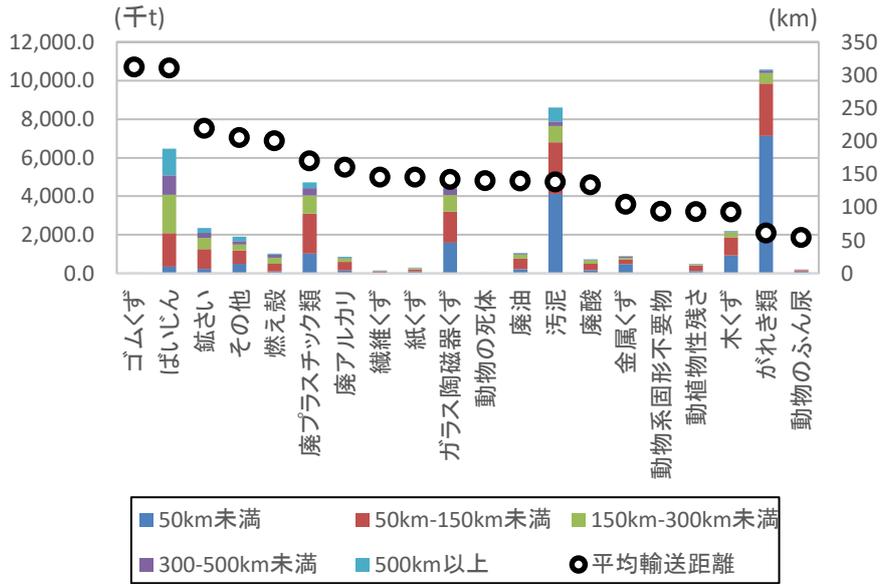


図 1-16 廃棄物種類別の区域外処理量と輸送距離（2019 年度）

### 1.2.3 廃棄物等の輸送実態

国土交通省では、全国の貨物流動の実態把握を把握する目的で、荷主側から捉え、貨物の真の発着地、産業活動との関連等を明らかにすることを通じて、貨物純流動の実態を詳細に明らかにするための唯一の実態調査として、「全国貨物純流動調査」（以下、物流センサスという）を5年おきに実施している。静脈物流に関するデータ整備の必要性から、2005年の調査より静脈物流関連の品目を「排出物」と追加するとともに、他の廃棄物関連統計との整合を考慮した分類の追加を行っており、廃棄物に関するデータの充実を図っている。本データの詳細は、以降の4.2.1で述べる。ここでは、品目区分が「排出物」に該当するデータを抽出し、輸送機関分担率の違いを各項目で考察する。

輸送機関分担率を時系列にみると（図 1-17）、車両とするトラックが8割超える状況にあり、それ以外を海運となっている。2005年からは海運の占める割合は微増傾向であるものの、2割弱にとどまる。

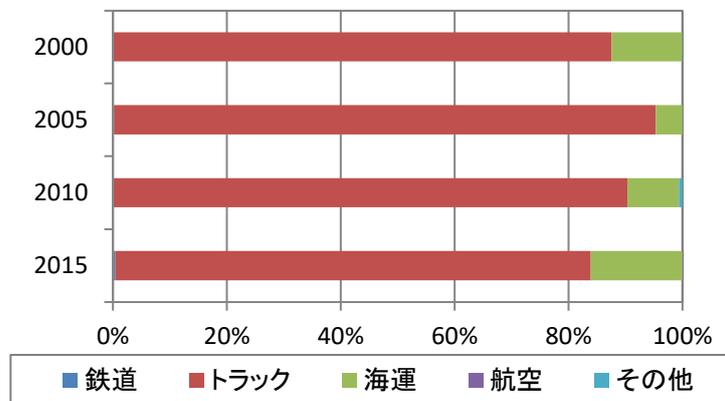


図 1-17 輸送機関分担率の推移

これ以降では、2015年度分の調査データから輸送機関に対して、クロス集計を行い、特徴を考察する。図 1-18 は、品目別の輸送機関分担率の結果である。鉱さい、ばいじんに該当する品目で、海運を選択する割合が高い傾向にある。選択割合は低いものの廃プラスチック類とその他産業廃棄物で鉄道を、金属スクラップ、古紙、汚泥でフェリー、海運を選択されている。

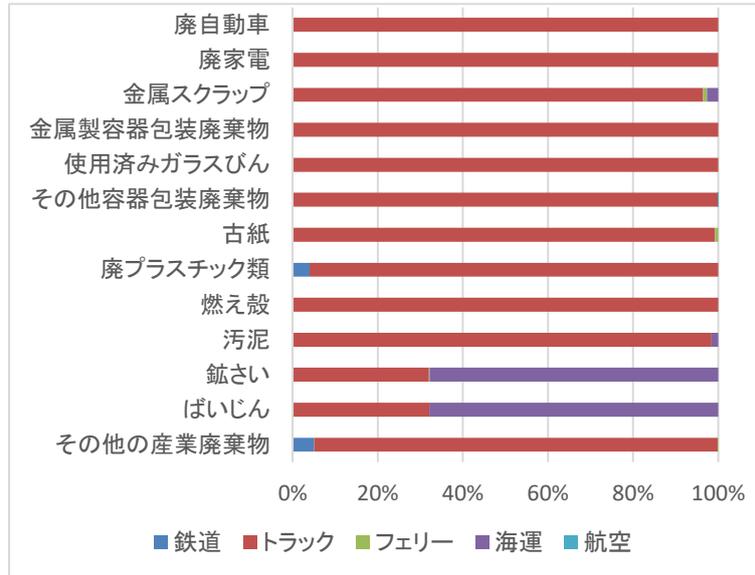


図 1-18 品目別の輸送機関分担率

輸送距離別では、100km 未満という近距離ではトラックの選択する傾向が高く、距離が長くなるにつれ海運が選択される割合が高くなる。鉄道は 300km 以上 750km 未満の区分で 10%弱選択されていた (図 1-19)。300km~1,000km の区分に航空を選択する場合がある。

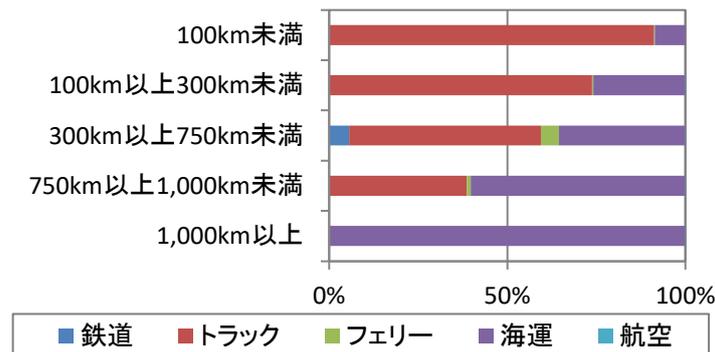


図 1-19 輸送距離別の輸送機関分担率

輸送ロット別の輸送機関の選択結果を図 1-20 に示している。100 トン未満はトラックが選択される傾向にある。100 トン以上で 65%が海運を選択する。1%程度であるが 5~10 トンと 100 トン以上の区分で鉄道が選択されている。

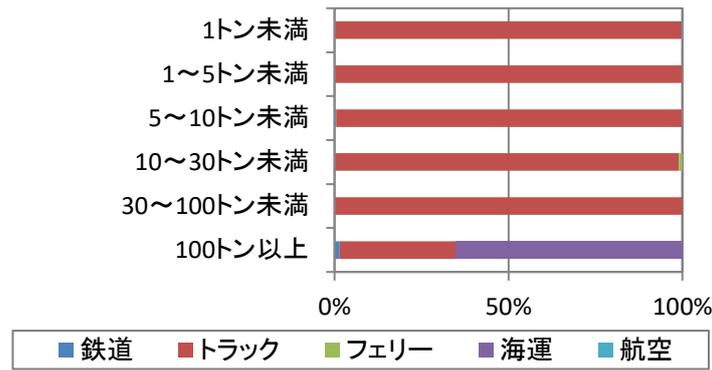


図 1-20 輸送重量別の輸送機関分担率

北海道、関東、中部地区はほぼトラックが選択される傾向にある。東北地区では鉄道、海運が少し選択されている。近畿地区では 25%、中国四国地区では 42%、九州地区では 36%が海運を選択している。以上の分析により、品目では鉱さい、ばいじんが、750km を超える移動距離が、100 トン以上のロットが、関西より以西の地域がトラック以外の輸送機関を選択する要因として高いことを示した（図 1-21）。

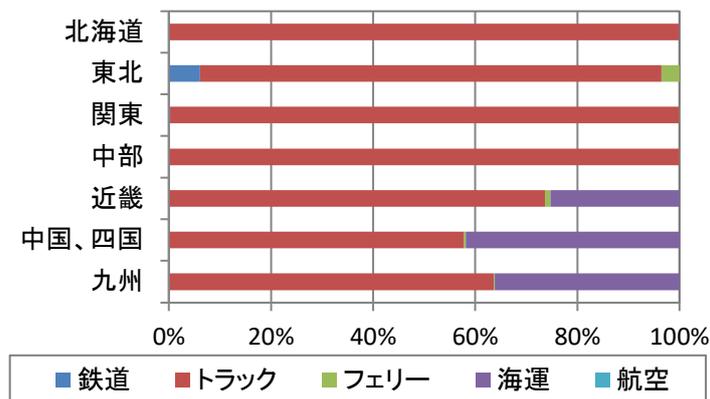
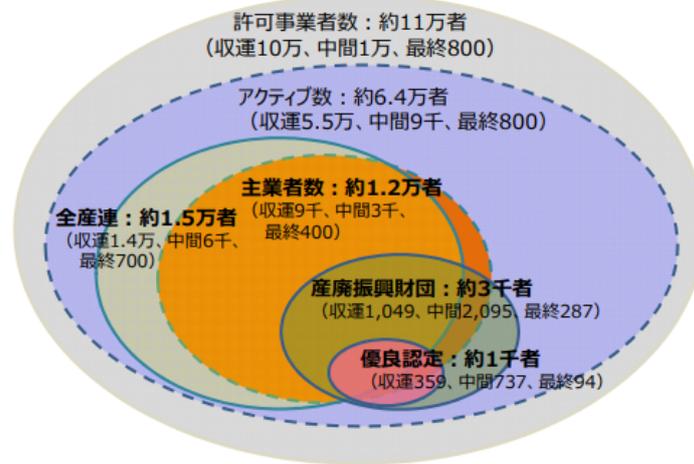


図 1-21 発地区別の輸送機関分担率

#### 1.2.4 産業廃棄物の処理業の実態

産業廃棄物の処理業の実態については、産業廃棄物処理業の振興方策に関する検討会により、整理されている。それによれば、産業廃棄物の処理業の許可を保有する事業者は、全国で 11 万者あり、このうち、収集運搬に係る事業者が約 10 万者、処分事業者が約 1 万者となる。この数は、建設業を主体としており、許可を保有している事業者も数多く含まれることから、これを除くと、処理業者を主たる業者とする数は、6.4 万者と推定している。この事業者が静脈物流を支える事業者である（図 1-22）。主たる業者に関して、従業員数と売上高などについて記載する。

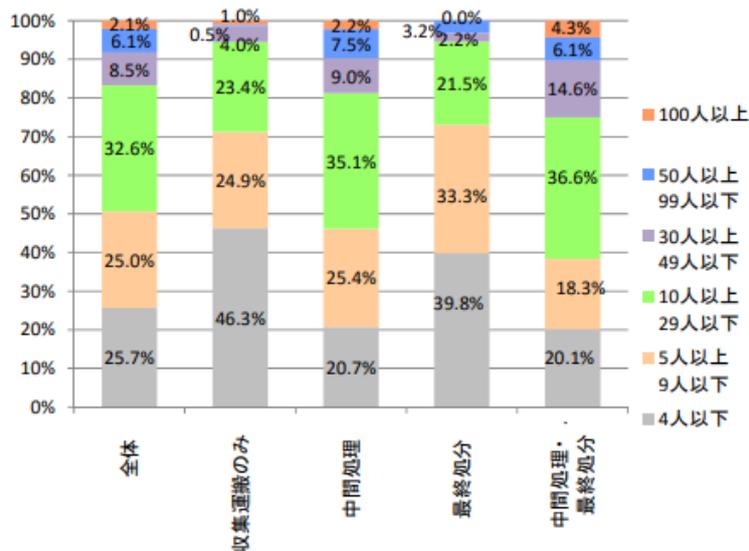
	(推計値)		(推計値)			
	許可事業者数	アクティブ数	主業者数	全産廃連会員 企業数	産廃振興財団 登録業者数	優良認定業者数
収集運搬業	103,884	55,162	8,701	13,744	1,049	359
中間処理業	9,641	8,783	3,165	6,033	2,095	737
最終処分業	799	755	394	687	287	94
全体数	114,324	64,700	12,260	15,045	3,145	1,087



引用) 産業廃棄物処理業の振興方策に関する検討会：産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言、平成 29 年 3 月

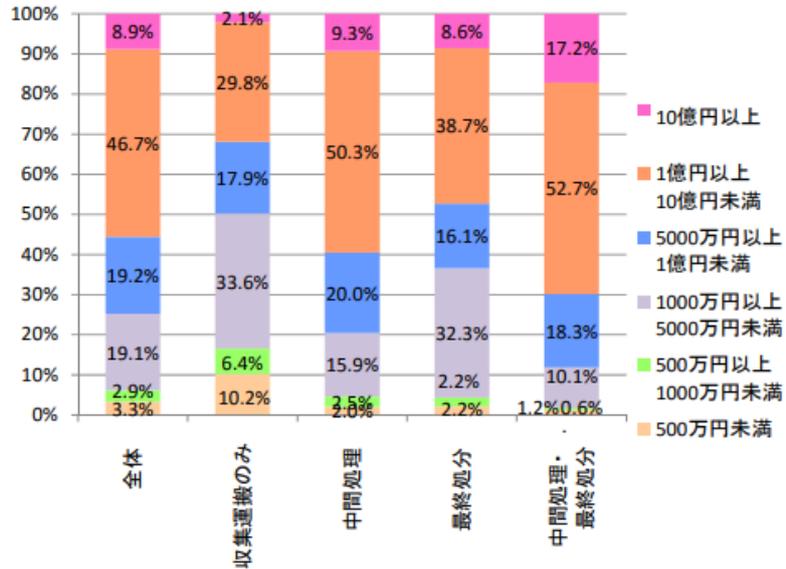
図 1-22 産業廃棄物処理業の事業者数

図 1-23 は、従業員数の割合を示しているが、収集運搬事業者は、29 人以下と小規模な事業者で 9 割を超し、4 人以下が 5 割弱もある。また、図 1-24 は、売上高を示しているが、1 億円未満が 7 割を示しており、1000 万以上 5000 万未満の区分の占める割合が最も大きいことから、中小零細の事業者であるといえる。



引用) 産業廃棄物処理業の振興方策に関する検討会：産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言、平成 29 年 3 月

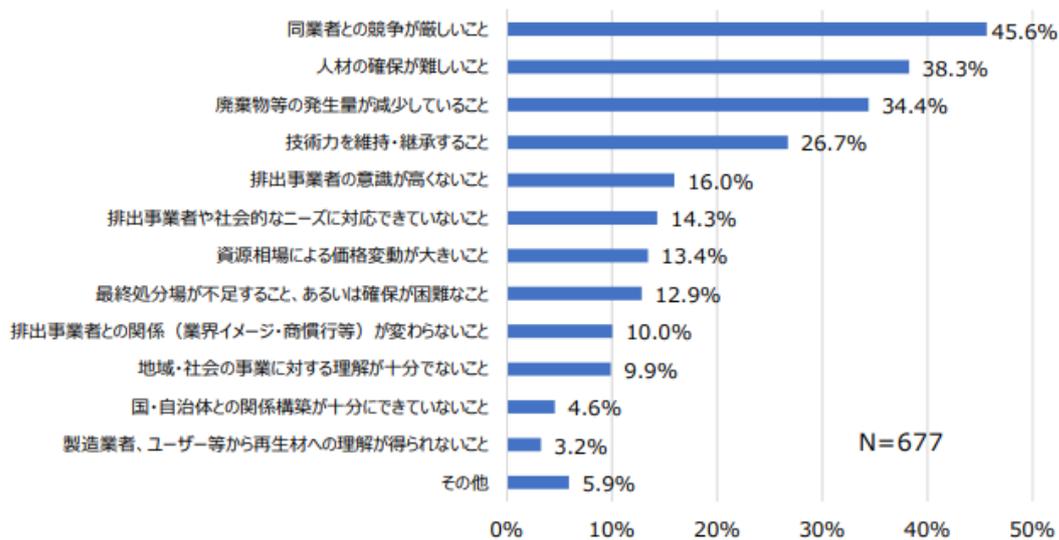
図 1-23 許可業者における産業廃棄物処理業に携わる従業員数



引用) 産業廃棄物処理業の振興方策に関する検討会：産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言、平成 29 年 3 月

図 1-24 許可業者における産業廃棄物処理業の売上高

産業廃棄物処理業者の抱える課題認識としては、同業者との競争が激しいこと、人材の確保が難しいことが順に挙げられている。産業廃棄物処理業、特に収集運搬業者は小規模な事業者が割拠していることから、競争が激しくなり、経営基盤が安定せず課題対応がなされていない状況にあると推察する。



引用) 産業廃棄物処理業の振興方策に関する検討会：産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言、平成 29 年 3 月

図 1-25 産業廃棄物処理業界の課題認識

以上、ここまで述べてきたように、静脈物流は、資源循環・適正処理の中の社会経済システムとして、必要不可欠なインフラであることは間違いない。一方、脱炭素対策、人口減少少子高齢化による労働人口の減少といった環境問題や社会課題といった外部環境の変化に対応が出来なければ、事業の継続が出来なくなる日が迫ってきている。さらに、廃棄物の広域的な輸送が増加していくことが見通される状況にある。そのような中であっても、動脈物流で見られる共同輸送やモーダルシフトなど輸送効率化に向けた対策は、ほとんど進んでいない状況にある。これは、収集運搬業が労働集約型の産業であることに加え、小規模な事業者が多いことから、新たに投資を行うことで対策をとる体制にない状況があると推測される。さらに、取れる対策が廃棄物処理基準の適応範囲である必要があることや排出事業者責任の強化により排出事業者が主導して実施していく構造になっていることが、抜本的な対策が取りにくい状況にあると推察する。

## 参考文献

- 1) 環境省：日本の廃棄物処理の歴史と現状、2014
- 2) 環境省：第四次循環型社会形成推進基本計画、2018
- 3) 中央環境審議会循環型社会部会：第四次循環型社会形成推進基本計画の進捗状況の第1回点検結果について、2020
- 4) 外務省：日本の排出削減目標、2021、  
[https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w\\_000121.html](https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000121.html) (2021.12.02 閲覧)
- 5) 首相官邸：第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説、2020、  
[https://www.kantei.go.jp/jp/99\\_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html](https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html)  
(2021.12.02 閲覧)
- 6) 国土交通省：総合物流施策大綱（2021年度～2025年度）、2021
- 7) 産業廃棄物処理業の振興方策に関する検討会：産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言、2017
- 8) 国土交通省：モーダルシフト・輸送効率化による低炭素型静脈物流促進事業、  
[https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan\\_fr6\\_000020.html](https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr6_000020.html) (2021.12.02 閲覧)
- 9) 公益社団法人全国産業資源循環連合会：低炭素社会実行計画における実態調査等報告書、2021
- 10) 環境省：産業廃棄物の不法投棄の状況について、  
[https://www.env.go.jp/recycle/ill\\_dum/santouki/](https://www.env.go.jp/recycle/ill_dum/santouki/) (2021.12.16 閲覧)
- 11) 貨物自動車運送事業法、<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=401AC00000000083> (2021.12.16 閲覧)
- 12) 国土交通省：法令適用事前確認手続 回答書、  
[https://www.mlit.go.jp/confirmation\\_procedure/inquiry\\_reply/images/3/reply.pdf](https://www.mlit.go.jp/confirmation_procedure/inquiry_reply/images/3/reply.pdf)  
(2021.12.16 閲覧)
- 13) 国土交通省：法令適用事前確認手続 回答書、  
[https://www.mlit.go.jp/confirmation\\_procedure/inquiry\\_reply/images/2/reply.pdf](https://www.mlit.go.jp/confirmation_procedure/inquiry_reply/images/2/reply.pdf)  
(2021.12.16 閲覧)
- 14) 内田 賢悦、佐藤 馨一、唐澤 豊：貨物鉄道システムを用いたグリーンロジスティクスの実現化方策に関する研究、日本物流学会誌、1999 巻、7 号、p. 98-107、1999
- 15) JR 日本貨物鉄道株式会社：貨物運送約款、2016
- 16) 環境省：廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書（広域移動状況編）
- 17) 国土交通省国土地理院：都道府県庁間の距離、  
<https://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHOKenchokan.html> (2021.12.06 閲覧)
- 18) 産業廃棄物処理業の振興方策に関する検討会：産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言（2017）

## 第2章 既往研究の整理と本研究の位置づけ

本章では、既往研究を整理することで、今後の静脈物流の輸送効率化に向けた論点を整理し、本研究の位置づけを明らかにする。

### 2.1 既往研究の整理

静脈物流、特に廃棄物等の輸送効率化に関する研究は、数理モデルを構築し、輸送量や経済、環境面の最適化を目指す研究や、施設配置問題として効率化を検討する研究がある。また、産業連関分析や、広域輸送や輸送機関の選択要因を分析、法制度や解説をした研究があり、それぞれの分類に従って以下に述べる。

#### 2.1.1 数理モデルを用いた計算

##### (1) 輸送問題

様々な制約条件の下で、目的関数を最大・最小化するために、定式化を行うもので、これを廃棄物の輸送問題に当てはめた研究である。輸送トンキロの最小化を目的とした計算として、古紙を取扱った吉田ら<sup>1)</sup>の研究、産業廃棄物と廃PETボトルを対象にした藤山ら<sup>2)</sup>、廃プラスチックを対象とした荒井ら<sup>3)</sup>の研究がある。また、費用最小化を目的関数とする、東京都の特定の地域を対象とした荒井ら<sup>4)</sup>の研究や、東京北九州間の共同輸送とモーダルシフトを検討した尹<sup>5)</sup>、廃電気機器を対象としたDatら<sup>6)</sup>、都市ごみ焼却灰のセメント利用を対象とした飯野ら<sup>7)</sup>、ベルギー北部のフランダース地域を対象として環境コストを加えたInghelsら<sup>8)</sup>の研究やKannanら<sup>9)</sup>は、二酸化炭素のフットプリントを最小化させるモデルを開発し、プラスチックにあてはめた研究の他<sup>10-11)</sup>にコスト最小化モデルを適用させた例がある。これら研究から、対象とする特性に応じた制約により輸送計画の提案がなされ、輸送費用最小化させる輸送や二酸化炭素排出量の削減などの効果を示されているものの、対象とする廃棄物や地域が限定されていることから、全体観として捉えられていないことに加え、年単位といった集計データにより最適化をなされているため、ロットごとの特徴を考慮した解析まで行えていない。

##### (2) 施設配置

廃棄物処理施設を適正な配置にすることで、輸送効率を向上させるもので、田畑ら<sup>12)</sup>の愛知県を対象にグラフ理論を用いた輸送エネルギー消費及び処理能力を考慮したモデルを構築した研究や、溝本ら<sup>13)</sup>の費用関数を取り込んだネットワーク型の施設配置モデルを構築し広島県での分析を実施した研究や、関東圏の建設系廃棄物を対象として、地理情報システム(GIS)上で輸送面からみた施設立地点の最適解を求めた川端ら<sup>14)</sup>の研究があるものの、施設を中心し見ていることから、対象とする地域の範囲が狭い状況にある。

#### 2.1.2 産業連関分析

産業連関表を用いて、廃棄物の地域間輸送に係る影響を分析するもので、北海道を対象として、廃棄物委託処理率、再生利用量の配分、排出量と有価物の区分を考慮した連関表を作成し、廃棄物循環の特性を定量化した保永ら<sup>15)</sup>の研究や、筑井ら<sup>16)</sup>の日本全国の都道府県間移動を対象に、複数の輸送手段を考慮した廃棄物の地域間移動モデルを構築した研究や吉田ら<sup>17)</sup>の産業廃棄物の広域移動を対象に、変化要因、地域間の移動構造、広域移動の効率性を分析した研究がある。これらの成果から地域間輸送における環境負荷の評価や広域輸送されている廃

棄物の種類を提示する成果を得られているものの、どのように輸送機関を変更するのかといった輸送効率化方策の提案までは十分に議論されていない。

### 2.1.3 要因分析

輸送機関の選択要因を数量化理論Ⅱ類により分析した尹<sup>5)</sup>の研究や、E-wasteの国際移動に関して製品量と経済指標との関連の分析をした伊藤らの研究<sup>18)</sup>、産業廃棄物及び廃PETボトルの輸送距離に与える要因について数量化理論Ⅰ類を用いて分析した藤山ら<sup>19)</sup>の研究、容器包装プラスチックを対象とした輸送量に与える要因を明らかにした藤山ら<sup>20)</sup>の研究があるもののいずれも地域や廃棄物の種類を限定しており、一般化した議論まで行っていない。

### 2.1.4 制度・解説研究

制度や静脈物流に関する論文を解説した先行研究を示し、残された課題をここで述べる。田中<sup>21)</sup>は、資源循環の観点から広域的処理の検討がされるようになり、収集運搬システムの解析の重要性を述べている。また、山本ら<sup>22)</sup>輸送を選択する要因に時間があること、西送りの減少があることを指摘している。また、山本<sup>23)</sup>は、分別数と使用済み製品の輸送方法の2つの論点があることを提示しており、細田<sup>24)</sup>からは、処理情報の伝播、委託契約や新規参入のあり方など静脈物流の課題を指摘している。さらに、石村ら<sup>25)</sup>はNIMBY問題から広域輸送のさらなる増加を指摘している。直接的な輸送効率化に言及しているものではないが、廃棄物処理法に基づき収集運搬部門の管理の効率化を検討した山名ら<sup>26)</sup>の研究がある。また、都市物流との比較を行うことで、返品、返却の管理など共通点を示し効率化の可能性を得たRubioら<sup>27)</sup>の研究がある。加えて静脈物流を解説した尹<sup>28)</sup>は、廃棄物の品目特性に応じた物流の設計と共同輸送や大量輸送など規模を考慮した静脈物流の構築の必要性を述べている。また、杉村ら<sup>29)</sup>は日本における静脈物流の研究が量的にも質的にも不足していることを指摘したうえで、法規制下における廃棄物輸送の最適化やその限界性を明らかにしていくことが重要と述べている。Malladiら<sup>30)</sup>は、静脈物流の研究に多目的モデルによる評価や有害物や感染性廃棄物の問題に加え、交通渋滞や雇用創出を考慮する必要があるなど具体的に今後の方向性を示した研究がある。このように静脈物流を全体観として定量的に分析した事例は少ない状況にある。

## 2.2 研究の目的

第1章で述べたように、社会的な要請として、さらなる資源循環の構築に必要な場合は、広域的な処理が求められている一方で、脱炭素社会に対する取組みが必要になる。ところが、静脈物流を担う産業廃棄物処理業者、特に収集運搬業者は、これら社会課題に対して十分な対策を講じられていない状況を明らかにした。さらに、本章で述べたように既往研究では、輸送問題や施設配置などにおける輸送効率化に関する提案は、対象とする地域や品目が限定的な状況にあり、静脈物流を全体観として定量的に分析し、一般化することの必要性を示した。同時に、法規制下における廃棄物輸送の最適化やその限界性を明らかにしていく研究の重要性が示唆された。

そこで本研究は、静脈物流に関する以下に示す3つの観点で、輸送効率化に資する知見の充実に資する目的で実施するものである。

### (1) 処理先変更に伴う輸送距離の短縮化に伴う輸送効率化の評価

本テーマでは、廃棄物等の資源循環と適正処理に必要な広域輸送とそうでない輸送を区別し、不必要な広域輸送の短縮化を図ることを検討する際に必要な可能性量の推計と、その評価を二酸化炭素排出量の変化で示そうとするものである。

### (2) 輸送機関の選択要因に基づくモーダルシフト可能量と輸送費用の分析

排出事業者ごとに廃棄物の種類やその性状、排出量、排出方法、頻度に加えて、処理先並びに処理方法が異なるものである。その特徴に基づき、輸送方法が決定されるものとする。ここでは、その決定工程を数理モデルにより一般化することを試みる。そのモデルを利用することで、モーダルシフトされる特徴を持つ廃棄物のポテンシャル量を推定し、二酸化炭素排出量の変化で評価し、モーダルシフト対策の輸送効率化効果を試算することを目的とする。併せて、モーダルシフトにより輸送費用の変動がないかについても論じる。

### (3) 排出頻度緩和に伴うロット拡大による輸送機関変更の効果分析

ここでは、排出頻度を緩和し、輸送ロット拡大に伴う積載車両の大規模化や船舶利用により輸送回数を減少させる対策について、輸送費用最小化を思考した分析により、輸送効率化の効果を示すことを目的として実施する。

さらに、ここで実施する本研究の意義について述べる。既往研究では年間や特定の期間の集計されたデータによる分析であることから、荷ごとの特性を十分に反映できていなかった。このため、本研究は、輸送ロット単位のデータに着目したことで、ロットの変動や排出要因を詳細に分析した点に特徴を有する。これについて詳細を述べると、第3章、第5章の最適化計算においては、既往文献でも使用され実績のある線形計画法を利用しているものの、処理施設の余力、処理先変更割合を考慮した制約や、頻度緩和に伴う費用低減効果を制約条件に盛り込んで実施している。また、第4章での分析は、ロット単位のデータを用いることで、輸送機関の選択特性と輸送費用の要因を特定の廃棄物種類に限定しない形で分析している。選択特性を明らかにするための手法として、ロジットモデル、判別分析、数量化理論Ⅱ類が想定されるが、ロジットモデルは、データ数に偏りがある場合は精度が悪くなると指摘があり、今回使用

したデータは、輸送機関のサンプル数に偏りがあることに加えて、説明変数とするデータの多くは質的データであったこと、また、使用する一方にデータが大きく偏っている場合であっても、数量化理論第Ⅱ類の適用が有効であることが示唆されていることから、数量化理論第Ⅱ類を用いている。また、費用の分析は重回帰分析を使用し、説明変数の採用はステップワイズ法を採用する。また、第5章では雇用に関する考察をするために、従事者数に関する評価を行っていることが新たな視点である。このような詳細な分析は、世界的に文献レビューを実施しても確認できない、新たな研究であると言える。

## 2.3 本論文の構成

本論文の構成は、図 2-1 のとおり。

第 1 章「序論」では、静脈物流における背景、各種資料を用いた現状分析から実施すべき研究の方向性について、論じた。さらに、第 2 章「既往研究の整理と本研究の位置づけ」では、既往研究のレビューから、本研究の目的と位置づけを述べた。

第 3 章「処理拠点の変更可能性に着目した輸送の低炭素化と循環圏形成の検討」では、行政が保有する情報の活用に加えて、産業廃棄物の排出事業者に対するアンケート調査の結果を組み合わせて、北九州市域外に搬出し処理される廃棄物を、市内処理への移行可能量を輸送問題として解き、産業廃棄物の適正処理及び循環利用の適正な圏域について論じる。

第 4 章「輸送機関の選択と輸送費用の規定要因分析」では、廃棄物等の特性に応じた静脈物流のモーダルシフト策の議論を行うため、全国貨物純流動調査の 3 日間調査票データを活用し、輸送機関の選択要因に加えて、輸送費用を規定する要素を明らかにする。

第 5 章「処理業者の実績データに基づく輸送効率化のポテンシャル評価」では、産業廃棄物処理業者の実績データを用いて、静脈物流の輸送効率化対策を検討することを目的とする。まず、線形計画法の中で輸送費用の最小化を目的関数として経路を探索する手法である輸送問題を解き、実績データと最適化後の算出結果を比較した。次に、納期の制約が小さいという静脈物流の本質的な特徴に注目し、搬出頻度緩和による輸送効率化のポテンシャルを検討した。

最後に第 6 章「結論」では、各章の結果を踏まえ、本研究で示した結果の到達点と、今後の課題について述べる。

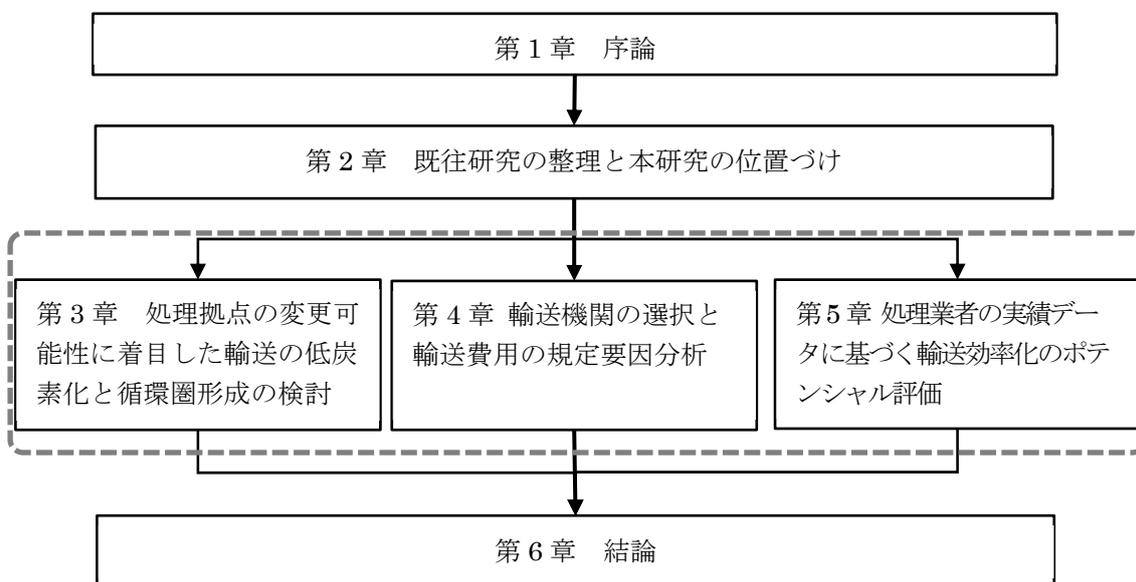


図 2-1 本論文の構成

## 参考文献

- 1) 吉田登、川端宏紀、金子泰純、日下正基：紙リサイクル原料古紙の地域間物流が輸送量及びエネルギー消費に及ぼす影響の分析、環境システム研究論文集、33 巻、pp.259-266、2005
- 2) 藤山淳史、松本亨：産業廃棄物及び廃 PET ボトルを対象とした循環圏に関する要因分析、環境科学会誌、23 巻、2 号、pp.115-125、2010
- 3) 荒井康裕、河村永、小泉明、茂木敏：産業系プラスチック廃棄物の広域循環システムに関する輸送計画モデル、土木学会論文集 G (環境)、67 巻、6 号、pp.II\_449-II\_458、2011
- 4) 荒井 康裕、 小泉 明、 稲員 とよの、 西出 成臣：都市ごみの広域的処理システムの多目的最適化に関する研究、環境システム研究論文集、34 巻、 p. 405-412、2006
- 5) 尹鍾進：静脈物流の現状分析に基づいた静脈物流の効率化方案に関する研究、土木学会論文集 G、63 巻、4 号、pp.332-344、2007
- 6) Luu Quoc Dat, Doan ThiTruc Linh, Shuo-YanChou, Vincent F.Yu : Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products, Expert Systems with Applications, Volume 39, Issue 7, Pages 6380-6387, 2012
- 7) 飯野成憲、荒井康裕、稲員とよの、小泉明：都市及び周辺地域におけるごみ焼却主灰のセメント資源化システムに関するモデル分析、土木学会論文集 G (環境)、72 巻、6 号、pp.II\_35-II\_44、2016.
- 8) Dirk Inghels, Wout Dullaertb, DanieleVigoa : A service network design model for multimodal municipal solid waste transport, European Journal of Operational Research, Volume 254, Issue 1, Pages 68-79, 2016
- 9) Devika Kannan, Ali Diabat, Mahmoud Alrefaei, Kannan Govind and Geng Yong : A carbon footprint based reverse logistics network design model, Resources, Conservation and Recycling, Volume 67, Pages 75-79, 2012
- 10) Tung-Lai Hu, Jiu-Biing Sheu, Kuan-Hsiung Huang:A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes,Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,Volume 38, Issue 6,Pages 457-473,2002
- 11) Somplak Radovan, Pavlas Martin,Nevrly Vlastimir, Tous Michal, Popela Pavel:Contribution to Global Warming Potential by waste producers: Identification by reverse logistic modelling,Journal of Cleaner Production, 208:1294-1303,2019
- 12) 田畑 智博、 後藤 尚弘、 藤江 幸一、 井村 秀文、 薄井 智貴：発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適正配置に関する研究、環境システム研究論文集、30 巻、 p. 315-322、2002
- 13) 溝本 剛志、 塚井 誠人、 奥村 誠：ネットワーク型施設配置モデルによる廃棄物リサイクル施設計画の分析、都市計画論文集、39.3 巻、 p. 565-570、2004

- 14) 川畑 隆常、大迫 政浩、山田 正人、田崎 智宏、松井 康弘、立尾 浩一：建設廃棄物の排出量と中間処理能力の地理的な需給アンバランスの解析、廃棄物学会論文誌、16 巻、2 号、p. 151-162、2005
- 15) 保永 展利、吉本 諭、原 勲、地域経済と廃棄物循環、地域学研究、35 巻、3 号、p. 611-624、2005
- 16) 筑井 麻紀子、中村 圭佑、輸送手段を考慮した都道府県間廃棄物移動モデルによるエネルギー消費量と CO2 排出量の推計、日本 LCA 学会誌、5 巻、4 号、p. 462-472、2009
- 17) 吉田 登、佐藤 雅俊、金子 泰純、産業廃棄物の排出及び広域移動に関する分析——移動量変化の要因、地域間での移動構造、及び移動の効率性に着目して——、地域学研究、41 巻、4 号、p. 969-983、2011
- 18) 伊藤 豊、馬奈木 俊介、寺園 淳：環境経済学の到達点と今後、環境科学会誌、22 巻、2 号、p. 103-112、2009
- 19) 藤山 淳史、松本 亨：産業廃棄物及び廃 PET ボトルを対象とした循環圏に関する要因分析、環境科学会誌、23 巻、2 号、pp.115-125、2010.
- 20) 藤山 淳史、松本 亨：容器包装を対象とした循環資源の広域移動に関する構造分析、環境科学会誌、24 巻、2 号、p. 103-113、2011
- 21) 田中 勝：廃棄物リサイクルと収集運搬システム、廃棄物学会誌、7 巻、5 号、p. 422-433、1996
- 22) 山本雅資、細田衛士、宮内環：静脈物流に関する基礎的分析-東アジアへの展開を視野において-、三田学会雑誌、99 巻 2 号、2006
- 23) 山本 雅資：リサイクルの制度設計における静脈物流の重要性、環境経済・政策研究、8 巻、1 号、p. 81-84、2015
- 24) 細田 衛士：循環型社会における適正な静脈物流の構築、廃棄物資源循環学会誌、21 巻、4 号、p. 205-214、2010
- 25) 石村 雄一、竹内 憲司：ごみ処理の広域化と NIMBY 問題、環境経済・政策研究、11 巻、1 号、p. 75-79、2018
- 26) 山名 宗之、富澤 康雄、水野 克己、藤原 照幸、稲垣 学武、水田 和真、勝見 武、嘉門 雅史：建設汚泥の適正活用を支援するトレーサビリティ管理システムの開発及び運用、土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)、76 巻、1 号、p. 29-41、2020
- 27) Sergio Rubio, Beatriz Jiménez-Parra, Antonio Chamorro-Mera and Francisco J. Miranda: Reverse Logistics and Urban Logistics: Making a Link, Sustainability, 11(20), 5684, 2019
- 28) 尹鍾進：静脈物流に関する研究の動向と課題、運輸政策研究、12 巻、3 号、pp.002-012、2009
- 29) 杉村佳寿、村上進亮：日本における静脈物流研究の課題、廃棄物資源循環学会論文誌、29 巻、pp.44-58、2018

- 30) Krishna TejaMalladi, Taraneh Sowlati:Sustainability aspects in Inventory Routing Problem: A review of new trends in the literature,Journal of Cleaner Production,Volume 197, Part 1, Pages 804-814,2018

### 第3章 処理拠点の変更可能性に着目した輸送の低炭素化と循環圏形成の検討

#### 3.1 はじめに

本章では、産業廃棄物の循環利用や適正処理における域内処理の実現ポテンシャルを評価することを目的に実施するものである。具体的には、北九州市を対象として、廃棄物処理法等に基づく届出情報から市内の産業廃棄物処理施設の処理状況を整理する。さらに、排出事業者へのアンケート実態調査により処理先の変更可能性を検討した上で、これらを制約条件とした輸送問題として低炭素化効果を推計する（図 3-1 分析の枠組み）。今回使用した分析手法は、既存文献でも使用され実績のある線形計画法を用いるが、調査に基づく施設余力、処理先変更割合を制約条件に加えたことに特徴を有する。

本研究で示す域内処理ポテンシャルと、その効果としての二酸化炭素排出削減量の定量化は、廃棄物の輸送距離の短縮化の検討資料となり、地域循環共生圏を構築に向けた政策提言に資するものとする。

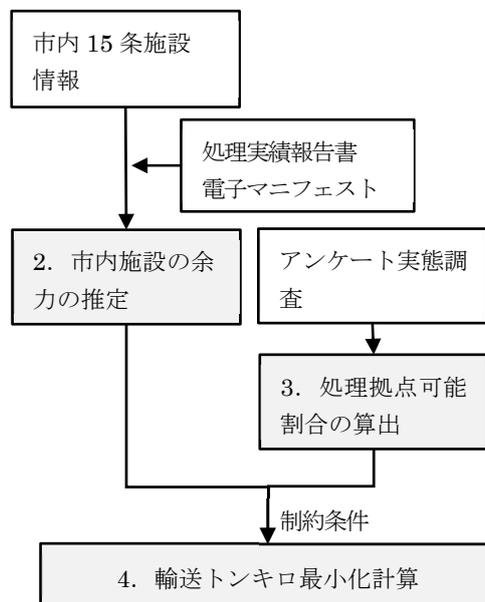


図 3-1 分析の枠組み

## 3.2 市内産業廃棄物処理施設の余力の推定

### 3.2.1 使用データ

市内の産業廃棄物の処理能力がどのくらいあるのか、また、その施設が既にどのくらい使われるのか、さらに市内で排出された産業廃棄物の輸送状況を把握するために、廃棄物処理法等に規定され、北九州市が保有している情報から、表 3-1 に示す情報を、情報開示請求制度に則って入手した。以下に各情報の特徴を概観する。

**表 3-1 分析対象データ**

情報	目的
1 法15条施設情報（平成29年時点）	処理能力の把握
2 平成29年度処理実績報告	受入状況の把握
3 平成29年度電子マニフェスト情報	輸送状況の把握

#### (1) 法 15 条施設

産業廃棄物処理施設を設置する場合には、都道府県知事等による許可を受けることが必要とされており、汚泥の脱水施設で処理能力が 10t/日を超えるものなど、廃棄物の種類や処理方法に加えて、規模の要件に該当する場合は、許可が必要な産業廃棄物処理施設となる。法第 15 条に規定されていることから、法 15 条施設と呼ばれる（15 条施設として政令で定める施設を表 3-2 に示す。）。この制度に基づき、施設を設置する場合は、都道府県等へ設定の申請があり、申請情報を基に、処理施設の種類、対象廃棄物や処理能力などが行政に保有される。本研究では、平成 29 年 11 月時点での廃棄物処理施設ごとの受入対象廃棄物の種類とその処理能力の情報を使用し、処理能力を把握する。ただし、表 3-2 に示す能力・規模に満たない施設や、施設の種類にない、例えば、動植物性残さの乾燥や汚泥の発酵処理などといった一部の施設を把握できないものがある。また、廃棄物等の処理の優先順位の観点から、最終処分場へ変更可能先に指定することは望ましくないことから、本研究では検討から除外した。

表 3-2 15 条施設の一覧

号	施設の種類	能力・規模
1	汚泥の脱水施設	10m <sup>3</sup> /日を超えるもの
2	汚泥の乾燥施設 汚泥の天日乾燥施設	10m <sup>3</sup> /日を超えるもの 100m <sup>3</sup> /日を超えるもの
3	汚泥の焼却施設	5m <sup>3</sup> /日を超える 200kg/時以上のもの 火格子面積が2m <sup>2</sup> 以上のもの
4	廃油の油水分離施設	10m <sup>3</sup> /日を超えるもの
5	廃油の焼却施設	1m <sup>3</sup> /日を超える 200kg/時以上のもの 火格子面積が2m <sup>2</sup> 以上のもの
6	廃酸又は廃アルカリの中和施設	50m <sup>3</sup> /日を超えるもの
7	廃プラスチック類の破砕施設	5t/日を超えるもの
8	廃プラスチック類の焼却施設	100kg/日を超えるもの 又は火格子面積が2m <sup>2</sup> 以上のもの
8の2	木くず又はがれき類の破砕施設	5t/日を超えるもの
9	有害物質を含む汚泥のコンクリート固型化施設	すべて
10	水銀又はその化合物を含む汚泥のばい焼施設	すべて
10の2	廃水銀等の硫化施設	すべて
11	汚泥、廃酸又は廃アルカリに含まれるシアン化合物の分解施設	すべて
11の2	廃石綿等又は石綿含有産業廃棄物の熔融施設	すべて
12	廃PCB等、PCB汚染物又はPCB処理物の焼却施設	すべて
12の2	廃PCB等又はPCB処理物の分解施設	すべて
13	PCB汚染物又はPCB処理物の洗浄施設又は分離施設	すべて
13の2	産業廃棄物の焼却施設（汚泥、廃油、廃プラスチック類及び廃PCB等、PCB汚染物又はPCB処理物の焼却施設を除く。）	200kg/時以上のもの 火格子面積が2m <sup>2</sup> 以上のもの
14	産業廃棄物の最終処分場	すべて

## (2) 処理実績報告

北九州市では、廃棄物処理法の第 18 条（報告徴収）に基づき、産業廃棄物処理業者に対して、毎年の処理実績として、廃棄物の種類・受入地域別の受入量の報告を求めている。この平成 29 年度処理実績分を使用し、受入状況を把握に用いる。

## (3) 電子マニフェスト情報

産業廃棄物を委託して処理する場合には、排出事業者が産業廃棄物管理票（マニフェスト）を交付して処理状況を確認することが、廃棄物処理法により義務付けられている。加えて、マニフェストを交付した排出事業者は、前年度 1 年間の状況を都道府県等への報告が求められる。マニフェストは紙マニフェストと電子マニフェストがあるが、電子マニフェスト情報は電子情報として即分析可能な状態であったことに加え、排出毎の情報であり、本研究内で把握したい排出量の季節変動と廃棄物の移動状況の両面で合致したことから、平成 29 年度実績分の電子マニフェスト情報を使用することとした。なお、処分先の住所が、福岡県内の場合は市町村名まで、福岡県外の処分先の場合には、都道府県名までの情報に加工されていたことから、処分先の住所情報を都道府県庁や市町村庁の住所に置き換え、排出事業所から処分場までは、直線距離を用いて輸送距離を算出した。

### 3.2.2 推定方法

法 15 条施設情報に記載される処理能力は、日量での記載であったことから、年間の稼働日数を 285 日<sup>1)</sup>として、年間の処理能力 (t/年) を求めた。ここで、汚泥や廃油の処理施設の一

部で処理能力の単位が $m^3$ であった施設については、重量換算係数<sup>2)</sup>を用いて重量(t)換算を行った。その結果と処理実績報告との差をとり、市内処理施設の受入れ状況、すなわち市内処理施設の余力とした。ただし、産業廃棄物の排出量は、例えば、建設工事が活発になる年度末等に建設系の産業廃棄物の排出量が増加するといった、事業活動に影響され排出量の変動が予測される。産業廃棄物処理事業者側は、それを見越した処理能力の設定を行っていると考えられる。このため、電子マニフェスト情報から月平均あたりの変動率を求め、変動に対応できる余力に変換した。

### 3.2.3 結果と考察

#### (1) 入手した情報の概要

北九州市より入手した情報を表 3-3 に示す。市内の処理施設は、16 の産業廃棄物の種類に対応する施設が、全体で 346 施設あり、処理能力は 3,161 万トンあった。ここからは、この 16 種類の産業廃棄物に対する状況について、分析していくこととする。がれき類、汚泥、木くず、廃酸、廃アルカリの順で処理能力がある状況にあった。これらの施設における処理の実績を見ると全体として 184 万トンであり、処理施設の利用率で見ると、6%程度の受入状況である。廃棄物種類別に処理施設の利用率を見ると、燃え殻で 51.1%、ガラス陶磁器くずで 47.5%、廃プラスチック類で 15.5%となり、市内の処理施設には、受入れるキャパシティがあることが伺える。電子マニフェスト情報は全体で約 13 万件のデータがあり、委託量で約 51 万トンとなる。ここでゴムくずについて、電子マニフェスト情報で 1 データと限られていることから分析から除外することとした。輸送距離で見ると、紙くず 8.6km、がれき類の 9.1km と距離の短い範囲で処理されるものがある一方で、汚泥、廃酸で 43.7km と輸送距離が長い廃棄物がある。市内の処理施設の利用率で、廃棄物の種類により異なるものの、利用率が低い状況であることから、市外に輸送し処理しているものを、市内処理へ転換していくことが、循環圏を構築していくうえで、望ましい姿である。

表 3-3 使用するデータの概要

	15条施設		処理実績報告		電子マニフェスト情報			
	施設数	処理能力 (t/年)		うち市外 から搬入	件数	委託量(t)	うち市外へ の委託量	平均輸送 距離 (km)
燃え殻	1	85,500	43,663	37,837	3258	38,138	31,855	29.0
汚泥	50	2,712,301	359,391	247,197	18448	163,841	77,897	43.7
廃油	19	544,420	71,942	56,626	15534	42,416	1,665	14.2
廃酸	14	1,084,653	45,912	40,877	1824	12,927	3,801	43.7
廃アルカリ	15	1,009,511	76,945	60,428	2682	16,421	1,625	11.5
廃プラスチック類	56	646,957	100,125	70,903	36008	38,574	22,471	30.8
紙くず	9	276,222	6,772	1,766	5230	4,652	129	8.6
木くず	62	1,840,296	68,561	25,553	10417	16,365	1,995	11.3
繊維くず	8	262,257	352	161	292	164	71	15.4
動植物性残さ	8	360,383	4,768	3,861	911	620	229	14.9
動物系固形不要物	5	276,821	-	-	-	-	-	-
ゴムくず	7	139,137	13	1	1	0	0	4.2
金属くず	3	320,340	23,125	13,765	4263	4,121	772	13.5
ガラス陶磁器くず	3	174,990	83,048	55,660	14019	53,704	27,187	18.6
鋳さい	-	-	122,238	64,680	20040	233,204	72,851	17.7
がれき類	83	21,659,476	956,342	85,036	19374	122,240	8,359	9.1
動物のふん尿	3	219,165	-	-	-	-	-	-
動物の死体	-	-	-	-	-	-	-	-
ばいじん	-	-	249,438	195,614	8171	137,072	94,091	20.1
全体	346	31,612,428	2,212,635	959,965	160,472	884,459	344,999	21.6

(2) 廃棄物排出量の季節変動

委託量は、月ごとに変動があり、10月、1月、3月に増加する傾向が見られる（図 3-2）。廃棄物種類別に変動の状況をみると（表 3-4）、繊維くずで変動係数が 1.11 とばらつきが大きく、月の平均に対して 4.2 倍の量が排出される月がある。同様に廃酸が 3.4 倍、燃え殻が 2.7 倍となっている。このことから、前節で求めた利用率は、1年間を通して廃棄物の排出量に変動しない想定で算定したが、産業廃棄物処理施設の能力は、季節変動に応じて増加した場合でも対応できるよう、能力を設定しておく必要があると考える。

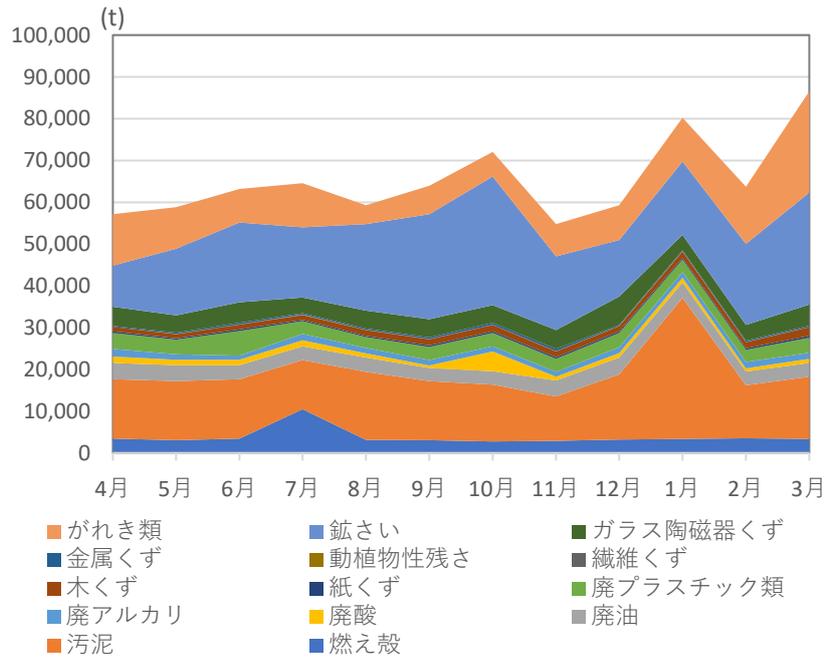


図 3-2 廃棄物種類別の月別委託量

表 3-4 月別委託量の変動係数と平均値と最大値の比率

	変動係数	平均と最大の比
燃え殻	0.53	2.74
汚泥	0.37	2.18
廃油	0.08	1.14
廃酸	0.75	3.41
廃アルカリ	0.15	1.33
廃プラスチック類	0.24	1.71
紙くず	0.12	1.23
木くず	0.21	1.53
繊維くず	1.11	4.20
動植物性残さ	0.26	1.62
金属くず	0.23	1.63
ガラス陶磁器くず	0.18	1.50
がれき類	0.48	2.38

(3) 市内処理施設の受入れ許容量推計

前述した、平均値と最大月の比を考慮して、市内処理施設の受入れ許容量を推計した（表 3-5）。その結果、燃え殻の受入許容量は得られなかったものの、特にがれき類、汚泥、木くずの処理施設で多くの許容量が確認され、それ以外の産業廃棄物でも、市外に搬出される分の受入許容量を確認した。

表 3-5 廃棄物種類別の市内施設の受入れ許容量

	処理能力 (t/年)	処理量 (t/年)	最大月考慮 係数	受入れ許容 量(t/年)
燃え殻	85,500	43,663	2.7	0
汚泥	2,712,301	359,391	2.2	1,928,285
廃油	544,420	71,942	1.1	462,437
廃酸	1,084,653	45,912	3.4	928,133
廃アルカリ	1,009,511	76,945	1.3	907,090
廃プラスチック類	646,957	100,125	1.7	475,596
紙くず	276,222	6,772	1.2	267,879
木くず	1,840,296	68,561	1.5	1,735,625
繊維くず	262,257	352	4.2	260,779
動植物性残さ	360,383	4,768	1.6	352,659
動物系固形不要物	276,821	-	-	276,821
金属くず	320,340	23,125	1.5	285,542
ガラス陶磁器くず	174,990	83,048	1.6	43,482
がれき類	21,659,476	956,342	2.4	19,382,449
動物のふん尿	219,165	-	-	219,165

### 3.3 処理拠点の変更可能割合の算定

#### 3.3.1 排出事業者に対するアンケート実態調査

産業廃棄物の排出や処理の実態に加えて、処理方法の選択理由や処理上の課題等を把握することを目的に、排出事業者に対するアンケート調査を実施した。調査の対象は、定期的に排出が行われ取扱う廃棄物量が比較的多い事業者である多量排出事業者を対象にした。なお、北九州市分ではサンプル数を十分に確保できない懸念があったことから、福岡県、福岡市、久留米市、大牟田市へ多量排出事業者として報告されている分も加え 556 事業所を対象にした。調査項目は、産業廃棄物の排出実態（回収頻度、処理先の地域、処理先の選択理由、処理方法、輸送方法等）として郵送法によるアンケート調査を実施した（表 3-6）。

表 3-6 アンケート調査概要

項目	内容
調査対象	福岡県内の多量排出事業者556
調査方法	郵送配布、郵送回収
調査時期	2018年3月
調査項目	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 事業所の概要</li><li>・ 廃棄物の処理状況（処理ルートごとの廃棄物の排出量、処理方法、処理先、処理先の選択理由、輸送方法）</li><li>・ 輸送効率化に向けて取組みたい対策</li><li>・ 輸送効率化に向けた取組みの制約</li></ul>

(参考) アンケート調査票に係る発送物

- ・依頼状：A4 で1枚
- ・調査票：A3 で両面1枚

平成30年3月吉日

調査票を受け取られた事業者の皆様

北九州市立大学国際環境工学部  
教授 松本 亨

時下ますますご清栄のこととお慶び申し上げます。

平成29年度に、北九州市企画調整局政策部企画課より研究助成金をいただき、廃棄物や循環資源等を含む静脈物流の低炭素化やコスト低減化のための、モーダルシフト等輸送効率化の可能性の検討を進めています。

そこで、静脈物流の現状やモーダルシフト、帰り荷利用、複合一貫輸送、共同保管・輸送等の方法の導入可能性や導入するための条件等を整理する目的で、静脈物流に関連する排出事業者様及び処理業者様を対象にアンケート調査を実施させていただくことにいたしました。

年度末のご多忙な折のお願いとなり大変恐縮ではございますが、調査の趣旨をご理解いただき、ご協力を賜りますようお願い申し上げます。

なお、本調査票は、福岡県、北九州市、久留米市、大牟田市において産業廃棄物の多量排出事業者の対象となっておられ、内容を公表されている事業者様と、同地域に積替保管施設を含む収集運搬業の許可を保有している事業者様を対象に調査票を送付させていただいております。

◇同封物について

- アンケート調査のご協力のお願い（本紙）
- アンケート調査票（A3版）
- 返信用封筒

◇ご回答について

アンケート調査票に直接回答を記入してください。貴事業所単体の内容としてご回答ください（他の支店・事業所は含まない）。選択肢に○をつけていただくものや、直接内容を記入いただく設問があります。

◇調査票のご返送について

同封の返信用封筒にて、平成30年3月23日（金）までにご投函ください。

◇ご回答内容の取扱いについて

本調査で知り得た情報は統計的に処理した上で利用します。回答された個々の情報を公開することは一切ありません。なお、事業所名、ご回答者名等は、必要な照会が発生した際にのみ利用するもので公開するものではありません。

◇お問合せ先

〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1 北九州市立大学N432号室  
TEL/FAX：093-695-3719  
北九州市立大学国際環境工学部 松本 亨研究室  
（担当：安村、田口、大久保）



### 3.3.2 アンケート結果と考察

#### (1) アンケートの回収結果

調査票を配布した 556 件の事業所のうち、141 件から回答を得て、回収率は 25.4%であった。回答事業者の属性情報を表 3-7 に示す。業種としては製造業、建設業、電気・ガス・熱供給・水道業の順で、これらの業種で約 8 割を占めていた。従業員数では 11～50 人以下が 35%、10 人以下が 25%、151 人以上が 24%となった。また、回答事業者から排出される廃棄物としては鉱さい、汚泥、ガラス陶磁器くずの占める割合が大きいデータとなった（表 3-8）。さらに、本調査結果と福岡県が公表する排出量<sup>3)</sup>の実績値を廃棄物種類別の割合を比較した（図 3-3）。これを見ると、本調査結果は、排出割合が大きいものの、汚泥、がれき類、ガラス陶磁器くずが多く排出されているなど同様の傾向を示している。これらの結果から、本調査で得られた回答の集計値は、県内の傾向を捉えたものであると言える。

**表 3-7 回答事業者の属性**

回答事業所の属性	件数	比率 (%)
建設業	52	37%
製造業	53	38%
業 電気・ガス・熱供給・水道業	15	11%
種 サービス業	1	1%
公務	6	4%
その他	14	10%
従業員数		
10人以下	35	25%
11～50人以下	49	35%
51～150人以下	21	15%
151以上	34	24%
無回答	2	1%
回答事業所合計	141	

**表 3-8 ルート数と排出量**

廃棄物の種類	ルート数	排出量(t)
燃え殻	10	8,840
汚泥	156	258,702
廃油	48	30,202
廃酸	25	7,075
廃アルカリ	21	3,728
廃プラスチック類	106	12,228
紙くず	34	550
木くず	63	12,930
繊維くず	13	36
動植物性残さ	3	2,245
金属くず	50	2,784
ガラス陶磁器くず	147	113,156
鉱さい	10	258,778
がれき類	82	104,069
合計	768	815322.69

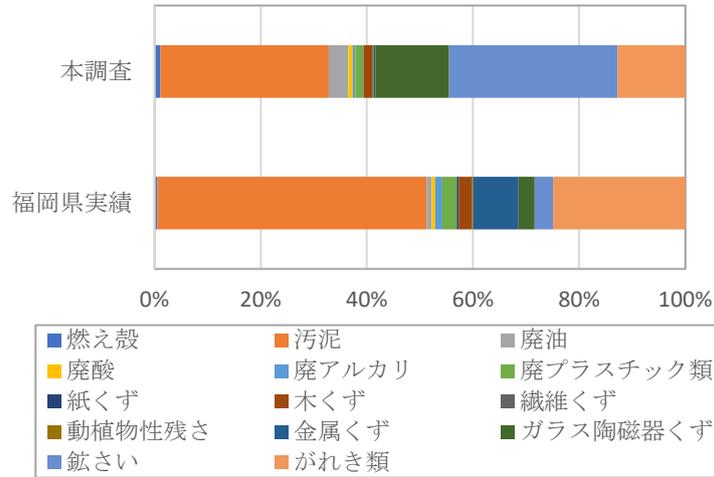


図 3-3 調査結果と福岡県公表値と廃棄物種類別排出量の比較

(2) 廃棄物の処理先と処理先の選択理由

廃棄物の処理先の地域は、福岡県（北九州市を除く）に次いで北九州市内で大半を占める状況であった。一方で、量は少ないものの、関東、北海道といった遠方の処理先を選択するルートがあることを確認出来た（図 3-4）。これら処理先の選択理由としては、適正処理ができる、リサイクルができる、処理能力の大きな事業者である、という理由が支持された（図 3-5）。ただ、これら上位の理由はいずれも、産業廃棄物の許可業者であれば対応可能な能力を有していると考えられることから、現在の処理先でなければ必ずしもならないという理由ではないと推察する。

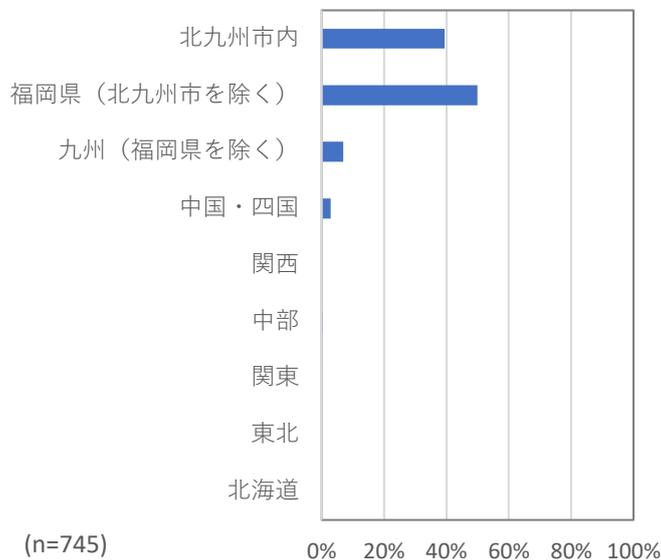


図 3-4 処理先の地域

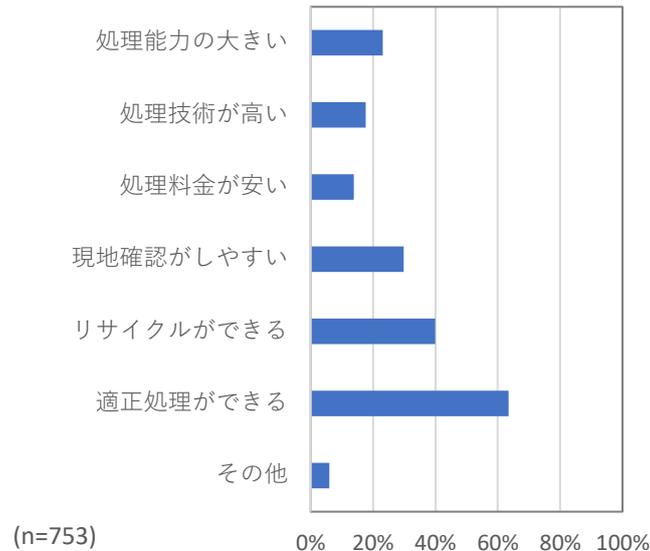


図 3-5 処理先選択の理由

### (3) 輸送効率化に関する取組み

輸送効率化に関する取組み内容の回答結果を図 3-6 に示す。多くの事業者では取組みの予定はないとの結果になった。取組み内容で見ると、回収頻度を減らしたい、輸送距離を近距離にしたいとの支持が高かった。図 3-7 は、輸送効率化の検討に際し制約となっていることを問う結果で、対策の導入手順がわからないが最も多く、廃棄物の量が少ないや適正処理が担保できない、人材が確保できないとの理由が挙げられた。これらの点から、どのような対策が効果的な対策か不明であることが問題であり、実施すべき取組みを見える化し、目指す方向に誘導していくことが必要であると考え。また、取組み内容の優先順位を考えると、回収頻度を減らすためには、保管場所の確保などハード的な整備が必要になることから直ちに対応することは難しいが、輸送距離を近距離にという対応は、委託契約の変更など手続き的な変更であり対策として実施しやすい施策である。

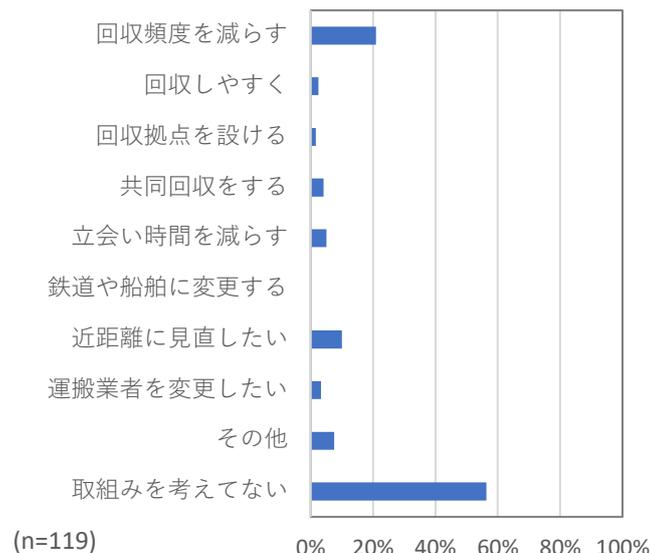


図 3-6 輸送効率化で取組みたいこと

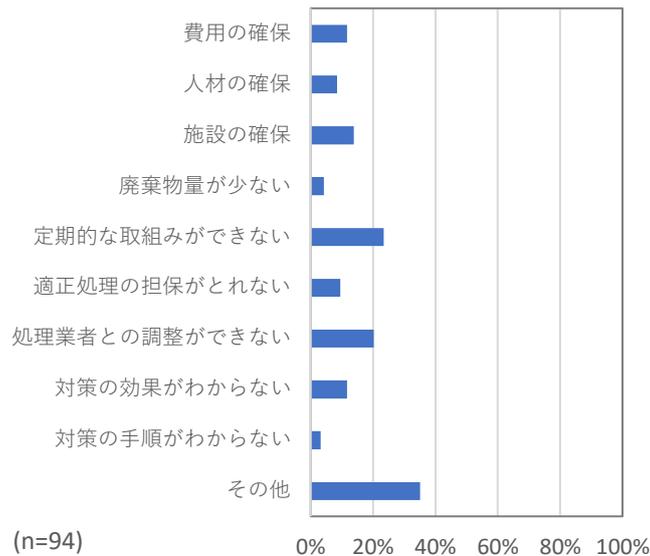


図 3-7 輸送効率化を検討する際に制約となること

### 3.3.3 処理先変更可能割合の推定方法

調査の設問の「処理先の地域」「処理先の選択理由」に着目し、輸送先の変更可能割合を廃棄物種類別に求めた。具体的には、「処理先の選択理由」の選択肢から以下の理由で該当する選択肢を一つでも選択された回答は、処理先を変更できないとして、それ以外の選択肢の回答である場合は、処理先の変更を可能とした。

- 選択肢「②処理技術の高い業者がある」は、処理業者が新しい技術や他の処理業者が有する固有の技術を導入するのは難しい。
- 選択肢「③処理料金が安い」は、処理料金や取引価格の引き下げ等は容易に行えず、さらに価格競争は望ましくない。
- 選択肢「⑦その他」は特定の理由を持っている。

### 3.3.4 処理先変更可能割合の推定結果

処理先変更可能割合の推定結果は、図 3-8 に示すとおり、廃油、廃アルカリ、廃酸といった液状廃棄物は、処理技術の高い業者を求める傾向があり、処理先を変更しにくい廃棄物となった。また、廃プラスチック類や紙くずは、処理料金や処理技術の観点から処理先の変更可能割合が低い結果となった。一方で、動植物性残さ、鉍さい、木くず、金属くず、がれき類は、処理先の変更可能となる割合が 8 割を超す結果となった。

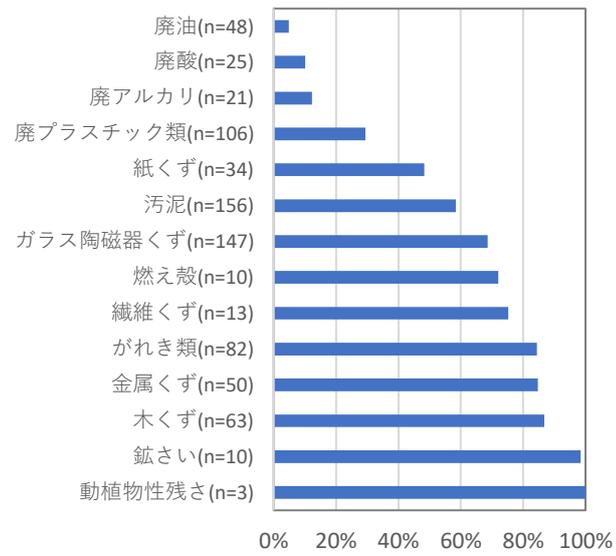


図 3-8 処理先変更比率

### 3.4 処理先拠点の変更に伴う産業廃棄物輸送の循環圏の変化と低炭素化

#### 3.4.1 輸送トンキロを目的とした最適化計算

##### (1) 定式化

ここでは線形計画法における輸送トンキロを最小化させる輸送問題を解くことで、実績データと最適解後の比較分析を実施する。式(2)に示すように排出場所からの総搬出量と、各地域の処理施設の受入量(3)を制約条件とした。これらの制約条件下で、排出場所から処理施設までの輸送距離と輸送量を乗じて合計する値を最小化することを目的関数と(1)して設定した。なお、計算は、産業廃棄物の種類別に行っている。

Minimize

$$\text{TonKm} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} L_{ij} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^n w_{ij} = W_i \quad (2) \quad \sum_{j=1}^n w_{ij} = W_j \quad (3)$$

ここで、 TonKm : 総輸送トンキロ

W<sub>ij</sub> : 排出場所 i から処理施設 j までの輸送量

L<sub>ij</sub> : 排出場所 i と処理施設 j までの距離

W<sub>i</sub> : 排出場所 i の総排出量

W<sub>j</sub> : 処理施設 j の受入可能量

##### (2) 制約条件の設定 (受入可能量)

北九州市外に搬出されている廃棄物を、3.3.4 で得られた廃棄物の種類別の変更可能割合を用いて、北九州市への受入可能量として変動させた。さらに、3.2.3 (3) で求めた許容量を超えないように制約条件を設けた。ただし、実際には一括してすべてを輸送先変更できるとは限らないことから、遠方から優先して市内へ移行させるパターンと、地域均等に市内に移行させるパターンの2つの方法で受入可能量を変動させた。

##### (3) 二酸化炭素排出量の計算

現状と最適化計算後を二酸化炭素排出量の変化で評価を行った。二酸化炭素排出量の算出は次式<sup>4)</sup>によるトンキロ法を用いて行った。なお、3 で用いたアンケート結果では、輸送機関はすべて車両による輸送であったことから、輸送機関は車両として取扱いをした。

$$\text{二酸化炭素排出量(t-CO}_2\text{)} = \text{輸送量 (t)} \times \text{輸送距離(km)} \times 173 \text{ (g-CO}_2\text{/t} \cdot \text{km)} \times 1/1,000,000$$

### 3.4.2 結果と考察

#### (1) 線形計画法を用いた最適化計算結果

計算結果を表 8 に示す。遠方優先で移行するパターンでは、変更可能割合の低い廃油の一部が北海道・東北に残るものの、遠方輸送が減少する。地域で均等に移行させるケースの場合は、そのとおりそれぞれの地域の輸送先から北九州市内に移行された。

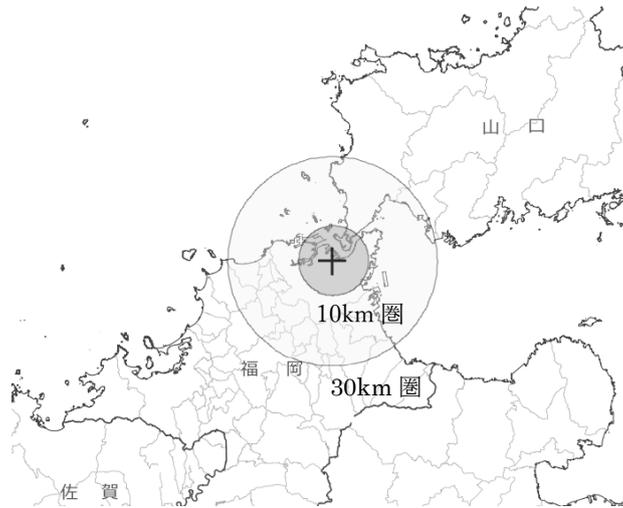
**表 3-9 地域別の処理量**

処理量(t)	現状	遠方優先 移行	均等移行
北九州市内	336,128	417,298	417,314
福岡県	121,213	87,859	66,813
九州	5,117	1,492	3,276
中国・四国	45,857	7,490	24,269
近畿・中部・北陸	5,564	0	2,308
北海道・東北	305	45	203

廃棄物の種類別の平均輸送距離の変化（表 3-10）についてみると、市内処理施設の許容量がなかった燃え殻以外の廃棄物のすべてで距離が短くなった。遠方輸送を優先するケースの場合は、廃酸で 34.9km、燃え殻で 29.0km と輸送距離が長いものがあるものの、その他は 30km 未満になる。地域を均等に移行させる場合も輸送距離が短くなることが確認できた。北九州市役所を中心とした半径 10km と 30km の同心円描き（図 3-9）、表 3-10 をみると、10km 前後の輸送距離である廃棄物は市内処理を実現可能な範囲であり、30km を超える場合は、山口県や市外を超えて福岡県の近隣県で収まる範囲となる。このことから十分な余力のある施設を抱える地域においては、狭小な循環圏が構築できることが伺える。

**表 3-10 廃棄物種類別の平均輸送距離の変化**

輸送距離(km)	現状	遠方優先 移行	均等移行
燃え殻	29.0	29.0	29.0
汚泥	43.7	11.1	22.6
廃油	14.2	12.1	13.8
廃酸	43.7	34.9	40.0
廃アルカリ	11.5	9.6	11.0
廃プラスチック類	30.8	16.9	23.9
紙くず	8.6	7.8	8.1
木くず	11.3	7.8	8.0
繊維くず	15.4	9.5	9.5
動植物性残さ	14.9	7.5	7.5
金属くず	13.5	8.0	8.4
ガラス陶磁器くず	18.6	10.4	11.0
がれき類	9.1	7.7	7.8



地理院地図電子国土 Web（国土地理院）を加工して作成

図 3-9 北九州市役所を中心とした同心円

(2) 処理先変更に伴う二酸化炭素排出量の変化

輸送に伴う二酸化炭素の排出量の結果を図 10 に示すとおり、現状では 2,285t-CO<sub>2</sub> であり、遠方の処理拠点を優先して市内に変更した場合には、51%減、処理拠点の地域を均等に變更した場合で、34%の削減効果が得られた。産業廃棄物業界として、収集運搬の二酸化炭素排出量を 2030 年度に 210 年度比で 10%削減をうたっている<sup>5)</sup>ことから、市内の処理施設を最大限活用して処理先変更に伴う輸送距離の短縮化は、二酸化炭素削減に大きく貢献する施策であることが示唆される。

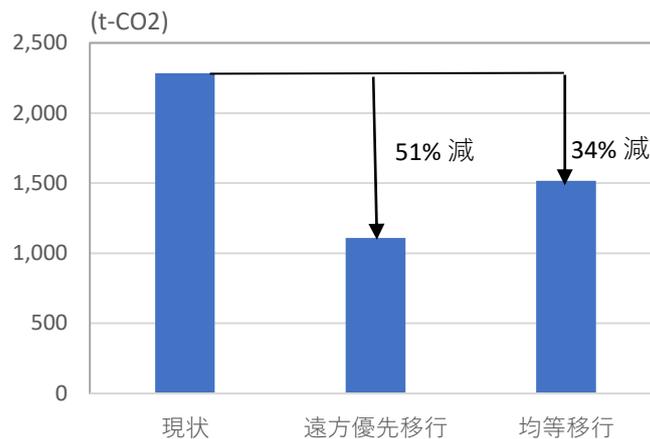


図 3-10 二酸化炭素排出量の試算結果

### 3.5 まとめ

産業廃棄物の適正処理及び循環利用における適正な輸送距離を検討するため、行政報告を活用して、廃棄物処理施設の余力を推定した。さらに、排出事業者の処理先の選定要因の意向結果から、処理先変更可能割合についても求めた。その結果を制約条件として用い、輸送トンキロ最小化を指向する輸送問題を解き、二酸化炭素排出量の変化でその効果を分析した。本研究によって得られた主要な成果を以下に述べる。

- 許可情報と処理実績を利用することで、市内の廃棄物処理施設の利用率を求めることができた。さらに、電子マニフェスト情報から季節変動を考慮した処理施設の余力を推定し、その量を可視化することができた。この結果、北九州市内の処理施設の利用率は低く、処理先を変更して廃棄物を受入することができる可能性があることを示した。
- 産業廃棄物排出事業者に対するアンケート結果より、排出事業者は、必ずしも廃棄物処理業者を特定の理由をもって処理先を選択している状況でないことがわかった。また、輸送距離の短縮化のニーズが一定程度あることが明らかになった。このため、処理先変更可能割合を推定してみると、動植物性残さ、鉍さい、木くず、金属くず、がれき類は処理先を変更しやすい廃棄物である一方で、廃油、廃アルカリ、廃酸といった液状廃棄物は処理先変更が難しい廃棄物であることを解明した。
- 受入可能量と処理先変更可能割合を制約条件に輸送トンキロ最小化を目的として定式化を行い、最適化計算を実施することで、現状から最大で二酸化炭素削減量の効果を 51% 得られることを示した。また、輸送距離から想定する廃棄物の移動圏域は、北九州市近隣の 30km 圏内で十分に処理が可能であることが示唆された。

以上について改めて整理すると、排出事業者が主導し、近隣の処理施設へ処理先を変更することで、輸送の効率化が図られることから、二酸化炭素排出量の削減効果が得られる。この対策を実行するためには、行政は保有する情報（特に電子マニフェスト情報のような即時性のある電子情報）を活用して、処理施設の受入れ状況などを整理して公開し、近隣施設へ誘導していくことが求められる。一方で、燃え殻は処理先変更可能割合が高い廃棄物であったものの、北九州市の場合には処理施設の余力がなく、輸送の効率化が図れなかった。このため、行政は域内廃棄物の発生と処理の需給バランスを検討し、施設の能力が不足している場合には、施設整備の支援を行う検討をするなど、輸送距離の短縮化についても低炭素対策の一環として考慮すべきである。このように、循環分野における地域循環共生圏を考えるにあたり、広域処理を検討する前に、足元の地域に立地する施設や廃棄物等の排出状況を分析した上で、適正な輸送について地域内で検討していくことが求められるといえる。本研究によって得られた成果により、各地で適正な地域循環共生圏が構築されていくことが期待される。

本研究で使用したデータの特性上、産業廃棄物の委託処理の範囲にとどまっている。すなわち、廃棄物の自己処理や廃棄物に該当しない有価物の循環まで検討ができていない。加えて、紙マニフェストによって管理された委託処理量についても考慮できていない。また、輸送機関について船舶や鉄道による輸送効率化は扱っていない。さらに輸送先での処理方法を考慮出来ていないことから、リサイクルから焼却処理など処理が変化することが想定されるため、処理内容を含めた議論が必要である。これらは今後の検討課題としたい。

## 参考文献

- 1) 環境省：廃棄物処理施設整備費国庫補助金交付要領の取扱いについて、2003
- 2) 環境省：産業廃棄物管理票に関する報告書及び電子マニフェストの普及について（通知）、2006
- 3) 福岡県：福岡県廃棄物処理計画、2021
- 4) 経済産業省・国土交通省：ロジスティクス分野における CO2 排出量算定方法共同ガイドライン Ver. 3.1、2016
- 5) 全国産業資源循環連合会：全国産業資源循環連合会 低炭素社会実行計画、2018

## 第4章 輸送機関の選択要因と輸送費用の規定要因分析

### 4.1 はじめに

本章は、廃棄物等の個別輸送データに着目し、特性に応じた最適な輸送機関を選択することで輸送効率化方策を提案していくものである。このため、廃棄物の種類別といった個別の問題として整理するのではなく、輸送に影響を及ぼす項目を変数として盛り込み、輸送機関の選択要因や輸送費用のモデルとして一般化した点に特徴を有する。1.2.1 で述べたように、廃棄物等は処理の過程において、発生場所から集積所等に収集され、そこから中間処理施設まで運搬される1次輸送と、さらに、中間処理後に生じた残さを最終処分するために生じる2次輸送がある。本研究では、廃棄物等の排出源の特性に近い1次輸送を対象としている。

以下、4.2 では使用するデータの特徴を整理し、4.3 では数量化理論第Ⅱ類を用いて輸送機関の選択要因を明らかにした。その上で、4.4 では4.3 で構築したモデルを使用してモーダルシフト可能量を推定し、その効果を二酸化炭素で評価した。4.5 では、重回帰分析により輸送費用の要因を分析し、輸送費用がモーダルシフトの阻害要因となっていないかを確認した。

## 4.2 使用するデータ

### 4.2.1 物流センサス

物流センサスとは、国土交通省が5年に1度実施する調査である。貨物の発生場所である鉱業、製造業、卸売業、倉庫業の事業所単位に貨物の出発地から到着地までを一区切りの流動として捉えて調査の範囲とし、貨物そのものの動きを詳細に把握した唯一の全国調査であり、国の政策資料等や土木の分野でも地域間の物流解析<sup>1)</sup>、<sup>2)</sup>や、経路・輸送機関等選択要因<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>に関する研究等に広く用いられている。この範囲を資源循環分野で置換えてみると、廃棄物等の発生場所である事業所から中間処理施設等までを捉えたものであることから、本研究の範囲は、1次輸送が対象であると言える。本データは、①貨物の真の発着地の把握が可能、②産業・業種間の貨物の流動の把握が可能、③出荷1件あたりの重量（流動ロット）の把握が可能などの特徴を有している。このことから、廃棄物等の特性に応じた解析ができると考え、本研究で使用するデータとした。

表 4-1 主な調査項目

主な調査項目	
1. 出荷日	2. 出荷品目（85区分）
3. 着産業業種（55区分）	4. 出荷重量（出荷数量）
5. 出荷時の輸送機関※1	6. 代表輸送機関※1
7. 輸送経路（中継地点，中継地点以降の輸送機関）	
8. 代表輸送機関の選択理由	9. 届出施設
10. 高速道路利用の有無	11. 利用インター名
12. 高速利用途中の一般道利用の有無	
13. コンテナ利用の有無	14. 到着日時指定有無
15. 所要時間	16. 輸送費用
※1輸送機関の12分類 鉄道コンテナ，車扱・その他，自家用トラック，宅配便等混載，一車貸切，トレーラ，フェリー，コンテナ船，RORO船，その他船舶，航空，その他	

### 4.2.2 分析対象データ

本研究では、2015年10月20日(火)～2015年10月22日(木)の間で実施された第10回のデータを使用する。このデータから調査項目として55区に分類し調査されている出荷品目のうち、排出物とされた「廃自動車、廃家電、金属スクラップ（有価の金属くず等）、金属製容器包装廃棄物（使用済み缶等）、使用済みガラスびん、その他容器包装廃棄物（使用済みのペットボトル・飲料用紙パック等）、古紙、廃プラスチック類、燃え殻（石炭がら等）、污泥、鋳さい、ばいじん、その他の産業廃棄物（廃油、繊維くず、コンクリートくず、廃タイヤ等）」の13品目が廃棄物等に該当するとして対象にした。なお、輸送費用を要してもそれ以上の価値がある場合や迅速性が求められる廃棄物等であるなど、特殊な事情により選択されることが考えられる航空やその他（パイプライン・ベルトコンベアなど）は、特定の事業所や廃棄物の種類

のケースであり、限定的なデータであったことから分析対象から除外した。その結果、全体の約 90 万件/3 日間のデータから 4、710 件/3 日間のデータに絞込まれた（表 4-2）。

**表 4-2 分析対象データ**

	件/3日間	千t/3日間
	件数	重量
全件	898,476	5,786
廃棄物等	4,729 (0.5%)	145 (2.5%)
分析対象	4,710 (0.5%)	145 (2.5%)

また、分析に用いた調査項目を表 4-3 に示す。ここで、質的データである調査項目の場合は、その項目に該当するか否かでダミー変数に変換した。その際に、変数間にサンプル数で偏りが生じることがあったことから変数を集約する加工を行った。例示すると、業種の製造業では工業統計調査が示す産業 3 類型を参考にして、木材・木製品製造業、家具・装備品製造業、パルプ・紙・紙加工品製造業、印刷・同関連産業、化学工業、石油製品・石炭製品製造業、プラスチック製品製造業、ゴム製品製造業、なめし革・同製品・毛皮製造業、窯業・土石製品製造業、鉄鋼業、非鉄金属製造業、金属製品製造業に該当するデータを「素材産業」とし集約を行った。さらに、廃棄物の種類では、廃自動車、廃家電、金属スクラップに該当するデータを「金属主体」とするなどした。加えて、着業種がその他サービス業（廃棄物処理業が該当）もしくは届出先区分がリサイクルセンターに該当するデータを廃棄物処理の必要かどうか、すなわち有価物か廃棄物かを別とするダミー変数とした。

表 4-3 分析に用いた調査項目と変数の変換

変数名	変数種別	変数に用いるため加工した調査データ
1 鉱業		
2 製造業		
3 生活関連型産業		食料品製造業，飲料・たばこ・飼料製造業，飲料・たばこ・飼料製造業，繊維工業，家具・装備品製造業，印刷・同関連産業，なめし革・同製品・毛皮製造業，その他の製造業
4 業種 加工組立型産業	ダミー変数	はん用機械器具製造業，生産用機械器具製造業，業務用機械器具製造業，電子部品・デバイス・電子回路製造業，電気機械器具製造業，情報通信機械器具製造業，輸送用機械器具製造業
5 基礎素材型産業		木材・木製品製造業，パルプ・紙・紙加工品製造業，化学工業，石油製品・石炭製品製造業，プラスチック製品製造業，窯業・土石製品製造業，鉄鋼業，非鉄金属製造業，金属製品製造業
6 卸売業		
7 倉庫業		
8 金属主体		廃自動車，廃家電，金属スクラップ
9 容器包装		金属製容器包装廃棄物，使用済みガラスびん，その他容器包装廃棄物
10 廃古紙		
11 廃物の燃え殻	ダミー変数	
12 汚泥		
13 鉱さい		
14 ばいじん		
15 その他の産業廃棄物		
17 輸送機関 車両	ダミー変数	自家用トラック，営業用トラック(宅配便等混載)，営業用トラック(一車貸切)，トレーラー
18 鉄道		鉄道(コンテナ)，鉄道(車扱・その他)
19 船舶		フェリー，海運(コンテナ船)，海運(RORO線)，海運(その他船舶)
20 環境負荷考慮	ダミー変数	代表輸送機関の選択理由に「環境負荷の小ささ」を選択
21 コンテナ利用	ダミー変数	コンテナ利用有を選択
22 日時指定	ダミー変数	日単位，午前・午後単位，時間単位のいずれかを選択
23 届出先での処理有	ダミー変数	着業種を「その他サービス業」または届出先として「リサイクルセンター」を選択
24 輸送費用	実数(円)	
25 輸送重量	実数(t)	
26 輸送距離	実数(km)	

### 4.3 数量化理論第Ⅱ類を用いた輸送機関の選択要因の分析

#### 4.3.1 分析方法

輸送機関の選択特性を明らかにするための手法として、ロジスティック回帰分析、判別分析、数量化理論第Ⅱ類を用いることが想定される。ロジスティック回帰分析は、関谷ら<sup>9)</sup>の高速利用率の関係、末廣ら<sup>10)</sup>の高速道路選択モデルの構築、永岩ら<sup>7)</sup>の経路選択に用いられるなど、多くの事例があるものの、永岩ら<sup>7)</sup>からは、データ数に偏りがある場合は精度が悪くなることを指摘している。今回使用するデータは、輸送機関のサンプル数に偏りがあることに加え、説明変数とするデータの多くは質的データであったこと、また、谷口ら<sup>8)</sup>による分析では、使用する一方にデータが大きく偏っている場合であっても、数量化理論第Ⅱ類の適用が有効であることが示唆されていることから、ここでは数量化理論第Ⅱ類を採用する。数量化理論第Ⅱ類は質的データある説明変数と群データとして与えられる目的変数をモデル式で表し、変数の相互の関連性や説明変数の重要度に加えて、判別・予測を行う手法である。そこで、車両(n=4,626)、鉄道(n=19)、船舶(n=65)の3群を目的変数とした判別分析を実施する。一方、説明変数(アイテム)は、「排出事業者の業種」、「廃棄物の種類」、「環境負荷の考慮有無」、「廃棄物処理の有無」、「コンテナ利用の有無」、「日時指定の有無」、「輸送距離」、「輸送重量」の8アイテムとした。なお、輸送費用は選択に寄与するアイテムと推察されるが、自家用トラックを選択している場合には、輸送費用の回答が不要となっており、輸送費用をアイテムに加えると自家用トラックの特性が除外された分析になることから、ここではアイテムに加えず、輸送費用に関しては、4.5で分析を行うこととした。加えて、表4-3で実数とする調査項目については数量化理論Ⅱ類を適用させるため、データ数の偏りが生じないようにカテゴリ変換を行った。

#### 4.3.2 分析結果

分析結果を図4-1に示す。分析精度を示す的中率は93.8%であった。カテゴリスコアと輸送機関の関係は負の値が大きいほど1軸では鉄道に2軸では船舶に判別されることとなる。カテゴリ間の影響力の大きさを示すレンジ(カテゴリースコアの最大値と最小値の差)に注目すると、1軸(鉄道と車両の別)では「コンテナ利用」が最も大きく、次いで「排出事業者の業種」、「輸送距離」となっている一方で、2軸(船舶/車両)は、レンジが大きい順に「廃棄物の種類」、「コンテナ利用」、「輸送距離」となる。さらにカテゴリに着目してみると、船舶と鉄道に共通しているのは、環境負荷の考慮と輸送距離が長距離化すると判別される傾向にある。一方で、コンテナ利用や業種の倉庫業では逆の傾向を示している。また、廃棄物の種類での鉱さいは船舶をけん引するカテゴリとなる。以上の分析から車両から鉄道を考える場合には排出時にコンテナ利用が強く求められることに加えて、輸送距離が300kmを超えるような場合であり、輸送条件が厳しいものであると推察する。一方、船舶を指向する場合は、コンテナ利用といった排出形態は問われないものの、150kmを超す輸送距離が必要であることに加えて、輸送量が25t以上といったロットの確保が求められる。そのためには、鉱さいをターゲットにした収集運搬や倉庫業などを活用して積替・保管によるロットを拡大させることが重要であることの示唆を得た。このように、モーダルシフトを促進させるためには、一様な政策展開ではなく輸送機関に応じた排出指導や情報提供が必要と言える。

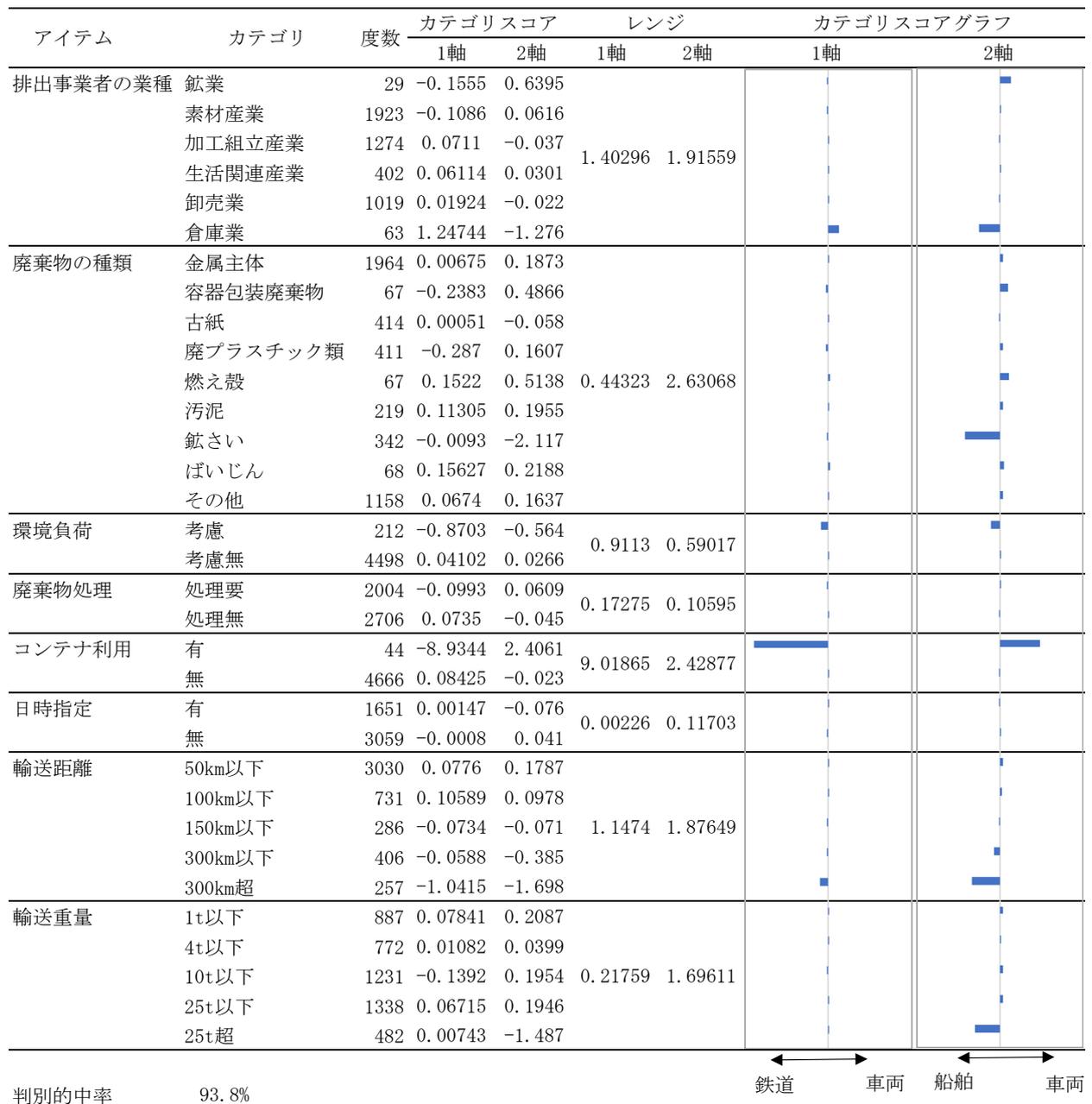


図 4-1 数量化Ⅱ類の分析結果

## 4.4 モーダルシフト可能量の推計

### 4.4.1 方法

4.3 で構築した数量化理論第Ⅱ類を用いた輸送機関の選択モデルを使用して、車両から船舶または鉄道へのモーダルシフト可能量を推計する。具体的には、モデルに物流センサスの実データを当てはめ、シフト可能量を求めた。モデルを用いて計算した輸送機関選択と実際の選択の差は、モデルで説明しきれない残差、つまり他に要因が存在していることを意味するが、他の要因が作用しない条件下でモーダルシフト可能量を計算することとなる。さらに、昨今の環境意識の高まりを考慮するため、モデルにおける環境配慮変数をすべて考慮すると変換して可能量の推計を行った。ただし、150km に満たない輸送距離のデータについてはモーダルシフトをさせない設定とした。さらに得られたモーダルシフト可能量を二酸化炭素排出量の変化で評価を行った。二酸化炭素排出量の算出は次式<sup>9)</sup>により行った。なお、輸送機関別の二酸化炭素排出原単位は表 4-4 を用いる。

二酸化炭素排出量(t-CO<sub>2</sub>)=

輸送量 (t) ×輸送距離(km)×輸送機関別二酸化炭素排出原単位(g-CO<sub>2</sub>/t・km)×1/1,000,000

表 4-4 輸送機関別二酸化炭素排出原単位

輸送機関	(g-CO <sub>2</sub> /t・km) 二酸化炭素排出原単位
車 営業用普通車	173
両 自家用普通車	394
鉄道	22
内航船舶	39

### 4.4.2 結果

車両として輸送されているうち、2.3%の1、622t が船舶へシフト可能量と推計され。さらに環境配慮を考慮した場合には4、232t (6.1%) と拡大する。ただ、モーダルシフト先の輸送機関として鉄道は選択されず、すべて船舶となった。これはコンテナ利用に見る鉄道輸送が求める排出ルールと排出事業者の排出特性に乖離が生じていることがこのことからもうかがえる。このため意向では車両から船舶のシフト可能量について考察する (表 4-5)。廃棄物の種類別の金属主体を見ると、300km を超す輸送が 739t/3 日間あり、このうちの 25.4%である 188t/3 日間が船舶へのモーダル可能量と推計され、さらに環境配慮を考慮すると全量の 739t/3 日間が可能量となる。また、150km を超す輸送量が 793t/3 日間ある鋳さいは、100% がモーダルシフト可能と推定される。このように、現時点でも船舶輸送可能な特性を持つ、300km 超えの輸送をする容器包装廃棄物や鋳さいがある。さらに、環境配慮指向を向上させることで廃プラスチック類、燃え殻、汚泥、ばいじんがシフト可能量が向上する。

表 4-5 車両から船舶へのモーダルシフト可能性

		(単位：t/3日間, (%))		
		150km以下	150超-300km	300km超
金属主体	車両輸送量 (現状)	30,199	2,008	739
	シフト可能量	-	27(1.3%)	188(25.4%)
	シフト可能量 (環境配慮)	-	715(35.6%)	739(100.0%)
容器包装	車両輸送量 (現状)	213	58	194
	シフト可能量	-	(0.0%)	186(95.9%)
	シフト可能量 (環境配慮)	-	(0.0%)	194(100.0%)
古紙	車両輸送量 (現状)	2,967	953	440
	シフト可能量	-	27(2.8%)	182(41.4%)
	シフト可能量 (環境配慮)	-	27(2.8%)	440(100.0%)
廃プラスチック類	車両輸送量 (現状)	1,838	356	27
	シフト可能量	-	(0.0%)	(0.0%)
	シフト可能量 (環境配慮)	-	67(18.8%)	27(100.0%)
燃え殻	車両輸送量 (現状)	439	175	18
	シフト可能量	-	(0.0%)	(0.0%)
	シフト可能量 (環境配慮)	-	120(68.6%)	8(44.2%)
汚泥	車両輸送量 (現状)	4,055	343	42
	シフト可能量	-	(0.0%)	(0.0%)
	シフト可能量 (環境配慮)	-	97(28.3%)	42(100.0%)
鉱さい	車両輸送量 (現状)	11,080	706	87
	シフト可能量	-	706(100.0%)	87(100.0%)
	シフト可能量 (環境配慮)	-	706(100.0%)	87(100.0%)
ばいじん	車両輸送量 (現状)	1,058	281	0
	シフト可能量	-	(0.0%)	-
	シフト可能量 (環境配慮)	-	178(63.4%)	-
その他	車両輸送量 (現状)	9,700	846	317
	シフト可能量	-	137(16.2%)	83(26.2%)
	シフト可能量 (環境配慮)	-	469(55.4%)	317(100.0%)
計	車両輸送量 (現状)	61,549	5,726	1,864
	シフト可能量	-	896(15.7%)	726(38.9%)
	シフト可能量 (環境配慮)	-	2,378(41.5%)	1,854(99.5%)
シフト可能量合計				1,622(2.3%)
シフト可能量合計 (環境配慮)				4,232(6.1%)

さらに、輸送距離帯別に輸送機関分担率の結果 (図 4-2、図 4-3) を見ると輸送距離が長くなるにつれて船舶が選択される割合が高くなり、300km を超える輸送では 9 割を超す比率で船舶になる。このことより船舶へのシフトする可能性は見いだせたものの、鉄道についてはコテナ利用など排出特性に変化がない限りシフトが難しいことがわかった。

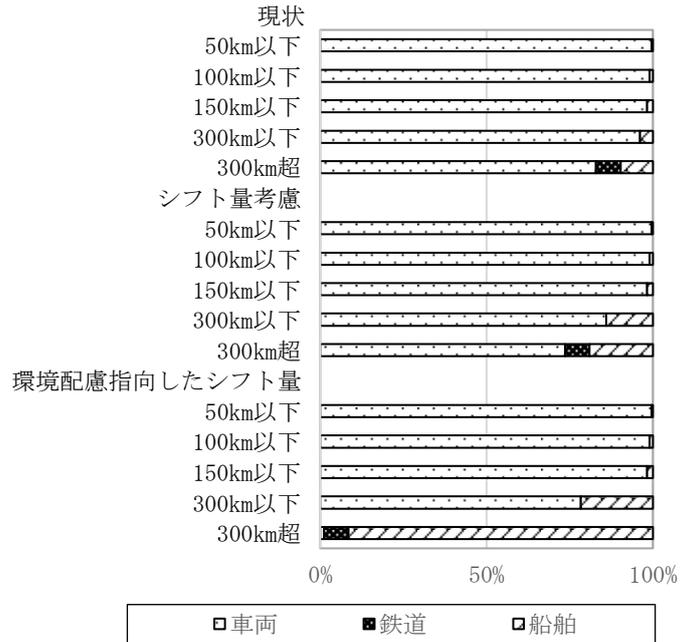


図 4-2 距離帯別輸送機関分担率 (件数)

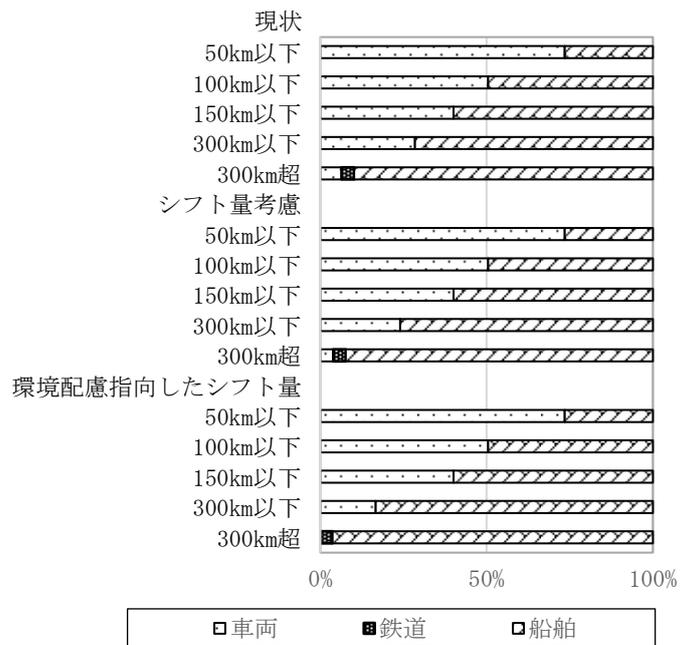


図 4-3 距離帯別輸送機関分担率 (重量)

さらにモーダルシフトによる効果として、二酸化炭素排出量の比較を行った結果を表 4-6 に示す。現状 2,543t-CO<sub>2</sub> に対して最大で 18%削減できるという試算を得た。目標対象年度との比較が行えないが業界団体が示す目標値である 1 割減<sup>10)</sup>を十分に達成できる水準にある。

表 4-6 二酸化炭素排出量の算定結果

輸送機関	現状	シフト量 考慮	(t-CO2)
			環境配慮指向 したシフト量 考慮
車 営業用普通車	1,369	1,149	898
両 自家用普通車	105	105	74
鉄道	16	16	16
内航船舶	1,054	1,075	1,107
計	2,543	2,345	2,095
削減率	-	-8%	-18%

## 4.5 輸送費用を目的関数とした重回帰分析

### 4.5.1 分析方法

モーダルシフトに輸送費用が阻害要因になっていないか、また、効果的な支援策等を見出す観点から輸送費用に関する要因分析を実施した。具体的には輸送費用（円）を目的関数とした重回帰分析を行う。なお、輸送費用は輸送重量に大きな影響を及ぼすとあらかじめ想定されることから輸送費用単価（円/t）を目的関数にした解析も行った。説明変数は、表 4-3 分析に用いた調査項目と変数の変換の調査項目から輸送費用を除いた 25 項目を用いた。なお、説明変数はステップワイズ法により選択した。また、自家用車両や輸送費用の回答がなかったデータについては除外して分析を行ったことから、分析の対象としたデータ数は 1,906 となる。

### 4.5.2 輸送費用（円）を目的関数とする分析結果

分析の結果、9 つの説明変数からなる重回帰モデルが生成された。モデルの当てはまり度合を示す自由度修正済み決定係数は 0.6951 であり、良好な結果を示している（表 4-7）。標準偏回帰係数により変数間の影響度を確認すると、最も大きな影響を与えているのは輸送重量であり、次いで輸送距離、船舶ダミーの順となる。これらの変数はいずれもプラスとなっていることから輸送費用を押し上げる要素である。一方でマイナスとなった変数は生活関連産業ダミー、鉱さいダミー、卸売業ダミーとなる。このように輸送費用を決定づける要素は輸送重量が大きいものの、輸送機関として船舶は費用を押し上げる要素となっていることから、船舶へのモーダルシフトを考える場合は経済的な支援策が必要と言える。

表 4-7 輸送費用（円）の重回帰分析結果

	偏回帰係数	標準 偏回帰係数	p値	
切片	12896.3		0.00167	**
輸送重量	891.71	8.00E-01	< 2e-16	**
輸送距離	85.08	7.79E-02	5.64E-09	**
汚泥ダミー	19852.1	2.85E-02	0.0276	*
生活関連産業ダミー	-19745	-3.49E-02	0.00749	**
廃棄物処理ダミー	8027.47	2.23E-02	0.10339	
船舶ダミー	59114	4.38E-02	0.03053	*
鉱さいダミー	-14311	-2.67E-02	0.04901	*
卸売業ダミー	-10546	-2.21E-02	0.11023	
コンテナ利用ダミー	29166	2.03E-02	0.12217	
自由度修正済み決定係数		0.6951		
有意水準:	**<0.01, *<0.1			

### 4.5.3 単位重量あたり輸送費用（円/t）を目的関数とする分析結果

12 の説明変数からなる重回帰モデルが生成された。自由度修正済み決定係数は 0.1149 であった。白井ら<sup>11)</sup>によると、属性から行動等を説明しようとしたモデルの場合には、決定係数が低くなるのが指摘されており、このことからすると、本モデルは有用と判断される範囲に収まっているといえる。標準偏回帰係数から変数の影響度を見ると大きい方から、輸送距離であ

り、次いで素材産業ダミー、燃え殻ダミー、その他産廃ダミーの順である。輸送費用の重回帰分析によって得られた説明変数と比較してみると、新たな変数として、素材産業ダミー、燃え殻ダミー、その他産廃ダミー、鉄道ダミー、廃プラダミーなどが選択された（表 4-8）。マイナスとなる変数は、素材産業ダミー、鉄道ダミー、廃棄物処理ダミー、古紙ダミー、鉱業ダミー、加工組立ダミー、倉庫業ダミーであり、単位重量あたりの輸送費用を低減に寄与する変数である。このことから鉄道は、輸送費用が必ずしも制約となっていないことが確認できた。また、素材産業や加工組立産業との共同輸送や、倉庫業の活用によりロットの適正化により、輸送費用の低減の可能性があることも示唆された。ただし、燃え殻や廃プラ、容器包装は単位重量あたりの輸送費用を上昇させる変数となっていることから、輸送する廃棄物の種類に留意すべき点があることをも示された。

表 4-8 単位重量あたり輸送費用（円/t）を目的関数とした重回帰分析結果

	偏回帰係数	標準 偏回帰係数	p値
切片	13136.9		1.67E-04 **
輸送距離	100.501	2.43E-01	< 2e-16 **
素材産業ダミー	-18273	-1.37E-01	4.18E-07 **
燃え殻ダミー	60440.1	1.35E-01	1.15E-09 **
その他産廃ダミー	19311.9	1.35E-01	4.78E-08 **
鉄道ダミー	-64995	-8.90E-02	2.25E-04 **
廃プラダミー	15958.3	6.55E-02	0.005738 **
容器包装ダミー	33622.3	4.15E-02	0.05814
廃棄物処理ダミー	-5606.7	-4.11E-02	0.096018
古紙	-14508	-4.12E-02	0.070165
鉱業	-31938	-3.63E-02	0.098598
加工組立産業	-7793.3	-4.41E-02	0.091829
倉庫業ダミー	-16892	-3.59E-02	0.109916
自由度修正済み決定係数		0.1149	
有意水準:	**<0.01, *<0.1		

#### 4.7 まとめ

第4章では、廃棄物等の特性に応じたモーダルシフト策を議論するために、輸送機関の選択要因を把握する数量化理論第Ⅱ類による分析に加え、輸送費用を規定する要素の重回帰分析を行った。本研究によって得られた主要な成果を以下に述べる。

- 車両、鉄道、船舶の目的変数をとった3モードによる数量化理論第Ⅱ類を適用することで、鉄道へのシフトにはコンテナ利用や300kmを超える遠距離輸送であること、船舶には輸送距離に加え輸送重量も必要な要素であることから、倉庫業との連携、また、廃棄物の種類としては鉱さいが船舶をけん引する要素であることを明らかにした。
- 排出事業者の環境配慮指向を盛り込んだモデル式を構築することで、昨今の環境配慮の動向を反映したモーダルシフト可能量を試算することができた。その結果、車両から鉄道へのシフトは確認できなかったものの、車両から船舶には最大で4、232tシフトするポテンシャルがあることがわかった。これを二酸化炭素排出量で評価すると、現状よりも約18%削減できることを示すことができた。この数値は業界が示す目標値に達成するに十分な効果を与えうる結果となった。
- 輸送費用について要因分析をした結果、輸送費用には特に廃棄物の輸送量と輸送距離が大きく寄与していることを明らかにした。さらに単位重量あたり輸送費用による分析を見ると、距離に加えて素材産業、燃え殻とその他産廃の影響度が大きく、素材産業を除く変数は単価を押し上げる要因であった。輸送単価を下げるための施策として、素材産業や加工組立産業との共同輸送や倉庫業を活用した積替保管による運搬ロットの適正化を考察した。また、燃え殻など廃棄物の種類によって単価を押し上げることになることから、廃棄物の種類の組合せ等の留意事項を定量的に検討可能なモデルを取得できた。

以上のことから、車両からのモーダルシフトを考える際には、船舶の場合には輸送費用の増加が、鉄道の場合は鉄道が求める排出形態がネックになっていると考えられる。このため、経済的な支援や共同輸送等の工夫を図る一方で、鉄道への排出ルール緩和を求めることが必要といえる。廃棄物等の循環利用や適正処理のため広域的な輸送が今後益々進められる状況にあり、本研究によって得られた成果から輸送効率化が図られていくことが期待される。一方で、排出事業場と港湾施設までのアクセスや荷役の効率向上等の課題が生じてくると考えられるが、これらの検討については十分に行えていないため、今後の課題としたい。また、今回扱ったモーダルシフト策だけでは脱炭素を達成することが難しいことから、車両の電動化等の対策についても検討していきたい。さらに、本研究で用いた物流センサスのデータは、農業、建設業、小売業等が調査対象となっていないことや、調査期間が特定の3日間であり、業種に想定される廃棄物排出の季節変動等が考慮できていない点は、今後の検討課題としたい。

## 参考文献

- 1) 吉田登、川端宏紀、金子泰純、日下正基：紙リサイクル原料古紙の地域間物流が輸送量及びエネルギー消費に及ぼす影響の分析、環境システム研究論文集、33 巻、pp.259-266、2005
- 2) 吉田 好邦、松橋 隆治：産業連関を考慮した地域間の貨物輸送の構造分析、土木学会論文集D、66 巻、4 号、 pp.461-468、2010
- 3) 関谷 浩孝、上坂 克巳、小林 正憲、南部 浩之：輸送品の特性と貨物車の高速道路利用率との関係、土木学会論文集 D3 (土木計画学)、 67 巻、 5 号、 pp.67\_I\_769-67\_I\_777、 2011
- 4) 末廣 真道、岸 邦宏、岩館 慶多、中辻 隆：道路ネットワークの食料供給機能寸断による地域経済影響評価手法に関する研究、土木学会論文集 D3 (土木計画学)、 73 巻、 5 号、 pp. I\_269-I\_280、 2017
- 5) 関谷 浩孝、上坂 克巳、小林 正憲、南部 浩之：輸送品の特性と貨物車の高速道路利用率との関係、土木学会論文集 D3 (土木計画学)、 67 巻、 5 号、 pp.67\_I\_769-67\_I\_777、 2011
- 6) 末廣 真道、岸 邦宏、岩館 慶多、中辻 隆：道路ネットワークの食料供給機能寸断による地域経済影響評価手法に関する研究、土木学会論文集 D3 (土木計画学)、 73 巻、 5 号、 pp. I\_269-I\_280、 2017
- 7) 永岩 健一郎、松尾 俊彦：トラック輸送の経路選択モデルによるモーダルシフト分析、日本航海学会論文集、125 巻、 pp.105-112、 2011
- 8) 谷口 栄一、関 宏志、飯田 恭敬、倉内 文孝：地域間貨物輸送における輸送手段選択の分析、土木計画学研究・論文集、13 巻、 pp.673-679、 1996
- 9) 経済産業省・国土交通省：ロジスティクス分野における CO2 排出量算定方法 共同ガイドライン Ver.3.1、2016
- 10) 全国産業資源循環連合会：低炭素社会実行計画、2018
- 11) 白井 浩介、栗栖 聖、花木 啓祐：食品を対象としたリスク認知への影響因子の評価、土木学会論文集 G (環境)、 71 巻、 6 号、 pp.II\_99-II\_107、 2015

## 第5章 処理業者の実績データに基づく輸送効率化のポテンシャル評価

### 5.1 はじめに

多量な地域資源の循環拠点として、代表的な動脈インフラの1つに、セメント産業がある。セメント工場は日本全国に存在するものの、特に主原料の石灰石が豊富な北九州地区や山口県と、国内最大の消費地を抱える関東地区に多く、また、その多くが臨海部に存在するという特徴がある<sup>1)</sup>。このことから、セメント工場を軸に資源循環を検討する場合は、輸送計画を適切に検討しなければ、資源の輸送に伴うコストや環境負荷の増加が生じる懸念がある。他方、図1-7で示したように、静脈物流における2次輸送は、廃棄物等の排出場所から収集運搬され、破碎、選別、圧縮等の処理を施した後に、再資源化若しくは最終処分するために必要な輸送であり、1次輸送と比較して排出するロットや質をコントロールがしやすいという特徴を持つことから、輸送計画を立てやすいと考える。

そこで、本章では、セメント原燃料向けの処理を主体とする産業廃棄物処理業者の実績データを用いて、静脈物流の輸送効率化対策を検討することを目的とする。まず、線形計画法の中で輸送費用の最小化を目的関数として経路を探索する手法である輸送問題を解き、実績データと最適化後の算出結果を比較した。次に、納期の制約が小さいという静脈物流の本質的な特徴<sup>2)</sup>に注目し、搬出頻度緩和による輸送効率化のポテンシャルを検討した。具体的には、廃棄物を保管し搬出頻度を減少させることで、1回あたりの搬出ロット拡大に伴うモーダルシフトを含む輸送機関の大型化の実現可能量を推定するとともに、輸送効率化のポテンシャルについてコストを指標として評価した。この結果をとして、搬出頻度緩和策の有効性を提示し、輸送効率化の手段の一つとしての、搬出頻度緩和策の有効性を示すものである。

## 5.2 分析の枠組み

### 5.2.1 使用するデータ

2016年1月4日（月）から2016年12月30日（金）までの1年間の産業廃棄物処理業者のデータを使用した（表 5-1）。なお、ここで用いたデータの処理業者とは、資本金5億円規模で産業廃棄物処理業者であり、業界の経営規模<sup>3)</sup>でみると上位4%に入る業界大手事業者のものと位置づけられる。データの内容は、セメント向けの原材料・原燃料化をするために汚泥や燃え殻、ばいじん等を処理した製品の搬出情報であり、搬出回数では7,067回で搬出量としては128千tという規模の情報となっている。

表 5-1 データの概要

搬出元 処理施設	搬出先 セメント工場	車両輸送距 離 (Km)	搬出回数 (回/年)	搬出量 (t/年)
施設1	工場A	18	55	1,294
	工場B	18	402	6,325
	工場C	132	387	9,229
	工場D	75	1,299	17,937
施設2	工場A	473	11	188
	工場B	473	1	300
	工場C	327	172	14,743
	工場D	396	13	1,257
	工場E	250	17	172
	工場F	281	10	1,537
	工場G	34	3,548	38,526
施設3	工場D	957	1	18
	工場F	806	15	18,000
	工場H	784	1	550
	工場I	674	1	1,300
	工場J	523	4	3,610
施設4	工場K	85	426	4,516
	工場L	42	534	6,568
	工場M	69	147	1,887
	工場N	87	23	234
全体			7,067	128,189

この内訳を経路別にみると、約3,500回と多頻度に排出がある一方、年1回という経路もある。搬出元として関東地域2施設、関西地域1施設、九州地域1施設の計4の処理施設から搬出先として14セメント工場という20の輸送経路からなっている（図 5-1）

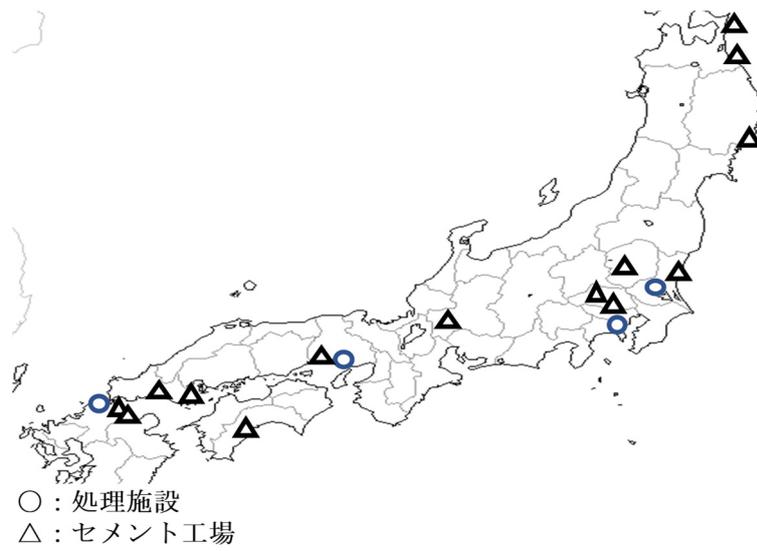


図 5-1 処理施設とセメント工場の位置関係

## 5.2.2 条件の設定

### (1) 輸送経路

使用するデータには、搬出元及び搬出先の住所情報が格納されていたことから、Google map の経路探索の機能を使用し、検索された結果の中から、最速ルートとして得られた距離を車両による輸送距離として設定した。また、船舶輸送に伴う輸送距離は沿岸航海最短距離計算<sup>4)</sup>から求められた内容とした。

### (2) 輸送費

車両別の収集運搬単価<sup>5)</sup>から、式(1)、(2)の回帰式を作成し、積載量別の収集運搬単価を求めた。例えば、0.5t 車で 100km 未満の輸送であれば、4,549 円/回とし、同様の手順で、100km 以上で場合は、12,838 円/回と計算した。また、25t 車は 100km 未満の輸送で 38,993 円/回、100km 以上の輸送で 59,250 円/回というように輸送距離・車両形式別に推計して輸送費用にかかる単価を設定した。

近距離（100km 未満）輸送の場合：

$$\text{運搬単価[円/回]} = 8,804.6 \times \ln(\text{車両積載量}) - 50,168 \quad (1)$$

遠方（100km 以上）輸送の場合：

$$\text{運搬単価[円/回]} = 11,864 \times \ln(\text{車両積載量}) - 60,892 \quad (2)$$

船舶輸送にかかる費用として、運賃は、日本内航海運組合総連合会調べ<sup>6)</sup>から平均値を算出し、3.6 円/t・km とした。荷役に掛かる費用は、既往論文<sup>15)</sup>より 1.2t/teu の換算係数を用いて 1,200 円/t と設定した。

### 5.3 輸送費用最小化を指向した最適化計算

#### 5.3.1 定式化

ここでは線形計画法における輸送費用を最小化させる輸送問題を解き、実績データと最適解の比較分析を実施する。式(4)に示すように処理施設からの総搬出量と、セメント工場での総受入量(5)を制約条件とした。これらの制約条件下で、処理施設からセメント工場までの輸送に伴う単価と輸送量を乗じて合計する値を最小化することを目的関数として設定した。

Minimize

$$TC = \sum_i \sum_j p_{ij} w_{ij} \quad TC = \sum_i \sum_j p_{ij} w_{ij} \quad (3)$$

Subject to

$$\sum_j w_{ij} = W_i \quad (4)$$

$$\sum_i w_{ij} = W_j \quad (5)$$

ここで、

if : 処理施設

j : セメント工場

TC : 総輸送費用[万円]

$p_{ij}$  : i 施設から j 工場までの輸送単価[万円/t]

$w_{ij}$  : i 施設から j 工場までの輸送量[t]

$W_i$  : i 施設の総搬出量[t]

$W_j$  : j 工場の総受入量[t]

#### 5.3.2 最適化計算結果

最適化計算を行った結果を表 2 に示す。経路別にみると、輸送量が数%のものから全量が変わ化したものがあるものの、それを集計した変化量の絶対値の合計は、7,085t であり、輸送量の 6%となった。また、費用の変化でも 8%減となり、大きな削減効果は得られなかった。このことから、今回利用した産業廃棄物処理業者の輸送経路については、輸送量と費用の面から概ね最適な状態であることが確認された。

表 5-2 輸送費用最小化計算の結果

搬出元 処理施設	搬出先 セメント工場	車両輸送距 離 (Km)	搬出量 (実績)	(t)	(%)
				搬出量 (最適化)	変化率
①施設	A工場	18	1,294	1,481	14%
	B工場	18	6,325	6,625	5%
	C工場	132	9,229	7,466	-19%
	D工場	75	17,937	19,211	7%
②施設	A工場	473	188	0	-100%
	B工場	473	300	0	-100%
	C工場	327	14,743	16,506	12%
	D工場	396	1,257	0	-100%
	E工場	250	172	172	0%
	F工場	281	1,537	1,519	-1%
	G工場	34	38,526	38,526	0%
③施設	D工場	957	18	0	-100%
	F工場	806	18,000	18,018	0%
	H工場	784	550	550	0%
	I工場	674	1,300	1,300	0%
	J工場	523	3,610	3,610	0%
④施設	K工場	85	4,516	4,516	0%
	L工場	42	6,568	6,568	0%
	M工場	69	1,887	1,887	0%
	N工場	87	234	234	0%
合計			128,189	128,189	0%
変化量の絶対値				7085	6%
費用 (百万円)				439	-8%

## 5.4 搬出頻度緩和による輸送効率化ポテンシャルの評価

### 5.4.1 推計方法

20の輸送経路ごとに、輸送費費用と保管費用の合計が最小となる搬出頻度を求めた。

#### (1) 輸送費用の推定

廃棄物の搬出頻度を1日に1回、2日に1回と減らしていき、最大14日に1回までの期間に設定した場合に必要な輸送機関と台数を推定する。例えば、1回の排出が300tを超える場合は船舶、300t未満の場合は、25t車、22t車～0.5t車という11区分の車両形式で割振り搬出に必要な台数を推計した。

ここで、静脈物流は時間制約が少ない急がない物流であるとされていることから、本稿でのロット拡大の手法として搬出頻度の緩和策をとった。ただし、廃棄物処理法上では収集運搬の積替保管時や中間処理時に限り保管日数の上限が定められている。一方で、排出時には、時間制約がかからないものの、無制限に保管し搬出頻度を減らすことは望ましくないと考え、ここでは緩和できる日数を最大14日までと設定した。また、使用したデータでは、船舶輸送される最小ロットが300tだったことから、300t以上ロットを確保できた場合を船舶として、それ未満の場合は、積載率100%上限で最適な積載重量の車両を選択することとした。

船舶輸送：1回あたりの搬出量が300t以上の回数

ただし、船舶を選択するケースの大半は、輸送距離が100kmを超える場合であることから、1ロット300t確保できたとしても輸送距離が100kmに満たない輸送経路の場合には、船舶へのモーダルシフトをさせない設定をした。

車両台数：300t未満の搬出時に必要な車両台数

上記で算定された輸送機関別の台数に、収集運搬費用の単価を乗じ、運搬費用を推定した。

輸送費[円]=

$$\begin{aligned} & \text{船舶輸送単価}[\text{円/t} \cdot \text{km}] \times \text{輸送量}[\text{t}] \times \text{輸送距離}[\text{km}] + \text{荷役単価}[\text{円/t}] \times \text{輸送量}[\text{t}] \times 2 \\ & + \text{車両輸送単価}[\text{円/回}] \times \text{輸送回数}[\text{回}] \end{aligned} \quad (6)$$

#### (2) 保管費用の推定

輸送頻度を減らすための間、廃棄物を保管することが求められる。その保管費用を推定する。具体的には、各輸送パターンにおいて、最も廃棄物が多く搬出された日の廃棄物量を保管容量とし、高さ1mまで積み上げて保管すると仮定した。なお、処理施設の立地するエリアの用途地域が工業用とする公示地価の平均値<sup>7)</sup>に6%<sup>8)</sup>と保管容量を乗じた値を保管コストとして推計した。

$$\text{保管費用}[\text{円}] = \text{年間の最大搬出量}[\text{t}] \times \text{重量換算係数}^9[\text{m}^3/\text{t}] \times \text{公示地価価格}[\text{円}] \times 0.06 \quad (7)$$

### 5.4.2 輸送効率化の推計結果

搬出頻度を緩和した結果を 20 経路全体で集計してみると、搬出頻度の間隔を延ばしていくほど車両では最大の積載量である 25t 車が選択され、さらに、船舶の利用が進むことから輸送回数が減少する（図 5-2）。

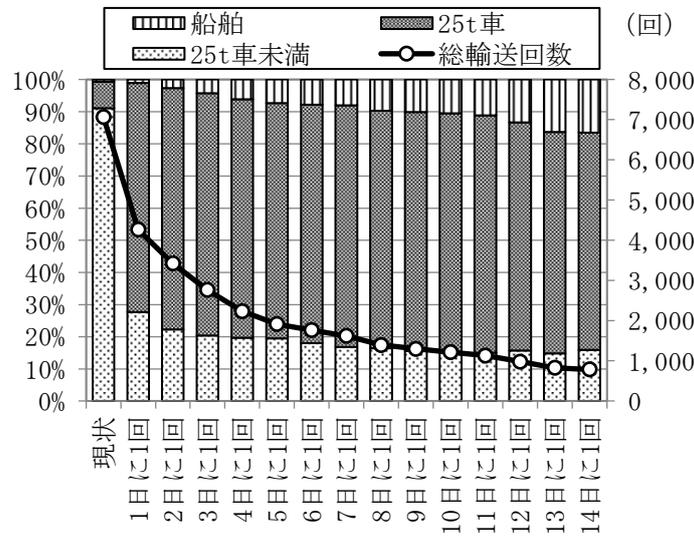


図 5-2 総経路の頻度緩和による輸送機関の変化

次に、総経路における頻度緩和に伴う費用の変化結果を図 5-3 に示す。頻度を減らすほど運搬費用は減少していくものの、保管費用が反対に増加する結果となった。これらのことから全経路としてみると費用が最小化するの、6日に1回の搬出頻度となった。

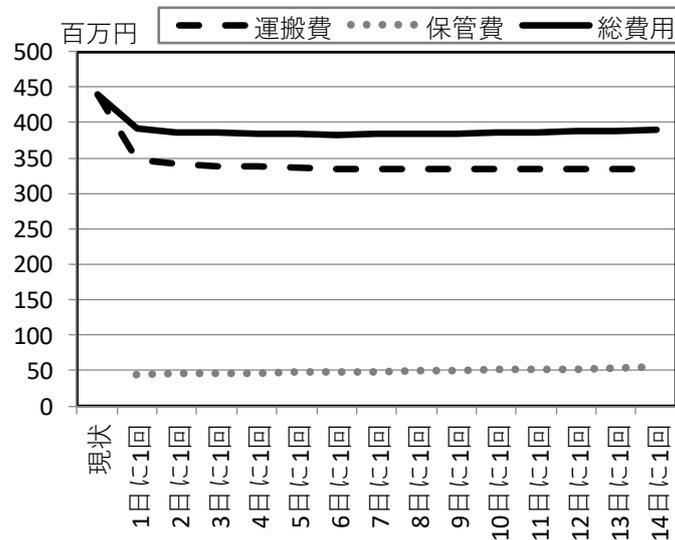


図 5-3 総経路の頻度緩和による費用の変化

続いて、輸送経路別に運搬費と保管費の関係を考察する。図 5-4 は搬出頻度が多く輸送距離が短い経路であり、このケースでは、ロット拡大により 25t 車が選択されることで輸送回数の削減は可能であるが、輸送距離が 100km 未満なので船舶のモーダルシフトが見込めないこと

から、運搬費の削減効果が頭打ちになった。加えて、保管費の上昇が影響し、緩和日数を最大にする前に最適頻度を迎える結果となった。

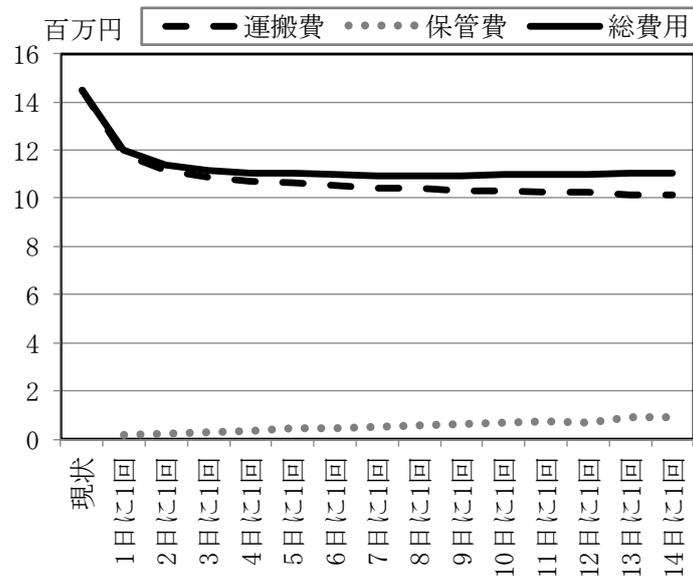


図 5-4 施設 1-工場 B の頻度緩和による費用の変化

次に図 5-5 は、輸送距離が 100km を超え搬出頻度も多い経路の結果を示している。25t 車の選択及び船舶のモーダルにより輸送頻度を緩和するごとに輸送回数は減少したものの船舶にかかる費用の増加が大きくなったため、現状が費用最小となった。

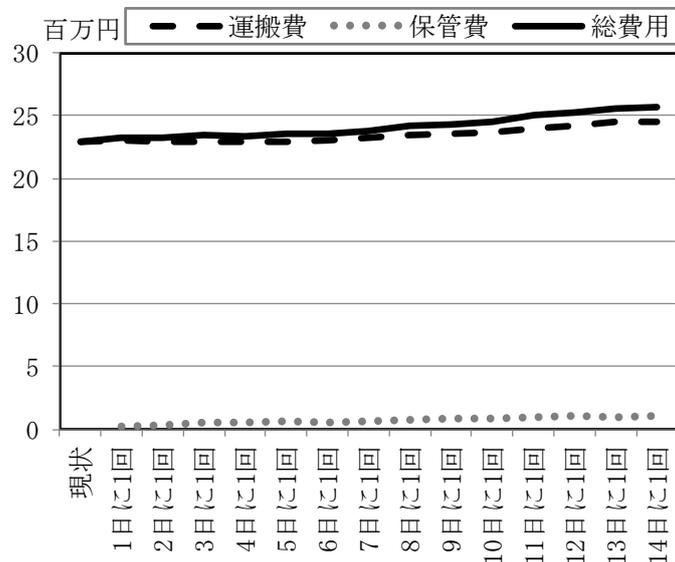


図 5-5 施設 1-工場 C の頻度緩和による費用の変化

また、すでに船舶を利用して輸送している経路で、頻度を緩和しても輸送費用に削減効果はなく、現状と同等であるものの、保管費だけが加わる形になったため総費用が現状よりも増加する経路があることがわかった (図 5-6)。

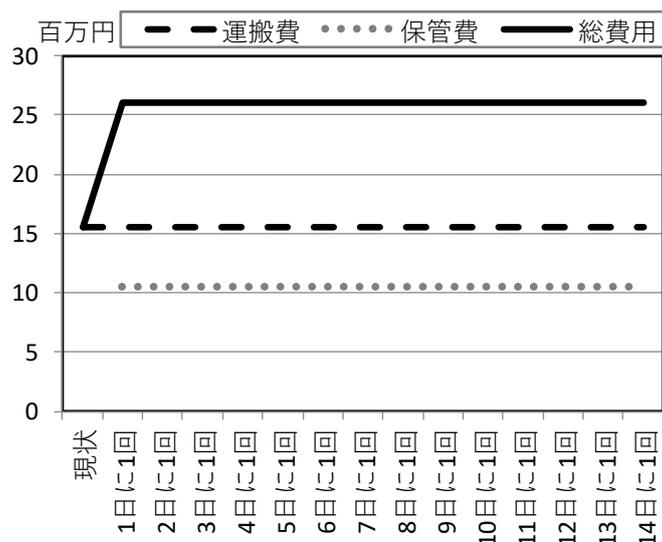


図 5-6 施設 3-工場 F の頻度緩和による費用の変化

これら経路の特徴から頻度緩和による効果に差異が見られたことから、経路ごとに費用を最小化する最適搬出頻度を推定した。その結果を表 5-3 に示す。現状からの費用の削減効果を率でみると最大で 46.7%の削減効果を得られる経路があった。全体としては 22.7%の削減効果を得ることが確認できた。

表 5-3 経路別の最適搬出頻度の推定

搬出元 処理施設	搬出先 セメント工場	最適搬出 頻度	費用 (百万円)	削減効果 (%)
施設1	工場A	1日に1回	2.2	8.8
	工場B	7日に1回	10.9	24.7
	工場C	現状	22.9	0.0
	工場D	8日に1回	44.5	37.3
施設2	工場A	現状	0.6	0.0
	工場B	現状	1.1	0.0
	工場C	6日に1回	49.2	0.3
	工場D	現状	4.8	0.0
	工場E	11日に1回	0.7	20.2
	工場F	現状	5.2	0.0
	工場G	5日に1回	63.0	44.3
施設3	工場D	現状	0.1	0.0
	工場F	現状	83.1	0.0
	工場H	現状	2.9	0.0
	工場I	現状	6.4	0.0
	工場J	現状	15.6	0.0
施設4	工場K	12日に1回	11.5	46.7
	工場L	8日に1回	11.0	38.4
	工場M	11日に1回	3.3	32.9
	工場N	1日に1回	0.7	37.5
全体			339.6	22.7

## 5.5 搬出頻度緩和を考慮した輸送費用最小化計算

5.3.1 で定式化した輸送問題をベースに、前節で実施した搬出頻度緩和を考慮した輸送効率化の算出結果（経路別輸送費用＝運搬費用＋荷役費用＋保管費用）を用い、改めて輸送問題による費用最小化計算を実施した。その結果を表 5-4 に示す。実績値である 439 百万円から、316 百万円へと輸送費用が約 3 割削減される結果となった。経路別にみると、工場 C への主たる供給元が施設 1 に、工場 D への供給元が施設 3 と、工場 F への供給元が施設 2 に変化したことが大きく寄与していることがわかる。

表 5-4 頻度緩和を考慮した輸送費用最小化計算の結果

(t)				
搬出元 処理施設	搬出先 セメント工場	輸送量 (実績)	輸送量 (最適化)	輸送量 (頻度+最適)
施設1	工場A	1,294	1,481	1,481
	工場B	6,325	6,625	6,625
	工場C	9,229	7,466	23,972
	工場D	17,937	19,211	2,706
施設2	工場A	188	0	0
	工場B	300	0	0
	工場C	14,743	16,506	0
	工場D	1,257	0	0
	工場E	172	172	172
	工場F	1,537	1,519	18,025
	工場G	38,526	38,526	38,526
施設3	工場D	18	0	16,506
	工場F	18,000	18,018	1,512
	工場H	550	550	550
	工場I	1,300	1,300	1,300
	工場J	3,610	3,610	3,610
施設4	工場K	4,516	4,516	4,516
	工場L	6,568	6,568	6,568
	工場M	1,887	1,887	1,887
	工場N	234	234	234
(合計)		128,189	128,189	128,189
費用(百万円)		439	402	316

## 5.6 その他副次的な効果

搬出頻度緩和策は、人口減少・少子高齢化に伴う、トラックドライバーの人手不足に対する問題に貢献する。すなわち、排出頻度を緩和によるロット拡大に伴い、積載量の大きな車両への移行や、船舶へのモーダルシフトした結果、輸送回数は減少する。これは、人手不足に対する1つの対策でもある。

そこで、本データの輸送に際し、300kmまでの輸送は1人、300kmを超える輸送の場合は2人体制で運搬すると仮定し、運搬に従事する人数を試算した。その結果、現状で、延べ年間7,294人日分の人員が従事する必要があるが、本結果で得られた最適頻度にする場合に必要となる従事者は、年間3,957人日となり、45.7%の労働力の削減効果が見込まれた。

## 5.7 まとめ

第5章では、産業廃棄物処理業者の実績データを用いて、線形計画法の輸送計画により費用最小化問題を解き、経路最適化の結果を実績と比較した。さらに、搬出頻度を緩和させることによるロット拡大と、それに伴う輸送機関の大規模化等による輸送効率化のポテンシャルを推計した。以下に本結果をまとめる。

- 線形計画法の輸送問題により、実績データの輸送経路がおおむね最適な状態であることを確認できた。このことから、輸送効率化には輸送経路変更以外の対策を検討する必要があるとの示唆を得た。
- 保管費用を考慮した搬出頻度緩和の分析では、多頻度に搬出する経路は、車両形式の大型化（25t車利用）による効果が大きいことを確認できた。一方で、もともと搬出頻度が少ないかつ、25t車や船舶を既に利用している経路では、保管に要するコストが増加するため効果がないとの結果となった。
- 搬出頻度緩和による輸送効率化を輸送費用は、22.7%の削減を見込めることを明らかにし、輸送効率化のための一時保管の有用性を示した。
- 搬出頻度緩和の算出結果を組込んだ費用最小化の輸送問題を解くと、28.1%の費用削減効果が見込めるとの結果が得られた。
- 人手不足対策としての評価として、延べ従事者数を推定した結果、年間3,337人日分の削減が見込まれ、頻度緩和に伴う輸送回数の緩和策は従事者不足という社会問題への効果もあることを定量的に示した。

今後は、搬出頻度緩和対策を二酸化炭素排出量最小化についても同様の計算を行い、それをもとにした輸送問題を解くことで、環境負荷削減という指標を組み込んだ複合的な効率化ポテンシャルを推計する必要がある。また、今回はセメント工場への供給側の視点での研究であったが、需要側の事情も考慮した検証（受入可能な量や原料として搬入されるものの質的情報など）を実施する必要がある。

他方、内航海運を支える人材については、航海時に資格保有者の当直の義務付け等から船員の確保が課題となっている一面もある<sup>10)</sup>。このことからモーダルシフトを含んだ静脈物流の最適化を図るためには、人材確保についても考慮する必要がある。さらに、本研究で対象外とした1次輸送について輸送効率化策を示し、効果を検証することで静脈物流の全体像を捉えていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会：セメント産業の概要、2017
- 2) 尹 鍾進：静脈物流の現状分析に基づいた静脈物流の効率化方案に関する研究．土木学会論文集G、63 卷 4 号、pp. 332-344、2007
- 3) 産業廃棄物処理業の振興方策に関する検討会：産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言、2017
- 4) 沿岸航海最短距離計算：<http://www.comship.co.jp/Jp/Inp.asp>、(2019.6.30 参照)
- 5) 株式会社工業調査研究所：産廃料金情報 2010～産業廃棄物の現況～、2011
- 6) 日本内航海運組合総連合会：内航海運から見た素材型産業の物流コスト効率化に関する調査、2004
- 7) 国土交通省：標準地・基準地検索システム、2018、  
<http://www.land.mlit.go.jp/landPrice/AriaServlet?MOD=2&TYP=0>(2018.4.25 参照)
- 8) 国税庁：相当の地代及び相当の地代の改訂、2017
- 9) 公益財団法人日本産業廃棄物処理振興センター：産業廃棄物の種類ごとの集計単位と重量換算係数、2018
- 10) 加藤博敏・相浦宣徳：長距離ユニットロード輸送における長距離フェリーの担う役割と各輸送機関の特徴、運輸政策研究、20 卷 (2018)、pp. 049-060、2018

## 第6章 結論

### 6.1 各章のまとめ

本研究は、定量的なデータ分析に基づき、静脈物流の輸送効率化や低炭素化に関するポテンシャル評価を行ったものである。具体的な分析として、第3章では、輸送距離の短縮化を検討するため輸送問題として輸送トンキロを最小化に関する定式化により計算を実施した。また、第4章ではモーダルシフトを検討するために、数量化理論第Ⅱ類を用いたモデルに加え、輸送費用に関する回帰モデルの構築をした。さらに、第5章では排出頻度緩和に伴うロット拡大による輸送機関変更に伴う効果の評価を行った。これらを通じて、排出事業者が主導する廃棄物等の資源循環ならびに適正処理を支える静脈物流の輸送効率化に貢献する対策を検討するための知見を提示することが出来た。以下、各章で得られた結果をまとめる。

第1章「序論」では、本研究の対象とする静脈物流の範囲を示し、現状と課題について論じた。社会からの要請として、さらなる資源循環の構築に広域的な処理が求められている一方で、脱炭素社会への対応が求められている状況にあるなか、静脈物流を担う産業廃棄物処理業者は中小零細企業が多いことに加え、廃棄物処理法が示す排出事業者責任の観点から収集運搬事業者自身が主体的に効率化対策を講じる構造になっていないことから、社会課題に対して十分な対策をとれてない実態を明らかにした。

第2章「既往研究の整理と本研究の位置づけ」では、静脈物流に関する既往研究の分類として、数理モデルに関する研究や産業連関分析研究や要因分析に関する研究、法制度や解説をした研究の4つに整理されることを示した上で、一部の地域であることや品目が限定的な状況にあることを指摘するとともに、現行の法規制下における静脈物流の最適化を行う意義を抽出し、本稿における静脈物流の研究の方向性を述べた。

第3章「処理拠点の変更可能性に着目した輸送の低炭素化と循環圏形成の検討」では、行政が保有する情報の活用に加えて、産業廃棄物の排出事業者に対するアンケート調査の結果を組み合わせて、北九州市域外に搬出し処理される廃棄物を、市内処理への移行可能量を最適化計算により求めた。さらに、その結果を二酸化炭素排出量で定量的に評価した。その結果、市内の処理施設は燃え殻の施設を除き十分な余剰能力があることを示し、また、処理先の変更の可能性という観点では、廃油、廃酸、廃アルカリなど難しい廃棄物がある一方で、動植物性残さ、鉍さい、木くずなど変更しやすい廃棄物があることを明らかにした。さらに輸送トンキロ最小化を目的とした輸送問題を解き、最大で二酸化炭素排出量を現状から51%減少の効果を得られ、輸送距離の短縮化の対策効果を定量的に示した。

第4章「輸送機関の選択要因と輸送費用の規定要因分析」では、静脈物流の特性に応じたモーダルシフト策を検討するために、物流センサスのデータを使用して車両、鉄道、船舶の3モードを対象とした数量化理論第Ⅱ類による輸送機関の選択要因を行った。さらに、輸送費用を目的関数とする重回帰分析を行った。その結果、鉄道へのシフトを考える際には輸送費用では

なくコンテナ利用や遠方輸送など排出形態が問題であること、一方、船舶は輸送費用がネックとなっていることから素材産業と共同輸送を行うなど費用低減に資する対応策を検討する必要があることがわかった。また、輸送機関の選択モデルによるモーダルシフト可能量を算定し、業界が示す二酸化炭素排出量の削減目標値以上の削減率である 18%減を得た。

第 5 章「処理業者の実績データに基づく輸送効率化のポテンシャル評価」では、産業廃棄物処理業者の実績データを用いて輸送効率化策の検討を行った。具体的には搬出頻度緩和に伴う輸送ロット拡大により、輸送費が最小になるような船舶もしくは積載量の大きな車両へのモーダルシフトの量を計算した。その結果、コスト 28.1%減が見込めることが示された。また従事する人工を計算すると、45.7%の削減が見込めるという結果を得た。

以上、静脈物流の効率化・低炭素化に関するポテンシャル評価という研究を進めたことで、得られた知見を述べた。さらに、それぞれの成果の具体的な利用先や利用方法について、以下に整理する。

第 3 章は、行政の廃棄物部局が用いることを想定している。行政保有する情報を活用し処理施設の受入れ状況が見える化し、排出事業者を示すことで、広域的な輸送により域外処理から市内処理へ誘導する対策に用いることが考えられる。施設の受入れはリアルタイム性が求められることから、電子マニフェスト情報などの積極的な活用と、普及が同時に必要となる。また、市内の廃棄物の排出量と処理量で需給バランスが取れていないことが確認できた場合は、施設整備計画に対する根拠資料としても活用可能であろう。

第 4 章は、排出事業者の廃棄物処理の担当が、数量化理論Ⅱ類のモデルを参考に、排出される廃棄物の特性を、業種や廃棄物の種類、排出するロットの量から、鉄道、船舶輸送の特徴を有するかを事前に確認し、収集運搬業者の選定する際に利用することを想定する。また、輸送費用の重回帰分析のモデルにより、輸送費用の目安をあらかじめ計算することにより、輸送機関を選択に必要な情報を提供し、効率的な輸送手段が選択されることを期待する。なお、本モデルには農業、建設業、小売業等の一部のデータが入っていないことから、必ずしもすべての事業者にも最適な解を提供できないことに留意が必要である。

第 5 章では、車両を使った輸送をしている場合には、ロット拡大のため排出頻度緩和による収集運搬費用の削減は、それに必要な保管場所を確保ための費用よりも大きいことから、保管施設の整備を中間処理施設に提案する資料としての利用されることを望む。

## 6.2 本論の結論

本論文の総括をする。本研究では、静脈物流の輸送効率化に資する対策を検討した上で、輸送ロット毎に得られるデータに着目し、情報の収集に加えて、各種調査を実施した。その情報を分析・解析し、対策の効果を可視化した。その結果として、主要な3つの対策に関する知見を得た。以下のとおり整理する。

第1に、排出事業者は、廃油、廃酸、廃アルカリなどの廃棄物処理施設が限定される廃棄物以外は、近隣の処理施設の受入れ状況を把握し、可能な限り近隣施設での処理を選択すべきであるといえる。そのためには、排出事業者、収集運搬業者、処理業者、行政が連携し、特に行政は多くの情報を保有していることから、情報を活用し、処理施設の余力を可視化して、排出事業者と処理業者をマッチングするなど、近隣処理先へ誘導策を積極的に取り入れるべきである。

第2に、排出事業者は、300kmを超える場合や、燃え殻、ばいじん、鉍さいの150km～330km未満の中距離帯である場合には、輸送手段として船舶を選択する際の障壁の除去・緩和が検討されるべきである。船舶を利用する場合には輸送費の増加が予想されるものの、二酸化炭素排出量の削減が期待できる。しかし、現状の排出特性ではコンテナ利用など鉄道が求める仕様が制約になり、鉄道へシフトするポテンシャルは確認できなかった。このため、鉄道の利用促進には、フレコンバックやバラ積みでの受入など簡易な手法による輸送方を検討する必要がある。また、行政側から脱炭素化政策における誘導策としての補助や助成制度によって輸送費用を低減する方策の導入を検討することもモーダルシフトの後押しとなる。

第3に、特に中間処理後の処理物（2次輸送）をリサイクルする際に、セメントや鉄鋼など受入場所が決まった場所に定期的に搬出している場合は、排出事業者は、積載量の大きい車両や船舶へのシフトするために、搬出頻度を緩和し、ロット重量を拡大すべきであるといえる。輸送回数が大幅に減少することから、保管場所に係る費用の上昇に対しても輸送費の削減分は相対的に大きく、総費用の削減が図れるとともに、二酸化炭素排出量の削減が期待できる。なお、本研究では、処理物を受入れるセメントや鉄鋼産業である需要側の事情（受入可能なロット単位の量や原料として搬入されるものの質的情報など）を考慮していない。輸送頻度緩和を実現させるためには、頻度緩和に対する需要側の理解が必要となる。

## 6.3 今後の課題

本研究で述べてきた輸送効率化は、脱炭素に向けた緩和策としてもこれからの対策としても必須の必要であるものの、序章で述べたように、脱炭素社会に向けて欧州が先駆けて宣言している「ガソリン車、ディーゼル車の販売禁止」や、情報技術の革新による自動運転といった大きな変革が起こりつつあり、静脈物流分野にも波及していくものと考ええる。一方で、電気自動車が増えると夏の電力使用のピーク時に電力不足が起こるや、充電スタンドの不足などの課題を指摘されている。このため、静脈物流へ電気自動車の適応可能性を研究していくことが必

要になると考える。また、これまでに述べてきたように収集運搬事業者は小規模な事業者が多く、経済基盤が安定しておらず、新たな技術を導入する体力がないことも予想される。このため、事業者の大規模化や事業者間のネットワークを構築するなどして、収集運搬事業者を強化するための方策を検討していくことも同時に必要な点である。さらに、将来の人口減少、少子高齢化により、地域の過疎化が想定され、一般廃棄物の収集が立ち行かなくなるケースも想定する。そこで、産業廃棄物、一般廃棄物を問わない収集体制の構築による効率化の検討も考えられる。また、帰り荷の利用で輸送効率化が図られる場合も考えられるが、域外から搬入する場合は自治体により事前協議が求められる場合があることから、利用の足かせになっている点があるなど、現在の制度を改正することにより効率化が図れる点がないか等制度制約にとらわれない効率化に資する研究も挙げられる。以上整理すると、以下3点が今後の課題となる。

- (1) 電気自動車や自動運転等新技術の静脈物流への適応可能性とその効果の検証
- (2) 静脈物流における事業者の大規模化や事業者間のネットワーク化の効果分析
- (3) 一廃産廃を問わない収集体制構築による輸送効率化分析

## 謝辞

本論文は、北九州市立大学大学院国際環境工学研究科環境システム学専攻の博士後期課程に在籍中に実施した研究を取りまとめたものです。取りまとめにあたって、たくさんのご指導、ご協力を頂きました。ここに謝辞として記させていただきます。

主査を引き受けていただきました松本 亨教授には、博士後期課程で実施する研究テーマの設定から各論の構成に関わる細部まで丁寧にご指導いただきました。研究を進めるにあたっては、北九州と東京という物理的な距離がありましたが、先生の出張時に合わせての個別ゼミやコロナ禍で急速に進展したオンライン会議システムを用いて議論を定期的実施していただいたことなど、ご配慮くださったことで、博士論文として纏めることができました。深く感謝申し上げます。

副査を務めていただきました野上 敦嗣教授、加藤 尊秋教授、デワンカー バート教授には、本論文の審査時において、論旨に必要な観点を的確にご助言くださったことで、新たな視点からの考察を加えることが出来ました。そのことで多面的なものの見方の重要性も改めて勉強させていただきました。厚く御礼申し上げます。

また、2020年4月より国立研究開発法人国立環境研究所資源循環領域に出向という形で配属になりました。その間に本論文執筆の山場を迎えましたが、大迫政浩領域長には、本務との分担に加えて、博士論文を取りまとめることの重要性など研究者としての心構えを教えていただいたことも、まとめるにいたることにつながったと感じています。ここに、謝意を表します。

最後に、本当に博士後期課程を修了し論文をまとめることができるのかと、心配と諦めが混在した心境と思われる中でも、生活・経済面から応援してくれた家族には、心から感謝しています。ありがとうございました。

2022年3月10日

大久保 伸



