

< 修 士 論 文 >

南海トラフ巨大地震における生活  
廃棄物の広域処理についての考察

滋 賀 大 学 大 学 院

デ ー タ サ イ エ ン ス 研 究 科

デ ー タ サ イ エ ン ス 専 攻

修了年度：2020年度

学籍番号：6019115

氏 名：西野 優

指導教員：和泉 志津恵

提出年月日：2021年1月20日

## 目次

第1章	序論	1
第2章	研究背景	2
2.1	過去の災害における災害廃棄物	2
2.1.1	東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)	3
2.1.2	熊本地震	5
2.2	南海トラフ巨大地震における災害廃棄物	6
2.3	災害廃棄物対策	7
2.4	関連研究と本研究の位置づけ	9
第3章	災害時のし尿収集必要量の推計	10
3.1	災害時のし尿収集必要量の推計状況	11
3.2	災害時のし尿収集必要量の推計方法	12
3.3	結果と考察	15
第4章	輸送効率性の最小化を目的としたLPモデルの定式化	23
4.1	LPモデルの定式化	23
4.2	処理シナリオの設定	24
4.3	結果と考察	27
第5章	二次輸送の効果分析	38
5.1	輸送費用の最小化を目的とするLPモデルの定式化	38
5.2	処理シナリオの設定	39
5.3	結果と考察	40
第6章	結論	48
	謝辞	50

## 第1章 序論

平成 23 年東北地方太平洋沖地震(平成 23 年 3 月), 平成 28 年熊本地震(平成 28 年 4 月), 平成 30 年 7 月豪雨, 令和 2 年 7 月豪雨など, 近年, 全国各地で大規模な自然災害が発生し, それに伴って発生した大量の廃棄物が, 避難所生活や復旧の課題となった. 環境省の指針<sup>1</sup>では, 自然災害に直接起因して発生する廃棄物のうち, 生活環境保全上の支障へ対処するため, 市区町村がその処理を実施するものを災害廃棄物としている.

今後 30 年内には, 南海トラフ巨大地震や首都直下地震といった大きな災害も 70~80% といった高い発生確率で予測されている. 大規模な災害が発生すると, 被害が広範囲かつ突発的であり, 多量の災害廃棄物が発生する. 環境省では, 災害廃棄物について「人の健康又は生活環境に重大な被害を生じさせるものを含むおそれがあることを踏まえ, 生活環境の保全及び公衆衛生上の支障の防止の観点から, その適正な処理を確保しつつ, 円滑かつ迅速に処理しなければならない。」<sup>2</sup>とその重要性について言及している. 平時の枠組み・対策では対応できない状況においてもその対応が要求されていることから, 防災・減災の観点から備えが必要である.

災害廃棄物には, 地震や津波等の災害によって発生する廃棄物と, 被災者や避難者の生活に伴って発生する廃棄物がある. し尿や生活ごみは災害に直接由来するものではなく, 初動時期から継続して発生するため, 平時と同様に安定した処理が必要である. 本研究の目的は, 生活由来の廃棄物であるし尿(仮設トイレからの汲み取りし尿等)を対象として災害時のし尿収集必要量の推計, 効率的な運搬計画についての検討を行うことで, 今後起こり得る巨大地震への強靱な備えの一助となることである.

まず, 第 2 章においては本研究の背景を述べる. 災害廃棄物について, 過去の災害例を取り上げると共に, 南海トラフ巨大地震における被害想定について紹介する. 第 3 章では被害想定に基づいて, 災害時のし尿収集必要量の推計を行い, 第 4 章, 第 5 章において数理計画法を用いて作成した輸送モデルについてケーススタディを行う. 最後に第 6 章でまとめを行う.

## 第2章 研究背景

我が国における災害廃棄物の位置付けは、事業活動に伴い発生した廃棄物(=産業廃棄物)とは異なるため、一般廃棄物に該当し、一般廃棄物の処理責任は市町村にある。それを受けて環境省の指針<sup>1</sup>では、災害廃棄物を「自然災害に直接起因して発生する廃棄物のうち、生活環境保全上の支障へ対処するため、市区町村等がその処理を実施するもの。」と定義している。一方で過去の災害の例では、大規模災害時には、被災市町村のみで適切な処理を行うことは困難であり、市町村、都道府県を越えた協力・連携が行われている。

災害廃棄物には、地震や津波等の災害によって直接発生する家屋廃材やがれきのような廃棄物と、被災者や避難者の生活に伴い発生する生活廃棄物に大別される。前者の特徴として短期間で膨大な量の廃棄物が発生すること、その性状は自然由来の草木や倒壊した家屋、廃木材やコンクリート、家財から廃自動車といった多種多様なものが混合した状態で発生することに加え、廃油やアスベスト等の有害物質が含まれることもある。それらの特徴から処理が中長期に渡ることがある。後者については、発災直後から継続して発生し続けることから、公衆衛生上の観点からもその処理が極めて重要である。また、避難を行わなかった家庭においても平時同様に発生し続けるため、災害時の対応と平時の対応が併存することになる。

本研究では生活廃棄物であるし尿(仮設トイレ等からの汲み取りし尿等)に焦点をあてるが、災害廃棄物対策の基本的な考え方にも関係するため、過去の主な震災における災害廃棄物の課題と対応について紹介するとともに、今後発生が予測されている南海トラフ巨大地震における災害廃棄物について述べる。

### 2.1 過去の災害における災害廃棄物

災害は地震や津波、台風、洪水等様々な自然現象によって引き起こされる。Brown & Mike & Seville(2011)<sup>3</sup>は1995年から2010年までに発生した世界の大規模災害における災害廃棄物量をまとめた(表1)。大規模災害が起こることで、数百から数千万トンといった平時とはかけ離れた膨大な災害廃棄物が発生する。報告の中では、これら廃棄物が潜在的な健康リスクをもたらすことも示している。

表 1 過去の災害によって発生した災害廃棄物量

Year	Event	Waste Quantities
1995	Great Hanshin-Awaji Earthquake, Kobe, Japan	15 million tonnes
1999	Marmara Earthquake, Turkey	13 million tonnes
2004	Hurricanes Frances and Jeanne, Florida, US	3 million cubic metres
2004	Indian Ocean Tsunami	10 million cubic metres (Indonesia alone)
2004	Hurricane Charley, US	2 million cubic metres
2005	Hurricane Katrina, US	76 million cubic metres
2008	Sichuan earthquake, China	20 million tonnes
2009	L'Aquila earthquake, Italy	estimated 1.5-3 million tonnes
2010	Haiti earthquake	estimated 23 - 60 million tonnes

#### 2. 1. 1 東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、日本国内観測史上では最大規模であり、世界でも1900年以降4番目の規模の地震であった(USGS<sup>4</sup>)。この地震に伴って発生した津波や福島第一原子力発電所事故による被害は東日本大震災と呼ばれる。主な被害<sup>5</sup>を表2に示す。

表 2 東北地方太平洋沖地震による被害

発生日	2011年3月11日
規模	マグニチュード9.0
人的被害	死者 19,630 人, 行方不明者 2,569 人, 負傷者 6,230 人
住家被害	全壊 121,781 棟, 半壊 280,962 棟, 一部損壊 744,530 棟
非住家被害	公共建物 14,555 棟, その他 92,037 棟
災害廃棄物	約 2 千万トン(津波堆積物を除く)
津波堆積物	約 1.1 千万トン

人々の生活に甚大な被害をもたらし、膨大な災害廃棄物が発生した。その量は3千万トンを超え、2010年度におけるごみ総排出量が約4.5千万トン<sup>6</sup>であったことから処理困難だったことがうかがえる。東北地方太平洋沖地震では津波堆積物が大量発生したことも特徴である。津波堆積物には砂泥のほかに様々なものが混在することで性状や組成が様ではなく、人の健康や生活環境への影響が懸念されるものが含まれる可能性があり、速やかに撤去する必要がある。また震災に伴う原子力発電所の事故により放射性物質が含まれる廃棄物の処理にも対応を迫られることとなった。廃棄物が該当自治体だけでは処理が及ばない為、「東日本大震災により生じた災害廃棄物の処理に関する特別措置法」等の法整備がなされ、広域処理が行われた。これらの災害廃棄物は2014年3月末を処理目標と設定され、福島県の一部地域を除いて3年間かけて処理された。費用は約1兆1千5百億円かかったとされている<sup>5</sup>。

また地震動や津波による影響で、ライフラインの寸断等が発生し地震直後から3日目のピーク時には全国で約47万人の避難者が出た(図1)。災害時においても住民生活による生活廃棄物は排出され続けるが、避難所に住民が集中したことや、廃棄物処理施設、下水道関連設備の被災も程度によって従来と大きく異なる対応が要求された。

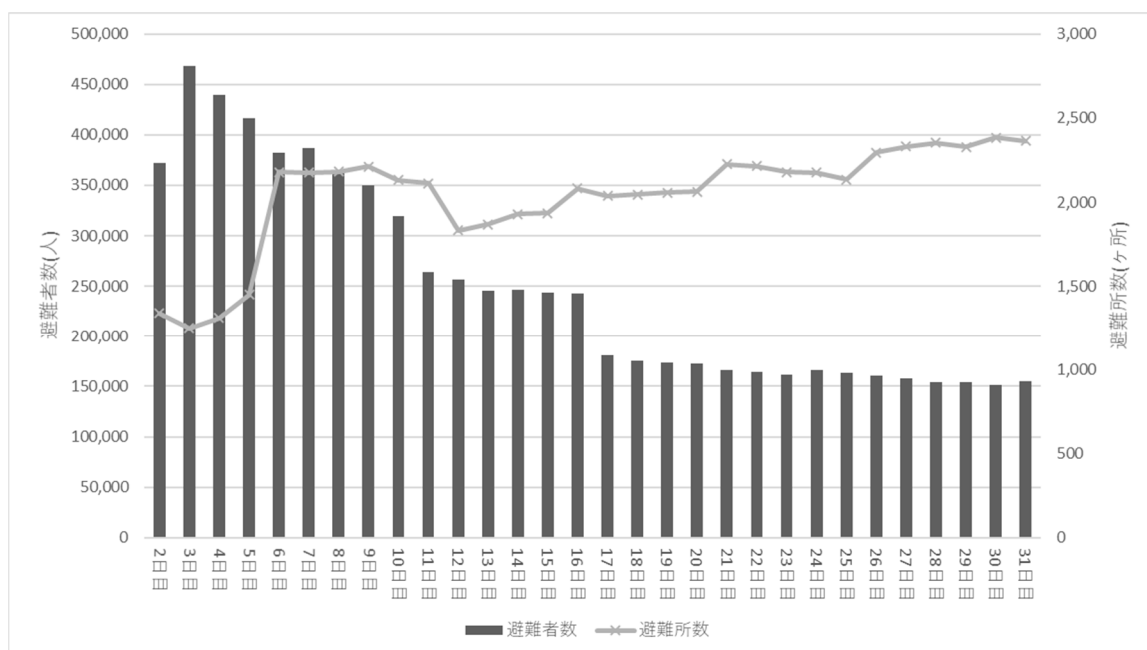


図1 東日本大震災における発災後1か月間の避難者数、避難所数の推移  
(国土交通省作成資料<sup>7</sup>をもとに作成)

宮城県石巻保健所職員の事例報告<sup>8</sup>によれば、「水道、電気、下水道などのライフラインが破壊され、石巻市内の避難者数は3万7千人を超えた。避難所では断水した水洗トイレを何百人もの避難者が使用したため、便器が瞬く間に排泄物で満杯になり使用できなくなり、一時仮設トイレの設置が追い付かず3月下旬には衛生の確保が急務の状況となった。」とある。河田(2018)<sup>9</sup>によれば、下水への被害が最も大きく、下水処理場の復旧には2年7ヵ月たって目処がついた状況であった。また復興庁の調査報告<sup>10</sup>では東日本大震災における地震関連死に関する原因では「避難所等における生活の肉体・精神的疲労」が最多となり、市町村からのアンケートでは、断水によりトイレを心配し水分を控えたという報告事例も挙げられた。処理が間に合わず衛生状態が悪化したことで、トイレの使用を敬遠した被災者が飲食を控え、エコノミークラス症候群等の体調不良によって、震災関連死につながったと考えられている。

後に災害時における廃棄物処理の課題に対応するため、2015年に自治体などにおける支援体制を強化することを目的として、災害廃棄物処理支援ネットワーク(D.WasteNet)が発足した。D.WasteNetは研究機関や自治体、各種関係団体から成り、環境省の協力要請を受けて、平時、災害時において支援活動を行う。

### 2.1.2 熊本地震

2016年4月14日および16日に発生した熊本地震は、その特徴として観測史上初めて同一地域において28時間の間に震度7の地震が二度発生した地震である。この地震を受け、地震調査委員会において「大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方」が検討され、地震活動に関する呼びかけや活断層に考慮した呼びかけについて見直しがされた。

主な被害<sup>5</sup>を表3に示す。

**表3 熊本地震の主な被害**

発生日	2016年4月14日、16日
規模	マグニチュード7.3
人的被害	死者137人、行方不明者993人、負傷者1,436人
家屋被害	全壊8,329棟、半壊31,692棟、一部損壊143,615棟
災害廃棄物	約289万トン

2015年度の熊本県の一般廃棄物の発生量は約56万トンであった<sup>11</sup>。熊本地震によって発生した廃棄物は289万トンであり、約5年分の廃棄物が発生したことになる。熊本地震ではD.WasteNetの応援派遣を受け、過去の災害の教訓から廃棄物処理を適正かつ円滑、迅速に進めるための体制が整備された。

地震によるライフラインへの甚大な被害等により、避難者はピーク時には18万人以上にのぼった。(図2)

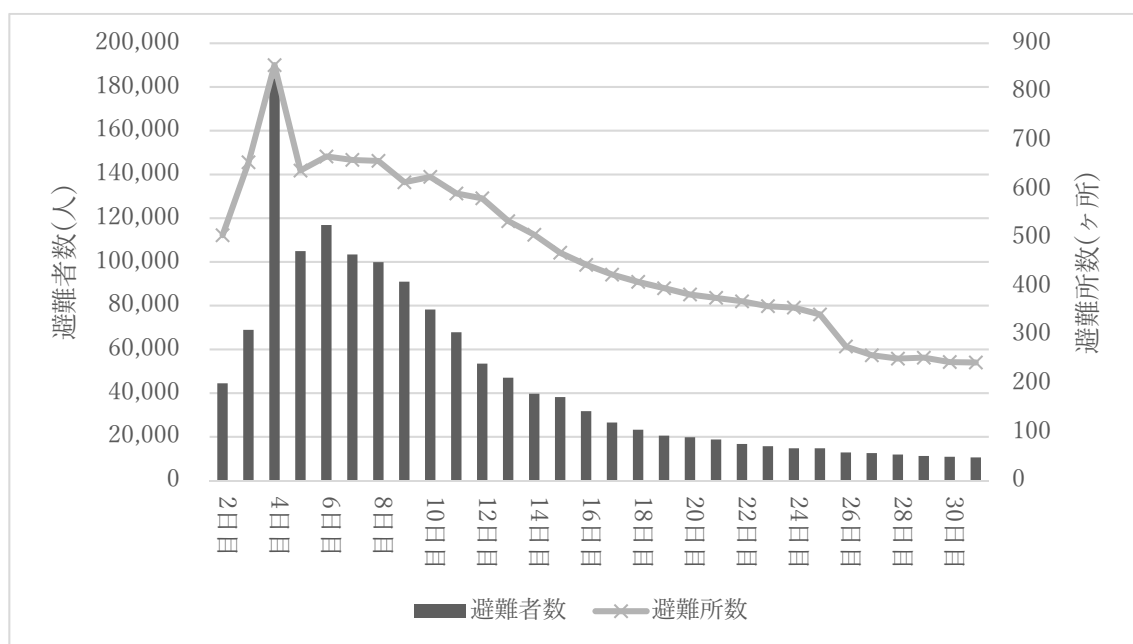


図2 熊本地震における発災後1か月間の避難者数、避難所数の推移  
(熊本県提供資料より作成)

熊本県の報告<sup>12</sup>では、上益城地域ではし尿処理場が被災したことで仮設トイレから輸送されたし尿を受け入れることが不可能になったが、流域下水道へ直接投入することが国の特例によって可能となったことが報告されている。柔軟な対応が行われることで、影響を小さくできた事例である。また、災害時の対応の中で評価できる点として、熊本県の一般廃棄物処理業者団体との災害協定を締結していたことがスムーズな処理につながったことも挙げられている<sup>13</sup>。防災の備えが災害時において重要であることがわかる。

## 2.2 南海トラフ巨大地震における災害廃棄物

南海トラフ巨大地震について、内閣府南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ



の報告<sup>14</sup>によれば、30年以内の発生確率が70～80%、その規模は最大で推定マグニチュード9.1、最大震度7、被災地域は東海・近畿・中国四国・九州地方、避難者数950万人、推定災害廃棄物量3.1億トン(津波堆積物含む)という、広範囲かつ深刻な被害が予測されており、東海、西日本だけでなく日本全体に影響を与えることが想定されている。その主な特徴として、「超広域にわたり強い揺れが発生すること」、「超広域にわたり巨大な津波が発生するとともに、第1波の津波のピーク到達時間が数分ときわめて短い地域が存在すること」とされている。なお、廃棄物処理の主管である環境省グランドデザイン<sup>15</sup>では、災害廃棄物は最大で3.5億トンと推計している。これは内閣府では家屋の全壊のみを被害想定にしているのに対し、環境省では半壊・床上浸水・床下浸水を被害想定に追加したことが要因である。東北地方太平洋沖地震による災害廃棄物3.1千万トンと比較して約11倍の廃棄物が発生することとなる。これらの処理には全国で広域処理をしたとしても焼却処理に6～8年、埋め立てに8～20年かかると試算されている。このグランドデザインを基に災害廃棄物対策の促進とともに、具体的な対策のための連携・協力を進め災害への備えが整備される。

### 2.3 災害廃棄物対策

災害廃棄物に関しては災害対策基本法、大規模な災害からの復興に関する法律、国土強靱化基本法、南海トラフ地震にかかる地震防災対策の推進に関する特別措置法、廃棄物処理法等によって法整備されている。これらを基に都道府県および市町村における災害廃棄物処理計画の作成を目的として平成26年3月に災害廃棄物対策指針が作成された。本指針は、過去の震災や豪雨等の災害対応から得られた経験や知見を踏まえ、平成10年に策定された震災廃棄物対策指針の改定、平成17年に策定された水害廃棄物対策指針との統合を行うものである。2018年6月に閣議決定された第四次循環型社会推進基本計画では、万全な災害廃棄物処理体制の構築のため、都道府県、市区町村の災害廃棄物処理計画策定率の2025年度目標をそれぞれ100%、60%とした。なお、2019年度末における策定状況は都道府県：98%、市区町村：51%となっている<sup>16</sup>。

また、大規模災害時には都道府県域を超えた連携が必要となることから、災害廃棄物対策を強化するため、地方環境事務所を中心とした地域ブロック協議会が全国8箇所を設置された(図3)。

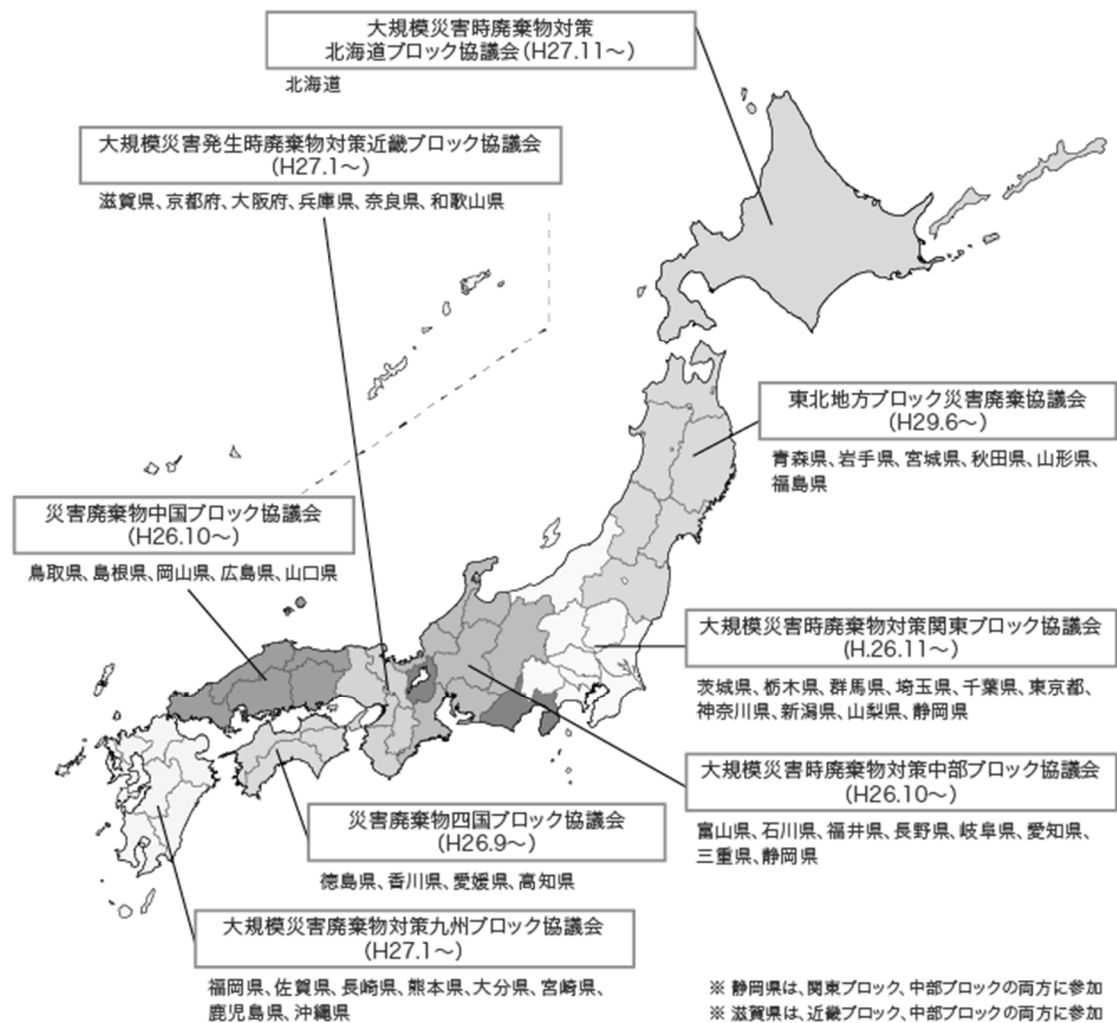


図 3 地域ブロック協議会(環境省サイト<sup>17</sup>より転載)

先にも述べたが、災害廃棄物の処理は基本的に市町村の責務であるが、大規模災害時においては処理困難となるため市町村をまたいだ協力によって処理がなされる。その順序は、被災市町村による処理が基本であり、地域内での処理が困難な場合には被災市町村の隣接市町村、被災市町村の所在する都道府県、それらが困難な状況では、地域ブロックや複数ブロックでの対応が行われる。

災害時における地域ブロック協議会の役割は基本的に市町村との合意が得られてからの調整・支援が主であるが、併せてプッシュ型の支援(被災自治体からの要請を待たずに人材物資の支援等)が行われる場合もある。

## 2.4 関連研究と本研究の位置づけ

災害時におけるし尿の処理を扱った研究は少ない。平山・河田(2007)<sup>18</sup>は都道府県間の広域連携シミュレーションモデルの構築を行い、広域連携の手法の違いによる災害廃棄物処理期間と運搬仕事を推定した。その結果、広域連携によって処理期間の削減が可能であることを示した。この研究においての主な対象はがれき等の固形廃棄物であり、し尿のように長期に渡る仮置きができない廃棄物については適していないといえる。

荒井・梅沢・稲員・小泉・蛭江(2014)<sup>19</sup>は災害時における広域し尿処理について、数理計画法を用いて施設整備計画、輸送計画の最適化モデルを提案し、処理施設を中継基地として併用することで輸送にかかる負担低減が可能となることを示した。一方で避難によるし尿収集必要量の変化を考慮していないことを課題としており、複数県が被災した想定での解析はなされていない。

本研究は、災害への強靱な備えに寄与することが狙いである。南海トラフ巨大地震によって近畿地方が大きな被害を受けたと想定し、荒井ら(2014)の研究において提案されたモデルを参考に解析を行う。荒井らの研究では、運搬すべきし尿の量には平時におけるし尿収集量を用いている。災害時にはライフラインの支障等による影響で避難者が発生し、平時とは異なる処理が必要となる。また単県での処理と広域処理では地理的な要因や自治体間の調整等についても勘案する必要がある。

本研究では災害時のし尿収集必要量が輸送計画に与える影響や、より広域な被害、広域処理における課題を明らかにするとともに効率的な輸送を行うための輸送計画を示す。

### 第3章 災害時のし尿収集必要量の推計

平時におけるし尿を含む汚水は、下水道、農業集落排水施設等、合併処理浄化槽、コミュニティプラント、便槽からの汲取りによって適切に処理が行われている。大規模な災害時には、家屋倒壊や上下水道や電気といったインフラへの被害によって避難所での生活を強いられることで、仮設トイレからの輸送を必要とするケースが想定される。平時の収集には通常バキュームカーと呼ばれるし尿収集運搬用の小型、中型の車両を用いて、し尿処理施設へと運ばれる。しかし、従来の下水道利用者から発生するし尿については平時の収集運搬・処理計画に含まれていないために、車両、作業員の不足や、し尿処理施設の処理能力を上回るし尿収集必要量となることが起こり得る。平時と災害時の基本的な処理フローを図4に示す。

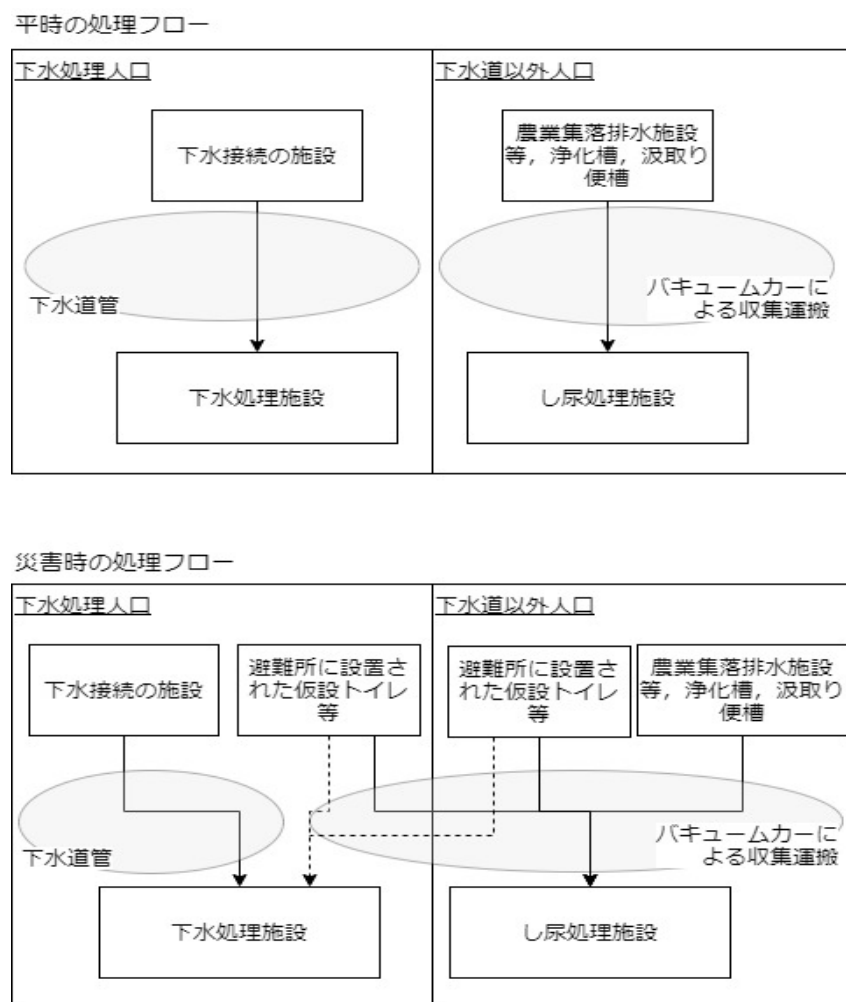
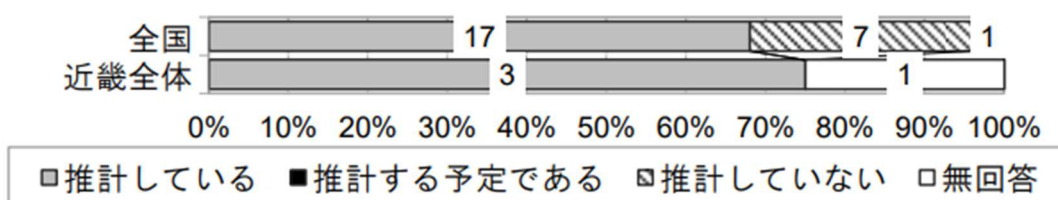


図4 平時と災害時の処理フロー

### 3.1 災害時のし尿収集必要量の推計状況

災害時のし尿収集必要量推計の目的は災害廃棄物が地域に与える影響を概略的に把握し、対応の方向性を検討するための基礎的な情報を得ることである。第2章で述べた通り、災害時のし尿収集必要量の推計については、国や、都道府県、市町村によってなされているところではあるが、未だ策定されていない自治体も多くある。近畿ブロック協議会が2017年度にブロック内の自治体を対象に行ったアンケート結果<sup>20</sup>を転載する(図5)。

図表 64 災害時のし尿の収集必要量の推計について (都道府県)



図表 65 災害時のし尿の収集必要量の推計について (市町村)

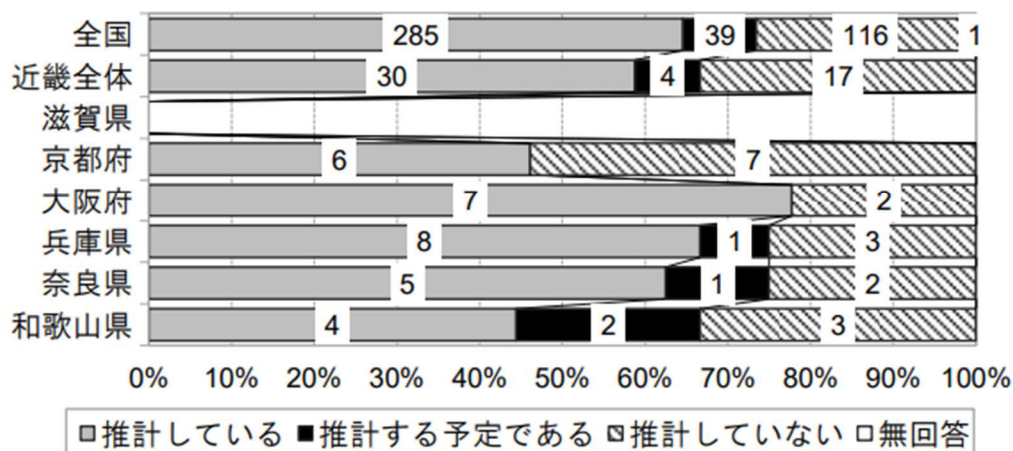


図5 災害時のし尿収集必要量の推計についてのアンケート結果

この設問に回答しているのは、単独の災害廃棄物処理計画が策定されている自治体であり、し尿の収集必要量の推計をしているのは約6割である。同調査では単独の災害廃棄物処理計画の策定が未だなされていない自治体に対して、今後の策定予定時期についても設問を設けている。そこでは市町村のうち約半数が「策定する予定はない」もしくは「無回答」としており、「作成に当たる職員や時間を確保できない。」「専門的な情報や知見が不足している。」が主な要因・課題として報告されている。一部自治体の災害廃棄物担当者へも照会

を行ったが、都道府県全体のみで推計している自治体、市町村別に推計している自治体、作成されていない等、自治体によって対応は様々であった。

### 3.2 災害時のし尿収集必要量の推計方法

し尿処理は、市町村の事務であることから、災害時の輸送計画においても市町村ごとのし尿収集必要量は重要な要素ではあるが、前述の状況から困難な状況である。そこで本研究においては内閣府「南海トラフ地震対策検討ワーキンググループ」（以下、ワーキンググループ）において一義的に推計された都道府県別の被害状況に、水洗化人口等の市町村ごとのファクターを与えることによって近似的な被害想定を行う。し尿収集必要量の推計方法は環境省「災害廃棄物対策指針」技術資料の推計方法を用いる。

本研究における対象地域は滋賀県、京都府、大阪府、兵庫県、奈良県および和歌山県の2府4県とする。この2府4県は大規模災害発生時廃棄物対策近畿ブロック協議会（以下、協議会）の構成府県である。協議会の目的を「大規模災害発生時廃棄物対策近畿ブロック協議会設置要綱」より転載する。

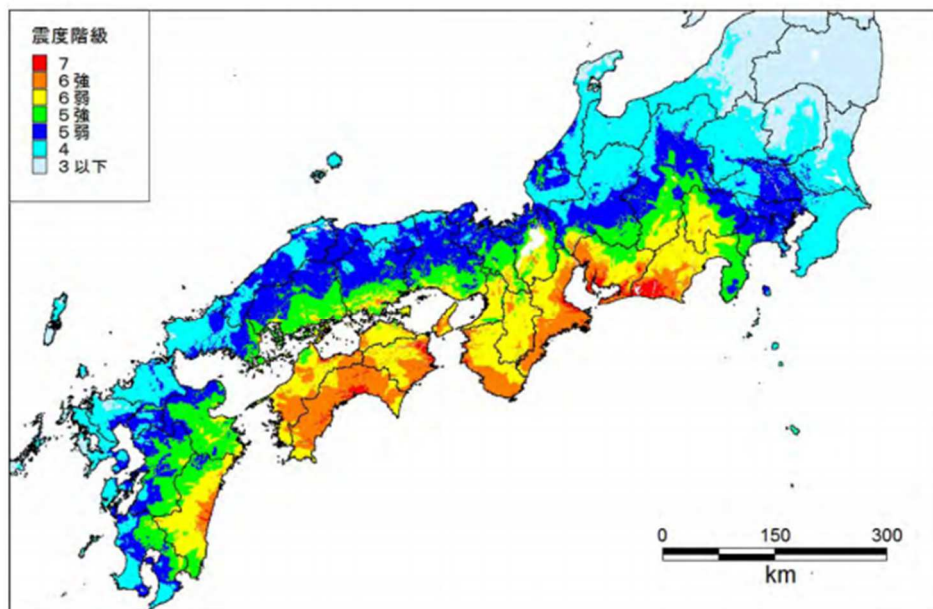
「協議会は、近畿地域ブロック（滋賀県、京都府、大阪府、兵庫県、奈良県、和歌山県の2府4県をいう。）において、災害時の廃棄物対策について情報共有を行うとともに、府県域を超えた連携が必要となる災害（以下「大規模災害」という。）時の廃棄物対策に関する広域的な連携について検討し、行動計画策定に結び付けることを目的とする。」

協議会では平時においては、情報の共有や広域連携についての検討が行われる。そして災害時には被災状況の集約・共有や、広域処理の調整等が行われる。

被害想定にはワーキンググループによる南海トラフ巨大地震の被害想定のうち、近畿地方が大きく被災するケース（地震動：陸側ケース，津波ケース(3)，冬夕方，風速 8m/s）を用いる。各条件についてワーキンググループの報告<sup>21</sup>より転載する。

- ・陸側ケース：基本ケース強振動生成域を、可能性がある範囲で最も陸域側（プレート境界面の深い側）の場所に設定したもの（図 6）
- ・津波ケース(3)：「紀伊半島沖～四国沖」に「大すべり域＋超大すべり域」を設定
- ・冬夕方（想定される被害の特徴）：住宅，飲食店などで火気使用が最も多い時間帯で，出火件数が最も多くなる。オフィスや繁華街周辺のほか，ターミナル駅にも滞留者が多数

存在する。鉄道、道路もほぼ帰宅ラッシュ時に近い状況でもあり、交通被害による人的被害や交通機能支障による影響が大きい。



陸側ケースの震度分布

図 6 陸側ケースの震度分布

上記の条件における南海トラフ巨大地震による近畿ブロックの府県別の被害想定は表 4 に示す。なお、被害想定で 1 週間後を想定しているのは断水等ライフライン被害による影響で 1 週間後に最大の避難者が発生すると想定されていることによる。

表 4 南海トラフ巨大地震による被害想定

	1 週間後の断水率	1 週間後の避難者数
滋賀県	34%	78,000
京都府	26%	170,000
大阪府	23%	770,000
兵庫県	12%	160,000
奈良県	51%	150,000
和歌山県	68%	280,000

市町村別の1週間後の被害想定は以下のように推定を行う。

(例：滋賀県大津市)

大津市の1週間後の断水率 = 滋賀県の1週間後の断水率

大津市の1週間後の避難者数 =

$$\text{大津市の総人口} \times \text{滋賀県の1週間後の避難者数} / \text{滋賀県の総人口}$$

し尿収集必要量推計方法には環境省災害廃棄物対策指針の推計式を用いる。

し尿収集必要量

=災害時におけるし尿収集必要人数×1日1人平均排出量

= (①仮設トイレ必要人数+②非水洗化区域し尿収集人口)×③1人1日平均排出量

① 仮設トイレ必要人数=避難者数+断水による仮設トイレ必要人数

避難者数：避難所へ避難する住人数

断水による仮設トイレ必要人数 = {水洗化人口 - 避難者数 × (水洗化人口 / 総人口)}  
× 上水道支障率 × 1/2

水洗化人口：平常時に水洗トイレを使用する住民数(下水道人口，コミュニティプラ  
ント人口，農業集落排水，浄化槽人口)

総人口：水洗化人口+非水洗化人口

上水道支障率：地震による上水道の被害率

1/2：断水により仮設トイレを利用する住民は，上水道が支障する世帯の内約1/2の  
住民と仮定

② 非水洗化区域し尿収集人口 = 汲み取り人口 - 避難者数 × (汲み取り人口 / 総人口)

汲み取り人口：計画収集人口

③ 1人1日平均排出量 = 1.7L/人・日

なお，この推計では以下の3点を前提条件としている。断水のおそれがあることを考慮し，避難所に避難する住民全員が仮設トイレを利用する避難所は一時に多くの人数を収容することから既存のトイレでは処理しきれないと仮定する。断水により水洗トイレが使用できなくなった在宅住民も，仮設トイレを使用すると仮定する。断水により仮設トイレを利用する住民は，上水道が支障する世帯のうち半数とし，残り半数の在宅住民は給水，井戸水等により用水を確保し，自宅のトイレを使用すると仮定する。



### 3.3 結果と考察

上記の方法から算出された市町村の収集必要量を表 5 に示す。以下、収集量は 1 日当たりの量とする。なお、水洗化人口、非水洗化人口、汲み取り人口については、環境省のサイト<sup>11</sup>より、平成 30 年実績データを採用した。

表 5 各市町村におけるし尿収集必要量の推計結果

市町村	発生量	市町村	発生量	市町村	発生量
大津市	133	京都市	480	大阪市	886
彦根市	50	福知山市	30	堺市	286
長浜市	49	舞鶴市	40	岸和田市	74
近江八幡市	36	綾部市	24	豊中市	133
草津市	51	宇治市	66	池田市	34
守山市	33	宮津市	14	吹田市	123
栗東市	27	亀岡市	37	泉大津市	27
甲賀市	43	城陽市	27	高槻市	122
野洲市	20	向日市	19	貝塚市	43
湖南市	23	長岡京市	26	守口市	47
高島市	23	八幡市	24	枚方市	135
東近江市	51	京田辺市	25	茨木市	94
米原市	16	京丹後市	48	八尾市	100
日野町	11	南丹市	15	泉佐野市	59
竜王町	6	木津川市	30	富田林市	41
愛荘町	9	大山崎町	6	寝屋川市	78
豊郷町	4	久御山町	6	河内長野市	40
甲良町	4	井手町	3	松原市	45
多賀町	4	宇治田原町	5	大東市	41
		笠置町	2	和泉市	75
		和東町	3	箕面市	46
		精華町	14	柏原市	28
		南山城村	2	羽曳野市	44
		京丹波町	7	門真市	43
		伊根町	2	摂津市	29
		与謝野町	14	高石市	21
				藤井寺市	24
				東大阪市	164
				泉南市	30
				四條畷市	19
				交野市	27
				大阪狭山市	20
				阪南市	29
				島本町	11
				豊能町	7
				能勢町	6
				忠岡町	8
				熊取町	20
				田尻町	5
				岬町	12
				太子町	5
				河南町	7
				千早赤阪村	3
滋賀県	593	京都府	969	大阪府	3,091

(単位：kL)

市町村	発生量	市町村	発生量	市町村	発生量
神戸市	231	奈良市	211	和歌山市	368
姫路市	102	大和高田市	43	海南市	60
尼崎市	71	大和郡山市	53	橋本市	61
明石市	47	天理市	39	有田市	27
西宮市	73	橿原市	80	御坊市	26
洲本市	19	桜井市	40	田辺市	76
芦屋市	15	五條市	25	新宮市	29
伊丹市	31	御所市	22	紀の川市	71
相生市	6	生駒市	71	岩出市	55
豊岡市	16	香芝市	48	紀美野町	11
加古川市	61	葛城市	23	かつらぎ町	20
赤穂市	8	宇陀市	23	九度山町	5
西脇市	7	山添村	3	高野町	4
宝塚市	36	平群町	12	湯浅町	13
三木市	18	三郷町	14	広川町	8
高砂市	17	斑鳩町	18	有田川町	33
川西市	25	安堵町	5	美浜町	8
小野市	11	川西町	5	日高町	9
三田市	20	三宅町	5	由良町	6
加西市	13	田原本町	20	印南町	10
篠山市	9	曾爾村	2	みなべ町	13
養父市	5	御杖村	2	日高川町	10
丹波市	11	高取町	6	白浜町	21
南あわじ市	8	明日香村	4	上富田町	16
朝来市	7	上牧町	14	すさみ町	5
淡路市	14	王寺町	15	那智勝浦町	17
宍粟市	10	広陵町	22	太地町	4
加東市	11	河合町	11	古座川町	4
たつの市	16	吉野町	7	北山村	1
猪名川町	5	大淀町	12	串本町	18
多可町	4	下市町	6		
稲美町	7	黒滝村	1		
播磨町	6	天川村	1		
市川町	7	野迫川村	1		
福崎町	7	十津川村	3		
神河町	3	下北山村	1		
太子町	6	上北山村	1		
上郡町	4	川上村	1		
佐用町	4	東吉野村	2		
香美町	7				
新温泉町	6				
兵庫県	984	奈良県	872	和歌山県	1,009

(単位：kL)

平時の収集量と災害時の収集必要量を府県ごとに集計したものを表 6 に示す。

収集必要量推計の結果，対象地域全域では災害時に 7,518kL のし尿が発生する。これは平時の収集量(5,177kL)に対して約 1.45 倍のし尿が発生することになる。

表 6 平時の収集量と災害時収集必要量の比較

	平時収集量(kL)	災害時収集必要量(kL)	※比率
滋賀県	460	593	1.29
京都府	569	969	1.70
大阪府	1,373	3,091	2.25
兵庫県	816	984	1.21
奈良県	573	872	1.52
和歌山県	1,386	1,009	0.73
合計	5,177	7,518	1.45

※比率は平時の収集量を 1 とした災害時収集必要量の比率を示す

地域によってその収集必要量は平時の 0.73～2.25 倍と大きく異なる。これらが何に起因するものか，地域の汚水処理の特徴と被害想定についての考察を行っていく。府県別の汚水処理人口普及率とその内訳を表 7 に，処理方式別の人口を総人口で除したものを表 8 に示す。

表 7 汚水処理人口普及率とその内訳(国土交通省の資料<sup>22</sup>をもとに作成)

都道府県名	汚水処理人口 普及率	総人口	汚水処理 人口計	下水道	農業集落 排水施設等	合併処理 浄化槽	コミュニティ プラント
滋賀県	98.9%	1,419	1,403	1,293	76	35	0
京都府	98.4%	2,538	2,497	2,410	41	46	0
大阪府	98.0%	8,844	8,664	8,511	1	152	0
兵庫県	98.9%	5,534	5,473	5,165	148	99	60
奈良県	89.3%	1,350	1,205	1,097	7	101	1
和歌山県	66.0%	950	627	265	44	317	0

(千人)

表 8 総人口に対する処理方式別の比率(国土交通省の資料<sup>22</sup>をもとに作成)

都道府県名	下水道	農業集落 排水施設等	合併処理 浄化槽	コミュニティ プラント
滋賀県	91.1%	5.4%	2.5%	0.0%
京都府	95.0%	1.6%	1.8%	0.0%
大阪府	96.2%	0.0%	1.7%	0.0%
兵庫県	93.3%	2.7%	1.8%	1.1%
奈良県	81.3%	0.5%	7.5%	0.1%
和歌山県	27.9%	4.6%	33.4%	0.0%

滋賀県の汚水処理の特徴として、汚水処理人口普及率が 98.9%と東京都に次いで全国 2 番目の高さである。一方でその処理方式は下水道が 91.1%と、人口の約 1 割が農業集落排水設備等や合併処理浄化槽、汲み取りといった下水道以外の処理方式をとっている。下水道以外の処理方式については、前述の通りバキュームカーでの収集運搬、し尿処理施設での処理が行われているため、平時においても一定量のし尿収集が計画的に行われている。一週間後の断水率は 34%と京都府や大阪府に比べ、低くはない数字であるが、約 1.3 倍となった。

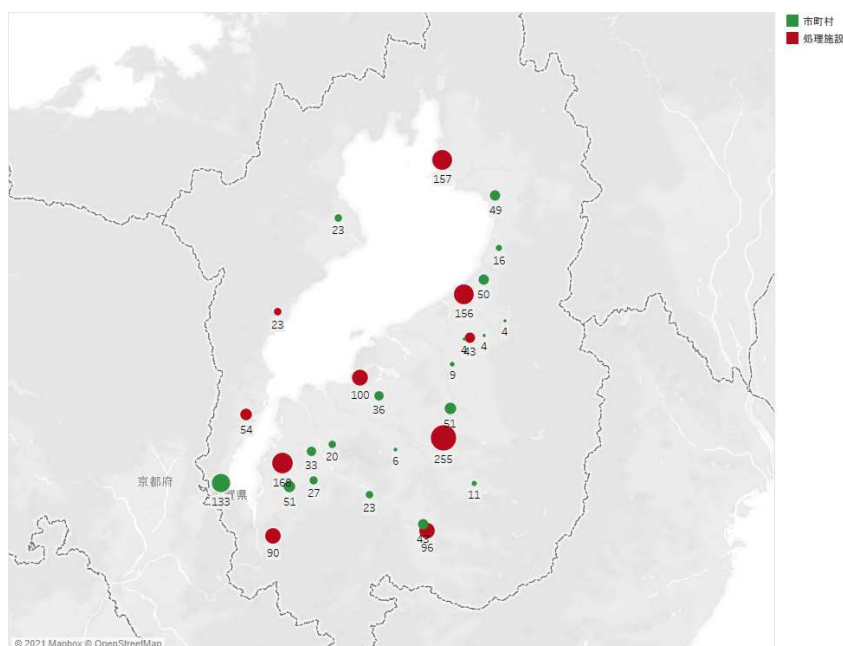


図 7 (滋賀県)市町村代表点と処理施設※

※図中の数字は各市町村のし尿収集必要量及び処理施設の処理能力を表す(以下同じ)

京都府の汚水処理の特徴として、総人口の 95.0%が下水処理による方式となっていることである。特に中心部においてはほぼ全てが下水処理となっているため、平時の収集量も少なく、収集運搬の車両や処理のための施設に乏しい。下水道管路の被災や断水によって、家庭のトイレが使えなくなることで避難所に人が集中した際には、仮設トイレからの搬出等に困難を要することが想像できる。日本海側や山間部には下水以外による処理が残っているため、府内で処理を行う際には、長距離の輸送が必要となる。

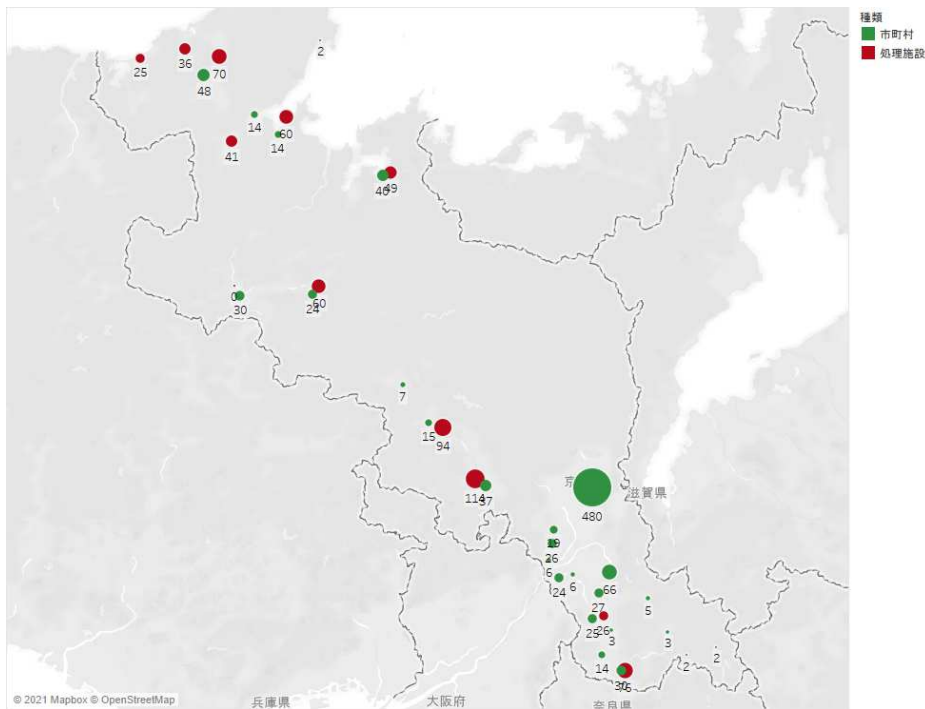


図 8 (京都府)市町村代表点と処理施設※

大阪府の汚水処理の状況は京都府と類似する。中心部についてはほぼ全てが下水施設にて処理されている。中心部から離れるとし尿処理施設も多く整備されており、平時の収集量は和歌山県に近い。しかし、地震による 1 週間後の避難者が 77 万人と想定されていることから、その災害時収集必要量は平時の約 2.25 倍と多量のし尿が発生することとなる為、大阪府内だけで処理を行うことは困難である。

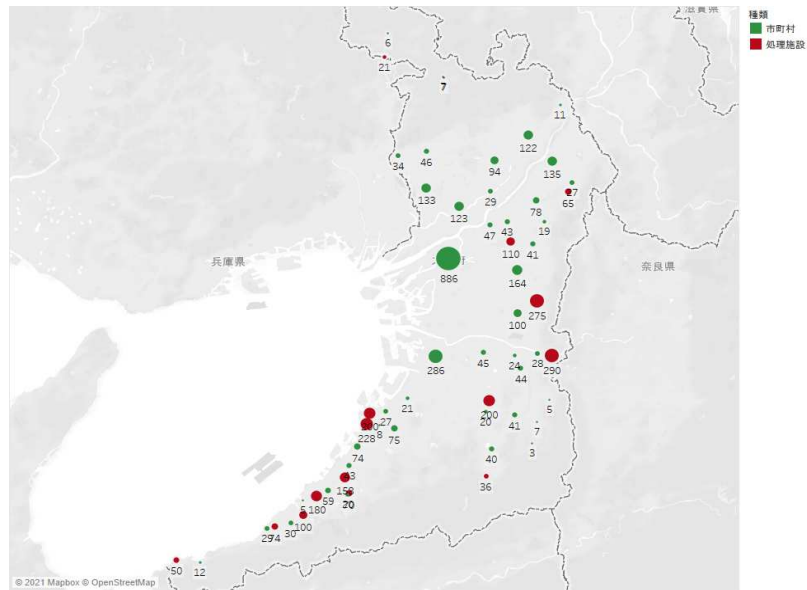


図 9 (大阪府)市町村代表点と処理施設※

兵庫県の汚水処理人口普及率は滋賀県に次ぐ全国三番目である。その内訳も滋賀県と類似している。しかし地理的に見てみると中心部には処理施設がなく、多くの場合は下水によって処理されている。一方で内陸部や西側沿岸部には下水処理以外の処理方式もあり、平時の収集量、処理能力が整備されている。被害想定も断水率 12%と低く、避難者数も総人口との比率で考えると少なく、収集必要量が低く収まっている。以上のことから、広域処理を検討する際には京都や大阪からの受入れを行う上で重要な地域になると考える。

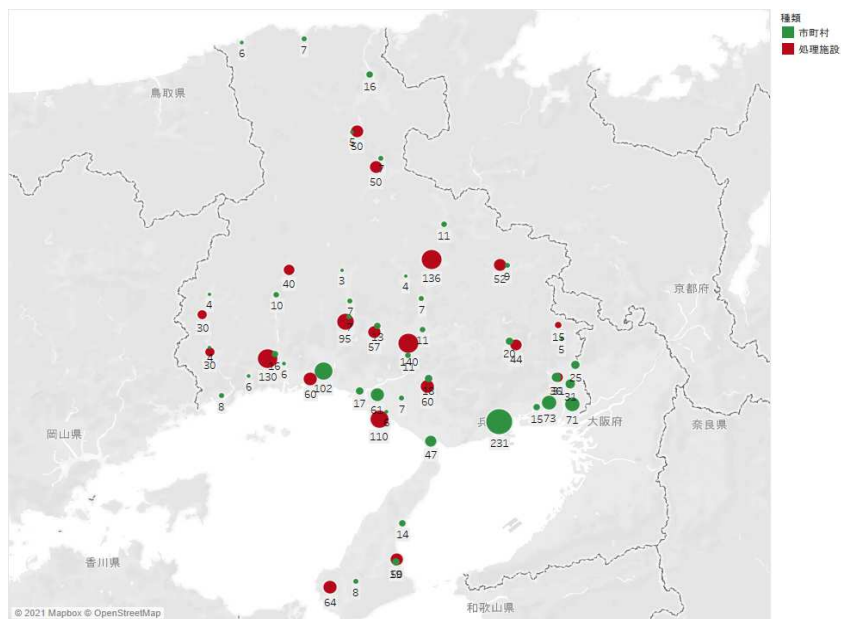


図 10 (兵庫県)市町村代表点と処理施設※



施設管理・清掃に伴う汚泥引き抜き量の影響等を受けていると推察される。

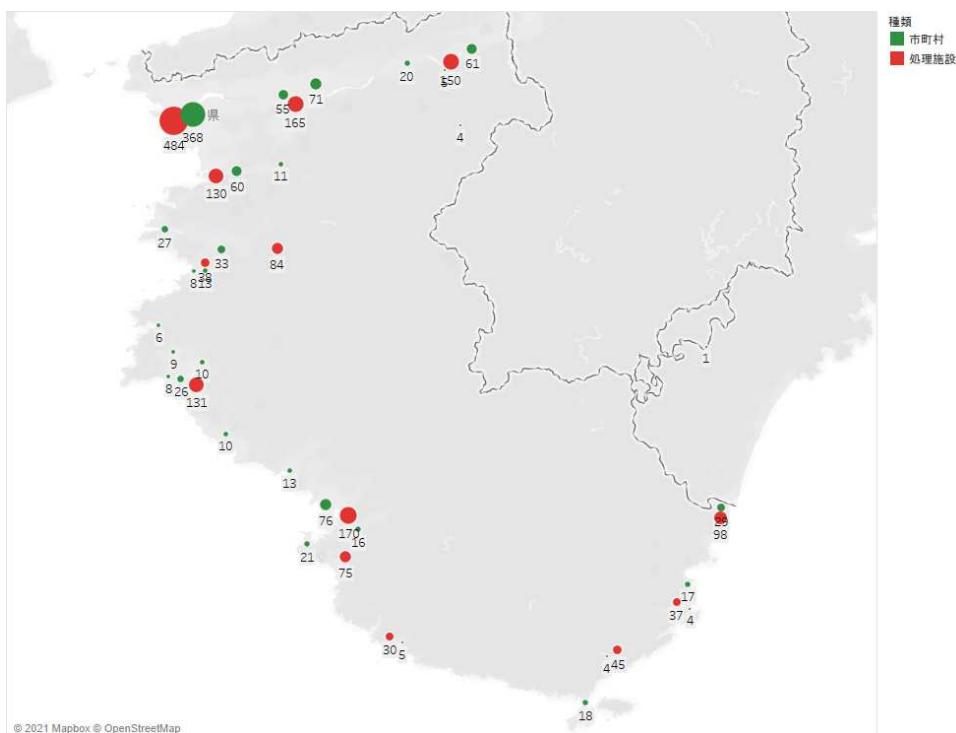


図 12 (和歌山県)市町村代表点と処理施設※

以上のことから、災害時のし尿収集必要量は断水率や避難者数、その自治体の汚水処理の特性によって大きく影響を受ける。汚水処理のうち、下水による処理が普及している都市部においては、平時の収集運搬・処理能力が収集必要量に対して小さく、災害時の影響をより大きく受けることが分かった。特に京都府、大阪府においては、地域内での収集必要量が平時の処理計画を大きく上回ることとなり、これらの地域から発生したし尿をいかに処理するかが課題となる。和歌山県においては、平時の処理量を下回る収集量となり、他府県のし尿受け入れの可能性があることがわかった。一方で汚水処理方式が特異的な地域における推計式については検証が必要である。

第 4 章では本章で得られた推計値を基に、輸送モデルについての検討を行う。



#### 第4章 輸送効率性の最小化を目的とした LP モデルの定式化

本章では荒井ら(2014)によって提案された線形計画法(LP: Linear Programming)を用いて各市町村から排出されたし尿を処理施設へ効率的に輸送するために、輸送効率性[kL・km]の最小化を目的とした最適輸送計画問題を解く。一次輸送モデルを図 13 に示す。

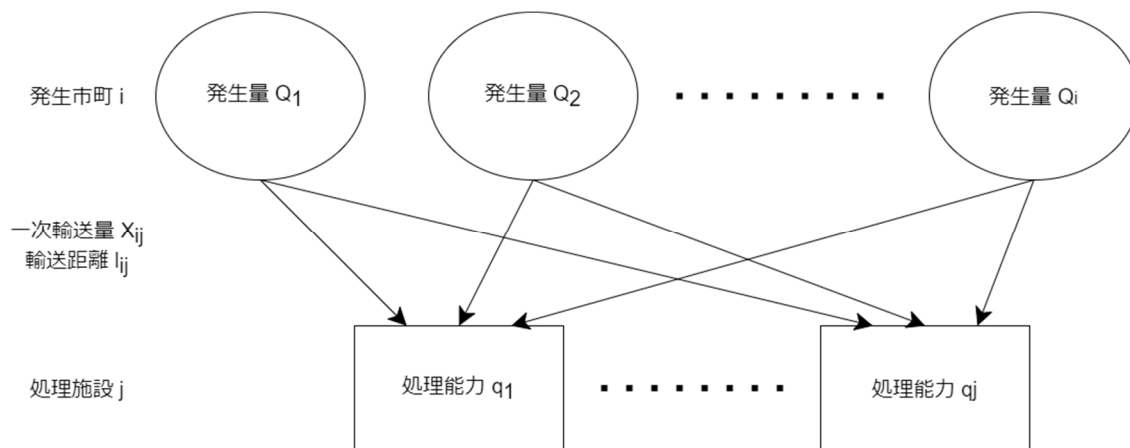


図 13 一次輸送モデル

##### 4.1 LP モデルの定式化

###### 【目的関数】

$$\min \sum_i \sum_j l_{ij} X_{ij} \dots (1)$$

###### 【制約条件】

$$\sum_j X_{ij} = Q_i \dots (2)$$

$$\sum_i X_{ij} \leq q_j \dots (3)$$

$$X_{ij} \geq 0 \dots (4)$$

ここで $X_{ij}$ を市町村  $i$  から処理施設  $j$  への輸送量[kL],  $Q_i$ は発生市町村  $i$  のし尿収集必要量,  $l_{ij}$ は発生市町村  $i$  から処理施設  $j$  までの輸送距離[km],  $q_j$ は処理施設  $j$  の処理能力[kL]とする。  $i, j$  の取りうる範囲は別に示す。

モデルの解析には python の PuLP ライブラリーを用いた。

## 4.2 処理シナリオの設定

前提条件として災害発生から1週間後の状況を想定。発生したし尿を全て当日中に輸送し、処理施設に運び込まれたし尿は当該施設の処理能力を超過することなく、全量処理を行うものとする。施設の処理能力は、環境省のサイト<sup>11</sup>より、2018年度のデータを採用する。し尿の発生場所は各市町村の代表点とする。輸送距離 $l_{ij}$ には市町村の代表点から処理施設までの経路をGoogle Maps APIを用いて探索する。道路の被害については被害なし、もしくは復旧済みとして考慮していない。

case1-1として荒井ら(2014)のモデル同様に災害発生前の状況、すなわち平時の収集量において、府県内のみで処理を行った場合を設定する。case1-2では平時において発生したし尿を、近畿ブロック2府4県を単一の地域として扱うことで広域処理による輸送効率性の変化を示す。なお、平時の収集量は収集必要量とみなす。この災害発生前の状況を基準とすることで、災害によるし尿収集必要量の増加、減少がどのように輸送効率性に影響を及ぼすのかを検討する。case1-1, case1-2における $i, j$ の範囲を表9, 表10に示す。

表9 case1-1における $i, j$ の範囲

地域	市町村	処理施設
滋賀県	$1 \leq i \leq 19$	$1 \leq j \leq 10$
京都府	$1 \leq i \leq 26$	$1 \leq j \leq 12$
大阪府	$1 \leq i \leq 43$	$1 \leq j \leq 16$
兵庫県	$1 \leq i \leq 41$	$1 \leq j \leq 19$
奈良県	$1 \leq i \leq 39$	$1 \leq j \leq 15$
和歌山県	$1 \leq i \leq 30$	$1 \leq j \leq 13$

表10 case1-2における $i, j$ の範囲

地域	市町村	処理施設
近畿ブロック	$1 \leq i \leq 198$	$1 \leq j \leq 85$

災害発生後の想定として、処理場の被害なし、単一府県内のみで処理を行う状況をcase2-1とする。災害時のし尿収集必要量を用いたときに、地域内での処理可能性について判断するとともに、最適化された輸送計画を示す。case2-1における $i, j$ の範囲を表11

に示す

表 11 case2-1 における i, j の範囲

地域	市町村	処理施設
滋賀県	$1 \leq i \leq 19$	$1 \leq j \leq 10$
京都府	$1 \leq i \leq 26$	$1 \leq j \leq 12$
大阪府	$1 \leq i \leq 43$	$1 \leq j \leq 16$
兵庫県	$1 \leq i \leq 41$	$1 \leq j \leq 19$
奈良県	$1 \leq i \leq 39$	$1 \leq j \leq 15$
和歌山県	$1 \leq i \leq 30$	$1 \leq j \leq 13$

case2-2 として処理場の被害なし，他府県施設での処理も可能とした広域処理，つまり近畿ブロック 2 府 4 県がそれぞれ単独で処理を行うのではなく，2 府 4 県を単一の地域として処理を行う．地域内での処理困難となるし尿について，広域連携によって処理されることを想定している．case2-2 における i, j の範囲を表 12 に示す．

表 12 . case2-2 における i, j の範囲

地域	市町村	処理施設
近畿ブロック	$1 \leq i \leq 198$	$1 \leq j \leq 85$

case2-3 として沿岸部の処理施設では地震による津波被害によって 5 施設(処理能力合計 1,102kL/day)の処理機能が消失，近畿ブロック隣接県での 15 施設（処理能力合計 1,185kL/day)を利用可能とした広域処理を設定した．津波被害については，各府県のハザードマップより，沿岸部において浸水が想定されている処理施設を処理機能の消失とした．case2-3 における i, j の範囲を表 13 に示す．処理機能が消失した 5 施設と隣接県の 15 施設を表 14, 表 15 に示す．

表 13 case2-3 における i, j の範囲

地域	市町村	処理施設※
近畿ブロック	$1 \leq i \leq 198$	$1 \leq j \leq 100$

※処理施設には隣接地域の 15 施設を含む

表 14 津波被害を受ける処理施設

施設	所在地	処理能力(kL)
天の川浄苑処理場	大阪府岸和田市	228
第1事業所	大阪府泉大津市	200
中部衛生センター	兵庫県姫路市	60
青岸汚泥再生処理センター	和歌山県和歌山市	484
海南海草環境衛生センター	和歌山県海南市	130

表 15 隣接地域の処理施設

施設	所在地	処理能力(kL)
敦賀市衛生処理場	福井県敦賀市	70
小浜市衛生管理所	福井県小浜市	50
高浜町浄化センター	福井県大飯郡	10
大飯浄化センター	福井県大飯郡	11
美方汚泥再生処理センター	福井県三方上中郡	21
大垣衛生センター	岐阜県大垣市	340
南濃衛生施設利用事務組合衛生センター	岐阜県養老郡	60
亀山市衛生公苑	三重県亀山市	60
浄化センター第2処理場	三重県伊賀市	70
奥伊勢クリーンセンター	三重県多気郡	40
伊賀南部浄化センター	三重県名張市	123
備前市衛生センター	岡山県備前市	34
勝英衛生施設組合 滝川苑	岡山県勝田郡	74
和気赤磐衛生センター	岡山県和気郡	72
因幡浄苑	鳥取県鳥取市	150

### 4.3 結果と考察

結果を表 16 に示す

表 16 一次輸送モデルにおける輸送効率性

	case1-1	case1-2	case2-1	case2-2	case2-3
滋賀県	3,852	/	5,281	/	/
京都府	7,136		*		
大阪府	7,696		*		
兵庫県	9,461		30,602		
奈良県	3,706		7,964		
和歌山県	8,179		5,433		
合計	40,030	38,609	*	218,265	297,154

\*モデルを満たす解無し

case1-1 と case1-2 の結果の比較を行う。各府県の輸送効率性の合計 40,030[kL・km]に対して、広域処理を行った場合の輸送効率性は 38,609[kL・km]となる。このことから、平時においても広域輸送は一定の効果を与えることがわかる。なお、実務上の輸送効率性については、発生したし尿が市町村(一部事務組合)をまたいで処理されることは無いため、case1-1 の輸送効率性よりも大きくなり得ることに注意が必要である。

case1-1 と case2-1 の結果からは収集必要量の増減に対応して輸送効率性の増減が見られる。特に兵庫県においては、収集必要量が 1.2 倍の増加に対して輸送効率性は 3.2 倍となった。これは都市部における処理能力が小さく、地方部の処理施設へと長距離の輸送が必要となることが要因と考えられる。後に示すネットワーク図からは被災した市町村から近傍の処理施設ではなく、遠方への輸送がされていることがわかる。また、京都府と大阪府については一次輸送モデルを満たす解が存在しない。地域内の収集必要量がその処理能力を上回った為に、同地域内のみでの処理は不可能となる。このことから地域外との連携が処理の上で不可欠となってくる。

case2-2 では、case-2-1 では処理困難であった京都府、大阪府で発生したし尿においても広域輸送を行うことで処理可能となった。case1-1 と比較して約 5.5 倍となり、災害時には多くの車両や人員が必要となる。大阪や京都府から発生したし尿は和歌山県や奈良県、滋賀県、兵庫県へと輸送される。これらはそこまで処理地域を拡げないと処理ができない

ことを示す。また、自治体所有の施設が他府県からの受入れによって処理出来なくなるため、自地域のし尿を遠方の施設へと輸送することとなる。広域での最適輸送計画では、自治体間の綿密な連携が重要となる。

case2-3 では地震による津波によって地域内の処理場が一部被災し、隣接する自治体処理場において協力を受けることを想定した。輸送効率性は case2-2 の 1.36 倍となった。処理能力は補完されたが、輸送距離が大きくなったことが影響している。特に都市部からの距離が近く、処理能力の大きい施設が被災したことの影響が大きいといえる。

それぞれの case での解析結果から得られたネットワーク図を図 14 から図 26 に示す。

単一ではなく、広域処理による輸送最適化計画の検討では、全体最適のため、本来は自地域のし尿を処理すべき施設においても、他市の受入れを優先し、自地域のし尿をあえて遠方へと運ぶような、玉突きで押し出していくようなケースも存在する。今回の解析結果から一例をあげて説明を行う(表 17)。単一県モデルでは大津市から輸送されたし尿は、大津市南部衛生プラント、大津市北部衛生プラント、環境衛生センターへ輸送される。一方広域処理のモデルでは、大津市で発生したし尿が彦根市清掃センター、環境衛生センターへと輸送される。大津市から彦根市清掃センターは輸送距離が 56.9km である。なぜこのようなことが起こるかという京都市で発生したし尿が大津市南部衛生プラント、大津市北部衛生プラントへと輸送されることによる。大津市の 2 施設は処理能力が 144kL なので、京都市から受け入れたし尿だけで処理限界となる。結果として大津市のし尿は彦根市清掃センターまで輸送した方が全体の輸送効率は向上する。ネットワーク図を図 27 に示す。

このような方式では自治体単独の災害廃棄物処理計画では難しく、県をまたいだ調整と自治体の理解が特に重要である。その役割としての近畿ブロック協議会等や国に求められるものは大きい。処理方式の一つとして行動計画や平時の防災のための情報共有、ケーススタディにおいて、想定しておくことも必要と考える。

災害時においては、車両や施設、人的資源の被災も起こる。資源が限られる状況においてはより効率的な輸送モデルが求められる。第 5 章では中継施設を利用した二次輸送モデルについて効果分析を行う。

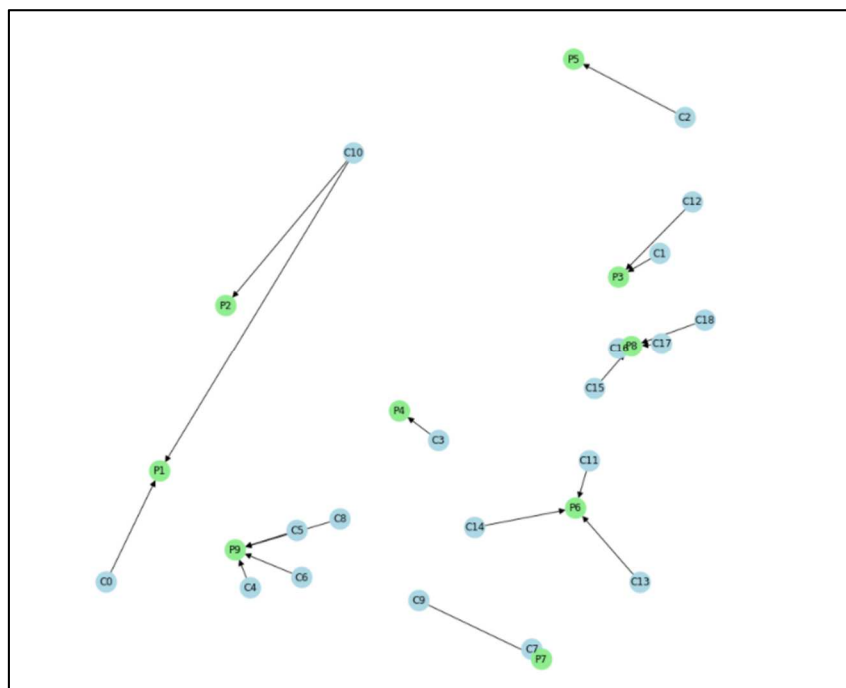


図 14 case1-1 のネットワーク図(滋賀県)

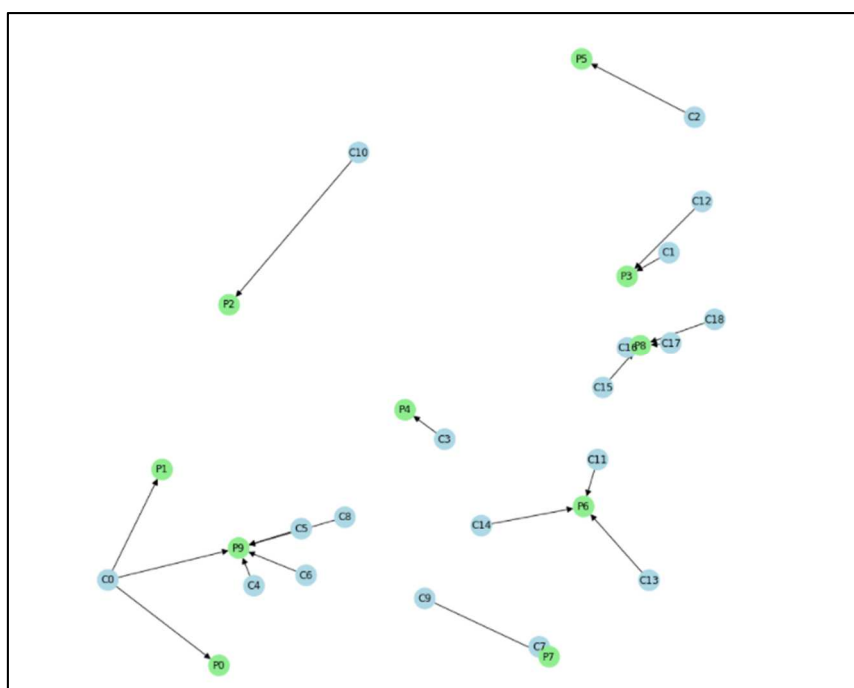


図 15 case2-1 のネットワーク図(滋賀県)





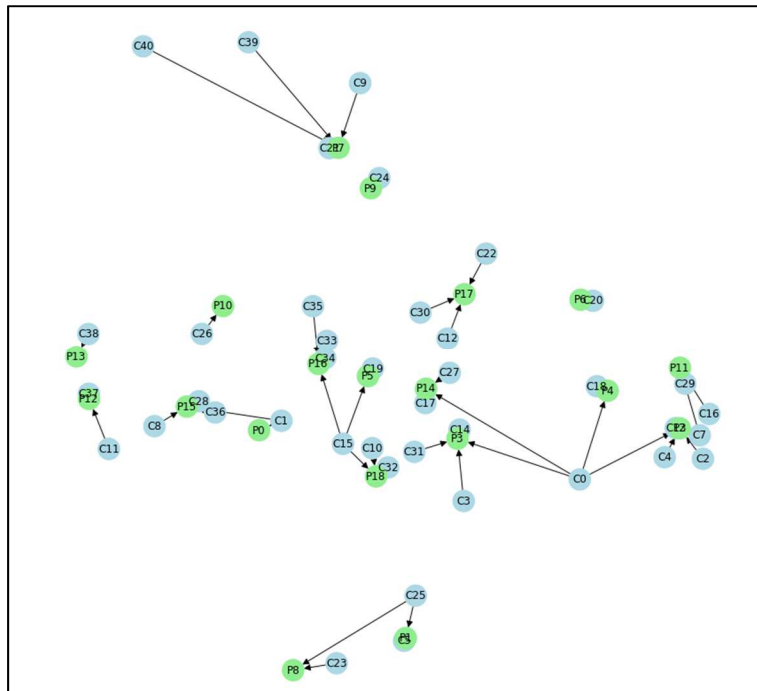


図 18 case1-1 のネットワーク図(兵庫県)

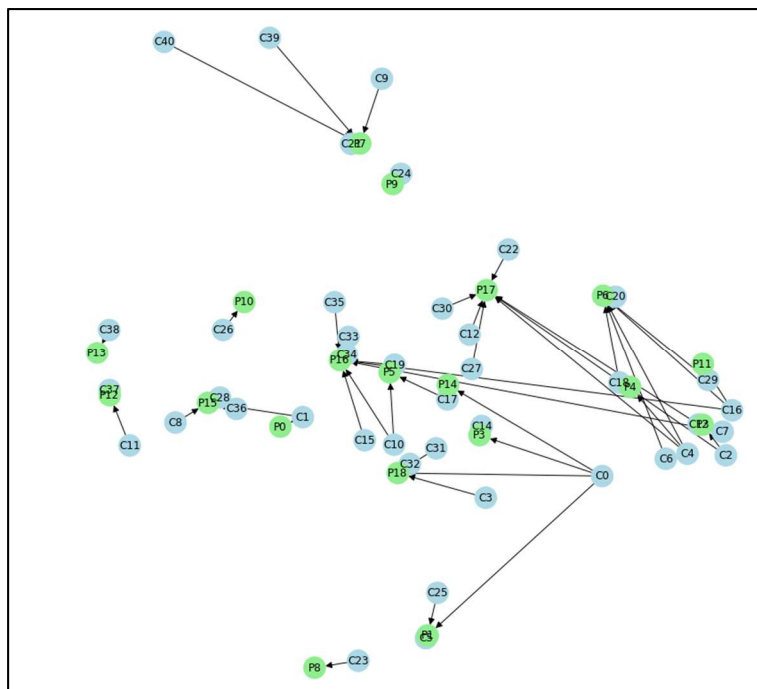


図 19 case2-1 のネットワーク図(兵庫県)

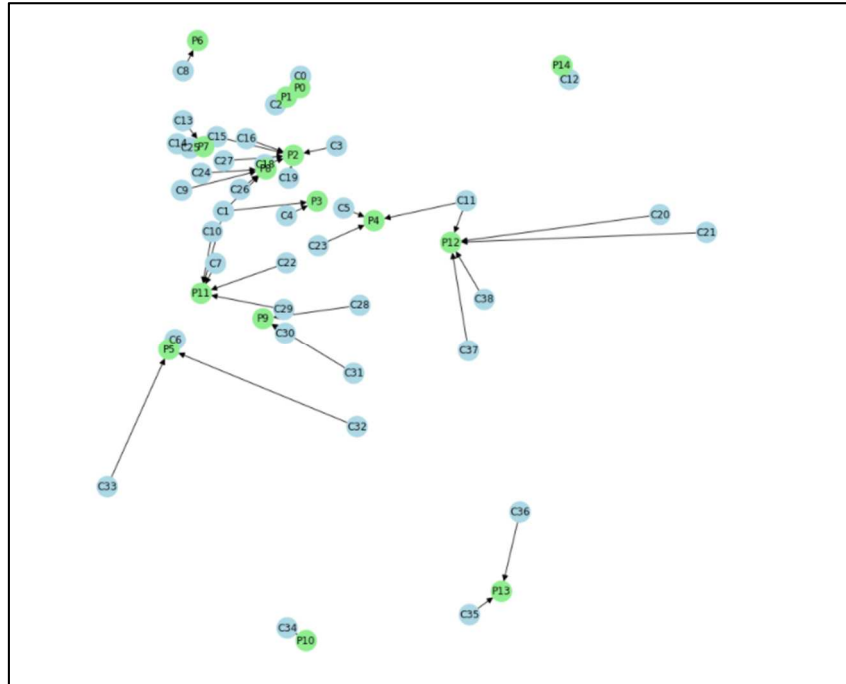


図 20 case1-1 のネットワーク図(奈良県)

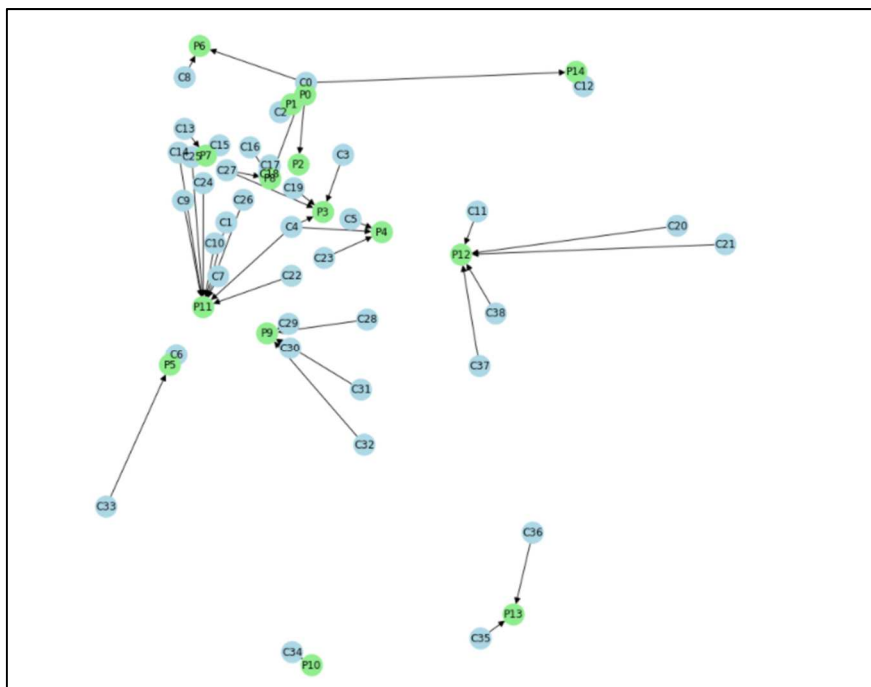


図 21 case2-1 のネットワーク図(奈良県)

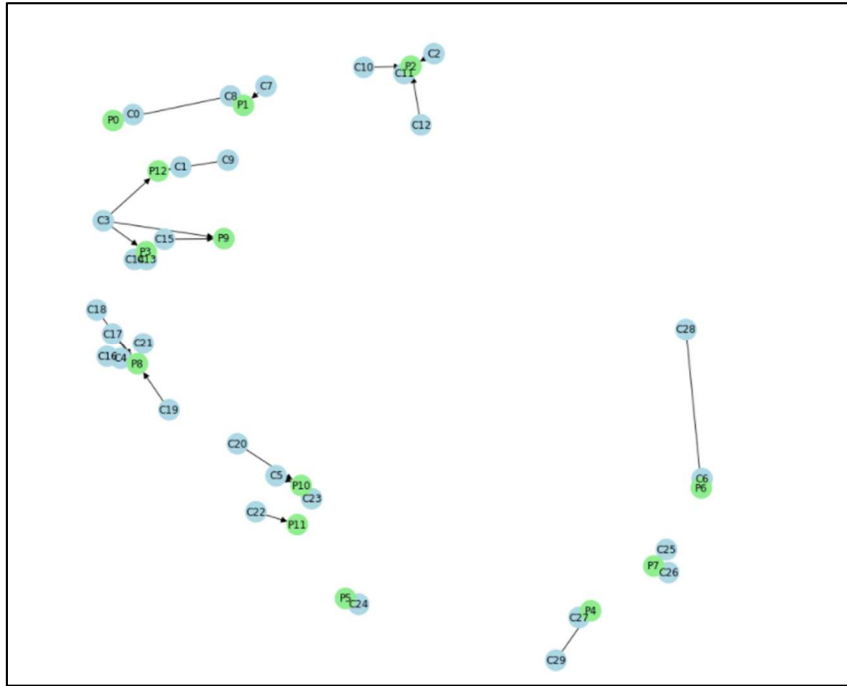


図 22 case1-1 のネットワーク図(和歌山県)

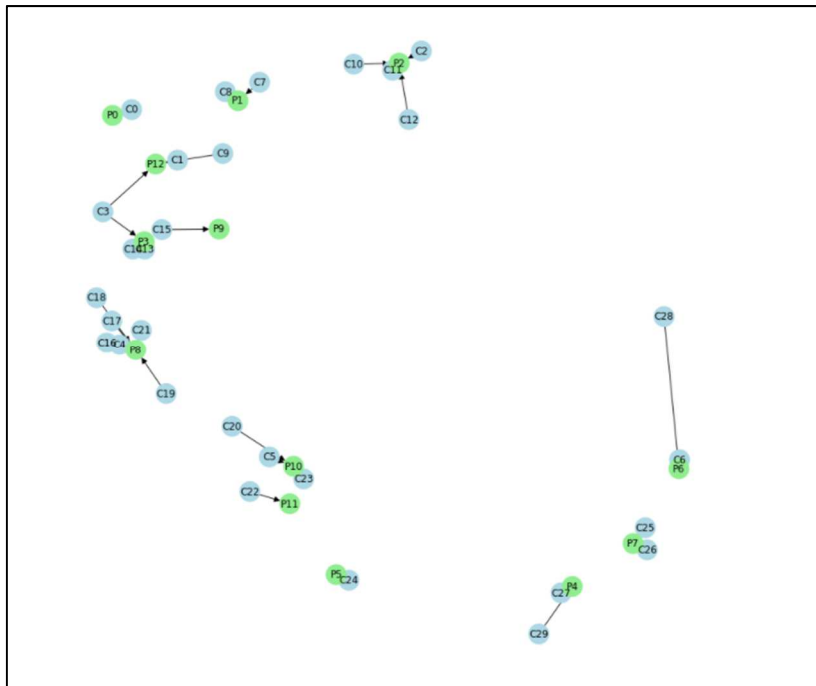


図 23 case2-1 のネットワーク図(和歌山県)

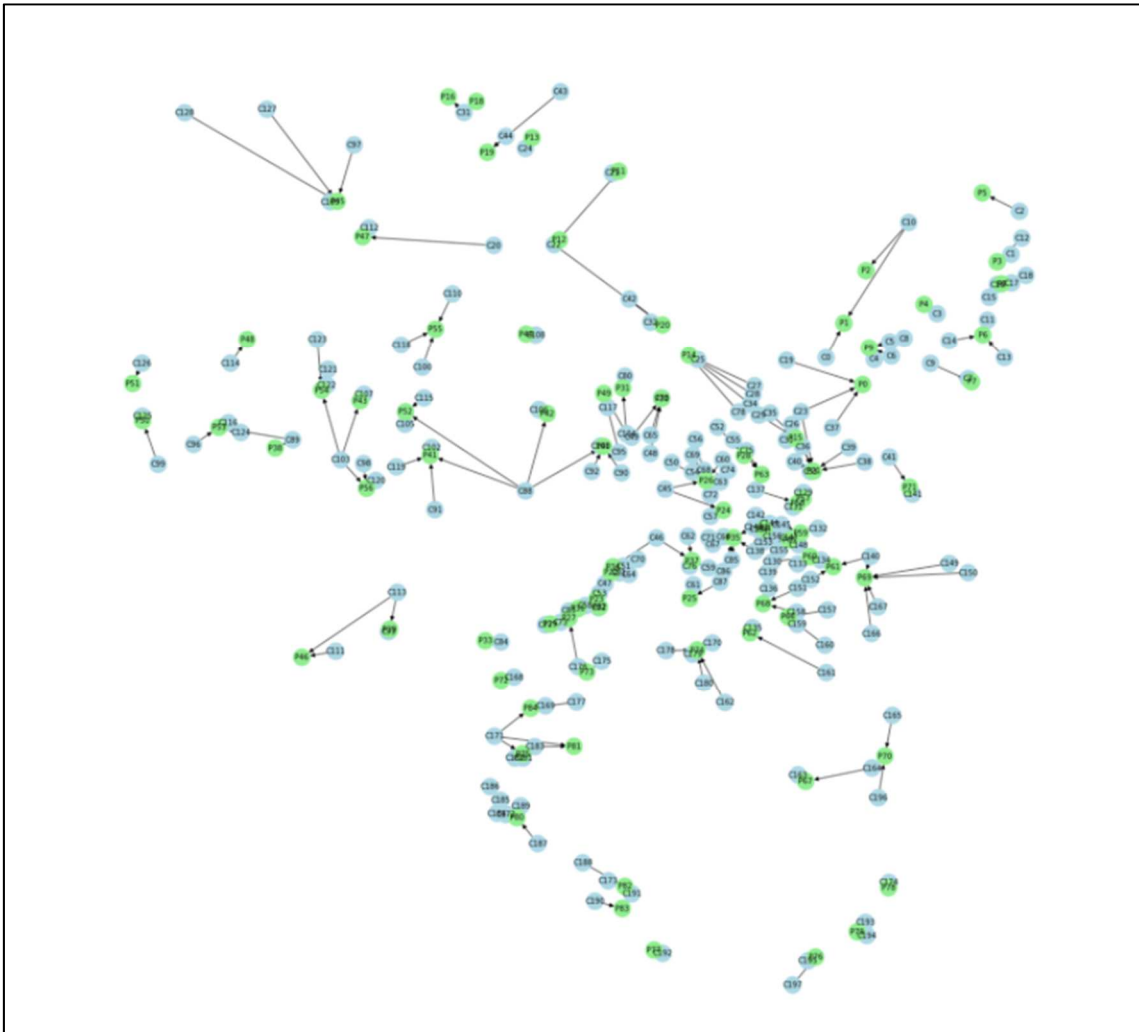


図 24 case2-1 のネットワーク図

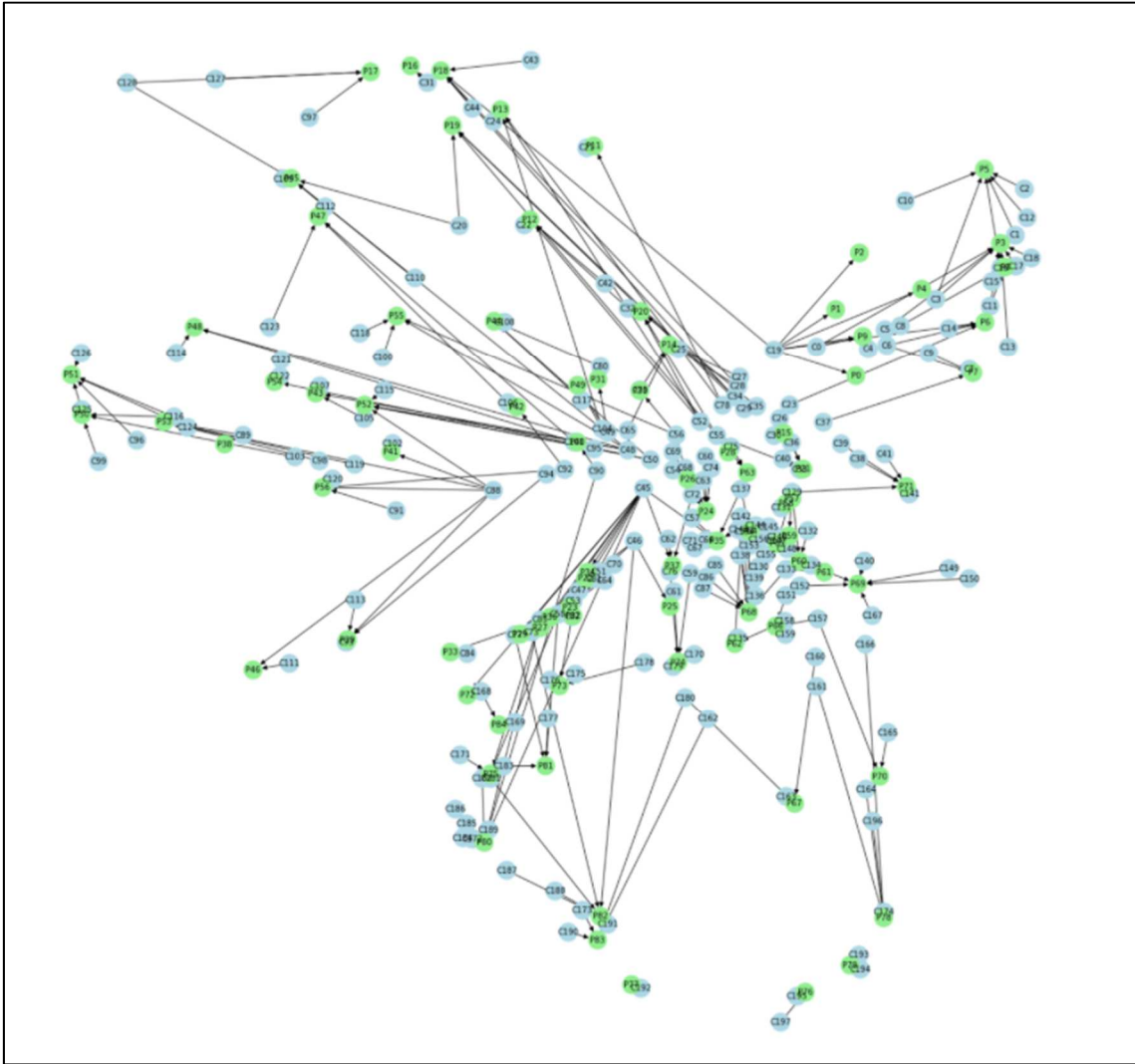


図 25 case2-2 のネットワーク図

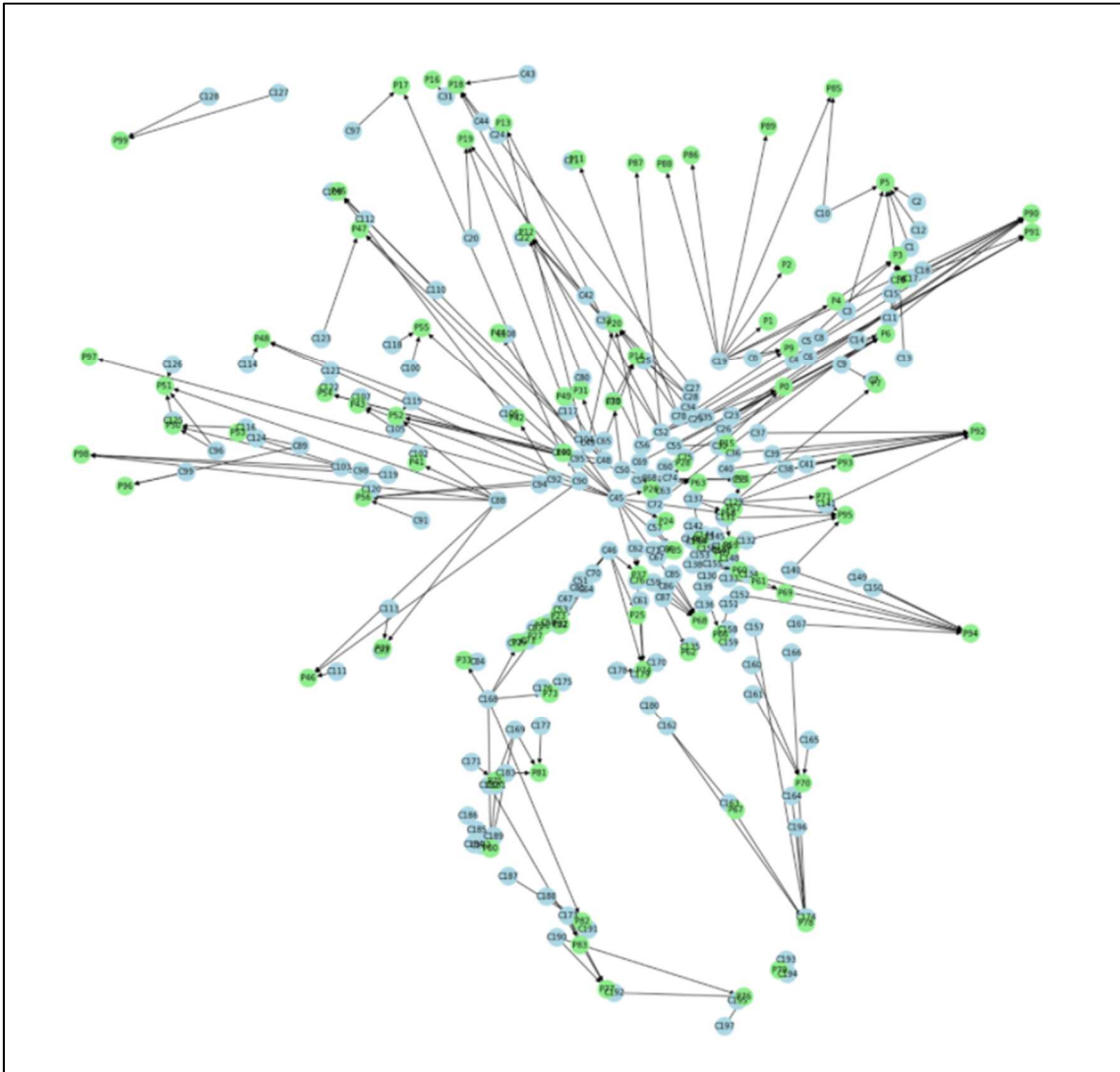


図 26 case2-3 のネットワーク図

表 17 玉突き輸送の一例

県内処理

発生市町村	処理施設	輸送距離(km)	輸送量(kL)
大津市	大津市南部衛生プラント	14.9	42
大津市	大津市北部衛生プラント	11.5	54
大津市	環境衛生センター	14.2	37

広域処理

発生市町村	処理施設	輸送距離(km)	輸送量(kL)
大津市	彦根市清掃センター	56.9	46
大津市	環境衛生センター	14.2	87
京都市	大津市南部衛生プラント	21.5	90
京都市	大津市北部衛生プラント	22.3	54
京都市	環境衛生センター	28.9	30

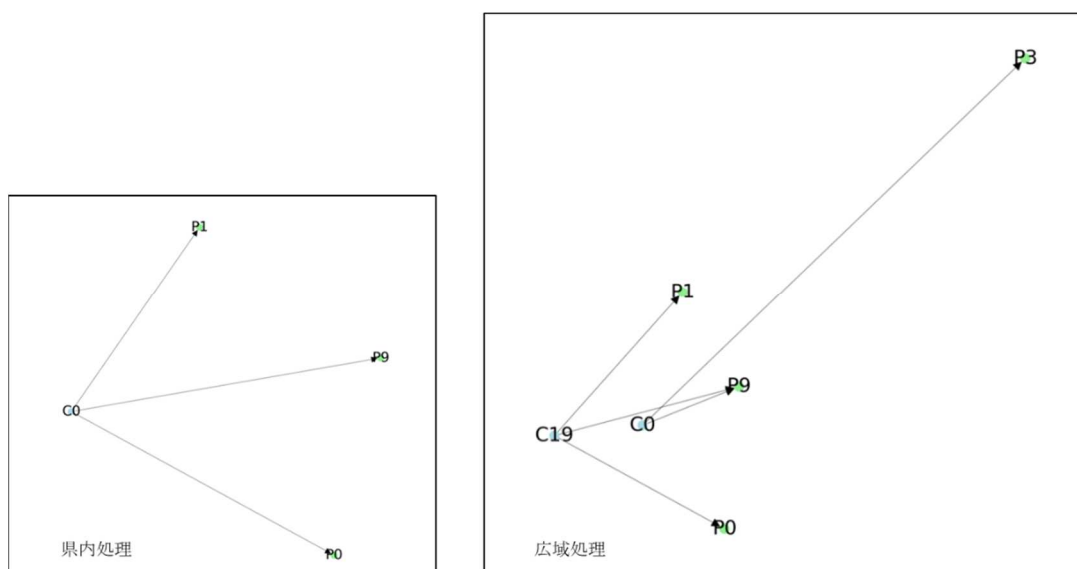


図 27 玉突き輸送のネットワーク図

## 第5章 二次輸送の効果分析

過去の災害において、避難所等に設置された仮設トイレから地元業者が収集を行い、中継施設へ輸送し、他府県から応援に来た業者が大型車で中継施設から遠方の処理場まで輸送する二次輸送による処理が行われたケースがある<sup>23</sup>。ヒアリングを行った一般廃棄物処理業者によると、東日本大震災の応援に行った際には、片道約130kmの距離を大型車で何往復も輸送した、とのことであった。

本章においては二次輸送による輸送モデルについて輸送コストの低減を目的として検討を行う。図28は中継施設を利用した二次輸送モデルである。

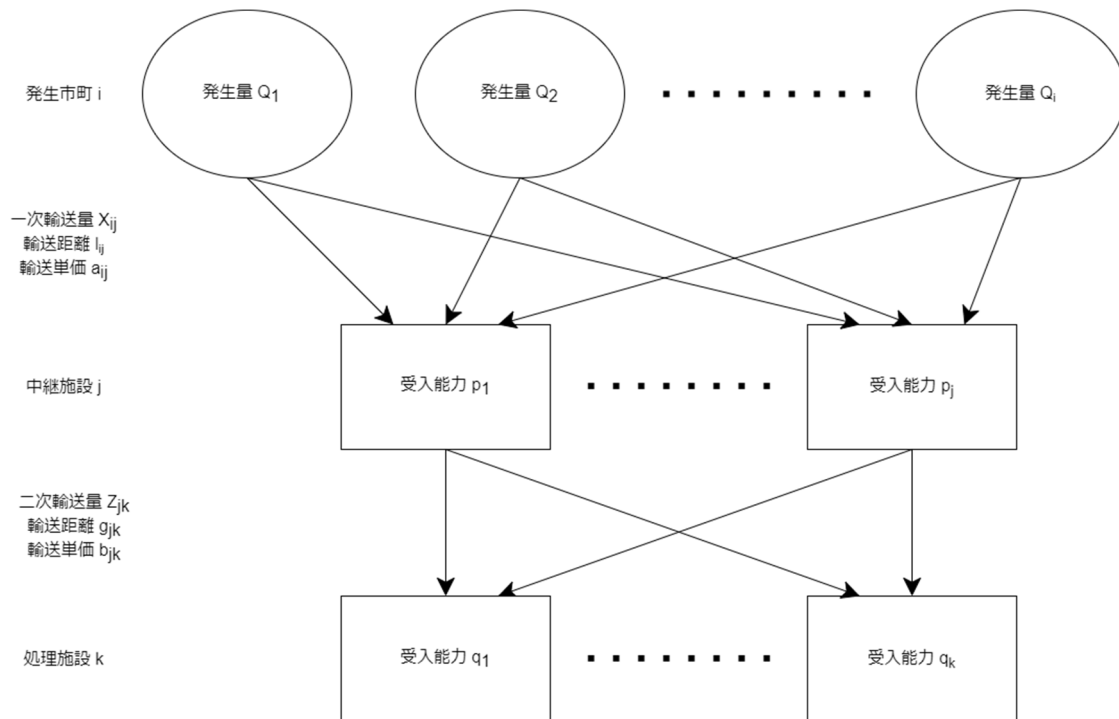


図 28 中継施設を利用した二次輸送モデル

### 5.1 輸送費用の最小化を目的とする LP モデルの定式化

【目的関数】

$$\min \sum_i \sum_j a_{ij} X_{ij} l_{ij} + \sum_j \sum_k b_{jk} Z_{jk} g_{jk} \dots (5)$$



【制約条件】

$$\sum_j X_{ij} = Q_i \cdot \cdot \cdot (6)$$

$$\sum_j X_{ij} \leq p_j \cdot \cdot \cdot (7)$$

$$\sum_i X_{ij} = \sum_k Z_{jk} \cdot \cdot \cdot (8)$$

$$\sum_j Z_{jk} = q_k \cdot \cdot \cdot (9)$$

$$X_{ij}, Z_{jk} \geq 0 \cdot \cdot \cdot (10)$$

ここで、 $X_{ij}$ は発生市町村  $i$  から中継基地  $j$  への一次輸送量[kL]、 $l_{ij}$ は発生市町村  $i$  から中継基地  $j$  までの最短距離[km]、 $Z_{jk}$ は中継基地  $j$  から処理施設  $k$  への二次輸送量[kL]、 $g_{jk}$ は中継基地  $j$  から処理施設  $k$  までの最短距離[km]、 $a_{ij}$ は発生市町村  $i$  から中継基地  $j$  までの輸送単価[円/kL・km]、 $b_{jk}$ は中継基地  $j$  から処理施設  $k$  までの輸送単価[円/kL・km]、 $Q_i$ は発生市町村  $i$  の収集必要量[kL]、 $p_j$  は中継基地  $j$  の受入能力 [kL]、 $q_k$ は処理施設  $k$  の処理能力[kL]とする。  $i, j, k, l$  の取りうる範囲は別に示す

モデルの解析には python の PuLP ライブラリーを用いた。

## 5.2 処理シナリオの設定

第4章では、発生市町村から処理施設へ輸送し、受入れたし尿をその施設においてすべて処理を行うシナリオを設定し最適輸送問題を解いた。本章では発生市町村から中継施設へと中型車にて一次輸送し、中継施設から処理施設へと大型車で二次輸送、処理を行う二次輸送モデルについて検討する。中継施設は処理施設と同一であり、二次輸送を行わない場合は中継施設にて全量処理を行う。二次輸送を行った場合は受入れ先の処理施設において全量処理を行う。輸送については、発生市町村から中継施設へは中型バキュームカー、中継施設から処理施設へは大型バキュームカーを使用する。輸送費用に関しては「一般貨物自動車運送事業に係る標準的な運賃の告示に関する諮問について」を参考に kL・km あたりの費用算出を行い、一次輸送費：127[円/kL・km]、二次輸送費：70[円/kL・km]とする。

case3-1 では受入能力を「し尿処理施設構造指針解説」より、処理能力の 1.5 倍とする。

荒井ら(2014)は、多目的貯留槽を整備することで輸送効率性の向上を目指した。本研究では処理施設の既存の受入能力に注目し、既存施設を活用することで一時貯留が可能な中継施設としての機能を持たせる。既存の施設を利用することで、新たな設備を設ける必要がなく、発災直後であっても貯留のための槽が利用可能であれば中継施設として緊急的な使用が可能となる。case3-1における  $i, j, k$  の範囲を表 18 に示す。

表 18 case3-1 における  $i, j, k$  の範囲

地域	市町村	中継施設	処理施設
近畿ブロック	$1 \leq i \leq 198$	$1 \leq j \leq 85$	$1 \leq k \leq 85$

荒井ら(2014)は地域内の全発生量を受け入れられる十分な「多目的貯留槽」を設けることで、震災への備えとしての施設の在り方を検討した。本研究においても同様に重要な検討事項であるために、case3-2 では地域内で発生した収集必要量を受入できるよう理想の受入能力に設定して解析を行う。case3-2 における  $i, j, k$  の範囲はを表 19 に示す。

表 19 case3-2 における  $i, j, k$  の範囲

地域	市町村	中継施設	処理施設
近畿ブロック	$1 \leq i \leq 198$	$1 \leq j \leq 85$	$1 \leq k \leq 85$

### 5.3 結果と考察

モデル解析から得られた輸送費用[円]の結果を表 20 にまとめる。

表 20 二次輸送モデルの輸送費用と総移動距離

	case2-2	case3-1	case3-2
輸送費用(円)	27,719,769	23,972,462	21,661,890
総移動距離(km)	8,209	7,865	5,825

分析結果から二次輸送によって輸送費用、総移動距離の削減につながることを示された。また大型車を使用することで輸送量に対する車両台数が少なくなるというメリットがある。輸送時間の短縮や必要車両台数の低減は作業員や燃料といった資源の限られる災害時にお

いては特に重要である。

次に case3-1 によって得られた二次輸送のネットワーク図を発生市町村が所在する府県別に図 29 から図 34 に示す。大阪府を一例にとれば中心部で収集されたし尿が一旦近隣のし尿処理施設に集められ，そこから日本海側や兵庫県の西部，和歌山県南部まで二次輸送されていることがわかる。このことは単県だけの輸送モデルではわからなかったことである。

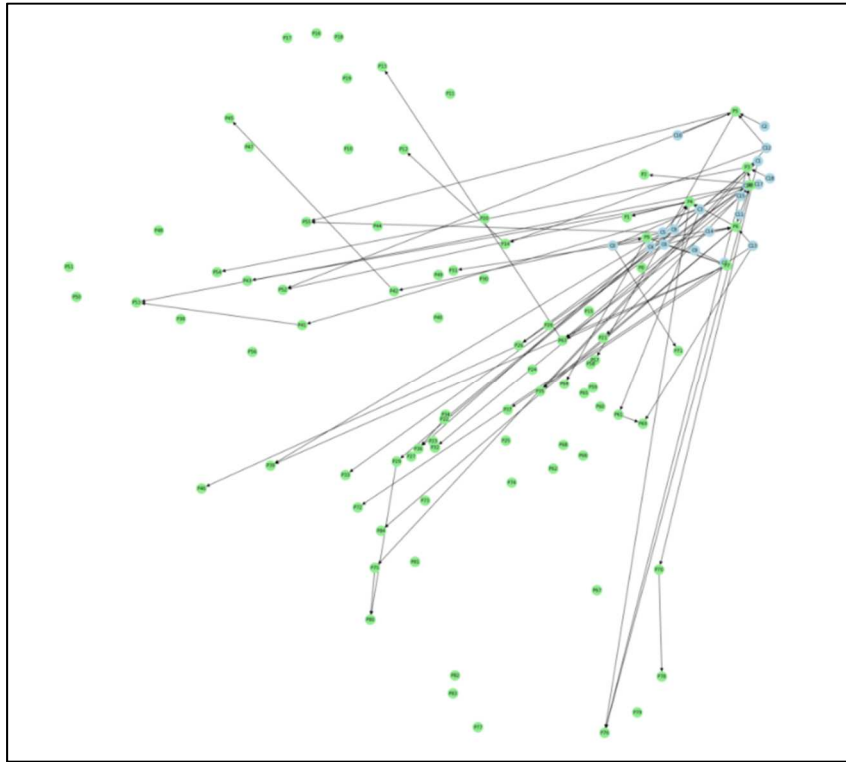


図 29 二次輸送モデルネットワーク図(滋賀県)

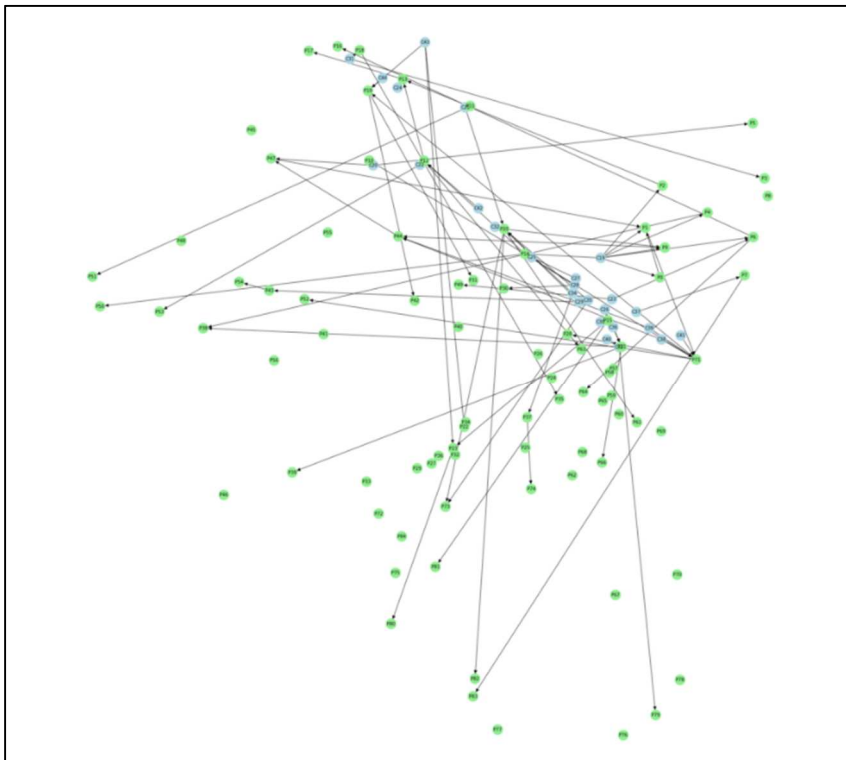


図 30 二次輸送モデルネットワーク図(京都府)

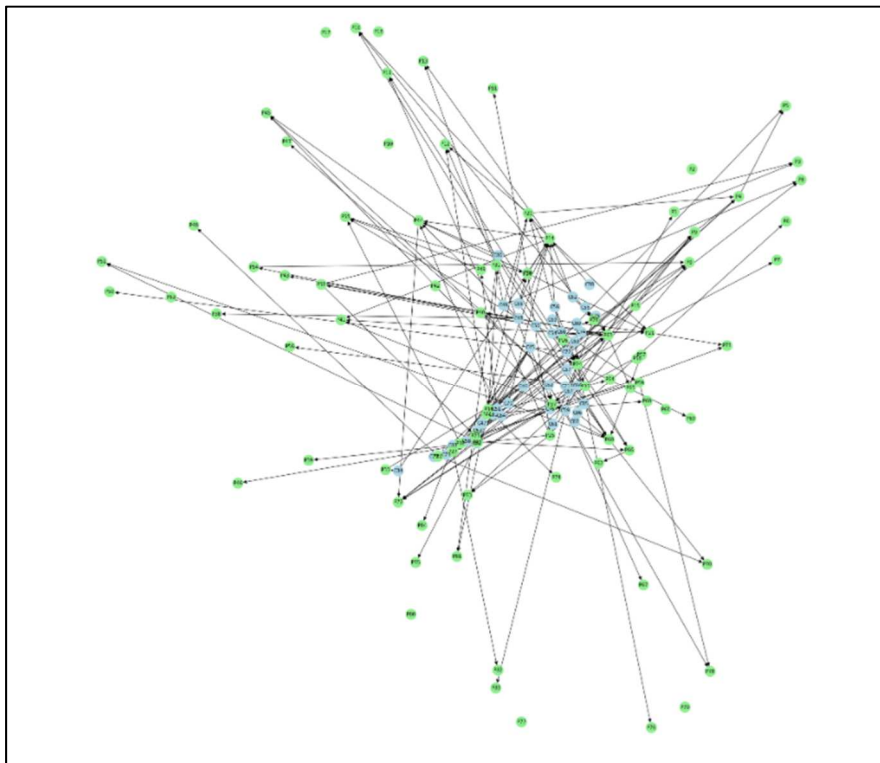


図 31 二次輸送モデルネットワーク図(大阪府)

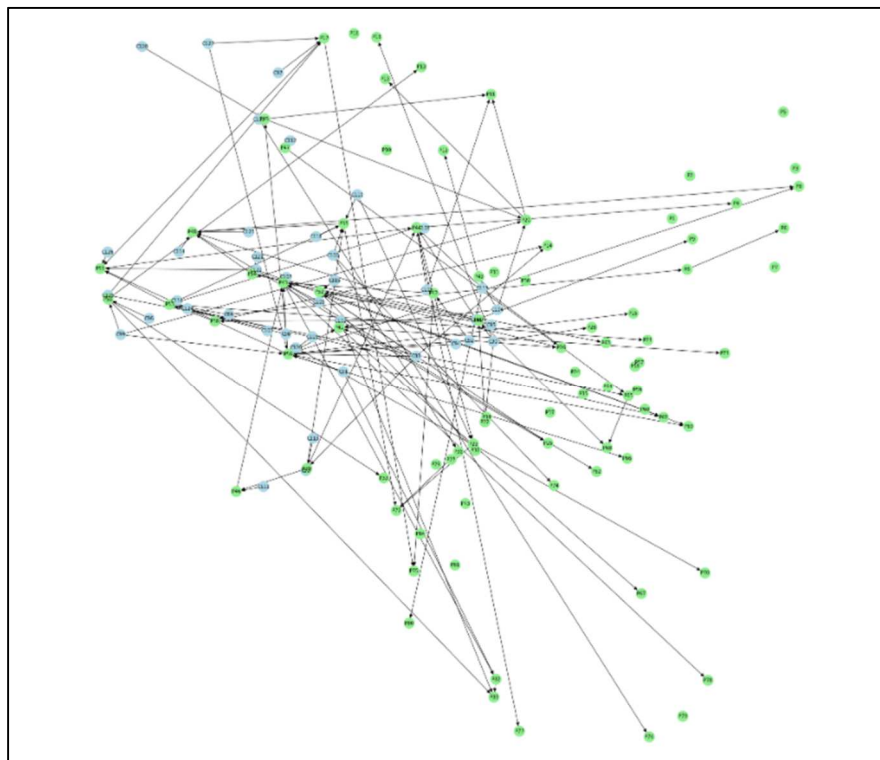


図 32 二次輸送モデルネットワーク図(兵庫県)

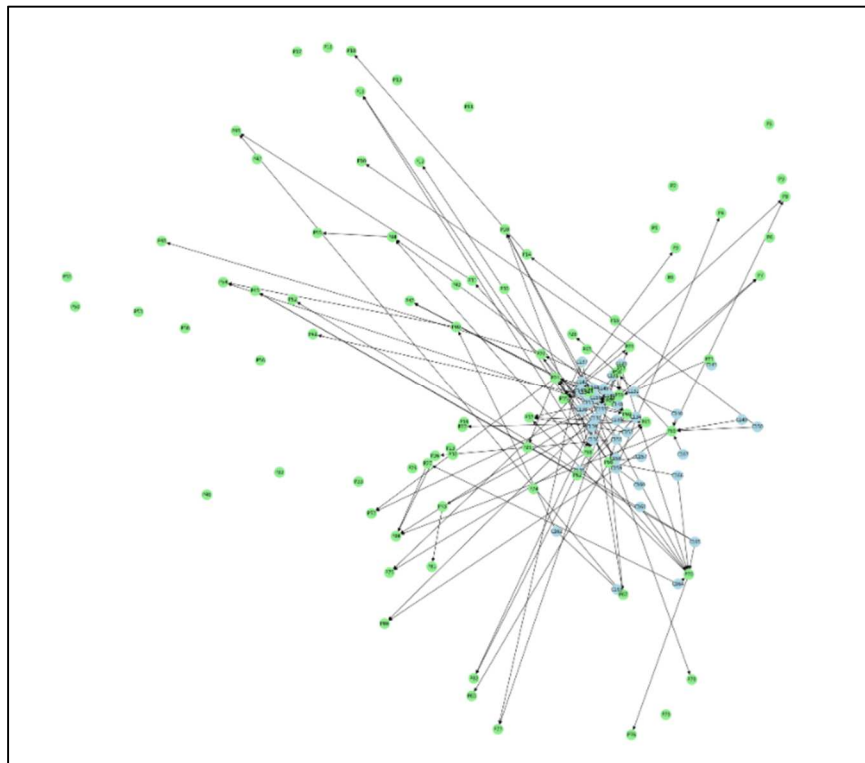


図 33 二次輸送モデルネットワーク図(奈良県)

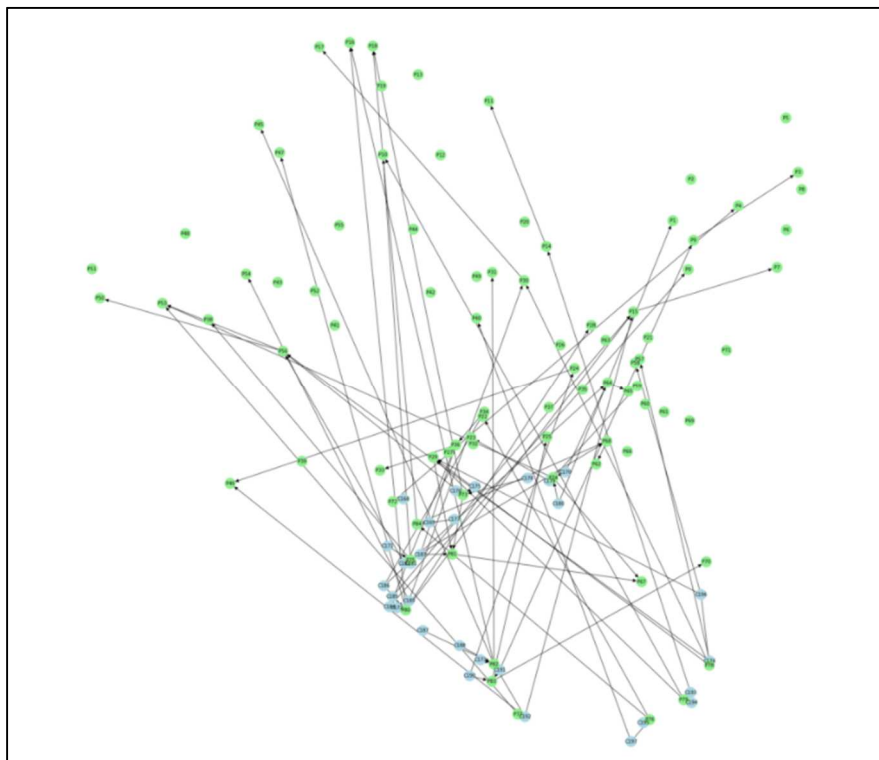


図 34 二次輸送モデルネットワーク図(和歌山県)

case3-2 の設定での解析から得られた施設への一次輸送量を case3-1 の受入能力で除することで、中継施設として重要な施設を特定することができた。最も負荷率の大きい施設では既存の受入能力の 10 倍以上が必要となる。一次輸送量を受入能力で除した結果を施設負荷率として特に大きかった施設、一次輸送量の総量が多い施設について表 21、図 35 に示す。施設負荷率、一次輸送量共に大きい施設については広域輸送を行う上で、特に重要な施設となる。

表 21 二次輸送モデルにおいて重要となる処理施設(上位 10 施設)

施設名	施設負荷率	施設名	一次輸送量(kL)
し尿処理棟	1037%	第 1 事業所	1, 114
衛生センター	505%	し尿処理棟	482
大津市北部衛生プラント	393%	青岸汚泥再生処理センター	368
第 1 事業所	371%	八尾市立衛生処理場	351
交野市立乙辺浄化センター	291%	大津市北部衛生プラント	318
三木市クリーンセンター	258%	交野市立乙辺浄化センター	284
大津市南部衛生プラント	205%	大津市南部衛生プラント	277
能勢町し尿処理施設	175%	三木市クリーンセンター	232
緑泉園	169%	浄化センター	232
河内長野市衛生処理場	169%	奈良市衛生浄化センター	211

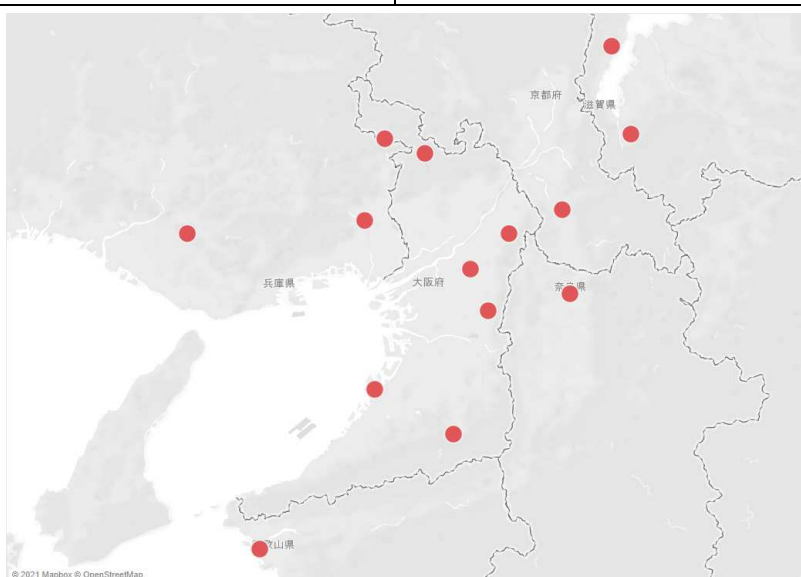


図 35 二次輸送モデルにおいて重要となる処理施設

また case3-1 と case3-2 の比較によって、輸送計画がわずかに簡素化されていることも分かった。それぞれのネットワーク図を図 36、図 37 に示す。計画が複雑になるほど広域での調整は困難となる。また災害時には初動の速さが求められるため、計画の簡素化につながることは大きな価値がある。

以上の分析結果から、処理施設を一時貯留が可能な中継施設として利用した広域輸送モデルが災害時の輸送において輸送コストの削減に寄与することが確認できた。また施設負荷率を求めることにより、二次輸送モデルにおける重要な拠点を特定することができた。しかし、施設の処理能力の変更には施設改修が必要であり、人口減少や下水道の普及が進んでいることから現実的ではない。一方で受入能力については仮設タンクの設置や休廃止施設の中継地利用といった方法で対応が可能であることも重要な視点である。

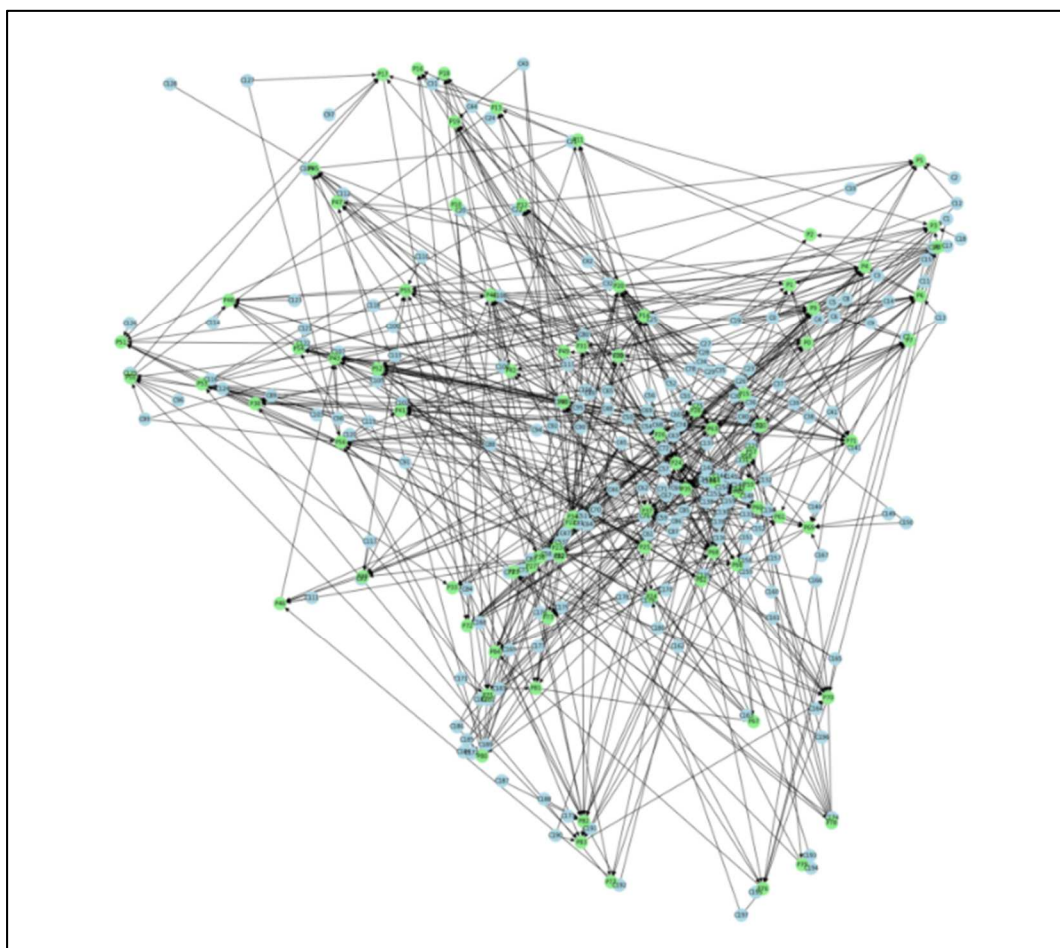


図 36 (case3-1)二次輸送モデルネットワーク図



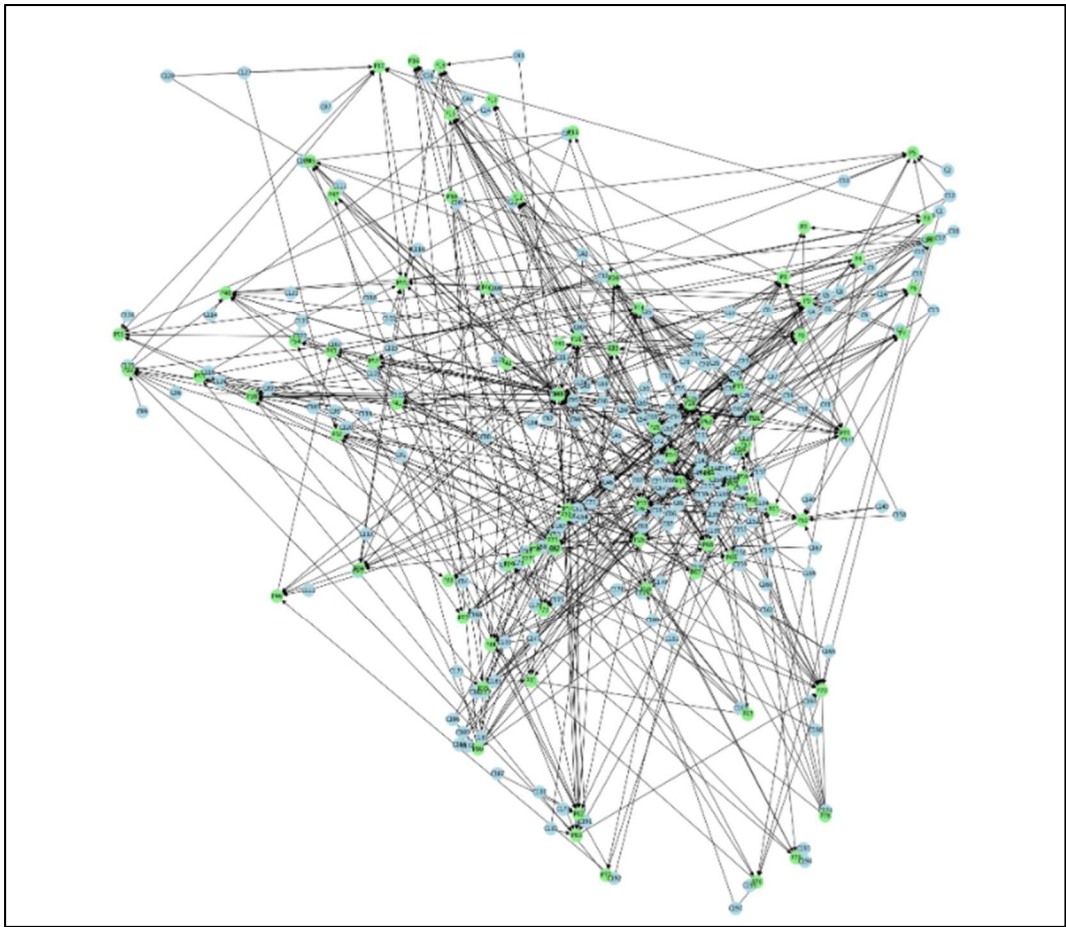


図 37 (case3-2)二次輸送モデルネットワーク図

## 第6章 結論

本研究では南海トラフ巨大地震を想定した生活廃棄物(し尿)について、収集必要量の推計と、既存施設の設備を利用した広域輸送モデルのシミュレーションを行った。本研究の特徴は災害時のし尿収集必要量を用いることで、平時とは異なる発生状況での輸送を検討したことである。また単一の都道府県における輸送モデルではなく、複数の地域にまたがった被害想定とそれに応じた広域輸送モデルについて解析を行うことで新たな課題を見出すことができた。

災害時のし尿収集必要量の推計からは京都府および大阪府において、平時の処理量を大きく上回るし尿が発生することがわかった。そしてその傾向は都市部、特に下水道の普及が進んでいる地域において顕著であることを見出すことができた。一方で汚水処理を農業集落排水施設等や合併処理浄化槽といった方式で行っている地域は、災害時においても一定量の増加分は地域内において処理可能であることもわかった。課題としては、和歌山県のように汚水処理の状況が特異なケースでのし尿収集必要量の推計には検証が必要である。また今回の推計では、市町村ごとの汚水処理状況は考慮できているが、被害想定は府県単位で全て同一の被害想定としている。自治体による災害廃棄物処理計画の策定について第3章で触れているが、早期の策定が望まれる。

災害時に都市部で発生した処理困難な量のし尿については、複数の府県をまたいだ広域連携による最適輸送モデルで解決できることを見出すことができた。これは強靱な災害への備えには単一県モデルではなく、より広域での検討を行うことが、有効であることを示す。ただし、このモデルが機能するためには、自治体の理解と対象地域内での調整が課題となってくる。そのためにも地域ブロック協議会のような都道府県を越えた組織の担う役割は大きい。

併せて中継施設を利用した二次輸送モデルが輸送コストの削減につながることを示すとともに、広域輸送における重要施設を特定することができた。今後起こりうる災害への備えとして、自治体－自治体、自治体－廃棄物処理業者間の協力協定や災害廃棄物処理計画、行動計画を検討するうえでの判断材料となり得る。例えば今回の研究によって災害時には都市部におけるし尿処理が課題となり、処理ためには地方へと広域にその影響が及ぶことが明らかとなった。防災・減災の上で重要な処理施設については所在の自治体のみで行うのではなく、広域連携による防災の観点から関係自治体で一部費用負担をして機能強化をすることや、施設の休廃止をした際にも中継施設機能を持たせる目的で調整槽や貯留

槽を残すという行政判断につながれば、災害時に活かされることになる。また、この手法は災害時のみではなく平時における広域処理、施設改修や老朽化あるいは施設の統廃合といった課題に対しても応用可能と考える。

本研究の対象は近畿地方の2府4県であったが、四国地方においても南海トラフ巨大地震による大きな被害が想定されており、四国4県で広域的に連携をしたとしても処理できない可能性がある。こういった場合には中国ブロックや近畿ブロック等のブロック間の連携が必要となってくる。対象を変えることで新たな知見が得られることを期待し、次の検討課題としたい。

今後の発展として、し尿収集必要量推計の精度向上、災害時の道路啓開状況等の考慮や、処理施設の耐震状況、また各自治体の保有車両等のデータを組み込むことで、より実用性の高いシミュレーションが可能になると考えられる。

## 謝辞

本論文は、筆者が滋賀大学データサイエンス研究科の修士課程において行った研究成果をまとめたものです。本研究を進めるに当たり、多くの方々にご指導、ご協力を賜りました。ここに御名前を記させていただくと共に、深く感謝の意を示します。

主指導教員として、和泉志津恵教授には研究の進め方をはじめとして、様々な面で多くのご指導ご鞭撻を賜りました。また研究以外においてもお心遣いをいただき、有意義な2年間を送ることができました。厚く御礼申し上げます。

京都大学防災研究所・畑山満則教授、廣井慧准教授には、多くのご助言をいただき、ご教授を賜りました。本論文がとらえるべき問題や意義について、ご自身の知見も含め、貴重な意見を賜り、本研究の質を向上させることができました。特に畑山教授には無理なお願いにもかかわらず、快く指導を引き受けていただきました。心より感謝を申し上げます。

東京都立大学・荒井康裕准教授、国立環境研究所・蛭江美孝氏には、研究に関して照会させていただき、詳細な説明を賜りました。ここに記して深謝の意を表します。

今回ヒアリングをさせていただいた行政、自治体の方々には災害時における対策、過去の災害時の状況について照会させていただき、貴重なデータや知見を賜りました。厚く御礼申し上げます。

滋賀県環境整備事業協同組合様には過去災害時の応援や現地の状況等の情報を拝受しました。厚く感謝申し上げます。

最後に、大学院生活にあたってご協力を賜りました滋賀大学の諸先生方、職員方並びに、ゼミ生の皆様、筆者を支えてくれた同期の皆様、職場の方々。皆様のお力添えが無ければこのように充実した2年間を送ることはかないませんでした。心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- <sup>1</sup> 環境省, 災害廃棄物対策指針(改定版), 平成 30 年 3 月
- <sup>2</sup> 廃棄物の処理及び清掃に関する法律
- <sup>3</sup> Brown & Milke & Seville, (2011), *Disaster waste management: A review article*
- <sup>4</sup> USGS, 20 Largest Earthquakes in the World, [https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/science/20-largest-earthquakes-world?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/science/20-largest-earthquakes-world?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects), (参照 2020-01-14)
- <sup>5</sup> 環境省, 災害廃棄物対策情報サイト, 災害廃棄物処理のアーカイブ, <http://kouikishori.env.go.jp/archive/>, (参照 2020-01-14)
- <sup>6</sup> 環境省, 廃棄物処理技術情報, 平成 22 年度調査結果, 一般廃棄物の排出及び処理状況等について(平成 24 年 3 月 24 日現在), [http://www.env.go.jp/recycle/waste\\_tech/ippan/h22/index.html](http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h22/index.html), (参照 2020-01-14)
- <sup>7</sup> 国土交通省(2011), 平成 22 年度国土交通白書, 第 I 部第 1 章第 1 節 2, 2011
- <sup>8</sup> 藤原, 震災時における石巻市内のトイレ事情の変化と衛生管理について, 2011. 3. 11 東日本大震災の危篤・体験記「絆」, 公益社団法人宮城県生活環境事業協会, 2013, 260 頁
- <sup>9</sup> 河田, (2018), 東日本大震災の教訓と南海トラフ地震に備えて, 一般財団法人日本環境衛生センター, 南海トラフ巨大地震と災害廃棄物処理, 6 頁
- <sup>10</sup> 復興庁, (2012), 東日本大震災における震災関連死に関する報告, 平成 24 年 8 月 21 日
- <sup>11</sup> 環境省, 廃棄物処理技術情報, 一般廃棄物処理実態調査結果, [http://www.env.go.jp/recycle/waste\\_tech/ippan/index.html](http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/index.html), (参照 2020-01-14)
- <sup>12</sup> 熊本県, (2018), 被災者の生活の支援, 平成 28 年熊本地震 熊本県はいかに動いたか(初動・応急対応編), 174 頁
- <sup>13</sup> 熊本県, (2019), 平成 28 年熊本地震における災害廃棄物処理の記録
- <sup>14</sup> 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ 南海トラフ巨大地震対策について(最終報告)
- <sup>15</sup> 環境省, (2018), 巨大災害発生時における災害廃棄物対策のグランドデザインについて 中間とりまとめ, 平成 26 年 3 月
- <sup>16</sup> 環境省, 災害廃棄物対策情報サイト, 災害廃棄物処理計画策定状況, 「災害廃棄物処理計画策定状況(令和 2 年 3 月末時点)」, [http://kouikishori.env.go.jp/strengthening\\_measures/formulation\\_status/pdf/formulation\\_status\\_r0203.pdf](http://kouikishori.env.go.jp/strengthening_measures/formulation_status/pdf/formulation_status_r0203.pdf), (参照 2020-01-17)
- <sup>17</sup> 環境省, 災害廃棄物対策情報サイト, 各地域ブロックにおける取組, [http://kouikishori.env.go.jp/action/regional\\_blocks/](http://kouikishori.env.go.jp/action/regional_blocks/), (参照 2020-01-14)
- <sup>18</sup> 平山・河田, (2007), スーパー広域災害における災害廃棄物の広域連携シミュレーションモデルの構築
- <sup>19</sup> 荒井・梅沢・稲員・小泉・蛭江, (2014), 災害時における減災を考慮した広域し尿処理の最適化計画, 土木学会論文集

- <sup>20</sup> 大規模災害時廃棄物対策近畿ブロック協議会，(2018)，平成 29 年度第 2 回協議会配布資料，資料 2，災害廃棄物の処理に係る 2 府 4 県の自治体を対象とした調査，45-47 頁
- <sup>21</sup> 内閣府，南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ，[http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku\\_wg/index.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/index.html)，(参照 2020-01-17)
- <sup>22</sup> 国土交通省，(2020)，令和元年度末の汚水処理人口普及状況について，令和 2 年 9 月 4 日
- <sup>23</sup> 公益社団法人宮城県生活環境事業協会，(2013)，2011.3.11 東日本大震災の危篤・体験記「絆」，105-132 頁