

低物質・低炭素社会に向けた建設副産物の地域循環圈に関する研究
(A Study on Regional Resource Recycling Zones of Construction Byproduct
Aiming at a Dematerialized and Decarbonized Society)

奥岡 桂次郎
(OKUOKA, Keijiro)

名古屋大学大学院環境学研究科 博士（工学）

2013 年

要旨

低物質かつ低炭素な社会の実現に向けた取り組みは OECD 諸国を中心に数多くなされており、我が国では循環型社会の構築へ向けて積極的な施策が実行されている。資源生産性や循環利用率は資源を効率的に利用するために有効的な指標であり、我が国では物質フローを把握することで短期的な目標を達成しつつある。特に、投入量と排出量の観点から重要である「建設副産物」は、効率的な循環利用が図られている。重量比で占める割合が大きいコンクリート塊の循環利用率は、平成 20 年度に 97.3% と非常に高い値を示している。

他方、資源を効率的に利用するために、「地域循環圏」という概念が検討されており、低物質・低炭素な地域の実現に向けて最適な圏域が検討されている。地域循環圏では、対象とする品目の種類別に循環圏を形成し、それらの重ね合わせによって、より効率的な循環利用が達成可能であるとしている。しかし、対象とされやすいのは、家庭廃棄物であるプラスチックや食品廃棄物あるいは家電機器、産業廃棄物である重化学工業に伴う副産物、里地里山里海の利用によるバイオマス資源であり、建設副産物であるコンクリート塊はあまり対象とされていない。コンクリート塊に代表される建設副産物は、循環利用率は増加しているが、その動態は正確に把握されておらず、存在している地域や発生する年代による偏在が大きいことから、その将来的な循環利用の圏域を把握することは重要である。

本論文では、都市における建物需要量の推計モデルを構築し、その利用により将来における空間的な建設副産物の循環利用を分析して、地域循環圏の検討を行った。特に、循環利用による地域のマテリアルバランスの改善と、圏域の最適規模推計の評価を行った。

民生部門の人間活動を示す建物需要量の推計モデルは、多くの既往研究があるが、行政界で区切られていることが多い。都市の階層性に基づくことで、人口の動態をより正確に把握することが可能となり、人口が集積・分散したことによる需要量への影響を広域で評価できる。また、できうる限り詳細なデータを必要とせず、適応性の高いモデルの構築を行った。このモデルを「仮想都市モデル」とし、人口がダイナミックに変動した際の、資源蓄積量やエネルギー消費量に基づく、環境負荷量を推計可能である。コンクリート塊需要供給比(*RIO*: Ratio by value of Input to Output of concrete mass)と地域循環圏の圏域の規模(*AReZ*: Aresize of Regional Resource Recycling Zone)をコンクリート塊の循環利用のリサイクル性指標として用いることで、最適な地域循環

圏の評価を行った。

本論文では、以下に示す7章で構成されている。

第1章では、背景として低炭素かつ低物質な社会のあり方とその実現へ向けた現状を述べると共に、資源の循環利用と地域循環圏について考察を行った。圏域を対象とした分析とそのモデル化について説明した。また、研究の目的と論文の構成を示すことで、本論文の位置づけを示した。

第2章では、コンクリート塊の地域循環圏に関して基礎的な情報を整理し、コンクリート塊の循環利用の現状をまとめた。また、その検討の中に地域循環圏が触れられていないことを指摘し、その基盤となる人間活動モデルの必要性を説明した。

第3章では、都市の圏域に関する理論的基礎を整理し、都市の階層性を用いた都市圏の決定について述べた。

日本における圏域は、ある一視点によって決められている場合が多く、産業特性・社会特性を組み込んだ都市の階層性は考慮されていない。多変量解析を用いて産業的特徴・社会的特徴による都市の類型化を行い、集約された情報から評価する都市の階層性を示した。

都市間の関係性について、重力モデルを応用して定義した都市間力により、都市の階層性における都市間の従属性を示した。これにより、新たな都市圏の決定を検討した。

第4章では、都市における建物需要量の推計モデルを構築した。仮想的な都市圏内の人口の集約・分散を表現することで、人口・面積など限られた情報で人間活動量としての建物延床面積あるいは人間活動量による環境負荷量の定量化を行った。モデル内部においては、人口の分布に応じて建物延床面積の需要量に変化し、人口密度の影響により環境負荷が変化する計算を行う。

低物質かつ低炭素な都市圏の評価方法として、一人あたりの二酸化炭素排出量や一人あたりのマテリアルストック需要量を用いており、都市圏の持続性を考慮した際に、適した人口規模や人口分布を検討した。

第5章では、東海三県をケーススタディとしたコンクリート塊の地域循環圏について検討した。本研究では、建物が廃棄されることに伴い建設副産物として排出されたコンクリート塊を、再生砕石として道路着工に投入することを、コンクリート塊の循環利用として、その時空間の分布を評価した。既存の都市分布の中でコンクリート塊の循環利用によるマテリアルバランスを評価するために、名古屋市都市圏を含む東海

三県を対象として分析を行った。

第6章では、コンクリート塊の地域循環圏について5章から拡張して日本全国を対象に検討を行い、その最適な規模について検討を行った。コンクリート塊需要供給比 (*RIO*: Ratio by value of Input to Output of concrete mass)と地域循環圏の圏域の規模 (*AReZ* : Aresize of Regional Resource Recycling Zone)をリサイクル性指標として、新たに開発したコンクリート塊の循環利用最適化モデルを適応することで、コンクリート塊の循環利用について評価した。

コンクリート塊の循環利用最適化モデルは、マルチエージェントシステムを用いており、個々の輸送の挙動から全体が最適化される地点について考察した。

第7章では、各章のまとめと展望について述べた。本論文では、圏域における建物需要量の推計モデルを構築しており、その利用による建設副産物の循環利用について、コンクリートを対象に地域循環圏を検討したことを示した。

目次

1. 序論	1
1.1 背景	1
1.2 建設副産物の循環利用	3
1.3 地域循環圏	5
1.4 人間活動による圏域	6
1.5 研究の目的	7
1.6 論文の構成	8
2. コンクリート塊の地域循環圏	11
2.1 循環型社会形成推進基本計画	11
2.2 地域循環圏	11
2.3 建設副産物の循環利用	13
2.4 建物需要量推計モデル	14
3. 都市の圏域に関する理論的基礎	16
3.1 日本における圏域の定義	16
3.2 都市の階層性	18
3.3 都市類型化	19
3.3.1 使用データ	19
3.3.2 類型結果	19
3.3.3 大都市圏による地域構造の比較	21
3.4 都市間の結びつき	23
3.5 都市圏の決定	24
4. 仮想都市モデルを用いた環境負荷定量化	28
4.1 仮想都市モデルの概要	29
4.2 都市圏内における人口分布の推計	29
4.2.1 コアと周辺への配分	30
4.2.2 DID 地区への配分	33
4.3 家庭部門における環境負荷量の推計	36
4.4 業務部門における環境負荷量の推計	38
4.5 仮想都市モデル	39
4.6 低環境負荷都市圏の検討	40
4.7 都市圏におけるマテリアルストック需要量の最小化	40
4.8 都市圏における二酸化炭素排出量の最小化	43
4.9 まとめ	45

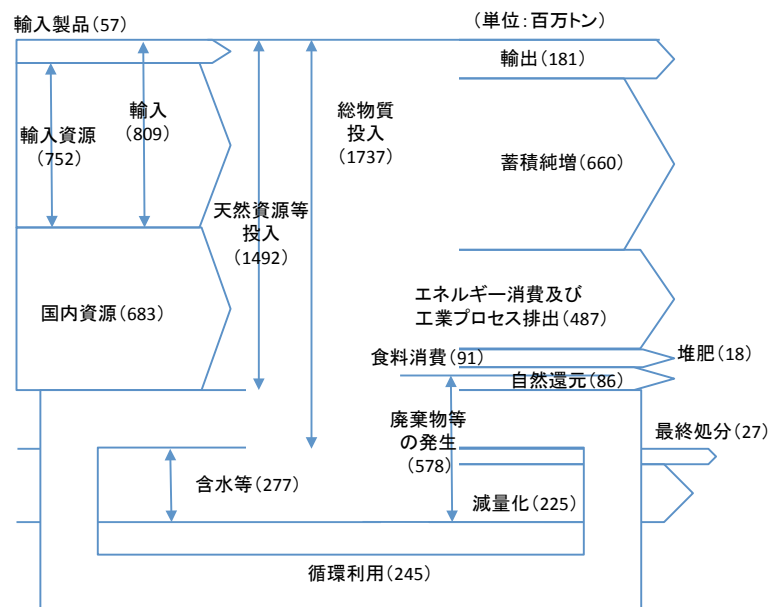
5. 東海三県をケーススタディとしたコンクリート塊の地域循環圏の検討	47
5.1 既往研究	48
5.2 都市圏内における人口分布の推計既往研究	49
5.2.1 将来年度における世帯数の推計	49
5.2.2 構造別着工量の推計	51
5.2.3 建設副産物量の推計	51
5.2.4 再生砕石需要量の推計	53
5.2.5 コンクリート塊需給の検討	54
5.3 推計結果	55
5.3.1 ケーススタディ・シナリオの設定	55
5.3.2 需給検討に必要な諸値の推計結果	56
5.3.3 コンクリート塊需給の推計結果	58
5.4 コンクリート塊需要供給費	60
5.4.1 需要供給費の空間分布	60
5.4.2 需給バランスの空間分析	61
5.4.3 建物寿命シナリオにおける検討	62
5.5 まとめ	63
6. コンクリート塊の地域循環圏の最適規模の検討	66
6.1 建設副産物将来推計モデルの拡張	66
6.1.1 リサイクル性指標	67
6.2 コンクリート塊の循環利用最適化モデル	68
6.3 推計結果	70
6.4 コンクリート塊の地域循環圏	73
6.5 まとめ	83
7. 結論	84
7.1 まとめ	84
7.2 今後の課題	86

1. 序論

1.1. 背景

地球上ではグローバル経済に伴う、多量の資源消費による経済活動を営んでいる。世界人口は62億人を突破し、2050年には100億人を超える試算がされている。これによる資源消費の増大、とりわけマテリアル・エネルギーの消費量の増大は大きな環境負荷をもたらすため、COP など、OECD 主要先進国を中心に低物質・低炭素社会の実現へ向けた議論がなされている。ワイツゼッカーら(1998)は、環境負荷の原理を要因分析的に人間活動総量と活動量あたりの環境負荷に分けることで、それぞれが効率を2倍にすることで環境負荷を4分の1にする「ファクター4」という概念を提唱し、さらにイノベーションを付加することによる「ファクター5」へとその概念を昇華させている。シュミット＝ブレーク(1997)は、持続可能な経済社会を実現するには天然資源の利用効率を10倍に高めることが必要であるとし、ファクター10の概念を提唱している。その評価手法として、「MIPS: Material Input Per Unit Service」を開発し、サービス単位当たりの物質投入量を定量化することで、経済のエコロジー評価を行うための指標となるとしている。我が国では、低炭素型社会の実現や循環型社会の構築などの社会構造の変化によって持続可能な社会の実現を目指しており、資源生産性に代表される環境利用効率は大きく改善している(環境省、2010)。

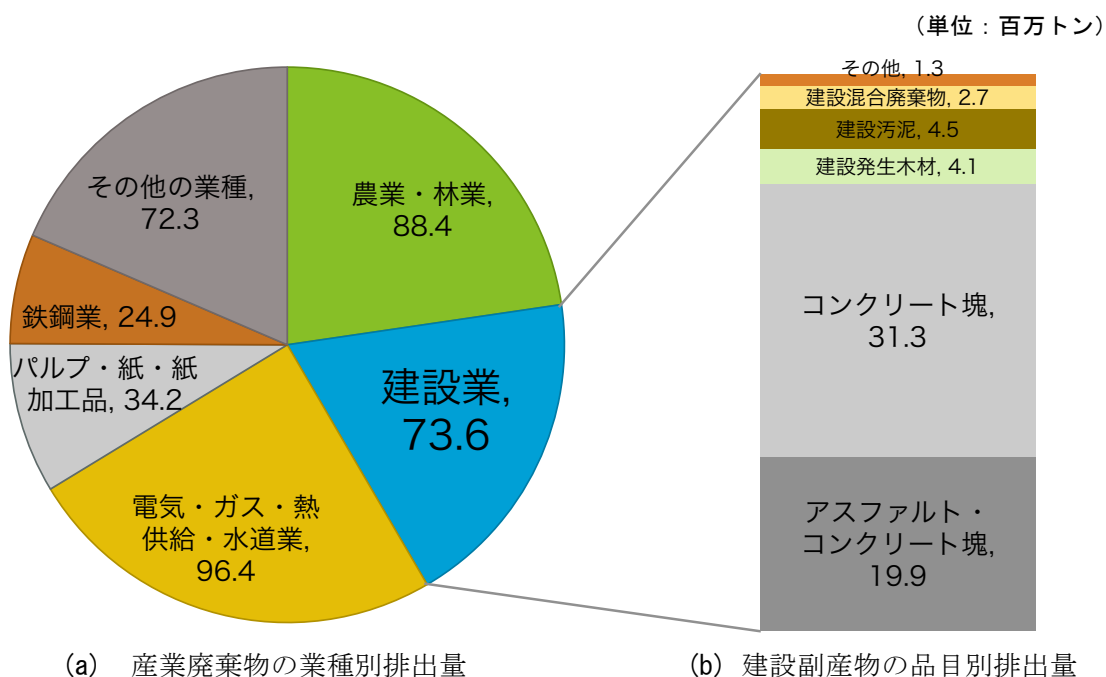
我が国の物質フローを図 1-1 に示す。物質フローにより、自然界から人間社会に物質が移動する天然資源の採取の段階から、最終的に人間社会から自然界に廃棄される最終処分の段階までを把握することが可能となる。前述の資源生産性等の環境利用効率指標は物質フローを基に計算されており、我が国の資源循環を評価する上で重要である。循環型社会の構築に伴い、天然資源等投入量が可能な限り抑制できる。循環利用量の上昇による廃棄物等発生抑制と、蓄積純増やエ



出典：平成 23 年度環境・循環型社会・生物多様性白書

図 1-1 我が国の物質フロー図（平成 20 年度）

エネルギー消費及び工業プロセス排出の抑制の結果，総物質投入量が削減される．総物質投入量の削減は，総じて消費エネルギーの削減であり，循環型社会の構築は低炭素社会の実現とも密接に関係している．つまり，循環利用の促進による低物質・低炭素な社会こそが持続可能な社会の実現に結びつく．投入と排出の現況を比較すると，総物質投入量は平成 12 年度の約 21 億トンに対して平成 20 年度に約 17 億トンであり，約 19%の減少ではあるが，その削減は十分ではない．また，廃棄物等の発生は平成 12 年度の約 6.0 億トンから平成 20 年度の約 5.8 億トンとあまり減少しておらず，循環利用量が 2.1 億トンに対して 2.5 億トンと微増である．今後の循環利用を促進する必要があることから，廃棄物量の把握は重要であり，その内訳をみると，その約 70%が産業廃棄物である(環境省，2011)．産業廃棄物の業種別排出量を図 1-2(a)に示す．図では，電気・ガス・熱供給・水道業，農業に次いで，建設業が 18.4%を占めている．建設業における産業廃棄物のほとんどは建設副産物であり，図 1-2(b)で示される．建設副産物の約 80%をアスファルト・コンクリート塊またはコンクリート塊が占めており，その総量は約 5,100 万トンである．これは全廃棄物の約 10%程度であり，非常に高い割合を占めている．



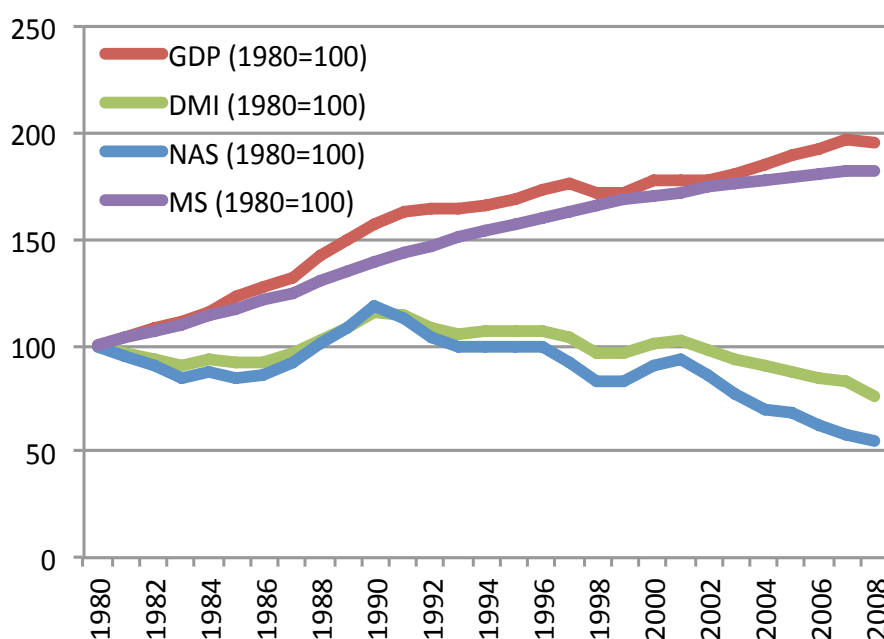
出典：平成 23 年度環境・循環型社会・生物多様性白書

平成 20 年度建設副産物実態調査

図 1-2 平成 20 年度の産業廃棄物量

一方，総物質投入量(Direct Material Input: DMI)の 40%近くは蓄積純増(Net Additional to Stock: NAS)であり，建築物や社会基盤などとしてストックされている．蓄積純増による資源蓄積量はマテリアルストック(Material Stock: MS)として，サービスや効用を発生させる経済活動の基盤として重要である．図 1-3 は日本における国内総生産(Gross Domestic Product: GDP)，総物質投入量(DMI)，蓄積純増(NAS)，マテリアルストック(MS)について 1980 年を 100 とした推移を示したものである．GDP とマテリアルストックは継続して増加しており，2008 年時点でそれぞれ 554 兆円と 150 億ト

ンである。一方、総物質投入量と蓄積純増は 2000 年あたりまではおよそ横ばいであり、その後減少に転じている。2008 年時点でそれぞれ、総物質投入量は 14 億トン、蓄積純増は 7 億トンであり、これらの減少がマテリアルストックの値について一定の収束を示す原因となっている。今後もこの傾向が続くと予想され、将来マテリアルストックは一定の量で飽和ないしは減少に転じる可能性があり、適切な資源蓄積量を把握することは重要である。特に、前述した建設分野における物質フローは大規模であり、都市構造物の更新は、資源搾取や土地改変、資材輸送コストや資材製造段階でのエネルギー消費あるいは建設副産物・廃棄物の発生などの諸問題に密接に関係しているため、これらの改善が持続的な社会の実現に果たす役割は非常に大きい。しかし建設分野でもとりわけ建築物は人口の動態に大きく関係しており、人口分布の変化に伴う建築物の動態を把握することは非常に重要である。



出典：谷川ら (2010)

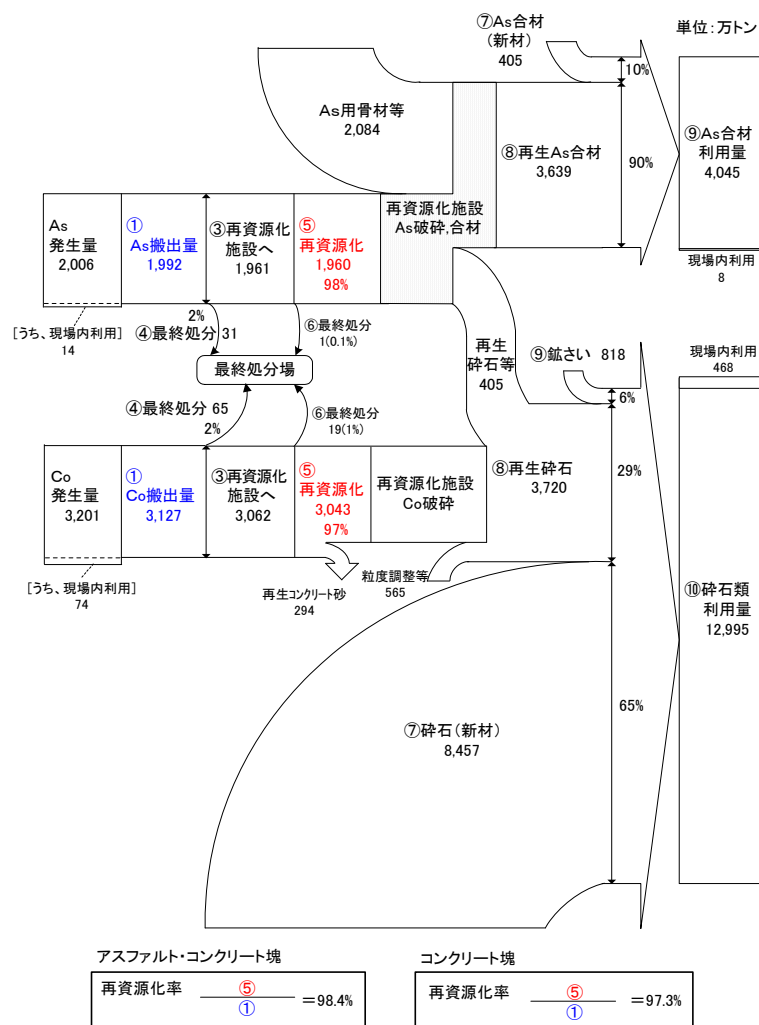
図 1-3 マテリアルストックフローに関する指標

1.2. 建設副産物の循環利用

建築物解体による排出物は、昭和 40 年代以降に急増した建築物が更新期を迎えており、今後とも発生量が増加することが予想されている。平成 12 年に制定された「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」(建設リサイクル法、2000)では、一定規模以上の工事において特定建設資材の分別解体および再資源化等(縮減で足りる場合も規定)が義務づけられた。特定建設資材は、建設副産物のうち約 80%を占め、再資源化技術が確立・普及しており、再資源化等の義務化による過度な負担が無い、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊及び建設発生木材の 3 項目が指定されている。特定建設資材のうち、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊は、平成 12 年度以降高い再資源化率を維持しており、平成 20 年度の値はそれぞれ 97.3%、98.4%で

ある。建設発生木材の再資源化率は、平成 12 年度以降上昇傾向にあり、平成 12 年度の 38%から平成 20 年度には 80.3%となっている。建設副産物全体の再資源化率等は、平成 12 年度の 85%から、平成 20 年度には 93.7%にまで上昇している（国土交通省，2010）。つまり、今後は高い再資源化率を維持しながら、効率的な循環を考えていく必要があり、建設副産物の約 50%を占めるコンクリート塊は、特に検討が必要である。

コンクリート塊の発生からリサイクルまでの流れを整理する。コンクリート塊は主に構造物解体の際に発生する。一部建設混合廃棄物として処理される量が存在するが、分別解体が進んでおり、建設時に投入された量の大部分が回収されると考えられる。分別解体されたコンクリート塊は再資源化施設に輸送され、再生砕石、再生コンクリート砂、再生コンクリート骨材に加工される。再生コンクリート骨材は、加熱すりもみ方式等によってコンクリート中の骨材を分離回収したものである。その利用用途は多く考えられるが、再生コンクリート骨材の利用は再資源化施設が工事現場から 40km 以内に存在する場合のみ想定されていることや、経済性等の問題があるため、現状ほとんどが再生砕石と再生コンクリート砂となり、再生砕石は道路路盤材に投入され、



出典：平成 20 年度建設副産物実態調査結果参考資料 (2010)

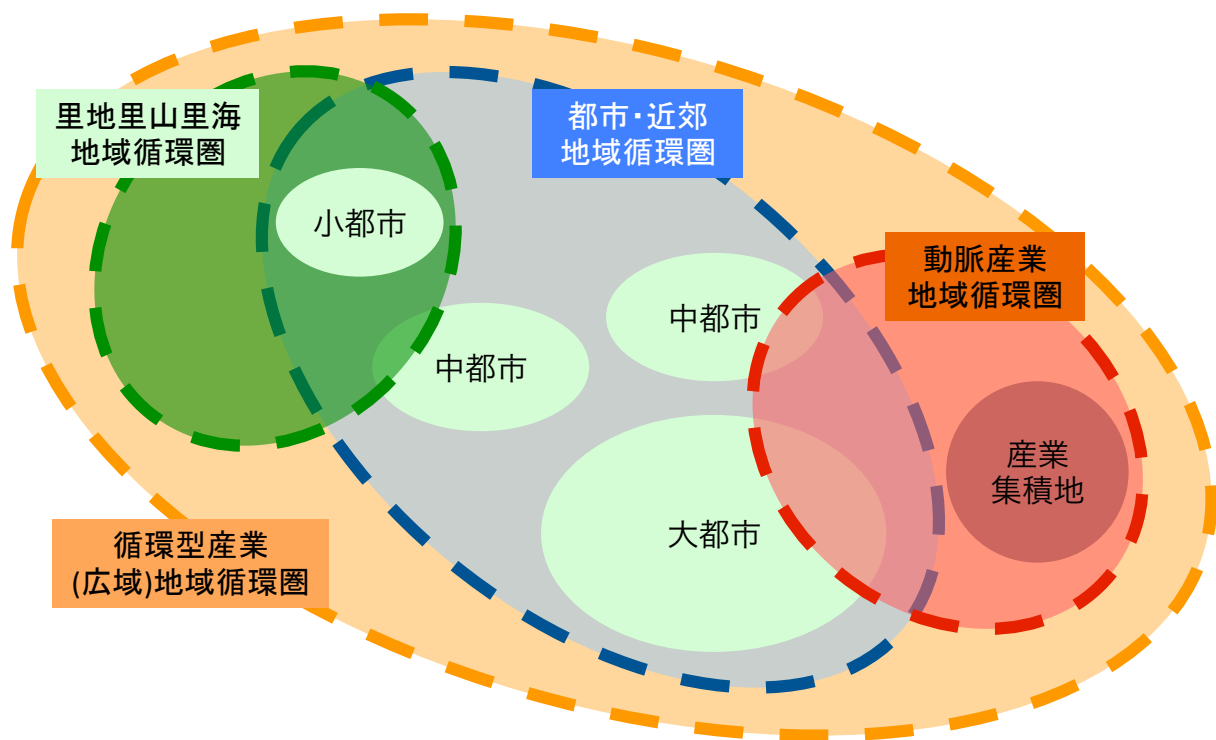
図 1-4 アスファルト・コンクリート塊及びコンクリート塊のリサイクルフロー

再生コンクリート砂は埋め戻し材料等となる。平成 20 年度建設副産物実態調査（図 1-4）によると、現場から搬出されたコンクリート塊のうち、約 9%が再生コンクリート砂、約 90%が再生砕石であり、再生砕石を中心として循環利用の検討を行う必要がある。我が国の交通網は都市部を中心に整備が進んでおり、今後道路改良事業が活発化することは考え難い。そのため、道路改良事業量は現状維持もしくは減少することが想定される。コンクリート塊の供給量は増加が予想され、道路路盤材への再生砕石需要量は減少が予想されているため、コンクリート塊の余剰が多量に発生することが危惧されている。したがって、天然資源投入量の削減や、処理・輸送に関わるコストや環境負荷の低減を考える上で、コンクリート塊の発生量と、必要とされているコンクリートの量を空間的に把握することは循環型社会に向けた一つの課題であるといえる。

1.3. 地域循環圏

環境負荷の低減を空間的に捉える考え方に「地域循環圏」がある。地域循環圏とは、第 2 次循環型社会形成推進基本計画(2008)において検討されており、「個々の資源に適した循環圏を構築することによって、環境負荷や社会的コストの削減を達成する」という概念である。資源を有効的に活用するという点で、地域循環圏は、低物質・低炭素な地域の実現に向けた、最適な圏域の検討と考えられる。地域循環圏では、比較的处理が容易な排出物は小さな地域単位で循環させ、処理に規模や高度な技術を要するものは広域的に循環させることで、それらに関わる輸送、処理、埋立てによる社会的コストや環境負荷を小さくし、効率的な社会の実現を目指すものである。循環圏の範囲は、地理的、社会的、経済的に密接なコミュニティレベルの小さな単位のものから、国境を超えてその処理システムを構築することが必要となるような大きな単位のものまで様々である(図 1-5)。そのため、現在の資源循環を把握することと、経済性や効率性を満たすような循環圏を評価することが求められている。ここで、資源循環の把握を行う上で重要となる情報は、排出物の発生地・処理地・消費地の空間分布やそれらに関わる重量が考えられる。地域循環圏は、地理情報と密接に関わった概念であり、切り離して考えることはできない。その空間分布に重量が重なることによって、供給過多になる地域や需要超過となる地域、処理能力を超える排出物が発生している地域を可視化し、有効かつ合理的な政策提言を行うことを可能にする。

図 1-5 より、地域循環圏の種類には、1)里地里山里海循環圏、2)都市・近郊地域循環圏、3)動脈産業地域循環圏、4)循環型産業(広域)地域循環圏などがあげられる。循環圏において、循環資源の対象としてより多く検討がなされているのは、1)ではバイオマス資源など、2)では食品廃棄物やプラスチックなどの家庭廃棄物、3)では重化学工業に伴う副産物など、4)ではエコタウン施設に集積される家電機器などである。これらは、家庭や工場など、分布に応じて時間軸に沿ってある程度定常的に発生が期待できる循環資源であり、Chen ら(2012)など分析の対象としても研究が進んでいる。一方、廃棄物の多くを占める建設副産物は、廃棄される時間分布が複雑であるため、都道府県などの地域における分析にとどまっており、中でもコンクリート塊を対象とした将来の地域循環圏についてさらなる検討が必要である。



参考：環境省「地域循環圏形成推進ガイドライン」（2012）

図 1-5 地域循環圏の類型パターンと重層的な構成イメージ

1.4. 圏域に関する既往研究

物質フローの観点から、資源エネルギーは建築物など社会基盤を中心として、消費・蓄積されている。社会基盤は人口の集積した都市地域に多く分布しており、都市では大量のエネルギーが消費されると共に多量のマテリアルが蓄積されている。つまり、マテリアル・エネルギーは都市を中心に消費されており、都市の拡大と都市人口の増加はよりその傾向を大きくしている。1970年に20%であった世界都市人口割合は、2010年には50%を越え、2020年には70%を越えるとされている。拡大する都市は、都市群として都市機能の集中と分散をしており、都市間のつながりの組み合わせの中で都市圏を形成している。この圏域は人間活動の主軸をなしており、それに伴うエネルギー消費量や、それを可能とするマテリアルストックについても、各圏域を対象にとらえ、将来に向けたそのあり方を検討することは大変重要である。

人間活動総量は主として人口規模と経済規模に起因し、世界規模での人口増加・発展途上国の経済成長により、さらに増加する。つまり、活動量あたりの環境負荷を低減することと技術革新こそが、唯一の可能性である。技術革新については、資源利用効率やエネルギー生産効率などに期待が集まるが、活動量あたりの環境負荷については検討の余地が多い。特に、人間活動の効率はその空間的な密度に負う部分が大きく、人口密度や産業構造など、将来の政策的動向に大きく影響を受ける。特に、人口密度は居住形態、ライフスタイル、通勤・通学など多くの活動に影響を与えるため、その把握は大変重要である。つまり人口規模は小地域別の人口の和で示され、小地域ごとの人口密度（圏域内の人口分布）が地域全体（圏域）の活動効率に影響を及ぼす。将来

的に圏域内の人口分布が変化することで、地域の環境負荷の効率に与える影響がある。

以上から、人間活動の範囲として圏域を対象として環境負荷を考慮することは重要である。しかし、これまでの圏域は金本ら(2002)に代表されるように、経済圏や都市圏など呼称は様々であるが経済活動を要因に決定していることが多い。金本らは中心地区と通勤で結ばれる周辺地区を合わせた都市圏を「都市雇用圏」と定義した。しかし、環境負荷を地域全体で捉えるという点においては、通勤などの経済活動とは異なる圏域の評価が必要である。特に、地域循環圏はこうした必要性に応える概念ではあるが、マテリアル・エネルギーの観点から大きな領域である建設業部門に関して十分に検討が進んでいない。その理由としては、以下の2点の建設副産物の特徴が関係していると考えられる。1点目は、その排出に関して時間的な偏りが存在することである。他の排出物の発生量は、自然条件や経済状況の要因を除けば人口動態からみる需要に従い毎年ごとに大きな変化はなく、安定的な処理を想定して分析をすることができる。一方、建設副産物の発生は、その建設年度に大きく依存するため、耐用年数に伴い消費に対して遅れ時間が発生することから、処理に関わる分析を長期的に行う必要がある。2点目は、空間的な偏りが存在することである。建設物は人口の集中する都市部に多く存在するなど、人口分布に大きく影響を受けるため、その処理は都市部を中心として空間的に検討しなければならない。さらに、1点目に関連して、将来人口分布が変化した際に、循環利用を考慮するために将来の需要を空間的に推計する必要がある。

以上の特徴をもつ建設副産物は、その特徴を踏まえ処理方法の検討や再利用の効率化を行うことで、地域循環圏の検討により天然資源等投入量の削減や環境負荷の低減を期待できると考えられる。そのためには、圏域を対象とした人間活動推計のフレームが必要であり、中でも民生部門の人間活動を示す建物需要量推計について都市や都市圏のモデル化が重要となる。大西ら(2010)や谷川ら(2011)は、名古屋市における都市構造の転換に応じた、二酸化炭素排出量やマテリアルストックの推計フレームを構築しているが、単一の都市にとどまっており、圏域を対象としていない。圏域における将来の人間活動と環境負荷を組み合わせた既往研究として戸川ら(2010)があるが、外性的に必要となる変数が多く、設定された地域では分析が可能であるが、それ以外の適応性に関してはそれほど大きくない。また、地域内における人口分布の変化や人口密度に影響して環境負荷を捉えた研究はそれほど多くない。これらから、都市・都市圏を対象とした適応性の高い建物需要量推計フレームのモデル化により、二酸化炭素排出量や資源蓄積量を推計することは非常に重要である。

1.5. 研究の目的

資源循環のあり方を考慮する上で、廃棄物における排出物の占める割合の大きい建設副産物を対象とすることは需要である。さらに、地域循環圏として空間的に資源循環の検討をすることが今後の廃棄物処理における展望であるが、以上の議論にあるように建設副産物に関してはその検討が十分ではない。そこで、本研究では、建設副産物から発生量の多い建築物のコンクリート塊

を対象に、地域循環圏の検討を行う。特に、人間活動を圏域で把握するモデルが必要であり、仮定の都市圏を想定して、汎用性の高い建物需要量推計モデルを構築することを目的のひとつとした。また、地域循環圏の検討については、既存の圏域をケーススタディとして対象とした後に、日本全国を対象にすることで段階的に分析を行った。その際に、循環効率の指標として排出物の需要供給比を時系列に算出し、地域別の差異を空間分布として見ることで、将来の地域循環圏の検討を行った。

1.6. 論文の構成

本章では、以下に示す7章から構成されている。

第1章では、背景として低炭素かつ低物質な社会のあり方とその実現へ向けた現状を述べると共に、資源の循環利用と地域循環圏について考察を行った。圏域を対象とした分析とそのモデル化について説明した。また、研究の目的と論文の構成を示すことで、本論文の位置づけを示した。

第2章では、コンクリート塊の地域循環圏に関して、基礎的な情報を整理した。コンクリート塊の循環利用の現状をまとめると共に、その検討の中に地域循環圏が触れられていないことを指摘し、その基盤となる人間活動モデルの必要性を説明した。

第3章では、都市の圏域に関する理論的基礎を整理し、都市の階層性を用いた都市圏の決定について述べた。

日本における圏域は、ある一視点によって決められている場合が多く、産業特性・社会特性を組み込んだ都市の階層性は考慮されていない。多変量解析を用いて産業的特徴・社会的特徴による都市の類型化を行い、集約された情報から評価する都市の階層性を示した。

都市間の関係性について、重力モデルを応用して定義した都市間力により、都市の階層性における都市間の従属性を示した。これにより、新たな都市圏の決定を検討した。

第4章では、都市における建物需要量の推計モデルを構築した。仮想的な都市圏内の人口の集約・分散を表現することで、人口・面積など限られた情報で人間活動量としての建物延床面積あるいは人間活動量による環境負荷量の定量化を可能とした。モデル内部においては、人口の分布に応じて建物延床面積の需要量に変化し、人口密度の影響により環境負荷が変化する計算となっている。

低物質かつ低炭素な都市圏の評価方法として、一人あたりの二酸化炭素排出量や一人あたりのマテリアルストック需要量を用いており、都市圏の持続性を考慮した際に、適した人口規模や人口分布を検討した。

第5章では、東海三県をケーススタディとしたコンクリート塊の地域循環圏について検討を行った。本研究では、建物が廃棄されることに伴い建設副産物として排出されたコンクリート塊を、再生砕石として道路着工に投入することを、コンクリート塊の循環利用として、その時空間の分布を評価した。既存の都市分布の中でコンクリート塊の循環利用によるマテリアルバランスを評価するために、名古屋市都市圏を含む東海三県を対象として分析を行った。

都市部ほど供給過多つまり再生砕石が過剰であり，周辺部ほど需要過多つまり再生砕石が不足していることが示された．コンクリート塊輸送の結果としては，20km 程度の輸送ではあまりバランスが改善されず，40km 以上の輸送が必要であることが示された．将来については，建物寿命を長期化することで大きく改善され，20km での圏域でも多くの循環が見られた．

第 6 章では，コンクリート塊の地域循環圏について 4 章から拡張して日本全国を対象に検討を行い，その最適な規模について検討を行った．コンクリート塊需要供給比(*RIO*: Ratio by value of Input to Output of concrete mass)と地域循環圏の圏域の規模(*AReZ*: Aresize of Regional Resource Recycling Zone)をリサイクル性指標として，新たに開発したコンクリート塊の循環利用最適化モデルを適応することで，コンクリート塊の循環利用について評価を行った．

コンクリート塊の循環利用最適化モデルは，マルチエージェントシステムを用いており，個々の輸送の挙動から全体が最適化される地点について考察を行った．

第 7 章では，各章のまとめと展望について述べた．本論文では，圏域における人間活動量の推計モデルを構築しており，その利用による建設副産物の循環利用について，コンクリートを対象に地域循環圏の検討を行った．低物質・低炭素な地域の実現に向けて，最適な圏域の提案を示唆した．

また，図 1-6 には，本論文の構成の概念図を示した．

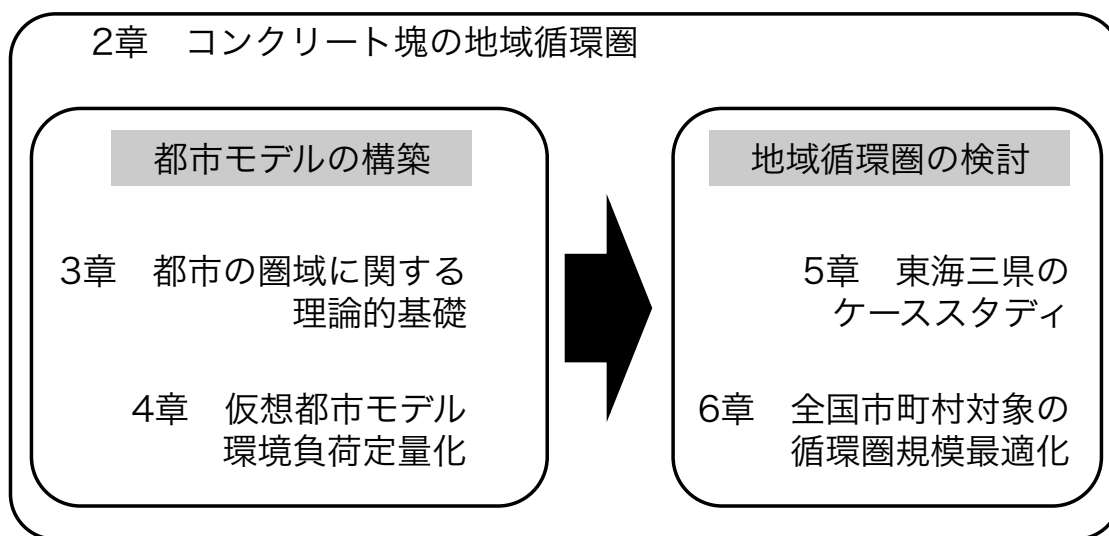


図 1-6 本論文の概念図

参考文献

- 1) エルンスト・ウルリッヒ・フォン・ワイツゼッカー, エイモリー・B・ロビンス, L・ハンター・ロビンス (1998) ファクター4, 財団法人省エネルギーセンター.
- 2) フリードリヒ・シュミット＝ブレーク (1997) ファクター10 エコ効率革命を実現する, シュプリンガー・フェアラク東京株式会社.
- 3) 環境省 (2010) 平成 22 年度 環境・循環型社会・生物多様性白書.
- 4) 環境省 (2011) 平成 23 年度 環境・循環型社会・生物多様性白書.
- 5) 国土交通省 (2010) 平成 20 年度建設副産物実態調査.
- 6) 建設工事に係る資材の再資源化等のに関する法律, 平成 12 年 5 月制定 (建設リサイクル法).
- 7) 循環型社会形成推進基本法, 平成 12 年 6 月制定.
- 8) 第 2 次循環型社会形成推進基本計画, 平成 20 年閣議決定.
- 9) 環境省 (2012) 地域循環圏形成推進ガイドライン.
- 10) 金本良嗣, 徳岡一幸 (2002) 日本の都市圏設定基準, 応用地域学研究, No.7, pp.1-15.
- 11) 谷川寛樹・大西暁生・高平洋祐・橋本征二・東修・白川博章・井村秀文 (2010) “ストック型” かつ “低炭素型” 社会へ向けた都市構造物の 物質・エネルギー消費の 4D マッピング: 名古屋市の建築物を対象としたケーススタディ, 日本 LCA 学会誌, Vol.6, No.2, 92-101.
- 12) 戸川卓哉・小瀬木祐二・鈴木祐大・加藤博和・林良嗣 (2010) 環境・経済・社会のトリプル・ボトムラインに基づく都市持続性評価システム, 土木計画学研究・講演集, Vol.41, CD-ROM(27).

2. コンクリート塊の地域循環圏

2.1. 循環型社会形成推進基本計画

1992年の環境と開発に関するリオ宣言(1992)を受けて、地球環境の保全に関する持続的な発展のために、OECD諸国を中心にそれぞれ国内の法整備を進めていった。日本では、資源の有効利用や廃棄物処分場残余年数の観点から、循環型社会の構築に向けた法整備がなされていった。特に、循環型社会形成推進基本法はその中核を担うもので、廃棄物の種類に応じて、循環利用を促進することを義務づける法律であった。同法15条で定められた計画が、循環型社会形成推進基本計画である。第一次循環型社会形成推進基本計画(2003)は、循環を基調とする社会経済システムの実現を目指し、増大する総物質投入量、資源採取量、廃棄物等発生量、エネルギー消費量について、抑制、再使用、再生利用のいわゆる3R(Reduce, Reuse, Recycle)の推進を図った。特に、物質フロー指標に関して目標を設定することで、その実現を可能とすると示した。物質フロー指標とは、同計画では「入口」、「循環」、「出口」と物質フローの過程の中で3種類を定義しており、それらはそれぞれ、資源生産性、循環利用率、最終処分量である。第一次基本計画(平成12年度)において設定した、これらの平成22年度における目標はそれぞれ、約39万円/トン、約14%、約28百万トンである。平成21年度の実績値としてそれぞれ、約40.3万円/トン、約14.9%、約19百万トンであることから、これらの目標は達成されており、物質フロー指標の改善が達成されている。このように、第一次基本計画は循環型社会形成に効果的であったが、統計的な指標に関する結果を参照していることから、資源利用と廃棄物排出において空間的な分布を加味していない。また、循環型社会の形成に向けて、地域特性をふまえた環境と経済の好循環を実現していくことが重要との課題から、第2次循環型社会形成推進基本計画(2008)において、中長期的なイメージとして「地域循環圏」の構築が掲げられた。これにより、地域の特性に応じた循環型社会の実現に向けて、物質循環を統計で評価する画一的なものから、循環資源の性質に応じて最適な規模の循環を形成することが示された。「地域循環圏」では、幾重にも構築された地域間の連携により、広域の圏域を構築することが想定されている。その上で、新たな物質フロー指標の目標として、前述した資源生産性、循環利用率、最終処分量に加えて、化石系資源やバイオマス系資源など資源種別の生産性や投入率、隠れたフローや関与物質総量(Total Material Requirement: TMR)が指標として設定された。これらの指標を改善するために、地域全体で多層に重なった循環圏の枠組みで相互に協力することが重要である。

2.2. 地域循環圏

地域循環圏は、資源を有効的に活用するという点で、低物質・低炭素な地域の実現に向けた、最適な圏域の検討と考えられる。地域循環圏では、比較的处理が容易な排出物は小さな地域単位で循環させ、処理に規模や高度な技術を要するものは広域的に循環させることで、それらに関わる輸送、処理、埋立てによる社会的コストや環境負荷を小さくし、効率的な社会の実現を目指す。

ものである。循環圏の範囲は、地理的、社会的、経済的に密接なコミュニティレベルの小さな単位のものから、国境を超えてその処理システムを構築することが必要となるような大きな単位のものまで様々である。

地域循環圏の形成は、3つの基本軸となる考えに基づいている。3つの基本軸とは、1)適正で効率的な資源循環、2)地域特性を活用する資源循環、3)地域に活力をもたらす資源循環、である(環境省、2012)。1) 適正で効率的な資源循環は、①資源の特性を活かす高効率の循環、②適正処理の堅持、③再資源化製品や再生エネルギー受入れ先の確保、④未利用資源の利用促進、があり、循環システムの構築・拡充の展開に関する項目である。2)地域特性を活用する資源循環は、⑤取り組みが比較的遅れている 2R の推進、⑥動脈産業との連携、⑦エコタウンなどの循環型産業集積基盤の積極的な活用、⑧地域型の新しい生産・消費チェーンシステムづくりの促進、があり、社会基盤の活用や社会システムの整備に関する項目である。3)地域に活力をもたらす資源循環は、⑨新しい環境ビジネスの創出、⑩都市交通やエネルギーネットワークなどの社会インフラ整備と連動した取り組み、⑪民間企業の活力や創意工夫の積極的な活用、⑫経済・ライフスタイルを含む地域活性化、であり、経済活動や地域活動の活性化に関する項目である。さらに、地域循環圏の機能として、3段階のステップが想定されており、a)地域で循環可能な資源はなるべく地域で循環する、b)広域での循環が効率的なものについては地域間での連携を図りつつ適正な規模の「循環の環」を形成する、c)「循環の環」を重層的に形成する、である。「循環の環」により、各地域の循環類型パターンの組み合わせをもって、多層な地域循環圏の形成を狙う方針である。前章で示したように、地域循環圏の種類には、1)里地里山里海循環圏、2)都市・近郊地域循環圏、3)動脈産業地域循環圏、4)循環型産業(広域)地域循環圏などがあげられる。表 2-1 に示すように、循環資源の対象としてより多く検討がなされているのは、1)ではバイオマス資源など、2)では食品廃棄物やプラスチックなどの家庭廃棄物、3)では重化学工業に伴う副産物など、4)ではエコタウン施設に集積される家電機器などである。これらは、家庭や工場など、分布に応じて時間軸に沿ってある程度定常的に発生が期待できる循環資源であり、Chen ら(2012)など分析の対象としても研究が進んでいる。

一方、廃棄物の多くを占める建設副産物は、基本軸の中でも位置付いておらず、「循環の環」のスケールは明確ではない。そのため、地域循環圏の立地・集積の種類や分布について示されておらず、ガイドラインでは建設副産物の地域循環圏は不明瞭である。また、建設副産物は分析に関しても、廃棄される時間分布が複雑であるため都道府県などの地域スケールにとどまっており、中でもコンクリート塊を対象とした将来の地域循環圏についてさらなる検討が必要である。

表 2-1 地域循環圏の類型パターンごとの取り組み

地域循環圏の類型パターン	資源循環等の取り組み	取り組みの方向性
里地里山里海 地域循環圏	バイオマスを活用した 小規模分散エネルギー 利用の促進	<ul style="list-style-type: none"> 木質バイオマスのペレット燃料や薪などとしての利用について、家庭用やビニールハウスでの利用・公共施設や福祉施設・観光施設や旅館などでの積極的な利用の促進 メタン発酵施設由来のメタンガスの利用に関して、移送可能なガスボンベとして、地域内の農業施設や畜産施設・道の駅などでも利活用可能なシステムの構築
	家畜ふん尿の 利活用の効率化	<ul style="list-style-type: none"> 協働組合方式による堆肥化施設の集約化や堆肥品質の高付加価値化・集落排水処理施設での活用や新しいメタン発酵施設などとの整備 排水処理施設の汚泥も含めた家畜ふん尿の燃料化利用の可能性検討や技術開発の促進
都市・近郊 地域循環圏	都市系の食品廃棄物・ 下水汚泥の利用促進	<ul style="list-style-type: none"> 都市系から排出される食品廃棄物由来の堆肥化・飼料化の促進や都市近郊の農業エリアと連携した付加価値の高い農産物づくり 下水汚泥に生ごみを混合したメタン発酵によるエネルギー利用や消化液の堆肥利用等の促進
	廃プラスチックの 利用促進	<ul style="list-style-type: none"> 資源の性質や需要に応じた選別による、工業原料としてのニーズに対応した素材別に分配・供給するソーティングセンター整備の促進 新しく高度化されたプラスチックの利活用の仕組みづくりの促進
動脈産業 地域循環圏	ゼロエMISSIONの 加速化	<ul style="list-style-type: none"> セメント・鉄鋼・非鉄製錬・製紙等の動脈産業の集積におけるゼロエMISSIONの取り組みについて、これまで以上の加速化促進
	エネルギー施設基盤と 一般廃棄物処理施設の 連携可能性の検討	<ul style="list-style-type: none"> 動脈産業施設が保有する発電施設と一般廃棄物処理施設との連携の可能性の検討 工場の余剰排熱の利用・余剰水素の利用・燃料電池利用等、新しい連携システムの可能性について積極的な検討の推進
循環型産業 (広域)地域循環圏	エコタウンの高度化・ 循環拠点統合機能の充 実化	<ul style="list-style-type: none"> 培われた基盤やノウハウを最大限に活用した、循環型社会形成や地域循環圏形成における循環拠点としての機能充実 循環システムの拠点機能のみにとどまらない、環境教育や人材育成・研究開発の拠点としての機能の充実
	使用済小型電子機器等 のリサイクルシステム 構築への寄与	<ul style="list-style-type: none"> 既存の拠点を活かした使用済小型電子機器等リサイクルの解体拠点や回収物流拠点として機能する仕組みの構築 付加価値の高い有用金属が含有されている基盤類の分別解体・動脈産業の集積拠点が保有する製錬業への供給

参考：環境省「地域循環圏形成推進ガイドライン」（2012）

2.3. 建設副産物の循環利用

一方、建設副産物の循環利用に関しては、平成 12 年に制定された「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」（建設リサイクル法，2000）から、一定規模以上の工事において特定建設資材の分別解体および再資源化等（縮減で足りる場合も規定）が義務づけられたため、その再資源化率は高く、その現況は国土交通省(2012)に詳しい。特定建設資材のうち、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊は、平成 12 年度以降高い再資源化率を維持しており、平成 20 年度の値はそれぞれ 97.3%、98.4%である。建設発生木材の再資源化率は、平成 12 年度以降上昇傾向にあり、平成 12 年度の 38%から平成 20 年度には 80.3%となっている。建設副産物全体の再資

源化率等は、平成 12 年度の 85%から、平成 20 年度には 93.7%にまで上昇している。これらから、建設副産物の循環利用はコンクリート塊を中心に高い水準であることが示されている。

また、前章で示したように、コンクリート塊は主に構造物解体の際に発生し、一部建設混合廃棄物として処理される量が存在するが、分別解体が進んでおり、建設時に投入された量の大部分が回収されると考えられる。分別解体されたコンクリート塊は再資源化施設に輸送され、再生砕石、再生コンクリート砂、再生コンクリート骨材に加工される。再生コンクリート骨材は、加熱すりもみ方式等によってコンクリート中の骨材を分離回収したものである。その利用用途は多く考えられるが、再生コンクリート骨材の利用は再資源化施設が工事現場から 40km 以内に存在する場合のみ想定されていることや、経済性等の問題があるため、現状ほとんどが再生砕石と再生コンクリート砂となり、再生砕石は道路路盤材に投入され、再生コンクリート砂は埋め戻し材料等となる。平成 20 年度建設副産物実態調査によると、現場から搬出されたコンクリート塊のうち、約 9%が再生コンクリート砂、約 90%が再生砕石であり、再生砕石を中心として循環利用の検討を行う必要がある。我が国の交通網は都市部を中心に整備が進んでおり、今後道路改良事業が活発化することは考え難い。そのため、道路改良事業量は現状維持もしくは減少することが想定される。コンクリート塊の供給量は増加が予想され、道路路盤材への再生砕石需要量は減少が予想されているため、コンクリート塊の余剰が多量に発生することが危惧されている。

しかし、天然資源投入量の削減や、処理・輸送に関わるコストや環境負荷の低減を考える上で重要である、コンクリート塊の発生量と、必要とされているコンクリートの量を空間的に把握することを対象とした研究は多くない。コンクリート塊の発生は主として建築物の解体量に依存しており、建築物が多く集積している地域がある一方、コンクリート塊の再生骨材の利用は主として道路改良に伴う路盤材への投入であり、建築物ほど人口に密接に関わった分布をしていない。そのため、コンクリート塊の排出量と投入量の空間分布には差異がある。他方、建築物と道路では耐用年数が異なるため、地域ごとに将来にわたって排出量と投入量の傾向に差異が出てくる。以上のことから、コンクリート塊の循環利用を考慮するには、建築物と道路の時空間のばらつきを考慮した分析が必要である。

2.4. 建物需要量推計モデル

建築物や道路の着工、更新、解体には、様々な要因が影響する。なかでも、その需要量は人間活動に起因するものであり、人間活動の動態による建物需要量を把握する必要がある。建物需要量の推計モデルは多くの既往研究があるが、単一の都市を対象とするのではなく、地域循環圏の構築に向けて地域間の関係を考慮する必要があるため、複合的なモデルが必要である。そこで、本研究ではコンクリート塊の地域循環圏検討に向けた建物需要量推計モデルを構築する。構築されるモデルに必要とされる特徴としては、大きく以下の 2 つがあげられる。まず、地域循環圏は既存の行政界などの境界を越えて検討すべきであるため、適応性の高い分析モデルが必要である。そのため、モデルの入力変数は少数に限定しつつ、気候などをふまえた地域性など外生変数の選

択に応じてモデル内部のフローが変化する枠組を検討した。次に、建築物や道路は耐用年数に応じて将来動向が変化するため、人口変動に対応する必要がある。人口の変動は主としてコーホート法によって将来推計を行うが、建物受領量の傾向は集積地域とそうでない地域では異なるため、集積地域の区分と集積の程度に応じたモデル内部のフローについて人口密度を中心に検討した。以上の２点をふまえ、本研究では地域循環圏検討に向けた建物需要量推計のモデル化を行った。

参考文献

- 1) 環境省（2010）平成 22 年度 環境・循環型社会・生物多様性白書.
- 2) 環境省（2011）平成 23 年度 環境・循環型社会・生物多様性白書.
- 3) 国土交通省（2010）平成 20 年度建設副産物実態調査.
- 4) 建設工事に係る資材の再資源化等の関する法律，平成 12 年 5 月制定（建設リサイクル法）.
- 5) 循環型社会形成推進基本法，平成 12 年 6 月制定.
- 6) 第 2 次循環型社会形成推進基本計画，平成 20 年閣議決定.
- 7) 環境省（2012）地域循環圏形成推進ガイドライン.

3. 都市の圏域に関する理論的基礎

本研究では、地域の環境負荷構造を分析するうえで、地域特性としての人口分布等によって決定される都市の圏域に着目する。よって、分析の対象の単位として、都市の圏域を明確に理解し、決定することが重要である。本章では、都市の圏域を決定するための理論について考察を加えた後に、その分類・手法について比較・検討を行う。

3.1. 日本における圏域の定義

現在、日本の都市の活動は活発化・複雑化しており、圏域の定義が明確ではない。例えば、以前の移動における主要な交通機関は鉄道であったが、現在は自動車の利用が増加しており、都市圏、特に生活圏の範囲が広がっている。そのような状況から、平成の大合併といわれる広域合併が繰り返されたが、現在の行政境界が、実際の都市圏や生活圏と適合しているかという点、必ずしもそうではない。特に、圏域の定義に関しては、交通の流動の最も主要な要素として、通勤者数を利用した指標を扱うことが多い。行政における都市圏の定義で主要なものとして、総務省が定めた統計上の地域区分としての都市圏がある。以下に総務省統計局による都市圏の定義を示す。

- ・都市圏は、「中心地」と「周辺市町村」によって構成されている
- ・都市圏は、大都市圏と都市圏の2種類とする
- ・中心地は、大都市圏の場合は東京特別区および政令指定市とし、都市圏の場合は大都市圏に含まれない人口50万人以上の市とする
- ・周辺市町村は、大都市圏および都市圏の中心市への15歳以上通勤・通学者数の割合が当該市町村の常住人口の1.5%以上であり、かつ中心市と接続している市町村とする
- ・中心市への15歳以上通勤・通学者数の割合が1.5%未満の市町村であっても、その周囲が周辺市町村の基準に適合した市町村によって囲まれている場合は、「周辺市町村」とする

また、総務省以外にも行政における都市圏の定義はあり、国土交通省都市・地域整備局が定義した都市圏を示す(都市再生ビジョン, 2003)。

- ・都市圏は、「核都市」と「周辺都市」によって構成されている
- ・核都市は、人口10万人以上で昼夜間人口比率が1以上の都市とする
- ・周辺都市は、核都市への通勤通学者が全通勤通学者の5%以上または500人以上である市町村とする
- ・核都市が20km以内に併存する場合には、連結して一つの都市圏とする

参考：都市再生ビジョン（2003）

その他にも、第四次全国総合開発計画(1987)における定義もあり、都市圏の定義は行政においても一義的ではなく、統計や分析の対象によって変わってくる。

このような状況から、金本ら(2002)は、「都市雇用圏」という都市圏を定義した。都市雇用圏とは、DID 人口を利用して中心地域を決め、その地域の雇用求心力を基準に設定されたもので、詳細を以下に示す。なお、DID とは人口集中地区 (Densely Inhabited District) のことで、市区町村の区域内で人口密度が 4,000 人/km² 以上の基本単位区が互いに隣接して人口が 5,000 人以上となる地区に設定されたものである。

- ・都市圏は、「中心都市」と「郊外」によって構成されている
- ・中心都市の DID 人口が 5 万人以上を大都市雇用圏、1 万人以上 5 万人未満を小都市雇用圏と呼ぶ
- ・中心都市は、以下の条件のいずれかを満たす市町村であり、複数存在する場合には、それらの集合を中心とする
 - (1)DID 人口が 1 万人以上の市町村で他都市の郊外ではない
 - (2)郊外市町村の条件を満たすが、
 - (a)従業常住人口比が 1 以上である
 - (b)DID 人口が中心市町村の 3 分の 1 以上か、あるいは 10 万以上である
- ・郊外は、以下の条件を満たす市町村とする
 - (a)中心都市への通勤率が 10%以上のものを (1 次) 郊外市町村とする
 - (b)郊外市町村への通勤率が 10%を超え、しかも通勤率がそれ以上の他の市町村が存在しない場合には、その市町村を 2 次以下の郊外市町村とする
- ・郊外に関しては、以下の注意点を含む
 - (1)相互に通勤率が 10%以上である市町村ペアの場合には、通勤率が大きい方を小さい方の郊外とする
 - (2)中心都市が複数の市町村から構成される場合には、それらの市町村全体への通勤率が 10%以上の市町村を郊外とする
 - (3)通勤率が 10%を超える中心都市が 2 つ以上存在する場合には、通勤率が最大の中心都市の郊外とする
 - (4)中心都市及び郊外市町村への通勤率がそれぞれ 10%を超える場合には、最大の通勤率のものの郊外とする

都市雇用圏による都市圏は、都市間の関係について雇用を基準とすることで標準化していることが重要である。標準化することによって、都市圏の定義を一般化し、データの取り扱いを便利にすることができる。しかし、市町村の合併に伴い、単一市町村が拡大してしまった今日に都市雇用圏の数値が詳細に適応しているかは確かではない。都市圏の定義として、どういうものが最適であるかに関する理論的基礎は存在しないというのが現状である。

また、通勤以外の指標によって都市圏を決定しようとする試みもある。吉村ら(2003)は都市の「規模」と「距離」に着目し、都市の空間的配置の規則性について、都市規模と都市間距離を明示的な変数として実証を試みている。それにより、以下のように、空間構造と都市の階層性の関係を示唆している。

- 1)日本の都市圏のおおまかな階層構造を、直近大都市圏を結ぶことで表すことができる
- 2)直近大都市圏距離とその順位には、ランク・ディスタンスルールというべき規則性がある
- 3)自都市圏規模は、都市圏間距離と直近大都市圏規模によって規定される

この分析では、都市の人口規模により都市の階層性が形成されるとしており、都市間の関係を示す指標として人口規模が重要であるとしている。また、都市の人口規模と都市間の距離により都市にランク付けをし、それが都市の階層性を形成するとしている。しかし、ここではある都市がより人口規模の大きい都市に引きつけられることを示しているが、それは最近隣のものに限っている。例えば、横浜市やさいたま市が東京特別区のひとつ下の階層にある場合は適当であるといえるが、名古屋市や福岡市が、大阪市の下下の階層にあるとするのは、あまり適当でない。これは、人口規模と都市間距離をランクとしてしかとらえてないからであり、都市間の結びつきを考慮していないことから、都市の階層性を十分に示していない。

以上から、日本における都市圏の定義は対象となる地域や分析の手法によって様々であり、理論的基礎が定まっていない。しかし、都市間の関係により定義されることは確かであるので、それをふまえて都市の階層性を検討した。

3.2. 都市の階層性

都市の階層性は、W.Christaller(1969)が中心地理論において、財の供給原理に加えて交通原理と行政原理によって都市の階層別中心地のシステムを形成することを示している。特に、Christallerは財の種類によりその到達範囲が異なることを強調している。到達範囲の大きい財を「高次」な財と呼び、その反対を「低次」な財と呼ぶ。これらの財を供給する機能を「中心地機能」といい、中心地が持つ中心地機能を「中心性」と呼び、その大きさにより複数の階層が形成されるのである。つまり、都市の空間構造は地域の産業構造の影響を受けており、それにより都市の形態は異なる。Christallerの示す中心地理論は現実には適用が難しい部分もあるが、地域分類を行う際に、人口規模だけではなく産業形態も地域特性として考慮すべきである。つまり、都市の階層構造により、都市ごとに供給するサービスに違いがあるため、異なる都市として類型される。

加えて、都市間の関係を定量化して整理することは重要であるため、都市を類型化すると共に階層的に都市間の結びつきを評価する方法を検討した。

以上から、本研究では都市の階層性を示すために、産業的特徴と社会的特徴により都市の類型化を行い、その関係性を階層的に都市間の結びつきとして定量化することで、都市圏の定義を行った。

3.3. 都市の類型化

都市の類型に際しての主要な視点は、都市の規模、機能、構造、発展度など多岐にわたっている(大友, 1997). 本研究では、都市の階層性を示すための地域分類であることとデータの利用可能性を考慮し、産業的特徴と社会的特徴の2つの要因で地域を類型した.

都市類型化の手順は以下の通りである. まず、統計データを基に市町村単位のデータベースを構築した. 次にそのデータベースをもとに主成分分析を行い、市町村の特徴を集約した指標を作り出した. 最後に、主成分分析で得られた主成分得点を用いてクラスター分析を行い、市町村を複数のカテゴリに類型した.

3.3.1. 使用データ

産業的特徴については、町村レベルまで含めて詳細に情報を公開している統計は少ない. そこで、ここでは、事業所・企業統計調査(2010)の雇用者数を用いて、各市町村の各業種についてその全雇用者に占める割合を計算し、それを用いた. なお、分類数は、出来るだけ実際の産業構造を把握できるよう、最も詳しい411分類を用いた.

社会的特徴は、ここでは市町村の人口などの居住分布とインフラなどの都市基盤の充実さを示すデータをまとめたものとした. 都市類型を行うに当たり、以下の12のデータを用いた.

- | | | |
|-------------|-------------|----------------|
| 1) 人口密度 | 5) DID 人口密度 | 9) 市域内道路実延長 |
| 2) 世代別人口率 | 6) 昼間人口比率 | 10) 市域内高速道路実延長 |
| 3) 構成別世帯割合 | 7) 市域内鉄道路線数 | 11) 自動車種別保有台数 |
| 4) DID 人口比率 | 8) 市域内鉄道駅数 | 12) 中心地距離 |

1)~3),6),11)は総務省統計局(2010)を参照した. 4),5),7)~10),12) は国土数値情報ダウンロードサービスでダウンロードした GIS データを市町村ごとに整理して利用した.

3.3.2. 類型結果

産業的特徴に基づく地域分類では、「業務中核都市型」、「業務衛星都市型」、「製造業中心型」、「公共事業中心型」、「地方中核都市型」の5つのカテゴリに分類した. 図3-1にカテゴリの空間的分布の模式図を示す. 業務中核都市型を中心として、業務衛星都市型、製造業中心都市型、公共事業中心都市型と同心円帯に分布する. また、地方中核都市型は、周囲に公共事業中心都市型や製造業中心型都市型に分類された都市が多くある場所に、点在している.

次に図3-2に産業類型の結果を示す. 各カテゴリの産業の特徴は以下の通りである.

「業務中核都市型」は、他のカテゴリと比較してソフト産業や金融業の就業者の割合が多い. また、業務中核都市型に分類された都市の多くは、県庁所在地であり、大消費地でもあるため、卸売業の就業者割合も比較的多いことが特徴である.

「業務衛星都市型」は、「業務中核都市」の近辺に分布し、洗濯業など、一般的なサービス業が盛んであるという特徴がある. また、ゴム製・プラスチック製履物等製造業など、幾つかの業種の

製造業について就業者の割合が他のカテゴリよりも多いものもある。

「製造業中心型」は、自動車・同附属品製造業や電子部品・デバイス製造業といった製造業の就業者の割合が比較的多いという特徴がある。

「公共事業中心型」は、土木工事業の就業者の割合が他地域よりも高いという特徴がある。また、農林水産業の就業者の割合も他のカテゴリよりも多い。

「地方中核都市型」は、病院等の福祉施設や食料品等の小売業の就業者の割合が他のカテゴリに比べて多いという特徴がある。また、土木工事業の就業者の割合は、「公共工事中心型」に次いで多い。したがって、地方の中核都市として機能している都市だと考えられる。

次に、社会的特徴による都市類型の結果を図 3-3 に示す。社会的特徴は、「大都市域」、「都市域」、「中規模市町村域」、「小規模市町村域」の 4 つに類型した。なお、カテゴリの空間的分布については、大都市域を中心として、都市域、中規模市町村域、小規模市町村域と同心円帯に分布した。

大都市域に分類された都市は、東京 23 区、名古屋市、大阪市、福岡市等が含まれており、人口面では、人口密度が高く、昼間人口比が 1 を超え、65 歳以上人口比が比較的低いといった特徴がある。また、交通面では、地下鉄が整備されるなど、駅密度が高く、かつ、1 人当たり乗用車保有台数が比較的小さいという特徴がある。

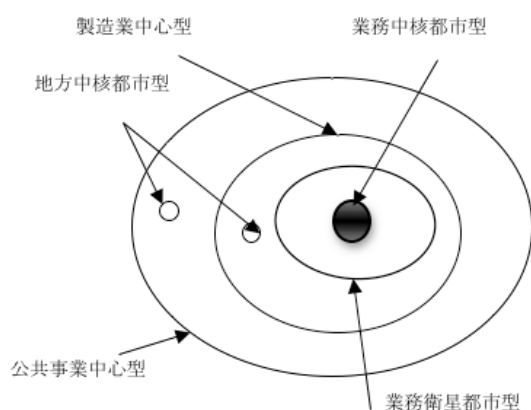


図 3-1 産業的特徴による地域分類模式図

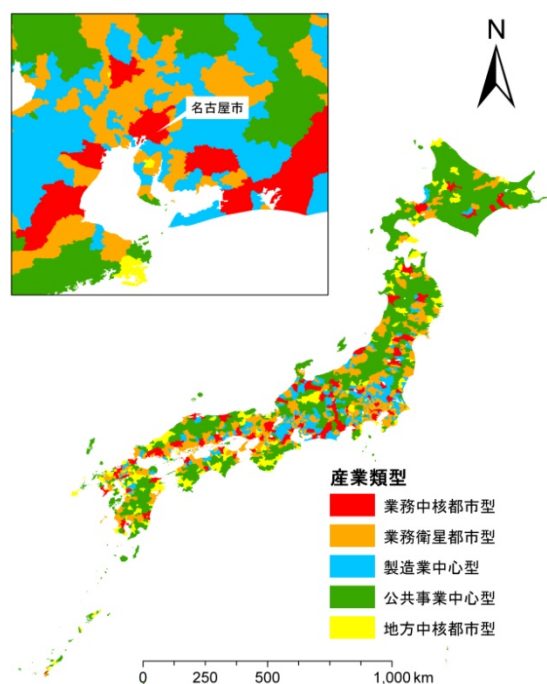


図 3-2 産業的特徴による都市類型

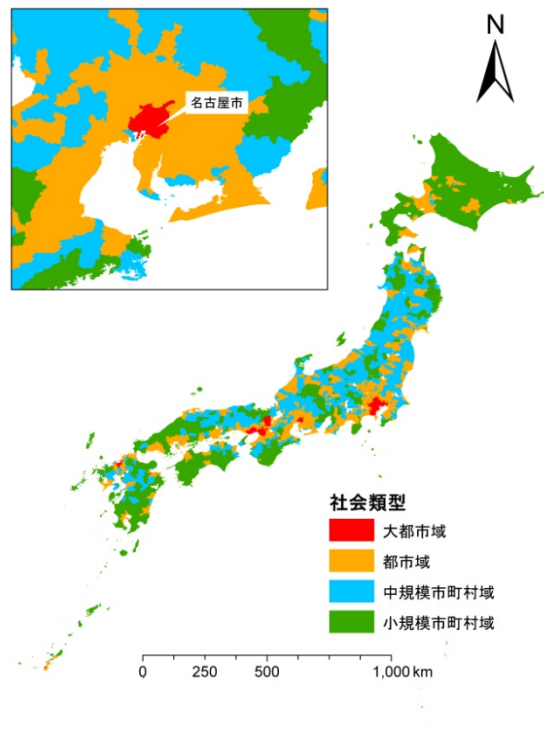


図 3-3 社会的特徴による都市類型

3.3.3. 大都市圏による地域構造の比較

産業類型，社会類型がどのように分布しているのかを通じて，東京，名古屋，大阪の三大都市圏について，地域構造の違いを検討する．産業類型，社会類型の分布を図 3-4 の(a)～(c)に示す．

まず，社会類型に関する共通点については，どの地域においても社会類型がある程度，「大都市域」を中心に，「都市域」，「中規模市町村域」，「小規模市町村域」というように，同心円帯状に分布していることがわかる．

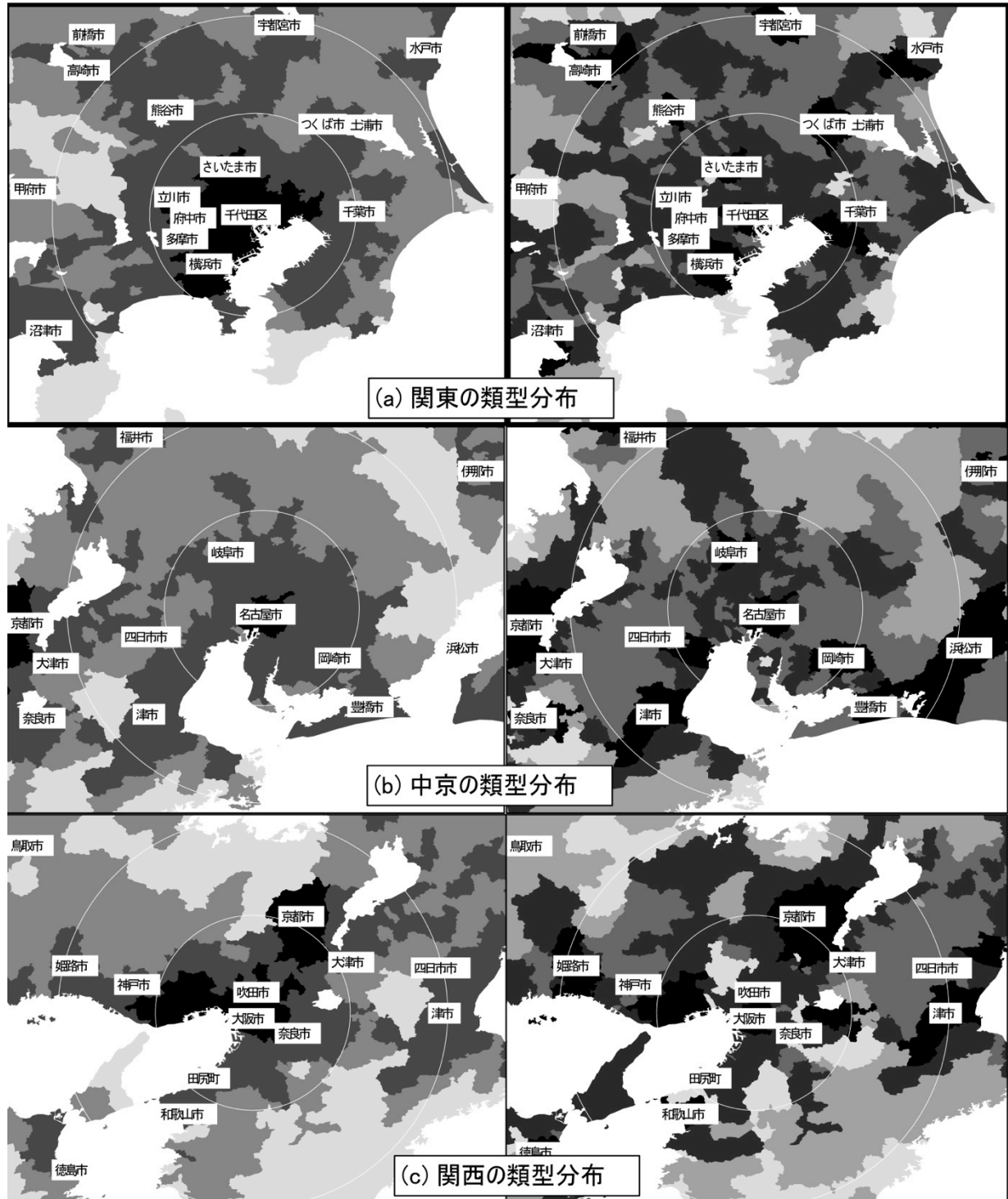
他方，(a)～(c)における相違点は，(a)関東は「大都市域」がほかに比べて非常に大きいことがあげられる．これは，東京の23区と横浜市や川崎市などの政令指定都市を結ぶ公共交通機関が発達し，この地域が一体となって大きな人口集中地域を形成しているからだと考えられる．逆に，名古屋都市圏では，分析の結果「大都市域」に分類されたのは，名古屋市だけである．このことは，地下鉄の整備は名古屋市だけに限られ，近隣の都市圏との公共交通ネットワークの充実度が他の二つの都市圏と比べると低く，自動車への依存度が高いことを意味している．

次に，産業類型について見ると，どの都市圏も概ね，各都市圏の中心から，概ね 40km～60km ごとに「業務中核都市型」が出現している．しかし，(a)～(c)を比較すると，名古屋都市圏では，中心から 50km 圏内の都市について「業務衛星都市」に分類された都市の割合が，他の都市と比較すると少なく，その代わり「製造業中心型」に分類された市区町村が比較的多いように見える．

これらから，都市類型は都市の階層性を示しており，大都市域や業務中核都市型など上位の類型にそれ以外の下位の類型が結びついて分布していることが示される．そこで，都市類型を考慮した都市間の結びつきを示すことで都市の階層性を把握し，都市圏の決定が出来ると考えられる．

社会類型

産業類型



凡例

社会類型

- 大都市域
- 都市域
- 中規模市町村域
- 小規模市町村域

産業類型

- 業務中核都市型
- 業務衛星都市型
- 製造業中心型
- 公共事業中心型
- 地方中核都市型

0 50 100 km



(注) 図中の円はそれぞれ 50km 圏、100km 圏を示す。

図 3-4 三大都市圏における地域構造の比較

3.4. 都市間の結びつき

都市圏の定義から、都市間の関係が強い都市の集合が都市圏だとするのはどの定義においても共通に認識であると考えられる。すると、都市間の結びつきの強さを定義しなければならない。先行研究においては、都市間の通勤者の割合が大きいほど結びつきが強いとしており、それにより中心地と郊外との関係を決定している。また、人口規模によるランクが都市間の距離に応じて決定されている。つまり、都市間の関係を示すには、通勤・人口・距離を利用するのが適していると理解できる。さらに前節の都市類型を用いることによって、都市間のランクの概要を産業類型・社会類型によって間接的に示すことが出来る。

ここで、都市間の結びつきを「都市間力」と呼称し、その定義について物理的な解釈を行う。ある二つの都市があるとしたとき、その二都市をそれぞれ質点だと仮定する。質点とは質量を持った点がある空間に配置されていることを示す。二つの質点、つまり都市は、持ちうる性質により相互に作用するはずである。

ここで、物理学における質点間の作用を参考にする。例えば、二つの質点は質量の大きさに比例して引力を発生させる、つまり万有引力である。

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (3.1)$$

万有引力 F は式(3.1)に示されるように質量 M と m の積に比例するとともに、距離 r の二乗に反比例する。 G は万有引力定数である。この式は重力モデルとして、様々な形で応用・利用されている。

質点の持つ性質の規模に比例し質点間の距離に反比例する。また、ある比例係数を有する。これらを参考に、質点を都市だと仮定すると、その質量は人口規模であり、その距離は都市間距離であると推測できる。また、都市間の関係は一定の係数によって示されるわけではなく、その関係は通勤によって示されると推測できる。

以上から、都市間力を定義することとする。ただし、通勤者数、人口、距離のすべてを対数変換して標準化したものを用いる。ある都市 i と都市 j の間の都市間力を以下の式で定義する。

$$F_{ij} = \ln(C_{ij}) \frac{\ln(P_i) \ln(P_j)}{\ln(D_{ij})} \quad (3.2)$$

F_{ij} : 都市 i の都市 j に対する都市間力

C_{ij} : 都市 i から都市 j への通勤者数[人]

P_i : 都市 i の人口[人]

P_j : 都市 j の人口[人]

D_{ij} : 都市 ij 間の距離[km]

この都市間力を、日本を対象として市町村間について算出する。なお、都市間距離は都市の役所間の距離であるとした。また、人口、通勤者数は 2005 年の国勢調査を利用した。

都市間力により、都市間の関係の大きさが示された。この値が大きいほど都市間の結びつきが

強いとすると、ある都市 i の都市 j に対する都市間力の中で、最大のものを取り上げることで都市の階層性を見ることができる。ただし、ランク付けを行うために、 $P_i < P_j$ についてのみ取り上げるものとする。つまり、都市 i からみて人口規模の大きい都市に対して結びついている、というイメージである。よって、以下の式により都市 i の上層にある都市 k を決定する。

$$F_{ik} = \text{Max}_j(F_{ij}) \quad (P_i < P_j) \quad (3.3)$$

式(3.3)により都市 i はただひとつの都市 k に対して従属している（ただし、人口規模が最大の都市はどの都市にも従属していない）と仮定する。この際に都市類型を考慮することで、都市 i より上位ないしは同じ類型の都市にのみ結びつくとして仮定した。すると、都市の階層性が都市類型と都市間力によって決定できる。

3.5. 都市圏の決定

次に、都市の階層性により、都市圏の境界について検討を行った。図 3-5 に示すように、都市の階層性の中から、都市圏を単位とするように、区切る必要があることが分かる。都市圏の境界は都市間力が小さい都市間であると推測できるが、都市間力は規模に応じて大きくなるため、都市間力が小さい順に都市圏の境界であるとする、小都市間の関係はほとんどが切断されてしまう。そこで、都市間力について多少の改善を施し、都市圏の境界を判別するのに適した式を検討する。

まず、都市間の関係は両都市の規模の偏りに依存すると考えた。つまり、同じ都市間力であっても、都市間の関係は、同規模であるほど対等であり、規模に差があるほど一方的に従属していると考えた。例として、2 種類の都市間の対等性を示した図 3-6 を参照されたい。

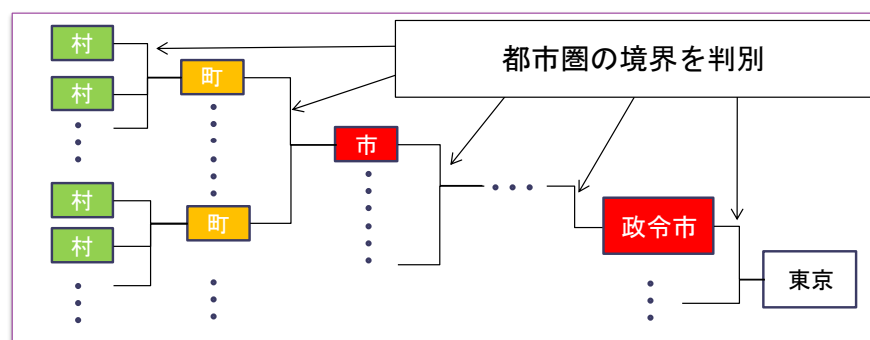


図 3-5 都市の階層性と都市圏の境界

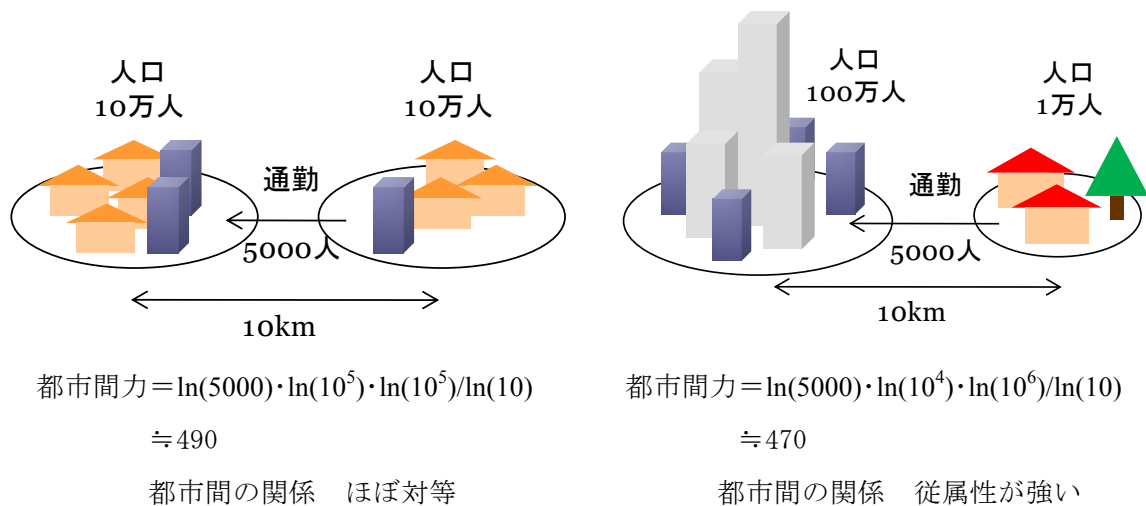


図 3-6 都市間の対等性と従属性

両者の都市間力はほぼ等しい。しかし、その対等性は全く異なる。両者は通勤者数、都市間距離が等しく、異なるのは人口である。しかし、人口の積はほぼ等しく、よって都市間力もほぼ等しくなる。このように見たときに、左においてはそれぞれに独立した都市圏を作っているが、右においてはひとつの都市圏に含まれていると考えられる。よって、都市間の人口の偏りが都市間の対等性に影響していることが分かる。

よって、都市圏の境界を定めるために、次の式で示す。

$$F'_{ij} = \ln(C_{ij}) \frac{\ln(P_j) / \ln(P_i)}{\ln(D_{ij})} \quad (3.4)$$

式(3.2)と式(3.4)の違いは、人口の積と人口比の部分だけである。これにより、都市間が対等であると、 F' は小さくなり、都市間の従属が大きいと F' が大きくなる。よって、都市の階層性の中で F' が小さい都市間から都市圏の境界としていけばよい。なお、この F' を利用する利点はインデックス j で最大値を見たときに、 F のときと最大値をとる j が共通であることである。つまり、 F で計算しても F' で計算しても、都市の階層性は共通であり、都市圏の境界を決定するうえでは F' の方を利用するということになる。

中央値以下である $F' < 1$ において、都市圏の境界として階層を区切った結果、181 の都市圏候補が得られた。ただし、コア人口比率のばらつきが大きすぎるため、4 以下の都市の集合は次章以降に示す仮想都市モデルに適合しなかった。従って、都市「圏」を対象としていることも考慮し、これらを省き 5 つ以上の都市の集合で構成される 121 を都市圏とした。都市圏の中で最上位の層にある都市はこの都市圏の中心地であり、表 3-1 に中心地の人口別に都市圏の数をまとめる。ここでは小さな都市圏も分析の対象として見なしている点に特徴がある。これは、人口規模が大きい場合のみを都市圏と見なした先行研究の「都市雇用圏」などとの違いである。

図 3-7 に示した都市圏の全国分布からは、横浜市や京都市のように 100 万人以上の都市であってもさらに大きな都市の近隣に位置していれば中心地とはならないことや、東北地方や九州地方は小規模な都市圏が多いこと等の特徴が伺える。

表 3-1 中心地の人口ごとの都市圏の数

人口規模	都市圏の数	代表的な都市
100 万人～	7	東京特別区 名古屋市 など
50 万人～100 万人	10	新潟市 鹿児島市 など
10 万人～50 万人	42	長崎市 那覇市 など
5 万人～10 万人	28	米沢市 日南市 など
1 万人～5 万人	29	富良野市 熊野市 など
～1 万人	5	草津町 など
合計	121	

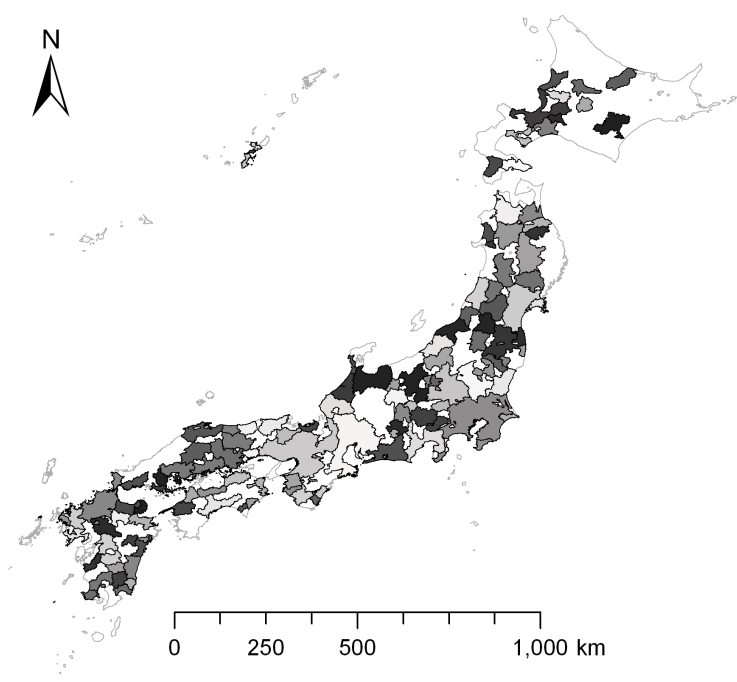


図 3-7 都市圏の分布

参考文献

- 1) 都市再生ビジョン（2003）社会資本整備審議会.
- 2) 金本良嗣・徳岡一幸（2002）日本の都市圏設定基準，応用地域学研究，No.7, 1-15.
- 3) 吉村弘・山根薫（2004）日本における都市の階層性と空間構造 —「規模」と「距離」による都市間構造分析—，地域経済研究，第 15 号.
- 4) W.Christaller（1969）都市の立地と発展，大明堂.
- 5) 大友篤（1997）地域分析入門，pp. 43-46，東洋経済新報社.
- 6) 総務省統計局（2005）事業所・企業統計調査.
- 7) 総務省統計局（2006）平成 17 年度国勢調査.
- 8) 国土数値情報ダウンロードサービス<<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>>

4. 仮想都市モデルを用いた環境負荷定量化

低物質かつ低炭素型の社会の実現に向けて、現在の環境負荷を定量化し、その把握をすることは非常に重要である。我が国では、全国や都道府県などスケールで、多くの環境統計を整理されており、その利用による環境負荷量の把握が可能である。一方で、政策実行は市町村スケールであり、具体的に地域で対策を行う際の環境情報が十分であるとは言えない。低物質かつ低炭素な地域の実現に向けた施策としては多種多様にあるが、先駆的な事例として環境モデル都市(2008)や低炭素都市づくり(2009)などがある。これらの事例では、都市の特性に応じたパイロットケースの確立に向けて、集中的に施策を実施することでその効果を評価されている。しかし、前章で示したように都市の特性は単一で決定されるだけではなく周辺の都市との関係が重要である。また、前述したように、環境統計については市町村スケールでは十分であるとは言えず、具体的に施策の効果を都市の特性との関係とするには情報が不足していると考えられる。そこで、本研究では仮想的な都市を想定し、その地域の環境負荷を定量化するモデルを提案する。これにより、地域特性をふまえた環境負荷を計算できるため、具体的に施策を実地した際の効果について比較・検討を提案できる。

また、地域の環境負荷量を推計する際に、地域特性の他に人口分布や就業構造など多くの具体的な情報が必要となる。しかし、全国の地域を一律に評価するには汎用性の高い推計モデルが必要であるため、できる限り外生的な変数を限定する必要がある。人口の総数やその分布が変化するなど、将来の変化に対応できるモデルであることが望ましいことから、少ない外生変数による、一方でその地域の特徴を捉えた推計モデルの必要性が理解できる。また、施策の実地の効果を把握するためには、そのシナリオ選択に応じた推計フローを含める必要がある。以上を満たすために、外生変数の選択と施策シナリオ、また地域特性を評価できる、モデルの構成について十分な吟味が必要である。

以上の点をふまえ、本章では、仮想都市モデルを構築することで、地域の環境負荷の定量化について汎用性の高いモデル化を行った。現在の日本の都市をもとに仮想都市モデルを構築し、仮想的な都市における人口の分布を決定し、民生部門の活動量を推計し、地域特性により異なる地域別原単位を利用することで環境負荷量を推計する。また、その仮想都市における施策シナリオの仮定し、人口密度などに応じた効果的な施策シナリオ検討を可能となるモデル化を試みた。

4.1. 仮想都市モデルの概要

仮想都市モデルでは、汎用性の高い推計モデル構築のために、都市の特徴を損なわない範囲内で、モデルの外生変数の数を極力少なくするよう仮定をした。特に、その特徴を表す仮定としては、人口密度により大きく影響を受けるモデル化を行ったことである。また、それを補足する変数として地域を示すダミー変数を設定した。業務部門については通常の人口分布(夜間人口)とは異なる、昼間人口を基盤にモデル化をする必要があるため、昼間人口比についても外性的に入力する仮定をした。以上から、本モデルでは以下の 4 の外生変数による推計を行うと仮定した。4 の外生変数は、人口、面積、地域ダミー、昼間人口比である。その推計フローの概要を図 4-1 に示した。

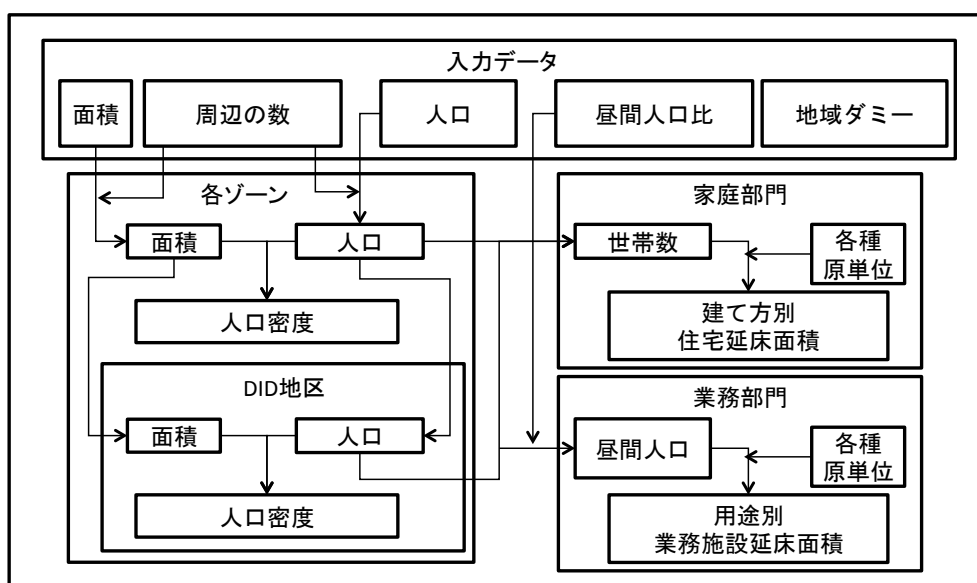


図 4-1 推計フローの概要

4.2. 都市圏内における人口分布の推計

仮想都市モデルでは、都市を対象にモデル化を行うが、より広域での推計を可能にするために、都市群を対象とした仮想都市圏モデルについても作成を行った。仮想都市圏モデルは、仮想都市モデルの前段階である都市圏内の人口分布を推計するモデルである。

2 章において決定された都市圏を仮想都市圏モデルのサンプルとして利用する。その際に、都市圏内の最上層に位置する都市を都市圏における中心として「コア」と定義する。また、それ以外の都市を都市圏における郊外として「周辺」と定義することにする。以下、「コア」、「周辺」はこの定義に基づくものとする。また、仮想都市圏モデルにおいては単純化を行うために、都市圏においてはコアが 1 つと仮定する。周辺については、新たな外生変数「周辺の数」を定義することでその数を設定する。しかし、大きな都市圏では数多く存在するものすべてをひとつひとつ認識することによりモデルが繁雑になるので、都市圏の規模等に応じて、ある程度まとめた周辺都市群が 1 から 3 の数だけ、コアの周りに分布しているものとした。さらに、人口密度の大きい地域と小さい地域を分けるために、人口集中地区(Densely Inhabit District: DID, 以下 DID)をコアと周

辺内でそれぞれ設定した。以上から、仮想都市モデルにおいては、都市圏をコア DID, コア非 DID, 周辺 DID, 周辺非 DID の 4 つのエリアに分割した(図 4-2)。また、コアの昼間人口比を設定することで、都市圏内で昼夜間の人口移動が完結するとの過程から、コア・周辺それぞれの昼間人口を推計する。

以上から、仮想都市圏モデルにおいては、人口、面積、地域ダミー、昼間人口比、及び周辺の数の 5 の外生変数を設定することで、その圏域内の人口分布を示した。なお、周辺の数とは都市圏域における周辺都市の個数であり都市圏域の規模を示す指標となり、地域ダミーは地域における違いを表現するコードであり、北海道地方、東北地方、関東地方、北陸地方、中部地方、関西地方、中国地方、四国地方、九州地方、沖縄地方の 10 とした。

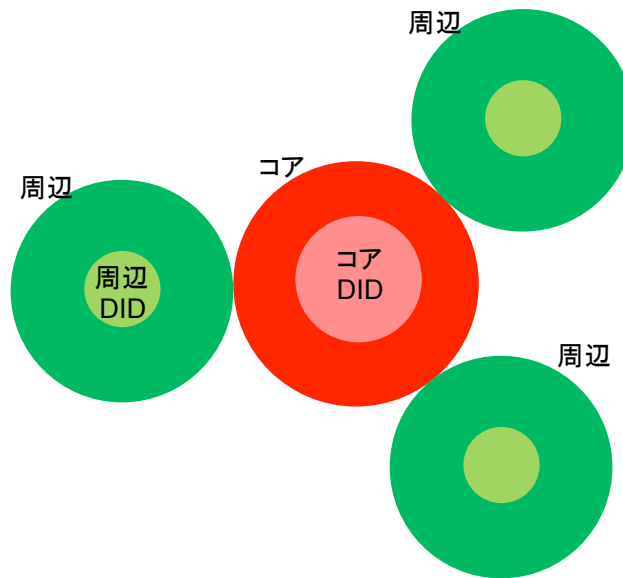


図 4-2 仮想都市圏モデルの概念図

4.2.1. コアと周辺への配分

まず、都市圏全体の人口と面積をコアと周辺に配分する。その手順を図 4-3 に示す。図より、都市圏人口と都市圏面積をコアと周辺に配分する際、コア人口比・コア面積比を設定しており、以下の式でコアと周辺の人口・面積は示される。

$$\begin{aligned}
 Pop^{core} &= Pop \times Rp^{core} \\
 Pop^{peri} &= Pop - Pop^{core} \\
 Area^{core} &= Area \times Ra^{core} \\
 Area^{peri} &= Area - Area^{core}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

ただし、 Pop^i : ゾーン i の人口、 $Area^i$: ゾーン i の面積、 Rp^i : ゾーン i の人口比率、 Ra^i : ゾーン i の面積比率、 $i : \{core, peri\}$, である。

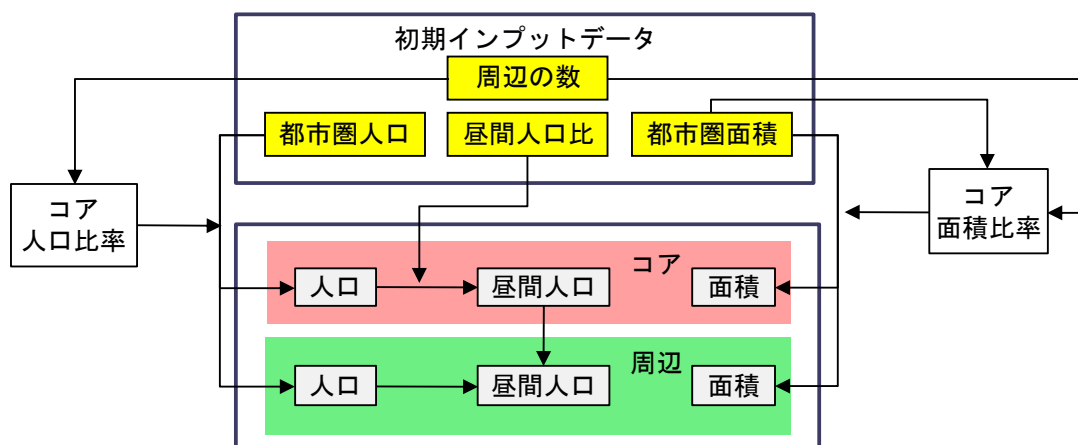


図 4-3 仮想都市圏モデルの配分フロー

コア人口比は、都市圏人口をコアに振り分ける比率であり、反対に述べるとコアにどれだけの周辺人口が引きつけられているかの指標でもある。都市圏規模を示す指標の代替として周辺の数を利用する。図 4-4 に周辺の数により場合分けをした都市圏人口とコア人口の関係を表す散布図を示した。周辺の数に応じてコア人口を都市圏人口で回帰した傾きをコア人口比とする。コア人口比は以下の式に示される。また、それぞれ括弧内は t 値である。

$$Rp^{core} = \begin{cases} 0.2489 & (t = 40.28) & (N \geq 20) \\ 0.4238 & (t = 14.99) & (10 \leq N < 20) \\ 0.6613 & (t = 27.06) & (5 \leq N < 10) \\ 0.6633 & (t = 29.94) & (N < 5) \end{cases} \quad (4.2)$$

ただし、 Rp^{core} ：コア人口比、 N ：周辺の数、である。

周辺の数が多いほど、コア人口比は小さくなり、より多くの周辺の人口を都市圏として引きつけていることが分かる。これは、周辺が 2 章で示した都市間力がコアとの間に作用しているためであり、大都市圏であるほど通勤者を引きつけることから理解できる。

次に、コア面積比を推計する。人口比の時と同様に、面積比を見てみると、都市圏面積が大きくなるほどコア面積比が小さくなっていることが分かる。また、人口比の時と同様に周辺の数が大きくなるとコア面積比は小さくなるようである。これは、中心地として機能する面積には限りがあるため、都市圏域が大きくなってもコア面積はあまり大きくならないためであると考えられる。

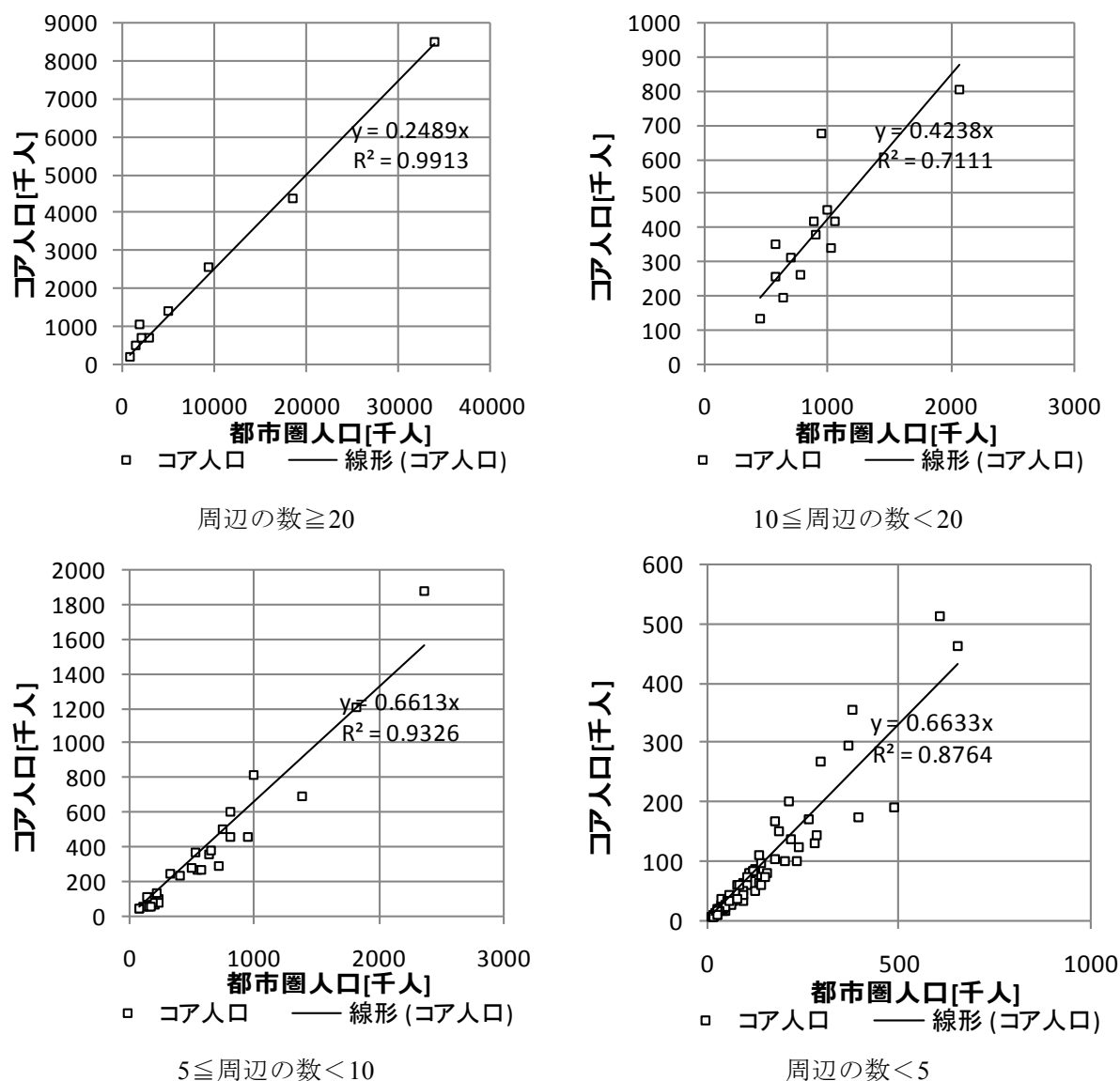


図 4-4 周辺の数で分類した都市圏人口とコア人口

以上のことから、コア面積比を以下の式で推計することとする。この式はロジスティック関数の形をとっている。ロジスティック関数とは成長曲線とも呼び、0 から 1 までの変化を生物の成長の過程に応じて描く関数である。成長の過程とは、初期はわずかな変化し、中期に大きな変化を経て、後期はまたわずかな変化になる S 字カーブを示す。この曲線は 0 から 1 の値をとるコア面積比を推計するのに適していると考えられる。

$$Ra^{core} = \frac{1}{1 + EXP(\alpha \ln(N) + \beta \ln(Area) + \gamma)} \quad (4.3)$$

ただし、 Ra^{core} : コア面積比、 N : 周辺の数、 $Area$: 都市圏面積、 α, β, γ : 各係数、である。

回帰分析により式(4.3)の係数を推計した結果を表-4.1 に載せる。表からは周辺の数が多いほ

どコア面積比が小さくなり、都市圏面積が大きいほどコア面積比が大きくなることがわかる。つまり、都市圏面積が大きいほどコア面積も大きくなるが、周辺がどれだけであるかによって、コア面積は影響を受けるということである。

表 4-1 コア面積比の推計結果

	係数	t 値
周辺の数	0.967	8.265
都市圏面積	-0.378	-2.767
定数項	1.645	1.990
重相関決定係数 0.687		
サンプル数 121		

以上から、都市圏内のコア・周辺への配分を推計した。

4.2.2. DID 地区への配分

次に各ゾーンで同様の配分フローを仮定することで、DID と非 DID の人口・面積の推計を行った。基本的には都市圏の人口と面積をコアと周辺に分配したのと同様に、人口比率と面積比率を内生的に決定し、それにより DID 地区と非 DID 地区に分配する。その手順を図 4-5 に示す。ここでいう全域とはコアないしは周辺に相当する。よってコアであれば、全域人口はコア人口であり、全域面積はコア面積である。比率は人口の集中度によって異なると考えられるので、人口密度により決定するものとする。

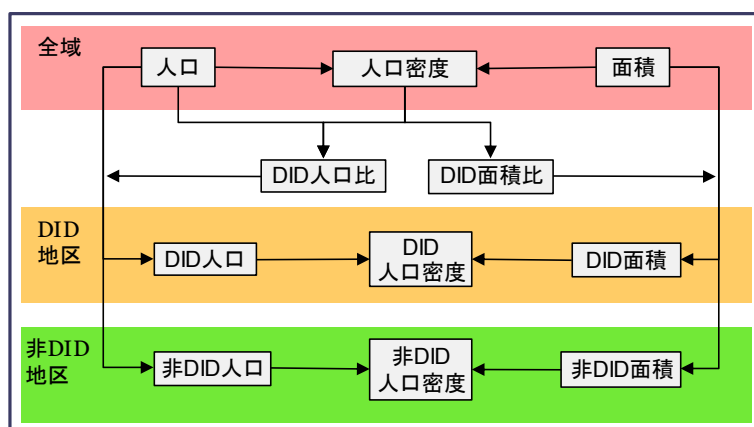


図 4-5 DID と非 DID へのフロー

コア比率を用いることで、各ゾーンの人口・面積は以下のように示される。

$$\begin{aligned}
 Pop_{DID}^i &= Pop^i \times Rp_{DID}^i \\
 Pop_{non-DID}^i &= Pop^i - Pop_{DID}^i \\
 Area_{DID}^i &= Area^i \times Ra_{DID}^i \\
 Area_{non-DID}^i &= Area^i - Area_{DID}^i
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

表 4-2 人口密度と人口規模によるカテゴリ分け

人口密度 人口	1500 人/km ² 以上	500 人/km ² 以上	500 人/km ² 以下
100 万人以上	A	B	
10 万人以上			
10 万人以下			C

ただし、 Pop_j^i ：ゾーン i の j 地区の人口、 $Area_j^i$ ：ゾーン i の j 地区の面積比率、 Rp_j^i ：ゾーン i の j 地区の人口比率、 Ra_j^i ：ゾーン i の j 地区の面積比率、 $i : \{core, peri\}$ 、 $j : \{DID, non-DID\}$ 、である。

コアの DID 人口は、都市圏において人口が最も集中している地区に居住する人口であるので、そのエリアに居住する人の比率は市域の人口密度だけでなく、コア人口にも影響を受けていると考えられる。よって、人口密度と人口規模に応じて、実際の配分に適合するように場合分けをすることとした(表 4-2)。ただし、このようなカテゴリを考える際には、様々な要因が考えられるが、今回の分析では、少ないデータ入力の特徴から、人口と人口密度という限られた要素のみ取り上げて場合分けを行った。

カテゴリ別に DID 人口を全域人口で回帰した傾きが DID 人口比率を示すものとし、以下の式で示す。なお、括弧内は t 値である。

$$Rp_{DID}^{core} = \begin{cases} 0.9899 & (t = 117.0) & (A) \\ 0.6826 & (t = 40.24) & (B) \\ 0.3278 & (t = 15.68) & (C) \end{cases} \quad (4.5)$$

ただし、 Rp_{DID}^{core} ：コア DID 人口比率、 A, B, C ：カテゴリ、である。

DID 面積は市域における人口の集中している地区の面積であるので、市域の人口密度が増加するほどに大きくなると考えられる。都市圏面積をコアと周辺に分配したときと同様に、DID 面積比率をロジスティック関数の形で、人口密度を説明変数として、以下の式により回帰する。人口密度を対数変換しているのはばらつきを標準化するためである。また、回帰結果は表 4-3 に示すとおりである。

$$Ra_{DID}^{core} = \frac{1}{1 + EXP(\alpha \ln(Dns^{core}) + \beta)} \quad (4.6)$$

ただし、 Ra_{DID}^{core} ：コア DID 面積比率、 Dns^{core} ：コア全域の人口密度、 α, β ：各係数、である。

表 4-3 コアにおける DID 面積比の推計結果

	係数	t 値
コア全域の人口密度	10.495	41.973
定数項	-1.258	-30.407
重相関決定係数 0.9077		
サンプル数 96		

表 4-4 コアにおける DID 面積比の推計結果

	周辺における DID 人口		周辺における DID 面積	
	係数	t 値	係数	t 値
周辺全域の人口密度	0.340	2.458	0.242	1.795
周辺全域の人口	1.013	13.024	0.962	12.721
定数項	-4.212	-5.035	-10.345	-16.679
重相関決定係数		0.879	重相関決定係数	0.866
サンプル数		71	サンプル数	71

また、周辺の DID 人口比率、DID 面積比率に関しては、統計的に有意となる結果とはならなかった。そのため、周辺については線形回帰モデルによって、DID 人口と DID 面積を直接推計した。式を以下に示す。また、回帰結果は表 4-4 に示す。

$$\begin{aligned}
 Pop_{DID}^{peri} &= EXP(\alpha \ln(Dns^{peri}) + \beta \ln(Pop^{peri}) + \gamma) \\
 Area_{DID}^{peri} &= EXP(\alpha \ln(Dns^{peri}) + \beta \ln(Pop^{peri}) + \gamma)
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

ただし、 Pop_{DID}^{peri} ：周辺 DID 人口、 $Area_{DID}^{peri}$ ：周辺 DID 面積、 Dns^{peri} ：周辺全域の人口密度、 α, β, γ ：各係数、である。

DID 人口、DID 面積ともに、人口密度、人口が増加するほど大きくなる。これはより多くの人口が密集しているほどに DID 人口も DID 面積も大きくなることを示す。

以上から、コア、周辺ともに、全域の人口と面積から DID 地区と非 DID 地区に人口を配分することが可能となった。

以上の方法で、初期インプットである都市圏の人口と面積、また周辺の数から、コア DID 地区、コア非 DID 地区、周辺 DID 地区、周辺非 DID 地区の 4 つの地区に、人口、面積を配分する過程を示した。

4.3. 家庭部門における環境負荷量の推計

人間活動の基盤である生活の主となるのは家庭部門である。家庭部門では人間活動の単位として世帯数や住宅の面積があり、それらに活動量あたりの原単位を乗じることで環境負荷を推計することが可能である。単位あたり環境負荷は、居住の様々な形態によって異なり、それに応じた原単位が整理される必要がある。居住の形態とは、戸建てや集合といった建物の建て方や、建築物の構造などである。エネルギー消費については、世帯あたりの消費量や延床面積あたりの消費量を用いることが一般的である(住環境計画研究所, 2009)が、本研究では世帯の規模も含めた世帯あたりの消費量を用いた。これにより、地区の人口密度が変化した際の世帯あたりの延床面積を考慮したエネルギー消費量推計を可能とした。資源蓄積量については、延床面積あたりの資源投入量を用いることが一般的で(長岡, 2010)、本研究では構造別の資源投入量を用いた。以上のことから、対象地区における人口・面積をもとに、世帯構成人数により世帯数を決定し、建て方・構造別の延床面積を推計した。また、規模別の世帯数に世帯あたりエネルギー消費原単位を乗じることでエネルギー消費量を、構造別の延床面積に単位面積あたりの資源投入原単位を乗じることで資源蓄積量を推計した。

家庭部門で主要となるのは世帯数であり、以下の式で推計した。

$$Hh_{i,j} = Pop_{i,j} / PpH_{i,j} \quad (4.8)$$

ただし、 $Hh_{i,j}$: ゾーン i の j 地区の世帯数、 $Pop_{i,j}$: ゾーン i の j 地区の人口、 $PpH_{i,j}$: ゾーン i の j 地区の世帯構成人数、 $i: \{core, peri\}$, $j: \{DID, non-DID\}$, である。世帯構成人数については各ゾーン各地区において回帰分析により推計を行った。世帯構成人数を表 4-5 に示す。

次に、家庭部門の活動量として主となる住宅延床面積を以下の式により推計した。

$$TFHh_{i,j} = \sum_{type} \sum_k (Hh_{i,j}^{type,k} \times FApH^{type,k}) \quad (4.9)$$

$$Hh_{i,j}^{type,k} = Hh_{i,j} \times RhT_{i,j}^{type} \times RhF_{i,j}^{type,k}$$

ただし、 $TFHh_{i,j}$: ゾーン i の j 地区の住宅延床面積[m²], $Hh_{i,j}^{type,k}$: ゾーン i の j 地区の建て方 $type$ 世帯あたり面積範囲 k の世帯数、 $FApH^{type,k}$: 建て方 $type$ 世帯あたり面積範囲 k の平均面積、 $RhT_{i,j}^{type,k}$: ゾーン i の j 地区の建て方 $type$ の世帯割合、 $RhF_{i,j}^{type,k}$: ゾーン i の j 地区建て方 $type$ における世帯あたり面積範囲 k の世帯割合、 $i: \{core, peri\}$, $j: \{DID, non-DID\}$, $type: \{Detached, Collective\}$, $k: \{0-30, 30-50, 50-70, 70-100, 100-150, 150-\}$, である。なお、 $type$ の $Detached$, $Collective$ はそれぞれ戸建て、集合住宅を示し、面積 k の単位については[m²]である。

表 4-5 ゾーン・地区別の世帯構成人数

	コア	周辺
DID 地区	2.22	3.41
非 DID 地区	3.38	4.12

建て方別世帯割合は世帯の住み方を示す割合であり，人口分布が集約した地域では戸建ての割合が小さく，分散した地域では戸建ての割合が大きいことから，人口密度を説明変数に以下の式で推計した．

$$RhT_{i,j}^{Detached} = f(Dns_{i,j}) \quad (4.10)$$

ただし， $RhT_{i,j}^{Detached}$ ：ゾーン i の j 地区の戸建て世帯割合， $Dns_{i,j}$ ：ゾーン i の j 地区の人口密度， $i : \{core, peri\}$ ， $j : \{DID, non-DID\}$ ，である．

世帯あたり面積別世帯割合は，世帯あたりの面積に応じた世帯数の割合で，確率密度関数により以下の式で推計した．

$$\begin{aligned} RhF_{i,j}^{type,k} &= f(k_2) - f(k_1) \\ f(x) &= \frac{1}{1 + EXP(a \ln(x) + b)} \\ a &= \alpha_1 Dns_{i,j} + \beta_1 \\ b &= \alpha_2 Dns_{i,j} + \beta_2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

ただし， $RhF_{i,j}^{type,k}$ ：ゾーン i の j 地区の戸建て世帯割合， $Dns_{i,j}$ ：ゾーン i の j 地区の人口密度， $i : \{core, peri\}$ ， $j : \{DID, non-DID\}$ ， $type : \{Detached, Collective\}$ ， $k : [k_1 : k_2]$ ， α, β ：各係数，である．

以上の方法で，世帯数から住宅延床面積を推計する際に世帯あたり床面積の規模を考慮することで，詳細な推計を行った．推計された住宅延床面積に，エネルギー消費原単位とエネルギー種別二酸化炭素換算係数を乗じることで家庭部門二酸化炭素排出量を，構造別資源投入原単位を乗じることで資源蓄積量を推計する．エネルギー消費原単位は日本エネルギー経済研究所エネルギー計量分析センター(2000)より地域別機器別住宅規模別に整理した消費量の値を利用した．二酸化炭素換算係数については図 4-6 に示したフローで計算した．資源投入原単位については表 4-6 に示す長岡ら(2009)の値を利用した．

表 4-6 建築物資源投入原単位[kg/m²]

	砂利・石材	コンクリート	モルタル	木材	ガラス	陶磁器	鉄	アルミニウム
W造	0.00	86.23	2.53	88.40	4.90	52.14	1.89	1.96
SRC造	0.00	1314.22	21.88	18.99	1.88	3.21	46.21	2.10
RC造	0.00	1257.56	21.88	17.91	2.03	3.51	33.23	2.09
S造	0.00	233.05	106.24	10.72	1.22	1.10	133.57	1.18

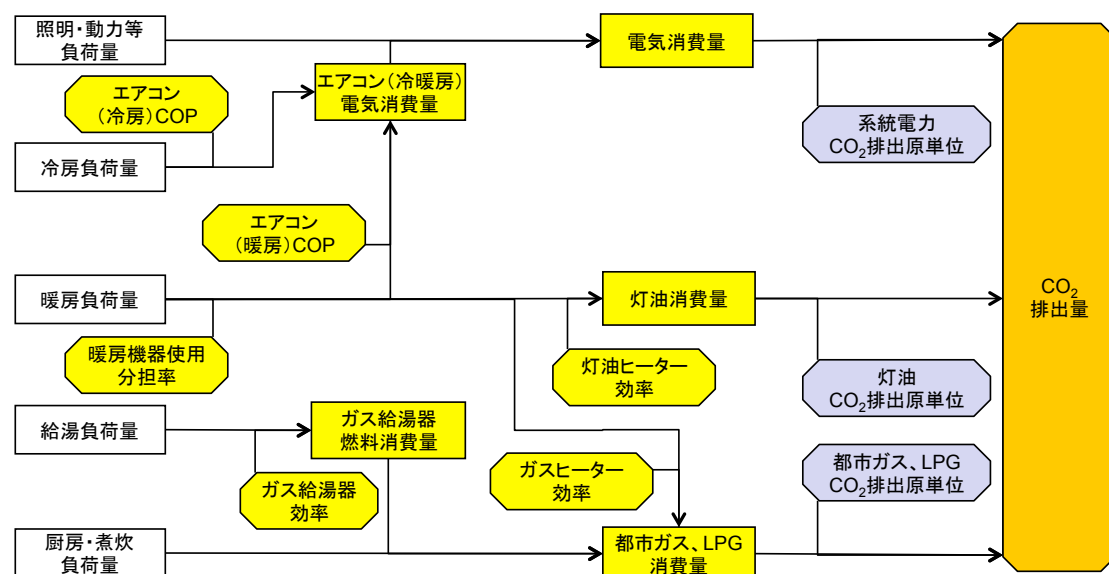


図 4-6 二酸化炭素排出量推計フロー

4.4. 業務部門における環境負荷量の推計

業務施設は、通常、日中の経済活動が行われている時間において利用される施設であるので、昼間人口 1 人あたりに必要となる面積を推計することで、その値を昼間人口に乗じて推計する。

また、用途別の業務施設とは事務所、卸小売店舗、飲食店、ホテル・旅館、学校・研究機関、病院、その他の 7 種類である。

用途別の 1 人当たり延床面積を推計するのだが、業務施設の面積のサンプルデータは国土交通省による法人建物調査(2008)で、都道府県と政令指定都市に限られている。そこで、少しでも多くのデータとして活用するために、政令指定都市がある都道府県についてはそれを除き、残りの部分をサンプルとした。これにより、サンプル数は 61 となる。また都道府県と政令指定都市を同じデータサンプルとしてとらえると、規模を扱うのは整合性に欠けるので、面積で除することによって標準化を行った。つまり、「昼間人口密度」1 単位に必要な「面積当たりの業務施設の延床面積」を推計した。用途別に推計を行い、回帰式の傾きが、昼間人口密度 1 単位に必要な面積当たりの業務施設の延床面積である。その単位は $[(人/㎢) / (㎡/㎢)]$ であり、分母分子で $㎢$ を除けば $[人/㎡]$ であり、昼間人口 1 人当たりの業務施設の延床面積である。このように、用途別 1 人あたり業務施設の延床面積を用途別に推計した。推計結果を表 4-7 に示す。

表から、事務所の値が特に大きいことがわかる。また、その他は上記に含まれない業務施設をすべてまとめたために、大きくなってしまったと考えられる。このような用途区分を用いたのは、後にエネルギーを推計する際にその原単位が用途別に異なるためである。以上のように、業務利用面積を推計する。

表 4-7 用途別 1 人あたり業務施設の延床面積

用途	コア	周辺
事務所	5.294	1.640
卸小売店舗	0.382	0.848
飲食店	0.082	0.025
ホテル・旅館	0.422	0.197
学校・研究機関	0.944	0.579
病院	0.334	0.944
その他	2.808	2.808

次に、推計された業務建物延床面積に、エネルギー消費原単位とエネルギー種別二酸化炭素換算係数を乗じることによって家庭部門二酸化炭素排出量を、構造別資源投入原単位を乗じることによって資源蓄積量を推計する。エネルギー消費原単位は日本ビルエネルギー総合管理技術協会(2008)の地域別機器別消費量の値を利用した。二酸化炭素換算係数については家庭部門で示した図 4-6 のフローと同様に計算した。資源投入原単位については家庭部門と同様に表 4-6 に示す長岡ら(2009)の値を利用した。

4.5. 仮想都市モデル

以上に示した推計過程によって、仮想都市モデルの構築を行った。本論文では、仮想都市モデルを VUAM(Virtual Urban Area Model)として以下の分析に用いた。各フローについては、随時改善がなされており、現在は VUAM ver.2.5.2 である。図 4-7 に VUAM ver.2.5.2 の概要を示した。本章以下の分析では、図中左にある初期入力値のみについて、外生変数とした。4 章、5 章で利用する際には、都市ごとに将来の年齢階層別の人口を推計しているため、各都市の人口や年齢別人口割合などについては、新たに外生変数として分析の必要に応じてその利用を変更した。

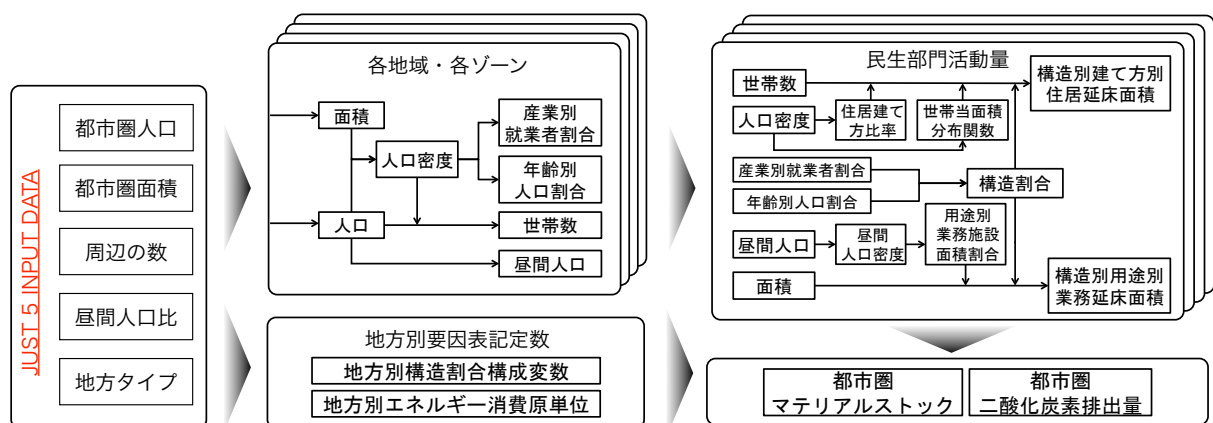


図 4-7 VUAM ver.2.5.2 フローチャート

4.6. 低環境負荷都市圏の検討

低物質かつ低炭素型の社会の実現に向けて、現在の環境負荷を定量化し、その把握をすることは非常に重要である。我が国では、全国や都道府県などスケールで、多くの環境統計が公表されているが、そのいずれも行政界に依存しており、地域計画などを検討する上で必ずしも最適な情報となり得るわけではない。人間活動は行政界を超えて存在しており、それをふまえた都市圏域での環境負荷の定量化が重要である。また、環境負荷量の把握に併せて、その削減に向けた方策を比較・検討する必要がある。特に、我が国では少子高齢化に伴う人口減少が現在進行中であり、居住の形態が問題となっている。特に都市や都市群の適切な規模や人口密度を論じることは重要で、適切な資源投入・管理と密接に関わってくる。以上のことから、以下では、2章において定義をした都市圏を対象に、3章で構築した仮想都市モデルを適応することで、都市圏全体の都市規模や、都市圏内の人口分布が変化した場合の、低環境負荷の可能性について検討した。

都市圏の所与の人口は、2章の都市圏の定義に従って設定されている。この人口を含めた、面積、昼間人口比、地域ダミー、周辺の数という初期設定によって、3章で構築した仮想都市モデルを利用することで、各都市圏における環境負荷量を推計可能である。また、人口分布については、3章2節で示した手順において、都市圏内をいくつかのゾーンに分配した場合の人口配分によって決定しているが、これは経験的な回帰的推計手法に依存しており、適切なあり方を示すには至っていない。そのため、モデルによる推計された人口分布から、集約または分散させた際の環境負荷量を検討することによって、最適な人口分布を検討することが可能である。そこで、本章では以下の3種の人口規模・分布の変化によって、一人あたり二酸化炭素排出量とマテリアルストックの最小化について分析した。

- 1) 都市圏全体の人口規模を変化させる
- 2) 都市圏内のコアと周辺の人口比率を変化させる

これらの変化はそれぞれ以下に示す都市圏の形態を分析することを可能とする。1)は都市圏そのものの最適規模を検討しており、地域別にその傾向を把握することを可能とする。2)はコアと周辺での都市間の人口移動を検討しており、コアに人口の集約が発生した場合や、周辺に人口が分散した場合の環境負荷量把握を可能とする。

以上の方法で、次節以降では都市圏における環境負荷量の最小化について検討を行った。

4.7. 都市圏におけるマテリアルストック需要量の最小化

仮想都市モデルで推計された資源蓄積量は、域内に存在する人口やその分布によって推計されたマテリアルストックの需要量であり、低物質社会を目指すためにも、その低減が望まれる。前節で述べた人口規模・人口分布の変化に応じて、本節ではマテリアルストック需要量の最小化について検討を行った。

1) 人口規模変化

2章で示した121の都市圏について、仮想都市モデルにおける推計結果を図4-8に示した。全体としては、人口規模が大きいほど一人当たりマテリアルストックは小さくなる傾向があり、都市圏規模が大きいほど、コアあるいはDID地区への集中による人口密度の増加から、効率が高いことが示唆される。しかし、人口がおよそ300万人(グラフ上では6.5程度)を超えた辺りから大きい部分では、その傾向は少ない。ここから、現在の都市圏の規模を対象とすると、大都市圏は効率という点ではやや過剰である可能性が示される。

また、地方別に見ると、九州や関東は全体から見て下方に推移しており、北陸は上方に推移している。どの地方の傾向から、人口規模が小さい段階では規模の増加による一人当たりマテリアルストック需要量の減少が見込めるが、人口規模が大きい段階ではあまり見込めないことがわかる。その段階については、地方によって、およそ30万人(グラフ上では5.5程度)のあたりであるか、およそ100万人(グラフ上では6.0)のあたりであるか、異なっている。

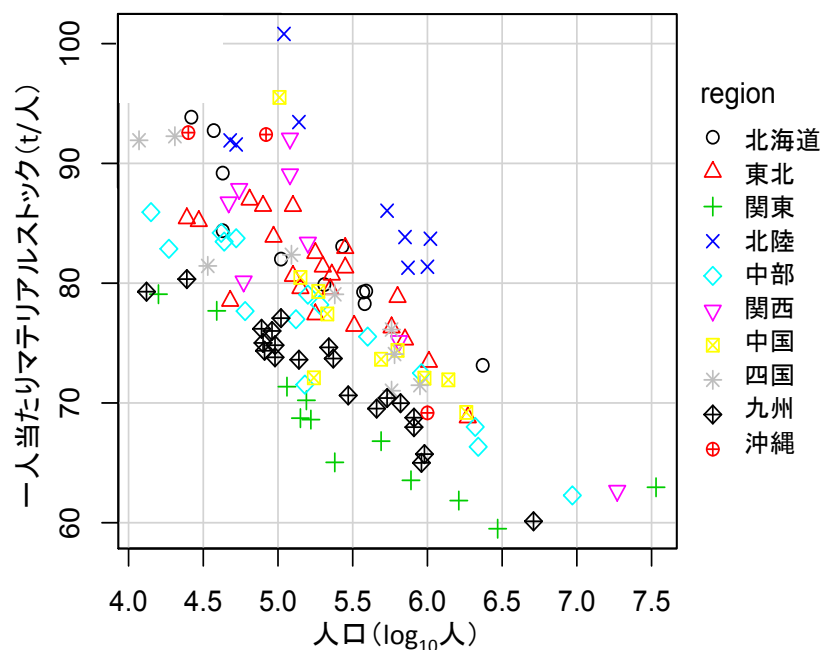


図4-8 都市圏の人口と一人当たりマテリアルストック

2) コア・周辺人口比率の変化

次に、1)で見た際に着目した100万人程度の都市圏と、30万人程度の都市圏を対象に、コアと周辺の人口比率を変化させて、一人当たりマテリアルストック需要量の変化を検討した。結果を図4-9、図4-10に示す。なお、ここでは人口移動率が、正であるとコアへの集約を意味し、負であると周辺への分散を意味する。

図4-9の結果から、沖縄以外の地方の都市圏では、集約すると一人当たりマテリアルストック需要量が減少し、分散すると増加することが示された。また、その変化の傾向は地方により、集約させた時の減少のピークは0.1から0.2の間で異なる。しかし、全体としては、集約するほどに

一人当たりマテリアルストック需要量は減少することが示された。図 4-10 の結果から、すべての地方の都市圏について、集約すると一人当たりマテリアルストック需要量が減少し、分散すると増加することが示された。また、100 万人程度の都市圏の場合とは異なり、0.05 から 0.1 程度の変化で集約した時に、それ以降は一人当たりマテリアルストック需要量が増加またはほとんど減少しない結果となった。これらの結果から、中規模な都市圏と比較すると、小規模な都市圏では集積による一人当たりマテリアルストック需要量の減少の効果は少なく、前項の人口規模の増加による変化がより大きな影響を持つことが示唆される。

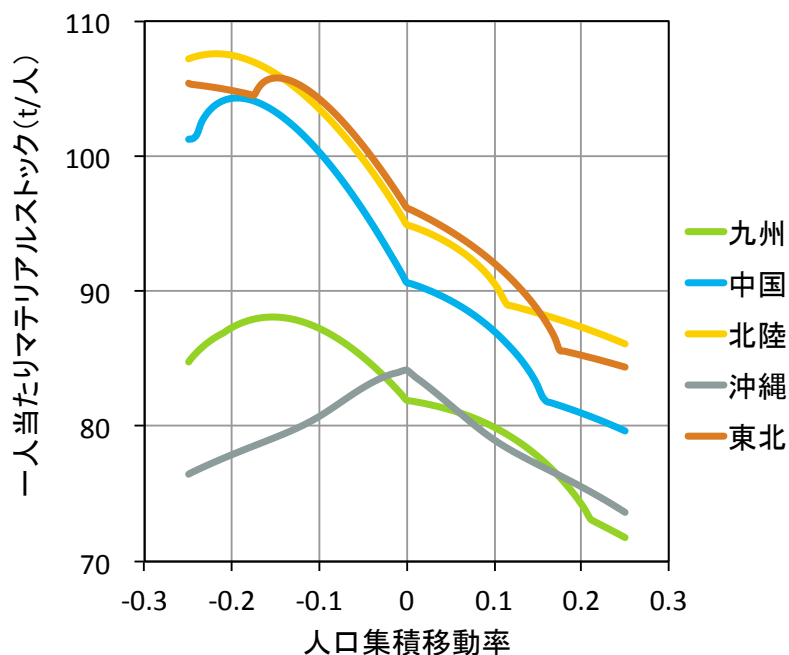


図 4-9 100 万人程度の都市圏における一人当たりマテリアルストック

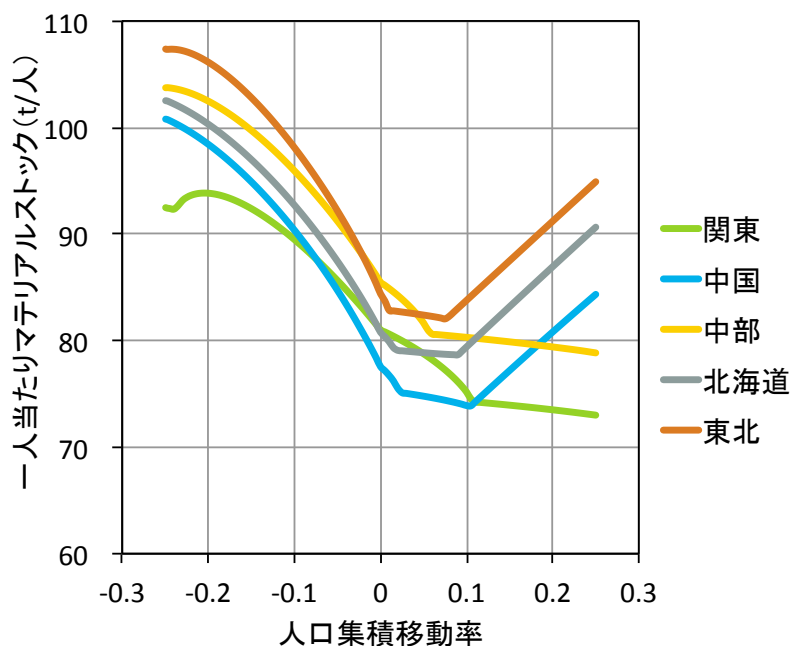


図 4-10 30 万人程度の都市圏における一人当たりマテリアルストック

4.8. 都市圏における二酸化炭素排出量の最小化

二酸化炭素排出量は、対象域内の人間活動により消費されたエネルギー消費量による結果であり、低炭素社会の実現へ向けて、削減することが望まれる。コンパクトシティの概念などから、集約した都市構造でその削減が期待されているが、前節のマテリアルストック需要量に見られたように、必ずしも集約の効果が大きいわけではない。本節では、前節同様 4.6 節の人口規模・人口分布の変化に応じて、二酸化炭素排出量の最小化について検討を行った。

1) 人口規模変化

2 章で示した 121 の都市圏について、仮想都市モデルにおける推計結果を図 4-11 に示した。全体としては、人口規模が大きいくほど一人当たり二酸化炭素排出量は小さくなる傾向があるが、その傾向は地方により大きく異なり、北海道や東北などの気温の低い地方では、人口規模の増加による一人当たり二酸化炭素排出量の減少効果が大きく示された。関東や関西など、大都市圏を抱える比較的温暖な地方では、規模による影響はそれほど示されていない。この原因としては、エネルギー消費原単位が考えられる。エネルギー消費原単位は地方別に整理しており、また機器別エネルギー源別に整理していることからその影響が結果に表れたと考えられる。

また、マテリアルストックの場合とは異なり、10 万人から 30 万人の範囲(グラフ上では 5.0 から 5.5 程度の範囲)ではほぼ一定であり、30 万人から 100 万人の範囲(グラフ上では 5.5 程度から 6.0 の範囲)で減少の傾向が見られる。そして 100 万人を超えた辺りから、また減少の傾向は小さくなることが示された。

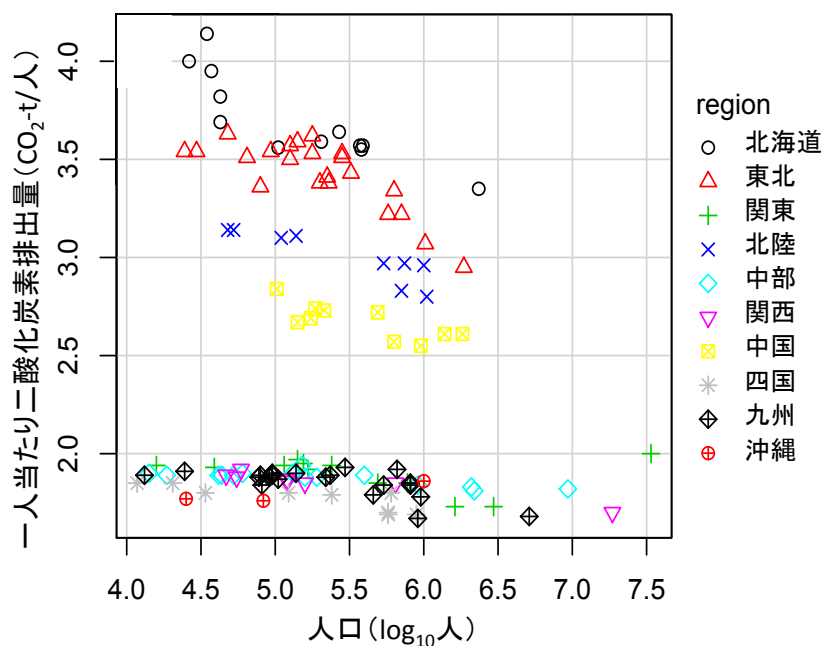


図 4-11 都市圏の人口と一人当たり二酸化炭素排出量

2) コア・周辺人口比率の変化

次に、1)で見た際に着目した 100 万人程度の都市圏と、30 万人程度の都市圏を対象に、コアと周辺の人口比率を変化させて、一人当たり二酸化炭素排出量の変化を検討した。結果を図 4-12、図 4-13 に示す。なお、前節と同様に人口移動率が、正であるとコアへの集約を意味し、負であると周辺への分散を意味する。

図 4-12 の結果から、沖縄以外の地方の都市圏では、集約すや分散による一人当たり二酸化炭素排出量への影響は大きくないことが示された。また、中国や九州の都市圏では、分散によりわずかに一人当たり二酸化炭素排出量の減少に影響があることが示された。しかし、全体としては、その変化は小さく集積・分散による効果はあまり見られないことが示された。図 4-13 の結果から、北海道と東北の都市圏について、集約することで一人当たり二酸化炭素排出量が増加することが示された。特に、0.1 を超える過度の集約は大きな増加が示された。関東や中部の都市圏では、わずかではあるが集積による減少の影響が見られた。これらの結果から、マテリアルストック需要量と比較すると、二酸化炭素排出量への影響では集積による効果は大きくないことが示唆される。

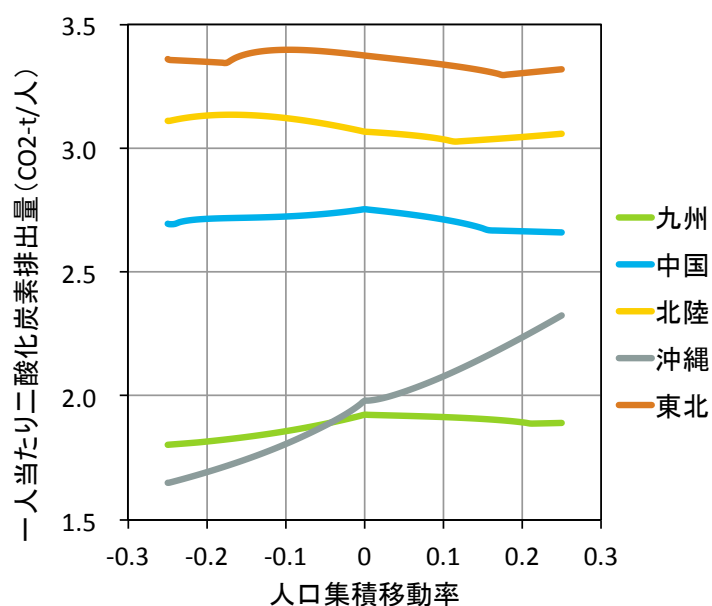


図 4-12 100 万人程度の都市圏における一人当たり二酸化炭素排出量

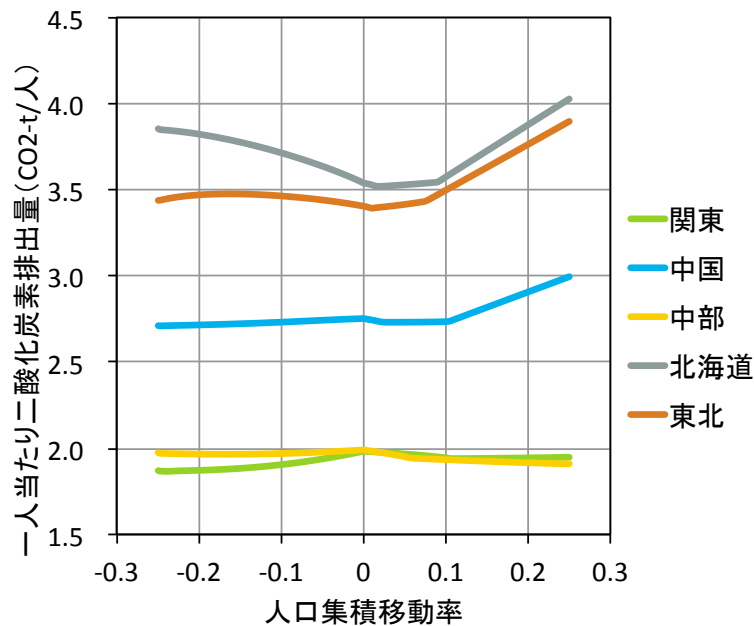


図 4-13 30 万人程度の都市圏における一人当たり二酸化炭素排出量

4.9. まとめ

本章では、仮想都市モデルを構築することで、地域の環境負荷の定量化について汎用性の高いモデル化を行った。現在の日本の都市をもとに仮想都市モデルを構築し、仮想的な都市における人口の分布を決定し、民生部門の活動量として住宅と業務施設の延床面積の需要量を推計した。また、地域により異なる地域別原単位を利用することで、地域特性に応じたマテリアルストック需要量や二酸化炭素排出量の推計を可能とした。

また、仮想都市モデルを利用した、低物質かつ低炭素な都市圏の人口規模や人口分布について検討を行った。特に人口規模において、マテリアルストック需要量、二酸化炭素排出量ともに、100 万人程度の都市圏で最小化の可能性があることが示唆される。既存の知見においては、集積による効果が大きいことが示されていたが、本分析ではそれらはあまり大きくないことが示された。しかし、本分析では、地域内を DID 地区とその他の地区にしか分けていないため、モデル内の計算フローにおいて、さらなる検討が必要である。

本モデルを利用することで、外生変数として将来人口を入力することで、地域ごとのマテリアルストック需要量を推計することが可能である。需要量は地域循環圏を検討する上で重要な値であり、以下の章でモデルを利用した結果値を利用する。

参考文献

- 1) 地域活性化統合本部会合（2008）環境モデル都市提案書.
- 2) 総務省統計局（2010）平成 17 年度国勢調査.
- 3) 国土交通省（2003）平成 15 年度法人建物調査
- 4) 住環境計画研究所（2009）家庭用エネルギーハンドブック（2009 年版）.
- 5) 長岡耕平・稲津亮・東岸芳浩・谷川寛樹・橋本征二（2009）全国の都道府県における地上と地下のマテリアルストック推計に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol. 37. pp. 214-219.
- 6) 日本エネルギー経済研究所 エネルギー計量分析センター（2000）民生部門エネルギー消費実態調査 No13, No14.
- 7) 長岡耕平・谷川寛樹・吉田登・東修・大西暁生・石峰・井村秀文（2009）全国都道府県・政令都市における建設資材ストックの集積・分布傾向に関する研究, 環境情報科学論文集 23, pp84-88.
- 8) 日本ビルエネルギー総合管理技術協会（2008）平成 19 年度版建築物エネルギー消費量調査報告書.

5.東海三県をケーススタディとしたコンクリート塊の地域循環圏の検討

近代に代表される大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会は、環境に甚大な悪影響を及ぼし、世界規模で持続可能な発展を危ぶむ結果となった。このような社会構造を変えるための概念の一つに循環型社会があり、我が国においてもこの概念に乗っ取って様々な環境政策が打ち出されている。特に取り組むべき問題の一つに建設副産物がある。建設副産物は重量にして産業廃棄物全体の18.4%を占め、1970年代以降に数多く建設された建築物が更新期を迎えることにより、今後も排出量の増加が見込まれているため、各種資材のリサイクル率の向上が図られている(環境省、2010)。

建設副産物を個別に規制する法律として建設リサイクル法(平成14年完全施行)がある。この法律は一定規模以上の工事に対して、分別解体等と木材、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊の再資源化等を義務化している。平成20年度建設副産物実態調査(2010)によると、建設副産物の総排出量は平成12年度の8,480万トンから、平成20年度には6,380万トンに減少し、再資源化率等は平成12年度の85%から、平成20年度には93.7%にまで上昇しており、一定の成果を挙げている。今後は、いかに効率的な形で循環させていくかが課題となっている。また、第2次循環型社会形成推進基本計画の中で、地域循環圏という概念が検討されている。この概念は個々の資源に適した循環圏を構築することによって、環境負荷や社会的コストの削減を達成しようというものであり、様々な循環物質での検討が行われている。代表的なものに小売業や外食業等から排出される食品残さを対象としたものがある。中部地方環境事務所では、「めぐりフード」という愛称で、地域循環圏構築に向けた食品リサイクルに関する取り組みを進めている。

しかし、建設副産物の資源循環を考える際に問題となるのが、その重量の大きさに加えて、建設時期の集中による時間的なばらつきと、建築物が都市部に集中しているために起こる空間的なばらつきである。これらは地域ごとに大きく異なり、それぞれの特徴に合った計画を立てる必要がある。ところが、建設副産物に関する統計情報や既往研究は、都道府県単位での集計が為されており、また、地域循環圏構築に向けた研究や取り組みは一般廃棄物や希少金属を対象としたものがほとんどである。また、建設副産物は、都市圏や経済圏といった場合に、行政界を越えることがしばしばあり、より詳細な単位での分析が持続可能な社会の形成に向けて必要と考えられる。

そこで本章では、循環型社会構築を補助する概念である地域循環圏構築に向けた基礎的研究として建設副産物の性質を十分に考慮できるようにコンクリート塊の循環利用を取り上げ、ケーススタディとして東海三県市町村を対象に供給量と需要量のモデルを作成し、2010年から2050年の期間で需要供給比の観点からの分析を行った。特に、前章で示した仮想都市圏モデルはこの分析において有効であり、同モデルの一部を適応することで検討を行った。

5.1. 既往研究

循環圏構築に関する定性的な研究として、藤田ら(2000)は、循環型の産業集積開発事業の計画と評価についての調査研究において、循環型の産業集積事業の事例としてデンマークの産業地区である Kalundbrog, 米国の Fairfield Ecological Business Park, 日本の北九州エコタウン事業を取り上げ、その物質の代謝構造および主体間連携の組織構造を明らかにした。その上で、地域循環の理念を、排出物の再資源化施設の立地を含めた空間把握によって達成されるものとして定義した。Chen ら(2012)は、リサイクル品目ごとに地域循環圏の検討を行い、その循環圏の領域を多層的に分析することで循環圏ネットワークのあり方を示した。

また、地域循環圏の定量評価に関しては、廃棄物の動態に着目した研究が多く見られる。田畑ら(2002)は、地域内の廃棄物発生空間分布の把握と廃棄物を再資源化施設までに輸送するための収集・輸送領域の決定を行い、その過程に生じるエネルギー消費量を最小にしつつ適当な処理規模での再資源化が可能となる領域について検討した。藤山(2010)は、廃棄物・循環資源の輸送に関する分析を通じて類型化を行い、廃 PET ボトルの輸送の現状と要因を明らかにした。

建設副産物の発生や再利用量の予測は以前から行われてきた。橋本ら(2000)は、建築物解体廃棄物の発生予測において、解体建築物量の予測手法を、既存の統計データおよび建築物の寿命変化に対応できるものとして、コンクリート塊の発生が解体廃棄物量の主な増加原因として挙げている。藤川ら(2006)は、建設廃棄物の排出量および再生利用量の予測に関する研究において、山口県を対象として 2020 年までの排出量とその再生利用量の予測を行っており、コンクリート塊の排出量は今後建築解体の増加に伴い増加するが、コンクリート塊の主な需要源である公共土木工事は減少傾向にあるため、再生砕石が供給過多になる可能性が高いと指摘している。

建築物の廃棄物発生量の将来推計については、萩島ら(2002)が東京都 26 市・23 区、鳥取県・島根県の全市町村及び福岡県全市町村の 3 つの地域を対象として、建築解体廃棄物発生量の将来予測を行っている。建築物の寿命と人口密度などの関係について検討し、人口変化に応じた一人あたりの延べ床面積から、将来の人口構造に応じた立て替え・廃棄物発生を推計している。

コンクリート塊リサイクルの評価は、橋本ら(2000)がコンクリート塊リサイクルの環境面からの評価において、コンクリート塊を道路路盤材用再生砕石としてリサイクルすることを LCA 的に評価し、その有効性を示した上で、環境負荷を低減させるためには輸送距離が重要であることを示した。

以上のように、コンクリート塊の供給過多を都道府県以上の単位で言及しているものが一般的である。しかしながら、再生砕石はその利用に関して空間的な制約が存在しており、バーゲン材のみを利用しているような地域も存在するといわれている。循環型社会の構築を目指すなか、このような現状が LCA の観点から許容されるものなのか評価するためにも、より小さな単位で分析し、空間分布を把握することが必要である。

5.2. 建設副産物需給推計モデル

本研究は、建築物の解体に伴い発生するコンクリート塊と、道路改良の際に必要な碎石を市町村ごとに推計することにより、コンクリート塊の形成する地域循環圏を受給の面から把握するものである。モデルの概要を図 5-1 に示す。推計モデルは大きく左側の供給量推計と右側の需要推計に分けられる。供給量推計では、将来人口から将来世帯数を推計し、それと世帯当たりの建築物着工量から建築物着工量の推計を経て、減失延床面積を推計することで、建設副産物から出るコンクリート塊を推計した。なお、本研究における建築物とは、建築基準法における定義であり、住宅用建物・業務用建物を含んでいる。需要量推計では、道路改良事業量を推計し、コンクリート塊の再利用先である道路における再生碎石投入量を推計した。

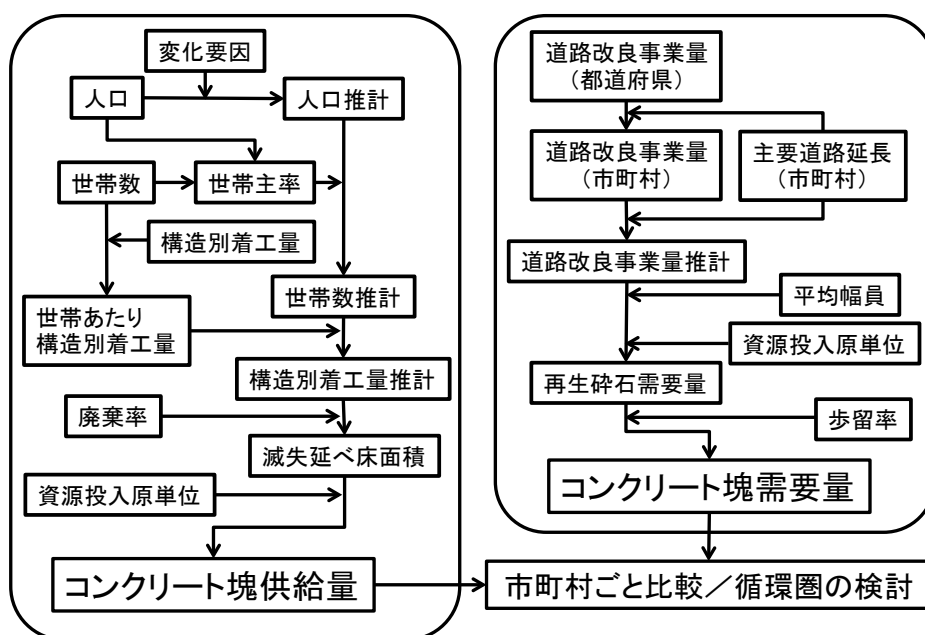


図 5-1 建設副産物需給推計モデル概要

5.2.1. 将来年度における世帯数の推計

人口の推計には、コーホート要因法を用いる。コーホート要因法とは、男女別・5 歳階級別に整理された人口構成を利用して、将来人口をシステムの推計する手法である。これを利用するにあたって、必要なデータとしては、基準年度の男女別 5 歳階級別人口コーホート、死亡率、出生率、移出入率、出生性比がある。式(5.1)は $t+5$ 年次の推計人口を示した式である。

$$POP_{m,n+1,t+5} = POP_{m,n,t}(1 + PIR_{m,n,t} - POR_{m,n,t} - DR_{m,n,t}) \quad (5.1)$$

ただし、 m ：性別を示すインデックス（ $m=1$ は男性 $m=2$ は女性）、 n ：年齢階層を示すインデックス（ $n=1$ が 0~4 歳、 $n=2$ が 5~9 歳、 $n=3$ が 10~14 歳……、 $n=17$ が 80~84 歳、 $n=18$ が 85 歳以上）、 $POP_{m,n,t}$ ： t 年における年齢階層 n 性別 m の人口、 $PIR_{m,n,t}$ ： t 年における年齢階層 n 性別 m の移入

率, $POR_{m,n,t}$: t 年における年齢階層 n 性別 m の移出率, $DR_{m,n,t}$: t 年における年齢階層 n 性別 m の死亡率, である. また, $n=1$ の出生人口に関しては式(5.2)を用いる.

$$POP_{m,1,t} = \sum_{n=4}^{10} POP_{2,n,t} BR_n MR \quad (5.2)$$

ただし, BR_n : 年齢階層 n の女子の出生率 (n 層の女子が 5 年間に子供を産む割合), MR : 出生性比 (産まれた子供が男子である割合), である. これら 2 式より, $t=t+5$ 年次の総人口は式(5.3)により推計できる.

$$POP_{t+5} = \sum_m \sum_n POP_{m,n,t+5} \quad (5.3)$$

次に, 世帯主率法を用いて推計人口から世帯数を推計する. 世帯主率法とは, 男女別・5 歳階級別の人口および世帯主の数から世帯数を推計する手法である. 基準年度の世帯数を人口で除した男女別・5 歳階級別の世帯主率を当該年の人口に乗ずることによって各年齢階層の世帯数を求め, その合計によって当該年の世帯数が決定される. 推計手順を以下に示す.

$$H_{n,t} = \sum_m POP_{m,n,t} \cdot HR_{m,n} \quad (5.4)$$

$$H_t = \sum_n H_{n,t} \quad (5.5)$$

ただし, $H_{n,t}$: t 年における各年齢階層の世帯数, $HR_{m,n}$: 年齢階層 n 性別 m の世帯主率, H_t : t 年における全世帯数, である. 図 5-1 にコーホート要因法と世帯主率法を用いた世帯数推計の概要を示した.

推計に用いるデータとして, 基準年の男女別 5 歳階級別人口とそれに対する世帯主数は平成 17 年国勢調査を利用し, 出生率等のコーホート要因は国立社会保障・人口問題研究所の公表する値を使用した.

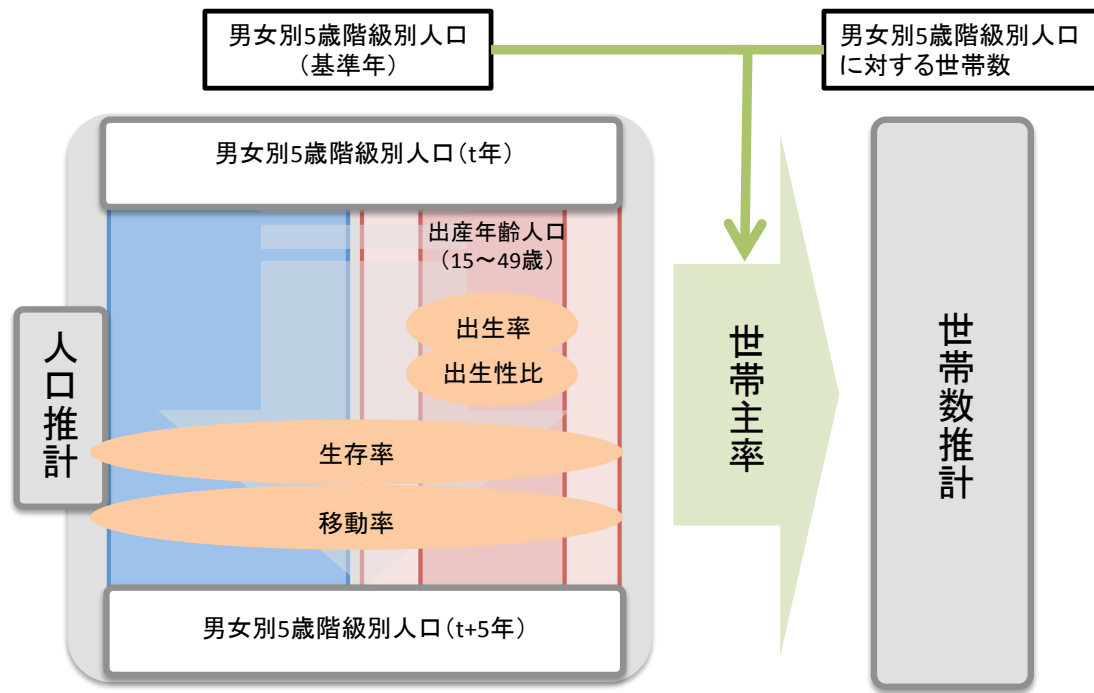


図 5-2 世帯数推計フローの概要

5.2.2. 構造別着工量の推計

本研究では構造別着工量を基礎として建設副産物量を推計するため、過去の構造別着工量と将来推計が必要となる。第一に、過去の構造別着工量であるが、建築統計年報の市町村別に整理されたものを使用する。その構造は、木造・RC造・SRC造・S造・C造・その他の6つに分類されている。第二に構造別の着工量推計であるが、その決定要因は将来の世帯数であると考え、基準年度における各市町村と構造別着工量を原単位として整理し、将来世帯数に乗じることで以下のように推計した。

$$CB_{s,t} = H_t \cdot \gamma_s \quad (5.6)$$

ただし、 $CB_{s,t}$: t 年における構造 s の着工量、 γ_s : 構造 s の世帯あたり着工量、である。

5.2.3. 建設副産物量の推計

将来の建設副産物量の推計は、建築物着工量に廃棄率を乗じることで推計した。廃棄率は廃棄率曲線から計算する。廃棄率曲線に関して、小松ら(1992)は、建物の残存率を調査した結果から構造別に整合性の高い確率分布関数を検討している。また、小見ら(2010)は、将来にわたる残存率の変化について考察しており、主にワイブル分布を利用している。本研究では、これらを参考に以下の式(5.7)で示される廃棄率曲線を用いた。

$$R_s(\tau) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\tau - \delta}{\eta} \right)^m \right\} \quad (5.7)$$

ただし、 $R_s(t)$ ：建設後 t 年における構造 s の廃棄率、 m ：形状パラメータ、 η ：尺度パラメータ、 δ ：位置パラメータ、ある。以上から廃棄率を計算し、前節で求めた建築物着工量に乗じることで、構造別減失延べ床面積を推計した。減失延べ床面積推計を式(3.8)に示し、図 5-3 に使用した廃棄率曲線を建築物の構造別を、表 5-1 に廃棄率曲線の各パラメータを示した。なお、SRC 造は RC 造の廃棄率曲線を用いた。C 造とその他の建物については延床面積の割合が小さいことから、本研究では取り扱わないものとする。

$$EA_{s,t} = CB_{s,t} \cdot \{R_s(t+5) - R_s(t)\} \quad (5.8)$$

ただし、 $EA_{s,t}$ ：建設後 t 年から $t+5$ 年の間における構造 s の減失延べ床面積、である。

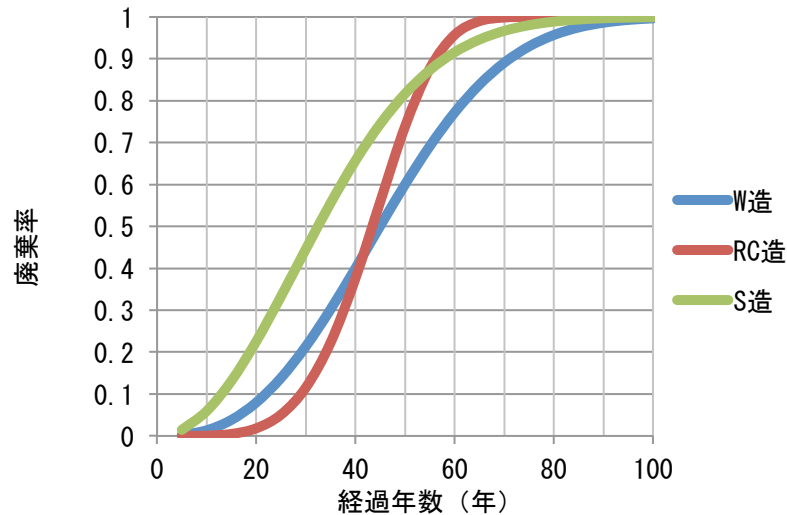


図 5-3 廃棄率曲線

表 5-1 廃棄率曲線のパラメータ

	W 造	RC 造	S 造
δ	0.00	0.00	0.00
m	2.62	4.68	2.07
η	51.68	46.96	38.71

また、推計された構造別減失延べ床面積に表 5-2 に示す長岡ら(2009)による資源投入原単位を乗じることで、建設副産物量の推計を行った。本研究では、コンクリート塊を循環利用する対象の排出物と設定しており、以下の式で示すようにコンクリート塊供給量を推計する。

表 5-2 建築物の資源投入原単位[kg/m²]

	砂利・石材	コンクリート	モルタル	木材	ガラス	陶磁器	鉄	アルミニウム
W造	0.00	86.23	2.53	88.40	4.90	52.14	1.89	1.96
SRC造	0.00	1314.22	21.88	18.99	1.88	3.21	46.21	2.10
RC造	0.00	1257.56	21.88	17.91	2.03	3.51	33.23	2.09
S造	0.00	233.05	106.24	10.72	1.22	1.10	133.57	1.18

$$S_T = \sum_s \left(I_s \sum_t CB_{s,t} \Delta R_s(T-t) \right) \quad (5.9)$$

ここで、 S_T : T 年におけるコンクリート塊供給量[kg]、 I_s : 構造 s のコンクリートの資材投入原単位[kg/m²]、 $\Delta R_s(T-t)$: t 年着工のうち T 年における廃棄率、とする。

5.2.4. 再生碎石需要量の推計

再生碎石の供給先は主に道路路盤材であるため、道路事業における再生碎石需要量を市町村ごとに推計する。道路事業は、表 5-3 に示す 4 つに区分されている。

表5-3 道路事業の種類

道路改良	道路の拡幅や改良またはバイパス等の建設を行う事業
舗装新設	道路改良が終わった区間に新たに舗装を設置する事業
舗装補修	舗装路面の破損状態が甚だしい舗装の補修を行う事業
砂利道補修	砂利道において、破損した道路の機能を回復するために行う補修事業

道路路盤材の投入または更新を伴う工事は道路改良事業と考えられるため、国土交通省の道路統計年報の各年の都道府県別道路改良事業量 (km) を基礎として推計を行う。また、道路改良事業は交通量の多い主要道路 (舗装道路) で主として行われていると考え、県ごとの道路改良事業量を主要道路の割合で各市町村に割り当てる。割り当てられた道路改良事業量は、そのトレンドを考慮して将来にわたって推計する。道路の耐用年数に関しては、加藤(1996)、森本(2009)、国土交通省国土交通政策研究所(2002)、内閣府政策統括官(2007)など、複数の年数が見られるため、その平均的な値として 30 年を用いることとしたため、主要道路の更新は 1 年に 30 分の 1 ずつ更新すると仮定し、主要道路総延長を 30 で除した量を下回らないように下限値をもうけた。

次に道路改良事業量に幅員を設定する必要がある。本研究では、ESRI スタンダードパック(2010)を使用して、市町村別に幅員を設定した。道路改良事業量に、この市町村別に設定した幅員を乗じることで、道路改良事業量面積を得る。

そして道路改良事業量面積に道路の資源投入原単位を乗じることによって再生砕石需要量を推計する．資源投入原単位は長岡ら(2009)の作成した道路の資源投入原単位のうち，高級アスファルト舗装の平均値を使用した．その値を表 5-4 に示す．

表 5-4 道路の資源投入原単位 [kg/m²]

表層				上層路盤	下層路盤		
表層重量	骨材	アスファルト	セメント	水硬性スラグ	クラッシャラン	流調砕石	切り込み砂利
235	220	15	0	416	391	88	0

また，平成 20 年度建設副産物実態調査(2010)によると，発生したコンクリート塊のうち再生砕石となる割合は約 90%である．コンクリート塊供給量との比較を行うため，再生砕石需要量を当該割合で除することでコンクリート塊需要量とする．以上のコンクリート塊需要量計算を式(5.10)に示す．

$$D_T = IR_T W \gamma_R / \alpha \quad (5.10)$$

ここで， D_T ： T 年におけるコンクリート塊需要量[kg]， IR_T ： T 年における道路改良事業量[m]， W ：平均幅員[m]， γ_R ：道路資源投入原単位[kg/m²]， α ：コンクリート塊から製造される再生砕石割合，である．

5.2.5. コンクリート塊需給の検討

推計されたコンクリート塊供給量と需要量の関係から，コンクリート塊需給について検討を行う．まず，以下の式で示すように，コンクリート塊供給量をコンクリート塊需要量で除した値を，需要供給比と定義する．

$$B_T = S_T / D_T \quad (5.11)$$

ここで， B_T ： T 年におけるコンクリート塊の需要供給比，である．需要供給比は，地域ごとに資源循環の供給元か需要先を示す指数であり，その空間分布から，需要・供給のバランスを検討できる．

また，コンクリート供給量の需要先への移動の可能性を定量的に評価することも重要である．本研究では，供給量をエージェントと仮定し，その移動をシミュレートすることで地域におけるコンクリート塊排出物再利用の圏域について検討した．

5.3. 推計結果

5.3.1. ケーススタディ・シナリオの設定

ケーススタディとして、推計単位は名古屋都市圏を含む東海三県内の市町村を対象とした。図 5-4 にはケーススタディエリアの市町村を表記した。人口・世帯数は国勢調査(2005)を、構造別着工量については建築統計年報を用いた。コンクリート塊から製造される再生砕石割合は平成 20 年度建設副産物実態調査(2010)より求めた値を用いた。また、シナリオとして、小見ら(2010)の廃棄率を基準に、建物寿命が 1.5 倍、2.0 倍の値を仮定した。建物寿命が長くなるということは、建築物の更新期が遅延し、建設副産物の発生時期同様に将来へと持ち越されることを意味する。

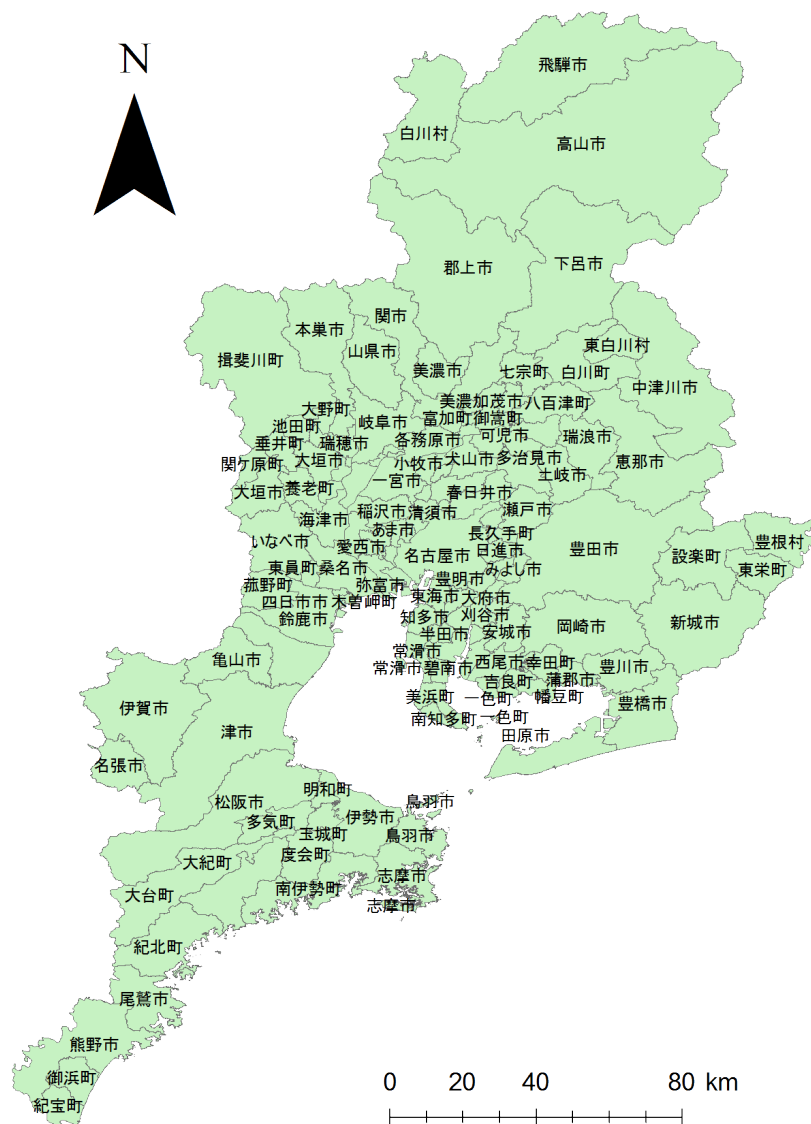


図 5-4 東海三県の市町村

5.3.2. 需給検討に必要な諸値の推計結果

世帯数の推計結果を図 5-5 に示す。現在日本の人口は減少し続けており、今後もこの傾向が続くと予想されている。本推計結果においても各市町村でこの傾向が見られるが、名古屋市等の一部の地域では、人口構成の変化によって、人口の減少に反して世帯数の増加が予想される。この影響によって愛知県では 2020 年にピークを迎えることとなった。ピーク時の世帯数は約 289 万戸であり、2005 年と比較して 6%増加している。対して岐阜県、三重県はともに世帯数の減少が推計された。2005 年に対する 2050 年の減少率は、岐阜県、愛知県、三重県それぞれ 14.3%、8.4%、13.4%となった。

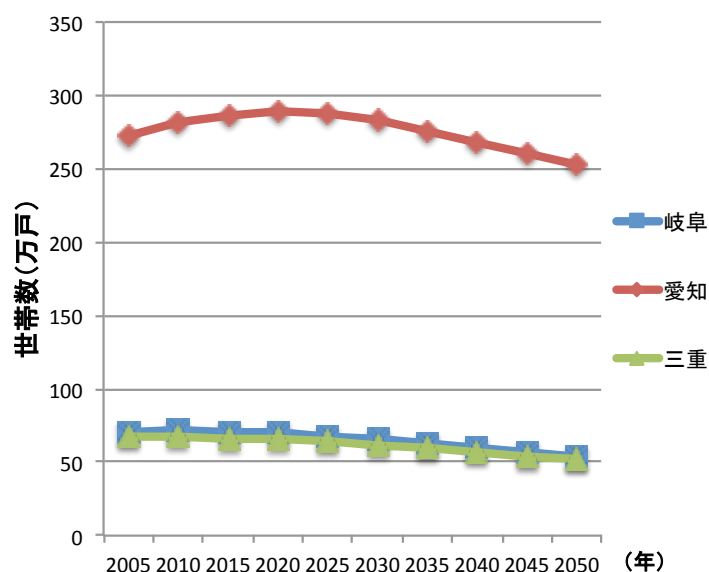
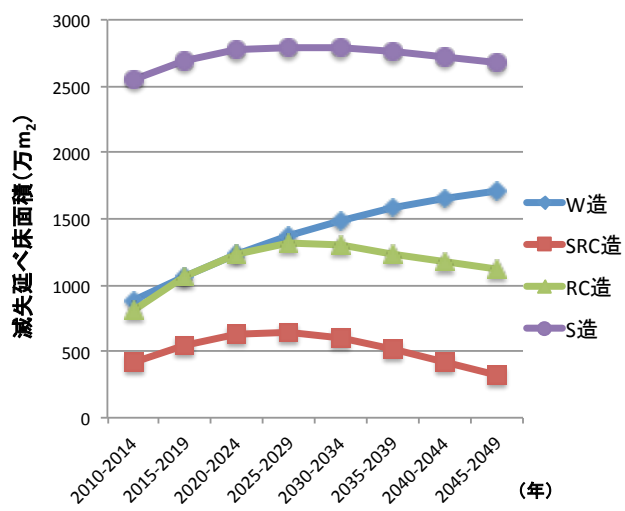
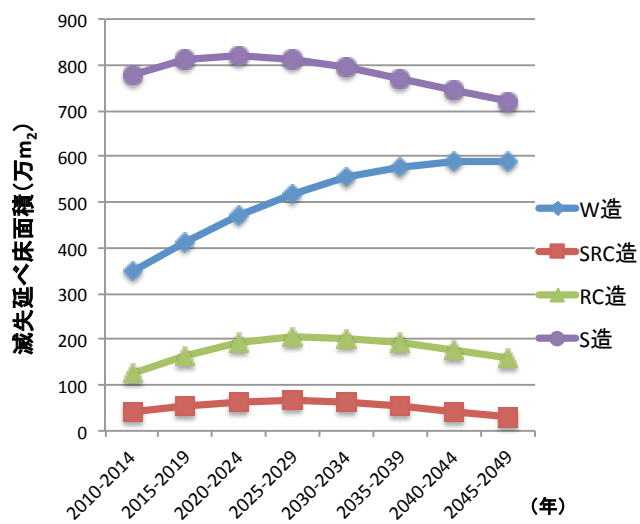


図 5-5 各県の世帯数推計結果

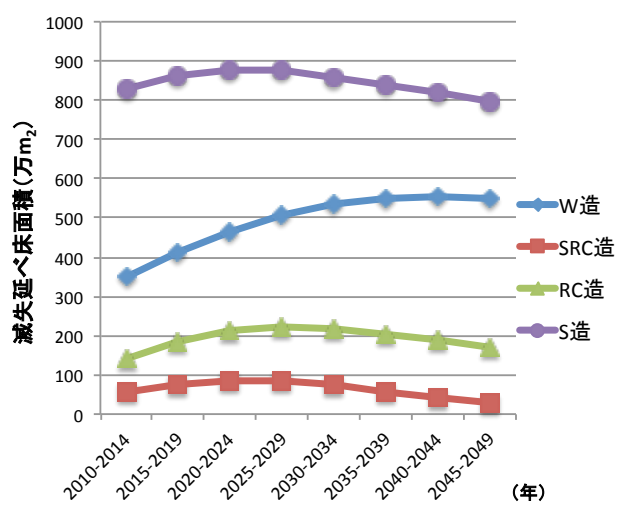
構造別の滅失延べ床面積を県ごとに図 5-6(a)-(c)に示す。まず、三県全体に言えることとして、S 造、W 造、RC 造、SRC 造の順で滅失延べ床面積が多い。これは、各構造の廃棄率の違いによるものではなく、単に着工延べ床面積量の違いによるものであると考えられる。県ごとの滅失量と構成割合の比較を行う。岐阜県と三重県は量、構成割合ともにほとんど同じ結果となった。愛知県は他県と比較して、各構造で 2~10 倍多くの滅失延べ床面積量があり、構成割合は、SRC 造、RC 造の割合が高いという結果となった。コンクリートの資源投入原単位の大きい SRC 造と RC 造の全体に占める割合を比較する。各県とも 2025-2029 年に割合が最も大きくなっており、岐阜県、愛知県、三重県それぞれ 16.8%、31.9%、18.2%となった。愛知県は滅失延べ床面積の多さに加えて、その構成割合からもコンクリート塊発生量が多くなると考えられる。



(a) 愛知県



(b) 岐阜県



(c) 三重県

図 5-6 構造別滅失延べ床面積推計結果

また、県別の SRC 造と RC 造の構成から、愛知県は滅失延床面積の多さに加えて、その構成割合からもコンクリート塊発生量が多くなると考えられる。

また、これらの諸値について建築統計年報(2010)の統計値と比較することで、分析方法の妥当性を検討した。着工延床面積の比率は、愛知県、岐阜県、三重県でそれぞれ、1.384、1.391、1.395 であった。滅失延床面積の比率は、愛知県、岐阜県、三重県でそれぞれ、1.483、1.530、1.609 であった。これらから多少の過大評価となっているが、その傾向は着工・滅失と県ごとに大きく異なっていない。また、滅失から計算される 2008 年の三県のコンクリート塊供給量合計はおよそ 630 万トンであり、建設副産物実態調査(2010)による 438 万トンとの比率は、着工・滅失と似た傾向にあり、供給量推計ではやや過大評価している結果となった。一方、需要量推計では道路の再生砕石需要量と砕石等統計年報(2011)の道路用再生砕石生産量との比較をすることで検討を行った。2010 年の三県の道路の再生砕石需要量合計はおよそ 281 万トンであり、道路用再生砕石生産量の 208 万トンとの比率は 1.282 であった。供給量と需要量を比較すると、推計値と統計値の比率は似た傾向にあり、共にやや過大評価ではあるが、一定の妥当性が見られた。

5.3.3. コンクリート塊需給の推計結果

図 5-7 に 2010-2014 年における各県のコンクリート塊需給を示す。愛知県は供給量が 22.5Mt、需要量が 5.6Mt と推計され、約 17Mt のコンクリート塊が余る結果となった。また、愛知県の供給量の 40%である 9.0Mt が名古屋市で発生している。岐阜県は供給量が 4.2Mt、需要量が 4.0Mt と推計され、需給はバランスしているといえる。三重県は供給量が 4.8Mt、需要量が 3.0Mt と推計され、若干の供給超過であった。

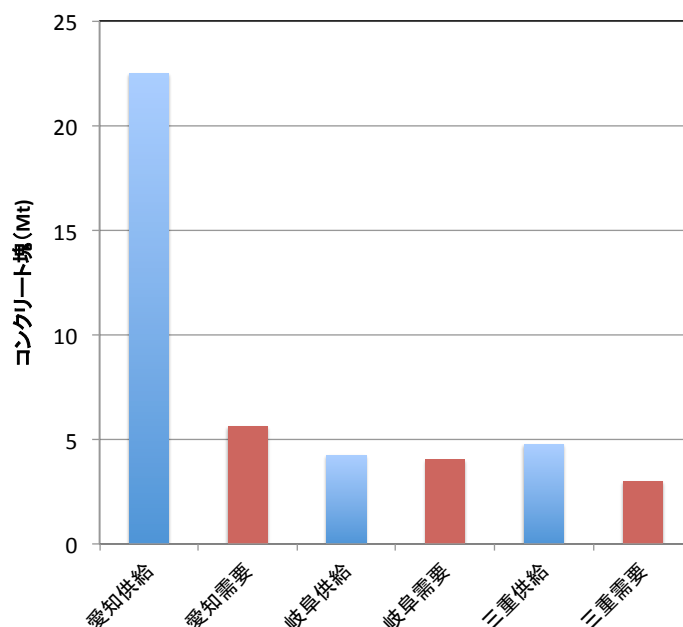


図 5-7 各県のコンクリート塊需給結果(2010-2014)

東海三県内におけるコンクリート塊需給推計の時系列結果を、シナリオごとの結果と共に図 5-8 に示す。建築寿命の延長を考えない場合、供給量は 2025-2029 年にピークを迎えることとなり 36.4Mt の余剰コンクリート塊発生が推計された。建築寿命の延長を考えた場合、どちらの場合もそれほど多くの建物が更新期を迎えておらず、建築寿命 2.0 倍のシナリオ時には、排出物の急激な発生増加を抑制する効果が認められる。そのため、需要と供給を総量で比較すると、一定のバランスが見られる。

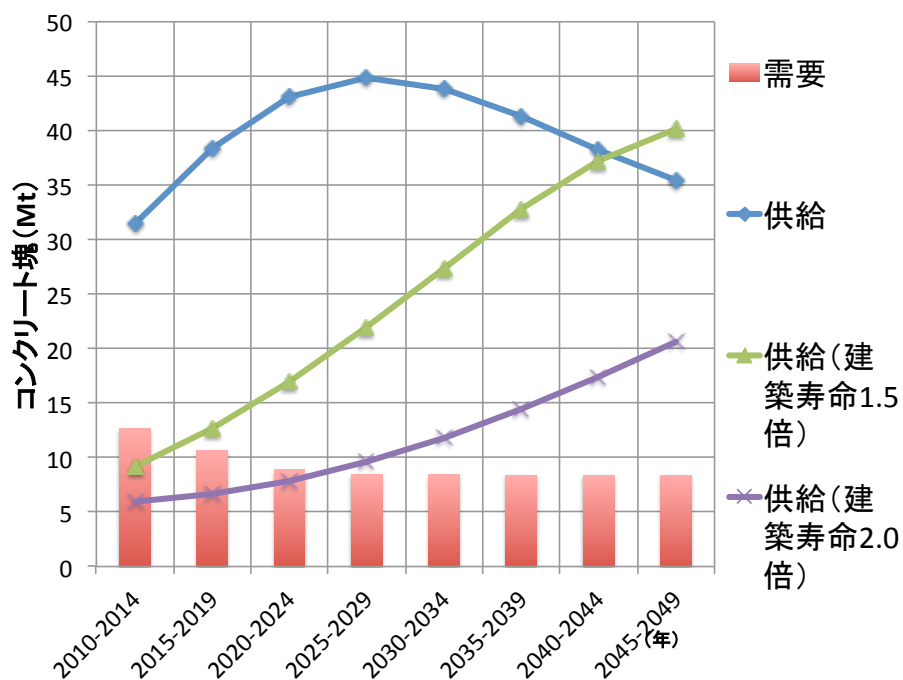


図 5-8 東海三県のコンクリート塊需給結果(2010-2050)

5.4. コンクリート塊需要供給比

5.4.1. 需要供給比の空間分布

需要供給比の空間分布を時系列で図 5-9 に示す。需要供給比の値が大きいほど、コンクリート塊が供給過多となっていることを表し、図中では濃い青色で示されている。また、黄緑色の地域では、市町村内で需給がバランスしていることを、赤色の濃い地域では過度の供給不足となっていることを表している。需要供給比の個別の値を比較すると、2010-2014 年愛知県豊根村の 0.019 が最低であり、2025-2029 年愛知県名古屋市の 23.059 が最高であった。前章で示したように、東海三県全体で需給を比較した際には推計期間中継続して大幅に供給が需要を上回る結果となったが、市町村別に整理すると、供給不足となる地域が多く存在することが示された。具体的には、岐阜県北部、愛知県東部、三重県南部では、慢性的な供給不足に陥っているが、名古屋都市圏では圧倒的に供給過多となっている。そのため、東海三県では名古屋都市圏から各地方へのフローが発生するような循環圏を形成すると考えられる。この結果から、都市部では供給過多となるが地方部では供給不足となる構図が顕著に表れることとなった。

次は時系列に比較・検討をした。図 5-9 より、2010-2014 年から 2025-2029 年にかけて、多くの市町村で供給不足の緩和または供給超過の悪化が見られる。これは、都市部においては高度経済成長期に立てられた建築物が更新期を迎えることが、地方部では道路事業量減少を仮定したことによる影響が大きいと考えられる。その結果、都市圏からの供給に依存しないような小さな循環圏の形成が想定される。2025-2029 年から 2045-2049 年にかけては、近年の建築物着工量の影響により、2010-2014 年の分布に戻りつつあると考えられる。以上より、コンクリート塊の形成する循環圏はその規模や時間により変化することが示唆される。

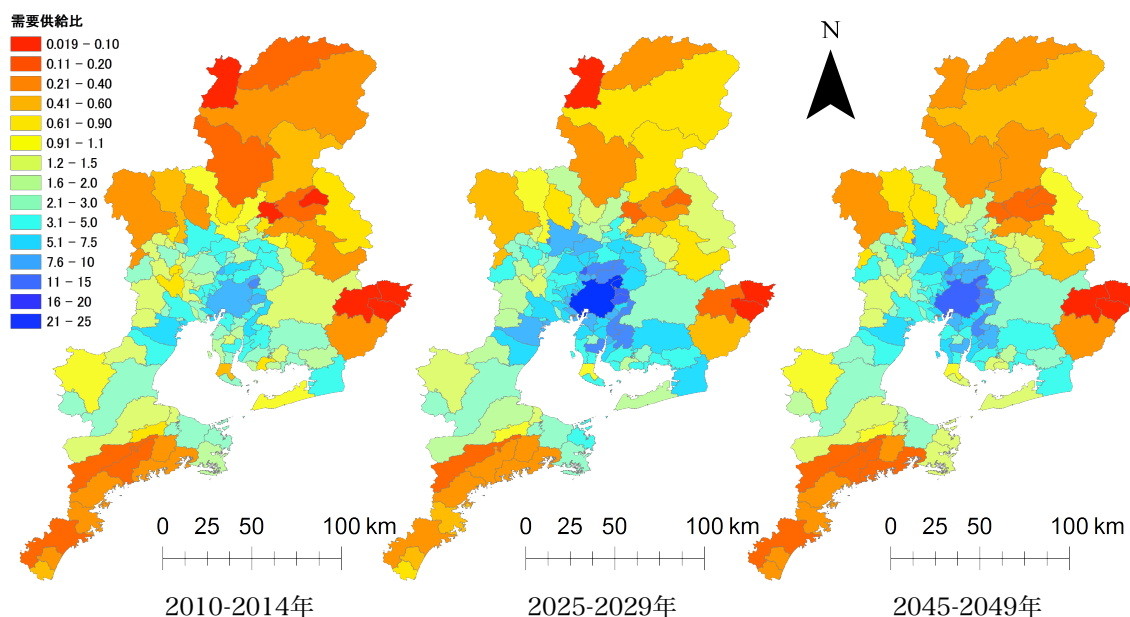


図 5-9 需要供給比の空間分布と時系列比較

5.4.2. 需給バランスの空間分析

次に、地域ごとの物質循環を把握するために、市町村別に推計した結果を利用して空間分布を用いた分析を行う。分析方法は、市町村間の距離を仮定し、最も近い市町村間から順に、対象区域内で需要もしくは供給が満たされるまで排出物のやり取りを行い、どれだけの距離までフローが発生するのかを検討するといった手順である。分析の結果を図 5-10 に示す。図中の横縞模様の地域はコンクリート塊を他市町村から需要する地域であり、横縞模様のない色付きの地域は供給する地域である。それぞれ 20km, 40km, 60km, 80km, 100km 以内に排出物のやり取りを行った圏域を赤から緑への凡例で図中に示した。赤色の地域では、近距離で物質のやり取りが成立し、緑色に近づくにつれて輸送距離が長くなることを示す。そして色の付いていない地域では 100km 以内での排出物のやり取りは行われていないことを表す。図 5-10 から、大量のコンクリート塊余剰の発生している名古屋市周辺や四日市市からの移動は生じていないことが示される。名古屋市を中心に見る都市圏の分布と比較すると、コンクリート塊は都市圏の中層から外周の地域へ移動が見られ、中心部のコンクリート塊は供給不足の地域へ物質循環が成立していない。また、時系列で比較すると、網のかかっていない色の付いた地域が経年で減少しており、より少ない地域の供給により、コンクリート塊の形成する循環圏が縮小することが示される。輸送距離に着目することで、中心部に関しては余剰コンクリート塊が滞留する結果となった。ここで、2010-2014 年の津島市や、2025-2029 年と 2045-2049 年の名張市のように供給超過地域が循環圏と隣接していない場合がある。これは、市町村間の距離を役所間で仮定したことに起因しており、循環圏と隣接する地域間では、優先的にやり取りを行うよう分析を行うことによって結果が変化すると考えられる。また、単純に距離を用いるのではなく、道路ネットワークを考慮した時間距離を用いて分析を行うことでも、現状と異なった結果となる可能性がある。

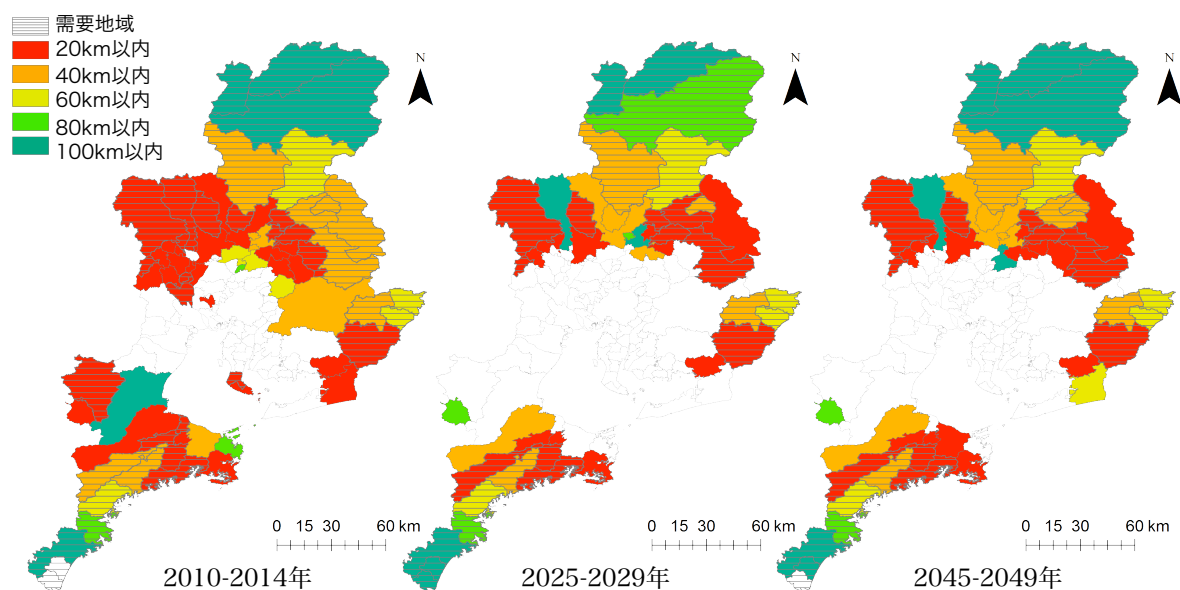


図 5-10 距離別のコンクリート塊需給バランスの空間分布

5.4.3. 建物寿命シナリオにおける検討

次に、建物寿命を変化させた際の検討を行う。図 5-11 には、2045-2049 年における建物寿命を基準値の 2.0 倍で推計した結果を示した。図 5-10 と比較することで、建物寿命の延長によるコンクリート塊供給量抑制効果によって需要超過地域が増加し、循環圏の偏りが解消され、よりバランスのとれた圏域が示される。特に、対象地域の多くが赤く示されるように、一つの圏域が 20km 以内で収まっており、より安定した圏域が示される。また、三重県南部では供給不足となっており、関わらず近隣の地域からコンクリート塊が供給されないこととなった。これは、供給地域一つあたりの供給量が減少し、三重県南部においては一部バランスの取れない地域が現れる結果となったことを示す。

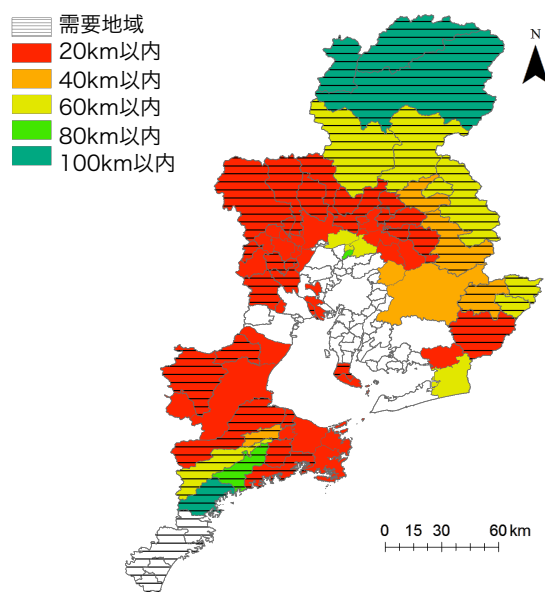


図 5-11 空間分布の結果(建物寿命 2 倍)

5.5. まとめ

本章では、地域循環圏構築に向けた基礎的研究として、東海三県を対象に市町村レベルの統計情報を用いて、コンクリート塊の循環利用における供給量と需要量に関する将来推計モデルを作成し、その量と空間分布を用いて循環圏の検討を行った。以下にそのまとめを示す。

- 1) 本ケーススタディにおいては、建物寿命を現状のままと仮定した場合、東海三県全体で2010-2014年に18.8Mt、2025-2029年に36.4Mt、2045-2049年に27.1Mtのコンクリート塊が道路路盤材に投入されることなく、余剰が発生することが推計された。
- 2) 建物寿命を現状の1.5倍とした場合には、2010-2050年までの期間ではコンクリート塊発生量のピークを遅延させるに停まるが、建物寿命を現状の2.0倍とした場合には、コンクリート塊の発生量急増を抑制する効果が認められた。
- 3) 各市町村間の距離を役所間の直線距離と仮定し、輸送距離を最小化させるように東海三県内でコンクリート塊を循環させる場合、名古屋都市圏中核部からは地方部への移動が生じず、大量のコンクリート塊が余剰することが推計されたため、中核部におけるコンクリート塊の道路路盤材以外の利用を具体的に検討する必要がある。
- 4) 建物寿命が現状のままの場合、2010-2014年から2025-2029年にかけて需要超過から供給超過に転ずる地域が存在することで、圏域のサイズや規模が変化することが推計された。
- 5) 本分析から、コンクリート塊による資源循環の圏域は大都市を中心とせず中都市と小都市の間で形成されることが示唆され、地域循環圏の将来的なあり方について検討を行った。

本章では、既存の圏域と比較するために東海三県を対象としたが、次章では分析手法を日本全国に拡張することで、既存の圏域を超えた領域での地域循環圏の検討を行う。

参考文献

- 1) 環境省（2011）環境・循環型社会・生物多様性白書.
- 2) 藤田壮, 盛岡通, 大石晃子（2000）循環型の産業集積開発事業の計画と評価についての調査研究, 環境システム論文集, Vol.28, pp.285-294.
- 3) Xudong Chen, Tsuyoshi Fujita, Satoshi Ohnishi, Minoru Fujii, Yong Geng（2012）The Impact of Scale, Recycling Boundary, and Type of Waste on Symbiosis and Recycling, Journal of Industrial Ecology, Vol.16, No.1, pp.129-141.
- 4) 田畑智博, 後藤尚弘, 井村秀文, 薄井智樹（2002）発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適性配置に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.30, pp.315-322.
- 5) 藤山淳史, 松本亨（2010）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, No.23-2, pp.115-125.
- 6) 橋本征二（2000）建築物解体廃棄物の発生予測, 廃棄物学会論文誌, Vol.11, No.5, pp.271-279.
- 7) 藤川洋平, 樋口隆哉, 浮田正夫, 関根雅彦, 今井剛（2006）建設廃棄物の排出量および再生利用量の予測に関する研究, 土木学会論文集 G, 62-1, pp.53-60.
- 8) 萩島理, 谷本潤, 片山忠久, 熊本健（2002）地域特性を考慮した建築解体廃棄物の発生量の将来予測に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 562 号, pp.75-82.
- 9) 橋本征二, 広池秀人, 寺島泰（2000）コンクリートがらリサイクルの環境面からの評価, 土木学会論文集 No.657, pp.75-80.
- 10) 総務省統計局（2005）平成 17 年国勢調査.
- 11) 国立社会保障・人口問題研究所ホームページ: <http://www.ipss.go.jp/>
- 12) 国土交通省（1988-2010）建築統計年報.
- 13) 小松幸夫, 加藤裕久, 吉田倬郎, 野城智也（1992）わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 439 号, pp.101-110.
- 14) 小見康夫, 栗田紀之（2010）長寿命化トレンドを考慮した建物残存率のシミュレーション, 日本建築学会計画系論文集, 第 75 巻 第 656 号, pp.2459-2464.
- 15) 長岡耕平, 稲津亮, 東岸芳浩, 谷川寛樹, 橋本征二（2009）全国の都道府県における地上と地下のマテリアルストック推計に関する研究, 環境システム研究論文集 Vol.37, pp.213-219.
- 16) 国土交通省（1967-2009）道路統計年報.
- 17) 日本 ESRI 株式会社（2010）ESRI スタンダードパック 2010.
- 18) 長岡耕平, 谷川寛樹, 橋本征二（2008）全国の都道府県における地下と地上のマテリアルストックに関する研究, 環境システム研究論文発表会講演集 36, pp.303-308.
- 19) 国土交通省（2010）平成 20 年度建設副産物実態調査.
- 20) 経済産業省（2011）砕石等統計年報.
- 21) 加藤博和, 林良嗣, 登秀樹（1996）道路構造代替案の地球環境負荷に関するライフサイクル

的評価手法，環境システム論文集，Vol.24，pp.282-293.

- 22) 森本涼子，柴原尚希，加藤博和（2009）道路交通流への効果を考慮した道路改良事業の LCA 手法：踏切除却事業を対象として，日本 LCA 学会誌，Vol.5 No.1，pp.33-39.
- 23) 国土交通省国土交通政策研究所（2002）今後の社会資本整備についての基礎的研究，国土交通政策研究第 11 号.
- 24) 内閣府政策統括官（2007）日本の社会資本 2007，pp.36-40.

6.コンクリート塊の地域循環圏の最適規模の検討

地域循環圏に関する検討は、Chen ら(2012)や、藤山ら(2012)など、様々な検討がなされている。しかし、その多くは循環圏を考慮することで全体の循環利用率を改善させる狙いであるため、家庭廃棄物であるプラスチックや、重工業に伴う副産物である場合が多い。コンクリート塊に代表される建設副産物は、循環利用率は平成 20 年度で 97.3%と高い値を示している(建設副産物実態調査, 2010)。建築物解体に伴う建設副産物の推計は、橋本ら(2000)、藤川ら(2006)、萩島ら(2002)に示されており、耐用年数の関係から将来増加することが示唆されている。しかし、コンクリート塊の循環利用先は道路の着工量に依存しているため、今後も高い値を維持できるかは不透明である。本章では、コンクリート塊の地域循環圏を対象に、循環利用の空間分布を最適化するモデルを作成し、将来の地域循環圏の圏域の規模を検討した。

6.1. 建設副産物需給推計モデルの拡張

前章で示した建設副産物需給推計モデルについて拡張をすることで、分析の対象を全国市町村に拡大する。フレームワークを図 6-1 に示す。市町村データベースは、前章と同じくコーホート法を用いることで、2005 年と 2010 年の国勢調査(2005, 2010)から 2050 年まで 5 年ごとの将来人口を推計した値である。市町村の数は 1720 であり、男女別、5 歳階級別のデータを集計している。章で構築した仮想都市モデルを用いることで、人口から、世帯数と建物面積需要量を推計する。建物面積需要量は、構造別に住宅と業務建物を推計しており、その総計を用いている。建物着工量から建物面積供給量を推計し、建物面積需要量と重ねることで、建物面積の需要と供給から当該 5 ヶ年に着工・廃棄される建物面積を推計する。廃棄については、小松ら(1992)や小見ら(2012)を参考に既存の廃棄率曲線を作成し、そちらの平均耐用年数を 2050 年時点で、現状維持、または 2 倍となるように、各年次に対応した廃棄率を推計することで、その値を用いた。ここでは、廃棄された構造別の建物面積より、資源投入原単位を乗じて再生砕石として用いるコンクリート塊を再生砕石用コンクリート塊排出量として、需給バランスの計算に用いた。一方、道路については、現在のトレンドから道路着工量の回帰曲線を作成し、一人あたり道路需要量を下回らないように、当該 5 ヶ年に着工される道路面積を推計する。着工量は、4 章と同様に耐用年数を 30 年とし、資源投入原単位を乗じて再生砕石用コンクリート塊投入量を推計した。

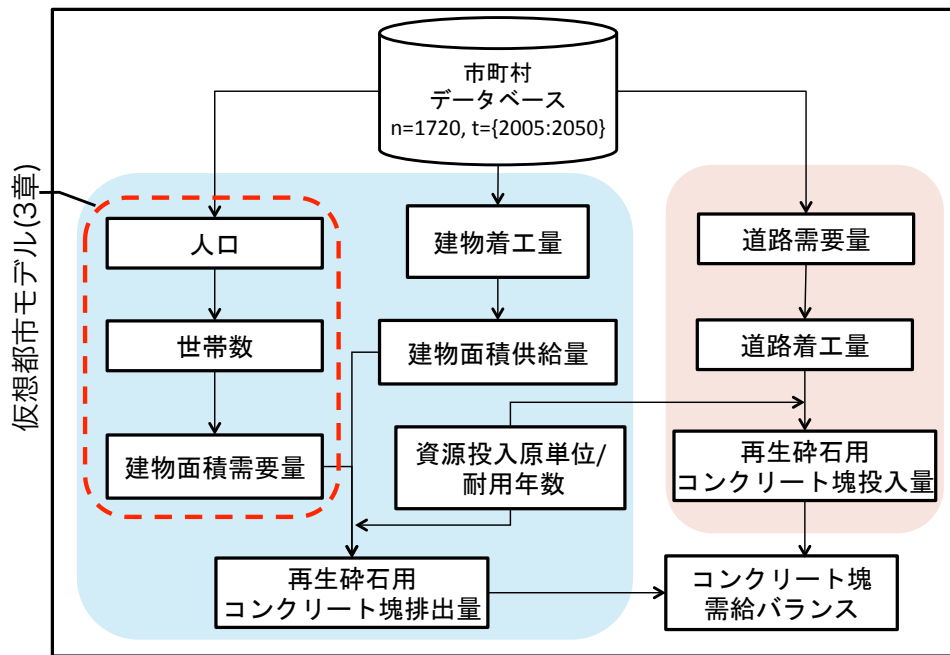


図 6-1 建設副産物需給推計モデル概要

6.1.1. リサイクル性指標

需要供給比は、4 章で示した値と同じく、本章の基盤となる重要なリサイクル性指標である。また、循環利用を行う圏域の大きさについても、同様に重要な指標である。本章では、需要供給比を *RIO* (Ratio by value of Input to Output of concrete mass)、圏域の大きさを *AReZ*(Aresize of Regional Resource Recycling Zone)として、リサイクル性指標として地域循環圏の検討を行った。

RIO は、コンクリート塊投入量を排出量で除した値で、以下の式で定義した。

$$RIO_i = \frac{IC_i}{OC_i} \quad (6.1)$$

ただし、*IC*：コンクリート塊投入量、*OC*：コンクリート塊排出量、*i*：市町村コード、である。*RIO* はコンクリート塊の循環利用のポテンシャルを示しており、1.0 に近いほど適した需給バランスを示す。1.0 より大きいと、その地域は再生砕石が不足しており、コンクリート塊投入量が過剰であることを示す。一方、1.0 より小さい場合は、その地域は再生砕石が過剰であり、コンクリート塊排出量による再生砕石が余っていることが示される。この場合、過剰なコンクリート塊を不足している地域に移動することで、両地域の *RIO* は改善が期待される。つまり、*RIO* が 1.0 より小さい地域と *RIO* が 1.0 より小さい地域が、協力してコンクリート塊を過剰と不足の偏在を解消する「輸送」を行うことにより、全体のマテリアルバランスは改善する。

一方で、輸送によりマテリアルバランスを改善は可能であるが、長距離の輸送はコンクリート塊を収集するための効率など他の問題を発生させる。循環利用の促進のために、輸送をすることで形成される地域循環圏により適した圏域の大きさを明らかにすることは重要である。本研究では、圏域の大きさを *AReZ* として、日本全国における適した値を以下の式で検討した。

$$AReZ = \frac{\sum dist_j}{n} \quad (6.1)$$

ただし、 $dist$: 圏域における中央から最遠市町村までの距離、 n : 圏域の数、 j : 圏域コード、である。 $AReZ$ は、コンクリート塊を輸送する距離を最小から大きくしていく段階で形成される、全国の地域循環圏の平均の圏域の大きさを示す。輸送を始めた最初の段階では、 $AReZ$ は十分に小さいが、輸送を多く行うにつれて、 $AReZ$ の値は大きくなる。輸送されるコンクリート塊の量の増加と圏域の拡大を比較することで、リサイクル性を評価することが可能である。

6.2. コンクリート塊の循環利用最適化モデル

前節で示したように、地域循環圏における循環利用のリサイクル性を評価するためには、コンクリート塊の輸送による、 RIO の改善と $AReZ$ の変化から、最適な圏域の規模が検討可能となる。田畑ら(2002)、橋本ら(2000)は、コンクリート塊の輸送・再利用に関する分析を行っており、リサイクル評価の要因として輸送距離を指摘している。本節では、コンクリート塊の輸送を循環利用最適化モデルとしてモデル化を行った。図 6-2 に、モデルのフレームワークを示した。循環利用最適化モデルは、(a)輸送拠点の生成、(b)輸送拠点の統合、によって構成されており、(a)において作成された輸送拠点を、(b)において輸送距離を拡大することで統合し、初期に多数生成された輸送拠点が減少していくことで圏域の拡大を表現するモデルである。

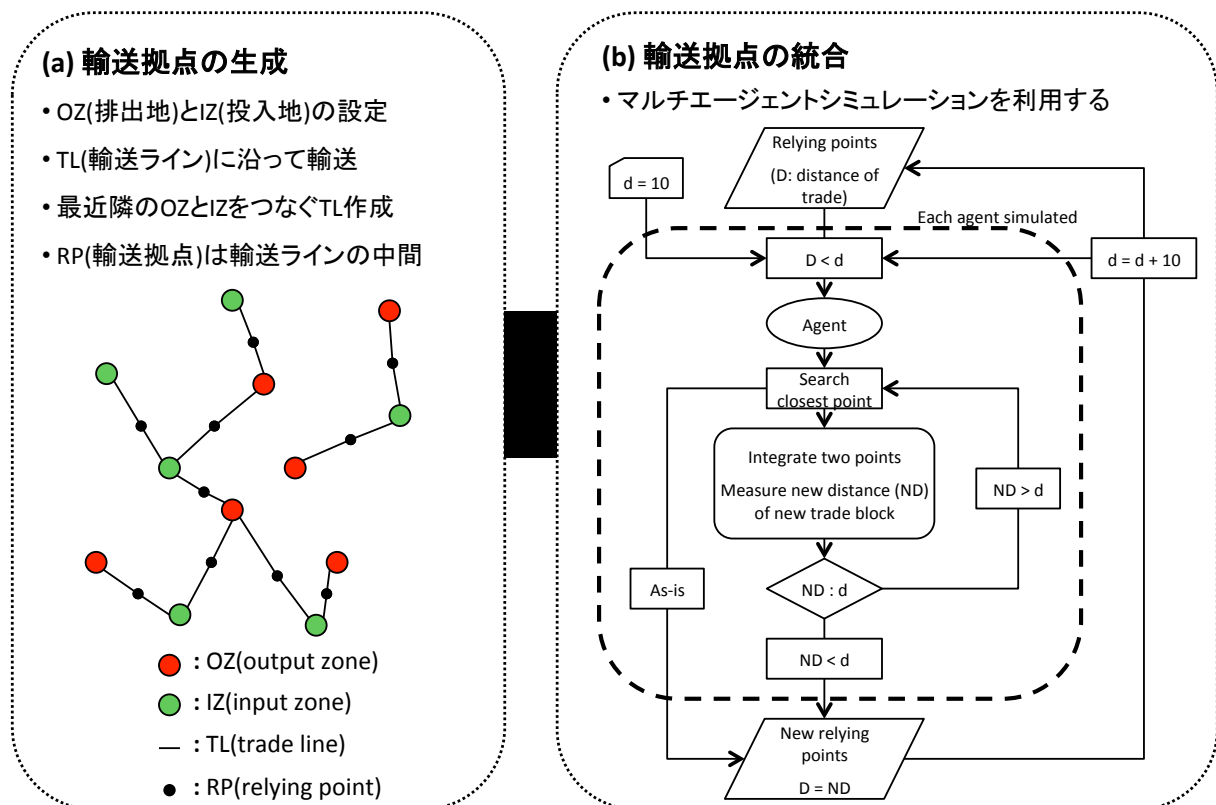


図 6-2 循環利用最適化モデル概要

まず、輸送拠点の生成を行う。ほぼすべての市町村は RIO が 1.0 より大きい小さいかどちらかであるため、コンクリート塊が不足しているか余剰であるかのどちらかである。そのため、不足している地域(IZ)と余剰である地域(IZ)は RIO を 1.0 に近づけるために、それぞれ大小が逆の最近隣の地域を輸送相手とみなす。その際に、輸送が達成すれば十分に RIO が 1.0 に近づく地域は順次、輸送対象とはならないこととする。これにより、排出量か投入量が 0 に近づくまで、輸送の相手を決定し、その相手との中間に輸送拠点を生成する。輸送拠点には不足地域と余剰地域の座標、また両地域までの距離 D を格納する。

次に、生成された輸送拠点を統合することで、コンクリート塊の地域循環圏を決定する。モデル内では、輸送拠点は両地域の中間で交換する場所であると仮定し、交換量を増大させるために他の輸送拠点との統合を、マルチエージェントシステム(Multi-Agent System: MAS)によってモデル化する。MAS とは、シミュレーションの手法のひとつで、エージェント指向によるモデルである。従来のオブジェクト指向のモデルと異なり、個々のエージェントの振る舞いに応じて、自己組織的なモデル化を可能とし、近年研究が進んでいるシミュレーションである。

手順は以下の通りである。

- 1) 輸送距離 d を 10km と設定する
- 2) d と輸送拠点に格納された輸送距離 D とを比較し、 $d > D$ であれば輸送を決定する。
- 3) 最近隣にある輸送可の輸送拠点と自拠点に格納された全地域の中央の点を取り、そこから最も遠い地域までの距離(ND)を計算する。
- 4) $ND < d$ であれば、新しい拠点を生成し、 $D = ND$ とする。
- 5) すべてのエージェントにおいて 2)~4)を繰り返す
- 6) $d = d + 10$ として 2)に戻る。

これらの手順において、輸送を行う際の圏域の拡大についてモデル化を行った。輸送により、循環利用が改善することで、各市町村の RIO の値が 1.0 に近づく。その際の効率を評価するために、圏域が拡大した時の輸送量の増加の傾向を分析する。ここで、効率とはコンクリート塊の限界輸送量を示し、その大小の変化によって最適な循環圏の検討を行った。

6.3. 推計結果

本節では、前節で示した方法を用いて推計した結果を示す。

対象地域は日本全国にある 1720 の市町村であり、対象期間は 2005 年から 2050 年まで 5 年ごとである。シナリオとして、2050 年に達成する建物の耐用年数が、1)現状維持(Status Quo: SQ), 2)2.0 倍(double: W)の場合の 2 種類を仮定した。これらのシナリオにおける推計結果を比較することで、コンクリート塊の循環利用のリサイクル性の評価を行った。

図 6-3 に 2005 年から 2050 年までの日本全体における人口と建物延床面積、一人あたり建物面積を示す。人口と建物延床面積は 2020 年をピークに減少に転じており、その傾向は徐々に大きくなっている。一人あたり建物面積は 2020 年まで減少するが、その後は大きくなっている。これは、将来人口が減少することから、人口密度の低下による影響であると考えられる。



図 6-3 人口と建物延床面積および一人あたり建物面積(2005-2050)

次に、図 6-4 に日本全国におけるコンクリート塊の排出量と投入量をシナリオ別に 2010 年から 2050 年までの推計結果を 5 年ごとに示す。コンクリート塊の排出量は、耐用年数現状維持シナリオでは 2040 年まで増加を示すが、耐用年数 2 倍シナリオではほぼ横ばいである。再生砕石投入量は 2025 年まで減少しており、以降 2050 年までおよそ一定の値となっている。コンクリート塊の排出地域の全体に対する割合は、両シナリオとも増加傾向にあり、特に現状維持シナリオでは、70%近くまで推移し、地域のマテリアルバランスは偏っていることが示される。

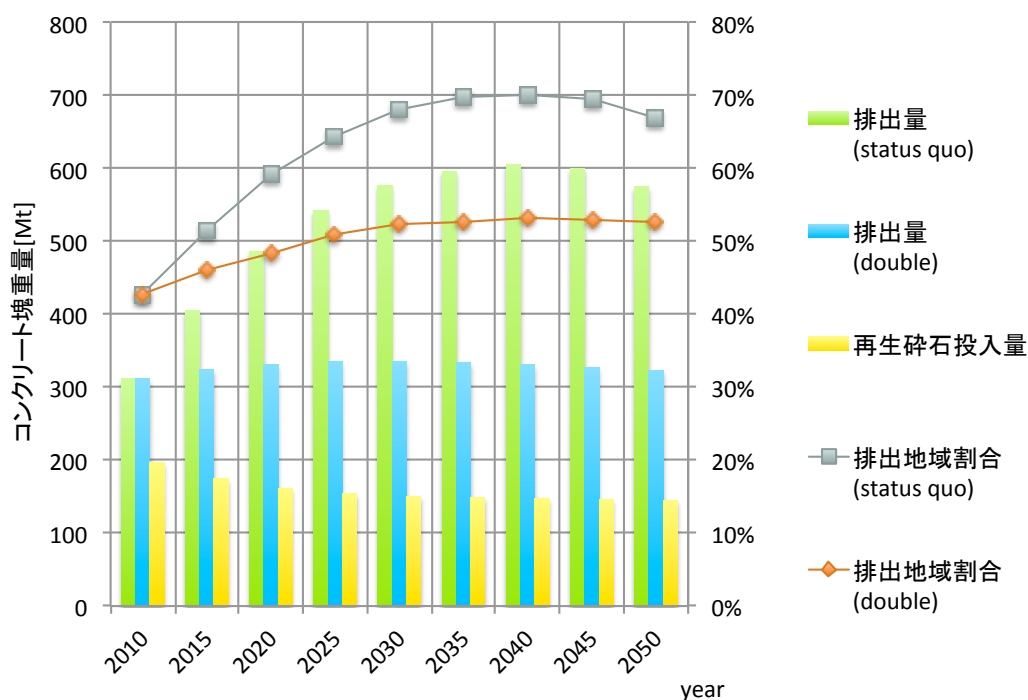


図 6-4 コンクリート塊の排出量と投入量将来推計結果

図 6-4 より、排出量が大きいつまり再生碎石過剰の地域が将来にかけて増加することが示された。その傾向について *RIO* を用いることで示した(図 6-5)。図 6-5 は *RIO* の値により、市町村の数を示したヒストグラムで、適正に近い 0.9~1.1 の範囲には市町村数は少なく、0.5 以下や 2.0 以上といった、偏った値の市町村数が多い。特に、2006-2010 では *RIO* が小さい市町村数はそれほど多くないが、2046-2050 では増えており、現状維持シナリオで倍程度に増加していることが示される。どの推計結果についても分布が U 字の形をしており、改善の必要性があることが示された。これらは、地域間でコンクリート塊を輸送して、地域循環圏を形成することで改善されるため、次節では推計結果より、コンクリート塊の循環利用最適化モデルを用いることでさらなる考察を行った。

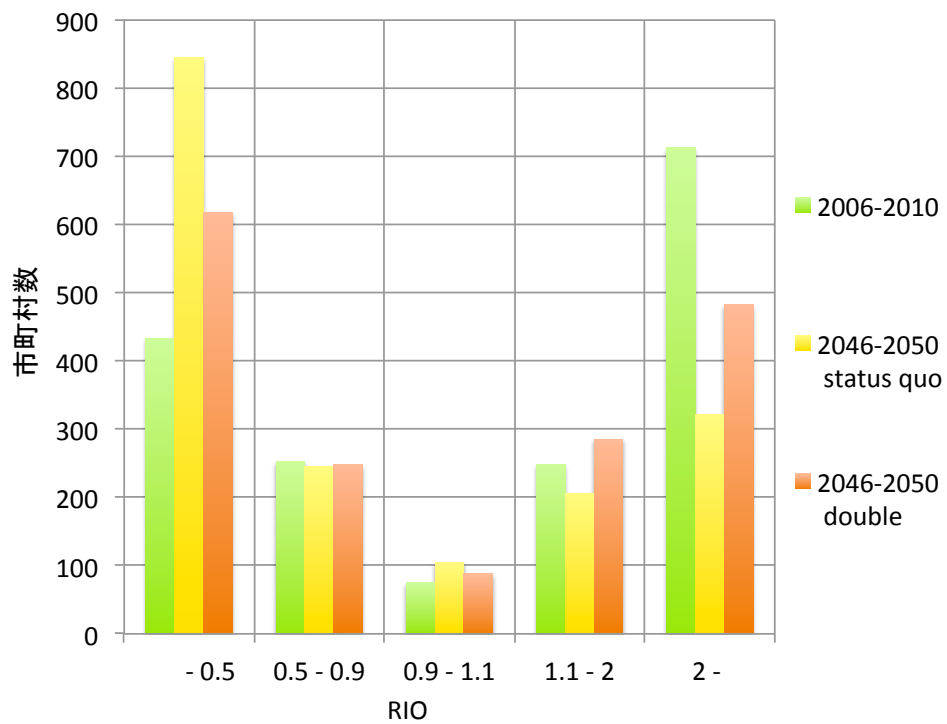


図 6-5 RIO による市町村の分布

6.4. コンクリート塊の地域循環圏

コンクリート塊の輸送を考慮することで地域循環圏の検討を行った。方法としては、前述したコンクリート塊の循環利用最適化モデルを利用して、輸送拠点を生成・統合することにより、地域循環圏における圏域規模の大きさを算出した。輸送を多く行くと、圏域は大きくなり $AReZ$ は高い値を示すため、適切な輸送量を検討することで、適切な圏域の規模を明らかにする。分析では、ステップ毎に 10km ずつ圏域の最大値を変化させることで、最大 100km までを対象とした。

図 6-6 にシナリオ別の分析結果を示す。横軸は $AReZ$ の値、つまり日本全国での平均的な圏域の規模である。縦軸は、シミュレーションの結果輸送されたコンクリート塊の日本全国の総量であり、大きいほど RIO の改善が期待できる。結果は、時系列で 2010 年、2030 年、2050 年の 3 種類、シナリオで、耐用年数現状維持(SQ)と耐用年数 2 倍(W)の 2 種類、組み合わせて 5 種類の結果とした。2010 年では、 $AReZ$ が 40km 程度までは総輸送量は大きく増加し、以降は微増となっている。耐用年数現状維持シナリオでは、2030 年、2050 年共に、総輸送量は大きく減少しており、 $AReZ$ が 20km 程度以下でしか総輸送量はほとんど増加しない。また年次の違いはあまりなく、コンクリート塊の排出が多いため、多くの地域で再生碎石過剰となっており、循環利用のポテンシャルがそれほど大きくないことが示される。一方、耐用年数 2 倍シナリオでは、現状維持に比べて改善しており、およそ 1.5 倍程度総輸送量が増加している。また、 $AReZ$ についても、40km あたりまでは総輸送量の増加が見られ、より多くの循環が可能であることが示された。全体としては、20km から 40km 以上の輸送をすることで、総輸送量はほぼ飽和してしまうことが示されたが、2010 年に関しては大きい循環圏が形成される可能性は存在する。ここから、現在の排出・投入のバランスで構築した循環圏は将来について大きく転換が必要であることが示唆される。

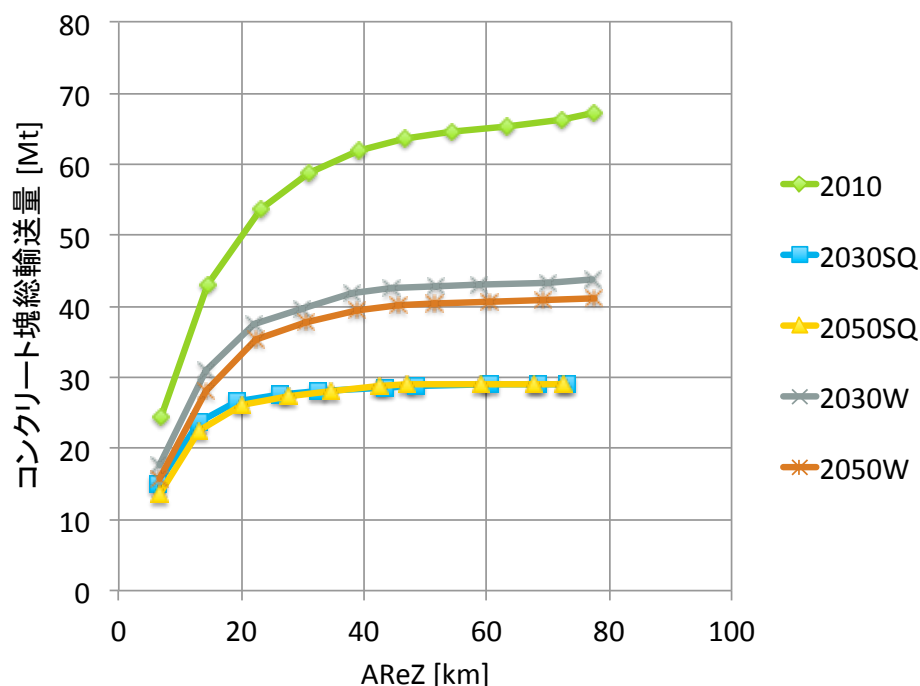
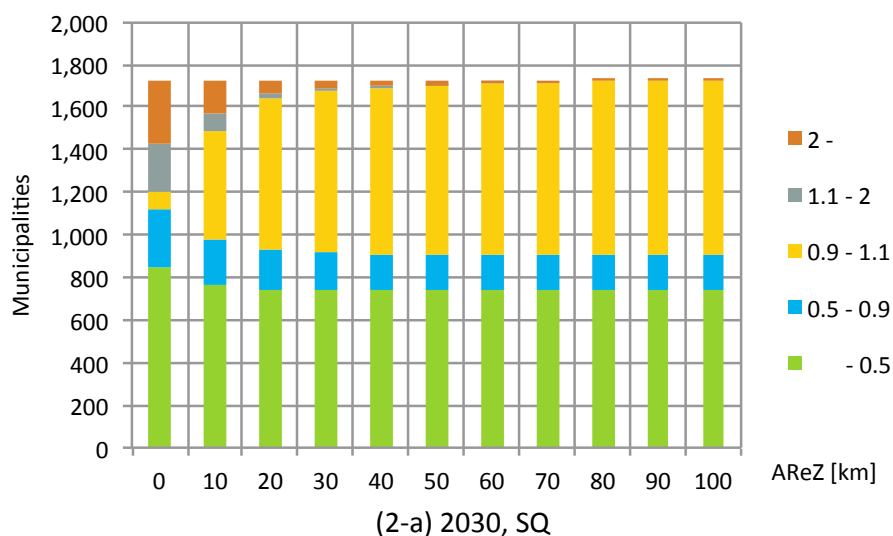
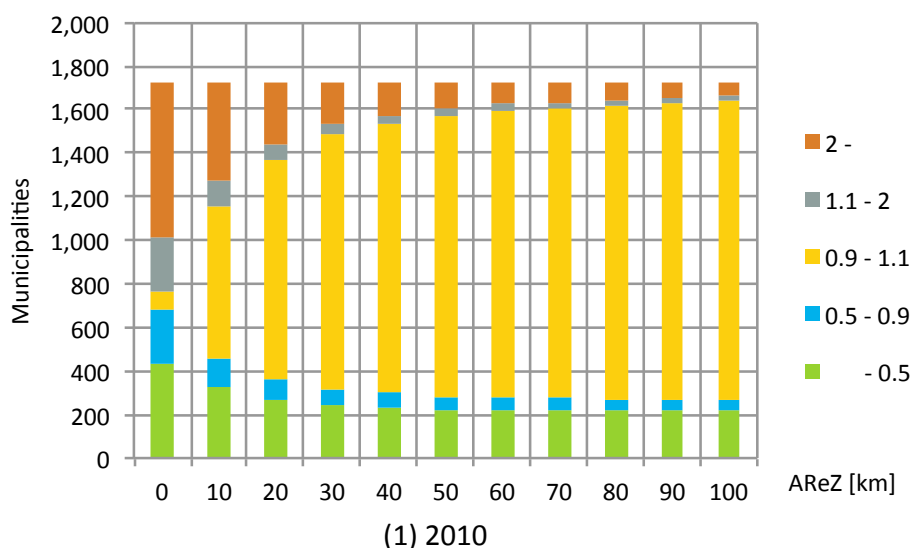


図 6-6 $AReZ$ と輸送されたコンクリート塊総量の関係

次に、圏域の規模を大きくしたことによる *RIO* の改善を評価する。図 6-7 に、*AReZ* と *RIO* 別の市町村数の関係を示した。結果は、時系列で 2010 年、2030 年、2050 年の 3 種類、シナリオで、耐用年数現状維持(SQ)と耐用年数 2 倍(W)の 2 種類、組み合わせて 5 種類の結果とした。(1)2010 の結果からは、10km の循環圏を形成することで *RIO* が大きく改善されていることが示された。特に、*RIO* が 0.5 以下と 2.0 以上の偏在地域について、両者バランスよく改善が出来る結果となった。*AReZ* を大きくすることで、およそ 80%の市町村を *RIO* の値が適正となるよう改善された。一方で、図 6-7(2-a)、(2-b)に示す耐用年数現状維持シナリオにおいては、およそ 50%の市町村が *RIO* の値が 1.0 より小さい範囲にあり、再生砕石が過剰であることが示された。この原因としては、耐用年数が伸びないことから建築物から多量のコンクリート塊が排出されていることが考えられる。また、循環圏を拡大して改善を図るにも、投入地域が少なく *AReZ* が 20km 程度で飽和してしまうことがわかる。図 6-7(3-a)、(3-b)からは、耐用年数を 2 倍にすることにより、現状維持シナリオと比較して大きく改善されていることが示された。循環圏も *AReZ* が 40km あたりまでは *RIO* の改善が期待できるため、将来の循環圏構築に望ましい結果となった。



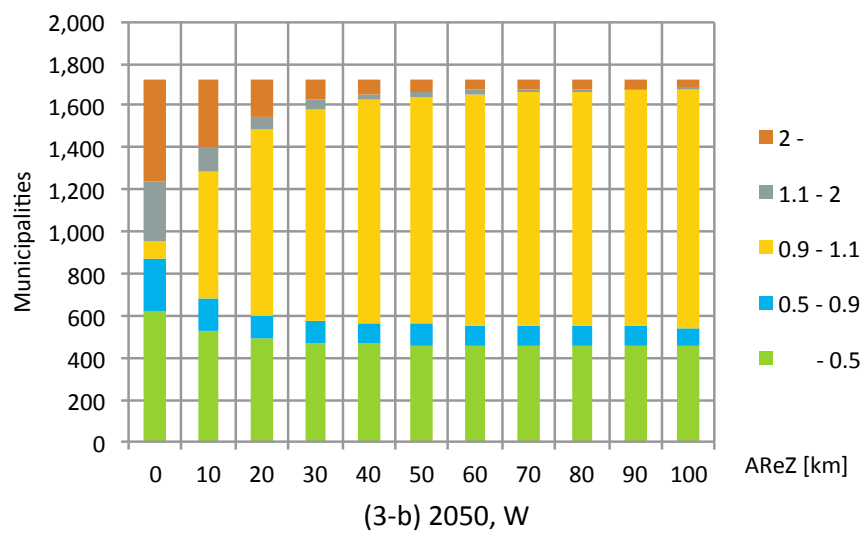
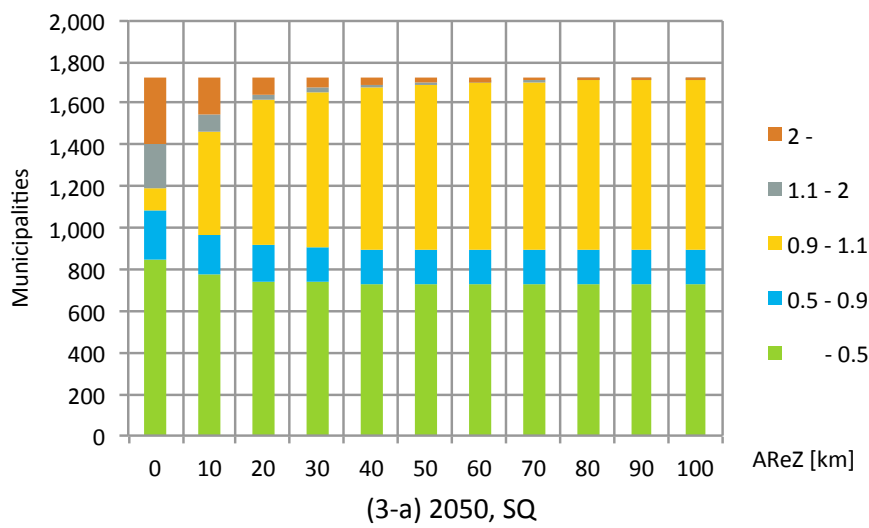
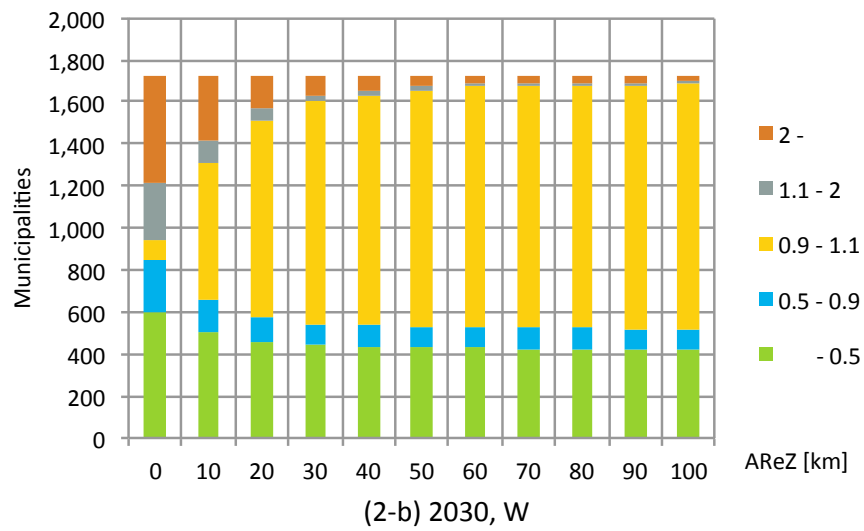


図 6-7 AReZ と RIO 別の市町村数の関係

次に、輸送域拡大に伴う循環圏分布の変化を 2010 年と 2050 年のシナリオ結果別に図 6-8(a)-(e) に示した。図において、色で塗りつぶされている地域が循環圏を示し、無色の地域は輸送のやり取りが行われず循環圏に組み込まれなかったことを示す。図 6-8(a)は輸送の限界を 20km とした場合であり、以下(b)-(e)まで 40km, 60km, 80km, 100km とした場合である。図より、2010 年では、全体を通して多くの地域を覆うように循環圏が分布していることが示された。2050 年では、現状維持シナリオにおいて、多くの地域が空白となっていることが示された。特に、太平洋ベルトの大都市でその傾向が顕著であり、輸送圏を拡大しても循環圏が拡大しないことが示される。一方、耐用年数 2 倍シナリオでは、圏域が小さい時は現状維持とあまり変わらないが、圏域の拡大につれて循環圏が拡大していくことが示された。この点から、現在から将来にわたって地域循環圏を検討する際に、徐々に耐用年数を延長することによって、現在の循環圏とあまり空間分布を変えことなく検討が可能になることが示唆される。しかし、東北地方から北海道にかけては、都市部が少ないことから、現状維持シナリオの場合の方が圏域が大きくなる逆の現象が示された。このことから、地域循環圏の観点から見た将来の耐用年数のあり方は、地域によって異なることが考えられる。

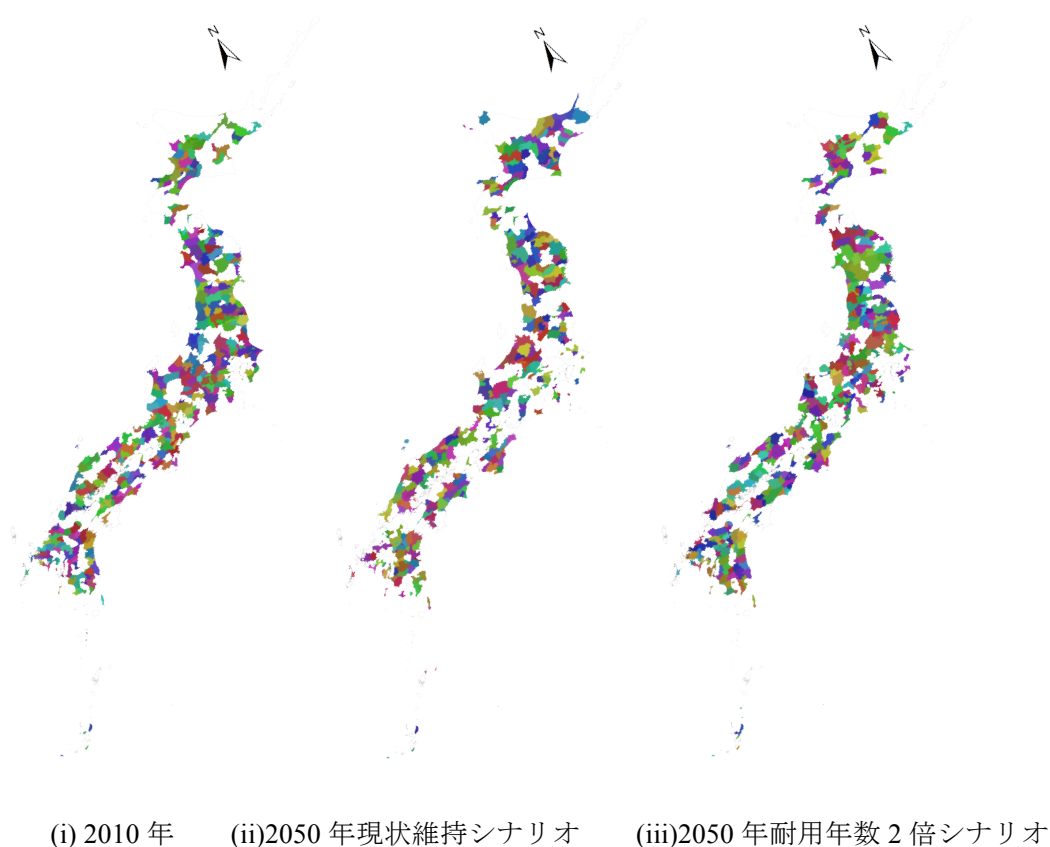
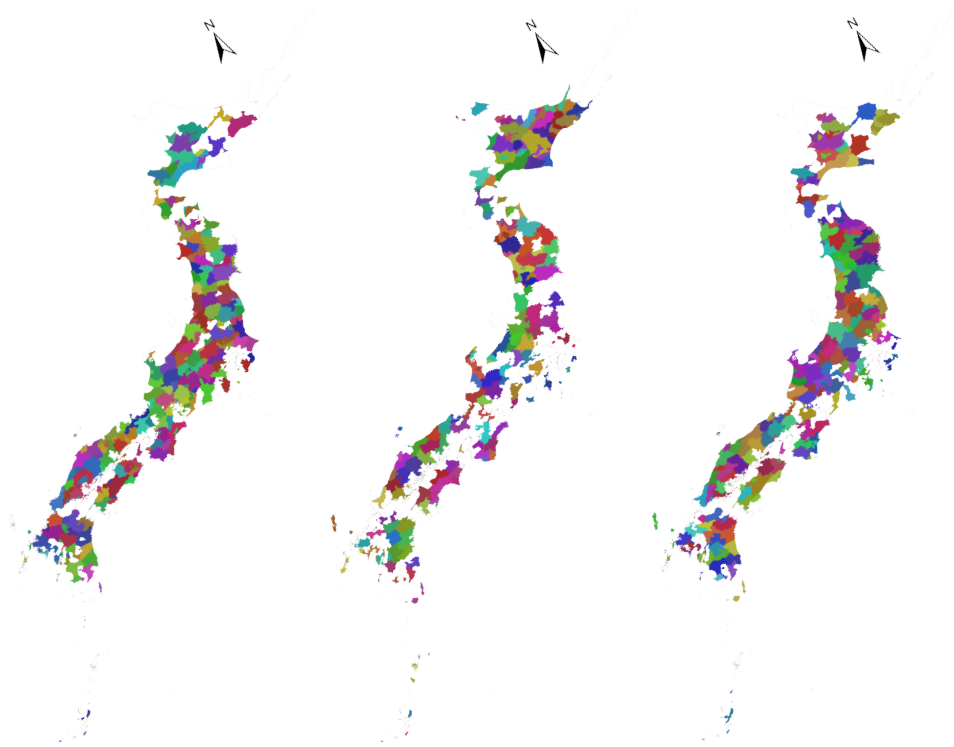
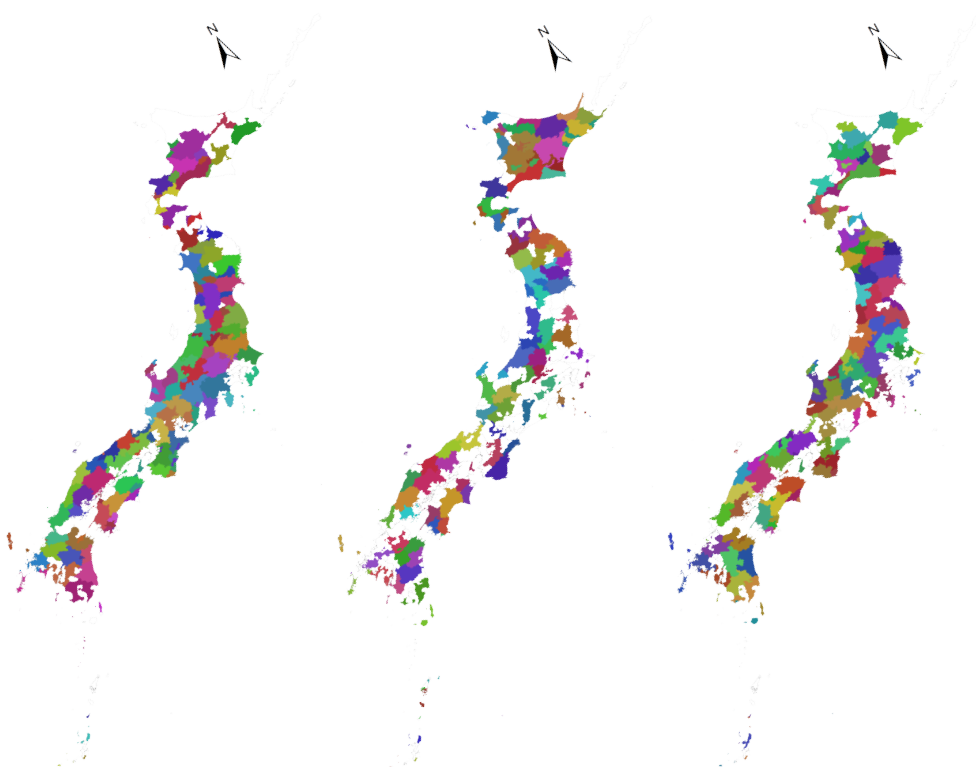


図 6-8 (a) シナリオ別圏域分布の比較（圏域 20km）



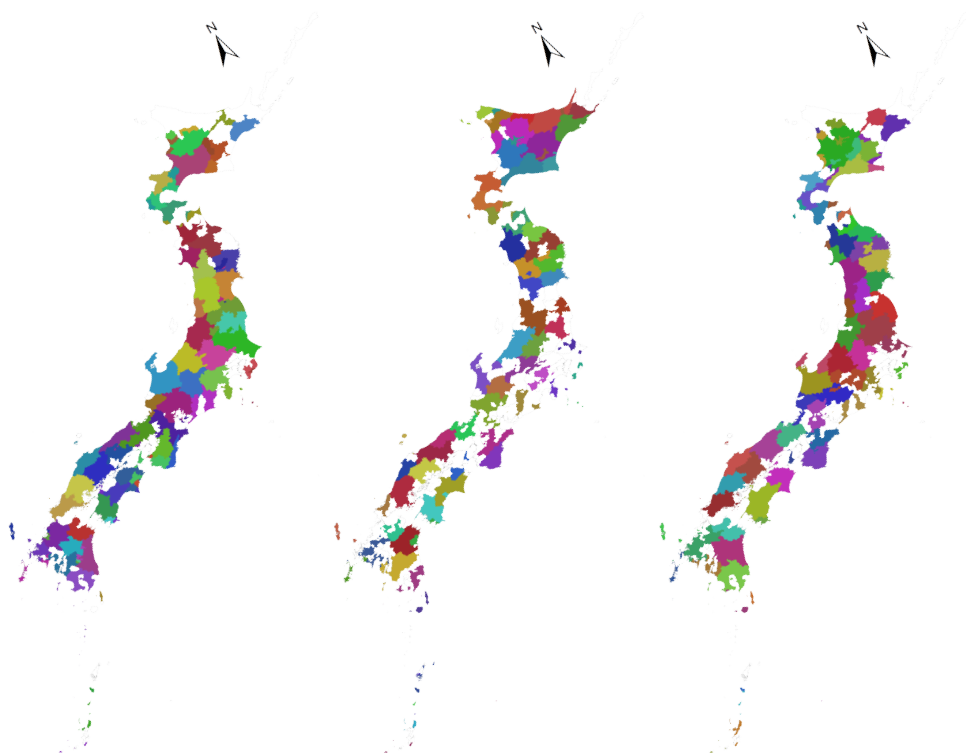
(i) 2010 年 (ii) 2050 年現状維持シナリオ (iii) 2050 年耐用年数 2 倍シナリオ

図 6-8 (b) シナリオ別圏域分布の比較 (圏域 40km)



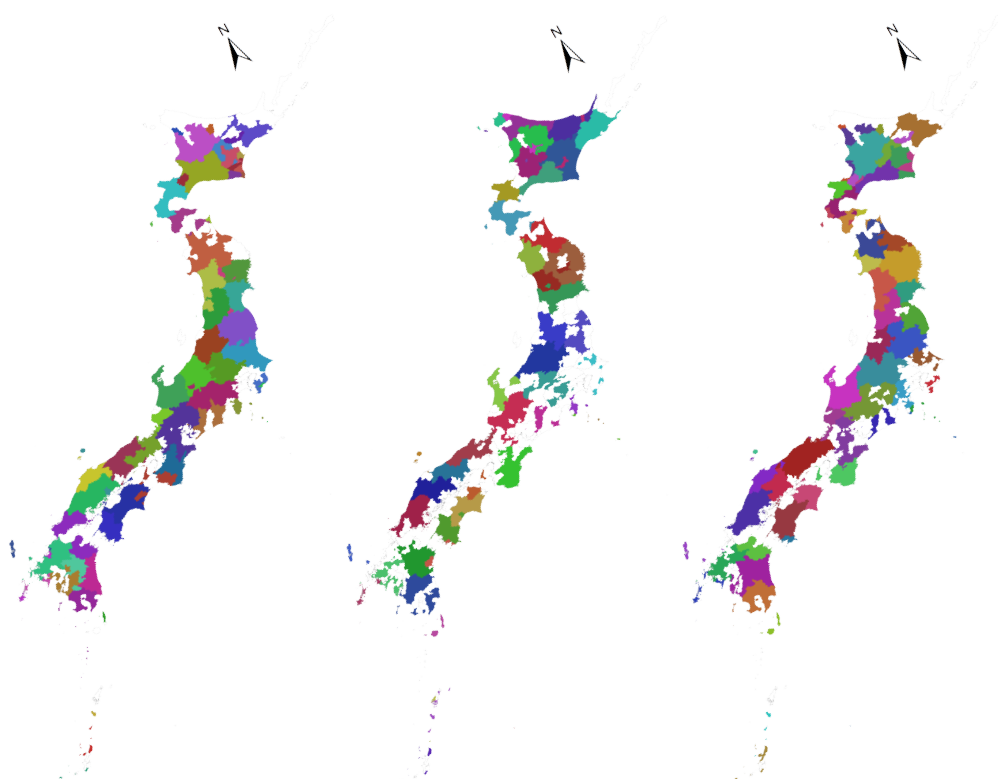
(i) 2010 年 (ii) 2050 年現状維持シナリオ (iii) 2050 年耐用年数 2 倍シナリオ

図 6-8 (c) シナリオ別圏域分布の比較 (圏域 60km)



(i) 2010 年 (ii)2050 年現状維持シナリオ (iii)2050 年耐用年数 2 倍シナリオ

図 6-8 (d) シナリオ別圏域分布の比較（圏域 80km）



(i) 2010 年 (ii)2050 年現状維持シナリオ (iii)2050 年耐用年数 2 倍シナリオ

図 6-8 (e) シナリオ別圏域分布の比較（圏域 100km）

図 6-9 に、圏域の規模を大きくしたことによる *RIO* の改善を空間的に評価した。黄色の地域は *RIO* がおよそ 1 でありマテリアルバランスが良いことを示している。赤色の地域は排出過多な地域であり、一方緑色の地域は投入過多な地域であることを示している。図 6-9(a)は輸送を行わない場合の結果を示しており、ほぼすべての地域がマテリアルバランスの改善が必要であることがわかる。特に現状維持シナリオの 2050 年時点での結果はそれが顕著であり、濃い赤と濃い緑が多く分布していることが示された。図 6-9(b)は、20km まで輸送の範囲を拡大した場合であり、(i), (ii), (iii)すべての場合で黄色い地域が増加しており、大きく改善されていることが示された。特に、2050 年耐用年数 2 倍シナリオでは黄色の地域が大きく増加しており、改善の傾向がその他に比べて大きいことが示された。特に、図 6-8(a)と重ねて見ることで、その効果は顕著であり、輸送を行ったことによる影響が大きいことが伺える。図 6-9(c)では、50km まで輸送の範囲を拡大した場合の結果を示した。こちらでも、2050 年耐用年数 2 倍シナリオでの結果における改善は明らかであり、多くの地域が黄色であることが示されている。しかし、これらのすべての結果において太平洋ベルトに位置する大都市では赤いままであり、循環域を拡大した効果は大都市ではほとんど見られないことが示された。そのため、将来にわたって、都市部におけるコンクリート塊の循環利用構造を必要があり、建築物や港湾施設など道路以外の循環利用の受入先を考慮することが求められることが示唆される。

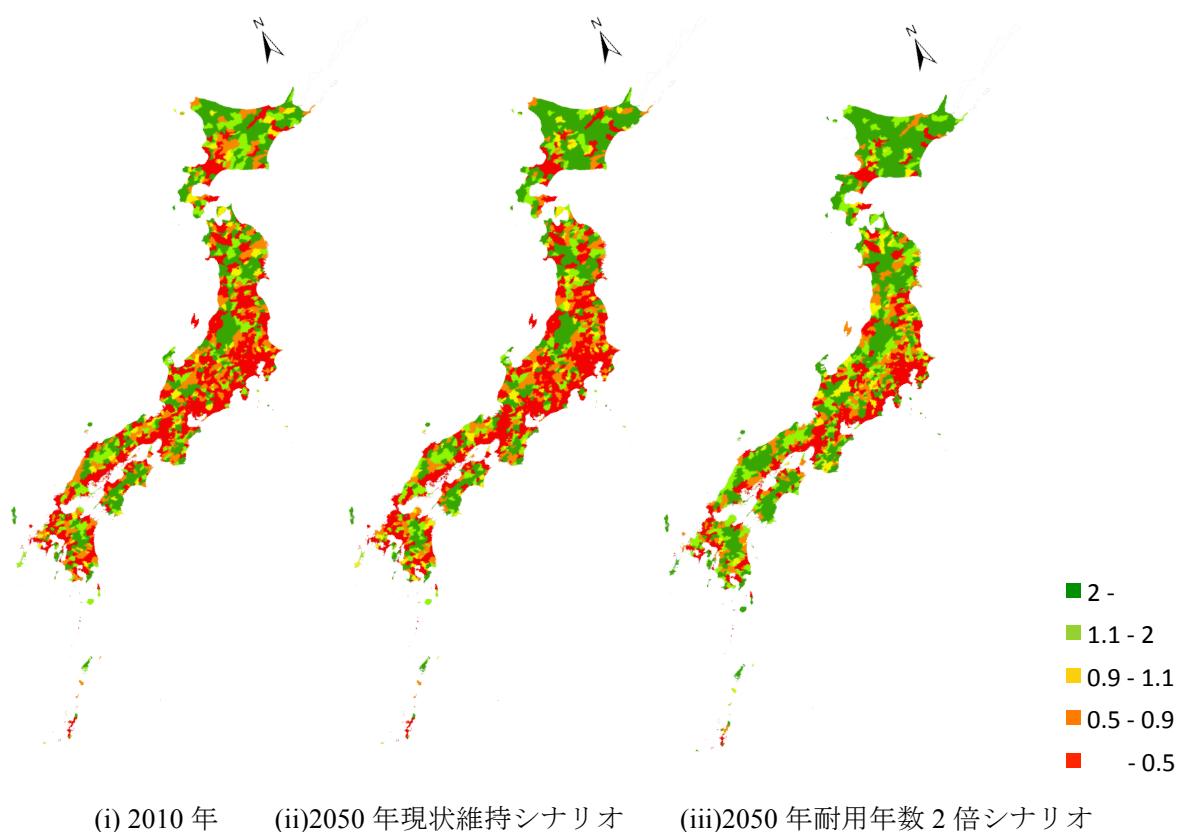


図 6-9(a) 圏域拡大による需要供給比の分布（輸送なし）

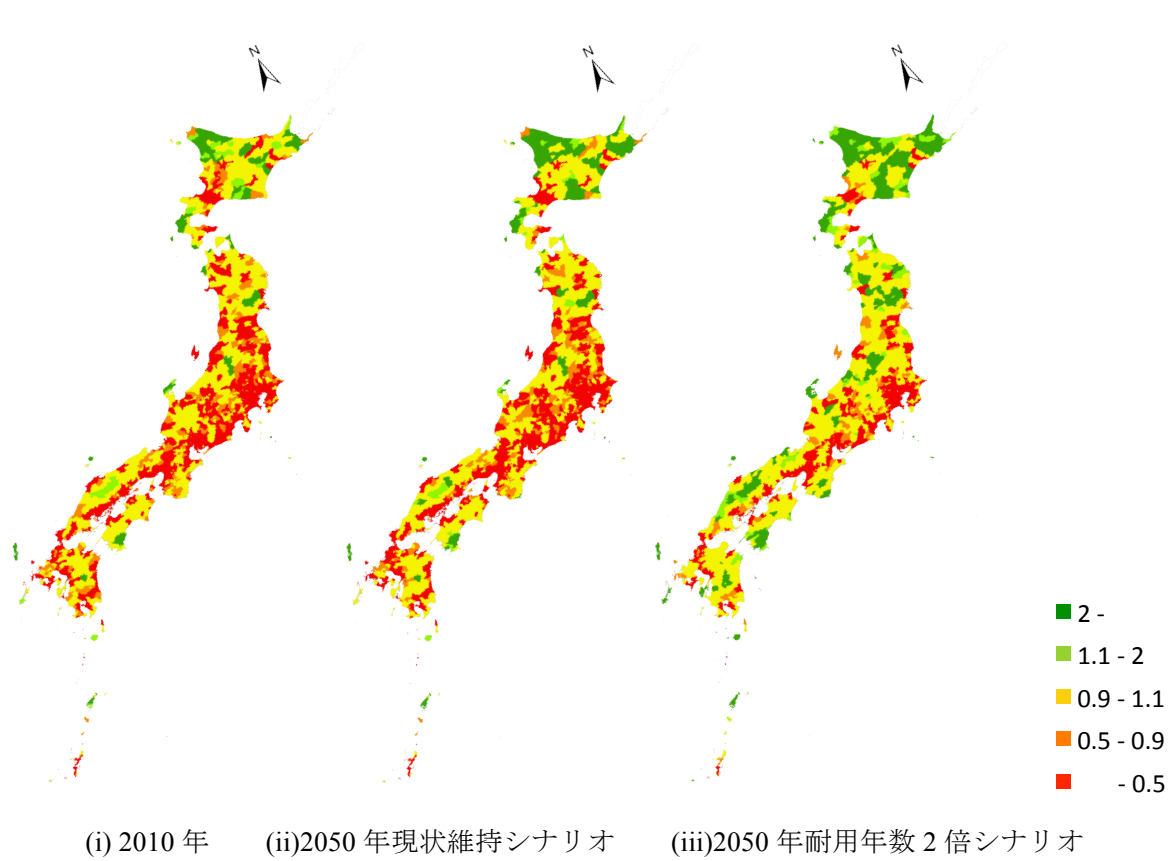


図 6-9 (b) 圏域拡大による需要供給比の分布 (輸送 20km)

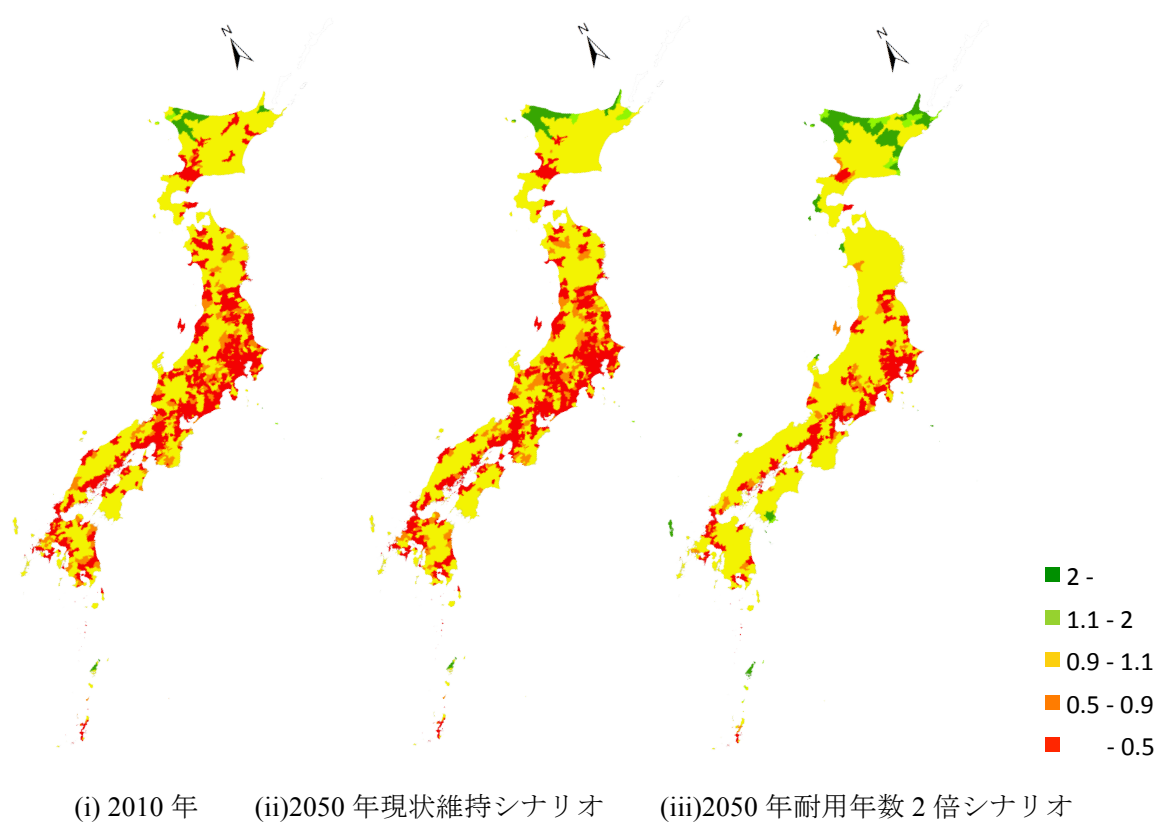


図 6-9 (c) 圏域拡大による需要供給比の分布 (輸送 50km)

最後に、循環圏拡大の効率として、コンクリート塊の限界輸送量で評価した。図 6-10 にその結果を示す。図から、すべての結果で AReZ を 40km まで拡大する過程で循環利用の改善の効率性が高いことが示された。2010 年では、40km を超えた辺りから効率は低下の傾向となり、その傾向は 60km まで続いた。60km 以上では再度上昇の傾向があるが、循環圏拡大の際におよそ 60km のところに圏域の規模拡大の“谷”が存在することが示された。2050 年の現状維持での結果は、40km を超えた後も 60km あたりまでは増加の傾向であり、循環利用の改善を図るには 2010 年より大きな圏域が示された。一方、2050 年の耐用年数 2.0 倍の結果では、40km を超えた後はおよそ一定の傾向が示された。これらの結果から、輸送を行い、循環圏を拡大することで循環利用は改善されるが、その傾向は各結果で異なり、2010 年で最適化を行うと、40km 程度の圏域が想定されるが、将来はシナリオによって異なった。そのため、輸送拠点を決定するには現在の基準だけではなく、将来の推計結果と重ねた結果が必要であり、耐用年数を 2 倍にすることでより適応性の高い圏域が示される可能性が示唆される。

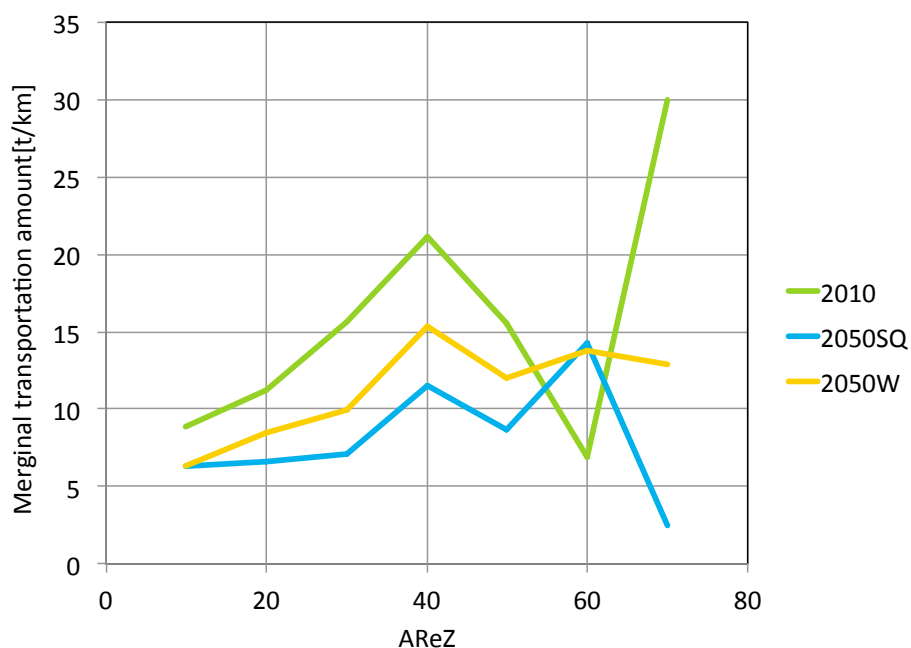


図 6-10 AReZ とコンクリート塊の限界輸送量の関係

6.5. まとめ

本章では、コンクリート塊の地域循環圏構築に向けた最適規模の検討を行った。コンクリート塊の循環利用最適化モデルを構築することで、コンクリート塊の輸送をモデル化し、*AReZ* が変化するに対して *RIO* が改善される可能性を示した。これらはリサイクル性指標として将来の循環圏構築の参考になり、現在の規模の地域循環圏は、耐用年数を現状維持としたシナリオのケースでは維持できないことを示した。耐用年数を 2 倍とするシナリオを導入することで、現在の循環圏とあまり変わらない規模の圏域を維持できる可能性が示された。

今回の分析では、将来の人口分布については仮想都市モデルを用いているため現在の傾向を継続する仮定を設定しており、将来的に人口分布が集積・分散した場合の地域のマテリアルバランスを考慮することはできていない。しかし、輸送の拠点を仮定して、地域循環圏の時空間的分布を検討したことは既往研究にも見られない点であるため、分析の改善によってさらなる結果が見込まれる。

参考文献

- 1) 環境省（2011）環境・循環型社会・生物多様性白書.
- 2) Xudong Chen, Tsuyoshi Fujita, Satoshi Ohnishi, Minoru Fujii, Yong Geng（2012）The Impact of Scale, Recycling Boundary, and Type of Waste on Symbiosis and Recycling, *Journal of Industrial Ecology*, Vol.16, No.1, pp.129-141.
- 3) 藤山淳史, 松本亨（2010）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*, No.23-2, pp.115-125.
- 4) 国土交通省（2010）平成 20 年度建設副産物実態調査.
- 5) 橋本征二（2000）建築物解体廃棄物の発生予測, *廃棄物学会論文誌*, Vol.11, No.5, pp.271-279.
- 6) 藤川洋平, 樋口隆哉, 浮田正夫, 関根雅彦, 今井剛（2006）建設廃棄物の排出量および再生利用量の予測に関する研究, *土木学会論文集 G*, 62-1, pp.53-60.
- 7) 萩島理, 谷本潤, 片山忠久, 熊本健（2002）地域特性を考慮した建築解体廃棄物の発生量の将来予測に関する研究, *日本建築学会計画系論文集*, 第 562 号, pp.75-82.
- 8) 田畑智博, 後藤尚弘, 井村秀文, 薄井智樹（2002）発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適性配置に関する研究, *環境システム研究論文集*, Vol.30, pp.315-322.
- 9) 橋本征二, 広池秀人, 寺島泰（2000）コンクリートがらリサイクルの環境面からの評価, *土木学会論文集 No.657*, pp.75-80.
- 10) 総務省統計局（2005）平成 17 年国勢調査.
- 11) 国土交通省（1988-2010）建築統計年報.
- 12) 小見康夫, 栗田紀之（2010）長寿命化トレンドを考慮した建物残存率のシミュレーション, *日本建築学会計画系論文集*, 第 75 巻 第 656 号, pp.2459-2464.
- 13) 長岡耕平, 稲津亮, 東岸芳浩, 谷川寛樹, 橋本征二（2009）全国の都道府県における地上と地下のマテリアルストック推計に関する研究, *環境システム研究論文集 Vol.37*, pp.213-219.
- 14) 国土交通省（1967-2009）道路統計年報.
- 15) 日本 ESRI 株式会社（2010）ESRI スタンダードパック 2010.
- 16) 長岡耕平, 谷川寛樹, 橋本征二（2008）全国の都道府県における地下と地上のマテリアルストックに関する研究, *環境システム研究論文発表会講演集 36*, pp.303-308.

7. 結論

7.1. まとめ

本論文では、低物質かつ低炭素な社会に向けた環境負荷評価を対象とした仮想都市モデルを構築し、主要な建設副産物であるコンクリート塊の地域循環圏について検討を行った。以下に、まとめを記す。

第1章では、低炭素かつ低物質な社会のあり方とその実現へ向けた現状を述べた後に、資源の循環利用と地域循環圏について考察を行った。本論文の独自性として、仮想都市モデルの構築の必要性を説明し、コンクリート塊の地域循環圏を評価することを示した。

第2章では、コンクリート塊の地域循環圏に関する、基礎的な情報を整理した。コンクリート塊の循環利用の現状をまとめると共に、その検討の中に地域循環圏が触れられていないことを指摘し、その基盤となる人間活動モデルの必要性を説明した。

第3章では、都市の圏域に関する理論的基礎を整理し、都市の階層性を用いた都市圏の決定について述べた。

日本における圏域は、産業特性・社会特性を組み込んだ都市の階層性は考慮されていないため、産業的特徴・社会的特徴などの情報を集約することで都市の階層性を示した。多変量解析を用いて都市の類型化を行うことで、都市圏の重要な要素である都市の特性をまとめた。重力モデルを応用して定義した都市間力により都市間の関係を示し、都市の階層性における都市間の従属性を示した。これにより、新たな都市圏の決定を検討した。

第4章では、仮想都市モデルを構築し、低環境負荷都市圏を検討した。モデルでは、仮想的な都市圏内の人口の集約・分散を表現することで、人口・面積など限られた情報で人間活動量としての建物延床面積あるいは人間活動量による環境負荷量の定量化を可能とした。人口の分布に応じて建物延床面積の需要量に変化し、人口密度の影響により環境負荷が変化する計算となっている。低物質かつ低炭素な都市圏の評価方法として、一人あたりの二酸化炭素排出量や一人あたりのマテリアルストック需要量を用いており、適した人口規模や人口分布を検討した。

第5章では、コンクリート塊の地域循環圏について東海三県をケーススタディとして検討を行った。本研究では、建物が廃棄されることに伴い建設副産物として排出されたコンクリート塊を、再生砕石として道路着工に投入することを、コンクリート塊の循環利用として、その時空間の分布を評価した。既存の都市分布の中でコンクリート塊の循環利用によるマテリアルバランスを評価するために、名古屋市都市圏を含む東海三県を対象として分析を行った。

都市部ほど供給過多つまり再生砕石が過剰であり，周辺部ほど需要過多つまり再生砕石が不足していることが示された．コンクリート塊輸送の結果としては，20km 程度の輸送ではあまりバランスが改善されず，40km 以上の輸送が必要であることが示された．将来については，建物寿命を長期化することで大きく改善され，20km での圏域でも多くの循環が見られた．

第 6 章では，コンクリート塊の地域循環圏について 4 章から拡張して日本全国を対象に検討を行い，その最適な規模について検討を行った．コンクリート塊需要供給比(*RIO*: Ratio by value of Input to Output of concrete mass)と地域循環圏の圏域の規模(*AMCB* : Aresize of Material-Cycle Block)をリサイクル性指標として，新たに開発したコンクリート塊の循環利用最適化モデルを適応することで，コンクリート塊の循環利用について評価を行った．

コンクリート塊の循環利用最適化モデルは，マルチエージェントシステムを用いており，個々の輸送の挙動から全体が最適化される地点について考察を行った．コンクリート塊の地域循環圏は，2010 年で 40km 程度が望ましいが，建物の耐用年数を現状維持とすると 2050 年では 20km と縮小し循環利用量も減少するが，耐用年数を 2 倍にすることで圏域は 40km となり，循環利用量の大幅な減少を回避できることを示した．

7.2. 今後の課題

本論文では、コンクリート塊の地域循環圏の検討に際して、建築物解体に伴う建設副産物を排出量、道路着工に伴う再生砕石を投入量と仮定することで、その需給バランスによって、循環利用を評価しているが、排出量、投入量は社会基盤などのその他の構造物を対象とすることも考えられる。分析結果としては排出物が過剰となり、将来的に再生砕石の利用先が特に大都市部で多く必要であることが望まれる。そのため、国土の持続的な発展もふまえ、レジリエントな国づくりへ向けた海岸構造物などが、新たな再生砕石の投入先として期待される。しかし、制度や設計規格上、難しいのが現状である。今後、さらなる分析を含め、建築物・社会基盤を含めた構造物全体での資源の循環利用のあり方を検討する必要があると考えられる。

また、分析に関する詳細な課題は以下通りである。

資源循環による影響として、再利用コストとして圏域の距離を代替的に用いているが、地域循環圏構築の課題であげられる社会的な費用の説明としては十分でなく、望ましい圏域を提示するにとどまっている。また、建設副産物に含まれる鉄や木材など、その他の資源についても考慮する必要がある。

本論文では、再資源化等施設の立地や処理能力の影響をモデルに組み込まれていない。より厳密に循環圏を把握するためにはこの情報は必要不可欠であり、データ収集につとめる必要がある。構造別着工量の推計において、今回のモデルでは世帯主数のみを変化要因として組み込むことができなかった。産業構造や昼夜間人口比なども構造別着工量に影響を与えていると考えられるため、それらを考慮する必要がある。

空間分布を用いた分析を行う際に、本研究では直線距離と仮定したために、一部現実的でない結果が得られた。また、輸送距離については、リサイクルに際して再処理場の経由や、リサイクルされない場合の処分場への移動について検討されていない。隣接する市町村間での優先的なやり取りや、時間距離を用いる、またリサイクルの可否による移動の変化について考慮することでより有用な分析を行うことができると考えられる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、まず主査である谷川寛樹教授(名古屋大学大学院環境学研究科)に深く感謝申し上げます。また、副査をお受け頂いた、林良嗣教授(名古屋大学大学院環境学研究科)、井村秀文教授(横浜市立大学グローバル都市協力研究センター)には、貴重なご助言を頂きました。深く感謝いたします。

谷川教授には、博士課程を過ごした3年間に大変多くのことを教えて頂きました。研究への取り組み方から、環境システム研究という一聞するとやや理解しづらい分野について、懇切丁寧な指導がありました。著者の研究内容は都市のモデル化による環境影響を評価することにあります。モデル化に際して数字ばかりを見ることが多く、現実がどう動いているかをやや把握していないことが多かったのですが、「より具体的に」や「現実では」などの実情を交えた多様な視点での助言は、研究をより価値のある方向へ導いて下さったと強く感じます。谷川教授とは井村教授に指導を頂いたという共通の側面が多く、より著者を理解して頂いて、常に最良のお言葉を頂けたと思います。また、助教として採用して頂き、今後の研究生活への重要な一步を踏ませて頂きました。

林教授には、修士論文でも副査としてご指導を頂き、多くの鋭い指摘を頂きました。また、修士学生の頃より研究プロジェクト等でご指導頂いており、林教授の幅広い知見は、お話し頂く度に新たな刺激となり、研究意欲をもり立ててくれました。

井村教授は、工学部学生に研究室に配属されたときから博士課程に至るまで、多くのことを教えて頂きました。修士学生の時は、井村教授が代表を務められた環境省地球環境研究総合推進費「低炭素型都市づくり施策の効果とその評価に関する研究」での研究を通して、研究と施策の関係とそれに伴う社会への影響を学ばせて頂きました。この経験は、研究を始めたばかりの私にとって、大きな財産となりました。

所属している環境社会システム工学研究室では、大変お世話になりました。白川博章准教授は研究への取り組みの心構えを教えて頂きました。学部生の時は緑地と歴史的景観という私の「思い」に対して、経済的評価という解決案をご提示頂き、無事に卒業論文を書き上げることができました。杉本賢二研究員は、研究に関する技術的な相談について快く聞いて頂き、後輩の指導も含めていつもお世話になりました。若林麗事務補佐員は、常にサポート頂き、多くのミスについて助けを受けました。修士2年の田中健介君をはじめ、研究室所属の学生には、多くのことに付き合って頂きました。本来上手く指導すべき私に対して、自分の研究でなかなか手が回らないことを察して、多くのことを協力して解決してきました。研究室の先輩である、東京都市大学環境学部大西暁生准教授には、殊にお世話になりました。研究内容の立ち上げから研究手法の提案、研究に対する心構えまで、研究生活を始めたばかりの頃に多大な影響を与えて下さいました。

このように、本論文の完成に至るまで、ここでは書ききれない以上の多くの方に助け励まして頂きながら研究生活を送りました。

最後に、生まれたときから現在に至るまで、常に支援し続けてくれた両親に感謝し、本論文の謝辞としたいと思います。

有難うございました。

平成 25 年 6 月 20 日

奥岡桂次郎