

コンクリート塊の地域循環圏に関する 将来分析

奥岡桂次郎¹・大西暁生²・谷川寛樹³

¹正会員 名古屋大学大学院 環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町D2-1)

E-mail : okuoka@nagoya-u.jp

²正会員 東京都市大学 環境学部 (〒224-8551 神奈川県横浜市都筑区牛久保西3-3-1)

³正会員 名古屋大学大学院 環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町D2-1)

地域循環圏の高度化を推進するために、地域特性や廃棄物の種類に応じた循環利用のあり方を検討することは重要である。しかし、廃棄物に占める割合が大きいかかわらず、建設副産物を対象とした地域循環圏は十分な検討がされていないのが現状である。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道路に循環利用することを対象に、日本全国における地域循環圏の検討を行った。建築物の耐用年数を現状維持と長寿命化のシナリオとして構造別廃棄量を推計し、道路改良に投入される再生砕石と比較した。結果として、循環圏の規模はおおよそ40km程度が望ましいことが示された。特に長寿命化シナリオにおいて、コンクリート塊の排出と投入のバランスが改善されることが示された。

key words : regional resource recycling zones, spatial analysis, urban metabolism, construction byproduct, material flow analysis

1. はじめに

2013年に第3次循環型社会形成推進基本計画¹⁾が閣議決定され、これまで以上に循環型社会の構築を図ることは必須である。また、地域循環圏の高度化を推進するために、地域特性や廃棄物の種類に応じた循環利用のあり方を検討することは重要である。地域循環圏に関する検討は、Chen *et.al.*²⁾や、藤山ら³⁾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。廃棄物に占める割合が大きいかかわらず、建設副産物を対象とした地域循環圏は十分な検討がされていないのが現状である。建設副産物の中でも、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。また、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「建設リサイクル法⁴⁾」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、その現況は平成20年度建設副産物実態調査⁵⁾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⁵⁾。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。一方で、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⁵⁾、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。しかし公共事業の規模は縮小傾向にあり、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、再生砕石の主要な投入先である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。建築物解体に伴う建設副産物の推計は、橋本ら⁶⁾、藤川ら⁷⁾、萩島ら⁸⁾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。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。

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再生砕石の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マテリアルストックフロー分析が必要である。

以上から本研究では、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道路に循環利用することを対象に、日本全国における地域循環圏の検討を行った。

2. 地域循環圏検討の方法

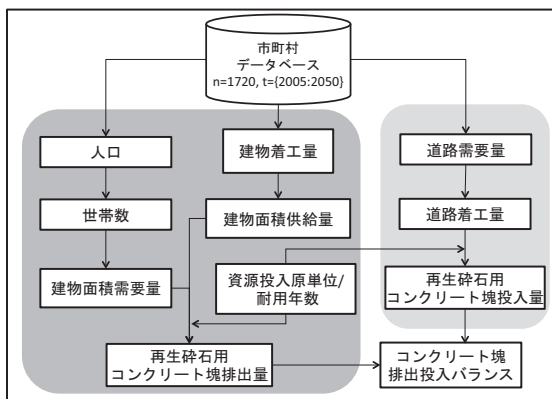


図-1 建設副産物排出投入推計モデル概要

2.1 建設副産物排出投入推計モデル

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砕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排出量と供給量のバランスから把握するものである。モデルの概要を図-1に示す。推計モデルは大きく左側の排出量推計と右側の投入量推計に分けられる。排出量推計では、将来人口から将来世帯数により推計した建物面積需要量と、建物着工量により推計した建物面積供給量から、耐用年数による建物廃棄面積に資材投入原単位を乗じることにより、建設副産物から再生砕石に利用できるコンクリート塊排出量を推計した。投入量推計では、道路需要量から道路着工量を推計し、コンクリート塊の再利用先である道路における再生砕石投入量を推計した。

市町村データベースは、コーホート法を用いることで、2005年と2010年の人口(総務省統計局⁹⁾)と出生率¹⁰⁾・死亡率¹⁰⁾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。仮想都市モデル(Okuoka *et.al.*¹¹⁾)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した。建物面積需要量は、国勢調査⁹⁾と法人建物調査¹²⁾より、構造別に住宅と業務建物を推計しており、その総計を用いた。建築統計年鑑¹³⁾の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¹⁴⁾や小見ら¹⁵⁾を参考に既存の廃棄率曲線をワイブル分布と仮定して作成し(表-1)、そちらの平均耐用年数を、2050年時点で現状維持または2倍となるようにシナリオを設定し、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、表-2に示した資源投入原単位(長岡ら¹⁶⁾)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、排出投入バランスの計算に用いた。一方、道

表-1 廃棄率曲線のパラメータ

	木造	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

表-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
木造	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

表-3 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	流調碎石	切り込み砂利
235.0	220.0	15.0	0.0	416.0	391.0	88.0	0.0

路については、国土交通省¹⁷⁾より、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、奥岡ら¹⁸⁾より耐用年数を30年とし、表-3に示した資源投入原単位(長岡ら¹⁹⁾)を乗じて再生砕石用コンクリート塊投入量を推計した。

2.2 リサイクル性指標

本研究では、基盤となるリサイクル性指標として、排出投入比率と循環利用を行う圏域の大きさを扱う。排出投入比率を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)と定義して、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。

$$RIO_i = \frac{IC_i}{OC_i} \quad (1)$$

ただし、IC：コンクリート塊投入量[ton]、OC：コンクリート塊排出量[ton]、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の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。

$$AREZ = \frac{\sum dist_j}{n} \quad (2)$$

ただし、dist：圏域における中央から最遠市町村までの距離[km]、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。

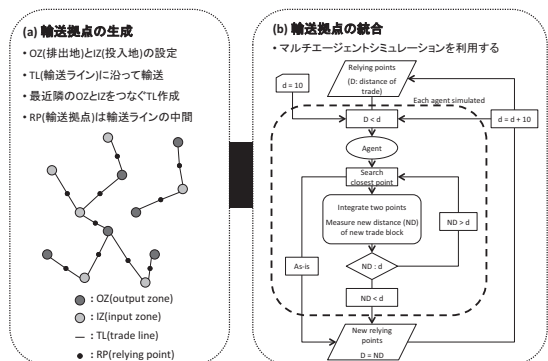


図-2 循環利用最適化モデル概要

2.3 コンクリート塊の循環利用最適化モデル

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²⁰⁾、橋本ら²¹⁾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-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)輸送拠点の結合、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。なお、分析には構造計画研究所のマルチエージェント・シミュレータ「*artisoc*」を用いた。

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。

3. 分析結果

3.1 シナリオ設定

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

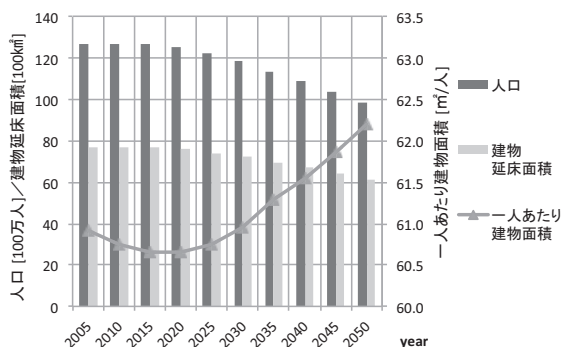


図-3 構造別減失延床面積推計

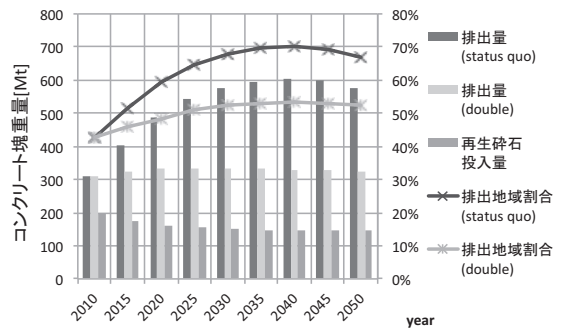


図-4 コンクリート塊の排出・投入量将来推計結果と排出過多地域割合

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。

3.2 推計モデル結果

図-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。

次に、図-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

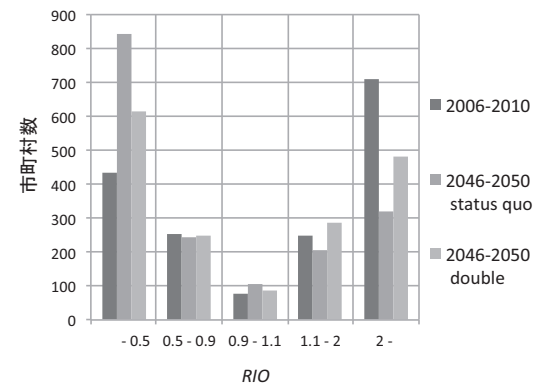


図-5 *RIO*による市町村の分布

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-4より、排出量が大きいつまり再生砕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-5)。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大きい。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。

3.3 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5km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

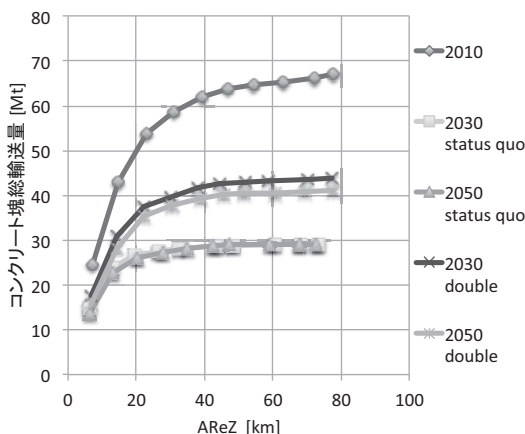


図-6 各県のコンクリート塊需給(2010-2014)

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、多くの地域で再生砕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。

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。AReZとRIO別の市町村数の結果として、2010年と、2050年のシナリオ別に、耐用年数現状維持(SQ)と耐用年数2倍(W)の2種類、合わせて3種類を示した。図-7に示した2010年の結果からは、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

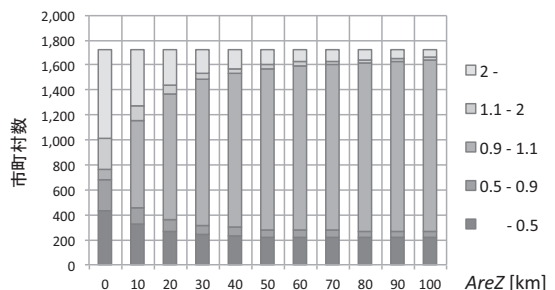


図-7 AReZとRIO別の市町村数(2010年)

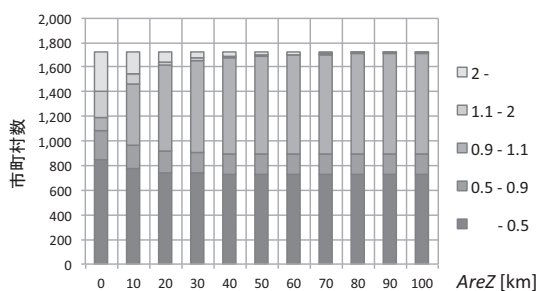


図-8 AreZとRIO別の市町村数
(2050年、耐用年数現状維持シナリオ)

よう改善された。一方で、図-8に示した2050年の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-9に示した結果から、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。

4. 終わりに

本研究では、コンクリート塊の地域循環圏構築に将来分析を行った。建設副産物排出投入推計モデルを作成することで、2050年までの建築物解体に伴うコンクリート塊排出量と再生砕石として道路改良へのコンクリート塊投入量を推計を可能とした。また、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、圏域の大きさ(AreZ)が変化することに対して排出投入比率(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

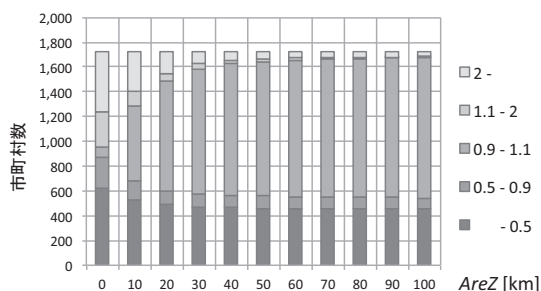


図-9 AreZとRIO別の市町村数
(2050年、耐用年数2倍シナリオ)

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。

謝辞：本研究の一部は、環境省循環型社会形成推進科学研究費(3k113002)、環境省環境研究総合推進費(S-6-4, 1E-1105)の助成を受けて行われたものである。ここに感謝の意を記します。

参考文献 (引用順)

- 1) 環境省：第3次循環型社会形成推進基本計画，2013。
- 2) Xudong Chen, Tsuyoshi Fujita, Satoshi Ohnishi, Minoru Fujii, Yong Geng : 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, 2012.
- 3) 藤山淳史, 松本亨：産業廃棄物及び廃PETボトルを対象とした循環圏に関する要因分析，環境科学会誌，No.23-2, pp.115-125, 2010.
- 4) 建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律，平成12年5月制定（建設リサイクル法）。
- 5) 国土交通省：平成20年度建設副産物実態調査，2010。
- 6) 橋本征二：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, 2000.
- 7) 藤川洋平, 樋口隆哉, 浮田正夫, 関根雅彦, 今井剛：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, 2006.
- 8) 萩島理, 谷本潤, 片山忠久, 熊本健：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, 2002.
- 9) 総務省統計局：平成17年国勢調査，2005-2010。

- 10) 国立社会保障・人口問題研究所ホームページ：http://www.ipss.go.jp/
- 11) Keijiro Okuoka, Tomer Fishman, Hiroki Tanikawa：A Study on Population Distribution and Optimal Size of Urban Area from the Aspect of Material Intensity per Person using the Virtual Urban Area Model, 7th International Society for Industrial Ecology Biennial Conference, ISIE2013-262, 2013.
- 12) 国土交通省：平成15年度法人建物調査, 2003.
- 13) 国土交通省：建築統計年報, 1988-2010.
- 14) 小松幸夫, 加藤裕久, 吉田倬郎, 野城智也：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, 1992.
- 15) 小見康夫, 栗田紀之：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, 2010.
- 16) 長岡耕平, 稲津亮, 東岸芳浩, 谷川寛樹, 橋本征二：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, pp213-219, 2009.
- 17) 国土交通省：道路統計年報, 1967-2009.
- 18) 奥岡桂次郎, 三宅悠介, 大西暁生, 韓驥, 白川博章, 谷川寛樹：東海三県における建設系廃棄物の地域循環圏に関する基礎的研究, 土木学会論文集G(環境), Vol. 68, No.6, 環境システム研究論文集第40巻, II_147-II_154, 2012.
- 19) 長岡耕平, 谷川寛樹, 橋本征二：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, 2008.
- 20) 田畑智博, 後藤尚弘, 井村秀文, 薄井智樹：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, 2002.
- 21) 橋本征二, 広池秀人, 寺島泰：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, 2000.

(2013. 7. 19 受付)

FUTURE ANALYSIS OF REGIONAL RECYCLING ZONE OF CONCRETE MASS

Keijiro OKUOKA, Akio ONISHI, and Hiroki TANIKAWA

To enhance the sophistication of regional resource recycling zone, it is important to consider how the recycling should function according to region characteristics and waste types. Yet the regional zone to recycle construction byproducts, which accounts for a substantial fraction of total waste has not been examined enough. This study evaluates regional resource recycling zone of concrete mass from building demolition to road construction in Japan. The output of concrete mass from building demolition was estimated with two scenarios of building lifespans, which was then compared with the input of reclaimed aggregate to road construct. The results show that the zone size of about 40km would prove efficient to transport concrete mass in 2050. In particular, doubling the lifespan of buildings improved the material balance between output and input of concrete mass.