

TMR指標を用いた建設資材の リサイクルにおける環境影響評価

石原 和弥¹・前新 将²・山末 英嗣³・谷川 寛樹⁴

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)

E-mail:ishihara.kazuya@c.mbox.nagoya-u.ac.jp

²非会員 三菱重工工業株式会社 (〒652-0854 神戸市兵庫区和田崎町1丁目1番1号)

E-mail: sho.maezawa@gmail.com

³非会員 京都大学助教 京都大学大学院エネルギー科学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail:yamasue@energy.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 名古屋大学教授 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)

E-mail:tanikawa@nagoya-u.jp

都市に大量に蓄積されてきた建設ストックは潜在的な資源(都市鉱石)であり、循環型社会構築に向けてそうしたストックの定量化ならびにリサイクルは重要である。一方、リサイクルの環境への影響を評価することも重要である。そこで本研究では、福岡県北九州市を研究対象値として、地理情報システム(GIS)を用いてストック量の推計ならびに今後発生する建設副産物量を建築物の耐用年数を推計することで定量化した。その上で鉄スクラップとアルミスクラップのリサイクル性について関与物質総量(TMR)の観点から評価を行った。その結果、全ての建築物におけるストックの合計は6900万トン、2030年までの累計建設副産物量は500万トンであった。1km²メッシュで区切って評価を行った結果、鉄スクラップもアルミスクラップも多くの地域で、そのリサイクル性は有効となった。

Key Words : *Geographic Information System, material stock, Total Material Requirement, construction by-product*

1. はじめに

現在、循環型社会の構築が求められており、建設分野でも「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」により、建設副産物の抑制とリサイクル率の向上が図られている。排出される建設副産物の中でも、8割を占めるコンクリート塊やアスファルト・コンクリート塊におけるリサイクル率は95%以上となっている¹⁾。鉄スクラップやアルミスクラップを含む建設混合廃棄物に関しても排出削減され、再資源化に向けた取り組みが行われている。

一方で、リサイクルの環境への影響を評価することも重要である。その方法として、新規資源からの生産との比較を行うことが有効であるが、環境影響に関する知見が不足しており、その充実が望まれることを森口²⁾は指摘している。そのため、循環型社会形成を目指す上で、経済社会における物質代謝構造の把握及びリサイクルの環境影響を評価し、適切な循環利用を行うことが求めら

れている。

リサイクルの環境に対する影響を評価することは、それが天然資材を用いた場合に比べてどの程度有用であるのかを評価することと同義である。山末³⁾は関与物質総量 (Total Material Requirement, TMR) の観点からリサイクルの環境影響評価を行う手法を開発している。この手法では、TMRを応用した指標を用い、都市に蓄積する資材(都市鉱石)からリサイクルする際のTMRを「都市鉱石TMR, Urban ore TMR (UO-TMR)」(kg/kg)、自然鉱石からのTMRを「自然鉱石TMR, Natural ore TMR (NO-TMR)」(kg/kg)と定義している。このUO-TMRとNO-TMRとを比較することでリサイクル性の評価を行っている。谷川⁴⁾は、和歌山市中心部をケーススタディ対象地として、この評価指標と地理情報システム(GIS)を用い、建設副産物のリサイクルの有効性について検討を行っている。中小規模都市である和歌山市での評価を行っているが、循環型社会形成を考えて行く上で、多くのストックを抱える大規模都市での評価を行うことも重

要である。そこで政令指定都市である、福岡県北九州市をケーススタディ対象地として評価を行った。北九州市は人口約100万人を抱える大規模都市である。また、北九州工業地帯の中心地であったが、近年、工場跡地の再開発が多く行われ、人口の減少もみられる。そのため、日本の将来の循環型社会形成を考えていく上で適した地域であると言える。

本研究では、地域レベルでのリサイクル性評価を行うことを目的としGISを用いて、ストック量と今後発生する建設副産物を建築物の耐用年数を推計することで定量化した。また、排出された建設副産物のリサイクル性についてTMRの観点から評価を行った。さらに地域レベルでの評価を行えるように1kmメッシュに区切って評価を行った。

2. 研究手法

(1)マテリアルストック推計

都市における建設ストック推計は式(1)を用いて行う。

$$Stock = \sum_n \sum_t (I_{n,t} * S_{n,t}) \quad (1)$$

$I_{n,t}$: 建築構造種 n の建築年代 t における資材蓄積原単位

$S_{n,t}$: 建築構造種 n の建築年代 t の建物の延床面積

ここで建築物は、建築基準法・同施行令(1950-2007)により制約され、建設された年代により構造が変化しており、使用される資材の質や量も変化している。そこで本研究では、稲津ら⁵⁾によって整備された建築年代に即した資材原単位を用いる。(表-1)

(2)耐用年数および建設副産物推計

年代間のGIS差分データを基に耐用年数の推計を行う。まず、2000年から2005年にかけて滅失した建築物を抽出し、年齢別の差分データを作成する。その差分データを用い、現存建物数と滅失建物数から滅失率を求め、小松ら⁶⁾の研究による残存率の推定式を用いて残存率を推計する(式2)。

表-1 資材蓄積原単位 (Kg/m²)

資材蓄積原単位 (kg/m ²)	1950	1959	1971	1974	1981	2000
木造(軸組工法)	361	369	443	443	451	488
木造(桝組壁工法)	-	-	-	472	475	531
コンクリート構造	1541	2025	2027	2027	2182	2182
鉄骨構造	914	922	968	968	976	1028

$$R(t) = \exp \left[- \sum_{i=0}^t \lambda_i \right] \quad (2)$$

λ_i : 滅失率, t_i : 経過年

さらに、残存率の式に近似曲線をあてはめる。ここでは成長曲線を用いた。成長曲線と知られるロジスティック曲線は、そのまま変数変換を行っても線形化できないため、あらかじめ収束値(飽和定数 K)を決定し、その他のパラメータ(a, b)を求めることで近似曲線の特長を行う⁷⁾。(式3)

$$y = \frac{K}{1 + a \exp(-bt)} \quad (3)$$

K : 飽和定数, a, b : パラメータ, y : 残存率

地域特性を考慮するため、用途地域(住居系、商業系、工業系)別に分類し、推計を行う。

既存の建設ストックから解体・更新等により今後排出される建設副産物量を、耐用年数を用いて推計する。まず、ある時点における築年別現存床面積のデータから解体延床面積の算出を行う。用途地域 l に属す建築構造種 n の i 年における t 年代建築物の解体延床面積は式(4)で表される。よって、将来の i 年における建設副産物排出量は、算出した解体延床面積に資材蓄積原単位を乗じた式(5)で表される。

$$D_{l,n,t}(i) = G_{n,t}(i) \cdot \lambda_l(i-t) \quad (4)$$

l : 用途地域, n : 建築構造種, i : 年, t : 建築年代

D : 解体延床面積, G : 残存延床面積, λ : 滅失率

$$CB(i) = \sum_l \sum_n \sum_t (D_{l,n,t}(i) \cdot I_{n,t}) \quad (5)$$

l : 用途地域, n : 建築構造種, i : 年, t : 建築年代

$D_{l,n,t}$: 構造種 n , 建築年代 t の建物の i 年における解体床面積

$I_{n,t}$: 建築構造種 n の建築年代 t における資材蓄積原単位

(3)リサイクル性評価

a)TMR指標

リサイクル性の評価は、先にも述べた山末らが開発したTMR指標を用いる。TMRとは物質集約度を示す指標の一つで、直接投入量、間接投入量、隠れたフローで表される。隠れたフローとは、直接・間接的な経済活動により生じる物質以外の、その活動に伴い起こる物質の移動や攪乱量である。この「隠れたフロー」がTMRにおいて重要な概念であり、従来のLCAでは十分に議論されてこなかった領域である。その重要性について国内外における様々な研究において指摘されている。

そのため、UO-TMRとNO-TMRを比較検討することで、リサイクルによって資源を回収する際における、環境影

響を議論することが可能となる。TMRが小さい値の場合、環境への影響が比較的小さいと考えることができる。このことから、UO-TMRがNO-TMRよりも小さい場合、そのリサイクルが環境に対して負荷が小さく、有効であると言える。このTMR指標に基づくリサイクルの有効性を、リサイクル性と定義し評価を行った。したがって、リサイクル性を以下によって判断する(式6a-c)。本研究では、鉄およびアルミニウムについて評価を行った。

$$(NO-TMR-UO-TMR) \cdot S > 0; \text{有効} \quad (6a)$$

$$(NO-TMR-UO-TMR) \cdot S = 0; \text{等価} \quad (6b)$$

$$(NO-TMR-UO-TMR) \cdot S < 0; \text{有効でない} \quad (6c)$$

S; 建設副産物量

b)鉄スクラップのリサイクル性評価

鉄スクラップは、棒鋼や形鋼としてリサイクルする際に、純鉄を加え希釈するため、それらのUO-TMRは増加する。一方、木材をリサイクルすることでそれらのUO-TMRは減少する。これは、リサイクルされない木材は都市鉱石ずりとみなされるためである。これらの値を建築物の構造種別、木材リサイクル率別、希釈量別で把握し、これと建設副産物に含まれる鉄スクラップの量を乗じることで、それらを用いてリサイクルした場合のTMRを推算する。ここで希釈量に関しては、棒鋼として最低限必要な1.1kg/kg、圧延鋼としての7.4kg/kgとする。自然鉱山を用いた場合におけるTMRは原田による報告値⁹⁾を用いて推算する。鉄におけるNO-TMRは8kg/kgであり、これと鉄スクラップ量を乗じることで求める。木材リサイクル率が0%の場合および100%の場合における2010年から2030年までの経年での推計を行う。

c)アルミスクラップのリサイクル性評価

アルミスクラップはほとんどがダイカストなどの合金としてリサイクルされる一方で、純アルミニウムによる

希釈を用いた展伸材へのリサイクルもある。しかし、純アルミニウムを加えることでUO-TMRは大きく増加し、NO-TMRを超えてしまう。そこで本研究では、アルミスクラップをアルミニウムダイカストとしてリサイクルする場合について考える。アルミニウムダイカストとしてのリサイクルでは追加的物質投入が少ないため、純アルミニウムの希釈は行わないとする。アルミニウムにおけるNO-TMRは48 kg/kgであり、これとアルミスクラップ量を乗じることで求める鉄スクラップと同様に、木材リサイクル率が0%の場合および100%の場合における2010年から2030年までの経年での推計を行う。

3. 推計結果

(1)マテリアルストック量

図-1に2000年における建設ストック量を推計した結果を示す。特に都市中心部において、多くの建設ストックが集中していることが分かる。研究対象地の全ての建築物におけるストック量の合計は6900万トンであった。資材別にみると、セメントコンクリートが最も多く、全体の70%を占める。コンクリート系資材を除くと、鉄関係と木材の占める割合が大きく、それぞれコンクリート系資材を除いた全体の約50%、約25%となった。また、本研究においてリサイクル性を評価を行なった鉄とアルミニウムに関してみると、鉄関係は330万トン、アルミニウムは10万トンであった(図-2)。このことから、再利用できる可能性のある鉄やアルミニウムが都市内に多く存在していることが分かる。

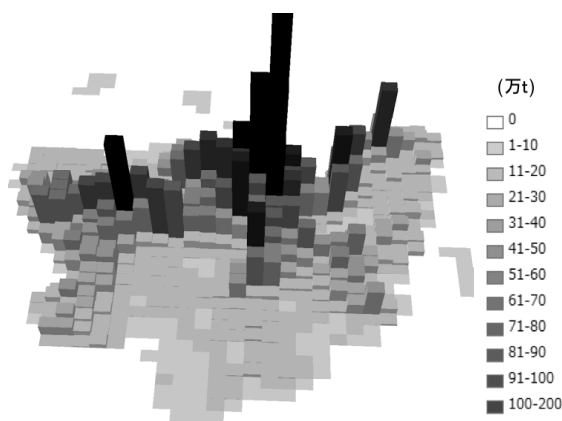


図-1 マテリアルストック (2000)

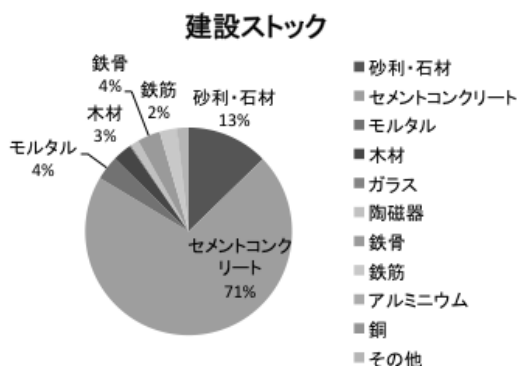


図-2 ストック量資材別割合

(2)リサイクル性

図-3a-dに2010年と2030年における排出された鉄スクラップを、棒鋼としてリサイクルする場合において木材リサイクル率を0%、100%とした時の結果を示す。結果の値は、UO-TMRとNO-TMRの差分値に建設副産物量に乗じたものを示している。値が大きいほど環境への影響が小さいことを意味する。全体として、多くの地域でリサイクル有効となり、特に都市中心部において高い有効性が示されている。これは、大量の建設ストックが存在する中心部において、UO-TMRが低い建築物が多く存在したためである。また、木材リサイクル率が0%の場合であっても比較的高い有効性がみられたが、100%にした場合では、ほぼ全域でリサイクル性が有効となり、都市中心部においてリサイクル性が大きく改善する結果となった。一方で、鉄スクラップを圧延鋼としてリサイクルする場合、そのすべてでUO-TMRの値がNO-TMRの値を超えるため、リサイクル性が有効でないと結論付けたため、ここでは掲載していない。

アルミスクラップをアルミダイカストとしてリサイク

ルする場合について評価を行った結果を図-4a-dに示す。鉄と同様に、2010年と2030年について、木材リサイクル率が0%と100%の場合において示した。結果から、木材リサイクル率が0%の場合におけるリサイクル性は、棒鋼をリサイクルする場合と異なり、あまり有効でない地域が多く存在することがわかった。しかし、木材リサイクル率が100%の場合、2010年と2030年共に、そのリサイクル性は大きく値が改善され、多くの地域でリサイクル有効となった。鉄をリサイクルする場合と同様、特に都市中心部において高い有効性が示される結果となった。このことから、アルミスクラップをリサイクルする場合、木材リサイクル率の上昇がその有効性に大きく影響してることがわかる。

以上から、市域全体で、特に建築物が集積している地域で、TMR指標を用いたリサイクル性の検討が有効であることが示された。

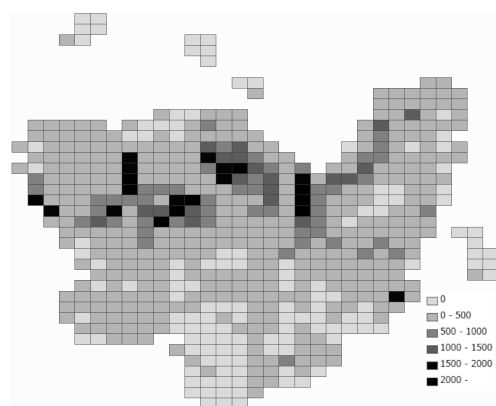


図-3a 木材リサイクル率 0% (2010)



図-3b 木材リサイクル率 0% (2030)



図-3c 木材リサイクル率 100% (2010)



図-3d 木材リサイクル率 100% (2030)



図-4a 木材リサイクル率 0% (2010)

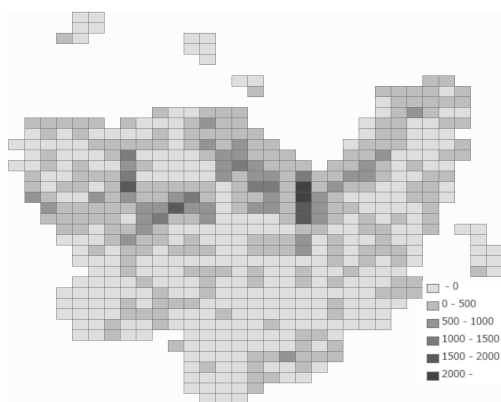


図-4b 木材リサイクル率 0% (2030)



図-4c 木材リサイクル率 100% (2010)



図-4d 木材リサイクル率 100% (2030)

4. まとめ

本研究では、北九州市を研究対象地として、GISを用いて、循環型社会形成を考える上で重要な都市内における建築物のストック量の把握と、今後発生する建設副産物の定量化を行い、そのリサイクル性についてTMRの観点から評価を行った。以下に、その結論を示す。

- i. 本研究の研究対象地である、北九州市の2000年における建築物のストック量は、6900万トンであり、そのうち鉄関係は330万トン、アルミニウムは10万トンであることがわかった。
- ii. 経年で建設副産物量を定量化し、GISを用いて空間的にメッシュ単位で評価することで、リサイクルの環境影響を経年的に地域レベルで検証することが可能となった。
- iii. 2010年と2030年について木材リサイクル率を変化させた場合について評価を行なった。その結果、木材リサイクル率が上昇することで、特にアルミ

ニウムのリサイクル性において、大きく改善される結果が得られた。

今後の課題として、将来における建設副産物排出量推計について、考察を加える必要がある。今回、残存した建築物から今後いつ、どのくらい排出されるかを予測したが、その後における新規着工建築物や建築物の改装・改修に関しては、考慮に入れていない。そのため、建設副産物排出量が通常よりも小さい値で推計された可能性があり、このことについても今後考慮していく必要がある。また、本研究では、木材リサイクル率が0%と100%の場合についてのリサイクル性について評価を行ったが、100%木材をリサイクルすることは困難である。そこで、どの程度の木材リサイクル率があればそのリサイクル性は有効となるのか、詳細に検討を行って必要がある。さらに、本研究では鉄とアルミニウムのみの評価を行ったが、建設ストックの大部分を占めるセメントコンクリートをはじめ、その他の資材についてもリサイクル性の検討を行っていく必要がある。

謝辞：本研究は、環境省循環型社会形成推進科学研究費補助金（K113002）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

- 1) 環境省：平成 22 年度版環境・循環型社会・生物多様性白書，2010.
- 2) 森口祐一：循環型社会の理念，実践と研究展望，土木学会論文集，vol.63 No.4，pp.286-293，2007.
- 3) 山末英嗣・南埜良太・奥村英之・石原慶一：関与物質総量 TMR を用いた使用済み製品に含まれる元素・素材のリサイクル性評価，軽金属，第 59 巻，第 11 号，pp620-626，2009.
- 4) 谷川寛樹・山末英嗣・稲津亮・前新将：4D-GIS を用いた都市重量の変化と建設資材の TMR 指標によるリサイクル性に関する検討，環境システム研究論文集，vol.38，pp413-419，2010
- 5) 稲津亮・谷川寛樹・大西暁生・東修・石峰・井村秀文：複数年の空間情報を用いた都市重量の変化に関する研究-建築物・道路を対象とした和歌山市中心部でのケーススタディ-，環境情報科学論文集，vol.23，pp89-91，2009.
- 6) 小松幸夫：建物寿命の年齢別データによる推計に関する基礎的研究，日本建築学会計画系論文報告集，第 439 号，pp91-99，1992.
- 7) 東岸芳浩・谷川寛樹・橋本征二：複数年の空間情報を用いた建築物の耐用年数の推計手法の提案，環境情報科学論文集，vol.21，pp37-42，2007
- 8) 原田幸明：希少資源・元素の現状，まてりあ，第 46 巻，第 8 号，2007.

(2012.8.3受付)

EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF RECYCLABILITY OF CONSTRUCTION MATERIALS USING TOTAL MATERIAL REQUIREMENT INDEX

Kazuya ISHIHARA, Sho MAEARA, Eiji YAMASUE and Hiroki TANIKAWA

Building material stock accumulated enormously in city is one of potential resources (urban ore), and quantification of its stock amount and recycle are important for establishment of material balance society. Add to this, to assess the environmental impact of recycle is also important. Hence this study estimated stock amount using Geographic Information System (GIS) and quantify construction by-product that will be generated in the future to estimate life span of building, regarding Kita-Kyushu city, Fukuoka prefecture as the research area. Based on it, recyclability of steel and aluminum scrap was assessed from the view of Total Material Requirement (TMR). As a result, the material stock amount of all building was 69 million ton in total, the accumulative construction by-product until 2030 was 5 million ton, and moreover, the recyclability of steel and aluminum scrap was shown to be effective in many areas from the result of the assessment divided the research area into 1km² meshes.