GIS データベースの拡充と日本全国の建築物に関する物質ストック･フローの動態分析

吉田　英立[1]・GUO Jing[2]・白川　博章[3]・谷川　寛樹[4]

[1]学生会員　名古屋大学大学院　環境学研究科（〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 D2-1（501））
E-mail: hidetatsu.yoshida@gmail.com

[2]正会員 名古屋大学大学院　環境学研究科（〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 D2-1（501））
E-mail: jing@urban.env.nagoya-u.ac.jp

[3]正会員 名古屋大学大学院　環境学研究科（〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 D2-1（501））
E-mail: shirakawa@urban.env.nagoya-u.ac.jp

[4]正会員 名古屋大学大学院　環境学研究科（〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 D2-1（501））
E-mail: tanikawa@nagoya-u.jp

循環型社会形成に向け，日本全国のマテリアルバランスを把握することが急務である．日本は高度経済成長期に大量の建設資材を投入し，成長を遂げた．しかし，現在その多くの構造物が耐用年数を迎え，将来，大量の建設資材廃棄物の放出が危惧されている．本研究では，Tanikawa et al.(2015)の手法を用いて，日本全国の建築物を対象とした建設資材ストックの GIS データベースを拡充した．また，朝隈ら(2018)が開発した同一性判定システムを用いて，建築物に関する物質動態を分析した．結果，2016 年の建設資材蓄積量は 116 億トンと推計された．また，2003 年から 2016 年にかけて，投入量は 42.6 億トン，解体量は 27.6 億トンとなった．また，三大都市圏(東京・名古屋・大阪)に全国の 47.7%の建設資材が蓄積されていることが明らかになった．

Key Words: *gis-database, material stock analysis, material flow analysis, flow rate per stock*

1.　はじめに

日本は高度経済成長に伴って，天然資源の大量投入・大量消費を繰り返すことで成長を遂げてきた．特に建築物に関して，総務省が提供する「固定資産の価格等の概要調書」[1]によると，1974 年から 2016 年にかけて約 48.4 億 m^2 の建築物が着工された．しかし，対前年比の総延床面積増加率は 1975 年で+4.9%であった反面，2016 年では+0.6%に留まっている．このように，総延床面積の増加率は年々減少傾向にあり，将来，建築物の解体量が着工量を上回ると示唆される．このような事態を踏まえ，環境省は循環型社会の形成を掲げている．第四次循環型社会推進基本計画 [2]によると，循環型社会とは「天然資源の消費を抑制し，環境への負荷をできる限り低減」する社会と述べられている．さらに，循環型社会形成に向けて，「私たちがどれだけの資源を採取，消費，廃棄しているか知ることが，循環型社会を構築するための第一歩」であると述べられている．このように，建築物の解体量が増加し，建設資材の循環利用の機運が高まる時に備え，都市に蓄積された建設資材ストック量を把握することが急務である．

他方，近年では自然災害の増加が後を絶たない．気象庁によると，一時間 50mm を超える豪雨の年間発生回数は，2020 年に 1975 年の約 1.5 倍発生した [3]．また，2018 年の西日本豪雨災害では，約 174 万トンの災害廃棄物が放出されたと環境省より報告されている [4]．このように，突発的に生じる自然災害によって，建設廃棄物が放出されうる．同時に，迅速な復興を目指して，災害廃棄物の仮置き場などの輸送を考慮した建設資材廃棄物量の予測が重要である．これより，現存する建設資材ストック量を把握するだけでなく，建設資材フローにも目を向け，地理的分析を行う必要がある．

これら議論を踏まえて，近年マテリアルストック・フロー分析である MSA(Material Stock Account/Analysis)及び MFA(Material Flow Account/Analysis)が注目されている．全国を対象とした研究で，環境省(2019)は各種貿易・製造に関する積み上げ，平成 19 年度における国内の物質の流れ「我が国における物質フロー」[5]を報告している．

2016年度の一年間で，我が国は建築物・土木構造物・その他耐久財として 4.7 億トンの物質が蓄積されたと報告されている．しかし，空間情報を考慮していないので，例えば災害ハザードエリアにおける建設資材蓄積量のような，特定の地域における建設資材蓄積量の空間分布を表現出来ない．また，長岡ら(2009)[9]は，全国の都道府県を対象とし，統計情報を用いて地上と地下それぞれのマテリアルストックを推計した．結果，1975 年で 55 億トン，2005 年で 135 億トンと推計されている．特に，建築物に関して，地上はコンクリートの 41 億トン，地下は砂利・石材の 11 億トンが最も多いことが示された．しかし，空間情報を考慮した推計は行われていない．

一方， GIS(Geographic Information System/地理情報システム)によるマテリアルストック分析は，空間分布や人口 GDP・土地利用といった様々なデータとの比較を可能にし，空間情報を考慮できる．GIS を用いたマテリアルストック推計は白濱ら(1997)[7]によって行われた．白濱らは GIS を用いて単位面積あたりの建設資材ストック量を推計した．対象地域は福岡市から用途地域の異なるサンプル地区を 9 つ抽出し，サンプル値を福岡市全域へ拡大した．しかし，推定結果は統計値に比べて約 55%大きく得られた．また，研究手法に関して，建築物一棟ごとに建設資材ストックを推計し，時系列順に GIS データベースを構築することは多大な労力を費やすと指摘されている．これより，GIS データベース構築に関する既往研究では，対象範囲が限定的であることが多い．

しかし， Tanikawa et al.(2015)[8]は日本全国における建築物・土木構造物を対象に構造物別に GIS データベースを構築した．結果，日本全国における 2009 年の建築物に関する建設資材ストック量は 76 億トンであることが明らかになった．しかし，GIS による推計結果は統計情報よりも約 20% 低く得られた．研究手法に関して，Tanikawa et al.(2015)はプログラミングによる自動化に成功した反面，建物構造を階数情報のみによって一律に決定した．そこで，本研究では統計データを参照し，建物構造の決定方法に修正を加えた．

以上より，社会を取り巻く環境が大きく変わる中，循環型社会形成に向け，早急に都市の物質動態を把握する必要がある．これより，本研究の目的を以下にまとめる．

(i) Tanikawa et al.(2015)が作成した 2003 年と 2009 年の GIS データベースを最新年である 2014 年，2016 年に拡充する
(ii) 朝隈ら(2018)[10]が開発した同一性判定システムを用いて，各年代間における建設資材フローを推計する．
(iii) 日本全国の都市を比較し，建設資材の代謝率を比較し，分析を行う．

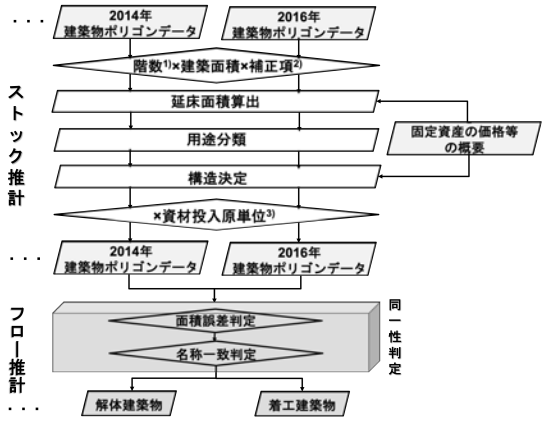

図-1 建設資材ストック・フロー推計の手順

2. 研究手法

(1) 基盤データ「Zmap-TOWNⅡ」

建築物一棟ごとに詳細な GIS データベースを構築するため，各建築物に対して空間情報・属性情報など，詳細な情報が格納された基盤データが必要である．本研究では，株式会社ゼンリンが提供する「Zmap-TOWNⅡ(2003, 2009, 2014, 2016)」という住宅地図データベースを利用した．Zmap-TOWNⅡとは， (株)ゼンリンの調査員が全国に存在する全ての建築物を対象に，現地調査を行って作成された住宅地図である．このように，本研究では建築物一棟ごとに建設資材ストック・フローを推計し，時空間分析 を行うため，Zmap-TOWNⅡを基盤データとして利用した．また，以下の**節(2)**と**節(3)**で説明する建設資材ストック・フロー推計の手順を**図-1** に示す．

(2) 建設資材ストック推計

a) 資材投入原単位法

建設資材ストック推計は推計式(1)に示す通り，東岸ら(2008)[11]が作成した資材投入原単位を利用した．単位面積当たりに投入される建設資材量を各建築物の延床面積に乗じることで，各建築物に蓄積されている建設資材ストックを推計する．そのためには，基盤データに不足する属性情報である延床面積・用途種・構造種を決定する必要がある．延床面積の算出方法は**項 b)**，用途種・構造種の決定方法は**項 c)**で言及する．

$$MS_{s,m} = TFA_s \times MI_{s,m} \quad (1)$$

$MS_{s,m}$：建物構造種別 s である建築物の，建設資材 m の蓄積量(建設資材ストック)
TFA_s：建物構造種別 s である建築物の延床面積
$MI_{s,m}$：建物構造種別 s である建築物の単位延床面積当

たりに投入される，建設資材 m の投入量(資材投入原単位)

b) 延床面積算出

各建築物の延床面積は階数に建築面積を乗じた．しかし，基盤データには階数が正確に格納されていない．そこで，平川ら(2011)[12]の手法によって，統計値と比較し各建築物の階数を決定した．本研究で用いた統計情報は，総務省が提供している「固定資産の価格等の概要調書」である．この統計データは固定資産税徴収を目的とし，各市区町村の建物用途種・構造種ごとに棟数や総延床面積が格納されている．

また，建築物の用途種によっては上層階で，下層階よりも吹き抜け等による床面積の減少が考えられる．そこで，大場ら(2000)[13]の手法を用いて延床面積の補正を行なった．これより，各建築物の延床面積を推計した．

c) 建物用途種･構造種の決定

以下に，ある市区町村における総木造棟数の算出式(2)を示す．Tanikawa et al.(2015)は基盤データに不足する建物構造種を階数情報のみで判断していた．本研究では上述した統計データである「固定資産の価格等の概要調書」を利用し，構造種の決定を行った．具体的な構造種決定に至る過程を以下に示す．

(i) 建築物一棟単位に扱っていた基盤データを市区町村単位で用途種ごとに建物棟数を集計した．

(ii) 基盤データの対応する市区町村の総棟数に統計データの各構造棟数の割合を按分した．(式(2))

(iii) 市区町村ごとに算出された各建物構造棟数を基盤データの全ての建築物に配分する．例えば，共同住宅であれば，延床面積の大きい建築物から RC 造，小さい建築物から木造，残りを鉄骨造と配分した．

$$ {}^{z}NB_{i,u,W} = {}^{z}NB_{i,u,all} \times {}^{stat}BSR_{i,u,W} \qquad (2) $$

${}^{z}NB_{i,u,W}$: 基盤データにおける，市区町村 i の，建物用途種 u の木造棟数

${}^{z}NB_{i,u,all}$: 基盤データにおける，市区町村 i の，建物用途種 u の全建物棟数

${}^{stat}BSR_{i,u,W}$: 統計データにおける，市区町村 i の，建物用途種 u の木造棟数割

⑶ 建設資材フロー推計

建設資材フロー推計には，朝隈ら(2018)が開発した年代間で同一の建築物を機械的に判定する同一性判定システムを用いた．同一性判定システムとは，GIS 上の機能である空間検索機能及び属性検索機能をプログラミング言語 Python で連続処理することにより，建築物の着工・解体を判別する手法である．以下に，年代間同一性判定システムの手順を示す．(朝隈ら，2018)

(i) 異なる 2 年代間の建築物ポリゴンの属性を，位置情報に基づいて結合，時系列データを構築する．

(ii) 各建築物について，残存・着工(解体)を示す属性情報を追加し，全ての建築物に着工(解体)を示す”1”を定義する．

(iii) 空間検索機能を用いて，年代間で建築面積の誤差が 10%以下である建築物を抽出，該当した建築物の属性を，残存を示す”0”へ変更する．

(iv) 属性検索機能を用いて，年代間で階数が同一であり，かつ建築物名称において同一の文字列を含む建築物の属性を，残存を示す”0”へ変更する．

朝隈ら(2018)は同一性判定の研究精度に関して，使用する GIS データのポリゴン形状に依存すると指摘している．都心部から離れ，時点が古くなるほど，ポリゴン形状の正確性は低くなる．この欠点を補うため，建築物の形状が完全一致する場合だけでなく，(iii)と(iv)で言及した通り，建築物名称が一致し，かつ面積誤差が 10%以下のものを同一建築物と見做すことにした．

⑷ 建設資材の投入率・廃棄率の推計

朝隈ら(2018)が開発した同一性判定システムを用いて，都市間の建設資材代謝率を比較し，分析を行う．建設資材代謝率はある市区町村における建設資材蓄積量と投入量(廃棄量)との関係を表す．以下，式(3.1)と(3.2)で示すように本研究では，建設資材蓄積量に対する投入量(廃棄量)を代謝率（FRS : Flow Rate per Stock）とする．さらに，これらを経過年数で除することで，一年当たりの建設資材投入率(廃棄率)となる．これを用いて，都道府県ごとの代謝率の差異について考察する．

$$ FRS_{in,ave} = \left(\frac{Input_{t1,t2}}{Stock_{t2}}\right) / (t_2 - t_1) \qquad (3.1) $$

$$ FRS_{out,ave} = \left(\frac{Output_{t1,t2}}{Stock_{t1}}\right) / (t_2 - t_1) \qquad (3.2) $$

FRS_{in} ：建設資材蓄積量に対する建設資材投入率

FRS_{out} ：建設資材蓄積量に対する建設資材廃棄率

$Input_{t1,t2}$ ：時点t_2から時点t_1における建設資材投入量

$Output_{t1,t2}$ ：時点t_2から時点t_1における建設資材廃棄量

$Stock$ ：時点t_iにおける建設資材蓄積

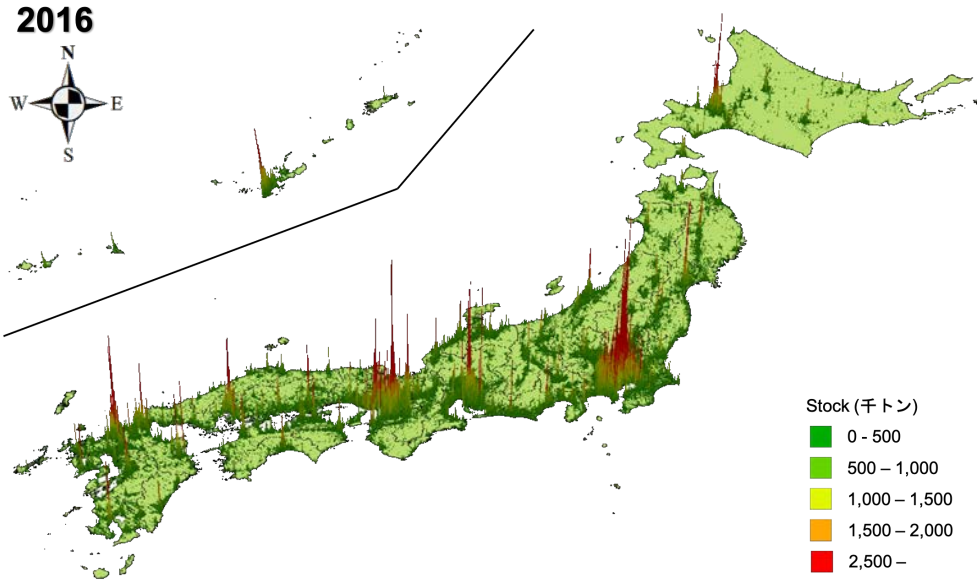

図-2　日本全国における建設資材蓄積量分布（1km×1km メッシュ，2016 年）

3.　研究結果と考察

(1)　建設資材蓄積量分布

2016 年の建設資材蓄積量分布を**図-2** に示す．また，2003 年から 2016 までの建設資材蓄積量と年代間の投入量・蓄積量，それぞれの経年変化を**図-3** に示す．建設資材蓄積量は 2003 年で 102 億トン，2009 年で 110 億トン，2014 年で 114 億トン，2016 年で 116 億トンと推計された．また，2003 年から 2009 年にかけて，建設資材投入量が 19.1 億トン，廃棄量が 10.5 億トンであり，2009 年から 2014 年にかけて，投入量が 18.8 億トン，廃棄量が 13.9 億トン，2014 年から 2016 年にかけて，投入量が 4.75 億トン，廃棄量が 3.19 億トンであった．特に，2016 年の三大都市圏(東京・名古屋・大阪)における建設資材蓄積量は全国の 47.7%を占めることが明らかになった．また，2014 年から 2016 年の間に三大都市圏に投入された建設資材量は全国の 39.6%を占める．中でも東京 23 区や神奈川県市街地(横浜市・川崎市)に建設資材蓄積量は集中しており，合計で 148 万トンにのぼる．また，日本全国の政令指定都市における建設資材蓄積量は，2016 年で 37.5 億トンにのぼる．同様に，中核都市における建設資材蓄積量は 20.3 億トンにのぼる．これより，2016 年で日本全国に蓄積されている建設資材の内，49.8%が政令指定都市と中核都市に存在することが分かった．一方で町村における建設資材蓄積量は全国の 8.4%にあたる 9.6 億トンであった．これより，都市部における開発が顕著であり，地方に比べて都市へ建設資材の一極集中が示唆される．さらに，建設資材蓄積量は増加傾向にあり，2003 年から 2016 年にかけて，1.14 倍の 14.3 億トンが増加した．しかし，一年間当たりの建設資材投入量は減少傾向にあり，2014-2016 年間の建設資材投入量は 2003-2009 年間と比較して，25.5%に減少した．また，建設資材廃棄量もやや減少傾向にあり，2014-2016 年間の建設資材廃棄量は 2003 年-2009 年間と比較して，9.0%減少した．これより，建設資材投入量と廃棄量の傾向には違いが見られ，将来は建設資材廃棄量が投入量を上回ると示唆される．つまり，今後，建設資材蓄積量は極大値を迎え，建設資材の廃棄に伴う環境負荷が懸念される．今後は，建設資材の計画的な再利用・処分に関して議論する必要がある．

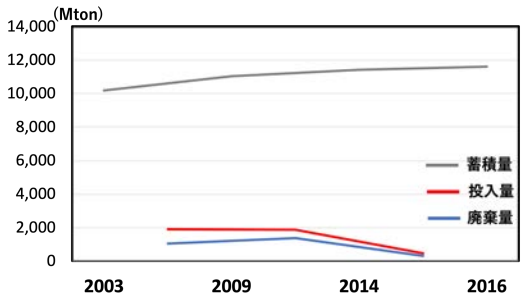

図-3　建設資材蓄積量・投入量・廃棄量の経年変化

(2) 建設資材別フロー分析

図-4 に建設資材別の投入量と廃棄量の経年変化を示す．特に，コンクリートが全体の 77%を占めることが分かった．続いて，砂利・石材が全体の 8.0%，鉄が全体の 4.8%を占める．本研究では，東岸ら(2008)が作成した建設資材原単位に大きく依存する．課題として超高層ビルに用いられる鉄骨鉄筋コンクリート構造などについて言及できていない．これより，今後は資材投入原単位を構造種別・用途種別により詳細に作成する必要がある．また，コンクリートは製造時 CO_2 を排出する反面，空気中に放置すると中性化によって CO_2 の吸収に貢献する．これより，コンクリートの投入・蓄積に伴う CO_2 吸排出量を推計することが今後の課題として挙げられる．

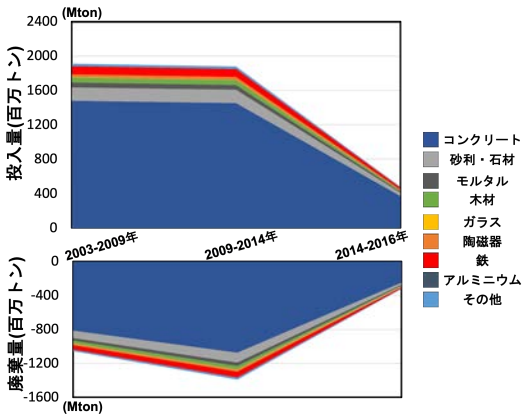

図-4 全国における建設資材別投入量と廃棄量

(3) 地域ごとの建設資材投入率と廃棄率

以下，**図-5**，**図-6**，**図-7** に各三大都市圏の市区町村ごとにプロットした物質代謝を示す．本節では**2章**の**節(4)**で紹介した建設資材代謝率(FRS : Flow Rate per Stock)を用いて都市間の物質代謝の差異を明らかにする．東京都市圏と名古屋都市圏を比較すると，2014-2016 年間での一年間当たりの建設資材投入率は東京都市圏の方が名古屋都市圏より 15.7%大きい．しかし，同年代間の一年間当たりの建設資材廃棄率は東京都市圏の方が 4.4%大きいが，あまり変わらない．同様に，東京都市圏と大阪都市圏を同年代間で比較すると，建設資材投入率は，東京都市圏の方が 9.5%大きい．一方で建設資材廃棄率は東京都市圏の方が 24.2%大きい．これより，東京都市圏と比較すると，大阪都市圏と名古屋都市圏では，東京都市圏ほど建物の建替え・解体が行われていないことが示唆される．特に，建設資材の投入量に比べて，建設資材の廃棄量に年代間の差がないことより，東京に比べて建物の更新が遅れていることが示唆される．

表-1 建設資材蓄積量に対する更新量(FRS)

	投入						廃棄					
	2003-2009		2009 - 2014		2014 - 2016		2003-2009		2009 - 2014		2014 - 2016	
	FRS_{in}	R^2	FRS_{in}	R^2	FRS_{in}	R^2	FRS_{out}	R^2	FRS_{out}	R^2	FRS_{out}	R^2
東京圏	0.0302	0.892	0.0308	0.979	0.0184	0.922	0.0146	0.941	0.0222	0.964	0.0118	0.880
名古屋圏	0.0275	0.934	0.0253	0.872	0.0159	0.804	0.0163	0.924	0.0181	0.9412	0.0113	0.847
大阪圏	0.0289	0.9562	0.0321	0.964	0.0168	0.881	0.0275	0.965	0.0220	0.9654	0.0095	0.858

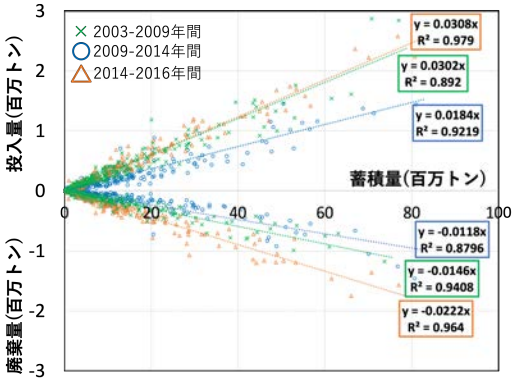

図-5 東京都市圏の物質代謝

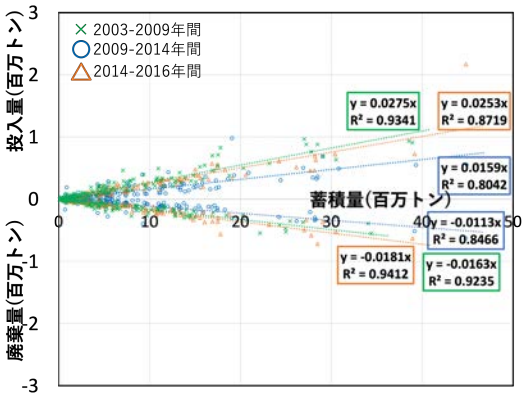

図-6 名古屋都市圏の物質代謝

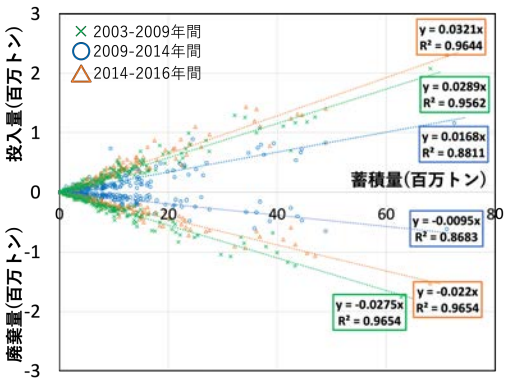

図-7 大阪都市圏の物質代謝

4. おわりに

本研究では，Tanikawa et al.(2015)の手法と朝隈ら(2018)が開発した同一性判定システムを用いて，GIS データベースの拡充及び建設資材ストック・フロー分析を行なった．さらに，地域間の建設資材代謝率を比較した．本研究で明らかになったことを以下に示す．

(i) 日本全国における建設資材蓄積量は増加傾向にあり，2016 年で 116 億トンと推計された．しかし，増加率は年々緩やかになっており，将来，蓄積量の極大値を迎えることが示唆される．

(ii) 日本全国における建築物に関するコンクリートの蓄積量は 89.3 億トンであった．今後の課題は，各建設資材の投入・廃棄に伴う環境負荷を定量化することで，循環型社会形成の一助となる．

(iii) 三大都市圏における建設資材代謝率を明らかにした．名古屋都市圏と関西都市圏は東京都市圏と比べて，建築物の更新が遅れていることが示唆された．

今後の課題として，社会基盤構造物を考慮した上で，建設資材の動態を分析する必要がある．また，近年増加する災害に備えるため，災害ハザードエリアにおける建設資材の代謝量を分析する．

謝辞：環境研究総合推進費：S18-4-2, 3-1902, 2-2103, 1-2003

参考文献

1) 総務省：固定資産の価格等の概要調書，1974-2016.
2) 環境省：第四次循環型社会推進基本計画，2018
3) 気象庁：全国(アメダス)の 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数
4) 環境省：災害廃棄物情報サイト，平成 30 年 7 月豪雨による被害状況
5) 環境省：環境白書・我が国における物質フロー，2019
6) 長岡耕平，谷川寛樹，吉田登，東修，大西暁生，石峰，井村秀文：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，pp.83-88，Vol.23，環境情報科学論文集，2009.
7) 白濱康弘，谷川寛樹，松本亨，井村秀文：GIS を利用した都市内エネルギー消費量及びマテリアルストックの推計，pp.269-275，Vol.25，環境システム研究，1997.
8) Hiroki Tanikawa, Tomer Fishman, Keijiro Okuoka, and Kenji Sugimoto：The Weight of Society Over Time and Space; A Comprehensive Account of the Construction Material Stock of Japan 1945‐2010，pp. 778-791，Vol.19-5，Journal of Industrial Ecology，2015.
9) 朝隈友哉，奥岡桂次郎，谷川寛樹：建築物の年代間での同一性判定を用いた東京都市圏における更新量の推計，pp13-18，Vol.32，環境情報科学学術論文集，2018.
10) 東岸芳浩，稲津亮，内藤瑞枝，谷川寛樹，橋下征二：都市構造物における経年的資材投入原単位の推計に関する研究，pp. 147-149，Vo.19，廃棄物学会研究発表会講演論文集，2008.
11) 平川隆之，黒岩史，鬼頭祐介，田中健介，谷川寛樹：東日本大震災により失った建設ストックの推計，pp.374-378，Vol.7，日本 LCA 学会誌，2011.
12) 大場亨：建築面積及び地上階数からの延べ面積の予測，pp.1033-103，Vol.35，日本都市計画学会学術研究論文集，2000.

(Received August 23, 2021)
(Accepted ?, 2021)

Dynamic Analysis of Material Stock and Flow on Buildings with Expanded GIS-database in Japan

Hidetatsu YOSHIDA, GUO Jing, Hiroaki SHIRAKAWA, Hiroki TANIKAWA

Toward the sound material-cycle society, it is required to comprehend the material balance in the whole of Japan. For the period of high economic growth, Japan developed by investing in a large number of construction materials. However, many of these buildings are now reaching the end of their lifespan, and it is concerned that a large amount of construction material waste will be released in the future. This study describes the expansion of GIS-database of construction material stock in Japan using the method of Tanikawa et al.(2015). In addition, we analyzed the material dynamics by tracking buildings with the automatic identifying technique developed by Asakuma et al.(2018). As a product of research, in 2016, 11,603 million tons of construction material stock was accumulated in Japan. From 2003 to 2016, the amount of renewal was 4,267 million tons and the amount of demolition was 2,763 million tons. Besides, in the three major metropolitan areas (Tokyo, Nagoya, and Osaka), it is accounted for 47.7% of Japan’s construction materials.