

ストック型社会に向けたストック使用効率の評価 -建設物を対象としたケーススタディ-

八柳 有紗¹・谷川 寛樹²・橋本 征二³

¹学生会員 立命館大学大学院修士課程学生 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail:rv0023xk@ed.ritsumeai.ac.jp

²正会員 名古屋大学大学院教授 環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

³正会員 立命館大学教授 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

近年、循環型社会の形成に向け、ストック型社会を構築すること望まれている。ストック型社会に向かうためには、経済社会中に蓄積されている物質ストック量を適切に把握し、その使用価値や使用効率を評価する必要がある。本研究では、道路、下水道、鉄道に蓄積されている物質ストック量を推計し、その使用効率の推移の推計および要因を検討した。その結果、2012年度時点で、道路には52億トン、下水道には9億トン、鉄道には4億トンの資材が蓄積されていると推計された。また、ストック使用効率に関しては、貨物輸送に着目した場合の道路および下水道が増加傾向、旅客輸送に着目した場合の道路および鉄道が減少傾向にあると推計された。2002年度から2012年度の各建設物のストック使用効率の変化の要因としては、物質使用効率の変化の影響が大きい場合と稼働率の変化の影響が大きい場合があった。

Key Words: material flow analysis, material stock, material-use efficiency, capacity usage ratio, decomposition analysis

1. はじめに

近年、循環型社会の形成に向けて、経済社会中に蓄積されたストックに焦点を当てる動きが高まっている。平成 27 年度環境白書¹⁾によると、我が国の平成 24 年度における総資材投入量 16 億トンのうち、約 1/3 にあたる 5.3 億トンが蓄積純増であると推計されている。蓄積純増は平成 21 年度から横ばいであるが、これは、毎年 5 億トン以上の資源が、建設物や工業製品等として経済社会中に新たに蓄積されていることを意味する。つまり、日本のストックは増え続けていると考えられるが、こうしたストックの中には、有効に活用されているものがある一方、有効に活用されていないものも存在すると考えられる。有効に活用されていないストックは、限られた資源を浪費していると考えられるほか、倒壊の危険がある空き家に代表されるように、地域住民の生活環境に影響を及ぼす可能性があり、再資源化ないしは適切に処理していくことが望まれる。

これらの理由から、近年ストック型社会という概念が注目を集めている。この概念は、使用価値や使用効率が高いストックを生産、長期間活用し、一方で使用価値や使用効率が低いストックを再使用、再生利用、または適

正処理していくことで、限りある資源を有効に活用する社会のことである。このような社会を形成するためには、第三次循環型社会形成推進基本計画²⁾において今後の指標の課題として挙げられているように、ストックの状況を適切に把握し、その使用価値や使用効率を表す指標について検討を行う必要がある。

経済社会に蓄積されている物質量（物質ストック量）に関しては、現在までに Hashimoto et al.³⁾が建設物全般を対象に、延床面積または工事費をもとにした推計をトップダウン手法により行っている。建設物の耐用年数が経過した後には、全ての資材が廃棄されるとして推計を行っているが、実際には、整地用の骨材・石材などの半永久的な形態で使用される資材⁴⁾があり、これについて考慮する必要がある。また、田中⁵⁾が建築物、道路、鉄道、空港、港湾、漁港、ダムについて各建設物の物理量に着目し、ボトムアップ手法により物質ストック量を推計しているが、対象構造物に制限がある。そのため、より包括的かつより詳細な物質ストック量の推計が求められる。

ストックの使用効率については、田中⁵⁾が各都道府県における一人あたりの物質ストック量を推計しているほか、Lwin et al.⁶⁾が道路、鉄道について、貨物輸送トンや旅客輸送人に着目し、各都道府県におけるストックの使

用効率を推計している。今後は、ストックの使用効率について、より包括的な指標を作成していく必要がある。

筆者らは既報⁷⁾において、14種の建設物を対象として、ストック使用効率を計測する指標を提案するとともに、道路、鉄道、港湾空港の物質ストック量およびストック使用効率を推計した。しかしながら、既報においては後述する潜在的な機能を考慮できていなかった。

本研究では、道路、鉄道、下水道を対象に、(1)潜在的な機能を中心としたストック使用効率の計測指標の提案、(2)物質ストック量の推計、(3)日本におけるストック使用効率の推移の推計およびその要因の検討を目的とする。

2. 方法

(1) 推計期間、対象とする建設物および物質

本研究では、使用する統計の制約上、1956年度から2012年度までを物質ストック量の推計期間とする。

対象物質は、セメント、鋼材、骨材・石材、瀝青材とした。さらに、骨材・石材については、生コンクリート用骨材、アスファルトコンクリート用骨材、再生アスファルト用骨材、上記いずれの用途にも当てはまらないその他の骨材・石材に分類した。

(2) ストック使用効率の定義および影響度分析

各建設物のストック使用効率は、以下で計測する⁷⁾。

$$\begin{aligned} & \frac{\text{ストックの発揮している機能}}{\text{物質ストック量(ton)}} \\ &= \frac{\text{ストックの潜在的な機能}}{\text{物質ストック量(ton)}} \quad \cdots(1) \\ & \times \frac{\text{ストックの発揮している機能}}{\text{ストックの潜在的な機能}} \end{aligned}$$

ここで、ストックの発揮している機能とは、そのストックが実際にどのくらいの機能を発揮しているかという値であり、ストックの潜在的な機能とは、そのストックが潜在的にどのくらいの機能を持っているかという値である⁷⁾。ストックの潜在的な機能を物質ストック量で除した項は物質使用効率、ストックの発揮している機能をストックの潜在的な機能で除した項はストックの稼働率を示す。物質使用効率は、1単位の物質ストック量に対してどれだけの潜在的な機能を持ったストックが整備されているかを示すものであり、稼働率は潜在的な機能に対して実際にどれだけの機能が発揮されているかを示す。

ここで、 t 年度と τ 年度($<t$ 年)におけるストック使用効率の変化が、物質使用効率の変化と稼働率の変化の和で説明できるとする。

$$SUE(t) - SUE(\tau) = f_{MUE} - f_{CUR} \quad \cdots(2)$$

ここで、 $SUE(t)$ は t 年度におけるストック使用効率、 f_{MUE}

は物質使用効率の変化の影響、 f_{CUR} は稼働率の変化の影響である。本研究では、Sun⁸⁾のcomplete decomposition modelにより、物質使用効率と稼働率の影響度を算出した。

$$f_{MUE} = \Delta MUE \times CUR_{\tau} + \frac{1}{2} \Delta MUE \Delta CUR \quad \cdots(3)$$

$$f_{CUR} = MUE_{\tau} \times \Delta CUR + \frac{1}{2} \Delta MUE \Delta CUR \quad \cdots(4)$$

ここで、 MUE_{τ} 、 CUR_{τ} はそれぞれ τ 年度における物質使用効率、稼働率、 ΔMUE 、 ΔCUR はそれぞれ t 年度と τ 年度の間の物質使用効率、稼働率の変化率である。 f_{MUE} および f_{CUR} が正である場合、当該因子がストック使用効率を増加させる方向に、負である場合、当該因子がストック使用効率を減少させる方向に働いていることを示す。

(3) 物質ストック量の推計方法

a) 推計の枠組み

物質ストック量はHashimoto et al.³⁾の方法を参考にし、以下の式で推計する。

$$MS_{ia}(t) = \sum_{\tau} (C_a(\tau) \times (\alpha_{ia}(\tau) \times R_a(t-\tau) + \beta_{ia}(\tau))) \quad \cdots(5)$$

ここで、 $MS_{ia}(t)$ は、建設活動 a に関わる資材 i の t 年度における物質ストック量(ton)、 $C_a(\tau)$ は τ 年度に行われた建設活動 a の活動量(円)(2005年度価格)、 $\alpha_{ia}(\tau)$ は τ 年度に行われた建設活動 a 一単位あたりの半永久的な形態で使用されない資材 i の蓄積原単位(ton/円)(2005年度価格)、 $\beta_{ia}(\tau)$ は τ 年度に行われた建設活動 a 一単位あたりの半永久的な形態で使用される資材 i の蓄積原単位(ton/円)(2005年度価格)、 $R_a(t-\tau)$ は τ 年度($<t$ 年)に行われた建設活動 a によるストックの($t-\tau$)年後における残存確率である。建設活動量や蓄積原単位は、公共工事、民間工事別に統計が区分され整備されているため、本推計ではこれに従って推計する。

建設活動 a は道路、鉄道、下水道の各活動である。 $C_a(t)$ は工事費⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾で表現される。ただし、民間工事のうち、工事費の統計値が存在しない年度に関しては、統計値が存在するその前後2年度で線形補間した。

$\alpha_{ia}(\tau)$ 、 $\beta_{ia}(\tau)$ は、建設活動 a 一単位あたりの資材 i の投入原単位¹⁴⁾¹⁵⁾を用いる。厳密には投入原単位と蓄積原単位は異なるが、建設分野において投入した資材のうちストックとならずに廃棄される量はわずかである³⁾ことから、本研究では投入原単位と蓄積原単位は同一の値をとるものとする。また、その他の骨材・石材の蓄積原単位を $\beta_{ia}(\tau)$ 、それ以外を $\alpha_{ia}(\tau)$ とし、前者には残存確率を乗じないこととした。これは、生コンクリート用骨材等に用いられる骨材は建設物が使用済みとなった後、廃棄物となる可能性が高いが、その他の骨材・石材は、主に整地に使用されると考えられ、建設物が使用済みとなった後

も多くはそのまま土地として半永久的に使用され则认为られるためである。Hashimoto et al.⁴⁾はこれを散逸的利用物と定義している。

$R_d(t-t)$ は竹ヶ原¹⁶⁾より、平均寿命での廃棄確率を10%とする正規分布に従うとした。建設物別資材別の平均寿命に関しては、表-1に示すように設定した。セメントおよび生コンクリート用骨材は一般的な寿命とされる60年、鋼材は日本の社会資本2012¹⁷⁾にて推計されている各建設物の平均耐用年数、また瀝青材、アスファルトコンクリート用骨材および再生アスファルトコンクリート用骨材は既往研究¹⁷⁾を参考に設定した。

b)投入原単位の設定方法

投入原単位¹⁴⁾¹⁵⁾は1976年度から3年度に1回、2010年からは2年度に1回発行されている。本研究では、原単位が作成されていない年度に関して、その前後の調査年2年度の原単位で線形補間することで推計した。また、その他の骨材・石材の原単位は、骨材・石材全体の原単位から、生コンクリート用骨材、アスファルトコンクリート用骨材、再生アスファルト用骨材を減じることで算出した。投入原単位¹⁴⁾¹⁵⁾が作成されていない1976年度以前は、以下のように推計した。

まず、公共工事に対する原単位は以下のように整備した。セメント、鋼材に関しては、1956年度から1966年度まで、建設工事着工統計年報⁹⁾および公共工事着工統計年度報¹⁰⁾に記載されている工事費予定額を資材使用予定量で除すことにより、投入原単位を算出した。1967年度から1975年度までは、該当する統計が存在しないため、統計が存在する1966年度と1976年度の原単位で線形補間することで推計した。次に、生コンクリート用骨材に関しては、該当する統計が存在しないため、セメントの原単位の推移に沿うように設定した。アスファルトコンクリート用骨材、再生アスファルトコンクリート用骨材、骨材・石材全体は1976年度値で一定とした。その他の骨材・石材は、1976年度以降と異なる手法をとり、1976年度値で一定とした。次に、民間工事に対する原単位は以下のように整備した。セメント、鋼材に関しては1956年度から1959年度まで建設工事着工統計年報⁹⁾に記載されている工事費予定額を資材使用予定量で除すことにより、投入原単位を算出した。それ以外の資材に関しては、1976年度値で一定とした。

また、下水道の原単位は、公園と複合され、下水道公

園として作成されている年度がある。そのような場合、下水道のみの原単位が得られた年度で線形補間することにより、下水道のみの原単位を推計した。

3. 結果と考察

(1)ストック使用効率指標の検討結果

筆者らの既報⁷⁾を改善する形でストックの潜在的な機能、発揮している機能を検討した結果を表-2に示す。ストックは複数の機能が有する場合が多いが、(1)主たる機能が何か、(2)その機能を算出できる可能性があるか、という2つの基準から、これらの機能を設定した。

道路の潜在的な機能としている道路面積は、田中⁵⁾の手法を参考に、道路統計年報¹⁹⁾に記載されている幅員ごとの延長より推計した。下水道の潜在的な機能としている晴天時最大処理量は、下水道統計²⁰⁾にて整備されている各施設の晴天時一日最大処理量を合計したものを年換算することで推計した。

(2)物質ストック量推計結果

図-1に建設物別の物質ストック量の推計結果を示す。2012年度時点の物質ストック量は約66億トンであり、うち道路に約52億トン、鉄道に約4億トン、下水道に約9億トン、の資材が蓄積されていると推計された。次に、資材ごとの物質ストック量の推計結果を図-2に示す。2012年度時点では、セメント約4億トン、鋼材約1億トン、生コンクリート用骨材約20億トン、アスファルトコンクリート用骨材約1億トン、再生アスファルトコンクリート用骨材約1億トン、その他の骨材・石材約37億トン、瀝青材約2億トンが上記3つの建設物に蓄積され

表-1 建設物別資材別物質ストック量

	道路	鉄道	下水道
セメント、コンクリート用骨材	60	60	60
鋼材	40	26	20
アスファルトコンクリート用骨材、再生アスファルトコンクリート用骨材、瀝青材	20	20	20

表-2 ストック使用効率の計測指標

対象とする建設物	潜在的な機能	発揮している機能
道路	道路面積(km ²)	貨物輸送トンキロ ²²⁾ (ton・km)、旅客輸送人キロ ²²⁾ (人・km)
鉄道	営業キロ(km) ²¹⁾	貨物輸送トンキロ ²³⁾ (ton・km)、旅客輸送人キロ ²³⁾ (人・km)
下水道	晴天時最大処理量 (m ³ /年)	年間処理量 ²⁰⁾ (ton)

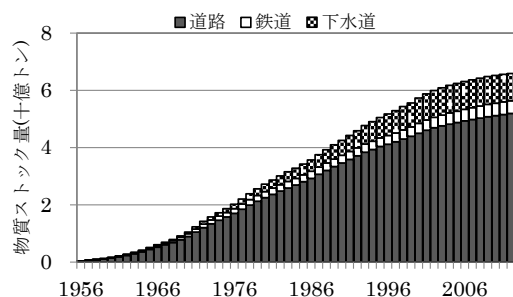


図-1 建設物別物質ストック量

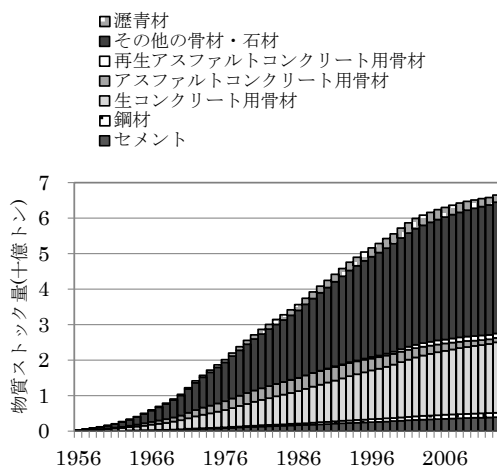


図-2 資材別物質ストック量

ていると推計された。蓄積された資材の約6割がその他の骨材・石材であり、散逸の利用物が多くを占めることが示された。

次に、既往研究である田中⁵⁾と比較する。田中⁵⁾は2010年時点の物質ストック量を道路57億トン、下水道5億トン、鉄道0.8億トン、3部門合計で63億トンと推計しており、本推計が2億トン程度上回る結果となった。田中⁵⁾は構造物の物理量に着目したボトムアップ手法を用い、構造物ごとに物質ストック量の推計を行っているのに対し、本推計は用いている統計の関係上、建設工事とされるもの全てが対象となる。そのため、本推計値のほうが大きくなるのが自然と考えられる。しかしながら、鉄道のように、時系列で比較するとその推移に整合がとれていないと考えられる建設物もみられた。その要因として、本推計の推計開始年度以前の物質ストック量の存在等が考えられる。また、本推計における道路と下水道のそれぞれに蓄積しているアスファルトコンクリート用骨材、再生アスファルトコンクリート用骨材、および瀝青材の和が両者でほぼ同じであった。このことから、下水道の管工事を行うために、道路表層を剥がし、再び施工した

場合、その道路表層の物質ストック量が、本推計では下水道として勘定されている可能性があると考えられる。

(3) ストック使用効率推計結果

本研究の物質ストック量は経済社会に投入された資材の積み上げによって推計されているため、過去については推計の精度が低い可能性がある。そのため、本研究では、直近の10年間（2002年度から2012年度）のストック使用効率を推計した。ただし、道路の発揮している機能のうち旅客輸送人キロに関しては、その統計が2010年度に大きく変化したため、2002年度から2009年度までを推計期間とした。

図-2～図-4に2002年度から2012年度におけるストック使用効率の推計結果、図-8に2002年度から2012年度の物質使用効率と稼働率の影響度の割合を示す。

発揮している機能を貨物輸送トンキロとした場合の道路のストック使用効率は増加傾向であり（図-3）、2002年度から2012年度のストック使用効率の変化に対しては、稼働率が正に強く影響していると推計された（図-8）。一方、発揮している機能を旅客輸送人キロとした場合の道路のストック使用効率は減少傾向であり（図-4）、2002年から2012年度のストック使用効率の変化に対しては、稼働率が負に強く影響していると推計された（図-8）。道路のストック使用効率の変化の要因は、主に稼働率であると考えられる。他の要因も勘案する必要があるが、稼働率の正負は新しく整備した道路を活用できているか、あるいは新たな旅客輸送、貨物輸送を誘引できているか等に関係する。旅客輸送に関しては、道路ストックの活用度が落ちているないしは道路整備が新しい旅客輸送を誘引できていない可能性が示唆される。また、物質使用効率は双方とも負に影響しており、高架構造物やトンネルの増加、高速道路の建設などが要因として考えられる。

次に、発揮している機能を貨物輸送トンキロおよび旅客輸送人キロとした場合の鉄道のストック使用効率は減少傾向であり（図-5、図-6）、2002年度から2012年度のストック使用効率の変化に対しては、物質使用効率が負に強く影響していると推計された（図-8）。これは、新幹線などに用いられる高架構造物や複線、複々線の増加などが要因として考えられる。また、貨物輸送に着目した場合、稼働率は負に影響しているのに対し、旅客輸送に着目した場合は正に影響している。道路での検討と同様に、他の要因も勘案する必要があるものの、貨物輸送に対しては鉄道ストックの活用度が落ちているないしは鉄道整備が新しい貨物輸送を誘引できていない可能性が示唆される。

最後に、下水道のストック使用効率は増加傾向であり（図-7）、2002年度から2012年度のストック使用効率の変化に対しては、物質使用効率、稼働率ともに正に影響

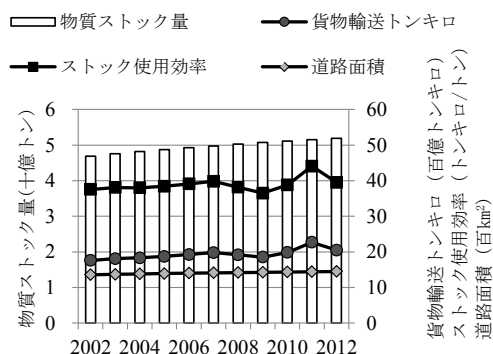


図-3 貨物輸送トンキロに着目した道路のストック使用効率

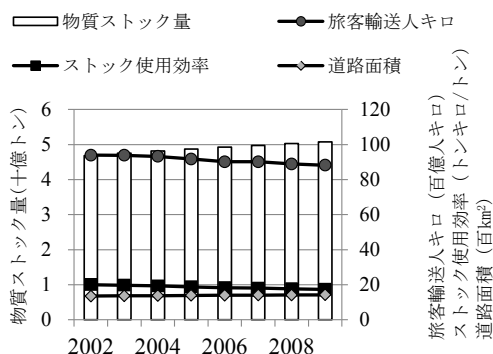


図-4 旅客輸送人キロに着目した道路のストック使用効率

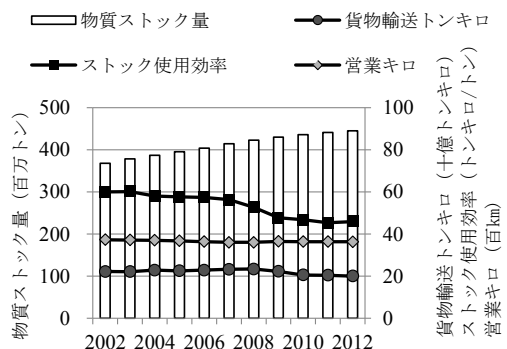


図-5 貨物輸送トンキロに着目した鉄道のストック使用効率

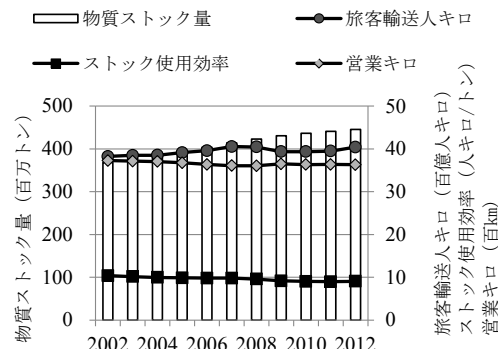


図-6 旅客輸送人キロに着目した鉄道のストック使用効率

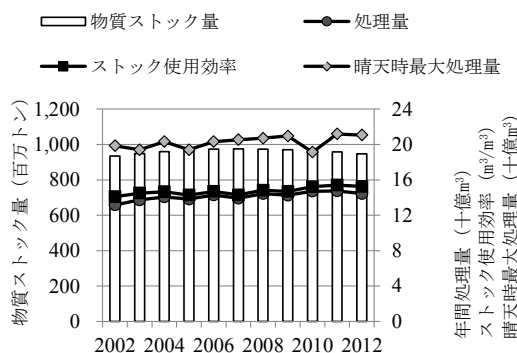


図-7 下水道のストック使用効率

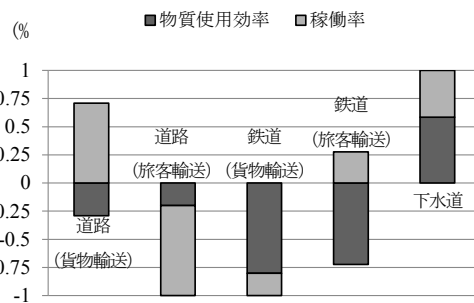


図-8 ストック使用効率の変化に対する各因子の影響度

響していると推計された（図-8）。

4. おわりに

本研究では、ストック型社会に形成に向け、道路、鉄道、下水道を対象にストック使用効率を計測する指標を提案するとともに、蓄積されている物質ストック量の推計、ストック使用効率の推移とその要因の分析を行った。そ

の結果、2012年度時点での物質ストック量は道路52億トン、鉄道4億トン、下水道9億トン、3つの建設活動合計で66億トンであると推計された。また、2002年度から2012年度を推計期間としたときのストック使用効率に関して、旅客輸送に着目した場合の道路および鉄道のストック使用効率は減少傾向であり、貨物輸送に着目した場合の道路および下水道のストック使用効率は増加傾向にあると推計された。2002年度から2012年度のストック使用効率の変化に対する物質使用効率と稼働率の影響度については、建設物によってどちらに強く影響されるかが異なることが示された。

本研究の課題は以下の通りである。

- 1) 本研究のストック使用効率は物質ストック量の精度に強く影響を受けるため、推計精度を向上させる必要がある。そのためには、本推計開始年度以前にすでに存在する物質ストック量を検討する必要がある。
- 2) ストックが果たしている機能について、より詳細に設定する必要がある。例えば、道路の機能に着目する場合、輸送トンキロだけではなく、輸送に要した時間も重要になる。また、鉄道の潜在的な機能を営業キロとしているが、実際には複線や複々線が増加しているため、鉄道延長等に拡張する必要がある。

謝辞：本研究は、環境省環境研究総合推進費（1-1402）及び文部科学省科学研究費補助金（26281056）による成果である。ここに記して深謝する次第である。

参考文献

- 1) 環境省：平成 27 年度版環境・循環型社会・生物多様性白書，2015。
- 2) 環境省：第三次循環型社会形成推進基本計画，2013。
- 3) Hashimoto, S., Tanikawa, H., Moriguchi, Y.: Where will large amounts of materials accumulated within the economy go? – A material flow analysis of construction minerals for Japan, Waste Management, 27(12), 1725-1738, 2007.
- 4) Hashimoto, S., Tanikawa, H., Moriguchi, Y.: Framework for estimating potential wastes and secondary resources accumulated within an economy - A case study of construction minerals in Japan, Waste Management, 29(11), 2859-2866, 2009.
- 5) 田中健介：ストック型社会へ向けたマテリアルストックの基盤データ拡充および指標体系に関する研究，名古屋大学大学院環境学研究科年環境学専攻修士論文，2014
- 6) Lwin, C.M., Tanikawa, H., Hashimoto, S.: An Analysis of Material Stocks for the Construction of Transport Infrastructure in Japan: Moving towards a Sustainable Stock-type Society, Journal of Environmental Information Science, 41(5), 63-72, 2013.
- 7) 八柳有紗，橋本征二：ストック型社会形成に向けたストック使用効率の評価，第 10 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集，88-89，2015。
- 8) Sun, J.W.: Changes in energy consumption and energy intensity: A complete decomposition model, Energy Economics, 20, 85-100, 1998
- 9) 建設大臣官房：建設工事着工統計年報、1956-1959
- 10) 建設省：公共工事着工統計年度報、1960-1999
- 11) 国土交通省：建設工事受注動態統計調査年度報、2000-2013
- 12) 建設省：民間土木工事着工統計推移資料，1980。
- 13) 建設省：民間土木工事着工統計報告，1987，1996，2000。
- 14) 建設省：土木工事資材・労働力需要実態調査報告書，1979-1987
- 15) 建設省/国土交通省：建設資材・労働力需要実態調査報告書，1990-2012
- 16) 竹ヶ原啓介：都市再生と資源リサイクル-資源循環型社会の形成に向けて-，調査第 33 号，日本政策投資銀行，2002
- 17) 内閣府：日本の社会資本 2012
- 18) 長谷川正利：道路の維持管理を考慮した物質代謝の空間分析，名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻修士論文，2015
- 19) 国土交通省：道路統計年報，2002-2012
- 20) 社団法人日本下水道協会：下水道統計，2002-2012
- 21) 国土交通省：鉄道統計年報，2002-2012
- 22) 国土交通省：自動車輸送統計，2002-2012
- 23) 国土交通省：鉄道輸送統計，2002-2012

(2015. 8. 28 受付)

EVALUATION OF STOCK-USE EFFICIENCY TOWARD THE DEVELOPMENT OF A STOCK-TYPE SOCIETY - A CASE STUDY FOR INFRASTRUCTURE-

Arisa YATSUYANAGI, Hiroki TANIKAWA, and Seiji HASHIMOTO

It is required to develop a stock-type society for establishing a sound material-cycle society. To achieve this, the amount of stocked material in our socio-economic system needs to be captured and the stock-use value or stock-use efficiency should be evaluated. In this research, we estimated the amount of stocked material in roads, sewages, and railways, and examined the trends in stock use-efficiency and its reasons. The results show that 5.2G, 0.9G, and 0.4G tons of materials are accumulated in roads, sewages, and railways, respectively, in 2012. Moreover, the stock-use efficiency of roads (when focusing on freight) and sewages is estimated to be increasing, while the stock-use efficiency of roads (when focusing on passenger transport) and railways is estimated to be decreasing. Relative impact of change in material-use efficiency and capacity usage ratio on change in stock-use efficiency was dependent on infrastructure.