

MASを用いた建築資材のリユースによる資源循環型社会の構築に関する研究

A Study of Building a Circulation Society by Reusing Construction Materials Using MAS

○徳勝 遊子*¹, 山邊 友一郎*², 谷 明勲*³
Yuko Tokukatsu*¹, Yuichiro Yamabe*² and Akinori Tani*³

*1 神戸大学大学院工学研究科 大学院生

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kobe University

*2 神戸大学大学院工学研究科 准教授, 博士(工学)

Associate Professor, Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.

*3 神戸大学大学院工学研究科 教授, 博士(工学)

Professor, Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.

Summary: The increasing need to build a sustainable society has led to adoption of Sustainable Development Goals (SDGs) globally. The construction industry is no exception, facing environmental challenges such as excessive waste production and illegal disposal. The responsibility of the construction industry to promote sustainability is crucial and it is essential to create a new circulating societal system for construction materials for buildings. As a potential new system, reusing construction materials is under consideration.

The purpose of this paper is to motivate reusing construction materials for the upcoming sustainable society, although in today's world reusing is not yet technologically possible and institutionalized. In order to construct a virtual society, the simulations are performed by using MAS (Multi-agent System). The relation between the varied parameters and the effectiveness of reusing construction materials is discussed. Results show that by reusing materials, there is a huge reduction in the production of newly manufactured materials. Also, to have a sufficient circulating system, the number of times that a material can be reused is crucial.

キーワード: 循環型社会; マルチエージェントシステム; リユース

Keywords: Circulation society; multi-agent system; reuse.

1. はじめに

地球環境維持のため国際社会では持続可能な社会の構築が求められ¹⁾, 2015年には持続可能な開発目標(SDGs)も国連によって採択されている。そこで, 従来の大量生産・大量消費・大量廃棄型社会システムから脱却し, 資源の有限性を考慮した新たな循環型システム・社会の形成が必要とされる²⁾。特に建築業を含む建設業は, 多くの環境問題に影響を及ぼしている。産業廃棄物の排出量を業種別にみる³⁾と, 建設業は約2割を占めており, 不法投棄等をされた産業廃棄物のうち約8割を建設系廃棄物が占めている。このように建築業界の持続可能性に対する責務は重大である。しかし, 建築業の現状においては, リサイクルの推進は多いものの, 技術的・制度的な課題がある中でリユースはほとんど行われていない。リユースを導入することで, 環境負荷を大規模に低減し, 循環型社会システムの形成に大きく貢献すると考えられ

る。

先行研究として, 山邊らは部材リユースを基調とした循環型社会における資源採掘量, CO₂排出量の検討⁴⁾⁵⁾を行っている。また, 部材リユースによる資源循環に伴う経済性の評価を考慮したものととして, 五十嵐らによる資源循環型住宅のライフサイクルコスト現在価値の研究⁶⁾がある。しかしリユース部材の寿命をパラメータとした検討は行われていないため, 本研究で実施する。

本稿では, 部材寿命と建物寿命というパラメータを変動させ, 新規部材の使用量や資源循環に及ぼす影響を考察する。部材リユースによる環境負荷低減効果を, マルチエージェントシステム(MAS)を用いて検証することで, 資源循環型社会構築に向けた動機付けの一助となることを目的とする。

2. 資源循環型社会システム

本研究では、図1に示すように、建物の所有・建設・解体を行う3種類のエージェントと、エージェント間を流通する建物・部材などのオブジェクトの振る舞いを再現するマルチエージェントシステムを構築し、種々の設定の下でシミュレーションを実行する。以下では、本システムで登場するエージェントとオブジェクトの内容及び相互の関係性を説明する。

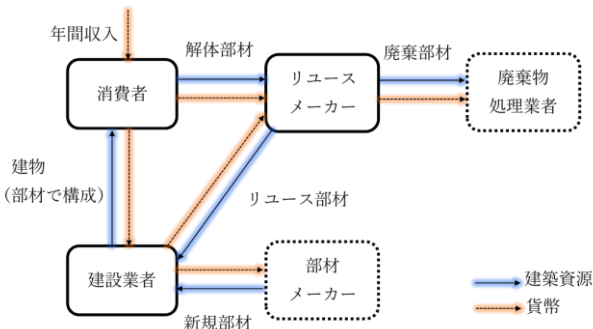


図1 エージェントの関係図

2.1. オブジェクト

部材オブジェクト：実際の建築物は柱・梁・床・壁など様々な部材で構成されるが、本研究では、着目する要素に応じた簡潔さを実現する、つまり、結果に影響を及ぼさないパラメータはできるだけシンプルに構成することを目指して、部材オブジェクトは1種類のみを考える。部材年齢はシミュレーションでの1実行年数ごとに加算されていき、新規製造時から廃棄物となるまで対象空間内を循環する。部材には、新規、リユース、解体、廃棄の4種類の状態がある。部材の寿命は、シミュレーションのケースごとに設定する。表1に属性を示す。

表1 部材オブジェクトの属性一覧

| | |
|----------|------------------------------|
| 所有者 | 消費者、またはリユースメーカー |
| 材齢 | 部材製造時を0とし、一年ごと（更新時）に1ずつ加算される |
| 寿命（耐用年数） | 60～200年の間で設定 |

建物オブジェクト：建物オブジェクトは、複数の部材オブジェクトにより構成される。建物の大きさは、部材数に比例する。築年数は建物が建設されたときを0とし、1実行年数ごとに加算される。建物オブジェクトの寿命はシミュレーションのケースごとに設定する。表2に属性を示す。

表2 建物オブジェクトの属性一覧

| | |
|-------|----------------------------|
| 所有者 | 消費者 |
| 構成部材数 | 2～4の間でランダムに設定 |
| 築年数 | 建設時を0とし、一年ごと（更新時）に1ずつ加算される |
| 寿命 | 10～100年の間で設定 |

2.2. エージェント

表3～5に各エージェントの行動ルールをまとめる。

表3 消費者エージェントの行動

| メソッド | 行動 |
|------|---------------------------|
| 建設 | ランダムに選択した建設業者に建設を依頼する |
| 解体 | ランダムに選択したリユースメーカーに解体を依頼する |

表4 建設業者エージェントの行動

| メソッド | 行動 |
|------|---|
| 建設 | 使用可能なリユース部材をリユースメーカーから調達する。リユース部材の選定では、残存部材寿命の有効活用の観点から、想定する建物寿命以上の部材寿命を持つ部材の中から、残り寿命が短い部材を優先して使用する。部材の不足分は新規部材を調達する。建物は消費者に引き渡す。 |

表5 リユースメーカーエージェントの行動

| メソッド | 行動 |
|----------|---|
| 解体 | 解体部材をストックする。この時、解体部材はメンテナンスのため1年間を要する設定とし、時間経過を考慮し、同年に新たなリユース部材として建設に使用されないために仮置き場に1年間保管し、その後リユース部材としてストックする。 |
| リユース部材管理 | リユースメーカーは各自のストックヤードに保管しているリユース部材のうち、建設業者に売却するもの以外は、ストックヤードに保管する。部材寿命に達すると、部材を廃棄する。 |

主体的に行動しないエージェントとして、廃棄物処理業者と部材メーカーが存在する。前者は廃棄部材数の管理、後者は新規部材製造数の管理する役割を担っている。

エージェント間を循環する資源は、建築部材及び複数の建築部材によって構成される建物である。その他、部材・建物などのモノのやり取りに応じてエージェント間

では貨幣が移動する。なお本システムでは、貨幣の移動とそれがもたらす影響については議論しない。建物建設時の資源移動を図2、解体時の資源移動を図3、リユース部材管理を図4に示す。

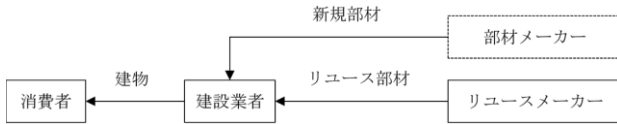


図2 建物建設時の資源移動



図3 建物解体時の資源移動

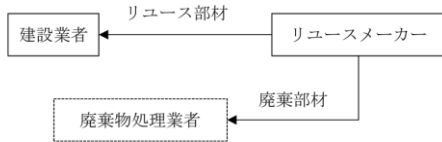


図4 リユース部材管理時の資源移動

2.3. メインルーチン

図5に本研究で構築したシステムのメインルーチンを示す。詳細は後述するが、初期設定で各種パラメータの設定を行い、シミュレーション実行期間には、1年単位で建物の建設、解体及び部材寿命の更新を行う。実行年数が設定値に達したら結果集計、出力などの終了処置を行い、システムを終了する。

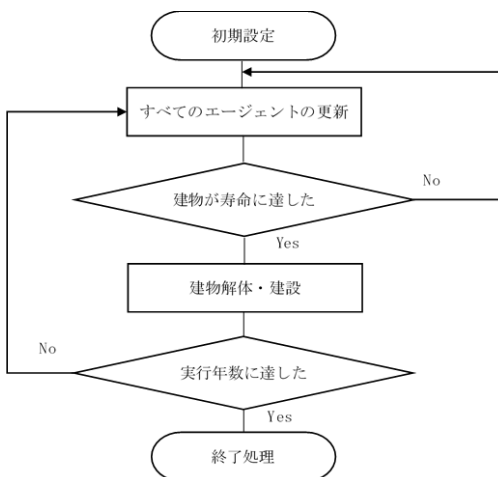


図5 メインルーチンのフローチャート

3. シミュレーションの設定

各シナリオで共通に利用するパラメータ設定を表6に、シナリオごとに異なるパラメータ設定を表7に示す。本

研究では、実行年数を500年で一定とし、①建物寿命、②部材寿命のみをパラメータとして変化させて25通りのシナリオのシミュレーションを実施し、得られた結果をもとに考察する。

シミュレーション開始時、消費者は建物を所有する。建物サイズは3種類を想定しており、部材数が2~4の範囲でランダムに決定されることでサイズを区別する。また、建物の建設からの経過年数は、シナリオに依存する建物寿命の範囲内でランダムに決定される。尚、建物サイズと寿命はシミュレーション中変化しない。

ケース1では、部材寿命を200年に固定し、建物寿命を10年から100年までの10年刻みで変化させ、10パターンのシミュレーションを行う。ここで、部材寿命を200年と設定したのは、建物寿命が100年のときにリユースがされないケース(ケース1-10)を検証するためである。ケース2では、建物寿命を30年に固定し、部材寿命を60年から200年までの10年刻みで変化させ、15パターンのシミュレーションを行う。

表6 共通設定

| | |
|---------------|-----|
| 実行年数 | 500 |
| 消費者数 | 100 |
| 建設業者数 | 4 |
| リユースメーカー数 | 4 |
| 建物のサイズ(必要部材数) | 2~4 |

表7 シナリオごとの設定

| ケース | 建物寿命(年) | 部材寿命(年) |
|------|---------|---------|
| 1-1 | 10 | 200 |
| } | } | |
| 1-10 | 100 | |
| 2-1 | 30 | 60 |
| } | | } |
| 2-15 | | 200 |

4. 実行結果

各シナリオの下でシミュレーションを実行した結果を図6~16に示す。本稿では、実行結果として、建物を建設する際に使用された新規部材製造数、リユース部材数、そして、廃棄部材数、リユース建物率に注目する。そのため、シミュレーションを500年間実行し、建物建設時に使用された部材種別の総計から新規部材率・リユース部材率を計算し、同様に、リユース部材で構成された建物の割合と新規部材で構成された建物の割合を計算する。この時のリユース部材で構成された建物の比率のことをリユース建物率と呼び、リユース建物率が高いほどリユースが進んでいることを示す。新規部材率とは、建物建

設時に利用された部材のうち、新規部材の割合のことであり、リユース部材率は総部材数のうち、リユース部材を使用した割合を示し、両者を合計すると100%になる。

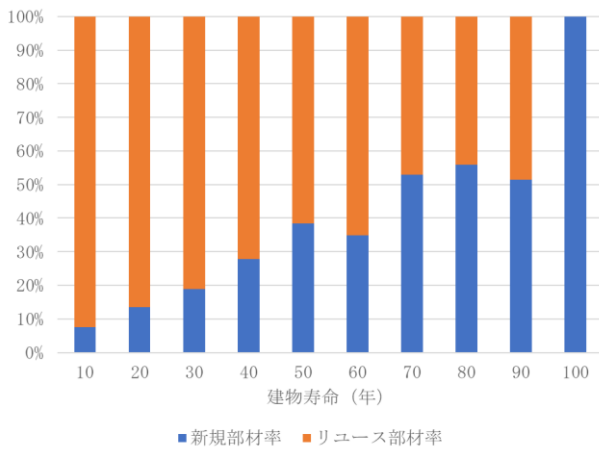


図6 ケース1の新規部材率とリユース部材率

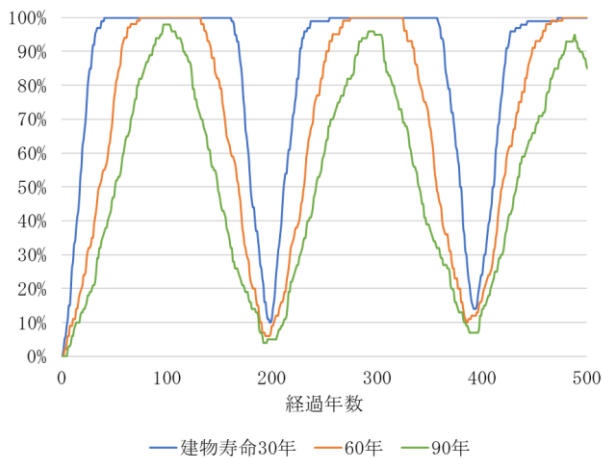


図7 ケース1 (抜粋) のリユース建物率の推移

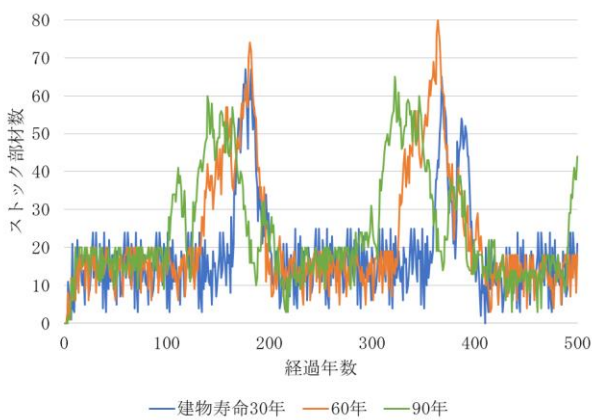


図8 ケース1 (抜粋) のストック部材数の推移

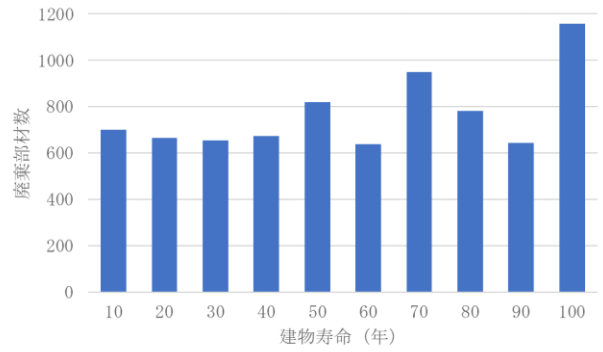


図9 ケース1の廃棄部材数

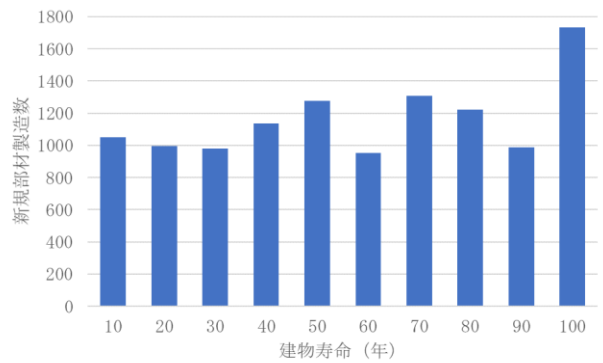


図10 ケース1の新規部材製造数

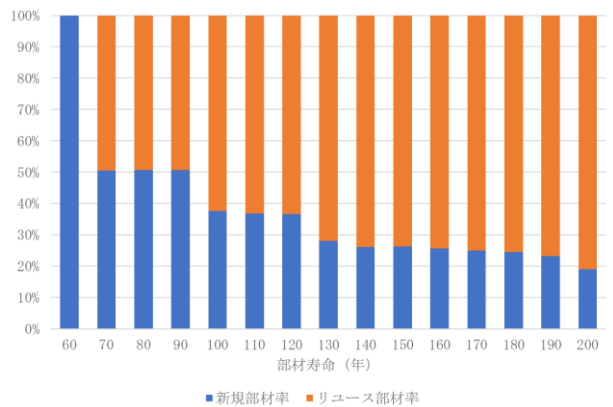


図11 ケース2の新規部材率とリユース部材率

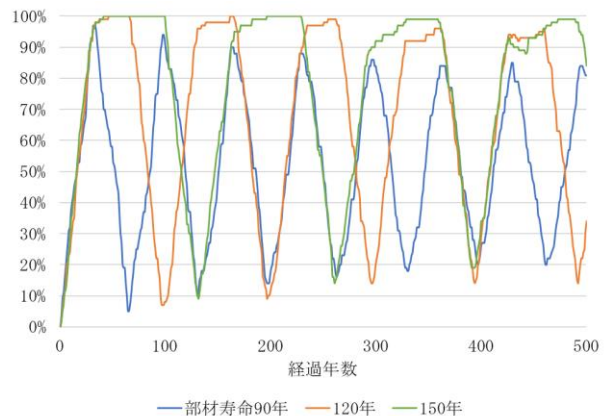


図12 ケース2 (抜粋) のリユース建物率の推移

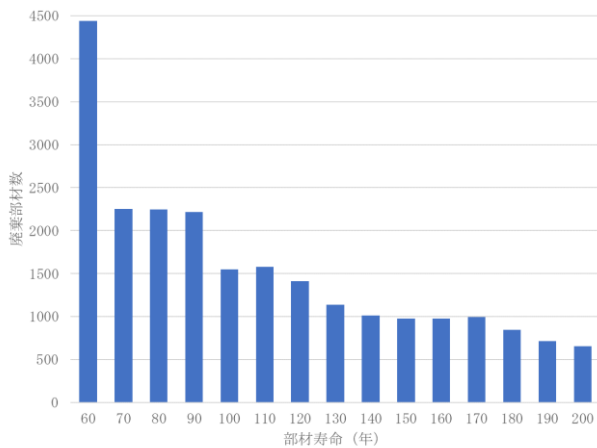


図 13 ケース 2 の廃棄部材数

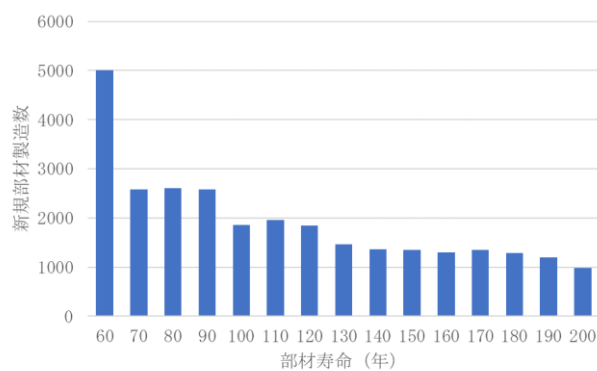


図 14 ケース 2 の新規部材製造数

図 15, 16 に、各シナリオでの部材寿命を建物寿命で割った値を横軸として、縦軸に各シナリオでの新規部材数の割合とリユース建物率をプロットしたグラフを示す。部材寿命を建物寿命で割った値は、部材リユース回数の上限に相当する。今回シミュレーションを行った計 25 パターンのうち、ケース 1-1, 1-2 を除いた 23 パターンについてプロットしている。

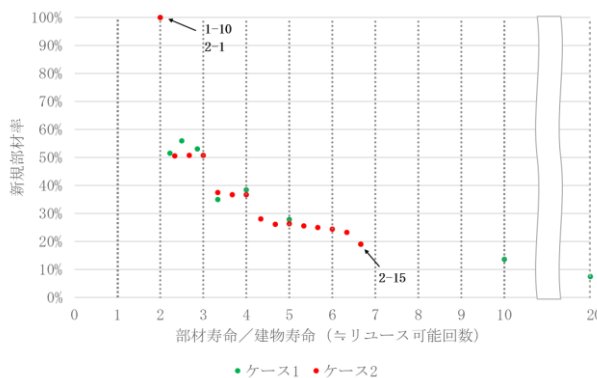


図 15 リユース可能回数と新規部材率の関係

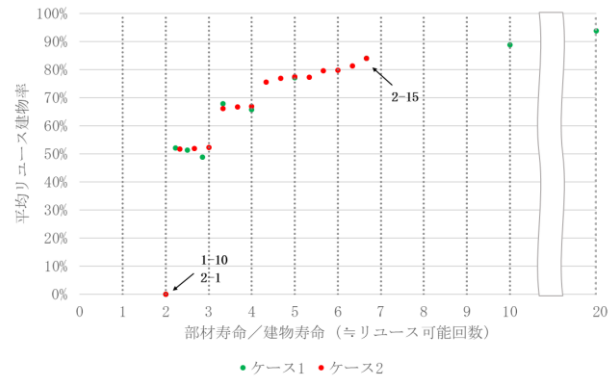


図 16 リユース可能回数と平均リユース建物率の関係

5. 考察

図 6 では、建物寿命が 100 年の場合、新規部材率が 100% となり、リユースが行われていないことが分かる。これとその他のリユースされている場合を比べると、リユースの導入によって新規部材率が少なくとも 40% 減っていることが分かる。これは、リユース部材が活用されていることを示す。基本的には建物寿命が短くなるほど、新規部材率は減少する。しかしながら、建物寿命が 50 年の場合では新規部材率が 60 年の場合と比べて増加している。これは最大リユース可能な回数に依存していると考えられる。建物寿命が 50 年と 60 年の場合では、最大リユース可能な回数はともに 3 回であるが、60 年の場合のほうが使用されていない期間が短いためにこのような結果になっていると考えられる。同様のことが、建物寿命が 90 年と 80 年の場合にも起こっていることが分かる。

図 7 では、建物寿命が 30 年、60 年、90 年の 3 パターンを取り出して、リユース建物率の経年変化を見ている。部材寿命を 200 年に固定しているの、図 8 のように 200 年周期でリユースメーカーのストック数が減少し、新規部材のみで建設する建物が大幅に減少する。このとき、建物寿命が短いほうが、リユース建物率が 100% の期間が長く、200 年周期でのリユース建物率の落ち込み度合いも低く、リユースの効率が低いといえる。また、リユース建物率が 100% になるまでの年数が少ないこともわかる。年数が経過するにつれて、200 年周期での最も低くなる際の割合は徐々に高くなり、100% で維持される期間が短くなっている。これは図 8 のように建物寿命が 30 年の際、リユースメーカーでのストック数が 200 年前後では一気に増加しているのに対し、400 年前後ではストック数の増加が 2 回に分かれているために、リユース部材での建設が進んだためであると考えられる。

図 9, 10 では、それぞれ廃棄部材数、新規部材製造数を示しており、図 6 と似たような傾向をとる。リユースができない期間が短いときには、廃棄部材数、新規部材製造数が同じリユース可能な回数をもつ時と比べて、廃

棄部材数、新規部材製造数がともに少なくなっている。

図 11 では、部材寿命が 60 年の場合、新規部材率が 100%となり、リユースが行われていないことが分かる。これと比べて、その他のパターンすべてでは、新規部材率は 50%以下となっていることが分かる。建物寿命が 30 年で固定されているため、70~90 年、100~120 年では、新規部材率は同じ水準にあることが見て取れる。これは部材がリユース可能な回数に依存していると考えられる。部材寿命 70~90 年ではリユース可能回数は 2 回、100~120 年では 3 回である。だが、130 年以降では、部材寿命が増えるにしたがって、新規部材率は徐々に減少している。リユース回数が影響していることは確かであるが、それが 4 回以上になると以前ほどの急激な変化は見えてとれない。すなわちリユース可能回数は 4 回以上にするとは循環型社会にとって重要な要素であるともいえる。

図 12 では、部材寿命が 90 年、120 年、150 年の 3 パターンを取り出して、リユース建物率の経年変化を見ている。ここでは、各グラフがそれぞれの周期ごとにリユース建物率が上下していることが見て取れる。部材寿命が長いほうが 100%に近い値で推移する期間が存在することもわかる。ここでも周期を経るごとにリユース建物率の最も低い値が徐々に上昇し、最も高い値が減少して、両者の幅が狭くなってきていることが分かる。実行年数がより長くなると、リユース建物率はある一定の値に近づいていくと考えられる。

図 13, 14 では、それぞれ廃棄部材数、新規部材製造数を示しており、図 10 と似たようなグラフをとる。リユースが導入されていない場合（部材寿命が 60 年の場合）と比べると、廃棄部材数、新規部材製造数はともに約半分以下に減っている。すなわち、リユースの導入には、建設資材である部材の廃棄量、新規製造量を減少させる効果がある。特に、部材寿命が 130 年を超えてくると、リユースを導入していない場合と比べて、4 分の 1 以上減っていることが分かる。

図 15, 16 では、部材寿命を建物寿命で割った値に応じた新規部材率と平均リユース建物率の関係を示している。部材寿命を建物寿命で割った値をリユース可能回数とおくと、これが 2 以下の場合、リユースは行われぬ（ケース 1-10 とケース 2-1 の場合）。リユース可能回数が 1 増えると、数字は大きく異なってくる。リユース可能回数は、ある自然数 n より大きく、 $n+1$ 以下の範囲では、新規部材率と平均リユース建物率はほぼ同様の値となる。例えば、リユース可能回数が 2 より大きく 3 未満の場合、新規部材率と平均リユース建物率はどちらも 50%程度の値となっている。また、リユース可能回数が 4 を超えると、新規部材率と平均リユース建物率の変化は緩やかに減少している。これは、ケース 1 とケース 2 での差異はほとんど見られない。全体を見ると、リユース可能回

数が増えるほど、新規部材率が減少し、平均リユース建物率が増加していることから、リユースの効率が良くなっていることが分かる。

6. まとめ

本研究を通して得られた知見を以下にまとめる。

- ① リユースを導入することは、新規部材製造数を減らし、廃棄物の量を 40~90%減らすことができるという点で、環境負荷低減に寄与する。
- ② 部材リユース可能回数を 4 回以上に増やすことで、効率的な循環サイクルが形成される。つまり、部材リユース可能回数が資源循環型社会の構築に重要になる。

今後は、部材を調達する際に、部材の価格を考慮して仕入れ先を選定する仕組みを導入することで、より実際の社会システムの構築についての検討を行う予定である。

[参考文献]

- 1) 国際連合広報センター：SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS
HP(https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/)(2020/7/2 閲覧)
- 2) 経済産業省：資源循環ハンドブック 2018 法制度と 3R の動向
(<https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/pamphlet/pdf/handbook2018.pdf>)(2020/7/2 閲覧)
- 3) リデュース・リユース・リサイクル推進協議会（3R 推進協議会）：3R とは
(<http://www.3r-suishinkyogikai.jp/intro/3rs/>)(2020/7/2 閲覧)
- 4) 竹田友典、山邊友一郎、谷明勲：リカレント建築社会における資源・経済循環システム—地球銀行を用いた税金・分配率の最適化—、計算工学講演会論文集，Vol. 12, No. 1, 15-18, 2007. 5
- 5) 山邊友一郎、谷明勲、河村廣：リカレント建築ネットワークに基づく循環型社会シミュレーションシステムの構築、日本建築学会環境系論文集，Vol. 73, No. 624, 253-260, 2008. 2
- 6) 五十嵐健、嘉納成男：資源循環型社会に向けた住宅生産システムの経済性評価に関する基礎的研究、日本建築学会計画系論文集，第 555 号，pp. 279-286, 2002. 5