

MAS を用いた部材リユースによる資源循環型社会シミュレーション 部材の供給安定化についての検討

Social Simulation of Building a Circular Resource Society by Reusing Construction Materials Using MAS

Consideration of stock stabilisation of construction materials

○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 神戸大学名誉教授 博士 (工学)

Professor Emeritus, 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, thus leading to Japanese construction companies following the global tradition to pursue SDGs. 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, material and economy-wise. 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. The parameter is mainly focused on providing stable number of construction materials to the market. Results show that there could be an amount of people who are against reusing, but limiting the percentage is essential. Also, to have a sufficient circulating system, the number of stocked construction material needs to be considerable.

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。グローバルな流れにより, 日本の建設会社もSDGsへの取り組みを進めている²⁾。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³⁾。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⁴⁾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。しかし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⁵⁾⁶⁾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⁷⁾がある。既報⁸⁾では, 建物寿命と部材寿命の変動が循環型社会に及ぼす影響について検討したが, リユース部材の供給の確保に関する検討は行われていなかった。そのため本稿では, 新規部材の使用量, およびリユース部材ストック数から, リユース部材の市場への供給を安定化させるための施策の有効性を検討する。そのうえで, 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、部材リユースによる環境負荷低減効果を検証することで、望ましい資源経済循環型社会構築に向けた動機付けの一助となることを、本稿の目的とする。

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・部材の所有・建設・解体を行う5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。なお、2015年に欧州委員会によって提唱された概念であるサーキュラーエコノミー⁹⁾を取り入れた流通市場モデルの基礎的な検証のため、リユース部材が導入された際の社会システムをモデルとする単純化したシステムモデルとした。サーキュラーエコノミーでは、資源投入量、消費量を抑えつつ、ストックを有効活用しながら付加価値の最大化を図る循環型社会¹⁰⁾を構想としている。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。

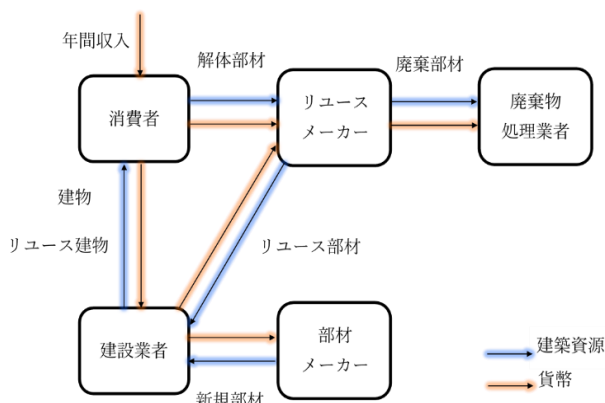


図1 エージェントの関係図

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)	100年

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	30年

2.2. エージェントの行動ルール

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。部材余命が建物寿命を下回った際に部材を廃棄する。

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し、前者は廃棄部材数の管理、後者は新規部材製造数の管理を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。この際、エージェント間での資源を移動するうえで地理的な広がりや運搬は考慮しない。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が、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。

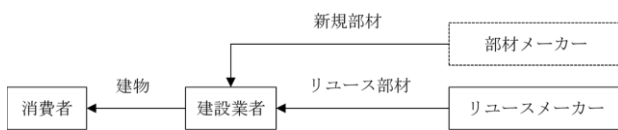


図2 建物建設時の資源移動

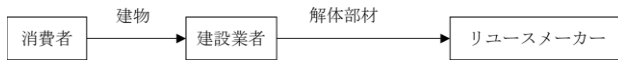


図3 建物解体時の資源移動

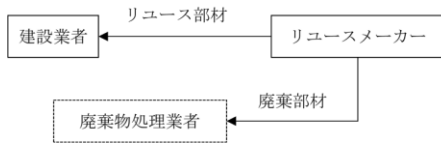


図4 リユース部材管理時の資源移動

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

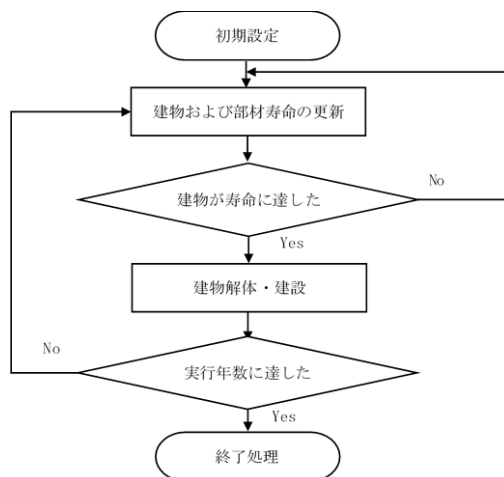


図5 メインルーチンのフローチャート

を行い、システムを終了する。

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, 8に示す。本研究では、実行年数を500年で一定とし、リユース部材の市場供給の安定化の手法の有用性を検証するために、消費者の不寛容率、リユースメーカーに対する補充の割合を変化させて17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。ここでいう不寛容率とは、ある一定数リユースを許容しない消費者の割合を意味する。通常、建物を建設する際にリユース部材または新規部材を選択するが、不寛容である消費者は必ず新規部材を使用する。すなわちリユース部材を選択しない消費者の割合を示している。

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、建物寿命はシミュレーション中変化しないが、建物サイズは新たに建設する際に範囲内でランダムに再決定される。

ケース1では、消費者の不寛容率を0%から100%まで10%刻みで変動させ、計11パターンのシミュレーションを行う。リユース部材を使用せずに、新規部材を使用する消費者を設定することで、リユース部材ストック数を増やすのみの役割、すなわち、部材の供給の安定化の役割を持たせる。リユース部材に否定的な消費者がいる場合でも、循環型社会成立の可能性のための消費者の許容の程度を見出す意図がある。ケース2では、リユースメーカーの毎年の更新時にストックにある既定の部材数を下回っていた場合、その既定の部材数になるまで部材を補充する仕組みを導入した。既定の部材数を上限部材数である4の0~5倍までの計6パターンのシミュレーションを行う。リユース部材の市場供給を考慮した際に、直接ストックに部材を供給する方法も考えられる。その際に供給部材の過不足を補充部材数の数量によってその安定性を検証する。

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
建物寿命 (年)	30
部材寿命 (年)	100

表7 シナリオごとの設定 (ケース1)

ケース	不寛容率
1-1	0%
1-2	10%
1-3	20%
1-4	30%
1-5	40%
1-6	50%
1-7	60%
1-8	70%
1-9	80%
1-10	90%
1-11	100%

表8 シナリオごとの設定 (ケース2)

ケース	補充部材数
2-1	0 (部材上限数の0倍)
2-2	4 (部材上限数の1倍)
2-3	8 (部材上限数の2倍)
2-4	12 (部材上限数の3倍)
2-5	16 (部材上限数の4倍)
2-6	20 (部材上限数の5倍)

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6~12, 表9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, 廃棄部材数, 平均リユース部材ストック数, 補充部材数, そして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, リユース部材を用いて建設された建物(リユース建物)の割合と新規部材を用いて建設された建物(新規建物)の割合を計算する。この時の, リユース建物の比率をリユース建物率(R_{Reuse})と呼び, 式(1)で求める。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(R_{NM})は, 建物建設時に利用された部材のうち, 新規部材の割合を示し, 式(2)で求める。また, リユース部材率(R_{RM})は, 総部材数のうち, リユース部材を使用した割合を示し, 式(3)で求める。両者を合計すると100%になる。さらに, 不寛容率に対する部材ストック数をストック定数(R_{Stock})と呼び, 式(4)で求める。

$$R_{Reuse} = \frac{\sum N_{Reuse}}{\sum N_{ALL}} / Y \quad (1)$$

$$R_{NM} = \frac{\sum N_{NM}}{\sum N_{NM} + \sum N_{RM}} / Y \quad (2)$$

$$R_{RW} = \frac{\sum N_{RM}}{\sum N_{NM} + \sum N_{RM}} / Y \quad (3)$$

$$R_{Stock} = \frac{\sum N_{Stock}}{P_{Intol}} / Y \quad (4)$$

上式において, R_{Reuse} :リユース建物率, N_{Reuse} :毎年のリユース部材で建設された建物数, N_{ALL} :毎年の全建物数, R_{NM} :新規部材率, R_{RM} :リユース部材率, N_{NM} :毎年の新規部材製造数, N_{RM} :毎年のリユース部材利用数, R_{Stock} :ストック定数, N_{Stock} :毎年の部材ストック数, P_{Intol} :不寛容率, Y :シミュレーション実行年数, とする。

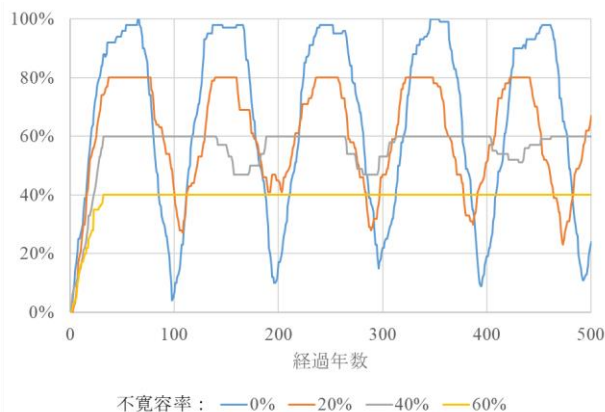


図6 ケース1(抜粋)のリユース建物率の推移

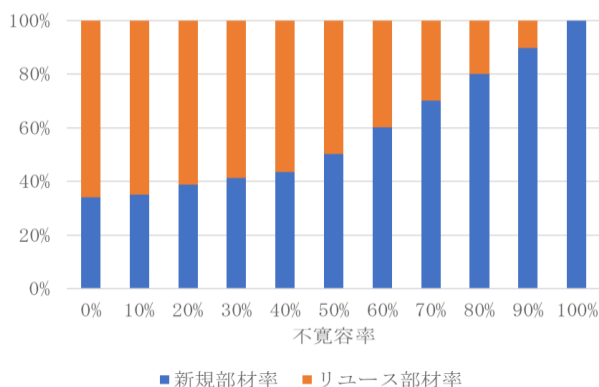


図7 ケース1の新規部材率とリユース部材率 (500年間)

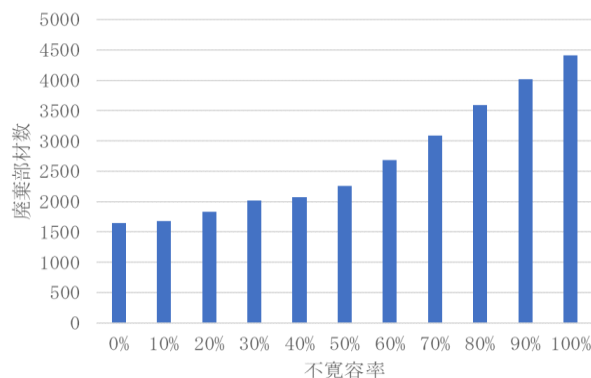


図8 ケース1の総廃棄部材数 (500年間)

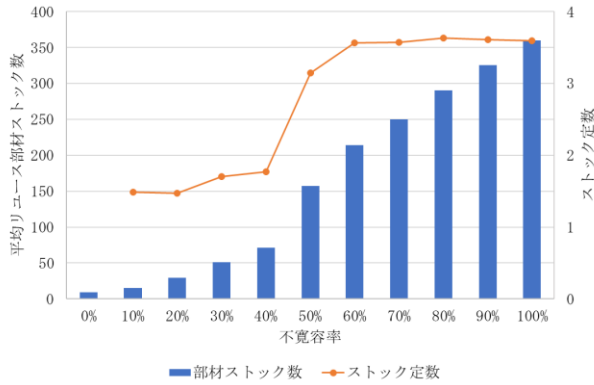


図9 ケース1の1年あたりの平均リユース部材ストック数とストック定数

表9 ケース2の新規部材率，リユース部材率と廃棄部材数

ケース	補充部材数	新規部材率	リユース部材率	廃棄部材数
2-1	0	33.40%	66.60%	1602
2-2	4	28.45%	71.55%	1657
2-3	8	27.17%	72.83%	1777
2-4	12	29.29%	70.71%	1949
2-5	16	31.33%	68.67%	2133
2-6	20	32.74%	67.26%	2293

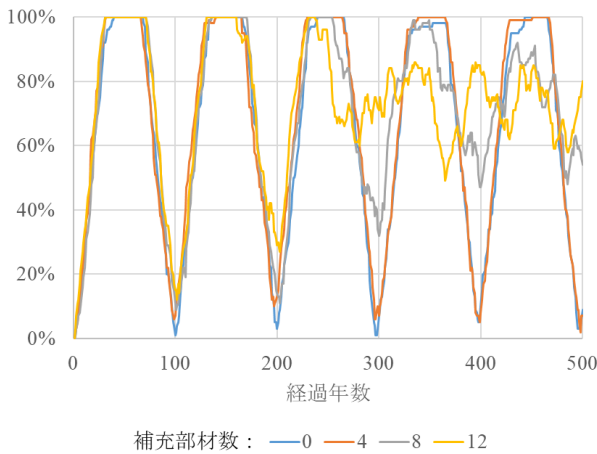


図10 ケース2(抜粋)のリユース建物率の推移

5. 考察

5.1. 不寛容率についての考察

図6では、不寛容率が0%、20%、40%、60%の4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。この場合、部材寿命を100年に固定しているので、100年前後の周期で部材寿命に達することにより、使用可能なリユース部材がなくなり、リユース建物率が大幅に減少する傾向が不寛容率0%、20%の場合に見られる。不寛容率が高いと、実行年数全体でのリユース建物率の平均が低くなる傾向があり、リユースの効率が低いといえる。

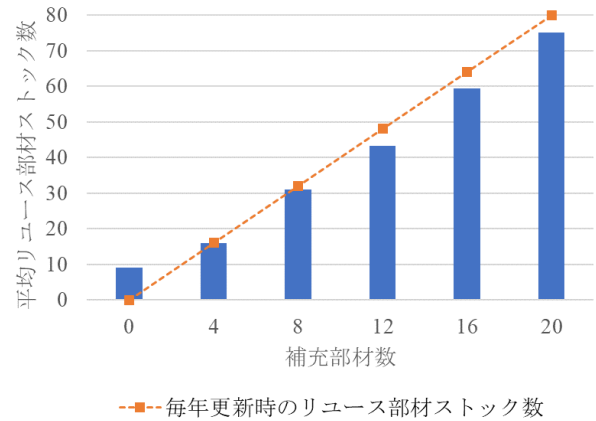


図11 ケース2の1年あたりの平均リユース部材ストック数

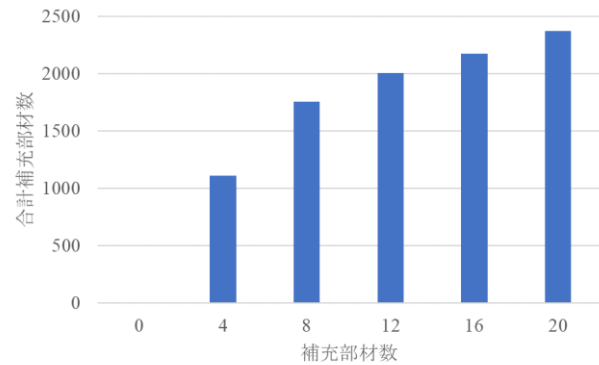


図12 ケース2の合計補充部材数(500年間)

また、リユース建物率の上限が制限されるのは、不寛容率の分、その割合の消費者がリユース部材を用いて建設をしないためである。不寛容率が60%の場合には、リユース建物率の上限の40%で推移しており、リユース部材の供給が安定していることを示している。

図7, 8, 9から、不寛容率が増加するにつれて新規部材率、廃棄部材数、そして平均リユース部材ストック数は増加していることがわかる。また、50%を過ぎると、増加率が上がっており、より急激に上昇していることがわかる。また、不寛容率が50%以降の増加率は、50%までより急激に大きくなる結果が得られ、ストック定数も50%以前と以後で大きく異なる。また、不寛容率が0%と10%では新規部材率、廃棄部材数と平均リユース部材ストック数がそれぞれで同程度の値を示していることから、社会にリユース部材に対して不寛容な消費者がいた場合にも、その割合を抑えることで、部材リユースの効率が維持しやすいこととなる。

5.2. 補充部材数についての考察

表9では、補充部材数が上限部材数の2倍のケース2-3までは、新規部材率が下がっており、その後上昇する傾向にある。また、補充部材数が増えるにつれて廃棄部

材数は徐々に増えていることがわかる。よって部材をある一定数補充することは、リユース部材導入の推進に効果があることがわかる。しかし、補充部材数ないしストックされている部材が多すぎると、逆効果になる結果となった。

図 10 では、補充部材数が 0, 4, 8, 12 の 4 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。こちらも図 6 と同様に 100 年前後の周期でリユース建物率が大幅に減少する変動の傾向を取る。補充部材数が 0 と 4 では似たような傾向をとるが、補充部材数が 8 や 12 では、年数が 200 年経過すると、変動幅が小さくなる結果となった。これはある程度の年数が経過したことによりストックへの部材供給が社会システムとして安定してきていることが考えられる。また、基本的には、補充部材数が多くなるほどリユース建物率の平均は高くなっている。

図 11 では、平均リユース部材ストック数を示しており、点線が毎年必ず更新時に存在するリユース部材ストック数を示している。平均リユース部材ストック数が点線を下回っているとき、市場に供給される部材数が多いことを示している。補充部材数が 8 を超えると、この点線を下回っていることがわかる。図 12 では合計補充部材数を示しており、補充部材数が増えるにしたがって合計補充部材数は増えていく。ただし、補充部材数が増えるにしたがって、比例的に増えていくのではなく、徐々に増加分は少なくなっていく。このため、補充部材数が多ければ、供給できる部材は増えるが、補充部材数が 12, 16 のときが合計補充部材数の増加分に対して平均リユース部材ストック数が抑えられ、リユースの効率が良くなることがわかる。

5.3. MAS の適用性について

本研究では、MAS を用いてリユース部材が導入された社会を想定したシミュレーションを実施した。リユース部材は、コスト、技術的、制度的などの問題があり実際には実現していない。そのような実際に実験して検証することができないような問題に MAS は適用でき、情報技術を用いて未来志向の社会システムの検討が可能になるという優位性がある。しかし、現実の問題を適切にモデル化することは難しい。現実には、地理的な条件や運搬費、リユース可能な部材設計などの様々な課題があるためである。これらの解決策としては、ステークホルダーの把握や、部材の種類による区別などが考えられる。

なお、本研究では全てのエージェントが同じ行動ルールに基づいて行動しているが、例えば、個々のエージェントが異なる建物寿命をもち、異なる行動ルールに基づいて行動した場合でも、その建物寿命の平均が大幅に増えなければ、建物寿命固定時の結果に近づくため、シミュレーション結果に与える影響は小さいと考えられる。

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) リユースに不寛容な消費者が増えると、リユース部材ストック数が、不寛容率が 40% までは徐々に、50% を超えると急激に上昇する。
- (2) 毎年の補充部材数を増やすことによって、リユース部材ストック数が比例的に上昇する。その結果、リユース部材の市場供給の安定化を図ることができる。
- (3) 一方、リユース部材ストック数が需要量と差異が大きい状態であると、新規部材率が増加しやすく、不足していると、廃棄部材数が増加し、環境に対して負荷がかかる。
- (4) 以上より、リユースに対して不寛容である消費者をある程度 (約 10%) 以下に抑える、さらには、毎年の部材補充数を、建物を構成する上限部材数の 2、または 3 倍にすると、効率的な循環サイクルが促進され、環境負荷を低減できることがわかった。

今後は、建物建設時に、価格や補助金によってリユース部材を選択する仕組みを導入することで、経済面からも検証を行い、より実的な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/)(2021/7/1 閲覧)
- 2) 「建設業界が目指す地球環境のゴール 「イノベーション」と「連携」で推進する SDGs」『Ace 建設業界』, 2019 年 7 月号 (Vol.99), pp.4-15
- 3) 経済産業省：資源循環ハンドブック 2020 法制度と 3R の動向 (<https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/pamphlet/pdf/handbook2020.pdf>)(2021/7/1 閲覧)
- 4) 令和 3 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書(PDF 版), p. 198, 2021.6. (<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r03/pdf/full.pdf>)(2021/7/1 閲覧)
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 徳勝遊子, 山邊友一郎, 谷明勲：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, 第 43 回情報システム利用技術シンポジウム論文集, 論文(R77), pp.430-435, 2020.12
- 9) COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy, EUROPEAN COMMISSION, 614 final, pp.2-3, 2015.2
- 10) 経済産業省：循環経済ビジョン 2020 (概要) (<https://www.meti.go.jp/press/2020/05/20200522004/20200522004-1.pdf>)(2021/9/24 閲覧)