

平成21年 6月1日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760590  
 研究課題名 (和文) リカレント建築ネットワークに基づく資源経済循環型社会モデルの研究  
 研究課題名 (英文) Simulation of a recurrent architecture network based circulation society  
 研究代表者  
 山邊 友一郎 (YAMABE YUICHIRO)  
 神戸大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：70362762

研究成果の概要：建設関連分野からの環境問題への対処として、本研究課題では部材レベルでのリユースを導入した循環型社会を対象としたマルチエージェントシミュレーションを実行した。パラメータとして、部材回収率、リサイクル鋼材歩留り、リユース部材適合率などの物理的因子に焦点を当ててシミュレーションを実行した結果、これらの因子が資源採取量及びCO2排出量の削減効果に及ぼす影響について有益な知見が得られ、リカレント建築の意義と貢献性を明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	0	1,700,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	210,000	2,610,000

研究分野：建築構造・情報学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：循環型社会, LCCO2, マルチエージェントシミュレーション, リサイクル, リユース, リカレント建築, ストックヤード

## 1. 研究開始当初の背景

(1) CO2 排出による地球温暖化及び地下資源の枯渇に対処するため、地球環境負荷の低減、省資源・省エネルギーの観点から、3R(Reduce, Reuse, Recycle)を基調とした循環型社会の構築が求められている。日本の炭素排出量に占める建設活動関連の割合は約3分の1程度であり、内訳の5割強は建設資材生産、建設に関わる運輸、建設工事で占められる。そのため、建設分野での環境問題に対する取り組みは極めて重要な役割を担って

いる。近年では建築分野でも、安易なスクラップアンドビルドに対する反省から、リフォーム・リファインによる建築の再利用・価値向上や素材レベルでのリサイクルなどの取り組みが行われつつある。

(2) 部材リユースの利点としては、①素材のリサイクルに比較して再資源化に要する投入エネルギーを削減できること、②建築のリフォーム・リファインとは異なり、新たな計画で建物を再構築できるため、よりフレキシ

シビリティに富んだ利用が可能となり、適用範囲が広がることなどがあげられる。研究代表者らは、部材レベルでの再使用を特徴とするリカレント建築・都市に関する研究に取り組んでおり、マルコフ連鎖を用いて循環型社会を形成し、部材リユースの有効性を示し、データベースを使用したリユース部材の管理及び、リユース部材の選択を遺伝的アルゴリズムにより行う設計支援システムを構築してきた。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、動的に変動する環境に対応するため、マルチエージェントシミュレーションにより社会システムを構築する手法を用いる、その際、現状では存在していないが、リユース部材の管理、円滑な市場での循環を実現するためには重要な役割を果たすことが想定されるリユースメーカーをエージェントとして設定したこと及び、リユースを行う際に支障となることが想定される、一品生産である建築の特殊性による部材の多様性をパラメータとして考慮することで、建築の規格化の程度と環境負荷との関連性をシミュレーションにより評価した点に特色がある。また、本研究では部材リユースを基調とした循環型社会実現に向けた基礎的研究を行うために、リサイクル、リユースに影響を及ぼす因子の設定及び、その変動による資源採取量、CO2 排出量への影響を明らかにすることを目的とする。尚、本研究では解体部材の回収率やリサイクル鋼材の歩留りなどの物理的・技術的因子に焦点を当て、環境負荷への影響の度合いを提示し、議論することを目指したものである。

(2) 本研究課題では、鋼構造建築物と RC 構造建築物の 2 種類の構造種別を対象として、部材リユースによる建設・解体・流通システムを構築したが、本報告では、鋼構造建築物を対象としたシミュレーションについて研究成果を報告する。

## 3. 研究の方法

### (1) エージェント

以下に示す 6 種類のエージェントを設定した。

- ①ユーザ：建物を使用する。
- ②建設業者：建物の建設及び解体を行う。
- ③高炉メーカー：新規鋼材を製造し、建設業者に供給する。
- ④電炉メーカー：リサイクル鋼材を製造し、建設業者に供給する。
- ⑤リユースメーカー：鋼材製造は行わないが、ストックヤードを持ち、使用后鋼材の管理・メンテナンスを行い、建設業者にリユース鋼材を供給する。

- ⑥廃棄物業者：使用后の廃棄鋼材を建設業者から引き受け、処分を行う。

### (2) エージェント間を移動する資源

- ①建物：ユーザが使用する資源。構造種別は鉄骨構造とする。
- ②新規鋼材：高炉メーカーにより製造される建物構成材料。
- ③リサイクル鋼材：電炉メーカーにより製造される建物構成材料。
- ④リユース鋼材：リユースメーカーから供給される建物構成材料。
- ⑤使用后鋼材：建物解体後、リユースあるいはリサイクルのため建設業者から電炉メーカーあるいはリユースメーカーに引き渡される建物構成材料。
- ⑥廃棄鋼材：建物解体後、利用不可能と判断され、建設業者から廃棄物業者に渡される建物構成材料。

### (3) メインルーチン

図 1 にシステムのメインルーチンを示す。シミュレーション実行期間では、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（図 1 中の  $V_s$ ）に達したら結果集計、出力などの終了処理を行い、システムを終了する。

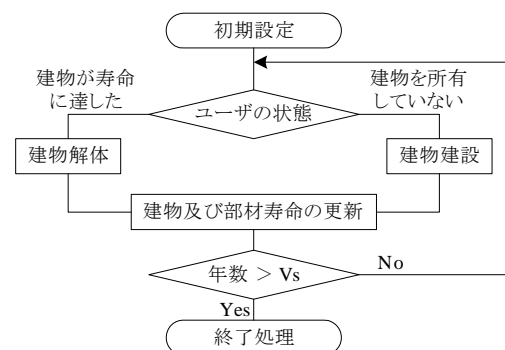


図 1 メインルーチンのフローチャート

### (4) 建物建設時のエージェントの行動

- ①ユーザは建物を所有していなければ、建設業者に建設を依頼する。
- ②建設業者は建設資材（鋼材）を高炉メーカー・電炉メーカー・リユースメーカーのいずれかから調達する。
- ③建設業者は建物を建設し、ユーザに引き渡す。建物建設時の資源の移動を図 2 に示す。

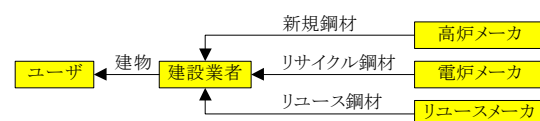


図 2 建物建設時の資源移動

(5) 建物解体時のエージェントの行動

- ①ユーザが所有する建物の利用期間が建物寿命に達したら、ユーザは建設業者に建物解体を依頼する。
- ②建設業者は建物を解体し、発生した鋼材を分別し、リサイクルメーカー、リユースメーカーあるいは廃棄物業者に引き渡す。
- ③リサイクルメーカー・リユースメーカーは受け取った鋼材をストックし、廃棄物業者は鋼材を廃棄する。建物解体時の資源の移動を図3に示す。

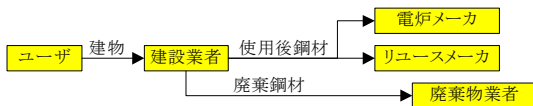


図3 建物解体時の資源移動

(6) 各年度のエージェントの行動

- ①ユーザは所有する建物及び建物構成材料の使用期間を更新する。
- ②リユースメーカーはストックしている使用後鋼材の使用期間を更新し、鋼材寿命に達したものはリサイクル鋼材の原料として電炉メーカーに引き渡す。

(7) 鋼材の調達・分別・廃棄

本研究では、各エージェントは可能な限り環境への負荷を減らすことを指向して行動する設定とした。つまり、建物建設時にはユーザはリユース鋼材、リサイクル鋼材、新規鋼材の優先順位で建物構成要素を建設業者に指定する。また、建物解体時には、建設業者は建物を部材レベルまで解体し、リユース可能であれば、リユースメーカーに引渡し、リユース不可能であればリサイクル鋼材の原料として電炉メーカーへ引渡す。あるいは、リユースもリサイクルも不可能な状況であれば廃棄物業者へ引渡す。ところで、本システムではリサイクル・リユースによって資源の長寿命化を目指す。新規鋼材の製造を要しない完全な循環型社会の実現は困難である。その阻害要因として本研究では、以下に示す3つの因子を考慮する。

- ①鋼材回収率  $C$ : 建物の解体後に建設業者が使用後鋼材を鋼材メーカーに振り分ける際に、本来はリサイクル・リユースに回すべき鋼材を、廃棄鋼材として廃棄物業者に引き渡すケースが考えられる。原因としては、鋼材のサイズ・施工方法などによっては完全に分別することが不可能な場合や、分別にかかる時間や手間を削減するために建設業者が意図的に分別を行わないことなどが考えられる。本研究ではこれらの要因を考慮して、建物解体によって生じる鋼材に回収率  $C$  を乗じた量が使用後鋼材として

電炉メーカーあるいはリユースメーカーに引き渡される設定とする。

- ②リサイクル鋼材歩留り  $Y$ : 使用後鋼材の回収量に対するリサイクル鋼材の生産量の割合を歩留り  $Y$  とする。不純物の除去などによる目減りを考慮するものである。
- ③リユース鋼材適合率  $R$ : リユースでは回収量の100%を再使用可能、つまり歩留り  $Y=1.0$  と想定する。しかし、リユース鋼材の材料強度、断面寸法などは変更できないため、建設に必要な鋼材が、ストックヤードにストックされていることは保障できない。そこで本研究では、必要な鋼材をリユースメーカーから調達できる確率を、リユース鋼材適合率  $R$  として定義し、調達できるか否かを判断する。 $R$  は、リユースメーカーのストック量 ( $S$  とする) に応じて変動し、ストック量が多いほど必要な鋼材を調達できる確率が高くなる設定とし、図4により算出する。ここで、 $R$ : リユース鋼材適合率、 $S$ : リユースメーカーのストック量、 $Q$ : 建物1棟分の使用鋼材量、 $N$ :  $R$  を算出するためのパラメータで、建設される建物に使用される鋼材規格のばらつきの程度を表す。

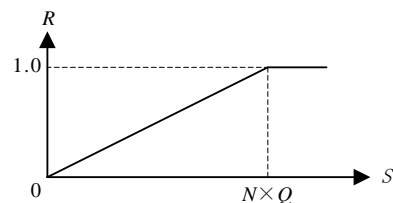


図4 リユース鋼材適合率  $R$  の算出

(8) CO2 排出原単位

本研究では、建物の建設・解体に係る鋼材の製造・運搬のみをCO2排出量計測の対象とし、建物供用期間中のCO2排出は考慮しない設定とする。エージェントの行動により発生するCO2は、表1に示すCO2排出原単位により算出する。また、エージェント間の資源の移動に対応するCO2排出量集計方法を図5に示す。ここで、図5中の①～⑤の記号は、資源が移動する際に排出されるCO2を、表1のCO2排出原単位に対応させたものである。

表1 CO2 排出原単位

①	新規鋼材製造	1.72	kg-CO2/kg
②	リサイクル鋼材製造	0.749	kg-CO2/kg
③	鋼材輸送	0.0733	kg-CO2/kg
④	建物建設	37.8	kg-CO2/m <sup>2</sup>

⑤	建物解体	13.6	kg-CO2/m <sup>2</sup>
---	------	------	-----------------------

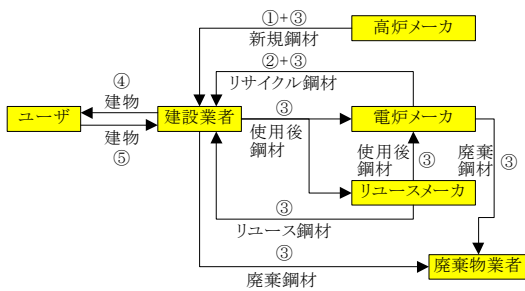


図5 資源移動とCO2排出量の対応

#### 4. 研究成果

##### (1) シミュレーションの設定

システムの設定を表2に示す。対象建物は、中規模の鉄骨造建築とする。シミュレーション実行の初年度に各エージェントのインスタンスを生成するが、ユーザは建物を既に所有している状態とし、建物使用年数は建物寿命の範囲内でランダムに設定する。また、電炉メーカー、リユースメーカーのストック量は0とする。尚、本研究ではエージェントの個々の空間的な配置は考慮されていないが、鋼材の取引を行う建設業者、鋼材メーカーなどのエージェントは1箇所に集約させており、取引相手を選択する際に空間的な距離は全国的な平均量として勘案されていることになる。また、鋼材の製造可能量、ストックヤードの規模などに上限を設けていないため、各エージェントは需要があれば、その分供給可能な設定としたが、本システムを現実の都市に適用するには、平面的な空間設定及びエージェントの業務規模などを適宜設定して、シミュレーションを実行する必要がある。

表2 シミュレーションの設定

建物1棟の延べ床面積	1,000	m <sup>2</sup>
建物1棟の使用鋼材量	120	tf
建物寿命	50	年
ユーザの数	1,000	-
ユーザ以外の数	1	-
シミュレーション実行年数	500	年

##### (2) ケーススタディ

ケース①リサイクル・リユースがない場合。  
 ケース②リサイクルが完全に実行される場合：リサイクル鋼材の歩留り  $I=1.0$  とし、使用後鋼材が100%再資源化できる状況を想定する。

ケース③リサイクル及びリユースが実行され、完全に循環型の社会システムが実現した場合：リユース鋼材適合率  $R$  算出用パラ

メータ  $A=1$  と設定しているが、これはリユースメーカーのストックヤードに1棟分の鋼材がストックされていれば、建設業者から鋼材を要求された際に適合する確率が100%であることを示す。また、建物寿命は50年とし、リユース鋼材寿命は、3回程度は鋼材がリユース可能な品質を保持していることを想定して160年と設定した。ケース①～③の個別設定を表3に、実行結果を図6、図7に示す。

表3 ケース①～③の個別設定

ケース	①	②	③	-
リサイクルの有無	×	○	○	-
リユースの有無	×	×	○	-
リユース鋼材寿命	-	-	160	年
使用後鋼材回収率 $C$	-	1.0	1.0	-
リサイクル鋼材歩留り $I$	-	-	1.0	-
リユース鋼材適合率 $R$ の $N$	-	-	1.0	-

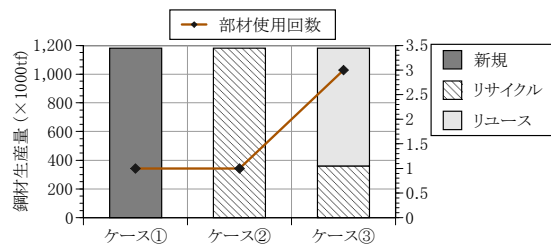


図6 ケース①～③の鋼材使用量と鋼材平均使用回数

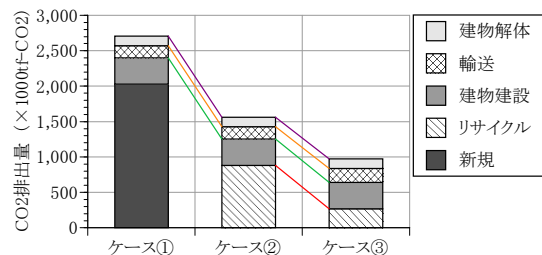


図7 ケース①～③のCO2排出量

ケース④鋼材回収率  $C$  の変化による影響：図8に  $C$  を0から1.0まで変化させた場合の鋼材生産量を、示す。但し、リサイクル鋼材歩留り  $I=0.5$ 、リユース鋼材適合率  $R$  算出用パラメータ  $A=100$  と設定した。

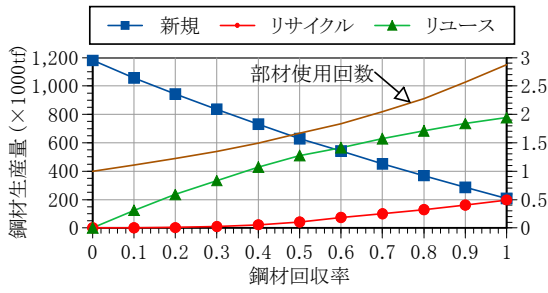


図8 鋼材回収率  $C$  と鋼材生産量の関係

ケース⑤リサイクル鋼材歩留り  $F$  の変化による影響：図9に、 $F$  を0.1から1.0まで変化させた場合の鋼材生産量を示す。但し、鋼材回収率  $C$  を0.5、リユース鋼材適合率  $R$  算出用パラメータ  $N=100$  と設定した。

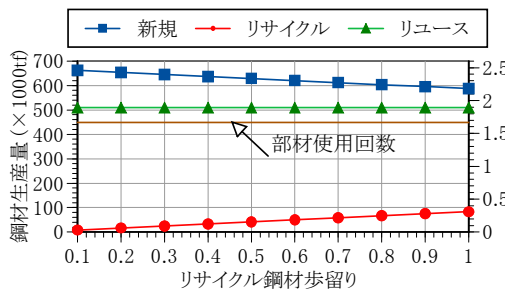


図9 リサイクル鋼材歩留り  $F$  と鋼材生産量の関係

ケース⑥リユース鋼材適合率  $R$  算出用パラメータ  $N$  の変化による影響：図10に、リユース鋼材適合率  $R$  算出用パラメータ  $N$  を1~5000まで10刻みで変化させた場合の鋼材生産量の推移を示す。但し、使用後鋼材回収率  $C=0.5$ 、リサイクル鋼材歩留り  $F=0.5$  と設定した。また、図11に、リユースメーカーのストック量の各年度の推移を示す。図12にリユースメーカーのストック量のピーク値 ( $V_p$ ) の  $N$  の変化による推移を示す。

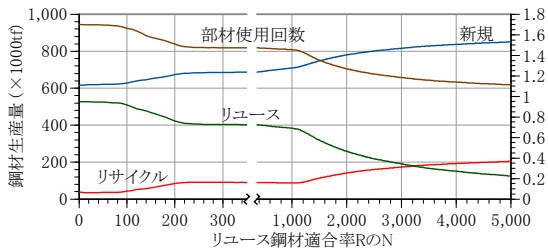


図10 リユース鋼材適合率  $R$  と鋼材生産量の関係

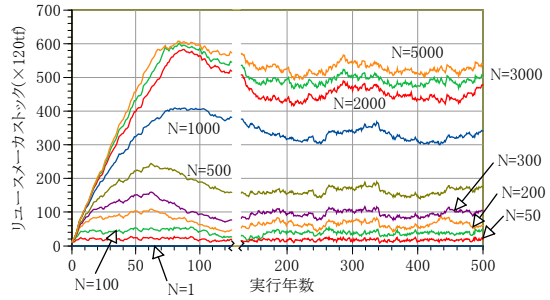


図11 リユース鋼材適合率  $R$  とリユースメーカーのストック量の関係

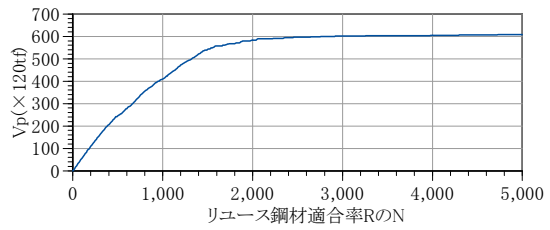


図12 リユース鋼材適合率  $R$  と  $V_p$  の関係

### (3) まとめ

本研究では、エージェントを用いて資源循環型社会シミュレーションシステムを構築し、リサイクル・リユースに影響を及ぼす因子（鋼材回収率  $C$ 、リサイクル鋼材歩留り  $F$ 、リユース鋼材適合率  $R$ ）の変動が資源採取量及び  $\text{CO}_2$  排出量の削減効果に及ぼす影響について、以下に示す①～⑦の知見を得た。但し、以下の知見で示す数値に関しては、定数として設定した建物寿命、リユース鋼材寿命などに依存するものである。つまり、リフォームなどの促進により建物寿命が延びれば建物建設数が減少すること及び、リユース鋼材の寿命を長く想定すれば、リユース鋼材の使用回数の増加が見込めるため、資源採取量・ $\text{CO}_2$  排出量共に更なる削減が期待できる。しかし本研究により、リカレント建築ネットワークの循環型社会システム構築における意義と貢献性は明らかにされた。

- ① 建設、解体、運搬に係る  $\text{CO}_2$  排出量は、リサイクル、リユースの程度に関わらず、ほぼ一定であった。これは、シミュレーション実行期間内の建物の建設棟数が一定であることによる。このため、②以降で示す  $\text{CO}_2$  排出量の増減に関する記述は、リサイクルあるいはリユースの適用の程度の変化に応じて、使用鋼材の供給元が変化したことに起因するものである。
- ② リサイクル鋼材歩留り  $F=1.0$  の時、完全な循環システム（新規鋼材の製造を要しない）が実現し、 $\text{CO}_2$  排出量はリサイクルが無い場合の約58%まで削減できる。
- ③ リサイクルに加えてリユースを想定し、

リユース鋼材寿命を建物寿命の3倍強に設定すると、使用される鋼材の約70%はリユース鋼材で賄われ、CO2排出量はリサイクル及びリユースが無い場合の約36%となり、リサイクルを考慮した場合と比べても約62%まで低減可能である。

- ④ リサイクルのみを考慮した場合、リサイクル鋼材回収率 $C$ 及び鋼材歩留り $Y$ の向上に伴い、リサイクル鋼材生産量は直線的に増加し、新規鋼材生産量は減少する。これに伴いCO2排出量も直線的に減少する。
- ⑤ リサイクル、リユースを共に考慮した場合、鋼材回収率 $C$ の向上に伴い、リユース鋼材供給量は増加し、CO2排出量は減少する。また、リユース鋼材の平均使用回数は $C=0$ では1.0回であるが、 $C=1.0$ では設定の上限値に近い2.87回まで上昇する。
- ⑥ リユース鋼材適合率 $R$ 算出用パラメータ $N$ を増加させると、リユース鋼材供給量は減少し、CO2排出量は増加する傾向があり、変化の割合には段階的なパターンが観察された。具体的には、 $N$ が80以下及び240~1,100の間では、リユース鋼材供給量、CO2排出量共にほとんど変化が認められなかった。
- ⑦ リユースメーカーのストック量の推移から、 $N$ の設定に応じて必要なストックヤードの規模は異なるが、 $N$ がある値(実行例では約2,000)以上では必要規模はほぼ一定となることがわかった。

#### (4) 今後の課題

建物の建設過程における部材リユースを普及させるためには、制度面及び技術面の課題解決も重要であるが、それに加えてリユース材使用に関するインセンティブの設定や品質への信頼性をいかに確保するかという問題がある。そこで本研究で構築した循環型社会シミュレーションシステムに経済量を導入することにより、コスト及び性能の面からユーザに部材選択を行わせることなどを今後の課題とする。また、信頼性の確保に関しては、ICタグなどの情報システム技術を用いることにより部材の使用履歴を蓄積し、建築物情報の運用・管理を行うシステムの有効性も検討する予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① Yuichiro Yamabe, Akinori Tani and Hiroshi Kawamura: Circulation Society System Based on Recurrent Architecture Network, Proceedings of 12th International Conference on Computing

in Civil and Building Engineering & International Conference on Information Technology in Construction, CD-ROM, pp.1-6, 2008.10, 査読有

- ② Yuichiro YAMABE, Akinori TANI and Hiroshi KAWAMURA: Co-Evolutionary and Co-Existent Formation of Architectural Spaces using a Multiple Optimization System, Journal of Computational Science and Technology, Vol. 2 (2008), No. 3 Special Issue on Soft Computing and its Neighborhoods in Engineering, Architecture, and Environmental Science, pp.371-380, 2008.7, 査読有
- ③ 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, 第73巻, 第624号, pp.253-260, 2008.2, 査読有

[学会発表] (計2件)

- ① 大久保雅司, 谷明勲, 山邊友一郎: マルチエージェントシステムを用いた資源循環社会シミュレーション-RC部材のリユースが与える環境負荷の影響-, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第49号・構造系, 2009.6(予定), 大阪
- ② 大久保雅司, 谷明勲, 山邊友一郎: マルチエージェントシステムを用いた資源循環社会シミュレーション-RC部材のリユースについての評価-, 第31回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 報告, pp.151-154, 2008.12.5, 東京

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山邊 友一郎 (YAMABE YUICHIRO)  
神戸大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 70362762

##### (2) 研究分担者

##### (3) 連携研究者