解体木質材の地域リサイクルシミュレーションモデルの構築

DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL FOR RECYCLE OF WOODEN RESOURCE
GENERATED IN DECONSTRUCTING HOUSES

野村希晶*, 有川 智**, 福田展淳***, 小林 均****

Noriaki NOMURA, Satoshi ARIKAWA, Hiroatsu HUKUDA
and Hitoshi KOBAYASHI

A model for simulating the recycle process of wooden material produced by the deconstruction of wooden houses has been developed, which is capable of describing the material flow of wooden resource based on logistic condition in a local area. The model, called recycle logistics model, consists of several agents which simulate wooden houses, deconstruction companies, intermediate process factories and recycle material production factories in the real world. They play their own role in computer program directed by political scenarios which control the material flow. An applied simulation for the recycle process in Yamaguchi Prefecture shows the useability and effectiveness.

Keywords: *Recycle, Simulation, Wooden resource, Deconstruction, Logistics*

リサイクル, シミュレーション, 木質資源, 除却解体, ロジスティクス

1. はじめに

建築物の除却解体時に発生する廃棄物量は年々増加する傾向にあり、その再資源化を促すとともに建築活動から発生する廃棄物量を抑制するための新しい技術と仕組みに対する社会的要望が高まっている。特に木造建築物由来の建設発生木材は再資源化率が低迷しており、その再資源化を促すための関連技術及びその普及基盤を早急に整備する必要がある。循環型社会形成推進基本法をはじめとした関連6法の成立により、我が国でも漸く廃棄物・リサイクル法体系が整備されつつある。それらの中には、再資源化に関する具体的な数値目標が示されているものも少なくない。例えば、平成11年9月ダイオキシン対策関係閣僚会議において決定された「ダイオキシン対策推進基本指針」では、平成8年度比での廃棄物減量化目標が定量的に示されている。即ち、平成22年度までに、産業廃棄物排出量の増加を13%削減、再生利用量を42%から48%に増加、そして最終処分量を半分に削減するとともに、焼却量を22%削減するというものである。更に、平成12年12月には「建設リサイクル法に基づく基本方針」が策定され、建設発生木材を含む特定建設資材廃棄物の平成22年度における再資源化・縮減率を95%にするという数値目標が掲げられている。

これらの目標達成にあたっては、多様な再資源化ルート（例えば、

部材としての再使用、チップ化した上での再生利用（パルプ、パーティクルボード等）、粉体化した上での再生利用（プラスチック化木材等）、サーマルリサイクル等々が考えられるが、その組み合わせや比率によって再資源化のあり方は大きく異なる。また、各ルートの需給バランスは地域によって異なり、再資源化を阻害している要因も様ではない。これら多様な再資源化の問題に対応した技術・政策が求められているのであり、適正な再資源化の実現のために具体的な「リサイクルシナリオ」を提示するとともに、その効果を定量的に検証する手法の開発も求められている¹⁾。

2. 研究の目的

本研究は、木質系建築廃棄物の発生抑制技術の開発に関する基礎資料とするために、現在そして将来に急増が予想される木質系建築廃棄物について、マテリアルリサイクルや縮減などの処理内訳比率が各種リサイクル施策によってどのように変化し、処理にかかわる輸送コストがどのように変化するかを量的に検討するモデルの開発を行ったものである。具体的には、木質系建築廃棄物のうち木造住宅（躯体非木造を含む）の除却解体時に発生する廃木質材について、その除却以降再資源化に至るマテリアルフローを地域内の道路輸送を条件として定量的に追跡するモデルを構築し、様々な再資源化政策シナリオによ

* 東北大学大学院工学研究科建築・社会環境工学科
助教授・工博

** 国土技術政策総合研究所住宅研究部 研究員・工博

*** 北九州市立大学国際環境工学部環境空間デザイン学科
助教授・工博

**** エックス都市研究所

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Science, School of Engr., Tohoku Univ., Dr. Eng.

Researcher, Housing Dept., National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Environmental Space Design, Faculty of Environmental Engr., The Univ. of Kitakyushu, Dr. Eng.

EX CORPORATION Urban & Environment Planning

るシミュレーション計算を行い、地域内のマスバランス等の問題点を抽出することを行っている。

本報は、今後目指すべき資源循環社会において、木造建築物の資源循環が除却・生産の社会構造の中に量的にどう適用するかをシミュレーションによって明らかにしようとする端緒である。この問題はもとより国内全域の生産経済過程で考えるべきものであるが、現実的に検証可能な範囲を都道府県規模の地域に限定し、モデルに基づいた手法が有効性を持つかを吟味しようとしている。

適正な資源循環を実現するためには、1) リサイクルプロセスにおけるマクロなバランス（出口と入りの量的な整合性）－排出量と処理可能量、再生材料の供給と需要等、2) 流通（市場）のあり方（材料を循環させるための前提条件）－発生量・品質・立地（距離）・情報・経済的支援等、3) 近未来の時系列に沿った将来予測とその対応策－建設年代による使用材料の変化・滅失戸数の推計に基づく除却量の予測、の観点からの検討が必要である。本研究では、これらの検討事項のなかから、特に 1) と 2) についてモデル構築を行ったものである。

本論で示すような、道路輸送を条件として廃木質材の処理をシミュレートするモデルに関する研究はこれまで行われていないが、わが国の木造住宅の CO₂ 循環に着目し建設と除却をも考慮したパラメトリックモデル研究²⁾や建設業における物質のマテリアルフローを扱った研究³⁾などが類縁の先行研究として挙げられる。

3. 除却解体木質材移送モデルの基本概念と構成要素

3.1 概要

「都道府県」単位の地理規模を圏域と呼ぶことにする。本章では圏域内で生じる住宅の除却解体時に発生する木質材料が、解体業者から中間処理業者へ移送され中間処理業者から各種リサイクル工場あるいは縮減工場などへ移送される全プロセスをシミュレーションするモデルについて述べる。このモデルによって、ある圏域内での木質資源の処理能力の現状を把握し、資源循環政策が計画されたときその効果を、地域内での工場配置の特性や道路ネットワークの地理的条件から検討することが可能になる。本モデルを地域リサイクルロジスティクスモデル（以下ロジスティクスモデルまたはモデル）と呼ぶことにする。

3.2 対象

住宅建築の除却解体時には、建築生産物の特性から非常に多岐に渡る材料が発生する。前章までに述べたようにこれらの中で今後も問題になるものは特に木質材料である。そこで、まず域内での木質材の資源循環を取り上げることとする。しかし、本モデルの考え方で廃プラスチックなど他の循環対象材料についても同様のシミュレーションは可能である。

また、廃木質材のうち特に除却解体に由来するものについてモデル化を行う。廃木質材としては、新築工事由来あるいは土木工事由来のものがあるが、これらについては本モデル内では表現していない。木くず資源の総量を考えると、伐採木など土木工事由来の木質資源を加味すべきと思われるが、それらの発生時期、発生位置が現状では将来にわたって適正に予測できないので本研究ではモデルに取り入れることを見合わせた。但し、新築工事由来の廃木質材は、ほぼ除却解体工事と同等に扱えると思われる。あるいは、住宅除却解体件数と新築件数の間に関係が見いだせれば、本モデルのシミュレーション結果を係数倍することである程度は推定可能と思われる。

モデルで扱っている廃木質材は住宅の除却由来の廃木質材なので結果の解釈には注意を要する。例えば、後で述べる山口県のシミュレーションでは、山口県の木くず調査実績から除却解体由来の廃木質材が総量の約 1/3 を占めた（2000 年度）という事実を考慮した上で結果を吟味する必要がある。

3.3 ロジスティクスモデルの概要

地域内の住宅除却解体木質材の発生・移送及び処理に関わる地理的及び人的事象について現象論的なモデル化を行った。モデル挙動の骨格は以下のように述べるができる。域内で発生する住宅除却解体木質材の解体・移送・処理に係る実在の世界（実世界）の人や工場を、属性と行為を持ったエージェントとして定義し、エージェント間で相互に応答をやりとりする行為によって木質材は移送され、その移送前後で分別された廃木質材、チップなどと形態が変化してゆく。その結果域内の地理的に異なる場所に処理された木質材が蓄積されることになる。エージェント間の応答のやりとりは時間軸にそって行われるので離散的な時間ごとの挙動がシミュレーション結果として得られることになる。

モデルをプログラムに実装する際には、各エージェントの属性は数値情報や文字情報で表現される property として、行為や相互の応答は method として、これら property と method を有するエージェントはオブジェクトとして記述されることになる。以下では実世界のモデル化という文脈ではエージェントと、モデルのプログラム記述という文脈ではオブジェクトと呼ぶことにする。次節以降でロジスティクスモデルの挙動を記述する基本要素のオブジェクトについて述べる。

3.4 地域 - AREA オブジェクト

各種地理的統計情報の入力と結果集計のための基本単位オブジェクトである。実際の解析対象県の市町村としてモデル化され、属性と変数のみを有し method を持たないオブジェクトである。設定属性は表 1 に挙げたように、土地面積、人口と世帯数、人口集中地区（DID）中心位置座標、隣接 AREA との道路距離の情報などを保持している。また、この AREA オブジェクトそれ自体が後述する解体業オブジェクトと各種処理工場オブジェクトの属性にもなる。

表 1 地域オブジェクトの属性

地域情報	情報の型（単位）	種別
ID コード	整数	属性
地域名	文字列	属性
地域面積	実数 (km ²)	属性
世帯数	整数 (世帯)	属性
地域人口	整数 (人)	属性
人口集中地区の広がり	実数	属性
人口集中地区中心 x 座標	実数 (km)	属性
人口集中地区中心 y 座標	実数 (km)	属性
圏域内世帯率	整数	属性
平均住宅齢	整数 (年)	属性
除却総床面積	実数 (m ²)	変数
木造家屋率	実数	属性
除却数	整数	変数
除却率	実数	変数
無効除却発生数	整数	変数
隣接地域数	整数	属性
隣接地域間距離	実数 (km)	配列変数
隣接地域コード	整数	配列変数
地域内解体業者数	整数	属性

3.5 解体業 - WRECKER オブジェクト

地域内で発生した除却家屋を分別解体する解体業をモデル化したオブジェクトである。除却対象住宅の延床面積と建築年から、軸材、面材を各自の業務能力に応じて分別し、政策シナリオに従い、地理的条件（ロジスティクス）を考慮して各種中間処理工場に移送する働きを有する。このオブジェクトの有する属性は表2に示した通りである。

3.6 中間処理工場 - IMPF オブジェクト

解体業オブジェクトの解体木質材の処理受け入れを意思決定し、移送された解体木質材を切削、破碎、粉体化、縮減などのいずれかの処理を行う中間処理施設をモデル化したオブジェクトである。IMPF(Intermediate Process Factory)と略称する。実際の中間処理にはその後の製品化や減容化に応じた各種の処理様態が存在するが、現在のわが国の解体材の処理を現実的な範囲で表現できるものとして、本モデルでは表3のように破碎工場、縮減工場、破碎・縮減工場とした。破碎工場は特に縮減用チップ化とボード用チップ化に分けた。また、地域内ロジスティクスの政策シミュレーションのために、実際には存在しないが分別資源を蓄積・再配分する新しいタイプの中間処理工場（共同集積場と呼ぶ）を設けた。これら、中間処理工場オブジェクトが有する情報を表4に示した。

3.7 製品化工場 - RCY オブジェクト

中間処理工場で処理されたチップなどを受け取る工場を表現したオブジェクトである。RCY (Recycle Factory) と略称する。中間処理には木質ボードなどリサイクル製品用のチップを生成する場合と、焼却

用チップを生成する場合があります、後者の場合は引き続いて縮減のための焼却中間処理工場やサーマルリサイクル用の処理工場に処理チップが移送される。縮減された処理物は最終処分場へと移送されるが本モデルではその移送プロセスや最終処分場との需給関係は取り扱わず、縮減化された処理物はその工場に留め置いてマスマランスを計測するものとした。

RCYは、リサイクル用のチップなどを受け取るオブジェクトでこれ以上の木質材の流れは追わないモデルの境界に相当している。言い換えれば、境界の外部にある経済とのやりとり、すなわち生産や出荷などは行わず、木質材移送物の最終保持状態を計量するためのオブジェクトである。したがって、処理能力などはオブジェクトの属性として考慮せず、移送チップは全て処理タイプに応じた製品化がなされると見なしている。RCY オブジェクトでは、全地域内の立地条件の影響を調べるうえで位置座標とストック量のみが主要な属性になる。モデルに実装された処理タイプすなわち製品化工場の種類は、実世界ではバイオマス発電所などに相当するサーマルリサイクル工場、マテリアルリサイクルとしてのボード工場、近い将来開発と流通が期待される構造用部材を生産する高付加価値型材料工場、および製紙工場である（表5）。これらの工場の配置条件を変えることで解体木質材の地域内移送を調べることができる。

3.8 解体住宅 - HOUSE オブジェクト

以上の他に、それ自身の挙動は受動的で他に働き掛ける影響が少なく必要な構成要素として、解体される住宅のオブジェクトを表6の

表2 解体業オブジェクトの属性

解体業情報	情報の型 (単位)	種別
ID コード	整数	属性
所属地域コード	整数	属性
所在位置 x 座標	実数 (km)	属性
所在位置 y 座標	実数 (km)	属性
除却処理速度	実数 (m ² /日)	属性
除却処理精度	実数	属性
平米あたり解体単価	実数 (円/m ²)	属性
解体中家屋コード	整数	変数
除却待ち家屋数	整数	変数
除却待ち家屋コード	整数	配列変数
累積移送支出	実数 (円)	変数
解体材処理費	実数 (円/m ³)	変数
累積解体収入	整数 (円)	変数
中間処理工場との取引のタイプ	文字列	属性
親取引中間処理業工場数	整数	変数
親取引中間処理業工場コード	整数	配列変数
中間処理工場取引緊密度	実数	配列変数
近距離中間処理工場数	整数	変数
近距離中間処理工場コード	整数	配列変数
解体終了状態フラグ	論理	変数
搬出待状態フラグ	論理	変数
解体中状態フラグ	論理	変数
受注待状態フラグ	論理	変数

表3 中間処理工場の種類

記号	工場種類
C	縮減用チップ工場
C-RCY	製品用チップ工場
R	縮減工場
C&R	チップ化後縮減工場
C&R-RCY	製品用チップ工場（有焼却炉）
SEP	共同集積場（仮想工場）

表4 中間処理工場オブジェクトの属性

中間処理工場情報	情報の型 (単位)	種別
ID コード	整数	属性
工場名	文字列	属性
処理工場タイプ	文字列	属性
所属地域コード	整数	属性
所在位置 x 座標	実数 (km)	属性
所在位置 y 座標	実数 (km)	属性
処理能力速度	実数 (ton/日)	属性
処理効率 (歩留り)	実数	属性
未処理ストックヤード (面材)	実数 (m ³)	変数
未処理ストックヤード (軸材)	実数 (m ³)	変数
処理後ストックヤード	実数 (ton)	変数
受入処理費	整数 (円)	属性
処理材有価値	整数 (円)	属性
取引型	文字列	属性
累積受託処理費	整数 (円)	変数
累積処理費	整数 (円)	変数
累積移送費	整数 (円)	変数
得意先処理工場数	整数	変数
得意先処理工場コード	整数	配列変数
接続中間処理工場数	整数	変数
接続中間処理工場コード	整数	配列変数
接続中間処理工場距離	実数 (km)	配列変数
接続地域数	整数	属性
接続地域 DID 中心との距離	実数 (km)	配列変数
接続地域コード	整数	配列変数

表5 製品工場の種類

記号	工場種類
BD	ボード工場
THML	サーマルリサイクル工場
EWD	高付加価値型材料工場
PMF	製紙工場

表6 解体住宅オブジェクトの属性

解体住宅情報	情報の型 (単位)	種別
ID コード	整数	属性
所属地域コード	整数	属性
地域域内位置距離偏差	実数 (km)	属性
建築年齢	整数 (年)	属性
初期床面積	実数 (m ²)	属性
構法種コード	文字列	属性
解体中残り床面積	実数 (m ²)	変数
除却木質材 (軸材)	実数 (m ³)	変数
除却木質材 (面材)	実数 (m ³)	変数

ように設けている。シミュレーション計算では、AREA オブジェクトによって生成され、その状態を表す解体中残り床面積 (解体前は初期床面積と等しい) が単位時間 (日) に WRECKER オブジェクトによって減少させられ (解体され)、除却木質材 (軸材) と除却木質材 (面材) が増加することになる。

4. ロジスティクスモデルの挙動

前章に述べたオブジェクトが、与えられた政策シナリオと自己の能力に基づいて、関連する他のオブジェクトと情報をやりとりしながら行動し、自分の状態と関連オブジェクトの状態を単位時間中に変化させることが、シミュレーション計算の実体である。本章では、各オブジェクトの挙動の詳細について述べる。ここでの各挙動は単位時間 (実際のシミュレーションでは日単位) におけるものである。

4.1 地域オブジェクトの挙動

AREA オブジェクトには、圏域全体で得られている実際の除却床面積の総和が世帯数比にしたがってシミュレーション開始前に分配される。単位時間中には各 AREA オブジェクトは正規乱数で除却床面積を発生し、平均家屋床面積で除してその整数商を当単位時間の必要除却家屋数とする。したがって、世帯数の少ない地域には必ずしも毎単位時間に除却家屋が発生することにはならないようになっている。

除却確率は、除却家屋予測モデルによって与えるべきものだが、本研究の目的の範囲を超えること、また、地域毎の除却家屋予測自体が精度の観点からは困難な課題になるので、本モデルでは除却家屋総床面積が圏域の1年間の実績計量に合致するように除却を発生させるものとした。

必要除却家屋は以下の規則にしたがって当該地域内の WRECKER オブジェクトに割り当てられる。

- (1) 現在解体物件を持たない WRECKER オブジェクトに割り当てる。
- (2) 解体単価が小さい順に割り当てる。
- (3) 解体単価が同じ場合はランダムに割り当てる。
- (4) 以上でも割り当てられない場合は、単価の小さい順にランダムに WRECKER オブジェクトの除却待ち行列に割り当てる。

4.2 解体業オブジェクトの挙動

4.1 のように必要除却家屋を割り当てられた WRECKER オブジェクトは以下の規則にしたがって、地域内必要除却家屋の分別解体と中間処理工場への移送を行う。

- (1) 単位時間当りの作業能率と作業精度にしたがって、当該除却家屋の床面積から、柱梁などの軸材と壁や下地などの面材を生成する (解体する)。その生成割合は、除却住宅の種別毎の平均的な構成比にしたがうものとする。
- (2) 当該除却住宅の床面積がゼロになった時点で、次の時間ステップ

から移送処理に移行する。実世界の解体では、解体作業と移送作業が同一日に行われる場合もあるが、そのような作業工程でも解体終了後移送をまとめて行う工程でも、総作業量で見るとモデルの全体結果に及ぼすような大きな差はないと考えられるので、モデルではミクロな解体作業の記述はしていない。

- (3) 解析時に設定した政策シナリオ (後述) を遵守しつつ、解体材を移送する中間処理工場 (IMPF オブジェクト) を探す。この際、処理費の低いものから探し、処理費が同じ場合は移送距離の小さい方を優先する。

- (4) IMPF オブジェクトが受け入れを受諾した場合にはそこへ解体材を移送する。受け入れを拒否された場合には (3) を繰り返す。

以上の処理は、各地域毎に全 WRECKER オブジェクトがとる行動だが、計算時の行動順序は毎時間ランダムに変えることで、結果の平等性を確保している。

WRECKER オブジェクトが悪意を持った行動をとることは全く考えられていないので、建設リサイクル法に従って 50km 圏内に中間処理工場を探索し、見つかった場合でそこが受け入れを受諾した時は、たとえ移送費が大きくなっても解体材は必ずそこへ運ぶことになる。したがって、いわゆる不法投棄などは発生しない。しかし、解析時に与えた IMPF のストックヤードや処理能力の値しだいでは行き先のない解体材も計算上は発生する可能性がある。この場合の解体材は、HOUSE オブジェクト内に残ったままになる。現実には、中間処理工場の空きを待ったりして移送先を探し続けるものだが、圏域内の中間処理工場の総処理能力の評価や不法投棄の可能性評価のために、HOUSE オブジェクトに解体材が残る現象を許すことにしている。

4.3 中間処理工場の挙動

IMPF の行動は、工場の種類によらず共通なものと、工場の種類によって異なるものがある。工場の種類によらない共通な行動規則は以下の通りである。

- (1) WRECKER オブジェクトから解体材の処理要求があった場合に、ストックヤードの限界量以内であればそれを受け入れ、限界量を超える場合は拒否する。
- (2) スtockヤードにある解体材を、自己の処理能力に応じて処理し、備蓄ヤードに蓄える。
- (3) 備蓄ヤードにある処理材 (チップなど) を、政策シナリオを遵守しつつ次の処理工場に、処理費の低い順で移送距離の小さい順に選択し移送する。

工場の種類別では以下の行動規則に従う。

- (1) C (縮減用チップ工場) : 移送先は縮減工場かサーマルリサイクル工場である。
- (2) C-RCY (製品用チップ工場)、C&R-RCY (有焼却炉) : 移送先は縮減工場とサーマルリサイクル工場以外である。C&R-RCY は歩留り以外の残余の焼却処理を行う。
- (3) R (縮減工場) : 次の処理工場はないことにする (前述の最終処分の扱いによる)。
- (4) C&R (チップ化後縮減工場) : サーマルリサイクル優先シナリオが採られていない場合には自社で縮減処理まで行う。次の処理工場はないことにする (前述の最終処分の扱いによる)。
- (6) SEP (共同集積場) : 解体材の処理を行わず、備蓄ヤードから解体材を、製品用チップ工場のうち予め決められている得意先工場 (共同集積の契約工場) へ再配送する。

4.4 全体挙動の記述と評価量

以上の各オブジェクトの行動によって、解体木質材が各種処理を受けて、圏域内を移動することになる。これらの量的変化は、単位時間の変化量が各種オブジェクトの各種属性として与えられているので、一階差分を前進的に解くことになる。モデルの全体挙動の骨格部分は、各オブジェクトの相対的位置関係から計算される道路距離評価に基づく行動決定関係とその間の木質材移送にある。そしてこれらを制約したり、助長したりする政策シナリオが関数記述として表現されている。

モデルからの出力は、木質材の各種処理量と移送コストの地理分布と時系列である。除却解体は実際の一棟一棟を数値的に発生させており、何十年単位での挙動を想定していない。現状との比較のために単年解析が中心になるので、季節条件が深刻な地域でないかぎり時系列はあまり意味を持たず、年間総量が重要な出力結果となる。また、モデルの表現精度に比べ、与えているパラメータの情報精度が低いので、出力量はオーダー程度で吟味するものとし、解析パラメータの違いによる出力量の構成比に着目するべきと考える。

以上のような挙動をシミュレートし必要なパラメータ設定と入出力を行うコードをプログラム開発した。図1はそのメインインターフェイスである。

図1 シミュレーションプログラムメインインターフェイス

表7 設定政策シナリオ

記号	内容
Base	現況をシミュレーションするもの
Dxn	ダイオキシン類対策特別措置法および改正廃棄物処理法に基づきダイオキシン非対応焼却炉を有する工場を除外した場合
RcyThrml	縮減用チップ工場にその移送先としてサーマルリサイクル工場を優先させる
RcyForce	解体木質材を製品用チップ工場へ優先移送する場合
RcySep	解体木質材を共同集積場に優先移送し、共同集積場が特定の製品化工場に契約接続する場合

上記で「優先」という意味は、道路距離 50km 圏内に対象移送先がある場合は必ずそこへ移送することを指す

5. 政策シナリオの設定と適用事例

5.1 政策シナリオ

4で述べたように、WRECKER オブジェクトの解体木質材移送と IMPF オブジェクト間の処理材移送は、各オブジェクトに内在しない政策的な誘導、すなわち政策シナリオに従うことが決められている。また、この政策シナリオによって、圏域内の住宅除却由来木質材のマスバランスの違いや移送コスト変動を検討することが本モデルの目的でもある。政策シナリオのあり方は、法的な論拠と木質資源の市場価値を勘案して定められるもので、論理的な設定法が求めにくいものである。本研究ではモデルの表現力・記述力をはかる目的で、ある程度妥当と考えられる5つの基本シナリオを表7のように定めた。このうち、RcySep は政策シナリオは他の現実的なシナリオとは異なり、政策が新たな工場立地を誘導したもので対象圏域の将来のリサイクルネットワークの理想像のひとつを形にしようとしたものである。

これらのシナリオは計算プログラムではオブジェクトがとる行動の関数によって実装されている。また、同一のシナリオでも、後述の表9に示す計算パラメータや定数の設定の組合せで多様な表現ができるようになっている。

5.2 適用対象概要

本ロジスティクスモデルは多くの計算パラメータの設定が必要であり、実在のわが国の都道府県において当てはめるためには、ある程度調査資料が充実している圏域を選定する必要がある。本研究で選定した圏域は山口県である。ここは、国内ではリサイクル政策への取り組みが先進的な自治体のひとつで、モデル適用対象として統計資料も充実している⁴⁾。そこで既存の統計資料に独自の調査を加えて本モデルの計算パラメータを設定し、山口県の解体木質材のロジスティクスシミュレーションを行った。

5.3 山口県モデルパラメータ

山口県の統計資料および調査資料からロジスティクスモデルに与えた基本条件は表8の通りである。各オブジェクトには3章で述べた属性が付与されている。AREA オブジェクトには統計資料に基づいて属性を与えた。但し、DID 中心は各市町村の行政中心とした。また、隣接市町村間のネットワークは、地図上の県道以上の主要道路の接続関係から道路距離を測って与えている。

WRECKER オブジェクトについては、解体業者の統計実態がほとんど不明で総数も未知である。そこで、計算時に発生除却家屋が地域内の WRECKER オブジェクトに割り当てられればよいとし、WRECKER オブジェクトの待ち行列に数件以内で納まる程度の解体業者数を想定した。結果的には必要解体業者総数は県内工務店数の3分の1ぐらいになり、これを地域の人口比に応じて地域内に一様に分布させた。また、同様の理由から WRECKER オブジェクトの属性は全て一律にした。したがって、本解析では WRECKER オブジェクトの個々の特性は捨象されている。

中間処理業のモデルでの取り扱いを述べておく。収集した山口県の中間処理施設データで、能力や施設位置などがはっきりしているも

表8 山口県モデル基本データ

AREA オブジェクト	56 県内市町村数						
住宅除却総床面積	木造 665000m ² 、非木造 323000m ² (2000 年実績)						
WRECKER オブジェクト	2199 仮定総解体業者数 (市町村に人口比で配分)						
IMPF オブジェクト	種類	C	C-RCY	R	C&R	C&R-RCY	計
	ダイオキシン対応前	18	10	27	9	10	74
	ダイオキシン対応後	18	10	14	6	7	55

図2 山口県圏域概要

産廃6地区区分（図注番号），主要道路およびシミュレーションに用いた主要な各種処理工場

表9 シミュレーションに用いた計算パラメータ

名称	内容	値
軸材率	家屋分別解体時に軸材の占める割合	0.179 m ³ /m ²
面材率	家屋分別解体時に面材の占める割合	0.066 m ³ /m ²
かさ比重	解体木質材のみかけ比重	0.205
稼働時間	中間処理施設日平均稼働時間	10 hours
減容率	焼却縮減時体積現象割合	95 %
政策移送距離限界	政策シナリオに従う最大移送距離	50 km
解体材移送費	解体業の除却木質材平均移送費用（4 トントラック）	10000 円 /25km
チップ移送費	中間処理工場のチップ平均移送費用	53 円 /km/ton
プレストック量	中間処理施設未処理材蓄積可能量	28 日分処理量
除却家屋床変動	住宅平均面積の変動係数	0.2
除却家屋日変動	日当り除却発生率の変動係数	0.1

の、あるいはそれらが仮定できるものの数は74施設である。これらの施設の処理の種類は、調査結果によれば（1）破碎、（2）焼却、（3）破碎と焼却である。しかし、チップ化工場でも、実際にリサイクル原料として製品化工場へ売却しているか、縮減用チップとしているかなどの実態は全ての施設について分かってはいない。また、処理後の移送先も分かっているものはわずかである。従って、シミュレーションデータとしては、製品用チップとしてリサイクル工場へ販売していることがわかっている場合以外のチップ工場は焼却縮減している場合が多いと考えられるので焼却用として扱った。

表8のダイオキシン対応工場数は基本的には調査結果に従ったが、調査回答が不明の焼却工場は、全て未対応として扱った。また、山口県には焼却処理能力が極めて高いセメント工場が存在するが、実際の受け入れはあまり行われていないこと、また、これを考慮すると影響が強すぎるので扱わないこととした。

山口県内の産廃地域6区分（山口県独自の定義による）とIMPFを図2に示した。また、これらがシミュレーション時に表示された一例を図3に示した。図3でネットワークは直線で表わされているが、プ

図3 シミュレーションプログラムでのネットワーク表示

ログラム内部のリンク距離は直線距離ではなく地図上の道路距離を測定して与えた。

5.4 政策シナリオと計算パラメータ

山口県の平成12年度（2000年度）実績の県内木くず発生量が報

表 10 山口県産廃地域毎の除却木質材発生量

地区番号	地区名	2000 年度実績 < ton >	計算値 (変動係数) < ton >	計算値/実績値
1	東部地域	10831	8941 (0.008)	0.83
2	周南地域	7767	8631 (0.007)	1.11
3	山口・防府地域	10830	10016 (0.009)	0.92
4	宇部・小野田地域	10904	9481 (0.007)	0.87
5	下関地域	9493	9662 (0.007)	1.02
6	長門・萩地域	5366	3808 (0.009)	0.71
	県全体	55191	50539	0.92

告されている。この統計量と比較しうる基本解析を行った後に、各種政策シナリオを設けてシミュレーションを行った。設定したシナリオは表 7 に示したものをを用いたが、シナリオ Base は統計量が存在する 2000 年度の山口県を対象とした。また、シナリオ RcySep として、

1) RcySep1: 下関近郊に仮想共同集積場 (図 2 の SEP1) を設け、契約工場として近傍の 4 箇所の製品用チップ工場 (図中○印) に接続した場合

2) RcySep2: 仮想共同集積場を下関近郊と徳山近郊に 2 つ (図 2 の SEP1, SEP2) 設けて、そのそれぞれが近傍 4 箇所の製品用チップ工場を契約工場として持つ場合

3) RcySep3: 防府市付近 (瀬戸内海側の県中央部) に高付加価値型材料を想定して新規に RCY 工場オブジェクトを配置し (図 2 の EWD)、共同集積場を 3 箇所にした場合 (SEP3 を追加)

を設定した。

モデル境界の意味を持つ製品工場は距離計算上はダミー的であるので県の人口重心に近い位置に設けた (図 2 の BD1)。但し、シナリオ RcySep 3 では EWD 工場 (図 2 の EWD) と距離をおくためにその位置を移動させた (図 2 の BD2)。また、製紙工場 (PMF) は山口県のシミュレーションでは用いていない。

表 9 は本解析で計算に用いた計算パラメータの主要なものである。計算は 1 年を 300 日として行った。

5.5 シミュレーション結果と考察

(1) 基本解析結果

表 10 に計算と調査実績の比較結果を示す。シミュレーション計算では、発生除却面積やオブジェクトの行動順序など事象の発生を確率的に与えている点が多々ある。従って、基本解析では 10 回の計算を行いその平均値で結果を検討している。AREA (市町村) 毎に計算が実行されているので、表のように産廃地域 (山口県が設定したもの) 毎にシミュレーション結果をまとめることが可能である。シミュレーションパラメータとして与えている実資料は、年間総除却面積だけであるので、表 10 のように計算値/実績値がおおむね 1.0 前後におさまっていることから、モデルのマクロな精度としては充分であると思わ

れる。地域毎に 1.0 のまわりにばらつくのは、モデルでは総除却面積を各 AREA に人口比で割り当てているのに対し、実情は AREA 毎の除却発生に偏りがあるためと思われる。県全体の総除却木質材発生量は計算/実績 = 0.92 であった。計算値が小さいのは、モデルの解析時間が実態より小さくなっている可能性があること (工場稼働時間 8 時間、週末休止を仮定して計算)、分別解体の解体率や歩留りの設定、解析終了時点で未解体家屋が存在することなど複数の要因によるものと思われる。解析時間の調整で計算値を実績値に恣意的に近づけることは可能だが、現段階では家屋解体処理現状全般の高精度な再現は目標にしていけないので、表 10 の結果はマクロな量的検証として充分なものと判断した。

(2) 政策シナリオ解析結果

表 11 に、各種政策シナリオのシミュレーション結果を、処理内訳と移送コスト比としてまとめた。基本解析の結果、変動係数が極めて小さいことが分かったので、各政策シナリオの解析では 5 回の計算の平均値を求めた。

コスト比は製品化チップ工場とリサイクル工場間の移送コスト (記号: C-Rcy)、焼却用チップ工場と焼却工場間の移送コスト (記号: C-R)、共同集積場とリサイクル用チップ工場間の移送コスト (記号: Sep-C、シナリオ RcySep1, RcySep2, RcySep3 の場合) および解体業から各種中間処理工場への移送コスト (記号: wrecker) の総和を、基準移送コスト (シナリオ Base の C-R のコスト値及びシナリオ Base の wrecker のコスト値) の比で表している。

計算プログラム内部では、解体費、処理費、チップ売却費も計算しているが、実情のデータが非常に粗いので、オブジェクトの行為をコストで決定するシミュレーション方略はかえって挙動の不整合を引き起こしやすい。したがって、実際には動的に変化する諸単価を一律に扱い、上述のように距離に基づいた移送コストの比率を考察対象とした。設定した各シナリオから得られた知見は次のようにまとめられる。

(a) シナリオ Base: これは 2000 年現状のうち、家屋除却解体由来分の廃木質材の処理を見たものだが、ほぼ 1/3 のマテリアルリサイクル率になり、これは山口県の全木くずの処理現況と対応している数値

表 11 各種政策シナリオ毎のシミュレーション結果

シナリオ 記号	処理内訳 (%)								移送コスト比			
	マテリアル リサイクル	サーマル リサイクル	高付加価 値材	縮減	破碎待	縮減待	移送待	waste	C-Rcy	C-R	Sep-C	wrecker
Base	34.9			55.3	1.3	4.3	0.3	3.9	2.90	1.00		1.00
Dxn	32.0			44.4	2.2	4.4	12.7	4.4	2.19	2.72		1.14
RcyThrm1	30.3	62.9		0.0	2.2	0.0	0.3	4.2	1.87	8.89		1.13
RcyForce	94.6			0.8	1.5	0.0	0.3	2.8	6.62	0.02		1.59
RcySep1	52.8			36.4	2.9	3.5	0.4	4.1	3.46	1.06	0.82	1.76
RcySep2	81.9			11.9	2.5	0.6	0.3	2.7	6.27	0.36	4.00	2.40
RcySep3	33.6		50.4	10.4	1.7	0.6	0.3	3.0	3.32	0.34	4.07	1.82

となった。

(b) シナリオ Dxn: ダイオキシン非対応処理場を除くことにより、マテリアルリサイクル分はあまり変化しないが縮減量が減り焼却工場への移送待ち量が増加している。モデルで扱っている対象が解体工事由来の廃木質材で、山口県の現実はその2倍の処理量が要求されていることを考えると、焼却場不足は明らかである。また、処理されているものも、対応以前の3倍弱の移送コスト(C-R)がかかっている。

(c) シナリオ RcyThrm1: 縮減にまわる廃木質材を50km圏内にサーマル工場がある場合はそちらへ移送するという政策を取ると、全縮減量とマテリアルリサイクルの一部がサーマルリサイクルにまわった結果となる。ただし、処理工場からサーマル工場への移送コスト(C-R)が大きく増大することは避けられない。

(d) シナリオ Rcy-Force: 全て製品用チップ化することを強制すると、解体から製品用チップ工場へ移送するコストが約1.6倍になる。また製品用チップ工場からの移送コストも増大している。このときのチップ供給量は約46000トンで過剰供給が心配される。またこの結果は、山口県で縮減分を全て製品用チップに移行させようとしてそれができただけのチップ工場の総能力があるということも意味している。

(e) シナリオ RcySep1: 下関に仮想共同集積場を設けて製品用チップ工場と4箇所と接続した場合、縮減量が約19%減少し、その分のマテリアルリサイクルが増加する。この場合、解体業者の共同集積場への移送コスト増が生じ1.8倍になる。

(f) シナリオ RcySep2: 下関と徳山にそれぞれ仮想共同集積場を設けて製品用チップ工場とそれぞれ4箇所と接続した場合、山口県の除却木質材がほとんど配送圏内に入るの、マテリアルリサイクルが8割以上に上昇する。リサイクルの観点から見ると好ましく思えるが、実際にはチップの過剰供給に陥る可能性があり必ずしも有効な政策とは限らない。また、共同集積場からの移送コストは、徳山の共同集積場とこれに接続する処理場の距離が遠いため、上昇している。また、共同集積場が増えたことで、解体移送コストも上昇する。

(g) シナリオ RcySep3: 意図的に防府市付近に構造物などに使用可能な高付加価値型材料を想定して新規にRCY工場オブジェクトを配置した場合である。また、共同集積場配置はシナリオ RcySep1, RcySep2の結果からみてわかるように、人口集中地域に適切に分散配置することが望ましい。ここでは、宇部市近郊に一箇所増やしている。これらの結果、リサイクルのうち、通常のボード類など(表中マテリアルリサイクル)と高付加価値型材料の割合がオーダー的にはほぼ同程度になり、移送コスト比もシナリオ RcySep2に比べるとSep-C以外は下げることができている。高付加価値型材料工場には2000年実績の家屋除却木質材からは約21600トンが供給できており、現実的な値になっていると思われるので、安定的なチップ供給を行える可能性は指摘できる。

6. まとめ

市町村規模の圏域内の住宅除却由来の廃木材資源が、リサイクルに関する政策シナリオに従って、道路ネットワークからなる圏域内で資源循環される材料移送状況をシミュレーションする地域ロジスティクスモデルを構築した。山口県を適用事例とした数値計算から、設定したシナリオ毎に生じる具体的なリサイクルの姿と問題点のある程度指摘できた。本モデルは、最善の政策や政策誘導工場立地の最適解を直接導くものではないが、地理情報システムなど他の立地用件解析システムからいくつかのパターンの配置案が与えられたときには、取るべき政策と域内でのロジスティクスに基づいたリサイクル率と移送コストの検証が可能である。

木質材の廃棄物問題については、総合科学技術会議において「ゴミゼロ型・資源循環型技術研究」が重点領域として挙げられ、重視すべき事項として「循環型社会変革シナリオ研究」が示されている。建築物のライフサイクルを通して、(各フェーズが連携した)モノと情報の円滑な流れを促進する高度な資源循環社会システム(規格・法令・制度等を含んだ総合的概念)を構築していくことが今求められており、適正な政策立案に際して、本論で報告した地域リサイクルロジスティクスモデルが活用されることが期待される。

謝辞

本研究は、総合技術開発プロジェクト「循環型社会及び安全な環境形成のための建築・都市基盤整備技術の開発」の中課題「木質系建築廃棄物発生抑制技術の開発」(平成12年度～14年度)の一環として実施されたものであり^{5),6)}、(財)日本建築センターに設置された「社会システム分科会 資源循環社会モデルWG(主査:野村希晶)」において検討されたことを記し、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会地球環境委員会資源利用小委員会: 建築における資源循環のモデル化, 資源利用委員会活動報告書(1999-2000年度), 2001.
- 2) 高口洋人, 尾島俊雄: 木造住宅と森林資源の日本型循環モデル構築に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.544, pp.85-92, 2001.6.
- 3) 下田吉之, 井上晋一, 山岸源, 水野稔: 大阪府におけるマテリアルフローの推定と評価—都市における物質・エネルギー代謝と建築の位置づけ その1—, 日本建築学会計画系論文集, No.546, pp.83-90, 2001.8.
- 4) 山口県環境生活部: 平成13年度山口県産業廃棄物実態調査報告書, 2002.
- 5) 野村希晶, 有川智, 武藤正樹, 小林均, 福田展淳, 野城智也: 木造住宅の分別解体・再資源化の促進に関する研究 その11 リサイクルロジスティクスモデルの開発—モデル概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, 1099-1100, 2003.
- 6) 有川智, 野村希晶, 武藤正樹, 小林均, 福田展淳, 野城智也: 木造住宅の分別解体・再資源化の促進に関する研究 その11 リサイクルロジスティクスモデルの開発—結果概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, 1101-1102, 2003.

(2004年5月10日原稿受理, 2004年10月13日採用決定)