

建築仕上げ材の再資源化に関する現状調査

A STATE OF THE ART REPORT ON RECYCLING OF FINISHING MATERIALS

古賀(井戸川)純子 —*1 清家 剛 —*2
 名取 発 —*3 本橋健司 —*4

Junko Idogawa KOGA —*1 Tsuyoshi SEIKE —*2
 Akira NATORI —*3 Kenji MOTOHASHI —*4

キーワード：
 建設廃棄物, 再資源化, 建築仕上げ材

Keywords:
 Construction and demolition waste, Recycling, Finishing materials

The purpose of this study is to clarify the present state of the art on recycling of finishing material wastes derived from production process, construction work and demolition work. The survey was conducted by interviewing and sending questionnaires to manufacturer associations of the finishing materials. The survey was carried out from July 2001 to March 2002, and the current situations and problems were identified and discussed.

1. 序

昨今、最終処分場の残余量のひっ迫や、循環型社会構築へ向けた活動の活発化といった背景から、廃棄物の発生抑制、再資源化への要請がますます高まっている。なかでも建設廃棄物については、図1に示すように産業廃棄物約4億トンのうち19%を占め(平成11年度、環境省調査による)、そのうち15%が最終処分されている¹⁾ 実情から、実効的な発生抑制への対策が望まれている。

建設廃棄物においては、「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」が平成14年5月に完全施行され、再資源化が推進されている。同法律において、再資源化もしくは削減が義務づけられる特定建設資材に指定されたコンクリート、木材、アスファルト・コンクリート等の廃棄物は、図2に示すようにすでに再資源化等が相当量実施されている。しかし、特定建設資材以外の材料については取り組みが遅れており、建設混合廃棄物および図2に示していないその他(廃プラスチック、紙くず、金属くず)の建設廃棄物は建設廃棄物中に占める割合は8%¹⁾と少ないものの、最終処分量は540万トンにもなる¹⁾ため、発生抑制のための対策は急務である。

本調査は建築仕上げ材ならびに断熱材、建具構成材、配管設備等の特定建設資材以外の材料(以降、これらをまとめて仕上げ材等と呼ぶ)を対象に、再資源化の現状を把握すると共に、今後の再資源化推進の方向性検討の基礎資料を得ることを目的とし、平成13年7月~14年3月にかけて実施した。

ここで、再資源化には、廃棄物を原材料の一部として再資源化するマテリアルリサイクル、燃焼させて熱を回収するサーマルリサイクル等

があるが、本調査は今後のマテリアルリサイクルの可能性を検討することを目的とし、マテリアルリサイクルを主な対象とする。

さらに、建築仕上げ材等の製造工程においては、効率の向上などの理由で端材等の排出物のマテリアルリサイクルが実施されていると想定され、製造時以外の廃棄物にもその手法が適用されているもしくは適用できる可能性がある。また、住宅・建築物の解体時に発生する

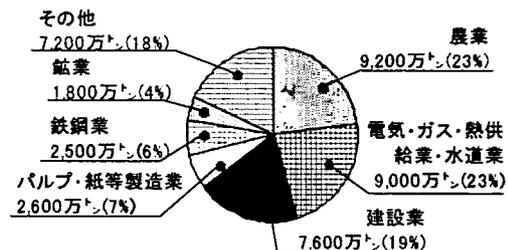


図1 産業廃棄物の内訳(平成11年度、環境省調査)

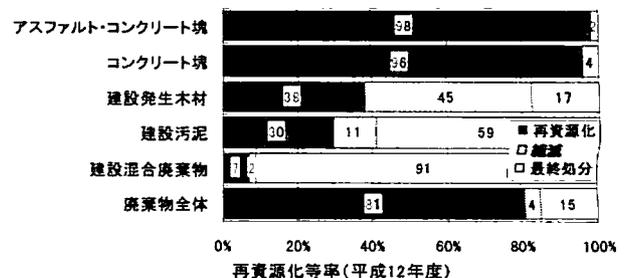


図2 建設廃棄物の再資源化等率の現状(平成12年度)¹⁾

*1 国土交通省 博士(工学)
 (〒305-0802 つくば市立原1)
 *2 東京大学新領域創成科学研究科 助教授・博士(工学)
 *3 東京理科大学工学部建築学科 助手・博士(工学)
 *4 独立行政法人建築研究所 上席研究員・博士(工学)

*1 MLIT, Ph. D.
 *2 Assoc. Prof., Dept. of Environmental Studies, Graduate School of Frontier Science, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
 *3 Research Assoc., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
 *4 Chief Research Scientist, Building Research Institute, Dr. Eng.

建築仕上げ材に由来する廃棄物の再資源化が現状で進んでおらず、建築仕上げ材を再資源化し、他製品の原材料としている例はきわめて少ないと想定される。このため、建築仕上げ材を同種の製品の原材料として再利用する場合を主な調査対象とする。

また、廃棄物を部材等に再び使用するリユースについては、住宅、建築物に多種多様な建築仕上げ材が用いられている一方で規格化、標準化が十分なされていないこと、建築仕上げ材には装飾性が要求され、再使用材料が消費者のニーズに合致する可能性が低いと考えられ、現時点において現実的でないことから、本調査では対象外とする。

なお、本調査は国土交通省総合技術開発プロジェクト「建設分野におけるダイオキシン類汚染土壌対策・廃棄物発生抑制技術の開発(建築分野)」及び独立行政法人建築研究所研究プロジェクト「木造建築物の再資源化・資源循環化技術の開発」の一環として実施し、結果を同プロジェクトの平成13年度報告書²⁾としてまとめている。また、結果の一部を日本建築学会大会梗概集³⁾に発表済みである。

2. 調査の概要

2.1 調査内容

仕上げ材等の再資源化に関係する技術的問題と流通に関わる問題を中心に、

- ・現在、各材料の再資源化はどの程度行われているか
- ・現在、再資源化するための技術はどの程度確立されているか
- ・再資源化を事業として成立させるための要件は何か
- ・再資源化できないもの(適正に埋立てすべきもの)、または、再資源化する必然性の乏しいものは何か

などの観点から調査項目を設定した。また、再資源化の状況は、排出物(本報告では、材料の製造過程や建築物の施工時に発生する製造かすや端材、解体時に発生する解体資材を排出物と呼ぶ)の排出される段階、つまり建築物を建造する段階(以降、新築時と呼ぶ)、建築物を解体する段階(以降、解体時と呼ぶ)により異なるため、段階毎に調査した。また、材料の製造時(以降、製造時と呼ぶ)に排出される排出物は建設廃棄物ではないが、再資源化がすでに行われていることが予備調査より推測され、新築時および解体時の排出物の再資源化への対策を検討する際の参考となるため、同様に調査を行うこととした。

多岐にわたる調査項目のうち、本報で結果を報告する調査項目とその内容を表1に示す。

2.2 調査対象および方法

調査は、表2に示す24の材料に関連する製造業者もしくは

表1 調査項目と内容

調査項目	内容
生産量	過去30年程度の生産量。単位は基本的には質量としたが、質量での表示が困難な場合は面積や個数等とした。
排出物の発生率	製造時、新築時に排出される排出物の生産量に占める割合(質量比)
再資源化率	排出物のうち再資源化が実施されている割合(質量比)
再資源化の方法	現状で行われている再資源化の方法
回収ルートの整備状況	現状の回収ルートの整備状況
再資源化技術の整備状況	再資源化技術の保有状況とその到達段階および適用条件

はその団体を対象とした。これらの材料は必ずしも建築物や住宅に使用される仕上げ材等を網羅してはいるが、再資源化への取り組みの状況や、新築時、解体時の排出物の回収ルートの整備状況について様々な到達段階にある事例を収集することを主眼に選定した。

調査はヒアリングおよびアンケート、アンケートのみの2つの方法で実施した。実施方法を表2に示す。

表2 調査対象

分類	材料	回答	方法 ^{*)}	
			ヒアリング	アンケート
ボード	繊維板、パーティクルボード	日本繊維板工業会	○	○
	せっこうボード	(社)石膏ボード工業会	◎	○
	木毛セメント板	全国木毛セメント板工業組合	○	○
	木片セメント板	日本木片セメント板協会	○	○
コンクリート製品	ALC	ALC協会	○	○
	粘土瓦	全国陶器瓦工業組合連合会	○	○
	金属屋根	(社)日本金属屋根協会	○	○
	住宅屋根用化粧スレート	K社	○	○
内外装材	窯業系サイディング	日本窯業外装材協会	○	○
	仕上げ材	日本建築仕上げ材工業会	○	○
	陶磁器質タイル	I社	○	○
	ビニル壁紙	壁装材料協会、日本ビニル工業会	○	○
	ビニル系床材	インテリアフロア工業会	○	○
	断熱材	押出発泡ポリスチレンフォーム	押出発泡ポリスチレン工業会	○
建具構成材	ロックウール	ロックウール工業会	○	○
	グラスウール	硝子繊維協会	○	○
	硬質ウレタンフォーム	ウレタンフォーム工業会	○	○
	シャッター	(社)日本シャッター・ドア協会	○	○
その他	普通板ガラス	板硝子協会	○	○
	フロートガラス	板硝子協会	○	○
	アルミサッシ	(社)日本サッシ協会	○	○
	ガスケット	建築ガスケット工業会	○	○
その他	衛生陶器(便器)	I社	○	○
	塩化ビニル管・継手	塩化ビニル管・継手協会	◎	○

^{*)}○は同方法を実施した材料、◎は予備調査を実施した材料

3. 調査結果

3.1 生産量

排出物および廃棄物の量の多少は、廃棄物の発生抑制を検討するためには重要な項目である。しかし、現状では特定建設資材廃棄物以外は分別があまりなされておらず、材料毎の排出物の量を把握するのは困難なことから、本調査では生産量を把握することとした。生産量と建築物の平均寿命から、排出量の推定が可能であるが、付着物が多いなど、分別困難な材料についての廃棄時の質量推定は今後の課題といえる。

生産量を表3に1970年から約10年間隔で示す。生産量を質量で表示困難な材料についてはその他の単位で表示した。結果は可能な限り質量単位に換算して示した年間生産量である。これらのうちの相当量が、建築物の解体後は建設混合廃棄物やその他の廃棄物として最終処分場で処分されていると推定される。

ここで、排出物が廃棄物として運搬、埋立等されるにあたっては、質量のみならず体積も重要な要因である。現時点では検討が不十分で個別の材料の廃棄物の体積推定は困難であるため、推定のための基礎資料の収集が今後必要といえる。

3.2 再資源化の現状

1) 製造時

製造時については、表4に示すように再資源化を80%以上実施している材料が半数以上あり、再資源化への対策が進んでいるといえる。ただし、製造時の排出物の再資源化には、廃棄物発生抑制のみならず製造効率の向上、製造コスト抑制の目的もある。

2) 新築時

現場等からの回収を一部実施するなど、回収ルートの整備も同時

新築時の排出物については、表5に示すように 再資源化率 に進めている例である。

の多い材料は大幅に減少する。80%以上再資源化が実施されているのは、繊維板・パーティクルボード、金属屋根のみである。繊維板・パーティクルボードは、燃料としての再利用がなされている。金属屋根は、金属製品であり溶融により再資源化が可能で、使用済み材料であっても市場価値があることから自然発生的に回収ルートが構築され、再資源化が実施されている材料である。排出物の50%を再資源化しているのは木毛セメント板、木片セメント板、塩化ビニル管・継手であるが、粉碎処理後、原料の一部として再資源化する方法がなされているとの回答であった。粉碎処理後、原料の一部として混入する再資源化方法は、コストの増加も少なく有効な方法であるが、再資源化材料の受入可能量に制限がある場合が多く、新たな用途開発が必要な場合もある。塩化ビニル管・継手は回収についても”一部実施”と回答している。30%以上50%未満の再資源化率である材料は、せっこうボードであるが、せっこうボードは大口の建築

表3 生産量

材料	生産量 (t)				出典*	備考
	1970年	1980年	1990年	2000年		
せっこうボード	1,385,234	2,295,570	4,710,322	4,477,000		いずれも推定試算値
粘土瓦	3,404,700	5,105,700	4,079,700	3,358,800	工業統計	2.7kg/枚で換算
窯業系サイディング ALC	—	—	1,179,315	1,734,334		14.6kg/m ² で換算
陶磁器質タイル	391,337	1,162,954	2,627,719	1,585,366	経済産業省調査	0.6kg/m ² で換算
	926,961	983,307	1,309,657	825,941	産貨統計年報	外装タイル、内装タイル、床タイル、モザイクタイルの合計
金属屋根	—	—	627,884	580,584		
塩化ビニル管・継手	295,000	391,000	489,000	503,000		
グラスウール	74,656	229,322	409,550	439,250		
ロックウール	—	—	410,915	342,730		繊維全生産量
仕上塗材	—	310,808	454,104	301,847		建築用仕上塗材(溶媒を含む)の合計
アルミサッシ	—	260,420	229,578	199,242		
ビニル壁紙	5,400	61,730	159,274	188,178		0.3kg/m ² で換算
ビニル系床材	—	—	—	180,000		
衛生陶器(便器)	—	—	—	150,576	経済産業省産貨統計月次連報	18kg/個で換算
押出発泡ポリスチレンフォーム	—	27,300	39,500	64,600		2000年のみ費用を追加
ガスカート	—	—	—	39,866		クレーンガスカート、気密ガスカートの合計
硬質ウレタンフォーム	—	4,989	19,262	34,722		

材料	生産量				出典*	備考
	1970年	1980年	1990年	2000年		
繊維板(硬質繊維板)	74,082千m ²	82,051千m ²	43,978千m ²	26,080千m ²	経済産業省建材統計年報	
繊維板(中質繊維板)	24,510千m ²	—	28,137千m ²	60,644千m ²		
繊維板(軟質繊維板)	22,899千m ²	34,732千m ²	51,844千m ²	48,071千m ²		
パーティクルボード	22,749千m ²	85,177千m ²	79,616千m ²	79,720千m ²		
木毛セメント板	22,597千枚	11,599千枚	8,897千枚	4,288千枚	経済産業省建材統計年報(1970年、1980年)	
木片セメント板	—	—	13,107千枚	10,033千枚		
住宅屋根用化粧スレート	—	—	—	—		データ無し
ロックウール(吹き付けロックウール)	—	—	29,884千m ²	21,296千m ²		
ロックウール(ロックウール吸音板)	—	17,435千m ²	27,974千m ²	19,337千m ²		
シャッター	4,216千m ²	8,104千m ²	8,136千m ²	10,033千m ²		重量シャッター、軽量シャッターの合計
普通板ガラス	25,246千箱	17,915千箱	6,048千箱	3,611千箱	経済産業省窯業	
フロートガラス	—	22,535千箱	30,989千箱	22,354千箱	建材統計年報	

*1 無記入の場合は回答者提供値、*2 1998年の値、*3 1999年の値

表4 製造時排出物の再資源化の現状

材料	排出物発生および再資源化の現状			再資源化の方法	
	排出物発生率(%) ^{*1}	再資源化率(%) ^{*2}			
	0	10	20		
繊維板、パーティクルボード	5	■	■	100	破砕し原料の一部として利用
せっこうボード	2.5	■	■	ほぼ全量	石膏部分：粉砕し原料として利用、紙部分：エネルギー源として利用
木毛セメント板	3~4	■	■	ほぼ全量	粉砕し原料の一部として利用
木片セメント板	3~4	■	■	ほぼ全量	粉砕し原料の一部として利用
ALC	約8	■	■	ほぼ全量	オートクレーン前水に溶かし原料の一部として利用、オートクレーン後：粉砕し増量材として利用
粘土瓦	3	■	■	ほぼ全量	粉砕し原料(粘土)の一部として再利用
金属屋根	0.1~0.2	■	■	ほぼ全量	同種の金属に再資源化
住宅屋根用化粧スレート	約14~15	■	■	不明	破砕し自製品骨材として利用(K社では95%を再利用)
窯業系サイディング	推定0.2~0.3	■	■	不明	粉砕し原料の一部として利用、加工工場から回収された端材も全量再利用
仕上塗材	—	■	■	—	—
陶磁器質タイル	20	■	■	ほぼ全量	粉砕し自製品原料の一部として利用
ビニル壁紙	3~4	■	■	1	自製品原料の一部として利用
ビニル系床材	10	■	■	ほぼ全量	粉砕し自製品原料の一部として混入
押出発泡ポリスチレンフォーム	25	■	■	100	ペレットとして再資源化、自製品へ利用
ロックウール	22	■	■	84	溶解し原料の一部として利用もしくは製造ライン上で製品に戻す
グラスウール	2.5	■	■	90	ガラス原料として還元、溶融窯へ投入
硬質ウレタンフォーム	8~15	■	■	10~15	ボード化、サーマルリサイクル、ケミカルリサイクル
シャッター	約3	■	■	—	端材はほとんどでない
普通板ガラス	15	■	■	ほぼ全量	原料の一部として利用
フロートガラス	15	■	■	ほぼ全量	原料の一部として利用
アルミサッシ	約5	■	■	ほぼ全量	溶融し、ビレット原料として利用
ガスカート	1~5	■	■	不明	塩化ビニル製については自製品原料の一部として利用
衛生陶器(便器)	10	■	■	100	粉砕し原料の一部として利用
塩化ビニル管・継手	0.1	■	■	不明(ほぼ全量と推定)	自製品原料の一部として利用

*1 排出物発生率は生産量に対する質量比、*2 再資源化率は排出物発生量に対する質量比

■：再資源化、□：不明、▨：廃棄処分等

表5 新築時排出物の再資源化の現状

材料	排出物発生および再資源化の現状		再資源化の方法	回収ルートの整備状況
	排出物発生率(%) ^{*1}	再資源化率(%) ^{*2}		
繊維板、パーティクルボード	5	90	破砕し、燃料として利用	検討中
せっこうボード	8	38	石膏部分:粉砕し原料の一部として利用、紙部分:エネキ-源として利用	一部実施
木毛セメント板	約4	約50	粉砕し原料の一部として利用	検討中
木片セメント板	約4	約50	粉砕し原料の一部として利用	検討中
ALC	約4	あまりなされていない	粉砕し増量材として利用	一部実施
粘土瓦	1~3	0		未検討
金属屋根	1~2	ほぼ全量	同種の金属に再資源化	ほぼ全量回収
住宅屋根用化粧スレート	5	不明	破砕し自製品骨材として利用(K社では約8%を利用)	一部実施
窯業系サイディング	15	0		検討中
仕上塗材	1~2	0		未検討
陶磁器質タイル	3~5	ほとんどなされていない		試行中
ビニル壁紙	10	0		整備中
ビニル系床材	5~7	ほとんどなされていない	粉砕し自製品原料の一部として混入	整備中
押出發泡ポリスチレンフォーム	0~5 ^{*3}	0	(化学量用については端材は発生しない)	未検討
ロックウール	不明	不明	原料の一部として利用	一部実施
グラスウール	7	0		検討中
硬質ウレタンフォーム	10~20	5~10	ボード化、サーマルリサイクル、ケミカルリサイクル	整備中
シャッター	0	-	端材はほとんどでない	-
普通板ガラス	10	不明(回収は90)		一部実施
フロートガラス	10	不明(回収は90)	普通板ガラス原料の一部として利用(技術的には可能)	一部実施
アルミサッシ	ほとんど発生しない	不明(ほぼ全量と推定)	熔融し、ピレット原料として利用	ほぼ全量回収
ガスケツト	0	-	端材は発生しない	-
衛生陶器(便器)	0	-	端材は発生しない	-
塩化ビニル管・継手	1.2	55(推定値)	自製品原料の一部として利用	一部実施

*1: 排出物発生率は生産量に対する質量比、*2: 再資源化率は排出物発生量に対する質量比

*3: ■:再資源化、□:不明、○:廃棄処分等

*4: 化学量用0%、住宅用5%未満、一般建築用5%未満

3) 解体時
解体時の排出物については、表6に示すように、再資源化はほとんどなされていない。80%以上再資源化を行っている」と回答したのは金属屋根とシャッターのみである。また、協会が再資源化の実態の把握が困難なことから回答は“不明”となっているが、アルミサ

ッシも再資源化が実施されている。これらはいずれも金属製品であり、新築時排出物同様、有価物として回収ルートが既に存在している材料である。また、解体材の受け入れ基準を提示するなどの対応を行っている塩化ビニル管・継手が40%超との回答であった。その他はいずれもほとんど再資源化がなされていない状況にある。

3.3 回収ルートの整備状況

回収ルートの整備状況について集計した結果を表5、6に示す。

新築時については、“試行中”、“一部実施”、“ほぼ全量回収”の回答が10件あったが、そのうち2件は金属製品であり、先述のように有価物としてすでに回収ルートが存在している例である。金属製品以外では、広域再生処理指定産業廃棄物処理者の資格を取得するなど、積極的に回収ルートの整備を行っている例がある。

解体時については、“一部実施”、“ほぼ全量回収”と回答した4件のうち3件は金属製品である。残りの1件は、塩化ビニル管・継手であるが、使用済み材料について受入基準を提示するなどの対策がすでになされている。“試行中”は化学量用の押出發泡ポリスチレンフォーム保温板であり、試行的回収がされはじめている。その他はいずれも未検討、検討中であり、回収ルート整備自体の困難さに加え、分別があまりなされていないこと、回収し

表6 解体時排出物の再資源化の現状

材料	再資源化の現状		再資源化の方法	回収ルートの整備状況
	再資源化率(%) ^{*1}	再資源化率(%) ^{*2}		
繊維板、パーティクルボード	ほとんどなされていない	1	燃料として利用	検討中
せっこうボード	1	1		検討中
木毛セメント板	不明(一部実施)	不明(一部実施)	粉砕し原料の一部として再利用	検討中
木片セメント板	不明(一部実施)	不明(一部実施)	粉砕し原料の一部として再利用	検討中
ALC	ほとんどなされていない	0		検討中
粘土瓦	0	0		未検討
金属屋根	ほぼ全量	ほぼ全量	同種の金属に再資源化	ほぼ全量回収
住宅屋根用化粧スレート	0	0		未検討
窯業系サイディング	0	0		未検討
仕上塗材	0	0		未検討
陶磁器質タイル	ほとんどなされていない	0		検討中
ビニル壁紙	0	0		未検討
ビニル系床材	ほとんどなされていない	0		検討中
押出發泡ポリスチレンフォーム	1未満	1未満	分別し再資源化(化学量用)	化学量用については試行中
ロックウール	不明	0		検討中
グラスウール	0	0		検討中
硬質ウレタンフォーム	0	0		検討中
シャッター	95~99	95~99	鋼製品へ再利用(鋼製以外の部品については廃棄)	一部実施
普通板ガラス	ほとんどなされていない	0		未検討
フロートガラス	ほとんどなされていない	0		未検討
アルミサッシ	不明(相当量と推定)	不明(相当量と推定)	熔融し、ピレット原料として利用	ほぼ全量
ガスケツト	不明(ほとんどなされていない)	0		未検討
衛生陶器(便器)	0	0		未検討
塩化ビニル管・継手	42(推定値)	42(推定値)	自製品原料の一部として利用	一部実施

*1: 再資源化率は解体時の排出物に対する質量比

*2: ■:再資源化

ても再資源化の目的がたっていないことから実質的な対応は遅れているといえる。

3.4 再資源化技術の整備状況

表7に再資源化技術の整備状況を示す。再資源化技術については、未検討の材料は少なく、“構想”~“実施”と、到達段階の差こそあるものの、何らかの検討や技術開発を行っている場合がほとんどである。ただし、再資源化技術のなかには、粉砕後に原料の一部に混入させることで再資源化とするなど排出物の受入

量に限界のある場合、再資源化した材料の需要が小さい場合等、同技術が廃棄物発生抑制に直結しない場合がある。また、再資源化技術を適用するための条件として、異物の混入や汚れを不可とする場合が多く、解体現場での分別の徹底に加え、新築時および解体時の排出物を再資源化するためには、異物混入の防止、分別回収の徹底、異物や汚れを除去するための施設整備等が必要な場合も生じる。ただし、本調査結果からは、これらの条件が製造上必要な条件、製品の品質保持上必要な条件のいずれであるかは判断できない。また、ビニル系床材やガasketのように異なる材料や異素材の同材料との判別の困難さが分別回収の障害となる例もみられた。

さらに、判明している場合のみ、備考欄に原料全体に対する受入可能量の目安を記した。製造時の原料として新築時以降の排出物を利用しようとする場合、異物混入等の条件を満たしても、これ以上の受入が困難な場合が多い。

3.5 まとめ

以上、調査結果を述べたが、団体、企業において回答の精度に多少の差がみられたものの、同種の製品へのマテリアルサイクルを中心とした再資源化の現状把握、問題点抽出の目的は十分に達成できた。なお、本結果は製造会社や地域他の条件により数値や状況に差異が生じる可能性がある。また、いずれも調査時点での数値、状況であり、今後変化する事が予想されるため、状況の変化に伴い追加調査が必要と考える。

4. 結

以上から、本調査の範囲においては、仕上げ材の再資源化お

よび回収ルート整備の現状は以下である。

- ①製造時発生 の排出物については、現状で再資源化が行われている場合が多い。
- ②新築時発生 の排出物については、回収ルートの整備が一部の材料で始まっており、再資源化も一部でなされている。
- ③解体時発生 の排出物については、回収ルートの整備は金属製品等一部を除きほとんどなされておらず、再資源化もほとんどなされていない。

また、金属製品以外、現状でほとんどなされていない解体時に発生する排出物の再資源化においては、現在の再資源化技術（開発中を含む）を適用するには分別回収の徹底を要することが明らかになった。分別解体は、本報告で対象とした材料については現在あまりなされておらず、分別回収の可能性は未知である。今後の具体的な検討がまたれる。同時に、再資源化技術の開発等、技術的課題のみならず、回収ルートの整備、需要の開拓等も重要な課題と考えられる。

以上、建築仕上げ材の、同種の製品へのマテリアルサイクルを中心とした再資源化に関して実施した調査のうち、再資源化率、回収ルートの整備状況、再資源化技術の整備状況について考察を行った。新築時、解体時に排出される排出物の再資源化が実現するためには、分別の徹底、回収ルートの整備、再資源化技術の整備、再資源化原料を用いた製品の需要確保などの要件が同時に満たされる必要があることに難しさがある。

本報告では再資源化率を現状の把握のために調査したが、再資源化が進んでいない材料については、排出量が少なれば廃棄物発生抑制の観点から大きな問題とならない場合もある。再資源

表7 再資源化技術の整備状況（1/2）

材料	再資源化技術の内容	適用条件	到達段階 ^{※1}	備考
繊維板、パーティクルボード	破砕し、原料の一部として利用	異物（プラスチック・石・土・砂・非鉄金属・釘）や化粧材の混入は不可	実験 実証（製造時）	原料の15%まで利用可
せっこうボード	廃せっこうボードを原料の50%としたせっこうボード	古紙の混入率1%以下、混入物不可	実証	
	石膏部分をせっこうボード原料として再利用	混入物は不可、濡れていないこと（ただし解体時塵材は現時点で本用途での利用はない）	実施	せっこうボード生産量の10%まで利用可（現状で受入量の全量を既に利用）
	石膏部分を地盤改良材（石灰系固化材の添加材）	木、プラスチック、紙クロス、岩綿吸音材、ペイント、石膏プラスターの混入不可、濡れていないこと	実験 実証	
木毛セメント板	石膏部分を地盤改良材（セメント系固化材の添加材）	金属、塩化ビニルクロスの混入不可	実験 実証	
	セメント原料	金属、塩化ビニルクロスの混入不可	実験	
	燃焼処理後、セメント原料として利用	金物の混入不可、紙類は粉体であれば可、塗料の混入量も問題になる可能性有り	実施（一部）	
木片セメント板	粉砕し、木毛部分を木毛セメント原料として利用	金物の混入不可、紙類は粉体であれば可、塗料の混入量も問題になる可能性有り	実施（一部）	原料の木材中10%まで利用可、現状は10%、これ以上の増加は困難
	粉砕後、セメント部分を硫酸処理し、セメント原料へ再利用	金物の混入不可、紙類は粉体であれば可、塗料の混入量も問題になる可能性有り	実施（一部）	
	燃焼処理後、セメント原料として利用	金物の混入不可、紙類は粉体であれば可、塗料の混入量も問題になる可能性有り	実施（一部）	
ALC	粉砕し、木片セメント板原料へ再利用	金属の混入不可	実施	
	土壌改良材		構想	
	セメント原料	受け入れ基準をセメントメーカーと協議中、付着物の量やばらつきが問題となる	実証	
粘土瓦	自製品原料	土砂その他の汚れ、異物混入不可	実施（新築時）	原料の10%まで利用可（現状で原料の8%の製造時発生塵材を利用）
	粉砕し、原料（粘土）の一部として利用			
金属屋根	路盤材	粘薬に鉛が含まれる場合もあるが、環境省の溶出基準内のため問題ではない	実験	
	同種の金属に利用	不明	実施	
住宅屋根用化粧スレート	電炉メーカーで原料として利用	不明	実施	
	破砕し自製品骨材として利用		実施	

^{※1}実施：同技術を利用して製造した製品を製品化し、販売している、実証：同技術を利用して製造した製品を製品化可能なことを確認している
 実験：同技術を開発・検討中である、検討：同技術の開発にむけた準備段階である、構想：技術開発の方向性のひとつとして同技術を構想中である

化推進においては、再資源化時のエネルギー消費量、二酸化炭素排出量等も含め、総合的な検証が求められる。本調査により仕上げ材の再資源化に関する現状と課題の把握がなされたが、今後、本調査で得られた資料等から、仕上げ材の再資源化の必要性、推進の優先度等のさらなる検討が必要である。また、本報告はマテリアルリサイクルが検討の中心となったが、熱回収や縮減なども廃棄物削減の有効な手段であるため、十分な検討が必要となる。これらは今後の課題とする。

謝辞 本調査にあたり、関係団体・企業の多大な御協力を賜りました。また、調査の実施にあたり、東京大学大学院修士課程・昇隆章氏、同卒論生(当時)・鈴木香奈子氏、廣瀬隆治氏、東京都立大学角田誠助教授、同修士課程(当時)・高橋正樹氏の御協力を賜りました。記して謝意を表します。また、本調査は(社)日本建築センターに設置した委員会、「木造資源循環総プロ再資源化分科会仕上げ材WG」(主査:明治大学 菊池雅史教授)において審議いただきました。委員各位に謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 国土交通省 平成12年度建設副産物実態調査結果
- 2) 国土交通省総合技術開発プロジェクト「建設分野におけるダイオキシン類汚染度状対策・廃棄物発生抑制技術の開発(建築分野)」及び独立行政法人建築研究所研究プロジェクト「木造建築物の再資源化・資源循環化技術の開発」平成13年度報告書、平成14年3月、国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所、財団法人日本建築センター
- 3) 昇隆章他、「木造戸建住宅に用いられる各種建材のリサイクルに関する研究 その1リサイクルの現状について」、日本建築学会大会学術講演梗概集E-1建築計画Ⅰ、pp.559-560、2002.8
- 4) 廣瀬隆治他、「木造戸建住宅に用いられる各種建材のリサイクルに関する研究 その2将来の可能性と現状の評価」、日本建築学会大会学術講演梗概集E-1建築計画Ⅰ、pp.561-562、2002.8
- 5) 高橋正樹他、「木造戸建住宅に用いられる各種建材のリサイクルに関する研究 その3解体材発生量に着目したリサイクルの可能性」、日本建築学会大会学術講演梗概集E-1建築計画Ⅰ、pp.563-564、2002.8

表7 再資源化技術の整備状況(2/2)

材料	再資源化技術の内容	適用条件	到達段階 ^{*)}	備考
窯業系サイディング	セメント原料へ利用	塗料、ホコリの混入は可、鉄の混入は不可	実証もしくは実施(製造時)	
	粉砕し、原料の一部として利用	泥、粘土、埃、金属粉、糖類、酸類等セメント硬化を阻害するものの混入は不可	実施(製造時、自社製品に限り新築時) 未検討	原料の10%(推定値)まで利用可
仕上げ材				
陶磁器質タイル	破砕し、路盤材として利用	接着剤、モルタルの付着はある程度可	実施(製造時)	
	製造時に発生する汚泥をセメント原料として利用 タイル原料として利用		実証	
ビニル壁紙	粉砕し、コンクリートパネル、インターロッキング原料の一部として利用	特になし	実証	タイル原料の35%まで利用可(現状で33%まで利用) 需要の確保が課題
	塩化ビニル部分から化学物質の抽出(フィードストックリサイクル)		実験	
ビニル系床材	粉砕しビニル系床材の裏打ち層へ混入	接着剤の混入は不可、下地コンクリートの混入は不可	実験(一部実施)	ビニル系床材の約30%まで利用可(現状では10%程度)
	塩化ビニル部分から化学物質の抽出(フィードストックリサイクル)			
押出発泡ポリスチレンフォーム	化学製フォームポリスチレンを原料として混入	ワラ・糸等の混入品は不可減容に用いる溶剤が許容以内のこと	実施	6000枚/月を受入可能
ロックウール	原料の一部として再溶融及び製品ラインに戻して利用	分別の実施が前提	実施	
グラスウール	硝子繊維原料等として利用(溶融し、カレットを製造する等)	釘、木材、ポリエチレンフィルム、タッカーの混入は不可、ほこり、カビ等は少量であれば可	実証	実現すれば3500t/年を受入可能
硬質ウレタンフォーム	硬質ウレタンフォーム断熱材をボード原料として混入	異物の混入不可、但し紙は可	実施	原料の50%を受入可能
	硬質ウレタンフォーム断熱材を原料へ混入	異物の混入不可	実施	原料の50%を受入可能
	硬質ウレタンフォーム断熱材を脱臭剤の分散材へ再生	異物の混入不可	実施	
	硬質ウレタンフォーム断熱材を屋根裏等への吹込み断熱材へ再生	異物の混入不可	実施	実現すれば硬質ウレタンフォーム断熱材の100%を受入可能
シャッター	鋼製品に再利用する	不明	実証	
普通板ガラス	型板ガラス原料の一部として利用	混合物はメーカー受け入れ基準内可	実施(製造時)	
普通板ガラス、フロートガラス	路盤材(アスファルト骨材)として利用	混入物可	構想	
	ガラス繊維原料として利用	混合物は基準内可	構想	
	ブロック・タイル・レンガ等原料として利用	混入物は基準内可	構想	(ブロック等自体の需要が少ない)
	ガラスびん原料として利用	混合物は基準内可	構想	(ガラスびん自体の需要が減少し、ガラスびんのリサイクルで受入量は既に満たされている)
アルミサッシ	溶融し、ビレット原料として利用	シール材、ねじ、モルタル等の混入は不可	実施	
ガスカート	合成ゴム系は熱加硫工程前のスクラップ、端材を原料の一部として利用	汚れの除去、劣化部分の除去、異なる色・硬さのガスカートは分別が必要	実施(製造時)	
	プラスチック系はスクラップ、端材を原料の一部として利用		実施(製造時)	
衛生陶器(便器)	粉末状に粉砕し、原料の一部として再利用		実施(製造時)	
塩化ビニル管・継手	排水用リサイクル硬質塩化ビニル管への再利用	汚れ、劣化及び退色が少ないもの	実施	
	下水道用リサイクル発泡三層硬質塩化ビニル管への再利用	汚れ、劣化もある程度可、退色は問題なし	実施	
	建物排水用リサイクル発泡三層硬質塩化ビニル管への再利用	汚れ、劣化が少ないもの、退色は問題なし	実施	
	その他再生管への再利用	汚れ、劣化もある程度可、退色は問題なし	実施	
	フィードストックリサイクル	マテリアルリサイクルが出来ないもの	実証	

*1: 実証: 同技術を利用して製造した製品を製品化し、販売している、実証: 同技術を利用して製造した製品を製品化可能なことを確認している

実験: 同技術を開発・検討中である、検討: 同技術の開発にむけた準備段階である、構想: 技術開発の方向性のひとつとして同技術を構想中である

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やっている。

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指定し、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にする。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・処理に関係する実在の世界（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身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、縮減された処理物はその工場に留め置いてマスマバ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いが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年間の実統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たず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とする(前述の最終処分扱いによる)。
- (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とする(前述の最終処分扱いによる)。
- (5) 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。

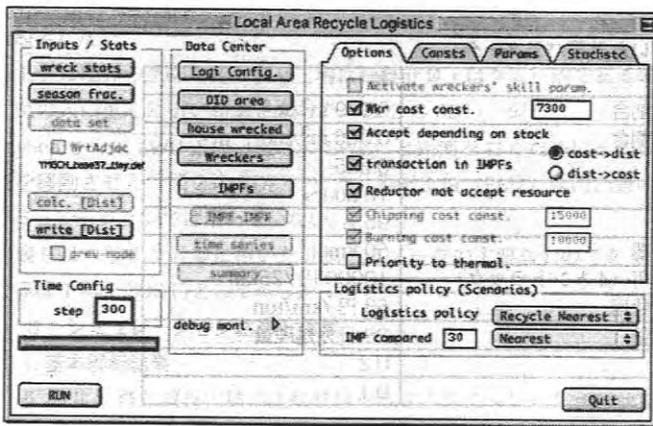


図1 シミュレーションプログラムメインインターフェイス

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IMPFS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。ここでは、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)						
IMPFS 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

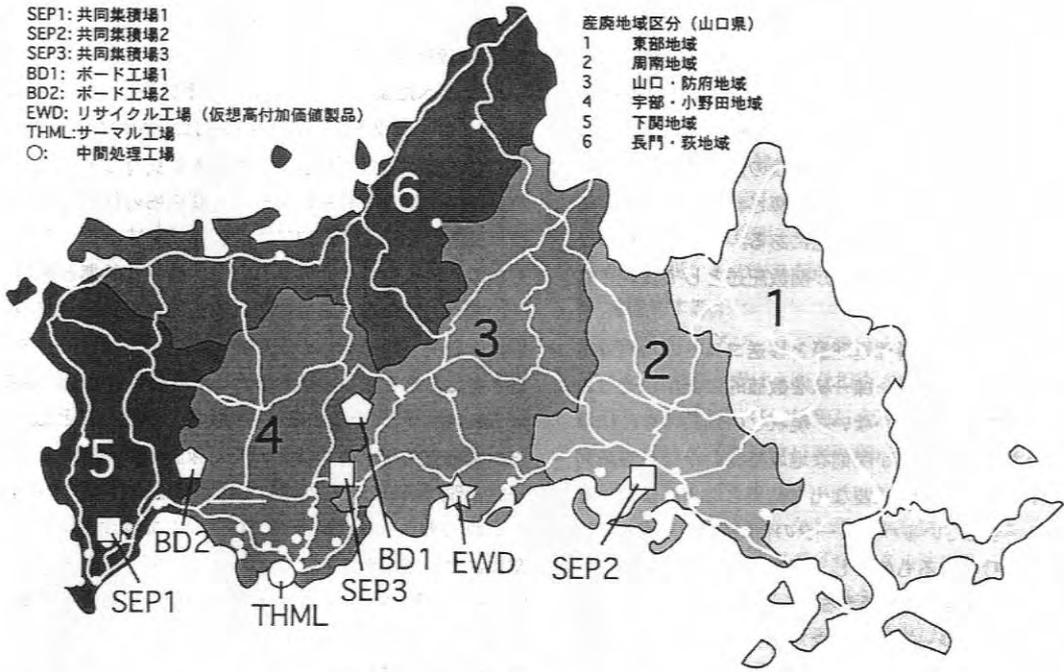


図2 山口県圏域概要

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

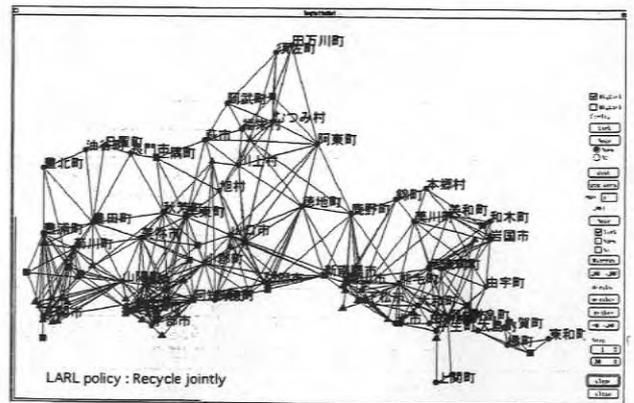


図3 シミュレーションプログラムでのネットワーク表示

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して判断した。

(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 Dxm: 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で、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^{9,10}、(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)

ひずみエネルギー密度関数を用いた 遮水シートの二軸引張変形挙動評価

狩野真吾¹・小田勝也²・近藤三樹郎³

本研究では廃棄物最終処分場に敷設される軟質PVC, HDPE, SMePEの各遮水シートを対象に、ひずみエネルギー密度関数(W関数)を用いた遮水シートの二軸引張変形時の応力-ひずみ曲線の推定精度を検討した。軟質PVC, HDPE, SMePEの各遮水シートについて、一軸拘束二軸引張試験結果からそれぞれのW関数を求め、均等二軸引張変形時の応力-ひずみ曲線を計算した。この計算値と二軸引張試験における実測値とを比較した結果、軟質PVCでは15~40%, HDPEでは3~4%, SMePEでは6~15%までのひずみ領域に対して、W関数は10%以内の誤差で実験値の応力を推定可能であることがわかった。ここで、敷設面不陸に追従した際の軟質PVCに発生するひずみは最大でも15%程度であるという既往の研究結果を考慮すると、たとえば軟質PVCの裏込不陸への追従性を検討する場合、W関数による推定手法は十分に適用可能であると考えられる。

キーワード：遮水シート，二軸引張試験，ひずみエネルギー密度関数，応力-ひずみ曲線

1. はじめに

廃棄物最終処分場に敷設される遮水シートの性能値を規定する場合、遮水シートに発生する応力状態を考慮し、それを再現できるような試験方法および解析手法によって検討がなされるべきである。これに対し、設計に用いられる遮水シートの性能値は一軸引張試験による結果が主となっている。海面処分場の場合、遮水シートは地盤の不等沈下、自重や上載荷重等の引き込み力による引張変形、敷設面不陸への追従、突起物の貫入等、二次元的な変形挙動を示す場合が少なくない。陸上処分場および海面処分場に敷設される遮水シートの力学的性質に関して、これまでさまざまな検討が行われてきた。その結果、突起物の貫入による遮水シートの変形破断挙動¹⁻³⁾、海面処分場に敷設された遮水シートの変形状態⁴⁾、地盤の不等沈下への変形追従性の評価手法^{5, 6)}等が明らかにされた。しかし、二軸応力下での遮水シートの性能値は設計に反映されていないのが現状である。その理由としては、二軸応力下での遮水シートの挙動を検証するための二軸引張試験が一軸引張試験に比べて手間がかかり、工学的には一軸引張試験がより汎用性の高い試験方法であること等が挙げられる。

一方、ゴム材料の力学を対象とした研究分野では、ゴム材料のひずみエネルギー密度関数(以下、W関数と記す。)の関数形が明らかにされ、ゴム材料の二軸引張変形時における応力ひずみ挙動のW関数による検討がなされている⁷⁾。これに対し、W関数による評価手法が遮水

シートの設計に用いられた例はない。遮水シートの力学的性質を正しく把握し、その結果が遮水シートの設計に反映されることは、管理型廃棄物最終処分場の信頼性設計法の構築に必要な不可欠な検討事項である。

そこで、本研究では、遮水シートの二軸引張変形時の挙動を明らかにするため、シート供試体を用いた二軸引張試験を実施した。その際、供試体の厚さの変化、および引張速度が変形挙動に及ぼす影響について考慮した。また、ゴム材料のW関数に関する上述の検討例を基礎にして、一軸拘束二軸引張試験結果を用いて遮水シートのW関数を求めた。さらに、二軸引張変形時の応力-ひずみ曲線について実験値とW関数を用いた計算値とを比較することにより、W関数による遮水シートの応力-ひずみ曲線の推定精度を検討した。

2. 二軸引張試験

(1) 二軸引張試験機

二軸引張試験は大阪府立産業技術総合研究所所有の二軸引張試験機を使用して行った。試験機の概略図を図-1に、装置の写真を写真-1に、主な仕様を表-1にそれぞれ示す。この試験機は水平軸、鉛直軸が個別にコンピュータ制御されており、鉛直軸を自動荷重-ひずみ制御で荷重拘束し、水平軸に荷重をかけて引張る一軸拘束二軸引張試験、および鉛直軸、水平軸に均等に同時に荷重を負荷する均等二軸引張試験を行うことが可能である。試料のつかみ部は試料の1辺あたり各4個のチャックで均

¹正会員，東北大学大学院環境科学研究科，研究員（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20）

²正会員，国土技術政策総合研究所 沿岸防災研究室，室長（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

³正会員，土木シート技術協会，理事（東ソー・ニッケミ株式会社（〒105-0014 東京都港区芝2-5-10））

表 - 1 二軸引張試験機の主な仕様

有効試験片寸法	最大200mm x 200mm
最大荷重容量	X軸, Y軸ともに49kN
最大測定変位	X軸, Y軸ともに400mm
引張速度範囲	0.1 ~ 500mm/min
試験温度範囲	-20 ~ 200

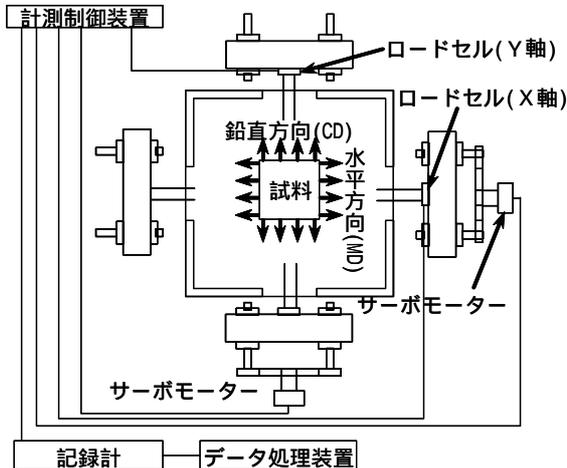


図 - 1 二軸引張試験機概念図



写真 - 1 二軸引張試験機 (大阪府立産業技術総合研究所所有)

等に把持し、試験時に各チャックが試験片の自由変形に応じて連動し移動することが可能である。

一軸拘束二軸引張試験および均等二軸引張試験の各試験方法と現実の遮水シートの変形挙動の対応については、以下のように考えられる。すなわち、法面平行方向はシート相互が溶着され変形が拘束されているのに対し、法面垂直方向はシートの自重や上載荷重による引き込み力によって引張変形が生じやすい。一軸拘束二軸引張試験はこのような片側を拘束された状態でのシートの変形挙動に対応する。また、突起物が貫入した場合、あるいは遮水シート敷設面に陥没等があり上載圧等の影響でシートが陥没内に向かって変形する場合等においては、遮水シートには局所的に等方的な引張応力、すなわち均等二軸応力が発生すると考えられる。

(2) 試験に使用した材料

二軸引張試験の供試体には、海面処分場への施工実績が多いポリ塩化ビニル系シート（軟質PVC：厚さ3.0 mm）、および陸上処分場で施工実績のあるポリエチレン系シート（HDPE：厚さ1.5 mm, SMePE：厚さ3.0 mm）の計3種類の材料を使用した。供試体の寸法と形状は一辺が15 cmの正方形とした。

(3) 試験方法

試験の手順はまず、15 cm x 15 cmの大きさに成形した供試体を二軸引張試験機の試料つかみ部に設置し、チャックで均等に把持した。その後、一軸拘束二軸引張試験を50 mm/minの一定速度で、また、均等二軸引張試験を

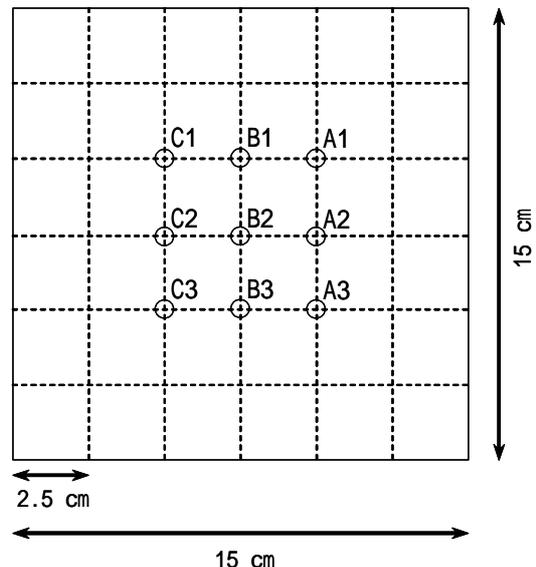


図 - 2 供試体の寸法および厚さの測定箇所

表 - 2 試験ケース

		軟質PVC	HDPE	SMePE
一軸拘束二軸引張試験				
均等二軸引張試験	引張速度 (mm/min)	5		
	50			
厚さ測定				

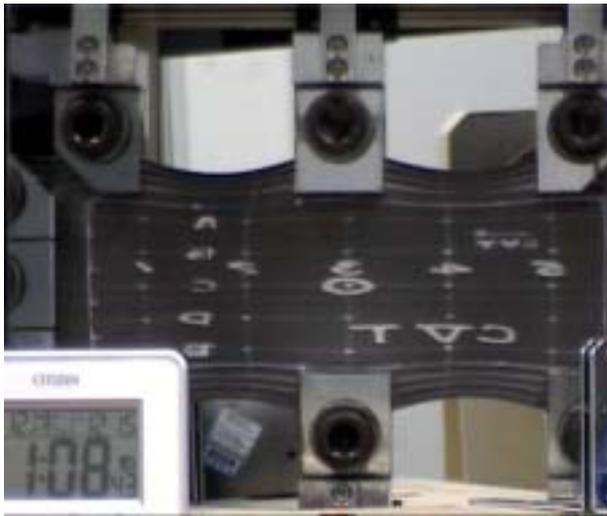


写真 - 2 一軸拘束二軸引張試験で変形する軟質PVC

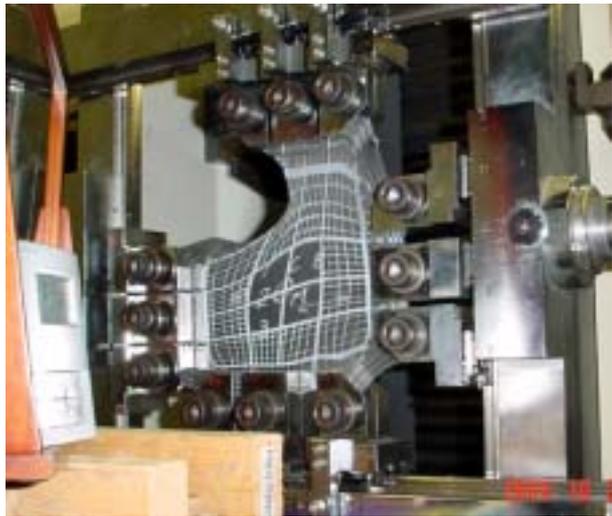


写真 - 3 一軸拘束二軸引張試験で破断する軟質PVC

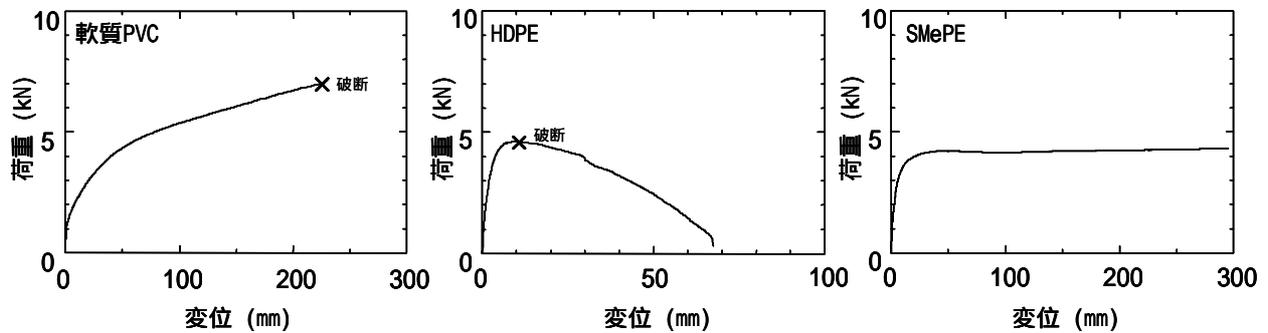


図 - 3 一軸拘束二軸引張変形時の荷重 - 変位曲線

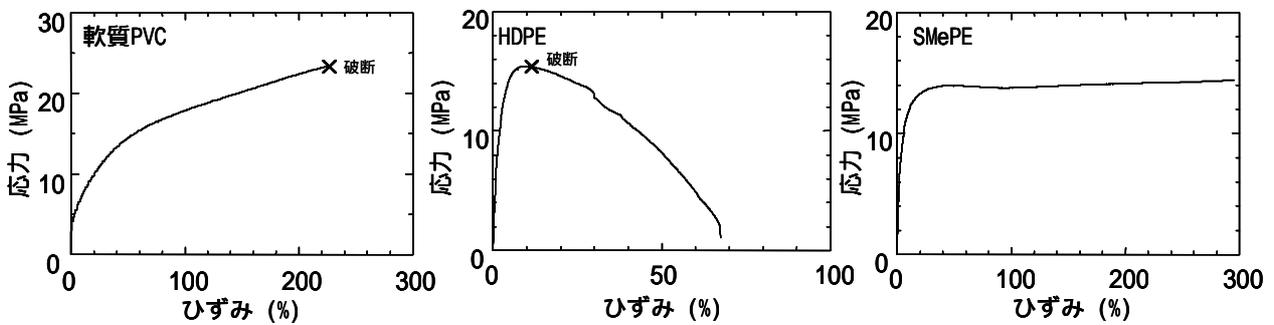


図 - 4 一軸拘束二軸引張変形時の応力 - ひずみ曲線

50 mm/minあるいは5 mm/minの一定速度で実施し、供試体が破断するまでの荷重と変位を計測した。その際、荷重はロードセルで測定し、変位はクロスヘッドの移動量（チャック間距離）を測定した。なお、試験室の温度は23℃に保ち、また、試験回数は1回とした。

(4) 厚さの測定方法

均等二軸引張変形中の供試体の厚さの変化を把握するため、試験中に数回、载荷を数分程度一時的に停止し、供試体の厚さを外側キャリパーゲージで測定した。供試体にはあらかじめ格子線を引いておき（図 - 2）、厚さの測定は中心部の9点（A1～A3, B1～B3, C1～C3）を対象

に行った。なお、あらかじめ別途の試験で供試体の破断伸びを測定しておき、その破断伸びを5等分した各段階で初期状態も含めて5回測定した。

(5) 試験ケース

試験ケースを表 - 2 に示す。

3. 試験結果

(1) 一軸拘束二軸引張時の変形および破断挙動

供試体の変形の様子を写真 - 2 に、破断の様子を写真

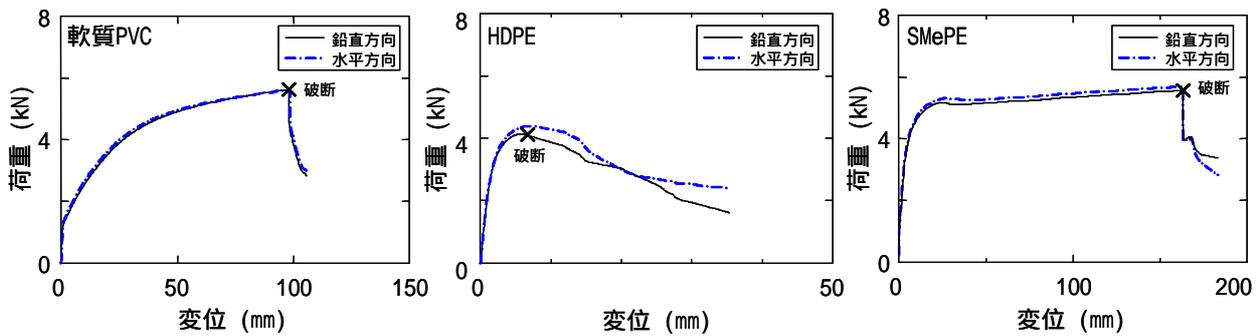


図 - 5 二軸引張変形時の荷重 - 変位曲線

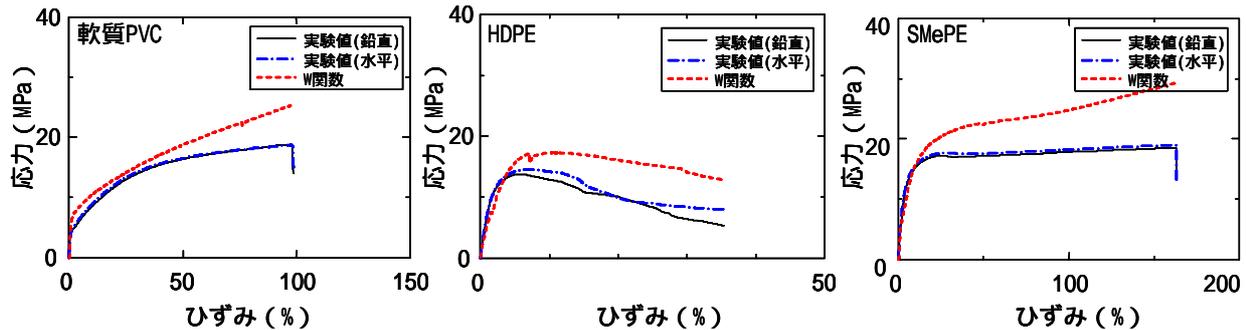


図 - 6 二軸引張変形時の応力 - ひずみ曲線に関する試験値とW関数による計算値との比較

- 3にそれぞれ示す。破断は、いずれの供試体のケースも供試体のつかみ部分（角部）が引き裂かれることにより発生した。これは、隣り合うチャック間において局所変形による応力集中が発生したためと考えられる。とくに角部は供試体が縦、横方向に引っ張られるため、他の部分より大きな応力集中が作用したと考えられる。このような破断は引張変形時の二軸応力が原因で発生したものであるのではないため、材料の二軸応力下における破断時性能を評価することはできなかった。

軟質PVC、HDPE、SMePE各供試体の荷重と変位の関係を図 - 3に、測定した荷重を断面積で除して得られた応力（MPa）と初期の試料幅に対するひずみとの関係を図 - 4にそれぞれ示す。図中の×印は破断点を示している。荷重 - 変位曲線および応力 - ひずみ曲線ともに、軟質PVCは変位（ひずみ）の増加とともに連続的に荷重（応力）が増加し、明確な降伏点は存在しなかった。一方、ポリエチレン系供試体であるHDPEとSMePEは変形初期に急激に荷重（応力）が増加した。HDPEは荷重（応力）の最大点で破断が発生した。一方、SMePEは変位が300 mmを越えた時点で試験を終了した。これら3種類の供試体の荷重（応力）増加傾向は一軸引張変形時に一般的に見られる挙動と類似するものである。なお、図中における最大点は供試体のつかみ部分における破断を示し、これは前述のように供試体の真の破断点とは異なる。なお、変形のごく初期に見られる曲線の急激な立ち上がり（たとえば軟質PVCにおいて約1 kNの荷重まで、もしくは約5 MPaの応力までを指す。）は試験機の測定上の誤差の影響を受けた結果であり、供試体の本来の変形挙動ではな

い。

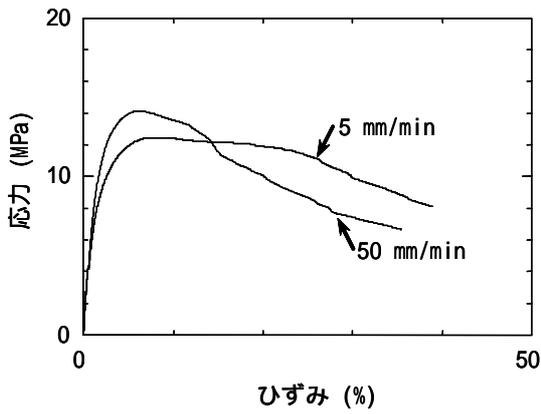
(2) 均等二軸引張時の変形および破断挙動

均等二軸引張試験における供試体の破断は、一軸拘束二軸引張試験の時と同様、供試体の角部から発生した。これもやはり、つかみ部分で発生した応力集中が原因と考えられる。

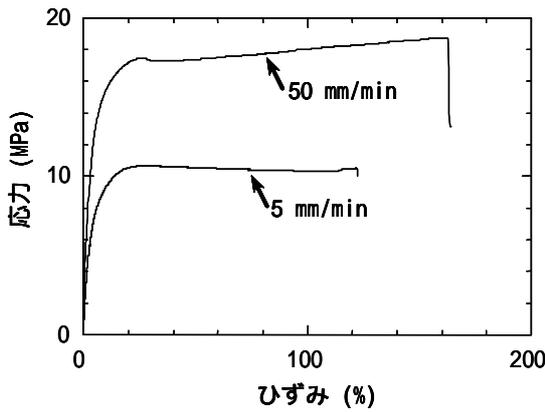
軟質PVC、HDPE、SMePE各供試体の荷重と変位の関係を図 - 5に、荷重を断面積で除して得られた応力（MPa）と所期の試料幅に対するひずみとの関係を図 - 6に示す。図中の実線は鉛直方向の挙動を、破線は水平方向の挙動をそれぞれ示している。また、図中の×印は破断点を示している。鉛直方向と水平方向の曲線の傾向はどの供試体も同じことから、供試体は両軸方向に均等に変形したことがわかる。軟質PVCは変位（ひずみ）に対して荷重（応力）が徐々に増加したのに対し、ポリエチレン系供試体であるHDPEとSMePEは変形初期に急激に荷重（応力）が増加した。この荷重増加傾向は、一軸引張変形時や一軸拘束二軸引張変形時の挙動と類似するものである。なお、変形のごく初期に見られる曲線の急激な立ち上がりは一軸拘束二軸引張試験結果と同様、試験機の測定上の誤差の影響を受けた結果である。

(3) 引張速度の違いが二軸変形挙動に及ぼす影響

2種類のポリエチレン系シートについて、引張速度を50 mm/minおよび5 mm/minでそれぞれ一定とした時の試験結果を図 - 7に示す。ただし、図中の曲線はどちらの引張速度についても鉛直、水平両軸の算術平均値を示して



(a) HDPE



(b) SMePE

図 - 7 異なる引張速度における二軸引張試験結果

いる。原点と5%ひずみ時のプロットを直線で結んだ5%割線弾性係数は、HDPEの50 mm/minでは14.0 MPa、5 mm/minでは11.9 MPaだった。一方SMePEの50 mm/minでは12.8 MPa、5 mm/minでは7.5 MPaだった。また、最大応力は、HDPEの50 mm/minでは14.2 MPa、5 mm/minでは12.4 MPaだった。一方SMePEの50 mm/minでは18.8 MPa、5 mm/minでは10.6 MPaだった。以上の結果から、一軸引張変形時において一般的に見られるように、二軸引張変形時にもまた、引張速度が大きい方が遮水シートは高弾性、高強度であると言える。

(4) 二軸引張変形時の厚さの変化について

軟質PVCについて、図 - 8 に厚さを測定したケースの応力 - ひずみ曲線を示す。厚さの測定は図中の矢印の点で行った。载荷を一時的に停止した影響による応力緩和が見られる。

厚さの測定結果を図 - 9 に示す。測定箇所ごとの厚さのばらつきは最大でも0.1 mm程度であり、供試体全体が均一に変形したことがわかる。9箇所の厚さの算術平均値は、変形が進行するにつれて、3.0 mm、2.2 mm、1.7 mm、1.3 mm、1.1 mmと減少した。

次に、鉛直、水平方向への伸び量と厚さから計算した供試体の体積を変形前の体積で規格化した結果を図 -

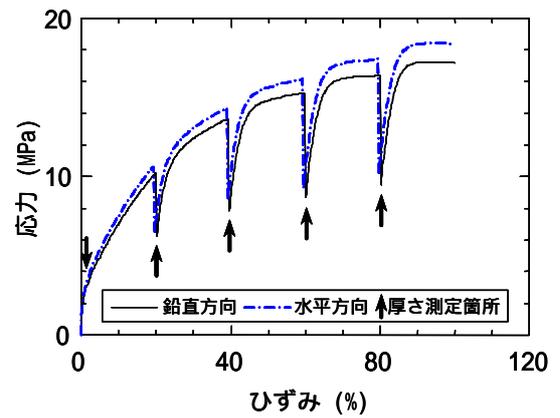


図 - 8 厚さ測定時の軟質PVCの応力 - ひずみ曲線

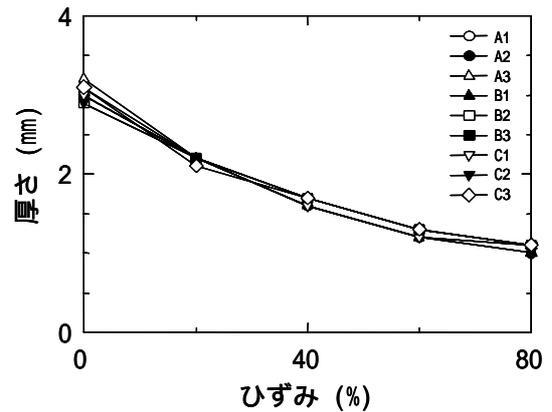


図 - 9 二軸引張時における軟質PVCの厚さ変化

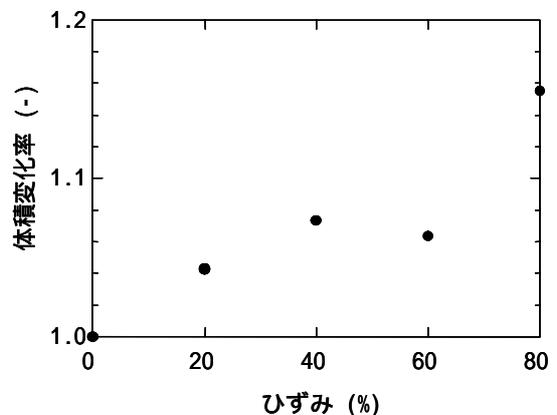


図 - 10 二軸引張時における軟質PVCの体積変化率

10に示す。その結果、供試体の体積は変形とともに徐々に増加し、80%ひずみでは変形前の約1.15倍になった。体積が増加した理由として、高分子鎖の切断に伴うマイクロボイドの発生、拡大の可能性が考えられるが、詳細については不明である。

4. W関数を用いた二軸引張変形時の応力 - ひずみ

曲線の推定

(1) W関数の求め方

W関数は数学的大変形理論として扱われ、主に弾性体を対象にして研究が進められてきた。一軸伸張を例にとると、試験片を伸張させるのに外力がなした単位体積当りの仕事は変形前の体積を基準にすると、

$$W(\lambda) = \int_1^{\lambda} \sigma d\lambda \quad (1)$$

与えられる。λは伸張比、Wは弾性体をひずませる仕事であるが、Wは同時に弾性体内にひずみエネルギーとして貯えられるエネルギーでもある。ここで、厳密には高分子化合物は非弾性の性質も持つため、変形時に外部からなした仕事はそのまま内部の弾性エネルギーの増加と等しくならない。ここでは仮に物体を弾性体とみなして外力と変形の関係からWを決定すると、応力とひずみの関係はこのWにより求まる。また、Wは物体が非弾性の性質を帯びる場合も外力 - ひずみの関係を推定するのに唯一の手がかりとなる関数である⁸⁾。

変形時に非圧縮性を仮定すると、二次元応力状態での応力、伸張比とひずみエネルギー密度関数の偏微分値との関係は以下のように表される⁸⁾。

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = \frac{1}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left[\frac{\lambda_1^3 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2^3 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial I_2} = \frac{1}{2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} \left[\frac{\lambda_1 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} - \frac{\lambda_2 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^{-2}} \right] \quad (3)$$

ここに、

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2} \quad (4)$$

$$I_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_1^2 \lambda_2^2 \quad (5)$$

均等二軸変形時は $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ なので、応力は次式のよう表される。

$$\sigma = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^5} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (6)$$

ここに、

$$I_1 = 2\lambda^2 + \lambda^{-4} \quad (7)$$

$$I_2 = \lambda^4 + 2\lambda^{-2} \quad (8)$$

また、一軸拘束二軸引張変形での応力は次のように表される⁸⁾。

$$\sigma_1 = \frac{2}{\lambda_1} \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_2 = 2 \left(1 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (10)$$

ここに、

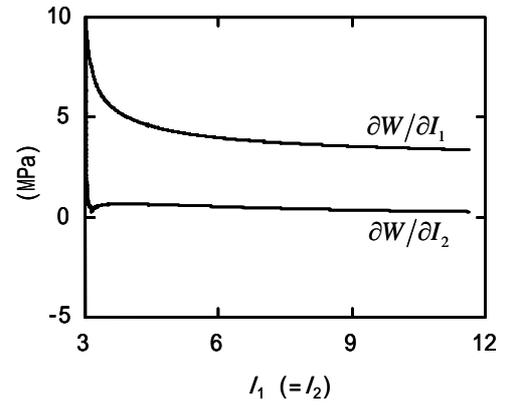


図 - 1 1 Wの偏微分値の計算結果

$$I_1 = I_2 = \lambda_1^2 + \frac{1}{\lambda_1^2} + 1 \quad (11)$$

一軸拘束二軸引張試験での実測値である $\sigma_1, \sigma_2, \lambda_1$ を式

(9)、式(10)に代入することにより、 I_i と $\partial W / \partial I_i$ の関係が求まる。この関係を利用して、均等二軸引張変形時の供試体の応力 - ひずみ曲線を推定することが可能となる。

(2) 一軸拘束二軸引張試験結果に基づくW関数の推定

Wの偏微分値 $\partial W / \partial I_1$ 、 $\partial W / \partial I_2$ を求めるため、式(9)、式(10)を次式のように変形した。

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = \frac{1}{2(\lambda_1^2 - 1)} \left[\frac{\lambda_1^3 \sigma_1}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2}} - \frac{\sigma_2}{1 - \lambda_1^{-2}} \right] \quad (12)$$

$$\frac{\partial W}{\partial I_2} = \frac{1}{2(1 - \lambda_1^2)} \left[\frac{\lambda_1 \sigma_1}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2}} - \frac{\sigma_2}{1 - \lambda_1^{-2}} \right] \quad (13)$$

軟質 PVC について、式(12)、式(13)の $\sigma_1, \sigma_2, \lambda_1$ に試験

値を代入することにより求められた $\partial W / \partial I_1$ 、 $\partial W / \partial I_2$ を、

I_1 に対してプロットしたものを図 - 1 1 に示す。

$\partial W / \partial I_1$ 、 $\partial W / \partial I_2$ はいずれも I_1 の、したがって伸張比 λ

の複雑な関数であることがわかる。すなわち、 $\partial W / \partial I_1$

は小変形領域では変形の増加に伴い最初は急激に低下するが、極小値をとった後は約 9 MPa 付近で極大値を取り、

その後は変形とともに徐々に減少した。一方、 $\partial W / \partial I_2$

は小変形領域において変形の増加に伴い最初急激に増加し、極大値を取った後は 0.2 ~ 0.7 MPa の間で変曲しながら徐々に減少した。

(3) W関数を用いた応力 - ひずみ曲線の推定精度

上述の方法で求められた $\partial W/\partial I_1$, $\partial W/\partial I_2$ を λ の試験値とともに式(2)に代入し、均等二軸引張変形時の応力を計算した結果を図-6に示す。図中の破線は計算値を、実線および一点鎖線は試験値をそれぞれ示す。なお、横軸は伸張比をひずみに変換して表示している。また、試験値の応力は測定値である荷重を断面積で除して計算し、ひずみは初期の供試体幅に対する伸び率を計算した結果である。

試験値と計算値とを比較した結果、どの供試体も低ひずみ側では両者の傾向はよく一致したが、高ひずみ側では大きなずれが生じた。その理由としては、二軸引張変形では伸張比の2乗の項が $\partial W/\partial I_2$ にかかるため、高ひずみ側では小さな誤差が無視できなくなった、あるいは、 W 関数は物質を弾性体と仮定しているが、高ひずみ側では供試体の非弾性的性質が無視できなくなった、等が考えられる。軟質PVCに比べ、ポリエチレン系シートの方がその傾向が顕著だった。

図-12は、 W 関数を用いて計算した応力値が試験値とどの程度一致するかを示した図である。縦軸は次式による計算結果である。

$$\sigma_{\text{ratio}} = 1 - \frac{|\sigma_m - \sigma_c|}{\sigma_m} \quad (14)$$

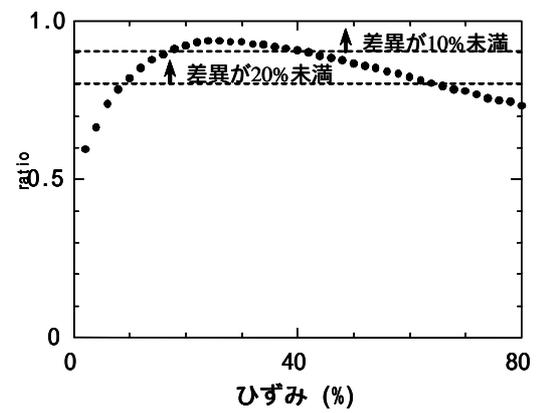
ここに、 σ_m は試験値、 σ_c は計算値である。

その結果、応力の試験値と計算値が80%以上一致する、すなわち、両者の差異が20%未満である変形領域は、軟質PVCでは約10%~60%、HDPEでは約2%~10%、SMePEでは約4%~30%の各ひずみ範囲だった。さらに、両者の差異が10%未満である変形領域は、軟質PVCでは約15%~40%、HDPEでは約3%~4%、SMePEでは約6%~15%の各ひずみ範囲だった。

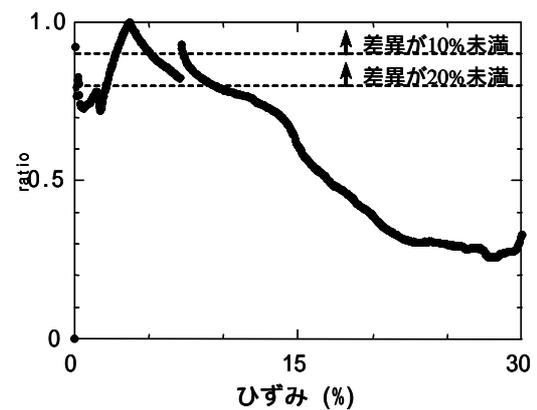
ここで、実際の廃棄物海面処分場において、遮水シートに局所的な二軸応力が発生すると考えられる敷設面不陸への追随時の挙動を土槽実験により検証した結果、静的な環境下で不陸に追随する軟質PVC製遮水シートに発生したひずみは最大でも15%程度であった⁹⁾。この結果を考慮すると、たとえば軟質PVCの裏込不陸への追随性を検討する場合、 W 関数を用いて計算した応力値は実際の値に対して90%以上の推定精度を有していることから、 W 関数による推定手法は十分に適用可能であると考えられる。ただし、本推定手法では遮水シートの変形の時間依存性や温度依存性は考慮されていないため、実際の推定においてはこれらの諸特性を十分に考慮することが望ましい。

5. まとめ

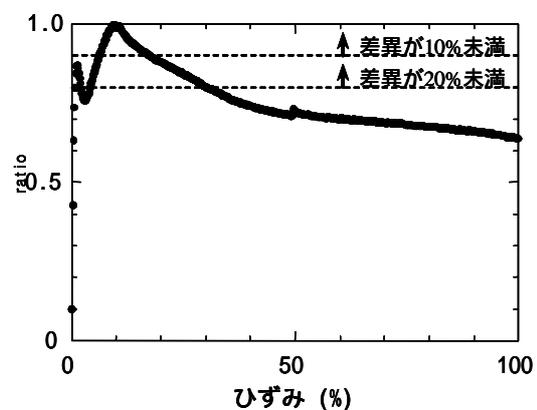
本研究では、管理型廃棄物最終処分場に敷設される遮水シートを対象とし、一軸拘束二軸引張試験ならびに均



(a) 軟質PVC



(b) HDPE



(c) SMePE

図-12 W 関数による二軸引張変形時の応力の推定精度

等二軸引張試験を行った。また、一軸拘束二軸引張試験によって遮水シートの W 関数の偏微分値を求めた。さらに、得られた W 関数形を用いて遮水シートの二軸引張変形時の応力ひずみ挙動の評価を試みた。以下に得られた結果を示す。

(1) 二軸引張試験により、一軸拘束二軸引張変形時および均等二軸引張変形時の軟質PVC、HDPE、SMePEの各応力ひずみ関係が明らかになった。

(2) HDPEおよびSMePEについて引張速度を変化させて均等二軸引張試験を行った結果、引張速度が大きい方が供試体は高弾性、高強度であることがわかった。また、軟質

PVCについて均等二軸引張変形中の厚さを測定した結果、変形中の供試体の体積は80%ひずみにおいて変形前の約1.15倍に増加することがわかった。

(3) W関数を用いて均等二軸引張変形中の遮水シートの応力-ひずみ曲線を計算した結果、どの供試体も低ひずみ側では試験値と計算値の傾向はよく一致したが、高ひずみ側では大きなずれが生じた。さらに、W関数による応力-ひずみ曲線の推定精度が明らかになった。

今後は、保護マットの二軸引張変形挙動、および遮水シートと保護マットを重ね合わせた時の二軸引張変形挙動について検討する予定である。また、突起物の貫入や引き込み力作用時の引張変形等、実際の現場を想定した遮水シートの変形挙動に対する本推定手法の適用性について、今後さらに検討を行っていく予定である。また、二軸引張試験は一軸引張試験に比べて複雑であり、計測時の誤差が供試体の性能に及ぼす影響が現時点では不明確なため、より詳細な議論をするためには同一種の供試体による再現性の検討を行う必要がある。なお、本研究の成果の一部は土木シート技術協会が大阪府産業技術総合研究所に委託した研究の結果を活用したものである。

参考文献

1) 宮地秀樹, 今泉繁良, 吉直卓也: 保護マットの組合せ順序と遮水シート貫入抵抗の関係について, 第13回廃棄物学会研

究発表会講演論文集, pp.942-944, 2002.

- 2) 狩野真吾, 諸星一信, 小田勝也: 廃棄物海面処分場遮水シートの突き破り抵抗に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.142, 154p, 2004.
- 3) 平原直征, 兵動正幸, 村田秀一, 中田幸男, 吉本憲正, 黒岩正夫, 下田宏治, 松村聡, 木俣陽一, 山本和彦: 砕石を模擬したコーンの貫入による遮水シートの損傷評価, 第40回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2579-2580, 2005.
- 4) 小竹望, 北出圭介, 鶴ヶ崎和博, 馬場慎太郎, 西野好夫, 徳淵克正: 管理型廃棄物海面処分場における遮水シートの発生ひずみ, ジオシンセティックス論文集, Vol.19, pp.81-86, 2004.
- 5) 最終処分場技術システム研究会: 廃棄物最終処分場技術システムハンドブック, 730p, 1999.
- 6) (社)全国都市清掃会議: 廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領, 485p, 2001.
- 7) 山下義裕, 川端季雄: 補強ゴムのひずみエネルギー密度関数の近似式, 日本ゴム協会誌, Vol.65, No.9, pp.517-528, 1992.
- 8) 深堀美英: 設計のための高分子の力学, 技報堂出版, pp.31-36, 2000.
- 9) 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明: 管理型廃棄物埋立護岸遮水シートの敷設面不陸に対する変形追従性, 海洋開発論文集, Vol.20, pp.809-814, 2004.

EVALUATION OF BIAXIAL TENSILE BEHAVIOR OF WATERPROOF SHEETS BASED ON THE STRAIN ENERGY DENSITY FUNCTION

Shingo KANO, Katsuya ODA and Mikio KONDO

In this study, we tried to examine the accuracy of estimation for stress-strain curve in biaxial extension condition which was calculated by strain energy density function of waterproof sheets laid on a seepage structure in a controlled waste disposal site. The partial differential value of the strain energy density function was determined by the pure shear test. After a comparison between calculated stress-strain curve and that from the biaxial extension test, calculated values were correspond with the testing data within 10% error for the range from 15 to 40% strain for PVC, 3 to 4% for HDPE and 6 to 15% for SMePE. The previous study says that the strain of waterproof sheet made of PVC laid on backfilling unevenness was at most 15%. Thus, we suggest that the application of strain energy density function for the evaluation of waterproof sheet deformation due to unevenness of backfilling slope in a controlled waste disposal site should be possible.

Keywords: Waterproof sheet, Biaxial tensile test, Strain energy density function, Stress - strain curve.

海面廃棄物最終処分場における遮水シートの変形・ 破損検知技術の開発

国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 沿岸防災研究室長

小田 勝也

はじめに

海面廃棄物最終処分場（港湾施設としての「廃棄物埋立護岸」）は、大都市圏を中心として廃棄物処理等に大きな役割を果たしている。管理型廃棄物埋立護岸には、常時・異常時を問わず、護岸内部の管理型廃棄物を安定的に保管し、護岸内部の廃棄物や保有水等を護岸外部に流出・浸出させない性能（遮水性能）が求められる。この性能は、廃棄物処分の段階から廃棄物最終処分場として廃止され土地利用が行われる段階を通じて長期にわたり要求される。陸上の廃棄物最終処分場では遮水シートを用いた遮水工の漏水検知技術が実用化されている。しかし、これらの技術は、海面処分場に対して適用が困難である。廃棄物海面処分の信頼性向上を図るためには、地震動等の外力作用時も考慮した遮水工健全性評価手法の開発が必要である。

研究の目的と概要

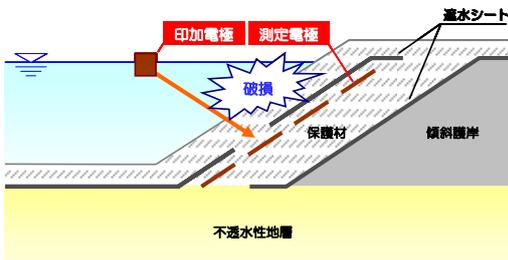
本研究は、管理型廃棄物埋立護岸遮水工に用いられる遮水シートの変形又は損傷を検知する技術を模型実験等により開発することを目的とする。

本研究は、平成16年度及び17年度に4企業グループと国総研との共同研究として実施した。開発した技術は、①印加電極からの電流測定による遮水シートの変形検知技術、②フレネル反射型光ファイバを用いた廃棄物処分場の漏水位置検知方法と遮水構造、③変光ファイバを利用した遮水シートの健全性モニタリングシステム、④電気検知方式を用いた袋状二重遮水シートの健全性評価方法、である。図-1に開発した技術のイメージを示す。

研究成果

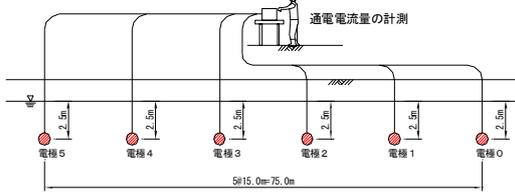
○それぞれの手法は、適用できる廃棄物埋立護岸のライフサイクルの段階、計測対象が異なっているが、施設に影響を及ぼす様々な要因に対応した遮水シートの変形・損傷が検知できる。

○破損検知技術はいずれも、損傷の大きさが 10mm 程度以下までの破損を計測することが可能で、計測方法によってはそれ以下の規模の損傷も検知可能である。損傷・変形位置の検知精度は、種々の条件によって異なるが、実験では 1m 程度以下の精度で検知が可能であった。

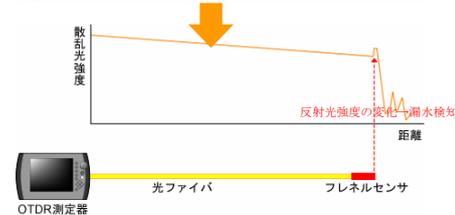
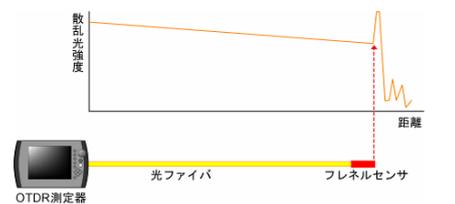


印加電極：電流を発生させる電極
測定電極：破損を検知する電極（遮水シート背後に複数個配置）

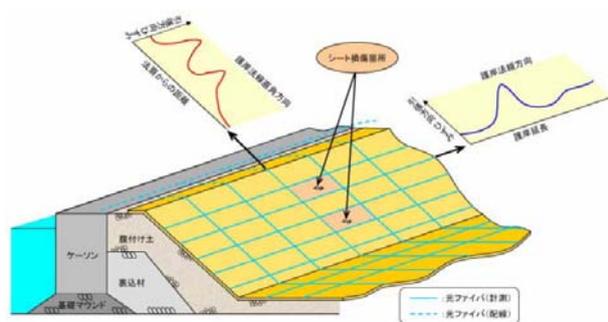
① 電気的検知による検知システムの概念



③ 電気的漏水検知システムの海域における大規模実験



② 光ファイバを用いたフレネルセンサの概念



④ 光ファイバを用いた検知システムの概念（遮水シート変形検知センサの配置イメージ）

図-1 遮水シート変形・破損検知技術の概要

おわりに

本研究の成果は、海面廃棄物最終処分の信頼性の向上、適切なリスク管理に活用され、それによって海面廃棄物最終処分場の計画的・安定的な確保、跡地利用の促進等のアウトカムが期待される。