

土石系循環資源の将来ビジョン

九州大学大学院工学研究院 環境社会部門 准教授 中山 裕文

1. はじめに

近年、循環型の持続可能な社会システム実現に向けた取り組みが多方面で求められている。土石系の廃棄物等は、産業廃棄物全体の発生量約 5.9 億 t の約 36% にあたる 2.1 億 t を占めており、量が大きく我が国の物質フローに大きな影響力を持っている¹⁾。

土石系廃棄物等の発生源としては、**図 1** に示すように、大別すると構造物等の既存ストックの解体に由来するものと、産業生産活動に伴い発生するものの 2 種類がある。建築物の解体や道路の修繕事業から発生するコンクリート塊、アスファルト塊等は、ストック解体由来の土石系廃棄物等であり、鉄鋼スラグや石炭灰等は、それぞれ鉄鋼業、石炭火力発電等の産業活動由来の土石系廃棄物等と区別できる。今後の土石系廃棄物発生量について考察すると、寿命を迎えた構造物の解体に伴い発生するコンクリート塊が増大する可能性があり、また、鉄鋼生産や石炭火力発電からも一定量の土石系廃棄物が発生し続けると考えられる。一方で、需要面では、路盤材、セメント原料などの土木建設分野での利用がほとんどであるが、建設投資の減少に伴い今後の需要減が危惧されている。環境省は、土石系資源の循環利用量の拡大及び最終処分量の削減に向けては、土木建築資材として、経済合理性が確保できる範囲での受入れ拡大等は考えられるものの、土木建築需要はすう勢的に減少傾向にあり、今後とも減少していく可能性もあることから、別途循環利用方策や最終処分量の削減方策の検討を視野に入れる必要があるとしている。

以上述べた土石系資源循環の状況を踏まえ、本稿では、今後 2030 年までの近未来をにらみ、土石系

廃棄物の発生および再生材としての需要のバランスを考察し、土石系廃棄物に関する現状把握と将来動向について論ずる。なお、本稿においては、土石系廃棄物および副産物の総称を土石系廃棄物等、土石系廃棄物等のうち循環利用されるものを土石系循環資源、土石系の天然および循環資源の総称を土石系資源と呼ぶことにする。

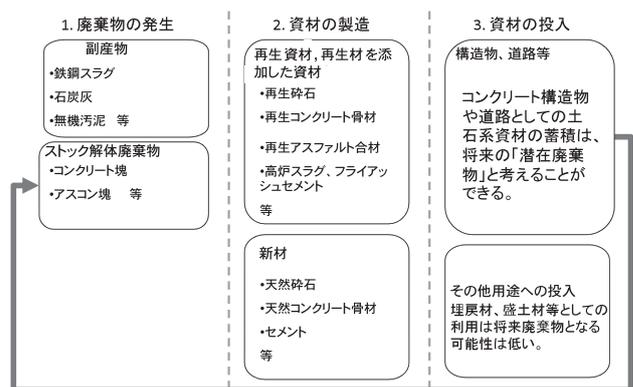


図 1 土石系廃棄物等の循環フロー

2. 土石系廃棄物等の発生と利用の状況

表 1 に、主要な土石系廃棄物等の発生量を示す。表に示す 6 種類すべての廃棄物についてデータが揃っているのは 2005 年であり、この年の各廃棄物の発生量をみると、コンクリート塊が 3,220 万トン、アスファルト・コンクリート塊が 2,610 万トン、鉄鋼スラグのうち、高炉スラグ 2,405 万トン、転炉スラグが 993 万トン、電炉スラグが 349 万トンとなっている。また、石炭灰は 1,115 万トン発生している。経年的な変化をみると、コンクリート塊は微減、アスファルト・コンクリート塊は大きく減少、鉄鋼スラグは増減を繰り返している。石炭灰は増加傾向にある。

次に、土石系廃棄物等の利用用途について、**図 2**

に示す物質フローをみると、最も大きな利用先は碎石であり、4,674万トンの土石系廃棄物等が碎石として有効利用されている。また、セメント・セメント製品への利用が次いで大きく、2,460万トンとなっている。

以降では、個別の土石系廃棄物等について詳しく考察してみる。

表1 主要な土石系廃棄物等の発生量^{2) 3) 4)}
(単位: 万トン)

年度	コンクリート塊	アス・コン塊	鉄鋼スラグ			石炭灰
			高炉スラグ	転炉スラグ	電炉スラグ	
1995	3,650	3,570	2,311	1,044	355	712
2000	3,530	3,010	2,307	1,064	347	843
2002	3,510	2,970	2,346	884	333	924
2005	3,220	2,610	2,405	993	349	1,115
2008	3,130	1,990	2,244	1,020	301	N/A

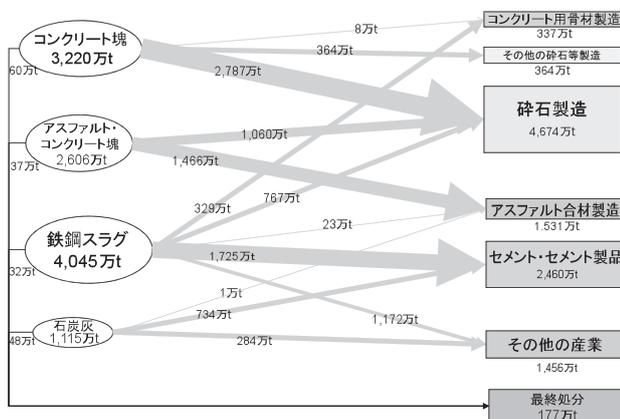


図2 2005年の土石系物質フロー

(参考文献^{2) 3) 4)}等を元に作成。一部に著者による推定値を含むため、表1と一致しない値がある。)

2.1 ストック解体に伴い発生する土石系廃棄物等 (1) コンクリート塊

コンクリート塊は、毎年3,000万トン以上発生している。主としてコンクリート構造物の解体により発生することから、コンクリート塊の発生量の推移を分析するためには今後の建築物の減失床面積(図3)に影響を及ぼす政策や計画に注目していく必要がある。図3に示すように、近年では減失床面積が減少する傾向にあるが、高度経済成長期に建設された構造物が今後寿命を迎え、構造物の解体が増加していくとする研究事例(例えば、橋本ら(2000)⁵⁾)は多くあり、今後とも注視していく必要がある。

コンクリート塊発生量が増加する要因として、老朽化した建築物等の解体推進策がある。例えば、老

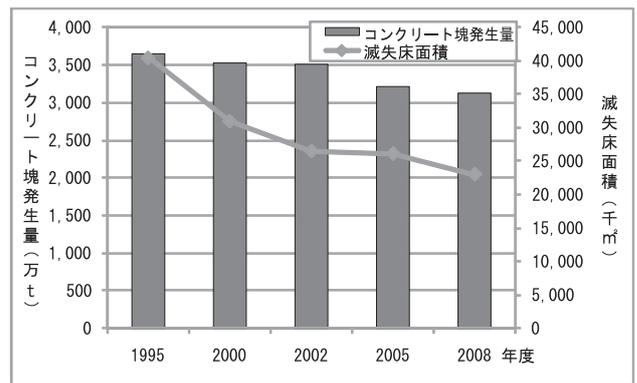


図3 コンクリート塊発生量と建物減失床面積^{2) 7)}



図4 建設後50年以上経過する社会資本の割合⁵⁾

朽化したマンションについては安全性確保のために建替の円滑化のための方策が検討されている。国土交通省によると平成18年のマンションストック数は505万戸で、このうち、築30年以上の老朽化マンションの件数は平成16年末で44万戸、10年後には140万戸を超えると見込まれている⁶⁾。しかしながら、建替が必要と判断された老朽化マンションであっても、コスト高が理由で建替が進まないため、建替円滑化のために補助金、融資、税制優遇措置等の活用が図られている。マンション等の建築物以外では、道路橋、河川管理施設、下水道、港湾岸壁などについて、高度経済成長時代に整備されたストックのうち高齢化したものの割合が急速に増加することが指摘されている(図4)。将来、高齢化したストックの割合が増加すると致命的な損傷が発生するリスクが飛躍的に高まる恐れがある。そのため、修繕、更新が行われていくものと見られる。

一方、コンクリート塊の発生量を減少させる動きとして、既存のコンクリート構造物のストックの有効活用策がある。既存住宅の性能表示制度や瑕疵(かし)保証制度の普及、不動産市況情報の提供、既存住宅の質を考慮した価格査定システムの導入等によ

る既存住宅流通市場の整備、住宅リフォーム市場の整備、住宅の長寿化等は、既存構造物の解体を抑制し、コンクリート塊の発生量を低減する効果がある。

なお、東日本大震災では多くの建物が倒壊し、多量の災害廃棄物が発生した。環境省が発表した被災県の種類別廃棄物発生量⁸⁾によると、岩手県における災害廃棄物発生量 435 万トンのうち、21% に相当する 90 万トンがコンクリート塊であった。宮城県においては、全体の 1223 万トンのうち、22% にあたる 274 万トンがコンクリート塊であったと報告されている。有効利用のため、従来の主用途である道路路盤材の他にも、盛土用材、港湾施設の建設用材、漁場施設（魚礁や増殖礁）等、各種の方策が実施あるいは検討段階にある。

(2) アスファルト・コンクリート塊

我が国の道路事業は、新設工事よりも修繕工事が多い。修繕時に舗装面を更新することによりアスファルト・コンクリート塊が発生する。図5に示すように、道路修繕により発生するアスファルト・コンクリート塊発生量と道路事業費には相関が見られる。近年では道路事業費は年々減少する傾向にあり、それにともないアスファルト・コンクリート塊の発生量も減少傾向にある。自治体は厳しい財政事情下において、将来の道路修繕等の維持管理費の縮減を検討している。そのために、適切な道路管理による道路構造物の延命化に注力し、将来にわたる道路劣化状況をあらかじめ予測し、その上で最適な修繕計画をたてるアセットマネジメントの手法が検討されている。これは修繕間隔を長くして大規模な打ち替え工事を行うよりも、小規模な表層修繕を比較的頻繁に実施する方が、ライフサイクルコストを考慮すると有利な場合が多いという考えに基づく。アスファルト・道路修繕の間隔や工法もそれに応じて変化している。

なお、大規模な打ち替えを実施した場合、路盤層を入れ替える必要があるため、この場合には、既設路盤材が建設発生土として大量に発生するが、表装修繕であれば、この問題を回避することができる。

さらに、利用者の視点に立った路上工事時間の縮

減にも重点が置かれており、共同溝の設置等による掘り返し工事の防止等の対策が検討されている。以上のことを考慮すると、今後道路工事から発生するアスファルト・コンクリートが増加するとは考えにくく、現状維持または減少するものと考えられる。

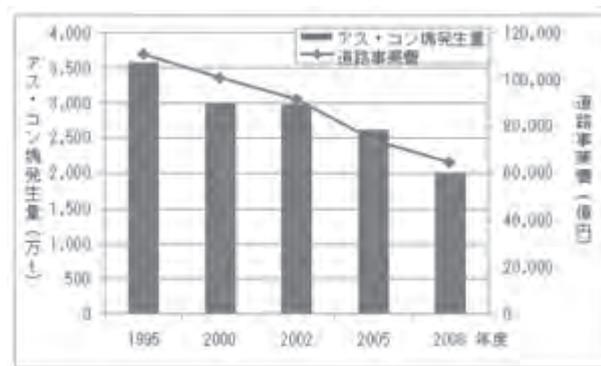


図5 アス・コン塊発生量と道路事業費^{2) 9)}

2.2 生産活動に付随し副産物として発生する土系廃棄物等

(1) 鉄鋼スラグ

鉄鋼スラグは、銑鉄の生産過程で生成される高炉スラグと粗鋼の生産過程で生成される製綱スラグの総称である。銑鉄は主に輸送用機械用、一般機械用の銑鉄鑄物の生産に利用される。そのため銑鉄の国内生産量はこれらの鑄物製造業の業績に左右され、さらに銑鉄生産に必要となるコークスの価格によっても影響を受ける。一方、粗鋼は自動車産業などへ利用される量が多いため生産量が自動車産業の生産計画に大きく左右される。海外向けの鉄鋼生産については、都市部において超高層建築や都市間高速鉄道の建設が続く中国等、アジアでの需要の高まりからアジア向け輸出用に鉄鋼が増産され、その後減産したが最近では回復してきている¹⁰⁾。銑鉄、粗鋼の生産に伴い発生する鉄鋼スラグの量は国内、国外の経済状況の変化によって決定されるため、近未来であっても正確に予測することは難しい。今後の鉄鋼スラグの生成量を分析するには、日本周辺各国の経済状況、国内の鋼材ユーザーの生産量をシナリオとして与え、分析することが必要である。

(2) 石炭灰

石炭は可採埋蔵量が 150 年以上あり、他の化石燃

料に比べて供給安定性が高く、経済性にも優れていることから、不可欠なエネルギー源として位置づけられている。電力供給においては、長時間継続運転を行い安定的に電気を供給するベース電源として重要な役割を果たしている。従って、石炭の更なる安定供給の確保を目指して、産炭国との関係を強化する必要があるとされている¹¹⁾。一方、石炭は他の化石燃料に比し、燃焼過程における単位熱量当たり二酸化炭素の排出量が大きいこと等、環境面での制約要因が多いため、環境への適合を図る観点からの技術開発が望まれている。

なお、東日本大震災による原子力発電所の事故の影響から、石炭火力発電の将来計画に変化が生じている。国が東日本大震災より前に策定したエネルギー基本計画¹²⁾によると、二酸化炭素排出量を削減するため、石炭火力の割合を2007年の25.4%から2030年には11.4%まで低減させる計画であったが、今後の原子力発電の動向が不透明となったため、石炭火力発電の重要度は相対的に高まっていくと考えられる。

2.3 土石系廃棄物等の有効利用先の一例：再生路盤用碎石の動向

道路は、コンクリート塊、アスファルト塊、鉄鋼スラグ等からの再生路盤用碎石、再生アスファルト合材の受け入れ先として、土石系廃棄物等の重要な有効利用先に位置付けられる。道路事業における土石系資源利用の推移をみるため、原ら(2003)¹³⁾の手法に基づき、路盤用碎石の利用量をマテリアルバランスによって算定した結果を図6に示す。路盤用碎石の利用量は年々減少していることがわかる。これは、道路事業の規模が縮小したこと、道路修繕工法が、路盤材をすべて交換する打ち替え工法から、表層部分のみを補修する切削オーバーレイや路上表層再生工法にシフトしたことが大きく影響していると考えられる。このような道路や構造物等の既存ストックの更新に際しては、全面的な更新を避け、小規模な補修を頻繁に行うことで寿命を延長し、廃棄物等の発生量を抑制する努力がなされている。しか

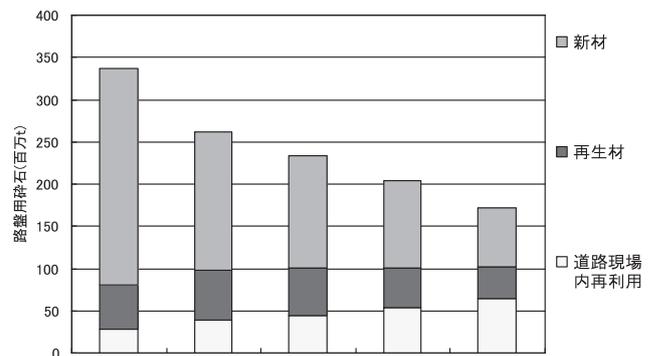


図6 路盤用碎石利用量の推定結果

し、それは同時に更新時に新たな資材が不要になることを意味しており、土石系循環資源の受け入れ可能量が減少することにつながる。また、道路打ち換えについても、セメント・フォームドスタビ工法等による既設路盤材の再利用の技術が進んでいる。この結果、既設舗装材及び既設路盤材の有効利用(再資源化)が可能となり、水平リサイクルが成立するため、新たに外部から調達する資材の量は減少すると考えられる。

これらの水平利用は、今後技術の発展とともに活性化することが予想され、廃棄物等の発生を抑制するために全面的な改修から補修による維持管理によって既存ストックの長期的な利用を行う維持補修へのシフトが進んでいる。建設業における水平利用が進展すれば、鉄鋼スラグ、石炭灰等の他産業からの土石系循環資源の受け入れが進まないことが懸念される。このような建設業以外から供給される土石系循環資源によって物質フローが供給過多になることを防ぐためには、土石系循環資源の再利用の状況を把握し、新たな利用先を創出していく必要があるといえる。

3. 近未来の土石系物質フローの推定

次に、近未来(2030年度)の土石系廃棄物の最終処分量の削減目標を設定し、あわせてCO₂排出量の削減を考慮した土石系廃棄物の有効利用方法およびフローについて検討した研究事例¹⁴⁾について紹介する。この分析では、土石系廃棄物のうち、建築物の解体や道路の修繕事業から発生する①コンクリート

塊と②アスファルト・コンクリート塊、鉄鋼製造工程において副産物として発生する③鉄鋼スラグ、電力業より発生する④石炭灰を対象とした。利用用途は、道路用砕石、コンクリート用骨材、その他の砕石、アスファルト合材、セメント（原料、混合材）とした。混和材としての利用については、現状のセメント代替率のままとするシナリオ1と、代替率を向上させるシナリオ2の2種類を設定した。また、発生した土石系廃棄物等のうち再利用されないものは最終処分されるものとした。CO₂排出量は図7の破線で囲まれる範囲を対象とした。

分析手法としては、まず土石系廃棄物等と土石系循環資源の物質フロー、および関連する産業間の金銭フローとCO₂排出量を一体的に把握するために土石系資源分析用産業連関表を作成した。作成した土石系資源分析用の産業連関表を用い、線形計画法を用いて、将来における土石系資源の物質フローについて検討した。

表2に対象とした土石系関連産業のCO₂排出量の内訳を示す。基準年とした2005年では、土石系関連産業のCO₂排出量は53.1百万t-CO₂であり、そのうち98.49%に相当する52.3百万t-CO₂がセメン

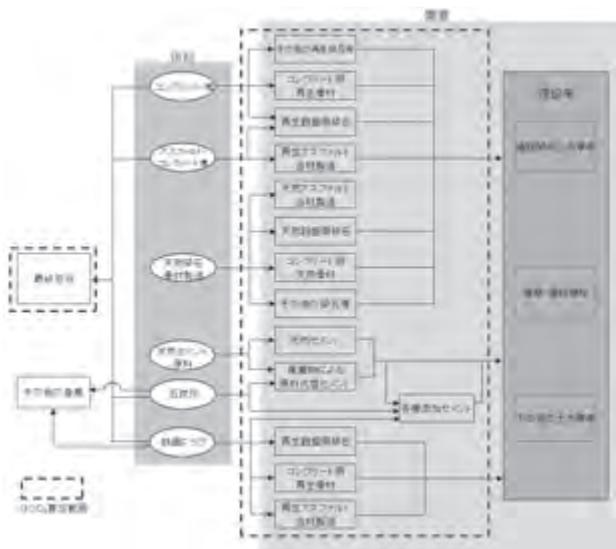


図7 土石系資源循環のフローおよびCO₂排出量の算定範囲

ト分野からの排出、1.46%に当たる0.78百万t-CO₂が砕石や骨材等の製造からの排出であり、最終処分からの排出は小さく0.04%に過ぎない。計算の結果、

表2 土石系資源循環に関わるCO₂排出量(単位:1000 t)

土石系関連産業		2005	2030 シナリオ1	2030 シナリオ2
砕石・骨材	天然路盤用砕石	112 (0.21)	57 (0.11)	65 (0.15)
	再生路盤用砕石	64 (0.14)	99 (0.22)	89 (0.22)
	天然コンクリート骨材	141 (0.27)	105 (0.21)	105 (0.25)
	再生コンクリート骨材	5 (0.02)	65 (0.17)	65 (0.20)
	天然アスファルト合材	60 (0.11)	60 (0.12)	60 (0.14)
	再生アスファルト合材	360 (0.69)	284 (1.13)	284 (1.34)
	その他の砕石等	30 (0.06)	25 (0.05)	25 (0.06)
	その他の再生砕石等	4 (0.01)	5 (0.01)	5 (0.01)
小計	777 (1.46)	702 (1.39)	700 (1.66)	
セメント	セメント	50,355 (94.83)	47,818 (94.97)	39,722 (94.01)
	生コン・セメント製品	1,943 (3.66)	1,824 (3.62)	1,824 (4.32)
	小計	52,299 (98.49)	49,642 (98.59)	41,547 (98.33)
埋立処分		23 (0.04)	8 (0.02)	8 (0.02)
合計		53,099 (100.00)	50,352 (100.00)	42,254 (100.00)

2030年の土石系関連産業のCO₂排出量は50.4百万t-CO₂へと5.2%の減少(シナリオ1)、42.3百万t-CO₂へと20.4%の減少(シナリオ2)という結果が得られた。土石系関連産業のCO₂排出量のほとんどがセメント産業からの排出である。シナリオによる結果の差はセメント混和剤としてのスラグの利用量の設定条件の違いによる。一方、砕石・骨材系の製造からの排出量の内訳をみると、路盤用砕石およびコンクリート骨材においては、新材製造からのCO₂排出量が減少し、再生材製造では逆に増加した。

図8に2005年、2030年(シナリオ1)、2030年(シナリオ2)の土石系の物質フローを示す。シナリオ1において、2005年ではコンクリート塊発生量が3,220万tであり、そのうち2,878万t(87%)が再生路盤用砕石に利用されている。2030年にはコンクリート塊の発生量が5,478万tへと増加し、再生路盤用砕石への利用4,508万tに加え、再生コンクリート骨材への利用が520万tへと拡大するという結果となった。鉄鋼スラグの発生量は、2005年の4,045万tから2030年には6,523万tへと増加すると仮定した場合、コンクリート骨材への投入量が337万tから1,986万tへと増加し、アスファルト合材への投入も23万tから1230万tへと増加する。一方、セメントへの投入は1725万tから1621万tへと減少しているが、これは建設業の縮小に伴うセメント需要の減少によるものである。石炭灰については、2005年から2030年において発生量に変化しないと設定しているため、フローにおいても大きく変化しなかった。一方、シナリオ2では、鉄鋼スラグのセメントへの利用が増大し、2005年の1,725万tから2030年には2,378万tへと変化している。その分、

砕石へと流れていた量が減少するという結果が得られた。

最後に、2030年における建設業の最終需要を変化させた場合の土石系資材の利用量の推移について分析した(図9)。2030年の建設業の最終需要が2005年比で15%以上減少した場合には解が得られず、この結果は建設業の最終需要が減少しすぎると、土石系資源循環システムの需給バランスを保つことができず、土石系廃棄物が供給過多となることを示している。

4. 環境修復事業における土石系循環資源利用に関する検討

土石系循環資源の新たな利用先の一つとして、近年、陥没の恐れのある特殊地下壕や廃坑の埋め戻しへの利用検討がはじまっている。廃坑は時間の経過とともに各所で陥没し、地上の構造物に被害を及ぼしており、埋戻しを行うことで被害を防ぐことができる。

例えば、岐阜県御岳町には垂炭廃坑の面積が約800万㎡あるといわれ、市街地の大部分に及んでいる。放置された垂炭坑道が陥没事故を引き起こし、公共施設や農地、住宅地に被害を及ぼすことから、今では負の遺産とみなされることもある。

「垂炭鉱廃坑の危険度に関する調査研究会」(座長：早稲田大学濱田政則教授)の調査¹⁵⁾によると、市街地を50mメッシュに分割したとき、過去に浅所陥没が多数発生している深さ15m以浅の空洞が存在するメッシュの総面積は市街地面積約520万㎡のうち約40%を占めるとされている。崩落の危険性が高い地域に居住する住民や世帯の全てが炭鉱崩落により人命や建物あるいは所有する土地に被害を受けると考えると、町全体で約2,600世帯の住民が何らかの被害を直接受けると想定されている。これらの全てを埋め戻すことは費用対効果を考えると現実的ではないが、重要施設のうち、危険度が高い状況にある廃坑の上に建つ重要施設を抽出して充填工法によって対策を行う事業を実施することで陥没を防止できると考えられる。廃坑の埋戻しに土石系循環資源を利

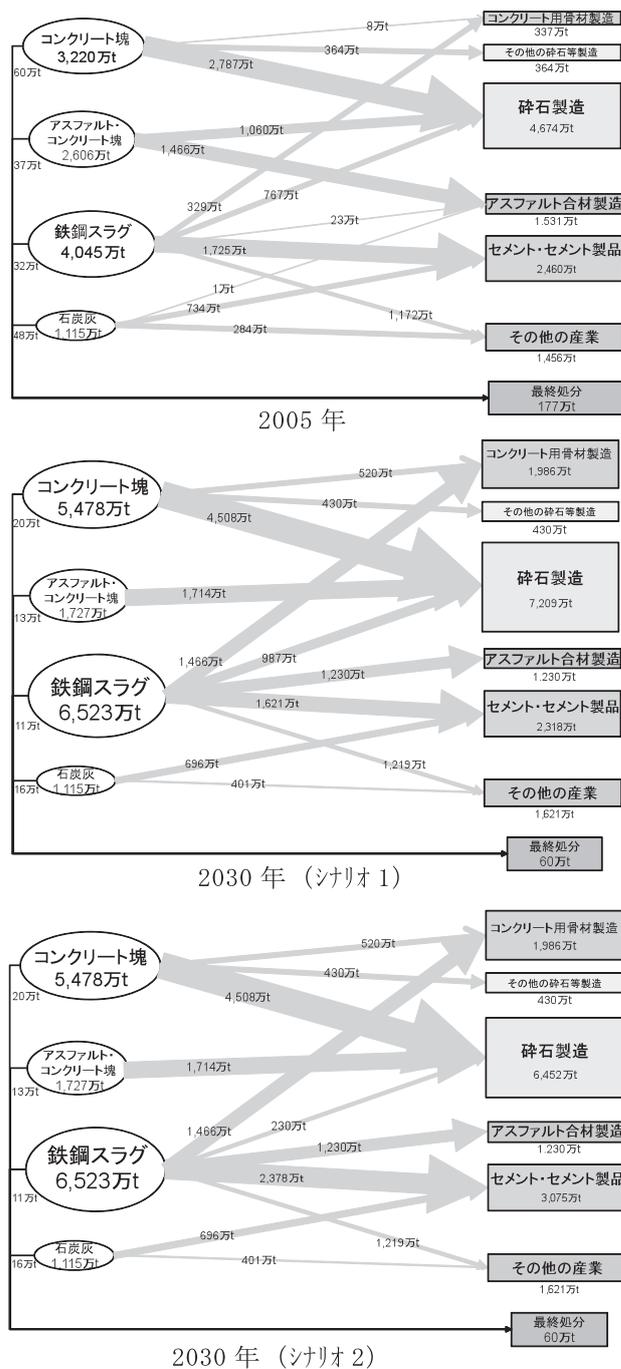


図8 土石系物質フローの推定結果

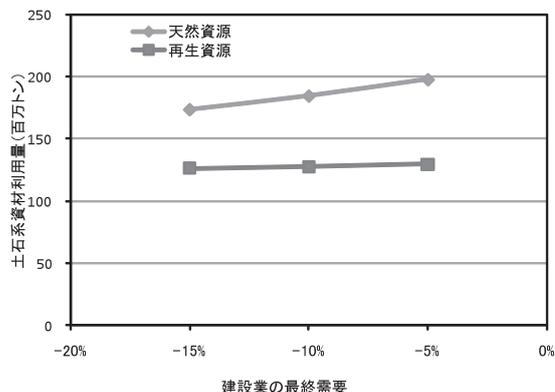


図9 土石系資源の利用量と建設業の最終需要の関係

用した場合、事業費の削減と、陥没の未然防止による社会的な便益の面で大きな効果が得られると考えられる。

土石系循環資源の需要拡大のためのシステム設計においては、上記のような環境汚染や災害などの外部費用を発生させるリスクを有する「負の遺産」のリスク低減を図るための環境修復が重要となり、これらの事業形態をどのように成立させていくかが問題となる。

5. おわりに：土石系資源循環システムのビジョン

土石系資源の利用先である建設業を見ると、社会資本の整備が進んだ現在、わが国では、新規の建設需要が減少し、既存ストックの補修や更新を主とした維持管理の時代に入っている。既存の構造物ストックの補修、更新に伴い、土石系廃棄物等が発生し、それが循環資源として有効利用されるシステムである。

ここで、近年では、道路や構造物等の既存ストックの全面的な更新を避け、小規模な補修を頻繁に行うことで土石系廃棄物等の発生量を抑制しようとする努力がなされている。しかしながら、それは同時に更新のために必要な資材が不要になることを意味しており、土石系循環資源の受け入れ可能量を減少させる面を併せ持つ。さらに、打ち換えを必要としない道路修繕工法や、コンクリート骨材の回収技術の普及により、水平リサイクルが進展すれば、これらの利用先での土石系循環資源の受け入れ量はさら



写真2 道路陥没の他、家6軒が傾いた被害の様子¹⁶⁾

に減少するものと考えられる。また、近年の建設投資の減少もこの状況に一層拍車をかけている。一方で、土石系循環資源は、建設業に起因するものだけでなく、鉄鋼スラグや石炭灰等のように、他産業からも大量に流入してくる。このため、土石系循環資源のマスマランスは供給過剰になりやすい性質を持つが、そのバランスを取る役割を果たしているのが、土地造成のように補修や更新の必要がなく、利用された土石系循環資源が将来における廃棄物（潜在廃棄物）として蓄積しない利用先である。ただし、人口減少がはじまり、経済も成長から維持の時代へと移行した現在、住宅や工業用地等の土地需要にも限界があると考えられる。

今後の土石系循環資源の需給バランスを安定させる鍵を握るのは、これまでなされていなかった新規の需要先の開拓であると考えられる。特に循環資源として副産物を自然に戻し、さらに負の遺産を解消し、負の価値を0にするという「自然還元」の考えが重要と考えられる。現在、亜炭廃坑、特殊地下壕の埋め戻しや、浚渫深堀跡の埋め戻し、人工干潟の造成等の海洋環境の修復事業といった利用先の検討が始まっている。これらの事業は、いずれも社会的便益を生み出すものであるが、現状では投資費用を回収することが困難であるため、低コストのリサイクル技術の開発だけでなく、円滑に事業をすすめる

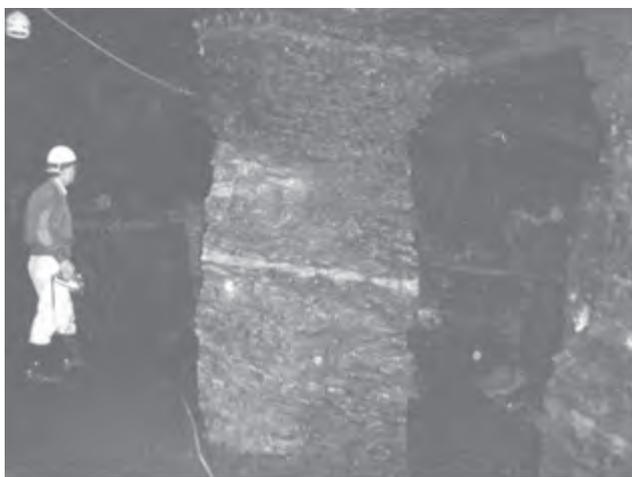


写真1 亜炭廃坑内の様子（著者撮影）

ための制度やシステムづくりが必要である。再生利用認定制度や経済特区等のさらなる活用のための基準作りとともに、資金調達システムの確立が必要である。

引用文献

- 1) 環境省:平成 22年度版 環境・循環型社会・生物多様性白書, 2010年
- 2) 国土交通省:平成 20年度建設副産物実態調査結果参考資料, 2010年 3月
- 3) 鉄鋼スラグ協会:鉄鋼スラグ統計年報(平成 21年度実績), 2010年 7月 54-56. 94 pp. 日本蟻類研究会, 東京
- 4) 財団法人石炭エネルギーセンター:石炭灰全国実態調査報告書(平成 19年度実績)
- 5) 橋本 征二;寺島 泰(2000) 建築物解体廃棄物の発生予測, 廃棄物学会論文誌, 11(5) 271-279
- 6) 国土交通省:国土交通白書
- 7) 財団法人建設物価調査会:建築統計年報平成 21年度版
- 8) 環境省:被災3県における災害廃棄物の種類別発生量, http://www.env.go.jp/jishin/waste/ministerial_conf/conf001/mat02-2.pdf
- 9) 全国道路利用者会議:道路統計年報(平成 20年度), 2010年
- 10) 一般社団法人日本鉄鋼連盟:鉄鋼需給の動き, 2011年
- 11) 財団法人石炭エネルギーセンター:石炭政策に係る要望, 2009年
- 12) 経済産業省資源エネルギー庁:2030年に向けたエネルギー政策～新たな「エネルギー基本計画」の策定について～, 2010年 7月
- 13) 原卓也, 吉田好邦, 松橋隆治:建設廃棄物に着目した道路のマテリアルバランス, 土木学会論文集 No.734/VII 27,pp85～ 97,2003
- 14) 坂本光二, 中山裕文, 島岡隆行, 長谷川良二, 大迫政浩:循環型・低炭素型社会に向けた土石系資源循環フロー制御に関する研究, 土木学会論文集 G, Vol.67, No.6, pp. 235-242, 2011年 10月
- 15) 亜炭鉱廃坑の危険度に関する調査研究会(座長:早稲田大学濱田政則教授) 資料



アリアケガニ

【県別絶滅危惧Ⅰ～Ⅱ類

(福岡・佐賀・長崎・熊本)】

足先が赤いのが一番の特徴。捕まえると固まって死んだフリをする。