

わが国における骨材生産の推移と
今後の展望*大塚 尚寛¹

Trend and Future Prospect of Aggregate Production in Japan

by Naohiro OTSUKA^a

a. Professor Emeritus Iwate University (Corresponding author, E-mail: otsuka@iwate-u.ac.jp)

Aggregate is important as a basic material that supports Japan's industrial economy, along with steel, cement, wood, and non-ferrous metals as construction materials for civil engineering and construction. After the Great East Japan Earthquake, the importance of aggregate as a basic material was reaffirmed, and the demand for aggregate is currently in a slight increase or leveling off, and the annual production has been around 380 million tons. In this review, overviewing the transition of aggregate production in Japan from the viewpoint of aggregate resources, the current issues and future prospects are explained. It mentions the shift to mining method in harmony with the environment to enable "sustainable development" on the premise of coexistence with the region, which is an important issue in the mining and production of aggregate. Then, it will be described that trends such as the construction of smart mining system that utilize ICT, IoT, AI, etc. with the aim of responding to labor shortages due to the declining birthrate, aging population, and the advent of a declining population.

KEY WORDS: Aggregate, Crushed Stone, Gravel, Sustainable Development, ICT, Smart Mining System

1. はじめに

骨材は、コンクリートやアスファルト混合物などを作る際に用いられる材料の総称であり、建設用原材料として鉄鋼・セメント・木材・非鉄金属などととも、わが国の産業・経済を支える基礎資材として重要な役割を担っている。骨材の需要は、昭和40年代初めの高度成長時代における建設事業の急速な展開に連動して急速に増大し、平成2年度には生産量が945(百万t)のピークに達した^{1,2)}。その後、バブル経済の崩壊とそれに続く長引く景気の低迷、公共投資の削減などの影響を受けて骨材の需要は漸減し、平成22年度にはピーク時の約40%にまで減少した³⁾。しかし、平成23年3月11日に発生した東日本大震災を境に、震災からの復旧・復興需要や国土強靱化政策、インフラの老朽化対応、頻発する大規模自然災害からの復旧等々において、基礎資材としての骨材の重要性が再認識され、現状の骨材需要は、微増ないし横ばいの状態にあり、年間生産量は380(百万t)程度で推移している⁴⁾。

骨材は廉価で大量に供給されなければならない資材であるが、国内で自給できる数少ない鉱産資源の一つでもあり、基本的には各地域で「地産地消」されている。そのため、骨材の採掘・生産が生活圏に近接した地域で行われる場合が多く、様々な課題が派生している。例えば、自然の改変を最小限に抑えた自然と調和した開発、災害や公害のない合理的な開発、地域の整備計画との調和、跡地の積極的利用など地域との共生を目指した様々な取り組みが求められている^{5,6)}。また、骨材生産における技術革新、生産性向上、労働力不足、災害の撲滅、環境問題、品質管理、流通

の合理化などの課題も山積している⁷⁻¹⁰⁾。

このような状況を背景として、本稿では、わが国における骨材生産の推移を骨材資源の観点から概観した上で、現状の課題とその対応策について述べる。特に、骨材の採掘・生産において重要な課題となっている地域との共生を前提にした“持続可能な開発”を可能にするための環境調和型採掘方式への転換や、少子・高齢化、人口減少社会の到来に伴う労働力不足への対応を目指したICT, IoT, AIなどを活用したスマート採掘システムの構築、骨材の供給・輸送の最適化などの動向について紹介する。さらに、将来的な骨材の安定供給に資する骨材産業の目指すべき方向と今後のあり方について言及する。

2. 骨材資源の種類と特徴

骨材とは、コンクリートやアスファルト混合物などを作る際に用いられる材料の総称である。骨材の用途は、道路用、コンクリート用、鉄道道床用などがあり、粒径によって粗骨材と細骨材に、また、重量によって普通骨材、軽量骨材、重量骨材に分類される。一方、骨材の原材料、すなわち、骨材資源という観点からは、天然骨材、人工骨材、再生骨材の3つに分類される。ここではこの分類にしたがって、骨材の種類と特徴について説明する。

Table 1に、骨材の分類を示す。

なお、良い骨材の条件は、つぎのとおりである。

- ①堅硬強固であること。
- ②清浄で不純物を含有、付着しないこと。
- ③吸水量が少ないこと。
- ④大小粒が適当に混合していること。

その他、コンクリート用骨材として使用する場合には、

- ⑤粒形が丸みを帯びていること。
- ⑥粒径が均一であること。
- ⑦アルカリ骨材反応の原因にならないこと。

*2021年9月30日受付 2022年1月6日受理

1. 正会員 岩手大学名誉教授

【著者連絡先】E-mail: otsuka@iwate-u.ac.jp

キーワード: 骨材, 砕石, 砂利, 持続可能な開発, ICT, スマート採掘システム

Table 1 Classification of aggregate.

採取場所・製造方法による分類			粒径による分類		重さによる分類		
天然骨材	人工骨材	再生骨材	粗骨材	細骨材	普通骨材	軽量骨材	重量骨材
砂利・砂 (1)川砂利・川砂 (2)陸砂利・陸砂 (3)山砂利・山砂 (4)海砂利・海砂	砕石・砕砂 スラグ骨材 (1)鉄鋼スラグ骨材 ・高炉スラグ骨材 ・製鋼スラグ骨材 (2)非鉄鋼スラグ ・銅スラグ骨材 ・フェロニッケルスラグ骨材 人工軽量骨材	アスファルト混合物からの再生骨材 コンクリート構造物からの再生骨材 (1)再生骨材 H (2)再生骨材 M (3)再生骨材 L	5mm ふるいに重量で 85% 以上とどまるもの	10mm ふるいをすべて通り 5mm ふるいを重量で 85% 以上通るもの	2.5 ~ 2.6 程度	0.7 ~ 1.8	3 ~ 5
天然軽量骨材 ・軽石、火山噴出物等					砂利・砂、砕石・砕砂、高炉スラグ等	真岩、フライアッシュを原料とする。 用途 軽量コンクリート、左官用等	重晶石、鉄鉱石等 用途 放射線遮蔽用コンクリート

⑧塩分が少ないこと。(鉄筋コンクリートの材料とする場合)

2・1 天然骨材

天然骨材には、自然作用によって岩石からできた粒状物である砂利・砂と、火山礫や軽石を採取、粉碎、ふるい分けして使用する天然軽量骨材がある。

2・1・1 砂利・砂

砂利・砂は、その産出地・採取地によって、川砂利・川砂、陸砂利・陸砂、山砂利・山砂、海砂利・海砂に分けられる^{11, 12)}。砂利は自然の状態で、河川の上流部に存在する岩石が、長い年月の間に気温の変化、雨水の作用、凍結などの風化作用によって母石を離れ、または流域に存在する礫・砂が種々の浸食作用によって崩壊し、これが河川の流水中を転々と流下する間に、次第に脆弱な部分が削り取られて、ついに丸味を帯びた状況に変化したものである¹³⁾。

(1)川砂利・川砂(かわじゃり、かわずな) 河川砂利・河川砂とも呼ばれ、河川敷に賦存する礫・砂を対象とする。川床だけでなく、ダム底から採取されることもある。粒の大きさが他の採取場所の骨材よりも揃っている傾向が強く、骨材として使用する際に洗浄が不要であり、かつてはコンクリート骨材の主流を占めていた。現在、採取量はわずかであるが、近年では、ダムや堰に堆積した砂利・砂を活用することや、河川の堆積土砂が増加したために、砂利採取の規制緩和を進める機運も高まっている。

(2)陸砂利・陸砂(おかじゃり、おかずな) 地形的に旧河川敷あるいは氾濫原とみなされる平坦地の地下の砂礫層、または扇状地の堆積物の砂礫層を対象とする。現状は、水田、畑地、原野となっていることが多い。現在、重要な細骨資源であるが、都市化や圃場整備の進行で開発適地が減少し、採取量が減少傾向にある。

(3)山砂利・山砂(やまじゃり、やまずな) 段丘堆積物となっている砂礫層を対象としている。砂・礫の粒間は固結していない。また、新第三期系上部以降の砂層が砂の原料として採掘されることがあり、川砂や海砂と区別して「山砂(やまずな)」と呼ばれている。最大の産地である房総半島では大量採取のため、資源の枯渇や環境問題が起きている。

(4)海砂利・海砂(うみじゃり、うみずな) 海浜および浅海に堆積している砂・礫を対象とし、水深 30 ~ 40m 程度まで採掘されている。細骨材が多く、砂として利用する場合は「海砂(うみずな)」と呼ばれている。また、海浜の砂を利用する場合は「浜砂(はますな)」と呼ぶことがある。川砂や山砂に比べて密度が小さく、貝殻を含んでいるものもあるが、その量が少なければ品質に影響はないことがわかっている。塩分を含むため、塩害対策のために採掘後洗浄される。

Fig. 1 に、主要な天然骨材の採取場所を模式図で示す¹⁴⁾。

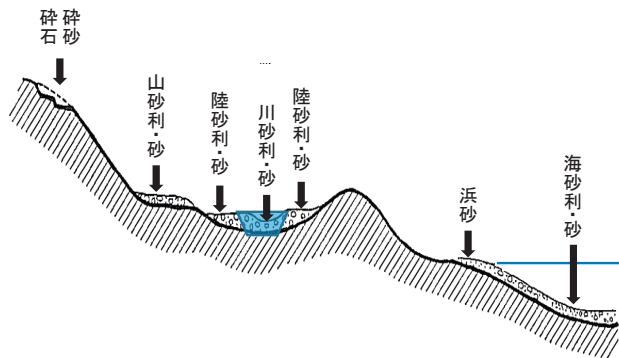


Fig. 1 Conceptual diagram of major aggregate resources.

2・1・2 天然軽量骨材

天然軽量骨材は、主として火山の噴火に伴って噴出した軽石や火山礫などで、火山国である日本では全国的に分布しており、かなりの埋蔵量がある。

2・2 人工骨材

人工骨材とは、破碎や冷却などの人工的な手法を用いて作られた骨材のことで、砕石・砕砂、スラグ骨材、人工軽量骨材などがある。

2・2・1 砕石・砕砂(さいせき・さいさ)

砕石は、山地を形成する硬い岩石を発破などにより起砕して原石を採取し、これらを破碎・選別して使用目的に合う粒度に調整した上で骨材として用いる材料を指すが、粒度調整の過程のものも砕石と呼ばれることが多い。現在、骨材としての生産量が最も多いのが砕石である。また、砕砂は天然の岩石を破碎機・粉砕機などで人工的に小さく砕き製造したもので、粒径が、2.0 ~ 2.5mm ふるいを通り、75μm に留まるものである。近年では天然砂が全国的に不足しており、岩石を細砕して砂の粒度に調整した砕砂が多く使用されるようになってきている。砕砂は、破碎・磨砕技術の進歩により、様々な岩石から製造が可能となり、製品の粒径も改善されているが、大量に発生する脱水ケーキや砕石ダストの処理が課題となっている^{15, 16)}。

Table 2 に道路用砕石の種類および呼び名、Table 3 にコンクリート用砕石・砕砂の種類および粒径による区分を示す。

なお、砕石・砕砂の原石の種類は、採石法が適用となる岩種では砂岩、安山岩、花崗岩、せん緑岩、輝緑岩、粗面岩、玄武岩など、また、鉱業法が適用となる岩種では石灰石がある。岩種別の比率は、令和元年(2019)の「砕石等統計年報」(経済産業省製造産業局素材産業課)によると、第1位が砂岩の30.7%、第2位が石灰石の25.8%、第3位が安山岩の17.2%で、この3岩種で全体の73.75%を占めている。

Table 2 Types and names of crushed stones used for road construction.

種類	呼び名
単粒度碎石	S-80 (1号), S-60 (2号)
	S-40 (3号), S-30 (4号)
	S-20 (5号), S-13 (6号)
	S-5 (7号)
クラッシュラン	C-40, C-30, C-20
スクリーニングス	F-2.5
粒度調整碎石	M-40, M-30, M-25

2・2・2 スラグ骨材

スラグ骨材は、鉄、銅、ニッケルなどの金属を鉱石から抽出する（製錬）際や、金属から有害な不純物を除去する（精錬）際に副産されるスラグを破碎・粒度調整してコンクリート用骨材としたものである。スラグ骨材には、鉄鋼スラグと非鉄鋼スラグがある。

(1) 鉄鋼スラグ骨材¹⁷⁾ 鉄鋼スラグは、高炉で鉄鋼石を熔融・還元する際に生成する高炉スラグと、鉄を製錬する製鋼段階で生成する製鋼スラグに大別される。高炉スラグは、鉄鋼石に含まれるシリカなどの鉄以外の成分などが、副原料の石灰石と結合したものである。鉄鋼スラグから製造されるコンクリート用骨材としては、高炉スラグ骨材と電気炉酸化スラグ骨材がある。さらに、高炉スラグ骨材には、細骨材と粗骨材がある。

(2) 非鉄スラグ骨材¹⁸⁾ 非鉄スラグは、原料である鉱石、精鉱から、銅やフェロニッケルを製錬する工程で、鉄・珪素の酸化物を主成分として生成され、この非鉄スラグから製造されるのが非鉄スラグ骨材である。非鉄スラグ骨材には、銅スラグ骨材、フェロニッケルスラグ骨材がある。

2・2・3 人工軽量骨材¹⁹⁾

人工軽量骨材は、軽量コンクリート用に軽量化された骨材である。軽量コンクリートは、コンクリートの重量を軽減することを目的に工夫されたコンクリートの総称である。高層建築への適用や橋梁、高架、浮橋などの構造物への活用だけでなく、耐震性、断熱性やエネルギー吸収性なども有し、幅広い目的で利用される。わが国の人工軽量骨材の多くは、頁岩を破碎し、造粒したものを高温で焼成して造られている。頁岩に限らず、粘土、スレート、ボタなども原料となる。

2・3 再生骨材²⁰⁾

再生骨材とは、建設工事に伴って廃棄されるコンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊などを破碎・選別して混合物を除去した後に、路盤材・建築物の基礎材・コンクリート用骨材などに再利用できるように調整した骨材のことである。平成14年に制定された「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」（建設リサイクル法）では、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊、建設発生木材の3品目について、一定規模以上の工事における再資源化を建設業者に義務付けている。再生骨材として建設材料に再利用することは、資源の有効利用や自然保護の観点から必要であり、そのための技術や知見の蓄積が重要である。

2・3・1 アスファルト混合物からの再生骨材とその再利用

アスファルト廃材は、ジョークラッシュャやコーンクラッシュャによる機械破碎方式、あるいは加熱によるアスファルトの軟化を利用した熱解砕方式により破碎される。解砕方式では、熱風式ロー

Table 3 Classification by type and particle size of crushed stone / sand for concrete.

種類	粒の大きさによる区分	粒の大きさの範囲 (mm)
砕石	砕石 4005	40 ~ 5
	砕石 2505	25 ~ 5
	砕石 2005	20 ~ 5
	砕石 1505	15 ~ 5
	砕石 1305	13 ~ 5
	砕石 1005	10 ~ 5
	砕石 8040	80 ~ 40
	砕石 6040	60 ~ 40
	砕石 4020	40 ~ 20
	砕石 2515	25 ~ 15
	砕石 2015	20 ~ 15
	砕石 2513	25 ~ 13
	砕石 2013	20 ~ 13
	砕石 2510	25 ~ 10
	砕石 2010	20 ~ 10
砕砂	砕砂 5	2.0 ~ 2.5mm ふるいを通過し、75μm に留まるもの

タリーキルンや温水槽を利用する。熱解砕方式の場合、粉じん、振動、騒音の発生が少なく、骨材の破損割合も減る。しかし、機械破碎方式は、熱解砕方式に比べて経済的であるため、ほとんどの再生骨材製造プラントでは機械破碎式が使用されている。取り出されたアスファルト再生骨材には、旧アスファルトが4.4 ~ 6%程度付着しているが、再生骨材を使用したアスファルト混合物は、新材を用いた場合と同様の性状が得られる。現在の再生骨材の利用状況は、道路用と路盤用が殆どである。

2・3・2 コンクリート構造物からの再生骨材とその再利用

コンクリートは構造物の解体時に、人頭大に粗割られ、解体がらとして排出される。目視で木片、プラスチックなどを手作業で取り除いたのち、1次破碎処理として、ジョークラッシュャなどで破碎される。1次破碎処理後の粒子は比較的角張っているため、コーンクラッシュャやボールミルなどのすりもみ効果による整粒機能をもった装置で2次破碎処理を行う。2次破碎処理の前後には、磁力選別や比重選別により鉄筋やプラスチックなどを除去する。最後にエアセパレータなどで微粉末を取り除き、再生骨材を得る。

コンクリート構造物からの再生骨材は、素材となるコンクリート解体材の状態や加工方法により品質に差が出るため吸水率や飽和密度によって、H、MおよびLに区分される。

(1) 再生骨材 H 再生骨材 H は、コンクリート塊に対して、破碎、磨砕、分級など高度な処理により普通骨材と同程度の品質をもつ骨材である。再生骨材をコンクリートの材料として使うときは H が一般的で、公共工事標準仕様書などに明記されており、普通コンクリートと同等の一般の RC 構造物に利用することができる。再生骨材の中では高価であるが、全ての部材に適用可能である。

(2) 再生骨材 M 再生骨材 M は、比較的低強度の構造用コンクリートへの適用を対象として、中程度の破碎、磨砕などの処理をして製造された骨材であり、高度処理されていないためモルタルやセメントペーストがかなり残っている。再生骨材 M は、乾燥収縮や凍結溶解作用を受けにくい部材や部位への使用を目的としている。

(3) 再生骨材 L 再生骨材 L は、破碎処理のみで製造された骨材である。再生骨材の中でも安価で、高い強度や耐久性が要求される構造物などに使用することはできない。高い強度や

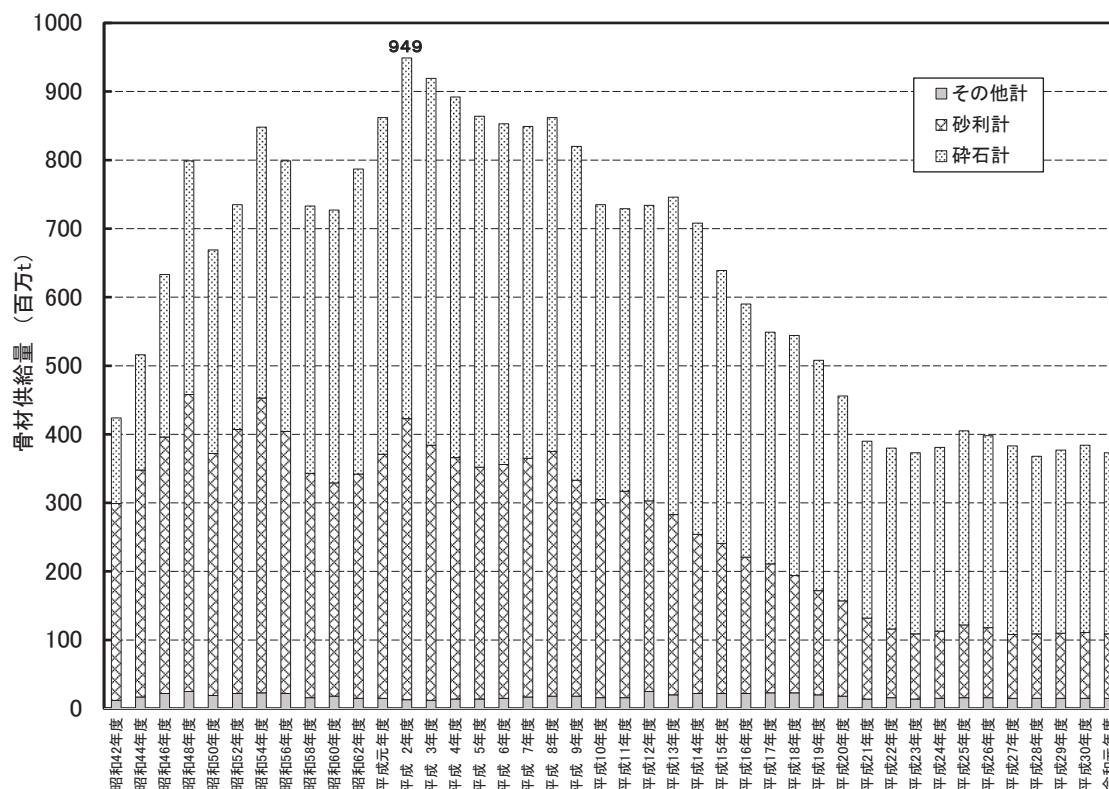


Fig. 2 Changes in aggregate supply.

耐久性を必要としない構造体でない部位への使用が可能であり、例えば、捨てコンクリート、均しコンクリート、強度の必要ない裏込コンクリート、土間コンクリートなどに利用されている。

今後、解体工事から発生するコンクリート塊の発生量が増大することが予想されることから、再生骨材の幅広い利用の必要性が高まっていくと考えられる。

3. 骨材生産の推移

Fig. 2 は、経済産業省製造業局素材産業課の公表データを基に、昭和42年度(1967)以降の骨材供給量の推移を示したものである。わが国における骨材生産の推移を時代区分すると、つぎのとおりである。

- (1) 河川砂利の時代(～1965年) 河川に恵まれるわが国では、砂利は豊富に存在する天然資源であり、高度経済成長以前は骨材の主体は砂利、なかでも河川砂利がその大部分を占めていた。昭和42年度の骨材供給量は423(百万t)であるが、その内訳は砂利が67.8%を占め、なかでも河川砂利が44.2%と主流を占めていた。しかし、骨材需要の増大に対応した河川砂利の大量採取は、特に大都市の周辺で急激な資源の枯渇化と、著しい環境の悪化をもたらした。また、河川管理の面でも、橋梁護岸、根固めなどの基礎の浮き上がりを始め、様々な障害が顕在化してきた。このような状況を受けて、昭和38年には、砂利採取法(昭和31年制定)が自然破壊防止の観点から全面改正され、規制が強化された。
- (2) 骨材資源の多様化時代(1965～80年) 高度経済成長期の建設ラッシュに伴い骨材需要が急増し、それまで骨材の主流であった河川砂利に加えて、陸砂利・山砂利・海砂利、砕石の生産量が急増して骨材の多様化時代へと遷移した。
- (3) 砂利・砕石の大量消費時代(1980～95年) 新幹線、高速

道路、ニュータウン建設などの社会基盤整備やバブル経済期のリゾート開発などにより骨材の需要は年々増加し、骨材大量消費時代を迎えた。また、砂利資源の枯渇や採取規制などにより砕石の生産量が年々増加し、昭和58年度には砕石が砂利の生産量を上回った。そして平成2年度には、骨材供給量が949(百万t)のピークに達した。当時は、骨材資源の逼迫が懸念されるようになり、各通商産業局に採石委員会が設置され、各地域の砕石資源量の把握などが行われた²¹⁾。因みに、平成2年度の骨材供給量の比率は、砕石55.4%、砂利43.2%であった。

- (4) 骨材需要低迷の時代(1995～2011年) バブル経済の崩壊とそれに続く長引く景気の低迷、公共投資の削減、再生骨材の増加などの影響を受けて、骨材の需要は平成2年をピークに漸減した。その後も、骨材需要は平成8～10年にかけて大きく落ち込み、さらに平成14年以後も下落が続く低迷期となった。骨材供給量は、約20年間に亘り減少を続けて、平成22年度には平成2年度のピーク時の約40%にまで減少した。その当時は、民主党政権の「コンクリートから人へ」の政策により、骨材業界が最も疲弊していた時期であった。
- (5) 骨材再認識の時代(2011年～) 平成23年3月11日に発生した東日本大震災を境に、震災からの復旧・復興需要や国土強靱化政策、インフラの老朽化対応、頻発する地震、台風、豪雨などの大規模自然災害からの復旧等々において、基礎資材としての骨材の重要性が再認識され、骨材需要量は、現在、微増ないし横ばいの状態にある。なお、令和元年度における骨材供給量の比率は、砕石70.8%、砂利25.2%、その他(再生骨材を含む)が4.0%である。

4. 骨材生産における課題への対応

骨材生産において直面している課題としては、労働力不足、働

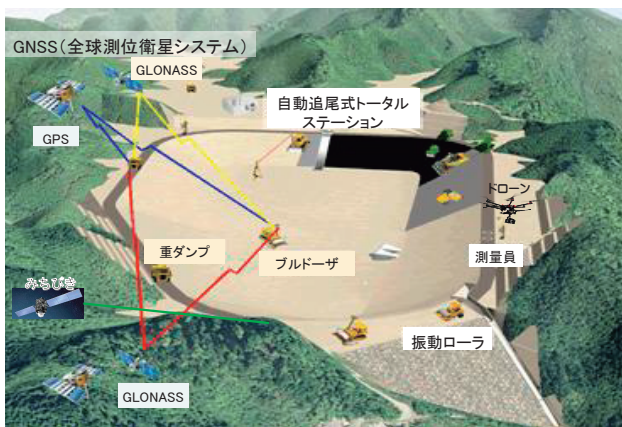


Fig. 3 Image of smart mining system utilizing information technology.



Fig. 4 Image of centralized management system for quarry.

き方改革, 生産性の向上, 技術継承, 新技術の導入, 労働災害の撲滅, 設備の老朽化, 適正価格の設定, 公害・環境対策, 地域との共生, 輸送・流通の合理化, 品質管理, 原石資源の枯渇, 骨材需要の低迷・減少, 安定供給体制の確立など様々なものがあり, これらの克服すべき課題への対応が求められている。本稿ではこれらの課題のうち, 少子・高齢化, 人口減少社会の到来に伴う労働力不足への対応を目指した ICT, IoT, AI などを活用した情報技術の導入, 地域との共生を前提とした“持続可能な開発”を可能にするための環境調和型採掘方式への転換, 骨材需要の将来予測と輸送・流通の合理化などの動向について言及する。

4・1 骨材生産における情報技術の導入

骨材産業は, 従来から設備産業とも呼ばれ, 重厚長大産業の典型でもある。しかし, 近年では, 各種の IT (情報技術) が活用されるようになってきており, 少子化による労働力不足に対応するためには, 旧来型のローテク産業からハイテク産業への転換が必要である。近年, 破碎プラントや製品出荷プラントなどでは, 省力化や自動化が進んでいる。しかし, 原石の採掘現場では, ハイテクの大型重機などの導入は進んでいるが, 中小零細企業の多い骨材業では大規模な鉱山が多い石灰石鉱業と比較して, 省力化や無人化が進展していないのが現状である。そのため, 今後急速に進む少子・高齢化に伴う労働力不足に対応するためには, 省力化・無人化への転換が必要である。建機やプラント設備のハイテク化は先行して進んでいるが, 作業工程が多岐にわたる骨材採掘・生産の全体システムとしては, 現状ではローテク産業と言わざるを得ない。しかし, それがゆえに情報技術の活用による究極の省力化・環境負荷の低減への転換が図れる伸び代(のびしろ)が大きいと前向きに捉えるべきと考える²²⁾。

Fig. 3 に, 情報技術を活用したスマート採掘システムのイメージを示す²³⁾。GNSS (全球測位衛星システム), デジタル無線, デジタルカメラ, 重機の油圧制御・センサ技術, ICT, IoT, AI, ドローンなどの最新の情報技術を駆使したツールを統合的に利用することにより, スマート採掘システムが可能になるものと考えられる。なお, みちびき (準天頂衛星システム) の運用開始により, 重機や原石ダンプの位置を 10cm 以下で制御することが可能になったことから, 採掘現場での自動化・無人化が一段と進展するものと考えられる。また, ドローンの採掘場での活用例としては, 地形測量, 切羽の点検・管理²⁴⁾, 重機の稼働状況確認, 発破前の避難確認, プラントの点検・管理, ベルトコンベアーの点検・管理, 緑化用播種・散水などが考えられ, 今後現場での活用が一層進むことが期待される。

Fig. 4 に, 採石場の一元管理システムのイメージを示す²⁵⁾。マルチディスプレイによる閲覧システムを利用することで, 全員参加による効率向上や改善, 安全衛生活動への展開も期待できる。また, このような一元管理システムが採石現場で実現可能となる要因として, 5G (第5世代移動通信システム) の運用開始 (2020年) が背景にある。5G は, 「高速・大容量」「低遅延」「多数端末との接続」という特徴を持っており, 従来の 4G と比較して, 通信速度, 通信容量が大幅に向上するばかりでなく, 通信エリアが格段に拡大する可能性がある。そのため, これまで WiFi の通信エリア外であった採石場でも, 高速・大容量の通信が可能になることが期待される。その結果, 遠隔による重機・原石ダンプなどを複数台同時に操作することが可能になるスマート採掘システムや, 後述するクラウド管理システムを利用した骨材サプライチェーンシステムなどを融合したスマート骨材業への転換も実現可能になると考えられる。

4・2 持続可能な開発のための環境調和型採掘システムの構築

骨材は, 地域で生産され地域で消費される“地産地消”物資であり, 骨材産業は地域経済や雇用に貢献している。その反面, 生活地域に近接して操業される事業であるため, 生活環境や自然環境への影響が大小問わず必ず生じて来る。そのため, 地域との共生を前提とした“持続可能な開発”を継続するためには, 環境への影響を十分に考慮した環境調和型・低環境負荷型の採掘・生産システムを確立する必要がある。骨材の採掘・生産における環境問題としては, つぎのような項目がある。

- (1) 生活環境への影響 騒音・振動, 粉じん, 水質汚濁, ダンプ公害, 微気象 (風向・風速) 変化, その他。これらの項目は産業公害型の環境問題であり, かつては周辺住民への直接的な被害として問題化していた。
- (2) 自然環境への影響 森林伐採・表土除去・岩盤露出 (自然破壊), 動植物の生態系分断, 落石・崩壊・地すべり (防災上の問題を含む), 河川汚濁, 景観破壊, その他。これらの項目は環境保全型の問題であり, 事業継続および新規原石山確保の困難化をもたらしている。

これらの環境問題への対応を目的として, つぎのようなシステムの開発・構築が試みられている。

4・2・1 採掘場周辺の生態系可視化システム

骨材の採掘・生産に伴う動植物への影響の軽減, 生態系の基盤となる植生の回復, 水土保持, CO₂ 吸収機能の再生, 地域景観保全などを旨とした環境調和型・低環境負荷型の露天採掘を実現するためには, 露天採掘場およびその周辺の生態系に関する情報を

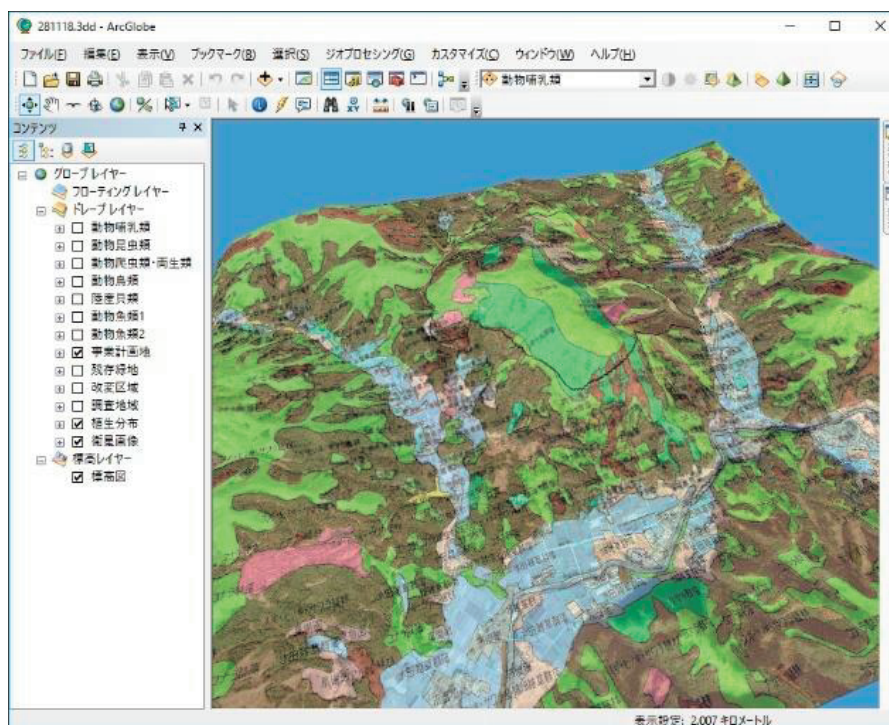


Fig. 5 Visualization of vegetation distribution by overlaying on a 3D terrain model.

収集し、データベース化することが不可欠である。これらのデータベースは、生態系の現状把握に役立つと共に、採掘跡地の再生と環境保全機能回復への取組にも活用できる。また、露天採掘場の拡大に伴う周辺地域の生態系への経年影響の予測や、採掘跡地の植生や景観などの回復、再生、創出に関する計画策定に活用できるデータベースとして機能することも期待できる。そこで、露天採掘場周辺の地形情報から作成した3D地形モデルをベースとして、これに地形・地質、動植物分布、水象などの情報をオーバーレイすることで、露天採掘場周辺の生態系を視覚的に把握できるITを活用したシステムが構築されている²⁶⁾。Fig. 5に、植生分布の3D地形モデルへのオーバーレイによる可視化図を示す。

4・2・2 景観保持を考慮した山づくり

砕石用原石の採掘によって裸地化した残壁が、市街地や観光地などから眺望されたり、跡地の整備が不十分であるなどのために、採掘跡地が周辺の自然景観を阻害して問題化している事例が多くみられる²⁷⁾。自然保護や景観保全意識が社会的思潮にまで発展した現在では、開発行為に伴って生じた自然環境への影響を可能な限り復元し、美しい自然景観を維持することが責務となっている。そのため、採掘終了後の跡地は順次緑化を行い、周辺の景観に調和するように努めなければならない。近年では、露天採掘場の景観を考慮した開発計画立案手法として、岩石採取シミュレーションシステムをベースに、バーチャル・リアリティ・システム(VRS: Virtual Reality System)と地理情報システム(GIS: Geographic Information System)を併用したシステムなども構築されている²⁸⁾。Fig. 6に、景観を考慮した開発計画立案の流れを示す。

4・2・3 自然回帰型修復緑化法と評価システム

近年、人々の環境問題意識の高揚と相まって、残壁の修復緑化は周辺景観や地域の生態系と調和した植物群落の回復を目指した、より質の高い修復緑化が求められている²⁹⁾。そこで、従来の残壁小段だけに樹木を導入する方法を改良して、小段の斜面部

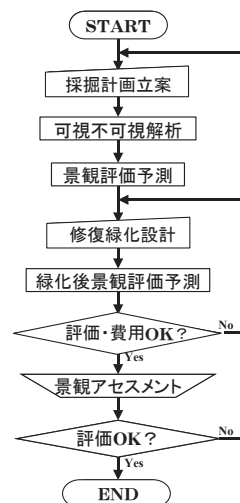


Fig. 6 Flow of development planning considering the landscape.

にも樹木を生育させることによって、残壁全体に周辺と同等の在来の植物群落の形成を目指す緑化法である「自然回帰型修復緑化」の開発が行われている³⁰⁾。Fig. 7に、自然回帰型修復緑化法の流れを示す。さらに、より効果的な修復緑化法を立案する観点から、残壁に生育する樹木の生長過程を指標とする自然回帰度の評価システムが構築されている³¹⁾。Fig. 8に、自然回帰度評価システムの流れを示す。

4・3 骨材需給量の将来予測

人口減少社会の到来により、将来的な骨材需給量がどのように変化するかを予測することは、骨材産業にとって重要な関心事である。骨材供給量は、経済産業省や日本砕石協会から四半期毎に公表されて来たが、それらの将来予測は行われていない。そこで

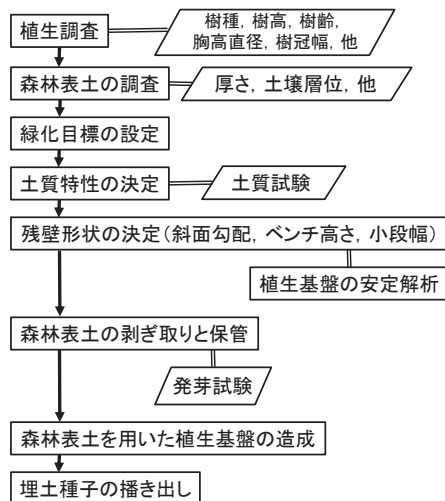


Fig. 7 Flow of natural regression type restoration greening method.

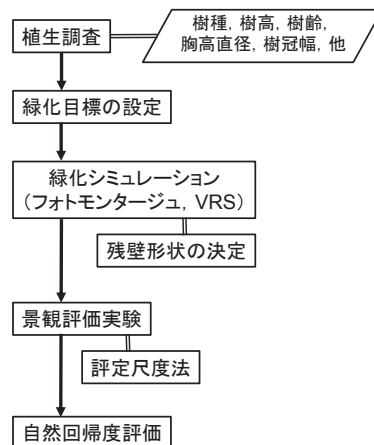


Fig. 8 Flow of evaluation system for natural regression.

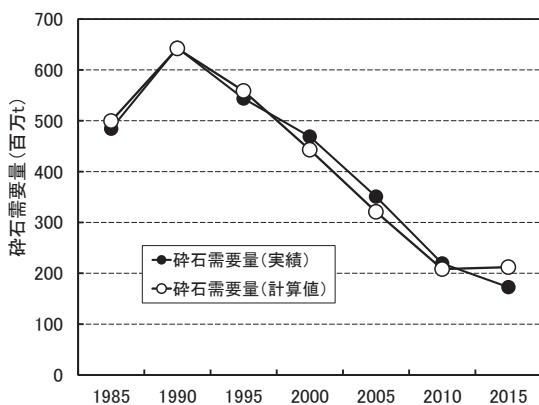


Fig. 9 Comparison of actual and calculated values of crushed stone demand.

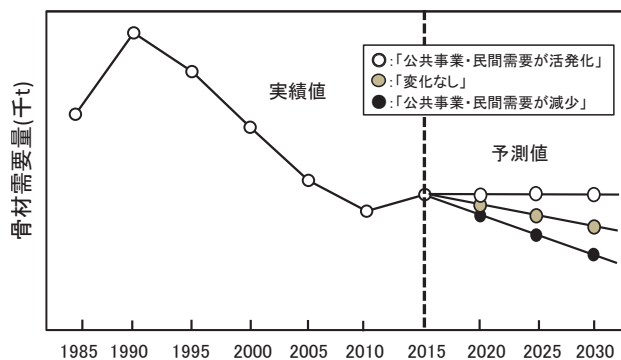


Fig. 10 Forecast of future aggregate demand.

骨材の需要量の将来予測を目的として、骨材需給量と人口動態、経済推移、インフラ整備などとの関係について相関性を考察して因子を抽出し、これらの因子を説明変数、また、砕石需要量を目的変数として、多変量解析(重回帰分析)を行い、砕石需要量の予測式(1)が導出されている³²⁾。

$$Y = 8.94X_1 - 2.28X_2 - 0.571X_3 \dots\dots\dots (1)$$

$$(R^2 = 0.997)$$

ここで、Y：砕石需要量(千t)
 X_1 ：人口(千人)
 X_2 ：世帯数
 X_3 ：建設工事費(億円)
 R^2 ：決定係数

Fig. 9は、(1)式を用いて求めた砕石需要量の推移と実際の砕石需要量の推移を比較したものである。図をみると、(1)式で算出された砕石需要量と実際の砕石需要量の推移がよく一致していることがわかる。ただし、予測式の課題となるのが、因子としての寄与率が最も大きい建設工事費の将来予測が不可能であるという点である。説明変数である人口、世帯数の将来予測値は、各省庁などから公表されている。しかし、建設工事費については、そ

の性質上、社会・経済情勢、政府の政策などに大きく左右されるため予測が難しく、将来予測値が公表されていない。Fig. 10は、建設工事費の将来予測が困難であることから、人口減少社会の到来を前提として、建設工事費を①「公共事業・民間需要が活発化」、②「変化なし」、③「公共事業・民間需要が減少」の3シナリオで仮定した骨材需要量の将来予測イメージである。

一方、骨材需要の将来予測を行う上で参考となるのが、社会資本整備が進んでいる欧米諸国における骨材消費量である。Table 4は、骨材資源工学会および筆者が各国の骨材協会などから収集した情報を基に、国民1人当たりの年間骨材消費量を算出して比較したものである。欧米諸国における国民1人当たりの年間骨材消費量は、3~4(t/人/年)程度といわれていたが、今回の調査で米国や英国はこの数値に近いことがわかった。なお、フィンランドやノルウェーの値が非常に大きいのは、北欧では氷河が後退する際に表土が侵食されて岩盤がむき出しの状態であり、建設工事で発生する掘削岩石が骨材として使用されるためである。なお、その多くは海外に輸出されているので、実質的な国民1人当たりの年間骨材消費量は、他の欧米諸国より若干多い程度と推察される。因みに、わが国の骨材生産量が最も多かった平成2年度の949(百万t)を当時の人口で割った国民1人当たりの年間骨材消費量は、7.9(t/人/年)となる。この数値をみると、当時の急速な社会資本整備の進展とバブル経済による急激な設備投資に

Table 4 Annual aggregate consumption per capita.

国名	国民1人当たりの年間骨材消費量 (t/人/年)
日本	2.9
イギリス	3.5
フィンランド	20.0
ノルウェー	9.7
ロシア	5.2
米国	3.9

Table 5 Forecast of aggregate demand in Japan.

	1人当たりの骨材消費量 (t/人)	予測人口 (千人)	骨材需要予想量	
			(百万t)	2015年比
2015年	2.9	126,597	383	100
2020年	2.9	124,100	360	94.0
2030年	2.9	116,618	338	88.3
2040年	2.9	107,276	311	81.2
2050年	2.9	97,076	282	73.5

骨材輸送最適化のためのIoTプラットフォーム

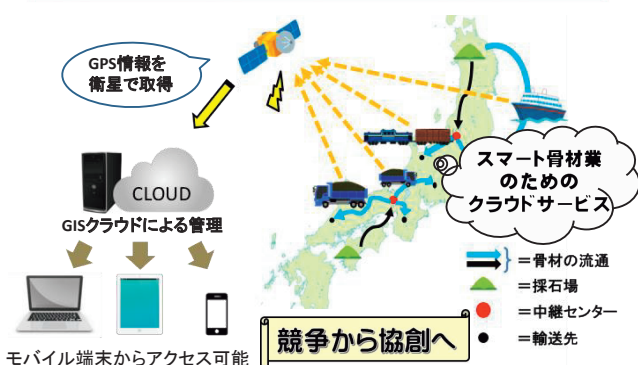


Fig. 11 Image of aggregate supply chain using cloud management system.

よる骨材需要がいかに多かっただかを窺わせるものであり、現在の2.9 (t/人/年) が欧米並みの水準であることがわかる。

Table 5 は、国民1人当たりの年間骨材消費量が現在の2.9 (t/人/年) のまま推移すると仮定して、将来の人口予測から骨材需要量を推定した結果である。人口減少に伴って骨材需要量は減少し、2015年の骨材供給量を100とすると、2050年の骨材需要量は73.5にまで減少する推定結果となった。

4・4 骨材の供給・輸送の最適化

骨材産業は産業分類上では、第2次産業に分類される。骨材生産の流れは、原石採取、製造、輸送の3工程から成っており、その工程をみると、原材料として原石を採取する第1次産業、原石を破碎・選別する第2次産業、骨材製品を運搬・販売する第3次産業に分かれている。そして、殆どの事業者は、原石採取から製品販売までを一貫して行っている。つまり骨材産業は、1次+2次+3次=6次産業なのである。6次産業としての骨材産業は、これまで中間業者が介在しない製造・物流業者として、「骨材を安価で物流し地域に貢献」してきた。しかし、今後もこの業態が持続可能であろうか。東日本大震災を経験して、骨材の遠距離輸送・流通に壁があることが明らかとなった^{33, 34)}。骨材業が「地産地消」産業として困難になることが予想される近い将来には、骨材生産・流通の最適化を広域的に考えていく必要があると思われる。

一方骨材は、廉価で大量に供給されなければならない資材であり、基本的には、「各地域で自給自足」していくことが原則である。しかし、人口減少社会の到来に伴う内需縮小により、骨材需要は将来的に減少していくことが予想される。さらに今後、骨材の需給関係の地域間格差が、大都市部と地方で大きく進むことが想定

される。すなわち、大都市部では骨材需要の減少は進むものの一定の需要は見込めるが、地方部では原石資源は豊富にあるが、骨材需要の大幅な減少により、骨材生産企業の存続が困難になることが想定される。そのため、これまで「地産地消」が基本であった骨材の生産・流通を広域的に最適化する変革が起こることも考えられる。Fig. 11は、骨材の生産・流通を広域的に最適化するための、クラウド管理システムを利用した骨材サプライチェーンのイメージを示したものである³⁵⁾。これは、GISクラウドを利用した骨材の需要と供給の一元管理、余剰在庫の削減など適正な生産体制の整備、都道府県を越えた情報の共有化、エンドユーザのモバイル端末からのアクセスなどを可能にするシステムの構築を目指すものである。骨材輸送最適化のためのIoTプラットフォームを利用することによって、製品輸送ダンプトラックの安定確保、輸送費の節減、近隣事業者による価格ダンピングによる過当競争の排除などを実現し、骨材の広域的な安定生産・供給が可能になることが期待される。これにより、今後見込まれる骨材市場の縮小に伴う近隣事業者の生き残りを掛けた「競争」から、地域全体で骨材の安定生産・供給を行う「協創」への転換を図ることが望まれる。

5. 今後の展望

5・1 骨材産業におけるSDGsの取り組み

SDGs (Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標) は、政府や自治体だけでなく、民間企業においても取り組む気運が国内外で高まっており、骨材産業においても、今後、SDGsの取り組みが事業活動の中で重要な位置づけになる可能性がある。

Fig. 12に、骨材産業におけるSDGsの取り組みのイメージとして、採石場のライフサイクルを骨材の生産、跡地利用、修復緑化による生態系の回復・地球温暖化防止対策などの観点から捉えた概念図を示す³⁶⁾。採石場のライフサイクルを考えた場合、基本的な使命は原石を採取しバージン骨材を生産して建設用原材料として供給することにより、安全・安心・快適な社会基盤の構築に貢献することである。しかし、骨材産業は資源産業であるため、原石の枯渇により将来的には必ず終掘を迎える。その際には、採掘跡地を有効に活用することによって社会貢献することが可能となる。近年、公共事業の削減により、再生骨材の受入先や量が減少しているが、今後、高度経済成長時代に建設された多くのコンクリート構造物などの解体が進み、大量に発生する建設廃棄物をどの様に処理するかが近い将来課題になるものと考えられる。採掘跡地は、通常、堅硬な岩盤であり、透水性が極めて低いことから、建設廃棄物最終処分場の設置条件には最適である。また、大規模な建設廃棄物最終処分場の埋め戻し空間を新規に造成することは社会的にも困難となっている。したがって、採掘跡地を放置したままとせず、建設廃棄物の最終処分場として利用すること

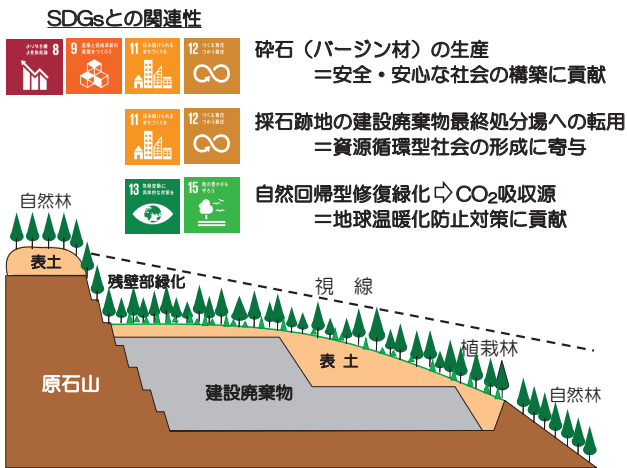


Fig. 12 Efforts of SDGs in the life cycle of quarry.

ができないかを検討することは、採掘跡地の有効利用の観点からも有益である。

採掘跡地を廃棄物最終処分場に利用しようとする試みはこれまでも行われてきたが、殆どが地域住民の強い反対があり実施に移されていないのが現状である。その原因は科学的データに基づく技術的検討が不足していることもさることながら、社会的要請と地域住民の合意形成を定量的に評価する手法がなかったことにも由来する。そこで、対象課題を体系的に扱うツールである GIS を利用したデータベースに基づき、評価者の意志を反映させる AHP を適用することによって、採掘跡地の廃棄物最終処分場への転用の可能性を定量的に評価するシステムが構築されている³⁷⁾。

Fig. 12 に示した採石場のライフサイクル概念図は、採掘跡地の建設廃棄物最終処分場への転用イメージを示すものでもある。この方法は、採掘跡地の平坦部を建設廃棄物などの堆積場として利用し、その上部に地山の表土により緩傾斜の盛土を施し、マザーソイル工法を施工して在来種の導入を行い、自然回帰を図るものである³⁸⁾。これにより、生態系の回復や景観の修復が可能になるとともに、逼迫する廃棄物最終処分場の確保にも繋がる。また、自然界回帰型修復緑化による森林の再生は、CO₂ 吸収源の創出となるため、採掘跡地の修復緑化が地球温暖化防止に貢献することを社会にアピールすることができる。これにより、地球温暖化防止対策という観点から、採掘跡地の修復緑化に対する補助金制度の創設の可能性も考えられる。

以上のように、採石場は単に原石を採取して骨材を生産する場所ではなく、跡地の有効利用や修復緑化による美しい森の再生と CO₂ 吸収源の創出などによって社会に貢献することが可能になることから、SDGs (持続可能な開発目標) の趣旨に合致する取り組みになると考える。

5・2 骨材産業の目指すべき方向

5・2・1 骨材業継続に必須な事項

骨材業継続に必須な事項としては、①原石山の確保、②安全第一、③設備更新、④新技術の導入、⑤人材確保・育成などが挙げられる。いわゆる「ヒト・モノ・カネ」であるが、これに加えて、「情報」と「時間」が重要な要素と考える。情報とは、骨材業を営む上で必要な社会的・経済的・技術的な情報であり、これらをいち早くキャッチして経営に取り入れていくことが必要である。また、情報技術の導入という意味での情報も重要である、一方、「時

間」は不可逆であり、すべての人間に平等に与えられているものである。この「時間」を有効に活用できるか否かが、今後の骨材業継続にとって重要である。例えば、設備更新や新技術の導入には時間が掛かるし、また、人材育成は最も時間を要する事項である。すなわち、「時間」こそが、最も重要な要素といえる。

5・2・2 3K から K3 への転換

骨材産業はかつて、「きつい」「汚い」「危険」の 3K (サンケー) 職場といわれた。最近では、新 3K : 「きつい」「給料が安い」「休暇が少ない」に「高齢化」を加えて、4K 職場といわれる場合もある。これでは、人手不足の現状とともに将来に向けて、骨材業に入職する人の確保は困難である。今後は、「きれい」「かっこいい」「高収入」の K3 (ケースリー) 職場への転換が必要と提言する。「きれい」とは女性も就業できる整理・整頓・清掃・清潔・躰の“5S 活動”を推進すること。「かっこいい」とは、男児の憧れである重機が操作できる職場であり、先端の情報技術を導入した職場、そして、「高収入」とは、人手不足のピンチを技術革新によって自動化・省力化を進めることで、作業員 1 人当たりの収入を増やす職場の実現である。加えて、技術革新による自動化・省力化は、労働災害の撲滅にも繋がるイノベーションとなる。

5・3 骨材産業の今後のあり方

骨材産業を取り巻く環境が大きく変化する中で、再び活力を取り戻し、国民経済や地域社会に更なる貢献を果たしていくために、つぎの 3 つの課題に取り組む必要があると思われる。

(1) 産業構造の転換 骨材生産量は、高度経済成長初期の昭和 40 年代前半の水準にまで落ち込んでいる。このような状況下で、全ての企業が従来と同様に存続できるとは考えられない。技術力・経営力・環境配慮に優れた企業が生き残り、成長することを促す競争を通じて、過剰供給構造を是正し、企業間の「競争から協創への転換」を図り、骨材産業全体をより効率的な構造に改善していくことが必要である。

(2) 適正価格の設定 近年の厳しい経営環境下で極端な低価格による販売や、一方的な下請・労働者へのしわ寄せなどにより、企業経営や労働条件などが悪化してきている。一方、中国に代表される東アジア地域の急成長や円安傾向は、あらゆる原材料の高騰という形で日本経済にも大きな影響を及ぼしている。その中であって、骨材は国内で自給できる数少ない鉱産資源であり、価格も安定しているという“優等生”である。また、逼迫する地方財政下で社会基盤を維持していくためには、現地で調達できる骨材は地域にとって貴重な財産であり、「地産地消」物資の代表格ともいえる。これらの点をユーザーや行政側に強くアピールしていくことにより、今後も安定した価格と品質で供給できる「適正価格の設定」を行うべきである。

(3) 「人づくり」の推進 人口減少社会の到来、団塊世代の退職、価格競争の激化に伴う労働条件の悪化など、骨材産業における労働環境は極めて厳しい状況に置かれている。一方では、働き方改革の推進も求められている。このような状況下において、骨材産業は“ものづくり産業”であり、それを支えるのは「人」であることを改めて認識し、将来を担う人材の確保・育成、技術・技能の向上・承継などに一体的・総合的に取り組んでいく必要がある。そして、技術のわかる経営者ばかりでなく、「経営のできる技術者」の養成も進め、将来に希望を持って働ける仕組みを構築する必要がある。

6. おわりに

少子・高齢化、人口減少社会の到来により、骨材需要の先行きには不透明な部分もあるが、社会基盤整備にとって欠かせない基

礎資材として、その重要性は継続するものと期待される。一方、社会の急激な変化に対して今後も骨材の安定供給を続けていくためには、骨材産業における一層の技術革新と根本的な考え方の転換（パラダイムシフト）が必要と思われる。骨材産業が今後も持続可能であるためには、「骨材資源」「技術革新」「流通革命」に関する三位一体となったパラダイムシフトが必要と考える。

ところで、現在世界が直面する最大の課題は、新型コロナウイルス感染の克服である。ウイズコロナ社会では、新しい働き方が求められており、その一つに「テレワーク」による在宅勤務がある。他産業において、テレワークが浸透してきている現在、テレワーク・リモートワークは、骨材産業の未来を考える上でもキーワードではないかと考える。骨材産業は設備産業であり、重機作業、プラント作業における自動化、省人化の余地が大いにある。リモートワークの導入により、人手不足の解消、生産性の向上、労働災害の撲滅などが可能となり、これまでの骨材産業のイメージを一新する「スマート骨材業」が実現できると考える。労働力不足やコストの削減など、骨材業界が抱える喫緊の課題を解決し、次世代の担い手を確保する観点からも、この機会に「リモートワーク」の導入を早急に図る必要があるといえる。

また、骨材産業は、国民生活や経済活動の基盤である社会資本の整備に不可欠な基礎資材を供給する産業あり、国民の安全・安心・快適な生活に貢献していることが、社会的に余り認知されていない状況にあることから、情報発信の強化にも取り組む必要があると考える。

References

- 1) I. Akimoto: Journal of MMIJ, **110**(1994), 1017-1022.
- 2) Hokkaido Bureau of International Trade and Industry, Tohoku Bureau of International Trade and Industry, Kanto Bureau of International Trade and Industry, Chubu Bureau of International Trade and Industry, Kinki Bureau of International Trade and Industry, Chugoku Bureau of International Trade and Industry, Shikoku Bureau of International Trade and Industry, Kyushu Bureau of International Trade and Industry, Okinawa Bureau of International Trade and Industry: Journal of MMIJ, **110**(1994), 1048-1071.
- 3) M. Abe: Concrete Journal, Vol.46, No.5 (2008), 4-10.
- 4) (一社)日本砕石協会: ホームページ [Japan Crushed Stone Association Home Page]
- 5) M. Terada: Journal of MMIJ, **110**(1994), 1033-1036.
- 6) H. Saito, Y. Kikuchi: Journal of MMIJ, **116**(2000), 551-557.
- 7) N. Otsuka, Y. Sekimoto: Journal of MMIJ, **109**(1993), 203-208.
- 8) T. Nishiyama, H. Kusuda, T. Ito: Journal of MMIJ, **110**(1994), 1037-1044.
- 9) T. Watanabe, N. Otsuka, M. Saito: Journal of MMIJ, **116**(2000), 253-258.
- 10) Y. Sakai: Journal of MMIJ, **128**(2012), 225-231.
- 11) T. Takeshima: Journal of MMIJ, **110**(1994), 1011-1016.
- 12) H. Kujirai: *Aggregate Resources Handbook*, (Japan Institute of Aggregate Technology, Tokyo, 2019), pp. 105-111.
- 13) H. Kujirai: *Aggregate Resources Handbook*, (Japan Institute of Aggregate Technology, Tokyo, 2019), pp. 3-4.
- 14) 五十嵐俊雄: 地質調査所地質ニュース, No.368, (1985), 6-18. [Igarashi, T.: Bulletin of the Geological Survey of Japan, No.368, (1985), 6-18.]
- 15) T. Wajima: *Aggregate Resources Handbook*, (Japan Institute of Aggregate Technology, Tokyo, 2019), pp. 504-508.
- 16) T. Wajima: *Aggregate Resources Handbook*, (Japan Institute of Aggregate Technology, Tokyo, 2019), pp. 621-622.
- 17) H. Matsumoto: *Aggregate Resources Handbook*, (Japan Institute of Aggregate Technology, Tokyo, 2019), pp. 623-627.
- 18) T. Sakai: *Aggregate Resources Handbook*, (Japan Institute of Aggregate Technology, Tokyo, 2019), pp. 627-632.
- 19) T. Fumoto: *Aggregate Resources Handbook*, (Japan Institute of Aggregate Technology, Tokyo, 2019), pp. 610-621.
- 20) T. Fumoto: *Aggregate Resources Handbook*, (Japan Institute of Aggregate Technology, Tokyo, 2019), pp. 603-610.
- 21) K. Nakamura: Journal of MMIJ, **110**(1994), 1004-1010.
- 22) N. Otsuka, M. Saito: Journal of Japan Institute of Aggregate Technology, **193**(2017), 155-162.
- 23) N. Otsuka: Journal of Japan Institute of Aggregate Technology, **204**(2020), 180-192.
- 24) Y. Obara, T. Yoshinaga, M. Hamachi: Journal of MMIJ, **134**(2018), 222-231.
- 25) Y. Sumi: *Aggregate Resources Handbook*, (Japan Institute of Aggregate Technology, Tokyo, 2019), pp. 283-285.
- 26) N. Otsuka, M. Saito: Journal of Japan Institute of Aggregate Technology, **201**(2019), 8-16.
- 27) N. Otsuka, Y. Sekimoto: Journal of MMIJ, **105**(1989), 215-219.
- 28) T. Hokazono, N. Otsuka, Y. Shida, M. Saito: Journal of Japan Institute of Aggregate Technology, **151**(2006), 131-140.
- 29) 資源・素材学会 編集: 残壁ハンドブック (丸善出版, 2005) [MMIJ: *Zanpeki Handbook* (Maruzen, 2005).]
- 30) T. Otake, N. Otsuka, M. Saito, Y. Abe: Journal of MMIJ, **123**(2007), 329-335.
- 31) T. Otake, N. Otsuka, M. Saito, Y. Abe: Journal of MMIJ, **124**(2008), 166-172.
- 32) N. Otsuka: Journal of Japan Institute of Aggregate Technology, **204**(2020), 180-192.
- 33) T. Ito: Journal of Japan Institute of Aggregate Technology, **174**(2012), 83-89.
- 34) N. Otsuka: Journal of Japan Institute of Aggregate Technology, **178**(2013), 73-79.
- 35) A. Oikawa, N. Otsuka, M. Saito, T. Imai: Journal of Japan Institute of Aggregate Technology, **203**(2019), 73-79.
- 36) N. Otsuka: Journal of Japan Institute of Aggregate Technology, **208**(2021), 192-200.
- 37) M. Saito, N. Otsuka, K. Otsuka, S. Koshiya: Journal of Japan Institute of Aggregate Technology, **165**(2010), 1-10.
- 38) T. Otake, N. Otsuka, M. Saito, T. Narumi: Journal of Japan Institute of Aggregate Technology, **178**(2013), 73-79.