砂資源

増　田　俊　夫*

はじめに

元来，自然界には廃棄物が存在せず，植物・動物・微生物が物質循環を担うことで，生命の維持に適した平衡状態が保たれてきた．たとえば，植物が光エネルギーを利用し，光合成によって二酸化炭素と水から有機物を合成し，動物がそれを消費して生命を維持し，動物の死後や排出物は微生物によって分解され，二酸化炭素や水などを再生する，という元素や物質の「循環」が維持されてきた．

これに対し，人類が出現し文明が進化すると，特に産業革命以降，石炭・鉄・石油などの「資源」を大量に消費することで社会を発展させ，人々の生活を豊かにしてきた．しかしその一方で，大量消費に伴う「廃棄物」の発生は地球の「環境」を著しく悪化させた．すなわち，人類の繁栄は資源の枯渇と環境の悪化という深刻な二律背反を引き起こした．たとえば，化石燃料の大量消費に伴う大気中の二酸化炭素の継続的な増加は，地球温暖化の主要因と考えられている．

本稿では，このように多角的な視点が求められる資源問題のなかでも，近年問題になりつつある「砂資源」に焦点を当てて論じる[1), 2)]．まず砂の分類について紹介したのち，砂の用途（建設用の砂や高機能材料の原料となる珪砂など）や資源としての砂について考察する．砂資源の問題は，世界人口の急増や都市化の進展と密接に関連していることを認識し，砂利用の典型例を概観する．最後に，資源と環境一般について現状と今後のあり方について私見も交えて考察する．

砂の種類

表１には，地質学における定義による砂の粒径区分を示している．同定義において，砂とは粒径が２mm 以下，1/16 mm 以上の細かい岩石や鉱物の粒子を指す．砂を粒径によってさらに細分化すると，表中に示した５種類（大きい順に，極粗粒砂，粗粒砂，中粒砂，細粒砂，極細粒砂）に分類される．なお，砂より粒径が大きいものは礫（れき；実用上は砂利と呼ぶ），細かいものは泥と総称され，泥はさらにシルト（1/16～1/256 mm）と粘土（1/256 mm 未満）に区分される．また，コンクリート材料の観点からは，砂と砂利（礫）はそれぞれ「細骨材」「粗骨材」と呼ばれる．

表２には，砂を多角的な観点から分類した結果を示す[3), 4)]．生成様式による分類としては，自然環境下で形成された「天然砂」と，人間が岩石を破砕して製造した人工的な「砕砂」に大別される．産出場所による分類として天然砂はさらに，川砂，海砂，山砂，火山砂，砂丘砂，ダム堆積砂，砂漠砂などに分類される．また，砂の種類による分類としては，石英砂，溶岩由来の黒砂，ざくろ石を含む赤砂，有孔虫の骨格に由来する星砂などがある．構成鉱物には，石英，雲母，長石，輝石，カ

表 1. 粒径による砂の区分

大分類	名称	説明	粒径 (mm)
砂利 (粗骨材)			2 ~ 75
砂 (細骨材)	極粗粒砂	すごく粗い砂	1 ~ 2
	粗粒砂	粗い砂	1/2 ~ 1
	中粒砂	中くらいの砂	1/4 ~1/2
	細粒砂	細かい砂	1/8 ~ 1/4
	極細粒砂	すごく細かい砂	1/16 ~ 1/8
泥			< 1/16

*京都大学名誉教授

第 435 回京都化学者クラブ例会（令和８年９月５日）講演

表 2. 砂の分類

生成様式による分類	天然砂、砕砂（岩石を砕いて作った砂）
産出場所による分類	川砂、海砂、山砂、火山砂、砂丘砂、ダム堆積砂、砂漠の砂
砂の種類による分類	石英砂、黒砂（溶岩が砕けた砂）、赤砂（ざくろ石の砂）、星砂（有孔虫の殻でできた星形の砂）
構成鉱物による分類	石英、雲母、長石、輝石、カンラン石、磁鉄鉱、火山ガラス
砂による地形	砂漠、砂浜、砂丘、砂嘴（さし）、砂州

注）各種データを基に作成

ンラン石，磁鉄鉱，火山ガラスなどがある．さらに，砂が形成する代表的な地形としては，砂漠，砂浜，砂丘，砂嘴（さし），砂州などが知られている．

地球上の陸地の約 3 分の 1 は，砂漠またはそれに準じる乾燥地域である．サハラ砂漠はかつて緑豊かな環境であったが，気候変動に伴い砂漠化した．仮に砂漠の砂をコンクリート用骨材として利用できれば，建設用の砂資源はほぼ無尽蔵に存在することになる．しかし残念ながら，砂漠の砂はコンクリート材料として適していない[4), 5)]．その主な理由は，風によって長年摩耗した砂粒が丸みを帯びており，角がないため粒子どうしやセメントペーストと強く結合しない（噛み合いによる強度が得られない）点，ならびに粒径が細かすぎる点にある．さらに，乾燥地域特有の地下水の蒸発過程などによって砂に塩分が集積している場合が多く，これが構造物内部の鉄筋を腐食させる原因（塩害）となる．これらの理由から，広大な砂漠を擁する中東の湾岸諸国で近年続く建設ラッシュにおいても，建築用の砂はオーストラリアなど海外からの輸入に頼らざるを得ないのが実状である．

砂の用途と資源としての砂

砂は表 3 に示す多種多様な用途で使用される．最も大きな割合を占めるのが建設資材であり，全体の 70～80% がこれに充てられる．用いられる砂は「天然砂」と「砕砂」に大別されるが，近年は環境保護や資源枯渇に伴い天然砂の供給拡大が

表 3. 砂の用途

順位	用途	説明	使用割合 (%)
1	建設資材	コンクリートの細骨材として使用	70 ~ 80
2	埋め立て・土地造成	埋め立て工事、沿岸部の開発など	10 ~ 15
3	産業用原材料	ガラス、セラミックスの主原料	5 ~ 10
4	その他	水処理（ろ過材）、石油・ガス採掘	1 ~ 5

注）各種データを基に作成

困難となったため，砕砂の利用割合が増加しており，その比率は概ね 6：4 程度となっている．コンクリート用細骨材としては川砂が最も優れているとされるが，供給上の理由から山砂や岩石を破砕して製造した砕砂，さらには脱塩処理を施した海砂なども広く活用されている．砂の用途として 2 番目に多いのは埋め立てや土地造成であり，それに次いでガラスやセラミックス製造などの産業用途が続く．

コンクリートは一般にセメント，砂，砂利に水を混合して製造されるが，その標準的な配合比を表 4 に示す．通常のコンクリートでは「セメント 1：砂 3：砂利 6」程度の割合（体積比）が目安となるが，強度を高めるためには砂や砂利に対するセメントの割合を高くする．なお，モルタルは砂利を含まずセメントと砂のみで構成される材料であり，主に壁面の仕上げやタイルの接着などに用いられる．配合時の水は，セメントに対して体積比で通常 0.8～1.0 程度（重量比では 50～60% 程度）が使用される．

珪砂（シリカサンド）は，二酸化ケイ素（SiO_2），すなわち石英を主成分とする砂であり，その広範

表 4. コンクリートの種類と配合比（体積比）

種類	セメント	砂 (細骨材)	砂利 (粗骨材)	用途
標準的なコンクリート	1	3	6	基礎など
高強度コンクリート	1	2	4	構造物など
モルタル（砂利なし）	1	3	0	タイル張りなど

注）各種データを基に作成

かつ不可欠な用途から近年「産業のコメ」とも称されている[6]．一般的な用途としては，ガラスの主原料や鋳物の鋳型材，上水道の清浄化を担う濾過材などが挙げられるが，現在ではシリコンウェハー，光ファイバー，スマートフォン用強化ガラスといった先端ハイテク産業への応用が極めて重要視されている．主な輸出国は米国，オーストラリア，マレーシアなどであり，特にオーストラリア産の珪砂は鉄分などの不純物が少なく，極めて高純度（SiO_2 > 99%）であることで知られる．一方，主な輸入国としては，半導体や液晶パネルなどの巨大な生産基盤を擁する中国，日本，台湾，韓国などが挙げられる．

表 5 には，代表的な世界資源の年間消費量を示している．金額ベースで見ると，石油，石炭，鉄などの主要資源はそれぞれ約 1 兆ドル以上に達する．一方，砂や砂利は金額ベースでは約 6,000 億ドルとそれらには及ばないものの，年間消費量は約 500 億トンに達しており，他のどの資源よりも 1 桁多い膨大な量が使用されている．

2018 年時点で，世界の砂，砂利，および砕石の年間総消費量は約 500 億トンと見積もられており，需要と供給は辛うじてバランスを保っている．しかし将来的には，需要の増大が続く一方で，川砂や海砂などの天然砂の供給量はほぼ横ばいで推移すると予測されている[7]．供給源が河川や海岸に限られており，環境保護の観点からも今後の供給拡大が困難であるためである．その結果，現在は 1 トンあたり約 10 米ドルである取引き価格も，需給の逼迫に伴って 2 倍前後に上昇すると予想されている．なお，今後の需要増加分は主に山砂や砕砂によって補われると見込まれている．

近年，アジアをはじめとする世界経済の急速な発展に伴い，砂の需要は飛躍的に拡大した．例えば，東南アジアの大河であるメコン川流域は，豊かな生物多様性を擁し，農業や水産業を支える豊富な土砂にも恵まれていた．しかし近年，建設用砂の乱掘や上流部でのダム建設，流域人口の増加などに起因する深刻な環境破壊や海岸・河岸侵食が指摘されている[8]．

砂の主な輸入国・地域としては，中国，UAE（アラブ首長国連邦），シンガポール，カナダなどが挙げられる．一方，主要な輸出国には米国，オーストラリア，マレーシア，インド，エジプトなどがある．中国は世界最大の砂消費国であり，近年の旺盛な建設需要を背景に輸入量も増加傾向にある．また，国土面積の拡大を目的として大規模な埋め立てを行ってきたシンガポールが，世界有数の砂輸入国として市場に大きな影響を与えてきたことは広く知られている．

図 1 には，世界全体，中国，および中国以外の国々におけるセメント生産量の推移を示している．世界のセメント生産量は，1995 年から 2015 年までの 20 年間で約 14 億トンから 42 億トンへと，実に 3 倍に増加した．なかでも中国の伸びは著しく，同期間に約 5 億トンから 25 億トンへと約 5 倍の飛躍的な増加を遂げている．一方，中国以外

表 5. 世界の近年の各種資源の消費量

資源	消費量、金額	資源	消費量、金額
砂、砂利、砕砂、砕石	約 500 億トン（約 6千 億ドル）	石油	約 50 億トン（約 3 兆ドル）
セメント	約 40 億トン（約 4千億ドル）	石炭	約 80 億トン（約 1 兆ドル）
		鉄	約 19 億トン（約 1 兆ドル）

注）各種データを基に作成

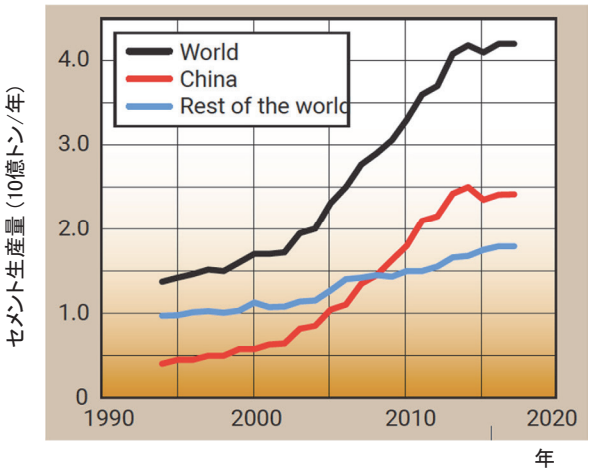


図 1. 世界のセメント生産量[1]

の国々の合計生産量は，約 10 億トンから 1.7 倍程度の上昇にとどまる．世界における砂の消費量に関する正確な経年統計は存在しないものの，コンクリート骨材としての砂・砂利の消費量はセメント消費量の約 6〜7 倍（重量比）に相当するため，セメント生産量の急増は砂需要の急増を直接的に反映していると推定される．

米国は 20 世紀の 100 年間で目覚ましい発展を遂げ，その間に消費したセメント総量は約 45 億トンであった．これに対し中国は，2011 年から 2013 年までのわずか 3 年間で約 66 億トンものセメントを消費し[9]，2020 年時点で世界の超高層ビルの約 45% を擁するに至った．実業家のビル・ゲイツ氏は 2014 年，自身の公式ブログ「The Gates Notes」において「中国はわずか 3 年間で，米国が 20 世紀の 100 年間に消費した量を上回るセメントを使用した」と紹介し，世界的に大きな話題を呼んだ．

人口の増加と都市化

表 6 は，国連の「世界人口推計 2024 年版（World Population Prospects 2024）」[10] の発表データなどを基に，人口の従来変化と将来予測を示したものである．本表から，世界人口は 20 世紀後半から 21 世紀初頭にかけて，10 年余りごとに約 10 億人ずつ増加してきたことが分かる．この背景には，食料の増産，大規模な世界大戦の回避，医療技術の飛躍的進歩などがあると推定される．同推計によれば，世界人口は 2084 年に約 102.9 億人でピークに達すると予測されている．

表 6. 過去および将来における世界（推計）人口

西暦（年）	人口（億人）	西暦（年）	人口（億人）
元年	~3	2030	85.7
1804	10	2040	91.8
1927	20	2050	96.6
1960	30	2060	99.9
1974	40	2070	101.9
1987	50	2080	102.8
1999	60	2090	102.7
2011	70	2100	101.8
2022	80		

注）各種データを基に作成

図 2 は，主要な人口大国における人口の経年変化を示している．中国は 2021 年に約 14 億人で人口のピークを迎え，その後は少子高齢化の進行に伴い人口減少局面が鮮明化している．一方，インドの人口は 2023 年に中国を追い抜き世界最多となり，2060 年代に約 17 億人でピークに達すると推定されている．その他の国々については，2100 年頃にかけてパキスタン，ナイジェリア，米国などが引き続き人口上位国を占めると予想されている．

図 3 は，世界人口の分布を「大都市」「中小都市」「農村地域」に区分し，その経年変化を示したものである．同図からは，大都市の人口が年々急激に増加しているのに対し，農村人口は横ばいあるいは微増にとどまっていることが読み取れる．すなわち，今後の人口増加の大部分は都市部で生じることが確実視されており，2050 年には世界人口の大半が都市に居住すると推定される．具体的

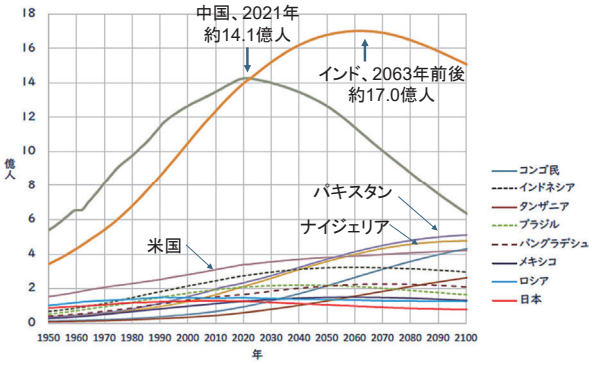


図 2. 人口大国の人口変化[10]

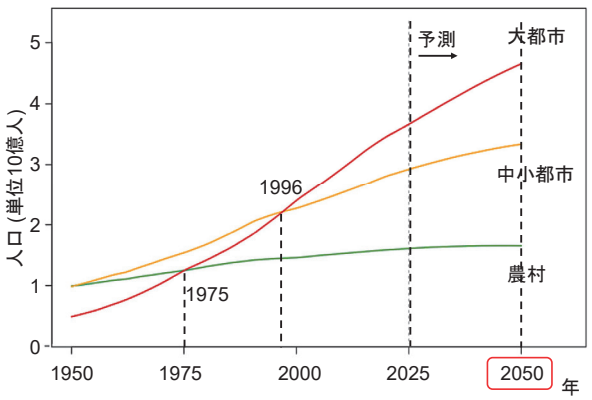


図 3. 世界における人口分布[11]

には，1950 年当時に大都市人口の割合は 20% 程度に過ぎなかったが，2050 年には全人口の半分前後が大都市に，そして全体の約 80% 以上が都市部（中小都市を含む）に集中すると予測されている．

国連の「世界都市化予測 2025 年版（World Urbanization Prospects 2025）」[11] は，世界の大都市における 2000 年から 2050 年にかけての人口動態と予測を発表している．それによると，人口 1,000 万人を超えるメガシティは主にアジアに集中しており，東京，広州，ソウルなどでは減少傾斜に転じる一方，ダッカ，ジャカルタ，上海，ニューデリーなどではさらなる人口増加が見込まれている．具体的には，2000 年時点では東京圏の人口（約 3,000 万人）が世界最大であったのに対し，2050 年に首位と予測されるダッカの人口は 5,000 万人を超えると予想されている．

世界の砂の使用例

セメントや鋼材とともに膨大な量の砂を消費する典型例として，世界各地の超高層ビルやメガストラクチャーが挙げられる．現在，世界最高の高さを誇るビルはドバイのブルジュ・ハリファ（高さ 828 m，163 階建て）である．それに次ぐ超高層建築物として，クアラルンプールのムルデカ 118（高さ 679 m，118 階建て），上海の上海中心（高さ 632 m，128 階建て），メッカのアブラージュ・アル・ベイト・タワーズ，深圳の平安国際金融中心などが存在する．ブルジュ・ハリファに使用されたコンクリート量は約 76 万トン，ムルデカ 118 では約 100 万トンに達する．なお，高さこそ約 200 m にとどまるものの，巨大建築物として知られるシンガポールのマリーナベイ・サンズは，3 棟のビル群の上に巨大な船型構造物を配置した独創的な統合型リゾート（IR）施設であり，こうした複合建築にも膨大な骨材が使われている．

建築物以外の用途として代表的なのが，海洋埋め立てによる国土の拡張である．シンガポールは近隣諸国からの海砂・海浜砂の輸入によって広大な埋め立てを行い，国土面積を独立時（1965 年）の約 580 km^2 から，2018 年には約 1.25 倍に相当する 722 km^2 へと拡大させた．また，ドバイ沿岸に建設された「パーム・ジュメイラ」は，上空から見るとアラビア語の「ジュメイラの椰子の木」の形状をした世界最大の人工島群であり，膨大な海底砂と岩石を用いて造成された観光・リゾート拠点として有名である．

さらに，鉄道や道路などの巨大交通インフラの建設にも大量の資材と砂が必要となる．中国はこの約 20 年間で，日本の新幹線（営業距離約 3,000 km）の 15 倍以上に達する総延長約 4.5 万〜5 万 km の高速鉄道網を急速に整備した．中国の高速鉄道は歴史こそ浅いものの，累計乗車人数はすでに 100 億人を突破し，日本の新幹線の累計（約 130 億人）に迫る規模となっている．その建設に投入された総費用および骨材としての砂の使用量は，日本の新幹線の十数倍規模に達すると推定される．

資源と環境

「コモンズ（公共の資源）」の原義は，入会（いりあい）地や共有地を意味し，かつて草原を移動する遊牧民が自由に利用できた放牧地などを指していた．より一般的には，空気，水，砂，野草，森林，水産物などが広義のコモンズ，すなわち人類共通の資産と考えることができる．しかし，人類が種々の資源を過剰に消費してきた結果，これら共有資源の著しい減退や枯渇が懸念されるようになった．この現象は「コモンズの悲劇」[12] と呼ばれ，現在では「砂」もまたコモンズの悲劇の象徴的な一例となりつつある．

表 7 は，過去，現在，そして未来における資源概念の変遷を示している．従来の主たる資源としては，人々の生活や産業を支えてきた石油，石炭，各種金属などが挙げられる．しかし今後は，限られた従来型資源が減少していくなかで，これまで資源と見なされていなかった領域や物質を「資源」へと転換・活用していく発想が不可欠となる．た

表 7. 資源：過去，現在，未来

従来からの資源	石油、石炭、金属、木材、水、砂、天然の魚類、水力、風力
最近の資源	シェールオイル・ガス、太陽光、地熱、バイオマス、深海資源
現在・将来の循環型資源	都市鉱山、建築廃棄物、コンクリート廃棄物、アスファルト廃棄物、廃ガラス、石炭灰、廃プラスチック

とえば近年では，シェールオイル・ガス，太陽光，バイオマス，深海鉱物資源などが挙げられる．さらにかつては「廃棄物（ゴミ）」として処理されていたもののなかにも，将来的に貴重な資源として再定義・活用できるものが多く存在すると考えられる．

環境問題の代表例として，プラスチックごみの問題について考えてみる．現代社会においてプラスチックは不可欠な素材であるが，2019 年における世界のプラスチックごみ排出量は約 3 億 5,000 万トンに達する（図 4）．その処理方法は国・地域によって著しく異なる．世界全体では「埋め立て」が 49%，「不法投棄・管理不備」が 22%，「焼却」が 19%，「リサイクル」が 9% とされる．これに対し，日本では「焼却」が 69% と大部分を占めるのに対し，米国では「埋め立て」が 73% で主流である．一方，中国やインドでは不法投棄と埋め立ての合計が過半を占める．遺憾ながらプラスチックごみ処理をめぐる国際的な合意形成は未だ途上にある．

2018 年に米国科学アカデミー紀要（PNAS）に掲載された研究[14] によると，地球上の全生物の総

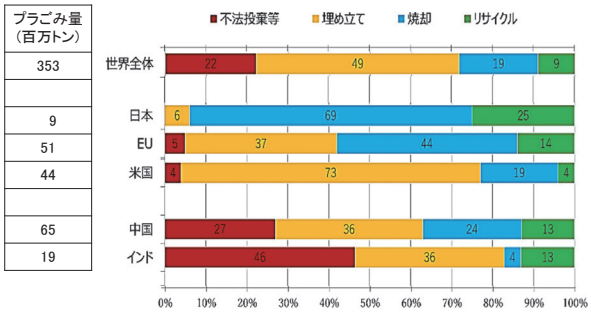


図 4. プラスチックごみの排出量と処理法（2019 年）[13]

炭素量は約 5,500 億トンとされる．その大部分を植物（約 4,500 億トン）が占め，次いで細菌（バクテリア，約 700 億トン），真菌類（約 120 億トン）が続く．動物全体の炭素量はすべて合わせても約 20 億トンに過ぎず，そのうち半数は節足動物，約 3 分の 1 を魚類が占める．人類の炭素量は約 0.6 億トンであり，野生哺乳類はその 10 分の 1 程度しか存在しない．一方，地球上に存在するプラスチックの総炭素量は 2025 年推計で約 50 億トンに達する．これは，プラスチックに含まれる炭素量が，すでに地球上の全動物の総炭素量の 2.5 倍に達していることを意味する．

また 2020 年に *Nature* 誌に掲載された研究[15] は，地球上の全生物量（バイオマス）と人類が創出した人工物（建築物やインフラ）の質量比較において極めて示唆に富む結論を提示している．すなわち，「人類がこれまでに築き上げた建築物やインフラの総質量（約 1 兆 1,000 億トン）が，地球上の全植物（主に樹木）の総質量（約 9,000 億トン；乾燥質量基準）を上回った」という結論である．これは，人類が築いてきた人工物の規模がいかに膨大であるかを物語っている．

現在我々が直面する資源危機と環境破壊に立ち向かう概念として，「線形経済（リニア・エコノミー）」から「循環経済（サーキュラー・エコノミー）」への転換が提唱されている[16]．線形経済は「資源の採取→製造→消費→廃棄」という一方通行のモデルであり，経済成長に伴い資源枯渇と廃棄物増大が直線的に加速する．これに対し，循環経済は「資源の採取→設計・製造→消費→回収・再利用」の流れを築き，「廃棄物」という概念そのものを排除することを目指す．製品の設計段階から長期使用，修理の容易さ，分解・再利用の可能性をあらかじめ組み込むアプローチは，今後のあらゆる資源利用に求められる重要な転換と言える．

まとめ

本小稿「砂資源」は，以下のようにまとめられる．

1. 砂の定義と分類：砂とは粒径2 mm以下，1/16 mm以上の細かな岩石や鉱物の粒子を指し，川砂などに代表される「天然砂」と，岩石を機械的に破砕して造られる「砕砂」に大別される．
2. 資源としての重要性：砂は建設用骨材や土地造成，さらには先端ハイテク産業の素材に至るまで多岐にわたる用途を有し，現代社会の発展に不可欠な資源となっている．
3. 需要拡大の背景：世界人口は2080年代に約103億人でピークを迎えると予測されており，この人口増加と急速な都市化の進展が砂需要の著しい増大を引き起こしている．
4. 持続可能な社会への課題：我々は資源利用と環境保全のあり方について再考を迫られている．今後は循環型社会を構築していくことが極めて重要である．

文献

1）UNEP, *Sand and Sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*, United Nations Environment Programme, 2019.
2）UNEP, *Sand and Sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis*, United Nations Environment Programme, 2022.
3）石弘之，『砂戦争 知られざる資源争奪戦』，角川新書，2020.
4）ヴァンス・バイザー 著，藤崎百合 訳，『砂と人類：いかにして砂が文明を変容させたか』，草思社，2020.（原著：V. Beiser, *The World in a Grain*, 2018.）
5）F. Neumann, M. Curbach, *MATEC Web of Conferences*, **149**, 01030 (2018).
6）加賀美敏郎，林瑛 監修，『高純度シリカの製造と応用』，シーエムシー出版，1999.
7）M. Bendixen, J. Best, C. Hackney, L. L. Iversen, *Nature*, **571**, 29–31 (2019).
8）WWF, *Impacts of sand mining on ecosystem services in the Mekong River*, 2018. https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2018-04/180419_Mekong_sediment_CS-external.pdf
9）V. Smil, *Making the Modern World: Materials and Dematerialization*, Wiley, 2013.
10）UN DESA, *World Population Prospects 2024*, United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2024.
11）UN DESA, *World Urbanization Prospects 2025*, United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2025.
12）G. Hardin, *Science*, **162** (3859), 1243–1248 (1968).
13）OECD, *Global Plastics Outlook Database*, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2019.
14）Y. M. Bar-On, R. Phillips, R. Milo, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **115** (25), 6506–6511 (2018).
15）E. Elhacham, L. Ben-Uri, J. Grozovski, Y. M. Bar-On, R. Milo, *Nature*, 588, 442–444 (2020).
16）笹尾俊明，『循環経済入門　廃棄物から考える新しい経済』，岩波新書，2023.