2.2.10 循環利用とライフサイクル評価

（1）研究開発領域の定義

本領域は、製品やサービスの全ライフサイクルについての環境負荷や影響を定量的に把握し低減するための評価・管理技術と、資源利用の効率性や持続可能性をより一層進めるための処理技術、リサイクル技術等に関する新しい切り口からの研究アプローチや、新しい社会実装手法・技術の導入等に係る動向を含む領域である。様々な資源の物理的、化学的、生物学的処理の要素技術開発に加え、AIやIoT、センサ、ソーティング、データ基盤整備などの情報処理技術による分離や管理技術、資源の採掘から循環利用、最終形態までを考慮した製品設計やデザインやシステム構築、ライフサイクルアセスメント、物質ストック・フロー分析などを対象とする。また、主として土地改変やそれに由来する天然資源利用の環境影響評価の進展や、鉱山開発における技術的変化も併せて検討することとする。

（2）キーワード

ライフサイクルアセスメント、マテリアルフロー分析、サーキュラーエコノミー、食料―水―エネルギーの相互依存性分析、産業共生、天然資源開発の環境影響、鉱山開発技術、資源循環、プラスチックリサイクル、分離・選別技術

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

循環型社会を構築していくためには、資源の有効利用度を高め、低環境負荷な生産工程を確立しつつ、適切な消費行動をとることができるようになる必要がある。このとき、単一のプロセスや意思決定において最適であると考えた選択肢が、他のプロセスや意思決定に対して悪影響を及ぼすことがある。製品やサービスのライフサイクル全体を対象にしながら、資源のフローやストックを分析することで可視化し、任意の選択肢が与える波及効果を利害関係者間で共有することで、よりよい管理を目指すことができる。本研究開発領域はこうした目的における分析や可視化、結果の共有に関する方法論を開発、普及させていくものである。

資源には枯渇性資源（化石資源や鉱物資源など）と再生可能資源（自然資源など）があるが、多種の資源を複雑に利活用することで製品の製造や消費、サービス、日常の社会活動を行っている。複雑かつ拡大化するサプライチェーンにおいて、適切に資源・生産・消費を管理するためには、俯瞰的な視野における全体の可視化と、科学的な分析手法によるフローやストックの定量化が必須である。

この分析手法のひとつとして、例えば、ライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）やその基礎的な考え方であるライフサイクル思考（life cycle thinking）がある。これは、製品のゆりかごから墓場までのライフサイクル全体を対象とした環境負荷や社会的影響、コストの定量的分析を行う手法として開発され、国内外で利用されている。例えば、軽量で頑丈な新素材を開発した場合、その素材を利用することで飛行機や鉄道車両、自動車などの環境性能を大幅に向上させうるが、素材そのものを生産するプロセスでは、高機能な製品を生産するために環境負荷が増大してしまう可能性がある。このようなとき、LCAは、素材の製造と使用における環境負荷を比較し、素材の有効性を分析することを可能とする。

本節では、主として素材系資源に関する話題を扱う。こうした資源の効率的利用が叫ばれるようになってしばらく経つが、大きな方向性に変化はない。しかし、鉱山現場での大規模な尾鉱ダムの決壊が大きなニュースとなったように、鉱山開発などの土地改変を通じた環境影響や、資源そのものの枯渇など、天然資源利用

を可能な限り抑える、そして使うのであれば可能な限り環境影響を少なく使おうという、経済成長と環境影響や天然資源利用を切り離すいわゆるデカップリングへ向けた動きがますます進んでいる。この点はSDGsのゴール12.2「2030年までに天然資源の持続可能な管理および効率的な利用を達成する」としても設定されている。また欧州発のいわゆるサーキュラーエコノミー（CE;Circular Economy）については、昨今のプラスチック問題などもあり、その促進の動きがますます進んだ。その結果、これまでの技術開発の継続だけではない、天然資源消費量の削減、循環利用の促進につながるような新しい技術の開発とその社会実装は、極めて社会・経済的意義の高いものになっている。

［研究開発の動向］

世界的・学術的な研究開発の動向を客観的に把握するために、Web of Scienceにおいてタイトル、要旨、キーワードに”Circular Economy”（CE）を含んだ5,374件の論文と、2010年～2020年7月までに登録された文献のうち”Life Cycle Assessment”もしくは”Life Cycle Analysis”（LCA）を含んだ22,896件の文献に対し、書誌情報をテキストマイニングとネットワーク分析により自動分析することができる学術俯瞰システム[1)]を用いて、計量書誌分析を行った。その結果、CEを含む文献については、引用関係からのクラスタリングにより、上記の論文は3,468件の文献で構成される18のクラスターに分割された。また、LCAに関する文献については、引用関係からのクラスタリングにより、上記の論文は20,740件の文献で構成される18のクラスターに分割された。

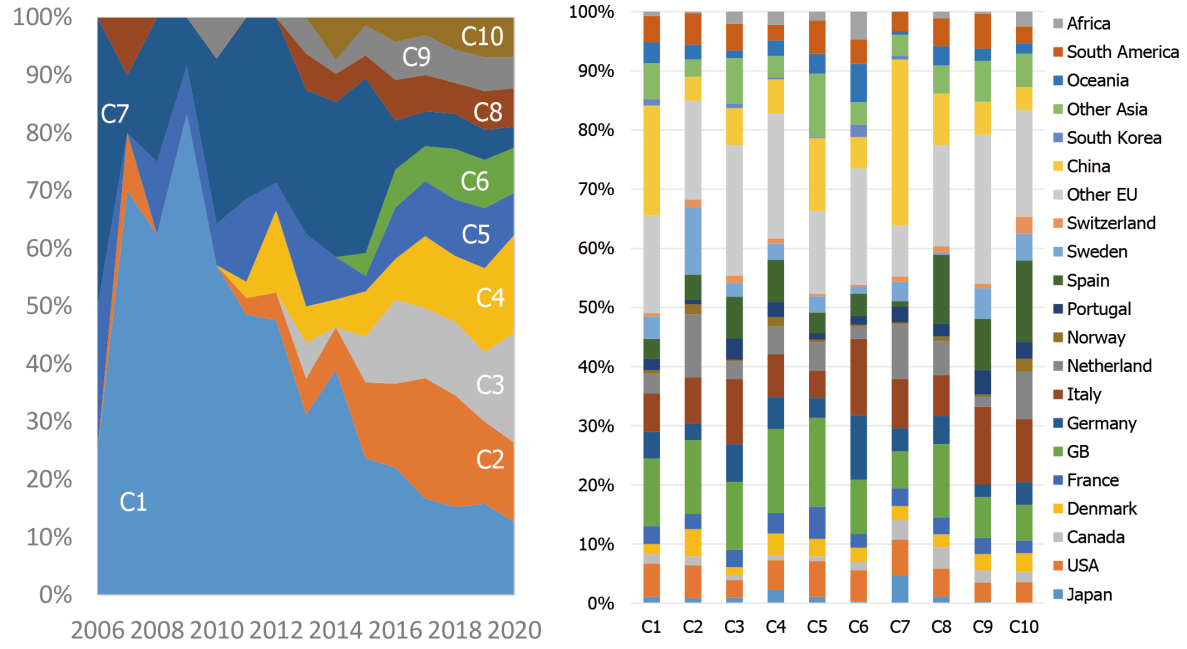
CEおよびLCAのいずれにおいても、年々文献数は増加しており、引用関係からのクラスタリングにより、CE・LCAともに18のクラスターに分割された。本稿では分類される文献数が多い上位10のクラスターに関して議論する。トップ10クラスターで、CEを含む論文群では約90%、LCAを含む論文群では約76%がカバーされる。この10の主クラスター内で共通して利用されている主なキーワードは図表2.2.10-1、図表2.2.10-3の通りである。

図表2.2.10-1にCEを含む文献群のクラスター別キーワード、ノード数、被引用回数をまとめる。”Circular Economy”という用語自体は比較的新しい言葉であることもあり、文献数は必ずしも多くないが、議論されている分野は多岐に渡っていることがわかる。図表2.2.10-2（a）に示す通り、クラスターの分岐は近年になり文献数の増加とともに顕著にみられるようになってきているが、図表2.2.10-2（b）に示されている通り、いずれのクラスターにおいても欧州が占める割合は比較的大きく、トップ10クラスター平均で約67%の著者が欧州の所属となっている。これに対し、中国が約10%程度、米国が約5%程度、日本はわずか約1%程度にとどまっている。国別にみると、イギリスが最も文献数が多く、ここに、中国、イタリア、スペイン、オランダ、米国、ドイツ、スウェーデンが続き、日本は22位であった。

各クラスターを概観すると、まず、C1は廃棄物管理に関するクラスターであり、いわゆる5R（remanufacturing, refurbishment, repair, reuse, recycle）に関する文献が多く分類されている。トップ10クラスターの中では著者所属に中国が含まれている割合が比較的高く、約19%となっている。 C2はビジネスモデルに関する文献が含まれており、CEによって形成される新しいシステムの価値や、指標に関する研究がなされている。 C3は廃棄物管理の中でもバイオマスに関する研究が含まれており、バイオエコノミーに関する研究も含まれていた。 C4はC3同様にバイオマスに関する研究であるが、バイオリファイナリーや産業共生など、生産技術に関する研究が含まれており、LCAに関する研究も多く含まれていた。 C5はサプライチェーン管理や生産技術について、特に、情報技術を用いた研究が含まれており、3Dプリンティングや人工知能に関する研究が含まれていた。 C6は電気電子廃棄物やリチウムイオン電池などを対象とし、含有してい

図表 2.2.10-1　　CEを含む文献群のクラスター別キーワード、ノード数、被引用回数

クラスター	キーワード	ノード数、平均被引用回数
C1	maintenance, metal trade, scrap, GSCM（green supply chain management）, value retention option, refurbish, remanufacturing, repair, China	578, 3.93
C2	business model innovation, value proposition, smart service, lifetime extension	500, 4.83
C3	Waste management, digestion, bioeconomy, fermentation	415, 1.61
C4	biorefinery, industrial symbiosis, stock, LCA（life cycle assessment）, adaptive reuse, service system	413, 2.55
C5	GSCM（green supply chain management）, additive manufacturing, cyber physical system, blockchain, 3D printing, artificial intelligence	300, 2.74
C6	WEEE（waste electrical and electronic equipment）, indium, LiB（lithium ion battery）, printed circuit board, battery, Lithium, Cobalt, copper, silver, rhenium, silicon, mobile, urban mining, criticality	238, 1.59
C7	eco industrial park, industrial symbiosis, chemical industrial park, urban industrial park	227, 3.62
C8	construction, adaptive reuse, material stock, building, circular building	195, 1.97
C9	food, landfilling, fish, biomethane, MSWI（municipal solid waste incineration）	182, 1.43
C10	Circular city, tourism, food contact, luminaires	175, 1.47



（a）年別の発刊割合　　（b）著者所属の国別割合

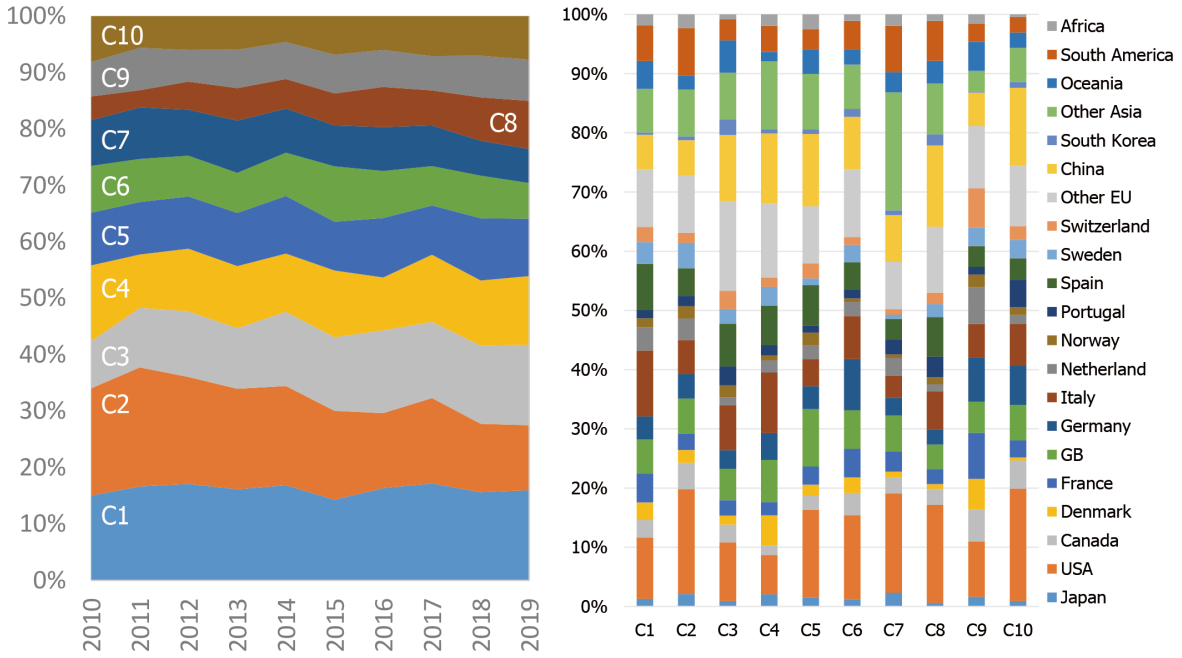
図表 2.2.10-2　　2010年～2020年7月に発刊されたCEを含む論文の概況

る金属資源の回収、都市鉱山としての管理方法などに関する研究がなされている。 C7は産業共生やエコインダストリアルパークに関する研究であり、都市計画や地域設計に関する研究が含まれていた。トップ10クラスターの中で最も著者所属に中国が多く含まれており約28%であった。 C8では建築物に関する資源循環が議論されており、C9では食料や一般廃棄物に関する循環の可能性が研究されている。C10では都市の機能としての循環が議論されており、ツーリズムなどとの関係性なども示されていた。

図表2.2.10-3　　LCAを含む文献群のクラスター別キーワード、ノード数、被引用回数

クラスター		キーワード	ノード数、平均被引用回数
C1	-1	urban agriculture, tomato, lettuce, rooftop greenhouse, cropping system, organic farming, hydroponic, farming system,	409, 4.82
	-2	milk production, dairy farm, cheese, fat and protein,	328, 5.27
	-3	rice production, cropping system, data envelopment analysis, energy use efficiency, paddy production,	315, 4.87
	-4	seafood, fishery, aquaculture, aquaponics,	281, 6.65
	-5	dietary pattern, nutritional quality, food consumption, dietary guideline, dietary choice,	213, 3.96
C2	-1	ethanol, switchgrass, giant reed, miscanthus, sorghum, stover, lignocellulosic ethanol,	559, 3.95
	-2	logging residue, forest carbon, energy biomass, HWP（harvested wood product）,	322, 4.94
	-3	forest operation, pellet, torrefaction, logging, short rotation,	309, 3.86
	-4	biochar, pyrolysis, bio oil, hydroprocessing, charcoal production,	249, 4.12
	-5	PHA（polyhydroxyalkanoates）, PLA（polylactic acid）, biopolymers, bioplastics, phb（polyhydroxybutyrate）, biodegradable plastic	247, 3.33
C3	-1	embodied carbon, prefabricated, building construction, low carbon building,	408, 4.64
	-2	passive house, zero energy building, building stock, renovation, building retrofit, new building, family house,	378, 3.77
	-3	cork, brick, thermal insulation, insulation material, insulation thickness, fired clay,	330, 3.13
	-4	building information modeling, digital fabrication, zero energy building, parametric design, energy building,	237, 4.05
	-5	Nzeb（net zero energy building）, solar heating and cooling, ground source heat pump, new residential, office building,	167, 2.15
C4	-1	digestate, biogas plant, biogas production, biomethane, anaerobic,	413, 5.22
	-2	MSW（municipal solid waste）management, mechanical biological treatment, leachate, composting, landfill gas,	386, 4.37
	-3	MSW（municipal solid waste）management, integrated municipal solid, separate collection, source segregation, selective collection,	243, 2.72

	-4	deposit refund system, mechanical recycling, glass packaging, recycled plastic,	185, 2.54
	-5	restaurant food waste, animal feed, food surplus, food loss,	174, 4.03
C5	-1	energy payback time, crystalline silicon, building integrated photovoltaic, concentrator, cadmium telluride, microgrid, CIGS（Copper indium gallium selenide）,	354, 4.53
	-2	power loss, transformer, power transmission, energy system modelling, network asset,	284, 3.57
	-3	wind farm, axis wind turbine, gearbox, blade, onshore wind, offshore wind,	152, 3.68
	-4	perovskite solar cell, polymer solar, power conversion efficiency, organic photovoltaics,	133, 4.77
	-5	concentrating solar power, cooling heating and power, combined cooling, thermal energy storage,	131, 2.72
C6		machining, remanufacturing, pallet, hotspot database, metal arc, distributed recycling, criticality,	1181, 4.51
C7		microalgae, biodiesel, hydrothermal liquefaction, nannochloropsis, chlorella, seaweed, jatropha curcas, jet fuel,	1161, 5.65
C8		pavement, asphalt pavement, aggregate concrete, reclaimed asphalt,	1083, 4.99
C9		cropping system, specie richness, water scarcity, biodiversity impact, land use impact, organizational life cycle assessment, planetary boundary,	1081, 5.02
C10		electric vehicle, charging, vehicle, lithium ion battery, powertrain, high speed rail, fuel cell vehicle, charging infrastructure, carbon fibre, cathode, criticality,	1062, 4.93



（a）年別の発刊割合　　（b）著者所属の国別割合

図表 2.2.10-4　2010年～2020年7月に発刊されたLCAを含む論文の概況

図表2.2.10-3にLCAを含む文献群のクラスター別キーワード、ノード数、被引用回数をまとめる。図表2.2.10-4（a）に示される通り、各クラスターの割合は比較的安定しており、全体数が増えていることから、どのクラスターも過去10年で文献数を同等程度増やしていることがわかる。図表2.2.10-4（b）によると、トップ10クラスターの中で著者の所属となっている割合は、欧州で約53%、米国で約13%、中国で約9%、日本が約2%であった。国別にみると、米国が最も文献が多く、次いで中国となった。その後はイタリア、スペイン、イギリス、ドイツ、フランスと続き、日本は19位であった。

各クラスターを概観すると、まず、C1では食料生産、食品などに関する研究が含まれており、農業や酪農、漁業といったプロセスを対象としたLCA研究のクラスターであった。 C2はバイオマスを用いた生産技術や製品、制度に関する研究が行われており、バイオプラスチックに関する研究もC2-5として含まれていた。 C3では建築物や建築用材料に関する研究クラスターとなっており、ネットゼロ建物に関する研究もあった。 C4は廃棄物に関するクラスターとなっており、廃棄物から燃料やエネルギーを得る技術などが含まれていた。 C5は、エネルギー関連技術が含まれており、太陽光や風力、変動性再生可能エネルギーを用いるためのネットワークシステムなどの研究が含まれていた。C6は機械製品やそのリサイクルに関する研究が含まれており、金属資源のリサイクルについても含まれていた。 C7は藻類バイオマスに関する研究となっており、そこから得られるバイオディーゼル燃料や航空機用燃料に関する研究が含まれていた。 C8ではコンクリートや舗装、アスファルトといったインフラの構造材に関して研究がなされていた。 C9では水の消費や土地の利用に関する環境影響や、生物多様性など影響項目に関する研究が含まれていた。 C10は主に自動車に関する技術や製品についての研究が含まれており、バッテリーやそのリサイクルについても研究がなされている。

CEは、物質や資源の循環によって経済的な効果をも引き出し、生産と消費の在り方を根本的に変えることを意味しており、欧州委員会では、2030年までに廃棄物の65%をリサイクルすることや、包装廃棄物の75%をリサイクルすること、埋め立て廃棄量を10%削減すること、などを挙げている[2)]。世界経済フォーラムによる報告書では、循環により価値の基準を再定義すべきことや、人工知能等を用いることでより高効率化された建造物や製品を生み出し得ることなどが議論されている[3)]。これらの提言は産業界からの関心を高め、技術開発や導入を促している。さらにCEの規格化へ向けISO（国際化標準機構）においてTC（Technical Committee：技術委員会）が立ち上がるなどしており、欧州外へ向けての展開が進みつつある。資源・生産・消費管理のための手法として広範に使用されているLCAに関しては、研究論文はさらに増加している。

LCAについては、歴史的に、基礎的な方法論の深化とともに、応用研究・開発の推進が積極的に進められてきた。 LCAの適用先としては大きく、（A）製品レベルLCA、（B）組織のLCA、（C）消費者/ライフスタイルのLCA、（D）国のLCA、を挙げることができる[4)]。ここで、昨今の変遷として、LCAは、社会の中で単純に環境負荷を分析するだけにとどまらない、ライフサイクル思考のための方法論として位置付けられ始めていることが指摘できる。そのため、”LCA”を含まない物質・エネルギーの解析や、経済性の分析などにおいても、ライフサイクル全体に関する議論が必要であることは前提となりつつある。定量化すべき指標がさらに複雑化してきており、研究のターゲットとされる製品やサービスについては、水素やバイオマス由来の製品製造など、新規なものもあるが、従来対象となってきた製品群についても、開発途上国に対してなど、継続的に解析が行われている。現在開発済の方法論に基づくことで、既に存在している技術システムや社会システムを何らかの指標により定量的に評価することは、様々な事例研究から可能となっているといえる。しかし、導入数が少ないシステムや、将来技術に関する分析は、完全には実施できていない。

天然資源・循環資源の双方において重要になる技術開発の一つは分離・選別である。それはこれまでの技術では使いこなせなかった低品位の資源やスクラップを有効利用するためには当然必要な技術である。ここで

はAI、IoT技術の援用や、物理的な処理による回収対象成分の濃縮と、的確な乾式・湿式製錬などの従来技術の組み合わせの最適化が検討されてきている。新しい分離・選別の対象は次々と現れており、低品位鉱石からの忌避物質の除去、混合プラスチックスクラップからの難燃剤含有プラスチックの除去など、より細かいものを分けていく技術の開発が引き続きターゲットである。

また、鉱山現場における無人化へ向けた動きは急速に進みつつある。鉱山採掘現場においては低品位化、大深部化などが進んでおり、それを受けての大規模坑内堀技術の利用が進むなどしているが、これと平行して事故の危険は上がっている。この点、国際金属・鉱業評議会（ICMM）、国連環境計画（UNEP）、国連責任投資原則（PRI）は、2019年に発生した廃滓ダム決壊事故を機に、翌2020年に初めて廃滓管理に関する国際業界基準を策定・公表しており、改めて個別の事象に目を向ける動きがあったといえる[5)]。また、コロナ禍の影響もあってそもそも現場への人員配置を最低限に抑えようとする動きがある。その中で、鉱山機械業界で言えば世界のトップに位置する小松製作所を始め、日系企業が世界的に見て優位性を持つ資源開発関連では数少ない分野であり、引き続きこれをリードしていく必要がある。

資源循環の観点から、情報技術の援用も含め全体の効率化によるコスト削減は急務であり、特に物流の高効率化は避けられない課題である。静脈物流に関する研究は動脈に比べれば非常に少なく、急ぎ進める必要がある。動脈物流の知見を援用する取り組みも必要であろう。

最後に、資源のサプライチェーン全体を通したトレーサビリティの強化は社会的要請であって、そのための情報技術の援用も大きな研究課題である。例えば天然資源における紛争鉱物問題、循環資源においては例えば社会システムとして循環利用の進んだ製品に補助を出そうとしたときに、そのエビデンスとしての原料側のトレーサビリティ情報の利用などが考えられる。こうした動きは世界的に進みつつあり、またこうした動きと関連して、先述のCEのISO化の動きなどにも目を向ける必要がある。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

• プラスチック関連の技術開発と評価

従来から存在していたプラスチックリサイクルに関する技術・システム開発に加え、生分解性プラスチック、バイオプラスチックに関する研究開発が増えている。再生可能資源や廃棄物からの化成品製造という観点で、以前から存在していたが、近年のプラスチックに関する社会からの関心の高まりを受け、多くの研究開発が加速推進されている。合わせて、LCAをはじめとする評価に関するニーズも高まっている。各種国家プロジェクトにおいてもLCAプロジェクト期間中にLCAを実施することが要件となっていることもあり、技術開発に合わせた方法論の開発とケーススタディの実施が必要となっている。

• Nexus Analysis：多様な観点の依存性解析

食料と水の生産とエネルギー消費の相互依存性に関する分析（Food-Energy-Water Nexus Analysis）をはじめとし、多様な評価の観点の依存性を解析する研究が増えている。例えば、Energy-Nutrients-Water、Nutrition-Environment、Climate-Renewable energy-Resource management-Bioeconomy、Energy material-Buildings-Mobility-Energy systemsなどがある。これらは国や地域ごとに行うものであり、統計データや技術・システムに関する情報を組み合わせ、現在の依存性を明らかにするものから、何らかの変化が起きたときに将来的にどのような依存性へと波及するかなど、主に可視化して議論することを目的とした研究が多く存在する。特に農業や食料に関する研究は、元々Food-Energy-Water nexusが2011

年頃から議論されはじめ[6]、FAOからもガイドラインが発行[7]されるなど、活発化している。本領域の主要雑誌であるApplied EnergyやResources、Conservation and Recycling、Sustainabilityなどにおいて特集号が組まれるなど、研究報告も増えてきている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

• カーボンリサイクル

CO_2を炭素資源と捉えてこれを回収し、多様な炭素化合物として再利用（リサイクル）するカーボンリサイクルが推進されている[8]。カーボンリサイクル技術のロードマップが策定され、多くの産学官連携のプロジェクトが開始されている。

• プラスチック資源循環

プラスチック資源循環戦略に基づき、Plastics Smart[9]や関連技術開発のプロジェクト[10]が推進されている。特にバイオプラスチックについては、導入ロードマップが2020年度に検討されており、2030年までに最大限の導入を目指した技術開発の方針を策定する試みがなされている[11]。

• Horizon 2020における関連プロジェクト

Horizon2020とは、欧州全体で行われる研究・イノベーションの枠組み計画であり、様々なプロジェクトを包含している。その中で社会的課題解決を志向する枠組みの中に環境に関するものもあり、その中で資源効率にかかる研究のための枠がそれなりに用意されている。技術寄りのものから社会システム全体を扱うようなものまで幅広く支援されている。

（5）科学技術的課題

• 社会（地域）システムの変革を伴う技術システムの設計・評価プロジェクト

資源・生産・消費管理として、特定の技術システムに限った設計や評価といった研究が行われてきた。しかし、例えば木質バイオマスからの化成品や燃料、エネルギーの生産を議論する場合、林業における技術システムや社会システムの変化が、ライフサイクル全体での性能に大きく影響しうる。この変化は地域性があり、日本全国の平均的な分析結果だけでは、個別具体的な技術の導入を議論することができない。こうした社会システムの変革を伴う技術システムとしては、国内ではエネルギーシステムが最たるものの一つといえる。例えば太陽光パネルによる電力供給は、低炭素化効果があると言われているが、これは実際に発電が行われ、その電力が使用された場合に限っての話である。地域によっては系統連系が回答保留されたり、出力抑制が行われたりと、太陽光パネルを設置するだけではその電力が有効に使われない場合が増えつつある。一方、リアルタイム市場やアンシラリーサービスといった電力システム側の変革が議論されている中、太陽光パネルが持ちうる価値が変化する可能性がある。デマンドレスポンスなど、従来とは異なる価値を社会システムの中で持ちうる技術もありえる。こうした技術システムの価値や使用形態は社会システムの変化によるところも多く、将来の技術システムを評価することが重要となる。この点、社会における技術の評価として、社会技術的（Sociotechnical）な分析が必要とされてきている[12]。自然科学的なシステムの解析に加え、人文社会的な人の行動や政策、経済といった観点の分析が技術の社会導入に不可欠であり、こうした学際的な取組が当該分野ではますます必要となってくる。

（6）その他の課題

• データの更新による過去の研究の再評価と、技術・システムの将来性の評価

LCAをはじめとした評価手法により環境影響などが定量化された過去の研究が蓄積してきているが、電力システムをはじめとしたエネルギーシステムや、生産におけるインベントリが、プロセスシステムの省エネ化などによって変化している。例えば、10年など、一定の期間を経過した過去の研究対象については、アップデートのための研究を実施すべきである。しかし、科学研究においては、こうした過去の研究結果の再評価に関して、研究費等を獲得しやすい状況にはなっていない。常に更新しながら現状を把握すべき環境性能などの技術システムの側面については、何らかの仕組みで継続的な分析を可能とすることが必要といえる。

また、再生可能資源を用いる技術は2030年/2050年などに導入されることを狙って開発されているが、多くの技術評価は現在（もしくは過去）のインベントリデータに基づいた評価になっている。他の技術の研究開発や、インフラの変化、主流となっているマテリアルフローなどが現在からどの程度変化しているのかを視野に入れた評価を行い、真に2030年/2050年などに導入されているべき技術・システムを探索することができる方法論が必要である。

• その他

分野間連携や若手人材の育成という観点では、当該分野の研究者ネットワークをさらに拡大していくことが必要といえる。サプライチェーンについてはますます国際化も進んでいることから、国際プロジェクトの支援も必要である。新規な技術開発における評価を実施するためには、新規技術のプロジェクトに対して、資源・生産・消費管理の観点からのシステム評価を義務付けるプロジェクトをさらに増やしていくことも有効といえる。LCAに関しては徐々にではあるが、確実に要素技術開発プロジェクトにおいても考慮すべき観点とされるようになってきた。一方、考慮されている事項が温室効果ガス排出など、LCAが評価できる範囲のうち限られた部分のみとなっている。また、マテリアルフロー分析や産業連関分析など、他の方法論についてはまだ検討範囲として含まれていないものも多い。技術評価手法としての定着をより一層進めていく必要がある。

（7）国際比較

資源・生産・消費管理においては、多くの研究が実際の技術システム・社会システムを対象としたものであり、応用研究といえる。そこで、下表において基礎的な研究としては手法論やデータベースの開発に関して記載し、特定の技術システム・社会システムを対象としたものは全て応用研究として記載する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	インベントリデータベースとしてIDEAv2が公開された。国内のデータベースとしては最大のものであり、多くのLCA研究で使用可能な状態となっている。また、日本版被害算定型影響評価手法（LIME；Life-cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modelling）が広く一般的に利用可能となっており、インベントリデータベースと合わせて国内の状況を反映させた評価が可能となっている。工業団体等からの提供データを格納したJLCA-LCAデータベースも存在しているが、データの更新は必ずしも頻繁ではない。

	応用研究・開発	○	→	LCAやマテリアルフロー分析、産業連関分析を用いた各種研究報告がなされているが、かねてより、他国と比べて、温室効果ガス排出に特化した評価が多いことが問題となっている。近年でも、LCAを実施するとしながらも温室効果ガスを算定するだけにとどまる研究が多く、総合的な環境影響が評価されていない事例がある。国のプロジェクトにおいても、エネルギー起源の温室効果ガスの排出量のみを分析対象として公募されているものがほとんどであり、他国と比較して、環境影響の総合評価と、持続可能性の評価に関し、認識の違いができてきている。 リサイクルに関する技術的な側面について言えば、LIBSソーターの実用化や電気パルス破砕など技術の社会実装は進みつつあるが、諸外国と比して圧倒的に進んでいると言える状況ではない。またシステム的な側面は圧倒的に遅れている。他方で、本稿の整理の対象外ではあるが、乾式製錬等の分野は多くの現場を持つこともあり決して弱くはないことから、それを見据えての分離・選別技術の開発という意味では若干の優位性がある。国際誌における論文数等でいえば非常に多いというわけではないが、本領域については和文誌に重要な論文が見られる。
米国	基礎研究	○	→	応用研究に比べると基礎的な手法論の研究報告は多国と同等の論文数であった。Social Life Cycle Assessmentについてはイタリアやドイツ、カナダなどに比べて論文数が少ない。
	応用研究・開発	◎	↗→	かねてより研究開発が盛んであり、近年もそれを維持している。いずれのクラスタにおいても上位の論文数を発刊した国としてランクインしている。特に、近年、太陽電池やリチウムイオン電池に関する研究報告が多くなってきており、建造物に関する研究事例も、中国に次いで2番目に多くの研究報告を挙げている。食品関連でもイタリアに次いで多い。水処理やバイオ燃料、サプライチェーン、シェール・新資源においては、世界トップの論文数となっている。 リサイクルに関する技術的な側面は、DOEが設立したCMI（Critical Material Institute）などにおいて、応用研究・開発が進められている。またアップルコンピューターの解体ロボットLiamやDaisyのように、動脈側の産業によるロボット解体など一歩先の技術開発が進む可能性がある。
欧州	基礎研究	◎	↗→	【EU】 世界最大のライフサイクルインベントリデータベースecoinventのデータ更新を継続的に行っている。現在の最新版は2018年8月23日に公開されたversion 3.5である。 ecoinventやSocial Life Cycle Assessment手法の開発は、欧州全体で執り行われていることであり、研究開発が盛んである。 【ドイツ】 Social Life Cycle Assessmentに関する研究が多く報告されている。 【英国】 イギリス化学工学会が総説したJournalであるSustainable Production and Consumptionでは、応用研究だけでなく、システム最適化手法における目的関数にLCAの結果などを置き、生産システムの持続性を高める方法論の議論が展開されるようになっている。
	応用研究・開発	◎	↗→	【EU】 かねてより研究開発が盛んであり、近年もそれを維持している。いずれのクラスタにおいても、欧州各国は論文数で上位に位置しており、研究が活発に行われているといえる。特に、イタリア、スペイン、英国、ドイツ、フランス、オランダ、デンマーク、スイス、ノルウェーの順に論文が多い。特定の研究機関としては、デンマーク工科大学、ライデン大学、マンチェスター大学、スイス連邦工科大学、ミラノ大学、ミラノ工科大学からの発表数が多く存在している。

				ミラノ大学、ミラノ工科大学をはじめとするイタリアからの研究発表が増加している。特に食品関連分野においては群を抜いて多くの論文が報告された。スペインからは特に水処理に関する研究報告や太陽光、風力に関する論文が報告されている。 ecoinventを有するスイスからの研究報告も多い。 【ドイツ】 ベルリン工科大学などを中心に研究報告が増えている。太陽光等の再生可能エネルギー関連について論文数が増加している。 【英国】 再生可能エネルギー関連や、バイオ燃料、シェール・新資源関連の研究報告が増えている。マレーシアにおけるパーム産業に関する研究報告もなされている。 リサイクルの技術的な側面について言えば、Horizon2020からの財政的な支援もあり、そもそも分離・選別技術のレベルの高さと相まって一歩先を進んでいる印象もある。またシステム的な研究・実際の社会システム設計などとこうした技術開発がより密接にリンクした形で進んでいるような所もあるようにみられる。
中国	基礎研究	×	↘	中国国内のライフサイクルインベントリの多くはecoinventに格納されているが、一部のサプライチェーンにとどまっており、多くは明らかとなっていない。環境影響を定量化するためのライフサイクルインパクト評価手法についても、中国の状況に合わせた解析をできる係数は、完全には整備されておらず、手法論の開発水準は高くないといえる。
	応用研究・開発	◎	↗	清華大学からの研究報告が増加しており、多くのクラスタにおいてもトップレベルの論文数となっている。特に建造物や廃棄物利用に関する研究報告は世界でトップであり、報告件数が多い。ただし、サプライチェーンに関する研究報告は比較的少ない。 レベルが高いとは言えないものの、社会実装を試みる現場は多く、また動脈側の産業の急激な成長が静脈産業の技術的な進展を促しているような側面もある。例えば電気自動車関係の急速な発展はバッテリーリサイクルに関する技術開発を推し進めているようなところは、技術、社会システム双方に見られる。 また、鉱山開発現場を多く持つことから、広い意味で資源関連の技術が進むことはありえる。
韓国	基礎研究	△	↘	特に目立った研究開発がなされておらず、報告論文数も少ない。
	応用研究・開発	△	↘	特に目立った研究開発がなされておらず、報告論文数も少ない。ただ、電子産業のサプライチェーンなど、韓国が関連するライフサイクルについての研究報告が他国からなされることがある。 技術的な側面について言えば、状況は我が国とある意味近く、学術的な交流も多い。また社会システムの進展度合いも非常に近いことから社会実装される技術も近いと言える。
その他の国・地域	基礎研究	△	→	インベントリデータベース、ならびにライフサイクル影響評価手法のいずれにおいても、アジア各国における研究報告ではecoinventや日本のLIMEなど、他国の手法が用いられている。
	応用研究・開発	○	↗	衣料品やパームなど、東南アジアを中心に生産され、世界に輸出されている製品に関し、LCAなどを用いた評価が盛んになっている。実際に評価を実施しているのは、欧州の研究者などが多いが、アジア諸国の研究者が共著者として参画しているものが多い。

				リサイクル関係の技術について言えば、台湾をはじめとする一部地域はアジアの中では非常に高いレベルにあり、そこに実装される技術も比較的高いものがある。その他ではタイなどで徐々に技術が実装されるように見られるが、これは先進国が工場を移転した結果、そこで発生する廃棄物の処理技術もあわせて移転させているような場合も見られる。また、近年豪州において資源循環に焦点を当てた研究が急激に増えている印象があるが、まだ突出した成果があるようには見受けられない。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・分離技術（ナノテク・材料分野　2.1.5）
・植物由来材料（ライフ・臨床医学分野　2.2.3）

参考・引用文献

1）イノベーション政策研究センター・東京工業大学梶川研究室,「学術俯瞰システム」『学術俯瞰』, https://academic-landscape.com/（2020年12月30日アクセス）
2）European Commission, “Closing the loop：Commission adopts ambitious new Circular Economy Package to boost competitiveness, create jobs and generate sustainable growth”, European Commission, http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_en.htm（2020年12月30日アクセス）
3）World Economic Forum and Ellen MacArthur Foundation, “Intelligent Assets：Unlocking the Circular Economy Potential”, Ellen MacArthur Foundation, https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/intelligent-assets（2020年12月30日アクセス）
4）S. Hellweg and L. M. Canals, “Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment”, *Science* 344, no. 6188（2014）：1109-1113, doi：10.1126/science.1248361
5）UNEP（The United Nations Environment Programme）, “New Global Industry Standard on Tailings Management aims to improve the safety of tailings facilities in the mining industry”, UNEP, https://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/new-global-industry-standard-tailings-management-aims-improve-safety（2020年12月30日アクセス）
6）M. Bazilian et al., “Considering the energy, water and food nexus：Towards an integrated

modelling approach", *Energy Policy* 39, no. 12（2011）：7896-7906, doi：10.1016/j.enpol.2011.09.039
7）FAO（Food and Agriculture Organization of the United Nations）, "The Water-Energy-Food Nexus A new approach in support of food security and sustainable agriculture", FAO, http://www.fao.org/3/a-bl496e.pdf（2020年12月30日アクセス）
8）経済産業省資源エネルギー庁長官官房資源エネルギー室,「カーボンリサイクルについて」『経済産業省資源エネルギー庁』, https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/（2020年12月30日アクセス）
9）環境省,「プラスチック・スマートにご賛同いただける皆様」『環境省』, http://plastics-smart.env.go.jp/（2020年12月30日アクセス）
10）環境省水・大気環境局水環境課海洋環境室,「令和２年度脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業（マイクロプラスチックによる汚染防止のための化石資源由来からの代替）（委託）募集について」『環境省』, http://www.env.go.jp/press/107791.html（2020年12月30日アクセス）
11）環境省,「バイオプラスチック導入ロードマップ検討会」『環境省』, http://www.env.go.jp/recycle/post_58.html（2020年12月30日アクセス）
12）F. W. Geels et al., "Sociotechnical transitions for deep decarbonization", *Science* 357, no. 6357（2017）：1242–1244, doi：10.1126/ science.aao3760