

## 2.9.5 ライフサイクル管理（設計・評価・運用）

### (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設計・評価・管理に関する技術を扱う。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、社会システム構築などがカーボンニュートラル社会に向けて必要となる。こうした社会の変化に対し、ライフサイクルアセスメント（LCA）、物質ストック・フロー分析（MFAs）、産業連関分析（IOA）、各種フットプリントやラベリング等による行動変容の分析などにより、現状の把握から、技術・システム・仕組みの導入による効果の予測が必須となっている。本領域はこうしたライフサイクルに関する管理（設計・評価・運用）技術の開発を対象とする。

### (2) キーワード

ライフサイクルアセスメント（LCA）、マテリアルフロー分析（MFAs）、産業連関分析（IOA）、エコロジカルフットプリント、環境ラベル、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

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

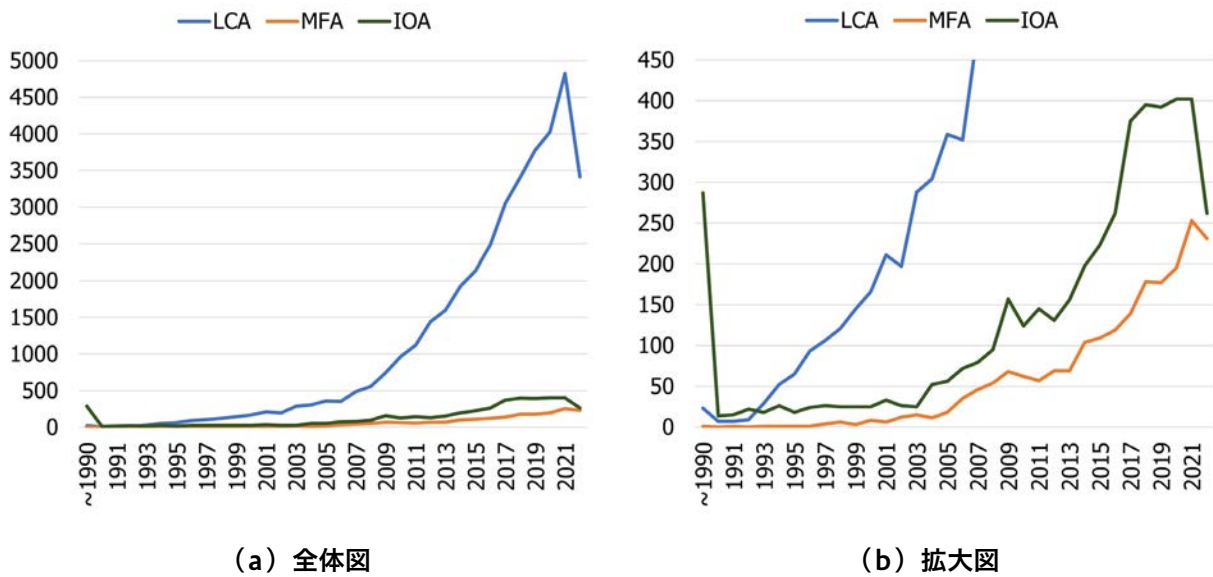
ライフサイクルに関わる資源としては、インフラや人的資源なども必須の要素といえるが、本領域では主として素材系資源に関する話題を扱う。こうした資源の効率的利用が叫ばれるようになって久しいが、大きな方向性の変化はみられない。ただし、気候変動の緩和に向けて社会的な要求がさらに高まっていること、大学等研究機関に限らず企業・政府が資源の循環利用を目指していること、植物資源などに見られるように資源採掘における社会問題を回避するなどの公正化が強く求められるようになってきた。その結果、これまでのライフサイクルを考慮しない技術開発の継続ではなく、天然資源消費量の削減、循環利用の促進につながる新しい技術の開発とその社会実装は極めて社会・経済的意義が高いものとして認識されてきている。

#### [研究開発の動向]

##### • 計量書誌分析による動向調査

世界的な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、抄録、著者キーワードに登録された文献のうちLCAに関連する文献（“life cycle assessment”もしくは“life cycle analysis”もしくは“life cycle management”を含んだ2017年10月1日～2022年9月30日（直近5年）の19,414件）とMFAに関する文献（“material flow analysis”を含んだ全期間の2055件）、IOAに関する文献（“input-output analysis”を含んだ全期間の4,569件）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<sup>1)</sup>を用いて、計量書誌分析を行った。それぞれの文献群（LCA群、MFA群、IOA群）の文献数の推移を図表2.9.5-1に示す。いずれの論文群においても近年急激に文献数が増加していることがわかる。LCA群については1990年代中頃から文献数が増えはじめ、2000年代に入ると急増している。MFA群は他の論文群と比較し最も数が少ないが、2000年代に増加傾向になっている。IOA群は古くから論文が存在しており、LCA・MFAと比較し手法として古くから存在していることがわかる。これらの論文群に対し、引用関係からのクラスタリングによりそれぞれ、LCA群クラスタ（16,690件の文献による23クラスタ）MFA群クラスタ（1,740件の文献による10クラスタ）、IOA群クラスタ（3,445件の文献による13クラスタ）に分割された。各論文群において、分類される文献数が多い上位のクラスタに関して議論する。LCA群については上位10クラスタ、MFA群・IOA群についてはいずれも上位5ク

ラストとする。対象とする上位クラスタによるカバー率は、LCA群で約97.4%、MFA群で約91%、IOA群で約73%となった。



図表 2.9.5-1 各論文群の論文数推移

• LCAに関連する文献群の計量書誌分析結果

図表 2.9.5-2 に LCA に関連する文献群のクラスタ別キーワード、ノード数、平均被引用回数 (直近5年のみ) をまとめる。図表 2.9.5-3 (a) より、各クラスタの占める比率は文献数割合は直近5年で大きな変化はなく、図表 2.9.5-1 より文献数全体が増加していることから、どのクラスタも過去5年で文献数を同等程度増やしていることがわかる。図表 2.9.5-3 (b) によると、トップ10クラスタの中で著者の所属となっている割合は、欧州で約47%、米国で約10%、中国で約12%、日本が約1%であった。国別にみると、中国が最も文献が多く、次いで米国となった。前回の本俯瞰報告書 (2021年) と比較すると、1位と2位の順位が入れ替わっている。

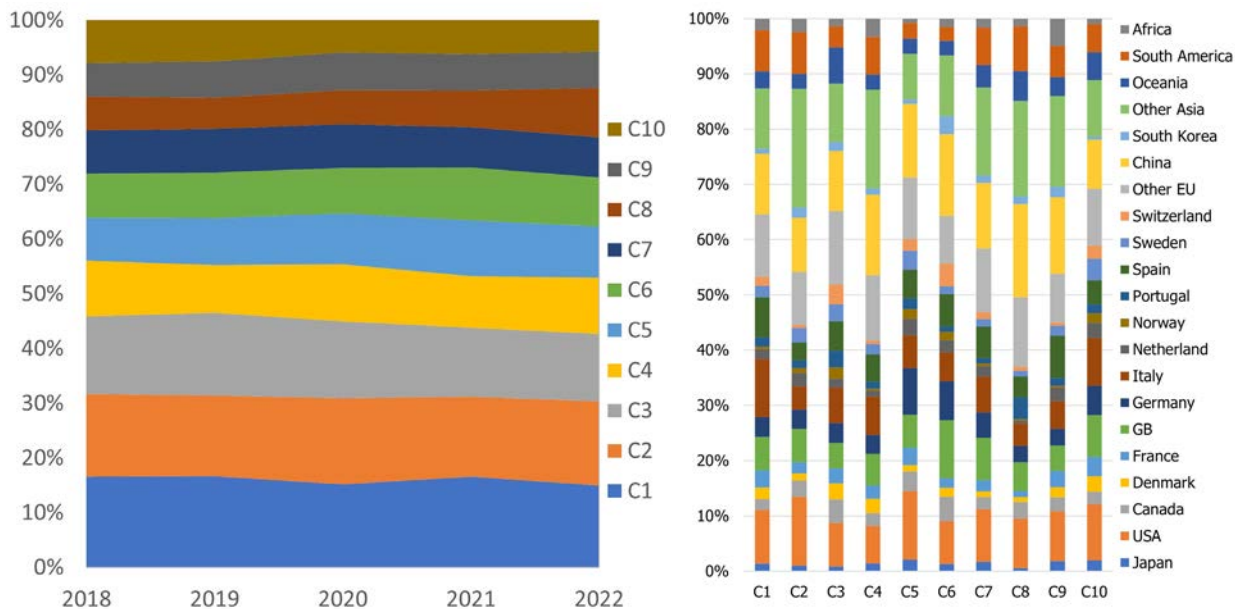
各クラスタを概観すると、C1に食料生産、食品生産、栄養などに関する研究が含まれており、農業や酪農、漁業といったプロセスを対象としたLCA研究が最も大きなクラスタとなった。これは前回の本俯瞰報告書 (2021年版) と比較し、C1クラスタ内で多少のキーワードの変化があったが大きな変化はない。C2はバイオマスを用いた生産技術や製品、制度に関する研究が行われていた。バイオプラスチックに関する研究がやや減少した一方、C2-4として持続可能な航空燃料 (SAF) がサブクラスタとして特定された。SAFに関しては顕著に文献数が増えており、クラスタとして認識できるほどになっている。C3では建築物や建築用材料に関する研究クラスタとなっており、建造物そのものに含まれる炭素に関する議論が行われ、建物におけるデジタルトランスフォーメーションに関連するような研究が増えていることがわかった。C4は廃棄物に関するクラスタとなっており、廃棄物から燃料やエネルギーを得る技術などが含まれ、大きな変化はない。C5はエネルギー関連技術が含まれており、サブクラスタの構造に変化があった。C5-1において車載用リチウムイオン電池と関連する技術に関するLCA研究が含まれ、C5-2では電気自動車と他の自動車が比較されるような研究が含まれるようになった。C5-3ではレドックスフロー電池に関する研究が含まれ、C5-4ではマイクログリッドなどのネットワーク技術に加え、定置型の電池の活用に関するLCA研究が含まれていた。C5-5には燃料電池車に関するLCAとして水素の生産に関する研究も含まれていた。特に自動車関連技術の研究の文献数が増えていた。C6では再生可能資源由来のメタノールや水素の製造、電解、大気からの二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の直

接回収 (DAC)、CO<sub>2</sub>の分離回収と有効利用 (CCU) など、炭素資源の循環に関連する技術の文献が含まれていた。C7は太陽光や風力、地熱、といった再生可能エネルギーを活用するための技術に関する文献が含まれていた。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では水に関する技術が含まれており、上水・下水に関する技術について研究されている。C10はオムツや電気電子機器廃棄物 (WEEE)、衣服など、多様な製品に関する LCA 研究が含まれており、LCA ケーススタディ群のクラスタと考えられる。

図表 2.9.5-2 LCA 群のクラスタ別キーワード、ノード数、平均被引用回数 (直近5年のみ)

クラスタ		キーワード	ノード数、平均被引用回数
C1	-1	milk production, dairy farm, cheese, fat and protein	320, 2.79
	-2	Food, packaging, food loss, food supply chain	232, 2.38
	-3	Wheat production, alfalfa, cropping system, maize, tillage,	227, 3.22
	-4	Diet, nutritional, nutritional quality, dietary pattern, school canteen, protein,	226, 2.60
	-5	Rice production, circular agriculture, capitalization, farming, cultivar, cherry, paddy, orchard, jasmine	128, 1.84
C2	-1	Microalgae, photobioreactor, chlorella vulgaris, hydrothermal liquefaction,	342, 3.06
	-2	Wood pellet, short rotation coppice, bioenergy, camelina, willow, miscanthus,	182, 1.77
	-3	ethanol, switchgrass, giant reed, miscanthus, sorghum, stover, lignocellulosic ethanol,	152, 1.66
	-4	Sustainable aviation fuel, biojet, Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), Fischer-Tropsch Synthesis (FT) , and Alcohol to Jet (ATJ) ,	145, 2.26
	-5	Biochar, carbon dioxide removal, bioenergy with carbon capture, pyrolysis torrefaction,	137, 2.47
C3	-1	Building, renovation, embodied carbon, building construction, low carbon building,	220, 2.15
	-2	building information modeling, digital fabrication, zero energy building, parametric design, energy building,	217, 5.03
	-3	HWP: harvested wood product, displacement factor, dynamic LCA, wood product, forest	191, 3.06
	-4	Thermal insulation, envelope, external thermal insulation composite system, aerogels, retrofit,	172, 1.78
	-5	prefabricated, slab system, reinforced concrete, modular construction,	136, 1.91
C4	-1	MSW (municipal solid waste) management, mechanical biological treatment, waste-to-energy technology	264, 2.93
	-2	Digestion, anaerobic digestion, food, composting, restaurant food waste,	178, 2.83
	-3	MSW (municipal solid waste) management, picker, PCB resin, vaccination, biological treatment	148, 2.22
	-4	digestate, upgrading, biogas production, biomethane, anaerobic, methanation,	123, 1.99
	-5	Biogas plant, digester, scale biogas, household biogas,	117, 2.37
C5	-1	Lithium-ion battery, battery pack, vehicle battery, battery recycling, cathode material, NMC (nickel manganese cobalt oxide) , LFP (lithium iron phosphate) ,	226, 4.62

	-2	ICEV (internal combustion engine vehicle) , electric vehicle, hybrid electric vehicle, charging,	161, 3.11
	-3	Redox flow battery, vanadium, microgrids, energy storage system, lead acid,	114, 2.18
	-4	Transformation pathway, energy system model, marginal mix, metal requirement, energy return on energy investment	102, 2.54
	-5	Fuel cell vehicle, hydrogen production, hybrid,	101, 1.88
C6	Methanol, hydrogen production, marine fuel, electrolysis, direct air capture, reforming, methanation, CCU, chemical looping,	1090, 3.09	
C7	Perovskite solar cells, wind farm, phase-change materials, energy payback time, crystalline silicon, geothermal power,	952, 2.52	
C8	Recycled aggregate concrete, geopolimer, carbonation, compressive strength, construction and demolition waste	846, 3.18	
C9	Waste water treatment, urban water, greywater, membrane, photo-Fenton, sludge	819, 2.86	
C10	Diaper, apparel, WEEE, textile, cotton, latex, product service system	816, 2.18	



(a) 年別の発刊割合

(b) 著者所属の国別割合

図表 2.9.5-3 2017年10月～2022年9月に発刊されたLCAに関連する文献の概況

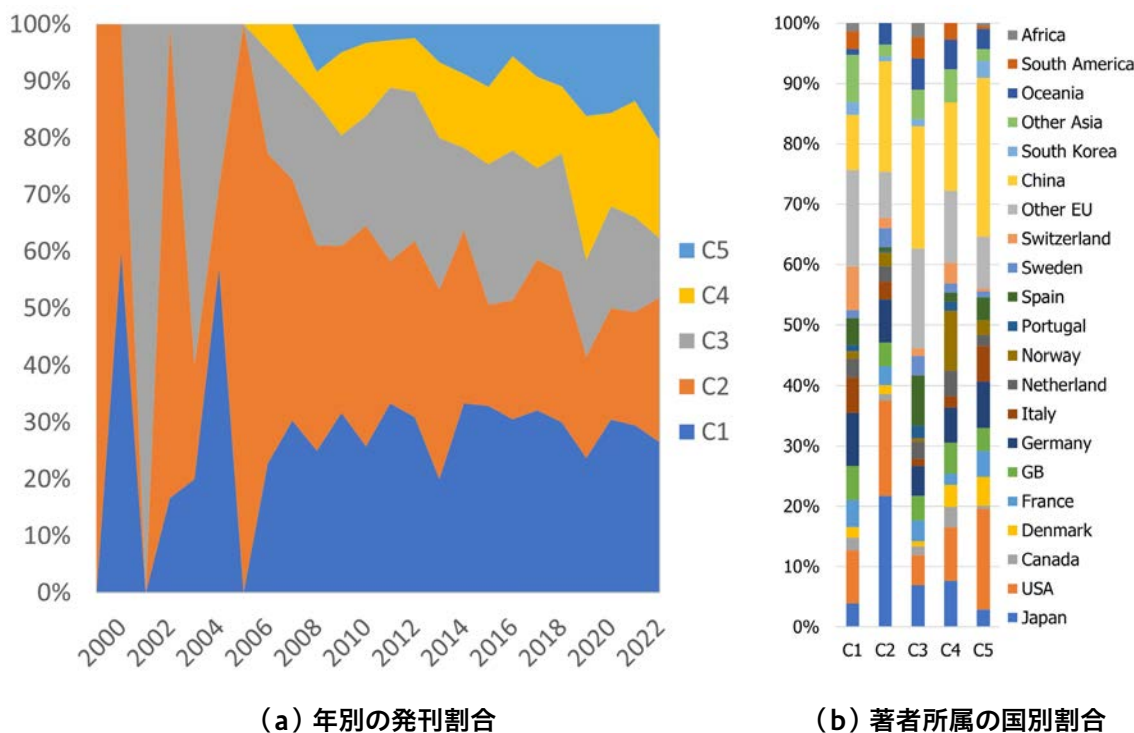
• MFAに関連する文献群の計量書誌分析結果

MFAとは、社会・経済に関連したモノの流れを可視化する手法であり、産業連関表やその他の統計等を用いて領域（国や地域など）の内外における対象（製品や元素など）の動きを把握できる<sup>2)</sup>。図表2.9.5-4にMFAに関連する文献群のクラスター別キーワード、ノード数、平均被引用回数をまとめる。図表2.9.5-5 (a)より各クラスターの文献数割合は変動しており、かつてはC2が割合として大きかったことがわかる。C1とC2は2000年以前から存在するクラスターであり、C3は2000年を過ぎたところからC4とC5は2006年以降に発生したクラスターであった。図表2.9.5-5 (b)によると、トップ5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49%、米国で約11%、中国で約16%、日本が約10%であった。国別にみると中国が最も文献が多く、次いで米国、日本が第3位となっている。特にC2において日本の文献が約22%を占めるなど、割合が大きい。

各クラスタを概観すると、まず、C1において木材や食料、食品廃棄物、固形廃棄物などに関するMFA研究が含まれている。ここでは生活に関連して動くモノに関する解析が含まれていた。C2では、鉄や銅、アルミニウム、クロム、ニッケルといった、金属のMFA研究が含まれていた。これらC1およびC2では、MFA研究の初期から対象となってきたモノについて議論がなされており、多様な国において同様に解析が進められていることがわかる。C3は都市部におけるモノの動きを対象としたMFA研究が含まれており、都市が関わるモノの流れが可視化されていた。C4においては、建造物のストックについても触れたMFA研究がなされ、特に時間軸を意識した解析も行われている。C5においては近年増加傾向となっているレアメタル等の希少金属に着目したMFA研究が含まれていた。特にC5については近年文献数が増加しており、重要性が高い研究分野といえる。

図表 2.9.5-4 MFA群のクラスタ別キーワード、ノード数、平均被引用回数

クラスタ	キーワード	ノード数、平均被引用回数
C1	Wood, food loss, municipal solid waste,	381, 2.33
C2	Steel, stainless, copper, metal, tellurium, chromium, aluminum, scrap, cadmium, nickel	345, 5.03
C3	Urban, raw material equivalent, ecological footprint, economy wide material,	245, 3.49
C4	Building stock, demolition, residential building, renovation, dwelling stock, construction material, infrastructure	200, 7.69
C5	Cobalt, battery, lithium, magnet, wind, electric vehicle, neodymium, tungsten, terbium, second use,	145, 4.06



図表 2.9.5-5 2022年9月までに発行されたMFAに関する文献の概況

## ・IOAに関連する文献群の計量書誌分析結果

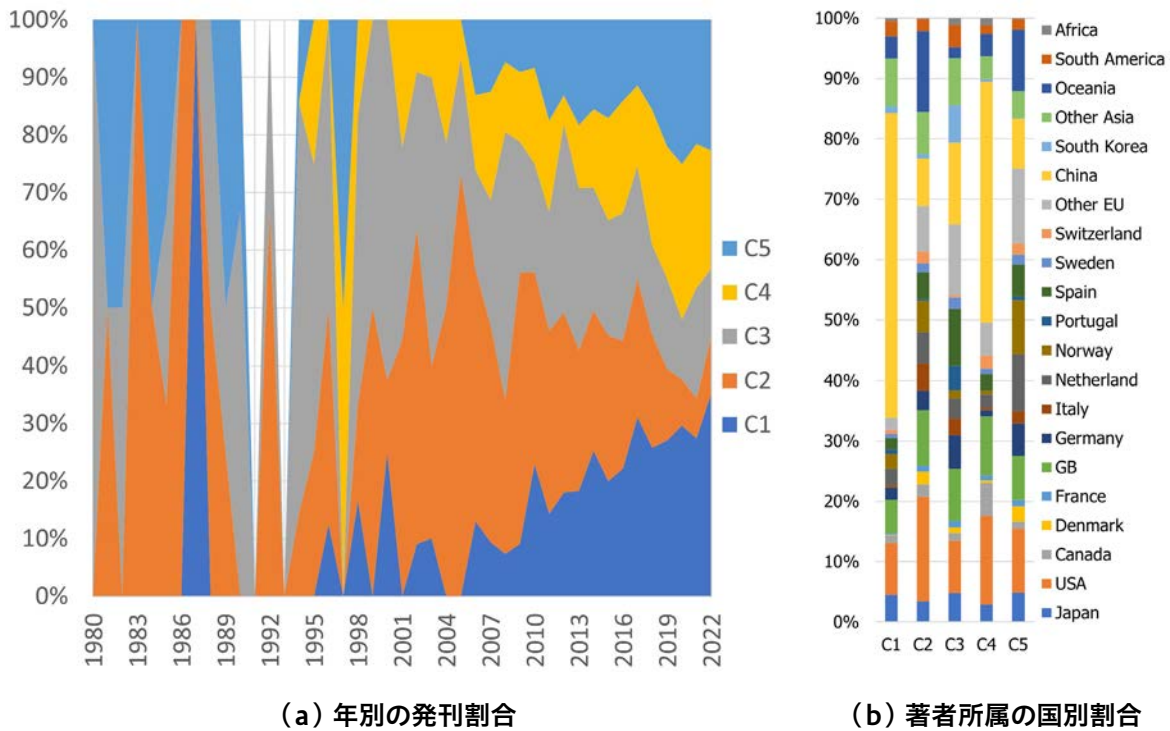
IOAとは、一国全体の経済活動を巨大な1つの勘定体系（Accounting system）として捉え、一定期間の産業や家計のすべての投入（消費）と産出を行列形式で記述した産業連関表（列方向に各産業の費用構造（生産技術構造）、行方向に販売構造の情報を持つ）を用いて、ある産業部門の需要の増加による経済全体への波及効果や産業構造の変化等を分析する手法である。これは、1936年にアメリカの経済学者Wassily Leontiefが1919年と1929年のアメリカ経済を対象に産業連関表を作成したことに始まる<sup>3), 4)</sup>。図表2.9.5-6に産業連関分析に関連する文献群のクラスター別キーワード、ノード数、平均被引用回数をまとめる。Web of Science上では、1949年のWassily Leontiefの論文が“Input output analysis”を含んだ最初の論文である。1950年代、1960年代に出版された文献はそれぞれ34件、39件に対し、1970年代：101件、1980年代：112件、1990年代：212件、2000年代：614件、2010年代：2,394件となっている。近年（2020年、2021年）は年間400本以上の文献が出版されており、特に2010年代以降の増加が著しい。1960年代までは、主に産業構造の分析やその国際比較・経年変化に関する分析に焦点が当てられていたが、1960年代後半から経済活動と環境汚染との関係解明に注目が集まり、近年の環境問題への関心増大に伴って文献数も伸びていると考えられる。図表2.9.5-7（a）によると、上位すべてのクラスターに環境問題に関連するキーワードが入っており、各クラスターの文献数割合は大きく変動しているが、2000年代以降、特にC1やC4の割合が増加していることがわかる。C4は1994年以降に発生したクラスターである。図表2.9.5-7（b）によると、トップ5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39%、米国で約12%、中国で約26%、日本が約4%であった。国別にみると、中国が最も文献が多く、次いで米国、日本は第5位となっている。日本の文献の約27%がC1、24%がC5に属するが、C2、C3、C4もそれぞれ15-19%と比較的どのクラスターに属する研究も行われていることがわかる。

各クラスターを概観すると、C1において貿易やそれに伴う炭素移転、製品の製造や輸送の際などに排出されるエンボディード・カーボン、そしてその最大の関係者である中国に関するIOA研究が含まれている。特に輸出品生産から排出される環境負荷の責任配分についての研究が多く、グローバルサプライチェーンの情報からそれらを分析できることはIOAの大きな強みである。C2はLCAに関するIOA研究が含まれており、特にIOAによるLCAと積み上げ型のLCAを連結したハイブリッドLCAを用いた分析が多い。C3は水運や漁業など海に関連するIOA研究が含まれており、グローバル輸送の多くを担っている海上輸送の各国経済に対する役割や影響力、今後の構造変化についての研究が行われている。C4は直接的間接的な水需要を表すバーチャルウォーターやウォーターフットプリント、水不足など水に関連するIOA研究が含まれており、近年深刻な水需要の増大と水不足への懸念を持つ中国を対象とした研究が多い。C1の貿易に付随する環境負荷の移転・責任配分と同様に、輸入品の生産に必要なであった水資源への責任をIOAを用いて明らかにすることができる。C5はバイオエコノミーや生物多様性、マテリアルフットプリント、災害、土地消費などに関するIOA研究が含まれており、グローバルなサプライチェーンによる生物多様性や土地消費、環境負荷に対するフットプリントを分析可能な多地域間産業連関表（MRIO）もキーワードとして抽出されている。特にC1、C4、C5が近年増加しており、IOAの適用・応用分野として関心を高めている。C1～C5以外のクラスターでは、例えば、旅行やスポーツなどの巨大イベントの経済効果についての研究クラスター（ノード数：239）、家計や都市の需要やそれに付随する環境負荷に関する研究クラスター（ノード数：235）、鉄や金属産業の構造やフロー、その廃棄物に関する研究クラスター（ノード数：114）などがあり、他の多くのクラスターも含め、それぞれに環境負荷や環境問題に関連する文献が含まれているのが特徴である。また、C1～C5の検出が少ない1990年代について解析を行うと、検出されたクラスターのキーワードは、温室効果ガス（GHGs）、電力、一次エネルギー、エネルギー需要、汚染、エネルギー原単位、鉄鋼産業、二酸化硫黄など、環境問題に関連する内容ではあるがC1～C5とは若干表現が異なるものであり、当該年代の傾向、特にエネルギー問題や環境汚染への関心の高さが表れている。上記のようにIOAは様々な研究分野への広がりを見せており、経済学に限らず工学やエネルギー、コンピューターサイエンス、農業、地理学、物質科学など多くの研究分野が「Web of Science」

上で検出されている。

図表 2.9.5-6 IOA 群のクラスター別キーワード、ノード数、平均被引用回数

クラスター	キーワード	ノード数、平均被引用回数
C1	China, trade, CO <sub>2</sub> , embodied carbon, carbon transfer	525, 9.15
C2	life cycle assessment, sustainability assessment, hybrid life cycle assessment	455, 4.58
C3	port, maritime, smart city	443, 2.20
C4	virtual water, water footprint, water scarcity	417, 5.80
C5	bioeconomy, MRIO, biodiversity, material footprint, disaster, land use	381, 5.37



図表 2.9.5-7 2022年9月までに発刊されたIOAに関連する文献の概況

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 技術やシステムの将来性に関する LCA 手法

LCAは環境影響を定量化し意思決定を支援するための手法として普及が進んでいる。基礎的な考え方であるライフサイクル思考に基づき、カーボンフットプリントやエコロジカルフットプリントなどの指標の算定から、各種リサイクル技術・システムの性能評価などに適用されはじめています。従来のLCAは、実際の生産現場などから対象とする技術やシステムに関するデータを収集し、その他のデータをLCAデータベースなどから抽出して組み合わせ、実施されている。一方、カーボンニュートラルやその他の持続可能性へ向けた技術・システムの開発や導入を検討するためには、現存しないライフサイクルの情報を得てLCAを実施しなくてはならず、

何らかの仮定や推定、シミュレーションなどが必要となる。こうした技術やシステムの将来性に関するLCA手法について、適用の可能性が議論されている<sup>5)</sup>。将来性に関するLCAとしては、Consequential LCA、Life cycle sustainability analysis、Dynamic LCA、Anticipatory LCA、Prospective LCA、Ex-Ante LCAといった方法を取ることで、開発中の技術や、現在よりも大規模な導入が進んだ後のシステムなど現存していないライフサイクルのLCAが実施可能となり得る。いずれも方法論として重複する部分などがあり、強みや弱みも相補的に有していることから、どれか一つの方法に偏ることなくケーススタディを増やしていくことが必要となってきている。

#### • 素材に関連する技術開発と産業のカーボンニュートラル化に関する動向

欧州の新循環経済行動計画<sup>6)</sup>に対し、日本でも循環経済ビジョン2020<sup>7)</sup>や、これに対応するプラスチック資源循環促進法<sup>8)</sup>の施行など、従来から存在していたプラスチック等の素材に関する社会的な要求がさらに高まり、持続可能性に向けた具体的な行動を取ることが必須となっている。また、化学産業のカーボンニュートラル化に関するロードマップの策定<sup>9)、10)</sup>など、産業ごとの解析も増えている。このような中、素材に関する技術・システム開発としては、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加傾向にある。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多くの研究開発が加速推進されており、LCAをはじめとする評価に関するニーズも高まっている。各プロジェクト実施期間中にLCAを実施することが要件となるほか、企業においてLCAを担当する部署が新設されるなどの動きが見られる。技術開発に合わせた方法論の開発と事例研究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、多様な評価の観点の依存性を解析する研究が増加傾向にある。例えばEnergy-nutrients-water、Nutrition-environment、Climate、Renewable energy、Resource management and bioeconomy、Energy-material、Buildings、Mobility and energy systemsなどが挙げられる。これらは国や地域ごとに統計データや技術・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である。さらに、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、主に可視化する取り組みが多くみられる。特に、農業や林業由来の植物資源を用いるライフサイクルにおいて、そのトレーサビリティを証明するための認証制度が取り入れられている。従来から存在している認証制度としては、パーム油の認証がある<sup>11)</sup>。これと同様に、他の資源についてもNexusを考慮しながら、水や土地、労働環境などの社会課題などと紐づけたサプライチェーンの可視化が必要とされている。

#### • 感染症や政情不安などによるグローバルサプライチェーンのリスクの発現による国内産業・資源への注目増加

新型コロナウイルス感染症の世界的な流行や、ウクライナでの紛争などに起因した製品の生産停止や輸出入の鈍化・価格上昇、サプライチェーンのグローバルな拡大傾向から国内生産への回帰や国内資源への注目が増している<sup>12)</sup>。また、国内の物価上昇と給与上昇の非連動性からも、輸入品の購入による国内の富の国外流出への関心も集まっている。これらの自給率や国内投資の増加による国内経済への影響分析や、安価な輸入品の購入と比較的高価な国産品の購入による社会経済的な価値の違いについて、IOAによる分析が必要である。

#### • 地域におけるカーボンニュートラルを支援するライフサイクル管理の必要性

環境省による地域循環共生圏<sup>13)</sup>や脱炭素先行地域<sup>14)</sup>など、地域の持続可能性に関する対策が必要となっている。地域という対象バウンダリを限定してライフサイクル管理を行う場合、GHGsプロトコル<sup>15)、16)</sup>におけるScope 1、2、3の概念に基づき、地域から直接的/間接的に寄与している環境影響の可視化が求められる。IOAにおいては、地域資源の活用による地域経済への影響や循環構造の変化を可視化し、地域経済の再構築を援助する必要がある。また、環境負荷の高い産業の責任配分について、立地している地域だけではなく、その産業製品を需要している地域へも配分するなど、地域間の取引から生じる環境負荷や経済価値などを明らかにしなくてはならない。



## [注目すべき国内外のプロジェクト]

### • LCAおよび関連する指標を評価項目とした国内外の公的な動き

ライフサイクル管理を前提とした公的な規制や事業が増加している。特に、LCAを用いた性能の評価を要件としている事業が増えている。例えば、欧州のバッテリー規制では金属資源のリサイクルだけではなくカーボンフットプリントによるGHGs排出量についても報告を義務付けている<sup>17)</sup>。日本では、ムーンショット型研究開発<sup>18)</sup>においては、LCAの観点からも事業の有効性をパイロット規模の実証試験の段階で明らかにしている。グリーンイノベーション (GI) 基金<sup>19)</sup>における事業においても、事業の評価の観点の中にLCAによる環境影響評価が組み込まれている。いずれも社会実装の前段階からの解析を必要とし、Prospective LCAやEx-Ante LCAといった方法論の成熟化を並行して進める必要がある。

### • カーボンニュートラルに向けた施策の増加と関連するライフサイクル管理

カーボンニュートラルの達成に向けては、国内外で多様な施策が提案されている。例えば国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) によるRace-to-Zero Campaign<sup>20)</sup>は、世界中の企業や自治体、投資家、大学などの非政府アクターに、2050年までにGHGs排出量実質ゼロを目指すことを約束している。この国際キャンペーンには1,049都市、67地域、5,235企業、最大手投資家441社、高等教育機関1,039機関が参加している (2022年10月現在)。国内では、2050年CO<sub>2</sub>排出実質ゼロ表明自治体<sup>21)</sup>が785自治体 (2022年9月30日現在) となっており、国をあげたカーボンニュートラルへの政策的な検討が進んでいる<sup>22)</sup>。いずれにおいてもGHGsプロトコル<sup>15)</sup>等のGHGs算定手法に基づいたLCAによるライフサイクル管理が必須であり、適切な評価が必要である。また、同時に社会経済構造の変化についても配慮が不可欠でIOAによる可視化が重要であると考えられる。

### • LCA実施支援のためのガイドラインや人材育成等の増加

LCAの必要性の高まりを受け実施支援のためのガイドラインや人材育成事業が増加している。例えば、CO<sub>2</sub>原料化では国内外にてガイドラインが提案されている<sup>23), 24)</sup>。また、LCA人材を養成する事業が開始されておりLCAの社会実装への動きが加速している<sup>25)</sup>。

## (5) 科学技術的課題

### • ライフサイクル情報と評価結果の解釈における課題

ライフサイクル管理に必要となるデータベース等の拡充は必須だが、すべての技術やシステムに関するデータをそろえることは困難である。同一製品であったとしても生産地や生産方法などにより、厳密には状況が異なる。これは不確実性として解釈されるべきであるが、LCAやIOAなどの評価手法に関する専門知識と、これを支援するツールが必要となる。しかしながらツールを汎用的にするほど不確実性が高まる可能性があり、逆に精緻な解析に対応した場合は難易度の高いツールになってしまう。ライフサイクル管理においては、対象の技術成熟度レベル (TRL) や、実施者のライフサイクル中の立場 (原料採掘/生産者、素材製造者、製品組立者から、消費者、廃棄物処理者、公的機関など)、目的 (フィージビリティスタディから詳細設計、保守・改善など)、実施の期間など、条件によって様々な場面がある。IOAにおいても分析手法や表の選択、結果の解釈において様々な知識が必要であり、そもそも新規技術導入による経済影響を分析するためのデータや手法の整備が不足している。それぞれの場面において適切なライフサイクル管理の方法論や分析手法、データを選ぶ必要があるが、高度な専門知識を持たない者が実施可能にするための工夫が必要である。

### • 多様な原料の投入におけるトレーサビリティの確保

植物資源やリサイクル原料などを活用することで、脱化石資源を図る取り組みが化学産業において重要視されはじめて<sup>9), 10)</sup>。化石資源からも再生可能資源からも製造できる製品について、どの程度再生可能資源を含んでいるのかを認証等により明らかにしていく取り組みがある。以前よりパーム油の認証方式<sup>11)</sup>においてアイデンティティブリザーブド方式 (生産者が特定でき、かつ100%認証製品を含むことを示す方式)、セグリゲーション方式 (100%認証製品を含むことを示す方式)、マスバランス方式 (物理的には非認証製品を含

むが、認証製品の総量が保証される方式)、などが実施されており、順にトレーサビリティが高い認証方式となっている。バイオプラスチック等においては、セグリゲーション方式で生産されるものも多いが、現在マスバランス方式による市場導入が進みつつあり、認証等についても方針が制定されはじめている<sup>26)</sup>。原料調達量に限界のある現時点においてマスバランス方式は一定の効果があるが、最終的にはカーボンニュートラルへ到達することを目指している以上、高いトレーサビリティを確保していかなければならないと考えられる。

#### • 地域別の分析を行うためのデータやルール、知見の不足

地域別のライフサイクル管理、特に地域経済への影響分析の重要性は高まっているが、市町村レベルの産業連関表の整備やその構築方法についての研究・知見は不十分である。また、構築するための統計データ、特に地域間の交易（移出入）のデータが不足している状態にある。利用可能なデータからどのように地域別の産業連関表を作成すべきかという知見の集積やルール化が今後に向けて必要である。

#### • 統計データのフォーマット（分類や年度・期間、対象など）の不具合

統計データを活用した製品ライフサイクルの評価や経済循環の可視化の必要性は今後さらに増大するが、現時点では多くの統計データが個々に作成・管理されており、産業分類や調査年度・期間、調査対象が統一されていない。そのため、複数の統計データを用いる際には、専門的な知識をもって突合・加工しなくてはならない。データ活用による社会目標到達への加速化を図るには、統計データの体系的な整理や連動とそれを可能とする法整備等が必要である。

#### • 社会一般に向けた情報開示における課題

持続可能な開発目標（SDGs）、サーキュラーエコノミー、カーボンニュートラルなど、多様な将来社会に対するビジョン・条件を検討するに当たり、技術・システムが持つ多面的な価値の理解が不可欠である。LCA、MFA、IOAといった手法による評価は、これらの価値を可視化するために必要となる。一方、その価値の評価結果が一般の社会において適切に把握・解釈されるためには、社会一般への的確な情報開示が求められる。ここには単に結果を開示してだけでなく、評価手法の理解を促す仕掛け（セミナーや勉強会など）も考えていかなければならない。

## (6) その他の課題

#### • CO<sub>2</sub>に偏重した評価

カーボンニュートラルへ向かう社会において、その目標へ到達するための技術の開発と導入が急務となっており、LCAによる評価結果としてライフサイクルからのGHGs排出量(LC-GHGs)が用いられることも多くなっている。一方、環境影響は気候変動だけではなく、人間健康や生物多様性への影響に加え、水資源の消費や、金属鉱物資源の消費なども対象とすべきであり、LCAはこれら进行评估することも可能な手法となっている。しかしながらLC-GHGsに偏重した評価結果も多く、リスクトレードオフを引き起こす可能性を否定できない。多様な環境影響を評価できる社会基盤が必要である。

#### • 過去の評価結果の更新

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や再エネの導入などによって変化している。具体例としては、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、こうした過去の結果の再評価は研究費等を獲得しやすい状況ではない。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、継続的な分析を可能とする仕組みが必要である。

再生可能資源を用いる技術の多くは2030年/2050年を目標に開発されているが、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。

• 人材の育成と多様化

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拡大していくことが肝要である。IOAについては、活用・応用先の拡大により研究分野は広がりを見せており、基盤となる理論の構築や開発を行う経済学分野での人材育成もあわせて必要になる。サプライチェーンの国際化もますます進んでいることから、国際プロジェクトの支援も必要だと考えられる。新規技術の開発における評価を実施するためには、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増やしていくことが有効であると考えられる。研究開発フェーズとの連携により、LCAをはじめとするライフサイクル管理手法が今後の研究開発方針を検討するための支援情報となる。様々な分野においてライフサイクル管理（設計・評価・運用）に関する技術が共通基盤として機能できるよう、データベースやツール、教育機会、情報基盤などを整備していく必要がある。

(7) 国際比較

本領域の多くの研究は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定義される。本比較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IDEAv3.2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。日本版被害算定型影響評価手法（LIME）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。IOAに関しては、国際的にも比較的詳細な部門分類での産業連関表が5年ごとに公表されており、各都道府県を対象とした産業連関表も公表されている。
	応用研究・開発	○	↗	LCAを用いた各種研究報告がなされているが他国と比べて、GHGs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GHGs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GHGs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、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ある。ただし、GI基金による事業などにおいてLCAが必須項目となるなど、LCAを普及させていくための変化が起きていることから今後の発展に期待したい。MFAについては、特に金属資源に関する事例報告が多くなされており国際的なシェアは高い。IOAに関しては、グローバルなサプライチェーンに付随する環境負荷分析と共に、自治体レベルの産業連関表の作成についての関心が高まっており、国内地域間の取引を対象とした多地域間産業連関表の作成なども行われている。様々な統計データが存在していることから、諸外国と比較し廃棄物産業連関表など特殊な産業連関表および分析なども進められている。
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他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。IOAに関しては、比較的詳細な部門分類での産業連関表が作成・公開されているが、日本と比較すると産業連関表に付随するデータへのアクセスが不十分である。
	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なっている。リサイクルに関する技術的側面では、DOEが設立した「CMI：Critical Material Institute」などで、応用研究・開発がこれまでと比べて広げ始めているように見える。動脈側の産業でのロボット解体など一歩先の技術開発・利用が進む可能性があるものとして、アップルコンピューターの解体ロボットLiam, Daisyはよく知られている。IOAに関しては、特にハイブリッドLCAの分野での研究が進んでいる。

欧州	基礎研究	◎	↗	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 3.8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。各種LCA評価手法についての検討も進められており、ISOの検討委員会への参加など活発といえる。IOAに関しては、ユーロスタット（欧州委員会の統計担当部局）が中心となり、各国の情報を統一した形式で公開し、国際間比較や連携による効果が分析可能な環境が整えられている。
	応用研究・開発	◎	↗	かねてより研究開発が盛んであり、近年も維持している。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。特に、イタリア、英国、スペイン、ドイツ、フランス、スウェーデン、オランダ、デンマーク、ポルトガル、スイスの順に論文が多い。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。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。体系的な研究・実際の社会システム設計などこうした技術開発がより密接にリンクした形で進行している。IOAに関してはLCAに関する研究や生物多様性やエコロジカルフットプリントに関する研究が多く、国家間の交易も盛んであるという性格上、多地域間産業連関モデルに関する研究も多い（例えば、オランダのフローニンゲン大学の研究グループが公開しているWorld Input-Output Database: WIODなど）。
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。IOAに関しては、産業連関表の作成自体の歴史は比較的古いですが、国民経済計算体系が国際標準に適用したのは2008年 <sup>28)</sup> と、必ずしも国際標準に準じて統計が整備されているわけではない。
	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最大である。社会実装を試みる現場は多く、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。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。IOAに関しては、近年多くの研究論文が報告されており、特にグローバルサプライチェーンに付随する環境負荷の責任配分、環境負荷移転、バーチャルウォーター、廃棄物など、世界の工場としての中国の役割と責任に関する分析、急速な発展に伴う環境と経済への影響に関する研究が盛んに行われている。
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。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の状況は我が国と近く、学術的な交流も多い。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いえる。IOAに関しては、釜山港や光陽港、蔚山港など世界有数の取扱貨物量を誇る港を有しているためか、特に海上輸送や海に関連する産業の研究が盛んである。一方で、他の国で盛んである環境と経済の関連性に関する研究は多くはない。
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。IOAに関しては、多くの国で産業連関表の作成やその試行が進んでおり、またOECD（経済協力開発機構）が加盟国の産業連関表を作成・公開している。

	応用研究・開発	○	↑	<p>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。</p> <p>リサイクル関係の技術について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。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。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。IOAに関しては、オーストラリアのシドニー大学の研究グループから多くの研究論文が報告されており、その多くが190の国と地域を対象とした多地域間産業連関表 (Eora MRIO) を用いた、グローバルサプライチェーンに付随する環境負荷や土地消費、生物多様性に対する影響フットプリントの研究である。</p>
--	---------	---	---	---

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国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。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・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」

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

### 関連する他の研究開発領域

<ul style="list-style-type: none"> <li>・リサイクル (環境・エネ分野 2.9.4)</li> <li>・分離技術 (ナノテク・材料分野 2.1.2)</li> </ul>
---

### 参考・引用文献

- 1) 東京大学総合研究機構イノベーション政策研究センター, 東京工業大学大学院イノベーションマネジメント研究科梶川研究室「学術俯瞰システム」<http://academic-landscape.com>, (2023年1月16日アクセス)。
- 2) 国立研究開発法人国立環境研究所編集委員会「マテリアルフロー分析：モノの流れから循環型社会・経済を考える」『環境儀』14巻(2004)。
- 3) Wassily W. Leontief, “Quantitative Input-Output Relations in the Economic System of the United States,” *The Review of Economics and Statistics* 18, no. 3 (1936) : 105-125., <https://doi.org/10.2307/1927837>.
- 4) Wassily W. Leontief, “The Structure of American Economy, 1919-1929: An Empirical Application of Equilibrium Analysis,” *Canadian Journal of Economics and Political Science* 8, no. 1 (1942) : 124-126., <https://doi.org/10.2307/137008>.
- 5) Coen van der Giesen, et al., “A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice,” *Journal of Cleaner Production* 259 (2020) : 120904., <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120904>.
- 6) Directorate-General for Environment, “Circular economy action plan,” European Commission, [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en), (2023年1月16日アクセス)。
- 7) 経済産業省 産業技術環境局資源循環経済課「「循環経済ビジョン2020」を取りまとめました」経済産

- 業省, <https://www.meti.go.jp/press/2020/05/20200522004/20200522004.html>, (2023年1月16日アクセス) .
- 8) 環境省「プラスチック資源循環」<https://plastic-circulation.env.go.jp/>, (2023年1月16日アクセス) .
- 9) Fanran Meng, et al., “Planet compatible pathways for transitioning the chemical industry,” *ChemRxiv* (2022)., <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2022-hx17h-v2>.
- 10) Center for Global Commons, et al., “Planet Positive Chemicals: Pathways for the chemical industry to enable a sustainable global economy (September 2022),” The University of Tokyo, <https://cgc.ifi.u-tokyo.ac.jp/research/chemistry-industry/planet-positive-chemicals.pdf>, (2023年1月16日アクセス) .
- 11) WWF ジャパン「認証パーム油を使うには? RSPO への手引き」<https://www.wwf.or.jp/activities/addinfo/1803.html>, (2023年1月16日アクセス) .
- 12) 経済産業省「通商白書2021: 第II部 第1章 第2節 サプライチェーンリスクと危機からの復旧」<https://www.meti.go.jp/report/tshaku2021/pdf/02-01-02.pdf>, (2023年1月16日アクセス) .
- 13) 環境省「地域循環共生圏」<https://www.env.go.jp/seisaku/list/kyoseiken/index.html>, (2023年1月16日アクセス) .
- 14) 環境省「脱炭素先行地域」脱炭素地域づくり支援サイト, <https://policies.env.go.jp/policy/roadmap/preceding-region/>, (2023年1月16日アクセス) .
- 15) Greenhouse Gas Protocol, <https://ghgprotocol.org/>, (2023年1月16日アクセス) .
- 16) 環境省「サプライチェーン排出量算定をはじめの方へ」[https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply\\_chain/gvc/supply\\_chain.html](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/supply_chain.html), (2023年1月16日アクセス) .
- 17) Directorate-General for Environment, “Batteries,” European Commission, [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/batteries\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/batteries_en), (2023年1月16日アクセス) .
- 18) 内閣府「ムーンショット型研究開発制度」<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/index.html>, (2023年1月16日アクセス) .
- 19) 経済産業省「グリーンイノベーション基金」[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/gifund/index.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/index.html), (2023年1月16日アクセス) .
- 20) United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), “Race-to-Zero Campaign,” <https://unfccc.int/climate-action/race-to-zero-campaign>, (2023年1月16日アクセス) .
- 21) 環境省「地方公共団体における2050年二酸化炭素排出実質ゼロ表明の状況」<https://www.env.go.jp/policy/zerocarbon.html>, (2023年1月16日アクセス) .
- 22) 経済産業省 資源エネルギー庁「エネルギー白書2021: 第1部 第2章 第3節 2050年カーボンニュートラルに向けた我が国の課題と取組」<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-2-3.html>, (2023年1月16日アクセス) .
- 23) Arno W. Zimmermann, et al., “Techno-Economic Assessment Guidelines for CO<sub>2</sub> Utilization,” *Frontiers in Energy Research* 8 (2020) : 5., <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00005>.
- 24) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「研究開発初期段階のCCU技術を対象としたライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量の簡易評価ガイドライン」<https://www.nedo.go.jp/library/ccuguideline.html>, (2023年1月16日アクセス) .
- 25) 一般社団法人サステナブル経営推進機構 (SuMPO)「「LCAエキスパート養成塾」いよいよスタート!」[https://sumpo.or.jp/news/expert\\_school\\_20220517.html](https://sumpo.or.jp/news/expert_school_20220517.html), (2023年1月16日アクセス) .
- 26) 公益財団法人日本環境協会「エコマーク認定基準における「バイオマス由来特性を割り当てたプラスチック

ク」の取扱方針を制定」公益財団法人日本環境協会エコマーク事務局, <https://www.ecomark.jp/info/release/PR22-05.html>, (2023年1月16日アクセス) .

- 27) 兵法彩, 菊池康紀「市町村産業連関表の作成・応用実態に基づく作表フローの構築」『日本LCA学会誌』17巻3号(2021):174-192., <https://doi.org/10.3370/lca.17.174>.
- 28) 岡本信広「中国の産業連関分析：特徴と応用」『産業連関』20巻1号(2012):23-35., <https://doi.org/10.11107/papaios.20.23>.

## 2.9

### 持続可能な資源利用