

## 特集3

# 未来戦略 ライフサイクルアセスメント 連携研究機構

## 序章

気候変動が深刻化し、いまや世界中で危機感が高まっています。都市の高温化や異常気象、海面上昇といった影響が各地で報告され、気候変動はもはや地球全体の課題として多くの人々に意識されるようになりました。しかしその一方で、私たちが抱く気候変動への認識は、しばしば「なんとなく悪いことが起きている」という漠然としたものにとどまっています。例えば、温暖化の原因の一つが二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）などの温室効果ガス（GHGs）の排出であるという知識はあっても、どの程度の排出がどのような影響をもたらすのか、あるいはどういった産業からどの程度排出されているのか、具体的にイメージできる人は少ないのではないか。

1970年代から1980年代にかけて、GHGsの増加による気候変動が科学者の間で広く認識されるようになりました。その後1980年代後半には、地球の気温上昇が顕著になり、1988年に気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が設立されるなど国際的な取り組みが本格化していきます。そして2015年、フランス・パリで開催された第21回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）において、国連気候変動枠組条約（UNFCCC）の締約国によって採択されたのが「パリ協定」です。この協定は、気候変動対策のために世界の平均気温上昇を産業革命前に比べて2°C未満、できれば1.5°C以下に抑えることを目標としています。続く2021年には、第26回気候変動枠組条約締約国会議（COP26）においてIPCCが温暖化を努力目標の1.5°Cで止めるためには2050年頃にGHGsの排出を実質ゼロ（カーボンニュートラル）にすることが必要であると評価しています。

」のように国際社会がカーボンニュートラルの達成に向けて取り組む中で、製品やサービスの環境影響を評価する手法として、ライフサイクルアセスメント（LCA）的重要性が高まっています。例えば自動車産業においては、バッテリー式電気自動車（BEV）が走行中にCO<sub>2</sub>を排出しないため、かつては「ゼロエミッション」（排出がない）と謳われたこともありました。しかし、BEVは特に車載用電池の製造時に多くのGHGsを排出しており、製造段階ではこれまでの内燃機関自動車（ICEV）よりも環境影響が大きいという研究報告もあります。つまりICEVとBEVの環境影響を公正に評価・比較するためには走行時のみではなく部品・車両の製造、燃料の製造や発電、走行、廃棄・リサイクルなどサプライチェーン全体も含めた計算が必要となります。このように製品やサービスにまつわる環境負荷を「ゆりかごから墓場まで（Cradle to Grave）」すなわちライフサイクルに渡って評価するLCAは、環境負荷低減の取り組みにおいて大きな役割を果たすようになりました。さて、国際社会がひとつの指標としているのは2050年、つまり将来時点でのカーボンニュートラルですが、これまでのLCAには電源構成やインフラ、社会制度など全て現時点のデータが利用されています。しかし気候変動の解決に向けていま現在研究開発されているカーボンリサイクル、再生可能エネルギー、水素を用いた新しいプロセスなどの技術は、将来社会に実装された時点のライフサイクル全体でどれほどの効果があるのか定量的に評価され、求められる性能や要件が明確化される必要があります。このような背景をもとに、東京大学は既存のLCAを未来社会のデザインに貢献する「先制的LCA」に発展させるべく2023年に「未来戦略ライフサイクルアセスメント連携研究機構（未来戦略LCA連携研究機構／UT-LCA）」を設立しました。UT-LCAでは未来戦略の立案に資する先制的LCAの学理を創成し、2050年に向かう世界的な技術開発と制度形成の機先を取るべく、東京大学の持つ知を集結し、国内外の研究者と連携し世界最先端の研究、教育、さらには未来に向けた科学技術戦略の提言を進めていきます。

# 平尾先生インタビュー

## LCAとは何か？

平尾 雅彦

シニアリサーチフェロー

未来戦略LCA連携研究機構  
先制的LCA社会連携研究部門

**LCAとは？**

例えばみなさん衣類を洗濯しますよね。その時、洗濯やすすぎの水はどうしているでしょうか。お風呂の残り湯を使っていますか。洗剤の量をついついちょっと多めにしたりしてしまいますか。使っている洗剤がどのように作られているか知っていますか。洗濯機からの排水はどこへ行くか知っていますか。

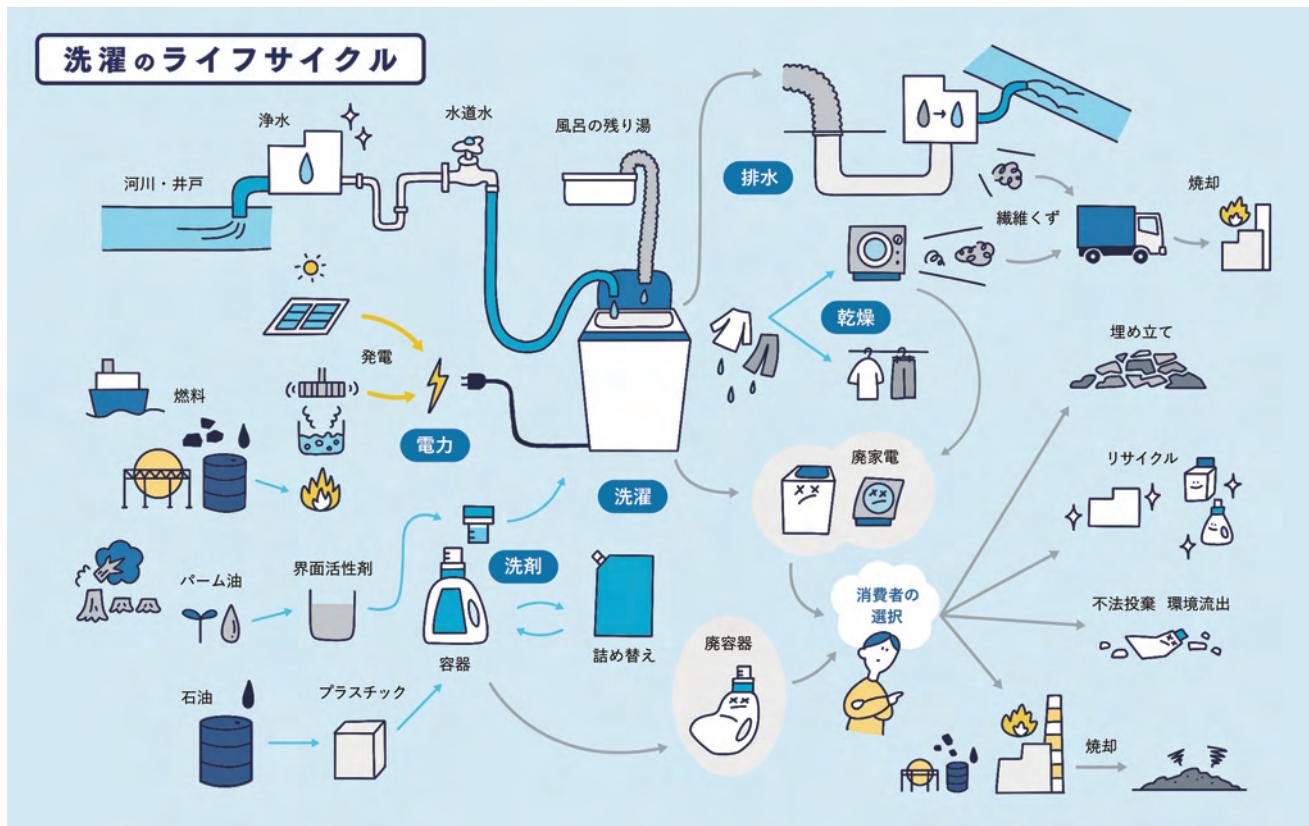
というようにですね、洗濯という何気ない日常の家事ひとつをとっても、ありとあらゆる環境への影響が発生している訳です。あるいは私たちが水を飲むとき、水道水なのかミネラルウォーターなのか、コンビニで買うのか自販機で買うのか。実はコンビニで冷やされたペットボトルで飲むのが普通のコップに水道水を注いで飲むのでは、環境負荷が千倍ぐらい違うのをご存知でしょうか。

ライフサイクルアセスメント（LCA）とは、ある製品やサービスの環境影響を評価するための手法です。原料の調達から廃棄、リサイクルを含め、製品やサービスのライフサイクル全体でどのくらいエネルギーや資源が使われ、その結果として地球環境にどのくらい影響を与えたのかを定量的に評価します。

多くの製品は、製造の各過程でエネルギーが使われ、その間の輸送のためにも燃料が使われます。製品が廃棄された後も、ごみとして燃やせばCO<sub>2</sub>が出ますし、リサイクルしても輸送や処理の過程でエネルギーを使います。使用時の環境負荷だけではなく、それがどう作られ、捨てられた後はどうなるのか、地球から資源をもってたら返すまでの環境負荷を考えるのがLCAです。環境負荷としては、温室効果ガスによるオゾン層破壊や、水を使う製品やサービスでは川に排出された有機物が近隣の淡水域や海水域にどう影響するなども評価します。

**なぜLCAの研究をはじめられたのでしょうか**

私は元々東京大学工学部化学工学科（現・化学





システム工学科)で化学プラントの設計を専門に研究していました。当時取り組んでいたのは、例えば水とアルコールを分離するようなシステムですね。実は普通に分離しようとしても途中で共沸といってアルコールも蒸発してしまうので、水とアルコールって完全分離ができないんですね。どうしたら効率よくアルコールを分離できるかというような研究をしていましたね。その後、就職してまた全然違う分野の研究をしていたんです。日立の基礎研究所っていうところで当時発見されたばかりの高温超伝導体の電子物性の研究をやっていました。ただ、なかなかやはり高温超伝導体は実用化が大変そうだというのが当時の実感でしたね。1996年に会社から大学に戻った時に、先端研所長の杉山先生の恩師である小宮山宏先生らが海外に調査

を行なったんです。その時に、カナダのアルミニウムの会社だったと思うんですが、LCAっていうのをやっていると話を伺いました。それとLCAの元祖と呼ばれている方がオランダのライデン大学にいらして、こちらでもお話を伺ったんです。で、これは必要な技術だと思ったんですね。同時に私の専門であつた化学プラントの設計、つまり水とアルコールを分離する時にどこにどのぐらいエネルギーが必要かというような計算はLCAとすごく親和性が高かったんです。それで、当時学生を二人受け持っていたんですが、一人は元々やっていた物理の計算の方をやつてもらつて、もう一人の学生には「何か世の中にはLCAつてものがあるらしい。私もよく知らないが、やってみないか」ということで。当時の1996年というのが実は日本で容器包装リサイクル法という皆さんの家庭で使ったプラスチック包装をリサイクルする法律ができる、ペットボトルの回収が始まつた頃なんですね。それでその学生にペットボトルのリサイクル手法とそれをLCAで評価するってことを考えようということで一緒にやり始めたのが最初でしたね。その後1997年には研究者が作成したLCAの標準的な算定の手順が国際標準化機構(ISO)によって国際的な標準規格となっています

(ISO14040)。

なところを周ったんです。その時に、カナダのLCAっていうのをやっていると話を伺いました。それとLCAの元祖と呼ばれている方がオランダのライデン大学にいらして、こちらでもお話を伺つたんです。で、これは必要な技術だと思つたんですね。同時に私の専門であつた化学プラントの設計、つまり水とアル

コールを分離する時にどこにどのぐらいエネルギーが必要かというような計算はLCAとすごく親和性が高かつたんです。それで、当時学生を二人受け持つていたんですが、一人は元々やっていた物理の計算の方をやつてもらつて、もう一人の学生には「何か世の中にはLCAつてものがあるらしい。私もよく知らないが、やってみないか」ということで。当時の1996年

というものが実は日本で容器包装リサイクル法とLCAを知る前にものがどうやつてできているかを知らずに買つているのが現状だと思います。LCAを知る前にものがどうやつてできているかを知る必要があると思うんですね。アルミって何故電気の缶詰って呼ばれてるんだろう、とか。

人間の活動によつて生まれる環境負荷は地球ひとつ分に收まらなければなりません。それを超えている現在の消費と生産のサイクルは「持続可能」ではなく、できるだけ早く変えていくべきです。UTLCAは、持続可能な未来の実現に貢献することを目指します。

**LCAを社会に浸透させるために必要なことは何でしょうか**

# 醍醐先生インタビュー

## 材料の視点から見る持続可能な社会

醍醐 市朗  
准教授

高機能材料 分野  
未来戦略LCA連携研究機構  
先制的LCA社会連携研究部門

それに鉄鋼材料の場合、求められる機能は「強度」になりますよね。では加工技術の向上で強度が倍になるかというとそんなことはないんです。ある程度質量を倍にしないと強度が倍にならない。これが半導体産業だと事情が違っていて、処理性能の向上によって同じ機能で見るときの生産の負荷ってかなり下がっているんです。

LCAではしばしば「機能単位」当たりの環境影響を評価します。たとえば自動車だと「10年間で10万km走る」という機能単位を前提に1台ごとの環境負荷を比較するのですが、平均として1台ごとに10万km走るというのはその通りですが、日本全体で走っている何万台もの自動車について先程の機能単位で掛け算をしてしまうと、原料が足りなくなったり、環境負荷が高くなったりということが当然あり得るわけです。このような社会全体での総量による制約が、従来のLCAでは捉えられない部分です。

推計すると、どの国も一人当たり10トン前後で頭打ちになることがわかつたんです。これまで将来の材料需要の予測は、過去における生産量・需要量のデータから推計されていたのですが、鉄鋼のストック量はあるところで飽和することがわかつたので、発想を転換してストック量から将来の需要を推計する「ストック飽和モデル」を提案しました。現在、鉄鋼のストック量が一人当たり1トン前後の途上国でも、先進国並みの10トンに向けて増えいくと想定し、鉄鋼の将来需要を推計し

**研究内容を教えてください**

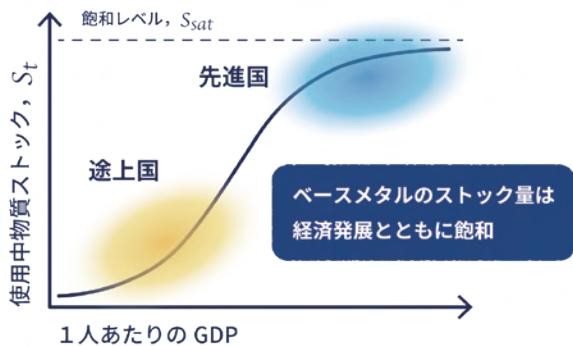
私は材料工学を専門にしており、材料の視点から産業の環境負荷を低減するための評価手法を開発しています。私が特に注力してきた鉄鋼産業は、すでに技術的に成熟してきている産業もあるのでこの30年間劇的に効率が上がっているわけではないです。鉄を作る高炉と呼ばれるプロセスは酸化鉄を鉄に還元するというたったひとつの反応のための人類最大の反応容器なんですね。いわゆる装置産業になりますので劇的な変化は起きにくい。

### 具体的にどのような手法を開発し、どのような評価結果が得られているのでしょうか

材料は使われているときに機能を発揮しておらず、使用中の物質の量を「ストック量」といいます。鉄鋼のストック量を推計したところ、日本全体では10～11億トン、一人当たりでは約9トンという結果でした。他の先進各国で



## ストック飽和モデル



$$S_t = \frac{S_{sat}}{1 + \exp(\alpha - \beta \times GDP_t)}$$

私たちの機構の中には企業の方に積極的に運営しているのかという疑問が生じます。最初に皆様からお持ちいただいたデータを合計すると、二千万トンではとても足りないという結論になりました。そこで、各セクターが最小限の水素使用量でやりくりすることを想定した場合、バイオマスや再生可能エネルギーなど他のどのようなリソースがどれだけ必要なのか、その供給が可能なれば、水素の必要量は二千万トンを下回ることも考えられます。しかし当然新しい制約も出てくる訳です。結局のところ、ひとつずつ丁寧に潰していく、どこにどのようなギャップが生じるのかを明確にしていくというのが、現在必要な議論です。

例えば鉄鋼についても考えてみると、現在の日本では年間約八千万トンの鉄鋼が生産され、そのうち国内消費は五千万トンに満たない状況です。半分近くは鋼材、あるいは自動車などに加工されて海外に輸出されています。つまり、国内の鉄鋼生産の約半分は海外需要のために行わ

## UTLCAではどのような取り組みがあるのでしょうか

たところ、2100年には世界全体で約25億トンが必要とされる一方、使える鉄スクラップは15億トンしかないと予想されています。残りの10億トンは鉄鉱石から作らなくてはいけなくなるわけです。この解析から逆算して、これから発展が進む都市について、鉄鋼のストック量が一人当たり5トンくらいでインフラが整備されるような都市構造にするといったような提案が考えられます。

UTLCAではどのような取り組みがあるのでしょうか

私たちの機構の中には企業の方に積極的に運営しているのかという疑問が生じます。最初に皆様からお持ちいただいたデータを合計すると、二千万トンではとても足りないという結論になりました。そこで、各セクターが最小限の水素使用量でやりくりすることを想定した場合、バイオマスや再生可能エネルギーなど他のどのようなリソースがどれだけ必要なのか、その供給が可能なれば、水素の必要量は二千万トンを下回ることも考えられます。しかし当然新しい制約も出てくる訳です。結局のところ、ひとつずつ丁寧に潰していく、どこにどのようなギャップが生じるのかを明確にしていくというのが、現在必要な議論です。

現在、議論の出発点として「水素」をテーマに取り上げています。仮に政府が提唱しているように、2050年に二千万トンの水素を供給することが可能だとして、それをどの分野でどのように使用するのか、またそもそもその量で足りるのかという疑問が生じます。最初に皆様からお持ちいただいたデータを合計すると、二千万トンではとても足りないという結論になりました。そこで、各セクターが最小限の水素使用量でやりくりすることを想定した場合、バイオマスや再生可能エネルギーなど他のどのようなリソースがどれだけ必要なのか、その供給が可能なれば、水素の必要量は二千万トンを下回ることも考えられます。しかし当然新しい制約も出てくる訳です。結局のところ、ひとつずつ丁寧に潰していく、どこにどのようなギャップが生じるのかを明確にしていくというのが、現在必要な議論です。

現在、議論の出発点として「水素」をテーマに取り上げています。仮に政府が提唱しているように、2050年に二千万トンの水素を供給することが可能だとして、それをどの分野でどのように使用するのか、またそもそもその量で足りるのかという疑問が生じます。最初に皆様からお持ちいただいたデータを合計すると、二千万トンではとても足りないという結論になりました。そこで、各セクターが最小限の水素使用量でやりくりすることを想定した場合、バイオマスや再生可能エネルギーなど他のどのようなリソースがどれだけ必要なのか、その供給が可能なれば、水素の必要量は二千万トンを下回ることも考えられます。しかし当然新しい制約も出てくる訳です。結局のところ、ひとつずつ丁寧に潰していく、どこにどのようなギャップが生じるのかを明確にしていくというのが、現在必要な議論です。

現在、議論の出発点として「水素」をテーマに取り上げています。仮に政府が提唱しているように、2050年に二千万トンの水素を供給することが可能だとして、それをどの分野でどのように使用するのか、またそもそもその量で足りるのかという疑問が生じます。最初に皆様からお持ちいただいたデータを合計すると、二千万トンではとても足りないという結論になりました。そこで、各セクターが最小限の水素使用量でやりくりすることを想定した場合、バイオマスや再生可能エネルギーなど他のどのようなリソースがどれだけ必要なのか、その供給が可能なれば、水素の必要量は二千万トンを下回ることも考えられます。しかし当然新しい制約も出てくる訳です。結局のところ、ひとつずつ丁寧に潰していく、どこにどのようなギャップが生じるのかを明確にしていくというのが、現在必要な議論です。

現在、議論の出発点として「水素」をテーマに取り上げています。仮に政府が提唱しているように、2050年に二千万トンの水素を供給することが可能だとして、それをどの分野でどのように使用するのか、またそもそもその量で足りるのかという疑問が生じます。最初に皆様からお持ちいただいたデータを合計すると、二千万トンではとても足りないという結論になりました。そこで、各セクターが最小限の水素使用量でやりくりすることを想定した場合、バイオマスや再生可能エネルギーなど他のどのようなリソースがどれだけ必要なのか、その供給が可能なれば、水素の必要量は二千万トンを下回ることも考えられます。しかし当然新しい制約も出てくる訳です。結局のところ、ひとつずつ丁寧に潰していく、どこにどのようなギャップが生じるのかを明確にしていくというのが、現在必要な議論です。

現在、議論の出発点として「水素」をテーマに取り上げています。仮に政府が提唱しているように、2050年に二千万トンの水素を供給することが可能だとして、それをどの分野でどのように使用するのか、またそもそもその量で足りるのかという疑問が生じます。最初に皆様からお持ちいただいたデータを合計すると、二千万トンではとても足りないという結論になりました。そこで、各セクターが最小限の水素使用量でやりくりすることを想定した場合、バイオマスや再生可能エネルギーなど他のどのようなリソースがどれだけ必要なのか、その供給が可能なれば、水素の必要量は二千万トンを下回ることも考えられます。しかし当然新しい制約も出てくる訳です。結局のところ、ひとつずつ丁寧に潰していく、どこにどのようなギャップが生じるのかを明確にしていくというのが、現在必要な議論です。

# 小原先生インタビュー

## UTLCAが立てる 二つの未来戦略

小原 聰  
特任教授

未来戦略LCA連携研究機構  
先制的LCA社会連携研究部門

**UTLCAの目的はどこにあるのでしょうか**

未来戦略LCA連携研究機構の目的は、大きく二つあると考えています。ひとつは、東大内のみんなで様々な研究分野で別々にLCAを行っている研究者を繋げること。もうひとつは、まさに「未来戦略」の部分で、LCAを将来の社会や技術に対応できるツールとして発展させることです。従来のLCAは、現時点でのエネルギー構成や技術を前提に、製品やサービスの環境影響を測る、いわばここまで産業社会に対する「通信簿」のようなものです。しかし、いま研究開発段階にあるような先端技術、化学で言えばフ

ラスコのように小さなスケールでやっているような技術が、実用化して工場やプラントのスケールになる頃には、そもそもその技術 자체がスケールアップの影響でどうなっているかもわからないですし、産業構造や社会制度もきっと今と同じではないですよね。つまりこういった先端技術が未来社会でどのような環境に対する性能・影響を持つかを現在のLCAで評価することは難しいのです。この技術の未来と社会の変化を予測し、将来的にどう活用すべきかを考えることが、未来戦略の中心にあります。

### 具体的にどのように未来戦略を立てるのでしょうか

私達の未来戦略の中には大きく分けて二通りの方法論があります。一つは未来予測型（プロスペクティブ）LCA、そしてもう一つが先制的LCAです。昔の蒸気機関車で例えると、いま東京―大阪間を12時間で走っているのを、技術改良によつてもっと早く走らせたら数年後には10時間になるのではないか、というのが未来予測型の考え方になります。現時点の状況から考えて5年後10年後とうまく技術を発展させていくということです。しかしこの考え方では新幹線はできないと思うんです。例えば将来東京―大阪の間を3時間で結びましょう、となつたらどれだけ蒸気機関車を早く走らせてでも実現できませんよね。インフラや社会制度、法律と

いたたレベルまで考えて、もっとまっすぐな線路を敷いて、新しい技術を盛り込んだ車両をつくって、そうやってはじめて新幹線というものが実現できたわけです。つまり将来社会においてその技術に求められる性能（技術的要件）を定量的に評価し、現在の研究開発にバックヤードすることで先端技術の効果的な開発が可能になるのです。これこそが「先制的LCA」の考え方になります。

前者の未来予測型LCAにはある程度の学理があるのですが、先制的LCAにはまだ学理が確立されていません。この先制的LCAの手法を確立するためには、先ほど説明したように科学技術だけではなく社会制度や法律、経済あるいは



これからは先行して技術の種を持つている方が、将来を全部塗り替えるぐらいの戦略を同時に立てることがとても重要だと思います。もちろん社会の変化は狙つて作るものだけではなく、予測不能な変化に後押しされるケースもありますね。例えばコロナの影響でこんなにも早くオンライン化が進んだのは記憶に新しいところです。なのですべてが狙い通りというわけにはいかないのですが、少なくとも発生しうるいくつかの事態を予め「シナリオ」として考えられる想像力は必要ですよね。そういう意味でLCAには想像力がとても大事だと思います。想像力を持った人たちを繋げ、技術や社会の未来を共に描くことが、未来戦略を立てるツールとしてLCAを活用する鍵だと言えるでしょう。

は文化に至るまで様々な要件を検討する必要があります。UTLCAが設置した先制的LCA社会連携研究部門には、自動車、自動車部品、化学、鉄鋼、リサイクルなど様々な業界の企業だけでなく、主幹である先端研や学内の総合文化、経済、公共政策などいろいろな価値観をお持ちの研究者の方々が参加しておられます。非常に複雑な議論と作業になるからこそ、大学がやる価値があると思っています。

## 今後の技術開発の現場で考へるべきことは何でしょうか

### 未来戦略LCA連携研究機構 シンポジウム開催報告

**[日時]** 2024年9月9日（月）13:30～17:10

**[場所]** 東京大学駒場IIキャンパス ENEOSホール（先端科学技術研究センター3号館南棟1階）

**[主催]** 東京大学未来戦略LCA連携研究機構（UTLCA）

#### 【概要】

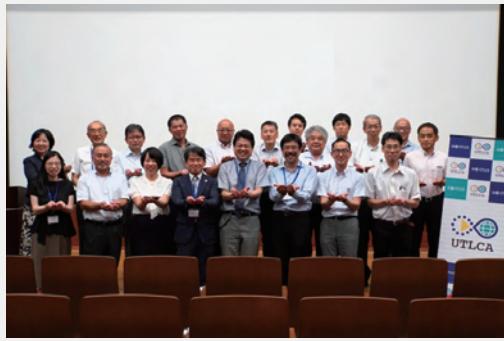
2023年4月に設立された未来戦略LCA連携研究機構（UTLCA）は、従来のライフサイクルアセスメント（LCA）が「現在」の環境影響を評価するのに対し、未来の産業・社会構造に対応する「先制的LCA」に発展させることを目指して活動しています。

2024年9月9日に開催された第2回シンポジウムでは、醍醐市朗准教授（東京大学先端科学技術研究センター 高機能材料分野）がLCAの歴史と鉄鋼産業での事例を紹介し、従来のLCAとUTLCAが進める「先制的LCA」の意義を解説しました。続いて、田原聖隆ラボ長（国立研究開発法人産業技術総合研究所 IDEAラボ）は、将来の産業や技術の変化に対応するLCAデータベース「IDEA」の取り組みについて紹介し、将来のデータベース構築の重要性を説明しました。小泉悠准教授（東京大学先端科学技術研究センター 國際安全保障構想分野）は「地政学とエネルギー安全保障」をテーマに、評価されにくい戦争行為の環境影響および将来の社会情勢を予測することの難しさを強調しました。尾下優子特任講師（東京大学未来ビジョン研究センター）は、産業連関分析を用いて新技術の社会経済的影響を評価する手法を紹介し、その活用方法について解説しました。

シンポジウム後半では、UTLCAの2つの分科会が活動報告を行い、小原聰特任教授が将来シナリオ分科会について、藤井克氏（三菱ケミカルグループ株式会社 サステナビリティ・ソリューション部）が資源循環分科会の取り組みについてそれぞれ発表しました。最後に、杉山正和機構長（東京大学先端科学技術研究センター所長）が産学連携的重要性を強調し、シンポジウムは終了しました。UTLCAは今後も、先制的LCAの学理創成と社会実装に向けて研究を進めていきます。



杉山正和機構長（先端研所長）による閉会の挨拶



機構メンバーの集合写真