

記 録

文書番号	S C J 第 25 期-050913-25560300-091
委員会等名	日本学術会議機械工学委員会生産科学分科会
標題	社会の持続可能性向上に貢献する 生産科学の長期的課題と解決に向けて
作成日	令和5年（2023年）9月13日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

この記録は、日本学術会議機械工学委員会生産科学分科及び生産科学分科会生産科学構想小委員会での審議結果を踏まえ、機械工学委員会生産科学分科会において取りまとめ公表するものである。

日本学術会議機械工学委員会生産科学分科会

委員長	光石 衛	(第三部会員)	独立行政法人大学改革支援・学位授与機構理事
副委員長	須藤 雅子	(第三部会員)	ファナック株式会社 FA 事業本部・技監
幹事	足立 幸志	(第三部会員)	東北大学大学院工学研究科機械機能創成専攻教授
幹事	塚田 竹美	(連携会員)	本田技研工業株式会社事業開発本部アシスタントチーフエンジニア
	新井 民夫	(連携会員)	国際廃炉研究開発機構副理事長
		*R5. 8. 3 付任期満了	
	有信 睦弘	(連携会員)	広島県公立大学法人叡啓大学学長
		*R5. 4. 20 付任期満了	
	伊藤 宏幸	(連携会員)	ダイキン工業株式会社テクノロジーイノベーションセンターリサーチコーディネーター
	岩城智香子	(連携会員)	東芝エネルギーシステムズ株式会社エネルギーシステム技術開発センター シニアフェロー
	岩淵 明	(連携会員)	岩手大学名誉教授
	遠藤 勝義	(連携会員)	大阪大学大学院工学研究科附属超精密科学研究センター教授
	厨川 常元	(連携会員)	東北大学共創戦略センター特任教授
	佐々木直哉	(連携会員)	株式会社日立製作所研究開発グループシニアアドバイザー
	佐田 豊	(連携会員)	株式会社東芝執行役常務
	新野 秀憲	(連携会員)	職業能力開発総合大学校校長
	鈴木 宏正	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	永井 正夫	(連携会員)	一般財団法人日本自動車研究所顧問、東京農工大学名誉教授
	松田三知子	(連携会員)	一般財団法人日本規格協会フェロー
	柳本 潤	(連携会員)	東京大学生産技術研究所教授

日本学術会議機械工学委員会生産科学分科会生産科学構想小委員会

委員長	梅田 靖	東京大学大学院工学系研究科附属人工物工学研究センター教授
副委員長	木村 文彦	東京大学名誉教授
幹事	野中 洋一	株式会社日立製作所研究開発グループ制御口

			ボティクスイノベーションセンター主管研究 長
須藤	雅子	(第三部会員)	ファナック株式会社 FA 事業本部・技監
光石	衛	(第三部会員)	独立行政法人大学改革支援・学位授与機構理事
足立	幸志	(連携会員)	東北大学大学院工学研究科機械機能創成専攻 教授
厨川	常元	(連携会員)	東北大学共創戦略センター特任教授
越塚	誠一	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科システム創成学 専攻教授
佐田	豊	(連携会員)	株式会社東芝執行役常務
塚田	竹美	(連携会員)	本田技研工業株式会社事業開発本部アシスタ ントチーフエンジニア
青山	英樹		慶應義塾大学理工学研究科総合デザイン工学 専攻教授
白瀬	敬一		神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻教授
高田	祥三		早稲田大学名誉教授

本記録の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	佐々木 亨	参事官 (審議第二担当)
	高橋 直也	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐 (令和5年3月まで)
	柳原 情子	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐 (令和5年4月から)
	影山 祥子	参事官 (審議第二担当) 付審議専門職付

要 旨

人類社会の持続可能性の維持は、現在の人の活動を続ける限り困難になりつつある。現状を客観的に認識し、必要な対策をとることは、人類の喫緊の課題である。

持続可能性向上は学術会議全体に関わる重要な課題であり、課題解決において生産科学も重要な役割を担うと考えられる。本文書の目的は、持続可能性向上に向けて、生産科学が貢献できる課題を分析し、政府や関係機関及び広く社会に向けて解決の方針を記録として提示することである。

本記録では、持続可能社会構築のための最重要要件の一つである、地球の環境的持続可能性、すなわち、人間活動を長期的に阻害しない程度に、地球資源の浪費や地球環境の劣化の可能性をより少なくすることに注目する。社会の持続可能性向上は、重要な社会課題として、すでに学術的にも政策的にも広く取り組まれている。しかし、持続可能性を損なう要因は様々で複雑であり、各種の対策が関連してどのような効果があるか、互いに矛盾していないか等、学術的には明確でないことが多い。短中期的な対策を推進することは重要であるが、並行して、持続可能性に関する学術的な理解を深め、長期的かつ確実に持続可能性を向上させる方策を統合的に推進することが求められている。

社会経済活動が引き起こす温暖化や資源枯渇、環境汚染などの環境影響において、生産活動や製品使用など、人工物のライフサイクルを通じた影響は大きいと考えられており、その負の影響を軽減させる方策を、学術的に研究することは重要である。

本記録では、まず、社会活動が様々な人工物を活用していることから、人工物を生み出す生産科学が社会の持続可能性に関係し、その向上に貢献できることを指摘する。現状の生産活動を分析し、無駄の多い人工物のライフサイクルを革新し、また、新たな人工物ライフサイクルを創出できることが重要であることを述べる。人工物ライフサイクルを介して各種の社会活動を連携させ、持続可能性を向上させることができることを主張し、そのためには、生産活動や人工物のライフサイクルについて、製品や技術領域に制約されない俯瞰的で包括的なモデリングが重要であることを述べる。そのモデリングを活用して持続可能性向上へ向けた様々な方策が考えられることを述べ、そのための俯瞰的で包括的なモデリング手法の確立へ向けて、現状の問題点を分析し、デジタル・ツインの考え方を導入して、モデルの連携と統合の考え方を論じ、課題の解決を目指す研究推進の必要性を述べる。

社会は多くの人工物を包含しているため、持続可能性向上に向けた対策についての具体的な社会実装が進もうとしているこの時期に、対策の基本的な考え方について生産科学の立場から、検討を行うことは意義深い。

目 次

1	本記録の目的と範囲	1
2	持続可能性向上に向けた生産科学の貢献	3
	(1) 生産科学の範囲	3
	(2) 生産活動の重要性	3
	(3) 生産活動の現状認識	4
	(4) 生産科学の対応	4
3	生産科学が解決すべき課題	6
4	課題に対応するための人工物ライフサイクルモデリング	7
	(1) 人工物ライフサイクルモデリングの役割	7
	(2) 現状のモデリングの問題点	9
	(3) 人工物ライフサイクルモデリングの要件	10
5	人工物ライフサイクルモデリングに関する研究推進の必要性	11
	(1) 人工物ライフサイクルモデリングのアプローチ	11
	(2) 人工物ライフサイクルモデリングの基本的考え方	13
6	提案	16
	<用語集>	17
	<参考文献>	19
	<参考資料> 審議経過	22

1 本記録の目的と範囲

本記録では、社会の持続可能性を向上させる上で、生産科学の立場から貢献できる課題を分析してその解決へ向けた方策を提言する。

生産科学とは、生産活動に関わる科学の総称である。ここで言う生産活動とは、人間社会の利便性向上を目的に人工物（形のある物体及び形のないソフトウェアとの結合を含む。また、システムも含む。）を発想・設計・製造・使用・回収・再利用・廃棄する一連のプロセス及びその組織的活動である。その結果は、社会経済的価値の増加に寄与するとともに、人間・自然環境に影響を及ぼす[1]。

本記録においては、生産活動とそこから生み出される人工物の全ライフサイクルを考察の対象とする[2]。本記録で考察する人工物とは、いわゆる工業生産により造り出される成果物を意味することとする。

本記録で想定する人工物の製品領域としては、機械製品を主な対象とするが、メカトロニクス製品や関連するソフトウェアやシステムも考える。電気自動車など、最近の製品は、個別の工学領域を総合して構成されるものが多く、従来の枠組みでは対処しきれないような製品も考える。

本記録の考察においては、加工や材料などの生産の物理的側面についての要素学術については深く踏み込まず、設計や生産活動、及び人工物のライフサイクル全般に係わるシステム的な学術について考える。例えば、付加製造技術（Additive Manufacturing）の物理プロセス技術については踏み込まないが、このような加工や材料新技術が人工物ライフサイクル全般に及ぼす影響は考察の対象とする[3]。

本記録では、社会の持続可能性向上のための最重要要件の一つである、地球の環境的持続可能性、すなわち、人間活動を長期的に阻害しない程度に、地球資源の浪費や地球環境の劣化の可能性をより少なくすることに注目する[4]。持続可能性の考察において、状況に応じた恣意的な判断や妥協を回避するためには、究極的には、Absolute Sustainabilityを目指して、プラネタリー・バウンダリー（Planetary Boundaries）を追究することが必須である[5, 6, 7]。プラネタリー・バウンダリーの議論は、一定の仮説やモデルに基づいているが、その妥当性の検証は、学術的に継続的な課題である。本記録では、妥当性の評価に立ち入らず、これらは学術的で客観的な参照基準であると考え、Absolute Sustainabilityを損なわない範囲で、先進国のみならず、全地球的に、いかに人のQuality of Life(QoL)を向上できるかを、持続可能性向上へ向けての包括的な課題と考える。

持続可能性の課題に取り組むために、本記録では、人工物の効用と環境負荷を明示化し、環境への負の影響が小さい無駄を排した生産活動と人工物のライフサイクルを実現することを目的とする[8]。以下では、生産活動や人工物のライフサイクルを併せて「人工物ライフサイクル」と総称することとする。持続可能性に貢献する人工物ライフサイクルの実現の必要性については、これまでも繰り返し指摘されている。しかし、その実現は必ずしも思うように進んでいない。本記録では、その要因の一つは、人工物ライフサイクルを俯瞰的に捉え、包括的かつ領域横断的にモデリングできる汎用的な手法（以下「人工物ライフサイクルモデリング手法」という。）が確立していないことであると主張する。実世界で

の多領域に渡る人工物ライフサイクルを連携させて、その動的な変化を充分に取り込める人工物ライフサイクルモデリング手法には未だ多くの課題が残されている。

本記録では、人工物ライフサイクルが、持続可能性に与える負の影響を軽減させることのみならず、持続可能性向上に積極的に良い効果をもたらす方策を、生産科学として学術的に研究することも視野に入れる。例えば、自動車のレンタル利用は環境負荷を軽減しつつ利用者の利便性を向上できる可能性があるかを、人工物ライフサイクルのモデリングを活用して客観的に明らかにできるようにするといったことである。

なお、持続可能性向上へ向けてどのような具体的方策を採用し、例えば2050年にどのような社会を構築したいかなどは、各国・各地域の人々が社会的合意として決めていくべきものであるとして、本記録では直接的には議論しない。本記録で議論する人工物ライフサイクルモデリングや人工物ライフサイクルを操作対象とした持続可能性向上に向けた方策は、社会的合意に基づいて構想する持続可能性向上のための具体的な手段を提供する役割を担う。

以上のことより、本記録では、以下のような点に着目する。

- ・ 持続可能性という着眼点で見たときに、生産活動や人工物の使い方に応じて得られる効用と環境負荷を学術的に明示化することによって、Absolute Sustainability を満足する限界を示した上で、社会の判断を仰ぐことが、生産科学の役割と考える。
- ・ 持続可能性向上に資する生産活動や人工物を実現するためには、既存の技術領域や応用領域に捉われない視点で、人工物ライフサイクルを再構築していくことが重要であると考えられる。
- ・ この点については、これまでも多くの議論がなされている。しかし、従来の生産活動において重視されていた効率向上、コスト削減等の問題と比較すると、持続可能性に資する人工物ライフサイクルの実現のために考慮すべき要因ははるかに多く複雑である。また、持続可能性向上のためには、重要な手段の一つとして資源循環を考慮する必要があるが、資源循環の閉ループを含む系においては時間遅れが発生するために、その計画において見通さなければならない時間期間もはるかに長くなる。
- ・ このような多数の要因が互いに関係しあい、かつ長期間に関わる問題を扱うためには、実務的な制約に縛られた経験主義的なアプローチでは困難であり、人工物ライフサイクルを俯瞰的に捉え、包括的なモデリングに基づいた理論的アプローチが必須である。しかし、従来のモデリング手法は個々の領域に特化して構築されることが多く、ライフサイクル全体を俯瞰的に扱うための包括的な人工物ライフサイクルモデリング手法は確立されていない。

以上により、本記録の目的は、持続可能社会に貢献する生産科学の課題を追究するために、既存の学術領域の制約に捉われない視点で、人工物ライフサイクルに関する基礎的なモデリング手法を確立するための研究推進の必要性を述べることである。

2 持続可能性向上に向けた生産科学の貢献

(1) 生産科学の範囲

人々の生活は、人、自然に加えて、建築物、交通システム、家電製品等の人工物で支えられている。各学術専門領域を扱う領域科学は対象物毎に構成され、例えば、自然、人間、電力網をモデル化する科学として、自然科学、人間科学、エネルギー科学がある。生産科学は、1章に記述したように人工物ライフサイクルを扱う学問である。さらに、本記録ではモデルに注目する。したがって、多くの学問領域は、実世界における実体とそれに対応するモデルで構成されると見ることができる。例えば、生産科学は、人工物、そのライフサイクル、それらのモデルで構成される。

(2) 生産活動の重要性

社会経済活動が引き起こす温暖化や資源枯渇、環境汚染などの環境影響において、生産活動が直接的に引き起こす環境影響の割合は決して小さくはない[9]。特に、以下の例に示すような関連により、人工物ライフサイクルの変化が地球環境に及ぼす影響の変化は大きいと考えられる。

- ・生産上流のサプライチェーン（最終組立メーカから見た温室効果ガスプロトコル(GHG protocol)におけるスコープ3 カテゴリー1 [10])
 - － 製品の素材の製造が引き起こす環境負荷など
- ・生産下流の製品循環チェーン（最終組立メーカから見た温室効果ガスプロトコルにおけるスコープ3 カテゴリー11、12[10])
 - － 製品使用時に発生する環境負荷など
- ・新しい製品やサービスの創出による社会生活や消費行動の変化
 - － レンタルによる製品使用など
- ・人工物を通じた社会インフラストラクチャの革新
 - － スマートグリッドによる電力網の効率化など
- ・産業構造の変革による社会生産性の向上
 - － 農業と流通業の統合による食品ロスの削減など

これらの分析や持続可能性向上に向けた方策については、3章以下に記述する。これらの影響は、例えば、SDGsにおける「目標12: つくる責任 つかう責任」(Goal 12. Ensure Sustainable Consumption and Production Patterns)を初めとして、より一般的にSDGsの他の目標においても指摘されている[11]。

人工物ライフサイクルが、地球規模で環境に及ぼす影響は、俯瞰的には十分に把握されておらず、その重要性が一般には良く理解されていないと思われる。一例として、電気自動車の電池について、他用途転用も含めて再利用、再生産により循環させる場合のグローバルな環境負荷の把握は技術的に困難な課題である。生産活動や人工物の全ライフサイクルを通じて、生産活動や人工物利用と環境影響の因果関係を構造的また動的に詳細に分析し、環境影響の大きさを定量的に評価し、さらに影響軽減の方策を検討するための基礎的な研究が必要であり、持続可能社会へ向けた生産科学研究の重要な課題の

一つである[12]。このためには、普遍的で包括的な人工物ライフサイクルモデリングが基本的な役割を果たす。

(3) 生産活動の現状認識

現状の生産活動や社会における人工物の利用において、持続可能性を損なう多くのシステムの課題が存在している。例えば、人工物の利用については、既存の産業構造の制約や大量消費型のライフスタイルの定着などにより、必要な情報や人工物が適切に利用できず、再利用可能な製品の破棄など、資源の無駄が発生していることがある。これらの課題は、産業界や学界でも認識されていながら、俯瞰的な立場で取り組まなければならない課題であるために、容易には手が付けられず、結果として見過ごされていることが多いと考えられる。

本記録においては、持続可能性達成のために、新素材や新加工法、製品新機能などの未踏要素技術の開発が基本的に重要であることはもちろんであるが、同時に多くのシステムの課題が存在し、それらが持続可能性を低下させることに注目する。

例えば、

- ・デジタル化の遅れにより、必要な情報が得られず、無駄な作業が発生する。
- ・製品利用者の意図が設計者に十分反映されず、製品利用について無駄な消費が生ずる。
- ・人工物の有する価値を使い切らずに廃棄される。
- ・既存の産業構造の制約により、必要なものや情報が利用できない等。

(4) 生産科学の対応

現状を局所的に改善することを超えて、持続可能性の概念を明確に意識して、俯瞰的視点により本来の姿へ改革することで、持続可能性の飛躍的な向上が期待される。

このような視点の転換は、従来は困難であったが、近年の情報工学やシステム工学の進展、デジタル情報基盤の実装などにより、現実的に追究できる課題となった。それにも拘わらず、関係者の習性となった思考態度が切り替わらず、対応が遅れている。すなわち、技術的にも経済的にも実現可能であり、持続可能性向上のための効果も明確であるにも拘わらず、従来からの考え方に捉われ、また既存の制約を変更困難であると思ひこみ、現実の分析が合理的に行われず、課題が明示化されていないことが多いと考えられる。

現状において、持続可能性を低下させる上述のような要因が依然として多く潜んでいるという事実を可視化し認識することが重要である。そのために、環境負荷の因果関係を分析し、持続可能性低下の要因の可視化を実用的に容易にする手段が必須であり、人工物ライフサイクルモデリングが有効な手段となる。

上記のような視点による現状の認識は、すでに工業化が進展した先進地域より、これから技術革新が進行しようとしている発展途上地域の方が容易であるかもしれない。生産科学が広く持続可能性向上へ貢献できる可能性がある。

これらの課題への対応策のひとつとして、以下に定義するような「無駄」を把握し、

持続可能性の観点から無駄排除の対策をとっていくことは有効であり重要であると考えられる。

【無駄】

目的とする製品・サービスに関する生産活動や利用において、本質的には必須ではないが（これが意味することについては慎重な考察が必要である）、現状の技術や制度的な制約などにより発生する活動やそれに要する資源。

生産活動や人工物は、長年に渡ってボトムアップ的に発展してきた。その過程で、その時々々の制約条件や利用可能技術の影響を受け改善されてきたので、過去には必要であったが、現在では不必要に複雑化し、多くの「無駄」を含んでいる可能性がある。現在と将来の制約条件や利用可能技術を明示化し見極めていくことは、人工物ライフサイクルを理論化、単純化、効率化し、持続可能性を向上させていくために重要である。

3 生産科学が解決すべき課題

2章(4)で述べたように、生産活動の現状の問題を打破するために生産科学が対応すべき課題は多様であるが、以下の二つの典型的な課題に大別して考えることができる。この分類は包括的あるいは排他的なものではなく、両者の間には、様々な融合した課題が存在する。

【既存人工物ライフサイクルの無駄の排除】

今までの設計生産の在り方には、歴史的な発展の経緯から、様々な「無駄」が存在している可能性がある。顕在化していながら現実的な制約により対応出来ていない無駄も多いが、さらに、従来からの思考態度に捉われていたり、過度な複雑化などにより、関係者の思考が及ばず、見逃されていたりする無駄も多いと考えられる。

このような無駄への対応には、目的に従って生産活動や人工物を徹底的に分析しモデル化することで、無駄を検出し、排除の対策を検討することができるであろう。例えば、以下のような無駄排除の事例がある。

- ・対象製品に合わせた製造設備の小型化により、エネルギー消費の無駄を削減する[13, 14, 15]。
- ・分断した工程のライン化により運搬や仕掛に係わる無駄を削減する[13, 14, 15]。
- ・高度な調整機能により変種変量生産における歩留まりを向上させる[16]。

以上において、注意深い定義が必要であるが、従来の「効率向上」と「無駄排除」は、必ずしも同じではないことに注意が必要である。例えば、「生産速度の向上による生産効率向上」は資源消費を増加させるかもしれない。

【新たな人工物ライフサイクルの創出】

持続可能性の向上のためには、従来の人工物ライフサイクルの制約を超えて、目的に従い資源制約を考慮しつつ新たな価値を生み出す人工物ライフサイクルを創出していく必要がある。例えば、従来にない異業種サプライヤ連携により、部品供給を効率化することなどがある。本来の用途を超えて他応用への部品リユースを可能とするための、部品設計と循環プロセスの連携などが循環経済(Circular Economy)でも議論されている。いずれも、連携する既存の人工物ライフサイクルを俯瞰的に考え直すと、潜在する多くの可能性が見いだせるという例である。以下のような事例が考えられる。

- ・製品設計において素材を変更することにより、素材自身の環境負荷のみならず、必要な機械加工や成型加工の環境負荷も削減する。
- ・使い切りから修理を前提とした製品へ設計変更し、対応する製品ライフサイクル管理を確立する。
- ・車載蓄電池について使用による状態変化を監視することにより、使用後の効果的な再使用、あるいは他目的への転用を可能とする[17]。
- ・軽量化により稼働負荷削減が見込める自動車ボディの樹脂化を推進し、そのためにエンジニアリングや生産プロセスを革新し効率化する[18]。

4 課題に対応するための人工物ライフサイクルモデリング

(1) 人工物ライフサイクルモデリングの役割

前章に記述したような課題に対応するために、本記録では、生産活動や人工物のライフサイクルを自然法則や活動の基本的考え方に基づきモデル化すること、及び、それらを活用した問題解決策の創成が基本的に重要であると考え。基礎となるモデリング手法の開発などの生産科学の基礎学術が中核となり、現状活動や人工物の徹底した見直しや、Society5.0[19]が対象とするような社会や産業の活動の新たな連携が可能となると考えられる。

ここで改めて人工物ライフサイクルモデリングの役割について考察する。2章で述べた人工物のモデルと実体を対(twins)にして扱い、両者がライフサイクルにおいて対応しつつ変化していく様相をサイバー世界におけるシミュレーションなどを用いて動的に関係させモデル化しようとする考え方をデジタル・ツイン (Digital Twins) [20, 21]と呼ぶ。このような人工物ライフサイクルについてのデジタル・ツインを図1に示す。物理層の人工物に対応して、サイバー層に人工物ライフサイクルモデルが構築される。いまだに広く受け入れられた定義は未確立であるが、デジタル・ツインにおいては、サイバー層で先に計画し、物理層で実現したり、物理層の変化を忠実にサイバー層に反映したりなど、サイバー層と物理層の関係は様々である。このような関係を活用するシステムをサイバー・フィジカルシステム(Cyber-Physical System: CPS)と呼ぶ[22, 23]。本記録において、生産科学として持続可能社会の実現へ貢献するための中核は、図1に示した人工物ライフサイクルモデルであり、モデル構築のために必要な各種の基本的手法からなるモデリング手法群により汎用的な人工物ライフサイクルのモデル群が構築される。

さらに、それらを活用することにより、社会における様々な活動を支える人工物のライフサイクルモデルが構築されている様相を図2に示す。図中で、肌色と白色の角丸長方形は図1で示した人工物ライフサイクルのデジタル・ツインを示している。緑色やオレンジ色の角丸長方形は様々な社会活動を示しており、各社会活動の中で様々な人工物が活用されて社会活動が成立している。青色の線は、各社会活動が互いに関連し、また、社会活動と人工物、人工物同士が互いに関連していることを示している。この図は、人工物は社会活動を駆動する不可欠な要素であり、各社会活動のデジタル・ツインを構築するとすれば、人工物ライフサイクルのデジタル・ツインはその構成要素であり、かつ、両者は共有の要素を持つことになることを示している。

この図において、本記録における生産科学の範囲は、社会活動の一環としての「工業生産」、及びその他の社会活動で利用されている「人工物」のライフサイクルの全てであることを示している。図中に濃橙色で示す工業生産活動では、中核となる汎用的な人工物ライフサイクルのモデルが構築され、それらを基礎として、各社会活動中の人工物のライフサイクルを表現する様々なモデルが構築され、生産活動に関するCPSが構築される。社会活動の構成要素として、人工物に依存する活動については、工業生産の成果を活用して、各々の目的に適合するように人工物のライフサイクルモデルを提供することが生産科学の役割の一つとなる。生活の例においては、生活そのものは生産科学の直接

の対象としない（図中の緑色）一方で、生活を構成する要素である家電品、情報機器、自動車、それらを制御するソフトウェアなどは、生産科学の対象となる人工物ライフサイクルのデジタル・ツイン（図2の肌色と白色の組）であることを図2は示している。

図1、図2に示すように、ライフサイクルについての共通のモデリング手法を適用できれば、現状では様々な製品や技術領域に分断されている生産活動を連携させることが可能となる。現状では、モデリング手法は、製品や産業領域、技術領域ごとに固有に詳細化された手法となっており、それらを連携させるためには、固有のモデリング手法の深い理解が必要となり、現実的に困難である。社会活動においても同様に、含まれる人工物ライフサイクルモデルが共通のものになっていれば、それを介して例えば生活や都市機能、農業などを効果的に連携させることなどができる[11]。このような新たな連携により、人工物ライフサイクルを通じて新たな産業や社会活動が創出され、それらを俯瞰的に考えた時の持続可能性向上を追究できるようになるため、その方策を研究することは重要である。図1では、人工物ライフサイクルモデルを用いた検討に基づき、そのような方策を創出する各種の基本的な手法を人工物ライフサイクル革新手法群として図示してある。

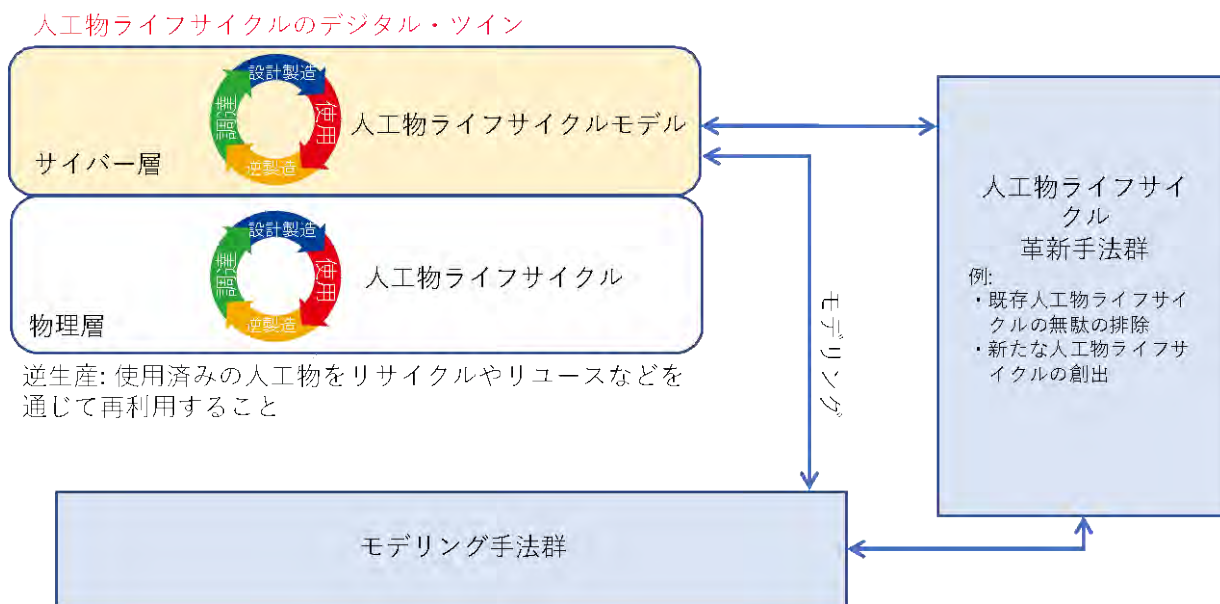
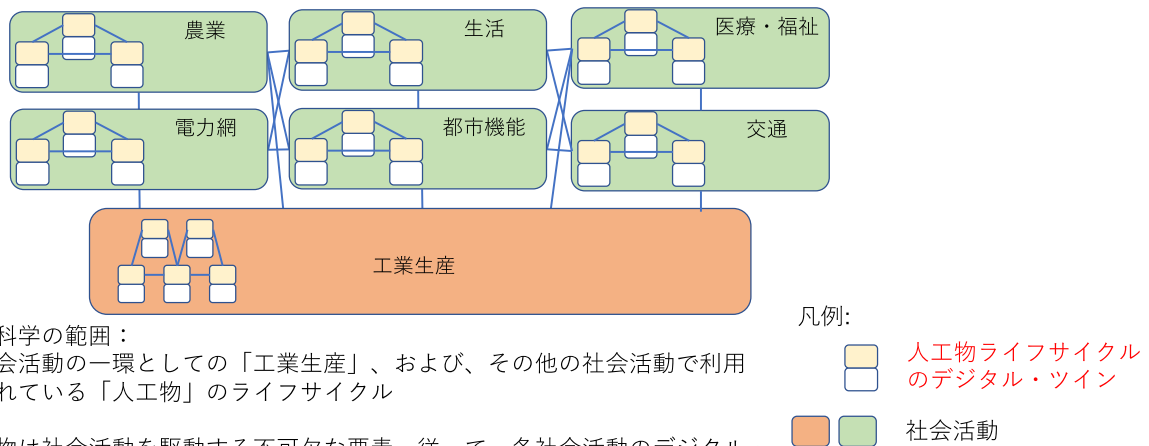


図1 人工物ライフサイクルのデジタル・ツイン
（出典）分科会で作成



生産科学の範囲：

社会活動の一環としての「工業生産」、および、その他の社会活動で利用されている「人工物」のライフサイクル

人工物は社会活動を駆動する不可欠な要素。従って、各社会活動のデジタル・ツインを構築するとすれば、人工物ライフサイクルのデジタル・ツインはその構成要素であり、かつ、両者は共有の要素を持つことになる。

凡例：

人工物ライフサイクルのデジタル・ツイン

社会活動

図2 社会活動を支える生産科学

(出典) 分科会で作成

(2) 現状のモデリングの問題点

基礎的なモデリングとして、生産システムやプロセス、人工物などに関する人工物ライフサイクルモデリングは、長年に渡って研究開発されており、生産システムソフトウェアやCAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing), CAE(Computer Aided Engineering), PDM(Product Data Management), PLM(Product Lifecycle Management)などのモデリングツールとして実用的にも有効に活用されている[24]。

これらのモデリングは、個々の目的に従って研究開発されてきたので、固有の理論やモデル化手法、モデルデータ記述法があり、独自の発展を遂げてきた。具体的なモデルデータについても、各々の目的に従い、機能要求、設計、生産、利用、保守、リサイクル・リユースなどの多くの視点からデータ化が試みられてきた。また、人工物を利用する各産業領域や社会活動ごとにも固有の視点や概念でモデル化がなされてきた。

これらのモデル化手法やデータは個別的に開発されており、それらの統合や相互運用性(Interoperability)[25]は十分ではなかった。近年ではスマート生産(Smart Manufacturing)などの要請により分野横断的なモデル利用の要求が強くなっているが、従来のモデルは、各適用分野を超えて分野横断的に利用できる状態にはなかった。持続可能性向上の視点から、生産活動や人工物に関する情報は、他産業でも必要とされ有効に活用されることが期待されるので、他産業との相互運用性も非常に重要になってきた。しかし、従来のモデル化手法では、分野横断的に人工物を活用して、社会をも対象とする持続可能性を検討するためには、不都合が多かった。

また、従来の人工物のモデルは、主に生産効率や品質向上を目的に開発されてきたので、持続可能性評価の視点からは欠けている情報が多い。全ライフサイクルの視点や環境影響に関する視点からの情報である。関係する学術領域との連携を深め、必要なモデルデータの整備と人工物ライフサイクルモデルへの組み込み手法について深い考察が必要とされている。

(3) 人工物ライフサイクルモデリングの要件

上記のように、前章で述べた課題を解決するための普遍的かつ包括的なモデリング手法は未だに充分研究開発されていない。人工物ライフサイクルモデリングの見直しや連携を基礎として、持続可能性を損なうようなシステム的な要因を排除し、Absolute Sustainability へ向けて、社会や産業の持続可能性を向上させる方策を学術的に追究できるようにになると期待される。人工物ライフサイクルモデリングに関する重要な要件を示す。

【持続可能社会の姿を議論するために必要な情報の表現】

対象とする社会の姿に従い、人工物ライフサイクルをその要件、機能、振舞、実体化、運用、循環などの各視点間の意味的關係性を保った形式でモデル化する。その際に、環境影響項目を徹底して網羅的にモデル化することが重要である。環境影響項目の情報表現を、様々な文脈情報（発生源、日時、環境条件、関連機器、運用条件、計測条件など）と関連させて表現する。これらの情報表現が、環境科学や地球科学などの持続可能性を対象とする学術分野と共有できるように体系化することが、持続可能性評価のために重要である。

【人工物ライフサイクルの社会活動への影響分析】

環境影響項目を十分に組み込んだ人工物ライフサイクルのモデリングができれば、様々な地球環境や人間活動との干渉において、人工物ライフサイクルの社会活動への影響を分析することができるようになる。この際に、恣意的にモデリングの範囲を絞り込むことなく、5章に述べるような micro-meso-macro レベルのモデル連携により、構造的な環境影響分析ができることが重要である。大規模計算や大量データに対応する技術開発などが必要とされる。

【社会活動のモデリングに組み込める人工物ライフサイクルモデリング】

社会活動や産業活動においては、様々な人工物が不可欠な要素として利用されている。そのような人工物ライフサイクルについて、従来のモデリングでは、活動の直接的な目的に従い、そのために必要な情報を現状にできるだけ忠実に写し取ることがなされてきた。様々な制約や過去の経緯から現状の活動には不必要な活動も含まれ、無意味に複雑化していることが往々にしてある。また、従来の活動の目的は機能・効率重視だったので、環境影響評価の視点からは可視化されず、モデル化されていない情報も多い。このような従来のモデリングの課題を認識して、持続可能性評価の視点から、活動の本来の目的に沿った姿をモデリングしていくことは重要である。様々な手法を追究すべきであるが、まとまった手法を提案することは難しく、虚心坦懐に対象を記述するモデル記述のアプローチの徹底が重要である。

5 人工物ライフサイクルモデリングに関する研究推進の必要性

(1) 人工物ライフサイクルモデリングのアプローチ

3章において、持続可能性の向上に向けて生産科学に関する二つの課題を示した。【既存人工物ライフサイクルの無駄の排除】、及び【新たな人工物ライフサイクルの創出】である。4章(3)では、課題に対応する人工物ライフサイクルモデリングの要件を議論した。ここでは要件に対応するモデリングへの具体的なアプローチを議論する。

上記のいずれの課題についても、本章(2)で基本的考え方を述べるような人工物ライフサイクルの俯瞰的かつ包括的なモデリングが基礎となる。最初の課題については、現実の複雑さの徹底したモデル化を支援するために、汎用的なモデルの拡大と高度化が重要である。第二の課題については、「無駄」のない人工物ライフサイクルを適切に設計することが重要である。これらを支援するモデリング技術として、汎用的なモデルに関するモデリング手法が基礎となる。特に、要素としてのモデルのモジュラー化や標準化を進めてモデルライブラリを充実すると共に、macro-meso-micro 連携モデリングとライフサイクルシミュレーションによって、垂直統合を実現することが重要である。

以下に、人工物のライフサイクルモデリングに対するアプローチを列挙する。

【領域間の連携を可能とするモデル化手法】

生産活動や人工物のライフサイクルに関するモデルの記述手法として、モデル要素を表現するクラス記述、及びクラス間の階層関係などの記述は基本であり、従来から多くの研究がある[26, 27]。汎用的なモデルとするためには、様々な製品領域や技術領域に共通な要素を領域横断的にモデル化できることが必要である。このような汎用的なモデルを構築するためには各領域に共通な基礎概念に関するオントロジー[28]を確立し、オントロジーを活用したモデル記述法が必要となる。

汎用モデルに基づいて、生産活動や人工物に関する領域知識をモデル化する。すなわち、オントロジーを活用した汎用的なモデルを基に、可能な限りの汎用化や共通化を念頭に置きつつ、個別の製品領域や技術領域の知識の形式化を進めていく必要がある。過去の実用的知識では技術的な曖昧さが残されているものがあつた。機械工学領域において部品寸法に許容される誤差を指定する公差の知識などは厳密にモデル化できていない良く知られた一例である[29]。モデル化に際して、改めて厳密な理論化・知識化が求められる。

【macro-meso-micro 連携モデリング】

持続可能性評価のためには、個別の人工物のレベルから企業や社会のレベルまで、連携させてモデリングする必要がある場合がある。個別に発展してきたシステムが System-of-system として、必要に応じて連携させられる。各システムのレベルにより macro-meso-micro の各レベルのモデルを適切に連携させる仕組みが重要になる[30, 31]。

- ・ macro レベル：図2の社会活動レベルのモデル表現に組み込めるように人工物ライフサイクルモデルを設定する。

- meso レベル：人工物ライフサイクルに関するモデルを設定する。
- micro レベル：個別の生産工程モデルや人工物のモデルを設定する。

【持続可能性評価の基盤としてのモデリング手法】

地球温暖化、資源枯渇、環境汚染に関する Absolute Sustainability を基本的な制約条件として、持続可能社会へ向けて重視すべき評価指標（目標指標、手段指標）[32]の設定とモデルに基づく評価法について、生産科学の立場から、評価を実行するためのデータやモデルについての課題を明確にする。ただし本記録では、評価指標の具体的な設定については今後の検討課題と考え議論しない。評価指標の算出に必要なデータを適切に提供する方策について考える。

本モデリング手法は、工業生産や各種の社会活動において、人工物に支えられる活動を対象とする。作成された人工物のライフサイクルモデルに、持続可能性評価に関わる環境影響項目を組み込み、持続可能性評価に必要なデータを積算できることが必要である。実稼働におけるデータをモデルに基づき計測したり、人工物のライフサイクルを通じて人工物が環境に及ぼす影響を動的にシミュレーションするライフサイクルシミュレーションによりデータを推算することなどを考える。

【ライフサイクルの評価を可能とするライフサイクルシミュレーション】

人工物のライフサイクルを通じて、人工物が環境に及ぼす影響などを動的にシミュレーションするライフサイクルシミュレーションの技術は重要である[12, 33]。micro レベルの個々の人工物の生産や利用が meso レベルのシステムに影響を与え、さらにそれらが macro レベルの社会に波及するというように、macro-meso-micro レベルのモデルの連携が必要となることが多い。電気自動車を導入された都市の持続可能性評価などは一例である[34]。社会の持続可能性評価における人工物ライフサイクルの影響を定量的また構造的に示すために必須である。

他産業領域や他製品との新たな連携により今までに無い人工物ライフサイクルを設計していく際の評価手段として活用できることが、ライフサイクルシミュレーションの目的である。そのためのシミュレーションモデルの構築手法などは重要な課題である。

【多様性へ対応できるモデリング手法】

人や人を取り巻く環境の多様性、例えば、人と人工物との関係の多様性、多様な地域での社会生活、生産活動の多様性などについて考察することは重要である。人工物との関係における人の多様性を考察し、人と人工物あるいは生産活動や社会活動との関係や共生を客観的に検討するための基礎となる人のモデル化は重要な課題である。

人工物ライフサイクルのモデル化を通じて、生産活動や人工物をこれらの多様性に適応させて、人も含む資源の無駄を削減し、人の QoL を向上させることは、持続可能社会の構築にとって極めて重要な課題である。

多くの人工物は、人が利用者や操作者として係わっており、その係わり方が人工物の

持続可能性に影響を与えるとともに、人自身の QoL に影響して、社会の持続可能性に影響を与えることになる。この係わりにおいて、人は多様であり、標準化されたインタフェースでは、人工物を持続可能に維持することは難しい。重要な社会資産である人も、生活を楽しむことも含めて、その資産価値を発揮できなければ、社会の持続可能性に大きな影響を与えることになる。

人工物との係わりにおいて、人をモデル化し、例えば、得意・不得意分野、学習や熟練による能力向上や高齢化による能力低下などを表現できることを考える。時間により変化していくこれらのモデルと人工物のライフサイクルモデルを適切に連携させて、人工物やそのインタフェースを構築し、評価できることが重要である。人を観る視点は多くの学術分野に係わるが、ここでの議論のためには、生産科学的側面に限定して如何に有用なモデルが構築できるかに焦点をあてる必要がある。

(2) 人工物ライフサイクルモデリングの基本的考え方

製品領域や技術領域毎に多様に開発されてきた領域モデルの連携や統合、相互運用性の向上については、いくつかの基本的考え方があるが、いずれも学術的な追究と現実的な実現との兼ね合いにおいて、今後の多くの研究開発の努力が必要である。図3に概念を示すように、「連携」とは何らかの変換により領域モデルの相互運用性を達成することであり、「統合」とは汎用的に定義されたモデルの要素を共用して各領域モデルを記述することで相互運用性を達成することであるとする。設計意図や使用目的などに関する意味的なモデル化や領域ごとに孤立しているモデル情報の統合のためには、中核的な汎用モデルを確立して、個別の領域モデル間の意味的な関係付けを体系的に確立していくことが正統的なアプローチであるが、多くの課題がある。現実的なアプローチとして、個別の領域モデルを適切な抽象度の共通モデルで連携させていくことが考えられ、研究開発が進められている。これらの様々な研究を俯瞰し、今後の研究開発の方向性を議論していくことは重要である。

図3において、各モデルは、モデル化される対象の一般的な性質を表現するもので、モデル記述におけるクラスとして表現されている。本節の記述では、モデルとはクラスとしてのモデルを意味し、特に個別に実現され存在する具体的な対象物であるインスタンスとしてのモデルの場合にはそのように明記する。

モデルは、モデルの要素であるサブモデルの集合として表現されている。図3において、角丸四角枠は、ある領域における人工物ライフサイクルのモデルを表す。領域モデルのすべてが連携や統合の対象となるわけではない。連携や統合の対象となるモデル内のサブモデルの集まりを、各モデルの中の小さな角丸四角枠で表現する。(b)及び(c)における灰色の角丸四角枠は共有される汎用モデルのサブモデルを表す。領域モデルやそのサブモデルは、目的に応じて様々に設定されるが、例えばメカトロニクス分野を領域と考えた場合、領域モデルはメカトロニクス製品全体のモデルであり、そのサブモデルは機械要素や電気電子要素、ソフトウェア要素などのモデルとなる。

連携や統合のために次のような人工物ライフサイクルモデルを導入する。

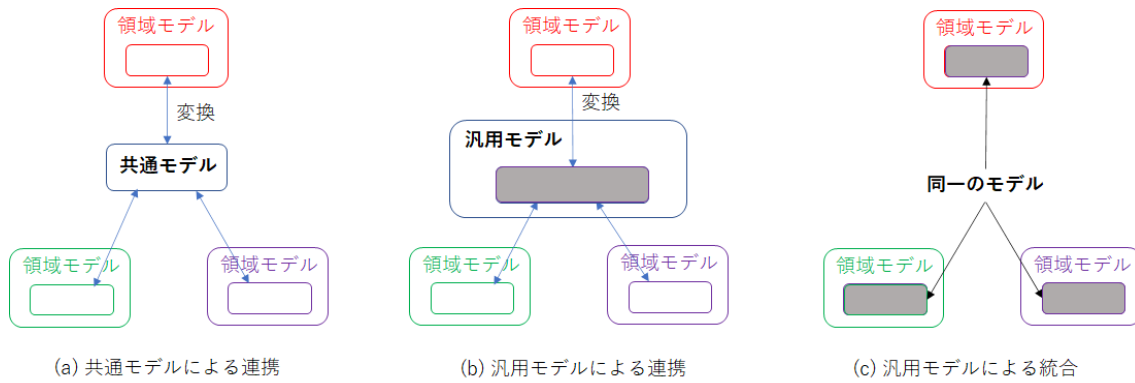


図3 モデルの連携と統合の概念

(出典) 分科会で作成

【共通モデル】

連携の対象となる各領域モデルのサブモデルについて、変換の容易性などを考慮して定義される共通のモデルである。

【汎用モデル】

個々の連携や統合に依存せず、対象として規定された各領域分野を包含するように、予め定義されたモデルである。対象分野を構成する概念表現の集まりであると言える。

図3において、(a)は、各領域モデルの連携の必要に応じて、その都度適切な共通モデルが設定されることを示している。(b)は、必要に応じて共通モデルを設定するのではなく、できるだけ汎用的なモデルを構築しておくことを示している。個々の領域モデルの連携については、各モデルの該当するサブモデルを汎用モデル中の対応するサブモデルに変換することで実現する。様々な領域連携の要求に統一的な手法で対応しようとするものである。(c)は、汎用モデル中の対応するサブモデルが、そのまま各領域モデルのサブモデルとして組み込まれることにより、統合を達成しようとするものである。領域モデルに組み込めるようにモデルデータのみならずモデル操作機能も規定されている必要がある。このためには、モデルデータとしての生産科学知識が明示的に記述できるように学術的に体系化されている必要がある。

例えば、一般的な「公差」という概念が工学的に厳密に定義されていないことを、ここでは生産科学知識が明示的でないと言う。公差とは、機械部品を製造する際に、寸法などに許容される誤差を規定する手法である。公差が厳密に定義可能になれば、無駄の無い公差を設定することが可能になり、必要以上の加工精度を要求することがなくなり、不要な加工作業を削減できて、必要な製造エネルギーを削減することが可能になる。このような学術的な体系化が困難な場合が依然として多く存在するところにこのモデル研究の困難さがある。従来研究を発展させ、継続的に研究に取り組む必要があるとともに、基礎学術に基づいて生産科学知識をより論理化していく必要もある。

現状では、例えば、形状の扱いについては、数学的基礎がかなり確立しており、現実

的な開発が進んでいる。3D-CADにおける形状モデルについては、個別のCADシステム間でそれらのCADシステムに都合の良い方式で固有の共通モデルを設定する(a)から、STEP (Standard for the Exchange of Product Data) [35]などの国際標準に基づいて変換用の汎用モデルを設定する(b)の段階にあると考えられる。さらに、形状に関する汎用のモデルクラスを各CADシステムに組み込もうとする(c)の可能性を追究している。具体的には、一例として、汎用のモデルクラスについて共通のAPI(Application Programming Interface)を整備することなどが考えられる。

実体をモデル化しようとする物理モデルや様々な技術モデルについては、領域依存性が強く、(a)から(b)へ発展するためには、概念の体系化や共通化について今後多くの研究開発が必要とされている。例えば、「品質」という概念は、使用寿命など製品が備えている特性のレベルを規定しており、持続可能性にとって必須の概念である。製品領域や技術領域ごとに固有の物理現象に依存して定義されているのが実態であり、一般的に比較することは困難である。この概念整理は興味ある課題であるが困難な課題であり、今後の研究が必要とされる。

具体的なモデルインスタンスとしてのデータ項目については、設計や製造を主体として従来から考えられてきた生産科学に関するモデルデータのさらなる体系化、理論化が必要である。特に、持続可能性評価に必要なデータ項目を取り入れていくことは、重要な基本的要求である。持続可能性評価に必要なデータ項目の多くは、関連学術により明らかにされてきているので、それらを多視点で領域連携できるような人工物ライフサイクルモデルに構造的に組み込んでいく。これにより、Absolute Sustainabilityへ繋がるような環境科学や地球科学の視点から構成されるマクロなモデルに対し、人工物が支える社会や産業活動に関する環境影響データを構造的に提供できるようになると期待される。例えば、温暖化や資源枯渇、環境汚染などの環境影響に関するデータ項目については、LCA(Life Cycle Assessment) [36]の分野でのデータ体系や蓄積されてきたデータを不整合なく活用していくことは重要である。

6 提案

本記録は、持続可能社会を構築し向上させていくために、様々な人工物がそのライフサイクルを通じて社会活動を支えているという視点を基礎として、人工物を生み出す生産科学が社会の持続可能性向上にさらに貢献できるための方策について考察したものである。

生産活動や人工物のライフサイクルについての俯瞰的で包括的なモデリングが重要であることを述べ、そのモデリングを活用して社会の持続可能性向上へ向けて人工物のライフサイクルを変革するための様々な方策が考えられることを述べた。

本記録で指摘した生産科学における課題は以下のとおりである。

- ・ 持続可能性向上に資する生産活動や人工物のためには、既存の技術領域や製品領域に捉われない視点で生産活動や人工物を再構築し、発生する無駄を削減していくことが必要である。
- ・ そのためには、人工物をそのライフサイクル全体で捉えて、様々なライフサイクルの総体との関係において社会の活動を捉えることが必要である。それを支援するような相互運用可能で透明性のあるライフサイクルモデリング手法が必要である。
- ・ 持続可能性という着眼点で見たときに、人工物のライフサイクルに応じて得られる効用と環境負荷を明示化することによって、Absolute Sustainability を満足する限界を示す必要がある。

上記の課題を解決するために、以下の方針を提案する。

1) 生産科学の視点から、人工物ライフサイクルに関する情報とその表現に関して、人工物ライフサイクルを俯瞰的に捉え、領域横断的、かつ、汎用的なモデル化手法群に関する研究を推進する必要がある。例えば、人工物ライフサイクルにおけるカーボンフットプリント(Carbon Foot Print: CFP)の具体的積算法において、本記録に基づく、異業種横断的なデータ交換の基盤の構築である。

2) モデル化手法群を基礎として、持続可能性向上に資する人工物ライフサイクルの変革のために、不適・不要な制約を廃して生産活動を本来の在り方に変革する方策に関する研究を推進する必要がある。例えば、資源循環を容易化する人工物設計手法において、人工物設計における方策と資源循環系での効果の関係の明示化、もしくは、人工物と資源循環系のデータ連携が自動的に行われることで相互関係が明示化されるようなモデル統合基盤の構築である。

以上の方針は、いずれも問題の難しさゆえに長期の取組を必要とする。研究成果の蓄積と効果的な再利用を目指して、総合的かつ長期的な研究計画を設定することが重要であることを指摘する。

短期的には、カーボンフットプリント、デジタル製品パスポートなど個別に実証的なプロジェクトを進めて行き、その結果を本記録で示した視点（可視化、将来の拡張性など）で再整理し、それに基づきさらに実証的なプロジェクトを進めるという循環的な進め方から始めるべきである。本記録はこのような短期的な検討の重要性も指摘する。

<用語集>

オントロジー

様々な定義があるが、本文書では、考察対象とする分野のモデルを構築する際に基本となる概念や概念間の関係の体系と定義する。個別の製品や技術領域に横断的に共通のオントロジーを規定できることが相互運用性にとって重要である。

サイバー層

論理的に存在する対象の場を意味する。本文書では、主に、物理層に存在する対象のモデルを考える。物理層に対応する対象が存在しない場合もある。

サイバー・フィジカルシステム (Cyber-physical system: CPS)

物理層の対象とサイバー層のモデルとを必要に応じて動的に関係させ、単独では達成できないような機能を実現しようとするシステムである。物理層における詳細な装置情報の獲得によるサイバー層における高度なメンテナンスサービスや、サイバー層における新たなサービス設計に基づく物理層の施設再編などは一例である。

人工物

人の活動により生み出されるものの総称で、形ある物体のみならず、形のないソフトウェアやシステム、知的資産も含む。本文書では、いわゆる工業生産により造り出される成果物を意味することとする。

人工物ライフサイクル

人工物が生まれてから消滅するまで、すなわち、発想・設計・製造・使用・回収・再利用・廃棄などの一連の活動およびその対象を意味する。

相互運用性 (Interoperability)

ある目的の仕事を達成するために、独立した人工物を協働させて活用できることを言う。協働の程度は様々であり、特に協働の意味を理解している場合を意味的相互運用性 (Semantic interoperability) と言う。この場合には、関係する人工物が共通のオントロジーを有していることが基本となる。

物理層

物理的に存在する対象の場を意味する。

モデリング

モデルを構築する活動、手順、仕組み、あるいはそのためのツールを意味する。

モデル

一般的には、設定された目的のために、考察対象の特性や特性間の関係を、代替物や言語、形式的な記述手法などで表現したものである。本文書では、モデルは情報処理的な記述手法で表現されるものとする。

モデルインスタンス

モデルクラスの特性に個別の実現値が付与されたものである。物理層の実体から実現値が付与される場合もあるが、物理層の実体が存在しない場合もある。

モデルクラス

ある一般的な特性を持つモデルの群を意味する。

<参考文献>

- [1] 日本学術会議機械工学委員会生産科学分科会、報告「21世紀ものづくり科学のあり方について」、2008年9月18日。
- [2] 日本学術会議人工物設計・生産研究連絡委員会生産システム学専門委員会、報告「人工物のライフサイクルデザイン(LCD)のために振興すべき基礎学術」、2000年4月24日。
- [3] M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, F. Martina: Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations and constraints, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol.65, no.2, pp.737-760, 2016.
- [4] IPCC: The Intergovernmental Panel on Climate Change: the Sixth Assessment Report, WG I: The Physical Science Basis, 2021, WG II: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022, WG III: Mitigation of Climate Change, 2022.
- [5] M. Z. Hauschild, S. Kara, I. Røpke: Absolute sustainability: Challenges to life cycle engineering, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol.69, no.2, pp. 533-553, 2020.
- [6] J. Rockström, et al: A safe operating space for humanity, Nature, vol.461, Issue 7263, pp.472-475, 2009.
- [7] W. Steffen, et al: Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet, Science, 347-6223, pp.736-746, 2015.
- [8] 日本学術会議機械工学委員会生産科学分科会、報告「資源循環型ものづくりを実現するための学術的指針ー地球温暖化対策を主対象にー」、2011年8月8日。
- [9] 環境省：部門別CO₂排出量の現況推計,
https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/tools/suikai.html, 2023.
- [10] Greenhouse Gas Protocol, Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard, Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard, World Resource Institute,
<https://ghgprotocol.org/corporate-value-chain-scope-3-standard>.
- [11] UN 2030 Agenda for Sustainable Development, 2015.
- [12] Y. Umeda, S. Takata, F. Kimura, T. Tomiyama, J. W. Sutherland, S. Kara, C. Herrmann, J. R. Dufloy: Toward integrated product and process life cycle planning - an environmental perspective, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol.61, no.2, pp.681-702, 2012.
- [13] 森下弘一、他：グローバル生産に向けた小ロット・コンパクト鍛造ラインの開発、塑性と加工、vol.52, no.611, pp.1247-1251, 2011.
- [14] 師岡将義、他：小型ダイカストシステムによる同期一貫ライン、デンソーテクニカルレビュー、vol.20, pp.182-188, 2015.
- [15] 波多野智之、高木博己、原田英明、肥後徳仁、西川浩司、地球環境にやさしい省エネ

- ルギーダイカスト技術の開発, 鑄造工学, vol. 82, no. 4, pp. 223-229, 2010.
- [16]山田篤史, 児玉和俊, 安田浩一郎, 瀬川佳秀, 榎並正晃, 持続可能型セラミック生産システム「SPS」の開発—市場変化の先読みと精密加工の融合によるマスカスタム生産実現—, 精密工学会誌, Vol. 89, No. 2, 2023.
- [17]K. Richa, C. W. Babbitt, N. G. Nenadic, G. Gaustad: Environmental trade-offs across cascading lithium-ion battery life cycles, *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, issue 1, pp. 66-811, 2017.
- [18]大庭敏之監修, 自動車樹脂化の最新動向, シーエムシー出版, 2020.
- [19]日本経済団体連合会 : Society 5.0 - とともに創造する未来 -, 2018. あるいは、内閣府 : https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
- [20]D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, B. Hicks: Characterising the digital twin: a systematic literature review. *CIRP J Manuf Sci Technol* 29:36-52, 2020.
- [21]R. Stark, C. Freseman, K. Lindow: Development and operation of digital twins for technical systems and services, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 68, no. 1, pp. 129-132, 2019.
- [22]NIST Special Publication 1500-201: Framework for Cyber-Physical Systems: Volume 1, Overview, 2017.
- [23]L. Monostori, B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn, K. Ueda: Cyber-physical systems in manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 65, no. 2, pp. 621-642, 2016.
- [24]R. Stark: *Virtual product creation in industry*, Springer, 2022.
- [25]IEC White paper: Semantic interoperability: challenges in the digital transformation age, 2020.
- [26]F. L. Krause, F. Kimura, T. Kjellberg, S. C. Y. Lu, L. Alting, H. A. ElMaraghy, W. Eversheim, K. Iwata, N. P. Suh, V. A. Tipnis, M. Weck: Product modelling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 42, no. 2, pp. 695-706, 1993.
- [27]L. Roucoules, N. Anwer: Coevolution of digitalisation, organisations and product development cycle, *CIRP Anals - Manufacturing Technology*, vol. 70, no. 2, pp. 519-542, 2021.
- [28]溝口理一郎 : オントロジー工学、オーム社、2005.
- [29]一般社団法人電子情報技術産業協会三次元 CAD 情報標準化専門委員会 : 3DA モデルの使い方と DTPD への展開、日刊工業新聞社、2021.
- [30]K. Hara, M. Uwasu, H. Kobayashi, S. Kurimoto, S. Yamanaka, Y. Shimoda, Y. Umeda: Enhancing meso level research in sustainability science—challenges and research needs, *Sustainability*, vol. 4, issue 8, pp. 1833-1847, 2012.
- [31]H. Kobayashi, H. Murata, S. Fukushige, Connected life-cycle systems: a new perspective on industrial symbiosis, *Procedia CIRP*, vol. 90, pp. 388-392, 2020.
- [32]日本学術会議人工物設計・生産研究連絡委員会生産システム学専門委員会、報告「ラ

ライフサイクルデザイン(LCD)指標体系に基づく人工物設計・生産の評価指針—LCD 戦略に向けた構造的評価方法」、2003年6月24日。

- [33]Y. Umeda, A. Nonomura, T. Tomiyama: Study on life-cycle design for the post mass production paradigm, AIEDAM, vol.14, pp.149-161, 2000.
- [34]H. Kobayashi, T. Matsumoto, S. Fukushige: A simulation methodology for a system of product life cycle systems, Advanced Engineering Informatics, vol.36, pp.101-111, 2018.
- [35]ISO 10303: Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange.
- [36]ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, 2006.

＜参考資料＞審議経過

令和3年

3月30日生産科学分科会（第1回）

意思の表出を行うことの承認、スケジュールの確認

6月11日生産科学分科会（第2回）

カーボンニュートラルをはじめとする持続性社会実現のため、工場のエネルギー管理、リチウムイオン電池、エネルギーシステムの在り方等、周辺状況の調査を行った。

9月30日生産科学分科会（第3回）

カーボンニュートラルをはじめとする持続性社会実現のため、自動車、および周辺状況の調査を行った。

令和4年

1月6日生産科学分科会（第4回）

循環型製造業に関する討議、及び意思の表出の検討

3月4日生産科学分科会（第5回）

意思の表出のための小委員会の設置を決定

6月30日生産科学分科会生産科学構想小委員会（第1回）

本小委員会の設置目的、審議事項などが説明され、意思の表出の内容、スケジュールについての検討

7月22日生産科学分科会生産科学構想小委員会（第2回）

意思の表出の内容についての検討

8月10日生産科学分科会（第6回）・生産科学分科会生産科学構想小委員会（第3回）合同会議

意志の表出に向けた申出書について討議

12月28日生産科学分科会（第7回）・生産科学分科会生産科学構想小委員会（第4回）合同会議

意思の表出に向けての意見交換を実施。今回の議論を反映させた意思の表出申出書を作成し、分科会委員長確認の上、事務局に提出を了承。

1月27日生産科学分科会より意思の意志の表出に向けた申出書を事務局へ提出

3月 生産科学分科会（第8回）メール審議

見解案「持続可能社会を推進する生産科学の長期的課題と解決に向けた見解」承認