

ものづくりのスキーマ転換期におけるデザイン

On design in the transition period of manufacturing schema

○小野里 雅彦 (北海道大学) *1

*1 Masahiko ONOSATO

Hokkaido University, N14W9, Sapporo, 060-0814

onosato@ssi.ist.hokudai.ac.jp

キーワード:ものづくりの三層スキーマ, デザイン, バーチャル技術

1. はじめに

著者は 1980 年代半ばより、大学の機械・システム系の設計・生産(「ものづくり」⁽¹⁾)の研究・教育に従事してきた。その約 40 年にわたる経験からみて、ここ数年における「ものづくり」を取り巻く状況の進行の速さには驚かされる。この変化は時を同じくして発生した COVID-19 対策としてのリモートワーク実施と業務効率化のためのデジタル推進(digital transformation: DX)に留まらない、「ものづくり」の仕組みの根幹が転換していると考えている。

本講演では、この「ものづくり」の構造変化について概説した後、その新たな構造の中において、デザインの今後の変化の可能性について考察を加える。なお、本講演で対象とするデザインは、機械⁽²⁾などの物理的実体を有するものを主として議論を行う。組織構成や業務構造などの抽象的な対象や、工芸品や美術品のような美的価値が重要なもの、さらには、コンピュータゲームや各種プログラムの製作などはここでは考察の対象としない。対象が物理的な実体を有するものに限定された狭義のデザインを、ここでは設計と呼ぶこととする⁽³⁾。

まず、「ものづくり」の構造がどのように変化をしてきたかについて、情報の観点から見ていくこととする。

2. 「ものづくり」の情動的視点での変遷

2.1. 記述による設計と生産の分化

原始の「ものづくり」の形態を次のように想像する。欲しいものを頭の中にイメージして、それを目指して工具等で形作る。考えることと作ることが一人の中で完結し、それらは不可分に同時進行する(図 1 A)。この出発点においては設計と生産は未分離である。

その後、作りたいものと作る手順を言葉や絵で記述し、外在化することを可能とした。これにより、つくるものを定める設計と、それを実体化する生産に「ものづくり」は分化をする(図 1 B)。設計と生産は時間、場所、考案と製作が同一であるという制約から解放される。これが「ものづくり」の構造における最初で最大の転換といえる。

「ものづくり」における記述は、各産業分野で拡大され、精緻化していく。国際標準 ISO や日本工業規格 JIS による用語定義や製図法などはその例である。

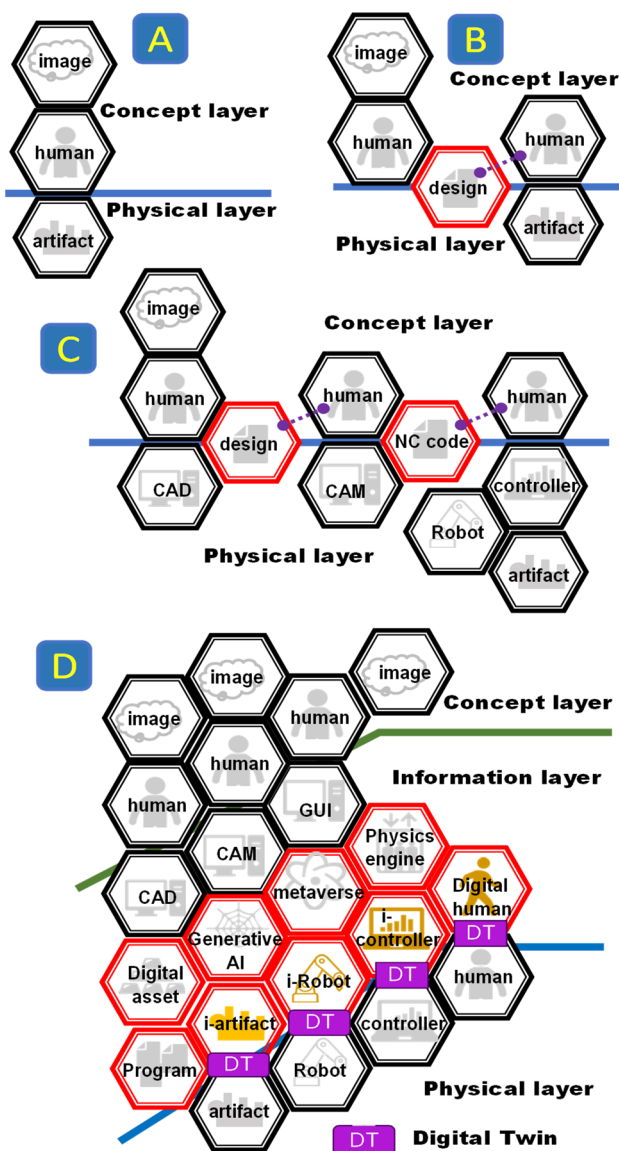


Fig.1 Historical changes in manufacturing up to three layered scheme with intermediate layer of information

2.2. デジタル化による効率化

二十世紀半ばにコンピュータが登場すると、「ものづくり」の世界にも計算機援用設計 (Computer-Aided Design) や計算機援用生産 (Computer-Aided Manufacturing) が導入され、記述の編集・評価・実行に利用されるようになる。記述は人間が作成・理解することを前提とした“アナログ”表現から、コンピュータが処理し保存することが前提となる“デジタル”表現へと移行していく。これにより、対象物の記述は製図法を基本とする2次元から、幾何モデルによる3次元へと高次元化をしていく。ただし、設計・生産のプロセスの中心は依然として人間であり、コンピュータは人間が指示する処理を行う従属的な役割に留まる (図1C)。

現在、産業界を中心に Digital Transformation (DX) という用語が盛んに用いられている。本来は次節に述べる形態への移行が目的と考えられるが、現状ではデジタル形式でのデータ再利用による業務連携のレベルを目標にしている場合が多い。例えていうと、これまで紙に手書きして郵送していた文書を、ワープロで入力・印刷して FAX で送る、といった変更である。相手に届くまでの時間は短縮されるが、相手を受け取るデータの内容と形式に本質的な違いはなく、導入の効果も限定的である。

2.3. 情報通信技術 (ICT) による産業構造の高度化

設計と生産の業務にコンピュータが導入され、CAD, CAM, CAE などの業務支援のソフトウェアが普及することで、業務の結果やプロセスの記述がデジタルの情報として生成・処理・収集・共有されるようになった。

具体的には、統合的なサービスへのアクセスを提供するクラウド・コンピューティング、ネットワーク接続されたデバイス間での高レベルなデータ交換を可能とする Internet of Things (IoT)、実環境と等価な構造と挙動を提供するデジタル・ツイン (Digital Twin)、GPT-4 に代表される高度な対話能力を持つ生成 AI、などである。

こうした多くの優れた技術が連携して、コンピュータが主導的に活動するプラットフォーム (情報基盤) を形成する。このプラットフォームが従来からの概念世界と物理世界の二層で形成されていた「ものづくり」の間に介入して、概念世界—情報世界—物理世界の三層を形成し、中間層である情報世界をコンピュータが実効的にコントロールする状況へと変化してきている (図1D)。こうして形成される中間層を、本稿では、情報層 (Information layer) と呼ぶことにする。

3. 「ものづくり」三層構造への転換の意味

3.1. 第4次産業革命

著者は上で述べた情報層の形成による三層構造の出現は、外在化された記述により概念世界と物理世界が分離し、「ものづくり」が設計と生産に分化して以降、「ものづくり」史上最大級の変革と考えている。一般に現在進行する変化は第4次産業革命 (Industrie 4.0) と称され、蒸気機関の動力導入による第1次、電力供給と科学的管理法による大量生産を確立した第2次、電子機器を用いてオートメーションを推進した第3次に続く“次の生産革新”の意味で用いられている⁽⁴⁾。具体的にはビッグデータ、人工知能、IoT などの先端的な情報通信技術を用いて新たなサービスの創出と、

生産効率の向上を目指すものである。しかしながら第4次産業革命で提示する将来像^(*)は、これまでの技術発展の延長線上にあり、“産業革命”と呼ぶ理由となる不連続性が何であるか明確ではない。そこで、三層構造の形成がいかなる不連続性を「ものづくり」にもたらすかを考えてみる。

3.2. 「ものづくり」が向き合う不連続性

3.2.1. 概念世界と物理世界の分離 先に述べたように、三層構造では、新たに形成された情報層が概念世界 (層) と物理世界 (層) の間に介在する構造をとる (図2A)。これにより、概念世界と物理世界の間インタラクションは必ず情報層経由となる。設計者は概念層で思考し、情報層の提供する各種のデジタル環境を用いて情報層の中に設計対象のモデルを構築する。情報層では記述された設計対象のモデルには物理演算エンジンが物理制約の充足を常に管理をしている。物理世界と情報面で等価な世界を情報層に構築することで、物理世界と分離した形で設計作業が遂行できる。

他方、物理世界に設置された加工装置に関しても、情報層で生成されたデジタル形式での動作指示を受けて動作を行い、加工物の状態や装置の状態などの計測データを実績として報告することで、人間の作業員からの指示を受ける必要がなくなる。物理世界から見ても概念世界と直接につながる必要性はなくなる。

現状では設計者や生産技術者を物理世界から完全に隔離した形—例えば試作や実験をしない—で設計業務を行うことは信頼性の面でも問題も多く、推奨されない。しかしながら、今後、各種の実験データの共有や解析手法の精緻化、物理演算エンジンのマルチフィジクス化などにより、情報層による物理世界の再現精度向上が予想され、信頼性が同等もしくは遠くない将来に逆転することも考えられる。

3.2.2. 人間とコンピュータのワークフローの分離 従来のコンピュータ利用の形態 (図1C) においては、人間とコンピュータの業務が直列につながり、そのワークフローを制御するのは主に人間である。そのため、人間とコンピュータが協力して遂行する業務の時間的な応答性 (例え

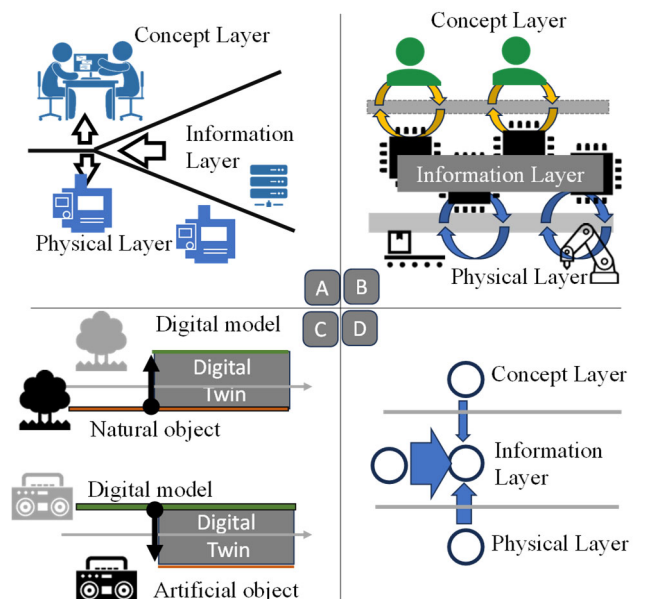


Fig.2 Four discontinuities in the three-layer scheme

ば、要求に対する応答の所要時間)は、人間の能力と勤務形態(就業時間、休日)、組織の決定フローなどによって定まる。このことはコンピュータ業務が拡大し、高速化する現状において大きな障害となる。

三層構造(図1D)においては、人間とコンピュータはそれぞれが独立した業務ループを持ち、情報層に蓄積される設計対象を参照、改訂、評価を行う(図2B)。これにより、コンピュータが主導する情報層においては、365日24時間の連続運用が可能となる。

3.2.3. 設計物の実体とモデルの先行関係 三層構造においては、物理世界に存在する「もの」には、それに対応する「モデル」が情報層に存在し、その両者を組み合わせてデジタル・ツインを形成する(図1D中のDT)。従来のアプローチでは物理世界に「もの」が存在して、そこから計測データを収集し、それをを用いてモデルを作成する。すなわち、デジタル・ツインを作るためには付加的な作業が必要となる。

一方、三層構造のアプローチでは、人工物は三層構造の設計支援環境の下で設計が行われており、物理世界の設計物に先行して、設計仕様としての「モデル」が定義されている。これがデジタル・ツインに求められるデータの多くを提供する(図2C)。自然物ならびに設計時のモデルを失っている人工物のデジタル・ツインを一から構築する労力と比べ負担が少ない。

3.2.4. 実データと仮想データの量の逆転 情報層が形成され整備が進むことで、従来、物理世界において実験や試作、計測などを行って取得していた実データに対して、情報層のデータベースやシミュレーション機能を用いて生成した仮想データ(synthetic data)がより大量に、より状況の多様性を反映して用いられる(図2D)。例えば、自動運転車両の開発においては、様々な運転状況の元での制御プログラムの信頼性を確認する必要があるが、それらの運転状況を実物理空間で設定し実験を行うことは非常に困難であるが、シミュレータによる仮想運転環境ではそれが可能となる。

3.3. 三層構造転換への条件

ここで述べてきた情報層を中間層として介在させた構造の構想そのものは格別、目新しいものではない。著者らが1993年に発表した仮想生産システム(virtual manufacturing system)⁽⁶⁾において同様な内容を提唱しているし、プロダクトモデリングやロボットの遠隔制御の研究においても対象世界の情報モデル化が重要視されていた。

それが最近になって転換への動きが顕著になってきた理由として以下のことが考えられる。

- (1) クラウド・コンピューティングなどにより、データやサービスの共有の仕組みが容易に利用可能となったこと。
- (2) 大量のGPUを用いたサーバーなどにより、大きな並列度を持つ計算を高速で低コストで行えること。
- (3) 工場の設備に高速で信頼性の高い通信と計算能力を持ったコントローラを低コストで装備できること。
- (4) LiDAR(Light Detection and Ranging)や SfM (Structure from Motion)などの物理世界の空間構造を情報層でモデル化するハードウェア、ソフトウェアが低コスト

トで入手できること。

- (5) NVIDIA 社の Omniverse に代表される物理制約を満足する仮想世界の構築環境が利用可能となったこと。
- (6) GPT-4 などの生成 AI の登場により、将来、多くの業務で人間と置き換わる可能性を提示したこと。
- (7) COVID-19 により、時間的、地理的制約の影響を受けにくい業務形態への関心が高まったこと。
- (8) 設計対象の情報サービス化が進み、設計作業そのものが物理的な内容から論理的内容へと比重が移っていること。

現代はこうした諸要件が揃いつつあり、いわゆる技術的特異点(technological singularity)の到来が差し迫ったものと予想される。「ものづくり」は本来、非常に大きな慣性を持っており、容易に方向を変えることはないが、「ものづくり」の記述の“デジタル化”という変化の利益を享受できる状況に到達したと解釈している。

4. 三層構造における設計と人間

4.1. 創造的作業としての設計

十数年ほど前に深層学習が関心を集めた頃、AIが代替する職業についての予想が社会的に大きな関心を集めた。調査の一つは、今後20~30年に日本の労働人口の49%が人工知能やロボット等で代替可能であるとの推計を出している⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾。そうした調査において、広くデザインに関する職業は代替されにくいと評価されている。一般では「設計は創造的作業なのでAIには無理」と要約されている場合も多い。ここで、「設計における創造性とはなにか?」と「その創造性は人間は持ち得て、なぜAIは持ち得ないのか?」という問いに答える必要がある。しかしながらそれに対して正面から論じたものを筆者は知らない。

著者は以前から「創造性は人間の特権」とする立場に懐疑的であったが、最近の生成AIの生成物の完成度と多様性を見ると、創造性を理由に設計における人間の優位性を主張することは、もはや難しいと感じている。ここでは議論の出発点として、人間とコンピュータ、シンセシスとアナリシスという2つの対立軸を設定した2×2のマトリックスの上で、先に述べた三層構造が形成された作業環境下での設計(デザイン)のプロセスについて説明する。

4.2. 設計の基本プロセス

ここでは設計のプロセスをシンセシス(Synthesis: S)とアナリシス(Analysis: A)の交互サイクル $S_0 \rightarrow A_0 \rightarrow S_1 \rightarrow A_1 \rightarrow S_2 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots$ で構成されるものとする。ここでシンセシスとは要求に対する記述(解)を提示することであり、アナリシスは与えられた記述(解)がいかなる振舞(挙動、構造、状態)をするかを示すことと規定する。

また、プロセスを主導的に行うのが人間(Human: H)かAIやロボットを含めたコンピュータ(Computer: C)かの区別をする。これにより、設計は

S-H: 人間によるシンセシス

S-C: コンピュータによるシンセシス

A-H: 人間によるアナリシス

A-C: コンピュータによるアナリシス

の4種類のプロセスの連節したものとして捉える。結合のパターンは様々なものが考えられるが、ここではもっとも

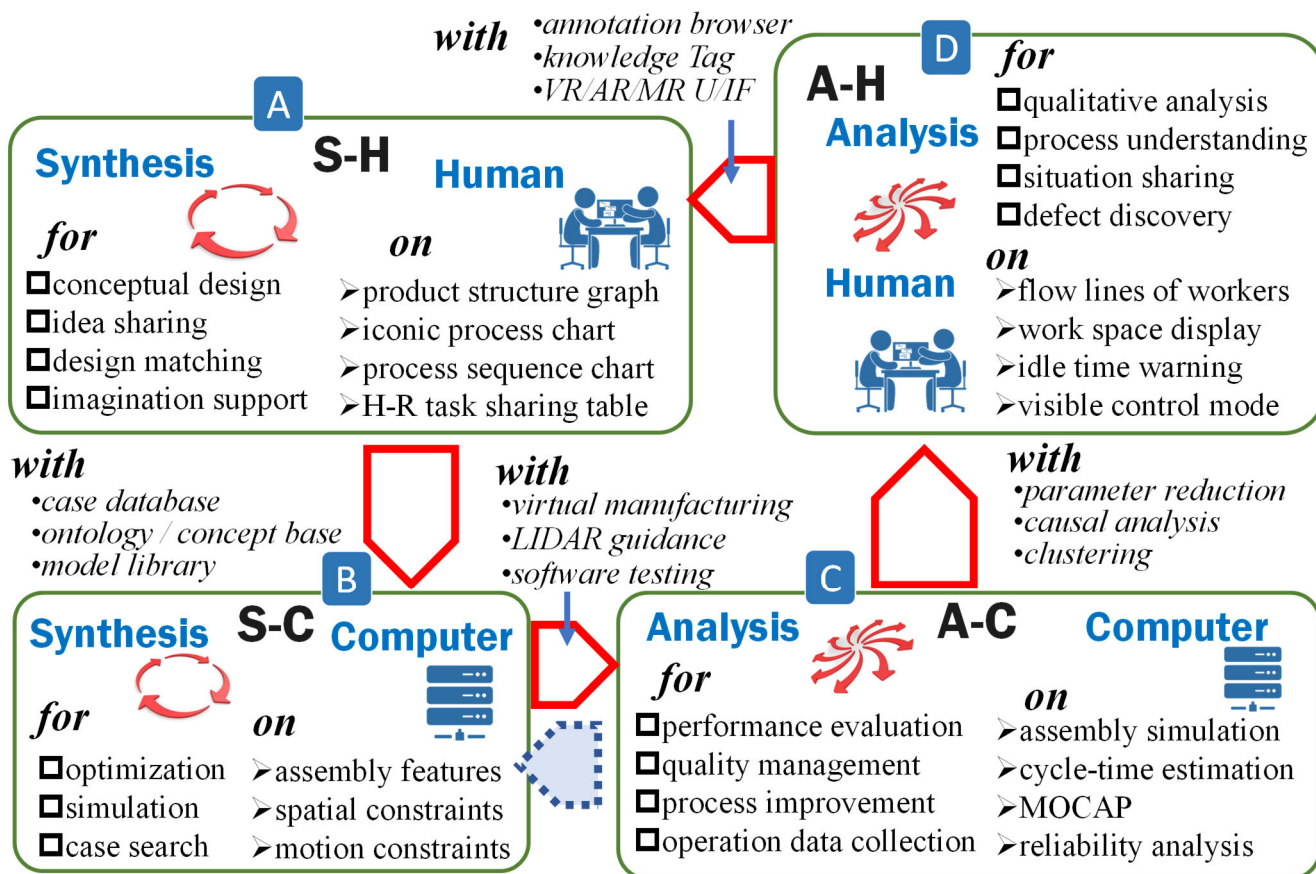


Fig.3 Design work matrix with two axes human – computer and synthesis - analysis

標準的と考えられる

S-H→S-C→A-C→A-H→S-H→…

を設計プロセスの典型として論じる。これは人間が設計の起点となり、最後は人間が判断する、という考え方に沿っているが、こうあるべきという主張ではない。

4.3. 設計の基本サイクル

4.3.1. 設計の基本サイクル図の説明 図3に基本サイクル図を示す。図は大きく2×2の4つのブロックからなり、左上から反時計回りにS-H, S-C, A-C, A-Hと並んでいる。4つのブロック内には、プロセスの目的 (for) とプロセスでの処理項目等 (on) が箇条書きで記され、さらにサイクルの次のブロックとの間には、ブロック間でのデータ変換や補完などに関する技術や手法について記載している。

4.3.2. S-H: Synthesis by Human 部分設計も含めたプロセスの起点であり、創造性に関して人間の関与を最も期待するプロセスである。各種の設計法やデザイン思考 (Design Thinking), 発想支援やブレインストームが用いられる。

このブロックのアウトプットは次段のコンピュータによるシンセシスに渡されるが、人間が議論した内容を的確にコンピュータが解釈できる形式に翻訳する仕組みが必要であり、概念辞書や事例集、モデルライブラリなどが必要とされる。

4.3.3. S-C: Synthesis by Computer 前段の人間によるシンセシスの結果を受けて、それを詳細化、具体化、拡

張などを行う。また記述の矛盾や不整合の検出に加え、既存の特許などとの抵触の判断などを行い、設計作業の継続に支障があると判断すると前段に差し戻す。膨大に考えられる代替案に関しては、次段のA-Cと連携して最適化や解空間の縮小を行う。

解析結果の出力に加え、次段でのアナリシスを行う上で必要となる境界条件や目的関数決定に必要な情報に用意する。また、アナリシスで行う物理世界での実計測のガイドンを提供する。

4.3.4. A-C: Analysis by Computer 前段で作成された設計解に対してアナリシスを行い、性能や経済性などの要求仕様に対する実現値を提供する。また、AIの機械学習で使用する生成データ (synthetic data) を生成し、解析に用いる。結果は次段の人間によるアナリシスで人間に理解可能な形で、重要な内容を抽出、低次元化、因果による説明などを行う。

このブロックは三層構造の中核であり、人工物に関するデータやノウハウ、解析手法等が集約された統合プラットフォームの導入が加速する。

4.3.5. A-H: Analysis by Human サイクルの最終段であり、前段のコンピュータによる詳細なアナリシスの結果から重要なものを抽出してわかりやすく人間に提示し、評価をしてもらう。そのため、数値データの集合に対して直観的にわかりやすい図的表現が用いられる。また、設計解の評価を行い次の新たな設計サイクルに対するフィードバ

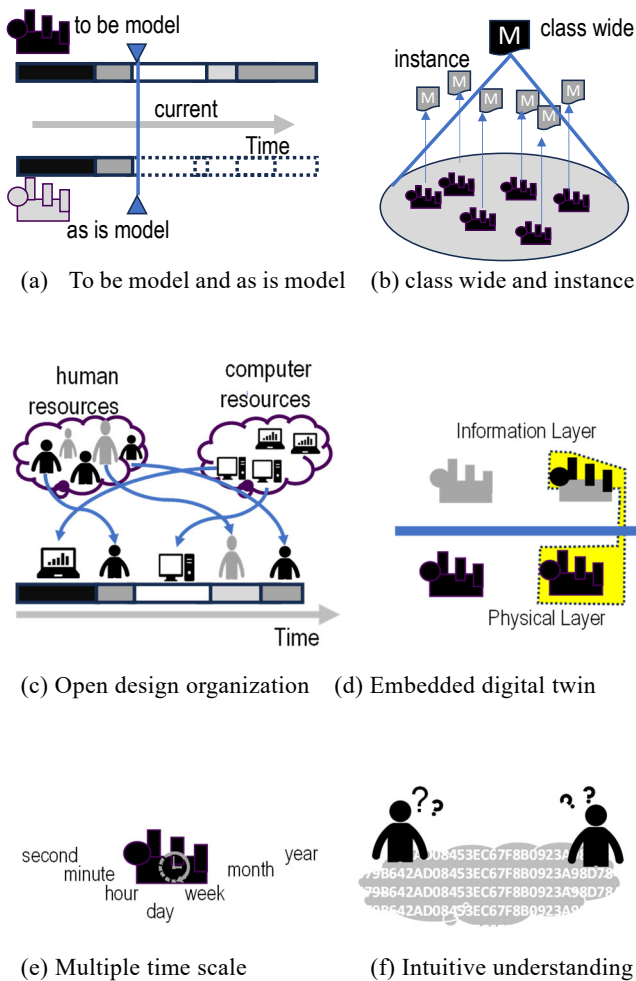


Fig. 4 Six changes in model description

ックや改訂された初期条件等を入力する。

4.3.6. コンピュータによるローカル・ループ 上に挙げた例では図3の4つのブロックを反時計周りに回る形で構成されるプロセスを説明したが、現実にはコンピュータによるシンセシス (S-C) とアナリシス (A-C) の部分でローカルなループを形成し、S-H で人間が生成するよりもはるかに多くの設計代替案を評価・比較できる。また、人間が主導する S-H は時定数が大きい (低速) ため、作業中に高速な S-C, A-C のループをバックグラウンドで並列に実行することで、S-H のプロセスに実現可能性や性能の優劣などの評価を提供することが可能となる。

5. 概念—情報—物理の三層構造での設計

はじめに現代は「ものづくり」の歴史的転換期であると述べたが、そこでは設計 (デザイン) の記述はどう変わっているだろうか。予想を以下に簡潔にまとめる。

- (1) “記述”は人工物のライフサイクル全般に対する計画を述べる “to be model/plan” と実績である “as is model/fact” が情報層に随時、形成される (図4(a))。
- (2) “as is model” は、製品種別単位のクラスワイドな記述と、個々の製品ごとのインスタンスレベルの記述に分

かれる。(図4(b))

- (3) 情報層の記述の形成には、多様な人間集団と AI を中心とするコンピュータ群が、分担、協同、競争して行うオープンで持続的な活動になる。(図4(c))
 - (4) 設計対象の人工物の情報層における“記述”は、計測・制御・情報処理などの機能の一部を担い、人工物そのものと不可分になる。図4(d))
 - (5) 設計解の記述は従来の静的な組み立て図のみではなく、機能発現の動作、製造工程、分解、組立、保守、解体、廃棄、長期にわたる劣化や変形という、様々な時間スケールでの変化を記述し、シミュレーションでできることが求められる。図4(e))
 - (6) コンピュータの主導により拡大するデジタル形式の記述に対して、人間が設計状況を把握し必要に応じてプロセスに介入できる仕組みを用意することが重要である。特に安全性と倫理に関することの逸脱は人間が責任をもって排除しなくてはならない。図4(f))
- 以上を図示したものを図4に示す。

6. おわりに

デザインの語源は「記号に表すこと」であり、そのことはデザインの本質であり不変であると思う。ただし、「だれにとつての記号か？」ということが今、大きく変わりつつある。これまで記号で書かれたことの意味解釈は人間に委ねていたが、コンピュータが、生成 AI の力などを得て、自ら解釈し、人間が求める設計解を構成する能力を急速に獲得しつつある。そうした状況の下で、設計の業務にはいかなる変化が生じ、その中で人間の位置づけについての議論のきっかけになれば幸いである。

文 献

- (1) 藤田喜久雄：設計論—製品設計からシステムズイノベーションへ、コロナ社、2023。
- (2) 渡辺茂：岩波講座 基礎工学 10：設計論 I、岩波書店、1968。
- (3) 吉川弘之：一般デザイン学、岩波書店、2020。
- (4) 内閣府：日本経済 2016-2017、第2章第1節 第4次産業革命のインパクト
https://www5.cao.go.jp/keizai3/2016/0117nk/n16_2_1.html (参照日 2023年8月30日)
- (5) Onosato, M., et al.: Development of a Virtual Manufacturing System by Integrating Product Models and Factory Models, Annals of CIRP, Vol. 42, pp. 475 – 478, 1993.
- (6) Frey, C. B., Osborne, M. A.: The Future of Employment: How susceptible are jobs to computerisation?, An International Journal of Technological Forecasting and Social Change, Vol. 114, pp. 254-280, 2017.
- (7) 野村総合研究所：日本の労働人口の49%が人工知能やロボット等で代替可能に、2015/12/2 ニュースリリース
https://www.nri.com/-/media/Corporate/jp/Files/PDF/news/newsrelease/cc/2015/151202_1.pdf (参照日 2023年8月30日)