



SICニュースレター「論説・寄稿」集（第6巻）

（2025年度掲載分）

 一般社団法人
システムイノベーションセンター
Systems Innovation Center (SIC)

はじめに

本書は一般社団法人システムイノベーションセンター(SIC) (2019年1月設立)の広報誌「SICニュースレター」(月刊:web 発行)に掲載された2025年度(2025年1月～12月)の記事を、会員からの「論説」、非会員からの「寄稿」および会員からの「技術紹介」、「エッセイ」を掲載時の内容を改変することなく編集・集約したものです。それぞれの掲載順は「SICニュースレター」への掲載順となっており、各著者の所属先名および肩書は掲載当時のものです。

なお、「SICニュースレター」のアーカイブは、SICのホームページ <https://sysic.org/> に公開しています。

2026年1月

©一般社団法人システムイノベーションセンター(SIC) 2026.1

本著作物の権利は一般社団法人システムイノベーションセンターに帰属します、
無断複製、無断転載を禁止します。

目次

ページ

I 論説(会員)

- DX時代の倫理と可能性～人間と技術が共創する未来のために～……………1
学習院大学名誉教授 遠藤 薫氏(SIC理事)

II 寄稿(非会員)

- 寄稿1 ロボットとシステム……………8
大阪工業大学 ロボティクス&デザイン工学部大須賀公一氏
- 寄稿2 グローバル先進工場との比較による日本の製造DXの現状と課題……………15
豊橋技術科学大学総合教育院 教授 藤井 享氏
- 寄稿3 人材多様化時代を生きる個人……………23
法政大学 キャリアデザイン学部 教授 武石恵美子氏
- 寄稿4 カーボンニュートラルに向けた大阪ガスのメタネーション技術開発
～大阪・関西万博でのメタネーション実証を終えて～……………29
大阪ガス株式会社 エンジニアリング部
カーボンニュートラルメタン開発チーム マネジャー 横山晃太氏

III 技術紹介(会員)

- 技術紹介1 国際電気のデジタルソリューションに向けた取り組み……………40
株式会社国際電気
プロダクト本部 製品企画部長 廣岡慎一郎氏
- 技術紹介2 原子力防災と避難シミュレーション……………47
株式会社構造計画研究所
執行役員 創造工学部 部長 米山照彦氏
同 小山智加氏
社会デザイン・マーケティング部 小野晋太郎氏

IV エッセイ(会員)

- Unity3.0: エネルギーと情報をつなぐ新文明論……………58
—システム思考とワットビット連携にもとづくイチゴ大福的宇宙仮説—
東京電力パワーグリッド株式会社
取締役 副社長執行役員 岡本 浩氏(SIC理事)

- V 2025年度 SIC役員一覧……………64

- VI 2025年度 SIC会員企業一覧……………65

I 論説

DX 時代の倫理と可能性～人間と技術が共創する未来のために～ 学習院大学名誉教授 遠藤 薫氏(SIC理事)

1. はじめに

近年、DXという言葉が注目を集めている。DXとは、デジタル・トランスフォーメーション(Digital Transformation)の略語である。2004年にスウェーデンのエリック・ストルターマン教授が提唱した概念で、「ICTの浸透が人々の生活をあらゆる面でより良い方向に変化させること」をいう。したがって、広義には「デジタル化」とほぼ同じであるが、特に近年の人工知能(AI)技術や、世界のあらゆるモノが常時相互にネット接続されるIoT(Internet of Things:モノのインターネット)技術、ビッグデータ活用などを活用する動きを狭義のDXという。

DXはすでに深く私たちの日常生活にも広く浸透しつつある。ことに2022年末に発表されたChatGPTは世界に大きな衝撃を与え、社会は新たなパラダイムシフトに直面している。

それを象徴するように、2024年ノーベル物理学賞及び化学賞は、AI関連の研究に与えられた。DXによる人類の文明への大きな貢献とその今後への期待が表現された出来事といえよう。

その一方、2024年に発表された世界経済フォーラムによるグローバルリスクの短期・長期的な重要度ランキングによれば、「誤情報・偽情報」、「サイバー犯罪・サイバーセキュリティ」、「AI技術がもたらす悪影響」などがランクインしている。また、2024年ノーベル物理学賞の受賞者の中にも、AI技術のあまりにも急速な進歩に警鐘を鳴らすものたちがいる。

DXは私たちの社会に、恩恵と共に重大なリスクももたらす可能性がある。

このような状況に、私たちはどう対処すべきなのだろうか。本稿では、AI技術の社会的埋め込みに伴うリスクとそれらへの対処について整理、検討するものである。

2. 社会のDX化の進行

2.1 コンピュータの時代の始まり

先にも述べたように、DX化とは広義にはデジタル化そのものであり、その現実的な始点は、第二次世界大戦中のマンハッタン計画にあると言える。

1945年、フォン・ノイマンがEDVACに関する報告書を発表し、プログラム内蔵方式を提案した。1946年、ペンシルベニア大学で真空管を使って演算処理をするデジタル計算機ENIACが開発された。1964年には、米IBMがメインフレームのSystem/360を発売した。コンピュータの時代が始まったのである。

そして、1969年、インターネットの原型であるARPANETが開発された。

2.2 インターネットの爆発的普及

1993年、インターネットの商用利用が解禁された。同じ年、NCSA がマルチメディア対応のブラウザである Mosaic をリリースした。これによって、専門的知識を持たなくても、インターネットを介して膨大な情報資源にアクセスすることが可能になった。

1995年7月に Amazon.com がサービスを開始し、同年8月に Windows95 がリリースされたこともあり、この後、インターネット利用者数は爆発的な増加のフェーズに入った。

2.3 SNS の日常化とアテンション・エコノミー

2000年代に入ると、SNS(ソーシャル・ネットワーキング・サービス)の普及により、オンラインでのコミュニケーションは日常生活に深く組み込まれるようになった。この現象は「SNS の日常化」と呼ばれ、ユーザーが SNS を単なる情報発信のツールとしてではなく、日常生活の一部として利用することを指す。特に、スマートフォンの普及によって SNS の利用が断続的かつ持続的に行われるようになり、個人のアイデンティティ形成や社会関係の維持に不可欠な要素となっている。

SNS の普及と密接に関連する概念として、アテンション・エコノミーが挙げられる。この概念は、膨大な情報が流通する現代において、興味・関心(アテンション)が希少資源となり、経済価値を持つという考え方に基づいている。SNS はユーザーの注意を引きつけることで広告収益を得るビジネスモデルを採用しており、プラットフォームはアルゴリズムを最適化し、ユーザーのエンゲージメント(アクセス数)を最大化する設計になっている。

アテンション・エコノミーは、情報へのアクセスの可能性を大きく向上させ、創造的産業の成長や、ソーシャルムーブメントを促進するなどの効果をあげる。その一方、誤情報の拡散、注意の分散、メンタルヘルスへの悪影響といった深刻な課題も抱えている。今後、プラットフォーム企業の責任、規制の強化、個人のメディアリテラシー向上が求められる。

2.5 AI 技術の社会的埋込み

さらに2010年以降は、AI 化(AI 技術の社会的埋込み)の動きが加速してきた。

2012年の AlexNet の登場により、画像認識の精度が飛躍的に向上した。2018年に登場した BERT(Bidirectional Encoder Representations from Transformers) は、文脈を考慮した言語理解を可能にし、翻訳や質問応答タスクの精度を大幅に向上させた。さらに、2020年以降の GPT-3(Brown et al., 2020)や ChatGPT の登場により、対話型 AI が実用化された。しかも、クラウド AI の普及により、企業や個人が容易に AI を活用できる環境が整った。

このような AI 化は、単に技術的な問題ではなく、ビジネス、社会、国政、国際関係などにも多岐にわたって、大きな影響を及ぼしつつある。

すなわち、AI 化には、生産性の向上、労働力の代替、危険な作業を代替、ヒューマン・インターフェースの向上(障がい者、高齢者の自立支援)、ヒューマン・エラーの低減などのメリットがあるが、大量のデータを要する、高コスト、ブラックボックス化、ハルシネーション、破局的忘却、雇用の喪失、責任能力、セキュリティの確保、プライバシー保護などさまざまな

なデメリットもある。これらをいかに調整し、秩序と調和のある社会を創造するかが、喫緊の課題である

3. 技術はどこまで完全でなければならないか

このように、AI化を含むDXの社会的埋込みには、メリットと共に重大なデメリットもつきまとう。しかもそこには多様なステークホルダーがかかわっており、それぞれの目的・利害は必ずしも一致しない。

たとえば、コミュニティ・バスを自動運転車にする場合、個人は自分自身の利便性を重視するだろうが、自治体はコストを考慮しなければならない。企業にとっては収益が問題であり、国家は基本的人権や公平性、財政などに配慮する必要があります。さらに地球全体で考えれば、環境への影響も等閑にはできない。これらの間に生ずるコンフリクトを調停することはきわめて困難である。

さらに、自動運転技術の技術的な未完成性、自動運転技術のような自律的作動機械に対する法・制度の未整備、それらに関わる倫理・文化的諸問題、また地域コミュニティの中の問題など、問題を挙げればきりが無い。

もちろん、技術に関わる者たちは、技術を高め、リスクを低減する努力を惜しんではならないことは当然である。

しかし、私たちは人間／社会と技術を対立的に捉えすぎていないだろうか？ そもそもある新しい技術がいかなる点でもだれにとっても完璧であることは可能だろうか？

たとえば人類が最も古くから使っている技術の一つとして、料理包丁を考えてみよう。包丁は、人類が自然界の多くのものを食用とし、多様な料理法を編み出し、また美食文化を産み出すことに大きく貢献した。しかし、「料理用」といっても、武器に転用することは容易だし、扱い慣れた大人でさえ、しばしば怪我をする。それでも、包丁の扱い方の習得は、子どもが成長する過程で慎重に教育され、子どもたちは時に失敗もしながら、日常的に包丁を使えるようになっていく。こうして包丁は、人間社会とのかかわり合いの中で多様に発展し、またその文化を構成しているのである。

現代社会はしばしば技術を、人間社会とは独立して存在し、人間のためにどこまでも従順に奉仕する(すべき)道具／手段として考える(あるいは、それ自体の論理に従って暴走し、社会に害をなす敵対者として考えることもある)。しかし、哲学者のノーレン・ガーツ (Gartz2018)は、「テクノロジーを手段と考え、人間のためにある道具と見れば、人間もこの手段の支配下に入り、テクノロジーのための道具になってしまい、そのことに気づきにくいからだ」と指摘している。

4. 人間と技術が共に働きかけあうこと

この点に関しては、哲学者のハイデガー(Heidegger1954)がすでに『技術への問い』において思索を展開している。彼は、人間と技術の間の対立を超えて「われわれは技術について問い、そのことによって技術との自由な関係を準備したい」と述べ、「われわれを閉じ込めて、息苦しくも強制的に、技術を盲目的に促進させたり、あるいは、同じことだが、絶望的に技術に反抗させたり、技術を悪魔の所業だとして呪詛させたりは、けっしてしない。逆で

ある。われわれが自分自身を技術の本質にたいしてことさらに開くなら、思いがけず、自由にする呼びかけに自分たちが呼びかけられ、要求されていることに気づくだろう」と論じている。すなわち、技術は私たちから隔絶したところに存在するものではなく、私たちとの関係の中で作動するのである。

このことは、技術の両義性として現れる。ポスト現象学のダン・アイディは「あらゆる技術は両義的で、多様に安定する可能性を見せる。意外にも、技術は構造を見ても歴史を見ても、設計された機能にはどうしても還元できない、かつて主張したことだが、文学における「意図の誤謬」と同様な役割をする「設計者の誤謬」(designer fallacy)がある。つまり、文学作品の意味が作者の意図から跡づけられたり、それに限定されたりしえないとすれば、同様に、技術においてはその使用、機能、影響は設計意図に還元しえないし、またしばしば現に還元されないのである」(Idhe 1999)という。

したがって、技術を、人間と世界を媒介するものとして捉え、「倫理においては、人間と技術の双方が本質的な役割を果たしている。一人前の道徳的行為者として認められるような技術など存在しないのは確かである。しかし、人間の解釈や実践や判断の形成に技術が介入していることを考慮してみれば、一人前の道徳的行為者として認められる人間もまた存在しないのである」。このような様相において、「道徳」とは、人間と機械の相互作用の中にあるものとして捉え直されなければならない。これを哲学者のフェルベーク(Verbeek 2014)は「技術の道徳化」とよんでいる。

結局、問題は、世界・技術・社会が相互作用するオートポイエティックなシステムのパフォーマンスをどう設計するか?という問いになる。

5. 持続可能な DX 社会のためのシステムデザイン

5.1 ステークホルダー参画によるシステム進化

では、どのように設計すれば良いのだろうか？

ここで注意しなければならないのは、望ましい社会(状態)とは、いつか到達する予定調和的世界ではないということである。先にも述べたように、技術を鍛錬して、リスクを抑えようとするのは当然重要である。しかし、リスクをゼロにすることはできない。同様に、固定した社会倫理に則って未来社会を設計することもできない。なぜなら、時の経過とともに環境条件は変化し、人間たちの倫理も変わるかもしれないからである。

そうしたダイナミックなシステムにおける未来設計に関して、近年、「討議倫理」という考え方が注目されている。ドイツの社会学者ハーバーマス(Habermas 1991)などによれば、「社会における正しさ」とは、かつて考えられていたような一意的なものではなく、コミュニケーション的行為(人々の正当な相互作用)のなかで見いだされるものである。ある固定的な理想をめざすのではなく、多様なステークホルダーの参加による合意と評価のプロセスを丹念に組み込み、その結果を常に創造の途中にある社会にフィードバックし、適用する技術を改善していくことで、社会と技術の持続可能な共進化が実現される。社会の理想もまた、このようなダイナミズムにおいて共有可能ではないだろうか。

5.2 マルチスケール社会シミュレーション

しかし、ステークホルダーたちの討議は、主観的な意見ではなく、客観的科学的分析に寄らなければならない。

この時注意しなければならないのは、社会システムは多層的な構造を持ち、マイクロ(個人レベル)の相互作用がメソ(集団レベル)やマクロ(国家・国際レベル)の現象を生み出すということである(遠藤 2011)。したがって、社会現象を異なるスケール(個人、集団、地域、国家、グローバルレベルなど)で統合的に分析・予測するための方法論が必要となる。このような方法論を、マルチスケール社会シミュレーションと呼ぶ(図1)。マルチスケール社会シミュレーションでは、(1)エージェントベースモデリング(個々の行動をモデル化)、(2)システムダイナミクス(長期的なシナリオを評価)、(3)機械学習との統合(データ駆動型予測)などの手法を組み合わせる分析を行う。これらの手法は、計算社会科学(Computational Social Science)という新たな学問領域で活発な研究、開発、応用が進められている。

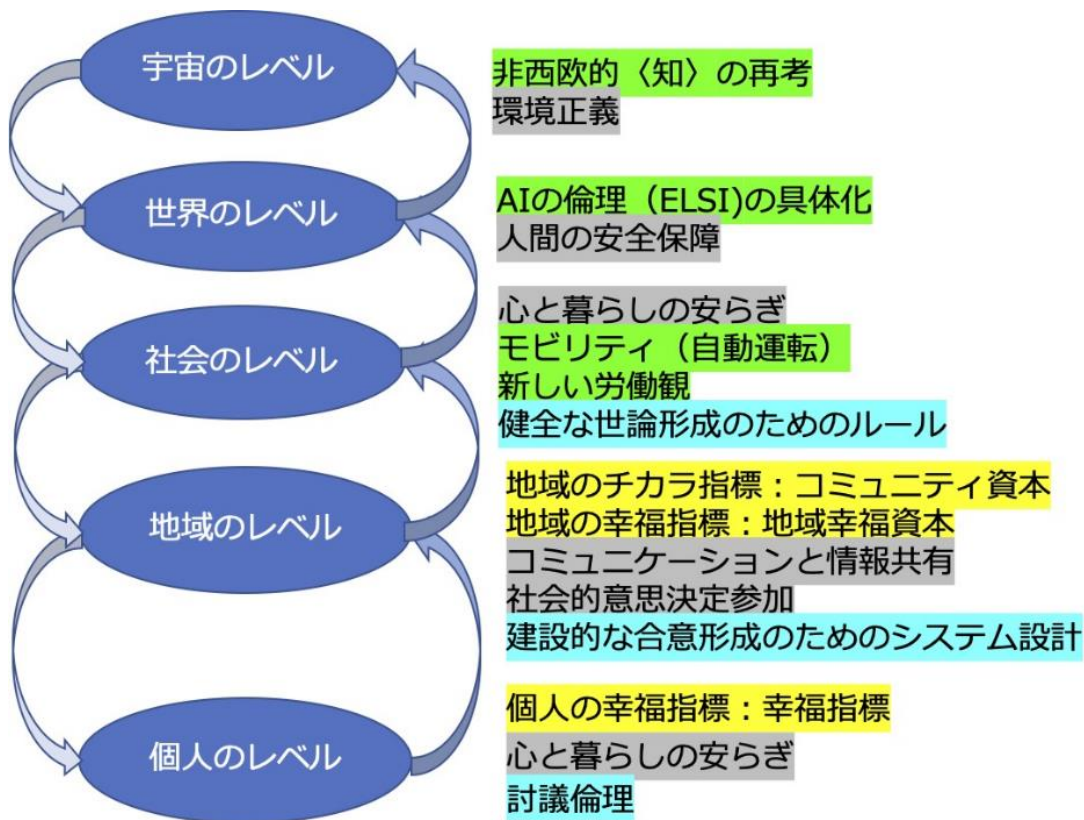


図1 マルチスケール社会シミュレーション(筆者作成)

このマルチスケール社会シミュレーションと討議倫理を組み合わせる(図2)ことで、ダイナミックな社会システムのレジリエントな運用が可能となるだろう。

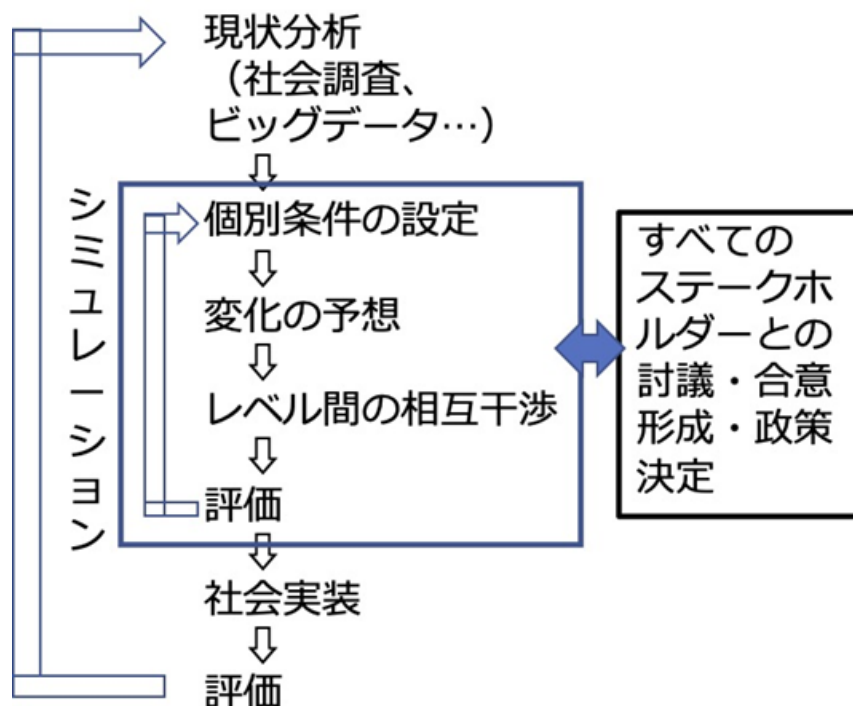


図2 マルチスケール社会シミュレーションを参照する討議倫理

6. 終わりに

DXは世界に大きな恩恵をもたらすと期待されている。一方で、人間たちは、社会や自然環境を考慮せずに、局所適的な効用最大化をめざして科学技術を利用すれば、さまざまなリスクが現実化するだろう。社会や自然環境の持続可能性を担保するためには、全体適的に科学技術を活用することが重要である。ただし、科学技術の全体適合性は、客観的に一意に定まることはない。科学技術が、人間たちとの相互関係による、両義性、多様安定性を持っているからである。したがって、社会(人間)-科学技術-自然環境の全体のダイナミズムを考えながら、幸福な未来設計をしていく必要がある。そのためには、計算社会科学を活用し、科学的エビデンスに基づくマルチスケール社会シミュレーションを参照しながら、多様なステークホルダーたちによる討議倫理を実践することが重要である。

【参考文献】

Gartz, Nolen, 2018, *Nihilism and Technology, Local Histories, Found Objects*, Rowman & Littlefield International. (南沢篤花訳, 2021, 『ニヒリズムとテクノロジー』翔泳社)

Heidegger, Martin, 1954, Vortrage und Aufsätze, Verlag Gunter Neske, Pfullingen. (関口浩訳, 2013, 『技術への問い』平凡社ライブラリー)

Ihde, D., 1999, “Technology and Prognostic Predicaments,” *AI and Society* (1999)13:44-51. (中村雅之訳, 2001, 「技術と予測が陥る困難」『思想』(2001) 7:145-156)

Verbeek, Peter-Paul, 2011, *MORALIZING TECHNOLOGY: Understanding and Designing the Morality of Things*, The University of Chicago Press. (鈴木俊洋訳, 2015, 『技術の道德化: 事物の道德性を理解し設計する』法政大学出版局)

遠藤薫, 2011, 『大震災後の社会学』講談社

Habermas, Jurgen, 1991, *ERLAUTERUNGEN ZUR DISKURSETHIK*, Shuhrkamp Verlag. (清水多吉他訳, 2005, 『討議倫理』法政大学出版局)

(2025年2月25日原稿受領: SIC ニュースレターVol.7.3 に掲載)

Ⅱ 寄稿

寄稿1

ロボットとシステム

大阪工業大学 ロボティクス&デザイン工学部 大須賀公一氏

1. はじめに

私たちが日々何気なく暮らしている日常社会をはじめ、都市、森林、海洋、空、宇宙、さらには土工現場や災害現場に至るまで、あらゆる場が「実世界(リアルワールド)」であり、そこには程度の差こそあれ、常に不確実性が内在している。このような環境には以下の特性が認められる。

- 1) 現地に実際に赴かなければ、環境の実態を把握できない
- 2) 環境が時々刻々と変化する可能性がある

本稿ではこのような特徴を有する環境を「無限定環境」と呼ぶこととする。

ロボットの活躍が期待される土工現場や、災害対応ロボットが求められる災害現場は、無限定環境の典型的な例である。例えば、地形など瞬間的な「幾何学的情報」は画像などから取得可能であるが、地盤の硬軟といった地盤特性は、実際にその場に立たなければ把握できない。また、天候の影響により自然環境が変化することもあり、土工現場においては建機の作業によって環境が刻一刻と変わることもある。

本来、ロボットにはこのような無限定環境において所定の作業を遂行することが求められる。しかしながら、従来の設計手法では原理的にこのような環境に対応するロボットを設計することは困難である。なぜなら、無限定環境を想定するという事は、ロボットや建機といった人工物が運用される環境をあらかじめ特定できないことを意味し、すなわち設計問題における境界条件が定まらないからである。

そこで筆者らは、無限定環境において柔軟かつ適応的に行動可能な人工物を実現するための新たな設計アプローチとして、「開いた設計」という概念を提案している。本稿では、まだ完成されたものではないが、この設計手法についてその理論的基盤の構築に向けた初步的な考察を行う[1][2][3]。

2. 閉じた設計と開いた設計

通常モノづくりの現場においては、製作対象となる人工物の使用環境があらかじめ明確に定められているのが一般的である。仮に一部に不確な要素が存在したとしても、確定可能な要素を仕様として定め、それ以外の変動要因を「外乱」として取り扱う。すなわち、問題設定に対してある種の「結界」を設けることで、設計に必要な境界条件(仕様)を明確に閉じる。このように境界条件が閉じている設計課題は「良設定問題」として位置づけられ、その内部において最適な設計解を理論的に導き出すことが可能となる(図1左)。この設計アプローチは、たとえば工場のように環境が整備・制御された「限定環境」において極めて有効に機能し、これまで数多くの成果を上げてきた。本稿では、このような従来型の設計手法を「閉じた設計」と呼ぶこととする。

「閉じた設計」

「開いた設計」

従来のモノづくりの典型例

このテーマで必要とされる方法

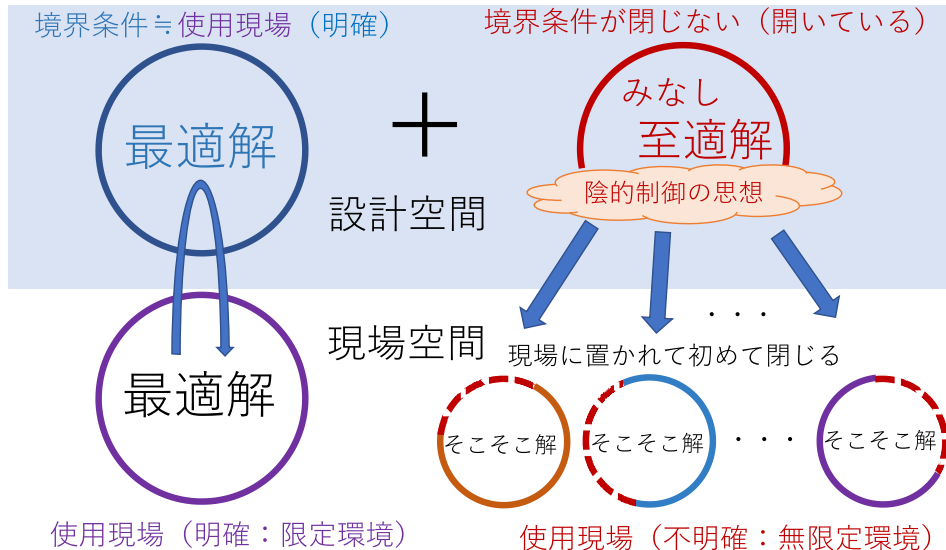


図1 閉じた設計と開いた設計

一方、自然環境や災害現場といった不確実性の高い現場において、特定の目的を達成するための人工物を設計しようとするとき事情は大きく異なってくる。これらの環境は、事前に十分な情報を得ることが困難であり、実際に現地に出かねば実態を把握できないことが多い。さらに、環境条件は刻一刻と変化し、場合によっては、投入される人工物自体が環境に影響を及ぼすこともある。このように、あらゆる要素が事前に規定できず、環境の条件が開かれたままの「無限定環境」においては、設計の前提となる境界条件を確定的に定めることができない。すなわち、設計空間の境界が閉じず、問題設定自体が定式化しえないのである。

このような設計課題は「不良設定問題」とされ、従来の「閉じた設計」の枠組みにおいては最適解を導くことが困難である。そこで筆者らは、このように境界条件が閉じない状況における設計アプローチを「開いた設計」と呼び(図1右)、その理論的基盤の構築と新たな設計手法の可能性について検討を行っている。

3. 物理的無限定環境と物理的身体

ここで、本考察における「無限定環境」の意味をあらためて確認する。普通、無限定環境とは「未知で不確定な変動を伴う環境である」という意味で使われる。この「無限定環境」を数理モデルで表現しようとするとき、それは無限次元・非線形・非定常・非平衡・不連続・確率的・・・なものになり、ある意味で何もわからないのと同じことになる。しかし幸いなことに我々は、全ての可能性が起こり得る一般的な環境を相手にするのではなく、いわゆる物理的に存在している「実環境」がターゲットなのである。すなわち、無限定とはいえ「物理的存在という意味の限定性(限定化)」を仮定してもよい。

上述のように、本稿では「物理的存在という意味の限定性をもった無限定環境」を一般的な無限定環境と区別する意味で「物理的無限定環境」と呼んでおこう。この制限は考察範囲を致命的に狭くしていることにはならない。逆に現実の世界に則した問題設定を考えることになり、むしろ必然である。

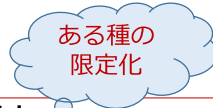
何らかのエージェントが環境の中に入って行動する

無限定環境：想定環境が限定されていない

- あらかじめ決められていない
- 未知
- 予測不可能
- 無限次元



「物理」である（ある種の「拘束」）



物理的無限定環境

物理的拘束の加わった無限定環境

図2 物理的無限定環境

さて、主題の「開いた設計」を考えるために、「いま対峙しようとしている環境は数学の世界ではなく、物理の世界であることを思い出そう」というのがここでのアイデアであった。相手が物理的存在物なのであれば、それに対応するのは数学(数学モデル)ではなく「物理そのモノ」であるべきだろうと考えるのが自然である。言い換えると、「物理的無限定環境」に対しては数学ではなく物理的存在物である「物理的身体」で直接対応すべきである、という考え方である。そしてそれは物理的無限定環境と巧く馴染んで、ある意味、環境と身体が渾然一体化する「身体の有り様」がポイントになるということである。環境の特性をセンサで察知して制御器で対応策を計算してアクチュエータで身体を動かすという通常の制御ループではなく(因果律に反しない制御系を構成するとこのようになるが、このような方法だと対応が常に後手後手になる)、身体が直接環境と一体化することで環境に馴染む状況を作り出すということである。その結果、(環境と一体化故)因果律に反することなく、環境に対応できるようになる、という考えである。

では、上述のような「物理的身体」とはどのようなモノだろうか。おそらくその身体は、環境と闘うのではなく、物理的に環境と巧に馴染む構造をもっていないとほならないだろう。物理世界においては、どんな時も「作用・反作用の法則」が成り立つので、環境に対して闘おう(押さえ込もう)とすると、環境から反発される。したがって「柳に風」のように自然に馴染む態度が必要だということである。すなわちそれが「環境と身体は渾然一体化すること」を意味する。具体的には、そのような特性をもつ身体は、例えば「柔軟性・冗長自由度を有している身体」が一つの候補になる。図3に、一例として筆者らが開発した i-CentiPot と呼ばれるロボットを示す。このロボット(?)には移動のためのセンサやコンピュータは搭載されておらず、すべての関節は受動的で脚も柔らかい。したがって図3のような屋外環境を移動する時、胴体や脚の様子を路面に応じて能動的に制御するのではなく(むしろ制御できない)、自然に馴染むことで無理のない移動が実現できる。



図3 i-CentiPot

4. 「開いた設計」と「陰陽制御」

さて、「開いた設計」を考える際の重要な視点は、現実の問題に内在する不確実性をいかに捉えるかという点にある。たしかにロボットの特長にも不確実性は含まれているが、ここでより本質的な課題となるのは「無限定環境(物理的無限定環境)」に含まれる未知性をどのように扱うかである。一般に、「無限定環境」はその性質上モデリングが困難である。このため、従来の設計法ではそうした環境要因をロボットにとっての「敵」と見なし、システムの外部要因、すなわち「外乱」として切り離すことで対応してきた。こうすることで不確実性を設計問題の枠外へ排除し、問題を閉じたものとして扱うことが可能となっていたのである。このような考え方は環境要因の影響が相対的に小さい場合には一定の有効性を持つ。しかしながら、災害現場や土工現場においては環境そのものが主たる要素であり、単に「敵」として排除するにはあまりにも大きすぎる。したがって、その環境を積極的に活用する視点が求められるのである。こうした認識に基づき、筆者らは制御工学の分野において「陰陽制御」という概念を提唱している。そして実は、この「陰陽制御」の考え方こそが「開いた設計」のツボになるのではないかと考えている。以下にその概要を紹介しよう。

よく知られているように、従来の制御工学においても、上述と同様、制御対象を取り巻く環境は対象にとって「敵」として捉え、その影響(すなわち相互作用)は「外乱」として扱われる。その結果、制御系は環境の影響を抑え込み、目標に向けて力づくで突き進む構造となっている。しかし、生き物のふるまいはこれとは対照的である。生き物は環境を敵視せずむしろそれを味方として取り込もうとする。なぜなら、環境と対立することは膨大なエネルギーの浪費を招くだけでなく「作用・反作用の法則」に基づく“しっぺ返し”を受けることを知っているからである。この生き物のふるまいを制御学的な視点から捉え直すと次のように表現できる。たとえば、生き物が物理的に無限定な環境の中で、何らかの「合目的的」な行動を取っているとしよう。その状況を示したのが図4の右図である。図のように、生き物には身体があり、その内部には脳神経系(存在しない場合もある)が備わっている。そしてこの身体は、常に環境と相互に作用しあっている。この状態を制御学の視点で捉え直したのが図4の左図である。ここでは身体が「制御対象」、脳神経系が「制御則」と見なされる。脳神経

系は構造が明示的であるため、この制御則は「陽的制御則」と呼ぶことができる。注目すべきは右図における「環境との相互作用」の位置づけである。工学的観点からは、この相互作用はしばしば制御対象への外乱と見なされる。しかし生き物はそれを単なる外乱とは捉えていない。むしろ自らの制御目的を達成するために、その相互作用を巧みに活用しているように見える。すなわち、生き物はそれを一種の「制御則」として機能させているのである。ただし、ここでの制御則は脳神経系のように意図的に設計されたものではない。自然に生じる物理的な相互作用を制御則として“見立てて”いるに過ぎず、構造としては明示的に把握しづらい。そこで、このような制御則を「陰的制御則」と呼ぶことにする。

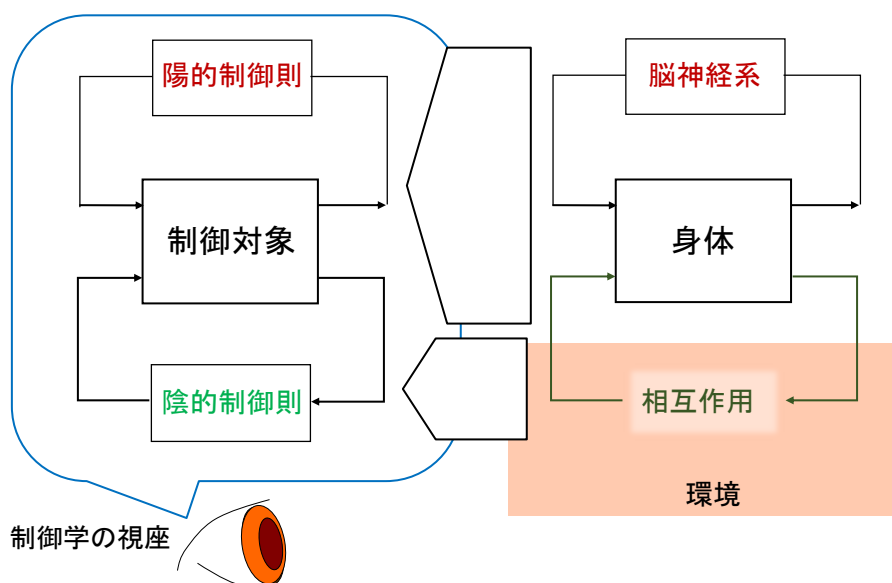


図4 陰陽制御構造

この「陰的制御則」は、身体と環境との相互作用を制御則とみなせるよう、制御目的そのものを柔軟に修正する働きと解釈することもできる。通常、制御目的は固定されており、その実現を妨げる環境要因は敵、すなわち外乱と見なされる。しかし「陰的制御」の考え方は、この枠組みが逆転している。まず環境との相互作用が存在し、それが制御則として機能するように制御目的の側をそれに応じて調整するのである。言い換えれば、「陰的制御」の真髄は制御目的そのものを柔軟に書き換える術にあり、いわば「忍法・制御目的修正の術」とでも呼ぶべきものである。

5. おわりに

本稿では、実世界で活躍できるロボットの設計においては、「無限定環境」との関係性が本質的な鍵であるとの視座に立ち、「開いた設計」という新たな設計思想の構築が求められることを提言した。これらの考察を踏まえ、図5には「物理的無限定環境へと踏み込むロボットにおける『開いた設計』」の概念図を提示している。この図は環境と一体化しながらも意図に沿った行動を実現するロボット、特にその移動体部のイメージを表現したものであり、そこに込められた設計思想の要点は以下のとおりである。

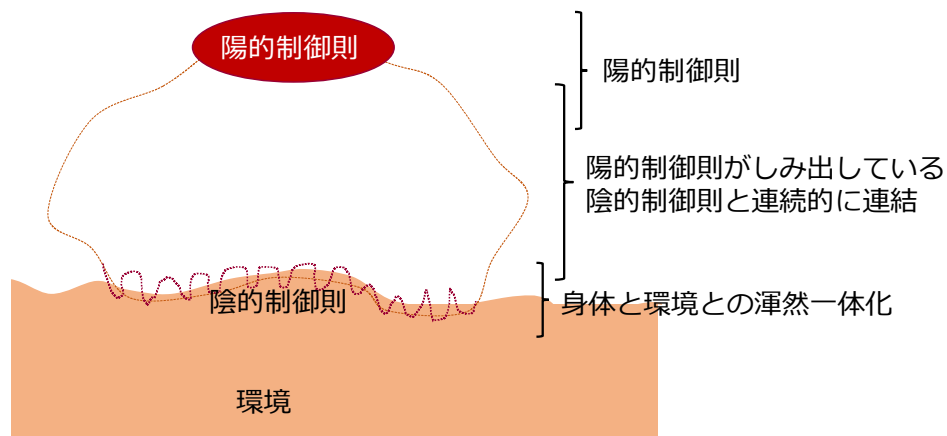


図5 開いた設計の概念図

- A) ロボットが環境と接触する部分では、両者が渾然一体となり、環境との融合が志向されている。
- B) ロボットは制御目的の達成に向けて明示的な制御則(陽的制御則)を備えている。
- C) 陽的制御則の直接的な影響力は環境との接触点に近づくにつれて次第に薄れ、その代替として身体と環境との相互作用が暗黙的な制御則(陰的制御則)として機能するようになる。
- D) ロボットの身体的自由度は環境に近づくほど高まり、より柔軟な対応が可能となる。
- E) 上記C)およびD)における制御則と身体構造との関係性は階層的というよりも、連続的かつグラデーション的な構造を成している。

本図が示す「開いた設計」の概念に基づいて開発したロボットの一例である「双胴柔軟クローラ(d-Flex-Craw)」を紹介する[4](図6参照)。本ロボットは上下左右に屈曲できるクローラ二対で構成された移動体である。陽的制御則によって能動的に駆動されるクローラの形状が柔軟に変形できるが故、地面に対して柔らかく対応することができ、そこに「陰的制御則」が生まれているとみなせる。



図6 d-FlexCraw

以上、無限定環境の中を立ち往生することなく進むことができる(あるいは作業ができる)ロボットの設計論について考察してきた。そこでは、いわゆる脳的装置(計算機, 陽的制御則)のみならず、身体と環境を含めた全体について総合的に捉えた考え方をみてきた。

その結果、その対象物の周りにある無限定環境に直接対峙して巧く対応してくれているのは陽的制御ではなく、陰的制御なのだということがわかった。陽的制御則は想定される状況に対してアルゴリズムックに対応するようにつくられているが、逆に想定外のことは対応できない。それに対して、適切に構成された陰的制御則は(正体は物理的な相互作用力なので)、能動的な行動を生むことはできないが、「物理として無限定環境に対応してくれる」のである。

【参考文献】

- [1]大須賀公一: 知能はどこから生まれるのか? —ムカデロボットと探す「隠れた脳」, 近代科学社(2018)
- [2]大須賀公一: 人工物の「開いた設計」とは?、第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2021)、3H3-10(2021)
- [3]大須賀公一: 建設機械の「開いた設計」とは?、計測と制御 Vol.61、No.9、pp.684-687(2022)
- [4]大須賀公一、衣笠哲也、宮本直輝、林良太、吉田浩治、柔軟双胴クローラ“d-FlexCraw”の開発、第62回自動制御連合講演会資料、1G3-01、(2019)

【著者プロフィール】

大須賀公一 (Koichi Osuka)氏

1984年3月大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。同年4月(株)東芝入社、総合研究所勤務。1986年10月大阪府立大学工学部機械工学科助手。その後、講師、助教授を経て、1998年5月京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻助教授、2003年12月神戸大学工学部機械工学科教授、2009年4月大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻教授、2025年4月より大阪工業大学ロボティクス&デザイン工学部ロボット工学科教授となり現在に至る。

ロボティクス、制御工学、レスキュー工学などの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、日本ロボット学会のフェロー。工学博士。

(2025年5月25日原稿受領:SIC ニュースレターVol.7. 6に掲載)

寄稿2 グローバル先進工場との比較による日本の製造DXの現状と課題 豊橋技術科学大学総合教育院 教授 藤井 享氏

1. はじめに

ビジネスの視点から見ると、DX の幕開け(2015年頃)から、早くも10年が経過した。わが国では2016年に内閣府が超スマート社会(Society5.0)を掲げ、製造業においても、DX 駆動型の生産改革や、モノ周辺のコトづくりによるデジタルサービス事業が出現してきている。

その一方で、わが国の DX 改革は、従来からの事業のデジタル化に留まり、ビジネス形態の根本的な変革にまでは至っていないとの指摘もある。それは、20世紀後半に優れた生産能力と、勤勉で匠の技を持つ有能なエンジニアが牽引してきた日本の「強いモノづくり」は健在なのか。テクノロジーが、アナログからデジタルへ変革するプロセスにおいて、日本の製造業(工場)は、世界の先端領域に君臨できるのかとの問いでもある。

本稿では、これまでの10年間を振り返り、グローバル先進企業との比較により、日本の製造 DX の現状と課題について考察する。

2. グローバル先進工場(Global Lighthouse)とは

グローバルライトハウス(Global Lighthouse)とは、世界経済フォーラム(WEF: World Economic Forum)が、米国のマッキンゼー・アンド・カンパニーと共同で2018年に発足したネットワークである。この組織では、製造業のロールモデル(灯台・お手本となる凄い工場)の認定を行っている。

その対象は、測定可能な1000件を超える製造現場を調査し、「テクノロジーを活用してパフォーマンスと持続可能性にプラスの影響を与えながら第四次産業革命をリードし、財政面に限らず運用面でも成功した世界で最も先進的な工場」と定義している。また、人工知能(AI)、IoT、ロボティクス、3D プリント、ブロックチェーン、ビッグデータ、デジタルツインなど、高度なデジタル製造技術を融合し、①自動化による生産効率向上、②人材育成・働き方、③企業や業界の持続可能性、④社会や環境へのインパクトの4点を認定の基準としている。

認定工場数は、2024年時点においては、全世界の1000以上の工場から172工場が認定されており、認定項目別には、工場ライトハウス(99工場)、エンドツーエンド(E2E)で、その企業のバリューチェーン全体に影響を与える技術を展開(54工場)、持続可能性ライトハウス(二酸化炭素排出、廃棄物および生産用水使用量の削減技術導入のロールモデル)(19工場)である。

国別認定工場数の内訳は、中国(74工場)、インド(14工場)、米国(9工場)、ドイツ(7工場)となっており、日本は、わずか(3工場・日立製作所大みか工場、P&G 高崎工場、GEヘルスケア日野工場)である。

グローバルライトハウスの評価のポイントは、①長期目線で必要なデジタル投資を後回しせず徹底して展開しているか。②俗人的な現場力に依存しない持続可能なオペレーションの整備が出来ているか。③グローバルでの横展開、外販を視野に入れた徹底的な標準化が出来ているか。の3点である。

これは、製造 DX の導入において、マス・カスタマイゼーション(エンジニアリングチェー

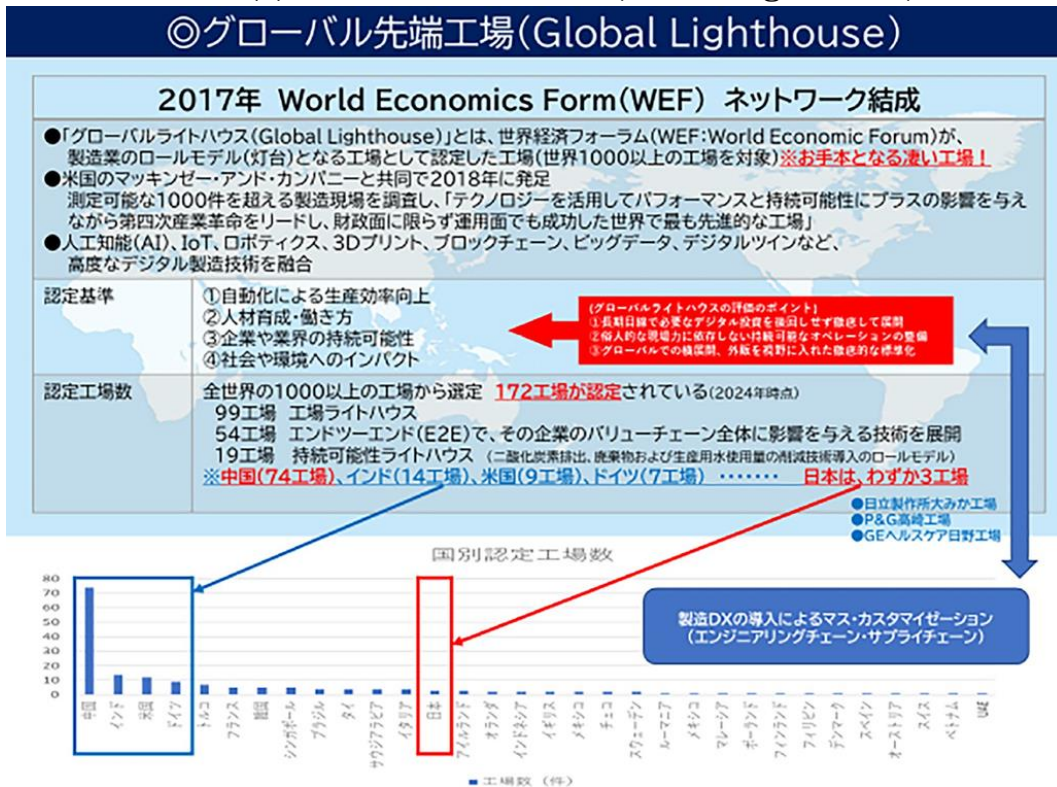
ン・サプライチェーン)を可能にしているかが重要なポイントであり、次世代の製造業のロールモデル(灯台・お手本となる凄い工場)の認定を受けるための重要要件となっている(図1参照)。

次に、2024年ライトハウス工場の認定を受けたのは、22工場である(図2参照)。国別認定工場数の内訳では、中国(13工場)と認定数を着実に伸ばさせているが、米国及び、日本の認定数はゼロである。

中でも、エンドツーエンド(E2E)で、その企業のバリューチェーン全体に影響を与える技術を展開していることで認定を受けた中国の(2工場)の特徴は、以下の通りである。

- ① 青島ハイアール(膠州)エアコンディショナー(中国、青島)は、世界的な需要増大に対応し、研究開発、配送、アフターサービスにおける遅延に対処するために、ビッグデータ、高度なアルゴリズム、生成型 AI を活用してバリューチェーン全体を最適化しており、設計サイクル時間を49%削減し、注文の納品時間を19%短縮し、海外での故障率を28%低下させている。
- ② シュナイダーエレクトリック(中国・上海)は、グローバル受注が増加し、新エネルギー市場からのSKU(Stock keeping Unit)が4倍に増加したため、自動化率を20%向上させ、ML 対応プロトタイピング、スマートプランニング、生成 AI 駆動型メンテナンスなどの先進技術を統合して対応しており、市場投入までの時間を 63%短縮し、受注生産のリードタイムを 67%削減し、労働生産性も 82%向上したとの目覚ましい経営成果を生み出している。

図 1. グローバルライトハウス(Global Lighthouse)



(出所)公開資料を参考に筆者作成

図 2. 2024 年グローバルライトハウス(22工場)

◎2024年ライトハウス(22工場)

今回認定された世界のライトハウス		
4IRライトハウス	アストラゼネカ	スウェーデン、セーデルテリニ
	アストラゼネカ・ファーマシューティカル	中国、無錫
	ペコ・ディッシュウォッシャー・プラント	トルコ、アンカラ
	コカ・コーラ・シンガポール	シンガポール、トウアス
	コンチネンタル・オートモーティブ・チェコ	チェコ、ブロンタイス・アド・パム
	F.ホフマン・ラ・ロシュ	スイス、カイザーアウグスト
	フォックスコン・インダストリアル・インターネット	ベトナム、バクザン
	GEヘルスケア北京	中国、北京
	ジュピラント・イングレピア	インド、バルーチ
	蒙牛乳業(涼夏)	中国、涼夏
	青島海信日立空調系統有限公司	中国、青島
	三門原子力発電	中国、三門
	SANY再生可能エネルギー	中国、韶山
	シュナイダーエレクトリック	メキシコ、モンテレイ
	シーメンスエレクトロニクス工場	ドイツ、エアランゲン
	ティアン・ヘビィ・インダストリー・レオナルド・エレクトロニクス・イノベーション(TI)	中国、太原
	ジャンテック・コール・マイニング・マシナリー・グループ	中国、鄭州
5Gライトハウス	青島ハイアール(膠州)エアコンディショナー	中国、青島
	シュナイダーエレクトリック	中国、上海
持続可能なライトハウス	フォックスコン・インダストリアル・インターネット	中国、深セン
	合肥志高ア・ウォッシング・マシン	中国、合肥
	青島ビール青島工場	中国、青島

※2024年 ライトハウス認定 22工場 (中国13工場……米国・日本とも認定はゼロ)

◎エンドツーエンド(E2E)バリューチェーンのライトハウス

高度な技術によって見える化に加え、複雑なプロセスの合理化、設計・計画の効率化を実現し、需要の増大に対応

●青島ハイアール(膠州)エアコンディショナー(中国、青島)

世界的な需要増大に対応し、研究開発、配送、アフターサービスにおける遅延に対処するために、ビッグデータ、高度なアルゴリズム、生成型AIを活用してバリューチェーン全体を最適化

設計サイクル時間を49%削減し、注文の納品時間を19%短縮し、海外での故障率を28%低下させた

●シュナイダーエレクトリック(中国・上海)

グローバル受注が増加し、新エネルギー市場からのSKUが4倍に増加したため、自動化率を20%向上させ、ML対応プロトタイプング、スマートプランニング、生成AI駆動型メンテナンスなどの先進技術を統合して対応
市場投入までの時間を63%短縮し、受注生産のリードタイムを67%削減、労働生産性も82%向上した

(出所)オートメーション新聞

≪<https://www.automation-news.jp/2024/10/86037/>≫より引用、一部加筆

ハイアール(中国)は、1984年設立の世界最大規模の家電メーカーで、冷蔵庫、冷凍庫、洗濯機、掃除機、キッチン、エアコン、食器乾燥機、電子レンジ、テレビなどを生産・販売する。家電事業のグローバル展開では、「Haier」「AQUA」(日本)、「Casarte」「Leader」(中国)、「GE Appliances」(米国)、「Fisher & Paykel」(ニュージーランド)、「Candy」(イタリア)の7つのエコシステムブランド戦略を展開している。

また、グローバルネットワークでは、世界中に10以上のオープン・イノベーション・システム、28カ所の工業団地、122カ所の製造拠点、108カ所のセールス拠点、14万カ所に及ぶ販売ネットワークを展開している。ハイアール(中国)では、「人単合一」の理念(従業員が、単に会社のポジションに属して働くのではなく、顧客のために働く)をスローガンに、オーダーの獲得・デリバリー・アフターサービスといったサイクルを中心に、自ら、より良い顧客体験を実現することを重んじた働き方を行っている。

これまでハイアール(中国)は、三洋電機や、GE アプライアンスの買収等に代表される様に、国外から、技術やノウハウを買っている企業とのイメージが強いが、これまでの説明の通り、新たなモノづくりのイノベーションを生み、世界に提供(市場を支配)する側へと転換している。

さらに、同社の瀋陽工場・青島工場では、機能やデザイン、色などを顧客のニーズに合わせた個別生産をデジタル技術/自動化技術を活用して高効率に行う「マス・カスタマイ

ゼーション」の仕組みを実現し、グローバルライトハウスに認定されている。また、自社のマス・カスタマイゼーションを実現するための仕組みとし、世界に先駆けたマス・カスタマイゼーションプラットフォーム「コスモプラット(COSMOPlat)」を世界20か国に販売しており、国際標準機関からマス・カスタマイゼーションの標準策定に指名されており、国際標準もリードする存在となっている(図3参照)。

図3. 中国(ハイアール)グローバルライトハウス認定工場

◎中国(ハイアール)のグローバルライトハウス認定工場

●ハイアール 1984年設立の世界最大規模の家電メーカー

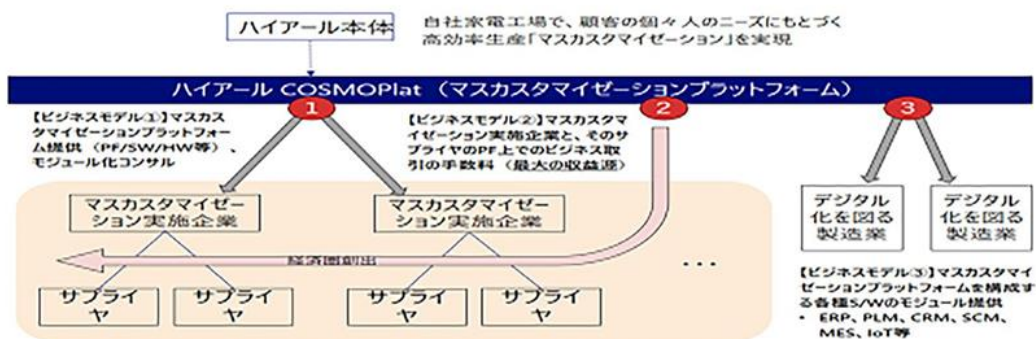
(冷蔵庫、冷凍庫、洗濯機、掃除機、キッチン、エアコン、食器乾燥機、電子レンジ、テレビなどを生産・販売)

エコシステムブランド戦略 (7つのブランドを保有) 「Haier」「AQUA」(日本)、「Casarte」「Leader」(中国)、「GE Appliances」(米国)、「Fisher & Paykel」(ニュージーランド)、「Candy」(イタリア)

グローバルネットワーク 世界中に10以上のオープン・イノベーション・システム、28カ所の工業団地、122カ所の製造拠点、108カ所のセールス拠点
14万カ所に及ぶ販売ネットワーク

「人単合一」の理念 従業員が、単に会社のポジションに属して働くのではなく、顧客のために働く
オーダーの獲得・デリバリー・アフターサービスといったサイクルを中心に、自ら、より良い顧客体験を実現する

①デジタル化アップグレード	②コネクテッド工場	③ライトハウス工場	④COSMOPlatエコシステム
情報と工業の融合	スマートファクトリー	お手本となる工場	他業種のプラットフォーム



(出所)

:<<<https://www.softbank.jp/biz/blog/business/articles/202105/lighthouse-haier/>>>を参考に作成

3. 世界の製造 DX の現況

3.1 中国(中国製造2025)の現在地点

中国製造2025は、中国政府が2015年5月に発表した中国の製造業の発展を促進するための国家戦略である。この政策の目標は、2025年までに、中国製造業のレベルを世界トップクラスに引き上げ(製造強国の列に参加)、2035年までに、世界製造強国の中等水準を達成、中華人民共和国建国100年にあたる2049年までに、世界製造強国の前列に立つことを掲げている。

この政策の重点分野は、次世代情報技術、新エネルギー車、産業用ロボットなど、10の重点分野と23の品目を設定し、イノベーション駆動、品質優先、環境保全型発展、構造の

最適化、人材本位を進めるとしている。

この政策を推進するために、政府は以下の様な強力な介入を行っている。

- ① 国家(中国共産党)の直接的資本介入
 - ・国策に伴うプロジェクト(EV・半導体・AI・ロボット等)に1兆円規模の国家ファンドを設置(有望とみなされた企業は、赤字覚悟でも大規模生産・研究開発に没頭できるため、破格の速度で規模拡大している)
- ② 競争社会における人材力の強さ
 - ・毎年数百万人規模の理工系大学生が卒業後、特に先端技術(AI・ロボット・半導体等)に就職している
 - ・「リターン政策」・・・中国人の海外留学生・海外企業の研究者・エンジニアを好条件で呼び寄せている
 - ・日本他欧米の先端技術(AI・ロボット・半導体等)エンジニアのヘッドハンティング
- ③ 国家主導の政策支援と規制
 - ・雄安新区(世界最大規模のスマートシティ)
人口規模530万人の居住に向けて北京市内の国有企業・大手民間企業の本社機能の移転誘致参加企業は、中国国有企業と民間主要企業で固めている(日本企業の名は1つもない)
 - ・EVの中国国内の普及に向けて、ガソリン車のナンバープレートの規制強化と、EVの助金・ナンバープレートの優先交付(都市部でのEVシェアは爆発的に拡大、北京市内を走る日本車の激減)

3.2 ドイツ(インダストリー4.0)の現在地点

ドイツ(インダストリー4.0)は、従来の装置単体の性能・コストでの競争から脱却し、産業プラットフォーム(標準化・規格と共創ネットワークによるエコシステム)構築へと大きくシフトし、自らが支配するプラットフォームで、顧客やサプライヤーが最適な装置・サービスを選び、データや価値が集積する構造を創り出すことで、持続的な高収益と競争優位を獲得する戦略へ大きく政策転換している。

この戦略の特徴は、強みとなる規格化・標準化を通して、エコシステム全体を掌握する標準化戦略である。製造DXの領域においては、産業オートメーション領域の通信プロトコル[OPU UA(Open Platform Communication Unified Architecture)]を導入すれば、設備の稼働状況や品質データを標準フォーマットで取得し、クラウド連携が可能となる。この仕組みをドイツ(OPC Foundation)が中心となり、リアルタイム通信・セキュリティ・データモデリングを統合した仕様を策定し、異なるベンダーの機器同士をシームレスに接続し、共通言語でデータ交換ができる様にしている。

自動車産業においては、「Catena-X」が存在し、BMW・ダイムラー・VW(完成車メーカー)と、ボッシュ・シーメンス等(部品メーカー)が、連携可能(サプライチェーン全体のデータ連携基盤)となっている。将来的には、部品の仕様・品質情報・ライフサイクルデータを一元管理し、EVやバッテリーのリサイクル管理を可能とするバリューチェーン全体で、CO2排出量の可視化・削減を目指すとしている。

また、環境規制強化(CN・CBAM)、EU(Fit for 55)は、2030年までにCO2を55%削減、2050年実質ゼロを目指すとしている。

3.3 米国(インダストリアル・インターネット)の現在地点

米国(インダストリアル・インターネット)では、新興デジタルベンチャー大手の GAFAM が、自社設計の AI チップ(TPU 専用の AI アクセラレータ)とソフトの組合せで、製造 DX 領域に参入してきている他、半導体大手の NVIDIA が、クラウドやデータセンター向けの高速度 GPU を提供し、CUDA 等の独自ソフトウェア基盤でロックイン効果を狙った動きをしている。

また、TESLA は「Giga Press」を導入し、リアアンダーボディの約70個の部品を1つの大型一体成型されたアルミ鋳造部品で代替し、車体組立工程の規模を30%削減に成功している。これにより、生産スピード向上・コスト削減・人員削減を同時に実現させ自動車製造プロセスの革命を起こすとしている。この動きは、トヨタ自動車の次世代 EV 開発にも大きな影響を及ぼし、2023年、トヨタは、次世代 EV の生産工程に、TESLA 流の「ギガキャスト」技術を導入している。この生産技術は、次世代 EV 開発のドミナント・デザインとして定着し、EV 時代の大量生産を支える新たな基準となりつつある。

この様に新興のベンチャーデジタル企業が新たな取り組みをしている一方で、国立スマート製造関連研究機関(CESMII)の調査方向では、米国の製造業全般の生産性は上がっていないという実態と、製造業の98%は第3次産業革命で、行き詰まっているとの指摘もされている。

4. 製造 DX の課題

製造 DX は、これまでの製造工場の生産性向上(エンジニアリングチェーン)を中心とするアプローチから、工場を含めたバリューチェーン全体(E2E)の価値創造を中心とするアプローチにシフトしている。その要因は、以下の3点である。

- ① デジタルネイティブな Y 世代・Z 世代が最大の消費市場となり、要求するニーズ・ウオツが、モノの所有から、コトの利活用に変化しており、使用価値・体験価値の創造が求められ、製造企業においてもバリューチェーン全体でのトータルの価値提供が必要となる。
- ② 不確実性の高い VUCA な時代を迎え、予測が難しい外部環境変化にフレキシブルに対応可能なサプライチェーンが必要となる。
- ③ E2E を実現可能なネクスト・テクノロジー(AI、NLP、センサー、ロボティクス、AR、VR、IoT、ブロックチェーンなど)がマーケティング 5・0 のイネーブラーとなる。

今後の製造 DX の方向性は、工場内(工場長や生産管理・IT 部門)主導の従来型の生産管理(エンジニアリングチェーン)から、本社(社長・経営戦略部門)主導のマス・カスタマイゼーションを実現する取り組みへ全面的にシフトすることが重要である。

5. おわりに

2023年度/財務省貿易統計によると、日本経済における製造業の GDP 全体に占める比率は約20%であり、就業者数は、総人口の約15%を占める。さらに、日本からの財貨輸出の約80%を(一般機械18%・電気機器17%・自動車23%等の工業製品が約6割)担っており、自動車・機械・電子部品の工業製品が、輸出による外貨獲得の柱である。このことから、製造業は、日本経済の中核的役割を果たしており、経済の成長・雇用・国

際競争力・国家安全保障の観点から重要な位置を占める。

本稿では、今後の日本の課題(インダストリー5.0への挑戦)に向けた以下の提言をする。

- ① 10年前に製造 DX が提唱され、生産性向上、新規ビジネス創出、新たな顧客価値提供を目的に展開されたが、日本の製造業は遅れていることを真剣に考えるべきである。
(グローバル先端工場は少ない、今後増える見込みはあるのか?)
- ② 社会・経済環境が大きく変わっていく中で、製造 DX の機能拡張が必要不可欠であり、マーケティング 5.0(デジタルネイティブ)な世界で通用するコトづくりを視点に、モノづくりへの構造転換が急務である。
- ③ マス・カスタマイゼーション、ソフトウェア・ファーストのモノづくりの実現に向けて、E2Eの製造 DX 改革を進める必要がある。
 - ・部分最適の DX による改善から、全体最適の DX 戦略の構築(ITとOTの融合)
 - ・エンジニアリングチェーンを全てデジタルツインで支える仕組みの構築
 - ・ハードの技術の競争から脱却して、顧客のウオント・ニーズを見極めた事業への変換(事業再構築)が必要である。例)ソニー(オンライン上のゲーム事業の拡大)、日立(参入障壁の高い、社会インフラ事業でのITとOTの融合)
- ④ GX(カーボンニュートラル・サーキュラーエコノミー等)を視野に入れた外部も巻き込んだエコシステムの構築
- ⑤ 生成 AI の利活用による匠の技・熟練技能の伝承

20世紀のモノづくりは、企業(製造業)の高い生産能力や、勤勉かつ匠の技を持つ有能なエンジニアの技術力によって産業経済の発展を牽引してきたが、DX 社会においては、ドイツの標準化戦略や、中国の国家(中国共産党)による直接的資本介入や、政策支援・規制強化などが、重要な意味を持っている。

これは、企業(製造業)だけの問題ではない。日本が「失われた30年」と言われる中で、2050年の日本のあるべき姿(成長戦略)を国家として明確に持つ必要がある。

【参考文献】

- (1) 小宮昌人、田中淳也(2020)「Global Lighthouse に見るグローバル先端工場のトレンド」『知的財産創造』2020年8月号 pp.6-23
- (2) World Economic Forum2023 Global Lighthouse Network Adopting AI at Speed and Scale WHITE PAPER DECEMBER 2023
- (3) World Economic Forum2023『グローバル・ライトハウス・ネットワーク:AI導入のスピードとスケール白書』2023年12月
- (4) 李東浩(2024)「グローバルライトハウス-第4次産業革命の礎・その現状と全体図の整理-」『流通科学大学リサーチレター(2024)』
- (5) 経済産業省 厚生労働省 文部科学省 2023年版 ものづくり白書(令和4年度 ものづくり基盤技術の振興施策)令和5年6月
- (6) ビジネス IT <<<https://www.sbbi.jp/article/cont1/74184>>>

- (7) アーサー・ディ・リトル・ジャパン(2024)『製品開発 DX:「製造業」の経営をリ・デザインする』東洋経済新報社
- (8) フィリップ・コトラー、ヘルマワン・カルタジャヤ、イワン・セティアワン(著)、恩藏 直人(監修)(2022)『コトラーのマーケティング 5.0 デジタル・テクノロジー時代の革新戦略』朝日新聞出版
- (9) 河西 恭太 (2025)『製造業 2040 -変化の渦中で進むべき日本の針路-: 急速な技術進化とグローバル再編に挑む戦略と実践的シナリオ』近代科学社
- (10) 福本 勲(2024)『製造業 DX EU/ドイツに学ぶ最新デジタル戦略』近代科学社
- (11) 福本 勲(2025)「インダストリー4.0 と製造業 DX~これからの日本の製造業に求められる『変革』とは ~」講演資料
- (12) 経済産業省製造産業戦略企画室「製造業のDXについて」
《https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/sangyo_cyber/wg_seido/wg_kojo/pdf/006_03_00.pdf》
- (13) 経済産業省
《https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2020/honbun_html/honbun/101031_1.html》

【筆者プロフィール】

藤井 享(ふじい とおる)氏

中央大学大学院総合政策研究科博士後期課程修了、博士(学術)

株式会社日立製作所(1990年~2019年、法人営業・産業財マーケティング・営業企画他)

国立大学法人北海道国立大学機構北見工業大学教授(2020年~2024年、大学院工学研究科マネジメント工学プログラム長(教員)・工学部地域マネジメント工学科(教員)・社会連携推進センター長・知的財産センター長・リカレント教育支援室長・国立大学法人北海道国立大学機構オープンイノベーションセンター研究推進部門長)

国立大学法人豊橋技術科学大学総合教育院教授(2024年~現在)

日本ホスピタリティ・マネジメント学会会長、日本情報経営学会理事、日本技術・文化マネジメント協議会理事、地域デザイン学会特命担当理事、横幹連合監事、戦略的協創イノベーション研究所所長

専門領域:俯瞰工学・産業財マーケティング・技術経営・戦略的協創イノベーション

(2025年9月11日原稿受領):SICニューズレターVol.7.10に掲載

寄稿3 人材多様化時代を生きる個人

法政大学 キャリアデザイン学部 教授 武石恵美子氏

はじめに

日本の組織は、高度経済成長期には、日本人の若年・壮年期の男性が中核層であった。彼らが活躍することを基礎に置いて組織の仕組みを構築することにより、同質性の高い人材を効率的に育成することができ、その人材が長期にわたり組織に定着することで事業が発展すると考えられた。当時は女性や高齢者、外国人などメインターゲットから外れる属性の人材も存在したが、それは組織にとっての「ノイズ」であり、そうした人材に無理に光を当てなくても組織はうまく回っていた。そしてこれは日本だけでなく、欧米諸国にも共通していたことである。ただし、この仕組みは、中核人材が安定的に供給される人口構造、ビジネス環境が大きく変化しない社会構造・技術構造という「安定性」の上に成立したのである。

1990年頃から、ビジネスを取り巻く環境は変化してきた。働く場に大きな影響を及ぼす社会環境の変化として、第1に少子高齢化等の人口構造の変化(Demography)、第2に人材の多様化(Diversity)、第3に DX に代表される技術の変化(Digitalization)の、「3つのD」が同時進行している。少子高齢化が急速に進み、併せて長寿化を背景に「人生100年時代」に入りつつある。これにより、働き手となる人材の多様化が進む。また、デジタル技術は、新たなマーケットの拡大を含めて市場を大きく変え、同時に金融システムや生産システムなど経済の根幹にも影響を及ぼしている。これらの環境変化は、変化のスピードと変動の幅の大ききの二つの側面から、雇用システムを含む社会システムに大きな変革を迫っており、そこから派生する組織構造や個人のキャリア形成も転換が求められている。

DEIの推進へ

将来が見通せない不透明な社会情勢において、何が正解なのかがわからない時代に入りました。ゴールがどこにあるかがわからない状況で、全員が同じ方向に全速力で走ってしまうのはリスクが大きい。他の選択肢への目配りができず、捨ててしまった選択肢の中に重要な発見があるかもしれない。こうした時代背景において、複雑な経営課題に対して、多様な人の知恵や視点を結集する「集合知」により難局を乗り越えていく必要があると考えられるようになってきた。組織を健全に運営するガバナンスという側面からも、多様な視点からチェック機能を働かすことができるという点で、人材の多様性は重視されている。

「多様性の推進」で取り上げられることの多い「DEI」の概念を整理しておきたい。

ダイバーシティ経営の流れでとらえると、人口構造の変化等を背景に「D(Diversity)」が目された。組織の中に多様な人材が存在している、ということはダイバーシティ経営の前提である。

しかし、多様な人材が組織の中に「存在する」だけでは、ダイバーシティが価値を生むという状況につながりにくく、放置しておく、むしろ異質なものを排除する力がはたらいてしまいかねない。そこで、多様な人材が組織の中に受け入れられて能力を発揮するための環境の重要性が目され、2010年代終わり頃からダイバーシティ経営を「D&I(Inclusion)推進」として進める企業が増えてきた。

Inclusion を理解する上で、図1が参考になる。個人が組織の中でメンバーとして所属しているという感覚(所属性)、自分らしさを認められてそれが発揮できているという感覚(独自

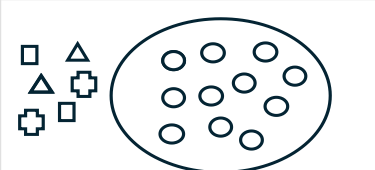
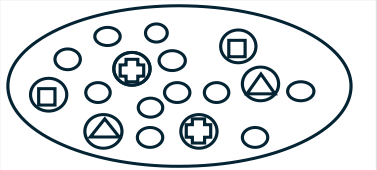
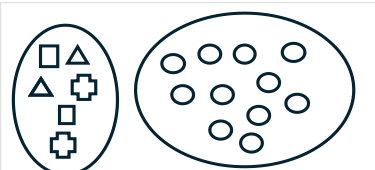
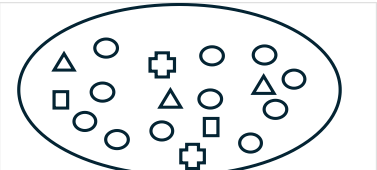
性の価値)、この両者が高い場合に「包摂・受容(Inclusion)」の状態にあるといえる。理解し易いように図の中に丸や三角などを筆者が追記したが、丸がマジョリティの人材、それ以外の形はマイノリティの属性を持つ人材と考えてほしい。

「排除」は、マジョリティのグループにそれ以外の属性の人材が入れない状況を示しており、これはダイバーシティ経営においては問題外である。

「差異」は、マジョリティグループの他に、マイノリティのグループが存在している。つまりマイノリティグループはマジョリティのグループメンバーとは別のグループと見なされ、マジョリティとは異なる特徴を持つグループとしてその独自性は認められているが、マジョリティのグループには入れないという点で所属性が低いと考えられる。「女性ならではの感性を活かして女性だけのチームを組成して商品開発をしたら成功した」というエピソードをきくことがあるが、これが「差異」の典型的な事例である。「女性らしい感性」という点に価値を見出していると受け止められるが、マジョリティの中核メンバーとは「間仕切り」されたところでの能力発揮を求められており、違いから相互に学ぶという姿勢を放棄してしまっている点で問題といえる。

「同化」は、マイノリティのメンバーもマジョリティのグループメンバーとして受け入れられているという点では「所属性」は高い。しかし図をよく見ると、マイノリティのメンバーは丸枠の中に入っている。マイノリティのメンバーがマジョリティグループと同じような立ち居振る舞いをする、すなわちマジョリティのメンバーへの同化ができているという条件下で同じグループに所属できるということを示しており、自分らしい独自性を発揮することが難しい状況にある。

図1 インクルージョンの考え方

	低・所属性	高・所属性
低・独自性の価値	<p>排除(Exclusion) 個人は、職場内で独自性のあるメンバーとして扱われず、職場の部内者と位置付けられる別のメンバーやグループがある</p> 	<p>同化(Assimilation) 個人は、組織的/支配的な文化の規範に準拠して独自性を重視していない場合に、職場の部内者として扱われる</p> 
高・独自性の価値	<p>差異(Differentiation) 個人は、職場内の部内者とはみなされないが、固有の独自性は職場・組織の成功にとって価値があり、必要であるとみなされる</p> 	<p>包摂・受容(Inclusion) 個人は、職場内の部内者とみなされ、職場の中での独自性が許容・奨励される</p> 

出所:Shore et al(2011)に筆者追記

このように、「Inclusion」により、マイノリティグループがマジョリティに同化することを求められずに、組織の中で自分らしさを発揮することができることになる。

さらに、近年は「E(Equity)」が加わり、「DEI」としてダイバーシティ経営を進める組織が増えてきた。多様な人材が個々に置かれている状況が異なることを認識して積極的な支援を行うというように、多様な人材が活躍するための条件整備が「E(Equity)」である。

「Equity」は、「公平、公正」を意味しており、「Equality(平等)」と異なる概念である。多様な人材が持てる能力を發揮しようとする際に、そもそも置かれた状況が異なっていることは少なくない。たとえば、子育てをしている女性が責任のある仕事をしようとしても、子育て責任がない人と同じように残業や休日出勤がある働き方はできない。そこで、子育てをしている社員には、子育てを支援するベビーシッターの補助をしたり、自宅でも仕事ができるようなテレワークを可能にすることで、他の社員と遜色のない働き方ができるようになる。ここで子育て支援や働き方の柔軟化が、条件調整のための支援策に当たる。しかし、より重要なのは、残業や休日労働をこなさないと責任ある仕事が任せられないという職場の構造にこそ問題がある、ということに気が付くことである。

「Equity」の概念が登場したことで、能力を發揮しようとするときに能力發揮が難しいグループが存在することに気づくことになり、それは本人の問題ではなく置かれた環境の問題であるという構造をとらえる視点が明確になったといえる。

ダイバーシティ経営で重要な個人の役割

ダイバーシティ経営において様々な取組が進展する中で、従業員個人がどのような役割を担うのかという点については、これまで議論がなされてこなかったのではないだろうか。従業員は組織の取組や施策の「受益者」としてのみ存在するのではない。ダイバーシティ経営の効果を発現させるために、従業員が果たすべき役割は大きく、そのために重要とされる意識や行動がある。

ダイバーシティ経営は、人材の多様性、異質性に積極的な価値を置くことから、一人ひとりの個性や違いという面に光が当たることになる。特に同質性の高い日本の組織においては、組織の中に埋没しがちな「個」があらためてクローズアップされることを、組織はもとより、従業員個人も認識する必要があるだろう。ここで、個々人の個性や多様性を理解してそれを活かすということは、個人の自己主張を組織が無批判に受け入れることではない、ということにも留意すべきである。組織目標の実現という点では、組織も働く人も共通の方向性を持つのは当然で、その中で従業員の多様性を發揮する・受容するという点が重要であり、組織の戦略と従業員の個性發揮や自発性との調和を図ることが肝要となる。

組織貢献を意識しながら自身の個性や独自性に自覚的な従業員をダイバーシティ経営における従業員モデルとして設定し、ダイバーシティ経営で重要な役割を担う従業員の意識や行動のあり方、それを支援する人事の制度について検討することが必要になってきた。

ダイバーシティ経営と整合する個人

それでは、ダイバーシティ経営を効果的に進める上で重要な従業員の役割とは何か。従業員個人に求められる意識・行動について、以下の2点を指摘したい。

まず第1に、ダイバーシティ経営においては、個性を發揮してユニークな人材として存在することが各個人に期待されている、ということから従業員自身が意識化すること、すなわち独自

性の発揮である。ダイバーシティ経営は、組織内に多様な人材が存在しているからこそ意味がある。したがって、従業員個人が自身の個性、独自性に自覚的になり、それを組織貢献に結びつけようとする意識を持ち行動することが重要である。自身がユニークな存在であることを理解し、周囲に過度に同調することなく独自性を発揮するということが従業員に求められる。

しかしこれは簡単なことではない。組織に所属すると、組織目標を理解して組織に適応しながら自身の役割を果たすことが求められる。これは「組織社会化」といわれ、組織の特徴を理解してその文化を受け入れながら、組織に愛着を持って組織に適応をする重要なプロセスである。しかし組織への適応が度を超えると「過剰適応」になってしまうという点に注意しなければならない。

若林(1995)は、組織参入者がキャリア形成を図る際に、経営目標と職場慣行の2つをどの程度受容するかにより4つのタイプをモデル化している(表1)。経営目標を受け入れることは職場適応の上で重要であるが、職場慣行の受容度が高くなると「会社人間」となり、職場に過剰同調してしまうことになる。そうなると、多様性が発現されにくくなり、反対意見が言いにくい雰囲気になり、不祥事が起こりやすいといった問題にもつながりやすい。一方、経営目標を受容しつつ職場慣行と一定の距離を置くタイプは「創造的組織人」として、自身の考えを持ち自己のスタイルを保持しようとするタイプと位置づけられており、ダイバーシティ経営が前提とするモデルと重なる。

表1 職場適応のモデル

		職場慣行受容度	
		低	高
経営目標 受容度	高	創造的組織人 (選択的適応)	会社人間 (過剰同調)
	低	疎外人 (離職、不適応)	指示待ち人間 (仮の同調)

出所:若林(1995)、p.170より。

従業員に求められる第2の点が、自身の視野やスキルなどの多様性を拡張することである。ダイバーシティ経営では、組織を構成するメンバーの多様性、つまり性別や年齢、国籍、スキル、価値観など「個人間」の多様性が注目されてきたが、近年になって、個人の中にある多様性として「個人内多様性=intrapersonal diversity」も注目されてきている。

そもそも、個人は常に複数の役割を担いながら生活している。具体的には、市民として、労働者として、家庭人として、というように複数の役割を同時並行で担いながら生活し、複数の役割は、個人の人生の経過の中で、その時々によって重要度が変化する(注 i)。この複数の役割を担うことで、個人の中の経験を増やし多様な視点や価値観を持つことにつながると考えられるようになってきた。たとえば、育児や介護の経験が商品・サービスの開発や職場管理などで活かされる場面があれば、生活経験がビジネスに活用されることになる。従業員の副業や社会貢献活動などを容認、さらには奨励する企業が増えているが、これも個人が社外で多様な経験を積むことによって、人的なネットワークや視野を広げることが期待されており、人材多様性を活かすダイバーシティ経営に直結する取組となる。

求められるキャリア自律と組織の課題

このように、人材多様性に価値を置く経営・人事戦略へと舵を切った組織においては、それと整合するように働く側の意識や行動変容が求められることになる。ダイバーシティ推進において企業が取るべきアクションの一つに、従業員が自律的に行動できるようキャリアオーナーシップを育成する必要性が指摘されてきた。つまり、キャリア形成において、個人の価値観や意思を重視し、個人が主体的に学び、仕事を選ぶという姿勢を重視するという考え方が広がってきた。組織が主導する人材育成により従業員が均質的になってしまうことへの問題意識から、従業員個人の発意を重視して、それにより多様性の確保を期待するといえるだろう。将来が不透明で変化の激しい環境変化の下で、組織主導のキャリア開発策の限界が露呈し、自律的にキャリアを考えることの重要性が指摘されるようになってきた。「キャリア自律」が組織の活力の源泉になるという考え方が、経営者サイドで強調されるようになってきた(注 ii) のは、大きな変化である。

先に述べた「会社人間」が「創造的組織人」へと変貌を遂げるためには、「自律的であること」をあえて意識化するための制度対応を行う必要性が高い。自分の意見があっても周囲に合わせようとする意識や行動はダイバーシティ経営においては回避すべき状況であり、日本企業のダイバーシティ推進においては、こうした従業員のマインドセットを変えることを制度改革の視点に明確に据える必要性が高い。ダイバーシティ経営において、改めて「個の自律」という課題を設定すること自体が、日本的な組織の特徴を踏まえると、ある意味で必然的なテーマなのかもしれない。

ここで注意しなくてはならないことを2点指摘したい。

1点目が、従業員が自律的にキャリアを考えることにより、自社以外の組織への関心が向くことで、組織からの遠心力が働くのではないかということが組織側からみた懸念材料となることである。「キャリア自律」と組織への求心力とのバランスをどのように考えればよいかという点が問題となる。

「自律」という言葉から、従業員が自由にやりたいことを選んでいく、というイメージを持たれがちで、ここから「組織から自律人材が飛び出していくのではないか」という疑心暗鬼が生じることになる。しかし、自律と自由放任とは別のものである。表1に戻ると、「創造的組織人」は、職場慣行の受容度は低いが発行目標の受容度は高いタイプである。個人が「組織の中で」自律的であろうとすると、組織の目指す方向性を無視してやりたいことを自由にやりたいとは考えないだろう。組織が大切にしている価値観や社会の中で果たすべきミッションについて共感・受容した上で、自分は何ができるのか/したいのか、を考えることが基本になる。

2点目の懸念材料として、ダイバーシティ経営においては、多様な価値観や意見を許容していくために、議論を始めると拡散して収拾がつかなくなると考えられてしまうことがある。多様な意見を自由に言えるインクルーシブな職場風土では、様々な意見が衝突する場面は避けられない。その時、拡散した意見を収斂する上で重要なのが、理念や大切にしている価値観といったものを明確化して共有しておくことである。様々な意見を出し合いながら収束した結果に対しては、議論に参加したメンバーの納得感も高くなると言われている。

これまでの成功モデルが通用しなくなり、新たな発想や視点で、変動の大きい状況に対応することが不可欠である。組織の中で「ノイズ」とされていた人材にこそ光を当て、多様性を組織の価値として認識することが重要になってきた。したがってダイバーシティ経営において「不調和」が起こることは必然である。組織の中の意思決定において、上層部に上がるほど情報の内容が洗練化されてノイズがなくなっていくとすれば、不確実な時代の意思決定におい

ではリスクが大きいことに注意する必要がある。同調圧力が高まることで、人材多様性の意義が薄れることのないような組織の在り方もこれからの重要なテーマである。

【脚注】

(注 i) Super, D. (1980)が提唱した「キャリアレインボー」がわかりやすい。個人は人生の発達段階において複数の役割を担いながらキャリアを形成していることをモデル的に示している。

(注 ii) 経営者の提言として、日本経済団体連合会(2020)などがある。

【引用文献】

Shore, L. M., Randel, A. E., Chung, B. G., Dean, M. A., Ehrhart, K. H. & Singh, G.(2011)“Inclusion and Diversity in Work Groups : A Review and Model for Future Research,” *Journal of Management*, Vol.37, No.4, pp.1262-1289.

Super, D.E.(1980)“A Life-span, Life-Space Approach to Career Development,” *Journal of Vocational Behavior*, Vol. 16, pp.282-298.

日本経済団体連合会(2020)『Society5.0 時台を切り拓く人材の育成－企業と働き手の成長に向けて』若林満(1995)『創造的組織人』ストアーズ社。

【著者プロフィール】

武石恵美子(たけいし えみこ)氏

筑波大学卒業後、労働省(現 厚生労働省)、ニッセイ基礎研究所、東京大学社会科学研究所助教授等を経て、2006年4月より法政大学。

お茶の水女子大学大学院人間文化研究科博士課程修了。博士(社会科学)。

専門は、人的資源管理論、女性労働論、キャリア開発論。

主な著書に、『ダイバーシティ経営と人材活用』(共編著、東京大学出版会)、『女性のキャリア支援』(共著、中央経済社)、『多様な人材のマネジメント』(共編著、中央経済社)、『キャリア開発論 第2版』(中央経済社)、『「キャリアデザイン」って、どういうこと?』(岩波ブックレット)など多数。

法政大学 DEI センター長、及び厚生労働省「労働政策審議会委員」「労働政策審議会 人材開発分科会長」、経済産業省「なでしこ銘柄選定基準等検討委員会委員」等の公職を務める。

(2025年10月20日原稿受領:SIC ニュースレターVol.7. 11に掲載)

寄稿4 カーボンニュートラルに向けた大阪ガスのメタネーション技術開発 ～大阪・関西万博でのメタネーション実証を終えて～

大阪ガス株式会社 エンジニアリング部
カーボンニュートラルメタン開発チーム マネジャー 横山晃太氏

1. はじめに

2020年10月、菅義偉元首相の所信表明演説で「日本全体で2050年に温室効果ガス排出ゼロを目指す」ことが宣言されて以降、日本のカーボンニュートラルに向けた取り組みが活発化した。それから5年が経過したが、日本の温室効果ガス排出量は、ピークかつ基準年である2013年度の14.1億トン-CO₂から徐々に減少し、最新の2023年度には10.7億トン-CO₂まで減少している。ただし、2020年度から2023年度の4年間は10～11億トン-CO₂の範囲で推移しており、今後も順調に減少し続けるか、2030年度の目標である7.6億トン-CO₂の達成が見込まれるか、については引き続き注視が必要である。日本全体で削減努力を継続していくことが求められている。

当社は温室効果ガス削減に向け、2021年1月に「カーボンニュートラルビジョン」¹⁾を公表し、2050年のカーボンニュートラル実現に挑戦する姿勢を示した。その後も、2023年3月に「エネルギーtransition2030」²⁾、2025年2月に「エネルギーtransition2050」³⁾を公表し、実現に向けたロードマップをより明確にしている。また、2025年4月から10月に開催された大阪・関西万博では、「いのち輝く未来社会のデザイン」をテーマに、日本ガス協会のガスパビリオンや当社の実証設備「化けるLABO」での展示・見学を通じて、多くの人々に都市ガス業界および当社のカーボンニュートラルへの挑戦を訴求した。当社は2030年までに都市ガスの1%をカーボンニュートラル化することをコミットしており、今後の5年間はその実現に向けて引き続き尽力する。

都市ガスの脱炭素化に関しては、主原料である天然ガスから「e-メタン」への移行を目指し、さまざまな取り組みを進めている。e-メタンとは、水素とCO₂を合成して得られるメタンであり、水素キャリアの一種である。この合成過程はメタネーションと呼ばれる。e-メタンは使用時にCO₂を排出するが、原料として「排出計上済み」のCO₂を利用するため、大気中のCO₂を増加させないカーボンニュートラルな燃料と位置づけられる。天然ガスとe-メタンは主成分がメタンでほぼ同じであるため、既存の都市ガスサプライチェーンをそのまま利用して供給でき、天然ガスからのシームレスな移行が可能である(図1)。

e-メタンの社会実装に向けてはさまざまな課題が存在するが、メタネーション技術の確立はその中でも大きな課題の一つである。当社も複数の技術開発に取り組んでいる。本稿では、それらの概要と現在の開発状況を紹介する。第2章では当社が取り組む3種類のメタネーション技術開発について、第3章では本年10月に閉幕した大阪・関西万博会場内で実施した「生ごみを主原料としたe-メタンの製造・利用実証」(環境省委託事業「既存のインフラを活用した水素供給低コスト化に向けたモデル構築・実証事業」)について詳述する。

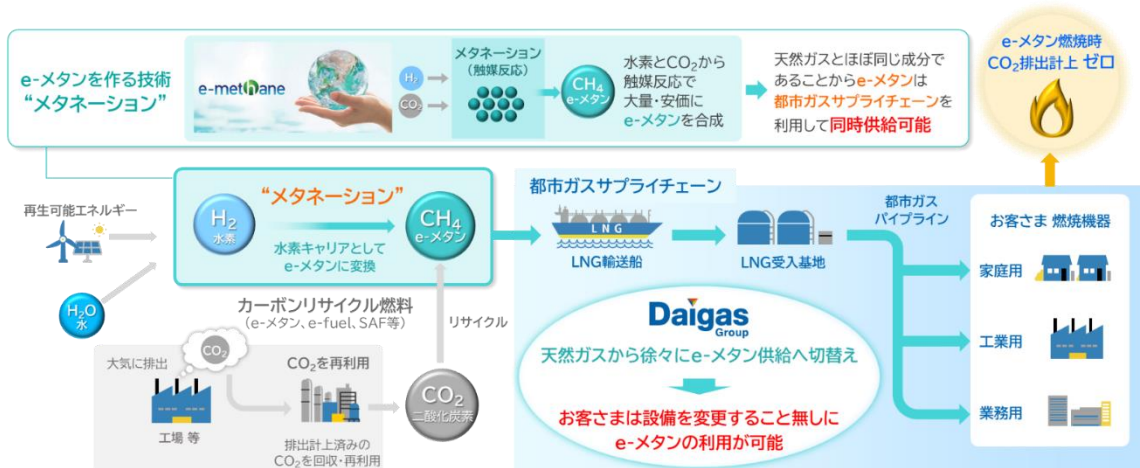


図1 都市ガスのカーボンニュートラル化の鍵となる“e-メタン”

2. 大阪ガスのメタネーション技術開発

当社ではメタネーションの大規模化や高効率化を目指した3つの技術開発や実証を実施中である(図2)。

① サバティエメタネーション	② バイオメタネーション	③ SOECメタネーション
<ul style="list-style-type: none"> ■ 意義: 早期の大規模化・社会実装 ■ 実証: NEDO様事業 長岡実証 ■ 特徴: ① 世界最大規模 400 m³/h ② 既存都市ガス供給網へ注入 <p>INPEX長岡鉦場近隣での大規模実証</p> <p>供INPEX 提供</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 意義: 地産地消のエネルギー製造・利用 ■ 実証: 大阪・関西万博[®]、下水処理場での実証 ■ 特徴: ① メタン生成菌によるメタン合成 ② 生ごみ・下水のバイオガス利用 <p>2025年万博で生ごみからメタン合成・利用</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 意義: 高効率化によるエネルギーコスト低減 ■ 開発: グリーンイノベーション基金による開発 ■ 特徴: ① 効率をサバティエの1.5倍に向上 ② 水とCO₂から直接メタンを合成 <p>2050年に向けた次世代メタネーション技術開発</p> <p>SOECセルスタック</p> <p>電力 CO₂ H₂O → メタン</p>

図2 大阪ガスが取り組むメタネーション技術開発

1) サバティエメタネーション

サバティエメタネーションとは、水素と二酸化炭素を原料として触媒を用いて、メタンと水を生成する化学反応のことであり、フランスの化学者ポール・サバティエが発見したことになんで名づけられた反応である。



当社でも、都市ガスの原料を石炭系ガスや石油系原料から天然ガスに切り替えた1980年代に、石炭系ガスや石油系原料から得られる合成ガス(水素と一酸化炭素の混合ガス)からメタンを主成分とする代替天然ガス(SNG)を製造するための技術開発を行い、最終的には自社技術にて複数の大規模プラントを1980年代に建設し、SNG製造を行っていた(図3)。その後天然ガスが大量に安定に長期的に輸入することを確認し、1990年代にはその役目を終えた。



COG-SNG(石炭ガス化メタネーション)プラント



OGAS-SNGプラント

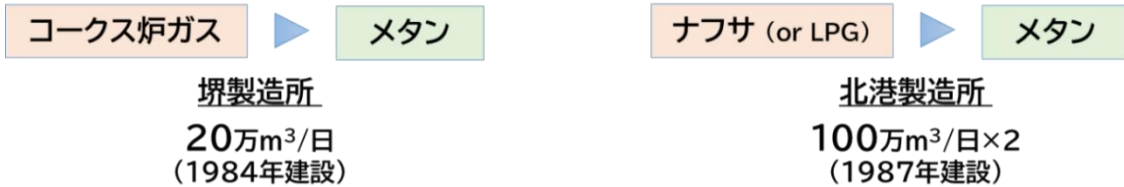


図3 大阪ガスの代替天然ガス製造プラント

このSNG製造向けに開発した当社の触媒技術に関しては、その後天然ガスから水素を製造するプロセスに適用しながら、耐熱性や耐久性等を高める改良を行い、その触媒性能を更に向上させてきた。

この当社触媒技術は、サバティエメタネーションにも適用可能であり、本触媒を用いた大規模なメタネーション技術開発を新潟県長岡市で(株)INPEX様とNEDO助成事業(カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発)にて取り組んでいる(図4)。

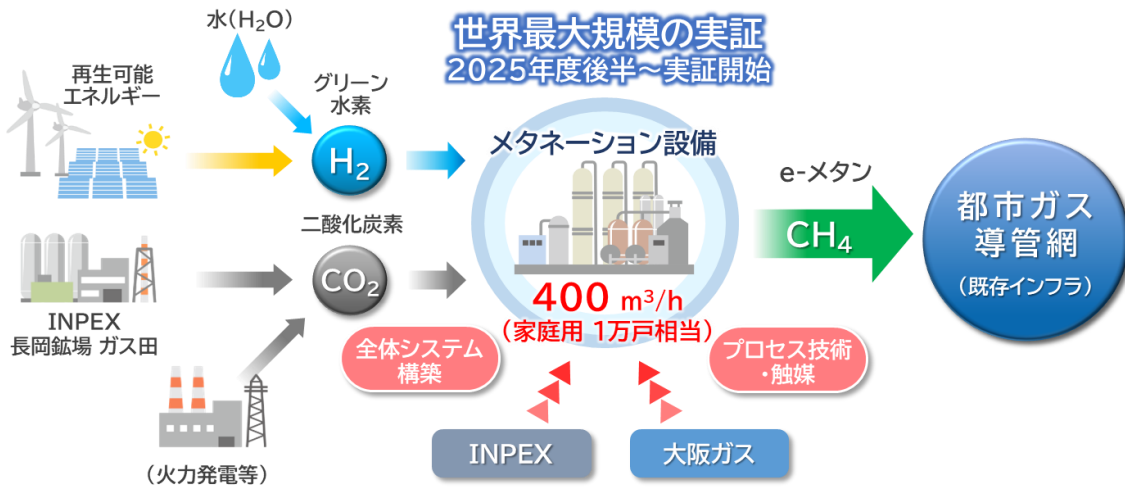


図4 新潟県長岡市でのサバティエメタネーション技術開発

本実証規模はe-メタン製造量で約400m³/hであり、サバティエメタネーションとしては世界最大規模のものである。標準家庭約1万戸相当のe-メタンを製造し、都市ガス導管網へ注入する予定である。設備は2025年度上期にほぼ完成し(図5)、2025年度

下期から単体機器試運転及び総合試運転を行い、2025年度内に実証試験を開始する予定である。

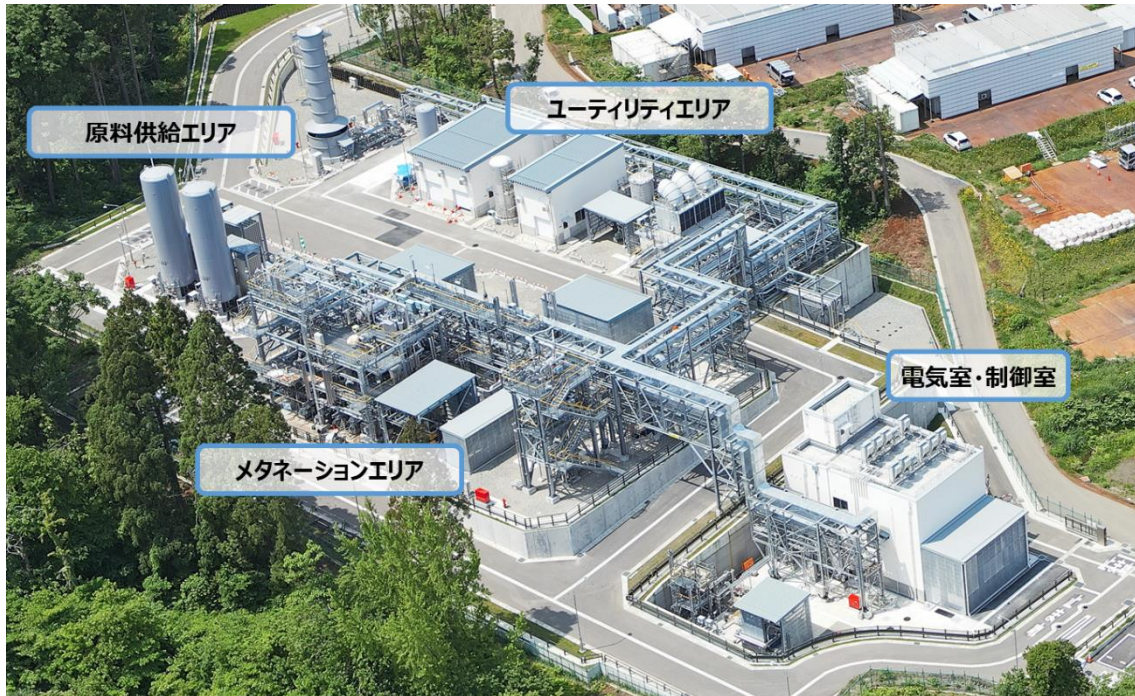


図5 サバティエメタネーション実証設備写真(INPEX 様提供)

2) バイオメタネーション

バイオメタネーションとは、メタン生成菌という微生物を用いた生ごみや下水汚泥から発生するバイオガス中の CO_2 のメタネーションのことである。メタン生成菌は水素と CO_2 を取り込み、メタンと水を生成する微生物である。生ごみや下水汚泥を「メタン発酵」させると、様々な微生物がそれらに含まれる有機物を分解し、最終的にバイオガスが得られる。バイオガスはメタンと CO_2 との混合ガスであり、以前からバイオガスそのものやバイオガス中のメタン(以後、バイオメタン)は、ボイラー燃料、発電燃料、自動車用燃料、都市ガス燃料として利用されるケースがあった。一方、バイオガス中の CO_2 に関してはこれまでほぼ利用されてこなかった。そこでe-メタンの原料としてこのバイオガス中の CO_2 に着目し、生ごみや下水汚泥(廃棄物系のバイオマス)由来のe-メタンの製造技術開発を行っている。特に筆者が責任者として実施した大阪・関西万博会場内での「生ごみを主原料としたe-メタンの製造・利用実証」に関しては次章でその結果も含めて詳しく紹介する。

3) SOEC メタネーション

SOEC メタネーションとは、水や CO₂ を電気分解する SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) と触媒メタネーション技術を組み合わせ、メタネーションで発生する熱を SOEC に活用することで、総合エネルギー効率(e-メタン/再エネ)を大幅に高めることができる次世代メタネーション技術のことである(従来の総合エネルギー効率55~60%を85~90%に)。メタネーション触媒に関しては、サバティエメタネーション開発と同様に当社の触媒技術を活用中であるが、SOEC についても金属支持型のセルスタックを独自に開発している。従来のセラミックス支持型と比較し、耐衝撃性が高く強靱であり、スケールアップの実現も容易と考えている(図6)。

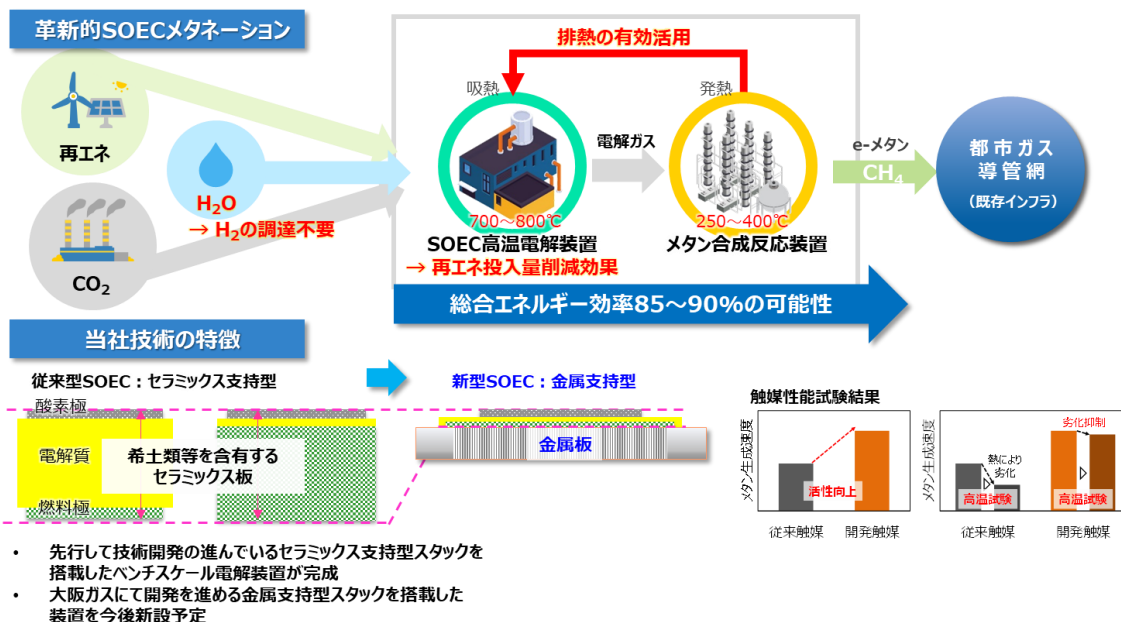


図6 SOEC メタネーションコンセプトと当社 SOEC 技術の特徴

本技術開発は、当社と産総研様(国立研究開発法人産業技術総合研究所)とともに採択された、NEDO 様(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)の「グリーンイノベーション基金事業/CO₂等を用いた燃料製造技術開発プロジェクト」の「SOEC メタネーション技術革新事業」のもと開発を進めている。2025年6月にはメタネーションのベンチスケール試験装置(図7)を完成し、試験を開始した。本試験装置のe-メタン製造能力は10Nm³/h(一般家庭200戸相当)であり、まずはSOEC 水蒸気電解装置と当社触媒を充填したメタン合成装置を組み合わせ、プロセス全体の運転データの取得を行い、高いエネルギー変換効率を達成するための検証を進める。その後、更なる高効率化に向けて、開発を進めるSOEC 共電解装置(水とCO₂を同時に電解する装置)を新たに設置し、試験を行う予定である。更には2028年度~2030年度にはパイロットスケール試験を進め、2030年度に世界最高レベルのエネルギー変換効率(約85~90%)を実現するe-メタン製造技術の確立を目指す予定である。

SOEC水蒸気電解装置



メタン合成装置



図7 SOEC メタネーションのベンチスケール試験装置

3. 万博会場内で実施した「生ごみを主原料としたe-メタンの製造・利用実証」

3.1 実証フローと要素技術

本章では、大阪・関西万博会場内で実施した「生ごみを主原料としたe-メタンの製造・利用実証」に関して成果も含めて記載する。本実証は、環境省委託事業「既存のインフラを活用した水素供給低コスト化に向けたモデル構築・実証事業」にて実施した。

万博会場内の実証試験のフローを図8に示す。生ごみは会場等から毎日1トン受け入れ、メタン発酵槽にて約 $5\text{Nm}^3/\text{h}$ のバイオガスを製造する。水素については、証書付きのグリーン電力を購入し、オンサイトで水の電気分解を行い、 $16\text{Nm}^3/\text{h}$ の水素を製造する。また、 CO_2 原料としては、バイオガスだけではなく、RITE(公益財団法人地球環境産業技術研究機構)が実施するDAC(Direct Air Capture)で得られる CO_2 、エア・ウォーターが実施する CO_2 回収実証(ボイラー排ガス中の CO_2 回収)で得られる CO_2 、さらには日本館で得られるバイオガス精製後の CO_2 を最大合計 $2\text{Nm}^3/\text{h}$ 受け入れる。基本的にはRITE、エア・ウォーター、日本館それぞれの運転計画に沿って CO_2 を受け入れている。これらの原料(バイオガス、 H_2 、各 CO_2)をメタネーション設備に供給し、e-メタンを最大 $7\text{Nm}^3/\text{h}$ 製造する。製造されたe-メタンにグリーン証書付きLPG(液化石油ガス)を添加して都市ガスと同じ熱量とした後、シクロヘキセン添加による付臭を行い、迎賓館及び熱供給設備(ガスコージェネレーションやガス吸収式冷凍機)へ供給する。会場内から原料を調達し、製造したe-メタンは会場内で利用する形を取ることで、将来のe-メタンの地産地消的な社会実装をイメージした実証を行った。

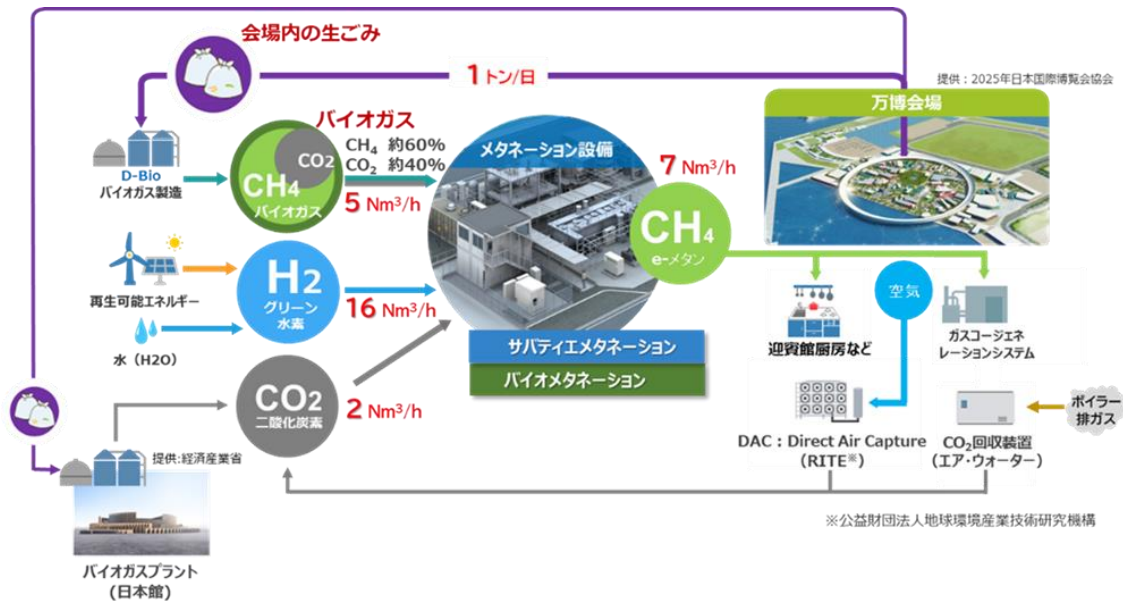


図8 万博会場内の実証試験のフロー(設備能力)

以下、主たる要素技術について概要を記載する。

- メタン発酵技術) Daigas エナジー株式会社の「D-bio メタン」を採用した。高温タイプ (50℃～55℃) の湿式メタン発酵技術であり、商用機として数件の実績がある。万博会場で想定されるような飲食店舗から排出される生ごみのメタン発酵の実績も含まれている。
- 電気分解技術) カナデビア株式会社の PEM (Proton Exchange Membrane) 型の電気分解技術を導入した。水素製造能力としては最大 20Nm³/h である。
- メタネーション技術) メタネーション設備には、バイオメタネーション設備とサバティエメタネーション設備を備えている。社会実装時には、バイオメタネーションまたはサバティエメタネーションのどちらか一方の技術の適用を想定している。
 - バイオメタネーション) 微生物(メタン菌)の力を用いて H₂ と CO₂ からメタンを合成するものである。当社ラボ試験で得られた結果から今回スケールアップしたものを設計・建設しており、本実証にて圧力、温度、滞留時間などを変化させた運転データを取得し、性能確認を実施した。
 - サバティエメタネーション) 触媒を用いて H₂ と CO₂ からメタンを合成するもので、本実証規模では十分な実績があるカナデビア株式会社製の装置を導入した。等温式反応器の 2 段構成となっており、出口ガス中のメタン濃度はおおむね 97% 程度以上となる。等温式反応器とはシェル&チューブ型の反応器で、チューブ内に触媒が充填されており、シェル側には熱媒油が循環され、メタネーション反応で発生する熱を熱媒油が除去する仕組みとなっている。

3.2 実証成果

万博会場内での本実証設備の建設は、2024年8月から開始し、2025年2月に完了した(図9)。建設完了後は、各機器の立ち上げや試運転を実施したのち、3月からe-メタンを製造し始め、会期前の3月下旬に迎賓館厨房及び熱供給設備内のガスコージェネレーションやガス吸収式冷凍機でe-メタン燃焼試験を実施したが、無事に終了した。e-メタンと都市ガスとの切替試験も行ったが、目視では全く気付かないほどスムーズに切り替わることを確認できた(図10)。



図9 メタネーション実証設備写真



図10 迎賓館厨房でのe-メタン燃焼試験写真

2025年4月13日の万博開幕後から万博会場で発生した生ごみの受け入れを開始したが、当初は目標としていた日量1トンの生ごみが受領できず、足りない分については外部からの生ごみ(食品工場で発生しているもの)を調達して補った。8月中旬からは100%万博会場の生ごみのみを原料とした。半年間の万博期間中、メタン発酵は順調に稼働することができ、 $5\text{Nm}^3/\text{h}$ 以上のバイオガスを安定して得ることができた。

バイオメタネーションに関しては、運転圧力・運転温度・滞留時間・担体(メタン菌を付着させるもの)などの諸条件を変更させ、最高で約94%のメタン濃度のe-メタンを製造できた。今後も引き続きメタン濃度の向上や高効率化を目指して実験を継続する予定である。

図11に期間中のe-メタンの製造量の累積グラフを示した。10月13日の閉幕まで累計約 $14,300\text{m}^3$ のe-メタン製造を行った(100世帯の143日分に相当)。また図12に迎賓館及び熱供給設備へのe-メタン供給量の累積グラフを示す。熱供給設備は冷房用の冷水を製造するプラントのため、春にはあまり利用量がなかったが、6月頃から利用量が増加した。迎賓館に関しては期間中安定的に利用が継続した。熱供給設備ではe-メタンだけでは必要な燃料量に満たないため、都市ガスも含めた燃料供給となっており、e-メタンの割合は最小数%(日中のピーク時)から最大50%程度(夜間の低負荷時)であったと推測している。一方、迎賓館でe-メタンを利用する際にはe-メタン100%で利用されていたと考えられる。

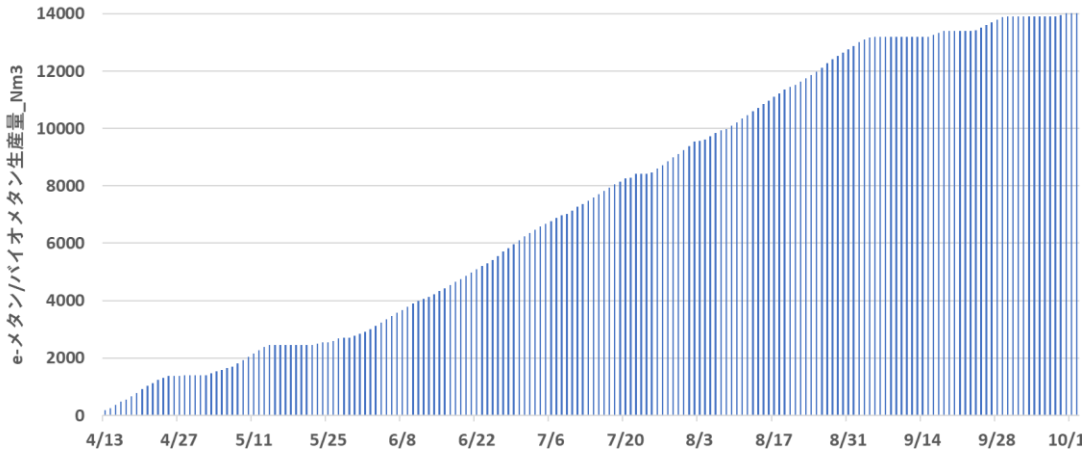


図11 e-メタン製造量(累積)

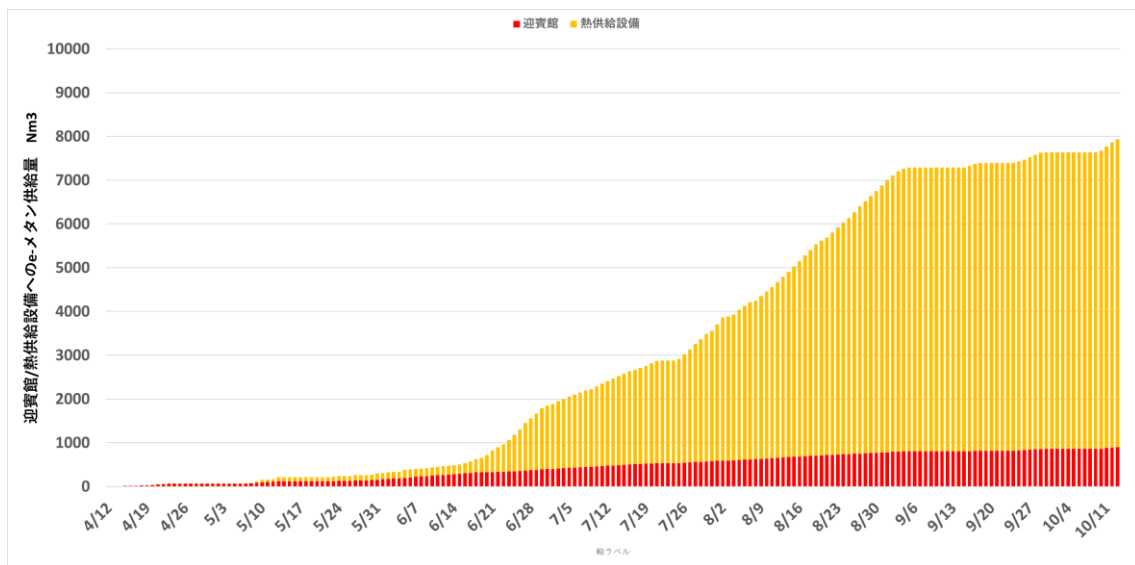


図12 迎賓館および熱供給設備への e-メタン供給量(累積)

本実証設備は、CO₂が e-メタンというエネルギーに変化する(化ける)仕組みを大人から子供までわかりやすく見学してもらえるような思いも込め、当社の設備は「化ける LABO」という名称として、見学者も受け入れた。具体的にはアテンダントによる説明、パネルによるフローの図示、タブレット端末を用いた拡張現実(AR)などを活用して、e-メタンのプロセスを誰でも理解していただけるように努めた。最終的に累積7,500人超の方々に見学をいただき、見学後のアンケートでも97%以上が満足と回答いただけた。

4. おわりに

開幕前にはさまざまな懸念があった万博であったが、終わってみると2,900万人を超える来場者を迎え、成功裏に幕を閉じた。成功の要因は多岐にわたると考えられるが、関係者として約50日以上会場に足を運んだ筆者の視点から見ると、ハード面では独特で魅力的な会場デザインや高いクオリティのパビリオンが印象的だった。一方、ソフト面では多層的な体験プログラムやスタッフの献身的なおもてなしがすばらしかったと感じている。筆者自身も「化けるLABO」のブースで、多くのビジネス関係者や一般来場者に対して説明や質疑応答を行った。そこで、e-メタンが将来のクリーンエネルギーとして期待されていることを実感するとともに、具体的な製造装置を実際に見ていただき、製造方法や一定の手間がかかることについても理解を深めていただけたように思う。また、開幕前には、e-メタンの万博会場内での実利用に対する関係者の漠然とした不安を解消することに苦労した。こうした経験から、実証することだけではわからなかったe-メタンの社会的な受容性の重要性を強く実感した。実証期間中もなんら問題なく、迎賓館や熱供給設備における様々なガス利用機器の燃料として利用できたことも大変意義深いことであった。来年からは長岡市で大規模なe-メタン製造及び製造したe-メタンの導管注入を行う。導管を通じて注入したe-メタンは都市ガスとして利用されることになる。この規模でのe-メタンの都市ガス導管注入は世界でも初めてである。引き続き技術開発のみならず社会受容性の向上にも注力しながら進めていきたい。

Daigasグループは、今年10月に創業120周年を迎えた。1905年のガス供給開始を第1の創業とすれば、1975年の天然ガス転換は第2の創業にあたり、e-メタンの本格的導入を迎える2030年は第3の創業と位置づけ、引き続き着実にカーボンニュートラルへのトランジションを進めていく所存である。

【参考文献】

- 1) 大阪ガス株式会社プレスリリース、「Daigasグループ カーボンニュートラルビジョンの策定について～2050年脱炭素社会実現に向けた挑戦～」、2021年1月25日、https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2021/1291446_46443.html
- 2) 大阪ガス株式会社プレスリリース、「Daigasグループ エネルギートランジション2030の策定について」、2023年3月9日、https://www.osakagas.co.jp/sp/company/press/pr_2023/1720418_54097.html
- 3) 大阪ガス株式会社プレスリリース、「Daigasグループ エネルギートランジション2050の策定について」、2025年2月27日、https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2025/1786064_58387.html

【筆者プロフィール】

横山 晃太(よこやま こおた)氏

大阪ガス株式会社 ガス製造・エンジニアリング部 エンジニアリング部 カーボンニュートラルメタン開発チーム マネジャー

1997年 東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻(修士課程)修了

1997年 大阪ガス入社。以降、技術開発系組織(研究所、エンジニアリング部、技術戦略部)にて、技術開発やマネジメントに従事。主にはメタンセンサ、排ガス中のNO_x除去触媒、天然ガスからの合成ガス製造プロセス、燃料電池向け水素製造プロセス、バイオガス精製技術、メタネーション技術などの開発や事業化に従事。2017年からエンジニアリング部マネジャーとして、CN 関連の技術開発に取り組み中。

(2025年11月5日原稿受領:SIC ニュースレターVol.7.12に掲載)

Ⅲ 技術紹介

技術紹介1 国際電気のデジタルソリューションに向けた取り組み

株式会社国際電気

プロダクト本部 製品企画部長 廣岡慎一郎氏

1. はじめに

近年の災害の激甚化や地政学的リスクの高まり、少子高齢化の急速な進行とそれに伴う労働力人口の減少などを背景に公共分野から製造業に至るまで、さまざまな現場の最前線で働くフロントラインワーカーの負荷の増大が社会共通の大きな課題となっている。

国際電気(以下、当社)は、1949年創業の国際電気、1948年創業の日立電子、1952年創業の八木アンテナを祖として、2000年に3社合併により誕生した¹。当社は、70年以上にわたって、無線通信技術と映像処理技術をコアとしたモノづくりを通じて、安心・安全な社会の実現に向けてフロントラインワーカーを支えるシステムやプロダクトを、官公庁や自治体、鉄道事業者、防衛などの各分野に向けて提供してきた。代表的な例として、公共の防災の領域に提供している自治体向けの防災行政無線や、河川の増水などを監視する高感度の映像監視システム、鉄道の安全な運行に寄与する列車無線システムなどが挙げられる。

さらに近年は、これらのお客様と長年築いた豊富な経験や実績に基づくノウハウの蓄積を土台に、映像の AI 解析やクラウド上でのデータ処理を始めとした IT 技術を組み合わせ、データを活用して各分野のフロントラインワーカーが抱える業務課題を解決し、負担軽減を支援するためのデジタルソリューションの提供に注力している。これらを自治体や鉄道事業者など従来のお客様へ提供することで、更なる安心・安全の実現に向けた業務支援の取組みを加速するとともに、製造業などの分野に向けてもお客様のニーズを探りながらデータ活用のソリューション展開を図ることで事業の拡大を目指している。

本稿では、当社の取組みの直近の具体的な事例として、公共分野における①防災・減災に寄与する防災業務支援サービス²と、製造分野における②現場最適型ソリューション³を紹介し、また、それらの迅速なソリューション提供を可能とするプラットフォーム構想について述べる。

2. 防災業務支援サービスの展開

自然災害の激甚化が進む中、自治体は事前に計画を立て、災害発生時は迅速に対応することがますます重要になっている。自治体の主な防災業務と当社の取組を図1に示す。自治体の防災業務では、災害のフェーズを「(1)平常期」「(2)警戒期」「(3)発災期」「(4)

¹ 当時、日立国際電気。2023年12月の日清紡ホールディングスへの主要株主の変更に伴い、2024年12月に創業時代の商号である国際電気に改めて新たなスタートを切った。

² 日立国際電気(当時) プレスリリース(2024.7.23)
「防災業務支援サービス」を提供開始：株式会社 国際電気

³ 国際電気 SaaS型現場最適化ソリューション「GEMBA TOTAL MANAGEMENT」紹介ページ
スマートファクトリー：株式会社 国際電気

復旧・復興期」の4つに分けて、それぞれのフェーズで有事に備えた準備・計画や有事の際の迅速な対応を行うことが求められる⁴。当社はその中で、安心・安全な社会の実現に貢献するため、災害因の監視や把握に寄与する監視カメラを用いた河川監視システムや、予報・警報の発令および避難勧告等に寄与する防災行政無線などを官公庁や自治体に向けて長年提供してきた。

これまで当社が提供し、また自治体も注力してきたこれらのシステムは、「情報入手手段の確保」や「住民への情報伝達手段(通信手段)の確保」など災害フェーズ内の個別の手段の提供に留まっていた。一方、多くの自治体では職員の数年ごとの異動や、高齢化に伴う経験のある職員の減少により、ノウハウの継承不足や人手不足が発生し、有事の際の対応が遅れることや特定の職員に負担が集中する課題がある。このような自治体の抱える課題を根本から解決するには、単に個別の手段の提供だけではなく、住民へ情報を発信するための職員への判断材料の提供、情報の集約・分析など、情報を活用して災害フェーズ内の業務プロセスを最適化することが必要であり、自治体のニーズも次第にシフトしてきた。そこで当社は、情報活用によるIT化を行い、自治体の災害フェーズの中で最適化につながる業務をプロセス内から抽出してシステム化することで、災害対応時の自治体職員の業務を体系的に支援する「防災業務支援サービス」を開発し、提供を開始した。

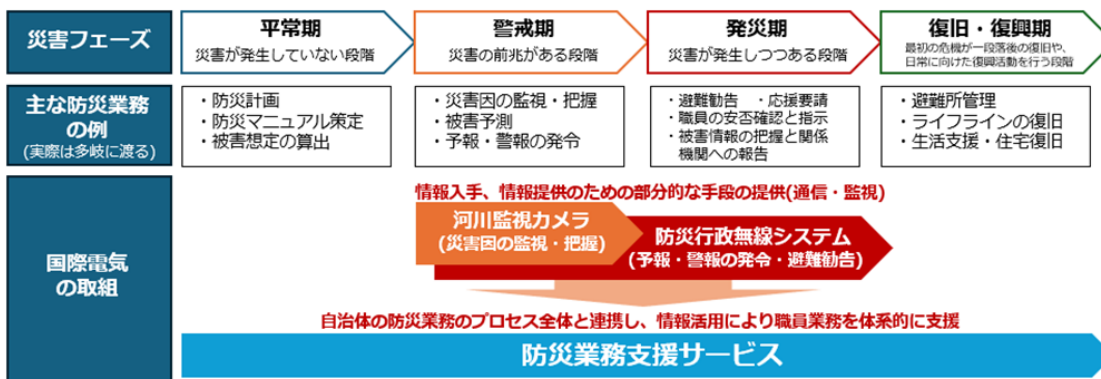


図1: 災害フェーズごとの防災業務と当社の取組

図2に防災業務支援サービスの概要図を示す。防災業務支援サービスは、クラウド上のシステムとして構成され、平常期に策定した地域防災計画の取り込みや、警戒期で把握すべき気象庁の発行する気象警報や河川水位など、災害対応で必要となる情報を監視し、自動で収集する機能を備えている。また発災期における現場の被害状況、復旧期における避難所情報などを集約することも可能である。

⁴ 大屋根他編,「災害社会学入門」, 弘文堂(2007), pp.108-113(中村功,「4.2 災害情報とメディア」)

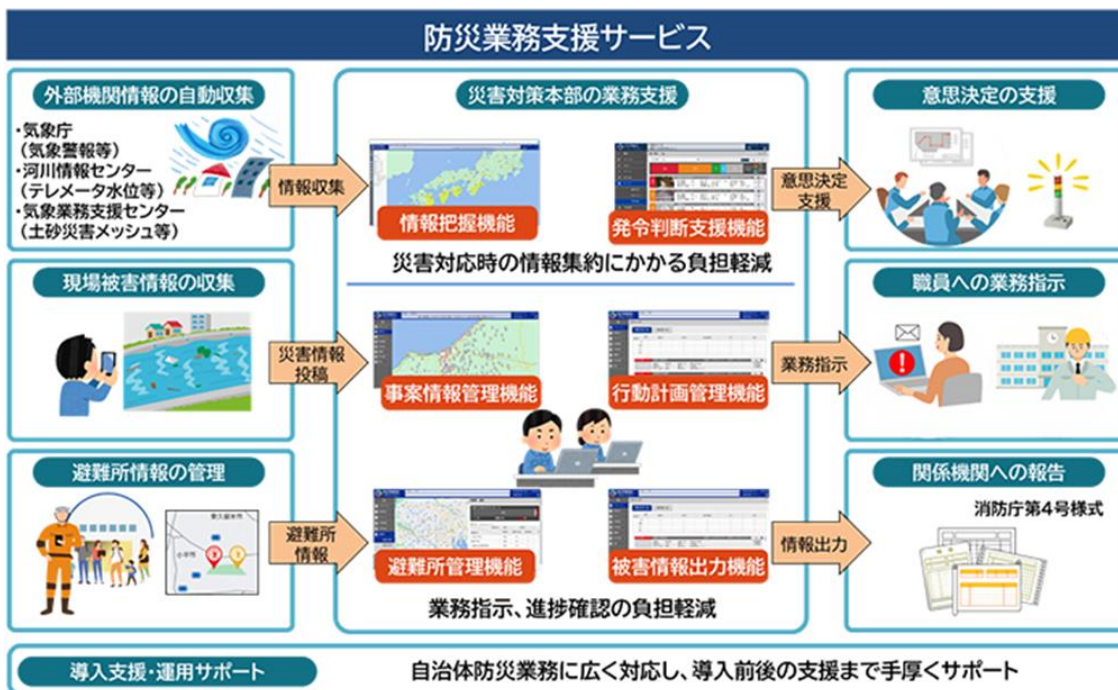


図2: 防災業務支援サービスの概要

これらの情報はデータベース上で一元的に格納および管理され、業務の内容に合わせたデータの処理やグラフィカルな可視化を行うことで、現場の情報把握や、職員が避難発令を行う際の判断の支援、行動計画の管理や避難所管理など、種々のアプリケーションを実現して、自治体職員の業務を支援する。これにより、前述の課題に対して、情報の選別にかかる職員の負担が軽減されるとともに、タブレットやスマホなどの手段を用いてリアルタイムに場所を問わず情報を共有してタスクを行うことができるため、災害発生後の迅速な行動を支援する。また、情報把握の手段や行動計画の管理など一連の業務をシステム化することにより、職員の異動や交代があった場合も均質の対応が可能となり、職員への負荷の平準化にも貢献する。

今後も防災業務支援サービスは、一連の災害フェーズにおける防災業務のプロセス全体にわたって自治体の職員を支援するサービスとして拡充していく。そのために、既存のオープンデータだけでなく、自治体が独自に持っている情報や、当社の強みとするカメラ映像および映像のAI解析を始めとしたセンサ情報の活用など、収集するデータの対象の拡大に加え、分析・予測機能の拡充、あるいは災害の可視化を始めとした各種機能のさらなる高度化を進めていく。

3. 現場最適型ソリューションの展開

近年、製造業では、原材料価格の高騰や少子高齢化による労働力不足のほか、ニーズ多様化による多品種少量生産への対応と生産管理の複雑化など様々な課題に直面しており、一層の業務効率化が求められている。当社も製造業に属する企業であり、DXを目指して個別の現場改善活動から着手している。

中でも、モノを実際に作る「直接生産活動」に限らず、日々変化する現場の作業や機械、材料、方法といった直接生産活動を支える4Mを調整する「間接生産活動」に手間がかかっていることに着目し、様々な”現場”の間接業務効率化を実現するSaaS型現場最適化ソリューション「GEMBA TOTAL MANAGEMENT」の展開を推進している(図3)。「GEMBA TOTAL MANAGEMENT」は、人が介在して感覚的に判断、調整、管理をしていた製造現場のリソースをOTとITを掛け合わせたデジタルツインとして構築し、最適化を図ることにより製造業の抱える課題解決を目指すものである。昨年、その一つとして、位置情報を活用して現場のリソース管理を実現する「ロケーションマネジメント」のサービス提供を開始した。



※ GEMBA TOTAL MANAGEMENTは、株式会社国際電気の商標または登録商標です。
 ※ ロケマネ（ロゴ）は、株式会社国際電気の商標または登録商標です。

図3:SaaS型現場最適化ソリューション「GEMBA TOTAL MANAGEMENT」

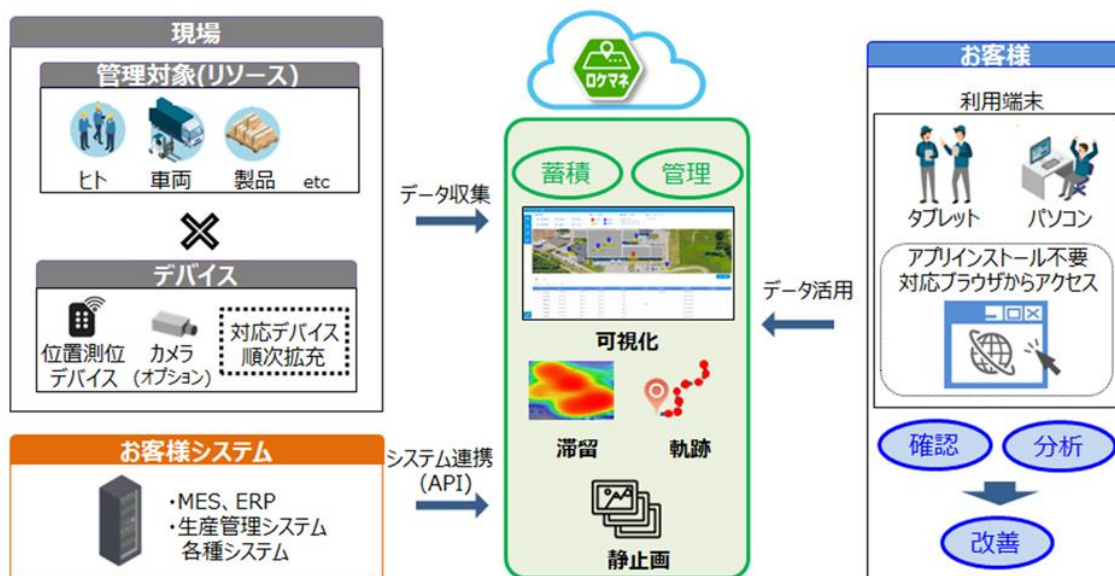
図4にロケーションマネジメントの概要図を示す。

製造業や物流業では、完成品や仕掛品、さらにそれらを載せたパレット・台車の位置が分散し、探索に時間を費やすといった課題や、構内運搬に必要なトラックやフォークリフト、ユニック車等の稼働状況を把握して最適な運用を行いたいといったニーズがある。

そこで、ヒトや車両、製品といった管理対象のリソースに、スマホやトラッカーなどの位置測位のデバイスや位置把握のためのカメラを備え付け、正確な位置情報を取得し、データ

ベースに収集・蓄積することで現場の実態把握を行う。これらの位置情報を、航空写真や構内図などの地図画像上にマッピングする機能を備え、リアルタイムにヒトや車両、物品がどこにいるのかを視認することができる。さらに、データベース上に蓄積した位置情報の時系列変化を分析し、移動の軌跡や滞留状態を可視化することで、例えば仕掛品が予め計画した適切なルートでは運搬されているか、滞留されずにスムーズに流れているかなどを確認することができる。

ロケーションマネジメントは単体のアプリケーションとして完結するだけでなく、集約した位置情報をお客様のシステムと連携させることを想定している。製品の管理においては、生産管理システムと連携することで納期や製造番号などの情報から瞬時にモノ探しを完遂することができるといったように、新たな気づきを得て経営改善に繋げる活用が可能である。



※ ロケマネ (ロゴ) は、株式会社国際電気の商標または登録商標です。

図4:ロケーションマネジメントの概要

今後は、「GEMBA TOTAL MANAGEMENT」の第二弾として、工場内の部材の位置やスペースの占有状況を可視化し、管理するスペーシングマネジメントのサービス展開を計画しており、継続して拡充を図る。これらのサービス提供によるソリューションをMES(製造実行システム)やERP(統合基幹業務システム)などの基幹システムと連携することにより、現場データを有効活用して、生産計画の最適化など、お客様の経営課題の解決に向けたスマートファクトリーの実現を目指している。

4. デジタルソリューション提供に向けたプラットフォーム構想

前章までで紹介した防災業務支援サービスと現場最適型ソリューションは、それぞれ公共分野と製造分野を主ターゲットとしており、ソリューションを構成するシステムおよびプロダクトに求められる品質要求のレベルや、製品維持のライフサイクルなど事業の特性が大きく異なる。特に、製造分野においては、お客様の現場ごとに固有の課題を抱えており、要求されるニーズが多岐にわたる。そのため、従来は、それぞれの事業に即したシス

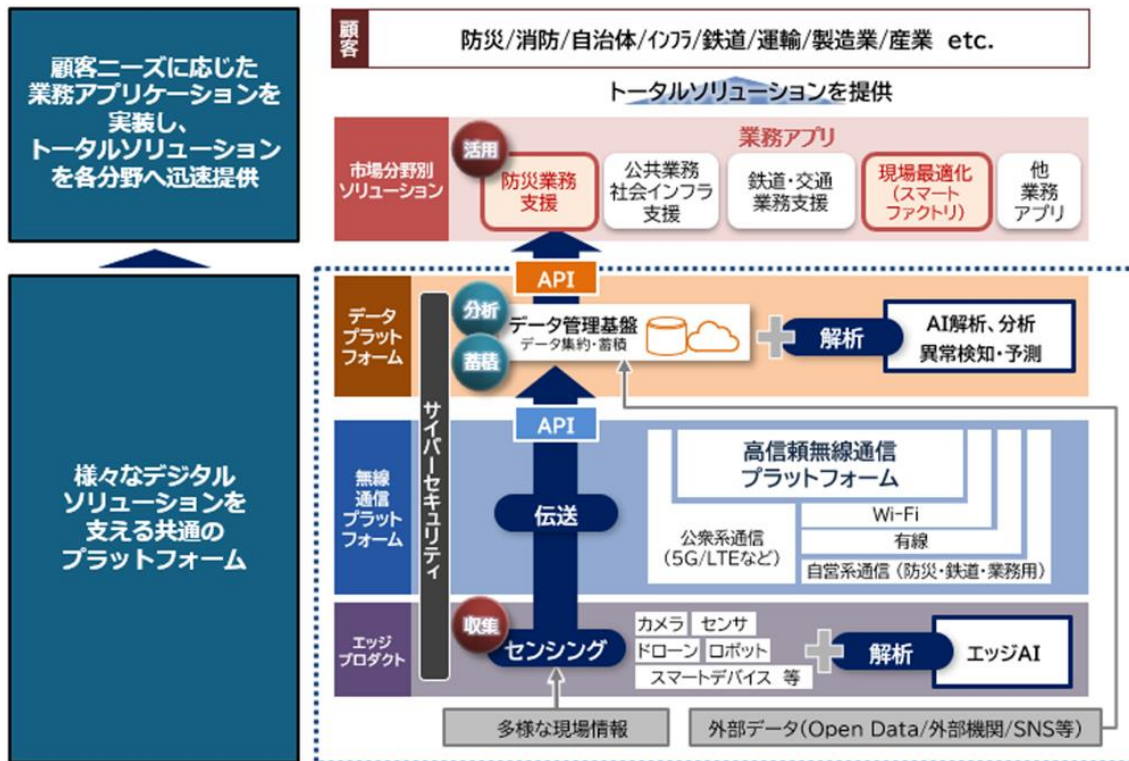
テムを個別に組み上げてソリューション提供を行っており、都度開発による開発規模の増大化や長期化、それに伴う品質低下のリスクが生じていた。一方で、お客様の抱える課題や周辺環境の変化、IT技術の進化は著しく、課題解決のためのソリューションの提供は待ったなしで要求される。

当社は「現場で働くフロントラインワーカーの業務課題」に対し、業務システムと現場の連携により課題解決を目指している(図5)。当社がこれまで提供してきたソリューションは、(1)現場をセンシングによりデータ化し、(2)収集したデータを業務システムに伝送・蓄積し、(3)蓄積データを分析・解析し知見を創造し、(4)知見を現場へ展開して活用して解決するという、共通の構造を有している。そこで、長年培った無線通信のノウハウや実績を全事業のプラットフォームとして位置づけ、カメラを始めとした現場をセンシングするエッジプロダクト、AIによるデータ活用を行うデータプラットフォームと組み合わせ、現場の多様な情報を収集し、集約・蓄積して、分析する仕組みをソリューション共通の基盤として構築するプラットフォーム構想の実現を進めている(図6)。当社は業務用無線を始めとした狭帯域の無線から5G/Beyond 5Gに至る広帯域の無線まで、免許帯が必要な周波数帯を中心に幅広い無線通信のノウハウ・経験を有し、屋外から工場内まで多様な現場環境に応じた無線通信環境の提供を実現する。この基盤上に、目的に応じた業務アプリケーションを実装することで、顧客ニーズに応じたトータルソリューションの各分野への迅速提供を可能とする。今後、防災業務支援サービスや現場最適型ソリューションも、本プラットフォーム上に実現する業務アプリケーションとして拡充を図っていく。



図5: 当社の目指す姿(日清紡ホールディングス決算説明資料より抜粋⁵⁾)

⁵ 日清紡ホールディングス 2024年第2四半期決算説明資料 日立国際電気(当時)事業概要 (p.16)



※ LTEは、欧州電気通信標準協会（ETSI）の商標または登録商標です。
 ※ Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの商標または登録商標です。

図6：プラットフォーム構想(日清紡ホールディングス決算説明資料より抜粋⁶、加筆修正)

5. まとめ

本稿では、当社が提供を進める公共分野向けの防災業務支援サービスと、製造分野向けの現場最適型ソリューション、また、これらのソリューション提供を加速するための当社のプラットフォーム構想について紹介した。当社は無線通信技術や映像処理技術をコアとしたシステム・プロダクトの長年の提供によるノウハウと、お客様の業務理解を通じて、IT 技術を活用して課題解決を図るソリューションの開発および提供を進めている。今後も、これらのノウハウを埋め込んだプラットフォーム実現の構想を基に、インフラの老朽化対策や現場作業の効率化などさらなる社会課題の解決や DX 実現に向けたソリューション提供に積極的に取り組んで行く。システムイノベーションセンターに参加の皆様とも連携しながら、安心・安全な社会の実現に貢献していきたい。

(2025年4月21日原稿受領:SIC ニュースレターVol.7.5 に掲載)

⁶ 日清紡ホールディングス 2024 年第 2 四半期決算説明資料 日立国際電気(当時)事業概要 (p.20)

技術紹介2 原子力防災と避難シミュレーション

株式会社構造計画研究所
執行役員 創造工学部 部長 米山照彦氏
同 小山智加氏
社会デザイン・マーケティング部 小野晋太郎氏

1. はじめに

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所の事故(以降、「福島事故」と言う。)では、約15万人が広範囲に避難を余儀なくされ、大きな混乱を招いた[1]。この事故以降、我が国では原子力防災体制の見直しが行われ、原子力発電所周辺の自治体では広域避難計画の見直しが進められている。

広域避難計画の策定においては、避難にかかる時間や避難時の課題を事前に把握することが重要となり、その検討には、避難時間推定(ETE:Evacuation Time Estimation。以降、「ETE」と言う。)と呼ばれるコンピュータシミュレーションが活用されている。これは、コンピュータ上に避難者や道路ネットワークなどを含む人工社会を構築し、避難状況をシミュレートするものである。その結果として、避難時間の把握、避難状況の傾向の把握や混雑などの課題の抽出、それらの課題に対する対策の検討やその効果の検証に活用されている。

構造計画研究所では、2011年の福島事故以降、これまで約14年にわたり、原子力発電所周辺の自治体を対象に、数十件に及ぶ原子力発電所災害(原子力災害)時の避難に係るプロジェクトを実施してきた。ここでは、我が国における原子力防災における ETE の活用とその効果、これまでの発展、そして現状の課題について述べる。

2. 福島事故後の原子力防災の変化

2011年3月の福島事故では、約15万人が広範囲に避難を余儀なくされ、長い渋滞が発生し、避難先も二転三転となる等、大きな混乱を招いた[1]。福島事故時の避難時の状況を図1に示す。



図1 福島事故の避難時の状況[2]

この福島事故以降、原子力防災体制の見直しが進められ、原子力発電所周辺の自治体では広域避難計画の見直しが進められている。

2012年10月には原子力規制委員会による「原子力災害対策指針」が制定された[3]。また、各自治体では ETE と呼ばれるコンピュータシミュレーションが自治体で実施され、2016年4月には、内閣府から ETE の手順を示す「原子力災害を想定した避難時間推計 基本的な考え方と手順 ガイダンス」(ETE ガイダンス)[4]が公表された。

さらに、原子力発電所の再稼働に向けた動きが高まるにつれ、避難計画の具体化や、避難計画上の課題に対処するための具体的な対策の実施とその評価への要請が高まっている。福島事故以降の原子力防災に係る国と地方自治体の動きを図 2 に示す。

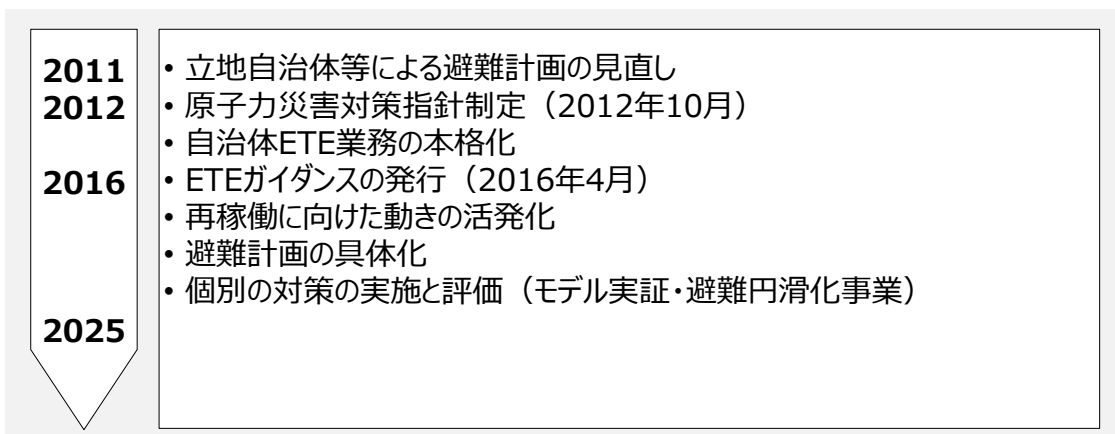


図 2 福島事故以降の原子力防災に係る国と地方自治体の動き

原子力災害が発生した場合に影響を受ける可能性のある地域については、原子力災害時の対策を講じる範囲として、国際原子力機関(IAEA)の考え方に基づき、PAZ (Precautionary Action Zone: 予防的防護措置を準備する区域。原子力施設から概ね 5km)とUPZ(Urgent Protective action planning Zone: 緊急防護措置を準備する区域。原子力施設から概ね 5~30km)の2種類の原子力災害対策重点区域が設定されている。原子力災害対策重点区域のイメージを図 3 に示す。

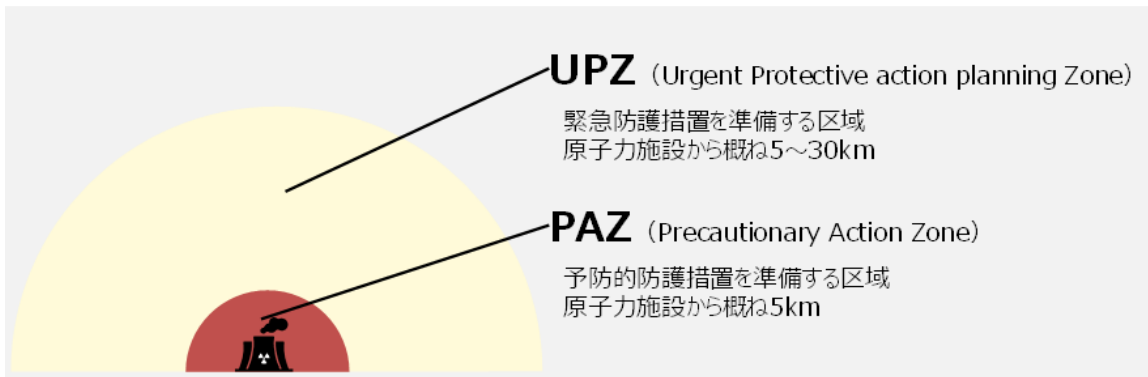


図 3 原子力発電所災害対策重点区域のイメージ

原子力災害対策重点区域の住民は、事故の進展に応じて段階的に避難または屋内退避といった防護措置を行う。PAZの住民は緊急時活動レベル(EAL:Emergency Action Level)、UPZの住民は運用上の介入レベル(OIL:Operational Intervention Level)といった状況の推移に応じて避難等の防護措置を行う。緊急時の防護措置の流れを図4に示す。

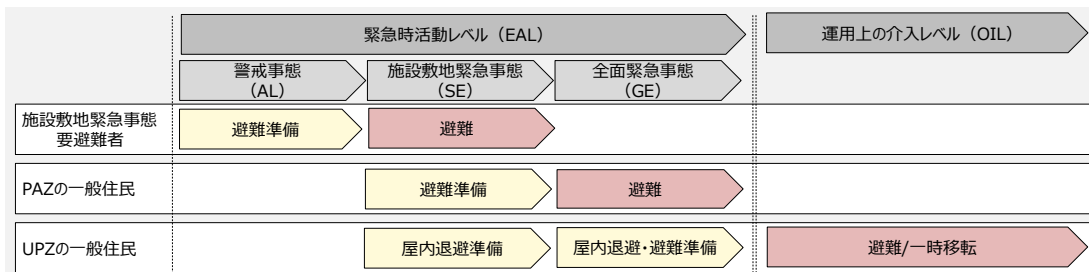


図4 緊急時の防護措置の流れ

3. ETE の位置づけとシミュレーションの利点

これらの地域からの避難は数万人から数十万人規模と大規模となるため、広域避難計画の策定が極めて重要となる。日本では、このような広域避難計画は原子力発電所周辺の自治体によって策定されている。

この過程において、ETE と呼ばれるコンピュータシミュレーションが用いられる。ETE とは、コンピュータ上に避難者や道路ネットワークなどを含む人工社会を構築し、避難状況をシミュレートするものである。現在の避難計画に基づいて ETE を実施し、ETE の結果から現在の計画の課題を抽出し、避難計画の改善策を検討する。

ETE の交通シミュレーションの例として、マイクロ交通シミュレータ PTV Vissim のイメージを図5に示す。

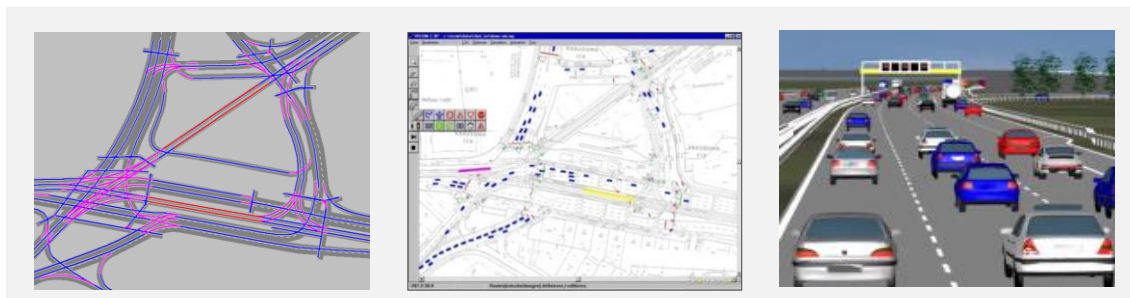


図5 ETE の交通シミュレーションのイメージ[5]

大規模避難においては、想定される避難状況、避難に要する時間、避難時の課題などを事前に把握することが重要となる。現実世界で大規模避難の状況を模擬することは難しいが、コンピュータシミュレーションでは、そうした状況を模擬できるだけでなく、昼夜の人口分布の違い、天候による交通状況の違い、自然災害による被害に伴う避難経路への影響など、様々な条件を検証することが可能となる。そして、避難状況の傾向の把握や、渋滞による避難時間の遅延などの課題の抽出、それらの対策の検討や効果検証に活用できる。

ここで、ETE の結果の例をいくつか示す。

まず、避難時間のグラフを図 6 に示す。このように、避難経路上の経由地と避難先の到着時刻を可視化することで、避難元から任意の地点などの間の移動に要する時間を把握することができる。また、米国の研究などを踏まえると、避難時間の結果の検証にあたっては、避難者全員が避難を完了する 100%避難時間は、赤信号等の影響を大きく受けた最後の避難者の行動に依存するため、全避難者の 90%が避難を完了する時刻(90%避難時間)の情報も併せて検証することが重要である[6]。

また、避難完了率のグラフを図 7 に示す。このように、避難完了率の推移を可視化することで、避難状況のパターンが変化する時間が明確になり、その理由を検証することができる。例えば、推移が停滞している時間帯があれば、そこに避難のボトルネックが生じている可能性があると考えられ、このような可視化を行うことで、避難における課題の特定が容易になる。

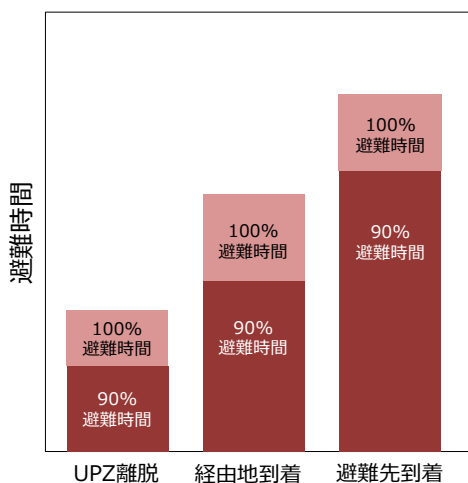


図 6 避難時間のグラフ

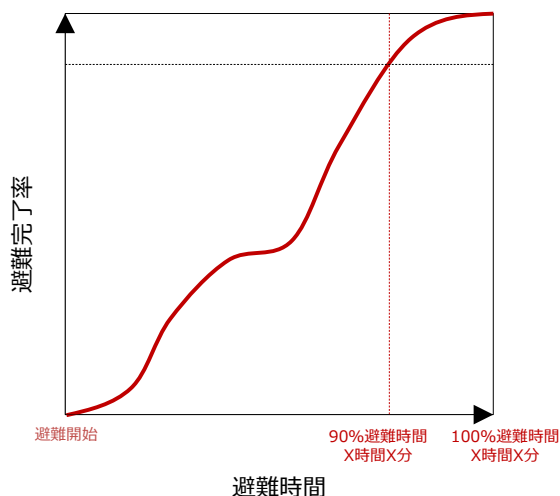


図 7 避難完了率のグラフ

次に、交通状況を可視化することで、いつどこで渋滞が発生しているかを明確に把握することができる。交通状況の可視化のイメージを図 8 に示す。このイメージは、UPZ 圏内の住民数十万人が避難計画に基づき UPZ 圏外へ車で避難することを想定して作成したものであり、赤丸で示した経由地を起点として渋滞が発生していることがわかる。このように、交通状況を可視化することで、避難時にどこで渋滞が発生しているかを簡潔に把握することができる。

また、交通状況の時系列推移のイメージを図 9 に示す。これは、大規模避難が発生した場合に避難先周辺がどのようになるかをイメージしたものであり、特定の経路に多数の車両が集中することで渋滞が発生し、時間が経つにつれて渋滞が長くなっていることがわかる。このように、交通状況を時系列に可視化することで、いつ、どこまで渋滞が延伸するかを把握することができる。

さらに、対策前後の交通状況のイメージを図 10 に示す。これは、避難計画に基づいたシミュレーション結果と、シミュレーションによって判明した渋滞緩和策を実施したシミュレーション結果を比較したものであり、対策として避難経路を分散させたことで、車両の集中が緩和され、渋滞が緩和されていることがわかる。このように、課題に対する対策を検証する際に、対策前後の交通状況を可視化することで、対策の効果を把握することができる。

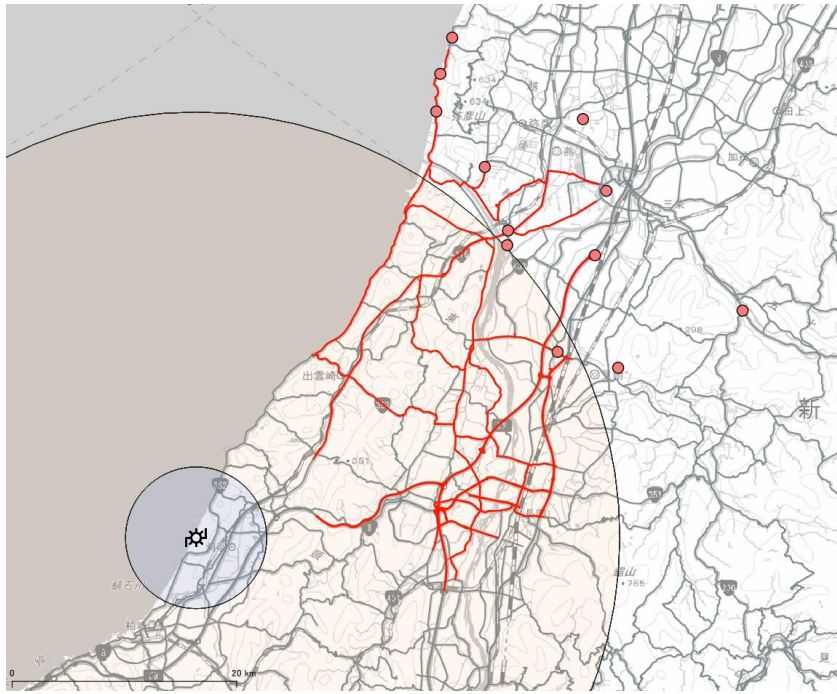


図 8 交通状況の可視化のイメージ

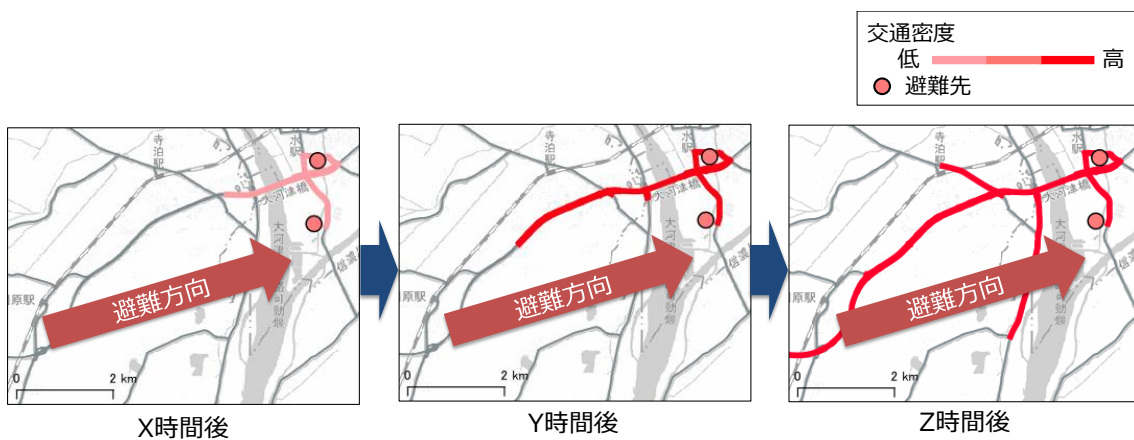


図 9 交通状況の時系列推移のイメージ

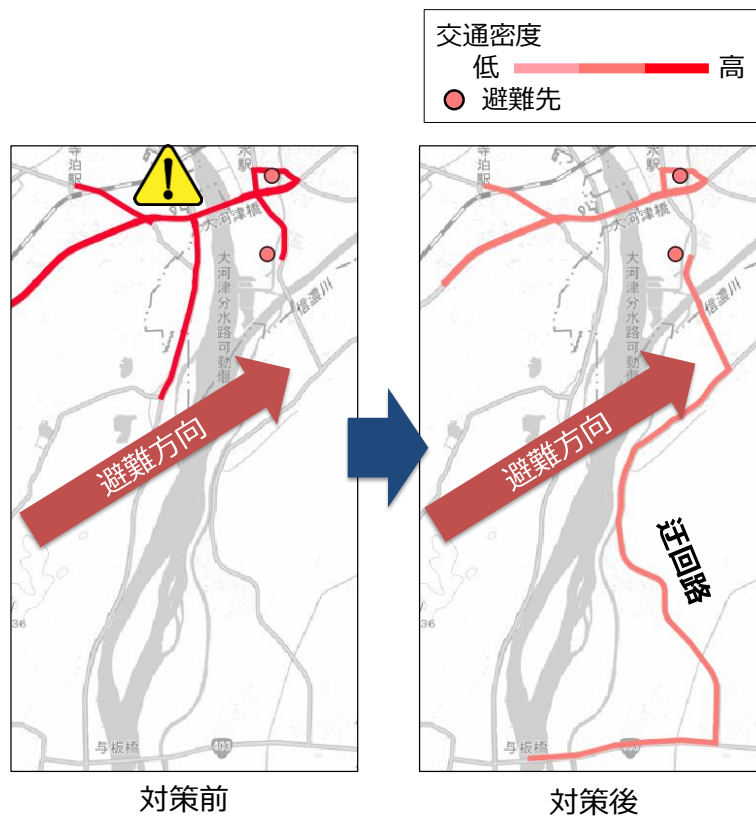


図 10 対策前後の交通状況のイメージ

ここで、シミュレーションの利点について述べる。

第一に、前述のように、シミュレーションでは、様々な条件における大規模避難の状況を作り出し、現在の計画を様々な角度から検証することができる。例えば、渋滞が懸念される避難経路上での渋滞の発生有無を確認したり、思わぬ場所で渋滞が発生する可能性を把握したりすることができる。現実世界では大規模な避難状況を作り出すことは不可能であったり、多大なコストがかかったりするが、コンピュータシミュレーションであれば比較的容易にこうした検証が可能となる。

第二に、これらの結果に基づいて、課題への対策を検討し、シミュレーションによってその効果を検証することができる。シミュレーションでは、様々な条件の変更が可能となるため、例えば、計画されている避難経路上で渋滞が発生することがわかった場合に、迂回路を設定したらどうなるか、地域ごとに避難開始のタイミングをずらしたらどうなるかなどの対策を検討し、これらの対策の効果検証の結果を比較することで、どの対策が有効かを評価することができる。

第三に、大規模避難の状況を可視化し、対策の有効性を検証した結果は、避難計画の策定や計画変更の合意形成に活用できる。シミュレーション結果の避難時間などを数値化・グラフ化することで、結果を客観的かつ定量的に比較・評価することができ、さらに交通状況などを地図上に可視化することで、避難の様相を容易に把握できる。自治体と住民など、立場の異なる関係者であっても、このような同一の情報を用いて議論できるようになる。実際に、原子力発電所周辺の自治体が避難計画を見直すにあたり、ETEを実施し、その結果を迅速な避難方法の検討や住民への避難行動の啓発に活用している。これもシミュレーションのメリットと言えるであろう。

第四に、シミュレーションを実施する前に、現実世界の避難計画をモデル化する段階で、避難計画そのものを見直すことができる。モデル化とは、現実世界における影響要素を仮想空間上に設定することであり、避難のモデル化とは、シミュレーション空間において避難状況を模擬できるように設定することを意味する。このモデル化のプロセスを通じて、現在の避難計画で考慮されていないことが明らかになる。これらを想定したり補ったりすることで、より実効性のある避難計画を策定できる。

このように、シミュレーションには多くの利点があり、ETEは避難計画の実効性を高めるための強力な手法となる。

4. ETEの実施手順

ETEの主な実施手順は、「避難計画の反映・避難シナリオの想定」、「避難状況の模擬・課題抽出」および「対策検討・効果検証」となる。ETEの実施手順を図11に示す。

まず、「避難計画の反映・避難シナリオの想定」のフェーズでは、シミュレーションの前提条件として、避難計画の内容（人口、避難開始時期、避難元、避難先、経路、交通手段等）を整理する。さらに、昼夜や放射性物質の拡散方向など、避難時の状況を想定したシミュレーションシナリオを整備し、これらの前提条件とシナリオをシミュレーションモデルとして設定する。

なお、シミュレーションを行う前には、シミュレーションモデルの妥当性を検証する必要がある。例えば、シミュレーションモデル上の特定区間の移動時間が現実の所要時間と同じかどうか、シミュレーションモデル上での平常時の渋滞の様相が現実の様相と類似しているかどうか等を検証して、モデルの妥当性を確認する。

次に、「避難状況の模擬・課題抽出」のフェーズでは、シミュレーションを実施し、その結果を分析する。分析は主に時間的分析と空間的分析の2つとなる。時間的分析の例としては、避難元から避難先までの避難時間の分析が挙げられる。また、空間的分析の例としては、避難経路上の渋滞の分析が挙げられる。これらの分析により、避難が遅延する原因を明らかにし、避難計画の課題を抽出する。

最後に、「対策検討・効果検証」のフェーズでは、特定された課題に対する対策を検し、その対策の効果を検証する。交通渋滞対策としては、例えば、交通誘導や規制、利用する避難経路の変更、信号設定や経路変更などが含まれる。このように様々な対策を検討し、実際のシミュレーションに反映させることで、その効果を検証し、改善に向けた提言を行う。



図 11 ETE の実施手順

5. ETE の発展

日本の ETE は、もともと米国の ETE をベースとしていた。2016年には内閣府から「原子力災害を想定した避難時間推計 基本的な考え方と手順 ガイダンス」(ETE ガイダンス)[4]が公表され、ここでは米国の NUREG-0654[7]および NUREG/CR-7002[6]を参考にしている。しかし、福島事故から14年以上が経過し、ETE は日本独自の発展を遂げ、日本の原子力防災体制の整備とともに、今日では、より詳細なものとなっている。

ここで、日本における ETE の3つの特徴的な点を紹介する。

1点目は、シミュレーションにおいて個人の避難時間まで推計することである。米国では、避難者の 90%または 100%が避難先に到着するまでの時間を主な指標としているのに対して、日本では、これらの指標に加えて、個人が避難するまでにどれくらいの時間がかかるかという点も重要な指標とされている。

90%避難時間や 100%避難時間といった全体的な避難時間は、自治体が避難指示を发出してから避難者が避難を完了するまで、避難プロセス全体としてどれくらいの時間がかかるかを把握するためのものであり、主に避難行動を管理する自治体にとって有用な情報となる。

他方で、個人の避難時間は、避難者個人にとっての重要な情報となる。例えば、自家用車で避難する場合、避難にどれくらいの時間がかかるかが分かれば、避難状況の具体的なイメージが掴みやすくなり、これは原子力災害発生時の避難行動に係る啓発活動にも繋がる。

2点目は、避難退域時検査に要する時間をシミュレーションに反映させることである。避難退域時検査とは、放射性物質の拡散後の避難時において、放射性物質による汚染が基準以下であるかどうかを避難者や避難車両に対して確認するものである。汚染が基準を超えている場合は、その場で除染が行われる。避難退域時検査の訓練の様子を図 12 に示す。

放射性物質の拡散後の避難時においては、このような検査自体に係る時間だけでなく、避難退域時検査場所に多くの避難車両が集中することによる交通渋滞の影響を把握するために、この避難退域時検査をシミュレーションモデル上に反映させる。



図 12 避難退域時検査の訓練の様子 [8]

3点目は、自主避難者をシミュレーションに反映させることである。福島事故時の避難はさまざまな問題を浮き彫りにしたが、その1つが自主避難者の存在である。自主避難者とは、避難指示が発令される前の段階から自主的に避難する(避難指示に基づかない)避難者のことである。国会事故調によると、福島では避難指示が発令される前に全避難者の約4割が自主的に避難している[1]。これらの自主避難者による交通は、本来の早急に避難しなければならない避難者の避難を妨げる可能性があるため、シミュレーションに反映する。実際、ETE では、自主避難者による交通が避難状況に大きな影響を及ぼすことが示されている。

6. 原子力災害時の避難に係る現状と課題

前述したように、構造計画研究所では、2011年の福島事故以降、これまで約14年にわたり、原子力発電所周辺の自治体を対象に、ETE など数十件に及ぶ原子力災害時の避難に係るプロジェクトを実施してきた。その経験を踏まえて述べると、各自治体において共通する主な課題は、避難退域時検査による交通渋滞と自主避難による交通渋滞の2点である。これらが、避難を遅延させる主な要因となっている。

まず、避難退域時検査について述べると、ETE の結果では、検査に伴う交通渋滞によって避難時間が長くなるという現象が見られる。避難退域時検査の本来の意味は、避難者の被ばくの有無を確認し、基準を超えた場合には除染することで、避難者の被ばくに対する安全・安心を確保するというものである。しかしながら、検査による渋滞は、屋外の滞在時間を長引かせ、かえって避難中の被ばくりスクを高める可能性がある。他方で、仮に避難退域時検査を行わないとすると、避難時間がより短くなることで避難中の被ばくりスクは低くなるものの、今度は検査による安全・安心が確保できなくなる。また、汚染地域の拡大につながる可能性も考えられる。これは、避難時間すなわち被ばくりスクと安全・安心のジレンマと言える。

次に、自主避難について述べると、自主避難を抑制することで、本来の早急に避難しなければならぬ避難者の避難時間を短縮させることが期待できる。一方で、避難指示は出ていないものの、原子力災害を目の前にして「怖い」「早く遠くに逃げたい」という人の気持ちを抑制することはできない。さらに、自然災害との複合災害であった場合は、自宅等が倒壊して、そもそもその場に居続けられないということも考えられる。このように考えると、自主避難を抑制することは容易ではない。これもまた、原子力災害時の避難に係るジレンマである。

原子力災害時の避難は、このような社会的ジレンマを孕んでいる。ETE の役割は、こうした意見が分かれる議論について、その意思決定や合意形成のための定量的な情報を適切に提供することだと考える。

7. 将来の展望

避難の様相は、当該地域の人口や人口分布、道路ネットワークなどの社会的変化によって変わる可能性があり、これに伴い、ETE を繰り返し実施することが考えられる。現状では ETE の実施には時間とコストがかかるが、今後は ETE の技術の発展によってそれらを軽減し、ETE の実施のハードルを下げることで、このような社会変化が起こった場合でも、比較的容易に避難計画の再検証やその見直しができることが期待できる。防災に終わりがないうように、避難計画の改善のサイクルを回し続けることが重要であり、ETE の技術の発展が、そのサイクル促進に寄与できれば良いと考える。

さらに、シミュレーションに対する社会的なリテラシーの向上も重要だと考える。ETE は確定的な物理法則に基づくシミュレーションではなく、ある想定をもって不確実な現実社会を模擬するシミュレーションである。正確な予測というよりは、避難中に起こりうる現象を検証し、避難計画を改善していくということに重点を置くという観点が重要となる。

原子力災害時の避難に係る意思決定プロセスの中で、ETE といったシミュレーションがより多く活用され、原子力防災のさらなる発展に貢献することを期待する。

【参考文献】

- [1] 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 国会事故調(2012年)
- [2] 内閣府, “福祉避難所ワーキンググループ(第1回)資料 7「緊急避難と移送のリスク」(2015年),” [オンライン]. Available: <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/kentokai/hinanzuyokakuho/wg/pdf/dailkai/siryu7.pdf>.
- [3] 原子力規制委員会, “原子力災害対策指針(2012年制定、2024年全面改正),” [オンライン]. Available: <https://www.nra.go.jp/data/000473921.pdf>
- [4] 内閣府, “原子力災害を想定した避難時間推計 基本的な考え方と手順 ガイダンス(2016年),” [オンライン]. Available: https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/pdf/02_ete_guidance.pdf
- [5] PTV Group, PTV Vissim(最終閲覧日:2025年8月28日), [オンライン]. Available: <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim>.

- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “NUREG/CR-7002 Criteria for Development of Evacuation Time Estimate Studies(2011年),” [オンライン]. Available: <https://www.nrc.gov/docs/ML1130/ML113010515.pdf>.
- [7] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “NUREG-0654 FEMA-REP-1 Rev.1 Criteria for Preparation and Evaluation of Radiological Emergency Response(1980年),” [オンライン]. Available: <https://www.nrc.gov/docs/ML0404/ML040420012.pdf>.
- [8] 内閣府, “令和4年度原子力総合防災訓練 実施成果報告書 資料,” [オンライン]. Available: https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/kunren/pdf/07_r4seika.pdf.

(2025年8月28日原稿受領:SIC ニュースレターVol.7.9に掲載)

IV エッセイ

Unity3.0: エネルギーと情報をつなぐ新文明論

—システム思考とワットビット連携にもとづくイチゴ大福的宇宙仮説—

東京電力パワーグリッド株式会社

取締役 副社長執行役員 岡本 浩氏(SIC理事)

本稿は、筆者による思考実験的仮説として、宇宙とエネルギーの構造を情報システム論の観点から再構成する「Unity 3.0」という構想を紹介し、それを電力(ワット)×情報(ビット)の連携で社会実装する試みと接続するものです。

私たちは今、複雑性と非線形性を極めた時代に生きています。気候危機、地政学的分断、超高齢化社会、そして AI の急速な進展。こうした課題は、もはや単一の専門領域や従来型の線形思考では捉えきれません。必要なのは、あらゆるものの関係性を System of Systems として統合的に捉えるシステム思考です。

そうした視座から筆者が提案するのが、Unity 3.0 という構想です[1]。これは、宇宙・意識・エネルギー・情報を一体的に捉え、文明そのもののあり方を再設計する、超学際的なフレームワークです。ここでは Unity 1.0 はニュートン力学やマクスウェル電磁気学、Unity 2.0 は相対論と量子論による世界観を意味しています。

Unity 3.0 は未検証の仮説にすぎませんが、量子力学、ホログラフィック宇宙論、複雑系科学、ループ量子重力理論などの知見と調和し、現代科学との深刻な矛盾を含まない“未来思考の試み”です。さらに、量子論の観測問題(量子力学に観測という過程をどのように位置づけるのかという問題)、人間原理(宇宙を観測する人類が生まれるように物理定数が微調整されているという仮説)、意識のハードプロブレム(物質および電氣的・化学的反應の集合体である脳から、どのようにして主観的な意識体験というものが生まれるのかという難問)、時間の矢といった現代科学の根本的な謎を統合的に説明できる可能性すら秘めています。

宇宙 OS とその二層構造: WST-MEB と WGE-MEB

Unity 3.0 の核心は、宇宙を OS(オペレーティングシステム)として捉える発想にあります。宇宙は二層構造をもつエネルギーの2つの様態(Mode of Energy Being)として定義されます(図1参照:「宇宙 OS」の二層構造と進化アルゴリズム)。

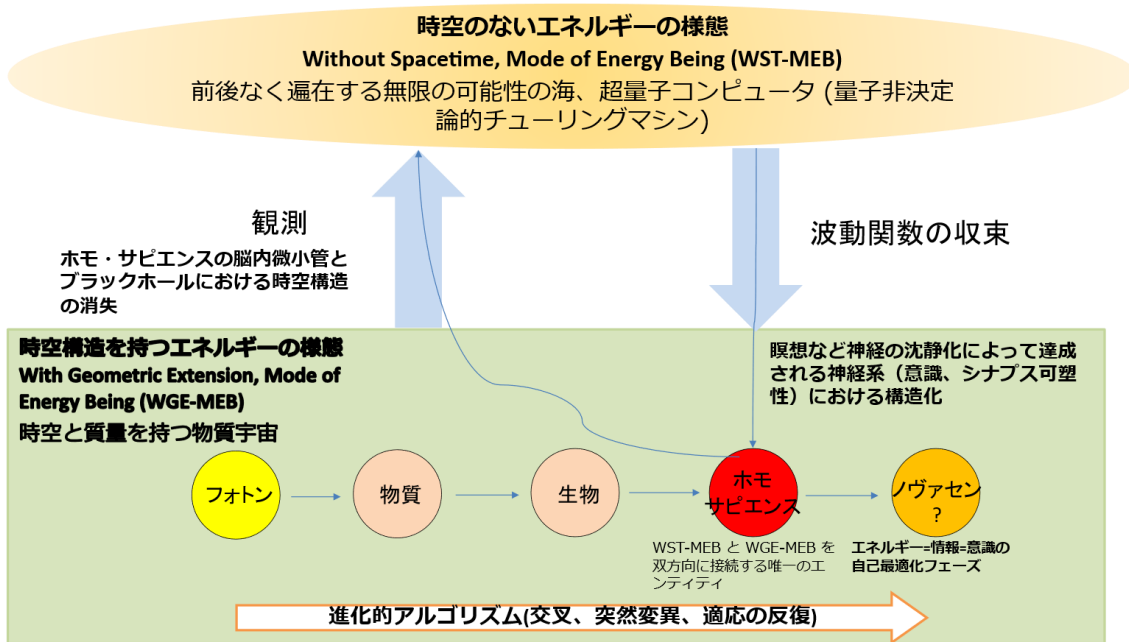


図1. Unity 3.0 仮説における宇宙の二層構造[1]

WST-MEB(Without Space-Time Mode of Energy Being):時空を持たないエネルギーの様態で、全ての可能性が量的に存在し、エネルギーが無数の可能性を有する重畳として非局所的に遍在。宇宙スケールの量子コンピュータ、より正確には量子非決定論的チューリングマシン QNTM(Quantum Non-deterministic Turing Machine、量子重ね合わせと干渉効果を利用して複数の計算経路を並列処理する理論的計算モデル)として、あらゆる可能性が同時に存在する量子的重ね合わせの状態。

WGE-MEB(With Geometric Extension Mode of Energy Being):私たちが体験している時空構造をもつ物理宇宙であり、非局所的なエネルギーが時間・空間の中で情報によって構造として具象化される(最新のループ量子重力理論では、時空は根源的存在ではなく派生的に生じるとされる)。分子構造、遺伝子、文字などはすべてデジタルコードとして表現され、これらが組み合わせられることで進化が生じる。進化アルゴリズムの具現化された状態であり、観測によって選択された特定の構造が物理的現実として顕現。

この二層は、全体として量子非決定論的チューリングマシンによる進化アルゴリズム演算を実行しますが、図1に示した通り、人類の意識(観測)を通じて接続されます。つまり、人類の意識は、宇宙が自身を知覚し、自己進化するための”センサーかつアクチュエーター”であるという考えです。

観測と自己組織化の不可分な関係

量子論では観測が波動から粒子への波束収束を引き起こすと考えられています。これを実世界(WGE-MEB)に展開すると、エネルギーがWGE-MEBにおいて構造化され自己組織化するというシナリオしか時空という舞台に現れることはありません。その理由は、能動的観測者、すなわち何かの意図を持って観測を行う観測者によって観測されなければWST-MEBからWGE-MEBへの波束収束も、WGE-MEBにおける自己組織化も起こり得ないからです。言い換えれば宇宙という非決定論的チューリングマシンの受理条件は、エネルギーの自己組織化による進化でWGE-MEBに能動的観測者が現れることです。

例えば、写真機で光子を写すと粒子として映り、波動から粒子への波束収束が起きます。科学者や技術者は、意識のない写真機でも波束収束が起きると考えがちですが、重要なのは「観測したい、記録したい」という意図がなければ、そもそも写真機が発明されることも設置されることもないという点です。人類がいなければ写真機も存在しないのです。これが「能動的観測」の本質です。「観測者なしの観測」という前提は、形而上学的であり、現実世界で意味を持ち得ぬ仮定と言えるでしょう。エネルギーが自己組織化するためには可観測性が不可欠なのです。

さらに、能動的観測者たる人類は観測結果に基づいて行動します。この行動がWGE-MEBを変えていくこと(可制御性)で自己組織化が達成されるという循環的プロセスが、宇宙の創造的進化の核心となります。

ワット(Watts)とビット(Bits)の連携:技術実装への橋渡し

この仮説の示唆するものは、単なるメタファーにとどまるものではありません。筆者らはこの「エネルギーと情報の統合」という原理を、ワット・ビット連携という形で現実の社会インフラに実装しようとしています。

東京電力パワーグリッドが提唱するワット・ビット連携とMESH(Machine-learning Energy System Holistic)構想では、電力(Watts)と情報(Bits)のやりとりがリアルタイムで行われ、価格信号やAIの学習を通じて“自己組織的なエネルギー生態系”が形成されます[2]。その構造はまさに、Unity 3.0が示す宇宙OSのマクロな構造と響き合っており、理論と実装の“相似性”がここに現れています。宇宙OSモデルにおける「観測に基づく選択と顕現」のメカニズムを、社会インフラとして実装する試みといえます。

倫理的観測者としてのエンジニア——技術と意識の融合へ

Unity 3.0 が特に強調するのは、人類の“観測”が物理現象に影響を及ぼすという仮説です。これは量子論における「観測問題」やペンローズ、ハメロフによって提起されている「Orch OR 理論」(意識は脳内の微小管に量子論的に生じているとする仮説)に着想を得たもので、観測とは単なる測定行為ではなく、意図を持った“選択”であると捉えます。このように意図を持ち行動をとる観測を「能動的観測」と言えるでしょう。

ここで登場するのが「倫理的観測者(Ethical Observer)」という概念です。これは、「誰が、どのような価値観で、どのような目的のために観測(設計・介入)するのか」という、これまで技術分野で軽視されてきた人間の“内面性”を問う存在です。

例えば、ワット・ビット連携においては、再エネの導入量を最大化するだけでなく、「誰のために、どのようなコミュニティにとって、どのような価値を提供するのか」といった社会的な倫理判断軸と社会実装に向けた行動による実践が不可欠です。このような判断を実践し続ける技術者こそ、Unity 3.0 が提唱する「宇宙において能動的に行動する倫理的観測者」となります。

なお、ペンローズ、ハメロフの量子脳仮説については、最近になって脳の量子論的作用に関する実測が徐々に進んでおり、将来的には実証される可能性があります。

宇宙 OS の本質的セキュリティ機能

宇宙 OS には自己組織化要件、すなわち倫理的観察者のみにアクセスを許可するという一種の制限機能が備わっています。破壊的な意図を持つ存在は根本的なレベルでのアクセスができない仕組みとなっているのです。これは破壊は自己組織化の原理に反するからであり、宇宙に内在する倫理的セキュリティシステムと捉えることができます。

このような宇宙の天才的な設計は、創造的・構築的なプロセスのみを許容し、真の革新や変革は根本的に真善美を目指す創造的な意図からのみ生まれるという原理を示唆しています。

和の知と曼荼羅的構造：日本文化が拓く統合知

Unity 3.0 の着想は、東洋思想、とりわけ真言密教の両界曼荼羅から得たものです。曼荼羅とは、宇宙の全体構造を視覚的に表現した図像体系であり、WST-MEB は大日如来を中心に据える胎藏界曼荼羅、WGE-MEB は構造を持つ金剛界曼荼羅と対応します。「縁起」や「空」といった非二元論的世界観は、現代のシステム論や複雑系科学とも高い親和性を示します。あらゆる関係(縁)は、調和と循環(円)を生み出します。日本的な En(縁) = En(円)の原理が、自己組織化と共創の根底にあると言えるでしょう。

Unity 3.0 は、未来を受け身に「予測」するのではなく、意識的に「共創」するための知的装置です。そこでは、技術、情報、エネルギー、意識、倫理が一体となって“創発するシステム”が構想され、人間中心ではなく、エネルギー中心の進化的世界観が提示されます。

それは単なる「工学」ではなく、「宇宙の自己組織化への参加行為」としてのエンジニアリングであり、「日本発の知」が次なる地球文明の指針を示す可能性でもあります。古くは神仏習合、そして新しくは「すき焼き」、「イチゴ大福」など、本来は異なるもの同士を、見事に融合し昇華する日本文化の強みを発揮すべき時です。私の仮説も、形がはっきりしない外側の「もち」(WST-MEB)から、形と味がくっきりした「イチゴ」(WGE-MEB)が現れると考えれば、異なるものをつないでいるといえるでしょう(図 2)。

「私たちは、どのような意識で世界を観測し、どのような未来を選択するのか？」

Unity 3.0 は、その問いを私たちに投げかけています。そして、宇宙 OS をアップデートして「ノヴァセン」(新たな意識段階や文明形態)への移行を目指す革命的な試みとして、私たちの存在の意味に新たな可能性を示唆しています。

エネルギーそのものの自己組織化を根源とする宇宙の設計の精妙さに畏敬の念を抱きながら、私たちもまたその創造的なプロセスの能動的な参加者となることを選び取るとき、真の文明的進化への道が開かれるのではないのでしょうか。

選ばれる未来ではなく、選び取る未来を創造する。それが、Unity 3.0 の本質なのです。

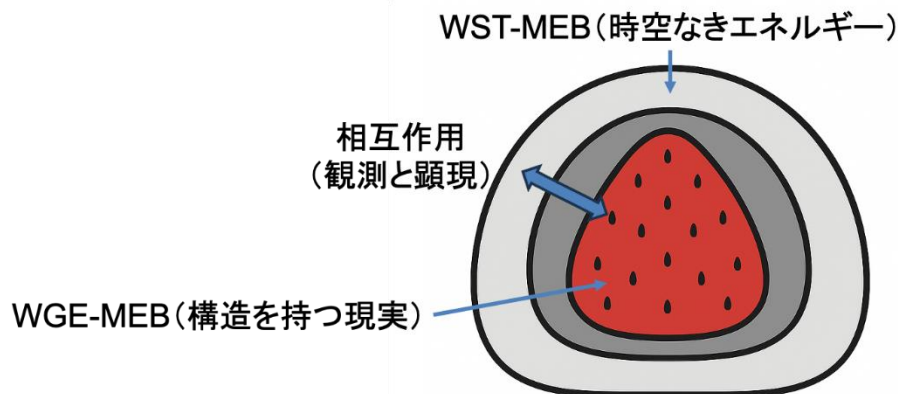


図 2. イチゴ大福

【参考文献】

[1] Okamoto. H, "Unity 3.0 Part 2: The Cosmic Operating System and Energy's Fundamental Role", ELECTRA, No. 340, June 2025
<http://electra.cigre.org/>

[2] 岡本浩、高野雅晴:「経営に活かす生成 AI エネルギー論:日本企業の伸びしろを探せ」、日経新聞出版(2025年4月)

(2025年4月12日原稿受領:SIC ニュースレターVol.7.7に掲載)

V 2025年度 SIC役員一覧

理事・監事

代表理事・センター長	浦川 伸一	株式会社スカイエージ/株式会社スカイエージネクスト 代表取締役
理事・実行委員長	松本 隆明	元・独立行政法人情報処理推進機構 顧問
理事・学術協議会主査	藤田 政之	金沢工業大学 教授・東京科学大学名誉教授
理事	青山 和浩	東京大学大学院工学系研究科人工物工学センター 教授
理事	遠藤 薫	学習院大学名誉教授
理事	岡本 浩	東京電力パワーグリッド株式会社 取締役 副社長執行役員
理事	鹿子木宏明	横河電機株式会社 取締役 デジタルソリューション統括本部 デジタル戦略本部長
理事	木谷 昭博	マツダ株式会社 常務取締役員兼 CIO
理事	久間 和生	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 理事長
理事	齊藤 裕	独立行政法人情報処理推進機構 理事長 DADC センター長
理事	島田 太郎	株式会社東芝 代表取締役 社長執行役員 CEO
理事	高林 幹夫	三菱電機株式会社 執行役員 情報技術総合研究所 所長
理事	服部 正太	株式会社構造計画研究所ホールディングス 取締役 代表執行役
監事	船橋 誠壽	元・特定非営利活動法人横断型基幹科学技術研究団体連合 理事
監事	新谷 勝利	早稲田大学 招聘研究員

(参考)

顧問	小林 敬幸	株式会社野村総合研究所 専務取締役 コンサルティング事業本部長
----	-------	---------------------------------

VI 2025年度 SIC会員企業一覧

正会員

SCSK株式会社	NTTドコモソリューションズ株式会社
株式会社NTTドコモ	株式会社クエスト
株式会社構造計画研究所	株式会社国際電気
株式会社JSOL	株式会社東芝
株式会社ニューチャーネットワークス	株式会社野村総合研究所
株式会社日立産業制御ソリューションズ	株式会社日立システムズ
株式会社日立製作所 研究開発グループ システムイノベーションセンタ	損害保険ジャパン株式会社
東京電力パワーグリッド株式会社	日鉄ソリューションズ株式会社
日本郵船グループ株式会社MTI	マツダ株式会社
三菱電機株式会社	横河電機株式会社
ロジスティード株式会社	

準会員

アメリス株式会社	電腦バンク株式会社
東京ガス株式会社	三菱重工業株式会社 デジタルイノベーション本部

(2025年12月末日現在:五十音順)

SICニューズレター「論説・寄稿」集(第6巻)(2025年度掲載分)

発行者 : 一般社団法人システムイノベーションセンター(SIC)
代表理事・センター長 浦川伸一
2026年1月15日発行 非売品

編集者 : SIC実行委員 中野一夫(構造計画研究所 HD)

事務局 : 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-12-7 ストック新宿 B-19 号
URL: <https://sysic.org> E-mail: office@sysic.org Tel.Fax: 03-5381-3567
