

3.7 システム構築方法論区分

3.7.1 合意形成

(1) 研究開発領域名

合意形成

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

実社会に関する課題について人々が有する多様な見解や選好を、相互理解を図りながら共通の理解や解決策に繋げようとする実践的かつ系統的な取り組み、及びそのプロセスに関する理論および手法論を対象とする領域。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 交渉分析

「交渉」をもっとも一般的に定義すると、「複数の利害関係者が資源の配分を巡ってコミュニケーションを行い、最終的にある結論に達するまでの過程」ということができる。ある財の取引を巡って、売り手と買い手の間で価格を巡って取り交わされるコミュニケーションは、交渉の典型例である。公共政策を巡っても、国同士、国と地方自治体、地方自治体同士、政府と企業などの間で、交渉が必要となることは多い。交渉分析の主目的は、「交渉に勝つため」「交渉で有利になるため」ではない。むしろ、相手主体と合意し、いかに共存共栄関係を築くことができるかを考察するために、交渉分析は行われる。

利害関係者が、交渉を通じて利益を得ることができる、すなわち Win-Win solution が得られると予期しているとき、交渉は始まる。交渉の中で、Win-Win solution に達することができないと利害関係者が判断した場合は、交渉は終了する。

ゲーム理論においては、その最初期の段階から交渉のモデル化が試みられている。ゲーム理論は、複数のプレイヤーが相互作用を伴いながら(相手の出方をうかがいながら)戦略的に行動する状況をモデル化するための理論であり、経済学においても、政府が規制を導入した場合の企業の反応の予測など、広く応用されている。ゲーム理論には、プレイヤー間の協力関係を前提とする協力ゲーム理論と、協力を前提としない非協力ゲーム理論が存在する。交渉そのものにおいては、決裂の可能性も存在するため、非協力ゲームによる分析がより適している。ナッシュ均衡 (Nash equilibrium) とは、非協力ゲームにおいて、「どのプレイヤーにも、現状を敢えて変更する動機がない」状態を意味する。Nash は、2人のプレイヤーが資源の取り分を巡って提案を交わす交渉を非協力ゲームとした場合、ナッシュ均衡となる資源配分が存在することを示し、これがナッシュ交渉解 (Nash bargaining solution)¹⁾と呼ばれている。さらに、非協力ゲームによって協力行動を説明するというナッシュプログラムを提唱している²⁾。

事前の交渉により合意に達し、複数プレイヤーによる提携行動が可能となった状況を記述するのが協力ゲーム理論である。協力ゲームでは、提携 (coalition) に所属するプレイヤー間で拘束的な合意が成立し得ることと、協力によって非協力的なケースよりも全体の利益が増大することを前提としている。そのため協力ゲーム理論では協力によっ

て得られた利益をプレイヤー間でいかに配分 (imputation) するかが主要な問題となる。協力ゲームの配分解に関しては、シャプレイ値 (Shapley value)³⁾を始め、数多くの解が導出されている。協力ゲーム理論の実問題への適用研究としては Young ら⁴⁾があり、その後国内外で水資源開発事業等への適用事例が蓄積されている。

また、非協力的な状態から協力的な状態に至る要因を明らかにしたいという動機から、提携が形成される過程をモデル化するものとして提携形成ゲームがある。提携形成ゲームには、提携構造を分割、すなわち複数の部分集合として記述するものと、ネットワーク、すなわち2名のプレイヤー間の協力関係の累積として記述するものがある。前者の代表例としては Shenoy⁵⁾があり、後者の代表例として Myerson⁶⁾がある。

一方、非協力ゲーム理論から導かれる理論解に対する疑義も提起されている。実験ゲーム理論 (行動ゲーム理論) においては、実験室環境での実際の人間の行動に関する結果が蓄積されている。代表例として、ある金額の現金 (例えば 1000 円) を 2 名で分け合う交渉に関する実験 (最後通牒ゲーム) を取り上げる。2 名のうち一方が配分額を提案し、もう一方はその提案を受諾するか、拒否するかを選択することができる。非協力ゲーム理論からは、後者は自分への配分額が正であれば、不公平な配分であっても (例えば自らが 1000 円中 50 円しか得られない配分であっても) 受諾するはずである。しかし実験においては、あまりにも不公平な配分を提示された後者は提案を拒否することが多い。さらには、前者の被験者の多くはそもそもそのような不公平な提案をすることは少なく、双方が 5 割前後を得られるような提案を行うことが多い⁷⁾。

実験ゲームにおける多くの知見は、個人合理性の仮定に基づいた非協力ゲームによる交渉分析の枠組みに、何らかの修正が必要なことを示唆している。利他性 (Altruism)、互酬性 (Reciprocity) 等の寄与が指摘される他、合意形成の観点から注目すべき要素として文脈 (Context) がある。

Shelling⁸⁾は 1960 年の段階において既に、協調行動において双方の期待の焦点 (フォーカルポイント) が重要な役割を果たすことを指摘している。また Liberman ら⁹⁾は、実験ゲームにおいて、「ゲームの名称」が被験者の行動に大きな影響を及ぼすことを示している。これらの研究は、既存のゲーム理論において考慮されていなかった、交渉に至るまでの経緯、経験に基づいた当事者の問題に対する認識構造等の文脈が、交渉結果に影響することを示唆している。

また、より実務的要請にこたえるための研究として、わが国の都市地域計画、防災計画等においては、ワークショップ形式等による市民参加、住民参加が導入されており、ファシリテーション (Facilitation) の重要性が認識されている。ファシリテーションは一般に、複数の関係者が討議する場で、円滑なコミュニケーションを促進するための活動を指す。一般の市民は、討議の場で理路整然と意見を述べる人々のみではない。そのため、市民参加の場においては、時に議論が発散してしまうこともある。ファシリテーター (ファシリテーションを実施する人) は、そのような発言を主旨に沿って言い換えたり、他の人の意見と結合させたり、発展させるなどして、有益な議論の実現を目指す。ただし実際のファシリテーションには経験的要素も多く、現状においては暗黙知に依存する部分も大きい。

さらに、調停 (Mediation)、仲裁 (Arbitration) 手法も導入されてきている。調停、

仲裁は共に第三者の関与を通じた紛争解決のための手法である。調停が第三者による解決案の提示に留まり、解決案を受け入れるか否かは当事者にゆだねられているのに対して、仲裁においては、当事者は第三者によって示された判断に従わなければならない。

(3-2) コンフリクト・マネジメント

ナッシュ均衡を始めとする、非協力ゲーム理論の分析枠組みを、実際のコンフリクト分析に適用することを志向したものとして、Howard が提案したメタゲーム分析がある¹⁰⁾。メタゲーム分析は、①プレイヤーの戦略を各プレイヤーの有する「オプション」の組み合わせとして表現すること、②オプション間の相互依存性（同時に生起し得ないオプション群の存在など）を考慮可能であること、③現状（Status Quo）概念が導入されていること、④プレイヤーによる一方的改善（unilateral improvement）に対する制裁（sanction）の可能性が考慮されていること等、数理的な非協力ゲーム理論には存在しない概念が導入されてきている。

メタゲーム分析をもとに、Fraser らはコンフリクト解析手法を提案している¹¹⁾。さらにコンフリクト解析手法を発展させたものとして、コンフリクト解決のためのグラフモデル（Graph Model for Conflict Resolution, GMCR）がある¹²⁾。戦略（あるいはオプション）の組み合わせとして事象（state）あるいは結果（outcome）を記述するという非協力ゲーム理論の伝統的枠組みとは異なり、GMCR の特徴として、まず事象を同定した上でモデル構築を行う点がある。このような柔軟なモデル構造の導入により、現実の複雑なコンフリクトに対して、過度の単純化を行うことなしに、非協力ゲーム理論に基づいた分析を適用することが可能になったといえる。

非協力ゲーム理論における協力行動と非協力行動の間のジレンマの代表例は「囚人のジレンマ」である。囚人のジレンマ状況においては、2人のプレイヤーはそれぞれ、「協力的な行動」と「非協力的な行動」という2つの選択肢を有している。2人のプレイヤーが構成する社会の視点からみれば、2人とも「協力的な行動」を選択するのが最も望ましい帰結と言える。しかし、一方のプレイヤーの視点に立つと、相手プレイヤーが「協力的な行動」を取っているとき、自分が「非協力的な行動」を取れば、相手の協調にただ乗りして利益を得ることができる。どちらのプレイヤーもそのように考えたとすれば、結局2人とも「非協力的な行動」を選択する結果となり、社会的にも望ましくない。

非協力ゲーム理論の立場からの囚人のジレンマの解決策として、囚人のジレンマ構造を有するゲームの繰り返し（フォーク定理）がある。Axelrod¹³⁾は繰り返し囚人のジレンマゲームのシミュレーションにおいて、制裁の可能性を考慮に入れつつ、協調的行動を基本とする行動戦略が有効であることを示している。さらに、実験ゲームにおいては、実際人間は必ずしもジレンマに陥らず、協調が可能であることが示されている。コンフリクト・マネジメントという立場からは、いかなる条件、場面設定のもとで、人々の協調行動が可能となるのかを明らかにすることが今後重要となるといえる。

一方、ジレンマの当事者が多数となる社会的ジレンマの状況においては、人々の協力関係の形成はより困難となることが多い。社会的ジレンマにおいては、プレイヤーが「協力的な行動」と「非協力的な行動」という2つの選択肢を有している点は囚人のジレンマと同じであるが、プレイヤーが多数存在する。その場合、1人が「非協力的な行動」をとることの影響が見えづらいため、ただ乗りしようという誘因は囚人のジレンマよりも

大きくなると考えられる。社会的ジレンマ構造が生起しやすい問題としては、交通問題（社会全体から見て適切な交通手段選択への誘導、放置自転車問題など）、環境問題（地球温暖化対策への協力、ゴミ分別の徹底など）などがある¹⁴⁾。我が国においては、実験社会心理学において、社会的ジレンマ研究が進展している¹⁵⁾。また、交通問題を中心に、社会的ジレンマ解決のための工学的実践事例も多く蓄積されている¹⁶⁾。

(3-3) 合意形成論・熟議型計画

実社会における課題が益々多様化していく中で、「いかなる状態を以て解決とするのか」、「どうすれば解決に至れるのか」、「そもそも何が社会として問題にされる（べきである）のか」、といった問に対する回答自体が多様化してきた。19世紀後半から20世紀前半にかけて主流であった実証主義的アプローチによる計画理論の多くは、技術的・専門的知見を有するプランナーが合理的、長期的視点から目的とする社会状態に向かって最適な施策を実行することを志向するものであった。しかしながら、1950年代には複雑な社会問題を、科学的に定式化されたモデルの精緻化によってのみ解決しようとする手法論に限界が指摘され、社会問題の複雑性、多元性に対処しうる代替的なアプローチが模索されてきた。

合意形成論は、社会の構成員が有する価値規範や事実認識が多様であることを前提としつつ、多くの個人が他者との差異を尊重しつつ共存していくための方策を探るプロセスとその手法論である。さらに、政策科学および計画学において、合意形成に向けたコミュニケーション行為とその討議倫理こそが本質的な公共過程であると位置づけた新たな計画理論として¹⁷⁾、対話型計画（communicative planning）¹⁸⁾、熟議型計画（deliberative planning）¹⁹⁾が提唱されてきた。

合意形成の近年の実践的取り組みについては、Susskindらによる体系化が行われている²⁰⁾。合意形成論はしばしば公理的アプローチである公共選択論、ひいてはその例である多数決決定をめぐる議論と対比される。Susskindらは、多数決決定でしばしば排除されがちな少数意見をいかにして尊重し、全員によるプロセスへの参加を実現するか的手法を合意形成の各段階について提唱する。事実認識の差異を解消しようとする共同事実確認（joint fact-finding）、対立の構造をあらかじめ明らかにするための紛争アセスメント、合意形成プロセスそれ自体に関する規約（グラウンド・ルール）等は、その内の広く普及した例である。

社会的関心事の合意形成に関する代表的実践手法としては、市民陪審（Citizens Jury）と討議型世論調査手法（Deliberative Polling）が挙げられる。これらはいずれも討議の主体となる市民が、実際の意思決定過程で用いられている投票手続きではなく、無作為抽出によって選ばれる点に特徴がある。市民陪審では、ある特定の課題について無作為に討議参加者が抽出され、専門家との対話や討議参加者同士の対話を通して、課題に対する態度表明が行われる。市民陪審で合意された見解は社会に対する提言として位置づけられ、実際の社会的意思決定手続きによって選定された意思決定者が、真に全ての市民を代表しているかという代表性に関わる問題に、代替的な解決策を提供する。一方、討議型世論調査手法では、無作為に抽出された討議参加者が、討議の前後において課題に対しどのような態度を表明したか、とりわけどのような態度変化が見られたのか、に主として着目する。討議参加者は、課題に対する事前意向調査の後に市民陪審と類似し

た討議プロセスを行い、課題に対して理解をより深めた時点において再度意向調査に回答する。さらに、このプロセスを通して見られた態度変容の結果や要因について分析が行われ、その分析結果が社会的に公表される。いずれも米国および英国において多数の応用例が見られる²¹⁾。わが国における合意形成手法の代表的な実践例については、猪原²²⁾、城山・松浦²³⁾、土木学会誌編集委員会²⁴⁾等が詳しい。

(3-4) 社会技術システム理論

実社会の課題を解決するために開発、導入される科学技術的成果が果たして本当に社会問題の解決に寄与するか否かは、単に科学技術の機能的側面だけではなく、社会がその科学技術を受容するか否かという社会的側面によっても強く規定される。両者の相互作用を明示的に理解することによって、より効果的な社会問題への技術的介入を目指す社会技術的アプローチが提唱されてきた。1960年代に英国 Tavistock Institute を中心としたグループは、鉱業や製造業の生産過程において新規技術が導入された際、必ずしも期待された生産性向上が生じない理由を明らかにしようとする中で、技術が用いられる集合的な行為に内在する社会的、組織的文脈が大きな影響を与えていることを明らかにした。社会技術システム理論 (sociotechnical systems theory) は、「人間=組織」と技術との相互作用を社会心理学的、人類学的アプローチを援用して明らかにすることによって、生産システムの組織再設計をはじめとする技術的介入を提唱する研究分野である²⁵⁾。

社会技術システム概念は、その後の技術の構成主義的アプローチに多大な影響を与えた。Bijker らによる「技術の社会的構成」(Social Construction of Technology: SCOT)²⁶⁾は、ある技術が現在の形で成立しているのは、そこに至る社会集団の相互作用の帰結であるという立場に立ち、技術は社会的要請から必然的に開発され、社会に普及するという決定論的な見方に疑念を唱えた。SCOTは、合意形成論の文脈においては、社会問題の解決策として科学技術専門家が提示する介入策が必ずしも社会に受容されないのはなぜかを明らかにするための分析視角を提供するものといえる。関連する概念として Latour によって提唱されたアクターネットワーク理論 (Actor-Network-Theory: ANT)²⁷⁾では、科学技術を人間とその他の構成要素が互いに影響を及ぼし合うネットワークとして捉え、人間が人工物を創造するだけでなく、人工物が結果として人間の行動や社会の規範を形成する積極的役割を担う存在であると論じた。

SCOT および ANT はその後の科学技術社会論に大きな影響を与え、実践的な取り組みにも適用されてきた。初期には 80 年代のデンマークで試行され、その後多くの地域で実践されたコンセンサス会議を例に見ることができる。コンセンサス会議は上記の討議型世論調査手法と類似の過程を経て選ばれ、討議を行った市民が、社会的に重要な影響をもたらす特定の技術について提言を行う仕組みである。最近では地球規模の課題を解決するための科学技術はいかにして社会的に成立するかを考察するサステナビリティ・トランジション(sustainability transition)の分析枠組みとしてしばしば用いられている²⁸⁾。

(4) 科学技術的・政策的課題

- ・社会的重要な課題をめぐって、合意形成手法を用いてファシリテーション、メディエー

ション、仲裁等の第三者介入を行う中立な実施機関の設立がある。社会的課題に対し導入しようとする政策・施策に直接の利害を有さず、中立性・不偏性が担保される合意形成の専門機関が米国、欧州の非営利部門においては既に活動しているが、わが国においては未だ同種の組織が十分に確立しているとはいえない。

- ・公正な合意形成プロセスの前提となる公共コミュニケーション・メディアと「熟議の場」の確立が求められている。社会的課題について、多様な価値観を有した市民が、専門家、非専門家を問わず既存の情報資源を活用しつつ議論を行い、その結果自体が新たな公共資源となるようなコミュニケーション・メディアの開発が模索されている。とりわけ情報通信技術を活用した熟議民主主義の実現に向けた取り組みが各国で注目されている。
- ・社会心理学分野における小集団研究、意思決定研究、組織科学等の関連分野において蓄積されてきた実証的アプローチの知見を、合意形成の実践に活用する取り組みが課題である。
- ・まちづくり、地域づくりにおいて参加型計画の枠組み導入が進展している。しかし、ファシリテーションについては実施者の経験に依存しているのが実態であり、経験知を形式知に変換するための技術開発が必要である。
- ・熟議民主主義の立場から、「少人数の人々が集まって討議する場」の総称としてのミニ・パブリックス概念が提唱されている²⁹⁾。ミニ・パブリックスは必ずしも意思決定の場ではなく、問題認識の共有などを目的としている。ミニ・パブリックスに該当する試みは世界各国に存在しており、それに対する支援技術の開発も必要と考えられる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・合意形成研究は初期の概念提唱段階から実践段階を経て、現在、各合意形成手法および計画手法論について実証的な評価がなされつつある段階にある (例えば Street et al³⁰⁾)。実証的な評価にあたっては、その評価基準となるべき規範自体が合意形成理論および対話型・熟議型計画の存在意義と根幹的目的を規定することになるため、理念枠組みの再定義を行う理論研究も同時に活発である。
- ・合意形成手法の体系が早期に確立した地域・国においては、重要な政策課題及び社会的意思決定に同手法が用いられた例も多く見られる。例えば医療・公衆衛生分野における市民陪審やコンセンサス会議の事例、都市計画、社会資本整備における対話型・熟議型計画の実践、英国の統治体制をめぐる大規模な討議型世論調査の実施 (Power 2010³¹⁾)、日本における「エネルギー・環境の選択肢に関する討議型世論調査³²⁾」、等が挙げられる。
- ・地球規模の課題をめぐる合意形成の取り組みの例として、サステナビリティ・トランジションの研究ネットワーク (Sustainable Transitions Research Network³³⁾)、および同ネットワークによる International Conference on Sustainability Transitions が国際的な活動報告・情報発信の場として定期的に開催されている。
- ・東日本大震災を踏まえて新設された「地区防災計画」制度においては、「地域コミュニティ主体のボトムアップ型計画」の重要性が強調されている他、ワークショップ等

による地区属性の把握の必要性が指摘されている³⁴⁾。

- ・ 実験ゲーム理論における、文化的・社会的要素（文脈）を導入する試み。

（6）キーワード

合意形成、熟議型計画、対話型計画、市民陪審、コンセンサス会議、討議型意識調査手法、社会技術システム、技術の社会的構成、アクターネットワーク理論、実験ゲーム、利他性、文脈依存性、ファシリテーション、コンフリクト、社会的ジレンマ

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・ 公共政策、科学技術社会論、計画学などの分野において主要な諸概念は定着しており、専門教育に反映されている。
	応用研究・開発	○	↗	・ エネルギー、社会資本整備をはじめとする政策分野において合意形成の取り組みが実施されている。
	産業化	△	→	・ 一部において合意形成支援団体の非営利組織化が図られているものの、成果は限定的である。
米国	基礎研究	◎	→	・ 合意形成手法の体系化に関して国際的に顕著な成果をあげている。
	応用研究・開発	◎	→	・ 合意形成手法が、重要な社会的課題にしばしば適用されている。
	産業化	○	→	・ 非営利組織を中心とする活動が顕著に行われている。
欧州	基礎研究	◎	→	・ 西欧・北欧を中心に科学技術社会論や熟議民主主義の分野において顕著な理論的貢献が見られる。
	応用研究・開発	◎	→	・ 合意形成手法が、重要な社会的課題にしばしば適用されている。
	産業化	△	→	・ 成果は限定的である。
中国	基礎研究			・ 不明。
	応用研究・開発			・ 不明。
	産業化			・ 不明。
韓国	基礎研究			・ 不明。
	応用研究・開発			・ 不明。
	産業化			・ 不明。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Nash, J. The Bargaining Problem. *Econometrica*. 1950, vol.18, no.2, p.155-162.
- 2) Nash, J. Non-cooperative games. *Annals of Mathematics*. 1951, vol.54, no.2, p.286-295.
- 3) Shapley, L. A Value for N-Person Games. In *Contributions to the Theory of Games* volume II, H.W. Kuhn and A.W. Tucker (eds.). 1953.
- 4) Young, P.; Okada, N.; Hashimoto, T. Cost Allocation in Water Resources Development. *Water Resources Research*. 1982, vol. 18, p. 463-475.
- 5) Shenoy, P. On Coalition Formation: a Game-Theoretical Approach. *International Journal of Game Theory*. 1979, vol.8, No.3, p.133-164.
- 6) Myerson, R. Graphs and Cooperation in Games. *Mathematics of Operations Research*. 1977, vol.2, no.3, p.225-229.
- 7) Camerer, C. *Behavioral Game Theory*. Princeton University Press, 2003.
- 8) Shelling, T. *The Strategy of Conflict*. Harvard University Press, 1960.
- 9) Liberman, V.; Samuels, S.M.; Ross, L. The name of the game: Predictive power of reputations versus situational labels in determining Prisoner's Dilemma game moves. *Personality and Social Psychology Bulletin*. 2004, vol.30, no.9, p. 1175-1185.
- 10) Howard, N. *Paradoxes of Rationality: Games, Metagames, and Political Behavior*. The MIT Press, 1971.
- 11) Fraser, N. ; Hipel, K. *Conflict Analysis: Models and Resolutions*. North-Holland, 1984.
- 12) Fang, L.; Hipel, K. ; Kilgour, M. *Interactive Decision Making: The Graph Model for Conflict Resolution*, Wiley, 1993.
- 13) Axelrod, R. *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, 1984.
- 14) 藤井聡. 社会的ジレンマの処方箋—都市・交通・環境問題のための心理学. ナカニシヤ出版, 2003.
- 15) 山岸俊男. 社会的ジレンマ: 「環境破壊」から「いじめ」まで. PHP 出版, 2000.
- 16) 日本モビリティ・マネジメント会議(JCOMM).
<http://www.jcomm.or.jp/>
- 17) Habermas, J. *Theory of Communicative Action*. Beacon Press. 1985
- 18) Innes, J. E. Information in Communicative Planning. *Journal of the American Planning Association*. Winter 1998, vol. 64, no. 1, p.52-63
- 19) Forester, J. F. *The Deliberative Practitioner: Encouraging Participatory Planning Processes*. MIT Press. 1999.
- 20) Susskind, L.; McKernan, S. ; Thomas-Larmer, J. *The Consensus Building Handbook: A Comprehensive Guide to Reaching Agreement*. Sage. 1999.
- 21) Consensus Building Institute. <http://www.cbuilding.org>
- 22) 猪原健弘編著. 合意形成学. 勁草書房. 2011
- 23) 城山英明. 松浦正浩. 日本における公共政策の交渉と合意形成. L. E. サスカインド・J. L. クルックシャンク「コンセンサス・ビルディング入門: 公共政策の交渉と合意形成の進め方」有斐閣. 2008, p.191-204
- 24) 土木学会誌編集委員会編. 合意形成論—総論賛成・各論反対のジレンマ. 土木学会. 2004

- 25) Trist, E. L. ; Murray, H. The Social Engagement of Social Science: A Tavistock Anthology: The Socio-Psychological Perspective. University of Pennsylvania Press. 1990
- 26) Bijker, W. E.; Hughes, T. P.; Pinch, T. The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology. MIT Press. 1987
- 27) Latour, B. Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network-Theory. Oxford University Press. 2005
- 28) Paredis, E. Sustainability Transitions and the Nature of Technology. Foundations of Science. 2011, vol. 16, p.195-225.
- 29) 田畑真一. 熟議デモクラシーにおけるミニ・パブリックスの位置づけ：インフォーマルな次元での熟議の制度化. 田中愛治監修. 政治経済学の規範理論. 勁草書房, 2011.
- 30) Street, J. ; Duszynski, K. ; Krawczyk, S.; Braunack-Mayer, A. The Use of Citizens' Juries in Health Policy Decision-making: A Systematic Review. Social Science & Medicine. 2014, vol. 109, issue C, p.1-9
- 31) Power 2010, <http://www.power2010.org.uk>
- 32) 内閣府. エネルギー・環境の選択肢に関する討論型世論調査.
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/kokumingiron/dp/index.html>
- 33) Sustainability Transitions Research Network, <http://www.transitionsnetwork.org/>
- 34) 内閣府. 地区防災計画ガイドライン
<http://www.chikubousai.go.jp/pdf/guidline.pdf>

3.7.2 問題構造化技法

(1) 研究開発領域名

問題構造化技法

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

システム概念やシステム・モデルを用いて、組織や集団・社会など多様な意思決定主体を含む複雑な問題状況の改善や解決の支援を目的として、利害関係者間で問題を構造化しようとする様々な方法論を開発・提案・実践するとともに、それらを俯瞰し、それらの特徴を比較検討する研究開発領域。その主たる方法論は以下の通り。

ソフトシステム方法論(SSM: Soft Systems Methodology)、戦略的選択アプローチ(Strategic Choice Approach)、メタゲーム(Metagame)、ハイパーゲーム(Hypergame)、ドラマ理論(Drama theory)、戦略的仮説検証法(SAST: Strategic Assumptions Surfacing and Testing Methodology)、インタラクティブ・プランニング(Interactive Planning)、批判的システム思考(Critical Systems Heuristics)、マルチメソドロジー、質的研究方法、シミュレーション&ゲーミング、アクション・リサーチ、デザイン科学研究

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 問題構造化技法の体系

問題構造化技法とは、システム概念やシステム・モデルを用いて、組織や集団や社会など、多様な意思決定主体を含む複雑な問題状況の改善や解決を支援しようとする思考の体系である。

まず、問題構造化技法に関するメタ方法論として、比較選択方法論がある。比較選択方法論は、問題構造化技法で用いられる方法論全体を比較し、ある問題状況ではどの方法論を選ぶべきかについて検討し、各方法論について、それぞれのいわば強み弱みを明らかにして、それを問題状況に応じて使い分けようとする方法論的相補主義の考え方に基づく。その代表的な枠組みとして、SOSM (System of Systems Methodologies) がよく知られている¹⁾。SOSMは、複雑な問題状況をシステムの複雑さ(単純か、複雑か)と参加者の関係(単一的か、多元的か、強圧的か)の2軸に従い4つのタイプに分類し、そのタイプごとにそれに適した問題構造化技法を対応させる典型的な状況適用的かつ相補的な方法論の分類枠組みである。SOSMは、その方法論が目指す方向性が目標追求なのか、多様な価値観の調整なのか、公平性の確保なのか、あるいは多様性の促進なのかによって、タイプAからDまでの4つに分類する。本報告では、まずこの分類方法に従い、問題構造化技法を俯瞰する。

問題状況に関心や利害関係を持つ参加者は、問題状況の複雑さと多様性を増大させる要因のひとつである。このような参加者としての人に焦点をあてた実践ないしは研究の領域として、社会や組織を構成する参加者の経験や思考を参加者の内面から理解し記述しようとする質的研究方法、参加者がシミュレーションに意思決定者として参加し体験に対する内省(振り返り)にもとづく学びを通じて、対象の理解や問題解決を図ろうとするシミュレーション&ゲーミング、研究者自身が問題状況に行為的に関わることによ

って学びを得ると同時に状況それ自身も変えようとするアクション・リサーチなどがある。質的研究は、参加者のおかれた状況と文脈に関する詳細な記述と解釈（一部領域密着的な理論の生成）を指向し、シミュレーション&ゲーミングは、（教育や訓練にも用いられるが）参加者間の相互理解や合意形成を指向し、アクション・リサーチは、改善と関与を指向する方法である（Carr & Kemmis, 1986）²⁾。一方で、参加者を取り巻く社会的組織的要素よりはむしろ、参加者の認知的行動的側面の持つ特徴を人工物システムの設計に活かそうとするデザイン科学的研究という研究領域もある。以下、本節では、問題構造化技法の関連方法論あるいは関連研究領域として、質的研究方法、シミュレーション&ゲーミング、アクション・リサーチ、デザイン科学研究について説明と国内外の動向について述べる。

(3-2) タイプ A：目標追求をめざすハードシステム思考および構造主義的アプローチ

タイプ A は SOSM の枠組みでは単純なシステムで参加者が単一の場合に対応し、タイプ A での問題状況を扱おうとする問題構造化技法は、目標追求型のアプローチで、あらかじめ決められた目標に向かう最適化アプローチから組織の生存可能性を確保するために必要な組織的行動と設計を目指すアプローチまで、多種多様である。このタイプのアプローチは、目標はすでに明白であるか、簡単に決められるものと想定している。対象システムが目標を達成するためにシステムを最適化したり、あるいはシステム内外で発生する複雑さや混乱の度合いに対応したりすることに力を注ぐ、問題解決型のアプローチである。

このカテゴリーの典型的なものは、（従来型の）オペレーション・リサーチ(OR)、システム分析、システム工学などのハードシステム思考と、システム・ダイナミクスや組織サイバネティクスなどの構造主義的なアプローチである。ただ、ハードシステム思考にも、ソフト OR、ハイパーゲーム、メタゲームドラマ理論など、主観性、非合理性などを取り入れてモデルを拡張する方向も、特に英国・日本・カナダを中心に一部に見られるようになってきている（タイプ B の項で後述）。また、システム工学でも、米国で最大規模の産学官を繋ぐ団体 INCOSE（International Council on Systems Engineering）が、ソフトな方向性に大きな関心を持つ動きが最近活発化している。

構造主義的アプローチのなかで、システム・ダイナミクス(SD)は、複雑系の中に存在する膨大な変数を、相互性のあるフィードバックループとして表現することが本質的な特徴である。フィードバックループ同士のシステミックな相互関係により、システムの構造を表現し、この構造がシステムの振る舞いを決定するとする。なお、このシステム・ダイナミクスにも、ソフト SD と呼ばれるソフト化の方向が最近開発されている（David Lane, 1998）。

一方、組織サイバネティクスは、システムが生存し絶え間なく自己を調整し続け、自己組織化し、内的もしくは外的な要因で発生する混乱に対応していくために、設計上のどの主要ポイントを操作すればいいのかを、より深いレベルで考察することを目指している。すなわち、組織サイバネティクスは、生存可能システム・モデル（VSM: Viable Systems Model）を使い、ハードシステム思考では扱いきれない複雑さや混乱の問題を取り扱おうとする。VSM は、ダイナミックに変化する環境の中でシステムが生存可能であり続けるためにサイバネティクスの処方に従って複雑な組織を設計しようとする

際の処方箋であり、組織内の問題を診断し、生存可能性を確保するために有用である。なお、VSMに基づき、より問題解決の手法として開発されたコンサルティング手法であるチームシンテグリティ(Team Syntegrity)は、カナダを始め北米、英国で実務的な人気がある。

(3-3) タイプB: ソフトシステム思考(Soft Systems Thinking)

タイプBはSOSMの枠組みでは参加者が多元的な場合に対応し、タイプBの問題構造化技法は、利害関係者の異なる価値観を探求し調整することを目的とするもので、ソフトシステム思考ないしはソフトシステムズアプローチと呼ばれる。ここでは、利害関係者の主観性を尊重した学習プロセスの重要性が強調される。

ソフトシステム思考の方法論は、(1)構造のよくわかった問題に対して厳密な解決案を提供することを目指すというより、むしろ構造のよくわからない問題状況を部分的にでも構造化しようとする、(2)意思決定プロセスへの問題関係者の積極的参加を強く要請すること、などの際だった特徴をもつ有力な問題構造化手法のひとつである。ソフトな方法論にとっての評価尺度は、「有効性(effectiveness)」（達成したいことを実際に達成しているか）と「洗練さ(elegance)」（利害関係者は提案内容が趣味のいいものだと感じているか）である。ソフトシステム思考は、利害関係者同士の価値観や信念や哲学が異なることから発生する意見の食い違いや対立を取り扱い、こうした食い違いや対立に対処できるなら、問題の解決はより明快なものになるとの立場に立つ。

以下、タイプBに属するいくつかの問題構造化技法を説明する。

(i) ソフトシステム方法論

特に、Peter Checkland (1981)の提唱したソフトシステム方法論(SSM)は、複数の価値観や視点とその意味するところを明示するためにシステム・モデルを用い、複数の視点をシステムックに探求し、比較対照しようとする典型的なソフトシステム思考である^{1) 3)}。その目的は、問題状況の参加者が異なる世界観とその異なる世界観が提示する変化の可能性を、より完全に理解できるように、システムックな学習プロセスを生み出すことである。

この学習プロセスによって、異なる価値観や信念を持つ問題関係者間で、仮に一時的でも、様々な価値観が並立しながらそれぞれが他を受け入れている状況（アコモデーション(accommodation)）を達成しようとするのである。合意(consensus)が合理性・最適性をもって追求されるのに対して、アコモデーションは学習により探索される。関係者それぞれが、認識する世界や環境に関する知覚を、ディベートや自由討論等で互いに表明し、すり合わせ、その過程で自分とは異なる世界観を持った他者の立場・考え方を学習し、理解するのである。

ソフトシステム方法論は、次の戦略的仮説検証法(SAST)の強い影響を受けている。

(ii) 戦略的仮説検証法(SAST)

SASTはその哲学的根拠の多くをChurchmanの「社会システム設計」に負っている。ChurchmanはAckoffとともに、第二次世界大戦後のアメリカでORの研究に関わった重要な先駆者であるが、二人は1960年代から1970年代にかけてORに失望し、ソフトシステム思考の開発に注力し、SASTを提唱した¹⁾。SASTは、(1)論理的根拠を重視する最適化よりも満足化・目標をめぐる対立を容認する、(2)自身の表現内における異なる

目的の評価・対立を明確化し交渉を促進する透明な手法を活用する、(3)能動的主体としての人間要素を取り扱う、(4)ボトムアップ・プロセスに基づく問題構築を行う、(5)不確実性を受け入れる、という特徴をもつ。

(iii) インタラクティブ・プランニング

インタラクティブ・プランニングは、Russell L. Ackoffによって提案された、望ましい現在のデザインを通して未来を作り出そうとする方法論である。インタラクティブ・プランニングは、組織の将来は、それまで何をやってきたか以上に、これから何を行うかに依存するという信念に基づき、(1)現時点で考えるあるべき姿から現状へのバックワードを行う、(2)このアクションは、絶え間なく行われ、開始も終了もない。(3)組織・グループのあらゆるステークホルダーを取り込み、計画段階から関与させる、といった特徴を有する¹⁾。

(iv) 戦略的選択法(Strategic Choice)

John Friendらによって提唱された、政治的な不確実性を含む種々の不確実性に直面する意思決定主体のインタラクティブ・プランニングへのアプローチである⁴⁾。英国タビストック研究所(Tavistock Institute of Human Relations)でORと社会学者により考案されたという出自から、極めて柔軟性に富んだ使い勝手の広い問題解決の方法論で、現在では、公共・私的を超えて様々な問題解決で用いられている。それぞれ異なる利害を持つ多様な利害関係者のグループを仲介し、それまでの発言・コミットメントに縛られることなく、より未来志向的で創造的にアコモデーションが達成できるように導くことが、この方法論の主眼である。

(v) ソフトORとソフトゲーム理論

メタゲーム、ハイパーゲームは、それぞれ、高次の認知階層、主観性に焦点を当てた具体的な数理的分析の枠組みである^{5, 6)}。メタゲーム分析は問題状況を戦略ゲームとして捉え、典型的には、各プレーヤーは自分の戦略を選ぶ方針(相手の取る戦略から自分の戦略を対応させる関数)を高次の戦略として取り得るとして分析を行う。

ハイパーゲームは、通常のゲーム理論のように「関与するすべてのプレーヤーは同じゲームを見ている」とは想定せず、ある問題状況に関与する人々は異なった多様な価値観をもっており、各主体は共通に関与している問題状況を異なって知覚し、いわば内部モデルを構築して意思決定を行うと仮定する。

ハイパーゲームのメタモデルとして、木嶋らは、I-PALM (Poly-agent Learning Model)を提唱し、問題状況の理解の変化といったダイナミックな視点から、各合意形成主体間に相互作用のない独立な状況認識(単純ハイパーゲーム)から始まって、各合意形成主体が次第に他者の内部モデルを学習し、相互認識を形成し(共生的ハイパーゲーム)、ついには通常のゲーム状況を共通に認識するようになる一連の過程を記述している⁷⁾。

(vi) ドラマ理論

ゲーム理論では、合理的で目標追求的な振る舞いが論じられるのに対して、ドラマ理論では感情や非合理性に焦点を当て、決定が実行される前段階(プレプレー段階)での相互作用を通してどのように意思決定主体が変化してゆくかが考察される。変化に焦点を当てること、すなわち、決定主体が未解決の問題に取り組む際に、彼らが状況認識をどのように書き換えていくか(「再フレーム化」しているか)に焦点を当てることによ

って、ドラマ理論は、彼らが他者との関係の中でどのようにして自己実現を達成しようとするのかを明らかにしようとする⁷⁾。

具体的には、ドラマ理論の枠組みは、次のような特徴を持っている。

ドラマ理論は、各キャラクターが行動を実際に採る前のプレプレー段階でのキャラクター間の相互作用により、将来的にどのようなことが起こるかに関心がある。実際の行動が採られるのは、最後の実施の段階にすぎない。

ゲーム理論が、「合理的な解」に興味があるのに対して、ドラマ理論は相互作用という「ドラマティックな解」に関心がある。ドラマ理論の関心は、与えられた合理性の下で得られる解では満足できないキャラクターが、より良い解決策を求めて相互作用を書き換えていく過程全体の分析にある。

ゲーム理論では、立場(ポジション)や脅しといった概念は用いられていない。ゲーム理論が、プレーヤは合理性にのみしたがって行動すると仮定し、合理性のみを意思決定過程の有効な概念とみなすのに対し、ドラマ理論では、意思決定過程を「緊張が解消していく過程」として意思決定状況を捉える。

(3-4) タイプC：公平性確保の方法論

タイプCは、強圧的と見なされる問題状況に介入しようとするアプローチである。ソフトシステム思考には、異なる利害関係者間でも合意、あるいは少なくとも調整は可能だという多元的なバイアスがかかっているため、この強圧的な状況には適切に対応できないとし、タイプCのアプローチは、システム設計そのものと設計に伴う結果において、公平性を確保しようとする。すなわち、現状で不利益を受けている人々を支援し、全員がシステム設計に完全に貢献し、対象システムの運営からしかるべき利益を受けられるようにしようとするのである。

この典型的な方法論である批判的システム・ヒューリスティクス(CSH: Critical Systems Heuristics)は、社会的不公平に真正面から取り組もうとする方法論で、(1)ある決定で影響を受ける者全員が決定プロセスに参加するよう確保することで、社会的不公平に対応すべきだという解放的システム思考を確立し、(2)計画者や関心のある市民が使える方法論を提供しようとする。すなわち、CSHは、社会システムの設計者や関心のある市民に、システムの設計の規範的内容(normative content)を明らかにすることを目指している。ここで、規範的内容とは、計画の前提となる価値観と計画の利害関係者への社会的影響や副作用を意味する。

(3-5) タイプD：ポストモダンアプローチ

一般論として状況改善を保証できると主張するシステム方法論に懸念を抱く立場がタイプDである。彼らはあらゆる問題状況には膨大で解析不可能な複雑さと強圧が内在しているものだとして、これにはポストモダンなシステム実践が適切だと主張する。すなわち、解放のためのシステムズアプローチと同様に、抑圧された視点を強調し、多様性を助長しなくてはならないという。これはある意味で、圧倒的支配のシステムに挑戦し打破して、抑圧された意見に声を与えなくてはならないと考えるため、アンチ・システムミックであるともいえる。ほかのシステム手法に比べて比較的新しく、まだきちんと確立されていない。

(3-6) 問題構造化技法のマルチメソドロジー

SOSM が主張する方法論的相補主義をさらに進め、問題状況の次元と介入プロセスのフェーズ (ステージ) に応じて、問題構造化技法の様々な方法論の特徴をうまく組み合わせさせて使おうとするマルチメソドロジー (multi-methodology) と呼ばれる立場がある。これは、既存の様々な方法論のプロセスをいくつかのフェーズに分解して、再度組み合わせることにより、新たな問題解決の可能性を開拓しようというのが、マルチメソドロジーの考えである。

(3-7) 質的研究方法

質的研究 (qualitative research) という名称は、言葉の形式をとるデータに依拠するあらゆる種類の社会研究の総称を指す。一般に質的研究とは、インタビュー、観察記録、公的文書、映像、歴史的な文書などを基にした調査・研究手法、および研究方法論を指す。主に、心理学、社会学、文化人類学、教育学、福祉学、経営学などの人文・社会諸科学、看護学や医学 (特に、精神医学、心身医学、公衆衛生学) において用いられる。質的研究には、大きく個人誌 (ライフヒストリー)、現象学、グラウンデッド・セオリー (Grounded Theory)、エスノグラフィー (Ethnography)、ケーススタディの 5 つの伝統がある (Creswell, 1998)⁸⁾。ここでは、情報システム分野でよく用いられるグラウンデッド・セオリーとエスノグラフィーについて述べる (Mingers, 2003)⁹⁾。

グラウンデッド・セオリーは、Glaser と Strauss(1967)¹⁰⁾によって提案された研究方法で、基本的には、統一理論ではなく、収集されたデータを説明する中範囲の理論を構築するための、データの収集と分析に関する体系的で帰納的なガイドラインから成る (Charmaz, 2000)¹¹⁾。グラウンデッド・セオリーには、多様な系譜がある。木下 (2003)¹²⁾は、分析技法の共通性として「コーディング方法としてのオープン・コーディングと(軸足・)選択的コーディング、基軸となる継続的比較分析、その機能面である理論的サンプリング、そして分析の終了を判定する基準として、それ以上の修正が必要とされない水準に達することを意味する理論的飽和」の 5 点を不可欠の条件として挙げている。この方法は、人工物システムが享受される社会や組織の構成要素である人 (ユーザ) やシステム構築に関わる利害関係者の分析として利用可能である。情報システム分野では、主要な研究方法の 1 つになりつつあり、米国、欧州、豪州、ニュージーランドではよく用いられている。また、シンガポール、中国 (香港)、韓国、わが国でも徐々に用いられるようになってきた。ただし、データ分析技法として表面的に用いる傾向にあり、理論的飽和まで至るものは多くない。

エスノグラフィーは、本来はフィールドワークの報告書としての記述を意味していたが、今日では、文化的行動を記述し解釈するプロセスとその記述や解釈の両者を指す。欧米では、方法論としての側面が強調される傾向にあり、わが国でもその傾向になりつつある (小田, 2010)¹³⁾。前者の意味では、エスノグラフィーとは、研究者が人々の日々の生活に溶け込み、グループ参加者を観察したりインタビューを行ったりする参与観察を通じて、文化共有グループのメンバーの行動や言語や相互作用の意味を学ぶ方法である。エスノグラフィーへの科学的アプローチは、構造機能主義、シンボリック相互作用論、文化人類学、認識人類学、フェミニズム、マルクス主義、エスノメソドロジー、批判理論、カルチュラル・スタディーズ、ポストモダニズムなどに広がりを見せている。

わが国では、災害に居合わせた人自身の言葉を聴き災害対応に関わる知識の体系化を行う災害エスノグラフィーという言葉が注目を集めているが、記述や解釈の側面を強調している。批判的エスノグラフィーでは、エスノグラフィーを研究者と研究対象の人々との対話から生じる創発的プロセスと捉え、研究に提言的な視点を持ち込もうとする。システム構築においては、人工物システムを享受し文化を共有する組織における参加者の行動や言語のパターンの意味を学び、よりよいシステムの設計や開発に役立てるという利用方法がある。方法論としてのエスノグラフィーは、フィールドへの比較的長期間の滞在を要するため、システム構築分野でこれを採択した研究はあまり多く見られない。

(3-8) シミュレーション&ゲーミング (Simulation & Gaming)

ゲーミングとは、一般に人間が勝負や競技に参加することを意味するが、シミュレーション&ゲーミング (あるいはゲーミングシミュレーション) とは、人間がシミュレーションに参加することを通じて、現実対象の理解や問題解決を図る方法論を指す。典型的な応用例は、教育や訓練での利用である。Greenblat (1998)¹⁴⁾は、ゲーミングシミュレーションを、現実がシミュレートされた文脈の中に人間の行うゲーム活動を取り込んだ形式と定義している。ゲーミングは、ゲーム設計者、ゲーム参加者 (プレーヤ)、および、ゲーム進行役 (ファシリテータ) の三者間のコミュニケーションと見ることもできる。新井 (2004)¹⁵⁾は、「設計者、ファシリテータ、プレーヤの3者がともに現実世界に対する認識と理解を深める」ための方法論と位置付けている。シミュレーション&ゲーミングの応用分野は、心理学、教育学、政治学、政策科学、経営学、経済学、看護学など多様であり、開発教育、合意形成、戦略策定、制度設計などの実践的応用領域もある。システム構築に対しては、構築するシステムの目的、望ましい状態や振る舞いなどについて、利害関係者間で事前に合意形成を行なう場合に用いることが可能である。シミュレーション&ゲーミングは、欧州を拠点とする ISAGA(International Simulation And Gaming Association)をはじめとして、オランダ、ドイツ語圏、北米、日本、タイ、シンガポールで学会が設立されている。中国では特に上海を中心として、意思決定能力や組織化能力向上を目的とする企業内研修のためにゲーミングを用いる動きが出て来た。わが国においては、ゲーミングとエージェントベースシミュレーションを組み合わせたハイブリッドなシミュレーションの動きが活発である。

(3-9) アクション・リサーチ

アクション・リサーチ (Action Research) とは、目標とする社会的状態の現実へ向けた変化を志向した広義の工学的・価値懐胎的な研究であり、この目標状態を共有する研究対象者と研究者による共同実践的な研究のことを指す (矢守, 2010)¹⁶⁾。

アクション・リサーチは、望ましい社会状態に対する価値判断に関する調整が求められる場合、研究者と研究対象者との間の固定的な構造に変化が求められる場合に必要とされる (矢守, 2010)¹⁶⁾。制度や規則などを含む広義の人工的システムの構築においては、何を望ましい状態とするかの価値について、その調整が求められるが、このような場面において、アクション・リサーチは有効である。Mingers (2003)⁹⁾は、情報システム研究において、アプローチを実証的なものと解釈的なものに大別し、その両者に跨るものとして、アクション・リサーチと事例研究を挙げている。アクション・リサーチは、個別の研究手法というよりは、研究当事者の実践に対する態度や当事者間の関係性

を指した概念であり（矢守, 2010）¹⁶⁾、そのような態度で、たとえば、OR（オペレーションズリサーチ）、SSM（ソフトシステム方法論）、社会技術的システム思考などの既存の技法や方法、あるいは方法論を活用するアプローチと言える（神沼ほか, 1995）¹⁷⁾。上述したように、アクション・リサーチは、特定の方法というより、研究の態度や概念を指すものであるため、アクション・リサーチそのものをテーマとした研究コミュニティは、国内外に優勢なものは見当たらない。むしろ、看護学や教育学などの研究分野ごとに、アクション・リサーチを行おうとするコミュニティが存在する。なお、学術雑誌として Action Research 誌が 2003 年から刊行されている。

（3-10）デザイン科学的研究

デザイン科学的研究（Design Science Research）は、特定の領域で支持されている核となる理論を、関心のある問題状況に仮説的推論（演繹や帰納に先立って、個別の現象を適切に説明しうる仮説を導出する推論）によって適用し、人工物の構築と評価を通じた学びによって、問題解決や改善を図ると同時に特定の問題状況に適用可能な（一般理論ではない）中範囲の理論を生成しようとする研究方法である。例えば、組織で利用するシステムの設計において、システムにとって重要な組織的文脈的な情報をいかに設計者に際立たせ、それが実装されるシステムに反映させられるようにできるかという問題に関して、認知心理学で支持されている理論を仮説推論的に適用して、システム構築を行ない、その成果物の評価をすることを通じて、システム構築という中範囲の領域に適用することのできる理論を得ようとする。

この一連の研究の主要関心は、システムの設計法や構築法ではなく、組織で使われるシステムに関わる問題解決に対して、システム成果物を設計・構築・評価をする循環的なプロセスがいかに貢献できるかにある。構築を通じた学びという観点では、デザイン科学的研究は、情報システム、教育学、ヘルスケア、コンピュータ科学、工学の領域にも広く利用されている（Vaishnavi & Kuechler, 2011）¹⁸⁾。デザイン科学的研究では、一連の活動は、問題解決や業績向上を目的として行われ、とりわけ情報システム領域において人気を博している。米国で最も盛んであり、実証研究、行動学的研究、情報経済的研究、質的研究と並んで1つの領域を確立しつつある。この流れは、欧州、豪州、ニュージーランドにも広がりつつあるが、米国ほどではない。残念ながらわが国においては、情報システム領域においてもデザイン科学的研究を方法として採択した研究は見られない。

（4）科学技術的・政策的課題

問題構造化技法は、応用システム思考として、特に英国、北欧、ドイツ、オーストラリア、ニュージーランド、南米等で十分確立され、コンサルティングの実務でも大きなプレゼンスを示している。ただ、その特徴からも分かるとおり、問題構造化技法のかなりの部分は、文化的コンテクストに依存するところが大きく、特に米国、北米での認知度は高いとはいえない。今後は、これらの地域・文化を踏まえた上での問題解決のためのシステム構築方法論として、一皮脱皮することが求められる。その萌芽として、社会を複雑系として捉えたシステム思考が急速に発展しつつある¹⁹⁾。問題構造化技法の関連領域・方法の主要な関心は、組織的、社会的、政治的文脈におかれる利害関係者とその

中において構築されるシステムとの関係性を、人間の側面から理解し、それをシステム構築における問題構造化に役立てようとするものである。人工物システムは人間活動が営まれる複合システムとして多重的な現実をもたらすことを意識し、その構築に当たって複眼的なシステムズアプローチの確立が求められる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

英国、欧州、オセアニア、南米等では、問題構造化技法 (応用システム思考) は、ビジネススクールで広く標準的なカリキュラムとして設定されるとともに、コンサルティング会社、地方自治体、政府、NPO などの具体的な問題解決に頻繁に用いられる「通常のコ考え方」となっている²⁰⁾。

米国では、ここ数年来、巨大規模の産学官の団体 INCOSE (International Council on Systems Engineering) が、システム工学のソフト化、社会化を狙い、問題構造化技法をテーマとする学会 (たとえば、ISSS= International Society for the Systems Sciences) に定期的に参加し、連携を模索し成果を上げ始めている。

デンマークを中心とする北欧・ドイツにおいては、最近、自然エネルギー活用、ゴミ処理問題を中心に持続的発展を目指すプロジェクトとしてトランジション・マネジメント (Transition Management) という潮流が大きくなっているが、その基礎となっているのはこの問題構造化技法である²¹⁾。また、ケンブリッジ大学が中心となって、問題構造化技法 (特に VSM) とサービス科学をつなぐ研究プロジェクトを推進している²²⁾。

(6) キーワード

問題構造化手法 (Problem Structural Methodologies)、応用システム思考 (Applied Systems Thinking)、ソフト・システムズ・メソドロジー (SSM)、戦略的選択アプローチ (Strategic Choice Approach)、メタゲーム (Metagame)、ハイパーゲーム (Hypergame)、ドラマ理論 (Drama theory)、戦略的仮説検証法 (SAST)、インタラクティブ・プランニング (Interactive Planning)、批判的システム思考 (Critical Systems Heuristics)、マルチメソドロジー、質的研究方法 (Qualitative Research Method)、シミュレーション &ゲーミング (Simulation & Gaming)、アクション・リサーチ (Action Research)、デザイン科学的研究 (Design Science Research)、エスノグラフィー (Ethnography)、グラウンデッド・セオリー (Grounded Theory)

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・ビジネススクールでのカリキュラムとして、一定の水準を保っている。特に、ソフトOR、ソフトゲーム理論に関しては、世界でのプレゼンスを発揮している。
	応用研究・開発	○	→	・ビジネススクールでのカリキュラムの一貫として、適用事例集の作成が一定の水準で行われている。特にサービス科学(SSME)での適用が顕著である。
	産業化	△	→	・通常の意味の産業化にはなじまない。
米国	基礎研究	△	→	・ほとんど行われていない。
	応用研究・開発	○	↗	・産学官の団体 INCOSE (International Council on Systems Engineering)が、システム工学のソフト化を狙い、問題構造化技法をテーマとする集会に定期的に人を送り込み、連携を模索している。
	産業化	△	→	・通常の意味の産業化にはなじまない。
欧州	基礎研究	◎	↗	・南アフリカで開発され現在世界41カ国で実際に用いられているKetsoなど新たな理論と実践が着実に進んでいる ²⁰⁾ 。
	応用研究・開発	◎	↗	・南アフリカで開発され現在世界41カ国で実際に用いられているKetsoなど新たな理論と実践が着実に進んでいる ²⁰⁾ 。
	産業化	○	→	・通常の意味の産業化にはなじまない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Jackson, M. Systems Thinking: Creative Holism for Managers. John Wiley and Sons, 2003.
- 2) Carr, W.; Kemmis, S. Becoming Critical: Education, Knowledge, and Action Research, Falmer, 1986.
- 3) Checkland, P. Systems thinking, systems practice. John Wiley and Sons, 1999.
- 4) Friend, J.; Hickling, A. Planning Under Pressure: The Strategic Choice Approach. 2005.
- 5) Bennett, P. G.; Bryant J. "Drama Theory and Confrontation Analysis", Rational Analysis for a Problematic World: Revisited, Rosenhead, J.; Mingers, J. Eds. Chichester: Wiley, 2001, p. 225-248.
- 6) Bennett, P. G. "Modelling complex conflicts: formalism or expertise?". Review of International Studies. Oct. 1991, vol. 17, no. 4, p. 349-364.
- 7) 木嶋恭一. ドラマ理論への招待. オーム社, 2001.

- 8) Creswell, J. W. *Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing among Five Traditions*, Sage, 1998.
- 9) Mingers, J. The paucity of multimethod research: a review of the information systems literature, *Information Systems Journal*. 2003, vol.13, no.3, p. 233-249.
- 10) Glaser, B. G.; Strauss, A. *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*, Aldine De Gruyter, 1967.
- 11) Charmaz, K. Grounded theory: Objectivist and constructivist methods. In N. K. Denzin & Y. S. Lincoln (Eds.), *Handbook of qualitative research* (2nd ed.; p. 509-535), Sage, 2000.
- 12) 木下康仁. *グラウンデッド・セオリー・アプローチの実践—質的研究への誘い*. 弘文堂, 2003.
- 13) 小田博志. *エスノグラフィー入門*. 春秋社, 2010.
- 14) Greenblat, C. S. *Designing Games and Simulations: an illustrated handbook*, Sage, 1998.
- 15) 新井潔. *ゲーミングシミュレーション, オペレーションズリサーチ*. 2004, vol.49, no.3, p.143-147.
- 16) 矢守克也. *アクションリサーチ—実践する人間科学*. 新曜社, 2010.
- 17) 神沼靖子, 佐藤敬. *アクションリサーチとソフトシステム方法論*. 情報処理. vol.36, no.10, p.941-946, 1995.
- 18) Vaishnavi, V. ;Kuechler, B. *Design Science Research in Information Systems*, <http://desrist.org/desrist/>, 2011.
- 19) Ball, P. *Why Society is a Complex Matter*. Springer, 2012.
- 20) Ketso. *Ketso:a hands-on kit for creative engagement* <http://www.ketso.com/learn-about-ketso>
- 21) Loorbach, D. *Transition Management for Sustainable Development: A Prescriptive, Complexity Based Governance Framework*. *Governance*. 2010, vol. 23, no. 1, p. 161-183.
- 22) Ng,I. C. L. *Creating New Markets in the Digital Economy*. Cambridge University Press, 2014.

3.7.3 高信頼要求工学

(1) 研究開発領域名

高信頼要求工学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

システムは社会インフラとして実社会に広く深く浸透している。CPS (Cyber Physical System) が注目されているように、従来はハードウェアだけで構築されていたシステムも、ハードウェアの機能の多くがソフトウェアで置き換えられ、現代ではソフトウェアなしでは成立しない状況である。業務の効率化のためだけでなく、あらたなイノベーションを生む価値創造のための重要な手段としてソフトウェアシステムが認識されている。このため、以下では主としてソフトウェアシステムを中心に説明するが、ソフトウェアシステムが人間による業務やハードウェアと密接に関係しているため、ソフトウェアシステムに限定したとしても、人間系やハードウェアとの相互作用を含んでいることはいうまでもない。要求工学自体、主としてソフトウェア開発領域で発展し 40 年以上の歴史があるが、最近、セキュリティ、安全性など人間系やハードウェアを含む社会システムの高信頼化が重要となっており、ソフトウェアシステムに限らず一般的なシステム構築の研究開発領域としても高信頼要求工学に注目が集まっている。高信頼要求工学は、実社会のあらゆるサービスや機器が相互に接続され、あらたなサービスがこのような複合的なシステムアーキテクチャの上で創出されていく状況を前提にして、どのようなサービスをなぜ開発するか、それが他のシステムとどのように相互連携し、社会環境にとって意義ある公正なシステムであるのかに関する非機能要求を明らかにするとともに、要求の妥当性を確認する研究開発領域である。ここで、非機能要求とは、システム機能についての特性および制約についての要求のことである。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

安全設計の観点から 1990 年代に入ってソフトウェア安全性が検討されるようになった¹⁾。セキュリティ要求工学の研究は、2000 年に入ってから研究開発が盛んになった。持続可能性は、ようやく 2010 年代になってソフトウェアシステムの品質の一部として認識されるようになった^{1, 2)}。このような安全性やセキュリティに対するソフトウェア技術の発展は、社会的な事件・事故の顕在化がきっかけになっている。したがって、最初から安全性やセキュリティが要求工学で検討されてきたわけではない。たとえば、IEEE Std. 830-1998 では、安全性とセキュリティは制約の一種としてしか扱われていない。これに対して、最も新しい要求工学の標準である ISO/IEC/IEEE 29148:2011 では、安全性とセキュリティが主要な話題として取り上げられている。

識別されたハザードから導出される制約が安全性要求である。過去のソフトウェア障害原因のほとんどが、コーディングエラーではなく要求欠陥であるという Leveson の報告³⁾がある。このため、重要安全システムに対する要求仕様の網羅的な分析手法の研究が進んでいる。

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災とそれに続く福島第一原子力発電所の事故は、我々にシステムの安全性に対する認識を飛躍的に高め、ハザードが起こったとしても小さな

被害で速やかに回復することが求められるようになった。このような安全性は、最近ではレジリエンス（resilience）と呼ばれることが多く、ハザードに対して一定の耐性を持つと同時に、万一被害を受けたときにはその後の回復を早めることや機能が低下したままでも最低限の機能を維持するグレースフルデグラデーションなどを含めた概念である。このようなレジリエンス的な安全性に対する要求も高まっている。

特定のシステムにおける具体的な要求に、セキュリティに関する高水準の組織方針が明示されていることがセキュリティ要求である。安全要求と同様に考えると、「保護すべき資源への識別された攻撃への対策としての制約」がセキュリティ要求であるということもできる。安全性は、システムコンポーネントが環境内で相互作用する際に発生する「創発特性（emerging property）」である。創発特性は、システムが静的に存在するときから継承する特性と反対に、システムが使用されるときに発生する動的な性質である。ソフトウェアシステムは使われなければ、非安全（unsafe）ではない（つまり、安全である）。これに対して、持続可能性は、継承部分と創発部分がある。

持続可能性要求のために、経済面、社会面、環境面、人間面、技術面からなる5次元の汎用参照モデルが Penzenstadler らによって提案されている（www.se4s.org）。この参照モデルでは、環境面の持続可能性要求が他の持続可能性要求と相互に関連付けられるようになっている。また、安全性要求と同じように、品質保証のための追跡と妥当性の確認ができる。

また、エンタープライズアーキテクチャの国際標準である TOGAF ではアーキテクチャ開発手法にセキュリティならびにディペンダビリティの概念が導入されている。ここで、特定のシステムのアーキテクチャに対して、複数のシステム全体に関するアーキテクチャのことをエンタープライズアーキテクチャという。また、安全性、信頼性、持続可能性、可用性などを包括した用語がディペンダビリティである。

（4）科学技術的・政策的課題

ソフトウェアイノベーションで成功しているサービスや製品に共通するのは、すべてオープンなプラットフォームを提供していることである。したがって、社会がソフトウェア化する現代におけるイノベーションは、ソフトウェアイノベーションであり、システム構築に当たっては、多様なソフトウェアシステムとの相互連携が不可欠となるオープンプラットフォームについて、価値だけでなく安全性、セキュリティ、持続可能性を統合的に明らかにする高信頼要求工学の研究開発が必要である。

産官学連携プロジェクトの成果を継続的に発展させるためには、標準化が必要である。たとえば、オランダの産官学プロジェクトであったエンタープライズアーキテクチャの統合モデル図式言語である ArchiMate は TOG(The Open Group)が継続的に標準化している。また、2014年3月に終了した JST による日本の産学連携 DEOS プロジェクトでも、高信頼アーキテクチャプロセスである O-DA(Open Group Releases Dependability through Assuredness)を TOG で標準化している。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

国際的な産官学連携プロジェクト Shields には、スウェーデンの Linköping University の他、ノルウェーの SINTEF、スペインの European Software Institute、ドイツの Fraunhofer IESE、フランスの Institut National des Télécommunications と Montimage、ハンガリーの SEARCH-LAB とイタリアの TXT e-Solutions が参画した。2008年1月1日から2010年の6月30日までの予定で終了したこのプロジェクトには、産官学の異なる国の組織が参画しているところにEUの高い戦略性を見ることが出来る。

また TOG では、Openplatform3.0 の取組みが2013年に発足し、オープンプラットフォームのための要求開発を加速しようとしている。

（６）キーワード

要求工学、安全性、セキュリティ、持続可能性、運用性、非機能要求、エンタープライズアーキテクチャ、アーキテクチャ、社会技術システム、サイバーフィジカルシステム、ステークホルダ要求、システム開発

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・高信頼性要求工学に関する基礎的な研究論文がある。
	応用研究・開発	○	→	・高信頼要求工学に関する応用研究論文がある。
	産業化	△	↘	・欧米に比べ、産業化に関連する明確な方向性は見えない。
米国	基礎研究	◎	↗	・IEEEなどでの学術論文が多数あり、活発な議論がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	・システムおよびソフトウェアの分野で着実に進展している。
	産業化	◎	↗	・TOGなどで産業界が連携して進展させようとしている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・IEEEなどでの学術論文が複数あり、活発な議論がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	・システムおよびソフトウェアの分野で着実に進展している。
	産業化	◎	↗	・EUがプロジェクトとして連携して進展させようとしている。
中国	基礎研究	△	↘	・南京大学などで形式手法についての研究がある。また南京大学で Symposium on Dependable Software Engineering2014を開催した。
	応用研究・開発			・不明
	産業化	○	→	・セキュリティ技術では、最近のサイバー攻撃に見られるように、急速に発展していると思われる。

韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • IEEEなどの国際会議でセキュリティ技術などの発表がある。 • Ministry of Knowledge Economy が Korea 大学に Center for Engineering and Education of Dependable Software を設置して研究を支援している。
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> • Hyundaiなどが機能安全要求について研究開発を進めている。
	産業化	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> • Hyundaiなどが機能安全要求について研究開発を進めているが、産業化までには至っていない。

(8) 引用資料

- 1) Penzenstadler, Birgit; Raturi, Ankita; Richardson, Debra; Tomlinson, Bill. Safety, Security, Now Sustainability : The Non functional Requirement for the 21st Century. IEEE Software. 2014, May/June, p. 40-47.
- 2) Hilty, L. M. et al. The Relevance of Information and Communication Technologies for Environmental Sustainability. Environmental Modelling and Software. 2006, vol. 21, no. 11, p. 1618-1629.
- 3) Leveson, N. Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety, MIT, 2011.

3.7.4 システムアシュアランス

(1) 研究開発領域名

システムアシュアランス

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

安全性やディペンダビリティ（広義の信頼性）などのシステムの属性（attribute）に完全、客観、絶対を求めることが実際的にも概念的にも極めて困難であることが明らかになるにつれ、リスク評価やそれに基づく機能安全の概念が、社会的に受け入れられはじめている¹⁾。前者の立場を仮に絶対的な立場、後者を相対的な立場とよぶこととする。この二つの立場は、安全性やディペンダビリティなどの属性の評価方法、および、評価結果の判断基準の設定に関して異なる前提を持っている。

絶対的な立場では、これらの属性は万人が認める客観的な法則や事実に基づいて評価することが可能であり、またそのような評価がなされるべきであるとする。判断基準の設定についても、万人が認めるべき「絶対に安全」等の基準を、客観的な法則や事実に基づいて確立することができ、また、そのような記述を確立するべきであるとする。したがって、誤りの混入を除けば、システムは「絶対に安全」か否かの二者択一の判定結果だけが評価の利用者にとって重要なことになる。

相対的な立場では、属性の評価方法にも、判断基準の設定にも、評価者の主観に基づく部分があることを前提とする。この場合、諾否の判定結果だけでなく、評価の過程が明示されることが評価の利用者にとって重要なことになる。この明示には、評価がどのような主観にもとづいてどのようになされたか、安全性やディペンダビリティがどういう意味で考えられているか等の記述が含まれる。評価の利用者は、これらを検討した上で、システムの安全性やディペンダビリティについて各々の判断を下すことになる。結局のところ、相対的な立場で問題となるのは、システムの開発者、利用者を含む各関係者がシステムの安全性やディペンダビリティについて十分な「確信」を得ているかどうかである。この確信を与えることをシステムアシュアランス（system assurance）と呼び、より強いシステムアシュアランスを得るためのアシュアランス活動（assurance activity）が展開されている。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 一般システム理論

Bertalanffy による文献²⁾が初期の一般システム理論に関する古典的文献としてしばしば引用される。1968年に刊行された同書では一般システム理論の要求に応える「新しい」研究動向としてサイバネティクス（制御理論）、情報理論、ゲーム理論、決定理論、グラフ理論、因子分析等が挙げられており、応用を含むシステム科学の分野としてシステム工学、オペレーションズリサーチ、人間工学などが挙げられている。

Luhmann の講義録³⁾も一般システム理論の概説として広く引用されている。そこでは一般システム理論におけるモデルの変遷が、均衡の概念に基づいて安定と攪乱に関する考察を行う均衡モデル；閉鎖システムと開放システムを扱うための入力-出力モデル、刺激-応答モデル、及びブラックボックスモデル；サイバネティクスや制御理論にみられ

るフィードバックモデルなどを通して説明されたのち、『システムは形式である（ただし形式の概念がシステムと環境の差違にあてはめられるという前提のもとで）』との見解が述べられる。

文献²⁾は、生物学、心理学、経済学、社会学、物理学、化学などのいろいろな科学にみられる理論の「同形性」に注目し、数理科学的方法が物理学や化学のみならず、これらのいろいろな科学に適用できることを強調している。しかし、理論の同形性の理解は一般常識に委ねられ、同形とはどういうことなのかについて、数理科学的な考察が深く加えられているわけではない。この方向の考察はその後も発展していないが、例えば、代数構造を対象化して比較する函手意味論（圏論を用いて形式的体系の意味論の一般的な与え方を議論する理論。Lawvere の文献⁴⁾に始まる）などの応用の可能性がある。

大規模で複雑なシステムをどのように扱うのかは、システム科学の今後にとって極めて重要である。文献²⁾ではしかし、理論の同形性に焦点をあて、大規模性や複雑性に対する関心が少ない。一方、Luhmann の文献³⁾では、「形式」や「自己組織性」、「観察」、「再参入」、「複雑性」など、大規模で複雑なシステムを考察する時に重要な視点を取り入れている。そのためには、微分方程式による記述などの解析学的手法だけでは不十分である。Luhmann はこれを補うものとして数理論理的な手法に着目しており、特に、文献⁵⁾の体系を基にして記述と分析を試みる。文献⁵⁾は数理論理学をゼロから展開するが、二十世紀の数理論理学の主流からはずれた個性的な記述を採るために他の文献との関連がわかりにくい上、命題論理に相当する部分だけで、述語論理に相当する部分（限量子）がない。

開放システムは伝統的には熱力学で用いられた概念である。そこでは「外界」との物質やエネルギー、あるいはエントロピーの交換がないシステムと規定された。文献³⁾ではエネルギーやエントロピーだけでなく「情報」の交換にも注目して社会システムにおける開放システムを論じるが、情報の内容について踏み込んだ定式化は与えられていない。今後、情報の定式化をもっと詳細にした上で開放システムの考察を進めることが求められる。

ところで、文献²⁾や文献³⁾では、Shannon の情報理論を出発点として情報に関する考察を進める傾向がある。しかしこれでは情報の質的あるいは意味的な側面を論じることができず、情報処理の多くの側面を捉えることはできない。既に 1960 年代後半、梅棹忠夫と湯川秀樹は、Shannon の情報概念で情報処理の対象を取り扱うことの不十分さを指摘している⁶⁾。梅棹らは Shannon の情報理論に代わる「情報物理学」の必要を感じたが、その後情報物理学の発展は見られなかった。その役割を不十分ながら果たしつつあるのが、現在の情報科学におけるプログラム意味論であると見なすことができる。

もっとも、プログラム意味論が複雑で大規模なシステムを十分に扱うことができているとはまだいえない。大規模システムを取り扱うために抽象データ型の理論⁷⁾が提出され、その数学的背景として普遍代数^{8, 9)}や函手意味論⁴⁾が用いられた。これらはプログラムを入力から出力への関数とみる立場に立って必要な操作の構造を代数系によって表現する理論である。さらに 90 年代末になって、代数の双対概念である余代数が、停止しないプロセスを記述するのに有効であることが示された¹⁰⁾。代数による理論と余代数による理論は、Luhmann のいう入力-出力モデルと刺激-応答モデルに対応する。

これらの過去の業績の上に立って、System of Systems の数理科学的な根拠を構築することは、システム科学が進むべき一つの重要な方向であろう。

(3-2) 検証と妥当性確認の枠組

検証はシステムの実体（実現）が仕様を満たすよう正しく作られているかを調べることを言う^{11, 12)}。検証の概念は、システムの実体とそれを記述する仕様の二つが常にある、という二元論を前提としている。数理論理学における形式理論（仕様に相当する）とそのモデル（実体に相当する）は、この二元論を数理的に表現する概念として広く受け入れられている¹³⁾。（なお、ここでのモデルは、形式理論による抽象的な記述に適合するように構成されたより具体的な対象を指す。論理学以外の分野、特に工学での一般的用語としての「モデル」は、具体的な対象を抽象化した結果を指すが、論理学では意味が異なる（逆になる）ので注意を要する。どちらも、与えられた対象をより扱いやすい対象に変換するものである。数理論理学では、形式理論を対象としてその性質を調べる目的でより具体的な対象を考えるため、このような逆転が起きる。）

検証は一般的には観察によって行われる。システム自体を観察して仕様通りになっているかどうかを確かめる（静的な観察）他、システムが「動作」するもの場合には、システムの実体を実際に動作させ、仕様通りの動作かどうかを（動的に）観察する、いわゆる試験（テスト）が重要な検証方法である¹⁴⁾。

システムの実体が同時に別のシステムの仕様になっている場合もあり、その場合には、システムの動作をテストによらずに検証することもできる。たとえばソフトウェア（ソフトウェアはシステムの一例である）の実体であるソースコードは通常高級プログラミング言語におけるプログラムであるが、これはそれ自身、それがコンパイルされる目標言語（アセンブリ言語など）のプログラムの仕様だと見なすこともできる。プログラミング言語の意味が明確に決まっておれば、ソースコードをよく観察することによって、それがどのように動くかが決定し、仕様通りの動きかどうかを推論することができる。

実体が別のシステムの仕様になるのはソフトウェアに限らず、大規模なシステムでは広く見られる。このような場合には、検証を推論によって行うことができる。一般にはこの推論は非常に煩雑なものになるが、近年の情報科学の発達の結果生まれた定理証明支援技術を用いて、煩雑な、しかし型通りの推論を計算機によって支援することができるようになり、「定理証明による検証」の可能性が広がりつつある。

検証だけではシステムのアシュアランスは得られない。必ずしも明文化することができないユーザのニーズや使用目的に対して、正しいシステムが作られていることを確認する必要がある¹²⁾。まず、システムの仕様がニーズや目的に適ったものかどうかを確かめる必要がある。さらに、検証過程が適切なものかどうかを確かめる必要がある。検証過程の執行が適切であるかどうかだけでなく、検証過程そのものがそもそも適切に設計されているかどうかについても、何らかの形で確かめられなければならない。

また、システムの外に目を向けて、システムが周りの環境に受け入れられるものであるかどうかを確かめることも必要である。社会的、倫理的、法律他の規則、そのときの技術水準、などいろいろな基準に照らしてシステムを確かめる必要がある。

これら、検証の枠組の外でのシステムの確認をまとめて妥当性確認という¹²⁾。妥当性確認は、その根拠とする基準に常に不明確さが残る。検証の「適切さ」も参照すべき外

部基準も、いずれも完全に明確には記述しきれないものである。参照すべき外部基準のリストが明確に与えられることはないし、各々の外部基準がそれ自体、不確定である場合もある。社会的常識は不明確なものよい例だが、明確に決まっているように見える法律も、実は解釈が時代によって変わることを考えると、不明確さが残るといわなければならない。

(3-3) 検証

大規模で複雑なシステムの試験では、テストケースの選択が大きな問題である。大規模で複雑なシステムでは、テストすべき入力データ、つまりテストケースの数が膨大であり、あらゆる場合を尽くす全数検査が不可能であるが、それでは「どのテストケースをどのような基準で選ぶべきか」ということが問題になる。特に情報処理を含む巨大システムの場合、システムの動作が環境の変化に関して連続ではなく、微細な環境変化が動作を全く変えてしまうことが普通なので、機械システムや電子システムなどのテストケース選択とは異なる基準が必要である。

情報処理におけるテストケースの選択は古典的には被覆 (coverage)、つまりいろいろな分岐の枝をどれくらい尽くしているか、をもとに基準が作られてきた。これはシステムの実体の構造に依存して行なう、いわゆる white box test である。試験結果が実体に依存することになり、望ましい状況ではないが、これ以上のことができなかった。

近年になって、model based testing^{15, 16)}の考えが広がっている。これは、仕様を明確に記述し、実体ではなく仕様をもとに coverage などを算出しながら、テストケースの設計をしようとするものである。したがってここでいう model は仕様にあたる。また、この方向を延長して、形式理論として対象化した仕様から、テストケースを自動生成する技術が過去十年間に発達している。このために有効なのが形式理論の充足可能性判定に関する SAT (SATisfiability) solver¹⁷⁾、SMT (Satisfiability Modulo Theory) solver^{4, 18, 19)}等のソフトウェアである。これは論理式を与えると、それを真とする解釈が存在するかどうかを判定して、存在する場合には、各変数の具体的な値を計算して返すものである。これを使ってテストケースを計算させることができる。

形式理論として仕様を対象化することからもう一つの可能性が生まれている。これはモデル検査の手法である。様相論理の一つである modal μ calculus においてシステムの動作を記述すると、検証項目をあらゆる動作にわたってしらみつぶしに検査することができる。これは modal μ calculus^{20, 21)}における形式理論が必ず有限モデルを持つこと (finite model property²²⁾)を根拠とする技術である。その後 modal μ calculus をいろいろな制限して高速な検査を可能にする研究 (計算木論理 (Computation Tree Logic, CTL²³⁾、線形時相論理 Linear Temporal Logic, LTL²⁴⁾、あるいは拡張してより詳細かつ複雑な仕様を書くことを可能にする研究 (実時間モデル検査²⁵⁾、確率モデル検査²⁶⁾など)が進められる一方、検査技術の研究 (モデル検査器の開発)にも大きな努力が払われている (SMV²⁷⁾、Spin²⁸⁾をはじめ多数)。

以上は試験による検証の技術であったが、システムの実体の下位システムの仕様等の記述である場合には、実体が仕様を満たすことの確認を適切な形式体系の中の形式証明を構築することによって行うことができる。これを定理証明による検証という。このような形式証明は、一般には極めて煩雑になってしまい、計算機による処理が求められる。

計算機による定理自動証明は計算機技術黎明期からのテーマであるが、ここで求められるのはむしろ、計算機が証明を作ることよりも、証明に間違いがないか、システムに変更があった時にどこの証明を見直さなければならないかのトレースをとることなど、どこかで（計算機あるいは人間によって）書かれた証明をデータとして処理することである。そのような研究分野が情報科学における定理証明支援系と呼ばれるものであり（Coq²⁹, Agda³⁰, HOL³¹, Isabelle³²）、近年では関数型プログラミング言語などのプログラミング技術と合流して大きな流れを作りつつある。

(3-4) 妥当性確認とアシュアランスケース

実装（モデル）が仕様を満足していることを確かめるのが検証であるのに対し、仕様が意図通りに記されているかどうかを確かめる作業を妥当性確認という。情報システムや大規模プラントなど、大規模で複雑なシステムでは、仕様の記述が膨大であるのが普通で、仕様がそれを書いた者の意図通りになっているかどうかは、自明ではない。

検証や妥当性確認に加え、これらの確認作業の方法が適切であるかどうかの確認も必要である。検証や確認の対象となる主張、それらの項目が成り立つことの議論およびその根拠を提供するデータ（テスト結果、モデル検査に用いた状態遷移機械の記述と検証項目、検証結果を表す形式証明など）を記した文書をアシュアランスケースと呼んで、リスクコミュニケーションのために用いようという動きが近年盛んである。認証のための提出文書にアシュアランスケースを要求する事例もでてきており、アシュアランスケースに関する国際標準も次々に制定されつつある。

アシュアランスケースは、全くの自由形式で書かれてよいものである。しかし、意思疎通を容易にするためには、一定の構造を持たせた方が好都合であり、アシュアランスケースが持つべき構造が研究された（GSN³³, CAE³⁴, Toulmin diagram³⁵, D-Case³⁶）。

その結果、アシュアランスケースは、数理論理学における形式証明と同様の構造をもつべきことが明らかになった³⁷⁻³⁹。）この考察を押し進め、アシュアランスケースの構造を明確にして、機械処理を可能にしようとする形式アシュアランスケースの研究もある⁴⁰。その背景には情報科学における定理証明支援系研究の成果がある（Agda, Coq, HOL, Isabelle）。

以上はアシュアランスケースの構文的な構造であるが、意味的な構造を明らかにしようとする研究も進められている。

(4) 科学技術的・政策的課題

複雑で大規模なシステムを的確に理解するための数理科学的な基盤が求められている。一般システム理論を発展させて、社会学や経営学などにも適用しようとする Luhmannらの仕事⁴¹は、そのための一つの有望なアプローチを提供している。

妥当性確認は、妥当性確認過程自体の確認をも含む。これは自己参照である。自己参照は矛盾を導き得るが、その矛盾を避ける方法も現在ではいくつか知られている。Luhmann³は自己参照を一般システム理論の重要な項目としてあげており（「再参入 re-entry」）、文献⁵を用いて、いくらか数理科学的な分析をおこなっている。しかし、そこで用いられている形式体系の枠組は学界による検討を経たものとはいいがたく、二十世紀の数理論理学の発展を反映していない。自己参照は情報科学においても中心的課

題の一つであり^{10, 42, 43)}、高階論理⁴⁴⁾や構成的型理論⁴⁵⁾などの学術的に評価が確立した形式体系を用いて、システム工学(systems engineering)への応用を図ることは、システム科学における大きな科学技術的課題である。

妥当性確認の技術的研究は、検証の技術的研究に比べて大きく遅れを取っているが、大規模で複雑なシステムの取り扱いには、検証よりもむしろ妥当性確認が必要とされている。妥当性確認には系統的、科学的手法があり得ないと考える者もいるが、例えばアシュアランスケースは、妥当性確認の結果を客観的に記述するためのものとして広く受け入れられつつある。アシュアランスケースは合理的な議論を記述するためのものであるから、情報科学、論理学、存在論をはじめとする学術研究の対象である。一方、アシュアランスケースは、システムに関する確信を社会で共有するための文書であるため、標準化や認証などの政策と一体となって発展させるべきものである。

以下に、アシュアランスケースに関する科学技術的・政策的課題をいくつかあげる。

1. 確信の問題。数学の証明と違い、アシュアランスケースには蓋然性の議論が含まれる。したがって、アシュアランスケースの確からしさや議論の確実さを量的あるいは質的に評価する方法が求められる^{46, 47)}。
2. オントロジー・整合性。現実をよく反映したアシュアランスケースを記すための、系統的な語彙の与え方(オントロジー)が求められる。また、アシュアランスケースは一般に膨大な文書になるため、自動的、機械的な整合性検査が求められる⁴⁰⁾。
3. 評価法。アシュアランスケースは認証のための提出文書等として用いられるため、アシュアランスケース自体の客観的な評価法の提示が求められる^{48, 49)}。
4. 標準化。確信を社会で共有するためには、アシュアランスケースが対象とするシステムおよびシステムに期待される性質に関する社会的合意が必要である。そのための標準化活動を、システム科学技術に関する政策立案者と研究者・技術者が連携して展開することが求められる^{11, 50, 51)}。

(5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

アシュアランスケース手法を用いたシステムアシュアランスが注目を集めている背景の一つとして、システムに関する標準規格や安全規制の性格付けがここ十年ほどで世界的に大きく変化しつつあることが挙げられる。従来の「規範的(prescriptive)規格・規制」では、開発者・運用者に求められたのは規格・規制の示す特定の技術的要求を満たすことであり、それが規格・規制の目的を達成するのに十分かどうかは規格制定者・規制者側の問題と考えられた。それに対して、近年の「目的に基づいた(goal-based)規格・規制」のアプローチでは、開発者・運用者自らが目的に対するリスクを分析して、適切な技術的要求を設定し、目的が十分に達成されていることを議論と証拠で示すことが要求される。この変化は、複雑・大規模なシステムの障害・事故を通して、規範的規格・規制に限界があり、ある場合には全く有効でないことが認識されてきた結果でもある。

上記の変化で、ここ数年で特に影響が大きいものの例として、以下が挙げられる。

- ・ ISO 26262 Road vehicles – Functional safety (10 パート、2011~2012 年発

行)⁵²⁾: ISO 26262 は自動車の電気・電子機器の機能安全に関する ISO 国際規格で、車載機器のライフサイクル全体を通じて安全ケース (安全性のアシュアランスケース) を作成し活用することが鍵となる (機能安全とは、安全関連機器が機能することによって安全性を確保することをいう)。これはアシュアランスケースの概念を初めて自動車産業に導入するもので、新概念を消化しようとする産業側の活動や、そのニーズを受けた大学等での研究が急速に活発化している。日本でも、JasPar によって機能安全テンプレート、同記入ガイド、等が開発されている⁵³⁾。

- ・医療用機器へのアシュアランスケースの適用: 米国 FDA は、501(k)制度 (医療用機器市販前申請認可制度) の改善に関する 2010 年の報告書において、機器申請にアシュアランスケースを要求していく方向性を示し、2011 年から特に輸液ポンプの認可にアシュアランスケースを用いるパイロットプログラムを進行中である^{54, 55)}。これも、それまでアシュアランスケースに馴染みのなかった産業分野への導入であり、医療機器産業による対応とそれを支援する学術的研究が急速に活発化している⁵⁶⁾。

関連して、医療用機器の安全性に関する英国のプロジェクト Chi+Med (Computer-Human Interaction for Medical Devices)⁵⁷⁾においても、アシュアランスケースの利用が検討されている。

新しい分野の規格・規制にシステムアシュアランスの考えが導入される度に、産業側は上記のような急速な対応をしてきたが、アシュアランスのための費用が大きいことから導入に抵抗が示されることも多い。費用増大の要因に、たとえ共通の技術部品でも、使用先のシステムごとに、また適用分野別の規格・規制ごとにアシュアランスを繰り返さなければならない点がある。安全性のアシュアランスと認証に関する EU の大型プロジェクト OPENCROSS (Open Platform for Evolutionary Certification of Safety-critical Systems)⁵⁸⁾は、合成的・進化的な手法によってアシュアランスの部品化・再利用を促進し、分野に跨る認証の共通基盤を構築することで、アシュアランスと認証にかかる時間・費用を大幅に削減することを目指している。

アシュアランスケース手法の普及のために、アシュアランス議論の具体的・標準的な表現法の確立や計算機上でアシュアランスケースを扱うツールの整備が進められている。表現法としては、航空・鉄道分野でも採用された Goal Structuring Notation (英 York 大) が普及してきている⁵⁹⁾。また、アシュアランスケース・ツールの相互互換性を目的としたデータ形式として、OMG SACM (Structured Assurance Case Metamodel)標準仕様が開発されている⁶⁰⁾。

(6) キーワード

システムアシュアランス、アシュアランス活動、検証、妥当性確認、一般システム理論、再参入、形式、理論の同形性、自己組織性、観察、複雑性、高階論理、構成的型理論、情報、函手意味論、普遍代数、余代数、アシュアランスケース、メタアシュアランスケース、形式アシュアランスケース、定理証明支援系、GSN、CAE、Toulmin diagram、D-Case、確信、モデル検査、SAT solver、SMT solver、model based testing、有限モデル性 (finite model property)、

（7）国際比較

検証に関しては膨大な活動があり、単純な比較が意味をなさないもので、ここでは、近年急速に立ち上がっているアシュアランスケースに関する研究開発について比較する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・形式アシュアランスケース。
	応用研究・開発	○	↗	・産学連携の試みを開始（D-Case研究会）。
	産業化	○	↗	・国際標準への貢献(ISO 15026改訂作業の分担)。
米国	基礎研究	○	→	
	応用研究・開発	◎	→	・アシュアランスケース生成技術(NASA Amesの活動)。
	産業化	◎	↗	・政府認証に取り入れつつある(FDAによる輸液ポンプ認証など)。国際標準への貢献(ISO 15026改訂のリーダーシップ)。
欧州	基礎研究	◎	→	・安全工学、ディペンダビリティ工学など。
	応用研究・開発	◎	↗	・産学の連携が密。自動車や航空、医用機器、軍用技術その他。
	産業化	◎	↗	・国内規制にアシュアランスケースが用いられている(特に英国)。コンソーシアム、ベンチャーなどが盛ん(GSN, Adelard)。事故調査にも用いられている(Nimrod墜落など)。国際標準への貢献(IEC 62741提案)。
中国	基礎研究	×	→	
	応用研究・開発	△	→	
	産業化	△	→	
韓国	基礎研究	×	→	
	応用研究・開発	△	→	
	産業化	△	→	

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Inge, J. R. "The safety case, its development and use in the United Kingdom." In PROC. 25TH INTERNATIONAL SYSTEM SAFETY CONFERENCE. 2007.
- 2) von Bertalanffy, Ludwig. General System theory: Foundations, Development, Applications, New York: George Braziller, revised edition. 1976, ISBN 0-8076-0453-4. (First edition 1968.)
- 3) Niklas Luhmann. Introduction to general system theory.
- 4) Lawvere, F. William. Functorial Semantics of Algebraic Theories and Some Algebraic Problems in the context of Functorial Semantics of Algebraic Theories. Ph.D. thesis, Columbia University, 1963. (Republished in Reprints in Theory and Applications of Categories, 2004, no.5, p.1-121.)
- 5) Brown, Spencer. Laws of form, 5th English editon, 2011, ISBN 978-3-89094-58004, Bohmeier Verlag, Leipzig, Germany. (First published in London in 1969).
- 6) 梅棹忠夫, 湯川秀樹. 人間にとって科学とは何か. 中公新書 132, 中央公論新社, 1967, ISBN-13 978-4121001320.
- 7) Goguen, Joseph; Thatcher, James; Wagner, Eric. An initial algebra approach to the specification, correctness and implementation of abstract data types, In Raymond Yeh (ed.) Current Trends in Programming Methodology IV, Prentice-Hall, 1978, p.80-149.
- 8) Cohn, Paul Moritz. Universal Algebra. Dordrecht, Netherlands: D.Reidel Publishing. 1981, ISBN 90-277-1213-1. (First published in 1965 by Harper & Row).
- 9) Grätzer, George. Universal Algebra, D. Van Nostrand Company, Inc., 1968.
- 10) Rutten, J. J. M. M. Universal coalgebra: a theory of systems. Theoretical Computer Science, Vol. 249 Issue 1, Oct. 2000, p.3 - 80.
- 11) IEC, IEC 62741/Ed1: Guide to the demonstration of dependability requirements. The dependability case, 2014.
- 12) Boehm, Barry W. "Verifying and validating software requirements and design specifications." IEEE software. 1984.
- 13) Goguen, Joseph; Burstall, Rod M. Institutions: Abstract model theory for specification and programming. Journal of the ACM (JACM) . 1992, vol.39, no.1, p.95-146.
- 14) Avizienis, A.; Laprie, J-C.; Randell, B.; Landwehr, C. E. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. Dependable and Secure Computing, IEEE Transactions on 1.1. 2004, p.11-33.
- 15) Utting, Mark; Legiard, Bruno. Practical model-based testing: a tools approach. Morgan Kaufmann, 2010.
- 16) Utting, Mark; Pretschner, Alexander; Legiard, Bruno. "A taxonomy of model-based testing approaches." Software Testing, Verification and Reliability. 2012, vol.22, no. 5, p.297-312.
- 17) Gomes, Carla P.; Kautz, Henry; Sabharwal, Ashish; Selman, Bart. "Satisfiability solvers." Handbook of Knowledge Representation 3 . 2008, p.89-134.

- 18) Barrett, Clark W.; Sebastiani, Roberto.; Seshia, Sanjit A.; Tinelli, Cesare. Satisfiability Modulo Theories. Handbook of satisfiability. 185, 2009, p.825-885.
- 19) De Moura, Leonardo; Bjørner, Nikolaj. "Z3: An efficient SMT solver." In Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. Springer Berlin Heidelberg. 2008, p.337-340.
- 20) Kozen, D. Results on the propositional mu-calculus. Theoret. Comput. Sci..1983, vol.27, p.333-354.
- 21) Pratt, V. R. "A decidable mu-calculus: Preliminary report," Foundations of Computer Science, 1981. SFCS '81. 22nd Annual Symposium. 28-30 Oct. 1981, p.421-427.
- 22) Bradfield, J.; Stirling, C. The Handbook of Modal Logic, chapter Modal Mu-Calculi, 2006, p.721 - 756.
- 23) Clarke, E. M.; Emerson, E. A.; Sistla, A. P. "Automatic verification of finite-state concurrent systems using temporal logic specifications". ACM Transactions on Programming Languages and Systems. 1986, vol. 8, no.2, p.244-263. doi:10.1145/5397.5399 .
- 24) Pnueli, Amir. The temporal logic of programs. Proceedings of the 18th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS), 1977, p.46-57. doi:10.1109/SFCS.1977.32.
- 25) Yi, Wang; Pettersson, Paul; Daniels, Mats. Automatic Verification of Real-Time Communicating Systems by Constraint Solving. In Proceedings of the 7th International Conference on Formal Description Techniques, Berne, Switzerland, 4-7 October, 1994.
- 26) Kwiatkowska, Marta; Norman, Gethin; Parker, David. Stochastic Model Checking. In M. Bernardo and J. Hillston (editors) Formal Methods for the Design of Computer, Communication and Software Systems: Performance Evaluation (SFM'07), volume 4486 of Lecture Notes in Computer Science (Tutorial Volume), Springer. June 2007, p.220-270.
- 27) McMillan, K.L. Symbolic model checking. In Kluwer Academic Publ.,1993.
- 28) Holzmann, G. J. The SPIN Model Checker: Primer and Reference Manual. Addison-Wesley, 2004. ISBN 0-321-22862-6.
- 29) Huet, Gérard; Herbelin, Hugo. "30 years of research and development around Coq." In Proceedings of the 41st annual ACM SIGPLAN-SIGACT symposium on Principles of programming languages. ACM. 2014, p.249-250.
- 30) Bove, Ana; Dybjer, Peter; Norell, Ulf. "A brief overview of Agda—a functional language with dependent types." In Theorem Proving in Higher Order Logics, Springer Berlin Heidelberg, 2009, p.73-78.
- 31) Slind, Konrad; Norrish, Michael. A brief overview of HOL4. In Theorem Proving in Higher Order Logics (TPHOLs). LNCS. Springer. 2008, p.28 - 32.

- 32) Nipkow, Tobias; Paulson, Lawrence C.; Wenzel, Markus eds. Isabelle/HOL: a proof assistant for higher-order logic. LNCS vol. 2283. Springer, 2002. Updated version available as <http://isabelle.in.tum.de/doc/tutorial.pdf>
- 33) Kelly, T.; Weaver, R. The Goal Structuring Notation - a safety argument notation. In Proceedings of the dependable systems and networks 2004 workshop on assurance cases. 2004.
- 34) Bishop, P.; Bloomfield, R. A methodology for safety case development. In F. Redmill and T. Anderson, editors, Industrial Perspectives of Safety-critical Systems - Proc. Sixth Safety-critical Systems Symposium. Springer London, 1998, p.194 - 203.
- 35) Toulmin, Stephen. *The Uses of Argument*. Cambridge University Press, 2003 (First edition 1958).
- 36) Matsuno, Yutaka; Takamura, Hiroki; Ishikawa, Yutaka. "A Dependability Case Editor with Pattern Library." In HASE 2010. 2010, p.170-171.
- 37) Hall, Jon G.; Mannering, Derek; Rapanotti, Lucia. Arguing safety with Problem Oriented Software Engineering. In Proc. 10th IEEE High Assurance Systems Engineering Symposium (HASE'07), 2007, p.23-32.
- 38) Basir, Nurlida ;Denney, Ewen; Fischer, Bernd. Constructing a Safety Case for Automatically Generated Code from Formal Program Verification Information. In Proc SAFECOMP 2008, p.249-262
- 39) Takeyama, Makoto; Kido, Hiroyuki; Kinoshita, Yoshiki. Using a Proof Assistant to Construct Assurance Cases Correctness by Construction (Fast abstract), 42nd Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks, 2012.
- 40) Kinoshita, Yoshiki; Takeyama, Makoto. Assurance Case as a Proof in a Theory ---towards formulation of rebuttals---. In Assuring Safety of Systems: Proceedings of the Twenty-first Safety-critical Systems Symposium. SCSC. 2013, p.205-230.
- 41) Niklas Luhmann. Social systems.
- 42) Aczel, P. Non-Well-Founded sets. CSLI Lecture Notes. no.14, Stanford University Center for the Study of Language and Information, 1988, ISBN-13: 978-0937073223.
- 43) Scott, D. S. "Data types as lattices". Proceedings of the International Summer Institute and Logic Colloquium, Kiel, in Lecture Notes in Mathematics. Springer-Verlag. 1975, vol.499, p.579-651.
- 44) Church, Alonzo. A formulation of the simple theory of types. The Journal of Symbolic Logic 1940, vol.5, no.2, p.56-68.
- 45) Per Martin-Löf. Intuitionistic type theory. Napoli, Bibliopolis, 1984.
- 46) Bloomfield, R.; Littlewood, B. ;Wright, D. Confidence: its roles in dependability cases for risk assessment. Proc. 37th Int. Conf. Dependable Systems and Networks, 2007.
- 47) Hawkins, R.; Kelly, T.; Knight, J.; Graydon, P. "A new approach to creating clear safety arguments." In Proc. Safety Critical Systems Symp. 2011.

- 48) Bloomfield, R.; Bishop, Peter. "Safety and assurance cases: Past, present and possible future—an Adelard perspective." In Making Systems Safer - Proceedings of the Eighteenth Safety-Critical Systems Symposium, Springer London, 2010, p. 51-67.
- 49) Denney, E.; Pai, G.; Habli, I. "Towards Measurement of Confidence in Safety Cases," In Proc. International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM) 2011. 2011, p.380-383.
- 50) ISO/IEC, ISO/IEC 15288 Systems and software engineering - System life cycle processes, 2008.
- 51) ISO/IEC, ISO/IEC 15026 Systems and software engineering – Systems and software assurance – Part 2: Assurance case, 2011.
- 52) ISO, ISO 26262 Road vehicles -- Functional safety. 2011-2012.
- 53) JasPar. 機能安全対応のための解説書・テンプレート. 2013
- 54) FDA. Accomplishments: CDRH Plan of Action for 510(k) and Science.
<http://www.fda.gov/AboutFDA/CentersOffices/OfficeofMedicalProductsandTobacco/CDRH/CDRHReports/ucm276286.htm>
- 55) FDA. Guidance for Industry and FDA Staff - Total Product Life Cycle: Infusion Pump - Premarket Notification [510(k)] Submissions. 2010.
- 56) University of Pennsylvania. Generic Infusion Pump project.
<http://rtg.cis.upenn.edu/gip.php3>
- 57) CHI+MED team. CHI+MED project home page. <http://www.chi-med.ac.uk/index.php>
- 58) OPENCROSS consortium. OPENCROSS project homepage.
<http://www.opencross-project.eu/>
- 59) Goal Structuring Notation Working Group. The GSN working group online.
<http://www.goalstructuringnotation.info/about>
- 60) Object Management Group. OMG Structured Assurance Case Metamodel 1.1. 2014

3.7.5 コンセプトエンジニアリング

(1) 研究開発領域名

コンセプトエンジニアリング

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

コンセプトエンジニアリングとは、「新たな創造を実現していくための、システムの理想的なあり方を戦略的に表現している概念を構築し、実現していくための技術」を指す。つまり、システム構築のライフサイクルの上流工程において、アイデアを作り出し、そのキーとなる特徴を抽出し、関連する専門分野を統合して抽象的なレベルでアーキテクチャを構想し、実現性を含めて評価・確認するための総合的・構造的なアプローチである¹⁾。この意味で、システムズエンジニアリングがシステム構築の長いライフサイクルを通じて確実に実現するための工学であるのに対し、コンセプトエンジニアリングは、「高い抽象度」、「戦略的な特徴への集中」および「短時間での実施」というシステム構築の上流工程であるための特徴に合わせた工学である。

歴史的には、すでに 70 年代初頭に、コンセプトエンジニアリングをキーワードとする文献²⁾が米国で発表されている。現在とほぼ同様の意味として使用されており、当時から、初期段階でコンセプトを適切に定義し、それを製品化に結びつけるという考えが、このコンセプトエンジニアリングという言葉に込められていたことが分かる。ただし、当時はシステムが特定の適用領域に閉じたもの（例えば、単独の自動車など）であったため、必ずしもコンセプトエンジニアリングがなくても対応ができたため、その後の研究は新たなアイデアを生み出すコンセプトメイキングに集中していった。

これに対して、近年スマートグリッドなどを代表とするような、複数領域システムが統合されたシステムが必要になったため、構造的なアプローチとしてのコンセプトエンジニアリングの重要性が急激に増してきた。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

一般的な用語である「コンセプト」と「エンジニアリング」のコンビネーションとしての「コンセプトエンジニアリング」は、少なくとも海外においては比較的長い期間にわたってある程度認知を得ている。しかしその工学的かつ具体的なアプローチについては、いまだに体系化されていないというのが実情である。更に、上述した通り、これまではシステムが単一分野（例えば、自動車などドメインが単独であるか、ソフトウェアのように分野が単独）であったため、高い能力を有する個人がいれば対応することができた。しかし、スマートグリッドやスマートシティなどを代表とする分野統合的なシステムでは、これまで独立なシステムとして構築されていたものが統合されて、一つのシステムとして機能する必要がでてきた。このような分野統合的なシステムを社会に実装するためには、技術的な側面だけでなく、社会的側面（法制度など）も含めて、同時に考える必要がある³⁾。このため、複数の人が協同して検討をする必要がでてきたため、個人の暗黙知と感覚に依存するのではなく、どのような考え方に基づいて、何のために何をやっているのかについて、体系化・明示化されたアプローチが必要となってきた。このような背景から、近年急激にコンセプトエンジニアリングに関する研究が進められ

てきている。

コンセプトエンジニアリングに似た活動として、コンセプトメイキングやコンセプトデザインという活動がある。これらはどちらもコンセプトを作り出すことに中心をおいた活動であり、アイデアを作り出し、その特徴を抽出し、更に実現性を含めながら抽象的なアーキテクチャを構想し、評価・確認するといった、システム構築の上流工程におけるトータルなプロセスをカバーしたものとなっていない。

また、意匠デザインを中心としたデザイン分野としては、作り出したコンセプトをプロトタイピングすることが容易であるため、これまでもいわゆるプロトタイピングを通じてコンセプトを明確にしていく活動が進められてきた。しかしながら、システム全般については必ずしも明示的には実施されていない。これらの活動は、コンセプトエンジニアリングの一部を担うものとはなるが、コンセプトを作り出すすべての活動を網羅しておらず、必要な活動を十分にカバーするものとなっていない。1998年に発表されたサーベイ論文⁴⁾を始め多数の論文で、上流（コンセプト設計）フェーズでの判断が、ライフサイクル全体のコスト・性能・信頼度・環境影響度など極めて広範な要素に重大な影響を与えることが指摘されている。しかもこのフェーズでは入手可能な情報が最も少ないことが大きな制約となっている。

海外においては以下に示す通り、本開発領域に関連する研究が様々なアプローチで実施されてきた。文献⁵⁾では、プロトタイピングプロセスの体系的な評価を試みており、コンセプトフェーズにおける作業が重要な役割を果たしていることを指摘している。ただし、プロトタイピングプロセスに限定した評価となっており、コンセプトに関わるすべてのプロセスに関するものとなっていない。また、概念としてはコンセプトエンジニアリングに関連するものであるが、用語としては必ずしも陽に使われているわけではない。文献⁶⁾においては、調査の結果、製品開発の競争力に最も強い影響を及ぼすのがコンセプトエンジニアリングであると結論づけている。また、コンセプトフェーズに注目しつつ、ライフサイクル全体の理解と、その間、関係者が適切に情報を共有することが不可欠であるとも主張しており、体系的なマネジメントとして捉えることの重要性を指摘している。つまり、コンセプトエンジニアリングのような考え方の重要性は述べているものの、ではコンセプトエンジニアリングがこういったものであるかなどについての検討は含まれていない。文献⁷⁾ではコンセプトエンジニアリングをサポートする支援解析システムとして、“Conceptual design support and analysis system (COSDAS)”と呼ばれる、適用分野に依存しないフレームワークを示している。このCOSDASシステムをある種のテストベッドとして活用することにより、設計作業の体系的な記録や分析を試みている。文献⁸⁾はコンセプトエンジニアリングにおけるアイデア創出の手法に関して幅広く調査・評価してその特徴を整理している。この目的のため、デザインコンセプトを創出する過程を記録・測定するソフトウェアを開発し、手法、問題の種類、作業者等にどの程度依存するかを検討している。ここでは論理的に手法を提示することは決して創造性を損ねるものではないということが確認されており、俯瞰的なアプローチの重要性が強調されている。

以上のように、海外においては、コンセプトエンジニアリングに関連する研究は様々な切り口とアプローチによって継続的に推進されており、一つの専門分野が構成されて

いる。ただし分野に依存しない体系的なエンジニアリング活動という観点としては、まだ緒に就いたばかりであり不十分と言わざるを得ない。

一方、我が国では、当該分野における論文もほとんど存在せず、研究開発の対象としては認識されていなかった。研究開発ではないが、数少ない企業での組織的取り組み事例として確認されたのが、（株）東芝のケース⁹⁾と（株）東レ経営研究所のケース¹⁰⁾くらいであり、海外と比較して本分野における学術的な取組みに関して明らかに遅れを取っている。

以上の経緯を踏まえて、上流フェーズで適切なコンセプトを創り上げ、それを体系的に実現するための手法である「コンセプトエンジニアリング」を研究する意義は大きい。

（４）科学技術的・政策的課題

コンセプトを作り出し、それを実現につなげていくことは、イノベーション創出においても大変重要であり、個別技術分野・製品分野に対する基礎的な研究は、これまでも実施されてきた。しかしながら上流システム工程であるコンセプトフェーズにおいて、適用分野に依存しない体系的な設計手法に対する研究開発は必ずしも十分に研究されていない。特にコンセプトの構築には技術的側面のみならず、組織活動や調達側・供給側に関わる要素も加味する必要があり、総合的かつ構造的にアプローチする手法の確立が大きな課題となっている。さらに複数のコンセプトを体系的かつ定量的に評価した上で最適なものを選択するための手法についても十分とは言えない。

現在、イノベーション創出を目的として、デザイン思考などのアプローチが注目を浴びてきている。デザイン思考やワークショップなどは文部科学省、経済産業省などでもイノベーション創出のための手法として政策的にも活用されている。しかし、デザイン思考は人間中心的なアプローチのため、人が強く関わる対象分野に特に有効なものであり、上述した分野統合的なシステムの人に直接的に関わらない部分も含めてコンセプトをデザインするためには、より俯瞰的に分野横断的なエンジニアリングが必要となるが、現在は明確に政策的には支援・教育が行われていない。このため、政府が今後ますます、分野統合的な大規模システムを進めるときに、その実現を支援する体制が十分にとれないと考えられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

システムズエンジニアリングの国際的団体である INCOSE (International Council on Systems Engineering)の中で、Model-Based Conceptual Design Working Group (MBCD WG)が2012年5月から活動を開始した。このWGは、コンセプトデザインにモデルベース開発のアプローチを適用するというものである。コンセプトデザインという言葉を使っているが、そもそも Model-based Systems Engineering がモデルをシステム開発のライフサイクルを通じて活用していくという概念で作られているため、議論としてはコンセプトエンジニアリングと同じレベルのものが実施されている。MBCD WGは、オーストラリアのシステムズエンジニアリングの団体である SETE (Systems Engineering Test & Evaluation Conference)が中心となって立ち上げたもので、すでに2012年に2回、2013年に3回の会合が SETE や INCOSE のシンポジウムなどで開催

されている。INCOSE の論文誌である INSIGHT の 2014 年 12 月号で MBCD の特集が組まれており、米国、欧州、オーストラリアから投稿された多数の論文から、20 件近くが紹介される予定である。

INCOSE が欧米（およびオーストラリア）を中心として MBCD を組織的に推進する一方で、我が国ではこれに対応した活動は残念ながら不十分と言わざるを得ない。特定の分野に限定することなく、広くあらゆる分野における製品・サービスに影響を及ぼしうる技術分野であり、早急に着手することが必要である。

(6) キーワード

Concept Engineering, Conceptual Design, Concept Making, Model-based Concept Development, Innovation, Idea Creation

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	・一部体系化の試みは実施されたことがあるが、継続はしていない ^{2, 3)} 。
	応用研究・開発	△	→	・一部、体系化されたものをもとに実際に活用を試みられたが、一部のみでの継続に限定されている ⁹⁻¹¹⁾ 。
	産業化	△	→	・実効的には暗黙的知識により実行されている。
米国	基礎研究	◎	↗	・以前体系化されたものをベースに、更に広げるための活動が行われ始めている ^{2, 12)} 。
	応用研究・開発	◎	↗	・以前体系化されたものをベースに、更に広げるための活動が行われ始めている ^{2, 12)} 。
	産業化	△	→	・実効的には暗黙的知識により実行されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・以前体系化されたものをベースに、更に広げるための活動が行われ始めている ^{2, 12)} 。
	応用研究・開発	◎	↗	・以前体系化されたものをベースに、更に広げるための活動が行われ始めている ^{2, 12)} 。
	産業化	△	→	・実効的には暗黙的知識により実行されている。
中国	基礎研究	△	→	・工学的な応用をある程度想定した基礎研究の発表事例もある ¹³⁾ 。
	応用研究・開発	△	→	・実験を通じた応用研究の実績もある ^{14, 15)} 。
	産業化	△	→	・実効的には暗黙的知識により実行されている。
韓国	基礎研究	△	→	・工学的な応用をある程度想定した基礎研究の発表事例もある ^{16, 17)} 。
	応用研究・開発	△	→	・工学的な応用をある程度想定した基礎研究の発表事例もある ^{16, 17)} 。
	産業化	△	→	・実効的には暗黙的知識により実行されている。

(註 1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル
 応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル
 産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
 ◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○ : ある程度の活動・成果が見えている、
 △ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 × : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

↗ : 上昇傾向、 → : 現状維持、 ↘ : 下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Strengers, George A Structure for Model Based Concept Definition. Model-Based Conference Handbook. 2013
- 2) Wetzstein, Hanns J. Interdisciplinary Aspects of Engineering: The Environment of concept Engineering. IEEE trans of Aerospace and Electronic Systems. March 1970, vol. AES-6, No.2 .
- 3) de Weck, Olivier L. et al., Engineering Systems: Meeting Human Needs in a Complex Technological World. MIT Press. 2011
- 4) Hsu, Wynne ;Woon, Irene M Y. Current research in the conceptual design of mechanical products. Computer-Aided Design. 1998, vol.33, p.377-389.
- 5) Wall, Matthew B. ; Ulrich, Karl T.; Flowers, Woodie C. Evaluating prototyping technologies for product design. Research in Engineering Design. 1992, vol. 3, Issue 3, p.163-177.
- 6) Hague, M J ;Taleb-Bendiab, A ; Brandish, M J. An Adaptive Machine Learning System for Computer Supported Conceptual Engineering Design.AI System Support for Conceptual Design. 1996, p.1-16
- 7) Al-Salka, M. A. ;Cartmell , M.P. ; Hardy, S.J. A Framework for a Generalized Computer-based Support Environment for Conceptual Engineering Design. Journal of Engineering Design. 1998, vol. 9, Issue 1 , p.57-88.
- 8) Mohan, Manikandan ;Shah, Jami J. ;Narsale, Sumit ;Khorshidi, Maryam Capturing Ideation Paths for Discovery of Design Exploration Strategies in Conceptual Engineering Design, Design Computing and Cognition '12. 2014, p. 589-604.
- 9) 國澤好衛. デザイン過程におけるコンセプトエンジニアリング. Bulletin of JSSD, 2006, p.276-277.
- 10) 谷口文朗. コンセプトエンジニアリングのセオリーと上野原市中山間地の公共交通体系再構築のためのデマンドミニバスのコンセプト. 帝京科学大学紀要. 2009, vol.5, p.29-49.
- 11) 麻生洋平, 白坂成功, 保井俊之, 前野隆司. 2x2 欲求マトリクス - 心理的価値に基づく利他的コンセプト創出法 -, 日本創造学会論文誌, 2013年2月, vol. 16, p. 171-189.
- 12) Dr Quoc Do, MBCD - Working Group 2013 Activity Report, MBCE Working Group, INCOSE, 2014/09/29.
http://www.omgwiki.org/MBSE/lib/exe/fetch.php?media=mbse:08-iw14-mbse_workshop-mbcd_wg-2013_activity_report-do-final.pptx
- 13) Chen, Yong. et al., A knowledge-based framework for creative conceptual design of multi-disciplinary systems. Computer-Aided Design, 2012, vol.44, p.146-153.
- 14) Zhang, Yu Xian. et al., The Research on Modeling of Design of Product, 2011, Applied Mechanics and Materials, 2011,vol.121-126, p.1196-1199.
- 15) Min, Li, Zhang Mingqin, ;Ruijun, Zhang. Application study of TRIZ theory in product conceptual design. Hoisting and Conveying Machinery. 2010, vol.3.

- 16) Hong, E. P ;Park, G. J. Modular design method based on simultaneous consideration of physical and functional relationships in the conceptual design stage. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014, vol.28, p.223-235
- 17) Park, G. J. Teaching conceptual design using axiomatic design to engineering students and practitioners. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014, vol.28, p.989-998.

3.7.6 SoS アーキテクチャ

(1) 研究開発領域名

System of Systems (SoS) アーキテクチャ

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

実社会における課題を解決に導くためには、対象とする社会技術システムをグローバルな観点から分析し、価値を最大化するために技術的なアプローチを採る必要がある。今や実社会は、発電プラント、自動車、各種機械や産業用ロボットなどの物理的なシステムが、インターネットを含む通信ネットワークに接続されたコンピュータシステムによって管理、統制され、いわゆるサイバーフィジカルシステムとなっている¹⁾。すなわち、社会技術システムは、そのライフサイクルを全般にわたってマネジメントすることができない複数の個々のシステムが複雑に相互関係性をもっている。このような、異質な個々のシステムが独立して動作可能ではあるが、ある共通したゴールに向けて共にネットワークされている大規模な統合された複数システムは **System of Systems (SoS)** と呼ばれる²⁾。こうした複雑な社会技術システムの中で、関心の対象とする製品やサービスなどのシステムが、環境、経済、政策、技術の観点から、所望の機能を果たすことが求められている。当該研究開発領域は、社会技術システムを **System of Systems** として捉え、さまざまな利害関係者からの要求を満たすアーキテクチャとそれを導くためのプロセスを研究する。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

INCOSE SE ハンドブック³⁾で、「システムは、一つ以上の定められた目的を達成するために編成された相互作用する要素の組み合わせ」と定義される。また、アーキテクチャ記述の国際標準 ISO/IEC/IEEE 42010⁴⁾では、「アーキテクチャは、システム要素とその関係性の中で具体化されたシステムの動作環境、ならびに、システムを設計し進化させるその原則における、システムの基本概念または特性」と定義される。システムズエンジニアリングプロセスでは、対象とするシステム (**system of interest**) に関してライフサイクル全体を見渡した上で、要求分析を行い、そしてそのアーキテクチャを構築することが極めて重要となる。

しかしながら、近年では、対象とするシステムが、ライフサイクル全般にわたりマネジメントすることができる単体のシステムではなく、ライフサイクルをマネジメントできないシステムを含めて複雑に相互関係性をもつ複数システムとなる場合がある。このような、異質な個々のシステムが独立して動作可能ではあるが、ある共通したゴールに向けて共にネットワークされている大規模な統合された複数システムを **System of Systems (SoS)** と呼ぶ²⁾。SoS は、大規模で複雑で、ネットワーク化されているため、個々のシステムは独立して動作可能であるが、相互関係があり、SoS の要素であるシステムは、それぞれ異なるシステムライフサイクルを持つ。個々のシステムを最適化しても SoS 全体の最適性は保証されない⁵⁾。

SoS の特徴としては、各システムの運用の独立性、各システムの管理の独立性、進化的な発展、創発的な振る舞い、地理的な分布が挙げられる⁶⁾。文献⁷⁾ではこれらを、自

立性、帰属性、接続性、多様性、創発性という 5 つの特徴にまとめ、文献⁸⁾では、これら 5 つの特徴により、従来のシステムがもつ調和性、集中化、プラットフォーム中心、同質、かつ予見可能性という性質が、SoS ではそれぞれ、独立性、分散化、ネットワーク中心、異質、不確定性という性質になることを述べている。このような特徴をもつ SoS を成功裏に導くには、既存、もしくは、新規のシステムが混在することで得られる能力を、SoS を構成する部分の能力の合計よりも優れたものにするために、計画し、分析し、編成し、統合するプロセスとして、**System of Systems Engineering (SoSE)** が必要となる²⁾。しかしながら、これは容易なことではない。SoS の課題としては、次の点が挙げられる²⁾。システムズエンジニアリングで検討されるコンセプト、分析、制御、評価、設計、モデリング、可制御性、可観測性、信頼性などを、どのように SoS へ拡張して適用するのか。どのように SoS をモデル化し、シミュレーションするのか。SoS の要素となるシステム間のインタフェースをどのように扱うのか。SoS の創発的な振る舞いをどのように扱うのか。SoS の境界は動的であり、これをどのように定めるのか。時間が経つにつれて進化する SoS に関する要求をどのように扱うのか。

このような SoSE の難しい問題に対処するためのマネジメントフレームワークとして、文献⁸⁾では、リスクマネジメント、構成管理、性能管理、政策管理、リソースマネジメントをヒューマンファクタとして実施することを提案している。文献⁹⁾では、SoSE のプロセスを時間で展開した波モデルとして示し、多岐にわたる進化の繰り返しで構成システムの開発を促し、SoS を追加開発として特徴づけている。そこでは、外部環境からの SoS への継続的な入力が必要であり、SoS の動的な性質に対処するための継続的な分析を行い、SoS の進化が繰り返される。この過程の中で、アーキテクチャの進化もまた重要となる。SoS アーキテクチャは時間とともに進化する SoS の持続的なフレームワークを与えると同時に、計画された SoS アーキテクチャが追加的に実装され、それ自身を進化させる。

SoS の進化をサポートするため、文献¹⁰⁾ではリスク分析を用いた方法論が検討されている。ここでは、化学プロセスの安全性を確保するために開発された HAZOPS(Hazard and Operability Study)を修正した形式で SoS の進化に関連するリスクを分析している。また、文献¹¹⁾では、SoS を理解し進化させるためにシステムズモデリング言語 SysML (Systems Modeling Language) を用いることについて論じられており、文献¹²⁾では、全球地球観測システム GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) を事例として、SysML を用いてシステムアーキテクチャをモデルとして記述し、シミュレーションモデルと結合させることでアーキテクチャの評価、分析、詳細化を進めるアプローチを示している。この他、マルチドメインマトリクス (Multi-Domain Matrix) を用いることで、SoS に関する複数のドメイン、すなわち環境、社会、機能、技術、プロセスにわたる関係性を明らかにしている研究¹³⁾、オブジェクトプロセス方法論 OPM (Object-Process Methodology) に基づき、SoS アーキテクチャを分析し、その進化を観測する研究¹⁴⁾がある。

（４）科学技術的・政策的課題

INCOSE は 5 年ごとに 10 年後を見据えた将来ビジョンを示しており、2014 年に公表された最新のシステムズエンジニアリング・ビジョン 2025¹⁵⁾では、常に進化し続ける社会で、環境、経済、政策そして技術などの新たな課題が発生していることを踏まえた上で、その解決策が大規模で複雑なエンジニアリングシステムとなることを指摘している。こうした解決策は、社会的に受容可能で、かつ、社会に対して価値を提供するときのみ成功し得るものであり、ここに応用される技術は、関連する地域、あるいは地域の能力と人的・物的資源に応じて調整されなければならない。そこでは、ライフサイクル全般にわたる分析と、安定した統治環境に沿った安全で、堅牢で、かつ、持続可能な実装が必要となる。特に、文献¹⁶⁾では、価値を最大化することを目的として明確化する価値駆動システムズエンジニアリングの重要性を論じるとともに、環境、経済、政策そして技術の関係性を明確にするこれらの境界を越えたグローバルなコンテキスト分析の重要性を述べている。また、文献¹⁵⁾では、多数の利害関係者の関心事に対処しなければならないという SoS の難しい課題には、そのシステムアーキテクチャの構築などに際して、システムモデルに基づいてシステムズエンジニアリングを遂行するモデルベースシステムズエンジニアリングやデジタル形式でのプロセスに移行することの重要性が強調されている。このような方向性に対しては、モデル間の矛盾を特定するためのアプローチが必要と考えられる¹⁷⁾。

IEEE Systems Society では、製造業のサプライチェーン、車両－ドライバー－環境システム、スマートグリッド、協調制御、同定、学習、適応、モニタリング、故障診断、故障許容制御、SoS 自動制御アーキテクチャといった分野と、制御システムとの関連性が述べられている^{18, 19)}。また、制御理論の観点から SoS について論じる研究²⁰⁾があり、そこでは、マルチエージェントシステムの観点から個々人、業者や組織などでは解決困難な問題を SoS によって解決に導く方向性を提示している。文献²¹⁾では、サイバー攻撃シナリオの検討を通して冗長設計と動的システムモデルと状態推定の 3 つの統合により、コンピュータやコンピュータネットワークの安全を確保するためのサイバーセキュリティが報告されている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

システムズエンジニアリングの知識体系ガイド SEBoK では、SoS に対してどのようにアーキテクチャを構築するべきかという方向性を示している²²⁾。一方で、INCOSE および OMG (Object Management Group) では、モデルベースシステムズエンジニアリングの重要性²³⁾とともに、その基本となるシステムズエンジニアリング教育の必要性を強調している。欧州では、SoS のエンジニアリングとマネジメントにおける研究と革新に関する欧州ロードマップの策定に向けて、Cyber Physical Systems of Systems (CPSoS)の活動を 2013 年から開始している¹⁾。ドイツを中心とした活動として、2013 年 4 月には Industry 4.0 のレポート²⁴⁾が公表され、そこでは製造業を中心とする産業として Internet of Things (IoT)の活用が描かれている。サイバーフィジカルシステムとしての社会技術システムによる価値を生むための仕組みの議論がすでに始められている。米国では、Industrial Internet Consortium²⁵⁾が 2014 に発足し、ここでもサイバーフィ

ジカルシステムによる革新を加速しようと試みられている。カーネギーメロン大学ソフトウェアエンジニアリング研究所では、システムとソフトウェアの購入者とエンジニア（提供者）を越えて、複雑な SoS へのすべての参加者が、ユーザー要求への異なった見方と期待を必要としている現状を踏まえ、SoS Navigator²⁶⁾を提供している。これにより、SoS に関与する各リーダーに対して、彼らが置かれている状況で需要側と供給側の重要な観点からの新たな気づきを与え、SoS コンテキストで現状と異なるビジネスモデルの適応と持続が要求されているか否かを判断するための評価基準を示している。

（6）キーワード

System of Systems、アーキテクチャ、システムズエンジニアリング、社会技術システム、サイバーフィジカルシステム、システムライフサイクル、対象システム、システム設計、システム開発、モデルベースシステムズエンジニアリング、コンテキスト分析、システム解析

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	×	→	・ SoSに関する基礎的な研究論文が見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	・ SoSのシステム故障を防ぐための方法論を論じている ²⁷⁾ 。 ・ 全球地球観測システム GEOSSを実現するにあたってのSoSの観点や、情報システムとしてのアーキテクチャの課題が整理されている ²⁸⁾ 。
	産業化	△	↘	・ 欧米に比べ、産業化に関連する明確な方向性は見えない。
米国	基礎研究	◎	↗	・ IEEEやINCOSEなどに学術論文が多数あり、活発な議論がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	・ システムおよびソフトウェアの分野で着実に進展している。
	産業化	◎	↗	・ 産業界が連携して進展させようとしている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・ IEEEやINCOSEなどに学術論文が複数あり、活発な議論がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	・ システムおよびソフトウェアの分野で着実に進展している。
	産業化	◎	↗	・ 産業界が連携して進展させようとしている。
中国	基礎研究	×	→	・ SoSに関する基礎的な研究論文が見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	・ CPS分野での応用研究が散見される。
	産業化			・ 産業界としての動きの情報は現時点で得られていない。
韓国	基礎研究	×	→	・ SoSに関する基礎的な研究論文が見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	・ CPS分野での応用研究が散見される。
	産業化			・ 産業界としての動きの情報は現時点で得られていない。

（8）引用資料

- 1) Definitions used throughout the project. Towards a European Roadmap on Research and Innovation in Engineering and Management of Cyber-Physical Systems of Systems. <http://www.cpsos.eu/project/what-are-cyber-physical-systems-of-systems/>
- 2) Mohammad, Jamshidi., ed. System of systems engineering: innovations for the twenty-first century. John Wiley & Sons, 2011
- 3) Haskins, Cecilia. Systems Engineering Handbook, A Guide for System Life Cycle Process and Activities. 2010, Ver. 3.2
- 4) International Standard ISO/IEC/IEEE 42010 1st ed., Systems and software engineering —Architecture description. 2011
- 5) Eisner, Howard; Marciniak, John; McMillan, Ray. Computer-aided system of systems (S2) engineering. Systems, Man, and Cybernetics, Decision Aiding for Complex Systems, Conference Proceedings, 1991 IEEE International Conference on. IEEE, 1991.
- 6) Maier, Mark W. Architecting principles for systems-of-systems. Systems Engineering. 1998, vol.1, no.4, p.267-284.
- 7) Boardman, John; Sauser, Brian. System of Systems-the meaning of of, System of Systems Engineering, 2006 IEEE/SMC International Conference on. IEEE, 2006, p.6.
- 8) Gorod, Alex; Sauser, Brian. J.; Boardman, John. T. System-of-Systems Engineering Management: A Review of Modern History and a Path Forward. IEEE Systems Journal, 2008, vol.2, no.4, p.484-499.
- 9) Dahmann, Judith; Rebovich, George; Lowry, Ralph; Lane, JoAnn; Baldwin, Kristen. An implementers' view of systems engineering for systems of systems. Systems Conference (SysCon), 2011 IEEE International, 2011, p.212-217.
- 10) Lock, Russell. Developing a Methodology To Support the Evolution of System of Systems Using Risk Analysis. Systems Engineering, 2012, vol.15, no.1, p.62-73.
- 11) Lane, Jo Ann; Bohn, Tim. Using SysML Modeling To Understand and Evolve Systems of Systems. Systems Engineering, 2013, vol.16, no.1, p.87-98.
- 12) Wang Renzhong; Dagli Cihan H. Executable System Architecting Using Systems Modeling Language in Conjunction with Colored Petri Nets in a Model-Driven Systems Development Process. Systems Engineering, 2011, vol.14, no.4, p.383-409.
- 13) Bartolomei Jason E.; Hastings Daniel E.; Neufville de Richard; Rhodes Donna H. Engineering Systems Multiple-Domain Matrix: An Organizing Framework for Modeling Large-Scale Complex Systems. Systems Engineering, 2012, vol.15, no.1, p.41-61.
- 14) Osorio Carlos A.; Dori Dov; Sussman Joseph. COIM: An Object-Process Based Method for Analyzing Architectures of Complex, Interconnected, Large-Scale Socio-Technical Systems. Systems Engineering, 2011, vol.14, no.4, p.364-382.
- 15) A World in Motion, Systems Engineering Vision 2025. Vision 25 Systems Engineering, INCOSE.

- http://www.incose.org/newsevents/announcements/docs/SystemsEngineeringVision_2025_June2014.pdf
- 16) Leea Benjamin D.; Paredisa Christiaan J.J. A Conceptual Framework for Value-Driven Design and Systems Engineering. 24th CIRP Design Conference 2014, 2014
 - 17) Herzig Sebastian J. I.; Qamar Ahsan; Paredisa Christiaan J.J. An Approach to Identifying Inconsistencies in Model-Based Systems Engineering, Conference on Systems Engineering Research (CSER2014), 2014
 - 18) T. Persini. Control systems technology: Towards a systems-of-systems perspective, IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 18., no.2, p.249, March 2010
 - 19) Samad Tariq; Parisini Thomas. Systems of Systems, from The Impact of Control Technology. T. Samad and A.M. Annaswamy, 2011.
<http://ieeecss.org/general/impact-control-technology>
 - 20) Karcianas Nicos. System of Systems: A Control Theoretic View, 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2013, p.1732-1737.
 - 21) Horowitz Barry M.; Pierce Katherine M. The Integration of Diversely Redundant Designs, Dynamic System Models, and State Estimation Technology to the Cyber Security of Physical Systems. Systems Engineering, 2013, vol.16, no.4, p.401-412.
 - 22) Architecting Approaches for Systems of Systems. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK).
http://www.sebokwiki.org/wiki/Architecting_Approaches_for_Systems_of_Systems
 - 23) MBSE Wiki. Object Management Group (OMG).
<http://www.omgwiki.org/MBSE/doku.php>
 - 24) Securing the future of German manufacturing industry, Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, Final report of the Industrie 4.0 Working Group. National Academy of Science and Engineering, 2013.
http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/rot/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report_Industrie_4.0_accessible.pdf
 - 25) Internet Industrial Consortium.
<http://www.iiconsortium.org/index.htm>
 - 26) SOS Navigator 2.0: A Context-Based Approach to System-of-Systems Challenges. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University.
<http://resources.sei.cmu.edu/library/asset-view.cfm?assetid=8515>
 - 27) Nakamura Takafumi; Kijima Kyoichi. System of System Failure: Meta Methodology to Prevent System Failures. System of Systems, Edited by Dr. Adrian V. Gheorghe, 2012.
 - 28) Shibasaki Rousuke; Pearlman Jay S. System of Systems Engineering of GEOSS (Global Earth Observation System of Systems). Chapter 22, Mohammad, Jamshidi., ed. System of systems engineering: innovations for the twenty-first century. John Wiley & Sons, 2011.

3.7.7 ライフサイクルマネジメント

(1) 研究開発領域名

ライフサイクルマネジメント

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

システムには、設計から、構築、廃棄へとといった複数の段階からなる時系列的な流れが存在する。この流れはライフサイクルと呼ばれ、各段階において性能や機能ならびに品質、信頼性、安全性などのシステムの特徴が確認され、様々な意思決定がなされるなどして、各段階の進捗が管理される。この管理がライフサイクルマネジメントである。ライフサイクルマネジメントの研究は、長期間にわたり発現するシステムの特徴であるライフサイクル特性（システム価値）を最大化するために必要なマネジメントに関する研究であり、ライフサイクルにおける各段階の進め方に関する研究や、各段階で必要となる検討の順序に関係する研究が存在する。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

旧来の考え方では、システムが起動、使用される際の、システムに要求する機能の実現保証が重要課題であり、将来に起こる可能性があることに対しては殆ど注意が払われなかった。しかしながら、システムの規模が拡大し、その使用期間が長期化するにしたがって、長期にわたるシステムの発展自体が要望として重要な側面の一つとなった。システムの長期間にわたり発現する特性に注意する必要があるが指摘され、ライフサイクルマネジメントの必要性が認識されている。

システムのライフサイクルは、開発（Exploration）、構想（Concept）、設計（Development）、構築（Production）、支援（Support）、利用（Utilization）、廃棄（Retirement）の7つの段階から構成される^{1, 2)}。各段階においてシステムの特徴が確認され、段階の進捗がマネジメントされる。このマネジメントがライフサイクルマネジメントである。ライフサイクルマネジメントに関する研究は、後述するシステムのライフサイクルにおける特性（ライフサイクル特性）を最大化するために必要なマネジメントに関する研究であり、ライフサイクルにおける各段階の進め方に関する研究や、各段階で必要となる検討の順序に関係する研究も含まれる。

ライフサイクルマネジメントの対象を実質的な適用分野で考えると、建築物や車、電気製品などの工業製品や、銀行のオンラインシステムやWebサービスシステムのようなソフトウェアなど、様々に存在する。それらの対象に応じて、ライフサイクルマネジメントを具体的に捉える活動、概念が存在する。代表的なものとして、プロダクト・ライフサイクルマネジメントとソフトウェア・ライフサイクルプロセスがある。

(3-1) プロダクト・ライフサイクルマネジメント（PLM: Product Lifecycle Management）³⁾

製造業において、製品開発期間の短縮、生産工程の効率化、および顧客が要求する製品を適切に市場投入できるように、企画・開発から設計、製造・生産、出荷後のサポートやメンテナンスまで、製品のライフサイクルを包括的に管理することが重要視されている。これには、製品のライフサイクルに関係する製品データを共有化する情報システムなどが構築され、数多く市販されている。

また、環境配慮型設計（エコデザイン）においては、製品のライフサイクルにおけるリユース、リサイクル、アップグレードなどを、企画・開発段階から計画し、製品設計に埋め込むライフサイクルプランニングという考えも提唱されている。このライフサイクルプランニングもライフサイクルマネジメントに関連する概念として認識できる。さらには、顧客に対して物理的な製品を提供するだけでなく、販売後の製品サポートやメンテナンスなどのサービスの提供まで含めたシステムを提供することで、製品の付加価値を高める取組みが活発化している。この取組みはプロダクト・サービスシステム（PSS：Product Service System）⁴⁻⁶⁾と言われ、プロダクトとサービスを一体化したシステムのライフサイクルマネジメントの重要性が強く認識されている。

なお、プロダクト・ライフサイクルマネジメントのライフサイクルとは異なる意味で使用される用語として製品ライフサイクル（PLC：Product Life Cycle）が存在する。製品ライフサイクルは、販売市場での製品の導入期、成長期、成熟期、衰退期の4つの段階からなる、新製品の普及過程に関する概念である。製品企画やマーケティングなどの分野では、製品システムと市場との関係、市場参入者との競争関係、顧客や社会的責任などを考えた上での最適な製品ライフサイクルを設計することの重要性が議論され、様々な手法が提案されている。

(3-2) ソフトウェア・ライフサイクルプロセス（SLCP：Software LifeCycle Process）

ソフトウェアの構想・設計から開発、導入、運用、保守、破棄に到るまでの工程全体をライフサイクルプロセスと定義し、そのライフサイクルプロセスをマネジメントするために、構成する各工程について個々の作業内容、用語の意味などを標準化した枠組みが提案されている。ソフトウェアの開発・運用に際しては、発注側と受注側の間で相互の役割や責任範囲、各工程の具体的な業務内容について認識に差異が生じてしまうが、枠組みによって規定される標準モデルを活用することによって、相互認識を共通化することが期待できる。1995年8月に国際標準化機構（ISO）によって策定されたISO/IEC 12207がSLCPの標準的なモデルとなり、日本では、1996年7月にISO 12207を日本語化したものがJIS X 0160:1996としてJIS規格となっている。

図1に、ISO/IEC 15288（JIS X0170）で定義されているライフサイクルプロセスを示す⁷⁾。このプロセスは、下記の合意プロセス、エンタプライズプロセス、プロジェクトプロセス、テクニカルプロセスの4つのプロセスから構成される。

- ・合意プロセス（Agreement Process）：製品またはサービスの取得・提供に関する合意を確定するための活動
- ・エンタプライズプロセス（Enterprise Process）：合意を確実に満たすための組織の能力を管理し、プロジェクト遂行に必要な資源および基盤を提供する活動
- ・プロジェクトプロセス（Project Process）：プロジェクト計画を確立し、進捗を追跡し、目標の達成までコントロールする活動
- ・テクニカルプロセス（Technical Process）：システムに対する要求を定義し、要求を製品に変換し、サービスを提供するために製品を使用し、その効用を持続させ、製品を終息させる活動

上記のプロセスを円滑に進めるためのマネジメントに関する研究が存在する。プロジ

ェクトプロセスに関しては、後述のプロジェクトマネジメントが関連するが、テクニカルプロセスは、利害関係者要件定義（Stakeholder Requirements Definition）、要求分析（Requirements Analysis）、方式設計（Architectural Design）、実装（Implementation）、結合（Integration）、検証（Verification）、移行（Transition）、妥当性確認（Validation）、運用（Operation）、保守（Maintenance）、処分（Disposal）の11種類のプロセスに整理され、それらのプロセスのマネジメント方法に関する開発、研究課題が多く存在する。

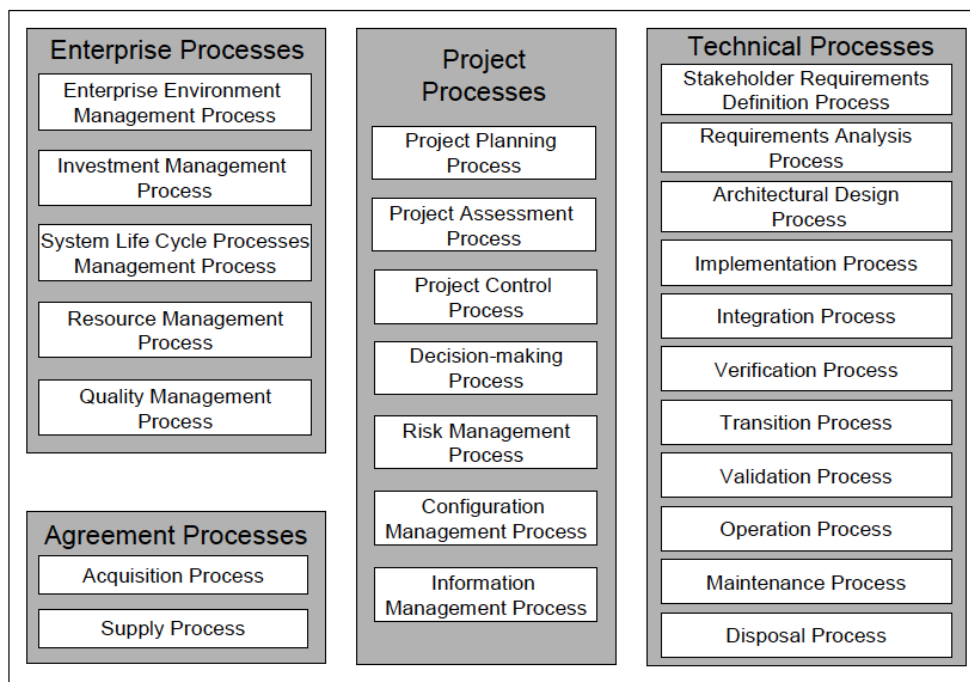


図1 システムのライフサイクルプロセス⁷⁾

このテクニカルプロセスのマネジメントに関連して、その実行モデルとして V-model が提唱され、システムの構築プロセスが整理されている。この中での V の意味は、システムのライフサイクルにおけるテクニカルプロセスをグラフィカルに V 字で表現したものであり、さらには、Verification と Validation の V&V モデルからも由来している。V&V モデルは、システムが設定された目的に応じて構築されているかを検証するプロセスであり、「Verification：仕様に沿ってシステムを正しく構築しているのか?」、「Validation：目的に適った正しいシステムを構築しているのか?」を検証するものである。V 字型で表現されるプロセスの左側はシステムの仕様を記述していく流れを示しており、右側はテストの流れを示す。仕様策定部分は、ユーザ要求仕様→機能仕様→設計仕様（詳細仕様）の順となる作業から構成される。また、テスト実行部分は、単体テスト→結合テスト→システムテストの順となる作業から構成される。

ライフサイクルにおけるシステムの特性を評価することはライフサイクルマネジメントにおいて重要な位置づけとなる。システムの複雑化に伴って、ライフサイクルにおいて重要な副作用が発生するようになった。柔軟性や保守性など、システムに要求される

特性は、システムが最初に使われ始めた後で出現することが多い。これらの特性は英語では"-ility"で終わることが多いので、イリティと総称される⁸⁾。イリティとして扱われるシステム特性としては、品質、信頼性、安全性、柔軟性、堅牢性、耐久性、スケーラビリティ、適応性、ユーザビリティ、相互運用性、持続性、保守性、試験容易性、モジュール性、復元力、拡張性、機敏性、製造可能性、修理性、発展性などが挙げられる。これらのイリティの定義、活用法に関する研究はライフサイクルにおけるシステムの定量的評価を実現するうえで重要である。

ライフサイクルにおいてはシステムの変更がしばしば発生する。マネジメントとしては、その変更に対して適切に対応することが重要課題となる。システムの変更に対するマネジメントとしては、コンフィグレーション・マネジメント（CM：Configuration Management，構成管理）がある^{9, 10)}。コンフィグレーション・マネジメントは、システムのライフサイクルにわたる性能、機能的および物理的要件、設計、操作に関する情報などを管理し、要求の変化に応じたシステムの構成変更に対応する。複雑なシステムである軍事、IT サービス、土木構造物、生産システム、パッケージソフトウェアなどで利用される。システムの構成変更を検討する際には、システムの構成要素間、サブシステム間、システム間の機能的関係を把握し、システムの部分的変更が及ぼす影響を考慮することが重要とされる¹¹⁾。コンフィグレーション・マネジメントの方法論に関する研究はシステムのライフサイクルをマネジメントする上では重要な研究課題として認識できる。

（４）科学技術的・政策的課題

- 1) ソフトウェアではライフサイクルの標準モデルが示されているが、一般的にはライフサイクルという考え方の存在を示しているだけであり、そのライフサイクルの中でモデルがどのように変遷するかを具体的に議論することまでには至って居ない。ライフサイクルモデルが示すように、ライフサイクルに応じてシステムに対する認識は変化し、モデルは変遷する。モデル間の整合性を確保し、モデルの生成や活用を効果的に進める手法に関する研究が要望される。
- 2) システムの大規模化、複雑化に伴ってシステムの変更要求に対する対応が複雑化している現状が存在する。マネジメントの観点では、変更の影響が俯瞰でき、全体的な視野でマネジメントすることが要望される。大規模、複雑なシステムを効果的に俯瞰できる手法が待望される。
- 3) ライフサイクルマネジメントの対象が工業製品であるプロダクト・ライフサイクルマネジメントに関する研究、実用化は進んでいる。しかしながら対象製品に特化される部分が多く、汎用的な手法とし実用化されていない他の製品、システムへ使用することは困難な状況である。
- 4) ライフサイクルという時間軸を意識し、将来のシナリオを想定したマネジメントを計画することは有効である。推定する将来のシナリオの不確実な情報を扱い、システムの計画、構築に対して有効に活用する研究が待望される。
- 5) システムの変更は、一貫性を保証する体系的手法を使って提案され、評価され、実施される必要がある。変更案は予想されるシステム全体への影響について常に評価され

る。その際に、変更が規定通りに行われるかを検証し、部品やシステムの文書が実際の構成を反映していることを確認することが重要である。完全な構成管理では、部品毎、サブシステム毎、システム毎についての全システム情報が実体を反映するよう対策をとる手法の開発が待望される。

- 6) システムの大規模化、複雑化に伴い、システムに関係する知識も大規模、多様化する。それらの知識を集約し、有効活用する人材も多分野から構成される。それらの人が持つ知識を集約し、システムの構成要素間の関係を明確にする必要性はある。また、それらの情報を可視化し、システムの共通理解を与えるプラットフォームの開発が重要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

現代社会が大規模に激変する時代を迎え、システムの外部環境の変化を深く考慮したシステムの構築、運用は極めて重要な課題である。また、複合システム（SoS：System of Systems）の時代と表現されるように、多様なシステムが複雑に相互作用を持つ現在では、システムの変化、変更に対する適応性は必須である。この問題認識の視点から整理する。

- 1) プロジェクト・ポートフォリオ管理（PPM：Project Portfolio Management）¹²⁾：同時に進行している全プロジェクトを対象に、プロジェクトの優先順位やリソースの割当等を検討し、組織の戦略に基づいて計画／実行／管理／統制を行なうプロジェクト・ポートフォリオ管理（PPM）が存在する。この管理も、システムのライフサイクルを管理する上では重要であり、ライフサイクルマネジメントに関連する重要課題である。
- 2) チェンジマネジメント（Change Management）¹³⁾：システムのライフサイクルにおけるすべての変更をコントロールするためのマネジメントである。システムの機能を最小限の停止に止めながら、システムの変更を実現化する方法論である。システムの運用段階において、顧客の要求、外部環境の要求などの変化に対する柔軟な対応を実現する重要課題である。
- 3) レジリエンス（Resilience）¹⁴⁻¹⁶⁾：レジリエンスとは、環境から加えられる擾乱に対してシステムが適応し、平常状態をどれだけ維持できるかという能力のことである。環境変化に対する生態系の回復能力を意味する概念であったが、技術システム、社会システムにおいて、安全性・信頼性などよりも進んだ概念として注目され始めている概念である。東日本大震災において甚大な災害を受けた日本においては、社会システム、産業システムなどの機能復旧が問題視され、システムのレジリエンス性に関する研究の必要性が強く叫ばれた。システムに対する想定外の危機発生に対する機能回復力がシステムの評価指標となるが、System of Systemsにおいては多様な利害関係者（Stakeholders）が関与しているため、総合的なレジリエンスを評価する方法論の構築が必要である。
- 4) システム構造の分析：システムのモデル化および分析は容易な仕事ではない。システムの個々の要素を全て抽出するだけでなく、これらの要素がどのように互いに影響し合い、また、これらがシステムの境界線を超えて他のシステムや外部環境とどのよう

に相互作用するかを追跡する必要がある。システムを構成要素とそれらの影響関係からなるネットワークで捉えることにより、システムの変更に対する柔軟性や、変更が及ぼす影響等が議論できる。さらには、DSM (Dependency Structure Matrix / Design Structure Matrix) や MDM (Multi Domain Matrix) などによるシステムの構造を可視化し、分析するアプローチ^{17, 18)}は、行列表示でシステム要素間の関係を示すシンプルな手法であるが、その可能性は高いと思われる¹⁹⁾。

(6) キーワード

プロダクト・ライフサイクルマネジメント (PLM: Product Lifecycle Management)、ライフサイクルプランニング、プロダクト・サービスシステム (PSS: Product Service System)、製品ライフサイクル (PLC: Product Life Cycle)、ソフトウェア・ライフサイクルプロセス (SLCP: Software LifeCycle Process)、V-model、コンフィグレーション・マネジメント (CM: Configuration Management)、プロジェクト・ポートフォリオ管理 (PPM: Project Portfolio Management)、チェンジマネジメント (Change Management)、レジリエンス (Resilience)、イリティ (ility)、DSM (Dependency Structure Matrix)、MDM (Multi Domain Matrix)

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> 手法の基礎となるモデル・理論の研究などはあまり盛んに行われていない。 大学等の教育機関では、ライフサイクルマネジメントは課題とされていない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ライフサイクルマネジメントの市販システムを外部から購入し、活用しようすることが多い。 日本的なマネジメント手法が残り、新しいマネジメント手法への移行の障壁となっている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> システムエンジニアリングに関する学術活動は低調であり、ライフサイクルマネジメントの必要性は理解されているが、実行性に乏しい。 自動車産業等では継続的に研究・実践が行われており、世界的に高いレベルにある。 社会システムの分野、特に教育や行政の分野では研究・実践が遅れている。
米国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究が確実にされている。 大学等の教育機関では、ライフサイクルマネジメントは課題となっている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究の成果を応用する流れが存在する。特に大学と企業との共同研究が盛んである。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> システムズエンジニアリング協会 (INCOSE) の活動を通じて、ライフサイクルマネジメントの普及活動は盛んである。 社会システム分野、特に、医療・福祉や教育の分野の研究・実践はトップレベル。 プロダクト・ライフサイクルマネジメントを対象とした市販システムが存在し、実務レベルでの活用が盛んである。 ソフトウェアに関するライフサイクルマネジメントに関しては、標準モデルの策定や、マネジメント手法の標準化等、実務レベルにおいて精力的に進められている

欧州	基礎研究	○	↑	・システムの複雑性を定量化したり、構造分析の手法などの研究が行われたりなど、基礎研究が確実に実施されている。
	応用研究・開発	◎	↑	・基礎研究の成果を応用する流れが存在する。特に大学と企業との共同研究が盛んである。 ・製品とサービスの統合システム（PSS）に関するライフサイクルマネジメントの研究、実用化が盛んに検討されている。
	産業化	○	→	・システムズエンジニアリング協会（INCOSE）の活動を通じて、ライフサイクルマネジメントの普及活動は盛んである。 ・プロダクト・ライフサイクルマネジメントを対象とした市販システムが存在し、実務レベルでの活用が盛んである。
中国	基礎研究	△	→	・大学等では、ライフサイクルマネジメントは研究課題として取り組まれているようである。欧米追従的な内容である。
	応用研究・開発	×	-	・特筆すべき活動・成果が見えていない。
	産業化	×	-	・特筆すべき活動・成果が見えていない。
韓国	基礎研究	△	→	・応用研究のニーズに引っ張られて基礎研究も進められている。 ・大学等の教育機関では、ライフサイクルマネジメントは課題となっている。
	応用研究・開発	○	↑	・情報技術を有効活用したプロダクト・ライフサイクルマネジメントに関する取組みは積極的であり、応用的な研究は盛んである。
	産業化	○	→	・ライフサイクルマネジメントを導入する活動は盛んである。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK), [http://www.sebokwiki.org/wiki/Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge \(SEBoK\)](http://www.sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_(SEBoK))
- 2) 井上雅裕, 陳 新開, 長谷川浩志. システム工学 問題発見・解決の方法, オーム社, 2011.9
- 3) IEEE Std 15288™-2004, Adoption of ISO/IEC 15288:2002 Systems Engineering—System Life Cycle Processes
- 4) Corallo, Angelo ; Latino, Maria Elena ; Lazoi, Mariangela ; Lettera, Serena ; Marra, Manuela ; Verardi, Sabrina. Defining Product Lifecycle Management: A Journey across Features, Definitions, and Concepts, Hindawi Publishing Corporation, ISRN Industrial Engineering Volume 2013, Article ID 170812.
- 5) Park, Yongtae ; Geuma, Youngjung ; Lee, Hakyeon. Toward integration of products and services: Taxonomy and typology, J. Eng. Technol. Manage. 2012, vol.29 p.528-545.
- 6) Umeda, Yasushi; Takata, Shozo; Kimura, Fumihiko; Tomiyama, Tetsuo; Sutherland, John W.; Kara, Sami; Herrmann, Christoph; Duflou, Joost R. Toward integrated product and process life cycle planning—An environmental perspective. CIRP Annals -

- Manufacturing Technology. 2012, Vol. 61, Issue 2, p. 681-702.
- 7) Boehm, Matthias; Thomas, Oliver. Looking beyond the rim of one's teacup: a multidisciplinary literature review of Product-Service Systems in Information Systems, Business Management, and Engineering & Design. *Journal of Cleaner Production* 51. 2013, p.245-260.
 - 8) de Weck, Olivier L.; Roos, Daniel; Magee, Christopher L. エンジニアリングシステムズ (春山真一郎 監訳) . 慶應義塾大学出版会. 2014.2.
 - 9) Xu, Yuchun ; Malisetty, Mahesh Kumar ; Round, Michael. Configuration management in aerospace industry. *Procedia CIRP* 11. 2013, p.183 – 186.
 - 10) Lindkvist, Carmel ; Stasis, Angelos ; Whyte, Jennifer. Configuration management in complex engineering projects. *Procedia CIRP* 11 . 2013, p.173 -176.
 - 11) D. C. Wynn, N. H. M Caldwell, P. J. Clarkson; Predicting change propagation in complex design workflows, *Journal of Mechanical Design*. 2014, vol.136, 081009-1 - 081009-13.
 - 12) Martinsuo, Miia. Project portfolio management in practice and in context, *International Journal of Project Management* 31. 2013, p.794-803.
 - 13) Motawa, I.A.; Anumba, C.J.; Lee,S.; Peña-Mora,F. An integrated system for change management in construction, *Automation in Construction* 16 . 2007, p. 368-377.
 - 14) 東京大学大学院工学系研究科 編著. 震災後の工学は何をめざすのか. 内田老鶴圃. 2012.7
 - 15) Hollnagel, Elik; Woods, David D.; Leveson, Nancy. レジリエンスエンジニアリング 概念と指針 (北村正晴 監訳) . 日科技連. 2012.11.
 - 16) 東北大学災害復興新生研究機構 <http://www.idrrr.tohoku.ac.jp/>
 - 17) Schmidt, Robert III;Vibaek, Kasper Sanchez; Austin, Simon. Evaluating the adaptability of an industrialized building using dependency structure matrices, *Construction Management and Economics*. 2014, vol. 32, no. 1-2, p.160-182.
 - 18) Eppinger, Steven D.; Browning, Tyson R. *Design Structure Matrix Methods and Applications (Engineering Systems)* . The MIT Press. First Edition edition ,May 25, 2012.
 - 19) Lindemann,Udo; Maurer, Maik; Braun, Thomas. *Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design*.Springer. 2009 edition (October 15, 2008).

3.7.8 プロジェクトマネジメント

(1) 研究開発領域名

プロジェクトマネジメント

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

科学の進歩が緩やかであった時代、日々の仕事には変化が少なく、繰り返しの作業が多かった。しかし、現代社会は、科学技術の発展に伴い、めまぐるしく変化している。そのため、システムを構築する際に過去の作業形態や作業手順が有効とは限らなくなってきた。行政や企業においても、絶えず自らを変革し、価値あるシステムを顧客に提供していくことが求められる。このような社会状況を背景に、私たちは、絶えず新しいシステム構築にチャレンジしていくことが必要となっている。新しいシステムを構築する場合は、日々の業務とは別にプロジェクトとして取り組む。プロジェクトは必ず新しい何かを含んでいるため、過去に成功した方法を使えば成功するというものではない。未経験な事態を前提に、新しいチャレンジが必要とされる。新規性と不確実性を伴うシステム構築を組織として成功に導いていくための一連の科学的方法とプロセスをまとめたものがプロジェクトマネジメントである。また、そのための科学的手法や関連する領域を横断する、いわば目標達成のための統合的な方法論全般が研究領域となる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

プロジェクトを確実に成功させるためには、科学的な計画の立案が重要となる。プロジェクトに関する計画技法の始まりは、必ずしも定かではないが、近代のプロジェクトマネジメントに関するツールには、ネットワークダイアグラムを用いて日程計算等を行う PERT(Program Evaluation and Review Technique)や CPM(Critical Pass Method)、プロジェクトの作業を統一的な価値の基準に置き換えて計画・管理していく技法として、EVM(Earned Value Management)¹⁾等が利用されている。これらは1960年代に開発されたシステム科学技術であり、教科書にも取り上げられている。また、システム構築プロジェクトを確実に成功させるためには、上記の技法だけでなく、組織としての取り組みが重要であり、職業人としてのプロジェクトマネージャの存在が重要になる。このようなことを背景として、米国では1969年に、プロジェクトマネジメントに関する団体として、PMI(Project Management Institute)が設立された。そして、様々な産業で使える汎用的なプロジェクトマネジメントに関する知識体系として、1996年に PMBOK(Project Management Body of Knowledge) Guide²⁾が発行された。PMBOK Guide は、4年に一度更新され、最新の第5版では国際規格である ISO 21500 と同じく、プロジェクトマネジメントの知識エリアを、統合、スコープ、タイム、コスト、品質、人的資源、コミュニケーション計画、リスク、調達、ステークホルダーとし、各知識エリアに分けて記述している。

欧州では、IPMA(International Project Management Association)が、ICB(IPMA Competence Baseline)と呼ばれる標準を発行しており、現在、約50ヶ国のPM団体が加盟している。英国では公共調達プロジェクトに用いるPMの標準として、Prince2(PRjects IN Controlled Environments, version 2)の適用をOGC(英国商務局)が義務付けている。また、BS 6079は、英国の標準であるBritish Standardの一つで、プ

プロジェクトマネジメントに関する3部構成の標準となっており、主として建設系で利用されることが多い³⁾。

日本では、1996年のPMBOK Guideの発行をきっかけにプロジェクトマネジメントへの注目が高まり、1998年から1999年にかけて、日本プロジェクトマネジメントフォーラム（現、日本プロジェクトマネジメント協会）、PMI東京支部、プロジェクトマネジメント学会が相次いで設立された。プラントエンジニアリングや情報産業を中心に、プロジェクトマネジメントへの取り組みやプロジェクトマネージャの育成が活発化した。また、2001年には、P2M（プロジェクト&プログラムマネジメント標準ガイドブック）が日本発のガイドとして発刊された。

（4）科学技術的・政策的課題

プロジェクトには、必ず各プロジェクト固有の新しい要素が含まれており、決められた手順で実施すれば成功が約束されるわけではない。そこで、少しでも確実にプロジェクトを成功させていくために、様々な産業分野で、プロジェクトに関する取り組みがなされて来た。現代のプロジェクトマネジメントは、国防、プラントエンジニアリング、宇宙開発などで生まれ、建設や情報分野など、日常的に多くのプロジェクトを実施している産業分野で発達してきた。しかし、近年、社会の変化が激しくなり、より多くの分野で日常的にプロジェクトに取り組むことが多くなっている。例えば、政府や地方公共団体は多くのイベントを実施しており、それらの確実な実施のためにプロジェクトマネジメントが必要となっている。また、JAXAでは、ロケットの打ち上げから始まり、多くの研究プロジェクトを抱えており、これらのプロジェクトの成功のために、プロジェクトマネジメントに取り組んでいる。

このように、従来の産業分野やシステム構築だけでなく、科学技術研究なども、プロジェクトとして取り組まれており、その研究プロジェクトの確実な成功のためには、プロジェクトマネジメントの進展と啓蒙が必要となっている。

科学技術や研究に関するプロジェクトは、土木や建設のプロジェクトに比べ、さらに不確実性が強いという性質を持っている。このことから、従来のプロジェクトマネジメントの枠組みだけでは不十分であり、科学技術研究のような不確実性の高いプロジェクトに対しても効果が発揮できるプロジェクトマネジメントのあり方に関する研究が必要である。これらの研究成果は、不確実性を内包するシステムの構築にも適用可能である。

国や行政組織が行う科学技術研究プロジェクトは、税金によって実施されており、限られた期間、予算、人員の中で、成功への精度を高めることが要求される。また、その科学技術研究プロジェクトの成功率が国際競争において重要な要素となる。仮に、他国に比べて科学技術研究プロジェクトの成功率が悪い場合は、まさに国際競争力そのものが低下することになる。このことから、行政としてもプロジェクトの成功率を上げるために、プロジェクトマネジメントに取り組む時代に来ている。

国や行政組織が行うプロジェクトは、研究開発だけではない。公共事業や情報システムの調達もプロジェクトである。このような調達プロジェクトも、一つひとつ確実に効率的に取り組まなければならない。そういう意味においても、行政としてプロジェクトマネジメント技術の利用、そしてその知識のある人材の登用が必要不可欠である。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

プロジェクトには、新規性、個別性の問題があり、必ず計画の中に不確実性を伴う。この不確実性への取り組みがプロジェクトの成否に大きく影響する。近年は、社会が大規模化、複雑化するとともに、変化が激しくなり、関与するステークホルダーの多様化と相まって、プロジェクトに含まれる不確実性も従来とは比較できないほど大きくなっている。このことを含め、プロジェクトマネジメント領域では、以下の動向が予想される。

1) プロジェクトの持つ不確実性へのマネジメントの確立

プロジェクトの持つ不確実性については、主にリスクとして語られ、研究の重要なエリアである。リスクの識別方法、リスク対策、プロジェクト期間を通したリスクマネジメントプロセス等に関する研究が行われている⁴⁾。また、今後は、システムが一層大規模化、複雑化してくることが予想され、リスクに対する更なる取り組みや複雑なシステム構築に適用できるプロジェクトマネジメントの研究が期待されている⁵⁾。

2) プロジェクトの見積り

計画段階でプロジェクトの規模を可能な限り正確に見積もることは、プロジェクトを成功させるために重要な要素である。建設、プラントエンジニアリング、情報システム開発などのシステム構築では、それぞれの産業分野ごとに見積りのベストプラクティスが存在する。また見積りの手法としては、積算、過去プロジェクトデータからの回帰予測などがある。IT プロジェクトでは、情報システムそのものの規模の計測のために、プログラムコード数だけでなく、ファンクション・ポイント数などが使われており、それらをどのように計測、予測するかの研究が数多くなされている。しかし、システム構築の技術は、日進月歩を遂げているため、企業が独自にデータを蓄積し、より適切な見積りができるように研究が進められている⁶⁾。本課題においては、今後もさらなるデータの蓄積と分析が必要である。

3) スケジューリング

プロジェクトのスケジューリングには、PERT 等の技法が用いられる。また、プロジェクトマネジメントツールでは、具体的な人の割り当てを含めたスケジューリングの技法が既に広く用いられている。しかしながら、実際のプロジェクト現場では、作業と、その作業を実施するために必要なスキルや技能とのマッチングを考慮しなければいけないという課題がある。また、システム構築では、途中で計画や設計を変更しなければならないことがある。このような、プロジェクト途中での変更に対応することも求められる。以上のことから、プロジェクトメンバーが保有するスキルに基づくスケジューリングの在り方や、不確実性下でのスケジューリングについての研究が期待されている。

4) 国際規格 ISO 21500 に基づいたプロジェクトマネジメントの適用

2012 年にプロジェクトマネジメントに関する新しく国際規格として ISO 21500 が発行された。このことに伴い、今後は、国際的にも ISO 21500 に準拠したプロジェクトマネジメントの推進が活発化することが予想され、日本も例外ではない。現代社会はボーダレス化が進展しており、プロジェクトも国境を跨いで行われることが珍しくない。このことから、国際標準に基づいたプロジェクトのあり方や、国際プロジ

プロジェクトのマネジメントについての研究が期待される。また、ISO では既刊のプロジェクトマネジメント規格に加え、複雑大規模なプロジェクトつまりプログラム、およびプロジェクトやプログラムのポートフォリオマネジメントの規格化を進めている。

5) プロジェクト人材の育成

行政や企業では、多くのシステム構築プロジェクトが日々実施されている。このことから職業人としてのプロジェクトマネージャが不足している。そのため産業界から、優秀なプロジェクトマネージャの育成に関する要望が大きい。また、プロジェクトの成否が社会に与えるインパクトが大きいため、欧米では既に PM4K(Project Management for Kids)の名前で初等教育からプロジェクトマネジメントの知識と技能の教育に取り組んでいる。この点に関し、日本は、大学においてもプロジェクトマネジメントを教育しているところが少なく、大きく立ち遅れている。そのため、効果的なプロジェクトマネジメント教育に関する研究が望まれている。

6) パーソナル PM

私たち社会を構成する一人ひとは、自らの人生というプロジェクトを運営している。個人が目標を立案し、達成するための方法論と、組織を対象とした従来のプロジェクトマネジメントには多くの共通点といくつかの違いが存在する。そこで、個人のプロジェクトを成功させるための方法論を確立しようという動きがある⁷⁾。また、個人として目標を達成し、充実した人生を送ることができる国民を多く持つ国は、組織としてのプロジェクトマネジメントも卓越して運営できると考えられる。このような視点から、パーソナル PM としての研究が期待されている。

7) アジャイル・プロジェクトマネジメント

システム構築プロジェクトには多様な種類があり、限られた予算、限られた期間で運営される。そのため、本来やっておきたいマネジメント作業をフルに実行することはできない。そこで、求められる品質や要求事項に合わせて、プロジェクトマネジメントの技法や質の水準をテーラリングして適用する。情報システム開発に代表されるように、近年、プロジェクトに許される期間は、短縮し、かつ要求事項の変更は増大している。このような環境の中、アジャイルな開発が注目されている。ここでいうアジャイルとは、「迅速な」「軽微な」という意味で用いられる。また、システム構築の初期段階で完成時の仕様や見積りを確定するのではなく、プロジェクトをとりまく状況の変化に応じて「育てる」「成長させる」というニュアンスで考えると理解しやすい。このようなアジャイルな性質を強く持った開発や研究に適したプロジェクトマネジメントの確立が望まれている。

8) 契約に関する課題

プロジェクトは不確実性の下で実施される。そのため、既に、製品として製造された物品の売買と異なり、契約行為そのものが難しい。このことから、プロジェクト契約をめぐる発注者と受注者間でトラブルになるケースもある⁸⁾。さらに、プロジェクトの実施に伴い作成される成果物の著作権や特許権の扱いについても注意が必要である。プロジェクトを円滑に運営していくためには、これらの問題について、トラブルとにならないような契約形態と社会的コンセンサスの形成が必要となる。

また、欧米ではプロジェクトの品質向上や期間短縮を目指すため、アワード(報奨)

やインセンティブを用いた多様な契約形態を利用して、発注者側、受注者側双方のモチベーション向上を図っている⁹⁾。

9) プロジェクトの評価

プロジェクトの評価には多様な軸と尺度が必要であり、成功したか失敗したかについて単純に決定することはできない。このことから、従来より評価尺度に関する研究が行われてきた。また、評価カテゴリー間の依存関係について、AHP(Analytic Hierarchy Process)やニューラルネットワークを用いた解析を行う研究もある¹⁰⁾。今後もシステムの複雑性が増すことから、引き続き適正な評価に関する研究が期待される。

(6) キーワード

不確実性のマネジメント、見積り、ソーシャル・プロジェクトマネジメント、パーソナル・プロジェクトマネジメント、アジャイル・プロジェクトマネジメント、契約、評価

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 企業を中心として、不確実性（リスク）への取り組み、プロジェクト人材への教育に関する研究等が行われている。 一方、大学におけるプロジェクトマネジメントの研究、授業、教員数は、欧米に比べてかなり見劣りしている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> プロジェクトマネジメントの国際標準化において、日本は重要な役割を担ってきた。 ソーシャルプロジェクトやパーソナルプロジェクトなど、従来の企業等の枠組みを超えたスケールのプロジェクトのあり方についての研究が行われている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 建設、土木、プラントエンジニアリング、ITシステムインテグレーションなどに関わる企業は、プロジェクトマネジメントに積極的に取り組み、ビジネスとして成功させてきた。この過程において、日本は諸外国に比べ、一括請負や受託契約が多くなっている。このことは、プロジェクトマネジメントのノウハウや人材が受託側企業に集中していることを意味している。これには、良い面と悪い面がある。また、欧米では、モチベーション向上のために多様な契約形態を用いているが、日本での取組みは大きく遅れている。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> プロジェクトマネジメントに関する技術および知識体系の作成において世界をリードしてきた。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 連邦政府をはじめ行政がプロジェクトマネジメントに取り組み、調達等に取り入れている。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 職業人としてのプロジェクトマネージャは確立しており、企業も積極的にその人材を活用している。プロジェクトマネジメントに関するPMP(Project Management Professional)資格取得に関するニーズも高い。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> IPMAを中心として研究と交流を深めている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> IPMAを中心として研究と交流を深めている。建設をはじめ産業分野での研究が積極的に行われている。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> プロジェクト調達において、多様な契約形態が存在し、プロジェクトの特性に合わせて組み合わせている。これにより、プロジェクト関係者のモチベーションを向上させ、プロジェクトの納期や品質の向上に活用している。

中国	基礎研究	△	→	・基礎的な研究については、あまり見当たらない。
	応用研究・開発	○	↗	・中国では项目管理という名前で、プロジェクトマネジメントの教育が積極的に行われている。また、関連する複数のプロジェクトをまとめて管理するプログラムマネジメントは、多项目管理と呼ばれ、同様に教育されている。
	産業化	◎	↗	・中国では、プロジェクトマネジメントのノウハウを十分に活用し、産業の育成、国家プロジェクトを推進している。
韓国	基礎研究	△	→	・基礎的な研究については、あまり見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	・1992年に、韓国プロジェクトマネジメント協会(Korean Project Management Association: KPMA)が設立されている。 ・PMP資格取得者の数は日本の約半数であり、総人口からすると日本と似た状況にある。
	産業化	○	→	・製品開発などへの活用が行われている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 富永章. 解説：アーンド・バリュー・マネジメント. プロジェクトマネジメント学会. 2003.
- 2) Project Management Institute Standards Committee. A Guide to The Project Management Body of Knowledge. Project Management Institute. 1996.
- 3) プロジェクトマネジメント学会 出版委員会 編著. プロジェクトマネジメント入門. プロジェクトマネジメント学会. 2013.
- 4) 桑原希尽, 江崎和博. プロジェクトにおけるリスクマネジメントの研究に関する動向. 情報処理学会研究報告. 2014, vol.2014-IS-192, no.2.
- 5) 竹久友二. 複雑性マネジメントにおける PM コンピテンシーについて. プロジェクトマネジメント学会秋季研究発表大会予稿集. 2011, p.76-80.
- 6) 渡辺浩世, 辻川直輝. 継続的な見積りプロセスの改善とその定量的効果について. プロジェクトマネジメント学会誌. 2012, vol.14, no.3, p.14-19.
- 7) 富永章 編著. パーソナル プロジェクトマネジメント. 日経 BP 社. 2011.
- 8) 市毛由美子. ソフトウェア開発をめぐる法律問題 - 紛争回避のためのポイント -. 情報処理. 2014, vol.55 no.3, p.225-231.
- 9) 大久保隆, 持原真理子. 米国政府調達における契約の種類と実際：コントラクト・マネジメントの考慮点. プロジェクトマネジメント学会誌. 2002, vol.4, no.2, p.3-7.
- 10) 本間利久, 房克哲, 山戸昭三. NN モデルにおける発見的方法によるプロジェクト評価カテゴリー間の相互依存性解析. プロジェクトマネジメント学会 2012 年度春季研究発表大会予稿集. 2012.

3.7.9 品質マネジメント

(1) 研究開発領域名

品質マネジメント (品質管理)

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

システムの構築・運営は、多くの人が働く組織によって行われる。このため、組織が適切にマネジメントされていないと、どんなに良いシステム構築・運営の方法論を用いても期待する成果は得られない。品質マネジメントとは、顧客及び社会のニーズを満たす製品・サービス・システムの提供と働く人々の満足を通じた組織の長期的な成功を目的とし、製品・サービスの開発・提供やシステムの構築・運営に関わる様々なプロセス (インプットをアウトプットに変換する活動) の維持向上、改善及び革新を組織の全部門・全階層の参加を得て科学的手法を駆使して行うことで、外部および内部の環境の変化に適した効果的かつ効率的な組織運営を実現する活動である。なお、ここで言う品質／質とは、関心の対象となるものが、顧客および社会の明示された、暗黙の、または潜在しているニーズを満たす程度であり、高性能、高機能、高信頼性を必ずしも意味しない。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

品質マネジメントは、1924年に W. A. Shewhart が管理図を考案したことから始まった。統計学を使って品質の維持向上・改善を行うところから、統計的品質管理 (Statistical Quality Control, 略して SQC) と呼ばれた。SQC は第 2 次世界大戦中に米国や欧州で活用され、大きな成果をあげるとともに、理論化・体系化が進んだ。これが戦後に日本に紹介され、多くの企業が自社の製品競争力を強化するためにその活用・実践に取り組んだ。そのような中、産学連携を通して PDCA サイクル、方針管理、QC サークル、改善の手順、QC 七つ道具、工程能力指数などの原則・活動・手法が生まれ、組織運営の方法論として発展していった。1970年代に入ると、品質マネジメントは、製品の製造だけでなく、製品の設計・開発にも適用されるようになり、品質機能展開、信頼性・保全性、品質保証体系などに関する研究が進んだ。また、1980年代には、ソフトウェア開発やエネルギー分野への適用が進むと同時に、欧米やアジア諸国から組織運営の有効な方法論として注目され、多くの研究者・実務家が調査のために日本を訪れ、世界中に普及した。さらに、これらの国々では、1990年代に入ると、品質マネジメントが医療、教育、運輸、金融、行政などの社会システムの分野で活用・実践されるようになり、当該分野に適した活動・手法が研究されるようになった。日本でもこれらの動きを受けて、同様の取り組みが行われている。このような発展の経緯を踏まえると、品質マネジメントの研究領域およびその動向を概括する場合には、a)SQC、b)品質を中核とした組織運営のための原則・活動・手法、c)適用領域の拡大に応じた方法論の拡張、の 3 つに分けて捉えるのが適切である。

品質マネジメントの原点である SQC (項目 a) については、ppm レベルの管理が求められるようになった、計測装置やコンピュータの発達により多量のデータを自動的に収集することができるようになった、顧客ニーズの多様化に伴って品種の切り替えが頻繁

に行われるようになったなどの製造工程の変化に伴い、累積和管理図、多変量管理図、回帰残差管理図などの研究が行われている¹⁾。また、複雑で広範なプロセスやシステムの因果関係の解析が求められるとともに、膨大な量の多次元データが利用できるようになったことで、グラフィカルモデリングやパス解析などの手法、機械学習などのデータ駆動型の手法の適用・研究が進んでいる²⁾。さらに、実験計画法から発展し、安定設計の方法として広く活用されるようになった品質工学については、様々な場面における適用の難しさを克服するための具体的な手順の開発、より少ない実験数で精度のよい結果を得るための計画の提案、実務的に提案されている方法の理論化、応答曲面法・最適化手法との融合などの研究が活発に行われている³⁾。他方、価値提供の下流および上流域では、市場における故障・トラブルの発生状況や製品・システムの使用・運用状況、顧客の購買行動や意見・発言に関するデータの量・内容が、情報技術の活用により飛躍的に増大・変化する中で、これらを用いて信頼性の推定やトラブル予測を簡単に精度良く行うための手法、データの形態に適した顧客行動のモデル化やニーズの解析を行うための手法の研究が活発に行われている^{4) 5)}。

品質を中核とした組織運営（項目 b）は品質マネジメントの最も主要な研究領域である。組織運営のための原則については、1960～70年代に内容が固まった。研究者によって色々な整理がされているが、顧客第一、プロセス重視、PDCA サイクル、再発防止、未然防止、重点志向、事実に基づく管理、全員参加、人間性尊重など、10～20個にまとめているものが多い。ただし、組織の規模が大きくなるにつれてこれらの原則をどうやって浸透させるかが大きな課題となっており、そのための方法が研究・実践されている。他方、活動については、大きく、方針管理、日常管理、小集団改善活動、品質管理教育、プロセス保証、新製品開発管理などに分けられるが、それぞれをどう実践するのがよいか組織の状況に大きく依存するため、組織の状況の変化に応じて新たな方法が研究されている。また、これらの活動を支援するための手法についても、数多くの提案がなされている。

例えば、方針管理については、方針（課題、目標、方策）の策定、組織階層に沿った展開・実施、期末の反省という基本的な枠組みは1960～70年代に日本で確立されたものの、米国やアジア諸国を中心に、管理指標の系統的な生成、事業戦略の立案・展開との融合などが研究・実践されている^{6) 7)}。また、日常管理については、標準に基づく作業の実施と管理項目による異常の検出・処置という基本は変わらないものの、標準における動画・静止画の活用、4M（Man、Machine、Material、Method）の変化点の管理、意図しない人的エラーや意図的な不遵守などの人に起因するリスク抽出と対策生成、力量・スキルの評価と教育・訓練、効果的な内部監査などの方法がそのための支援ツールとともに研究・実践されている⁸⁻¹⁰⁾。さらに、小集団改善活動については、1960年代に日本で生まれたQCサークル活動をベースとしながら、1990年代に米国において非製造職場に適した横断型・非継続型のチーム改善活動が開発され、現在は世界中で両者を併用する形での実践が行われている¹¹⁾。また、小集団改善活動の実践を支える改善の手順についても、問題・課題のタイプによって複数の手順が考案され、それらと組み合わせで使用できる手法や手法のパッケージ化に関する研究も進んでいる¹²⁾。方針管理、日常管理、小集団改善活動などを支える人材を育成するための品質管理教育については、階

層別分野別教育体系、教育効果の定量的な把握の視点からの研究・実践が行われている¹³⁾。

プロセス保証については、在庫ゼロを目指した生産方式の普及や安全・安心に対する関心の高まりを受け、100%保証が求められるようになった。このため、プロセス、FMEA QA ネットワーク、良品条件の明確化など、トラブル・事故の未然防止を目指した方法・手法が研究・実践されている^{14, 15)}。また、新製品開発管理については、顧客のニーズを満たすために不可欠な技術の特定とその開発のための方法・手法（品質機能展開や品質工学の活用など）、既存の固有技術や過去の知見を着実に設計に活かすための方法・手法（デザインレビューや設計の標準化など）、顧客のニーズに合った製品・サービス・システムを企画するための方法・手法（顧客の声の収集・分析や顧客満足度調査など）、これらを有機的に結びつけ有効な新製品開発体系として機能させるための方法・手法（コンカレント開発、品質情報システムなど）が研究・実践されており、このような中から高い顧客価値を持った製品・サービス・システムが生み出されている^{16, 17)}。

組織運営のための原則・活動・手法については、どんなに個々の要素のレベルが高くてもそれらが密接に関連づけられていなければ全体として大きな成果は得られない。このため、品質賞、マネジメントシステム認証、自己評価などの視点から、総合的な組織運営に関するモデル化や推進方法の研究・実践が行われている¹⁸⁾。なお、これらの研究・実践では、狭い意味の品質だけでなく、環境、量・納期、コスト、安全などの他の経営要素に着目して、あるいはそれらの統合を目指して行われているものも多い。

適用領域の拡大にともなう方法論の拡張（項目 c）については、1970～90年代に米国や日本を中心にソフトウェア開発の分野に関する研究・実践がソフトウェア工学と密接に関連しながら進んだ。ソフトウェアは論理の集合体であり、目に見えない、物理的な連続性がないなどの特徴を持つため、設計・文書化や検証・妥当性確認のための技法、信頼性評価や再利用のためのモデルなどが研究されている¹⁹⁾。また、これに加えて、ソフトウェアを含めた製品・サービス・システムの開発は一般にプロジェクトによって行われるため、工数予測や人的資源管理などのプロジェクトマネジメントの方法が研究されている。さらに、ソフトウェアやハードウェアを含む複合的なシステムについては、ニーズの変化に伴って適時に機能拡張を行うこと、これに伴って生じるコンフィギュレーションの管理を確実に行うこと、運用時の保守や使用終了後の廃棄・回収を考慮することなどが必要であり、システムのライフサイクルを考え、各段階に応じた適切な対応を行うライフサイクルマネジメントの方法が研究されている。これらについては、組織全体の運営を取り扱う品質マネジメントと連携を保ちながら、それぞれ独自の研究領域が形成されている。

医療・福祉の分野においては、1990年代より米国を中心に事故防止・患者満足度向上を目指して品質マネジメントの活用が進んだ。患者・利用者の状態が一人一人異なるために標準化が進んでいないとともに、人による作業が中心のため人的エラーの防止が重要な課題となる。これらを受けて、プロセスの標準化やエラー防止に関する方法・手法が活発に研究・実践されている²⁰⁾。また、医療機関・福祉施設の状況に適した品質マネジメントのモデルや手法のパッケージ化も研究されている。また、教育の分野での活用については、1990年代より米国・欧州・アジア諸国において研究・実践がなされ、小集

団改善活動を生徒の学習意欲・能力の向上に役立てる取り組みも行われている²¹⁾。エネルギー、運輸、金融、行政などの分野における活用も進んでいる²²⁾。

（４）科学技術的・政策的課題

- 1) 多くの日本企業がグローバル展開を行っており、従業員の中の非日本人の割合が増えている。また、高年齢化と生産人口の減少にともない、高齢者や女性の活躍が期待されている。言語・文化・考え方が異なる人が働く組織において、価値観を共有し、組織力と働く人の満足を高める方法の研究・実践が求められている。
- 2) 開発期間の短期化が求められる中、ばらつきを考慮した設計、シミュレーションによる評価、トラブル予測などを設計・開発プロセスの中に総合的に組み入れ、複数の組織が密接に連携を図りながら効果的・効率的に設計・開発を行うことができる方法が求められている。
- 3) IT の活用により製造工程や市場で得られるデータが量的に増大する中で、これらに適した解析手法の研究・開発が求められている。また、社会の発展により顧客・社会のニーズが多様化する中で、潜在ニーズを把握し、これを満たす製品・サービス・システムを企画するための手法の研究・開発が求められている。
- 4) 製品・サービス・システムにおいてソフトウェアや情報の果たす役割が大きくなっており、これらの信頼性を保証する方法が求められている。また、製品・サービスの開発・提供やシステムの構築・運営において人が果たす役割が大きくなっており、意図しないエラーや意図的な不遵守を防ぐ方法が求められている。
- 5) 社会システムが複雑化し、安全・安心への関心が高まるにつれ、エネルギー、医療・福祉、運輸、金融などの分野で品質マネジメントの必要性が着目されており、各分野に適した実践の方法が求められている。特に、法的規制と事業者の自律的な取り組みをどう連係させるかは重要な課題となっている。
- 6) 教育分野における品質マネジメントを活用した教育・学習の質の向上、そのための方法の研究・実践が求められている。特に、初等・中等教育において品質マネジメントの考え方・手法を教育カリキュラムに組み込み、学ぶ力や生きる力を持った生徒を育てる方法の研究・実践が重要な課題となっている。
- 7) 地球温暖化などの環境問題がクローズアップされ、持続的成長が重要な課題となるにつれ、組織の環境への取り組みを加速するために品質マネジメントを活用すること、そのための方法を研究・実践することが求められている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

品質マネジメントは、組織運営のための方法論であり、各産業分野のリーダーと見なされる組織が大学の研究者やコンサルタントと協力しながら個別に研究・実践を進めている。これは、社会システム分野（エネルギー、医療・福祉、運輸、金融などの分野）でも同様である。

また、これに加えて、日本品質管理学会、American Society for Quality、日本科学技術連盟、日本規格協会など、品質マネジメントを専門とする学会・協会では、複数の組織・研究者が協力して研究を行っている。例えば、日本品質管理学会の現地現物研究会

では、産と学が定期的に会合を開き、自工程完結のためのマネジメント手法の構築、SQCと品質工学の融合による問題解決ストーリーの構築などを行っている。また、グローバル品質教育研究会では、海外拠点における品質教育の標準的なプログラムを開発している。日本科学技術連盟では、ソフトウェア品質に関する研究会を組織しているほか¹⁹⁾、各地域の企業・組織と協力し、小集団改善活動の普及を行っている。日本規格協会では、品質工学に関する研究会を継続的に行うとともに、JIS規格の発行やISO規格の審議、品質管理検定の企画・運営を通じて品質管理の普及を行っている。

さらに、欧州やアジアでは、European Organization for QualityやAsian Network for Qualityを中心にして、それぞれの地域において品質マネジメントの普及・推進を行っている複数の学会・協会の間の連携も図られている。また、Deming賞やMB賞(Malcom Baldrige National Quality Award)などの品質賞、ISO規格に基づくマネジメントシステム認証制度なども個々の組織の取り組みを加速する上で役立っている。Deming賞やMB賞の受賞報告講演要旨集を見ると、様々な業種・業態の組織が賞への挑戦の過程を通じて、顧客・社会のニーズや各組織の経営環境に適した品質マネジメントを工夫・実践し、顕著な成果をあげていることがわかる。

このような中から、(4)で示した課題を克服するために、(3)で述べたような新たな知見や技術が着実に生み出されている。

政府等が経済的に支援し、複数の組織・研究者が連携して推進する大規模プロジェクトは少ないが、米国における医療・福祉分野のNational Demonstration Program、MB賞教育部門の創設などは、当該分野における研究・実践の進展に大きく寄与したものである。

(6) キーワード

顧客ニーズ、プロセス、PDCAサイクル、未然防止、全員参加、方針管理、小集団（チーム）改善活動、品質保証、品質賞、マネジメントシステム認証

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・国際比較研究 ¹⁶⁾ や手法の基礎となるモデル・理論の研究などが行われている。
	応用研究・開発	○	→	・品質工学やグラフィカルモデリング ³⁾ 、設計・開発プロセスの管理や人に起因するトラブルの防止の手法 ^{9, 17)} 、医療・福祉分野に適した手法 ²⁰⁾ などの研究が行われている。
	産業化	◎	→	・自動車産業等では継続的に研究・実践が行われており、世界的に高いレベルにある。 ・社会システムの分野、特に教育や行政の分野では研究・実践が遅れている。
米国	基礎研究	△	→	・応用研究が中心であり、基礎研究はほとんど見当たらない。
	応用研究・開発	◎	↗	・品質工学やQFDのほか ⁵⁾ 、Six Sigma等の小集団改善活動 ¹¹⁾ 、BSC等のメトリックスに着目した研究 ⁶⁾ 、品質マネジメント活動のモデル化に関する研究が行われている。
	産業化	◎	↗	・MB賞受賞企業等に見られるように、高いレベルにある。 ・社会システム分野、特に、医療・福祉や教育の分野の研究・実践はトップレベル ^{13, 21)} 。
欧州	基礎研究	△	→	・応用研究が中心であり、基礎研究はほとんど見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	・サービス業を含めた広い分野で品質マネジメントを実践するための方法が研究されている。ISOマネジメントシステム認証の活用に関する研究も見られる ¹⁸⁾ 。
	産業化	○	→	・欧州品質賞受賞企業等に見られるように、高いレベルにある。
中国	基礎研究	△	→	・SQCなどの研究が行われている。
	応用研究・開発	△	↗	・SQCの研究が中心であるが、品質マネジメントの組織での実践を促進することを目指した研究も見られる ¹²⁾ 。
	産業化	△	↗	・日本企業の関連企業がDeming賞を受賞するなど、少しずつ成果が出始めている。
韓国	基礎研究	△	→	・手法の基礎となるモデル・理論などの研究が行われている。
	応用研究・開発	○	↗	・方針管理やリスクマネジメント ⁷⁾ 、新製品開発や調達管理、顧客満足などに関する研究、実践研究や成功事例に着目した研究が行われている。
	産業化	○	→	・国際的な品質賞を受賞した企業や組織はない。
インド他	基礎研究	△	→	・応用研究が中心であり、基礎研究はほとんど見当たらない。
	応用研究・開発	○	↗	・製造業に限らず、運輸、教育、行政などを含む様々な分野で品質マネジメントを実践するための方法が研究されている ²²⁾ 。
	産業化	◎	↗	・インドやタイではDeming賞受賞企業も多い。これらの企業は世界的にトップレベル。 ・インド、タイ、マレーシア、シンガポール等では社会システム分野でも活発な研究・実践が行われている。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Wang, Sai; Reynolds, Marion R. Jr. A GLR Control Chart for Monitoring the Mean Vector of a Multivariate Normal Process. *Journal of Quality Technology*. 2013, vol. 45, no. 1, p.18-33.
- 2) 黒木学.分散に対する因果効果の定量的評価と工程解析への応用. *品質*. 2008, vol. 38, no. 3, p.373-384.
- 3) 大久保豪人, 永田靖. タグチの RT 法における同次元でない連続量データへの適用方法. *品質*. 2012, vol. 42, no. 2, p.86-102.
- 4) 横山真弘. オンライン状態監視により個別に取得されるユーザの稼働情報に基づく寿命分布の推定に関する研究. *品質*. 2013, vol. 43, no. 4, p.59-61.
- 5) Singh, Rahul K.; Elrod, Cassandra C.; Cudney, Elizabeth A. Comparative Analysis of Quality Function Deployment Methodologies: A Case Study Analysis. *Quality Management Journal*. 2012, vol.19, no.1, p.7-23.
- 6) Schonberger, Richard J. Time-Relevant Metrics in an Era of Continuous Process Improvement: The Balanced Scorecard Revisited. *Quality Management Journal*. 2013, vol.20, no.3, p.10-18.
- 7) Chung, Kyu Suk. Evaluating Korean Strategic Management System by Malcolm Baldrige Criteria. *Asian Journal on Quality*. 2013. vol.14, no.1, p.1-11.
- 8) 金子憲治. ビジュアルマニュアルを使い品質管理を現場に徹底. *クオリティマネジメント*. 2009, vol. 59, no. 2, p. 34-39.
- 9) 中條武志. 人に起因するトラブル事故の未然防止と RCA. 2010, 日本規格協会.
- 10) 竹島壮郎, 安田駿一郎, 篠田心治ほか. 作業者の動きとももの変化に着目した技能分析手法の考案. *日本経営工学会論文集*. 2014, vol. 64, no. 1, p. 1-8.
- 11) Zhang, Weiyong; Hill, Arthur V; Gilbreath, Glenn H. A Research Agenda for Six Sigma Research. *Quality Management Journal*, 2011, vol.18, no.1, p.39-53.
- 12) Cheng, Chuen-Sheng; Kuan, Chi-Ming. Research on product reliability improvement by using DMAIC process: A case study of cold cathode fluorescent lamp. *Asian Journal on Quality*. 2012. vol.13, no.1, p.67-76.
- 13) Kirkpatrick, Donald L.; Kirkpatrick, James D. *Implementing the Four Levels: A Practical Guide for Effective Evaluation of Training Programs*. 2007, Berrett-Koehler Publishers.
- 14) 早乙女慧, 高見沢正己, 石崎博ほか. 情報システム開発における情報漏洩事故の未然防止－意図しないヒューマンエラーに起因する事故の防止を目的とする FMEA の提案－. *品質*. vol.43, no.4, p.86-93.
- 15) 佐々木眞一. 自工程完結－品質は工程で作り込む－. 2014, 日本規格協会.
- 16) アブレート・グルミレ; エルバス・ボリスほか. 顧客満足度とマーケットシェアの関係メカニズムについての国際比較研究. *品質*. 2012. vol.42, no.3, p.95-105.
- 17) 鈴木潤平, 賀治明日香, 清水望寿帆ほか. 複数機種に対応した機能設計プロセスの手順化 : 自動販売機を事例として. *日本経営工学会論文誌*. 2011, vol.62, no.3, p.95-105.

- 18) Sampaio, Paulo; Saraiva, Pedro; Rodrigues, António Guimarães. A Statistical Analysis of ISO 9000-Related Data for European Union Ultra-Peripheral and Portuguese Region. *Quality Management Journal*, 2009, vol.16, no.2, p.44-58.
- 19) SQuBOK 策定部会. ソフトウェア品質知識体系ガイド（第2版）. 2014, 日科技連出版社.
- 20) 金海哲, 棟近雅彦, 佐野雅隆, 金子雅明. 与薬事故に対するエラープルーフ化に関する研究－改善対象要素に着目した対策立案方法の提案－. *品質*. 2013. vol.43, no.3, p.110-124.
- 21) Pewaukee School District. Malcolm Baldrige National Quality Award Application. 2013, http://patapsco.nist.gov/Award_Recipients/
- 22) Kumar, Madhu Ranjan; Sahay, B K; Ranjan, P. Adapting TQM to Change Indian Bureaucracy: A View From Inside. *Quality Management Journal*, 2011, vol.18, no.1, p.23-38.