

わたしたちの研究（22）機械システム創成学研究室

榎木哲夫（S56/1981卒）



榎木哲夫



中西弘明
(H4/1992卒)

1. 研究室の概要・教員紹介

機械システム創成学研究室は、工学研究科機械理工学専攻に属し、同専攻を含む機械系三専攻（機械工学群）および工学部物理工学科機械システム学コースの教育に関わっています。本研究室の源流は、旧精密工学専攻におけるデザインシステム論の専任講座で、同講座が設立された当初の担当教授は久保愛三教授（現在京都大学名誉教授）で、著者は同講座の助教授を担当していました。さらにその先を辿りますと、著者自身は旧精密工学専攻において岩井壯介教授が主宰されていたシステム工学研究室の出身であり、昭和55年に4回生として同研究室に卒業研究のために配属され、その後修士課程、博士後期課程へと進みました。昭和61年3月に博士後期課程を研究指導認定退学して、同年4月に精密工学教室で助手に採用されて引き続き岩井研究室に在籍させて頂きました。当時の岩井研究室には、助手を務められていた渡部透先生（現在、立命館大学名誉教授）と片井修先生（現在、京都大学名誉教授）がおられました。片井先生は岩井先生のご退職後助教授から教授に昇任され、しばらくは工学研究科で研究室を率いられていましたが、1998年（平成10年）4月の京都大学大学院情報学研究科の創立に合わせて情報学研究科に研究室とともに移られました。著者は岩井先生のご退職後の1994年（平成6年）4月から、上述の工学研究科精密工学専攻のデザインシステム論講座の助教授として、独立した研究室をもたせていただいて教育・研究に従事した後、2002年（平成14年）3月に精密工学専攻デザインシステム論講座（専任講座）の担当教授に昇任させて頂きました。その後の2005年（平成17年）4月の機械系3専攻の改組により、所属専攻は機械理工学専攻となり、担当する講座は現研

究室の機械システム創成学講座（専任講座）となって現在に至っています。この間、助手時代の1988年（昭和63年）には京都大学工学博士の学位を取得し、その後1991年（平成3年）から1992年（平成4年）の1年間余りは、米国スタンフォード大学工学部経済工学科において客員研究員として在外研究に従事しました。

著者とともに当研究室の運営を支えてきて貰ったのが、中西弘明講師と堀口由貴男助教（2021年からは関西大学総合情報学部教授）のお二人の先生であり、加えて、研究室秘書として著者の助教授時代から今日まで支え続けて貰ってきたのが教務補佐員の湊忍さんで、これらのスタッフに恵まれてきたからこそ、教育研究・学生指導・研究室運営をなんとかこれまで果たせて参りました。中西講師は1992年に京都大学工学部を卒業後、1994年3月に京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻修士課程を修了し、同年4月から日本電気株式会社に入社して、1996年4月から航空宇宙工学専攻の出身研究室である振動制御工学研究室に助手として戻り、その後2006年8月に私たちの機械システム創成学研究室に講師として着任しました。中西先生は、研究室の中にあっては、「機械の知」すなわち複雑で不確かな環境に適応できる機械の知能化技術開発のスペシャリストであり、とくに助手時代から手がけてきたインテリジェント制御およびその無人ヘリコプタの自律飛行制御、その安全・防災活動への適用に係る研究では、我が国でも数少ない先導的な研究者の一人であり、同研究内容で2002年には博士（工学）を取得しています。機械システム創成学研究室に移ってからは、無人ヘリコプタに加えてマルチコプタのドローンの飛行制御にかかる研究や、熟練者技能の動作解析に基づくハイブリッドシステムモデル化等の研究で教育研究に貢献して貰っています。

2. 研究紹介

2.1 研究テーマ発見の経緯

研究内容について述べるにあたり、まずはなぜ著者がこのような研究に行き着いたかの経緯について述べたいと思います。

筆者は生まれも育ちも京都市で、小学6年生の時の米国によるアポロ11号の人類初の月面着陸の偉業に釘付けになり、振り返ればこの出来事が今の専門の道に進むきっかけになりました。中学に入って間もなく、アポロ13号の「輝かしい失敗（Successful Failure）」と後日評せられることになった爆発事故からの奇跡的生還のニュースに、絶望視された3名の乗務員を無事地球に帰還させたNASAの技術

力と人間力、組織力に感銘を受けました。いてもたってもおられず中学3年生の時に、当時姉夫妻が滞在していた米国ヒューストンを単身訪ね、米国のテクノロジーと壮大な自然に圧倒されました。その後、高校時代にはパイロットを真剣に目指した時期もありましたが、操縦者になるよりもその操作を支援したり人の操縦を代替したりするシステムについて研究する方が必要とされる時代になるよとの助言を受け、京都大学工学部機械系学科に進みました。若い時代に焼きついた米国の魅力は忘れられず、1991～1992年には米国スタンフォード大学に滞在しました。そこで「人と機械からなるシステム：人間機械系」に関する学術研究分野があることを知り、また当時の人工知能研究の最先端に触れて、それ以来「人間機械協調系デザイン」というテーマを一貫して追いかけてきています。なおここでの「人間」と「機械」を対峙させる場合の「機械」の側は、ロボットのような自動化機械である場合や人工知能（AI）のような形は持たないプログラムだけの場合もあり「機械＝人工物全般」と考えています。

このような研究テーマに行き着いた背景についてももう少し詳しく述べます。スタンフォード大学での滞在先であった Department of Engineering-Economic Systems（現在の Department of Management Science and Engineering）には、Prof. Ronald Howard という意思決定分析（Decision Analysis）の大家がおられ、現実的で実際的な意思決定科学・意思決定分析の手法を、ビジネスの分野における戦略的意思決定支援や、同大学医学附属病院の医療分野での医師・看護師の意思決定支援に展開するプロジェクトがいくつも走っていて、それに関する勉強会が日常的に開催されていました。さらにはスタンフォード大学から車で数分で行ける距離に SRI（Stanford Research Institute）や NASA Ames Research 研究所、そして当時の AI の総本山とされた Xerox Palo Alto 研究所があり、当時話題を集めていた宇宙分野での火星探査の マーズ・パスファインダー（Mars Pathfinder）計画において、意思決定分析手法を導入した火星表面を探査するロボット（Mars Rover）の共有自律（Shared Autonomy）に関する勉強会などが頻繁に開催されていました。シリコンバレー全体がスタンフォード大学との産官学連携で熱く盛り上がっていた時期であり、そんな時期に家族と共に米国に滞在できたことは本当にラッキーなことで、その後の著者の研究者人生に大きな刺激と影響を受けたこととは言うまでもありません。

スタンフォード大学から帰国後しばらくして、1994年に起きた名古屋空港での

「中華航空140便墜落事故」という衝撃的なニュースが飛び込んできました。この事故を起こしたのは当時ハイテク旅客機の代表格として世界中で就航していた欧州の航空機メーカーのエアバス社のA300-600の最先端機種であり、墜落の原因は機体の不良によるものではなく、同機の自動操縦装置と人間パイロットとの齟齬が原因で起こった事故で、テクノロジーの進化によって人間側のシステムの理解不足が助長され、これに誤信号の発生による混乱が相乗することで大事故に至ってしまうという複合的原因による過誤として注目されました。残念ながら、類似の原因による航空機事故の発生はその後もあとを絶たずに発生してきており、近年においても2018年から2019年の半年間に米国の航空機メーカーであるボーイング社のBoeing 737 MAX 8の墜落事故が、インドネシア沖でのライオン航空機とアフリカ大陸でのエチオピア航空機とで引き続いて発生しました。このような背景が現在の研究室の研究テーマである「人間機械協調系のデザイン」や「大規模複雑系としての社会・技術システムの安全分析・評価・設計」に繋がっていると言えます。

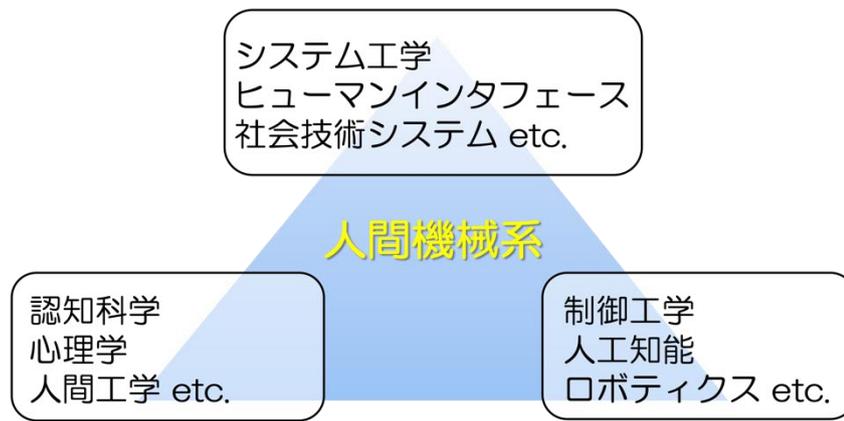
2.2 研究室での研究テーマの概要

機械システム創成学研究室では、『人間—機械協調系のデザイン』をテーマに掲げ、人と機械が関わるさまざまな活動を円滑にし、人間の知と機械の知を融合した知的システムを実現するための理論と技術について幅広く研究しています。つまり人間と機械システムのより良い関係作りを目指す研究室です。

高度な自動化を実現したロボット・工作機械などに代表されるマシンシステム、急速な拡大を続けるマルチメディアや情報ネットワークなど、近年我々を取り巻く各種の人工物システムは、人間の身体機能、知覚・情報処理機能やコミュニケーション機能を代替し拡張することに多大な寄与をもたらしてきました。このようなメカトロ・インフォマティクスの浸透は、人間の介在を極力排除することによる高効率と高品質の達成を可能にしてきましたが、その一方で経験により培われる人間固有の熟練技能の喪失をもたらし、実際人間の介在が真に必要な緊急時などにおいて自動化システムと人間の相性の悪さや、さまざまな人的要因が介入する機械システムそのものの脆弱性が露呈し始めてきています。今後は「人間中心の自動化システム」や「人に優しい機械システム」へのパラダイムシフトが迫られてくるでしょう。

このような問題認識にたつて機械システム創成学研究室では、人間本来の特徴能力である目的意識、気づき、技量、判断力、創造性、コミュニケーション能力を最大限引き出すことができるとともに、これらの能力を内包した機械システムを実現することによって、境界を意識させることのないシームレスかつフレンドリーな人間-機械間での相補的依存関係を維持できるシステム設計に関する研究を展開してきました。すなわち複雑大規模な工学システムの監視にあたる人間や、人間と共存する場で活動を求められる搬送ロボット・介護ロボットのようなマシンシステムが、他者を含む作業環境との間で相互作用を繰り返す過程において新しい認識世界を常に創造し、それに基づいて雑多な作業環境の中から適宜注視点や焦点を絞り込むことができ、必要に応じて人間の作業を代行したり、有効な支援情報を提供して人間との協調的な関係を組織化し維持していくことのできるような人間-機械共存下での協調系の設計原理の究明を行なってきました。

研究テーマの構成としては、図1に示すように、人や組織の認知・判断・行動の特性理解とモデル化（「人間の知を探る」）、複雑で不確かな環境に適応できる知能化技術の開発（「機械の知を究める」）、人同士や人と機械の円滑な協働システムの設計（「共創の知をデザインする」）を柱としています。人と機械が協働するシステムの構築には、さまざまな学問分野が関係します。それらの中でも主要な3極を研究室の標語に込めました。まず、人や組織の認知・判断・行動の特性がどのようなものかを理解しモデル化できなければ、人々の実態に合ったサービスや支援というものは考えられません。認知科学や心理学、人間工学といった分野がこの探求に関係します。また、複雑で不確かな環境に対してうまく適応して動作する知能化技術がなければ、変化する状況の中で人々のニーズに適う機能をシステムは提供できません。制御工学や知能工学、ロボティクスといった分野がこの探求に関係します。さらに、人同士や人と機械という異なる要素をシステムとして統合し円滑な協働を実現するには、システム工学やヒューマンインタフェースといった共創の知のデザインに関する知見が欠かせません。



人間の知を探る

人・組織の認知・判断・行動の特性理解とモデル化

機械の知を究める

複雑、不確かな環境に適応する知能化技術の開発

共創の知をデザインする

人同士や人-機械の円滑な協働のデザイン

図1 機械システム創成学研究室での研究テーマの全容

さらに、人間と機械（ロボット）の間でのコミュニケーションの必要性も増してきています。指示に従って行動するだけの「人間に隷属するロボット」ではなく、ある種対等に付き合いながら、互いに互いを「感じ合う」ことのできる「人間のパートナーとしてのロボット」が求められます。ここで必要になるコミュニケーションは、「高コンテキスト情報による高コミュニケーション」として特徴付けられます。コンテキストとは、言葉や文章などの前後関係、背景知識、文脈、あるいは、それにかかわる解釈や意味づけのための情報を意味し、行間、裏、真意を読むことに相当しますが、これを前提とするのが高コミュニケーションです。従来のShannon-Weaver流のコミュニケーションモデルのように情報のコンテンツのみを扱うモデルに代わり、コンテンツとコンテキストとの関連づけをできるシステム理論が必要になってきます。

研究室メンバーは、このような知識と技術を分野横断的に取り入れながら、以下のような個々の研究テーマに取り組んでいます。

1. 生産現場における人間と自動化機械（ロボット）の協調系の設計と解析
2. 人機械生産システムのレジリエンス評価

3. 熟練知の構造化（見える化）とモデリング
4. 視線運動の注視点・瞳孔径計測に基づく操作者の意図・認知負荷・理解度の推定
5. 身体運動の観察時系列データからの運動状態・行動意図・情動の推定
6. 睡眠時の計測時系列データからの眠りの質評価
7. ユーザ作業分析に基づくヒューマンマシンインタフェースのユーザビリティ評価
8. 熟練知の伝承における教示・模倣・サイバーコーチング
9. テキストマイニング手法による文書データからの保健指導の評判分析
10. 壁面近傍を飛行するドローンの自律制御
11. 音波測位と慣性航法を複合化した屋内航法システム
12. 産業用ロボットのエラーリカバリ機能実装と教示作業支援技術 ほか

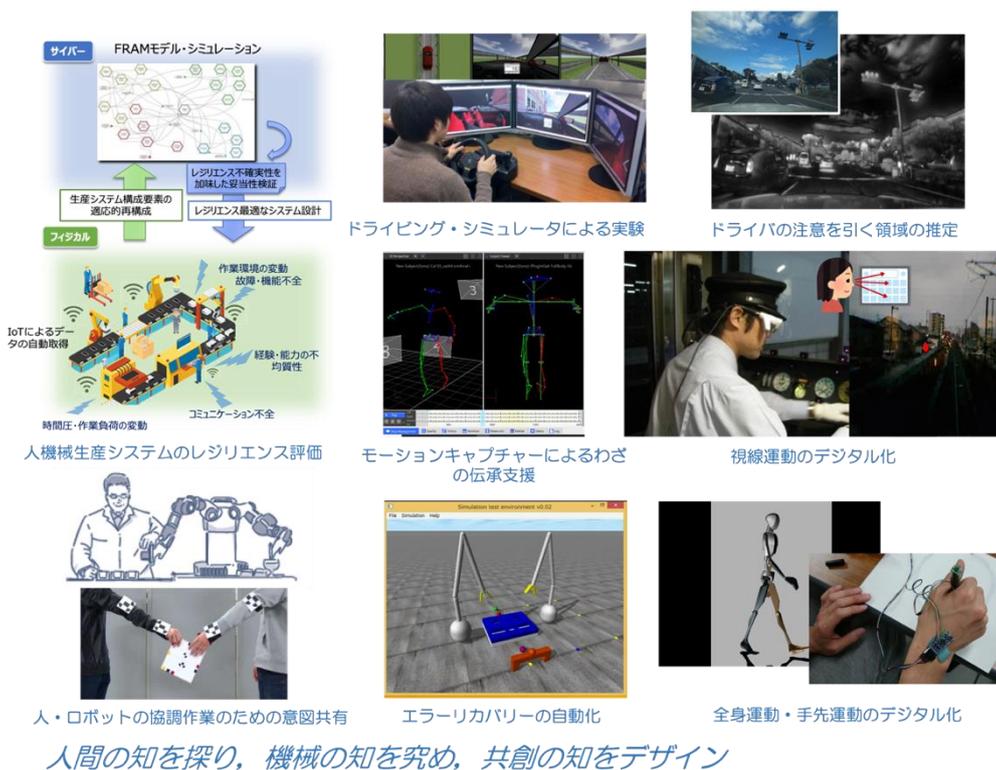


図2 機械システム創成学研究室での個別の研究テーマの例（その1）

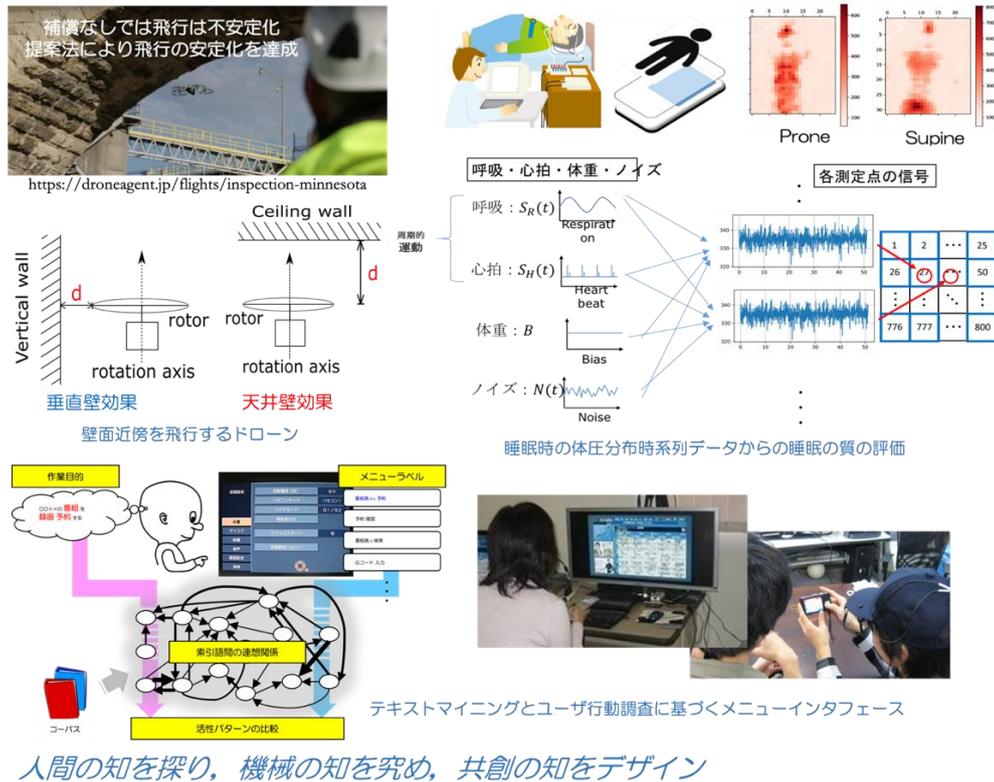


図3 機械システム創成学研究室での個別の研究テーマの例 (その2)

図2と図3に研究テーマの一部をビジュアル化したものを提示いたします。また以下には、機械システム創成学研究室からの近年の卒業研究や修士論文研究の表題の一部について、グループ分けしてリストアップいたします。

○ 作業支援インタフェース

- プラント操作インタフェース評価のための視線運動からのオペレータ意図推定
- 作業と操作画面遷移の構造的適合度に基づくユーザビリティ評価
- 階層タスク分析に基づく産業用ロボット動作点教示用インタフェースの設計
- 作業との構造的適合性に基づくロボット教示端末のユーザビリティ分析

○ 聴覚による情報提示

- 視覚タスクとの並行処理におけるパラメータマッピング型可聴化適性
- マスキング耐性をもつ情報可聴化のための周波数変調
- マルチタスク環境における視覚情報との並行処理のための可聴化法の検討
- 加算合成による位置決め制御課題における情報可聴化

○ 社会システムの安全性評価

- U字型生産ラインを対象とした機能共鳴解析による作業ゆらぎ影響分析
- 離散事象システムモデルに基づく生産工程サプライチェーンのゆらぎ分析
- 機能共鳴解析のためのファジィ推論に基づく作業手順の脆弱性評価
- ヘリコプタの飛行制御
 - ロータ空力特性における垂直壁効果
 - フラップ角運動を考慮した産業用無人ヘリコプタの姿勢角制御
 - マルチコプタのロータ空力特性における天井壁効果の補償法
- 機械学習
 - Deep Reinforcement Learning with State Prediction against Non-stationary Agents
 - スパース報酬環境における方策獲得のための模倣から強化学習への遷移
 - トピックモデルによる教師なし評判分析のための感情極性補正法
- ドライバの注視領域推定
 - 視点による手がかり利用の変化がドライバの運転行動に与える影響
 - 移動体の誘目性を考慮した顕著性マップによるドライバ注視領域の推定
 - 準自動運転における人間-機械間の状況認識機能の分担に関する研究
 - 半自律運転車両の多感覚ヒューマンマシンインタフェース設計
- 睡眠ステージの推定
 - 睡眠時耐圧分布時系列からの呼吸曲線抽出と無呼吸事象抽出
 - Neural-CRFを用いた心肺信号からの睡眠段階判別
 - モルフォロジ成分分析を用いた睡眠時体圧分布時系列からの心拍数推定

3. 研究室の垣根を越えた教育研究活動・産学連携活動

以上に紹介した研究のほか、当研究室では、研究室単独での研究にとどまらず、複数の専攻や他の研究科と共同して実施する教育活動・産学連携活動にも携わってきています。

3.1 学際共同による教育研究プロジェクト

まず21世紀COEプログラム『動的機能機械システムの数理モデルと設計論』（2003年度～2007年度）がありました。これは当時航空宇宙工学専攻の土屋和雄教授（現在名誉教授）を拠点リーダーとして、工学研究科の機械工学分野と情報学研究科複雑系専攻（当時）との連携のもとで実施した博士課程教育プログラム

で、著者自身もサブリーダーの一人に指名され申請の段階から関与することになりました。当時のCOE運営方針としては、教員の間で共通の問題意識を共有することのみとし、緊密な情報交換と多様な研究発信・発想により有機的なネットワークを醸成すること、そして何より自主的で自由な研究を進めてもらうこととしました。いわば「基礎研究型の共同研究方式」であって、力学・複雑さ・情報を基礎概念とする21世紀の応用力学を機械系から発信していくことを目指しました。この中で、当研究室は4つの研究グループのなかの「制御と設計論」のグループで「人間機械の共適応」に関するテーマを実施してきました。複雑系に顕著な物理的・生物学的なパターン形成や自己組織化の過程が、「人間によってつくられた人工物システム」や「人間と相互作用するシステム」の制御や設計にどのように活用でき、またそれがどのような革新をもたらすことになるのかについて、機械そのものの設計・制御における革新と、機械を取り巻くシステム全体のデザインに敷衍した場合の革新の両面からアプローチを行いました。

続いて2007年度（平成19年度）～2011年度（平成23年度）にかけては、科研費の学術創成研究費の採択を受け、「記号過程を内包した動的適応システムの設計論：つくる設計論から育てる設計論への転回」を著者が研究代表で実施しました。研究者は京都大学大学院工学研究科から機械理工学専攻の4研究室と航空宇宙工学専攻・建築学専攻、情報学研究科の知能情報学専攻・複雑系科学専攻、他大学からは神戸大学・同志社大学・立命館大学からの参画を得て実施しました。これからの我々の日常生活や生産活動を支えるユビキタス社会基盤のあり方は、人間と自動化機械・情報機器のような人工物が渾然一体に繋がれ、多数の系が相互に影響し合って進化するような生態学的特性を有する系となります。そこでは、個々の場所や時間の中で動的に変容する対象の多義性を十分考慮に入れ、それとの関係の相互性の中で事象を捉えていくことのできる新たなシステム設計論の確立が求められていました。本研究プロジェクトでは、そのための普遍原理を「記号過程（セミオーシス）」に求め、周囲環境の個別性や多様な利用者・利用状況に応じて、しなやかに自ら機能を創成できる新たな人工物システムの設計論の確立を目指しました。とりわけ人間や生体のような「主体性」のある存在が関与する系においては、システム要素間の相互作用はますます複雑さを増すことになる点に着目し、これまでの「つくる設計論」に代わり、快適さと安心を享受できる持続性社会実現に向けた「育てる設計論」の確立を目指しました。

さらに2012年度から現在に至るまで、博士課程教育リーディングプログラム『デザイン学大院連携プログラム』（通称、京都大学デザインスクール）の開発と運営に取り組みました。これは、個々の人工物を超えて、社会のシステムやアーキテクチャをデザインできる人材の育成を目指し、情報学・機械工学・建築学・経営学・心理学及び芸術に関わる教員が協働して実施する教育プログラムですが、この中で著者にとっては「アーティファクトデザイン論」の新たな科目を開設して教科書も発刊でき、これまでの人間機械系に係る研究・教育活動の集大成とすることができました。

3.2 産官学共同による組織的連携研究プロジェクト

産学連携研究については、2012年3月より3カ年にわたり、一般社団法人日本鉄鋼協会の助成を受けた震災復興アクションプランとして、「『ゆらぎ』への耐性を実現するための人・システム共創型リスクマネジメント」の採択を受け、著者が主査として鉄鋼メーカー4社を含む産学共同で展開しました。我が国のものづくりにおいては、市場変化、海外展開、さらにはエネルギーや経済環境変化などにより、従来の想定を超える種々の「ゆらぎ」への臨機応変な対応がもとめられる場面が増えてきています。さらに、熟練作業員が大量に現場から抜けることに伴う作業品質の低下に伴うゆらぎや、老朽化する生産設備の機能不全に伴うゆらぎについても、同様に深刻な問題となって来ています。このような種々の「ゆらぎ」への対応は、人間とシステムの共創によって初めて可能になります。そしてこれを実現するためには、想定外の災害発生時におけるシステムとしての脆弱性を事前に分析するためのシステム化技術、そして、重大事故防止のためのストレステストを、ハードウェア単体の耐久性のみならず、人・機械・組織が形づくる全体の活動にまで広げて実施するためのシステム化技術の確立が必要になるとして実施しました。

上記とは別に、著者らは「組織」対「組織」の産学連携として、京都大学と三菱電機株式会社との組織連携による共同研究を2005年から行って参りました。京都大学は従前、産学連携に対して「嫌い」「苦手」な大学として通っていました。それは社会に役に立つものづくりやエンジニアリングを追求する工学にあっても例外ではありませんでした。基本原理から究め、未開のフロンティアを追いかけることをよしとする本学の学風は、そのスピードのみを求められがちな産学連携

となじまない部分も多かったからです。これに対して著者らは、大学と企業が「組織」対「組織」で向き合う組織連携が、ビジョンの共有や部局を超えた連携によるリソースの結集でイノベーションを加速させると期待されている手法であるとして注目し、2005年という早い時期から取り入れました。次世代のセル生産を実現するロボット知能化技術について三菱電機株式会社と連携し、機械系3専攻に加えて他研究科からも参加する横断型の共同研究を進め、様々な成果を上げながら現在もなお拡張を続けています。この組織連携において著者は大学側の代表を務めてきましたが、何を研究すべきかを定める段階から産学が一緒に議論を開始したことが成功に繋がったと思います。議論から生まれたテーマに合わせて基礎研究から実用化にも結び付く発展型の研究が行われ、研究者が緩やかに結びついていることが連携成功の鍵となりました。この組織連携はその後、対象分野がシステム研究だけでなくデバイス研究にも広がり、第1期の「次世代セル生産を実現するロボット知能化技術」（2005年度～2013年度）から、第2期の「人と垣根のない機械システム」（2014年度～）として継続され、2019年度からは進化型機械システム技術産学共同講座が開設されています。本学側の連携の範囲も、工学研究科のみならず、情報学研究科、医学研究科、教育学研究科、学術メディアセンターの各部局にも拡大され、活発な産学協同研究が展開されています。

そして最近では、上記の共同研究から発展した熟練者の暗黙知を伝える支援のためのAI基盤技術の研究がNEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）による「人と共に進化する次世代人工知能に関する技術開発事業」の採択を受け、「熟練者暗黙知の顕在化・伝承を支援する人協調AI基盤技術開発」の研究プロジェクトを2020年度から2024年度まで著者が研究開発責任者として、国立研究開発法人 産業技術総合研究所と三菱電機株式会社と一緒に取り組んでいます。ここでは「暗黙知」というものについて、技能遂行者個人のなかに取り出せる実体としてあるわけではなく、作業対象や他者を含む外部環境との相互作用の中から立ち現れてくるものであるとし、技能者自身ですら自覚していない知識を含むことから、近年急速に開発の進む自然言語AIを用いて、インタビューや対話による効率的な潜在暗黙知の顕在化を促す手法を開発し、その上で暗黙知をインタラクティブに引き出すためのプロセスモデルをFARM（Functional Resonance Accident Model）という機能連鎖の表現法でアーカイブ化し、機能連鎖間でのゆらぎ伝搬のシミュレーション（エンビジョニング）を可能にすること

を目的としています。そのために、一連のインタビューデータに対して、個々の発話のラベリング、発話の理解度極性判定を自動化し、これに基づいて発話連鎖のプロット分析を可能にすることで、話し手側の「語りたことがあるけれどそれがうまく表現できない」と感じるブレークダウン(行き詰まり)状態を同定し、そのとき聞き手はどのような応答をすることで、話し手の語りに寄り添っていけるかを明らかにすることで、「語りにくさへ」の共感を引き出し、暗黙知の顕在化を促すためのインタビューモデルの確立を行なっています。そして、作業員へのインタビュー対話を、作業員同士の間でのコーチング対話に展開し、交渉型で協働的な暗黙知の共有プロセスをモデル化することを目標として研究を実施しています。

機械システム創成学研究室での主な教育研究活動は以上の通りです。本稿で紹介した内容に関心を持たれた方は以下の研究室のHPまでアクセスいただけましたら幸いです。

機械システム創成学研究室HP: <https://www.syn.me.kyoto-u.ac.jp/ja/>

なお末尾ながら、著者は2023年3月末をもって37年間お世話になった京都大学を定年退職いたします。現役中に賜りました皆様からのご厚情・ご指導に対しまして、心より御礼申し上げます。