



項目をクリックすることで当該記事に進みます

寄稿

3E を目指す電力システムの統合運用ツールの動向

3E: Energy security(安定供給)、Economic efficiency(経済効率性)、Environment(環境適合)

東京大学生産技術研究所

エネルギーシステムインテグレーション社会連携研究部門 特任教授 荻本和彦氏

目次

I センター情報

- ① SIC第3期システム科学概論連続講座「システム科学のための情報と数理」
(講義単位受講者募集中)
- ② SIC第3期システム科学概論連続講座「システム科学のための情報と数理」
第1回(2026. 6. 12)開催報告

II 会員活動

- ① 2026年度第5回SICフォーラム開催案内(会員限定)
【日時】 2026年7月6日(月) 15:00~16:15
【タイトル】 「AI 活用は何を変えるのか - 日本企業における AI の社会実装
~国内のビジネス現場からみえた課題と社会システムのイノベーションの必要性~」
【講師】 最首 英裕氏 株式会社グルーヴノーツ 代表取締役社長
- ② 2026年度第4回SICフォーラム(2026. 6. 17)開催報告
【タイトル】 「圏論による Model Based System Engineering の展開とその動向」
【講師】 本多 敏氏 慶應義塾大学名誉教授
- ③ 2026年度第6回実行委員会(2026. 6. 23)開催報告

III 会員企業一覧

3E を目指す電力システムの統合運用ツールの動向

3E: Energy security(安定供給)、Economic efficiency(経済効率性)、Environment(環境適合)

東京大学生産技術研究所

エネルギーシステムインテグレーション社会連携研究部門 特任教授 荻本和彦氏

1. はじめに

再生可能エネルギー導入で電力システムの運用は、それぞれの地域の電源構成に応じて過去の需要の変動に対し、限られた数の火力、水力、揚水が毎日、毎時、毎秒の需給を調整する形は過去のものとなりつつある。太陽光発電や風力発電の出力、需要の変動と予測誤差が拡大し、無数の蓄電池や需要が需給バランスや送配電網の混雑解消に参加する。従来の地震、台風、渇水などの自然の変動は、太陽光発電や風力発電を通してより大きなインパクトを与えるため、経済性、安定性、環境性の3E¹を目指す電力の市場運営とシステム運用では不確実性が増加し、臨機応変の意思決定が求められる。

この状況に対応するため、1990年代の英国から始まり世界に広がった自由化・市場化、そしてその後の再エネ導入、需要の能動化、データセンターなどの大規模重要な接続と続く大変革の中で、電力の市場運営とシステム運用は、SCUC/SCED²を核とする高度な統合運用ツール(以下、MMS(Market Management System)/EMS(Energy Management System))で支えられている。しかし、近年の市場価格変動や2025年4月イベリア大停電、電源や送配電網の長期投資難など、新たな課題も山積みの状態で、市場運営・システム運用はさらなる高度化が求められている。

本稿では SCUC/SCED を核とした MMS/EMS の動向について述べる。

2. MMS/EMSの現在

2.1 SCUC/SCEDの変遷

MMS/EMS の核となる SCUC/SCED では、ニーズの高度化・複雑化と技術革新の流れの中で、その手法は大きく変化してきた。電力の自由化・市場化が始まった1990年代は、従来の火力・水力・揚水など従来の集中電源による調整力が豊富な時代で、市場では各取引時間コマでの単純な需要と供給の一致までが求められ、動的計画法(DP)やラグランジュ緩和法(LR)による内製ソフトウェアが使われた。これに対し、2000年代には送電網の容量制約に対し地点別価格を導入するための直流潮流最適化(DCOPF)の導入や調整力の条件制約、それらの調達の機能の追加などに伴い、CIPREX などの汎用の MIP(混合整数計画)ソルバーが使われるようになった。その後、再生可能エネルギーの大量導入のための市場の取引時間コマの短時間化や複数の需給調整力とエネルギーの配分の同時最適化への対応が求められ、Gurobi に代表されるベンダーが提供する汎用ツールに依存する状態を作り出した。現在はさらに複雑化した多様なニーズに応えるために単純な並列計算では SCUC/SCED の計算時間の短縮が難しくなったため、一部の機能の前処理あるいは初期値を別ソフトあるいは AI を使って設定するなどの取り組みが行われている。

2.2 MMS/EMSのシステム構成

図1に SCUC/SCED を核とする市場運営と運用計画を行う MMS/EMS の流れを示す。第1層ではリアルタイム・オンライン入力とそれに伴うサイバー防衛処理が行われ、さらに状態推定やデータクレンジングが行われる。第2層では、VPP³を含めた入札条件の処理、再生可能エネルギーの出力や需要の予測シナリオの削減、燃料および貯水池など長期の計画要素の処理などの前処理が行われる。第3層の SCUC/SCED は、第4層による計画に関する各種の検証の結果により、反復して計画策定を行う。第4層では、第3層で策定された結果の妥当性を様々な視点で解析・評価して必要に応じて第3層に戻す。第5層では、約定処理の情報が各市場参加者のシステムへ、負荷配分など運転指令の情報が運用システムに送出される。SCUC/SCED は、実際のプロセスでは、予測の更新、電源・送電線の事故などによる使用停止・接続変更などに応じて、プロセス全体あるいはその一部を定期的あるいは随時実施する。

¹ 3E: Energy security, Economy efficiency, Environment

² Security Constrained Unit Commitment/Security Constrained Economic Dispatch

³ Virtual Power Plant: アグリゲータなどが運用する分散型の多数の電源、需要、エネルギー貯蔵を組み合わせたモデル。

- 第1層 データ収集・サイバー防衛
 リアルタイム・オンライン入力:
 例 SCADA, PMU, DERMS, DER 状態
 状態推定・データクレンジング
- 第2層 前処理
 オンライン連携: 例 入札処理、VPP アグリゲーション、
 予測シナリオ削減、長期燃料・貯水池計画
- 第3層 コア最適化エンジン: SCUC/SCED など
- 第4層 結果の並行・反復検証:
 例 ACOPF、短絡容量 SCR、系統慣性などの検証
- 第5層 給電指令と市場決済の出力
 市場決済: 例 市場価格、アップリフト補償
 給電指令: 例 起動停止/出力

図1 SCUC/SCED を核とする市場管理と運用計画の構成

2.3 ニーズの拡大と高速化

SCUC/SCEDの処理では、LMP⁴の導入、取引時間コマの短時間化などで負担が増え許容時間が短縮されたが、コア機能の向上と計算資源の高速化により対応が行われてきた。しかし、近年では、図2に示す新たなニーズによるさらなるSCUC/SCEDの負担の増加のため、市場のプロセスの中での許容時間内での処理の終了が難しくなった。

1. 貯蔵技術の大量導入
 時間と空間の二つの軸で多数の連続変数と充放電の整数変数が必要。
 揚水は最低運転電力が加わる。
2. 自然と社会・経済活動の不確実性
 再生可能エネルギーおよび需要の予測誤差の数理モデル化
3. 送電線の物理限界
 電圧・無効電力管理のための ACOPF、気象依存の動的送電容量
4. 分散資源の大量導入と市場参加
 電気自動車、ヒートポンプ給湯、家庭用蓄電の数の多さ、蓄電モデル、VPP アグリゲーション
5. 多様なシステムサービス市場の同時処理(Co-optimization)
 電源、需要、エネルギー貯蔵のすべての運用に関係する
 エネルギー市場に加え、各種需給調整力、混雑管理の調整力
6. 管理・制御対象の複雑化
 複合発電、蓄電池併設太陽光発電、大規模需要。
7. サイバー防衛
 データ注入を防止するため状態推定(準リアルタイム)

図2 SCUC/SCEDを核とするMMS/EMSの処理時間の増大要因

2.4 広がる課題と対応

SCUC/SCEDを核とするMMS/EMSには、処理の複雑さと規模の増大による処理時間のほかにも難しい課題が存在する。これについてAI(GoogleのGEMINI)による検索結果を以下に示す。

- 市場の論理: 起動停止の整数性(非凸性)による価格の歪み(事業者の赤字の発生)
- 物理の論理: 数式(モデル)と現実の設備特性のズレ (手動介入の発生)
- 人間の論理: 事業者は自社が儲かるようにデータをつくる (ゲーミング)
- 組織の論理: 機密データを開示したくない (情報ガバナンス不足)
- 時間の論理: 5分コマの経済最適化では1ミリ秒現象を防げない(動的安定度の死角)

これらの課題は、MMS/EMSのソフトウェアの改善では対応が難しいため、技術と制度の両面からの対策の検討・試行・実装を行うことが望ましい。例えば、非凸性による価格の歪みに関しては、市場参加者の収益が不当に不足しないように、米国のISO市場では不足分の補填(Uplift)や拡張地点別価格(Extended LMP)などが実運用に適用されている。

⁴ LMP: Locational Marginal Price

3. MMS/EMSのシステム・データ連携

本章では、2.2 で述べた構成を持つ MMS/EMS について、第2層の前処理、第4層の並列/反復処理、および第5層の約定情報・運転指令の出力について述べる。

3.1 第2層 前処理

第1層では、データ入力とそれに伴うサイバー防衛処理、さらに状態推定、データクレンジングを行う。これに続く第2層では、SCUC/SCED の処理の負担が小さくなるように、入札条件の処理、再生可能エネルギーの出力や需要の予測シナリオの削減、燃料および貯水池など長期の計画要素の処理などの前処理を行う。下記は現行の比較的多くの EMS の事例で実施されている入力側のシステム別の前処理の例である。

- 状態推定: 従来のSCADA⁵に加え同期した時間粒度の細かいPMU⁶の活用が広がる。
- 市場参加者接続システム: 市場参加者からの電源、蓄電、需要の入札、設備特性データ。複合発電、太陽光発電と蓄電のハイブリッド、調整可能な大規模需要の特性などの複雑なデータを整形する。
- VPPプラットフォーム / DERMS⁷集約モジュール: 住宅の蓄電池、給湯器、EV充電をはじめとするきわめて多数の分散型資源の運用を配電変電所、さらには市場が設定されるノード(上位の変電所)別に集約する。
- 再エネ・需要の確率予測システム: 作成された多数の予測シナリオから数本の特徴的なシナリオを選択する。
- 燃料調達・在庫管理システム: 時間粒度が大きい替わりに多数日での最適化が求められる地点別の燃料の受け入れスケジュール・在庫見通しから、使用の上限や等価的な機会費用を算出する。
- 送電制約スクリーニング・縮約ツール: 極めて多数の送電網から市場運営・システム運用に必要な(例えば混雑しない)送電性を除く。

3.2 第4層 並列・繰り返し処理

第4層では、第3層で策定された結果の妥当性を様々な視点で解析・評価して必要に応じて第3層に戻す。すなわち、第3層からの市場約定・運用計画について、並列あるいは繰り返しの検証を実施する。以下に、地域により一部実施されている多様な分野を示す。

【物理分野】

電圧・無効電力・短絡容量・損失解析(ACOPF など)

高速想定事故解析(CA: Contingency Analysis)

広域動的・過渡安定度解析(Dynamic Stability Analysis)

系統強度(System Strength)詳細解析(EMT Analysis⁸)

【インフラ・他分野】

マルチセクター(電力・ガス・熱)結合シミュレータ

【サイバーセキュリティ】

サイバー物理攻撃影響評価システム(CPES: Cyber-Physical Energy System)

再生可能エネルギーの大量導入のもとでの同期機の運転容量の低下やインバータ連系の機器設備の増加に伴う系統慣性、System Strength の確保などの要請や、これらに対する GFM⁹型インバータの適用による交流電力システムの新たな課題の発生により、並列繰り返し処理の項目は再び増加する傾向にある。

3.3 第5層 約定・運点司令の送出

第5層では、約定処理の情報が各市場参加者のシステムへ、負荷配分など運転指令の情報が運用システムに送出される。

【約定処理、精算】

- 卸電力市場約定価格(LMP / ELMP)公開プラットフォーム
- 多階層調整力、予備力・容量市場
- 金融的送電権(FTR¹⁰)及び地域間混雑料金還付プラットフォーム
- 配電・VPP ローカル柔軟性市場精算システム

⁵ SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition(遠隔監視制御)

⁶ PMU: Phasor Measurement Unit(フェーザ計測装置)

⁷ DERMS: Distributed Energy Resource Mangement System (分散資源管理システム)

⁸ EMT: Electro Magnetic Transient Analysis

⁹ GFM: Grid-Forming Inverter

¹⁰ FTR: Financial Transmission Right

【運転指令】

- 送電レベル: 中央給電指令システム(AGC¹¹/起動停止など発電所向けほか)
- 配電レベル: DERMS・VPP プラント

【環境・排出トラッキング】

- 炭素排出原単位予測システム
送電レベルの物理司令、エネルギー・調整力・容量など各市場の約定処理・清算は、基本的には世界のシステムで実現されているが、システム連携については、制度に基づく地域のニーズやシステム構成により差がある。欧州の炭素排出原単位予測システム、豪州の系統強度サービスの清算などは、先進的なシステム連携の例である。

3. 4 短期市場価格の決定と社会へのシグナル AI壁打ち_市場価格～解析

MMS は短期市場価格を決定する。短期市場価格には、地理的粒度から一律/ゾーン別/地点別、清算の時間軸から前日固定/当日補正/当日決定、計算方式からマージナル/コストベース、市場参加には義務的/自発的などの種類があり、それに応じて MMS システムの実装方法が決まる。

毎日の短期市場価格は、短期市場における取引の決済に使われるほか、短中期の市場価格予測など市場・システムの運営者、市場参加者、研究者、の基礎データを提供する。さらに電源や送配電設備、エネルギー貯蔵設備、MMS/EMS の改善などの長期投資を評価する基礎データ、消費者の行動変容や技術選択のシグナルとなり、それらを通して社会のエネルギー分野の方向性や制度の歪みを考える情報を与える。しかし、再生可能エネルギーの出力余剰で市場価格がゼロ、あるいはマイナスになる時間コマが増加し設備投資のシグナルにならないことが、長期投資の不足という電力分野での世界的な課題となっている¹²。

4. MMS/EMSのこれから

4. 1 MMS/EMSの導入状況

MMS/EMSの導入例は、米国のISO、イギリスや欧州について語られることが多い。しかしアジアの中国、韓国、フィリピン、オセアニアの豪州などは、それぞれの制度・政策の下で少しずつ異なるものの、MMS/EMSを導入して運用している。中国では豊富な数値最適化の専門家により大規模な集中型のシステムが作られた。

豪州では、大量の再生可能エネルギーの導入と電圧不安定性の対策のため、市場制度を通して短絡蓄電池などの多数の分散型システムを活用し、System Strength (系統強度)に関する取引を始めている。

MMS/EMS、SCUC/SCEDの高度な機能は、毎日の電力の市場とシステム運用の経済効率、信頼性、さらには安定性の維持に決定的な効果を発揮する。さらに、SCAD/PMUなどの電力システムの状態推定のデータと組み合わせることで、事故や異常現象の分析を可能とし、またそれらのデータを蓄積することで電力システムの運用や状態の変化を継続的に分析・評価することができる。これらの環境の整備により、適用効果を評価し、制度や運用ルールの変更・改善と組み合わせで先進技術の適用が進む。

4. 2 導入・改善の障壁

SCUC/SCEDあるいはそれに代わる仕組みによるMMS/EMSは、米国やイギリス・欧州、豪州、中国、韓国、フィリピンでは導入・運用されているのに対し、日本の周りではタイ、マレーシア、インドネシア、ラオスおよび日本では検討中の状態である。

SCUC/SCEDを核としたMMS/EMSシステムの導入には大きな便益・効果が期待されるがその導入には図3に示す乗り越えるべき障壁が存在する。各国におけるMMS/EMSの導入にあたっては、ソフトウェア本体に加え、市場とシステム運用の制度・ルール、機器・設備の機能向上、毎日の運営・運用にあたる人員の育成に加え、規制機関、事業者、電力の需要家の理解と協力が必要である。

¹¹ Automatic Generation Control(自動発電制御)

¹² IEA: Electricity Market Design (2025)

- リソース：システム開発に必要な技術、人、金
- 制度・法：既存 PPA、新制度未決定
- 運用・燃料：発電所運用・燃料ハンドリングの硬直性
- 制度の複雑さ：再エネ優先給電ルール
- システム連携：発電、小売りなどの事業者のシステム対応の難しさ
- データ・ガバナンス：機器・設備系統データの機密性・精度不足

図3 SCUC/SCEDを核とするMMS/EMSの導入障壁

MMS/EMSの導入のさらなる障壁としては、政治・社会的要素としては既得権益、一律で変化できない電気料金・託送料金、安全保障の視点からの供給途絶リスクへの対応、自然・気候の要素としての極端な事象への数理モデルの対応などが挙げられる。またこれらのすべてに共通する障壁として、数理計画やデータ活用のリテラシーのある人材不足が存在する。米国ISOのシステム部門では、中国をはじめとするアジア系のエンジニアが制度を理解してそれを反映するシステムの設計・運用に携わっている。MMS/EMSの導入に当たっては技術と制度・ルールを結ぶことのできる人材確保が大きな課題となることを示している。

なお、既導入の場合も、中国では管理対象の大規模化による処理遅れ、韓国では市場価格高騰、フィリピンではシステムのブラックボックス化による解決難など、それぞれの実情による多様な課題を解決しつつ運用が行われている。

4.3 データ活用と競争力強化

MMS/EMSシステムでは、蓄積されるデータを用いて、短期の予測あるいは長期の運用について、様々な市場を含め、システム全体の経済性・信頼性の解析・評価を行うことができる。また、新しい技術や制度・ルールの適用について効果評価を行うことができる。

このオフラインの解析・評価では、多数年のデータに基づく信頼性・費用の分析や、再エネ比率の最大、残余需要の最小、同期機の並列容量の最小など将来の技術課題を評価する断面の条件の提供なども重要な役割となり、将来のMMS/EMSシステムの継続的な競争力強化の原動力となる。

5. おわりに

SCUC/SCEDを核とするMMS/EMSシステムは、電力・エネルギーシステムにおける膨大なインフラ設備と複雑な経済・社会の制度やルールをつなぎ、毎日の市場運営と電力システムの運用を行い、蓄積されたデータは異常現象の分析、技術・制度・ルールの改善に用いられる。サイバーセキュリティの課題解決やAI技術による性能向上など、あらたな課題と技術の可能性は広く大きい。SCUC/SCEDは巨大な電力・エネルギーシステムの優れたデジタルツインであるのと同時に、現実のシステムとの物理的なギャップ、人間界の複雑な制度とのせめぎあいによる課題も多数存在し、それらを認識したツールとしての開発・利用は、電力・エネルギーシステム、ひいてはそれが支える経済社会活動の効率性、安定性に貢献する。

世界では再生可能エネルギーの大量導入のもと、市場取引は時間コマの幅を縮めよりリアルタイムに近い取引に代わり、扱う価値もエネルギー(kWh)から各種調整力さらには系統慣性や電圧維持能力などと変化してきた。他方、MMS/EMSはシステムとして隠れた脆弱性があり、人間側が管理・統治できるものでなければならない。技術、制度・ルール、数理・システム技術などのそれぞれの分野の専門家の協力・協調のもとで、MMS/EMSの活用が進むことが期待される

【著者プロフィール】

荻本和彦(おぎもと かずひこ)氏

1979年 東京大学工学部卒業後、電源開発株式会社入社。2008年より現職。

エネルギーシステムインテグレーションとして、エネルギー技術戦略、物質・エネルギー需給解析・評価、動的エネルギー需給解析・評価、集中/分散のエネルギーマネジメントと再生可能エネルギー導入、エネルギーシステムの診断・評価とリスクアセスメントなどの研究に取り組む。

(2026年6月24日原稿受領)

I センター情報

① SIC第3期システム科学概論連続講座「システム科学のための情報と数理」 (講義単位受講者募集中)

現代の複雑なシステムを理解するための「新たな知の基盤」が求められています
“複雑性を紐解き、未来のシステムをデザインする全6回の知的探求”

開催期間：2026年6月12日～11月20日（全6回 対面とオンライン講義を併用）

第1回、第2回の受講の申し込みは終了しています。

第3回(7月24日)、第4回(9月11日)、第5回(10月16日)、第6回(11月20日)
の講義単位受講者を募集中です。

受講料：● SIC正会員・準会員所属の方

講義単位で受講の場合、1 講義の受講料 6,000 円/人

● 非会員の方

講義単位で受講の場合、1 講義の受講料 8,000 円/人

(支払いは請求書払い)

詳細および申し込みは下記の URL を参照ください

<https://sysic.org/news/4993.html>

本講座の概要と開講スケジュール

システム科学の神髄は、多様な要素がいかに繋がり、全体として機能するのかを解き明かすことにあります。本講座では、情報科学と数理科学を「強力なレンズ」として用い、大規模システムの基礎概念から、最新のAI、圏論、人間拡張、そして未来のサイバー・フィジカルまでを体系的に網羅します。

システム開発を担う技術者、システムの実装・管理を担う実務者や、システムへの理解を求められている経営分野の方々を対象に、単なる知識の習得ではなく、複雑化する社会と技術を俯瞰し、自らシステムをデザインするための「知のOS」をアップデートする連続講座です。

「システム科学のための情報と数理」全6回講義 開講スケジュール

第1回	6月12日(金) 15:00-18:00	終了しました	システムをつなぐ情報と通信の数理基盤	出口光一郎 (SIC、東北大学)
第2回	7月3日(金) 15:00-18:00	オンライン	大規模動的システムと数理モデル	石井秀明 (東京大学)
第3回	7月24日(金) 15:00-18:00	オンライン	AIとシステム科学の接点ーマルチモーダル知能と実世界システムー	岡谷貴之 (東北大学, 理化学研究所)
第4回	9月11日(金) 15:00-18:00	オンライン	関係性の数理科学(圏論入門:システムは圏論でできている)	本多 敏 (慶応大学, 日越大学)
第5回	10月16日(金) 15:00-18:00	オンライン	Fusing Interactionー身体拡張から 共同体験へ向かう『境界のない世界』ー	嵯峨 智 (熊本大学)
第6回	11月20日(金) 15:00-18:00	対面(終了後 交流会)	情報と数理を基盤とする統合的システム デザインと未来社会	藤田政之 (金沢工大, 東京工業大学)

第2回

大規模動的システムと数理モデル

7月3日
15:00-18:00

講義形式:
オンライン講義

講師:
石井秀明
(東京大学教授)



講義概要

- ・ネットワーク化されたシステムの制御に焦点を当てる。
- ・大規模システムの数理モデル化の方法論を詳説する。
- ・情報・通信と制御論の融合領域および制御システムのサイバーセキュリティについて解説する。
- ・大規模複雑システムのダイナミクスを解析・制御するためのモデリング技術の習得を目指す。

講師紹介:

1998年 京都大学 大学院工学研究科 修士課程 修了, 2002年トロント大学 電気コンピュータ工学科 Ph.D. 課程 修了, 2001年イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校 研究員, 2004年 東京大学 大学院助手, 2007年 東京工業大学 情報理工学院 情報工学系 准教授, 2020年 同 教授, 2024年 東京大学 大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻 教授, 現在に至る. 計測自動制御学会 制御部門研究賞(木村賞), IEEE Control Systems Magazine 優秀論文賞等を受賞. IEEE および IFAC (国際自動制御連盟)の Fellow.

第3回

AIとシステム科学の接点 —マルチモーダル知能と実世界システム—

7月24日
15:00-18:00

講義形式:
オンライン講義

講師:
岡谷貴之
(東北大学教授)



講義概要

- ・視覚を中心に世界を理解するマルチモーダルAIの研究動向と、その設計思想を紹介する。
- ・AI研究を実世界・社会課題の解決へと接続する際の課題と可能性を考察する。
- ・実世界で機能する知能の実現に向けて、ロボティクスや車載応用などの事例を通じて議論する。

講師紹介:

東北大学大学院情報科学研究科 教授/理化学研究所 革新知能統合研究センター(RIKEN AIP)チームディレクター。

コンピュータビジョンおよびマルチモーダルAIを専門とし、視覚を中心とした実世界理解の研究に従事。物体認識、三次元理解、センサ統合、ロボティクス応用など幅広いテーマに取り組み、近年は基盤モデルとPhysical AIの接続に関心を持つ。国内外の主要国際会議・学術誌で多数の論文を発表し、学術活動と実社会応用の両面からAI研究を推進している。

第4回

関係性の数理科学 (圏論入門：システムは圏論でできている)

9月11日
15:00-18:00

講義形式:
オンライン講義

講師:
本多 敏
(慶応大名誉教授)



講義概要

- ・システム思考のOSを圏論でアップデートする
- ・システムを関係から観る: 圏論の抽象性と普遍性を観る
- ・「圏」の定義: モノとコトの構造を記述する
- ・構造の関係性: 関手・自然変換・随伴の役割を理解する
- ・MBSEと圏論: Wiring/String Diagram, Lens, Sheaf Theory

講師紹介:

1975年 東京大学工学部計数工学科卒業、同学科助手、講師を経て、1986年 熊本大学工学部生産機械工学科助教授、1990年 慶應義塾大学理工学部計測工学科助教授、1992年 ドイツアーヘン工科大学

客員研究員、1998年 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科教授。

2017年4月～現在 慶應義塾大学名誉教授、慶應義塾大学大学院SDM研究所上席研究員。

2025年8月～現在 JICA 日越大学支援プロジェクト 専門家/講師(コンピュータサイエンス&エンジニアリング分野)

第5回

10月16日
15:00-18:00

講義形式:
オンライン講義

講師:
嵯峨 智
(熊本大学准教授)

Fusing Interaction —身体拡張から共体験 へ向かう『境界のない世界』—



講義概要

- ・VR/AR技術や人間拡張工学を核とした、身体とシステムが融合し境界が溶け合う新しいヒューマンインタフェース
- ・物理・生理・知覚の多角的な手法を用いた、触覚ディスプレイ、力覚提示、および感覚変容技術による「実感」の創出、
- ・熟練技能の継承を実現する教示技術と、遠隔地間での感覚共有により個人の体験を「共体験」へと進化させるデザイン、など。

講師紹介:

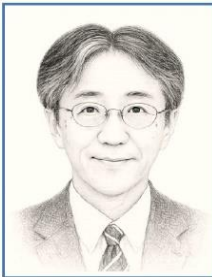
2007年3月 東京大学情報理工学系研究科システム情報学専攻博士後期課程 修了。2007年4月-2008年3月東北大学工学研究科バイオロボティクス専攻 助教。2008年4月-2013年4月東北大学情報科学研究科システム情報学専攻助教。2012年4月-2012年7月マサチューセッツ工科大学客員助教兼任。2013年5月-2017年9月筑波大学システム情報系情報工学域准教授。2017年10月-熊本大学大学院先端科学研究部准教授。現在に至る。
力覚教示、触覚センサ、触覚ディスプレイをはじめとした、人間中心の双方向型触覚インタフェースに関する研究に従事。博士(情報理工学)。

第6回

11月20日
15:00-18:00

講義形式:
対面講義(終了後
懇親会)

講師:
藤田政之
(東京工業大学名誉教授
金沢工業大学教授)



講師紹介:

1985年早稲田大学大学院博士後期課程退学。1985年金沢大学助手、同講師、助教授、JAIST助教授を経て、1999年金沢大学教授。1994~1995年ミュンヘン工科大学(文部省在外研究員)。2005年東京工業大学教授。2012~2019年 JST CREST研究総括。2020年東京大学教授。2024年金沢工業大学教授。現在に至る。

SICE(計測自動制御学会) 会長、横幹連合副会長、IEEE CSS(Control Systems Society) Vice Presidentなど歴任。IEEE CSS Distinguished Member Award, IEEE TCST Outstanding Paper Award, SICE論文賞/教育貢献賞、東京大学工学部 Best Teaching Awardなど受賞。IEEEライフフェロー、SICE名誉会員/フェロー、工学博士。

情報と数理を基盤とする 統合的システムデザインと未来社会

講義概要

システムの語源は「共に立てる(systema)」にあり、その思想は未来社会の構築に欠かすことができない。Society 5.0の中核をなすサイバーフィジカルシステム(CPS)はまさにサイバー空間とフィジカル空間を「共に立てる」ことを目指すものであり、1948年のウィーナーによるサイバネティクスの提唱以来、長足の進歩を遂げてきた。

一方で、1956年のダートマス会議においてマッカーシーが提案したAI(Artificial Intelligence)は、近年のフィジカルAI(Physical Intelligence)の台頭により、物理世界と高度に相互作用する劇的な進化を見せている。

本講義では、人間という要素をシステムの一部として内包する未来社会を見据え、CPSに人間(Human)を統合した「サイバー・フィジカル・ヒューマン・システム(CPHS)」について、新しいフィジカルAIを用いた統合的システムデザインの視点から論ずる。

② SIC第3期システム科学概論連続講座「システム科学のための情報と数理」 第1回(2026. 6. 12)開催報告

【日時】 2026年6月12日(金) 15:00~18:00

【開催形式】 対面とオンラインのハイブリッド

対面開催場所: 新宿住友ビル47階 新宿住友スカイルーム

【参加者数】 会場参加:15名(講師・SICスタッフ含む)、オンライン参加:16名 合計31名

【タイトル】 「システムをつなぐ情報と通信の数理基盤」

【講師】 出口光一郎氏 東北大学名誉教授・SIC事務局長

【受講者ルポ】

本講義では、1940年代に Claude Shannon が提唱した「エントロピー(平均情報量)」及び「相互エントロピー」を中心に、これらがシステム間での情報伝達で果たす役割について3つの実例を交えて解説された。

まず情報の数学的基礎として、ある情報源から受信者へ「空間」や「時間」を超えて情報を伝達する際、その「量」をどう評価するかという問題が提起された。Shannon は、情報量は『連続』『単調増加』『重み付けによる相加』という3つの性質を持つべきであるとし、これを満たす関数は唯一つしか存在しないことを証明した。この関数こそが「エントロピー(平均情報量)」である。エントロピーは不確実性の度合いを表す量で、まったく予想ができない(すべての事象が等しい確率で発生する)情報源で最大、結果が自明である情報源で最小となる。

続けて、システム間で「どれだけの情報が実質的に共有・伝達されたか」を測る極めて重要な概念として「相互エントロピー」が解説された。これは「受信者のエントロピー」と「情報源の内容を知った上での受信者のエントロピー」の差で定義されるもので、通信路における「情報のパイプの太さ」と捉えることができ、この概念が情報の流れを捉える上で最も重要であるという。

講義の後半では、この相互エントロピーが現実の技術や仕組みで果たす役割について、3つの実例が紹介された。

一つ目の実例として「スパースコーディング」が解説された。これは情報が持つ本来の豊かさを損なわずに、ごく少数の基底の組合せで対象を表現する技術である。その例として少数の基底画像の組合せで画像を表現する手法の紹介があった後、この戦略は脳の中で行われる動作メカニズムに一致することが示された。脳の究極の目的は、環境からの情報を極限まで高効率に伝達・保持することで、そのためには少数の要素で情報を正確に表現する必要がある。これは数学的に見れば「感覚入力」とそれに応答する「脳の内部表現」の相互エントロピーを最大化しようとする働きであり、「情報量最大化原理」と呼ばれる数理モデルで説明されるという。さらに脳内では、空間的な情報だけでなく、時間経過に伴う不確実性を最小限に抑えて未来を予測するために、脳内のネットワークを組み替える「リカレント情報量最大化」が行われており、これも「今」と「未来」の情報の相互エントロピーを最大化するための最適化として説明できるという。

続けて、二つ目の実例として「能動センシング」が解説された。これは、センシング行動において単にデータを受動的に観測するのではなく、状況に応じて動的にセンサーを制御することで、効果的なセンシングを目指す方法であると説明された。ここで最適なセンサー制御のための行動選択基準となるのが、対象の状態と観測データ間の相互エントロピーを最大化することだという。具体的な実証例として、外見の似た9種類の動物フィギュアをカメラで識別する実験が紹介された。観測パラメーターとして「カメラのズーム倍率」と「フィギュアを載せる回転テーブルの角度」を与えた時、これらをランダムに変えて試行する方法に比べ、相互エントロピーを最大化する能動センシングを用いる方法では、非常に少ない行動回数で迅速に認識できることが示された。

最後に三つ目の実例として、通信における「線形符号による誤り訂正」が解説された。線形符号による誤り訂正とは、送信データにできるだけ少ない冗長ビットを賢く追加して、誤りの検知と訂正能力を持たせるものである。その代表例として、代数的手法の「ハミング符号」から、現代の 5G や Wi-Fi の基盤となっている確率的手法の「LDPC(低密度パリティ検査)符号」への進化が取り上げられた。正確な通信が可能な通信速度の理論上の限界(シャノン限界)は、送信側と受信側の「相互エントロピー」の最大値(通信路容量)によって定められる。LDPC 符号は、通信路で混入したノイズを確率推論の観点から推定し、もっともらしい結果を反復的に最適化して導くもので、ハミング符号と基礎理論を共有しながらも、検査行列の要素を極限まで疎(スパース)にするという前段の話題と通底する戦略により、計算量を劇的に抑えつつシャノン限界に肉薄しているという。

講義の締めくくりには、質疑応答の形で熱力学エントロピーと情報エントロピーの関係性について興味深い補足があった。情報エントロピーという名称は、その数式が熱力学におけるボルツマンの式と酷似することから名付けられたというが、後になって両者は単なる数式の類似にとどまらず、「情報」と「熱」が互換性を持つことが実証されたとのことだ。これが物理学の難問であった「マクスウェルの悪魔」(熱力学第二法則を破るパラドックス)を解決したという。情報という目に見えない無形の概念が、熱力学という物理法則と地続きであるという事実、大きな知的な興奮を覚えて講義は幕を閉じた。

(ルポ: 藤田寛祐(構造計画研究所))



講義中の出口光一郎氏



会場受講風景

【講師プロフィール】

出口光一郎氏

1976年、東京大学大学院修了、東京大学講師、山形大学助教授、東京大学助教授を経て、2002年より東北大学情報科学研究科教授。この間、米国ワシントン大学准教授、東京大学客員教授等を併任。2015年、定年退職。東北大学未来科学技術共同研究センターシニアリサーチフェローを経て、現在、システムイノベーションセンター(SIC)事務局長

Ⅱ 会員活動

① 2026年度第5回SICフォーラム開催案内(会員限定)

【日時】 2026年7月6日(月) 15:00～16:15

【形式】 MS-Teams によるオンライン

【タイトル】 「AI 活用は何を変えるのか - 日本企業における AI の社会実装
～国内のビジネス現場からみえた課題と社会システムのイノベーションの必要性～」

【講師】 最首 英裕氏 株式会社グルーヴノーツ 代表取締役社長

【申込方法】 SICイベント参加登録ページ

<https://sysic-org.sakura.ne.jp/SICregistration.html>

より、記載の案内に沿ってお願いします。

【講演概要】

当社は、AI と量子コンピュータを核とした事業展開を行っております。

AI ビジネスの中核は、インテリジェンスになります。社会が激しい変革にさらされている今、社会の変化を的確に把握することは、世界的企業にとって極めて重要なテーマとなっております。

一方、変化の激しい今だからこそ、適切なリソース配分をタイムリーに経営判断に利用することは重要になっております。

こうした分野で、AI と量子コンピュータは重要な役割を果たしております。当社が取り組むプロジェクトのご紹介を通じて、AI と量子コンピュータがどのように活用されているのかを紹介しつつ、今後量子ゲートを軸とした技術の発展が何をもたらすのかについても考察してみたいと思っております。

【講師プロフィール】

最首英裕(さいしゅ えいひろ)氏

早稲田大学第一文学部にて詩人の鈴木志郎康に従事。

卒業後は、都市再開発事業のコンサルタントを経て、都市空間における IT 基盤の企画・開発に取り組む。

その後、米国 Apple Computer の製品開発プロジェクトの日本対応開発責任者として、様々な製品開発を手掛ける。

株式会社グルーヴノーツ設立後は、AI と量子コンピュータを活用したサービスを開発。

金融・物流を中心に数多くの社会課題を解決。金融分野における高度なインテリジェンス機能の実現や、物流分野におけるインテリジェンスと量子コンピュータの融合などに取り組む。



② 2026年度第4回SICフォーラム(2026. 6. 17)開催報告

【日時】 2026年6月17日(水) 15:00~16:15

【開催形式】 MS-Teams によるオンライン

【参加者数】 40名(講師・司会者・事務局2名含む)(会員限定)

【タイトル】「圏論による Model Based System Engineering の展開とその動向」

【講師】 本多 敏氏 慶應義塾大学名誉教授

司会 SIC実行委員長 松本隆明

【講演要旨】

本講義は、本多講師による圏論をモデルベースシステムズエンジニアリング(MBSE)に応用するアプローチとその最新動向に関する解説である。

1. 導入:なぜ MBSE に圏論か

現代のシステム開発は、System of Systems(SoS)に代表されるように極めて複雑化している。これにより、関係者間の合意形成の難しさ、用語の不統一、仕様の暗黙性といった課題が顕在化している。本多講師は、これらの課題を解決する鍵として、共有された概念を形式的・明示的に特徴づける「オントロジー」の概念を導入した Ontology Based Systems Engineering(OBSE)を紹介。その数学的基盤として、物事の「関係性」を記述することに長けた「圏論」が極めて有効であると説かれた。

2. 圏論の基礎

講義では、圏論の基本要素である「対象(object)」と「射(morphism)」から始まり、「関手(functor)」、「自然変換(natural transformation)」といった中核概念が解説された。特に、異なる圏(数学的体系)の間にある構造を保存した対応関係を示す「関手」や、関手間の関係を射として捉える「自然変換」は、異なる性質のシステムやモデルを統一的に扱うための強力な道具となる。

また、圏論における米田の補題が「ある対象(システム)の本質は、他のあらゆる対象(テスト入力)との関係性のすべてを知ることによって完全に決定される」ことを数学的に保証することについて解説された。この強力な定理については、筆者の視点を交え後述したい。

3. MBSE への圏論的アプローチ

本多講師は、各種のシステム記述言語(SysML, UAF, Archimate, Systemigram)を統一的に扱う枠組みとして、圏論に基づく記述言語「Olog(オーログ)」を紹介。Olog は、システム内の要素を「対象」、その関係性を「射」として記述することで、ナラティブ(自然言語)で表現された曖昧な概念を、数学的に厳密な構造へと落とし込むことを可能にする。

また、MIT で研究が進む「コンセプト→モデル→グラフ→ビュー」という CMGVC サイクルも紹介され、圏論がモデルとビューを分離し、アーキテクチャの分析や意思決定を強力に支援する様子が示された。さらに、INCOSE で提唱されている「7 人の侍フレームワーク」を Olog で記述する試みも紹介され、複雑なシステム構成をいかに構造的に、かつ普遍性を持って記述できるかについて実例をもって解説された。

4. 筆者考察:システム同定・ラプラス変換と圏論的メタ思考

質疑応答において、筆者は「システム同定」と「ラプラス変換」を題材に、工学における圏論の役割について本多講師と議論させて頂いた。

前述の「米田の補題」は、ブラックボックスであるシステムに対し、外部からのあらゆる入力とその応答(射の集合)を観測すればシステムを完全に同定できることと等価であり、システム同定の営みに強力な理論的裏付けを与える。

さらに筆者は、時間領域から複素周波数領域への「ラプラス変換・逆変換」において生じる初期値の扱いの煩雑さ(数学的に完全な一対一の同型にならない「綻び」)を、圏論によるメタレベルの「関手」の枠組みで捉え直すことで超越できるのではないかと提起した。これに対し本多講師からは、因果性のある関数空間に限定すれば逆変換は一意に決まるという、古典制御理論の厳密な工学的視座からの応答をいただいた。この議論は、圏論という「構造を記述する強力なメタ思考ツール」を、既存の厳密な工学理論とどのように擦り合わせ、どの抽象度で現場の問題に適用すべきかという、MBSE 実践における核心的な問いを浮き彫りにするものであった。

DX におけるリアルとバーチャルの写像(デジタルツイン)も、まさにこのようなメタな視座の調整を経ながら、圏論を用いて記述・整理されていくべきだろう。この「写像」の概念は、第3期 SIC システム科学概論連続講座の第1回で出口先生が講義された「シャノン限界」にまつわるトピックにも通底する。出口先生は、通信路をストレージと見なすことで「通信は時空を超える」と解説されたが、これは圏論で言えば、送信側(圏 C)、通信路(圏 D)、受信側(圏 E)という3つの圏を介した写像と捉えることができる。例えば、現代のサイバーセキュリティにおける脅威、すなわちクラッカーが暗号データを大量に蓄積し、将来の量子計算機で解読を狙う「Harvest Now, Decrypt Later」攻撃も、このモデルで説明可能だ。彼らの行為は、時空をまたぐ通信路(ストレージ)を介した「未来の強力な復号関手」の登場を前提とした、随伴問題として圏論的にモデル化できるのである。

5. まとめ

本講義は、圏論が単なる抽象的な数学理論にとどまらず、複雑なシステムを設計・分析するための具体的かつ強力なツールとなり得ることを示した。特に、システムを構成要素の「関係性のネットワーク」として捉え、Olog のような言語で記述し、米田の補題のような定理でその正当性を担保するアプローチは、今後の MBSE の発展やシステムイノベーションにおいて中心的な役割を果たす可能性を秘めている。

なお、本多講師には現在開催中の第3期SICシステム科学概論連続講座の第4回にて「関係性の数理科学(圏論入門:システムは圏論でできている)」をご担当頂くことになっており、1 講義でも受講できるとのことですので受講の検討をお薦めする。

[参考]第3期SICシステム科学概論連続講座(URL: <https://sysic.org/news/4993.html>)

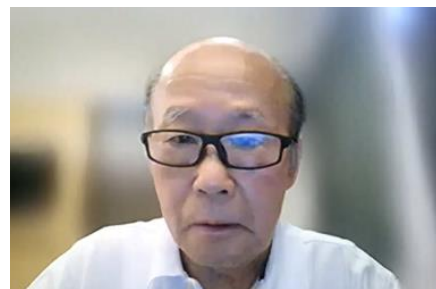
(文責:大道茂夫(実行委員))

【講師プロフィール】

本多 敏(ほんだ さとし)氏

1975年東京大学工学部計数工学科卒業、同学科助手、講師を経て、1986年熊本大学工学部生産機械工学科助教授、1990年慶應義塾大学理工学部計測工学科助教授、1992年ドイツアーヘン工科大学客員研究員、1998年慶應義塾大学理工学部物理情報工学科教授。2017年 同、定年退職。

2017年4月～現在 慶應義塾大学名誉教授、慶應義塾大学大学院 SDM 研究所 上席研究員。2025年8月～現在 JICA 日越大学支援プロジェクト 専門家/講師(コンピュータサイエンス&エンジニアリング分野)。



講演中の本多敏氏

③ 2026年度第5回実行委員会開催報告

【日時】 2026年6月23日(火) 15:00～17:00
【開催形式】 MS-Tems によるオンライン開催
【出席者数】 実行委員9名、監事1名、事務局1名、合計11名

司会 松本隆明実行委員長

議題

1. 報告事項

- | | |
|---|-----------|
| 1. 1 SICフォーラム2026年度第4回(6月17日)開催報告 | 久保忠伴事務局次長 |
| 1. 2 SICフォーラム2026年度第5回開催案内
日時:7月6日(月) 15:00～16:15
「AI 活用は何を変えるのか - 日本企業における AI の社会実装」
最首 英裕氏 株式会社グルーヴノーツ 代表取締役社長 | 同上 |
| 1. 3 第6回、第7回、第8回のSICフォーラム開催企画について | 同上 |
| 1. 4 SIC第3期システム科学概論連続講座第1回(6・12)開催報告
第2回以降の講義単位の募集は継続 | 同上 |

2. 協議事項 (フリー討議形式)

- | | |
|---|-----------|
| 2. 1 AI・SoS 分科会の企画書(案)について討議
企画書(案)は承認され、今後参加メンバー募集に入る | 松本隆明実行委員長 |
| 2. 2 戦略提言の外部連携について
「RRI-SIC戦略的連携に関する覚書(案)」について議論 | 久保忠伴事務局次長 |
| 2. 3 SICシンポジウム2026企画案を紹介
詳細は、今後講師等を含む実行 WG で決める | 出口光一郎事務局長 |

3. 広報活動

- | | |
|---|------------|
| 3. 1 SICニュースレター7月号発行予定と10月号までの巻頭記事執筆予定者
2026年7月号巻頭記事
「寄稿 3E を目指す電力システムの統合運用ツールの動向
3E: Energy security(安定供給)、Economic efficiency(経済効率性)、Environment(環境適合)」
東京大学 生産技術研究所 エネルギーシステムインテグレーション社会連携研究部門 | 中野一夫実行委員 |
| | 特任教授 荻本和彦氏 |

次回、次々回の実行委員会開催予定(オンライン開催)

2026年度第7回実行委員会	7月21日(火) 15:00～17:00
2026年度第8回実行委員会	8月25日(火) 15:00～17:00

Ⅲ 会員企業一覧

正会員

SCSK株式会社

株式会社NTTドコモ

株式会社国際電気

株式会社東芝

株式会社野村総合研究所

株式会社日立システムズ

東京電力パワーグリッド株式会社

マツダ株式会社

ロジスティード株式会社

NTTドコモソリューションズ株式会社

株式会社構造計画研究所

株式会社JSOL

株式会社ニューチャーネットワークス

株式会社日立産業制御ソリューションズ

株式会社日立製作所 研究開発グループ

システムイノベーションセンタ

日鉄ソリューションズ株式会社

横河電機株式会社

準会員

アメリス株式会社(準2)

東京ガス株式会社(準2)

電腦バンク株式会社(準1)

NEXT WIND 合同会社(準1)

(準1):インキュベーション会員、(準2):人財育成限定会員

(2026年7月1日現在:五十音順)

©SIC 2026.7

発行者: 一般社団法人システムイノベーションセンター(SIC)

代表理事・センター長 浦川伸一

編集者:SIC実行委員 中野一夫 (構造計画研究所 HD)

事務局 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-12-7 ストック新宿 B-19 号

URL: <https://sysic.org> E-mail: office@sysic.org Tel.Fax:03-5381-3567