

シンビオ社会研究会令和5年度第1回研究談話会報告

吉川 榮和¹、森下和功^{1, 2}、新田純也^{1, 3}、松岡猛⁴、黒江康明^{1, 5}、
辻倉米蔵¹、小林進二²、横山雅之⁶

(1 : シンビオ社会研究会、2 : 京都大学エネルギー理工学研究所、3 : アルカデイヤ・システムズ (株)、
4 : 宇都宮大学、5 : 京都工芸繊維大学、6 : 核融合科学研究所)

当会は、エネルギー理工学研究所 Ze 拠点と提案型共同研究「複雑なエネルギーシステムの先進的な故障診断・信頼性評価手法の実験研究」を進めている。令和5年度はエネルギー理工学研究所のヘリオトロン J プラズマ実験装置を対象に、3つの故障診断と信頼性評価手法の実験的な適用と検証について共同研究を進めている。今回の研究談話会ではこれらの研究の進展状況を報告し、また次年度以降の新たな展開に資するため、核融合分野でのデータ駆動科学の研究状況について外部識者を招いて講演をいただいた。

とき： 令和5年12月13日(水) 午後2時～5時 (午後1時45分開場)

ところ： 京都大学宇治キャンパス本館会議室(N571E) 及び ZOOM による

主催： シンビオ社会研究会

共催： 京都大学エネルギー理工学研究所ゼロエミッション(Ze)研究拠点

協賛： 日本保全学会西日本支部

★今回の研究談話会の趣旨と参加者数

当会は、エネルギー理工学研究所 Ze 拠点による提案型共同研究「複雑なエネルギーシステムの先進的な故障診断・信頼性評価手法の実験研究」を進めている。本年度は故障診断と信頼性評価に関する3つの方法をエネルギー理工学研究所のヘリオトロン J プラズマ実験装置に適用する研究を進めてきた。今回の研究談話会ではこれらの研究の進展状況を第1部で報告し、続く第2部ではこの共同研究の次年度以降の新たな展開に資するため、核融合分野でのデータ駆動科学研究の状況について核融合科学研究所から外部識者を招いて講演をいただいた。この度の研究談話会は森下和功 理事を総合司会として進められ、会場参加者16名うち学生5名(女子学生2名)またWebを通じて13名が参加し、合計29名の参加があった。

★開会の辞

14:00～14:05

シンビオ社会研究会

吉川 榮和

会長

シンビオ社会研究会では毎年シンビオ講演会と研究談話会を開催して当会会員や一般社会と交流を図っていますが、シンビオ講演会は社会啓発を目的にしているのに対し、研究談話会は専門分野の研究発表と討論の場となっています。今回の研究談話会は、京大エネルギー理工学研究所 Ze 拠点による提案型共同研究「複雑なエネルギーシステムの先進的な故障診断・信頼性評価手法の実験研究」で当会メンバーが進めている、エネルギー理工学研究所のヘリオトロン J プラズマ実

験装置を対象に3つの故障診断と信頼性評価手法について、それぞれの実験的な適用と検証を進めている研究の進展状況を第1部で報告し、続く第2部では次年度以降の新たな展開に資するため、核融合分野でのデータ駆動科学研究の状況について外部識者を招いて講演をいただきます。皆様からの活発な討論を期待しています。

【第1部】 Ze 共同研究活動報告 14:05~15:55 (質疑応答含め1時間50分)

表題：「複雑なエネルギーシステムの先進的な故障診断・信頼性評価手法の実験研究」

司会： シンビオ社会研究会 辻倉 米蔵 副会長

★その1 全体概要紹介

14:05~14:15 (10分) 吉川 榮和 理事

京大エネ理工研ゼロエミッション (Ze) 研究拠点への提案型共同研究をこの2年間進めてきた研究代表者として、吉川理事より、その趣旨、昨年度の取り組みと今年度の取り組みの経過を概略紹介し、今回の研究談話会では新田、松岡、黒江氏からそれぞれのこれまでの研究結果と今後の展開を発表されるので、皆様からのコメントを期待している、とPPTを用いて紹介があった。

発表のPDF： [こちら](#)

★その2 報告 「電気機器高調波診断システムのヘリオトロンJへの適用」

14:15~14:45 (30分)

発表者：新田 純也(にった じゅんや)氏(シンビオ社会研究会・理事、アルカディア・システムズ(株)取締役)

略歴：1977年同志社大学工学部電子工学科卒業。日本楽器製造株式会社を経て、日本メカトロン株式会社に入社。その間約20年間、計測制御アプリケーションプログラム開発及びシステクエンジニアリングに従事。その後、アルカディア・システムズ株式会社に転籍。約20年前に高調波診断技術に出会い、その普及活動に従事。その間、国からの助成金を得てHAMOS(高調波による電機設備の状態監視システム)を試作開発する。専門は、高周波移動体通信、半導体特性の評価及び解析、材料強度(ヤング率、剛性率、ポアソン比、内部摩擦)の温度依存性測定技術及びそのシステム開発(-150度から+300度、RTから1250度)。現在は高調波診断技術の普及と後身の指導に注力。



案内時の発表要旨：近年、設備メンテナンスの世界では「予知保全」に注目が集まっている。従来のTBMからCBMへの流れにのり益々加速すると思われる。SDGsと大上段に構えずとも、未だ使える物は、その寿命一杯使おう、その上で、故障する前に適切なメンテナンスと部品交換をしようと言う自然な流れである。

「予知保全」に最適な診断技術の一つが「高調波診断技術」である。非接触、活線での診断は安全で簡易なため、その適応分野も広い。

今回、高調波診断技術を用いて、ヘリオトロンJの補機類(真空系、冷却系の各種ポンプ)の診断を実施した。その幾つかについて診断事例を紹介する。

当日発表の概要

講師は、ヘリオトロン J には多くの装置があるが、メーカーとの契約ではその保全対象から除外されている補機を高調波診断システムの設置対象にして行った結果を報告すると前置きののち、大略以下の順に報告された。

- ① 一般に設備保全は故障が発生したら行う事後保全と、壊れる前に事前に行う予防保全があり、予防保全には一定期間ごとに行う時間基準保全と状態基準保全がある。原子力では時間基準保全がベースになっているが、壊れていないのに時間がきたら取り換えるのは無駄であり、環境問題上も問題あり、民間設備では状態基準保全が主流になっている。本報告でヘリオトロン J で適用する電気機器の高調波診断システムは状態基準保全への利用を目的にしたものである。
- ② 今回ヘリオトロン J にはHAMOS で真空系純水送水ポンプやロータリーポンプ、冷水ポンプの 5 チャンネル同時計測収録と NBI 電源室の純水ポンプなどにポータブル型診断器を設置した。そしてそれぞれの現場での設置風景、高調波センサーの取り付け方、測定方法の説明ののち、サーチコイルで取り出した電流波形の生データ、そのFFTデータから高調波成分の寄与率の計算、モータ部、負荷部、インバータ部での劣化部位、それぞれの高調波成分の寄与率から主成分分析に基づく劣化度を推定する方法の説明があった。一般にモータと負荷の同軸接続の配置に従って高調波成分の次数が高くなっていく傾向が観察されることと、今回のヘリオトロン J での対象設備の劣化診断表が例示された。
- ③ 今回 11 月 6 日から 10 日の間に設置して取得したHAMOS による真空計純水送水ポンプの高調波成分のトレンドグラフを示してトレンドから外れている時点ではなにか突発的な変動があったのではないかと推定していることを述べた。またNBI 電源室関連の合計 7 枚の異なった測定対象の劣化診断結果表を示して全体的に傾向が共通することからその理由がなにかを解明することが課題と述べた。
- ④ 今期は 4 日間だけ連続計測だけであり、上記③に指摘した問題を解決するには不十分であり、少なくとも 3 回ぐらい時期を変えて連続計測したいと述べた。

質疑応答の概要

Q(1)：NBI を測定した理由は？

A(1)：当初は水冷却系だけを対象にしていたが、ヘリオトロン J の小林先生から追加の測定依頼があったためです。

Q(2)：劣化はどのように判断するのか？

A(2)：発表のPPTでは省いたが、測定された高調波含有率と寄与率表より管理数値が計算される。管理数値の大小により、今回説明を省略した劣化裕度表より劣化度が判定される。結果、B1、B2等の劣化レベルとして診断されます。

Q(3)：冷却ポンプは現状どの程度劣化しているといえますか？

A(3)：P-105 純水送水ポンプの反負荷側軸受けは B3 で一番悪い。その他の設備は、B2 レベルです。経年劣化は大分進んでいます。ただ、NBI の設備は全体的に高調波のパターンが似すぎています。これは、高調波汚染の可能性があります、汚染源の犯人さがしも必要かも知れません。

Q(4)：NBI はメーカーのメンテナンスの範囲外ですか？

A(4)：その様に聞いています。

Q(5)：定性的に共通する傾向がグラウンドにあるというのはどういう意味ですか？

A(5)：

- ① 2台の同じ設備を同じ環境で同じように使用しても、同じように劣化はしません。1カ所でも弱い処があると、その部分が急激に劣化していく為です。従って、劣化パターン（高調波含有率から作られる図の形）も違った形になります。今回、NBIの設備のパターンが似すぎている処が気になっています。
- ② 原因としては、高調波が接地線を介して流れ込んでいる可能性も考えられます。
- ③ 例えば、キュービクルや、建屋の受電時点で、どの程度電流不平衡があるか、電源ラインのフロアノイズのレベル等が事前に分かっていたら、診断精度は向上します。

C(5)：ということは機械的に劣化度を判断する前に共通要因を推定するステップが必要ということですね。

Q(6)：NBIに共通する高調波成分は、上流側の電源側か下流側の負荷側かの判断はできますか？

A(6)：高調波は一般にインピーダンスの低い上流側に流れると思われるが、アースラインが共通だとそれに乗っていくようにも思える。ヘリオトロンJのアースラインがどうなっているかわからないが、それをコモンモードのノイズと言っています。

C(6)：その辺は調べてみようと思いました。

発表のPDF：[こちら](#)

★その3 報告 「信頼性解析法 GO-FLOW のヘリオトロンJ 水冷却系への適用」

14:45～15:15 (30分)

発表者：松岡 猛（まつおか たけし）氏（宇都宮大学、非常勤講師）

略歴：運輸省船舶技術研究所にて原子力船の安全性研究に従事、1979-1980年米国 MIT 留学、2006年4月宇都宮大学大学院工学研究科教授、2013年4月より現職。システム信頼性工学、安全工学の研究に従事。GO-FLOW手法の開発、ループ構造を持ったシステムの信頼性解析方法の開発等を行い、各種工学システムへの適用を実施。



案内時の発表要旨：ヘリオトロンJの運転において重要な役割を果たしている水冷却系の信頼性/アベイラビリティ解析を実施。水冷却系の主要な機器であるポンプ等の保守スケジュールを変更した時のアベイラビリティ

の時間履歴を算出し、適切な保守方法について検討を行った。各機器の信頼性データについては原子力等の他産業での値、京都大学でのヘリオトロンJの運用実績を参考に推定値を与えた。

当日発表の概要

水冷却系の図面をもとに主要機器のポンプ、クーリングタワー、弁等から構成されるフローダイアグラムを作成。半年間の実験と、残りの半年間の点検期間に基づき、運転及び保守スケジュールを設定した。これらの情報を盛り込んでGO-FLOWモデルを作成しアベイラビリティの時間履歴を求めた。保守条件として修理間隔変更等の4種類について解析し結果を比較検討した。機器の故障率については京都大学でのヘリオトロンの実績情報と他の分野の解析で使用している値を比較検討し、適切と思われる値を設定した。ポンプ等の主要機器について半数ずつ隔年で修理して

もそれほどアベイラビリティの低下は無いという結果が得られた。

質疑応答の概要

Q(1):機器の故障率には分布を与えているのか。

A(1):本解析では故障率は点推定値である。対数正規分布を各機器の故障率に与え、システム全体のアベイラビリティの分布を求めることもできる。

Q(2):クーリングタワーの成功基準は 3/5 であるが、これだと多数のケースを考慮しなくてはならず解析が複雑になるのではないか。

A(2):GO-FLOW の解析体系では数値演算も援用し組み合わせ爆発を防いでいるので問題なく解析が実施できる。

Q(3):修理をすると機器はどういう状態になるのか。正常に動作している機器に手を加えるとかえって故障してしまう現象があるが。

A(4):本解析では修理実施後機器は新品の状態に戻ると設定している。修理したつもりがかえって悪い影響を与えてしまうことについては 今回は考慮していない。今後より現実的な点検・修理についての条件を組み込んでいきたい。

発表の PDF : [こちら](#)

★その4 報告 「システム思考が加速するデータ駆動科学—核融合プラズマ研究への応用」

15:15~15:45 (30分)

発表者: 黒江 康明(くろえ やすあき)氏 (シンビオ社会研究会・理事、同志社大学嘱託研究員・京都工芸繊維大学名誉教授)

略歴: 1982年神戸大学大学院自然科学研究科博士課程修了。神戸大学助手、京都工芸繊維大学助教授、同教授を経て、2016年同大学名誉教授、関西大学客員教授。同志社大学嘱託研究員、この間1996年マサチューセッツ工科大学客員研究員、コンピューターショナルインテリジェンス、システム制御理論とシステム学などの研究に従事。



案内時の発表要旨: 近年、多種多様な大量のデータを取得、蓄積、処理、利用する必要があらゆる分野で高まり、データ科学が注目されている。一方、「一般システム理論」や「サイバネティクス」を嚆矢とし、それなりの歴史があるシステム科学は、最近の著しい情報科学技術の発達によりそのアプローチも変貌している。本報告ではこのような流れを背景として、著者らがこれまで提案してきたモデル内包学習をとりあげ、これがデータ同化などシステム、モデリング、データに関わる様々な問題を解決できることを示す。またこれの核融合プラズマ研究への応用についても議論する。

当日発表の概要

講師は発表の冒頭、前の二つとは研究の方向が違うとの印象をもたれると思うので講師の研究の背景からスタートしたいと前置きののち、ご自身はプラズマ研究者ではなくシステム科学者の立場だと述べて、三瓶明希夫(京工大)、政宗真男(中部大)と進めている表題の共同研究について大略以下の発表があった。

① 最近多種多様な大量のデータを取得し蓄積、処理、利用する必要性があらゆる分野で高まって

データ科学が注目されていること。

- ② その一方で一般システム理論やサイバネティクスを嚆矢とし、それなりに歴史があるシステム科学が最近の著しい情報科学技術の発達でそのアプローチが変貌していること。
- ③ そこで黒江氏らはデータ同化などのシステムとデータにかかわる様々な問題を解決できるモデル学習を提唱していること。
- ④ 黒江氏はシステムの考え方がデータ科学を牽引し加速しうること。データ同化は 2 種類がある。一つは『データを同化』（モデルの未知な部分をデータで同化する）であり、1 枚の陰影画像を用いて 3 次元の形状を復元する例を示した。もう一つは『データに同化』（既知のモデルをデータに同化させることにより新たな意味を導出する）であり、2 枚の動画画像から動きベクトルを推定する例を示した。
- ⑤ 最後にモデル内包学習の核融合プラズマ研究への応用例として黒江氏らによるプラズマの平衡再構成法のアルゴリズム導出と京工大所有の逆転磁場配位プラズマ装置 R F P に適用した結果を紹介した。

また後日当日の講演内容を反映した発表論文の加筆版が提供されたので併せて下記に P D F を示す。

質疑応答の概要

Q(1): 当面のプラズマへの適用ではどのような問題を考えていますか？

A(1): ヘリオトロンへの適用が考えられます。これまで探索法を適用してきたのは 2 次元問題なので、これを 3 次元問題に適用できるように拡張する必要があります。また V M E C が使えるという可能性があります。

Q(2): 内挿と外挿の考え方からいえばデータ同化で外挿の範囲が拡大されるということですか？

A(2): はい、モデル内包学習により外挿も可能となり、その範囲も拡大されると考えられます。

発表の PDF : [こちら](#)

黒江氏らの参考論文の PDF : [こちら](#)

★その 5 意見交換一次年度計画について 15:45~15:55 司会 辻倉米蔵 副会長

司会より、新田、松岡、黒江氏はそれぞれのご発表の中で今後の展望をされたが、3 つのご発表を聞いたうえで改めてそれぞれの方から次年度の取り組みについて、とくにヘリオトロン J 装置を対象にして今後どのようなテーマに取り組みたいか、またヘリオトロン J の装置を対象とするかしないかは別にしてどのような研究の取り組み方をするのか、3 氏から改めてお伺いしたいと発言があり、活発な意見の交換があった。その後司会より、本日の発表と議論を参考にして、それぞれの方には次年度の共同研究の計画をお考えいただきたいと総括して、第 2 部を締めくくられた。

~~~~休憩 10分~~~~

**【PART II】 招待講演**

16:05～17:00

**演題：「核融合研究におけるデータ駆動アプローチから統計数理核融合学の提案へ」**

**司会：**シンビオ社会研究会 八尾 健 副会長

**コメンテータ：**小林 進二（こばやし しんじ）氏（京都大学エネルギー理工学研究所 准教授）

**講師：**横山 雅之（よこやま まさゆき）氏（自然科学研究機構核融合科学研究所六ヶ所研究センター センター長 同研究部可知化センシングユニット教授）

**略歴：**核融合プラズマ閉じ込めのための3次元磁場配位設計（→京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロン J）や、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）における熱輸送現象に関する理論・シミュレーション解析、高性能化ミッショングループリーダーなどを務めながら、3次元プラズマの統合輸送解析スイートの構築と共同研究者への供用を主導。5～6年前から、核融合プラズマの諸現象を題材として、統計数理やデータ駆動の考え方を採り入れて、リアルタイムでの予測・制御に使うことができるモデリング研究の実践や共同研究枠組みの構築を行っている。



**案内時の講演要旨：**核融合プラズマ研究において、プラズマ物理の基礎方程式やモデル、および、それらの複合でもデータを説明しきれていない、また、複雑すぎてリアルタイムでの対応が困難である多様な問題が存在している。そのような問題に対して、プラズマ物理を基盤とした研究軸と相補的に、現象にまつわるデータを基盤としたデータ駆動的視点の研究軸が導入されてきている。今後の核融合研究において重要度が増す「リアルタイムでの予測や判断に基づく制御」の観点で、有望と考えられる研究成果を数例紹介するとともに、それらを基盤とする研究構想として講演者が提案している「統計数理核融合学」について述べ、皆様と議論を行わせていただきたい。

**当日の講演概要：**

講師の横山氏は、冒頭の自己紹介で高校時代の授業で将来核融合炉ができればノーベル賞と聞き、京大ヘリオトロン核融合研究センターを知って京大原子核工学科に進学したことを述べた。大学院博士課程終了後文部省核融合科学研究所に助手として就職した当初はシミュレーションの研究が主だったが LHD で実験グループのリーダーとなってからシミュレーションが現実とかけ離れている面が多々あることを実感し、その後実験データを基盤とした研究として統計数理に着目した本日の講演表題の『統計数理核融合学』を提唱していると前置きののち、講演の本論に入った。その講演で提唱されたアプローチのポイントは以下のごとし。

- (1) データを基盤としたアプローチの可能性の要点として科学研究における演繹と帰納の関係の対比から、核融合の分野で従来の伝統的な要素還元的な解析シミュレーション重視のアプローチから現象にまつわるデータに注目するデータ駆動サイエンスへの転換が求められる理由をまず論じた。
- (2) 核融合炉の実現がますます視野に入ってきている現在、逆に詳細なデータが計測できないようになることを踏まえて、現在核融合プラズマ研究で計測が充実している今のうちに『推定』、『尤度』、『時系列変化』に注目した統計数理を応用した研究を強化することを提唱。そして最近若い研究者によって開拓されてきた『統計数理核融合学』の成功した次のような研究事例が紹介された。

- ① データ同化によるプラズマ状態変化の記述の実証とリアルタイム制御アルゴリズムの構築
- ② プラズマの突発的崩壊、放射崩壊発生の有無の分類・判別アルゴリズムの構成とそれによるリアルタイムの放射崩壊回避の実証
- ③ 核融合炉出力制御に直結するプラズマ性能の重要指標である中性子発生率の回帰型モデルの提起とそれを用いた中性子発生率向上の実験的実証。

**質疑応答の要旨：**

講師に会場から以下のコメントと質問応答があった。

C (1)：『統計数理核融合学』を提唱される講演を聞いてシステム理論を研究している立場から、世界に存在するものに対する自然科学に対し、世界には実在しないものを創造するシステム科学の観点も組み入れることも考えられないかと思いました。

C (2)：外挿という点で人工知能との共通点があり、面白い接近の仕方と思った。

Q：松岡先生の信頼性評価のような個別要素から全体システムの評価を積み上げていく方法についてどのように考えていますか？

A：全体の信頼性に大きく影響する個別要素を取り上げて調べて全体の信頼性を向上させるアプローチと理解したが、プラズマ核融合では個別要素の現象が多く他の要素と複雑に絡み合っていて非線形性が大きくて個別要素を切り出して積み上げるのがむづかしい。それが統計数理核融合学提唱の背景です。

**発表の PDF：** [こちら](#)

**【開会の辞】** (5分)

総合司会 森下和功 理事

熱心に講演発表いただいた講師と有意義な討論になったことに対して参加者に謝意が述べられた。



会場風景





第1部 松岡猛氏の報告



第2部 横山雅之氏の講演