



統計数理核融合学

～統計数理による核融合研究課題の取り組み～

**“Statistical-Mathematics” Fusion Research
–Fusion Research from the Viewpoints of Statistical-Mathematics–**

横山 雅之

YOKOYAMA Masayuki

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

総合研究大学院大学物理科学研究科核融合科学専攻

統計数理研究所統計思考院 (客員)

(原稿受付: 2022年10月30日)

2022年7月の第14回核融合エネルギー連合講演会にて特別講演「データ駆動核融合科学」を行った。核融合研究におけるデータ駆動アプローチによる研究遂行の大きな可能性を述べたものであり、その内容を文章としてまとめておくのが本記事の主旨である。特に、リアルタイム制御や、そのための予測や判断が必要とされる課題への挑戦には重要な視点であると考えている。また、核融合の研究課題を、学問分野を超えて共有・協働する上で効果的な視点であり、核融合コミュニティの拡大、学問としての拡がりにも大いに寄与する。特に、統計数理分野との協働を意図して、“統計数理核融合学”(統計数理による核融合研究課題への取り組み)という言葉とともに聞きたい。

Keywords:

“Statistical-mathematics” fusion research, fusion research, statistical-mathematics, data-driven approach, prediction and control, expansion of fusion community

1. はじめに

本記事における「統計数理」の定義から始める。文献[1]では、「統計数理」という言葉は、諸外国で確立された概念の訳語ではなく、統計数理研究所創設当時に、研究所が取り扱うべき研究分野を規定する上で最適と考えられて採用されたものである、と記されている。さらに、文献[1]の著者の定義の試みとして、

統計数理≡統計的概念の発展を目的とする数学的理論

統計的概念≡統計的な物の見方に基礎を置く概念

とあり、「統計数理」という言葉の理解で中心的なことは「統計的な物の見方」ということになる、と記されている。「統計的な物の見方」は観念的であって科学的研究の対象にはなりえないのではないかという疑問に対して、数学を用いて議論を進めるとというのが統計数理の研究である、とも記されている。

本記事の著者自身、「統計的な物の見方」という言葉だけでなく、核融合研究の課題との結びつきは弱いと捉えがちであったが、そこに数理基盤も包含されている、つまり「統計数理」という言葉になると、核融合研究の課題との親和性が感じられる。

そこで、この考え方に基づいて核融合研究の課題に取

り組んでいこうというのが本記事の主旨であり、表題の「統計数理核融合学」という言葉が導かれる。「統計的な物の見方」による「核融合学」である。

ただし、「統計的な」という言葉に「数理」が含まれているという考え方で、「統計数理」を単に「統計」と記すこともあり、統計地震学[2]といった言葉はその例である。その意味で、単に統計核融合学としてもよいであろうが、数理基盤を強調する形で本記事では「統計数理核融合学」とした。

本記事では、統計数理に基づく研究実例を、物理要素・階層による研究動向との比較を行いながら記載を進める。しかし、従来の研究動向を否定するものではなく、それらとの相補的なアプローチであるということの特記しておく。3つの研究成果を引用するが、それぞれの研究グループが「統計数理核融合学」という言葉の下で研究を行ったわけではない。本記事の著者は、これらの研究成果を「統計数理核融合学」の実例として捉えているということである。

我々研究者は、取得したデータを用いる研究は当たり前に行っており、その意味では、「データ駆動」は新しい話ではない。計算性能の向上や機械学習などの進展など

National Institute for Fusion Science, Rokkasho, AOMORI 039-3212, Japan

author's e-mail: yokoyama.masayuki@nifs.ac.jp

も相まって、多様な研究分野でデータサイエンスの手法を取り入れた研究展開があるのも周知の事実である。実際、プラズマ・核融合学会においても、「データ駆動的アプローチによる研究動向を取りまとめた小特集[3, 4]が企画され、また、プラズマ・核融合学会他で特に若手研究者層を中心に、毎年のように授賞対象となっている。今後のさらなる進展を予感させる動向である。

本記事では、一般的なデータサイエンスという括りではなく、統計数理による研究成果を紹介する。「データへのあてはめ」という視点とも捉えることができる。ここでは、必ずしも「ビッグデータ」である必要はなく、データ活用の最大化という意味合いが強い。

この「データへのあてはめ」は、プラズマ物理学や分野知識と相補的な視点である。プラズマ物理学が、関連する基礎方程式やモデル、および、それらの複合で、多階層複雑系であるプラズマの現象を演繹的に理解・解明しようとするのに対して、「データへのあてはめ」は、現象にまつわるデータから、統計数理によって現象を帰納的に記述・推定しようとするものである。

2章では、「データへのあてはめ」の視点での研究実例を3つ紹介する。全て論文化され、あるいはプラズマ・核融合学会誌の小特集記事で紹介されているものであるため、それぞれの研究内容の詳細は記述しないが、物理要素・階層型の研究との視点の違いや、リアルタイム制御やそのための予測や判断への親和性を強調する構成としている。3章では、2章で紹介した実例を受けて、核融合研究における「統合記述」の新たな方向性と可能性を述べている。

本記事で紹介する実験データは全て大型ヘリカル装置(LHD)のものであるが、用いている手法や問題の捉え方はLHDに限定されるものではなく、普遍的なものである。その意味で、LHDプラズマに対する物理解釈は行っていない。

また、同様の研究は国内外で活発に行われているが、ここで引用する参考文献は、国内における代表的なものに限定している。より詳細、あるいは手法の多様性などについては、それらの文献の引用文献を参照されたい。

2. 核融合研究課題の統計数理による取り組みの実例

本章では、統計数理による核融合研究課題の成果の実例を3つ紹介する。

2.1 プラズマの状態変化の側面～データ同化を用いた記述・予測から制御へ～

気象や海洋分野で広く実践的かつ日常的に用いられているデータ同化手法を核融合研究の課題に導入して、プラズマの状態変化の記述や予測に用いようという研究が大きな進展を遂げている。データ同化とは、観測データを用いたシミュレーションモデルの最適化であり、状態ベクトル(最適化の対象である状態変数の集まり)は自由に構成することができる。ここでは、観測量をプラズマ温度とする熱輸送を中心としたデータ同化研究を紹介

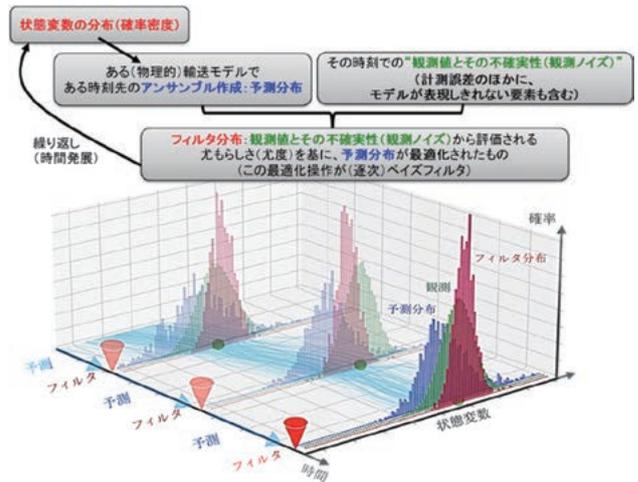


図1 データ同化の流れの模式図と各過程の説明(色は下図の各分布と対応している)。

する。

プラズマ温度に関する計測データの再現やシナリオ構築に関して、プラズマ物理学においては、「新古典輸送+乱流輸送」で熱輸送係数を精緻に評価したり、経験則や基礎方程式に基づく熱輸送モデルを構築したりして取り組んできている。しかしながら、壁に閉じ込められた人工物としてのプラズマ(固体壁との相互作用なども考慮しなければならず、自然界のプラズマよりもさらに多階層複雑)を対象としている核融合研究では、物理要素・階層型とは異なるアプローチも有用であろう。そのようなアプローチの実例がこのデータ同化である。核融合プラズマを要素還元的に見るのではなく、総体として概観する視点であるとも言える。

文献[5]の図1にデータ同化の流れが示されている。その図を基にしてデータ同化の流れを追記したものを図1に示す。状態変数の不確実性(確率分布)を考慮するので、決定論的ではなく確率論的になっている。状態変数の分布を近似する各アンサンブルメンバーの時間発展(状態変数軸-時間軸で張られる平面に描かれている薄青の多数の線)には従来のシミュレーション(ある熱輸送モデルを用いたもの)を用いるため、分野知識との親和性が高い(乖離が小さい)こともデータ同化手法の利点であろう。ある時刻先のアンサンブル(青の確率分布)に対して、その時刻での観測値とその不確実性(観測ノイズ)(緑の確率分布)から評価される尤もらしさ(尤度)を基に予測分布を最適化(逐次ベイズフィルタ)して、その最適予測分布を与えるように更新された輸送モデルを次の時刻の予測に用いるという流れでデータ同化が進む。ここで重要かつ誤解が多いのが、「観測ノイズ」の捉え方である。「観測ノイズ」は、計測誤差のみを意味するものではなく、シミュレーションモデルが表現しきれていない、より小さい時空間成分なども含んでいる。また、状態変数の不確実性には、従来のシミュレーションでは十分に考慮されていない効果(壁コンディショニングがもたらす温度変化など)も含めることができる。文献[4]でノイズ(システムノイズ)と書かれているのは、このような

効果も含めた不確実性の大きさを考慮していることを意味している。つまり、物理要素・階層の詳細を追究するのに代えて、核融合プラズマを総体として見て、考えている状態変数群が、整合のとれた尤もらしい状態になっているという記述を得たり、予測を立てたりすることに相当する。

図2に、ある放電で得られた全時間帯温度変化を対象とした、(a)従来のシミュレーションと(b)データ同化[6]による解析事例を示す。従来のシミュレーションでは、ある熱輸送モデルを決定論的かつ固定で与えているため、温度の時系列変化を再現することは困難である。一方、データ同化では、熱輸送モデル自体も確率分布の形で与えて、「観測データ」を用いて逐次最適化しているため、「データにあてはまる」熱輸送モデルを獲得することができ、結果として温度の時系列変化をうまく再現することができている。これに対してよくあるコメントに、「データに合うようにしているのだから、合って当たり前である」というものがあるが、物理要素・階層の考え方から放電全時間帯の温度変化をうまく再現する熱輸送モデルを手に入れること自体、非常に困難であるというも事実であろう。

図2の例は、ある放電パターンに対して行ったものであるが、同様の放電パターン12例に対しても時系列変化の再現性が高いことが文献[6]で示されている。多数放電に対するデータ同化による解析を通じて、従来のシミュレーションで用いていた熱輸送モデルからの定量的逸脱度が蓄積されている（文献[6]の Fig. 9）ため、これらを従来の熱輸送モデルの「補正」として取り込むことで、「データにあてはまる」熱輸送モデルを明示的に獲得できる。ただし、放電パターンが異なる場合には、データ同化による解析を改めて行う必要がある。

核融合研究におけるデータ同化手法の導入と急速な実装は、データ同化の分野にも新たな展開をもたらしている。

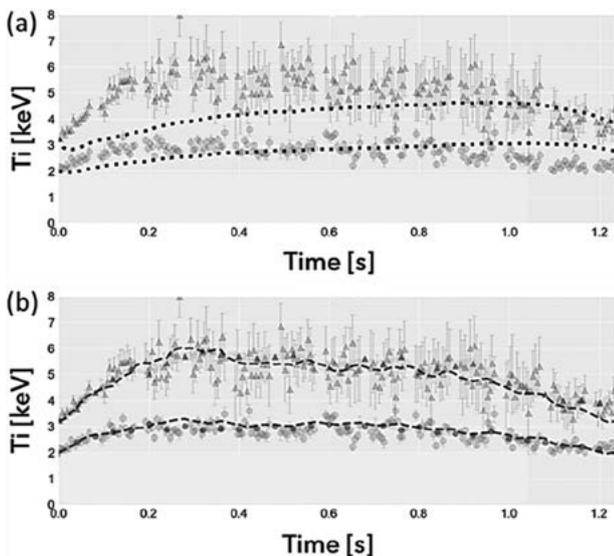


図2 計測されたイオン温度の時間変化（規格化小半径0.1（各図の●点列）と0.6（各図の▲点列））に対する、(a)従来のシミュレーションと(b)データ同化を用いた解析結果。

予測が主目的である気象や海洋分野にはない、核融合分野のオリジナリティとしての「データ同化の手法を用いた制御」という展開である。図1に示されている、予測を主目的とした状態変数や予測分布に加えて、制御変数や制御済み予測分布という新たな次元を導入するものである。制御手法の詳細については、文献[7]で報告されている。数値実験（ある熱輸送モデルを用いて数値的に作り上げたプラズマにおいて、温度変化の予測を行いつつ、予め設定した温度変化を加熱パワーの制御によって実現できるか）での制御手法の妥当性検証を経て、2022年度のLHD実験における実証試験を計画中である。

2.2 イベント制御の側面～スパースモデリングを用いた放射崩壊の回避～

放射崩壊やディスラプション（イベントと呼ぶ）は、核融合炉における発電停止や長期メンテナンスに直結するため、その克服が重要な課題となっている。例えば、文献[8]の図4は、実験装置JETにおける10年間に発生したディスラプションの原因（要素相関）をまとめた図となっている。各物理要素や素過程をつなぐ線の太さがそのシーケンスの頻度を表現しており、そこで見られるように、物理要素・階層からの整理や理解を経てディスラプション回避や緩和策を検討する研究展開がある。一方、問題の捉え方を転換して、統計数理によって、イベントの発生有無という「判別問題」として見る研究展開があり、本節ではその一例[9]を示す。

LHDにおける放射崩壊の有無を、ある決定関数の値を横軸にとってまとめたのが、図3(a)である。ここで、赤は放射崩壊する放電、青は放射崩壊しない放電である。幾分かオーバーラップがあるものの、概ね分類することができている。この横軸（決定関数の値）に対して、放射崩壊データの割合を示したのが図3(a)の上図である。オーバーラップの領域で、放射崩壊データの割合が0から1（100%）に上昇する形となっている。

放射崩壊というイベントに関して、物理的にも関係がありそうで、かつ、計測されているデータ（15種類）の全組み合わせ（全状態探索）の中から、この分類に対して統計的に寄与度の高い変数を選択する統計的手法を用いたところ、平均電子密度、4価の炭素イオンの発光強度、5価の酸素イオンの発光強度、周辺電子温度の4変数の組み合わせが選び出され、放射崩壊尤度（Collapse Likelihood）の表式を得ることができた。この4変数の組み合わせで張られる平面（縦軸：平均電子密度、横軸：他の3変数それぞれのべき乗の積）で放射崩壊の有無のデータをプロットし、さらに、放射崩壊尤度0.5の線（黒点線）を描いたのが図3(b)である。図3(a)と同様に、放射崩壊の有無のデータがオーバーラップしている領域があり、放射崩壊尤度0.5の線はその領域を通過している。このデータ群を基盤として、放射崩壊の発生なしをめざすのであれば、図3(b)で放射崩壊尤度0に対応する境界線（それより右側には赤の放射崩壊データを含まない）を指標とした運転領域を採るという指針が得られる。

多階層複雑系であるプラズマにおけるイベントの発生

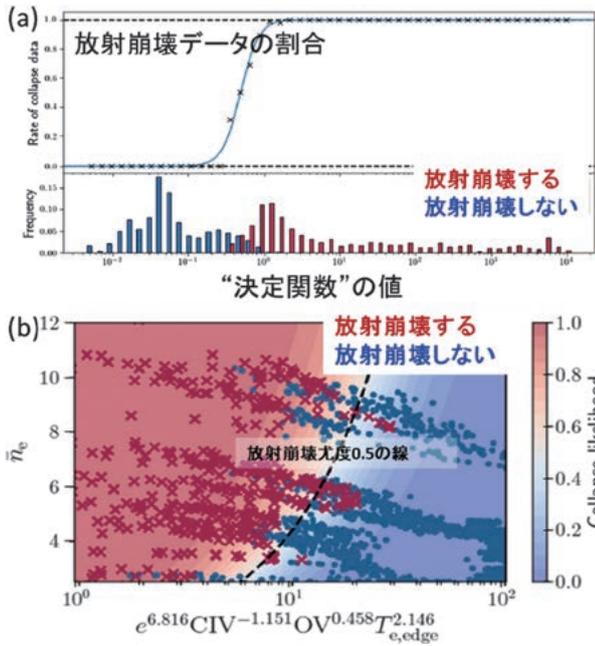


図3 (a)放射崩壊の有無(赤:発生, 青:発生しない)の頻度(下図)と発生するケースの割合(上図)を, 決定関数を横軸としてまとめた図. (b)平均電子密度と他の3変数それぞれのべき乗の積で張られる平面における放射崩壊尤度(collapse likelihood)の等高線. 黒点線は放射崩壊尤度0.5に対応している(文献[9]掲載の原図を改訂).

有無は, 本来は, 複雑に絡み合った物理要素や関連変数群が織りなす高次元空間の中での問題(文献[8]の図4のような問題設定)であるが, スパースモデリングの考え方をを用いて, より低次元(少変数)空間での判別問題として捉えるということになる.

文献[9]の成果は, さらに実験における実証という成果[10]につながっている. プラズマ実験を行いながら, 放射崩壊尤度に現れる4変数の計測データからリアルタイムで尤度を評価し, 放射崩壊を回避したという成果である. この実証実験では, 放射崩壊尤度の閾値を0.9にセットし, その閾値超えて, ECH(電子サイクロトロン波加熱)入射, ガスパフ(粒子供給)オフという信号を出し, 実際に放射崩壊を回避することに成功した. 他方, この対応を行わなかった場合には放射崩壊が発生した. 放射崩壊尤度という考え方を導入し, それに基づいて実際にリアルタイムでの放射崩壊回避に成功したものである. 放射崩壊有無のデータ群に対する取り組みの前に, ディスラプション有無のデータ群に対する取り組みが行われており[11], 実験装置 JT-60SA などでの実証実験が大いに待たれるところである.

アナロジーとしては, 緊急地震速報が好例であろう. 地震波の伝搬に関する計測時系列データから震源地やマグニチュードを推定し, 揺れの伝わりや大きさを推定して即座に速報を出すものである. そこでは, 揺れが伝わる経路上の岩盤や断層などの情報を高精細に考慮しているわけではない. 核融合プラズマにおけるイベントの回避や制御に対しても, 用いることができる(研究段階で異なることにも留意) 関連計測データや事前準備された

関連データベース群などからリアルタイムで評価できる指標を検討して, リアルタイム性の高い制御を行うという研究動向も重要性を増していくと考えられる.

また, スパースモデリングを用いた放射崩壊尤度の評価と, 物理要素・階層の考え方との整合を図ろうとする研究が行われていることにも本節の最後に触れたい. 文献[12]では, 放射崩壊尤度に現れる変数の中で, 特に4価の炭素イオン発光の発光強度の寄与に関して, 周辺プラズマシミュレーションを通じて, 物理的解釈(炭素不純物による放射増加が放射崩壊に与える影響)につなげようとする取り組みも行われている. これは, プラズマ物理学という学術基盤がある核融合分野の強みである. プラズマ物理と統計数理の両面から同一の研究課題を見ることで, 核融合研究の課題解決や指針の獲得ができるという好例であろう.

2.3 プラズマ性能向上の側面～回帰の活用による記録更新～

プラズマ性能の向上に関しても, 統計数理の中でも非常にベーシックな回帰を用いた成果がある. ここで取り上げる例は中性子発生率(S_n)に関する成果である. S_n は核融合プラズマ性能の重要指標の一つで, 核融合炉における出力制御に直結するデータである.

図4(a)に, LHD重水素実験である磁場配位条件における S_n の蓄積データ群(2017年度~2019年度の3年分)を示す[13]. データ数は2445点ある. さて, このデータ群に対してどのような研究が行われるだろうか? プラズマ物理の研究者は, データの値そのものの定量的理解や再現をしたいと思うのではないだろうか. そのために, 例えば, S_n 最大のデータ点を対象として, MHD(電磁流

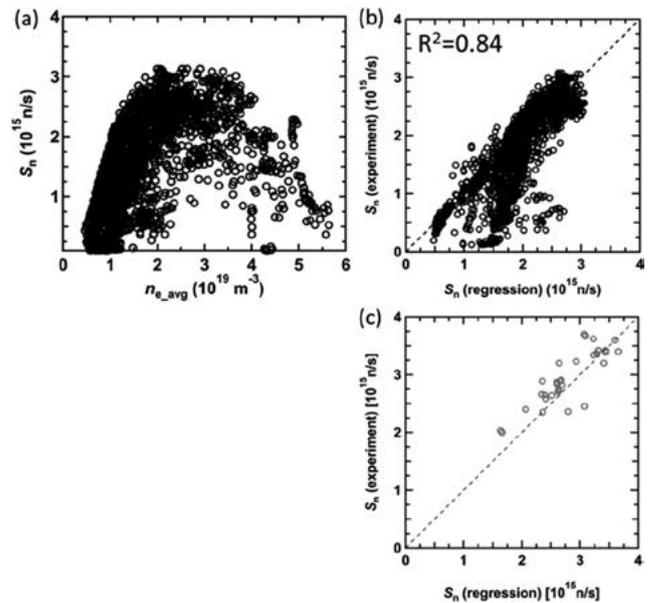


図4 (a)2017年度~2019年度のLHD重水素実験におけるある磁場配位条件での中性子発生率(S_n)計測データベース. 横軸は平均電子密度である. (b)(a)のデータを文中の3変数を用いて回帰した結果. 横軸は回帰式による評価値, 縦軸は計測値である. (c)回帰式に基づく適応的実験計画の結果. 従来の S_n 計測値を超える S_n を実現(記録更新)することができた.

体力学) 平衡を計算し, NBI (中性粒子ビーム入射) 加熱吸収パワーや核融合反応を起こす高エネルギー粒子の挙動などに関する実・速度空間における分布関数計算を行い, それらの結果を基に核融合反応計算を行い, S_n の見積もり値を得て, 計測データと比較をして, モデル改良の方策などを検討するものと思われる. 一方, 統計数理研究者は, このデータ群に「あてはまる」モデルを創りたいと考え, その結果として, トレンドやプラズマ応答を記述するものと思われる. さらに, このデータ群に基づいた実験計画 (適応型実験計画) を立案することもあるだろう.

そこで, 後者の見方, 適応的実験計画の立場で, S_n 記録更新 (プラズマ性能向上) をめざす取り組みを行った. S_n は核融合炉の出力制御に直結するデータであるため, 核融合炉での限定された計測を念頭に, なるべく少ない変数, かつ, 外部制御パラメータのみ使うという方針で, 平均電子密度, 接線・垂直 NBI パワー (吸収パワーではなく, 物理解析が不要な入射パワーであることに留意) の3変数のみで, S_n に対するログ線形回帰を行った結果が図4 (b)である. 得られた回帰式は下記の通りである (文献[13]から再掲).

$$S_n = 10^{14.25} \times n_{e_avg}^{0.52} \times P_{||NB}^{0.69} \times P_{\perp NB}^{0.37}.$$

ここで, n_{e_avg} は平均電子密度 [10^{19} m^{-3}], $P_{||NB}$ ($P_{\perp NB}$) はそれぞれ接線 (垂直) NBI 入射パワー [MW] である. 図4 (a)のデータ群から値がゼロのデータ (両辺とも) は除外して回帰を行っている. 用いる変数を限定していることもあり, S_n が小さいデータ群に対して, 回帰式による算定値 (図4 (b)横軸) が実測値 (図4 (b)縦軸) から外れている (対角線からのずれ) データも多くあるが, 全体的には決定係数が0.84ということで, あてはまりのよい回帰になっている. さらに, S_n の記録更新 (S_n を上げる) を狙う方向 (右上へ) としては, 対角線におおよそ沿っているので, 記録更新トライアルに向けて十分に活用できる回帰式であると言える. この回帰式によって, S_n の予測値の事前算出が可能になるとともに, 例えば, 接線 NBI の入射パワーが高い時に S_n 記録更新実験を行うのがより効果的, などという指針も得ることができた. 実際, その指針に基づいて S_n 記録更新実験を行ったところ, 図4 (c)に示すように, 対角線 (回帰式が示すトレンド) におおよそ沿う形で S_n の記録更新ができた[14]. この回帰式がなくとも, 分野知識でも予測できる範囲の知見であるとも言えるが, 統計数理によって「データにあてはまる」モデルを創って, それをプラズマ性能向上に役立てるとい研究動向は, 今後も様々な研究段階や場面で大きな貢献をなすうと考えている. また, 核融合炉出力のリアルタイム制御の一要素として, このようなモデルを構築しておくことも有用であろう.

なお, 回帰はその解析に用いたデータベースの範囲内でのみ有効で, 外挿 (この節の文脈では, 記録更新) に対する保証はない. これに対して, 本節で紹介した成果は, 回帰式が示すトレンドが, データを少しづつ伸ばしてい

く (性能向上, 記録更新) 場合には, 一定の指針として用いることができるということも意味している. 似た例として, エネルギー閉じ込めスケーリング則[15, 16]がある. これまでの実験データに基づいて, 回帰に基づいて「スケーリング則」が得られているが, その外挿性 (国際熱核融合実験炉 ITER への予測など) の根拠探究や検証を行う必要がある.

実社会の問題では統計数理の妥当性検証は非常に困難であることがほとんどであるが, 核融合研究は, 上記のように, 統計数理による知見を試す場があり, その妥当性検証や改良を継続的に行うことができるという強みを持っている. このことは, 統計数理コミュニティから見た核融合研究の大きな魅力になるものと考えられる.

3. まとめと展望

本記事では, 核融合研究における課題に対する物理要素・階層と相補的な統計数理による取り組みを, 3件の例を紹介しながら述べた. そこで共通するのは, 「データにあてはまる」モデルを獲得することである. この見方では, 必ずしも「ビッグデータ」である必要はなく, データ活用の最大化という意味合いが強い. 定量的な説明は難しいが, ビッグデータの存在を前提としたAIとは視点を異にしているとも言える. 統計数理による取り組みで, 統計数理コミュニティと課題を共有し, プラズマ物理・統計数理両面から課題に挑戦できるようになることも, 今後の核融合研究のデータ量増加, そして, その後, 原型炉から実用炉に至る過程で計測が限定され, 推定の必要性が増す状況への対応を考えると時宜を得ていると考える. 著者は, これらを「統計数理核融合学」として展開していくことを, 本記事をもって提案したい.

また, 物理要素・階層との相補性という観点では, 「イベントを基盤とした統合記述」という研究動向を興すことも重要であると考えている. 制御対象となるイベントにまつわるデータ群を用いて, 統計数理による統合記述を行い, それに基づいてイベントの入出力応答・因果に対して直接的な制御ロジックを構築するという考え方である. 本記事で紹介した3例だけをとっても, データ同化に基づく制御アルゴリズムの構築を基盤として, 制御対象 (制御済み予測変数) として, 放射崩壊尤度や S_n 回帰式を取り込むことで, 放電全体の時間変化を予測しつつこれらの観点についての制御を行うことが可能であるというアイデアが示されている[17]. 核融合プラズマにおいて制御すべき課題は他にも多数あるが, それらの課題を, 本記事で紹介したように, 統計数理によってプラズマ物理と相補的な研究を行い, それらをデータ同化制御のアルゴリズムに包含することで, 従来の物理要素・階層統合コードと相乗的に制御ロジックの構築ができるものと考えている.

本記事では, 核融合プラズマの課題を取り上げたが, 統計数理による取り組みができる課題は他にも多くあると考えている. その数例を表1に示す. 表に挙げたうちのいくつかは, すでに文献[3, 4]でも取り組みが紹介され

表1 核融合研究課題の統計数理による取り組み可能性の例 (キーワード).

【核融合】	【統計数理】
輸送モデリング・統合モデリング	データ同化, 回帰
ディスラプション, 放射崩壊	判別, 時系列データ変化点
プラズマ性能向上	適応型実験計画, 外挿性, 予測性
乱流	高次元データ, 特徴量抽出
ダイバータ熱流束とプラズマ条件	入出力間の応答・相関
大規模シミュレーション	次元縮約, 特徴抽出, 主成分分析
原子・分子データベース	欠損データ推定, 転移学習
新材料開発	少数データ, マテリアルズインフォマティクス
試料分析	パターン認識, 画像特徴抽出
核融合炉システム挙動	確率システム論

ている。

統計数理コミュニティとの結びつきをより強める観点で、2022年度より3年間のプロジェクトとして、情報・システム研究機構 第4期戦略的研究プロジェクト「プラズマ物理と相補的なプラズマデータに対する統計数理モデリング」を立ち上げた。これまでに両コミュニティ間で立ち上げている複数の共同研究などを基盤としたものであるが、表1に示されているような、さらなる取り組みの拡がりを検討している。核融合研究の多様な課題をこのようなプロジェクトに持ち込むことで、「統計数理核融合学」を実践しつつ、両コミュニティ協働で研究推進を図ることができるであろう。

謝辞:

2022年7月の第14回核融合エネルギー連合講演会にて特別講演を行う機会を与えていただいた同講演会プログラム委員会に感謝いたします。森下侑哉氏(日本学術振興会特別研究員, 京都大学大学院工学研究科博士課程3年), 横山達也氏(量子科学研究開発機構量子エネルギー部門那珂研究所博士研究員), 小川国大氏(核融合科学研究所准教授)らの研究成果を、「統計数理」, 「データへのあてはめ」を基盤としつつ特別講演で紹介し、また、本記事に掲載いたしました。これらの方々および共同研究者の皆様からのデータ提供や議論に感謝申し上げます。

これらの成果を生み出す基盤となったデータはLHD実験によるものであり、LHD実験グループの皆様にも感謝いたします。LHDのデータは、リポジトリ(https://www-lhd.nifs.ac.jp/pub/Repository_en.html)から参照することができます。

また、「統計数理」について、矢野恵佑氏(統計数理研究所准教授), 及び、菊地和平日氏(統計数理研究所特任助教)との議論が大変参考になるとともに刺激となりました。

ここに感謝申し上げます。

本記事に至る研究は、JSPS 科研費 JP19K03797, JP22K03582, JP19H0549, 核融合科学研究所一般共同研究 NIFS22KIPR009, NIFS22KIPT008, NIFS22KIPP013, NIFS20KLPT007, QST 原型炉研究開発共同研究「核融合の大規模データを活用するデータ駆動型モデリング手法の研究」, 統計数理研究所共同研究プログラム2019-ISMCRP-2027, 2022-ISMCRP-2026, さらに、情報・システム研究機構 第4期戦略的研究プロジェクト「プラズマ物理と相補的なプラズマデータに対する統計数理モデリング」における活動が基盤となっています。

本稿の投稿・受理後に、菊地和平日氏が急逝されました。本稿に至る菊地氏との様々な共同取り組みに思いを馳せるとともに、心からのお悔みを申し上げます。

参考文献

- [1] 赤池弘次: 統計数理 **35**, 109 (1987).
- [2] 尾形良彦: 統計数理 **67**, 215 (2019).
- [3] 浜口智志 他, 小特集「プラズマ・インフォマティクス—データ駆動科学のプラズマへの応用」プラズマ・核融合学会誌 **95**, 535 (2019).
- [4] 今寺賢志 他, 小特集「磁場閉じ込め核融合プラズマにおけるデータ駆動アプローチによる物理モデリングの進展」プラズマ・核融合学会誌 **97**, 64 (2021).
- [5] 森下侑哉 他: プラズマ・核融合学会誌 **97**, 72 (2021).
- [6] Y. Morishita *et al.*, Computer Phys. Commun. **274**, 108287 (2022).
- [7] 森下侑哉 他, 統計数理 (2023年6月発刊予定, Vol. 71-1) 掲載受理済み, Y. Morishita *et al.*, submitted to J. Comput. Sci. (2022).
- [8] P. de Vries, Nucl. Fusion **51**, 053018 (2011).
- [9] T. Yokoyama *et al.*, J. Fusion Energy **39**, 500 (2020).
- [10] T. Yokoyama *et al.*, Plasma Fusion Res. **17**, 2402042 (2022).
- [11] T. Yokoyama *et al.*, Fusion Eng. Des. **140**, 67 (2019).
- [12] T. Yokoyama *et al.*, Plasma Fusion Res. **16**, 2402010 (2021).
- [13] K. Ogawa *et al.*, Plasma Fusion Res. **15**, 1202087 (2020).
- [14] K. Ogawa *et al.*, Fusion Eng. Des. **167**, 112367 (2021).
- [15] ITER Physics Expert Groups on Confinement and Transport and Confinement Modelling and Database, Nucl. Fusion **39**, 2175 (1999).
- [16] H. Yamada *et al.*, Nucl. Fusion **45**, 1684 (2005).
- [17] Y. Morishita and T. Yokoyama, *private communication* (2022).