

# 機械学習は、内部閉じ込め融合を点火するコンピュータモデルを改善できるか

ジェフ・ヘクト

ロチェスター大のOMEGAレーザに適用された機械学習が核融合収率を強化した。同じことは国立点火施設(NIF)でも起こり得る。

レーザ核融合の研究者は、慣性核融合(ICF)の標的の内破の最適化に必要なレーザパルス特性と標的デザインの組合せを探すために機械学習に頼った。これは、核融合プラズマを点火する意欲的な目標を満たそうと努力するプログラムにとって重要な強化となる。その目標は、ICFエネルギー生産にとって重要な到達点である。

1960年にさかのぼると、コンピュータモデルは、重水素と三重水素を含むターゲットの内破が、核融合に必要な高温と高圧を一時的に作れると予測していた。ICFは、熱核兵器の物理学シミュレーションと融合エネルギーの磁気閉じ込めの代替としても魅力的に見えた。最大のプログラムを擁していた米国は、一連の大型コンピュータモデルと実験用レーザを開発した。大部分の資金は、核兵器プログラムが提供した。

この取組のために構築された最新にして最大のレーザは、米ローレンスリバモア国立研究所(LLNL)の国立点火施設(NIF)である。2009年に開始になったとき、それは、当初の計画から数年遅れであり、当初予算に対して数十億ドル少なかったが、2012年までに核融合プラズマを点火するのが目標だった。レーザは、コンピュータモデルが十分であると予測していた1.8MJ

パルスを出力したが、目標実験結果は、点火には至らなかった<sup>(1)</sup>。

2012年末、NIFショットは、点火の測定基準、ローソン条件の35%に届いたに過ぎなかった、とLLNLのICFプログラムの首席サイエンティスト、オマル・ハリケーン氏(Omar Hurricane)は言っている。同氏によると、NIFは現在、ローソン条件の74%に達している。より簡素な計測基準、中性子収率は、同時期に21倍増加した。2015年、LLNLは核融合で生成されたアルファ粒子が、標的プラズマに必須の熱を送達していると報告した。

核融合エネルギー収率は、この数年で大幅に増加した(図1)。2018年6月、

LLNLは、2014年に達成された記録を破ったと報告した。核エネルギーの収率を54kJ、 $1.9 \times 10^{16}$ に押し上げた。これは、ターゲットの内破に必要なだった運動エネルギー21kJの2倍以上である<sup>(2)</sup>。ショットは、間接駆動核融合を利用した、入力レーザパルスがいわゆる「空洞」(両端が開いていてレーザビームが通過するようになっている円筒コンテナ)を照射するプロセスである。これによりエネルギーをターゲットに移送する(図2)。間接駆動は、レーザパルスをターゲットに直接集光するよりも均一にターゲットを照射するので、面倒なプラズマの不安定性を低減する。しかし、1.5MJのレーザエネルギー

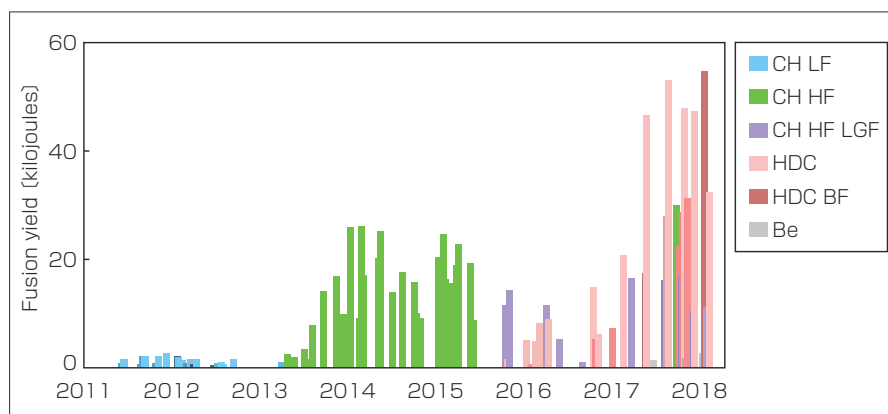


図1 NIF実験における核融合収率を示した。カプセルタイプはプラスチック(CH)、ベリリウム(Be)、または高密度炭素(HDC)。パルスは、いわゆるローフット(LF)、ハイフット(HF)、またはビッグフット(BF)。LGFは、カプセル内の低ガス充填を示している。記録的な結果は、HDCカプセルとBFパルスの組合せによるものであった。

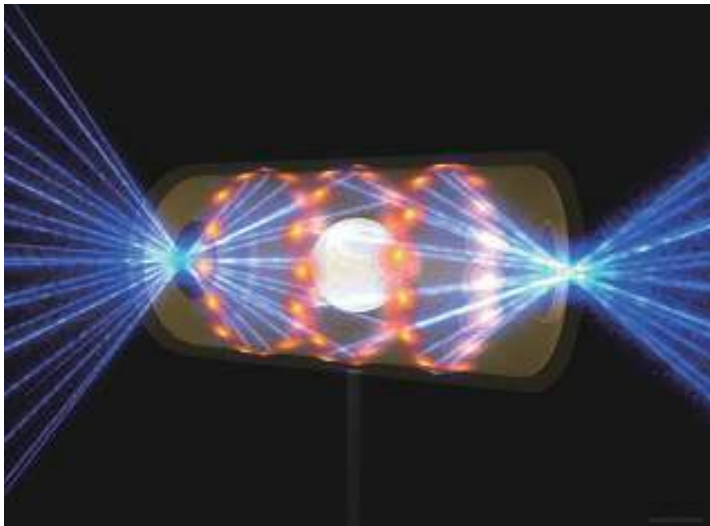


図2 レーザパルスが両端が開いた円筒形空洞に入り、金属壁に当たると、X線が出る。これが、中央の極低温水素ターゲットを均一に加熱し、圧縮する。(提供：LLNL)

ーが空洞を加熱するので、エネルギー効率を犠牲にすることになる。究極の目標は、正味のエネルギー利得である。つまり、核融合プロセスを起こすのに必要なよりも多くのエネルギーを融合から生み出すことである。

点火は、しばらくは達成されないように見えた。2016年、調査委員会は、「現在、NIFで点火を保証する既知の構成、特別なターゲット設計、もしくはアプローチはない」と報告した<sup>(3)</sup>。米国エネルギー省(DOE)は、NIFの時間を他の実験に多くシフトした。また、NIFによる点火の見通し決定の目標を会計年2020にずらした。国家核安全保障局(NNSA)に委託された調査委員会が、すでにラボの訪問を始めており、会計年2020末までに提言を伝えることになっている<sup>(4)</sup>。2018年、同局は点火目標を会計年2025年にずらした<sup>(5)</sup>。

## OMEGAにおける機械学習

現在、別の場所で機械学習が、より簡素なダイレクト駆動アプローチの融合収率を3倍にした。これは米ロチェスター大、30kJ OMEGA レーザで研究されているアプローチである。同大

のバルカス・ゴパラワミ氏(Varchas Gopalaswamy)とリカルド・ベッティ氏(Riccardo Betti)のチームが、簡素な次元モデルを数十万回走らせ、各ラン毎にパルス形状とターゲット構造の値をランダムに変えた。図3は、2つの例を示している。次に、ターゲットショットの新しいラウンドに最良の設計を選ぶために、シミュレートした結果と、固体重水素-三重水素ターゲットを使用したOMEGAショットの実際の結果を比較した。シミュレーションと実験結果を結びつけることで、ゴパラワミ氏によると、研究者は、機械設計されたターゲットに徐々に近づいた。これは、前の最高OMEGAショットのニュートロン収率を3倍増やした<sup>(6)</sup>。

「(ICFで)探求できるパラメータ空間は計り知れない」とベッティ氏は言う。数十万回の簡単なテストが行われ、OMEGA成果の保存記録に対抗させる豊富なデータが得られたからである。それは、設計を改善する確率を増やした。そのテストをNIFの1.8mJエネルギーに拡張することで、ロチェスター大のチームは、新技術が500kJ 溶融エネルギーを生成できる設計を作れると予測した。しかし、NIF用の間接駆動

を使うのではなく溶融を直接駆動するパルスを使う時にのみである。

「Nature 論文は、大きな前進である」とその研究には関わっていない、米SLAC国立研究所のジークフリート・グレンツァ氏(Siegfried Glenzer)は言う。その新しい洞察まで、停滞期に続いて、一連の大きな段階として、同氏はレーザー融合の開発を捕らえている。ロチェスター大の機械学習技術は、そのよう大きなステップであり、複雑な従来のモデルを悩ましていた非線形性と不安定性を回避する可能性がある。同氏によると、その2つのタイプのターゲットショットは、直接駆動ショットとともにNIFの間接駆動ショットの収率を改善する新技術にとっては、同等である。

## 機械学習をNIFに適用

ハリケーン氏は、原理的に、ロチェスター大の技術はNIFで溶融収率を高めることができるとして、彼らの研究は「優れており、興味深い」と言う。同氏には、実験結果改善のために機械学習を使うLLNLチームがある。また、「われわれの手で点火するまで、あらゆる有望な攻撃法」の適用を促している。同氏が見ている1つの力は、「人間の設計者なら考えなかったようなデザインパラメータ空間部分」に研究者を向けさせる能力である。とはいえ、機械学習技術は、「実世界に存在する断崖に近い失敗をするが、シミュレーションは、単に取り込まないだけではない」と考えている。

その技術をNIFに拡張する際のもう1つの懸念は、機械学習が膨大な量の入力データを必要とすることである。OMEGAは、1日に多数のショットを撃ち、多年の運用で大きな保存記録を集積している。対照的に、NIFは一般

に、点火研究のためのシングルショットを設定して実施するのに約5日を必要とする。グレンツァ氏によると、そのような低ショットレートでは、機械学習に十分大きなデータバンクを構築することは難しい。同氏は、他の代替が可能であると提案する。それに含まれるのはLCLS-IIによるテストショット、SLACのリニアコヒーレント光源のアップグレードバージョン、2020年秋に最初の発光が予定されているX線レーザーである<sup>(7)</sup>。

LLNLは、次の5年で独自の方向を構想している。ハリケーン氏によると、NIFターゲットショットによる中心圧力は、今では、太陽の中心圧力をはるかに上回る。核融合収率は、理論の予測通り、中心のホットスポットのエネルギーと強く関係している。同氏のグループは、ターゲットの表面積を拡張している。ターゲットの内破をスピードと対称性を維持しながら、空洞からのエネルギーをもっと吸収するためである。NIFチームは、ビームライン挙動の異常性を理解し、克服しようとしている。LLNLチームも、ターゲットの挙動で観察された異常性を解決しようと取り組んでいる。これには不均一な表面密度、低い燃料圧縮、側方へのホットスポットの動き、カプセルの欠陥が含まれる。

「より多くのエネルギーは、一般的なICF問題の解決を容易にする。より多くのエネルギーが、精密さに対する要件を緩和するからである」とハリケーン氏は言う。しかし同氏によると、新しい核融合レーザーの計画を始めようとする事は「問題外である。われわれが、何が実際に必要であるかに向き合って解決し、明確に判断する必要があるすべての問題を理解するまでは」と話している。

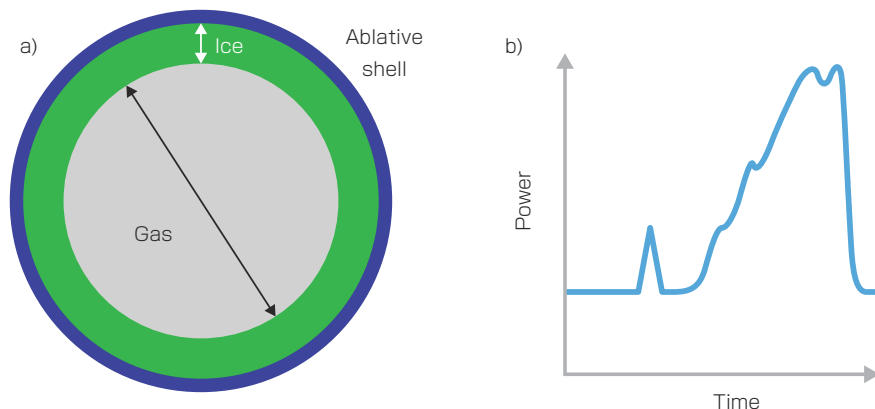


図3 融合ターゲット(a)の横断面とターゲットショット(b)の時間プロファイルをコンピュータ「ショット」ではランダムに変えた。これは、OMEGAレーザー実験結果と比較したものである。

### コンピュータが理解する

希望と警戒の混合は、慣性核融合の拡張が新たな問題を露呈させる傾向があるという多年の経験から来る。核融合収率における飛躍的な増加予測は、「危険を伴う。物理学や不安定性が、そのような大きなエネルギー範囲にどのように拡大するかには、途方もない不確実性があるからだ」とLLNLのNIFディレクター、マーク・ハーマン氏(Mark Herrmann)は、Natureのコメントに書いている。「そのような複雑なシステムを理解することに専心している研究者は謙虚になって、自分たちがいかに理解が足りないかを認識することだ」。同氏は、何年も前に、異なる文脈でユージーン・ウィグナー氏(Eugene Wigner)が示した観察を引

用して締めくくっている。「コンピュータがその問題を理解していると分かることはすばらしい。しかし、私もまた、それを理解したい」。

国家核安全保障局(NNSA)調査委員会は、慣性核融合プログラム全体を調べている。これには間接駆動、直接駆動及び米サンディア国立研究所が追求している磁気パルスパワーアプローチが含まれる。パネルメンバーの一人であるグレンツァ氏によると、目標はNIFをアップグレードして、より高いパルスエネルギーとパワーにすることである。これは、新しい実験で使用される。実験は、点火に到達するか、研究者が核融合プラズマの点火の仕方を理解できる点に研究者を導くか、いずれかである。

### 参考文献

- (1) J. Hecht, "Will NIF number laser fusion among its accomplishments?" Laser Focus World (Feb. 2013); <http://bit.ly/HechtJan20Ref1>.
- (2) S. Le Pape et al., Phys. Rev. Lett., 120, 24, 245003 (Jun. 2018); <http://bit.ly/HechtJan20Ref2>.
- (3) National Nuclear Security Administration, "2015 Review of the Inertial Confinement Fusion and High Energy Density Science Portfolio: Vol. 1," p. ii (May 2016).
- (4) Department of Energy, FY2020 Congressional Budget Request, National Nuclear Security Administration, DOE/CF-0150, 1, 183-186 (Mar. 2019).
- (5) National Nuclear Security Administration, "Fiscal Year 2019, Stockpile Stewardship and Management Plan - Biennial Plan Summary," Report to Congress, 4-17 (Oct. 2018).
- (6) V. Gopalaswamy et al., Nature, 565, 581-586 (Jan. 31, 2019), <http://bit.ly/HechtJan20Ref6>.
- (7) See <http://bit.ly/HechtJan20Ref7>.
- (8) M. C. Herrmann, Nature, 565, 577-578 (Jan. 31, 2019).