

LHDプラズマ中電子密度のトムソン散乱計測結果に対する ガウス過程回帰

中村紀彦¹, 大杉拓也¹, 山田一博², 蓮尾昌裕¹, 藤井恵介¹

¹京都大, ²核融合研

シミュレーションコードの入力としてプラズマ実験の計測データを使用するためには、ノイズを含む離散的な計測データ点から背後の関数を推定することが求められる。特に、輸送係数計算のような多くのシミュレーションコードは、電子密度のようなマクロな物理量の空間勾配に強く影響を受ける。

多項式曲線やスプライン曲線を用いた既存のフィッティング手法では、アンダーフィッティングやオーバーフィッティングを避けるために、何次の項までを用いるかのようなモデルの複雑さを人為的に制御する必要がある[1]。例えば、モデルが単純な場合(多項式の次元がデータの精度と比較して小さい場合)、背後の細かい構造は捉えられない(アンダーフィッティング)。反対にモデルが複雑な場合、フィッティング曲線はノイズによる高周波分散に過剰に従い、勾配は非常に大きな正負の値が細かく交互に表れる分布となる(オーバーフィッティング)。

ベイズ統計の枠組みでは、データの従う事前分布をパラメータ化し、周辺尤度を最大化する条件を見つけることで、このようなアンダーフィッティングやオーバーフィッティングを避けることができる。そのうちの一つの手法であるガウス過程回帰では、計測データは多変量ガウス分布に従うとモデル化される。その共分散関数をパラメータ化することで、空間分解能と不確かさの最適なトレードオフを決定できる。加えて、ガウス過程回帰はフィッティングの期待値だけでなく不確かさも推定することが可能である。このような利点のため、近年はAlcator C-Modにおける電子密度や電子温度データのフィッティング[2]など、データから背後の関数を推定するために使われ始めている。

本研究では、ガウス過程回帰をLHDにおけるトムソン散乱計測結果[3]に適用した。計測結果は負の計測点や外れ値を含む。そこで、フィッティング結果を正值に限定し、尤度関数に裾の重い t 分布を用いたモデルを開発し、上記の議論を適用した。図1に、推定された電子密度の空間分布を示す。正值に限定された、 $r = 0.67$ [m]付近の外れ値に影響されないフィッティング結果が得られた。

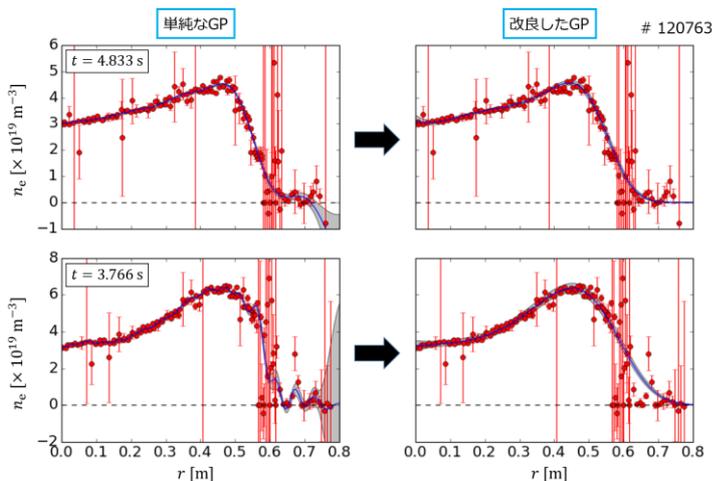


図1 解析に用いたデータ点とフィッティング結果。

左に単純なガウス過程モデルによるフィッティングを、右に改良したガウス過程モデルによるフィッティングを示す。トムソン散乱計測結果を赤丸、フィッティングの期待値を青線で示す。灰色の領域はフィッティングの不確かさ $\pm 2\sigma$ を示す。

[1] A. E. White, L. Schmitz, W. A. Peebles, T. A. Carter, G. R. McKee, M. W. Shafer, G. M. Staebler, K. H. Burrell, J. C. DeBoo, and R. Prater, Phys. Plasmas **17**, 020701 (2010).

[2] M. A. Chilenski, M. Greenwald, Y. Marzouk, N. T. Howard, A. E. White, J. E. Rice and J. R. Walk, Nucl. Fusion **55**, 023012 (2015).

[3] I. Yamada, K. Narihara, H. Funaba, R. Yasuhara, T. Kohmoto, H. Hayashi, T. Hatae, H. Tojo, T. Sakuma, H. Yoshida, H. Fujita, and M. Nakatsuka, Journal of Instrumentation **7**, C05007 (2012).