

一般セッション | III. 核分裂工学：301-1 炉物理，核データの利用，臨界安全

2024年9月12日(木) 9:30 ~ 10:50 会場(講義棟A棟1FA106)

[2D01-05] 未臨界実験解析

座長:多田 健一(JAEA)

9:30 ~ 9:45

[2D01]

未臨界状態の近畿大学原子炉に対するFeynman- α , Rossi- α , 相関関数解析の性能比較*菅 憲一郎¹、池田 晶一¹、左近 敦士¹、芳原 新也¹、橋本 憲吾¹ (1. 近大)

9:45 ~ 10:00

[2D02]

低中性子計数率条件下で利用可能な未臨界度監視法の妥当性確認

*森部 太陽¹、遠藤 知弘¹、山本 章夫¹、渡辺 賢一²、金子 純一³ (1. 名大、2. 九大、3. 北大)

10:00 ~ 10:15

[2D03]

遅発中性子成分に着目した自己相関法に関する検討

(1) 理論式導出

*遠藤 知弘¹、廣田 諒我¹、山本 章夫¹、金子 純一² (1. 名大、2. 北大)

10:15 ~ 10:30

[2D04]

遅発中性子成分に着目した自己相関法に関する検討

(2) 遅発・即発中性子減衰定数を利用した未臨界度測定

*廣田 諒我¹、遠藤 知弘¹、山本 章夫¹、渡辺 賢一²、金子 純一³ (1. 名大、2. 九大、3. 北大)

10:30 ~ 10:45

[2D05]

複数回積分した準定常状態の線形出力方程式に基づく反応度の推定

*山根 祐一¹ (1. JAEA)

10:45 ~ 10:50

座長持ち時間

未臨界状態の近畿大学原子炉に対する Feynman- α , Rossi- α , 相関関数解析の性能比較

Performance comparison among Feynman- α , Rossi- α and correlation function analyses for subcritical states of UTR-KINKI

*菅 憲一郎¹、池田 晶一¹、左近 敦士¹、芳原 新也¹、橋本 憲吾¹

¹近畿大学

未臨界定常状態の近畿大学原子炉に対して Feynman- α , Rossi- α , 相関関数法に基づく炉雑音解析を行い解析手法間の性能を比較した。Rossi- α と自己相関関数解析より得られる即発中性子減衰定数は刻みピッチ幅に依存しない小さな統計誤差をもった。3つの手法により得た減衰定数統計誤差は測定データ長の平方根に逆比例することが確認できた。

キーワード：近畿大学原子炉，未臨界，Feynman- α , Rossi- α , 相関関数，即発中性子減衰定数

1. 緒言

過去の炉雑音解析では、解析手法毎に時系列データ測定方法と条件が異なるため、解析手法自身の特徴や性能を比較することが困難であった。本研究では、同一の時系列検出時刻データを用いて Feynman- α , Rossi- α , 相関関数解析を行い、即発中性子減衰定数算出性能を解析手法間で比較検討する。

2. 時系列データ測定方法

近畿大学原子炉において未臨界度の異なる3つの制御棒挿入パターン(A, B, C)を設定し、中央ストリンガー空孔に設置した2本のBF₃計数管の中性子検出時刻を連続的に600秒間収録した。計数管を2本設置したのは、共分散対平均比解析法等の2検出器法も検討するためである。これら検出時刻データに対して3つの解析手法を適用し、即発中性子減衰定数と最小二乗フィットに起因する同減衰定数統計誤差を決定した。

3. 結果

図1、2に、3つの解析手法で得た即発中性子減衰定数の時間変数刻みピッチ幅依存性と同減衰定数統計誤差の解析データ長依存性をそれぞれ示す。分散対平均比解析で得た即発中性子減衰定数の統計誤差は非常に大きく、ゲート幅Tの刻みピッチ幅 ΔT 依存性が観察される。一方、Rossi- α と自己相関関数解析の統計誤差は小さく、ラグ及び時間間隔 τ の刻みピッチ幅 $\Delta\tau$ に依存しない(図1)。また、減衰定数の統計誤差は解析データ長Lの平方根に反比例する(図2)。

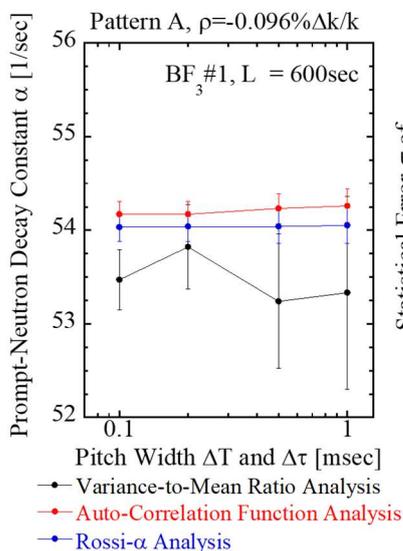


図1 即発中性子減衰定数の時間変数刻みピッチ幅依存性

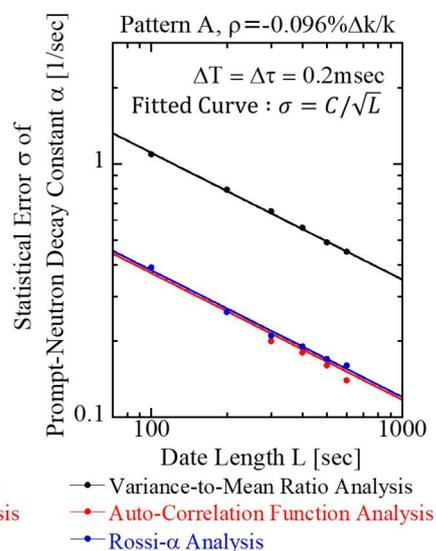


図2 即発中性子減衰定数統計誤差の解析データ長依存性

4. 結論

大きな統計誤差を生む分散対平均比解析に比べ、統計誤差が小さく時間変数刻みピッチ幅依存性が弱い Rossi- α と自己相関関数解析は未臨界度監視手法として有利である。即発中性子減衰定数の統計誤差と解析データ長の平方根との反比例性は、測定時間を設定する際の有用な知見である。

*Kenichiro Suga¹, Shoichi Ikeda¹, Atsushi Sakon¹, Sin-ya Hohara¹, Kengo Hashimoto¹

¹Kindai University

低中性子計数率条件下で利用可能な未臨界度監視法の妥当性確認

Validation of Subcriticality Monitoring Method under Low Neutron Count Rate Condition

*森部 太陽¹, 遠藤 知弘¹, 山本 章夫¹, 渡辺 賢一², 金子 純一³

¹名古屋大学, ²九州大学, ³北海道大学

先行研究において、改良型単純フィードバック法、最小二乗逆動特性法およびバイラテラルフィルタを組み合わせた未臨界度監視法を提案した。近畿大学原子炉(UTR-KINKI)の臨界近接実験で測定された中性子計数率時系列データを用いて、提案手法の妥当性を確認した。

キーワード: 未臨界度監視, 改良型単純フィードバック法, 最小二乗逆動特性法, バイラテラルフィルタ, UTR-KINKI

1. 緒言 東京電力福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出しにおける課題として、反応度の推定に必要な情報が不明であること、使用可能な中性子検出器の制限による検出効率の低下が挙げられる。これらの課題の解決のため、先行研究[1]において、改良型単純フィードバック法[2]、最小二乗逆動特性法[3]およびバイラテラルフィルタ[4]を組み合わせた未臨界度監視法を提案した。本研究では、近畿大学原子炉(UTR-KINKI)における臨界近接実験で測定された中性子計数率時系列データを用いて、提案手法の妥当性を確認した。

2. 提案手法 中性子計数率の時系列データ P_n の測定値($n = 0, 1, \dots$)から、平均的な遅発中性子の寄与 \bar{A}_n を逐次計算し、改良型単純フィードバック法[2]による推定式 $(\rho/\beta_{\text{eff}})_n = 1 - (\bar{A}_n + S_0)/P_n \dots(1)$ に基づいて、ドル単位の反応度 ρ/β_{eff} を逆推定する。ここで、反応度推定時に必要となる中性子源強度 S_0 の値は最小二乗逆動特性法[3]により推定する。具体的には、ステップ状の反応度変化が生じた際に、横軸を \bar{A}_n 、縦軸を P_n でプロットした散布図に対して、式(1)をフィッティングすることで S_0 の値が推定できる。

3. 妥当性確認結果 UTR-KINKIの臨界近接実験時に、検出効率を変化させた3つの光ファイバ型検出器で測定された中性子計数率の時系列データを用いて、提案手法の妥当性確認を実施した。妥当性確認のため、ドル単位の反応度の参照値(reference)は、別の測定で評価した各制御棒の反応度値および余剰反応度(全制御棒全引抜時の原子炉反応度)から求めた。中性子計数率時系列データに対し、バイラテラルフィルタ[4]を適用することで測定時の統計的不確かさの低減を図った。その後、上記提案手法を適用することでドル単位の反応度を推定した。各検出効率($P_{0,\text{low}} \approx 5$ cps, $P_{0,\text{middle}} \approx 70$ cps, $P_{0,\text{high}} \approx 800$ cps)におけるドル単位の反応度推定結果とドル単位の反応度参照値の比較結果を図1に示す。図1から分かるように、中性子計数率の測定データのみから、提案手法によりドル単位の反応度が推定できることを実証した。

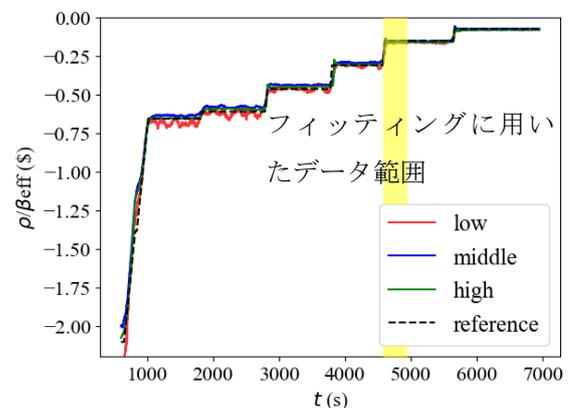


図1 ドル単位の反応度推定結果

謝辞 本研究は JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業(JPJA23P23813844)の助成による。

参考文献 [1] 森部 太陽, 他, 日本原子力学会 2024 春の年会, 近畿大学, 3L05, (2024); [2] T. Endo et al., AESJ 2022 年秋の大会, 2G16 (2022); [3] J. E. Hoogenboom and A. R. van der Sluijs, *Ann. Nucl. Energy*, **15**, p. 553 (1988); [4] C. Tomasi and R. Manduchi, *Proc. ICCV'98*, p. 839 (1998).

*Taiyo Moribe¹, Tomohiro Endo¹, Akio Yamamoto¹, Kenichi Watanabe², Junichi H. Kaneko³

¹Nagoya Univ., ²Kyushu Univ., ³Hokkaido Univ.

遅発中性子成分に着目した自己相関法に関する検討

(1) 理論式導出

Study on autocorrelation method focusing on delayed neutron component

(1) Derivation of theoretical formula

*遠藤 知弘¹, 廣田 諒我¹, 山本 章夫¹, 金子 純一²¹名古屋大学, ²北海道大学

自己相関法による未臨界度測定の高度化に向け、固有関数展開とゼロ出力伝達関数を利用することで、高次モード成分と遅発中性子成分を考慮した2時点検出確率の理論式を導出した。

キーワード：未臨界度、自己相関法、2時点検出確率、固有関数展開、ゼロ出力伝達関数

1. 緒言 自己相関法とは、炉雑音解析手法に基づく未臨界度測定手法の1つである。従来の自己相関法の場合、①一点炉動特性パラメータ(中性子生成時間 Λ 、実効遅発中性子割合 β_{eff})を利用するか、あるいは②別の測定で求めた臨界時の即発中性子減衰定数($\beta_{\text{eff}}/\Lambda$)を使用することで、基本モード成分の即発中性子減衰定数 α の測定結果から未臨界度に換算している。本研究では、対象体系で得られた自己相関関数の測定結果のみから未臨界度の絶対値を測定する方法論を模索するため、可能な限り厳密な自己相関法の理論式導出について検討した。

2. 理論式導出概要 ドル単位未臨界度の絶対値測定が可能な動的手法(最小二乗逆動特性法、ソースジャーク法、面積比法)では、遅発中性子成分の情報も有効活用している。そこで、自己相関法の基となる2時点検出確率 $P_2(t_1, t_2)dt_1dt_2$ について、遅発中性子先行核の崩壊も考慮した上で理論式を導出した。ここで、時間変数 t のみについて詳細化するのではなく、空間 \vec{r} ・エネルギー E ・飛行方向 $\vec{\Omega}$ の効果も考慮するため、 k_{eff} 固有関数展開に基づくことで、①($\vec{r}_0, E_0, \vec{\Omega}_0, t_0$)に中性子1個を投入した後、および②(\vec{r}_0, t_0)に第 i 群の遅発中性子先行核1個を投入した後のグリーン関数 $g_p(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t | \vec{r}_0, E_0, \vec{\Omega}_0, t_0)$, $g_i(\vec{r}, t | \vec{r}_0, t_0)$ をそれぞれ導出した。これらのグリーン関数に基づくことで、物理的直観法[1]により $P_2(t_1, t_2)dt_1dt_2$ を導出した。

3. 結果 n 次の高次モード成分と遅発中性子成分を考慮した場合、2時点検出確率 $P_2(t_1, t_2)dt_1dt_2$ の理論式は、計数率 R に起因する定数項と、多数の指数関数成分の和で表現できる：

$$P_2(t_1, t_2)dt_1dt_2 = R \left\{ R + \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^7 Y_{\infty, n, j} \alpha_{n, j} e^{-\alpha_{n, j}(t_2 - t_1)} - \sum_{i=1}^6 D_{\infty, n, i} \lambda_i e^{-\lambda_i(t_2 - t_1)} \right) \right\} dt_1 dt_2 \cdots (1),$$

$$\rho_n = -\alpha_{n, j} \Lambda_n - \sum_{i=1}^6 \frac{\alpha_{n, j} \beta_{n, i}}{\lambda_i - \alpha_{n, j}} \cdots (2). \quad \text{減衰定数 } \alpha_{n, j} \text{ は } n \text{ 次の反応度方程式(2)の解 } (1 \leq j \leq 7) \text{ であるため、それら}$$

の測定結果は n 次の反応度 ρ_n や中性子生成時間 Λ_n 、遅発中性子割合 $\beta_{n, i}$ と密接に関連している。 $Y_{\infty, n, j}$ と $D_{\infty, n, i}$ は、 $\alpha_{n, j}$ と遅発中性子先行核の崩壊定数 λ_i の指数関数成分の大きさにそれぞれ対応し、即発中性子数と比べ遅発中性子収率は遥かに少ないため $Y_{\infty, n, j} \gg D_{\infty, n, i}$ となる。例えば、基本モード成分($n = 0$)が支配的な場合、

$$Y_{\infty, 0, j} \propto G(\alpha_{0, j}) \left\{ -\rho_0 + \sum_{i=1}^6 \beta_{n, i} \left(\frac{\alpha_{n, j}}{\lambda_i - \alpha_{n, j}} \right)^2 \right\} \cdots (3), \quad G(s) \equiv 1 / \left(s \Lambda_0 - \rho_0 + \sum_{i=1}^6 \frac{s \beta_{0, i}}{s + \lambda_i} \right) \cdots (4) \text{ と簡略化できる。}$$

基本モード成分の各指数関数成分の大きさ $Y_{\infty, 0, j}$ は、 $s = \alpha_{0, j}$ のときのゼロ出力伝達関数 $G(s)$ の値と未臨界度 $-\rho_0$ に依存するため、自己相関関数の測定結果をデータ同化することで $-\rho_0$ を推定できる可能性がある。

参考文献 [1] T. Endo et al., *Ann. Nucl. Energy*, **33**(6), p.521 (2006).

謝辞 本研究は JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業(JPJA23P23813844)の助成による。

*Tomohiro Endo¹, Ryoga Hirota¹, Akio Yamamoto¹, and Junichi H. Kaneko²

¹Nagoya Univ., ²Hokkaido Univ.

遅発中性子成分に着目した自己相関法に関する検討

(2) 遅発・即発中性子減衰定数を利用した未臨界度測定

Study on autocorrelation method focusing on delayed neutron component

(2) Subcriticality measurement utilizing delayed and prompt neutron decay constants

*廣田 諒我¹, 遠藤 知弘¹, 山本 章夫¹, 渡辺 賢一², 金子 純一³

¹名古屋大学, ²九州大学, ³北海道大学

本研究では、炉雑音解析手法の1つである自己相関法において、中性子検出時間幅を大きくすることで、遅発中性子成分の減衰定数が分析可能か検討した。また、即発中性子減衰定数と、遅発中性子成分の減衰定数から、反応度方程式に基づいてドル単位の未臨界度を推定することを試みた。

キーワード：未臨界度，自己相関法，即発中性子減衰定数，遅発中性子，反応度方程式

1. 緒言 東京電力福島第一原子力発電所の燃料デブリ取出を安全かつ確実に遂行するためには、未臨界度測定が重要となる。本研究で対象とする自己相関法は炉雑音解析による未臨界度測定法の1つであり、炉雑音を自己相関関数で分析することで、即発中性子減衰定数 α を測定することができる。即発中性子減衰定数から未臨界度に換算するためには中性子生成時間 Λ や実効遅発中性子割合 β_{eff} の事前情報が別途必要になるが、これらのパラメータは体系(減速材/燃料比など)に依存して変化し、燃料デブリ体系では主に Λ の不確かさが大きいという課題がある。そこで本研究では、自己相関法において中性子検出時間幅を大きくし、遅発中性子成分に着目することで、 Λ , β_{eff} の事前情報を必要としない未臨界度推定手法を開発することを目的とした。

2. 提案手法 遅発中性子6群の1点炉動特性方程式に基づくと、体系内の中性子数時間変化は反応度方程式の根 ω_j ($\omega_7 \ll \omega_6 < \dots < \omega_1$)からなる7つの指数関数の和で表現できる。従来の自己相関法では、中性子の検出時間幅 Δt を $\Lambda = 10^{-4}$ (s)のオーダーに対応する値に設定することで、即発中性子減衰定数 $\alpha = -\omega_7$ のみを分析していた。本研究では、検出時間幅 Δt を遅発中性子先行核数の減衰に対応するオーダーの値に設定することで、遅発中性子成分に対応する減衰定数 $-\omega_j$ を分析することを試みた。仮に、2つの減衰定数 $-\omega_7$ と $-\omega_j$ が測定できた場合、主要な核分裂性核種の相対遅発中性子収率 a_i と崩壊定数 λ_i のみ入力値として与えることで、反応度方程式を変形して得られた式(1)に基づくことで、①ドル単位の反応度 ρ/β_{eff} と②臨界時の $\alpha_c = \beta_{\text{eff}}/\Lambda$ を同時推定することができる。

$$\begin{pmatrix} \frac{\rho}{\beta_{\text{eff}}} \\ \frac{\Lambda}{\beta_{\text{eff}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\omega_7 \\ 1 & -\omega_j \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^6 \frac{\omega_7 a_i}{\omega_7 + \lambda_i} \\ \sum_{i=1}^6 \frac{\omega_j a_i}{\omega_j + \lambda_i} \end{pmatrix} \dots (1)$$

3. 結果 炉停止状態の近畿大学原子炉で得られた炉雑音測定データに対して、提案手法を適用した。まず、検出時間 $\Delta t = 5 \times 10^{-4}$ (s)と設定することで、即発中性子減衰定数 $-\omega_7 = 148.4 \pm 0.6$ (1/s)を得た。次に、検出時間幅を $\Delta t = 5 \times 10^{-1}$ (s)と大きく設定することで、自己相関関数を求めた(図1)。図1の結果にフィッティング式 $r(\tau) = Ae^{\omega\tau} + B$ で非線形最小二乗法を適用したところ、遅い減衰定数 $-\omega_j$ を分析できることが分かった。得られた2つの減衰定数を式(1)に代入することで、近畿大学原子炉の動特性パラメータと $-\omega_7$ を反応度方程式に代入して求めた参照値から約6%の相対差でドル単位の反応度を推定できた。以上より、遅い減衰定数の測定結果も活用することで、 Λ や β_{eff} に関する情報が無くてもドル単位未臨界度を推定できる見込みを得た。

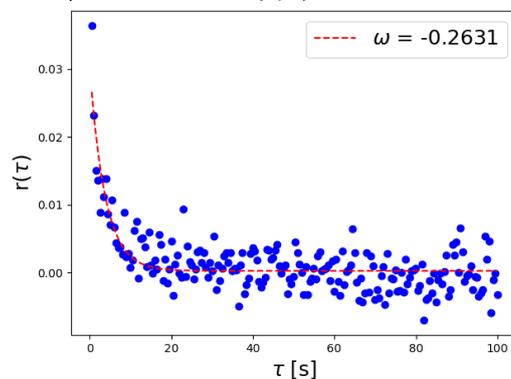


図1 $\Delta t = 5 \times 10^{-1}$ (s)での自己相関関数

謝辞 本研究はJAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業(JPJA23P23813844)の助成による。

*Ryoga Hirota¹, Tomohiro Endo¹, Akio Yamamoto¹, Kenichi Watanabe², and Junichi H. Kaneko³

¹Nagoya Univ., ²Kyushu Univ., ³Hokkaido Univ.

複数回積分した準定常状態の線形出力方程式に基づく反応度の推定

Reactivity estimation based on multiple integral linear power equation in quasi-steady state

*山根 祐一

原子力機構

反応度添加後の準定常状態の出力挙動から未臨界体系の反応度を評価する目的で、新しい計算手法を開発した。「準定常状態の出力が従う方程式」を複数回積分して得られる線形方程式を用いて反応度を推定することで移動平均の平均長が合理的に決定できることを確認した。

キーワード：未臨界，反応度評価，準定常状態，出力挙動，線形出力方程式

1. 緒言 準定常状態の出力が従う方程式 ($P(t) = \alpha_y q(t) + P_\infty$, $\alpha_y = 1/\rho_s - 1$, $q(t) = P'(t)/\mu(t)$) ①

[1] を変形して n 回積分すると $Y = \alpha_y X + P_\infty$ ②, $Y \equiv A_n/C_n$, $X \equiv B_n/C_n$, $A_n \equiv I_{[n]}[\mu(t)P(t)] - I_{[n-1]}[\mu(t)P(t)] \cdot \frac{1}{n-1} t$, $B_n \equiv I_{[n-1]}[P(t)] - I_{[n-2]}[P(t)] \cdot \frac{1}{n-1} t$, $C_n \equiv I_{[n-1]}[M(t)] - I_{[n-2]}[M(t)] \cdot \frac{1}{n-1} t$, と整理できる。ここで α_y は線 ($X(t), Y(t)$) の傾き、 P_∞ は安定出力、 $I_{[n]}[X(t)] \equiv \int_0^t \dots \int_0^t X(t) dt \dots dt$ (n 回積分) である。この方程式②を中性子計数率データに線形フィッティングすることで、 α_y 及び P_∞ を求めることができ、①式よりドル単位の反応度 ρ_s を評価できる。図 1 上に示すように中性子計数率の測定データは乱雑であり、積分するためある程度平均化する必要がある。

今回の検討により、移動平均のデータ長と積分回数 n については②式の線形性が成り立つ部分の長さが最大になるように決定すれば良いことがわかった。これにより移動平均のデータ長の決定方法の曖昧さ[2]がなくなった。この成果は、デブリの取出し時の反応度評価に役立つことが期待できる。

2. 検討 TRACY[3]による実験データでは、時刻 3160 秒で瞬時に反応度が添加されて -1.4% となる (図 1 上参照)。 $n = 3 \sim 13$ の範囲で②式の (X, Y) をプロットすると、積分回数 n が増えるほど、負の傾き α_y を持った部分がまっすぐになるとともに短くなっている。この点 (X, Y) に対して直線をフィッティングして得られた値 $\alpha_y = -1.79$ より反応度の評価値は $\rho_s = -1.3\%$ となった。

3. 結論 準定常状態の出力とその微分値の挙動を、中性子検出器信号から精度良く推定できるとともに、経験的に定めるような定数を用いることなく、直接式①、②を用いて反応度を評価できる見通しを得た。今後解析データ及び実験データで検証する計画である。

参考文献 [1] Y.Yamane, 57(8)JNST, pp.926-931(2020). [2] Y.Yamane, 59(11)JNST, pp.1331-1344(2022). [3] S. Gunji, et al., PHYSOR 2004 (2004).

*Yuichi Yamane

Japan Atomic Energy Agency.

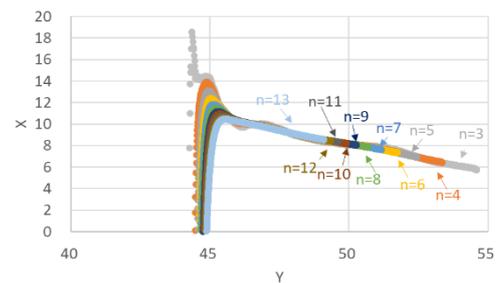
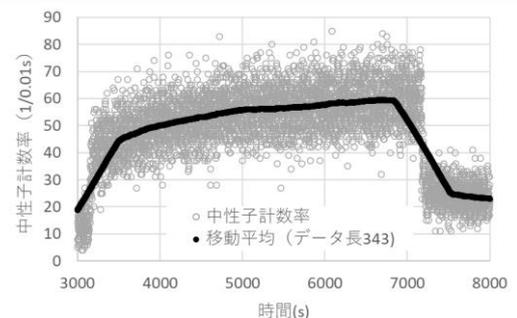


図 1：出力と線 (X, Y) の計算例 (見やすさのため (Y, X) で表示)