

先進計測・制御法と機械学習による熱流動・反応機構研究

研究代表者 古谷 正裕
(先進理工学科 共同原子力専攻 教授)

1. 研究課題

化学プラントや発電プラントでは経年劣化した部品を定期的に交換する予防保全が行われてきた。一方で、プラントの異常を検知し、予知することができれば事故を未然に防ぐことができる。しかしながら一般的に異常な状態を検知すること自体が難しく、また実プラントで異常な状態を再現することも困難である。

本研究の目的は、熱や流れ、振動を高感度で計測するセンサーや計測法を開発し、熱流動場と反応場を精緻に捉えることで、事故の兆候を予知して事故を未然に防ぐ、または早期検知することで事故の影響を緩和することである。このために本年度はノイズを含む信号から機械学習を援用し異常事象を診断する技術を開発する。

2. 主な研究成果

先進計測・制御法と機械学習による熱流動・反応機構研究として、2年目後期と3年目前期における主な成果を概説する。

2.1 音響放出信号の機械学習による漏洩検出技術の開発

核融合炉ブランケットでは高温(325°C)・高圧(15.5 MPa)の冷却水がブランケット内や真空容器内に漏洩する事故を想定し、冷却管に設置された差圧計により漏洩を検知する計画である。より迅速に且つ正確に漏洩を検知するためには、原理の異なる検知方法を併用することが望まれる。

著者らは材料内部の組織や構造の変化を音響放出(AE)として捉える漏洩検出法を提案している。図1に設計・製作した高圧漏洩試験装置を示す。ポンプで水圧を与えて、ステンレス薄膜(厚さ 20 μm)を破断させ、遠方に設置した2つのAEセンサーで破断を検知する。プランジャーポンプからの振動や外乱よりも薄膜の破断による振動はAE信号強度が小さく、信号強度の振幅のみからは破断を検知することが困難である。よってAE信号を4種(外乱無しの無音状態、破断前、破断時、破断後)にラベル付けして機械学習により破断の検出を試みた。

AE信号の時系列に一因子分散分析(ANOVA)を適用した。その結果、赤池情報量基準(AIC)、スペクトルエントロピーや、信号の鋭さを表すクレストファクタ等の特徴量が優位であることが判明した。これらは振幅情報(RMS)よりも顕著に優位であることが興味深い。

顕著な6つの特徴量の組合せから、19種類の機械学習モデルを適用し、2次サポートベクトルマシン(SVM)が事象分類に有用であることが判明した。図2に分類学習の結果を示す。94.2%の精度で漏洩分類を検知できた。

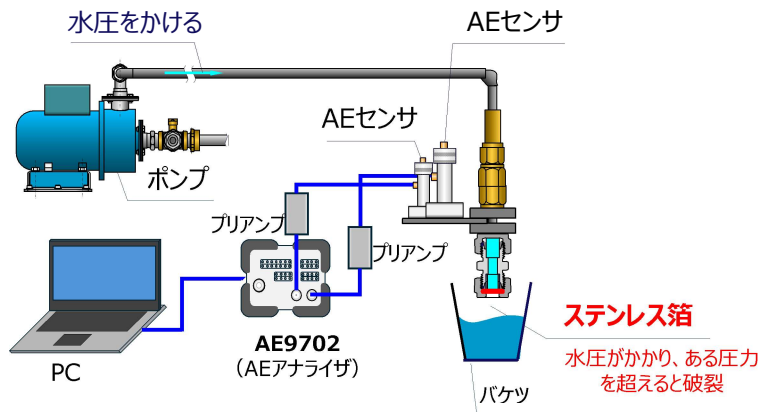


図 1 高圧水漏洩検知装置の概念図

テストデータの混同行列 (精度: 94.2%)

真のクラス	予測されたクラス			
	漏洩(破裂)	漏洩前	漏洩後	無音
漏洩(破裂)	17			
漏洩前		30	3	
漏洩後		2	32	1
無音			1	34

図 2 機械学習による漏洩検知結果(混同行列)

2.2 生成 AI によるフェーズドアレイ超音波探傷像の予知保全技術の開発

実プラントでは冷却材の漏洩など異常状態の情報を取得することが困難である。そこで異常状態の情報を仮想生成し、正常状態と対比することで、正常状態の特徴をより深く捉えつつ、異常診断に役立てる予知保全技術を開発する。

本研究ではフェーズドアレイ超音波探傷器を用いて、伝熱管群を模擬した水中の 7 本管列を対象に超音波像を取得する。最も遠方の 7 本目管から東西南北の 1 方向の小穴から、マイクロバブルを少流量で放出させ、各方向からの漏洩を伴う水流の超音波像を取得する。また漏洩がない場合も超音波像を取得した。2 つの分類学習法を試行した。

1 つ目は、オートエンコーダにて正常データと異常データに共通して重要な特徴量を抽出し、1 クラス SVM にて異常検知、k-means にて異常種別を特定する手法である。この手法は正常データのみから学習するため、未知の異常データに対して高い汎化性が期待できる。1 クラス SVM は正常データの特徴量のみを高次元特徴空間に入力し、超平面を作成して、その境界で異常検知を行う。k-means は全てのデータを入力し、クラスタ内誤差平方和を最小化することで異常種別を特定する。その結果、異常検知精度は 99.8%であった。

2 つ目は異常検知に有効な Ano-GAN と、異常種別特定に有効な AC-GAN を活用する手法である。GAN は実データに類似した偽データを作成し、その違いを学習することで実験データの特徴を抽出する。そのためデータ数が少ない条件においても機械学習で効率的に判別できる利点がある。これらに加え、判別根拠を明確にする手法 (LIME 法と差分マップ) を用い、t-SNE により異常クラス毎に色分けする可視化により、固有の特徴量が抽出できることを確認した。Ano-GAN による異常検知精度は 98.0%と AC-GAN に比べて劣るが、判断根拠は気泡放出方向を的確に捉えていることから、異常状態の特徴をより正確に捉えていると考えられる。

2.3 高温水放出実験によるシステム動特性解析コードの妥当性確認

高温水が漏洩して真空容器に流入することで加温・加圧される。放出初期の気液二相流では、気泡割合により音速が著しく変動する。この急減圧による高温・高圧水のフラッシング現象を把握するため、核融合炉ブランケットと同じ高温(325°C)・高圧(15.5 MPa)の水を、破断弁を介して真空容器中に放出する試験装置を設計・製作した。また原子炉過渡解析にデファクトスタンダードで用いられている TRACE コードを用いてフラッシング現象を再現する数値シミュレーションを行った。

今後は核融合炉の各部位からの漏洩を再現する実験を行うと共に、実験結果を再現するTRACE解析を元に核融合炉の安全設計に資する研究開発を行う。

3. 共同研究者

- 東京理科大学 理学部化学科 秋津貴城教授
- 埼玉大学 工学部応用化学科 鈴木美穂准教授
- 株式会社電力テクノシステムズ 楠憲司氏、鈴木広治氏、佐久間努氏
- 早稲田大学 基幹理工学部 電子物理システム学科 田中大器講師
- 早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構 ナノテクノロジー研究センター 藤田理紗氏

4. 研究業績

4.1 学術論文

- Faisal bin Nasser Sarbaland, Masashi Kobayashi, Daiki Tanaka, Risa Fujita, Nobuyuki Tanaka, Masahiro Furuya. Pulse Driven Injection in an Additive-Manufactured Microchannel for Rapid Mixing of Stratified Concurrent Flow and On-Demand Droplet Generation. (2026) *Micromachines*.
- Risa Fujita, Masashi Kobayashi, Takashi Tanii, Masahiro Furuya, Shuichi Shoji, Daiki Tanaka. Effect of droplet size on the encapsulation efficiency of microparticles in passive microfluidic systems (2026) *BIOMEDICAL MICRODEVICES*, 28(2).
- Masashi Kobayashi, Risa Fujita, Faisal bin Nasser Sarbaland, Masahiro Furuya, Daiki Tanaka. Direct access and recovery feature of solid precipitates embedded in a microfluidic device (2026), *Lab on a Chip* 26(4), 852-863.
- Yosei Ota, Shun Nukaga, Yuna Kanda, Masahiro Furuya. Explainable Machine Learning for Bubble Leakage Detection at Tube Array Surfaces in Pool. (2025) *Applied Sciences*, 15(23).
- Faisal bin Nasser Sarbaland, Masashi Kobayashi, Daiki Tanaka, Risa Fujita, Nobuyuki Tanaka, Masahiro Furuya. Temperature Control in Microfluidic Devices: Approaches, Challenges, and Future Directions. (2025) *Applied Sciences* 15(18).
- Shun Nukaga, Masahiro Furuya. Multi-dimensional condensation behavior during ingress of coolant event experiments for fusion reactors with TRACE code. (2025) *Fusion Engineering and Design*, 217.
- Faisal bin Nasser Sarbaland, Masashi Kobayashi, Daiki Tanaka, Risa Fujita, Masahiro Furuya. Redefining Quantum Dot Synthesis with Additive-Manufactured Microfluidics—A Review. (2025) *J*.
- Daiki Tanaka, Masashi Kobayashi, Risa Fujita, Dong Hyun Yoon, Tetsushi Sekiguchi, Takashiro Akitsu, Shuichi Shoji, Takashi Tanii, Masahiro Furuya. Synthesis and isolation of metalloprotein on a super water-repellent umbrella-shaped pillar array with double re-entrant structure. (2025), *Soft Matter* 21(12), 2251-2257.

4.2 口頭発表

- Masashi Kobayashi, Kohei Yamanaka, Daiki Tanaka, Risa Fujita, Shuichi Shoji,

Masahiro Furuya. Droplet Flow Sensor to Acquire Transient Temperature Distribution, Droplet Position, And Velocity in Microchannel. (2025) 23rd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers, 1323-1326.

- Daiki Tanaka, Masashi Kobayashi, Risa Fujita, Tetsushi Sekiguchi, Takashiro Akitsu, Shuichi Shoji, Takashi Tanii, Masahiro Furuya. Synthesis And Crystallization of Metal Complexes Containing Proteins in Microfluidic Devices Dedicated for Both Liquid and Solid (2025). 23rd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. 1347-1349.

4.3 招待講演

- Masahiro Furuya. Regional and Core-Wide Stability of Natural Circulation and Forced Circulation BWRs. CAMP Virtual Technical Information Exchange on Boiling Water Reactor Stability, USNRC, September 17, 2025.
- Masahiro Furuya. Natural Circulation BWR with Chimney. CAMP Virtual Technical Information Exchange on Boiling Water Reactor Stability, USNRC, September 17, 2025
- Masahiro Furuya. Experimental Method of Artificial Void-Reactivity Feedback and Stability Evaluation. CAMP Virtual Technical Information Exchange on Boiling Water Reactor Stability, USNRC, September 26, 2025.
- Masahiro Furuya. TRACE Validation of Flashing and Type I Density Wave Oscillations, CAMP Virtual Technical Information Exchange on Boiling Water Reactor Stability, USNRC, March 4, 2025.
- 古谷正裕「機械学習×熱・流体工学の最先端 沸騰・混相流×機械学習」, 日本機械学会 熱工学部門・流体工学部門・計算力学部門, 2026年3月3日.
- 古谷正裕「学習済みネットワークから根拠を学ぶー 実験と数値流体力学シミュレーション結果の可視化画像の機械学習法と説明可能性」, 日本機械学会関西支部第26回秋季技術フォーラム, 2025年10月25日.

5. 研究活動の課題と展望

今後は開発した計測・制御技術を活用し、実験とシミュレーション、機械学習を融合した予知保全法の開発やプラント機器の設計研究を行う予定である。