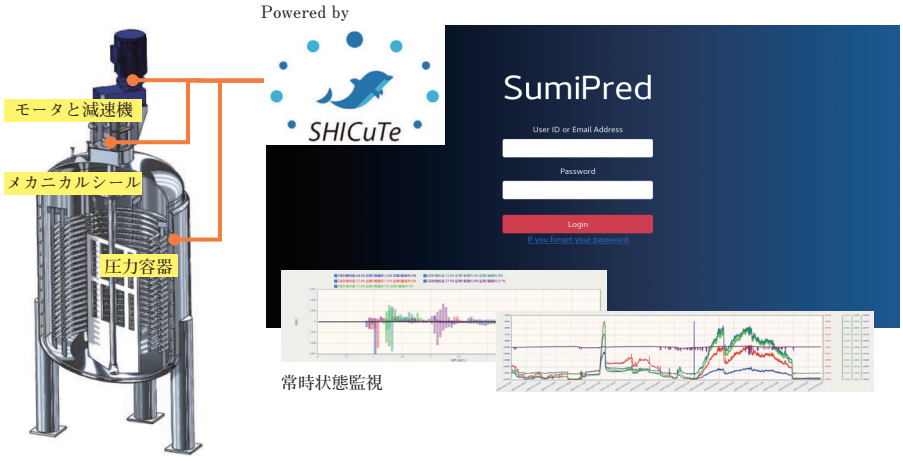
撹拌リアクターの状態監視ソリューション

Condition Monitoring Solutions for Agitator Reactors

●蒋　　雍*
Yong JIANG



撹拌リアクターの状態監視システム
Condition monitoring system for agitation reactors

本報では，化学プラントの撹拌リアクターにおけるメカニカルシールの状態監視技術について述べる。撹拌リアクターは生産効率や製品品質に大きな影響を与えることから，その安定稼働は特に重要である。なかでもメカニカルシールの状態監視は重要視されているにもかかわらず，従来手法では不十分であり，実用レベルでの有効なアプリケーションがまだ確立されていない。住友重機械プロセス機器株式会社では，アコースティックエミッション(AE：Acoustic Emission)技術の活用と処理手法の進化により摺動面における負荷や振動特徴を高次元パラメータで表現することを可能とし，さらに機械学習により変化度という指標を作成することで状態変化の可視化に成功した。

This paper presents a condition monitoring technology for mechanical seals in agitator reactors used in chemical plants. Given the significant impact of agitator reactors on production efficiency and product quality, their stable operation is particularly crucial. Among these components, mechanical seal monitoring is of paramount importance; however, conventional methods remain inadequate, and effective, practical-level applications have yet to be established. By leveraging Acoustic Emission (AE) technology and advances in data processing techniques, we have achieved high-dimensional parameter representation of load and vibration characteristics on sliding surfaces. Furthermore, utilizing machine learning, we successfully created an indicator called "change degree" to visualize state changes in real-time.

1　まえがき

撹拌リアクターは，化学プラントにおいて生産効率や製品の品質に影響を与える重要な設備である。特に，化学反応を担うメインリアクターのトラブルは工場全体の操業に甚大な影響を与えることから，点検および整備は怠ってはならない。しかしながら，一般の検査手法では不具合を検出できず，突発的な事故に発展するケースも少なくない。復旧には多くの時間と費用がかかることが多いので，効率的かつ確実な状態監視が求められている。

住友重機械プロセス機器では，撹拌リアクターの駆動部における不具合や容器の破損といった異常の予兆を早期に検出する総合的な状態監視ソリューションおよびそれらを用いたアフターサービスの提供に取り組んでいる。

1.1　常時状態監視の役割

従来の設備監視の目的は，早期異常検出や突発事故防止によるユーザの安定した操業を支援することにあった。近年では，このリスク低減という利点に加え，常時状態監視の導入によって連続的に得られる時系列データの新たな価値を創出する可能性が注目されている。たとえば，実際の運転負荷を把握することで，運転方法の改善点や設計上の妥当性を検証することが可能となる。これにより，ユーザは設備の制御を最適化でき，住友重機械プロセス機器はより適合する設計へと改良を進めることができる。本報では，メカニカルシールに焦点を当てた状態監視技術について紹介する。

1.2　メカニカルシール

撹拌リアクターには，反応槽内での化学反応を効率的に行うために撹拌軸と撹拌翼などが装備されている。このことから，撹拌リアクターは内部圧力や温度に耐え，反応物を外部に漏らさずに密封状態を維持する必要がある。この密封の役割を担う部品が**図 1** に示すメカニカルシールである。

＊住友重機械プロセス機器株式会社

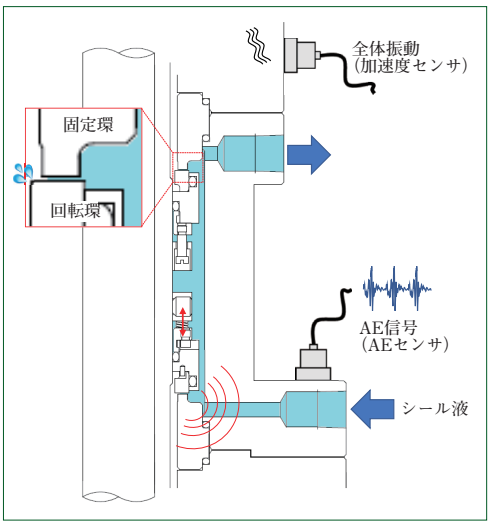


図1　メカニカルシールの概略図
Schematic outline of mechanical seal

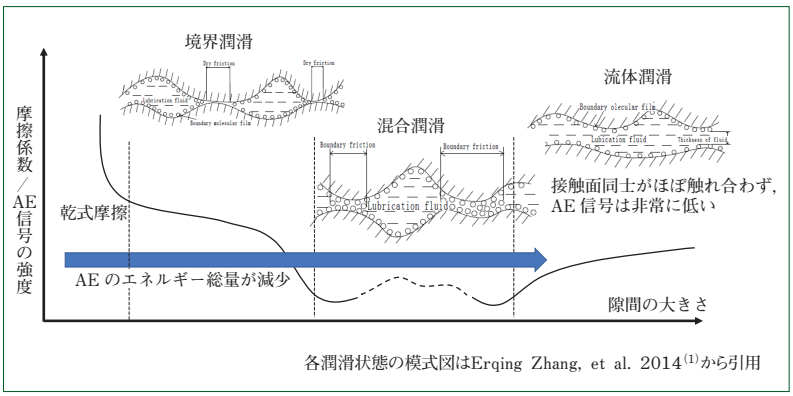


図2　潤滑状態と AE信号
Lubrication condition and AE signal

メカニカルシールには，反応槽内の有害物質が外部に漏れ出ないよう，高圧の条件に耐えるシール液が充填されている。このシール液は，シールを構成する固定環と回転環（摺動材）の間に保持され，摺動部の潤滑や冷却機能を果たしている。通常，シール液の消耗は微量にとどまるが，摺動材の摩耗や摺動部の損傷によってシール液が槽内に漏出する「メカ漏れ」が発生することがある。最悪の場合，シール液がすべて流出し，反応槽内の有害物質が大気中に漏出するというリスクも伴う。

設計段階において，ユーザによる運転方法の違いや，運転条件が多岐にわたることから，動的条件も考慮した高精度な性能設計は至難である。実際の運用における複雑な現象に適合できずに故障が頻発し，改善がなかなか進まない設備も存在する。さらに近年，既存の装置を新しい製品製造に利用するケースが増え，運転条件の複雑化が進むことで不具合リスクが増大している。このような突発的なトラブルを未然に防ぎ，複雑な条件に対応するために高度なセンシング技術を活用して早期の異常兆候を監視し，予防保全を行うことが求められている。

メカニカルシールの作動状態を診断することが難しい理由は，その構造にある。メカニカルシールは，固定環と回転環が軸方向に互いに押し付けられる構造であり，半径方向は半自由なことから固定環や回転環から発生する振動が外部に伝わりにくい。特に撹拌リアクターにおいては低回転で作動するため，振動センサによる監視が困難であるうえ振動センサを設置できる箇所も限られている。メカニカルシールでは，ベアリングのように損傷を振動データで検出することは難しい。さらに，メカニカルシールのシール性能低下は損傷だけでなく，摺動部に汚れが付着して動作が妨げられることなど，ほかの要因によっても生じる。大きく分けて，摺動材が損傷するケースと摺動面の追従性が低下するケース，あるいはこれらが同時に発生するケースが考えられる。このことから，摺動材と摺動面の両方の変化を検出可能な技術が必要となる。

2　アコースティックエミッション (AE)

AEは，物体内部での亀裂や変形に伴う弾性エネルギーの放出が超音波として放出される現象である。AE技術は構造物や材料内部で発生する損傷の発生をリアルタイムで検出する非破壊検査手段として実用化されている。

2.1　メカニカルシールにおけるAE技術

メカニカルシールの摺動面においては，摩擦や摩耗といったトライボロジー現象はAEが伴い，AE信号の強度や周波数特性を調べるなど，AEの解析技術を用いることで摺動面における摩擦や摩耗状態を監視することが可能となる。たとえば，摩耗が進行するとAE信号は高周波成分を含むようになり，摩擦の増加に伴って低周波成分が増加することが確認されている(1)(2)。**図2**に示すように，摺動面の潤滑状態によりAEの発生量が変化する。

2.2　計測処理技術

従来技術は，主にトライボロジー現象に注目して摺動材の損傷を監視するものであるが，摺動面の追従性低下や摺動部の機械的動作の変化については十分に考慮されていない。住友重機械プロセス機器は，それら両方に対処できるAE信号の処理方法と計測処理装置を開発した。具体的には，トライボロジー現象の変化によって生じるAE信号の強度変化を摺動部の負荷変動として捉えることで，損傷リスクの高い状態を把握することが可能となる(3)。また，機械運動や相互作用によりAEが伴うことから，AE信号から摺動部の振動特性を抽出することができた。両方に対応できる高次元な特徴パラメータはリアルタイムで計測処理装置により計算される。

3　機械学習による変化検出

摺動部におけるAE信号の強度は，設備の設計や運転条件によって異なることから，すべての機器に適用できるような「一般的な正常範囲」は存在しない。また，AE信号から摺動部の負荷を評価するには，複数の特徴パラメータで構成される高次元データが必要であり，それを直接人間が見て理解することは困難である。さらに，振動特性に関しても，特定の周波数成分のみを監視することは現実的ではない。このことから，変化の度合いを定量的に分析し，異常を検出するために機械学習を採用した。

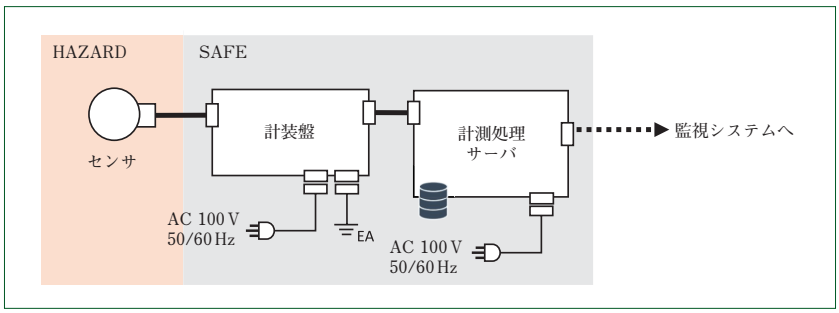


図 3　計測システム
Measuring system

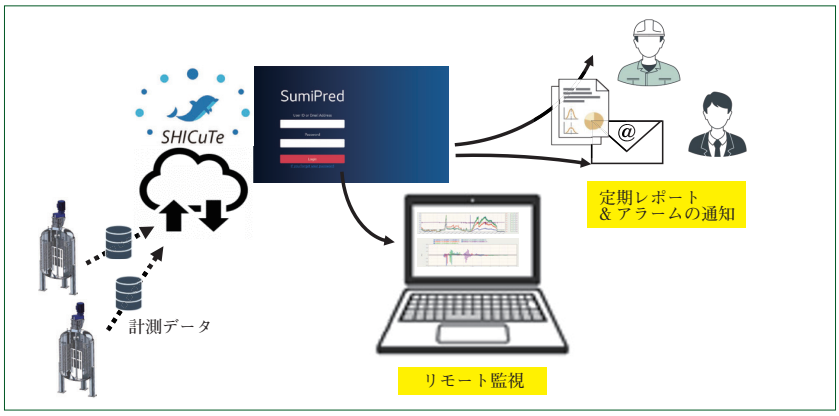


図 4　クラウド監視システム SumiPred
Cloud monitoring system SumiPred

最初に正常状態の初期データを収集し，それを用いて機械学習で正常範囲を定義する。以降のデータは，この初期データ空間との類似性をもとに，正常範囲に属する確率が計算される。最初はこの確率の閾値を厳しく設定し，運用が進むにつれて調整を行う。これにより，初期段階では微細な変化にも高感度に反応し，運用が進むにつれて必要なレベルに近づいていく仕組みとなっている。

複雑なAEから実用的な指標である変化度を生成し，その傾向をリアルタイムで監視することにより，気付かないうちに進行するトラブルの早期発見につなげる。長期間のデータから変化が認められる際に，次のステップとしてAE特徴パラメータの変化パターンを詳細に調査する。装置の分解検査で得られた知見と合わせることで，発生した問題を特定の不具合パターンに関連付けることが可能である。これによりAE信号のデータ分析は，従来のリアルタイム監視から一歩進み，不具合の根本原因を理解するための補助ツールとして機能する。最終的に，不具合のリスクを定量的に評価することが難しい場合でも，定性的に評価することで実用レベルでの改善が期待できる。

4　状態監視システムの構成

状態監視システムは，計測システムと監視システムから構成されている。

4.1　計測システム

計測システムはセンサ，計装盤，計測処理サーバから構成され，それぞれは有線接続となる（**図３**）。外部振動が原因のトラブルとメカニカルシール内部でのトラブルを区別すべく，AEセンサに加えて振動センサを装備している。

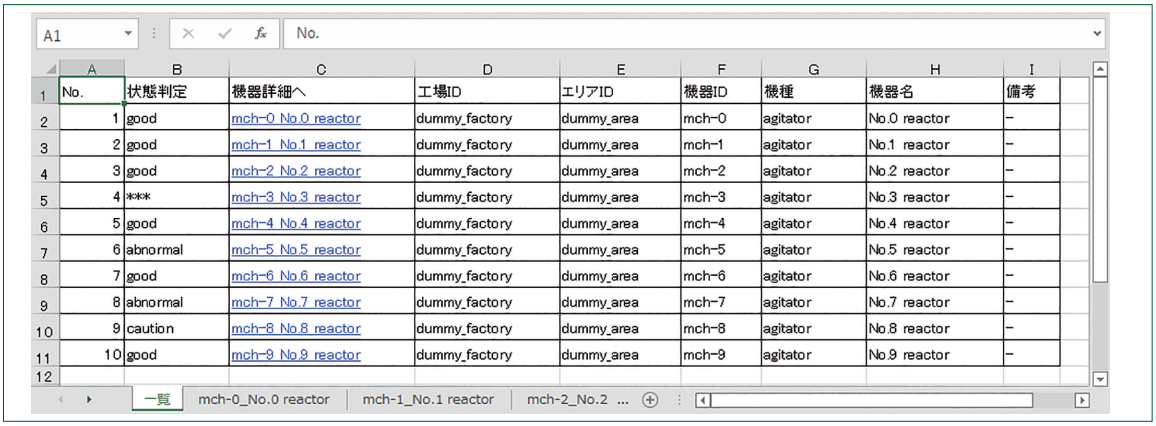
作動中のメカニカルシールの全体振動および内部で発生するAE信号を計測し，計測処理サーバで摺動面にかかる負荷や摺動部の振動特徴を示す特徴パラメータをリアルタイムで算出する。回転数やモータ電流値などのプロセスデータの取得には，PLC（Programmable Logic Controller）と計測システムとの連携も推奨される。これにより，計測された振動や負荷データがより豊富なデータセットとして機械学習モデルに活用され，精度の高い異常検出が可能となる。

さらに，機械学習モデルを実装することで，特徴パラメータやプロセスデータをインプットして，リアルタイムで変化度をアウトプットするセンサとして機能させることができる。

4.2　監視システム

住友重機械プロセス機器では，住友重機械グループの共通基盤プラットフォーム「SHICuTe[4]」を利用したクラウド型監視システム「SumiPred」を開発している（**図４**）。SumiPredは，必要十分なデータ可視化機能を備え，変化度や一部のパラメータを使用して時系列のトレンドを確認し，過去と現在のデータを重ねて比較することができる。また，設備の状態を日次で自動判定するメール日報機能も搭載しており，前日のデータと比較して「正常」「注意」「異常」のいずれかの判定結果を設備管理者へ通知する機能を備えている。

計測システムは，ユーザが独自にデータの可視化や監視システムを構築する場合にも対応可能である。さらに，ユーザのニーズに応じて，指定されたほかの可視化システムとの接続も可能であり，特定要件に基づいた柔軟なカスタマイズが提供できる。



No.	状態判定	機器詳細へ	工場ID	エリアID	機器ID	機種	機器名	備考
1	good	mch-0_No.0 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-0	agitator	No.0 reactor	–
2	good	mch-1_No.1 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-1	agitator	No.1 reactor	–
3	good	mch-2_No.2 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-2	agitator	No.2 reactor	–
4	***	mch-3_No.3 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-3	agitator	No.3 reactor	–
5	good	mch-4_No.4 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-4	agitator	No.4 reactor	–
6	abnormal	mch-5_No.5 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-5	agitator	No.5 reactor	–
7	good	mch-6_No.6 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-6	agitator	No.6 reactor	–
8	abnormal	mch-7_No.7 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-7	agitator	No.7 reactor	–
9	caution	mch-8_No.8 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-8	agitator	No.8 reactor	–
10	good	mch-9_No.9 reactor	dummy_factory	dummy_area	mch-9	agitator	No.9 reactor	–

図5　日報 Excel ファイルの機器一覧
Equipment list for daily report of Excel file

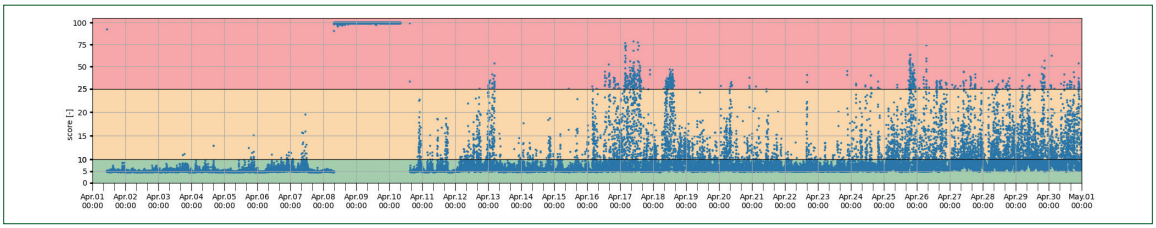


図6　変化度の時系列グラフ
Time series graph of condition variation

5　運用のイメージ

SumiPredの日報メールには，機器の判定結果をまとめたExcelファイルが添付されている。このExcelファイルの一覧（**図5**）で「正常（good）」「注意（caution）」「異常（abnormal）」を確認することができる。各機器の詳細ページに進むと，変化度の時系列グラフ（**図6**）を確認できる。正常な状態であれば，変化度スコアは0～10の範囲内で安定するが，状態が悪化するとスコアが大きくなる。スコアが25以上になると，正常な状態から大きく逸脱していることを示す。ここで，機器の状態は瞬間的なスコアではなく長期間にわたるスコアの傾向によって評価されることに注意していただきたい。高いスコアが増加している場合は，詳細な診断が必要となり，状態がさらに悪化すると全体的に赤い範囲へシフトすることが予想される。日報では1日の変化度スコアを分単位でプロットするが，SumiPredにアクセスすることで，より長期間のデータを1時間や1日単位で確認し，長期的な傾向を把握することができる。

注意や異常が判定された機器については，住友重機械プロセス機器が詳細な診断を行い，機械の不具合の可能性についてのレポートを提出する。詳細診断は計測処理サーバに蓄積されたパラメータデータを分析して行う。

6　今度の展望と課題

撹拌リアクターの状態監視技術は今後さらに進化し，設備の健全性だけでなく，より高度な予測制御や製品品質に関わる自律的な最適運転への応用が期待される。特に，機械学習を活用した高速シミュレーション技術により反応の最適化や異常予測の精度が向上し，効率的で安全な運転が可能となるだろう。それらを目指すには十分な導入実績とデータの蓄積が必要であるが，導入するには工期や費用などの初期投資が高額になることが問題である。このことから，低コストで既存設備に導入しやすいソリューションの開発が今後の課題となる。また，設備単位の状態監視にとどまらず，制御データやほかの設備のデータと連携することで，さらなる知見を得ることが可能だが，それにはエンドユーザやエンジニアリング会社の協力が不可欠である。このほかデータ活用の意識向上や社内教育，人材育成も必要であり，設備をシステムにつなげることで得られる潜在的なデータの価値を認識し，IoTによる状態監視システムの価値を最大限に引き出すことが重要である。

7　むすび

AE技術を活用した状態監視システムにより，メカニカルシールの運転中の状態変化，異常の予兆監視をできるようになった。データ蓄積が進むことで，より具体的な診断が可能となり，将来的には余寿命予測が期待できる。

（参考文献）
(1)　Erqing Zhang, et al., Mechanical Seal Opening Condition Monitoring Based on Acoustic Emission Technology, Sensors & Transducers, 172-6 (2014), 139-146.
(2)　Jinxin Chen, et al., Study on the Friction Behavior and Abnormal Conditions of Non-Contact Mechanical Seal based on Acoustic Emission, Tribology Letters, 72-71, (2024).
(3)　蒋雍，大西功一郎，小川雅史，診断装置，診断方法，診断プログラム，特開 2023-119674.
(4)　明渡豊，村上憲司，住友重機械グループ共通基盤プラットフォーム SHICuTe，住友重機械技報，209 (2023), 1-4.

※「SHICuTe」は，住友重機械工業株式会社の登録商標です。