

プロセスダイナミクス

第2回 オンライン PSI そして周波数解析

はじめに

前回は、PIMS (Plant Information Management System) で収集された時系列データに、AI 技術としても評価されているクラスタリング技術を適用することで、プラント運転の安定性/不安定性を検討する方法を、実例を交えて説明した。

また、我々が開発したクラスタリング解析結果から安定性/不安定性を定量化する PSI (Process Stability Indicator: プロセス安定性指標) も、紹介した。

プロセスを幾つかのセクションに分けて、それぞれのセクションでの PSI を評価すると、プロセス全体の運転が以前より安定なのか不安定なのか、あるセクションの不安定さが他のセクションに影響を与えているか、などの更に突っ込んだプロセス運転の安定性/不安定性検討が、精度よく定量的に実施できることも、説明した。

また、PSI の結果から判断する 5 段階の安定性評価により、そのセクションの運転が“安定・少し不安定・不安定・かなり不安定・たいへん不安定”か、プログラムにより判断できることも示した。これにより、安定性/不安定性の評価がエンジニアの技術力や経験に頼らないため、経験や知識不足のエンジニアであっても、正確な評価を導くことが可能となる。

今回は、開発したクラスタリングアプリケーションで自動生成されるレポートについて、初めに説明する。その後で、オンラインクラスタリング、またウェブレット変換を基にした周波数解析について説明する。

1. 簡単に前回のおさらい

1) プロセスプラントの運転が不安定であるという事は、装置や機器のダイナミクス (動特性) が不安定だという事である。しかし、プロセスエンジニアやオペレーションエンジニアにとって、自分が担当する装置のダイナミクスを理解することは難しい。また、ダイナミクスをどのように捉えれば良いか、その指針さえ得られない。

2) 装置運転のデータを収集に係るシステムとしては DCS (Distributed Control System) と PIMS (Plant Information Management System) がある。DCS では、短期間のデータを表示できるが、ダイナミクスを把握する機能はない。PIMS は、FFT (高速フーリエ変換) などの初歩的なダイナミクス把握機能は有しているが、その計算結果の判断はエンジニアに委ねられている。

3) 装置・機器のダイナミクスは、トレンド画面の表示によって把握しようとするが、プロセスの安定/不安定を評価するなら、そのユニットに係る全ての Tag を表示しなければならず、現状の DCS や PIMS では不可能である。また、もし全 Tag のデータを表示できたとしても、そこから安定/不安定を読み取ることは不可能に近い。

4) AI 技術の一つでもある“クラスタリング”では、与えられたデータを複数のクラスタ

に割り振ることでデータの分類を行うため、その結果から別の結論を推測することが可能となる技術である。例えば、アヤメの花弁の長さや花弁の幅で分類するだけで、アヤメの種類に関する情報がなくても、ほぼ正確に種類ごとに分類できる。

5) このクラスタリングは、プロセス運転においてはフォールトディテクション(異常検知)に適用されている。クラスタリングを適用した実例として、①APC(高度制御)による運転安定化の確認、②運転不安定期間の正確な同定、③バッチ運転のサイクルでの安定/不安定期間の同定、④連続運転の中に存在する周期変動の検知、などを示した。

6) クラスタリングの結果を定量的に評価するために、新しい指標としてPSI(Process Stability Indicator)を開発した。PSIの結果は、次の5段階で評価される。

| | |
|------------------|---------------------------------|
| 100% ≧ PSI > 90% | 安定している (Stable) |
| 90% ≧ PSI > 80% | 若干不安定である (A little Unstable) |
| 80% ≧ PSI > 70% | 不安定である (Unstable) |
| 70% ≧ PSI > 60% | かなり不安定である (Very Unstable) |
| 60% ≧ PSI | たいへん不安定である (Extremely Unstable) |

7) PSIとその評価を使う事で、エンジニアの主観に頼らないプロセス運転の安定性/不安定性評価が可能となった。また、時間において適用することにより、装置運転が安定方向に向かっているのか、不安定方向に向かっているのか、そのような評価も行える。

2. CPCon パッケージ

我々が開発したアプリケーションパッケージは、“CPCon”と呼ばれる。

CPConは、データ解析及び解析結果を応用する機能として以下を含んでいる。

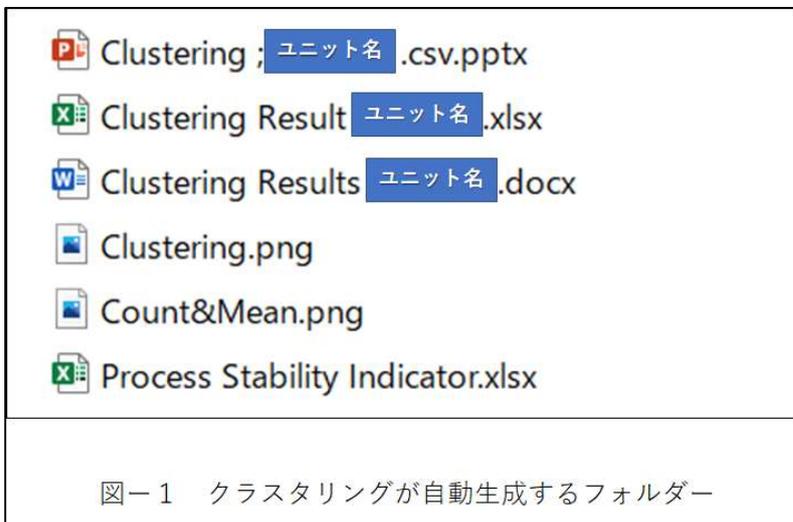
- 1) クラスタリングによる時系列データ解析
- 2) PSI計算とその結果による安定性/不安定性評価
- 3) オンラインでのクラスタリング計算とPSI評価
- 4) ウェーブレット変換による周波数ごとのノイズの切り分け
- 5) 各ノイズのフラクタル次元計算結果による周期変動解析
- 6) HFSI (High Frequency Stability Indicator) 計算とその結果による高周波帯での安定性/不安定性評価
- 7) オンラインでのウェーブレット・フラクタル計算とHFSI評価
- 8) インパルス応答をベースとしたSISO (Single Input Single Output) モデル予測制御
- 9) SISOモデル予測制御を使った安定化制御とPLS (Partial Least Square : 部分最小二乗法) による品質制御

この中で、6)以下は次回以降の説明となる。

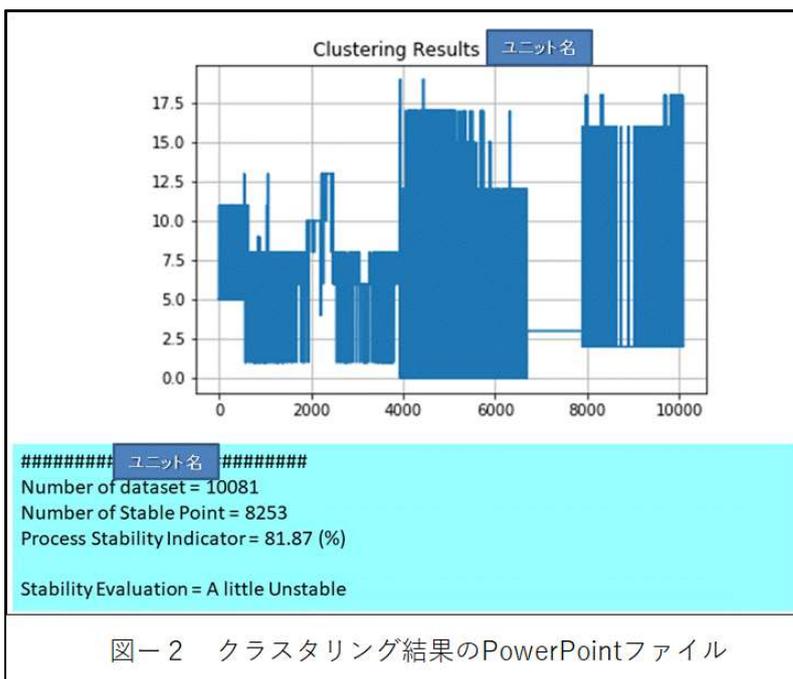
また、プロセスエンジニアのレポートングに対してサポートする機能も付いている。次に、そのサポート機能について説明しよう。

3. クラスタリング計算・PSI 評価サポート機能

CPCon のクラスタリングアプリケーションを適用すると、図-1 に示されるファイル群がユニット名を付けた新規フォルダーの中に自動生成される。



1) PowerPoint ファイル (図-2) : クラスタリング計算結果のトレンドグラフ及び PSI 計算・評価結果を含んだファイル



2) Excel ファイル (図-3) : クラスタリングに使用したデータと計算結果 (クラスタ毎のカウンタ数、それぞれの平均値) を含んだファイル

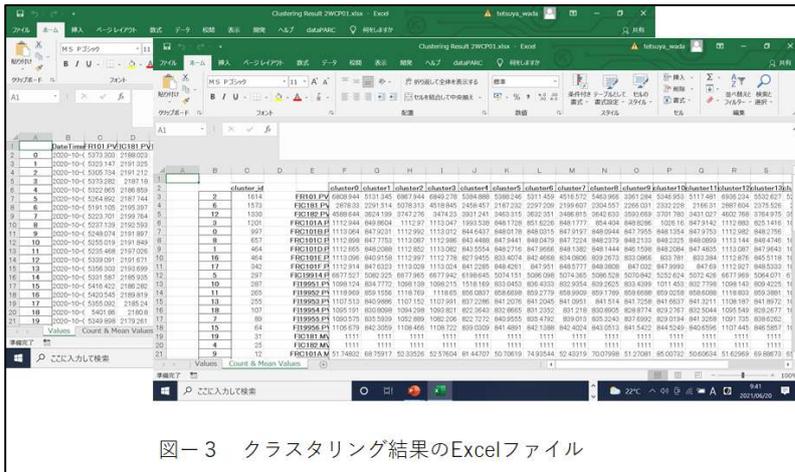


図-3 クラスタリング結果のExcelファイル

3) Word ファイル (図-4) : クラスタリングに使用した Tag 数、Tag 名とそれぞれの単位、データ数、データのスタート・エンド時間、クラスタリング計算を実行した時間、などの基本情報と、結果のトレンドグラフ、クラスタ毎のカウンタ数・平均値のグラフ、そして PSI 計算・評価結果を含んだファイル

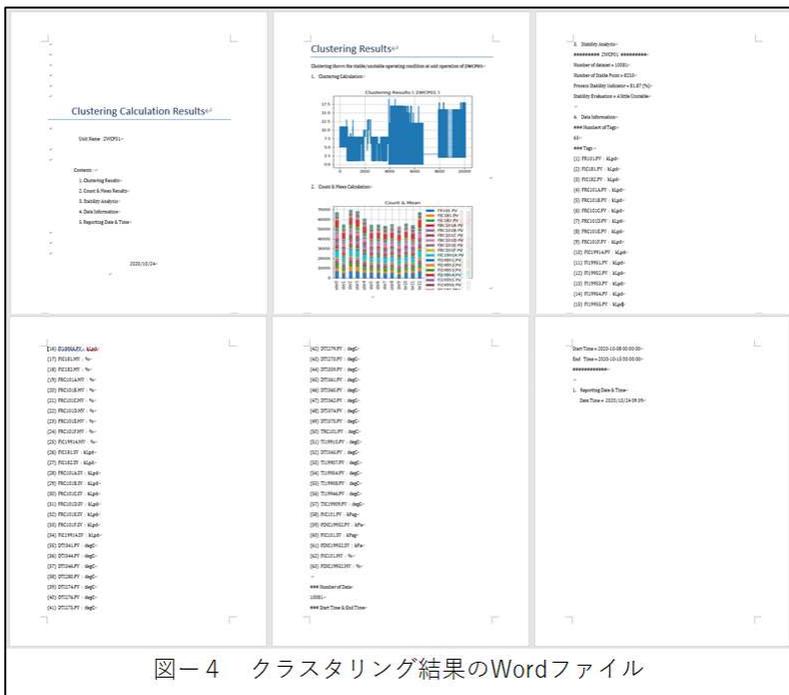


図-4 クラスタリング結果のWordファイル

ユーザーは、この3つのファイルを使うことで、報告書が容易に作成できる。また、Word ファイルは、そのまま報告書としても使用可能である。同じテンプレートのファイルを使う事で報告形式を統一できるため、データ解析の報告にエンジニアの主観が入らず、また他のエンジニアの報告でも容易に理解できる。更にカスタマイズした報告書を作成したいエンジニアのために、クラスタリング結果のトレンドグラフ、クラスタ毎のカウンタ数・平均値のグラフ、そして PSI 計算結果 Excel ファイルも個別にフォルダー内に生成されている。

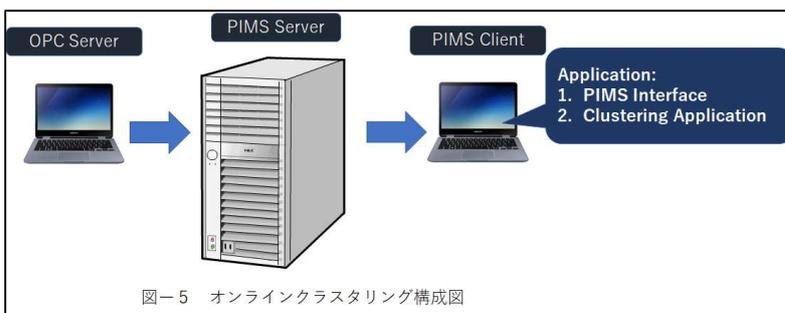
4. オンラインクラスタリング・PSI 評価

現状でプロセスエンジニアがデータ解析をする場合、PIMS の機能では不十分なので、PIMS から過去データを Excel ファイルにダウンロードして、その Excel ファイルのデータを使って色々な検討を行うのが、最も一般的なやり方である。そして、この作業に意外と手間取っている。

なぜ PIMS のデータを直接データ解析用のアプリケーションに通信できないのか、それは殆どのアプリケーションに PIMS から直接データを取得する機能がないからだ。そのために、エンジニアはデータを手動で橋渡ししなければならない。これは全くバカげたことだ。

我々が開発した CPCon には、このオンラインで PIMS からデータを自動取得する機能も付加されている。

図-5 は、CPCon が PIMS からデータを取得するシステムの構成図である。ここでは省略したが、OPC サーバーは DCS に繋がっている。



PIMS サーバーは、OPC サーバー経由で DCS からプロセス運転データを取得し、保管する。その PIMS サーバーに保管されたデータを取り出してトレンド画面などに表示するのが、PIMS クライアントの役割である。

CPCon のオンラインクラスタリング・アプリケーションは、全てこの PIMS クライアント上にインストールされる。その内容は、PIMS クライアントからデータを取得するためのインターフェースアプリケーションと、そのデータを使って計算を実行しフォルダーやファイルを自動生成するクラスタリングアプリケーションである。

PIMS には色々なアプリケーションがあり、よく使われているのは PI (OSIsoft)、IP21 (Aspen Tech)、Uniformance (Honeywell)、dataPARC (Capstone) である。CPCon のインターフェースアプリケーションは、それら PIMS に対応しており、PI は旧バージョンでもインターフェース可能である。

CPCon は、PIMS クライアントからデータ収集するため、PIMS クライアントに制限があれば、制限以上のデータ収集は行わない。つまり、CPCon でデータ収集した場合、PIMS サーバーに設計以上の余分な負荷をかけることはない。

CPCon では、インターフェースアプリケーションで収集されたデータは、そのままクラスタリングアプリケーションで処理されるため、エンジニアの介在は必要ない。エンジニアは、

クラスタリングを適用するユニットと、そのユニットに係る Tag 名を前もってシートに記入しておけば、CPCCon が自動でシートを読み込み、そこに記載されている Tag 名を使ってデータ収集を行い、クラスタリングを実行する。データ収集の期間と幅は任意に設定できる。また、標準として CPCCon を稼働させた時点から 2 週間前までの 1 分データの収集が設定されている。

更に、クラスタリングアプリケーションには、“3. クラスタリング計算・PSI 評価サポート機能”で説明した機能を全て付帯している。

つまり、計算結果や関連するデータは、自動生成されるフォルダーの中に、PowerPoint ファイル、Excel ファイル、Word ファイルそして画像ファイルとして、格納される。

だから CPCCon では、アプリケーションを起動させるだけで、予め決められた Tag と期間のデータ収集、収集されたデータを使ったクラスタリング計算と PSI 計算・評価、

そしてその結果を含む報告用のファイル群までが、自動で実行・生成されるのである。

エンジニアにとっての見せ所は、今までのような手間暇かけたプロセス運転の安定性/不安定性の評価ではなく、一歩進んで、不安定だと同定されたユニットでの不安定要因の同定と原因の追究になるだろう。

5. 周波数解析によるダイナミクスの同定

プロセス装置を稼働させるためには、装置を構成するポンプ・コンプレッサー・加熱炉・蒸留塔などの機器を個々に動かさなくてはならない。ただし機器を動かすだけでは、求められる性能を出すための運転を実行することは難しい。求められる性能を出すためには、流量、温度、圧力などを正しく制御して、個別機器の性能を発揮させなければならない。

Dale E. Seborg らが書いた「プロセス・ダイナミクス&コントロール：工業技術社刊、訳和田哲也ほか」では、プロセス・ダイナミクスがなぜ必要なのか説明するために、第 1 章からプロセスコントロールを取り上げている。その冒頭を紹介しよう。

「最近、要求される性能を満足して、プロセスプラントを運転することが大変難しくなってきた。我々は、競争の激化、環境や安全面での規制強化、急激に変化する経済環境などの要因によって、製品性状を厳しく規定し、運転しなければならない。さらに最近のプロセスは、大規模かつ高度に集中化されているにもかかわらず、プロセスユニット間には小さなサージドラムしか設置されていないため、これが運転に対して、より以上の複雑さを生み出している。このようなプラントでは、あるユニットから他のつながったユニットに、運転変動が容易に伝わってしまう。そこで安全に、効果的にプラントの運転を行うために、運転におけるプロセスコントロールの重要性が年を追うごとに高まっている。事実、最先端プロセスをプロセスコントロールなしで、製品性状を満足した上で、安全に、効率的に運転することは、ほとんど不可能に近い。」

ここに書かれているのは、プロセスを安定に制御しなければ、プロセス運転上の製品品質、安全、効率化は満足できないという事である。

それでは、“安定な制御”とは何か？

我々は、“安定な制御”とは“制御系に係る外乱の影響を最小化し、期待通りの結果を出す制御”であると考え。だから、外乱の影響を正確に同定すれば、制御系の安定性/不安定性は検討できるだろう。

制御系に影響する外乱は、2種類考えられる。一つは、例えば原料供給量の低下、燃料ガス圧力の上昇、などのステップ入力として捉えられる外乱である。この外乱は、制御系を設計する際に事前に考慮されている外乱であり、制御系はこの外乱による変動を速やかに治めるように設計されている。だから、プロセスエンジニアは制御系の応答性のみを検討すれば良く、この外乱に対する安定性/不安定性の検討は必要ない。

二つ目は、一般的には“ノイズ”と呼ばれている外乱である。このノイズには、電子機器などによる本来プロセス運転とは関係ないノイズと、他の機器や制御系の変動が引き起こすノイズがある。前者のノイズは、ホワイトノイズ（無視して構わないノイズ）である。後者のノイズは、ブラックノイズ（無視できないノイズ）またはグレーノイズ（無視すべきではないノイズ）である。

ホワイトノイズとブラックノイズ（グレーノイズ）の違いは、ホワイトノイズは周波数帯全域に同じように影響を与えるのに対して、ブラックノイズ（グレーノイズ）は特定の周波数帯のみに影響を与える、という事である。プロセス運転の制御に関して考慮しなければならないのは、ブラックノイズ（グレーノイズ）だ。

ただし、このブラックノイズ（グレーノイズ）がプロセス運転の低周波帯に影響を与えている場合は、ステップ入力に対する制御と同様に考えればよい。考慮しなければならないのは、このノイズがプロセス運転の高周波帯に影響を与えている場合であり、その場合はノイズが制御系の応答自体に変動を与えてしまうため、より詳細に原因を追究して、その原因を修復する必要がある。

だが、周波数帯毎のノイズやその仕分けと言っても、読者や一般のプロセスエンジニアは何をすればよいか分からないだろう。

その答えの一つであり最も効果的な技術は、ウェーブレット変換であると考え。

我々は、コンサルティングやCPConの導入を行った多くの工場で、プロセス運転上のノイズの分析にこのウェーブレット変換を適用して、今まで十分な効果を上げてきた。

6. ウェーブレット変換

プロセスの運転データは、時系列データとしてクラスタリングを用いた安定性/不安定性の解析が可能である事は、以前述べた。

ただし、プロセスの運転データを別の角度で見ると、最終的なトレンド成分に、低周波帯から高周波帯に渡り幾つものノイズが包含されたデータである、とも言える。

例えば、図-6では、中央のなだらかな波形がトレンド成分であり、大きく変動している実データは、そのトレンド成分に複数のノイズが包含されたものである、と考えられる。

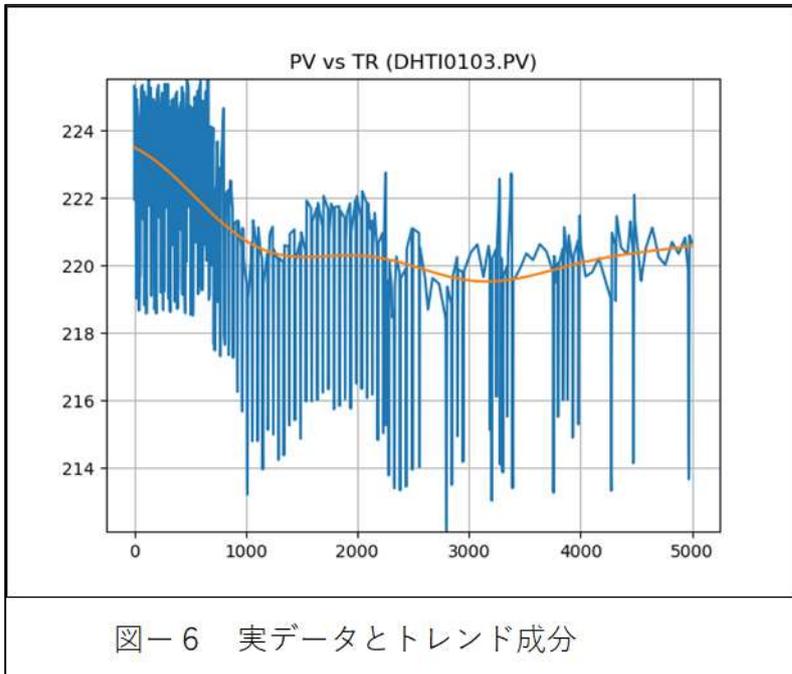


図-6 実データとトレンド成分

だから、ノイズが原因となる変動を考慮するときは、周波数帯毎にノイズを切り離して、切り離した個々のノイズの変動度合いを検討する必要がある。

では、どうやって周波数帯毎のノイズを切り離せばよいか。その回答を与えてくれるのが、ウェーブレット変換なのである。

ウェーブレット変換とは、ウェーブレットと呼ばれる波形を使って、高周波帯からノイズを順次切り離していく技術である。図-7は、よく使われるウェーブレット波形である。この波形は、開発者の名前を付けて Meyer ウェーブレットと呼ばれる。

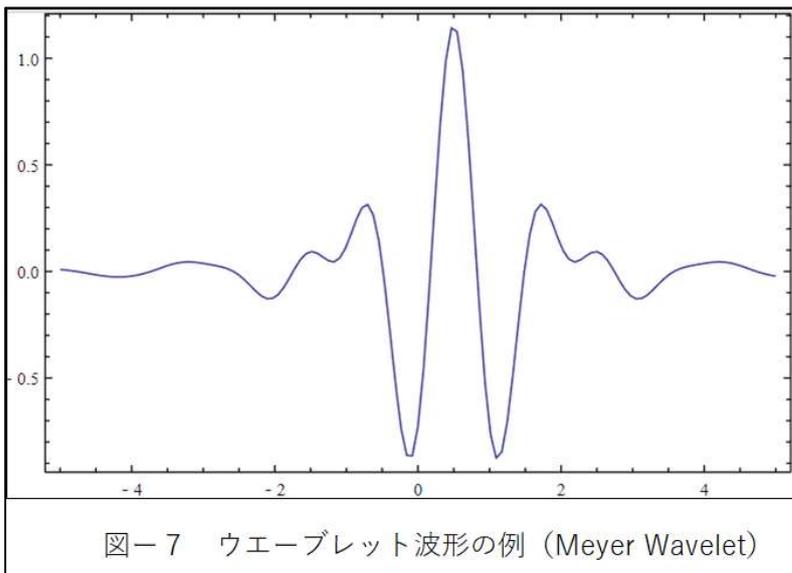


図-7 ウェーブレット波形の例 (Meyer Wavelet)

離散系で使う場合は、この波形を一定間隔で数値化してやればよい。ただし、その数値の合

計が0（ゼロ）になることが重要である。

図-8は、ウェーブレット変換を適用して切り離されたノイズの例である。この例では、ウェーブレット変換を10回適用して、高周波帯から低周波帯までのノイズを切り離している。①が最も高周波帯のノイズであり、⑩が最も低周波帯のノイズである。

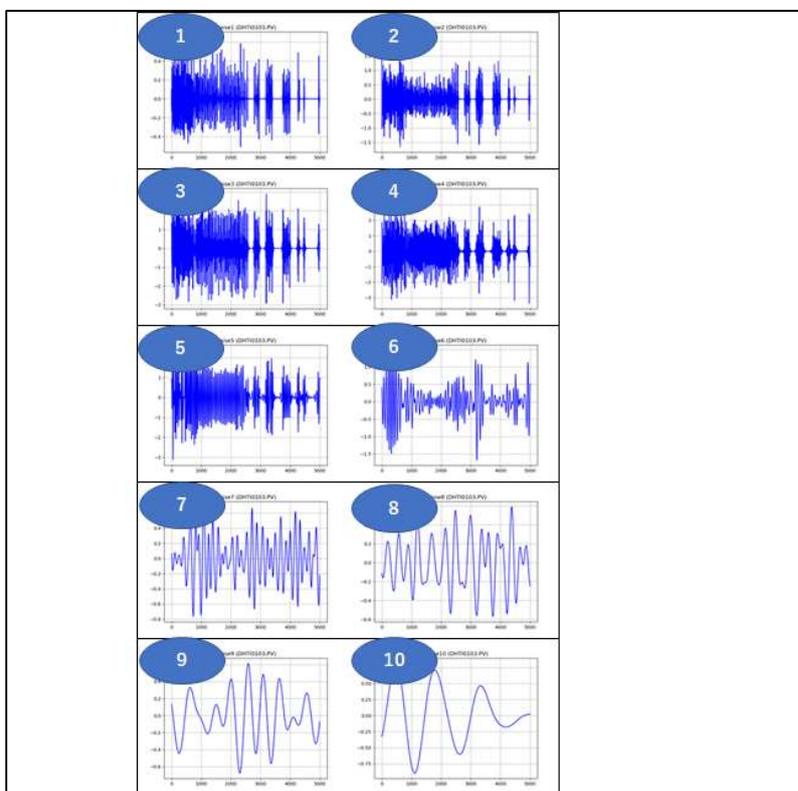


図-8 ウェーブレット変換により切り離されたノイズ

この例では、特に高周波帯のノイズに、変動があることが分かる。また、横軸は時間軸なので、ノイズの変動がいつ始まっていつ落ち着いたか、そのような情報も読み取ることが可能である。

7. ウェーブレット変換による解析例

これは、ある蒸留塔の塔底レベル変動について検討した例である。

この蒸留塔でレベル変動が発生したとき、塔頂圧力、原料流入量、そしてリボイラ用燃料ガス調整バルブ開度（OP）に変化はなかった。（図-9）

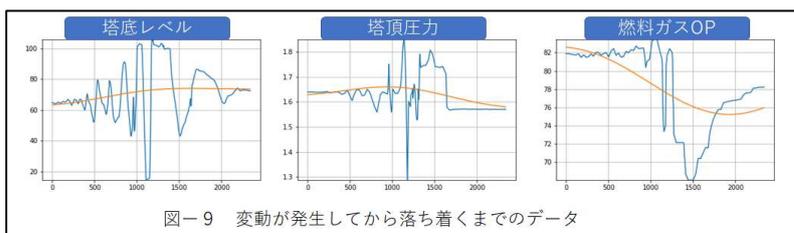


図-9 変動が発生してから落ち着くまでのデータ

何も変化がない状態で、塔底レベルが突然変動を始めたのである。

オペレータは原因が分からなかったが、一時的な変動でありすぐに元に戻るだろうと考え、何も調整を行わなかった。すると、変動はどんどん大きくなり、ついにレベル計の100%を超えてしまった。オペレータは、慌ててリボイラ燃料ガスのバルブ開度を絞り込んだ。すると今度は、塔底レベルが一気に降下してしまっただ。そこでオペレータは、急いでバルブ開度を増やした。その結果、また塔底レベルが100%を超えてしまい、再度バルブ開度を絞り込むことになった。しばらくこのような塔底レベルの変動とそれに対応するための燃料ガス・バルブ開度の調整を行ったが、その結果、塔頂圧力に大きな変動を発生させてしまい、製品はオフスペックとなり、長時間の製品ロスを招いた。なぜ変動が始まったのか、その原因は運転が安定した後も分からなかった。

そこで我々は、塔底レベルのデータにウェーブレット変換を適用して、高周波から低周波へのノイズの切り出しを行った。その結果が、図-10である。

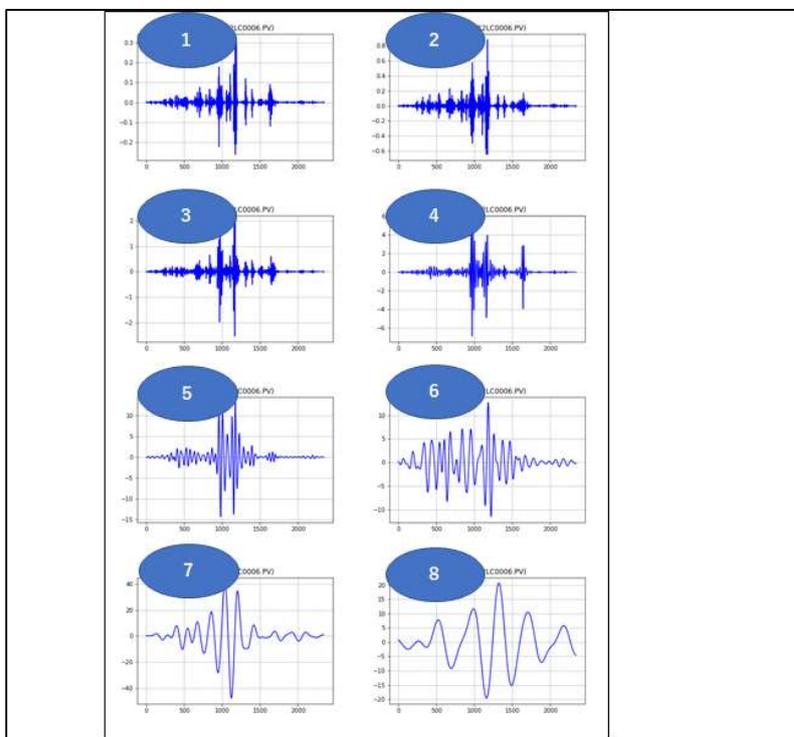


図-10 ウェーブレット変換で切り出されたノイズ

この結果から、6番目のノイズの変動が大きいことが分かったので、塔頂圧力と燃料ガス・バルブ開度そして、普段はバルブ開度と比例している燃料ガス流量について、ウェーブレット変換での6番目のノイズの比較を行った。(図-11)

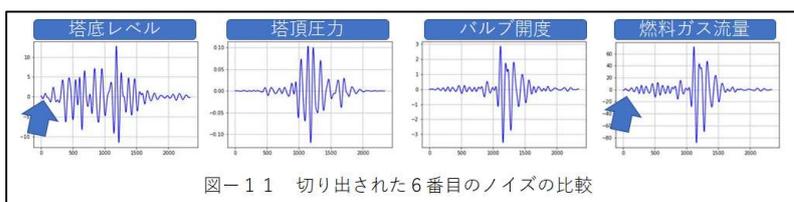


図-11 切り出された6番目のノイズの比較

この比較から、燃料ガスのバルブ開度は変化していないのに、燃料ガス流量に変動が発生し、それが塔底レベルの変動を引き起こしたことが判明した。

そして、燃料ガスは装置外からパイプで送気されているため、燃料ガス系統の圧力変動による燃料ガス流量の変動が、塔底レベルの変動を引き起こしたと推察された。また、6番目のノイズに著しい変化が表れたので、1～2時間の周期で変動していたことも分かった。

このように、ウェーブレット変換を適用して、各計測データのノイズの安定性/不安定性を確認すれば、何が原因で、いつ始まっていつ落ち着いたか、また変動の周期はどの程度だったかなど、ユニットの安定性/不安定性を判断するクラスタリングでは分からなかった事実も判明する可能性が大きい。

おわりに

この例のように、ウェーブレット変換はクラスタリング以上にプロセス運転の安定性/不安定性解析に大きな効果をもたらすが、ノイズの波形を見て定性的に評価しているのが現状である。

そこで我々は、切り出されたノイズに対し、フラクタル次元を適用して、その定量化を図った。また、クラスタリングと同様に、安定性/不安定性評価を行うための、HFSI (High Frequency Stability Indicator : 高周波安定性指標) を開発した。

もちろん、ウェーブレット変換についても、オンライン化及び自動ファイル作成アプリケーションの開発は終わっている。

今回は、ウェーブレット変換適用の更なる実例を含めて、これらの詳細について説明する。