

プロセスダイナミクス

第3回 周波数解析とフラクタル、そしてオンラインウェーブレット

はじめに

今回は、我々が開発した CPCon パッケージについて説明した。パッケージのコンテンツは以下の通りである。

- 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

そして、オンライン・クラスタリング計算と PSI 評価に対するサポート機能についても説明した。

更に、周波数解析がダイナミクスの同定になぜ必要なのか、またその解析のために使用されるウェーブレット変換と、その適用例についても紹介した。

そこで今回は、ウェーブレット変換の機能を再確認するところから始めたい。

1. ウェーブレット変換の機能

運転データは、時系列の変化として捉えるだけでなく、トレンド成分に複数の周波数帯のデータが重なったもの、として捉えることもできる。このことは前回説明した。

この場合、決められた周波数帯毎に変化を解析する周波数解析（または分析）手法が、運転の安定/不安定を同定するために必要となる。この周波数解析で最もよく使われる手法は、FFT 法（高速フーリエ変換法）である。FFT 法を使うと、一定期間における各周波数帯のノイズの大きさを計算できる。

ただし FFT 法では、データの時間軸は考慮しないため、計算に使った期間内では常に同じ変動が起きているとみなされる。だから、ある周波数帯での異常がいつ発生したのか、またいつ拡大したのか、それを時系列で読み取ることはできない。

その FFT 法の弱点を補うのが、ウェーブレット変換法である。

ウェーブレット変換を使うと、周波数帯毎に時間軸を残したままノイズが切り分けられる。だから、異常がいつ発生したのか、またいつ拡大したのか、それを的確に把握することが可

能となる。

図-1 は、実データ（上図）からウェーブレット変換を使ってトレンド成分（下図）を抽出した例である。

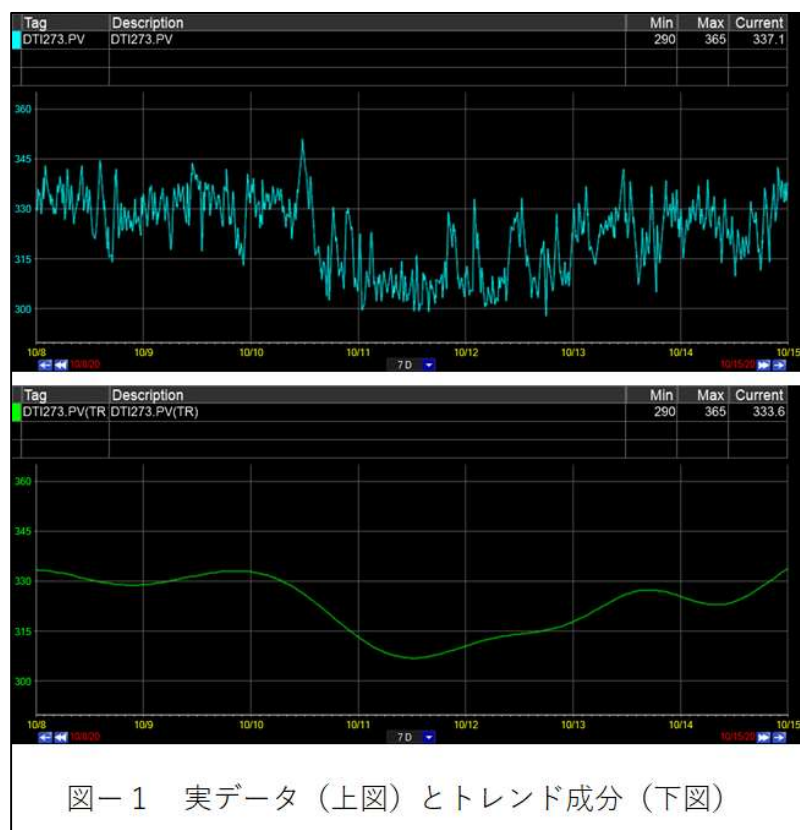
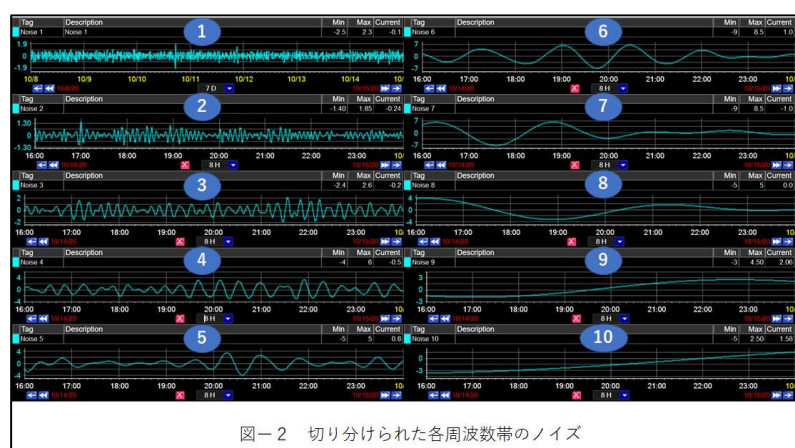


図-2 は、実データから切り離された周波数帯毎のノイズである。つまり、実データは、図-1 のトレンド成分と、図-2 のノイズ群で構成されていると言える。



ウェーブレット変換では、このように周波数帯毎のノイズを切り分ける機能を、Decomposition と呼んでいる。

ウェーブレット変換には、更に、切り離したノイズの幾つかをトレンド成分に組み合わせる

機能もある。これは、Reconstruction と呼ばれる。

図-3 は、トレンド成分（上図）に、図-2 で切り離したノイズの内、②と③のノイズだけを組み合わせたデータ（下図）である。もちろん、トレンド成分に切り離した全てのノイズを組み合わせて Reconstruction すれば、実データと全く同じデータとなる。

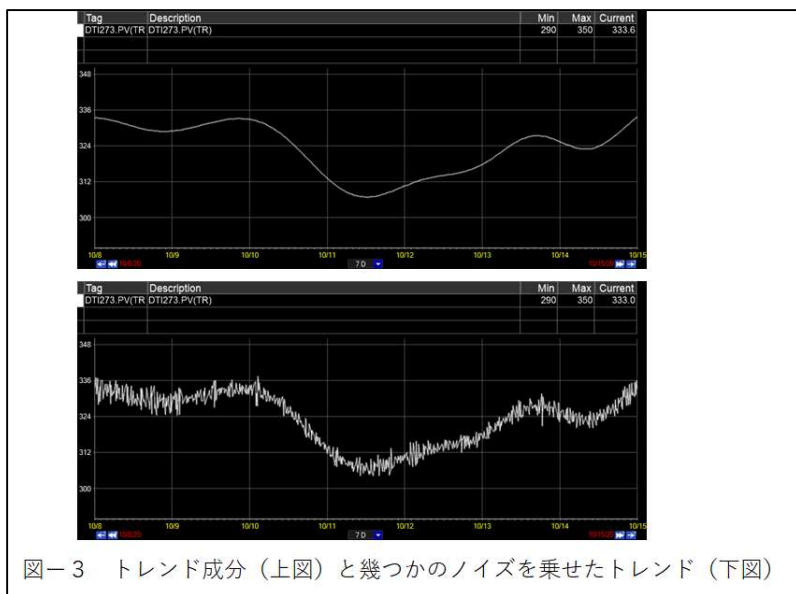


図-3 トrend成分（上図）と幾つかのノイズを乗せたトレンド*（下図）

ウェーブレット変換のこれら Decomposition と Reconstruction を使えば、周波数帯毎のノイズを切り離し、そのノイズ群で任意の複数又は単一のノイズを組み合わせて、必要な成分だけを含んだデータを生成することが可能となる。

2. フラクタル

プロセスエンジニアには、“フラクタル”という言葉は馴染みが薄いと思う。

一般的にフラクタルとは、拡大しても縮小しても同じ形が表れる図形を示す言葉だ。例題としてよく使われるのは、1975年に“フラクタル”という造語を提唱したマンデルブローによる“マンデルブロー集合”である。この図形は、一部を拡大すると全く同じ形が表れ、それを何回拡大しても同じ形が表れる図形である。（図-4）

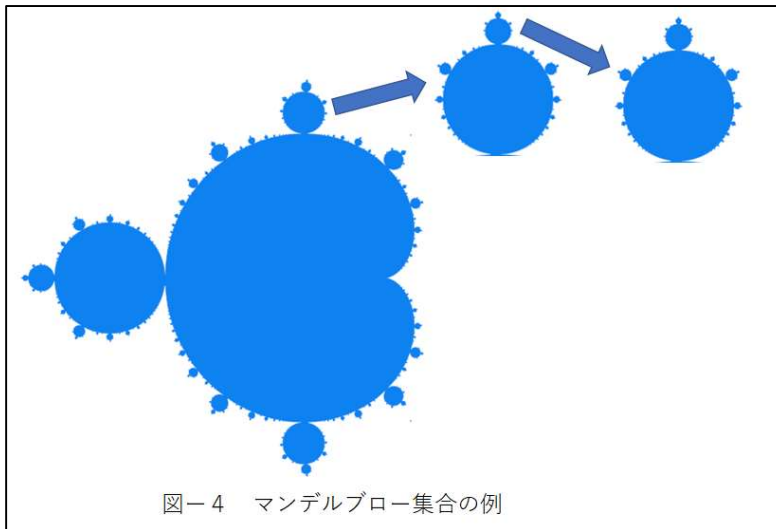


図-4 マンデルブロー集合の例

我々は、その考え方をプロセスの運転データのノイズ成分に適用を試みた。その際に拡大、縮小する軸を、一般的な平面や3次元図形を表示する軸ではなく、時間軸とした。つまり、瞬時値のデータであれば、サンプリング周期が異なっても同じ幅で似た形状のノイズが維持される、つまりフラクタルな挙動が維持されると考えた。

図-5は、完全なホワイトノイズを異なった周期（1分：上図、5分：下図左、10分：下図右）でサンプリングした例である。これらの図から、サンプリング周期が異なっても、フラクタルな挙動が維持されることが分かる。これら3種類のデータの標準偏差は、全て0.29であった。

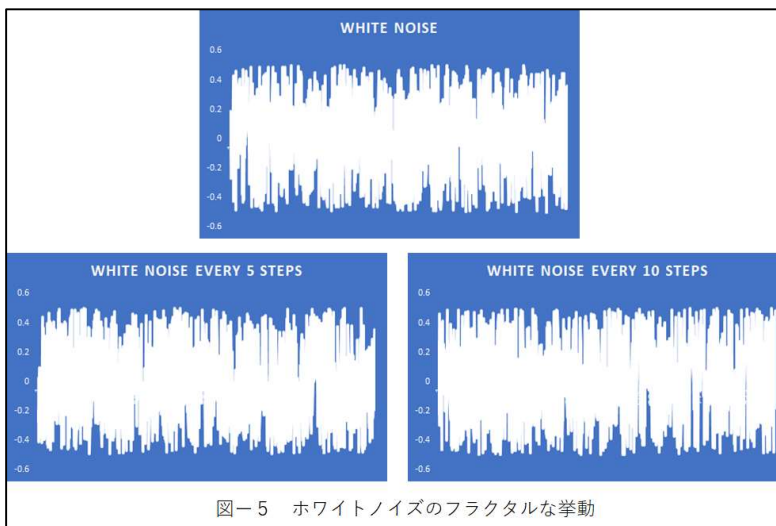
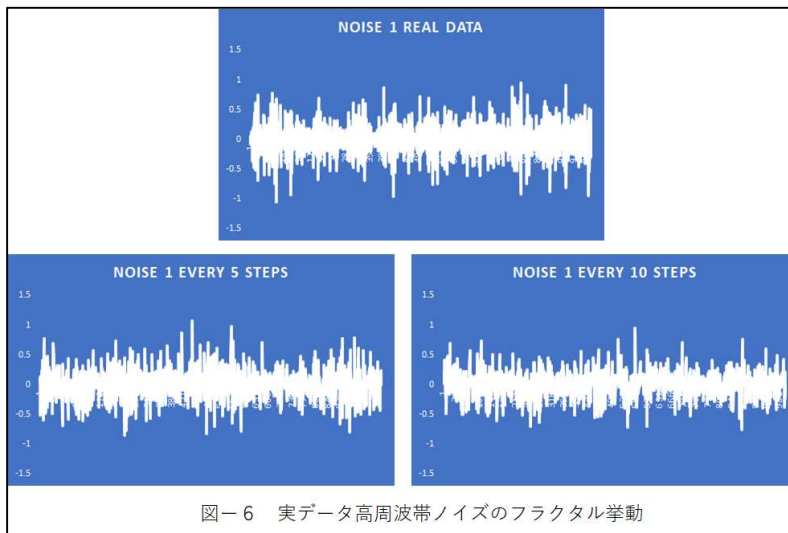


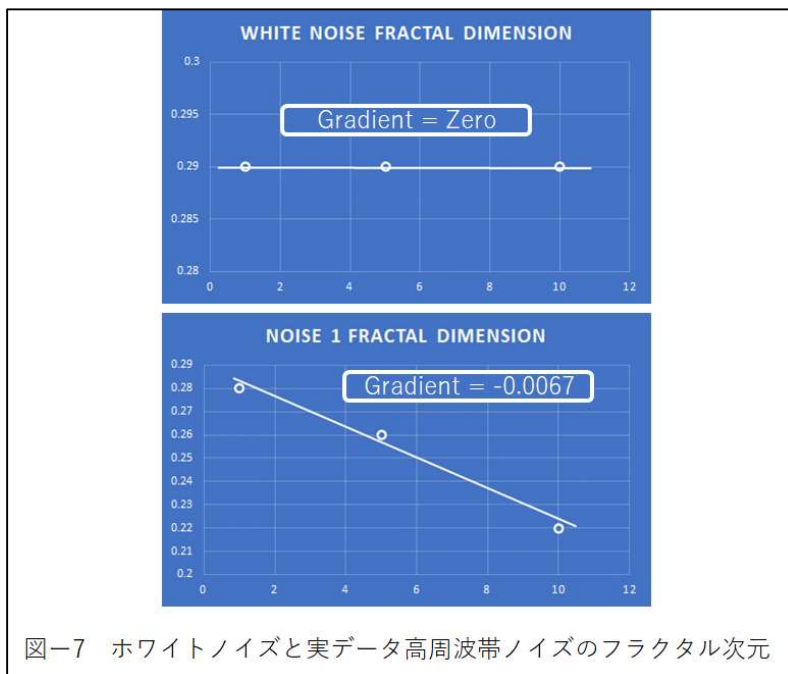
図-5 ホワイトノイズのフラクタルな挙動

図-6は、同様の比較を実データの高周波帯ノイズに適用した例である。この結果では、ホワイトノイズのような完全なフラクタル挙動は再現されていないように見える。この場合の標準偏差は、それぞれ0.28、0.26、0.22であり、同じではなかった。



これらの結果から、ホワイトノイズでは標準偏差はサンプリング周期に係らず常に一定であるが、完全なホワイトノイズではない実データでは、サンプリング周期によって標準偏差が異なることが分かる。

図-7は、 x 軸をサンプリング周期、 y 軸を標準偏差値としてプロットしたものである。常に標準偏差が一定なホワイトノイズでは、傾きはゼロになる。一方、実際の運転データの高周波帯ノイズでは、標準偏差が異なるため傾きはゼロにはならない。



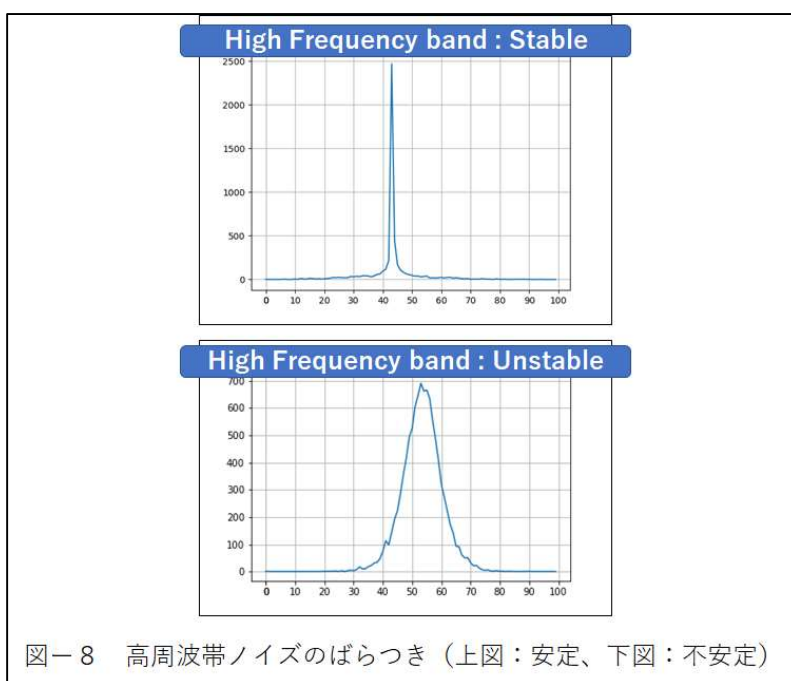
運転データがどの程度ブラックノイズ（グレーノイズ）なのかは、このように幾つかのサンプリング周期のデータ群から計算した標準偏差値を外挿した直線の傾きから、定量化できる。

この傾きは、フラクタルにおけるフラクタル次元を示すと言ってもよい。つまり、ホワイトノイズであればフラクタル次元はゼロであり、ホワイトノイズではない運転データでは、フラクタル次元はゼロにはならない（この例の場合は、傾き=-0.0067）、という事である。この傾きの絶対値が大きければ、よりブラックノイズ（グレイノイズ）であると言える。

3. HFSI (High Frequency Stability Indicator : 高周波安定性指標)

運転データのノイズから安定性/不安定性を評価する場合、前述のようなホワイトノイズ/ブラックノイズ（グレイノイズ）の判断は必要だが、もしノイズの“ばらつき”が無視しても構わないほど小さなものであった場合、そのノイズは運転の安定性/不安定性にはほとんど寄与しないと考えるべきである。

図-8は、安定な運転データの高周波帯ノイズと不安定な運転データの高周波帯ノイズの“バラツキ”を比較したものである。安定な運転では、高周波帯ノイズのバラツキは小さいが、不安定な運転では、高周波帯ノイズのバラツキは大きい。



だから、運転データの高周波帯ノイズに示される安定性/不安定性は、ノイズのバラツキにより定量化される。

我々は、高周波帯ノイズ群（最も高周波から切り分けた3つのノイズ）のバラツキと、今までの経験則を組み合わせ、周波数解析による安定性/不安定性指標を開発した。それは、HFSI (High Frequency Stability Indicator : 高周波安定性指標) と呼ばれる。

$$\text{HFSI} = f(\text{高周波帯ノイズ群のバラツキ})$$

4つ目以降のノイズは、比較的長い周期のノイズであり、一般的な外乱と同じように扱う事が可能なので、HFSI では考慮していない。

また、クラスタリングの項で説明した評価方法と同様に、HFSI の評価を経験則に基づき決定した。

HFSI < 3.0 たいへん安定している (Extremely Stable)

3.0 ≤ HFSI < 4.0 十分安定している (Very Stable)

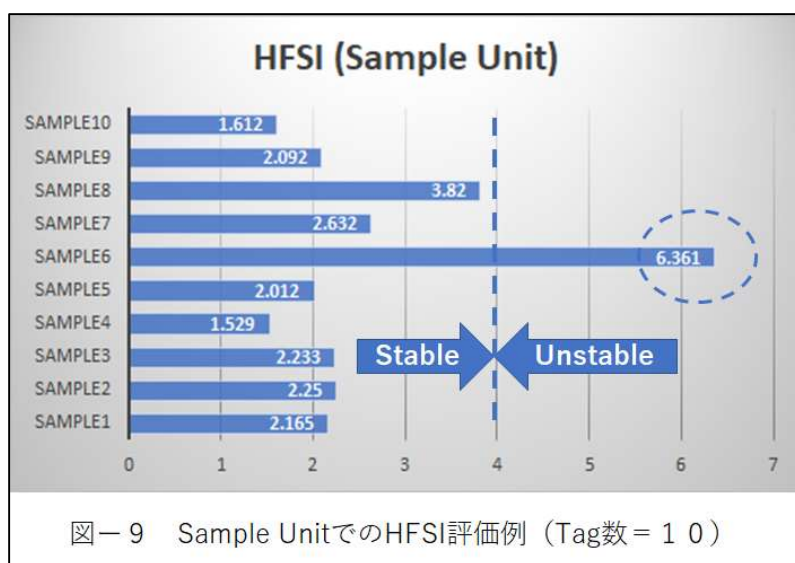
4.0 ≤ HFSI < 5.0 安定している (Stable)

5.0 ≤ HFSI < 6.0 不安定である (Unstable)

6.0 ≤ HFSI たいへん不安定である (Very Unstable)

HFSI の値が 5 以上であり、運転が不安定であると評価された場合は、例えば制御系の PID チューニングなどを行って、HFSI の値の改善を試みる必要がある。

図-9 は、あるユニットの 10 Tag のデータで HFSI を解析した例である。



この結果から、Tag 名 : Sample 6 だけが、高い HFSI 値であり Very Unstable (たいへん不安定) であることが分かる。実は、Sample 4 ~ 9 のデータは、5 パスに分かれた加熱炉の燃料ガス流量のデータである。本来なら全パスの流量が同じように安定でなければならないが、HFSI の結果から、Sample 6 の流量だけが不安定であることが分かる。そしてこれは、この制御系の PID チューニングが不十分であるか、または計器そのものの異常に起因しているのではないかと考えられる。燃料ガス元圧の変動などの外的要因であれば、他の流量も同じように不安定でなければならないからだ。

また、Sample 8 も、評価は安定ではあるが他のパス流量に比べると若干不安定である。この制御性の改善は、Sample 6 の制御系安定化を行ったあとの検討対象となるだろう。

4. ウェーブレット・フラクタル計算・HFSI 評価サポート機能

CPCon のウェーブレットアプリケーションを使うと、以下のファイル群が「ユニット名 : Tag 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 : ウェーブレットで切り出された各ノイズとトレンドのグラフ、

ノーマライズしたノイズの分布図（フラクタル）、HFSI 計算・評価結果を含んだファイル
2) Excel ファイル：ウェーブレット計算に使用した実データと切り分けたノイズ群、ノイズをノーマライズした値と分布（フラクタル）計算結果を含んだファイル

3) Word ファイル：ウェーブレット・フラクタル計算に使用した Tag 名、データ数、データのスタート・エンド時間、ウェーブレット・フラクタル計算を実行した時間、などの基本情報と、各ノイズやトレンドのグラフ、そして HFSI 計算・評価結果を含んだファイル
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。

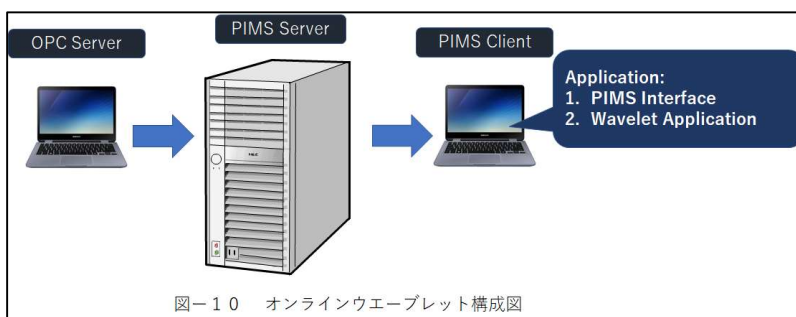
同じテンプレートのファイルを使う事で報告形式を統一できるため、データ解析の報告にエンジニアの主観が入らず、また他のエンジニアの報告でも容易に理解できる。

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、ウェーブレット・フラクタル結果の各ノイズのグラフとフラクタル関連のグラフが、個別にフォルダー内に生成されている。

5. オンラインウェーブレット・フラクタル・HFSI 評価

我々は、オンラインクラスタリング・PSI 評価と同様に、ウェーブレット・フラクタル・HFSI 評価についても、オンライン化を実施した。

これは、既存の PIMS から任意の期間の任意の Tag を収集して、それらのウェーブレット・フラクタル・HFSI 評価計算と安定性/不安定性評価を自動で行うアプリケーションである。
図-10 は、オンラインウェーブレットのシステム構成図である。オンラインクラスタリングと同様に、全てのアプリケーションは PIMS (PI、PHD、IP21、dataPARC など) のクライアントアプリケーションがインストールされた PC 上にインストールされる。



アプリケーションの内容は、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ウェーブレットアプリケーションである。

ユーザーは、オンラインウェーブレットを使用する前に、図-11に示すように“プラント名・セクション数・セクション名・Tag 数・Tag 名”を予め定義しておく。アプリケーションプログラムは、このシートに定義された個々の Tag 名の情報を PIMS から収集して、ウェーブレット・フラクタル・HFSI 評価の計算を自動的に実行する。

Plant Name	No. of Sections	Section Name	No. of Tags	Tag Name
Sample Boiler	2	Boiler1	3	Plantname.Sample_Boiler.FC100.PV Plantname.Sample_Boiler.FC102.PV Plantname.Sample_Boiler.FC107.PV
		Boiler2	4	Plantname.Sample_Boiler.FC118.PV Plantname.Sample_Boiler.FC120.PV Plantname.Sample_Boiler.FC122.PV Plantname.Sample_Boiler.FIC000.PV

図-111 オンラインウエブレット計算用情報シート

このアプリケーションにも、評価サポート機能が付帯されているので、新規に設定されるフォルダーの中に、Power Point、Excel、Word の各ファイルと、トレンド、ノイズ、フラクタル関連の各グラフなどが、生成される。

7. PID チューニング

HFSI 評価で、高周波帯ノイズの不安定性が把握出来たら、制御系の PID パラメータの調整が不十分な可能性がある。だから、まずは PID チューニングを実行してみるとよい。

だが、制御の教科書に載っている“PID チューニング”方法は、例えば内部モデルを使って最適値を導く（IMC 法）など、オペレータやプロセスエンジニアにとっては、なかなか取り扱い難いものが多い。だから、PID チューニングを行わずにそのまま不安定な運転を継続するか、またはベンダーに PID チューニングを任せるケースが殆どである。

我々も、クライアントである東南アジアの石油精製工場で、高周波帯が不安定なので PID チューニングを実施してほしいと頼んだが、「やり方が分からない」「ベンダーに任せると費用が発生する」などの理由で、実施してもらえなかった。

そこで、100%十分とは言えないが、制御系の PID パラメータへの理解が少ないオペレータやプロセスエンジニアにも、とりあえずより良い値を見つける方法（手順）を考え、今まで複数の現場で実施して制御系の安定化を行ってきた。

我々の考案した PID チューニング方法は、I パラメータのみのチューニングである。これまでの経験から、石油・石油化学プロセスの制御系安定化は、I パラメータのチューニングのみで十分な場合が多いことが分かっているからだ。

海外の工場で実施している I パラメータチューニング方法は、以下の通りである。

（この例では、I パラメータは T1 パラメータと呼ばれている。）

「(あるベンダー) の DCS では、CV への出力 (OP) は、以下の式で計算される。

$$OP = [K \cdot (60 \cdot T1 \cdot s + 1) / (60 \cdot T1 \cdot s)] \cdot \text{error} + [(60 \cdot T2 \cdot s) / (0.1 \cdot 60 \cdot T2 \cdot s + 1)] \cdot PV$$

ここで

K = proportional gain

T1 = integral time (mins/repeat)

T2 = derivative time (mins)

である。

T2=0 であり、error=1 を設定していると思われるので、上記の式は以下のようなになる。

$$OP = [K \cdot (60 \cdot T1 \cdot s + 1) / (60 \cdot T1 \cdot s)] = [K \cdot (1 + 1 / (60 \cdot T1 \cdot s))]$$

s=1 なら、

$$OP = [K \cdot (1 + 1 / (60 \cdot T1))]$$

となる。

T1 をチューニングするための手順

1. Auto から Man に切り替えて、10 分間維持する。その間、流量が安定していることを確認する。
2. Auto に戻して、T1 の値を記録する。
3. T1 の値を 2 倍に変更して 10 分間維持する。次に、T1 の値を元に戻して 10 分間維持する。更に、T1 の値を半分にして 10 分間維持する。その後、T1 の値を元に戻す。
4. T1 を倍にした場合と T1 を半分にした場合の PV の動きを比較する。
5. もし T1 を倍にした方がより安定するなら、T1 の値を記録した元の値の 4 倍にして、10 分間維持する。その後、T1 の値を元に戻す。T1 の値を倍にした場合と 4 倍にした場合の PV の動きを比較して、より安定な値を T1 (倍または 4 倍) にセットする。そのまま 20 分間運転して、元の状態より PV の動きが安定していることを確認する。
6. もし T1 を半分にした方がより安定するなら、T1 の値を記録した元の値の 1/4 にして、10 分間維持する。その後、T1 の値を元に戻す。T1 の値を半分にした場合と 1/4 にした場合の PV の動きを比較して、より安定な値を T1 (半分または 1/4) にセットする。そのまま 20 分間運転して、元の状態より PV の動きが安定していることを確認する。
7. PV の動きが最も安定した状態での T1 を、新しい T1 の値として記録する。
8. 調整が不十分だと思う場合、T1 の値を 6 倍または 1/6 に代えて、PV の安定性を確認する。

備考：

- 1) T1 を変更したときは、必ず変更した値と時間を記録しておく。
- 2) PV 値が大きく変動するようなら、すぐに前の値に戻して様子を見る。」

図-1 2 は、ある制御系に上記の PID チューニングを適用した例である。ウェーブレットで切り出された高周波帯 4 つのノイズを、チューニング前後で比較した。

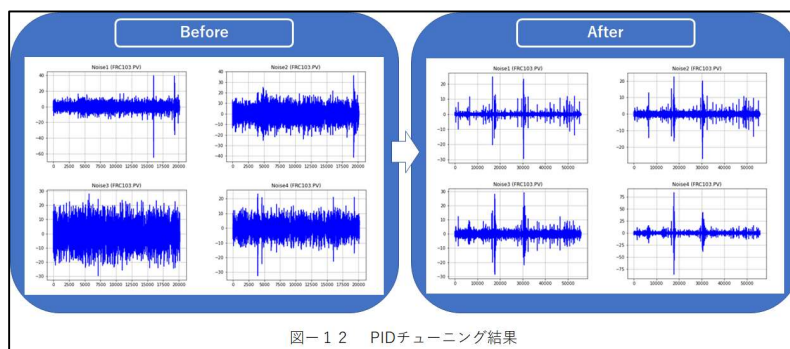


図-1 2 PIDチューニング結果

この結果を見ると、PID チューニングによって制御系が大きく改善されていることが分かる。

もちろん、PID チューニングだけでは安定性改善に不十分な場合もある。その場合は、他の制御系からの影響を考慮する必要があるだろう。

おわりに

今回は、前回に引き続きウェーブレット変換とその応用であるフラクタル（次元）、そして独自に開発した HFSI (High Frequency Stability Indicator: 高周波帯安定化指数) について、その応用の一部を含めて説明した。ここまでの連載 3 回で、プロセス運転データから安定性/不安定性の動特性をどのように掴むか説明した。また、その際に役に立つ安定化指標やサポートツール、また PIMS に直結させたオンラインツールについても紹介した。

次回は、安定化した後のプロセスダイナミクスを活かして、どのように APC (高度制御系) を設計したらよいか、インパルス応答のモデル予測制御を使って説明する。