

## プロセスダイナミクス

### 第1回 時系列変化の中の運転安定性

#### はじめに

数回に渡り、プロセスダイナミクス（プロセス動特性）について説明する。

最近、プロセスエンジニアに対するエンジニアとしての成熟度調査を目的とした“チェックリスト”を作成し、国内外のエンジニアにチェックを依頼した。その結果、国内外を問わず、成熟度が低い項目があることが分かった。それは、プロセスダイナミクスについての知識・経験・理解度である。

全ての装置は、静的状態（止まった状態）のままでは機能しない。装置は動かすことで、機能する。そして、装置を動かすなら、そこには必ずプロセスダイナミクスが発生する。具体的に言うなら、ポンプ、コンプレッサー、加熱炉、蒸留塔など、プロセス運転に係る全ての機器は、止まった状態では、全く機能しない。それらの機器は、動かして初めて所定の機能を発揮する。そして、その際に機器固有のダイナミクスが発生するのである。

プロセスの運転が安定か不安定か、それはこのダイナミクスによって表される。しかし、個々の機器のダイナミクスを検討すればプロセス運転の安定/不安定が分かるかと言うと、それほど単純ではない。なぜなら、単体機器のダイナミクスは連続する機器のダイナミクスに影響する（される）からである。また、ダイナミクスは一定ではない。運転条件や機器の異常によって変化する。ある機器の運転状態が不安定である場合、その不安定さはプロセス全体に影響を与えプロセス全体の運転が不安定になることがある。また、連続する機器によって不安定さが増大する場合もある。プロセスのフローにリサイクルがあるなら、リサイクルループの中で不安定さが増大することも考えられる。

だから、プロセス運転を安定的に続けようとするなら、プロセス全体のダイナミクスを理解して、不安定要因を特定するための検討が必要となる。

しかし残念なことに、プロセスダイナミクスがほとんど理解されていない現状では、どのようにプロセス運転の不安定要因を捉えれば良いか、こここのプロセスエンジニアが自分の所属する部署や企業の中でその指針を得ることは、かなり難しい。

このトレーニングでは、個々の機器のダイナミクスが把握し難い状況で、どのようにプロセス運転の安定/不安定を把握すればよいか、その指針を説明したいと考えている。プロセス運転の不安定性を検討する上で、この内容が少しでも役に立てれば幸いである。

#### 1. DCS と PIMS

DCS とは Distributed Control System の略で、現在では最も一般的な装置運転システムに対する呼称である。DCS の機能は、おおまかに以下のようになる。

1) プロセス装置の各種変数（温度、圧力、流量、液高など）測定値を収集し、それを数字やトレンドグラフとして、画面上に表示する。

- 2) 各種変数の測定値が、あらかじめセットした上下限値を越えた場合、表示色の変化などでアラーム表示し、同時にビープ音で運転員に異常を気付かせる。
- 3) PID 制御を基本としたフィードバックやフィードフォワードなどの制御機能を有しており、変数の測定値から制御機器への出力値を計算により求め、制御機器を動かすためにその値を伝送する。
- 4) 異常事態に安全に対応するためのシーケンスが組み込まれており、そのシーケンスに沿って制御機器への出力値変更を行う。

だから、一般的な DCS の機能には、“変数の測定値からダイナミクスを把握する”機能は含まれてはいない。運転員は、画面に表示されるトレンドの変化を見ながら、通常と違う動きを見つけて運転の不安定さを把握している。ただし、トレンド画面に表示できる変数の数と期間が限られているので、プロセス全体の運転安定性を常に監視することは、不可能である。PIMS とは Plant Information Management System の略で、ISA-95 (ISA: the International Society of Automation) のレベル 3 (MOM : Manufacturing Operations Management) で定義されるサブシステムの一つである。一般的には、PI (OSISoft)、IP21 (Aspen Tech)、PHD (Honeywell)、dataPARC (Capstone) などの商品名で呼ばれることが多い。

事前に登録された Tag の測定値を、決められた周期で DCS から OPC サーバー経由で取得して内部のデータベースに保管する。また付帯して、一般的に以下の機能を有する。

- 1) データ表示機能：複数の変数の値をトレンドに表示する。DCS と異なるのは、保管する数年分の過去データを自由に表示できることである。一部の PIMS では、過去データと同じトレンド画面に表示して比較することも可能である。また、表示する Tag 数に制限がない PIMS もある。
- 2) データ加工機能：四則演算などを使って、複数の測定値を使った計算式を定義し、その結果を計算 Tag として保管し、トレンド画面に表示できる。定義された計算式は過去データにも適用される。また、C 言語などを使ってプログラミングできる PIMS もある。
- 3) アプリケーション：PIMS によって異なるが、収集したデータ群を使ってデータ間の相関関係を計算するアプリケーションや、ソフトセンサー (PLS : 最小二乗法) を構築するアプリケーションなど、各種アプリケーションを有して機能の拡充を図っている。一部の PIMS には、FFT (高速フーリエ変換) などの周波数をベースにした動特性を把握するアプリケーションも存在する。
- 4) インターフェース：OPC サーバーとのインターフェース以外にも、SQL サーバーとのインターフェース、また各種プログラム言語とのインターフェースを有している。この機能によって、ユーザーが作成したプログラム上で収集したデータを使用することが可能である。以上が PIMS の機能であり、FFT (高速フーリエ変換) などによる初步的なダイナミクス把握の機能は有しているが、その結果によるプロセス運転の安定性/不安定性の判断は、ユーザーの経験則に基づく判断に委ねられている。

ただし PIMS は、オンラインでデータを収集しているのも関わらず、オンラインで運転を支

援するシステムとして使われることは“まれ”である。もっともよく使われるには、何かトラブルが発生した際に遡って発生時近傍のデータを解析する、そのためのデータ保管システムとしての機能である。

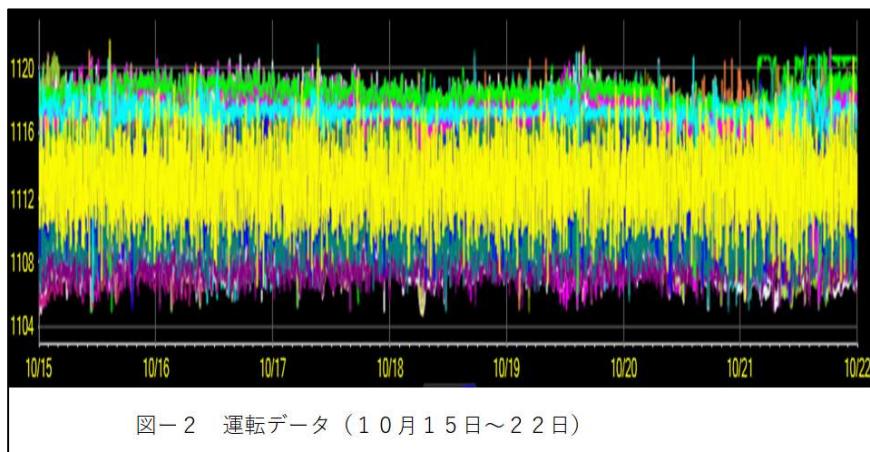
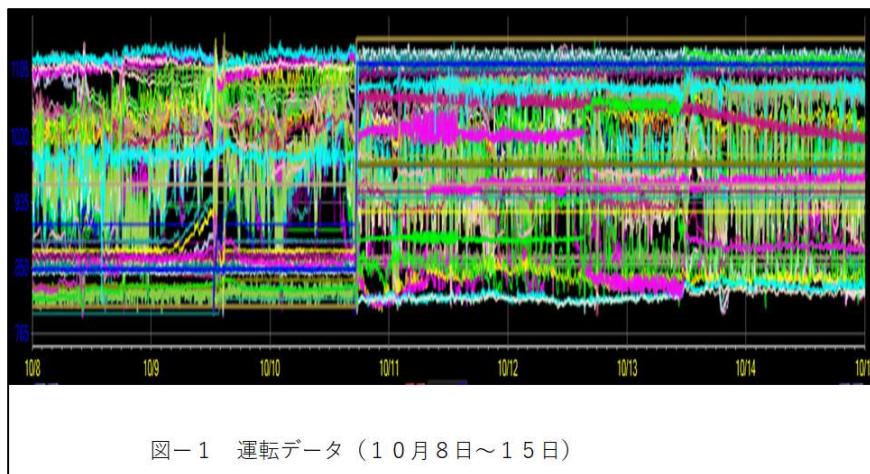
## 2. トレンド画面から何が分かるのか

DCS では、動特性を把握することは不可能で、また表示できるデータの期間も限られている。だからここからは DCS ではなく PIMS についてのみ取り上げる。

一般的な PIMS ではトレンド画面では、1 画面に表示できる Tag 数が限られている。しかし、プロセス運転の安定性/不安定性を評価しようとするなら、評価の対象となるユニットに係る全ての Tag のデータについての評価が必要である。1 部の PIMS では、トレンド画面に表示する Tag 数に制限がないので、ここではその機能を使ってトレンドを表示して、安定性/不安定性の評価を試みる。

(例題)

A 装置の B ユニットに係る Tag は、全部で 6 3 Tag である。その 1 週間分のデータをトレンド画面に表示した。(図-1、図-2)



両方とも同じ 6 3 個の Tag 群で構成されている。ただし、図-1 と図-2 ではデータ収集の期

間が1週間ずれている。実は、このどちらかの期間で運転が不安定であり、もう一方の期間は比較的安定であったことが分かっている。

もし皆さんがあるプロセス運転のトラブルシューティングの担当者であり、これらのトレンドグラフとそのデータセットを与えられて、どちらでトラブルが起きているか報告しなければならないなら、どのように判断して報告するだろうか。

どちらでトラブルが発生していたか、トラブルが発生していたのは図-1の期間である。

皆さんは、その答えを明確に見抜けただろうか？

我々は、判断が間違っていた、または明確な理由なしに感覚で選んだら当たった、という皆さんのが殆どだったのではないかと考える。

では、なぜ明確な判断が下せなかつたのか。それは、現状トレンド画面の情報だけで安定/不安の検討を行っているエンジニアリングに対する限界（情報不足）が存在するからである。簡単に言えば、トレンド画面で表示される情報だけでは、安定/不安定の検討に対する十分な情報は得られない、という事だ。

それでは、トレンド画面の情報以外にどのような情報が得られれば、安定/不安定の判断を正確に実行できるのだろうか？

その一つの技術がこれから説明する“クラスタリング”であることは、間違いない。

### 3. クラスタリング

現在のようなパンデミックの状況になってから、“クラスタ”という言葉をよく耳にするようになった。パンデミック以前では、ほとんど使わなかつた言葉である。このクラスタの意味は、「疾病の発生率が、ある場所で平均や期待値を上回つた数字である場合」の事であり、従来はガンなどの発生割り振るについて使われていた言葉である。

技術用語としてのクラスタは、例えば“コンピュータクラスタ”とは結合によりあたかも一つのマシンであるかのように稼働するコンピュータ群を表し、“クラスタサンプリング”とは母集団の中で統計的に明確なグループ化を行うサンプリング技術の事であり、“クラスタ分析”とは統計的データ解析手法を表す、などのように使われる。

そして、ここで取り上げるクラスタリングとは、この内の“クラスタ分析”を行う手法の事である。

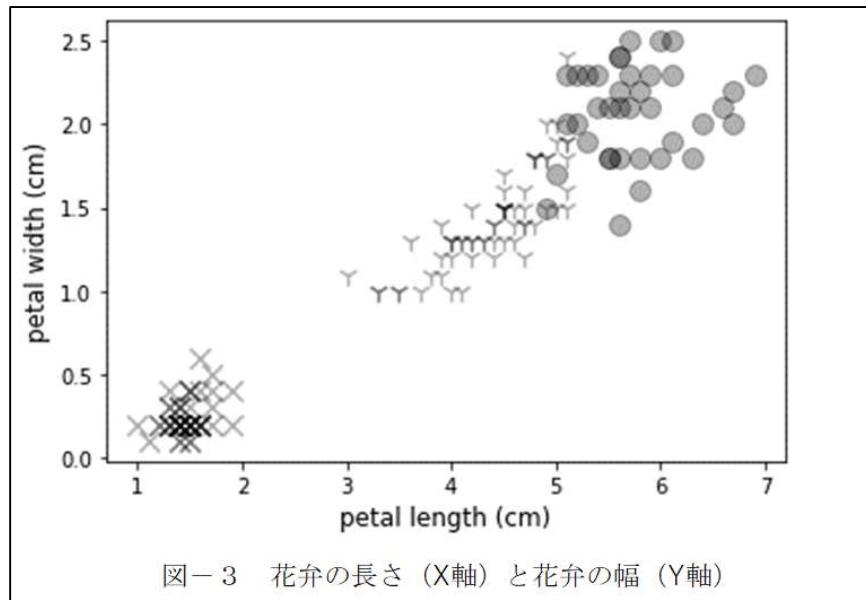
簡単に言えば、クラスタリングとは、データ群を似たような塊にまとめ上げることだ。

その計算は以下の手順で行われる。

- 1) 各データをランダムにクラスタに割り振る。
- 2) クラスタごとに中心を計算する。一般的には算術平均を用いる。
- 3) 各データから各々のクラスタ中心への距離を求め、もし距離の計算結果で他のクラスタ中心への距離の方が短いなら、データの所属を最も短いクラスタに変更する。
- 4) 新しいクラスタの割り振りを使って、2) と3) の作業を繰り返す。
- 5) クラスタごとのデータに変化がないなら、そこで処理を終了する。

クラスタ分析の例題としてよく用いられる「iris」（アヤメ）というデータセットがある。これは、3種類のアヤメ各50個について、それぞれ“ガクの長さ”、“ガクの幅”、“花弁の長さ”そして“花弁の幅”、これら4つの特性をデータ化したものである。

このデータを使ってクラスタリング（クラスタの数は3とする）を実行する。図-3は、実行結果を花弁の長さ（X軸）と花弁の幅（Y軸）で表したものである。



この図では、ほぼ3種類のアヤメ種に分類されていることが分かる。（参考：Pythonによる機械学習（株式会社システム計画研究所編）オーム社）

このように、3種類のアヤメ種のどれに属するかが分からなくても、花弁の長さと幅からおよその推定が行える。

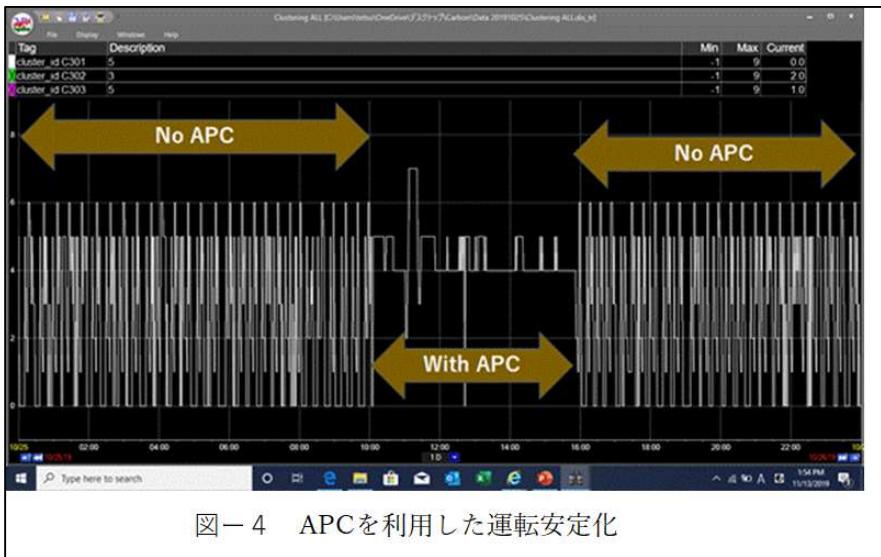
プロセス運転のデータで例えるなら、安定時のデータ、不安定時のデータが混在していても、幾つかのクラスタにデータを分類することで、安定期間/不安定期間の特定や、期間全体に対する安定/不安定運転期間の比率などが、運転データ群から推定できるという事である。つまり、クラスタリングによってプロセス運転データを使った定量的なフォールトディテクション（異常検知）が可能だという事だ。

#### 4. フォールトディテクション（異常検知）へのクラスタリングの応用

現在商品化されているフォールトディテクション用のアプリケーションは、クラスタリングを利用しているものが多い。クラスタリングの結果から、時系列データを分類することで、運転状態の変化を時系列に確認できるからである。

（例-1）

図-4は、不安定な運転をしている個所にAPC（高度制御）を導入した場合、どの程度安定化されたのかをクラスタリングの結果で表したものである。

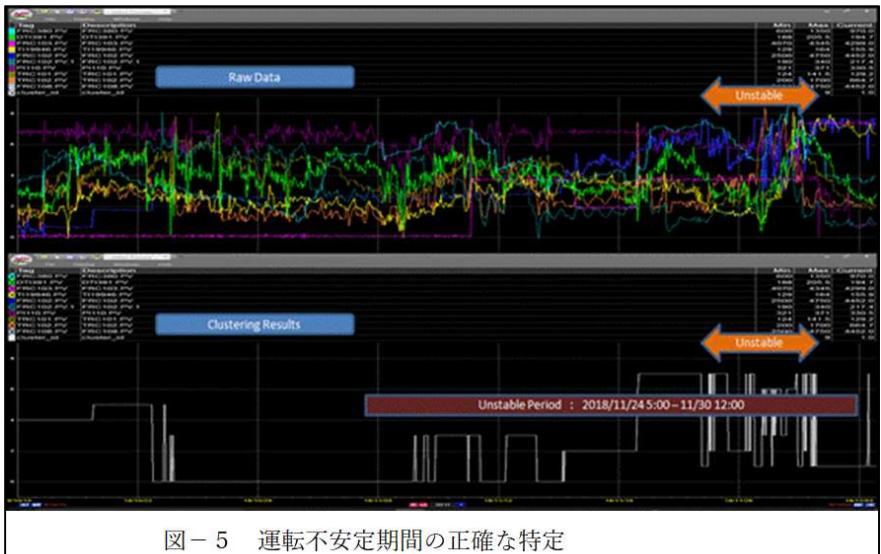


この装置では、前半は APC を導入せずに、通常運転を行っていた。その後 APC を数時間導入し、また APC を外して通常運転を行った。

このように表現した時系列データでは、クラスタ変化が激しい場合は“運転が不安定”であり、クラスタ変化が少ない場合は“運転が安定”である。だから、このグラフから、APC を導入した際に運転安定化が大きく改善されていることが分かる。

#### (例-2)

図-5の上図トレンドは、時系列の生データを表示したものである。また下図トレンドは、そのクラスタリング計算結果を表示したものである。



上図の運転データトレンドから、運転が不安定である期間を特定するのは困難だろう。

しかし、下図のクラスタリング結果を使うと、計算結果が変動している期間（つまり運転不安定期間）を正確に特定できる。この運転不安定期間が特定できれば、その際に何が起きていたのか、運転申し送り帳などから確認できるだろう。

クラスタリング結果で判明した不安定運転には、必ず原因がある。だから、不安定運転の期間を特定した後、その原因を同定し対応することで、不安定運転を解消できるだろう。運転が不安定になる主な要因は、以下の通りである。

- 1) 制御系の調整不良 (PID チューニング不良含む)
- 2) 各機器・配管などのオーバーキャパシティ (設計範囲を超えた運転)
- 3) 各機器・配管などのキャパシティショート (設計範囲に届かない運転)
- 4) 各機器・配管などの詰まりによる偏流 (反応塔のコーリング含む)
- 5) 特に蒸留塔におけるフラッディング・ウェーピング
- 6) 制御系設計ミス
- 7) その他

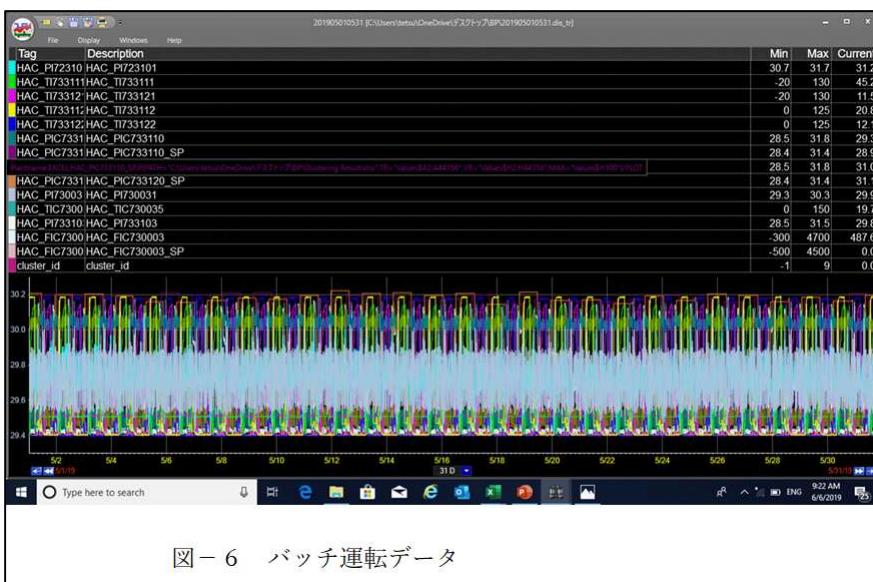
クラスタリングで特定された不安定運転期間に対し、これらの不安定要因を個々に検討すれば、不安定性を招いた原因の同定は可能である。

## 5. クラスタリングで同定できる運転不安定さの例

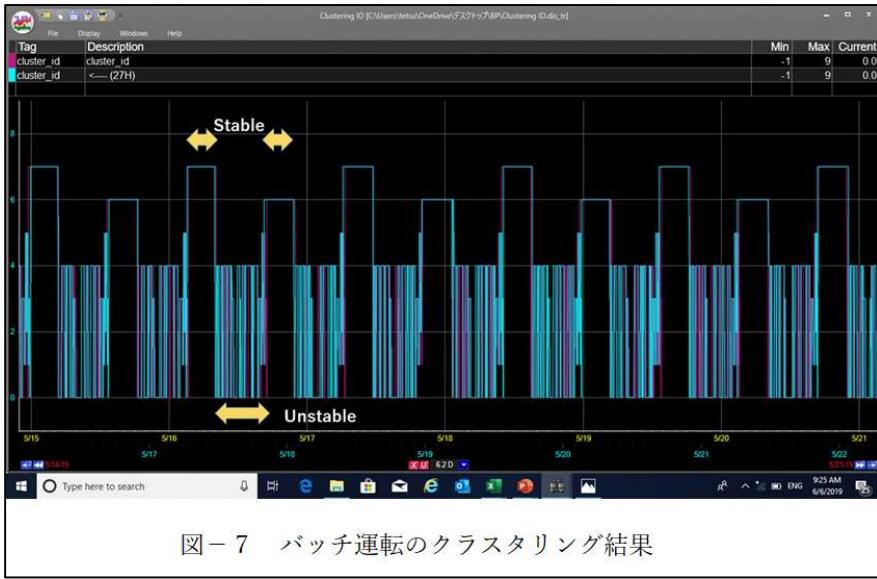
クラスタリングを適用することで運転の不安定さについての事例を、更に見ていく。

(例-1)

図-6 は、バッチ運転を行っているプロセスの運転データである。



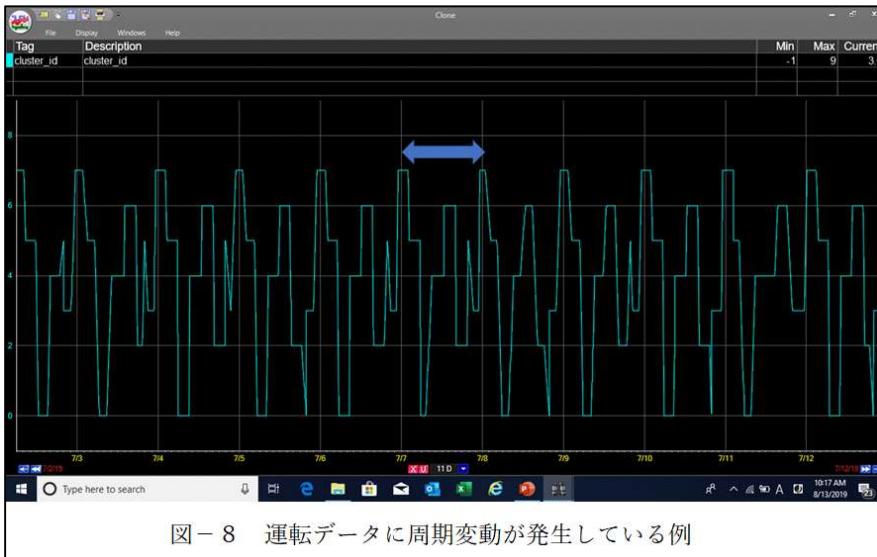
運転員やプロセスエンジニアは、このトレンド画面上で同じようにデータが表示されているので、このバッチ運転は安定だと考えていた。そこで、これらのデータを使ってクラスタリングを行った。その結果が、図-7 である。この結果から、安定運転に見えるバッチ処理であっても、その 1 周期の中で安定運転/不安定運転部分が存在することが分かった。この工場では、なぜこの期間で不安定運転がなぜ起るのか検討することとした。このように、1 周期の中で部分的に不安定変動がある事は、バッチ運転では見逃されやすい。



(例-2)

クラスタリングの結果から、今までのトレンド画面表示では気が付かなかった運転上の動特性が分かることも多い。

図-8は、ある装置のクラスタリング計算結果である。



この結果から、この装置の運転に24時間の周期が発生していることが分かった。装置の機器と関連装置を確認したところ、外部から導入している燃料ガスがこの24時間周期を生み出していた。その後、工場内の燃料ガス供給装置が外気温の影響を受けていることが確認でき、その影響が24時間周期を発生させている原因であると考えられた。ただし、外気温だけでは説明できない動きもあり、検討は継続している。

ここまで説明した色々な例からも分かる通り、クラスタリングは装置運転が安定/不安定であるかを、正確に同定できる。

ただし、どの程度不安定なのか、そこまでの確認はできない。そこで我々は、次に説明する PSI (Process Stability Indicator : プロセス安定指数) を開発して、運転不安定さの定量化を実施している。

## 6. PSI (Process Stability Indicator : プロセス安定指数)

PSI は、クラスタリングの計算結果を基に、プロセス運転の安定性/不安定性を表した指標である。

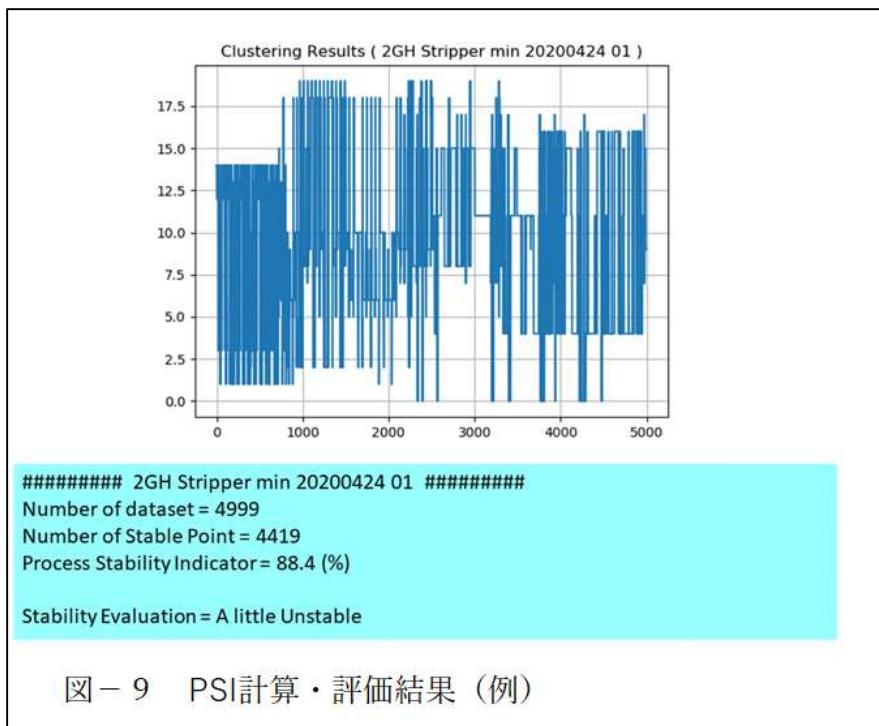
経験則に基づき、計算結果から得られる安定点が全体の中で何%になるか計算し、更にその評価を 5 段階で行っている。

5 段階評価は、以下の通りである。

1 0 0 % $\geq$ PSI > 90%	安定している (Stable)
9 0 % $\geq$ PSI > 8 0 %	若干不安定である (A little Unstable)
8 0 % $\geq$ PSI > 7 0 %	不安定である (Unstable)
7 0 % $\geq$ PSI > 6 0 %	かなり不安定である (Very Unstable)
6 0 % $\geq$ PSI	たいへん不安定である (Extremely Unstable)

我々が開発したプログラムでは、クラスタリングの計算を行った後、PSI (%) を求めて評価まで行い、全ての計算・評価結果をレポートするファイルを自動生成する。

図-9 は、自動生成されたファイルの中のクラスタリング結果と PSI 計算・評価結果の例である。このケースでは、PSI が 88.4% であり、評価は“若干不安定である (A little Unstable)” となっている。



## 7. PSI を使った検討例

ここでは、PSI の計算結果がどのように活かされているか、その例について説明する。以下の例は、本プログラムを既に導入している工場での実際の検討結果である。

### (例-1)

図-10 は、A 社 B 工場のある装置をいくつかのセクションに分けて、4月と10月のデータを用いて、それぞれのクラスタリングと PSI 計算・評価を行った例である。

Section	PSI (Apr20)	Status	PSI (Oct20)	Status
Section 01	90.6 %	S.	85.3 %	A.L.U.
Section 02	93.1 %	S.	<b>37.6 %</b>	<b>E.U.</b>
Section 03	81.2 %	A.L.U.	90.7 %	S.
Section 04	93.2 %	S.	85.5 %	A.L.U.
Section 05	92.6 %	S.	94.6 %	S.
Section 06	67.4 %	V.U.	95.6 %	S.
Section 07	<b>24.2 %</b>	<b>E.U.</b>	<b>25.6 %</b>	E.U.
Section 08	94.2 %	S.	93.7 %	S.
Section 09	<b>91.8 %</b>	S.	<b>65.0 %</b>	<b>U.</b>
Section 10	<b>34.1 %</b>	<b>E.U.</b>	<b>46.0 %</b>	<b>E.U.</b>
Section 11	87.2 %	A.L.U.	74.3 %	U.
Section 12	<b>68.5 %</b>	<b>V.U.</b>	<b>42.4 %</b>	<b>E.U.</b>
Section 13	<b>62.5 %</b>	<b>V.U.</b>	<b>38.7 %</b>	<b>E.U.</b>

図-10 A社B工場のPSI計算値と評価結果

4月のデータの結果では、PSI が 60% 以下、つまり Extremely Unstable であったセクションは、2 セクションだった。しかし、10月のデータを用いて計算した結果では、PSI 60% 以下のセクションは、6 セクションに増えている。

つまり、この装置では、不安定な運転を行っているセクションが、4月よりも10月の方が格段に多く、製品ロスやエネルギーロスが増えている、またはトラブルに繋がる要因が増えている、と考察される。

### (例-2)

図-11 は、C 社 D 工場のある装置の検討結果である。この結果から、この装置の運転は Section 14 以外、比較的安定に運転されていることが分かる。また、Section 14 が不安定でも、後続のセクションが安定的に運転されており、Section 14 の変動が装置全体の安定/不安定には影響していないと推察される。

これらの例のように、PSI を使えば、時間的变化の中で運転安定性がどうなったのか、不安定な運転を行っているセクションが他のセクションに影響を与えているか、などの検討が容易に行えるのである。

Stability	Section	PSI
Stable	Section 01	99.47 %
	Section 02	99.20 %
	Section 03	98.91 %
	Section 04	98.41 %
	Section 05	97.79 %
	Section 06	97.77 %
	Section 07	96.57 %
	Section 08	94.74 %
	Section 09	94.14 %
	Section 10	97.67 %
A little unstable	Section 11	93.87 %
	Section 12	83.04 %
Extremely unstable	Section 13	82.82 %
	Section 14	41.50 %

図－11 C社D工場のPSI計算値と評価結果

おわりに

最近、クラスタリング及び PSI 計算・評価プログラムと、各種 PIMS を連動させるプログラムを開発した。このプログラムを使えば、任意の時間または予め決めた時間に、プログラムが PIMS からデータを自動収集して、そのデータを用いて PSI 評価まで自動で行う。また、その結果を含めた ppt ファイル (PowerPoint)、xlsx ファイル (Excel) 及び doc ファイル (Word) を自動生成してくれる。

そのアプリケーションの概要と、周波数帯での安定性/不安定性解析手法は、次回以降に説明する。