

## 第6章 Wavelet 解析を用いた蒸留塔運転データの解析

### Wavelet 解析を用いた蒸留塔運転データの解析結果報告

執筆者

松尾 徹

三井化学(株) 大牟田工場技術部システムG

西澤 淳

三菱化学株式会社 四日市事業所

## 6.1. はじめに

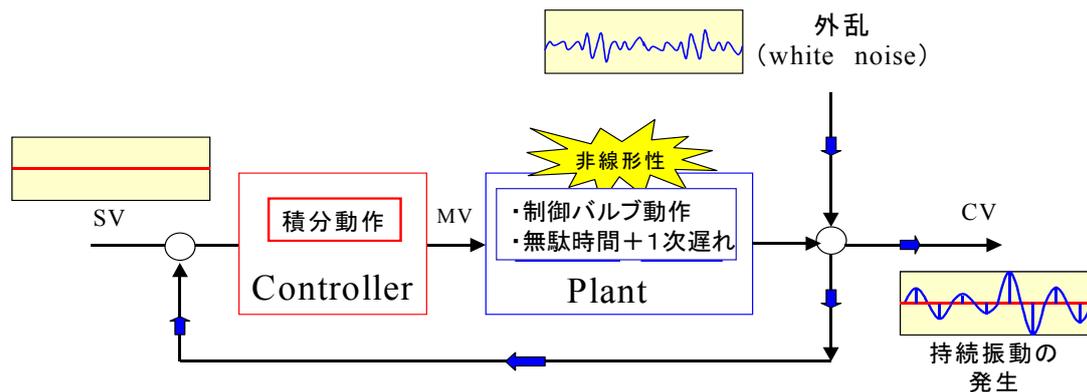
蒸留塔各部分の状態(温度、圧力、組成)と熱収支、物質収支、は互いに影響を及ぼし干渉する関係になっていることが多い。そのため実際のプラントでは、熱移動や物質移動などに含まれる外乱から蒸留塔の状態が変動することを防ぐために制御系(熱収支や物質収支を調整する機能)が実装されている。

一般に、制御系はPID制御に代表されるようなフィードバックの構造を持っており、制御対象が目標の値との偏差が生じた場合にはその差を少なくする修正動作が行われるように設計がされている。しかし実際の制御系では、調整不良、機器の不良などにより、行すべき動作が不適切になり、修正機能が低下してプロセスに対する制御能力が低下することもよく起こる。場合によっては、不適切な制御動作により信号の一部が正のフィードバックとして加わることになり、偏差に対する修正機能が低下するばかりでなく振動的な偏差(持続振動)を新たに発生することもある。更に悪いことに、蒸留塔は各部分の状態が干渉する関係になっていることから、制御系の一部で発生した振動が蒸留塔全体に伝播すると系全体を不安定にする。そのため、制御系は適切な維持管理と運用が行われないと、制御動作が原因で新たな変動を生み出し系全体が不安定状態に陥るといった皮肉な結果を招くことになる。

それではどのようにしたら、制御系に起因する変動を見つけることができるのだろうか? 制御系に起因する変動は持続的振動の特徴を持ち、時系列データを周波数に変換することで持続的振動成分を明瞭に分別して制御系の不具合を見つけ出すことができる。従来、プロセスの信号についての周波数解析は高速フーリエ変換(FFT)を用いた検討がいくつか行われてきたが<sup>(1)</sup>、ここでは実際の蒸留塔の運転データに含まれる変動に対して、新しい周波数解析手法のウェーブレット変換を応用することで制御系に由来する持続振動を抽出することが可能なことを示す。そして、時間と周波数の関係から変動の発生源や系内伝播の範囲などについての考察を行う。

## 6.2. 化学プラントの制御方式と振動の関係

化学プラントに使用されている制御方式は各種あるが、レギュラトリレベルで実装されているのはPID制御が大多数でありプロセス制御の基本となっている<sup>(2)</sup>。PID制御は構造が簡単で実績も多い制御方式であるが、コントローラ、操作端、プロセスからなるループ内に非線形性、位相遅れ要素とパラメータの調整不良等の存在で、リミットサイクルなどの周期的動揺を発生しやすい構造になっている(図1 参照)。実際のプラントでも、パラメータの調整不良、バルブのスティクションやヒステリシス、プロセスの非線形性が原因で振動的な動揺を発生している場合も多い。また、プロセス全体との関連では、反応器内部、蒸留塔内部、装置前後段の熱交換器などを経由しながら種々の変数が関連して周期的動揺がプラント全体に広がることもある。このようにいくつかの要因により制御系を含むプラントの状態は周期動揺に陥りやすいが、トレンドデータの中にはいくつかの信号が混在しているために振動を簡単に見つけ出すことが出来ずに、解決すべき制御上の問題が見逃されていることが多いのも事実である。



現実のフィードバックシステムでの持続振動は良く起こる現象

原理

- (1) 外乱からの変動は制御システムの積分動作とプロセスの非線形要素で遅延する
- (2) フィードバックにより外乱に含まれる特定の周波数成分は、系の中で強調する
- (3) 共鳴周波数が持続振動として現れる

$$\text{一巡伝達関数: } |G(j\omega)| = 1, \quad \angle G(j\omega) = -\pi \quad (3)$$

一巡伝達関数のナイキストカーブが不安定点(-1, 0)を通過すると持続振動あるいは周期動揺を発生する

図1 フィードバックシステムにおける振動発生のメカニズム

化学プラントは、安定的に操業されている時に最大の生産効率が発揮されることが一般的で、制御性の良否は化学プラントの安定性に直接影響するので制御性を良好に保つことは商業プラントの重要な課題である。そのため、制御系はプラントから変動を無くして状態を安定に保つように常に調整された状態になっていることが望まれる。

### 6.3. ケーススタディ

ここでは、蒸留塔の系内に伝播する振動的な変動をウェーブレット変換により解析した事例を2つほど取りあげる。

最初の事例(ケース1)では、蒸留塔における品質制御は良く行われており、運転上や生産上の不都合はあまり発生していない。もう一つの事例(ケース2)では運転上の不都合が十分に意識されているのだが、変動が大きくしかも系全体に広がっており、どこが原因でどのように変動が相互に影響を及ぼしているのかを特定することが出来ていない。

しかしいずれにしろ、系内の変動を抑制して超安定な状態にすることは、蒸留塔の場合は塔底での加熱と塔頂での除熱といった、相反する方向のエネルギー消費を最小にすることにつながり、蒸留塔の性能(商業的指標ではコストパフォーマンス)を最高にすることに繋がる。

#### 6.3.1. 安定的に運転されている蒸留塔(ケース1)

(1) プロセスの記述

検討対象の実プラントの概要を 図2 に示す。これは前述の、4. 1. 6. 2. の検討対象の蒸留塔と同一であるが、本章では、プラント内のあらゆる変数の挙動を解析することを目的として、モデル予測制御系の全変数のみならず、モデル予測制御系に含まれていない変数に対しても解析を行っている。なお、制御の目的、制御周期等は前章で述べた通りである。

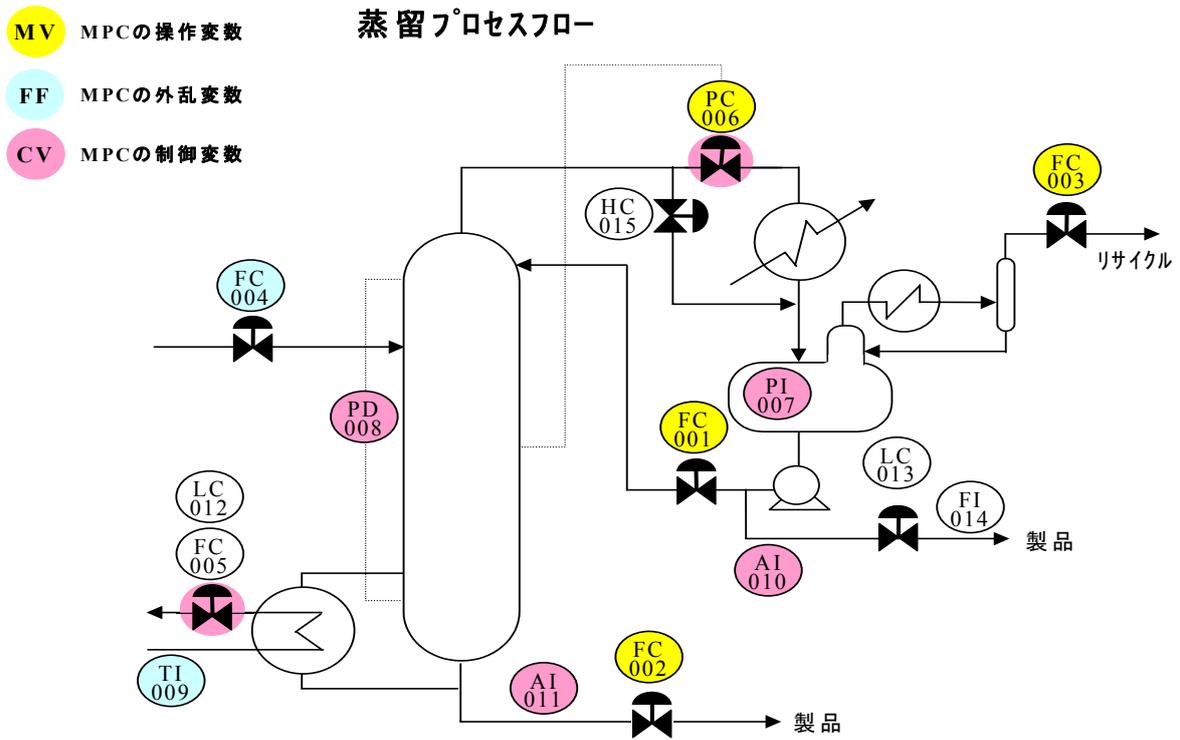


図2 蒸留塔(ケース1)プロセスフロー図

(2) 変動の状態

蒸留塔の操業データ(図2 の各測定点のデータ)を時系列的にプロットした図(トレンドグラフ)を以下(図3)に示す。しかしこれらの図からは、いずれの箇所の状態も時間的に多少の変動を伴っていることはわかるが、それらの間の関係(干渉)については、トレンドグラフからはわからない。

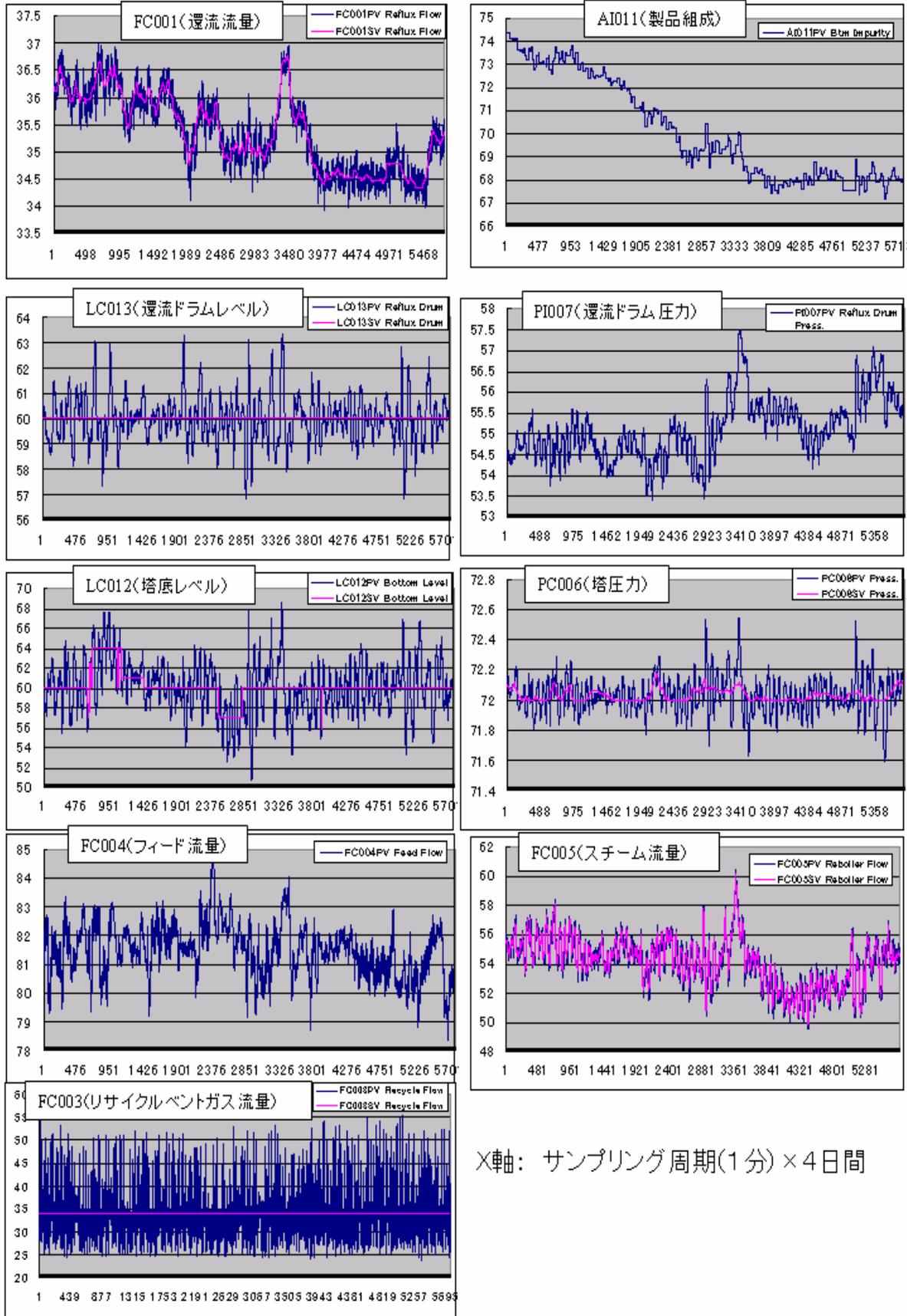


図3 ケース1 プラントの各部分の時系列データ (トレンドグラフ)

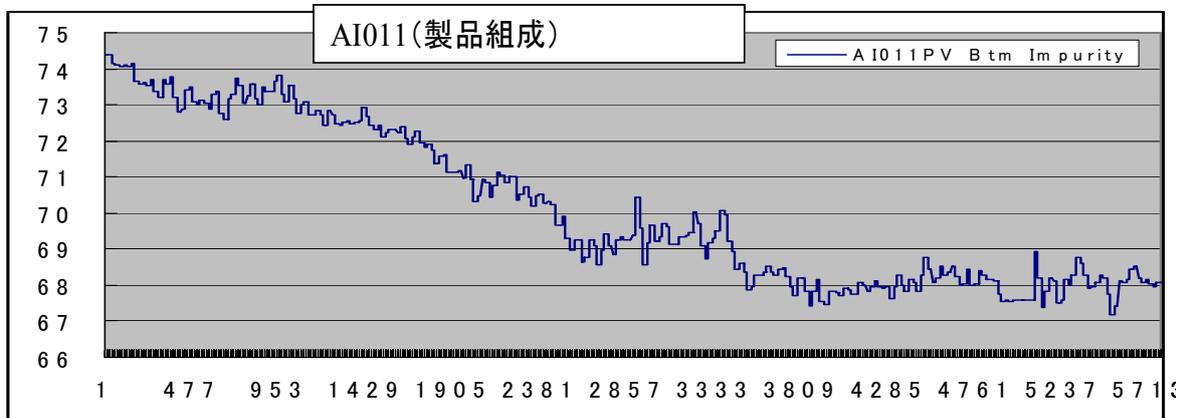
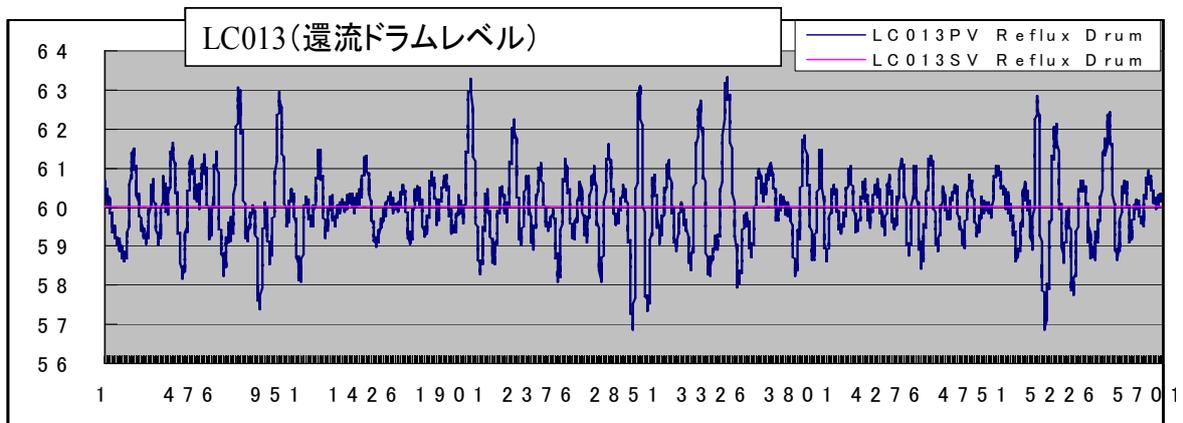
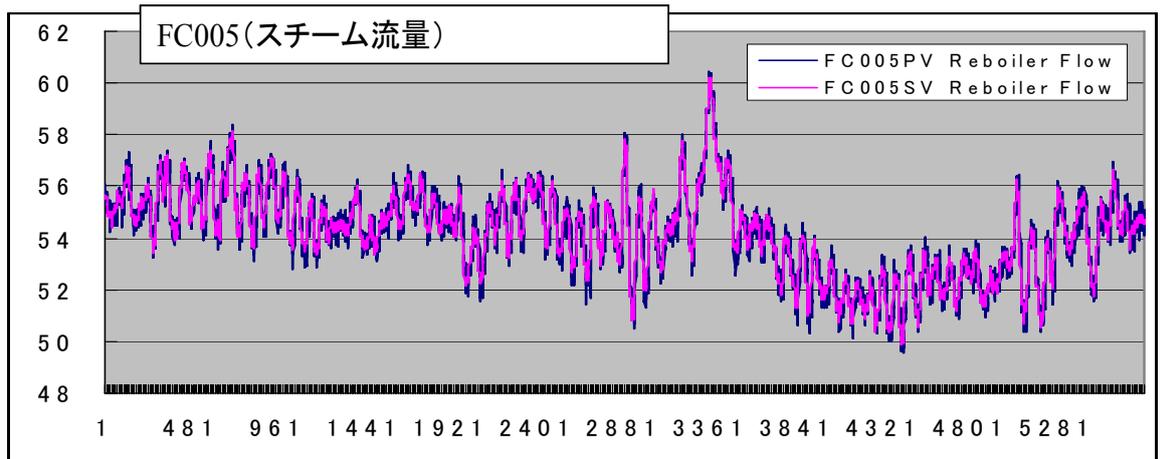
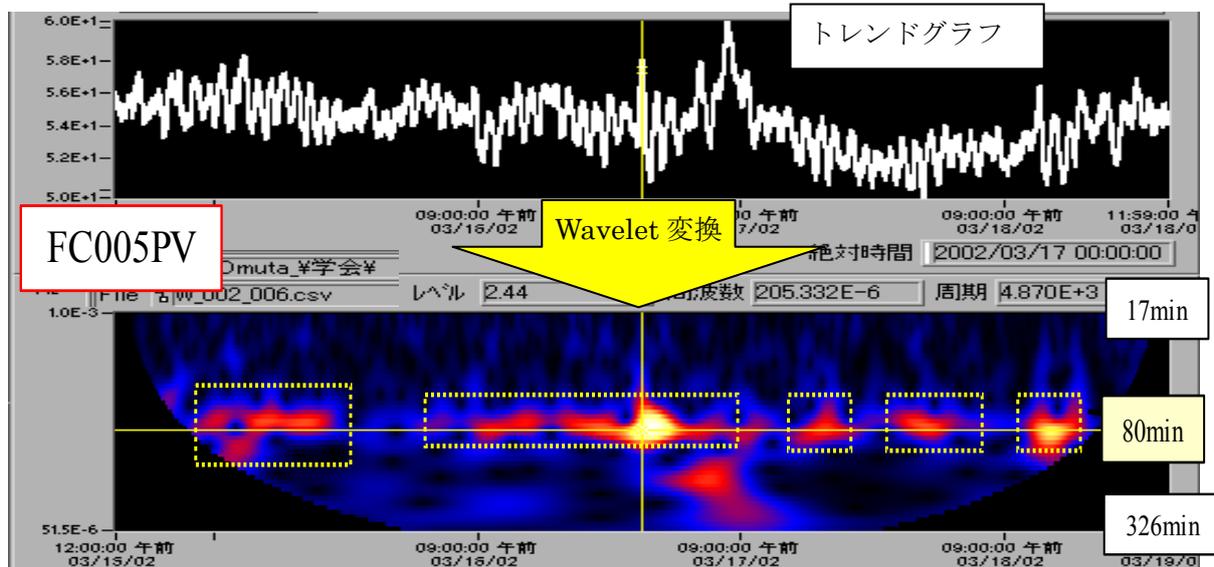


図4 トレンドグラフの拡大比較

図3のトレンドグラフから、3点ほど抜き出して拡大して比較した。それぞれベースラインの動きが違っていたり、ガス組成データ(AI011)はサンプリング周期が異なること(20分周期)から、お互いの関連性の有無はトレンドグラフからはわからない。

## (3) ウェーブレット変換による変動の解析

先の蒸留塔周りのトレンドグラフ(図3)についてウェーブレット変換を行って検討を行う。まずは特徴を確認するために、代表的なトレンドデータとして FC005(塔底温度制御スチーム流量)を選び、それをウェーブレット変換したものを図5に示す。



## &lt;特徴&gt;

- ① 変動成分には、80分の一定の周期の振動が含まれている。
- ② 80分周期の振幅は、時間とともに変化している。

図5 スチーム流量(トレンドデータ)のウェーブレット変換

各トレンドグラフをウェーブレット変換したものを 図6 に示す。トレンドグラフからは、特徴が見つからなかったが、時間-周波数領域で観察すると FC004, FC003 を除く蒸留塔の状態はそれぞれ 80min の周期で振動しており、その生成消滅のタイミングも一致していることが明瞭に見てとれる。(FC003, FC004 には、80min の明瞭な振動周期は見当たらない。) FC004 については、一部、80min 付近の振動の痕跡が見られるところもあるが、塔の圧力(PC006.PV)の位相と対照して観察すると塔の圧力が上昇した時に FC004 のフィード量が減少するような対応関係になっており、塔の圧力の変動に誘起されてフィード流量(FC004)の変動が生じているように解釈することができる。

そのため、80min の周期を特徴とする変動は塔の制御系において発生し、系の中に伝播していることが考えられる。

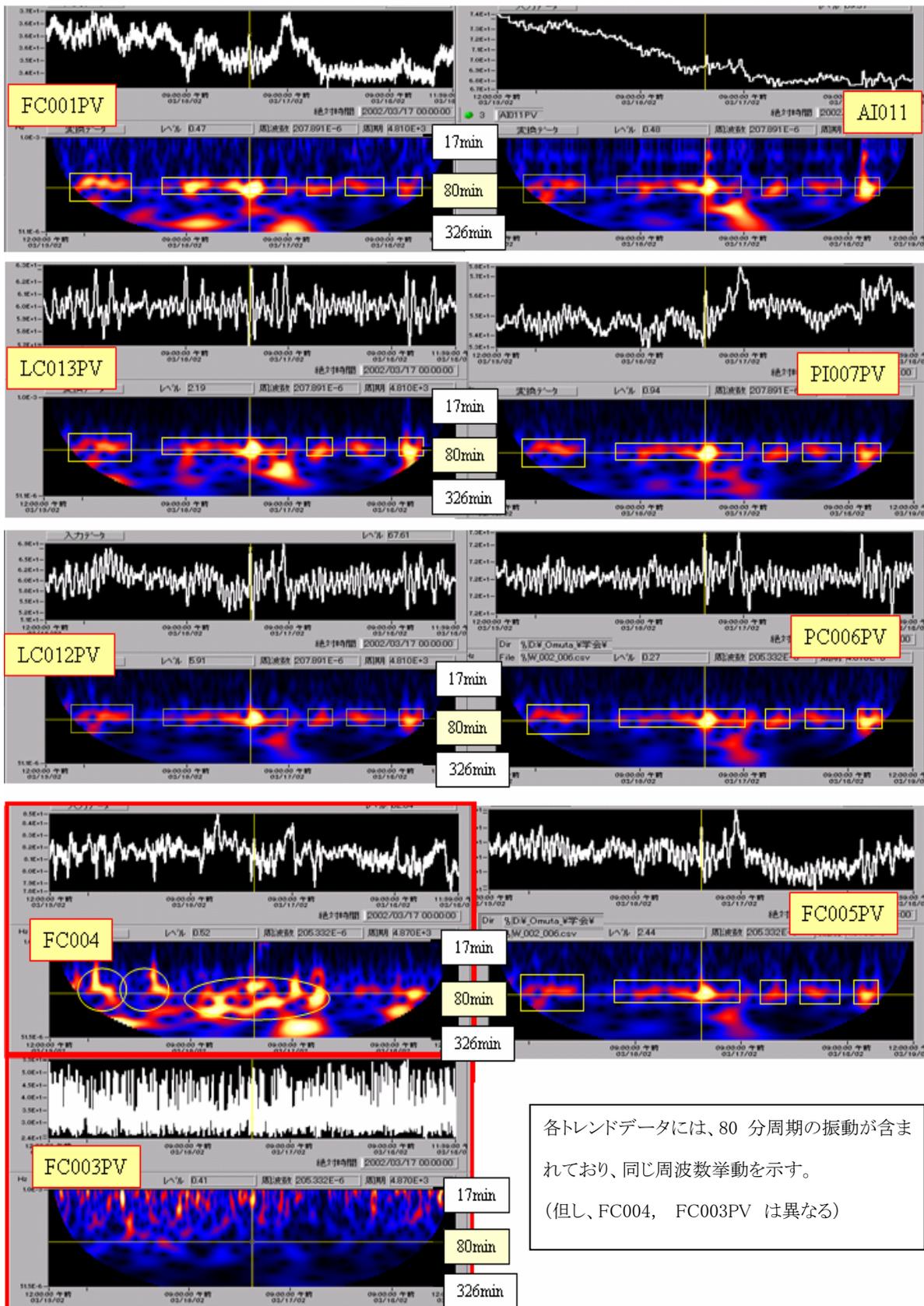


図6 ケース1プラントトレンドデータのウェーブレット変換

(4)バルブの作動状況についての考察

各制御ループのトレンドグラフの目標値(SV)と制御値(PV)の挙動を観察すると、FC005のSV, PVの変動(80分の振動)はほぼ一致しており、他の制御ループではSVの値を中心にして制御値(PV)が80分の周期で振動していることがわかる。このことから、80分の振動的な変動はFC005のSVから発生していることが示唆される。それでは、何故、FC005のSVは常に振動的な指示値を出しているのだろうか？ 図8に、FC005のSVとPVのトレンドグラフを示す。FC005のSV値は上位から常に変更されておりこれに対して流量値(PV)は追従するようになっているが、詳細に見るとSVに対してPVは約5分程度の遅れを持っている。SVとPVの動きを、X-Yプロットで整理すると、増加方向と減少方向(行きと帰り)が異なる軌跡を描いておりヒステリシスの特徴を持つことが示された。(図9 参照)

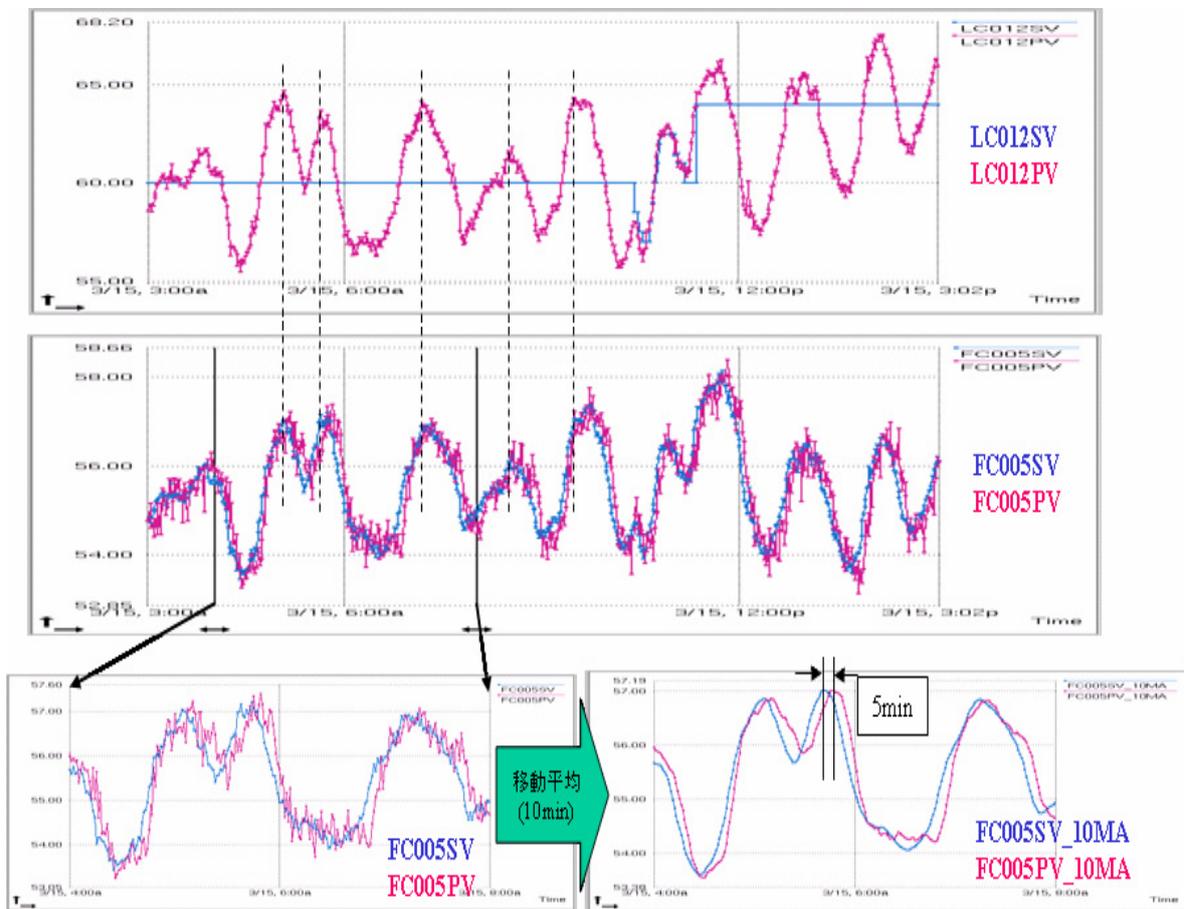


図8 FC005(スチーム流量)の設定値(SV)と制御値(PV)のトレンドグラフ

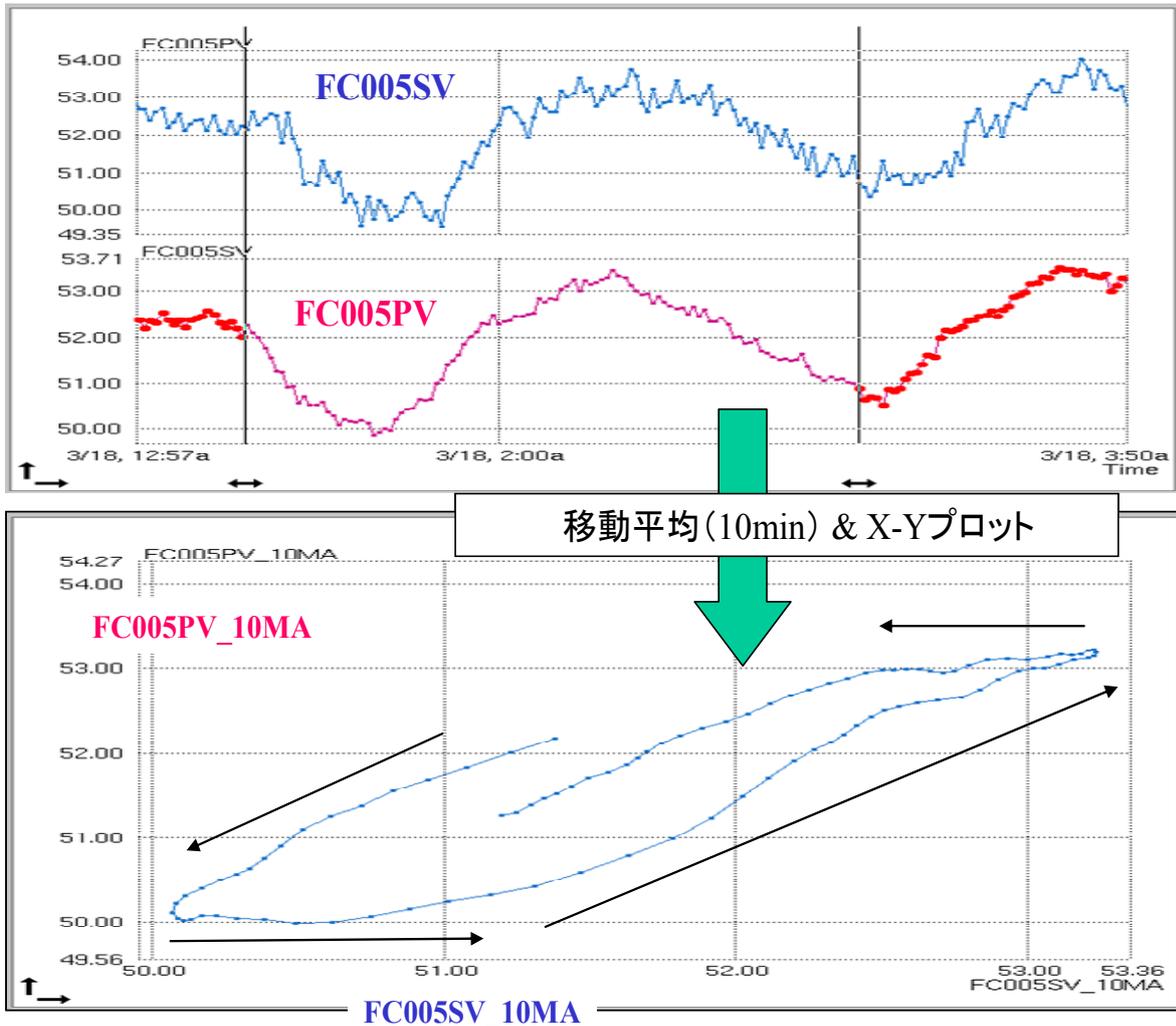


図9 FC005(スチーム流量)の設定値(SV)と制御値(PV)の X-Yプロット図

次に、FC005 バルブ装置の動作についての検討を行った。FC005の流量(PV)と操作量(MV)についてのX-Yプロットをとったものを示す(2002/3/18 0:00～ 24時間, 15:00～ 2.5 時間)。本来、装置としてのバルブは制御信号(MV)に対して、一対一に対応する動きが保証されていることが理想的であり、MV値の増大、減少の動的状態にあってもMVに対応するバルブのポジションは一意的に決まるべきである。(理想的なバルブ動作は、MVとPVの動きが、X-Yプロット上で一つの線になる)

バルブポジションについての情報は本検討のデータでは採取されていないが、バルブポジションの結果としての流量が発生するので、流量についてもMVの動きに対応して一意的に決まることが望まれている。以下(図10)に、FC005の操作量(MV)と制御値(PV)の関係を、トレンドグラフ、X-Yプロットにて示す。

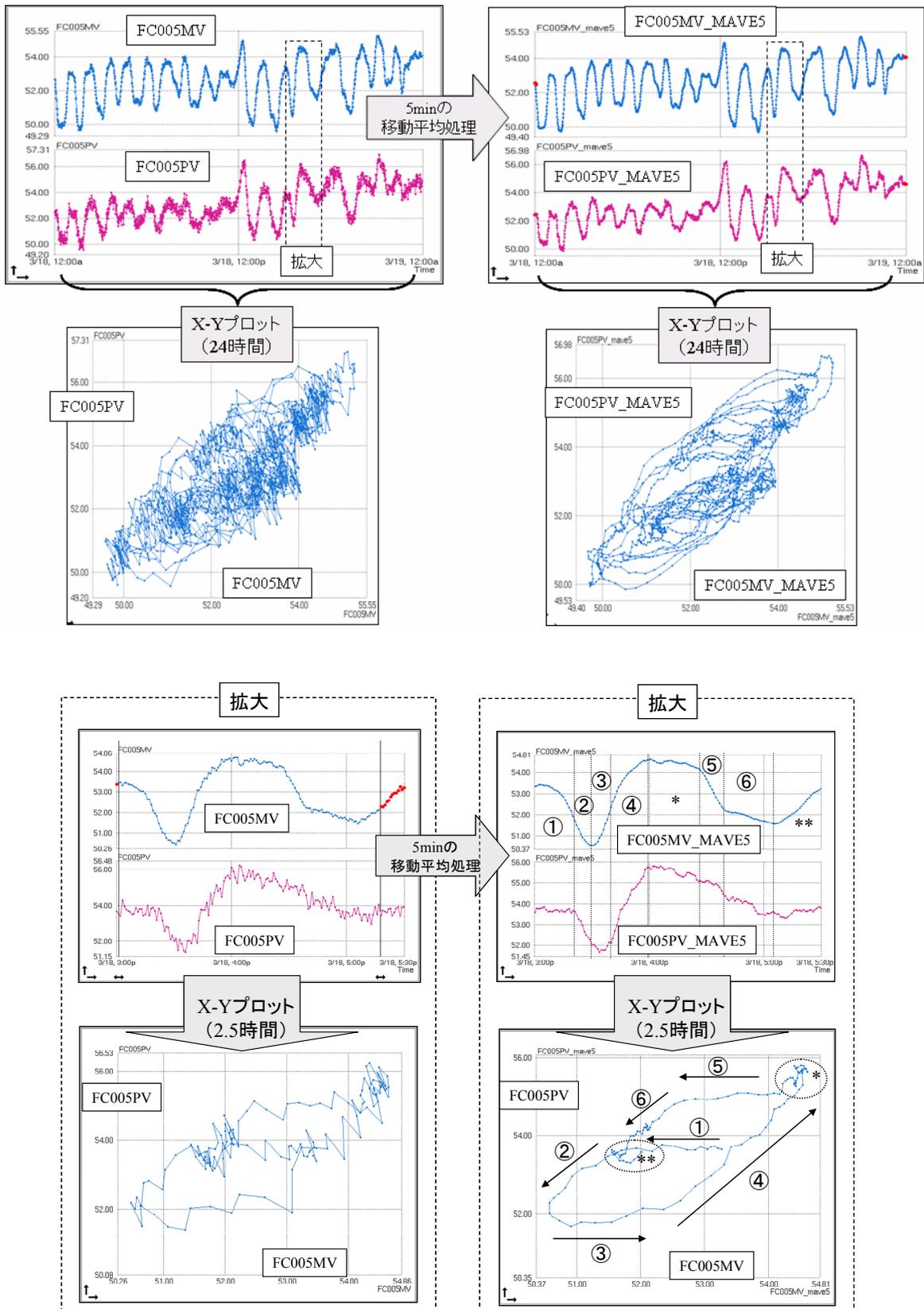


図10 FC005 の操作量(MV)と制御値(PV)の関係

ここで得られたX-Yプロットを観察すると、MVが極小から増加を開始の一定期間と極大から減少を開始する一定期間、MVの変化があるにもかかわらず流量の変化が発生しない。更にMVの増加と減少(行きと帰り)でMVと流量の関係は異なる軌跡を描いている。これから、バルブ信号に対して固着などによりバルブの動作が一意的に対応しない場合(スティクションなどを起こしている時)の典型的なヒステリシスがバルブ動作に含まれていることが推察される。

図1のフィードバックシステムの制御対象(プラント)部分にはバルブが介在するので、バルブ動作も含めて制御系を考える。制御系からの信号(MV)が対象を制御する時、バルブが操作端として存在する場合は、MVがアクチュエータを介してバルブを動かし流量(CV)へと変換していく。このとき、バルブの動作にヒステリシスがあると、MVからCVの間に時間的な遅れが発生しPLANTに無駄時間が存在している場合と同様になる。一般的に制御対象に無駄時間がある場合、フィードバック制御が難しくなることからわかるように、バルブのヒステリシスは制御系の能力を低下させることになる。

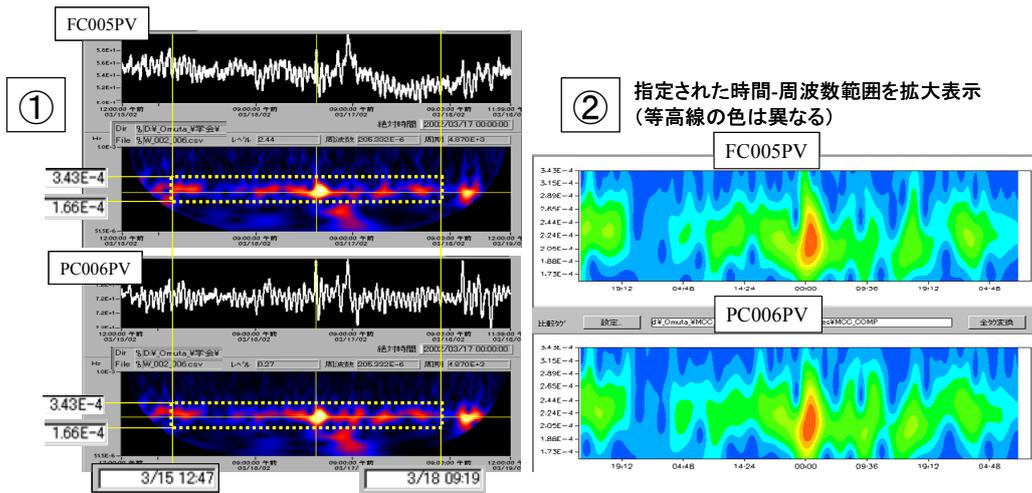
複数の蒸留塔を含む蒸留システムにおけるケーススタディでは、プロセス全体に比較的長周期(150 min付近)の振動が伝播しており、その原因の一つが制御バルブ挙動の非線形性に由来していることが報告されている。<sup>(4)</sup> 本ケース(ケース1)の蒸留塔の場合、このバルブのヒステリシスが持続振動の直接の発生原因かどうかは特定できないが、レベルの制御性能を低下させる可能性があると思われる。

#### (5) 持続振動の発生原因についての考察

本ケース(ケース1)のように系全体の持続振動が見られる場合は、系のどこかに振動の根本原因(Root Cause)が有り、それが系全体に伝播していることが考えられる。本ケーススタディでは各所からの信号について Wavelet 変換が行われており、図6のごとく 時間一周波数領域でのスペクトルパターンが既に得られているのでこれを利用して、持続振動の Root Cause を特定することを試みる。

プロセスの入力信号と出力信号を周波数に分解して同一の周波数帯で比較すると、出力信号の位相にはプロセスの伝達関数(たとえば、無駄時間+1次遅れ)に応じた遅れが含まれる。そのため、入力と出力の周波数成分を時間軸方向にずらしながら相関係数を計算することで、両者の時間のずれを測定することができる<sup>(5)</sup>。また、プロセス入力=原因系、プロセス出力=結果系、という考えに立てば時間的な順序から結果系に先行する原因系を特定することができる。(あるいはもっと単純に、同様な事象が複数存在する場合、時間的に先に起こった事象は後の事象の原因と考えることができる。)

そこで、図6に見られる時間一周波数領域のスペクトルについて周波数を持続振動周波数領域に絞り、時間領域をシフトさせながら3次元(時間、周波数、振幅強度)の相関係数を測定し、各信号の時間的な順序を見つけていった。(図11, 図12 参照)



③ 類似度: 
$$R = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (f_{i,j} - \bar{f})(g_{i,j} - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (f_{i,j} - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (g_{i,j} - \bar{g})^2}}$$

$f, g$ : 信号強度  
 $I$ : 周波数範囲  
 $J$ : 時間範囲  
 類似度: 94.34%

- ①信号をWAVELET変換して、時間一周波数領域図を描く。
- ②比較対照する信号の時間一周波数範囲を切り出す。
- ③類似度評価法で、両者の類似度を定量的に算出する。

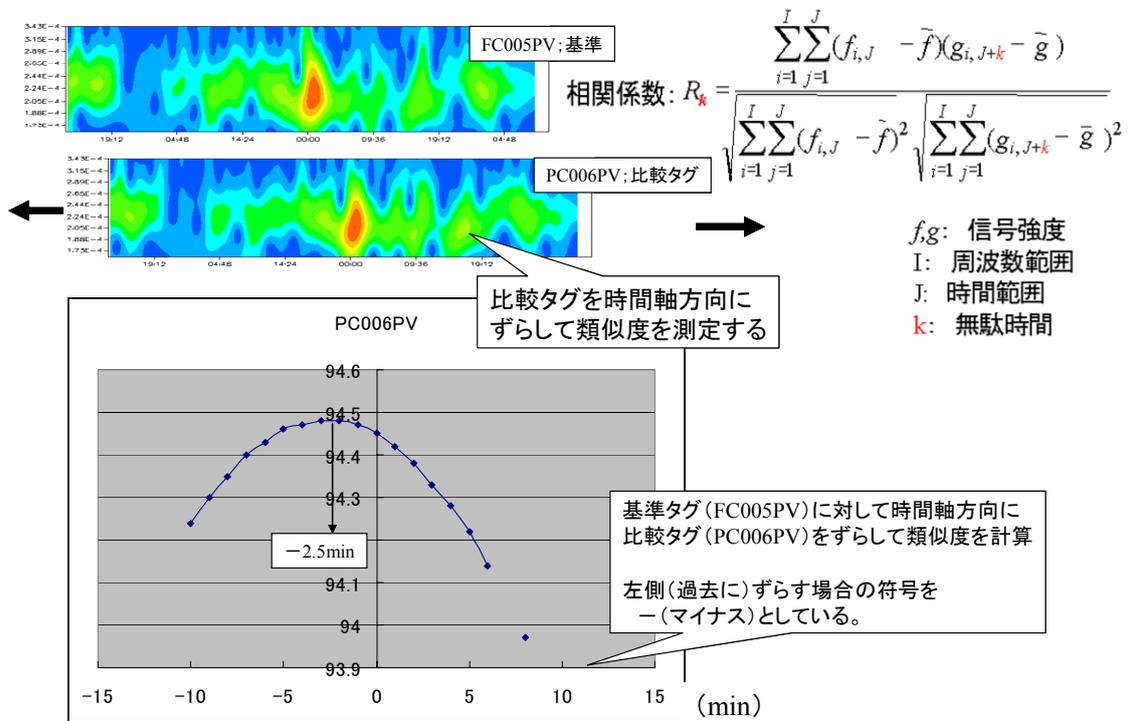


図11 信号の時間的順序の算出方法

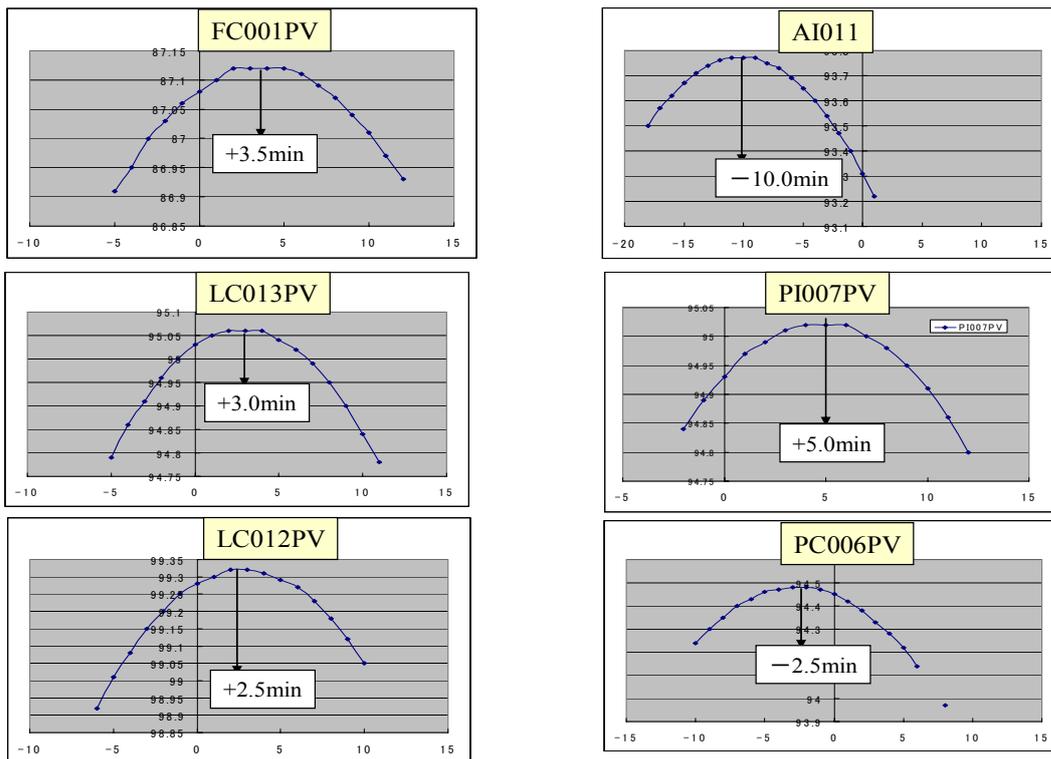


図12 各信号の FC005 に対する前後関係 (+:早い, -:遅い)

FC005PVの信号を基準として、それに対する各信号の時間的ずれを測定したところ、各信号の時間的な順序は以下ようになった。(括弧内は、基準信号からのずれ時間。+:早い, -:遅い)

PI007PV (+5min) → FC001PV (+3.5min) → LC013PV (+3.0min) → LC012PV (2.5min) → FC005PV (0min) → PC006PV (-2.5min) → AI011 (-10min)

これによると、持続振動の Root Cause に一番近いものとして、PI007PV、その次に FC001PV が示されている。そこで、PI007PV、FC001PV の関係について調査を行った。

PI007PV は還流ドラムの圧力でありこれは塔の圧力制御(PC006PV)の下流となっているがこの圧力の制御は行われていない。そのため、還流ドラムの圧力は流量バランス、温度変化から決まる。

FC001PV は MPC の制御変数となっているために、上位の MPC から設定値(SV)が与えられてこれに対応した流量を出力するように設計されている。

まず、FC001PV の FC001SV に対する追従性(下位システムの制御性)を調べたところ、SV に対する PV の追従性が悪く、PVの値は遅れている(図13 参照)。そこで、操作信号(FC001MV)と被制御信号(FC001PV)の関係を調べたところ、MV に対してPVがかなりずれて発生しておりピークの位置で比較すると30minほどの遅れが観測された(図14 参照)。この原因を探るべく上流の圧力(PI007PV)と FC001PV の関係を調べたところ、FC001PVはPI007PVの変動に大きく影響されており、バルブ操作信号(FC001MV)との関係を阻害していることが推定された。(図15 参照)

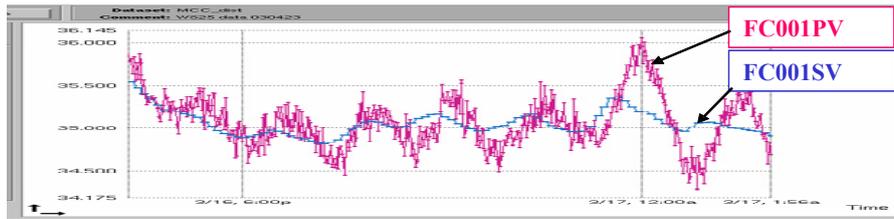


図13 FC001PVの設定値(SV)に対する追従性

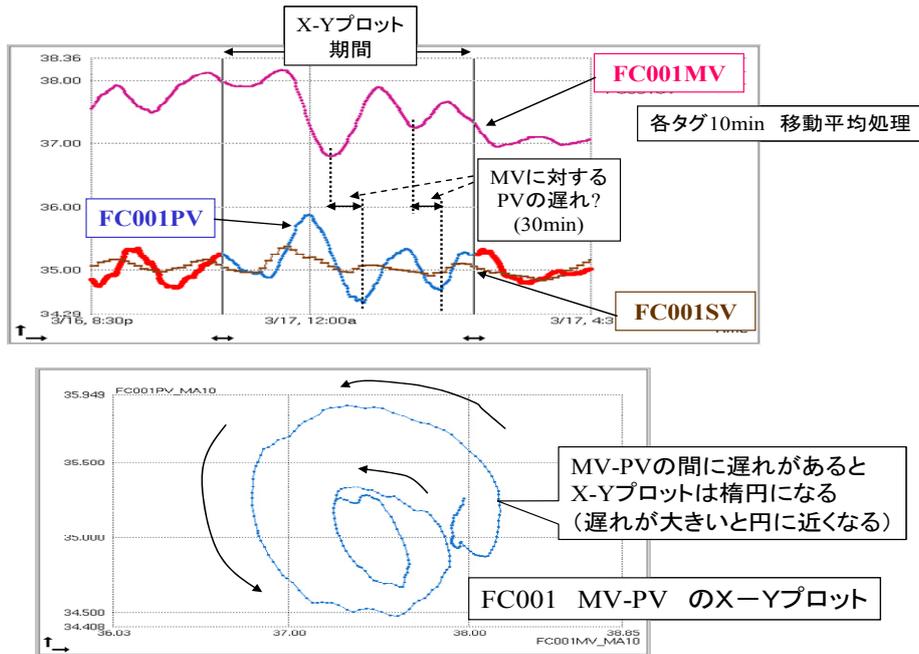


図14 FC001MVとFC001PVの関係

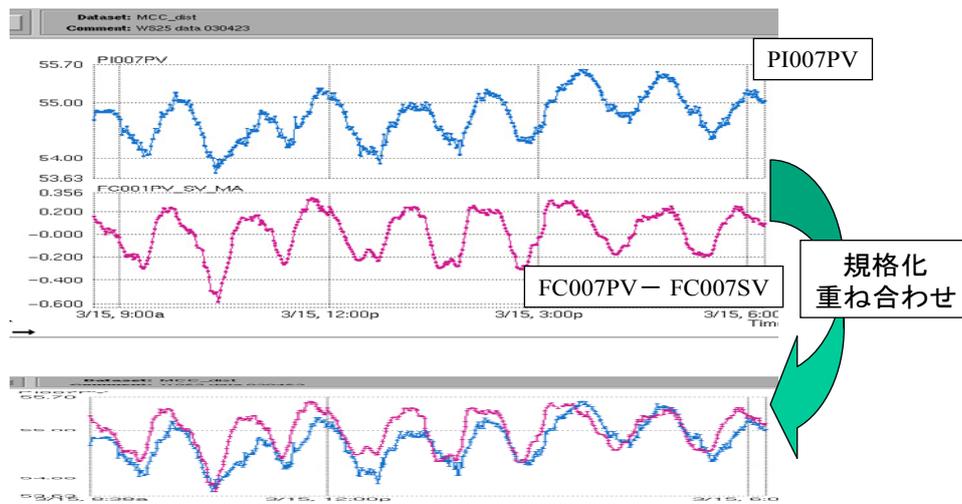


図15 FC007 への上流圧力(PI007PV)の影響

これまでの関係を整理してみる。

MPC からの制御信号(FC001SV)が還流流量(FC001PV)を制御しようとしているが、還流ドラムの圧力(PI007PV)の変動は塔に還流する流量(FC001PV)へ大きな外乱となるために、流量制御の関係(FC001のMV-PV)に制御上の遅れ(30min)を生じる。SVとPVの差を修正するために、MPCからは常にSVにより修正変更が指示されるが、外乱のためにSVとPVが一致することは無い。これが、還流ドラムにおける持続振動(80min周期)の発生につながっている可能性が高い。

更に、ここで発生した持続振動は、還流流量の変動となって塔に戻り塔底のレベルは変動する傾向を持つ。塔のレベル制御系はバルブのヒステリシスがあるためにこの変動(LC012PV の変動)傾向を抑制する能力が十分でない。そのため、状態の変動は塔の圧力変動(PC006PV)にまで伝播し、塔全体の持続振動になっていくのだろう。

結局、Wavelet による時間一周波数領域のスペクトルから求めてきた持続振動の Root Cause の場所に、制御上の問題点(バルブ挙動における、MV-PV 挙動の非線形性)が有った。そしてその MV-PV 挙動の非線形性は、バルブ上流側の圧力変動により引き起こされており、この流量制御に関する非線形が持続振動発生の原因になっていると考えられる。

対策としては、FC001PVの積極的な操作を控えること(たとえば、MPC の操作端から切り離して、下位の制御ループでの定値制御)、あるいはPI007 の圧力を積極的に一定にするために、PI007-PC003 の還流ドラム圧力のカスケード制御を行うことがあげられる。しかし、実際のプラントでの変動抑制の具体的な対応についての検討は本ケーススタディの範囲ではない。

具体的な対応の検討においては、変動の大きさにより発生している不具合の程度や調整作業のコスト、対応によって得られる効果の大きさ、などについての総合的な判断に基づいて対応策の実施が決められる。試みに、対応策の候補を列挙すると以下のようなものがある。

- ① 上位から切り離して下位システムによる FC001 定値制御
- ② 還流ドラム圧力(PI007PV)の定値制御(PC007-FC003 のカスケード制御)
- ③ FC005のバルブの点検、メンテナンス実施

### 6.3.2. 系全体が変動している蒸留塔(ケース2)<sup>(6)</sup>

#### (1)プロセスの記述

蒸留塔のプロセスにおいて各所の状態量(塔底レベル、塔圧力、塔底温度、フィード量)のトレンドデータについて検討する。以下にプロセスフローを示す。(図16 参照)

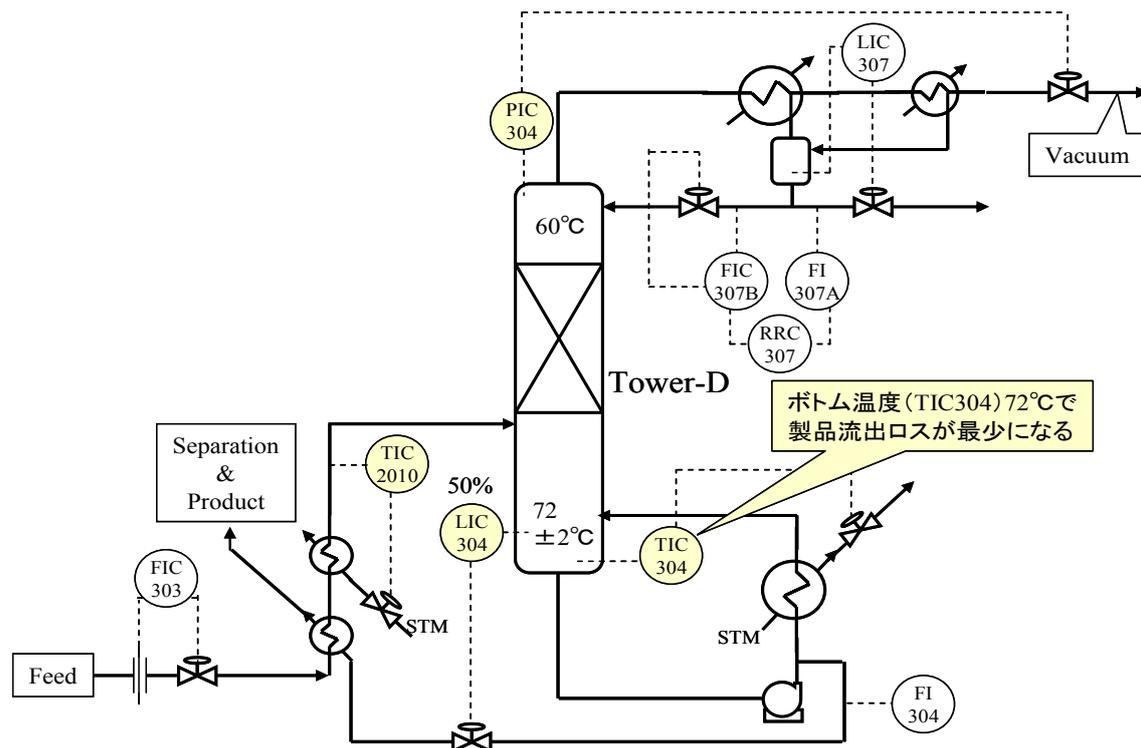


図16 蒸留塔(ケース2)プロセスフロー図

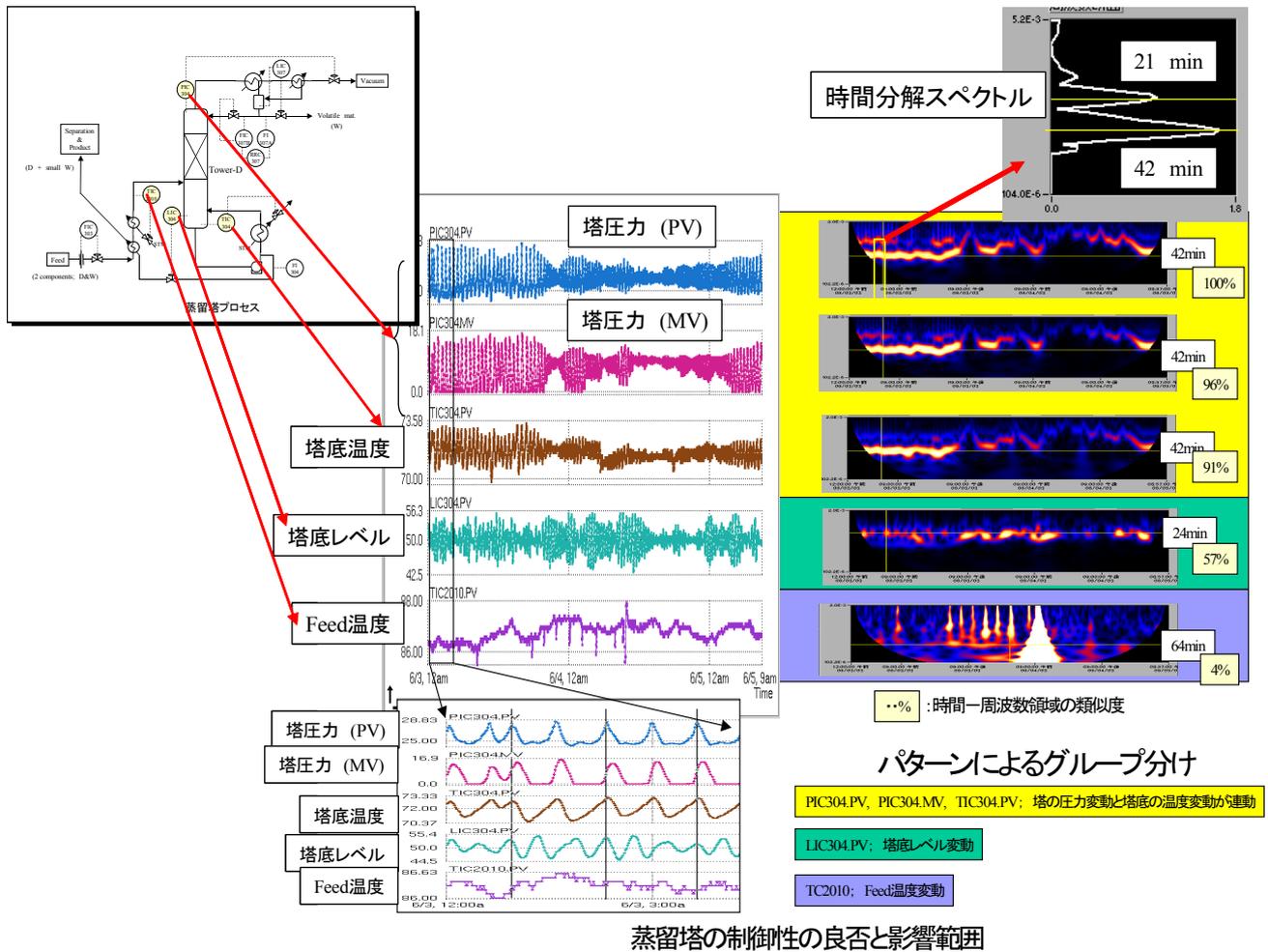
## (2) 変動の状態と操業上の問題点

塔圧力制御(PIC304.PV, PIC304.MV)、塔底温度(TIC304. PV)、塔底レベル(LIC304.PV)、フィード温度(TIC2010. PV)の運転中のトレンドデータを調べた。トレンドグラフから塔全体の各種状態量が振動しており系全体が不安定になっていることがわかる。一見すると、制御系全体に問題があるように見えるが、一部のフィードバック制御のパラメータ調節が不適切で、それが原因で一部に振動が発生してその変動が系全体に伝播している可能性もある。しかし、原因となっている制御ループはどこで、どの範囲まで影響が伝播しているのかはトレンドグラフだけではわからない。ちなみに、塔の各部分の状態は以下のように変動しており、この変動は運転でも意識されている。

PIC304.PV(塔圧力):  $26 \pm 2$  kPa abs (減圧蒸留),      TIC304.PV(塔底温度):  $72 \pm 2^\circ\text{C}$   
 LIC304.PV(塔底レベル):  $50 \pm 2\%$  ,      TIC2010.PV(フィード温度):  $86.3 \pm 0.3^\circ\text{C}$

## (3) ウェーブレット変換による変動の解析

それぞれのトレンドデータについてWavelet変換を行いそれらについての比較を行ったところ、時間一周波数領域上に特徴的なパターンが現れた。塔圧力制御(PV,MV)と塔底温度のパターンは42分付近の振動周期が共通しており、塔底レベルには、42分は無く24分の振動周期を持つ。Feed温度には特定の振動周波数は見られない。これらのことから、塔圧力と塔底温度の変動は関係しており、塔底レベルとFeed温度はそれぞれ独立した変動であることが示唆される。



蒸留塔の制御性の良否と影響範囲

図17 ケース1の運転データと Wavelet 変換

(4) 変動原因についての考察

塔圧力 と 塔底温度 のパターンを仔細に観察すると 塔圧力 には塔底温度に比べて顕著な倍音の振動(20分付近の周期)が存在していることがわかる。倍音が顕著に存在することは、振動の原因 (Root Cause)に近いことを意味しており、塔圧力の制御系が40分付近の振動の発生元でここから発生した振動が 塔底温度の変動に伝播していると推定される。以上の検討に基づき、塔圧力制御系 (PIC304)についてPIDパラメータの調整を行った。

PIDパラメータの調整は、圧力制御系をマニュアルモードにして、ステップテストからの応答をとり、標準的な無駄時間、時定数の同定方法を試みた。調整前のパラメータは積分動作が強く、これを弱める方向で以下の数値に調整した。

調整値: P304 P:240→120, I:60→600sec D:0→0sec

パラメータ調整前後の蒸留塔の状態を図19に示す。パラメータ調整の前後比較から明らかなように、

塔圧力制御のパラメータの調整を行うと、塔圧力に関する振動が消滅すると同時に塔底温度の振動も無くなる。そして、塔底レベルの振動はそれとは無関係に継続している。

当初の Wavelet 変換から推測された関係(以下)がPIDパラメータ調整により確認された。

「P304 と T304 は干渉しており、L304, T2010 はそれとは独立に変動していること」

補足ながらのベルト、ケース2のプラントのパラメータ調整後は、塔の安定的な運転が行われるようになり、運転操作に関する労力削減と、安定的な運転の継続により効率的な生産が行われるようになった。

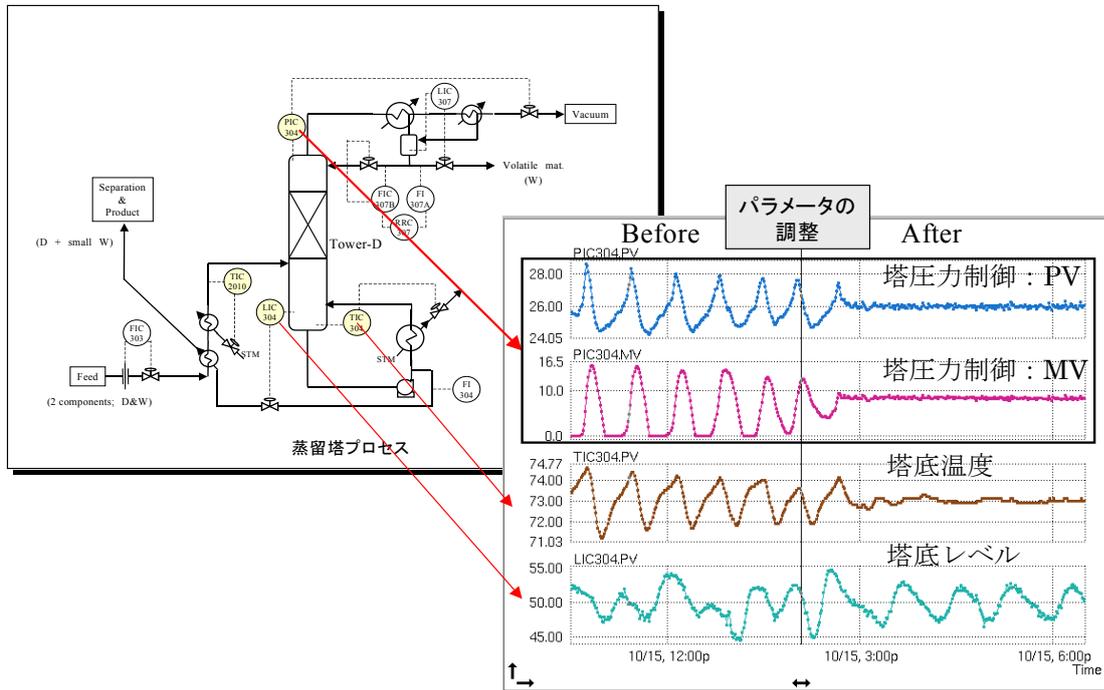


図18 蒸留塔の圧力制御系 におけるパラメータ調整とその影響

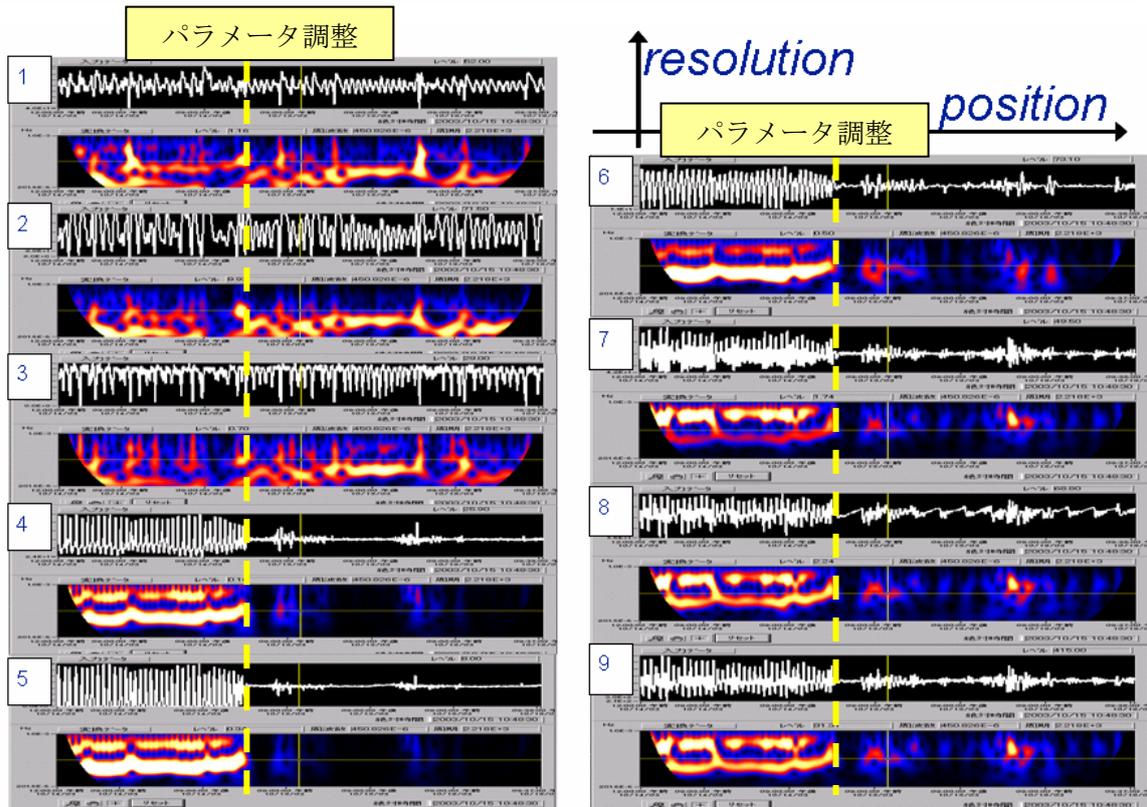
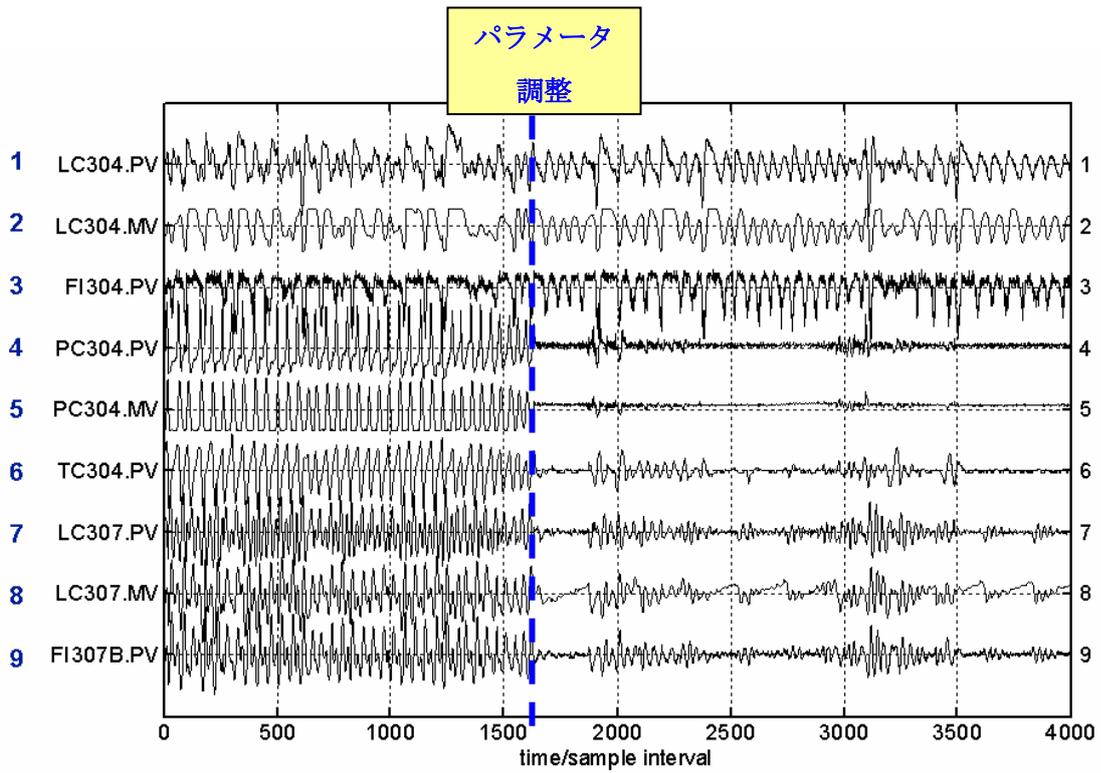


図19 ケース1プラント 各部分運転データとそのウェーブレット変換(詳細図)

#### 6.4. 結論

- (1) 蒸留塔の制御系から得られる時系列データにウェーブレット変換を応用することで、制御系の不良による持続振動を見つけ出すことが可能になった。
- (2) 持続振動を起こしている系の周波数－時間領域のスペクトルの時間的な関係から、Root Cause を特定した。
- (3) 制御系に非線形応答が存在すると定周期の振動が発生することを実際の蒸留塔の運転データで確認した。
- (4) 非線形応答は、バルブの開度制御と流量(MV－PV)の関係に現れることが多く、この関係はX－Yプロットの形状により確認できる
- (5) いったん発生した振動は、蒸留塔の系全体に伝播する。
- (6) 系全体に広がる振動を抑制するには、制御系のデータに含まれる非線形性に注目して振動の発生元(Root Cause)を特定し、これについての対策を講じることが効果的である。
- (7) 蒸留塔全体に伝播した振動的な変動のRoot Causeを発見し、これへの対処を行うことで系全体が安定化することを実証した。(ケーススタディ2)

#### 参考文献

- (1) Thornhill,N.F., Cox,J.W. and Paulonis,M., 2003, Diagnosis of plant-wide oscillation through data-driven analysis and process understanding, Control Engineering Practice, 11. 1481-1490
- (2) 橋本伊織、長谷部伸治、加納学 「プロセス制御工学」 朝倉書店 2002年
- (3) 山本重彦、加藤尚武 「PID制御の基礎と応用」 朝倉書店 1997年
- (4) Vinay Kariwala, M.A.A.Shpukat Choudhury, Sirish Shah, J.Fraser Forbes, Edward S Meadows, Hisato Douke, Haruo Takada, 2004, “Detection and Diagnosis of Plant-wide Oscillations: An application study” IEEE APC in Vancouver, session paper
- (5) IMS国際共同研究(0303:プラント操業における高度エンジニアリング手法に関する研究) 報告書
- (6) Matsuo,T., Tadakuma, I., Thornhill,N.F., 2004, Diagnosis of a Unit-Wide Disturbance Caused by Saturation in Manipulated Variables, IEEE APC in Vancouver, session paper