

制御性能診断ツール *LoopDiag*

【ツールの紹介】

制御性能診断ツール **LoopDiag** は、MATLAB を使用して開発されたソフトウェアです。最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価のほか、時系列データ解析、バルブステイクション（調節弁固着）検出などの実用的な機能が組み込まれています。

MATLAB を使用して開発された **LoopDiag** は、MATLAB 環境で動作することはもちろん、Windows アプリケーションとして非 MATLAB 環境でも動作します。また、MATLAB GUI の活用により、グラフィカルで使用感に優れたインターフェースを備えているため、初心者でも簡単に使用できます。

【開発の経緯】

制御性能診断ツール **LoopDiag** は、日本学術振興会プロセスシステム工学第 143 委員会において、「制御性能監視—プロセス産業での実用化を目指して—」というテーマを掲げて、2002 年に立ち上げられたワークショップ No.25（通称 WS25）の活動成果の 1 つです。WS25 の活動は 2002 年 4 月から 2004 年 6 月まで続き、それ以降は報告書の作成と **LoopDiag** の開発が進められてきました。この度、最終報告書の発行に合わせて、制御性能診断ツール **LoopDiag** を公開することとなりました。

【使用条件】

制御性能診断ツール **LoopDiag** は、日本学術振興会プロセスシステム工学第 143 委員会の委員だけでなく、一般にも無償配布します。ただし、本ソフトウェアを使用した結果については、使用者が全責任を負うものとします。本ソフトウェアの使用によって発生したいかなる損害についても、日本学術振興会、プロセスシステム工学第 143 委員会、およびソフトウェア開発者・配布者は一切の責任を負わないものとします。制御性能診断ツール **LoopDiag** を使用される場合には、この使用条件を承諾されたものとします。

なお、制御性能診断ツール **LoopDiag** のソースコードは、日本学術振興会プロセスシステム工学第 143 委員会の委員にのみ公開します。その他、下記開発担当者が特に必要と認めた場合にのみ、委員以外へも配布できることとします。ソースコードの取り扱いには十分にご注意下さい。

また、制御性能診断ツール **LoopDiag** を実用的なツールへと発展させていくため、ご感想・ご要望を開発担当者にフィードバックしていただけますようお願いいたします。

【開発担当】

久下本秀和	所 属： 住友化学(株) 生産技術センター
	連絡先： kugemoto@sc.sumitomo-chem.co.jp
加納 学	所 属： 京都大学大学院工学研究科化学工学専攻
	連絡先： kano@cheme.kyoto-u.ac.jp

【更新履歴】

2005 年 9 月 1 日 **LoopDiag Version 1.0.2** を公開

【資料目次】

制御性能診断ツール LoopDiag 使用マニュアル	3
制御性能診断ツール LoopDiag の使用例	11
制御性能診断ツール LoopDiag 使用マニュアル 付録	17

【資料作成】

作成日 2005 年 9 月 1 日 初版

作成者 久下本秀和, 加納学

Copyright (C) 2005 JSPS143 WS25. All rights reserved.

日本学術振興会 プロセスシステム工学第 1 4 3 委員会 ワークショップ No.25

制御性能診断ツール LoopDiag 使用マニュアル

1. LoopDiag の設定

制御性能診断ツール LoopDiag を使用するための設定について説明します。

1-1. MATLAB 環境での設定

MATLAB 環境で使用する場合、特に設定は必要ありません。ただし、MATLAB 本体に加えて、システム同定ツールボックスが必要です。

1-2. 非 MATLAB 環境での設定

非 MATLAB 環境で本ソフトウェアを実行するためには、使用する計算機に MCR をインストールしなければなりません。既にインストールしてあれば、この作業は必要ありません。Windows 環境の場合、MCRInstaller.exe を実行するだけです。UNIX 環境の場合、MCR のインストールに加えて、パスと環境変数の設定が必要になります。以下では、Windows 環境の場合についてのみ説明します。

手順 1) MCRInstaller.exe を使用する計算機の適当なフォルダにコピーして、実行して下さい。

MCRInstaller が起動し、ウィンドウが開きます。

手順 2) MATLAB Component Runtime のウィンドウが現れたら、Next をクリックして下さい。

手順 3) 画面の表示に従って、インストール先フォルダ等の設定を行って下さい。標準通りで問題ありません。

手順 4) インストール作業が完了したら、Close ボタンをクリックして、作業を終了して下さい。

2. LoopDiag の実行

LoopDiag の実行方法について説明します。

2-1. MATLAB 環境での設定

loopdiag.m を実行して下さい。

2-2. 非 MATLAB 環境での設定

loopdiag.exe を実行して下さい。

3. LoopDiag の使用方法と機能

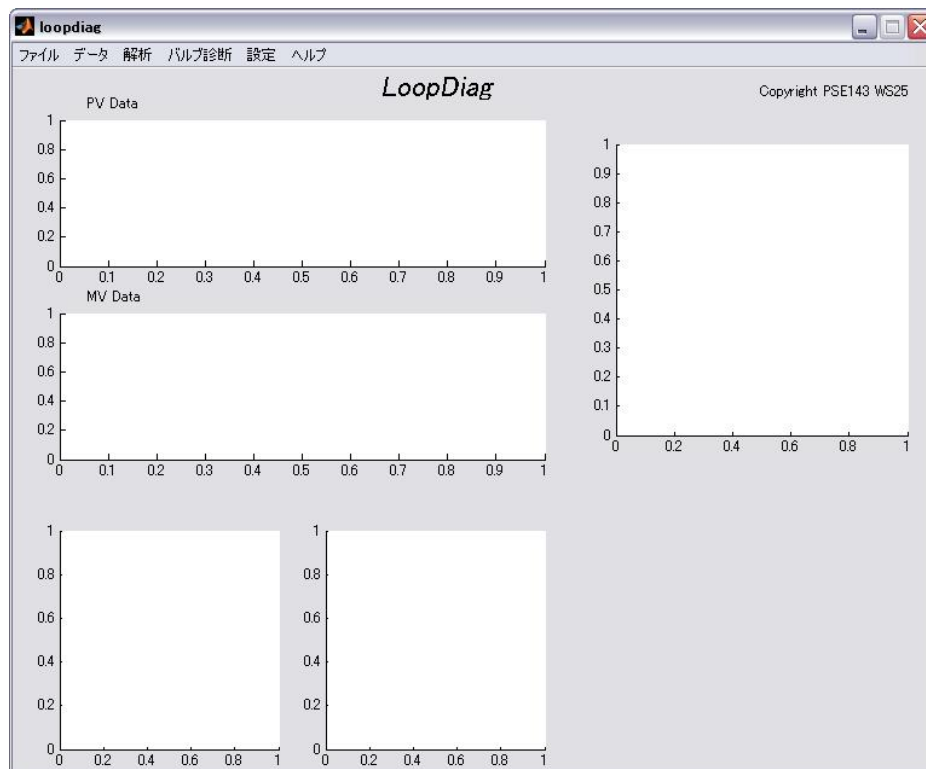
制御性能診断ツール LoopDiag の使用方法および機能について説明します。

3-1. 使用方法

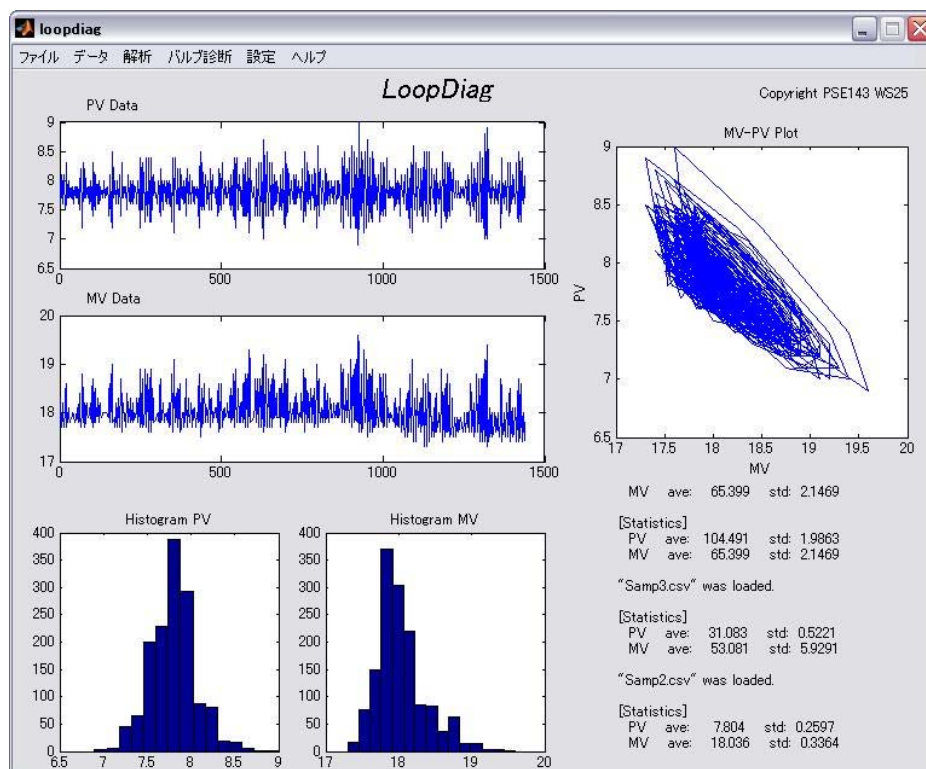
loopdiag を起動すると、ウィンドウ (LoopDiag の GUI) が現れます。

まず、「ファイル」→「読み込み」によって、解析対象とするデータを読み込みます。データは、通し番号、PV データ、MV データの 3 列からなる CSV ファイル形式 (カンマ区切り) で用意します。ただし、カンマの前後に空白を入れないで下さい。具体例は、本ソフトウェアに付属のサンプルデータを参考にして下さい。

データを読み込んだ後、LoopDiag の各種機能を利用して解析を実施することができます。



LoopDiag 起動画面



データの読み込み

表 LoopDiag 機能一覧

メイン・メニュー	サブ・メニュー	機能
ファイル	読み込み	
	エクスポート	各種結果をテキスト形式で出力
	印刷	
	閉じる	
データ	統計値表示	平均，標準偏差
	平均値除去	平均を 0 に変更
	正規化	平均を 0，分散を 1 に変更
	フィルタリング	1 次遅れフィルタによるスムージング
解析	MV-PV プロット	PV と MV のトレンド，ヒストグラム，および MV-PV プロット
	相関解析	PV と MV のトレンド，自己相関関数，および相互相関関数
	スペクトル解析	PV と MV のトレンド，パワースペクトル，およびクロススペクトル
	制御性能評価	PV と MV のトレンド，白色ノイズ，閉ループ系インパルス応答，および制御性能指標
バルブ診断	不動区間カウント法	スティック指標，スティック幅
	Backlash 関数同定法	スティック指標，スティック幅
	定性的信号化法	スティック指標，スティック幅
	総合評価	上記 3 法のスティック指標とスティック幅，および総合評価
設定	フィルタリング	フィルタ時定数
	制御性診断	むだ時間最大値，AR モデル次数，MA モデル次数
	バルブ診断	3 法の閾値
	既定値保存	
ヘルプ	バージョン	
	使い方	

3-2. 機能

制御性能診断ツール **LoopDiag** の機能を前頁の表にまとめます。以下では、各機能について簡単に説明します。

【統計値表示】

PV と MV の時系列データの平均値 (ave) と標準偏差 (std) を出力します。

【平均値除去／正規化】

平均値除去は、時系列データの平均を 0 にします。正規化は、平均を 0、標準偏差を 1 にします。結果はトレンドグラフに反映されます。

【フィルタリング】

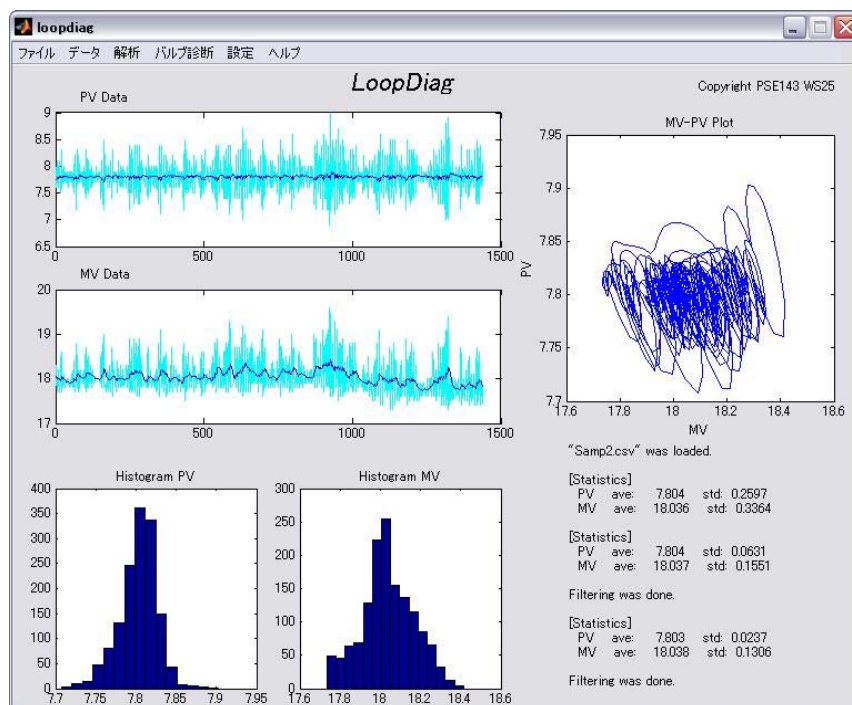
測定ノイズの除去に利用します。

PV と MV の時系列データを 1 次遅れフィルタでスムージングします。「設定」メニューで、PV と MV についてのフィルタ時定数を独立に設定できます。結果はトレンドグラフに表示されます。濃い青色がフィルタリング後の時系列データ、薄い青色がフィルタリング前の時系列データです。

フィルタリングは繰り返し何回でも実行できます。「戻す」を選択すると、フィルタリングが解除され、元の時系列データに戻ります。

【MV-PV プロット】

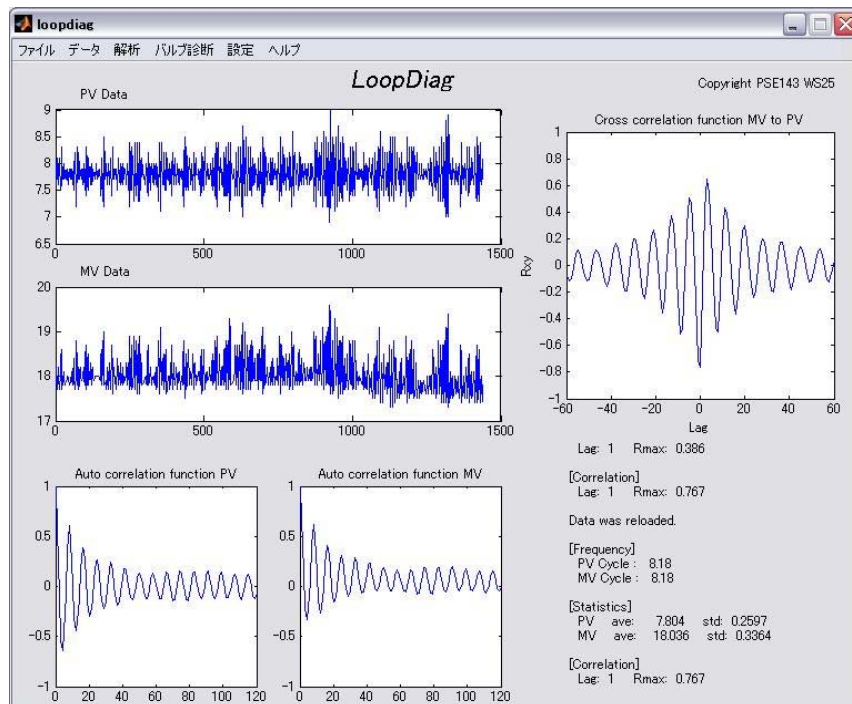
PV と MV のトレンドの他、PV と MV のヒストグラム（下）、および MV-PV プロット（右上）を表示します。MV-PV プロットは、バルブスティクション（調節弁固着）が疑われる場合に使用すると効果的で、スティクションの特徴の有無を容易に判断できます。



フィルタリングと MV-PV プロット

【相関解析】

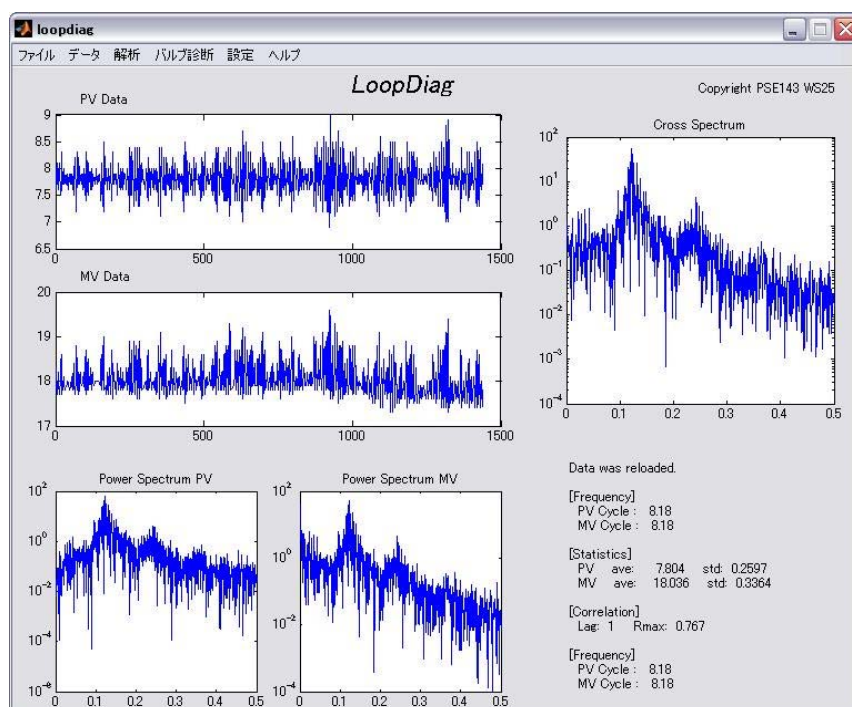
PV と MV のトレンドの他，自己相関関数（下）と相互相関関数（右上）を表示します。周期性やむだ時間を判断するのに便利です。



相関解析

【スペクトル解析】

PV と MV のトレンドの他，パワースペクトル（下）とクロススペクトル（右上）を表示します。周期性を判断するのに便利です。



スペクトル解析

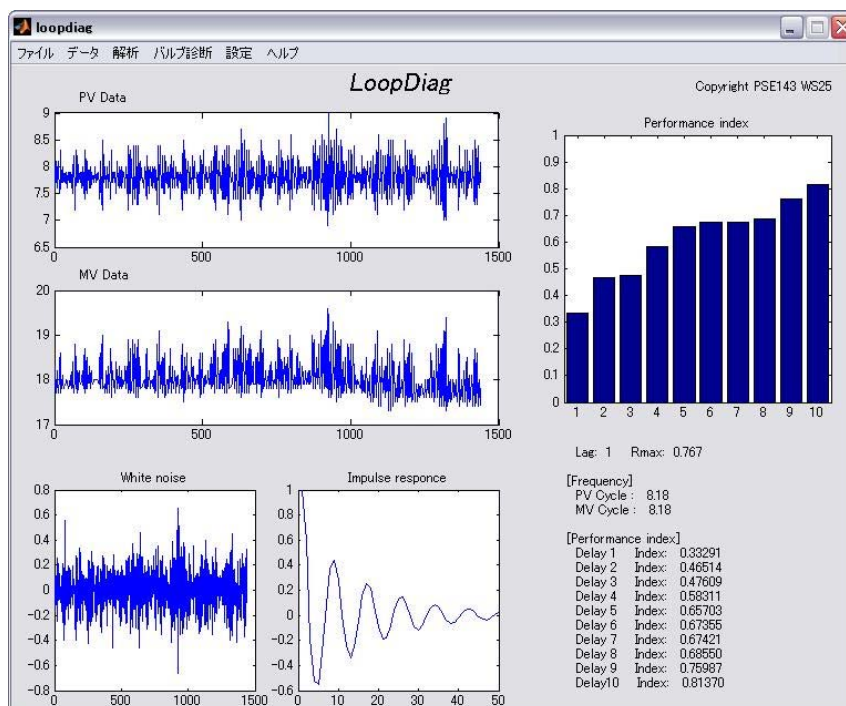
【制御性能評価】

PV と MV のトレンドの他、同定した ARMA モデルから算出される白色ノイズの時系列データ（下左）と閉ループ系インパルス応答（下右），および制御性能指標（右上）を表示します。

算出した白色ノイズが白色でなければ（自己相関を持つようであれば），ARMA モデルが適切に構築できていないことになります．その場合は，ARMA モデルの次数を変更して下さい．「設定」メニューで，ARMA モデルの次数を設定できます．詳しくは，時系列データ解析やシステム同定のテキストを参照して下さい．

閉ループ系インパルス応答は，外乱を生起している白色ノイズから制御量 PV までの閉ループ伝達特性のインパルス応答です．このインパルス応答が迅速かつ滑らかに 0 に収束していれば，制御システムは良好に機能していると考えられます．応答が振動的な場合は，制御が強すぎる可能性が高く，収束するのに時間がかかるようであれば，制御が弱すぎる可能性が高いと判断できます．制御性能指標が悪かった場合に，その原因を探るのに役立ちます．なお，制御不良の原因はチューニングだけではないことに注意して下さい．

制御性能指標のグラフは，横軸にむだ時間，縦軸に制御性能指標（Harris Index / Closed-Loop Potential）をプロットしています．プロセスのむだ時間が既知である場合は，そのむだ時間に対応する制御性能指標の値を利用して下さい．制御性能指標が 1 に近ければ制御性能は高く，0 に近ければ制御性能は悪いと判断できます．なお，制御性能指標が 1 の状態は，最小分散制御が実現されている状態を意味します．このため，操作量が非常に振動的になるなどの副作用も考えられます．したがって，必ずしも，制御性能指標が 1 となることが良いわけではありません．制御系に求められる役割を正しく認識した上で，適切に判断して下さい．詳しくは，WS25 最終報告書を参照して下さい．「設定」メニューで，むだ時間の最大値を変更できます．



制御性能評価

【不動区間カウント法】

丸田・加納法によるバルブスティクション診断を実施します。診断指標とスティック幅が算出され、結果がウィンドウ右下に表示されます。結果は **Method A** という名称で表示され、項目の前に*印が付くと、スティクション発生と判断されたことを意味します。経験的に、指標が **0.25** を越えるとバルブスティクションと判断されます。「設定」メニューで、閾値を変更できます。手法の詳細については、**WS25 最終報告書**を参照して下さい。

【Backlash 関数同定法】

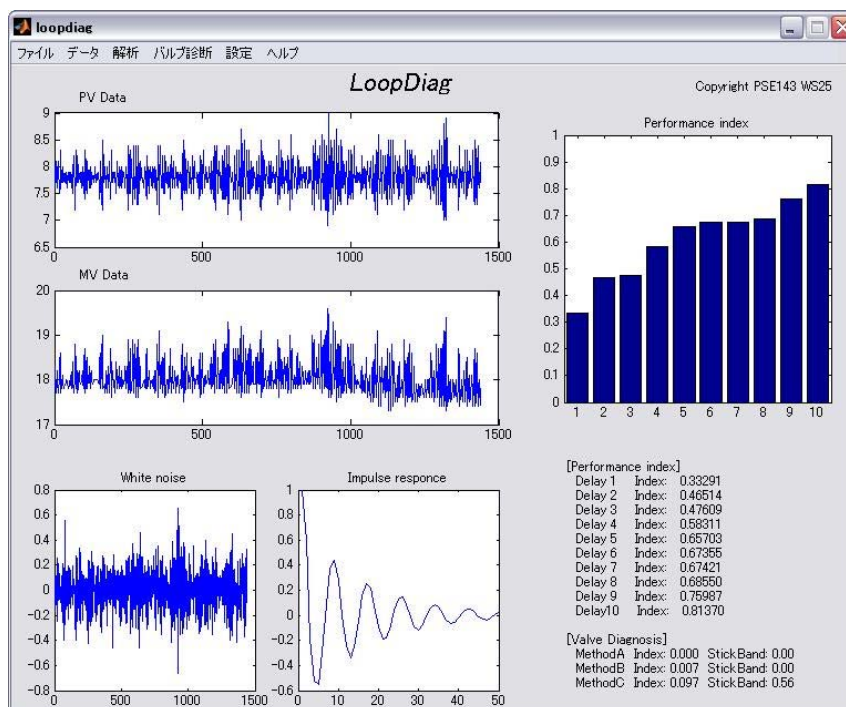
久下本法によるバルブスティクション診断を実施します。診断指標とスティック幅が算出され、結果がウィンドウ右下に表示されます。結果は **Method B** という名称で表示され、項目の前に*印が付くと、スティクション発生と判断されたことを意味します。経験的に、指標が **0.5** を越えるとバルブスティクションと判断されます。「設定」メニューで、閾値を変更できます。手法の詳細については、**WS25 最終報告書**を参照して下さい。

【定性的信号化法】

山下法によるバルブスティクション診断を実施します。診断指標とスティック幅が算出され、結果がウィンドウ右下に表示されます。結果は **Method C** という名称で表示され、項目の前に*印が付くと、スティクション発生と判断されたことを意味します。経験的に、指標が **0.25** を越えるとバルブスティクションと判断されます。手法の詳細については、**WS25 最終報告書**を参照して下さい。

【総合評価】

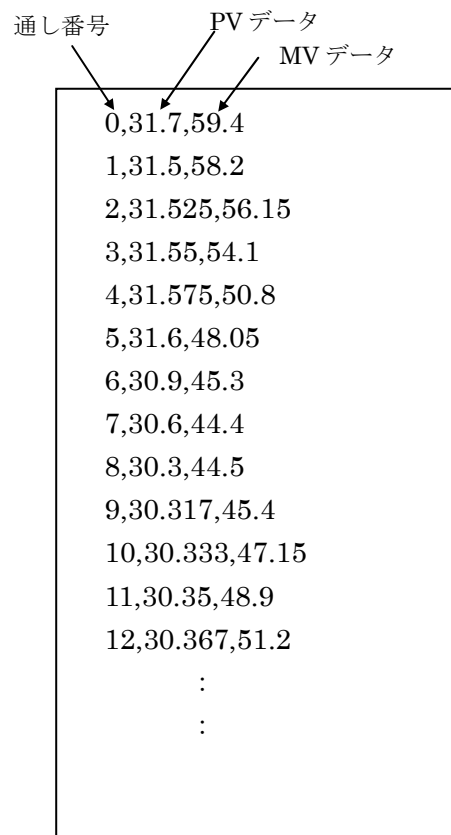
上記3種類のバルブスティクション診断法の評価結果を表示します。結果はウィンドウ右下に表示されます。3手法のうち2手法以上がスティクション発生と判断した場合に、スティクション発生と判断します。



総合評価

3-3. データフォーマット

下記のフォーマットでデータを準備して下さい。通し番号, PV データ, MV データからなる CSV ファイル形式 (カンマ区切り) になります。ただし, カンマの前後に空白を入れないで下さい。



通し番号	PV データ	MV データ
0	31.7	59.4
1	31.5	58.2
2	31.525	56.15
3	31.55	54.1
4	31.575	50.8
5	31.6	48.05
6	30.9	45.3
7	30.6	44.4
8	30.3	44.5
9	30.317	45.4
10	30.333	47.15
11	30.35	48.9
12	30.367	51.2
	:	
	:	

制御性能診断ツール LoopDiag の使用例

サンプルデータを利用して、制御性能診断ツール LoopDiag の具体的な使用方法を紹介します。

1. サンプルデータの説明

サンプルデータは、図 1、図 2 に示す 2 種類の制御シミュレーションによって作成しました。2 つの制御系の違いは、外乱が制御対象プロセスの前に付加されるか、後に付加されるかです。いずれも、温度制御系を対象としており、制御変数 (CV) は温度 (T)、操作変数 (MV) はバルブ開度であり、バルブ開度から流量 (熱媒を想定) への動特性を一次遅れ (Transfer Fcn1) で、流量から温度への動特性を一次遅れ (Transfer Fcn2) とむだ時間 (Transport Delay) で表現しています。また、調節弁の固着を表現するために、WS25 で開発したモデル (New Kyoto Model) を利用しています。コントローラは PI コントローラであり、設定値は 0 で一定としました。

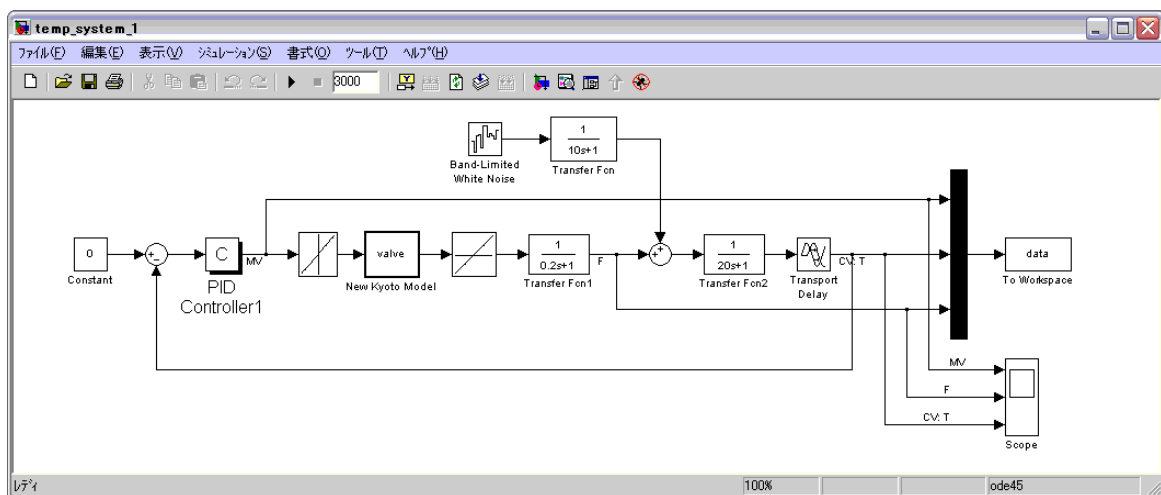


図 1 制御系 1

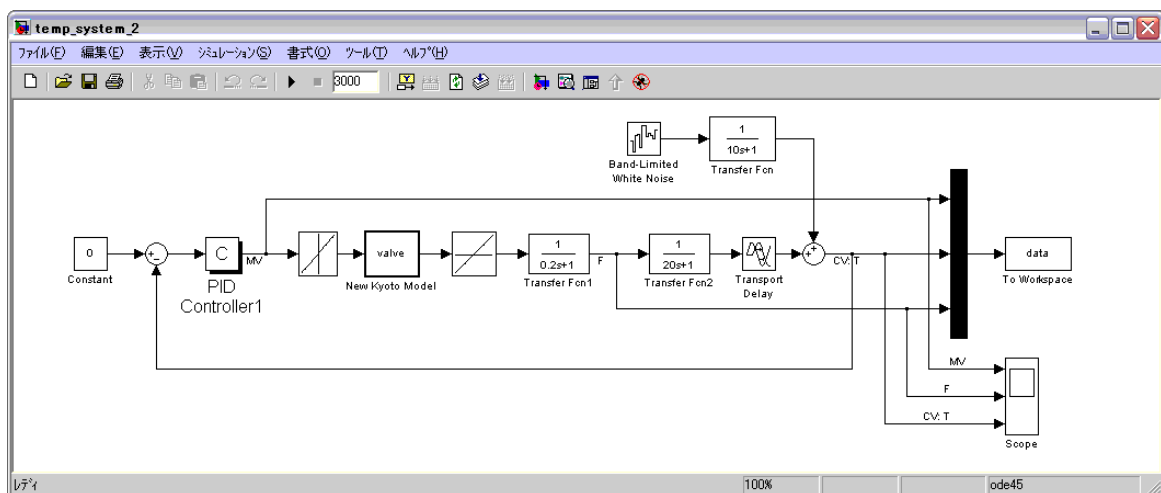


図 2 制御系 2

生成した 10 種類のサンプルデータは、"sample_data" フォルダに用意されています。それぞれのデータの特徴は以下の通りです。

S1_CHR00.csv	制御系 1	CHR 法（外乱抑制，行過ぎ 0%），温度と MV のデータ
S1_CHR20.csv	制御系 1	CHR 法（外乱抑制，行過ぎ 20%），温度と MV のデータ
S2_CHR00.csv	制御系 2	CHR 法（外乱抑制，行過ぎ 0%），温度と MV のデータ
S2_CHR20.csv	制御系 2	CHR 法（外乱抑制，行過ぎ 20%），温度と MV のデータ
S2_LargeKp.csv	制御系 2	比例ゲインが大きい，温度と MV のデータ
S2_SmallTi.csv	制御系 2	積分時間が小さい，温度と MV のデータ
S2vs_CHR00_1F.csv	制御系 2	調節弁固着あり（大），流量と MV のデータ
S2vs_CHR00_1T.csv	制御系 2	調節弁固着あり（大），温度と MV のデータ
S2vs_CHR00_2F.csv	制御系 2	調節弁固着あり（小），流量と MV のデータ
S2vs_CHR00_2T.csv	制御系 2	調節弁固着あり（小），温度と MV のデータ

2. 制御性能診断ツール LoopDiag の使用例

使用例を示します。各操作については、前記「制御性能診断ツール LoopDiag 使用マニュアル」を参照して下さい。

2-1. 制御系 1 の制御性能評価

まず，“S1_CHR00.csv”を読み込み，制御性能評価を実行します。結果を図 3 に示します。対象プロセスのむだ時間は正確に 4 です。そこで，Delay=4 の Performance Index を読み取ります。画面右下の表示から，評価値は 0.01278 であり，非常に小さい，すなわち非常に悪いことがわかります。

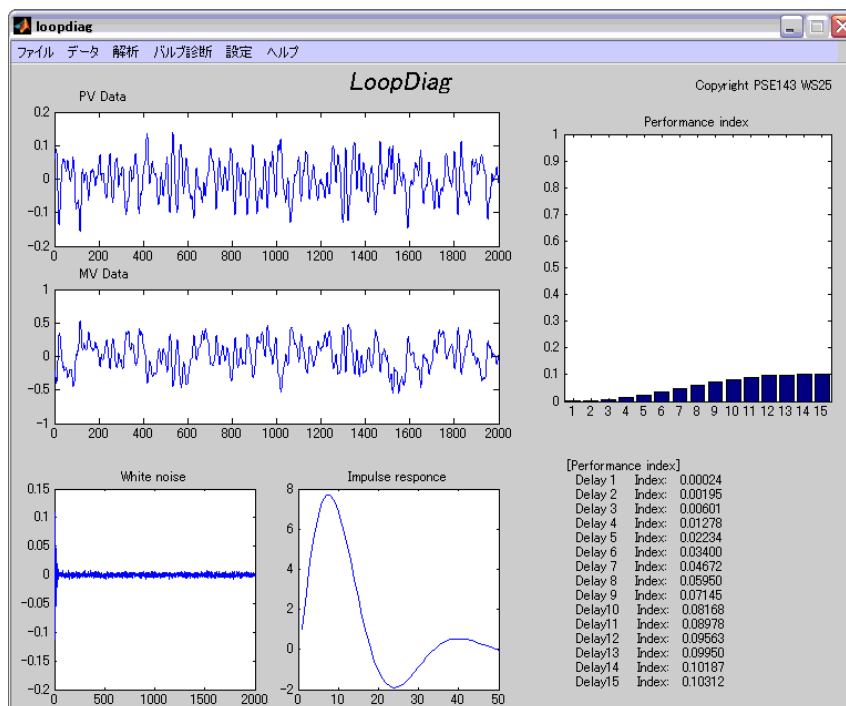


図 3 S1_CHR00.csv 制御性能評価結果

同様の手順で，“S1_CHR20.csv”を評価します。評価値は 0.09655 であり，やはり非常に悪い結果となります。

チューニングには CHR 法を利用していますから，制御パラメータが極端に悪いわけではありません。それでも，このように悪い評価が得られるのは，外乱の特性に関係があります。ここで対象とした制御系 1 では，1 次遅れフィルタを通過した外乱がプロセスの入力側に付加されています。このため，外乱

が制御量に与える影響は非常に遅く、長期に継続するようになっています。このような状況下では、最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価方法は、非常に悪い評価を下します。

2-2. 制御系 2 の制御性能評価

外乱がプロセスの出力側に付加される制御系 2 を対象として、”S2_CHR00.csv”と”S2_CHR20.csv”を評価します。それぞれの評価値は 0.59817 と 0.42114 であり、制御系 1 と比較すると、随分と良い評価が得られます。評価の違いは、閉ループ系インパルス応答を見ても明らかであり、制御系 1 を対象とした場合には非常に大きく振動していた閉ループ系インパルス応答が、制御系 2 を対象とした場合にはその振動が小さくなっています。

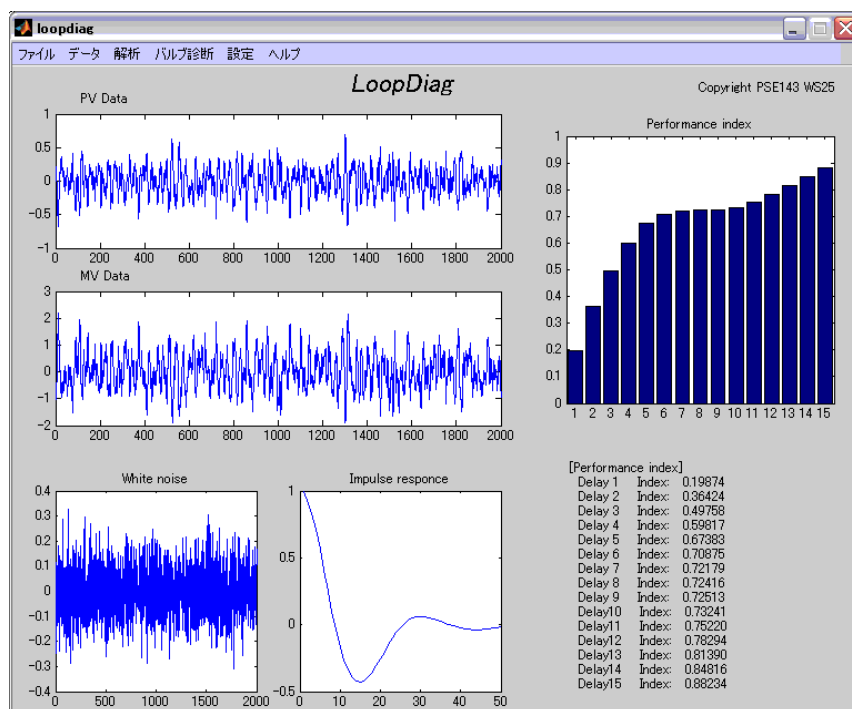


図 4 S2_CHR00.csv 制御性能評価結果

2-3. チューニング不良

CHR 法（外乱抑制，行過ぎ 0%）によって決定した制御パラメータをベースとして，比例ゲインを大きくしたときのデータが”S2_LargeKp.csv”，積分時間を小さくしたときのデータが”S2_SmallTi.csv”です。それぞれの制御性能評価結果を図 5，図 6 に示します。

いずれも制御が強すぎる例ですが，CV や MV のトレンドを見ているだけでは，制御性能が悪いことを確認できません。もちろん，概ね適切に制御されているときの結果である図 4 と比較して，CV や MV の変動が大きいことは確認できます。しかし，現実のプラントでは，比較対象となるデータ（制御パラメータを変更して得たデータ）は存在せず，プロセスに付加される外乱の大きさも変化します。したがって，制御性能を評価するのに，関連する変数のトレンドデータだけでは不十分なのです。

制御性能評価の結果，“S2_LargeKp.csv”の評価値は 0.13806，“S2_SmallTi.csv”の評価値は 0.26122 であり，制御性能が悪いことが確認できます。CHR 法を採用した際の評価結果（0.59817）よりも，随分と低い値になっています。さらに，閉ループ系インパルス応答に着目すると，いずれの場合でも振動の減衰性が悪く，制御が強すぎることで制御性能を低下させている原因であると推測できます。

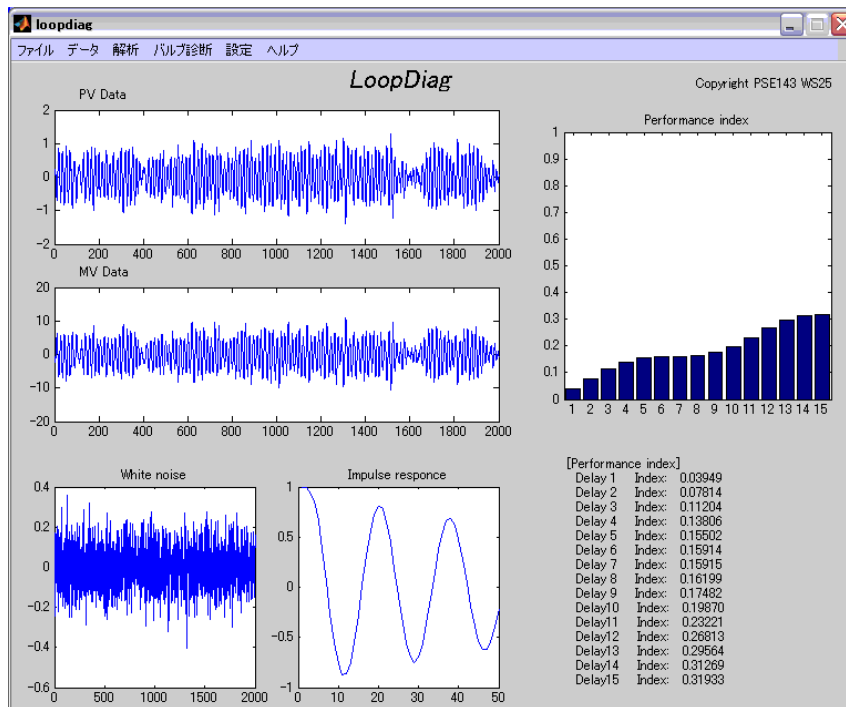


図5 S2_LargeKp.csv 制御性能評価結果

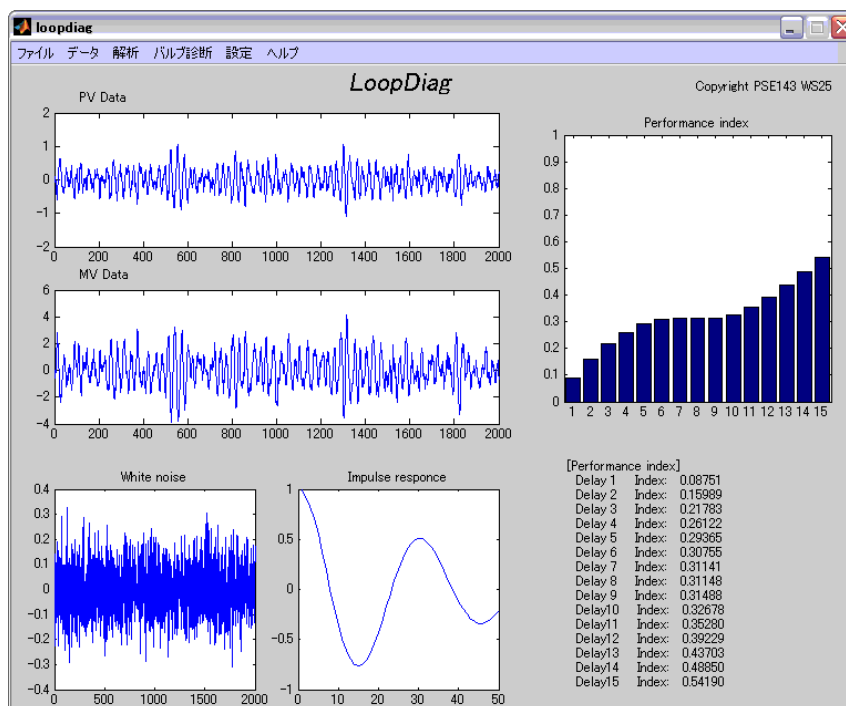


図6 S2_SmallTi.csv 制御性能評価結果

2-4. 調節弁固着

調節弁固着が発生している場合の制御性能診断について解説します。ここでは、制御系2を対象として、CHR法（外乱抑制，行過ぎ0%）によって決定した制御パラメータを利用し，さらに調節弁固着を発生させたシミュレーション結果を利用します。

まず，これまでと同様の手順で，“S2vs_CHR00_1T.csv”に対して，制御性能評価を実施します。結果を図7に示します。評価値は0.32771であり，調節弁が固着していない場合の評価結果（0.59817）と比較して，随分と低い値になっています。閉ループ系インパルス応答に着目すると，激しくは振動して

いないものの、やや長い周期の振動が確認できます。この段階で、制御性能が悪い原因を断定してしまうのは賢明ではありません。チューニング不良の他に、調節弁固着も考えられます。

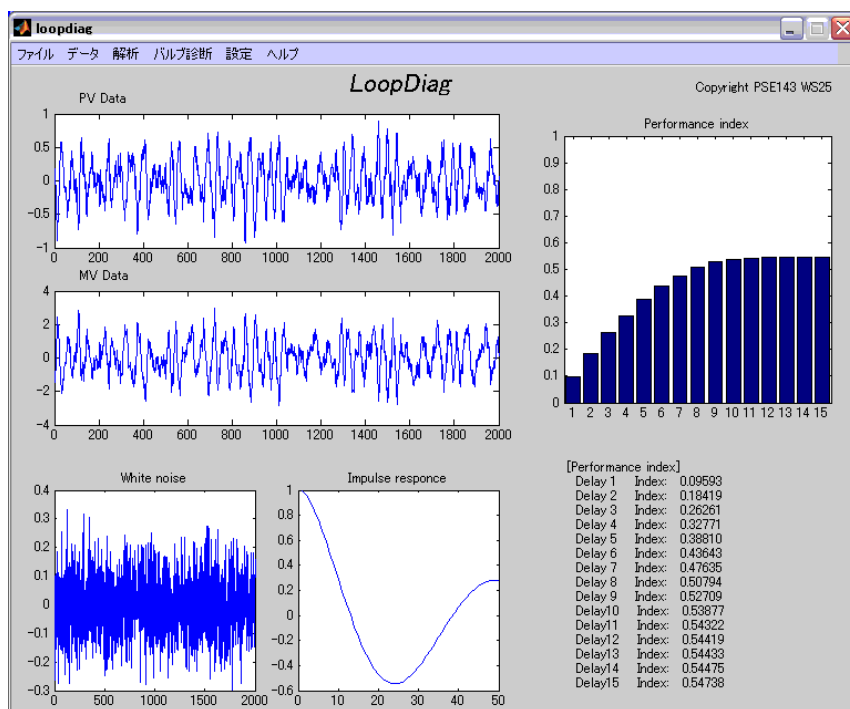


図7 S2vs_CHR00_1T.csv 制御性能評価結果

そこで、調節弁固着の有無を確認します。なお、固着検出には、バルブ開度（コントローラ出力）と流量のデータ”S2vs_CHR00_1F.csv”を利用します。バルブ開度と温度では、遅れが大きいため固着を検出するのが困難だからです。診断結果を図8に示します。

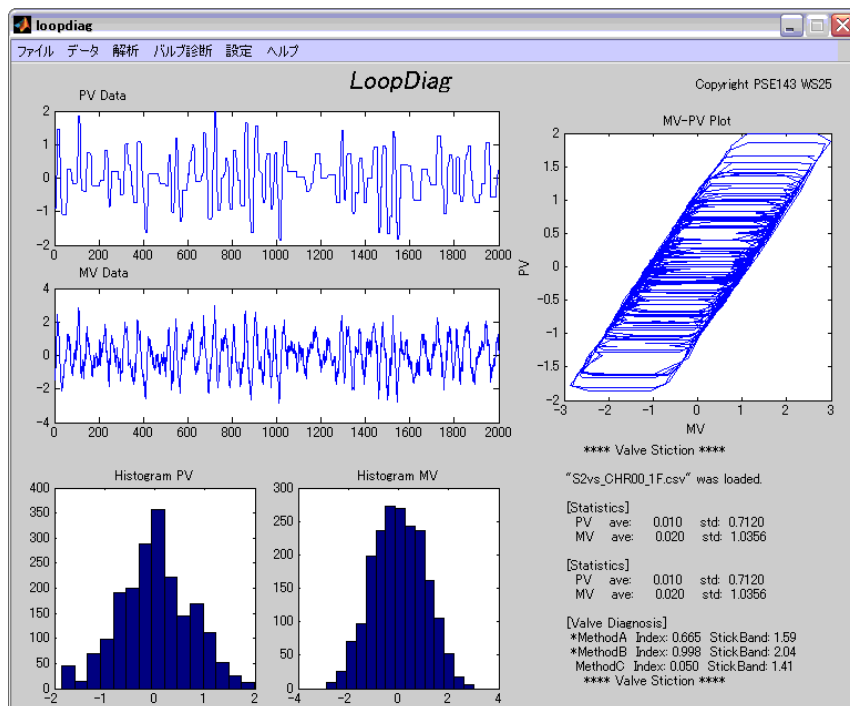


図8 S2vs_CHR00_1F.csv 制御性能評価結果

調節弁固着が発生している場合、MV-PV プロットを見ると、その特徴が明確に現れている場合があります。図 8 はその典型的な例です。Method A と Method B で固着ありと判断されています。

次に、もう少し固着の程度が小さい場合について検討します。”S2vs_CHR00_2T.csv”の制御性能評価結果は 0.44366 であり、良いとは言えません。そこで、調節弁固着検出を実施すると、固着ありと判定されます。

A 1. コンパイル方法

MATLAB Compiler を利用してスタンドアロン・アプリケーションを作成するには、次のコマンドを利用します。

```
mcc -m loopdiag
```

作成したスタンドアロン・アプリケーションを実行する際に、DOS プロンプトウィンドウを開かないようにする方法は以下の通りです。MATLAB プロンプト上で `prefdir` コマンドを用いて確認できるフォルダ下にある `compopts.bat` ファイル内に、変数 `LINKFLAGS` を設定している行があります。その設定行の後に、以下の行を追加することで、スタンドアロン・アプリケーション実行時に、DOS プロンプトウィンドウが開かなくなります。

【LCC の場合】

```
set LINKFLAGS=%LINKFLAGS% -subsystem windows
```

【Microsoft Visual C/C++ の場合】

```
set LINKFLAGS=%LINKFLAGS% /SUBSYSTEM:WINDOWS /ENTRY:mainCRTStartup
```

【Borland の場合】

```
set LINKFLAGS=%LINKFLAGS% -aa
```

A 2. ソフトウェアの配布

MATLAB Compiler を利用してスタンドアロン・アプリケーションを配布するには、下記のファイルを配布する必要があります。

- ・ 実行ファイル (loopdiag.exe)
- ・ CTF アーカイブ (loopdiag.ctf)
- ・ MCRInstaller.exe

以上