

**P / D 制御システムの
閉ループテストに基づく P / D 調整
- E-FRIT MATLAB Program Quick Start -**

E-FRIT (Extended-Fictitious Reference Iterative Tuning)

version 3.0

5/22, 2014

小河 守正

加納 学

使用にあたっての留意事項

本プログラムを使用する方は、下記項目に同意したものとします。同意できない場合は使用しないで下さい。

【編集】

本プログラムは自由に編集していただいて結構です。

【再配布】

編集の有無にかかわらず、プログラムを再配布することは禁じます。

【成果】

本プログラム（編集したものも含む）を使用して得られた成果は、できるだけ学会等で発表して下さい。公表できない場合でも、できるだけプログラム作成者に連絡して下さい。今後の技術開発の励みにさせていただきます。

【責任】

本プログラム（編集したものも含む）を使用して生じる結果について、作成者は一切の責任を負いません。なお、お礼は拒みません。

【連絡先】 京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻 教授 加納学

<http://human.sys.i.kyoto-u.ac.jp>

内 容

- E-FRIT version 3.0 増強内容
- E-FRIT アルゴリズム改良版
- 実用設計
- MATLAB Program Quick Start
- ベンチマーク

E-FRIT version 3.0 増強内容

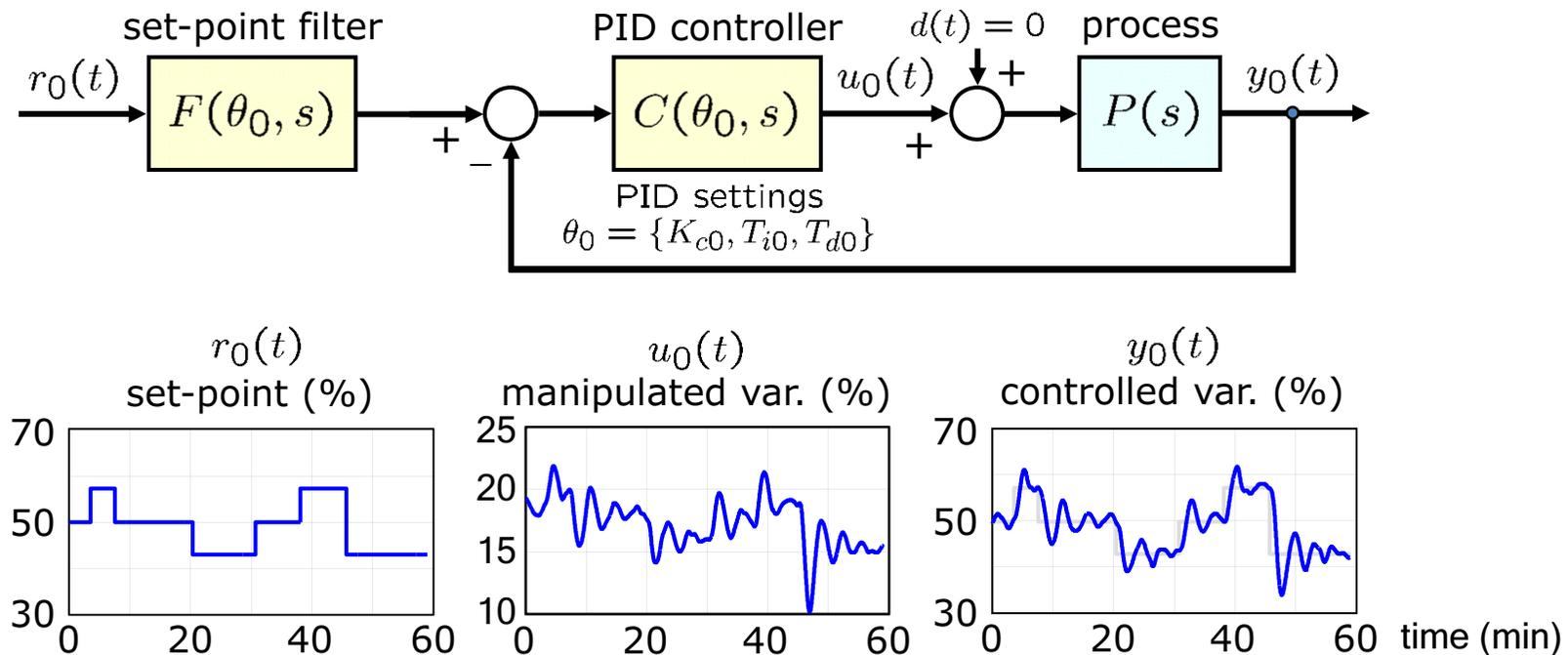
#	課題	増強
1	<ul style="list-style-type: none"> PI-D アルゴリズムの E-FRIT 設計ができるようにしてほしい。 	<ul style="list-style-type: none"> PI-D アルゴリズムの E-FRIT 設計を追加した。 無定位プロセス（積分系）の PI-D 制御では、E-FRIT 設計によると外乱抑制性が不十分。I-PD アルゴリズムに変えるのがよい。
2	<ul style="list-style-type: none"> 制御周期（1 秒）に比べ、テストデータの収集周期が長い（60秒）場合に設計精度が劣化するのではないか。 	<ul style="list-style-type: none"> テストデータ収集周期 >10 秒の場合には、その1/10 周期にスプライン補間したデータで設計するようにした。
3	<ul style="list-style-type: none"> プロセスむだ時間の同定がうまくいかない場合がある。 むだ時間の存在が明らかなテストデータであっても同定値 0 になることがある。 	<ul style="list-style-type: none"> システム同定の直接法で、テストデータから、むだ時間をおおまかに定めることを試みた。完成度が未熟なので次の増強で必ず対応する。
4	<ul style="list-style-type: none"> 最適化処理が最適値に収束しない場合がある。 テストデータにノイズが多いとその傾向が強まるようである。 	<ul style="list-style-type: none"> 目的関数の操作量の項を、操作量の 1 次差分から操作量誤差に変更した。 平滑化カットオフ周波数を指定しノイズ除去性能を調整できるようにした。

内 容

- E-FRIT version 3.0 増強内容
- E-FRIT アルゴリズム改良版
- 実用設計
- MATLAB Program Quick Start
- ベンチマーク

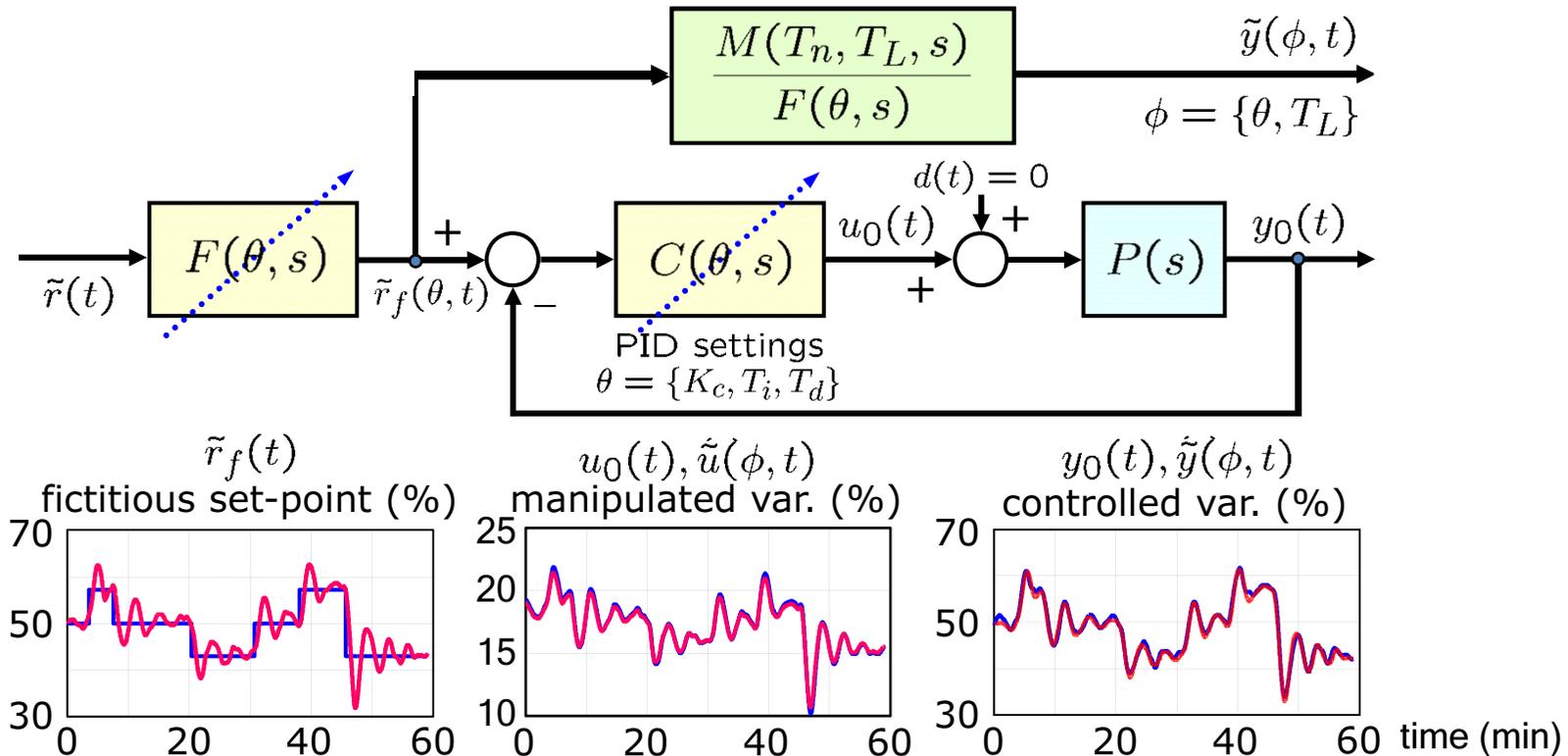
E-FRIT アルゴリズム改良版

- step 1 : 閉ループ目標値変更テスト
 - P/D 制御システム : 安定性は確保されているが, 制御性能に改善の余地がある.
 - 閉ループテスト : 外乱の影響がない閉ループの状態において, 目標値を階段状に数回変更する. このときの目標値・操作量・制御量の時系列データ $\{r_0(t), u_0(t), y_0(t)\}$ を収集する.



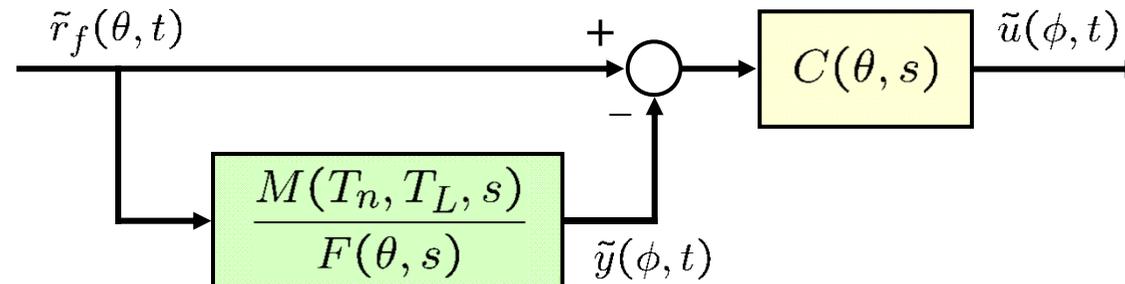
E-FRIT アルゴリズム改良版

- step 2 : 望ましい目標値応答を与える P / D 設定値を求値する最適化問題
 - 擬似目標値 : 任意の P / D 設定値 θ において, 閉ループテストの操作量と制御量応答を与える擬似目標値 $\tilde{r}_f(\theta, t)$ を求める.
 - 規範モデル(望ましい目標値応答) : $M(T_n, T_L, s)$
 - 目的関数 : 擬似目標値に対する規範モデル応答 $\tilde{y}(\phi, t)$ が閉ループテストの制御量応答 $y_0(t)$ に一致すれば, P / D 制御系は規範モデルと同等である. 目的関数を制御量誤差 $\tilde{y}(\phi, t) - y_0(t)$ の2次形式とする.



E-FRIT アルゴリズム改良版

- step 3 : ロバスト性確保のために操作量誤差を追加した目的関数
 - 擬似操作量 : 擬似目標値に対して望ましい制御量応答を与える仮想的な操作量 $\tilde{u}(\phi, t)$
 - 目的関数 : 操作量誤差 $\tilde{u}(\phi, t) - u_0(t)$ の2次形式を目的関数に追加する.



- step 4 : 最適化問題を数値的に解き $\mathcal{P} / \mathcal{D}$ 設定値を求値
 - 最適化変数 : $\mathcal{P} / \mathcal{D}$ 設定値・プロセスむだ時間 $\theta = \{K_c, T_i, T_d\}, \phi = \{\theta, T_L\}$
 - 最適化ソルバー : 非線形計画法 SQP (MATLAB Optimization Toolbox®, fmincon)

$$\phi^\circ = \arg \min_{\phi} \sum_t \left[\left(\tilde{y}(\phi, t) - y_0(t) \right)^2 + f_s^2 \left(\tilde{u}(\phi, t) - u_0(t) \right)^2 \right]$$

$$\text{subject to } \phi_l \leq \phi \leq \phi_u, \text{ initial guess } \phi_0 = \{\theta_0, T_L = 0\}$$

$$\tilde{r}_f(\theta, t) = C^{-1}(\theta, s) u_0(t) + y_0(t), \quad \tilde{y}(\phi, t) = \frac{M(T_n, T_L, s)}{F(\theta, s)} \tilde{r}_f(\theta, t)$$

$$\tilde{u}(\phi, t) = C(\theta, s) \left(\tilde{r}_f(\theta, t) - \tilde{y}(\phi, t) \right) = u_0(t) - C(\theta, s) \left(\tilde{y}(\phi, t) - y_0(t) \right)$$

$$f_s : \text{scaling factor } f_s = \sigma_y / \sigma_u$$

内 容

- E-FRIT version 3.0 増強内容
- E-FRIT アルゴリズム改良版
- 実用設計
 - 閉ループテストデータ平滑化
 - 目標値応答規範モデル：I-PD / PI-D
 - PID パラメータ制約条件
- MATLAB Program Quick Start
- ベンチマーク

閉ループテストデータ平滑化

- 閉ループテストデータ平滑化：高周波ノイズ除去

- ・ 操作量・制御量時系列：位相遅れを生じない平滑化により高周波ノイズを除去する

- ・ Hamming-window filter: $u(k), y(k) \xrightarrow{\text{smoothing}} u_f(k), y_f(k)$

order: $n_f = 10$

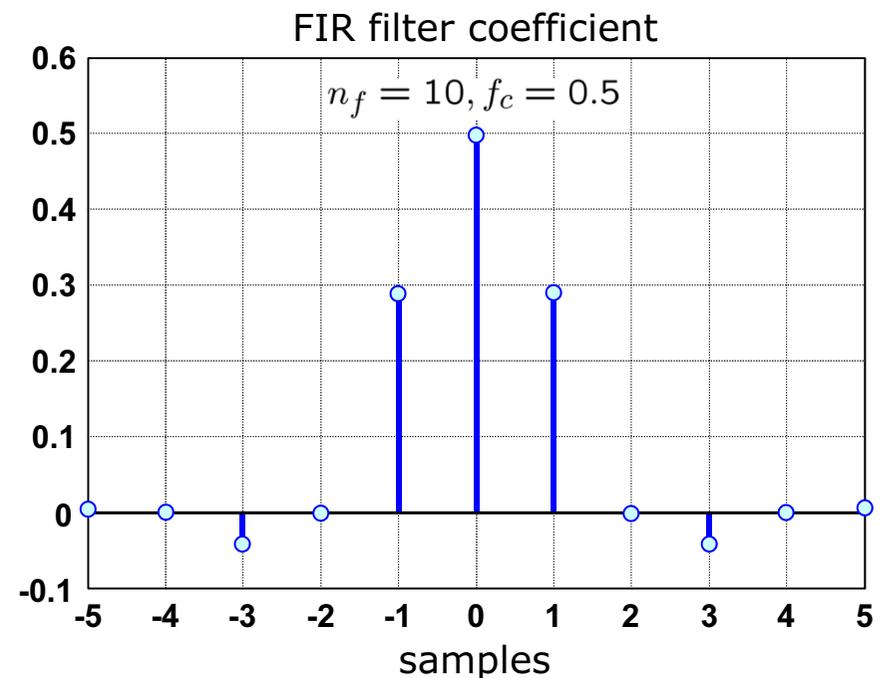
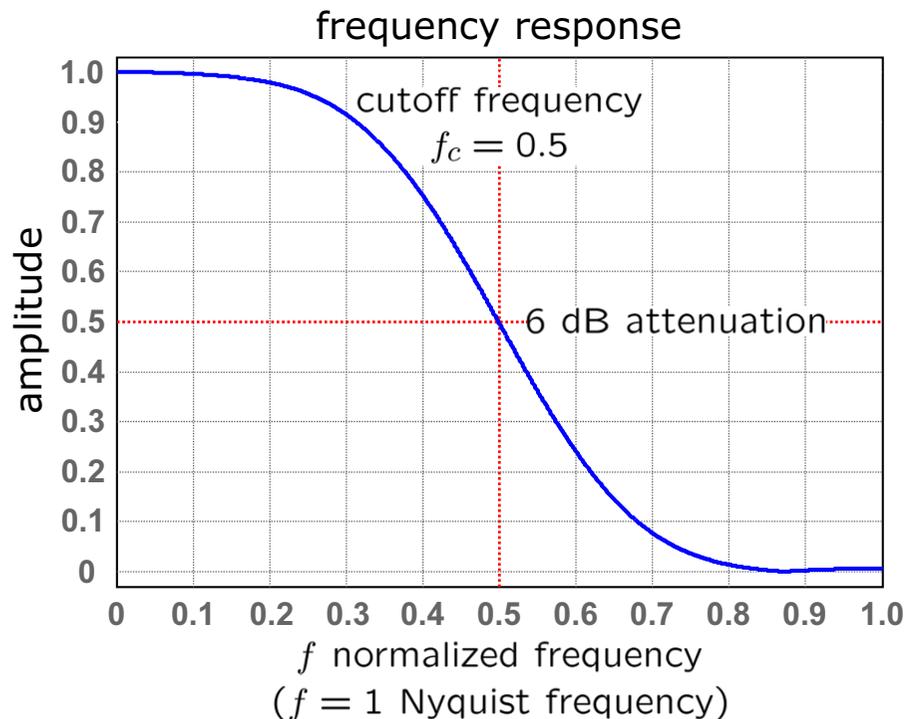
cutoff frequency: $f_c \in (0, 1)$ normalized by Nyquist frequency: F_n

$F_n = F_s/2$; F_s : sampling frequency

- MATLAB Program Example

```
nf=10; fc=0.5; b=fir1(nf,fc); kw=ceil(nf/2);
```

```
for k=1:kmax; yf(k)=b*[y(k-kw) ... y(k-1) y(k) y(k+1) ... y(k+kw)]'; end;
```



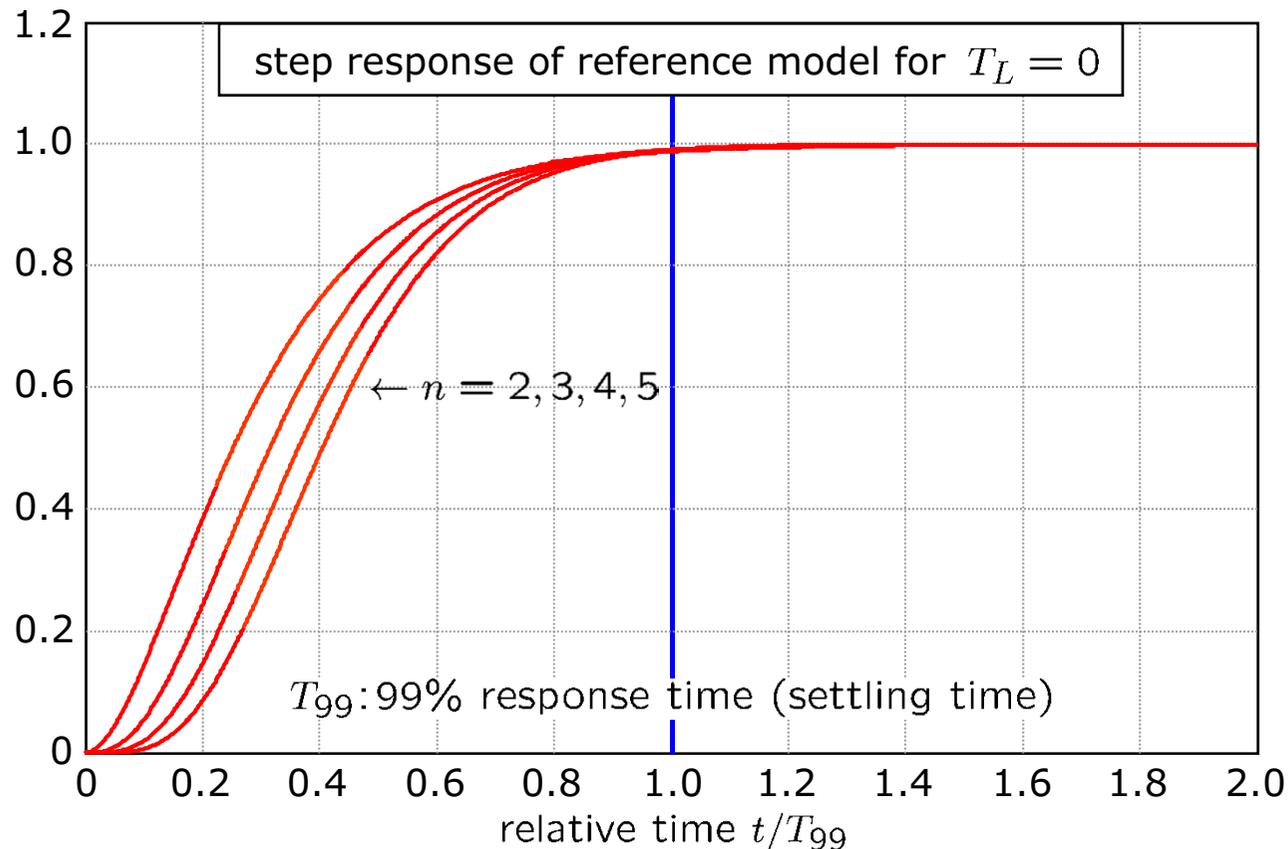
目標値応答規範モデル：I-PD algorithm

- 目標値応答規範モデル：臨界制動応答

$$M(s) = \frac{y_r(s)}{r(s)} = \frac{1}{(1 + T_n s)^n} e^{-T_L s}$$

- 調整パラメータ： T_{99} : 99 % 応答時間 $\rightarrow T_n \approx T_{99}/(4.4 n^{0.6})$

$n = p + 1$ (I-PD) p : プロセス相対次数 $\rightarrow p = 2, n = 3$

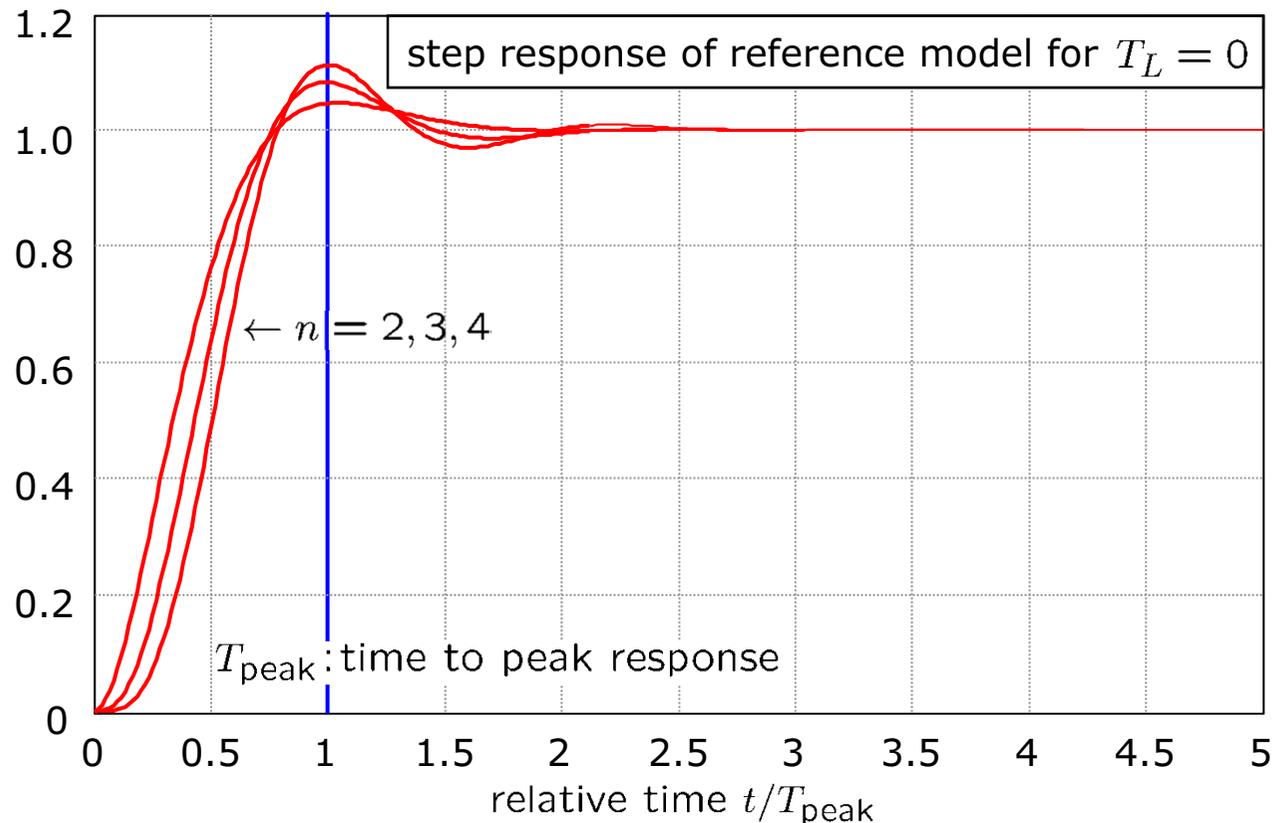


目標値応答規範モデル：PID, PI-D algorithm

- 目標値応答規範モデル：Butterworth 標準型（ISE 最小になる）

$$M(s) = \frac{y_r(s)}{r(s)} = \frac{1}{1 + b_1 T_n s + b_2 T_n^2 s^2 + \dots + b_n T_n^n s^n} e^{-T_L s}$$

- 調整パラメータ： T_{peak} ：ピーク応答時間 $\rightarrow T_n \approx T_{\text{peak}} / (3.2 n^{0.4})$
 $n = p$ (PID, PI-D) p ：プロセス相対次数 $\rightarrow p = 2, n = 2$



P / Dパラメータ制約条件

- 上下限值制約

- 最適化変数：P / D設定値・プロセスむだ時間の上下限値を下表のように定める

最適化変数		unit	lower	upper
P / D設定値：比例ゲイン	K_c	%/%	0.1	50
積分時間	T_i	min	0.1	150
微分時間	T_d	min	0	30
プロセスむだ時間	T_L	min	0	10

- 不等式制約

- P / D調整の経験則に倣い，微分時間は積分時間の α (e.g. $\alpha=1/5$) 以下にする

$$\frac{T_d}{T_i} \leq \alpha \Rightarrow -\alpha T_i + T_d \leq 0$$

内 容

- E-FRIT version 3.0 増強内容
- E-FRIT アルゴリズム改良版
- 実用設計
- MATLAB Program Quick Start
 - 閉ループテストデータファイル
 - プログラム実行・調整パラメータ
 - 会話型 GUI：液面制御設計・実際の制御設計
- ベンチマーク

閉ループテストデータファイル

下表の閉ループテストデータを mat ファイル型式保存し
ディレクトリー：E-FRIT_version3.0 に置く

- file name: CL_Test_Data.mat
- MATLAB Command Prompt

```
>> save('CL_Test_Data.mat','PID_algorithm','dir_rev','Kc0','Ti0','Td0','gamma','tau','rs','us','ys')
```

データ	変数名	単位	型式	内容	
PIDアルゴリズム	PID_algorithm	-	scalar	1=PID, 2=PI-D, 3=I-PD	
正逆動作 (脚注参照)	dir_rev	-		1=direct, -1=reverse	
比例ゲイン	Kc0	%/%		PID設定値	
積分時間	Ti0	min			↓
微分時間	Td0	min			↓
微分ゲイン	gamma	-			一般に gamma=10
時系列データ収集周期	tau	min			
目標値時系列	rs	%	row vector	計測レンジで正規化：0-100 %	
操作量時系列	us	%		常に 0 - 100 %	
制御量時系列	ys	%		計測レンジで正規化：0-100 %	

理論コントローラにおける正逆動作を表す (実用コントローラはこの逆の呼称が通則なので要注意)

- direct : 制御偏差 (+) → 操作量 (+)
- reverse : 制御偏差 (+) → 操作量 (-)

プログラム実行・調整パラメータ

- EFRIT プログラム実行

- MATLAB Command Prompt

>> **efrit**

- EFRIT 調整パラメータ : MATLAB Command Window で会話型式で入力

調整パラメータ	変数名	単 位	内 容
peak response time 99 % response time	Tpeak T99	min	PI-D : 目標値変更ピーク応答時間 I-PD : 目標値変更量に 99 % 応答時間
upper limit of Td / Ti	alpha	-	P / D設定値の微分時間と積分時間の比の上限値 alpha ≤ 1/5 (= 0.2) が標準である

- EFRIT 内部パラメータ : MATLAB Program 内部で固定値にしているものを下表に示す

内部パラメータ	変数名	単 位	内 容
FIR filter order & cut-off frequency	nf fc	-	平滑化フィルターの次数とカットオフ周波数 nf=10, fc=0.5
desired response order	n	-	望ましい目標値応答の次数 PI-D: n=2, I-PD: n=3
weight coefficient on MV squared error	lambda	-	評価関数の操作量誤差項にかかる重み係数 lambda=1

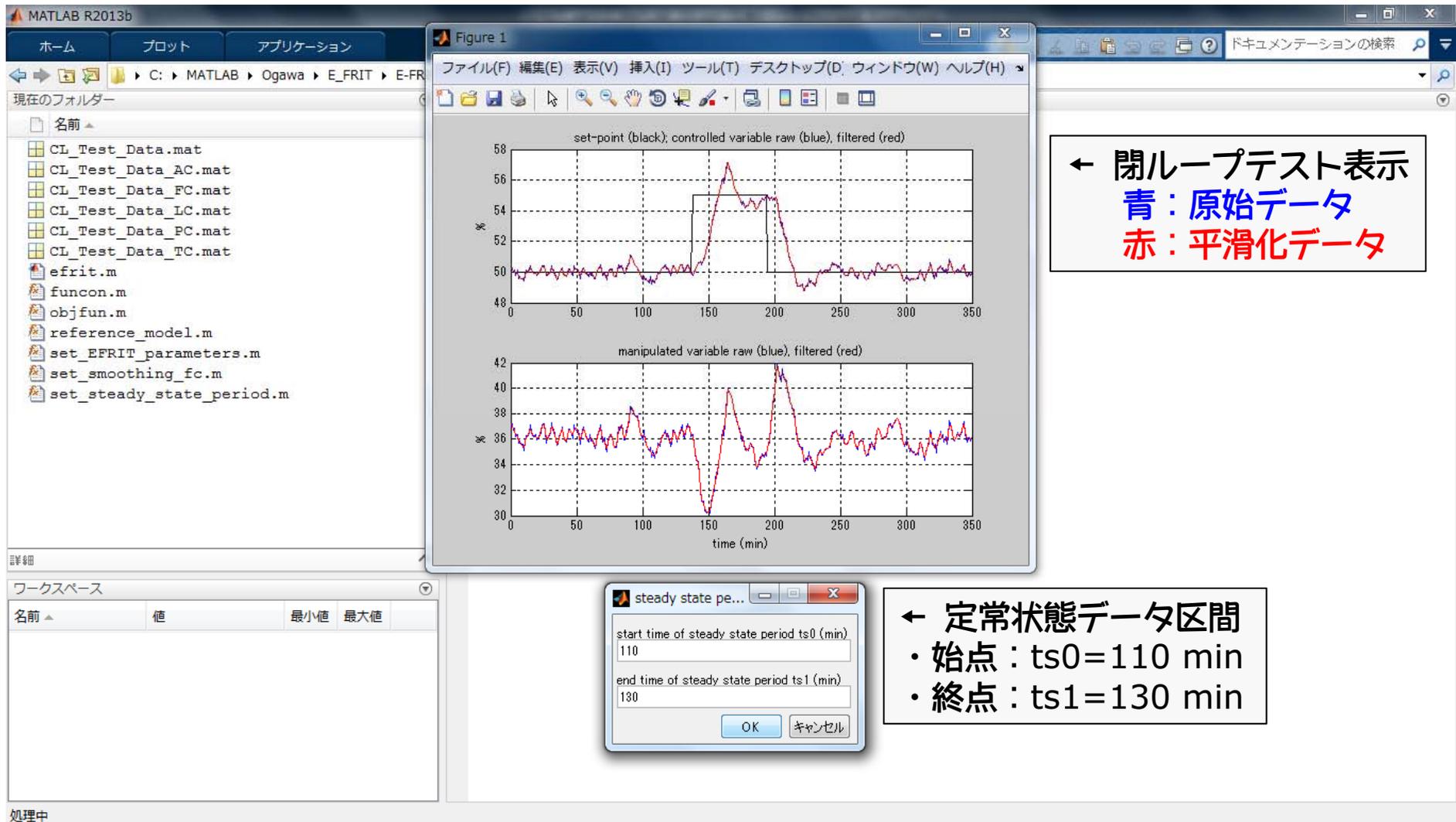
会話型 GUI : 液面制御設計

- メニューダイアログの level control (I-PD) ボタンを左クリックする



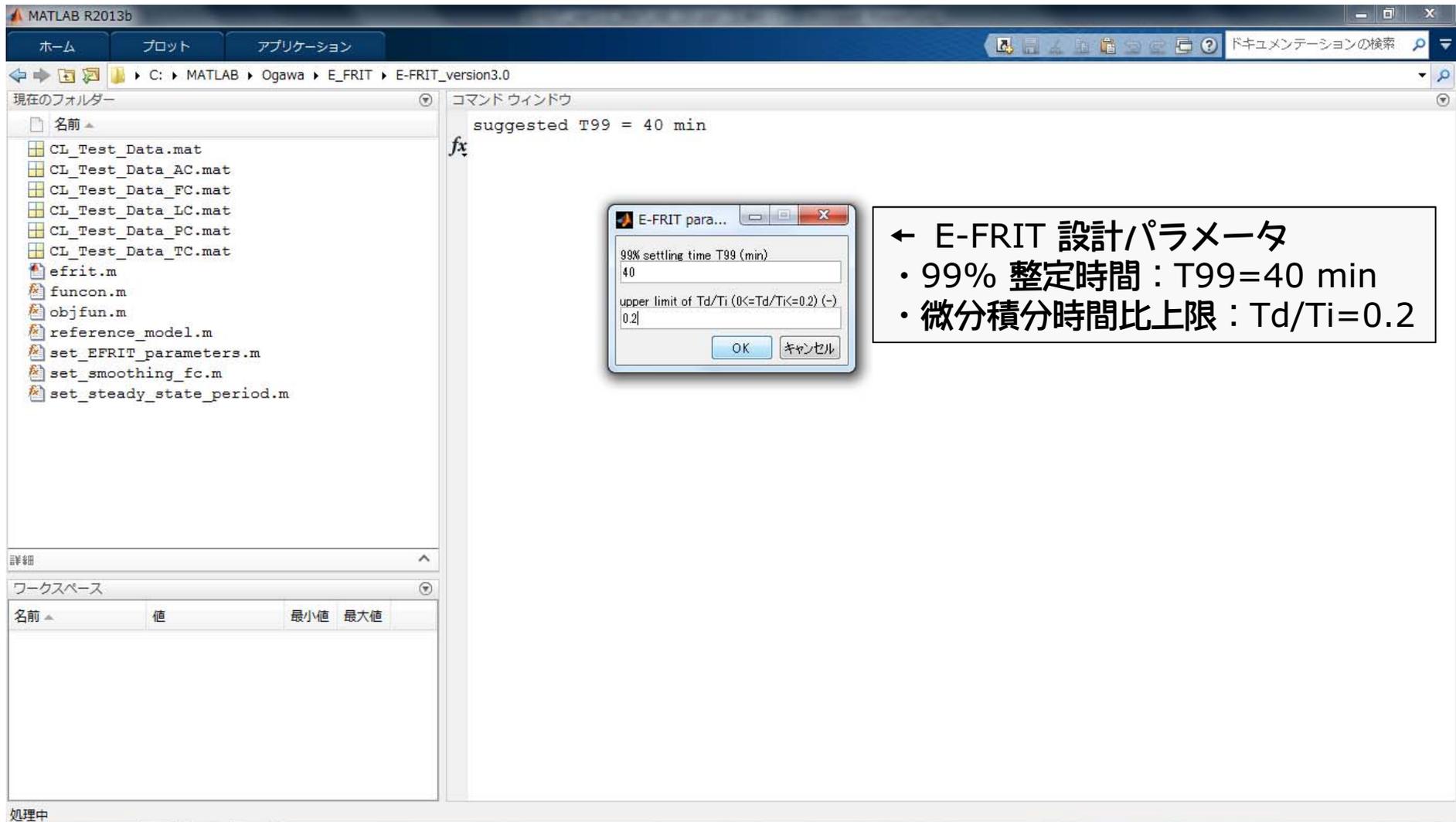
会話型 GUI：液面制御設計

- 閉ループテストの時系列グラフが表示される（ $fc=0.5$ で平滑化したもの）
- 目標値変更前の定常値を決める時間区間を入力し OK ボタンを左クリック
- 入力ウィンドウがグラフに重なって表示されるので適当に移動する



会話型 GUI：液面制御設計

- E-FRIT 設計パラメータを入力し OK ボタンを左クリック



会話型 GUI : 液面制御設計

- E-FRIT 設計結果がメッセージボックスに出力される
- これはグラフウィンドウの裏に隠れている

The screenshot shows the MATLAB R2013b interface. The Command Window displays the following text:

```
suggested T99 = 40 min  
Local minimum found. The search direction is  
fmincon search direction is less than the tolerance  
are satisfied.  
<stopping>  
-----  
--- design condition  
I-PD algorithm  
peak response time T99 (min) = 40.0  
reference response time constant Tn (min) = 4.70  
reference response order n = 3  
-----  
--- closed loop tested PID settings  
proportional gain Kc0 (%%) = 2.00  
reset time Ti0 (min) = 10.00  
derivative time Td0 (min) = 0.00  
-----  
--- E-FRIT designed PID settings  
proportional gain Kc (%%) = 1.82  
reset time Ti (min) = 17.48  
derivative time Td (min) = 0.00  
process dead time TL (min) = 4.05  
-----  
E-FRIT designed PID settings: Kc (%%), Ti (min), Td (min), TL (min)  
Kc = 1.8209  
Ti = 17.4751  
Td = 0  
E-FRIT estimated process dead time: TL (min)  
TL = 4.0491  
fx >>
```

An "E-FRIT" message box is overlaid on the Command Window, containing the following text:

```
-----  
--- design condition  
I-PD algorithm  
peak response time T99 (min) = 40.0  
reference response time constant Tn (min) = 4.70  
reference response order n = 3  
-----  
--- closed loop tested PID settings  
proportional gain Kc0 (%%) = 2.00  
reset time Ti0 (min) = 10.00  
derivative time Td0 (min) = 0.00  
-----  
--- E-FRIT designed PID settings  
proportional gain Kc (%%) = 1.82  
reset time Ti (min) = 17.48  
derivative time Td (min) = 0.00  
process dead time TL (min) = 4.05  
-----  
OK
```

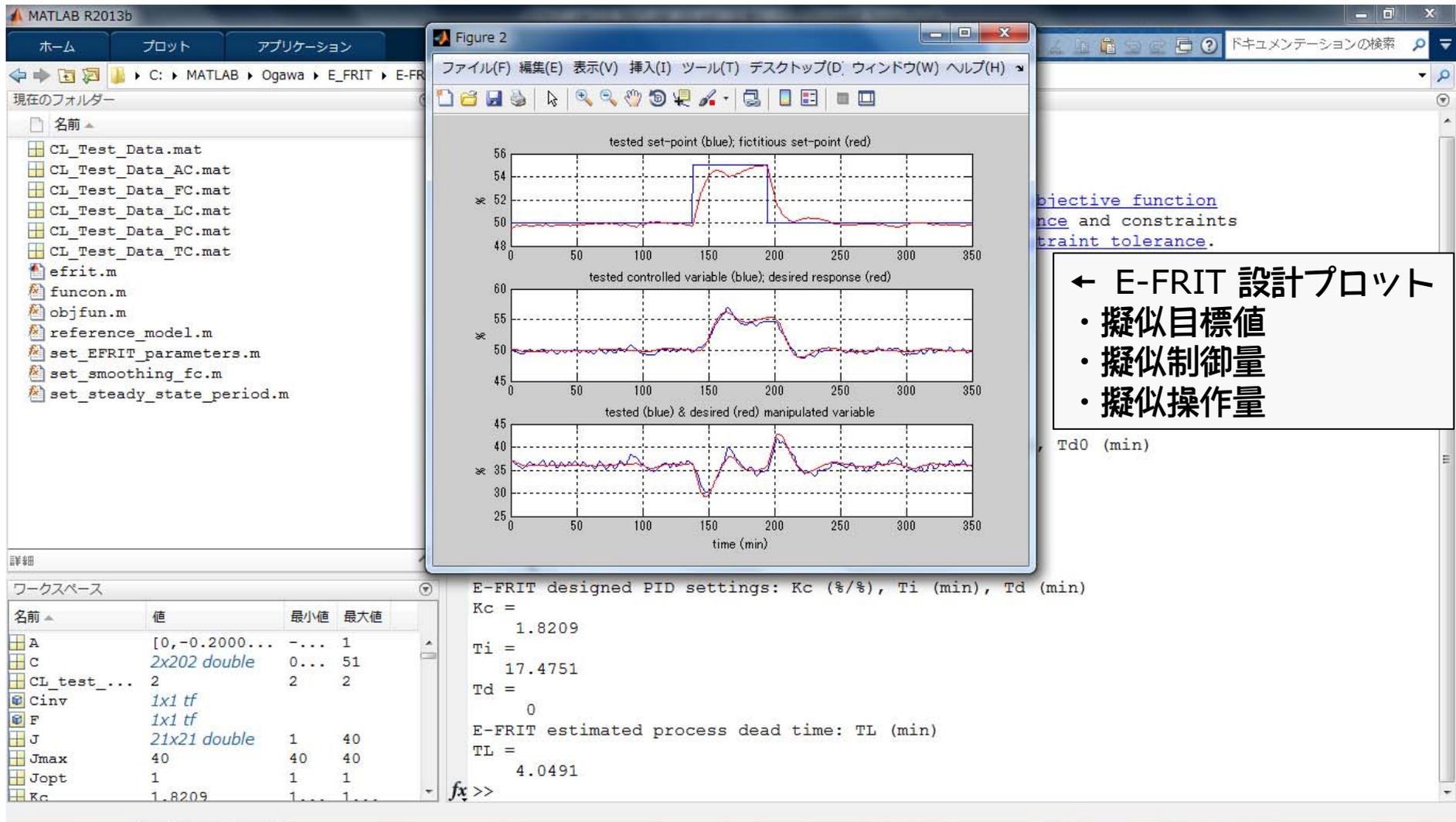
A callout box on the right side of the screenshot contains the following text:

← E-FRIT 設計結果

- 比例ゲイン : $Kc=1.82$
- 積分時間 : $Ti=17.5$ (min)
- 微分時間 : $Td=0$ (min)
- むだ時間 : $TL=4.05$ (min)

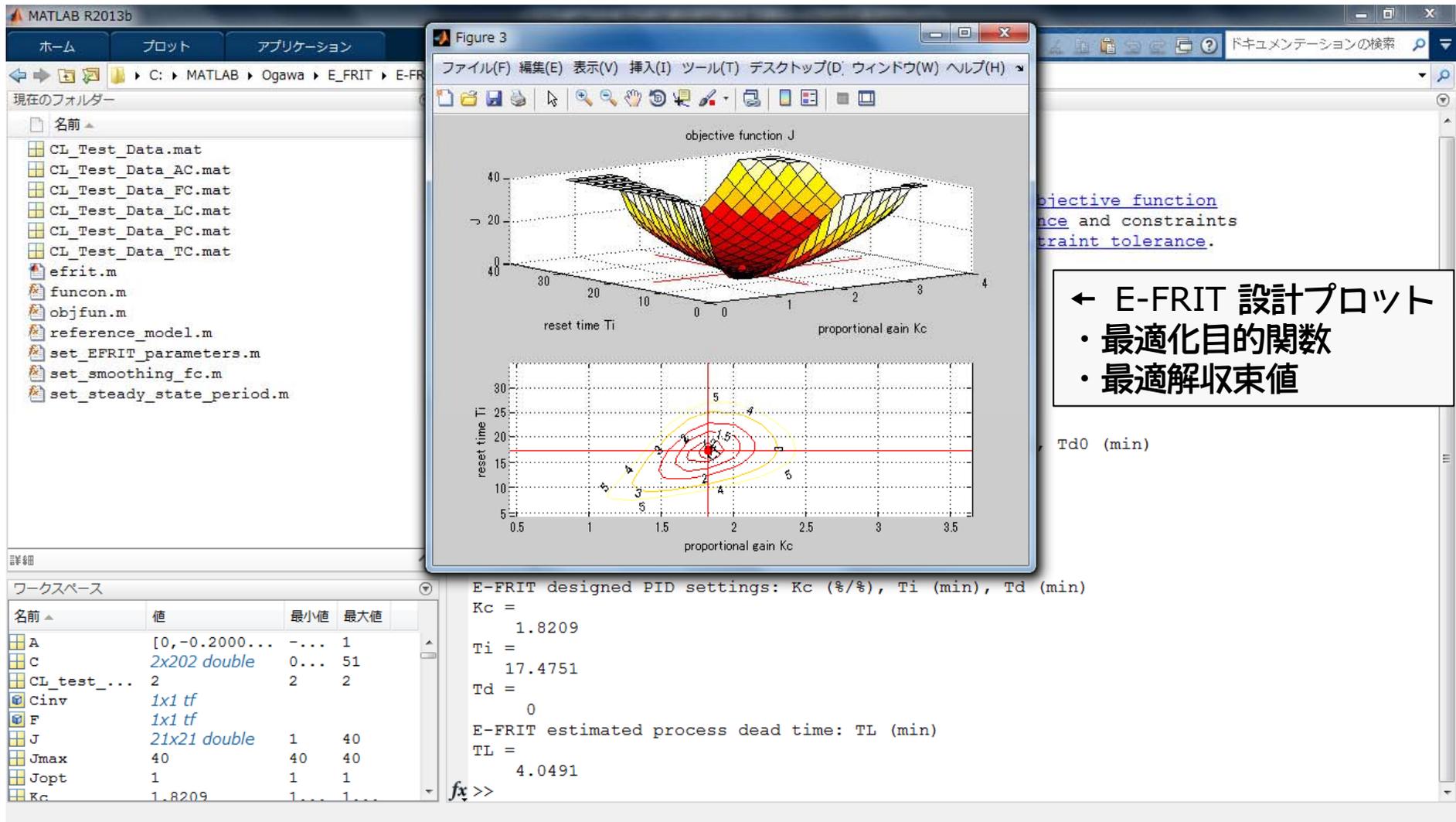
会話型 GUI : 液面制御設計

- E-FRIT 設計の擬似目標値・擬似制御量・擬似操作量が閉ループテスト時系列に重ねてグラフ表示される
- 擬似制御量・擬似操作量が閉ループテスト時系列の制御量・操作量に重なっていれば良い設計結果である



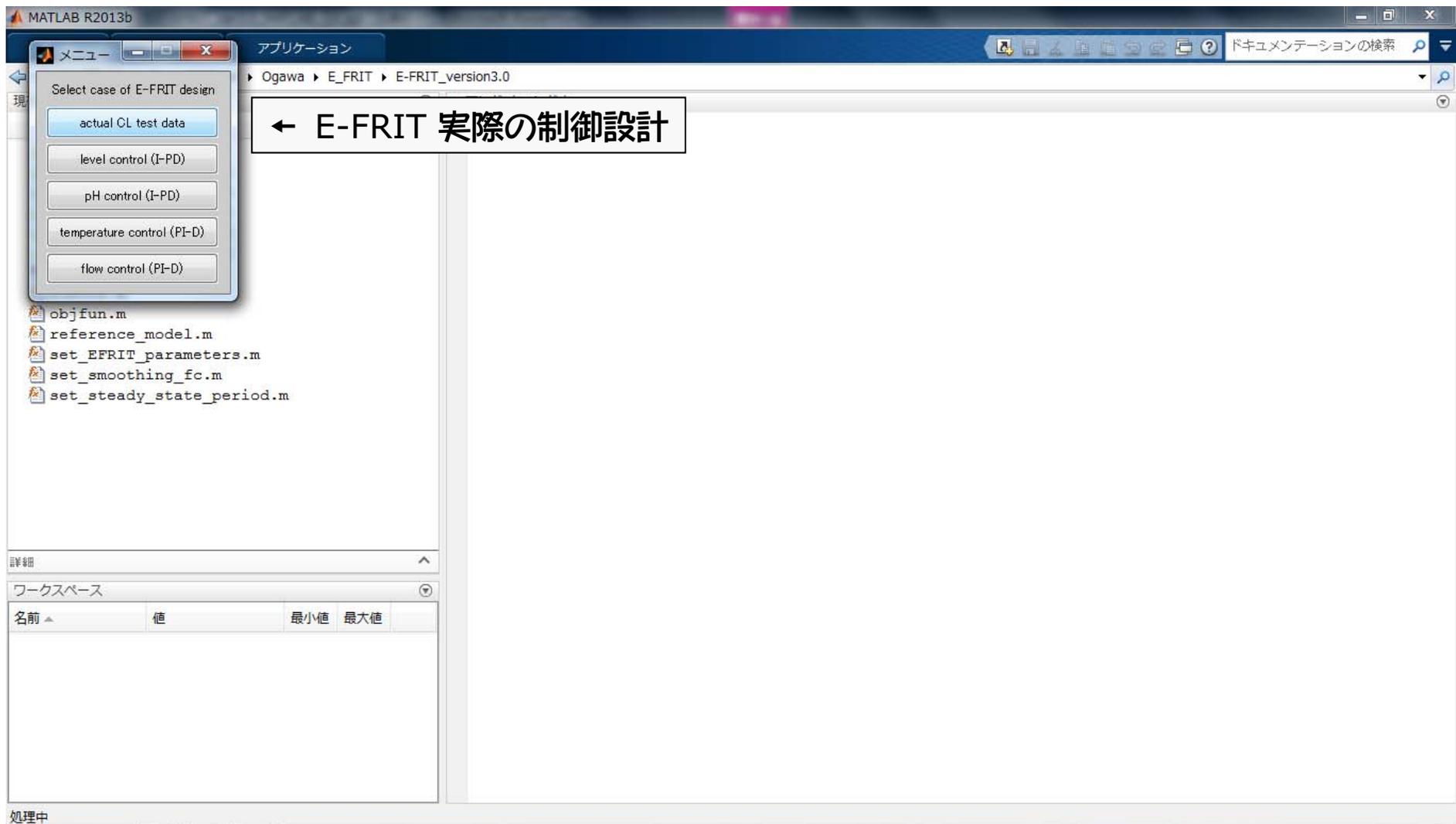
会話型 GUI：液面制御設計

- E-FRIT 設計の最適化目的関数と収束状態がグラフ表示される
- 最適解（赤丸）が適切なことを確認できる
- 収束状態が思わしくない場合は、閉ループテスト条件を見直し再テストする



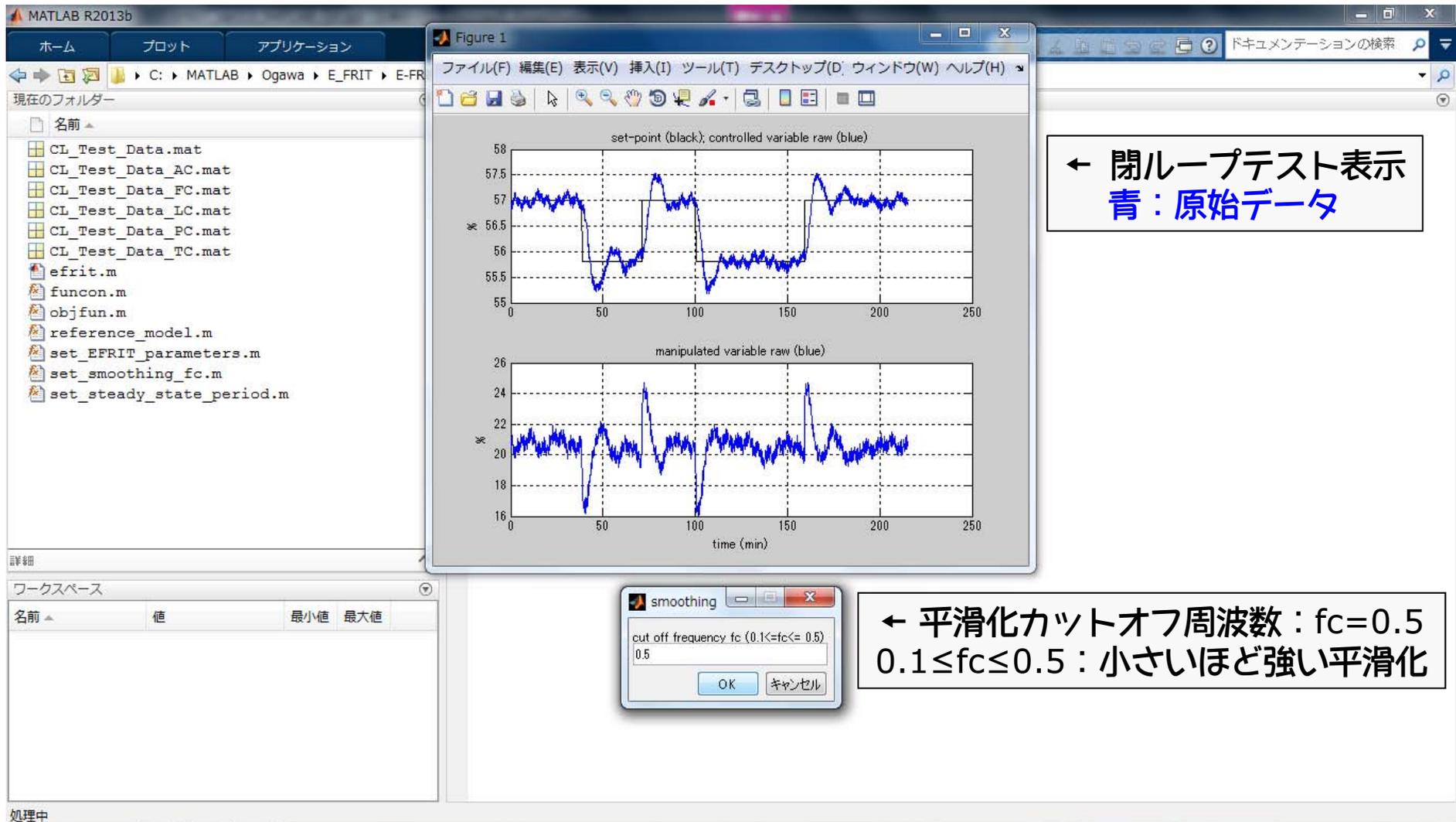
会話型 GUI : 実際の制御設計

- メニューダイアログの actual CL test data ボタンを左クリックする



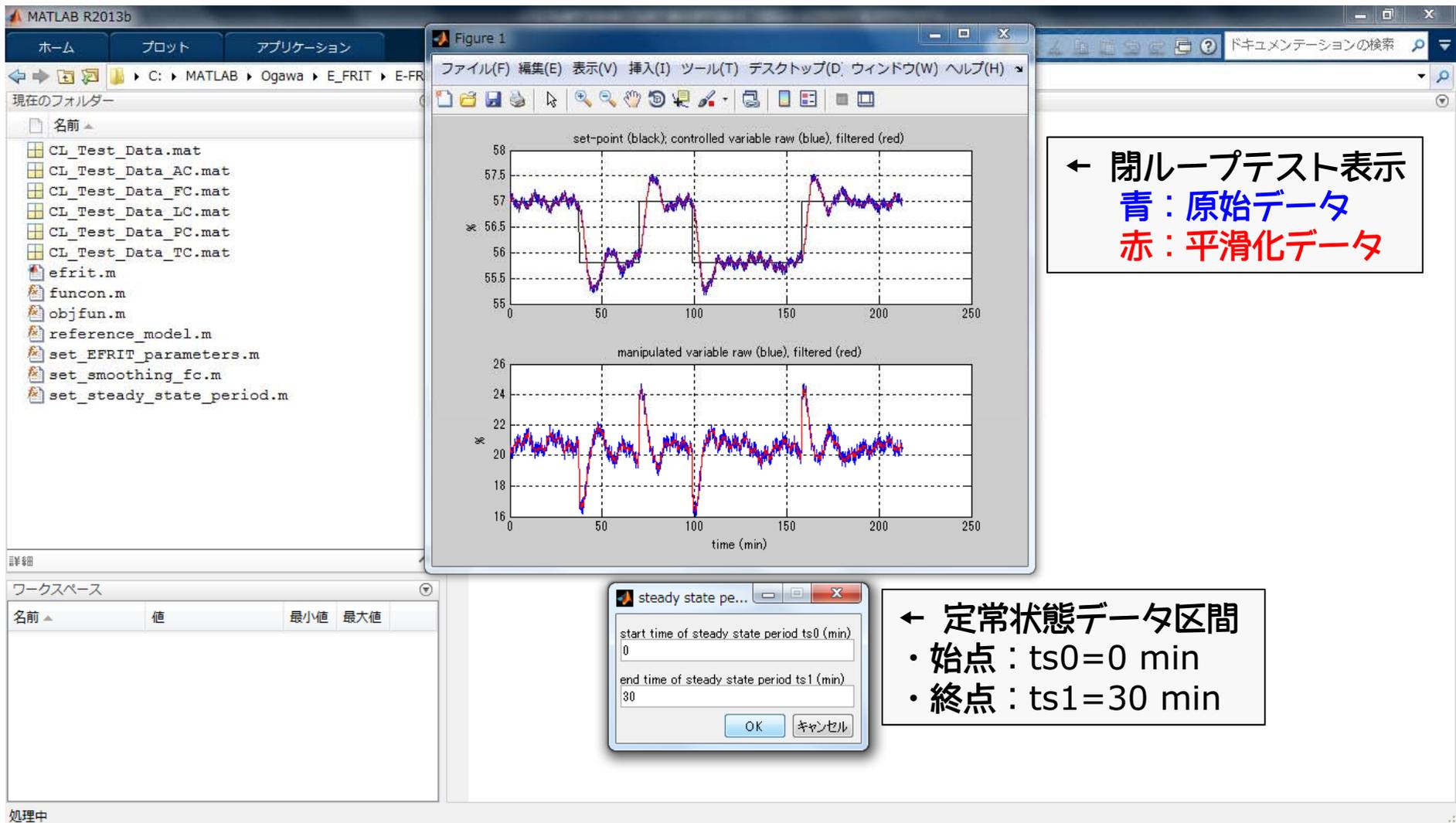
会話型 GUI：実際の制御設計

- 閉ループテストの時系列グラフが表示される
- 平滑化カットオフ周波数を入力し OK ボタンを左クリック
- 入力ウィンドウがグラフに重なって表示されるので適当に移動する



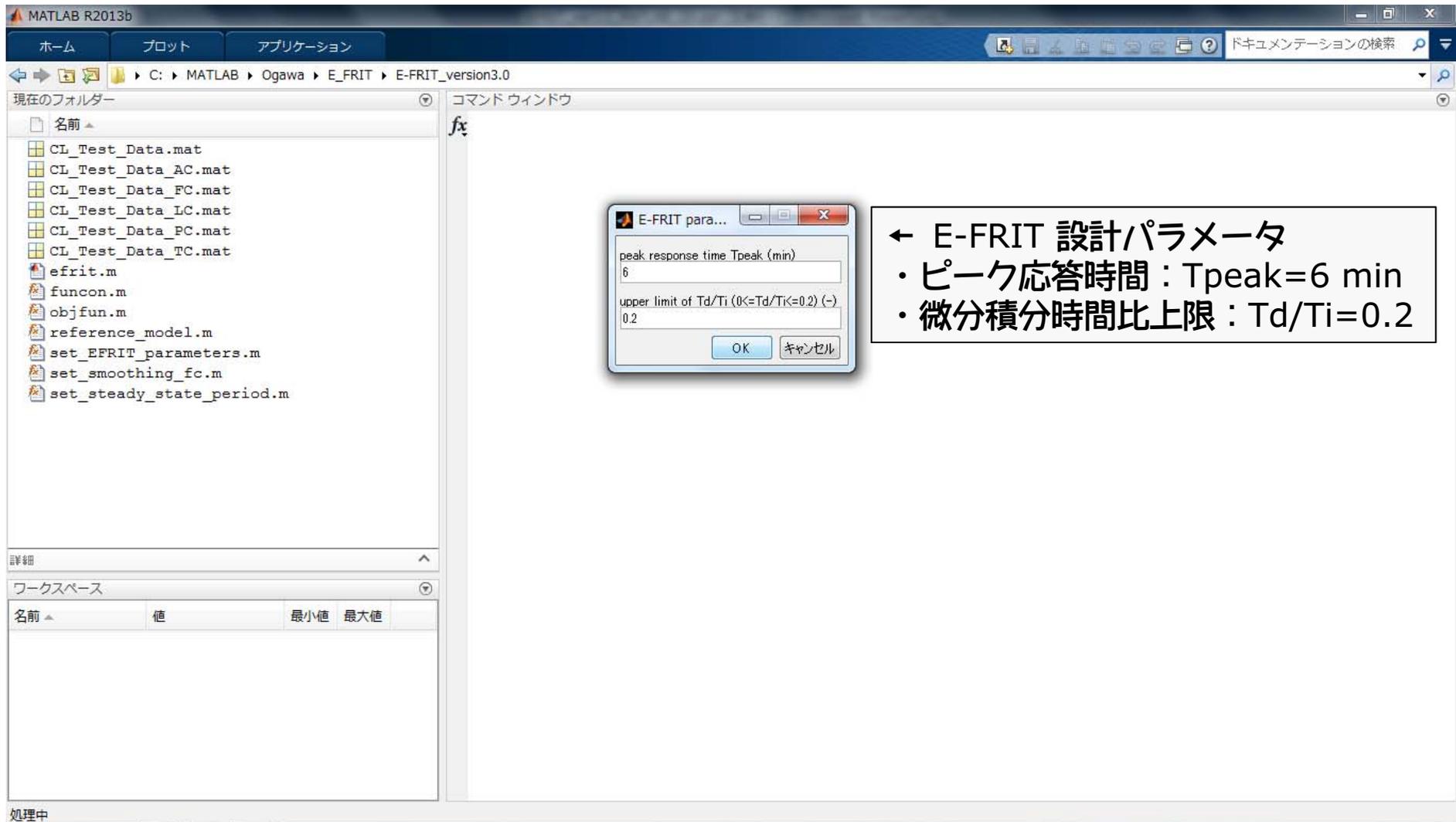
会話型 GUI：実際の制御設計

- 閉ループテストの時系列グラフが表示される（指定条件で平滑化したもの）
- 目標値変更前の定常値を決める時間区間を入力し OK ボタンを左クリック
- 入力ウィンドウがグラフに重なって表示されるので適当に移動する



会話型 GUI：実際の制御設計

- E-FRIT 設計パラメータを入力し OK ボタンを左クリック



会話型 GUI：実際の制御設計

- E-FRIT 設計結果がメッセージボックスに出力される
- これはグラフウィンドウの裏に隠れているので最前面に移動する

The screenshot shows the MATLAB R2013b environment. The Command Window displays the output of the E-FRIT design process, including the design condition, PID algorithm parameters, and the designed PID settings. A message box titled "E-FRIT" is overlaid on the Command Window, displaying the design results. The message box contains the following text:

```
--- design condition
PID algorithm
peak response time Tpeak (min) = 6.0
reference response time constant Tn (min) = 1.38
reference response order n = 2
--- closed loop tested PID settings
proportional gain Kc0 (%%) = 3.00
reset time Ti0 (min) = 4.00
derivative time Td0 (min) = 0.00
--- E-FRIT designed PID settings
proportional gain Kc (%%) = 3.22
reset time Ti (min) = 67.95
derivative time Td (min) = 0.00
process dead time TL (min) = 0.31
```

The Command Window also shows the E-FRIT estimated process dead time: TL (min) = 0.3130.

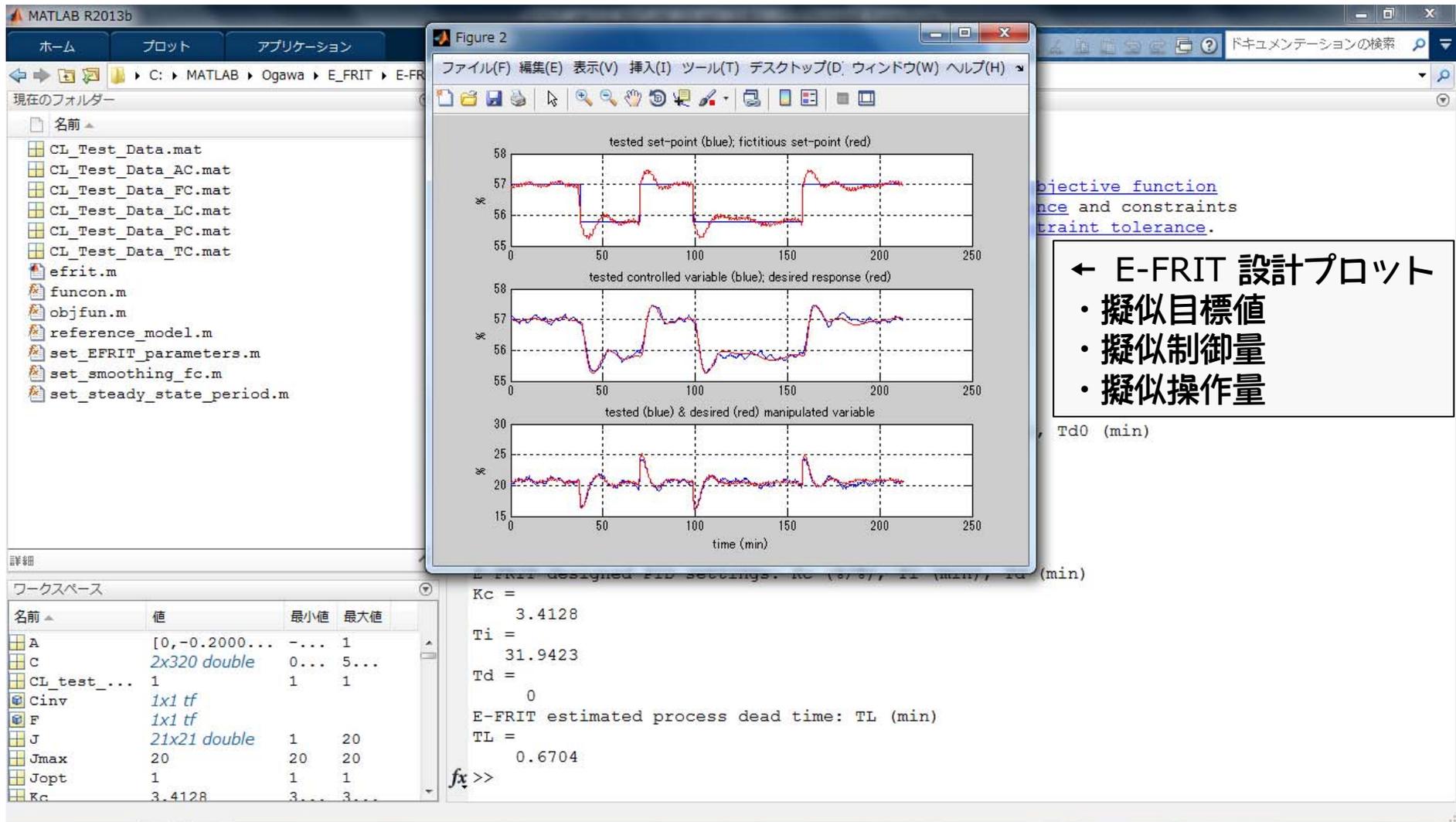
The workspace window shows the following variables:

名前	値	最小値	最大値
A	[0, -0.2000...	-...	1
C	2x289 double	0...	1...
CL_test_...	1	1	1
Cinv	1x1 tf		
F	1x1 tf		
J	21x21 double	0...	6...
Jmax	20	20	20
Jopt	1	1	1
Kc	3.2186	3...	3...

- ← E-FRIT 設計結果
- 比例ゲイン：Kc=3.22
 - 積分時間：Ti=67.9 (min)
 - 微分時間：Td=0 (min)
 - むだ時間：TL=0.31 (min)

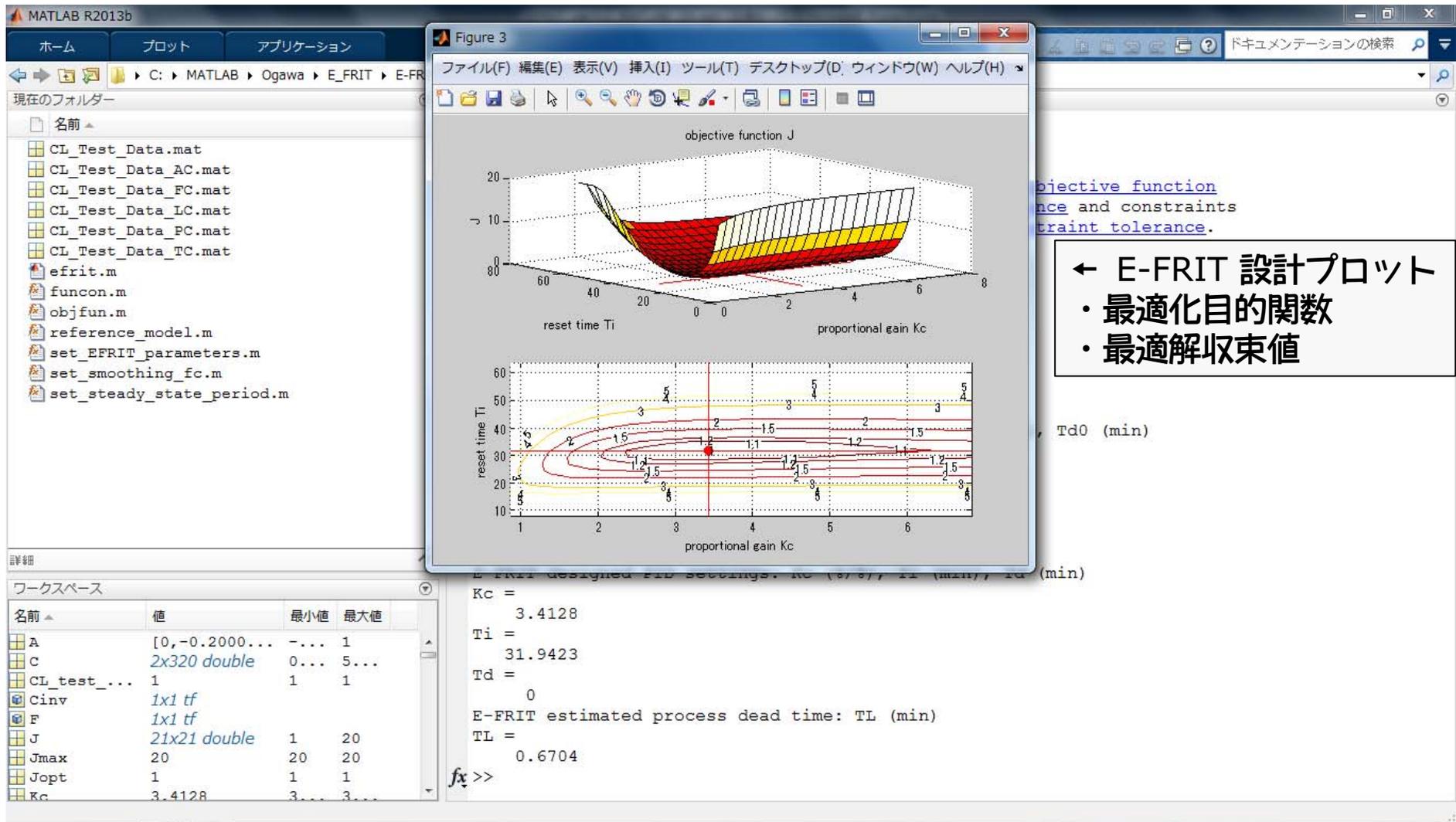
会話型 GUI：実際の制御設計

- E-FRIT 設計の擬似目標値・擬似制御量・擬似操作量が閉ループテスト時系列に重ねてグラフ表示される
- 擬似制御量・擬似操作量が閉ループテスト時系列の制御量・操作量に重なっていれば良い設計結果である
- 重なりが悪い場合は不確定外乱が作用している可能性がある。閉ループテスト条件を見直し再テストする



会話型 GUI：実際の制御設計

- E-FRIT 設計の最適化目的関数と収束状態がグラフ表示される
- 収束値（赤丸）が最適解に収束しているか確認できる
- 最適解に収束しない場合は、閉ループテスト条件を見直し再テストする



内 容

- E-FRIT version 3 増強内容
- E-FRIT アルゴリズム改良版
- 実用設計
- MATLAB Program Quick Start
- **ベンチマーク**
 - 蒸留塔塔底液面制御
 - pH 制御
 - 重合温度制御
 - リボイラー蒸気流量制御

ベンチマーク：閉ループシステム同定

閉ループ目標値変更テスト条件

データ	変数名	単位	Case 1: LC	Case 2: AC	Case 3: TC	Case 4: FC
			蒸留塔液面	pH	重合温度	リボイラー蒸気
PID algorithm	PID_algorithm	-	3 (I-PD)	3 (I-PD)	2 (PI-D)	2 (PI-D)
正逆動作	dir_rev	-	-1 (Reverse)	1 (Direct)	1 (Direct)	1 (Direct)
比例ゲイン	Kc0	%/%	2.0	0.67	2.5	0.50
積分時間	Ti0	min	10	1.0	2.8	11.7
微分時間	Td0	min	0	0	0.10	0
微分ゲイン	gamma	-	10	10	10	10
データ収集周期	tau	min	1	1/60 (1 sec)	1/60 (1 sec)	1

閉ループシステム同定結果

プロセス動特性モデル			積分+1次遅れ	2次遅れ	2次遅れ	2次遅れ
ゲイン	$ K_p$	%/%	-	3.69	0.0724	1.48
時定数 1	T_{p1}	min	-13.6	0.837	1.86	9.65
時定数 2	T_{p2}	min	3.83	0.837	1.86	0
むだ時間	T_L	min	0.250	0.220	0	0

process dynamics model: $P(s) \equiv \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{T_{p1}s(T_{p2}s + 1)} e^{-T_L s}$, $P(s) = \frac{K_p}{(T_{p1}s + 1)(T_{p2}s + 1)} e^{-T_L s}$

ベンチマーク：E-FRIT

閉ループ目標値変更テスト条件

データ	変数名	単 位	Case 1: LC	Case 2: AC	Case 3: TC	Case 4: FC
			蒸留塔液面	pH	重合温度	リボイラー蒸気
PID algorithm	PID_algorithm	-	3 (I-PD)	3 (I-PD)	2 (PI-D)	2 (PI-D)
正逆動作	dir_rev	-	-1 (Reverse)	1 (Direct)	1 (Direct)	1 (Direct)
比例ゲイン	Kc0	%/%	2.0	0.67	2.5	0.50
積分時間	Ti0	min	10	1.0	2.8	11.7
微分時間	Td0	min	0	0	0.10	0
微分ゲイン	gamma	-	10	10	10	10
データ収集周期	tau	min	1	1/60 (1 sec)	1/60 (1 sec)	1

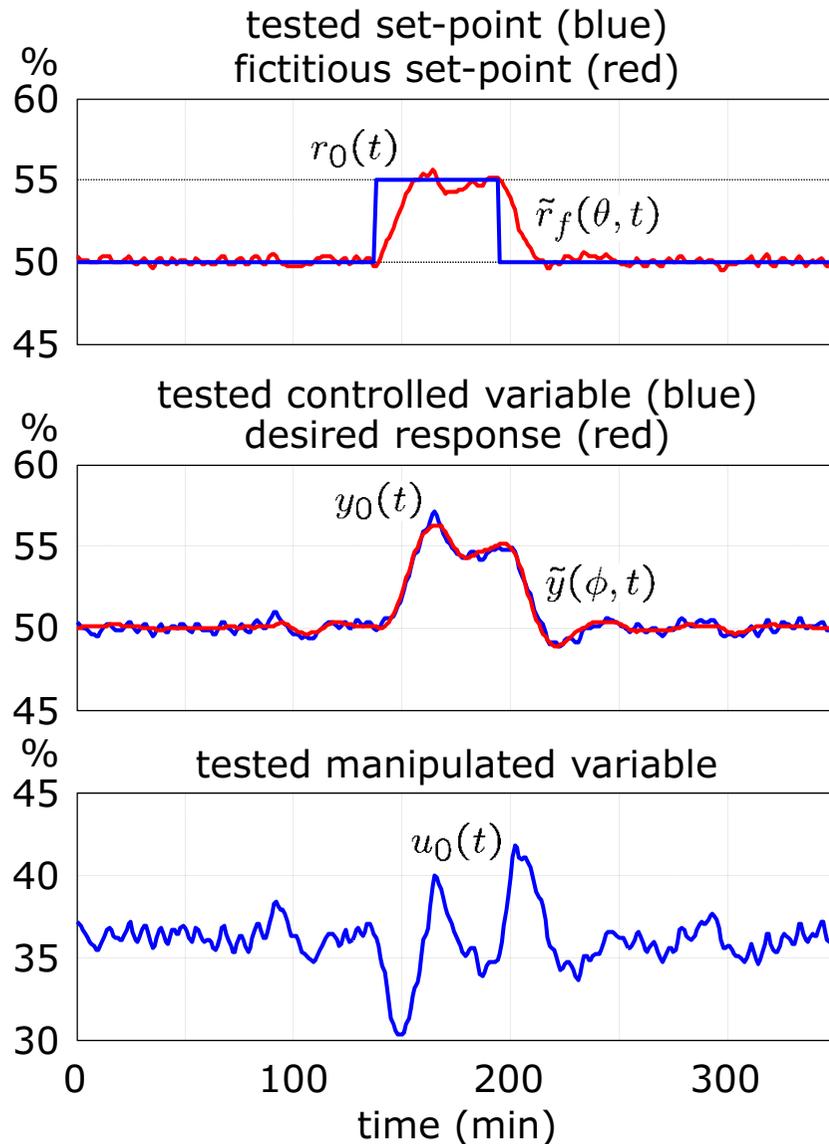
E-FRIT 設計結果

整定時間	T99	min	30	5.0	15	15
比例ゲイン	Kc	%/%	1.98 (5.7)	0.200(0.32)	3.90 (5.3)	0.809 (2.2)
積分時間	Ti	min	15.1 (12)	0.770 (1.3)	1.69 (2.3)	6.49 (9.7)
微分時間	Td	min	0 (2.3)	0 (0.35)	0.06 (0.25)	0 (0)
プロセスむだ時間	TL	min	5.47	0.02	0.33	0.10

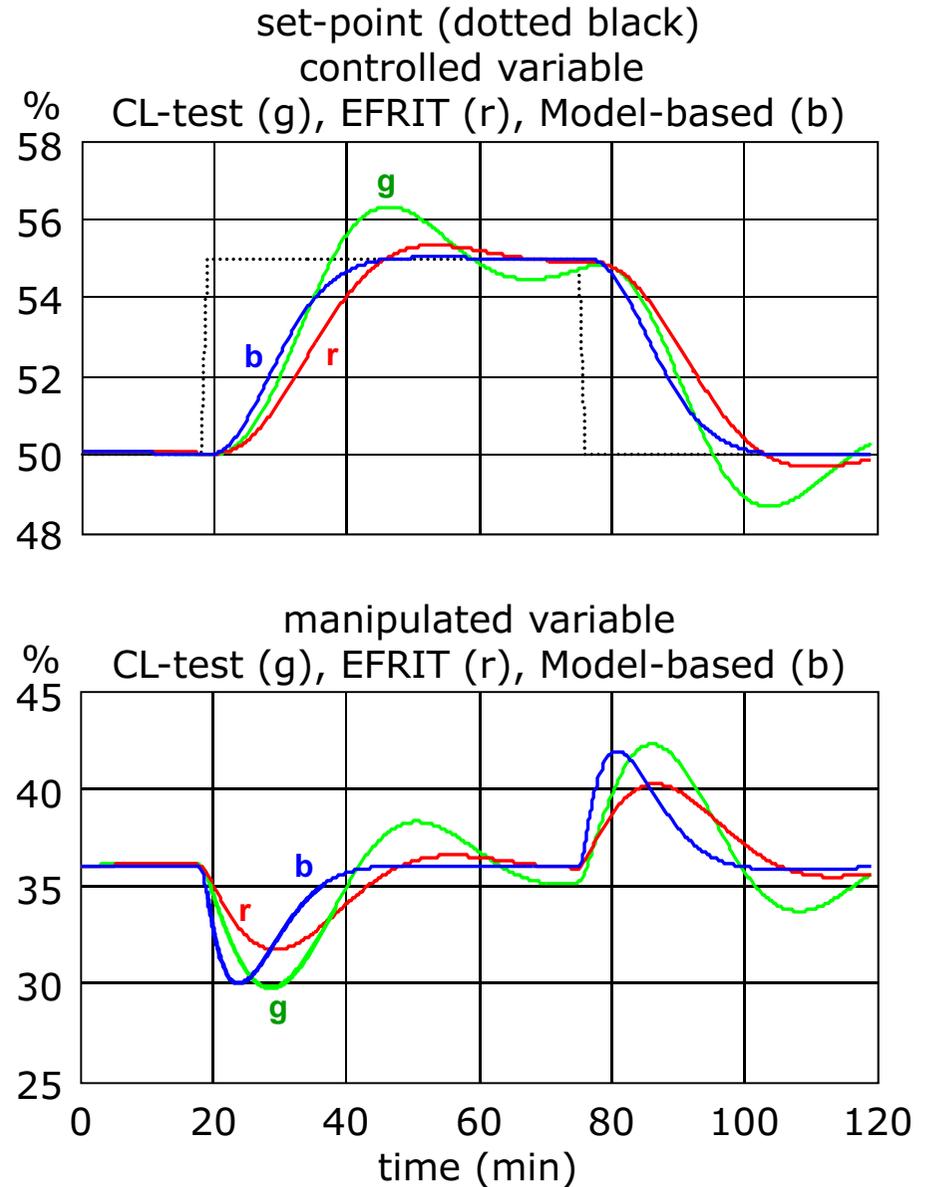
(・) : 閉ループシステム同定とモデルベース PID 設定則 (小河法) による

蒸留塔塔底液面制御 - 操作量がリボイラー蒸気量

Case 1: LC EFRIT Design Results

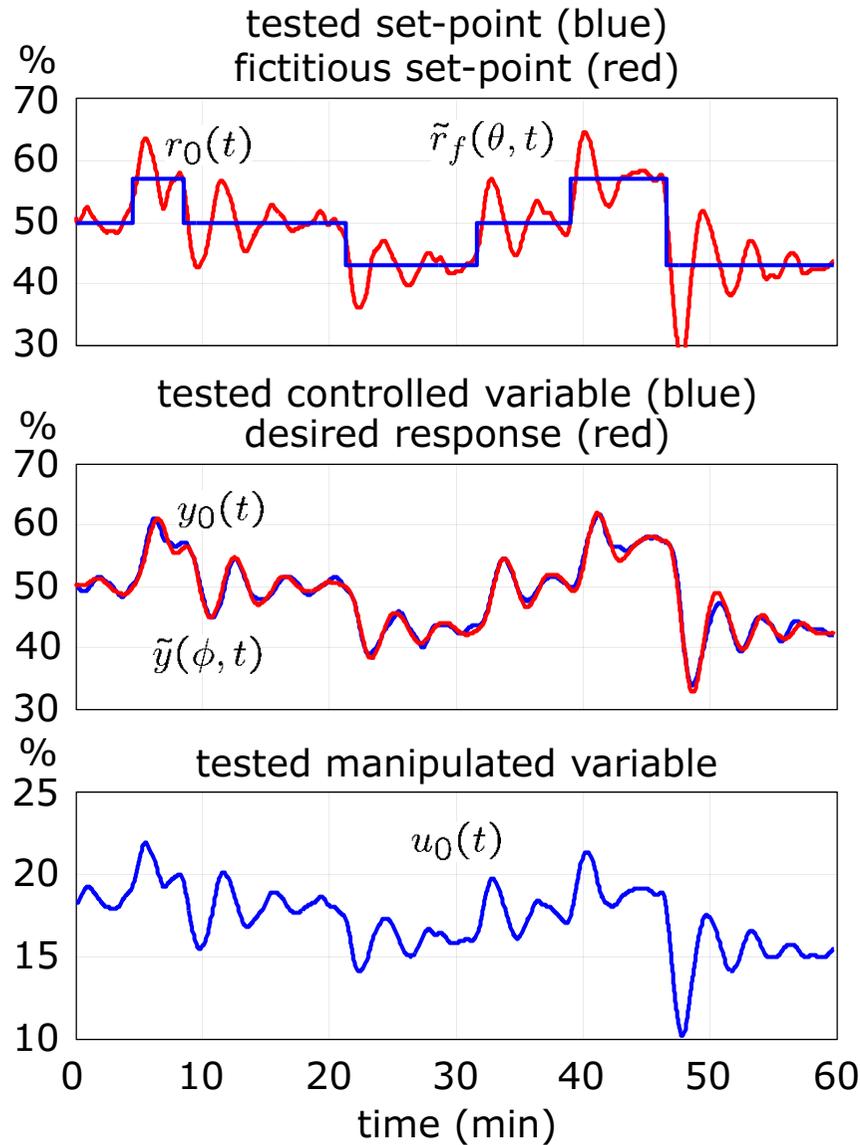


I-PD Control Simulation

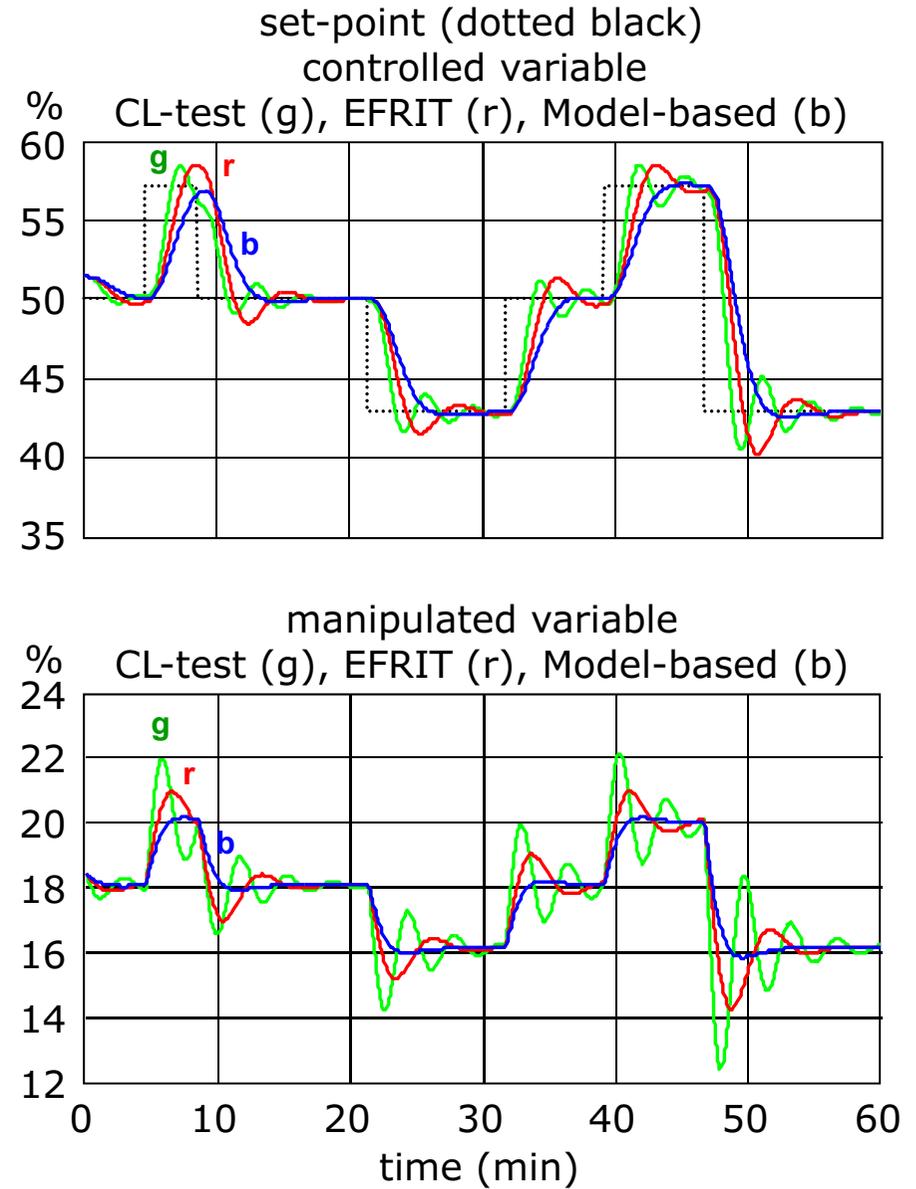


pH制御 - 速いプロセス動特性

Case 2: AC EFRIT Design Results

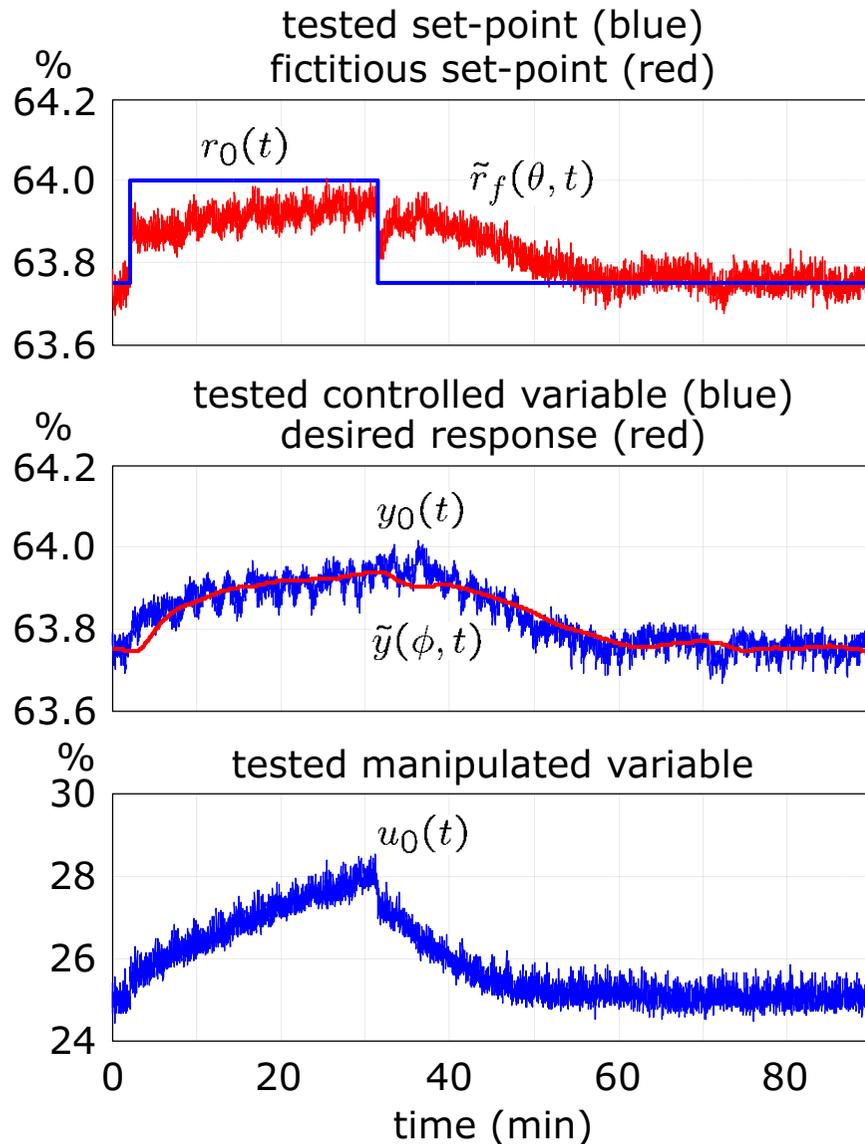


I-PD Control Simulation

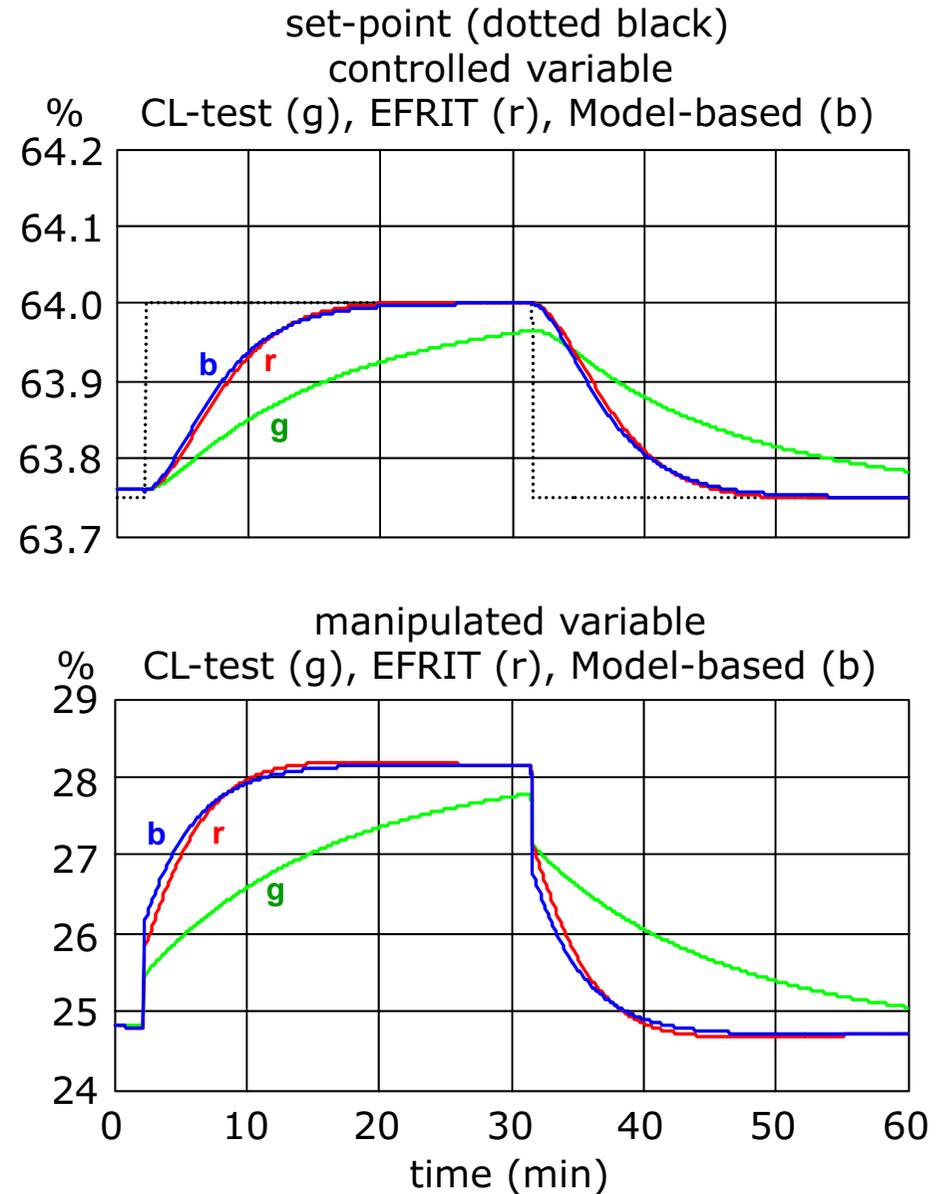


重合温度制御 - 目標値応答の速応性改善

Case 3: TC EFRIT Design Results

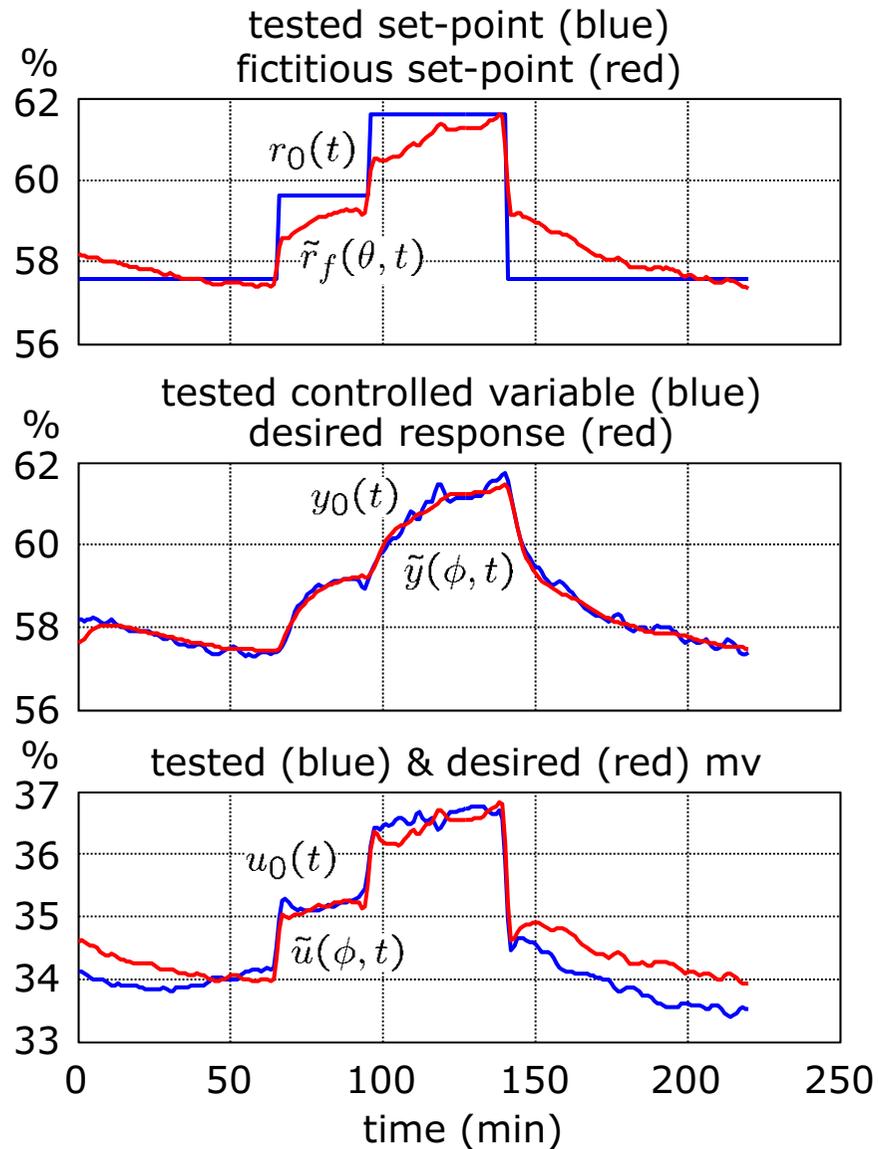


PI-D Control Simulation



リボイラー蒸気流量制御 - 凝縮水ラインに調節弁設置

Case 4: FC EFRIT Design Results



PI-D Control Simulation

