

3.5 高精度加振制御技術の開発

3.5.1 三次元震動台シミュレーションシステムの整備

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5 ヶ年の年次実施計画
- (e) 平成 15 年度業務目的

(2) 平成 15 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 全体設計
 - 2) 計算システム本体の詳細機能設計およびシステム構築
 - 3) 震動台モデルの詳細設計および構築
- (c) 業務の成果
 - 1) 全体設計
 - 2) 計算システム本体の詳細機能設計およびシステム構築
 - 3) 震動台モデルの詳細設計および構築
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成 16 年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 三次元震動台シミュレーションシステムの整備

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名	メールアドレス
独立行政法人防災科学技術研究所	主任研究員	梶原浩一	kaji@bosai.go.jp
	研究員	佐藤栄児	eiji@bosai.go.jp

(c) 業務の目的

E - ディフェンスによる震動実験を安全かつ高精度に行うために、震動台の応答挙動を事前に精度良く把握するための三次元震動台シミュレーションシステムを開発する。システムは、震動台モデル、加振系、応用制御系、基本制御系、試験体モデルにより構成されるものとし、試験体による震動台応答の影響を推定できるものとする。また、科学技術振興調整費による総合研究の研究成果を反映し、そこで検討された制御系と震動台ユーザーが持ち込む制御系の装備が可能なシステムとする。

(d) 5 カ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

シミュレーションシステムの全体構想の取り纏めを行う。

震動台、加振機構系と油圧系、実装を予定する基本制御系のダイナミクスを定式化する。

2) 平成15年度：

14年度で取り纏めた個々の項目のプログラム化を行う。

振動台シミュレータ上に積載する試験体の基本的な履歴モデルのプログラム開発を行う。

3) 平成16年度：

実験者が多様な条件下でシミュレーションが容易に行えるようにマン・マシンインターフェースの整備を行う。

一連の解析、作図プログラムの製作を行う。

4) 平成17年度：

E - ディフェンス負荷試験体モデルの設計に取り掛かる。

E - ディフェンス加振・調整データより、震動台シミュレータのパラメータ調整を行う。

シミュレーションデータの解析、作図プログラムの動作確認を行う。

5) 平成18年度：

震動台シミュレータの評価・改良を行うため、試験体を積載した実験データとシミュレーションの比較検討を行う。
シミュレーションシステム全体のとりまとめと報告書の作成を行う。

なお、開発する震動台シミュレータは、先に行われた確認試験のシミュレーション等で用いた実績ある手法に基づき構築するが、今後の研究の進歩によっては、更に高精度なシステムへ移行する展開も考えられるので、ここで開発する震動台シミュレータの名称を特に、「震動台基準シミュレータ」とする。

(e) 平成 15 年度業務目的

14 年度で取り纏めた個々の項目のプログラム化を行う。
振動台シミュレータ上に積載する試験体の基本的な履歴モデルのプログラム開発を行う。

(2) 平成 15 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 15 年度は次の各項目を実施した。

- 1) シミュレータの構成に基づく全体設計を行い、プログラム構成の詳細をまとめ、適用するソフトウェア等を決定した。
- 2) 計算システム本体の機能および震動台モデルとのインターフェイスについて設計を行い、ユーザーインターフェイスに必要な詳細機能を設計した。
- 3) 震動台モデルに関する詳細設計を実施し、それらについてのダイナミクスを定式化した。試験体系の詳細を除く主要なサブシステムモジュールを構築した。

(b) 業務の実施方法

1) 全体設計

震動台基準シミュレーションで製作する「震動台シミュレータ」は、平成 14 年度に実施した「全体基本設計書」に基づき詳細仕様を確立する。なお、概要図を図 1 に示す。

全体設計における詳細仕様検討では、以下の 4 つの項目について仕様を確立する。

- a) 設定パラメータの洗い出しおよびユーザーインターフェイスの仕様検討
- b) 出力物の選定およびそれに関連する出力パラメータの洗い出し
- c) 適用ツールの最終選定
- d) 適用ツールの動作検証

以下に、詳細仕様検討の具体的な実施方法を記述する。

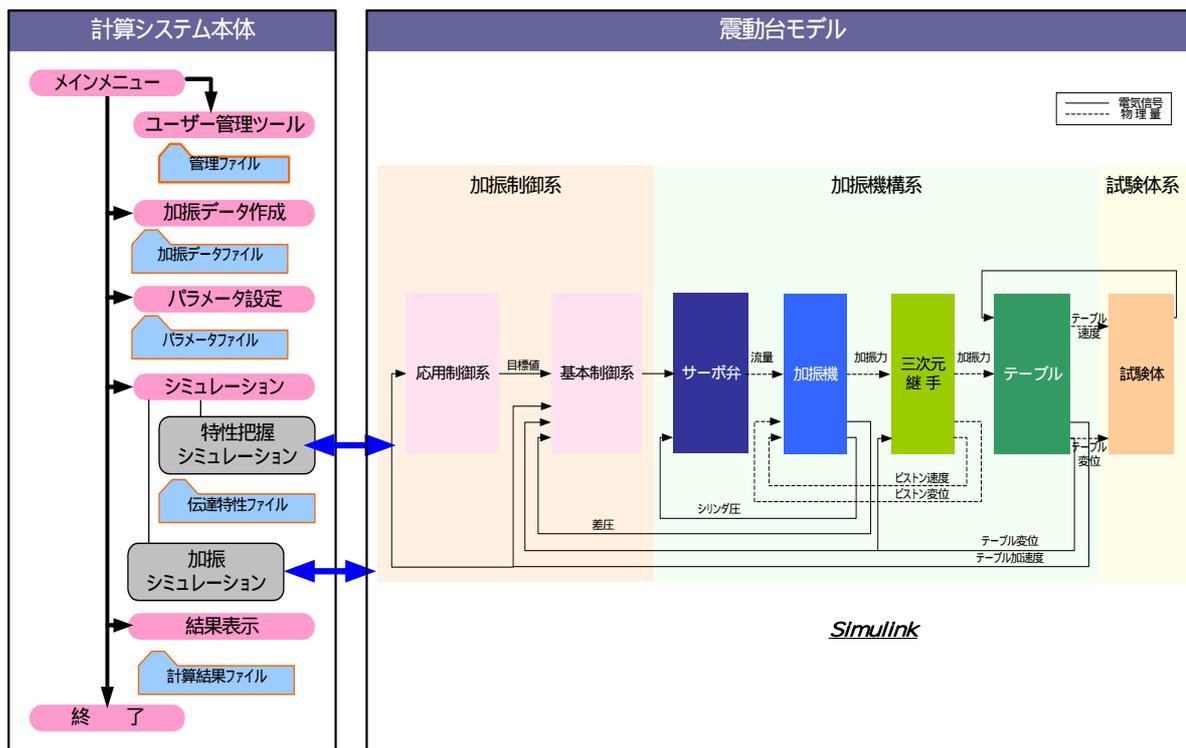


図 1 震動台基準シミュレーション「震動台シミュレータ」概要図

a) 設定パラメータの洗い出しおよびそのユーザーインターフェイスの仕様検討

平成 14 年度に実施した「全体基本設計書」に基づき、モジュールごとに必要と考えられる設定パラメータ(選択, 切替え等) または入力項目(数値, 変数名, ファイル名等)について洗い出す。また、その設定や状況表示に必要なユーザーインターフェイスについても検討する。

計算システム本体は、サブシステムごとに独立したプログラム群であるため、ユーザーインターフェイスが必要となる。また、震動台モデルは、入力および設定パラメータについて計算システム本体より受け取る必要があるため、それに応じたユーザーインターフェイスが必要となる。ユーザーインターフェイスは操作を容易にするため、GUI(Graphical User Interface)の手法で構築する。

b) 出力物の選定およびそれに関連する出力パラメータの洗い出し

入力項目の洗い出しと同様に、結果あるいは状況を出力する出力物およびそれに関する出力用データを洗い出す。出力項目としては、基本的にパラメータ設定におけるデータおよび計算結果のグラフ表示におけるデータとなる。

c) 適用ツールの最終選定

システム構築時に適用するツールおよびその補助ツールを整理し、適用すべきツールを洗い出す。適用ツールは購入手続の関係から、早期に確定させる必要がある。

d) 適用ツールの動作検証

開発環境にて適用ツールの最終選定で決定したツールを導入し、これを用いて試験用の震動台模擬モデル(試験体を除く)を構築し、オプションツールならびに選定したコンパイラ等を用いて実行プログラムを試作する。ただし、今回はあくまで選定した適用ツールを試験用モデルにおいて動作検証することを前提とするため、GUI化を考慮した「RSIM(Rapid Simulation Target)」による手法(「平成14年度全体計画検討書」参照)の機能は用いず、一般的と考えられる手法を使いプログラムのC言語化を実施する。

2) 計算システム本体^{D,2)}の詳細機能設計およびシステム構築

震動台基準シミュレーションにおける「計算システム本体」のユーザー操作において必要となる機能を設計し、詳細仕様をまとめ、その基礎部分をシステム構築する。

ユーザーの操作画面および出力フォームならびに操作手順を明らかにするため、全体設計で選定した適用ツールを用い主要なメニュー画面を試験的に構築し、一連の操作フローの実現を確認したうえで、詳細仕様としてまとめる。

実施項目をまとめると、次のようになる。

- a) 詳細機能設計
- b) GUI設計
- c) GUI/システム構築

また、基本方針として、以下の項目を考慮する。

- ・ 表示単位は、実機コントローラ画面にできる限り準拠すること
- ・ 表示されるグラフは、印刷を可能にすること
- ・ 可能な限り操作画面は少なくし、効率的な操作を実現すること
- ・ データの取り出しについては、一括してテキスト形式としての出力を可能にすること

以下に、計算システム本体の詳細機能設計およびシステム構築の具体的な実施方法を記述する。

a) 計算システム本体の詳細機能設計

「計算システム本体」における詳細機能設計では、前年度に検討した「メニューに関する操作フロー」、「パラメータ設定に関する操作フロー」、「シミュレーションに関する操作フロー」、「結果出力に関する操作フロー」の4つの項目において必要となるサブプログラムを設計し、まとめる。ただし、震動台基準シミュレーションでは、「計算システム本体」と「震動台モデル」とに区分しているが、実際には相互で参照するやりとりも多く、厳密に上記2つに区分することは難しいため、明確には区分しない。

b) 計算システム本体のGUI設計

「計算システム本体」におけるメニューなどのGUI機能、「震動台モデル」に必要なパラメータを引き渡すための入力および設定項目の設定画面等について、設計を実施し、GUI機能仕様を作成する。また、印刷するグラフの形式やフォームについての仕様も検討する。

c) 計算システム本体の G U I / システム構築

全体計画検討で選定した開発ツールを用いて、「計算システム本体」の基礎となる部分を構築する。

3) 震動台モデルの詳細設計および構築

震動台基準シミュレーションにおける「震動台モデル」のユーザー操作において必要となる機能の設計を実施し、詳細仕様書を作成するとともに、その基礎部分についての構築を実施する。これにより、全体設計で選定した開発ツールを用い、主要なモデル構成について検討し、一連の操作フローを考慮したうえで、実現可能な手順ならびに仕様を確定する。

本設計に基づき震動台モデルのサブシステムモジュールを構築する。

実施項目をまとめると、次のようになる。

a) 詳細設計 (ダイナミクス定式化・G U I 設計)

b) G U I 構築

以下に、震動台モデルの詳細機能設計および構築の具体的な実施方法を記述する。

a) 震動台モデルの詳細設計

「震動台モデル」のユーザー操作において必要となる機能を設計し、詳細仕様を作成する。なお、試験体のうちトリリニア特性を持つ非線形試験体モデルについては、現在のところ仕様が未確定であるため来年度に詳細設計を実施する。

b) 震動台モデルの G U I 構築

震動台モデルは詳細設計の仕様をもとにサブシステムモジュールによって構成し構築する。なお、基本的には、Simulink (汎用制御系設計ソフト) をモデル化するが、すべて実行形式としてコンパイルを実施するためここでは記載しない。また、応用制御系モジュールについても、本報告書には記載しないものとする。

(c) 業務の成果

1) 全体設計

a) 詳細仕様検討

全体設計における詳細仕様検討では、以下の4つの項目について仕様を確立した。

-) 設定パラメータの洗い出しおよびユーザーインターフェースの仕様検討
-) 出力物の選定およびそれに関連する出力パラメータの洗い出し
-) 適用ツールの最終選定
-) 適用ツールの動作検証

本検討結果については、以下に記述する。

-) 設定パラメータの洗い出しおよびユーザーインターフェースの仕様検討

必要なパラメータを洗い出し、ユーザーインターフェースの機能について検討をした。この結果、GUI化するものとししないものとに区分した。図2に入力および設定項目における詳細仕様、GUIに関する項目をまとめた。

また、震動台モデルにおいて、モジュールごとに入力または設定が必要な内容と、その数量などの区分、GUI化の有無、表示のみとインプット用ダイアログ(入力フォーマット)を用意するかなどを検討した。この結果を表1に示す。GUI化については、その一部にマイクロソフト EXCEL を用いることにより、製作工期の大幅な短縮を図ることとした。

計算システム本体							
GUI操作画面を構築する	メインメニュー	ユーザー管理ツール	加振データ作成ツール	パラメータ設定	シミュレーション	結果表示	終了
入力設定パラメータ	・ログインID	・ログインID ・格納先	・正弦波 ・地震波 ・ランダム波	・表示/印刷 ・設定変更	・保存条件 ・加振時間 ・履歴番号	・履歴番号	(なし)

計算システム本体と震動台モデルとのインターフェイスは自動的に処理	新規開発の制御ロジックについてもこれに準拠	応用制御系モジュール			
		特性把握シミュレーション	加振シミュレーション()		
		特性把握サブシステム	反復型入力補償サブシステム	逐次適応型入力補償サブシステム	高速適応型入力補償サブシステム
入力設定パラメータ		・目標波ファイル名 ・応答波ファイル名 ・データ長 ・ブロック長 ・保存ファイル名	・目標波ファイル名 ・応答波ファイル名 ・伝達特性 ・補償回次 ・補償係数 ・保存ファイル名	・目標波ファイル名 ・応答波ファイル名 ・伝達特性 ・補償回次 ・補償係数 ・保存ファイル名	・目標波ファイル名 ・応答波ファイル名 ・伝達特性 ・補償回次 ・補償係数 ・保存ファイル名

震動台モデル							
要所のみGUI化を実施する	基本制御系	応用制御系	サーボ弁部	加振機部	継手部	テーブル部	試験体部
入力設定パラメータ (GUI化する項目)	(なし)	・補償種別切替	・オーバーラップ切替	・摩擦力切替 ・洩れ特性切替	(なし)	・イナーシャ ・加振機結合点における重心点からの位置情報	・質点数 ・質量 ・イナーシャ ・質点位置情報 ・質点間剛性 ・質点間減衰
入力設定パラメータ (Excel形式でデータを格納する項目)	・TVC制御 ・DOF制御 ・サーボ制御	(なし)	・油の弾性係数 ・供給圧 ・戻り圧 ・流量ゲイン ・マニホールド特性	・ケーシング質量 ・シリンダ容積	・継手質量 ・ハウジング質量 ・継手長さ ・ピストンロッド質量 ・主軸慣性	・テーブル質量	(なし)

図2 設定および入力項目における詳細仕様

表 1(a)基本制御系パラメーター一覧

基本制御系						
項目	内容	区分	GUI化		数値表示	数値変更
TVC制御	フィードバックゲイン	自由度毎	×			
	フィードフォワードゲイン					
	差圧平均				×	×
	差圧フィードバックゲイン					
	差圧ハイパスフィルタ					
	ノッチフィルタ中心周波数				×	×
	ノッチフィルタバンド幅				×	×
	ノッチフィルタ深さ				×	×
	ノッチフィルタ特性				×	×
	ノッチフィルタ初期値				×	×
DOF制御	PID-Shear制御変換行列	加振機毎	×		×	×
	PID-Shear差圧比例ゲイン				×	×
	PID-Shear差圧積分ゲイン				×	×
	PID-Shear差圧微分ゲイン				×	×
	PID-Shear差圧微分除数				×	×
	PID-Warp制御変換行列				×	×
	PID-Warp差圧比例ゲイン				×	×
	PID-Warp差圧積分ゲイン				×	×
	PID-Warp差圧微分ゲイン				×	×
	PID-Warp差圧微分除数				×	×
サーボ弁制御	線形補償リミット値	加振機毎		ボタン選択画面		
	線形補償切替スイッチ					

GUI画面を用意し設定する項目
 Excel形式で簡易設定する項目
 ・これ以外はバイナリデータとして扱うため表示しない

表 1(b)応用制御系パラメーター一覧

応用制御系						
項目	内容	区分	GUI化		数値表示	数値変更
	補償種別切替スイッチ	シミュレーション毎		ボタン選択画面		
特性把握 シミュレーション	目標波ファイル名			ファイル選択画面		
	応答波ファイル名			ファイル選択画面		
	データ長			入力画面		
	ブロック長			入力画面		
	伝達特性保存ファイル名			入力画面		
加振 シミュレーション (入力補償) ・反復型 ・逐次適応型 ・高速適応型 ・外部補償	目標波ファイル名			ファイル選択画面		
	応答波ファイル名			ファイル選択画面		
	補償回次			ボタン選択画面		
	補償係数			入力画面		
	伝達特性ファイル名			ファイル選択画面		
	前次補償波ファイル名			ファイル選択画面		
	前次応答波ファイル名			ファイル選択画面		
	DCカット周波数			入力画面		
高周波カット周波数			入力画面			

表 1(c)サーボ弁部パラメーター一覧

サーボ弁部						
内 容	区 分	GUI化		数値表示	数値変更	
オーバーラップ切替スイッチ	加振機毎		ボタン選択画面			
サーボ弁供給圧力		×				
サーボ弁戻り圧力						
サーボ弁無負荷流量係数						
サーボ弁流量係数						
サーボ弁スレッシュホールド						
サーボ弁オーバーラップ						
サーボ弁スプール特性						
マニホールド特性						×

表 1(d)加振機部パラメーター一覧

加振機部						
内 容	区 分	GUI化		数値表示	数値変更	
洩れ特性切替スイッチ	加振機毎		ボタン選択画面			
ケーシング質量		×				
ケーシングばね定数						
ケーシング減衰定数						
シリンダ面積						
シリンダ片側容積						
ピストンリング洩れ特性						
シリンダ洩れ圧力 流量係数						
作動油の体積弾性係数						

表 1(e)三次元継手部パラメーター一覧

継手部					
内 容	区 分	GUI化		数値表示	数値変更
継手質量	加振機毎	×			
ハウジング質量					
継手長さ					
ピストンロッド質量					
主軸回転慣性モーメント					

表 1(f)震動台テーブル部パラメーター一覧

テーブル部					
内 容	区 分	GUI化		数値表示	数値変更
テーブルイナーシャ	なし		入力画面		
加振機取付位置			入力画面		
テーブル質量			入力画面		

表 1(g) 試験体部パラメータ一覧

試験体部					
内 容	区 分	GUI化		数値表示	数値変更
質点数	なし		入力画面	/	/
質点位置情報			入力画面		
質点質量			入力画面		
質点回転慣性モーメント			入力画面		
質点間剛性			入力画面		
質点間減衰			入力画面		

）出力物の選定およびそれに関連する出力パラメータの洗い出し

入力項目の洗い出しと同様に、結果あるいは状況を表示する出力物(グラフ)およびそれに関する出力用パラメータについて洗い出した結果、出力物とその出力方式は、表 2 に示す通りとした。

なお、出力用パラメータについては一旦 MAT ファイルに保存して使用することとしたが、その内容などは「計算結果表示サブシステム」にて、検討を実施する。

表 2 出力物一覧

結果表示<出力物>			時刻歴折れ線グラフ/ 最大値棒グラフ							周波数軸折れ線グラフ				
設定手順	メニュー画面にて選択履歴番号を入力してデータを読み込む		加速度	速度	変位	力	差圧	油量	角度 (上下 加速度)	転倒 モーメント	ゲイン	位相	コヒー レンス	応答スペ クトル
特性把握	テーブル	中心点												
入力補償	加振機	(時刻歴)												
		(最大値)						積算						
	試験体	質点												
層間														

）適用ツールの最終選定

基本方針として選定したツールと適用するサブシステム，用途などを表 3 に一覧として示す。

構築の基本ツールとしては「MATLAB6.5」(2003 年 4 月現在の MATLAB 最新バージョン)を用いるものとし、関連するツールはすべて当該ソフトと互換性を持つソフトウェアおよびバージョンのものを選定した。

また、互換性はあっても設計段階で入手できないツールについては除外とし、当方で未検証のものについてはメーカーから試用版等入手して実際に使用したうえで、組み込み可能どうか判断した。なお、確定したソフトウェアについては、将来バージョンアップする可能性があるが、改訂せざるを得ない場合を除き、基本的には開発時のまま継続運用することとした。表 4 にバージョンアップに関する対応を示す。(ただし、調査は平成 15 年 6 月時点のもの)

表 3 選定した適用ツール一覧(基本方針)

	選定ソフトウェア/ツール (カッコ内は単体製品名)	選定バージョン	適用するサブシステム	主な用途	開発時 必要性	運用時 必要性
計算システム 本体	Visual Studio .NET(1) (Visual Basic .NET)	2002 (7.0)	・メニュー画面 ・ユーザー管理ツール	・操作メニュー		
	Office XP Personal (Excel)	- (2002)	・パラメータ設定	・入力用画面		
	MATLAB Excel Link <MATLAB Option>	2.0				
	MATLAB	6.5	・加振データ作成 ・結果表示	・操作画面 ・結果表示		
震動台モデル	Simulink <MATLAB Option>	5.0	(開発のみ)	・モデル構築		(2)
	Real-Time Workshop <MATLAB Option>	5.0	・パラメータ引渡し	・Simulinkブロック線図 のCソース化		(2)
	MATLAB Compiler <MATLAB Option>	3.0	・パラメータ引渡し	・MATLABソース のCソース化		(3)
	Control System Toolbox <MATLAB Option>	5.2	(開発のみ)	・モデル構築		(3)
	Signal Processing Toolbox <MATLAB Option>	6.0	(開発のみ)	・モデル構築		(3)
	Visual Studio .NET(1) (Visual C++ .NET)	2002 (7.0)	(開発のみ)	・Cソースのコンパイル ・実行形式の作成		

《補 足》上記ソフトウェアの各バージョンとも2003年5月現在すべて購入可能
 1:統合パッケージ名は「Visual Studio .NET 2002 Professional」(単体製品のVisual Basic.NET、Visual C++.NETが含まれる)
 2:ユーザー運用時は起動しないがライセンスは必要(メーカー指示)
 3:ユーザー運用時には使用しないがシステム改造時に使用する

表 4 バージョンアップが見込まれている製品と本システムでの対応

更新が予定されている製品	現行バージョン	バージョン更新	販売予定	適用の可能性	本システムでの対応
MS-Office 2000/XP	-	2003へ統合	2003年9月頃	(見込み)	×
Visual Studio .NET	2002	2003	2003年6月末頃	(見込み)	×
MATLAB	6.5	6.5.1	2003年10月頃	×(不明)	×

) 適用ツールの動作検証

最終選定にて選出したツール(前述の表 3 を参照)を実導入(市販製品であり試用版ではない)し、これを用いて実験用の震動台模擬モデル(試験体等を除く)を構築した。さらに、選定した「Real-Time Workshop5.0」および「MATLAB Compiler3.0」の両オプションツールならびにコンパイラ「Visual C++.NET」を用いてコンパイルを実施した。

シミュレーション条件は、目標波は神戸海洋気象台における兵庫県南部地震波(無補償加振)20.48秒間を用い、シミュレーション計算の刻み時間間隔は 5×10^{-5} 秒とした。これはランダム波加振など幅広い帯域を持つ加振波を想定したときの安全な刻み時間であり、ランダム波加振以外では 1×10^{-4} 秒間隔程度でも発散しない計算が可能であると推測される。ちなみに、計算ステップ数と計算時間はほぼ比例しており、刻み時間 1×10^{-4} 秒だと、今回の刻み時間 5×10^{-5} 秒間隔の半分程度の計算時間で済むと予想される。この実験における評価項目について表 5 に示した。

表5 適用ツールの動作実験における評価項目

Simulink ブロックからの一般的なCソースの生成
コンパイラ(Visual C++ .NET)による実行モジュールの作成
実行モジュール(MS-DOS形式)による計算

実験の結果、いずれの評価項目についても問題無く実行でき、計算結果も妥当なものになった。

計算時間は、ソフトウェアの性能向上(MATLAB 旧バージョンとの比較)ならびにパソコンの性能向上(開発機の最新CPU投入)などの相乗効果もあり当初予想に比べて大幅に短縮された。

今回の実施例として、CPU:インテル社製 Pentium4 クロック数 2.8GHz、メモリ 1GB 搭載の Microsoft Windows 用 PC において、約 1 時間で計算終了した。試験体および C 言語化の手法や加振条件によっても異なるが、高速なハードウェアを用いることで、当初の目標であった「1 地震波 10 時間以内」よりも高速な計算が達成可能であった。

今回の検証結果をまとめたものを図 3 に示す。

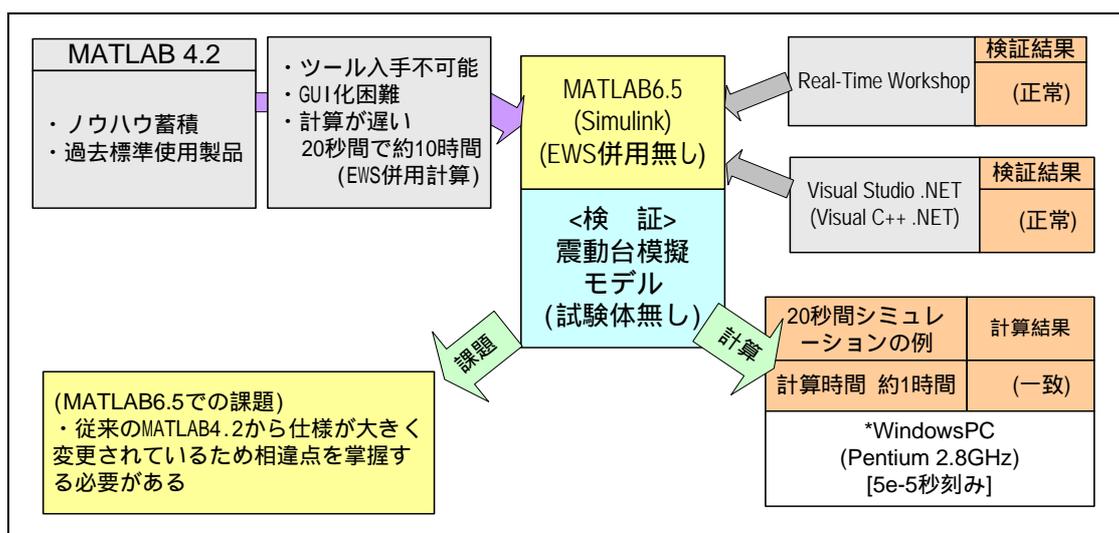


図3 選定ツールの動作実験検証内容とその結果

2) 計算システム本体の詳細機能設計およびシステム構築

a) 計算システム本体の詳細機能設計

本設計では、システムフロー(全体画面階層等)、GUI機能、グラフ等印刷フォームの項目について詳細仕様書を作成し、これをもとに計算システム本体の構築を実施した。詳細機能設計では、ユーザーの操作フローに沿って各項目ごとに必要となる機能について検討を実施し、システムフローとしてまとめた。

各項目に必要な機能構成について検討した結果を表 6 に示す。

また、これらの構成サブシステムから、メニューおよび各サブメニューでの操作フローを決定した。この結果を図 4 に示す。

表 6 各項目において必要となる機能構成について

項目	機能構成
メインメニュー	起動画面。すべてのサブメニューを統括する。
ユーザー管理 (管理者のみ)	ユーザーおよびその計算データ格納用ディレクトリの作成と抹消を実施する。
加振データ作成	特性把握加振あるいは加振シミュレーション用の波形データの生成ツールであり、ランダム波または正弦波を作成する。
パラメータ設定	計算システム本体から震動台モデルに引き渡すパラメータの入力または設定、および表示を実施する。
シミュレーション	震動台モデルの計算条件(目標波, 計算刻み, 計算時間等)を指定し、シミュレーションの計算をバッチ的に実行処理する。計算完了後は自動的に結果表示に移行する。
結果表示	シミュレーション終了時あるいは既存の計算結果ファイルを使って計算結果を表示または印刷する。
終了	すべてのシステムを終了する。

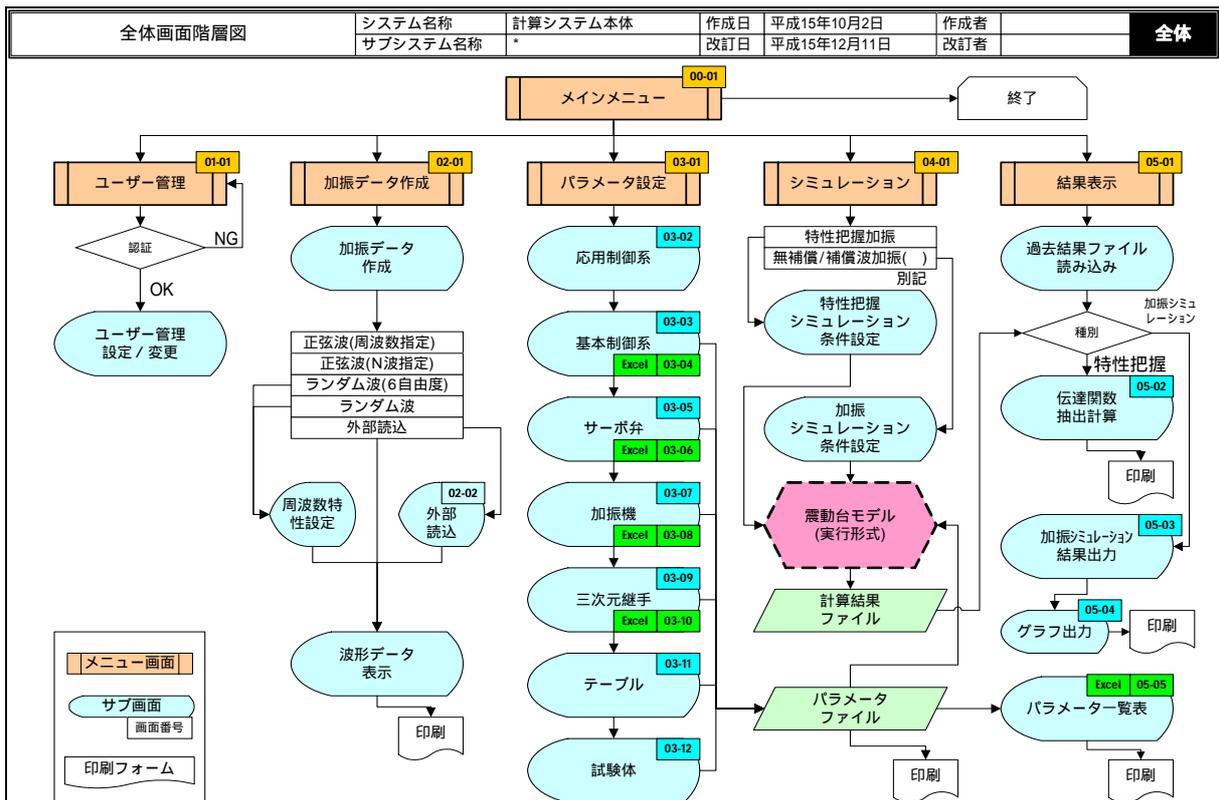


図 4 作成した操作フロー設計書の一例(全体構成階層図)

b) 計算システム本体の GUI 設計

GUI 機能仕様の作成にあたり、機能について設計した。ユーザーの操作画面は操作しやすいように図 5 のように統一することとした。設計した機能については表 7 に、GUI

設計において作成した機能仕様書の内容は図 8 にそれぞれ示す。画面設計にあたっては、一部の画面で MATLAB の「Guide (Graphical User Interface Development Environment)」という GUI 構築ツールを使用することにより設計画面をそのままコード化可能にする、いわゆる「プロトタイプ手法」を用いることで効率的な設計作業を実現した。

領域	項目	用途
	基本操作部(メニュー・設定項目)	メニューボタンや必要な設定項目の入力画面など基本操作画面を配置する。
	タイトル表示部	表示しているグラフの内容を示すタイトルを表示する。
	設定切替部	表示しているグラフの表示方法を切替操作を実施する部分。例えば加速度、速度、変位と切り替えるボタンを配置する。
	グラフ表示部	グラフを表示する。
	補助情報表示部、ボタン配置部	補助情報や印刷ボタンなどを配置する部分。補助情報の例としては、最大値やピーク到達時間など。
	ユーザー名表示部	ログイン中のユーザー名を常に表示する。
	履歴番号表示部	シミュレーションの履歴番号(既存データをロードして使用している場合)を表示する。
	操作案内情報表示部	エラーなどが発生した場合に情報を表示する部分。計算中の表記などもここで行う。
	日付表示部	常に日付を表示する。

図 5 計算システム本体操作画面の基本設計

表 7 計算システム本体の GUI 設計内容

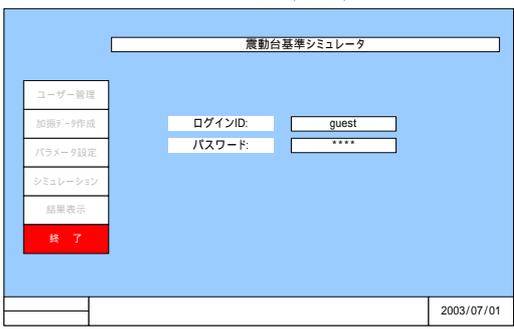
必要な GUI 画面	機能設計の内容
メインメニュー	MATLAB の起動コマンドを含む実行形式として作成する。このため本サブシステムのみ MATLAB ではなく、Visual BASIC で構築する。
ユーザー管理	ユーザーの登録・抹消については、登録ボタンを押したあと表示される画面において、管理用パスワードを入力することで許可する。
加振データ作成 (起動画面)	正弦波生成、特性把握用ランダム波の生成、外部データ取り込みを実施する。 プルダウンメニューにより、生成する波形を選択する。
加振データ作成 (正弦波波数指定) (正弦波周波数指定)	正弦波については、波数(N波)指定および周波数指定を設定できるようにする。
加振データ作成 (ランダム波) (ランダム波 6 自由度) (周波数特性表示)	ランダム波については、「ランダム波(6自由度)」を選択することにより相関性の無い6自由度を一度に生成可能とし、周波数特性は、低い順から最大10個まで指定できるようにする。周波数の設定を完了後、特性グラフを表示する。 先頭および終端データのウィンドウ処理については、Sin2 乗で実現し、処理区間の長さは全長に対し、「無し」「1/8 区間」「1/4 区間」「1/2 区間」から選択する。自由度毎に加振レベル(%)を入力し、波形生成ボタンを押すとデータを生成し、画面に波形グラフを表示する。生成された波形データは、保存ボタンで一旦 MAT 形式のファイルとして保管する。
加振データ作成 (外部データ)	外部データは MAT 形式として取り込む。 詳細については、取扱説明書等で通知する。
パラメータ設定 (初期画面)	制御系ならびに機構系パラメータを設定する。初期画面では、標準構成のパラメータ、あるいは過去にユーザーが定義したパラメータのファイルを選択する。ファイル読み込み確認画面を出した後、設定画面に移動する。 構成のパラメータでは、応用制御系ならびに試験体を除き標準値データが既に確定している場合には、「設定済」と赤く表示する。 各パラメータのボタンを押すことで、パラメータの設定内容を表示する。
パラメータ設定 (応用制御系)	応用制御系の補償方法を選択する。 外部補償モジュールについては、ファイル選択画面を表示する。補償方法の選択が終わると前の画面に戻り、赤文字で選択した補償方法を表示する。

パラメータ設定 (基本制御系)	基本制御系パラメータは Excel ファイルに保管される。 このうち、「線形補償スイッチ」については、MATLAB 側のボタンで EXCEL データを切替する。
パラメータ設定 (加振機) (サーボ弁) (三次元継手) (テーブル部)	設定中のパラメータの表示または変更については、ボタンを押して起動する EXCEL の画面で表示または編集する。ただしテーブルに関しては、EXCEL データは存在しない。
パラメータ設定 (試験体)	質点の数(階層数)、取り付け位置、回転慣性モーメント、非線形特性を設定し、それに応じた各質点の質量、階層間の距離・剛性・減衰を設定する。試験体パラメータについては、Excel データは存在しない。 非線形特性については、「無し」、「バイリニア型特性」、「トリリニア型特性(計画中)」、「スリップ型トリリニア特性(計画中)」を切り替える。設定後、パラメータ画面上に試験体系で設定した非線形特性および質点数の情報を表示する。
シミュレーション (初期画面)	シミュレーションの種別と、計算条件を設定する。 特性把握シミュレーションと加振シミュレーションどちらかを選択するかで、表示する内容が異なる。 加振シミュレーションを選択した場合、パラメータ設定の応用制御系で指定した補償形式を自動的に反映するため、ここでは制御方式の切り替えは実施しない。
結果表示 (初期画面)	シミュレーション終了後は、自動的にこの初期画面に移動する。また、過去の計算結果ファイルを使用しても結果を表示できる。計算結果ファイルには内部情報として「特性把握シミュレーション」あるいは「加振シミュレーション」どちらの結果ファイルか判断するパラメータを持たせている。これによって、結果ファイルを読み込むと、自動的に処理フローが切り替わる。
結果表示 (特性把握シミュレーション)	特性把握シミュレーションの場合は、伝達関数抽出計算の処理を実施できるよう画面を表示する。画面の出力形式としては、ゲイン、位相、コヒーレンスの3種類を各々選択することができる。周波数軸については、必要に応じて log と linear の切り替えを可能とする。
結果表示 (加振シミュレーション)	グラフを出力したい部位のボタンを選択すると、その部位に応じた出力物が表示される。たとえば部位として「テーブル」を選択。テーブル台上の中央点と端点の表示が可能であることを示すボタンを表示する。 出力については、6 自由度出力が可能ないように、画面上部に

	<p>各軸方向を示す補助メニューを出す。</p> <p>画面には計算結果ファイル名と使用したパラメータファイル名をそれぞれ表示する。計算結果ファイルについては、「外部出力」ボタンを押すことで、テキスト形式(カンマ区切り)のデータとして出力が可能。また、パラメータファイル名については「一括表示」ボタンを押すことで、EXCEL形式で使用したパラメータの一覧表を表示または印刷が可能。なお、シミュレーション結果に関するグラフ表示フォームについては、G U I 機能仕様書にて別途まとめた。</p>
終了	<p>終了ボタンでは新たに表示されるサブメニューは存在しない。このため、ボタンを押すと直接すべての画面を閉じる。</p>

機能設計仕様書		00-01
ファイル名:	main.fig	作成日: 2003年10月17日 改訂日:
説明:	メインメニュー Position[X=0.55,Y=7.55,Widht=50.0,Height=54.55]	

設計中(VBで構築)



分類	名称	テキスト表示	デフォルト値	備考
ボタン	pushbutton1	ユーザー管理		mku.m
ボタン	pushbutton2	加振データ作成		mkwave2.m
ボタン	pushbutton3	パラメータ設定		mkU2.m
ボタン	pushbutton4	シミュレーション		m_simu.m
ボタン	pushbutton5	結果表示		m_kekka.m
ボタン	pushbutton6	終了		
ボタン	pushbutton7	説明		
入力	edit1	ログインID		
入力	edit2	パスワード		(暗号化)

グラフ表示定義書	
ファイル名:	m_kekka_s.m
説明:	シミュレーション計算結果(加振シミュレーション) 継手 - 加振力最大値
表示単位:	加振機番号(-) 継手最大加振力(kN)

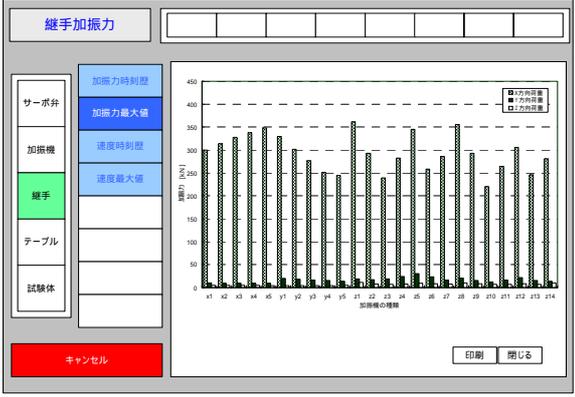


図 6 作成した機能設計仕様書とグラフ書式定義書の一例

c) 計算システム本体の G U I / システム構築

設計した仕様に準じて計算システム本体の GUI システムを構築したが、現在のところ大きな問題点は発生していない。しかし、主要なメニュー画面を試験的に構築し、一連の操作フローの動作確認を実施したところ、一部の機能については、全体設計検討で確定した動作フローを修正する必要が生じた。これをまとめたものを表 8 に示す。

「計算システム本体」の構築に用いるツールと作成するサブシステムについては、表 9 に示す。メインメニュー表示サブシステムについては、現在設計段階であり未構築である。それ以外については、メニューの表示部分については構築済みである。

図 7 に主要な構築画面を示す。

表 8 全体計画検討以降に設計変更が発生したもの(概要)

パラメータ設定において EXCEL から MATLAB にデータを引き渡す手順の変更	
設計変更前	EXCEL 側に「設定」ボタンを設置する
不都合の理由	EXCEL 側ボタンでは、MATLAB の画面更新ができない
設計変更後	EXCEL 側のボタンを廃止し、代わりに MATLAB 側に設けたボタンで EXCEL を操作する
設計変更に伴う対処点	<ul style="list-style-type: none"> • 新たなソフトウェアの投入を避けるため、すべて内部プログラムで実現させる • 新たに MATLAB 側に EXCEL を操作する GUI 機能を設置する必要があり、作業量は当初設計に比べて増加する見込み • ただし、EXCEL 側はデータのみを扱う簡素な形となる • ユーザーの操作方法については、ボタンが EXCEL 側から、MATLAB 側に移動するだけで、大きな変更は生じないように配慮

表 9 計算システム本体の構築サブシステムと使用ツール一覧

名 称	使用ツール
メインメニュー表示サブシステム	Visual BASIC
ユーザー管理サブシステム	MATLAB
加振データ作成サブシステム	MATLAB
パラメータ設定サブシステム	MATLAB
シミュレーション計算指令サブシステム	MATLAB
シミュレーション結果表示サブシステム	MATLAB

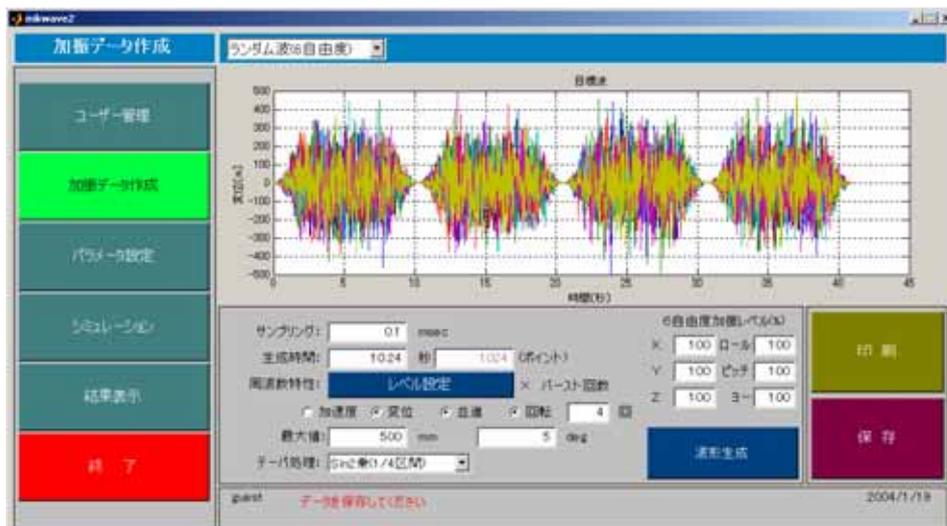


図 7(a) 加振データ作成 - (ランダム波 6 自由度) 波形生成完了画面



図 7(b) パラメータ設定 - ファイル読み込み完了画面

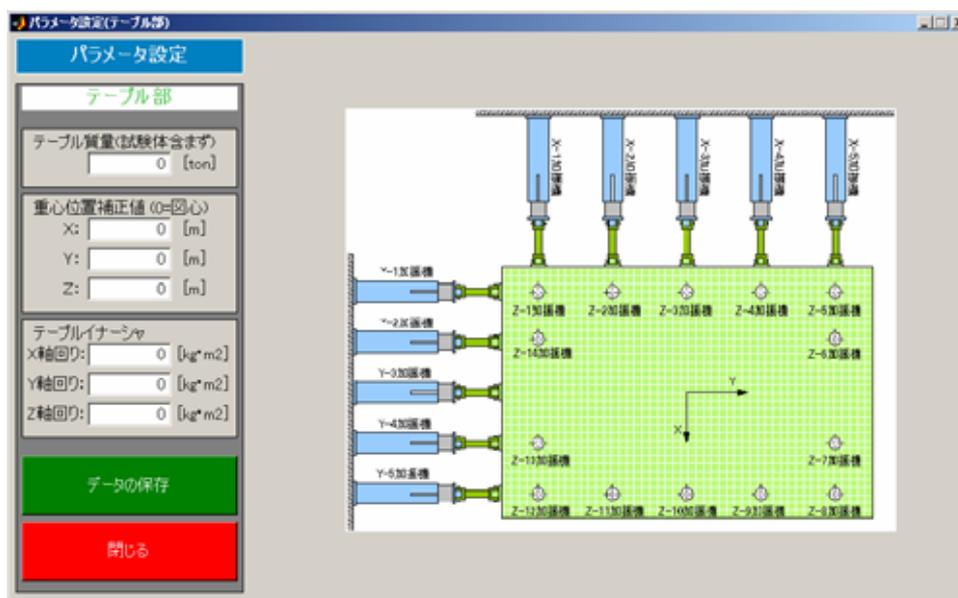


図 7(c) パラメータ設定画面 - テーブル部

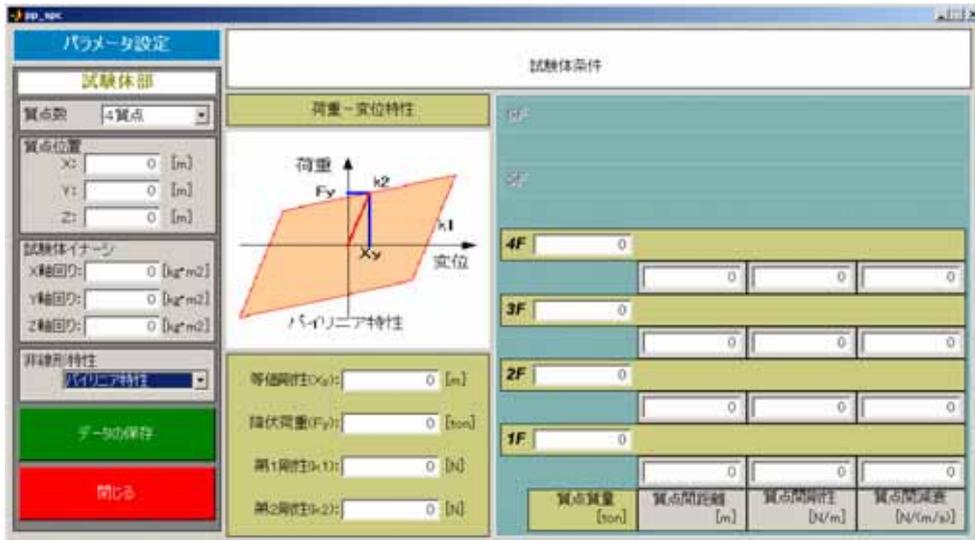


図 7(d) パラメータ設定 - 試験体設定画面



図 7(e) シミュレーション - 初期画面(加振シミュレーション)

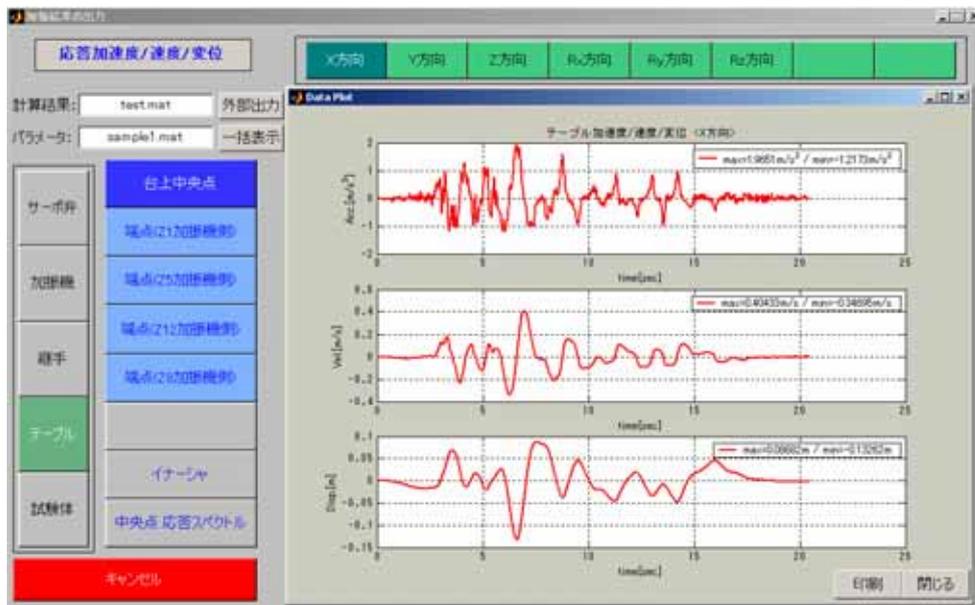


図 7(f) 結果表示 - 結果表示グラフの例(テーブル台上中心応答)

3) 震動台モデルの詳細設計および構築

a) 震動台モデルの詳細設計

一連の操作フローを考慮したうえで、震動台モデルの設計を実施した。震動台基準シミュレーションにおける「震動台モデル」モジュールのうち、基本制御系ならびに機構系の2つのモジュールについては Simulink モデルで構成し、実際には Real-Time Workshop を用いて C 言語化し、コンパイルを実行したのち、独立した単体プログラムとして作成する。また、応用制御系については、FORTRAN や C 言語で直接記述するサブルーチン、および MATLAB で直接ソースを記述したうえで MATLAB Compiler を用いて C 言語化するなど、一般的なソース記述によるプログラム構築を実施する。これにより、「震動台モデル」には、入出力インターフェイスを設けデータのやり取りを実施する。

「震動台モデル」へのデータ入力については、「計算システム本体」のパラメータ設定サブシステムで実施し、データ出力に関しては「計算システム本体」の結果出力サブシステムにおいて実施する。同様に結果の印刷についても設計した。なお、MATLAB の GUI 画面に表示されたグラフは直接印刷することができないため、印刷プログラムは別途作成する必要がある。作成した印刷書式定義書については図 8 に示す。

入力・設定パラメータの内容、単位について検討した。この結果を表 10 に示す。また、結果の出力に関する、出力内容、変数名、単位等については、表 11 に示す。出力に関しては、MATLAB 形式のファイルおよび一括してテキスト形式に出力可能とする。単位などについては、正規の震動台コントローラに準じる。

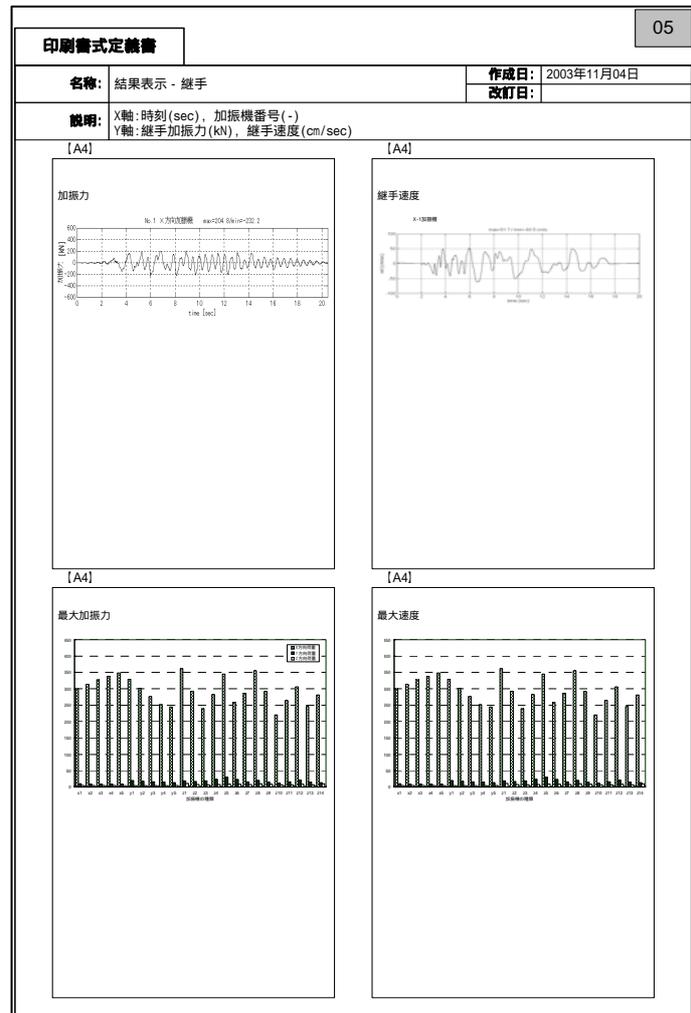


図 8 印刷書式定義書の一例(印刷プログラム構築用)

表 10 入力・設定パラメータの名称と単位

応用制御系パラメータ		(補償方法)	サーボ弁部パラメータ		単位
試験体パラメータ		単位	サーボ弁部パラメータ		単位
試験体据付位置		m	サーボ弁流量係数		cm ³ /s
試験体イナーシャ		kg・m ²	サーボ弁無負荷流量係数		cm ³ /s
非線形特性		-	サーボ弁供給圧力		MPa
降伏の条件			サーボ弁戻り圧力		MPa
剛性		N	サーボ弁スレッシュホールド		-
等価剛性		m	サーボ弁オーバーラップ		-
降伏荷重		ton	サーボ弁スプール特性[num]		-
階層の条件			サーボ弁スプール特性[den]		-
質点質量		ton	オーバーラップ切替スイッチ		ON=1 / OFF=0
層間の条件			加振機部パラメータ		単位
質点間距離		m	シリンダ受圧面積		cm ²
質点間剛性		N/m	シリンダ片側容積		cm ³
質点間減衰		N/(m/s)	ケーシング質量		kg
基本制御系パラメータ		単位	ケーシングばね定数		N/cm
加速度フィードバックゲイン		-	ケーシング減衰定数		Ns/cm
速度フィードバックゲイン		-	シリンダ洩れの圧力流量係数		cm ⁵ /Ns
変位フィードバックゲイン		-	ピストリング洩れ特性		cm ⁵ /Ns
加速度フィードフォワードゲイン		-	作動油の体積弾性係数		N/cm ²
速度フィードフォワードゲイン		-	洩れ特性		ON=1 / OFF=0
変位フィードフォワードゲイン		-	三次元継手パラメータ		単位
差圧フィードバックゲイン		-	継手質量		kg
差圧フィルタ[Aマトリクス]		-	継手長さ		m
差圧フィルタ[Bマトリクス]		-	ピストンロッド質量		kg
差圧フィルタ[Cマトリクス]		-	ハウジング質量		kg
差圧フィルタ[Dマトリクス]		-	軸に関する慣性モーメント		kg・m ²
線形補償リミット値		-	軸に関する慣性モーメント		kg・m ²
線形補償スイッチ		ON=1 / OFF=0	軸に関する慣性モーメント		kg・m ²
			テーブルパラメータ		単位
			重心位置補正值		m
			テーブルイナーシャ		kg・m ²
			テーブル質量		ton

表 11 主なテキスト出力パラメータの名称と単位

位置	名称	単位
入力信号を同時格納	シミュレーション時間	sec
	加振入力指令値 - 加速度	cm/s ² , deg/s ²
	加振入力指令値 - 変位	mm , deg
サーボ弁部	作動油の流量 (#加振機)	cm ³ /s
加振機部	加振機加振力 (#加振機)	kN
	アクチュエータ差圧 (#加振機)	MPa
継手部	継手加振力 (#加振機)	kN
	ピストン速度 (X#加振機)	cm/s
テーブル部	テーブル加速度 / 回転角加速度	[並進] cm/s ² [回転] deg/s ²
	テーブル速度 / 回転角速度	[並進] cm/s [回転] deg/s
	テーブル変位 / 回転角度	[並進] cm [回転] deg
試験体部	試験体加速度 (#階部分)	[並進] cm/s ² [回転] deg/s ²
	試験体速度 (#階部分)	[並進] cm/s [回転] deg/s
	試験体変位 (#階部分)	[並進] cm [回転] deg

b) 震動台モデルのGUI構築

震動台モデルは表 12 に示したサブシステムモジュールで構成し構築した。

本年度は加振機構系のみ構築を実施した。詳細な試験体は来年度に構築を実施する。また入力補償の各サブシステムについては、単体検証のみ実施したため、来年度に入力項目のユーザーインターフェイスを構築したのち、計算システム本体への組み込みを実施する。

表 12 震動台モデルの構築サブシステムとその使用ツール一覧(ファイル名は仮称)

サブシステム一覧			
分類	ファイル名	名 称	使用ツール
震動台 モデル	(非公開)	反復型入力補償波生成サブシステム	(非公開)
		逐次適応型入力補償波生成サブシステム	
		高速適応型入力補償波生成サブシステム	
		外部接続補償波生成サブシステム	
	Simmdl0.mdl	試験体非搭載モデル	Simulink
	Simmdl1.mdl	試験体バイリニア特性モデル	Simulink
	Simmdl2.mdl	試験体トリリニア特性モデル(計画中)	Simulink
	Simmdl3.mdl	試験体スリップ型トリリニア特性モデル(＃)	Simulink

(試験体トリリニア特性モデルに関しては、現時点で仕様が未確定)

(d) 結論ならびに今後の課題

- 1) 計算システム本体および震動台モデルに関わり開発したソフトウェアの動作確認を行い、各サブシステムの構築ソフトウェアを確定した。
- 2) 震動台基準シミュレータの全体設計ならびに各サブシステムの詳細機能設計を行い、以下の設計仕様書を作成した。
 - ・ システムフロー(操作方法)に関する仕様書
 - ・ 結果グラフの書式设计を含むGUI(操作画面)に関する仕様書
 - ・ 印刷フォーム仕様書
 - ・ 入出力パラメータ仕様書
- 3) 作成した設計仕様書に基づいて、主要サブシステム、震動台構成モデルの構築を実施した。今後の課題として、非線形試験体の搭載が可能なテーブル+試験体のモデル化とインターフェイスの構築を行う必要がある。また、サブシステムと震動台モデルの結合作業ならびに動作検証を行う必要がある。

(e) 引用文献

- 1) 梶井伸一郎、安田千秋、前川明寛、奥田幸人、原田孝幸、小川信行、柴田碧：超大型三次元地震震動台の動的シミュレータの開発、第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集、pp.47-50、2000
- 2) 前川明寛、安田千秋、広江隆治、作野誠：三次元地震振動台の高機能制御、第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集、pp.51-55、2000

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

発表者	題名	発表先	発表年月日
梶原 浩一 佐藤 栄児 田川 泰敬 光田 真旅	振動台・試験体連成系を考慮した多変数制御と性能について	日本機械学会関東支部第10期総会講演会、日本機会学会、工学院大学 新宿キャンパス	平成16年3月5日

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
震動台基準シミュレータ(本研究テーマにて開発中)	震動台の応答挙動を事前に精度良く把握するための三次元震動台シミュレーションシステム。システムは、震動台モデル、加振系、応用制御系、基本制御系、試験体モデルにより構成されるものとし、試験体による震動台応答の影響を推定できる。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成16年度業務計画案

15年度に着手した、震動台、加振機構系と油圧送流系等のプログラム化と、振動台シミュレータ上に積載する簡易化した試験体数学モデルのプログラム開発を進める。また、実験者が多様な条件下でシミュレーションが容易に行えるように、マン・マシンインターフェースの整備と一連の解析、作図プログラムの製作を行う。また、シミュレータを用いた事前解析により、加振実験手法の将来的な応用展開についても検討を加える。具体的な項目、実施内容、予定期間については表13に示す。

なお、本シミュレーションシステムの検証は、平成16年度中旬から16年度末に行うE-ディフェンス確認試験の実験データを用いて平成17年度に行う予定である。

表13 平成16年度業務実施計画(案)

項目	平成16年度 実施計画(案)		予定期間
	実施項目	実施内容	
1.GUIの作成	(1) 計算システム本体	画面・印刷用出力グラフ作成	16年4月 ～ 16年10月
		データ出力プログラム	
	(2) 震動台モデル	試験体履歴モデルの組込み	
		応用制御系の組込み	
		計算システムとの統合作業	
2.動作確認・調整	(1) 準備作業	テスト用データ作成	16年9月 ～ 16年12月
	(2) 単体・結合テスト及び調整	サブプログラム単位での動作確認	
		プログラム結合動作確認及び調整	
	(3) 評価	表記単位・データチェック	
3.インストール作業	(1) 導入計画・作業	定式化の検討	17年2月 基本システム 完成
		GUI設計(震動台モデル)	
	(2) 動作確認	GUI構築(震動台モデル)	

