

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 14 年度業務目的

(2) 平成 14 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 全体構成検討
 - 2) 計算システム本体の設計検討
 - 3) 震動台モデルの設計検討
- (c) 業務の成果
 - 1) 全体構成検討
 - 2) 計算システム本体の設計検討
 - 3) 震動台モデルの設計検討
- (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 15 年度業務計画案

- (a) 全体設計
- (b) 計算システム本体の詳細機能設計およびシステム構築
- (c) 震動台モデルの詳細設計および構築

(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
独立行政法人 防災科学技術研究所	主任研究員	梶原 浩一
	研究員	佐藤 栄児

(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 ヶ年の年次実施計画

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：

1年目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簡易化した試験体数学モデルのプログラム開発を行う。

3) 平成16年度：

試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：

実験結果に基づく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：

E - ディフェンスの実験データより試験体モデルを積載した震動台シミュレータの評価・改良を行う。

全体のまとめを行う。

なお、開発する震動台シミュレータは、先に行われた確証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14年度業務目的

シミュレーションシステムの全体構想を取り纏め、本システム設計の基本方針を明確にする。

震動台、加振機構系と油圧送流系、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14年度の成果

(a) 業務の要約

平成14年度は次の項目を実施した。

- 1) 全体構成検討として、全体概要、計算システム本体、震動台モデルについて検討し本システム設計の基本な構築の方針を定めた。
- 2) 計算システム本体の設計検討として、操作性の良いユーザーインターフェイスを考慮し、パラメータ設定フローの検討、シミュレーションフローの検討、システム管理フローの検討、データフローの検討を実施した。また、結果の出力内容と出力の実現方法について取り纏め、出力結果表示に用いるグラフ構築ツールを選定した。
- 3) 震動台モデルの設計検討として、加振制御系モデル、加振機構系モデル、試験体系モデルの構成内容を検討しダイナミクスを定式化した。

(b) 業務の実施方法

平成14年度業務を、「全体構成検討」、「計算システム本体の設計検討」、「震動台モデルの設計検討」の3つの項目に分け実施した。

1) 全体構成検討

- a) 計算システム本体について、メニュー、加振データ作成、結果表示、ユーザー管理の構成要素を検討した。
- b) 震動台モデルについて、加振制御系、加振機構系、試験体系の構成要素を検討した。

2) 計算システム本体の設計検討

- a) パラメータ設定フローの検討を行い、パラメータは、加振波形データ、機構系パラメータ、制御パラメータ、試験体パラメータに分類し、各パラメータ設定に必要な機能等を検討した。
- b) シミュレーションフローの検討を行い、特性把握シミュレーション、加振シミュレーションに区別し、GUI メニューによって操作することとした。また、各詳細内容について仕様を決めた。
- c) システム管理フローの検討を行い、複数のユーザーが使用できる環境としてシステム化することを決めた。このため、ログイン画面とユーザー登録画面を用意することとした。
- d) データフローの検討を行い、データファイルは、加振ファイル群、パラメータデータ群、シミュレーション結果ファイル群、ユーザー管理ファイル群に区別した。
- e) 結果の出力内容と出力の実現方法について、出力内容をとりまとめ、出力結果表示に用いるグラフ構築ツールを選定した。

3) 震動台モデルの設計検討

- a) 加振制御系モデルの構築内容を検討し、モデル構成を E-ディフェンスに実装を予定する、基本制御系、応用制御系とした。特に、応用制御系では、新規開発制御手法についても組み込める構成とした。
- b) 加振機構系モデルの構成内容の検討では、サーボ弁、加振機、三次元継手、震動台テーブルの構成内容を決めた。
- c) 試験体系モデルの構成内容を検討し、試験体モデルを 6 質点までの「ばね-質量系」モデルとし、ユーザーは質量情報、復元力特性等を入力することとした。

(c) 業務の成果

1) 全体構成検討

a) 全体概要

震動台基準シミュレータの仕様を表 1 に示す。本仕様をもとにシステムの全体概要を検討した。図 1 に震動台基準シミュレータの全体概要を示す。震動台基準シミュレータは、以下の 2 つの構成要素に区分する。

計算システム本体

震動台モデル

なお、ハードウェアはパソコン(OS:Windows)による運用とし、結果出力はカラープリンタを適用することを前提とする。

表 1 震動台基準シミュレータの仕様

震動台基準シミュレータの仕様(要約)					
《開発の目的》					
(1)震動台・試験体の応答の事前予測					
・震動台応答予測の実施					
・試験体応答予測の実施					
(2)応用制御性能の事前確認					
・制御パラメータの最適値確認の実施					
・新規開発した制御手法を組み込んだ確認の実施					
シミュレータの適用条件		適用		適用外	
加振制御系	基本制御系	TVC制御(1)			
	応用制御系	反復入力補償		AIC(1)	
		逐次入力補償		AHC(1)	
		高速適応型入力補償			
		新規手法(MATLAB)との結合		外部システムからの利用	
加振機構系	サーボ弁(油圧)	動特性モデル	圧力流量特性		
			油の圧縮性模擬		
			油圧力低下模擬		
	加振機	6自由度加振機		シール摩擦力模擬	
				静圧軸受	
	三次元継手	三次元継手(ピンジョイントモデル)		油膜特性	
	テーブル	剛体		弾性体	
油圧流送系			(油圧流送系は適用しない)		
試験体系	試験体	6自由度対応(最大6質点)	線形	直列マスバネ	非線形(その他)
			非線形	バイリニア(1ケース)	
				トリリニア(1ケース)	

1: 詳細については図 2 を参照

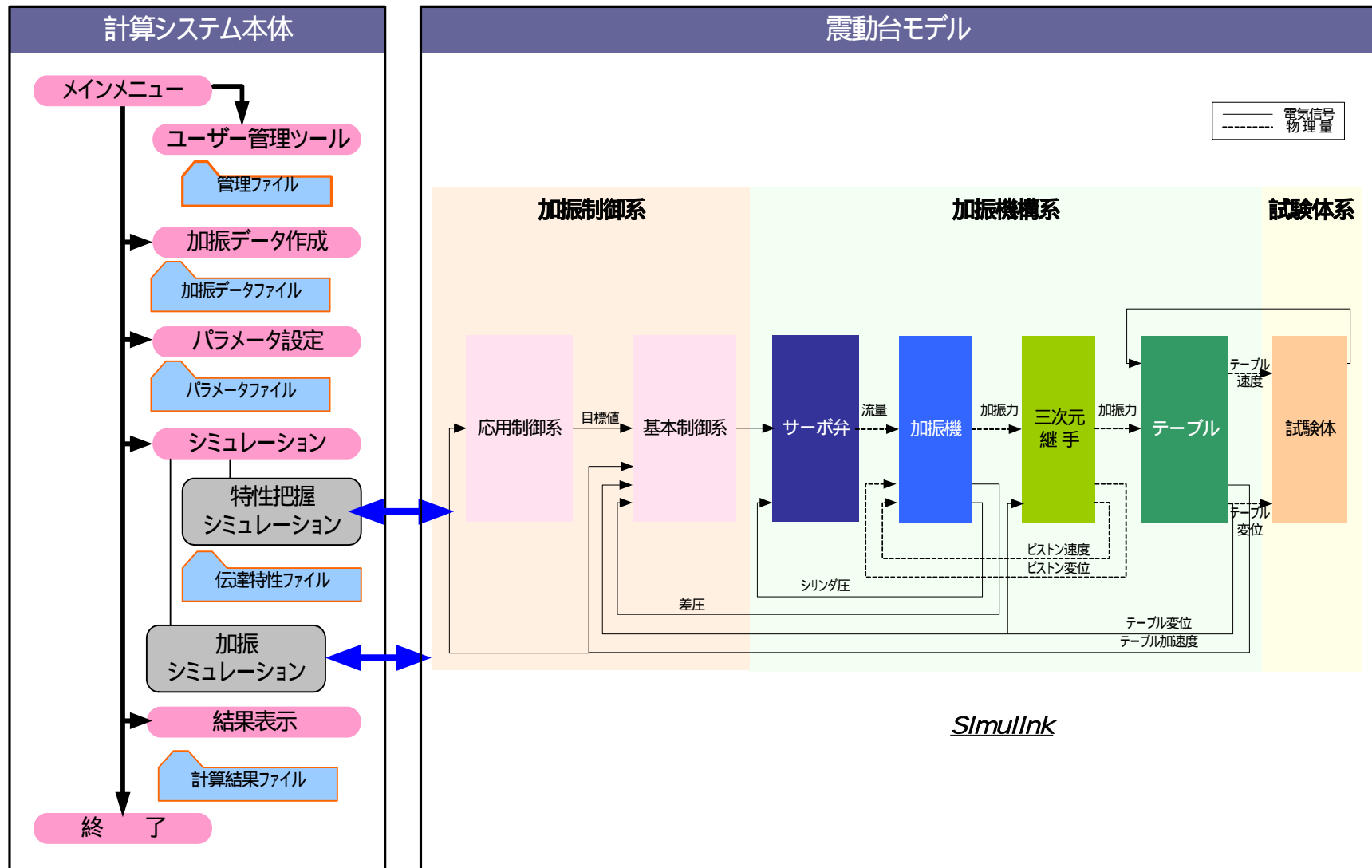
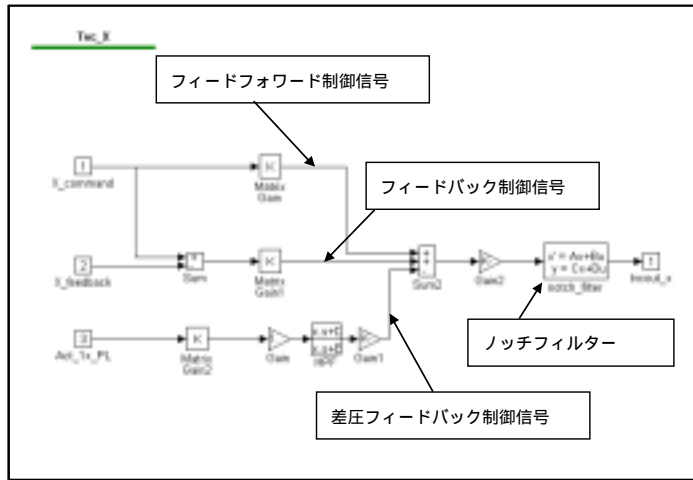


図1 震動台シミュレーションの全体構成

TVC Three Variable Control

加速度・速度・変位コマンドと各フィードバック信号との偏差にゲインを掛け加算したフィードバック制御信号と、各コマンド信号にゲインを掛けて加算したフィードフォワード制御信号を加算し、さらに自由度毎の差圧平均を計算しゲインを掛けて加算する。

これらを合成された信号にマスタゲインを掛け、ノッチフィルターを通した信号がTVC制御信号となる。



6自由度制御モデル

- 6自由度制御部は、
- (1)目標波からテーブル姿勢信号を生成するジェネレータ
 - (2)TVC制御
 - (3)自由度制御信号からサーボ弁制御指令を出すDOF(Degree Of Freedom)信号変換

の3つの要素で構成する。

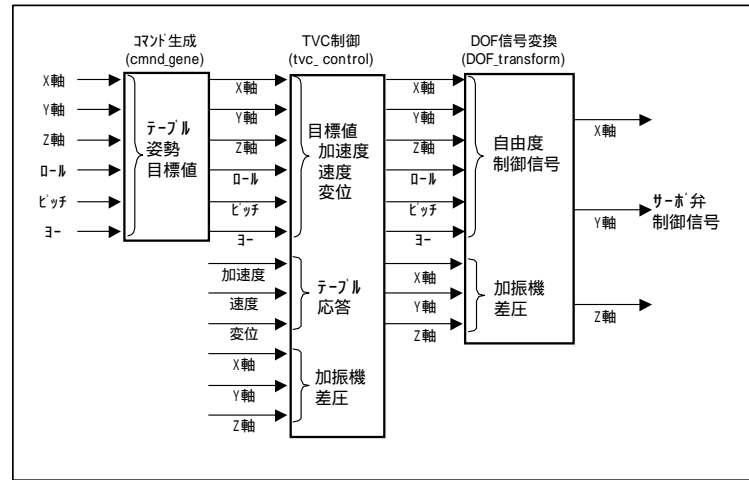


図2 制御モデルの説明

b) 計算システム本体

計算システム本体の概要

計算システム本体は、主にユーザーインターフェイス部分で形成したものであり、下記に示す機能にて構成する。

- i) メニュー画面およびパラメータ設定機能
- ii) 加振データ作成機能
- iii) シミュレーション結果表示
- iv) ユーザー管理機能

ユーザーインターフェイスの検討

最近のアプリケーションは、ボタンやメニューなどのグラフィックスの部品を使って設計・開発するのが主流となっており、この手法を適用したユーザーインターフェイスを GUI(Graphical User Interface)と呼ぶ。計算システム本体でも、ユーザー操作性の向上のため、ユーザーインターフェイスは GUI を用いて構築する。

GUI の構築方法としては、GUI 構築機能を持つアプリケーション開発ツールを用いて構築する「プロトタイプ手法」および、C 言語もしくは FORTRAN 言語ならびにコンパイラ等に付属するグラフィックライブラリ関数を用いて構築する「一般的なソース記述手法」の 2 種類に分類できる。「一般的なソース記述手法」のほうが、高性能かつ高機能なシステム開発が可能であるが、設計・開発期間が長くなる傾向があり、さらにすべてのプログラムが完成するまで、ユーザーは操作性を確認できないデメリットがある。このため、震動台基準シミュレーションでは、「プロトタイプ手法」を用いることとした。これによって構築するシステムは、ある程度構築した段階でユーザーがその操作性を確認可能なため、完成したあとの修正作業が少なくて済むなどのメリットが得られる。

GUI 構築ツールの検討

計算システム本体の構築に適用可能な GUI 構築ツール(アプリケーション開発ツール)を抽出し、以下の検討項目について、調査を実施した。

- i) 作成効率
- ii) ボタンおよびメニュー等の作成機能
- iii) ファイル選択画面(ユーザー操作性が顕著に確認できるため)
- iv) グラフ表示画面
- v) 仕様変更やカスタマイズにともなう画面の改造の容易性
- vi) ファイルの受け渡し(特に MATLAB との整合性)

検討した GUI 構築機能を持つアプリケーション開発ツール

- マイクロソフト社製「Visual BASIC」(Windows アプリケーション開発言語)
- Mathworks 社製「MATLAB(GUI-building Component)」(MATLAB 内の GUI 開発機能)
- マイクロソフト社製「Excel」(表計算・グラフ作成ツール)
- (ただし、Excel の場合は MATLAB のオプションツール「Excel-Link」を併用)

なお、現在の最新版である MATLAB R13(バージョン 6.5)では、最新版のマイクロソフト社の Windows アプリケーション開発ツール「Visual .NET(通称：ビジュアルドットネット)」について、現時点で MATLAB のサポート対象外となっているため、本製品の検討は除外した。

調査については、カタログベースだけではなく、実際にサンプル画面を作成した上で判断するため、メーカーより上記アプリケーション開発ツールの試用版を入手して検証した。本調査結果を表 2 に示す。

この結果、上記 3 つのアプリケーション開発ツールには、それぞれ得意・不得意な項目が存在することが明確になった。そこで、サブシステムごとに得意な開発ツールを選定し、割り当てた。(表 3) ただし、これらは現時点での選定であり、GUI の実構築時には都合にあわせて適用する開発ツールを見直すことが必要である。

c) 震動台モデル

震動台モデルの構成について

「震動台モデル」は、シミュレーション実行時に「計算システム本体」から呼び出し、実行するサブプログラムであり、下記に示す 3 つの機能で構成する。なお、震動台モデルの定式化については 3)項の「震動台モデルの設計検討」にて詳述する。

- i) 加振制御系
- ii) 加振機構系
- iii) 試験体系

C 言語化に必要な手法の検討

適用検討の経緯について以下に述べる。図 3 に示すように、「震動台モデル」として 1 つのサブルーチンプログラムとするためには、一旦 C 言語ソースに置き換える必要がある。このあと、C 言語コンパイラによって実行モジュールを作成し、計算システム本体側から呼び出して実行する。このため、震動台モデルでは、MATLAB 専用プログラムソースならびに Simulink ブロックをそれぞれ C 言語に変換する必要がある。この C 言語化に必要な機能およびコンパイラについて調査検討した。

i) C 言語化に必要なソフトウェアの検討

イ) MATLAB 専用ソースの場合

MATLAB 専用プログラムソースによってアルゴリズムを開発したサブルーチンの場合、「MATLAB Compiler」ならびに「C 言語ライブラリ」によって C 言語化できる。ただし、「MATLAB Compiler」では、MATLAB で記述されたソースの大部分を C 言語化するものの、下記ソースについては C 言語化できないことが判明した。

- ・ スクリプトを含む MATLAB ソース
- ・ オブジェクトを利用した MATLAB ソース
- ・ ワークスペース変数进行操作するために input や eval を利用した MATLAB ソース
(ただし、最新版の MATLAB バージョン 6.5 に付属する最新版の Compiler 2.1 からは、eval と input は、ワークスペース変数を含まない文字列に対してサポート対象)
- ・ Simlink シミュレーション実行コマンドを含んだモデル
- ・ Linmod 関数など表 4 に掲載された関数

これら C 言語化できない項目については、実構築時にこれらの制約事項を避けたうえでプログラミングすることにより、機能的に問題がないように実施する計画である。

なお、「MATLAB Compiler」によって作成された実行モジュールは、ライブラリ関数が導入されていないパソコンでは動作しない。このため、ユーザー環境には、実行モジュールのほかに、MATLAB の「数式ライブラリ」および「グラフィックスライブラリ」についても導入する必要がある。これらのライブラリについては、メーカーより無償配布が承諾されており、グラフ表示をする程度であれば、MATLAB をインストールしていない環境でも動作可能である。ただし、メーカーの指示により、ユーザー環境での MATLAB(厳密には、「MATLAB」、「Simulink」、「Real-Time Workshop」)のインストールは必須とする。

ユーザーのパソコンに導入が必要なファイル構成を図 4 に示す。

ロ) Simulink ブロック線図の場合

Simulink ブロック線図についても同様に、MATLAB の「Real-Time Workshop」を用いて、UNIX あるいは PC 用の C 言語化ができる。現時点では、震動台シミュレータの構築にあたり、特に制限される事項は存在しない。なお、今回開発する震動台モデルでは、シミュレーションの高速化機能を有する C 言語化ツール「Embedded C 組込みシステム」に関する適正モデル化は実施しない。

表 2 GUI 構築ツールの検討内容




ツール		画面サンプル	作成効率	ボタン類メニュー	ファイル選択画面	グラフ表示画面	画面改造	MATLAB 整合性
Visual Basic	特徴							
	Microsoft社が開発したプログラミング言語およびアプリケーション開発ツール。従来のBASICを拡張しWindows環境でWindowsアプリケーションが作成可能なようにしたものの。「フォーム」と呼ばれる、アプリケーションのベースとなるウィンドウにボタンなどさまざまなコントロールを貼り付けてアプリケーションを完成させる。		(汎用的)					×
MATLAB	特徴							
	米MathWorks社が開発した行列演算およびグラフィックスツール。GUIを構築する総合的ツール「GUIDE(GUI Design Environment)」を持ち、これらはC言語化にも対応するため、完成したアプリケーションは外部からの実行も可能。		(専門的)					
Excel	特徴							
	Microsoft社の表計算ツール。Visual Basicとの親和性が高いため、ボタンなどのコントロールも貼り付け可能。		(簡単)		×			×

表3 各サブシステムへ適用するツールの選出

計算システム本体で適用するツール

アプリケーション開発ツール		特 長	計算システム本体で 適用するサブシステム	用 途	開発時 必要性	利用時 必要性
メーカー	バージョン					
Visual Basic		汎用的で作業効率も良く、比較的短時間で構築可能。カスタマイズなど改造時にも対応しやすい。	<ul style="list-style-type: none"> ・メインメニュー ・ユーザー管理ツール 	<ul style="list-style-type: none"> ・操作メニュー 		(1)
マイクロソフト	5.0または6.0					
Excel		表計算ツールのため、内部で自動演算するような処理が得意。項目の変更や追加が簡単であり、拡張性に富む。	<ul style="list-style-type: none"> ・パラメータ設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・入力用画面 		
マイクロソフト	97以上					
MATLAB (2)		グラフの表示が特に優れており、グラフ画面の操作性に富む。	<ul style="list-style-type: none"> ・加振データ作成 ・シミュレーション結果表示 	<ul style="list-style-type: none"> ・操作画面 ・結果表示 		
サイバネットシステム	6.1以上					
MATLAB Excellink (MATLABオプションツール)		Excelとのデータ交換が効率的に実施できるツール	<ul style="list-style-type: none"> ・パラメータ設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・入力用画面 		
サイバネットシステム	1.1以上					

《補 足》

- 1:ライブラリのみ必要(ただし、ホームページなどから無償で入手可能)
 - 2:関連するオプションツールについては今後調査が必要
- Visual Basicを除き、パソコン1台につき1ライセンスの購入が必要

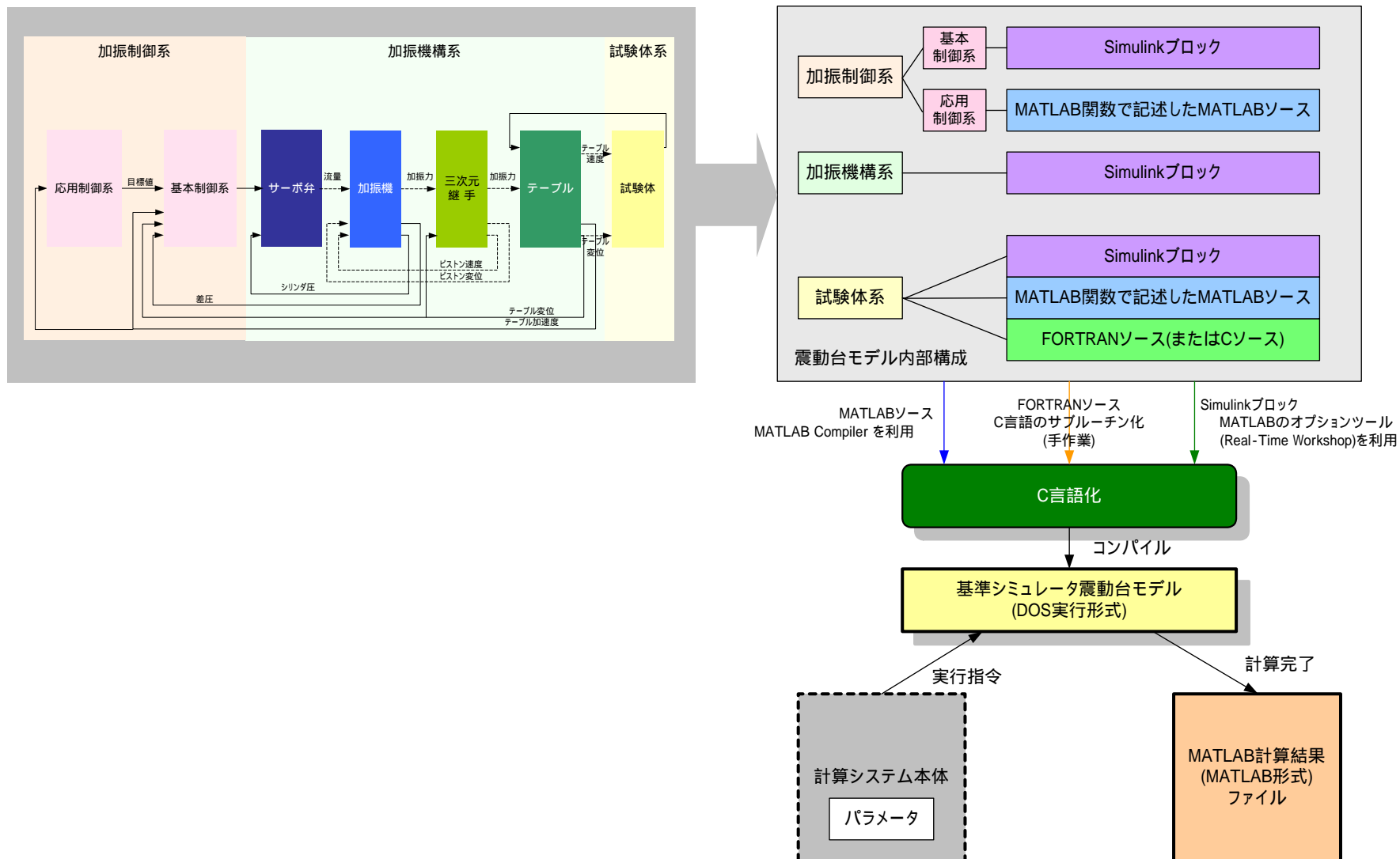


図3 震動台モデルの構成

MATLABソースのコンパイル完了後にユーザー環境に配布するファイル一覧

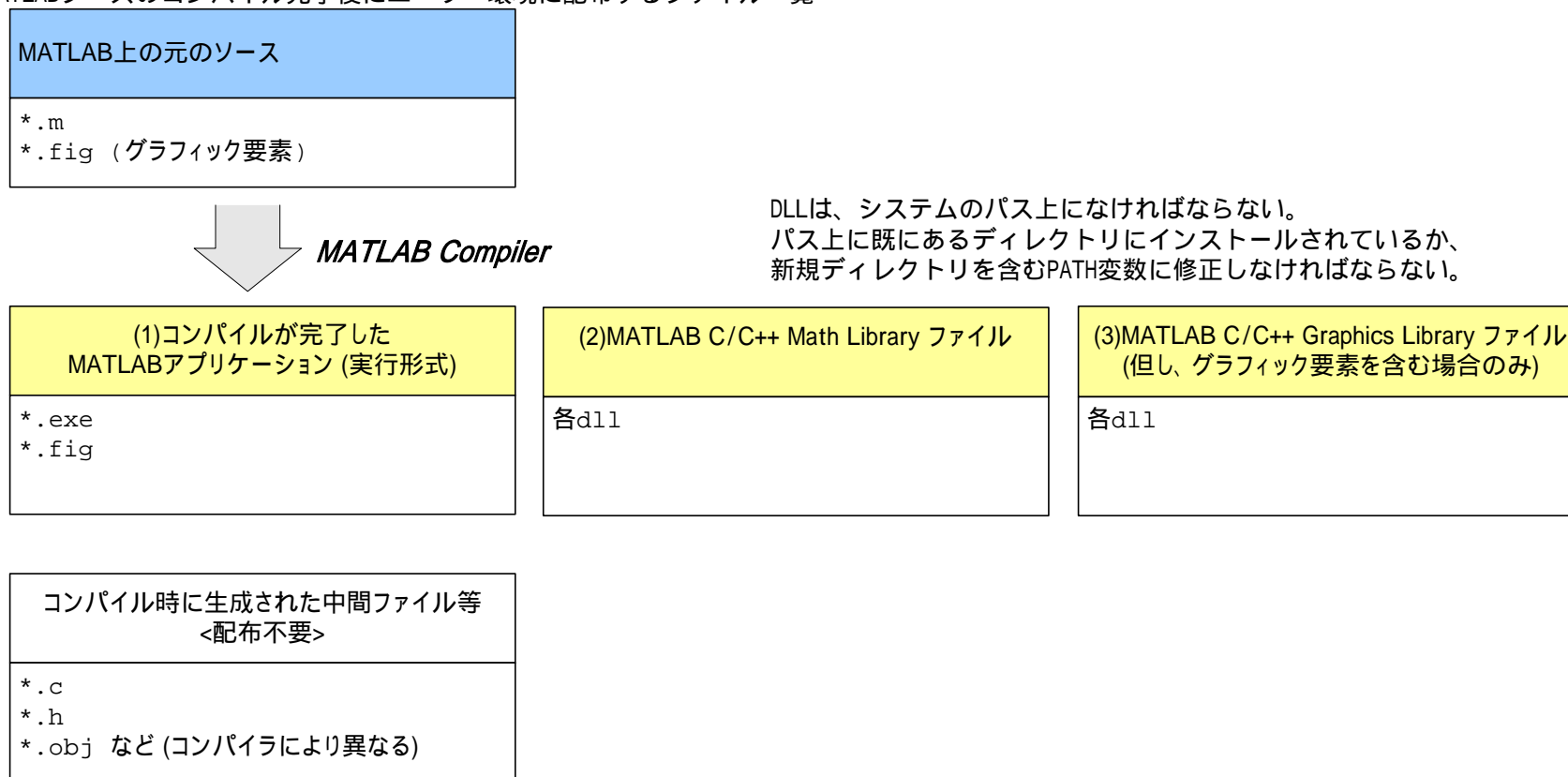


図 4 ユーザー環境で必要なファイルの一覧

表 4 C 言語化できない MATLAB 関数一覧

_colonobj	add_block	add_line	applescript
Assignin	Callstats	close_system	cputime
Dbclear	Dbcont	Dbdown	dbquit
Dbstack	Dbstatus	Dbstep	dbstop
Dbtype	Dbup	Delete_block	delete_line
Diary	Echo	Edt	errorstat
Errortrap	Evalin	Fields	fschange
Functionscalled	get_param	Hcreate	help
Home	Hregister	Inferiorto	inmem
Isglobal	Isjava	Isruntime	java
JavaArray	JavaMethod	javaObject	keyboard
Linmod	Lookfor	Macprint	mactools
Methods	Mislocked	mlock	more
Munlock	new_system	open_system	pack
Pfile	Rehash	runtime	set_param
Sim	Simget	simset	sldebug
str2func	Superiorto	system_dependent	trmginput
Type	u_new	u_set	u_get
U_find	u_copy	u_up	U_down
U_left	u_right	u_delete	u_isa
u_properties	u_subprop	u_findapp	u_findclass
U_findprop	u_findevent	u_findtype	u_findroot
U_convert_to_gobject	u_undo	u_redo	u_commit
Vms	Which	who	whos
What			

ii) コンパイラの適用検討

前述した「MATLAB Compiler」ならびに「Real-Time Workshop」の両者に対応する C 言語コンパイラを選定するため、動作検証を含んだ調査を実施し、C 言語コンパイラはマイクロソフトの「Visual C/C++」を選定した。なお、C 言語コンパイラによって作成する実行モジュールは、「MS-DOS 形式」とする。これは、MATLAB には「Windows 形式」で作成できる機能として「Real-Time Windows」と呼ばれる製品が存在する。しかし、本製品は高価であり、「Real-Time Workshop」を用いて作成した「MS-DOS 形式」の実行モジュールについても、「Visual BASIC」等のアプリケーション開発ツールを併用することで、代用できるためである。震動台モデルにおいて適用を計画しているツールの一覧を、表 5 に示す。

2) 計算システム本体の設計検討

計算システム本体の設計に必要な操作フロー、結果の出力内容とその実現方法の検討を実施する。図 5 に計算システム本体の概要を示す。

ここでは、下記の項目について検討する。

- a) パラメータ設定フロー
- b) シミュレーション計算フロー
- c) システム管理フロー
- d) データフロー
- e) 結果出力内容
- f) 結果出力方法

表 5 震動台モデルで適用するツール一覧

ソフトウェア名	バージョン	震動台モデルで適用するサブシステム	用途	開発時必要性	利用時必要性
MATLAB(1)	6.1以上	・シミュレーション結果の保存	・モデル構築		
Simulink	4.1以上	(開発のみ)	・モデル構築		(3)
Real-Time Workshop	4.1以上	・パラメータ引渡し	・SimulinkモデルのCソース化		(3)
MATLAB Compiler	2.3以上	・パラメータ引渡し	・MATLABソースのCソース化		× (4)
Control System Toolbox	5.1以上	(開発のみ)	・モデル構築		× (4)
Signal Processing Toolbox	5.1以上	(開発のみ)	・モデル構築		× (4)
Visual C/C++	5.0または6.0	(開発のみ)	・Cソースのコンパイル+リンク		
Fortranツール(2)	未定	(開発のみ)	・応用制御系のモデル構築		× (4)

《補 足》

- 1: 関連するオプションツールについては今後調査が必要
- 2: 実構築時まで判断できないためここでは仮定
- 3: 起動はしないがライセンスのみ必要(メーカー指示有)
- 4: 基本的には不要だが、改造が発生した場合に必要なため、開発時と同一バージョンの購入を推奨

震動台基準シミュレータ 計算システム本体の概要

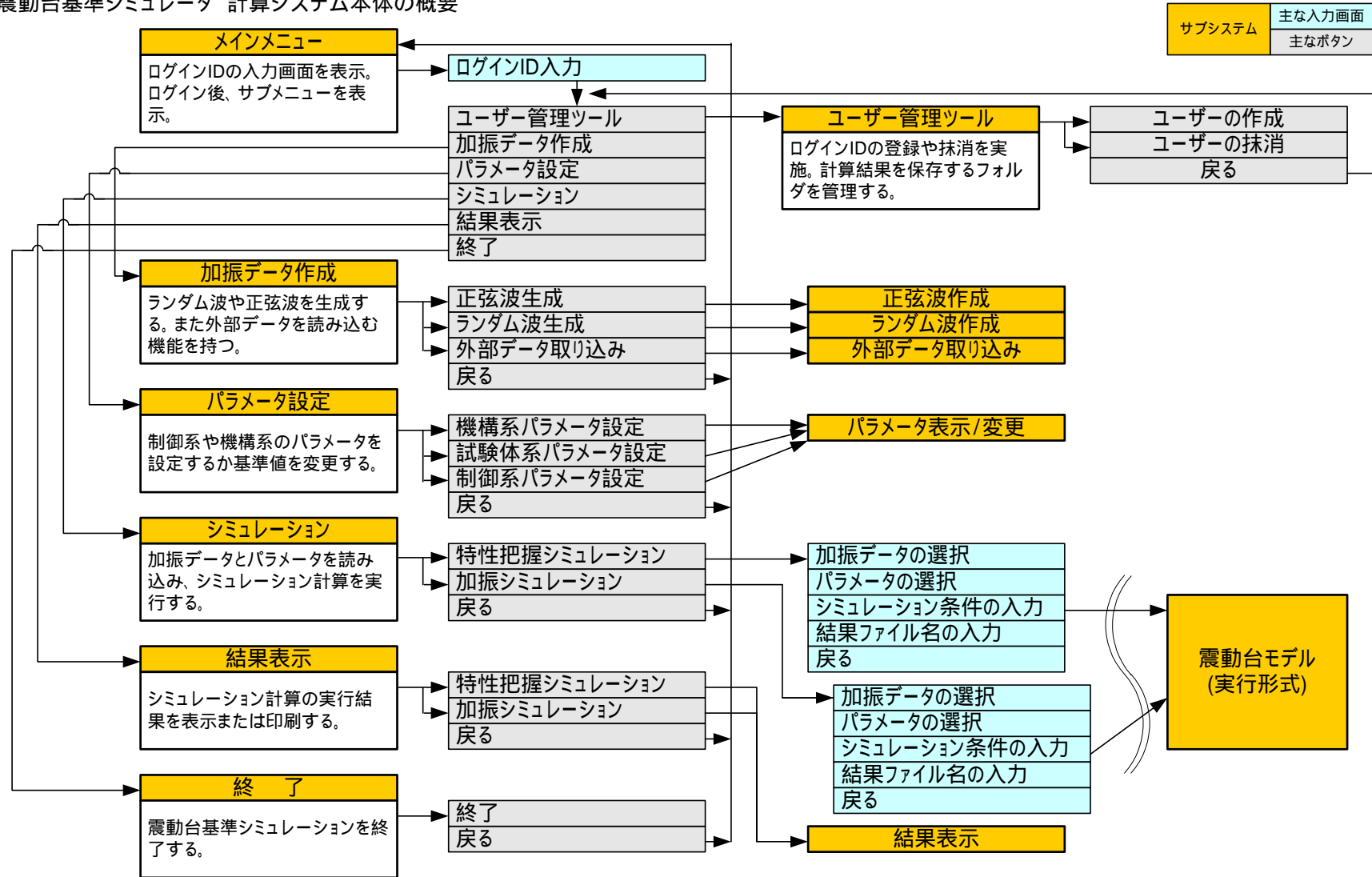


図5 計算システム本体の概要

a) パラメータ設定フロー

ここでは、パラメータとして定義しなければならない項目と、その内容について検討した。なお、パラメータは下記に示す4項目に分類する。

加振波形データ

機構系パラメータ

試験体パラメータ

制御系パラメータ

加振波形データ

加振波形データは、加振波形生成ツールにて作成する。生成ツールは以下に示す機能を有する。

i) 主として特性把握シミュレーションに使用するランダム波形生成機能

ii) 主として加振シミュレーションに使用する正弦波生成機能

iii) 外部で作成されたデータを取り込み本シミュレータ用に変換する機能

なお、外部で作成された加振波形データの変換機能は、MATLAB形式およびテキスト形式(CSV形式)のみとする。

機構系パラメータ

機構系パラメータは、物理設定値を実機相当とするため、ユーザーによる設定および変更はほとんどの場合実施しない。ただし、諸元値は表示できるようにし、一部のパラメータについては変更可能とする。

試験体パラメータ

試験体パラメータは、最大6質点(6点×6自由度=最大36自由度系)で構成されるモデルである。各質点の位置、質点質量、質点間の変位-荷重特性などを入力値とする。

制御パラメータ

制御パラメータは、基本制御系の設定値、反復入力補償などの応用制御シミュレーションに必要な設定値を格納する。計算システム本体で設定したパラメータは「震動台モデル」へ引き渡したのち、シミュレーション計算を実施する。

これらを踏まえて、パラメータの設定が必要な項目とその概要について表6のとおり検討した。

以上より、パラメータの設定フローは以下のように進め、Simulinkで構築した震動台モデルが利用可能な変数ファイルに保存してから、加振シミュレーション時にこのファイルを読み込み、実行させる手順で運用するものとした。

表 6 パラメータ設定フローに必要な項目と内容

パラメータ区分	項目	説明	単位	設定項目	表示項目	
加振波形データ	波形ファイル	波形ファイル名	-			
		入力変位	cm			
		入力加速度	cm/s ²			
		サンプリング	sec			
ゲイン情報	入力ゲイン	-				
機構系パラメータ	サーボ弁部	サーボゲイン	-			
		サーボ弁特性マトリクス	-			
		定格流量	(cm ³ /s)/(kgf/cm ²)			
		作動油の体積弾性係数	kgf/cm ²			
		中立時シリンダ片側容積	cm ³			
		ピストン受圧面積	cm ²			
		差圧ゲイン	-			
		サーボ弁供給圧力	kgf/cm ²			
		サーボ弁戻り圧力	kgf/cm ²			
		サーボ弁固有振動数	rad/sec			
		サーボ弁減衰比	-			
		サーボ弁スレッシュホールド	%			
		サーボ弁オーバーラップ	%			
		アキュムレータ圧力低下係数	-			
	加振機部	加振機質量	kgfs ² /cm			
		作動油の洩れ流量	(cm ³ /s)/(kgf/cm ²)			
		ピストンロッド質量	kgf·s ² /cm			
		ピストンロッドばね定数	kgf/cm			
		ピストンロッド減衰係数	kgf·s/cm			
		ケーシング質量	kgf·s ² /cm			
		ケーシングばね定数	kgf/cm			
		ケーシング減衰係数	kgf·s/cm			
		スプール定格変位	cm			
		加振機比例ゲイン	-			
		加振機差圧ゲイン	-			
		加振機変位フィードバックゲイン	-			
		ハウジング等価質量	kgf·s ² /cm			
		ハウジングばね定数	kgf/cm			
	ハウジング減衰係数	kgf·s/cm				
	継手部	継手長さ	cm			
		継手-テーブル結合ばね定数	kgf/cm			
		継手-テーブル結合減衰定数	kgfs ² /cm			
		継手質量	kgfs ² /cm			
		慣性モーメント	kgf·cm			
	テーブル部	テーブル質量	kgfs ² /cm			
		テーブル長	cm			
		テーブル高さ	cm			
		回転慣性モーメント	kgf·cm			
		加振機取付座標	cm			
	試験体パラメータ	質点情報	質点数	-		
			質点の位置情報	cm		
			質点の質量	kgf		
		位置情報	観測点の位置情報	cm		
	制御パラメータ	加振制御系	TVCフィードバックゲイン	-		
			TVCフィードフォワードゲイン	-		
			差圧FBゲイン	-		
			メインゲイン	-		
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			-			
Warp/Shear制御			-			
加振機取付位置			-			
座標変換式			-			
差圧計算用変換行列			-			
Shear制御用変換行列			-			
Warp制御用変換行列			-			
DOF変換行列			-			

補足: 本検討結果は、暫定版であり、今後協議の上決定する。

加振データ
(ファイルを選択)

機構系パラメータ設定
(サーボ弁、加振機、継手、テーブル)

試験体パラメータ設定
(質点情報、線形解析・非線形解析)

制御系パラメータ設定
(TVC 制御)

ファイル保存(震動台モデルへ反
映)

これら変数ファイルのデータフローについての検討は、d)項の「データフロー」にて記述する。

b) シミュレーションフロー

本シミュレータでは、計算システム本体から震動台モデルのプログラムを実行し、シミュレーションを行う。ここでは、そのシミュレーションフローについて検討した(表7)。シミュレーションフローの検討では、ユーザーがメニュー画面から一連のシミュレーション操作を実行できるように考慮し、用途に応じ以下2つに大別する。

- ・特性把握シミュレーション
- ・加振シミュレーション

さらに、特性把握シミュレーションを一度も実行していない場合には、加振シミュレーションで伝達関数を必要とする加振を選択できないような画面制御(例えば、エラーメッセージなどの警告表示等)を実施し、ユーザーの操作手順の誤りを補正するフローとする。また、加振シミュレーションについては、入力補償なしの加振、外部から入力した波形による加振を可能とする。

シミュレーションフローの構成とその詳細内容について、以下に記述する。

開始

ログイン画面およびメインメニューを表示する。

パラメータ設定

パラメータ設定は、1) a)項にて記述したように、加振波形データ、機構系パラメータ、試験体系パラメータ、制御系パラメータの4つから構成されるが、ここで、震動台モデルに必要なパラメータ変数の読み込みまたは設定を実施する。

加振データ作成については、特性把握シミュレーションで用いるランダム波や、加振シミュレーションで用いる正弦波、あるいは地震波など外部データから取り込む機能を持つ。

機構系パラメータについては、基本的には表示のみで、必要に応じて変更可能とする。ただし、寸法など物理的数値についての変更は不可とする。また、デフォルト設定値の一覧を表示させ、必要に応じて差圧フィードバックゲインや変位フィードバックゲインなどの変更を可能とする。

試験体系パラメータは、試験体の質点数、観測点の層間変位、試験体の質量、非線形特性などを入力する。

パラメータ保管

設定した複数のパラメータ変数を一つのファイルに保管する。

パラメータ呼出

パラメータ保管で保存しているファイルを選択する。

特性把握シミュレーション

特性把握とは、試験体を含んだ震動台の全体モデルの動特性を得るためのシミュレーションであり、加振データ作成機能で生成した通常4～8分割したランダム波形を使って加振シミュレーションを実施し、ここで得られたテーブル応答結果を用いて、FFTにより伝達関数を計算するなど、応用制御系のロジックで利用する。

加振シミュレーション

地震波や正弦波などの加振データを用いて、入力補償を実施する加振と、入力補償を実施しない加振を実施する。入力補償を実施する場合には、特性把握シミュレーションで得られた結果ならびにFFTで計算した伝達関数が必要となる。

シミュレーション計算条件設定

シミュレーション計算の実行条件を設定する。設定する条件は、加振データのファイル名、指令値の条件(加速度指令/変位指令)、試験体の条件、加振開始時間と加振終了時間、シミュレーション演算の刻み時間、格納する結果データの刻み時間、結果データの保存ファイル名などである。

震動台モデルへのパラメータの引渡し

シミュレーション計算条件で設定した加振ファイルと、パラメータ設定で保存したパラメータを震動台モデルの実行モジュールに引き渡す。引渡し作業については、プログラミングによって自動的に処理を実施する。

震動台モデルへの計算条件の引渡し

シミュレーション計算条件で設定した値を震動台モデルの実行モジュールに引き渡す。引渡し作業については、プログラミングによって自動的に処理を実施する。

震動台モデルの実行モジュールの起動

実際にはシミュレーション計算条件の設定画面に、シミュレーションの開始ボタンを設置し、自動的に震動台モデルの実行モジュールを起動する。

計算完了の確認

計算が完了した場合は、計算完了の表示を出し、処理を継続できるようにする。

結果データの保存

結果データは、MATLAB 専用のバイナリファイルとして格納し、利用する。これは、数多くの変数を 1 つのファイルとして扱えること、また通常のテキスト形式と違ってデータが自動的に圧縮されるので、ファイルのアクセスが速いというメリットがあるためである。ここでは、計算完了後に自動的に指定したフォルダに保存する。ただし、結果データの中身については、必要な変数を外部データとしてテキスト形式に出力することも可能とする。

評価条件の選択

評価条件を切り替えることによって、結果の表示に必要なメニューの内容を切り分ける。例えば特性把握シミュレーションの場合は、伝達関数の抽出計算処理のメニューを出し、加振シミュレーションの場合は、結果の出力メニューを出す。

グラフ出力

以下のグラフを表示する。表示した結果は印刷も可能とする。

- i) 時刻歴加速度(テーブル中央点・任意の観測点)
- ii) 時刻歴速度(テーブル中央点・ピストン・任意の観測点)
- iii) 時刻歴変位(テーブル中央点・試験体・任意の観測点)
- iv) 応答スペクトル(テーブル)
- v) 周波数応答<入力 6 自由度 × 出力 6 自由度> (テーブル)
- vi) コヒーレンス<入力 6 自由度 × 出力 6 自由度>(テーブル)
- vii) 時刻歴加振力(加振機)
- viii) 時刻歴差圧(加振機)
- ix) 時刻歴回転角度(テーブル)/時刻歴上下加速度(テーブル)
- x) 時刻歴転倒モーメント(試験体)
- xi) 時刻歴油量(加振機)
- xii) 加振機毎の最大加振力(加振機)
- xiii) 加振機毎の最大速度(加振機)

xiv) 加振機毎の最大変位(加振機)

xv) 加振機毎の時刻歴変位(加振機)

出力結果画面には、印刷ボタンを用意し、印刷を可能とする。また、時刻歴出力の場合は、最大値とその発生時刻を表示する。

伝達関数計算

特性把握シミュレーションの場合、伝達関数抽出計算 FFT(多自由度周波数応答計算)プログラムを実行する。このプログラムでは、加振データに対してのテーブル台上応答結果についてゲインと位相の周波数応答とそのコヒーレンスのグラフを表示する機能を持ち、印刷可能とする。なお、コヒーレンスが悪い場合は、再度ランダム波加振を実施するかまたは、平均化回数を増やすことで精度向上が可能となる。

外部へのデータ出力

結果データは、ユーザーによって選択された変数について、テキスト形式の外部データとして出力可能とする。この場合、変数一覧表を表示し、ユーザーがボタンで選択する手順とする。

伝達関数の補間

伝達関数抽出計算を実施した後、伝達関数 $G(\quad)$ の点数を補間して、地震波などの加振データの加振時間が収まるようにする機能を持つ。これらは、加振データの加振時間、サンプリング、周波数特性の1ポイントあたりの周期を決めた上で対処する必要がある。

入力補償波作成

特性把握シミュレーションの場合は、地震波などの目標波を読み込み、伝達関数計算で取得した伝達関数を用いて、逆伝達関数を作成する。この逆伝達関数を使って、目標波の周波数レベルを調整し、時系列の補償波加振データを生成し、MATLAB 専用のバイナリファイルに保管する。

表 7 基本的なシミュレーションフローと概要説明

シミュレーションフロー	概要説明	詳細条件・関連情報参照先
<p>1 開始</p> <p>パラメータ呼出</p> <p>パラメータ設定 ・ 加振データ ・ 機構系 ・ 試験体系 ・ 制御系</p> <p>保管</p>	<p>1 振動台の計算に必要なパラメータの設定と、機構系パラメータの読み込みを行う。 加振波形データの作成 データ作成機能・データ取り込み機能 ランダム波生成・正弦波生成・外部データファイル取り込み 機構系パラメータの設定 デフォルト入力値(基本的には変更なし) オプションにて登録および変更が可能な状態としておく。 試験体系パラメータの設定 試験体の質点数・観測点の層間距離・質量、非線形特性などを入力 制御系パラメータの設定 デフォルト設定 基本制御系パラメータを設定。 パラメータ設定完了後、一旦データファイルに保存。</p>	<p>開始でログイン画面を表示 設定したパラメータは MATLAB 形式で保存する</p>
<p>2 特性把握 シミュレーション</p> <p>加振 シミュレーション</p>	<p>2 シミュレーション条件を選択する。 特性把握シミュレーション 加振シミュレーション</p>	<p>メニュー画面を用意、ユーザー操作方法について適切に誘導</p>
<p>3 シミュレーション条件設定 計算条件の設定</p> <p>特性把握時</p>	<p>3 シミュレーション計算の実行条件を設定する。設定する条件のインターフェイス部分に必要と思われるものは以下のとおり。 指令値の条件(変位指令/加速度指令) 試験体の条件 加振開始時間,終了時間,シミュレーションサンプリング時間の設定 データ格納時の刻み時間の設定 結果データの保存ファイル名</p>	<p>ここでパラメータを読み込む準備をする</p>
<p>4 パラメータ引渡し</p>	<p>4 パラメータデータを選択して読み込み、震動台モデルの初期データ(初期値はすべてゼロデータとする)と交換する。</p>	<p>パラメータは、加振データ・機構系パラメータ・試験体系パラメータ・制御系パラメータの4項目</p>
<p>5 シミュレーション条件引渡し</p>	<p>5 震動台モデルにシミュレーション条件で設定した値を引き渡す。</p>	
<p>6 プログラムの実行</p>	<p>6 MS-DOS プロンプトから震動台モデルのプログラムを実行。</p>	
<p>7 計算完了の確認</p>	<p>7 シミュレーション計算が終了すれば、メッセージを出す。</p>	<p>できれば終了目安時間を表示できるようにする(ケースにより変動するため難しい)</p>
<p>8 結果データの保存(自動処理)</p>	<p>8 結果データを保存する。</p>	<p>結果データは MATLAB 専用バイナリデータ(MAT ファイル)のほか、ASCII 形式のテキストデータとしての出力も可能。ただし、行列数が多くなるので扱いが大変。</p>
<p>9 評価条件の選択</p>	<p>9 評価条件を選択する。 特性把握シミュレーション 加振シミュレーション(TVC のみ・反復入力補償・逐次適応型入力補償・高速適応型入力補償)</p>	
<p>10 グラフ出力</p> <p>データ出力</p> <p>伝達関数 FFT 計算</p> <p>伝達関数読み込み 計算</p> <p>補償波作成</p>	<p>10 以下のものを出力する。 (1) 時刻歴加速度(テーブル中央点・任意の観測点) (2) 時刻歴速度(テーブル中央点・ピストン挙動・任意の観測点) (3) 時刻歴変位(テーブル中央点・試験体層間・任意の観測点) (4) 応答スペクトル(テーブル) (5) 周波数軸応答<ゲイン/位相>(テーブル) (6) コヒーレンス(テーブル) (7) 時刻歴加振力(加振機) (8) 時刻歴差圧(加振機) (9) 時刻歴回転角度(テーブル)または時刻歴上下加速度(テーブル) (10) 時刻歴転倒モーメント(試験体) (11) 時刻歴油量(加振機) (12) 加振機毎の最大加振力(加振機) (13) 加振機毎の最大速度(加振機) (14) 加振機毎の最大変位(加振機) (15) 加振機毎の時刻歴変位(加振機)</p>	<p>フォームは「2.2.5 結果の出力内容」の項を参照</p> <p>・印刷可能とする ・時刻歴表示の場合にはすべて最大値(最大値の発生時刻を併記)を表記する</p>
<p>11</p>	<p>11 特性把握条件のとき、伝達関数 $G(\)$ の計算(多軸周波数応答計算)を実施。テーブル上の周波数応答(位相/ゲイン)とコヒーレンスのグラフを出力する。</p>	
<p>12</p>	<p>12 特性把握条件のとき、目標波を読み込み、逆伝達関数として計算し、初期補償加振波を生成し保管する。</p>	
<p>13</p>	<p>13 入力補償の回数によっては(2回め以降)、前回の結果と照らし合わせて、反復入力補償波を作成し、保管する。</p>	

c) システム管理フロー

震動台シミュレータのシステムに関連するファイルあるいはデータのフローについて検討をした。ここでは、下記の項目について検討を実施した。

ユーザー登録及び管理

データファイルのアクセス権管理

パラメータならびに結果データの管理など、システム化するために必要な手法とそのフロー

ここでの前提条件として、震動台シミュレータはパソコン1台での運用となっているため、他のパソコンからアクセスするためのファイルの共有やアクセス権の設定などについては考慮しないこととした。したがって、他のパソコンから震動台基準シミュレーションを利用することは、今回対象外とした。ただし、複数ユーザーでの利用を考慮し、ユーザー情報については管理を実施する。例えば、ユーザー毎にユニークなフォルダを作成し、そこにシミュレーション結果を保存するなどの処理を実施する。このため、パスワード機能は持たないものの、ログイン画面を用意し、ユーザー名を入力することによって、使用するフォルダを決定するような仕組みを実現する。

d) データフロー

作成した加振データファイル、加振結果ファイル、各パラメータファイル等について、またファイル形式やファイル名などの運用基準を含むファイルデータのフローを検討した。データファイルは、以下に示すとおり4つに区分した。

加振ファイル群

正弦波や地震波などの加振データの管理。

パラメータデータ群

機構系及び制御系の各パラメータデータの管理。

シミュレーション結果ファイル群

シミュレーションの結果ファイルの管理。

ユーザー管理ファイル群

ユーザー及びその権限の管理。

なお、これらに区分したパラメータを相互に参照する機能は検討対象外とした。ただし、これではシミュレーション結果ファイルを読み込んだ場合、どのユーザーがどういう加振データを使って計算したのかわからなくなるため、震動台基準シミュレーションでは、シミュレーション結果ファイルの補助データとして、加振ファイルとユーザー名の2つの情報をシミュレーション計算終了時に同時に保存することによって、データファイルを管理することとした。

以下に、その実現方法、震動台モデルへのデータ引渡し方法、基本的なフローとそのデータのフローについて記述する。

シミュレーション結果ファイルの管理方法

ここでは、シミュレーション結果ファイルの管理とその利用法について検討した。エンドユーザーがシミュレーション結果の情報を知りたい場合は、「シミュレーション結果の表示」のファイル選択画面によって閲覧可能とする。

シミュレーション結果ファイルの管理の実現方法としては、MATLAB 専用バイナリファイルのデータとして文字列変数を加えるか、またはファイル名を統一し、拡張子のみ変更する等の方法が考えられる。

一般的なシステム開発では前者の方法が有効と考えられるが、シミュレーション結果のファイルサイズがかなり大きくなると想定され、ファイルの読み込みに時間が掛かるため、ファイル選択時のレスポンスが低下する可能性も高い。このため、この方法については実構築時に最適な方法を選定する必要がある。

震動台モデルへのデータの引渡し方法

計算システム本体で設定したパラメータおよび加振データは、シミュレーション計算時に震動台モデルへ引き渡す必要がある。この手法を検討した。

図 6 に示すように、MATLAB における通常の操作手順で、Simulink で構築したモデルをコンパイルするためには、パラメータと加振データを MATLAB のコマンド上で読み込んでから、Real-Time Workshop を起動し、シミュレーションの計算条件を手入力で設定したあと、コンパイルを実行するといった手順で実施する。このような操作は、MATLAB を使い慣れていても、大変煩雑なものとなっている。

今回、これら一連の作業を自動的に処理できないか検討した。

基本的なシミュレーションにおけるデータフロー

シミュレーション計算時におけるデータの流について検討したデータフローを図 7 に示す。この図の例では「反復入力補償」における実際のシミュレーション操作の流れに沿って、必要なデータファイルの流れとその内容を記述した。各サブシステムにおいては、これらのデータファイルを読み書きできるように設計する。

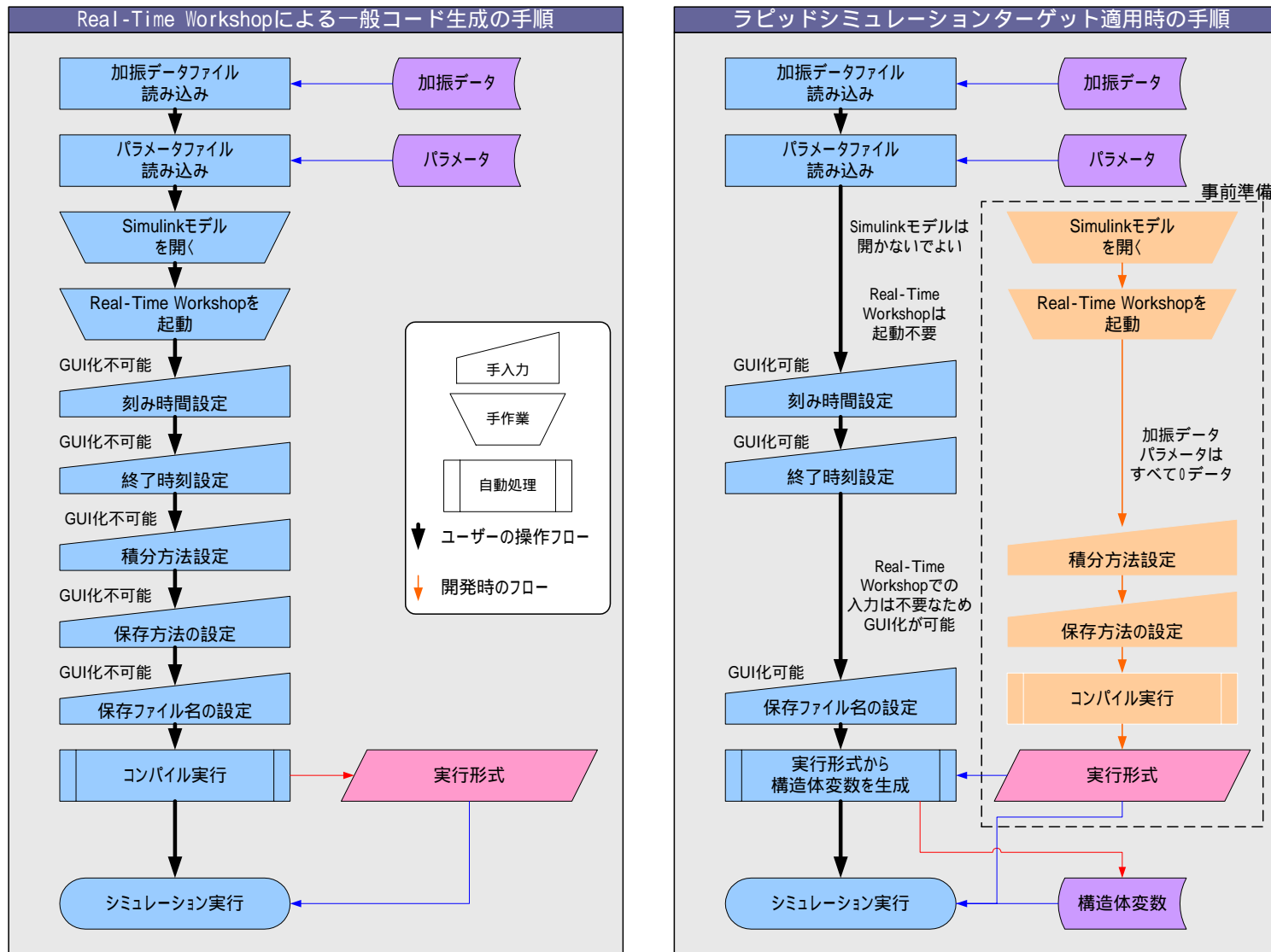


図6 ラピッドシミュレーションターゲット適用時のユーザー操作フローの比較

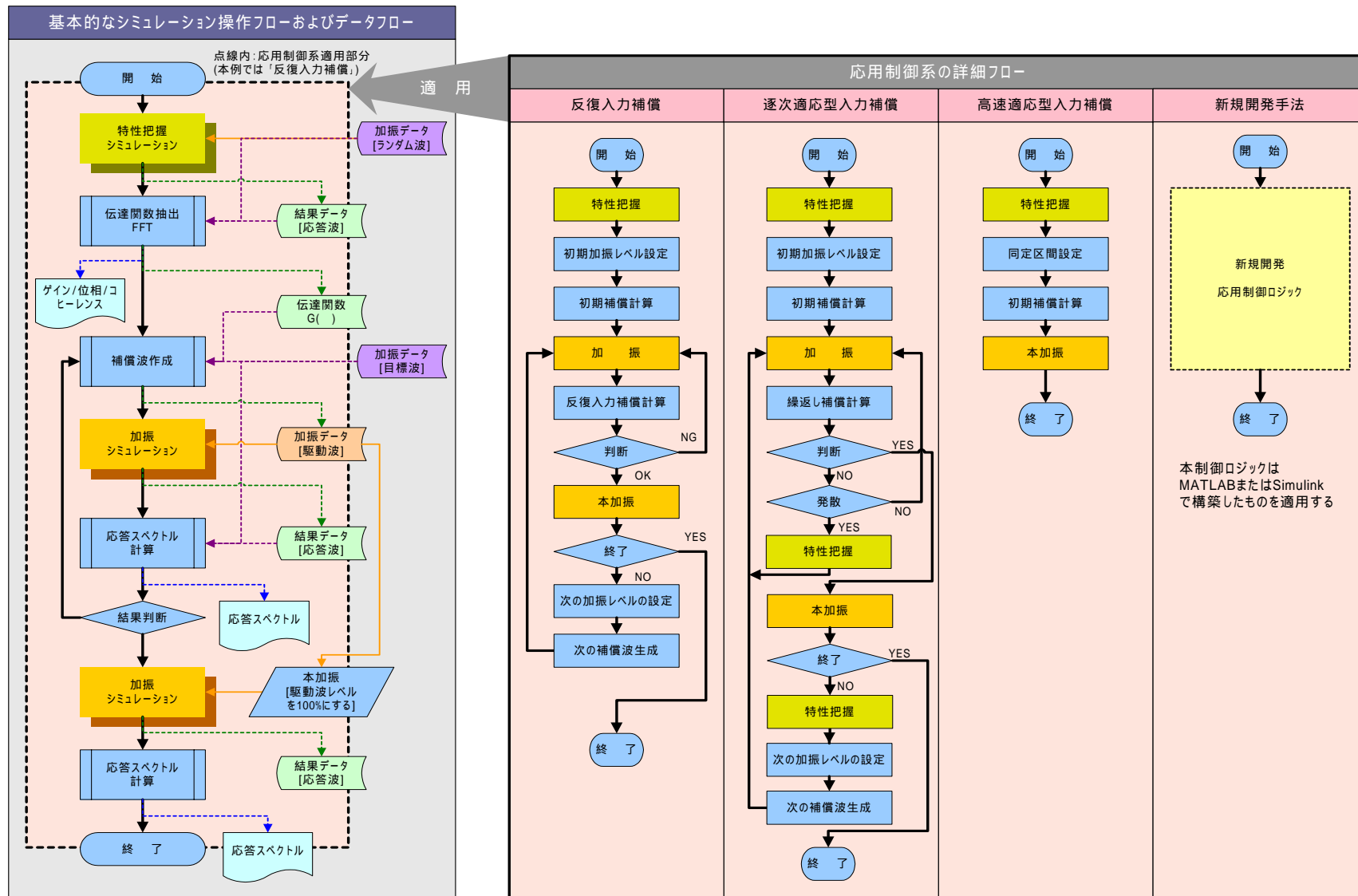


図7 基本的なシミュレーション計算におけるデータフロー

e) 結果の出力内容

ここでは、シミュレーションの計算結果の出力項目とその内容について検討した。

出力項目の選定

シミュレーション結果の出力項目を以下に示す。(図 8)

- i) 時刻歴加速度(テーブル中央点・任意の観測点)
- ii) 時刻歴速度(テーブル中央点・ピストン・任意の観測点)
- iii) 時刻歴変位(テーブル中央点・試験体・任意の観測点)
- iv) 応答スペクトル(テーブル)
- v) 周波数応答<入力 6 自由度 × 出力 6 自由度> (テーブル)
- vi) コヒーレンス<入力 6 自由度 × 出力 6 自由度> (テーブル)
- vii) 時刻歴加振力(加振機)
- viii) 時刻歴差圧(加振機)
- ix) 時刻歴回転角度(テーブル)/時刻歴上下加速度(テーブル)
- x) 時刻歴転倒モーメント(試験体)
- xi) 時刻歴油量(加振機)
- xii) 加振機毎の最大加振力(加振機)
- xiii) 加振機毎の最大速度(加振機)
- xiv) 加振機毎の最大変位(加振機)
- xv) 加振機毎の時刻歴変位(加振機)

出力内容

出力結果画面には、印刷ボタンを用意し、印刷を可能とする。また、時刻歴出力の場合は、最大値とその発生時刻を表示する。

出力スケールについては、最大値で自動設定する「オートスケール」を基本とし、LOG スケールあるいはリニアスケールの切り替えなど、あらかじめユーザーの操作が予想されるものはボタンで選択可能とする。それ以外については、ユーザー側の操作範囲とする。

種類	出力サンプル	主な使用箇所	種類	出力サンプル	主な使用箇所
時刻歴加速度		目標波の確認 観測点の挙動確認	コヒーレンス		特性把握シミュレーション 加振シミュレーション
時刻歴速度 ▶テーブル挙動 ▶ピストン挙動			時刻歴加振力 および 時刻歴差圧		
時刻歴変位 ▶テーブル挙動 ▶試験体層間挙動			時刻歴回転角度 または 時刻歴上下加速度		
応答スペクトル		加振シミュレーション	時刻歴 転倒モーメント		
			時刻歴 油流量		
周波数軸 ゲイン/位相		特性把握シミュレーション	加振機毎の 最大加振力		
			加振機毎の 最大速度 および 最大変位		

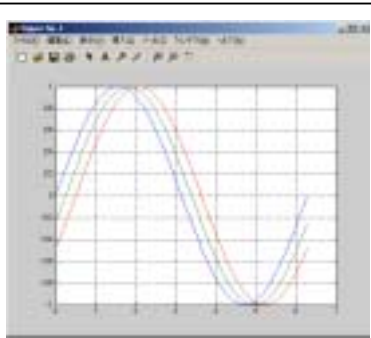
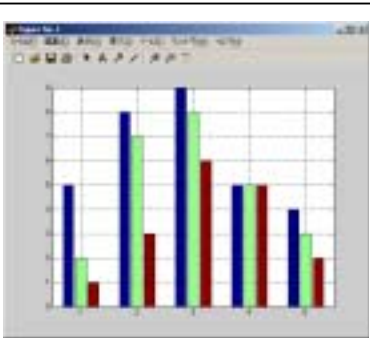
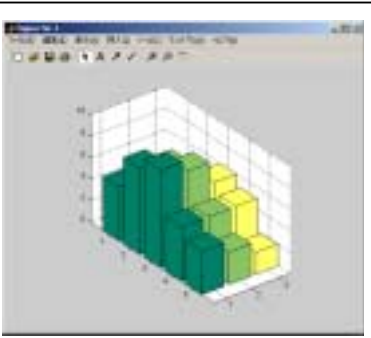
図 8 シミュレーション結果出力項目の検討

f) 出力の実現方法

ここでは前述した出力項目と内容について、それを実現するためのツールならびに方法を検討した。

図8で検討したサンプル画面は、実際に MATLAB および Excel によって作成したものであるが、Excel で出力した棒グラフに関しては、以下に示すように MATLAB で同様に実現可能なことがわかった。

この結果を踏まえて、本シミュレータでは計算結果ファイルの保存形式として、MATLAB 専用のバイナリファイルを選定したため、結果出力用のプログラムについても MATLAB を適用した方が効率的であり、出力の実現方法としては、全て MATLAB を使用して構築することとした。

MATLABのグラフ表示機能（具体的な例）		
		
一般的な線グラフ	平面的な棒グラフ	立体的な棒グラフ

3) 震動台モデルの設計検討

震動台モデルの範囲を図 9 に示す。震動台モデルは加振制御系、加振機構系、試験体系の 3 つの要素で構成する。

a) 加振制御系モデル

加振制御系モデルは、基本制御系および応用制御系モデルで構成する。

基本制御系モデル

基本制御系モデルは、姿勢目標値からサーボ弁指令値に変換する制御モジュールの集合体である。

図 10 に基本制御系モデルのブロック線図を示す。なお、姿勢目標値については 6 自由度の入力変位、すなわち X 軸並進変位、Y 軸並進変位、Z 軸並進変位、X 軸回転角度(軸)、Y 軸回転角度(軸)、Z 軸回転角度(軸)となる。

応用制御系モデル

応用制御系モデルは、「反復入力補償」、「逐次適応型入力補償」ならびに「高速適応型入力補償」を適用する。なお、新規開発の制御手法の適用も可能とする。

i) 反復入力補償

指令値からテーブル観測値までの伝達特性を適用し、その逆伝達特性から駆動波形を生成および修正する。

ii) 逐次適応型入力補償

反復入力補償の改良版であり、加振後に加振データから伝達特性を再同定する。

iii) 高速適応型入力補償

逐次適応型入力補償の改良版であり、加振中に伝達特性を同定する。この補償法は、反復加振を実施できない破壊試験に適用する。

iv) 新規制御手法(外部制御ロジック)

MATLAB または Simulink で開発した新規制御手法について、応用制御系モデルとして組み込み可能にする。手順については、2) d) 項の図 7 に示したように「基本的なシミュレーションフロー」の一部(点線部分)に組込んで構築するものとする。

図 11 にそれぞれの応用制御系の種類と特徴を示す。また、以下に各補償ロジックについての詳細を記述する。

i) 反復入力補償

反復入力補償は、あらかじめランダム波又は正弦波加振により得られた震動台伝達特性を用い、希望する震動台上再現波形が得られるまで反復的に入力補償を行なう。本補償は、加速度波形歪改善・周波数特性改善・供試体と震動台間の干渉除去・制御軸間の

干渉除去に効果があり、最も一般的に利用できる。しかし、加振レベルに応じて周波数応答特性が変化する強い非線形成分を有する供試体や崩壊する構造物には適用ができない。図 12 にそのフローを示す。

ii) 逐次適応型入力補償

逐次適応型入力補償では、地震波加振時のデータを用いて、震動台伝達特性を再推定し、この再推定した震動台伝達特性を用いて入力補償を実施する。これにより、反復入力補償の適用が困難であった、加振レベルに応じて周波数応答特性が変化する強い非線形特性を有する試験体についても補償を実現できる。ただし、試験体が崩壊をとまなう特性を持つ場合は、適用できない。図 13 に逐次適応型入力補償のフローを示す。

加振データを地震波とした場合、波形データが一過性のため、伝達特性の同定法として、一般的な FFT 法は適用できない。そこで、逐次適応型入力補償では、少ないデータでの推定に向いている同定法として、AR 法(Auto Regressive)を適用する。

iii) 高速適応型入力補償

高速適応型入力補償は、加振後に地震波加振結果を用いて同定を行い補償波を更新する、逐次適応型入力補償をオンライン化したものである。図 14 に高速適応型入力補償のフローを示す。

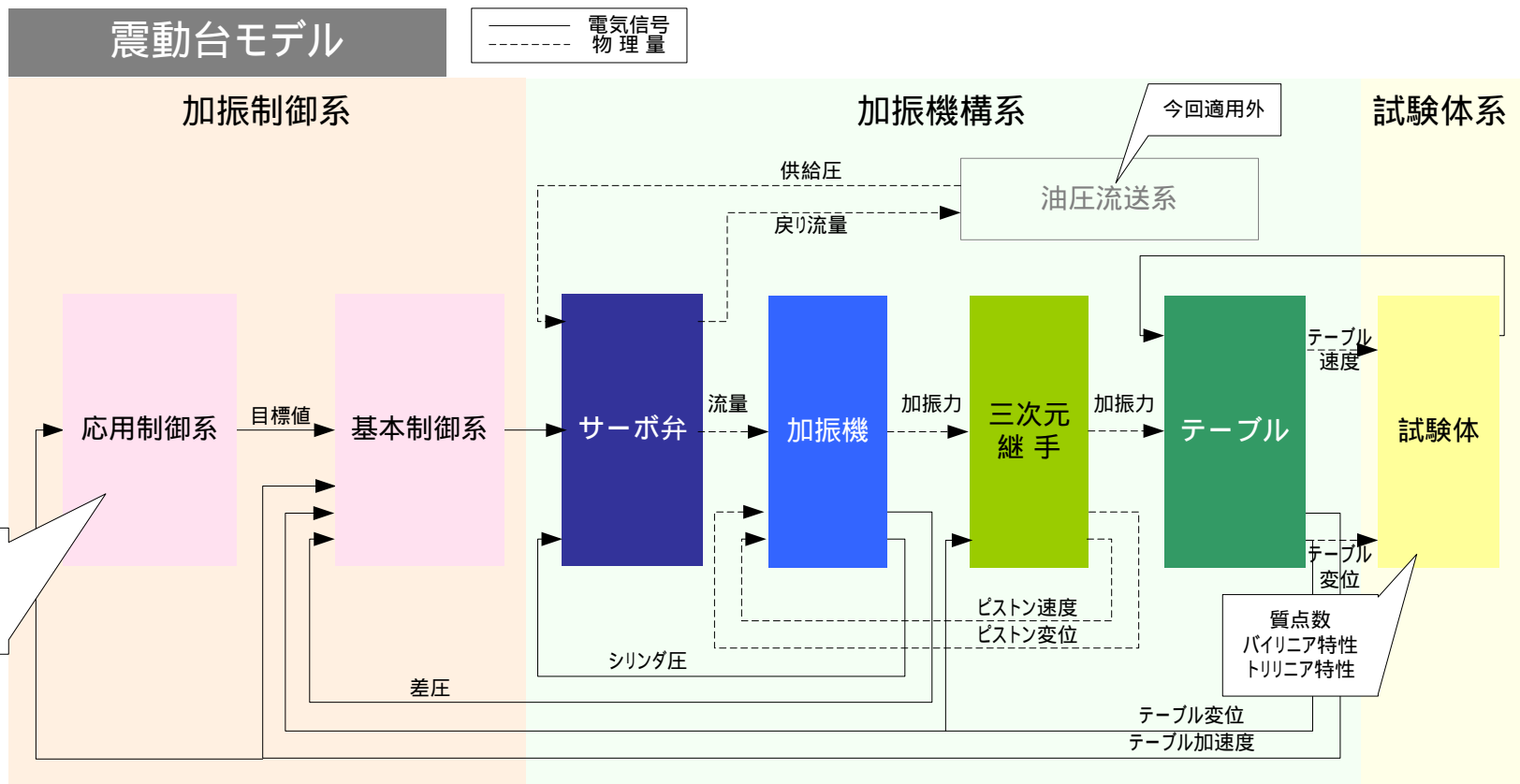


図9 震動台モデル

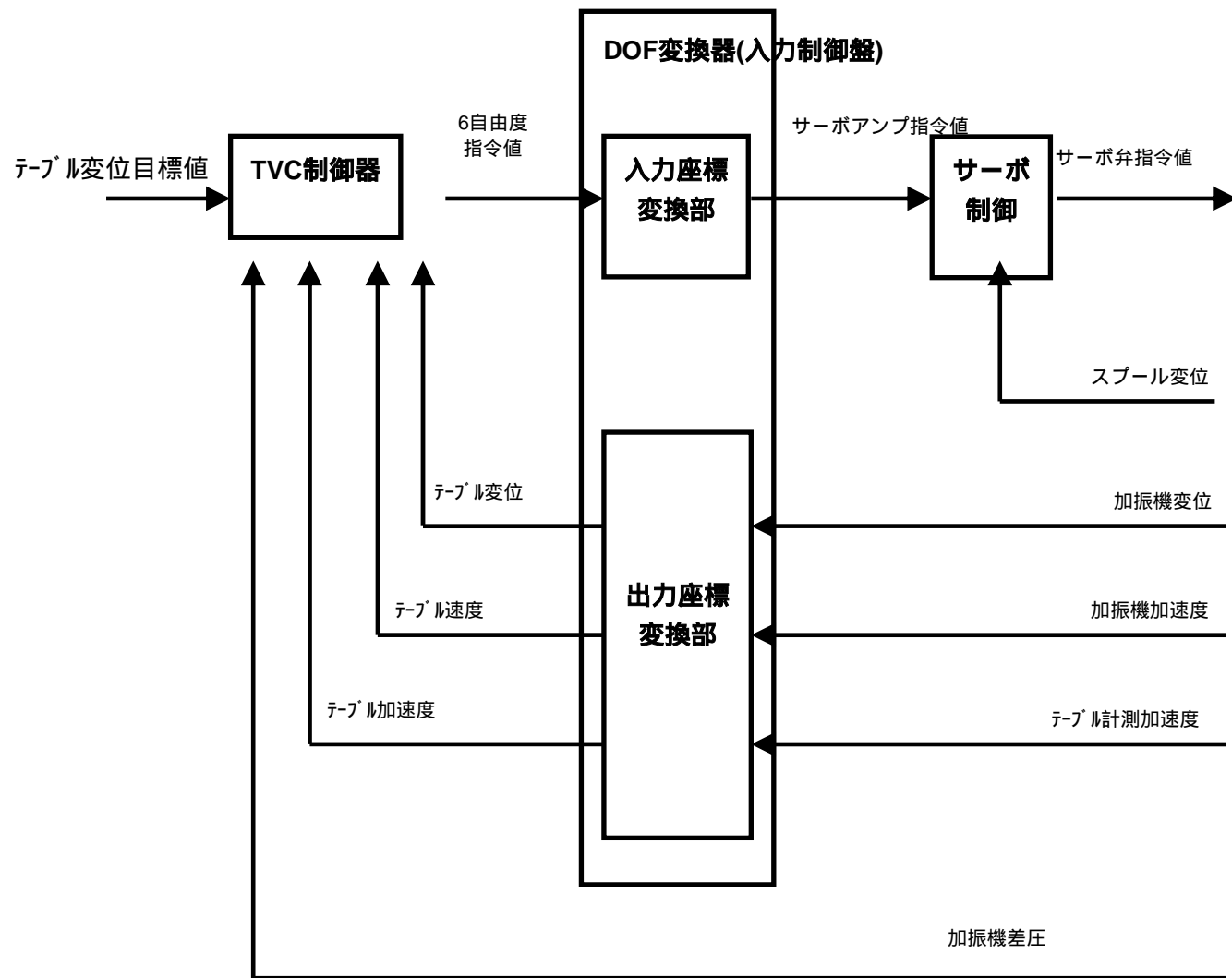
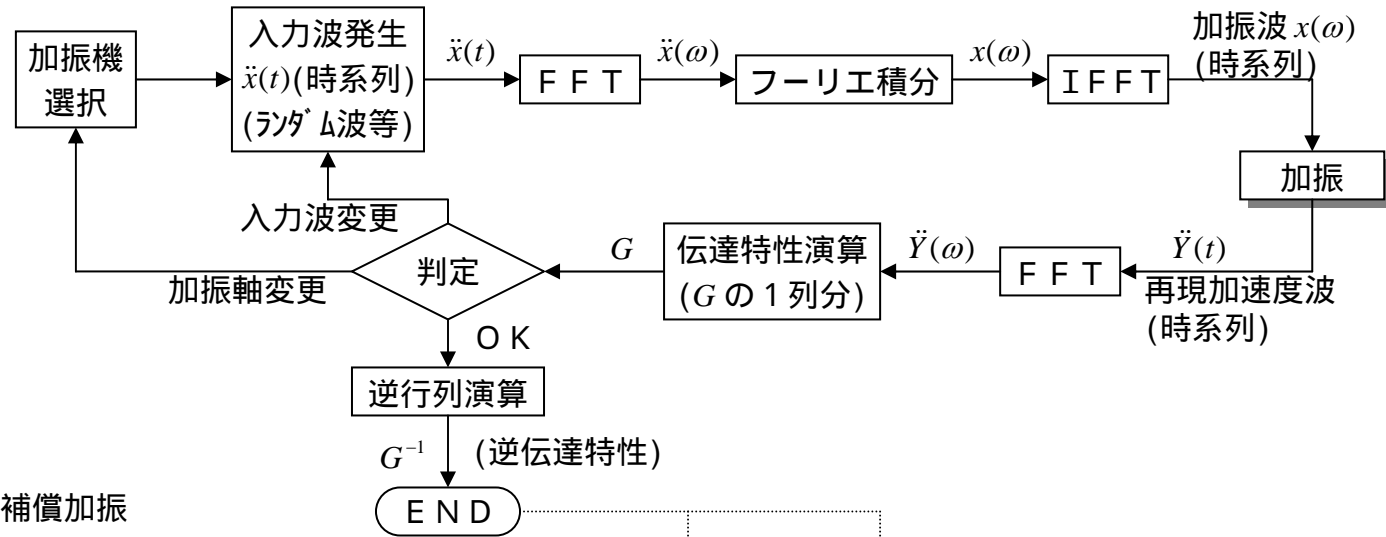


図 10 基本制御系の概要

応用制御の種類と比較		反復入力補償	逐次適用型入力補償	高速適応型入力補償
特徴	解説	指令値からテーブル観測値までの伝達特性を適用し、その逆伝達特性から駆動波形を生成および修正する。	反復入力補償の改良版であり、加振後に加振データから伝達特性を再同定する。	逐次適応型入力補償の改良版であり、加振中に伝達特性を同定し、補償波の更新を実施することで、反復加振を不要とする。この補償法は、反復加振を実施できない破壊試験に適用する。
	解説図			
特性把握	必要性	要		
	同定方法	FFT法		
	振幅限界	中	小	小
伝達特性更新	必要性	不要	要(加振毎)	要(加振中)
	同定方法	不要	AR法	AR法
反復加振	必要性	要	要	不要
試験体による制御効果	線形			
	非線形(弱)			
	非線形(強)			
	崩壊形	×	×	

図 11 適用する応用制御系の種類と比較

()特性把握加振



()入力補償加振

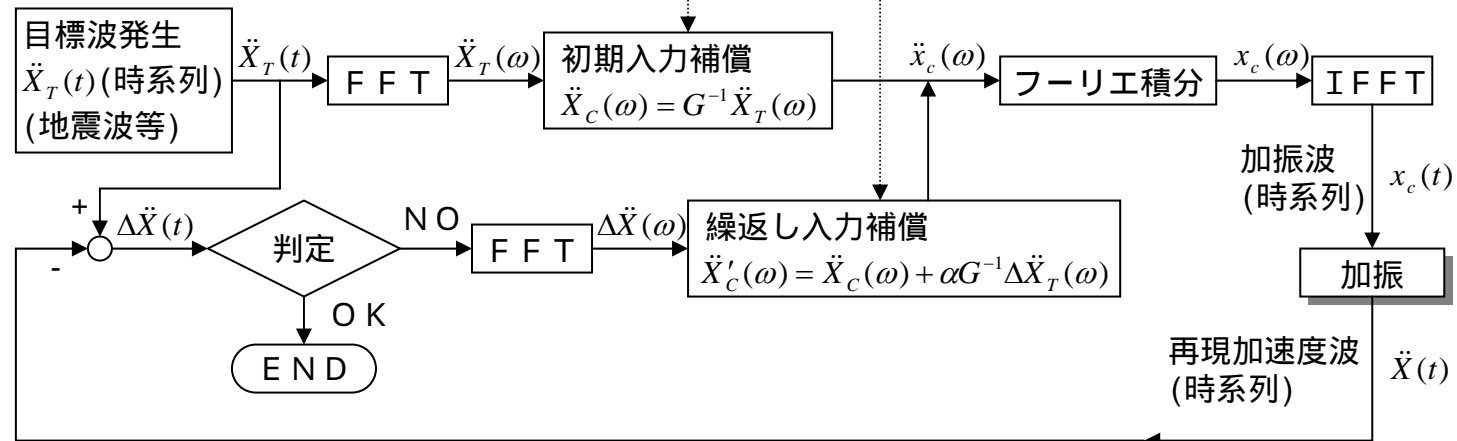


図 12 反復入力補償のフロー

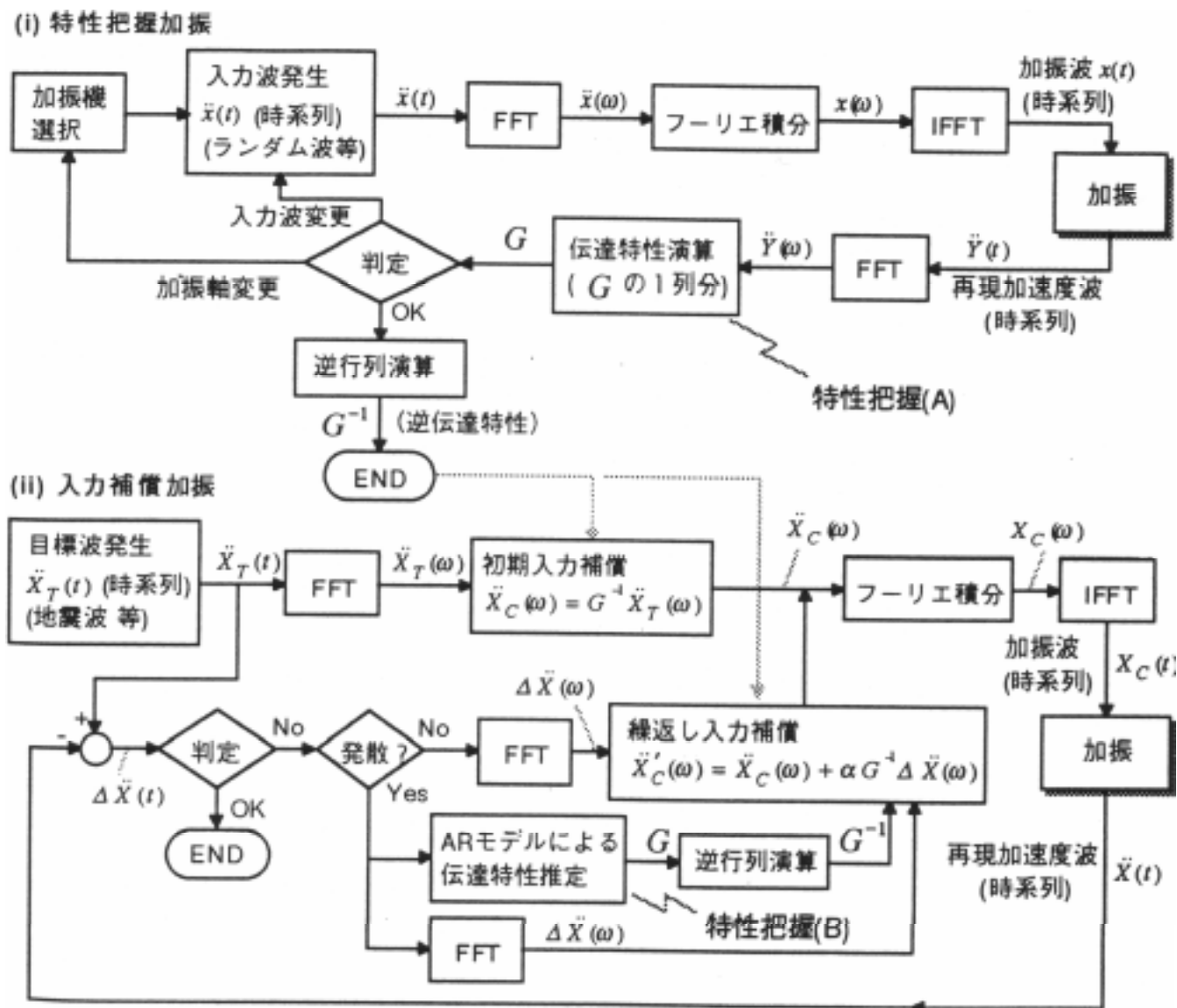


図 13 逐次適用型入力補償のフロー

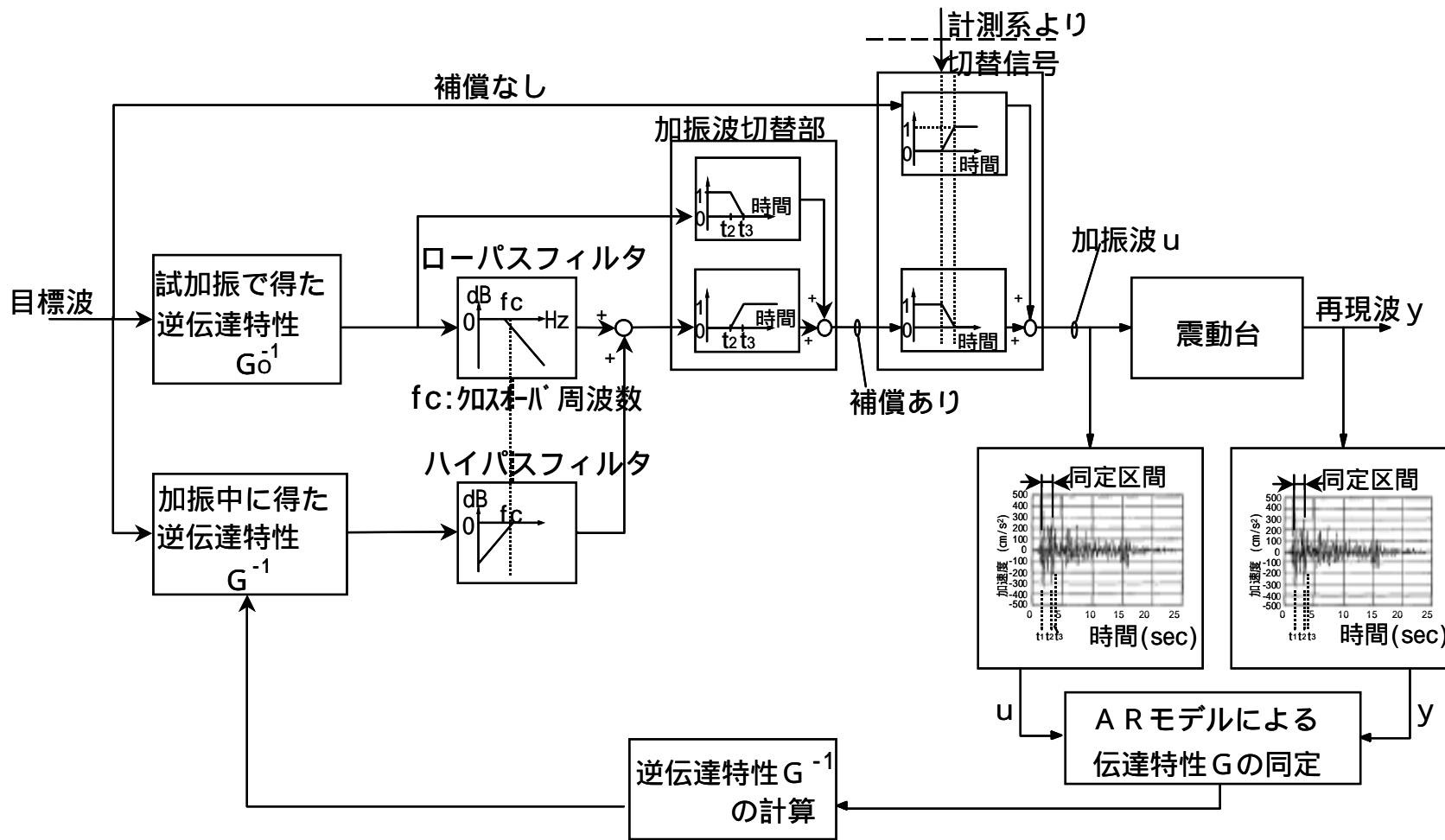


図 14 高速適応型入力補償フロー

b) 加振機構系モデル

加振機構系モデルについては、図 9 で示したように、震動台モデルのうち、「サーボ弁」、「加振機」、「三次元継手」および「震動台テーブル」の 4 つで構成する。

この加振機構系モデルについて定式化の検討を実施した。表 8 に加振機構系モデル化範囲およびその概念を示す。

サーボ弁

サーボ弁については、X 方向加振機(5 本)および Y 方向加振機(5 本)に対して、加振機 1 体あたり 3 基の大型サーボ弁とし、また Z 方向加振機(14 本)に対して、加振機 1 体あたり 1 基の大型サーボ弁で構成する定式化を実施する。サーボ弁とシリンダ定式化の概念については、図 15 に示す。また、定式化にあたって、以下の特性を考慮する。

- i) 動特性：多段の伝達特性、スプールに作用する流体力および、減衰力などを考慮し、確証試験設備による実測結果を反映する。
- ii) 圧力流量特性：バルブ開度・負荷圧力差に応じた非線形な圧力流量特性および供給圧力・バルブ開度制限に応じた飽和特性を考慮する。
- iii) 油圧力低下の模擬：連続加振による油圧力低下を模擬する。

以下にサーボ弁の定式化について記述する。

表 8 加振機構系モデル化範囲およびモデル概念

	モデル化範囲	モデル概念
サーボ弁	モデル化数 ・X方向加振機用 3基/1体 ・Y方向加振機用 3基/1体 ・Z方向加振機用 1基/1体 モデル化範囲 ・動特性 ・圧力/流量特性 ・油圧低下下の模擬(係数付与)	[動特性実測結果]
加振機	モデル化数 ・X方向 5体 ・Y方向 5体 ・Z方向 14体 いずれも実機データを基準 モデル化範囲 ・シリンダ系 1次元モデル ・油の圧縮性 ・シール部洩れ特性 シール部摩擦力は除外	[基本モデル]
三次元継手	モデル化数 ・X方向 5体 ・Y方向 5体 ・Z方向 14体 ピンジョイントモデルで作成 モデル化範囲 ・加振機ピストン ・リンク機構 ・軸受け部非線形特性 ・三次元運動(油膜特性は除外)	[ピンジョイントモデル]
テーブル	モデル化数: 1体 諸元: 20m x 15m モデル化条件 ・剛体 ・重量約 750tonf	[剛体モデル]

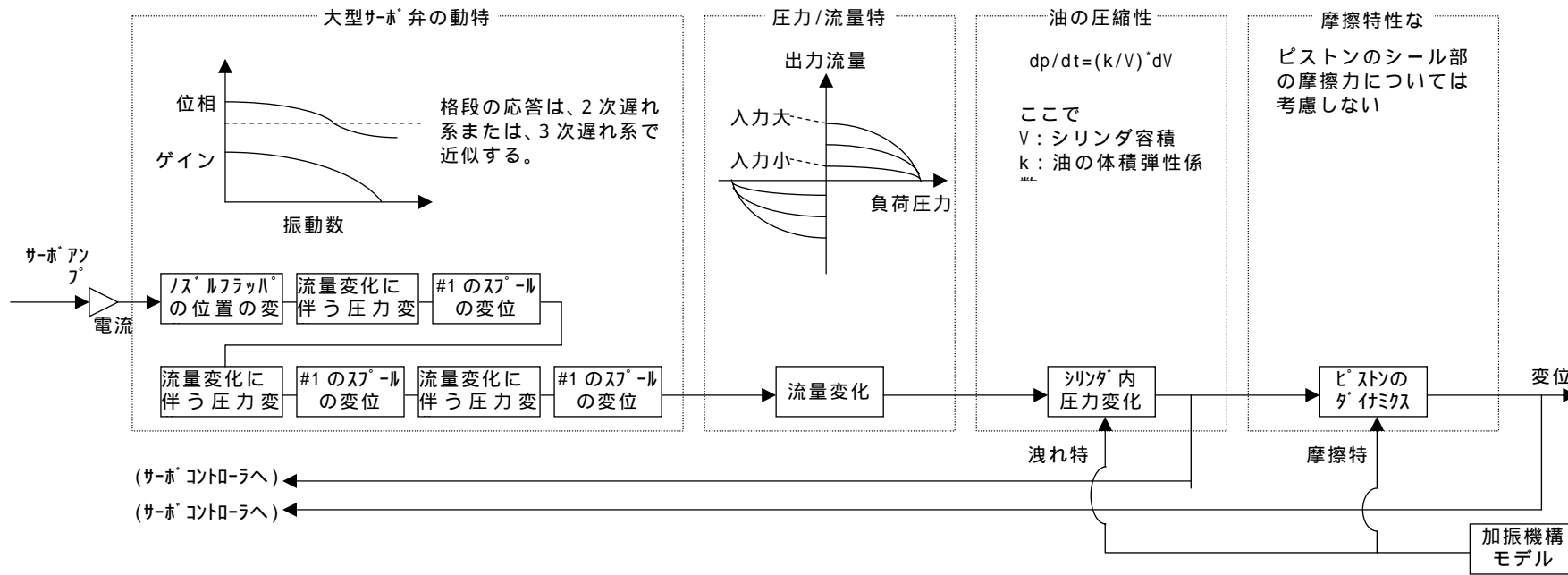
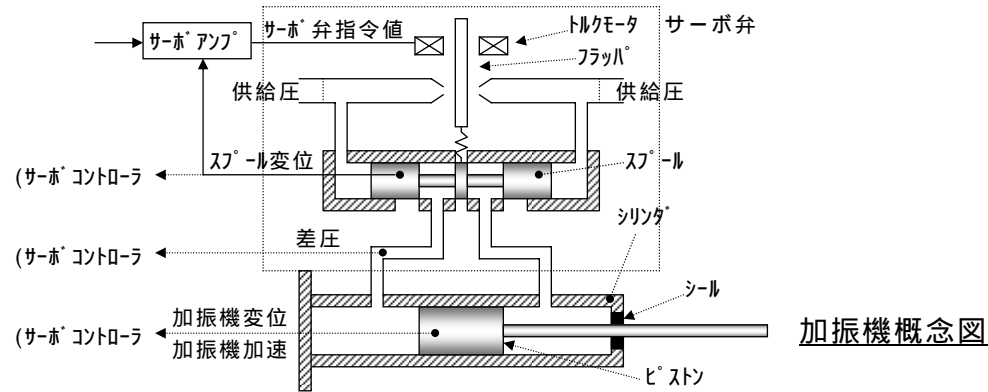


図 15 サervo弁とシリンダの構成概念図

イ) サーボ弁定式化の諸元

サーボ弁の定式化について、表9に記号の一覧を示す。なお、諸元値・初期値の項目が空欄のものは変数，数値を示したものは定数として用いた。

表9 サーボ弁部記号の定義

記号	意味	諸元値・初期値 (カッコ内は垂直加振)	単位
<u>サーボ弁部</u>			
・スプール特性			
s_k	k番目のサーボ弁開度		-
	サーボ弁の固有振動数	35	[Hz]
	サーボ弁の減衰比	0.85	-
set_k	k番目のサーボ弁指令値		-
s_h	サーボ弁の零点ドリフト	0	-
L_k	k番目のサーボ弁スプールオーバーラップ	0.1	[%]
SV	サーボ弁のスレッシュホールド	0.25	[%]
k	サーボ弁番号	1, 2, 3	-
・サーボ弁流量特性			
	供給圧力	160	[kgf/cm ²]
P_s	戻り圧力	5	[kgf/cm ²]
P_r	定格流量 [at 160kgf/cm ²]	25000	[cm ³ /sec]
Q_R	A室マニホールド圧力		[kgf/cm ²]
P_{mA}	B室マニホールド圧力		[kgf/cm ²]
P_{mB}	サーボ弁開度正規化ゲイン	1	-
X_{sR}	A室サーボ弁流量のk番目成分		[cm ³ /sec]
q_{sAk}	B室サーボ弁流量のk番目成分		[cm ³ /sec]
q_{sBk}			
・マニホールド特性			
	A室マニホールド部圧力		[kgf/cm ²]
	B室マニホールド部圧力		[kgf/cm ²]
P_{mA}	A室マニホールド部等価容積	113700(18852)	[cm ³]
P_{mB}	B室マニホールド部等価容積	105600(25480)	[cm ³]
V_{mA}	作動油の体積弾性係数	7000	[kgf/cm ²]

諸元値については、確証試験時の実設定値を記載した。

ロ) サーボ弁の動特性

大型サーボ弁の動特性については，3ステージのスプール動特性を3次遅れ系伝達特性として近似する。

ル) サーボ弁開度

弁開度としては零点ドリフト，オーバーラップ及び制御限界によるスレッシュホールド特性を考慮し、次式によりモデル化を実施する。(図 16)

水平方向

$$x_{sk} = \begin{cases} (G(s)x_{stlk} - x_{sh}) - \text{sign}(x_{stlk})\Delta L_k & [\Delta L_k < |x_{sk}|] \\ 0 & [\Delta L_k \geq |x_{sk}|] \end{cases} \quad (4)$$

$$x_{stlk} = \Delta sv \times \text{floor}(x_{setk} / \Delta sv + 0.5)$$

垂直方向

$$x_s = \begin{cases} (G(s)x_{stlk} - x_{sh}) - \Delta L & [\Delta L < |x_s|] \\ 0 & [\Delta L \geq |x_s|] \end{cases} \quad (5)$$

ここで，

$$G(s) = \frac{\omega^2}{S^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} : \text{サーボ弁スプールの動特性}$$

$\text{floor}(x)$: x の要素を x 以下の最大整数に丸める関数

二) サーボ弁の流量特性

大型サーボ弁における流量特性は次式に示す4ポートバルブモデルでモデル化を実施する。(図 17)

水平方向

$$q_{sAk} = \begin{cases} Q_{RS} \frac{x_{sk}}{x_R} \text{sign}(P_r - P_{mA}) \sqrt{|P_r - P_{mA}|} & [0 < \frac{x_{sk}}{x_R} < 1] \\ Q_{RS} \frac{x_{sk}}{x_R} \text{sign}(P_s - P_{mA}) \sqrt{|P_{mA} - P_s|} & [-1 < \frac{x_{sk}}{x_R} < 0] \end{cases} \quad (6)$$

$$q_{sBk} = \begin{cases} Q_{RS} \frac{x_{sk}}{x_R} \text{sign}(P_s - P_{mB}) \sqrt{|P_s - P_{mB}|} & [0 < \frac{x_{sk}}{x_R} < 1] \\ Q_{RS} \frac{x_{sk}}{x_R} \text{sign}(P_r - P_{mB}) \sqrt{|P_{mB} - P_r|} & [-1 < \frac{x_{sk}}{x_R} < 0] \end{cases} \quad (7)$$

$$(k = 1, 2, 3)$$

$$Q_{RS} = Q_R \sqrt{\frac{2}{160}}$$

垂直方向

$$q_{sA} = \begin{cases} Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_r - P_{mA}) \sqrt{|P_r - P_{mA}|} & [0 < \frac{x_s}{x_R} < 1] \\ Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_s - P_{mA}) \sqrt{|P_{mA} - P_s|} & [-1 < \frac{x_s}{x_R} < 0] \end{cases} \quad (10)$$

$$q_{sB} = \begin{cases} Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_s - P_{mB}) \sqrt{|P_s - P_{mB}|} & [0 < \frac{x_s}{x_R} < 1] \\ Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_r - P_{mB}) \sqrt{|P_{mB} - P_r|} & [-1 < \frac{x_s}{x_R} < 0] \end{cases} \quad (11)$$

$$q_{sB} = \begin{cases} Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_s - P_{mB}) \sqrt{|P_s - P_{mB}|} & [0 < \frac{x_s}{x_R} < 1] \\ Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_r - P_{mB}) \sqrt{|P_{mB} - P_r|} & [-1 < \frac{x_s}{x_R} < 0] \end{cases} \quad (12)$$

$$q_{sB} = \begin{cases} Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_s - P_{mB}) \sqrt{|P_s - P_{mB}|} & [0 < \frac{x_s}{x_R} < 1] \\ Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_r - P_{mB}) \sqrt{|P_{mB} - P_r|} & [-1 < \frac{x_s}{x_R} < 0] \end{cases} \quad (13)$$

ホ) マニホールド部特性

大型サーボ弁と加振機間のマニホールド配管の圧力 / 流量特性については次式の通りモデル化を実施する。(図 18)

水平方向

$$P_{mA} = \frac{\beta}{V_{mAh}} (q_{sA} - q_{mA}) \quad (14)$$

$$P_{mB} = \frac{\beta}{V_{mBh}} (q_{sB} - q_{mB}) \quad (15)$$

$$q_{sA} = \sum_{k=1}^3 (q_{sAk}), q_{sB} = \sum_{k=1}^3 (q_{sBk}) \quad (16)$$

$$q_{mA} = \alpha C_{mAh} \text{sign}(P_{mA} - P_A) \sqrt{\frac{2}{\gamma} |P_{mA} - P_A|} \quad (17)$$

$$q_{mB} = \alpha C_{mBh} \text{sign}(P_{mB} - P_B) \sqrt{\frac{2}{\gamma} |P_{mB} - P_B|} \quad (18)$$

垂直方向

$$P_{mA} = \frac{\beta}{V_{mA v}} (q_{sA} - q_{mA}) \quad (19)$$

$$P_{mB} = \frac{\beta}{V_{mB v}} (q_{sB} - q_{mB}) \quad (20)$$

$$q_{mA} = \alpha C_{mA v} \text{sign}(P_{mA} - P_A) \sqrt{\frac{2}{\gamma} |P_{mA} - P_A|} \quad (21)$$

$$q_{mB} = \alpha C_{mB v} \text{sign}(P_{mB} - P_B) \sqrt{\frac{2}{\gamma} |P_{mB} - P_B|} \quad (22)$$

加振機

図 19 に加振機概念図を示す。5 本の X 方向加振機、5 本の Y 軸加振機、14 本の Z 軸加振機で構成し、シリンダでの油の圧縮性、シール性能による洩れ特性を考慮する。基本的には確証試験設備による実測結果を反映する。ただし、シール部の摩擦力については除外とする。

表9 加振機部記号の定義

記号	意味	諸元値・初期値 (カッコ内は垂直加振)	単位
加振機部			
・シリンダ容積室の圧縮特性			
P_A	シリンダ A 室の圧力		[kgf/cm ²]
P_B	シリンダ B 室の圧力		[kgf/cm ²]
$V_{ho}(V_{vo})$	中立部のシリンダ両側容積	621500(305375)	[cm ³]
$A_h(A_v)$	シリンダ受圧面積	2825(2443)	[cm ²]
$Q_{bh}(Q_{bv})$	70-ティグシール部もれ流量係数	11.1(11.1)	[(cm ³ /sec)/(kgf/cm ²)]
$Q_{ph}(Q_{pv})$	ピストンリング部もれ流量係数	1.59(1.59)	[(cm ³ /sec)/(kgf/cm ²)]
X_c	ケーシング変位		
X_p	ピストン変位		
・ケーシングの運動方程式			
$M_{ch}(M_{cv})$	ケーシング質量	31.74(22.26)	[kgf・s ² /cm]
$K_{ch}(K_{cv})$	ケーシングばね定数	$2.13 \times 10^7(3.04 \times 10^7)$	[kgf/cm]
$B_{ch}(B_{cv})$	ケーシング減衰定数	260(260.13)	[kgf/cm ³]
$F_{ph}(F_{pv})$	ピストンリング部の摩擦力		[kgf]
$F_{sh}(F_{sv})$	ロッドシールの摩擦力		[kgf]
F_{bb}	バランスピストンリング部の摩擦力	- ()	[kgf]
F_{bc}	バランスピストンシール部の摩擦力	- ()	[kgf]

イ) シリンダ容積室の圧縮性

加振機のシリンダ容積室における油の圧縮性については次式のように、またケーシングの特性については次式で表わされる 1 自由度系としてモデル化を実施する。(図 20)

$$\begin{array}{c}
 \text{マニホールド部} \quad \text{マニホールド部} \\
 \left[\begin{array}{l}
 \dot{P}_A = \frac{\beta}{V_{ho}/2 + A_h(x_p - x_c)} \left\{ \overbrace{q_{mA} - A_h(\dot{x}_p - \dot{x}_c)}^{\text{マニホールド部}} - \underbrace{Q_{bh}P_A + Q_{ph}(P_B - P_A)}_{\substack{\text{フローティング・シール部から} \\ \text{ピストリング部からの内部漏れ流量}}} \right\} \\
 \dot{P}_B = \frac{\beta}{V_{ho}/2 - A_h(x_p - x_c)} \left\{ \overbrace{q_{mB} + A_h(\dot{x}_p - \dot{x}_c)}^{\text{マニホールド部}} - \underbrace{Q_{bh}P_B + Q_{ph}(P_B - P_A)}_{\substack{\text{フローティング・シール部から} \\ \text{ピストリング部からの内部漏れ流量}}} \right\}
 \end{array} \right. \quad (23)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 \text{垂直} \\
 \left[\begin{array}{l}
 \dot{P}_A = \frac{\beta}{V_{vo}/2 + A_v(x_p - x_c)} \left\{ q_{mA} - A_v(\dot{x}_p - \dot{x}_c) - Q_{bv}P_A + Q_{pv}(P_B - P_A) \right\} \\
 \dot{P}_B = \frac{\beta}{V_{vo}/2 - A_v(x_p - x_c)} \left\{ q_{mB} + A_v(\dot{x}_p - \dot{x}_c) - Q_{bv}P_B - Q_{pv}(P_B - P_A) \right\}
 \end{array} \right. \quad (24)
 \end{array}$$

ロ) ケーシング運動方程式(図 21)

各部の摩擦力(実質 0)

$$\text{水平 : } M_{ch}\ddot{x}_c = -A_h(P_B - P_A) - K_{ch}x_c - B_{ch}\dot{x}_c + \overbrace{(F_{ph} + F_{sh})}^{\text{各部の摩擦力(実質 0)}} \quad (25)$$

$$\text{垂直 : } M_{cv}\ddot{x}_c = -A_v(P_B - P_A) - K_{cv}x_c - B_{cv}\dot{x}_c + \overbrace{(F_{bb} + F_{pv} + F_{sv} + F_{bc})}^{\text{各部の摩擦力(実質 0)}} - M_{cv}g \quad (26)$$

ここで、上式中に含まれる各部の摩擦特性は以下の通りであるが、今回摩擦特性は実質 0 とみなし定式化の対象外とする。

サーボ弁開度信号

水平方向

$$x_{sk} = \begin{cases} (G(s)x_{stk} - x_{sh}) - \text{sign}(x_{stk})\Delta L_k & [\Delta L_k < |x_{sh}|] \\ 0 & [\Delta L_k \geq |x_{sh}|] \end{cases}$$

$$x_{stk} = \Delta sv \times \text{floor}(x_{setk} / \Delta sv + 0.5)$$

垂直方向

$$x_s = \begin{cases} (G(s)x_{setk} - x_{sh}) - \Delta L & [\Delta L < |x_s|] \\ 0 & [\Delta L \geq |x_s|] \end{cases}$$

- ここで x_{sk} : サーボ弁開度
 $G(s)$: サーボ弁動特性

$$G(s) = \frac{\omega_2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega_2}$$

 x_{setk} : k 番目のサーボ弁指令値
 x_{sh} : 零点ドリフト
 L_k : k 番目のサーボ弁スプリングオフセット
 sv : サーボ弁スレッシュホールド
 k : サーボ弁番号
 $\text{floor}(x)$: x の要素を x 以下の 1 番近い整数に丸める関数

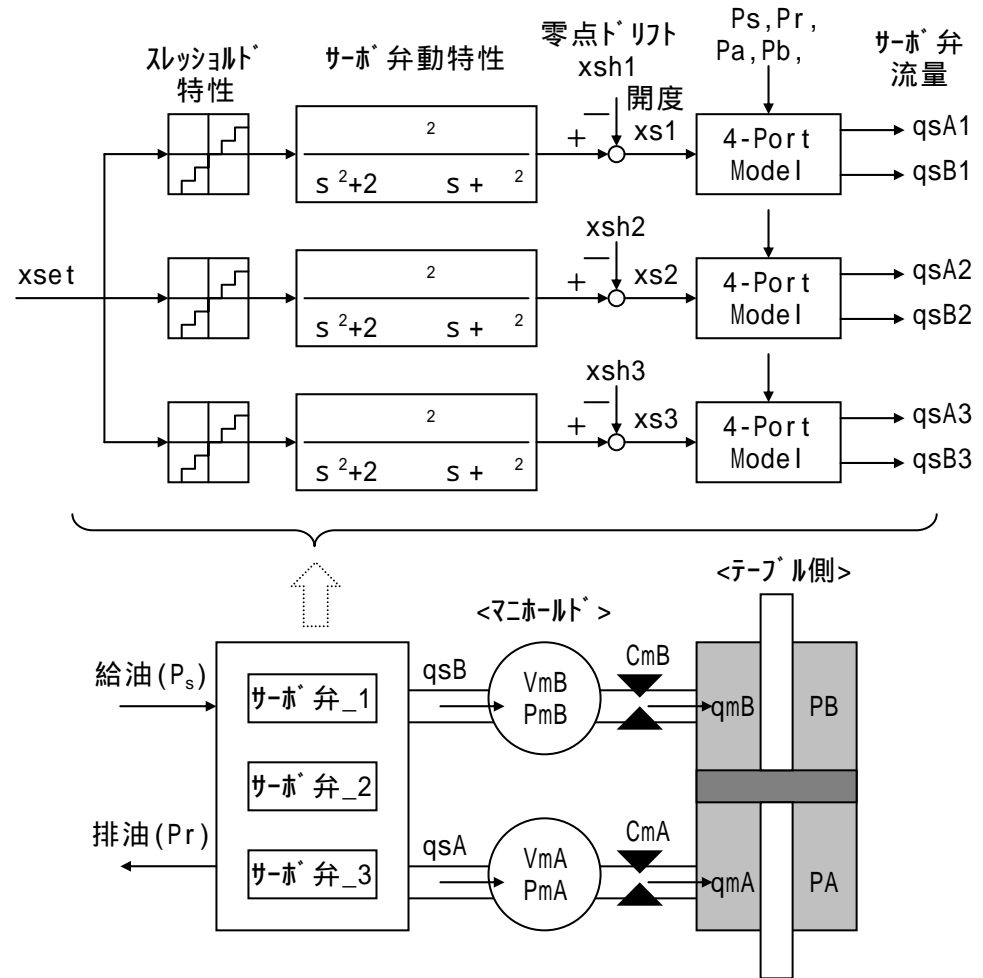


図 16 大型サーボ弁の開度信号

サーボ弁流量特性

水平方向

$$q_{sAk} = \begin{cases} Q_{RS} \frac{x_{sk}}{x_R} \text{sign}(P_r - P_{mA}) \sqrt{|P_r - P_{mA}|} & \left[0 < \frac{x_{sk}}{x_R} < 1 \right] \\ Q_{RS} \frac{x_{sk}}{x_R} \text{sign}(P_s - P_{mA}) \sqrt{|P_{mA} - P_s|} & \left[-1 < \frac{x_{sk}}{x_R} < 0 \right] \end{cases}$$

$$q_{sBk} = \begin{cases} Q_{RS} \frac{x_{sk}}{x_R} \text{sign}(P_s - P_{mB}) \sqrt{|P_s - P_{mB}|} & \left[0 < \frac{x_{sk}}{x_R} < 1 \right] \\ Q_{RS} \frac{x_{sk}}{x_R} \text{sign}(P_r - P_{mB}) \sqrt{|P_{mB} - P_r|} & \left[-1 < \frac{x_{sk}}{x_R} < 0 \right] \end{cases}$$

(k = 1, 2, 3)

垂直方向

$$Q_{RS} = Q_R \sqrt{\frac{2}{160}}$$

$$q_{sAk} = \begin{cases} Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_r - P_{mA}) \sqrt{|P_r - P_{mA}|} & \left[0 < \frac{x_s}{x_R} < 1 \right] \\ Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_s - P_{mA}) \sqrt{|P_{mA} - P_s|} & \left[-1 < \frac{x_s}{x_R} < 0 \right] \end{cases}$$

$$q_{sBk} = \begin{cases} Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_s - P_{mB}) \sqrt{|P_s - P_{mB}|} & \left[0 < \frac{x_s}{x_R} < 1 \right] \\ Q_{RS} \frac{x_s}{x_R} \text{sign}(P_r - P_{mB}) \sqrt{|P_{mB} - P_r|} & \left[-1 < \frac{x_s}{x_R} < 0 \right] \end{cases}$$

- ここで
- q_{sAk} : A室サーボ弁流量の k 番目成分
 - q_{sBk} : B室サーボ弁流量の k 番目成分
 - Q_R : 定格流量 (160kgf/cm² 圧力損失時)
 - x_R : サーボ弁開度正規化ゲイン
 - x_{sR} : サーボ弁開度
 - P_s : 供給圧力
 - P_r : 戻り圧力
 - P_{mA} : A室マニホールド圧力
 - P_{mB} : B室マニホールド圧力

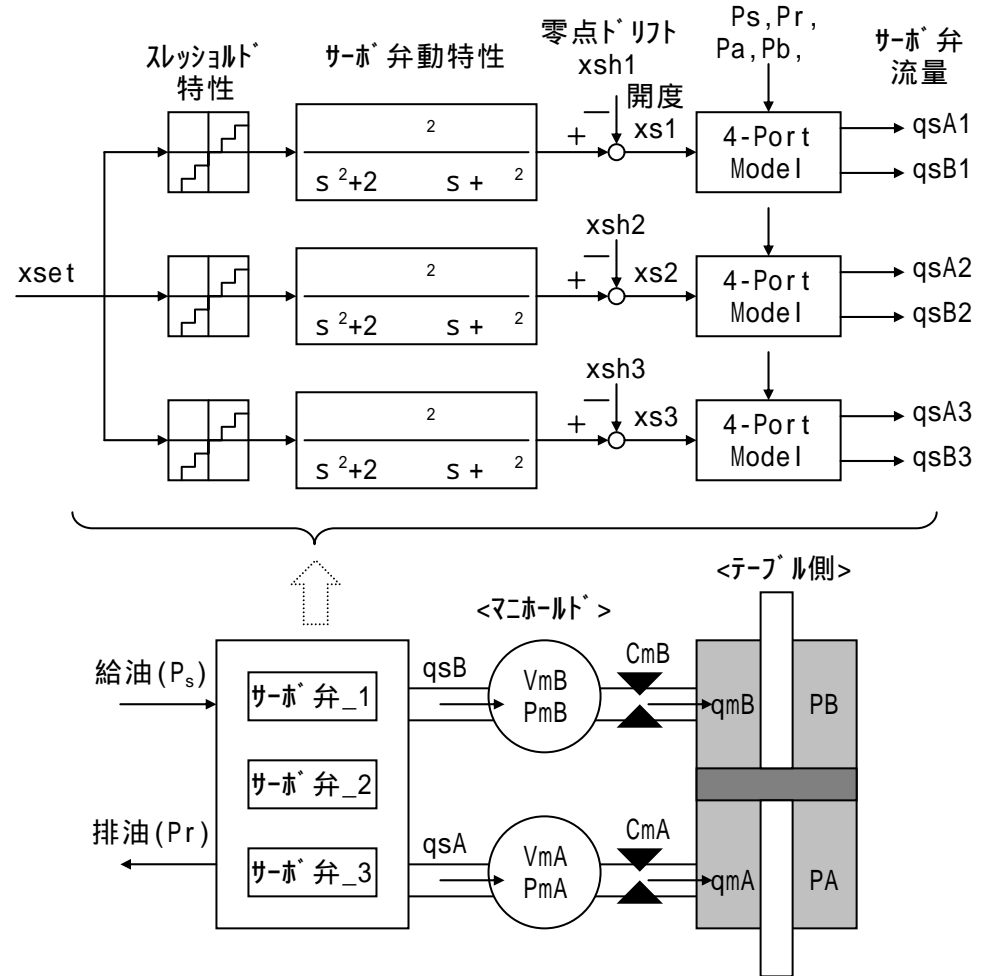


図 17 大型サーボ弁の流量特性

マニホールド部特性

水平方向

$$P_{mA} = \frac{\beta}{V_{mAh}} (q_{sA} - q_{mA})$$

$$P_{mB} = \frac{\beta}{V_{mBh}} (q_{sB} - q_{mB})$$

$$q_{sA} = \sum_{k=1}^3 (q_{sAk}), q_{sB} = \sum_{k=1}^3 (q_{sBk})$$

$$q_{mA} = \alpha C_{mAh} \text{sign}(P_{mA} - P_A) \sqrt{\frac{2}{\gamma} |P_{mA} - P_A|}$$

$$q_{mB} = \alpha C_{mBh} \text{sign}(P_{mB} - P_B) \sqrt{\frac{2}{\gamma} |P_{mB} - P_B|}$$

垂直方向

$$P_{mA} = \frac{\beta}{V_{mAv}} (q_{sA} - q_{mA})$$

$$P_{mB} = \frac{\beta}{V_{mBv}} (q_{sB} - q_{mB})$$

$$q_{mA} = \alpha C_{mAv} \text{sign}(P_{mA} - P_A) \sqrt{\frac{2}{\gamma} |P_{mA} - P_A|}$$

$$q_{mB} = \alpha C_{mBv} \text{sign}(P_{mB} - P_B) \sqrt{\frac{2}{\gamma} |P_{mB} - P_B|}$$

ここで

- β : 作動油の体積弾性係数
- α : マニホールド部流量係数
- V_{mA} : A室マニホールド部等価容積
- ρ : 作動油密度
- V_{mB} : B室 " " " "
- P_{mA} : A室マニホールド部圧力
- C_{mA} : A室マニホールド部等価オリフィス面積
- P_{mB} : B室 " " " "
- C_{mB} : B室マニホールド部等価オリフィス面積

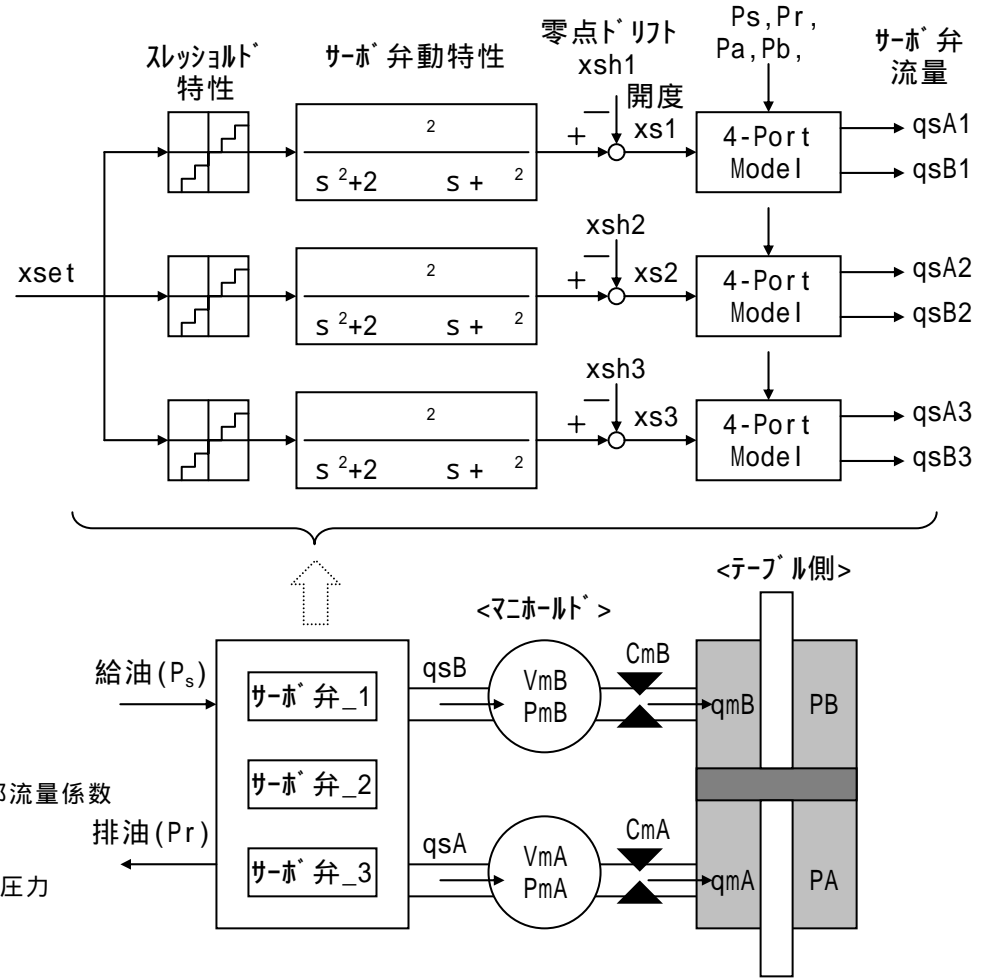
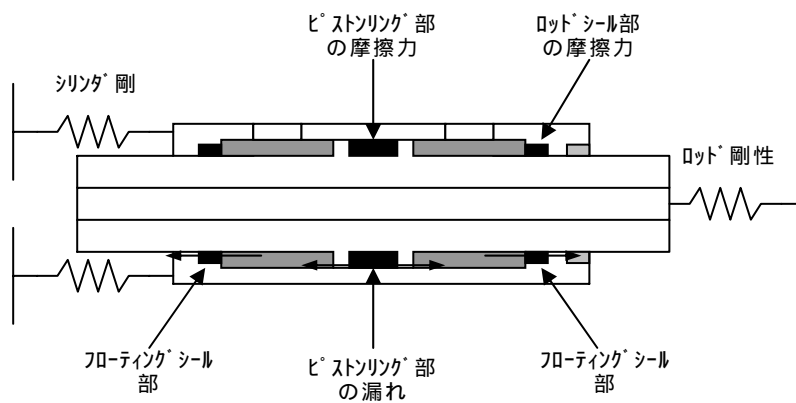
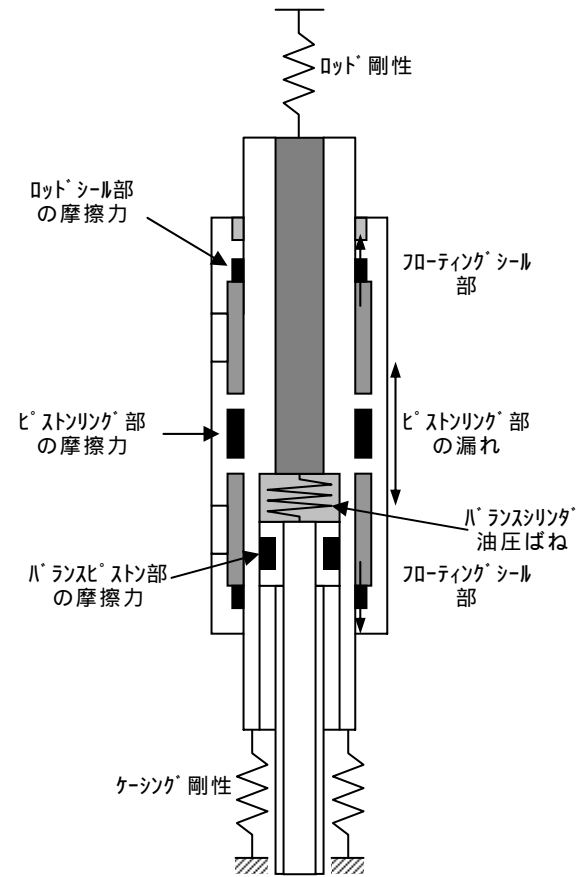


図 18 大型サーボ弁のマニホールド部特性



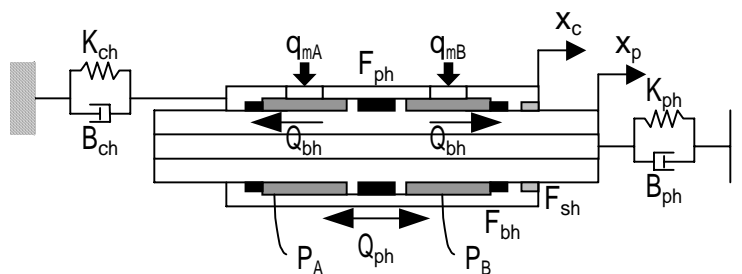
(水平加振機のモデル化)



(垂直加振機のモデル化)

図 19 加振機モデル化概念

シリンダ容積室の圧縮性の式



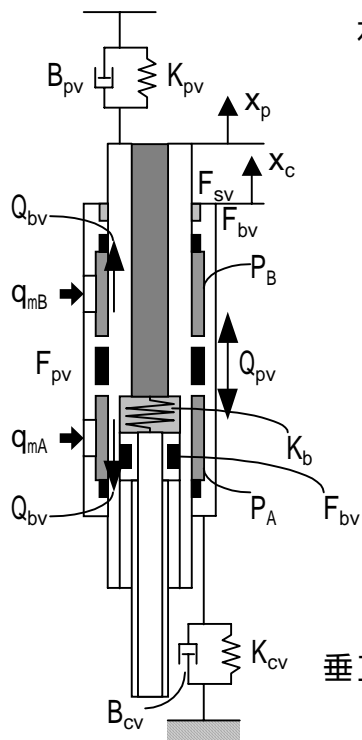
水平加振機モデル図

$$\text{水} \left[\begin{aligned} \dot{P}_A &= \frac{\beta}{V_{h0}/2 + A_h(x_p - x_c)} \left\{ \overbrace{q_{mA} - A_h(\dot{x}_p - \dot{x}_c)}^{\text{マニホールド部からの流入流量}} - Q_{bh}P_A + Q_{ph}(P_B - P_A) \right\} \\ \dot{P}_B &= \frac{\beta}{V_{h0}/2 + A_h(x_p - x_c)} \left\{ q_{mB} - A_h(\dot{x}_p - \dot{x}_c) - \underbrace{Q_{bh}P_B + Q_{ph}(P_B - P_A)}_{\substack{\text{パッキングシール部からの} \\ \text{ピストリング部からの内部漏れ流量}}} \right\} \end{aligned} \right.$$

ここで

- : 作動油の体積弾性係数
- V_{h0} : 中立部のシリンダ両側容積
- A_{h0} : シリンダ受圧面積
- x_c : ケーシング変位
- x_p : ピストン変位

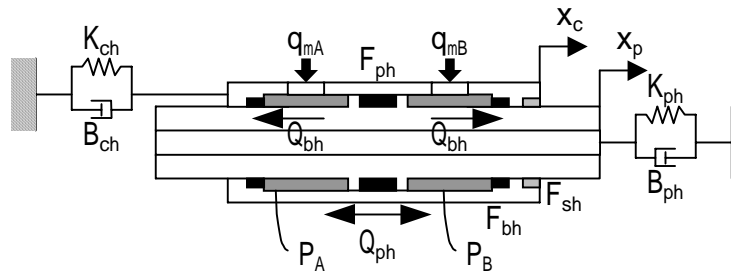
$$\text{垂} \left[\begin{aligned} \dot{P}_A &= \frac{\beta}{V_{v0}/2 + A_v(x_p - x_c)} \left\{ q_{mA} - A_v(\dot{x}_p - \dot{x}_c) - Q_{bv}P_A + Q_{pv}(P_B - P_A) \right\} \\ \dot{P}_B &= \frac{\beta}{V_{v0}/2 + A_v(x_p - x_c)} \left\{ q_{mB} - A_v(\dot{x}_p - \dot{x}_c) - Q_{bv}P_B + Q_{pv}(P_B - P_A) \right\} \end{aligned} \right.$$



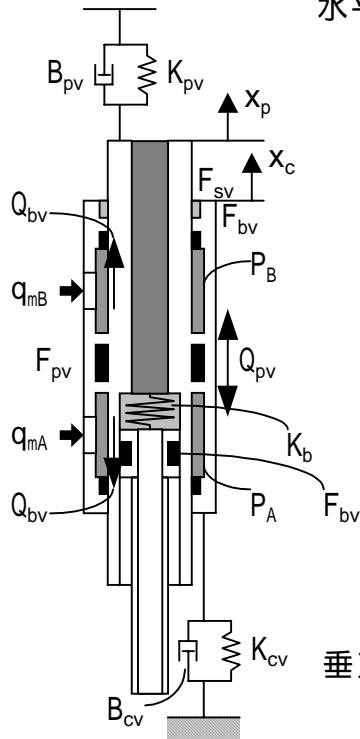
垂直加振機モデル図

図 20 加振機シリンダ容積室の圧縮性の式

ケーシングの運動方程式



水平加振機モデル図



垂直加振機モデル図

加振機ケーシングは1自由度系としてモデル化した。

各部の摩擦力

$$\text{水平: } M_{ch}\ddot{x}_c = -A_h(P_B - P_A) - K_{ch}x_c - B_{ch}\dot{x}_c + (F_{ph} + F_{sh})$$

ここで

M_{ch} : ケーシング質量

B_{ch} : ケーシング減衰定数

K_{ch} : ケーシングばね定数

A_h : ピストン受圧面積

P_A : シリンダA室圧力

P_B : シリンダB室圧力

F_{ph} : ピストンリング部の摩擦力(ゼロデータ)

F_{sh} : ロッドシールの摩擦力(ゼロデータ)

$$\text{垂直: } M_{cv}\ddot{x}_c = -A_v(P_B - P_A) - K_{cv}x_c - B_{cv}\dot{x}_c + (F_{bb} + F_{pv} + F_{sv} + F_{bc}) - M_{cv}g$$

各部の摩擦力

F_{bb} : バランスピストンベアリング部の摩擦力(ゼロデータ)

F_{bc} : バランスピストンシール部の摩擦力(ゼロデータ)

図 21 加振機ケーシングの運動方程式

三次元継手

ピストンと継手から構成されるリンク機構と、静圧軸受けでのスクイズばねの非線形性を考慮したモデル化を行うが、計算時間の短縮を計るために震動台システムの限界性

表10 三次元継手記号の定義

記号	意味	諸元値・初期値 (カッコ内は垂直加振)	単位
<u>三次元継手部</u>			
t	時間		
q_r	一般化座標		
L	ラグランジュ関数		
T	運動エネルギー		
U	ポテンシャルエネルギー		
D	消散エネルギー		
F_r	一般化座標に対応した一般化力		
m_p	ピストン質量	29.66(20.55)	[kgf s ² /cm]
m_{ha}	ピストン側ハウジング質量	4.52	[kgf s ² /cm]
m_j	継手部材質量	15.82	[kgf s ² /cm]
m_{hb}	テーブル側ハウジング質量	4.64	[kgf s ² /cm]
k_{ph}	ピストンばね定数	2.42e7(3.33e7)	[kgf/cm]
k_{hA}, k_{hB}	ピストン側及びテーブル側ハウジングばね定数	6.6e7(下向き) / 2.6e7(上向き)	[kgf/cm]
k_{BJA}		1.024e7(代表値)	[kgf/cm]
k_{BJB}	ピストン側軸受油膜ばね定数	1.024e7(代表値)	[kgf/cm]
k	テーブル側軸受油膜ばね定数		
B_{ph}	テーブルとの結合用ばね定数	261.2 (250.9)	[kgf s/cm]
B_{hA}, B_{hB}	ピストン減衰定数	172.7(下向き) /	[kgf s/cm]
B_{BJA}	ピストン側及びテーブル側ハウジング減衰定数	108.4(上向き) 7.42e6(代表値)	[kgf s/cm]
B_{BJB}		7.42e6(代表値)	[kgf s/cm]
B	ピストン側軸受油膜減衰定数		
A	テーブル側軸受油膜減衰定数	5.4e3	[kgf s ² /cm]
A	テーブルとの結合用減衰定数	2.15e5	[kgf s ² /cm]
A	継手部材の 軸に関する慣性モーメント	2.15e5	[kgf s ² /cm]
G	継手部材の 軸に関する慣性モーメント	980.7	[cm/s ²]
	継手部材の 軸に関する慣性モーメント		
	重力加速度		

能(0~30Hz)の評価に支障のない範囲で、三次元継手モデルは簡略化したモデルを適用する。

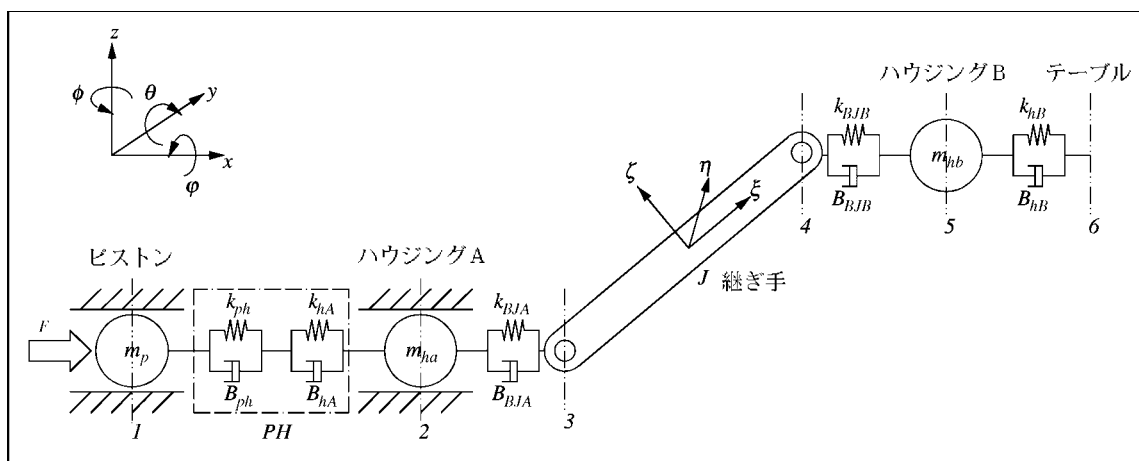
三次元継手モデルは、ピンジョイント - リンクモデル及び軸受部は非線形特性を持つ弾性体モデルの2つで構成される。なお、今回の弾性体モデルについては、軸受の油膜ばね・油膜減衰については考慮の対象外とし、ピストンは剛体として扱ったモデルで構築する。これらのモデルはいずれも三次元運動が可能なモデル化を行う。

運動方程式の導出手順としては、ラグランジュ運動方程式に基づき、各自由度に関する運動方程式を導出した。式の導出には、解析計算プログラム説明書に示された Mathematica のソフトウェアを用いた。

前半にて油膜ばねを考慮した場合の基本モデル (= 弾性体モデル) を示し、後半で油膜ばねを省略したモデルに関する運動方程式の定式化過程を示す。

なお、ここで扱う記号の定義等については、表 10 に従うものとする。

i) モデル化と各種の定義



3次元継手モデル

上図に3次元継手モデルを示す。この図に基づいて各リンクの位置，速度を以下のよ
うに定義する。

ピストン

$$\mathbf{X}_1 = [x_1, 0, 0]^T, \quad \dot{\mathbf{X}}_1 = [\dot{x}_1, 0, 0]^T \quad (27)$$

ハウジング A

$$\mathbf{X}_2 = [x_2, 0, 0]^T, \quad \dot{\mathbf{X}}_2 = [\dot{x}_2, 0, 0]^T \quad (28)$$

継ぎ手

$$\mathbf{X}_3 = [x_3, 0, 0]^T, \dot{\mathbf{X}}_3 = [\dot{x}_3, 0, 0]^T \quad (29)$$

$$\mathbf{X}_4 = [x_4, 0, 0]^T, \dot{\mathbf{X}}_4 = [\dot{x}_4, 0, 0]^T \quad (30)$$

$$\boldsymbol{\gamma} = [\varphi, \theta, \phi]^T, \dot{\boldsymbol{\gamma}} = [\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\phi}]^T \quad (31)$$

ここで，X 軸周りの運動は，考えないので，

$$\boldsymbol{\gamma} = [0, \theta, \phi]^T, \dot{\boldsymbol{\gamma}} = [0, \dot{\theta}, \dot{\phi}]^T \quad (32)$$

ハウジング B

$$\mathbf{X}_5 = [x_5, 0, 0]^T, \dot{\mathbf{X}}_5 = [\dot{x}_5, 0, 0]^T \quad (33)$$

テーブル

$$\mathbf{X}_6 = [x_6, 0, 0]^T, \dot{\mathbf{X}}_6 = [\dot{x}_6, 0, 0]^T \quad (34)$$

3次元継手の姿勢を表わすパラメータとして，オイラー角を適用する。以下にこれらのパラメータの定義と継ぎ手重心の速度，角速度との関係について述べる。

継ぎ手重心の位置は，継ぎ手支点(ハウジング A 側)から継ぎ手重心までの距離を l とすると次のようになる。

$$\mathfrak{S} = [l, 0, 0]^T \quad (35)$$

オイラー角は， z - y - x 形を用いており，最初に Z 軸回りに ϕ 回転させ，回転後の座標を θ 軸回りに q 回転させ，更に X 軸回りに ϕ 回転させて任意の姿勢を作り出すものである。なお，本モデルでは， X 軸回りは，考慮しないものとした。従って，最終的な座標系から最初の座標系への座標変換マトリクスは，以下のようになる。

$$\mathbf{R}_{\phi\theta} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\theta & -\sin\phi & \cos\phi\sin\theta \\ \sin\phi\cos\theta & \cos\phi & \sin\phi\sin\theta \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (36)$$

また，最終的な座標系の回転速度は，次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{R}_{\phi}\dot{\boldsymbol{\gamma}} = [-\dot{\theta}\sin\theta, \dot{\theta}\cos\theta, \dot{\phi}]^T \quad (37)$$

従って，継ぎ手重心の位置は次のようになる。

$$\mathbf{J} = \mathbf{X}_3 - \mathfrak{S} + \mathbf{R}_{\phi\theta}\mathfrak{S} \quad (38)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} x_3 - l + l \cos \phi \cos \theta \\ y_3 + l \sin \phi \cos \theta \\ z_3 - l \sin \theta \end{bmatrix} \quad (39)$$

同様にして，継手先端部の位置は，式(41)のようになる。

$$\mathbf{J} = \mathbf{X}_3 - 2\mathfrak{S} + 2\mathbf{R}_{\phi\theta}\mathfrak{S} \quad (40)$$

$$\mathbf{X}_4 = \begin{bmatrix} x_3 - 2l + 2l \cos \phi \cos \theta \\ y_3 + 2l \sin \phi \cos \theta \\ z_3 - 2l \sin \theta \end{bmatrix} \quad (41)$$

また，継手重心の速度は，式 (42)のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{J}} &= \dot{\mathbf{X}}_3 + \left(\dot{\mathbf{R}}_{\phi\theta} \mathbf{R}_{\phi\theta}^T \right) \mathbf{R}_{\phi\theta} \\ &= \begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\phi} & \dot{\theta} \cos \phi \\ \dot{\phi} & 0 & \dot{\theta} \sin \phi \\ -\dot{\theta} \cos \phi & -\dot{\theta} \sin \phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \\ \sin \phi \cos \theta & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \dot{\mathbf{J}} &= \begin{bmatrix} \dot{x}_3 - l\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta - l\dot{\theta} \cos \phi \sin \theta \\ \dot{y}_3 + l\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - l\dot{\theta} \sin \phi \sin \theta \\ \dot{z}_3 - l\dot{\theta} \cos \theta \end{bmatrix} \quad (42) \end{aligned}$$

同様にして，継手先端部の速度は，式(43)のようになる。

$$\dot{\mathbf{X}}_4 = \begin{bmatrix} \dot{x}_3 - 2l\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta - 2l\dot{\theta} \cos \phi \sin \theta \\ \dot{y}_3 + 2l\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - 2l\dot{\theta} \sin \phi \sin \theta \\ \dot{z}_3 - 2l\dot{\theta} \cos \theta \end{bmatrix} \quad (43)$$

ii) 運動エネルギーの導出

ラグランジュの運動方程式は，エネルギーを基にして機械的に計算できるもので，式(44)のようにして与えられる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_r} + \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial \dot{q}_r} = \sum F_r \quad (44)$$

ここに，

$$L = T - U$$

また，ポテンシャルエネルギーは，時間に依存しないので，式(44)は，式(45)のように展開できる。この式を用いて，各一般化座標の運動方程式を導出する。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_r} + \frac{\partial U}{\partial q_r} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_r} = \sum F_r \quad (45)$$

(運動エネルギー)

三次元継手の運動エネルギーは，継手部材の並進による運動エネルギーと回転による運動エネルギーの2種類が考慮され、次式で与えられる。

$$T = \frac{1}{2} m_p \dot{\mathbf{X}}_1^2 + \frac{1}{2} m_{ha} \dot{\mathbf{X}}_2^2 + \frac{1}{2} m_j \mathbf{J}^2 + \frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\omega}^2 + \frac{1}{2} m_{hb} \dot{\mathbf{X}}_5^2 \quad (46)$$

・継手部材の並進による運動エネルギー

$$\mathbf{J}^2 = \begin{bmatrix} \dot{x}_3 - l\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta - l\dot{\theta} \cos \phi \sin \theta \\ \dot{y}_3 + l\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - l\dot{\theta} \sin \phi \sin \theta \\ \dot{z}_3 - l\dot{\theta} \cos \theta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{x}_3 - l\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta - l\dot{\theta} \cos \phi \sin \theta \\ \dot{y}_3 + l\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - l\dot{\theta} \sin \phi \sin \theta \\ \dot{z}_3 - l\dot{\theta} \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{J}^2 &= \dot{x}_3^2 - 2\dot{x}_3 l\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta - 2\dot{x}_3 l\dot{\theta} \cos \phi \sin \theta \\ &\quad + \dot{y}_3^2 + 2\dot{y}_3 l\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - 2\dot{y}_3 l\dot{\theta} \sin \phi \sin \theta + \dot{z}_3^2 - 2\dot{z}_3 l\dot{\theta} \cos \theta \\ &\quad + l^2 \dot{\phi}^2 \cos^2 \theta + l^2 \dot{\theta}^2 \end{aligned} \quad (47)$$

各一般化座標 ($q_r = x_3, y_3, z_3, \phi, \theta, x_5, y_5, z_5$) についてまとめると以下ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_j \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{J}^2}{\partial \dot{x}_3} \right) &= m_j \ddot{x}_3 + 2m_j l \dot{\phi} \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta \\ &\quad - m_j l \ddot{\phi} \sin \phi \cos \theta - m_j l \dot{\phi}^2 \cos \phi \cos \theta \\ &\quad - m_j l \ddot{\theta} \cos \phi \sin \theta - m_j l \dot{\theta}^2 \cos \phi \cos \theta \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_j \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{J}^2}{\partial \dot{y}_3} \right) &= m_j \ddot{y}_3 - 2m_j l \dot{\phi} \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta \\ &\quad + m_j l \ddot{\phi} \cos \phi \cos \theta - m_j l \dot{\phi}^2 \sin \phi \cos \theta \\ &\quad - m_j l \ddot{\theta} \sin \phi \sin \theta - m_j l \dot{\theta}^2 \sin \phi \cos \theta \end{aligned} \quad (49)$$

$$\frac{1}{2}m_j \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{\mathcal{A}}^2}{\dot{\alpha}_3} \right) = m_j \ddot{z}_3 - m_j l \ddot{\theta} \cos \theta + m_j l \dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}m_j \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{\mathcal{A}}^2}{\dot{\phi}} \right) &= m_j l^2 \ddot{\phi} \cos^2 \theta - 2m_j l^2 \dot{\phi} \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta \\ &\quad - m_j \ddot{x}_3 l \sin \phi \cos \theta + m_j \ddot{y}_3 l \cos \phi \cos \theta \\ &\quad - m_j \dot{x}_3 l (\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta) \\ &\quad - m_j \dot{y}_3 l (\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta) \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}m_j \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{\mathcal{A}}^2}{\dot{\theta}} \right) &= m_j l^2 \ddot{\theta} \\ &\quad - m_j \ddot{x}_3 l \cos \phi \sin \theta - m_j \ddot{y}_3 l \sin \phi \sin \theta - m_j \ddot{z}_3 l \cos \theta \\ &\quad + m_j \dot{x}_3 l (\dot{\phi} \sin \phi \sin \theta - \dot{\theta} \cos \phi \cos \theta) \\ &\quad - m_j \dot{y}_3 l (\dot{\phi} \cos \phi \sin \theta + \dot{\theta} \sin \phi \cos \theta) \\ &\quad + m_j \dot{z}_3 l \dot{\theta} \sin \theta \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2}m_j \left(\frac{\dot{\mathcal{A}}^2}{\partial \phi} \right) &= m_j \dot{x}_3 l (\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta) \\ &\quad + m_j \dot{y}_3 l (\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta) \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2}m_j \left(\frac{\dot{\mathcal{A}}^2}{\partial \theta} \right) &= -m_j \dot{x}_3 l (\dot{\phi} \sin \phi \sin \theta - \dot{\theta} \cos \phi \cos \theta) \\ &\quad + m_j \dot{y}_3 l (\dot{\phi} \cos \phi \sin \theta + \dot{\theta} \sin \phi \cos \theta) \\ &\quad - m_j \dot{z}_3 l \dot{\theta} \sin \theta + m_j l^2 \dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (54)$$

式(51)と式 (52)をまとめると以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}m_j \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{\mathcal{A}}^2}{\dot{\phi}} \right) - \frac{1}{2}m_j \left(\frac{\dot{\mathcal{A}}^2}{\partial \phi} \right) &= m_j l^2 \ddot{\phi} \cos^2 \theta - 2m_j l^2 \dot{\phi} \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta \\ &\quad - m_j \ddot{x}_3 l \sin \phi \cos \theta + m_j \ddot{y}_3 l \cos \phi \cos \theta \end{aligned} \quad (55)$$

式(52)と式(54)をまとめると以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}m_j \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{\mathcal{A}}^2}{\dot{\theta}} \right) - \frac{1}{2}m_j \left(\frac{\dot{\mathcal{A}}^2}{\partial \theta} \right) &= m_j l^2 \ddot{\theta} + m_j l^2 \dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta \\ &\quad - m_j \ddot{x}_3 l \cos \phi \sin \theta - m_j \ddot{y}_3 l \sin \phi \sin \theta - m_j \ddot{z}_3 l \cos \theta \end{aligned} \quad (56)$$

継手部材の回転による運動エネルギー

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\omega}^2 &= \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{R}_{\phi\theta} \begin{bmatrix} A_{\xi\xi} & 0 & 0 \\ 0 & A_{\eta\eta} & 0 \\ 0 & 0 & A_{\zeta\zeta} \end{bmatrix} \mathbf{R}_{\phi\theta}^T \boldsymbol{\omega} \\
 &= \frac{1}{2} A_{\xi\xi} \dot{\phi}^2 \sin^2 \theta + \frac{1}{2} A_{\eta\eta} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} A_{\zeta\zeta} \dot{\phi}^2 \cos^2 \theta \\
 &= \frac{1}{2} (A_{\xi\xi} \sin^2 \theta + A_{\zeta\zeta} \cos^2 \theta) \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} A_{\eta\eta} \dot{\theta}^2 \quad (57)
 \end{aligned}$$

ここに， $\xi\xi$ - $\eta\eta$ - $\zeta\zeta$ は，慣性主軸である。

回転エネルギーは， ϕ ， θ のみに依存し，両者についてまとめると以下ようになる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\phi}} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\omega}^2 \right) \right) = (A_{\xi\xi} \sin^2 \theta + A_{\zeta\zeta} \cos^2 \theta) \ddot{\phi} + 2(A_{\xi\xi} - A_{\zeta\zeta}) \dot{\phi} \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta \quad (58)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\omega}^2 \right) \right) = A_{\eta\eta} \ddot{\theta} \quad (59)$$

$$-\frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\omega}^2 \right) = 0 \quad (60)$$

$$-\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\omega}^2 \right) = -(A_{\xi\xi} - A_{\zeta\zeta}) \dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta \quad (61)$$

式(58)と式 (59)をまとめると以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\phi}} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\omega}^2 \right) \right) - \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\omega}^2 \right) &= (A_{\xi\xi} \sin^2 \theta + A_{\zeta\zeta} \cos^2 \theta) \ddot{\phi} \\
 &\quad + 2(A_{\xi\xi} - A_{\zeta\zeta}) \dot{\phi} \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta
 \end{aligned}$$

式(59)と式 (61)をまとめると以下ようになる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\omega}^2 \right) \right) - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\omega}^2 \right) = A_{\eta\eta} \ddot{\theta} - (A_{\xi\xi} - A_{\zeta\zeta}) \dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta$$

(ポテンシャル(ひずみ)エネルギー)

ポテンシャルエネルギーは，次式で与えられる。

$$U = \frac{1}{2} k_{PH} (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1)^2 + \frac{1}{2} k_{BA} (\mathbf{X}_3 - \mathbf{X}_2)^2 + \frac{1}{2} k_{BB} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^2 + \frac{1}{2} k_{IB} (\mathbf{X}_6 - \mathbf{X}_5)^2 + m_j \mathbf{gZ} \quad (62)$$

(結合ばねによるポテンシャルエネルギー)

継手とハウジングBの結合ばねのポテンシャルエネルギーは，次のように与えられる。

$$\frac{1}{2} \mathbf{K}_{BJB} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^2 = \frac{1}{2} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^T \begin{bmatrix} k_{BJBx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{BJBy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{BJBz} \end{bmatrix} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4) \quad (63)$$

ここに,

$$(\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4) = \begin{bmatrix} x_5 - x_3 + 2l(1 - \cos \phi \cos \theta) \\ y_5 - y_3 - 2l \sin \phi \cos \theta \\ z_5 - z_3 + 2l \sin \theta \end{bmatrix}$$

従って,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \mathbf{K}_{BJB} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^2 \\ &= \frac{1}{2} k_{BJBx} \left\{ (x_5 - x_3)^2 + 4l(x_5 - x_3)(1 - \cos \phi \cos \theta) + 4l^2(1 - \cos \phi \cos \theta)^2 \right\} \\ &+ \frac{1}{2} k_{BJBy} \left\{ (y_5 - y_3)^2 - 4l(y_5 - y_3) \sin \phi \cos \theta + 4l^2 \sin^2 \phi \cos^2 \theta \right\} \\ &+ \frac{1}{2} k_{BJBz} \left\{ (z_5 - z_3)^2 + 4l(z_5 - z_3) \sin \theta + 4l^2 \sin^2 \theta \right\} \end{aligned} \quad (64)$$

各一般化座標 ($q_r = x_3, y_3, z_3, \phi, \theta, x_5, y_5, z_5$) をまとめると以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_3} (\mathbf{K}_{BJB} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^2) &= -k_{BJBx} \left\{ (x_5 - x_3) + 2l(1 - \cos \phi \cos \theta) \right\} \\ &= -k_{BJBx} (x_5 - x_4) \end{aligned} \quad (65)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y_3} (\mathbf{K}_{BJB} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^2) &= -k_{BJBy} \left\{ (y_5 - y_3) - 2l \sin \phi \cos \theta \right\} \\ &= -k_{BJBy} (y_5 - y_4) \end{aligned} \quad (66)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z_3} (\mathbf{K}_{BJB} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^2) &= -k_{BJBz} \left\{ (z_5 - z_3) - 2l \sin \theta \right\} \\ &= -k_{BJBz} (z_5 - z_4) \end{aligned} \quad (67)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\mathbf{K}_{BJB} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^2 \right) &= 2lk_{BJBx} \left\{ (x_5 - x_3) + 2l(1 - \cos \phi \cos \theta) \right\} \sin \phi \cos \theta \\ &\quad - 2lk_{BJBy} \left\{ (y_5 - y_3) - 2l \sin \phi \cos \theta \right\} \cos \phi \cos \theta \end{aligned} \quad (68)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\mathbf{K}_{BJB} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^2 \right) &= 2lk_{BJBx} \left\{ (x_5 - x_3) + 2l(1 - \cos \phi \cos \theta) \right\} \cos \phi \sin \theta \\ &\quad + 2lk_{BJBy} \left\{ (y_5 - y_3) - 2l \sin \phi \cos \theta \right\} \sin \phi \sin \theta \\ &\quad + 2lk_{BJBz} \left\{ (z_5 - z_3) + 2l \sin \theta \right\} \cos \theta \end{aligned} \quad (69)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_5} \left(\mathbf{K}_{BJB} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^2 \right) &= k_{BJBx} \left\{ (x_5 - x_3) + 2l(1 - \cos \phi \cos \theta) \right\} \\ &= k_{BJBx} (x_5 - x_4) \end{aligned} \quad (70)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y_5} \left(\mathbf{K}_{BJB} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^2 \right) &= k_{BJBy} \left\{ (y_5 - y_3) - 2l \sin \phi \cos \theta \right\} \\ &= k_{BJBy} (y_5 - y_4) \end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z_5} \left(\mathbf{K}_{BJB} (\mathbf{X}_5 - \mathbf{X}_4)^2 \right) &= k_{BJBz} \left\{ (z_5 - z_3) - 2l \sin \theta \right\} \\ &= k_{BJBz} (z_5 - z_4) \end{aligned} \quad (72)$$

(重力によるポテンシャルエネルギー)

重力によるポテンシャルエネルギーは，水平加振機と垂直加振機とで重力の作用する方向が異なり，各々についてまとめると以下ようになる。

水平加振機モデルの場合

Z軸方向に重力が作用するのでポテンシャルエネルギーは，以下ようになる。

$$m_j \mathbf{g}_v \mathbf{Z} = m_j \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_3 - l + l \cos \phi \cos \theta \\ y_3 + l \sin \phi \cos \theta \\ z_3 - l \sin \theta \end{bmatrix} = -m_j g (z_3 - l \sin \theta) \quad (73)$$

$$\frac{\partial}{\partial z_3} (m_j \mathbf{g}_v \mathbf{Z}) = -m_j g \quad (74)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (m_j \mathbf{g}_v \mathbf{Z}) = m_j g l \cos \theta \quad (75)$$

垂直加振機モデルの場合

X 軸方向に重力が作用するのでポテンシャルエネルギーは，以下ようになる。

$$m_j \mathbf{g}_h \mathbf{Z} = m_j \begin{bmatrix} -g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_3 - l + l \cos \phi \cos \theta \\ y_3 + l \sin \phi \cos \theta \\ z_3 - l \sin \theta \end{bmatrix} = -m_j g (x_3 - l + l \cos \phi \cos \theta) \quad (76)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_3} (m_j \mathbf{g}_h \mathbf{Z}) = -m_j g \quad (77)$$

$$\frac{\partial}{\partial \phi} (m_j \mathbf{g}_h \mathbf{Z}) = m_j g l \sin \phi \cos \theta \quad (78)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (m_j \mathbf{g}_h \mathbf{Z}) = m_j g l \cos \phi \sin \theta \quad (79)$$

(消散エネルギー)

消散エネルギーは，次式で与えられる。

$$D = \frac{1}{2} B_{PH} (\dot{\mathbf{X}}_2 - \dot{\mathbf{X}}_1)^2 + \frac{1}{2} B_{BA} (\dot{\mathbf{X}}_3 - \dot{\mathbf{X}}_2)^2 + \frac{1}{2} B_{BB} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^2 + \frac{1}{2} B_{hB} (\dot{\mathbf{X}}_6 - \dot{\mathbf{X}}_5)^2 \quad (80)$$

継ぎ手とハウジング B の結合ダンパによる消散エネルギーは，次のようになる。

$$\frac{1}{2} \mathbf{B}_{BB} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^2 = \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^T \begin{bmatrix} B_{BBx} & 0 & 0 \\ 0 & B_{BB_y} & 0 \\ 0 & 0 & B_{BB_z} \end{bmatrix} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4) \quad (81)$$

ここに，

$$(\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4) = \begin{bmatrix} \dot{x}_5 - \dot{x}_3 + 2l(\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta) \\ \dot{y}_5 - \dot{y}_3 - 2l(\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta) \\ \dot{z}_5 - \dot{z}_3 + 2l\dot{\theta} \cos \theta \end{bmatrix}$$

従って，

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \mathbf{B}_{BJB} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^2 \\
&= \frac{1}{2} \mathbf{B}_{BJBx} \left\{ (\dot{x}_5 - \dot{x}_3)^2 + 4l(\dot{x}_5 - \dot{x}_3)(\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta) \right. \\
&\quad \left. + 4l^2 (\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta)^2 \right\} \\
&\quad + \frac{1}{2} \mathbf{B}_{BJBy} \left\{ (\dot{y}_5 - \dot{y}_3)^2 - 4l(\dot{y}_5 - \dot{y}_3)(\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta) \right. \\
&\quad \left. + 4l^2 (\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta)^2 \right\} \\
&\quad + \frac{1}{2} \mathbf{B}_{BJBz} \left\{ (\dot{z}_5 - \dot{z}_3)^2 + 4l(\dot{z}_5 - \dot{z}_3)\dot{\theta} \cos \theta + 4l^2 \dot{\theta}^2 \cos^2 \theta \right\} \tag{82}
\end{aligned}$$

各一般化座標 ($q_r = x_3, y_3, z_3, \phi, \theta, x_5, y_5, z_5$) をまとめると以下のようなになる。

$$\begin{aligned}
\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{x}_3} (\mathbf{B}_{BJB} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^2) &= -\mathbf{B}_{BJBx} \{ (\dot{x}_5 - \dot{x}_3) + 2l(\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta) \} \\
&= -\mathbf{B}_{BJBx} (\dot{x}_5 - \dot{x}_4) \tag{83}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{y}_3} (\mathbf{B}_{BJB} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^2) &= -\mathbf{B}_{BJBy} \{ (\dot{y}_5 - \dot{y}_3) - 2l(\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta) \} \\
&= -\mathbf{B}_{BJBy} (\dot{y}_5 - \dot{y}_4) \tag{84}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{z}_3} (\mathbf{B}_{BJB} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^2) &= -\mathbf{B}_{BJBz} \{ (\dot{z}_5 - \dot{z}_3) + 2l\dot{\theta} \cos \theta \} \\
&= -\mathbf{B}_{BJBz} (\dot{z}_5 - \dot{z}_4) \tag{85}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{\phi}} (\mathbf{B}_{BJB} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^2) \\
&= 2l \mathbf{B}_{BJBx} \{ (\dot{x}_5 - \dot{x}_3) + 2l(\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta) \} \sin \phi \cos \theta \\
&\quad - 2l \mathbf{B}_{BJBy} \{ (\dot{y}_5 - \dot{y}_3) - 2l(\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta) \} \cos \phi \cos \theta \tag{86}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} (\mathbf{B}_{BJB} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^2) \\
&= 2l \mathbf{B}_{BJBx} \{ (\dot{x}_5 - \dot{x}_3) + 2l(\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta) \} \cos \phi \sin \theta \\
&\quad + 2l \mathbf{B}_{BJBy} \{ (\dot{y}_5 - \dot{y}_3) - 2l(\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta) \} \sin \phi \sin \theta \\
&\quad + 2l \mathbf{B}_{BJBz} \{ (\dot{z}_5 - \dot{z}_3) + 2l\dot{\theta} \cos \theta \} \cos \theta \tag{87}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{x}_5} \left(\mathbf{B}_{BJB} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^2 \right) &= B_{BJBx} \left\{ (\dot{x}_5 - \dot{x}_3) + 2l(\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta) \right\} \\ &= B_{BJBx} (\dot{x}_5 - \dot{x}_4)\end{aligned}\quad (88)$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{y}_5} \left(\mathbf{B}_{BJB} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^2 \right) &= B_{BJBy} \left\{ (\dot{y}_5 - \dot{y}_3) - 2l(\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta) \right\} \\ &= B_{BJBy} (\dot{y}_5 - \dot{y}_4)\end{aligned}\quad (89)$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{z}_5} \left(\mathbf{B}_{BJB} (\dot{\mathbf{X}}_5 - \dot{\mathbf{X}}_4)^2 \right) &= B_{BJBz} \left\{ (\dot{z}_5 - \dot{z}_3) + 2l\dot{\theta} \cos \theta \right\} \\ &= B_{BJBz} (\dot{z}_5 - \dot{z}_4)\end{aligned}\quad (90)$$

(運動方程式の定式化)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_r} + \frac{\partial \mathcal{U}}{\partial q_r} + \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial \dot{q}_r} = \sum F_{q_r}$$

ラグランジュの運動方程式に基づき，運動エネルギー，ポテンシャルエネルギー，消散エネルギー全ての項について，各一般化座標の運動方程式をまとめると以下のようになる。

一般化座標 $(q_r = x_1)$ について，

$$F + k_{PH}(x_2 - x_1) + B_{PH}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = m_p \ddot{x}_1 \quad (91)$$

一般化座標 $(q_r = x_2)$ について，

$$F + k_{BJA}(x_3 - x_2) + B_{BJA}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - k_{PH}(x_2 - x_1) - B_{PH}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = m_{hA} \ddot{x}_2 \quad (92)$$

一般化座標 $(q_r = x_3)$ について，

$$\begin{aligned}m_j \ddot{x}_3 &= m_j l \ddot{\phi} \sin \phi \cos \theta + m_j l \dot{\phi}^2 \cos \phi \cos \theta \\ &\quad + m_j l \ddot{\theta} \cos \phi \sin \theta + m_j l \dot{\theta}^2 \cos \phi \cos \theta \\ &\quad - 2m_j l \dot{\phi} \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta \\ &\quad - k_{BJAx}(x_3 - x_2) - B_{BJAx}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) \\ &\quad + k_{BJBx}(x_5 - x_4) + B_{BJBx}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4)\end{aligned}\quad (93)$$

一般化座標 $(q_r = y_3)$ について ,

$$\begin{aligned}
m_j \ddot{y}_3 &= -m_j l \ddot{\phi} \cos \phi \cos \theta + m_j l \dot{\phi}^2 \sin \phi \cos \theta \\
&\quad + m_j l \ddot{\theta} \sin \phi \sin \theta + m_j l \dot{\theta}^2 \sin \phi \cos \theta \\
&\quad + 2m_j l \dot{\phi} \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta \\
&\quad - k_{BJAy} (y_3 - y_2) - B_{BJAy} (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) \\
&\quad + k_{BJBy} (y_5 - y_4) + B_{BJBy} (\dot{y}_5 - \dot{y}_4)
\end{aligned} \tag{94}$$

一般化座標 $(q_r = z_3)$ について ,

$$\begin{aligned}
m_j \ddot{z}_3 &= +m_j l \ddot{\theta} \cos \theta - m_j l \dot{\theta}^2 \sin \theta \\
&\quad - k_{BJAz} (z_3 - z_2) - B_{BJAz} (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) \\
&\quad + k_{BJBz} (z_5 - z_4) + B_{BJBz} (\dot{z}_5 - \dot{z}_4)
\end{aligned} \tag{95}$$

一般化座標 $(q_r = \phi)$ について ,

$$\begin{aligned}
&(m_j l^2 \cos^2 \theta + A_{\xi\xi} \sin^2 \theta + A_{\zeta\zeta} \cos^2 \theta) \ddot{\phi} \\
&= 2(m_j l^2 - A_{\xi\xi} + A_{\zeta\zeta}) \dot{\phi} \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta \\
&\quad + m_j \ddot{x}_3 l \sin \phi \cos \theta - m_j \ddot{y}_3 l \cos \phi \cos \theta \\
&\quad - 2lk_{BJBx} \{(x_5 - x_3) + 2l(1 - \cos \phi \cos \theta)\} \sin \phi \cos \theta \\
&\quad + 2lk_{BJBy} \{(y_5 - y_3) - 2l \sin \phi \cos \theta\} \cos \phi \cos \theta \\
&\quad - 2lB_{BJBx} \{(\dot{x}_5 - \dot{x}_3) + 2l(\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta)\} \sin \phi \cos \theta \\
&\quad + 2lB_{BJBy} \{(\dot{y}_5 - \dot{y}_3) - 2l(\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta)\} \cos \phi \cos \theta
\end{aligned} \tag{96}$$

一般化座標 $(q_r = \theta)$ について,

$$\begin{aligned}
& (m_j l^2 + A_{\eta\eta}) \ddot{\theta} \\
&= -(m_j l^2 - A_{\xi\xi} + A_{\zeta\zeta}) \dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta \\
&+ m_j \ddot{x}_3 l \cos \phi \sin \theta + m_j \ddot{y}_3 l \sin \phi \sin \theta + m_j \ddot{z}_3 l \cos \theta \\
&- 2lk_{BJBx} \left\{ (x_5 - x_3) + 2l(1 - \cos \phi \cos \theta) \right\} \cos \phi \sin \theta \\
&- 2lk_{BJBy} \left\{ (y_5 - y_3) - 2l \sin \phi \cos \theta \right\} \sin \phi \sin \theta \\
&- 2lk_{BJBz} \left\{ (z_5 - z_3) + 2l \sin \theta \right\} \cos \theta \\
&- 2lB_{BJBx} \left\{ (\dot{x}_5 - \dot{x}_3) + 2l(\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \phi \sin \theta) \right\} \cos \phi \sin \theta \\
&- 2lB_{BJBy} \left\{ (\dot{y}_5 - \dot{y}_3) - 2l(\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta) \right\} \sin \phi \sin \theta \\
&- 2lB_{BJBz} \left\{ (\dot{z}_5 - \dot{z}_3) + 2l\dot{\theta} \cos \theta \right\} \cos \theta
\end{aligned} \tag{97}$$

一般化座標 $(q_r = x_5)$ について,

$$m_{hb} \ddot{x}_5 = -k_{BJBx}(x_5 - x_4) + k_{hBx}(x_6 - x_5) - B_{BJBx}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) + B_{hBx}(\dot{x}_6 - \dot{x}_5) \tag{98}$$

一般化座標 $(q_r = y_5)$ について,

$$m_{hb} \ddot{y}_5 = -k_{BJBy}(y_5 - y_4) + k_{hBy}(y_6 - y_5) - B_{BJBy}(\dot{y}_5 - \dot{y}_4) + B_{hBy}(\dot{y}_6 - \dot{y}_5) \tag{99}$$

一般化座標 $(q_r = z_5)$ について,

$$m_{hb} \ddot{z}_5 = -k_{BJBz}(z_5 - z_4) + k_{hBz}(z_6 - z_5) - B_{BJBz}(\dot{z}_5 - \dot{z}_4) + B_{hBz}(\dot{z}_6 - \dot{z}_5) \tag{100}$$

簡略化モデル (= ピンジョイントーリンクモデル)

ピンジョイントーリンクモデルは、以下のように簡略化した。

- ハウジング A とハウジング B を省く。
- ピストンと継手を直結する。
- 継手と震動台をばね - ダンパで結合する。ばね定数, 減衰定数は, 線形化する。
- ピストンの質量に, ハウジング A の質量と継手の質量を含める。

従って，式 (93)の運動方程式が以下のように変更される。

$$\begin{aligned}
 (m_p + m_{ha} + m_j)\ddot{x}_3 &= m_j l \ddot{\phi} \sin \phi \cos \theta + m_j l \dot{\phi}^2 \cos \phi \cos \theta \\
 &\quad + m_j l \ddot{\theta} \cos \phi \sin \theta + m_j l \dot{\theta}^2 \cos \phi \cos \theta \\
 &\quad - 2m_j l \dot{\phi} \dot{\theta} \sin \phi \sin \theta \\
 &\quad + k_{BJBx}(x_5 - x_4) + B_{BJBx}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) \\
 &\quad + F
 \end{aligned} \tag{101}$$

テーブル

震動台テーブルは、剛体として質点要素と仮定する。質点は、テーブル質量と慣性モーメントを有する。図 22 にモデル概念を示す。

表 11 震動台テーブル機構の定義

記号	意味	諸元値・初期値	単位
<u>震動台テーブル</u>			
m	震動台テーブル質量	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">ユーザーからの入力値</div>	$[kgf \cdot sec^2/cm]$
I_x, I_y, I_z	震動台テーブル回転慣性モーメント		$\left[\frac{kgf \cdot sec^2 \cdot cm^2}{cm} \right]$
L_{x_n}	X方向加振機の震動台重心からの距離 (n: 加振機番号)		[cm]
L_{y_n}	Y方向加振機の震動台重心からの距離 (n: 加振機番号)		[cm]
L_{z_n}	Z方向加振機の震動台重心からの距離 (n: 加振機番号)		[cm]
$\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$	震動台並進方向加速度		[cm/sec ²]
$\ddot{\theta}_x, \ddot{\theta}_y, \ddot{\theta}_z$	震動台回転角加速度		[rad/sec ²]
$F_{x_n} \times$	X方向加振機からの加振力		[kgf]
$F_{y_n} \times$	Y方向加振機からの加振力		[kgf]
$F_{z_n} \times$	Z方向加振機からの加振力		[kgf]

質点の運動方程式は下記の通りとなる。

$$m\ddot{x} = \sum_{n=1}^5 Fx_x x + \sum_{n=1}^5 Fy_n x + \sum_{n=1}^{14} Fz_n x$$

$$m\ddot{y} = \sum_{n=1}^5 Fx_x y + \sum_{n=1}^5 Fy_n y + \sum_{n=1}^{14} Fz_n y$$

$$m\ddot{z} = \sum_{n=1}^5 Fx_x z + \sum_{n=1}^5 Fy_n z + \sum_{n=1}^{14} Fz_n z$$

$$Ix\ddot{\theta}_x = -\sum_{n=1}^2 Fx_x z \cdot Lx_n + \sum_{n=4}^5 Fx_n z \cdot Lx_n - \sum_{n=1}^5 Fy_n z \cdot Ly_n$$

$$- Fz_1 z \cdot Lz_1 - Fz_2 z \cdot Lz_2 - Fz_{11} z \cdot Lz_{11} - Fz_{12} z \cdot Lz_{12} - Fz_{13} z \cdot Lz_{13} - Fz_{14} z \cdot Lz_{14}$$

$$+ Fz_4 z \cdot Lz_4 + Fz_5 z \cdot Lz_5 + Fz_6 z \cdot Lz_6 + Fz_7 z \cdot Lz_7 + Fz_8 z \cdot Lz_8 + Fz_9 z \cdot Lz_9$$

$$Iy\ddot{\theta}_y = \sum_{n=1}^5 Fx_x z \cdot Lx_n + \sum_{n=1}^2 Fy_n z \cdot Ly_n - \sum_{n=4}^5 Fy_n z \cdot Ly_n$$

$$+ Fz_1 z \cdot Lz_1 + Fz_2 z \cdot Lz_2 + Fz_3 z \cdot Lz_3 + Fz_4 z \cdot Lz_4 + Fz_5 z \cdot Lz_5 + Fz_6 z \cdot Lz_6 + Fz_{14} z \cdot Lz_{14}$$

$$- Fz_7 z \cdot Lz_7 - Fz_8 z \cdot Lz_8 - Fz_9 z \cdot Lz_9 - Fz_{10} z \cdot Lz_{10} - Fz_{11} z \cdot Lz_{11} - Fz_{12} z \cdot Lz_{12} - Fz_{13} z \cdot Lz_{13}$$

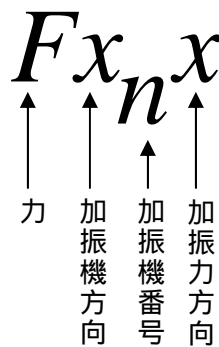
$$Iz\ddot{\theta}_z = \sum_{n=1}^2 Fx_x x \cdot Lx_n - \sum_{n=4}^5 Fx_n x \cdot Lx_n - \sum_{n=1}^5 Fx_n y \cdot Lx_n - \sum_{n=1}^2 Fy_n y \cdot Ly_n + \sum_{n=4}^5 Fy_n y \cdot Ly_n + \sum_{n=1}^5 Fy_n x \cdot Ly_n$$

$$+ Fz_1 x \cdot Lz_1 + Fz_2 x \cdot Lz_2 + Fz_{11} x \cdot Lz_{11} + Fz_{12} x \cdot Lz_{12} + Fz_{13} x \cdot Lz_{13} + Fz_{14} x \cdot Lz_{14}$$

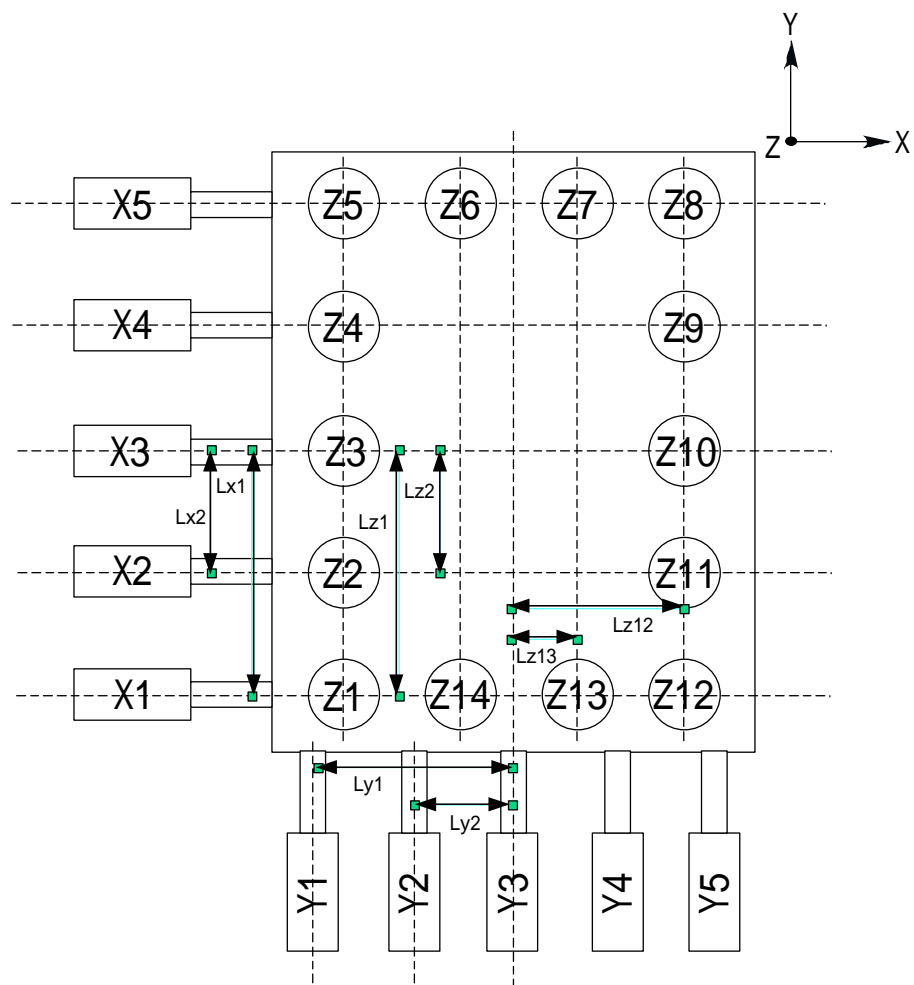
$$- Fz_4 x \cdot Lz_4 - Fz_5 x \cdot Lz_5 - Fz_6 x \cdot Lz_6 - Fz_7 x \cdot Lz_7 - Fz_8 x \cdot Lz_8 - Fz_9 x \cdot Lz_9$$

$$- Fz_1 y \cdot Lz_1 - Fz_2 y \cdot Lz_2 - Fz_3 y \cdot Lz_3 - Fz_4 y \cdot Lz_4 - Fz_5 y \cdot Lz_5 - Fz_6 y \cdot Lz_6 - Fz_{14} y \cdot Lz_{14}$$

$$+ Fz_7 y \cdot Lz_7 + Fz_8 y \cdot Lz_8 + Fz_9 y \cdot Lz_9 + Fz_{10} y \cdot Lz_{10} + Fz_{11} y \cdot Lz_{11} + Fz_{12} y \cdot Lz_{12} + Fz_{13} y \cdot Lz_{13}$$



震動台テーブル



m	テーブル質量
I_x	震動台テーブル回転慣性モーメント
I_y	
I_z	
L_{xn}	X方向加振機の震動台重心からの距離 (n : 加振機番号)
L_{yn}	Y方向加振機の震動台重心からの距離 (n : 加振機番号)
L_{zn}	Z方向加振機の震動台重心からの距離 (n : 加振機番号)

図 22 震動台テーブルのモデル化概念

c) 試験体系モデルの定式化

試験体は、最大6質点のバネ - 質点系で構築し、シミュレーション計算時にユーザーが任意の質量、層間距離などの試験体情報を付与する。図 23 にモデル概念を示す。

表 12 試験体モデルの記号定義

記号	意味	諸元値・初期値	単位
<u>試験体系モデル</u>			
m_n	質点質量 (n: 質点番号)	} ユーザーからの入力値	} $\left[\frac{\text{kgf} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{cm}}{\text{cm}} \right]$
I_{xn}, I_{yn}, I_{zn}	質点回転慣性モーメント (n: 質点番号)		
$\ddot{z}_n, \dot{z}_n, z_n$	質点加速度・速度・変位		
$\ddot{\theta}_{x_n}, \dot{\theta}_{x_n}, \theta_{x_n}$	質点回転角加速度・角速度・角変位	} ユーザーからの入力値	$[\text{cm}/\text{sec}^2]$
			$[\text{cm}/\text{sec}]$
			$[\text{cm}]$
			$[\text{rad}/\text{sec}^2]$
c_n	質点間並進方向減衰定数	} ユーザーからの入力値	$[\text{kgf} \cdot \text{sec}/\text{cm}]$
k_n	質点間並進方向剛性		$[\text{kgf}/\text{cm}]$
$c_{\theta_{xn}}$	質点間回転方向減衰定数		$[\text{kgf} \cdot \text{sec} \cdot \text{cm}/\text{rad}]$
	質点間回転方向剛性		$[\text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{rad}]$

これら試験体の運動方程式は、下式となる (並進 1 方向、回転 1 方向の代表のみ記述)。

並進方向

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \dot{z}_1 + c_2 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_1 z_1 + k_2 (z_1 - z_2) &= -m_0 \ddot{z}_g \\
 m_2 \ddot{z}_2 + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_3 (\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + k_2 (z_2 - z_1) + k_3 (z_2 - z_3) &= 0 \\
 m_3 \ddot{z}_3 + c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + c_4 (\dot{z}_3 - \dot{z}_4) + k_3 (z_3 - z_2) + k_4 (z_3 - z_4) &= 0 \\
 m_4 \ddot{z}_4 + c_4 (\dot{z}_4 - \dot{z}_3) + c_5 (\dot{z}_4 - \dot{z}_5) + k_4 (z_4 - z_3) + k_5 (z_4 - z_5) &= 0 \\
 m_5 \ddot{z}_5 + c_5 (\dot{z}_5 - \dot{z}_4) + c_6 (\dot{z}_5 - \dot{z}_6) + k_5 (z_5 - z_4) + k_6 (z_5 - z_6) &= 0 \\
 m_6 \ddot{z}_6 + c_6 \dot{z}_6 + k_6 z_6 &= 0
 \end{aligned}$$

回転方向

$$\begin{aligned}I_{x_1} \ddot{\theta}_{x_1} + c\theta_{x_1} \dot{\theta}_{x_1} + c\theta_{x_2} (\dot{\theta}_{x_1} - \dot{\theta}_{x_2}) + k\theta_{x_1} \theta_{x_1} + k\theta_{x_2} (\theta_{x_1} - \theta_{x_2}) &= -I_0 \ddot{\theta}_{x_g} \\I_{x_2} \ddot{\theta}_{x_2} + c\theta_{x_2} (\dot{\theta}_{x_2} - \dot{\theta}_{x_1}) + c\theta_{x_3} (\dot{\theta}_{x_2} - \dot{\theta}_{x_3}) + k\theta_{x_2} (\theta_{x_2} - \theta_{x_1}) + k\theta_{x_3} (\theta_{x_2} - \theta_{x_3}) &= 0 \\I_{x_3} \ddot{\theta}_{x_3} + c\theta_{x_3} (\dot{\theta}_{x_3} - \dot{\theta}_{x_2}) + c\theta_{x_4} (\dot{\theta}_{x_3} - \dot{\theta}_{x_4}) + k\theta_{x_3} (\theta_{x_3} - \theta_{x_2}) + k\theta_{x_4} (\theta_{x_3} - \theta_{x_4}) &= 0 \\I_{x_4} \ddot{\theta}_{x_4} + c\theta_{x_4} (\dot{\theta}_{x_4} - \dot{\theta}_{x_3}) + c\theta_{x_5} (\dot{\theta}_{x_4} - \dot{\theta}_{x_5}) + k\theta_{x_4} (\theta_{x_4} - \theta_{x_3}) + k\theta_{x_5} (\theta_{x_4} - \theta_{x_5}) &= 0 \\I_{x_5} \ddot{\theta}_{x_5} + c\theta_{x_5} (\dot{\theta}_{x_5} - \dot{\theta}_{x_4}) + c\theta_{x_6} (\dot{\theta}_{x_5} - \dot{\theta}_{x_6}) + k\theta_{x_5} (\theta_{x_5} - \theta_{x_4}) + k\theta_{x_6} (\theta_{x_5} - \theta_{x_6}) &= 0 \\I_{x_6} \ddot{\theta}_{x_6} + c\theta_{x_6} \dot{\theta}_{x_6} + k\theta_{x_6} \theta_{x_6} &= 0\end{aligned}$$

試験体復元力特性が非線形になる場合は、上記運動方程式の減衰項 C と復元力項 K が

- イ) バイリニアモデル
- ロ) トリリニアモデル

となる。これら非線形の復元力特性の詳細については、図 24～図 25 に示す。なお、トリリニアモデルについては、図 25 に具体的な例を示したが、このうち必要とすべき 1 ケースを抽出して実施する。この抽出については、実構築時までに取り決める。

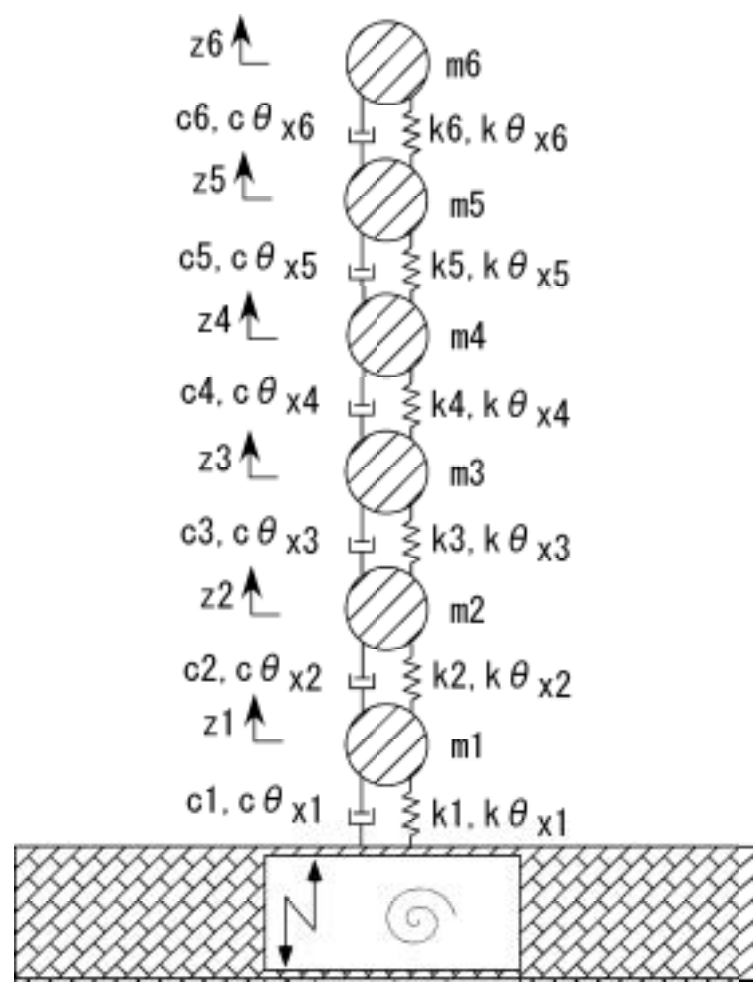


図 23 試験体のモデル化概念

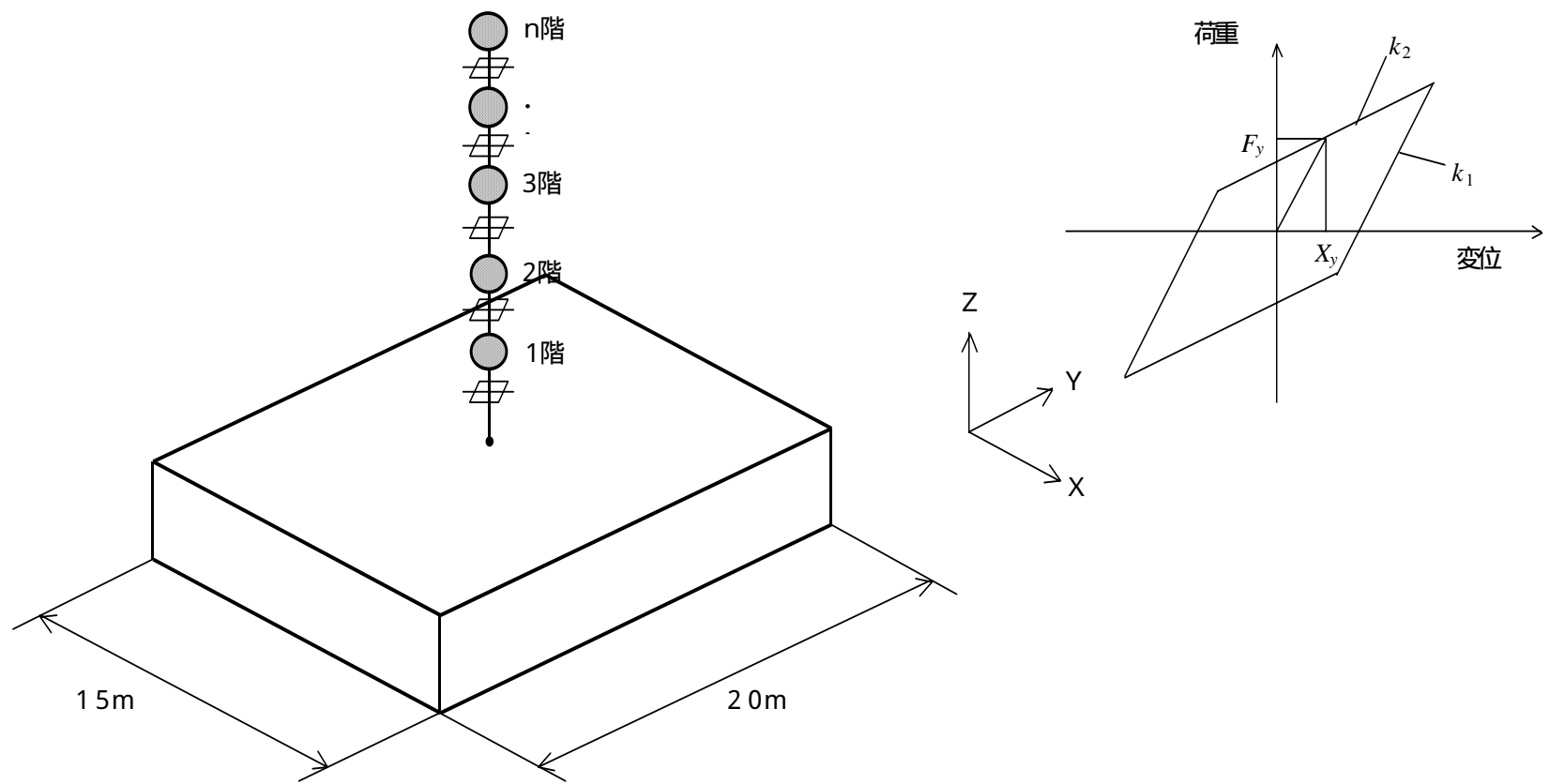


図 24 試験体非線形(バイリニア)モデルの概要

種類	ヒステリシスループ	h_{rc}	解の種類	η_{res}^2	$N = \eta^2 - 1$
トライ リニア 1			$\frac{2}{\pi} \frac{y_0 - 1}{y_0}$	K-B $(\theta - 0.5 \sin 2\theta) \cdot \pi$ E-L $1 \cdot y_0 (= \kappa^2)$	
			(注) $\cos \theta = 1 - 2 \cdot y_0, 1 \leq y_0 \leq 1/\mu$		
			$\frac{1}{2\pi} (1 - \mu) \left(1 - \frac{1}{\mu y_0}\right)^2$	K-B $\mu + [\theta_1 - 0.5 \sin 2\theta_1 - \mu(\theta_2 - 0.5 \sin 2\theta_2)] \cdot \pi$ E-L $\mu (= \kappa^2)$	
			(注) $\cos \theta_1 = 1 - \mu - 1/\mu, \cos \theta_2 = -1/\mu y_0, 1/\mu \leq y_0$		
トライ リニア 2			$\frac{2}{\pi} \frac{y_0 - 1}{y_0}$	K-B $(\theta - 0.5 \sin 2\theta) \cdot \pi$ E-L $1 \cdot y_0 (= \kappa^2)$	Kryloff-Bogoriabeff $\eta_{res}^2 - 1$ $= \sqrt{\left(\frac{L}{y_0}\right)^2 - (2\kappa^2 \eta_{res})^2}$ 2-階級 $\kappa^2 - 1$ $= \sqrt{\left(\frac{L}{y_0}\right)^2 - (2\kappa^2 \eta_{res})^2}$
			(注) $\cos \theta = 1 - 2 \cdot y_0, 1 \leq y_0 \leq 0.5(1 - 1/\mu)$		
			$\frac{1}{2\pi} \frac{\mu(4y_0 - 3) - 1}{\mu y_0}$	K-B $[(1 - \mu)(\theta_1 - 0.5 \sin 2\theta_1) + \mu(\theta_2 - 0.5 \sin 2\theta_2)] \cdot \pi$ E-L $1 \cdot y_0 (= \kappa^2)$	
			(注) $\cos \theta_1 = 1 - 1/\mu, \cos \theta_2 = 1 - 1/\mu - 1/\mu y_0, 0.5(1 + 1/\mu) \leq y_0$		
トライ リニア 3			$\frac{1}{2\pi} \frac{3 - \mu(2 - y_0)}{1 - \mu} \frac{y_0 - 1}{y_0}$	K-B $[(1 - \mu)(\theta_1 - 0.5 \sin 2\theta_1 - \theta_2 + 0.5 \sin 2\theta_2) + \theta_2 - 0.5 \sin 2\theta_2] \cdot \pi$ E-L $1 \cdot y_0 (= \kappa^2)$	
			(注) $\cos \theta_1 = (2y_0 - 3 + \mu) \cdot 2(1 - \mu) y_0, \cos \theta_2 = -1 \cdot 2y_0, \cos \theta_3 = -1 \cdot y_0, 1 \leq y_0 \leq 0.5(1 + 1/\mu)$		
			$\frac{1}{2\pi} \frac{\mu(4y_0 - 3) - 1}{\mu y_0}$	K-B $[(1 - \mu)(\theta_1 - 0.5 \sin 2\theta_1) + \mu(\theta_2 - 0.5 \sin 2\theta_2)] \cdot \pi$ E-L $1 \cdot y_0 (= \kappa^2)$	
			(注) $\cos \theta_1 = 1 - 1/\mu, \cos \theta_2 = 1 - 1/\mu - 1/\mu y_0, 0.5(1 + 1/\mu) \leq y_0$		
トライ リニア 4			$\frac{2}{\pi} \frac{1 - \mu}{1 - \mu(y_0 - 1)} \frac{y_0 - 1}{y_0}$	K-B $\mu + (1 - \mu)(\theta - 0.5 \sin 2\theta) \cdot \pi$ E-L $[1 - \mu(y_0 - 1)] \cdot y_0 (= \kappa^2)$	
			(注) $\cos \theta = 1 - 2 \cdot y_0, 1 \leq y_0 \leq 1 - 1/\mu$		
			$\frac{1}{\pi} \frac{\mu(2y_0 - 3) - 1}{\mu y_0}$	K-B $[(1 - \mu)(\theta_1 - 0.5 \sin 2\theta_1) + \mu(\theta_2 - 0.5 \sin 2\theta_2)] \cdot \pi$ E-L $2 \cdot y_0 (= \kappa^2)$	

図 25 代表的なトリリニア特性

(d) 結論ならびに今後の課題

- 1) 平成 14 年度の目的とした「システムの全体構想の取り纏め」、「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」が達成できた。今後は、実構築に向け必要なダイナミクスの定式化を進めるとともに、ここで取り纏めた個々の項目のプログラム化に着手する。
- 2) ユーザー（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を整備することが課題として挙げられる。

(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、井出和成、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

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2)口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
なし			

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標語等の策定

名称	機能
なし	

(3) 平成 15 年度業務計画案

15 年度は、実構築に向けて必要なダイナミクスの定式化を進めるとともに、14 年度に纏めた個々の項目のプログラム化に着手する。また、ユーザー（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に着手する。

(a) 全体設計に着手する。ここでは、14 年度に実施した全体計画検討をベースに、システムを計算システム本体と震動台モデルに分け詳細仕様を検討する。

- 1) 計算システム本体では、各モジュールに対して適用するツールを決めるための調査とその検証を実施する。また、各モジュールの必要変数およびデータの構成について

て仕様を明確にする。

- 2) 震動台モデルでは、各モジュールに対して適用するツールを決めるための調査とその検証を実施する。また、加振制御系、加振機構系、試験体のダイナミクス定式化に必要な具体的なパラメータおよびデータ構成について仕様を明確にする。

(b) 計算システム本体の詳細機能設計およびシステム構築に着手する。ここでは、詳細機能設計、GUI 設計、GUI システム構築を実施する。

- 1) 詳細機能設計では、14 年度実施した、パラメータ設定フロー、シミュレーションフロー、システム管理フロー、データフローをもとに、必要なサブプログラムを設計する。
- 2) GUI 設計では、メインメニュー、ユーザー管理ツール、加振データ作成、シミュレーション、結果表示、終了までのメニュー構成画面等の GUI 部分について検討し設計を行う。
- 3) GUI システム構築では、GUI 設計で決めた画面設計をベースに、全体設計で決めた開発ツールを用いて実構築を実施する。

(c) 震動台モデルの詳細設計および構築に着手する。ここでは、震動台モデルに関わる部分の詳細設計とその GUI 構築を実施する。

- 1) 詳細設計では、項目をダイナミクスの定式化と GUI 設計の 2 つとし、ダイナミクスの定式化では 14 年度に検討した内容を基に、加振制御系モデル、加振機構系モデル、試験体モデルに必要なダイナミクスを定式化する。また、GUI 設計では、モデルの定式化を確認するためのユーザー用 GUI 画面と試験体条件などを設定するための GUI 画面等を設計する。
- 2) GUI 構築では、モデルの詳細設計で決めた内容をベースに、全体設計で決めた開発ツールを用いて実構築を実施する。