

# WEC-Sim

## ユーザー・マニュアル

Version1.0

2014年6月30日

翻訳：佐賀大学海洋エネルギー研究センター 今井康貴、小柳喜見子

# 1章 まえがき

WEC-Sim(Wave Energy Converter SIMulator)はオープンソースの波力エネルギー変換(WEC)シミュレーションツールである。コードは、多体運動ソルバ SimMechanics を使用する MATLAB と Simulink で開発された。WEC-Sim は、剛体、動力取出し(PTO)システムおよび係留方式で構成される装置をモデル化する能力がある。流体力は radiation と diffraction を使用してモデル化された。また、システムの運動は、6 自由度(DOF)の WEC 運動方程式を解くことにより時間領域で求められる。

本ユーザーマニュアルは、2 章で WEC-Sim に関する理論を述べる。3 章で MATLAB および WEC-Sim のインストールおよび WEC-Sim の実行方法を述べる。4 章に WEC 構成要素のライブラリ構造が示される。5 章に WECSim のコード構造、WEC-Sim の入力パラメタが示される。最後に、ポイントアブソーバおよび上下可動装置モデル化の WEC-Sim の適用例を 6 章に示した。

## 2 章 理論

### 2.1 はじめに

WEC のモデル化は、入射波と装置運動、PTO メカニズムおよび係留間の相互作用を含む(図 2.1)。WEC-Sim は、動力性能と設計最適化を予測するために放射および回折[1,2]を使用する。放射と回折の方法は、時間領域のシステム動特性を解決するため、線形の係数を使用し、周波数領域境界要素法(BEM)ソルバから流体力を得る。

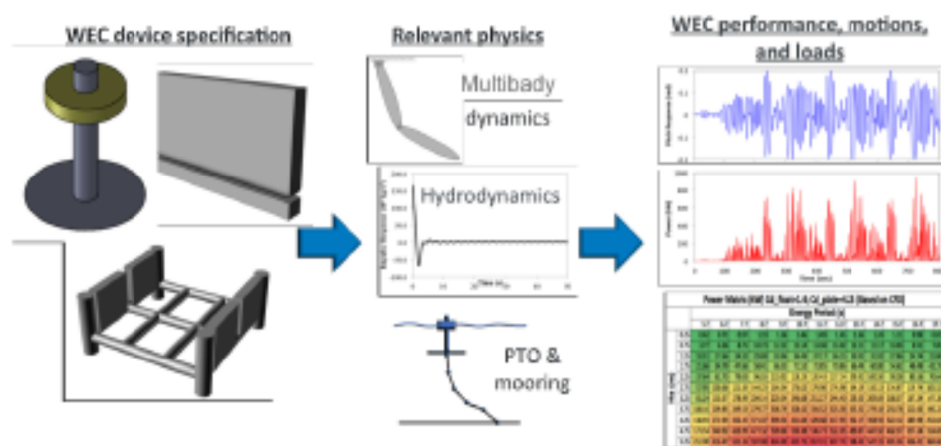


Figure 2.1: Methodology for WEC-Sim

### 2.2 境界要素法

流体力決定への共通のアプローチは、入射、散乱、回折の和である。これらの流体力成分は、周波数領域ポテンシャル流れ BEM ソルバ(WAMIT[3]、AWQA-FER[4]および Nemoh[5])から理想的に得られた線形の係数を使用してモデル化された。BEM 解は速度ポテンシャルを用いてラプラス方程式を解いて得られる。流れは非粘性、非圧縮、渦なしと仮定される。周波数領域 BEM のための理論についてのより多くの詳細は[3]にある。

### 2.3 WEC-Sim の座標系

図 2.2 は入射波中にある 3D 浮体型ポイントアブソーバを示す。図は、さらに WEC-Sim の座標系および運動の 6 自由度を定義する。WEC-Sim 座標系は、入射角が 0 の場合、X 軸が波の進行方向と仮定する。Z 軸は垂直の上向きにある。また、Y 軸方向は右手系で定義された。

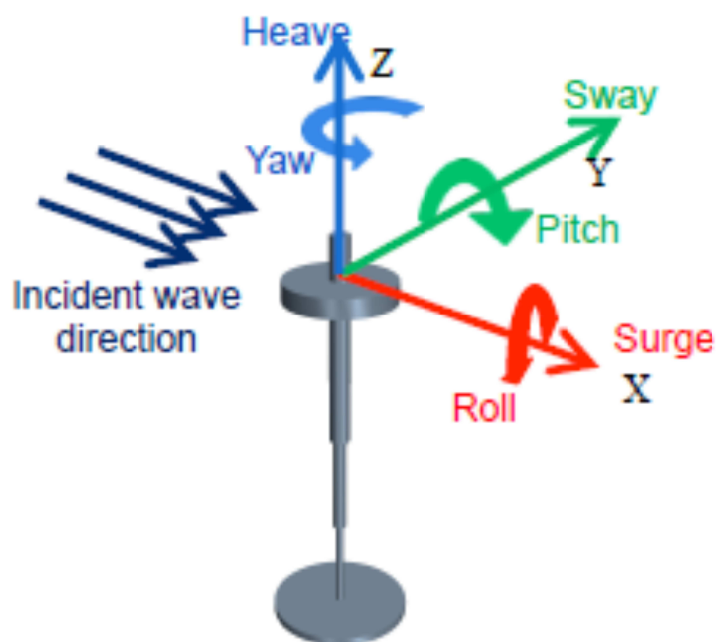


Figure 2.2: Sketch defining the coordinate system

## 2.4 時間領域計算方式

システムの運動応答は、WEC システムの運動方程式により計算される[2、6]。浮体の運動方程式はその重心に関して、次のように与えることができる。

$$ma = F_{ext} + F_{rad} + F_{PTO} + F_v + F_B + F_m \quad (2.1)$$

ここで、 $\mathbf{a}$  は装置の加速度ベクトルである(平行移動および回転)、 $\mathbf{m}$  は質量行列、 $F_{ext}$  は波強制力ベクトル、 $F_{rad}$  は波放射力ベクトル、 $F_{PTO}$  は PTO 力ベクトル、 $F_v$  は粘性減衰力ベクトル、 $F_B$  は浮力復原力ベクトルである。また、 $F_m$  は係留力ベクトルである。 $F_{ext}$  と  $F_{rad}$  の両方は周波数領域 BEM ソルバによる値から計算された。散乱項は、浮子体の加速度に関する付加質量と、速度に関連する造波ダンピング項を含む。波強制項は、入射波によって生成されたフルードクリロフ力成分、および浮体に起因する回折成分を含む。WEC-Sim は規則波および不規則波シミュレーションに使用できるが、任意の海シミュレーションのために  $F_{ext}$  と  $F_{rad}$  が正弦的な定常状態応答シナリオで計算されることに注意せよ。正弦的な定常応答は、規則的な入射波における WEC 設計にしばしば使用される。しかし、ランダム海象あるいはシステムの流体のメモリー効果が不可欠のシミュレーショ

ンでは、浮体の流体のメモリ遅延力を表すために、畳み込み積分が推奨される。

### 2.4.1 正弦的な応答

このアプローチは、システム応答が正弦的な定常的と仮定し、規則波シミュレーションに有効である。与えられた波周波数における付加質量および波放射減衰項を使用して放射項が計算される。

$$F_{rad} = -A(\omega_r)\ddot{X} - B(\omega_r)\dot{X} \quad (2.2)$$

$A(\omega)$ および $B(\omega)$ は付加質量と波放射減衰行列である。 $\omega$ は波周波数(rad/秒)である。また、 $dx/dt$ は浮体の速度ベクトルである。自由表面は、与えられた波高の線形の波理論、波周波数、水深に基づく。規則波強制力は次式で得られる。

$$F_{ext} = \Re \left[ R_f \frac{H}{2} F_x(\omega_r) e^{i(\omega_r t)} \right] \quad (2.3)$$

$\Re$ は式の実数、 $R_f$ はランプ関数、 $H$ は波高、 $F_x$ は波強制力であり大きさおよび位相から構成される。

### 2.4.2 畳み込み積分公式

浮体のメモリ効果を取り入れるため、カミングズ方程式[7]に基づく畳み込み積分が使用される。放射項は次式で計算される。

$$F_{rad} = -A_\infty \ddot{X} - \int_0^t K(t-\tau) \dot{X}(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

$A_\infty$ は周波数無限大の付加質量行列、 $K$ はインパルス応答関数である。規則波では波強制力の計算に式 2.3 を用いる。不規則波では、自由表面は多数の規則波の線形重ね合せで構築される。不規則波は波スペクトル(図 2.3)を使用して特徴づけられる。波スペクトルは周波数ごとのエネルギー分布を示し、有義波高と有義周期で特徴づけられる。不規則波の波強制力は全ての波周波数帯にわたる積分の実数部として計算される。

$$F_{ext} = \Re \left[ R_f \int_0^\infty \sqrt{2S(\omega_r)} F_x(\omega_r) e^{i(\omega_r t + \varphi)} d\omega_r \right] \quad (2.5)$$

S 波スペクトルおよび $\phi$ はランダムな位相角である。

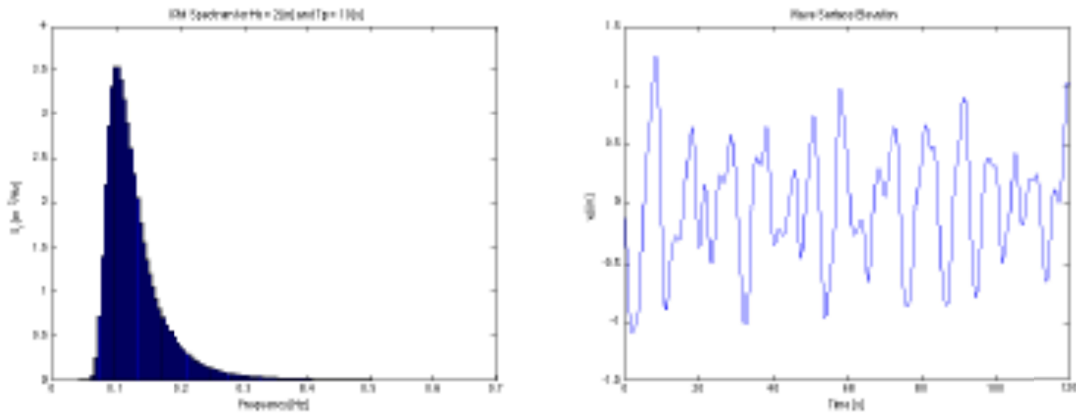


Figure 2.3: An example of wave spectrum and irregular wave elevation generated by WEC-Sim (Pierson–Moskowitz spectrum)

### 2.4.3 波スペクトル

規則波を生成する能力は、特定条件下のモデルの応答を観察する機会を提供する。一定波高および一定周期の海状態は実海域ではほとんど無い。本当の海象は、異なる振幅および周期をもった様々な波の重ね合せをモデル化した、任意の波の時系列にて表わされる。この重ね合せは波スペクトルで特徴づけられる。スペクトルは、統計分析を用いたパラメタで特徴づけられる。有義波高、ピーク周期、風速、フェッチ長さ。沖合で使用されるスペクトルは次節で議論される。WEC-Sim において利用可能なスペクトルの一般形は次式で与えられる：

$$S(f) = Af^{-5} \exp[-Bf^{-4}] \quad (2.6)$$

$f$  は波周波数(Hz)、 $\exp$  は指数関数である。

## ピアソン-モスコビッツ型スペクトル

最も単純なスペクトル[8]で提案された。風が広域に長時間吹いた後、波は風と平衡に入ると仮定した。これは完全に荒海のご概念である。「長時間」はおよそ 10,000 周期、「広域」はおよそ 5,000 波長である。スペクトルは次式で表される。

$$S(f) = \frac{\alpha_{PM} g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \quad (2.7)$$

$$A = \frac{\alpha_{PM} g^2}{(2\pi)^4}, \quad B = \frac{5}{4} f_p^4 \quad (2.8)$$

$\alpha_{PM}=0.0081$ 、 $g$  は重力加速度である。 $f_p$  はスペクトルのピーク周波数である。しかし、このスペクトル表現では、ユーザーが有義波高を定義できない。パワーマトリックスを生成するため、WEC-Sim では、 $\alpha_{PM}$  係数を用いた。所望の有義波高に合致するように  $\alpha_{PM}$  は以下のように計算された：

$$\alpha_{PM} = \frac{H_{m0}^2}{16 \int_0^\infty S^*(f) df} \quad (2.9)$$

$$S^*(f) = \frac{g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \quad (2.10)$$

スペクトルモーメントと呼ばれる固有の値に関連づけられたことに注意。これらの値は  $m_k$  で表され  $k=0,1,2$  として定義される

$$m_k = \int_0^\infty f^k S(f) df \quad (2.11)$$

スペクトルのモーメントおよび  $m_0$  は自由表面の分散である。これより、有義波高が定義される。

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.12)$$

## ブレトシュナイダー型スペクトル

このスペクトルは 2 つのパラメタ（有義波高およびピーク波周波数）に基づく。有義波高を与え、発達あるいは減衰など一連の波条件をカバーするようピーク周波数を変える。一般に、パラメタは風速(最も重要)、風向、フェッチ長、台風前線の位置に依存する。スペクトルは次式で与えられる

$$S(f) = \frac{H_{m0}^2}{4} (1.057 f_p)^4 f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \quad (2.13)$$

$$A = \frac{H_{m0}^2}{4} (1.057 f_p)^4 \approx \frac{5}{16} H_{m0}^2 f_p^4 \quad (2.14)$$

$$B = (1.057 f_p)^4 \approx \frac{5}{4} f_p^4 \quad (2.15)$$

$H_{m0}$ は有義波高であり、一般的に大きい方から3分の1平均した波高として定義される。

## JONSWAP スペクトル

WEC-Sim で使用されるスペクトルは Hasselmann ら[9]によって提案された。オリジナルの公式化は次式である。

$$S(f) = \frac{\alpha_j g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \gamma^\Gamma$$

$$\Gamma = \exp \left[ -\left( \frac{\frac{f}{f_p} - 1}{\sqrt{2}\sigma} \right)^2 \right], \quad \sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases} \quad (2.16)$$

$$A = \frac{\alpha_j g^2}{(2\pi)^4}, \quad B = \frac{5}{4} f_p^4 \quad (2.17)$$

ここで $\alpha_j$ は、風速およびフェッチ長の関数である無次元変数である。最も多い波状態のスペクトルをとらえた平均値を見つけるため、経験的な補正が適用された。所望の有義波高と一致させるため、 $\alpha_j$ を次式で計算した。

$$\alpha_j = \frac{H_{m0}^2}{16 \int_0^\infty S^*(f) df} \quad (2.18)$$

$$S^*(f) = \frac{g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \gamma^\Gamma \quad (2.19)$$

## ITTC スペクトル

JONSWAP スペクトルの別の形式が第17回 ITTC で提案された。



$$S(f) = \frac{155}{(2\pi)^4} \frac{H_{m0}^2}{(0.834T_p)^4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \gamma^\Gamma$$

$$\approx \frac{310}{(2\pi)^4} H_{m0}^2 f_p^4 f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \gamma^\Gamma \quad (2.20)$$

$$\Gamma = \exp\left[-\left(\frac{\frac{f}{f_p} - 1}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right], \quad \sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases} \quad (2.21)$$

$$A = \frac{310}{(2\pi)^4} H_{m0}^2 f_p^4, \quad B = \frac{5}{4} f_p^4 \quad (2.22)$$

$\alpha_j$ の修正および ITTC 記述の JONSWAP スペクトルの比較を図 2.4 に示す。2つの方法は非常によい合意を示す。

#### 2.4.4 ランプ関数

波強制力の計算において、シミュレーションの初期の時間ステップにおいて強い移行流を回避するためランプ関数(Rf)が使用された。ランプ関数は(2.23)で与えられる。

$$R_f = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos\left(\pi + \frac{\pi t}{t_r}\right)\right) & \frac{t}{t_r} < 1 \\ 1, & \frac{t}{t_r} \geq 1 \end{cases} \quad (2.23)$$

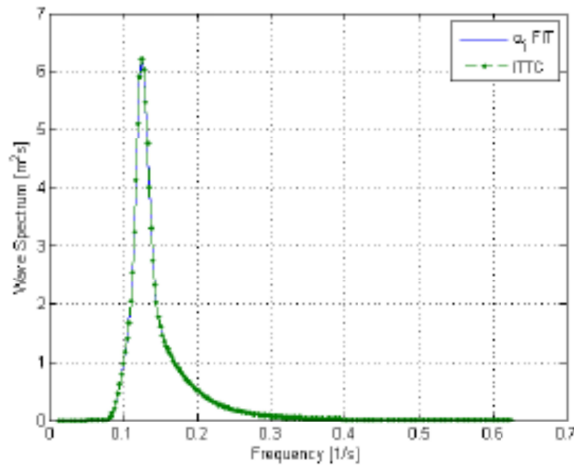


Figure 2.4: Comparison of  $\alpha_j$  fit to the ITTC description of the JONSWAP spectrum with  $H_{m0} = 2$  m and peak period ( $T_p$ ) of 8 sec.

$t$ はシミュレーション時間、 $t_r$ は傾斜時間である。

## 2.5 動力取出し力

反力が次のものから与えられる場合、PTO メカニズムは線形のスプリング・ダンパ・システムとして表わされる：

$$F_{PTO} = -K_{PTO}X_{rel} - C_{PTO}\dot{X}_{rel} \quad (2.24)$$

$K_{PTO}$ はPTOのスプリング定数、 $C_{PTO}$ はPTOのダンピングである。また、 $X_{rel}$ と $\dot{X}_{rel}$ は2つの物体間の相対運動および速度である。PTOによって消費されたパワーは次式で与えられる：

$$P_{PTO} = -F_{PTO}\dot{X}_{rel} = (K_{PTO}X_{rel}\dot{X}_{rel} + C_{PTO}\dot{X}_{rel}^2) \quad (2.25)$$

しかし、2つの物体間の相対運動および速度の位相が $\pi/2$ 異なると、積の時間平均はゼロである。そこで、吸収された力は(2.26)で表される。

$$P_{PTO} = C_{PTO} \dot{X}_{rel}^2 \quad (2.26)$$

## 2.6 係留力

係留力は線形の疑似の静的な係留スプリング定数を使用して表わされ、次式で計算することができる。

$$F_m = -K_m X \quad (2.27)$$

$K_m$ は係留のスプリング行列で、 $X$ は物体の変位である。

## 2.7 粘性抵抗

一般に、WEC運動への粘性の影響を考慮する必要がある。特に線形モデルが適用される場合、この影響を無視するとシステムの発電を過大に評価する。粘性減衰をモデル化する一般的な方法は、二次のダンピング項を運動方程式に加えることである(モリソン式タイプ)；

$$F_V = \frac{1}{2} C_d \rho A_D \dot{X} |\dot{X}| \quad (2.28)$$

$C_d$ は粘性抵抗係数、 $\rho$ は流体の密度、 $A_D$ は投影面積である。装置用の粘性抵抗係数は注意深く選択されるべきである[1,2]。それは、物体形状、スケール、物体間の相対速度、物体周囲の流れに依存する。レイノルズおよびケーリーガン・カーペンター数(KC数)が小さい場合、抗力係数ははるかに大きくなる。抗力係数の経験的なデータは様々な文献および基

準に記載されている。しかし、利用可能なデータは既存の単純な形状のみである。実際のポイント・アブソーバ形状については、流体力は水槽試験もしくは計算で評価する必要がある。

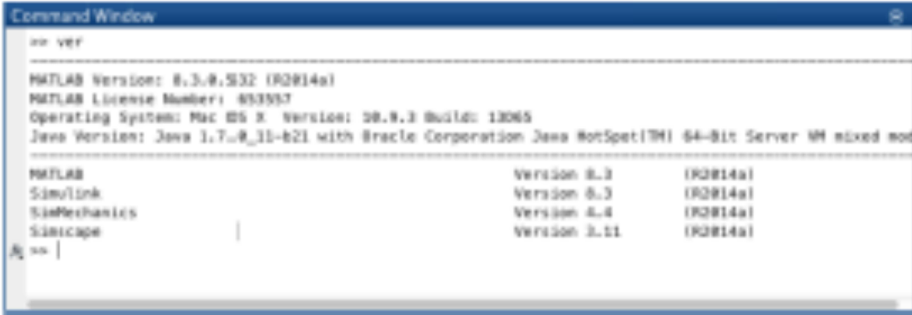
## 3 章: 入門

WEC-Sim は MATLAB に実装された。実行には MATLAB と表 3.1 の MATLAB ツールボックス、WEC-Sim ソースコードが必要である。WEC-Sim は MATLAB R2014a 上で開発された。また、MATLAB バージョンが推奨される。本章では、WEC-Sim のダウンロードおよびインストール(節 3.1)、WEC-Sim 実行方法(節 3.2)について記述する。

### 3.1 WEC-Sim のダウンロードとインストール

#### ステップ 1: MATLAB をインストール

MATLAB および表 3.1 の MATLAB ツールボックスをインストールする。MATLAB コマンドウィンドウで `ver` コマンドを実行し、必要なツールボックスがインストールされたことを確認する(図 3.1)。このステップの詳細 MathWorks ウェブサイト <http://www.mathworks.com> を参照。



```
Command Window
>> ver
-----
MATLAB Version: 8.3.0.532 (R2014a)
MATLAB License Number: 853537
Operating System: Mac OS X Version: 10.9.2 Build: 13065
Java Version: Java 1.7.0_621 with Oracle Corporation Java HotSpot(TM) 64-Bit Server VM mixed mode
-----
MATLAB                Version 8.3      (R2014a)
Simulink              Version 8.3      (R2014a)
SimMechanics         Version 4.4      (R2014a)
Simscape              Version 3.11     (R2014a)
>> |
```

Figure 3.1: Running the `ver` command from the MATLAB Command Window.

#### ステップ 2: WEC-Sim をダウンロード

OpenEI ウェブサイト(<http://en.openei.org/wiki/WEC-Sim/>)から WEC-Sim をダウンロードする。

Table 3.1: Required MATLAB toolboxes

Matlab package	Required release
MATLAB Base	R2014a Version 8.3
Simulink	R2014a Version 8.3
SimMechanics	R2014a Version 4.4
Simscape	R2014a Version 3.11

#### ステップ 3: WEC-Sim ソースコード に MATLAB 検索パスを入れる

WEC-Sim ソースコード・ディレクトリ内の `functions` フォルダにある `wecSimStartup.m` ファイルを開く。(このドキュメント中では `wecSimSource` と呼ばれる。) `wecSimStartup.m` ファイル中のコードをコピーして、それを MATLAB 起動フォルダ内の `startup.m` ファイルへ貼り付ける。コンピューター上で `wecSimPath` 変数を `wecSimSource` フォルダにセットする。MATLAB を一度閉じ、コードを再開し、MATLAB コマンドウィンドウで `path` コマンドを実行する。次に `wecsim-path-setup.m` にのディレクトリが MATLAB 検索パスにあることを確認する。

#### ステップ 4: Simulink ライブラリ・ブラウザに WEC-Sim ブロックを追加

MATLAB コマンドウィンドウで `simulink` を入力し Simulink ライブラリ・ブラウザを開く。一度 Simulink ライブラリ・ブラウザを開き、`ViewBRefresh` ツリー表示を選択する。この時点で、`Libraries` ペインの `WEC-Sim` メニューを拡張すると `WEC-Sim Body`, `Constraints`, `PTOs`, `Frame` ブロックが表示される。これらのブロックの機能は 4 章で説明される。以降、`WEC-Sim` ライブラリ・ブラウザ中の Simulink を開くと、`WEC-Sim Body Elements`, `Constraints`, `PTOs`, `Frames` ブロックが利用可能になる。ライブラリ・ブロックの使用および修正に関するヘルプは Simulink ドキュメント <http://www.mathworks.com/help/simulink/> を参照する。

## 3.2 WEC-Sim の実行

本節は WEC-Sim ワークフローおよび WEC-Sim の実行方法を示す。ここでは、WEC-Sim のファイル構造、WEC-Sim・シミュレーションを実行させるためのステップを示す。入力ファイル用の入力パラメタの詳述およびオプションは 5 章に記述される。WEC 装置をシミュレートする WEC-Sim 使用例を 6 章に示す。

### 3.2.1 ファイル構造

WEC-Sim のデフォルト・ファイル構造を表 3.2 に示す。WEC-Sim 実行に必要なすべてのファイルはユーザー定義フォルダにある。WEC-Sim ケースフォルダあるいはケースディレクトリと呼ぶ。

Table 3.2: Default files names and their locations

	File name	Location
Input file	<code>wecSimInputFile.m</code>	Case directory
WEC Model	<code>WEC Model Name.slx</code>	Case directory
WAMIT	<code>WAMIT File Name.out</code>	<code>wamit</code>
Geometry	<code>STL File Name.stl</code>	<code>geometry</code>

### 3.2.2 WEC-Sim の実行ステップ

WEC-Sim ワークフローを図 3.2 に示す。WEC-Sim のセットアップおよび実行を以下に示す。

#### ステップ 1: プリプロセス

WEC の各物体の流体力係数を WAMIT で計算する。WEC-Sim は WAMIT で生成された流体力係数を出力ファイル(<wamit\_file\_name>.out)から読む。WEC システムのモデル化において WEC-Sim が正確な流体力係数を使用するため、各物体の重心は WAMIT の物体座標系(XBODY)の原点にある。現行 WEC-Sim は多方向波を考慮しない。WEC-Sim は WAMIT でモデル化されたどんな方向波の結果でも使用するので注意。WAMIT の詳細は WAMIT ユーザーマニュアル[3]に記述される。

次に、WEC 船体形状を STL ファイル形式で作成する。STL ファイルは WEC-Sim/MATLAB GUI における WEC 船体の可視化に使用する。

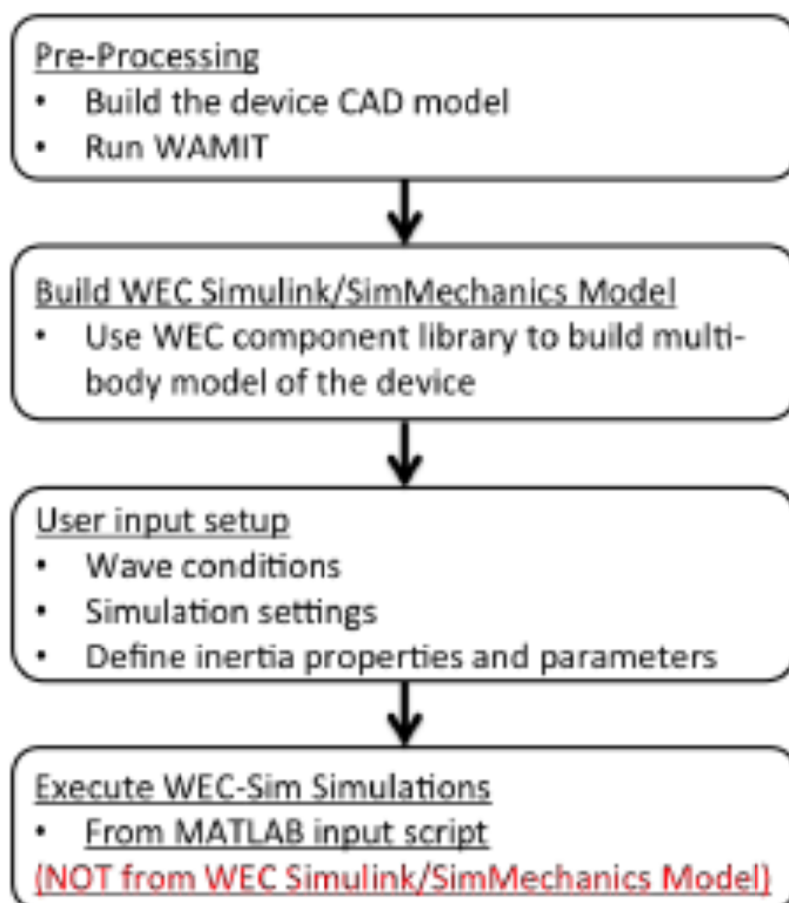


Figure 3.2: Work flow diagram for running WEC-Sim simulations

## ステップ 2: 構造装置 Simulink/SimMechanics モデルの作成

次に、Simulink/SimMechanics ツールボックスおよび WEC-Sim ライブラリを使用して、装置モデルを作成する(4章を参照)。2物体ポイントアブソーバの Simulink/SimMechanics モデルを図 3.3 に示す。

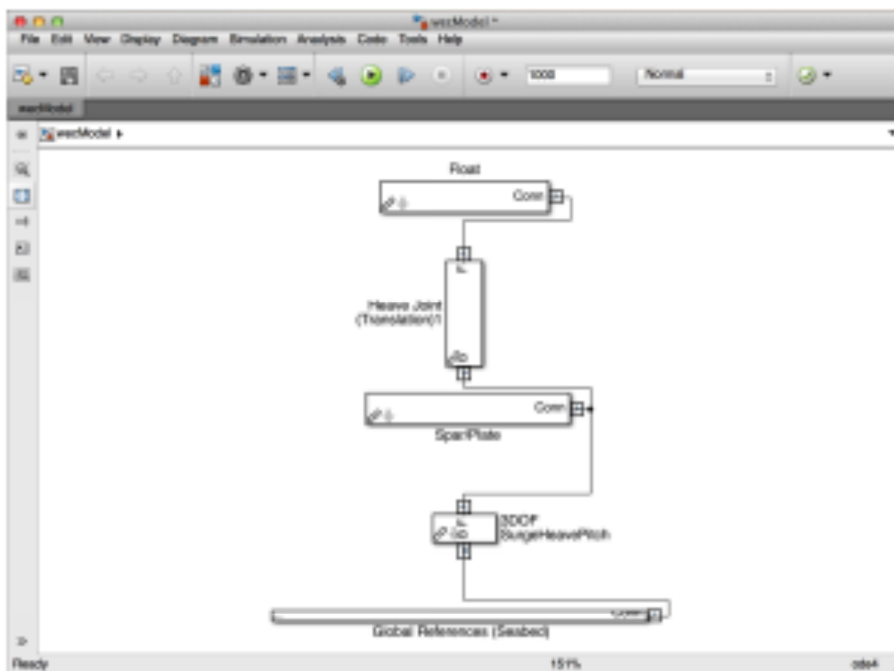


Figure 3.3: An example of device Simulink/SimMechanics model for a two-body point absorber

## ステップ 3: WEC-Sim 入力ファイルの作成

ケースディレクトリに WEC-Sim 入力ファイル `wecSimInputFile.m` を作成する。2物体ポイントアブソーバの入力ファイル例を図 3.4 に示す。入力ファイルでは、シミュレーション設定、波状態、物体質量分布、PTO、拘束が指定される。さらに、`wecSimInputFile.m` の中で Simulink/SimMechanics モデルファイル名 "`simu.simMechanicsFile=<WEC モデル名>.slx`" を指定する。

## ステップ 4: WEC-Sim の実行

MATLAB コマンドウィンドウで `wecSim` コマンドを入力し、シミュレーションを実行する(図 3.4)。`wecSim` コマンドは `wecSimInputFile.m` がある WEC-Sim ケースディレクトリで実行すること。WEC-Sim シミュレーションは、Simulink/SimMechanics モデルからではなく、常に MATLAB コマンドウィンドウから実行すること。これは、シミュレーション中に変数が MATLAB 作業スペースにあることを保証するためである。

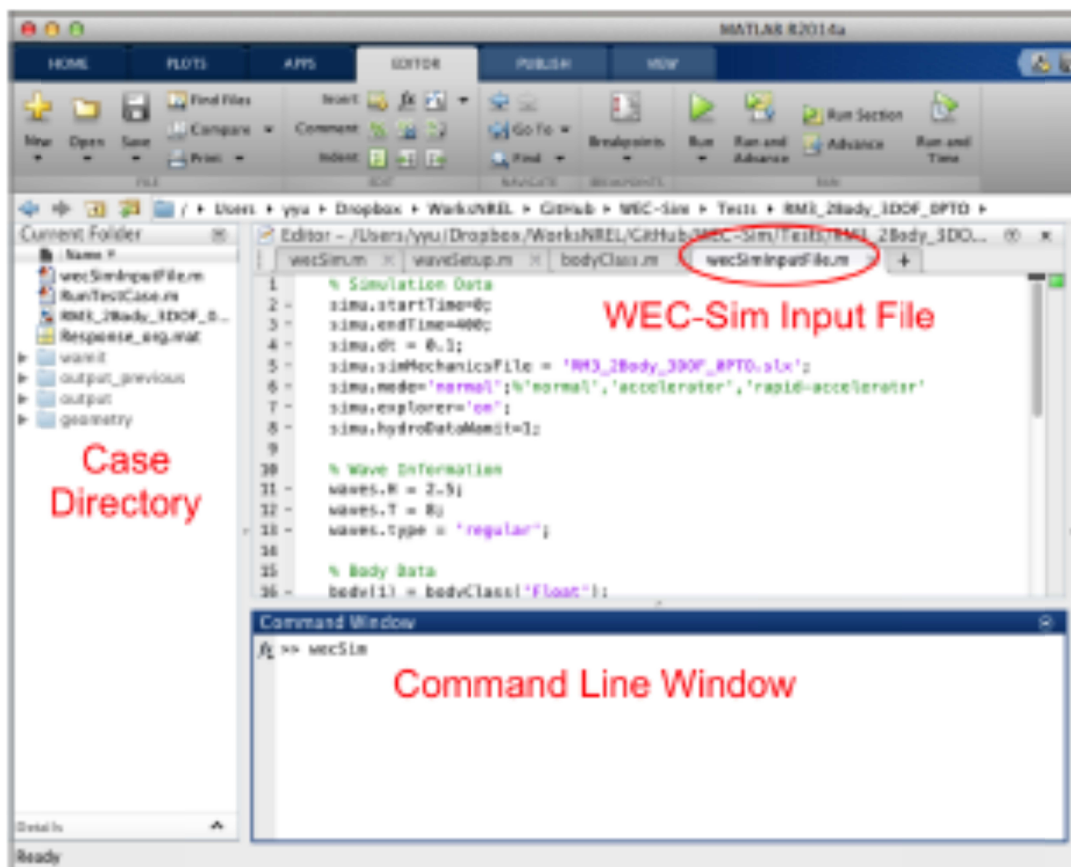


Figure 3.4: An example of running WEC-Sim

### 3.2.3 シミュレーション出力

シミュレーション出力はすべて MATLAB ワークスペース内の出力変数に保存される。具体的に、出力変数は、WEC 物体の力および運動、PTS、拘束を含む。さらに出力データファイルは、シミュレーションの時間ステップ情報を含む。シミュレーション完了時、WEC-Sim は、全てのシミュレーション情報を出力ディレクトリの3つのファイルに保存する。

<caseName>\_simulationLog.txt: シミュレーション中に MATLAB コマンドウィンドウに表示された情報を含むアスキーファイル

<caseName>\_output.mat: WEC 船体、PTS、拘束の力および運動を含む MATLAB データファイル。さらに、このデータファイルはシミュレーションの時間ステップ情報を含む。

<caseName> matlabWorkspace: シミュレーションのワークスペース変数をすべて含む MATLAB データファイル。この変数は output.mat データを含む。



### 3.2.4 ユーザ定義関数(UDF)を用いたポストプロセス

シミュレーションの完成の直前、WEC-Sim はケースディレクトリ内の `userDefinedFunctions.m` を探す。 `userDefinedFunctions.m` ファイルが存在する場合、WEC-Sim はこのファイル内のコマンドを実行する。シミュレーション終了前、ポストプロセスを行なうために、この `m` ファイルにコードを加えることができる。1つの例は WEC 装置の船体およびジョイントの運動および作用する力の描画である。RM3 ケースは、ユーザー定義関数を用いた力および応答の描画方法の例を示す。 `userDefinedFunctions.m` に記載された全てのコマンドを実行することに注意。

MATLAB ワークスペース内のすべてのデータがアクセスされる。

## 4 章:ライブラリ構造

### 4.1 ライブラリ構造

WEC-Sim ライブラリは 4 つのサブライブラリに分割される。利用可能な WEC-Sim ブロックおよび恐らくいくつかの SimMechanics ブロックを使用して任意の WEC 装置をモデル化できる。WEC-Sim ブロックおよびそれらのサブライブラリ構成を表 4.1 に示す。

表 4.1: WEC-Sim ライブラリ構造

WEC-Sim Library	
Sublibrary	Blocks
Body Elements	Rigid Body
Frames	Global Reference Frame
Constraints	Heave Pitch Surge Fixed Floating
PTOs	Rotational PTO (Local RY) Translational PTO (Local X) Translational PTO (Local Z)

次節では 4 つのサブライブラリおよびそれらの目的について記述する。**Body Elements** サブライブラリは、異なる船体に使用される **Rigid Body** ブロックを含む。**Frames** サブライブラリはすべてのシミュレーションに必要な **Global Reference Frame** ブロックを含む。**Constraints** サブライブラリは、船体の DOF（運動自由度）を抑制するために使用されるブロックを含む。付加的な力や抵抗は含まない。**PTO** サブライブラリは **PTO** システムのシミュレートおよび船体運動の制限に使用されるブロックを含む。マルチボディ間の相対運動を制限するため、**Constraints** と **PTO** の両方が使用される。

### 4.2 Body Elements サブライブラリ

**Body Elements** サブライブラリは 1 つのブロック (**Rigid Body** ブロック) を含む。(図 4.1) これは剛体を表わすために使用される。このブロックの少なくとも 1 つの部品が各モデル中で必要である。

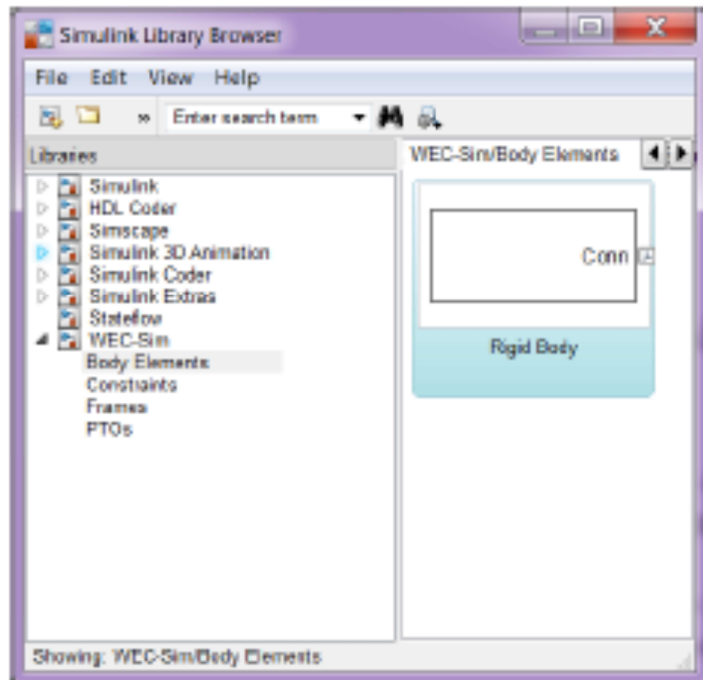


Figure 4.1: Body Elements sublibrary

#### 4.2.1 剛体ブロック

剛体ブロックはシミュレーション中で剛体を表わすために使用される。ブロック名 "body(i)" (i=1,2,..) を指定する必要がある。質量分布、流体力データ、形状ファイル、係留および他の計算要素を入力ファイル中に指定する。Body ブロック内で、放射力、波強制力、復元力、粘性減衰および係留力が計算される。

### 4.3 Frames サブライブラリ

図 4.2 に示される Frames サブライブラリは、全てのモデルに必要なブロックを含む。Global Reference Frame ブロックは海底に沿ったグローバル座標系を定義する。

#### 4.3.1 Global Reference Frame ブロック

Global Reference Frame はソルバ、海底および自由表面、シミュレーション時間および他のグローバルなセッティングを定義する。モデルを作成する際、グローバル座標系は海底であると考えerことは有用である。すべてのモデルには、Global Reference Frame ブロックが必要である。Global Reference Frame はクラス変数 `simu` および波クラス変数 `wave` を使用する。これは入力ファイルで定義される。

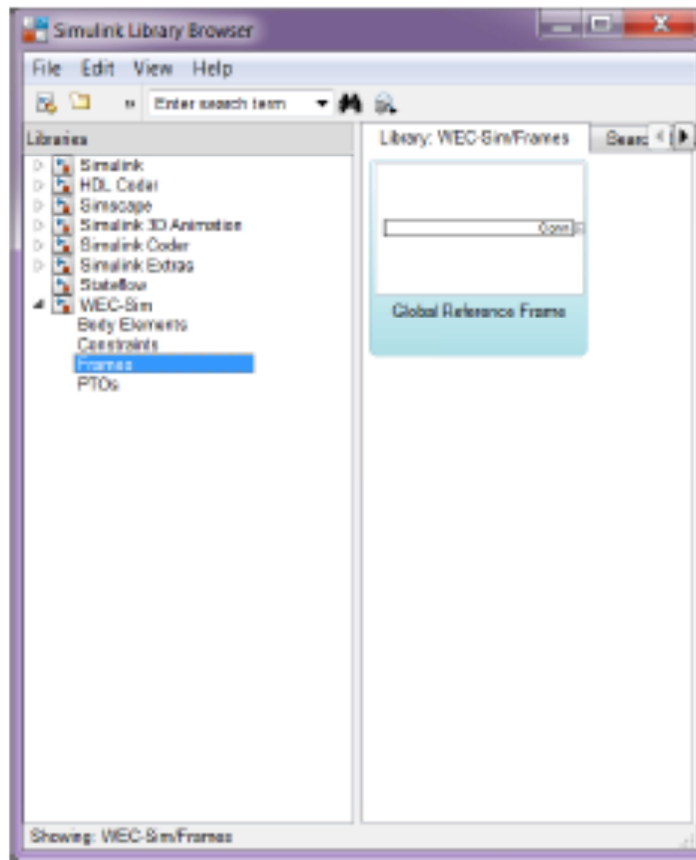


Figure 4.2: Frames sublibrary

#### 4.4 Constraints サブライブラリ

特定物体の運動自由度の定義に **Constraints** サブライブラリ内のブロックが使用される。

(図 4.3)。拘束ブロックは DOF だけを定義するが、他の物体運動の力や抵抗は定義しない。

**Constraints** ブロックには基礎(B)およびフォロアー(F)の 2 つの接続点がある。**Constraints** ブロックは、基礎に接続されたブロックに相対的なフォロアーブロックの運動を制限する。これらブロックの基礎は **Global Reference Frame** (海底と見なすことができる)である。また、フォロアーは **Rigid Body** である。

5 つの **Constraints** がある。DOF(Heave, Surge, Pitch)を制限する 3 つ、自由浮体(Floating)、固定(Fixed)である。本節の残りは各 **Constraints** ブロックについて詳細に記述する。

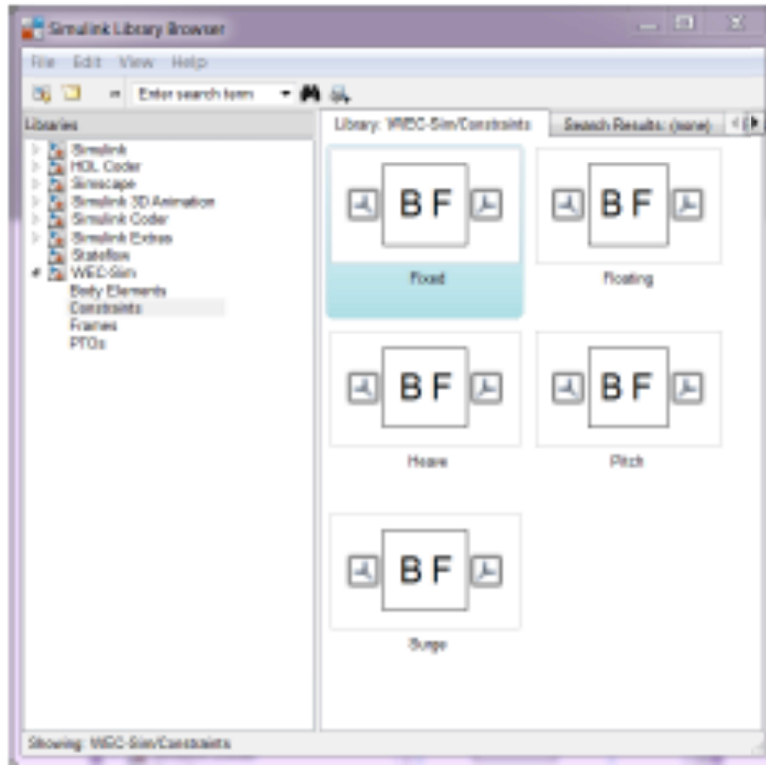


Figure 4.3: Constraints sublibrary

#### 4.4.1 Floating Block

**Floating** ブロックは自由浮体をシミュレートする。フォロアーの運動を基礎の  $XZ$  平面に沿って拘束する。つまり  $X$  軸および  $Z$  軸方向の平行移動および  $Y$  軸回転を許可する。それは、Global Reference Frame (海底) に接続された基礎と共に使用される。グローバルな  $XZ$  平面に沿ってフォロアーが運動する。

#### 4.4.2 Heave ブロック

**Heave** ブロックは、フォロアーの運動を基礎に関して  $Z$  軸方向に拘束する。Global Reference Frame (海底) に接続された基礎の場合、船体が鉛直方向 ( $Z$  軸) にのみ運動可能である。2つの物体を接続する **Heave** ブロックの場合、2つの物体間の相対運動が、それらの  $Z$  軸方向に拘束される。フォロアーと基礎の  $Z$  軸は常に並列であり、それら軸間の距離は一定である。フォロアーの実際の移動方向は、基礎の方向に依存する。

#### 4.4.3 Surge ブロック

**Surge** ブロックは、フォロアーの運動を基礎に対して  $X$  軸方向に拘束する。基礎が Global Reference Frame (seabed) に接続される場合、物体運動は水平方向の ( $X$  方向) に拘束され

る。Surge ブロックが 2 つの物体を接続する場合、2 つの物体の相対運動は、それらの X 軸方向に拘束される。フォロアーの X 軸と基礎の X 軸は常に平行になる。また、それらの軸間距離は一定である。フォロアーの実際の運動方向は、基礎の方向に依存する。

#### 4.4.4 Pitch ブロック

Pitch ブロックは、フォロアーと基礎の間の相対運動をピッチ回転のみ(Y 軸回転)に拘束する。両方の物体固定座標系から回転軸までの距離は一定を保つ。両方の物体固定 Y 軸の方向も一定である。入力ファイルに回転が生じる点の記述が必要である。

#### 4.4.5 固定ブロック

Fixed ブロックは固定接続である。基礎とフォロアーの間の運動をすべて抑制する。それは、X 軸と Z 軸方向の平行移動および Y 軸に関する回転を制限する。最も一般的な使用は海底に固定された剛体向けである。

### 4.5 PTO サブライブラリ

PTO サブライブラリは、単純な PTO システムのシミュレート、多数物体間の相対運動の抑制、物体と海底間の相対運動の抑制に使用される。図 4.4

PTO ブロックは接続に線形バネ定数およびダンピングの適用により単純な PTO システムをシミュレートする。拘束ブロック同様、PTO ブロックは基礎(B)およびフォロアー(F)を持つ。各 PTO ブロックは名前"pto(i)"  $i=1,2$ , が必要である。次に入力ファイルにそれらの特性を定義する

#### 4.5.1 伸縮 PTO (Z 方向) ブロック

伸縮 PTO(ローカル Z)は Heave 拘束と同一であるが、接続に線形バネ定数および減衰係数が適用される。上記のように PTO には名前を指定する。次に入力ファイルに弾性係数(N/m)および減衰係数(N/m)を指定する。

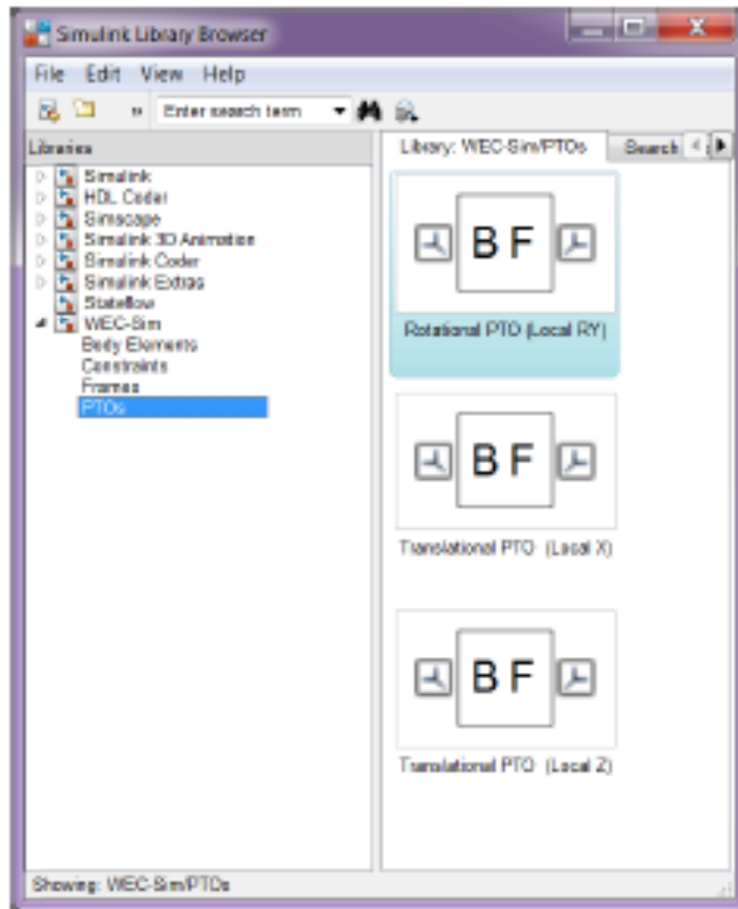


Figure 4.4: PTOs sublibrary

#### 4.5.2 伸縮 PTO (X 方向) ブロック

伸縮 PTO(X 方向)は Surge 拘束と同一であるが、接続に線形バネ定数および減衰係数が適用される。上記のように PTO には名前を指定する。次に入力ファイルに弾性係数(N/m)および減衰係数(N/m)を指定する。

#### 4.5.3 回転 PTO(RY) ブロック

回転 PTO(RY)はピッチ拘束と同一であるが、接続に線形回転バネ定数および減衰係数が加わる。上記のように PTO には名前を指定する。次に入力ファイルに弾性係数(Nm/rad)および減衰係数(Nm/rad)を指定する。

### 4.6 他の SimMechanics ブロック

独自の WEC モデルを作るため、WECsim ライブラリに含まれな SimMechanics ブロック

を使用する場合があります。よく使用されるブロックは **Rigid Transform** である。変形する、それは **PTO**, 拘束, 物体のフレームの回転に使用される。これも **SimMechanics** ユーザーガイドで説明される。



## 5 章: コード構造および入力パラメタ

本節は WEC-Sim ソースコードおよびコード構造について記述する。ソースコードは MATLAB m-ファイルである。ユーザー入力データの読み取り、Simulink/SimMechanics 時間領域シミュレーションの前処理計算を行う。

### 5.1 単位

WEC-Sim のすべての単位は MKS 系(meters-kilograms-seconds system)である。また、角度の単位はラジアンである。

### 5.2 WEC-Sim 入力ファイル

WEC-Sim 入力ファイルは計算に必要である。入力ファイルはケースディレクトリに置き、wecSimInputFile.m と命名すること。2 物体ポイントアブソーバの入力ファイルの例を図 5.1 に示す。WEC-Sim シミュレーションに必要な情報を入力ファイルに記述する。特に主要な関数が 4 つある。次節で各々説明される。

#### 5.2.1 Simulation Parameters の仕様

入力ファイルにシミュレーション持続時間および時間ステップのようなシミュレーションパラメタが指定される。シミュレーションパラメタはが `simu` 変数に指定される。それは `simulationClass` のメンバーである。図 5.1

さらに、Simulink/SimMechanics WEC モデルの名前を `simu` 変数に指定する。

`simulationClass` に設定可能なシミュレーションパラメタは節 5.3.1 に詳細に記述される。

#### 5.2.2 物体パラメタの仕様

WEC-Sim では、WEC は剛体から構成され、剛体は波力にさらされると仮定される。各物体について、入力ファイル中で物体変数内の仕様が指定される。

質量、慣性モーメント、重心、流体力を記述する WAMIT ファイルを指定する。

(図 5.1 を参照。) ユーザーが設定可能な `bodyClass` パラメタは、節 5.3.2 に詳細に記述される。

```

% Simulation Data
simu.startTime=0;
simu.endTime=400;
simu.dt = 0.1;
simu.simMechanicsFile = 'RM3.slx';
simu.mode='normal';

simu.explorer='on';

% Wave Information
waves.H = 2.5;
waves.T = 8;
waves.type = 'regular';

% Body Data
body(1) = bodyClass('Float');
body(1).hydroDataType = 'wamit';
body(1).hydroDataLocation = ...
    './wamit/rm3.out';
body(1).mass = 'wamitDisplacement';
body(1).cg = 'wamit';
body(1).momOfInertia = ...
    [20907301 21306090.66 37085481.11];
body(1).geometry = 'geometry/float.stl';

body(2) = bodyClass('Spar_Plate');

body(2).hydroDataType = 'wamit';
body(2).hydroDataLocation = ...
    './wamit/rm3.out';
body(2).mass = 'wamitDisplacement';
body(2).cg = 'wamit';
body(2).momOfInertia = ...
    [94419614.57 94407091.24 28542224.82];
body(2).geometry = 'geometry/plate.stl';

% PTO and Constraint Parameters
constraint(1) = ...
    constraintClass('Constraint1');

pto(1) = ptoClass('PTO1');
pto(1).k=0;
pto(1).c=1200000;

% Simulation Start Time [s]
% Simulation End Time [s]
% Simulation Delta Time [s]
% Specify Simulink Model File
% Specify Simulation Mode
%   (normal/accelerator
%   /rapid-accelerator)
% Turn SimMechanics Explorer
%   (on/off)

% Wave Height [m]
% Wave Period [s]
% Specify Type of Waves

% Initialize bodyClass for Float
% Specify BEM solver
% Location of WAMIT *.out file

% Mass from WAMIT [kg]
% Cg from WAMIT [m]
% Moment of Inertia [kg-m^2]

% Geometry File

% Initialize bodyClass for
%   Spar/Plate
% Specify BEM solver
% Location of WAMIT *.out file

% Mass from WAMIT [kg]
% Cg from WAMIT [m]

% Moment of Inertia [kg-m^2]
% Geometry File

% Initialize Constraint Class
%   for Constraint1

% Initialize ptoClass for PTO1
% PTO Stiffness Coeff [N/m]
% PTO Damping Coeff [Ns/m]

```

Figure 5.1: Example of a WEC-Sim input file (same to Figure 6.5).

### 5.2.3 波パラメタの仕様

入力ファイル中にシミュレーションの波条件を記述する。ユーザーMUSTは変数 `wave` の波条件を指定する。ユーザーが設定可能な `waveClass` パラメタは、節 5.3.3 に詳細に記述される。

### 5.2.4 動力取出しと拘束パラメタの仕様

PTO と拘束のブロックは WEC 物体を接続する(恐らく海底に)。PTO と拘束の仕様は、PTO 変数および拘束変数内にそれぞれ定義される。ユーザーが指定できるオプションは、節 5.3.4 および 5.3.5 に詳細に記述される。

## 5.3 WEC-Sim コード

WEC-Sim シミュレーションに必要なデータは、`simulationClass`, `bodyClass`, `wavesClass`, `jointClass` オブジェクトのインスタンスである。変数 `simu`, `body`, `waves`, `pto`, `constraint` の中にそれぞれ含まれる。これらのオブジェクトは MATLAB クラスで作成された。

WEC-Sim 入力ファイル (`wecSimInputFile.m`) でこれらの変数を設定する(図 5.1 参照)。本節の残りは、WEC-Sim オブジェクト内のデータ、適切なシミュレーション入力パラメタを設定するためにオブジェクトを記述する方法を記述する。WEC-Sim を用いた WEC 装置のシミュレートの例、および入力ファイルが 6 章に記述される。

### 5.3.1 `simulationClass`

`simulationClass` は WEC-Sim の実行に必要なシミュレーションパラメタおよびソルバを設定する。ユーザーは `wecSimInputFile.m` に適切なシミュレーションプロパティを設定できる。Simulink/SimMechanics WEC モデルの名前を指定する必要がある。それは入力ファイルに `simu.simMechanicsFile='<WEC Model Name>.slx'` コマンドを記述することにより設定できる。何もしなければ、他のすべてのシミュレーションパラメタはデフォルト値が使用される。利用可能なシミュレーションプロパティおよび各々のデフォルト値を図 5.2 に示す。

MATLAB コマンドウィンドウで "`doc simulationClass`" と入力すると、詳細が表示される。入力ファイルにシミュレーションパラメタおよびソルバ設定を指定することでデフォルト値は上書きされる。例えば、シミュレーションの終了時間は `simu.endTime = <user specified end time>` で設定できる。

### Property Summary

<a href="#">cIITime</a>	Convolution integral time (default = 60 s)
<a href="#">cIid</a>	
<a href="#">cTTime</a>	Convolution integral time series (default = dependent)
<a href="#">caseDir</a>	WEC-Sim case directory (default = 'NOT DEFINED')
<a href="#">domainSize</a>	Size of free surface and seabed. This variable is only used for visualization (default = 200 m)
<a href="#">dt</a>	Simulation time step (default = 0.1 s)
<a href="#">endTime</a>	Simulation end time (default = 500 s)
<a href="#">explorer</a>	SimMechanics Explorer 'on' or 'off' (default = 'on')
<a href="#">g</a>	Acceleration due to gravity (default = 9.81 m/s)
<a href="#">hydroDataWamit</a>	Equal to 1 if data from 1 WAMIT file, Equal to 0 if data from more than 1 input file (default = 0)
<a href="#">inputFile</a>	Name of WEC-Sim input file (default = 'wecSimInputFile')
<a href="#">logFile</a>	
<a href="#">maxIt</a>	Total number of simulation time steps (default = dependent) CII % Calculate the number of convolution integral timesteps (default = dependent)
<a href="#">mode</a>	'normal','accelerator','rapid-accelerator' (default = 'normal')
<a href="#">numConstraints</a>	Number of constraints in the wec model (default = 'NOT DEFINED')
<a href="#">numFrag</a>	Number of wave frequencies for interpolation (default = 201)
<a href="#">numPts</a>	Number of power take-off elements in the model (default = 'NOT DEFINED')
<a href="#">numHydroBodies</a>	make these dependent variables % Number of hydrodynamic bodies that comprise the WEC device (default = 'NOT DEFINED')
<a href="#">outputDir</a>	Data output directory name
<a href="#">rampT</a>	Ramp time for wave forcing (default = 100 s)
<a href="#">rho</a>	Density of water (default = 1000 kg/m <sup>3</sup> )
<a href="#">simMechanicsFile</a>	Simulink/SimMechanics model file (default = 'NOT DEFINED')
<a href="#">solver</a>	PDE solver used by the Simulink/SimMechanics simulation (default = 'ode4')
<a href="#">startTime</a>	Simulation start time (default = 0 s)
<a href="#">time</a>	Simulation time [s] (default = 0 s)
<a href="#">version</a>	WEC-Sim version
<a href="#">zeroVec</a>	Matrix of zeros with a size of 6,cbj,CII+1 (default = dependent)

Figure 5.2: Data contained within the simulationClass.

### 5.3.2 bodyClass

bodyClass オブジェクトは、シミュレートされる WEC 装置を構成する各物体の質量および流体力を含む。それぞれの物体は入力ファイルに bodyClass を持つこと。これらの物体は body(<body number>)と命名することが推奨される。図 5.1

各物体オブジェクトは body(<body number>)=bodyClass('<body name>')のコマンド入力により開始される。各物体の物体オブジェクトが始められた後、質量および流体力を指定する。図 5.1 に示されるように、各物体について、hydroDataType, hydroDataLocation, 質量, cg, momOfInertia, 形状パラメタの全てが指定される必要がある。ユーザーは物体パラメタにデフォルト値を使ってもよい。その場合何も指定しない、あるいは独自の値を指定する。bodyClass の利用可能なオプションを図 5.3 に示す。

例えば、粘性抵抗を指定する

粘性抵抗係数（無次元）および投影面積(m<sup>2</sup>)をベクトル形式で入力する

入力ファイルのフォーマットは以下の通りである

```
body(<body number>).cd= [0 0 1.3 0 0 0],
body(<body number>).characteristicArea= [0 0 100 0 0 0],
```

## Property Summary

<a href="#">cd</a>	Drag coefficient (format [Cd_x Cd_y Cd_z Cd_rotationX Cd_rotationY Cd_rotationZ], default = [0 0 0 0 0 0])
<a href="#">cg</a>	Center of gravity (format: [x y z])
<a href="#">cgCalcMethod</a>	Method of setting the body cg (options: 'user' or 'wamit', default = 'wamit')
<a href="#">characteristicArea</a>	Characteristic area for viscous drag calculations (format [Area Area Area Area Area Area], default = [0 0 0 0 0 0]).
<a href="#">fixed</a>	Default is 0. If the value is equal to 1, it means the body is fixed to the ground and the mass, MOI and CG will equal to the default value and are meaning less in the calculation.
<a href="#">geom</a>	Structure that defines the geometry for visualization and non-linear buoyancy and excitation force calculations
<a href="#">geometry</a>	Location of the .stl file that defines the geometry of the body (default = 'NOT DEFINED')
<a href="#">hydro</a>	Structure that contains the hydrodynamic data for the body (This structure is currently populated by reading WAMIT data)
<a href="#">hydroDataLocation</a>	Location of the wamit .out file (default = 'NOT DEFINED')
<a href="#">hydroDataType</a>	Code used to generate hydrodynamic coefficients (options: 'wamit', default = 'wamit')
<a href="#">hydroForce</a>	Structure used to calculate hydrodynamic forces acting on the body
<a href="#">initAngularDispAngle</a>	Initial displacement of cog - Angle of rotation - used for decay tests (format: [radians], default = 0)
<a href="#">initAngularDispAxis</a>	Initial displacement of cog - axis of rotation - used for decay tests (format: [x y z], default = [1 0 0])
<a href="#">initLinDisp</a>	Initial displacement of center of gravity - used for decay tests (format: [displacement in m], default = [0 0 0])
<a href="#">mass</a>	Body mass (options: 'wamitDisplacement' or [mass], default = 'wamitDisplacement')
<a href="#">massCalcMethod</a>	Method of calculating the center of gravity (default = dependent)
<a href="#">momOfInertia</a>	Moment of inertia (format: [Ixx Iyy Izz], default = [999 999 999])
<a href="#">mooring</a>	Data structure that contains the mooring stiffness and damping matrices
<a href="#">name</a>	Name of the body used (default = 'NOT DEFINED')
<a href="#">storage</a>	Structure to store simulation data for post processing

Figure 5.3: Data contained within the bodyClass.

### 5.3.3 waveClass 波クラス

waveClass は時間領域シミュレーションの波条件を定義するすべての情報を含む。特に WEC-Sim でサポートされる波環境のタイプを表 5.1 に示す。

Table 5.1: List of supported wave environments

Option	Additional required inputs	Description
waves.type ='noWave'	waves.noWaveHydrodynamicCoeffT	Free decay test with constant hydrodynamic coefficients
waves.type ='noWaveCIC'	None	Free decay test with convolution integral
waves.type ='regular'	waves.H; waves.T	Sinusoidal steady-state Reponse Scenario
waves.type ='regularCIC'	waves.H; waves.T	Regular waves with convolution integral
waves.type ='irregular'	waves.H; waves.T; waves.spectrumType	Irregular waves with typical wave spectrum
waves.type ='irregularImport'	waves.spectrumDataFile	Irregular waves with user-defined wave spectrum

- **No waves (waves.type='noWave')**: 波のないシミュレーションを実行し、一定の付加質量および放射減衰係数を使用する。従って WEC-Sim の前に WAMIT を実行する必要がある。さらに、ユーザーは周期を指定する必要がある。

waves.noWaveHydrodynamicCoeffT 変数のセットにより、流体力係数が選択される。このオプションは、与えられた放射付加質量および減衰係数を使用した自由動揺テストに使用される。解析解と比較を行う。

- **No waves with convolution integral calculation (waves.type='noWaveCIC')**: 畳込み積分および無限周波数の負荷質量を用いて放射力を計算する。それ以外は noWave と同じ。

- **規則波(waves.type='regular')**: 一定の付加質量および放射減衰係数を用いて規則波シミュレーションを実行する。入力ファイルで波周期 wave.T および波高 wave.H を指定する。システム動的応答は正弦的な定常状態と仮定する。一定の付加質量および減衰係数を用いて波放射力を計算する。畳込み積分は使用されない。

- **Regular waves with convolution integral (waves.type='regularCIC')**: 畳込み積分および無限周波数の付加質量を用いて放射力が計算される以外は waves.type='regular' と同じである。

- **不規則波(waves.type='irregular')**: 波スペクトルを与え、不規則波シミュレーションを行う。入力ファイルで有義波高(wave.H), ピーク周期(wave.T), 波スペクトル

(waves.spectrumtype)を指定する。利用可能な波スペクトルを表 5.2 に示す。

Table 5.2: WEC-Sim wave spectrum options (with waves.type='irregular')

Wave Spectrum Type	Input File Parameter
Pierson-Moskowitz	waves.spectrumType='PM'
Bretschneider	waves.spectrumType='BS'
JONSWAP	waves.spectrumType='JS'

・ **ユーザー定義スペクトルの不規則波**(waves.type='irregularImport'): ユーザー定義の波スペクトルを用いて不規則波シミュレーションを行う。ユーザーは、入力ファイル中で以下のように波スペクトルのファイル名を指定する必要がある。

```
waves.spectrumDataFile='<wave spectrum file>.txt',
```

ユーザー定義の波スペクトルは、第 1 列に波周波数(Hz)、第 2 列にスペクトルのエネルギー密度( $m^2/Hz$ )を記載する。WEC-Sim の"applications"フォルダに例 ndbcBuoyData.txt がある。このフォーマットは、NDBC ブイデータから直接コピーすることができる。NDBC ブイ計測の詳細は NDBC ウェブサイトを参照のこと。

<http://www.ndbc.noaa.gov/measdes.shtml>

デフォルトでは、不規則波の位相はランダムに生成されることに注意

(waves.randPreDefined=0) 入力ファイル中で waves.randPreDefined=1 が指定された場合、波のランダム位相は MATLAB の rand 関数 (seed=1) で生成される。これは同じ不規則波を再現できる。

MATLAB コマンドウィンドウで"doc waveClass"を入力すると、クラス関数の詳細が表示される。また、利用可能な波パラメタが図 5.4 示される。

### 5.3.4 constraintClass 拘束クラス

物体を Global Reference Frame に接続するために拘束オブジェクトが使用される。拘束変数は以下により開始される:

```
constraint(<constraint number>)=constraintClass('<constraint name>');
```

回転拘束(ピッチなど)は、さらに global reference frame に対する回転ジョイントの位置を constraint(<constraint number>).loc に指定する必要がある。

### Property Summary

<a href="#">a</a>	make dependent % [m] Wave amplitude for regular waves or sqrt(wave spectrum vector) for irregular waves
<a href="#">H</a>	[m] Wave height (regular waves) or significant wave height (irregular waves) (default = 1)
<a href="#">T</a>	[s] Wave period (regular waves) or peak period (irregular waves) (default = 8)
<a href="#">beamFreq</a>	make dependent % Number of wave frequencies from WAMIT
<a href="#">noWaveHydrodynamicCoeff</a>	Period of BEM simulation used to determine hydrodynamic coefficients for simulations with no wave. This option is only used with the 'noWave' wave type.
<a href="#">numFreq</a>	make dependent % Number of interpolated wave frequencies (default = 'NOT DEFINED')
<a href="#">phaseRand</a>	[rad] Random wave phase (only used for irregular waves)
<a href="#">spectraType</a>	Type of wave spectra. Only FM, BS, JS, and imported spectra are supported.
<a href="#">spectrumDataFile</a>	Data file that contains the spectrum data file
<a href="#">type</a>	Wave type. Options for this variable are 'noWave' (no waves), 'regular' (regular waves), 'regularCIC' (regular waves using convolution integral to calculate radiation effects), 'irregular' (irregular waves), 'irregularPRE' (irregular waves with pre defined phase). The default is 'regular'.
<a href="#">typeNum</a>	make dependent % Number to represent different type of waves
<a href="#">w</a>	make dependent % [rad/s] Wave frequency (regular waves) or wave frequency vector (irregular waves)
<a href="#">waterDepth</a>	make dependent % [m] Water depth (from WAMIT)
<a href="#">wavesAmplitude</a>	[m] Wave elevation time history

Figure 5.4: Data contained within the waveClass.

### 5.3.5 PTO クラス

PTO オブジェクトは固定基準フレームあるいは別の物体に対する物体運動から力を抽出する。さらに、PTO オブジェクトはある自由度の運動を抑制する。PTO 変数は以下の入力により開始される。

$$\text{pto}(\langle \text{pto number} \rangle) = \text{ptoClass}(\langle \text{pto name} \rangle),$$

回転  $\text{ptos}(\text{RY})$  は位置を設定する必要がある。さらに PTO システムを表わすため、ダンピング ( $\text{pto}(\langle \text{pto number} \rangle).c$ ) およびバネ定数 ( $\text{pto}(\langle \text{pto number} \rangle).k$ ) を指定するオプションがある。デフォルトでは両方とも 0 である。また、入力ファイル中のデフォルト値は上書き可能である。例えば、ダンピング値は以下のように指定する:

$$\text{pto}(\langle \text{pto number} \rangle).c = \langle \text{pto damping value} \rangle,$$



## 6章: アプリケーション

本節では、2つの異なる WEC へ WEC-Sim を使用方法について記述する。はじめに 2 物体ポイントアブソーバ WEC をモデル化する。次に OSWEC をモデル化する。

### 6.1 RM3 2 物体ポイントアブソーバ

#### 6.1.1 形状定義

WEC-Sim コードの最初の例として、参照モデル 3(RM3)2 物体ポイントアブソーバを設計する。WEC は波力に応じて 6DOF で自由に運動可能であるが、力は相対 Heave 方向に捕らえられる。DOE 参照モデルプロジェクトの数値計算および水槽実験でよく特性が分かっているため RM3 が選択された。

プロジェクトの詳細は以下ウェブサイト参照のこと。

<http://energy.sandia.gov/rmp>

装置は比較的単純な作動原理であり、WEC 産業が現在追求しているものの代表である。

RM3 は、浮体とリアクションプレートから構成される単純な 2 物体ポイントアブソーバである。RM3 の原寸を図 6.1 に示す。質量分布を表 6.1 に示す。

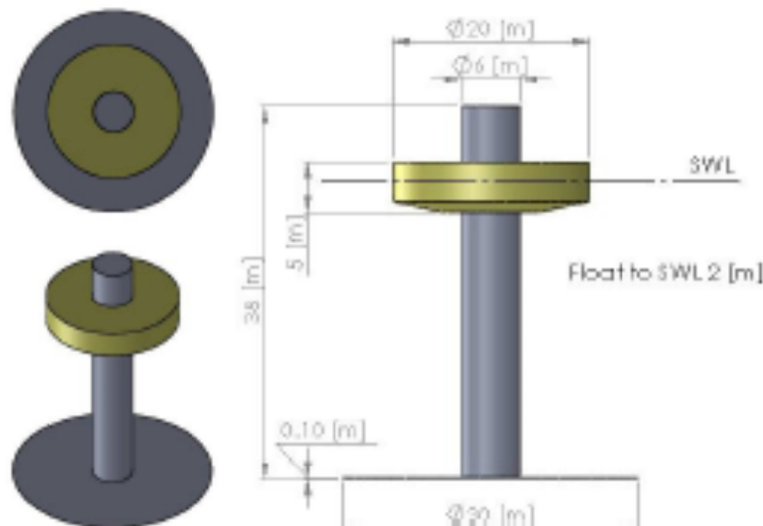


Figure 6.1: RM3 heaving two-body point absorber full-scale dimensions

Table 6.1: RM3 heaving two-body point absorber full-scale mass properties

Float Full Scale Properties				
CG [m]	Mass [tonne]	Moment of Inertia [kg-m <sup>2</sup> ]		
0	727.01	20907301	0	0
0		0	21306090.7	4304.89323
-0.72105		0	4304.89323	37085481.1
Plate Full Scale Properties				
CG [m]	Mass [tonne]	Moment of Inertia [kg-m <sup>2</sup> ]		
0	878.30	94419614.6	0	0
0		0	94407091.2	217592.785
-21.285		0	217592.785	28542224.8

### 6.1.2 RM3 の WEC-Sim モデル化

本節では、RM3 を WEC-Sim におけるシミュレーションの段階的な説明を示す。さらに、補足の RM3 WEC-Sim のチュートリアルビデオを作成した。

RM3 の WEC-Sim シミュレーションをセットアップし実行する方法を示す。チュートリアルのビデオは、documentation フォルダにある。3 章に記述されたように、すべての WEC-Sim モデルは、入力ファイル(wecSimInputFile.m) および Simulink ファイル(RM3.slx)から構成される。WEC-Sim シミュレーションの実行において、WEC-Sim の流体力係数を入力するため WAMIT(周波数領域 BEM ソルバ)の結果が必要である。WAMIT の流体力はあらかじめ計算しておく。この例では WAMIT 出力は buoywamit.out であり、wamit サブフォルダにある。すべての流体力係数は重心まわりで出力することに注意する。さらに、WEC-Sim 可視化のため、3D 形状ファイルを<STL ファイル名>の形で指定する。stl ファイルの座標系原点は重心にとる。ブイおよびスパー板から構成された RM3 の計算では、それぞれ geometry サブフォルダ内の float.stl と plate.stl に相当する。

### RM3 Simulink モデルファイル

WEC-Sim シミュレーションの第 1 段階は、Simulink モデルファイルの作成である。WEC-Sim ライブラリからブロックを<WEC model name>.slx にドラッグする。(詳細は 4 章参照)。

**ステップ 1:** Simulink モデルファイルの WEC-Sim ライブラリから 2 つの Rigid Body ブロックをドラッグし配置する。図 6.2

**ステップ 2:** Rigid Body ブロックをダブルクリックし、物体を改名する。最初の物体を

body(1)、第2の物体を body(2) と名付ける。これらの物体ブロックの特性は RM3 MATLAB 入力ファイル(節 6.1.2)に定義される。

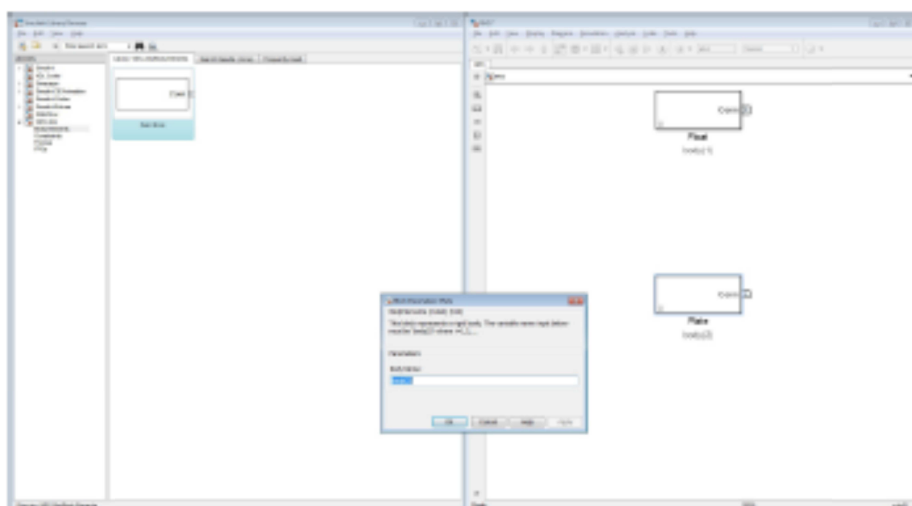


Figure 6.2: Adding two Rigid Body blocks to the RM3 WEC-Sim model

**ステップ 3:** 図 6.3 のように、Simulink モデルファイルの WEC-Sim ライブラリから Global Reference Frame ブロックを配置する。ジョイントや拘束によって他の全ての物体が基礎にリンクされる。

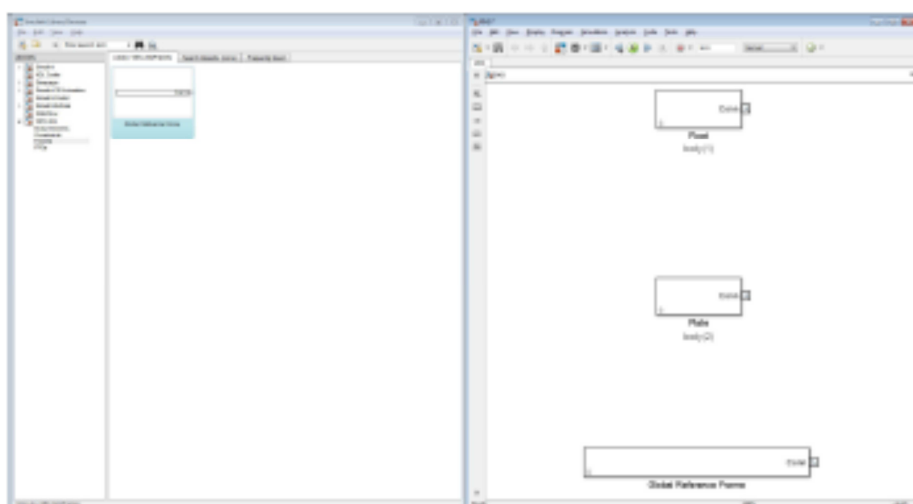


Figure 6.3: Adding the Global Reference Frame block to the RM3 WEC-Sim model

**ステップ 4:** 海底にプレートを接続するため、Floating 拘束ブロックを使用する。RM3 はグローバル座標系に対して 6DOF で運動可能なため、これが必要である。ステップ 4 と 5 の接続を図 6.4 に示す。

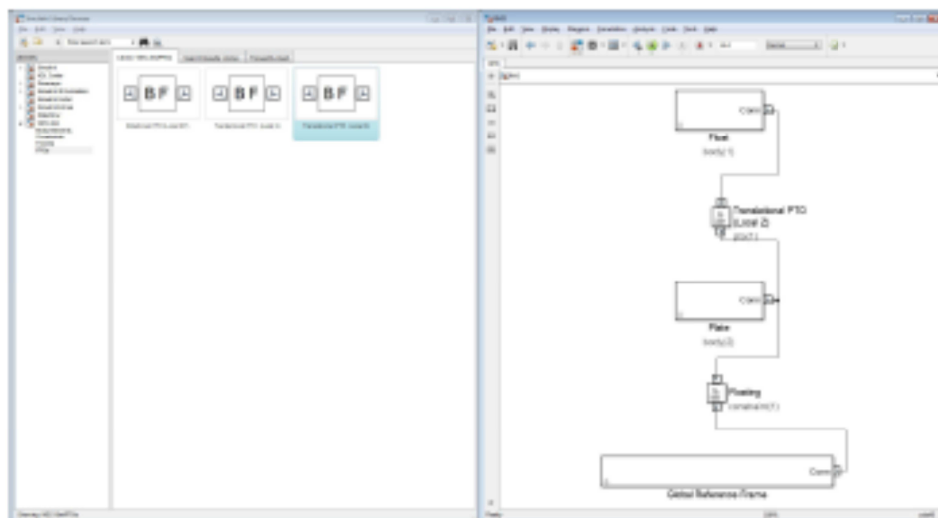


Figure 6.4: Adding the pto and constraint blocks to the RM3 WEC-Sim Simulink model

**ステップ 5:** 浮体とスパーを接続するため、Translation PTO(Local Z)ブロックを配置する。これは、板に対する浮体運動を Heave 方向に拘束するために必要である。RM3 シミュレーションでは、WEC の PTO を線形のダンパとしてモデル化するために translational PTO ブロックが使用された。パラメタは節 6.1.2 に定義される。

WEC-Sim モデルのセットアップにおいて、基礎とフォロアーの座標系に注意することが重要である。例えば、プレートと海底の拘束において、海底は Global Reference Frame であるため、基礎として定義されるべきである。同様に、浮体とプレート間にある PTO の場合、プレートは基礎として定義されるべきである。

## RM3 MATLAB 入力ファイル

本節では、RM3 モデル用の WEC-SimMATLAB 入力ファイルを定義する。各行には定義されたパラメタの説明コメントがある。RM3 モデルのシミュレーションパラメタ、船体特性、PTO、拘束を定義する。RM3 の入力パラメタを図 6.5 に示す。

```

% Simulation Data
simu.startTime=0; % Simulation Start Time [s]
simu.endTime=400; % Simulation End Time [s]
simu.dt = 0.1; % Simulation Delta Time [s]
simu.simMechanicsFile = 'RM3.slx'; % Specify Simulink Model File
simu.mode='normal'; % Specify Simulation Mode
% (normal/accelerator
% /rapid-accelerator)
simu.explorer='on'; % Turn SimMechanics Explorer
% (on/off)

% Wave Information
waves.H = 2.5; % Wave Height [m]
waves.T = 8; % Wave Period [s]
waves.type = 'regular'; % Specify Type of Waves

% Body Data
body(1) = bodyClass('Float'); % Initialize bodyClass for Float
body(1).hydroDataType = 'wamit'; % Specify BEM solver
body(1).hydroDataLocation = ... % Location of WAMIT *.out file
    './wamit/rm3.out';
body(1).mass = 'wamitDisplacement'; % Mass from WAMIT [kg]
body(1).cg = 'wamit'; % Cg from WAMIT [m]
body(1).momOfInertia = ... % Moment of Inertia [kg-m^2]
    [20907301 21306090.66 37085481.11];
body(1).geometry = 'geometry/float.stl'; % Geometry File

body(2) = bodyClass('Spar_Plate'); % Initialize bodyClass for
% Spar/Plate
body(2).hydroDataType = 'wamit'; % Specify BEM solver
body(2).hydroDataLocation = ... % Location of WAMIT *.out file
    './wamit/rm3.out';
body(2).mass = 'wamitDisplacement'; % Mass from WAMIT [kg]
body(2).cg = 'wamit'; % Cg from WAMIT [m]
body(2).momOfInertia = ... % Moment of Inertia [kg-m^2]
    [94419614.57 94407091.24 28542224.82];
body(2).geometry = 'geometry/plate.stl'; % Geometry File

% PTO and Constraint Parameters
constraint(1) = ... % Initialize Constraint Class
    constraintClass('Constraint1'); % for Constraint1

pto(1) = ptoClass('PTO1'); % Initialize ptoClass for PTO1
pto(1).k=0; % PTO Stiffness Coeff [N/m]
pto(1).c=1200000; % PTO Damping Coeff [Ns/m]

```

Figure 6.5: WEC-Sim input file for the RM3 point absorber).

## RM3 WEC-Sim モデル

一度 WEC-Sim Simulink モデルがセットアップされ、RM3 特性が MATLAB 入力ファイルに定義されれば、WEC-Sim で RM3 モデルを実行できる。図 6.6 はシミュレーション中の RM3 Simulink モデルおよび WEC-SimGUI を示す。RM3 装置の WEC-Sim シミュレーションの詳細は[12]と[13]を参照のこと。

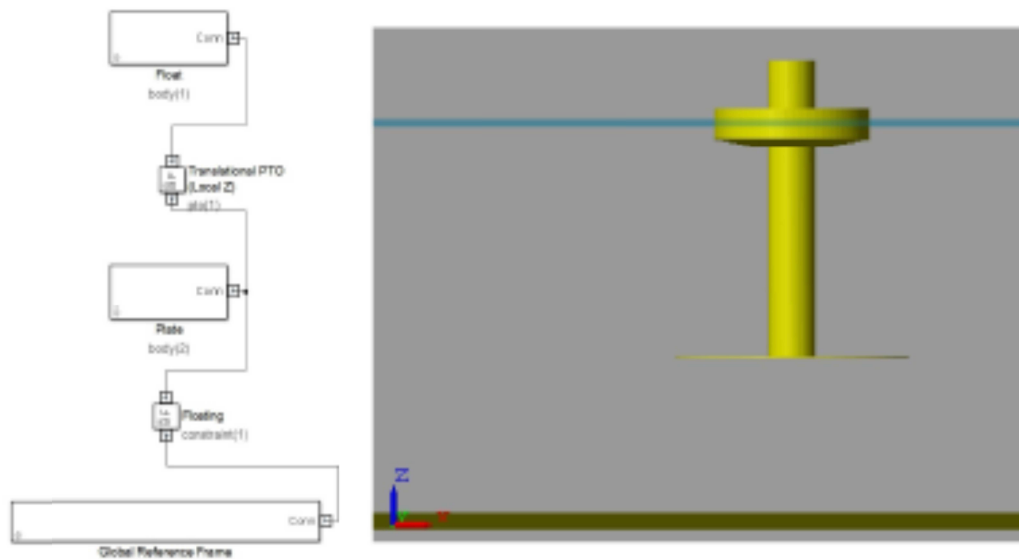


Figure 6.6: RM3 modeled in WEC-Sim (left-hand side) and with the GUI (right hand side)

## 6.2 Surge-Pitch 装置

### 6.2.1 形状定義

WEC-Sim コードの 2 番目の適用例は Surge 振動 WEC 装置(OSWEC)である。OSWEC の設計は RM3 とは基本的に異なるのため選択された。WEC の設計空間は広大にわたるため、これは致命的である。また、異なる法則で作動する装置を WEC-Sim でモデル化することは重要である。OSWEC は地面に固定され、フラップをもつ。フラップはヒンジを通じて基礎に接続される。基礎はフラップ運動をヒンジに関してピッチ方向に拘束する。OSWEC の原寸を図 6.7 に示す。また、質量分布を表 6.2 に示す。

### 6.2.2 WEC-Sim を用いた OSWEC のモデル化

本節では、WEC-Sim で OSWEC シミュレーションをセットアップし実行する段階的な方法を示す。3 章に記述されたように、全ての WEC-Sim モデルは、入力ファイル (wecSimInputFile.m) および Simulink モデル(OSWEC.slx)から構成される。WAMIT の流体力もあらかじめ計算しておく。WAMIT 出力ファイルは wamit サブフォルダの oswec.out である。さらに、WEC-Sim 可視化のため、重心を座標系原点とした 3D 形状を <WEC model name>.stl で指定する必要がある。フラップと基礎から構成される OSWEC では、geometry サブフォルダに位置する flap.stl と base.stl に相当する。

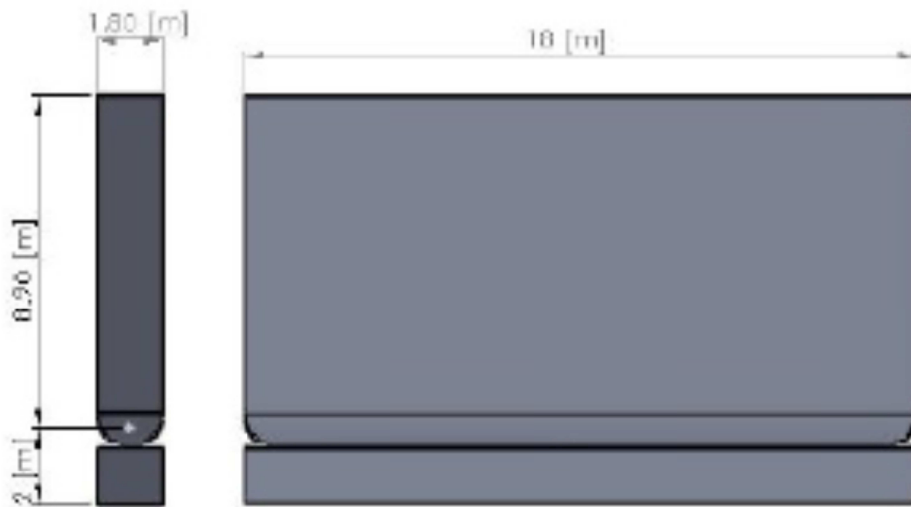


Figure 6.7: OSWEC pitching device full-scale dimensions

Table 6.2: OSWEC pitching device full-scale mass properties

Flap Full Scale Properties		
CG [m]	Mass [kg]	Pitch Moment of Inertia [kg-m <sup>2</sup> ]
0	127,000	1,850,000
0		
-3.9		

### OSWEC Simulink モデルファイル

WEC-Sim シミュレーションの第 1 段階は、Simulink モデルファイルの作成である。WEC-Sim ライブラリからブロックを<WEC model name>.slx にドラッグする。(詳細は 4 章参照。)

**ステップ 1:** Simulink モデルファイルの WEC-Sim ライブラリから 2 つの Rigid Body ブロックをドラッグし配置する。図 6.8

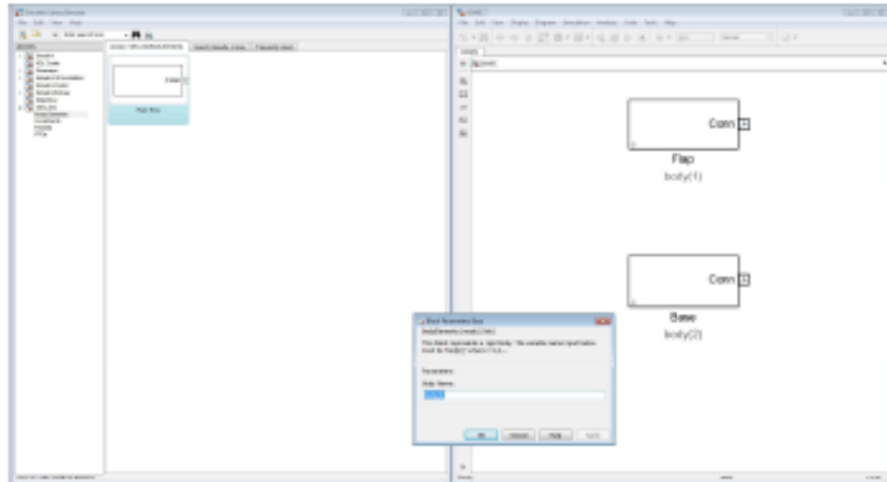


Figure 6.8: Adding two Rigid body blocks to the OSWEC WEC-Sim model

**ステップ 2:** Rigid Body ブロックをダブルクリックし、物体を改名する。最初の物体を body(1)、第 2 の物体を body(2) と名付ける。これらの物体ブロックの特性は OSWEC MATLAB 入力ファイル(節 6.2.2)に定義される。

**ステップ 3:** 図 6.9 のように、Simulink モデルファイルの WEC-Sim ライブラリから Global Reference Frame ブロックを配置する。Global Reference Frame は基礎として働く。他のすべての物体はジョイントや拘束によって基礎にリンクされる。

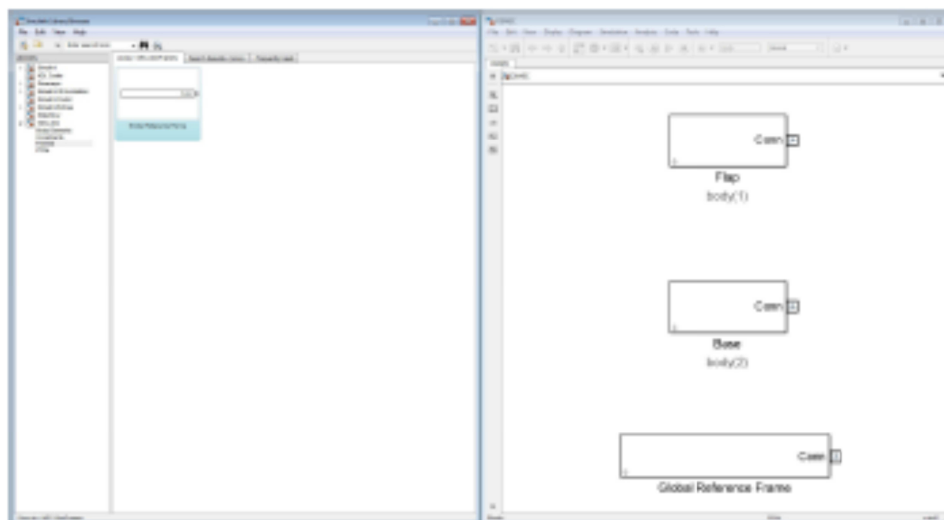


Figure 6.9: Adding a Global Reference Frame block to the OSWEC WEC-Sim model



**ステップ 4:** 海底にプレートを接続するため、Floating 拘束ブロックを使用する。OSWEC 基礎はグローバル座標系に固定されるので、これが必要である。ステップ 4 と 5 接続図を図 6.10 に示す。

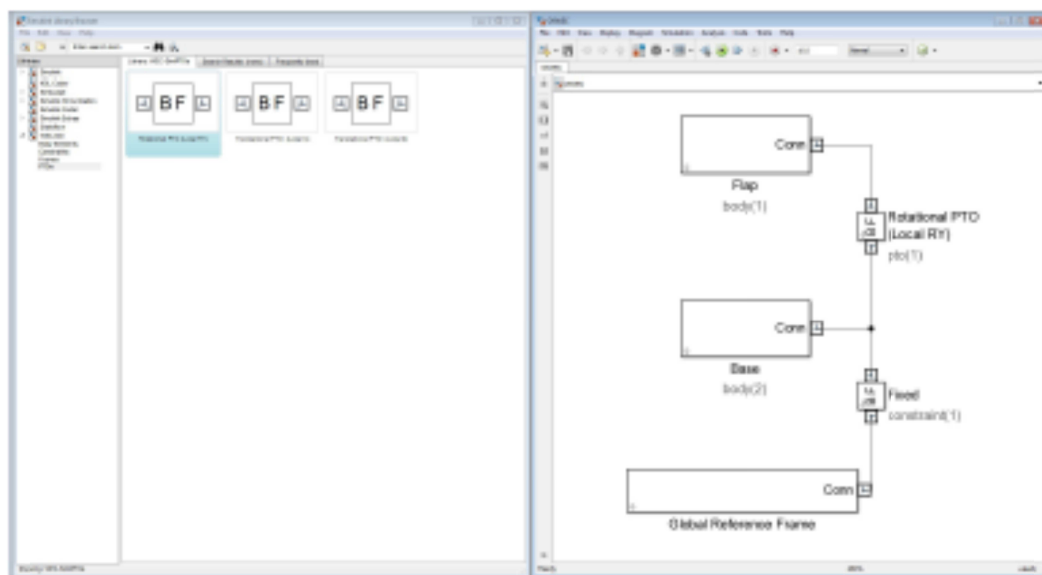


Figure 6.10: Adding pto and constraint blocks to the OSWEC WEC-Sim Simulink model

**ステップ 5:** フラップと基礎を接続するため、rotational PTO ブロックを配置する。フラップ運動が基礎に対してピッチ方向に拘束されるため、これが必要である。OSWEC シミュレーションでは、rotational PTO が使用された。

WEC の PTO を線形の回転ダンパとしてモデル化する。入力パラメタは(節 6.2.2)に定義される。

WEC-Sim モデルのセットアップにおいて、基礎とフォロアーの座標系に注意することは重要である。例えば、基礎と海底の間の拘束は、グローバルな座標系であるのため、海底は基礎として定義されるべきである。

### OSWEC MATLAB 入力ファイル

本節では、OSWEC モデルの WEC-Sim MATLAB 入力ファイル(wecSimInputFile.m)を定義する。各行には定義されたパラメタの説明コメントがある。OSWEC モデルのシミュレーションパラメタ、船体特性、PTO、拘束を定義する。OSWEC のパラメタの各々は下に定義された。RM3 の入力パラメタを図 6.11 に示す。

```

% Simulation Data
simu.startTime=0;
simu.endTime=400;
simu.dt = 0.1;
simu.simMechanicsFile = 'OSWEC.slx';
simu.mode='normal';

simu.explorer='on';

% Wave Information
waves.H = 2.5;
waves.T = 8;
waves.type = 'regular';

% Body Data
body(1) = bodyClass('Flap');
body(1).hydroDataType = 'wamit';
body(1).hydroDataLocation = ...
    'wamit/oswec.out';
body(1).mass = 127000;
body(1).cg = 'wamit';
body(1).momOfInertia = ...
    [1.85e6 1.85e6 1.85e6];
body(1).geometry = 'geometry/flap.stl';

body(2) = bodyClass('Base');
body(2).hydroDataType = 'wamit';
body(2).hydroDataLocation = ...
    'wamit/oswec.out';
body(2).geometry = 'geometry/base.stl';
body(2).fixed = 1;

% PTO and Constraint Parameters
constraint(1)=...
    constraintClass('Constraint1');

pto(1)=ptoClass('PTO1');
pto(1).k=0;
pto(1).c=0;
pto(1).loc=[0 0 -8.9];

% Simulation Start Time [s]
% Simulation End Time [s]
% Simulation Delta Time [s]
% Specify Simulink Model File
% Specify Simulation Mode
% (normal/accelerator
% /rapid-accelerator)
% Turn SimMechanics Explorer
% (on/off)

% Wave Height [m]
% Wave Period [s]
% Specify Type of Waves

% Initialize bodyClass for Flap
% Specify BEM solver
% Location of WAMIT *.out file

% User-Defined mass [kg]
% Cg from WAMIT [m]

% Moment of Inertia [kg-m^2]
% Geometry File

% Initialize bodyClass for Base
% Specify BEM solver
% Location of WAMIT *.out file

% Geometry File
% Creates Fixed Body

% Initialize ConstraintClass
% for Constraint1

% Initialize ptoClass for PTO1
% PTO Stiffness Coeff [Nm/rad]
% PTO Damping Coeff [Nm/rad]
% PTO Global Location [m]

```

Figure 6.11: WEC-Sim input file for the OSWEC).

## OSWEC WEC-Sim ・モデル

一旦 WEC-Sim Simulink モデルがセットアップされ、OSWEC 特性が MATLAB 入力ファイルに定義されれば、WEC-Sim で OSWEC モデルを実行できる。図 6.12 は、シミュレーション中の OSWEC Simulink モデルおよび WEC-SimGUI を示す。OSWEC 装置の WEC-Sim シミュレーションの詳細は[13] と[14]を参照のこと。

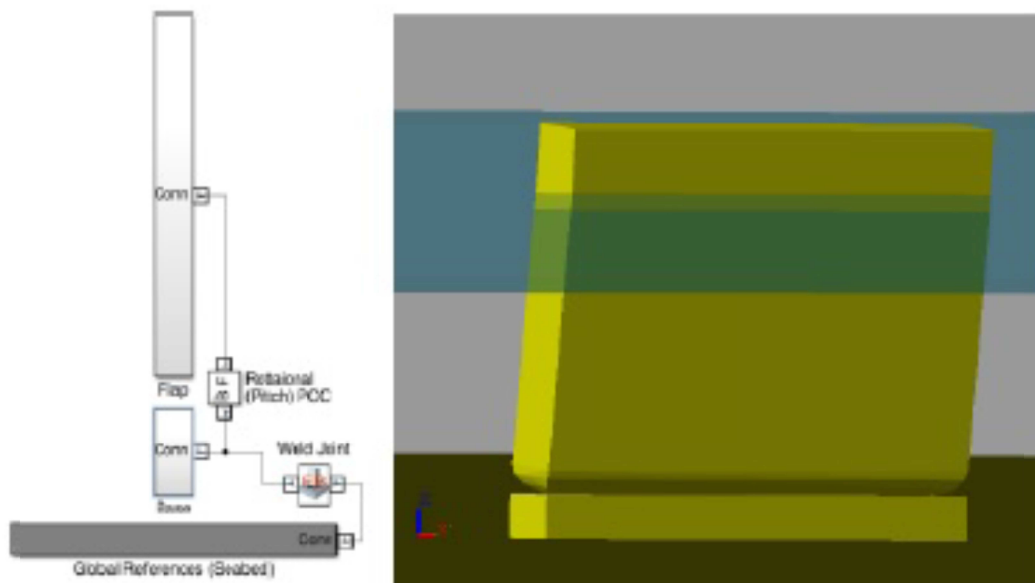


Figure 6.12: OSWEC modeled in WEC-Sim (left-hand side) and with the GUI (right-hand side)

### 6.3 WEC-Sim テストケース

WEC-Sim ディレクトリの applications フォルダ内に 2 つの WEC-Sim コード適用例がある。最初の適用例は、WEC-Sim コードを用いた RM3 WEC のモデル化である。また、第 2 の適用例は、OSWEC 装置のモデル化である。ユーザーは WEC-Sim コード、提供されたスクリプトを変えるデバッグのため、WEC-Sim の旧バージョン結果を最新の実行結果と比較する。これらのテストケースは RunTestCase.m スクリプトの実行により使用される。このスクリプトは、オリジナルの WEC-Sim 結果を含む \*.mat ファイルを取り込み、最新の WEC-Sim 実行結果と比較する。

#### 6.3.1 RM3 試訴

RM3 について、テストケースは以下のパラメータを使用してセットアップされる:

#### Wave Environment

Wave Type = Regular Waves (Sinusoidal Steady-State)

Wave Height H (m) = 2.5

Wave Period T (sec) = 8

## WEC-Sim Simulation Settings

Time Marching Solver = Fourth-Order Runge-Kutta Formula

Start Time (sec) = 0

End Time (sec) = 400

Time Step Size (sec) = 0.1

Ramp Function Time (sec) = 100

## List of PTO(s)

Number of PTOs = 1

PTO stiffness (N/m) = 0

PTO Damping (Ns/m) = 1.2E+06

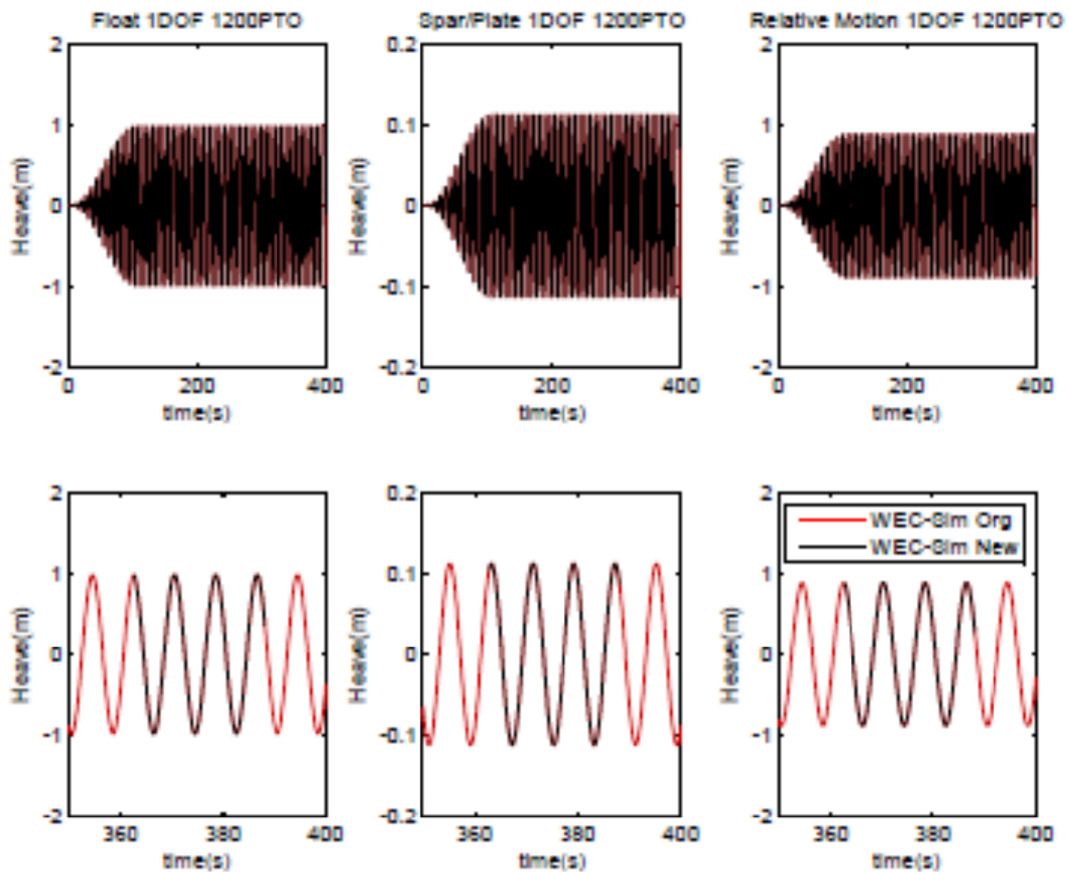


Figure 6.13: WEC-Sim test plot for RM3: Full simulation (top); last six periods (bottom)

### 6.3.2 OSWEC テストケース

OSWEC については、テストケースは以下のパラメタでセットアップされる:

#### Wave Environment

Wave Type = Regular Waves (Sinusoidal Steady-State)

Wave Height  $H$  (m) = 2.5

Wave Period  $T$  (sec) = 8

#### WEC-Sim Simulation Settings

Time Marching Solver = Fourth-Order Runge-Kutta Formula

Start Time (sec) = 0

End Time (sec) = 400

Time Step Size (sec) = 0.1

Ramp Function Time (sec) = 100

#### List of PTO(s)

Number of PTOs = 1

PTO stiffness (Nm/rad) = 0

PTO Damping (Nsm/rad) = 0

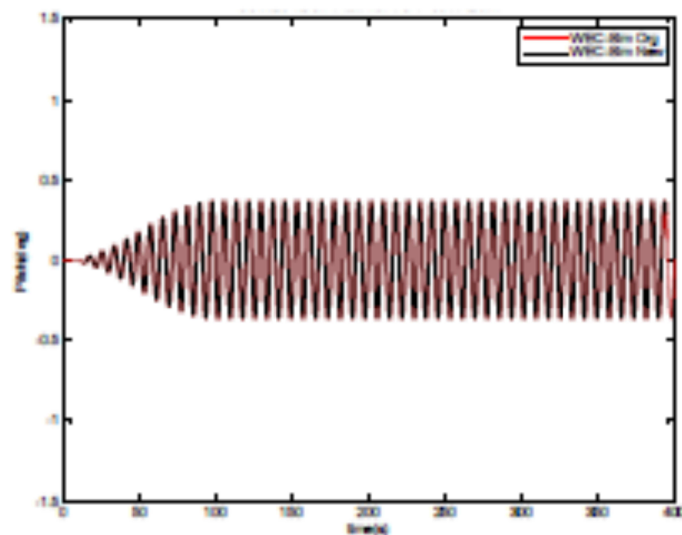


Figure 6.14: WEC-Sim test plot for OSWEC full simulation