

## 5. 流体解析モデル

弾性体応答解析法の代表的なプログラム CAsT (Computer Aided Aerodynamic and Aeroelastic Technology) において、流体力は、モリソン式を用いて、各部材に働く流体力の分布荷重が評価されている。石原ら (2013)<sup>19</sup> は、モリソン式で考慮されていない軸方向流体力についてヒーププレートに作用するフルードクリロフ力、付加質量力、非線形減衰力を評価しているが、造波減衰力およびヒーププレート以外の部材の軸方向流体力は考慮していない。

石原ら (2015)<sup>38</sup> は、モリソン式を用いて、従来考慮されていない流体力が動揺予測精度に関する影響を定量的に評価しているので紹介することにする。彼らは、係留索の有限要素法モデルを用いて流体力の考慮の有無が変動係留力の予測精度に及ぼす影響を定量的に評価するとともに、モリソン式および係留索の有限要素法モデルを用いて、不規則波中の浮体動揺と係留力の予測精度を評価している。

### 5.1 動解析モデル

#### 5.1.1 運動方程式

CAsT では、有限要素法に基づき、風車・浮体・係留索を 6 自由度の梁要素に定式化し、運動方程式を解いている。一般的に、浮体式洋上風力発電システムにおける浮体の運動方程式は式 5.1-1 に表される。

$$M\{\ddot{x}\} + C\{\dot{x}\} + K\{x\} = \{F_G\} + \{F_B\} + \{F_H\} + \{F_M\} + \{F_R\} \quad \text{式 5.1-1}$$

ここで、

- $x$  : 浮体の変位
- $M$  : 慣性力マトリクス
- $C$  : 減衰マトリクス
- $K$  : 剛性マトリクス
- $F_G$  : 重力
- $F_B$  : 浮力
- $F_H$  : 流体力
- $F_M$  : 係留力
- $F_R$  : 復元力

流体力は、波強制力 (フルードクリロフ力、ディフラクション力)、ラディエーション流体力 (造波付加質量、造波減衰力)、非線形減衰力の 3 つに分類される。細部材では、波の変形によるディフラクション力が無視でき、粘性影響による非線形抗力が支配的であり、モリソン式が適用される。一方、大部材では、部材による波の変形・回折の影響が大きく、浮体の運動による造波減衰力と反射波による波強制力が支配的であり、ポテンシャル理論が適用される。

## 5.1.2 流体力の評価

### 1) 軸直交方向流体力

軸直交方向の流体力は、細部材と大部材ともにモリソン式により評価されている。

$$f_n^i = m\dot{u}_n + C_{a,n}\rho\frac{\pi D^2}{4}(\dot{u}_n - \ddot{x}_n) + \frac{1}{2}C_{d,n}\rho D|u_n - \dot{x}_n|(u_n - \dot{x}_n)_{(i=s,l)} \quad \text{式 5.1-2}$$

ここで、

- $m$  : 部材の質量 (kg)
- $\rho$  : 流体密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $u_n$  : 水粒子の速度の部材直交成分 (m/s)
- $\dot{u}_n$  : 水粒子の加速度の部材直交成分 (m/s<sup>2</sup>)
- $C_{a,n}$  : 軸直交方向の付加質量係数
- $C_{d,n}$  : 軸直交方向の抗力係数
- $D$  : 部材の直径 (m)

第1項は入射波の圧力によるフルードクリロフ力、第2項は波と浮体の相対速度に比例する付加質量力、第3項は抗力項を表す。 $s$ は細部材、 $l$ は大部材を示す。

### 2) 軸方向流体力

軸方向流体力について、モリソン式は考慮しないため、ここでは、細部材については、フルードクリロフ力を考慮し、ラディエーション流体力は微小として省略した (式 5.1-3)。なお、 $A$ は部材の断面積を示す。

$$f_t^s = \rho \iint_A (\vec{u}_t) dA \quad \text{式 5.1-3}$$

ここで、

- $\rho$  : 流体密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $A$  : 部材の断面積(m<sup>2</sup>)

大部材については、式 5.1-4 に示すように、フルードクリロフ力、浮体動揺による付加質量力、粘性影響による抗力が考慮されている。

$$f_t^l = \rho \iint_A \left( \vec{u}_t \right) dA + C_{a,t} \rho V (\dot{u} - \ddot{x})$$

式 5.1-4

$$+ \frac{1}{2} C_{d,t} \rho A |u_t - \dot{x}_t| (u_t - \dot{x}_t)$$

ここで、

- $\rho$  : 流体密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $A$  : 部材の断面積 (m<sup>2</sup>)
- $C_{a,t}$  : 軸方向負荷質量係数
- $V$  : 浮体動揺の負荷質量 (m<sup>3</sup>)
- $C_{d,t}$  : 軸方向抗力係数

### 3) 造波減衰力の考慮

モリソン式が考慮しない造波減衰力の影響を検討するため、ラディエーションポテンシャル  $\varphi(\mathbf{x})$  より求めた造波減衰力  $B_j$  を、とりうる波の周波数領域  $[f_1, f_2]$  で平均し、式 5.1-5 に示す等価的な造波減衰力  $C_{RD,j}$  を評価している。ここで  $j$  は自由度を表す。

$$f_{RD,j} = C_{RD,j} \dot{x} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} B_j(f) df}{f_2 - f_1} \dot{x} \quad \text{式 5.1-5}$$

$$B_j = -\rho \int_A R_e[\varphi(X)] n_j dA \quad \text{式 5.1-6}$$

ここで、

- $C_{RD,j}$  : 造波減衰力
- $B_j$  : 造波減衰力
- $j$  : 自由度
- $f$  : 周波数 (Hz)
- $\rho$  : 流体密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $R_e$  : レイノルズ数
- $\varphi$  : ラディエーションポテンシャル
- $A$  : 部材の断面積 (m<sup>2</sup>)

### 4) 流体力評価のまとめ

本研究で考慮されている流体力を表 5.1-1 に示す。白丸印が従来のモリソン式で考慮される項であり、黒丸印が追加して考慮した項である。軸直交方向流体力について、従来のモリソン式に加えて、造波減衰力を考慮した。軸方向流体力について、細部材ではフルードクリロフ力を、大部材ではフルードクリロフ力、付加質量力、非線形抗力を考慮した。

表 5.1-1 流体力の評価項目<sup>38</sup>

項 目	細部材		大部材	
	軸直交	軸方向	軸直交	軸方向
フルードクリロフ力	○	●	○	●
ディフラクション力	N	N	N	N
粘性影響による抗力	○	N	○	●
造波付加質量	○	N	○	●
造波減衰力	●	N	●	N

注) ○：モリソン式で考慮、●：本研究で新たに考慮、N：考慮せず

本研究で用いられた流体力係数は、表 5.1-2 に示す通りである。軸直交方向の抗力係数・付加質量係数は、潮流中試験のサージ方向の動揺および自由振動試験の固有周期を用いて同定されている。ヒーププレートに作用する軸方向の抗力係数は、規則波中試験のヒープ方向の動揺から同定された。軸方向の付加質量は、ヒーププレートの底面を直径とする半球に相当する体積を与えると同時に、造波減衰力は、ポテンシャル理論を解く汎用ソフト AQWA を用いて評価している。なお、評価した造波減衰力はヒープ方向とピッチ方向は微小であったため、サージ方向だけを考慮し、周波数領域を 0.33Hz～0.625Hz とし、式 5.1-5 から  $C_{RD,surge}$  を求めている。

表 5.1-2 要素別の流体力係数<sup>38</sup>

要 素	係 数
軸直交付加質量係数	$C_a, n=2.2$
軸直交抗力係数	$C_d, n=1.2$
軸方向付加質量係数	$C_a, t=2/3 \pi D^3/V$
軸方向抗力係数	$C_d, t=4.8$
造波減衰力係数	$C_{RD, surge}=4.1$

### 5.1.3 数値解法

数値モデルでは、浮体・係留を Saint-Venant のねじりを考慮する 6 自由度の梁要素により定式化されている。各要素に作用する力および質量を要素の両端の接点に等分配し、全接点における連立運動方程式を求める。

参照座標系は、Total Lagrange で定式化し、構造減衰に Reyleigh 減衰を適用し、減衰比の評価にはサージ方向とピッチ方向の固有周期を用いている。本研究では、風車と浮体を 117 のビーム要素でモデル化し、係留索を 50 のトラス要素でモデル化した。構築した解析モデルの妥当性は、静的試験および自由振動試験の結果と比較することにより検証している。

## 5.2 水槽試験と数値解析の結果

### 5.2.1 水槽試験の概要

水槽試験と動揺解析で用いる浮体は、福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業で用いら

れている 2MW 風車搭載カタナリー係留セミサブ浮体で、動揺予測結果の検証を行うために、1/50 スケールの水槽試験が株式会社三井造船昭島研究所の潮流水槽を用いて実施された（水槽は長さ 55m×幅 8m×水深 3m）。

フルードの相似則に従い、浮体の剛体模型を作成するとともに（図 5.2-1）、水槽内の浮体模型と係留索の配置状況を図 5.2-2 に示す（水深は 2.5m に設定）。座標は、センターカラム上にある浮体の中心を XY 座標原点とし、喫水線を Z 軸原点としている。入射波高は、模型前方および横に設置されている波高計で計測するとともに、浮体の動揺は浮体に設置したターゲットの動きをカメラにより撮影し、運動解析により 6 自由度の変位に変換したデータが取得されている。



図 5.2-1 浮体の剛体模型<sup>38</sup>

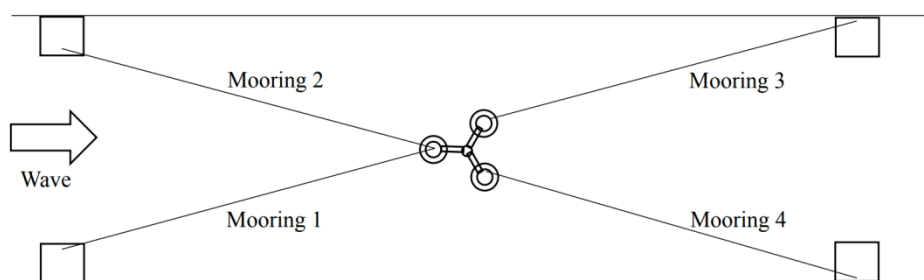


図 5.2-2 浮体と係留の配置<sup>38</sup>

### 5.2.2 造波減衰力が浮体動揺に及ぼす影響

造波減衰力の影響を評価するために、自由振動中における造波減衰を考慮する場合と、しない場合の浮体動揺の予測値と実験値が比較されている。造波減衰比を考慮しない場合は、ヒープ方向、ピッチ方向について予測精度は良かったものの、サージ方向については、過小評価となっていた。これは、図 5.2-3 に示す造波減衰力の予測値から分かるように、ヒープ方向、ピッチ方向には造波減衰力がほとんど生じないためとされている。

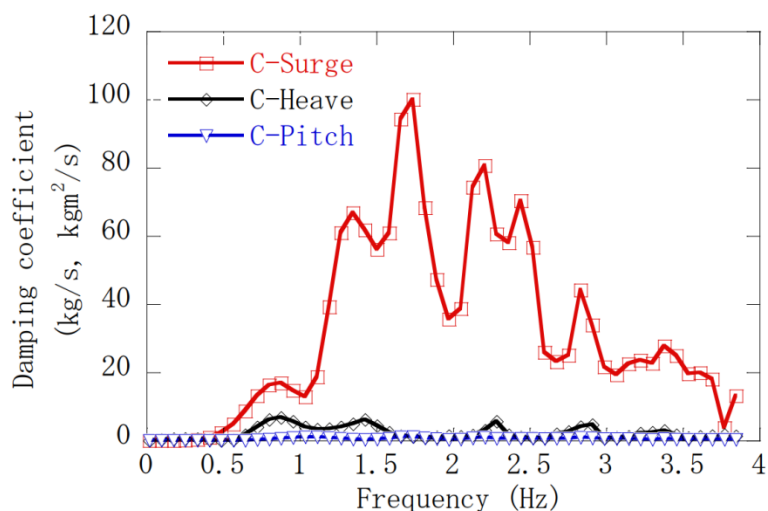


図 5.2-3 ポテンシャル理論による造波減衰力<sup>38</sup>

サージ方向の自由振動試験の実験値と予測値との時系列の比較を図 5.2-4 に示すとともに、表 5.2-1 には減衰比を評価した結果を示す。減衰比は、実験で 6.63、造波減衰力を考慮した場合に 6.87、考慮しない場合が 4.94 で、造波減衰力を考慮したケースで予測精度が向上している。このように、大振幅を生じる場合は、造波減衰の影響が大きいことが分かった。また、規則波中試験においては、波強制力がラディエーション流体力の影響を上回るため、造波減衰の影響はほとんどなかった。

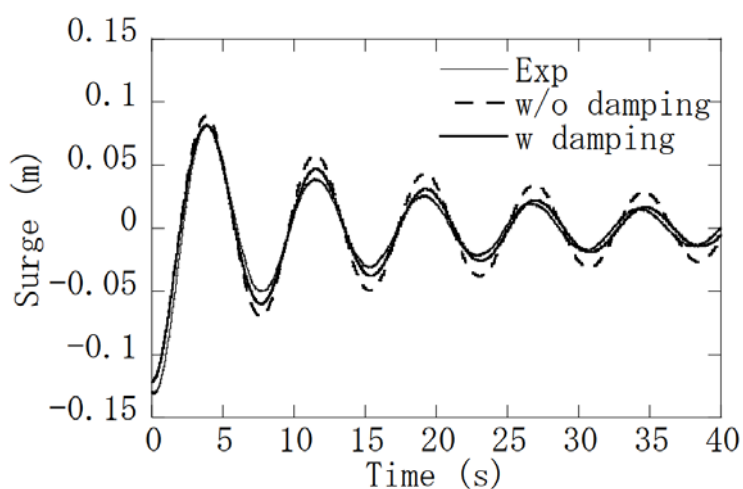


図 5.2-4 サージ方向の自由振動試験の実験値と予測値との時系列図<sup>38</sup>

表 5.2-1 減衰比 (%) の測定および予測<sup>38</sup>

	Exp.	Cal.w/o Damp.	Cal.with Damp.
Surge	6.63	4.94	6.87

### 5.2.3 フルードクリロフ力が浮体動揺に及ぼす影響

細部材に対するフルードクリロフ力の影響を評価するために、波高 0.1m の規則波中において

フルードクリロフ力を考慮しない場合と、した場合の浮体動揺の予測値と実験値が比較されている（図 5.2-5）。本図に示すように、フルードクリロフ力を考慮しない場合はヒープ方向の動揺の振幅において、短周期における過小評価、長周期における過大評価となって位相のずれがみられたが、考慮した場合には予測精度が向上している。また、図 5.2-6 には、軸方向のフルードクリロフ力を考慮した場合と、しない場合のヒープ方向の波力を示す。軸方向のフルードクリロフ力の有無により、ヒープ方向の波力が変化している。図 5.2-7 には不規則波中のヒープ方向の動揺予測結果を示す。規則波中において予測精度が向上した波周期に対応して、動揺の予測精度が向上している。

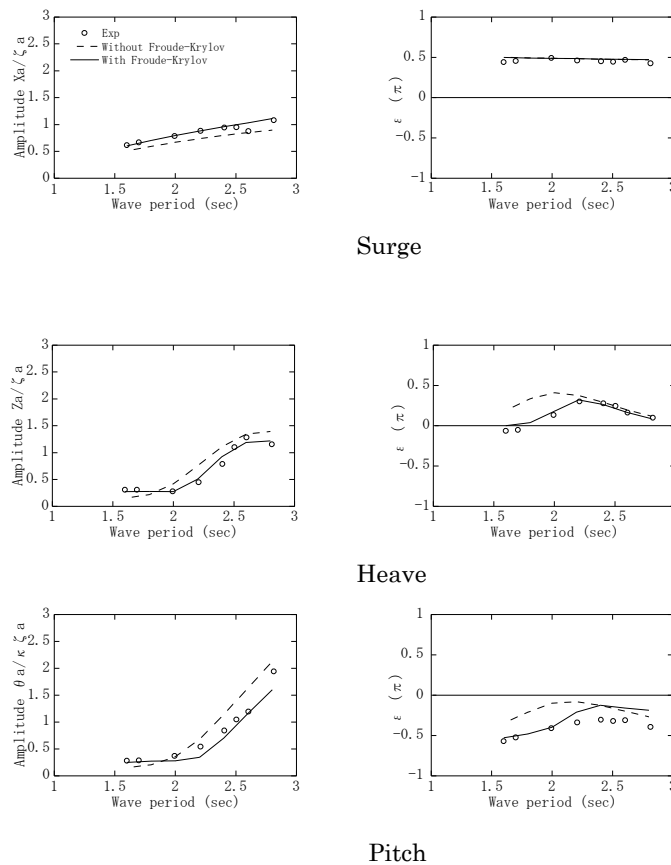


図 5.2-5 規則波中のフルードクリロフ力の有無による浮体動揺の予測値と実験値の比較<sup>38</sup>

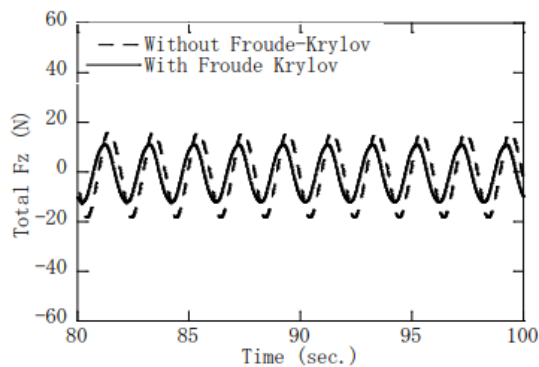


図 5.2-6 軸方向のフルードクリロフ力の有無によるヒープ方向の波力<sup>38</sup>

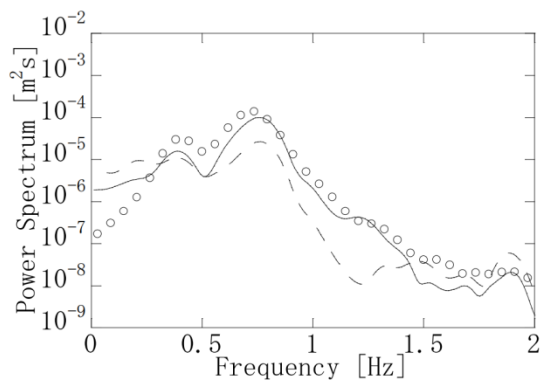


図 5.2-7 不規則波中のヒープ方向の動揺予測結果<sup>38</sup>

#### 5.2.4 流体力が係留索の変動張力に及ぼす影響

流体力の考慮の有無の影響を検討するために、規則波中における係留索 1 の変動張力について、流体力を考慮しない場合と考慮した場合の予測値と実験値を比較した (図 5.2-8)。本図から、流体力を考慮しない場合、変動張力 T1 を 4 倍近く過大評価したのに対して、流体力を考慮した場合は、誤差は大きく減少していることが読み取れる。このことから変動張力の評価には、流体力の評価が極めて重要であることが分かる。また、図 5.2-9 には不規則波中における変動張力の予測結果を示す。流体力を考慮した場合は、しない場合と比較して、予測精度が大きく向上していることが分かる。

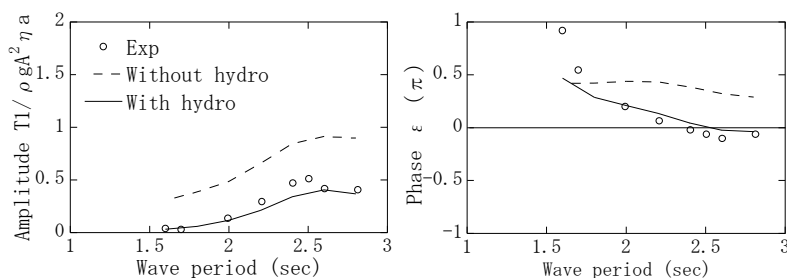


図 5.2-8 規則波中の係留索の張力の変化 (左図：振幅、右図：位相)<sup>38</sup>

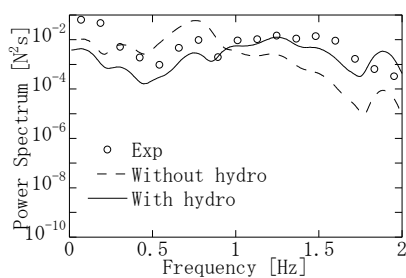


図 5.2-9 不規則波中の係留索の張力の予測値と実験値の比較<sup>38</sup>