

4. 連成解析モデル

浮体式洋上風力発電施設の設計は、風力発電設備、浮体施設および係留系に対する風、波等の外部条件による荷重が考慮されるとともに、風力発電設備の制御による施設への動揺に伴う荷重も取り上げられている。これらの解析には、時間領域での連成解析を行わねばならない。このように、浮体式洋上風力発電施設は、空力的な現象と水力的な現象が連成するため、数値解析ツールはこれらを評価できるものである必要がある。

一般に、連成解析モデルとは、複数の異なる領域（風、波等）の事象が相互に関連を有する場合に、これらの相互作用を考慮した解析モデルのことである。浮体式洋上風力発電施設の解析ツールは、欧米を中心として開発されてきているが、わが国でも東京大学、九州大学等により研究が実施されている。国際共同研究として、IEA-Wind Task23 および Task30 において、浮体式風車の解析およびコード検証が行われ、前者ではスパー式、後者ではセミサブ式が解析対象となっている。

4.1 連成解析モデルの概要

浮体式洋上風力発電施設の設計に利用可能な国内外の連成解析モデルは表 4.1-1 に示すように、多くのモデルが公表され、それぞれ特徴を有している。

空力評価は、空力解析モジュールとして、翼素運動量理論モデル（BEM）を用いて空力特性計算（AeroDyn）を行うもので、浮体運動に伴う翼素への流入風速の変化を考慮して評価する。なお、風車ブレードのピッチ制御は一般には回転速度制御としている。

浮体力評価は、浮体に働く波荷重を水力学計算（HydroDyn）より求め、復原力として浮体の構成部材毎の浮力、波力として浮体の没水領域の波力の変化を評価する。

係留モデルは、係留索取り付け部分の変位、速度、加速度等の力を評価する。

時間領域解析は、これらの風荷重、波荷重の時系列履歴データを用いて、構造系に作用する応力を計算し、風力発電設備、浮体施設および係留系による応答計算結果について時間刻みを細かく取って繰り返し計算を行い、疲労荷重と極値荷重を求めるものである。

表 4.1-1 連成解析に利用可能なコード³⁰（鈴木,2014 より作成）

解析コード	システムモデル	空力評価	浮体力評価	係留モデル	備考
NREL FAST(2009) 米国	MBS+モード	AeroDyn (BEM)	HydroDyn (流体力係数: WAMIT)	準静的	
CHARM3D+FAST(2008) 米国	剛体	AeroDyn	流体力係数: WAMIT	非線形棒要素 (FEM)	
TimeFloat+FAST(2009) 米国	剛体	AeroDyn	流体力係数: WAMIT	準静的係留力	WindFloatに適用
SIMO/RIFLEX+HAWC2(2009) ノルウェー	線形FEM, 非線形MBS	HAWC2 (BEM)	流体力係数: WAMIT Morison抗力	RIFLEX (FEM)	Hywindに適用
GH Bladed(2010) 英国	MBS+モード	BEM	Morison式 Wheeler stretching	非線形係留力	
MSC ADAMS	MBS	AeroDyn	HydroDyn	準静的係留力	
3Dfloat(2009) ノルウェー	梁モデル	BEM	Morison式	梁要素 (FEM)	
UTWind(2011) 日本	線形FEM	BEM	Hooft'sの方法 (Morison式)	ランプドマス	

注) FEM:有限要素法、MBS:多体系動力学、BEM]翼素運動量理論

4.2 主要な連成解析モデル

表 4.1-1 に掲げた連成解析に利用可能なコードの内、主要なコードの概要を取りまとめる。

4.2.1 FAST

FAST (Fatigue,Aerodynamics,Structures,and Turbulence ; 米国) については、今村ら (2012)、今村 (2013) ³¹により概要が取りまとめられているので、以下に紹介する。

図 4.2-1 に FAST による空力弾性解析のフローを示す。FAST には、空力解析モジュールとして翼素運動量理論モデル (BEM) をベースとした AeroDyn が組み込まれており、これは構造計算 (FAST) との連成解析を行うための空力計算である。空力計算結果を入力することで、構造系に働く応力等が FAST により計算され、ブレードの挙動が再び AeroDyn の計算にフィードバックされる。時系列解析はこのプロセスを各時刻で計算を行うものである。計算結果として、発電出力、各要素に働く荷重および構造変位等の時系列データが出力される。

疲労寿命等の予測に必要な変動風の時系列データは、Turbsim 等により生成した風データを用い、FAST への入力データとする。乱流場は、風車ロータ回転面を含む断面の格子点上に、風速変動の時系列データが Turbsim により生成される。

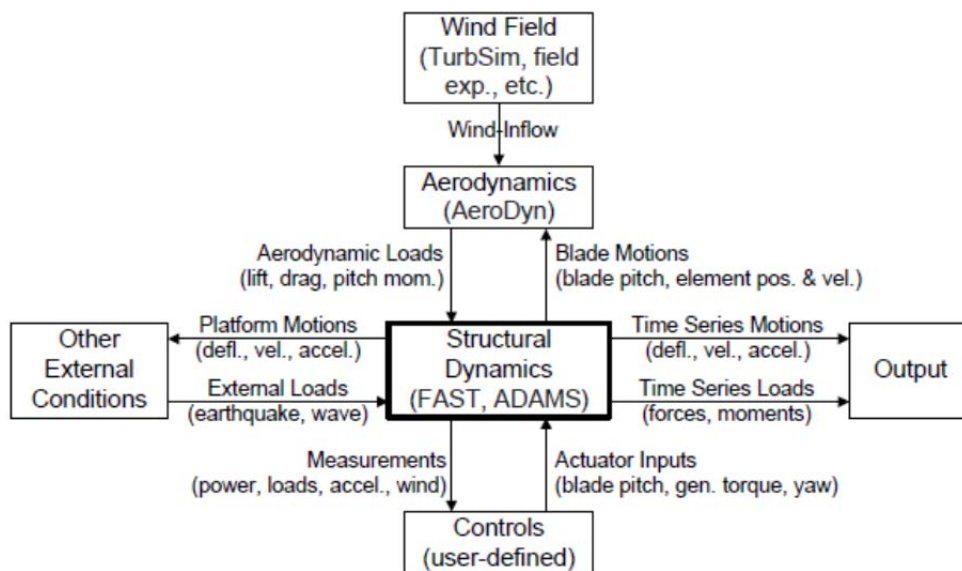


図 4.2-1 FAST による空力弾性解析のフロー³¹

FAST は、着床式および浮体式洋上風車の風車構造連成解析も可能である。風車・浮体の連成解析では、風車に働く風荷重を FAST/AeroDyn で、浮体に働く波荷重を HydroDyn でそれぞれ計算し、弱連成による時間領域において計算を行う。なお、FAST ではサージ方向 (x) およびヒープ方向 (y) の流体力を Morison 式の粘性項を用いて求めているが、ヒープ方向 (z) の粘性抗力は考慮されていない。図 4.2-2 に FAST の風車-浮体の連成解析モジュールの関係を示す。

FAST の波荷重に関するシミュレーションは、浮体運動解析モジュール HydroDyn を用いて行われる。HydroDyn の位置づけを図 4.2-3 に示すとともに、主な解析内容を以下に示す。

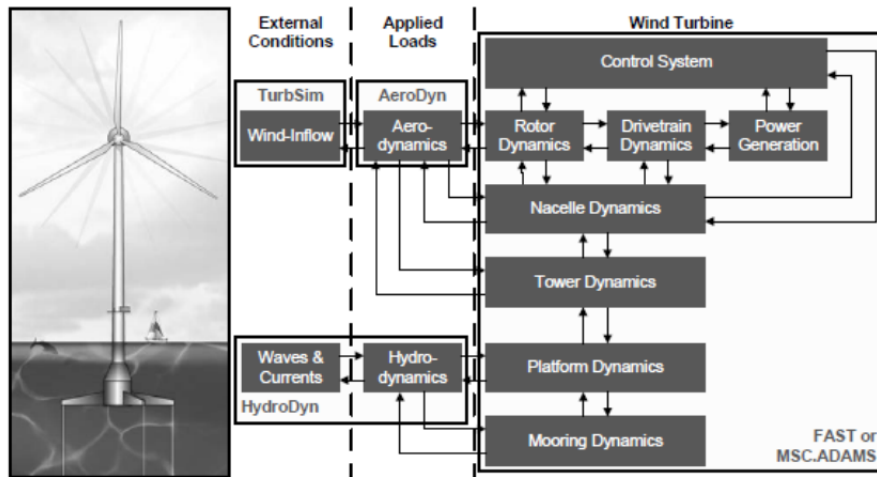


図 4.2-2 FAST の風車-浮体の連成解析モジュールの関係³¹

- ✓線形バネによる復原力
- ✓入射波、潮流、浮体運動による付加質量および自由表面のメモリ効果を含めた線形 wave-radiation による減衰力などを考慮した非線形抗力
- ✓規則または不規則波の線形 diffraction からの入射波による励起
- ✓Morison 式による流体の流れ方向から作用する動的流体力評価

浮体に働く荷重はその形状に依存することから、FAST では、任意の形状に対する流体力係数は WAMIT (WAVE MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) を用いて算出したデータを入力する。WAMIT は周波数領域における計算手法であるため、時間領域で計算を実施する FASTd では、HydroDyn により、WAMIT で求めた流体力係数に関して畳みこみを行っている。なお、HydroDyn では、非線形深水波および砕波、渦励起振動 (VIV)、氷荷重などは考慮しない。また、平均移動の二次オーダー効果、長周期および和周波数の励起も考慮されていない。

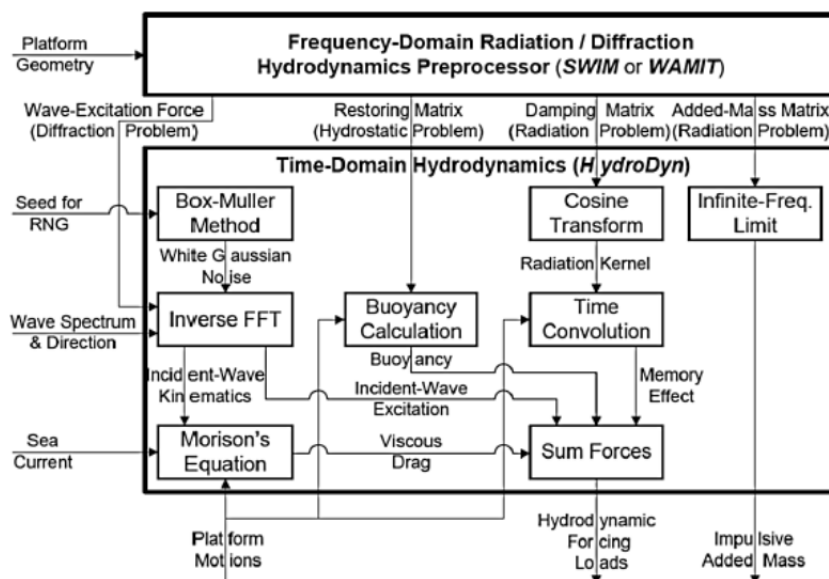


図 4.2-3 HydroDyn の概要³¹

FAST による解析例として、ヒーププレート有するセミサブ式浮体風車の運動解析結果を理論解、WAMIT（周波数領域解析）、UTWind および水槽試験により得られたサージ、ヒープおよびピッチ方向成分の RAO（周波数応答関数）の比較を図 4.2-4 に示す。なお、ここでは FAST のコードにヒープ方向の粘性抗力を扱う式を組み込んで解析した結果も示している。

FAST では WAMIT による周波数応答関数を入力として用いているため、各自由度の固有周期の値は WAMIT の影響を受ける。WAMIT の計算では、浮体の粘性抵抗は考慮されていないため、ヒーププレートの抗力が過小評価になり、サージ、ヒープおよびピッチの固有周波数における RAO は実験結果と比較して過大となっている。また、ヒープの固有周波数における RAO は実験結果と比較して大きな値を示し、理論値に近い。これに対して、FAST のコードにヒーププレート抗力モデルを付加した場合、それぞれの方向で RAO は著しく低減され、固有周波数よりも高い範囲で理論値よりも大きくなるものの、固有周波数の近くでは実験結果に近づく。また、固有周波数もヒープおよびピッチ方向で実験値に近づき、ヒーププレート抗力モデルを追加したことにより、FAST の解析が改善されたことが認められる。

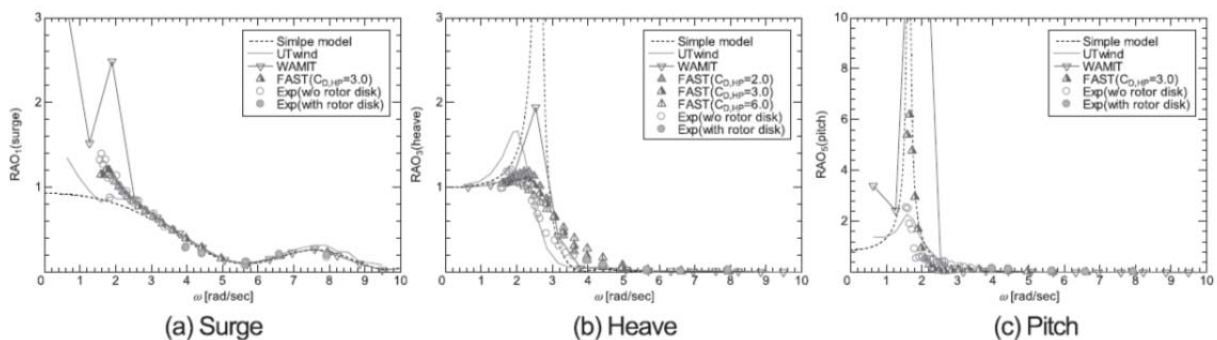


図 4.2-4 サージ、ヒープおよびピッチ方向成分の RAO の比較³¹

4.2.2 Bladed

Bladed ソフトウェアは GL Garrad Hassan (英国) により開発されたコードで、ここでは内田 (2013)³²により、その概要が取りまとめられているので、以下、紹介する。

外部条件による風荷重、波浪荷重について、空力学と水力学による解析から、それぞれの時系列履歴が生まれる。風荷重と波浪荷重は、構造プロパティおよびパワートレイン/制御システムと共に、構造動力への入力項目となり、構造動力の応答履歴は時系列解析され、風車設計の要である疲労荷重と極値荷重が計算される。Bladed の計算のフローチャートを図 4.2-5 に示す。

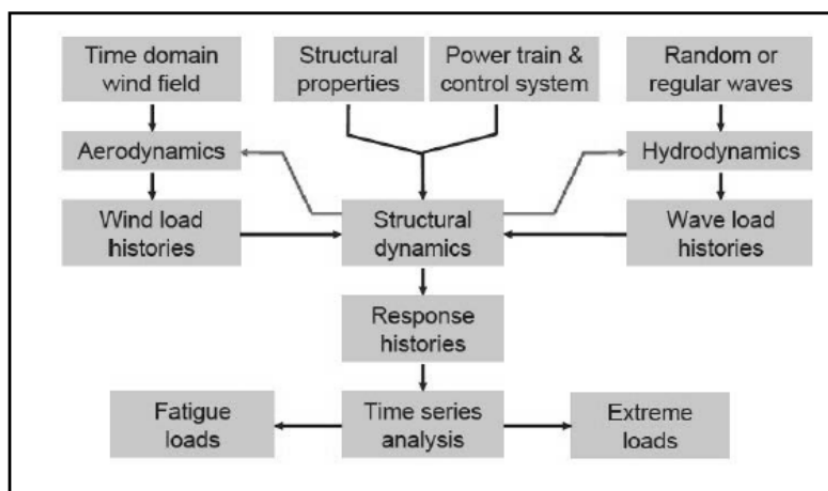


図 4.2-5 Bladed による計算のフローチャート³²

4.2.3 UTWind

UTWind ソフトウェアは東京大学にて開発されたコードで、ここでは柴田ら (2012)³³、鈴木 (2013)³⁴による概要報告を紹介する。

1) モデルの概要

構造部分のモデル化は、運動応答とともに内力の評価も可能なようにロータ、浮体を梁でモデル化されている (図 4.2-6)。ロータは、ロータ固定の回転座標系で記述し、慣性力としてコリオリ力、遠心力が考慮されている。なお、浮体は空間固定座標系で記述されているとともに、係留系モデルは線形バネとランプドマス法から選択する方法が取られている。

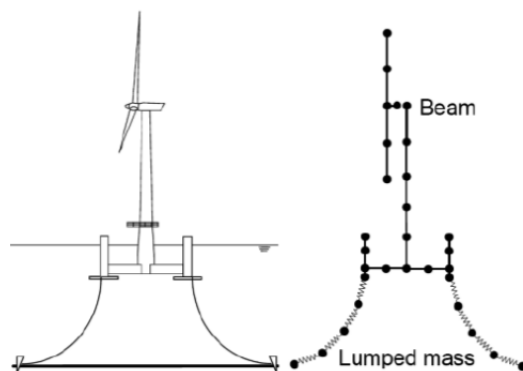


図 4.2-6 風車-浮体-係留系の構造モデル³⁴

空力荷重評価は、翼素運動量理論（BEM）を用いて、流体運動に翼素への流入風速の変化を考慮して評価する方法が取られている。

波荷重評価として、復原力は没水している部材表面での静水圧の積分結果として、浮体を構成する部材毎に浮力を求めることにより考慮されている。波力は、洋上風力発電設備が比較的細長い部材から構成されているため、波長に比べ、部材直径が小さく、波長と波高は同程度と考え、Hooftの方法が適用されている。これらを踏まえて、波力の評価は波表面下の波粒子運動に Wheeler のストレッチ法を用いて、時々刻々の浮体の没水領域について波力が評価されている。

時間領域解析法は、定式化されたロータ、浮体、係留系の運動方程式を弱連成解析により解析する方法である。UTWind の計算フローを図 4.2-7 に示す。

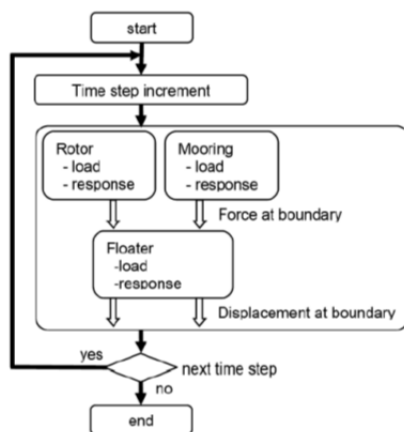


図 4.2-7 UTWind の計算フロー³⁴

2) 風車停止時の浮体式風車模型の検証

NK モデル 5MW セミサブ型浮体式風車の 1/40 モデルによる水槽試験による UTWind の妥当性の評価が行われている（図 4.2-8）。風車は、空力影響を無視し、円盤をサーボモーターで回転させることにより浮体に風車回転を模擬したジャイロ・モーメントを発生させる仕組みとなっている。

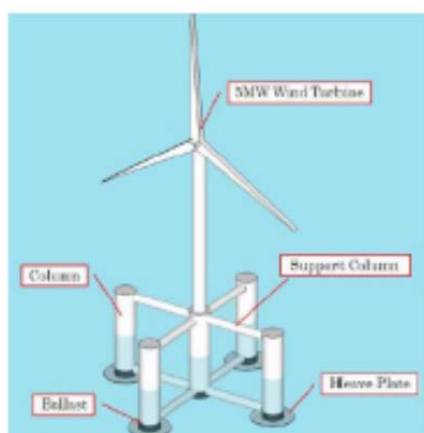


図 4.2-8 NK モデル 5MW セミサブ型浮体式風車³³

実験は、株式会社三井造船昭島研究所の潮流水槽において、浮体に入射する波の向き角度が 0 度と 45 度の 2 パターンに関して規則波を一定時間造波させ、6 自由度系の運動応答は各カラム上

端に取り付けたターゲットの変位を3台の CCD カメラで追跡することにより計測が行われている。

実験入射する波の向き角度が0度の場合の波周波数毎の時系列変位データから算出した応答関数 (RAO:Response Amplitude Operator) を図 4.2-9～図 4.2-11 に示す。図には、風車前方より規則波を一定時間造波させ、先頭波が浮体に到着後、60 秒間 0.01 秒間隔で得られた実験値をプロットしており、図中の WAMIT は波浪中浮体周波数応答解析プログラムによる解析結果である。なお、ロール、ヨー方向の変位は実験では検出可能なレベルは得られなかったと報告されている。また、円盤無回転時には造波機により同じ波周期でも異なった波振幅を有する2つの波パターン (Wave A と Wave B)、円盤回転時には Wave B についての実験が行われている。

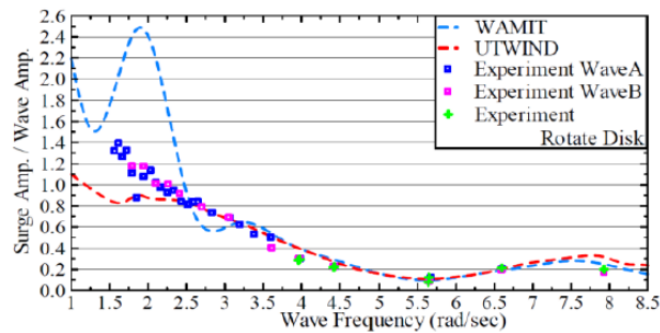


図 4.2-9 波周波数別の応答関数 サージ方向³³

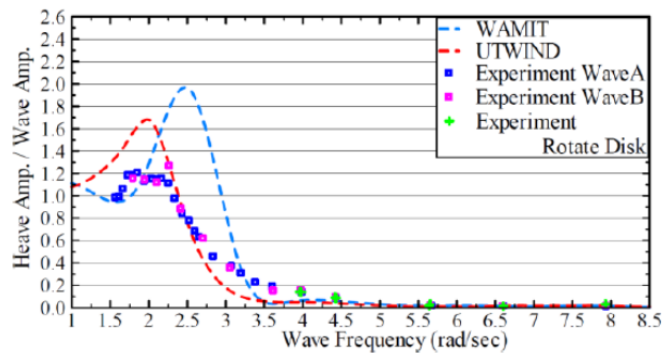


図 4.2-10 波周波数別の応答関数 ヒープ方向³³

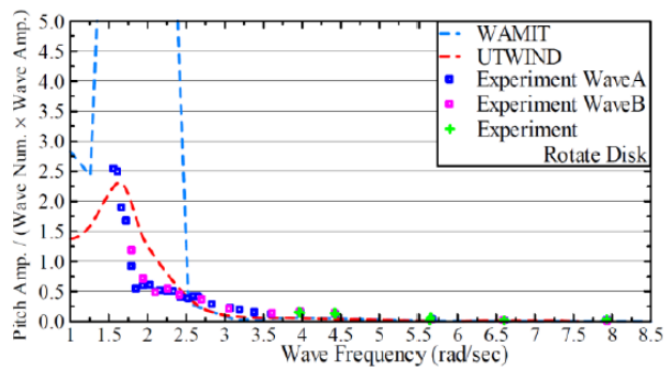


図 4.2-11 波周波数別の応答関数 ピッチ方向³³

実験結果は、図示されているように、UPWind はサージ、ヒープおよびピッチともに WAMIT よりも良好な再現性が得られている。WAMIT の計算結果では周波数 2-2.5rad/s 付近にピークが認められているのはピッチ方向との連成によると考えられている。また、円盤回転に伴うジャイロ効果はいずれの運動モードにおいても認められていない。なお、波の向き角度が 45 度のケースも同様な傾向を示している。

3) 風車運転時の浮体式風車模型の検証

2MW セミサブ型浮体模型 (1/50 スケール) を用いて、運転時の浮体式風車模型による検証実験が海上技術安全研究所海洋構造物水槽で行われている。搭載されている風車は、定格風速以上の風速の場合には実機と同様にピッチ制御が可能な仕組みとなっている。

実験は、風・波の単独試験および共存試験とともに、波向き角・風向き角も浮体模型に対して正面とそれ以外のケースが取り上げられ、実施されている

図 4.2-14 に波単独試験結果を示す。図示されているように、サーブ、ヒープおよびピッチともに、概ね実験値と UTWind の計算結果とは良好な一致性が認められるが、ピッチ方向の長周期帯で両者の差が顕著となっている。

その他、風車運転時における浮体変位について、風単独のケースにより実験値と UTWind の計算結果との比較が行われ、両者の相違が認められないことが示されている。

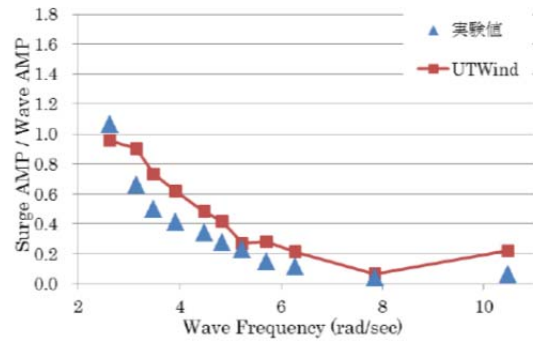


図 4.2-12 波単独実験の運動応答 サージ方向³³

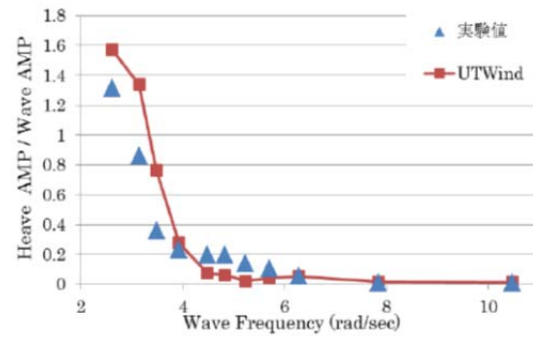


図 4.2-13 波単独実験の運動応答 ヒープ方向³³

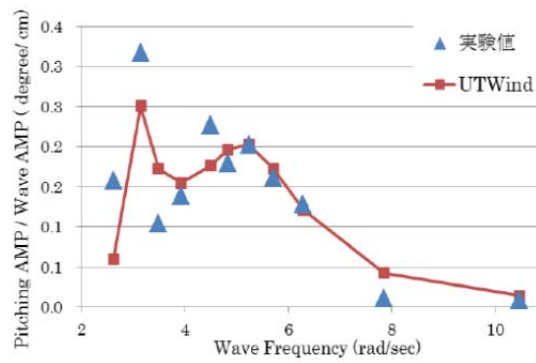


図 4.2-14 波単独実験の運動応答 ピッチ方向³³

4.2.4 ADAMS（宇都宮モデル）

Utsunomiya *et al.* (2012)³⁵は、浮体式洋上風車に作用する荷重計算には、マルチボディダイナミクスに基づく汎用機構解析ソフトウェアADAMSが基本ツールとして用いられていることを述べている。ここでは宇都宮ら(2012)³⁶および宇都宮(2013)³⁷により、その概要が取りまとめられているので、以下、紹介する。

1) 小規模試験機の主要諸元

小規模試験機は、定格出力100kW（SUBARU100/22改）のダウンウィンド型で、ハイブリッドスパー型と称されている構造で、スパー型浮体の下部はプレキャストPC製、上部は鋼製となっている。本機の主要な諸元を表4.2-1に示す。

表 4.2-1 小規模試験機の主要諸元³⁶

風車型式	SUBARU100/22改
定格出力	100kW
ロータ回転数	18-72rpm
カットイン風速	3-4m/s
カットアウト風速	20m/s
定格風速	7.5m/s(40kW出力制限時)
フィン寸法	0.475m(幅)×20m(高さ)
フィン枚数	4枚
係留チェーン	呼径56mm(Grade3)×3本
コンクリートシンカー	空中重量200tf×2か所
Danforthアンカー	気中重量10tf×1か所

2) モデルの概要

風車ロータに作用する風荷重は、4.2.1のFASTで記したように、NREL/AeroDynを用いて評価される一方、流体力はHydrodynamicsとして、ウェーラのストレッチ理論を適用した修正モリソン式により波力を評価するとともに、浮体各要素に作用する浮力を静水圧的復原力として評価している(図4.2-15)。なお、拡張モジュールの概要を表4.2-2に示す。

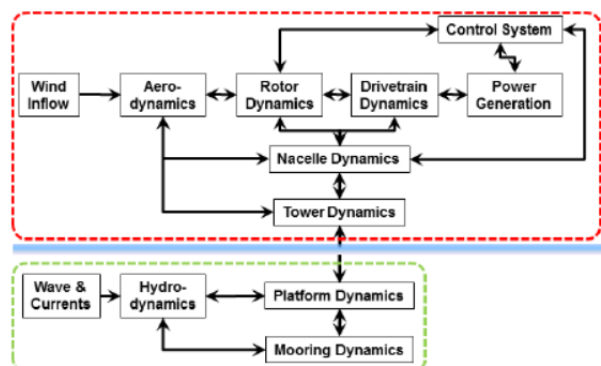


図 4.2-15 解析方法の概要³⁶

表 4.2-2 拡張モジュールの概要³⁶

拡張モジュール	概要
Control System	・ GH Bladed 形式の DLL として風車コントローラを外部定義
Wave & Current	・ 波：Airy 波理論により規則波または不規則波を生成 ・ 流れ：定常力として浮体要素に負荷
Hydrodynamics	・ 波力：Wheeler のストレッチ理論を適用した修正 Morison 式により評価 ・ 静水圧的復原力：浮体各要素に作用する浮力を直接評価
Platform Dynamics	・ 剛体-バネ系にモデル化し、ADAMS により剛体多体系として解析
Mooring Dynamics	・ チェーン係留に伴う非線形係留力をカテナリー理論により準静的解析

- 解析モデルは、浮体式洋上風車を複数の剛体がジョイントやバネで接続されたモデルとし（図 4.2-16）、係留力はカテナリー理論により準静的解析により各時間刻みにおいて、逐次、計算して係留チェーン接続点に作用させている。

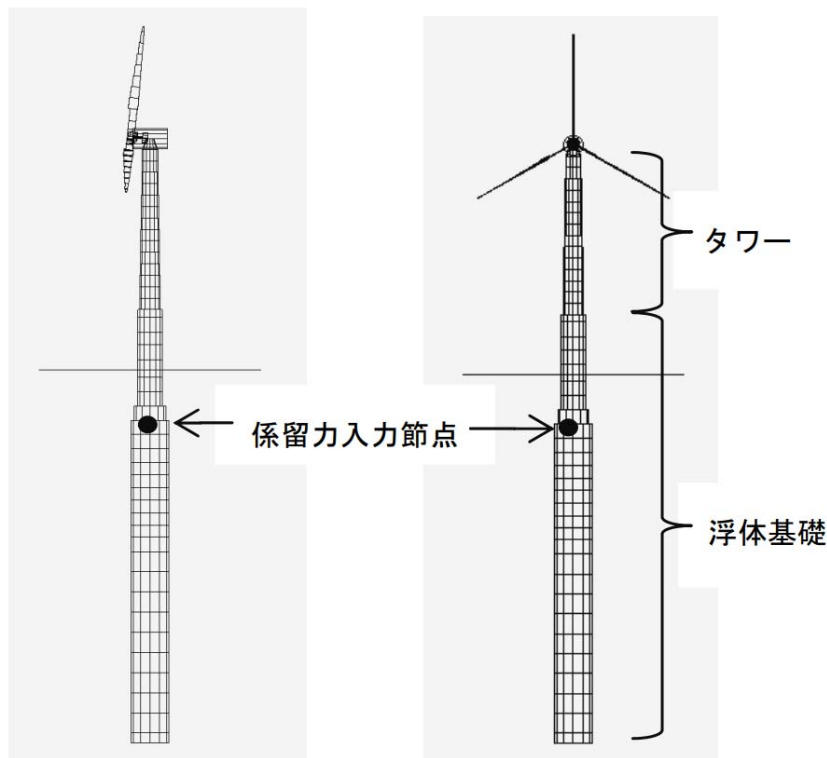


図 4.2-16 ADAMS 解析モデルの概要³⁶

- 係留索：剛体要素としてはモデル化されず、係留索接続点において係留力が外力として与えられる。
- 係留系の減衰力：ヨー回転速度に比例する線形減衰モーメントのみ考慮する。
- 浮体下部に取り付くフィン：ヨーに付加する減衰力（抵抗モーメント）を抗力式により評価する。

3) 解析方法

暴風時は変動風・不規則波シミュレーション法、発電時は規則波法によりそれぞれ行う。

(1) 風荷重

- 暴風時は、時刻歴解析を行う。
- 発電時は、発電時平均風荷重を定常水平力としてロータ中心、ナセル中心、タワーおよび浮体基礎に作用させている。

(2) 波および流れ荷重（暴風時・発電時）

- 流れ荷重は抗力式により算出し、定常水平力として与える。
- 波荷重は修正モリソン式およびウェーラのストレッチ理論により与える。
- 浮体基礎底面および径が変わる段付き部に作用する鉛直波力は動水圧として与える。
- 波は不規則波を与える。

(3) 浮力（暴風時・発電時）

- 静水圧による浮力を各タイムステップで与える。

(4) 係留力（暴風時・発電時）

- 各タイムステップの係留索取り付け点の位置座標から算出する。

(5) 減衰力（暴風時・発電時）

- フィンによるヨー減衰力（抵抗モーメント）を抗力式により評価する。
- 縮小試験体実験により、ヨー方向の線形減衰モーメントを付加する。

4) 固有値の解析結果

(1) 自由振動解析

自由振動解析の振動波形のパワースペクトルのピークから固有周期を求める。

(2) 弾性固有値

ADAMS モデルにおける弾性固有値解析結果による。波・風・流れ等の環境外力の卓越周波数から十分に離れていることを確認する。

(3) 弾性固有モード

固有値解析結果の曲げ1次モード、曲げ2次モード、曲げ3次モードをモデル化する。

5) 風・波浪応答解析結果

構造計算は、時刻歴波形のデジタルデータを用いて、全タイムステップに関して照査を実施することを基本とする。

ADAMS 解析モデルによる時刻歴応答解析結果の一例を図 4.2-17 に示す。これらの時刻歴波形により最大値と最小値を抽出し、設計荷重（または設計変位）として用いられている。なお、統計的外挿により 50 年再現期待値として求められた発電時最大荷重は、暴風時における設計荷重よ

りも十分に小さく、このことから短期荷重に対する断面（応力度）照査は、暴風時荷重に対してのみ実施すればよいことがわかった。図 4.2-17 の上図は（サージ、ピッチ、ヨー）、浮体基礎の応答変位（出力点 MSL-26.542m）、中図はタワー基部の断面力（出力点 MSL+6.0m）、下図は、チェーン張力（風上側のチェーン No.1）を示している。

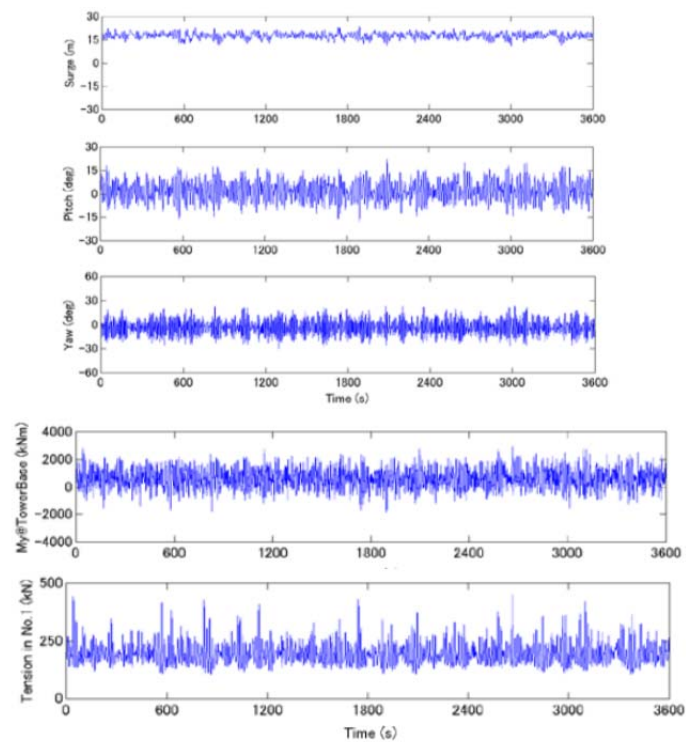


図 4.2-17 時刻歴応答解析結果の例 36