洋上風力発電のための VLMOS の航行性能

学生員 平松 拓郎* 正員 高木 健**
非会員 興梠 有人***

Sailing Performance of a Very Large Mobile Offshore Structure for Wind Power Plant

by Takuro Hiramatsu, *Student Member* Ken Takagi, *Member*
Yuto Kohrogi, *Nonmember*

Summary

Resistance test and oblique towing test in a towing tank with a 1/100 scale model of VLMOS for investigating the effect of interaction among the many struts or between lower hull and struts has been carried out. Experiment to test the stability of course keeping in which we imitate the wind drag force and sail force by adding external forces and the navigation performance of the structure with model sails have also been carried out. Finally we performed navigation simulation using maneuverability coefficient with interaction. These results show that the structure has enough performance of the navigation, although the interaction effect due to vortex occurring at the rear part of strut is not negligible.

1. 緒 言

近年、(独)国立環境研究所において非係留洋上風力発電プラント研究プロジェクトが発足し¹⁾²⁾、自然エネルギーを効率よく取得できる VLMOS (Very Large Mobile Offshore Structure) に関する研究が行われた。VLMOS の最大の特長は、帆およびストラットを装備した自己完結型洋上風力発電施設で航行可能な点である。これにより発電電力量を最大とするように風況のよい海域へ移動させることができ、また荒天による危険な海域を回避することも可能となる。本浮体の構造は推進性能確保のため、極力軽量化された細長いビームおよびローハル、アッパーハルにより構成されており、浮体の全長は 1,880m、幅は 70.2m、喫水は 20m である。また風力発電設備として定格出力 5MW の風車をアッパーハル上に 11 基搭載している。移動時は、横風を受けることで風車が効率よく発電できるように航行させ、その際に発生する風による抗力を打ち消すためにローハルとアッパーハル間に細長いストラットを配置して揚力を得ている³⁾。また、VLMOS の運用メカニズムに関しては参考文献^{2) 3)}を参照頂きたい。このコンセプトでは正味出力を向上させるために最適航路の構築は重要な課題である。堀田ら⁴⁾は

航路を最適化するためのロジックを構築した。しかし、それを検証するためのシミュレーションの際に、ストラット列間あるいはストラットローハル間の相互干渉について無視している。

本研究ではこの影響も考慮するために 1/100 スケールの模型を用いた抵抗試験、斜航試験を行い、操縦性微係数を測定した。さらに、浮体に働く風抗力を鍾で模擬した安定性試験および帆を用いた帆走試験を行った。これらの結果を用いて相互干渉影響を考慮した運行シミュレーションを実施し従来の研究結果の妥当性を検討した。

Fig.1 Image of the twin-hull VLMOS drawn by National Institute for Environmental Studies.

2. VLMOS の概要

2.1 主要寸法

VLMOS は波浪外力を軽減しかつ揚力を発生するように、ローハルとアッパーハルをストラットで支持したセミ

* 大阪大学大学院工学研究科

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科

*** トヨタ自動車株式会社

原稿受理 平成 21 年 8 月 24 日

サブ式となっている。風車を一列に 11 基配置し、前後端部に各 2 枚の帆を設置し、スラスト 6 基と水素製造、貯蔵施設をビーム内に有する。風力エネルギーは海水を電気分解して水素に変換し有機ハイドライトとして貯蔵し、それを運搬船により陸に運ぶ。

浮体の主要目を Table 1 に示す。風車の発電可能範囲は、相対風速 3.5~25.0[m/s]、相対風向が真横から±30[deg.]である。

Table1 Principal dimensions of the float.

Item	Dimension
Length	1,880m
Breadth	70.2m
Draft	20m
Depth	30m
Displacement	about 178,436 ton
Windmill	11 units
Sail	4 units
Thruster	6 units

2.2 浮体の運動方程式

浮体の航行シミュレーションを行うためには気象海象条件に応じた浮体の航行速度および、変針時の所要時間と移動距離が必要となる。浮体の運動応答は (1) の運動方程式を解くことで求めている。

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= X \\ m(\dot{v} + ur) &= Y \\ I_{ZZ}\dot{r} &= N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

m : 浮体質量

I_{ZZ} : 慣性モーメント

u, v : x, y 方向への船速

r : 角速度

X, Y : x, y 方向への外力

N : 浮体の重心周りの yaw モーメントを表している。

2.3 堀田らの推定法

堀田ら⁴⁾の航行シミュレーションでは、外力 X, Y は以下のように表される。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_W + X_H + X_{Strut} + X_{Sail} + X_T + X_D \\ Y &= Y_W + Y_H + Y_{Strut} + Y_{Sail} + Y_T + Y_D \\ N &= N_W + N_H + N_{Strut} + N_{Sail} + N_T + N_D \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、'W'は風圧抵抗(帆を除く)、『H』はローハル、『T』はスラスト、『Strut』はストラット、『Sail』は帆、『D』は波漂流力に関する項をそれぞれ示している。

ここで、(2)式は一般的な操縦性理論から類推したもので浮体部材間の干渉影響を考慮していない。

まず、風圧抵抗は $CD=0.08$ とし、投影側面積から推定した。帆に働く力は $CL=2.0$ とシアスペクト比を考慮して求めた。波漂流力は Takagi et al⁵⁾による実験値から推定した。水面下に働く力のうちローハル部分に関しては MMG 数学モデルによる cross flow drag 成分及び shoenherr の式による摩擦抵抗により求めた。ストラット部分に関しては吉武⁶⁾の実験により得られている揚力係数、抗力

係数、及び摩擦抵抗を用いて推定した。このようにこれまでの研究では、浮体の運動計算において、ローハルに関する項 (X_H, Y_H, N_H) とストラットに関する項 ($X_{Strut}, Y_{Strut}, N_{Strut}$) を分けて考えており、ストラット列間あるいはストラット・ローハル間の相互干渉を考慮していなかった。そこで今回、干渉影響がどの程度か調べるために模型実験を行った。なお、帆と浮体構造の間でも干渉影響が予想されるが帆による浮体に働く風抗力の変化はほとんど無視できる。ただ、浮体構造物の存在による帆の力の变化は無視できないかもしれない。しかし、これについては帆の大きさは設計時に簡単に変更可能であることから、今回は水面下の部材間の干渉影響に的を絞った。

3. 実験模型と試験水槽

水槽試験では VLMOS の 1/100 スケール模型を用いた。本模型は、水槽幅の関係から長さを 1/4 にしてある。模型はローハル:2本、ストラット S:8基、ストラット L:12基の3つの要素で構成されている。模型の主要目を Table2 に示す。

抵抗試験・斜航試験は大阪大学工学部で行い、安定性試験・帆走試験は東京大学生産技術研究所で行った。

Table2 Principal Dimensions of the Model

Item	Dimension
Lower-hall	
Length	4.6m
Breadth	0.08m
Draft	0.06m
Strut L	
Span	0.14m
Chord length	0.25m
Thickness	0.05m
Aspect ratio	0.56
Strut S	
Span	0.14m
Chord length	0.15m
Thickness	0.03m
Aspect ratio	0.93

4 抵抗試験・斜航試験

Fig.2 The experimental set up and the coordinates.

4.1 実験における座標系

模型を様々なフルード数、斜航角で曳航し、 X_{model} 、 Y_{model} を測定した。 X_{model} 、 Y_{model} はそれぞれ x , y 方向の流体力を表している。実験における座標系を Fig.2 に示す。 $o-x$, y と $o-x'$, y' はそれぞれ、物体固定座標系と空間固定座標系である。

4.2 実験結果と解析

Fig.3,4 に $F_n=0.031$ における X_{model} 、 Y_{model} の結果を示す。ここで、 X_{model} に関しては実機と模型で摩擦抵抗係数が異なるので $\beta=0$ で $X_{\text{model}}=0$ となるように調整した値を用いて議論する。

Y_{model} の結果を見ると、実験値が推定値の約半分になっている。また、運用シミュレーションで用いている推定値では実験で得られているストラット単独の揚力係数を線形化して用いているが Fig.3 のように実際には低斜航角において揚力値は線形近似よりもやや小さい値をとることが分かっている。

一方、ストラットの誘導抵抗が主成分と考えられる X_{model} はかなり小さい値になっている。 Y_{model} の主成分はストラットの揚力成分なのでこれの減少は前列のストラットからの翼端渦とローハル後流の影響により後列のストラットの流入迎角が減少しているためではないかと考えられる。これについては次節で可視化実験の結果を述べる。一方、 X_{model} の減少度合いは、実験誤差もあるがこれだけでは説明がつかない。おそらくローハルが翼端板の効果を出しているためにストラットの誘導抵抗が減少したためと考えられる。

いずれにしても干渉影響により揚力自体は減ってしまうが揚抗比は改善されている可能性が大きい。

また、(1) の運動方程式を解くことにより得られる浮体の航行性能を表すポーラダイアグラムによると発電中に風に対して真横に航行できる最大速度における斜航角は 6deg となっているが干渉影響を考慮し揚力係数を 0.5 倍にして計算しなおしたところ速力は変わらず、斜航角は 13deg となり、揚力が減少しても斜航角を大きくすることで同程度の帆走性能を発揮することができると予想される。なお、ストラット断面は一般の翼形ではなく前後対称形のため急激な失速は見られない。

Fig.3 Comparison of Y_{model}

Fig.4 Comparison of X_{model}

4.3 流れの可視化実験

後列部分での流れの状態を確認するために、スモークワイヤー法を用いて流れの可視化実験を行った。流入速度は 1.0m/s、流入迎角は 6 度に設定した。Fig.5 に計測位置 Point1, Point2 を示す。また、Fig.6 に Point1, Point2 でのストラット周りでの流れの様子を示す。

Fig.5 Experimental set up and measured point.

Fig.6 Comparison between Point 1 and Point 2.

Fig.6 では Point1 で観察された流れの様子を左側に Point2 で観察された流れの様子を右側に示す。Point2 での流入迎角が Point1 と比べ小さくなっていることがはっきりと分かる。

5. 安定性試験

数値シミュレーション上では帆の揚力により安定的に航走することが確かめられているが、実際には数値モデルで表せない何らかの影響により不安定が発生するかも知れない。そこで、安定性試験を実施した。ここで安定性とは操舵無しに直進する性能とする。

5.1 実験方法

風車への風抗力と、帆の力を鍾で模擬し、安定性試験を行った。本実験では風車に働く風抗力は風車一機当たり 5.7×10^5 (N) とした。前進する模型の位置を計測するために 4 つの LED ライトを模型に取り付け CCD カメラで撮影して位置を画像解析した。

また、抵抗試験の結果 yaw モーメントが推定値より大きいことが分かったので yaw モーメントを抑えるために舵を設置した。

5.2 実験結果

Fig.7 に計測位置 P1,P2,P3,P4 を示す。また、Fig.8,9 に $F_n=0.031$ 、 $\beta=6$ deg.での P1,P2,P3,P4 での LED ライトの x,y 方向位置の出力時系列を示す。

Fig.7 The experimental set up and the measurement point.

Fig.8 Result of position sensor's output of x axis.

Fig.9 Result of position sensor's output of y axis.

この結果では、非常に安定して航行可能であることが

分かる。

以上のように、風車への風抗力及び帆の力を鍾により模擬した実験により、想定風力下において安定して航行可能であることが実証された。

6. 帆走試験

6.1 実験方法

Fig.10 Principal dimensions of model sail.

模型の両端に 2 つの帆を設置し、曳航台車に固定した送風機を用いて帆走試験を行った。風速は 1.4m/s とした。これは実機では 14m/s となり、設計風速に相当するものである。

浮体運動をビデオカメラで撮影するとともに、安定性試験で用いた LED ライトによる位置計測を行った。

Fig.10 に実験に用いた帆の主要寸法を示す。

ここで $\frac{f}{c} = 0.1$ である。

また、送風機による風が一様でなく最も風速が早くなる帆の上部で測定して風速を調整しているため、帆全体で平均すると風速がやや遅くなっている可能性があることと、模型サイズでは浮体のレイノルズ数が 8.78×10^5 となり実機に比べると摩擦抵抗係数にして 3.67 倍とローハルとストラットに働く摩擦抵抗がかなり大きくなるため帆は実機の帆をスケールダウンした大きさよりも大きく作ってある。

6.2 実験結果

帆走試験を 2 つのフルード数、斜航角で行った。その結果を Table3 に示す。

Table 3. Experimental Condition and Results.

No	F_n	Target angle	Measured angle
1	0.021	12 deg.	11.7 deg.
2	0.031	6 deg.	6.2 deg.

帆走試験により、設計風速下で浮体が風に対し垂直に航行可能であることを確認した。ただし、前述のようにレイノルズ数の違いによる摩擦抵抗と送風機による風が一

様ではないことを考慮して帆を大きくしている影響、及び模型を水槽幅の関係から長さを 1/4 にしていることから浮体のスピードに関しては実機のそれを表現しているわけではない。Fig.11 にフルード数 0.021、斜航角 12 度における帆走試験の様子を示す。なお、Fig.11 で帆の上方に写っているのは送風機を固定した曳航台車である。

Fig.11 A picture of sailing test.

7. 運用シミュレーション

運用シミュレーションで用いている速力データベースの作成の為に (1) 式に以下、(3)、(4) 式を導入する事により干渉影響を考慮した速力データベースを作成した。

$$-F_y = C_{Fy} U^2 \beta \quad (3)$$

$$-F_x = C_{Fx} U^2 \beta^2 \quad (4)$$

ここで C_{Fy} , C_{Fx} は今回の実験値に合わせた係数である。

Fig.12,13 に (3) (4) 式を用いてカーブフィッティングした結果を示す。

ここで得られた C_{Fy} は長さの短い模型によるものなので、実機のように長い浮体の場合は干渉影響が大きくなるのでもう少し C_{Fy} が大きくなる恐れがある。しかし、今回の実験で得られた値は従来のシミュレーションで用いていた値の 0.51 倍で、4.3 流れの可視化実験の結果からもわかるように後列のストラットのほぼ全部が働いていないことが推測されることと 2 次元の無限翼列は単独翼より揚力が増加する、すなわちストラット数が増えれば列内の干渉で揚力が増加することから今回得られた値とそれほど変わらないと予想される。

(3)、(4) を用いて得られた速力データベースを用いた運用シミュレーションを行った。Fig.14 に干渉影響を考慮した風速 14m/s、有義波高 2m で風車による発電を行った状態の帆走性能ポラードグラムを示す。Fig.12 より発電しながら風に向かってわずかではあるが上っていくことが可能なことが分かる。なお、この計算では実験で用いた大きな帆ではなく元の小さな帆による推定値を用いる

シミュレーションは堀田ら⁴⁾の手順に従って行った。

また、本シミュレーションにおいて用いている気象海象データは 10m 高さでの海上風速を用いている。しかし、この風力発電プラントに用いられる 5MW クラスの風車

は直径が 120m あるため、風速に関しては境界層内で水平風速が鉛直方向に対数分布しているとした (5) 式⁷⁾を用いて風速を修正し、発電量を推定している。ここで、 V_z, V_h は地上高さ z, h での風速、 Z_0 は粗度係数である。ここで粗度係数は 0.001 としている。

Fig.12 Comparison of Y_{model} .

Fig.13 Comparison of X_{model} .

Fig.14 Polar diagram for navigation simulation.
(wind speed 14m/s, wave height 2m)

$$V_Z = V_h \left(\frac{\ln \frac{Z}{Z_0}}{\ln \frac{h}{Z_0}} \right) \quad (5)$$

Fig.15,16 にシミュレーション結果の一例を示す。Fig.15 は航行の軌跡、Fig.14 は遭遇した海象気象、浮体の状態を示している。H、Vw、U、 β 、E、CF はそれぞれ遭遇波高、風速、船速、斜航角、発電電力量、設備利用率を表している。

今回のシミュレーションでは、総発電電力量は 2.14×10^2 GWh、1 年間の設備利用率は 44% となっており、これは目標値を満たしている。その他のシミュレーション結果も全て設備利用率 40% 以上を示した。この結果から干渉影響を考慮してもこの発電浮体が十分な設備利用率が得られることが分かった。しかし、前述のように抵抗試験斜航試験の結果から、干渉影響を考慮すると、揚力値が約半分となり後列のストラットが揚力発生に関してほとんど働いていないことが分かっているため今後、無駄をなくした新しい形状を考えていく必要がある。

Fig.15 Track of the VLMOS and cumulative capacity factor.

Fig.16 Weather and Motion response of the float.

8. 結言

VLMOS の模型試験とそれに基づく運用シミュレーションを行い、その結果から以下の結論を得た。

- 1) 抵抗試験、斜航試験を行い、ローハルとストラット間の干渉影響を明らかにした。
- 2) 風車の抗力と、帆への力を锤で模擬した安定性試験および送風機と帆を用いた帆走試験を行い、模型が風に対して垂直に安定して航行可能であることを確認した。ただ、干渉影響のため、従来の数値シミュレーションに比べると斜航角を大きくする必要があった。
- 3) 抵抗試験、斜航試験により得た操縦性微係数を用いて運用シミュレーションを行った。その結果、この構造物が十分な航行性能を持っておりかつ十分な設備利用率が得られることが確認できた。

謝 辞

速力データベース及び変針データベース作成用プログラムを提供していただいた(株)三井造船昭島研究所及び運用シミュレーションのための気象海象データを提供していただいた(独)国立環境研究所の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) マリンフロート推進機構：平成15年度 洋上風力発電を利用した水素製造技術開発委託業務報告書，2004
- 2) 木下健、高木健、他：環境負荷の小さい基幹エネルギーとしての帆走型洋上風力発電，日本船舶海洋工学会論文集，第1号，2005，pp43-53
- 3) マリンフロート推進機構：平成19年度 外洋利用大型浮体システムの開発（調査）報告書，2008
- 4) Hotta, J., et al. (2007) Navigation Simulation of a VLMOS for Wind Power Generation, Proc. of OCEANS'07 MTS/IEEE Vancouver, 2007.
- 5) Takagi, K., et al.: Hydroelastic Motions and Drift Forces of Very Large Mobile Offshore Structure in Waves, Int.J of Offshore and Polar Engineering, Vol.15, No3 PP.183-188, 2005.
- 6) 高木 健、吉武優一郎：超大型移動式海洋構造物のスイッチバックモーションに適した翼断面に関する研究、日本船舶海洋工学会論文集、第5号、pp.27-33, 2007
- 7) 牛山泉：風車工学入門、森北出版（2002）