

着底式大型洋上風車に供するトラスタワーの 構造特性と風荷重と後流域の乱れに関する 風洞実験

STRUCTURAL PROPERTIES AND MODEL TESTS ON WIND LOADS AND
TURBULANCE INDUCED BY A TRUSS TOWER SUPPORTING A LARGE
SCALE OFFSHORE WIND TURBINE

関田欣治¹・大村優太²・矢後清和³・山下篤⁴・宮島正吾⁵

Kinji SEKITA, Yuuta OHMURA, Kiyokazu YAGO,
Atsushi YAMASHITA and Shogo MIYAJIMA

¹正会員 工博 東海大学海洋学部 海洋土木工学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水折戸3-20-1)

²学生会員 東海大学 大学院 海洋学研究科海洋工学専攻

³正会員 海上技術安全研究所 海洋開発研究領域 (〒181-0004東京都三鷹市新川9-38-1)

⁴正会員 新日本製鐵(株) 鉄構海洋事業部 建設・技術部 (千代田区大手町2-6-3)

⁵(財) 日本造船技術センター(〒112-0004東京都港区後楽2-1-2)

The offshore wind turbines (OWTs) are getting larger in scale in order to efficiently generate the electricity. Therefore the natural period of OWT becomes longer due to heavier weight of a nacelle and higher supporting towers for OWTs, resulting in possible fatigue damage. As we estimate that the diameter of the conventional tower to be more than seven meters, the tower having large rigidity such as a truss may be alternatively required. Therefore we made a comparison of required weights and rigidities through structural analyses of the cylindrical and truss towers for 5000kW OWTs. We also conducted a 1/100 scale model test on the both towers to obtain the wind loads acting on a rotor and the tower and to examine the differences in their downstream flow. The paper describes the ascendancy of the truss over the cylindrical tower.

Key Words : *Offshore wind turbines, truss tower, wind load, wind tunnel model test, rigidity, natural periods,*

1. はじめに

洋上の着定式発電施設は、5000kW級の大型機の実用化を目前にしており、その支持構造はモノパイルと円筒タワーからなる支持構造が主流であり、タワーは太径薄肉化の傾向にある。その結果、施設は固有周期が長くなり、台風や恒常的に発生する波浪や風荷重に同調し倒壊したり疲労損傷を受けやすくなる。そのため、大型施設の支持構造には十分な剛性と強度が要求され、さらに風の影響を受けにくいことが望まれる。

2. 研究目的

陸上では、ラティスという部材数の多い骨組が使用されることもあるが、本研究ではメンテナンス等も考慮し単純な鋼管トラス構造とし、試設計により剛性、鋼材重量、固有周期等の基本特性を評価する。さらに、風洞模型実験により、タワーやローターに作用する風荷重、発電量や後流域の空間及び時間的乱れを調べ、トラスタワーの優位性を明らかにしようとするものである。

3. トラスタワーの基礎的検討

(1) トラストタワーの試設計

a) トラストタワーの概要

5MW風車では、ローター半径は80mに達し、ナセル高さ約90mになるとされる。ここでは、図-1に示すようなトラストタワー・ジャケッ支持構造と従来の支持構造と比較した。前者に対しては立体骨組構造解析プログラムを用い後者については片持ち梁として構造解析を行い、それぞれの支持構造物の曲げ剛性、鋼材重量、固有周期等を評価した。なお、水深は10mとした。

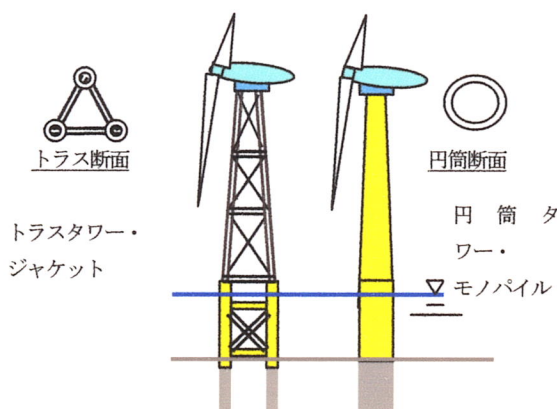


図-1 比較する洋上着底式支持構造

b) 風荷重

タワー天端に作用する荷重は、5MW級のローターとナセル重量2942kN、設計上クリティカルになる定格時（風速14.5m/s）風荷重（水平力1,375 kN、モーメント2,490 kNm）である。タワーが受ける風荷重はトラストタワーでも全体の約4%と小さいが部材に風圧を作用させた。なお、波浪荷重は考慮しない。

c) 構造諸元

円筒タワーの外径は、天端（海上+86.7m）で4m、モノパイルとの結合部（+8.0m）上で7mであり、その間の外径と板厚を段階的に変えた。板厚は天端から結合部まで17~41mmと厚肉であるものの外径・板厚比D/tは171~286と大きい。モノパイルはその天端から海底まで直径7mで板厚70mmの鋼管である。鋼材はSM490YAとする。図-2にトラスの骨組を示すが、海上+8.0mにトラス最下段の水平構面を設け、レグの直径は1.5~2.3m、水平材は900~1500mm、主構面の斜材には500mmの鋼管を用いた。水平及び斜材の細長比は70~100の範囲とした。トラス構造であるが、実際はジャケッと同様に部材が交差する格点は補強し、そのキャン部材には板厚50mmの鋼管を使用する。材質はSM490材とし

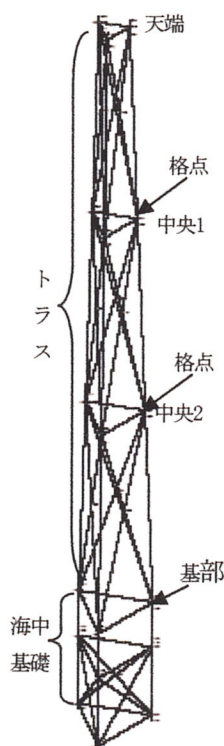


図-2 提案の支持構造

部SM490Y材を用いた。許容応力度は材質とD/tによって異なるが、180~210kN/mm²程度である。部材はAPIに従い曲げモーメントと軸力、せん断力に対する合成応力に対する許容応力により、格点は同じくAPI¹⁾に従い、パンチングシェアー（水平材や斜材のレグ材への押し込み押しぬき）に対する安全性をチェックした。海底下は、N値20程度の砂質土層を想定しモノパイルでは直径7m根入れは40m程度、ジャケッでは高い引抜に抵抗できるフィン付き杭を想定しているが、構造解析では海底との境界条件を固定とした。

(2) 試設計結果

ジャケッ天端1.9m上に84.8m長のトラスを搭載すると、海底から風車が高さ86.7mなる条件で骨組構造解析した結果、定格荷重に対し部材の応力は許容応力内に収まる。表-1に示すようにトラス・ジャケッ構造は重量比で円筒タワー・モノパイルに対し1.44倍と大きい。固有周期は約0.73倍と短くなる。過去実施した疲労解析では、固有周期が2.5倍になると疲労損傷度も3.2倍になる²⁾。この知見から疲労寿命への影響を大まかに掴んでみると、固有周期が0.74倍と短くなると疲労損傷度は1.7倍と減少すると予想される。この点については、今後詳細な検討が要るがこの効果は小さくないと考える。

表-1 試設計による両支持構造の相違

支持構造	円筒	トラス
支持構造重量 W (kN)	4871.2	7013.2
平均断面積 Ae (m ²)	0.655	0.943
断面 2 次モーメント I (m ⁴)	3.407	7.121
固有周期 T (s)	2.65	1.94

4. 実験方法

(1) 模型の諸元

実験では、海中基礎を除いた円筒及びトラストタワー1/100の縮尺模型を作製し、タワー単独並びにローターと発電モーターを取付けたタワー模型に対し風を与えた。また実験には（独）海上技術安全研究所が所有する風水洞を使用した。その装置は計測部が幅3.0m高さ1.5m長さ15mであり最大34m/sまでの定常風が発生できる。

模型はアップウィンド型を想定し表-2に示すように、ローター半径63cm、ハブ高さ80cm、風車質量260gである。ローターを構成するブレードは1枚当り35gであり、ハブと3枚分の全質量は186gとなる。ブレードは根元部で直径30mm円柱、中心から12.5cmで最大幅50mm、先端で15.6mmと細くなる翼形状である。断面形状はNACA63₄18を用いており、根元部から先端に向い一定の捩りを与えている。円筒タワーは、26mm角の矩形断面を有するアクリルライト製柱であり、その周りを半割り形状の発砲スチロール製カバーで覆った。カバーは、外径が天端50mm

表-2 模型の寸法等

		実機	模型
風車	ローター径	63m	63cm
	ハブ高さ	80m	80cm
	風車質量	260 t	260 g
	全高	140m	1.75m
	ナセル(L×D)	16m×5.5m	16cm×5.5cm
円筒	直径(天端)	4m	50mm
	直径(基部)	7m	88mm
	質量	350 t	350 g
トラス	レグ径(天端, 中央, 基部)	1.1, 1.5, 1.8m	11, 15, 18mm
	水平材直径(中央1と2)	0.5, 0.8m	5, 8 mm
	幅(天端, 中央1と2, 基部)	4.4, 6.2, 7.2, 9.2m	4.4, 6.2, 7.2, 9.2cm
	質量	634 t	634 g

から基礎部で88mmと連続的に変化するように成型した。

一方、トラスタワーは全てアクリルライトで製作し、約260mmの間隔で天端、中央1、中央2、基部の4つの水平構面を設け、その間を上から直径11、15、18mmの3本のパイプで結合した。天端構面は板厚19mm、70mm角の正方形板であり、図-2に示した基部は板厚8mm、直径22mmの円盤である。中央構面1と2部分のパイプには、直径30mm、高さ18mmのキャンを形成し、それぞれ間を円柱材3本で繋いだ。

静的特性に限定した実験であるので、トラスも円筒も剛性を等しくした。その結果、表-1で述べた海中基礎まで含む固有周期（タワー部だけでは円筒で2.17sトラスで1.58s）に対し、自由振動実験で得られた固有周期は実物スケールに換算しそれぞれ1.78s、1.80sである。すなわち、トラス模型では主構面には斜材を入れていないこともあり想定した剛性より若干小さめである一方、円筒模型はやや剛性が大き目となっている。

(2) 風速分布実験

トラスと円筒タワーの後流域の風速の測定実験では、タワー単独、タワー上で風車が回転している条件で6.0と7.0m/s定常風速を作用させ、空間的分布および時間的乱れを測定した。一定の周速比でローターを回転するため、直流モーターにより回転数を制御し、その回転速度 ω を3, 5, 8 RPS（毎秒当たり回転数）とした。なお、回転方向は風下に向かって時計回りとした。風車の背後にあたる風洞の風下方向（X軸）3列、幅方向（Y軸）8列、風洞の鉛直方向（Z軸）4列の格子点について風速を測定した。座標の原点はハブとし、風下に向かって右側が正、上側に向かって正とした。風下側断面の位置は60cm、120cm、180cmとしたが、60cm位置はローター半径に相当する。トラバースに取り付けた2セットの熱線風速計を遠隔操作により自動的に計測点間を移動させ、1点の計測点に20s間保持し風速を連続的に測定した。

(3) 荷重および発電実験

タワーの基部底が風洞床に接するように取付けたが、床下に定格200Nの3分力計を設置し風方向の荷重 F_x と直角方向荷重 F_y を測定した。また、トラスタワーでは作用点を調べるため、ロードセルとタワーの基部間に100mm高さのI型鋼に2枚の歪ゲージを貼り曲げモーメント M_θ を測定した。歪ゲージ中心とハブ高さの間隔は884mmである。モノタワーに関しては、模型基盤から60mm、410mm、710mmの高さの角柱裏表に歪ゲージを貼り、3箇所のモーメントも測定した。

模型基盤から820mmの高さに相当するナセル上面には、小型二軸加速度計（長さ22.5mm×幅28mm×高さ9.5mm、質量10g）を取付け、ナセル頭部の平面運動も調べた。発電機として、千葉精密製タコゼネレータ付きモーター（NC-18582）を用い、9.5RPSまでの回転速度設定が可能で同時にモーター電気子電流を出力できるコントローラーを用いた。計測電流からローターに作用するトルクが得られ、これにより発電出力が測定できる。

測定はタワー単独の場合及びタワー上に風車が搭載された発電状態に対し行なったが、その実験条件は、モーター回転数が3, 5 RPS、風速が1.3～6.0m/sである。

5. 実験結果

(1) 風速分布実験

トラスタワーと円筒タワーの空間的及び周期的風速分布について、実験の結果から以下のことが判明した。

a) 空間的風速分布

後流域では模型から離れるにつれて、タワー単独の場合は風速によらずほとんど減衰しない。風車が回転状態のタワーでもほとんど変わらない。風洞幅方向（Y軸）については、風洞中央部から風車に向かって右に60cm離れた点（Y=60cm）だけ他の測定点に比べて多少風速が低下する。この影響は構造物から測定位置が離れていくと次第に少なくなる（図-3参照）。この点はブレードの先端にあたりブレードが回転することによって生じた渦等による翼端損失影響が顕れたとも考えられるが、反対側の同位置や上側（Z=60cm）の後流域でははっきりと確認できなかった。なお、ハブ高さに当る位置はZ=0である。また、風車がある場合もない場合も風速が大きい方が空間的乱れも大きくなる。風車がタワー上にある場合となない場合の風速分布の空間的乱れは、風車がある方が当然ではあるが大きく乱れる。トラスタワーと円筒タワーとの違いについては、顕著な差が見られない（図-4参照）もののトラスタワーの方が円筒タワーより空間的乱れは数パーセント大きい。

b) 時間的乱れ

定常風を与えたにも拘わらず、図-5に示すように風速は周期的に変動する。図におけるU前は模型前方約2m置に取り付けた風速計測定記録であり、若干周期的変動が

認められる。後流域での風速の変動周期はおよそ0.2～0.5s程度でローターの回転数に近いものの一定でない。ここでは、読み取った全振幅 Δu をその平均速度 u で除して得られた $\Delta u/u$ により、周期的乱れと定義し、

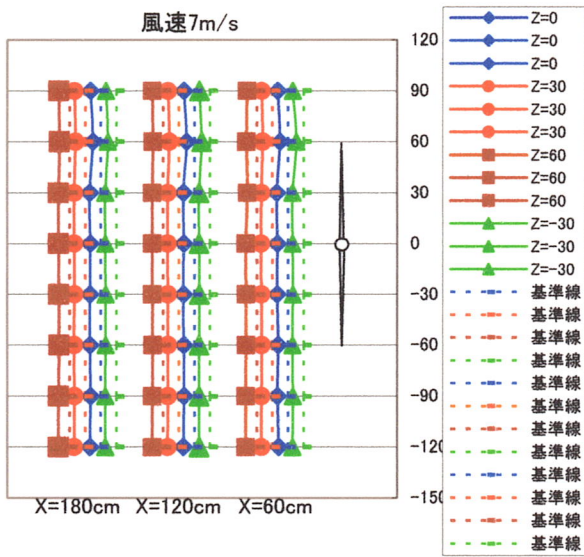


図-3 風車ありの時のY-X断面の風速分布

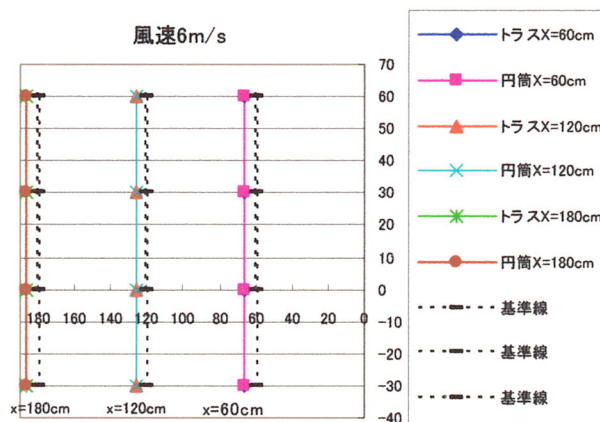


図-4 トラスと円筒タワーとの比較(Z-X面)

図-6にナセル高さ ($Z=0$ cm) での後流域での結果を示す。トラスタワーでは風車背後へローター半径分離れた位置で $\Delta u/u$ は最大7%と円筒に比べ大きい。直径だけ離れると $\Delta u/u$ は急激に減少し同程度となる。図-7は円筒タワー上でローターが回転している間のX方向での乱れの変化を示したものである。Y=30cm, 60cmの位置では $\Delta u/u$ が大きくなっている。逆にY=-30cm, -60cmの位置では小さくなっている。これはブレードの回転方向による違いだと考えられる。高さによる影響については図示していないが、風洞天井の影響と思われる全体的にZの大きい位置の方が $\Delta u/u$ は大きい。

(2) 荷重および発電実験

a) 水平力 F_x 及び曲げモーメント M_θ

トラス模型に作用する風荷重 F_x は風速の増加とともに大きくなり、回転数 ω が増えるほど風荷重は大きい(図-

8参照)。曲げモーメントも風荷重と同様の傾向にある。トラス単独の風荷重は円筒より約2倍大きく、またローターが回転している場合の約1/5である。タワーの抗力係数はトラスが0.6～0.8、円筒が0.2～0.5である。トラスが大きいのは天端に正方形板を用いた影響と思われる。ローター回転時の風荷重全体ではトラスの方が大きい。

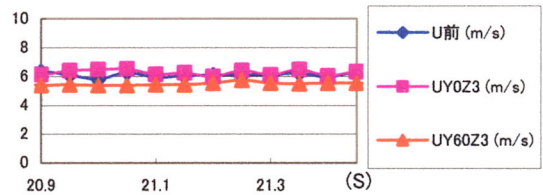


図-5 風速の時間的変動(風速6m/s)

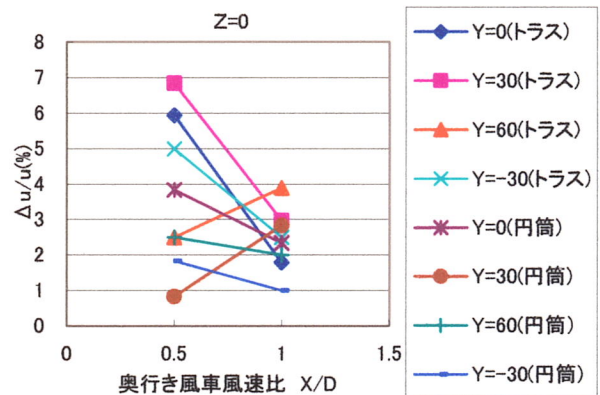


図-6 タワー単独での周期的乱れ(風速 6 m/s)

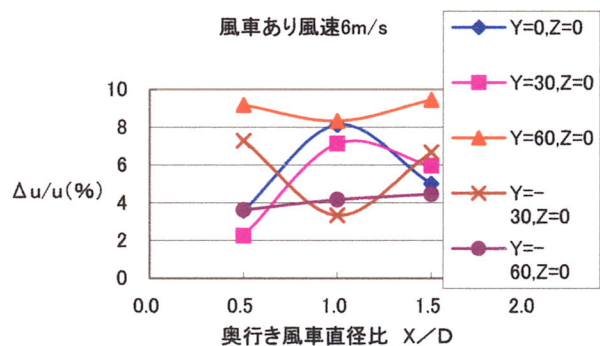


図-7 風車ありの風速比(風速 6 m/s)

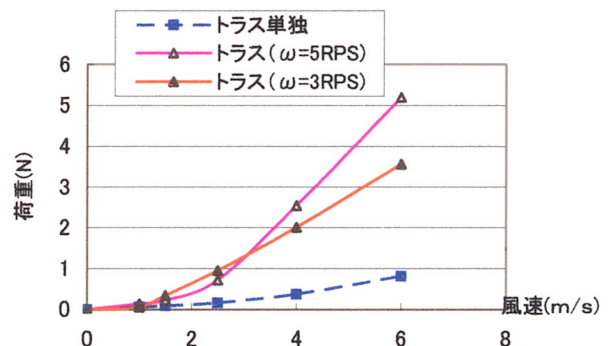


図-8 風速Uと風荷重 F_x の関係

b) 面外荷重 F_y と加速度 α_y

風に対してローター回転方向である面外水平方向の力 F_y はトラスタワー単独の場合は変動が小さくほとんど生じてないが、風車があると振動する。これは円筒タワーでも同様である。そこで、風荷重 F_x に対する面外変動荷重(片振幅) F_y の大きさを、 F_y/F_x の比と風速の関係で表してみた。図-9 から分かるようにトラス単独で10%を超える場合もあるが、風車が回転している場合は4%以下と面外振動荷重は小さくまたトラスの方が円筒タワーより小さい。同じ直角方向の加速度 α_y (片振幅)についてもタワー単独ではトラスも円筒も変わらないものの、ローターが回転している場合は円筒タワーの方がトラスより大きく最大で 0.4m/s^2 程度である(図-10 参照)。

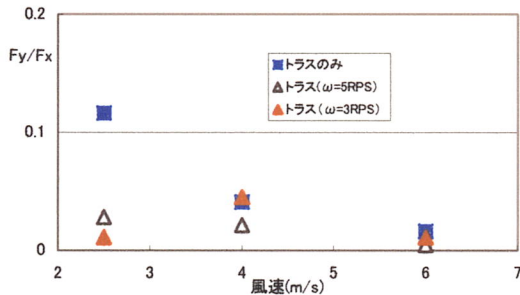


図-9 F_y/F_x と風速との関係

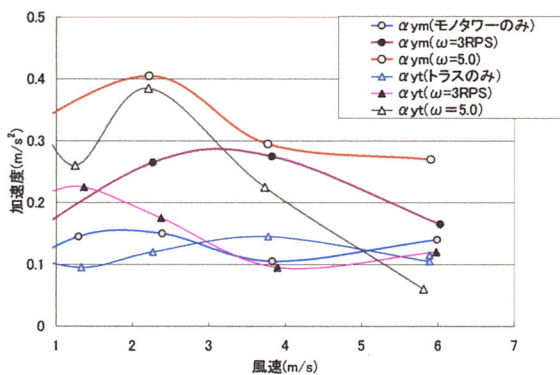


図-10 風速 U と加速度 α_y の関係

c) 作用点長

測定したモーメント M_θ を風荷重 F_x で除して、風荷重の作用点長を特定した。図-11に M_θ/F_x と風速との関係を示すが、曲げモーメント測定ひずみ位置とハブ高さとの間隔は102cmであり、5RPSの回転数ではこれにほぼ等しいが、3RPSの回転数では作用点は低くタワー単独の場合の作用点に近い。これは、回転数が小さいとローターが受ける風荷重が小さくなるので、相対的にタワーが受ける風荷重が増加し作用点が低くなると思われる。

d) 風車の抗力係数

定速度で回転するローターに作用する風荷重 F_x から、ローターを円盤³⁾(ディスクモデル)と見做して式(1a)を適用し抗力係数 C_d を算定し、これを式(1b)で定義する周速比 λ の関係で整理した(図-12参照)。

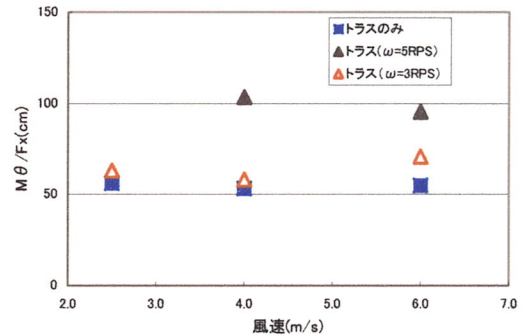


図-11 ローターに作用する風荷重の作用点長

$$F_x = 1/2 \rho C_d U^2 A \quad (1a)$$

$$\lambda = R \omega / U \quad (1b)$$

ここで、 ρ は空気の密度(1.25kg/m^3)、 U は風速(m/s)、 A はディスクとしてのローター面積である。また、 ω はローター回転数、 R は半径(0.6m)である。

実験結果は、アップウィンドであるに関わらずトラスで支持された風車の方が円筒よりかなり大きい。そこで、一定の速度で回転するローターに作用する風荷重を翼素運動理論⁹⁾に基づき推定した。その適用に当り、ブレードを8分割し各々の要素点での回転速度と風速が作る速度ベクトルに対し、各要素に作用する抗力と揚力を算定し、これらを積分し3枚分のブレードに作用する抗力を求めた。速度ベクトルを算定する際、ブレード軸方向及び接線誘導係数を考慮した。また、翼素断面に関する抗力係数 C_d と揚力係数 C_l については、式(2a)と(2b)を用いた。これらは実験に用いたNACA63₂-418断面翼に関する公表されたデータの近似式である。実験ではブレード先端部のピッチ角 α を 22° としたので、式(2a)の適用範囲は $0 \sim 8^\circ$ の範囲に拘わらずこれを適用し C_d を決定した。

$$C_d = 0.0002\alpha^2 - 0.007\alpha + 0.0063 \quad (2a)$$

$$C_l = 0.1125\alpha + 0.3078 \quad (2b)$$

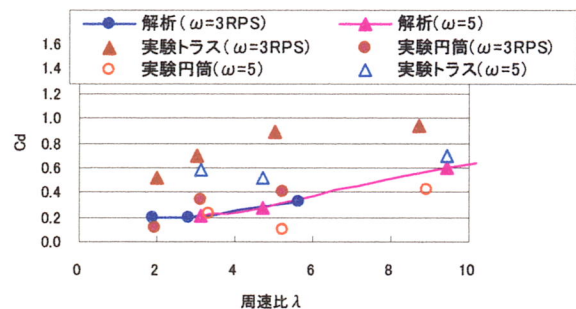


図-12 ローターに作用する風荷重の抗力係数

翼素理論に基づく結果は、図-12 に示すように円筒に支持された風車の実験結果 C_d と概ね一致する。しかしながら、トラスの実験値はそれよりかなり大きい。

e) 固有周期と減衰定数

実際の剛性より剛な模型を用いて実験を行っているけれども動的特性を述べておく。自由振動試験により、固有周期と減衰定数を求めた。その結果、円筒タワーに関してはロードセル F_x , F_y の結果から得られる固有周期は0.180s, 曲げモーメント M_θ は0.184sと共にほとんど変化はなかった。減衰定数も、3者とも4.5~4.6%とほとんど変わらなかった。

一方、トラスタワーに関してはロードセル F_x と曲げモーメント M_θ から得られる風の作用方向の固有周期は両者とも0.176sと変わらずばらつきも少ない。ロードセル F_y から得られる横方向の固有周期は0.160sと剛性が少し大きいぶん短い。 F_x も M_θ の結果から得られる減衰定数も2.6~2.7%, F_y から得られる減衰定数は2.2~5.7%と若干大きい。

f) 発電出力

モーターを取り付けた風車をはじめに電気を送り回転させておく。風が作用するとローターにトルクが発生しモーターの負荷が低下するので、無負荷及び風を受けた時の電流値から発電出力を算定し図-13に示した。その結果、トラスタワーに支えられた風車の方が、高風速範囲で円筒よりも出力が大きい。これはトラスタワーに支えられた風車の方が C_d は大きいことに対応する。また、両者とも風速とともに出力も増えるが、回転数 ω が低い3RPSの場合は5RPSに比べ増加の仕方が頭打ちとなる。

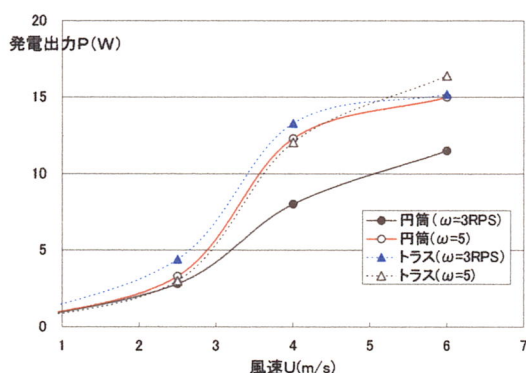


図-13 発電出力と風速 (m/s)

さて発電出力 P は式(3)に表すように風速の3乗で与えられ、その大きさは発電出力係数 C_p によって決まる。

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p U^3 A \quad (3)$$

実験結果から C_p を算定し周速比 λ に対し整理しこの関係を図-14に示す。その結果、周速比 λ が大きくなるにつれ C_p は増大する。トラスタワーの C_p の方が概ね円筒よりも大きく、回転数が小さい3RPSの方がトラスでも円筒タワーでも大きい。図中の実線は ω が5RPS, また破線は ω が3RPSにおける前述の翼素運動量理論に基づく解析結果である。 λ が5程度の範囲までは、実験結果の下限を与え、 λ が6を超えると実験結果の方が小さい。

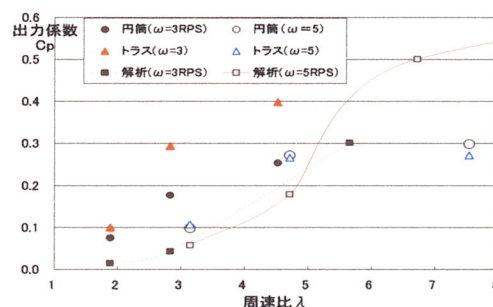


図-14 発電出力係数 C_p と周速比 λ の関係

6. 結論

(1) 試設計による両支持構造の構造特性

- トラス構造は重量比で1.44倍と大きいですが、固有周期は約0.73倍に減少する。従来の知見から疲労寿命1.7倍程度²⁾と改善されると期待される。したがって、今後は動的解析や疲労解析により、鋼材重量アップと耐久性のバランスを詳細に評価しトラス構造の優位性を検証する必要がある。

(2) 風洞実験による結果

- トラスタワーを支持構造とする場合、従来の円筒状モノタワーと後流域の風速分布についての時間空間的乱れはあまり差がみられない。
- 面外の振動加速度や荷重は、円筒タワーの方がトラスより大きい。
- ローターに作用する風荷重と発電出力については、トラスタワーの方が若干大きく、回転数の高い方が風荷重も発電出力も大きくなる。

謝辞：本研究は平成17年度「風力発電施設に供するタワーの最適構造に関する研究」として、(独)日本学術振興会「科学研究費補助金(基盤研究(C))」の支援を受けて実施したものである。

参考文献

- API: Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms, Report RP2A-LRFD, American Petroleum Institute, 1993.
- Yamashita, A. and Sekita K.: Analysis of the fatigue damage on the large scale offshore wind turbines exposed to wind and wave loads, Proc. of 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.166-171, 2004.
- 関田欣治, 林辰樹, 石川裕和, 山下篤, 林伸幸, 矢後清和: 洋上風力発電施設に作用する風抵抗及び減衰特性に関する風洞装置を用いた基礎的実験, 土木学会, 海洋開発論文集, VOL. 18, pp. 725-730, 2002.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G. and Rogers, A.L.: Wind Energy Explained, John Wiley & Sons Ltd, pp.83-139, 2002.