

「数値波動水路」を用いた風力発電塔に作用する波力の評価 WAVE FORCE ESTIMATION ON A TOWER OF OCEAN WIND FARM USING A WAVE SIMULATOR “CADMAS-SURF”

関山直樹¹・新井信一²・長尾昌朋³・上岡充男⁴

Naoki SEKIYAMA, Shinichi ARAI, Masatomo NAGAO and Mitsuo KAMIOKA

¹ 学生会員 足利工業大学大学院工学研究科 (〒326-8558 足利市大前町 268-1)

² 正会員 工博 東北工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

³ 正会員 博(工) 足利工業大学助教授 工学部都市環境工学科

⁴ 正会員 足利工業大学教務職員 工学部都市環境工学科

Wind farm at sea must be one of important projects in Japan. Although several mono tower and mono pile type wind turbines are in operation in North Sea having the flat sea bed, there is a problem of how to estimate wave loads on such type of structure which would be built on a slope of the sea bed around Japan. In this study, estimation of wave forces acting on such a tower using both a simulation of wave by “CADMAS-SURF” and a calculation of Morison’s equation is taken on trial. And it is found that this wave force estimation method gives good results for the condition on the slope where other estimation methods are not effective.

Key Words: Wave load, slope of sea bed, tower, wave simulation, Morison’s equation

1. 緒言

全世界的にクリーンエネルギー利用の必要性が認識されるようになり、ヨーロッパでは陸上と洋上の風力発電が推進されつつある。我が国でも風力発電を強力に推進する機運にいたり、関連する諸技術の至急の開発が望まれる。

狭い国土ながら広い海を有する我が国では地形上の特質から洋上風力発電を推進すべきであると考えられるが、その場合、図-1のようなヨーロッパで実績のあるパイル式モノタワー（以下単に、塔と称する）に風車を搭載するタイプを導入することはもっとも現実的といえる。しかしながら、平坦な海底からなる北海と異なり、急峻な海底を多く持つ我が国ではこれらを斜面に建設できるようにする必要がある。そのためには、斜面に設置した塔体に作用する波力推定法を確立しておく必要がある。

本研究では、公にされている「数値波動水路」²⁾を利用し、塔体に作用する波力を評価する方法を提案しようとする。そのため、2MWの発電風車搭載用の塔体を想定し、それが水平床海底におかれた場

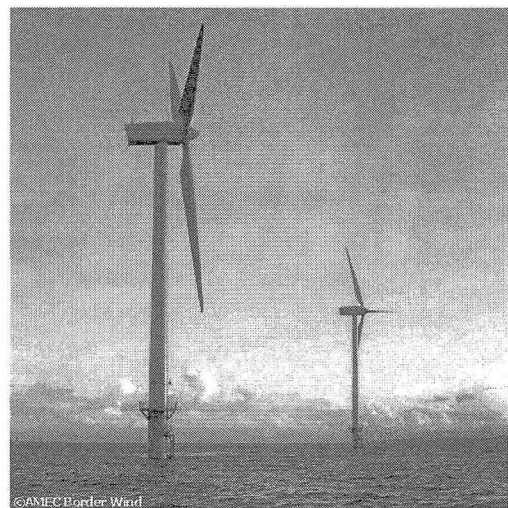


図-1 イギリス Blyth 沖の洋上風力発電所¹⁾

合と斜面上海底におかれた場合を考えた。そして、塔体に働く全波力を実験的に調べるとともに、合田式^{3,4)}による波力推定値と、微小振幅波、ストークス波、クノイド波のそれぞれの理論とモリソン式に

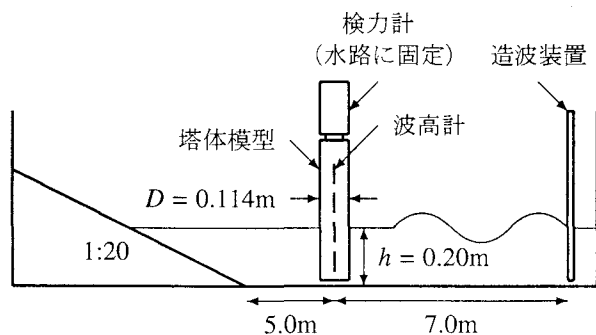


図-2 実験装置（水平床上）

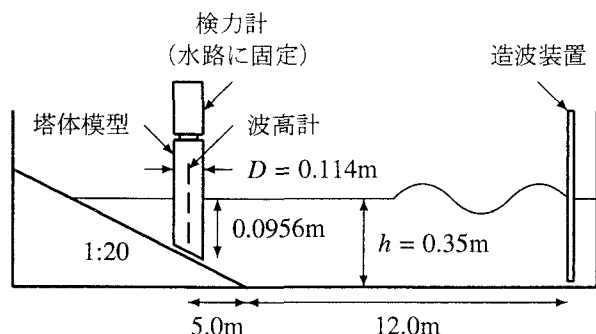


図-3 実験装置（斜面上）

よる波力推定値を調べた。また、「数値波動水路」により波面形状と水粒子速度をシミュレーションし、その結果をモリソン式に代入して時々刻々の波力の時系列を求めた。これらの結果を比較検討し、塔体に作用する波力の評価方法を考察した。

2. 検討モデルと実験方法

2000 年に出力 2MW のモノタワー式風力発電が英国の Blyth 沖（モノパイル式）で 2 台とデンマークの Middelgrunden（重力基礎式）で 20 台の営業運転が開始された。本研究では図-1 に示す Blyth の発電塔⁵⁾を検討モデルとした。その基礎部パイルの直径は 3.5m である。

実験には全長 27m、幅 0.8m、高さ 1.0m の両面ガラス張り鋼製水路を使用した。水路の一端にピストン型造波機が、他端には勾配 1/20 の斜面が設置されている。図-2 は水平床上での、また、図-3 は斜面上での状況図である。実物の約 1/30 の縮尺を想定し、塔体模型には直径 $D = 0.114\text{m}$ の塩ビ円筒を使用した。塔体模型は水路に固定された検力計に接続され、水路底面から少し浮かせて設置した。この検力計で塔体に作用する波力の水平成分 F を測定した。また、塔体と同じ位置の横で水位 η を計測した。なお、造波した波の条件を表-1 に示す。

表-1 実験条件

条 件	水平床	斜面
水 深 h	0.20m	0.35m
入射波高 H	0.01~0.07m	0.01~0.07m
周 期 T	1.0~2.5s	1.0~2.5s

3. 波力計算方法

(1) 波理論による方法

円柱部材に働く波力は、その部材軸と垂直な流速成分をモリソン式に代入して計算することができる。波動場に鉛直におかれた円柱の場合は、波面上昇量 η と水深方向に変化する水粒子速度の水平方向成分 u とを波理論から求め、それをモリソン式に当てはめ、次式のように海底から水面まで積分することで円柱に働く全波力 F が求められる。

$$F = \int_{-h}^{\eta} \left(C_D \frac{1}{2} \rho |u| u D + C_M \rho \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\pi D^2}{4} \right) dz \quad (1)$$

ここに、抗力係数 C_D と慣性力係数 C_M は適切に選定される必要がある。実験の範囲では $\text{Re} = 5000 \sim 46000$ 、 $\text{KC} = 0.3 \sim 8.6$ である。そこで、計算には $C_D = 1.2$ 、 $C_M = 2.0$ を使用した。

波理論は波高水深比と周期により微小振幅波、ストークス波、クノイド波の 3 種類を使い分ける。なお、ストークス波は 3 次近似式を、クノイド波は近似表現であるハイパボリック波の 2 次近似式を使用した。それぞれの理論の詳細は、例えば岩垣⁶⁾を参照願いたい。

(2) 合田式による方法

パイル式モノタワーのような鉛直な円柱の場合は、 C_D 、 C_M が水深方向に一定と見なすことができる。よって、全波力は、式 (1) の流速の水平方向成分を用いて、海底面から水面まで積分することによって計算される。合田^{3,4)}はこれを次式のようにまとめている。

$$F = \rho g C_D D H^2 K_D |\cos \sigma t| \cos \sigma t - \rho g C_M D^2 H K_M \sin \sigma t \quad (2)$$

ここで、 K_D は最大抗力の算定係数、 K_M は最大慣性力の算定係数である。これらは図-4 から求められる。

(3) 「数値波動水路」による方法

「数値波動水路 CADMAS-SURF」²⁾ は磯部らのグループが作成し、沿岸開発技術センターから発行

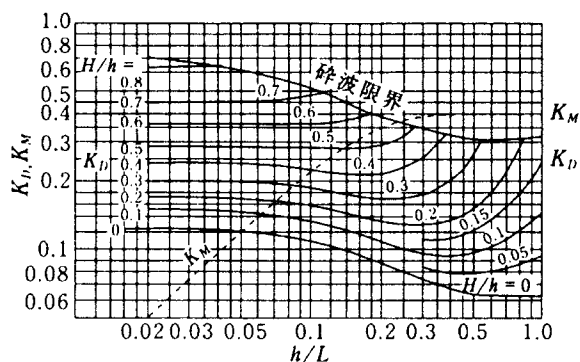


図-4 直立円柱に作用する抗力および質量力⁴⁾

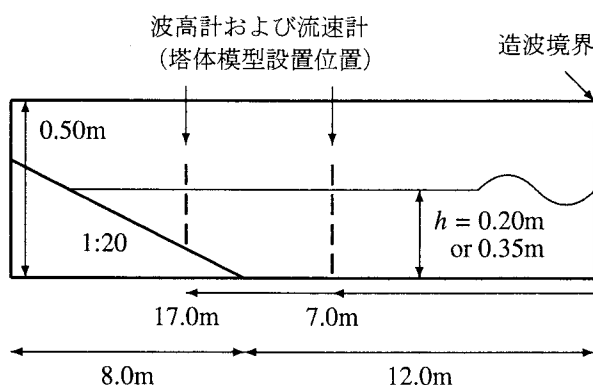


図-5 解析領域

されている波動数値シミュレーションソフトウェアである。多くの研究者・実務者が利用し、その適用範囲を確認していく必要がある。この数値波動水路は、自由表面モデルとしてVOF法を、地形や構造物を表現するためにポラスモデルを、支配方程式には2次元非圧縮性流体の連続方程式とナビエ-ストークスの運動方程式を用いている。また、精度向上のための様々なオプションが用意されている。本研究では、直立円柱が無い状態での流体運動の再現にこの数値波動水路を用いており、再現する現象が比較的単純であるため、ほぼ標準の状態で使用している。

図-2および図-3の波運動を再現するため、解析領域を図-5のように長さ20m、高さ0.5mとした。計算格子間隔は、長さ方向は400分割して0.05m、高さ方向は50分割して0.01mとした。解析領域右端には実験装置と同じピストンタイプの造波境界を設置し、実験での水位測定位置で、実験と同じ波高となるように入射波高を調整した。再現した波の条件を表-2に示す。

円柱に働く波力を推定するため、図-5に示す塔体模型設置位置で水位および流速分布の時系列を出力した。これらを式(1)に代入して、円柱に働く全波力の時系列を求めた。

表-2 解析条件

条 件	水平床	斜面
水 深 h	0.20m	0.35m
入射波高 H	0.03m, 0.06m	0.03m, 0.06m
周 期 T	2.0s	2.0s

4. 波力推定法の評価

(1) 波理論と合田式による方法

a) 水平床上の場合

塔体が水平な海底に設置された場合の、各種波理論により求められた塔体模型に働く波力(微小振幅波□, ストークス波△, クノイド波▽)および合田式から求められた波力(○)を実験値(●)とともに図-6に示す。波高が大きくなると波の非線形性が強くなるが、それとともに、微小振幅波、ストークス波、クノイド波とそれぞれの適用限界に従って波理論を使用している。砕波限界を超えた場合は、一応クノイド波を用いて波力を算定しているが、図ではクノイド波と異なる記号(+)で表現している。なお、図の副軸には、塔体の設置水深 h で無次元化した波高および塔体に働く浮力 B で無次元化した波力を示している。

周期 $T = 1.0s$ のケースを図-6(a)に示す。周期が短い場合、合田式による波力の推定値は全実験範囲で実験値と良い一致を示す。波理論を用いた推定法では、波高 $H = 0.04m$ 以内の範囲では実験値に一致するものの、波の非線形性が強くなるとともにやや過大評価となる傾向を見せる。

図-6(b)に周期 $T = 2.5s$ のケースを示す。合田式を用いた波力推定法は、波高が小さい場合(波高 $H = 0.03m$ 以内)は精度が良いものの、波高が大きくなり非線形性が強くなると過小評価する傾向が見られる。波理論を用いた波力推定法は図-6(a)のケースと同様の傾向を示す。

b) 斜面上の場合

塔体を斜面上に設置した場合の波力を図-7に示す。図の副軸は、塔体の設置水深 h で無次元化した波高および塔体に働く浮力 B で無次元化した波力である。水平床の場合と比較して塔体付近の水深が浅くなっているため、全体的に波の非線形性が大きくなっている。

図-7(a)は周期 $T = 1.0s$ のケースである。塔体模型位置で波高 $H = 0.08m$ 以上の場合、塔体模型沖側で砕波している。波高が小さい場合(波高 $H = 0.04m$)では、波理論を用いた波力推定法も、合田式を用いたものも、良い精度を示す。波高がこれより大きくなると、波の変形が大きく急峻な波形

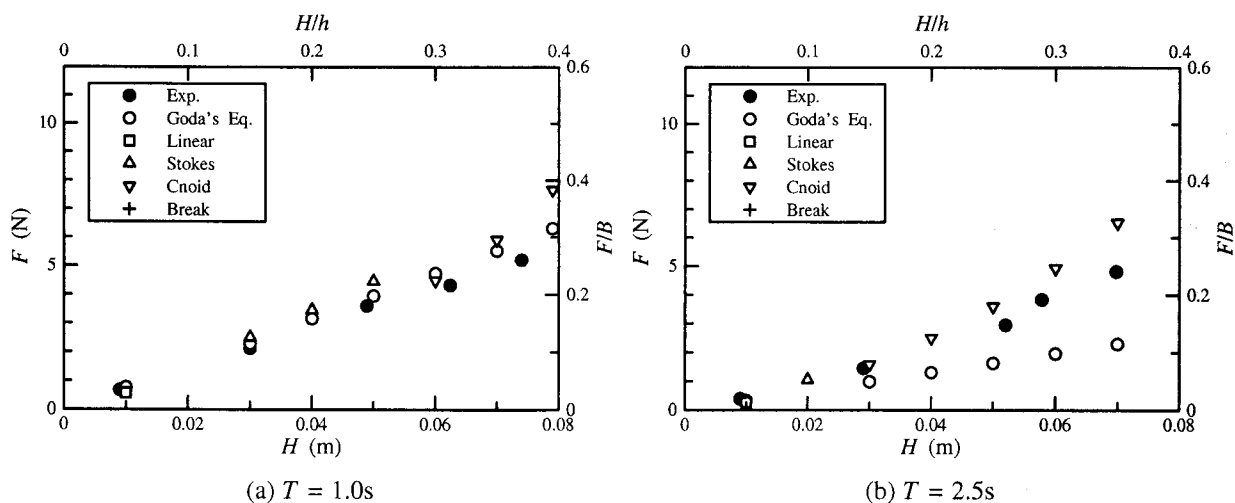


図-6 最大波力の実験値と理論値の比較（水平床）

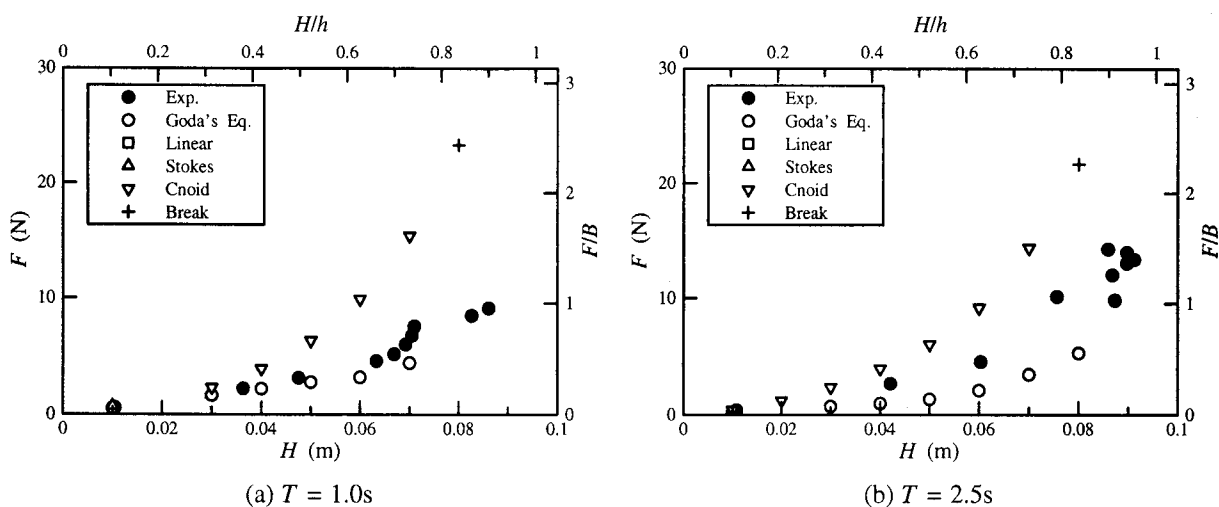


図-7 最大波力の実験値と理論値の比較（斜面）

となるため、波理論を用いた波力推定法は過大評価となっている。これに対して、合田式を用いた場合は $H = 0.06\text{m}$ までは精度が良いものの、これ以上波高が大きくなり、砕波限界に近づくやや過小評価となる。

図-7(b) に周期 $T = 2.5\text{s}$ のケースを示す。 $H = 0.08\text{m}$ 以上では塔体模型沖側で砕波している。波力推定値は、今までと同様に、波理論式を用いた場合は過大に、合田式を用いた場合は過小に評価されている。このように砕波限界に近い状態では、これらの手法を用いた波力推定法を利用することは困難と思われる。

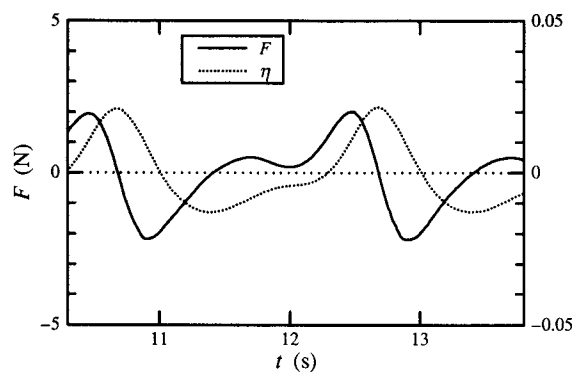
(2) 「数値波動水路」による方法

a) 水平床上の場合

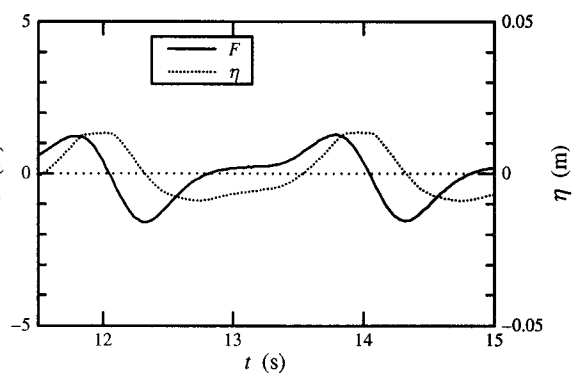
図-8 に塔体模型を水平床においた場合の塔体に働く波力および塔体付近での水位の変化を示す。波力の実験値は塔体模型を固定した検力計で測定され

た全波力、計算値は「数値波動水路」で再現された流速分布を式 (1) に代入して得た全波力である。実験値・計算値ともに、造波を開始して、塔体模型を波が数波通り過ぎた後の状態が安定した部分を図示している。

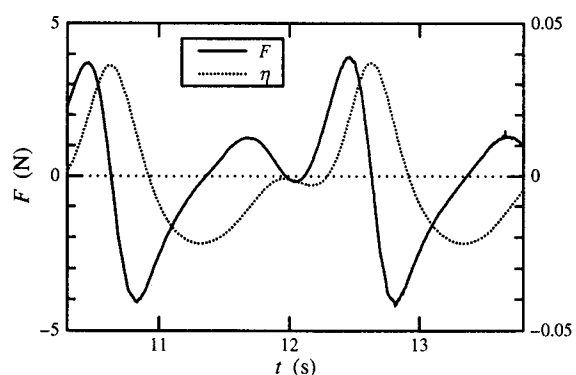
図-8(a) および (b) は波高 $H = 0.03\text{m}$ 、周期 $T = 2.0\text{s}$ の場合である。計算結果の波高と波力がともに実験結果よりもやや大きくなっているものの、その波形はほぼ同じになっている。図-8(c) および (d) は波高 $H = 0.06\text{m}$ 、周期 $T = 2.0\text{s}$ の場合である。水位の再現精度は非常に良いものの、波力に関しては計算値がやや大きく、また、位相も少し進んでいる。これは、数値波動水路で再現された波の前傾化がやや強く表れ、水粒子の加速度が大きくなったためではないかと考えられる。しかし、これらの差は非常に小さなものであり、若干周期は異なるものの図-6(b) と比較して、数値波動水路を用いた波力推定法は波力の大きさ・経時変化ともに十分良い精度



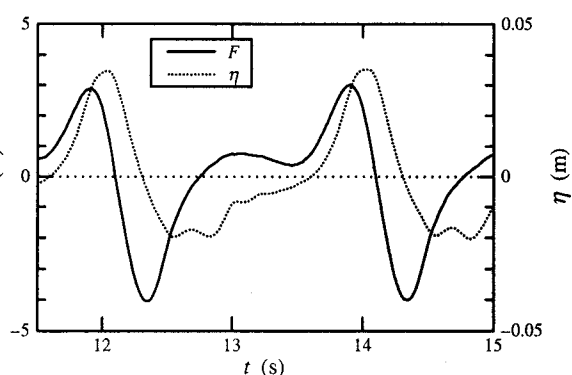
(a) 計算値 ($H = 0.03\text{m}$)



(b) 実験値 ($H = 0.03\text{m}$)

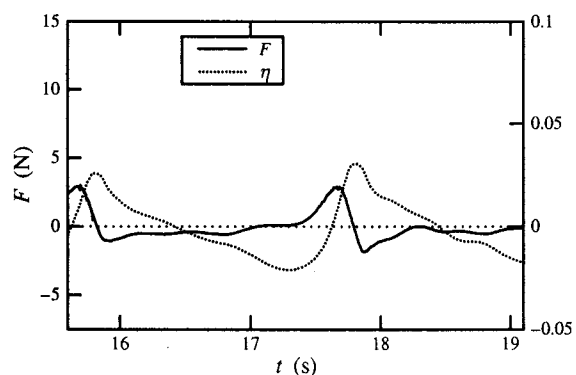


(c) 計算値 ($H = 0.06\text{m}$)

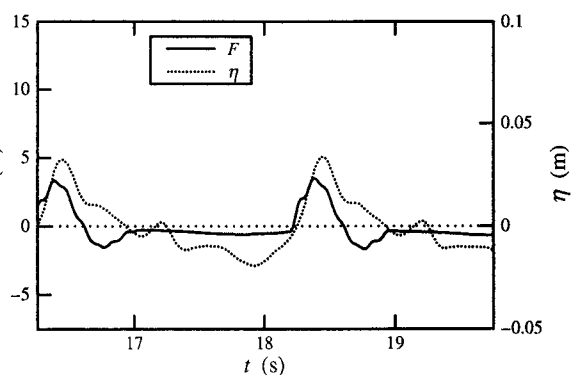


(d) 実験値 ($H = 0.06\text{m}$)

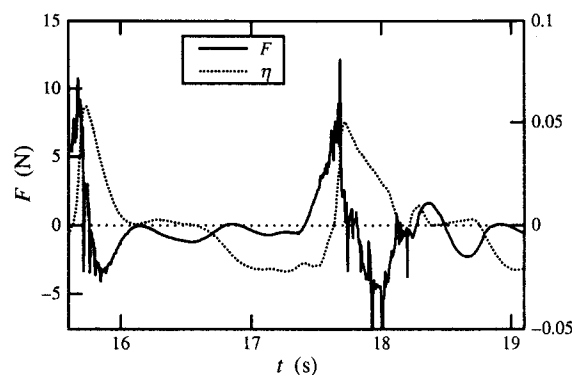
図-8 数値波動水路を用いた波力の推定（水平床）



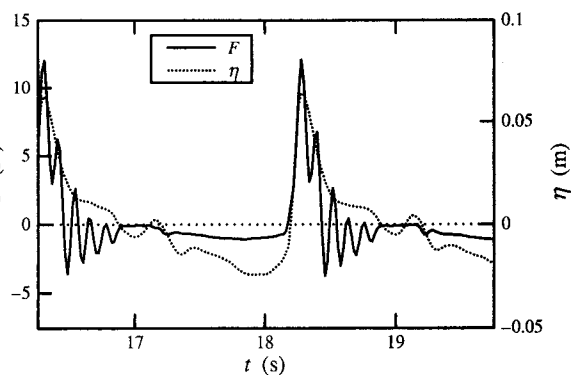
(a) 計算値 ($H = 0.03\text{m}$)



(b) 実験値 ($H = 0.03\text{m}$)



(c) 計算値 ($H = 0.06\text{m}$)



(d) 実験値 ($H = 0.06\text{m}$)

図-9 数値波動水路を用いた波力の推定（斜面）

がある。

b) 斜面上の場合

図-9 に塔体模型を斜面においた場合の塔体に働く波力および塔体付近での水位の変化を示す。

図-9(a) および (b) は入射波高 $H = 0.03\text{m}$ 、周期 $T = 2.0\text{s}$ の場合である。波力・水位ともに実験結果と計算結果が非常に良く一致している。ただし、ここでも計算による波力の位相がやや進む傾向が見られる。図-9(c) および (d) は入射波高 $H = 0.06\text{m}$ 、周期 $T = 2.0\text{s}$ の場合である。このケースでは、塔体模型の沖側で砕波している。そのため、波力の実験値には、砕波の衝撃力による塔体模型の振動が計測されている。一方、計算値には、流体運動を再現する際の計算誤差に起因すると思われるノイズが現れている。砕波波形まで再現するためにはより詳細な再現計算を行う必要がある。しかし、両者とも波力の経時変化に移動平均操作を施すと、波力の波形はほぼ一致しており、図-7(b) と比較して、波力の推定精度は十分良いと考えられる。

5. 結論

風車搭載用の塔体に働く波力推定法について調べた結果、以下の結論を得た。

- 1) 水平床上に塔体に働く波力は合田式により推定できる。ただし、周期が長く、波高が大きくなる場合は波面が急峻となり、合田式でも波力を正しく推定できなくなる。一方、波理論とモリ

ソン式による方法は波高が大きくなるにつれ波力の推定精度が悪くなる傾向にある。

- 2) 斜面上の塔体の場合には、波の変形が大きく比較的容易に急峻な波形となるため、その場合、合田式でも推定が困難になる。
- 3) 「数値波動水路」による方法は、水面波形が実験とおおむね良い対応を示し、波力の波形もその特徴を良く捉えている。また、波力の大きさも良く推定できている。したがって、この波力の評価方法は、波面と波力の位相関係に不満を残すものの、塔体設計のための波力の推定には十分な精度を有しているといえる。

謝辞：足利工業大学平成 15 年度卒業生の押切康宏氏、佐藤由行氏、村岡良英氏には実験に際して絶大なる尽力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) <http://www.offshorewindfarms.co.uk/>
- 2) 沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究・開発，296p., 2000.
- 3) Goda, Y.: Wave force on a vertical circular cylinder, Experiments and proposed method of wave force computation, *Rept. of Port and Harbour Res. Inst.*, No. 8, p. 74, 1964.
- 4) 土木学会：水理公式集 [平成 11 年版] (7.3.2 小口径部材に働く波力), pp. 534-537, 1999.
- 5) Still, D. and Grainger, W.: Blyth - the UK's first offshore wind farm, *MAREC2001*, pp. 3-5, 2001.
- 6) 岩垣雄一：最新海岸工学 (3.3 波浪), pp. 43-74, 森北出版, 1988.