土木学会論文集, Vol. 81, No. 18, 25-18167, 2025.

台船動揺下でのSEP船による瀬取り水理模型実験

柳澤　創[1]・野中　拓実[2]・水野　辰哉[3]・
出口　博之[4]・西畑　剛[5]・道前　武尊[6]

[1] 正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: hajime.yanagisawa@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)
[2] 正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
[3] 正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
[4] 正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
[5] 正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
[6] 五洋建設（株）洋上風力事業本部（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）

洋上風力発電の需要拡大に伴い風車部材の大型化が進んでいる．特にモノパイル(MP)などの重量物を吊上げる際は，クレーン性能限界近くでの作業が想定される．本研究では，動揺する台船から SEP 船への MP の瀬取りを水理模型実験で再現し，MP 吊上げ時の吊索張力を計測した．すると，架台から MP が地切りする前後において，吊索作用荷重が吊荷の静的荷重を越えることがわかった．実験は港内外における瀬取りを想定し，複数の波浪条件下における動的増幅係数“DAF”を比較した．その結果，本実験内で計測された DAF の最大値は 1.08 程度（日本海事協会の基準値内）であり，DAF の大きさは MP が台船から離れる瞬間の架台の鉛直速度に比例していることが確認された．また，実験条件などから求まる DAF の推定値と実験結果と比較し，両者がよく一致することを確認した．

Key Words : *DAF, oscillation, offshore wind power, monopile, hoist*

1.　はじめに

着床式洋上風力発電施設は，日本海側を中心とした比較的水深が浅い地域において既に導入が始まっており [1]，近年は風車の大型化に向けた施工検討が本格化している．施工時には，予め製作されたモノパイル（以下，MP）などの部材を，SEP 船や HLV 船を用いて施工場所まで海上運搬することが計画されている [2),3)]が，基地港湾の地耐力や設備が十分でない場合，工場から海上運搬してきた部材を，静穏な海域で台船から SEP 船や HLV 船へ直接瀬取りすることが想定されている（**図-1**）．この場合，台船の動揺により吊荷の静的荷重を上回る動的増幅荷重が作用することが懸念され [4]，動的増幅荷重を考慮した場合，SEP 船などのクレーン能力を超える可能性がある．吊荷の静的荷重に対する吊索作用荷重（静的荷重＋動的増幅荷重）の割合である動的増幅係数を DAF (Dynamic Amplification Factor)と呼ぶ．また，一連の吊作業における DAF の最大値を DAF_{max} とする．吊上げ作業時の DAF_{max} については，日本海事協会のガイドライン [5]に陸上，沿岸，沖合での基準値が示されており，本研究の状況（沿岸で 1400 t の部材を吊上げる場合）では DAF_{max} が 1.08 程度と想定される（本実験で記録された DAF_{max} の最大値も 1.08）．ガイドラインはDNV-ST-N001[6]に準拠しており，

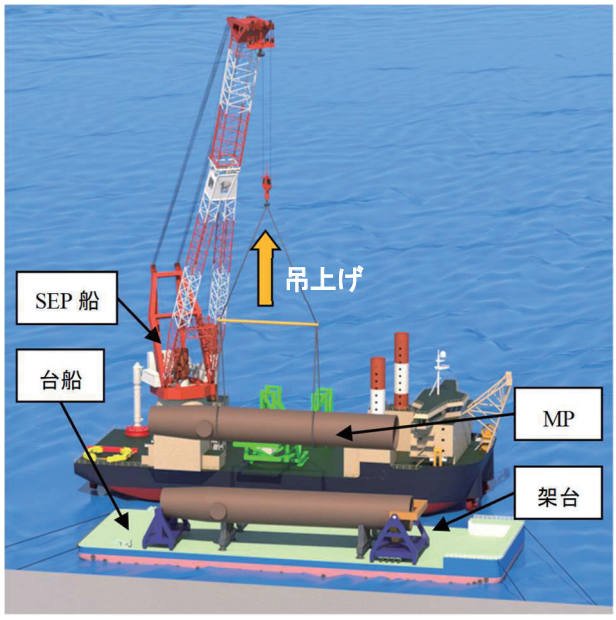


図-1　MP 瀬取りのイメージ図（港内）

吊荷重量による分類はあるものの，波高や周期などの外力条件が DAF に与える影響について言及されていない．

DAF に関する既往研究として，Chen ら[7]はジャケットの吊下げ時を対象にした動的解析を行い，DNV 基準の 1.20（ジャッキアップ無，沖合，吊荷 300 t 以上 1000 t 未満）に加え，定常状態の解析であることを考慮し，DAF_{max} の許容値を 1.22 としたうえで，波高や周期の組み合わせごとに DAF を評価した．また，Elzinga ら[8]は沿岸海洋工事における DAF_{max} の許容値を DNV 基準の 1.15（ジャッキアップ無，沖合，吊荷 1000 t 以上 2500 t 未満）としたうえで，HLV 船による MP 施工の動的解析を実施した．さらに Kronenberg ら[9]は波浪による動揺の影響を考慮した部材吊上げモデルを用いて DAF の軽減対策案を報告した．DAF_{max} の推定式については DNVGL-ST-0378[10]（欧州における洋上風力発電設備の施工規格）において提唱されており，式(1)のように表されている．

$$DAF_{max} = 1 + V_R\sqrt{\frac{k}{Wg}} \tag{1}$$

ここで，V_R は吊上げ時の吊荷とフックの相対最大速度(m/s)，k はバネ定数(kN/m)，W は吊荷の重量(kN)，g は重力加速度(9.81m/s^2)である．

一方，日本では，土居ら[11]や橋本ら[12]が洋上風力部材の海上吊上げ作業に関する実験および解析の研究を行っており，外力条件ごとの吊荷動揺量をまとめているが，DAFに関しては言及されておらず，水理模型実験を通じたDAF_{max}推定式の精度検証および実施工を想定した考察は行われていない．そこで本研究は，DAFと浮体動揺現象との関係性を明らかにすることを目的とし，港湾内外における瀬取り作業のうち，SEP船から台船へMPを吊上げる過程を水理模型実験で再現した．複数の波浪条件下における吊索作用荷重と浮体動揺量を計測し，DAFと浮体動揺現象との関係性を考察した．また，DAFの発生理論から導かれた推定値と実験結果を比較し，実施工時に想定されるDAFや，DAFを増幅させる要因を考察した．

表-1　実験模型諸元(S = 1/100)

台船	全長 (mm)	1200
	全幅 (mm)	420
	高さ (mm)	75
	喫水 (mm)	15.3
	排水重量 (kgf)	6.93
	Roll 固有周期 (s)	0.65
	Pitch 固有周期 (s)	0.87
SEP船 ジャッキアップ状態	全長 (mm)	1200
	全幅 (mm)	450
MP	径 (mm)	96
	全長 (mm)	721
	排水重量 (kgf)	1.41

表-2　係留索, 吊索および防舷材のヤング率および吊索全体系の軸剛性

	実機条件	実験条件
係留索	–	12.7 MPa
吊索上部（ワイヤ）	106 GPa	114 Gpa
吊索下部（スリング）	9.3 GPa	9.5 MPa
吊索全体	–	667 N/m
防舷材	2.7 MPa	3.1 kPa

2.　水理模型実験概要

(1)　実験装置と模型

本研究の水理模型実験は，ピストン型造波装置を有する，長さ 20.0 m，幅 30.0 m の一様水深水槽で実施した．実験では，15 MW 級風車の施工を想定し，台船に搭載されている MP が吊上げられる過程を再現した．SEP 船，台船，MP の各模型の諸元を**表-1** に示す．実験縮尺は Froude の相似則に従い 1/100 とした．

台船は**図-2, 3** に示す通り，港外では 4 点係留，港内では岸壁を模した壁面に係留し，ジャッキアップした SEP 船と並べて配置した．SEP 船のクレーントップから，吊索を用いて MP を吊るした．**図-4** の実験断面図に示した通り，吊索はクレーンフックから吊天秤まで吊角 50 度の 2 点吊りで，吊天秤から MP が半掛け吊りである．また，港内については，防舷材を模したスポンジを壁面に設置した．係留索，吊索，防舷材の剛性値を**表-2** に示す．吊索上部のワイヤ剛性は，実験上は伸びないと仮定して実際より硬い素材で設定した．剛性が高い場合，DAF は大きくなるため，実験結果は安全側の数値といえる．

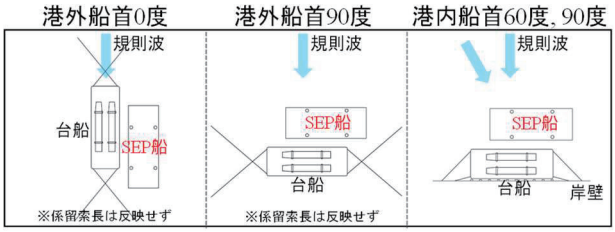


図-2　実験模型配置図

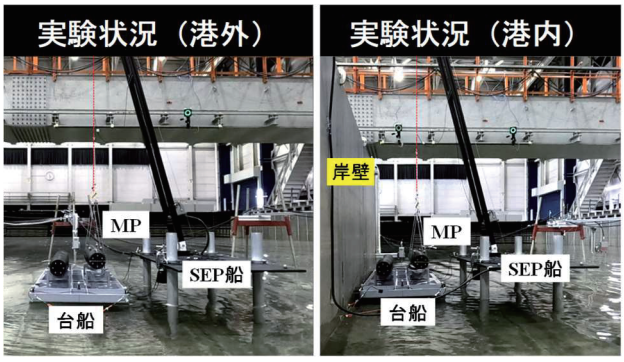


図-3　実験状況写真

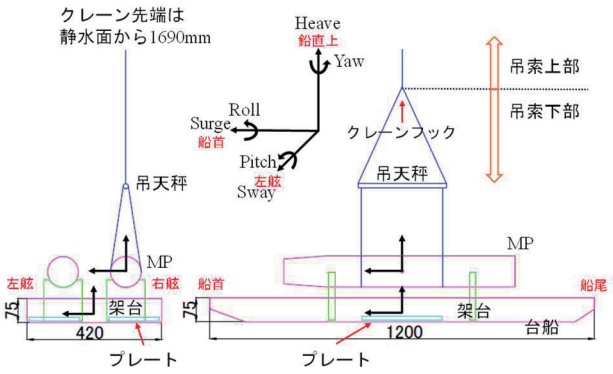


図-4　実験断面図 (mm)

表-3　実験条件 (S = 1/100)

			実機条件	実験条件
港内	規則波	波高H (cm)	50	0.5
		周期T (s)	4, 6, 8, 10	0.4, 0.6, 0.8, 1.0
		入射角 (度)	60, 90	60, 90
	吊上げ速度V (mm/s)		10, 20	1.0, 2.0
	台船上のMP本数		1, 2	1, 2
港外	規則波	波高H (cm)	100.0	1.0
		周期T (s)	6, 8, 10	0.6, 0.8, 1.0
		入射角 (度)	0, 90	0, 90
	吊上げ速度V (mm/s)		10, 20	1.0, 2.0
	台船上のMP本数		1, 2	1, 2

台船には左右 2 本の MP を搭載可能であり，1 本につき前後 2 カ所に MP を支える架台(0.13 kgf)が設けられている．また，実験時は台船内部にバラスト重量分の重りプレート(0.635 kgf)を 2 枚（MP2 本搭載時はプレートを左右に 1 枚ずつ，MP1 本搭載時は MP が無い側に 2 枚重ねて）設置し，台船の初期姿勢を水平に保持した．

(2)　実験方法

吊索が弛んだ状態を初期状態として MP を一定速度で吊上げ，MP が地切りしてから，完全に台船に荷重が載らなくなるまでの一連の過程を実験で再現した．各模型に設置したマーカーを高性能カメラで追跡し，台船および MP の重心位置における 6 自由度（並進運動の Surge, Sway, Heave および回転運動の Roll, Pitch, Yaw）の動揺量を画像解析(100 Hz)で計測した．MP と台船の 6 自由度の定義は**図-4** に示した通りであり，各浮体の重心位置を原点として 6 自由度の結果を整理した．また，吊索および各係留索に張力計（NTL 社製，SAZ-5）を設置し，吊上げ時に作用する張力をサンプリング周波数 100 Hz で計測した．これらのデータを用いて，一連の吊上げ過程における浮体動揺量と吊索作用荷重の挙動を比較した．

(3)　実験条件

実験は港内外を対象に行った．実験条件を**表-3** に示す．波は規則波を作用させ，港内については波高 0.5 cm，港外については波高 1.0 cm となるように入射波条件を決定した（波高と船体動揺量は，ほぼ線形関係にあることを踏まえ，港内および港外で想定される代表波高を設定）．周期は，港内で 0.4～1.0 s，港外で 0.6～1.0 s とし，2 s ピッチで実験した（船体固有周期を含む範囲で設定）．また，波向は**図-2** に示す通り，港内では浮体設置角度を変更して 0, 90 度を再現し，港外では造波方向を変更して 60, 90 度を再現した（船首方向からの波向を 0 度と定義する）．港内の岸壁は導波板（反射率 1.0）を並べて模擬した．清川ら [13]の研究から，反射率 1.0 の岸壁係留の場合，進行波条件と比較して Heave が大きくなる一方，Roll は小さくなると想定される．MP の吊上げ速度（吊索の巻上速度）は，実際の施工条件を参考に 1 mm/s と 2 mm/s の 2 通りとした．なお，吊上げ中の巻上速度の変化はないものとする．また，台船には MP が 2 本搭載でき，実施工時には SEP 船側の MP を吊上げたのち，もう一方の MP を SEP 船側にスライドさせてから吊上げる．本実験では，MP の搭載本数によって台船動揺が変化することを考慮して，MP1 本搭載時と 2 本搭載時の実験を行った．

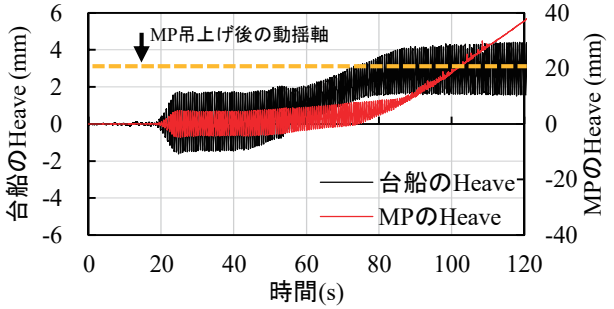


図-5　台船のHeaveとMPのHeaveの時系列変位（港外，周期 0.6 s，波向90度，吊上げ速度1 mm/s）

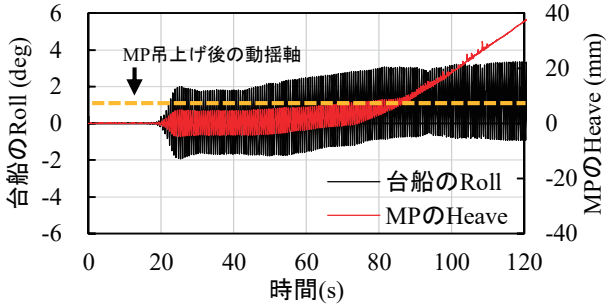


図-6　台船RollとMPのHeaveの時系列変位（港外，周期0.6 s，波向90度，吊上げ速度1 mm/s）

3.　水理模型実験の結果および考察

(1)　台船動揺の時系列変化

代表的な実験条件（港外，周期 0.6 s，波向 90 度，吊上げ速度 1 mm/s）を対象に，MP 吊上げ過程における台船の動揺量（Heave および Roll）と MP の Heave 時系列

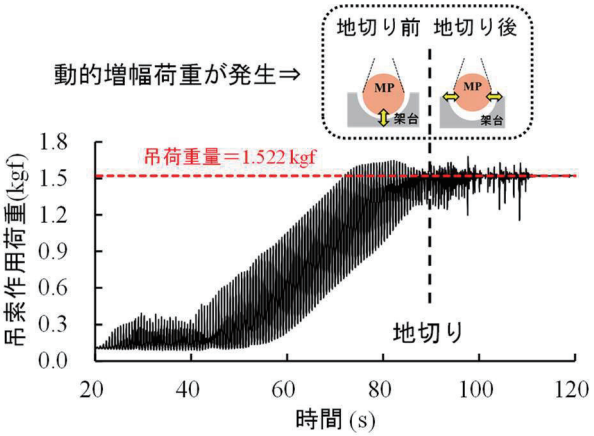


図-7 吊索張力の時系列グラフ（港外，周期0.6 s，波向90度，吊上げ速度1 mm/s）

変位を**図-5, 6** に示す．**図-5** より，台船の Heave は初期状態で 0 mm を中心に 1.5 mm 程度の振幅で動揺している．吊上げが開始されてからは MP の重量(1.522 kgf)が徐々に除荷されるため，台船の喫水が浅くなる（Heave の軸が正方向にシフトする）．吊上げ後の Heave 動揺軸は黄色破線で示した 3 mm 程度であり，実機スケールで 30 cm 程度台船が浮き上がっている．また，台船の Heave の軸が推移する間（40 s から 80 s）は，MP によって台船の運動が阻害され，Heave の振幅が小さくなる．一方で MP が地切りしてから（80 s 以降）は再び振幅が大きくなる．

次に**図-6** より，Roll についても吊上げ過程におけるシフトが認められ，吊上げ後に，吊上げた MP と反対側に約 1 度傾いている．振幅については，吊上げ前後ともに 2 度程度であり，重心位置のずれに伴うわずかな増減は認められるものの，顕著な変化はない．また，動揺周期についても吊上げ前後での変化は見られなかった．

(2) 吊索張力の時系列変化

次に，吊索作用荷重の時間変化の結果を**図-7** に示す．40 s 付近で吊上げが開始され，MP が吊上がるにしたがって吊索張力が増大していく．吊索張力の振動は台船動揺に追従して MP が上下に動揺することに起因する．70 s を過ぎたころから，吊索作用荷重が吊荷重量(1.522 kgf)を超え，動的増幅荷重が発生する．MP が架台と完全に地切りする約 90 s までは吊索作用荷重が規則的に振動して動的増幅荷重が発生するのに対し，地切り後は動的増幅荷重が発生するタイミングが不規則になる．これは動的増幅荷重の発生メカニズムが地切り前後で異なるためである．**図-7** の上部に概略図で示したように，地切り前は MP 底面が架台に追従できず，架台から離れるときに動的増幅荷重が発生しており，地切り後は MP 側面と架台が衝突するときに動的増幅荷重が発生している．地切り後の大きな動的増幅荷重は MP の Yawing に主に起因しており，実験の再現性が低いこと，実施工時にはタグラインで対策できることを踏まえ，地切り前の動的増幅荷重から求められる DAF に着目して結果を整理する．

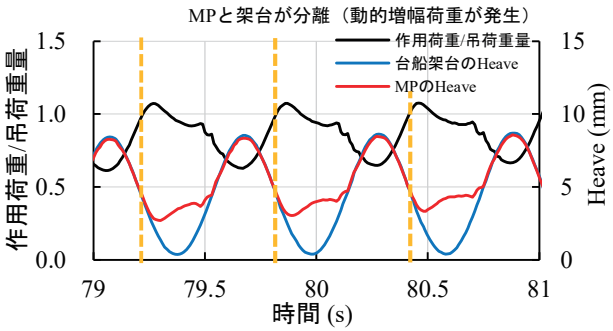


図-8 動的増幅荷重発生時のMPおよび架台のHeave挙動（港外，周期0.6 s，波向90度，吊上げ速度1 mm/s）

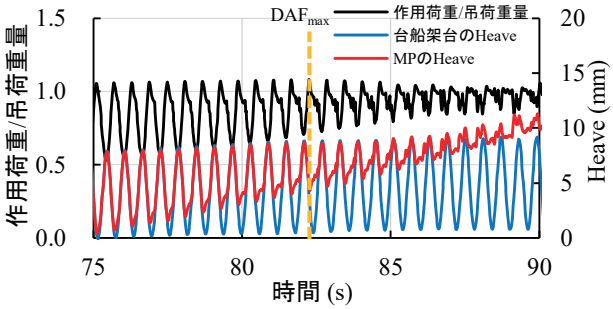


図-9 MPが離れるタイミングとDAF$_{max}$発生タイミングの比較（港外，周期0.6 s，波向90度，吊上げ速度1 mm/s）

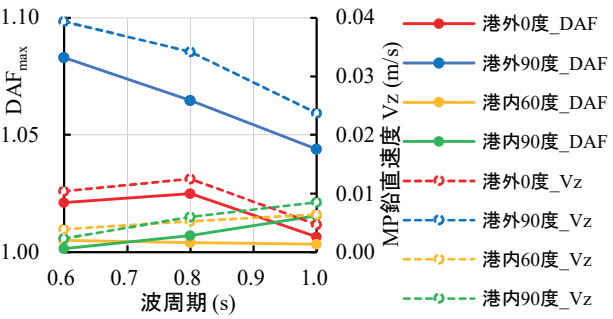


図-10 MP 分離時の MP 鉛直速度V_zと DAF$_{max}$ の比較

(3) DAF$_{max}$ と MP 鉛直速度の関係

動的増幅荷重の発生時における台船と MP の Heave，および吊荷重量で正規化した吊索作用荷重の時系列拡大図を**図-8** に示す．ここでいう架台位置とは，水平方向の位置を 2 つの架台の中間点，垂直方向の位置を台船の重心として定義した位置である．架台と MP の Heave を比較すると，架台が上がったタイミングでは架台と MP の動揺が一致しているのに対し，架台が下がったタイミングで，MP が追従できずに架台から離れる．また，MP と架台が離れた瞬間（黄色破線）を超えても，吊索が伸びるため，MP が多少下がる様子が見られ，MP が最下点に到達したとき，言い換えれば吊索が伸び切ったときに動的増幅荷重が 1 周期の中で最大となる．**図-9** に MP の分離が始まってから完全に地切りするまでの時系列を示す．グラフから，MP が台船動揺振幅の中央（台船が水平）付

近で離れるときのDAFがDAF_{max}であることが分かる．このことから，DAFの大きさには，MPが架台から離れる瞬間の架台の鉛直速度が関係していると推察される．

図-10に各ケースのDAF_{max}と，DAF_{max}が計測されたときのMP鉛直速度V_zを比較して示した．MP鉛直速度はMPのHeave変位を時間微分することにより算出した．両者の比較から，DAF_{max}とMP鉛直速度には強い相関性が認められた．また，港内外で比較すると，港外90度のケースにおいてDAF_{max}が最も大きく，波周期0.6 sのときに本実験内で最大である1.083となった．この値は，既往文献の日本海技協会のガイドラインに記載の数値とほぼ一致しており，本実験結果の妥当性の裏付けとなる．港外90度の条件でDAF_{max}が最大となるのは，港外の方が厳しい波浪条件であること，Rollが卓越する横波の方がMPの重心位置における鉛直速度が大きくなることが影響していると考えられる（Pitch方向の波の場合，台船とMPの動揺軸が近いため，MP鉛直速度が小さい）．港内において波高を1.0 cmとしたケースも追加で実施したが，港外よりDAF_{max}は小さい値となった．港内における岸壁係留方式や防舷材による運動エネルギーの吸収が原因と推察される．さらに，台船の固有周期は，Roll方向が0.65 s，Pitch方向が0.87 sであり，当然ではあるが固有周期周りでは台船の動揺量が大きくなり，その分だけDAF_{max}も大きくなる．しかし，同じ動揺量においても動揺周期が短いほど架台鉛直速度は速くなるため，DAF_{max}の大きさには波周期も大きく関係している．

4. DAF_{max}の推定値と実験結果の比較

(1) DAFの推定式の導出

第1章に記した通り，DAF_{max}の推定式はDNVGLに記載されているが，本研究では，新たに台船動揺や巻上げに伴うDAFの変動にも適用可能なDAF推定式の導出過程を詳細に述べたうえで，実験結果との比較および考察を行った．実験の結果（**図-10**）から，DAFはMPが架台から離れる瞬間のMPの鉛直速度V_zに依存している．離れる瞬間はMPと架台の鉛直速度V_zが一致している（MPの鉛直速度=架台の鉛直速度= V_z）ことを踏まえると，台船の動揺量からDAFの推定式が導出される．まず，MPが架台から離れる瞬間における運動方程式を式(2)に示す．このとき，mはMPの質量(kg)，kは吊索全体のバネ定数(m/s)，gは重力加速度(9.81 m/s^2)，aはMPの加速度(m/s^2)でり，吊索は自然長からΔl(m)だけ伸びている．Δlについて解くと式(3)のようになる．

$$mg - k\Delta l = ma \tag{2}$$

$$\Delta l = \frac{m(g-a)}{k} \tag{3}$$

次に，MPが架台から離れる瞬間と，吊索が伸びきってMPの鉛直速度が0になった瞬間のエネルギー保存則を式(4)のように解く．MPの鉛直速度が0になった瞬間に吊索が自然長からΔx(m)伸びたとして，式(3)を代入してΔxについて解くと，式(5)のようになる．

$$\frac{1}{2}k\Delta l^2 + \frac{1}{2}mV_z{}^2 - mg\Delta l = \frac{1}{2}k\Delta x^2 - mg\Delta x \tag{4}$$

$$\Delta x = \frac{mg \pm \sqrt{m^2a^2 + mV_z{}^2}}{k} \tag{5}$$

ここで，DAFは吊荷重量に対する吊索作用荷重の割合で定義されるため，式(6)のように求められる．式(6)の平方根内の加速度項を0と仮定した式がDNVGLに記載されているDAF_{max}の推定式（第1章の式(1)）と一致する．本研究のDAF推定式は，DAF_{max}だけでなく，吊荷が離れるときの位相を考慮できるように改良している．

$$DAF = \frac{T}{mg} = \frac{k\Delta x}{mg} = 1 + \frac{1}{g}\sqrt{a^2 + \frac{kV_z{}^2}{m}} \tag{6}$$

さらに，台船の架台位置の上下動揺は，単振動運動とみなすことができ，台船上のMPの鉛直変位$z(t)$と鉛直加速度$a(t)$は式(7)，(8)のように表せる．単振動の位相を表す角度をθとし，これを式(5)に代入すると，DAFは式(9)のように表され，平方根の中が楕円公式の形となる．

$$z(t) = A\,sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \tag{7}$$

$$a(t) = -\frac{4\pi^2}{T^2}A\,sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \tag{8}$$

$$DAF = 1 + \frac{1}{g}\sqrt{\frac{16\pi^4}{T^4}A^2\,sin^2\,\theta + \frac{k}{m}\frac{4\pi^2}{T^2}A^2cos^2\,\theta} \tag{9}$$

$$DAF = 1 + \frac{2\pi}{gT}A\sqrt{\frac{k}{m}}\sqrt{1 + \left(\frac{4\pi^2m}{kT^2} - 1\right)sin^2\,\theta} \tag{10}$$

式(6)より，式(9)の平方根内の第一項が加速度項，第二項が速度項である．式(9)は式(10)のように変形でき，kおよびmに今回の実験条件を代入すると，MPが離れる瞬間の位相θを変えることで，DAFの時系列推移を推定することができる．波周期Tが0.3 s以下（実機スケールで3 s以下）の場合は加速度項が支配的であり，$sin\theta = 1$のとき（架台が最高点に達したとき）にMPが離れるときにDAF_{max}となる．一方，波周期Tが0.3 s以上（実機スケールで3 s以上）の場合は速度項が支配的であり，$sin\theta = 0$のとき（架台が水平のとき）にMPが離れるとDAF_{max}となる．進行する重力波では波形勾配が1/7を越えないことがストークス波では示されており，これに基づくと波周期3 s以下の場合の波高は0.43 m以下である．よって本実験では，全てのケースで速度項が卓越する仮定して，加速度aが0として推定値と実験結果を比較した．

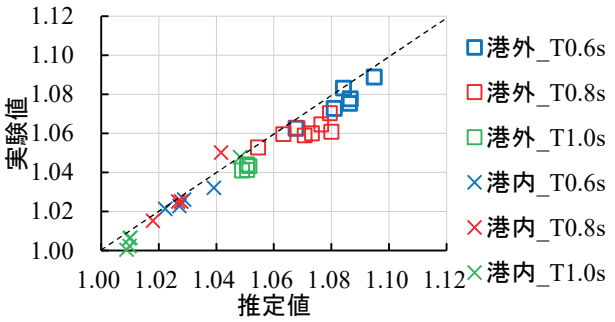


図-11　DAF_{max}の推定値と実験値の比較（V_z：架台から離れる瞬間のMP速度）

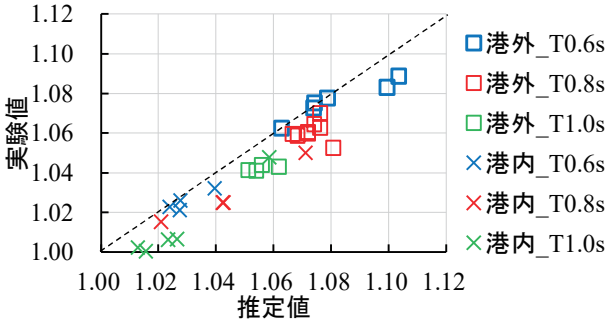


図-12　DAF_{max}の推定値と実験値の比較（V_z：架台最大速度）

(2)　DAF_{max} 推定値と実験結果の比較

図-11 に，架台から MP が離れる瞬間の MP 速度をV_zとした場合の DAF_{max} の推定値と実験値の比較グラフを示す．推定値の決定係数(R^2)は 0.93 であり，極めて高い再現性を示した．多少のずれは，モーションキャプチャ（Motive Tracker[14]）の計測誤差によるものと考えられる．この結果から，DAF 推定式の確からしさが検証できた．一方で，MP の鉛直速度は複雑な実験や動揺解析を実施しなければ求められない．そこで，MP の速度の代わりに，架台の最大鉛直速度を用いて DAF_{max} 推定値を求め，実験値と比較した．

図-12 に示した通り，架台鉛直速度を用いた場合，推定値の決定係数(R^2)は 0.81 であり，MP 鉛直速度を使用した場合と比較すると低いものの，比較的高い再現性を示した．推定値と実験値を比較すると，推定値の方が 0~3 % 大きい値であり，実験上，必ずしも架台の速度が最大のときに MP が架台から離れているわけではないことがうかがえる．MP は 1 mm/s または 2 mm/s で巻上げており，MP が離れる位置は時々刻々上昇している．架台速度が最大のときと，MP が離れる瞬間がずれると DAF_{max} は推定値より小さくなる．以上より，巻上速度が速い方が架台速度最大時と MP 分離時が一致しない確率が高く，DAF_{max} を小さくすることができると考えられる．これらの理由から，推定値より実際の DAF_{max} のほうが小さくなる可能性が高く，推定値は安全側の数値であるといえる．

本研究の条件下では，DAF_{max} の最大値は 1.08 程度であったが，揚重物が軽い場合や，吊索の剛性が大きい場合，さらには波周期や波高の関係でV_zが大きい場合は，これ以上の大きな DAF が発生する可能性も大いにあると考えられる．この DAF 推定式を使用することにより，吊索の剛性，揚重物の重量および揚重物が離れた後の台船架台位置の動揺量（速度）が分かれば，実験や解析を行うことなく DAF を精度よく推定することができる．また MP に限らず，洋上での瀬取り作業における DAF を推定できるため，幅広く活用されることが期待される．

5.　結論

本研究は，SEP 船を用いて動揺する台船から MP を吊上げる過程を水理模型実験で再現し，種々の波浪条件下において吊索に作用する DAF を定量的に評価した．また，DAF の推定式から求まる推定値と実験値を比較し，実験の考察を行った．得られた主な結論を以下に示す．

(1)　動的増幅荷重には2つの発生メカニズムがあり，MP が架台から地切りする前後で異なる．地切り前は MP 底面が架台に追従できず，分離するときに発生しており，地切り後は MP 側面と架台が衝突することによって発生している．

(2)　本実験の条件下における DAF_{max} の最大値は 1.08 程度であり，日本海事協会の基準値に適合した．吊上げる部材の形状や架台の位置にもよるが，今回の MP に関しては，特に横波で台船の Roll が卓越する条件下（波向 90 度）において架台位置の鉛直速度が速くなり，それに伴って DAF_{max} が大きくなる傾向が見られた．

(3)　DAF_{max} の推定式を台船位置の単振動運動を考慮した形に変形することにより，台船動揺や吊上げに伴う MP 分離タイミングの位相を考慮した DAF の推定が可能である．また，DAF_{max} となるのは架台の位相が$\theta = \pi$ のときに MP が分離したときである．

(4)　DAF_{max} の推定値と実験値を比較した結果，推定値の算出に DAF_{max} 時の MP 最大鉛直速度を使用した場合に，決定係数が 0.93 となり，推定式の再現性が極めて高いことが確認された．また，推定値の算出に DAF_{max} 時の架台最大鉛直速度を使用した場合も，決定係数が 0.81 と高い再現性があり，かつ推定値は安全側の値であることがわかった．

(5)　起重機船などはある一定の DAF_{max} を事前に見込んでクレーンの性能を設計していることがあるため，施工計画時には想定される海象条件における台船の動揺量と吊荷重量，吊索剛性から DAF_{max} 推定値し，事前に見込まれた DAF_{max} を超える可能性があるか検証を行う必要がある．

REFERENCES

1) 石井孝裕，洋上風力政策の現状，令和 5 年度日本風力エネルギー学会シンポジウム，2023. [Ishii, T.: Yojo furyoku seisaku no genjo, *The 45th Wind Energy Symposium*, 2023.]
2) 鈴木英之 : 洋上風車設置作業に用いられる作業船の技術課題と展望, 特集 洋上風力建設に向けた作業船（含，拠点校建設）最新情報，日本風力エネルギー学会誌，pp.2-5，2023. [Suzuki, H.: Yojo fusha setchi sagyo ni mochiirareru sagyosen no gijutsukadai to tenbou, *Japan Wind Energy Association*, pp.2-5, 2023.]
3) 松信隆，池田強，小林大輔，清水俊行，高具晃，和田英司，高橋宏 : 洋上風車設置工事と船舶，日本風力エネルギー学会誌，Vol.44，No.4，pp.595-599，2020. [Matsunobu, T., Ikeda, T., Kobayashi, D., Shimizu, T., Takagu, K., Wada, E. and Takahashi, H.: Yojo fusha setchikoji to sempaku, *Japan Wind Energy Association*, Vol.44, No.4, pp.595-599, 2020.]
4) 洋上風力発電施設検討委員会 : 洋上風力発電設備の施工に関する審査の指針，2020. [Yojo furyoku hatsuden setsubi no seko ni kansuru shinsa no shishin, 2020.]
5) 一般財団法人日本海事協会 : 洋上ウィンドファーム建設のための MWS ガイドライン，2023. [ClassNK: Yojo windfarm no tame no MWS guideline, 2023.]
6) DNV-ST-N001, Marine operations and marine warranty, 2023.
7) Chen, M., Yuan, G., Li, B. C., Zhang, X. and Li, L.: Dynamic analysis and extreme response evaluation of lifting operation of the offshore wind turbine jacket foundation using a floating crane vessel, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, Vol.10, 2023.
8) Elzinga, A. M., Stroo, J, D. and kana, A. A.: A comparative analysis of side and stern installation of a monopile lifting operation using a heavy lift crane vessel, *Proceedings of the 15th International Marine Design Conference*, 2024.
9) Kronenberg, H. B.: Feasibility for lifting from a feeder vessel for a tetrahedron crane, *TU delft*, 2021.
10) DNVGL-ST-0378, Offshore and platform lifting appliances, 2019.
11) 土居剛，久松稜弥，宇都宮智昭，大野訓 : 洋上施工作業における起重機船の吊荷の動揺解析，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 37 号，pp. 449-454，2023. [Doi, T., Hisamatsu, R., Utsunomiya, T. and Ono, J.: Dynamic analysis of suspended load motion under offshore installation with floating crane, *Conference proceedings, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, No. 37, pp. 449-454, 2023.]
12) 橋本貴之，織田幸伸，小俣哲平 : クレーン船の動揺と吊り荷の挙動に関する研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 77，No. 2，pp. 625-630，2021. [Hashimoto, T., Oda, Y. and Omata, T.: Study on oscillation of crane barge and behavior of slung piece, *Proceedings of civil engineering in the ocean*, Vol. 77, No. 2, pp. 625-630, 2021.]
13) 清川哲志，平山彰彦 : 接岸船舶の動揺に及ぼす岸壁反射率の影響，清水建設研究報告，第 43 号，pp.61-70，1986. [Kiyokawa, T. and Hirayama, A.: Setsugan senpaku no doyo ni oyobosu ganpeki hansyaritsu no eikyo, *Technical research report of Shimizu Construction Co., Ltd.*, Vol. 43, pp61-70, 1986.]
14) OptiTrack : https://optitrack.com/software/motive/ (2025 年 4 月 28 日参照)

(Received February 4, 2025)
(Accepted May 15, 2025)

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT OF SHIP-TO-SHIP TRANSFER BY SEP VESSEL UNDER BARGE MOTION

Hajime YANAGISAWA, Takumi NONAKA, Tatsuya MIZUNO, Hiroshi DEGUCHI, Takeshi NISHIHATA and Takeru MICHIMAE

As the demand for offshore wind power expands, the size of wind turbine components, particularly monopiles (MPs), is increasing. When lifting heavy components such as monopiles (MP), we sometimes operate near the crane's performance limit. This study reproduces the transfer of a monopile from a floating barge to a SEP vessel in a hydraulic model experiment and measures the lifting sling tension during the process. The results show that before and after the monopile detaches from the stand, dynamic amplification factors (DAF), which represent the ratio of the loads acting on the sling to the lifted component's weight, are observed. The experiment simulates the transfer operation inside and outside a port, comparing the DAFs generated under various wave periods and directions. As a result, the DAF measured in this experiment was approximately 1.08, and it was confirmed that the magnitude of the DAF is proportional to the vertical velocity of the stand when the monopile separates from the barge. Additionally, the estimated DAF, derived from the experimental conditions, was compared with the experimental results, and found to be in good agreement.