エゾバフンウニとキタムラサキウニに作用する流体力^{*1}

山崎慎太郎, 梨本勝昭, 山本勝太郎, 平石智徳

(1993 年 1 月 29 日受付)

Fluid Forces on Short-spined Sea Urchin and Northern Sea Urchin

Shintaro Yamasaki^{*2}, Katsuaki Nashimoto^{*3}, Katsutaro Yamamoto^{*3},
and Tomonori Hiraishi^{*3}

The drag coefficients and the added mass coefficients of short-spined sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* and northern sea urchin *Strongylocentrotus nudus* were determined. Meanwhile adhesive forces exerted by the tube feet were also measured.

The drag forces were measured in steady flow and the added masses were measured by torsion pendulum coating the sea urchins with paint. The drag coefficient C_d was greater for the northern sea urchin, while the added mass coefficient C_a was greater for the short-spined sea urchin. The average values of C_d , C_a in the direction of the test diameter was 0.66, 0.64 for the short-spined sea urchin and 1.06, 0.34 for the northern sea urchin respectively.

Adhesive forces on smooth glass substrates were 0.3~2.8 kg for the short-spined sea urchin and 0.2~2.4 kg for the northern sea urchin when they were more than 40 mm in test diameter. The adhesive forces of both species were much larger than the calculated maximum wave forces using determined C_d , C_a on the same size of sea urchin in an estimated rough sea condition.

ウニの人工種苗生産は現在盛んに行なわれており、健康な種苗を大量に安定して生産する技術はほぼ確立されている。しかし、種苗の放流後の生残率は概して低く、種苗の生残率の向上は種苗放流事業上の大きな課題となっている。

種苗の減耗要因としては波浪、砂泥の沈積、水温の上昇による斃死や、ヒトデやイソガミなどの外敵による食害などがあげられる。このうち波浪による減耗はウニが強い波や流れによって付着基盤からはがされるために生じるものと考えられる。本研究では波浪中においてウニに作用する流体力を算定するためにウニの抗力係数と付加質量係数を実験によって求め、また管足による付着力を明らかにし、ウニの耐波性について検討を行なった。

材料および方法

抗力および付加質量 実験には北海道松前郡福島町と同上磯郡知内町で採取したエゾバフンウニ *Strongylocentrotus intermedius* およびキタムラサキウニ *Strongylocentrotus nudus* を用いた。流体力の測定には生きたウニを用いるのが望ましいが、そのままでは計測が困難

であるため、採取したウニは両種とも以下に記す方法により加工して抗力および付加質量の測定に使用した。

最初にウニの口器部分を切除して内容物を完全に除去し、反口側の棘が放射状に伸びるように反口側を下にして吊り下げた姿勢と口側を下にしてスポンジの上に置いた姿勢とを交互にとりながら注意して乾燥させた。この結果、口側の棘はウニが基盤に付着した状態に近い、棘が寝た状態になった。完全に乾燥した後、水が殻の内部に浸入するのを防ぐために内壁に水性塗料を塗り、続けて棘の脱落を防ぐために希釈した水性塗料を殻全体に数回重ね塗りして棘の基部を補強した。そして外径 7 mm の真鍮パイプを口の中心と肛門を通る中心軸と直角の方向に、最大殻径部分を通して殻径方向に貫通させた。最後に殻の内部にポリエステル樹脂を充填した。以上の過程を経て加工したエゾバフンウニ、キタムラサキウニを Fig. 1 に、本実験に用いた両種のウニの諸元を Table 1 に示す。殻径と殻高は棘を含まない殻の最大径と最大高、投影面積は棘を含まない殻の殻径方向の値である。棘の最大長はエゾバフンウニで 8~10 mm、キタムラサキウニで 28~36 mm であった。

^{*1} 本報の要旨は平成 4 年度日本水産学会春季大会 (東京) において発表した。

^{*2} 水産工学研究所 (National Research Institute of Fisheries Engineering, Ebikai, Hasaki, Kashima, Ibaraki 314-04, Japan).

^{*3} 北海道大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041, Japan).

Table 1. Dimension of short-spined sea urchin (E1-E8) and northern sea urchin (K1-K8)

Sample No.	Test diameter (mm)	Test height (mm)	Weight (g)	Volume (cm ³)	Projected area (cm ²)
E1	83.4	39.8	222.5	174.5	30.0
E2	81.8	42.0	217.4	169.0	28.5
E3	80.0	39.0	169.6	140.0	27.2
E4	79.3	37.9	167.1	135.7	26.1
E5	72.5	39.2	147.4	116.1	24.2
E6	70.1	36.0	136.3	104.0	21.1
E7	58.4	23.9	69.5	53.9	—
E8	56.2	24.2	66.9	50.9	—
K1	92.7	52.3	336.5	265.3	40.9
K2	90.8	50.3	318.0	252.7	37.4
K3	64.6	35.1	119.1	91.0	19.3
K4	65.2	32.7	112.3	88.9	18.8
K5	59.5	32.5	91.4	72.9	14.9
K6	58.4	33.5	89.1	67.6	15.0
K7	52.0	25.4	58.5	45.0	—
K8	48.6	25.8	54.1	41.0	—

Fig. 1. Sea urchins prepared for measuring fluid force.

Left, short-spined sea urchin; right, northern sea urchin.

定常流中での抗力の測定には、北海道大学水産学部の大型回流水槽（長さ 14 m, 幅 2 m, 深さ 1.2 m）を使用した。水深を 1 m とし、流速は 20~80 cm/s で 8 段階に変化させた。実験には、Table 1 に示した 5 個体のエゾバフンウニ（E1, E2, E3, E4, E6）および 5 個体のキタムラサキウニ（K1, K2, K3, K4, K5）を使用した。実験個体は Fig. 2 に示すように直径 6 mm の丸棒を真鍮パイプの中に貫通させてねじ止めし、ウニの肛門と口の中心とを通る中心軸の位置が水深 35 cm となるように三分力検出器に接続した。最初に同一個体について塗装前と塗装後の抗力を測定し、両者の差がほとんど見られないことを確認した。

ウニに作用する流体力は流れの方向によって変わるもので、Fig. 3 に示すように流れの方向を設定した。測定は流れの方向に側面を向けて設置した場合、反口側を向け

Fig. 2. Sea urchin attached to a vertical iron rod for measuring drag force.

Sample is coated with paint.

て設置した場合、口側を向けて設置した場合の三通りについて行ない、それぞれの姿勢を X ポジション, -Z ポジション, +Z ポジションとした。流速は抗力の測定が終了してからウニを設置した地点に流速計を設置して測定した。また棒のみに作用する抗力を測定し、棒の抗力分を除いた。

これらのウニの抗力は、いずれもウニを水中に吊った

Fig. 3. Defined axis of the body of the sea urchin.
The direction is decided in relation to the mouth position and flow direction.

Fig. 4. Photograph of two sea urchins coupled together.
Sample is coated with paint and joined by a plate.

Fig. 5. Apparatus for measuring added mass coefficient by pendulum.

状態で水路の中央部分に設置し測定したものである。しかし実際にはウニは海底に付着した状態で生息しているので基盤に付着した状態とは異なる。そこでウニが海底で付着基盤に付着している状態での抗力を計測するため、Fig. 4 に示すようにはほぼ同じ殻径の 2 つの実験個体にボルトを貫通させてその両端を厚さ 0.3 mm の鉄板で連結し、殻径、棘長の関係が同じであるような鏡像体を作製して X ポジションの抗力を測定した。測定に用いたウニは、エゾバフンウニの E5, E6 およびキタムラサキウニの K5, K6 である。

付加質量の測定にはねじり振り子を用いた。Fig. 5 に実験装置の概略を示す。鉄棒にピアノ線とリン青銅板を鉛直方向に張り、その中央部に直径 6 mm、長さ 80 cm の鉄製の腕を固定し、その両端にウニを取り付けた。リン青銅板の表裏に直交歪ゲージを張り合わせ、振動周期と振幅を検出した。ねじり振動により検出したゲージの歪量はサンプリング周波数 100 Hz で A/D 変換器内蔵の収録機に入力した。実験は、大型回流水槽の観測水路で水深を 1 m にして行なった。実験装置の腕にウニを取り付けた場合と腕のみの場合についてねじり振動の周期を水中と空気中で測定し、水中と空気中での振動周期の差から付加質量を算出した。ピアノ線の直径は 1.2 mm, 1.4 mm, 1.6 mm, 1.8 mm, 2.0 mm の 5 段階に変化させた。なお、実験時には鉄棒面と腕を 40° 以上の角度で交差させており、また水の自由表面と測定に用いるウニとの距離はウニの殻径の 2 倍以上になっているので鉄棒と自由表面の影響はないものとした。¹⁾ 本実験ではウニを腕に貫通させたため、ウニを腕に取り付けた状態で腕が露出する部分について、別に腕のみの振動周期を測定した。測定はウニを殻径方向に振動させた場合と殻高方向に振動させた場合の二通りについて行なった。後者の場合は一方のウニが反口側の方向へ運動する際にもう一方のウニが口側の方向に運動するように設置した。この場合、付加質量係数は口側と反口側の両方を含んだ値と

なるが、ここでは殻径方向に振動させた場合の値との比較を目的としたので得られた値はそのまま取り扱った。実験は Table 1 に示したウニを用いて E1-E2, E3-E4, E5-E6, E7-E8 および K1-K2, K3-K4, K5-K6, K7-K8 の組み合わせで行なった。

ねじり振子を用いた付加質量の測定については Yu,^{2,3)} 磯部⁴⁾ をはじめとした報告がある。本研究では宮崎⁵⁾ と同様にウニの付加質量 M_a を次式より算出した。

$$M_a = M \left(\frac{T_w'^2 - T_w^2}{T_A^2 - T_a^2} - 1 \right) \quad (1)$$

T_A : (腕+ウニ)の空気中での振動周期

T_a : 腕の空気中での振動周期

T_w : 非粘性流体と仮定した場合の(腕+ウニ)の水中での振動周期

T_w' : 非粘性流体と仮定した場合の腕の水中での振動周期

本実験ではウニを腕に貫通させたため、取り付けた 2 個体のウニの重量に貫通部分の腕の重量を加えた値の平均値を (1) 式中の M の値とした。また、測定した水中周期は粘性による減衰振動のために (1) 式中の水中周期よりも大きくなることから、水の粘性抵抗が角速度に比例すると仮定し、対数減衰率 δ を用いて次式により補正した。

$$T_w' = \frac{T_w'}{\sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{2\pi} \right)^2}} \quad (2)$$

ここで、 T_w' は実測周期、 T_w は上述の仮定に基づき補正した周期である。 δ は n 回目の振幅の極大値を a_n 、 $n+1$ 回目の振幅の極大値を a_{n+1} とすると

$$\delta = \log \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} \right) \quad (3)$$

と表される。本実験では各周期ごとの δ を求め、その平均値を用いて腕にウニを取り付けた場合と腕のみの場合の両方について補正した周期を算出した。

さらに、次式から付加質量係数を求めた。

$$C_a = \frac{M_a}{\rho V} \quad (4)$$

C_a : 付加質量係数

ρ : 水の密度

V : ウニの体積

本実験のように振動周期から付加質量を求める場合、周期のパラメーターである無次元量 R_p が用いられる。 R_p は殻径を代表長さとするとき次式で示される。

$$R_p = \sqrt{\frac{T_p \nu}{d^3}} \quad (5)$$

$$T_p = \sqrt{T_w'^2 - T_w^2}$$

ν : 動粘性係数

d : 殻径

本実験で行った、振動周期より定義される付加質量は、 $R_p=0$ の場合において慣性力より定義される付加質量と一致する。⁶⁾

ウニの付着力 ウニに作用する流体力に対する耐久力を調べるために管足による付着力をバネばかりを使って測定した。測定には北海道亀田郡綴法華村と同上磯郡知内町の沿岸で採取した殻径 40 mm 以上のエゾバフンウニとキタムラサキウニ、および知内町種苗センターで生産された殻径 11~25 mm の種苗を用いた。

実験は種苗と殻径 40 mm 以上のキタムラサキウニについては種苗センター内で、殻径 40 mm 以上のエゾバフンウニについては北海道大学水産学部付属白尻水産実験所でそれぞれ行なった。実験時の水温は種苗センターでは 19.5°C、白尻水産実験所では 18.8°C であった。

実験は測定するウニを長さ 90 cm、幅 45 cm、深さ 40 cm の壁面の汚れていない、水を満たしたガラス水槽に入れ、1 時間以上経過した後に行なった。ウニに手で刺激を与えて水槽の壁面のガラス板に強く付着させた後、ウニに細い銅線を掛けてバネばかりで壁面に平行に静かに引っ張り、ウニが完全にはがれたときのバネばかりの指示値から付着力を読み取った。

実験結果および考察

抗力係数 測定したエゾバフンウニとキタムラサキウニの X ポジションと +Z ポジションの抗力と流速との関係を Fig. 6 に示す。いずれのウニも使用した流速の範囲内で抗力は流速のほぼ 2 乗に比例しており、投影面積の大きいものほど抗力が大きくなっている。

なお、X ポジションの投影面積はその後に行なった実験を含めすべての計測が終了した後に棘を取り去り、流れの方向より撮影した写真から求めた。また、Z ポジション (+Z, -Z) の投影面積 S_z は断面を円とみなし、殻径を t_d とし、 $S_z = (\pi/4)t_d^2$ より求めた。抗力係数 C_d は、次式より算出した。

$$C_d = \frac{2D}{\rho S V^2} \quad (6)$$

D : 抗力

S : ウニの投影面積

V : 流速

ρ : 水の密度

測定したウニの抗力係数 C_d とレイノルズ数 Re を Table 2 に示す。 Re は代表長さを殻径にとった。兩種とも +Z ポジションの場合の方が -Z ポジションの場合よりも C_d が大きくなっているが、これは流れが当たる部分の口側の形状が反口側の形状よりも扁平になっているためと考えられる。また、どのポジションでもキタムラサキウニの C_d がエゾバフンウニの C_d よりも大きく

Fig. 6. Relationship between the drag force of short-spined sea urchin and northern sea urchin, and the flow speed in X position ((A), (B)), +Z position (C), (D)).

Table 2. The drag coefficient in steady flow

Sample No.	C_d Position			Re ($\times 10^4$)
	x	-z	+z	
E1	0.74	0.83	0.95	1.95~6.74
E2	0.79	0.79	0.96	1.90~6.56
E3	0.55	0.79	0.94	1.84~6.30
E4	0.62	0.74	0.80	1.80~6.05
E6	0.58	0.80	0.94	1.58~5.43
Mean	0.66	0.79	0.92	
K1	1.02	1.19	1.32	2.22~7.58
K2	1.04	1.25	1.44	2.00~7.51
K3	1.04	1.19	1.31	1.40~5.00
K4	1.07	1.18	1.31	1.44~5.16
K5	1.15	1.23	1.29	1.37~4.62
Mean	1.06	1.21	1.33

Fig. 7. Comparison between the drag force of coupled short-spined sea urchin and northern sea urchin and the calculated drag force.

The alternate long and dashed line shows the calculated drag force accumulated by using C_d of E6, while the dashed line shows the calculated drag force accumulated by using C_d of K5.

なっている。キタムラサキウニの棘はエゾバフンウニの棘に比べてかなり長く、しかも太いために棘の受ける抗力が大きい。抗力係数の計算には棘の面積を入れずに殻を基準にしたためと考えられる。

次にエゾバフンウニとキタムラサキウニの鏡像体による流速と抗力との関係を Fig. 7 に実線で示す。図中の一点鎖線および破線は各個体の投影面積から次式を用いて求めた計算直線である。

$$D = \frac{1}{2} C_d \rho S_c V^2 \quad (7)$$

S_c : 接合した個体の投影面積

接合したウニは殻径、棘長ともほぼ同一であったので 2 個体の抗力係数を等しいとみなし、エゾバフンウニでは E6 の抗力係数と接合した個体の投影面積を (7) 式に代入して E5 と E6 の個体ごとの抗力の和を計算し、図中に一点鎖線で示した。キタムラサキウニの場合も K5 の抗力係数を用いて同様の計算を行ない図中に破線で示した。図からわかるようにエゾバフンウニ、キタムラサキウニともに測定値が計算値よりも大きくなった。

また、(6) 式からウニが付着基盤に付着している状態

での C_d を計算した結果, E6, K5 1 個体の C_d がそれぞれ 0.58, 1.15 であったのに対し接合した場合の C_d はそれぞれ 0.68, 1.25 となった。

Bagnold⁶⁾ は定常流中で球体と水平円柱を水路の中央部分に設置した場合と, 底面に接触させて設置した場合の抗力係数を比較し, 後者の方が抗力係数が約 25% 大きくなる結果を得ている。また, 土屋⁷⁾ は波動場での水平に設置した円柱の抗力係数が proximity effect により増加することを報告しており, 岩田^{8), 9)} も波動場での球体の抗力係数について同様の結果を得ている。したがって, 本研究では生息場でのウニの抗力はウニを 2 個体接合し測定した場合に得られた抗力係数を使って求めることにした。

付加質量係数 ウニの付加質量係数を求めるのに先立ち, 測定方法が妥当であることを確かめるため, ねじり振り子を用いて直径が異なる三種類の球体について付加質量係数 C_a を求めたところ, いずれの球体の C_a も理論値の 0.5 にきわめて近い値を示したので, 測定方法には特に問題がないものとした。

付加質量係数の算出に際してはねじり振り子に取り付けた一組のウニの殻径の平均値を代表長さとした。殻径方向 (X 方向) に振動させたときの付加質量係数 C_{ax} と R_p との関係を図 8 に, 殻高方向 (Z 方向) に振動させたときの付加質量係数 C_{az} と R_p との関係を図 9 に示す。両図とも白ぬきの記号はエゾバフンウニ, 黒塗りの記号はキタムラサキウニを示す。両図において個体別に求めた回帰直線を延長し, $R_p=0$ となる場合の付加質量係数の値を Table 3 に示す。慣性力よりの定義に基づく付加質量係数と一致する $R_p=0$ での値は両種とも殻高方向に振動させた場合の方が付加質量係数が大きくっており, また C_{ax} , C_{az} とともにエゾバフンウニがキタ

Fig. 8. Relationship between C_{ax} of short-spined sea urchin and northern sea urchin, and R_p . C_{ax} : Horizontal added mass coefficient.

Fig. 9. Relationship between C_{az} of short-spined sea urchin and northern sea urchin, and R_p . C_{az} : Vertical added mass coefficient.

Table 3. The added mass coefficient measured by torsion pendulum at $R_p=0$

Sample No.	C_{ax}	C_{az}
E1-E2	0.67	1.59
E3-E4	0.58	1.42
E5-E6	0.78	1.56
E7-E8	0.60	1.60
Mean	0.64	1.54
K1-K2	0.42	0.78
K3-K4	0.30	0.87
K5-K6	0.33	0.83
K7-K8	0.31	0.80
Mean	0.34	0.82

ムラサキウニに比べて大きい値を示している。この理由は棘の形状や密度の違いが振動の際に動く水の量に影響を及ぼしたためと考えられる。

付着力 エゾバフンウニとキタムラサキウニの付着力と殻径との関係を Fig. 10 に示す。殻径 40 mm 以上の個体の付着力はエゾバフンウニでは 0.3~2.8 kg, キタムラサキウニでは 0.2~2.4 kg であった。両種ともかなり大きな変動はあるが, 殻径が大きくなるに従い付着力は増加する傾向がみられる。この大きな変動は基盤に付着していた管足の数の違いによるものと考えられる。なお, 本実験ではガラス面からウニを引きはがすと管足がちぎれてガラス面に残ったことから付着力が管足の破断強度を上回っていたと考えられるが, 本研究では測定値をウニの付着力として取り扱うことにした。

最大波力の算出 ウニに作用する最大波力の算出にあ

Fig. 10. Comparison of the force required to detach the sea urchin from a glass surface and calculated maximum wave force on the sea urchin, using the Morrison equation and the following conditions.

Duration: 8 sec, wave height: 2 m, wave length: 53.1 m, water depth: 5 m. The dashed line represents the short-spined sea urchin. The continuous line represents the northern sea urchin.

たっては波動場で求めた抗力係数、質量係数を用いるのが望ましいが、実物のウニを使用して波力を測定するためには実際の波を用いることが必要である。しかし、室内実験で実際の波を再現し波力を測定することは困難であったため、ここでは本研究で求めた抗力係数および付加質量係数をもとに生息場においてウニに作用する波力を算出した。なお、ウニは海底の付着基盤に付着しており、生息場での波による水粒子運動は水平成分が卓越していると考えられるので、波力の計算は水平方向についてのみ行った。

計算の対象としたウニは実験個体のうちで殻径のほぼ等しい 70 mm のエゾバフンウニ E6 と 65 mm のキタムラサキウニ K4、および中間育成後の放流サイズである殻径 30 mm のエゾバフンウニとキタムラサキウニである。E6 と K4 の投影面積と体積は Table 1 の実測値を使用し、本実験の資料に含まれていない殻径 30 mm のウニの投影面積と体積は、投影面積については殻径の 2 乗に、体積については殻径の 3 乗に比例するものとして、E6 および K4 の投影面積と体積から逆算して得られる比例定数を使ってそれぞれ算出した。

波の条件は、波高が 2 m、周期は 8 秒とした。生息水深を 5 m および 10 m とするとこの時の波長は 53.1 m と 70.9 m となる。水平方向の抗力係数 C_{dx} は基盤に

付着した状態での抗力係数となる鏡像体の値を用いることとして、エゾバフンウニでは E6 を鏡像体の一方に使用したので鏡像体による実験結果をそのまま用い $C_{dx}=0.68$ 、キタムラサキウニでは Table 2 中の K4 の値に K5 の抗力係数の比率、1.25/1.15 を乗じて $C_{dx}=1.16$ とした。付加質量係数は Table 3 中の E5-E6 の組み合わせと K3-K4 の組み合わせの値を用いてエゾバフンウニでは $C_{ax}=0.78$ 、キタムラサキウニでは $C_{ax}=0.30$ とした。波力の計算には次に示す Morison 式¹⁰⁾を用いた。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_{dx} S_x u |u| + \rho (C_{ax} + 1) V \frac{du}{dt} \quad (8)$$

- ρ : 水の密度
- C_{dx} : 水平方向の抗力係数
- C_{ax} : 水平方向の付加質量係数
- S_x : 水平方向の投影面積
- u : 水平方向の水粒子速度
- $\frac{du}{dt}$: 水平方向の水粒子加速度
- V : ウニの体積

なお、 u には微小振幅波理論による水粒子の移動速度を適用し、レイノルズ数 Re の計算には水粒子の最大移動速度 U_m を使用した。

計算した波力を Table 4 に示す。 F_d は抗力項すなわ

Table 4. Calculated values of wave force on sea urchin

Period (s)	Wave length (m)	Depth (m)	U_m (m/s)	Species	Test diameter (mm)	Re ($\times 10^4$)	C_{dx}	C_{ax}	F_d (gw)	F_i (gw)	F_{max} (gw)
8.0	53.1	5.0	1.25	short-spined sea urchin	70	8.8	0.68	0.78	114.7	18.6	115.5
					30	8.1			21.1	1.5	21.1
				northern sea urchin	65	3.8	1.16	0.30	174.4	11.6	174.6
					30	3.8			37.1	1.1	37.1
	70.9	10.0	0.78	short-spined sea urchin	70	5.5	0.68	0.78	44.5	11.6	45.2
					30	5.1			8.2	0.9	8.2
				northern sea urchin	65	2.3	1.16	0.30	67.6	7.2	67.8
					30	2.3			14.4	0.7	14.4

Wave height: 2 m.

ち (8) 式の右辺の第 1 項の最大値, F_i は質量力項すなわち (8) 式の右辺の第 2 項の最大値, F_{max} は (8) 式より求めた波力の最大値を示す。いずれも質量力に比べて抗力が卓越しており, 最大波力の大部分は抗力である。このような条件下の波浪中では, ウニに作用する質量力はそれほど大きくならないことがわかる。

Table 4 の結果からわかるように生息水深が浅い方が最大波力は大きくなるので, 波力とウニの付着力を比較するために, ここでは波力の大きい水深 5 m で波の条件が波高 2 m, 周期 53.1 m の条件下におけるエゾバフンウニおよびキタムラサキウニに作用する波力の計算値を Fig. 10 に実線と破線で示した。図中の破線はエゾバフンウニ, 実線はキタムラサキウニの計算値を表す。なお投影面積は殻径の 2 乗に, 体積は 3 乗に比例するものとして計算した。図からわかるように波力の最大値は付着力のいずれの測定値よりも下回っており, 両種ともこのような条件の波浪中では十分に耐えうるものと考えられる。しかし, ウニの波に対する耐久力は付着基盤の違いや度重なる波による疲労により変化することが考えられる。今後ウニの耐波性について解析するためには, 波による疲労を考慮し, ウニに作用する波力やウニの付着

している基盤による付着力をウニの生息している場で測定することが必要である。

文 献

- 磯部 孝: 水中を振動する振り子の周期-(2). 応用物理, 17, 55-59 (1948).
- Y. Yee-Tak: Virtual masses and moments of inertia of disks and cylinders in various liquids. *J. Appl. Phys.*, 13, 66-69 (1942).
- Y. Yee-Tak: Virtual masses of rectangular plates and parallelepipeds in water. *J. Appl. Phys.*, 16, 724-729 (1945).
- 磯部 孝: 水中を振動する振り子の周期-(1). 応用物理, 17, 250-253 (1948).
- 宮崎芳夫: 網地の流体抵抗に関する基礎的研究-(VII). *Tokyo Univ. Fish.*, 50, 135-146 (1964).
- R. A. Bagnold: Fluid forces on a body in shear flow; experimental use of 'stationary flow'. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 340, 147-171 (1974).
- 土屋義人, 山口正隆: 水平円柱に作用する全波力について, 第 21 回海岸工学講演会論文集, 1974, pp. 487-492.
- 岩田好一郎, 水谷法美, 川角伸彦: 波動場におかれた没水球体に作用する流れの特性と波力に関する研究—Morison 式の適用限界について—. 第 34 回海岸工学講演会論文集, 1987, pp. 601-605.
- 岩田好一郎, 水谷法美: 没水球体に作用する波力の特性に関する研究, 土木学会論文集, 406, II-11, 1989, pp. 215-224.
- J. R. Morison, J. W. Johnson, and M. P. O. Brien: Experimental studies of force on pile. *Proc. 4th Conf. on Coastal Eng.*, 1954, pp. 340-370.