

非対称人工海藻による平均流速場制御の定量評価

小林智尚*・仲座栄三**・星野 仁***・高山義明****

1. はじめに

人工海藻は砂浜の侵食防止工などとして古くから考えられている海岸・沿岸構造物の一つである。近年、海岸はレジャーなどの需要が増大し、海岸景観も沿岸開発の重要な要素になっている。人工海藻は水面上には現れない海岸・沿岸構造物であるため、最近この景観の点からも注目されつつある。

現在波浪制御や漂砂制御など様々な目的に適用するための人工海藻が提案され、これらによる波浪制御や漂砂制御の試みが行われている。浅野ら (1988, 1991) や間瀬ら (1989) は人工海藻による波浪変形や波高減衰に関して室内実験およびモデル解析により検討を行っている。また、菅原・入江 (1990) や小田ら (1991) はこの人工海藻を用いて漂砂を制御しようとする試みを行っている。さらに菅原・永井 (1992) はこの人工海藻を海洋・海岸構造物の周辺部に設置し、この構造物まわりに発生する局所洗掘を抑制する試みを行っている。

これらに適用されている人工海藻の材質や形状もさまざまである。例えば浅野ら (1988, 1991) は波動場の水粒子と共に動揺する軟質の人工海藻を用いている。また小田ら (1991) はほとんど変形しない硬質で、形状もユニークな三角形の人工海藻を提案している。このように、現在それぞれの目的にあった特徴を有する人工海藻が種々提案されている。

本研究では小林ら (1993) が提案した湾内海水交換などに有効な非対称人工海藻を対象に解析を行った。この人工海藻は波動場における平均流速場を任意の方向に発生・制御可能な人工海藻であり、単純ではあるが岸沖方向に非対称な形状を有し、非対称な変形・動揺の様子示すものである。この非対称人工海藻の有効性は小林らによって示されている。しかし、この人工海藻の能力に関する十分な評価は行われていない。ここではこの非対称人工海藻の効果に関するパラメータを提案し、様々な波動場にこの人工海藻を適用するにあたって最適な人工海

藻を選択できるよう、このパラメータについて検討を行った。

2. 非対称人工海藻の形状と特徴

本研究では小林ら (1993) によって提案された非対称人工海藻を対象に検討を行った。この人工海藻は図-1に示すように、セルロイド製のシートに曲率を持たせた単純な形状を有している。実験ではこの非対称人工海藻を図-2に示すように、実験水槽底面上に2次元的に複数配置して人工海藻群を作成した。この人工海藻は曲率を有することにより、人工海藻凹面側 (図-1, a方向)には容易に転倒・変形するものの、逆の凸面側 (図-1, b方向)には転倒・変形しづらいという特徴を示す。波動場におけるこの人工海藻の動揺の様子を示したのが図-3である。この図は1/10周期ごとの人工海藻の形状を示したもので、図中の番号は波峰通過時を1としてそれから1/10周期ごとの形状の順を示している。この図では人工海藻の右側の面が凹面になっている。人工海藻は波動場において右向きの流れの位相では図中番号1~3のように転倒し、逆に左向き流れの位相の場合には図中番

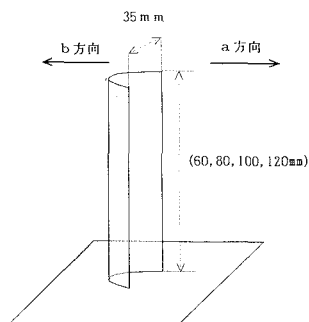


図-1 非対称人工海藻単体の形状

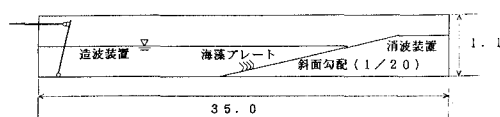


図-2 実験水槽 (単位: mm)

* 正会員 工修 東京理科大学助手 理工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 琉球大学助手 工学部土木工学科
 *** 工修 電源開発株式会社
 **** 神奈川県庁

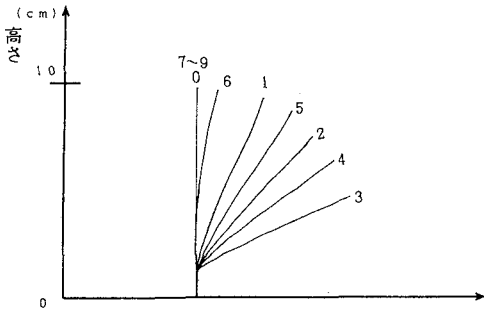


図-3 非対称人工海藻の変形の様子
水深 400 mm, 周期 2.0 s, 波高 133 mm, 人工海藻の長さ 100 mm

号 4~6 のように起き上がり, 最後には図中番号 7~9, 0 のように完全に直立して流れに抗している. このように人工海藻の変形特性に非対称性を持たせることにより波動場において任意の方向に平均流速を発生・制御できる人工海藻が本研究で対象としている非対称人工海藻である.

この非対称人工海藻まわりの流れ場の様子を示したのが図-4である. この図では水よりやや比重の大きい粒子の 1/10 周期ごとの軌跡を非対称人工海藻の動揺とともに示している. 図中の番号は図-3 と同様, 1/10 周期ごとの状態の順を表している. この図から, 粒子は徐々に沈降しながら, 非対称人工海藻に制御されて右側へ大きく移動していることが分かる. このようにこの非対称人工海藻はその動揺の非対称性によって水粒子を任意の方向に大きく移動させることができる. つぎにこの人工海藻によって誘導された平均流速分布を図-5 に示す. ここで図-5 の (a) および (b) はそれぞれ非対称人工海藻の凹面を岸側あるいは沖側に向けて設置した場合の平均流速分布であり, それぞれ凹面が向いている岸向きあるいは沖向きに大きな平均流速が誘導されていることが分かる. このようにこの非対称人工海藻の凹面を岸向き

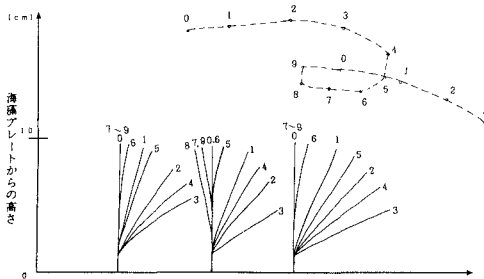
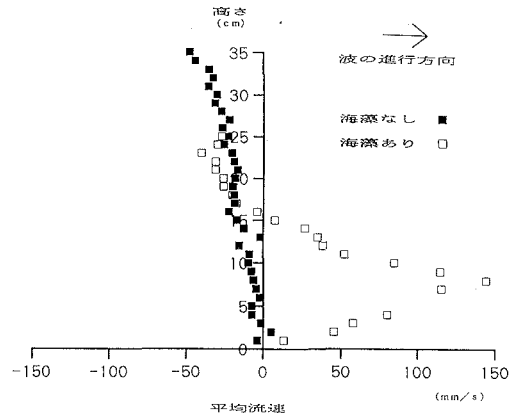
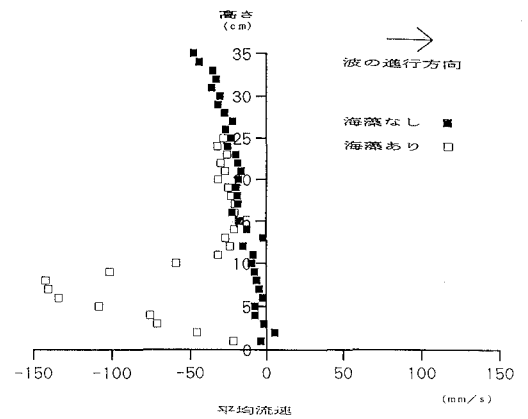


図-4 非対称人工海藻上の粒子の軌跡の様子
水深 400 mm, 周期 2.0 s, 波高 133 mm, 人工海藻の長さ 100 mm



(a) 人工海藻が岸側 (右側) に変形する場合



(b) 人工海藻が沖側 (左側) に変形する場合

図-5 非対称人工海藻により誘導された平均流速分布
水深 400 mm, 周期 2.0 s, 波高 133, 142 mm, 人工海藻の長さ 100 mm

あるいは沖向きに付けることにより, それぞれの方向に平均流速を生じさせることができる. またこの図からも明かであるが, 人工海藻上端部 (100 mm) において最も大きな平均流速が誘導されており, 人工海藻の効果もこの人工海藻の長さの 2 倍近くの高さまでおよんでいることがわかる.

3. 非対称人工海藻の効果の評価

(1) 平均流速場制御効果のちがい

前節で示したように, 非対称人工海藻は波動場において方向も含めて平均流速場を制御するのに大きな効果を示す. この人工海藻は流れ場から受ける流体力によって受動的に変形し, その変形特性によって平均流速場を制御している. この複雑な変形特性のため, 波動場の条件や人工海藻の諸元の組み合わせによって流れ場の平均流速制御効果にも大きな差が生じている. 図-6 に様々な

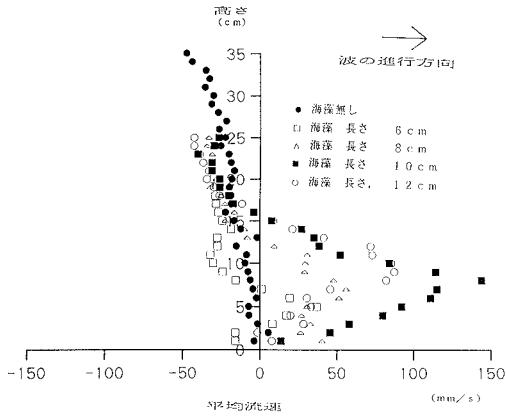


図-6 長さの異なる非対称人工海藻を設置した場合の平均流速分布
水深 400 mm, 周期 2.0 s, 波高 132~137 mm, 人工海藻の長さ 60~120 mm

長さの非対称人工海藻によって誘導された平均流速分布を示す。このようにほぼ同一の波動場においても人工海藻の長さによってこの人工海藻が誘導する平均流速場には大きな差がある。さらにこの場合、最も大きな効果を示しているのは長さ 100 mm の人工海藻であり、それより短い長さ 60 mm の人工海藻だけでなく逆に長い長さ 120 mm の人工海藻も、この長さ 100 mm の人工海藻ほど大きな効果を示さなかった。これより、それぞれの波動場に対して、人工海藻の長さの最適値が存在すると考えられる。そこでこの最適値を評価し得るパラメータを導入する。

(2) パラメータ χ の導入

波動場中での非対称人工海藻の動揺の様子を目視により観察すると、この人工海藻が長すぎる場合には転倒・変形している位相が 1 周期の内の大部分を占め、図-3 中の 7~9.0 の人工海藻のように、直立して流体の運動を妨げている位相がほとんど見られなかった。この状態は従来から提案されている対称の形状を有した軟質の人工海藻の動揺とほとんど同じである。したがって、この状態では方向性を持って平均流速を誘起・制御することは困難であると考えられる。逆にこの非対称人工海藻が短すぎる場合には十分な変形・動揺がみられるものの、この人工海藻の短さから、底面から高さ方向に平均流速を誘起する範囲が大きくなり、結果的に十分な平均流速制御効果が得られていないようであった。この目視観察、とくに長すぎる非対称人工海藻の動揺の様子から、効率よく非対称人工海藻が動揺するためには、波動場における水粒子の軌跡の長径と非対称人工海藻との間に最適な関係があるものと考えられる。そこでここでは次のようにこれらの比で表されるパラメータ χ を定義して、この

関係を議論する。

$$\chi = \frac{U_{max} \cdot T}{l} \dots\dots\dots (1)$$

ここで U_{max} は非対称人工海藻設置前における人工海藻先端の高さでの水粒子の最大流速であり、また T および l はそれぞれ波の周期と人工海藻の長さである。このパラメータ χ を用いて、様々な条件の波動場において非対称人工海藻が誘導する平均流速について考察を行う。

(3) パラメータ χ による整理

ここではそれぞれの条件の波動場において非対称人工海藻によって誘導された平均流速の最大値 u_{i-max} および誘導された単位幅平均流量 q_i と、新たに定義されたパラメータ χ との関係について整理・考察する。ここで誘導された単位幅平均流量とは図-5 においてこの人工海藻が設置された場合とされていない場合のデータとで囲まれる領域の面積である。これらの関係を図-7, 8 に示す。これらのグラフではかなりのばらつきが見られるが、これには 2 つの大きな原因が上げられる。ひとつは非対称人工海藻に作用する流体力に対して人工海藻のもつ剛性が大きかったために、波動場中でこの人工海藻が十分に動揺しなかったことである。もうひとつは逆に非対称人工海藻に作用する流体力が人工海藻のもつ剛性に比べて大きすぎたために、この非対称人工海藻がその凸面側にも変形・転倒してしまったことである。これは図中にお

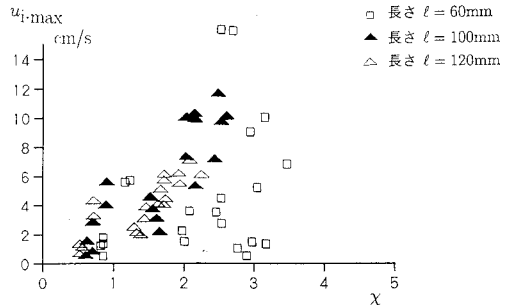


図-7 パラメータ χ と誘起最大流速との関係

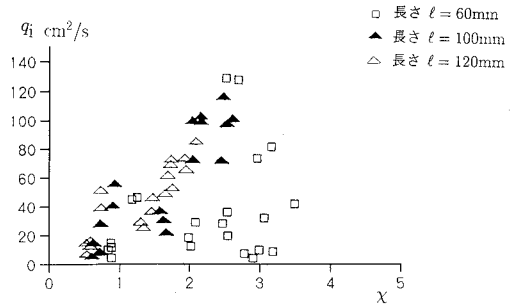
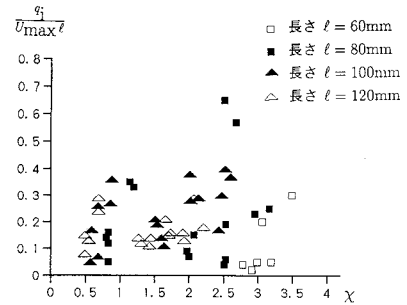


図-8 パラメータ χ と誘起された単位幅平均流量との関係

いて、剛性に対して流体力が小さくなりやすい短い人工海藻や逆に大きくなりやすい長い人工海藻の測定結果が小さな誘起最大流速や単位幅平均流量を示している点からも推測できる。したがってここでは人工海藻に作用する流体力と剛性とりの大小関係が程良く、人工海藻が十分に变形・動揺し、非対称人工海藻による効果が明確に現れていると考えられる包絡線上のデータに注目する。図一7,8の両図においてパラメータ χ の値が増加すると共に誘起最大流速 u_{i-max} や単位幅平均流量 q_i がほぼ直線的に増加していることが分かる。そしてこのパラメータ χ の値が2.5あたりでピークを示し、その後急激に誘起最大流速や単位幅平均流量が減少していることがわかる。したがってこれらの図より、パラメータ χ の値がほぼ2.5となる非対称人工海藻が最も有効であるといえる。この χ が2.5より大きくなったとき急激に誘起最大流速 u_{i-max} や単位幅平均流量 q_i が減少するのは、次の二つの理由が考えられる。ひとつはこのパラメータ χ が大きい人工海藻は比較的短い人工海藻であるため、人工海藻の平均流速制御範囲の上方向への広がりが小さく、結果的に小さい誘起最大流速や単位幅平均流量が得られたということである。もうひとつはこの比較的短い人工海藻に作用する流体力が人工海藻の持つ剛性に比べて小さいために人工海藻が十分な動揺を示していなかったためということである。またパラメータ χ が0.5あたりでは誘起最大流速や単位幅平均流量の値がほとんどゼロに近いのは、これらの人工海藻は比較的長いために、前にも述べたように、図一3における7~9,0の人工海藻のように直立して流れに抗している位相がほとんど存在せず、通常の対称の軟質人工海藻と同様の動揺を示したためである。図一8において χ が0.5から2.5までの範囲において χ が増加するにしたがって誘起された単位幅平均流量 q_i が増加しているのは、 χ が増加するにしたがって水粒子の最大流速 U_{max} が大きくなる傾向にあるので、このことから人工海藻が制御する流れ場の流速が大きくなるためと考えられる。

(4) 平均流速場制御の効率

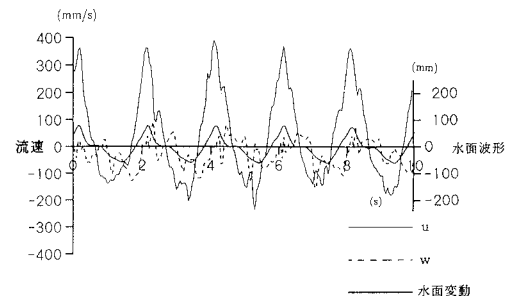
つぎに図一8の縦軸をさらに無次元化して検討を行う。ここでは非対称人工海藻によって誘起された単位幅平均流量 q_i を人工海藻がない場合の最大水粒子速度 U_{max} と人工海藻の長さ l によって無次元化された量 $q_i/(U_{max}l)$ を用いる。その結果を示したのが図一9である。この図においても図一7や図一8と同様の理由から包絡線上のデータに注目する。この無次元量 $q_i/(U_{max}l)$ はこの非対称人工海藻の平均流速の誘起効率を表している。この図から、パラメータ χ が2.5付近で極端に大きな値を示している実験結果が2点あるものの、 χ が0.5から2.5までの範囲でほぼ0.3から0.4の一定値を示し



図一9 パラメータ χ と無次元化された単位幅平均流量 $q_i/(U_{max}l)$ との関係

ている。これは χ が0.5から2.5までの範囲では人工海藻の動揺の様子に多少の差はあるものの、その効果はほぼ同等であることを示している。しかし、実質の誘起平均流量を考慮した場合には、人工海藻の長さが同一であった場合には水粒子の最大流速 U_{max} が長い場合すなわち χ が大きい方が有効である(図一8)。また、パラメータ χ が0.5より小さい場合には明らかに効率が低下していることが図一8からだけでなく図一9からも明かである。これは人工海藻が長すぎ、この人工海藻が直立して流れに抗する状態がなくなるために、従来の対称の軟質人工海藻と同じ動揺を示しているからである。またパラメータ χ が2.5より大きい領域においても明かな効率の低下が見られる。これには人工海藻に作用する流体力がこの人工海藻の剛性に比べて小さかったために人工海藻が十分な動揺を示さなかったためと考えられる。この点については今後さらに検討する必要がある。

ここで仮に非対称人工海藻が存在する領域においてこの人工海藻が变形する方向に水粒子が移動しているときには流れ場に影響を与えず、逆方向に水粒子が移動するときには完全にその移動を阻止する場合を考える。つまり非対称人工海藻によって底面上から人工海藻の高さ l



図一10 非対称人工海藻群中の流れの時系列変化
水深400mm, 周期2.0s, 波高137mm, 人工海藻の長さ80mm

までの領域において流速 $u(t)$ が

$$u(t) = \begin{cases} U_{\max} \sin \frac{2\pi t}{T} & (0 \leq t < \frac{T}{2}) \\ 0 & (\frac{T}{2} \leq t < T) \end{cases} \dots\dots (2)$$

であったと仮定する。この場合、図-9中の無次元量 $q_i/(U_{\max}l)$ は $1/\pi$ となる。これに比べて、図-9では χ が 0.5 から 2.5 までの範囲ではほぼこの値と同じ実験値を示している。さらに $\chi \approx 2.5$ ではこの値のほぼ 2 倍の値を示す実験値も見られる。このようにこの非対称人工海藻が大きな効率を示すことには次の 2 つの理由が考えられる。ひとつはこの非対称人工海藻が平均流速に影響を及ぼす範囲にある。この人工海藻が影響を及ぼす範囲は図-5に示すようにその人工海藻の長さの 2 倍近くの高さまで達している。このように実際に平均流速を制御する範囲が広いために誘起効率の値を示したと考えられる。もうひとつは非対称人工海藻によって誘導される流速変動にみられる。図-10に人工海藻先端の高さにおける流速の時系列データを示す。この図において岸沖方向の流速変動 u は多少乱れているものの、その波形が非対称人工海藻によって u の正側に移動していると考えられる。この条件において非対称人工海藻を設置していない場合、流速振幅は 296 mm/s となる。この点からも、非対称人工海藻はその変形方向と逆向きの流速成分を抑制させることにより平均流速成分を誘導するのではなく、流速の時間変動波形そのものを変形方向と順方向に移動させることにより平均流速成分を誘導していることが分かる。

4. おわりに

本研究では非対称人工海藻が有する平均流速制御効果を、新たに導入したパラメーター χ を用いて整理・評価した。このパラメーターは水粒子の軌道の長径と人工海藻の長さとの比を示したものである。その結果、この非対称

人工海藻が最も効果的に作用するパラメーター χ の値が存在することが実験的に示された。このパラメーターの値が小さすぎる場合には人工海藻は相対的に長くなりすぎ、従来の対称型の軟質人工海藻と同様の動揺を示しており、これが人工海藻の平均流制御効果低下の原因である。逆にこのパラメーターの値が大きすぎる場合には人工海藻は相対的に短くなりすぎ、この人工海藻が平均流を制御しうる有効な範囲が小さくなるために平均流制御効果が低下していた。

今回の実験・研究では動揺の様子が重要な非対称人工海藻がそれ自身が持つ剛性が大きすぎるために十分な変形・動揺が得られていないことも明らかにされた。したがって今後、最適な構造形や材質を選択するためにも、この非対称人工海藻の構造的な解析も行う必要がある。

本研究は文部省科学研究費(奨励研究(A), 05750491, 代表 小林智尚)の補助を受けて行ったものである。

参 考 文 献

- 浅野敏之・筒井勝治・酒井哲郎(1988): 海藻が繁茂する場の波高減衰の特性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 138-142.
- 浅野敏之・出口 浩・間瀬 肇・小林信久(1991): 揺動する海藻群落上を伝搬する波の特性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 26-30.
- 小田一紀・天野健次・小林憲一・坂田則彦(1991): 硬質型人工海藻の漂砂制御効果に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 331-335.
- 小林智尚・仲座栄三・星野 仁・石塚昭彦・石原慎太郎(1993): 非対称人工海藻による流れ場の制御, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 566-570.
- 菅原一晃・入江 功(1990): 人工海藻による底質移動の制御効果について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 434-438.
- 菅原一晃・永井紀彦(1992): 波による堤体前面の洗掘, 海岸侵食に対する人工海藻の防止効果, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 461-465.
- 間瀬 肇・古田幸也・酒井哲郎・浅野敏之・柳生忠彦(1989): 傾斜海浜に設置した人工海藻による波浪変形解析, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 90-94.