

# 波による堤体前面の洗掘，海岸侵食に対する 人工海草の防止効果

菅 原 一 晃\*・永 井 紀 彦\*\*

## 1. ま え が き

防波堤や突堤などの構造物は，波や流れによって基礎周辺の海底が洗掘され，沈下や耐波安定性の低下を生ずる．そのために，これら堤体の基礎にはグラベルマットやアスファルトマット等の洗掘防止工法が行われ，その改良工法も種々提案されているけれども，周辺洗掘を解決する有力な工法とはなっていないようであり，現在でも新工法開発の要請が高い．一方，海岸侵食は，わが国沿岸の多くの場所で発生しており，砂浜が後退あるいは消失し，ひいては国土保全上脅威なものとなっている．

著者らは，景観を阻害しないことを前提条件としたうえで，底質移動の制御を図ることを目的に，波や流れの中で柔軟に動揺する“人工海草”に取り組み，これまでに水理模型実験によってその基本的な機能について検討してきた．これによれば，進行波のもとでは人工海草はその植生区域内に底質を堆積させる効果とその岸側に底質を移送させる効果がある（菅原・入江，1990）．

本研究は，人工海草がさらに具体的な堤体前面の重複波領域における海底洗掘，海岸侵食の対策工法となる可能性を検討するために二つの移動床模型実験を行い，有用と考えられる結果を得たので報告するものである．

## 2. 堤体前面の海底洗掘に対する人工海草模型実験

### （1）堤体前面の地形変化の概要

重複波領域における海底洗掘については，多くの研究が行われ，最近ではその機構がほぼ明らかになっている．すなわち重複波のもとでは腹・節を境にして，水粒子運動が対称的であり，これによって生ずる底質移動による地形は，波の腹節に依存して対称的な変化を示す．地形変化は，波の諸元と底質の特性によって腹で洗掘して節で堆積する場合と，逆に腹で堆積して節で洗掘される場合がある．入江ら（1984）は，これらの発生機構を含めて発生限界を明らかにしている．これによれば底質の移動方向は，主として進行波の底面における水粒子最

大速度  $u_b$  と底質の沈降速度  $\omega$  との比  $u_b/\omega$  により支配され， $u_b/\omega > 10$  の場合は重複波の節の位置で洗掘されて腹の位置で堆積し， $u_b/\omega < 10$  の場合は腹と節の中間で洗掘されて節の位置で堆積する．前者をLタイプ洗掘，後者をNタイプ洗掘と呼んでいる．ここで，現地においては  $u_b/\omega > 10$  の条件すなわちLタイプ洗掘が発生しているものと推定される．

### （2）実験施設と実験概要

本実験で用いた二次元造波水路を図-1に示す．水路は長さ 25 m，幅 1 m，深さ 0.65 m の鋼製で，片面ガラス張り，床面は木製である．水路は岸側端から 14 m の間が鋼製隔壁で二等分されている．造波装置はフラップ型で，周期 0.2～2.5 s，最大波高 20 cm の規則波を発生できる．

堤体の模型は高さ 62 cm，幅約 50 cm，厚さ 18 mm のベニア板で，ガラス側壁を有する水路側に鉛直に立てて固定した．移動床は堤体前面から沖側 400 cm の間を厚さ 10 cm に水平に敷き均し，その沖側端は 1 : 3 の

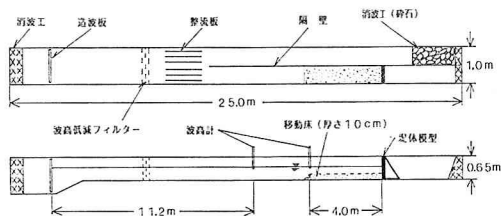


図-1 堤体前面の洗掘対策実験の概要

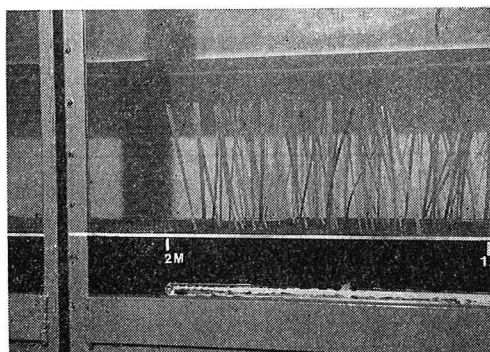


写真-1 人工海草の設置状況（後出ケース A-2）

\* 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋水理部主任研究官

\*\* 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海象調査研究室長

勾配で水路床面にすりつけた初期地形としてある。底質は中央粒径  $d_{50}=0.17\text{ mm}$  であり、その比重は 2.75 である。

人工海草は岸沖長さ 100 cm、幅約 50 cm、厚さ 5 mm のベニア製基盤に葉状体の一端を固定して立ち上げ、林立するように多数取り付け付けたもので、その設置例を写真-1 に示す。葉状体の植生間隔は岸沖、横断方向とも 5 cm で計 180 株植生してあり、その植生密度は  $0.036\text{ 株/cm}^2$  である。基盤は水路床面に固定し、その上に底質を敷き均してある。ここで、葉状体とは人工海草を構成する最小単位の 1 本（本実験では 1 本が 1 株）を呼んでいる。

### (3) 実験条件および実験方法

実験波は、進行波（堤体、人工海草および移動床のない状態）の沖側測点で  $H=10\text{ cm}$ 、 $T=1.6\text{ s}$  となるもので、(1) で述べたように、節で洗掘される L-タイプ洗掘の条件  $u_b/\omega > 10$  を満足する  $u_b/\omega=12.3$  である。水深は沖側固定床部で 40 cm、初期地形面で 30 cm である。波の作用時間は、人工海草なしのケースにおいて地形がほぼ安定したと判断された延べ 6 時間である。ここでの測定項目は、地形および波高である。

波高の測定には容量式を使用し、造波板から 11.2 m の沖側測点と堤体から 400 cm の位置で測定するとともに、重複波の波形を把握するために波作用 2～4 時間の間に、堤体から 300 cm までを 5 cm 間隔に測定した。測定は水路縦断方向の中央における 1 測線とし、30 波の連続波形をペン書きオシログラフによって取得した。

地形の測定は、水路縦断方向にガラス側壁より 10 cm、25 cm、40 cm の 3 測線において、原則として初期地形、1、2、4、6 時間後にポイントゲージによって行った。地形の岸沖測定間隔は 5 cm である。

表-1 に実験ケースを示す。表には葉状体の諸元、設置位置を示してある。A-1 は人工海草なし、その他のケースは人工海草がある場合である。人工海草ありの 4 ケースに用いた葉状体の素材は、すべてポリプロピレンである。ただし、A-2 の材質は他の 3 ケースのそれとは異なるものである。ここで、A-2 および A-4 は、著者ら (1990) が先に行った進行波による一連の水平固定床模型実験において、その植生区域付近に堆積すると

評価された人工海草の模型であり、A-3 および A-5 は植生区域の岸側に底質を移送させる効果があったものである。実験では A-1 以外の 4 ケースについても砂厚 10 cm の水平移動床を初期地形としてある。なお、人工海草の岸沖長は  $L_0/4$  である。

### (4) 実験結果および考察

堤体から 300 cm の区間について、図-2 に全ケースの波高分布を示す。堤体から 140 cm 付近の第 1 腹の波高の最大は A-1 では 20 cm、250 cm 付近の第 2 腹の波高の最大は 18 cm 強であるのに対し、他のケースではこれより小さい波高を示している。特に A-2 は第 1 腹で 16.8 cm (83%)、第 2 腹で 15.9 cm (86%) に低減し、他の 3 ケースでも第 1 腹では 18.1～18.5 cm (90～92%)、第 2 腹では 17.0～17.5 cm (92～95%) である。最も減衰する A-2 の場合、前資料 (菅原・入江, 1990) で得られた進行波の波高は、人工海草がある場合はそれがない場合の 90% 程度であったのに対し、重複波による第 1 腹の波高は、その 2 倍以上低減していることになる。

図-3 に全ケース波作用 6 時間後の断面地形を示す。図によれば堤体から 50 cm 付近の最大洗掘深は、初期地形面から A-1 では 6.6 cm であるのに対し、他のケースでは最も洗掘される A-3 が 4.32 cm、次いで A-5 の 4.27 cm、A-2 の 4.12 cm、A-4 の 3.22 cm の順であり、A-3 の場合で 65% に、A-4 では 49% に低減している。

人工海草なしに対するそれがある場合の地形変化の差

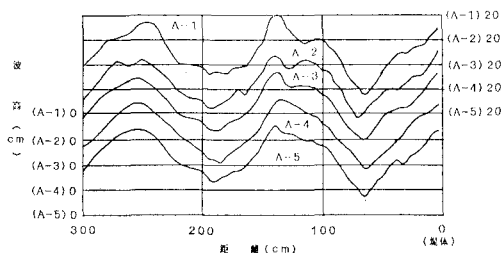


図-2 各ケースの波高分布

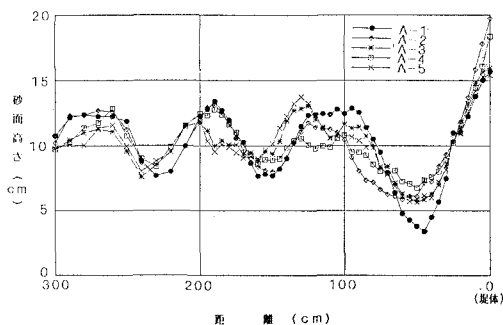


図-3 断面地形の比較 (6 時間後)

表-1 人工海岸による堤体前面の洗掘対策実験ケース

| ケース | 材 質       | 葉 状 体 の 諸 元 |           |            |      | 堤体からの<br>設置距離<br>(cm) |
|-----|-----------|-------------|-----------|------------|------|-----------------------|
|     |           | 長さ<br>(cm)  | 幅<br>(cm) | 厚さ<br>(cm) | 比重   |                       |
| A-1 | 人工海草なし    | —           | —         | —          | —    | —                     |
| A-2 | ポリプロピレン21 | 20          | 1.6       | 0.45       | 0.45 | 0～100                 |
| A-3 | ポリプロピレン   | 20          | 1.0       | 0.15       | 0.65 | 100～200               |
| A-4 | 〃         | 10          | 〃         | 〃          | 〃    | 0～100                 |
| A-5 | 〃         | 5           | 〃         | 〃          | 〃    | 100～200               |

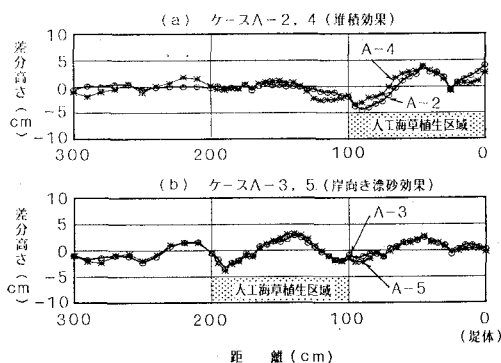
\* 材質のポリプロピレン21の数字は実験上の便宜のため任意に付したものである。

分を 図-4 (a), (b) に示す。横軸は移動床部の堤体から 300 cm までの水平距離、縦軸は差分高さである。縦軸のプラス側は、人工海草がある場合はそれがない場合の地形に対して、洗掘が低減するかまたは堆積することを(以下、堆積性という)、マイナス側は堆積が低減するか洗掘される(以下、洗掘性という)ことを表す。

まず 図-4 (a) は、ケース A-2, 4 のものである。A-1 において最大洗掘深を示した堤体より約 50 cm の位置をカバーする範囲に人工海草を設置した場合のものである。両ケースはほぼ似通った傾向を示し、植生区域内の中央部で顕著な堆積性を、堤体直前にも堆積性を示す。A-1 で堆積を示した 100 cm 付近は洗掘性であり、160 cm 付近の洗掘位置ではやや堆積性、190 cm 付近の堆積位置ではやや洗掘性を示す。したがって人工海草は、それがない場合の洗掘位置が堆積に変わるほどの効果は期待できないけれども洗掘深が浅くなり、その堆積位置では洗掘性を示し、平坦化の機能があることは明らかである。

図-4(b)はケース A-3, 5について示す。人工海草は A-1における最大洗掘域には置かず、堤体から 100 cm 離して設置してある。図によれば A-3 と 5 はほとんど同じ結果を示しており、堤体より約 50 cm 付近に強い堆積性を示し、さらに 150 cm の植生区域の中央付近では、A-1 で洗掘域であるのに対して堆積性が顕著であり、その前後の堆積位置では洗掘性を示している。すなわちこれらの人工海草は、底質を岸向きに移送させるとともに植生区域内にも堆積させる機能を有している。A-3 と 5 は同じ材質で長さのみが異なるもので、この図から長さの違いによる差異は見いだせない。

これらの結果から、先に著者らが把握した人工海草のもつ堆積効果と岸向き漂砂効果の2つの機能が本実験でも明らかになった。なお、岸向き漂砂効果がある A-3, 5 の場合の人工海草でも、堤体直前すなわち洗掘位置に設置すれば A-2, 4 と同じように植生区域内の堆積性が大きくなる地形変化を示すものと推察される。



図一4 人工海草なしに対する地形の差分

### 3. 海岸侵食に対する人工海草模型実験

### (1) 実験の概要とケース

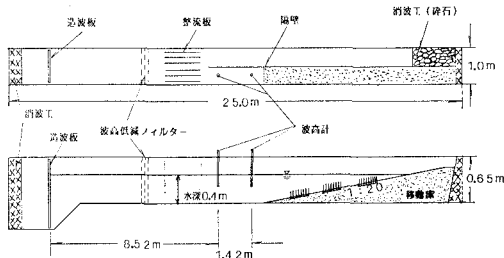
実験に用いた水路は、2. と同じものである。図-5 に実験の概要を示す。移動床は、岸側端の消波工前面に底質を投入し、まず岸側は高さ 50 cm の水平区間を岸沖 50 cm とり、その先を 1/20 の勾配として水路床面まで全て移動床で成形した。実験波は  $H=10$  cm,  $T=1.6$  s であり、岩垣・野田 (1961) による暴風海浜の性状をもつ波である。水深は床面まで 40 cm である。

1 ケースに対する波の作用時間は人工海草がない場合の実験ケースを行って、底質面がほぼ平衡状態となると判断した延べ7時間とし、人工海草模型の設置位置は、砕波点およびバーの位置から判断して決定した。移動床の底質は、2. の実験で用いたものと同じである。測定項目は断面地形、波高および砕波点の位置である。

断面地形の測定は、水路幅約 50 cm の中央とその両側 15 cm の岸沖 3 測線とし、5 cm 間隔に行った。測定の間隔は初期地形と波作用 0.5, 1, 3, 5, 7 時間後とした。

波高は、容量式波高計を用いて2定点および波高分布を求めるために測定した。碎波点は碎波頂の位置とし、目視によって測定した。

本実験の目的とする海岸侵食の防止に対する人工海草の設置位置は、①汀線付近、②砕波点の岸側、③砕波点付近、④砕波点の沖側、⑤砕波点のさらに沖側と種々な場所が考えられる。そこで現地にも人工海草を設置する場合の諸条件を勘案して考察すると、①は汀線付近の景観を損ねるばかりでなく、例えば海水浴には不適である。②は人工海草の安定的設置が比較的容易であると考えられ、効果があれば設置可能な場所である。③は海底面の変動が大きく、人工海草の長期的安定を保持するために、技術的な不安が多い。④は砕波点付近で侵食された底質がバーを形成する位置であるので、安定設置および人工海草の機能が顕著に現れる場所と推察される。⑤は高波時に底質がこれより沖へ流出しなければ有効であり、水深もある程度確保できることから設置安定上有利な場所である。このような観点から本実験は基本的に④



図—5 人工海草による傾斜断面の侵食対策実験の概要

表-2 人工海草による傾斜断面の侵食対策実験ケース

| ケース | 材 質     | 葉状体の長さ (cm) | 砂面上の長さ (cm) | 幅 (cm) | 1株の本数 (本) | 厚さ (mm) | 比重   | 植生間隔 (cm) | 植生区域長 (cm) | 植生位置 (初期汀線からの距離) (cm) |
|-----|---------|-------------|-------------|--------|-----------|---------|------|-----------|------------|-----------------------|
| B-1 | 人工海草なし  | —           | —           | —      | —         | —       | —    | —         | —          | —                     |
| B-2 | ポリプロピレン | 25          | 20          | 1.6    | 1         | 0.45    | 0.45 | 5         | 100        | 370~470               |
| B-3 | ポリプロピレン | 15          | 10          | 1.0    | 2         | 0.15    | 0.65 | 〃         | 〃          | 〃 〃                   |
| B-4 | 〃       | 10          | 5           | 〃      | 1         | 〃       | 〃    | 〃         | 〃          | 〃 〃                   |
| B-5 | 〃       | 15          | 10          | 〃      | 〃         | 〃       | 〃    | 〃         | 〃          | 550~650               |
| B-6 | 〃       | 〃           | 〃           | 〃      | 〃         | 〃       | 〃    | 〃         | 〃          | 170~270               |
| B-7 | 〃       | 〃           | 〃           | 〃      | 〃         | 〃       | 〃    | 〃         | 〃          | 370~470               |
| B-8 | 〃       | 10          | 5           | 〃      | 〃         | 〃       | 〃    | 〃         | 〃          | 170~270               |

に設置することとし、他に②および⑥について行った。

実験ケースを表-2に示す。ケース数は人工海草なしの1ケースを含め計8ケースである。葉状体の材質および植生間隔、模型長は前述した2.の実験で用いたものと同じである。ただし、B-3はB-7の模型に対し、1株を2倍の本数にしてある。人工海草模型の設置は、人工海草なしの地形変化を観察し、基盤が露出しないように初期地形に対して砂面から葉状体の取り付け板上面までのかぶりを5cmとって埋めてある。なお、人工海草の岸沖長は $L_0/4$ である。

## (2) 実験結果と考察

全ケースの変化地形を図-6に示す。図によればケースB-1の地形に対して、B-2は人工海草の植生区域とそのすぐ岸沖に堆積し、逆にB-3, 4, 7はその岸側に大きく堆積している。その他のケースはB-1とそう異なっているようには見えない。

砕波点付近に着目して図-7を示す。図には砕波点の経時変化とバーの形状および人工海草植生位置を示す。バーは7時間後の初期地形との差分でプラス部分のみを、砕波点は矢印で示してある。短い矢印は0.5時間、これに横線1本が1時間、2本が3時間、3本が5時間後で、長い矢印が7時間後を表す。砕波点が移動しない場合、例えばB-8では1, 3, 5, 7時間後の砕波点が同位置であることを意味する。

図によれば、バーの位置、形状はそれぞれ特徴があり、砕波点の位置も異なっている。B-2は人工海草植生区域とその岸沖に幅広く堆積し、7時間後の砕波点は全ケースのなかで最も沖側にある。B-3, 4, 7はどれも植生区域内の沖側が侵食されてより岸側に堆積する。なかでも植生密度の高いB-3が顕著であり、7時間後の砕波点も最も岸側にある。B-5は最も沖側に人工海草を設置したケースであり、植生区域内は全域が侵食(図-6参照)されてその岸側にあたるバーが他のケースよりやや沖側に位置するとともに堆積量も多い。砕波点の岸側に人工海草を設置したB-6, 8はバーの形

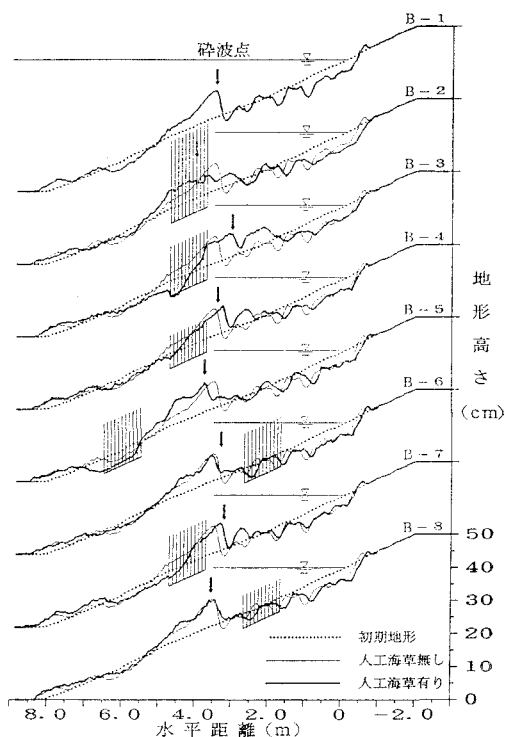


図-6 全ケースの断面形状 (7時間後)

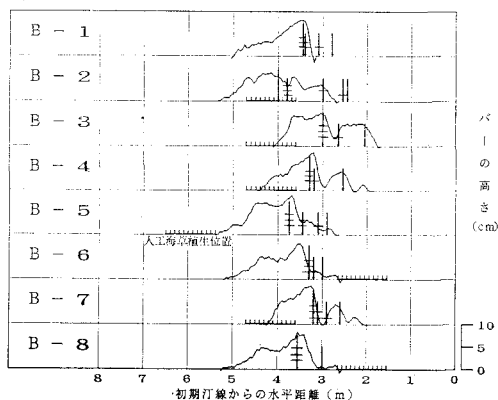


図-7 バーの形成と砕波点の経時変化

状および砕波点の位置とも B-1 とあまり変わっていない。なお、砕波点は全ケースとも時間の経過とともに沖側に移動している。

人工海草はバー付近に設置すると底質移動の制御効果が顕著であり、砕波点のさらに沖側に設置した場合もバーを発達させる。この効果は植生密度が高い方が大きくなる結果が得られた。

断面全体の底質の岸沖累積量の比較を 図-8 (a), (b) に示す。横軸は水平距離、縦軸は陸上部を基点とした累積量を示す。図中の数字はケース番号である。

(a) 図は人工海草なし (B-1) においてバーが形成される位置に人工海草を設置した 4 ケース, (b) 図はそれ以外の 3 ケースで, それぞれ B-1 とともに示す。(a) 図からわかるように B-3, 7, 4 の順で, 人工海草の岸側に顕著なプラスの累積量を示すとともにそのピークも同じ順序でより岸側にある。一方, 図-7 で人工海草植生区域内およびその岸沖に広範かつ顕著な堆積を示した B-2 は砕波点の岸側から汀線にかけてマイナスの累積量が多く, プラスの累積量は B-1 より僅かに多い程度である。一方, (b) 図によれば, B-5 が他のケースと大きく異なっている。このケースは B-1 における砕波点のさらに沖側に人工海草を設置した場合で, その植生位置のすぐ岸側に顕著なプラスの累積量を示す。砕波帯内は他の 3 ケースとあまり変わらない。人工海草を

B-1 の砕波点の岸側に設置した B-6 および 8 は, プラスの堆積量がわずかに多くなるほかは B-1 とほぼ同じ累積変化を示す。

したがって, 海岸侵食の防止には, 高波時に柔軟な人工海草をバー付近からその沖側に置けば, 植生区域の岸側により多くの堆積が期待できる。長さの違いは B-4 と 7 の差であり, 植生密度の違いは B-7 と 3 の差である。なお, 人工海草がある場合の汀線は総じて後退する傾向がある。

#### 4. おわりに

本研究は, 現実の問題となっている波による海中構造物前面の海底洗掘および海岸侵食に対して人工海草の機能を模型実験により検討したものである。その結果以下に示す結論が得られた。

① 堤体前面の洗掘に対して, 洗掘域に堆積効果のある人工海草を岸沖に  $L_0/4$  程度設置した場合, 最大洗掘が深 40~50% 程度低減し, またその沖側の堆積域に岸向き漂砂効果のある人工海草を設置すればそれが 35% 程度低減するとともにその場の堆積も低減する。

② 海岸侵食に対しては, 人工海草を砕波点のすぐ沖側およびさらにその沖側に岸沖  $L_0/4$  程度設置すれば底質は植生区域から岸側に著しく堆積する。植生密度は高ものが効果がある。ただし, 人工海草があると汀線が後退する傾向がある。

今後は現地用人工海草装置としての葉状体の諸元, 基盤, 葉状体の取り付け方法, アンカーリング, 設置方法等の具体的な検討を行い, 考察する所存である。

実験材料は日本化学繊維協会および関係各社から, 仲紀 (株) からは材料と共に最近の情報の提供を受けた。

九州大学工学部入江 功教授, 当所水工部加藤一正漂砂研究室長には全般にわたる適切な助言を, 水工部栗山善昭主任研究官には助力をいただいた。実験には (株) エュー調査役三沢邦弘氏が当たられた。実験の一部および作図のほとんどは海象調査研究室平野隆幸研究員が行った。これらの方々に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 入江 功・灘岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次 (1984): 重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘, 港湾技術研究所報告, 第 23 巻, 第 1 号, pp. 3-52.
- 岩垣雄一・野田文明 (1961): 海岸変形の実験における縮尺効果の研究, 第 8 回海岸工学講演会講演集, pp. 139-143.
- 菅原一晃・入江 功 (1990): 人工海草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・入江 功 (1990): 人工海草による底質移動の制御効果に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 692, 48 p.

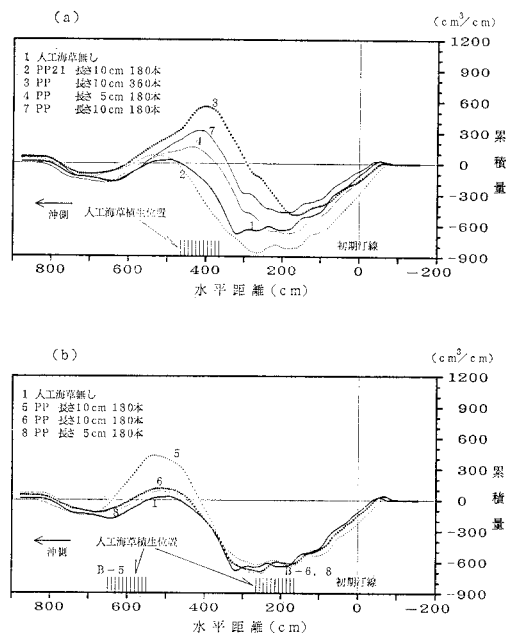


図-8 底質の岸沖累積量の比較