

茅ヶ崎海岸における BMS による地下水位低下の現地実測

西村 晋*・宇多 高明**・平野 浩一***・渡辺 敏****

1. ま え が き

近年、海浜の浸透性を向上させることにより海浜への堆砂を促そうとする工法が各地で試みられるようになった。柳島ら (1995; 1996) は、汀線と直交するトレンチに浸透性の良好な砂礫を敷き詰め、自然流下で地下水を排除する方法を提案した。また、最近では汀線と平行に集水管を設置する方法 (Beach Management System; BMS) も提案されている。茅ヶ崎海岸ではパイロット事業として BMS の試験運用がなされ、その効果検討が行われたが、1996 年の台風 17 号による高波浪によって集水管の一部が被災した。平野ら (1997) は、その被災原因を海浜変形から検討し、被災防止のための集水管の最小土被り厚として約 0.8 m が必要なことを実証的に明らかにした。また、観測井戸を設けて地下水位の変化を調べたが、観測データは限定的であって BMS 稼働時の地下水位の変化状況は十分明らかにされていない。さらに海浜の浸透性の向上の問題では前浜での堆砂に注目が集まる傾向があるが、前浜での堆砂は地下水位の低下の結果生じるはずなので、種々の潮位・波浪条件のもとで BMS 設置時の地下水位の挙動について十分検討することが必要とされている。そこで、本研究では茅ヶ崎海岸において地表面下に間隙水圧計を設置し、高波浪や長周期波の来襲時における地下水位の応答について現地観測によって調べようとするものである。なお、茅ヶ崎海岸における BMS 工法の検討は、神奈川県、(財) 土木研究センター、(財) 神奈川県都市整備技術センターの 3 者が共同研究として進めているものである。

2. 観 測 方 法

観測区域は、図-1 に示すように既設緩傾斜護岸前面に広がる、幅約 20 m、勾配約 1/10、中央粒径約 0.55 mm の細砂からなる前浜であって観測域の両端は 4 号突堤および 3 号突堤で区切られている。汀線と平行に延長 132 m の集水管を配置した上で、7 地点において間隙水圧計

(共和電業製 BP-2 KBT ヒズミゲージ式) を地表面下約 1.2 m に設置して地下水位の変化を観測した。各測点の沿岸方向間隔は 25 m で、汀線と平行に①, ②, ④, ⑥の 4 点を設置し、岸沖方向は交点となる④を加えた③, ⑤の 3 点の他にバックグラウンドの地下水位測定のための⑦を設置し、間隔は測点③が集水管から沖方向へ 6.0 m, 測点④, ⑤, ⑦は集水管から陸方向へ 1.5 m, 12.5 m, 36.0 m で配置した。さらに地下水位観測と同時に海浜測量も実施した。

地下水位観測期間中の波浪条件に関しては、当地点の西 7 km に位置する科学技術庁防災科学技術研究所の平塚観測塔における波浪・潮位データを入手して解析に用いた。観測塔における波浪観測は、水深約 20 m 地点に設置された超音波式波高計によって行われている。なお、平塚観測塔における潮位は絶対潮位として表されていないので、近隣の湘南港および大磯港の潮位と比較して絶対潮位に換算した。

3. 観 測 結 果

(1) 波浪の経時変化

観測は 1997 年 7 月以降継続的に行ったが、ここでは台風などによる高波浪がしばしば来襲した 7、8 月の観測データに注目して分析を進める。図-2 には平塚沖で観測された有義波高と周期の経時変化を示すが、観測期間中に繰り返し高波浪が来襲している。最初は 7 月 26 日を中心とする台風 9 号による高波浪で、この時の有義波高は約 4 m、周期は 15 s であった。8 月 13 日～20 日には周期 13～14 s の長周期波 (最大波高は約 1.5 m) が継続し

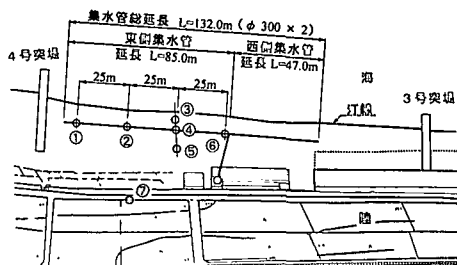


図-1 BMS の配置と測点配置

* 正会員 財団法人土木研究センター 研究開発一部
** 正会員 工博 建設省土木研究所 河川部長
*** 神奈川県湘南なぎさ事務所 海岸防砂課
**** 財団法人神奈川県都市整備技術センター

て作用している。観測期間中の波浪条件は大きく変化しているが、同時に潮位条件も変化しているので、ここでは表-1に示す4期間を選んで詳細分析を行うことにする。

期間I(7月19日～7月21日)は、波浪が静穏であるために潮位変化のみによる地下水位変動を観察し易い時期、期間II(7月23日～7月28日)は高波浪の来襲時、期間III(8月7日～8月11日)はBMSによる地下水位の低下が明瞭に観察された時期、期間IV(8月13日～8月20日)は長周期波の来襲時期である。

(2) 地下水位の経時データ

図-3には、期間Iにおける岸沖方向の測点③、④、⑤、⑦の地下水位の経時変化を示す。図には観測潮位、間隙水圧計の設置地点の地表面標高、さらには集水ポンプの稼働の有無も示してある。期間Iは有義波高が約0.3mと低い条件であり、ポンプは稼働していない。測点③の地表面標高はT.P.+0.10mであって、ほとんどの時期は海面下に位置する。このため、波浪に応答した短周期の変動が見られるが、測点が汀線から離れるにしたがい波浪に応答した短周期変動は見られなくなる。いずれの測点でも潮汐変動モードに対応した変化が卓越するが、陸側になるにしたがい位相のずれが大きくなる。例えば7月20日11:00の干潮時と、18:00の満潮時における位相のずれの時間を図から読みとり、汀線からの各測点までの水平距離との関係を整理すると図-4となる。図から上げ潮時においては、下げ潮時の時間の遅れと比較して時間遅れが少なく、水位変化に敏感に反応することがわかる。また汀線から各測点までの水平距離の増加と比例して時間遅れが増大しているのがわかる。

図-5は、期間IIにおける地下水位の変化である。併せて観測期間における各測点の地表面標高も示してある。この期間には図-2に示したように最大で約4mの波高が出現し、また図に示すように7月24日～27日までポンプ(平均吸水量 $8.33\text{ m}^3/\text{min}$)が稼働している。この図から測点③においては高波浪が作用したために、波浪に応答した短周期変動が顕著に現れており、測点④、⑤、⑦と陸側に移動するにしたがい波浪に応答した短周期変動はごくわずかとなっていく。一方、地下水位に関しては測点③でほとんど変化は見られないが、測点④、⑤、⑦と陸側になるほど急速に上昇している。

図-6は、期間IIIにおける地下水位の変化である。この期間では8月8日13:30にBMSのポンプの運転が始められたあと、明瞭な形で地下水位の低下が観測された。この間のポンプの平均吸水量は $8.33\text{ m}^3/\text{min}$ である。測点③では波浪に応答した短周期変動は見られるが、ポンプの運転による明確な水位低下は見られない。しかし、測点④ではポンプの運転開始後地下水位が徐々に低下し

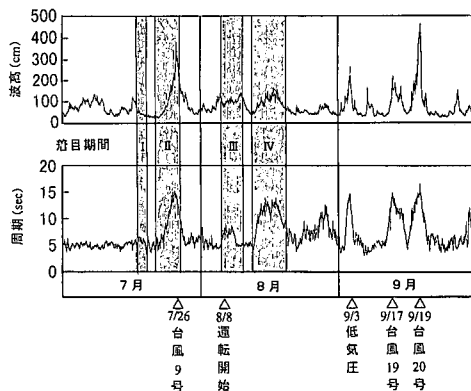


図-2 観測期間中における有義波高と周期

表-1 観測期間I～IVとその特徴

番号	着目期間	着目点	波高 (cm)			周期 (sec)		
			最大	最小	平均	最大	最小	平均
I	7/19～7/21	潮位と地下水位の偏差大	45	24	32	6.6	3.2	4.8
II	7/23～7/28	波浪による水位変動大	381	36	144	15.2	4.3	9.6
III	8/7～8/11	BMS 運転開始	142	52	100	8.7	4.6	5.8
IV	8/13～8/20	大潮・小潮長周期波	164	41	97	13.9	4.0	10.4

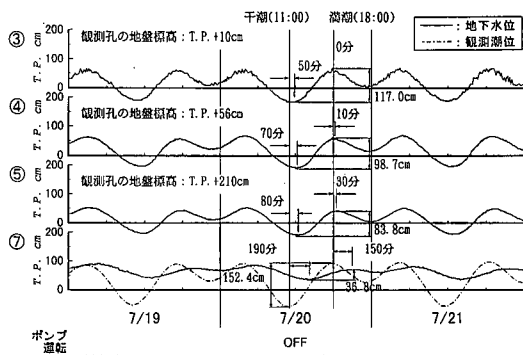


図-3 潮位と地下水位の時系列 (期間I: 7/19～7/21)

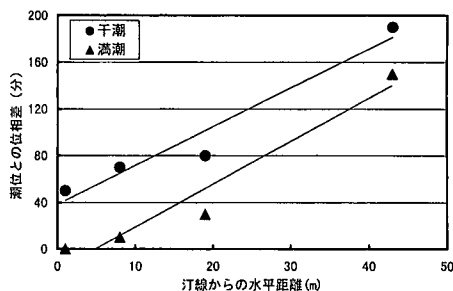


図-4 満潮時および干潮時における時間遅れと汀線からの距離との関係

ている様子がわかる。同様に測点⑤、⑦においてもこの傾向は確認され、特に測点⑦では集水管から36.0mも

離れている地点にまで水位低下の影響が位相の遅れを伴いながら伝播する様子が確認できる。

長周期波の来襲時期（期間Ⅳ）における地下水位の経時変化を図-7に示す。この期間もまた地下水位の著しい上昇が見られ、期間Ⅱの高波浪時による地下水位変化と同様な地下水位の上昇が生じている。このように長周期波の来襲時も前浜付近の地下水位に著しい上昇をみることは、前浜の安定性を議論する際に注目しなければならない点である。なお、この期間においてもBMSは稼働しており、この間の平均吸水量は $8.33\text{ m}^3/\text{min}$ であった。

(3) 波の遡上高と地下水位との相関関係

高波浪時および長周期波来襲時における前浜地下水位の上昇が著しくなる原因として、前浜への波の遡上状態が大きく関係すると推定される。そこで、図-5に示したような地下水位の経時変化図ではこの現象の理解が難しいので、各時刻において測定された地下水位がその時刻の潮位と波の遡上高に強く依存すると考えて、遡上高の絶対標高と地下水位との関係を調べた。なお、遡上高の絶対標高は、Huntの式を用いて波の遡上高を推算し、それに潮位を加算して求めた。また、Huntの式は次式で表わされ、計算では実測値をもとに $\tan \alpha = 1/10$ とし、 H には平塚観測塔の測定値をそのまま用いた。

$$R/H = 1.01 \cdot \tan \alpha / (H/L_0)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 R ：波のうちあげ高（m）

H ：水深 h での入射波高（m）

α ：水平面と斜面とのなす角

L_0 ：深水波の波長（m）

図-8は期間Ⅱにおける測点③、④、⑤の地下水位と推算された絶対遡上高との関係を整理したものである。なお、原点近傍の四角形区域は観測期間中における潮位の変動幅を示す。この図によれば測点③においては波浪の短周期変動の影響で相関係数は0.28と低いが、測点④、⑤と汀線から陸側に離れるにしたがい相関係数が0.74、0.84と高まりつつ地下水位の上昇量が増加していることがわかる。次に測点⑤に着目し、この測点の地表面の標高を越えて波が遡上する場合とそれ以下となる場合とを区別し、さらに地表面標高を越えない場合について地下水位上昇時と下降時のデータを区分してそれぞれについて相関を調べたものを図-9に示す。この結果によれば、地下水位の上昇時と下降時（図中の●、▲印）においては、波の遡上高と地下水位の間には全く同様な回帰係数を持った回帰直線が引かれること、一方観測点の地表面標高を越えて波がうち上がるようになると、地下水位の上昇割合は減少していくことが分かる。

同様に期間Ⅲにおける測点④、⑤の相関図を図-10、11に示す。図中の黒丸はBMS運転前の地下水位を示

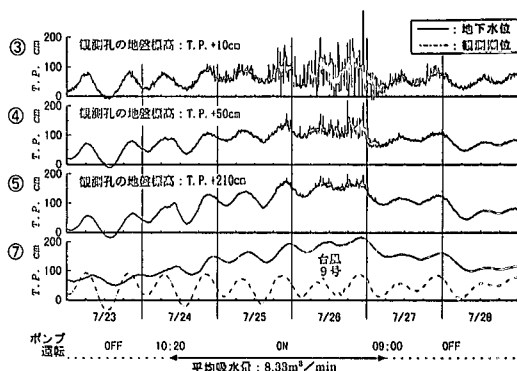


図-5 潮位と地下水位の時系列（期間Ⅱ：7/23～7/28）

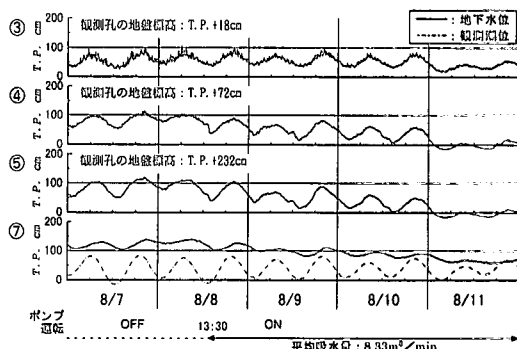


図-6 潮位と地下水位の時系列（期間Ⅲ：8/7～8/11）

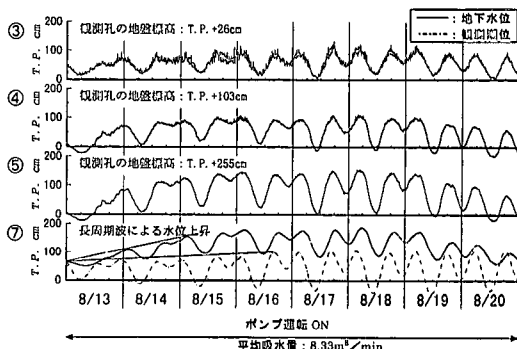


図-7 潮位と地下水位の時系列（期間Ⅳ：8/13～8/20）

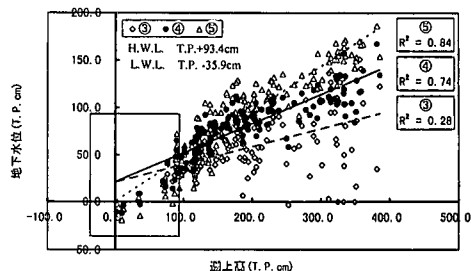


図-8 波の遡上高と地下水位の関係（期間Ⅱ）

し、一方白丸は運転後の地下水位を示す。期間IIIにおける平均波高は約1.0mであり、波のうちあげ高もT.P.+0.7~+1.7mの範囲で遡上していた。測点④では、BMS稼働前後において波の遡上高と地下水位の間には次の関係が成立する。

$$G_{4off} = 0.38R_4 + 32.3 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$G_{4on} = 0.89R_4 - 57.2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 G_{4off} ：ポンプ停止時の地下水位 (T.P. cm)

G_{4on} ：ポンプ運転時の地下水位 (T.P. cm)

R_4 ：波の遡上高 (T.P. cm)

すなわち、BMSを稼働することによって地下水位は低下するが、その低下量は遡上高が小さい時で最も大きく、遡上高が高くなっていくと徐々にその低下量は減少する傾向になり、遡上高がT.P.+2.0mに接近すると地下水位の低下は見られなくなる。同様に測点⑤では、次式が成立する。

$$G_{5off} = 0.52R_5 + 17.5 \quad \dots\dots\dots (4)$$

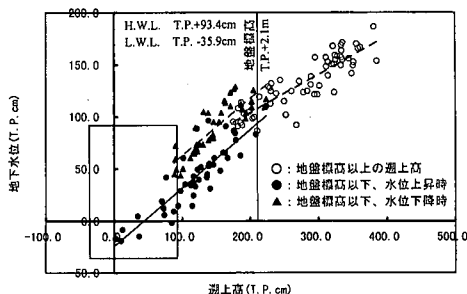
$$G_{5on} = 0.96R_5 - 65.7 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 G_{5off} ：ポンプ停止時の地下水位 (T.P. cm)

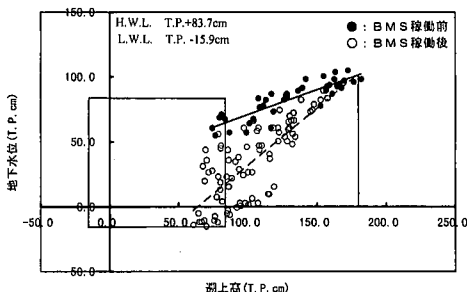
G_{5on} ：ポンプ運転時の地下水位 (T.P. cm)

R_5 ：波の遡上高 (T.P. cm)

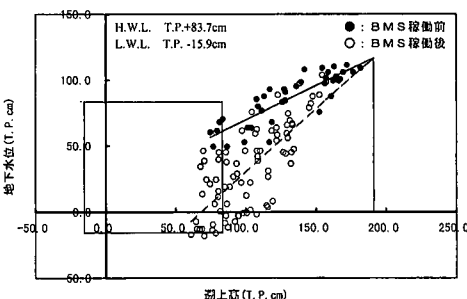
このように測点⑤は測点④と同様な傾向を示しているが、測点⑤は測点④より陸側に位置しているために、地下水位の上昇率は大きく、水位低下量は小さいことがわかる。また各図で2つの相関直線は交点を有することから、BMSによる地下水位の低下は、この交点を境に通常の地下水位上昇傾向に漸近すると考えられるので、この点がBMSによる地下水位低下の限界点を示すと考えられる。したがってBMSによる地下水位の低下効果が期待できる限界は、現在の施設の仕様で絶対遡上高T.P.+2.0m付近までであることがわかる。また、この限界値の存在を説明するものとして、波高はそれほど高くないが、長周期波が来襲している観測期間IVにおける測点④の相関図を図一12に示す。この期間では観測期間中BMSが連続的に稼働しているので、この期間内のデータから地下水位の低下を調べることはできないが、期間IIIと同様な効果が発揮されていたと推定すれば、遡上高がT.P.+2.0m付近を境に地下水位の上昇傾向に何らかの変化があるはずである。そこで図に示すように遡上高T.P.+2.0m付近を境にデータを区分して整理してみると、限界値より遡上高が低いものは、高いものと比較して、地下水位の上昇割合が大きくなっている。そして図一10に示した期間IIIの測点④の変化傾向とよく対応している。以上の点から、期間IVにおいても絶対遡上高がT.P.+2.0m付近まではBMSによる地下水位の低減効果が現れていたと推定される。



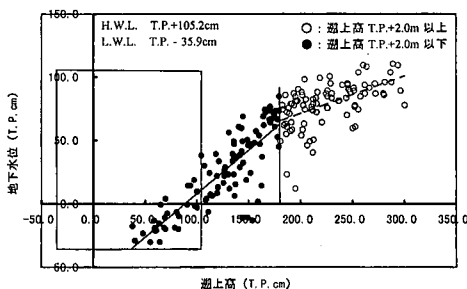
図一9 波の遡上高と地下水位の関係 (期間II, 測点⑤)



図一10 波の遡上高と地下水位の関係 (期間III, 測点④)



図一11 波の遡上高と地下水位の関係 (期間III, 測点⑤)



図一12 波の遡上高と地下水位の関係 (期間IV, 測点④)

(4) 地下水位の沿岸方向の変化

間隙水圧計は、沿岸方向には汀線とほぼ平行に設置されているために、潮位変動に伴う位相差はほぼ同一と判断される。そこで測点④の地下水位を基準として、測点①の地下水位との比較により、地下水位の沿岸方向の姿

化について整理し、図-13にその結果を示す。図中の off の印は BMS の稼働前、on の印は稼働後のデータである。この図によれば、測点④と測点①および②の相関係数はいずれも 0.9 以上と高い相関を示し、正比例の関係が成立することがわかる。一方、BMS の運転後の相関式は、運転前と比較してほぼ平行に約 10 cm 上昇している。このことは、測点④の水位が測点①と比べ、約 10 cm ほど低下していることを示している。これは、集水管の先端と比較して基部の方が地下水位の低下量が大きくなる傾向があることを示している。

(5) 海浜地形変化

図-14 は、1997 年 8 月 8 日と 8 月 19 日における BMS 集水管直上の海浜地盤高の沿岸方向分布である。左端には 4 号突堤が、また右端には 3 号突堤があり、中央部の 85 m 区間に集水管が敷設されている。地形測量を実施する前の 7 月 26 日には図-2 に示したように高波浪が来襲しているため前浜は侵食されたが、その後静穏波の作用によって前浜に土砂が堆積傾向にあった。このため調査区域全体で堆積傾向にあるが、集水管の設置範囲では BMS の稼働によって平均地盤高は約 34 cm 上昇したのに対し、集水管の未設置区間では約 22 cm の上昇にとどまっている。このことから、平均的に見て BMS により海浜地盤高は約 12 cm 上昇したと考えられる。

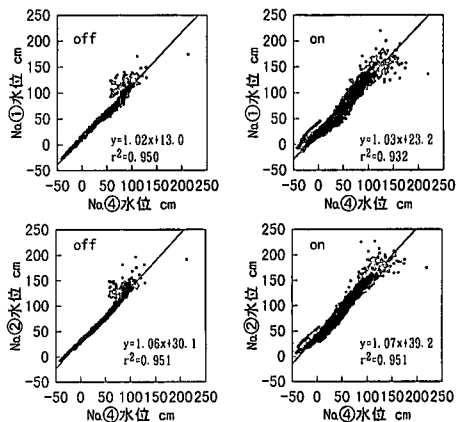


図-13 測点④と測点①、②の地下水位との関係

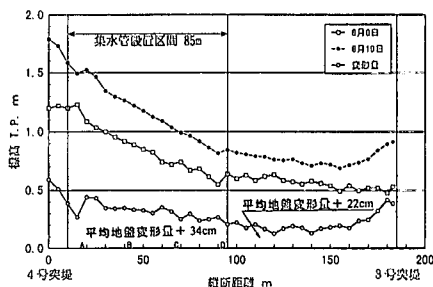


図-14 集水管直上の海浜地盤高の変化

4. 結 論

(1) 1997 年 7 月以降茅ヶ崎海岸において BMS の現地試験を行ったが、観測期間中 7 月 26 日の台風 9 号による高波浪(有義波高約 4 m, 周期 15 s), 8 月 13 日~20 日の長周期波作用下での地下水位変動の観測に成功した。そして波浪が静穏であるために潮位変化のみによる地下水位変動を観察し易い期間 I, 高波浪の来襲期間 II, BMS による地下水位の低下が明瞭に観察された期間 III, 長周期波の来襲期間 IV における地下水位の変動状況が明らかになった。

(2) 岸沖方向に配置された間隙水圧計による地下水位のデータの比較を行ったところ、汀線近傍では波浪に応答した短周期の変動が見られたが、汀線から離れるにしたがい波浪に定常した短周期変動は見られなくなり、潮汐変動モードに対応した地下水位の変化が観察された。この変化は、陸側になるにしたがい振幅が減少し、位相のずれが大きくなることが特徴である。上げ潮時は下げ潮時と比較して時間遅れが小さく、また間隙水圧計の設置地点の水平距離 L (m) の増加と比例して時間遅れ ϕ (min) が増大している。

(3) 長周期波の来襲時には高波浪時と同様著しい地下水位の上昇が確認された。

(4) 波の遡上高を Hunt の式で計算し、それに観測

潮位を加算して絶対遡上高を算定したところ、各測点の地下水位と絶対遡上高の間には線形関係が見られた。また、BMS の稼働時には T.P.+2.0 m 付近までの絶対遡上高に対しては地下水位の低減効果が現れたが、それ以上の範囲では地下水位の低減効果がほぼなくなることが明らかになった。この海岸の前浜勾配が約 1/10 であることを考慮すれば、現在の施設仕様 ($\phi 300$ mm 集水管 2 本) での地下水位低減効果は水平距離で汀線から約 20 m の範囲に遡上する波に対して有効であると考えられる。

謝辞: 科学技術庁防災科学技術研究所平塚実験場の渡部典主任研究官には、貴重な波浪データを提供していただいたことに感謝します。

参 考 文 献

- 柳島慎一・加藤一正・天坂勇治・望月徳雄 (1995): 現地海岸に埋設した透水管の排水流量と前浜地形変化, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 726-730.
- 柳島慎一・金澤 寛・平井宣典・加藤一正・望月徳雄 (1996): ストライプ状透水管の前浜地形変化に及ぼす三次元効果, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 661-665.
- 平野浩一・千田昌平・和田信昭・宇多高明・見附敬三 (1997): 茅ヶ崎海岸における BMS の被災原因とその改良方策, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 981-985.