

台風0709号時における茅ヶ崎中海岸の急激な侵食の再現

Numerical Simulation of Rapid Erosion of Chigasaki-naka Coast Triggered by Storm Waves during Typhoon 0709

宇多高明¹・青島元次²・鮫島 強³・吉岡 敦⁴
古池 鋼⁵・石川仁憲⁶・宮原志帆⁵

Takaaki UDA, Genji AOSHIMA, Tsuyoshi SAMEJIMA, Atsushi YOSHIOKA
Kou FURUIKE, Toshinori ISHIKAWA and Siho MIYAHARA

On September 6, 2007, storm waves associated with Typhoon 0709 attacked the Chigasaki-naka coast in Sagami Bay. Owing to the effect of rough waves with the longest duration of 18 hours, offshore sand transport occurred in the shallow water zone between the shoreline and a depth of 4 m, and sand was deposited forming a bar and trough in the offshore zone. These beach changes were predicted using the BG model proposed by Serizawa *et al.* (2006) incorporating Fukuhama *et al.*'s concept. The 3-D topographic changes around the Chigasaki fishing port and Chigasaki artificial headland were predicted. Predicted results were in good agreement with the measured beach changes.

1. はじめに

2007年9月6日、台風9号が小田原市付近に上陸し、その後日本列島を縦断して大きな被害をもたらした。平塚沖での波浪観測によれば、この時 $H_{1/3}=6.1\text{m}$ ($T_{1/3}=14.2\text{s}$)の高波が相模湾沿岸を襲った。この結果西湘バイパスの道路施設に甚大な被害が生じたが、同時に茅ヶ崎中海岸でも著しい侵食が起きた。侵食原因を調べると、台風9号時の波浪はエネルギーレベルが高いと同時に、異常に長い継続時間を有していたことが特筆される。このような異常波浪による海浜変形は、沿岸漂砂の作用に伴う長期的・広域的地形変化と比べ、はるかに短時間のうちに規模の大きな地形変化をもたらすことから、その予測は防災上極めて重要なテーマである。このことから、本研究ではBGモデル(芹沢ら, 2006)に、福濱ら(2008a,b)の提案した波高に応じた平衡勾配の変化の概念を組み込むことにより新しいモデルを開発し、台風9号による地形変化の再現を行う。

2. 台風時の地形変化

(1) 平面地形変化

研究対象地は、相模湾に面した茅ヶ崎漁港と茅ヶ崎へ

ッドランド(HL)に挟まれた茅ヶ崎中海岸である。この海岸では、台風9号の襲来時期を挟む2007年2月と2008年1月にはNMB測量が行われた。図-1に2007年2月の深浅図、図-2に2007年2月～2008年1月の地形変化量分布を示す。宇多ら(2006, 2008)によれば、この付近では東向きに沿岸漂砂が卓越すること、またこの海岸における波による地形変化の限界水深 h_c は-9mにあることが分

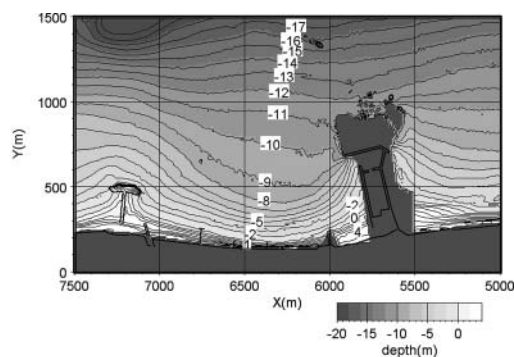


図-1 2007年2月の深浅図

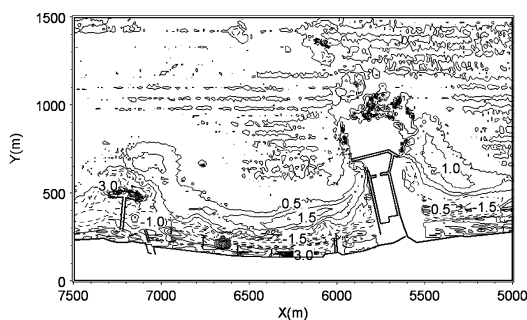


図-2 2007年2月～2008年1月の地形変化量分布

1	正会員	工博	(財)土木研究センター常務理事なぎさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科
2			神奈川県藤沢土木事務所なぎさ港湾部長
3			神奈川県藤沢土木事務所なぎさ港湾課長
4			神奈川県藤沢土木事務所なぎさ港湾部海岸研究室(有)
5			
6	正会員	工修	(財)土木研究センターなぎさ総合研究室主任研究員

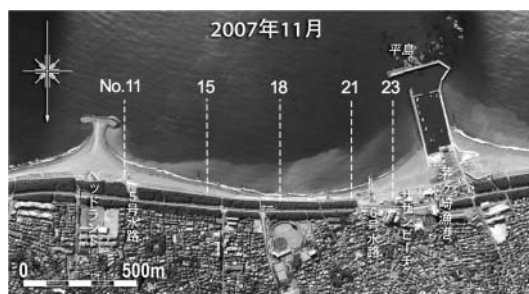


図-3 2007年11月撮影の空中写真

かっている。地形変化量分布によると、高波浪の作用により汀線から-2m付近が帯状に侵食され、侵食土砂がその沖の-4~-6m付近に堆積したことが見てとれる。またHL周辺では著しい局所洗掘が生じ、とくにHLの東側端部で著しい侵食が生じている。さらにHL沖でも堆積が見られ、堆積域が西側から伸びている状況から判断して、HL沖での堆積は西側隣接部から砂が運ばれたためと推定できる。図-2に示す地形変化より、台風9号に伴う地形変化は、主に汀線から-2m付近が侵食され、侵食土砂が-4~-8mに堆積したことで特徴付けられる。

(2) 縦断形変化

台風後の2007年11月撮影の空中写真(図-3)に示すように、HLから茅ヶ崎漁港間にあってほぼ200m間隔で並ぶ測線No.11,15,18,21,23を選んで縦断形の比較を行った(図-4)。No.11では台風前には沖合の $Y=150\sim600$ m間の海底勾配が1/60と緩い縦断形を有していたが、高波浪により沖合の-5~-8m間に大量の土砂が堆積した。また主な地形変化は $h_c=-9$ mまでで収束している。そこで陸域から h_c までの範囲において、2007年3月から10月までの侵食断面積(A_e)と堆積断面積(A_a)を求めると、 $A_e=100\text{m}^2$ 、 $A_a=250\text{m}^2$ となって堆積量のほうが大きく、HL近傍のNo.11では沖向き漂砂に加えて沿岸漂砂の作用もあったことが分かる。HLの西500mにあるNo.15では地形変化量は大きくないが、-3~-7mでは砂が堆積してバーの規模が増大している。中海岸のほぼ中央を通るNo.18では、顕著な縦断形変化が見られ、-2.5~-4m間が掘られ、比高1mのバーが発達した。大部分の侵食土砂はバーの沖側斜面を埋め-8m以浅に堆積した。この場合陸域ではほとんど侵食が起きていないことが注目される。No.21では-2~-4m間が削られ、フラットな海底面が形成されると同時に、大量の土砂が-9m以浅の区域に堆積した。漁港に近接するNo.23では、陸上部で盛土養浜が行われていたが、その土砂が削り取られ-3~-7mに堆積した。以上のように、T0709号時の縦断形変化は、盛土養浜の行われていたNo.23を除けば、いずれも陸上部での地形変化はほとんど生じることがなく、-2m~-4.5mが削り取られ、侵食土砂が沖向きに移動して-9m以浅に堆積すると

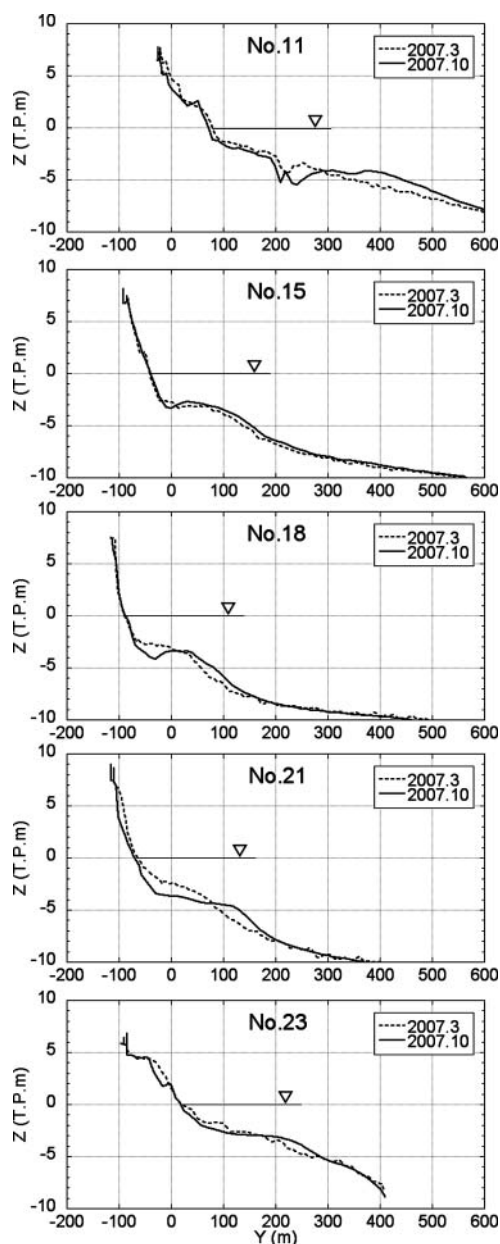


図-4 縦断形変化

同時に東向きの沿岸漂砂の作用も重なったことがわかる。また-9m以深での地形変化は起きていないことも確認された。

(3) 底質粒径の変化

茅ヶ崎中海岸では、台風前には2005年10月に、台風後は2007年10月に、陸上部から-10mまで1m間隔で海底砂のサンプリングが行われた。ここではHLの西隣のNo.11、海岸中央部のNo.18、および茅ヶ崎漁港の東側に近接するNo.23に沿う粒度組成の深さ分布について調べる。図-5は、2005年10月と2007年1月における

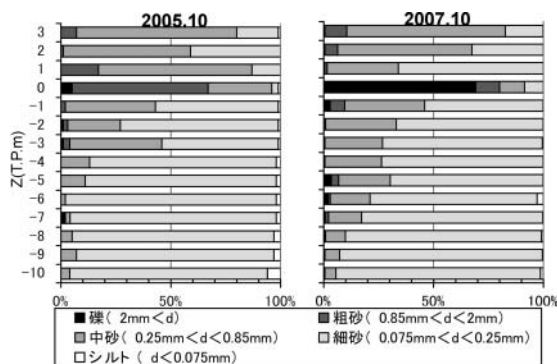


図-5 No.11の粒度組成の水深分布

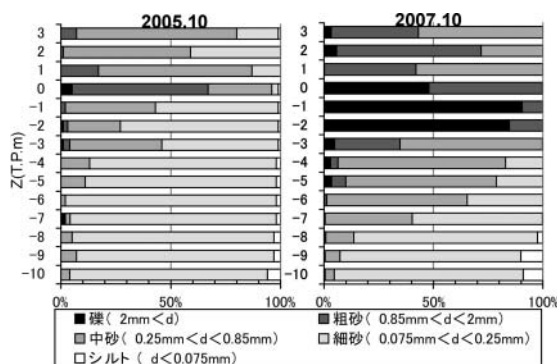


図-6 No.18の粒度組成の水深分布

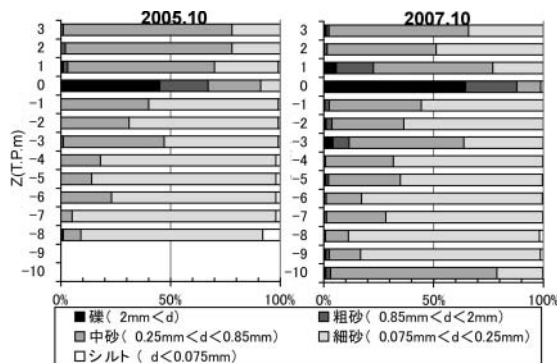


図-7 No.23の粒度組成の水深分布

No.11の粒度組成の水深分布を示す。

図-4に示したように、No.11の土砂堆積は-4m~-8mの水深帯で卓越している。この水深帯の粒度組成は、台風前、細砂の平均含有率が90%であったが、台風後にはそれが79%と下がり、逆に中砂(0.25-0.85mm)の含有率は平均7%から18%まで上昇し、かつ中砂含有率は浅い場所ほど高まるという分布形を有している。一方侵食が起きた-3mでは中砂の含有率が減少しており、土砂収支は別として、浅海域に堆積していた中砂が沿岸漂砂による東向き移動とともに沖合へ移動して沖合ではバーの形成が促進されたことが分かる。

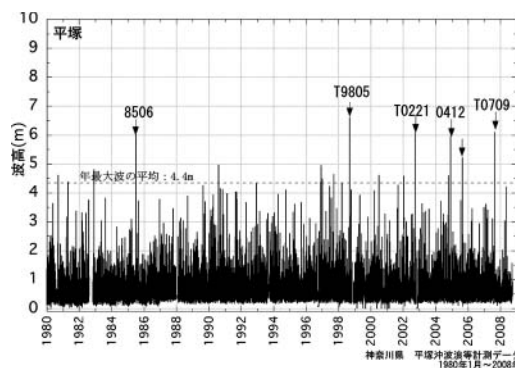


図-8 1980~2008年の有義波高の出現状況

同様に、図-6に示すNo.18の粒度組成の水深分布でも、沖合で堆積が生じた-4m~-8mの水深帯において、細砂と中砂以上の砂の含有率は台風前にそれぞれ49%、49%であったが、台風後には33%、62%となって、沖合の堆積域では細砂含有率が減少し、中砂の含有率が増大している。また中砂含有率は台風前水深方向に指数関数的に減少する分布形を有していたが、沖向き漂砂が起きた後も同様な特性が維持されている。一方、-1m付近では侵食の結果、粗粒化が起き礫の含有率が大きく増大したことも見て取れる。漁港の東側に隣接するNo.23での縦断形変化は他の測線と比較して小さかったが、-3m~-5m間で堆積が生じている。図-7にはNo.23の粒度組成の水深分布を示す。この測線でも細砂含有率は平均60%から56%まで低下すると同時に、中砂含有率は37%から39%までわずかに増加したことが分かる。

以上のように、沿岸方向に離れた3測線とも台風9号時の高波浪の作用により汀線のすぐ沖が侵食され土砂が沖向きに運ばれたが、その場合主に粒径0.25-0.85mmの中砂が運ばれたことが分かった。また高波浪の作用を受けても汀線付近に堆積していた礫は沖へと移動せず、汀線付近に堆積したままであったことも分かる。中海岸中央のNo.18の粒度組成の水深方向分布(図-6)によれば、 $h_c = -9\text{m}$ を境としてそれ以深では台風前からシルトの含有率が高かったが、その状況は台風後にも変化が見られない。海底面が攪乱を受ければシルト分は容易に拡散すると考えられるので、シルトの含有率に大きな変化が見られなかった点は-9m以深の海底面は高波浪の作用があっても安定していたことを意味すると考えられる。

3. 台風0709号時の波浪特性

上述のように台風9号に伴う高波浪の作用により、短時間のうちに特徴的な地形変化が生じた。この原因には台風9号時の波浪が従来の高波浪と条件が異なることが係わると推定される。そこで平塚観測塔における1980~2008年の波浪観測データをもとに、T0809以外の台風とT0709

表-1 各台風の年波高4.4m以上の継続時間

名称	年月日	最大有義波高 $H_{1/3}$ (m)	$H_{1/3}>4.4$ mの 継続時間 (h)
T8013	1980.09.11	4.6	1
T8506	1985.07.01	6.0	4
T9011	1990.08.10	5.0	2
T9720	1997.09.19	4.6	3
T9805	1998.09.15	6.4	8
T0003	2000.07.08	4.6	2
T0221	2002.10.01	6.1	3
南岸低気圧	2004.12.05	5.9	8
T0511	2005.08.25	5.2	4
T0709	2007.09.05	6.1	17

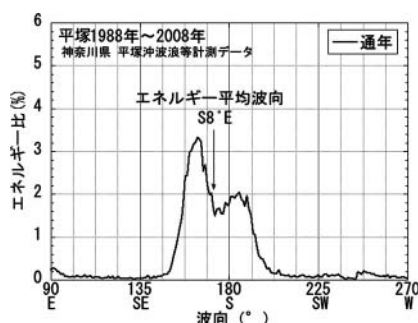


図-9 1°刻みでの波向の出現頻度 (1988～2008年)

との違いを調べた。図-8は、1980～2008年の有義波高の出現状況である。各年の最大有義波高の平均値は $H_{1/3}=4.4$ mなので、この値を明らかに上回る上位10位の有義波高の出現した台風を選んだ。表-1は、台風の発生順に台風名、最大有義波高、および有義波高が最大有義波高の平均値を超えていた時間（継続時間）を示す。有義波高が最も高かったのはT9805の $H_{1/3}=6.4$ mであり、T0709はこれに次ぐ $H_{1/3}=6.1$ mであった。これと比較すると他の台風はいずれも有義波高が相対的に低い。一方、T0709は継続時間が17時間と、他の台風の数時間と比べてはるかに長く、T9805と比較して2倍以上も長い継続時間を有していた。また図-9は、1988～2008年の波向観測結果について四季別に1°刻みで波向の出現頻度を整理したものであるが、春・秋には東寄りの入射が卓越し、冬季には西寄りも卓越して2山ピークとなる。また各季節におけるエネルギー平均波向も示すが、T0709号時観測された波の入射方向S10°Eはこれらの観測値の中央値に近い。これより特別に異常な波向ではなかったと言える。

4. T0709号時における地形変化の再現

(1) BGモデル構築の基本的考え方

福濱ら (2008a, b) は、ある平衡状態を保ってきた海浜に高波浪が作用すると急激な沖向き漂砂が生じ、前浜

表-2 計算条件

計算モデル	BGモデル (芹沢ら, 2006) 回折計算：方向分散法
計算対象区域	茅ヶ崎漁港～ヘッドランド周辺、 沿岸方向2500m×岸沖方向1500m
初期地形	2007年2月 (NMB)
再現対象地形	2008年1月 (NMB)
計算ケース	ケース1 再現計算：T0709来襲波 ケース2 T9805来襲時（過去の最大規模） の地形変化予測
入射波条件	波高 $H=4.4$ m (1980～2008年：28年間における各年の年最大波高の平均値)、波向S10°E ケース1 T0709 (2007年9月6日～7日) 継続時間17h ケース2 T9805 (1998年9月15日～18日) 継続時間8h
潮位条件	M.S.L.±0.0m
メッシュ間隔	$\Delta X = \Delta Y = 10$ m
計算時間間隔	$\Delta t = 0.04$ hr/step
計算ステップ数	1700 step/day ケース1 1200step (17 h相当) ケース2 560step (8 h相当)
粒径,平衡勾配	汀線より陸側 $d_{50}=1.0$ mm 汀線より海側 $d_{50}=0.25$ mm 台風来襲時の平衡勾配 -2.0mより陸側 $\tan \beta = 1/15$ -2.0mより海側 $\tan \beta = 1/150$ 勾配変化点-2m
漂砂の水深方向分布	宇多・河野の分布
波による地形変化の限界水深	$h_c=12$ m
バーム高	$h_R=3$ m
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_x=0.02$ 岸沖漂砂量係数 $K_y/K_x=0.2$ 小笹・Brampton係数： $K_2=1.62K_1$ 重力係数：0.2 安息勾配：陸上1/2、水中1/3 エネルギー逸散率の勾配：0.1 鉛直境界補正の勾配：0.1
境界条件	構造物を固定床とする。 地盤高に下限値を設ける。 下限値は初期地形の-2mとする。 左右端： $q=0$ 、岸沖端： $q=0$
構造物条件	構造物の波高伝達率： 漁港 $K_t=0.0$ 、ヘッドランド $K_t=0.9$

の土砂が削り取られて沖へと移動する現象を砂の持つ平衡勾配の変化から説明し、これをもとに海浜縦断形の変化予測モデルを構築した。すなわち高波浪来襲時には平衡勾配が小さくなり、それに応じて沖向き漂砂が起こるが、再び静穏な条件となって波高が低下すれば平衡勾配が大きくなり、任意地点における局所勾配が平衡勾配より小さいために岸向き漂砂が起きてそのずれをなくす方向に縦断形が復元されると考えるものである。台風9号時、茅ヶ崎中海岸では汀線のすぐ沖合が大きく削られた。台風時の侵食速度が非常に大きいことから、茅ヶ崎中海

岸の海浜変形には福濱らの提案した岸沖漂砂による地形変化が顕著に含まれていると考えられる。そこで以下では福濱ら (2008a, b) のモデルを基本として現象の再現モデルの構築を試みた。

図-4に示したNo.18における縦断形変化によれば、主な地形変化は水面下で起きている。また縦断形変化と底質組成の水深方向分布の比較によれば、侵食は-2m~-4mで集中的に起き、そこに堆積していた中砂成分が沖向きに移動してバーを形成しつつ-3~-8m間で堆積したことが明らかである。よって、高波浪の襲来時、主に中砂からなる土砂の平衡勾配が小さくなり、新たな平衡勾配になるよう水面下の土砂が沖向きに移動したと推定する。

(2) 計算条件

波の場を求めるための回折計算には方向分散法を用い、茅ヶ崎漁港~HL周辺の沿岸方向2500m×岸沖方向1500mを計算対象とした。ケース1はT0709時の再現で継続時間は17時間、ケース2はT9805の継続時間8時間での計算である。台風来襲時には-2mより陸側の平衡勾配が1/15が-2mより沖側の平衡勾配1/150に等しくなると仮定した。なお、実測地形変化では、-8m付近まで緩やかな堆積が起きているが、これを再現する上で h_c を実測値の-9mにすると、 h_c 付近での地形変化がうまく再現できない。そこで沖合の平衡勾配を1/150とした上で、実測値より深い-12mと仮定し、-8m付近での緩やかな堆積が起きるようにした。表-2には計算条件をまとめて示す。

(3) 計算結果

図-1の2007年2月の実測海底地形を与え、台風9号による地形変化予測を行った結果を図-10に示す。図-2に示したように実測地形変化では、汀線のすぐ沖が帯状に侵食され、その砂が-4mから-8m間に堆積しているが、計算結果でもほぼ同様な分布が予測できた。またHLの東端での著しい洗掘などの再現性もかなり高いことが分かる。

台風9号の継続時間は17時間と長かったが、過去最大規模の波はT9805時に生じており、ただその作用時間は8時間と短かった。そこで継続時間の相違が地形変化にもたらす影響を調べるために、T9805号時の波浪を同様に作用させた。この結果を図-11に示す。図-10と似た分布ではあるが、台風9号に比べ地形変化量が小さい結果が得られた。このことから、台風9号は高波浪の継続時間が観測史上最長であったことが原因し、著しい地形変化が生じたことが明らかになった。

4. 結論

- 2007年9月に来襲した台風9号は、波高、波向は過去に例のない特別なものではなかったが、高波浪の継続時間が17時間と長く、これは観測史上最長であった。
- 実測地形変化では、高波浪の来襲時汀線位置は変化

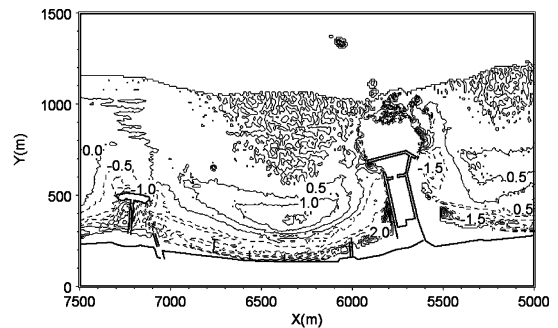


図-10 台風9号による地形変化の再現計算 (地形変化量)

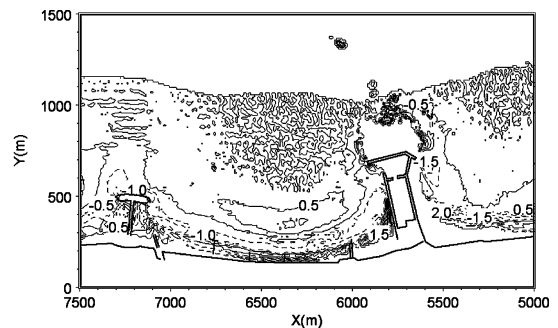


図-11 T9805号時の予測地形変化 (地形変化量)

しなかったが、汀線沖が侵食され土砂が沖合へ運ばれた。その場合、主に中砂成分が沖向きに移動しバーを形成したことが分かった。

- この特徴を、高波浪時には勾配変化点を境に海底勾配が変化するという考え方を取り入れて数値計算を行った結果、台風9号による侵食堆積状況が定量的意味から再現できた。
- 台風9号来襲以前の過去最大規模の台風 (T9805) では、作用時間が短かったため台風9号に比べ地形変化量が小さかったことが計算・実測から明らかになった。

参考文献

- 宇多高明・木下幸夫・山野 巧・吉岡 敦・三波俊郎・岩崎信二・石川仁憲 (2006) : 長期深浅測量データに基づく湘南海岸の海浜変形の実態分析, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.651-655.
- 宇多高明・青島元次・鯨島 強・吉岡 敦・三波俊郎・石川仁憲 (2008) : 粒径を考慮した土砂収支検討-湘南海岸の例, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.726-730.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼 (2006) : Bagnold概念に基づく海浜変形モデル, 土木学会論文集B, Vol. 62, No.4, pp.330-347.
- 福濱 茂・宇多高明・山田浩次・芹沢真澄・石川仁憲 (2008a) : 前浜勾配と汀線の短期変動の予測モデル, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.1237-1242.
- Fukushima, M., T. Uda, K. Yamada, M. Serizawa and T. Ishikawa (2008b) : Model for predicting short-term variation of foreshore slope and shoreline applying concept of equilibrium slope, Proc. 31st ICCE, pp.1839-1850.