

T0709号時の高波浪による西湘海岸の急変形の再現計算

Numerical Simulation of Rapid Erosion of Seisho Coast Triggered by Storm Waves during Typhoon 0709

宇多高明¹・丸山将吾²・高野弘之³・芹沢真澄⁴・三波俊郎⁵・石川仁憲⁶・宮原志帆⁵

Takaaki UDA, Shogo MARUYAMA, Hiroyuki TAKANO, Masumi SERIZAWA, Toshiro SAN-NAMI
Toshinori ISHIKAWA and Shiho MIYAHARA

On September 6, 2007, the Seisho Bypass extending along the Seisho coast was severely damaged over a length of 1.1 km owing to storm waves associated with Typhoon 0709, resulting in roads being closed to traffic for urgent repairs. During the typhoon, severe beach erosion occurred owing to both strong offshore sand transport and westward longshore sand transport by storm waves, and the foreshore was rapidly narrowed. However, the foreshore was recovered except the damaged area of the highway as a result of the effect of normal waves. These beach changes were predicted using the contour-line-change model incorporating Fukuhamu *et al.*'s concept. The predicted results were in good agreement with the measured beach changes.

1. はじめに

2007年9月7日、八丈島沖から北上してきた台風9号が神奈川県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、この台風時 $H_{1/3}=6.1\text{m}$ ($T_{1/3}=14.2\text{s}$)と、大磯・二宮地先の30年確率波相当の高波が相模湾沿岸を襲った。この結果、図-1に示す西湘バイパス大磯IC付近において延長約1kmにわたって前浜が消失して擁壁が倒壊し、道路施設に甚大な被害をもたらした(宇多ら, 2008; Uda *et al.*, 2008)。台風前後の汀線と縦断形変化データの比較によれば、台風時の高波浪の作用により急激な冲向き漂砂が生じると同時に、西向きの沿岸漂砂も発生し、これらによって著しい侵食が起きたと推定される。しかし台風後の通常波浪の作用により、沖に運ばれた土砂のかなり多くの部分が再び汀線へと打ち上げられた。このような高波による急激な冲向き漂砂の発生と、その後の通常波浪による前浜の回復は浜幅の大きな変動をもたらすことから、今後の西湘バイパスや西湘海岸の保全上で極めて重要な意味を持つ。しかしながら従来この種の海浜変形については実用レベルでの予測は困難であった。本研究では、二次元海浜変形について福濱ら(2008)が提案した、波高に応じた平衡勾配の変化の概念を芹沢ら(2002)の等深線変化モデルに組み込み、3次元海浜変形モデルに拡張することにより現象再現を行った。

2. 歪み空中写真に見る被災箇所周辺の海岸状況の変化

被災区間周辺の長期的海浜変形を把握するために、まず1947年11月から西湘バイパス被災後の2007年11月までに撮影された空中写真より、図-1に示す矩形区域を切り出して1/2,500の都市計画図に合わせてオルソ補正し、各年のモザイク写真を作成した。次に、これらの写真の縦横比を変え、沿岸方向距離を1/5に圧縮した画像を作成した(図-2(a)~2(f))。1947年11月では、幅約80mの海浜がほぼ連続的に伸びていた。また後に西湘バイパスの銀波橋が立地する付近(図の矢印)では海岸線に緩い突起が見られた。1985年8月7日では西湘バイパスがほぼ完成し、1999年12月7日までには二宮漁港の防波堤が伸ばされた。しかしこの時点では金波橋と二宮漁港間での汀線は1985年とそれほど大きな変化が見られなかった。2006年1月7日には、二宮漁港を境とした東西の汀線位置のずれがみられ、漁港西側と比較して東側の汀線後退量が大きくなった。とくに銀波橋と二宮漁港の間では前浜がほとんど消失した。

T0709襲来から1週間後の9月13日では、葛川河口付近で前浜が狭まると同時に銀波橋・金波橋付近では前浜が完全に消失し、倒壊した道路施設が直接波に曝された。これと対照的に、二宮漁港の防波堤の東側区域では2006年1月7日と比較して三角形の前浜が広がった。これらの点は、T0709襲来時、葛川河口付近ではその東側にある岩盤により西向きの沿岸漂砂が阻止されて西側隣接

- | | | |
|-------|----|---|
| 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 | | 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所海岸課長 |
| 3 | | 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所海岸課 |
| 4 正会員 | | 海岸研究室(有) |
| 5 | | 海岸研究室(有) |
| 6 正会員 | 工修 | (財)土木研究センターなぎさ総合研究室 |

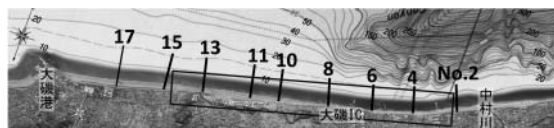


図-1 解析対象区域 (空中写真: 2008年1月4日撮影)

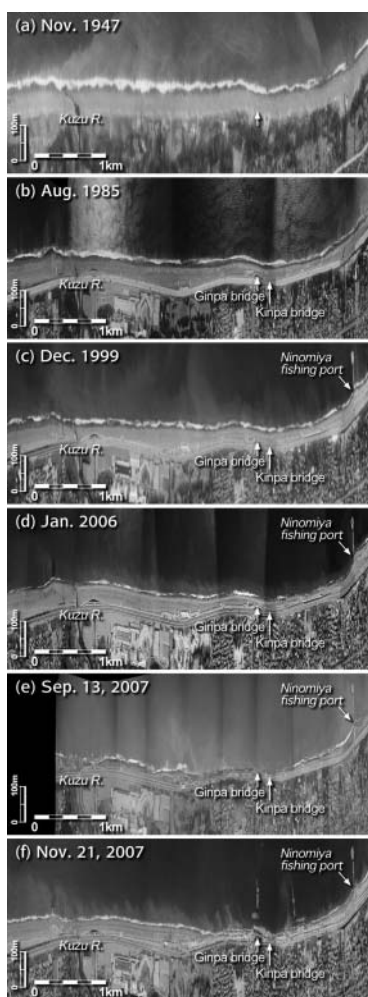


図-2 沿岸方向距離を1/5に圧縮した空中写真画像

部が侵食され、また二宮漁港では防波堤が西向きの沿岸漂砂を阻止した結果、その東側で前浜が広がったと解釈できる。2007年11月21日では、被災区域を除く大部分の区域では岸向き漂砂により前浜が広がった。金波橋付近では道路施設がもともと海側に突き出ていたが、こうした条件のもとで高波の作用により急速な沖向き漂砂が生じた結果道路施設が被災したと考えられる。

図-3は、2006年1月7日撮影の空中写真から求めた汀線を基準とした被災区間周辺の短期的汀線変化を示す。なお、9月13日の空中写真は被災箇所をみの撮影であり、大磯港～葛川間の画像がないので、11月21日撮影の空中写真から識別されるバーム陸端位置（標高約1.5m）から前浜勾配（1/8）の傾斜面を考え、台風9号襲来直後のバーム形成前の汀線位置を推定した。葛川河口付近では9月13日には岩盤により沿岸漂砂が阻止された結果汀線が楔状に後退していたが、11月21日までに汀線は大きく前進した。9月13日に汀線位置が読み取れる $X=4.1\sim5.3$ km区

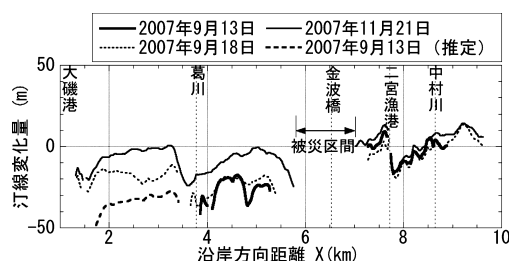


図-3 対象区域の短期的汀線変化（2006年1月7日基準）

間において平均汀線変化量を求めると、9月13日では-30m、9月18日では-21m、11月21日では-6mとなり、汀線は急速に前進したことが分かる。葛川河口から大磯港の間でも葛川河口の西側と同様2007年11月までに汀線が大きく前進した。

現況では、西側は被災区間により、東側は大磯港の防波堤によって沿岸漂砂が阻止されているので、被災区間と大磯港の間における前浜の拡大は岸向き漂砂に起因する以外考えられない。

3. 被災前後の海浜縦断形の変化

台風9号襲来前後における海浜縦断形の変化を縦断測量データにより調べた。この区域では、台風襲来を挟んで2007年3月と10月に、また通常波浪作用後の2008年3月にも測量が行われた。測線配置は図-1に示すように二宮漁港西側直近のNo.2から大磯港の西側隣接部に位置するNo.17までである。図-4は、台風前の2007年3月と台風直後の2007年10月の縦断形変化である。また2時期の縦断形変化より沖合で地形変化が収束している点を読み取り、その水深を波による地形変化の限界水深 h_c として示す。No.15では高波浪により海浜が大きく削られ、土砂が-9mまで落ち込んだ。被災区域に近づいたNo.10でも-3m以浅が大きく削り取られ、沖合の-3～-9m間に堆積している。西湘バイパスの被災区間に位置するNo.6では、災害工事が行われているため陸域の変化は明らかでないが、-4m以深では薄い堆積が見られる。ここでは省略するが、二宮漁港の西側のNo.2では著しい縦断形変化は見られなかった。以上のように、高波浪時の縦断形変化は、測線No.15、No.10に見られたように-3m以浅が侵食され、-3～-9m付近に堆積するという沖向き漂砂により特徴付けられる。また大磯港と被災区間の沖合で緩勾配の海底面が広がる区域では、縦断形変化の起こる沖合限界、すなわち波による地形変化の限界水深 h_c はほぼ-9mにあることも分かる。結局、これらの測線では台風後の通常波浪の作用では-3～-6m間が削られ、汀線へと砂礫が打ち上げられたことが分かる。一方、被災区間では仮設護岸のり先水深が-5mと深く、このため通常波浪では岸向きの漂砂は起きなかった。

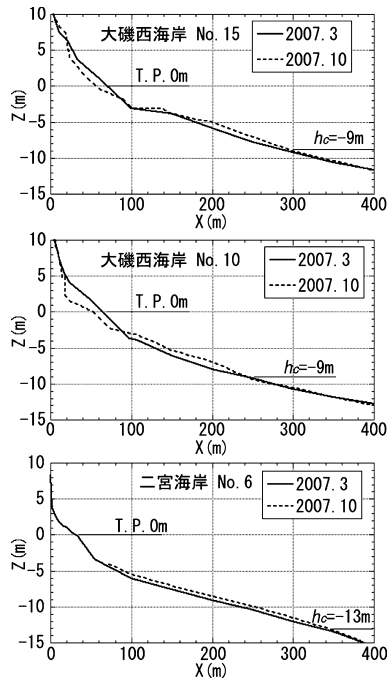


図-4 測線No.15, No.10, No.6における縦断形の変化

4. 地形変化予測

(1) モデル化の基本

実態データによれば、台風9号による高波浪時には礫を含む前浜が不安定となり、土砂が沖向きに移動したと考えられる。しかしその後の通常波浪の作用により沖へ移動した砂礫は再び岸向きに移動し前浜が復元された。福濱ら（2008）は、高波浪来襲時には平衡勾配が小さくなるため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れば平衡勾配が小さくなり、平衡状態からのずれに対する復元力が働いてもとの縦断形が復元されると考えて縦断形変化予測モデルを作成した。台風9号時の海浜変形でもこれと同様な現象が見られたことから、本研究では福濱ら（2008）の手法を等深線変化モデル（芹沢ら，2002）に組み込んで3次元海浜変形予測モデルを構築した。

(2) 計算条件

大磯港から二宮漁港まで6.5kmの海岸線を対象とし、図-1に示したように大磯港付近に原点を設け、そこから二宮漁港付近までの8.0kmの海岸線を計算範囲とした。初期地形の設定には展開座標を用い、曲線状の海岸線を有する来襲前の地形を直線平行等深線地形にモデル化した。図-5は、2007年3月の測量データをもとに図-1に示す8測線の縦断形について汀線位置を重ねて表示したものである。これによれば、陸上部から-4mまでの勾配はほぼ1/8であるのに対し、-4～-9mでは一例を除いてほぼ1/30である。

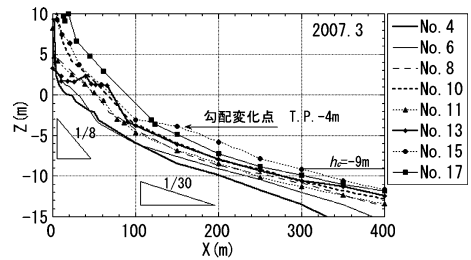


図-5 縦断形の重ね合わせ

そこで-4m以浅における初期勾配1/8が、高波浪の作用により沖合の1/30勾配と等しい平衡勾配まで減少したと仮定する。また台風後の通常波浪の襲来時には-4m以浅での平衡勾配が再び1/8と急になったと仮定する。境界条件として、東端の大磯港では流出土砂量を0とし、また西端では二宮漁港の防波堤の先端水深が約4mと浅いことから漂砂通過境界とした。また道路護岸や海岸に露出した岩盤は直立護岸とみなした。また、被災後西湘バイパスでは復旧工事が急速に行われた。銀波・金波橋では2008年1月当時既に仮設の消波工や搬入路が設置され、これらの施設が海側に突出していた。そこで仮設道路などの構造物条件の変化も考慮した。このほか入射波にはエネルギー平均波を与え、高波浪時は擾乱が始まった2007年9月4日12時～9月8日24時の平塚観測塔における実測値より算出した碎波波高 $H_b=3.0\text{m}$ ($T=9.1\text{s}$)を与えた。また波向については、波浮での観測値をもとに波浪変形計算により対象海岸前面海域での波向を算出したところ、海岸線に対して 10° 東側からの入射波であったこと（宇多ら，2008）から碎波波向を $\theta_w=10^\circ$ とした。一方、台風後の復元計算では、来襲後の9月9日～11月21日の実測値より $H_b=0.61\text{m}$ ($T=5.5\text{s}$)とした。この場合、その後の現地踏査で被災区間1.1kmを除く全域ではほぼ同様な形で前浜が復元していたことから、波向は海岸線に対して直角方向とした。また波による地形変化の限界水深 h_c は9m、バーム高 h_R は3mとした。沿岸・岸沖漂砂の水深方向分布には宇多・河野（1996）の3次式を与えた。表-1には計算条件を示す。

(3) 計算結果

図-6 (a) は初期海浜形状を示す。展開座標を用いているため、汀線は沿岸座標X軸と平行である。図には西湘バイパスの海側端の位置も示す。西湘バイパスから汀線までの岸沖距離を浜幅と定義すると、被災前の浜幅は大磯近傍では約100mと広がったが、被災区間周辺では初期状態でほとんど前浜がなかった。この状態で $H_b=3.0\text{m}$ の波を作用させ、高波浪の作用に伴い-4m以浅の平衡勾配が初期の1/8から1/30と緩くなったとした場合の計算結果を図-6 (b) に示す。前浜土砂が削り取られ、その土砂が沖合に堆積する。その後再び通常波浪の作用が起こ

表-1 計算条件

数値計算手法	等深線変化モデル (芹沢ら, 2002)
計算対象範囲	大磯港~二宮漁港: 6.5km (計算範囲8.0km)
計算ケース	再現1: 台風9号来襲時の侵食 (来襲前→9月13日) 再現2: 台風後の復元 (2007年9月13日→11月21日, 復旧仮設考慮)
計算ステップ	$\Delta t = 0.01\text{hr}$
予測期間	再現1: 4.5days 再現2: 83days
初期地形	再現1: 来襲前の地形を展開座標でモデル化した直線平行等深線 (-4m以浅1/8, -4m以深1/30) 再現2: 再現1の計算結果
入射波条件	波高は平塚観測塔の実測データより算出した期間中のエネルギー平均波, 波向は波浪変形計算より設定 再現1: 台風9号来襲時 (9/4 12:00-9/8 24:00) $H_b=3.0\text{m}$, 波向 $\theta_w=10^\circ$ 再現2: 台風後の復元 (9/9-11/21) $H_b=0.61\text{m}$, 波向 $\theta_w=0^\circ$
平衡勾配	再現1: -4m以浅: $\tan \beta_c=1/30$, -4m以深: $\tan \beta_c=1/30$ 再現2: -4m以浅: $\tan \beta_c=1/8$, -4m以深: $\tan \beta_c=1/30$
漂砂量係数	再現1: 沿岸漂砂量係数 $K_l=0.4$, 岸沖漂砂量係数 $K_z=0.05K_l$, 再現2: 沿岸漂砂量係数 $K_l=0.32$, 岸沖漂砂量係数 $K_z=0.05K_l$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	宇多・河野 (1996) の3次式
限界水深・バーム高	波による地形変化の限界水深 $h_c=-9\text{m}$, バーム高 $h_B=3\text{m}$
計算等深線範囲	$z=+3.5\text{m}\sim-9.5\text{m}$
土砂落ち込みの限界勾配	陸上: 1/2, 水中: 1/2
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=50\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z=1\text{m}$
境界条件	大磯港: $q_y=0$, 二宮漁港: 漂砂通過境界岸沖端: $q_z=0$

り, 平衡勾配が1/8となったとして83日間波を作用させた結果が図-6 (c) である. 高波浪時に沖へ運ばれた砂が通常波浪の作用に伴い岸向きに移動し, 再び前浜が広がることが分かる.

図-7 (a) は, 2007年5月基準での9月13日までの実測・予測汀線変化を示す. 被災区間では前浜が完全に消失して道路擁壁が露出した状況は実測と予測でよく一致している. 葛川河口の東側にある岩盤では東西で汀線位置にずれがあり, 西側の汀線が後退するという結果が予測されているのに対し, 実測ではその変化が小さい. しかし2007年10月8日に岩盤の西側を向いて撮影した写真 (図-8) によれば, 岩盤の西側では台風直後著しい侵食を受けて砂浜が消失していたことから, 実測では砂浜の下部にあった岩盤が露出したため汀線変化量が小さめに出たと考えられる. また大磯港の西側隣接域では宇多ら (2008) が示したように, 台風直後汀線が大きく後退したことが分かっておりこれとも符号する. 以上より, 高波浪による海浜変形については平衡勾配が緩くなること

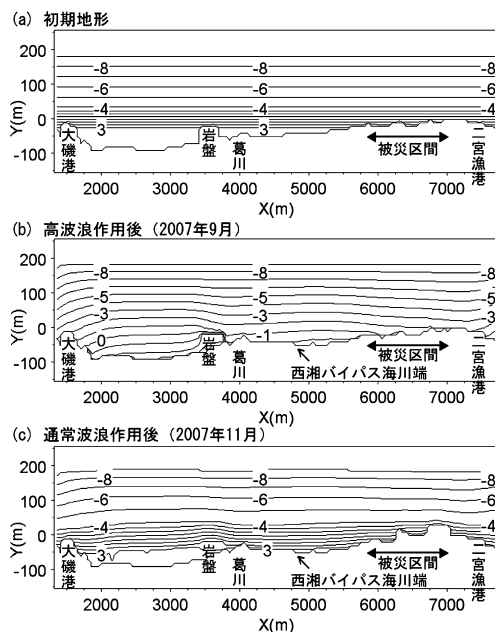


図-6 予測された等深線変化

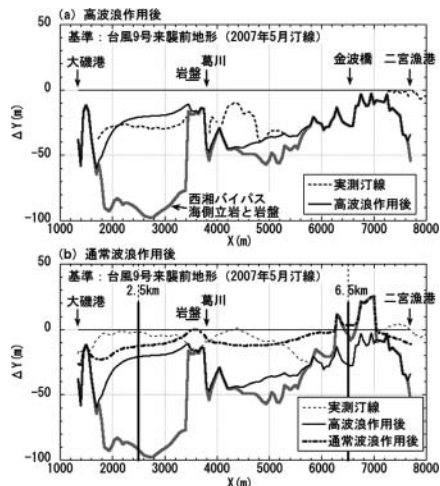


図-7 実測・予測汀線形状の比較

に起因して沖向き漂砂が生じると同時に, 西向きの沿岸漂砂も起きて地形変化が生じたと考えられる.

図-7 (b) は通常波浪作用後の汀線変化である. 高波浪作用直後に後退した汀線が再び前進し, 2007年11月21日の実測汀線とほぼ近いレベルまで回復している. 葛川河口の東側にある岩盤では, 台風直後には岩が大きく露出したが, 通常波浪の作用後の2007年11月20日には図-9のように砂が堆積し, 汀線が前進したことが確認されており, 図-7 (b) の汀線変化と対応している. なお, 上記再現計算のうち, 後者の汀線回復計算では, 前者と同じ係数値を用いた場合過大な結果を与えることから, 漂砂量係数を前者よりも2割低減することで再現性を高め



図-8 高波浪襲来直後における葛川東側の岩盤付近の状況
(2007年10月8日)



図-9 通常波浪作用後における葛川東側の岩盤付近の状況
(2007年11月20日)

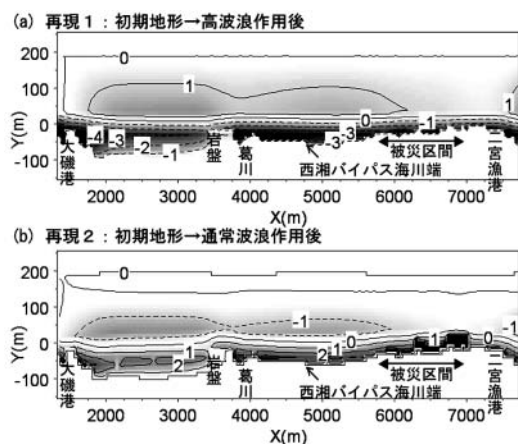


図-10 水深変化量の平面分布

た。福濱らのモデルでも、高波浪による侵食時とその後の堆積時とで係数を変えて前者に大きい係数値を与えることで短期汀線変動の再現性が確保されているが、本研究でも同様な傾向となった。

図-10は地形変化量の平面分布である。高波浪作用時には前浜が大きく削り取られ、土砂が沖合の広い区域に堆積する。地形変化量は汀線付近で最大で、陸側には地形変化量が減少するという分布となる。一方、通常波浪が作用すると岸向き移動が起こり、大部分の区域では前浜の復元が進む。しかし、被災区域では復旧施設が突き出ているため地盤の再上昇が抑えられている。

図-11には図-7に示すX=2.5と6.5km断面の縦断形変化を示す。これらは図-4に示したNo.15, 6に対応する。なお西湘バイパスの擁壁は鉛直壁とし、初期の前浜高はバーム高3mと同一としている。X=2.5km断面では、高波浪の襲来によって前浜が著しく侵食され、侵食土砂の大

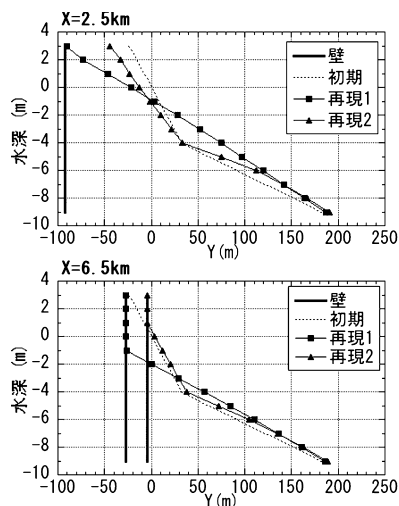


図-11 高波浪・通常波浪の作用による縦断形の変化

部分は冲向きに運ばれ緩勾配の海底面が形成された。その後通常波浪が作用すると前浜が再び復元している。被災区域にあるX=6.5km断面では、西湘バイパスが海側へ出ているため、当初から浜幅が狭かったため高波浪の襲来によって道路の擁壁が大きく露出したが、復旧工事により仮設道路ができた結果、通常波浪の作用があっても浜が復元しにくくなっている。

5. まとめ

西湘海岸では、台風9号に伴う高波浪によって強い冲向き漂砂と西向き沿岸漂砂が生じて前浜が消失したが、その後の通常波浪の作用により、被災区間を除けば失われた前浜が復元したことが現地写真、空中写真および縦断測量結果によって明らかにされた。またこれらの観察結果が波浪条件に応じて平衡勾配の変化を考慮した等深線変化モデルによりうまく再現できた。ただ今回の予測計算では高波浪および通常波浪の作用に伴う地形変化の履歴が十分に観測されていないことから、各種係数について十分な一般性を持って定めるまでには至っていない。これらの点は今後の課題である。

参考文献

- 宇多高明・今井雄二・三波俊郎・石川仁憲・古池 鋼・芹沢真澄 (2008) : 西湘バイパスの被災原因の検討, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.1285-1290.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之 (2002) : 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 496-500.
- 福濱方哉・宇多高明・山田浩次・芹沢真澄・石川仁憲 (2008) : 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.
- Uda, T., T. San-nami and T. Ishikawa (2008): Damage to Seisho Bypass due to storm waves during Typhoon 0709, Jour. Disaster Res., Vol. 3, No. 5. pp.342-350.