

偶発波浪荷重による被害例とその特性

Example and Characteristic of Disaster induced by Accidental Wave Load

平石哲也¹・平山克也¹・加島寛章²・春尾和人³・宮里一郎⁴

Tetsuya HIRAISHI, Katsuya HIRAYAMA, Hiroaki KASHIMA,
Kazuto HARUO and Ichiro MIYAZATO

The performance design code has been proposed in the coastal and harbor structure construction. In the new design code, the design wave with a return period employed in the former design method is defined as the variable wave load. Meanwhile the accidental wave load that occurs in a low probability but causes a serious damage is considered in the new design code to secure the safety and reparability of the structures. The specification of accidental wave load, however, is not clearly indicated in the new code. This paper describes the characteristics of structure damages caused by the recent stormy waves with long period swells and proposes the application of such waves as the accidental wave load. The long period swell becomes the critical load when the breakwaters are constructed in the surf zone.

1. はじめに

平成19年7月の港湾構造物の設計指針の改訂（日本港湾協会, 2007）では, 性能設計の導入が大きな要素となっている。性能設計の主な目的は, 照査すべき設計状態を明確に定義して, 想定されるモードで構造物が変形をしても, 危険な限界状態に達しないことを定量的に評価することである。これまでの設計に用いる波浪荷重は確率的に発生頻度が高い変動荷重に相当し, 照査項目は, 使用性を保つことができる極めて小さい限界値をシステム破壊確率が越えないことである。これに対し, レベル2地震動に対応するような低頻度であるが最も危険な波浪は「省令」の中で偶発波浪荷重として設定されている。さらに, 変動波浪荷重に対しては施設の使用性と供用性を照査すればよいが, 人命, 財産および社会経済活動に重大な影響を及ぼす施設や構成部材の要求性能において, 偶発波浪荷重に対する施設の安全性と修復性を照査すべきことが省令として定められている。すなわち, その施設に防護された水域や後背地の重要性が高い場合には, 変動波浪荷重に対して使用性（越波量や限界値以下で静穏度が目標の機能を果たす等）を照査するとともに, 偶発波浪荷重に対する施設の破壊状態を予測し, 破壊しても人の安全が確保でき, 短時間で修復できることを照査できる施設設計が期待されている。しかし, 偶発波浪荷重の定義は明確になされておらず, 「解説」中で, 該当海域で発生し得る波の中で施設に対して最

も厳しくなる波浪あるいは再現期間100年以上の波浪を適切に設定するただけ述べられているのみで, 具体的な定義はなされておらず, 早急な検討が必要になっている。

一方, 近年, 台風や低気圧に伴う高波による護岸崩壊や海岸堤防の破壊が頻発するようになり, その原因の一つとして設計を越える波浪荷重が挙げられ（平山ら, 2005）ている。また, 施設の破壊は, 設計波を越える波浪の作用だけでなく, 消波工の沈下や基礎の洗掘など多くの要因が複雑に重なって生じており, 当該海域の施設に対する危険な波浪状態を早急に精査しておく必要がある。そこで, 本研究では最近の護岸や防波堤の被災事例をもとに, 波の周期が設計波より長くなった場合（長周期うねり）を偶発波浪荷重の一つの例として考え, 波力が設計値より増大する危険性があることを示した。

2. 波浪統計から見た波候変化

(1) 計算手法

まず, 近年の長期波候の変化について調べるため, NOWPHAS 観測網（永井, 2002）で整理された波浪観測データによる確率波高の変化を調べた。すなわち1970～1989, 1990～2000および1990～2005年の異なる観測期間の年最大値資料と極大値資料を用いて計算した確率波高を比較し, 最近の観測データを用いると確率波高が変化するかどうかを調べた。また確率年を増加させた場合（偶発波浪荷重として100年確率波を用いる場合）の波高変化を調べた。計算に用いた観測点は比較的長期の観測値が揃っている青森県むつ小川原港, 山形県酒田港, 和歌山県潮岬, 沖縄県那覇港とし, それぞれ東北地方の太平洋側, 日本海側, 南西日本, 沖縄地方を代表する。各観測点の位置は図-1の黒丸に示す。

- 1 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・工部
- 2 正 会 員 工修 (独法)港湾空港技術研究所海洋・工部
- 3 (独法)港湾空港技術研究所海洋・工部
- 4 正 会 員 (独法)港湾空港技術研究所海洋・工部

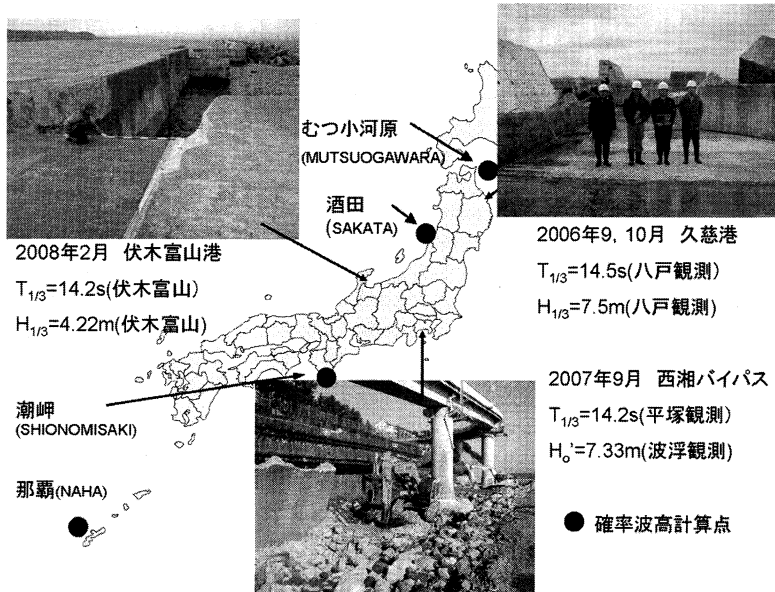


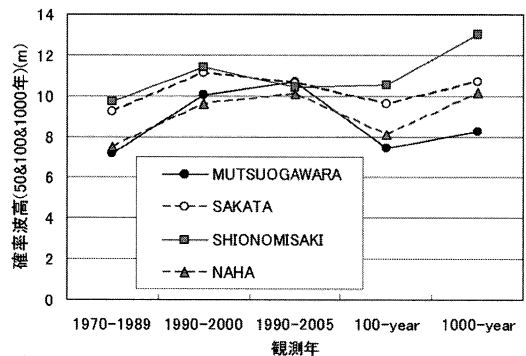
図-1 確率波を計算した観測点と近年の被災地

あてはめに用いる極値分布関数は、Gumbel 関数および Weibull 関数（形状母数 $k=0.75, 0.85, 1.00, 1.10, 1.25, 1.50, 2.00$ ）の7種類とし、最も適合する分布関数を選択した。分布関数が決まると、再現期間 R 年に応じた確率波高が計算できる（たとえば土木学会海岸工学委員会，2000）。

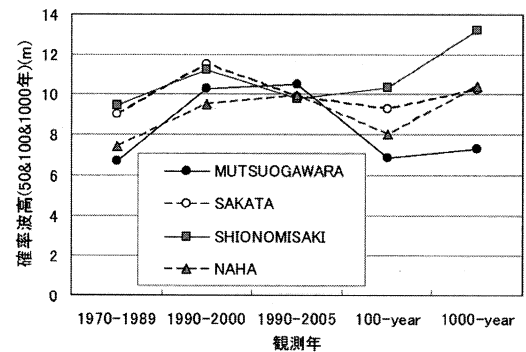
(2) 計算の結果

図-2 に観測期間の異なる(a)年最大波資料および(b)極大値資料を用いて確率波高を求めた例を示す。図の左側の3つの波高は50年確率波高である。1970～1989年の資料を用いた確率波高よりも、1990～2000あるいは1990～2005年の資料を用いた確率波高はいずれの観測点でも大きくなる。すなわち最近の観測値を用いると確率波高は増加する傾向にある。ほぼ同じ長さの観測期間を用いた1970～1989と1990～2005年の確率波だけで比較しても、酒田港と潮岬の比較で、確率波高は1m程度増加する。那覇港とむつ小川原港では、その差が大きく2m以上の波高増大が計算できる。図の100-year および1000-year は1970～1989年の観測値から100年および1000年確率波を求めた例である。100年確率波は同一期間の資料を用いた50年確率波高よりも当然大きい、近年の資料を用いた50年確率波高よりも小さくなる。むつ小川原を除くと1000年確率波高が近年の資料のみを用いた50年確率波高とほぼ対応している。この傾向は年最大値資料でも極大値資料の場合でもほぼ同様である。

したがって確率年を大きくしても近年の波高増大は説明できない。気象の長期的なトレンドの影響もあるので、最



(a) 年最大波資料



(b) 極大波資料

図-2 観測期間の相違による確率波高の変化

表-1 被災波の整理

地点	被災時	被災概要	作用した波	建設時の設定
久慈港半崎地区護岸	2006年9月5～6日 2006年10月7日	半崎地区護岸が30mにわたって損壊・転倒し、背後の工場に海水が浸入した。護岸の被災が進み、全長250m中、188mが損傷した。湾口防波堤北堤が3箇被災。	9月6日0:00, $H_{1/3}=4.5\text{m}$, $T_{1/3}=16\text{s}$ (島の腰漁港) 10月7日17:00, $H_{1/3}=8.12\text{m}$, $T_{1/3}=12.4\text{s}$ (八戸港)	2003年改良時 $H_0=6.0\text{m}$, $T_{1/3}=12.6\text{s}$
西湘バイパス	2007年9月6～7日	約1.0kmにわたって砂浜が急激に侵食され、道路擁壁直下の土砂が吸い出されたことにより擁壁が倒壊した。	9月6日 $H_{1/3}=8.31\text{m}$ (波浮港), $T_{1/3}=14.2\text{s}$ (平塚)。	(1969年完成時) $H_0=6.2\text{m}$, $T=11\text{s}$
伏木富山港	2008年2月24日	伏木富山港北防波堤の約800m区間でケーソンの滑動および被覆・消波ブロックの沈下が生じた。	2月24日14:00 $H_{1/3}=4.22\text{m}$, $T_{1/3}=14.2\text{s}$	(B区間) $H_{1/3}=4.80\text{m}$, $T_{1/3}=12.0\text{s}$

近の観測資料だけで確率波高を計算し、ただちに設計波を見直すことは難しい。ただし、これから設計を行う港湾構造物については、地球温暖化の進行とともに近年顕著に現れる異常波を偶発波浪荷重として考慮し、単に確率年を変化させるだけでなく、構造物の安定に最も危険な作用を精査しておく必要がある。

3. 最近の高波被災の特徴

(1) 事例の収集

近年の被害事例として①岩手県久慈港半崎地区護岸(2006年9月被災)②神奈川県湘南海岸での道路護岸(2007年9月)③富山県伏木富山港防波堤(2008年2月)に注目し、設計波周期を越える長周期のうねりが波力増大や平均水位上昇を引き起こし、被災を生じたことを示す。前出の図-1に被害状況を示す。

岩手県久慈港では、2006年9月5日に台風12号通過に伴う高波が久慈港半崎地区に襲来し、護岸からの越波で背後の北日本造船久慈工場に浸水被害をもたらした。また護岸パラペット部分が2カ所で倒壊し、消波ブロック等も打ち上げられた。当時の波浪は隣接する島の腰漁港での観測値で、最大有義波高 $H_{1/3}=4.5\text{m}$, $T_{1/3}=16\text{s}$ (6日0:00) であった。写真-1は護岸の被災状況を示す。

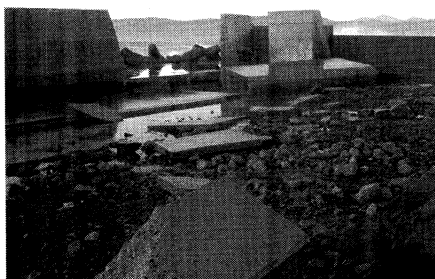


写真-1 岩手県久慈港半崎地区の護岸被害(2006年9月6日、久慈市提供)

久慈港は、2006年10月の台風16, 17号から変化した低気圧によって再度被災し、半崎地区護岸だけでなく沖合の津

波防波堤北堤のケーソン2箇の上部工が破壊され、上部斜面堤1箇が滑動を生じた。被災時の近隣の八戸港の観測値は、 $H_{1/3}=8.12\text{m}$, $T_{1/3}=12.4\text{s}$ であった。

神奈川県南部の湘南海岸に位置する西湘バイパスは、2007年9月7日に小田原に上陸した台風9号により延長1.1kmにわたって被災し、道路地盤を支える重力式擁壁が倒壊・流出した(国土交通省横浜国道事務所, 2008)。被災原因の調査と道路復旧方針の検討について助言を行った「西湘バイパス構造物崩落に関する調査検討委員会」による主な被災の要因として、当初の設計を越える波の来襲に加えて、周期の長い水位変動、海底地形変化による波の集中、海岸の侵食などの複合的な原因があげられている。神奈川県平塚での被災時の観測周期は $T_{1/3}=14.2\text{s}$ であり、擁壁完成当時(1969)に想定されていた波周期 $T=11\text{s}$ を上回るものであった。

富山湾沿岸では、2008年2月24日に“寄り回り波”が発達し、伏木地区の防波堤(1500m)が855mにわたって被災を受けるとともに、海岸の護岸緑地が越波により浸食された。また黒部川河口近くの入善町芦崎地区では、海岸堤防(D.L.+5.7m)を越波した水塊が背後の民家を破壊した。なお、水深20mの富山地区波浪観測点では24日14:00に、既往最大 $H_{1/3}=9.92\text{m}$, $T_{1/3}=16.2\text{s}$ を記録している(永井ら, 2008)。表-1に被災を受けた施設における設計値と被災波の相違を整理した(表中の伏木富山は伏木地区での観測値で、観測点の水深は46mである)。

(2) 被災のメカニズム

表-1に示した被災波はいずれの場合も設計で用いていた波と比べると、西湘バイパスを除くと波高は設計値を越えていないが、周期が設計値よりも長いことが特徴である。波の周期が長くなると、海底の影響を受けて浅水変形、屈折が始まる水深が深くなるため、より沖合で波は地形の影響を受けるようになる。また、最近の鹿島港等における被災時の波を解析すると、波の周波数スペクトル型はJONSWAP型で表され、エネルギー集中度パラメータ γ は高くなっている(加島ら, 2008)。そこで、ここではエネルギー集中度の高い波を作用させて、防波堤の被災力所と

防波堤帯に沿った波高の相関を調べた。

図-3 に伏木富山港の沖防波堤周辺の計算地形を示す。計算プログラムは、平山 (2007) によるブシネスク型波浪変形モデルを活用した計算法で、格子間隔10m で沖側境界近傍に波浪観測点 (水深47m) が位置する。被災時の波向は不明であるが、富山湾が北東に向かって広がっていることを考慮して、波向 N および NE として JONSWAP 型スペクトル ($\gamma=10$) の単一方向波 ($H_{1/3}=4.22\text{m}$, $T_{1/3}=14.2\text{s}$) を与えた。図-4 に防波堤周辺の計算波高分布を示す。反射波も含めた防波堤前面の波高分布は、場所によって変化し、防波堤中央部でやや小さく、端部近くで大きくなっている。入射波高は4.22m であるが、水深10m の防波堤設置点で浅水変形によって波高が急変し、 $H_{1/3}=6\text{m}$ に達していたことが分かる。防波堤の被災要因は複雑で、設

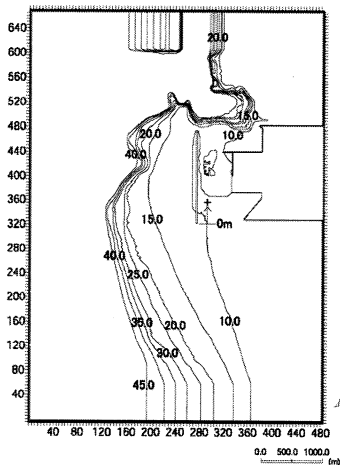


図-3 伏木富山波浪変形計算領域

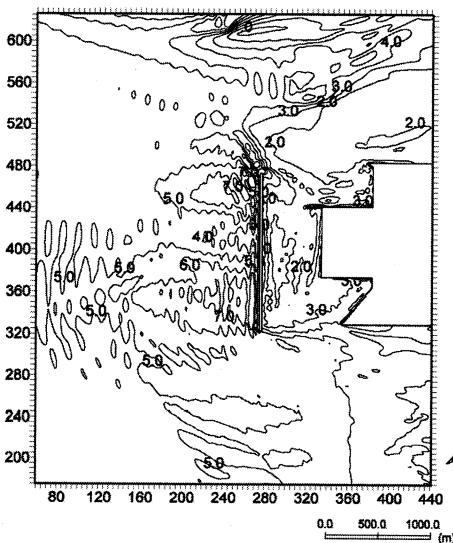


図-4 有義波高の分布

計時に想定した波高も場所的に異なり、ケーソンの構造も一定ではない。したがって、被災要因を波高だけに求めることは難しいが、波高が高い部分は被災の危険性が高まっていることがわかる。

図-5 は、被災時の波と設計で想定していた波 (設計波) が作用したときの防波堤前面の波高分布と被災カ所を比較したものである。なお、設計条件は場所的に異なるので、ここでは被災した部分に相当する設計値を用いて入射波境界値に換算している。被災波は入射境界の位置では設計波より小さいが、防波堤に沿った直線 ($5H_{1/3}$ 沖合) 上では、設計波よりも大きくなるかほぼ同一になる。現地調査において被災が確認された場所では、周期が長いために生じる浅水変形と屈折の影響による局所的な波高増大が生じ、設計値よりも作用波高が大きくなったことが被災の一要因になったことが確認できた。

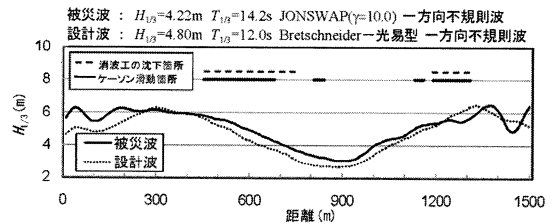


図-5 伏木地区防波堤添いの波高分布

4. 波力の増大

次に、岩手県久慈港における被災状況から、周期増大が及ぼす影響を示す。図-6 は久慈港防波堤の周辺地形を示す。2006年10月の台風期には半崎地区だけでなく施工途中の沖合防波堤も被災し、その要因は設計波に相当する波浪が一部施工中の構造物に作用したためと考えられる。ただし、波の周期は設計波より小さい。沖防波堤位置における被災波と設計波は以下の通りである；

被災波： $H_{1/3}=8.12\text{m}$, $T_{1/3}=12.4\text{s}$, 潮位 D.L.+1.61m

設計波 (全区間平均)： $H_{1/3}=7.41\text{m}$, $T_{1/3}=13\text{s}$, 潮位 D.L.+0.85m

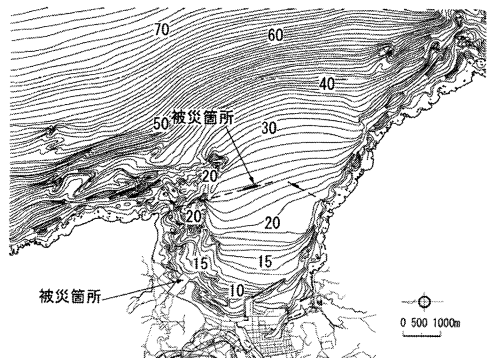


図-6 久慈港の地形 (上方被災箇所：防波堤, 下方：半崎護岸)

本ケースでは被災波と設計波はほぼ等しく、施工を続けて構造物を完成させれば、設計波に対して安定な構造となる。ただし、将来の偶発波浪の作用時には周期の増大を考慮しておく必要があり、設計時の荷重がどのように変化するのかを調べた。防波堤の堤体は簡単のために、水深27mの位置に7mのマウンドがあり、26mの高さを有するケーソン函が設置されているものとした。作用波は上記の設計波および周期を長くした偶発波浪とした。表-2に50年確率波と周期を長くした偶発波浪の諸元を示す。また比較のために波高だけを150年確率波高を用いて増大させた場合の計算値を示した。最大波浪荷重 H_{max}^* は計算で求めた換算沖波から合田の砕波変形式で推定した（合田，1975）。周期が長くなり波形勾配が小さくなると、無次元砕波波高比が大きくなるので、長周期うねりの最大波高は150年確率波に相当している。

図-7は周期を長くした場合の設計波と偶発波浪の計算諸元を偶発波浪荷重の設計荷重に対する比として示したものである。ここで、 H_s は沖波波高である。周期を13sから17sに長くしたので、 T_0 の項は1.3になっている。防波堤位置での波高計算にはエネルギー平衡方程式を用いて H_0' 、 $T_{1/3}$ を計算した。 p_{1max} は合田式（合田，1973）で計算した水面での波圧強度である。周期が1.3倍になることによって、浅水変形と屈折係数も変化する所以、 H_{max} の比は1.1となる。波圧の最大値は、周期が長くなる作用も加わって、当初の設計値より1.2倍になる。したがって偶発波浪として周期だけを長くした長周期うねりを採用すると、作用する波圧が増加する可能性が高くなる。

表-2 久慈港北堤を例とした確率波と偶発波

波浪条件	H_s (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	K_s	H_0' (m)	H_{max} (m)
50年確率波	8.1	13	7.41	0.93	7.96	13.31
偶発波浪	8.1	17	8.10	1.0	8.15	14.53
150年確率波	9.0	13	8.23	0.93	8.85	14.25

波向 ENE, 潮位 MSL+1.45m, 水深 25.6m

H_{max}^* は合田の砕波図表から算出

以上の考察をまとめると、周期17s程度のうねりが作用すると、沖波波高が変化しなくても波圧が増大し、構造物の安定に大きな影響を与えることがわかる。100年確率波を採用しても、50年確率波と同一の波形勾配を用いているので、波周期は長周期うねりより短いことが多い。また、波高だけを増加させても砕波波高だけで制限を受けてしまう。したがって、偶発波浪荷重としては長周期うねりを採用した方がよい。このとき、波高は設計波と同一でも構わない。また、港湾の荷役に障害を与える周期30s以上の長周期波、副振動、最大モデル台風による高潮、津波も偶発荷重として考慮し、照査をする必要がある。

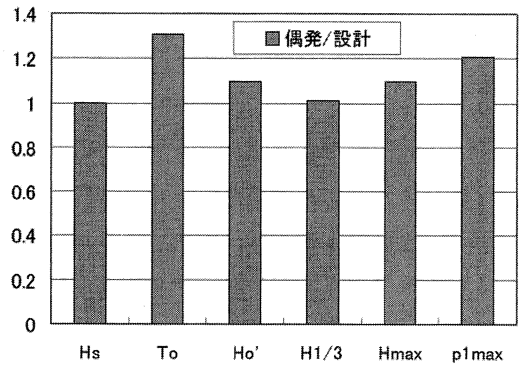


図-7 波周期が長くなった場合の作用諸元の比較

5. まとめ

本研究では、性能設計に応じて港湾構造物の安全性と修復性を照査する偶発波浪荷重の影響について考察した。確率年を増加させても、波高は大きく変化しないことや最近の被災事例から判断して、偶発波浪荷重として長周期のうねりを作用することが適切であることを示した。そして簡単な数値計算で、長周期うねりが作用すると作用荷重が1.2倍に増加することを予測した。今後は、偶発荷重として作用する長周期うねりに対して安全性と修復性を確保できる構造物の設計法を提案する。

参考文献

- 加島寛章・平山克也・峯村浩治・平石哲也(2008)：全国波浪観測データを活用したうねり性波浪の伝播特性について，海岸工学論文集，第55巻，印刷中。
- 合田良実(1973)：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第12巻，第3号，pp.31-69。
- 合田良実(1975)：浅海域における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告，第14巻，第3号，pp.59-106。
- 国土交通省横浜国道事務所(2008)：平成19年台風9号による国道1号西湘バイパスの被害と復旧状況，広報パンフレット，4p。
- 土木学会海岸工学委員会(2000)：海岸施設設計便覧，土木学会海岸工学委員会，pp.302-304。
- 永井紀彦(2002)：全国港湾海洋波浪観測30か年統計(NOWPHAS 1970-1999)，港湾空港技術研究所資料，No.1035，388p。
- 永井紀彦・平石哲也・河合弘泰・川口浩二・吉永宙司・大釜達夫(2008)：波浪観測網が捉えた2008年2月24日の日本海沿岸高波の特性，海岸工学論文集，第55巻，印刷中。
- 日本港湾協会(2007)：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，上巻，pp.1-26。
- 平山克也・平石哲也・南靖彦・奥野光洋・峯村浩治(2005)：2004年台風による高波災害の被災パターンについて，海岸工学論文集，第52巻，pp.1316-1320。
- 平山克也(2007)：ビジネスモデルによる波浪変形計算の精度と現地適用性，第43回水工学に関する夏期研修テキスト，B-7，20p。