

# 地球温暖化が海岸堤防越波に及ぼす影響について

山本吉道\*・堀川清司\*\*・長沼良子\*\*\*

## 1. 研究の目的

近年日本でも、地球温暖化に関する調査・研究が、政府機関や大学等で精力的に行われるようになってきた。その中で、温暖化が海岸環境に及ぼす影響については、アメリカの National Research Council (1987) のレポート等で、水位上昇による越波及び海岸侵食条件の悪化が指摘されて以来、建設省の地球環境問題検討委員会や運輸省の海面水位の上昇検討会等が、温暖化による多少の水位上昇が日本の海岸保全環境をかなり悪化させることを報告している。また、山本・堀川 (1991, 1992) は、温暖化により台風が巨大化する可能性のあることを紹介して、台風が巨大化した場合には越波量が大幅に増加し、海底勾配が途中から緩くなる海岸では潮位の増加によって越波量が大幅に増え、急勾配の海岸では波高の増加によって越波量が大幅に増えることを報告している。そして、三村ら (1991) や磯部 (1992) は、台風の巨大化の海岸環境への影響の評価法等について詳しく説明している。

本研究では、台風の巨大化の可能性について検討した後、海岸断面形の違いや水位上昇等による海岸侵食も考慮して、水位上昇や台風の巨大化による越波量の増加について具体的に検討した。

## 2. 温暖化が台風活動に及ぼす影響

Emanuel (1987) は、熱機関モデルを用いて、海面水温が  $3^{\circ}\text{C}$  上昇したならば、台風の中心示度は 30% 程度増力し、最大風速は 15% 程度増加する可能性を示した。また、気象庁の温室効果検討部会 (1990) は、実測記録を基に、海面温度が高くなるにつれて台風の中心気圧が低くなり、台風が強くなっていることを報告している。

さらに、気象庁の海況旬報と上空天気図から、フィリピンの東沖の台風発生域中心 (北緯  $15^{\circ}$ 、東経  $145^{\circ}$ ) での海面温度および鉛直温度差 (地上 850 mb の気温と海

面温度の差) を求め、台風諸量との関係を調べた結果、図-1 を得た。図中の□印は、海面温度データが旬平均されたものなので、鉛直温度差も旬平均してプロットした全データであり、●印は、台風発生時の海面温度データとその台風発生直前の鉛直温度差データをプロットしたものである。鉛直温度差データに台風発生直前のものを用いた理由は、台風発生時には台風中心部に強い上昇流が生じ、鉛直温度差が小さくなるので、不適当と考えたからである。なお、期間は気象庁が上空気温の観測を始めた1958年8月から1990年12月の間である。

図-1 の□印分布の重心に対して、●印分布の重心は右上がりであり、海面温度の上昇および鉛直温度差の増加に伴って、台風が発生し易くなると考えられる。

すなわち、海面温度の上昇により、対流圏の安定性が弱まる (鉛直方向の温度差が広がる) ならば、巨大化した台風が発生し易くなる可能性は高いと考えられる。

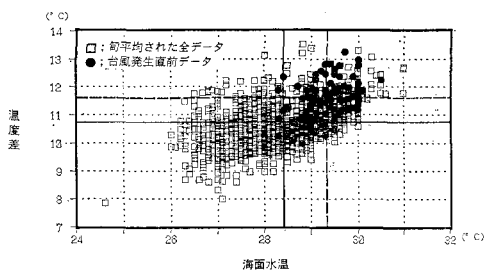


図-1 海面温度、鉛直温度差と台風発生頻度の関係

しかし、大気より海水の比熱の方が大きいので、温暖化が進んでも、対流圏下層の温度勾配が今よりも緩くなることも考えられる。気象庁の温室効果検討部会 (1990) は、気象研究所の大気循環モデルによる予測で、温暖化により台風が小さく弱くなったことも報告している。

したがって、温暖化によって鉛直方向の温度分布がどのように変化するかが重要な問題となってくる。

この手掛かりとしては、Manabe 等 (1990) による図-2 がある。この予測図では、台風発生域である北緯  $20^{\circ}$  付近で、上空 8 km 程度までの対流圏下層の鉛直温度差の増加はないが、温度そのものは  $2^{\circ}$  程度上昇して

\* 正会員 工修 埼玉大学大学院 後期課程社会人コース  
(株)アイ・エヌ・エー

\*\* 正会員 工博 埼玉大学長

\*\*\* パシフィックコンサルタンツ(株)

いる。また、上空 16 km 程度までの対流圏上層では温度上昇率が下がり、成層圏では温度低下が生じて、安定性が弱まっている。

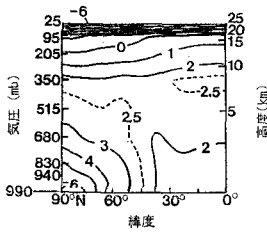


図-2 温暖化による鉛直温度分布の変化  
(二酸化炭素が現在の2倍, Manabe 等, 1990)

以上から、真鍋等の温度変化の予測が正確ならば、温暖化によって、台風が巨大化する可能性と、台風が今よりも北側の緯度で発生し易くなる可能性はあると判断される。それゆえ、巨大化台風が越波量に及ぼす影響について検討しておく価値は十分にある。

### 3. 海岸侵食も考慮した越波量増加の検討

温暖化により水位上昇や台風の巨大化が生じた場合の越波量について具体的に検討する。

#### (1) 越波量の算定法について

越波量  $Q$  の算定には、山本・堀川 (1991) が提案した以下の不規則波による方法を用いる。

$$Q = \int_0^\infty \int_0^\infty q \cdot p \, dH \, dT \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 $H$  は波高、 $T$  は周期、 $p$  は渡辺・川原 (1984) による波高周期結合分布式、 $q$  は成分波の越波量で、碎波時の  $q$  は式 (2) で表される。

$$\left. \begin{aligned} q &= a [(X_0/R) - \cot \alpha] (R - H_c)^2 / 2 \\ a &= 0.1 (L_0/H_b)^{1/3} (\cos \theta + \cos \alpha) / 2 \\ X_0 &= \cot [\alpha - \tan^{-1} (h_m/R \sin \alpha)] R \\ h_m &= 0.7 [0.1589 (\tan \alpha)^{0.5} \\ &\quad / (0.8 H_b/L_0)^{1/4} + 0.8 (\tan \alpha)^{0.6}] H_b \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 $R$  は式 (3) で表される碎波時の打ち上げ高、 $\alpha$  は中村ら (1972) の改良仮想勾配角、 $H_c$  は堤防天端高、 $H_b$  は砂村・堀川 (1974) の越波による波高低下を無視した碎波波高  $[(\tan \alpha)^{0.2} (H_0'/L_0)^{-1/4} H_0']$ 、 $\theta$  は堤防の表法勾配角、さらに、 $H_0'$  は換算沖波波高、 $L_0$  は沖波波長である。

$$R = 1.25 (\cos \alpha)^2 (\tan \alpha)^{0.6} (H_0'/L_0)^{-1/4} H_b' \quad \dots\dots (3)$$

そして、非碎波時の  $q$  には高田 (1977) の実験式 (4) を用い、この場合の打ち上げ高  $R$  には微小振幅波理論による式 (5) を用いる。

$$q = 0.65 (R - H_c)^2 \quad \dots\dots (4)$$

$$R = [1.0 + \pi (H_b/L_h) \coth(2\pi h/L_h)] H_0' \quad \dots\dots (5)$$

ここに、 $h$  は堤防前面の水深、 $H_b$  は  $h$  での進入波高、 $L_h$  は  $h$  での波長である。

#### (2) 海岸断面諸元の設定法について

外力が変われば、海岸断面は新しい平衡状態へ移ろうとして変化する。この変化を推定するために、以下の海岸断面諸元の設定法を提案する。

##### a) 汀線の岸沖変化長さの算定式

砂村 (1984) が提案した単位時間単位幅当たりの岸沖漂砂量  $Q$  の算定式 (6) に対して、電力中央研究所の大型実験および運輸省港湾技術研究所の現地観測の汀線付近のデータを用いて、漂砂量係数  $K$  の定式化を行うと式 (7) を得る。本式の算定値と実測値の相関は図-3 に示す通り、比較的良好である。

$$Q = K \cdot U_r^{0.2} \Phi (\Phi - 0.13 U_r) w d \quad \dots\dots (6)$$

$$K = A e^{-at/T}$$

$$A = 3.79 \times 10^{-10} (\tan \alpha)^{0.11} (d/H_0')^{-1.34}$$

$$a = 3.63 \times 10^{-3} (\tan \alpha)^{1.58}$$

(適用範囲は  $d/H_0' < 1.0 \times 10^{-3}$ )

ここに、 $U_r$  は式 (8) で表されるアーセル数、 $\Phi$  は式 (9) で表される砂村が用いたシルズ数に替わる指標、 $w$  は底質の沈降速度、 $d$  は底質の中央粒径、 $t$  は時間、 $T$  は周期、 $\tan \alpha$  は汀線付近の海底勾配、 $H_0'$  は換算沖波波高である。

$$U_r = 2.5 g T^2 \tan \alpha / (1.63 \tan \alpha + 0.048)^2 H_b \quad \dots (8)$$

$$\Phi = (2.5 \tan \alpha)^2 H_b / (1.63 \tan \alpha + 0.048) d s \quad \dots\dots (9)$$

ここに、 $g$  は重力加速度、 $s$  は底質水中比重である。

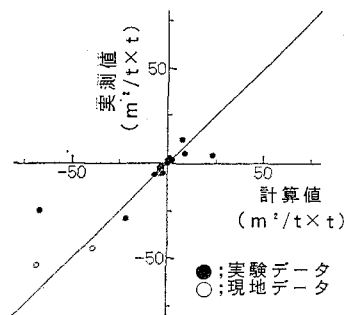


図-3 岸沖漂砂量の実測値と計算値の比較

次に、岸沖漂砂量の連続式の若干の変形から、汀線の岸沖変化長さ  $\Delta y \propto \left( \int_0^t Q \, dt \right)^{0.5}$  の関係を得るので、前述の大型模型実験および現地観測のデータを代入すると図-4 のようになり、式 (10) を得る。

$$\left. \begin{aligned} \Delta y &= 3.3 \left( \int_0^t Q \, dt \right)^{0.5} \\ &= 3.3 \times [A (1 - e^{-at/T}) U_r^{0.2} \Phi \\ &\quad \times (\Phi - 0.13 U_r) (w d T / a)]^{0.5} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (10)$$

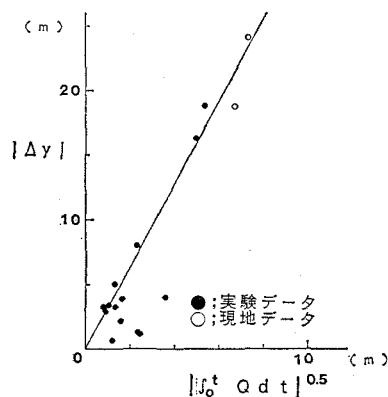
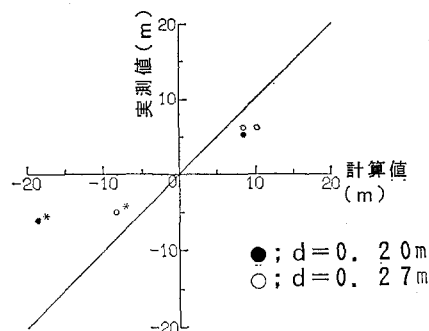


図-4 汀線の岸沖変化長さと岸沖漂砂量の関係

砂村 (1980) の現地観測データと式 (10) による算定値との比較を図-5 に示す。



\* のデータは砂村の予測モデルの計算値との比較である。

図-5 汀線の岸沖変化長さの実測値と計算値の比較

#### b) 海底勾配の算定式

越波量の算定に用いる海底勾配には、危険側になるように大きな値を設定する方が妥当と考え、改訂海岸保全施設築造基準解説 (1987) で紹介されている算定式の中から、入力諸元に対する最大値を与える次式を用いる。

$$\left. \begin{array}{l} d/H_0' > 2.4 \times 10^{-4} \text{ の場合} \\ \tan \alpha = (0.73d/H_0')^{0.158} \\ d/H_0' < 2.4 \times 10^{-4} \text{ の場合} \\ \tan \alpha = (376.6d/H_0')^{0.7856} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

また、式 (11) による斜面の上限の高さ  $h$  には、同上築造基準解説で紹介されている簡単な経験式  $h = 1.1H_0$  を用いる。また、下限の深さ  $h_b$  には頻度が一年当たり数回の時化時の碎波水深を用いる。この時化時の碎波水深で深では、波力が急に弱まるため、海底勾配はかなり緩くなる。

以上から、汀線位置を式 (10) で求める  $\Delta y$  移動させ、式 (11) で求める勾配で、上は  $h$  から、下は  $h_b$  まで引いた斜面が新しい海岸断面とする。そして、 $h_b$  より沖側の断面地形については、底質の安息角よりかなり緩い

状態で安定となるが、越波量に強く影響する断面地形は碎波水深までであるから、厳密な取扱を要しない。

#### (3) 越波量の検討ケース

基本海岸断面として、図-6 に示す太平洋に面した典型的な海岸と駿河湾のような急深海岸の2断面を考え、計算諸条件を以下のように設定する。

##### a) 現況 (基本ケース)

外洋に面した典型的な海岸の底質の中央粒径は 0.1 mm ~ 1.5 mm、頻度が年数回の時化時の波高および周期は 5 m ~ 6 mm および 10 s 程度であるから、設定値は、底質中央粒径 = 0.8 mm、波高 = 5.5 m、周期 = 10 s とする。

この場合の海岸勾配は式 (11) から  $\tan \alpha = 1/10$  となり、 $h$  は 6.4 m、 $h_b$  は 7.5 m (急深海岸では 6.68 m) となる。そして、浜がけ上端に相当する  $h$  の高さに天端高 9 m の海岸堤防を設けたならば、図-6 のようになる。

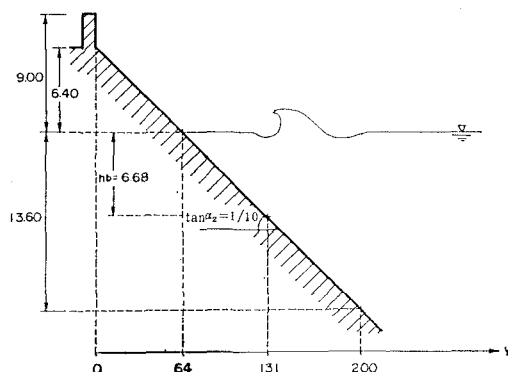
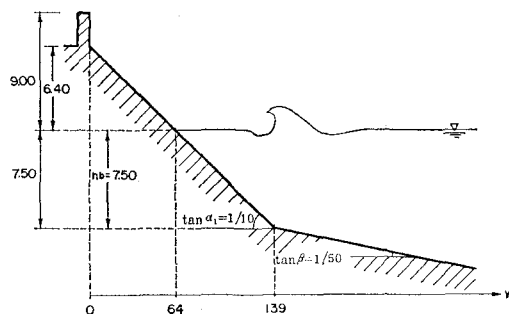


図-6 代表海岸の基本断面形 (単位: m)

##### b) 水位上昇のみ

a) の現況ケースに IPCC (気候変動に関する政府間パネル) の第一部会の最終報告値 (1990) である 65 cm の水位上昇のみを考慮する。

##### c) 水位上昇 + 海岸侵食

b) の水位上昇 65 cm に、この水位上昇による海岸侵食を考慮する。汀線後退量は式 (10) から 6.55 m で、海岸断面は図-7 のようになる。

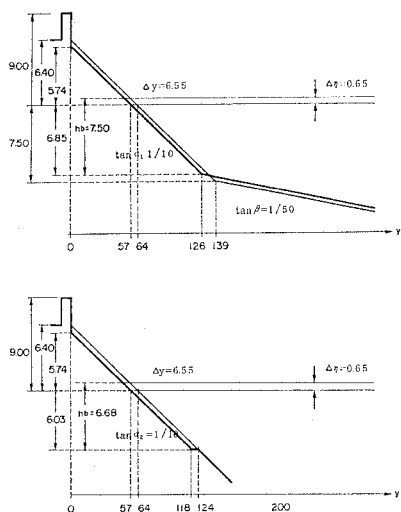


図-7 水位上昇による侵食後断面 (単位: m)

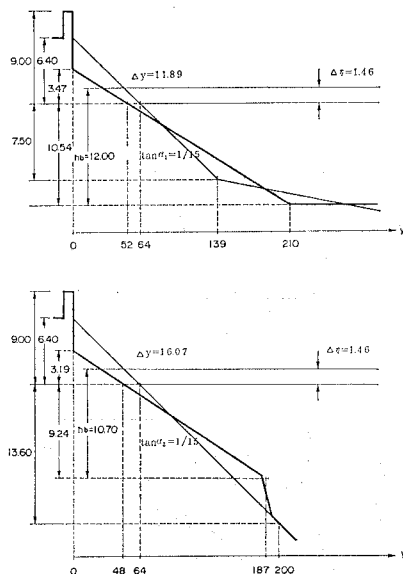


図-8 台風による侵食後断面 (単位: m)

## d) 現況+台風のみ

現況海岸断面に伊勢湾台風または第二室戸台風級の台風（上陸前の中心気圧 930 mb, 影響半径 600 km）による最大波高 9.4 m, 周期 11.5 s を考慮する。なお, 台風時の波浪推算は有義波法の数値シミュレーション（風波は井島の方法, うねりは Bretschneider の方法により, 海上風と傾度風の比は 0.66, 海上風と等圧線のなす角度は  $17.5^\circ$  とした）によった。

## e) 現況+台風+海岸侵食

d)の台風による波高, 周期, 水位上昇量および海岸侵食を考慮する。なお, 吹き寄せによる水位上昇量は経験式  $\Delta\eta = 0.01 \times (1013 - \text{中心気圧}) + 0.0005 \times (\text{最大風速})^2$  [単位は m および mb, 係数は外洋に面した海岸の平均的な値である] から求める。水位上昇量は 1.46 m であり, 海岸断面は図-8 のようになる。

## f) 水位上昇+巨大化台風

現況海岸断面に d) の台風が巨大化した場合（IPCC 第一部会の最終報告値である  $3^\circ\text{C}$  の温度上昇を想定して, 中心示度は 30% 増加し, 影響半径は 600 km のままとする）の最大波高 10.6 m, 周期 12.1 s を考慮する。波浪推算は d) と同じ方法による。

## g) 水位上昇+巨大化台風+海岸侵食

f) の巨大化台風の波高, 周期, 水位上昇量および海岸侵食を考慮する。水位上昇量, 汀線後退量, 海岸勾配および  $h_0$  を e) の場合と同様に求めれば, 海岸断面は図-9 のようになる。

## (4) 越波量の算定結果

2つのタイプの海岸に対する a)~g) のケースの越波量算定結果を図-10~13に示す。

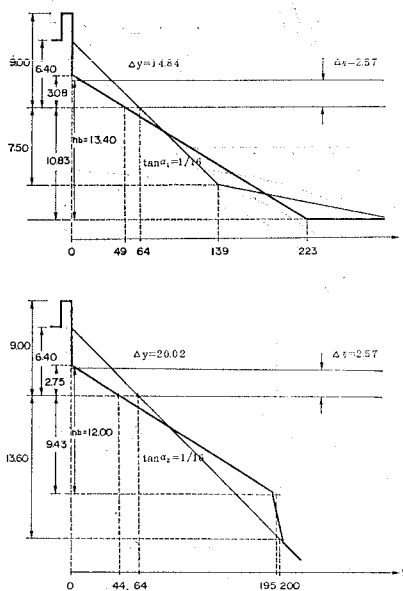


図-9 水位上昇+巨大化台風による侵食後断面 (単位: m)

図-10, 11 から, 1) 水位上昇により越波量は極端に増え, この影響は急深海岸より典型的な海岸で強く現れること, 2) 式 (10) および式 (11) を用いて, 海岸侵食を考慮すると, さらに越波量は増加すること, が判る。

図-12, 13 から, 1) 台風の巨大化も考慮すると越波量は相当に増加すること, 2) 水位上昇および巨大化台風による海岸侵食も考慮すると, 越波量はさらに相当に増加すること, が判る。

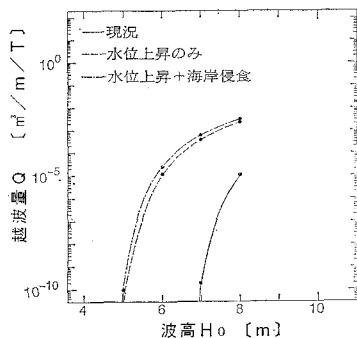


図-10 典型的な海岸に対する越波量 (その1)

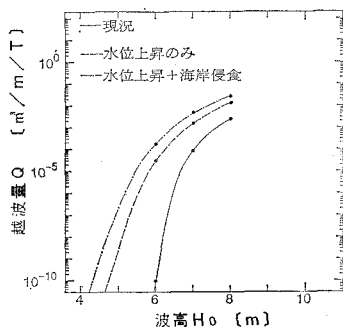


図-11 急深海岸に対する越波量 (その1)

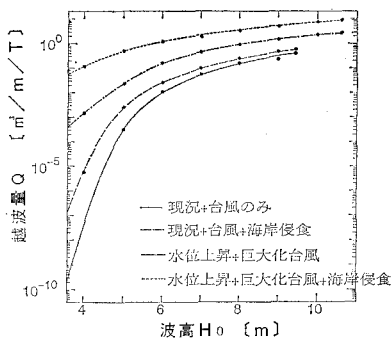


図-12 典型的な海岸に対する越波量 (その2)

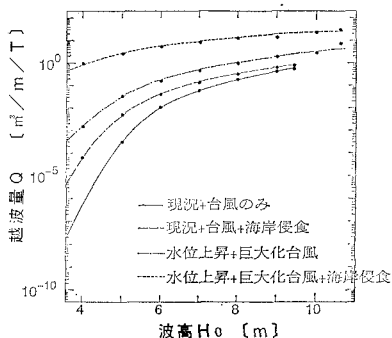


図-13 急深海岸に対する越波量 (その2)

#### 4. 主要な結論

(1) Manabe 等の鉛直温度分布の予測が正確ならば、温暖化により台風が巨大化する可能性および台風が今よりも北側の緯度で発生し易くなる可能性があると判断される。それゆえ、台風の巨大化も考慮して、温暖化が越波量の増加に及ぼす影響について検討する価値は十分に有ると判断される。

(2) 越波量は水位上昇により極端に増える。この影響は急深海岸より典型的な海岸で強く現れる。そして、海岸侵食を考慮すると、さらに越波量は増加する。

(3) 越波量は台風の巨大化も考慮すると相当増加する。そして、水位上昇および巨大化台風による海岸侵食も考慮すると、越波量はさらに増加する。

#### 参考文献

- 磯部雅彦 (1992): 地球温暖化による海面上昇と沿岸域におけるその影響予測, 沿岸海洋研究ノート, 日本海洋学会, 沿岸海洋研究部会, pp. 169-178.
- 海岸保全施設築造基準連絡協議会 (1987): 改訂海岸保全施設築造基準解説, pp. 239-240.
- 気象庁 (1990): 温室効果気体の増加に伴う気候変化(II), 大蔵省印刷局, 231 p.
- 砂村継夫 (1980): 自然海浜における汀線位置の時間変化に関する予測モデル, 第27回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 255-259.
- 砂村継夫 (1984): Swash zone を含む砕波帯の岸沖漂砂量に関する研究, 第31回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 316-320.
- 三村信男・磯部雅彦・細川恭史・灘岡和夫 (1991): 地球温暖化による海面上昇・海象変化の影響評価, 海岸工学論文集, 第38巻, 土木学会, pp. 936-940.
- 山本吉道・堀川清司 (1991): 新しい越波量算定式の提案, 海洋開発論文集, 第7巻, 土木学会, pp. 25-30.
- 渡辺 晃・川原俊郎 (1984): 不規則波のスペクトルと波高周期分布の関係, 第31回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 153-157.
- Emanuel, K. A. (1987): The dependence of hurricane intensity on climate, NATURE, Vol. 326, No. 2, pp. 483-485.
- IPCC WG1 (1990): Policymakers Summary of the Scientific Assessment of Climate Change, 27 p.
- Manabe, S., K. Bryan and M. J. Spelman (1990): Transient response of a global ocean-atmosphere model to a doubling of atmospheric carbon dioxide, J. Physical Oceanography Vol. 20, pp. 722-749.
- National Research Council (1987): Responding to Change in Sea-level, Engineering Implications, National Academy Press, Washington, D.C., 148 p.
- Yamamoto, Y. and K. Horikawa (1992): New methods to evaluate wave run-up height and wave overtopping rate, 23rd ICCE.