

地球温暖化がウォーターフロントに及ぼす影響について

Influence of Global Greenhouse Effect on Seawall Wave Overtopping at Waterfront

山本 吉道* ・ 堀川 清司** ・ 長沼 良子*** ・ 堀之内 毅****

Yoshimichi.Yamamoto, Kiyoshi.Horikawa, Yoshiko.Naganuma and Tsuyoshi.Horinouchi

In this paper, the following two subjects are investigated.

- 1) Influence to global greenhouse effect on typhoon action.
- 2) Increase of wave overtopping rate due to the combined effects of mean sea level rise, intensified typhoon, and beach erosion.

The main conclusions obtained are

- 1) The possibility of intensifying a typhoon due to mean sea level rise can not be neglected in the treatment of greenhouse effect.
- 2) Coastal profile eroded by magnified waves can be predicted by eqs. (5), (6), and (7).
- 3) Rate of wave overtopping is considerably increased by the effect of mean sea level rise and is further increased by beach erosion. the effect of intensifying a typhoon on wave overtopping rate is remarkably large.

Keywords : wave overtopping rate, mean sea level rise, intensified typhoon, beach erosion

1. 研究の目的

1988年に気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が組織された頃から、日本でも地球温暖化がウォーターフロントに及ぼす影響についての研究が盛んになってきた。アメリカのNational Research Council(1987)¹⁾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、日本でも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、磯部(1991)²⁾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、その場合に越波量が大幅に増加することを報告している。同じ時期に、山本・堀川(1991)³⁾は、台風の巨大化による越波量の増加パターンが、高波時の代表的碎波水深から沖側で海底勾配が緩くなっている海岸とそうでない海岸では、かなり違ってくることを報告している。

本研究では、温暖化が台風活動に及ぼす影響について検討した後、今まで定量的な評価がなされていなかった水位上昇等による海岸侵食も考慮して、水位上昇や巨大化台風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

2.1 温暖化が台風の強さに及ぼす影響

Emanuel(1987)⁴⁾は、熱機関モデルを用いて、表-2.1のように海面水温の上昇により台風の強さが増す可能性を示した。また、気象庁の温室効果検討部会(1990)⁵⁾は、過去の観測記録では、海面温度が高くなるにつれて台風の中心気圧が低くなっている(すなわち、台風が強くなっている)が、気象研究所の大気循環モデルによる予測では、温暖化により台風が小さく、且つ、弱くなることを報告している。

後者の予測結果は対流圏の安定性が今より増すとしたことに対応している。そして、Emanuelの予測結果や気象庁の過去の観測記録による結果のように、海面温度の上昇により対流圏の安定性が弱まる(すなわち、鉛直方向の温度差が広がる)ならば、台風の巨大化の可能性は高くなると考えられる。

表-2.1 海面水温と台風の強さの関係⁴⁾

海面温度 T (°C)	台風の中心気圧 Pc (mb)	台風の最大風速 Vmax (m/s)
27	911	72
28	902	75
29	891	79
30	879	83
31	865	88
32	849	93
33	829	99
34	805	106

熱力学効率 $\epsilon = 0.33$

周辺相対湿度 = 78%

台風内の典型的な値

* 正会員 (株)アイ.エヌ.エー 海岸海洋部 (〒162 新宿区水道町3-1)

** 正会員 埼玉大学学長

*** パシフィックコンサルタンツ株式会社

**** 株式会社 建設技術研究所

そして、Manabe等(1990)⁶⁾は、温暖化によって温度分布が図-2.1のようになると予測している。すなわち、台風発生域である北緯20°付近で、上空8 km程度までの対流圏下層の温度そのものは2°程度上昇するが、温度勾配はあまり変化しない。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。

大気より海水の比熱の方が大きいため、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が、Manabe等の予測が正確ならば、温暖化による台風の巨大化の可能性はありと判断される。

2.2 温暖化が台風の発生に及ぼす影響

気象庁が発表している海況旬報と上空天気図から、台風発生域の海面温度および鉛直温度差（地上850mbの気温と海面温度の差）を求めて、台風諸量との関係を調べた結果、図-2.2を得た。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。そして、フィリピン東沖の台風多発域内の4地点（緯度22度、15度と経度135度、145度の組合せ）についてデータ化した。

図-2.2は北緯15度、東経145度のものであり、図-2.2の上図は、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、全データをプロットしたものである。これに対して、下図は、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の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、鉛直温度差は小さくなるので、この値を用いたのでは図-2.2に示す関係を得られなくなるからである。

図-2.2の上図の全データの重心に対して、下図の台風発生直前データの重心は右上がりとなっており、海面温度の上昇および鉛直温度差の増加に伴い、台風が発生し易くなると考えられる。すなわち、Manabe等の鉛直温度分布の予測が正確ならば、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りと判断される。

3 海岸断面地形の諸元の設定法

水位上昇等によって外力特性が変われば、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、以下の海岸断面地形の諸元の設定法を提案する。

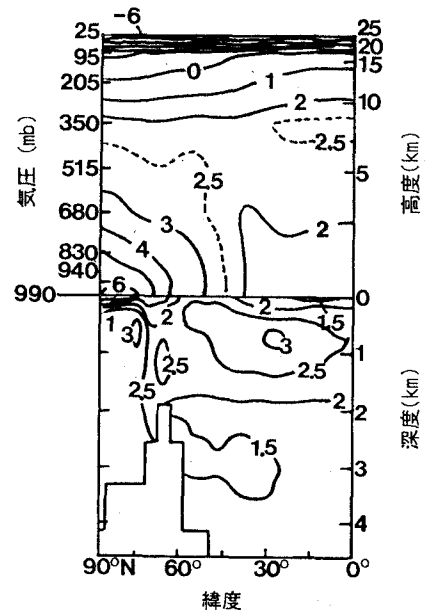


図-2.1 温暖化による鉛直温度分布の変化⁶⁾

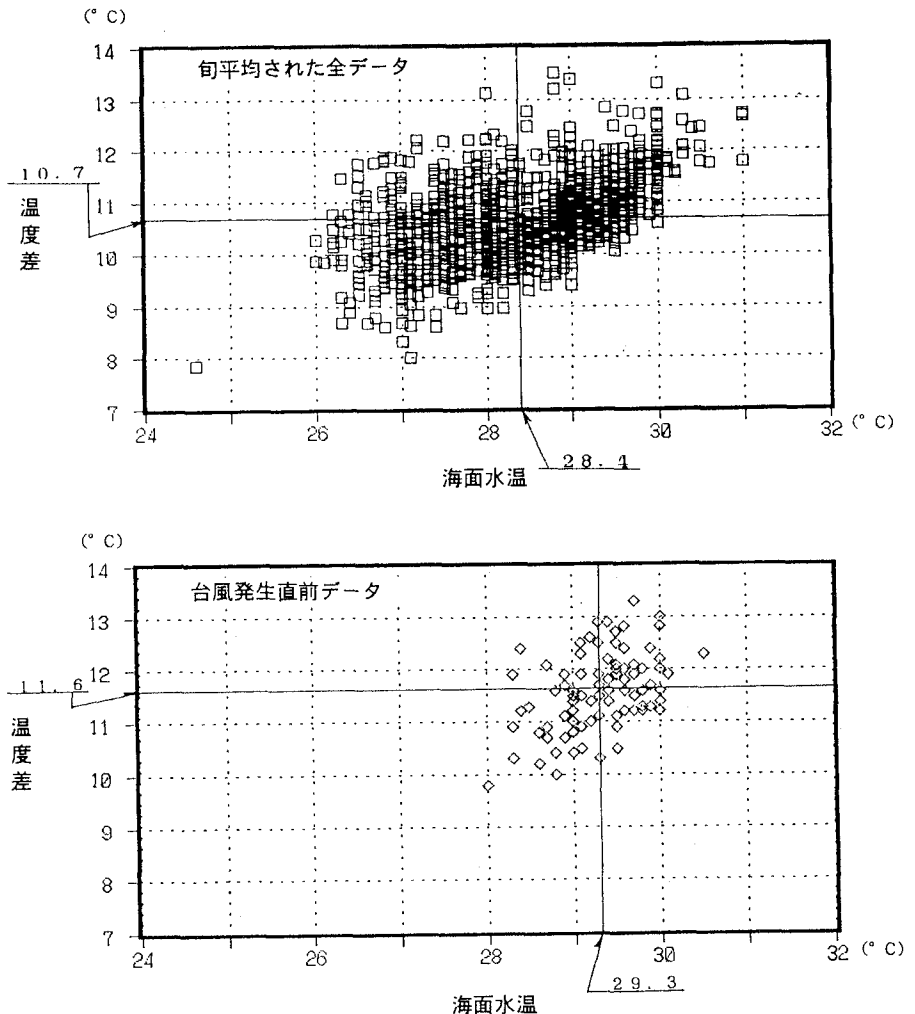


図-2.2 海面温度、温度差と台風の発生し易さの関係
(北緯15°、東経145°；1958年8月～1990年12月)

3.1 汀線の岸沖変化長さの算定式

砂村(1984)⁷⁾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(1)に対して、電力中央研究所の大型模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(2)式を得る。本式の算定値と実測値の相関は図-3.1に示す通りで、比較的良好である。

$$Q = K \cdot Ur^{0.2} \Phi (\Phi - 0.13 \cdot Ur) w d \quad (1)$$

$$K = A e^{-a t / T}$$

$$A = 3.79 \times 10^{-10} (\tan \alpha)^{0.11} (d / Ho')^{-1.34} \quad (2)$$

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

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

ここに、 Ur は(3)式で表されるアーセル数、 Φ は(4)式で表される砂村が提案したシー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、 Ho' は換算沖波波高である。

$$Ur = 2.5 g T^2 \tan \alpha / (1.63 \tan \alpha + 0.048) Hb \quad (3)$$

$$\Phi = (2.5 \tan \alpha)^2 \cdot Hb / (1.63 \tan \alpha + 0.048) d s \quad (4)$$

ここに、 g は重力加速度、 Hb は砕波波高〔 $= (\tan \alpha)^{0.2} (Ho' / Lo)^{-1/4} Ho'$; Lo は沖波波长〕、 s は底質の水中比重である。

次に岸沖漂砂量の連続式について若干の変形を行うと汀線の岸沖変化長さ $\Delta y \propto (\int_0^t Q dt)^{1/2}$ の関係を得るので、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データを代入すると図-3.2の様になり、(5)式を得る。

$$\Delta y = 3.3 (\int_0^t Q dt)^{1/2} \quad (5)$$

3.2 海底勾配の算定式

越波量の算定に用いる海底勾配は、危険側になるように大きな値を設定する方が良いので、改訂海岸保全施設築造基準解説⁸⁾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。

$$\tan \alpha = (0.73 \cdot d / Ho')^{0.158} \quad d / Ho' > 2.4 \times 10^{-4} \quad (6)$$

$$\tan \alpha = (376.6 \cdot d / Ho')^{0.7856} \quad d / Ho' < 2.4 \times 10^{-4} \quad (7)$$

また、本海底勾配による斜面の上限の高さ h には、同上解説⁸⁾で紹介されている簡単な経験式 $h = 1.1 \cdot Hb$ を用いる。更に、下限の深さ D には頻度が年数回の時化時の砕波水深を用いる。この時化時の砕波水深で深では、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、(5)式で求まる Δy だけ汀線の岸沖位置を移動させ、(6)または(7)式で求まる勾配で、上は h から、下は D まで引いた斜面が新しい海岸断面であるとする。また、 D より沖側の断面地形は、底質の安息角よりかなり緩い状態で安定となるが、越波量に大きく影響する断面地形は砕波水深までであるから、厳密な取扱は不要である。

4 海岸侵食も考慮した越波量増加の検討

第2節の検討から温暖化による台風の巨大化の可能性が否定出来ない以上、これを考慮して、温暖化が顕在化した時の越波量の増加について検討しておく価値は十分に有ると判断される。よって、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する。越波量の算定には、山本・堀川(1991)³⁾が提案した算定法を用いることとして、計算の諸条件は以下のように設定する。

① 現況(基本ケース)：太平洋に面した典型的な海岸を設定する。

一般的な諸値は、底質の中央粒径 = 0.1mm~1.5mm、来襲頻度が年数回の時化時の波高 = 5m~6m、周期 = 10s の程度であるから、代表海岸の底質の中央粒径を 0.8mm、算定用波高を 5.5m、算定用周期を 10s とする。また、基本海岸断面地形は図-4.1に示すように、(7)式から $\tan \alpha = 1/10$ 、 $h = 6.4m$ 、 $D = 7.5m$ とする。そして、 h の位置に天端高 9m の海岸堤防を設けるものとする。

② 水位上昇のみ：基本ケースに IPCC の第一部会の最終報告値である 65cm の水位上昇のみを考慮する。

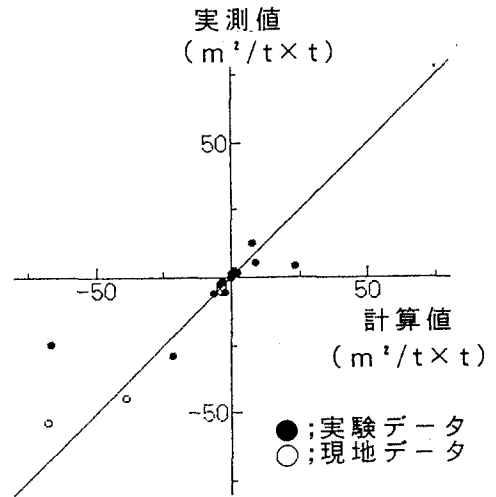


図-3.1 岸沖漂砂量の算定値と実測値の比較

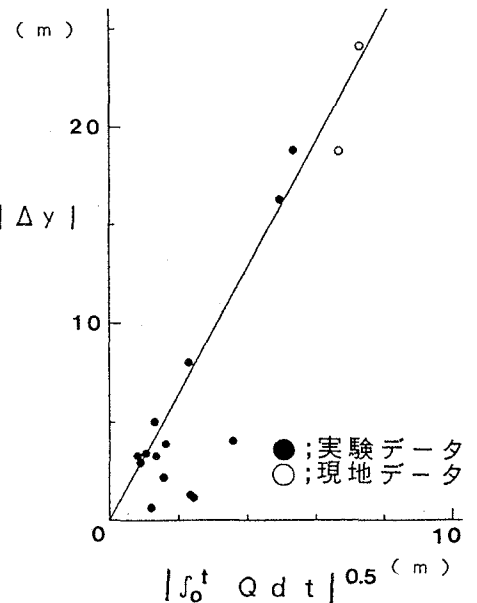


図-3.2 Δy と Q の関係

- ③ 水位上昇+海岸侵食：65cmの水位上昇に、この水位上昇による海岸侵食を考慮する。この場合の汀線後退量は(5)式から $\Delta y = 6.6\text{m}$ となり、海岸勾配およびDは変わらない。
- ④ 現況+台風のみ：現況海岸断面に伊勢湾台風級の台風（上陸前の中心気圧930mb、影響半径600km）による最大波高9.4m、周期11.5sを考慮する。なお、台風時の波浪推算是有義波法の数値シミュレーション⁸⁾（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° とした）により、この場合の最大風速は35.6m/sとなる。
- ⑤ 現況+台風+海岸侵食：現況海岸断面に同上台風による波高、周期、吹き寄せによる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 $\Delta\eta$ 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、係数は太平洋に面した海岸の平均的な値である〕から求めることとし、同上台風に対して $\Delta\eta = 1.46\text{m}$ であった。この場合の汀線後退量は(5)式から $\Delta y = 11.9\text{m}$ 、海底勾配は(7)式から $\tan\alpha = 1/15$ 、Dは12mとなる。
- ⑥ 水位上昇+巨大化台風：現況海岸断面に伊勢湾台風級の台風が巨大化した場合（IPCCの第一部会の最終報告値である 3°C の温度上昇を考慮すれば、表-2.1から中心示度は30%増加し、最大風速は15%増加する。ただし、影響半径は600kmのままとする）の最大波高10.6m、周期12.1sを考慮する。なお、台風時の波浪推算是④と同じ方法により、この場合の最大風速は40.6m/sである。
- ⑦ 水位上昇+巨大化台風+海岸侵食：現況海岸断面に伊勢湾台風級の台風が巨大化した場合の波高、周期、吹き寄せによる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等は⑤と同様にして $\Delta\eta = 1.92\text{m}$ 、 $\Delta y = 14.8\text{m}$ 、 $\tan\alpha = 1/16$ そしてD=13.4mである。

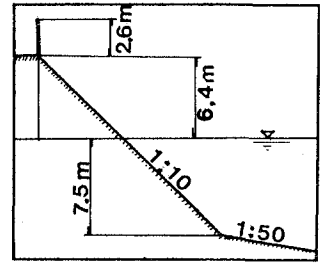


図-4.1 基本海岸断面地形

以上のケースに対する越波量算定結果を図-4.2および4.3に示す。

図-4.2から、越波量は水位上昇により極端に増えること、水位上昇による海岸侵食も考慮すればさらに増えることが予測される。また、図-4.3から、越波量は台風の巨大化も考慮すれば大幅に増えること、水位上昇と巨大化台風による海岸侵食も考慮すればさらに増えることが予測される。

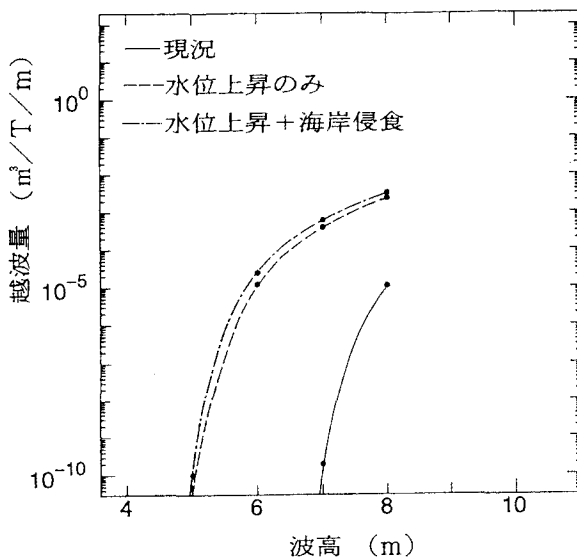


図-4.2 水位上昇時の越波量

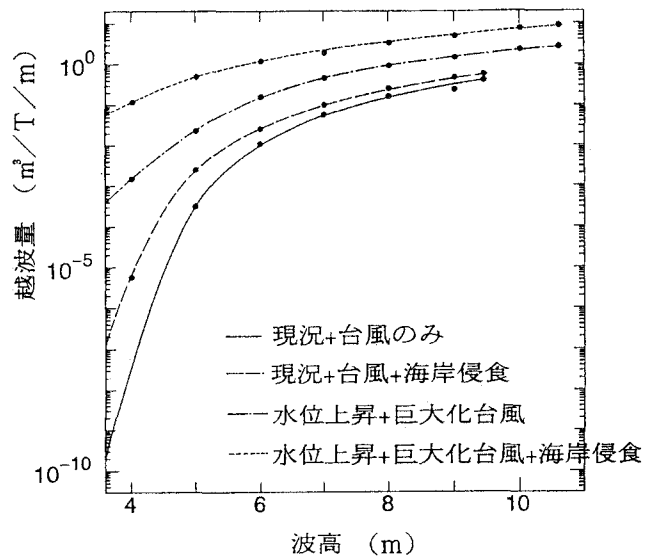


図-4.3 水位上昇・台風巨大化時の越波量

5. 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はあると判断される。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しておく価値は十分に有ると判断される。
- ② (5)式～(7)式を用いることにより、外力諸元が変化したあとの平衡海岸断面が求められる。
- ③ 越波量は水位上昇により極端に増えること、海岸侵食により更に増加すること、また、台風が巨大化した場合にも相当増加することが判った。

最後に、本研究に対して惜しめない御助言を賜った埼玉大学教授谷本勝利氏、同大学助教授浅枝隆氏および同大学助手中村廣昭氏、また、本研究を進めるに際して、惜しめない御支援を頂いたアイ・エヌ・エー海岸海洋部の諸氏に対して深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) National Research Council: Responding to Change in Sea-level, Engineering Implications, National Academy Press, Washington, D. C., 1987.
- (2) 磯部雅彦：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，沿岸海洋シンポジウム，日本海洋学会，沿岸海洋研究部会，1991.
- (3) 山本吉道・堀川清司：新しい越波量算定式の提案，海洋開発論文集第7巻，pp.25～30，1991.
- (4) Kerry A. Emanuel: The dependence of hurricane intensity on climate, NATURE Vol.326 No.2, pp.483～485, 1987.
- (5) 気象庁：温室効果気体の増加に伴う気候変化（Ⅱ），大蔵省印刷局，1990.
- (6) Manabe, S. ・ K. Bryan and M. J. Spelman: Transient Response of Global Ocean-Atmosphere Model to a Doubling of Atmospheric Carbon Dioxide, J. Physical Oceanography Vol.20, pp.722～749, 1990.
- (7) 砂村継夫：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，pp.316～320，1984.
- (8) 海岸保全施設築造基準連絡協議会：改訂海岸保全施設築造基準解説，pp.239～240，1987.
- (9) たとえば、港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会）を参照.