

2006 年 10 月上旬の茨城沿岸高潮の発生要因

Driving force of Storm Surge along Ibaraki Coast of Japan in October 2006

信岡尚道¹・加藤史訓²・武若 聡³・松浦健郎⁴

Hisamichi Nobuoka, Fuminori KATO, Satoshi TAKEWAKA and Takeo MATSUURA

A strong low-pressure system passed along the coast of Pacific Ocean side of the northern part of Japan in October 2006. High tide level was recorded, many beaches and dunes were eroded and coastal defense systems were damaged on the Ibaraki coast by the low-pressure system. This high tide level due to the low-pressure system continued for over 24 hours with big wind waves and met astronomical high tide two or three times. The results of the numerical simulation in this paper show that Ekman transport was the main physical force to generate this high tide level. Unusual time and spatial distribution of winds around the low-pressure system affected the force considerably.

1. 序 論

2006 年 10 月上旬, 急速に中心気圧が低下する非常に強い低気圧により, 北日本の太平洋沿岸では高潮と暴浪に見舞われた。茨城海岸では護岸崩壊や人工砂丘が大侵食を受けるなど広範囲で多大な被害を受け, 過去にない被害総額となった。

海岸の防災設計が地域ごとに史上最高水位と波浪を基準として, 同程度の海象を再び受けても防御できるように算定される限り, 地域間の最高水位の比較は災害の危険性を完全に表わすことにはならない。例えば茨城県大洗港における 2005 年までの史上最高水位は 120 cm (TP 基準) 強であり伊勢湾の 390 cm に比べて非常に低い, もし 200 cm の水位を受けた場合, 伊勢湾では構築された海岸保全施設で守られるが茨城県では守られない。したがって, これまでに高潮被害が極めて少なかった茨城海岸にとって, 今回の高潮発生 of 物理機構を把握して, 今後の高潮防災計画のための想定台風・低気圧を決めることが重要となる。

本研究は, 2006 年 10 月上旬の茨城における高潮の実態調査を踏まえて, 高潮の発生要因を数値シミュレーションで明らかにすることを目的としたものである。

2. 2006 年 10 月上旬の高潮の概要

(1) 気象概要

図-1 に示すように 2006 年 10 月上旬, 和歌山沖で発生した低気圧は, 最低中心気圧が 964 hPa までになるほど急速に発達しながら北日本太平洋沿岸をゆっくりと 3

日間かけて通過した。台風の定義をみると, 熱帯の海上で発生した低気圧は熱帯低気圧と呼ばれ, そのうち北西太平洋または南シナ海に位置し最大風速が 17 m/s 以上のものとなる。今回の低気圧は日本近海で発生しており台風とはならない。台風以外に急速に発達 (中心気圧が低下) する低気圧のことを「爆弾低気圧」と呼ばれる (ただし気象庁は 2007 年 4 月の用語改正から「爆弾低気圧」の利用を控えている)。爆弾低気圧の定義は式 (1) である。

$$P_f - P_b < -24hPa \times \sin \phi / \sin 60^\circ \dots\dots\dots (1)$$

P_f は中心気圧, P_b はその 24 時間前の中心気圧であり, ϕ は緯度を表わす。今回の低気圧は北緯 35 度前後の緯度より, 6 日 12 時から 7 日 12 時 (UTC) の 24 時間で, 中心気圧が 980 hPa から 964 hPa へと 16 hPa 低下した。爆弾低気圧にあたる, 急速に発達した低気圧と言える。

この低気圧に伴い, 関東から北海道までの太平洋側で最大風速が 25 m/s を超える暴風となり, 特に宮城県女

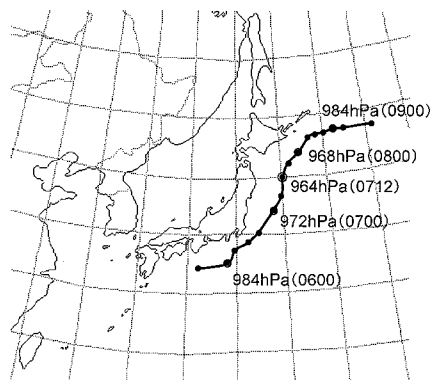


図-1 2006 年 10 月上旬の低気圧の経路と中心気圧。カッコ内は日付と時刻 (UTC)。

1 正 会 員 博(工) 茨城大学講師 工学部
2 正 会 員 工 修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 主任研究官
3 正 会 員 工 博 筑波大学准教授 システム情報工学研究科
4 茨城県土木部河川課

川町江ノ島で7日に最大風速が30 m/sとなるなど4地点で観測記録を更新し、千葉県銚子では最大瞬間風速が39.0 m/sの猛烈な風を記録した(気象庁, 2006)。

(2) 高潮の観測記録

この急速に発達しゆっくりと北上した低気圧の中心付近にあたる外洋では高さ10 mを超える波高となり、また北日本太平洋沿岸では7~8 m程度の波高となるなど大しけとなった。茨城県鹿島港沖で貨物船が座礁し死者・行方不明者が10名となったのをはじめ、全国の海上で死者・行方不明者が35名におよんだ(2006年10月30日付, 海上保安庁調べ)。

高潮が24時間以上継続した地域が北日本太平洋沿岸で多く、必然的に満潮と重なった。千葉県銚子漁港ではこれまでの最高潮位記録を37 cm上回る145 cm (TP基準)を観測した。また、神奈川県横浜と横須賀でもそれぞれ14 cmと11 cmほど過去の最高潮位より高かった(気象庁, 2006)。茨城県内でも史上最高潮位が観測されており、鹿島港で164 cm, 大洗港で160 cm (ともに, TP基準, 速報値)であった。

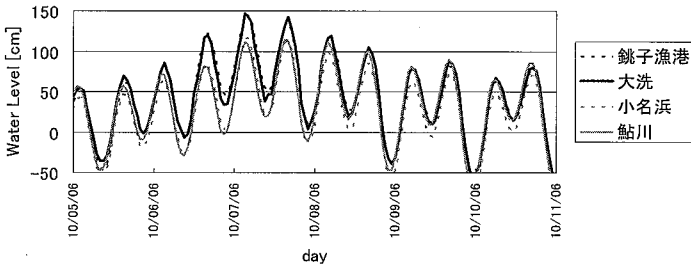
茨城県内と周辺の潮位と潮位偏差の時系列に関して、千葉県銚子漁港(気象庁観測), 大洗港(茨城県観測), 福島県小名浜, 宮城県鮎川(気象庁観測)の観測結果を図-2(a), (b)に示す。明確な潮位偏差(気象潮)は6日から8日までの72時間発生しており、その中でも7日は終日、高い状態が続いていたことがわかる。この地

域の天文潮は約12時間周期なので、したがって満潮と気象潮が重なる厳しい状況を必ず複数回受けることになった。さらに茨城県の大洗港の潮位で既往のインパクトと比較してみる。これまでの最高潮位は123 cmで、その前後1時間の潮位は100 cm未満であったので、短期的なものであったと言える。一方、今回の高潮で123 cm以上の潮位を記録したのは7日の3:00~5:00, 15:00~17:00と連続した高水位が2回あった。しかも前者の時には、有義波高が6 mを超えていた。これまでに経験の無い高水位の上を暴浪が進行して砂浜や護岸を襲ったことになる。

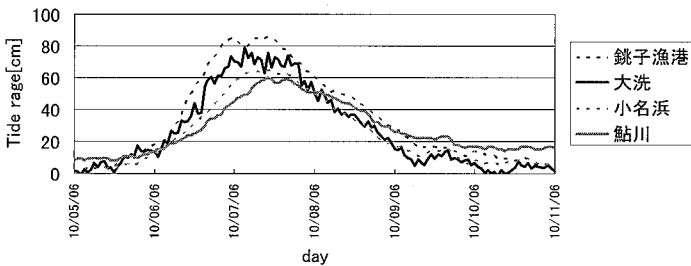
(3) 茨城県内の高潮に伴う被害

茨城県内の海岸では史上最高水位の上に暴浪を受けたことに伴い、大規模な護岸崩壊(写真-1)や離岸堤沈下が県北端の磯原海岸から県南部の鹿嶋市の荒野海岸まで12海岸で発生した。

その他海岸でも人工砂丘崩壊や波崎海岸などで大規模な砂浜浸食(写真-2), また越波による床上浸水や通行止めとなった道路もあり、総海岸線延長が180 kmを超える茨城沿岸全域で高潮被害を受けた。被害額の総計は、保安林護岸被災と護岸崩壊で50億円を越す試算となっている。



(a) 潮位 (TP基準)



(b) 潮位偏差

図-2 2006年10月上旬の茨城周辺の高潮記録(銚子, 小名浜, 鮎川:気象庁観測, 大洗:茨城県観測.)



写真-1 伊師海岸の傾斜護岸崩壊と人工砂丘侵食(日立市)

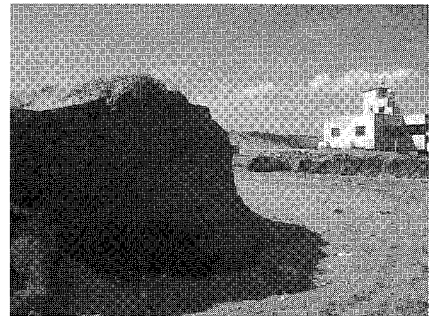


写真-2 須崎海岸の浸食による大規模浜崖(神栖市, 波崎海洋観測施設周辺)

3. 茨城沿岸の高潮の再現確率

今回の高潮を含めた1979年からの28年間における大洗港の潮位記録から極値統計解析を行い、今回の異常潮位の再現期間を求めた。また、2000年以降に高潮が頻発していたので、その前後での再現確率の変化も調べた。図-3は2006年度までの潮位を含めた確率潮位と同2000年までのものを表わしている(観測地基準)。2006年度までの観測値から求めた今回の高潮の再現期間は71年に1回、2000年以前までの観測値から求めた結果は95年に1回であった。近年の気候変動に伴う高潮リスクの増加傾向が示唆される。

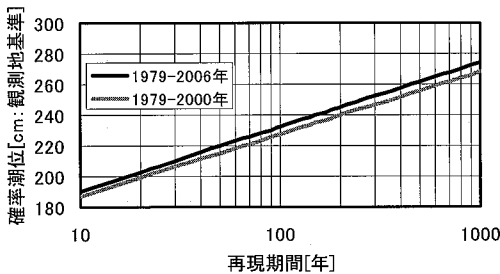


図-3 大洗港における高潮再現確率

4. 2006年10月上旬の高潮の駆動力

高潮の発生機構には、風による海水の吹き寄せ効果、大気圧分布による海面の吸い上げ効果、風向きによってはエクマン輸送、wave setupなどの複数が考えられる。2006年10月上旬の高潮が発生した過程を数値シミュレーションで分析する

(1) 解析方法と計算ケース

高潮の計算のうち、気圧による吸い上げ効果、風による吹き寄せ効果、コリオリ力によるエクマン輸送効果については、水平 flux 保存型の平面2次元長波方程式を用い、差分数値解法で求めた。この基本的な解法は信岡ら(2005)と同じである。この方程式の外力項には、海面での大気圧、風による海面のせん断力、コリオリ力を考慮している。風による海面のせん断力を定めるために用いた海面抵抗係数 C_D は、式(2)で表わされる本多・光易(1980)の式である。

$$C_D = (1.29 - 0.024 U_{10}) \times 10^{-3},$$

$$U_{10} \leq 8 \text{ (m/s)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C_D = (0.581 + 0.063 U_{10}) \times 10^{-3},$$

$$8 \leq U_{10} \leq 35 \text{ (m/s)}$$

海底摩擦に使用したマニングの粗度係数 n は 0.026 である。

観測潮位との比較で必要になる wave setup の効果については、茨城県大洗港の観測データとの検証に対してのみ計算結果に加えた。計算では、現地地形を単純化した平均一様海底勾配の1次元岸沖断面上に、SWANモデル(SWAN Group, 2003)を用い、平均水位分布を求めた。その結果から験潮位のある港湾区域の湾口水深5mに該当する地点の平均水位上昇量を抜き出し、長波方程式から求めた潮位に足し合わせて評価した。なお入射波浪には茨城県大洗港湾事務所における1時間間隔の有義波高と周期の観測記録を用いた。

計算領域は日本全体を覆う大領域と茨城周辺の小領域の2つとし、ネスティング手法を用いて計算を進めた。各領域の緯度経度と格子幅は表-1に示すとおりである。海底地形は、ETOPO2 (NGDC, NOAA) と、J-EGG500, J-BIRD (日本海洋データセンター) のデータを組み合わせて作成した。大気圧・風速分布データには、気象庁GPVのメソ客観解析データ(2006年10月)を用いた。

計算の目的は高潮を引き起こした要因を明らかにすることであり、表-2に示すように高潮の駆動力の作用を変えた、つまり計算で各駆動力を考慮、非考慮と変えた9ケースの計算をおこなった。

表-1 計算領域と格子幅

領域	北緯	東経	格子間隔
大	20 ~ 45°	110 ~ 155°	10 km
小	34.8 ~ 38.5°	139.4 ~ 142.8°	1 km

表-2 駆動力の扱いの違いに関する計算ケース

	Coriolis Force	Advection	Atmo. Pressure	Wind Stress	Wave Set-up
Case1	○	○	○	○	—
Case2	—	○	○	○	—
Case3	—	—	○	○	—
Case4	—	—	—	○	—
Case5	—	—	○	—	—
Case6	○	—	○	—	—
Case7	○	—	—	○	—
Case8	○	—	○	○	—
Case9	○	○	○	○	Addition

(2) 高潮追算結果

図-4に大洗港の潮位偏差の観測値と計算結果を示す。対象とした駆動力の全てを考慮した計算結果がCase9である。観測値と比較すると10cmほど計算値の方が

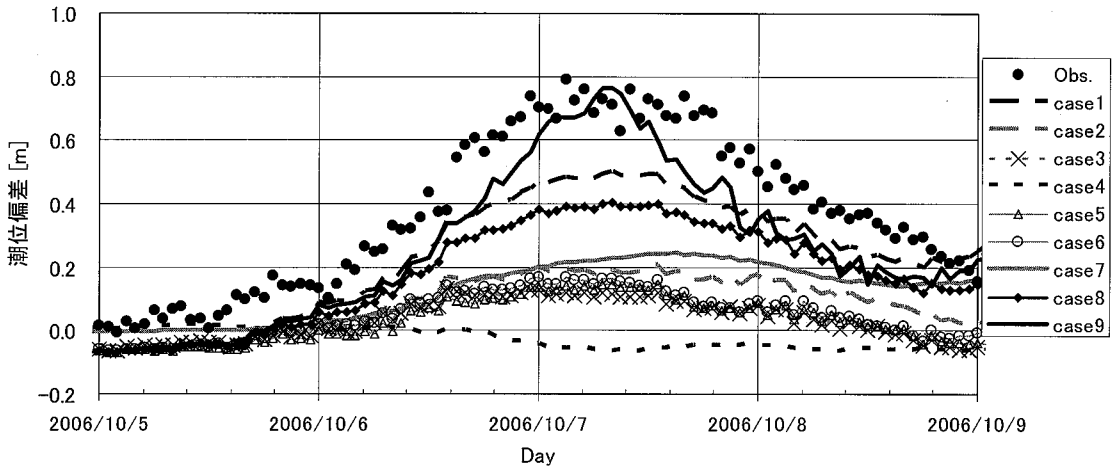


図-4 2006年10月上旬の大洗港の潮位偏差の観測値と計算値

低くなっているが、全体の水位変動をよく表現できているといえる。6日の午後から7日の朝にかけては、5mを超える有義波高を観測した時間帯であり、もっとも危険な時であった。Wave setup だけを除いた Case1 の計算結果ではピーク偏差が 50 cm 程度と 30 cm 低くなっている。この Case1 における偏差空間分布を示したものが図-5である。

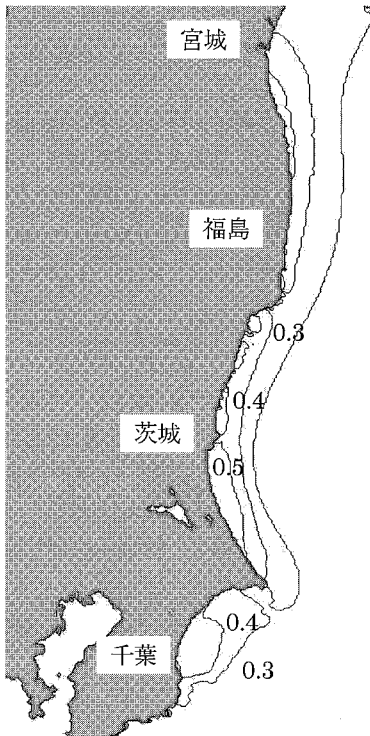


図-5 2006年10月上旬の潮位偏差分布 (Wave Setup の効果を除く)

千葉県の高里浜から計算領域端の宮城県まで連続して偏差が 30 cm を超え、その内の仙台から茨城県波崎までは連続して 40 cm を超えるほど、影響が広域におよぶ特徴をもった高潮であったことがわかる。気象庁が発表した記録から推測するに北は北海道の太平洋岸まで水位上昇が連続したと考えられる。

(3) エクマン輸送の卓越

高潮に及ぼした物理的要因は図-4 の Case2 から Case9 の結果を比較することから推測できる。風の吹き寄せ効果のみを示す Case4 では水位が低下している。これは風が陸から沖方向へ吹いていたためである。気圧による吸い上げ効果による水位上昇はたかだか 20 cm 弱である。大洗港で観測した期間最低気圧が 982 hPa であったことに対応している。

地球の自転に伴うコリオリ力の水位上昇への効果は、風の海面へのせん断力が作用しておこる。したがってコリオリ力の効果は、風とコリオリ力を考慮した Case7 と風みの Case4 を比較することからわかり、コリオリ力による水位上昇量は最大時で 25 cm 以上であることがわかる。また、この効果 Case1 と Case2 の水位差でもあり 6 日午後から 3 日以上続いたことが図から読み取れる。風によるせん断と水柱に作用するコリオリ力が釣りあうがために全流量が風向きから右に向く。この流れをエクマン輸送と呼ばれる。したがって、エクマン輸送が卓越した水位上昇といえる。

水塊が動くことによる移流加速度の水位上昇への効果も排除できないが Case1 と Case8 を比較すると 10 cm 未満でありエクマン輸送より小さい。前節で述べた wave setup の効果も加えて、期間最高水位への各駆動力への寄与率をまとめたものが図-6である。気圧による吸い上げ効果と風の吹き寄せ効果を合わせても 20%

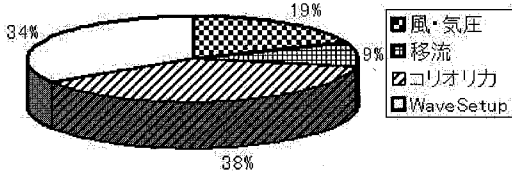


図-6 2006年10月上旬の大洗港における高潮偏差の寄与率

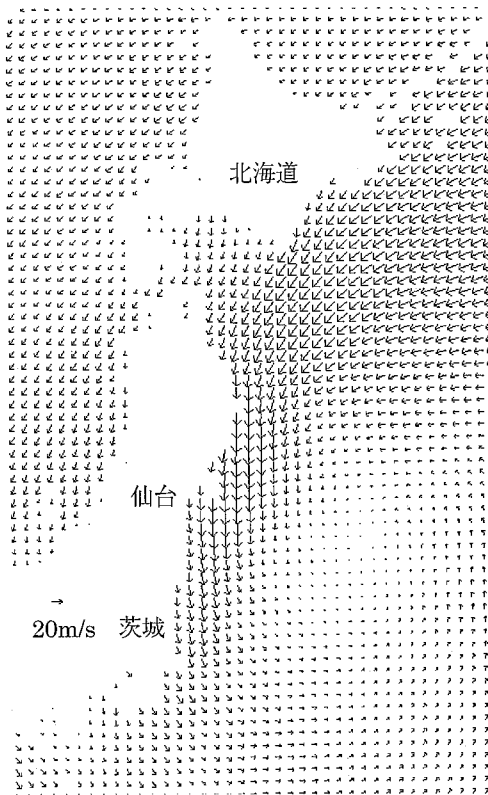


図-7 高潮期間の24時間平均風速
(2006/10/06 14:00~2006/10/07 14:00)

弱, wave setup の効果は 34% であるのに対し, コリオリ力の効果は 38% である. 今回の高潮は, 一般的な高潮に比べてエクマン輸送が卓越したものであったといえる.

(4) 気象場との関係

風のせん断力が, エクマン輸送を引き起こす. 今回の高潮でこの効果が高かったこと, また長期間持続したことを裏付けるために, 大洗港で潮位偏差が大きかった6日14時からの24時間における平均風速分布を求めた. 計算には先述のメソ客観解析データを1時間間隔に補間した風速を用い, それらを期間内で単純平均して算出した. 結果を図-7に示しているが, 24時間平均風速ながら, 岩手県の沖合いから房総半島沖合いへの南向きの風

が明瞭に現れており, その大きさは 20 m/s 以上である. この長時間吹き続けた強い風の分布がエクマン輸送を活性化し, 沿岸で潮位偏差を長時間押し上げた, 高潮と満潮を複数回同時に迎える厳しい状況を引き起こした, といえる.

5. 結 論

茨城にとっては史上最高潮位となった2006年10月上旬の高潮を, 調査解析して次のことを明らかにした. (1) 茨城海岸の全域で護岸・人工砂丘の崩壊が起り, 被害額は50億円を超えるものとなった. (2) 極値統計解析により, 今回の異常潮位は71年に1回の確率で出現する. 2000年以前の高潮位から求めた確率では95年に1回であり, 近年の気候変動によりこれまで被害が少なかった茨城海岸で高潮リスクが急増している. (3) 高潮数値計算より, 非常に広範囲で高潮が発生し, 最大潮位偏差 (wave setup を除く) は, 仙台から茨城県波崎まで空間的に連続して, 40 cm を超えた. (4) 茨城県沿岸では24時間にわたって潮位偏差が60 cm を超えた. 風向きがやや沖向きであったため吹き寄せ効果は若干の海水低下に作用し, 大気圧による吸い上げ効果と合わせても全体の潮位偏差への寄与率は20%以下であった. 他方, コリオリ力の寄与率が38%と wave setup による寄与以上にあり, しかもその作用時間が非常に長かった. (5) 潮位偏差が大きかった24時間の風速 (平均) は, 茨城の沖合で海岸線に平行の南向きに20 m/s を超える強いものであった.

以上より, 今回の高潮は沖合の南向きの強風により茨城海岸に向かうエクマン輸送が長時間卓越したものであり, その期間に大潮の満潮を3回も迎えたことも合わさり広範囲で被害を引き起こしたと言える. 今後の茨城沿岸の長期海岸保全計画のための想定台風・低気圧の設定には, この北風によるエクマン輸送の効果が顕著になるケースも対象候補に入れる必要がある.

参 考 文 献

気象庁(2006): 災害時気象速報, 低気圧による平成18年10月4日から10月9日にかけての暴風と大雨, 災害時自然現象報告書2006年第3号, 40p.
 信岡尚道・J. A. Roelvink・三村信男(2005): ラディエーションストレスの鉛直分布形状と3次元海浜流, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 106-110.
 本多忠夫・光易 恒(1980): 水面に及ぼす風的作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 90-93.
 SWAN Group (L.H. Holthuisen, N. Booij, R.C. Ris, I.J.G. Haagsma, A. T. M. M. Kieftenburg, E.E. Kriezid and M. Zijlema) (2003): SWAN Cycle III version 40.20 USER MANUAL.