

密度成層と内湾海上風の特徴を考慮した東京湾の高潮推算

藤本 憲久*・柴木 秀之**・仲井 圭二***

密度成層を考慮した高潮の多層モデルを東京湾で発生する高潮の推算に適用する。東京湾内の海上風は陸上地形の影響を受けるため、観測風の相関解析結果を利用して内湾海上風に変換するための補正方法を提案する。近年東京湾に来襲し、顕著な潮位偏差を発生させた台風 8506 号と 7920 号を対象に、海上風及び高潮の再現を試みた。推算結果は湾全域にわたり観測値を良好に再現した。この推算モデルを用いて、東京湾の計画台風である伊勢湾台風規模で、大正 6 年台風コースとキティ台風コースを想定した高潮予測を行った。気象庁の推算結果と比較すると、本研究の推算モデルは湾口から湾央にかけて数 10 cm 程度高い潮位偏差を予測した。

1. はじめに

内湾において発生する高潮を、数値シミュレーションにより忠実に表現するためには、湾外も含めた湾口から湾奥までの広範囲で発生する高潮を、最大値のみでなく時系列も合わせて精度良く再現する必要がある。外洋に面する沿岸で発生する高潮の再現精度を向上させる条件として、密度成層による高潮の増幅と wave setup による水位上昇が重要である点は明らかにされている(柴木・中山, 2000; 柴木ら, 2001)。一方、内湾で発生する高潮に対する重要な条件は、海上風の推算精度の向上である。周囲を陸地で囲まれた内湾では、海上風が陸上地形の影響を受ける。そのため、台風モデルのみによる高潮推算を行うと、湾内の潮位偏差の推算値は観測値と一致しない場合が多い。

本論文では、東京湾内の観測風の相関解析により、陸上地形が湾内海上風の分布に及ぼす影響を明らかにする。そして、この解析結果を利用した内湾海上風の平面場の推定法を提案する。この海上風推定法と前述した密度成層を考慮すると、内湾の高潮推算精度が向上することを示す。

さらに、東京湾における計画偏差の参考値とされている気象庁(1962)による想定台風時の高潮推算値と本研究で提案するモデルを用いた推算値を比較し、予測結果の量的な違いを明らかにする。

2. 東京湾高潮推算に用いる地形と観測データ

(1) 高潮推算に用いる地形データ

地形データの作成範囲は台風の通過経路を含む太平洋の広域とし、東京湾沿岸は、図-1 に表すように 200 m 格子により地形近似を行う。湾外の地形は 200 m 以上の大格子により地形近似を行い、サイズの異なる格子間で水位と流量の結合を行うことにより、広域から湾内までの

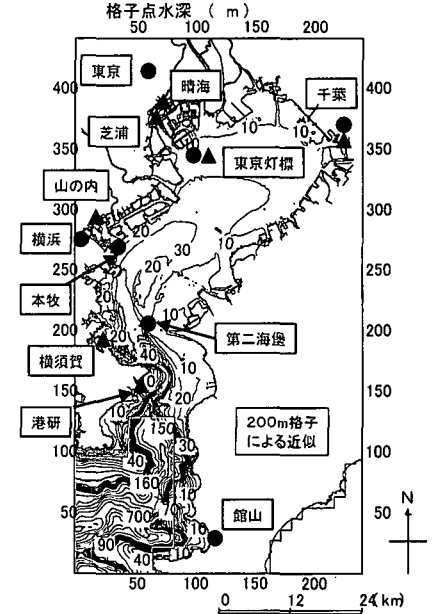


図-1 東京湾の地形近似と気象・潮位の観測点

同時計算を行う。

(2) 気象と潮位の観測点

東京湾における潮位の観測点を図-1 に▲印で表し、気象観測点を●印で表す。潮位観測点は、湾口の港研・横須賀、湾西部の山の内、湾奥の東京灯標・芝浦・晴海・千葉がある。一方、気象観測点は、湾口の第二海堡・館山、湾西部の本牧・横浜、湾奥の東京灯標・東京・千葉がある。これらの点の観測値により、近年顕著な高潮が発生した台風 8506 号と 7920 号来襲時の気圧場、風場及び高潮の推算精度を検証する。また、観測風の相関解析を利用して東京湾の内湾海上風のモデル化を行う。

3. 内湾海上風のモデル化

(1) 気圧と海上風のモデル化

Myers の式による台風影響圏内の気圧分布のモデル化と海上風場の推定は、次の手順により行う。

国土交通省関東地方整備局港湾空港部横浜港湾空港技術調査事務所所長

** 正会員 工修 株式会社エコー環境水工部副部長

*** 正会員 工修 前(財)沿岸開発技術研究センター波浪情報部課長

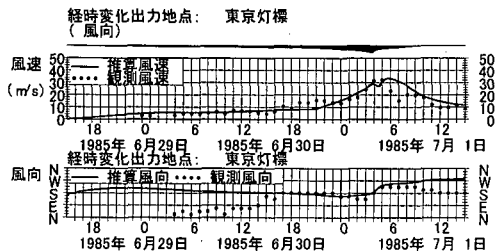


図-2 推算風と観測海上風の経時変化の比較

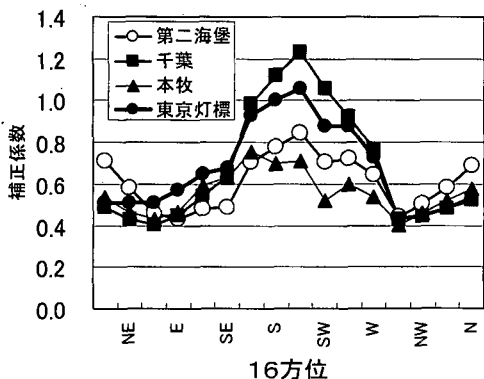
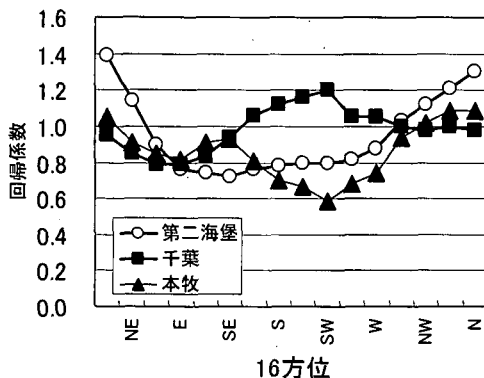


図-3 東京灯標と風観測地点における観測風相関解析から求められる風向別回帰係数

- ①地上天気図に記載された台風影響圏内の等圧線分布から台風の気圧分布を近似するための最適な台風半径を最小自乗法により求める。
- ②この台風半径を Myers の式に当てはめ、東京湾内の気象観測点における気圧の経時変化を推算する。
- ③東京湾内の推算気圧と観測気圧の経時変化を比較し、観測気圧が再現可能なように台風半径を修正する。
- ④台風影響圏外の気圧は天気図に記載されている等圧線分布をもとに設定する。
- ⑤台風・傾度風ハイブリッドモデル（以降、HB モデルと呼ぶ）を用いて、台風影響圏内と圏外の気圧を滑らかに接続する。上空大気の風も同様のモデルで推算する。
- ⑥上空大気の風を海上風へ変換するために、風速と緯度に依存する補正が可能な境界層モデルを適用する。HB モデルと境界層モデルによる計算は後藤・柴木（1993）にならう。

図-2 は①から⑥の手順により推算された風と観測風の経時変化の比較を表す。東京灯標は海上風観測点である。推算風との比較を見ると、台風が最接近するまでの時間帯は両者がほぼ一致する。一方、台風通過後の7月1日6時以降はW系の推算海上風が過大となる。

(2) 観測風の相関解析

HB モデルによる推算風では表現できない湾内の海上風の空間的な分布特性を把握するために、図-1 に表す気象観測点における観測風の相関解析を行う。

第1段階は、東京灯標においてHBモデルによる海上風推算値と観測値との風向別相関解析を行い、推算値を観測値に補正する係数を求める。相関解析に用いる推算値は、1974年～1989年までの16年間に東京湾へ来襲した気象擾乱を1,282個抽出し、これら気象擾乱時の東京灯標における海上風をHBモデルにより推算して得る。この相関解析から求まる回帰係数は、図-3 下図において東京灯標として表す風向別補正係数Aとなる。図を見ると、補正係数は東京湾の湾軸に沿うS系で1.0以上となり、推算値よりも観測値が大きくなる。他の風向は1.0以下となる。

第2段階は、東京灯標の海上風観測値と他の5地点(第

二海堡・横浜・本牧・東京・千葉)の観測値との風向別相関解析を行う。この解析により、図-3 上図に表す東京灯標の観測値から他の地点の観測値を推定する回帰係数Bが求められる。

第3段階は、東京灯標の補正係数Aと、他の地点との回帰係数Bの積 $A \cdot B$ を求める。図-3 下図は、前述した東京灯標の風向別の補正係数Aと他の観測点における風向別の補正係数 $A \cdot B$ を表す。この係数を各観測点におけるHBモデルによる推算海上風に乗ずると、各観測点が有する陸上地形の影響を考慮した海上風に補正できる。

第4段階は、図-4 に表すように観測点を頂点とする三角形要素網を、東京湾全域が計算領域に取り込まれるように構成し、各観測点には補正後の海上風を設定する。そして、要素内の海上風は3頂点の座標値を変数とする重み関数を用いた平面補間により推定する(数値流体力学編集委員会編, 1997)。図-4 に表す館山と湾口の2点は推算海上風をそのまま与える。また、東京湾奥に仮想点を設定し、千葉と同じ値を与える。ここで、陸上風観測点における相対的に開放した方向については、東京灯標と同じ補正係数を用いる。例えば、本牧はE系が該当する。ただし、千葉は東京灯標よりも大きい補正係数の

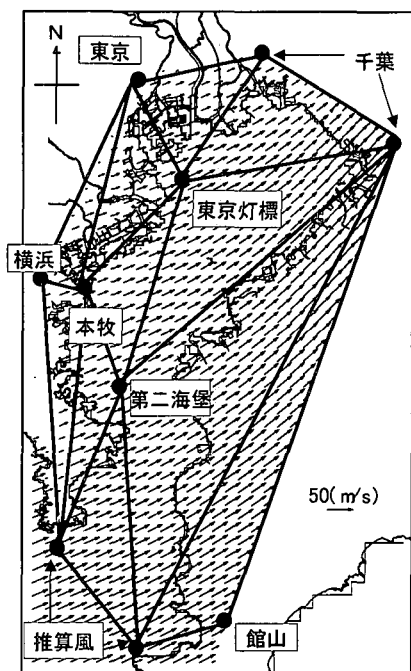


図-4 観測風補間に用いる気象観測点と補間領域分割図及び推算風補正モデルによる内湾海上風の分布例

ため、千葉の値を採用する。このようにして、風向別の地形条件の影響度を補正係数により定量化し、陸上風観測点における推算風の補正は、相対的に開放した海風系の方角に対して補正係数 A を、陸風系に対して補正係数 $A \cdot B$ を乗じる。

以上の手順により、HBモデルによる推算海上風から陸上地形の影響を受けた内湾海上風の平面分布が推定できる。この方法を推算風補正モデルとし、顕著な高潮を発生させた台風8506号と7920号時の高潮推算に適用する。

(3) 推算風補正モデルによる海上風の推定

図-4は推算風補正モデルによる海上風推定結果の例であり、台風8506号接近時刻の風速ベクトルの分布を表す。図によれば、湾西岸沿いは陸上地形による遮蔽効果により風速が弱くなり、湾口から湾奥の湾軸に沿っては強風となる傾向が見られる。また、図-5は東京灯標における補正後の推算風と観測風の経時変化の比較を表す。観測風の経時変化の再現性は良好と評価できる。

この推算風補正モデルにより、規模・コース等を任意に想定した台風来襲時の内湾海上風を推定できる。

4. 近年の顕著な高潮の再現

(1) 台風8506号による高潮の再現

はじめに、台風8506号時の気圧場と海上風場の推定に

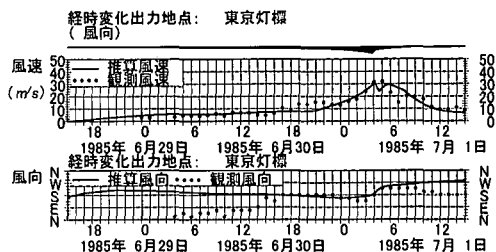


図-5 東京灯標における推算風補正モデルを用いた台風8506号時の推算風と観測風の経時変化の比較

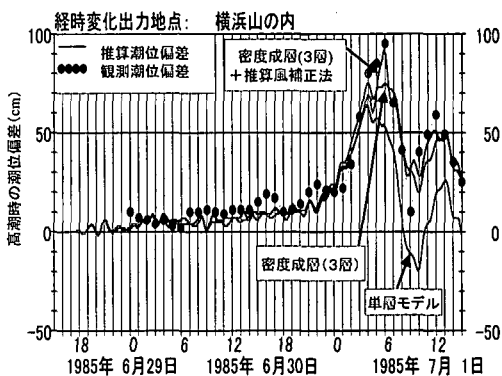


図-6 横浜山の内における台風8506号時の潮位偏差の推算値と観測値の経時変化の比較

HBモデルを適用し、単層モデルによる高潮推算を行う。

計算期間は6月29日15:00～7月1日15:00までの48時間とする。初期条件は潮位偏差及び流速を0とし、気圧と海上風は12時間かけて次第に所定の値へと漸近させる。外洋境界では、気圧降下分の潮位偏差を設定し、計算領域からの反射波は自由透過させる。

図-6は横浜山の内における潮位偏差の推算値と観測値の経時変化の比較を表す。また、図-7は湾口から湾奥にかけての潮位観測点における最大潮位偏差の推算値と観測値の比較を表す。図-6に表す単層モデルの経時変化を見ると、推算値は観測値を大きく下回る。このように推算値が過小となる傾向は、図-7に表す単層モデルの結果から判断すると、湾口の港研から湾奥の晴海までの湾内の広い範囲において生じている。

次に、密度成層を考慮した3層の高潮推算を行う。この計算では、中層と下層の密度差が 10 kg/m^3 となる密度成層を設定する。ここで、3層の高潮推算の理論及び推算方法は柴木ら(2001)にならう。図-6及び図-7に表す密度成層を考慮した推算結果を見ると、単層モデルに比べて湾全体の潮位偏差は10～20 cm程度高くなり、湾奥の千葉が過大となる点を除けば、潮位偏差の再現性は向上する。特に、湾口の港研において0.5 mを超える潮位偏差が再現されている。このような潮位偏差の上昇は、

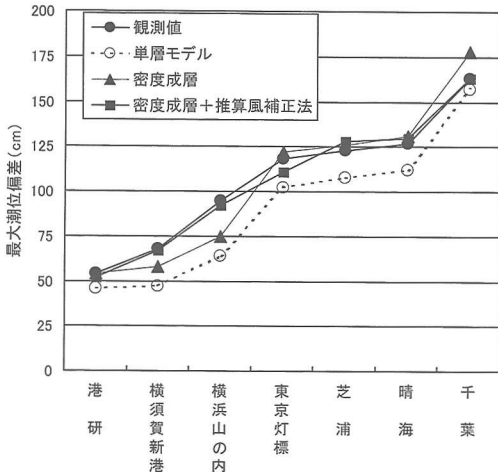


図-7 高潮検証地点における台風 8506 号時の最大潮位偏差の観測値と推算値との比較

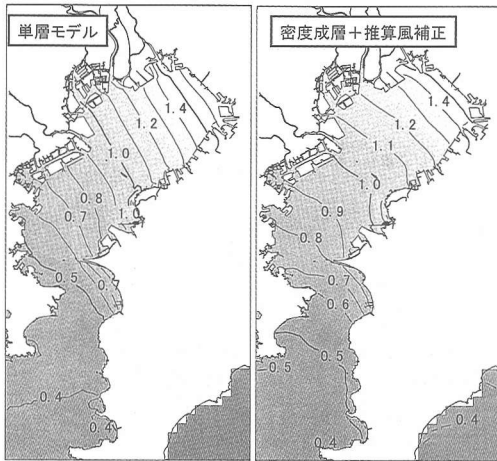


図-8 台風 8506 号時の最大高潮偏差の分布 (単層モデルと密度成層+推算風補正モデルとの比較)

湾の沖合から湾口にかけて生じており、その影響により湾内全体の潮位偏差が上昇する。この状況は柴木ら(2001)が指摘した。

さらに、推算風補正モデルにより推定される内湾海上風を高潮推算に適用する。図-6 及び図-7 に表す推算風補正モデルを用いた計算結果を見ると、最大潮位偏差の推算値と観測値は湾内全体でほぼ一致し、経時変化についても良く一致している。

図-8 は台風 8506 号時の東京湾全域における最大潮位偏差の分布を表し、左図が単層モデルによる分布を、右図が本研究で提案した密度成層+推算風補正モデルによる分布を表す。提案したモデルによる推算値は、単層

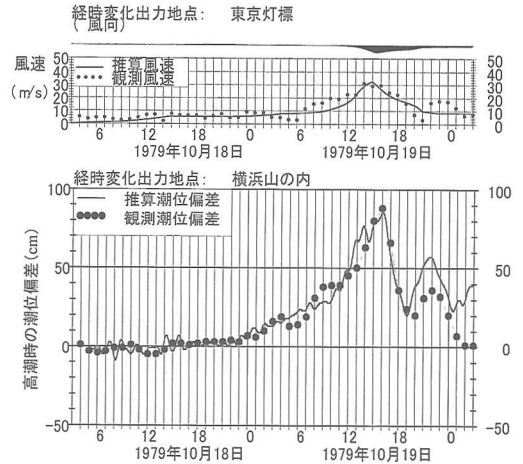


図-9 台風 7920 号時の東京灯標における推算風及び山の内における推算潮位偏差と観測値の経時変化の比較

モデルの推算値と比較して、湾口で大きくなり、逆に湾奥で小さくなる傾向にある。すなわち、湾内で生じる高潮による水位勾配は緩やかになる特徴が確認できる。

(2) 台風 7920 号による高潮の再現

台風 8506 号時の高潮再現モデルを、台風 7920 号時の東京湾における高潮推算にも適用する。図-9 上図は、東京灯標における海上風の推算値と観測値の経時変化を比較し、下図は横浜山の内における潮位偏差の推算値と観測値の経時変化を比較したものである。

海上風と高潮ともに、推算値は観測値の経時変化をほぼ再現している。特に、観測風に見られる台風最接近後の W 系風の風速が減少する傾向も再現されている。

(3) 設定条件が高潮再現に及ぼす効果

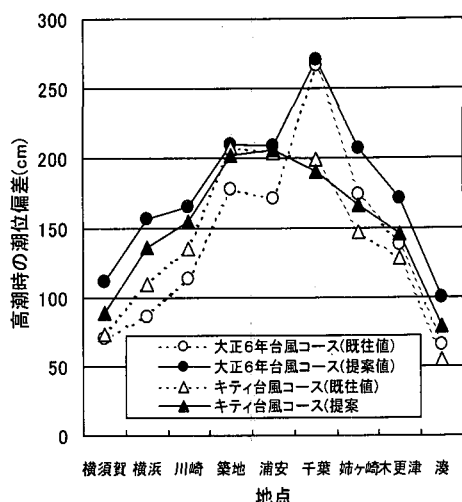
図-7 に表した東京湾の潮位観測点における最大潮位偏差の観測値と計算モデルの違いによる最大潮位偏差の推算値の比較から、設定条件が高潮の再現に及ぼす効果は次のようにまとめられる。

単層モデルは、湾奥の千葉を除く湾口から湾奥までの湾全体の高潮を過小に計算する。それに対し、密度成層を考慮すると、湾口から湾奥にかけて高潮推算値は 10～20 cm 程度上昇し、再現性は向上する。さらに、推算風補正モデルにより内湾海上風を推定すると、湾口から湾奥における潮位偏差の推算値は観測値とほぼ一致する。

5. 想定台風による高潮の予測

(1) 想定台風条件

東京湾の計画偏差の決定において想定した台風条件は、規模が伊勢湾台風であり、コースが大正 6 年台風とキティ台風の 2 種類である。これらの想定台風条件につ



図一10 東京湾代表点における提案モデルによる最大潮位偏差の予測値と気象庁モデルによる予測値の比較

いて、気象庁（1962）は台風モデルによる海上風推算と単層モデルによる高潮推算を行った。この時に推算された潮位偏差が東京湾計画偏差の参考値となっている。

本研究では、提案したモデルを用いて、2種類の想定台風時の高潮推算を行い、気象庁の推算結果との比較を行う。ここで、両者の台風条件の違いは次のようにまとめられる。

気圧場の近似は、気象庁が藤田の式を、本モデルが Myers の式を採用した。また、推算風を海上風へ変換する方法は、気象庁が傾度風の低減率 0.6、場の風の低減率 4/7、吹き込み角 30° を使い、本モデルが前述した推算風の補正モデルを用いている。その他の台風属性（台風中心位置、中心気圧、台風半径、移動速度）は同じである。

（2）高潮の予測結果の比較

図一10は2種類の想定台風（大正6年台風とキティ台風の2コース）による東京湾の代表点における最大潮位偏差を、気象庁の予測値と本モデルの予測値について比較したものである。図の横軸は、湾全体の最大潮位偏差の分布を把握できるように、西岸沿いの湾口から湾奥までと東岸沿いの湾奥から湾口までの代表点順に配置した。

図から、予測値の比較結果は次のようにまとめられる。

大正6年台風コースの場合、湾奥の千葉における最大潮位偏差は両者で一致する。しかしながら、湾口から湾奥（西岸の横須賀から浦安、東岸の湊から姉ヶ崎）にかけての最大潮位偏差は、本モデルの予測値が気象庁の予

測値よりも大きい。特に、湾西岸の横須賀から川崎において差が顕著であり 50 cm に及ぶ。一方、キティ台風コースの場合、湾奥の築地から千葉における最大潮位偏差は両者で一致する。しかしながら、湾口から湾中央にかけての最大潮位偏差は、本モデルの予測値が気象庁の予測値よりも 10 cm 程度大きい。

2種類の想定台風とも、本モデルの予測値は気象庁の予測値と比べると、湾奥ではほぼ一致するものの、湾口から湾中央において大きくなる。この傾向は前述した台風 8506 号の単層モデルによる推算値と提案モデルによる推算値の比較結果と整合する。

6. まとめ

本研究では、東京湾の湾口から湾奥までの潮位偏差を精度良く再現する高潮推算モデルを提案した。東京湾の潮位偏差を再現するための条件は、2つが挙げられる。

①密度成層による高潮増幅

②陸上地形の影響を受けた内湾海上風

このうち、内湾海上風の推定は、東京湾の気象観測点における観測風間の相関解析結果を利用して、推算風を空間的に補正するモデルを適用した。このモデルは、任意の台風来襲時の内湾海上風を予測することができる。

提案モデルを想定台風時の高潮予測に適用し、気象庁の予測値との比較を行った。結果は次のようにまとめられる。

③湾奥で予測される潮位偏差はほぼ同値である。

④湾口から湾中央で予測される潮位偏差は、提案モデルによる値の方が大きく、その差は数 10 cm となる。

本研究は、「東京湾高潮対策検討委員会」（委員長 東京大学 渡辺晃教授）において審議された内容の一部をまとめたものである。委員長をはじめとする委員ならびに関係者各位から貴重なご助言ならびに多大なるご協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 気象庁（1962）：東京湾高潮の総合調査報告，気象庁技術報告，第 48 巻，pp. 286-290.
- 後藤智明・柴木秀之（1993）：陸上地形の影響を考慮した海上風推算，港湾技術研究所報告，第 32 巻，第 3 号，pp. 65-97.
- 柴木秀之・中山哲殿（2000）：密度成層と wave setup を考慮した多層高潮推算による熊野灘高潮痕跡値の再現，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 201-205.
- 柴木秀之・加藤史訓・山田浩次（2001）：密度成層と wave setup を考慮した土佐湾異常高潮の推算，海岸工学論文集，第 48 巻，pp. 286-290.
- 数値流体力学編集委員会編（1997）：非圧縮性流体解析 第 3 章有限要素法による解析，pp. 159-162.