

東京湾における陸棚波に起因した異常潮位の分析とその将来影響

Analysis of Abnormal Tides in Tokyo Bay induced by Incoming Continental-shelf Waves

高木泰士¹・木津翔平²・柴山知也³

Hiroshi TAKAGI, Shohei KIDU and Tomoya SHIBAYAMA

Abnormal tides wherein the water level remains high for a few days despite the absence of remarkable meteorological disturbances may occur due to incoming continental-shelf waves. In this study, it is assumed that the continental-shelf wave can be initiated off the Choshi coast; this wave will subsequently reach Tokyo Bay. First, the characteristics of tide anomalies are discussed on the basis of tide, wind, atmospheric pressure, and wave data obtained near Choshi. Second, several obvious cases of water-level propagation from Choshi to Tokyo Bay are collected by scrutinizing the tidal data at both stations. Finally, it is discussed how the adverse effects of abnormal tides induced by the continental-shelf waves may appear to be more serious if the sea level rise is dramatic.

1. 研究の背景・目的

2006年10月上旬, 急速に発達した低気圧は, 太平洋東岸の各地において, 記録的な高波や高潮をもたらした(気象庁, 2006). 一方, 横浜港をはじめとする東京湾内各地においては, この低気圧に伴う気象擾乱の影響が過ぎ去り, 天気も十分に穏やかな時間帯であったにも関わらず, 潮位偏差60cmにも達する異常潮位が発生し, 各地で冠水を引き起こした(写真-1). 本研究では, この原因を銚子沿岸での水位上昇とそれが陸棚波の形態で東京湾に伝播した結果生じた異常潮位と考えた. これが正しいならば, 東京湾において異常潮位と考えられる現象の1つが, 銚子付近での気象や海象と密接に関係することになり, 防災対策上, この関係性を十分に分析しておく必要がある. そこで, 本研究では, 過去の潮位・風・波浪・気圧の各データを分析し, 銚子沿岸での潮位偏差の出現特性と東京湾内への陸棚波伝播の有無や発生頻度, 伝播速度, 継続時間等を調べる. そして, これらの分析に基づいて, 将来海面上昇が顕著となった場合の沿岸防災対策上の諸影響についての考察を試みる. なお, 本研究では横浜港を東京湾の代表地点として検討を進める.

2. 陸棚波に関連する既往の研究

陸棚波の現象をはじめて示した研究は, Shoji(1961)の研究であり, 日本沿岸22地点の日平均潮位を調べて, わが国の太平洋岸には数日周期(2, 3日から10日)の海面変動が2.5~7m/sの速度で北から南へ, すなわち陸岸を右に見て進むことがあることを発見した. また, Yoshida et al.(1972)は, 1971年9月に日本各地で発生し,



写真-1 横浜・大黒ふ頭の冠水(写真提供:後藤浩昭氏)

当時社会的にも注目を集めた異常潮位の原因の一つとして陸棚波を挙げている.

最近の事例としては, 2001年9月に広島湾で発生した異常潮位が厳島神社の冠水を引き起こした事例を末永ら(2003)がまとめており, 全体の潮位偏差約40cmのうち, 約20cmが地盤高の変動, 約13cmが黒潮蛇行や海流の振動, 約7cmが太平洋沿岸を伝播した陸棚波の影響であったと推測している. また, 信岡ら(2007)は, 2006年10月上旬に発生した太平洋東岸の異常潮位について数値解析に基づく検討を行っており, 潮位偏差に及ぼす効果として, エクマン輸送の寄与が吹き寄せや吸い上げ, wave setupの寄与よりも大きかったことを示している. 同様な結論は, 同一の気象擾乱に対して北海道東部太平洋沿岸を対象として, 橋本ら(2007)によって行われた検討においても得られている.

その他, 陸棚波の伝播に関連して, Kitade et al.(2000)は, 房総半島東岸で陸棚波の性質を持って伝播する沿岸補足波の大部分が, 房総半島南東の陸棚幅が急激に減少する海域で内部ケルビン波タイプの波と陸棚波のタイプに分離することを示している.

1 正会員 博(工) 横浜国立大学 特別研究教員 大学院環境情報研究院
2 横浜国立大学 大学院修士課程 工学府社会空間システム学専攻
3 フェロー 工博 横浜国立大学 教授 大学院工学研究院

3. 銚子沿岸における潮位偏差

ここでは、東京湾に伝播する陸棚波系の異常潮位の起源が銚子沿岸での顕著な潮位偏差にあると考えて、銚子沿岸での潮位偏差の出現特性を分析する。なお、潮位偏差としては、気圧成分に対する補正前の値と補正後の値の2種類があるが、本稿では前者を ξ_0 、後者を ξ_1 の記号を用いて区別する。

(1) 潮位偏差の出現特性の分析

銚子における1967年から2006年の40年間を対象として、日本海洋データセンターの潮汐データ(但し、1972、78-80年の計4年分は欠落)および60分潮に基づく推算潮位より潮位偏差 ξ_0 を求めて、気象業務センターの気象データベースに収録されている海面気圧を使用して気圧成分補正値 ξ_1 を求めた。図-1は各年の最大潮位偏差、また図-2は顕著な潮位偏差として、 ξ_0 が30cm以上の出現時間を年ごとに累計した結果である。

これらより、東京湾において異常潮位が出現した2006年は、銚子における潮位偏差に関しても、過去40年間で規模、出現時間ともに最大級であったことがわかる。

なお、気候変動が潮位偏差に及ぼす影響についても危惧されるところであるが、少なくともこの2つの結果からは明瞭なトレンドを見出すことはできない。

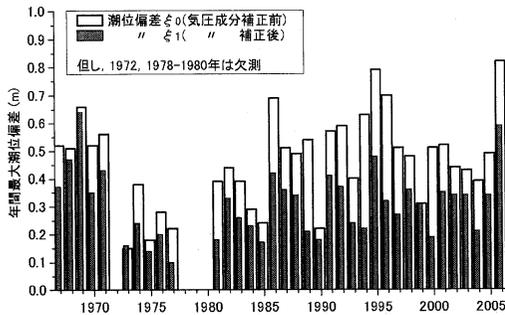


図-1 銚子における年間最大潮位偏差の推移

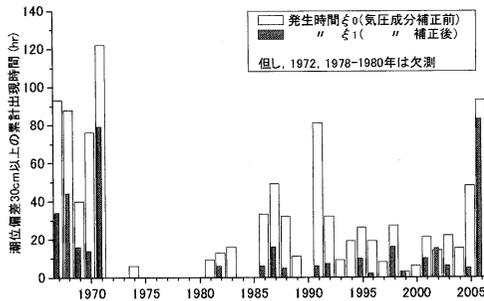


図-2 銚子における顕著な潮位偏差の累計出現時間

(2) 潮位偏差に及ぼす物理的要因の分析

防災の側面からは、災害につながる事態が起これらと判断された際、適切なタイミングで予報を発令する措置が望まれる。陸棚波系の異常潮位に関しては、現在までのところ、発生を予報できる段階には至っていないが、今後は津波や高潮同様に予報技術を向上していく必要性があると考えられる。そのためには、陸棚波の場合、その起源となる高潮位がどのような物理的要因によって発現しうるかを把握しておく必要がある。

一般的に、沿岸において高潮位を引き起こす要因としては、気圧や風の効果、wave setup、エクマン輸送、さらには海水の熱膨張や海流の位置や強度などが関係してくると考えられる。このような様々な物理的要因のうち、図-3は気圧成分を取り除いた潮位偏差 ξ_1 と風向および波高との相関を調べた結果である。対象期間は、2001年から2005年の計5年間であり、風は犬伏埼灯台のデータ、また波高はナウファスで入手可能な鹿島港でのデータを利用した。但し、風データは、風速10m/s未満のデータを除外し、比較的風速が大きなきの相関に注目した。太平洋東岸の海岸線は概ね南北に伸びているため、北寄りの風が卓越する場合にエクマン輸送により沿岸での水位上昇が発生し、反対に南寄りの風により水位低下が発生すると考えられる。図-3の潮位偏差の傾向はN系の風向では正の偏差、反対にS系の風向では負の偏差を示すため、一見すると風向と潮位偏差 ξ_1 に強い相関があるように感じられ、エクマン輸送の寄与が推測される。

しかし、同時にN系の風向が卓越した場合、S系の風向よりも波高が顕著に出現する傾向を読み取ることがで

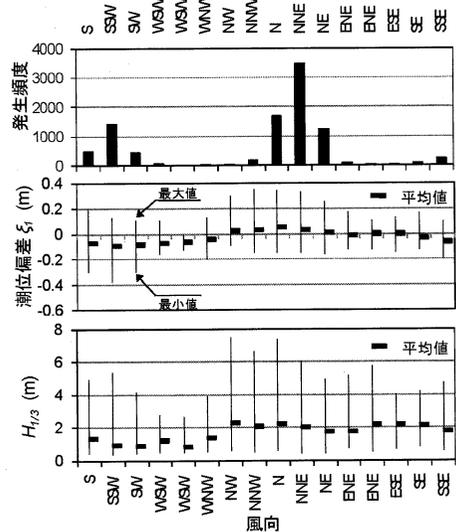


図-3 銚子における潮位偏差と風向・波高の相関

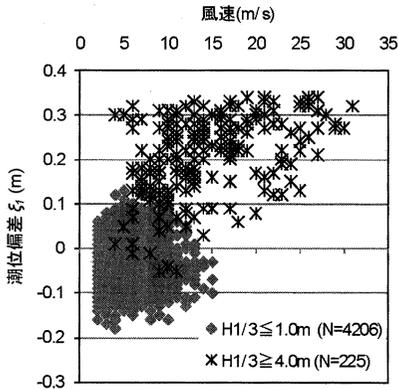


図-4 銚子における風速(風向N,NNE,NE)および波高が潮位偏差に及ぼす影響

き、このため潮位偏差 ξ_1 は風向よりも波高、すなわちwave setupの出現特性で決定づけられている可能性もある。

そこで更に、図-3より発生頻度の高いことが判明したN, NNE, NEのN系の風向3方向のデータのみを抽出して、波高が比較的穏やかな際(1m以下)と荒れている際(4m以上)の2パターンの波高レンジに対する潮位偏差の特性を調べた結果を図-4に示す。潮位偏差 ξ_1 に対してN系の風向によるエクマン輸送の寄与が卓越するならば、波高のレンジに関係なく、風速の増加に伴って潮位偏差は単純増加していくはずであるが、風速が比較的小さいレベルにおいても潮位偏差が30cmを越える場合もあり、エクマン輸送の寄与は明瞭には確認できない。一方、波高のレンジの違いが潮位偏差に及ぼす影響は明瞭であり、高波浪時には正の潮位偏差が非常に顕著に現れている。したがって、潮位偏差に及ぼすエクマン輸送とwave setupの両者の寄与を比較した場合、wave setupの寄与の方がより大きいと考えることができる。

また、潮位偏差 ξ_1 を目的変数、N系の風が吹いているときの風速と波高の2つを説明変数として、重回帰分析を行った結果、標準偏帰係数は風速が0.11、波高が0.51、また重相関係数は0.58と計算された。この結果、やはり潮位偏差に対する波高の影響は風向・風速の影響よりもかなり大きいことがわかる。

したがって、少なくとも2001年から2005年のデータについては、潮位偏差 ξ_1 の大部分がwave setupの寄与と解釈することができる。しかし、2006年10月上旬の銚子の例のように潮位偏差 ξ_1 が60cmにも達する異常潮位をwave setupの寄与のみで説明できないことは、信岡ら(2007)の研究で明らかになっている。また、図-4においてほぼ35cmあたりで頭打ちになっていることを考えると、銚子地点でのwave setupは35cmを越えない範囲で

潮位偏差に影響する可能性を指摘することができる。つまり、2006年10月上旬の例では、残りの25cm程度の潮位偏差分に寄与した物理的要因を考える必要があるが、信岡らはこの事例に対してエクマン輸送の寄与が全体の38%程度であることを示しており、25cm程度の偏差はこのエクマン輸送の寄与であった可能性が高い。

以上より、銚子における潮位偏差の物理的要因をまとめると、潮位偏差 ξ_1 はwave setupの寄与で大部分が説明可能であるが、過去最大レベルの異常潮位時にはエクマン輸送の寄与を考慮しないと説明がつかない。したがって、防災上、陸棚波の起源となりうる銚子での潮位偏差を監視する上では、特に波高と北寄りの風がもたらすエクマン輸送の両者に注意する必要があると考えられる。

4. 東京湾内への陸棚波伝播

以上のような物理的要因により、銚子沿岸において顕著な水位上昇が長時間継続した場合、ポテンシャル渦度の保存を満たすために浅水での水柱が負の渦度を獲得し、その結果陸棚波の伝播が発生することになる(図-5)。ここでは、銚子での水位上昇と東京湾への伝播の関係性を防災上の視点を重視して分析を行う。

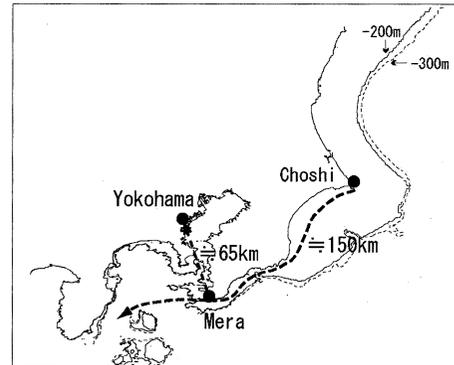


図-5 陸棚波の伝播経路

(1) 陸棚波の理論解

伝播速度の理論解は、不連続水深の場合、非分散性の波動として以下のように導かれる(宇野木, 1993)。

$$C = fL \left(1 - \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (1)$$

ここで、 f はコリオリパラメータ、 L は陸棚の幅、 h_1 は陸棚水深、 h_2 は外洋の水深である。

GISを用いて、房総半島周辺10地点の陸棚幅を算出したところ、陸棚水深を200mと仮定した場合、平均陸棚幅は26.7km、また陸棚水深を300mと仮定した場合、平均陸棚幅は29.1kmであった。接続する外洋の水深 h_2 を8000mと仮定すると式(1)より陸棚波の平均伝播速度が

2.2m/s($h_1=200\text{m}$), 2.4m/s($h_1=300\text{m}$)と計算される(但し、鹿島灘 36°N での $f=8.57 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ とする)。

(2) 2006年10月上旬の事例

写真-1からわかる通り、横浜で冠水が発生した時間帯は北寄りの風が5~7m/s程度吹いていたものの、顕著な高潮が発生するような気象条件ではなかった。図-6に示す通り、この期間の潮位偏差のピークは、銚子、布良、横浜の順に遅れて発現していることがわかる。銚子と横浜では1日程度の時間差があり、伝播速度は2.5m/s程度と計算される。したがって、ケルビン波のような重力波と比較すると非常に遅い速度で伝播し、また理論速度とも近似しているため陸棚波の形態で伝播した可能性が高いと考えられる。

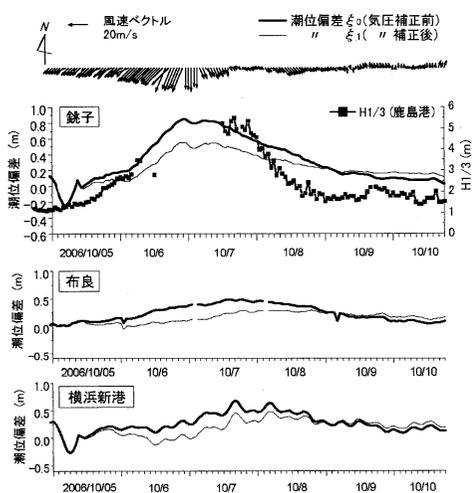


図-6 2006年10月異常潮位発生時の潮位偏差

(3) 2001年~2005年の陸棚波伝播の発生事例

銚子において潮位偏差 ξ_0 が30cm以上に発達し、かつ偏差のピークが横浜へと半日から2日程度とゆっくりとした速度で伝播したと判断できるケースを2001年から2005年の計5年間の潮位データの中から抽出した。その結果、表-1に示す合計7つの時期に銚子から横浜へ向けて潮位偏差が伝播する状況を確認することができた。表-1の最下段には2006年10月の事例についても示しているが、いずれの伝播速度も理論速度の値と同程度の値を示しており、陸棚波の形態で伝播した可能性が高いと考えられる。

5. 陸棚波に対する防災上の留意点と将来的な影響

(1) 横浜港における異常潮位の事例

台風や低気圧の通過に伴う一般的な高潮以外で、原因が特定できないものの、顕著な潮位偏差が長期間継続する現象を異常潮位と考えると、少なくとも横浜港におい

表-1 陸棚波伝播の実事例 (2001年~2005年)

	起時	伝播時間 (hr)	伝播速度 (m/s)	銚子偏差 ξ_0 (m)	横浜偏差 ξ_1 (m)	偏差比 横浜/銚子	継続期間 (days)
1	Jan-01	12.5	4.78	0.29	0.17	0.59	2-3
2	Apr-02	15.0	3.98	0.32	0.20	0.63	4
3	Sep-03	19.5	3.06	0.29	0.29	1.00	2-3
4	Nov-03	17.5	3.41	0.31	0.27	0.87	3-4
5	Oct-04	33.0	1.81	0.25	0.15	0.60	4-5
6	Jan-05	38.5	1.55	0.23	0.13	0.57	3
7	Sep-05	25.0	2.39	0.33	0.28	0.85	4
	Oct-06	24.0	2.50	0.55	0.45	0.81	3-4

ては、2006年10月の事例以外にも、1971年9月と1972年7月に連続して発生していたことが過去の新聞記事や神奈川県治水事務所へのヒアリング結果より明らかになった。このうち、1971年の事例では、横浜において4、5日間連続して冠水被害が発生している。この時期は秋の大潮の時期にあたり、また高潮位が長期間継続したために、満潮時刻が幾度と重なり、冠水被害が連続して発生したものと考えられる。なお、Isozaki(1971)はこの期間の潮位変動に陸棚波と考えられる伝播が太平洋岸を東から西へと伝播する状況を明らかにしている。

(2) 陸棚波に対する防災上の留意点

1971年と2006年の異常潮位を横浜港における各基準高に対して比較した結果を図-7に示す。このように比較してみると、1971年のケースは朔望平均満潮位と比較すると20cm以上も高い潮位であったけれども、現在の高潮注意報の潮位水準には届かない程度の潮位であったことがわかる。現在では護岸の改修が当時と比較すると相当に進んでいるため、このときと同程度の潮位が出現しても当時のような被害が発生するとは考えにくい。

一方で、2006年のケースは1971年のケースと比較して、さらに40cmも潮位が上昇しており、きわめて特異な状況であったことがわかる。しかし、その2006年のケースにしても、高潮注意報は発令されるが、警報は発令されないレベルである。しかし、写真-1からも明らかな通り、かなりの冠水が実際には発生しており、必ずしも高潮注意報や警報が陸棚波伝播に伴う異常潮位の危険性を表す指標として十分であるとは言い切れないことに留意すべ

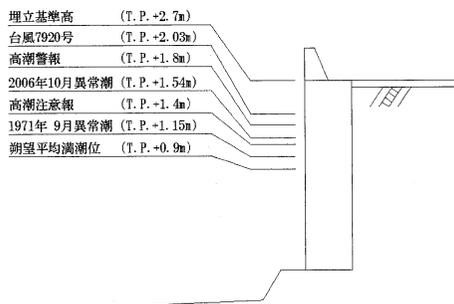


図-7 横浜港における過去の高潮位と各基準面

きである。

また、表-1に示す通り、潮位偏差の顕著な期間が2~5日間とかなり長期間継続することも陸棚波伝播の特徴である。台風の通過に伴う通常の高潮の継続時間は、東京湾の場合では8~10時間程度であり(河合ら, 2002), このため高潮時に満潮が重なる回数は1回あるかないかであるが、陸棚波に起因した偏差の伝播時には複数回満潮が重なり、それだけ異常潮位が発生しやすい状況にあるといえる。したがって、陸棚波に伴う異常潮の場合、最高潮位の到達地点としては、通常の高潮よりも低位であり、そのため護岸を乗り越えての浸水の可能性はそれほど大きくないものと考えられるが、潮位が平均的に高位な状況が長く続くため、雨水管等を逆流して海面よりも低位のマンホールから海水が流出し、冠水が短時間の間に進行していく危険性を考える必要がある。実際に、2006年10月の事例(写真-1)では、マンホールを逆流して周辺が冠水したという証言が得られている。

(3) 陸棚波に伴う異常潮位の将来的な影響

先の2001年-2005年の分析では、顕著な陸棚波の伝播として7ケースが検出された。したがって、発生頻度としては年間1, 2回程度であり、頻発しているという状況ではない。加えて、実際に冠水のような被害が発生するのは、陸棚波の起源すなわち銚子付近での潮位偏差がきわめて大きく、なおかつ、大潮の期間に顕著な陸棚波の伝播が重なった場合であると考えられるため、被害の発生確率は決して大きいものではない。しかし、将来的に海面上昇が進行していった場合、大潮ではなく小潮のタイミングでも、陸棚波の伝播が重なった場合には冠水が発生する可能性が高まる。また、陸棚波伝播を念頭におくと、海面上昇の影響が従来予想するよりも早く顕在化する危険性も懸念される。

6. まとめ

防災上、陸棚波に起因する異常潮位の出現を予測するためには、陸棚波の起源となる地点での潮位偏差の特性を明らかにしておく必要がある。銚子における1967年から2006年の各データを分析したところ、横浜の各地で冠水が発生した2006年において最大級の高潮偏差が発生していた。また、銚子地点において高潮偏差を引き起こす物理的要因としては、気圧低下の要因を除くと、wave setupの影響が最も大きいと考えられるが、過去最大レベルの高潮偏差の場合、wave setupのみでは説明が付かず、北寄りの風に伴うエクマン輸送の効果が大きく寄与していると考えられる。

また、2001年から2005年の潮位データを分析したところ、明瞭な形で銚子から横浜へと伝播する陸棚波を合計7ケース確認した。その伝播速度は、1.6~4.8m/sであり、理論速度と同等であった。

現在までのところ、横浜における異常潮位に伴う大規模な冠水被害の件数は、確認している範囲で1971年以降3件発生しており、いずれのケースも大潮満潮時に発生している。しかし今後、海面上昇が進行していけば、陸棚波の伝播により、小潮満潮時等においても冠水が発生する頻度が増加する可能性が十分にある。したがって、実質上、海面上昇の影響が早期に顕在化する可能性もあり、陸棚波が引き起こす異常潮位について、今後は他の気候変動の影響とセットで考えて、防災上対策していく必要があると考える。

謝辞：研究を進めるにあたり、神奈川県横浜治水事務所からは有益な情報を多数頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 宇野木早苗 (1993) : 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 672p.
- 河合弘泰, 竹村慎治, 原信彦 (2002) : 東京湾における台風による高潮と高波の同時性と継続時間特性, 海岸工学論文集, Vol.49(1), pp.251-255.
- 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, 第3号, 40p.
- 末永正次, 松本英雄, 板橋直樹, 三原正裕, 梅木康之, 磯部雅彦(2003) : 広島湾の異常潮位について, 海岸工学論文集, Vol.50(2), pp.1316-1320.
- 信岡尚道, 加藤史訓, 武若聡, 松浦健郎 (2007) : 2006年10月上旬の茨城沿岸高潮の発生要因, 海岸工学論文集, Vol. 54(1), pp.306-310.
- 橋本孝治, 吉本純, 村上智一, 安田孝志(2007) : エクマン輸送に起因する新たな外洋型の高潮発生機構, 海岸工学論文集, Vol.54(1), pp.271-275.
- Isozaki, I. (1971) : Unusually high mean sea level in September 1971 along the south coast of Japan, Meteorology and Geophysics, Vol.23, No.4, pp. 234-257.
- Kitade, Y., Matsuyama, M. (2000) : Coastal-trapped wave with several-day period cause by wind along the southeast coast of Honsyu, Japan, J. Oceanogr., 56, pp.727-744.
- Shoji, D.(1961) : On the variations of the daily mean sea levels along the Japanese Islands, J.Oceanogr. Soc. Japan, 17, pp.21-32.
- Yoshida, K., Shoji, D., Masuzawa, J. (1972) : A possible interaction between the storm tides and the Kuroshio - a speculation on the recent floods, Records Oceanogr., Works in Japan, 11(2), pp.47-51.