

台風による内湾の波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築と 台風 9918 号を例とした追算

河合 弘泰*・川口 浩二*・橋本 典明**

台風の気圧分布の歪みやスーパー・グラディエント・ウィンドを考慮した海上風を用い、波浪推算と高潮推算を双方向に結合して同時に計算する、新たな推算モデルを構築した。そして、この推算モデルを用いて、台風 9918 号による周防灘と八代海の波浪と高潮を追算した。その結果、水深の浅いところでは、高潮・天文潮による水位・流れを考慮することによって、波高や周期が変化した。また、吹き寄せの効果の卓越する湾奥では、波浪に依存した海面抵抗係数を導入することによって、高潮偏差も変化した。したがって、内湾の波浪・高潮の推算には波浪・高潮の相互干渉を考慮する必要がある。

1. はじめに

これまで一般的に、波浪推算においては、高潮や天文潮によって生じる水深や流れの変化を無視してきた。また、高潮推算においても、風速だけに依存する海面抵抗係数を用いて海面せん断応力を計算し、天文潮には平均海面あるいは被災時潮位など一定な潮位を与えてきた。このように波浪と高潮をそれぞれ独立に推算しても、実務において大きな支障のあることは少なかった。

ところが、台風 9918 号によって九州沿岸の内湾に生じた波浪と高潮に関しては、従来からの推算方法で、観測や痕跡による値を十分に再現することができなかった(橋本・真期, 2000; 河合ら, 2000a, 2000b)。その原因としては、海上風の過小評価もあるが(Veltcheva・河合, 2002)、その他にも波浪・高潮の相互作用が考慮されていないことが考えられる。内湾では、水深が最も深いところでもせいぜい数十 m であり、湾によっては湾奥などに広い干潟も存在している。そのため、高潮や天文潮による水深や流れの変化は、波浪の発達や浅水変形に影響しやすいと考えられる。また逆に、内湾では波浪が急激に発達するため、そのときの海面せん断応力の変化は、流れにも大きな影響を及ぼすと考えられる。したがって、波浪と高潮(流れ)を結合した推算を行い、波浪・高潮の相互作用が波浪や高潮の推算値に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、気圧分布の歪みやスーパー・グラディエント・ウィンド(SGW)を考慮した海上風を用い、波浪推算と高潮推算を双方向に結合して同時に計算する、新たな推算モデルを構築した。そして、この推算モデルを用いて台風 9918 号による周防灘と八代海(不知火海)の波浪と高潮を追算し、従来のように波浪推算と高潮推算をそれぞれ独立に行った場合と比較した。

2. 波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築

(1) 気圧と海上風の推算

内湾の波浪・高潮推算では気圧や海上風の平面分布を正確に与える必要があり、図-1 に示すように周防灘を横切った台風 9918 号の場合には、特に台風の中心付近を精度良く与える必要がある。また、台風が上陸すると、その気圧分布は陸上地形などの影響によって変形することもある。

そこで、Myers の気圧分布における最大風速半径 r_0 を台風の中心からみた方向の関数によって与えることで、気圧分布の歪みを考慮した(Veltcheva・河合, 2002)。また、台風の中心付近の三次元性に起因する SGW についても、気圧深度に応じた風速低減係数(Mitsuta・Fujii, 1987)を導入することで、海上風の推算に考慮した。

(2) 波浪推算

波浪推算には、第三世代波浪推算モデル WAM (The WAMDI Group, 1988) の cycle 4 を用いた。cycle 3 では Wu (1982) による風速だけに依存する海面抵抗係数が用いられていたが、cycle 4 では Janssen (1989) による波の周波数、波向、風向を考慮した海面抵抗係数が導入されている。そのため、同じ風場が与えられた場合であっても、風から波へのエネルギー輸送が海面の状態によっ

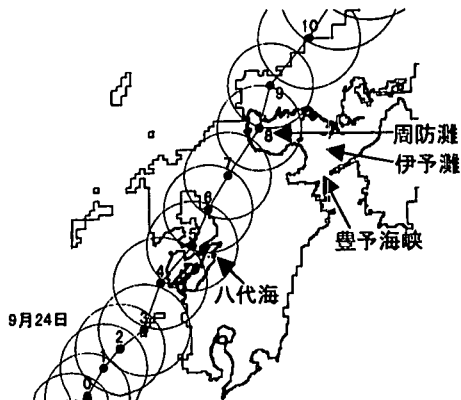


図-1 台風 9918 号の経路

* 正会員 工修 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部主任研究官

** 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部海洋水理研究室長

て異なり、波齢（波速と摩擦速度の比）の若い波ほど活発であることが考慮されている。

また、この cycle 4 では、定常な流れを波浪の発達・伝播過程に考慮できるようになっている。本研究では、高潮推算によって得られる非定常な水位や流れにも対応できるように、このモデルを改良した。

(3) 高潮推算

高潮推算には、非線形長波方程式に基づくモデル（河合ら、2000a, 2000b）を用いた。ただし、本多・光易（1980）による風速だけに依存する海面抵抗係数に代わり、前述の波浪推算で得られる海面抵抗係数を導入できるように、このモデルを改良した。また、周防灘や八代海の入口から十分に離れた周辺に線境界を設け、ここから天文潮を入射させ、天文潮と高潮をまとめて計算できるように、改良した。

(4) 波浪推算と高潮推算の双方向結合

気圧分布の歪みと SGW を考慮した海上風を外力とし、波浪推算と高潮推算を双方向に結合させて波浪と高潮を同時に計算する、新たな推算モデルを構築した。ここでいう双方向結合とは「波浪推算で得られる海面抵抗係数を高潮推算に導入し、逆に高潮推算で得られる水位・流れを波浪推算に考慮する」という意味である。

波浪推算および高潮推算の時間差分 Δt 、最小格子間隔 Δx 、水位・流れ、海面抵抗係数の受け渡し間隔 Δt_m は、表-1 のように設定した。また、これまで一般に、外洋の波浪推算では海上風として 6 hr 間隔の推算値を直線的に時間内挿したものが使われてきたが、このような粗い間隔では内湾を台風の中心付近が通過するときの風が正確に再現できない。そこで本研究では、120 s 間隔の推算値を時間内挿した。

表-1 計算条件

海域	波浪推算		高潮推算		両モデル間の受け渡し Δt_m (s)
	Δt (s)	Δx (km)	Δt (s)	Δx (km)	
周防灘	60	1.8	4	0.6	120
八代海	20	0.6	10	0.6	120

3. 台風 9918 号による周防灘の波浪・高潮

(1) 海底地形と天文潮

周防灘は、図-1 で示したように東西に長い海域であり、伊予灘につながる東部では水深が 40 m を超えるところもあるが、西部では海岸線から 10 km 以内の水深が概ね 10 m 未満と浅い。また、天文潮差は大潮時に 3.5~4 m であり、台風 9918 号の来襲も大潮時であった。

(2) 波浪

図-2 は周防灘の湾奥の苅田（位置は図-3 を参照）における波浪の経時変化を示す。気圧分布の歪みや SGW を考慮した海上風を用いても、高潮推算と独立した波浪推算では、有義波高の最大値が 3.2 m であり、観測値の 3.5 m よりもやや小さい。しかし、天文潮・高潮による水位、流れの変化を考慮すると、有義波高はそれぞれ約 0.1 m ずつ高くなり、観測値に近い 3.4 m が得られた。

一方、有義波周期は、ピークを過ぎた 9 月 24 日 7 時半から 12 時にかけて、水位、流れを考慮することにより、

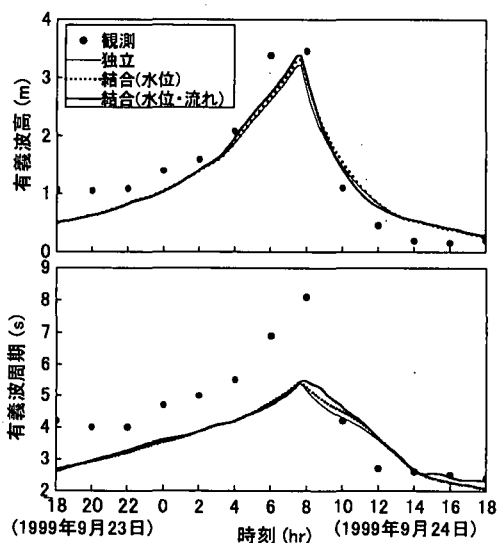


図-2 苅田における波浪の経時変化

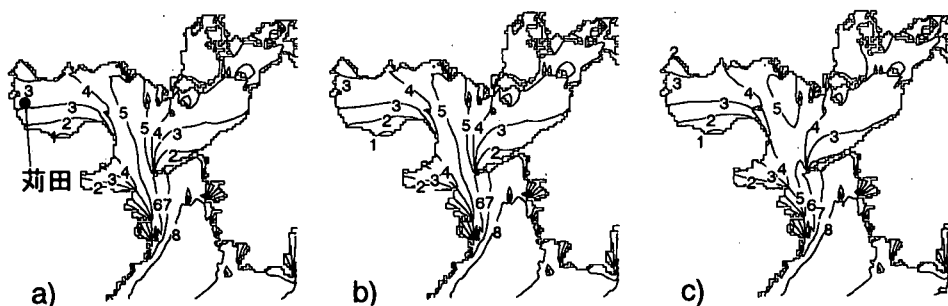


図-3 周防灘周辺海域における最大有義波高の分布 (a: 独立; b: 水位を考慮; c: 水位・流れを考慮)

それぞれ約0.2sずつ長くなっている。この時間帯は波浪にとって逆流・逆風の条件にあった。なお、水位・流れの考慮の有無にかかわらず、有義波周期の推算値は観測値よりも短くなっているが、その一因としてはWAM cycle 4における非線形相互作用の扱いが必ずしも十分ではないことが考えられる。

ところで、WAM cycle 4では周波数成分数のデフォルト値を25としているが、前述の推算では高周波数成分の再現性を高めるために35に設定した（最高周波数は1.07 Hz）。ただし、周波数成分数を25としても、台風到達前の弱風時に波浪の発達はやや遅れる傾向はあるものの、有義波高の最大値では約0.1m小さくなるだけで、有義波周期の最大値にはほとんど差が生じなかった。

周防灘周辺海域における最大有義波高の分布を図-3に示す。苅田のような岸近くを除くと、波浪に及ぼす水位・流れの影響は小さく、このような海域だけを対象とするのであれば、高潮推算とは独立した波浪推算でも大きな支障はないことが分かる。しかし、豊予海峡から周防灘の入口にかけては流れの影響が顕著に現れており、豊予海峡を通じて外洋波浪が到達する範囲を対象に波浪推算を行う際には流れの考慮が重要になる。

(3) 高 潮

周防灘における最大高潮偏差を図-4および5に示す。まず天文潮を考慮することによって、高潮偏差に若干の増減が生じている。

さらに、波浪の状態を考慮した海面抵抗係数も導入すると、吹き寄せ効果が従来の推算よりも大きくなり、周防灘の西側（台風接近時における風下側）で高潮偏差が増加した。その増加量は波浪推算の周波数成分数に依存し、周波数成分数を35（図中の波浪①）、25（波浪②）とした場合に高潮偏差はそれぞれ約0.5m、約1m増加している。この推算では、周波数成分数を35とした方が、現地調査による値に近い高潮偏差になっている。

4. 台風9918号による八代海の波浪・高潮

(1) 海底地形と天文潮

八代海は図-1で示したように細長い海域であり、その水深は中央部（龍ヶ岳と水俣の間）で50mを超える

が、八代より北側では10m未満の浅瀬が広がり、干潟も形成されている。また、天文潮差は大潮時に3.5~4mとなる。

(2) 波 浪

図-6は八代海の中部の龍ヶ岳と湾奥部の不知火（これらの位置は図-7を参照）における波浪の経時変化を示す。天文潮・高潮による水位・流れの変化は、前方の水深が比較的深い龍ヶ岳の波浪にほとんど影響を及ぼしていない。このようなところだけを対象にするのであれば、高潮推算と独立した波浪推算でも大きな支障のないことが分かる。

ところが、湾奥の浅瀬の中に位置する不知火では、水位の変化だけを考慮しても、有義波高は早い時刻から増加し始め、例えば有義波高が2.5mを超える時刻は約20分も早まっている。有義波周期も、早い時刻から増加するようになり、その最大値は逆に約0.6s短くなっている。さらに流れの影響も合わせて考慮すると、有義波高にはそれ以上の影響がほとんど現れていないが、有義波

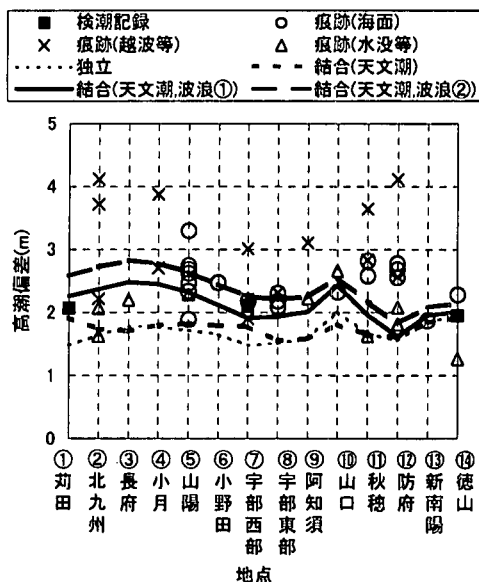


図-4 周防灘沿岸における最大高潮偏差

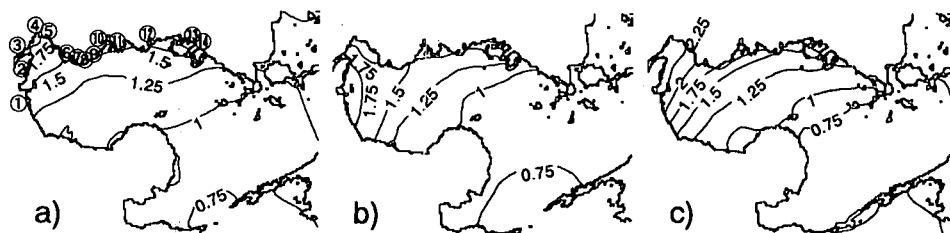


図-5 周防灘における最大高潮偏差の分布 (a: 独立, b: 天文潮を考慮, c: 天文潮と波浪①を考慮)

周期は最大値でさらに約 0.3s 短くなっている。したがって、湾奥の浅瀬を対象に波浪推算を行うような場合には、高潮推算との結合が必要となる。

ところで、前述の龍ヶ岳では 9 月 24 日 5 時頃に、越波が主な原因と考えられる住宅地の浸水が起きている。平石ら (2000) は、第一世代波浪推算モデルの MRI モデルによって有義波高 2.2 m、有義波周期 7.4 s を得たが、例えば有義波高が 3.0 m、有義波周期が 9.0 s の波浪で、高潮偏差も従来の推算方法による値より約 0.4 m 大きくないと、このときの浸水量を説明できないとしている。これに対して、気圧分布の歪みや SGW を考慮して海上風を推算し、さらに WAM cycle 4 によって波浪を追算すると、図-6 で示したように、被災時刻の付近で 3 m 以上の有義波高が得られた。ただし、有義波周期については約 5.5 s と短い。

八代海全体の最大有義波高の分布を図-7 に示す。最大有義波高で見る限りは、海岸線のそばや湾奥の浅瀬を除くと、高潮・天文潮による水位・流れが波浪に及ぼす影響は小さいことが分かる。

なお、八代海の波浪推算では、込み入った地形を再現するために、計算格子間隔を周防灘より細かい 0.6 km とし、波浪エネルギーの増加限界には Hersbach・Janssen (1999) のモデルを用いた。このモデルは周波数成分数を 25 とした推算に対応したものであると考えられ、本研究でも八代海に対してはこの周波数成分数を用いた。

(3) 高 潮

八代海沿岸の最大高潮偏差を図-8 に示す。天文潮も波浪も無視した高潮推算で、既に検潮記録や痕跡に近い高潮偏差が得られている。

ところが、天文潮を考慮すると、高潮偏差は湾中部の水俣～八代で約 0.2 m、湾奥部の鏡や不知火では約 0.5 m も減少した。さらに波浪の状態を考慮した海面抵抗係数を導入すると、湾中部では変化が小さいものの、吹き寄せの効果が蓄積する湾奥部では逆に約 0.5 m 増加した。その結果、湾口部から湾奥部まで全体的に現地調査

による値に近い値が得られた。

八代海の最大高潮偏差の分布を図-9 に示す。高潮偏差は湾奥に向かって大きくなっており、高潮推算に天文潮や波浪の影響を考慮するかどうかによって湾奥部の高潮偏差に大きな差が出ている。

5. おわりに

本研究では、気圧分布の歪みや SGW を考慮した海上風を用い、波浪推算と高潮推算を双方向に結合した、新たな推算モデルを構築した。そして、この推算モデルによって台風 9918 号による周防灘と八代海の波浪と高潮を追算し、従来のように波浪推算と高潮推算をそれぞれ独立して行った場合と比較した。

その結果、水深の浅いところでは高潮・天文潮による水位・流れの影響で波高や周期が変化し、吹き寄せの効

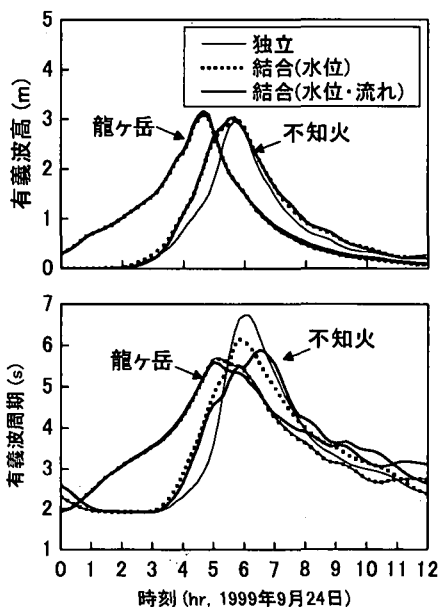


図-6 龍ヶ岳と不知火における波浪の経時変化

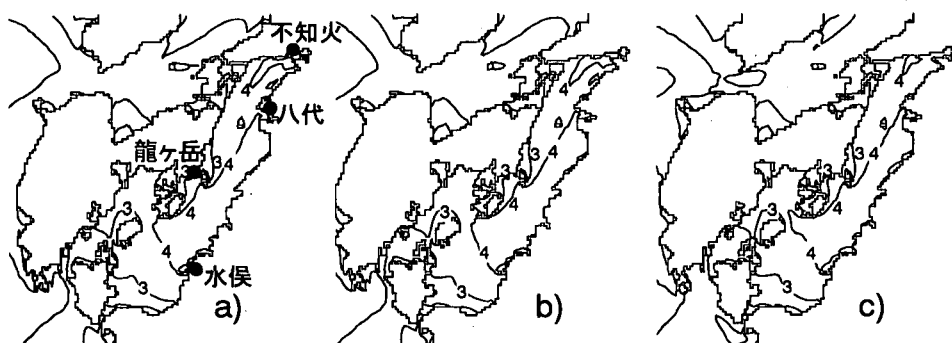


図-7 八代海における最大有義波高の分布 (a: 独立; b: 水位を考慮; c: 水位・流れを考慮)

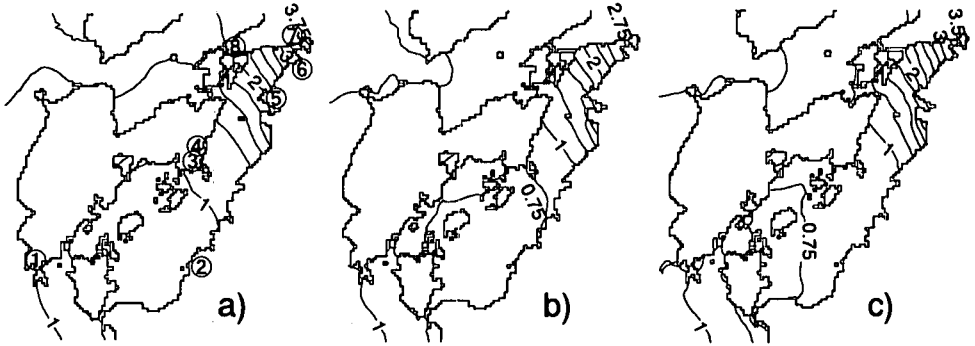


図-9 最大高潮偏差の分布 (a: 独立; b: 天文潮を考慮; c: 天文潮と波浪を考慮)

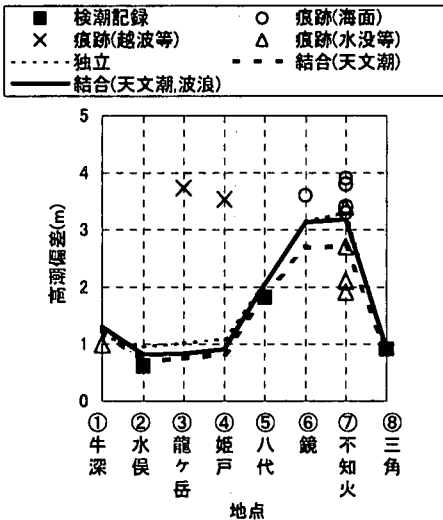


図-8 八代海沿岸の最大高潮偏差

果が卓越する湾奥では波浪の状態を考慮した海面抵抗係数を導入することで高潮偏差も変化することが分かった。したがって、内湾の波浪や高潮の推算では、海上風の推算精度を高める一方で、波浪・高潮の相互作用も考慮する必要がある。今後は、他の台風や海域に対しても同様な検討を行い、どのような場合に波浪推算と高潮推算の結合が必要であることを明確にしていきたい。

なお、本研究は運輸施設整備事業団基礎的研究制度によるものであり、関係各位に謝意を表したい。

参考文献

- 河合弘泰・平石哲也・丸山昭広・田中良男 (2000a): 台風 9918 号による高潮の現地調査と追算, 港湾技研資料, No. 971, 43 p.
- 河合弘泰・平石哲也・佐藤孝夫・大川郁夫 (2000b): 台風 9918 号による九州沿岸と瀬戸内海西部の高潮の特性, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 321-325.
- 橋本典明・真期俊行 (2000): 波浪推算法による台風 9918 号の異常波浪の再現計算, 港湾技研資料, No. 970, 33 p.
- 平石哲也・平山克也・河合弘泰 (2000): 台風 9918 号による越波災害に関する一考察, 港湾技研資料, No. 972, 19 p.
- 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.
- Veltcheva, A. D.・河合弘泰 (2002): 台風の気圧分布の歪みと超傾度風を考慮した高潮推算, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 241-245.
- Hersbach, H. and P. A. E. M. Janssen (1999): Improvement of the short-fetch behavior in the wave ocean model (WAM), Journal of Atmospheric and Oceanic Technology vol. 16, pp. 884-892.
- Janssen, P. A. E. M. (1989): Wave-induced stress and the drag of air flow over sea wave, Journal of Physical Oceanography, vol. 19, pp. 745-754.
- Mitsuta, Y. and T. Fujii (1987): Analysis and synthesis of typhoon wind pattern over Japan, Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol. 37, Part 4, No. 329, pp. 169-185.
- The WAMDI Group (1988): The WAM model—A third generation ocean wave prediction model, Journal of Physical Oceanography, vol. 18, pp. 1775-1810.
- Wu, J. (1982): Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, Journal of Geophysical Research, No. 87, C12, pp. 9704-9706.