

ハリケーン・カトリーナによる ニューオーリンズの高潮災害(速報)



山下隆男

YAMASHITA Takao

正会員 京大博士(工学)
京都大学防災研究所助教授

はじめに

最近 100 年で地球の平均気温は 0.6℃ 上昇しており、この温暖化による熱エネルギーの多くは海洋に吸収されている。最近の 10 年間で海面が 3.1cm 上昇し、2100 年までには 50cm の海面上昇が予想されている。特に海洋の温度分布は高緯度で低く、熱帯低気圧の発生場所である低緯度できわめて高いことから、今後のハリケーンや台風の巨大化が危惧される。気候変動予測の数値シミュレーション結果からは、温暖化による台風の発生数の増加より規模の巨大化が指摘されている。

1998 年には、中部アメリカではハリケーン (Mitch) により 2 万人、中国では洪水で 4,000 人が犠牲になり、バングラデシュでも記録的な洪水が発生した。ヨーロッパでは、2002 年に深刻な洪水が発生し、2003 年には記録的な猛暑となった。地球温

暖化に起因する気候の急激な変化は着実に進行しており、過去の気候特性とこれから数十年先のそれとの線形関係がなくなっていることは明白である。

1987 年以降、飛行機による台風観測が実施されるようになり、北西太平洋で発生、消滅する台風情報まで正確に知ることができるようになった。表-1 は、1960 年以降観測された北西太平洋の台風と大西洋のハリケーンを、中心気圧の低い順に並べて示したものである。地球上で観測された最強の台風は Tip で、わが国では台風 7920 号として登録されており、和歌山県白浜町に上陸し、台風 7916 号とともに大きな災害をもたらした台風である。表からは、ハリケーンに比べて台風が強いことや、1997 年には北西太平洋上で連続してスーパー台風が発生していることが読みとれる。もし、このスーパー台風が勢力を保ったまま高緯度に到達するようになれば、わが国の台風外力の大幅な見直しが必要となることが予想される。また、大規模なハリケーンや台風は連続して同一年に複数発生する傾向がある (カトリーナに続いてリタが発生した) ことを理解しておく必要がある。今回のハリケーン・カトリーナの高潮災害は、今世紀最初の 카테고리 5 (表-2) のハリケーンの来襲による災害としてとらえるより、スーパーハリケーン頻発への警鐘としてみるべきであろう。

ここで、注意しなければならないことは、米国とわが国の高潮特性の相違と海岸防災の基本方針の違いである。陸棚の発達した米国のメキシコ湾沿岸や東海岸では、図-1 に示すように、わが国の台風と同一規模のハリケーンでも 2 倍近い高潮が発生する。このメカニズムに関しては後述するが、気象擾乱と陸棚の規模との相違が主原因である。一方、海岸防災の基本方針は 180 度の相違がある。堤防に依存したわが国の海岸防災に対して、米国では砂浜海岸の

表-1 北半球の過去の巨大ハリケーン・台風 (1960 年以降)

順位	名前(台風番号)	海域(上陸国)	発生年	中心気圧(hPa)
1	Typhoon Tip (7920)	Pacific (日本)	1979	870
2	Typhoon Zeb (9810)	Pacific (日本)	1998	<872
3	Typhoon Gay (9230)	Pacific	1992	872
4	Typhoon Keith (9725)	Pacific	1997	872
5	Typhoon Joan (9724)	Pacific	1997	872
6	Typhoon Ivan (9723)	Pacific(フィリピン)	1997	872
7	Typhoon Yuri (9128)	Pacific	1991	885
8	Hurricane Gilbert	Atlantic(メキシコ、米国)	1988	888
9	Typhoon Nancy (6118)	Pacific (日本)	1961	888
10	Hurricane Rita	Atlantic(米国)	2005	897
11	Hurricane Allen	Atlantic(メキシコ、米国)	1980	899
12	Hurricane Linda	Pacific	1997	900
13	Hurricane Katrina	Atlantic(米国)	2005	902
14	Hurricane Camille	Atlantic(米国)	1969	905
15	Hurricane Mitch	Atlantic(ユカタン半島、米国)	1998	906

表-2 Saffir-Simpson のハリケーンスケール

ハリケーンのカテゴリ	風速 (mph, m/s)		高潮 (ft, m)	
カテゴリ 1	74~95 mph	33~42 m/s	4~5 ft	1.2~1.5 m
カテゴリ 2	96~110 mph	42~49 m/s	6~8 ft	1.5~2.7 m
カテゴリ 3	111~130 mph	49~58 m/s	9~12 ft	2.7~4.0 m
カテゴリ 4	131~155 mph	58~68 m/s	13~18 ft	4.0~5.5 m
カテゴリ 5	155 mph >	68 m/s >	18 ft >	5.5 m >

整備を基盤とした海岸防災を選択している。まず危険な海岸域に住むことを避け、構造物による防災対策は極力排除する方針である。ニューオーリンズのような低平地の都市で、堤防に強く依存した防災対策は特異なケースであり、防災予算の獲得面でもマイナス要因となっていることが予想できる。極言すれば、ニューオーリンズ以外の米国の海岸では、高潮に対する防災対策が十分できていたが、ここだけが危険地域であることが認識されたうえで放置されていたともいえよう。さらに、ニューオーリンズにとって不利なことは、ミシシッピ川からの堆積土砂のため河口テラスが広範囲に発達し、高潮に対して最も危険な海岸地形をしていることである。米国の海岸事業を掌握する工兵隊の担当官もこの点は十分承知していたであろうが、経費的な制約が大きく、海岸堤防を補強するどころか、地盤沈下や老朽化対策もままならない状況であったものと思われる。今回の高潮災害に関していえば、最も危険な時期に、最も危険な場所に、最も危険なハリケーンが予想通りに来襲してしまったという感が強い。

本報告は、直接災害現場に出向いて入手した被災情報の報告ではなく、防災大国、情報大国米国が発信する WEB 情報により氾濫災害過程をとりまとめ、ハリケーン、高潮・高波に関する独自の数値解析から高潮の発生機構を検討したものである。本高潮災害の発生機構のみならず、今後発生するであろう

スーパーハリケーンやスーパー台風とそれによる想定外の高潮災害を考える機会になれば幸いである。

浅い陸棚上での高潮の増幅機構

陸棚の広く発達した海域では、なぜ高潮が大きくなるのか？ これは次の2つの観点から説明される。1つは、1次元解析の説明でよく知られているコルディング式による吹き寄せ効果に基づくもので、もう1つは平面的な流れ場からの説明で、高潮循環流の形成によるものである。高潮の発生は、吹き寄せ効果以外にも、吸い上げの効果があることが知られているが、静的な吸い上げ効果は1hPaの気圧低下に対して1cmの海面上昇が見込める。たとえば、中心気圧870hPaの台風Tipの場合でも1.3mの海面上昇に寄与する程度である。浅海域の高潮は吹き寄せ効果により大きさが決まる。すなわち、強風がどの程度海水を流動させるかにかかわってくる。この度合いは、水深に反比例し、吹送距離と海面せん断応力に比例する。海面せん断応力は、定式上は風速の2乗に比例しているが、その抵抗係数は波浪と風速の関数であることが知られている。外洋では波浪は水深の影響を受けないが、波長の半分より浅い海域(浅水変形海域)では、波形勾配や白波碎波率が水深により変化する。特に白波碎波率は重要な

ファクターで、大半の風の運動量フラックスが波浪に遷移し、白波碎波過程を介して流れに移行するため、水深が浅くなり碎波しやすくなると風のエネルギーはより効率的に海水流動へと受け渡される。換言すれば、浅い海域が長く続けば続くほど、白波碎波の発生率が増え海水流動が活発化し、吹き寄せ効果が大きくなる。

平面的には、ハリケーンの規模と大陸棚の幅とで説明できる。

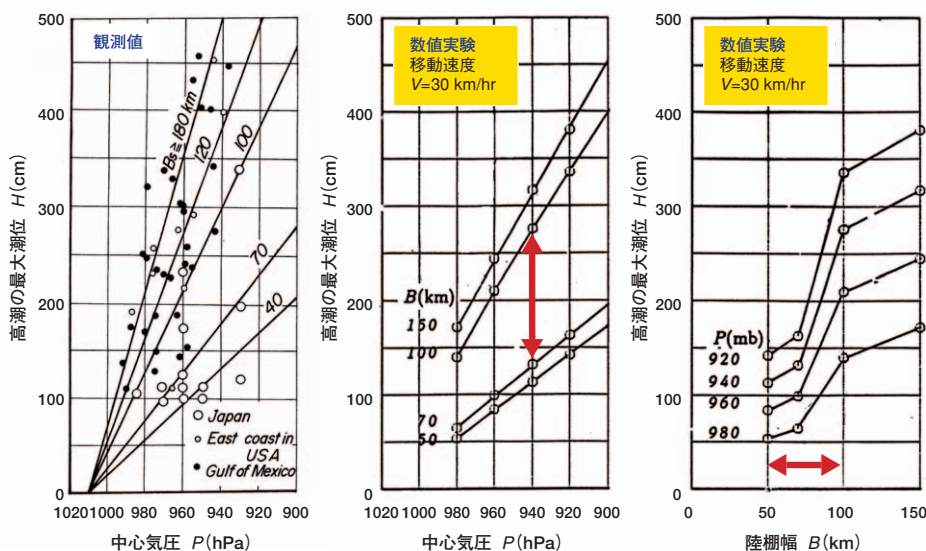


図-1 高潮の最大値とハリケーンの中心気圧と大陸棚の幅の関係

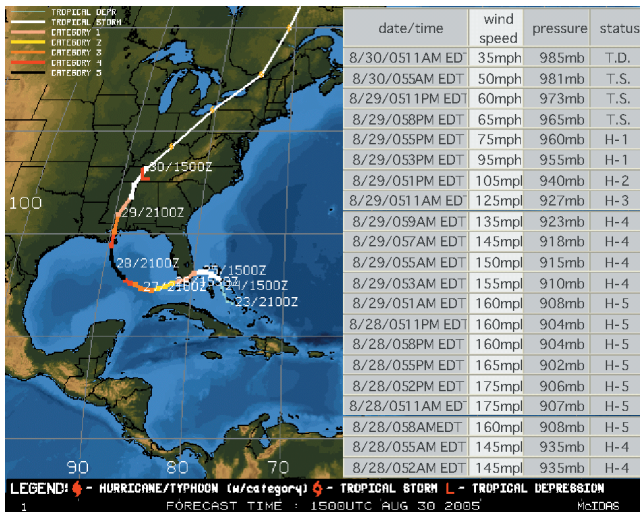
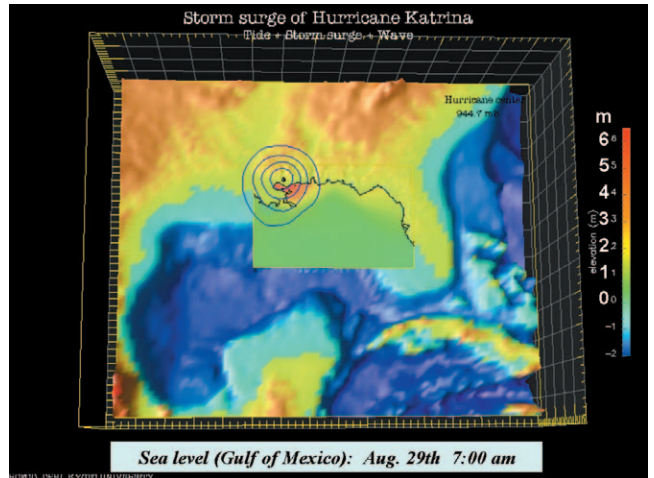


図-2 ハリケーン・カトリーナの経路と中心気圧、最大風速の変化 (<http://cimss.ssec.wisc.edu/tropic/real-time/atlantic/storm/storm2.html>)

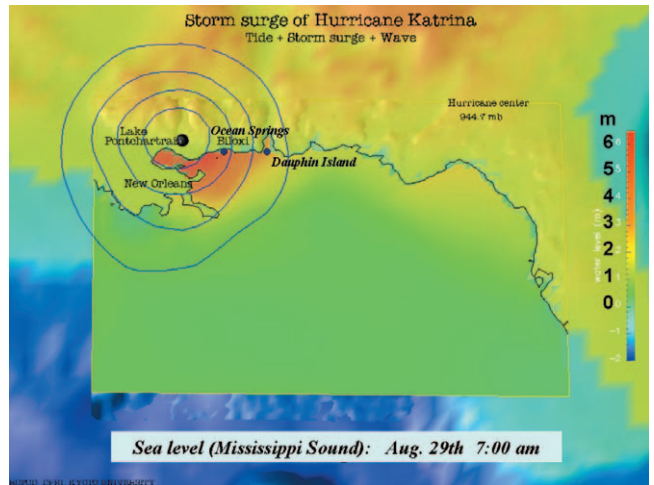
一般に、ハリケーンや台風の最大風速半径は70km前後であるため、陸棚の幅 B がこれより広い100kmあたりを境にして、吹き寄せ効果が急激に大きくなる(図-1)。これは、外洋や広い湾では旋回する台風の強風域に引きずられるような循環流が発達する。この渦は低気圧性(北半球で反時計回り)で、深海では流れは周辺へ発散するが、水深が規定される浅海域では発散効果が弱く、渦が維持されやすくなる。すなわち、浅海域では吹き寄せによる強い流れのエネルギーが渦として維持される。これが陸によって遮られると急激な水位上昇が発生する。このため、メキシコ湾のミシシッピ川河口部やベンガル湾ブラマプトラ川河口部のように、陸棚の幅が広く、水深が浅い海域では、同一規模の低気圧でもきわめて大きな高潮が発生する。このような地形はわが国の海域にはなく、現在の台風規模では4mを超えるような高潮がわが国に発生することはない。しかしながら、地球温暖化により台風の規模が増大すれば高潮が大きくなるのは当然で、これをどの程度に見定めるかが今後の高潮防災のカギになる。

高潮・高波の数値シミュレーション

大気・海洋間の運動量の交換には、風波が重要な役割を演じていることは、上述したとおりである。京都大学防災研究所では、波浪推算モデル



(a) 計算領域(メキシコ湾領域とミシシッピ河口領域)



(b) 高潮と地上気圧のシミュレーション結果(8月29日07:00)

図-3 カトリーナの気象場、高潮・高波場のシミュレーション結果

Wave Watch III、メソ気象モデルMM5、海洋モデルPOMを連結系として、波浪・高潮相互作用を取り込んだ次世代型の高潮数値モデルを構築し(金・山下、2004)、共同利用ソフトウェアとして公開している。この数値モデルを用いて、ハリケーン・カトリーナの気象場と高潮・高波場のシミュレーションを行い、観測結果と比較した結果を以下に示す。図-2にハリケーンの経路と中心気圧、最大風速の変化を示した。図-3には風速場、高潮場(メキシコ湾領域)、高潮場(ミシシッピ海域)のシミュレーション結果のアニメーションの1シーン(最大潮位を観測した現地時間の29日午前7時)を、図-4にはオーシャンスプリングスとドーフィンアイランドにおける潮位(青は天文潮)と観測結果(NOAA, <http://140.90.121.76/katrina.html>)を

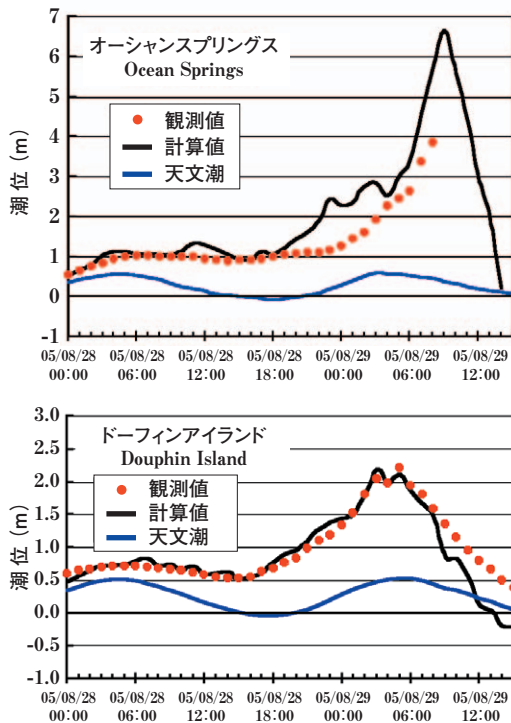


図-4 オーシャンスプリングスとドーフィンアイランドにおける計算潮位と観測潮位

示す。ニューオーリンズに近いオーシャンスプリングスでは6.5mの最大潮位(29日の午前8時頃)が再現されており、ポーニュ湖から6mの高潮が来襲し堤防を乗り越えて氾濫したという観測、目撃証言(The Asian Wall Street Journal, Sept. 8)を支持する結果となっている。

ニューオーリンズ市の高潮氾濫

ニューオーリンズは、独自の街の発展の歴史のなかで、災害危険地域である低平地に残された米国でも特異な沿岸都市である。住民を含め多くの人が、この街の高潮災害に対する危険性を認識していたが、スーパーハリケーンが、思いもよらず、これを現実のものとしてしまったといえよう。新聞記事、WEBサイトの情報から再現した高潮氾濫過程は以下のようなのである。

①海岸堤防を越える高潮の来襲。8月29日午前7時半頃に東側のポーニュ湖(Lake Borgne)からの高潮が海岸

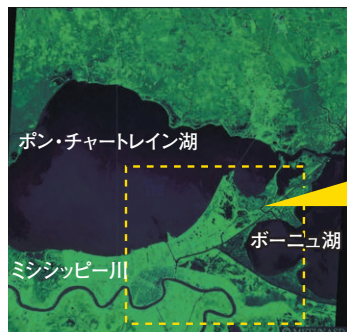


図-5 新聞記事、WEBサイト情報から再現したニューオーリンズ高潮氾濫課程(9月26日現在)

堤防を越えてセントバーナード区(St. Bernard Parish)に進入。同時に北側のポン・チャートレイン湖(Lake Pontchartrain)からも高潮が海岸堤防を越えてニューオーリンズの中心街、東地区に進入した(図-5)。米国工兵隊はポン・チャートレイン湖に面するニューオーリンズの中心街の防波堤天端高を平均海面上13.5ft(4.2m)~18ft(5.5m)に維持していたが高潮来襲時には堤防上を越流していた。ニューオーリンズ東地区の天端高は13.5ft(4.2m)~14.5ft(4.4m)と中心街に比べて低く設定されていたため、ここでの越流はより深刻であったと思われる。ポーニュ湖側からは6mの高潮が天端高さ17ft(5.2m)の海岸堤を越えて進入したとの証言記事があることから、これがセントバーナード区への主な氾濫過程であると考えられる。

②IHNC運河(Inner Harbor Navigation Canal)左岸の破堤。ポーニュ湖側からの氾濫水の侵入に加えて、この破堤による運河からの浸水は、地盤高の最も低いセントバーナード区やLower Ninth Wardに甚大な災害をもたらした。この地域は高潮危険地域として認識されており、ホワイトカラーは周辺地域へ移住し、多くの住民は車を持たない貧困層であったため避難ができなかったことも、災害を大きくした要因である(カバーストーリーの写真-②、③、④)。

③17th Street Canal右岸の破堤。高潮の翌日、8



月30日4時に破堤したという報道 (International Herald Tribune and The Asian Wall Street Journal) と、29日昼前には強い北風でポン・チャートレイ湖から海水が運河に侵入し水位が上り破堤したという報道 (The Times-Picayune) とがある。いずれにしても、この破堤(カバーストリー

の写真-⑤、⑥)はニューオーリンズの中心街の浸水被害を深刻なものにしたことは間違いない。また、London Av. Canalの破堤2箇所は9月1日 (New York Times)に発生しており、高潮による破堤ではないが、これも浸水被害を助長した。問題は、破堤がすべてコンクリート製の堤防で、すべてCanal内で発生している点と、直接高潮による破堤とは断言できない点である。設計、施工上の問題、流木衝突破損、湖の副振動のCanalへの集積現象、Canal内でのマッハ反射など、今後検討を要する問題が多くあるように思う。

おわりに

熱帯性低気圧の巨大化に伴う高潮災害の脅威。海岸堤防を基盤とする高潮防災の弱点。本災害から、わが国の高潮防災が学ぶところは多い。米国の海岸防災の基本は、次のようである。①危険な海岸地域には原則として住まない。②住む場合には住居を高く、強い構造物にする。③砂浜による防護を基本と

し構造物に頼らない。砂浜で高潮、高波を減衰させる。少しの氾濫は許す。住居を高く、強くして住む。

ニューオーリンズは、この方針にまったく従っておらず、わが国の防災対策にきわめて近い方式を採用していた。このため、「避難」にも重点を置いた防災対策を講じていたが、貧困層への配慮が困難であったことに加え、行政機関の複雑な構造が避難、災害救助態勢に混乱をきたし、初動を遅らせたことが大きな反省材料として残された。さらには、ブッシュ大統領の石油・石炭産業への保護政策やイラク戦争の長期化が、地球温暖化を促進させ、護岸補強費用を削減させ、ハリケーンを巨大化させた。ハリケーンによる高潮で国内有数の石油関連施設が大きな被害を受け、経済、政局の混乱をもたらした。この皮肉とも思える地球環境破壊・気象災害のスパイラルは、今、米国民が真剣に考えなければならない重要問題である。

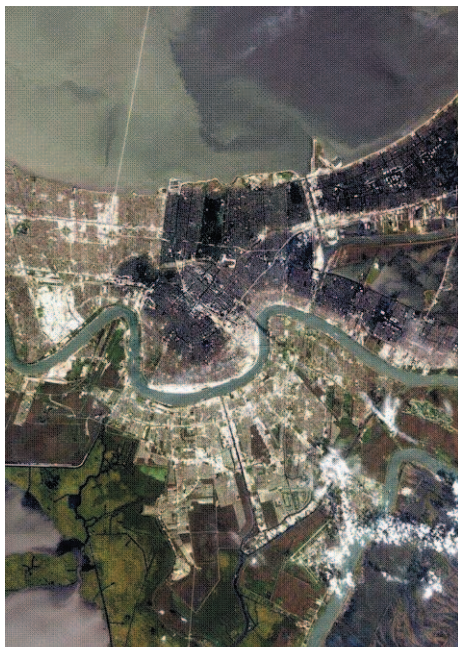
ニューオーリンズ以外にも、アラバマ州からミシシッピ州、ルイジアナ州の海岸部でも高潮、高波による浸水や構造物の被害があったことは周知のようであるが、砂浜海岸に依存した米国の海岸防災においては、高潮によるバリヤーアイランドの海浜変形(前浜侵食、ラグーンや後背地への堆積)も、実は大きな「被害」である。このような高潮被害はあまり注目されていないが、本災害から学ぶべき、も

う1つの重要な調査研究項目である。

最後に、大気・海洋結合モデルによる高潮シミュレーションを速やかに実施してくれた京都大学大学院、李漢洙、山口弘誠両君に謝意を表するとともに、1日でも早いニューオーリンズの復興と災害に強いまちづくりが行われることを祈願する。

参考文献

- 1) 金 庚玉・山下隆男: 大気・波浪・海洋結合モデルによる台風9918号の高潮・高波の追算, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.236-240, 2004



被災前のニューオーリンズの画像 (NASA Landsat7)

被災後のニューオーリンズの画像 (NASA Earth Observatory) 黒い部分が冠水している地域

写真-1 氾濫前(左: NASA Earth Observatory Image)、後(右)のニューオーリンズの画像