

ハリケーン・カトリーナの高潮災害の特徴とワーストケースシナリオ

高橋重雄¹・河合弘泰²・平石哲也³
小田勝也⁴・高山知司⁵

ハリケーン・カトリーナは、自然災害では米国史上最悪といわれる甚大な被害をもたらした。著者らは今後の沿岸防災に資するため、二回の現地調査を実施した。この災害はルイジアナ州からアラバマ州にわたる広範囲の災害であり、7 m に達する高潮で多様な災害が発生した。本研究では、特にワーストケースに備えるという視点から、この災害調査の結果をまとめ、その特徴や学ぶべき点について検討した。ハード防災を主体とするニューオーリンズでは、ワーストケースに対する備えが市民も行政も十分でなく、ソフト防災のロングビーチなどメキシコ湾岸に比べて死者が多かった。特にハード防災では、ワーストケースの災害シナリオの作成が重要である。

1. はじめに

2005 年 8 月 29 日ニューオーリンズ付近に上陸したカトリーナによる災害は、米国史上最悪の自然災害となった。この災害は、台風常襲地帯である我が国の高潮・高波対策にも、多くの貴重な教訓を与えるものである。

港湾空港技術研究所では、災害の発生直後から、現地の被災情報を収集し、米国土木学会 ASCE や現地の大学と連絡をとった。そして、9 月 21 日～23 日に実施された米国土木学会の海岸・海洋・港湾・河川委員会 COPRI による第一次の現地調査隊に著者の一人を派遣した。

この調査結果も踏まえ、港湾空港技術研究所、京都大学防災研究所、国土技術政策総合研究所、財団法人沿岸

技術研究センターによる「沿岸防災技術調査団(団長：高山)」が結成され、10 月 26 日～29 日に、米国の技術者や研究者と意見交換を行いつつ、アラバマ州ガルフショアからミシシッピ州ロングビーチを経て、ルイジアナ州ニューオーリンズ市周辺(図-1 を参照)までを調査した。

本研究では、この高潮災害の調査結果をとりまとめ、その特徴や学ぶべき点、特に「ワーストケースに備える」という視点から検討を行った。現地調査結果の詳細については既報(The White House, 2006; 高橋, 2005; 高山ら, 2006; 河合ら, 2006 等)をご参照いただきたい。

2. カトリーナはワーストケースか？

(1) ハリケーン・カトリーナの気圧と風

カトリーナは、大西洋のバハマ諸島付近で発生し、フロリダ半島の南端を横断して、メキシコ湾へと進んだ。その後、中心気圧は 902 hPa となり、その時点において 1988 年のギルバートの 888 hPa などに次ぐ歴代 4 位の記録になった。ただし、カトリーナの後、リタが 897 hPa, ウィルマが 882 hPa を記録し、6 位まで下がった。

米国では、ハリケーンの強さを 5 段階の「カテゴリー」に区分している。カトリーナはメキシコ湾で最上位のカテゴリー 5 (1 分間平均風速が 69 m/s 以上) に達したが、米国の観測史上ではまだ 3 回目であった。なお、日本では 10 分間平均風速が 54 m/s 以上の台風を「猛烈な台風」と分類しており、これがカテゴリー 5 の定義にほぼ匹敵する。また、北西太平洋では、中心気圧が 900 hPa 以下の台風が 1951 年以来 30 個以上も発生している。

カトリーナはその後、進路を北向きに変え、9 月 29 日に約 920 hPa の勢力を維持したままミシシッピ川の河口付近に上陸した。このときの最大風速は 54 m/s であった。また、この中心気圧は、1935 年のレイバーデイの 892 hPa, 1969 年のカミールの 909 hPa に次ぐ、米国歴代 3 位の記録である。室戸台風、枕崎台風、伊勢湾台風と上陸時の中心気圧で比較すると、カトリーナの勢力はこれら日本の台風より強かった。ニューオーリンズは

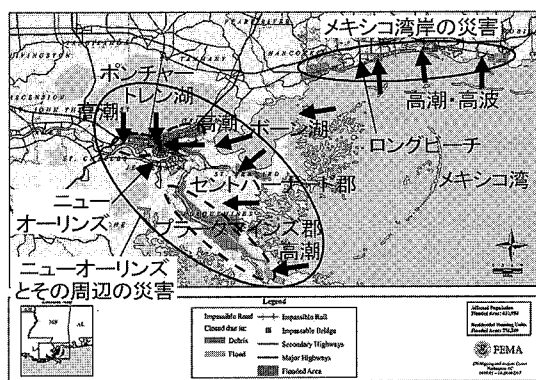


図-1 被災地域と被災パターン (FEMA による図に加筆)

- | | | | | |
|---|------|------|---------------|--------------------|
| 1 | フェロー | 工博 | (独法)港湾空港技術研究所 | 研究主監 |
| 2 | 正会員 | 修(工) | (独法)港湾空港技術研究所 | 海洋・水工部 海洋水理・高潮研究室長 |
| 3 | 正会員 | 工博 | (独法)港湾空港技術研究所 | 海洋・水工部 波浪研究室長 |
| 4 | 正会員 | 工修 | 国土技術政策総合研究所 | 沿岸海洋研究部 沿岸防災研究室長 |
| 5 | フェロー | 工博 | 京都大学防災研究所 | 教授 |

鹿児島県種子島の緯度にほぼ位置し、メキシコ湾の海水温も高く、ハリケーンの勢力があまり減衰しないまま上陸しやすい。カトリナが最大級のハリケーンであることは間違いないが、それを上回る危険性は十分考えられる。

(2) ハリケーン・カトリナによる高潮

米国海洋・大気庁 NOAA の速報によると、カトリナの進路の東側に位置するメキシコ湾岸では顕著な高潮が観測されており、この周辺の被害状況からもこの一帯で3~7mの高潮偏差が推測される。カトリナは伊勢湾台風クラスに相当するが、7mを越える高潮は我が国の想定高潮偏差の2倍以上になる。なお、メキシコ湾岸の天文潮差は0.5m程度と小さく、潮位の上昇はほとんど高潮偏差によるものと考えることができる。

これほど顕著な高潮が発生したのは、上陸時の中心気圧が低く、猛烈な風が吹いたためであり、また、図-2に破線・細字で示すように、メキシコ湾岸が日本列島周辺にはないほど大規模な遠浅地形になっているためである。ここでは図を省略したが、水深を実際の5倍にして日本の内湾と同じくらいにすると、高潮はかなり小さくなった。カトリナがミシシッピ川の河口付近に達したとき、ボーン湖では、湖口から湖奥（ニューオーリンズ側）に向かって吹き寄せが生じた。

ボンチャートレン湖は、東京湾と同じくらいの広さを有するが、その平均水深は約4mと非常に浅い。メキシコ湾とつながっているが、その海峡は狭い。ボンチャートレン湖はカトリナの進路の西側に位置するので、カトリナの最接近時に、湖水が北岸からニューオーリンズ市街地のある南岸へ吹き寄せられたものと考えられる。

図-2の実線・太字は、港空研の数値計算モデルで試算した最大高潮偏差の分布である。ボンチャートレン湖よりも、ミシシッピ川の河口周辺、ボーン湖、ロングビーチ周辺で高潮が顕著である。なお、ニューオーリンズから東に200km以上離れたモービルでも3m程度の高潮となっており、広範囲で大きな高潮が発生していたことに留意する必要がある。なお、図示していないが、もちろんコースによって高潮の計算結果は変わるが、実際のコースがニューオーリンズやロングビーチにおいてほぼ最も危険なコースとなっている（河合ら、2006）。

なお、メキシコ湾の沖合では多くの地点でブイによる波浪観測が行われており、最大有義波として15.4m、14sが観測された。沿岸部では、この地域の浅い地形により碎波し、水深に応じた波高になっていたと考えられる。

(3) ハリケーン・カトリナによる災害の程度

カトリナはアラバマ州、ミシシッピ州、ルイジアナ州の沿岸部に、高潮・高波による甚大な災害、広範囲に

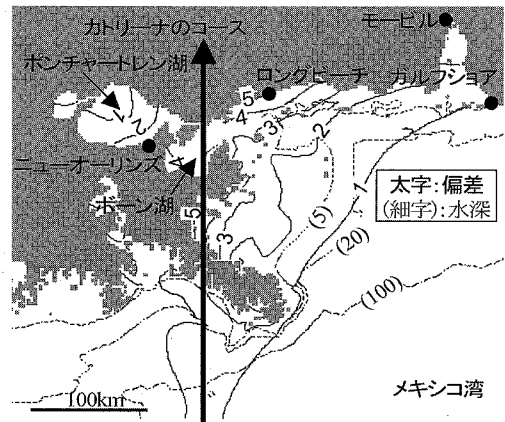


図-2 高潮の数値計算結果

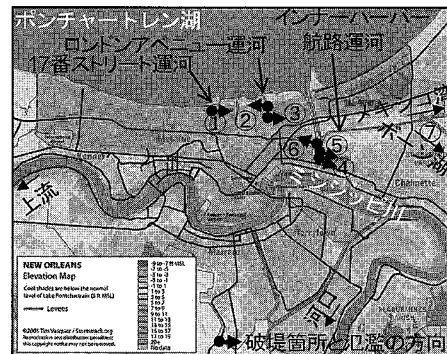


図-3 ニューオーリンズの地形 (Tim Vasquez の図に加筆)

多様な災害を発生させた。これらの被害総額は、最終的には1,000億ドルを超えられている。死者も既に約1,300名を超えているが、その多くは低所得者や高齢者など避難の困難な人々である。いずれにしても、災害の実態からはワーストケースと言えよう。

なお、前掲図-1で示したように、この災害は主にその被災地域によって、ニューオーリンズ地域の災害とアラバマ州からルイジアナ州までのメキシコ湾岸の災害の二つに分けられ、それぞれにその原因と特徴的な災害パターンがある。それぞれの概要を次章で述べることにする。

3. 二つの災害

(1) ニューオーリンズ及びその周辺の災害

a) ニューオーリンズ市街の地形と災害の概要

ニューオーリンズ市は、ミシシッピ川の河口から約160km上流に位置し、メキシコ湾に通じる大規模港湾都市として発展してきた。また、埋め立てで拡張されてきた街であり、図-3に示すように、ボンチャートレン湖とミシシッピ川に挟まれ、運河が張りめぐらされている。市街地の大部分はゼロメートル地帯で、この地形は

よく「スープ皿」にたとえられている。この地帯はベツィーやカミールなど1960年代のハリケーンによる浸水を契機に築造された堤防に守られてきた。堤防の構造は、写真-1に示すように、盛土に打ち込まれた矢板の上に高さ約2m、厚さ約20cmのコンクリート板を立てたもので、天端高さは約4mである。写真-1では堤体が市街地側に変位しており、更に進むと破堤となる。

ニューオーリンズ地域の災害には二つの原因があり、一つはポンチャートレン湖の高潮によるものである。一方、ニューオーリンズ東部の9番街区や港湾・工業地区の浸水はボーン湖を含むメキシコ湾の高潮に起因するものであり、ニューオーリンズの東に隣接するセントバーナード郡やその南方の沿岸地区にも浸水災害を引き起こしている。日本では、市街地の約8割が浸水して1,000名以上の死者を出したこのニューオーリンズ市街や9番街区の浸水災害がよく知られている。

b) ポンチャートレン湖の高潮による被害

ニューオーリンズでは、図-3に示すように、ポンチャートレン湖の高潮で17番ストリート運河やロンドンアベニュー運河の水位が上昇し、水位が天端まで達していないが堤防が決壊した（図中の地点①～③）。写真-2は、17番ストリート運河の破堤地点の様子であり、破堤時の強い流れで堤防の盛土が流された。壁や柱が流され、コンクリートの土台だけを残している家屋もあった。なお、破堤箇所から1km以上離れた同じ運河沿いの住

宅では、激しい流れによる壁の破壊は見られないが、最高で2階の床上まで浸水した。ポンプ場も浸水したため、1ヶ月以上浸水した状態が続き、木材の腐敗等が進んでいた。

c) ボーン湖（メキシコ湾）の高潮による被害

ニューオーリンズの東部にあるインナーハーバー航路運河は、メキシコ湾からは運河（Mississippi River Gulf Out-let Canal）でつながっており、この運河に沿って港湾施設が配置され、工業地帯が形成されている。また、9番街区のように低湿地を開発した住宅地もある地域である。メキシコ湾やボーン湖の高潮によってこの運河の水位は高さ約4mの堤防を越え、3箇所破堤した。これらの破堤は、壊滅的な破壊をもたらし、多くの死者を出す結果となった。特に土台に置かれただけの木造家屋は流されており、破堤地点近くではほとんどの家が流失していた。

また、工場地帯の諸施設にも被災があり、石油タンクからの石油の流失など、二次災害が問題となっている。また、バージが堤防に乗り上げたり橋梁に衝突したりしていた。さらに、この地域の東側は、広大な湿地帯となっているが、高潮と高波で破壊されて環境問題となっている。なお、ニューオーリンズ郊外から東に行くほど、次節で述べるメキシコ湾岸の被災のパターンに似ており、メキシコ湾からの高潮・高波の影響が大きくなっている。

（2）メキシコ湾岸の災害

アラバマ州からミシシッピ州にわたる200kmにおよぶ非常に長い海岸でも、メキシコ湾からの直接の高潮と高波によって、多くの家屋が破壊されるなど甚大な災害が発生している。ただし、死者は200名以下と被害の規模の割に人的な損失が小さいのが特徴である。

中でもロングビーチからガルフショアに至る海岸は、いわゆるリゾート海岸であり、海岸には堤防などの防災施設はほとんどなく、陸側は概ね平坦で、海岸に沿った道沿い（海を望めるくらいの範囲）にリゾート目的の民家やホテルが立ち、その背後の林の中にも民家が点在する、という土地利用形態になっている。7mに達する非常に大きな高潮とそれに伴う高波によって、海岸線から200～300mの範囲では家屋が破壊され、約1kmまで浸水した。特に海岸から第1線の大きな木造家屋が高潮

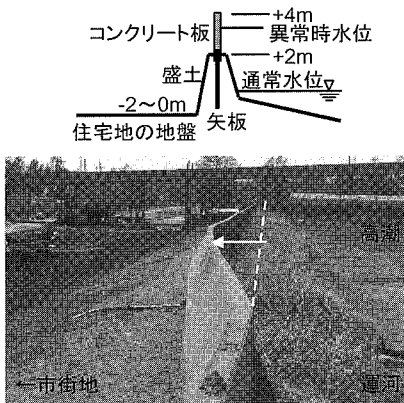


写真-1 堤防 (Flood Wall) の概観と断面

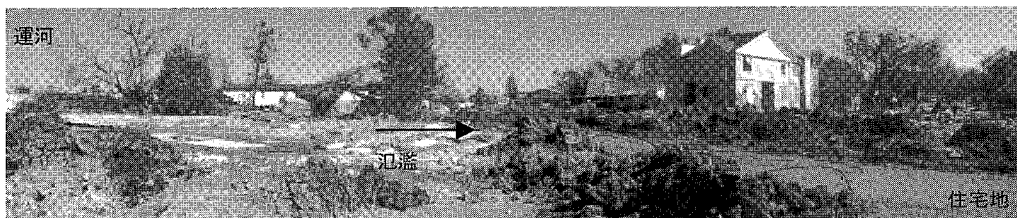


写真-2 17番ストリート運河の破堤



写真-3 メキシコ湾沿岸の家屋の破壊

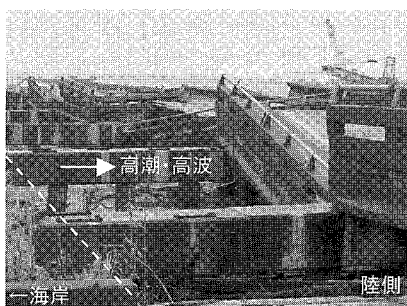


写真-4 橋梁の破壊

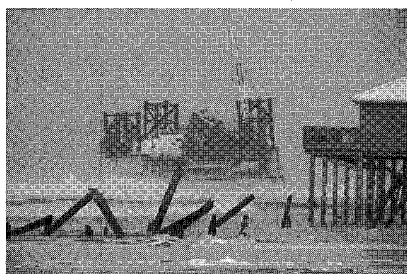


写真-5 沿岸砂州上の高床式の家屋

と高波によって破壊された様子(写真-3)は、インド洋大津波の被害を思い起こさせるものであった。また、ロングビーチのとなりのピロキシは、海岸に係留したバージ上のカジノで有名であるが、高潮と高波によって、このバージが岸に打ち上げられ、陸上の建物に衝突していた。

写真-4は、ピロキシ湾を跨ぐメキシコ湾の海岸に沿った橋梁である。その橋桁が陸側にずれ各橋桁のピロキシ側の端が落ちている。現地調査では海面から橋桁の底面までの高さが約3.8mであり、カトリーナの高潮時に高波で下から衝撃的な波力が作用したものと考えられる。

写真-5は、メキシコ湾に直接面した沿岸砂州上のリゾート地であるガルフショア海岸であり、養浜された砂浜の後方に高床式の家屋が並んでいる。州法で床の高さは海面上4m以上にしてあるが、それらの中にはカトリーナの高潮・高波で破壊されたものもあった。カトリーナ

の高潮・高波で海岸が浸食され大量の砂が陸に運ばれたため、その砂を海へ戻す工事も行われていた。また、メキシコ湾では石油やガスの採掘が行われており、この写真のようにプラットホームが漂流等の被害を受けている。

(3) 避難、復旧・復興

調査に同行した陸軍工兵隊 Winer 博士によると、ニューオーリンズでは、2日以上前から避難情報が流され、前日の避難勧告で多くの人が避難したが、避難の手段や費用の無い人がとり残された。災害発生後の復旧・復興に陸軍工兵隊などが活躍したが、作業は非常に困難で、仮止水は9月23日、排水完了は10月11日であった。都市のインフラの被害も大きく、彼の住む地区では電気が10月10日、ガスが11月4日、郵便が1月4日に復旧したが、電話は本年1月中旬でもまだであった。こうした災害では、復旧・復興の困難さも考慮しておくべきである。

4. カトリーナの教訓

(1) 二つの災害(ハード防災とソフト防災)

ニューオーリンズの災害とメキシコ湾岸の災害は、原因も異なり、その結果としての被災のパターンも異なっている。しかしながら、防災を考える上でさらに特徴的なことは、ハードとソフトの防災手段の違いである。

ロングビーチをはじめとするメキシコ湾岸には、ほとんど防災施設がなく、避難と保険による防災である。これまでもハリケーンの規模に応じて多くの被災の経験があり、避難の経験もあったため、死者の数が比較的少なかったと考えられる。

一方、ニューオーリンズは我が国の沿岸防災に近く、堤防によって高潮を防ぐことを基本としている。ただし、その設計レベルはカテゴリー3程度を考えたものであり、それ以上に対しては避難で対応することになっていた。今回は、ワーストケースクラスのハリケーンの来襲と堤防の破壊によって非常に大きな災害となっている。

(2) ハード防災とワーストケースシナリオ

ハード防災の問題点が見える形で現れたのが今回のニューオーリンズの災害である。我が国はハード防災を基本としており、この問題点は我が国にとっても非常に重要である。図-5はハード防災とソフト防災の二つの場合の外力のレベルと災害の程度を模式的に示したものである。横軸に比較的発生し易い外力レベル(レベルⅠ)、現状の設計レベル(レベルⅡ)、そしてワーストケースクラスのレベル(レベルⅢ)を示している。

ロングビーチのようなソフト防災では、レベルⅠでもある程度の被害が生じ、レベルⅡ、Ⅲに対して被害は連続的と考えられる。一方、ハード防災では、レベルⅡまでほとんど被害はないが、レベルⅢで不連続的に大災害

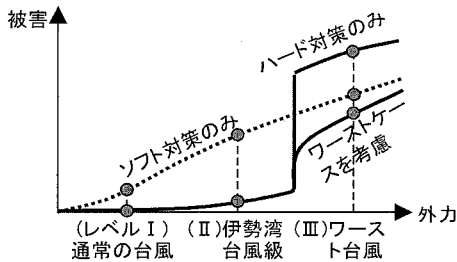


図-4 外力レベルと災害の程度

となる。市民も行政もこのワーストケースを想像できず、それについて考えることはほとんど無いのが現実である。また、小さな災害でも実際に経験している人が多いロングビーチと、そうでないニューオーリンズでの人々の避難や災害時の行動にも大きな違いがあり、それでニューオーリンズで大きな死者数になったと考えられる。

著者らは、こうしたハード防災の基本的な問題点を克服するために、ワーストケースを考えることが重要であり、ワーストケースの災害シナリオを防災施設の性能設計として体系的に考えることを提案している。

(3) ワーストケースシナリオと性能設計

性能設計は、必要な性能とこれに対する照査方法を明確に体系化して記述するものであり、施設の性能を具体的に説明できる設計法である（海岸工学委員会研究レビュー小委員会、2001）。具体的には図-4に示した3つの設計レベルを考えており、レベルⅢはこれまでの設計レベルを上回る設計レベル、ワーストケースに相当する。性能設計は、各レベルに対して防災施設の安定性や防災機能を照査し、被災の実態を明らかにするものであり、各レベルにおける災害のシナリオを作成することでもある。防災施設をレベルⅢに対して設計するのではなく、レベルⅢの場合に何がおきのかを明確にし（ワーストシナリオを作成し）、ハードの必要最低限な改善やソフト対策の構築を図るものである（高橋ら、2000、2003）。

なお、ニューオーリンズでは2000年からカテゴリ-5を含むワーストケースシナリオの検討が進められていたが、十分活用される段階にまでは至っていなかった。

(4) ワーストケースの選定

レベルⅢすなわちワーストケースの決定は、実際には困難である。既に伊勢湾などではワーストケースクラスの伊勢湾台風による高潮偏差を考慮しており、これ以上を考える場合には論理的な裏づけが必要である。著者らは、例えば伊勢湾では現状の設計レベルを1.5 m上回るレベルで再現確率が600年程度のを考えている。また、逆にカテゴリ-5のような台風から高潮を設定することも考えられる。何れにしても、防災施設の安定性能を照査することによって、防災施設の破壊を含めたワースト

ケースのシナリオの作成が可能となる。ただし、ワーストケースの選定については更に検討が必要である。

(5) ワーストケースシナリオの活用

ワーストケースシナリオがあれば、ワーストケースの災害の大きさが明らかとなって、必要な対策が明らかとなる。その中には必要なハード対策も含まれるが、最も重要なことはソフト対策であり、特に市民の啓蒙である。シナリオという形で市民に具体的に示すことができれば、災害を疑似体験でき、避難の重要性や具体的な方法を認識していただける。また、災害発生後のシナリオによって、復旧・復興のシミュレーションも可能となる。

5. おわりに

この災害で学ぶべき最も重要な点は、ワーストケースの災害シナリオを予測し、それに備えることである。その場合、既存の防潮堤の崩壊を伴うような設計を上回る外力を考えること、あるいは防災施設の破壊とそれに伴う災害の急激な拡大を考える必要がある。

今回の現地調査は沿岸技術研究センターの村田進理事長および小谷野喜二郎長も参加されており、国土交通省や米国の大学や陸軍工兵隊の技術者・研究者等のお世話になった。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 沿岸災害技術調査団(2005):ハリケーンカトリナによる米国メキシコ湾岸の高潮・高波災害の現地調査, CDIT 臨時増刊号, 沿岸技術研究センター, pp. 9-18.
- 海岸工学委員会研究レビュー小委員会(2001):新しい波浪推算法とこれからの海域施設の設計法-性能設計の確率に向けて, 土木学会, 256p.
- 河合弘泰・平石哲也(2006):ハリケーン・カトリナによる米国メキシコ湾岸の高潮災害の現地調査, 港空研資料, No. 1121, 27p.
- 高橋重雄(2005):ハリケーンカトリナ被害調査帰国報告, 米国土木学会海岸・港湾・海洋委員会, 第一次現地調査, 土木技術, Vol. 60, No. 11, pp. 58-64.
- 高橋重雄・河合弘泰・高山知司(2000):1999年の台風18号による災害と今後の高潮・高波対策について-高潮対策施設の性能照査と性能設計, 土木学会誌, Vol. 85, 11, pp. 67-70. (同, 港空研資料, No. 1042, 2003)
- 高山知司・高橋重雄・河合弘泰(2006):ハリケーンカトリナ被害調査報告書(帰国速報-2), 土木技術, vol. 61, No. 5, pp. 46-49.
- FEMA: FEMA-1603-DR, Louisiana- Imagery Derived Assessment, Mississippi, Louisiana, and Alabama Affected Population from Flooding as of 09/03/2005, http://www.gimaps.fema.gov/2005_graphics/dr1603/la-ms-al_pop_090305.pdf, 参照 2005-9-26.
- The White House (2006): The federal response to Hurricane Katrina, 17p. <http://www.whitehouse.gov/reports>.
- Tim Vasquez: New Orleans Elevation Map, http://en.wikipedia.org/wiki/Effect_of_Hurricane_Katrina_on_New_Orleans, 参照 2005-9-2.