

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1121 June 2006

ハリケーン・カトリーナによる米国メキシコ湾岸の
高潮災害の現地調査

河 合 弘 泰
平 石 哲 也

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

| | |
|---|----|
| 要 旨 | 3 |
| 1. まえがき | 4 |
| 2. ハリケーン・カトリーナとメキシコ湾沿岸の地形 | 5 |
| 2.1 ハリケーン・カトリーナの勢力 | 5 |
| 2.2 メキシコ湾とニューオーリンズ周辺の地形 | 6 |
| 2.3 ハリケーン・カトリーナによる高潮 | 7 |
| 2.4 ハリケーン・カトリーナによる被害の概況 | 10 |
| 3. ニューオーリンズ市周辺の高潮・高波災害 | 12 |
| 3.1 ジェファーソン郡のポンプ場と運河 | 12 |
| 3.2 17th Street Canalの堤防の決壊と浸水 | 12 |
| 3.3 London Avenue Canalの堤防の決壊と浸水 | 14 |
| 3.4 ポンチャートレン湖の横断橋 | 14 |
| 3.5 マリーナの係留施設とボートの破壊 | 14 |
| 3.6 Inner Harbor Navigation Canalの堤防の越流・決壊と浸水 | 15 |
| 3.7 セントバーナード郡の浸水 | 16 |
| 3.8 プラークマインズ郡の浸水 | 17 |
| 4. ミシシッピ州からアラバマ州のメキシコ湾沿岸の高潮・高波災害 | 18 |
| 4.1 ロングビーチ他における住宅地の浸水 | 18 |
| 4.2 ビロキシにおけるバージの漂流 | 19 |
| 4.3 ビロキシ他における道路橋の崩壊 | 20 |
| 4.4 バニューラベトレーのマリーナの被害 | 21 |
| 4.5 ダルフィン島とガルフショアにおける漂砂 | 21 |
| 5. ハリケーン・カトリーナの教訓 | 22 |
| 5.1 日本の高潮防災の課題 | 22 |
| 5.2 今後の高潮防災に必要な技術開発 | 24 |
| 6. 結論 | 25 |
| 7. あとがき | 25 |
| 謝辞 | 25 |
| 参考文献 | 26 |
| 付録 | 27 |

Field Investigation on Storm Surge and Wave Disaster on Gulf of Mexico, U.S. by Hurricane Katrina, 2005

Hiroyasu KAWAI*
Tetsuya HIRAISHI**

Synopsis

Hurricane Katrina made landfall near New Orleans, U.S. on August 29, 2005, and its storm surge and waves triggered a terrible disaster on the coast of the Gulf of Mexico. The damages of levees and buildings and the inundation were investigated in the affected areas.

- (1) The storm surge and waves in the Gulf of Mexico and the storm surge in Lake Ponchartrain were major two causes of the disaster. The Gulf coast and Lake Ponchartrain are so shallow that a significant storm surge can be generated by a severe hurricane.
- (2) Levees of Inner Harbor Navigation Canal were first breached due to the storm surge in Lake Borgne and then levees of 17th Street Canal and London Avenue Canal were breached due to the storm surge in Lake Ponchartrain. These breaches induced wide flood over the low-lying urban area of New Orleans and its surrounding perishes.
- (3) In St. Bernard Parish and Plaquemines Parish, the storm surge in the Gulf of Mexico and Lake Borgne made coastal dikes submerged and the rearward areas flooded.
- (4) In Mississippi and Alabama States, the storm surge and waves destructed building on the Gulf coast, and drifted casino verges, fishing boats, and cargo containers.

Future countermeasures for storm surge disasters in Japan are also discussed in this paper.

Key Words: Hurricane Katrina, storm surge, high waves, low-lying ground, flotsam

* Head, Marine Hydrodynamics and Storm Surge Division, Marine Environment and Engineering Department

** Head, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5049 Fax : +81-46-844-1274 e-mail: kawai@pari.go.jp

ハリケーン・カトリーナによる米国メキシコ湾岸の 高潮災害の現地調査

河合 弘泰*
平石 哲也**

要 旨

ハリケーン・カトリーナは 2005 年 8 月 29 日に米国ニューオーリンズ市付近に上陸し、メキシコ湾の沿岸に甚大な高潮・高波災害をもたらした。本研究では、その被災状況を現地で調査し、以下のことを明らかにした。

- ① この災害はメキシコ湾の高潮・高波とポンチャートレン湖の高潮によって生じたものである。これらの海域は、水深が非常に浅く、高潮が発生しやすい顕著な地形をなしている。
- ② ボーン湖の高潮で Inner Harbor Navigation Canal の堤防が決壊し、さらにポンチャートレン湖の高潮で 17th Street Canal や London Avenue Canal の堤防が決壊することで、ゼロメートル地帯を広く有するニューオーリンズの市街地が浸水した。
- ③ ニューオーリンズ市の郊外に位置するセントバーナード郡やブラークマイズ郡の沿岸では、ボーン湖やメキシコ湾の高潮が堤防を越流して浸水した。
- ④ メキシコ湾に直接面した、ミシシッピ州やアラバマ州の海岸では、メキシコ湾の高潮・高波によって建物が破壊され、バージやボート、コンテナが漂流した。

また、このような被災状況を踏まえながら、今後の日本の高潮防災の課題についても整理した。

キーワード：ハリケーン・カトリーナ，高潮，高波，ゼロメートル地帯，漂流物

* 海洋・水工部海洋水理・高潮研究室長

** 海洋・水工部波浪研究室長

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5049 Fax：046-844-1274 e-mail:kawai@pari.go.jp

1. まえがき

2005年8月29日、ハリケーン・カトリーナ(Hurricane Katrina)は、中心気圧が920hPaという猛烈な勢力を維持したまま、アメリカのミシシッピ(Mississippi)川の河口付近に上陸した。そのコースを図-1.1に示す。このカトリーナによる高潮は、ルイジアナ(Louisiana)州ニューオーリンズ(New Orleans)市の周辺にある運河の堤防を越流したり決壊させ、ニューオーリンズ市の市街地の80%に相当する約370km²をはじめ、広範囲を浸水させた。ルイジアナ州の東側に位置するミシシッピ州やアラバマ(Alabama)州のメキシコ湾岸では、高潮による浸水の上に高波も押し寄せ、海岸線の近くでは家屋の土台だけを残して破壊し、海岸に係留されていたバージも陸に打ち上げた。これらの災害はメキシコ湾岸の地形や土地利用に起因するところが多いと考えられる。日本とメキシコ湾岸には地形や土地利用に異なるところもあるが、日本も台風の常襲地帯に位置し、三大湾の沿岸には広大なゼロメートル地帯を有している。このハリケーンによる災害は今後の日本の高潮・高波対策にも多くの貴重な教訓を与えるものであろう。

そこで、著者らはカトリーナによる災害の発生直後から、インターネット上のニュースやアメリカ在住の知人から現地の情報を収集する一方で、アメリカ土木学会海岸・海洋・港湾・河川委員会(Coasts, Oceans, Ports, and Rivers Institute / ASCE)にも連絡をとった。そして、当研究からは高橋重雄研究主監が海岸・海洋・港湾・河川委員会による第一次の現地調査に参加した。この現地調査は、災害から約1ヶ月後の2005年9月22日～23日に実施され、アラバマ州ガルフショア(Gulfshore)～ミシシッピ州セントルイス湾(Bay St. Louis)のメキシコ湾沿岸を対象とした。

さらに、著者らは、当研究所の高橋重雄研究主監や、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の研究者とともに「沿岸防災技術調査団」を結成し、港湾空港技術研究所としては第二次の現地調査を実施した。この現地調査は、災害から約2ヶ月後の2005年10月26日～29日に行われ、アラバマ州～ミシシッピ州のメキシコ湾岸の補足的な調査と、ルイジアナ州ニューオーリンズ市、セントバーナード郡(St. Bernard Parish)、プラークマイズ郡(Plaquemines Parish)の被災状況を調査した。

これら2回の現地調査の範囲を図-1.1に、調査員の構成や行程の詳細を付録-Aに示す。また、以下の本文では

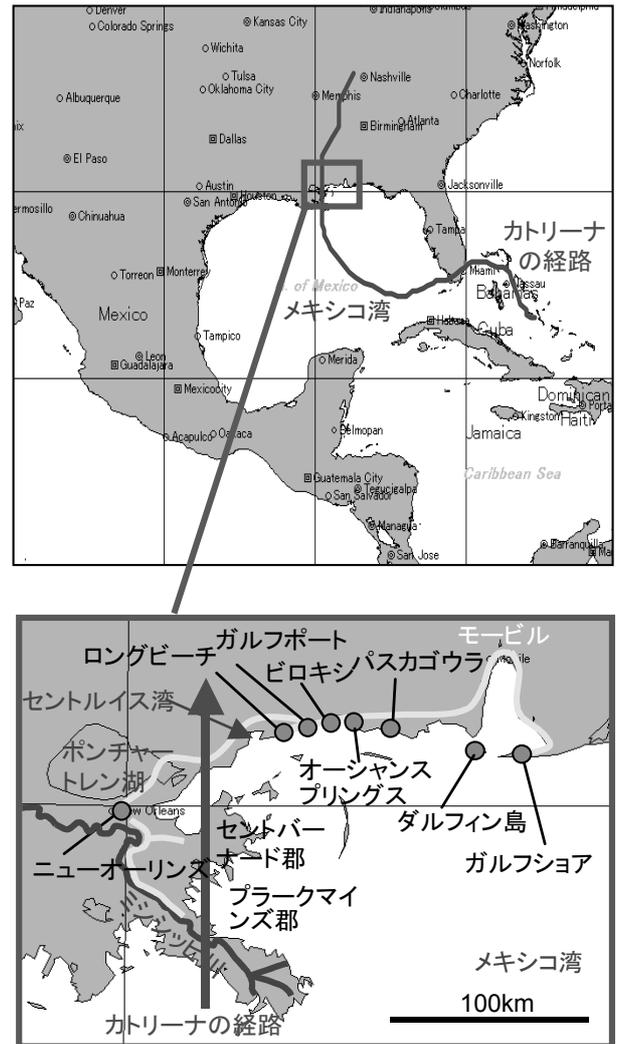


図-1.1 ハリケーン・カトリーナのコースと現地調査の範囲

それぞれを「第1次調査」、「第2次調査」と記す。

本資料ではまず、ハリケーン・カトリーナの勢力やメキシコ湾岸の地形の特徴など、史上稀に見る高潮・高波災害の発生原因について記す(第2章)。そして、ニューオーリンズ周辺(第3章)とアラバマ州～ミシシッピ州のメキシコ湾沿岸(第4章)に分けて、それぞれの被災状況を報告する。なお、ここで掲載する一次調査の結果は、高橋重雄研究主監から提供いただいたものである(高橋, 2005)。そして最後に、カトリーナの高潮・高波災害から学ぶべき教訓をまとめる(第5章)。

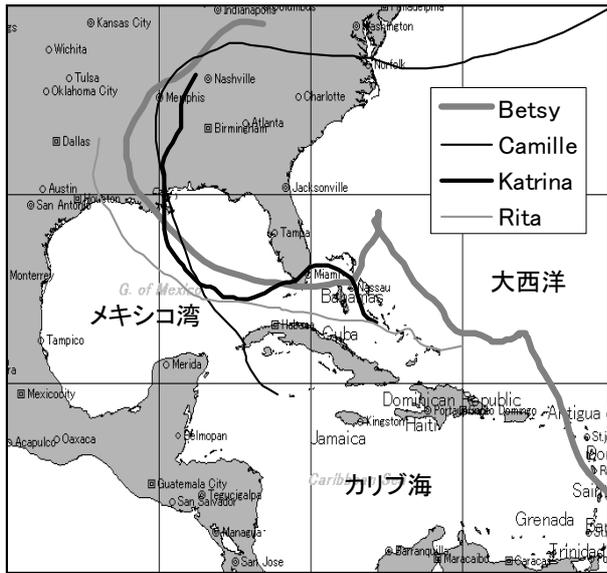


図-2.1 ミシシッピ川の河口付近に上陸した代表的なハリケーンのコース

表-2.1 大西洋におけるハリケーンの最盛期の中心気圧 (The Weather Channel による)

| 順位 | 名称 | 年 | 中心気圧(hPa) |
|----|----------------|-------------|------------|
| 1 | Wilma | 2005 | 882 |
| 2 | Gilbert | 1988 | 888 |
| 3 | Labor Day | 1935 | 892 |
| 4 | Rita | 2005 | 897 |
| 5 | Allen | 1980 | 899 |
| 6 | Katrina | 2005 | 902 |
| 7 | Camille | 1969 | 905 |
| | Mitch | 1998 | 905 |
| 9 | Ivan | 2004 | 910 |
| 10 | Janet | 1955 | 914 |

2. ハリケーン・カトリーナとメキシコ湾沿岸の地形

2.1 ハリケーン・カトリーナの勢力

アメリカでは毎年6月から11月までがハリケーンシーズンであると言われており、メキシコ湾沿岸にはメキシコ湾、カリブ海、大西洋で発生したハリケーンの一部が来襲している。ハリケーン・カトリーナは、図-2.1に示すように、大西洋のバハマ諸島付近で発生したものであり、発生後はフロリダ半島の南端を横断し、メキシコ湾を西へと進んだ。カトリーナの中心気圧はメキシコ湾において 902hPa にまで低下した。この記録は、表-2.1

表-2.2 ハリケーンの強さの階級

| カテゴリ | 1分間平均風速 | |
|------|---------|-------|
| | mph | m/s |
| 1 | 74-95 | 33-42 |
| 2 | 96-110 | 43-48 |
| 3 | 111-130 | 49-57 |
| 4 | 131-155 | 58-68 |
| 5 | >155 | 69- |

表-2.3 ハリケーンのアメ리카上陸時の中心気圧 (U.S. National Hurricane Center による)

| 順位 | 名称 | 年 | 中心気圧(hPa) |
|----|----------------|-------------|------------|
| 1 | Labor Day | 1935 | 892 |
| 2 | Camille | 1969 | 909 |
| 3 | Katrina | 2005 | 920 |
| 4 | Andrew | 1992 | 922 |
| 5 | Indianola | 1886 | 925 |
| 6 | Florida Keys | 1919 | 927 |
| 7 | Okeechobee | 1928 | 929 |
| 8 | Donna | 1960 | 930 |
| 9 | New Orleans | 1915 | 931 |
| 10 | Carla | 1961 | 931 |

に示すように、その時点でギルバート(Gilbert)の 888hPa などに次ぐ歴代4位であり、カトリーナの後に同じ年に発生したリタ(Rita)の 897hPa、ウィルマ(Wilma)の 882hPa を含めても6位である。

ところで、ハリケーンの強さは、1分間平均風速の最大値によって、表-2.2に示すような5段階のカテゴリに分類されている。カトリーナがメキシコ湾で最も発達したときにはカテゴリ5に達した。一方、日本では10分間平均風速が 54m/s 以上の台風を「猛烈な台風」と分類しており、1分間平均風速は10分間平均風速の約1.3倍であることから考えると、カテゴリ5の定義にほぼ対応するものである。

さて、カトリーナは、メキシコ湾で勢力を増した後、進路を北向きに変え、8月29日に中心気圧が 920hPa 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、ニューオーリンズ市の東側を北上した。この上陸時におけるカテゴリは4であり、中心気圧は、表-2.3に示すように、1935年のレイバーデーと1969年のカミールに次ぐ3位の記録であった。なお、リタはメキシコ湾でカトリーナよりも発達したものの、ヒューストン付近に上陸する前にカトリーナよりも減衰した。

図-2.1には、カトリーナとよく似たコースをたどった

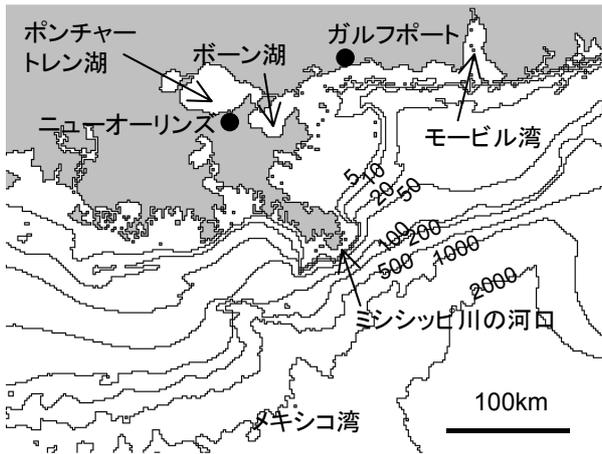


図-2.2 メキシコ湾沿岸の水深の分布 (単位 m, 米国海洋・大気庁(NOAA)の海図および地形データ GLOBE より作成)

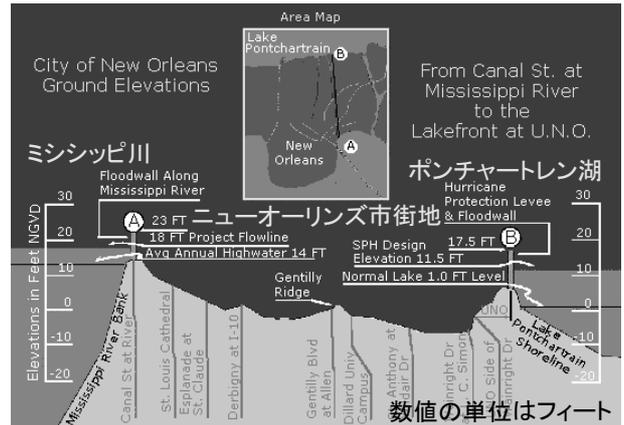


図-2.4 ニューオーリンズの断面 (<http://www.mvn.usace.army.mil/pao/response/NGVD.asp> に加筆)

5m 以下である。ミシシッピ川の河口からモービル湾にかけての海岸線から沖合に数十 km には離岸堤のような細長い島が多く並んでおり、これらはバリア・アイランドと呼ばれている。ニューオーリンズ市の北側にはポンチャートレン湖(Lake Pontchartrain)があり、その広さは東京湾にほぼ匹敵する。ニューオーリンズの東側にはボーン湖(Lake Borgne)がある。これらの2つの湖は、メキシコ湾とつながった塩水湖であり、それらの水深は5m 以下と非常に浅い。

ニューオーリンズ市 (オーリンズ郡(Orleans Parish)と同じ) 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港湾都市として発展してきた。また、ジャズの街としても世界的に知られている。人口は約 50 万人であり、その約 70%が黒人である。陸域面積は約 470km² である。ニューオーリンズ市の周りに位置するジェファーソン郡、セントバーナード郡などを合わせたニューオーリンズ大都市圏(Greater New Orleans)の人口は約 130 万人に達する。

ニューオーリンズ市の市街地は、ミシシッピ川に接した地盤の比較的高い地域から始まり、干拓によってポンチャートレン湖に近い低湿地帯に拡張された。その結果、図-2.3 に示すように、ポンチャートレン湖とミシシッピ川に挟まれたゼロメートル地帯に多くの市民が居住することになった。図-2.4 はニューオーリンズ市街地の典型的な断面を示したものであり、平均海面 NGVD (National Geodetic Vertical Datum)を基準に、ポンチャートレン湖の堤防の設計潮位は 3.5m (11.5feet)、天端は 5.3m (17.5feet) であり、ミシシッピ川の堤防の高さは 4.9m (23feet) である。これらの堤防に挟まれた地盤はポンチャートレン湖やミシシッピ川の通常の水位よりも低いところが多く、

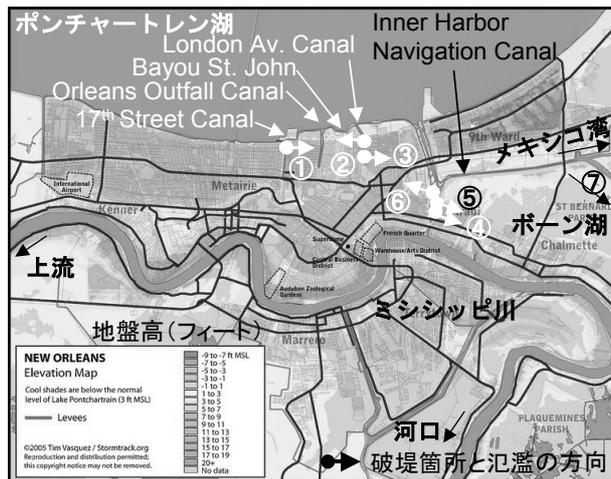


図-2.3 ニューオーリンズの地盤高と運河の破堤箇所 (<http://stormtrack.org/>に加筆)

ベッツィー(Betsy)とカミール(Camille)のコースも記してある。ニューオーリンズ市では、1965年のベッツィーによる高潮災害を契機に堤防の築造が開始され、1969年のカミールでは顕著な災害に至らず、カトリーナによって40年ぶりに大規模な高潮災害に見舞われた。アラバマ州やミシシッピ州のメキシコ湾沿岸では、カミール以来のやはり約40年ぶりの高潮・高波災害となった。

2.2 メキシコ湾とニューオーリンズ周辺の地形

メキシコ湾沿岸の水深分布を図-2.2に示す。ミシシッピ川の河口とガルフポートの間には、水深5m以下の非常に遠浅な海岸が形成されており、モービル湾の水深も

この地形はよく「スープ皿」にたとえられている。

ニューオーリンズ市の周辺には、図-2.3 で示したように、運河が張り巡らされている。そのうち 17th Street Canal, Orleans Outfall Canal, Bayou St. John, London Av. Canal はポンチャートレン湖につながっている。また、Inner Harbor Navigation Canal は、T 字になす運河であり、ポンチャートレン湖とミシシッピ川を短絡するとともに、東はボーン湖やメキシコ湾につながっている。

2.3 ハリケーン・カトリーナによる高潮

(1) 高潮の観測値

アメリカ海洋・大気庁(NOAA)によると、カトリーナの進路の東側に位置するメキシコ湾沿岸では大きな高潮偏差が観測された。図-2.5 はその最大高潮偏差の一部を地図上に示したものであり、例えば、オーシャンズプリングスでは高潮偏差が 3.5m を超えるまで潮位が観測され、それ以降は欠測した。すなわち、少なくとも日本で観測されたことのある最大の高潮偏差（伊勢湾台風時の名古屋で 3.5m）を上回る高潮偏差がこの海域で発生していたことになる。オーシャンズプリングスに近いガルフポートでは、家屋の破壊や浸水、バージの陸への打ち上げ、海岸付近の橋桁の落下など被害が生じており、これらの状況については後述するが、その状況から判断するとこの周辺では高潮偏差が 3~7m に達したものと推測される。なお、メキシコ湾沿岸における天文潮差は 0.5m 程度と小さく、カトリーナ来襲時の潮位の顕著な上昇はほとんど高潮偏差によるものと見なして良い。メキシコ湾の沿岸でこれほど高潮が顕著になったのは、カトリーナの中心気圧が低く、図-2.2 で示したような広大な遠浅海域に猛烈な風が吹いたためである。ニューオーリンズの市街地の浸水は、ポンチャートレン湖とボーン湖で発

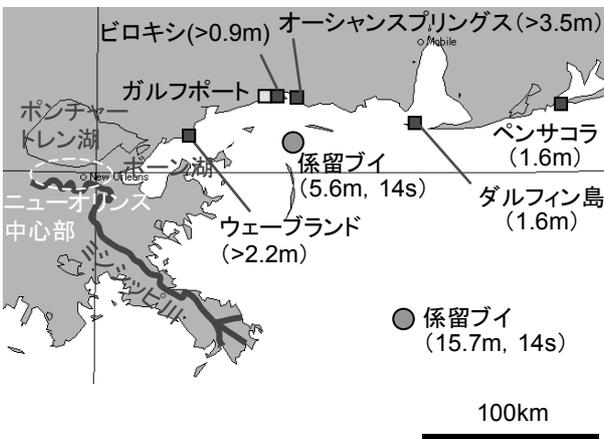


図-2.5 最大高潮偏差と最大有義波の観測値

生じた高潮に起因するものである。

なお、メキシコ湾沿岸ではブイによる波浪観測も行われており、ダルフィン島から 100km ほど沖合に係留されたブイでは最大有義波として 15.4m, 14s が観測された。オーシャンズプリングスの 30km ほど沖合にあるブイでは 5.6m, 14s と低かったが、これはバリア・アイランドによる遮蔽あるいは地形性砕波の影響によるものであると思われる。

(2) 高潮の数値計算

メキシコ湾沿岸の高潮の状況をもう少し詳しく知るために、ハリケーンの気圧と風場を経験的力学モデルで与え、これらを外力として海水の流れを線形長波方程式の差分式で計算した。

ハリケーンの気圧分布には、次式で示す Myers の分布を仮定した。

$$p = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (2.1)$$

ここに、 p は台風を中心から距離 r だけ離れた点における気圧、 p_c は中心気圧、 Δp は気圧深度、 r_0 は最大風速半径である。代表的な時刻（2~3 時間間隔）におけるハリケーンを中心の位置（緯度・経度）と気圧には、米国海洋・大気庁の再解析値を用いた。また、本論文では、移動速度をハリケーンを中心の移動距離から算出し、最大風速半径 r_0 を台風に関する経験式（河合ら、2004）

$$r_0 = 94.89 e^{\frac{p_c - 967.0}{61.50}} \quad (2.2)$$

によって与えた。これらの諸元を表-2.4 に示す。

海上風の風速 W は、移動座標系における力学的釣り合いに基づいて、次式により与えた。

$$W = C_1(X) U_G \quad (2.3a)$$

$$C_1(X) = C_1(\infty) + [C_1(X_p) - C_1(\infty)] \left(\frac{X}{X_p}\right)^{k-1} \cdot \exp\left\{\left(1 - \frac{1}{k}\right) \left[1 - \left(\frac{X}{X_p}\right)^k\right]\right\} \quad (2.3b)$$

$$U_G = \frac{1}{2} \left\{ -(fr - V_T \sin \beta) + \sqrt{(fr - V_T \sin \beta)^2 + 4 \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial r}} \right\} \quad (2.3c)$$

$$C_1(X_p) = \min\left\{ \frac{2}{3} [1 + 10^{(0.0231 \Delta p - 1.95)}], 1 \right\} \quad (2.3d)$$

ここに、 U_G は自由大気における風速、 $X=r/r_0$ である。

$C_1(X_p)$ は風速低減係数 $C_1(X)$ の最大値であり, Mitsuta and Fujii (1987)は気圧深度 Δp の関数を与えているが, カトリーナの気圧深度が非常に大きいため, 本論文ではこの値が1を超えないようにした. また, 海上風の自由大気風に対する偏向角は, 中心から最大風速半径 r_0 までは中心からの距離に比例し, 最大風速半径以上の距離では15 deg で一定とした. なお, ポンチャートレン湖やボーン湖の周辺には海上風の流れを大きく妨げるような山地がなく, 平坦な陸地が広がっているため, 海上風に局所的な陸上地形が及ぼす影響は無視した (MASCON モデルなどを用いた海上風の補正はしなかった).

海面気圧の変動や風によって生じる海水の流れは, 単層の非線形長波方程式に基づく数値計算モデルで計算し

表-2.4 カトリーナの諸元 (時刻は世界標準時)

| 年 | 月 | 日 | 時 | 経度 (deg) | 緯度 (deg) | 中心気圧 (hPa) | 最大風速半径 (km) | 移動速度 (km/h) |
|------|---|----|----|----------|----------|------------|-------------|-------------|
| 2005 | 8 | 26 | 5 | -81.1 | 25.4 | 990 | 138 | 12.8 |
| 2005 | 8 | 26 | 7 | -81.3 | 25.3 | 990 | 138 | 17.6 |
| 2005 | 8 | 26 | 9 | -81.5 | 25.3 | 987 | 131 | 8.0 |
| 2005 | 8 | 26 | 11 | -81.8 | 25.3 | 987 | 131 | 8.0 |
| 2005 | 8 | 26 | 13 | -82.0 | 25.2 | 987 | 131 | 9.6 |
| 2005 | 8 | 26 | 15 | -82.2 | 25.1 | 981 | 101 | 11.2 |
| 2005 | 8 | 26 | 18 | -82.6 | 24.9 | 969 | 98 | 12.8 |
| 2005 | 8 | 26 | 21 | -82.9 | 24.8 | 965 | 92 | 12.8 |
| 2005 | 8 | 27 | 0 | -83.3 | 24.7 | 965 | 92 | 12.8 |
| 2005 | 8 | 17 | 3 | -83.6 | 24.6 | 965 | 92 | 12.8 |
| 2005 | 8 | 27 | 6 | -84.0 | 24.4 | 963 | 89 | 12.8 |
| 2005 | 8 | 27 | 9 | -84.4 | 24.4 | 945 | 66 | 11.2 |
| 2005 | 8 | 27 | 12 | -84.6 | 24.4 | 940 | 61 | 11.2 |
| 2005 | 8 | 27 | 15 | -85.0 | 24.5 | 940 | 61 | 11.2 |
| 2005 | 8 | 27 | 18 | -85.4 | 24.5 | 949 | 71 | 11.2 |
| 2005 | 8 | 27 | 21 | -85.6 | 24.6 | 945 | 66 | 11.2 |
| 2005 | 8 | 28 | 0 | -85.9 | 24.8 | 944 | 65 | 11.2 |
| 2005 | 8 | 28 | 3 | -86.2 | 25.0 | 939 | 60 | 11.2 |
| 2005 | 8 | 28 | 6 | -86.8 | 25.1 | 935 | 56 | 12.8 |
| 2005 | 8 | 28 | 9 | -87.4 | 25.4 | 935 | 56 | 16.0 |
| 2005 | 8 | 28 | 12 | -87.7 | 25.7 | 908 | 36 | 19.2 |
| 2005 | 8 | 28 | 15 | -88.1 | 26.0 | 907 | 36 | 19.2 |
| 2005 | 8 | 28 | 18 | -88.6 | 26.5 | 906 | 35 | 20.8 |
| 2005 | 8 | 28 | 21 | -89.0 | 26.9 | 902 | 33 | 20.8 |
| 2005 | 8 | 29 | 0 | -89.1 | 27.2 | 904 | 34 | 17.6 |
| 2005 | 8 | 29 | 3 | -89.4 | 27.6 | 904 | 34 | 16.0 |
| 2005 | 8 | 29 | 6 | -89.5 | 27.9 | 908 | 36 | 16.0 |
| 2005 | 8 | 29 | 7 | -89.6 | 28.2 | 910 | 38 | 19.2 |
| 2005 | 8 | 29 | 9 | -89.6 | 28.8 | 915 | 41 | 24.0 |
| 2005 | 8 | 29 | 11 | -89.6 | 29.1 | 918 | 43 | 24.0 |
| 2005 | 8 | 29 | 13 | -89.6 | 29.7 | 923 | 46 | 24.0 |
| 2005 | 8 | 29 | 15 | -89.6 | 30.2 | 927 | 50 | 25.6 |
| 2005 | 8 | 29 | 17 | -89.6 | 30.8 | 940 | 61 | 27.2 |
| 2005 | 8 | 29 | 19 | -89.6 | 31.4 | 955 | 78 | 28.8 |
| 2005 | 8 | 29 | 21 | -89.6 | 31.9 | 960 | 85 | 28.8 |
| 2005 | 8 | 30 | 0 | -88.9 | 32.9 | 965 | 92 | 33.6 |
| 2005 | 8 | 29 | 3 | -88.5 | 33.5 | 973 | 105 | 35.2 |
| 2005 | 8 | 30 | 9 | -88.4 | 34.7 | 980 | 118 | 28.8 |
| 2005 | 8 | 30 | 15 | -87.5 | 36.3 | 985 | 127 | 33.6 |

た. メキシコ湾岸では天文潮差が小さいため, 本論文では, 天文潮を無視し, 高潮偏差分だけを求める方法をとった. その基礎方程式を以下に示す.

$$\frac{d\eta}{dt} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (2.5a)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (2.5b)$$

ここに, t は時刻, M, N はそれぞれ x, y 方向の流量フラックス, D は全水深 (= 静水深 h + 高潮偏差 η), ρ_w は海水の密度, p_0 は海面気圧, A_h は水平渦動粘性係数である. また, τ_{sx}, τ_{sy} は x, y 方向の海面せん断応力, τ_{bx}, τ_{by} は x, y 方向の底面せん断応力であり, それぞれ以下のように与えた.

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (2.6a)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (2.6b)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.7a)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.7b)$$

ここに, W_x, W_y は海上風速 W の x, y 成分, n はマニングの粗度係数である. また, C_D は海面抵抗係数であり, 本多・光易(1980)による式を用いた.

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024W)/10^3 & (W < 8) \\ (0.581 + 0.063W)/10^3 & (W \geq 8) \end{cases} \quad (2.8)$$

なお, 波浪の地形性砕波による radiation stress は無視し, 堤防の越流・決壊や陸上への氾濫も無視した.

計算領域は図-2.6 に示す東西 810km × 南北 360km の

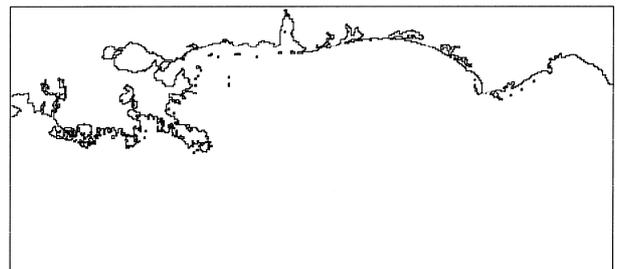


図-2.6 高潮の計算領域

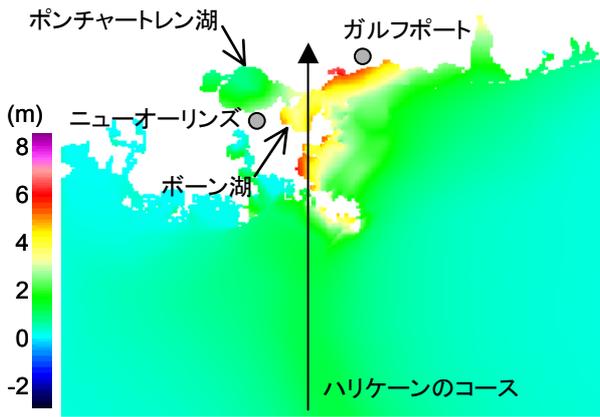


図-2.7 カトリーナによる最大高潮偏差の分布

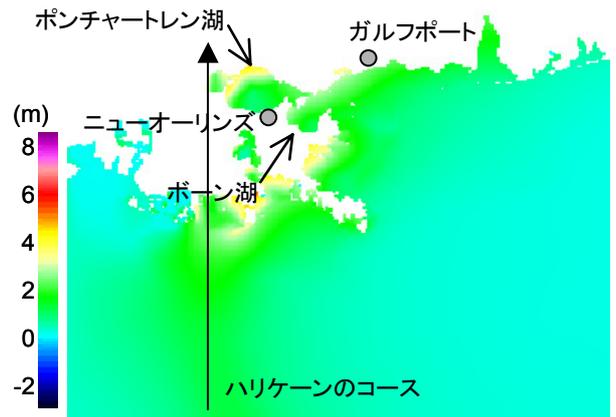
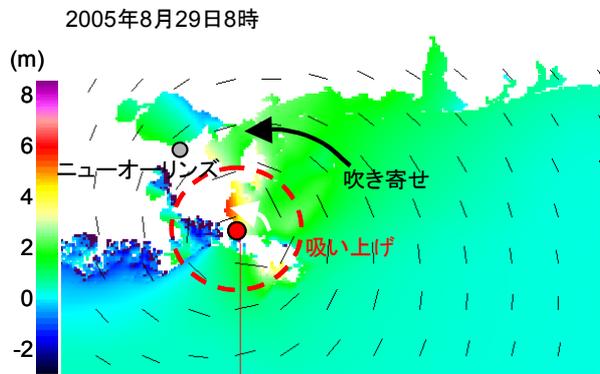
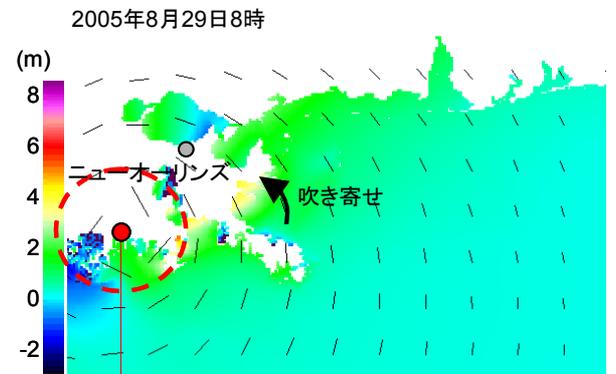


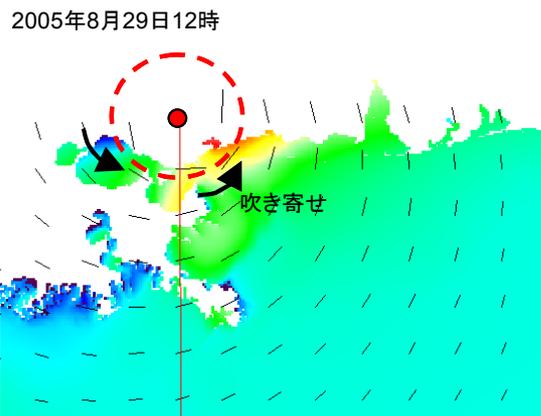
図-2.9 西寄りを通った場合の最大高潮偏差の分布



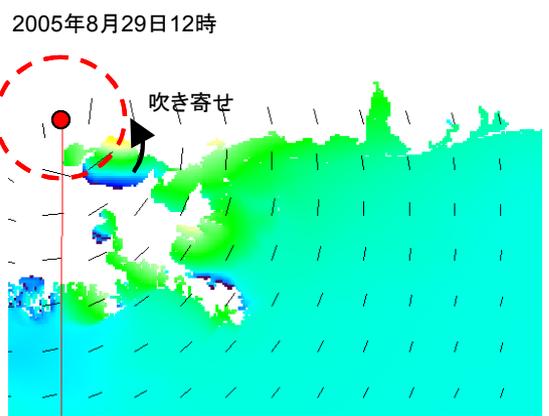
(a) ミシシッピ河口付近に上陸した時



(a) ミシシッピ川河口の西方に上陸した時



(b) ポーン湖を通過した後



(b) ポンチャートレン湖の北西に通過した後

図-2.8 カトリーナによる高潮偏差の平面分布の変化

図-2.10 西寄りを通った場合の平面分布の変化

長方形領域であり、この領域内に 1.8km 間隔で 450×200 個の計算格子を配置した。各格子点の水深は、ポーンチャートレン湖の周辺は米国海洋・大気庁発行の海図、それ

以外の海域は同庁の地形データセンター National Geophysical Data Center が Web 上に公開している 30" 間隔の地形データ GLOBE を内挿して求めた。

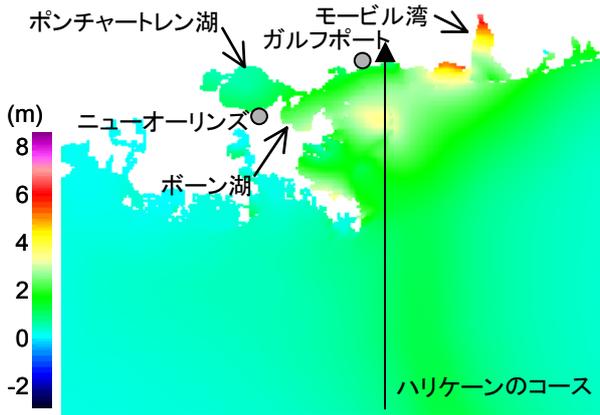
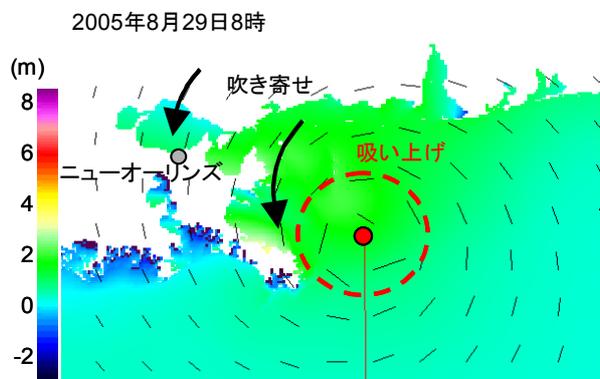
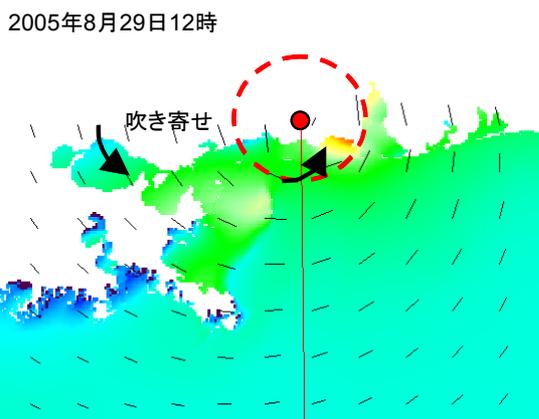


図-2.11 東寄りを通った場合の最大高潮偏差の分布



(a) 上陸前



(b) 上陸後

図-2.12 東寄りを通った場合の平面分布の変化

図-2.7 はこのような方法で求めた最大高潮偏差の分布であり、ポンチャートレン湖で約 2m、ボーン湖で約 5m、ミシシッピ川河口やガルフポートの周辺では約 6m

の高潮偏差が得られた。すなわち、ポンチャートレン湖よりもボーン湖やメキシコ湾に面した海岸で高潮が顕著であった。なお、この計算では波浪の地形性碎波による平均水位上昇や陸上への遡上を考慮していない。波浪の地形性碎波を考慮するとこの計算結果よりも高潮偏差は大きくなり、陸上への氾濫を考慮すると逆に小さくなるものと考えられる。

図-2.8 は代表的な時刻について、高潮偏差の分布を示したものである。(a)に示すように、カトリーナの中心がミシシッピ川河口付近に上陸したときに、カトリーナの中心付近（ブラークマイズ郡の沿岸）では吹き寄せと吸い上げによって高潮が顕著になった。ボーン湖でも西側（ニューオーリンズ市の方向）に向かう吹き寄せが生じた。ポンチャートレン湖では西岸で高潮偏差が大きく、南岸のニューオーリンズ市の付近ではまだピークに達していなかった。(b)に示すようにカトリーナの中心がボーン湖を通過してから、ポンチャートレン湖の南岸（ニューオーリンズ市）、ガルフポートなどミシシッピ州のメキシコ湾岸に海水が吹き寄せられた。これらのことから、ニューオーリンズ市には、まずボーン湖の高潮が襲い、その後にポンチャートレン湖の高潮が襲ったものと考えられる。

この付近の高潮の基本的な発生特性を調べるために、カトリーナが実際よりも経度で 1° （約 90km）西寄りまたは東寄りのコースをとった場合の高潮も計算した。その結果を図-2.9～2.12 に示す。西寄りのコースを通った場合、ボーン湖、ミシシッピ川の河口、ガルフポートの周辺では、ハリケーンの中心から遠ざかるために、吸い上げの効果や吹き寄せの効果が全体的に小さくなる。東寄りのコースを通った場合、ポンチャートレン湖ではハリケーンの通過前に北寄りの風が吹いて、ニューオーリンズ側の高潮偏差が増加する。ハリケーンの進路の左側に位置するガルフポート付近の海岸では陸風が吹くために高潮偏差は小さく、右側に位置するモービル湾で高潮偏差が大きくなる。これらのことから、ニューオーリンズやガルフポートにとって、カトリーナのコースは最も危険なコースであったと考えられる。

2.4 ハリケーン・カトリーナによる被害の概況

カトリーナの高潮・高波は、アラバマ州、ミシシッピ州、ルイジアナ州の3州を中心とする、メキシコ湾沿岸の海岸にある家屋や橋梁に甚大な被害をもたらした。また、沖合にある石油や天然ガスの掘削施設の被害は、世界の原油価格を高騰させた。これらの被害総額は未だ定まっていないが、表-2.5 に示すように、アメリカのハリ

表-2.5 インフレ率や資産価値で補正したハリケーンによるアメリカ国内の損害額 (NOAA による)

| 順位 | 名称 | 年 | 損害 (億\$) |
|----|-----------------------------------|-------------|------------------|
| 1 | Great Miami Hurricane | 1926 | 1019.7 |
| 2 | Hurricane Katrina | 2005 | >750.0 |
| 3 | Hurricane Andrew | 1992 | 431.5 |
| 4 | Galveston Hurricane of 1900 | 1900 | 375.4 |
| 5 | Galveston Hurricane of 1915 | 1915 | 318.1 |
| 6 | South Florida Hurricane of 1944 | 1944 | 237.8 |
| 7 | New England Hurricane of 1938 | 1938 | 234.5 |
| 8 | Lake Okeechobee Hurricane of 1928 | 1928 | 194.6 |
| 9 | Hurricane Betsy | 1965 | 175.4 |
| 10 | Hurricane Donna | 1960 | 169.9 |

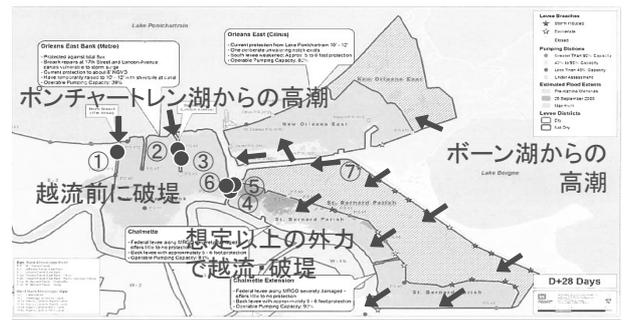


図-2.14 ニューオーリンズの運河と浸水の原因 (http://www.hq.usace.army.mil/cepa/katrina/pumps/pumps.html に加筆)

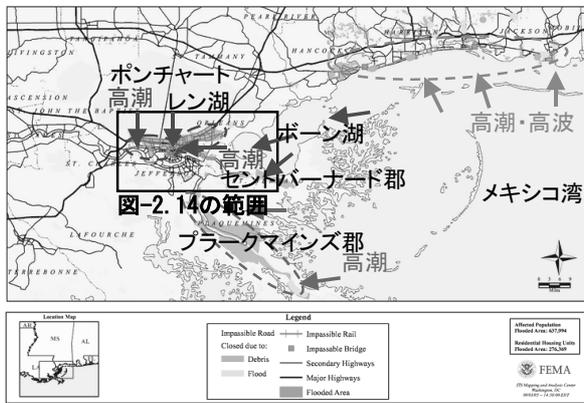


図-2.13 メキシコ湾沿岸の被災状況のまとめ (http://www.gimaps.fema.gov/2005graphics/dr1603/la-ms-al_pop_090305.pdf に加筆)

ケーン災害史上でトップクラスの被害額に達している。被害額はその集計の時期や基準によって左右されるが、既に 1,000 億ドルを超えたという報道もある。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った。

日本では、ニューオーリンズ市の中心街 (ルイジアナスーパードームの周辺) やセントバーナード郡 9th Ward の浸水が盛んに報道された。しかしながら、カトリーナの高潮・高波災害はニューオーリンズ市の周辺だけでなく、モービル湾の周辺に至る非常に広範囲に発生しており、その災害のメカニズムも場所によって異なることに留意しなければならない。現地の被災状況の詳細については第 3 章で述べるが、カトリーナの高潮・高波災害の原因 (外力) は、図-2.13 に示すように、ポンチャートレン湖の高潮と、メキシコ湾の高潮・高波の、2 つに

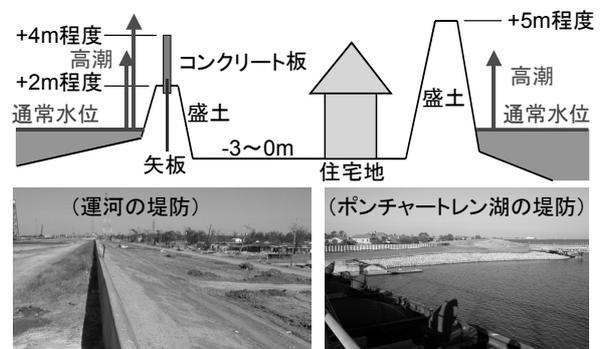


図-2.15 運河やポンチャートレン湖の堤防の構造

分けて考える必要がある。

ニューオーリンズ市の周辺では、図-2.14 に示すように、ボーン湖の高潮によって Inner Harbor Navigation Canal の水位が上昇し、堤防の越流や決壊に至った (地点④~⑥)。さらに、ポンチャートレン湖の高潮で 17th Street Canal や London Av. Canal の水位も上昇し、堤防の一部が決壊した (図中の地点①~③)。また、バージが堤防に乗り上げたところもある (地点⑦)。これら 2 方向からの高潮によって、ニューオーリンズ市の陸地の約 80% が浸水した。図-2.15 は、運河とポンチャートレン湖の堤防の構造を示したものである。運河の堤防は盛土に矢板が打ち込まれ、その上に鉄筋コンクリートの板を立てた構造になっている。ニューオーリンズ市の周辺では、市街地を貫く運河の堤防の決壊は生じたが、ポンチャートレン湖やミシシッピ川に面した堤防に決壊は生じなかった。

メキシコ湾やボーン湖の高潮は、図-2.13 に示したように、セントバーナード郡やブラークマイズ郡の沿岸を浸水させるとともに、アラバマ州~ミシシッピ州の約

100 km に及ぶ沿岸を浸水させた。これら沿岸部の地形は平坦であり、高潮による浸水に重なって高波が来襲したため、平時の海岸線から 200m 程度のところまで家屋が土台だけを残して破壊された地区もある。

なお、カトリーナが去った後、アメリカ陸軍工兵隊によって決壊した堤防の応急処置がなされ、住宅地を覆っていた海水の吐き出しも開始された。しかしながら、カトリーナから約 1 ヶ月後にリタが接近し、応急処置された区間の一部が再び決壊した。

3. ニューオーリンズ市周辺の高潮・高波災害

本章では、第 2 次調査で訪れたニューオーリンズ市周辺の被害状況について、概ね北西から南東に向かって(ジェファーソン郡、ニューオーリンズ市、セントバーナード郡、プラークマインズ郡の順で)で記す。

3.1 ジェファーソン郡のポンプ場と運河

ジェファーソン郡は、ニューオーリンズ市の西側に隣接し、1960 年代から整備されてきた地域である。市街地を貫く運河は雨水など内水の排除に利用されている。ポンチャートレン湖岸には 5 台のポンプ場が設置されており、その一つを写真-3.1 に示す。これらのポンプ場では、主に運河の水をポンチャートレン湖へ排水することで、内水位の管理を行っているが、ポンチャートレン湖でカトリーナによって生じたような顕著な高潮を想定した構造にはなっていない。ポンチャートレン湖から運河へ逆流するのを抑止するための弁は、手動で開閉する仕組みになっている。

カトリーナの接近時には、一般市民だけでなくポンプ場のオペレーターも避難し、停電も発生したため、ポンチャートレン湖の湖水は運河へ逆流し、さらにそれが市街地に氾濫した。しかしながら、カトリーナの通過後の早い段階でポンプを稼働させることができたため、この地域では市街地の浸水が長期化せず、復興も早かった。

図-3.1 にポンプ場の断面の概略図を示す。図中の数値は現地調査時の湖面を基準にレーザー距離計で高さを測定した結果である。ポンチャートレン湖側の管路上には木切れなどの漂流物が堆積しており、カトリーナの来襲時に湖面はこれより高くなっていった可能性がある。

3.2 17th Street Canal の堤防の決壊と浸水

ニューオーリンズ郡の市街地には 17th Street Canal や後述する London Avenue Canal などの運河が張り巡らされている。写真-3.2 は、17th Street Canal の破堤箇所(図



写真-3.1 ポンプ場のポンチャートレン湖側の概観

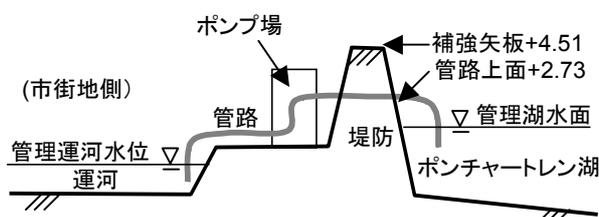


図-3.1 ポンプ場の断面の概略

-2.14 の地点①) の状況を示す。

写真-3.2(a)は破堤区間の様子であり、堤防の構造は、図-2.15 に示したように、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ある。コンクリート板の中にはゴム製の止水シートが入っている。ジェファーソン郡の運河にはポンチャートレン湖岸にポンプ場が設置されているのに対し、ニューオーリンズ市の運河はポンプ場を介さず直接ポンチャートレン湖とつながっている。運河の平常水位は盛土の天端よりも低い。被災から約 2 ヶ月を経た現地調査の際には、この写真にあるように盛土に補強してあったが、漏水が背後地に流れ込んでいた。また、堤防が決壊に至らなかった区間では、堤体の一部が傾斜していたものの、堤体の上を越流したことを裏付ける痕跡は見られなかった。運河の水位が堤体の天端に達する前に、基礎矢板の支持力不足により堤体が倒壊したものと思われる。

写真-3.2 (b)は破堤箇所から背後の住宅までの様子であり、破堤時の強い流れで堤防の盛土が流されていた。写真-3.2 (c)に示すように、家屋の壁や柱が流され、コンクリートの土台だけを残している家屋もあった。この家屋の一階に見える痕跡の高さは、図-3.2 に示すように、運河の平常時の水位に近い。したがって、この高さは破堤時の最高水位ではなく、浸水後しばらくしてポンプによる強制排水が開始されるまでの間についてのもと考え



(a) 破堤区間と堤防の断面

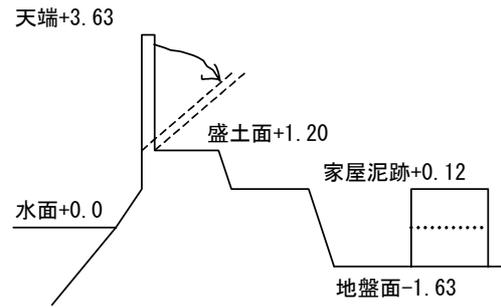


図-3.2 17th Street Canal の決壊地点の断面



(b) 氾濫による土砂の移動と家屋の破壊



(c) 破堤箇所の直背後にある住宅

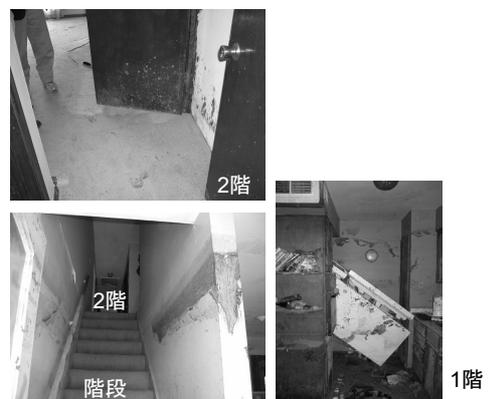


(a) 外観



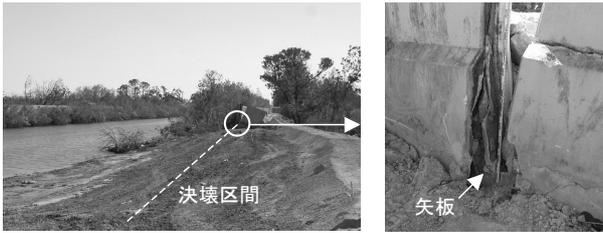
(d) 応急処置された堤防からの漏水

写真-3.2 17th Street Canal の破堤地点 (図-2.11 の地点①) の状況



(b) 屋内

写真-3.3 17th Street Canal の破堤地点から1.2km離れた住宅の状況



(a) 図-2.11 の地点②



(b) 図-2.11 の地点③

写真-3.4 London Avenue Canal の破堤地点の状況

られる。なお、破堤した堤防の盛土は復旧していたが、写真-3.2(d)に示すように漏水は続いており、漏水量を測るための堰が設けてあった。

写真-3.3は破堤箇所から約1.2km離れた同じ運河沿いの住宅である。この付近では、写真-3.2(c)で示したような激しい流れによる壁の破壊は見られないが、写真-3.3(b)に示すように2階の床上まで浸水した。階室内の水跡から判断した最高浸水高は、地表から+2.66mである。1階では浸水時に冷蔵庫が浮き、水が引く際に壁に傾いた状態で着地していた。

3.3 London Avenue Canal の堤防の決壊と浸水

London Av. Canal では2カ所(図-2.14の地点②③)で破堤した。写真-3.4は、それぞれの破堤箇所の状況を示したものであり、両地点とも、コンクリート壁はユニットの境目から割けて傾斜していた。堤防の背後では、木造平屋建ての家屋が浮いて流されたり、壁が破壊されているのが見られ、写真-3.4(b)の地点では漏水が生じていた。London Avenue Canal の両岸での決壊の状況は17th Street Canal とよく似ており、地盤の洗掘で支持力が弱くなった後に矢板式の堤防が倒壊したと考えられる。なお、現地調査時の運河の水位を基準として、堤防の天端高は+4.10m、応急復旧した盛土の天端は+2.17m、背後地の地盤は-1.00m、家屋の泥跡は+0.61mであった。



写真-3.5 ポンチャートレン湖の横断橋



写真-3.6 ポンチャートレン湖岸の堤防

3.4 ポンチャートレン湖の横断橋

ポンチャートレン湖には、ニューオーリンズ市からその対岸に向かって、写真-3.5に示す道路橋(Causeway Bridge)が架かっている。この橋は道路橋としては世界最長である。この道路橋には被害が無かった。桁下の高さは現地調査時の湖面から+4.28mであった。

3.5 マリーナの係留施設とボートの破壊

ポンチャートレン湖に面した West End の湖岸堤防には、写真-3.6に示すように、木片などが漂流していた。これらは、高潮時に高波によって打ち上げられたものと考えられる。堤防の天端上を越流した痕跡はなかった。現地調査時の湖面を基準として、この堤防の天端高は+5.00m、漂流物の痕跡高は+3.86~+4.21mであった。

ポンチャートレン湖岸のシティ・マリーナ(City Marina)では、係留されていたプレジャーボートが大破していた。ヨットハウスの室内には明瞭な浸水の跡が残っており、その高さは現地調査時の湖面を基準として+3.20m



写真-3.7 マリーナにおけるヨットの打ち上げ



写真-3.8 ニューオーリンズ市の東部にある湖岸堤防

であった。ヨットハウス周辺にはコンクリート壁があり、その高さはヨットハウス内の痕跡よりも 0.4m 低い+2.80 m であった。写真-3.7 に示すように、このコンクリート壁には目立った破損は見られず、ヨットがこの壁を乗り越えて打ち上げられていた。

写真-3.8 はニューオーリンズ市の東部にあるポンチャートレン湖岸の堤防であり、その湖側には鉄道線路も敷設されている。鉄道線路は復旧を終えてカトリーナ通過直後の面影を残していないが、堤防の天端上には木切れが散在して侵食されているところもあった。これらは越波によるものと思われる。現地調査時の湖面を基準として、堤防の小断にある鉄道線路は+2.50m、堤防の天端は+3.79m、後背地の地盤は湖面よりも低い-1.04 m であった。後背地は住宅地となっており、その1階部分は浸水により破壊されていた。

3.6 Inner Harbor Navigation Canal の堤防の越流・決壊と浸水

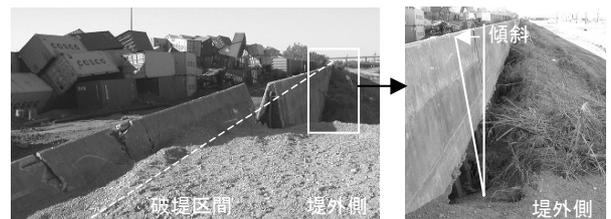
Inner Harbor Navigation Canal は、ニューオーリンズ市の東部からセントバーナード郡にかけて延びている。この運河は、船舶をメキシコ湾から、蛇行して流れの速い



(a) 図-2.14 の地点④



(b) 図-2.14 の地点⑤



(c) 図-2.14 の地点⑥

写真-3.9 Inner Harbor Navigation Canal の破堤地点の状況

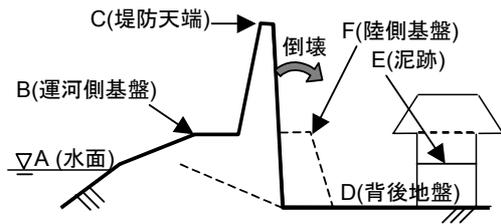


図-3.3 Inner Harbor Navigation Canal の堤防の断面

表-3.1 Inner Harbor Navigation Canal の堤防の諸元

| 地点 | ④ | ⑤ | ⑥ |
|-----|-------------|------------|------|
| A | 0 | 0 | 0 |
| B | 1.14 | — | — |
| C | 3.93 | 3.77 | 3.86 |
| D | -0.92~-1.28 | -1.8~-2.31 | 0.07 |
| E | × | 0.53 | × |
| F | 無し | 2.03 | 3.08 |
| 破堤長 | 247m | 65m | 50m |

ミシシッピ川を通らずに、ニューオーリンズ港へ入港させる目的で掘削されたものである。ミシシッピ川とは閘門を介してつながっており、ポンチャートレン湖とも幅は狭いながらつながっている。この運河に沿って港湾施設が配置され、その周りには工業地帯や住宅地が形成されている。

カトリーナの来襲時には、ポンチャートレン湖とボーン湖の両方で高潮が発生しているが、ボーン湖の高潮の方が早い発生時刻で大きかった。そのため、この運河の堤防の決壊はボーン湖の高潮の侵入によるものであり、17th Street Canal や London Avenue Canal とは被災原因が異なる。この運河は3箇所破堤した。写真-3.9は、それぞれの破堤箇所(図-2.14の地点④~⑥)の状況を示したものである。

まず、写真-3.9(a)では、矢板とコンクリート板からなる堤体が、堤内側に移動して倒れていた。堤体が地盤から抜けて流されたというよりは、盛土ごと動いたという印象を受けた。また、この破堤箇所の背後にある住宅地も浸水しており、その被害状況は破堤地点から近い順に、

- ① 土台だけが残っている。
- ② 壁や屋根が壊れて倒壊している。
- ③ 建物自体は壊れず軽い木造家屋は浮いて移動している。
- ④ 浸水しただけ。

という4段階に分かれていた。また、堤防のそばには大きなバージが漂着しており、これも高潮浸水時に家屋を



写真-3.10 Inner Harbor Navigation Canal の堤防 (図-2.14の地点⑦) に乗り上げたバージ

破壊する一因になったと考えられる。写真-3.9(b)は写真-3.9(a)から1kmほど離れた破堤地点である。その被災状況は写真-3.9(b)とよく似ている。ここでは、堤内地へ流された堤体の一区間はねじれて裏返しになっている。

写真-3.9(c)は、写真-3.9(a)と写真-3.9(b)のほぼ対岸に位置する破堤箇所である。この写真にある堤防は、運河の水面に接した堤防の背後に2線目として設置されているものである。破堤を免れた区間でも、堤体が堤内地側に傾斜し、それによって堤外側の地盤には隙間ができて、矢板の上部が露出した状態になっていた。堤外地には倉庫もあり、その壁の下半分が破れ、周りにはフェンスの上端にはビニル袋と思われるゴミが引っかかっていた。これらは、この周辺が高潮で浸水したことを示している。ところで、この堤防の破堤原因は、高潮で大きな水圧が作用したこともあるが、堤内側の地盤にも侵食が見られたため、高潮がこの堤防を越流して地盤を侵食し、堤体の支持力が低下したことも考えられる。この堤防の背後には、貨物の引き込み線やコンテナ置き場があり、そのコンテナは散乱していた。

これら3カ所の破堤地点における堤防の構造はよく似ており、それぞれの代表的な断面を図-3.3および表-3.1に示す。高さは現地調査時の運河水面を基準としたものである。

3.7 セントバーナード郡の浸水

ニューオーリンズの東側や南側には、図-2.13で示したように、ボーン湖やメキシコ湾がある。その高潮はセントバーナード郡やブラークマイズ郡でも海岸や運河の堤防を越流し、広範囲を浸水させた。

写真-3.10はInner Harbor Navigation Canalの堤防(図-2.14の地点⑦)に乗り上げたバージである。これほど大きなバージが堤防に大きな損傷を与えずに乗り上げるためには、水位が天端を大きく超えていなければならない

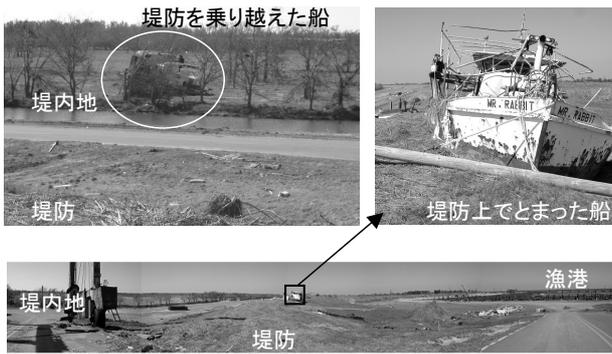


写真-3.11 プラークマイズ郡の漁港周辺の状況



(a) 堤内地



(b) ミシシッピ川の堤防

写真-3.12 ミシシッピ川の堤防とその周辺の状況

い。このことは、この周辺で高潮が顕著になった証拠の1つになる。また、この堤防の背後の樹木林には一様に流出した油の痕跡が見られた。

3.8 プラークマイズ郡の浸水

写真-3.11 は、プラークマイズ郡の漁港の一つである。漁港に係留されていたと思われる漁船が堤防に乗り上げ、あるいは堤防を越えて堤内地に横たわっていた。堤防上に残された漁船には、堤防の天端から1m以上の高さのあるところに草が引っかかっていた。したがって、高潮によってこの付近の水位が堤防を超えていたことが分かる。なお、この堤防の背後は、奥行約2kmにわたってミシシッピ川の堤防との堤内地（輪中のような構造）になっている。

この漁港の栈橋は木製であり、支柱に固定されたタイプである。普段から天文潮差が小さく、高波が襲うこともない場所であるゆえの構造であると思われる。ところが、この栈橋はほとんど被害を免れていた。したがって、浸水は比較的ゆっくりした流れで生じ、もし高波が生じたとしても、そのときにはその影響を受けないほど水位が高くなっていったと思われる。

写真-3.12 は、ミシシッピ川の堤防の状況である。堤内地にあった木造家屋は土台を残して破壊されたり、堤防に打ち上げられたりしていた。したがって、メキシコ湾で発生した高潮が、海岸の堤防を越流して陸地を浸水させ、さらにミシシッピ川の堤防を越えてミシシッピ川にまで流れ込む、という状況であったものと考えられる。メキシコ湾側の堤防の天端高は現地調査時の海面から約5.5mであり、これを1m程度越えるような高潮が生じていたものと考えられる。ミシシッピ川の堤防の高さは現地調査時の川面から最高で6.5mであり、局所的に草がはぎ取られた跡が残っており、わずかに越波した可能性がある。

なお、今回調査した範囲では、ミシシッピ川の堤防の天端が洗掘された箇所はあったものの、全面的に破堤に至った箇所は見あたらなかった。

図-3.4 は、本文中で記さなかった箇所も含めて、ニューオーリンズ市周辺の測量結果をまとめたものである。図中の地名の前に記してある時刻は、測量を行った2005年10月29日の現地時刻である。また、堤防の天端や痕跡の高さは、最寄りの運河やミシシッピ川などの水面を基準としたものである。

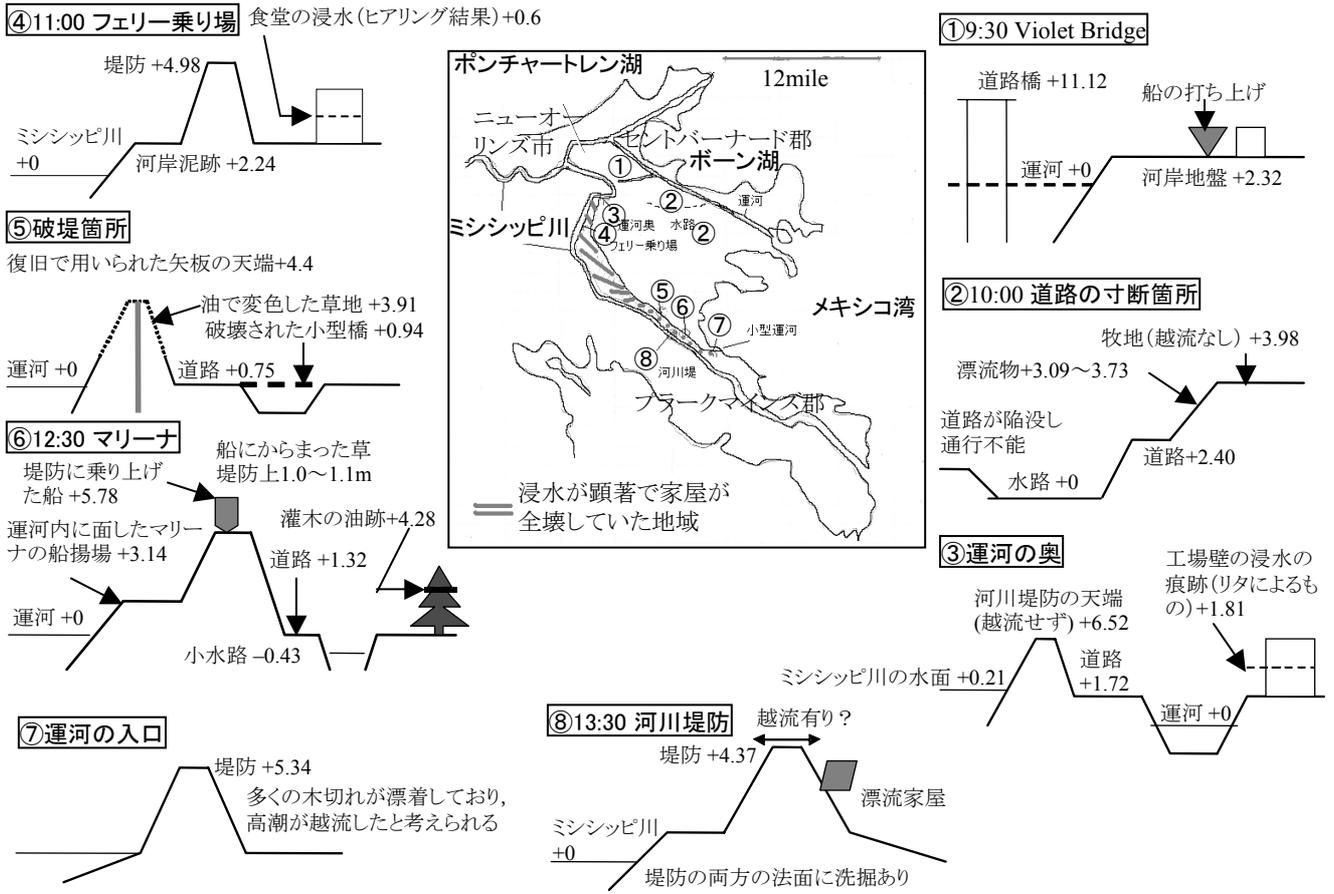


図-3.4 ニューオーリンズ市周辺の各地点における測量結果

4. ミシシッピ州からアラバマ州のメキシコ湾沿岸の高潮・高波災害

ミシシッピ州のロングビーチからアラバマ州のガルフショアに至る 100km 超の海岸では、3~7m と考えられる非常に大きな高潮偏差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。また、海岸付近の橋桁が落ち、海岸に係留されていたバージが陸に打ち上がって家屋を破壊する被害も発生した。本章では、概ね西の地点から東に向かって被災状況を記す。

4.1 ロングビーチ他における住宅地の浸水

ロングビーチでは、写真-4.1 に示すように、人工海浜が続き、その緩やかな砂浜の背後に道路がある。これを模式的に示したのが図-4.1 である。この付近の沿岸では「海岸に堤防はなく、陸上は概ね平坦で、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

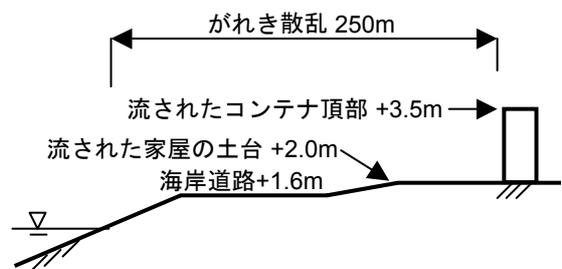


図-4.1 ロングビーチの痕跡高

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が典型的である。道路と砂浜の間にある護岸は、静穏時の浸食を防ぐ程度の高さしかなく、ハリケーン時の高潮による浸水を防ぐことは想定したものではない。この地域では、少なくともこの半世紀くらいの間に、カトリーナによるほどの浸水の被害に遭ったことがない。また、ハリケーンの強さ（カテゴリー）ごとに避難の対象区域が定められており、ハリケーンの接近時には避難するというのがこの地域におけるハリケ



(a) 海岸線と陸地の全景



(b) 家屋の被害



(c) コンテナの漂着

写真-4.1 ロングビーチの海岸と背後の家屋の被害 (2次調査)

ーン防災の基本になっている。

カトリーナの高潮・高波によって、海岸から1列目の家屋には、壁や屋根が流失して土台だけ残っているものも多かった。その背後の家屋も全壊は免れても窓が壊れて床が浸水した。その中には、ガルフポートから漂流し



写真-4.2 パスコゴウラの海岸の住宅の被害 (1次調査)



写真-4.3 鉄道の盛土 (1次調査)

てきたと思われるコンテナが衝突して破壊された家屋もある。このような被災状況は、インド洋大津波が襲ったタイやインドネシアの沿岸の被災状況ともよく似ている。

パスコゴウラでもロングビーチと同じように、海岸付近の家屋が破壊され、流される被害が生じた。その状況を写真-4.2に示す。

以上のように、メキシコ湾に面した海岸線の近くでは、高潮・高波による大きな被害が生じた。ただし、写真-4.3のように鉄道の盛土がある地区では、この盛土が堤防と同じような役目を果たし、家屋の浸水は免れなかったが高波による破壊は免れたところもある。

4.2 ビロキシにおけるバージの漂流

ロングビーチの東側に位置するビロキシは、アメリカでもラスベガスに次いで、カジノで有名な街である。その海岸には、緩やかな勾配の砂浜の背後にホテルなどの



(a) 道路上に打ち上げられた例 (1次調査)



(b) 建物に衝突した例 (2次調査)

写真-4.4 ビロキシのカジノ・バージの打ち上げと建物への衝突

建物が立ち並んでいる。ただし、州の法律によってカジノ施設を陸上に造ることができないため、海岸に係留したバージの上に設置している。

ところが、カトリーナの高潮と高波によって、写真-4.4に示すように、このバージが岸に打ち上げられ、陸上にある建物に衝突した。このバージの係留方法については分からないが、少なくともこの海岸の沖に防波堤など高波を遮るものはなかった。また、陸側にも護岸や堤防など高波の遡上を防ぐものもなかった。

4.3 ビロキシ他における道路橋の崩壊

写真-4.5は、ビロキシからオーシャンスプリングスを結ぶ、メキシコ湾の海岸に沿った鉄筋コンクリート製の橋梁である。その橋桁が陸側にずれて、各橋桁のビロキシ側の端が落ちていた。今回の現地調査の時に海面から橋桁の底面までの高さは約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。この橋梁の取り付け部の道路は、コンクリー



(a) 橋桁の状況



(b) 取り付け部の地盤の洗掘

写真-4.5 ビロキシと対岸を結ぶ橋桁の落下 (2次調査)

ト床板、アスファルト層、地盤という構造になっており、地盤が洗掘されていた。

写真-4.6は、このビロキシ周辺の状況を示したものである。マリーナに面した建物では1階の壁が完全に破れており、少なくともこれに近い高さまでは潮位が達していたものと考えられる。また、陸側では樹木の先にゴミがひっかかっており、その中には地盤から4m以上の高さのものもあった。さらに、海岸沿いの立体駐車場でも、2階の床が落下しており、高潮による潮位の上昇に高波による大きな揚圧力が作用したものと考えられる。

なお、ビロキシとオーシャンスプリングスを結ぶ橋梁以外にも、海岸近くにはこれと似た構造の橋梁がいくつもあり、同じような被害が生じていた。



(a) マリーナに面した建物 (2次調査)



写真-4.7 マリーナの船の打ち上げ (1次調査)



(b) 樹木の枝についたゴミ (2次調査)



写真-4.8 ダルフィン島の家屋の被害 (1次調査)



(c) 駐車場の被害 (1次調査)

写真-4.6 ビロキシ周辺の建物の被害と漂着物

4.4 バユーラベトレーのマリーナの被害

メキシコ湾岸はマリンスポーツや漁業の盛んであり、各地にプレジャーボートのマリーナや小さな漁港がある。写真-4.7 はバユーラベトレー(Bayou La Botre)という入江にあるマリーナであり、ボートが打ち上げられている。

4.5 ダルフィン島とガルフショアにおける漂砂

写真-4.8～4.9 は、メキシコ湾に直接面したダルフィン島とガルフショアの海岸であり、勾配の緩やかな砂浜の後方に高床式の家屋が列をなして並んでいる。その家屋の中には、カトリーナの高潮・高波で破壊されたままのものもあり、既に修理が行われているものもあった。カトリーナの高潮・高波で大量の砂が陸に運ばれたため、その砂を海へ戻す工事もなされていたが、その一部はまだ残っていた。なお、この砂は真っ白で粒子は細かく、



(a) 家屋の被害



(b) 砂の除去作業

写真-4.9 ガルフショアの海岸の状況 (1次調査)

いわゆる「鳴き砂」であった。

ガルフショアの沖合では、写真-4.10 に示すように、高波あるいは暴風によって損傷したと考えられる石油掘削作業船が漂着していた。

5. ハリケーン・カトリーナの教訓

ハリケーン・カトリーナによる高潮・高波によって、ニューオーリンズ市だけでも陸域の80%に相当する370 km²が浸水し、ミシシッピ州からアラバマ州の沿岸でも家屋や橋梁が破壊され、全米での被害総額は1,000億ドルを超えたという報道もなされている。これらの被災状況から、堤防など防御施設、橋梁など生活に密着した施設、家屋の破壊メカニズムを学ぶことができる。しかしながら、それ以外にもこの災害から様々なことを教訓として学ぶことができる。そもそも、これだけ広範囲が浸



写真-4.10 石油掘削作業船の漂着 (1次調査)

水して多くの家屋が破壊されたのにもかかわらず、死者が1,300人ほどですんだのは何故か、という疑問がある。

そこで、カトリーナによる災害をその発生前から復旧・復興まで振り返りながら、日本の高潮防災の課題と必要な技術開発について記したい。

5.1 日本の高潮防災の課題

(1) 災害の発生前

日本の沿岸には、台風による高潮・高波に備えて堤防や護岸などの高潮対策施設が設置されているのに対し、アメリカではハリケーンの高潮・高波に備えた施設はほとんどない。ただし、海岸侵食を防ぐための養浜や土留め程度の堤防は設置されている。また、広いゼロメートル地帯を有するニューオーリンズの市街地には堤防が築かれているが、運河の堤防はカテゴリ3のハリケーンまでに対応できるものであった。つまり、カテゴリ4で上陸したカトリーナは、運河の堤防にとって超過外力であり、ミシシッピ州やアラバマ州のメキシコ湾沿岸でも浸水を免れない外力であった。

アメリカではその代わり、ハリケーンの強さを5段階のカテゴリに分け、それぞれに対して避難勧告を発令する地域を定めている。そして、ハリケーンの被害が予想される場合には、その2~3日前から避難に必要な情報が発表され、市民は避難を開始する。また、ハリケーンで失われる財産は、普段から掛けている洪水保険によってある程度は補償されることになっている。

カトリーナの災害には、例えば以下のような要因も重なっている。

- ① カトリーナの接近時には、避難に用いるバスはあってもドライバーの手配に手間取った。

- ② クルマを所有していないあるいは運転のできない貧困層や高齢者など弱者の避難が十分にできなかった。
- ③ 避難後の盗難を心配して自ら避難を拒否する人も少なくなかった。
- ④ 洪水保険で想定していなかった運河の堤防の決壊が起きた。

このような反省点が色々あるのは確かであるが、避難というソフトの防災が人的な減災に大きく役立ったことに疑う余地はない。

一方、日本の高潮対策施設は、伊勢湾台風級の台風による波浪と潮位という一つのシナリオに対して安全であるように設計されている。この防御レベルはアメリカよりも高い。しかしながら、伊勢湾台風級以下の台風であれば安全であると信じ、伊勢湾台風級以上の台風が来襲したときにどんな破壊が起こるのかについての検討は立ち遅れている。高潮による浸水のハザードマップも、伊勢湾台風級の台風という一つのシナリオでようやく作られようとしているに過ぎない。

(2) 災害の発生直後

ニューオーリンズ市の周辺では、高潮による運河の堤防の越流・決壊によって、非常に広範囲が浸水した。ニューオーリンズの市街地の多くは、スूप皿とたとえられるゼロメートル地帯であった。

ところが、日本でも三大湾の沿岸には、ニューオーリンズ市を上回る規模のゼロメートル地帯があり、そこには400万人の人が生活している。万が一、これら内湾の堤防や護岸の弱いところが一カ所でも決壊したら、それがもとで浸水が非常に広範囲が及ぶ可能性も否定できない。また、三大湾の沿岸ほどの規模ではないにしても、他の内湾の沿岸にもゼロメートル地帯が多く存在している。例えば、1999年の台風18号による高潮で八代海沿岸の住宅地が浸水し、11名が亡くなるという被害はまだ記憶に新しい（河合ら、2000）。

新聞等のマスコミ報道や現地の方からのヒアリングによると、カトリーナの接近時にニューオーリンズの市民の中には、ルイジアナスーパードームに避難した人も多く、その人数は1~2万人に達した。しかし、食糧がすぐに底をつき、避難するためのバスはあってもドライバーの手配に手間取った。カトリーナ来襲の2日後の8月31日になってようやく700台のバスを用いて市外へ輸送できたと言われている。電話など通信手段も寸断したため、市民がお互いに安否を確認できず、政府機関ですら救援にあたるべき人との連絡が難しい状況に陥ったそうであ



(a) 浸水家屋から出た廃棄物



(b) 廃棄物の山

写真-5.1 浸水家屋からの廃棄物とその収集の状況（2次調査）

る。

(3) 災害からの復旧・復興

2次調査は、カトリーナの災害から約2ヶ月後に実施したものである。このとき既に、市街地の排水は完了しており、一部の地区では人々が戻りつつある状況にあった。写真-5.1は、浸水した建物から色々な廃棄物が出され、それらや壊れた建物を収集しているところである。水道や電気の復旧作業も行われていた。ただし、治安維持のために各所に軍隊や警官も配置されており、我々も何度か検問や職務質問を受けた。夜間に立入規制の引かれている地区も残っていた。

ところがその一方で、未だに帰宅のめどがつかず、親類や知人の家に身を寄せ、あるいは被災者に開方されたホテルやトレーラーハウスで生活している人も多かった。

救援担当者の宿泊基地も不足していた。災害の防止だけでなく、災害が発生してしまった場合にどう立ち直るのかということも非常に重要である。

なお、復旧を担当するアメリカ陸軍工兵隊担当者によると、復旧は、①準備、②被災後の状況調査、③援助物資の輸送・分配、④がれき(Debris)の撤去、⑤航路浚渫、の5段階で行われるとのことであった。航路はハリケーンの直後に閉鎖され、水深を探索して安全を確認できた後に開放し、必要があればポンプ浚渫をしている。

日本では、1959年の伊勢湾台風による高潮災害以来、それと同程度の高潮災害を経験していない。今回のカトリーナの高潮災害は、今後の日本の高潮防災の参考になると考えられる。

5.2 今後の高潮防災に必要な技術開発

日本の高潮防災技術を高めるためには、様々な課題が残されている。例えば、カトリーナによる高潮災害を契機に国土交通省が設置したゼロメートル地帯の高潮対策検討会(2006)の提言でも、今後必要な検討課題の一つとして「設計外力としての高潮の発生確率評価に関する調査研究」をあげている。そこで本節では、「設計潮位・波浪の確率評価」など、高潮対策施設の性能照査という観点からいくつかの課題について記してみたい。

(1) 設計潮位・波浪の確率評価

日本の高潮対策施設は伊勢湾台風級の台風による波浪や潮位に対して設計している。図-5.1は日本の代表的な台風のコースや上陸時の中心気圧をカトリーナやリタと比較したものである。伊勢湾台風の上陸時の中心気圧はカトリーナよりもやや高いが、これはニューオーリンズが鹿児島県の種子島くらいの緯度に位置し、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からであり、最盛期の中心気圧では伊

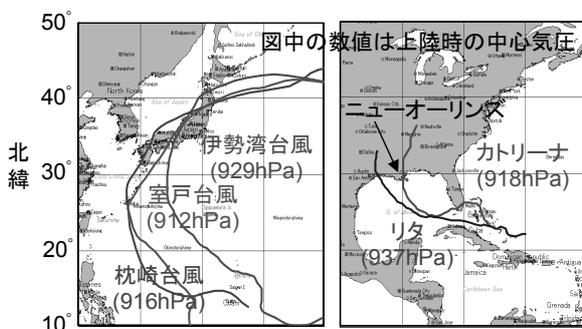


図-5.1 日本の代表的な台風とカトリーナ

勢湾台風の方が低い。したがって、伊勢湾台風がカトリーナに劣る台風とは言えない。

しかしながら、伊勢湾台風級の台風によって定められた設計潮位や設計波浪は「既往最大級」ではあるものの、その再現年数は明らかにされていない。内湾には多くの検潮所が設置されているが、極値統計解析によって設計潮位の再現年数を推定するのに十分なほど長期間の検潮記録が蓄積された地点は限られており、また高潮は地点によって大きく異なる。内湾での波浪観測点は非常に限られ、観測期間も短い。

したがって、少なくとも過去半世紀間の台風に対して高潮や波浪を高精度に推算し、設計潮位・波浪の再現年数を明らかにする必要がある。ただし、過去半世紀間の台風だけでは、数百年あるいは数千年のオーダーと考えられる設計潮位の再現年数を正確に評価することは困難である。

これを解決する一つの方法として、確率台風モデルによって数百年ないし数千年間の台風の諸元を与え、それぞれの台風に対する高潮や波浪を推算して、その極値統計解析を行う方法がある。このような設計外力の確率評価をする基本的な技術は、例えば、確率台風モデルの構築についても既にできているが(橋本ら, 2003, 2005), これを実用化するための努力が必要である。

さらに、こうして求めた波浪や潮位の極値分布に基づいて、現行の設計波浪・潮位を含む3段階程度の外力を設定し、それぞれのレベルの外力に対して高潮対策施設の防御性能を照査する必要がある(高橋ら, 2000)。

(2) 地球温暖化の影響の事前評価

気候変動に関する政府間パネル IPCC の第三次報告書(2001)では地球温暖化による平均海面の上昇や台風の強大化の可能性が指摘されており、最近の研究では台風の総数は減少するものの勢力の強い台風はむしろ増加するという結果も得られている(例えば, Yoshimura, 2006)。現状でも伊勢湾台風を超える勢力の台風は発生し得ると考えられるが、もし地球温暖化によって台風が強大化すると、伊勢湾台風級あるいはそれ以上の台風はさらに発生しやすくなるものと思われる。

したがって、過去の潮位や波浪の出現特性の長期トレンドを解析することは非常に重要である。またその一方で、現在考えられる地球温暖化のシナリオに基づいて、高潮や波浪の出現特性を評価し、海域や海域内の地点によってどのくらい高潮や波浪の特性が変化する可能性があるのかを把握しておく必要もある。

(3) リアルタイムな高潮災害の予測

これから発生する全ての高潮・高波に対して、高潮対策施設だけで防御することは不可能であり、避難などソフトの防災も組み合わせた対策をとる必要がある。そのためには、台風の接近時に単に高潮や波浪を予測するだけでなく、事前に護岸や堤防の越流量や変形量、背後地の浸水時刻や浸水高まで予測しておく必要がある。気象、高潮、波浪、越流量、浸水の計算という個々の要素技術はかなり確立されており、それを効率的につなぐ技術が必要である（高橋ら，2005）。

6. 結論

ハリケーン・カトリーナによる高潮・高波災害の現地調査や資料収集を通じて、以下のことが明らかになった。

- ① この災害をもたらした外力には、メキシコ湾の高潮・高波とポンチャートレン湖の高潮とがある。メキシコ湾やポンチャートレン湖は、水深が非常に浅く、もともと高潮が発生しやすい顕著な地形をなしている。
- ② ニューオーリンズの市街地の浸水は、ボーン湖の高潮が Inner Harbor Navigation Canal を逆流して堤防を越流・決壊し、さらにポンチャートレン湖の高潮が 17th Street Canal や London Avenue Canal に流入して堤防が決壊することによって生じたものである。堤防が決壊した区間はわずかであるが、ニューオーリンズの市街地の多くがゼロメートル地帯であるために、非常に広範囲が長期間に渡って浸水し、災害の規模を大きくするとともに復旧を遅らせた。
- ③ ニューオーリンズ市の郊外に位置するセントバ



写真-7.1 浸水地区のクルマへの落書き

ーナード郡やブラクマイズ郡の沿岸では、ボーン湖やメキシコ湾の高潮が堤防を越流して浸水した。

- ④ メキシコ湾に直接面した、ミシシッピ州やアラバマ州の海岸では、メキシコ湾の高潮・高波によって建物が破壊され、バージやボート、コンテナが漂流した。

また、このようなカトリーナによる広大なゼロメートル地帯での被害は、日本の今後の高潮防災にとって重要な教訓である。想定を上回る高潮による災害の状況を考えることで、防災施設の破壊とそれに伴う災害の拡大を考慮しておくこと、災害時や災害後の防災担当者の行動がそうした災害の状況に十分対応したものになっていることは重要である。

7. あとがき

本報告は現地調査結果の概要を速報としてとりまとめたものである。今後はさらに詳細なデータの整理・解析を行うとともに、カトリーナの災害の教訓を踏まえて、日本の沿岸防災に資するための研究をさらに推進していきたいと考えている。

写真-7.1 は破堤地点のそばにあったクルマの一つである。誰がいつ何の目的で落書きしたのか定かではないが、「生きているということは、いいことだ。神様ありがとう。」とガラスに落書きされている。被災地の早期の復興も祈るところである。

(2006年2月10日受付)

謝辞

本論文には、当研究所の高橋重雄研究主監が第一次の現地調査で撮影した写真も掲載している。また、第二次の現地調査は、高橋重雄研究主監の提案のもと、京都大学防災研究所の高山知司教授を団長とし、国土技術政策総合研究所の小田勝也沿岸防災研究室長、財団法人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第一研究部長とともに実施したものである。これらの現地調査の実施にあたっては、所内の関係各位はもとより、米国陸軍工兵隊、米国土木学会海岸・海洋・港湾・河川委員会、国土交通省港湾局のご支援をいただいた。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

また、被災地の早期の復興をお祈りします。

参考文献

- 河合弘泰・平石哲也・丸山晴広・田中良男(2000): 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, 43p.
- 河合弘泰・本多和彦・富田孝史・柿沼太郎(2005): 2004年に発生した台風の特徴と高潮の予測・再現計算, 港湾空港技術研究所資料, No.1103, 34p.
- 港湾局海岸・防災課・港湾空港技術研究所報道発表資料(2005): 米国ハリケーン・カトリーナ被害に関する現地調査の結果について(速報).
- ゼロメートル地帯の高潮対策検討会(2006): ゼロメートル地帯の今後の高潮対策のあり方について, 26p.
- 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.
- 高橋重雄・富田孝史・河合弘泰(2003): 性能設計の高潮対策施設への適用に関する基本的な考え方, 港湾空港技術研究所資料, No.1042, 27p.
- 高橋重雄(2005): ハリケーンカトリー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・富田孝史・高山知司(2005): シナリオに基づくリアルタイム高潮災害予測の枠組み, 海洋開発論文集, Vol.21, pp.827-832.
- 橋本典明・川口浩二・河合弘泰・松浦邦明・市川雅史(2003): 港湾・海岸構造物の合理的設計を目的とした確率台風モデルの構築と精度の検討, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.176-180.
- 橋本典明・河合弘泰・松浦邦明(2005): 地球温暖化を考慮した将来の台風特性の解析と確率台風モデルへの導入, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1221-1225.
- 本多忠夫・光易 恒(1980): 水面に及ぼす風の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.
- IPCC (2001): Climate Change 2001, Third Assessment Report.
- 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.
- Yoshimura, J. (2006): Tropical Cyclone Climatology in Greenhouse Climate – Simulation with a Super-high-resolution Global Atmospheric Model –, Proceeding of

Abstract, The 2nd International Workshop on Coastal Disaster Prevention – Tsunami and Storm Surge Disaster Mitigation.

付録-A 現地調査の参加者と行程

岸課長)

A.1 第一次調査

(1) 調査員

| | |
|-------------------|----------------------|
| Scott Douglass | 南アラバマ大学土木工学科教授 (団長) |
| Robert Dean | フロリダ大学名誉教授 |
| David N. Luckie | 米国陸軍工兵隊モービル地区経済解析チーム |
| Spencer M. Rogers | 北カロライナ大学土木工学科災害解析チーム |
| Patrick J. Lynett | テキサス A&M 大学土木工学科助教授 |
| 高橋重雄 | 独立行政法人港湾空港技術研究所研究主監 |

(2) 行程

2005年9月21日：移動 (東京→モービル).
2005年9月22日：現地調査
2005年9月23日：現地調査
2005年9月24日：移動 (モービル→ニューヨーク)
2005年9月25日：移動 (機中泊)
2005年9月26日：移動 (東京着)

A.2 第二次調査

(1) 調査員

| | |
|---|----------------------------------|
| 高山 知司 | 京都大学防災研究所教授 (団長) |
| 高橋 重雄 | 独立行政法人港湾空港技術研究所研究主監 |
| 平石 哲也 | 独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部波浪研究室長 |
| 河合 弘泰 | 独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部海洋水理・高潮研究室長 |
| 小田 勝也 | 国土政策総合研究所沿岸海洋研究部沿岸防災研究室長 |
| 村田 進 | 財団法人沿岸技術研究センター理事長 |
| 小谷野喜二 | 財団法人沿岸技術研究センター第一研究部長 |
| Douglas C. Otto, Mobile District, US Army Corps of Engineers | (工兵隊モービル事務所工務部水理課長) |
| Jeffrey A. Melby, Coastal and Hydraulics Laboratory, US Army Corps of Engineers | (工兵隊水理研究所) |
| Harley S. Winer, New Orleans District, US Army Corps of Engineer | (工兵隊ニューオーリンズ事務所海 |

(2) 行程

2005年10月25日：移動 (東京→モービル→ガルフショア).
2005年10月26日：ガルフショア～ロングビーチの調査, 移動 (ニューオーリンズへ).
2005年10月27日：ニューオーリンズ市街地の調査.
2005年10月28日：ニューオーリンズ港, Inner Harbor Navigation Canal 他の調査.
2005年10月29日：ニューオーリンズの南東部 (セントバーナード郡, プラークマインズ郡) の調査, 移動 (ダラスへ)
2005年10月30日：移動 (機中泊).
2005年10月31日：移動 (東京着).

港湾空港技術研究所資料 No.1121

2006.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(84)5040 URL.http: www.pari.go.jp

印刷所 ニッセイエプロ株式会社

Copyright© (2006) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。