

ハリケーン・カトリーナ災害の特徴と課題

Damages and Lessons That Hurricane Katrina Left

河 原 能 久

Yoshihisa KAWAHARA

1. はじめに

2005年8月29日にルイジアナ州に上陸したハリケーン・カトリーナは米国史上最悪の巨大な高潮災害を引き起こした。連邦災害地域に指定された面積は23.3万 km^2 に及んだ。ルイジアナ州、ミシシッピ州、アラバマ州のメキシコ湾岸沿いに、膨大な数の家屋の損壊、道路の破損、落橋、樹木の転倒、石油関連施設の破壊等が発生した。また、ニューオリンズ市では、越流や破堤による氾濫が発生し、市域の約8割が水没するという壊滅的な事態が生じた(図-1)。これまでに確認された死者数は1,600名を越え、甚大な被災地での行方不明者数は1,000人を超えている。特に、市内の低地では、水没期間が約1ヶ月に及んだこと、電気、上下水道、ガスなどのライフラインが未だ復旧していない地区が広範囲に広がっていること、住民の4割強程度しか市に戻ってきていないことなど、巨大災害からの復興への道のりはまだまだ長い。

ニューオリンズ市は、その約7割が海拔ゼロメートル以下の低平地であり、連続した堤防で守られた都市である。この特徴は、広いゼロメートル地帯を有する我が国の東京、名古屋、大阪等の大都市と共通しており、計画外力を超えるような状況が発生した時にどのようなことが発生しうるのか、被害を最小限に抑えるためには何が必要であるのかを考えさせるなど、我が国の治水対策の再点検と今後の方向性の検討に大きな影響を与えている。災害軽減の第一歩は災害のイメージを思い描くことにあると考えられるが、そのためには具体例をよく知ることが極めて重要である。特に、災害軽減の担当者は、広範囲で発生する被害の量と質に思いをいたす能力をもつことが不可欠であり、先手を打つための情報収集・発信能力と勇気ある判断力が問われることとなる。

我が国から多くの災害調査団が派遣され情報収集を行った。本報告は、土木学会水工学委員会からの調査団として調査、収集した情報にその後入手した情報を追加して、被害の実態を説明するとともに、今後の我が国での治水対策に資する知見を整理するものである。具体的には、まず基礎的な情報として、米国での治水に関する組織とその役割(2章)、ニューオリンズの抱える地理的、社会的な問題(3章)を紹介する。その後、ハリケーン・カトリーナの特徴と高潮の発生について説明する(4章)。そして、ニューオリンズ市とその周辺地域における被害(5章)とメキシコ湾岸地域での被害(6章)の概要を説明し、最後に、今後の治水対策を考える上での課題を整理する(7章)。



図-1 水没するニューオリンズ市

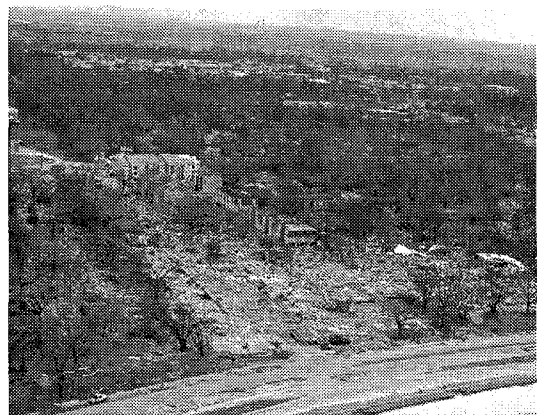


図-2 メキシコ湾岸沿いの壊滅的な被災

2. アメリカの治水に関する組織とその役割

アメリカにおける治水事業の特徴として、治水の第一義的責任が市町村にあること、治水事業が市町村の要望により始まること、洪水保険制度が存在すること、連邦政府、州政府、郡（County, Parish（レイジアナ州での呼び方））と地方自治体（市町村）の役割が明確であること等が挙げられる。

図-3 は、連邦政府、州政府、郡・地方自治体レベルでの治水事業に関連する組織の役割を整理したものである²⁾。陸軍工兵隊(USACE)は治水施設の建設を担当するが、施設の維持・管理は堤防組合が責任を持つ。陸軍工兵隊は、災害時には連邦法（PL84-99）の下で連邦危機管理局（FEMA）等の他機関を援助しつつ、州・地方自治体を支援する。カトリナ災害時には、氷の提供（冷蔵庫中の食物の腐敗防止）、清浄な水の供給、発電、瓦礫の処理、屋根の応急措置（ブルーシートの配布）、氾濫水の排水活動などを多数の兵士を動員して行った。これらの活動は名称の付けられたタスクフォースを組織して行われた。例えば、タスクフォース“Hope”（災害対応）、タスクフォース“Guardian”（災害復興）、タスクフォース“Unwater”（排水）、タスクフォース“X”（認可された堤防の建設と将来計画の立案）、タスクフォース“IPET”（Interagency Performance Evaluation Task Force）（堤防システムの安全性評価）が挙げられる。

図-3 中の FEMA は、国土安全保障省（Department of Homeland Security）内の部局であり、ワシントン DC の本部と 10 の地域事務所（Regional Office）で全米をカバーしている。長官の下に災害軽減部、準備・訓練・演習部、応急対応・復旧部、連邦保険部、米国消防部等があり、国家対応計画（National Response Plan）に沿って対応する。FEMA とその地域現地事務所（Area Field Office）の災害時の役割は、連邦政府の多数の災害関連機関が円滑に活動できるように主導的に調整を行うことであり、地区の復旧状態や要請を把握し、緊急支援（交通、通信、公共事業及び工事、消防、情報及び計画、大規模避難民支援、物資支援、保健・医療、捜索・救援、危険物質、食料、エネルギー、治安維持、長期コミュニティ復興、外部情報伝達）を行うことである。これまで多くの大規模災害における実績を有する FEMA ではあるが、今回のカトリナへの対応について、とりわけ初動時に、重大な問題を発生させた。例えば、カトリナの上陸予定地域にはごく少数の FEMA 関係者しか配置されておらず、また代替の通信手段（衛星電話等）を準備していなかったため、通信手段が寸断され、被災状況が的確に把握できなかった。大型船舶で運んだ国内外からの救援物資の荷揚げを

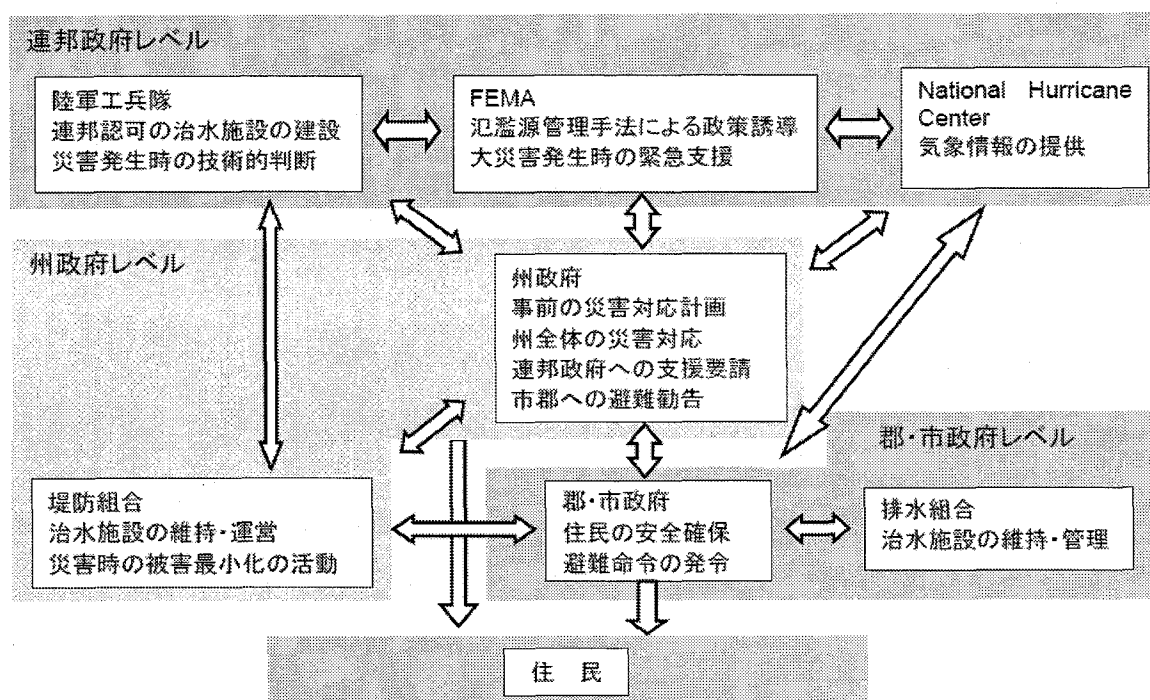


図-3 治水事業に関連する組織とそれらの役割

認めないなど、ニューオリンズへの救援物資の供給が大幅に遅れた。また、ニューオリンズ市の避難場所となったスーパードームやコンベンション・センターの惨状を遅くまで把握できていなかった。さらに、避難生活用のトレーラーハウスの借用手続きが容易でない一方で、多数のトレーラーハウスが使用されず駐車されたままの事態が発生するなど、市民感情を逆撫でにした。これに対して、国土安全保障省に統合された沿岸警備隊は、沿岸の流出したオイル対策の他に、いち早く災害現場に赴き、独自の救助活動を展開して1万を超える人を救助するなど傑出した活躍を行った。

米国ハリケーンセンター（National Hurricane Center）は、気象情報を連邦政府、州政府、郡・地方自治体へ提供する。カトリーナの来襲時にも的確な予警報を発信し続けた。センター長はルイジアナ州への上陸の1日半前にルイジアナ州知事、ミシシッピ州知事、ニューオリンズ市長に直接電話し、カトリーナ災害について説明している。

州政府は、郡や地方自治体を越えた災害に対して、州全体の災害対応計画の策定や避難勧告を行う。また、連邦政府に支援を要請する。ルイジアナ州政府は事前に州としての災害対応避難計画のパンフレット（Louisiana Citizens Awareness & Evacuation Guide）を配布している。その中には、ハリケーンの説明、非常ラジオ放送、公共避難場所、関係機関の連絡先、ハリケーンの規模と来襲時間別の避難経路（一方通行制限（contra flow）の適用など）、家庭用の非常キット、家族とのコミュニケーションの取り方、ペットへの準備などが説明されている。

ルイジアナ州には多くの堤防組合（Levee Board）があるが、排水路の維持管理が主体の組合とミシシッピ川の堤防の維持管理が主体の組合の2種類に分類される。堤防組合は管理、堤防警察、維持管理の3部署から構成されており、エンジニアはおらず必要な時に雇用する。平常時の主な業務は、堤防の除草、船着き場の維持管理、排水機場や水門の維持管理、堤防の小規模な補修などである。一方、高潮・洪水時には、堤防の見回り、水門の閉鎖、土嚢の設置などの水防活動や危機対応を行う。なお、堤防組合は堤防の建設・維持・管理のための税を設定や警察権力を有している。カトリーナ災害後、州議会で堤防の統合管理に向けて既存の多くの堤防組合が2つに統廃合することを決定した。

郡や市にも国土安全保障局が設置されており、米国ハリケーンセンターからの情報や州からの避難勧告を参考にして首長が避難命令の発動を決定する。

3. ニューオリンズ市の特徴

ニューオリンズ市は、図4に示すように、ルイジアナ州南西部、ミシシッピ川の下流部に位置し、北はボンチャートレイン湖、南はミシシッピ川、東はボーン湖に面している。ニューオリンズ市は元来ミシシッピ川沿いの自然堤防上や周辺の微高地に築かれたが、町の発展に伴って市街地は主に北側の湿地帯に広がっていった。治水の対象は20世紀中頃まではミシシッピ川の洪水であったが、1965年のハリケーン・ベティによる大災害を経験してハリケーン対策が本格的に検討されるようになった。現在、旧市街地からボンチャートレイン湖までの湿地帯の全てと東の湿地帯の一部が市街化されている。

ニューオリンズ市はミシシッピ川の運んできた土砂と有機物層の上に立地しており、ミシシッピ川沿いの自然堤防とボンチャートレイン湖岸の砂丘を除き、市域の70%の地盤高



図4 ニューオリンズ市とその周辺の地形

安全性に対する不安は地元の新聞でも以前から指摘されており、ルイジアナ州立大学ハリケーンセンター (LSUHC) の研究者もハリケーン時期の前には現在の高さの堤防システムが大型のハリケーンに対して氾濫を起こしかねないことを市民に説明していた。また、陸軍工兵隊や FEMA の内部でも現在の堤防システムがカトリーナに対して不十分であることは認識されていた。

表-1 にニューオリンズ市や周辺地域の治水計画が対象としているハリケーン（Standard Project Hurricane）の特性を示す。この表より、ポンチャートレイン湖の周辺に属するニューオリンズ市ではカトリーナよりも規模の小さいハリケーンに対して治水計画が立てられていることが確認できる。また、ニューオリンズ周辺の地域での治水計画は異なる時期に立てられており、対象とするハリケーンの特性が地域ごとに異なっている。

ニューオリンズ周辺の沿岸には湿地帯が広がっており、生態系の保全とともに高潮や高波に対して緩衝効果を発揮している。しかし、堤防システムや舟運用の水路等の建設により、淡水や土砂、栄養塩の供給が減少するにつれて海水の侵入が助長され、近年、湿地帯が急速に失われつつある。陸軍工兵隊によれば、漁業や野生動物保護とハリケーン対策のため、海岸に土砂を入れて湿地帯を再生する事業や塩害を防ぐために湿地帯へ淡水を流す事業を実施しているとのことであった。今後とも湿地帯の保全と堤防システムによる治水安全度の向上を両立させることが大きな課題となっている。

ニューオリンズ市の社会的な特徴もカトリーナ被害を考える上で重要である。2000 年現在の国勢調査によれば、ニューオリンズ市の人口は 48 万 5 千人、世帯数 18 万 8 千であった。人口構成からみると、白人 28.1%、アフリカン・アメリカン 67.3%であり、黒人中心の市であった。また、人口の 28%程度が貧困層であった。現在、カトリーナによる被災地に住んでいた黒人が戻っていないため、人口構成が大き

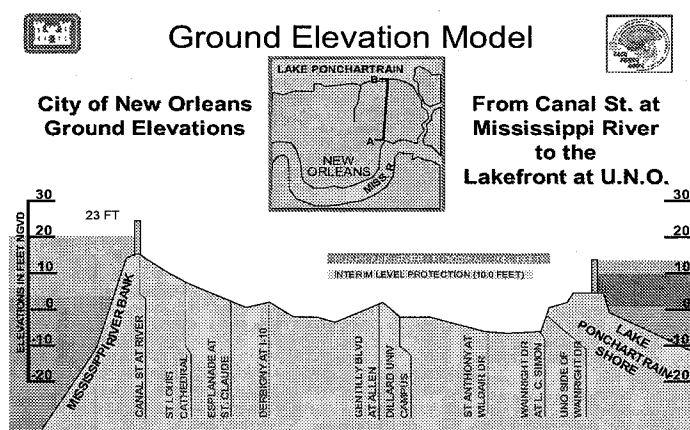


図-5 ニューオリンズ市のスープ皿状の地形



図-6 ニューオリンズ市及びその周辺の堤防システム

表-1 計画の対象となっているハリケーンとカトリナの特徴

計画対象地域	認可時期	中心気圧 (mmHg)	風		前進速度
			平均風速	評価半径	
Pontchartrain 湖とその周辺	Oct-1965	701 mm	161 km/h	48 km	9.3 – 20.4 km/hr
Grand Isle とその周辺	1965 – 1976	715 mm	140 km/h	56 km	21 km/hr
New Orleans から Venice	Oct-1962	714 mm	145 km/h	55 km	17.7 km/hr
West Bank とその周辺	1986	696 mm	185 km/h	55 km	20.3 km/hr
カトリナ (ルイジアナ州上陸時)	Aug-2005	701 mm	204 km/hr 強風半径 72 km		24 km/hr

く変化し、白人が多数を占めていると言われている。

4. ハリケーン・カトリナの特徴と高潮の発生

図-7にカトリナの経路と発達・減衰を示す。2005年8月23日にバハマ諸島南東部で発生した熱帯低気圧は、翌日の24日には熱帯性暴風となり、「カトリナ」と名付けられた。カトリナはその後ゆっくり西に進みながら発達して、25日にフロリダ半島へ上陸する直前にカテゴリー1のハリケーンとなった。(ハリケーンの強さについては表-2を参照。)26日にメキシコ湾上に抜けた後、進路を西から北に方向を変えながら進み、

表-2 Saffir-Simpson Hurricane Scale

カテゴリー	風速(m/s)	中心気圧	高潮(m)
1	33–42	980	1.2–1.5
2	43–49	965–979	1.8–2.4
3	50–58	945–964	2.7–3.7
4	59–69	920–944	4.0–5.5
5	≥70	<920	≥5.5

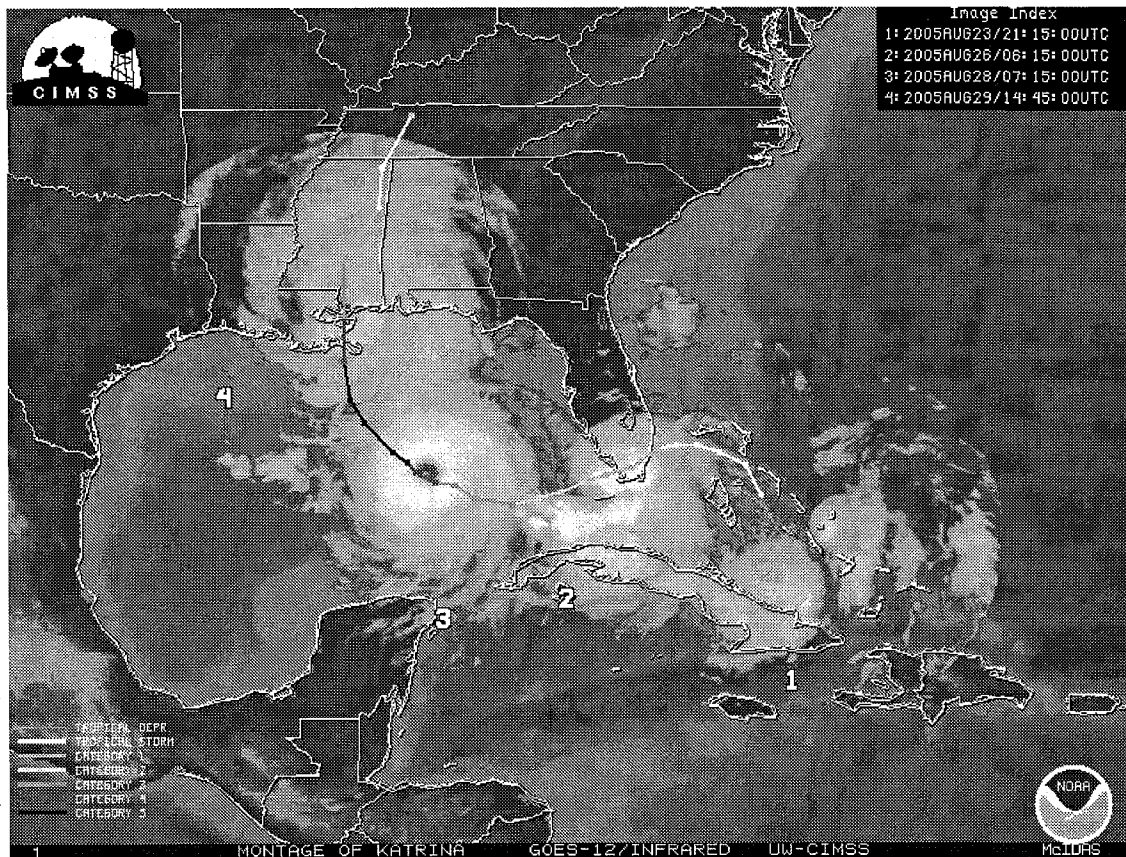


図-7 カトリナの経路と強さ

28日10時(米国中部時間)に最強のカテゴリー5(最大風速78m/s, 最低気圧902hPa)に達した。29日午前6時頃、カトリーナは最大風速約63m/s, 最低気圧918hPaでミシシッピ川下流の氾濫原に上陸した。その後さらに北上し、午前10時頃ミシシッピ州のセントルイス湾とガルフポートの間に928hPaで再上陸した後、ミシシッピ州東部を北上中の30日に熱帯性暴風になった。

図-8はメキシコ湾の海面温度の偏差を示しているが、海面温度が例年に比べ1~2℃高くなっていたことを示している。また、カトリーナが急激には発達した原因として、水温の高い層の厚い箇所を通過していったことや、風速の鉛直方向のシアが小さいことによると推定されている⁴⁾。

カトリーナは上陸時の風の強さでも歴代3位であった。このため、進行方向の右側の広い範囲において強風が吹いた。強風は低い中心気圧、広い陸棚等とともに大規模な高潮を引き起こしたが、陸上においても建築物の破壊や樹木の転倒等を多発させた。降水量についてはカトリーナの移動速度がやや速かったため、雨量の多い地点はニューオリンズ市周辺に限られた。

IPETの最終報告書案ではADCIRC(Advanced Circulation Model for Shelves, Coasts and Estuaries)モデルを用いて、ルイジアナ州からアラバマ州にかけての広範囲を対象とした高潮計算とニューオリンズ周辺を対象とした高解像度の高潮計算を行っている。なお、このモデルは潮汐、風、気圧、砕波によるwave setup、ミシシッピ川とアチャファラヤ川からの流入を考慮している。図-9に計算された最高潮位を、図-10に計算された最高潮位と痕跡水位の差を示している。図-10のプラスは計算結果の方が痕跡水位より大きいことを意味する。計算結果は痕跡水位をほぼ再現している。図-9より、高潮はポンチャートレイン湖よりもメキシコ湾岸からボーン湖、ミシシッピ川河口に沿った一帯の方が大きかったことが知られる。特に、ミシシッピ州のビロキシ(Biloxi)付近では8m以上の高潮が発生した。また、ニューオリンズの東部やミシシッピ川の下流部は東部から高潮が侵入し、水没したことが推定される。また、図-11にニューオリンズ市周辺の計算結果を示す。

数値解析によれば、高潮は次のように発生したとされる。すなわち、カトリーナの接近に伴って、ハリケーン前面の東風が大量の海水を西方向に吹き寄せ、ボーン湖やミシシッピ川下流沿いに大きな高潮が発生させた。このとき、ボーン湖の海水は東部(St. Bernard郡)から

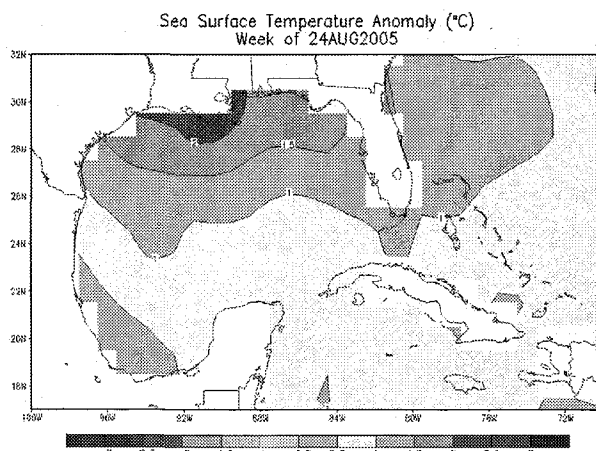


図-8 カトリーナの発達期におけるメキシコ湾の海面水温の偏差量(°C)

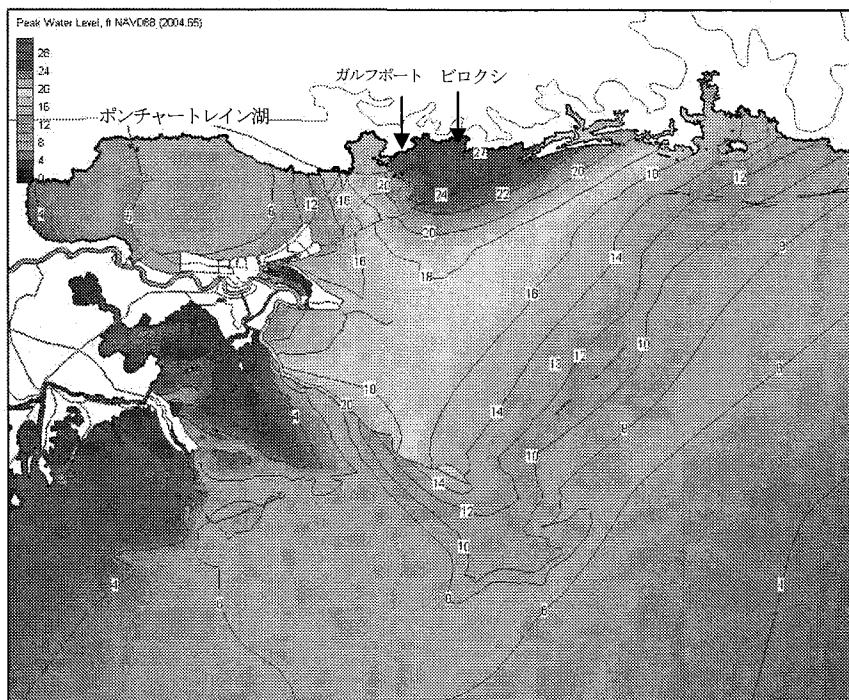


図-9 推定された最高潮位(単位: 1ft=0.30m)

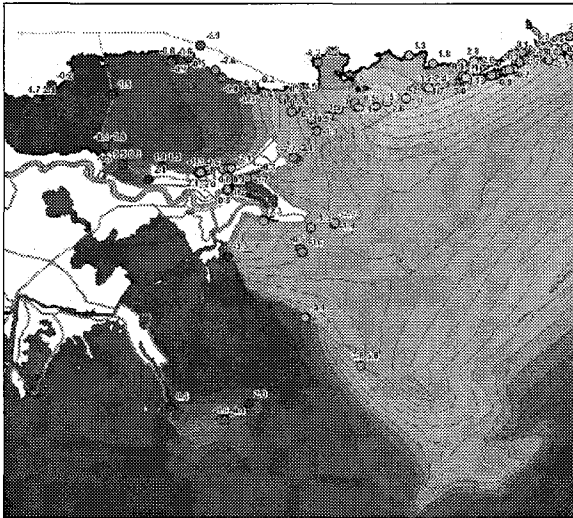


図-10 計算された最高潮位と痕跡水位の差

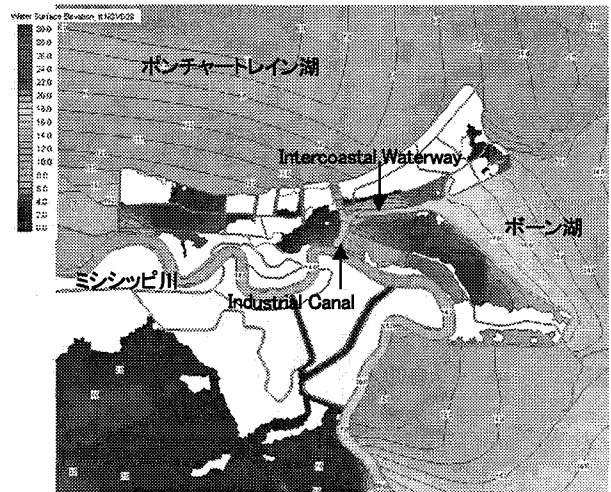


図-11 ニューオリンズ周辺の計算された潮位

越流・越波により流れ込むとともに、Intercoastal Waterway から Industrial Canal に沿って侵入し越流・越波を引き起こした。また、ハリケーンの北上に伴って、風向は南に変化しメキシコ湾岸に向けて海水が吹き寄せられ大規模な高潮を発生させた。カトリーナの接近によりポンチャートレイン湖に流入した大量の海水はハリケーンの通過後に南に吹き寄せられ、破堤によりニューオリンズ市に高潮をもたらした。実際には越流・越波だけでなく破堤が多数の箇所が発生し（これは計算では想定していなかった）、海水が市街地に流入し、大規模な浸水被害を引き起こすに至った。

ニューオリンズ市では、カトリーナの上陸以前から、米国ハリケーンセンター（NHC）からも、また地元大学のハリケーンセンター（LSUHC）からもニューオリンズ市内に高潮による甚大な浸水被害が発生するという情報が発信された。

5. ニューオリンズ市の被害の概要

5. 1 カトリーナ上陸直前から排水完了までの災害当局の動き

ニューオリンズ市ではカトリーナ上陸の8月29日の2日前に避難勧告を、1日前に強制避難命令を出した。市民の約8割が避難したと言われているが、避難しなかった、あるいはできなかった市民も大勢いた。8月29日に市内の複数の堤防が破壊し、ポンチャートレイン湖の海水が侵入し、市内の約8割が水没する事態となった。ポンチャートレイン湖の水位が高く、9月6日に破堤箇所の応急復旧が完了した。しかし、排水機場のポンプはなかなか稼働せず、排水作業は9月13日で市の4割、9月20日で8割、10月6日で完了と長期間を要した。

カトリーナの来襲から排水完了までの主な出来事を時系列的に整理したものが表-3である。この間に連邦政府の不適切な対応、連邦政府と州政府、市政府の連携の不備、対応の遅れなどが発生した。

5. 2 破堤と浸水被害

越流・越波による海水侵入による被害の発生は予想されていたが、市内の複数の運河が破堤し、市域の約80%が水没する事態が発生することは想定できていなかった。図-12に主要な破堤箇所を示す。すなわち、17番通り運河（17th Street Canal）の東岸（①地点、矢印は流出方向を示す）、ロンドン通り運河（London Avenue Canal）の西岸と東岸（②、③地点）、工業運河（Industrial Canal）（④、⑤、⑥地点）である。カトリーナによる浸水や操作員に避難によって、市内の排水機場は稼働できなくなった。この排水施設の復旧の遅れが浸水被害を増大させた。

表-3 カトリーナに関する出来事と連邦政府、州、市の対応

月 日	出 来 事	月 日	出 来 事
8 月 25 日	カトリーナがフロリダ上陸		連邦下院議長がニューオリンズの再建を疑問視する発言
8 月 26 日	NHC がカトリーナの発達を予報	9 月 1 日	DHS 長官や FEMA 局長がコンベンションセンターの状況を初めて知ったと発表
	ルイジアナ州、ミシシッピ州知事が非常事態を宣言		スーパードームからヒューストン・アストロドームへ避難民が続々と移動
8 月 27 日	ニューオリンズ市長が非常事態を宣言、避難勧告を発令	9 月 2 日	ルイジアナ州知事が 2 度目の避難・救援活動のためにバスの徴用を発令
	ルイジアナ州知事が連邦政府に支援を要請		ブッシュ大統領がルイジアナ州、ミシシッピ州、アラバマ州を視察
8 月 28 日	カトリーナがカテゴリ 4, 5 へと発達		下院が被災地救援費 105 億ドルの緊急補正予算を可決
	ニューオリンズ市長が強制避難命令を発令		ヒューストン市長アストロドームで 1 万 5 千人収容、満杯
	ブッシュ大統領がミシシッピ州、ルイジアナ州に非常事態宣言		17 番通り運河の仮締切工事を開始
	スーパードームに 2 万人収容		ブッシュ大統領が被災地に 7200 人を派兵
8 月 29 日	カトリーナ上陸	9 月 3 日	DHS 長官が予測不可能な災害であったと発表
	堤防の決壊や越流によりニューオリンズ市水没		ビロクシの避難所で 20 人以上が発病
	ブッシュ大統領がミシシッピ州、ルイジアナ州、アラバマ州に大規模災害宣言	9 月 4 日	スーパードームやコンベンションセンターからアストロドームへの移動終了
	スーパードームの屋根破損		遺体の収容、生存者の救援
8 月 30 日	17 番通り運河の破堤箇所の仮締切に失敗	9 月 5 日	ブッシュ大統領の 2 度目の視察
	スーパードームに 2 万 5 千人収容、衛生状態の悪化		本格的な排水作業の開始
	コンベンションセンターにて避難者の受入開始	9 月 6 日	運河の破堤箇所の応急復旧がほぼ完了、
8 月 31 日	ブッシュ大統領が被災地視察(着陸せず)		ニューオリンズ市長が残留する市民に強制排除を警察に指示
	ルイジアナ州知事がスーパードームの避難民を含め、全ニューオリンズ市民に避難命令	9 月 8 日	カトリーナ救援対策として 518 億ドルの新たな補正予算案が成立
	スーパードームからヒューストン・アストロドームへの移動開始	10 月 6 日	ニューオリンズ市の排水作業の完了
	コンベンションセンターに 3 千人以上の避難民がいることを地元マスコミが報道		

図-13 は 2005 年 9 月 25 日時点（カトリーナ来襲から 28 日後）における浸水状況と排水機場の稼働状況を示したものである。9 月 25 日には St. Bernard 郡に浸水域が残っているが、これはハリケーン・リタにより再度破堤したためである。排水機場の位置に着目すると、ポンチャートレイン湖への出口でなく運河の上流端に排水機場が存在する。これは排水機場が建設された後にポンチャートレイン湖方向に市街地が拡大したためである。しかし、運河の出口に水門を持たないため、堤防は長時間にわたり高い水圧を受けることとなり、弱体化する懸念がある。

(I) 17 番通り運河

水位の高い状態が長時間続いた。その結果、東岸の I 型の flood wall が堤内地側に移動するように変状し、海水が侵入した。ただし、越流した痕跡はなかった。図-14(a)は土嚢による破堤部の仮締切を行っている状況である。また、図(b)は手前側に位置するポンチャートレイン湖の濁水が堤内地に浸入している様子を示している。

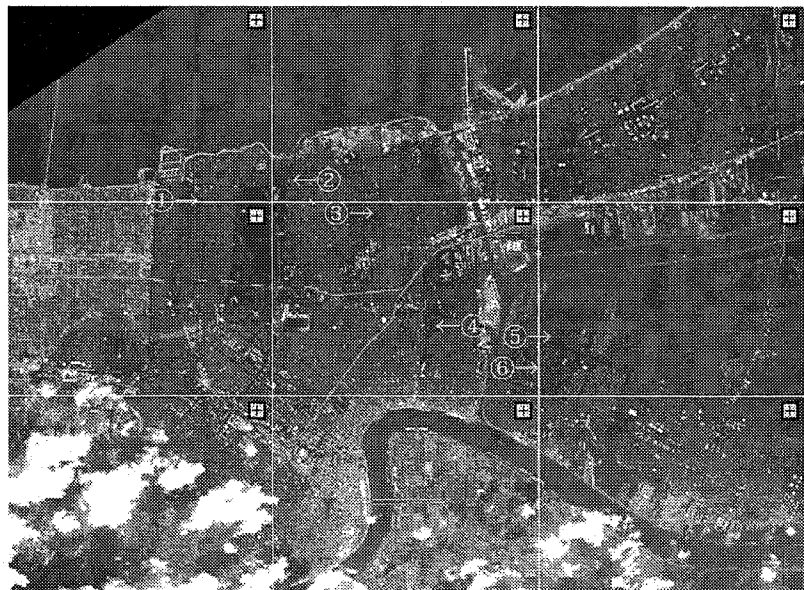


図-12 ニューオリンズ市内の主要な破堤箇所

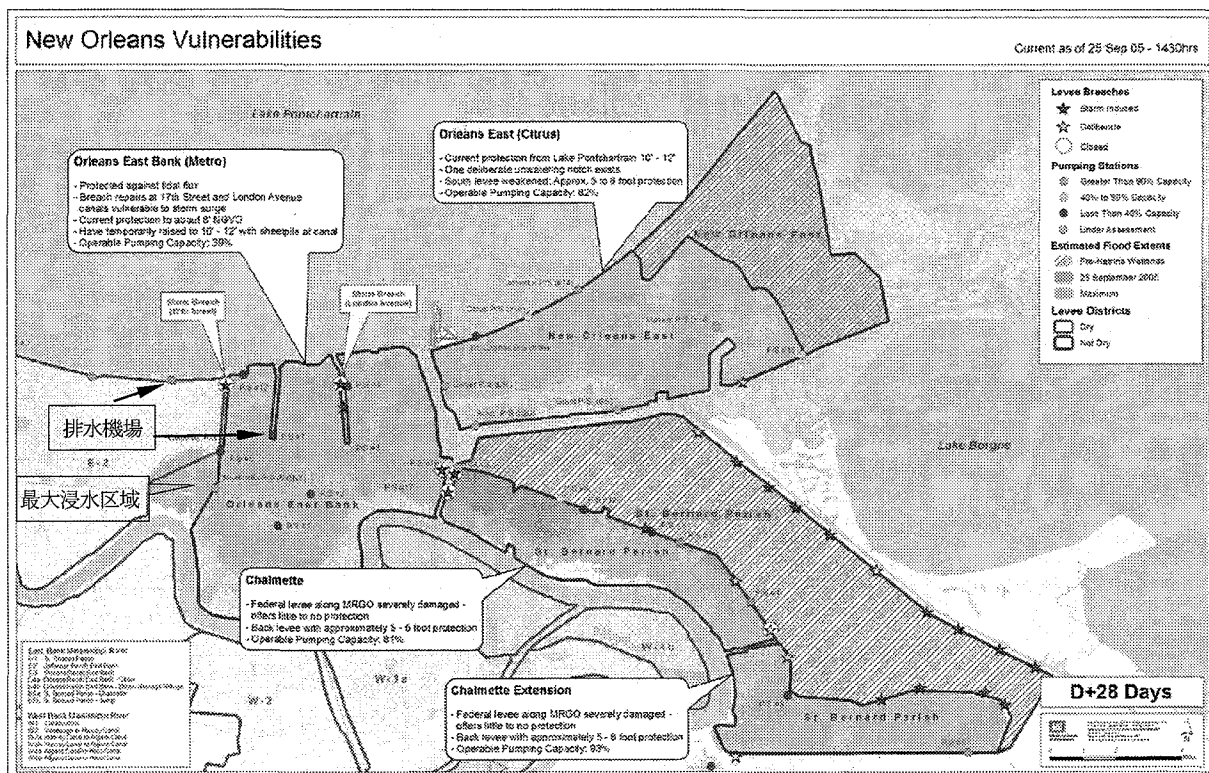


図-13 ニューオリンズ市とその近郊での破堤位置，浸水状況，排水場の稼働状況（2005年9月25日時点）

破堤の原因は確定されていないが，浸透破壊によるという説が有力である．当該地域の表層は粘土層であるものがその下には透水性の高いピート層が存在しており，地盤の強度が場所的に大きく変化している．設計時に地盤材料の特性をどのように考慮したのか，flood wallの下部の矢板の長さが不十分ではなかったか，あるいは運河の浚渫により浸透が進んだのではないかな等の疑問点がある．ただし，堤外地から堤内地への浸透が進んでいたのは事実であり，下水道・水道局の担当者が堤内地で上水道の水でも下水道の水でもない水の流出を確認していたという．しかし，そのことは関係機関には通報されなかった．

(2) ロンドン通り運河

ロンドン通り運河では北と南の2箇所破堤した．図-15にロンドン通り運河北の破堤地点の様子を示す．破堤の様子は17番通り運河のそれと類似しており，越流ではなく，flood wallが堤内地側に大きく移動している．

(3) 工業運河

工業運河では3箇所が破堤し，工業運河の東西両側に広がる第九地区（Ninth Ward）に大規模に海水が浸水



(a) 破堤部の仮締切工事



(b) 破堤直後の浸水状況

図-14 17番通り運河のI型 flood wallの破堤状況

した。特に、東側の下第九地区（Lower Ninth Ward）での被害は甚大であり、千人近くの死者を出している。下第九地区に浸水が始まったのは29日午前7時半ごろである。越水の開始とともに土堤が侵食されてI型コンクリート壁が崩壊したと推定されている。

図-16は工業運河の東岸の破堤状況である。図(a)より、堤防が数百メートルにわたって破堤し、写真(a)の右の下第九地区の水が堤外地側に流出している様子が見て取れる。図(b)は、破壊された堤防の様子を示しているが、破堤による氾濫水の勢いはすさまじく、破堤地点付近の家屋はほとんどその原形をとどめていない。破堤の直接的な原因は越流による洗掘と考えられている。

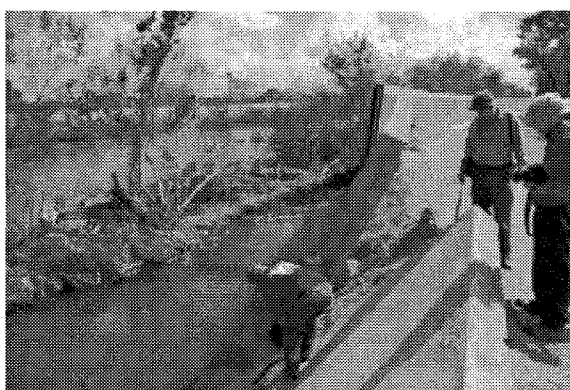
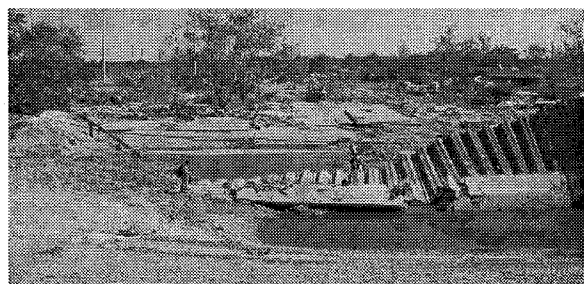


図-15 ロンドン通り運河の北の破堤状況(西岸側が破堤)



(a) 堤内地から運河へ水が戻っている様子



(b) 大きく変状した堤防

図-16 工業運河の破堤状況

5. 3 避難計画と課題

ルイジアナ州の避難計画では、要請避難命令が出された場合、自動車を保有する市民は自家用車で避難し、自家用車を所有しない市民に対しては、スクールバス等の公用車やボランティア組織から供出された車両等で避難することになっていた。しかしながら、スクールバスの運転手も避難してしまい、自動車を所有しない市民の避難に使用された台数は限られた。また、自家用車を所有しない市民に対して、スーパードームに避難するように呼びかけたが、食料や水などを持参する市民は少なく、トイレの増設なども不十分であった。

ルイジアナ州では、危機管理体制の強化を目的として、ハリケーン・パム（Pam, ニューオリンズの西をゆっくり北上するカテゴリー3の仮想ハリケーン）に対して演習を行ってきた。2004年7月に最初のワークショップが州都バトンルージュで開かれた。参加者は、FEMA、15以上の連邦の部局、ナショナル・ウエザー・サービス、20以上のルイジアナ州の部局、13の郡、ボランティア組織、隣接するミシシッピ州とアーカンサ

ス州の代表であった。パムは実際のカトリーナに近い設定であり、パムに対する演習はカトリーナの来襲時に大いに役立ったとの評価をニューオリンズ市役所でのヒアリングで聞いた。例えば、contraflow（上下車線とも避難方向にのみ通行できるように規制する）による避難計画の改善である。2004年9月ハリケーン・アイヴァン接近に際して、初めて contraflow が実施されたが、激しい渋滞が発生した。パムでは contraflow の出口における渋滞を解消するため、周辺の信号周期の変更、工事の中止などの見直しが行われた。その結果、カトリーナ時の contraflow は大幅に改善され、上陸前の48時間に120万人以上が避難した。

カトリーナによる発災時に危機管理の責任者がどのように動いたのか、避難民がどう移動したのかについては前述の表-3の通りである。現地でのヒアリング結果を基に避難計画や避難実態についての課題をまとめると以下ようになる。

- ・ ルイジアナ州、ミシシッピ州はNHCの予報に基づいて非常事態宣言をカトリーナの上陸3日前に発令した。ルイジアナ州では郡長は避難指示や命令を実施する立場にあるが、郡ごとに発動の時期が異なり、避難の開始時期にばらつきが発生した。
- ・ ニューオリンズ市では堤防が決壊し市の大半が水没するという被害想定が十分にはされていなかった。これが初動に遅れを生じさせた主因となった。
- ・ ニューオリンズ市の災害対応部署である国土安全保障局は、現場とコミュニケーションをとることが全くできなかった。広範囲にわたって通信手段が寸断された。そのため、避難場所として使用されたスーパードームやコンベンションセンターでの状況に対応できなかった。また、デマが広がり、不安をあおることとなった。
- ・ カトリーナ来襲時に、病院や老人施設等が孤立し、災害弱者の避難が遅れた。また、貧しく避難することのできない住民が水没した街に食料や水の無い状態で取り残され、多くの犠牲者が出た。
- ・ ニューオリンズ市では、カトリーナ上陸の4日後にFEMAから物資や資材を受け取る予定であったが、できなかった。FEMAが代替通信手段を持たず、現地の被災状況を的確に把握できなかったことによると言われている。
- ・ 自動車を持たず、お金も行き先もない住民と、自動車を保有するが安全であろうと思い込み避難しなかった住民約10万人が市内に残った。避難命令が出ても約1万人が拒否した。また、ペットの対応が課題となった。

ニューオリンズ市長は、2006年5月2日、ハリケーン・シーズンを前に新たな避難計画を発表した。新計画にはカトリーナの教訓が大いに反映されている。主な内容は以下のようである。

- ・ カテゴリー2以上のハリケーンに対して避難命令を出す。
- ・ 米国ハリケーンセンター(NHC)と直通回線を結ぶ。州、連邦レベルで連携しながら早期の避難、ハリケーン接近の30-36時間前に避難命令を出すことを目指す。
- ・ 避難手段を持たない人々は、指定集合場所からバスで一旦コンベンションセンターに運び、そこから別のバスで安全な避難場所まで輸送する。
- ・ スーパードームとコンベンションセンターは、避難場所として用いない。
- ・ FEMAのトレーラーハウスに住んでいる住民には、熱帯低気圧でも避難してもらう。赤十字と協力してニューオリンズ大学の建物、市公会堂などがそのための避難所として使えるか検討している。
- ・ バス、避難所の確保には、州、および連邦、さらには民間の協力が必須である。
- ・ バスの運転手の地位を上げるとともに、緊急時の出勤を義務化する。
- ・ 鉄道会社アムトラックとは特別援助が必要な避難者の輸送、航空会社とは旅行者の輸送について交渉している。
- ・ 避難命令とともに、外出禁止令を発令し、警察と州兵によるパトロールを実施する。
- ・ 避難する際に一定の条件のもとにペットを連れて行くことを認める。

- ・ 避難命令が出された場合、残るよりも避難した方が良いという状況を作り出す。残る人に避難の強制は行わないが、外出すれば逮捕される。
- ・ 5月23、24日に州と共同で机上演習と実地訓練を行って、計画をチェックする。

5. 4 現在及び今後の治水事業、治水計画

被災地の至る所に瓦礫の山が築かれ、その処分に膨大な時間と費用がかかっている。微高地ではライフラインの復旧も進んだが、東部に位置する下第九地区では瓦礫の処理も進まず住民は戻れない状態にある。

一方、陸軍工兵隊によれば、現在及び今後の水害対策の進め方について以下のように計画されている。

- 1) **Repair** : カトリーナによって被災した堤防天端高をカトリーナ来襲前の高さに戻す。2006年6月1日までに。
- 2) **Restore** : 被災していない堤防 (levees/floodwalls) 天端高を認可された計画高さに戻す。2007年9月1日までに。
- 3) **Complete** : 認可された計画のうちまだ建設が完了していない部分の完成を急ぐ。2007年9月までに。
- 4) **Improve** : 現在の治水システムが最大の効果を発揮するような改善を行う。
- 5) **Certify** : 治水システムの設計水準を100年確率に引き上げる。
- 6) **Higher Levels of Protection** : ルイジアナ沿岸域の保全と再生レポートを提出する。2006年6月までに事前検討レポート、2007年12月までに最終レポートの提出。

なお、上記の **Repair** では、破壊された堤防を復元するのではなく、天端高こそ同じであるが、**IPET** レポートでの成果を活用して堤防の基礎を強化する。また、**IPET** レポートによれば、構造物の建設に必要な基準高がこれまで地区毎に異なっており、さらに地盤沈下の影響を受けて、現在の堤防の天端高は認可された計画通りには建設、維持管理されていない。陸軍工兵隊の調査結果を表4に示す。Levee, flood wall とともに計画以下の天端高しかないものが相当量存在していることが知られる。今回のカトリーナ災害を受けて、基礎となる基準高の統一がなされたが、**Restore** によってニューオーリンズ市及び周辺地域の堤防システムが本来の計画通りに整備されることになる。連邦政府に認可された計画の進行段階で被災した、**Complete** はカトリーナ災害の繰り返しを防ぐために工事を急ぐことである。

ニューオーリンズ市内に入り込んだ運河の堤防が破壊されたことの反省から、運河のポンチャートレイン湖への出口(3箇所)に図-17に示すような水門の建設が2006年6月を目途に行われている。この水門によって、湖の水位が高い場合でも市内の運河の水位が上がるのを防ぐとともに市内の雨水排除を行うものである。

Emergency Improvements として、ポンチャートレイン湖に面する3箇所の排水運河の強化(図-18)、水害に強い排水機場への改善(図-19)、ボーン湖とポンチャートレイン湖との結節点での開閉式の水門の建設(図-20)、

表4 天端高が計画高を下回る堤防の長さ(単位: km)

堤防の位置	全長	Levee	Floodwall
Orleans East Bank	30.6	8.4	23.2
IHNC	19.3	1.3	12.2
New Orleans East	62.8	9.3	9.7
St. Bernard Parish	48.3	8.4	0.2
Plaquemines Parish	175.4	43.4	0.0
East Jefferson	25.7	6.9	0.8
West Jefferson	106.2	33.8	9.7
St. Charles	16.1	9.7	0.3
合 計	484.3	121.2	56.0

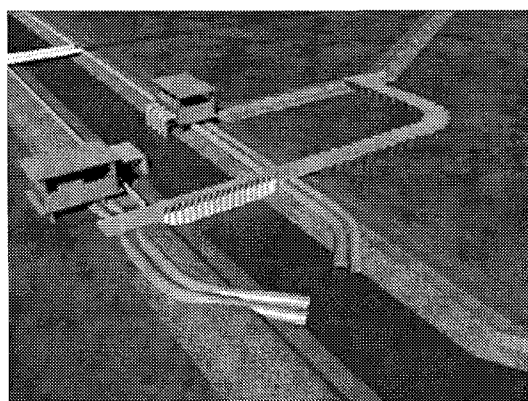


図-17 運河の出口に建設予定の水門と排水機(イメージ)

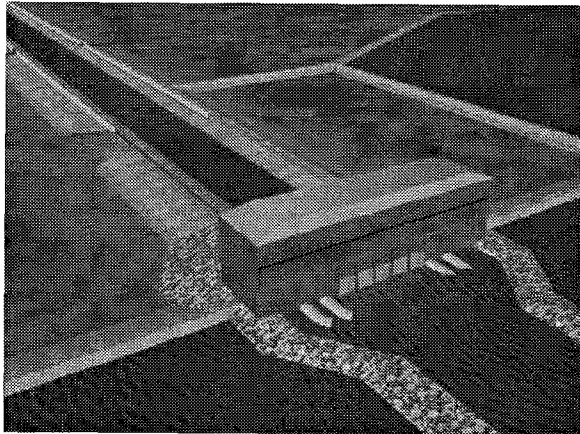


図-18 ポンチャートレイン湖に面する排水機場

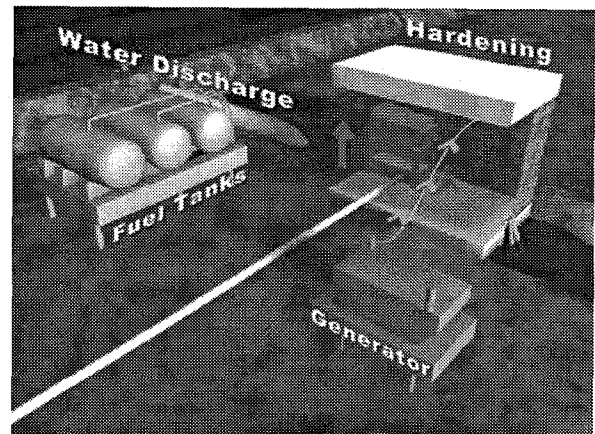


図-19 排水機場の強化



図-20 航行可能な水門の位置（2箇所）とイメージ

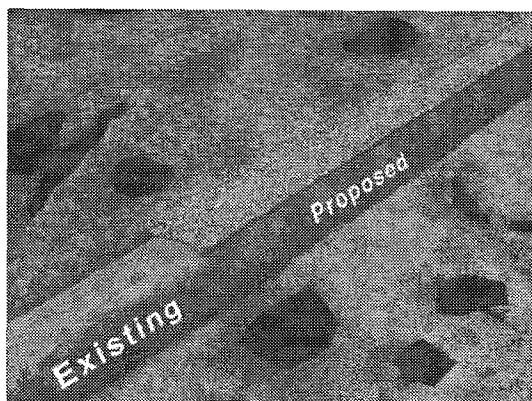
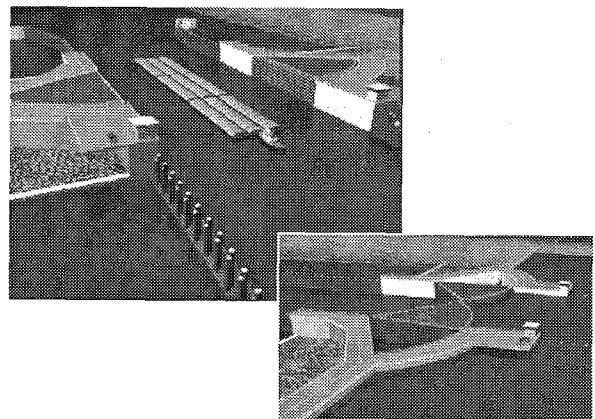


図-21 堤防の浸食防止工

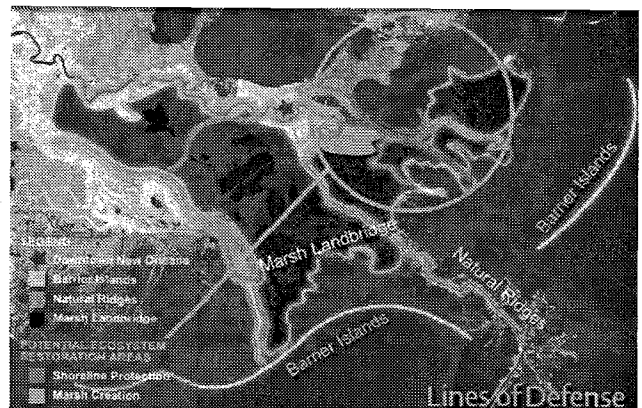


図-22 湿地帯と生態系の回復

堤防の浸食防止工の設置（図-21）、連邦政府が設計しなかった地元の堤防の強化、湿地帯の回復（図-22）等が提案されている。これらについては連邦議会で検討中である。

さらに、陸軍工兵隊はニューオリンズを含むルイジアナ東南部の河川堤防および高潮堤防の計画を作成している。図-23 にはミシシッピ川の洪水防御用の河川堤防、ハリケーン堤防とよばれる高潮堤防とともに建設の可能性の検討が行われている将来計画の堤防が記載されている。ただし、陸軍工兵隊の作成した計画を連邦議会が認可するかどうかは、明らかではない。また、堤防の質の向上が目指されており、図-24 に示されるような断面の堤防計画が検討されている。

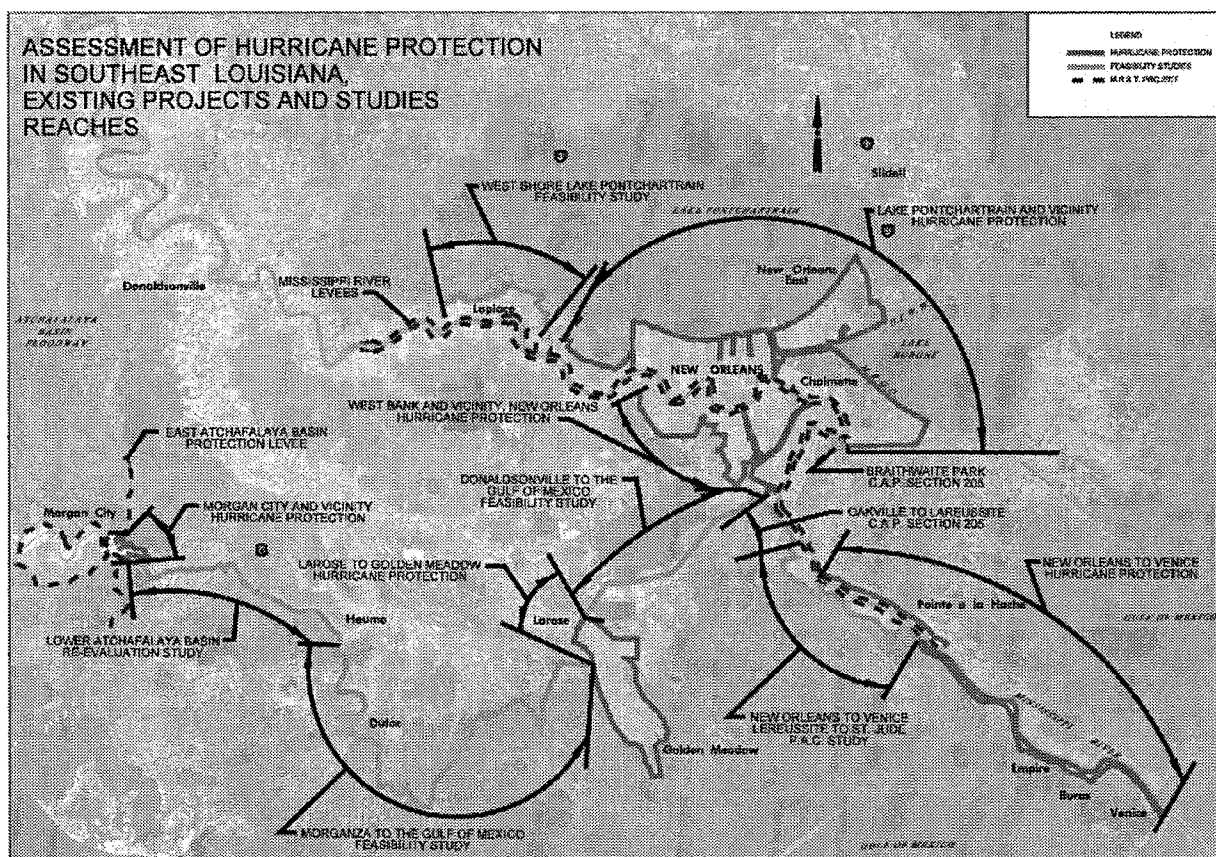


図-23 ルイジアナ州東南部の洪水防御計画

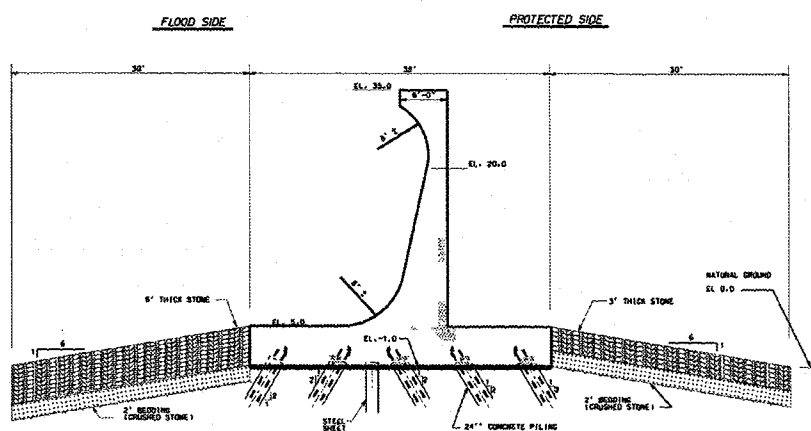
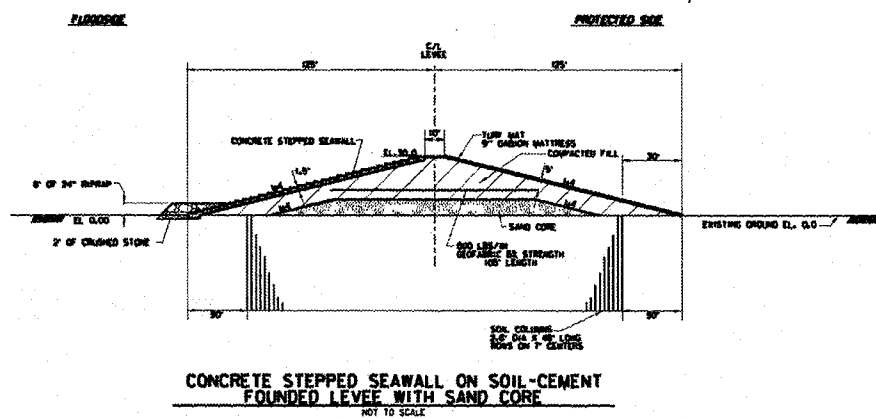


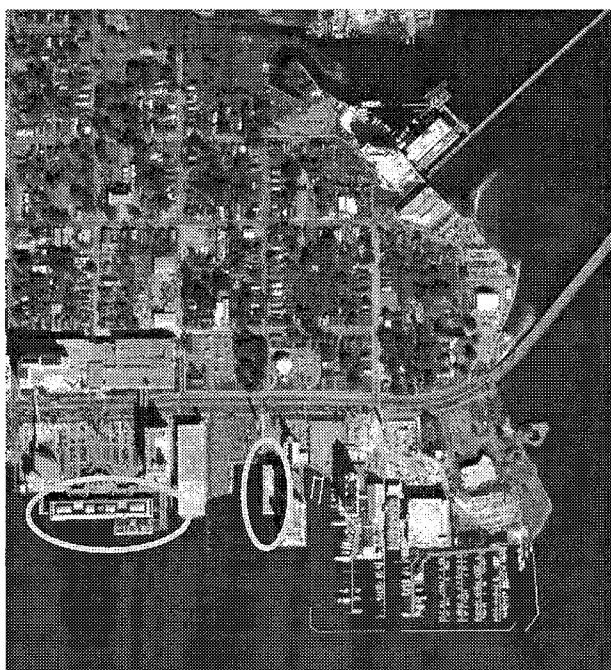
図-24 堤防の強化対策案

6. メキシコ湾岸地域の被害の概要

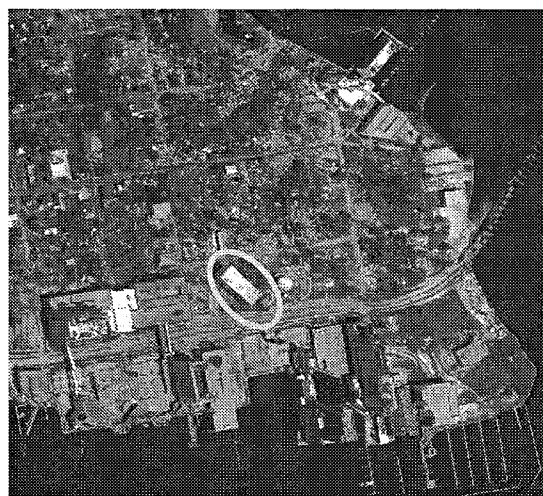
カトリーナはメキシコ湾岸に高い水位上昇と強風をもたらし、広い範囲で家屋の破壊や橋梁の破損等の浸水被害を生じさせた。ここでは特に大きな被害を受けたミシシッピ州の沿岸とミシシッピ川下流部の状況について述べる。

(1) ビロキシ (Biloxi)

図-25(a)はビロキシのカトリーナ前後の衛星写真である。ビロキシは船上のカジノで有名であり、カジノ船が何隻も係留されていた(図中円内)。また、同じ写真の右側には対岸の町Ocean Springsと連絡する橋(Biloxi-Ocean Springs Bridge, 下側)とその北側に残されている古い橋梁が見られる。図(b)はカトリーナが去った直後の8月31日の写真である。いくつかのカジノ船が消失している。図(a)の中央下にあったカジノ船は数百メートル離れた陸上に打ち上げられている。また、2つの橋梁でも橋桁が落下している。半年後の2006年2月の調査時における橋の被害の様子を示したのが図-26である。橋桁はみな東側で落橋している。ハリケーンが来襲した際、高潮によって海水面が上昇

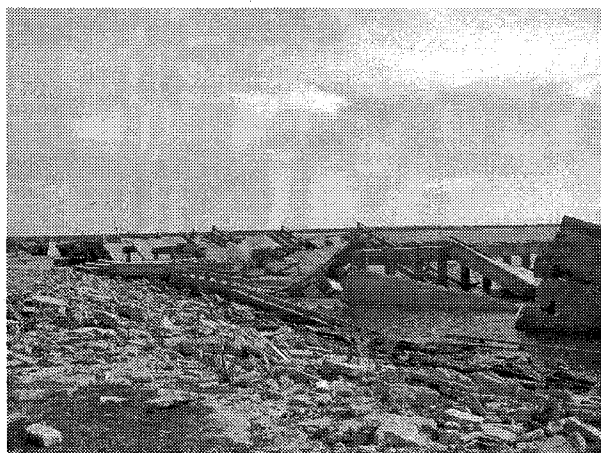


(a) カトリーナ来襲前

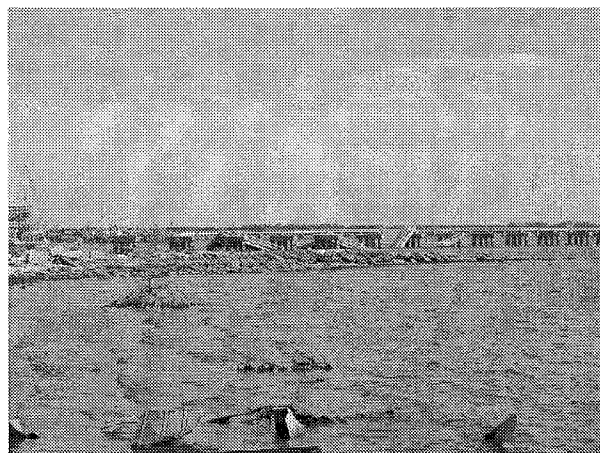


(b) カトリーナ来襲後

図-25 Biloxiの変貌 (丸内はカジノ船)



(a) Biloxi-Ocean Springs Bridge (I-90)



(b) I-90の北側の橋梁

図-26 Biloxiの変貌 (丸内はカジノ船)

し、さらに高波浪による一定方向の繰り返しの力によって徐々に移動して落橋したものと考えられている。

(2) ガルフポート (Gulf Port) 周辺

図-27はGulf Port近くのコンドミニアムの被災状況である。ピロティ形式で建てられているが、2階部分が大破している。図-28はバプテスト教会の被災状況である。外壁が完全に失われている。両写真とも2006年2月27日に調査団員が撮影したものである。図-29は海岸からやや内陸部へ入った地点での被害の状況である。家屋は破壊され瓦礫となっている。礫が詰まっている。

(3) ミシシッピ川最下流部

ミシシッピ川最下流部のミシシッピ川と湿地帯に挟まれた細長い地域には集落が散在している。ミシシッピデルタ末

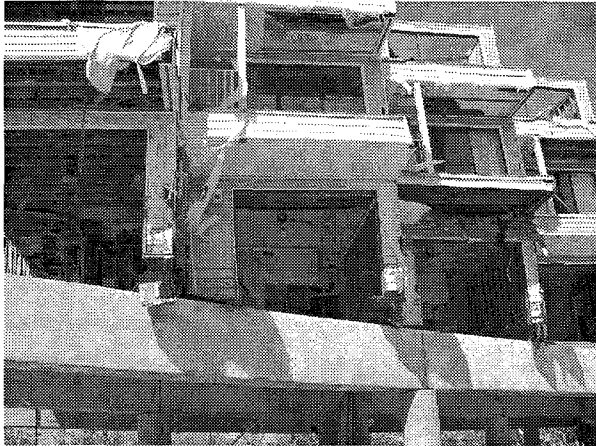


図-27 Gulf Port のコンドミニアム被災状況

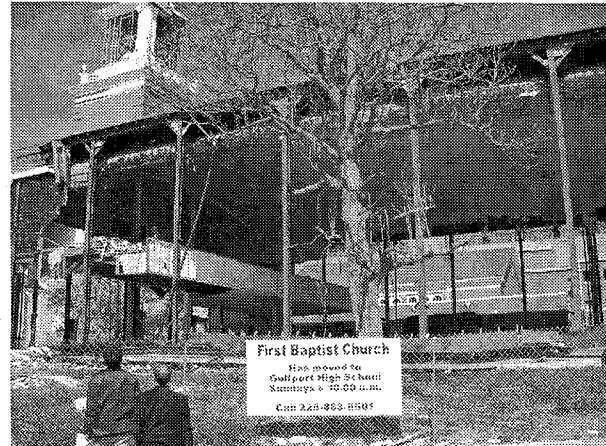


図-28 Gulf Port のバプテスト教会被災状況

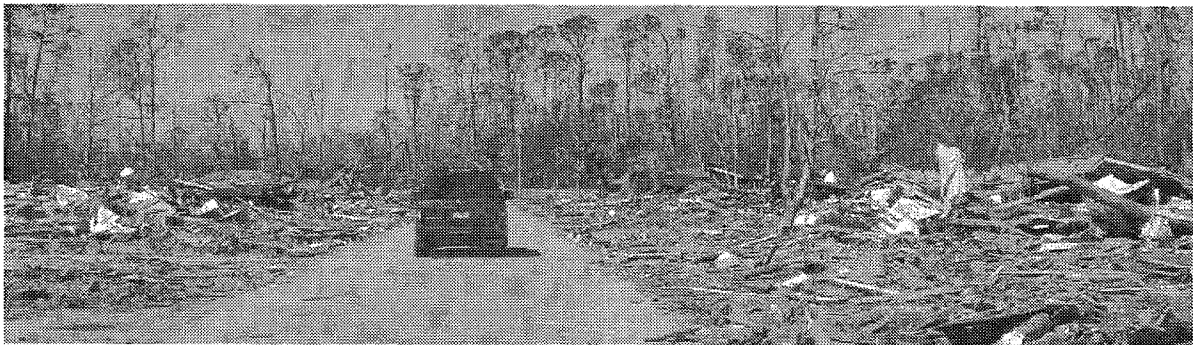


図-29 やや内陸部での被災状況



図-30 ミシシッピ川最下流部における被害状況. (2006年2月28日)

端に位置するこの地域は海面とほとんど標高差がなく、ミシシッピ川側(東側)と湿地帯側(西側)の二つの堤防によって守られている。カトリナだけでなくその後のハリケーン・リタによっても何箇所か破堤が生じている。図-30にミシシッピ川最下流部の被害状況を示す。この地域は非常に大きな被害を受けており、高潮によって堤防を越えて押し寄せた水の勢いの激しさがうかがわれる。聞き取り調査によるとハリケーン・カトリナによる高潮はミシシッピ川右岸堤防を越流し、湿地帯側の堤防を再度越流したという。堤内地における浸水深は3メートルを越えた。また、その後のハリケーン・リタの際には、高潮は湿地帯側とのことであった。

7. おわりに

カトリナ災害のような巨大災害において安全を確保するためには各人の適切な判断力が最も必要である。ニューオリンズ市の堤防システムが大型ハリケーンに対して十分には機能しないことを専門家は十分に理解していた。しかし、マスコミや地元大学の活動にも関わらず、そのことを理解していない市民が少なからずいた。多くの堤防が決壊し、市が水没することなど、ニューオリンズ市の当局者ですら念頭に置いていなかった。ニューオリンズと我が国の広いゼロメートル地域を有する大都市の間には、治水関係の組織や設計方法、人種・貧困問題などに大きな差異があるが、カトリナ災害から学ぶべきことは多数あると思われる。

カトリナ災害が浮き彫りにした課題の中で、今後の我が国の治水対策、特に複合災害で被害が巨大化する場合やゼロメートル地域を抱える都市での対策に活かすべき事項として次のことが挙げられよう。

- 1) 巨大台風による高潮、洪水の外力評価や複合災害の想定
- 2) 危機管理体制の強化による的確な災害対応
 - ・ 国、県、市町村、自主防災組織、自衛隊との連携の強化、役割・責任の明確化
 - ・ 災害への具体的な対応訓練
 - ・ 長期間にわたる場合の人員配置計画
 - ・ 瓦礫の処分方法、場所の検討
- 3) 避難計画の策定
 - ・ 住民の的確な避難誘導
 - ・ 高齢者や病人等の災害弱者やツーリストの避難対応
 - ・ 大勢の住民を長期間受け入れることのできる避難建物の選定
 - ・ 周辺都市との協力体制の確立
 - ・ 救援物資の供給方法、最新情報の提供方法の確立
- 4) 発災時の被災区域の最小化対策の検討
 - ・ 現在の治水施設の機能の再点検
 - ・ 破堤箇所の応急対策と資材の搬入経路の確保
 - ・ 既存の施設を利用した浸水域の拡大防止対策
 - ・ 排水施設の耐水化
 - ・ 危険物の処理、撤去
- 5) 被災者の生活支援制度の充実

謝辞

本報告は(財)河川環境管理財団の支援のもとで土木学会水工学委員会から派遣された調査団の活動成果である。調査団のメンバーは清水康行(北海道大学)、泉典洋(北海道大学)、四俣正俊(愛知工業大学)、中北英一(京都大学防災研究所)、岸田弘之(国土交通省)、岡山和生(河川情報センター)、古賀清隆(河川情報センター)、坂本拓二(河川環境管理財団)、藤堂正樹(パシフィックコンサルタンツ(株)) (敬称略)と河原能久(広島大学、調査団長)であった。

調査の立ち上げ段階から、土木学会水工学委員会と海岸工学委員会の委員長、国土交通省河川局港湾室、(財)河川情報センター、(財)河川環境管理財団、国土技術政策総合研究所、パシフィックコンサルタンツ(株)の方々には情報の提供や現地調査の内容などについて大変お世話になりました。一方、米国では、陸軍工兵隊、ニューオリンズ総領事館、ルイジアナ州政府、ニューオリンズ市、ルイジアナ州立大学ハリケーンセンター、FEMA、陸軍工兵隊の ERDC の方々から、多くの説明や資料の提供をいただきました。また、USGS の Jim Jelinski 氏のご自身が被災者でありながら、丁寧に現地を案内して下さいました。ミシシッピ大学の Yang Ding 助教授には現地の案内で協力いただきました。さらに、ミシシッピ大学の Mustafa Altinaka 教授、ASCE 会長 W. F. Marcuson III 氏、石原研而先生には調査団訪問先の手配に関して便宜をはかっていただきました。ニューオリンズ在住の通訳の石田さんからはハリケーンの経験やニューオリンズの最新の情報を提供していただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土技術研究センター：欧米諸国における治水事業実施システム，304p., 2001.
- 2) 高橋重雄：ハリケーン・カトリナ被害調査参加報告書（帰国報告）-米国土木学会海岸・港湾・海洋委員会現地調査-, 10p., 2005.9.
- 3) 田中茂信：米国 New Orleans におけるハリケーン「Katrina」による高潮災害とその教訓，24p., 2005.
- 4) 沿岸災害対策技術調査団：ハリケーン・カトリナ被災調査報告書（速報），5p., 2005.
- 5) 日本水フォーラム：2005 年米国南部における大規模浸水被害調査，平成 17 年度報告書，pp.3-5～4-35，2006.
- 6) 日本水フォーラム：中部地方整備局ハリケーン・カトリナ水害調査団現地調査帰国報告書（速報），47p., 2005.
- 7) 国土交通省：ニューオリンズ市を中心としたハリケーン“カトリナ”による災害の概要，「ゼロメートル地帯の高潮対策検討会」資料，29p., 2005.
- 8) <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/reports/tech-report-200501z.pdf> : Hurricane Katrina, A Climatological Perspective, October 2005, Updated January 2006.
- 9) Time, Inc.: Hurricane Katrina, The Storm That Changed America, Time Books, 136p., 2005.
- 10) The Wrath of Hurricane Katrina, 64p., American Products Publishing Company, September, 2005.
- 11) 林春男：ハリケーン・カトリナがもたらした新しい広域災害（速報），土木学会誌，vol. 90, No. 11, 34-38, 2005.
- 12) 山下隆男：ハリケーン・カトリナによるニューオリンズの高潮災害（速報），vol. 90, No. 11, 39-43, 2005.
- 13) 辻本哲郎：2005 年ハリケーン・カトリナによる高潮災害，平成 17 年度河川災害に関するシンポジウム，pp. 17-34, 2006.
- 14) 気象研究所台風研究部，その他：ハリケーン・カトリナについて，天気，Vol. 53, No.1, 49-59, 2006.
- 15) US Army Corps of Engineering, Performance Evaluation of the New Orleans and Southeast Louisiana Hurricane Protection System, Draft Final Report of the Interagency Performance Evaluation Task Force, 2006.
- 16) 2005 年ハリケーン・カトリナ調査団：2005 年ハリケーン・カトリナ調査報告書，土木学会水工学委員会，海岸工学委員会，(財)河川環境管理財団，2006.

なお、上記以外に、陸軍工兵隊から入手した PowerPoint ファイルやビデオ、Internet 上の資料等がある。カトリナ災害に関する衛星写真や地上での写真は現在でも download できるものが多い。