

## ニューオリンズ周辺の気候・水文・土地環境と水災害に対する脆弱性の増大

大楽浩司\*・水谷武司\*・佐藤照子\*

### Climate-Hydrological Conditions and Increasing Vulnerability to Water Hazard in the Vicinity of New Orleans

Koji DAIRAKU, Takeshi MIZUTANI, and Teruko SATO

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan  
dairaku@bosai.go.jp, mizutani@bosai.go.jp, sato.sun@bosai.go.jp

#### Abstract

The authors conducted a disaster survey of the hurricane Katrina by a field trip and collecting literatures supported by the disaster prevention research forum. We had several interviews with some experts and inhabitants and obtained associated materials. Mainly based on them, this paper focuses on a hazard of the hurricane and reports on increasing vulnerability to extreme events (hurricanes) in the vicinity of New Orleans under climate-hydrological environmental change. Artificial levees for flood protection, dredging canals, drainage, and so forth decrease wetlands and cause subsidence in New Orleans city located at the delta plain formed by sedimentation from upper Mississippi river. Human activities aggravate the vulnerability of land and human society to water disasters. In addition, climate change (intensifying or increasing extreme events and sea level rise) may even worsen the disaster risk.

**Key words:** Hurricane Katrina, Climate change, Vulnerability of land conditions, Development

#### 1. はじめに

2005年8月に発生したハリケーン・カトリーナは死者約1,300人、推定被害額約960億ドル(約11兆円)の大災害をもたらした。被害額は米国災害史上最大のものとなった(Whitehouse, 2006)。特に、ルイジアナ州南部の大都市ニューオリンズ周辺では、高潮によって大被害が発生した。

防災科学技術研究所では、「防災研究フォーラム」の支援を得て、現地調査を2005年11月30日から12月7日にかけて行った。なお、現地調査の概要については本調査報告書の冒頭で述べている。本稿では、気候・水文・土地環境の観点から、大災害の誘因となったハリケーンと、高潮災害の発生場の水文・土地環境について、現地調査における災害専門家らへのインタビューや収集した資料などをもとに報告する。

なお、本稿の第2, 4, 5, 6章ととりまとめを大楽が、

3章を水谷、佐藤が担当した。

#### 2. ハリケーン・カトリーナの概要

ルイジアナ州ニューオリンズは北緯30度7分、西経89度93分に位置しており、屋久島とほぼ同じ緯度である。年平均気温は20℃であり、7月平均気温は28℃、1月平均気温は12℃である。降雪は滅多に観測されない。州の年平均降水量は1,420mmであり、南の沿岸地域は平均1,670mmである(Ruffner and Bair, 1977)。周囲を湿地や湖で囲まれ湿潤であり、極端な高温・低温日がありないうるやかな気候である。12月半ばから3月半ばにはメキシコ湾からの温暖な空気塊と大陸からの寒冷な空気塊の流入の影響を受け、総観規模擾乱による比較的一様な降雨がある。5月や10月、11月は強い雨が観測される時もあるが、通常、降雨は少ない。6月から9月はハリケーンの影響を受けやすくなる。

\*独立行政法人 防災科学技術研究所 総合防災研究部門

海面水温はハリケーンの形成と発達に非常に重要な要素であるが、過去100年の中で、近年の7月～9月の大西洋、メキシコ湾の海面水温は顕著な増加傾向を示している。また、カトリーナが生起した2005年8月下旬のメキシコ湾の海面水温は、平年よりも1℃から2℃高い状態にあった。風の鉛直シアは例年よりも弱く、それもカトリーナを短期間に強く発達させる要因であった(Graumann *et al.*, 2005)。

カトリーナは、図1に示されるように、2005年8月25日にフロリダ半島に上陸・横断し、メキシコ湾に抜け、さらに勢力を増して29日午前6時10分にニューオリンズ付近に再上陸した。カトリーナの最大風速は約77m/s、上陸時の風速62m/s、最低気圧は902hPa、上陸時の最低気圧は920hPaであった。8月24日から9月1日の総雨量は、ルイジアナで376mm、フロリダでは417mmであった(Graumann *et al.*, 2005; 国土交通省, 2005a)。

表1にあるように、カトリーナの最低気圧や風速は、1959年9月26日に約5,100人もの死者・行方不明者を出した伊勢湾台風と匹敵する強さであった。暴風域の半径については、伊勢湾台風の方が大きい。高潮の潮位はニューオリンズ東側のピロクシなどの海岸地域で6～9m以上であった(Graumann *et al.*, 2005; 国土交通省, 2005b)。

図2はニューオリンズ周辺に影響を与えた過去の主要なハリケーンについて示したものである。1947年、1965年のBetsy、1969年のCamille、1998年のGeorgesの際も浸水被害があり、ハリケーンがニューオリンズ付近を通過するリスクについてはよく知られていることであった。

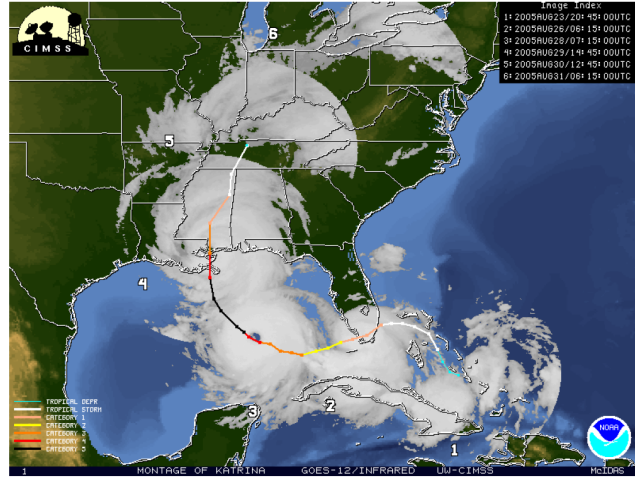


図1 ハリケーン・カトリーナの進路と強度 (Graumann *et al.*, 2005)

Fig. 1 The path and intensity of hurricane Katrina (Graumann *et al.*, 2005).

表1 カトリーナと伊勢湾台風

Table 1 Hurricane Katrina and typhoon Isewan.

	カトリーナ	伊勢湾台風
上陸日	2005年8月25日	1959年9月26日
最低気圧	902hPa	894hPa
上陸時気圧	920hPa	929hPa
最大風速	77m/s	75m/s
上陸時風速	62m/s	45m/s
暴風域半径	180km	350km

注: 風速はアメリカでは1分平均値(10分平均値の約1.3倍)、日本は10分平均値。国土交通省「ゼロメートル地帯の高潮対策検討会」掲載資料を編集 (<http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai/takashio/>)

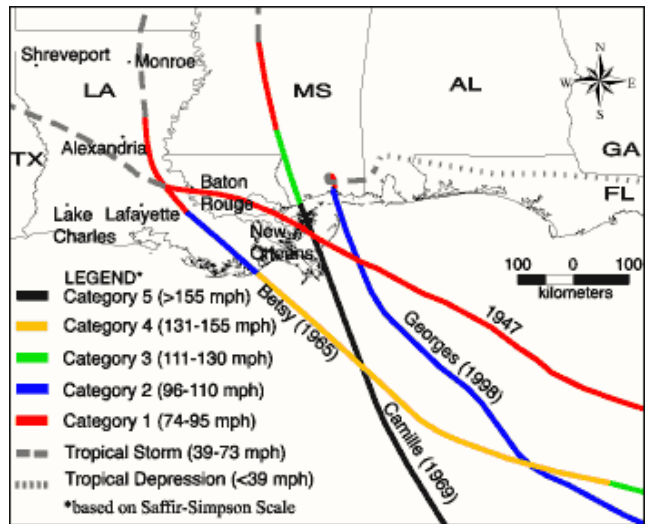


図2 ニューオリンズ付近を通った過去の主なハリケーン  
Fig. 2 Major hurricanes of the past in the vicinity of New Orleans (1947, Betsy, Camille, and Georges).

(<http://pubs.usgs.gov/of/2002/of02-206/phy-environment/recent-hurricanes.html>)

### 3. ニューオリンズ周辺の水害土地環境

水災害に対する脆弱性は、災害発生場の水文・土地環境に大きく影響をうける。本章では、ニューオリンズ周辺の水文・土地環境と、そこにおける水災害リスクについて述べる。

#### 3.1 土地条件

ハリケーン・カトリーナの被災地は、関東平野の3倍以上の面積をもつ広大なミシシッピ川デルタ(注記参照)上に展開する。ミシシッピ川の流域面積は約322万km<sup>2</sup>で、アメリカ合衆国国土の41%に相当する。支川には、オハイオ川、上ミシシッピ川、ミズーリ川、アーカンサス川、レッド川などがある。下流部では、図3に示すように、下流ではオールド川(ミシシッピの旧川)およびモルガンザの2つの放水路を経てアチャファラヤ放水路へ分派するものと、ニューオリンズでポンチャトレイン湖に洪水を分派するボネケリー放水路がある(玉光ら, 1991)。ミシシッピ川のデルタは、河道変遷を繰り返したミシシッピ川が氾濫し、運んできた土砂を堆積し形成した土地で、川沿いには自然堤防(微高地)が発達している。その背後は広大なSwamp(樹木がある湿地)やMarsh(草だけの湿地)と呼ばれる湿地帯や、埋め残された水面が広がっている低湿な地域である(図4, 写真1, 2)。

ニューオリンズの街は、18世紀初頭にミシシッピ川の自然堤防上に建設された。ここは現在ダウンタウンの中心になっている。20世紀に入ってポンプ排水技術の進歩により、ミシシッピ川とポンチャトレイン湖畔の低い砂州との間の凹状低地に市街域が拡大した。自然堤防は細長くて幅は広くないため、市街地の拡大が側方の低地内に向かうのは自然の成り行きだった。このかつての沼沢地は有機質土や泥炭で構成されているため、排水が進むと地層圧密が生じて地盤が沈下する。その結果、現在市街地の70%が海面下にある(図5, 図6)。

#### 3.2 水災害リスク

ニューオリンズのこのような土地環境下において、最も明らかな災害リスクは低湿な凹状低地における浸水災害である。それらは内水氾濫、高潮およびミシシッピの河川氾濫によって起こされる。常時、ポンプ排水が必要な海面下の凹状低地内の市街地では、排水能力を超える強度の降雨があるたびに内水氾濫が生じている。ミシシッピ川沿いの堤防は、年発生確率1/500相当の洪水流量に対する計画高水位5.4mに余裕高1.5mを加えた高さ約7mの連続堤防が建造されている。また、大出水があれば中流域で氾濫することや、上述したようにアチャファラヤおよびボネケリー放水路が作られていることから、ニューオリンズ付近における計画高水流量は中流域の半分程度になっている。ニューオリンズ付近では、ミシシッピ川氾濫による洪水の危険はさほど大きくないと考えられるが、堤内地の地盤高が低いために高水位が長時間続くと、堤防基盤を通じての浸透水湧出の進行により、堤防の決壊が生じる可能性がある。

次に高潮による浸水災害であるが、アメリカ南部はハリケーンの常襲地帯で、ハリケーンによる強風や高潮災害が繰り返し発生している。1900年にテキサス州ガルベ

ストーン(メキシコ湾岸の砂州上の街)を4.5mの高さを越える高潮が襲い、約1万人の死者を出した。ニューオリンズでは、1965年のハリケーンBetsyが引き起こした3mの高さの高潮が、Florida Avenue leveeを破堤させ、Lower ninth wardを水没させた。そして避難できなかった75人の死者の多くが屋根裏部屋で発見された。また、160,000軒の家が浸水被害を受けた。その4年後の1969年にはハリケーンCamilleがミシシッピ河口を襲った。そして、7.5mの高潮と89m/sの強風は、335人の死者と家屋破壊22,008軒を出した。

ニューオリンズ周辺の高潮の発生場についてみると、ポンチャトレイン湖は外海からほぼ完全に閉ざされており、ハリケーンの進行してくる方向とはほぼ逆方向の北側に位置しているため、強風による湖水の吹き寄せ量は大きくはならない。吹き寄せによる水位上昇量は平均風速の2乗に比例するが、ハリケーン・カトリーナによる高潮が3.5m程度であったことなどから、その比例係数は0.15程度と推算される。これは日本の高潮危険海湾である伊勢湾、大阪湾などと同程度の大きさである。なお、ポンチャトレイン湖岸堤防は、年発生確率1/200とされるカテゴリ3のハリケーン(中心気圧945-964hPa, 風速49-58m/s)による高潮位3.45mに余裕高1.8mを加えた約5mの高さである(玉光ら, 1991)。

これに対し市の東方のボーン湖はメキシコ湾に開いているので、水深が小さいことと相まって、吹き寄せによる海面上昇は大きくなる。その比例係数はハリケーン・カトリーナによる高潮が6~8mであったことから、0.25~0.3になると計算され、ポンチャトレイン湖よりも2倍程度大きな高潮が発生する。海岸は東方20kmにあるので市街がこの高潮の直撃を受けることはないが、本報告書の第4章で述べるMRGO(Mississippi River Gulf Outlet)等の人工運河を伝わって市街域にまで高潮が遡上してくる。この高潮が市街地に氾濫する場合、海岸に直接面する場合とは違って広域にわたり一気に流入してくることはない。その浸水域限界は一般に標高0mの等高線近くになるので、非浸水域もほぼ明確に線引きができる。

高潮は世界的にみて最大の人的被害をもたらす風水害である。前述の1900年ハリケーン・ガルベストーンにおける高潮は約1万人の死者を出した。バングラデシュでは1970年に死者およそ50万人のサイクロン高潮災害が発生している。日本においても最大の風水害は1959年の伊勢湾台風による高潮で、総死者数は5,100人であった。高潮はこのように大きな被害をもたらすが、その危険域は海岸に面する低地であることは明らかであり、その潮位は台風の勢力から予測することができるので、土地環境の認識と避難対応により人的被害を軽減することが可能な災害ともいえる。



写真 1 ミシシッピデルタの湿地帯

Photo 1 Wetland of the Mississippi River Delta.

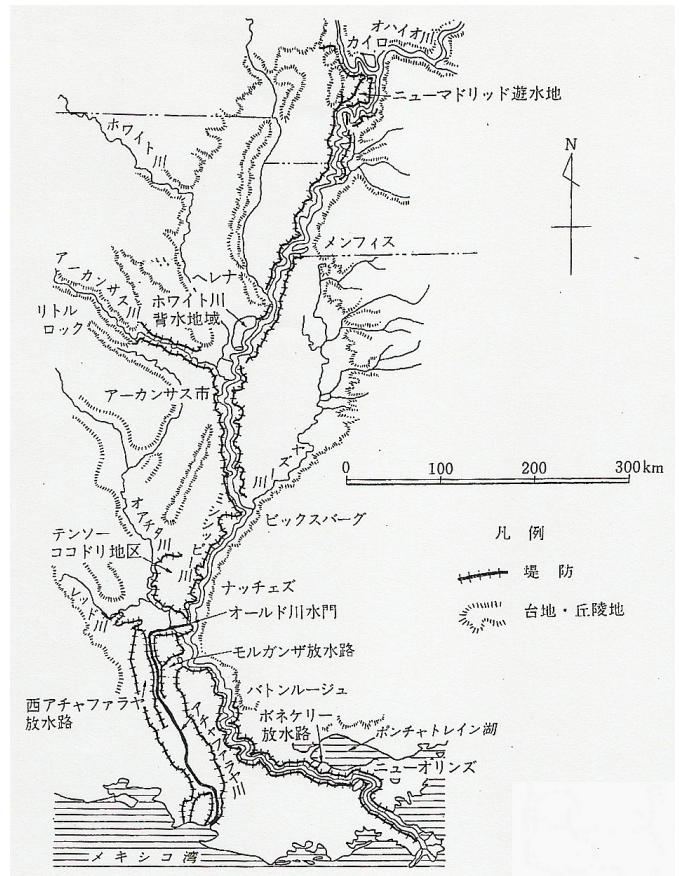


図 3 下ミシシッピ川の治水 (玉光ら, 1991)

Fig. 3 Flood control in the Lower Mississippi River (Tamamitsu *et al.*, 1991).



写真 2 ミシシッピデルタの湿地帯

Photo 2 Wetland of the Mississippi River Delta.

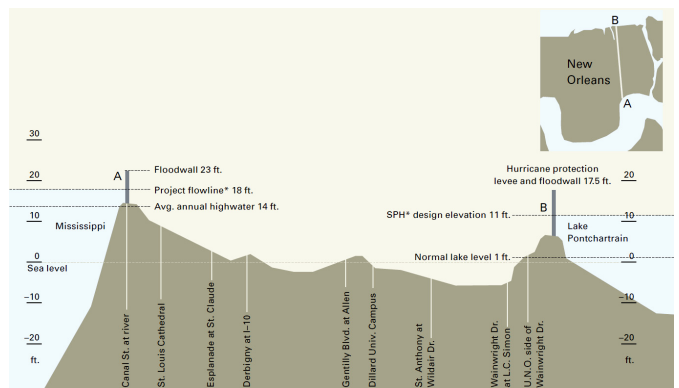


図 6 ニューオリンズの地形横断面図 (Munich Re Group, 2006)

Fig. 6 Topographic Cross section of the New Orleans (Munich Re Group, 2006).



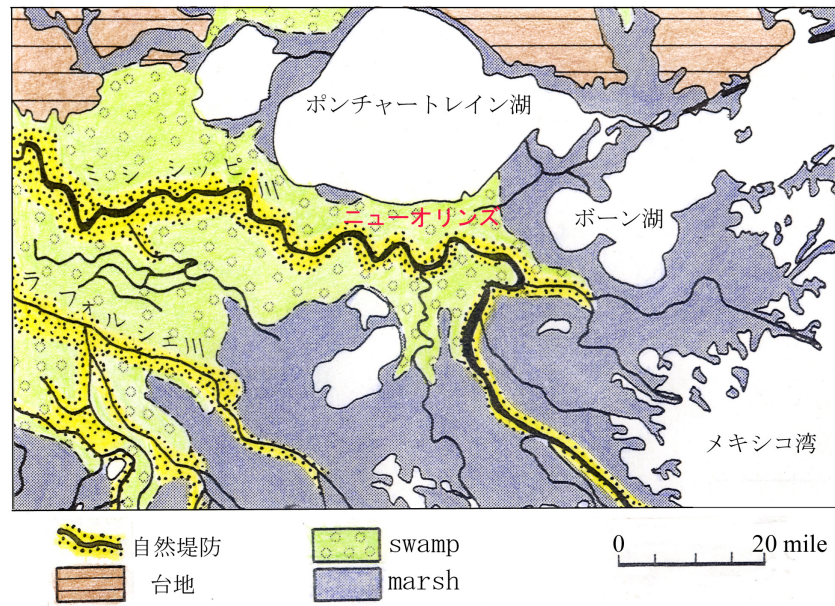


図 4 ミシシッピ三角州の地形分類 (水谷武司作成)

Fig. 4 Land form classification map in New Orleans district.

典型的な bird foot delta (鳥跡状デルタ) であり、河道沿いに比高 10 feet (約 3.0m) を超える自然堤防が延々と連ね、その間には広大な低湿地が広がっている。ボンチャートレイン湖は bird foot の分枝が浅海を閉ざして作った非常に浅い潟湖である。規模の大きい自然堤防が発達していることが一般的な三角州と異なる特徴で、この自然堤防上に都市・集落が線状に分布する。

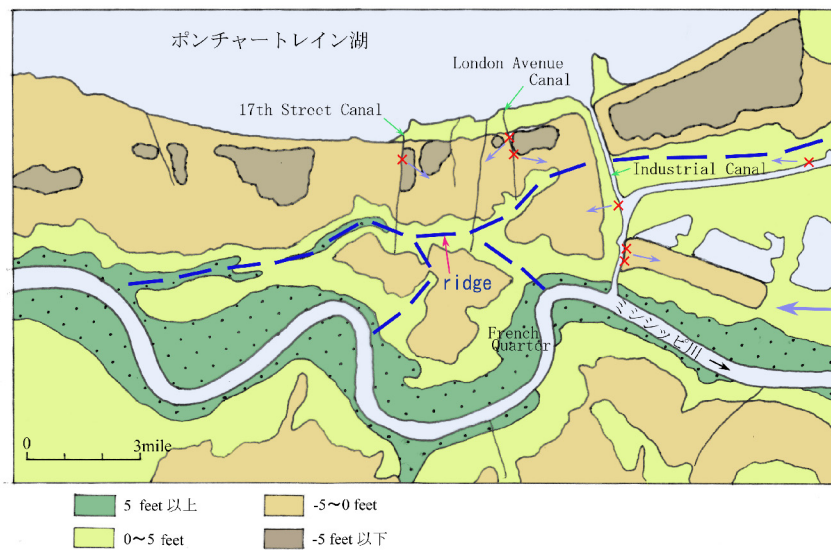


図 5 ニューオーリンズ地域の地盤高分布と今回の高潮氾濫 (水谷武司作成)

Fig. 5 Geomorphology map of the New Orleans city and storm surge.

ハリケーン・カトリーナ災害時に発生した破堤 (×印) の多くは堤内地盤高がより低いところで生じており、堤体基盤を通じた漏水が破堤の一要因になっていることを暗示している。Inner Harbor Navigation Canal 西岸の破堤箇所は明らかな水衝部である。図中央部 (中心市街域) では、浸水域の限界は 5 feet (約 1.5m) 等高線にほぼ一致した。17th Street Canal の西方では、湖岸に接する地域が湖水の越流により水深 2 feet 程度に浸水した。右上方の海面下の土地 (東ニューオーリンズ) は、1965 年のハリケーン Betsy 襲来時にはまだ開発利用されていなかった。大きい矢印はボーン湖からの高潮の流入を示す。青破線は ridge とよばれる線状微高地である。

#### 4. 開発と災害脆弱性の増大

訪問した地元大学の研究者は、ニューオリンズにおける災害脆弱性が次第に高まっていることを指摘した。このデルタ地域では地盤沈下、海面上昇の進行に伴う高潮の緩衝地帯(湿地帯 4.5km で高潮を約 30cm 減衰させる)となっている Swamp や Marsh の消失が進行し、ニューオリンズ市街まで到達する高潮がより大規模化する可能性が高くなることや、現在の海面下 1.5~3m であるニューオリンズと周辺地域の標高が、さらに低くなると予想されていることである。2100 年までに -2.5~-4m になるとの予測もある (Campanula et al, 2004; Burkett et al., 2005)。

Campanella et al. (2004) は、地盤沈下速度について都市域においては 1 年に 1cm 以下、郊外のデルタでは 100 年で 30cm 程度の速度で進んでいるとしている。その要因として、湿地の開発に伴う排水 (1,900 台の排水ポンプが設置されている) による有機土壌の圧密や、治水整備にともなう洪水氾濫の減少によってミシシッピ川が運ぶ土砂の堆積がなくなったことなどの影響が考えられている。なお、ミシシッピ川上流部でのダム建設等により下流部デルタへの土砂供給量は 20 世紀中頃の 3 分の 1 に減少したとされている。また、地盤沈下の進行は家屋や構造物に被害を与えるとともに、水災害に対する脆弱性を増大させている。

ルイジアナ南部の湿地帯についてみると、1930 年代から 1990 年代にかけて 4,860km<sup>2</sup> が失われ、現在でも次に示す様々な要因により 65-90 km<sup>2</sup>/year の速度で消失し、水面に戻っている。そして、この傾向が続けば、高潮の緩衝地帯が年々減少し、同じ規模の高潮がメキシコ湾で発生してもより大きな高潮に襲われることになる (Campanula et al, 2004)。

この湿地帯の消失に最も影響を与えている要因が、本報告書の第 4 編で言及しているように、ニューオリンズ東部の Inner Harbor Navigation Canal とメキシコ湾を結ぶ人口運河 MRGO (ミシシッピ川の流路と比較して約 64km の短縮) の開発と考えられている。この MRGO は当初水面幅約 183m で建設されたが、侵食作用により過去 40 年間で一部区間は幅 610m まで拡大した。ルイジアナ沿岸の湿地喪失のピークは 1956 年から 1978 年にかけてであり、MRGO 建設の時期と重なっている。これは MRGO の影響の大きさを示唆するもので、自然保護団体や地元自治体は MRGO の閉鎖を訴えている。なお、ハリケーン・カトリーナ通過後 MRGO には土砂が約 4m 堆積したが、激しい批判を受けていた陸軍工兵隊は浚渫をしない決定をした。また、この MRGO は塩水や高潮が都市部まで遡上するのを助長している。

ルイジアナ南部の湿地消失量の約 10% は、メキシコ湾沿海部における石油やガス探査や採掘用の人口運河ネットワークの開削に起因すると推定されている。これらの運河は、波浪による海岸侵食と塩水遡上の要因となっている。さらに、石油採掘は地表下の堆積物を動かすため、引きずられた表土層が崩れ、地盤沈下を増長させている。また、舟運が盛んなニューオリンズでは、かつて毛皮を

とるために移入され増殖した Rodent nutria が Marsh の草を食べたことも、表層の薄い土壌が波浪にさらされる要因の一つと考えられている。さらに、波浪の影響や海面上昇が海岸侵食を促進している (Campanula et al, 2004)。この海面上昇について、Burkett et al. (2005) は、過去 100 年間に年間 1~2mm の速度で上昇したと報告している。

#### 5. 地球温暖化とハリケーン

この地域の水災害に対する脆弱性が開発によって高まっていると述べたが、地球温暖化に伴う気候変動が、ハリケーン等の発生や海面上昇にどのような影響を与えるのであろうか？

地球温暖化のような気候変動と異常気象の関係は人々の重大な関心事であるけれども、自然はその変動の振幅が大きいため、多大な被害をもたらした 2005 年のハリケーン・カトリーナの発生・発達に地球温暖化が影響しているかどうかはわからない。しかし、これまで行われた多くの研究が、今後の異常気象の強まりを示唆している。

例えば、過去 30 年間で熱帯低気圧の寿命が延び、より強まったという報告 (Emanuel, 2005) や、図 7 に示される近年のカテゴリー 4, 5 の熱帯低気圧の変化傾向から、現在の熱帯低気圧は 35 年前よりも強まっていると結論づけている研究 (Webster et al., 2005) もある。しかしながら、大きな自然変動の中で、現時点では比較的小さいと思われる地球温暖化によるシグナルを検出するのは容易ではなく、これらの研究は決定的なものではない。例えば、後者の研究 (Webster et al., 2005) では、最大風速は 1970 年代から一定のままであると結論づけているが、熱帯低気圧が強まるということと整合的ではない。

上記で述べたようにいくつかの研究では、温暖化の結果ハリケーンが強まることが予測されているが、用いた数値モデルによって結果が異なったり、現在の熱帯低気圧の傾向を十分に再現できていなかったりする。

また、ハリケーンそのものが CO<sub>2</sub> を海洋から大気に運ぶ働きがあることが報告されている (Bates et al., 1998)。海洋が温まり、海水表層の CO<sub>2</sub> 濃度が大気中より大きくなったとき、海洋から大気への CO<sub>2</sub> の流れは小さくなるけれども、強まった熱帯低気圧による強風によって泡が生じ、CO<sub>2</sub> が大気中に放出されることが考えられる。海洋は二酸化炭素を全球的には吸収する働きがあると考えられているが、熱帯低気圧は大気・海洋間の二酸化炭素の交換に、地域的にも全球的にも定量的に大きな役割を果たす可能性がある。

これら多くの議論は、未だ観測データが不十分であることに起因している。衛星による地球観測は始まってまだ 30 年程度であり、気候システムの中でハリケーンが果たす役割の理解はまだ不十分である。熱帯低気圧の変動傾向がどの程度の地球温暖化の影響を受けたものなのか、あるいは関係はないのか、さらなる定性的・定量的な理解が必要である。



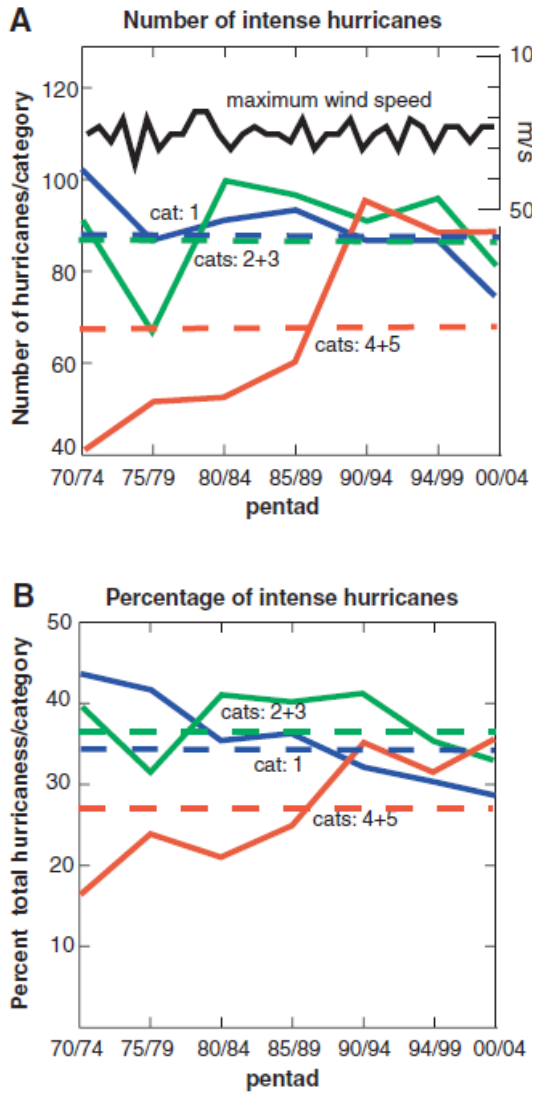


図 7 強さの異なる熱帯低気圧の頻度の変化 (A) と割合の変化 (B) (Webster *et al.*, 2005)

Fig. 7 The total number of hurricanes in each category class according to the Saffir-Simpson scale (categories 1 to 5) (A). (B) Same as (A), except for the percent of the total number of hurricanes in each category class (Webster *et al.*, 2005).

## 6. まとめと被害軽減への課題

### 6.1 ハリケーンの規模

過去にも、ハリケーンはニューオリンズ周辺に影響を与えており、ニューオリンズ付近を通過するリスクについてはよく知られていることであった。2005年8月25日にフロリダ半島に上陸・横断し、メキシコ湾に抜け、さらに勢力を増して29日にニューオリンズ付近に再上陸したハリケーン・カトリーナの最低気圧や風速は、1959年9月に約5,100人もの死者・行方不明者を出した伊勢湾台風と匹敵する強さであった。暴風域の半径については、伊勢湾台風の方が大きい。高潮の潮位はニューオリンズ東側のピロクシなどの海岸地域で6~9m以上であ

った。

### 6.2 水災害に対する水文・土地条件、脆弱性の増加

ミシシッピ川流域上流からの土砂流入・堆積によって形成されるデルタ平野に発達したニューオリンズ市は、その70%が海面下にあり、水災害に対して非常に脆弱な土地条件を持つ地域である。加えて、ハリケーンによる高潮災害のリスクもあわせ持っている。

ニューオリンズ市とその周辺地域においては、洪水防御のための治水構造物の整備や運河の浚渫による堆積物の損失・圧縮、沿岸部の埋め立て、排水などによって、地域の湿地の後退・消失、地盤沈下が進行している。結果的に人間活動によって自然現象に対する土地・社会の脆弱性が増しており、気候変動による大規模な暴風雨の変化や海面上昇はさらに災害リスクを高めることが懸念される。

### 6.3 被害軽減への課題

地球環境問題は因果関係が明確になっていないものも多く、地球温暖化と異常気象の関係もその一つである。しかし近年は、何らかの対策をとらないと甚大な被害が生じる可能性があるという危機感から、科学的証明が完全でなくても、因果関係を想定し、対策をとる「予防原則」が政策で標準的に採用されるようになってきているようである(長谷川, 2006)。しかしながら、対策は可能であるかもしれないが、さまざまな工学技術による解決策は資金次第であるし、当然限界もあり、災害を完全に予防するのは非常に困難である。

現地調査の際の住民の方も話をしていたが、被災してしまった後、一番の困難は将来の見通しが全く付かないことだと言う。政府各機関が責任を擦り付け合い、連携がスムーズでなく対応が後手に回り、住民らは今後どうする、という決断が出来ずにいるということである。堤防の復旧・補強工事が進められているが、整備途上で再び被災する可能性もある。被災する可能性をゼロにするのはほとんど不可能に近いということを前提として、被災後の危機管理・意志決定はいかにあるべきか、検討課題は多い。

現在、日本の3大都市圏のゼロメートル地帯に人口、産業が集積しており、約400万人が居住している。地震のリスクが高い日本においては、地震で海岸堤防などの施設が被災した後の台風による高潮襲来や、大雨による洪水などの複合災害が起こるような事態(最悪シナリオ)は考えておくべきである。

明日すぐに大地震が生起するとか、地球温暖化による気候変動が起こるわけではなく、準備する時間は十分あるわけである。今回の災害を教訓に現時点において得ることが出来る科学的情報・知見に基づき、気候変動による異常現象の変化にも、地震に対しても防災力を高めるような社会システムを検討し、構築していくことが必要である。それは将来への備えとなるだけでなく、気候システムの大きな自然変動による突発的な極端現象にも耐性を高める副次的効果をもたらすことになる。

謝辞

現地調査にあたっては、US Army Corps of Engineers にご協力頂き、Miki Rohbok 氏に現地ガイドをして頂きました。行政関係機関、大学の研究者の方々から様々な資料・情報の提供を受けました。今回の調査にあたっては、防災科学技術研究所特定プロジェクトセンター「気候変動に関わる気象・水災害に関する研究」と防災研究フォーラムから、資金の支援を頂きました。ここに感謝の意を記します。

参考文献

- 1) Whitehouse (2006) : The Federal Response to Hurricane Katrina Lessons Learned, 217.
- 2) Ruffner, J. A. and Bair, F. E., eds. (1977): The Weather Almanac Second Edition, Gale Research Co., Copyright 1997.
- 3) Graumann, A., Houston, T., Lawrimore, J., Levinson, D., Lott, N., McCown, S., Stephens, S., and Wuertz, D. (2005): Hurricane Katrina, A Climatological Perspective, Preliminary Report. NOAA's National Climatic Data Center, 28pp.
- 4) 国土交通省「ゼロメートル地帯の高潮対策検討会」(2005a): 資料2 ニューオーリンズ市を中心としたハリケーン"カトリーナ"による災害の概要.  
<http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai/takashio/>
- 5) 国土交通省「ゼロメートル地帯の高潮対策検討会」(2005b): 資料3 わが国の台風と米国のハリケーンとの比較.  
<http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai/takashio/>
- 6) 玉光弘明・中島秀雄・定道成美・藤井友竝 (1991): 堤防の設計と施工－海外の事例を中心として－. 新体系土木工学, 74, 土木学会.
- 7) Munich Re Group (2006): Hurricanes – More Intense, more frequent, more expensive, Insurance in a time of changing risks, 42pp., Germany.
- 8) Campanella, R., Etheridge, D., and Meffert D. J. (2004): Sustainability, Survivability, and the Paradox of New Orleans. Ann. N.Y. Acad. Sci., **1023**, 289-299, doi:10.1196/annals.1319.014.
- 9) Burkett, V. R. et al. (2005): Sea-Level rise and Subsidence: Implications for flooding in New Orleans, Louisiana, USGS online report. <<http://www.nwrc.usgs.gov/>>
- 10) Emanuel, K. (2005): Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature, **436**, 686-688, doi:10.1038/nature03906.
- 11) Webster, P. J., Holland, G. J., Curry, J. A., and Chang, H.-R. (2005): Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. Science, **309**, 1844-1846, doi:10.1126/science.1116448.
- 12) Bates, R. N., Knap, H. A., and Michaels, F. A. (1998): Contribution of hurricanes to local and global estimates of air-sea exchange of CO2. Nature, 395, 58-61,

doi:10.1038/25703.

- 13) 長谷川真理子(2006): 予防原則. Science & Technology Journal, 2, 32.

以下の文献は本文中では引用しておりませんが、執筆にあたり参考資料として用いました。

- 14) 防災科研：防災科学技術研究所ハリケーン・カトリーナ災害調査チーム (2005): ハリケーン・カトリーナ災害調査速報 <<http://www.bosai.go.jp/library/katrina>>
- 15) Zanetti, A., and Schwarz, S. (2006): Natural catastrophes and man-made disasters 2005: high earthquake casualties, new dimension in windstorm losses. in sigma, edited by R. Enz, 40pp., Swiss Reinsurance Company Economic Research & Consulting, Switzerland.
- 16) 朝日新聞記事 (2006): 住宅の復興, 責任はだれが. 朝日新聞社.
- 17) 林春男 (2005): ハリケーン・カトリーナがもたらした新しい広域災害(速報). 土木学会誌, **90**(11), 34-38.
- 18) 山下隆男 (2005): 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). 土木学会誌, **90**(11), 39-43.
- 19) Templet, P. H., and Meyer-Arendt, K. J. (1988): Louisiana wetland loss: a regional water management approach to the problem. Envir. Manag., **12**(2), 181-192.
- 20) Burkett, V. R., Zilkoski, D. B., and Hart, D. A. (2003) : Sea-level rise and subsidence: implications for flooding in New Orleans, Louisiana, edited by Prince, K. R. and Galloway D. L., 11-27-2001, 63-70.
- 21) Day, J. W. Jr., and Templet, P. H. (1989): Consequences of sea level rise: Implications from the Mississippi delta. Coastal Manag., **17**, 241-257.
- 22) Bourne, J. K. Jr. (2004): The big uneasy. The Louisiana bayou, hardest working marsh in America, is in big trouble - with dire consequences for residents, the nearby city of New Orleans, and seafood lovers everywhere. National Geographic, **206**(4), 88-105.
- 23) Campanella, R.(2002): Time and Place in New Orleans, Pelican Publishing Company.
- 24) IPCC (2001) : Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C. A., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 25) Pielke, R. A. Jr., Landsea, C., Mayfield, M., Laver, J., and Pasch, R. (2005): Hurricanes and global warming. Bull. Amer. Meteor. Soc., **86**(11), 1571-1575.
- 26) Sarewitz, D., Pielke, R. A. Jr., and Keykhah, M. (2003): Vulnerability and Risk: Some thoughts from a political and policy perspective. Risk Anal., **23**(4), 805-810.

(原稿受理：2006年3月10日)



注記：ミシシッピ下流のデルタは、海の作用が相対的に小さく河川作用が支配的な場合に形成される bird foot delta の典型である。多量の土砂を搬出する流量の大きい河川が、遠浅で沿岸流の強くない海岸域に流入すると、側面に砂質物質を積み上げながら、大流量を流す深い河道を沖に向かって前進させていく。沿岸流による変形をほとんど受けないので、河道はほぼまっすぐに伸びる。大洪水が生じて側面の高まり（自然堤防）が突破されると、新たな分枝がそこから伸長していく。このようにして bird foot 状の平面形が出現するが、現在のミシシッピ本流の先端部にはこれが

典型的に発達している。

Bird foot delta の形成が多方向に進行して複合すると、デルタ内部の地形は網状の分流路に沿って連続する規模の大きい自然堤防と、これによって囲まれる広大な低湿地 (swamp, marsh) とで構成されることになる。自然堤防をつくる砂質堆積層の幅は 10km 近くもあるが、地表上に高まりをつくる部分は幅 1km ぐらいまでである。ニューオリンズ付近では自然堤防は 3~4m の比高をもつ。ニューオリンズの北に接するポンチャトレイン湖は、北東に伸長した bird foot 分枝が浅い内湾を閉ざして作ったものである。

## 要 旨

本報告は、ハリケーン・カトリーナ災害の現地調査報告である。専門家や住民へのインタビュー、収集した資料などをもとに、ハリケーン・カトリーナ災害におけるハザードに焦点を当て、気候・水文環境の観点からハリケーンとニューオリンズ大都市圏における水災害に対する脆弱性とその変化について報告する。ミシシッピ川下流部のデルタに位置するニューオリンズ市の 70% は海面下という、水災害に対して脆弱な土地条件を持つ地域である。加えて、ハリケーンによる高潮災害のリスクもあわせ持つ。近年、洪水防御のための治水構造物の整備や運河の浚渫、排水などによって、湿地が後退・消失し、地盤沈下が進行するなど、開発にともなって、水災害に対する人間活動土地の脆弱性が増している。さらに気候変動による暴風雨の変化や海面上昇が災害リスクを高めることが懸念される。

キーワード：ハリケーン・カトリーナ、気候変動、土地環境の脆弱性、開発