

ハリケーン・カトリーナについて*

気象研究所台風研究部**・榊 原 均***・中 澤 哲 夫***
高 野 洋 雄***

2005年8月末に米国メキシコ湾岸を襲ったハリケーン Katrina (以後「カトリーナ」) はルイジアナ州, ミシシッピ州を中心に未曾有の被害をもたらし, その様子は全世界に詳しく報道されたが, わが国ではカトリーナ自体についてはよく伝えられていない. ここで主には米国のウェブサイトを中心に集めた資料をもとに, カトリーナおよびハリケーン全般について解説する. なお, 詳細については注に URL を記載してあるのでそれを参照してほしい. また, 図についてもカラーの原図を白黒で印刷してあるので見にくくなっているが, 詳細は URL で示す原図を見てほしい.

(気象研究所台風研究部)

1. ハリケーンとは

1.1 ハリケーンの定義およびハリケーンのカテゴリ^{注1}

ハリケーンは台風と同じ熱帯低気圧 (tropical cyclone) である. 熱帯低気圧のうち北大西洋および北東太平洋で最大風速が 33 ms^{-1} 以上のものをハリケーン (hurricane) と呼び, 17 ms^{-1} 以上 33 ms^{-1} 未満は熱帯暴風 (tropical storm) と呼ぶ. 以下では北大西洋のものに限定して記述する. ハリケーンではさらにその強さを5つの段階に分けている (第1表). ハリケーンの定義およびカテゴリ分けでは最大風速を1分間平均風速で表している.

(参考: 北西太平洋で最大風速が 17 ms^{-1} 以上に達し

* Information on Hurricane Katrina.

** Typhoon Research Department/Meteorological Research Institute.

*** Hitoshi SAKAKIBARA, Tetsuo NAKAZAWA, Nadao KOHNO, 気象研究所台風研究部.

© 2006年 日本気象学会

た熱帯低気圧を台風と呼ぶ. (台風では最大風速を10分間平均風速であらわしている). 台風の強さの定義を第2表に示した. ハリケーンと台風の強さの比較の際には最大風速の定義に違いがあるので注意が必要である. Atkinson (1974) によると10分間平均最大風速は1分間平均最大風速の88%である. これを考慮するとカテゴリ3のハリケーンは「非常に強い」台風にはほぼ相当する. また, カテゴリ4, 5のハリケーンは「猛烈な」台風にはほぼ相当する.)

1.2 ハリケーンの発生^{注2,3}

熱帯低気圧の発生には以下の6つの条件が環境とし

第1表 ハリケーンの強さの階級分け.
(<http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/D1.html>).

Saffir-Simpson スケール			
カテゴリ	最大風速 (1分間平均風速)	中心気圧	高潮
	ms^{-1}	hPa	m
1	33-42	>980	1.0-1.7
2	43-49	979-965	1.8-2.6
3	50-58	964-945	2.7-3.8
4	59-69	944-920	3.9-5.6
5	70+	<920	5.7+

第2表 台風の強さの階級分け.

階級	最大風速 (10分間平均風速)
台風	17 ms^{-1} 以上 ~ 33 ms^{-1} 未満
強い台風	33 ms^{-1} 以上 ~ 44 ms^{-1} 未満
非常に強い台風	44 ms^{-1} 以上 ~ 54 ms^{-1} 未満
猛烈な台風	54 ms^{-1} 以上

^{注1} <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/D1.html>

て必要と言われている (Gray, 1968).

- ① 温かい海水 (50 m以上の深さまで水温が 26.5°C 以上)
- ② 大気成層が潜在不安定
- ③ 対流圏中層が湿潤
- ④ 赤道から500 km以上離れている
- ⑤ 十分な地上渦度と収束を伴う下層の擾乱
- ⑥ 対流圏上層と下層の間の風の鉛直シアが 10 ms^{-1} 以下

これらは必要な条件であって、これらが満たされれば熱帯低気圧が発生するというものではない。Zehr (1992)は熱帯低気圧が2段階で発生すると主張している。

- ① (上記の条件下で発生した) メソ対流系 (MCC) の進行方向後方にメソスケールの渦ができる
- ② このメソスケール渦のところで次に非常に強い対流が発生すると渦の中心気圧は低くなり、回転する風は強くなり始める

北大西洋では多くの場合、西アフリカに起源をもつ下部対流圏の偏東風波動 (アフリカ波動) が熱帯低気圧の発生種になることが知られている。アフリカ波動は西アフリカにおける南北温度傾度 (北のサハラ砂漠で高温、南のギニア湾沿いの低温) の結果として生ずるアフリカ東風ジェット風のシアに関連した不安定 (順圧不安定) により生ずるものであり、対流が活発な気圧の谷が波列となっている。この波動は貿易風内を西に進み、大西洋を横断する。

北大西洋の熱帯暴風 (最大風速 $17\sim 33\text{ ms}^{-1}$) およびカテゴリー2以下のハリケーン (最大風速 $33\sim 49\text{ ms}^{-1}$) のうち、この波動から生じるものは60%にすぎないが、カテゴリー3以上のハリケーン (最大風速が 50 ms^{-1} 以上) では85%近くがこの偏東風波動から生じている (Landsea, 1993)。(榎原 均)

2. NOAAによる2005年のハリケーンシーズンの予測

2.1 ハリケーン活動の季節予報^{註4}

米国海洋大気庁(NOAA)は、1998年8月にハリケーン活動の季節予報を開始し、翌1999年5月からは、8月のみならず5月にもその年のハリケーン活動の季節

^{註2} <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A15.html>

^{註3} <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A4.html>

^{註4} <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outlooks/hurricane-archive.html>

予報を行ってきている。この季節予報の作成は、気候予測センター (Climate Prediction Center: CPC)、米国ハリケーンセンター (National Hurricane Center: NHC) そしてハリケーン研究部 (Hurricane Research Division: HRD) により共同で行われている。NOAAの予報は、決定論的な数値予報ではなく、ハリケーンの頻度、強度、生存期間の3つから計算されるACE (Accumulated Cyclone Energy, ハリケーン累積エネルギー指数)の大きさを、ENSO、数十年周期変動、大西洋の海面水温などから確率的に予測するもので、活動が活発か、平年並みか不活発かを推定する。この値から、総熱帯暴風の発生数、発生ハリケーン数、上陸ハリケーン数などを同時に予測する。

2.2 ハリケーンの気候学^{註5}

NOAAによれば、北大西洋のハリケーンシーズンは、6月1日から11月30日までで、その期間内に、平年は、最大風速 17 ms^{-1} 以上の熱帯暴風は10個発生し、そのうち6個がハリケーンになり、さらにそのうちの2個が強いハリケーン (カテゴリー3以上) になる。また、これら10個のうち、米国には2個、カリブ海諸島には1個がそれぞれ上陸している。ACEは、診断的には、6時間間隔の最大風速 (ms^{-1}) の二乗をすべての最大風速 17 ms^{-1} 以上の熱帯低気圧について、ハリケーンシーズン中に累積したものと定義される。平年値は、およそ $23.8 \times 10^4 (\text{ms}^{-1})^2$ である。この値が $27.3 \times 10^4 (\text{ms}^{-1})^2$ 以上であればより活発な年、 $17.5 \times 10^4 (\text{ms}^{-1})^2$ 以下であれば不活発な年とされている。ACEの値がわかれば、ハリケーンの発生個数の予測だけでなく、上陸個数もある程度推定できることがわかっていく。

2.3 NOAAのハリケーン季節予測^{註6}

NOAAが2005年5月に行ったハリケーンシーズンの予測は、ACEがメディアン値の120%から190%になるため、活発になる確率70%、平年並みになる確率20%、不活発の確率10%、熱帯暴風の発生数は12から15個、ハリケーンは7から9個、強いハリケーンは3から5個というものであった。この傾向が1995年から

^{註5} http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outlooks/hurricane2005/May/background_information.html#NOAADEF

^{註6} <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outlooks/hurricane2005/May/hurricane.html>
<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outlooks/hurricane2005/August/hurricane.html>

の数十年変動の活発期を反映したものである、とも述べている。

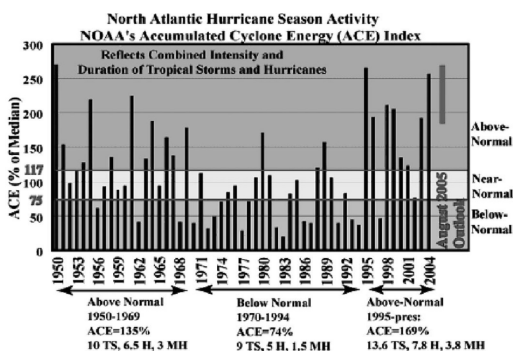
ところが、8月に行った予測では、活発になる確率が、実に95%から100%と、活発になることをほぼ確定させる内容となっていた。発生数は、18から21個、ハリケーンは9から11個、強いハリケーンは、5から7個へと修正された。

第1図に、ACEのこれまでの値と、2005年8月に出された予報値を載せる。この図からは、50年代から60年代が活発な時期であったが、その後、70年代から80年代にかけては平穏期、90年代後半からは再び活発期に入っているという数十年変動を見て取ることができる。2005年の予測値が、これまでで最高の、1950年と、1995年、そして2004年と肩をならべるほどの最高クラスであることがわかる。

2.4 NOAAの予測がなぜ当たるのか

今年の大西洋のハリケーンシーズンはカトリナの後も活発な状態が続き、11月1日現在23個の熱帯暴風が発生し、そのうちハリケーンは13個、カテゴリー3以上は7個、カテゴリー5が3個（カトリナ、Rita（リタ）、Wilma（ウィルマ））と8月の予測を更に上回っている。これまで、カテゴリー5のハリケーンが年間2個発生した年は1950年以降1960、61年の2年間だけである。これを見ただけで今年のハリケーンシーズンの活発さがよくわかる。

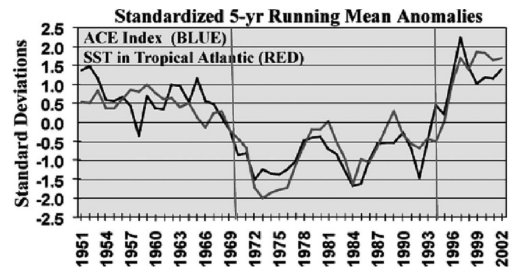
それでは、なぜこのように北大西洋ではハリケーン活動度の予測が当たるのか^{※7}。それは、その活動度が、



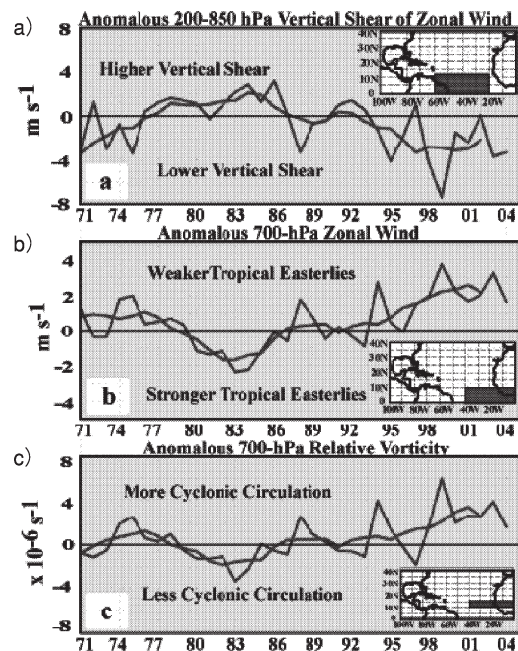
第1図 ACE（ハリケーン累積エネルギー指数）の変動、
(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outlooks/hurricane2005/August/figure2.gif>).

北大西洋の海面水温や風の鉛直シアなどの大気環境場の状況とよい対応関係のあることがわかっているからである。

第2図は、ACEと北大西洋の海面水温との時系列である。この図にも、第1図で見たような、数十年変動が顕著に見られ、両者の対応関係がきわめて良いことを示している。すなわち、熱帯大西洋の海面水温が高



第2図 ACEと北大西洋の海面水温の時系列、
(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outlooks/hurricane2005/August/figure5.gif>).



第3図 赤道大西洋200 hPaと850 hPaの東西風の鉛直シア(a)、熱帯大西洋700 hPaの東風(b)、そして西アフリカ700 hPaの相対渦度(c)の時間変化、
(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outlooks/hurricane2005/August/figure4.gif>).

^{※7} <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/F5.html>

い(低い)年は、ACE も高く(低く)、ハリケーン活動が活発な(不活発な)年となりやすい。

第3図には、大西洋におけるハリケーンの発生に深く関連する、風の鉛直シアなどの年々変動を示す。一番上に、大西洋の ITCZ 付近での850 hPa と200 hPa の東西風速差、真ん中に、700 hPa の東西風、一番下に、アフリカ波動発生域に対応した西アフリカでの700 hPa の相対湿度の変動を示す。1995年以降、鉛直シアは弱く、モンスーン東風も弱く、そして、過度も強くなっており、ハリケーンの発生にとって、大気側の条件も好都合となっている。(中澤哲夫)

3. カトリーナの発生、発達^{注8,9}

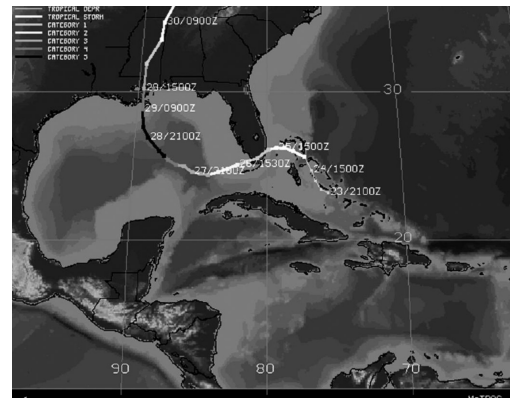
「1.2 ハリケーンの発生」で述べたように、ハリケーンの多くは、西アフリカに起源を持つアフリカ波動から発生している。カトリーナもこのアフリカ波動に伴う組織化された対流活動域が西進し、発達して生まれたものである。8月23日に今年12番目の Tropical Depression (低圧部) がバハマ諸島南東部で発生し、バハマ諸島中央部を進みながら発達して8月24日の朝には熱帯暴風となりカトリーナと名付けられた(第4図)。

カトリーナはゆっくり西に進み、さらに発達して8月25日米国東部時間午後5時(1700EDT)にフロリダ州 Fort Lauderdale の東北東25 km 付近でカテゴリー1のハリケーンになった。2005年の4番目のハリケーンである。同日1830EDT にハリケーン・カトリーナは最大風速 36 ms^{-1} 、最大瞬間風速 40 ms^{-1} で上陸した。カトリーナはその夜、フロリダ半島の南部を南西に向かって横断した。

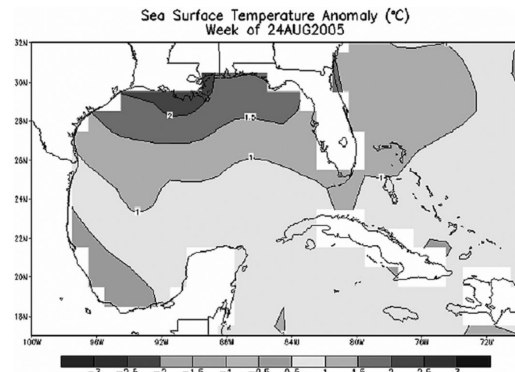
カトリーナはメキシコ湾に入ってから西方に進んだ。その後の数日、テキサス上空を中心とする中層のリッジが弱まりながら西に移動したため、カトリーナはリッジの弱まった北西に、そしてその後北にとゆっくりと向きを変えていった。メキシコ湾上層の高気圧と暖かい海面水温はハリケーンの急速な発達の助けとなった。これによりカトリーナは26日午後にはカテゴリー3に達した。

^{注8} <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/reports/tech-report-200501z.pdf>

^{注9} 以下では時間を EDT (Eastern Daylight Time: UTC-4hours) または CDT (Central Daylight Time: UTC-5hours) で表す。また風速は1分間平均風速である。



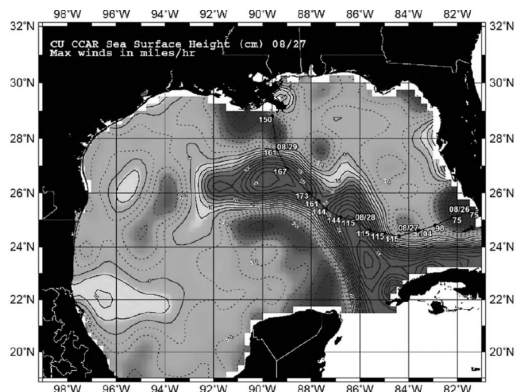
第4図 ハリケーン・カトリーナの経路と強度、(<http://cimss.ssec.wisc.edu/tropic/archive/2005/storms/katrina/katrina.html>).



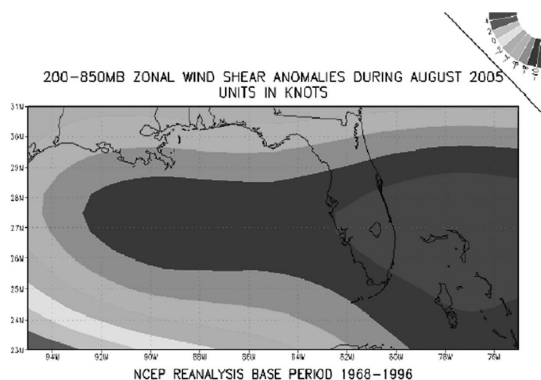
第5図 カトリーナの発達期におけるメキシコ湾の海面水温偏差(注8)。

8月28日米国中部時間午前7時(0700CDT)までにカトリーナは最大風速 72 ms^{-1} 、中心気圧908 hPa でカテゴリー5の状態に達した。3時間後、最大風速は 78 ms^{-1} のピークに達し、その日の午後もその風速を維持した。1600CDT にはカトリーナの中心気圧は902 hPa (その時点で、大西洋のハリケーンでは低い方から4番目の記録^{注10}まで下がった。この時までカトリーナはその強度のピークにあり、ハリケーン強度の風(33 ms^{-1})は中心から170 km まで、 17 ms^{-1} 以上の風は370 km まで広がっている。このハリケーンは1969年のハリケーン

^{注10} その後、ハリケーン・リタが9月22日897 hPa に達し、さらに10月19日ハリケーン・ウィルマが記録上最低の882 hPa まで発達したため、カトリーナの記録は11月1日現在6番目となっている。



第6図 海面高度（色と等値線）とカトリナの経路（黒丸と黒実線）。白抜き数字は最大風速（単位は mph. 1mph は 0.447 ms^{-1} ）、等値線は海面高度で 5 cm 間隔。ループカレントは海面高度の傾度に応じて正偏差域の周りを時計回りに流れている。また、海面高度が高いほど、深いところまで暖かい海水がある、
(http://en.wikipedia.org/wiki/Loop_Current).



第7図 2005年8月の200～850 hPa間の東西風シアの偏差（注8）。

ン Camille（以後「カミール」）の強度と同じくらいであったが、カミールよりかなり大きかった。1600CDTのNHCの発表では「通常の潮位より5.5 mから6.7 m、そして局所的には8.5 mまで高くなる」と高潮が起ることを定量的に警告していた。そして、「New Orleansのいくつかの堤防では水位の方が高くなるだろう」と述べていた。

カトリナをカテゴリー5の強いハリケーンにするのには多くの因子が寄与している。メキシコ湾の海面水温は平年より1～2℃高かった（第5図）。そしてこの

高温は海洋上層のかなりの深さに及んでいた。また、カトリナは第6図に示す「ループカレント」（メキシコ湾流の一部でメキシコ湾にあり、海面高度が高いところの周りを時計回りに回っている。この海面高度が高い部分では暖かい海水の層が周囲よりさらに厚くなっている）を横切る間に急激に発達した。ここでは温かい海水の層が厚いため湧昇による海面水温の低下が少ない。海洋表層の温度はハリケーンの発生と発達が決定的な要素の1つである。なお、近年大西洋の海面水温の上昇傾向が見られるが、メキシコ湾の海面水温には目に見える傾向はない。

また、風の鉛直シアは平年より小さく、それによりカトリナは急速に発達できた。第7図はその領域の2005年8月の200 hPaと850 hPaの東西風シアの偏差で、負の偏差になっている。（榊原 均）

4. カトリナによる強風、大雨と高潮

カトリナは、8月28日に最大風速 78 ms^{-1} という最高レベルのカテゴリー5に発達した後、やや弱まりながら北上して、29日の米国中部時間午前6時10分（0610 CDT）には中南部のルイジアナ州東南部の Plaquemines Parish にカテゴリー4の強さで再上陸し、0800 CDTにはNew Orleansの東40 kmを進み、1000CDTにはルイジアナ州とミシシッピ州境界付近を再度上陸してこの付近に大災害を与えた。この後は、内陸を進んだために急速に弱まっていて、1900CDTには熱帯暴風に、30日には低圧部になった。このため、被害はルイジアナ州やミシシッピ州などのアメリカ中部沿岸部で主に発生している。特にNew Orleansでは、高潮に伴って甚大な浸水災害が起こった。以下では、アメリカ中部の状況を中心にカトリナによる強風・大雨、そして最も大きな被害を発生させた高潮について概観していく。

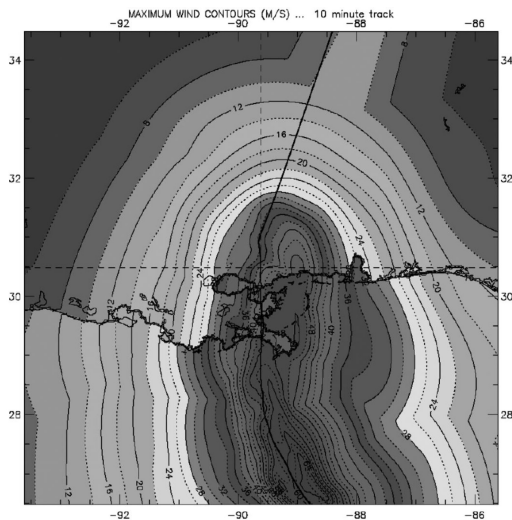
4.1 カトリナによる強風¹¹

カトリナは1851年以降の信頼できる記録では、米国に上陸したものの中で3番目に強いハリケーンであり、これより強いのは、1935年9月にフロリダ州Keysを襲った「Labor Day Hurricane」と1969年のハリケーン・カミールだけであり、最低気圧に関しては1992年にフロリダを襲って大きな経済損失を与えたハリケーン Andrew（以下「アンドリュー」）よりも低

¹¹ http://www.usatoday.com/weather/stormcenter/2005-08-31-Katrina-intensity_x.htm

第3表 アメリカ上陸時、最も強かったハリケーン
(National Weather Service による) (注
11)。

ハリケーン	年	気圧 (hPa)	最大風速 (ms^{-1})
"Labor Day"	1935	892	72
カミール	1969	909	85
カトリーナ	2005	920	63
アンドリュー	1992	922	74



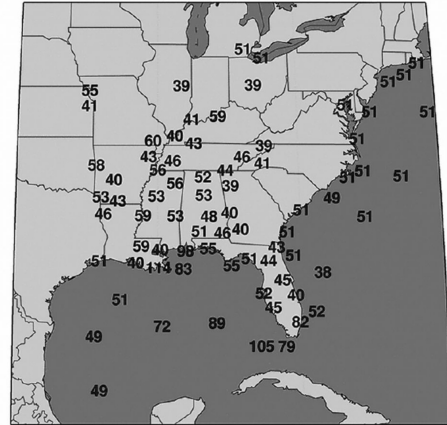
第8図 カトリーナによる海上および平坦地での
最大風速解析値 (ms^{-1}),
(http://www.aoml.noaa.gov/hrd/Storm_pages/katrina2005/katrina_landfall_ms.pdf).

い(第3表)。但し最大風速については、アンドリューのほうが大きくなっていて、カトリーナの上陸時の風速は 63 ms^{-1} ¹²でカテゴリー4に相当するのに対して、アンドリューがMiami南部に上陸した時の風速は 74 ms^{-1} でカテゴリー5に相当していた。なお、カミールとカトリーナの上陸地点はほとんど同じで80 kmと離れていない。

第8図は、HRDによるカトリーナの最大風速の解析結果である。カトリーナの中心付近右側では、上陸時でも 50 ms^{-1} 近い風が吹いており、風速 30 ms^{-1} を越

¹² このカトリーナの風速値は、カトリーナの接近時に多くの観測点で観測もしくは通報が不能になったため十分な実測値は利用できず、ルイジアナ州に上陸する直前の米国空軍の偵察飛行観測より推定された値である。

Observed Peak Wind Gusts (mph) on Aug. 25-29, 2005



第9図 8月25～29日に観測された最大瞬間風速
(単位は mph, 1 mph は 0.447 ms^{-1}),
(<http://www.ncdc.noaa.gov/img/climate/research/2005/katrina/gusts-5a.gif>).

える範囲も中心右側で広い範囲にわたっているのがわかる。なお、海上と陸上では風速に大きなコントラストが見られることに注意を要する。

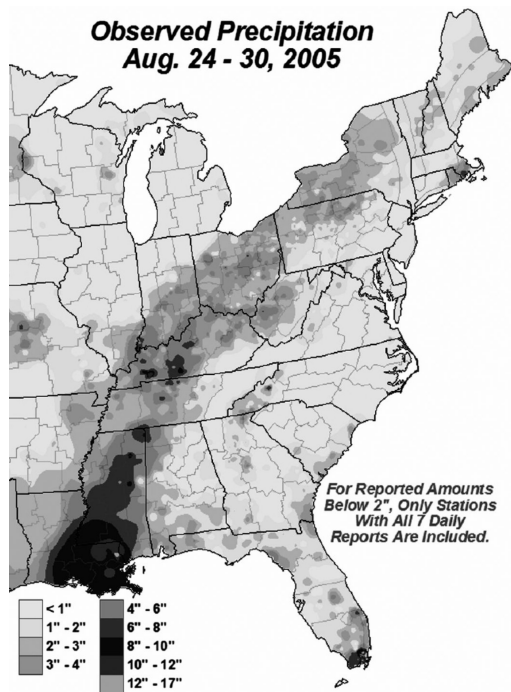
第9図は8月25日～29日に観測された最大瞬間風速(単位は mph : mile per hour で 1 mph は 0.447 ms^{-1})の分布である。カトリーナは大型のハリケーンであったために、上陸地点のほか特に右象限の広い範囲にわたって強風が観測されている。ただし、カトリーナの接近時に、観測または通報不能になっていた観測点が多かったために、実際にどの程度の瞬間風速が吹いていたのかについては、十分なデータで推定できていないという。

また、最近の調査によると、カトリーナの中心がNew Orleansの南約89 kmのBuras付近に達した時点での最大風速の公式発表値は 65 ms^{-1} であったが、Burasの近くにある高さ2 mの観測塔の記録では、最大で 51 ms^{-1} のガストと 42 ms^{-1} の平均風速しか観測されておらず、上陸時には既に弱いカテゴリーのハリケーンになっていた可能性もある。

4.2 カトリーナによる大雨¹³

カトリーナによる雨については、一部で多量の降水があったものの、あまり大きな災害などは報告されていない。8月24～30日の積算雨量が254 mm(10インチ)

¹³ <http://www.ncdc.noaa.gov/img/climate/research/2005/katrina/katrina-prcp-anal.png>



第10図 積算降水量(2005年8月24～30日)(単位はインチ(")。1"は25.4 mm), (<http://www.ncdc.noaa.gov/img/climate/research/2005/katrina/katrina-prcp-anal.png>).

を超えたのは、フロリダ州とルイジアナ州を中心とした14観測点のみである。第10図に1週間の総降水量を示す。(NOAA CPCの集計による)

フロリダ州に上陸したときは、カトリーナはカテゴリ1のハリケーンでそれほど強くはなかったが、移動速度がゆっくりしていたため、フロリダ州南部で局所的に380 mm程度の降水量を観測している。

中南部に再上陸したときのカトリーナは十分強かったのであるが移動速度が速かったため、総降水量としてはそれほど大きくはならず、ルイジアナ州のBig Branch 観測点で376 mm など多い降水量のところもあるが、その他の地点は大体250 mm 程度の降水量になっている。また、上陸後に勢力が弱まっているので、降水量が多かったのは沿岸部のみに限定されている。

4.3 カトリーナによる高潮

カトリーナによる災害でもっとも大きかったのはNew Orleansをはじめとする高潮による浸水災害だった(第11図の写真)。第12図はカトリーナによる浸水災害の状況である。New Orleansのほか、ミシシッ

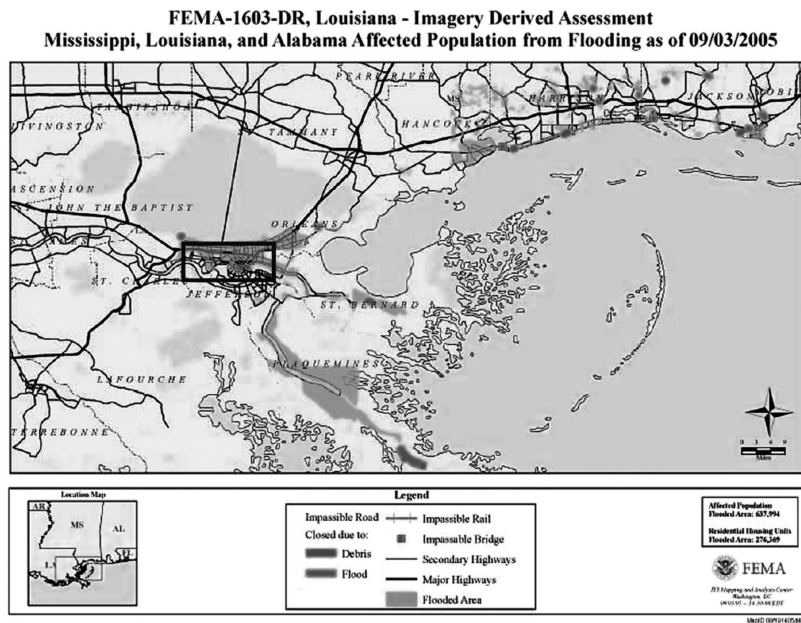


第11図 New Orleans 市街の浸水状況, (<http://newscover.squarespace.com/law-order/>).

ピ川河口部やミシシッピ州海岸部の Biloxi など広い範囲で浸水災害が発生している。特に New Orleans は、カトリーナの接近に伴って北側の Pontchartrain 湖の水位が上昇し、8月30日には2地点堤防が決壊して浸水災害が発生した。New Orleans はほとんどが海拔0 m以下であるために、浸水災害が拡大し、市の80%程度が浸水した。第13図の写真はLandsat 7衛星による浸水前後のNew Orleansを写したものである。市街地と西方に広い範囲にわたって浸水しているのが確認できる。また同じところにInner Harbor Navigation Canalでも越流や堤防の決壊によって、New Orleans 東部の港湾・工業地帯が浸水している。

水位計による高潮の観測結果は、NOAAのThe Center for Operational Oceanographic Products and Services: CO-OPSが取りまとめている^{注14}。この報告書にまとめられた、最高潮位観測値の分布を第14図に、第4表に最高潮位が1 m以上の地点を示す。表には潮

^{注14} http://140.90.121.76/publications/NOS_Preliminary_Water_Levels_Report_Hurricane_Katrina_2005.pdf

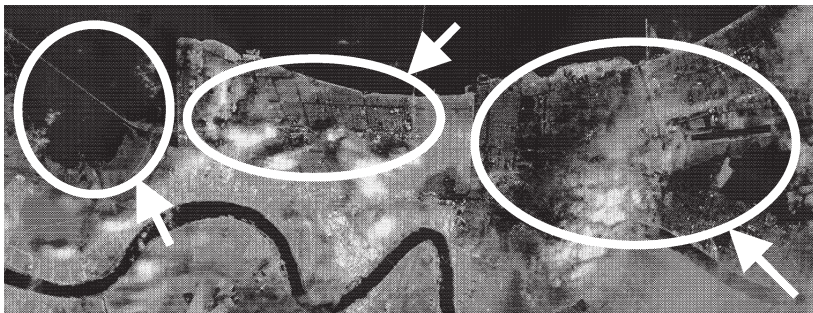


第12図 カトリナによる浸水地域の分布。浸水地域は New Orleans 市街地(図中の四角で囲った範囲、第13図に相当)、ミシシッピ川河口地帯、Biloxi などのミシシッピ州海岸地帯に広がっている、(http://www.gismaps.fema.gov/2005_graphics/dr1603/la-ms-al_pop_090305.pdf)。

a)



b)

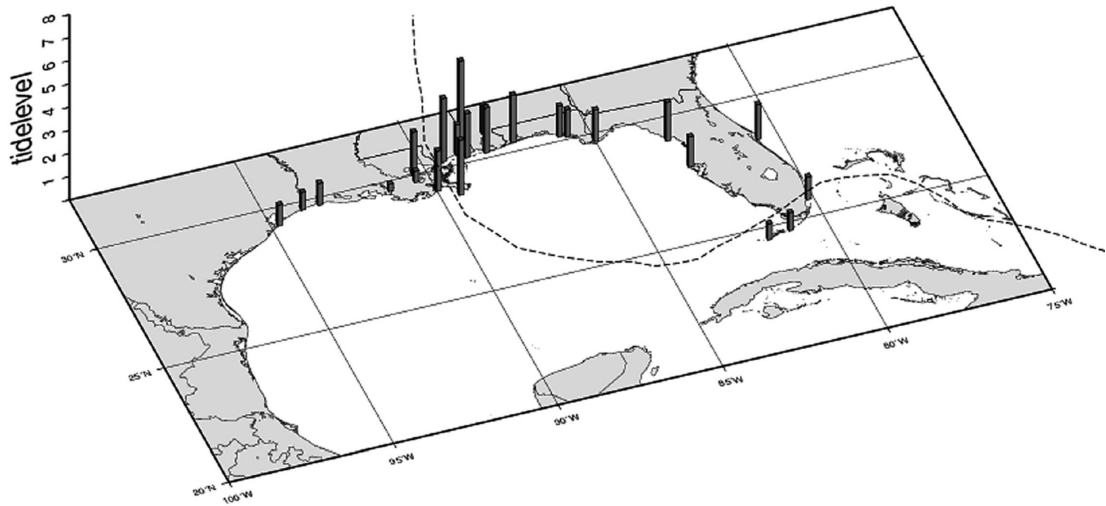


第13図 Landsat7号による New Orleans 市街部の (a) 浸水前 (2005年4月24日) と (b) 浸水後 (2005年8月30日) の状況。矢印で示す暗い色の一帯が浸水域を表す、(<http://landsat.usgs.gov/gallery/detail/412/>)。

位偏差も示してある。潮位偏差は観測水位から天文潮位(いわゆる月や太陽による海水面の変動。ほぼ正確に推算できる。)を差し引いたもので、高潮そのものの規模を表す尺度として利用される。表を見ると、フロリダの場合を除き天文潮位は数十 cm 程度で、数 m の最高潮位は基本的に高潮自体によることがわかる。

この結果によると、カトリナははじめにフロリダ半島に上陸しているが、このときも小さいながら高潮が発生している。このときはカトリナ自体がまだそれほど強くなかったなどの理由により、Vaca Key の偏差が0.43 m など大体50 cm 程度の偏差ですんでいる。

カトリナはその後メキシコ湾で発達し、米国中南部に上陸するときは、中心気圧918~923 hPa, 最大風速60~65 ms^{-1} という強い勢力になっていたために、大きな高潮が発生している。一番大きい値を観測したのはミシシッピ州 Ocean Springs で、4.04 m の潮位を観測(最大偏差は3.53 m、以下同じ)している。この値は観測が途中で止まっているので、最大値はもっと大きな値になっていたと考えられる。最大偏差で2番目に大きな値を観測した同州の Waveland で、2.74 m (2.23 m) という値もデータが途中で止まっている。これらの地点でピー



第14図 カトリーナによる最高潮位の観測値 (m) の分布。点線はカトリーナの経路を示す。

第4表 カトリーナにより1 m以上の最高潮位を記録した観測地点(注14)。()をつけた値は、欠測によりピークが観測できていない。

観測地点	州	緯度 (北緯)	経度 (西経)	最高 潮位 (m)	最大 偏差 (m)
Ocean Springs	ミシシッピ	30.39	88.80	(4.04)	(3.53)
Waveland	ミシシッピ	30.28	89.37	(2.74)	(2.23)
Pilots Station, SW Pass	ルイジアナ	28.93	89.41	2.36	1.88
Pensacola	フロリダ	30.40	87.21	2.04	1.58
Dauphin Island	アラバマ	30.25	88.08	1.94	1.65
Horn Island	ミシシッピ	30.24	88.67	(1.90)	1.64
East Bank, LaBranche	ルイジアナ	30.05	90.37	1.87	1.76
Grand Isle	ルイジアナ	29.26	89.96	1.74	1.30
Cedar Key	フロリダ	29.14	83.03	1.66	0.57
Trident Pier	フロリダ	28.42	80.59	1.50	0.29
Apalachicola	フロリダ	29.73	84.98	1.36	0.80
Panama City Beach	フロリダ	30.21	85.88	1.32	0.80
Biloxi	ミシシッピ	30.41	88.90	(1.32)	(0.87)
Clearwater Beach	フロリダ	27.98	82.83	1.31	0.49
Lower Bryant Landing	アラバマ	30.98	87.87	1.19	0.60
Panama City	フロリダ	30.15	85.67	1.17	0.68

ク時まで観測されていたら、もっと高い値となったと考えられる。データが完全にとれた地点で高かったのは、ルイジアナ州の Pilots station の2.36 m (1.88 m) である。また、台風中心から200 km 以上離れたフロリダ州 Pensacola でも2.04 m (1.58 m) という値が観測されている。

現地の調査結果や数値計算によると、高潮は、New Orleans 北岸の Pontchartrain 湖におけるもの(3～3.5 m)よりも、吹き寄せの効果が直接利いたミシシッピ河口から Borgne 湖, Biloxi にかけての帯のほうが大きかった(5～7 m)と解析されている^{注15}。特に上陸地点付近の Biloxi 付近では、痕跡などから8 m以上の高潮があったという推測もある。8 mというのは、従来の米国における高潮の記録で、1969年のハリケーン・カミールによるミシシッピ州 Pass Christian における7.4 m(宮崎, 2003)よりも大きい値である。ただし、Biloxi の水位計はピーク前に欠測となっていて、観測値は1.32 m (0.44 m) と小さい値である。大災害となった New Orleans 市街地の浸水は、高潮が大きくて堤防を越えたのではなく、堤防が決壊したことが主要原因のようである。

第15図に著者らが行ったカトリーナによる高潮のシミュレーション結果を示す。米国のメキシコ湾沿岸は、水深が浅い部分が広がっているが、海岸線は東西方向

^{注15} <http://www.pari.go.jp/information/news/h17d/3/katrina-invest2.html>

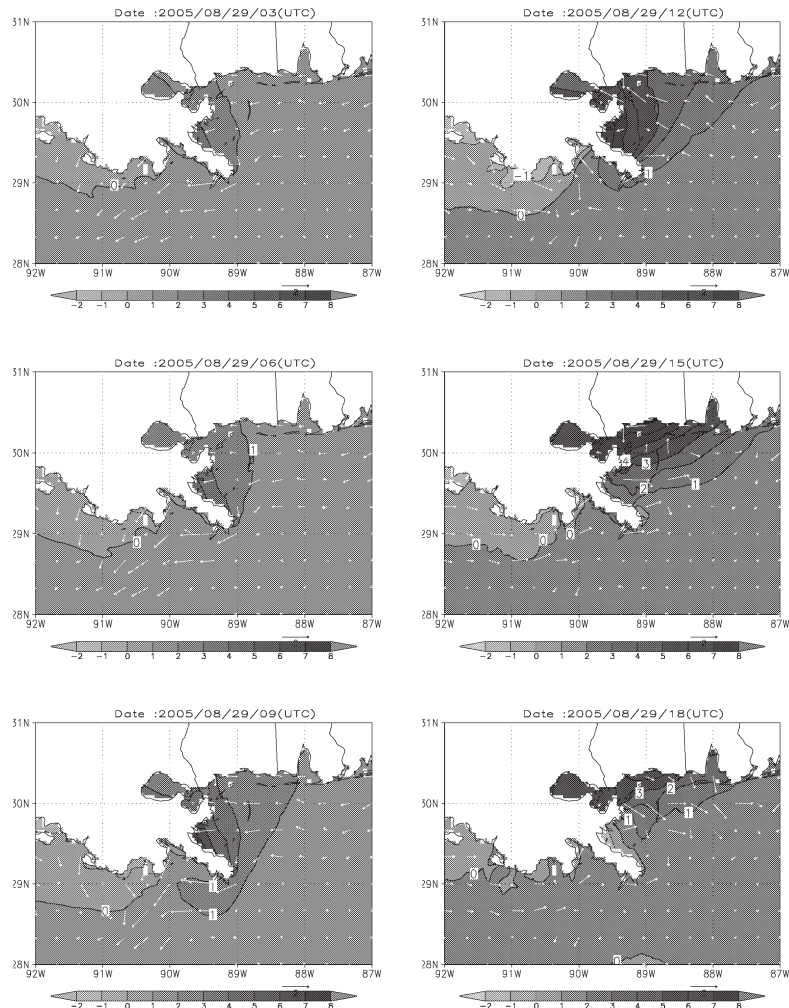
に延びているので、特に東西方向での吹き寄せの効果が大きくなる。このため、ハリケーンの接近に伴って、前面の東風により、大量の海水が西側に吹き寄せられる。ルイジアナ州付近は南に突き出ているために、この吹き寄せられた海水に面することになる。集積した海水は、Borgne 湖などに大きな高潮を発生させた後、ハリケーンの北上によって変わった南風によって北部の海岸線に吹き寄せられ、Biloxi などで大きな高潮が発生している。

New Orleans 市街地の高潮はさらに複雑な仕組みで発生している。ハリケーン接近時の東風で吹き寄せられた海水は、New Orleans の北側にある Pontchartrain 湖に集積する。ハリケーンの通過後に、この湖に溜まった海水が南に吹き寄せられて高潮が発生している。このときハリケーンは内陸にあつて既に勢力は衰えていた。このような時間差をもって発生する高潮に対する注意は十分

ではなく、今後の対応の検討課題でもあるという (NOAA NWS の Dr. Wu 私信)。

また、今回の高潮は、ハリケーンの進路にも大きく依存している。著者らは試算を行ったところ、ハリケーンが実際よりあと 50 km くらい東を通っていれば、New Orleans 周辺の高潮は全般的に低くなること、逆にもう数十 km ほど西を通ったときに New Orleans 北側の高潮が最大になることなどが示唆された。

その意味で、ハリケーンの強さや大きさだけでなく、カトリナの進路が New Orleans 付近に最大級の高潮を起こしうるものであったと考えられる。浸水災害の原因には、いくつか対処不備など人為的な問題も指



第15図 ハリケーン・カトリナによる高潮のシミュレーション結果 (高潮偏差の水平分布の時系列). 等高線は 1 m 毎に引いてある. 矢印は鉛直平均した流速 (ms^{-1}) をあらわす。

摘されているが、高潮自体が非常に大きかったことが大災害につながった理由のひとつといえよう。

(高野洋雄)

5. おわりに

ハリケーン・カトリナはルイジアナ、ミシシッピ両州の住宅と企業へ壊滅的被害をもたらした。死者は1200名を超え、カトリナは1900年以降米国で3番目に死者の多いハリケーン (1 番目は1900年の Galveston Hurricane, 2 番目は1928年の Lake Okeechobee Hurricane) である。また、物的損害は約23兆円に上り、これまでの最も大きな被害であった1992年のアンド

リュウの約5兆円をはるかに超えた。

カトリーナは上陸時カテゴリー4であったが、カテゴリー5で米国に上陸したハリケーンは1950年以降では1969年カミール、1992年アンドリューがあり、それらに次ぐものであった。

カトリーナを特徴づけるのはやはりその被害の大きさであるが、これは前節でも述べたように主として高潮によってもたらされた。カトリーナが持っていた強さ、大きさのほかに、カトリーナがたどった経路が海拔0 m以下の地域が占める割合の大きい大都市に高潮を引き起こしやすいものであったこと、さらに、多くの堤防が決壊したことが重なり、これらの被害をもたらしたのであった。 (榊原 均)

参 考 文 献

- Atkinson, G. D., 1974 : Investigation of gust factors in tropical cyclones, Fleet Weather Center Technical Note : JTWC 74-1, 9pp.
- Gray, W. M., 1968 : A global view of the origin of tropical disturbances and storms, Mon. Wea. Rev., **96**, 669-700.
- Landsea, C. W., 1993 : A climatology of intense (or major) Atlantic hurricanes, Mon. Wea. Rev., **121**, 1703-1713.
- 宮崎正衛, 2003 : 高潮の研究—その実例とメカニズム, 成山堂書店, 134pp.
- Zehr, R. M., 1992 : Tropical cyclogenesis in the western North Pacific, NOAA Technical Report NESDIS 61, U. S. Department of Commerce, Washington DC 20233, 181pp.